

Advances

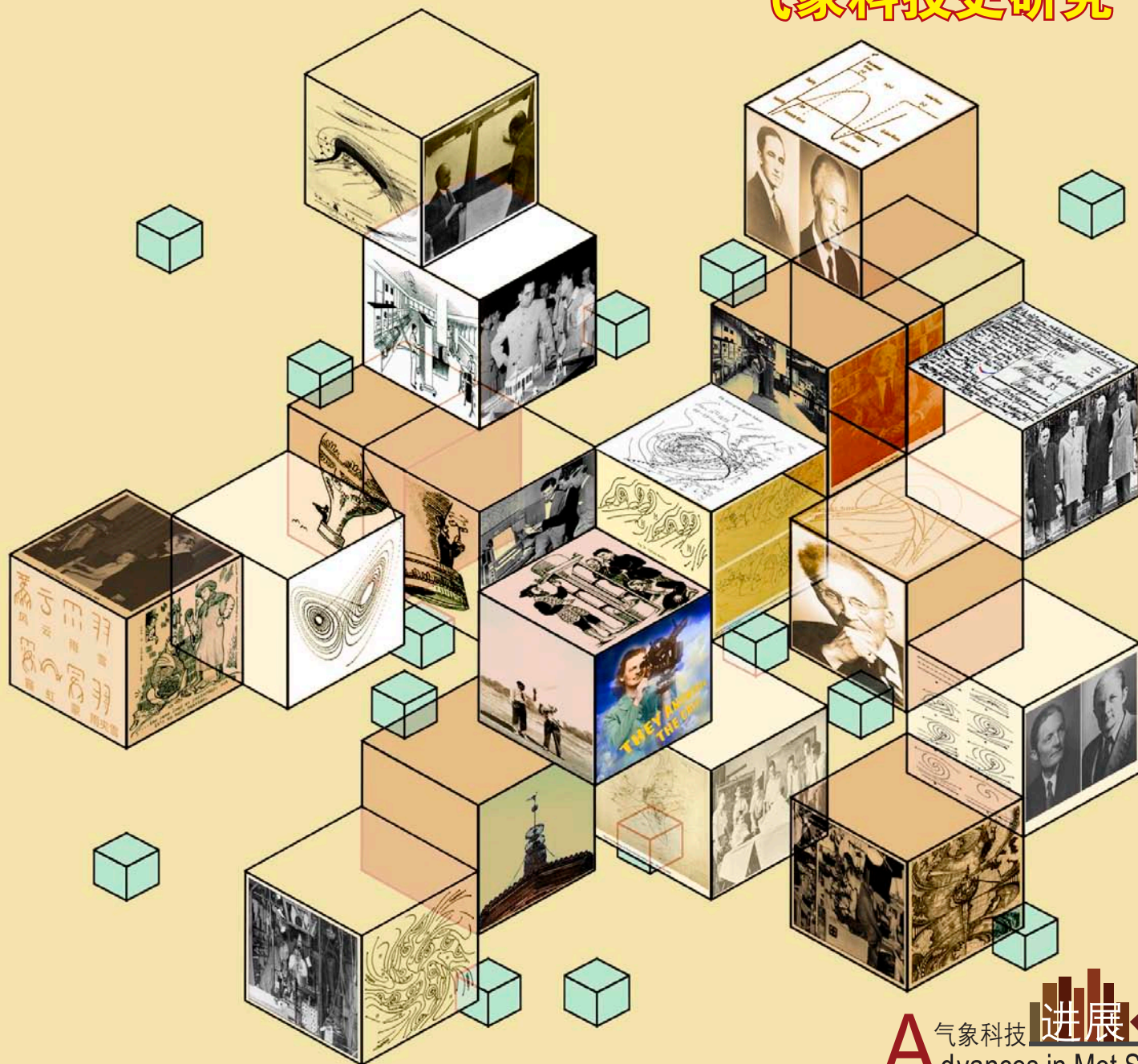
in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

No.6

2014年12月
第4卷 第6期

气象科技史研究



气象科技 **进展**
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



9 772095 197149

中国气象局气象干部培训学院 主办

主管 中国气象局
主办 中国气象局气象干部培训学院
出版 《气象科技进展》(英文)编辑部

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

肖子牛 中国气象局气象干部培训学院
翟盘茂 中国气象科学研究院
罗云峰 中国气象局
王会军 中国科学院大气物理研究所
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
费建芳 解放军理工大学
管兆勇 南京信息工程大学
何建新 成都信息工程学院
黄建平 兰州大学
廖小罕 国家遥感中心
吕世华 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
贾朋群 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

常务编委 (按音序排名)

成秀虎	高学浩	龚建东	郭学良	李 柏
李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉	任小波
沈文海	王卫丹	武炳义	杨修群	俞小鼎
张朝林	张 鹏	张庆云	赵 平	

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈云峰	陈振林	崔春光	崔讲学
董文杰	封国林	郭 虎	何金海	何 清
胡 欣	胡玉蓉	胡跃文	姜 彤	雷小途
李 慧	李集明	李良福	李耀辉	李跃清
梁旭东	刘晶森	刘黎平	刘 实	卢乃锰
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	马舒庆
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	石广玉
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王 斌
王东海	王建林	王晓云	王延青	王迎春
王 元	王在志	王自发	温 敏	文洪涛
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨 崧	杨昭明
姚学祥	伊 兰	翟武全	张 华	张立祥
张小玲	张跃堂	赵广忠	周定文	周凌晔
周显信	朱定真	朱小祥	祝燕德	邹立尧

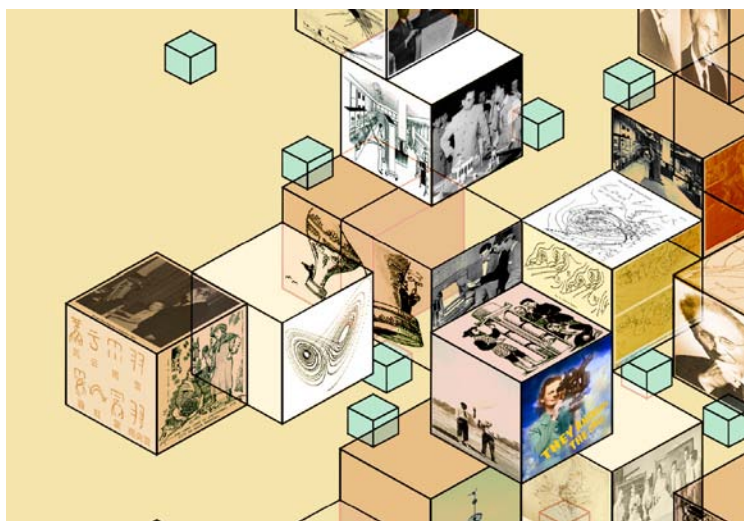
海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

编辑部

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 陈忠美
地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
邮箱: amst@cma.gov.cn
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA
网址: <http://library.cma.gov.cn/amst>
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>
印刷: 北京宝昌彩色印刷有限公司

国际标准刊号: ISSN 2095-1973
国内统一刊号: CN 10-1000/P
定价: 30元



本刊已被万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》和CNKI系列数据库以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录, 相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

目 次

第4卷 第6期 2014年12月(卷终)
(气象科技史研究 专辑)

1 许小峰: 主编语

研究论文

综述

- 6 许小峰, 张萌: 气象科技发展历程的若干回顾及启示
- 13 杜钧, 钱维宏: 天气预报的三次跃进
- 27 方宗义: 气象卫星发展历程和启示
- 35 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚: 挪威学派气象学家的研究工作和生平: J.皮叶克尼斯、H.索尔伯格和T.贝吉龙

多学科融合

- 46 高学浩, 陈正洪: 大气科学原始创新的学科背景视角
- 50 肖子牛, 叶梦姝: 大气科学历史进程中多学科的交叉影响
- 54 叶梦姝: 气象科学的发展与时间观变革的初步探索

台站建设

- 60 吴增祥: 1949年以前我国气象台站创建历史概述
- 67 王东, 丁玉平: 竺可桢与我国气象台站的建设

论坛

- 74 闻新宇, 朱清照: 二战后美国三个大气模式中心的美日组合

主编语

伴随着人类对地球环境的适应及对各类自然灾害的防御与抗争,包括对自身生存条件改善的关注,逐步发展出了气象学这门自然科学的分支。那么,这门古老且实用的学科是如何形成并演进的呢?无疑会涉及方方面面的诸多问题,即便无法详细解答,也并不妨碍对现代气象学的学习、理解和掌握。但正如科学史学科创始人乔治·萨顿(George Sarton, 1884—1956年)所言,科学史是自然科学与人文学科之间的桥梁,它有助于获得自然科学的整体形象、人性的形象,从而全面地理解科学、理解科学与人文的关系,帮助科学更好地为人类社会服务。另一方面,对科技史的了解,还有助于对不同学科相互影响的认识,特别是对气象学而言,其发展根植于多门学科的进步,伴随于多种技术的创新,了解这些,显然有助于拓展对学科发展认识的视野。

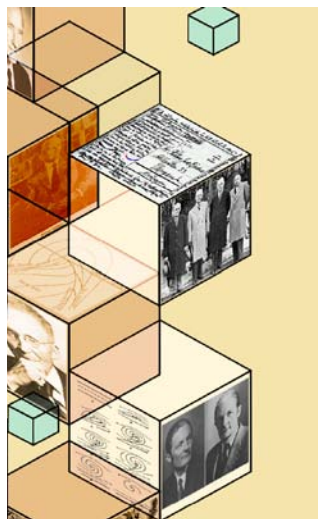
将气象科技发展历史脉络确定为本期主题,旨在能从气象科技发展进程中,探索、挖掘出一些带有本质特征的规律,供今人借鉴。尤其是那些伴随着学科进展而发生的一次次创新、突破,以及人物、学派、思想的出现和在不同理论体系的构建中折射出来的文化内涵和永恒动力,仍然会对当今和未来的发展产生极有价值的影响。然而,这样的初衷实现起来并非易事,整编工作需要投入很多时间、人力和精力。好在我们的设想和意图得到了很多学者的认可和响应,为我们初步交出一份探索性的答卷提供了支持。

在“综述”栏目,4篇文章(P6-P45)分别从发展史、天气预报的改进、气象卫星的发展以及

经典气象大师的工作等角度,审视了漫长的气象学发展历程,从中可以看到处于不同发展阶段的气象学进展程度、特征和规律。“多学科融合”栏目的文章,则更多地从对历史进程的分析中(P50和P54)来探索学科融合的未来之路。中国气象业务发展的回顾是气象史研究不可或缺的内容,我们在“台站建设”栏目中侧重于曾经让世界侧目的中国气象台站网建设成就的回顾和阐述。而“阅读”栏目的两篇书评(P121和P123),则对当地中国气象台站网的建设历程,给出了很好的印证。该栏目的一篇翻译文章,介绍了气象学大师罗斯贝的风采(P95),代表了全体编作者对20世纪中期先辈们的出色创新的敬意。法曼(P106)、冯·诺依曼(P111)和莫里(P115)等人物介绍,则能让读者感知其他领域的科学家对于气象学科发展的推动作用。“论坛”栏目的文章介绍了代表气象科学现代工具的大气模式在美国的快速发展历程(P74),并对美日科学家的组合模式进行了讨论。

本期专辑得到了各方面一如既往的支持和鼓励,主办机构气象干部培训学院主持的“气象科技史研究”课题取得的成果,为本期的组稿奠定了基础;美国气象学会向本期杂志提供了译文的版权支持并进行了认真审校;华风气象传媒集团和中国气象报社等机构对“气象科技史研究”课题的支持,为致力于气象科技史研究的年轻学者们提供了必要保障。在此对上述机构的贡献一并表示诚挚谢意。

许小峰



专辑:气象科技史研究

科学观察

2 读图 数字 榜单

特写

- 81 郑秋红:气候变化专门评估机构——IPCC发展历程
- 84 张改珍,李期位,马婧:日本气象大学的沿革及气象科学史课程
- 87 陈金阳:WMO教育培训历史、现状与发展
- 89 任珂,邵俊年,杨静:《气象知识》创刊以来的探索发展回顾
- 92 吴灿,郑秋红:“气象史”主题文献计量指标分析

阅读

人物

- 95 John M.Lewis:卡尔-古斯塔夫·罗斯贝——对其导师制的研究
- 106 贾朋群:他曾让NASA和卫星探测陷入尴尬——记发现南极臭氧洞的英国科学家法曼
- 111 贾朋群,张萌:现代数值天气预报之父——记美籍匈牙利数学和气象学家冯·诺依曼
- 115 贾朋群:海洋学之父莫里和国际气象合作的开端
- 118 贾朋群,徐虹:WMO的首任主席弗·乌·赖克尔德弗博士

书评

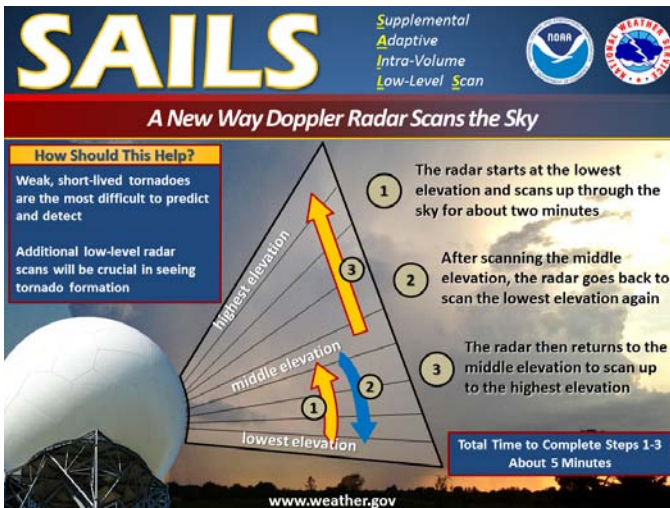
- 121 温克刚,李德善,刘立成:新中国气象事业发展的壮美画卷——简评《全国基层气象台站简史》
- 123 白凌燕:浅谈气象史料积累的意义——《全国基层气象台站简史》丛书编辑手记

信息

- 12 “第二届气象科技史研究学术研讨会”征稿启事
- 26 《哲学学报A》:厚重的历史探索的前沿
- 34/59 新书架
- 125 编辑选编
- 封3 媒体扫描



封3



SAILS带来更多期待

最近，美国气象局（NWS）启动了一项主要针对龙卷风和多普勒雷达网的名为SAILS（Supplemental Adaptive Intra-Volume Low-Level Scans，适宜的体积内低层补充扫描）的雷达技术改进项目，以期改进预报。这项技术如图中所示，就是将原来雷达体积内均匀扫描，改进为在低层重复扫描一次，这样做的主要好处是能够更好地捕捉难以探测到的微弱和短生命期的龙卷风。这样的升级预计将在今年秋季完成。这项技术在美国西部的实施表明，更加频繁的低层扫描还能够改进强降水路径预报。

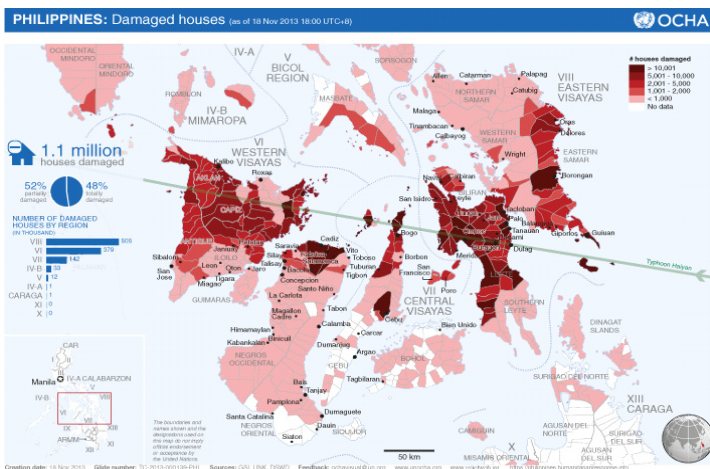
来源：NWS



北极观测站：随冰漂流

挪威卑尔根大学的南森环境和遥感中心，2014年8月30日在距离北极点280km处，建立了名为“FRAM-2014/15”的浮标站，这个建在1.1m厚的北极海冰上的站，在今后的几个月里会随冰向北流动，同时获取沉积岩芯以帮助学者了解6000万年以来的极地环境。在这个破冰船无法抵达的多年海冰区安装这个浮标站，多亏借助了图中名为“SABVABAA”研究气垫船才有可能。

来源：Science



台风海燕：在2013年世界天气中留下“痕迹”

英国皇家气象学会主办的《天气》杂志，在近期“2013年天气”专辑中，总结了2013年全球天气，专辑的6篇分析文章中，有一篇专门对“海燕”台风的发展、路径和消亡过程进行了分析，同时给出了其带来的损失。图为“海燕”台风在途经菲律宾时房屋损毁情况。

来源：Weather

数字

28%/20%

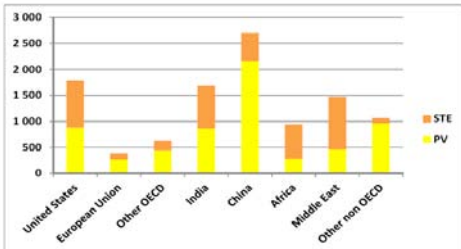
中美双方在北京发表《中美气候变化联合声明》，两国元首宣布了2020年后各自应对气候变化的行动目标：美国计划于2025年实现在2005年基础上减排26%~28%的全经济范围减排目标并将努力减排28%。中国计划2030年左右CO₂排放达到峰值且将努力早日达峰，并计划到2030年非化石能源占一次能源消费比重提高到20%左右。

7480 万美元

美国遭受桑迪飓风灾害后，2013年颁布了《赈灾拨款法2013》，NOAA研究部门总计获得桑迪增加款7480万美元，这笔款项将用于观测（2710万）、全球模拟（1330万）、区域风暴（990万）和高性能计算机（2450万）等方面。



STE vs. PV generation by region in 2050



China alone accounts for 37% of global PV deployment
STE eventually dominates in Africa and the Middle East;
it comes close to PV in India and the United States

21世纪中期：中国太阳能应用将领先世界

国际能源署（IEA）最新发表了2014年版太阳能电力技术路线图报告，报告对到2050年世界太阳能的应用进行了展望。在太阳能热电（STE）和太阳光伏（PV）两种主要太阳能利用上，中国将在21世纪中期领先全球，特别是中国将占有全球37%的PV能源比例，而非洲和中东地区将以STE为主导。

来源：IEA

国际“气象史”主题被引频次最高的前10篇论文

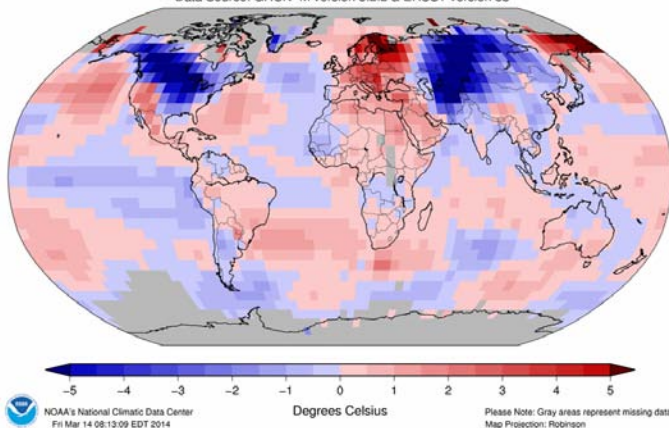
排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3)	Collins WD	Journal of Climate, 2006, 19(11)	1088
2	A comprehensive ocean-atmosphere data set	Woodruff SD	Bulletin of the American Meteorological Society, 1987, 68(10)	793
3	AMIP - The Atmospheric Model Intercomparison Project	Gates WL	Bulletin of the American Meteorological Society, 1992, 73(12)	698
4	The Community Climate System Model Version 4	Gent PR	Journal of Climate, 2011, 24(19)	369
5	Artificial neural networks (the multilayer perceptron) - A review of applications in the atmospheric sciences	Gardner MW	Atmospheric Environment, 1998, 32(14-15)	359
6	The polarization lidar technique for cloud research - A review and current assessment	Sassen K	Bulletin of the American Meteorological Society, 1991, 72(12)	257
7	Measurement of turbulent energy-dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques - A review	Hocking WK	Radio Science, 1985, 20(6)	242
8	Spatial regression methods in dendroclimatology - A review and comparison of 2 techniques	Cook ER	International Journal of Climatology, 1994, 14(4)	225
9	An overview of the International H ₂ O Project (IHOP_2002) and some preliminary highlights	Weckwerth TM	Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(2)	219
10	Large-Eddy simulation - A critical-review of the technique	Mason PJ	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1994, 120(515a)	188

来源：ISI数据库，检索时间：2014年11月14日

吴灿提供

Land & Ocean Temperature Departure from Average Feb 2014

(with respect to a 1981-2010 base period)
Data Source: GHCN-M version 3.2.2 & ERSST version 3b



今年冬天还会冷吗？

2014年全球温度在5、6、8和9月几乎连创最暖月记录，这样的趋势却在冬季被拉了后腿：例如，2月份在北美和欧亚中部出现了持续低温（见图）。面对马上到来的冬季，人们不禁要问，冷冬还会来吗？目前，基于快要形成的中度厄尔尼诺事件，美国官方—NOAA给出的预测是美国中西部和东北部今年冬季温度接近或略微高于平均值，而AccuWeather公司做出的气候预测则相反，相同地区将受到寒流和冰雪反复侵袭。NCAR的分析指出，后者的预报并没有给出相对历史平均值的趋势，但是两份预报还是存在明显距离，你相信谁的预报呢？

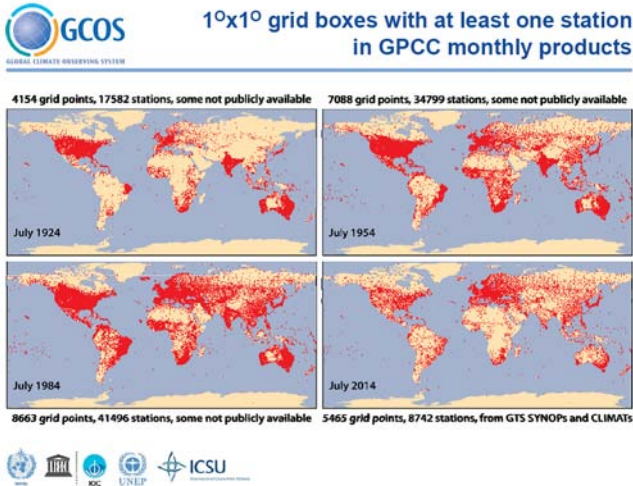
来源：NCAR

2亿元 为期10年，总投入为2亿元的“青藏高原地气耦合系统变化及其全球气候效应”项目近日启动，该项目的首要目标之一就是收集尽可能多的青藏高原观测数据。

13倍 英国气象局投入9700万英镑，将于2017年完成“高性能计算机”计划，该计划将使英国气象局的计算能力比目前提高13倍。

33% 2014年10月在德国举行的气候学术会上，科学家指出，近年来全球海面升高（ 0.77 ± 0.28 mm/a）的原因，有33%源自升温，另外的67%源自冰雪圈融化。

152% 美国科学家的一项最新研究表明，海洋温度升高速度比之前预想的快152%，而以往的研究海洋趋热变化被低估了24%~58%。



气候观测站：挑战继续

欧洲中期天气预报中心（ECWMF）的学者，在最近的一次学术会议上，梳理了最近90年的4个时间点，在全球降水气候月产品中，在全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点区域内至少有1个观测站的格点数量和采用数据的台站数量的不同，指出气候数据的系统性是根本性的，目前依然需要更多的实时资料支持，尽管台站的数量并不能代表覆盖率。

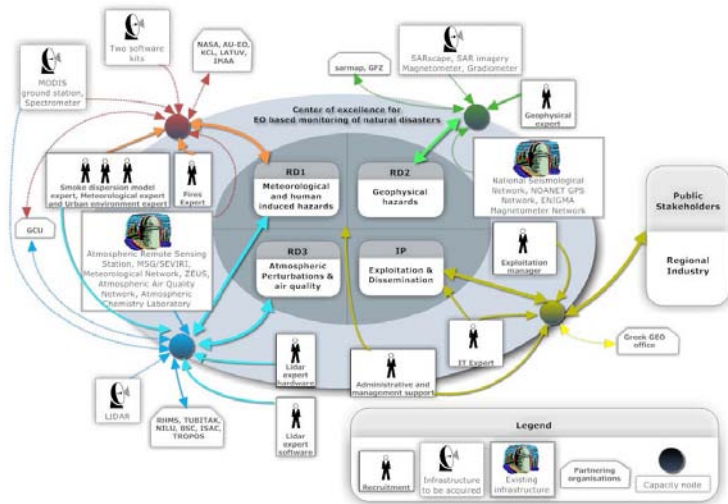
来源：ECWMF



GPM：全球降水观测深度发展

欧洲气象卫星组织（EUMETSAT）卫星应用平台（Satellite Application Facility, SAF）支持业务水文和水管理项目（H-SAF），2014年11月初召开了主题为“耦合水文学”的学术会，会上科学家们展望了未来由美日发起的全球降水项目（GPM）卫星族群的发展蓝图，到2020年，GPM项目将“渗透”到更多国家，在GPM核心卫星的引导下，形成覆盖全球的卫星族群。

来源：H-SAF



BEYOND项目：拉近减灾研究与实践的距离

BEYOND（Building a Centre of Excellence for Earth Observation based monitoring of Natural Disasters，基于自然灾害监测的地球观测权威中心）是在2012—2013年欧盟框架7（FP7）支持下开展的涉及欧洲多国的综合减灾项目，其目标是扶植和扩展基于地球观测方面最新的交叉科学研究，带动研究机构开放式的研究活动，并将研究成果积极应用于覆盖整个欧洲地区的减灾实践中去。在框架中，针对各种灾害和科学问题，各方面的专家和设备在该项目的平台下能够进行综合，快速获得完整的科学认知，进而推动快速科学决策。

来源：BEYOND

数字

2011 2014年南极海冰最大面积达到2011万 km^2 ，这是自1979年有卫星记录以来的最大值，而科学家们尚不清楚2012年以来南极海冰面积连创新高的原因。

39倍 地质学家最近在美国犹他州西南发现了2000—3000万年前发生的，可能是世界上已知的最大滑坡遗迹，其覆盖的面积大约是曼哈顿岛的39倍。

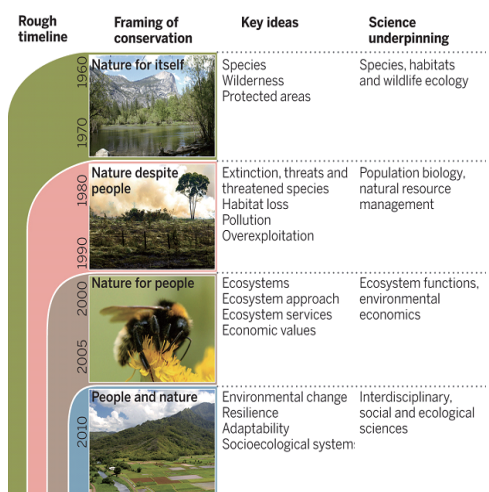
T639 2008年问世，2014年完成优化升级的中国数值天气预报系统T639，全面替代T213，后者也将在今年停止发布，从而完成其历史使命。

中国“气象史”主题被引频次最高的前20篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识	刘屹岷	气象学报, 2000/04	112
2	雷电研究的回顾和进展	张义军	应用气象学报, 2014/06	107
3	中国极端气候变化观测研究回顾与展望	任国玉	气候与环境研究, 2014/04	92
4	大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾	吕达仁	大气科学, 2014/04	67
5	中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展	方宗义	气象学报, 2014/05	59
6	兰州地区大气环境研究的回顾与展望	王式功	兰州大学学报, 1999/03	50
7	GPS遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望	李国平	气象科技, 2014/04	46
8	一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究	赵琳娜	大气科学, 2014/05	42
9	大气科学发展的回顾与展望	黄荣辉	地球科学进展, 2014/05	31
10	近30年大气化学和大气环境研究回顾——纪念中国气象科学研究院成立50周年	丁国安	应用气象学报, 2014/06	28
11	大涡模拟与大气边界层研究——30年回顾与展望	蒋维楣	自然科学进展, 2014/01	27
12	中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾	姚展予	应用气象学报, 2014/06	21
13	青藏高原低涡研究的回顾与展望	刘晓冉	干旱气象, 2014/01	17
14	降雪与冻雨天气研究回顾	刘熙明	气象与减灾研究, 2014/04	16
14	一次引发强沙尘暴天气的快速发展蒙古气旋的诊断分析	张志刚	气象, 2014/05	16
16	短期气候预测的出路在何方?	汤懋苍	高原气象, 2014/05	14
16	大气低频振荡研究回顾与概述	徐国强	气象科技, 2014/04	14
18	地基GPS/MET研究回顾与展望	詹丰兴	气象与减灾研究, 2014/04	13
19	人工影响天气研究工作的回顾与展望	王致君	高原气象, 1999/03	12
20	对流层顶研究回顾	杨双艳	气象科技, 2014/02	11

来源: CAJD数据库, 检索时间: 2014年11月13日

郑秋红 提供



观念的转变: 环保保护什么?

梳理过去50年,人们耳熟能详的环境保护理念,其中在保护什么这一关键问题上,实际上悄悄发生了几次改变,带来的结果是保护的重点从物种到生态系统的转变。老的理念框架并没有因为新的概念提出而黯然失色,导致今天多重环保口号并存。

来源: Science



火山喷发预警: 尚需努力

2014年9月27日,日本Mount Ontake火山喷发,导致位于山顶和火山灰覆盖区附近的30多名游客死亡,使得数百名登山者受到影响。日本气象厅(JMA)9月份以来记录到多次山体地震活动,仅9月11日1天内就有85次震动被记录在案。然而,因为没有观测到明显的地壳变形,而且地震活动在逐渐消失,因此JMA并没有发出火山喷发预警(预警等级为1~5级,本次喷发前1级预警都未发出)。日本信州大学火山学教授Yasuyuki Miyake认为,本次喷发是浅层喷发(phreatic eruption),由地下深层岩浆加热的蒸汽引发,这种喷发与可以通过地壳形变预警的岩浆喷发存在差异,具有突发性而难以预测。

来源: JMA

0.05℃ ~ 0.12℃

一项研究表明,2000—2013年小型火山喷发活动减缓了该时间段地球变暖的速度,使得全球平均温度上升幅度减少了0.05℃~0.12℃,这一冷却效果相当于温室气体升温作用的25%~50%。

9.29%

国家林业局和国家统计局公布的中国森林资源核算研究成果显示,全国林地林木资产总价值为21.29万亿元,相当于我国国民人均拥有“森林财富”1.57万元,其中净化大气环境占价值比为9.29%。

76.3万km²

自1970年以来的40多年间,盗采滥伐已经使近76.3万km²的亚马孙雨林消失,面积大约相当于两个德国。

气象科技发展历程的若干回顾及启示

许小峰¹ 张萌^{2,3}

(1 中国气象局, 北京 100081; 2 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000; 3 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 探索大气层及其演变规律, 科学预测其发展变化趋势, 是人类适应环境、趋利避害的必然选择。在回顾大气科学发展史多个关键事件的基础上, 通过分析气象学界著名的挪威学派、芝加哥学派产生和发展情况及近代中国气象学者对于大气科学学科发展所做出的贡献, 以此来探讨大气科学发展史对于当代大气科学发展的启示, 即: 大气科学的发展依赖于自然科学和技术的最新成果, 同时又与其他学科相互促进、协同发展; 在大气科学学科发展过程中应宽容不同意见, 不迷信神话和权威; 大气科学学科的兴盛离不开领军人才。

关键词: 大气科学, 气象史, 发展, 启示

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.001

Some Reviews and Inspirations on the Development of Meteorological Science and Technology

Xu Xiaofeng¹, Zhang Meng^{2,3}

(1 China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

3 CMA Training Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: In order to adapt to the environment and avoid disadvantages, human beings must keep exploring the atmosphere and its evolution rules, predicting its trends of change scientifically. Seeking the inspiration of atmospheric science history for the present, this paper reviews some key events in the history of atmospheric science by analyzing the development of the Bergen School and Chicago School of Meteorology, and putting forward the contributions of Chinese meteorologists in modern times. This paper sums up some viewpoints. The development of atmospheric science depends on the latest achievements of natural sciences, and it also contributes to the development of other subjects. With the development of atmospheric science, one should be tolerant to different viewpoints and not be superstitious to authority. And the leading talents are quite essential for the development of atmospheric science.

Keywords: atmospheric science, meteorology history, development, inspiration

1 引言

环绕地球不断运动的大气圈层, 是维持地球生态生存、演变的必要条件, 无时无刻不对人类的生产、生活及生态环境产生重要影响。探索大气层及其演变规律, 科学预测其发展变化趋势, 是人类适应环境、趋利避害的必然选择。

16世纪以前, 人们只能依靠肉眼看到的天象、物象来判断天气或气候的变化, 随着观云测天经验的积累, 气象观测仪器的出现和发展, 数学、物理等现代科学知识和原理的引入, 以及军事和民生对其的迫切需求, 对大气现象的分析、预测逐渐摆脱了“算

卦”、“占卜”等非科学因素, 发展成为一门有理论基础的气象学科。随着科学理论和高新技术的进一步发展, “气象学”或“气象科学”的概念已逐渐被“大气科学”的概念所取代, 其研究内容也大大超出了传统气象学的范畴^[1]。

2 大气科学发展回顾

2.1 气象学的萌芽

回望人类历史, 从远古时代开始一直到公元15世纪末的数千年, 是古代气象知识的积累期。在这段漫长的时期内, 自然界频繁出现的大气现象不断被人类关注, 对其认识也渐渐由少到多、由表及深。但在缺少现代科学思想和认识方法的时代, 人类对于气象的认识也只能是感知性和经验性的, 且在全球不同地区的气象认知水平参差不齐。

古代文化源地有四处, 即亚欧非三洲交界、印度

收稿日期: 2014年6月24日; 修回日期: 2014年10月15日
第一作者: 许小峰(1957—), Email: xuxf@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局气象干部培训学院“气象科技史研究”项目

次大陆、亚洲东部中国和古代美洲，本节仅对古代中国和古希腊的气象认知发展做简要梳理。

中国古代，为了安排农事生产、祭祀等活动，对天文、气象的占卜逐渐显现。例如商代就很重视天气对人类活动的影响。商代甲骨文中对天气现象的记载已十分完整、细致，包括降水、天空状况、风、云雾、大气光电现象等许多项目（图1），且对这些大项还有更细致的分类，如将降水现象分为雨、雪、雹、霜等，对雨又有大雨、猛雨、疾雨、足雨、多雨和毛毛雨等区别。

商代卜辞常有对预知天气状况的要求，这与当时的社会生产水平是相适应的。殷人还常在卜问后，把这十天的天气实况刻在甲骨上卜问部分的后面，用作验证。因此所发掘出来的甲骨文中，往往可以发现连续十天的天气实况记录^[2]。

到了西汉，中国的气象知识发展可以归纳为三个方面：观测范围的推广和深入，气象仪器的创造和应用，天气现象的理论解释。直到明代初期（即15世纪）以前，中国在气象学的认识有许多地方并不落后于西方^[3]。如唐代天文学家、数学家李淳风（602—670年），是世界上第一个给风定级的人，在其专著《乙巳占》的气候占和候风法中记录了很多重要的气象现象。李淳风对风的观测非常详细，古代中国一般使用的是8方位风向，因之有八风之名，李淳风进一步把风向明确定为24个，并根据树木受风影响而带来的变化和损坏程度，创制了八级风力标准，即：“动叶，鸣条，摇枝，堕叶，折小枝，折大枝，折木飞砂石，拔大树和根。”一千多年后，英国人蒲福（Francis Beaufort, 1774—1857年）于1805年才把风力定为12级共13个等级。明代杰出科学家徐光启（1562—1633年）编撰的《农政全书》中总结了天气和气候变化与农业生产的密切关系，供当时的农民参考，强调了纬度的变化对农作物生长非常重要，应该关注南北气候的差异，以便引种改制。在农业生产中，经度、纬度、季节、区域等影响要素都应该得到关注^[4]。

王鹏飞^[2]总结中国古代气象上的成就主要有：最早的十天天气实况资料，大气奇异光象的观测和图



图1 甲骨文中对天气现象的记载
（从左至右依次为风、云、雨、雪、霾）

谱，云的观测和古云图集，风、湿度、降水的观测和仪器，天气谚语和天气预报，以及古代天气现象理论。

在古希腊，气象的认知水平有了极大发展，可以说古希腊开创了世界气象科学发展的先河。到了公元前4世纪，古希腊的著名学者亚里士多德提出了冷、热、燥、湿四种基本物性，将在他之前的各类气象认知进行汇总，撰写了迄今为止发现最早的气象学专著《气象汇论》，全书共四卷42章，其中有15章谈到气象，较为全面地阐述了云、雨、雹、霾的形成，气候变化，风的形成和分布，飓风、焚风以及晕和虹等大气现象。《气象汇论》主要介绍亚里士多德及其同时期或其前人们的气象观，虽然书中的许多解释在今天看来是错误的，甚至是荒谬的，但它仍对17世纪以前的西方气象学产生了重要的影响^[5-6]。

2.2 气象观测与相关技术的进步

伴随着测量仪器的陆续发明，观测和实验的大量开展，以及在此基础上进行的理论研究，气象学对天气现象的定性描述逐渐过渡到量化认识阶段。

据记载，1597年意大利物理学家伽利略发明了温度计，在成为化学界和物理界应用的仪器之前，温度计首先被气象学家使用^[7]；46年后同样是在意大利，另一位著名的物理学家托里拆利通过玻璃管和水银进行实验，证实了大气压力的存在，但由于这一过程是在实验室里进行的，无法使公众有切身的感受，尚难以服众，还引起了争议；1654年，格里克的马德堡半球试验，使人们对气压的存在完全信服；虽然早在15世纪就有人提出了湿度测量的可行性，但作为科学观测仪器的湿度计直到18世纪才由德国数学家兰伯特制造出来。而气象中另外两种重要现代观测仪器——雨量计和测风仪在1800年前后被发明。同时随着观测仪器的不断改良，气温、气压、风速、湿度等气象要素的观测精度也越来越高，为大气科学的快速发展提供了必要条件。

需要强调的是，法国著名哲学家、数学家勒内·笛卡尔（Rene Descartes, 1596—1650年）在《论气象学》中贡献了基于实际观察和定量计算的研究理论，强调用“量”的范畴来描述自然现象必须要使用标准的观测仪器、统一的度量单位、明确的记录格式。世界上最早的定量、连续观测资料肇始于17世纪中期。最早使用气象观测仪器实施气象观测，并将气象观测记录一直保存下来的是巴黎、克勒蒙费兰德、斯德哥尔摩这三个地方，时间为1649—1651年。其中，斯德哥尔摩这个地方气象仪器的观测工作首先是由笛卡尔

实施的。这三个地方的气象仪器观测构成了世界上最早的国际气象观测网^[4]。

除了气象观测仪器自身的发展外，主要用于其他领域的科技产品也为气象观测水平的提高，提供了极大的帮助。

19世纪30年代电报的发明，为各地气象观测资料的迅速传递和集中提供了条件，使绘制当日天气图成为可能。1928年，无线电探空仪的发明对20km以下的各层气象要素的探测为当时的天气预报提供了有限的资料^[8]。二战之后，最早被应用于军事的雷达开始用于探测气象要素；1958年美国发射的人造卫星开始携带气象仪器；世界上第一台电子计算机ENIAC被用于数值天气预报试验，并与1950年获得成功。在此之后，空基和地基遥感技术以及计算机的发展，使气象观测资料更加丰富、计算更加可靠。

2.3 数学和物理的引入

人类文明伊始，人们仰望星空观察宇宙，通过风走云动、阴晴冷暖感知大气层的存在和其中发生的现象；在辽阔的荒原、山水间与大自然的持续博弈中体验、思考着各种大气现象的起源、行踪与规律。因此，气象学最早是与天文学、地理学等学科混合在一起的。随着气象学包含的内容不断丰富，逐渐形成了通过以记录天气现象为主的资料积累，以探讨天气变化规律为主的理论探索和以预测未来天气为主的应用实践三方面的经典气象学内容，从而逐步建立了经典气象学科^[9]。

17世纪之后，科学革命掀起的理性主义浪潮席卷了整个西方世界，气象学显然也从中受益。其中，笛卡尔做出了突出贡献，使其之后的气象学完全摆脱了《气象汇论》的束缚，成为了完全具有科学性质的学科。1637年，笛卡尔完成了《折光学》、《气象学》和《几何学》三篇论著，并为此写了一篇序言《科学中正确运用理性和追求真理的方法论》，简称《方法论》。笛卡尔试图以这三种科学研究为例，证明其方法论的正确性，进一步证明其实证主义的哲学观点。在《气象学》一书中，笛卡尔提出了诸多气象学方面的理论，用新方法解释了各种天气现象。如他详细讨论了地面上的物质以及上升的水汽性质、云层以及风的成因，并解释了云层演化成雨、雹、雪的过程和暴风雨、雷、闪电等的成因以及虹和大气光现象。最值得一提的是笛卡尔在《方法论》中提出了四条认识客观世界的原则：首先，要尽量避免轻率判断，即使对待“权威说法”也要保持怀疑的态度；第二，遇到复杂问题时，可以把它分解为一系列简单的问题；第

三，要按照次序认识并解决系列问题，逐步回溯到原始的复杂问题；第四，要尽量全面细致地考虑问题，确信准确无误^[4]。尽管这些原则并不深奥，但对于从中世纪走出来的西方世界而言，已是很大的突破了。即便是对现代人而言，能完全做到也并非易事。

人们对天气的认识是一个漫长的过程，依赖于知识的积累，认识的提升，技术的进步，需求的推动等多种因素，在具备了这些因素后，则要看人才的涌现了。在现代气象科学领域取得突破性、奠基性进展的要首推来自挪威的皮叶克尼斯父子和在他们的领导下形成的挪威学派了。V.皮叶克尼斯在20世纪初提出天气预报是一个物理初值问题，并给出了描述大气运动的方程组，首次将流体力学、物理学的观点引入气象学研究，并用数学公式将大气运动表达出来，推动、加快了现代气象学的发展。数学表达式和物理定律的引入，使气象学成为了一门真正的现代科学。

V.皮叶克尼斯在其1904年发表的经典文献^[10]中指出，大气运动过程本质是复杂的力学与物理学问题。每一个过程都可以用一个或多个遵循力学或物理学法则的数学方程表示。只要能够建立和未知变量数量相等的独立方程，就能充分获知大气的未来发展。从气象的角度来说，在任意时间，只要确定每个点上的大气速度、密度、气压、温度和湿度，大气的状态就可以确定。根据这些物理量，可以建立起三个方向的运动方程、连续方程、状态方程和两个符合热力学定律的方程（水汽质量方程和热力学能量方程）。这就是对现在出现在教科书中的大气运动方程组的最初描述。

1905年，V.皮叶克尼斯受邀到纽约哥伦比亚大学和华盛顿特区的卡内基学院做特邀报告，介绍了他发展的环流理论，以及如何将水文动力学和热力学的原理应用到大气科学上。他在报告中提议将物理理论带入天气预报来整合天气理论与预报实务，让气象学作为一门科学彻底站立起来^[11]，这个观点受到卡内基学院的巨大支持。

2.4 经典理论的提出与数值预报的诞生

1904年大气运动方程组这一科学概念的提出，以及1922年理查森基于科学理念对数值预报的尝试（虽以失败告终），成为20世纪三四十年代极锋理论、长波理论、准地转理论、斜压不稳定理论等经典理论提出的基础和动力。这些成果又帮助“计算机之父”冯·诺依曼和美国气象学家查尼，在1950年，用刚刚诞生的世界上第一台电子计算机ENIAC，在以1949年1月31日观测记录为初值，进行欧洲地区24小时数值

预报的试验中获得成功。数值预报的成功及其后来在天气预报业务的应用，使得天气预报从完全依据预报员经验的时代逐步进入到依据数学物理模式预报结果，再由预报员进行订正的主客观预报相结合的阶段。

2.5 迅速发展阶段

最近半个世纪，大气科学在继承经典的同时，获得了极大发展。例如，在天气预报主战场，特别是随着卫星遥感技术方法的不断改进和数值预报模式更加精细化，以数值预报理论和技术为代表的预报预测分析方法逐渐占据了天气预报领域的主要位置；在大气探测方面，各种雷达的出现，不仅让气象应用雷达的视野不断拓展，其识别能力也有了质的飞跃，特别是雷达探测已经结束了“看图识字”阶段，大量量化天气探测数据进入数值预报模式，派生出很多新的科学和技术问题，并为数值预报的进步不断提供潜能。此外，从世纪之交开始，大气科学的成果不断与其他科学融合，获得了新的研究和应用领域，例如，大气化学、生物气象、全球变化科学和地球系统科学等，这些交叉、衍生学科或新被认识到的领域的出现，不仅是强烈的应用需求使然，例如，大气化学因人们更加重视空气质量与人类福祉的关系而获得加速发展，更重要的是，大气科学一些核心问题的最终解决，在很大程度上是需要多学科发展融合的支持才有可能，例如，地球系统科学可能是最终实现包括准确预报大气行为在内的地球环境预报的最终解决方向。

在这样的科学进化过程中，一方面，大气科学扮演着越来越重要的角色，例如美国气象学家洛伦兹在用计算机模拟求解仿真地球大气的13个方程时，发现由于误差指数级增长和传递，微小误差随着不断推移

将会造成截然不同的后果，即“混沌现象”，并由此诞生和发展了一门新兴的数学分支——混沌理论。混沌现象的发现和发展的影响，影响了基础科学的众多领域，在人类对于自然界的认识上，引发了本质性的变化；另一方面，气象学家需要关注的领域已经数倍地增加，大气科学涉及的基础知识“谱”的拓展不断。这一情况也造成了两方面的必然结局：大气科学家的队伍在迅速扩大（原来的大气科学家学习新知识，探知新领域；其他领域的科学家进入大气科学相关领域，与气象学者共同研究攻关）和大气科学的学科划分向更多方向及更加精细化两个维度出现史无前例的延伸与扩展。这时候，要从科学家的角度，获得大气科学整体发展脉络，绝非20世纪前半叶以几个学派为主的科学家队伍就能代表。

3 学派和学术领袖

回顾大气科学的发展历程可以发现，作为自然科学的一个重要分支，大气科学与其他自然学科一样充满着未知，这就需要有一批又一批的学者为之前赴后继，不断积累经验、开拓创新。从古希腊的亚里士多德到16世纪的伽利略，再到现代气象学之父皮叶克尼斯、“芝加哥学派”创始人罗斯贝以及数值预报的点火者查尼、冯·诺依曼，他们每个人在自己研究领域的扎实推进，都最终在大气科学发展进程中留下了坚实的烙印。当这些精英学者组成的学术团体为某一个学科的发展做出了开创性或奠基性的工作时则可将其称之为学派，因此在大气科学的发展史上，能够被称为学派的，也是被广为认可的只有两个，即以皮叶克尼斯父子为首“挪威学派”（又称卑尔根学派、北欧学派等）和罗斯贝创立的“芝加哥学派”（图2）。

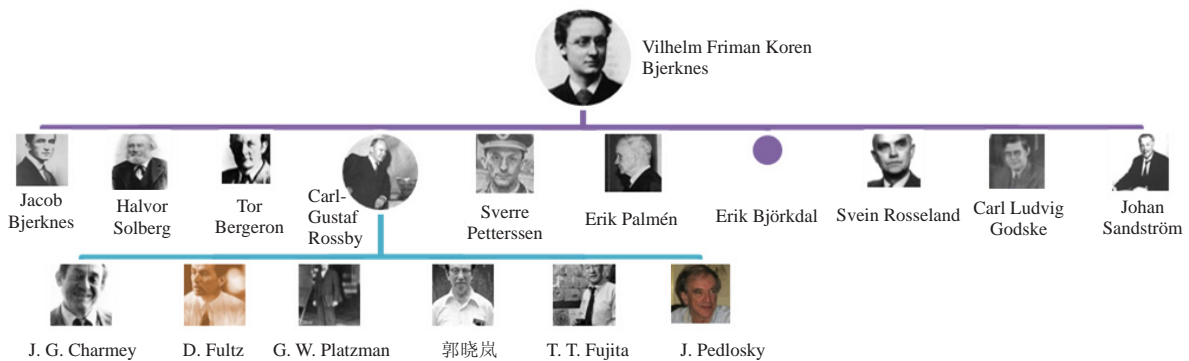


图2 挪威学派与芝加哥学派代表人物^①

^① 本图根据傅刚在2012年4月“第一届气象科技史研究学术研讨会”上的报告以及胡永云在2007年发表的《我所知道的芝加哥学派》一文绘制。

3.1 挪威学派

挪威学派是世界公认的主流气象学派，V.皮叶克尼斯和他的10个助手则是挪威学派的代表人物，无论在天气学理论方面，还是在天气分析和天气预报的方法上，他们都做出了卓越的贡献。其中，V.皮叶克尼斯先后提出环流定理^[12]和大气运动方程组^[10]，正是这些工作启发了包括埃克曼和罗斯贝在内的海洋、气象学家，在大尺度海洋和大气运动中使用数学方程和物理定律，使得现代天气预报成为可能。J.皮叶克尼斯通过查阅大量的观测数据首次描述了移动气旋的结构，指出每一个移动气旋都有两条辐合线，并将它们称之为“引导线”和“飚线”，这就是对在未来被人们熟知的“冷锋”和“暖锋”最初的命名^[13]。之后，他又和索尔伯格、贝吉龙等结合锋面气旋云系和降水特征建立了理想气旋模型，提出气旋生命史的四个阶段并解释其生成和消亡的原因^[14-15]。其他成员的工作，则不断完善了挪威学派的理论体系。总的说来，挪威学派在气象学上的贡献是非常广泛的，且都带有奠基价值。

3.2 芝加哥学派

曾是V.皮叶克尼斯的助手之一的罗斯贝，后来则成为了“芝加哥学派”的创始人。1925年，罗斯贝在瑞典-美国文化交流基金的资助下前往美国学习，1941—1947年在芝加哥大学任教期间，创立了芝加哥学派。而罗斯贝个人对气象学的主要学术贡献是1928—1939年在麻省理工学院（MIT）工作期间做出的，如关于中纬度西风带波动的研究^[16]，如今，大气科学中的许多术语都是用罗斯贝的名字命名的，且都或多或少与大气长波理论相关。芝加哥学派的另一代表人物查尼在大气动力学方面也有许多贡献，如首先给出了动力学分析中应用准地转近似的方法，建立了准地转理论；对大气长波的产生机制进行了深入研究，提出斜压不稳定理论^[17-18]；与冯·诺依曼合作，推动了数值预报取得成功；等等。芝加哥学派特别强调大气科学问题的基本物理原理，而不是停留在大气现象本身，这种从最基本的物理或流体力学原理出发来研究大气科学问题的风格，也许是芝加哥学派能够做出许多开创性工作的重要原因^[19]。

3.3 中国学者的贡献

在国际大气科学领域快速发展的时期，中国由于长年战乱，科学技术水平相对落后，但就是在这样艰苦的环境下，中国的气象学家们依然坚持探索，为中国气象事业的建立，乃至世界大气科学的发展做出了重要贡献。

竺可桢（1890—1974年）1918年获美国哈佛大

学博士学位后回国，那时中国气象的科研与业务几乎是空白的，他为推进我国的气象科学做出了不懈的努力。1927年，竺可桢在南京筹建了中央研究院下属的气象研究所，经过几年的努力，在国内建立了拥有40多个气象站和100多个雨量测量站的中国气象观测网，还开展了高空探测、无线电气象广播、天气预报等工作，整理出版了中国气候资料，创办《气象杂志》，发表了许多研究成果，培养了一批现代著名的气象学家，中国气象事业由此初具雏形^[20-21]。赵九章是中国动力气象学的创始人，所著《信风带主流间热力学》是我国真正把数学和物理引入气象学、解决气象学问题的一篇重要论文。他首先提出了长波斜压不稳定概念，比Charney的工作早发表了一年^[22]。郭晓岚在大气正压不稳定性理论、大气环流、飓风形成理论、热对流和地气相互作用等领域具有突出贡献，并被美国气象学会授予“罗斯贝奖”^[22]。叶笃正将罗斯贝提出的行星波理论发展到一个新的阶段，发表了被认为是对动力气象学发展具有重要贡献的论文——《论大气中能量频散》^[23]。他还对完善地转适应理论做出了贡献，提出地转适应的尺度理论，从物理上辩证地指出气压场和风场是两个相互依存并相互制约的矛盾双方，它们之间的适应关系取决于运动的尺度^[24]。谢义炳在东亚降水天气系统与湿斜压天气动力学等方面做出了开创性的成果，提出了湿斜压大气的概念和理论^[25]。陶诗言是中国天气学研究和天气预报业务的开拓者之一，他系统、准确地划分了入侵中国的寒潮路径，并首次提出寒潮过程是高空大型天气过程急剧调整结果的理论观点。顾震潮则开创了中国数值天气预报事业，提出在数值天气预报中运用历史资料的方法^[22]。

这些中国的气象学家，把从国外所学的理论带回中国，并结合中国的实际情况开展工作，为中国现代气象科学研究与业务发展做出了开创性的贡献，使得中国跟上了世界的步伐。

4 对当代大气科学发展规律的认识

大气科学的发展有其自身的规律，比如定量探测技术、观测站网的建设为现代气象科学奠定了基础，实际需求是推动大气科学发展的动力，杰出的领军人才和团队在科技创新中起着关键性作用等。

（1）大气科学与其他学科相互促进、协同发展

19世纪随着工业革命的进行，资本主义社会的科学技术水平飞速发展，人类对于自然的认识达到了前所未有的高度，自然科学的发展逐步形成体系。在此过程中，大气科学在其他学科的促进下，得到了快

速发展，比如流体力学方程成为大气动力学的发展基础；偏微分理论被用于解释大气运动和变化背后的微观过程；场论为气象学中的位势理论提供理论工具；概率论的发展为气象统计预报的发展奠定了方法基础。气象科学的发展除了依赖于19世纪哲学、数学、物理学、测量学等学科的成果，还离不开20世纪人造卫星技术和计算机技术的高速发展，探测技术的发展为气象高空探空提供了技术保障，随着气象卫星和气象雷达的出现，气象观测呈现快速、立体化发展，为气象预报与研究提供了大量的实况数据，极大地促进了大气科学的发展。同时计算机技术的发展又帮助大气科学开创了新的里程碑——数值天气预报。

大气科学在借鉴其他学科先进成果的同时也在促进其他学科发展。随着大气科学研究领域的不断拓展，学科间相互交叉渗透，相互促进的局面逐渐形成，大气科学特定的要求不断为其他学科开辟新的研究前沿，丰富其他学科的内容。例如海气相互作用的研究大大促进了海洋学的进步，由于大气和海洋运动都受到地球旋转、重力和热力影响，海气相互作用的研究开创和发展了地球流体动力学^[26]。大气科学对于云物理、雷暴、湍流的研究，提高了飞行器运行的安全性和稳定性，促进了航空业的发展。大气本身就是人类生存环境的重要组成部分，对其研究的深入和进展显然会推进对环境科学的认识。因此大气科学与其他学科之间应当建立一种相互促进、协作发展的关系，大气科学学科在其自身发展的过程中，要充分了解其他学科的前沿成果，应用先进的科学技术和研究方法，加强学科间的人才和成果交流。

(2) 宽容不同意见，不迷信神话和权威

优秀的科技人才往往较有主见，对一些问题有自己独特的看法，且性格直率，不掩饰自己的观点。如罗斯贝1925年到美国气象局工作后，由于对美国气象部门的行政和业务工作都不太满意，发表了一些不同意见，得罪了一些人，在那里工作期间并不愉快，并被宣布为“不受欢迎的人”。庆幸的是罗斯贝还有机会，时值加州要发展航空业，正筹建从旧金山到洛杉矶的航路，航空基金会便聘用了罗斯贝，请他去建立航空气象业务系统，一年之内便完成了航空气象网的建设。美国气象局最终也接收了罗斯贝建成的航空气象业务网，并将其作为美国各航空业务机构的样板，认可了罗斯贝的成绩。如果没有美国气象界的宽容，可能就不会有芝加哥气象学派的辉煌历史。

如果缺少宽容、迷信权威，也会导致在科学探索的道路上出现迷失或停滞不前。19世纪50年代，英国成立了气象局，首任局长菲茨罗伊的工作深受出海

水手们的欢迎，他们不要求天气预报全对，大部分对就可以了。但当时社会的贵族们认为不太准的天气预报会妨碍他们的生活，守旧的科学大师们也不支持，一些英国皇家学会的大人物用物理学、生物学的目光看待大气科学，认为科学结论都是要在实验室做好才能应用到实际。这导致19世纪60年代初期，英国气象局被取消，菲茨罗伊被调到英国皇家学会做资料统计员。后来，人们发现菲茨罗伊的天气图上已经绘出了气旋和锢囚气旋。1934年，英国气象学家肖氏(N. Shaw)提出，如果菲茨罗伊继续沿着他的道路前进，则气旋的锋面学说将出现在1870年而不是1919年。而再看肖氏自己，也有类似的遗憾。1878年英国气象学家艾伯克龙比总结出地面七种气压形势场，奠定了气压场形态学的基础。艾伯克龙比被捧为“大英帝国的亚里士多德”，他的学说完全主导了英国气象学界。20世纪初，肖氏逐步总结出气旋波理论，发现了气旋中的三股气流和不连续线，他已经走到了斜压大气气旋波理论的门口，但肖氏在权威面前戛然而止，未能再深入下去。否则，锋面学说或许可以首先诞生在英国。如果英国气象界当时不迷信权威，对后来者抱着宽容的心态，如果相关科学家不固步自封，在自己开辟的道路上再前进一步，或许在气象科技史上真的会出现“英国学派”。

(3) 科学的兴盛离不开领军人才

从挪威学派的气旋学说至芝加哥学派的长波理论，一批精英学者的通力合作带动了两个学派的兴盛发展，也使得气象学整体水平有了很大提升。而20世纪30年代前后，随着罗斯贝、J.皮叶克尼斯移居美国，气象学研究的主战场也从欧洲向美国转移，这更说明科学的兴旺离不开领军人才的引导。领军人才，顾名思义，不仅自身能力出众，而且通常具有崇高的价值追求、出类拔萃的科学素养、卓越的领导才能、独特的人格魅力、坚韧的拼搏毅力、强大的团队凝聚力和广泛的社会影响力等优良素质^[27]。而皮叶克尼斯父子、罗斯贝和查尼等人正是气象学界当之无愧的领军人才。他们以卓越的眼光招贤纳士、大胆做出创新的工作。正所谓“名师出高徒”，领军人才经常能够培养出精英学者，以壮大其研究团队，团队壮大所带来的号召力又会吸引更多的精英加入，从而形成良好的循环，研究成果不断推陈出新，一个地区甚至国家在某一学科上的领先优势也通常在这个时候被确立。

以史为鉴，如果中国大气科学要走到世界前端，科技人才队伍建设显然是最重要的环节，而其中领军人才的涌现则是更为关键的条件。

5 结语

20世纪是大气科学获得迅速发展的100年，基础理论的突破、现代探测技术和计算技术的发展起到了至关重要的作用。但对于复杂多变的大气，人类的认识还非常有限，仍有许多难题尚待解决。如对于中小尺度天气系统的剧烈变化，能否在云物理方面取得突破；在气候预测领域，能否在基础理论、预测方法上有所斩获；在气候变化领域，能否在气候增暖的背景下，对气候系统各圈层造成的影响及演化规律有系统性的、更为清晰的认识；还有诸如无缝隙预报、应用气象、探测技术、信息分析、复杂性处理等多方面的领域需要深入探索。或许通过回顾、探讨和总结历史进程，对推进未来的发展能有所启示，期待大气科学在一些核心领域，能像过去100年那样，突破瓶颈，攻克关键难题，取得大踏步进展。

参考文献

- [1] 李国平. 动力气象学(大气动力学)发展、回顾与展望//新编动力气象学. 北京: 气象出版社, 2006.
- [2] 王鹏飞. 中国古代气象上的主要成就. 南京气象学院学报, 1978(1): 141-151.
- [3] 竺可桢. 中国过去在气象学上的成就. 科学通报, 1951, 2(6).
- [4] 杨萍, 叶梦姝, 陈正洪. 气象科技的古往今来. 北京: 气象出版社, 2014.
- [5] 王鹏飞. 世界大气科学发展概史//王鹏飞气象史文选. 北京: 气象出版社, 2001.
- [6] 刘昭民. 西洋气象学史. 台湾: 中国文化大学出版社, 1981.
- [7] Middleton W E K. A History of the Thermometer and Its Use in Meteorology. Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1966.
- [8] 黄荣辉. 大气科学发展的回顾与展望. 地球科学进展, 2001, 16(5): 643-657.
- [9] Nebeker F. Calculating the Weather, Meteorology in the 20th Century. Academic Press Inc, 1995.
- [10] Bjerknæs V. The problem with weather forecasting as a problem in mechanics and physics. In: Shapiro M A, et al. Life Cycles of Extratropical Cyclones. Boston: American Meteorological Society, 1999.
- [11] Cox J D. 闻新宇, 贾喆, 朱清照译. 风暴守望者——从富兰克林的风箏到厄尔尼诺的天气预报风云史. 北京: 科学普及出版社, 2014.
- [12] Thorpe A J, Volkert H, Ziemiański M J. The Bjerknæs' Circulation Theorem: A Historical Perspective. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003(4): 471-480.
- [13] Bjerknæs J. On the structure of moving cyclones. Geofysiske Publikasjoner, 1919, 1(2): 1-8.
- [14] Bjerknæs J, Solberg H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. Geofysiske Publikasjoner, 1922, 3(1): 3-18.
- [15] 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚. 挪威学派气象学家的研究工作和生平: J.皮叶克尼斯、H.索尔伯格和T.贝吉龙. 气象科技进展, 2014, 4(6): 35-45.
- [16] Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. J Mar Res, 1939, 2: 38.
- [17] Charney J G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. J Meteor, 1947, 4: 135.
- [18] Eady E T. Long waves and cyclone waves. Tellus, 1949, 1: 33.
- [19] 胡永云. 我所知道的“芝加哥学派”//北京大学物理学院大气科学系. 江河万古流: 谢义炳院士纪念文集. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [20] 《竺可桢文集》编辑小组. 竺可桢文集. 北京: 科学出版社, 1979.
- [21] 王东, 丁玉平. 竺可桢与我国气象台站的建设. 气象科技进展, 2014, 4(6): 67-73.
- [22] 钱伟长. 20世纪中国知名科学家学术成就概览·地学卷·大气科学与海洋科学分册. 北京: 科学出版社, 2010.
- [23] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. J Meteor, 1949, 6: 1-16.
- [24] 吕美仲, 侯志明, 周毅. 动力气象学. 北京: 气象出版社, 2004.
- [25] 北京大学物理学院大气科学系. 江河万古流: 谢义炳院士纪念文集. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [26] 张大林. 大气科学的世纪进展与未来展望. 气象学报, 2005, 63(5): 812-824.
- [27] 盛若蔚. 呼唤“帅才”: 科技需要领军人物. 人民日报, 2005-01-11(9).

“第二届气象科技史研究学术研讨会” 征稿启事

气象科技史研究有助于从不同视角看待大气科学主流问题与发展难题，对全面把握气象科学发展规律、培养眼界开阔的气象科技工作者及拓宽大气科学研究边界等具有重要意义。继2013年首次会议成功举办之后，中国气象局气象干部培训学院主办的“第二届气象科技史研究学术研讨会”计划于2015年11月在北京召开。

现征集与会议主题相关的学术论文（字数一般不超过10000字）或详细摘要。本刊将与会议组委会合作，在征得作者同意后刊载参会优秀论文。

请于2015年5月15日前提交论文题目和摘要；2015年7月15日前提交会议论文或详细摘要。投稿Email: qxkjshy@yeah.net

会议详细通知参见本刊主页“信息公开”。

天气预报的三次跃进

杜钧¹ 钱维宏²

(1 美国国家海洋和大气管理局国家环境预报中心, 美国; 2 北京大学物理学院大气海洋科学系, 北京 100871)

摘要: 回顾过去100多年, 天气预报经历了两次跃进: 第一次是地面和高空天气图的绘制和应用(空间上的跃进), 第二次是数值预报的实施(时间上的跃进)。经过这两次跃进, 天气预报已经走过了从经验和定性描述到今天定量计算的一门数理学科。洛伦兹发现大气混沌现象后, 天气预报正在经历从单一确定论到多值概率论的第三次跃进(观念上的革命), 并试图通过量化或简化不确定因素来提高天气的可预报性和降低预报的不确定性。重点介绍两种现行的量化或简化不确定因素的做法: 一是直接面对问题(量化), 即用集合预报的方法, 定量描述预报的不确定性, 使之成为预报的一部分, 让用户在决策时科学地应用更全面的预报信息; 二是绕开数学上的难题(简化), 把大气变量分解为瞬变气候与瞬变扰动两个部分, 用瞬变扰动建立与异常天气之间的联系。

关键词: 天气预报, 三次跃进, 集合预报, 瞬变气候, 瞬变扰动

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.002

Three Revolutions in Weather Forecasting

Du Jun¹, Qian Weihong²

(1 National Centers for Environmental Prediction/NOAA, USA 2 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: The scientific evolution of weather forecasts is briefly reviewed from a historical perspective in this paper. During the last 100 years, applications of weather maps (surface and upper air) and numerical weather prediction (NWP) to daily weather forecasts marked two major achievements: weather maps expanded our view from two dimensions to three dimensions in space and NWP brought us ahead of real weather in time. Through these advancements, weather forecasting has gradually evolved from an empirical to a qualitatively-reasoning and further to an exact physical science based on mathematical equations. With the discovery of chaos by Prof. Edward Lorenz, weather forecasting is now undergoing its third philosophical revolution from a deterministic to probabilistic world to facing the reality of its limited predictability. Two different approaches are presented, as the main focus of this paper, to deal with the limitation of predictability and forecast uncertainty: one is using ensemble forecasting technique to directly quantify and include forecast uncertainty information in a forecast which can be utilized by end-users to make better decisions; the other is an attempt to have a workaround of nonlinearity mathematically by decomposing a meteorological field into climatic and anomalous two components. Therefore, weather forecasting could be possibly simplified in dealing with the anomalous components only.

Keywords: weather forecasting, three revolutions, weather map, numerical weather prediction, ensemble forecasting, variable decomposition

1 引言

天气预报作为一种信息与人们的生产和生活息息相关。天气预报, 从定性描述到逐步定量预测, 经历了几千年的发展历史。中国甲骨文中有关卜雨问晴的片断, 是有文字以来最早的天气预报记载。发展的过程也是对自然认识得到提升和预测方法建立与不断完善的过程。在此过程中, 思想观念的更新, 观测、通信技术、计算机和计算方法的使用发挥了积极的推动作用。通过回顾过去的发展和讨论正在进行的改革, 可以帮助我们更清晰地看到未来。

天气预报走向量化的思想火花是随着自然科学大思想家的出现而萌发的。英国大科学家的牛顿(1642—1727年)力学是建立在确定论上的思想体系。拉普拉斯(1749—1827年)是一位法国的机械决定论者, 他把牛顿的质点运动确定论扩展到了无穷质点系统的确定论。大气或地球流体正是由无穷的质点组成的。拉普拉斯在1814年的《概率论的哲学试验》著作中写道: “如果有一种智慧, 它能在某一瞬间知道支配着自然的一切力, 知道大自然所有组成部分的相对位置, 并能伟大到足以分析所有这些事物; 它能用一个单独的公式, 从最大的天体到最小的原子, 都毫无例外悉数概括出宇宙万物的运动, 而且对未来就像对于过去那样, 都能一目了然; 那么目前的宇宙整

收稿日期: 2014年3月12日; 修回日期: 2014年4月8日
第一作者: 杜钧(1962—), Email: JunDu_NOAA@yahoo.com

体，可以看作是它以前的状态的结果，以及以后发展的原因。”

拉普拉斯希望找到一个独立的公式，把宇宙的万物运动描述清楚。他提到，公式中要包含力、位置和原子状态等的描述。这样，宇宙的前因后果都确定了，也就能回溯过去和预测未来了。这个方程就是

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (N + L + D)S = F \quad (1)$$

其中 $S(t) = (d_1, d_2, \dots, d_R)$ 为 R 维空间中每个变量在 t 时刻所具有的观测值； $(N+L+D)$ 为宇宙系统的内动力学，分别为非线性算子、线性算子和耗散算子； F 为作用于该系统的外强迫。在初值可测量、动力学可描述和知道外强迫的情况下，用高性能计算机可以模拟过去，也可以预报未来。

这一理论体系直接影响到了后来用于天气预报理论与数值天气预报模式的纳维叶—斯托克斯（Navier-Stokes）方程在1821年的建立。直到现在，尽管存在观测资料的不确定和模式物理过程描述的不确定，但人们还是在不断完善公式，发展探测工具，获取高时空分辨率的资料，努力实现拉普拉斯的理想目标。可见，早期自然科学思想体系的发展为天气预报走定量化道路奠定了基础。

17—18世纪，科学家相继发明了各种定量测量天气现象的仪器，标志着气象科学研究的探测手段开始进入了一个新的发展时期。1820年德国的H. W.布兰德利用《巴拉丁气象学会杂志》刊载的气象观测资料，将1783年各地同一时刻的气压和风的记录填在地图上，绘成了世界上第一张天气图。它把人们的视野从一个点扩展到了一个面。这一开创性工作为后来分析气压、风与天气的关系，以及建立天气系统的概念模型，迈出了坚实的一步。传统天气图的诞生，是近代气象学理论研究和现代天气预报实践的标志。1851年，英国的J.格莱舍利用电报传送资料，绘制了可供实际应用的瞬时天气图。天气图的出现革新了古老亚里士多德气象学中天气预报的局地性。

最早的天气预报业务是军事驱动的。1853—1856年，英、法同俄国发生了瓜分土耳其的克里米亚战争。1854年11月14日黑海出现风暴，法舰亨利四号沉没，英法联军大败。事后，法国政府命巴黎天文台台长U.勒威耶收集了该年11月12—16日的气象资料，查明此风暴于11月12—13日还在西班牙和法国西部，14日就东移到了黑海地区。如能及时发现风暴并预告风暴的移动，损失是可能避免的。因此，U.勒威耶提出的组织气象台站网、开展天气图分析和天气预报的建议被法国政府采纳，1856年组织了气象观测网。从

此，绘制天气图便成为一项日常业务，并陆续推广到其他国家。

天气预报业务已经有了150年的历史，其发展经历了几个阶段。谢义炳^[1]先生曾指出：“开创性的研究常是旧道路走不通了，不能解决已发生事物的矛盾了，才有人谋求开辟一条新路。”他还提出了革新与创造的判别，认为工具的革新和创造，一般归之于发明，其价值直接决定于经济和社会效果。谢义炳总结认为，现代气象科学有两大跃进。一个是挪威学派的环流理论和气旋波模型。二是芝加哥学派的长波理论。谢先生说：“现在是等待第三个突破（跃进）的时候，正处在酝酿过程中。这里，我们简要总结前两次跃进，重点展望第三次跃进。”

2 第一次跃进——高空天气图

思想可以发端于一个人，但要把一种科学的思想付诸行动并能达到目标需要有一个能够带领一班人开创进取的领头人。V.皮叶克尼斯（1862—1951年）就是这样的领头人。他1862年出生在奥斯陆的一个流体力学教授家庭，1880年进入奥斯陆大学学习数学和物理，1888年获得硕士学位。1890—1892年，V.皮叶克尼斯在德国波恩大学从事电磁共振课题的研究。1892年，他回到奥斯陆获得了博士学位。1893年，V.皮叶克尼斯被任命为斯德哥尔摩工程学校的讲师。两年后，他成为斯德哥尔摩大学应用力学和数学物理学教授。在此期间，他把汤姆孙和赫姆霍兹的涡旋理论推广到大气和海洋运动中。

经过近10年的努力，V.皮叶克尼斯在1905年访问美国的时候介绍了他的气团理论，提出了用数学方法（流体力学和热力学方程）描述大气运动状态，并制作天气预报的设想与计划。他的计划深深地打动了卡耐基基金会，从此获得了36年的研究资助。百年前，V.皮叶克尼斯就提出了天气预报是一个物理初值问题的论断，并给出了描述大气运动的方程组，从而开启了现代气象学的大门。

1904年，挪威从瑞典王国独立出来。新的国家需要人才，1907年V.皮叶克尼斯接受了挪威奥斯陆大学应用力学和数学物理学教授的席位，开始了天气预报的实战性研究。1910年他建议在天气图上绘制流线，并分析辐合、辐散区。V.皮叶克尼斯先后在挪威和德国几所大学和研究所从事教学和科研工作。无论走到哪里，他都能够带出一个团队。

1914年8月，第一次世界大战开始，英国政府停止提供气象资料，挪威政府只能自主设立测候所（观测站），逐渐由8处增加到90处之多，丰富了气象观

测资料。1917年，挪威卑尔根大学邀请V.皮叶克尼斯加盟，天气预报的一系列基础性工作就是在那里做出的。随着无线电探空仪的发明，高空气象资料逐渐增多，人们的认识也从二维向三维空间拓展。1917—1918年，他们收集地面与高空观测资料并分析现在仍在使用的传统天气图，发现了不同气团之间的锋面类型（冷锋、暖锋、静止锋等），并提出了中纬度气旋发展的极锋理论，创立了气旋的现代模型和极锋学说。由此，他们形成了包括天气学理论、天气图分析和预报方法的完整体系。这些中高纬度天气系统的认识与挪威和欧洲所在的地理位置有直接的关系。在有了这些定性的天气系统模型后，他和助手们又一起推导出与大气中可测变量有关的方程组，这应该是后来数值天气预报的基础。根据理论和观测，1921年他提出了著名的“大气环流”图案。他们的开创性工作——对天气系统的描述，成就了国际知名的挪威气象学派。1926年，V.皮叶克尼斯接受了母校奥斯陆大学的邀请担任应用力学和数学物理学教授，直到1932年退休。

挪威气象学派培养出了两位杰出的后生。一个是V.皮叶克尼斯的儿子，J.皮叶克尼斯。1919年，J.皮叶克尼斯发现分隔冷气团和暖气团的极锋斜坡面上低气压系统生成、发展、消亡的过程，发表了《论移动性气旋结构》（*On the structure of moving cyclones*）一文，这是极锋学说划时代的文献。1922年，他与Solberg合著《气旋的生命循环和锋面学说》（*Life cycles of cyclones and polar front theory*）一文，详细论述了气旋风暴的发展过程。至此，极锋学说初步形成。20世纪30年代，J.皮叶克尼斯进一步发展了关于气旋和反气旋活动的理论，把上层气流纳入了研究体系，使气旋波的三维结构更加完整。

另外一个美国芝加哥学派的领袖人物，罗斯贝（C. G. Rossby, 1898—1957年），他出生于瑞典。1919年，罗斯贝跟随挪威气象学派的元老V.皮叶克尼斯学习气象学和海洋学，参加挪威学派极锋和气旋概念模型的构建。罗斯贝首先提出在天气图上，用红色标注暖锋，用蓝色标注冷锋，并沿用至今。1925—1927年，他来到美国气象局工作。1928年，罗斯贝在麻省理工学院（MIT）创立美国第一个气象系，并一直任教到1939年。1941—1957年，他兼职任教于芝加哥大学，开创了芝加哥学派并使其达到高峰。1947—1957年，他在瑞典创建了斯德哥尔摩气象研究所。

罗斯贝与芝加哥学派对天气预报的重大贡献就

是所谓的“罗斯贝波”，也称为“大气长波”。大气长波在高空天气图上就是那些“槽来脊去”的环流演变。预报员依此可以定性预报天气的变化。他的理论指出，中纬度高空的大气环流在自西向东的绕极运动之上，叠加有波长达数千千米的波动，这是由于科里奥利参数随纬度变化造成的。这一长波理论是动力气象学历史上的一个重大创新，并由此引出一系列与天气预报有关的理论，如叶笃正的长波频散理论，也为以后避开原始方程而应用简化的涡度方程成功进行数值天气预报的试验提供了理论基础。

3 第二次跃进——数值天气预报

20世纪工业革命带来了经济的飞速发展。恶劣天气造成的经济损失并不比过去一场战争的小。定量的天气预报成为20世纪经济和社会发展的迫切需要。天气图并没有解决定量的天气预报问题，但它定量地反映了刚刚过去的天气。根据天气系统的过去演变以及理论模型也可以外推和估计未来可能的天气形势和气象要素的变化。定量的天气预报来自牛顿的确定论思想体系，是拉普拉斯把这一思想复杂化了，更是纳维叶—斯托克斯在1821年建立了可为现代人使用的流体力学方程。在计算机出现之前，人们早就迫不及待的要预算出未来的天气，而不只是停留在对天气图的分析。正是高速运转的计算机实现了人们的愿望，让未来的天气实况走在了时间的前面。

百年前（1904年）V.皮叶克尼斯列出了控制大气运动的原始方程组并将天气预报作为一个物理初值问题的提出，为天气预报的数值化指明了方向。第一个尝试数值天气预报的人是英国气象学家理查森。他在1922年用原始方程制作的数值天气预报试验却因初值的不平衡（当时还没有认识到）而失败了，但却为后来开展计算机数值预报积累了经验。芝加哥学派的另一个重要人物是J. G. Charney（1917—1981年）。罗斯贝多次和Charney讨论他的博士论文以及气象学的其他关键问题。罗斯贝不止一次地给Charney写信强调数值天气预报的重要性，并把他介绍给普林斯顿大学高级研究院的冯·诺依曼。罗斯贝建议冯·诺依曼向军方申请经费，保证了Charney的研究顺利进行。Charney凭借他的数学功底和对大气现象的喜爱与观察，成为了一位杰出的理论气象学家。他在斜压不稳定理论、准地转运动、数值天气预报、地转湍流理论、第二类条件不稳定（CISK）机制、行星波垂直传播和大气环流的多平衡状态理论等多方面做出了成就。1950年，Charney等人用简化了的正压涡度方程成功地计算出了历史上第一张数值预报天气图，成为天气预报发展的

第二个里程碑。

第一次数值预报试验在1950年成功后，于1954年12月和1955年5月在瑞典和美国相继正式开始投入业务预报。这有两个值得深思的问题：（1）为什么瑞典先于美国半年投入业务预报？（2）为什么美国到1955年才把数值预报投入业务，即为为什么让1950—1955年长达5年的时间流逝？根据欧洲气象中心A. Persson先生的笔记回忆^[2]，瑞典把先在美国试验成功的数值预报率先投入业务运行同罗斯贝当时回到祖国瑞典有关，这反映了人才的重要性。关于第二个问题，他认为主要是受到了当时对数值预报持怀疑势力的影响，有些有影响的人认为计算机应该用于统计预报而不是动力预报。为此，洛伦兹还曾被要求去研究是否可用统计方法去重复和模拟非线性动力发展的课题，他的研究报告对这一研究的前景表示了谨慎的乐观，如洛伦兹为1960年在东京举行的数值预报会议提交的论文题目就是《动力方程解的统计预报》，其实他就是在研究这一问题时偶然地发现了划时代性的混沌现象。后来由于知道瑞典人正向着业务化前进，美国才匆忙建立了数值天气预报委员会。所以，Persson认为要是没有美国气象局的Phillips和Cressman设法发展了一个可操作的数值预报系统的话，整个天气预报也许真会沿着另一条道路发展下去（即统计预报而不是动力预报），这样今天我们也不可能有如此准确的天气预报了，可见有远见的领队人对科学道路的正确发展至关重要，反过来，后果却是相当可怕的。

下面简要地回顾一下业务数值预报的发展历程。最初的业务模式是北半球的正压模式，到了1960年代开始逐渐应用原始方程，终于实现了近40年前理查森的梦想。1970年代中期至1980年代初期半球模式发展成为全球模式，并开始考虑海气耦合和地表过程等，至1980年代中期出现了适合研究气候的气候模式。为了更好地预报较小尺度的局地 and 短期天气，1970年代初美国率先研发了区域模式并投入业务施用；特别是1980和1990年代，各类区域模式开始涌现，并且为了预报对流天气，人们研发了非静力平衡模式。为了弥补模式对近地面气象要素预报能力的不足，在1970年代中期美国气象局提出模式和统计相结合的MOS（Model Output Statistics）法，大大地提高了模式预报的实用价值。为了应对洛伦兹发现的混沌现象，1992年基于全球模式的中期集合预报模式相继在NCEP和ECMWF投入业务运行；2001年首个基于区域模式的短期集合预报系统SREF在NCEP投入业务运

行。近年来，区域模式已出现直接用显式云模式来取代对流参数化方案的1~3km风暴尺度模式；在全球模式中除了海洋、陆面、冰雪圈外，还包括了大气化学过程、气溶胶物理、水文过程和生态过程等。因此，数值预报模式已不再局限于地球大气而是整个地球环境系统，因此，已有人提议应把“数值预报模式”改称为“地球模拟器”或“地球模拟系统”（Earth Simulator）。除了向大而全发展之外，另一方面是向小而精的方向发展，如台风模式、扩散和空气质量模式、海浪模式、陆面和水文模式、空间天气等专门化模式。当然，随着计算能力的不断提高，全球模式的时空分辨率在不久的将来完全可以达到“区域”和“局地”尺度。在这种情况下，摆在我们面前的一个问题是：区域模式和这些专门化模式在将来还需要吗？

在数值预报发展的过程中，作为其第一步的初值条件预备（现称为“资料同化”）也同步经历了许多重大的变迁。在理查森和Charney的试验中是人工把观测资料内插到网格点上，可称为“主观分析”，但这工作量巨大，不适合真正的业务工作。后来发展出了可以自动作业的“客观分析”方法，如逐次订正法来内插观测资料并用最早期的业务数值预报中。后来认识到观测资料本身不足以满足模式的巨大自由度、特别是在那些观测点稀少的区域，所以需要一个背景场或第一猜测场开始再根据观测资料做调整（即在背景值和观测值之间作权重）来产生分析场。这样，在1960年代开始发展出了最优插值法（OI），先用气候场做背景，以后改用模式的6h预报场做背景（目前仍在用）。在1990年代，OI法逐渐被三维变分法（3DVar）和四维变分法（4DVar）取代。4DVar不但考虑了变量间三维空间上的关联，还考虑了在一段时间内的前后关联。近年来，集合卡尔曼滤波技术用于集合预报，来估计同天气系统相联的背景误差再同变分法相结合的集合-变分混合资料同化系统已在业务数值预报上实施，并取得了显著的效果。目前，基于集合预报的资料同化技术正方兴未艾，是研究的一大热门。

近年来，由于遥感技术的发展使气象卫星资料和其他许多非常规观测资料的大量应用、资料同化技术的显著改进、模式对整个地球物理过程（大气、云、降水、辐射、海洋、陆面包括植物圈和冰雪圈等）的深入描述以及高速计算机能力的迅猛提高，数值预报水平突飞猛进。图1和图2是欧洲中期数值天气预报中心的全球模式对中高纬地区北半球的500hPa高度

场和全球的24h累积降水预报水平的历史演变。可以看到目前6.5d之内的500hPa形势预报同实况非常接近（它们的距平相关达80%以上，图1a），目前4d之内的降水预报也达到相当的水平（同实况空间相关达0.45，图1b），并且可看到模式预报水平大概每10a延长预报时效1d左右（美国NCEP的情形也类似）^[2-3]。图3是美国飓风预报中心对大西洋热带风暴路径（图3a）和强度（图3b）预报误差的逐年变化（注：因数值预报是他们的主要预报依据，所以这里反映的其实就是数值预报的水平）。可以看见在过去的40多年间，路径预报误差持续减小，目前1d预报的误差已减至50海里^①左右，2d预报误差也降到100海里以下，5d预报已达到30年前2d预报的水平（误差在220海里左右）；然而，不足的是其强度预报误差在过去的十多年几乎没有减小（这主要同模式的分辨率不够和物理描述的缺陷有关）。为了专门改进热带风暴的强度预报，美国气象局已开始了一个为期10年的“飓风预报改进”

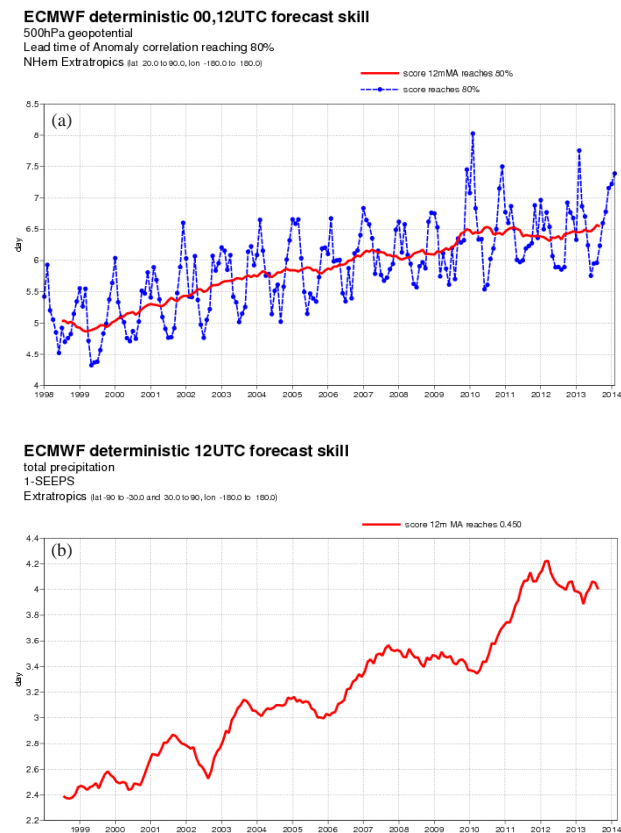


图1 欧洲中期数值天气预报中心全球模式有技巧预报的时效（天）逐年变化情况：（a）北半球中高纬地区500hPa高度场预报同实况的距平相关超过80%；（b）全球中高纬地区24h累积降水预报同实况空间相关超过0.45（资料来源：www.ecmwf.int）

① 1海里约为 1.852km，下同。

计划，在模式、资料同化和集合预报各个方面齐头并进，所以在未来的几年，热带风暴强度预报也许会有较大的进步。现在的模式不仅可以预报大尺度天气形势，而且可以直接预报各类气象要素和小尺度系统，如温度、湿度、风、雨雪、冰雹、雾、能见度、雷电、云底高度、对流云项、晴空湍流、飚线、超级单体，甚至龙卷风个体等，使天气预报的水平大大提高。自从模式能够成功预报高低压系统，天气预报的有效性也大致延伸到了1周左右。现在可以看到，1~2周的预报有了参考价值，并且南半球的预报技巧也提高到北半球的水准（图2）。现在大气科学家们发现阻碍数值模式不能有更长时效的原因是在描述对流和云这些次网格物理过程中小误差在模式积分过程中随时间的积累而使较长时效的预报失败^[4]。因此，有人认为，随着模式空间分辨率和初值质量的提高，如能精确地描述云的过程，那么天气预报的时效就有可能达1个月左右。但目前，2周的可预报上限可否突破还要拭目以待。现在人们已经提出了所谓的无缝隙预报的概念，就是要用数值模式来做出几分钟、几小时、几天一直到延伸期和季节预报。现在几乎所有国家的气象部门都设有专门的数值天气预报中心，数值预报已成为无可替代的天气预报主要工具。同时，随着这第二次跃进的成功，数值预报也把确定论的思想牢固地带进了天气预报领域，使人们认为天气是完全可以被准确预报的。所以，现在天气预报在大多数情形下是以确定论的单一值形式发布的。

4 第三次跃进——可预报性

正当人们利用高速计算机实现梦想的时候，另一场革命的序幕已在悄悄地拉开。Lorenz^[5]用非常简单

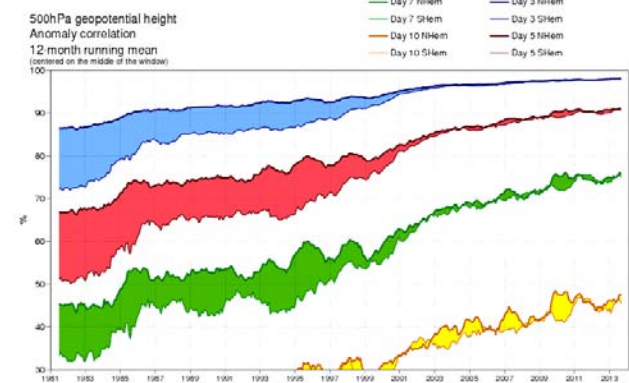


图2 欧洲中期数值天气预报中心全球模式的北半球（粗线）和南半球（细线）500hPa高度场预报技巧（距平相关%）逐年变化情况（蓝色为3d预报、红色为5d预报、绿色为7d预报、黄色为10d预报）（资料来源：www.ecmwf.int）

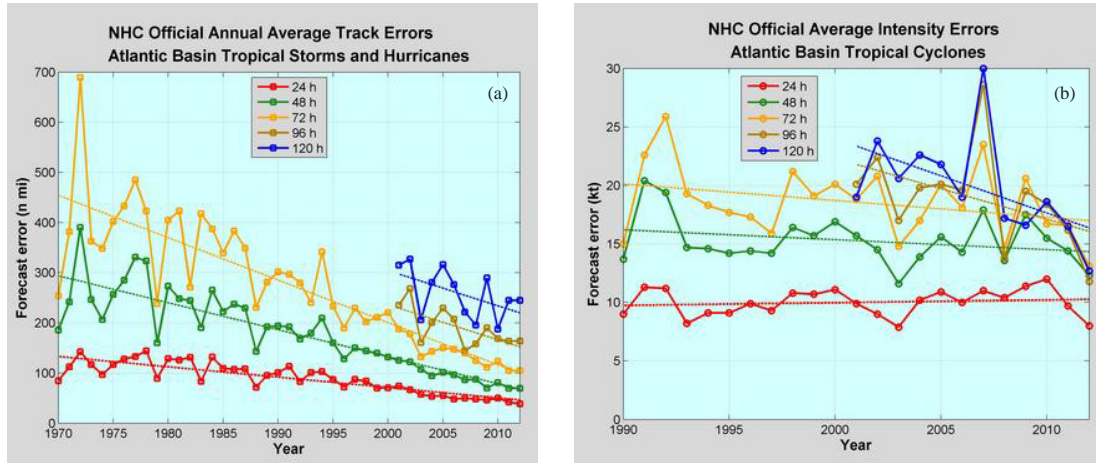


图3 美国国家飓风预报中心对大西洋热带风暴和飓风每年平均的路径预报误差 (a, 单位: 海里) 和强度预报误差 (b, 单位: 节, 2节= 1m/s) (资料来源: www.nhc.noaa.gov)

的计算机运算了一个非常简单的云对流数值积分(预报)模型,发现大气运动中的混沌现象直接限制了天气的可预报性,为确定论者们实现其梦想泼了一盆冷水。当然,在那如火如荼的迷踪数值天气预报的年代,他的不确定论也难以马上得到人们的认同。

大气系统是一个极其复杂的非线性系统,由此Lorenz^[6]开创了“混沌动力学”^[7-8]。模式大气是一个非线性系统,对各种误差极其敏感。这些误差可来自初始时刻的气象观测、模式的初始化同化技术和计算精度等。这些误差会在积分的过程中不断放大,最终导致预报失败。Lorenz^[5, 9-10]指出的不确定性包括:模式缺乏对大气三维初始状态的准确与完整的描述;模式缺乏对物理过程完整和精确的描述以及微分方程数值解的误差(如离散化)等;大气自身也具有混沌的特性。总之,预报模式或预报系统初始时的微小误差会在数值积分的过程中扩大,形成对可预报性的限制。除大气内部固有的不确定性根源之外,外强迫(如地表特征与大气界面的通量)的不确定性,也对限制天气预报的能力有推波助澜的作用^[11]。

当大气内部演变处于不稳定阶段时,这种不精确的初始场往往会因为大气这一多体系统本身的混沌特性或对初值的敏感依赖性而出现“失之毫厘,差之千里”的戏剧性预报误差。譬如,图4所示的是英国气象局联合模式所做的两个海平面气压预报^[12]。初值的微小差异(图4a, 4b)导致了4天后的预报完全不一样(图4c, 4d)。在英国西部海上,一个预报结果是强气旋,而另一个是高压脊。非线性系统会使误差随积分延长而放大,此外大气运动的固有随机性也是限制预报时效的原因^[13]。凡此种种,不确定性被认为是

天气预报的固有特性。解决不了的大气运动“混沌”问题,归根结底是一个非线性的数学难题同一个可能永远也无法被精确认知的地球大气(包括其状态和运动规律)的结合。但世界经济的高速发展和计算机能力不断提高都在等待着人们去攻克相关的难题,更完全地描述天气预报。因此,为解决这一难题,科学界正在经历着第三次具有挑战性的跃进^[12, 14]。不同于前两次跃进(都建立在新的预报工具即天气图和数值模式的出现),第三次跃进其实是第二次跃进“数值预报”的拓展,并没有新预报工具的出现,而是对天气预报本质更进一步的科学认识,所以是一种“观念”上的跃进。当然,观念的改变也必定会深刻地带来技术上的改变,如大气“实况”(分析资料)不再是一个而是一群,模式物理不再是确定的经典“牛顿力学”而具有随机性,预报值也不再是唯一的而是一种概率分布等,所以它可能更适合被称为“革命”。跃进具有提高、进步的意思,因为前两次都是使天气预报更准确,所以是“跃进”。而第三次却相反,从精确单一观念的确定论转变为随机多值的概率论,看上去是科学上的一种倒退,所以是一种观念上去旧迎新的完全转变,更像“革命”。下面讨论针对这第三次挑战的两种不同途径或做法。

4.1 途径一:直面预报中的不确定性

苏格拉底曾说“智者就是知道他不知道什么”。自从洛仑兹发现大气运动的混沌特性后,一种主流的做法是在预报方程或模式中把初始已知的不确定因素包括进去,定量地描述可预报性和不确定性,即给出了误差范围。为此,Epstein^[15]和Leith^[16]分别提出了动力随机预报理论框架和实用的集合预报法。现在,集

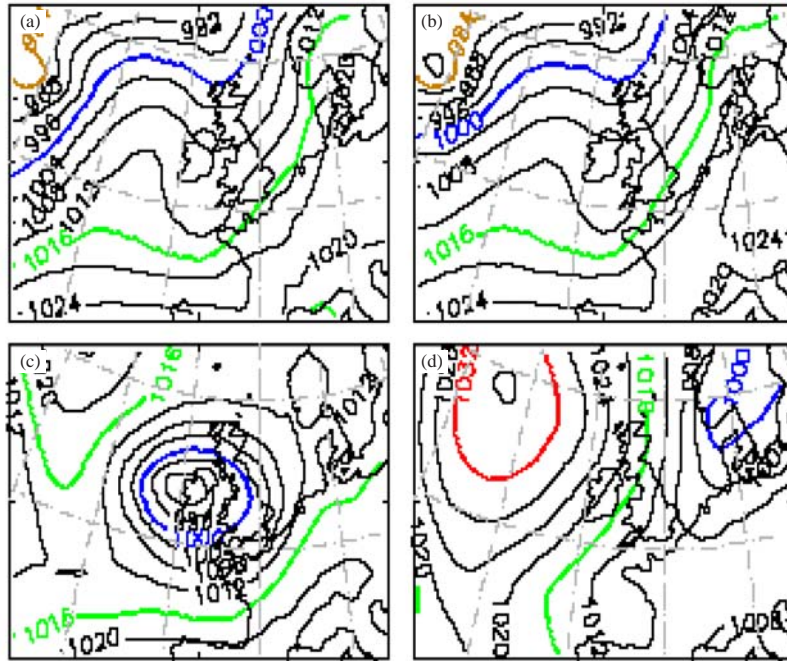


图4 英国气象局联合模式所做的两个海平面气压场的4天预报 (a, b分别为两个稍有差异的起报初值; c, d分别为对应初值的4天后海平面气压预报场)

合预报已在世界上的主要数值预报中心成为日常业务系统的一部分^[17]，但它背后所带来的深刻理念还没有被大部分人所领悟和实践出来。

集合预报（如集合平均和概率）除了可延长确定预报的可预报性以外^[18]，它更主要的功能是针对某一特定的预报系统来预测该系统对任一气象要素随时间和空间以及天气系统而变化的可能预报误差的分布^[19]。具体来说，集合预报使命的最低目标是不漏报实况，即提供所有可能的解；在此基础上，定量可靠地（在概率意义上）估计每种可能性的可信度，即“可预报性”的预报，这是集合预报的核心，也是最具挑战性的部分；最后，集合预报信息也可用来尽量减少一个预报的不确定性。这可用图5来说明：鉴于大气有限的可预报性，模式的确定预报（即使是集合平均预报） X_m 总是同实况 X 有差异（ X_0 ），因为我们无法预先准确知道 X_0 ，集合预报则试图给出一个包含有实况的预报范围 $\langle X \rangle$ ；并且此范围能可靠地反映大气的真实可预报性（如其分布的形状在各方向是不一样的）；最后，尽量缩小分布 $\langle X \rangle$ 的范围，因为 $\langle X \rangle$ 的范围愈小，预报就愈确定、信息量也就愈大。所以，集合预报报的是分布 $\langle X \rangle$ ，而不是更准确的 X_m 。关于集合预报技术的现状和进展，已有相关的综述文献^[20]。下面举一雷雨预报的例子。如确定论的预报说，傍晚前后西城区有雷雨，结果午后在东城区出现

了雷雨，在时间和地点上都错了。由于是确定预报，人们无法选择而只能听单一值的预报内容，所以没有准备而只能承受较大的损失。而基于集合预报的方法，则首先可以根据集合离散度预先估计预报对象的难报点在什么地方，然后再用集合成员来计算概率把不确定性定量地表达出来：如难报点在时间上，则预报说“西城区雷雨出现在午后的可能性是20%，傍晚前后是50%，上半夜是30%，东城区没有雷雨”；如难报点在位置上，则说“傍晚前后雷雨出现在西城区的可能性是65%，出现在东城区的可能性是35%”；

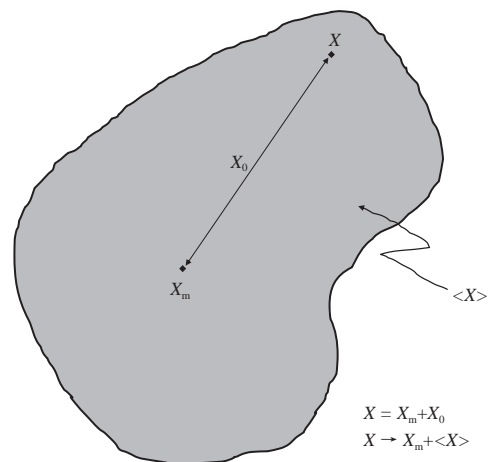


图5 集合预报概念示意图（集合预报提供的预报范围 $X_m + \langle X \rangle$ ，这里 X 为实况； X_m 视为集合平均预报； $\langle X \rangle$ 为预报不确定范围； X_0 是一个确定性预报的误差）

如果难报点在对流云的强度上，则可能说“傍晚前后在西城区出现一般阵雨的可能性是15%，出现强雷雨的可能性是10%，而75%没有雷阵雨”，如此等等。所以，虽然预报有很大的不确定性，但所有的可能性包括它们的可信度都放在公众和用户的前面，供他们选择施用。可见，误差或不确定性不等于就是无用的预报信息。

因此，集合预报所带来的不仅仅是一种新的技术，而更重要的是为整个数值预报系统开创了一个新的理念^[19]。表现在两方面，首先是从单一值的确定论向多值的概率分布转变。这一转变不仅仅只在预报层面上，也包括整个数值预报系统中的所有环节（图6）。初始观测资料除了平均值之外，还应有相应的误差范围估计；资料同化步骤中输出的分析资料也不再是一个而是一群（集合）分析资料，以反映初值的不确定性；预报不再是单一确定预报而是由多初值、具有随机物理和随机动力过程的模式所产生的集合预报和多值的概率预报，以此反映预报的不确定性；用户决策所用的气象资讯不再由预报员替他们来选择，而是各用户根据自身对气象条件的依赖程度对各不同预报解和它们的可信度计算出风险和利益的大小来抉择，这表示同样的预报信息对不同的用户可能意味着完全相反的意义^[21]。总之，每一步都不再是单一值的决定论，而是包含了对不确定性的定量估计（概率密度函数）（图6a）。其次是从单向过程变为双向过程。目前传统的数值预报流程是单向进行的（图6b），即观测→资料同化→模式预报→用户应用，而没有反向反馈。但以集合预报为中心技术的新数值预报系统中，后面的步骤可以修正前面的步骤（图6a），譬如用户的应用可以改变观测的步骤。用户或预报员从集合预报的离散度可以判断所关心的重大天气系统预报的不确定性是否过大。如过大，那么为了减少预报的不确

定性以满足服务的需要，气象专家可以应用相关技术在上游地区追踪该预报不确定性的可能来源^[22-23]，然后在该源头区进行一些特殊的加密观测以期提高作为模式初值用的分析资料的质量。这样希望下一时刻做出的数值集合预报的不确定性会大大减小，并提高预报的精度。这就是所谓的目标观测或适应观测的概念^[24-25]。类似地，在天气稳定较易预报的情况下，则可以减少应用上游的观测资料（如卫星、雷达等大量的遥感资料）以节省资源。集合预报和资料同化过程也互相依赖和影响而成为一体化：集合预报所估计的不确定性为资料同化提供背景误差信息，而反过来“集合”资料同化则为集合预报各成员提供众多的初值场，如目前较新的集合卡尔曼滤波技术^[26]。在这种新的理念下，预报员的作用也将发生根本变化^[19]。这种含有不确定性信息的完备预报会使更多的用户受益并有利于帮助用户做出更加合理的决策，比单一值确定预报具有更大的经济价值^[21]。

4.2 途径二：绕过和分解大气方程的复杂性

公元前104年，落下闳与邓平等总结了前几个朝代对当地气候的描述，制定了《太初历》，正式把24节气订于历法，明确了24节气的天文位置。24节气反映了太阳的周年视运动，所以节气在现行的公历中日期基本固定，上半年在每月的6日和21日，下半年在每月的8日和23日，前后差不了1~2天。《太初历》是一部比较完整的历法，它的24节气取名与正常的年循环气温和降水变化相联系。这样，它就具有了指导生产和生活的实用性，哪个节气不出现被命名的气温和降水，说明天气（或气候）发生了冷暖异常或旱涝异常。

现在，人们都用月平均和季平均表示年循环的气候，而相对偏差称为异常。这样的12等分的月分辨率的气候年循环和四季分辨率的气候年循环比起

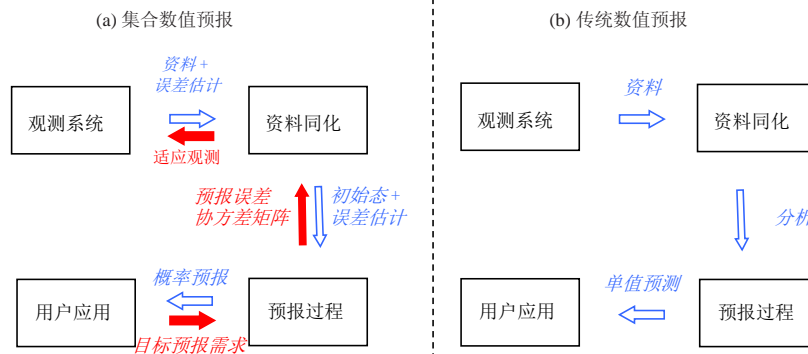


图6 数值预报系统的理念（a为基于考虑了不确定性的概率论思想的流程图，它是多值的和双向互动的；b为传统的基于单一值决定论思想的流程图，它是单值的和单向的）

中国古代人的24节气年循环的分辨率低多了。这三种年循环表示了三种分辨率的“气候钟”。每个气候钟都描述了太阳的周年视运动和正常的气候年循环，即气候变化。

单位时间内最大的气候（或大气要素）变化是日循环，其次是年循环。实际资料分析得出，相邻日的气候是不同的，相邻两个小时的气候也是不同的。我们有必要铸造有两个指针的气候钟：一个走得快的指针具有24h的日循环，另一个走得慢的指针有365d的年循环。对辨别热浪和低温事件，以365d循环的气候为背景就可以了^[27-28]。但对热带风暴路径和暴雨落区这样的极端天气系统，我们需要构造365d×24h等分的年循环气候作为背景场^[29-32]。

一个大气变量场 $S_{d,y}(\lambda, \varphi, t)$ 可以分解成气候 $\tilde{S}_d(\lambda, \varphi, t)$ 和异常 $S'_{d,y}(\lambda, \varphi, t)$ 两个部分^[33]

$$S_{d,y}(\lambda, \varphi, t) = \tilde{S}_d(\lambda, \varphi, t) + S'_{d,y}(\lambda, \varphi, t) \quad (2)$$

其中，

$$\tilde{S}_d(\lambda, \varphi, t) = \sum_{y=1}^N S_{d,y}(\lambda, \varphi, t) / N \quad (3)$$

下标分别为第y年在365天年循环中第d天及在24小时日循环中第t时刻的观测。N为总共的年数。

在天气预报中，我们把式（1）中的外强迫看作只有太阳辐射的日循环和年循环。这样两个周期性循环的强迫 \tilde{F} 形成了气候 \tilde{S} ，它反映了气候相对太阳高度角的精细化描述。任意时刻的一个观测场就可以分解为气候与扰动两个部分

$$S = \tilde{S} + S' \quad (4)$$

由于气候 \tilde{S} 是一个状态，它是太阳辐射日循环和年循环强迫 \tilde{F} 的线性结果，也就是每个时刻的气候都是确定的。一年的循环中，气候至少可以划分为 365d×24h=8760 等分。这样一个确定的气候

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial t} = \tilde{F} - (L + D)\tilde{S} \quad (5)$$

可以用历史观测资料代入式（3）估算得到。其中气候要素 \tilde{S} 的变化总是与强迫 \tilde{F} 的变化之间有一个时间的滞后差 $-(L + D)\tilde{S}$ ，如太阳最大辐射在正午（或北半球6月22日），地面温度最高在午后（或7—8月份）。

分解出的扰动部分包含气候和扰动的非线性项与线性项

$$\frac{\partial S'}{\partial t} = -N(\tilde{S} + S') - (L + D)S' \quad (6)$$

式（6）还可以分为三项（ $S' = S'_1 + S'_2 + S'_3$ ）

$$\frac{\partial S'_1}{\partial t} = -NS' \quad (7)$$

$$\frac{\partial S'_2}{\partial t} = -(L + D)S' \quad (8)$$

$$\frac{\partial S'_3}{\partial t} = -NS' \quad (9)$$

式（7）认为，如果人为地把不需要再分解的气候 \tilde{S} 做谱展开或格点差分计算和积分运算，则长期数值积分的结果就会产生虚假的扰动 S'_1 和虚假的极端天气事件。因此，在这里的气候定义下， S'_1 是不需要考虑的，即 \tilde{S} 是一个已知的气候态，不需要再对它运算了。

式（8）表明，如果大气中初始时刻有一个扰动 S' ，则它在未来的时刻只是经历了一个线性作用过程，扰动仍然存在，即大气扰动 S'_2 是可以预报的。式（9）表明，如果初始时刻大气中有一些扰动，则这些扰动会发生非线性相互作用，产生出扰动 S'_3 。

再回到式（1），我们会发现：未来的大气变量（或天气）预报由下式给出

$$S(t) = \tilde{S}(t) + S(t)_2' + S(t)_3' \quad (10)$$

即天气预报等于气候变化加扰动。气候及其变化 $\tilde{S}(t)$ 是由式（3），通过长期的观测资料估算出来的，它就是气候钟。如果再对它差分（或谱展开）积分是徒劳的。大气扰动 $S(t)_2'$ 是一个线性过程，在极端天气事件发生前是早期信号，未来的变化也是可以简单预报的。大气扰动 $S(t)_3'$ 是一个非线性过程，需要借助动力学模式积分运算。台风异常路径的成功预报就是因为考虑了大气扰动 $S(t)_3'$ 之间的相互作用^[32]。去除了年循环中8760等分的气候后，大气中仍然存在不同的扰动。长期而言，非线性的动力学模式仍然解决不了这些扰动的长期行为。这时，一种方法是统计模型做出 $S(t)_3'$ 的未来预估。或者，干脆忽略它的存在，这样未来的天气预报近似为

$$S(t) \approx \tilde{S}(t) + S(t)_2' \quad (11)$$

即未来的天气预报是气候与线性扰动的叠加，其误差也来自没有能够预报出扰动 $S(t)_3'$ 。

利用历史日任一时刻的原始观测和模式输出与式（2）和式（3）的分解运算，就可以得到对流层至平流层的位势高度、温度和风等大气变量的扰动场。用原始大气变量绘制的天气图称为传统天气图，而分解后的扰动变量绘制的天气图称为扰动天气图。两种

表1 传统天气图与扰动天气图上变量对高影响天气的指示意义

大气变量	传统天气图	扰动天气图
风	暴雨带位于低空急流的左侧和 低层辐合线的右侧	暴雨带位于低层扰动气流对峙 的辐合线上
高度	高影响天气（热浪和低温）上 空高度等值线平缓	热浪（低温）区上空200~300hPa 处高度扰动为正（负）中心
温度	高影响天气（热浪和低温）上 空温度等值线平缓	热浪（低温）区上空400和850hPa 处温度扰动为正（负）中心

天气图上的大气变量对高影响天气的指示意义概括在表1中。预报员诊断暴雨落区多用低层大气风场的形势。传统天气图上，暴雨带位于低空急流的左侧和低层气流辐合线的右侧。但在扰动天气图上，暴雨带位于低层扰动气流对峙的辐合线上。暴雨带两侧，扰动风向相反，扰动风速相当。区域性热浪和低温（雨雪冰冻）是另外两类高影响天气事件。传统天气图上，位势高度和温度在水平方向上的分布相对平缓，对热浪和低温中心缺少指示能力。但在扰动天气图上，正的高度扰动在对流层上层（200~300hPa）对应地面上的热浪，而负的高度扰动对应地面上的低温。在扰动天气图上，热浪区上空400和850hPa上有对应的温度扰动正中心，而低温区上空对应为温度扰动负中心。200~300hPa高度扰动中心的上方100hPa温度扰动与下方的400和850hPa温度扰动正、负分布相反，反映了整层大气中扰动高度场与扰动温度场之间的静力平衡关系。地面热浪和低温是上层大气高度扰动和温度扰动延伸到地面的表现。

为了让读者有更好的感性认识，下面给出对2010年鲇鱼台风分解预报的例子。这个台风在2010年10月

11日在西北太平洋关岛的东南方上生成，先向西南移动，再转向西北。10月17日12时达到最强，在菲律宾东部的海上发展为超强台风向西偏南移动。10月18日登陆菲律宾北部继续西行，但在19日进入南海后突然向北转向，23日06时在福建登陆。属于难以预报的台风异常路径^[34]。图7是2010年10月20日12时（世界时）过台风中心沿117°E绘制的传统天气图和扰动天气图的垂直剖面。传统天气图的垂直剖面上，台风位置处的高度场和温度场与其周边差异不大。但在扰动天气图上，台风上空的高度负异常和暖中心凸显出来了，并且在300hPa层附近存在较多的大气扰动中心。这些扰动中心与台风会发生非线性相互作用。

台风鲇鱼转向前19日00时的300hPa传统天气图上的观测风场和气候风场如图8所示。台风位于高压脊南侧的偏东气流中。用传统天气图上的信息很难判断台风会突然向北转向。用引导气流法，台风应该继续西行，向海南岛靠近。

分离掉气候场后，各个时刻的扰动高度和扰动流线在图9给出。扰动天气图上出现了较多的高、低压环流中心。其中，扰动涡旋II与台风发生了逆时针式

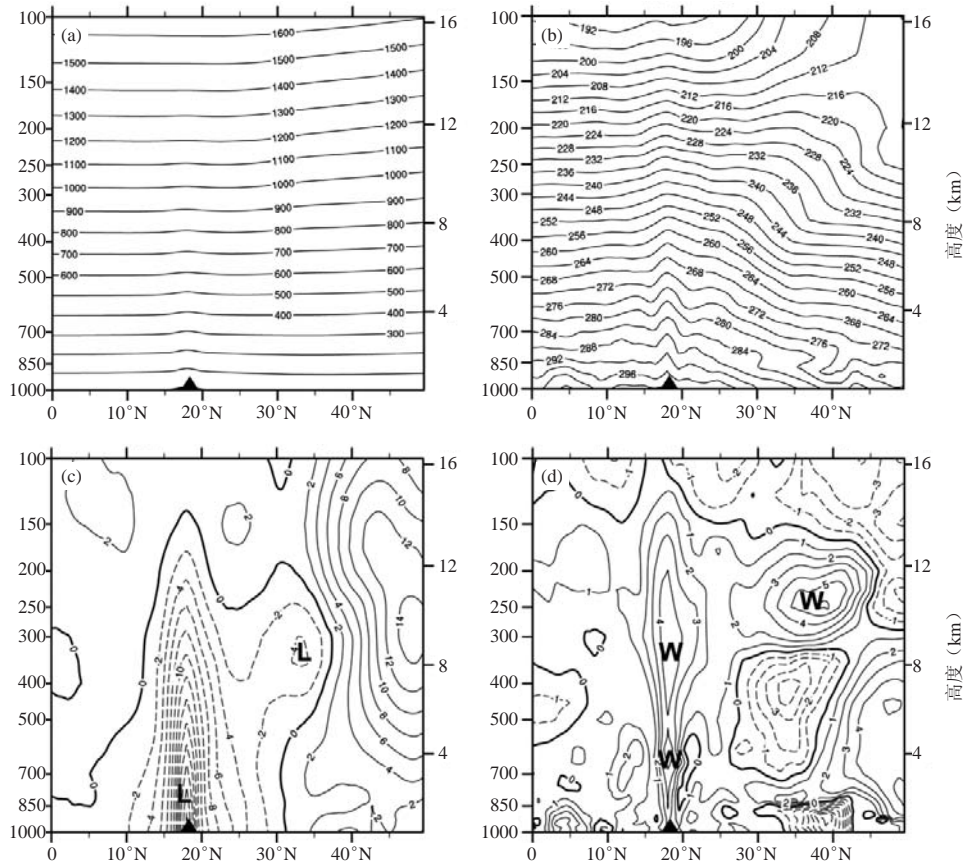


图7 2010年10月20日12时（世界时）过台风中心沿117°E的传统天气图垂直剖面上的位势高度（a，单位：10gpm）和温度（b，单位：K），以及扰动天气图垂直剖面上的位势高度（c，单位：10gpm）和温度（d，单位：K）（▲指示台风鲇鱼的位置）

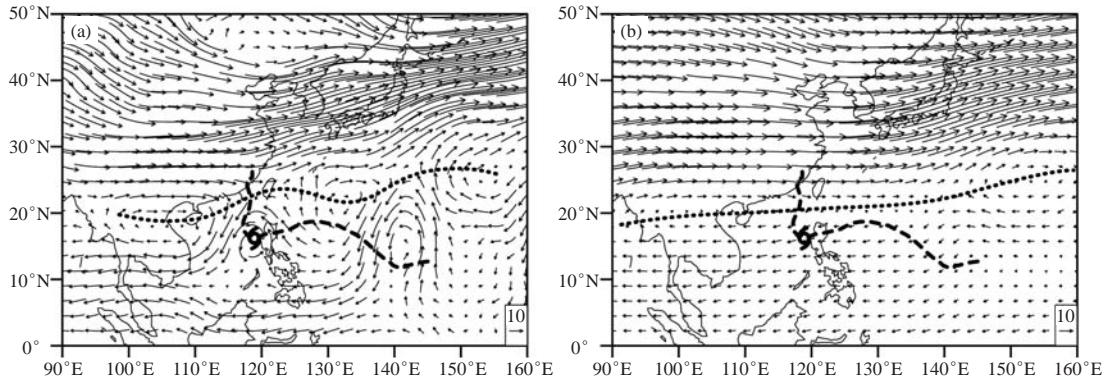


图8 2010年10月19日00时300hPa传统天气图上观测风场 (a, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和气候风场 (b, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (符号 \odot 为台风当前位置, 粗虚线为台风路径, 点线为副高脊线)

的旋转与合并的相互作用。扰动涡旋II向南移动, 同时台风突然转向朝北移动。最后, 它们在22日合并。

各种常规模式和方法都没有能够预报出这样的突然转向(图10a)。用气候引导气流模式预报出的台风仍然向西偏南移动, 而用扰动气流模式预报出的路径在原地打转, 只有用分解气流模式才预报出了它的转向路径(图10b)。具体来说, 用式(8)做台风鲇鱼的路径预报, 相当于用引导气流法, 台风是继续向西移动的; 用式(9)做台风的路径预报, 相当于考虑这些扰动涡旋的相互作用, 台风是打转的; 只有同时考虑了式(8)和式(9)后, 预报路径才与实际路径一致。

我们平时看到数值模式对环流形势预报在总体统计准确率(accuracy)上表现还不错, 原因是它对每年的大多数天数都是对的。实际上, 那是报对了气候, 而对那些与极端天气事件联系的环流形势并不总是报对。如果能按照本节的提法, 把气候部分过滤掉, 而让我们的计算机模型专门预报那些与极端(或异常)事件相联系的扰动变量部分(当然基于原始方程的数值预报模式不大可能对瞬变扰动量单独进行积分, 因为仅仅扰动部分在许多物理量上可能是不守恒的, 所以得有特殊处理方法, 见下节讨论中提到的两个例子)。这样也许会进一步增加天气预报的真正技巧(skill)。至于时间较长的预报则可以同变化较慢的低频扰动部分相联, 如孙国武等^[35]报告的低频天气图方法。通过这样对大气高、低频扰动分解处理就可达到简化天气预报的目的。

5 结束语

在过去的百年中, 天气预报走过了从天气图到数值天气预报的两次跃进。高空天气图, 以及锋面气旋的三维结构和演变, 带来了人们看待天气从一个点到

全球观的空间跃进。以V.皮叶克尼斯为首的挪威气旋学派为天气学的第一次跃进做出了巨大的贡献。在时机成熟的情况下, 芝加哥气旋学派的Charney实质性地推动了数值天气预报跃进的实施。他真正让天气走在时间的前面, 所以数值天气预报是一次时间跃进。但是, 天气预报并没有达到人们预期的效果。其原因是洛伦兹的发现: 大气混沌现象导致的天气预报的不确定性。这就给人们提出了天气预报需要进行第三次跃进的命题, 这是一次在预报观念和内容上的革命(观念革命)。解决第三次跃进命题的做法可能有多种, 本文讨论了其中的两种做法。

其一, 直接面对问题, 即用集合预报的方法把初值和模式中不可避免的不确定因素包括在模式的积分过程中来定量描述预报的不确定性, 使之成为预报的一部分, 让用户根据全面的预报信息来科学地决策。集合预报并不是单纯用来提高单一确定预报的准确率, 而是定量估计预报误差的分布和预报的可信度。因此, 集合预报所带来的不仅仅是一种新的技术而更重要的是为整个数值预报系统开创了一个新的理念。首先是从单一值的确定论向多值的概率分布转变, 这一转变包括整个数值预报系统中的所有环节: 观测、资料同化、预报和用户应用。其次是从单向过程变为双向过程, 传统的数值预报流程是单向进行的, 即观测→资料同化→模式预报→用户应用, 而没有反向反馈; 但以集合预报为中心技术的新数值预报系统中, 后面的步骤可以修正前面的步骤, 譬如目标观测。在这种新的理念下, 预报员的作用也将发生变化。这一做法成功的关键包括: 来自初值和模式扰动的集合预报^[20], 天气预报发布形式的改变^[36-37]和用户在决策中科学应用预报不确定性信息^[21]等方面。

其二, 同一时刻观测的全球大气变量确实是混沌的, 因为它包含了多时空尺度的变化信息。常规的做

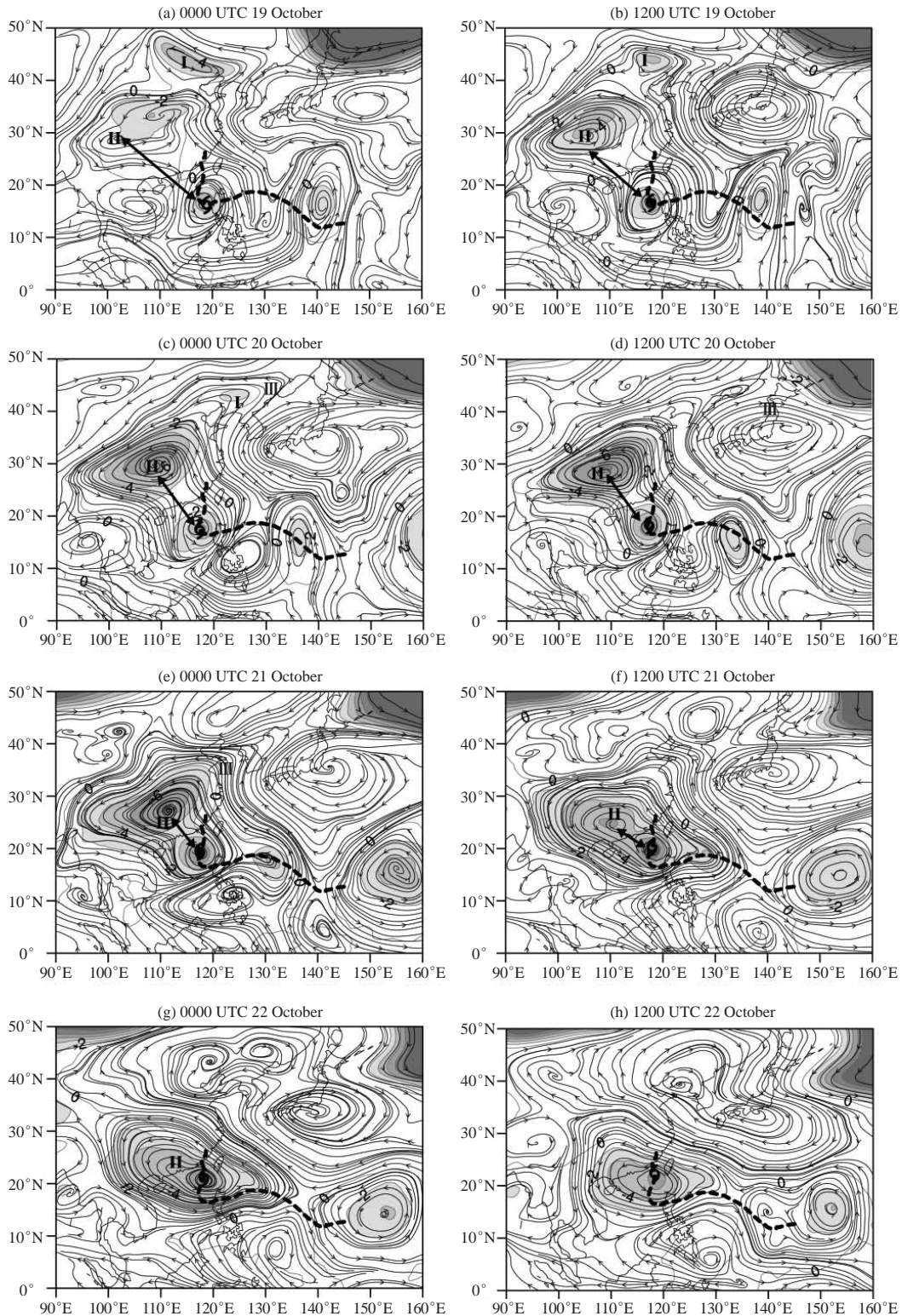


图9 2010年10月19日 (a, b), 20日 (c, d), 21日 (e, f) 和22日 (g, h) 300hPa高度扰动和扰动流场在00时和12时的分布 (仅负的高度扰动 (20gpm) 给出了阴影; I、II和III指示3个扰动涡旋)

法是对全球观测变量做数学的正交分解, 但是分解的每个分量都难以知道它的物理含义。那些没有物理意义的数学分量让计算机积分必然产生虚假的结果, 导

致预报失败。这就是洛伦兹对大气混沌现象的发现。现在有一种方法是绕开数学上的难题, 把大气变量分解为瞬变气候与瞬变扰动两个部分, 用瞬变扰动建立

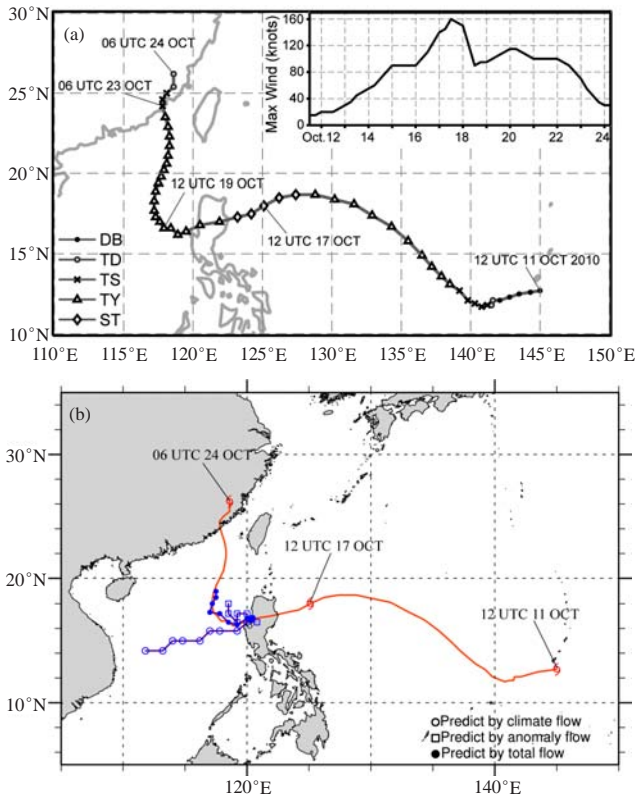


图10 台风鲑鱼在2010年10月11—24日的路径和每6h地面最大风速 (a, DB、TD、TS、TY和ST分别表示风暴的强度达到热带扰动、热带低压、热带风暴、台风和超强台风) 和台风路径 (红实线) 与转向前起报的48h三种模式预报路径 (b, 分解气流模式预报路径 (实心点蓝线), 引导气流模式预报路径 (空心点蓝线) 和扰动气流模式预报路径 (方点蓝线))

与异常天气之间的联系。最近有两个数值天气预报模式的工作验证了这种分解方法对提高预报技巧的效果。Peng等^[38]把单一模式预报的未来逐日大气分解成模式气候与扰动部分, 就能够把模式可预报能力提高到15d, 即达到2周的目标。其实, 这里的模式气候不是真正的气候, 而是单一模式对不同初始场未来时刻预报的集成。另一例子就是4.2节提到的, 用气候引导气流加扰动相互作用的模式做法, 虽然对台风异常路径预报的能力只有2~3天, 但对防御的时间准备已经足够了。我们常常总结的晴雨预报得分很高和台风路径预报平均误差很小, 那些都不是预报技巧, 而是预报的气候部分。有技巧的是对个别极端天气事件的预报和那些异常台风路径的预报。

最后, 以上两种做法也可以结合起来, 这样既可反映天气事件的“异常度”, 又可定量估计预报的“可信度”, 如杜钧等^[18]最近提出的“集合异常预报法”就是一例, 他们在数值预报结果中除去气候分量并同气候分量相比较得到该预报的“异常度”, 再

同集合预报结合得到这异常度的“可信度”。不难想象, 当一个预报愈异常且发生的可能性愈大时, 该预报的潜在社会影响就愈大, 反之就愈小, 因此综合异常度和可信度可导出一个定量的天气预报“社会影响矩阵”(具体例子可参见该文)。

除了前瞻的科学思想指导和社会需求的推动, 天气预报科学进步的背后都有新技术的出现作为外部条件, 譬如第一次跃进是基于无线电的出现, 第二次跃进是基于高速计算机和遥感技术(观测和资料反演)的发展, 第三次跃进也同数值预报的精细化分不开。因本文的主题是天气预报, 这些背后关键支撑技术的进步历史在此不做回顾。

参考文献

- [1] 谢义炳. 今后气象走向何方? 中国气象学会讯, 1983, 5: 8-12.
- [2] Kalnay E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge: University of Cambridge Press, 2003.
- [3] Harper K, Uccellini L W, Morone L, et al. 50th anniversary of operational numerical weather prediction. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88: 639-650.
- [4] Rodwell M J, Magnusson L, Bauer P, et al. Characteristics of occasional poor medium-range weather forecasts for Europe. Bull Amer Meteor Soc, 2013, 94: 1393-1405.
- [5] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. J Atmos Sci, 1963, 20: 130-141.
- [6] Lorenz E N. 混沌的本质. 刘式达, 刘式适, 严中伟, 译. 北京: 气象出版社, 1997.
- [7] 柳崇健. 复杂大气系统的性质和问题//中国科学院大气物理研究所. 东亚季风和中国暴雨. 北京: 气象出版社, 1998: 465-469.
- [8] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002.
- [9] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. Tellus, 1965, 17: 321-333.
- [10] Lorenz E N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. Tellus, 1969, 21: 289-307.
- [11] Beven K. Changing ideas in hydrology- The case of physically-based models. J Hydrol, 1989, 105: 157-172.
- [12] 王东海, 杜钧, 柳崇健. 正确认识和对待天气预报的不确定性. 气象, 2011, 37(4): 385-392.
- [13] 周秀骥. 大气随机动力学与可预报性. 气象学报, 2005, 63(5): 806-811.
- [14] US National Research Council. Completing the Forecast: Characterizing and Communicating Uncertainty for Better Decision Using Weather and Climate Forecasts. Washington D C: The National Academy Press, 2006.
- [15] Epstein E S. Stochastic-dynamic prediction. Tellus, 1969, 21: 739-759.
- [16] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. Mon Wea Rev, 1974, 102: 409-418.
- [17] 杜钧. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [18] 杜钧, Grumm R H, 邓国. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”: 以北京2012.7.21特大暴雨为例. 大气科学, 2014, 38(4): 685-699.
- [19] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革. 气象, 2010, 36(11): 1-11.
- [20] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. 气象科技进展, 2014, 4(5): 6-20.
- [21] 杜钧, 邓国. 单一值预报向概率预报转变的价值: 谈谈概率预报的检验和应用. 气象, 2010, 36(12): 10-18.
- [22] Du J, Yu R C, Cui C G, et al. Using a mesoscale ensemble to predict forecast error and perform targeted observation. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(1): 83-91.

- [23] Li J, Du J, Zhang D L, et al. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China. QJ R Meteorol Soc, 2014, 140: 766-782.
- [24] Szunyogh I, Toth Z, Morss R C, et al. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program. Mon Wea Rev, 2000, 128: 3520-3537.
- [25] Toth Z, Szunyogh I, Majumdar S, et al. Targeted observations at NCEP: Toward an operational implementation. Preprints, 4th Sym Integrated Obs Sys, 2000, Amer Meteo Soc.
- [26] Houdekamer P L, Mitchell H L. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. Mon Wea Rev, 1998, 126: 796-811.
- [27] 丁婷, 钱维宏. 中国热浪前期信号及其模式预报. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1472-1486.
- [28] 张宗婕, 钱维宏. 中国冬半年区域持续性低温事件的前期信号. 大气科学, 2012, 36(6): 1269-1279.
- [29] 钱维宏. 基于大气变量物理分解的低温雨雪冰冻天气的中期预报系统和方法. 中华人民共和国知识产权局, 2011, ZL 2011 1 0061438.7.
- [30] 钱维宏. 瞬变扰动天气图和低频扰动天气图制作方法及其在天气预报中的应用. 中华人民共和国知识产权局, 2012, 2012 10 134358.4.
- [31] 钱维宏, 李进, 单晓龙. 中期模式扰动风在2010年区域暴雨预报中的天气学释用. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(5): 862-873.
- [32] Qian W H, Shan X L, Liang H Y, et al. A generalized beta-advection model to improve unusual typhoon track prediction by decomposing total flow into climatic and anomalous flows. J Geophys Res, 2014, 119(3): 1097-1117.
- [33] 钱维宏. 中期-延伸期天气预报原理. 北京: 科学出版社, 2012.
- [34] 钱传海, 端义宏, 麻素红, 等. 我国台风业务现状及其关键技术. 气象科技进展, 2012, 2(5): 36-43.
- [35] 孙国武, 李震坤, 信飞, 等. 用低频天气图方法进行延伸期预报的探索. 气象科技进展, 2013, 3(1): 6-10.
- [36] 杜钧, 陈静. 天气预报的公众评价与发布形式的变革. 气象, 2010, 36(1): 1-6.
- [37] 杜钧, 康志明. 天气预报中不确定性问题的调查分析. 气象科技进展, 2014, 4(1): 58-67.
- [38] Peng X D, Che Y Z, Chang J. Anovel approach to improve numerical weather prediction skills by using anomaly integration and historical data. J Geophys Res, 2013, 118: doi:10.1002/jgrd.50682.

《哲学学报A》：厚重的历史 探索的前沿

■ 张沅

2015年, 由英国皇家学会创办的世界上第一本科技期刊《哲学学报》(Philosophical Transactions of the Royal Society) 将迎来创刊350周年(图1)。1660年, Francis Bacon爵士为促进新试验哲学组建了皇家学会(The Royal Society)。学会的第一任秘书官Henry Oldenburg作为第一任编辑, 于1665年3月开始编辑出版《哲学学报》, 该刊曾经发表过牛顿、达尔文、法拉第等著名科学家的文章, 同时也建立了重要的科学优先权及同行评议原则, 这些准则日后成为了更多科学期刊的核心基础。1886年, 《哲学学报》被划分成两部分, 即《哲学学报A》和《哲学学报B》, 分别覆盖了自然科学和生命科学。《哲学学报A》沿袭了《哲学学报》的风格, 最近几十年来, 为了更加系统、准确地捕捉到不同领域最前沿的进展, 期刊出版采用主题专辑形式, 同时推出特约编辑负责制, 即针对不同的主题, 由领域内的学术领军人物任责任编辑, 负责向研究者征集稿件并最终完成编审。每一专辑的目标, 是给出独创和权威的系列文章, 帮助读者把握学科最新的发展和未来趋势, 并且在应用和决策之间起到桥梁作用。由于气候变化及其相关交叉学科为近年来关注的热点问题, 《哲学学报A》发表了大量和气象密切相关的专辑, 表1给出了其中的一部分信息。

《哲学学报A》的大部分专辑, 是基于具有国际影响的皇家学会讨论会的内容进行组稿的, 专辑主题和6~12个月前的讨论会的主题也基本吻合。这些讨论会的前沿性, 以及参会作者的充分重视和在会上的深度讨论, 都保

证了这些专辑的质量上乘。

《哲学学报A》的网站能让读者方便获取出版物, 一般每期特约编辑导言和主打文章都可以免费下载, 其他文章在发表24个月后可以免费下载。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)



图1 2015年第373卷第2033期封面

表1 近年来《哲学学报A》与气象密切相关的专辑

序号	专辑主题	第一特约编辑	年卷期
1	地质学和地质形态学灾害的气候强迫	Bill McGuire	2010, 368(1919)
2	减轻气候变化的能量材料	Peter Bruce	2010, 368(1923)
3	水和社会: 过去, 现在和未来	Emily Black	2010, 368(1931)
4	4°C及更高: 全球温度升高4°C的可能性及其含义	Mark G. New	2011, 369(1934)
5	湍流的动力障碍和界面	Ian Eames	2011, 369(1937)
6	空气动力学流控制减阻方法: 发展和前景	Luca Biferale	2011, 369(1940)
7	地球系统中的温室气体	Andrew C. Manning	2011, 369(1943)
8	流体动力学分离模拟: 方法及应用	Luca Biferale	2011, 369(1944/1945)
9	气候预报: 非线性和随机影响	J. M. T. Thompson	2012, 370(1962)
10	地球工程: 怎样控制我们的行星气候?	Andy Ridgwell	2012, 370(1974)
11	应用于气候系统的数学	Paul D. Williams	2013, 371(1991)
12	过去的暖气候——未来的一个教训	Daniel J. Lunt	2013, 371(2001)
13	地学中范式的形成	Lucas Goehring	2013, 371(2004)
14	天气与气候预报随机模拟及节能计算	Tim Palmer	2014, 372(2018)
15	南大洋新模式和观测及其在全球气候和碳循环中的作用	Andrew Watson	2014, 372(2019)
16	气候工程: 细微差别探索与地球能量储蓄有意识改变的后果	John Latham	2014, 372(2031)

气象卫星发展历程和启示

方宗义

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 简要地回顾了国内外气象卫星, 特别是业务气象卫星的发展及其更新换代的变化。简要地介绍了业务气象卫星的功能及其在大气科学、地球系统科学中的作用和地位。在此基础上, 探讨了由50多年来业务气象卫星快速发展的事实中得到的启示。

关键词: 业务气象卫星, 快速发展, 功能和作用, 启示

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.003

The Evolution of Meteorological Satellites and the Insight from It

Fang Zongyi

(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: This paper briefly recollects the meteorological satellites at home and abroad, especially their development cause as well as renovative and generation replacement changes of the operational meteorological satellites. It gives an elementary introduction to their function, role and position in atmospheric sciences and systematic sciences concerning the earth. Furthermore, proceeding from such a basis, the paper probes into the revelation derived from the fact that operational meteorological satellites have made rapid progress in the past 50 years or more.

Keywords: operational meteorological satellite, rapid progress, function and role, revelation

1 引言

自1960年4月1日世界上首次成功发射气象卫星以来^[1], 已经过去半个多世纪了。空间技术和遥感技术的发展与进步, 地球科学和人类生存与发展的需求牵引, 气象卫星在天气分析预报、数值天气预报、气候监测和预测、生态和环境监测, 特别是在对热带气旋和中尺度强对流灾害性天气监测和预警方面的成效, 极大地促进了气象卫星和卫星气象学的发展。本文将在简要回顾和总结国内外气象卫星发展的历程、成就和作用的基础上, 探讨从中得到的启示。从过去半个多世纪气象卫星发展的历程中吸取成功的经验和失败的教训, 寻求一条适合中国国情、积极稳妥的发展中国气象卫星的道路。

2 气象卫星的发展历程

2.1 极轨气象卫星的发展历程

2.1.1 美国极轨气象卫星的发展

1960年4月1日, 美国发射了第一颗气象卫星“泰罗斯-1号”(TIROS-1, 电视红外观测卫星), 从而

开创了人类从太空探测地球大气的新纪元。截至1965年7月2日, 总共发射了10颗泰罗斯卫星, 这些卫星均携带光电摄影系统和红外辐射计, 前者用以在白天拍摄可见光图片, 后者昼夜均可工作。经过以上10颗气象卫星对卫星轨道(近极地太阳同步轨道)、自旋稳定的姿态控制(飞轮控制)、遥感探测器(光电摄像系统和红外辐射计)和图像传输方式(APT, 自动图像传输系统)等的试验验证, 直接导致了美国第一代试验业务气象卫星的诞生^[2]。

(1) 美国第一代试验业务气象卫星

1966—1969年, 美国共发射了9颗以环境勘测局(ESSA)命名的泰罗斯业务气象卫星(TOS)。此卫星由环境科学服务局(即后来的NESDIS)负责运行、管理。这一代卫星的主要功能是获取全球范围的白天云图和实现云图的直接分发服务。

(2) 美国第二代业务气象卫星

1970—1978年, 美国共发射了5颗以美国国家海洋和大气管理局(NOAA)命名的气象卫星(包括改进的泰罗斯卫星艾托斯和NOAA-1~5)。这是第一批采用三轴稳定姿态控制技术的业务气象卫星。星上的可见光及红外扫描辐射计(SR)和1972年开始采用的甚高分辨率扫描辐射计(VHRR)使卫星不但实现

收稿日期: 2013年8月2日; 修回日期: 2013年12月18日
第一作者: 方宗义(1938—), Email: fangzy@cma.gov.cn

了昼夜连续定量观测，还开始了多通道高分辨率扫描辐射观测。

(3) 美国第三代业务气象卫星

1978—1998年，美国共发射了新一代泰罗斯卫星（New Tiros）10颗，命名为TIROS-N和NOAA-6~NOAA-14。卫星的主要变化是由4个或5个通道的先进甚高分辨率扫描辐射计（AVHRR）代替了VHRR；增加了由高分辨率红外探测器（HIRS）、微波探测器（MSU）和平流层探测器（SSU）组成的探测大气温湿度垂直分布的仪器组合TOVS，同时还有太阳后向散射紫外辐射计（SBUV）和空间环境监测器（SEM）。气象卫星具有了同时获取多通道图像和大气温、湿度垂直分布的能力。

(4) 美国第四代业务气象卫星

1998—2009年，美国共发射了5颗先进的泰罗斯-N系列卫星，命名为NOAA-15~19。6通道的AVHRR代替了5通道的AVHRR，HIRS-2取代了HIRS，AMSU（A/B）代替了MSU和SSU。这些变化使气象卫星可以遥感有云情况下的大气温、湿度，实现了全天候的三维大气遥感探测，并能很好地区分云和雪。

(5) 美国第五代业务气象卫星

2011年NPP卫星的成功发射，标志着美国以NOAA命名的极轨业务气象卫星时代的结束和新一代以NPP/JPSS（联合极轨卫星系统）命名的极轨业务气象卫星时代的开始。NPP是NOAA-19与JPSS两代业务卫星之间的桥梁。JPSS计划发射两颗，JPSS-1、-2，预计在2017和2023年发射。NPP卫星主要装载5种仪器：可见光/红外成像辐射计（VIIRS）、先进技术微波探测器（ATMS）、跨轨扫描红外大气探测器（CrIS）、臭氧图像和廓线仪（OMPS）以及云和地球辐射能量系统（CERES）。星上的这些遥感探测器使它具有获取多通道图像、全天候气象要素三维分布、气溶胶和云的微物理特性、大气成分和地球大气辐射收支等地球物理参数的能力。

2.1.2 中国极轨气象卫星的发展

1988年9月7日，命名为“风云一号”的中国极轨气象卫星的第一颗卫星“FY-1A”发射成功^[3]。卫星获得了高质量的可见光图像，但是由于水汽对探测器件的污染，红外图像没有成功。1990年9月3日发射的“FY-1B”解决了红外图像获取问题。但因三轴稳定姿态控方面的问题，使“FY-1A”和“FY-1B”两颗卫星的寿命都没有达到设计要求。

(1) 中国第一代业务气象卫星

1999年5月10日发射的经过改进的“FY-1C”卫

星，其工作寿命超过了设计要求，探测通道由5个增加到10个。2002年5月15日发射的“FY-1D”卫星，其寿命超过7年。以上两颗极轨气象卫星构成了中国的第一代业务星。

(2) 中国第二代业务气象卫星

风云三号（FY-3）气象卫星是我国第二代极轨业务气象卫星，是FY-1号气象卫星技术的发展和提高^[4]。它具有探测大气三维要素和参数、大幅度提高全球资料获取能力，进一步提高对云区和地表特征的遥感能力，从而能够获取全球、全天候、三维、定量、多光谱的大气、地表和海表特性参数。FY-3A已于2008年5月27日发射升空，FY-3B于2010年11月5日发射，它们组成上午星和下午星，实现双星组网观测。FY-3A/B卫星遥感仪器涉及可见、红外、紫外、微波多个谱段，总共有11套仪器。表1和图1分别是FY-3A气象卫星携带的遥感仪器和卫星本体。FY-3,02批卫星为业务星，共有5颗，设计寿命5年，可以持续发展10年左右，其技术状态和水平与欧洲正在运行的METOP和美国正在发展的NPP极轨业务气象卫星接近。

2.1.3 欧洲极轨业务气象卫星的发展

欧洲气象卫星组织（EUMETSAT）的极轨气象卫星计划起步较晚，但起点高，其第一代极轨业务气象卫星就具有较高水平，发挥了很好的作用。

2006年欧洲气象卫星组织发射了第一代业务极轨气象卫星的第一颗星METOP-A，目前已进入业务运行状态。METOP系列由3颗卫星构成，METOP-B于2012年发射，METOP-C预计2017年发射。该系列卫星包括9种对地遥感仪器，其中具有显著特色的是红外大气干涉探测器（IASI）、全球臭氧监测仪（GOME）、GPS掩星探测器（GPS-S）、散射计（ASCAT）、空间环境监视器（SEM）。在9种仪器中有4项由美国NOAA提供，其余5项由欧洲自行研制。它的探测能力与美国的NPP相当。

2.2 地球静止气象卫星的发展历程

2.2.1 美国地球静止气象卫星的发展

1966年美国宇航局（NASA）发射了首颗地球静止卫星——应用技术卫星（ATS-1），在星上进行了多项试验，利用地球静止轨道进行气象探测的可能性是其中之一。星上的旋转扫描云相机（SSCC）成功地每20min获取一幅地球全圆盘可见光图像。此后，宇航局又发射了2颗地球同步轨道气象卫星（SMS），探测器为可见光及红外自旋扫描辐射计（VISSR）。

表1 FY-3A/B星载仪器基本参数

仪器名称	光谱范围	光谱通道数	扫描宽度 (°)	星下点分辨率 (km)	量化等级 (bit)	主要应用
可见光及红外扫描辐射计 (VIRR)	0.44~12.5μm	10	±55.4	1.1	10	云、植被、雪、冰、陆/海表温度, 气溶胶, 火点等。
红外分光计 (IRAS)	0.69~15.5μm	26	±49.5	17	13	大气温、湿度廓线, 射出长波辐射等
微波温度计 (MWTS)	50~57GHz	4	48.6	50	13	大气温度廓线、地表辐射率
微波湿度计 (MWHS)	150~183GHz	5	±48.95	15	14	大气湿度廓线、降水强度
中分辨率光谱成像仪 (MERSI)	0.41~12.5μm	20	±55.4	0.25~1.1	12	真彩色图像, 云、植被、陆地覆盖类型, 海色等。
紫外臭氧垂直探测仪 (SBUS)	252~340nm	12	星下点	200	12	O3垂直分布
紫外臭氧总量探测仪 (TOU)	309~361nm	6	±56.0	50	12	O3总量
微波成像仪 (MWRI)	10.65~89GHz	10	±45.0	9~85	12	降水和云水、大气可降水、地表土壤水分、积雪等。
地球辐射监测仪 (ERM)	0.2~3.8μm 0.2~50μm	2	±50.0	35	16	反射太阳辐射通量 射出长波辐射通量
太阳辐射监测仪 (SIM)	0.2~50μm	1			16	太阳常数
空间环境监测仪 (SEM)	3.0~300Mev 0.15~5.7Mev					探测高能粒子、星体内辐射容量、卫星表面电位差和粒子事件等

(1) 美国第一代业务静止气象卫星

1975—1978年, 美国共发射了3颗命名为地球同步业务环境卫星GOES-1~3的地球静止业务气象卫星。星上的主要遥感探测器是可见光及红外自旋扫描辐射计。

(2) 美国的第二代业务静止气象卫星

1980—1987年, 美国共发射了4颗GOES卫星, 即GOES-4~7。星上的主要变化是在VISSR上增加了探测大气温、湿度垂直分布的能力, 即VISSR的大气探测器 (VAS, 可见光及红外自旋扫描辐射计大气探测器), 以上两代卫星的姿态都是自旋稳定。

(3) 美国第三代业务静止气象卫星

1994—2001年, 美国发射了GOES-8~12共5颗第三代业务静止气象卫星。其最大的改进是采用了三轴稳定的卫星姿态控制技术, 使成像与垂直探测独立同时进行, 对局部区域可以进行高频次监测。

(4) 美国第四代业务静止气象卫星

当前运行的GOES-13~15为第四代业务静止气象

卫星 (2006—2010年), 星上有5通道成像辐射计、19通道大气探测器、空间环境监视器和太阳X-Ray成像仪。

美国再下一代业务静止气象卫星的第一颗卫星GOES-R, 计划于2016年发射。星上的主要探测器是先进基线成像仪 (ABI)、闪电成像仪 (GLM)、空间环境监测器 (SEISS)、太阳紫外成像仪 (SUVI)、远紫外和X射线辐照度探测器 (EXIS) 以及磁力计 (MAG)。其中的ABI由16个探测通道组成, 包括6个可见光和近红外通道、10个红外通道, 空间分辨率为可见光0.5km, 近红外1km, 红外2km, 全圆盘图成像时间约5min。它具有分辨率更高、通道更多和速度更快的成像能力。同时, 它也将显著地增强对空间环境的监测能力。

2.2.2 欧洲静止气象卫星的发展

欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT) 于1977年发射第一颗静止气象卫星Meteosat-1, 卫星采用自旋稳定的姿态控制方式, 星上主要载荷为3通道可见和红外自旋扫描辐射计 (VISSR), 该星发射成功后, 由VISSR中的水汽通道获取的图像是全球第一幅水汽图像。

(1) 欧洲第一代业务静止气象卫星

1977—2001年, 欧洲气象卫星组织共发射和运行了7颗与Meteosat-1同一型号的静止气象卫星 (包括Meteosat-1), 成为欧洲的第一代星。

(2) 欧洲第二代业务静止气象卫星

第二代星由4颗卫星组成。2002—2012年已发射3颗, 命名为Meteosat-8~10。卫星仍然采用自旋稳定的姿态控制方式, 但扫描辐射计的通道数增加到12个, 空间分辨率可见光通道1km, 红外和水汽通道3km, 全圆盘观测时间15min, 数据量化等级10bit。

(3) 欧洲再下一代业务静止气象卫星

EUMETSAT计划中的第三代业务静止气象卫星

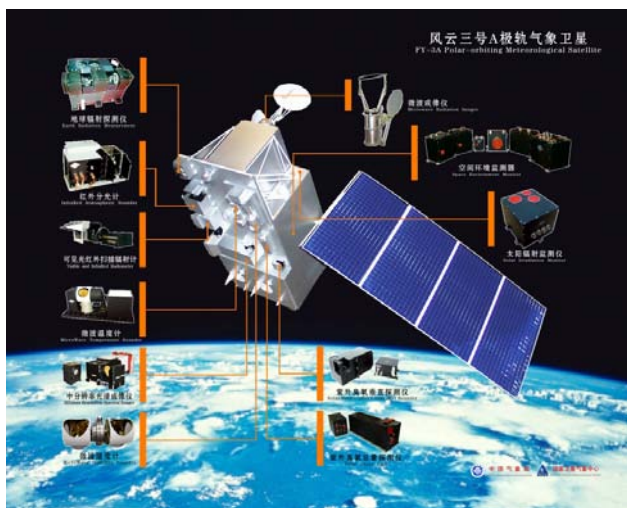


图1 风云三号极轨气象卫星

MTG的第一颗星将于2020年发射。卫星将采用三轴稳定的姿态控制方式，携带的新型多光谱成像仪和大气垂直探测器将大大地增强其探测能力。

2.2.3 中国业务静止气象卫星的发展

1986年，我国第一颗静止气象卫星“风云二号”正式列入国家计划。第一颗卫星于1997年6月10日在西昌卫星发射基地发射，被命名为“FY-2A”。卫星的主要遥感观测仪器是多通道可见光及红外扫描辐射仪。由于消旋天线故障，“FY-2A”卫星没有达到设计寿命。2000年6月25日发射的“FY-2B”卫星也未达到设计寿命。

(1) 中国第一代业务静止气象卫星

2004—2012年，中国共发射了4颗业务静止气象卫星FY-2C~2F。与试验星相比，其主要发展是星上的可见光及红外自旋扫描辐射仪的探测通道由3个增加到5个，数据量化等级增至10bit。计划中第一代业务静止气象卫星还有两颗，即FY-2G和-2H。

(2) 中国下一代业务静止气象卫星

中国第二代业务静止气象卫星FY-4计划于2015年前后发射，它将由4颗卫星组成。卫星将采用三轴稳定姿控方式，主要载荷为：多通道成像仪、傅里叶红外大气探测仪、闪电成像仪和空间天气监测仪器组等。其中多通道成像仪具有14个通道，波长范围0.45~13.8 μm 。可见光图像水平分辨率为0.5~1km，红外和水汽为2km。全圆盘图成像时间15min，区域图3000km \times 3000km，3~5min，区域和时段可选。这将极大地增强对暴雨、强对流等中小尺度灾害性天气系统的监测能力。

2.2.4 日本和印度业务静止气象卫星的发展

日本和印度也是业务静止气象卫星的运行国家，但情况相对简单，简要情况如下。

日本于1977年发射第一颗业务静止气象卫星向日葵1号(Himawari-1)，定位于140°E的赤道上空。星上的主要遥感探测器是可见光及红外自旋扫描辐射仪。1977—1995年，共发射5颗同类卫星，对外统称为GMS-1~5。2005和2006年日本分别发射多功能卫星(MTSAT-IR和MTSAT-2)接替GMS卫星工作。与此前的GMS卫星相比，除卫星的姿态改为三轴稳定的姿控方式外，星上的遥感探测器和卫星的功能变化不大。日本于2014年底发射业务静止气象卫星向日葵8号(Himawari-8)。卫星装载先进的向日葵成像仪(Advanced Himawari Imager, AHI)。AHI共有16个通道，可见光分辨率为0.5/1km，红外分辨率为2km，成像仪正常扫描获得全圆盘图，时间小于

10min，也可在选定的时间对特定区域进行扫描，每2.5min获得一幅区域图像。卫星的资料发送方式也会有一定的变化。

印度是较早发射和运行静止气象卫星的国家。但长时期以来都采用区域波束传送资料，周边国家难以共享其成果，因而对其关注度不高。第一代INSAT-1卫星共4颗，第一颗INSAT-1A于1982年4月发射。

第二代INSAT-2卫星共5颗，卫星装载了三通道VHRR成像仪，可见光通道分辨率为2km，红外通道分辨率为8km，每30min得到一帧全圆盘图像。第三代INSAT-3卫星共计6颗，装载了三通道VHRR成像仪和三通道(VIS/NIR/SWIR) CCD电荷耦合器件成像仪，分辨率为1km。

2.3 对地观测和科学试验卫星

为了试验新型遥感探测器的性能，为了为重大的国际地球科学试验获取信息，一些国家的空间科学技术机构发射了许多专用的科学试验卫星和对地观测卫星，在国际科学活动中发挥了重要作用。其中有大家所熟知的美国国家航空航天局(NASA)的雨云卫星计划(Nimbus)，NASA与日本空间探测局(JAXA)合作的“热带降水测量任务”卫星计划(TRMM)，NASA为行星使命计划发射的地球观测系统(EOS的Terra和Aqua等卫星)，欧空局(ESA)的环境卫星(ENVISAT)，印度空间研究组织(ISRO)的海洋水色测量卫星(OCEANSAT2)等。

为了利用多颗携带有不同探测器的卫星同时对地球大气进行综合观测，以便更好地了解地球系统各圈层及其相互作用，NASA还组织了有明确科学目标的“A-Train”卫星队列观测计划。这些卫星在太阳同步轨道上运行，过赤道的地方时大约在13:30，相差时间在几秒到几分钟之内，几乎可认为对同一地点是同时观测。目前有6个卫星在“A-Train”队列中运行，如表2所示。

2.4 空间导航卫星系统(GNSS)在气象领域中的应用

导航卫星的基本功能是定位、导航和授时，这些功能在军事和民用的诸多方面均得到重要而广泛的应用。除此之外，它在地球科学的一些分支学科也具有重要的应用价值。如：定位在测绘科学技术和地壳形变监测中的应用；米级定位精度的功能在气象探空气球定位、跟踪方面的应用等。另一方面，把GNSS发射的电磁波作为双分雷达的发射端，利用地面、飞机和低轨卫星等平台上安装的高精度接收机作为接收端，通过在地面接收GNSS电磁波的直接信号，低轨

表2 A-Train队列卫星

卫星	运行机构	发射时间 (年)	主要载荷
EOS-Aqua	NASA	2002	大气红外探测器 (AIRS)、先进微波探测装置 (AMSU-A)、湿度探测器 (HSB)、先进微波扫描辐射计 (AMSR-E)、中分辨率成像光谱仪 (MODIS)、云和地球辐射能量系统 (CERES)
Aura	NASA/BNSC	2004	高分辨率动力学临边探测器 (HIRDLS)、微波临边探测器 (MLS)、臭氧监测仪 (OMI)、对流层发射光谱分光计 (TES)
PARASOL	CNES	2004	地球反射率极化和方向性测量仪 (POLDER)
CALIPSO	NASA/CNES	2006	云-气溶胶正交极化激光雷达 (CALIOP)、成像红外辐射计 (IIR)、宽视场照相机 (WFC)
CloudSAT	NASA/CSA	2006	云廓线雷达 (CPR: 94GHz)
GCOM-W1	JAXA	2012	先进微波扫描辐射计 (AMSR2)

卫星上的接收机在临边状态下接收经过大气折射的掩星信号或经过海面、地面散射、反射的GNSS信号，可以反演整层大气的水汽总量，大气温、湿度垂直分布，海表的粗糙度、浪和风，地表的介电常数和土壤湿度等。这些参数都是地球系统科学研究中必不可少的，但要在全球尺度上监测这些大气和地球物理参数是一件极为困难的事情。GNSS在这方面的应用对地球系统科学真是雪中送炭。

在20世纪90年代利用GPS（由美国发射的GNSS卫星系统中的类型之一）接收机接收的经过与大气相互作用的GNSS信号，获取大气参数的工作取得了两大进展。一是利用地基高精度GPS接收机信号，计算整个气柱的水汽总量。这项工作已在多个国家得到推广使用，中国也在21世纪的前10年，利用国家和地方的联合项目，建成了覆盖全国的高精度GNSS接收机网，具有获取全国范围高时间频次大气水汽总量分布的能力。二是利用安装在低轨卫星上的高精度GNSS接收机，利用它在掩星状态下获取的穿过大气密度分布不均匀的GNSS信号，在掩星状态下信号会发生折射，通过对这种电磁波弯曲率的反演，就可以得到大气温度、湿度的垂直分布。

由于无线电掩星探测具有不需要辐射定标、垂直分辨率高、性能价格比高和全天候观测等突出优点，因而受到广泛重视，得到迅速发展。国外，在20世纪90年代开始此项研究，并在21世纪初投入业务。2006年由美国和台湾联合研制与发射运行的COSMIC计划，获取了大量掩星探测资料，在数值天气预报中发挥了显著作用。ECMWF的资料表明，在输入模式的23种遥感资料中，空间导航卫星—掩星探测资料的作用排在第5位（也有人排在第2或第3位）。目前在美国和欧洲的业务极轨气象卫星上均有导航卫星—掩星接收机。我国在21世纪前10年开始研究，并进行了星载试验。2013年9月23日发射的FY-3 02批卫星上安装有针对GPS和中国北斗两类导航卫星的掩星接收机，进行遥感大气参数垂直分布的业务试验。初步结果表明，利用北斗导航卫星掩星信号反演得到的大气

温、湿度垂直分布的精度与利用GPS卫星掩星信号反演的精度大体相当。差别在于GPS是全球星座由FY-3得到的掩星事件多，每天全球约有576个。目前的北斗导航卫星是针对我国及周边地区的区域星座，因而获取全球资料的能力与GPS有差距，每天全球约有184个掩星事件。

2.5 全球业务气象卫星探测系统

全球业务气象卫星探测系统是在WMO协调下，在各气象卫星发射和运行国家的共同努力下建成的地基探测系统。

图2是目前正在运行的全球业务气象卫星探测系统，由极轨和静止两类轨道卫星组成。正在业务运行的极轨气象卫星有美国的NOAA（即图上的TIROS，下一步将被JPSS替代）、俄罗斯的流星系列气象卫星（METEOR）、中国风云系列卫星（FY-3），以及欧洲气象卫星组织的极轨气象卫星（Metop）。位于赤道平面上离地面35800km高度的地球静止气象卫星有中国的风云二号D和E星（105°E和86.5°E）、日本的MTSAT（140°E）、美国的地球静止业务环境卫星西（GOES-W，135°W）、美国的地球静止业务环境卫星东（GOES-E，70°W）、欧洲气象卫星组织的METEOSAT（0°E）以及另一颗METEOSAT

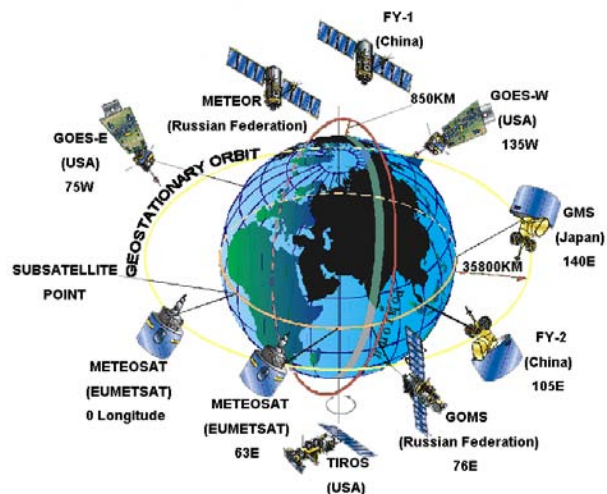


图2 全球业务气象卫星探测系统（来自WMO，2009年）

(63°E)，它是欧洲气象卫星组织为了支持印度洋的季风试验而从其备份位置移到印度洋实施观测任务。

图2上的业务气象卫星观测系统实现了高空间分辨率和高时间分辨率的全球探测，其观测资料已经在各国的天气分析预报、数值预报、短期气候预测、各种大气科学研究项目和世界气象组织协调的大型科学研究计划（如WCRP、IPCC）中发挥着重大的、基础性的作用。

3 气象卫星的功能和作用

3.1 气象卫星云图在天气分析和预报中的作用

卫星云图已经成为认识、理解和帮助分析天气尺度系统的重要辅助工具。它是海洋上监测热带气旋、确定中心位置、估计其强度和大风范围的主要手段；是监测、分析中尺度天气系统并对其制作临近预报和预警的重要工具。卫星云图揭示出的海上细胞状云型的形成和演变，大陆上中尺度对流云团的发展和演变，斜压叶状云型向气旋云系的发展演变过程等观测事实，都丰富和发展了天气学的相关内容^[5-7]。

3.2 气象卫星资料对数值天气预报的作用和影响

长期以来，由于卫星反演产品的精度不够高、卫星探测方式与常规探测不同，直到20世纪80年代，气象卫星资料对数值预报模式的影响甚微，在一些地区甚至出现负效应。1989年Eyre^[8]率先提出了在数值预报模式中直接同化卫星遥感辐射率问题，使卫星资料在数值预报模式中的应用发生了质的飞跃。目前，美国和ECMWF的业务数值预报模式系统中，输入的观

测资料有85%来自卫星的辐射测值和加工处理出来的各种要素和参数。图3是2007年ECMWF业务数值预报模式同化卫星资料后对预报结果的影响图。它表明，在模式中同化气象卫星遥感资料后，北半球的预报时效延长了3~4天，南半球延长了3天。

随着卫星探测得到的辐射率种类增多、精度提高，数值预报模式对初值的同化技术不断发展，其作用将会更加显著。

3.3 气象卫星资料在气候变化监测、预测和研究中的作用

由长时间序列卫星遥感资料生成的多种气象要素、参数的时间序列产品是气候监测、研究、预测的重要基础信息。例如：由ISCCP项目得到的各种类型和不同分辨率的云参数已经广泛的应用于气候监测、短期气候预测、气候诊断分析研究和气候数值模拟，以及气候模式检验等许多方面。又如：全球大气温度的长时间变化是一个非常重要的气候问题，但利用常规探测又难以得到可信的结论。利用经过重新标定和校准的NOAA卫星长时间序列的微波探测器（MSU）资料，得到了1979—2001年时段内对流层中部和平流层下部大气温度的变化趋势。图4^[9]清楚地揭露出对流层中部温度上升和平流层下部温度下降这一事实。

3.4 大气成分的卫星遥感监测

大气成分的微小变化都会影响人类的生存环境，利用卫星遥感技术监测大气成分及其变化就成为近年来对地观测卫星发展的前沿。20世纪末和21世纪初各国为此发射了一系列卫星，如：1995年发射的ERS-2

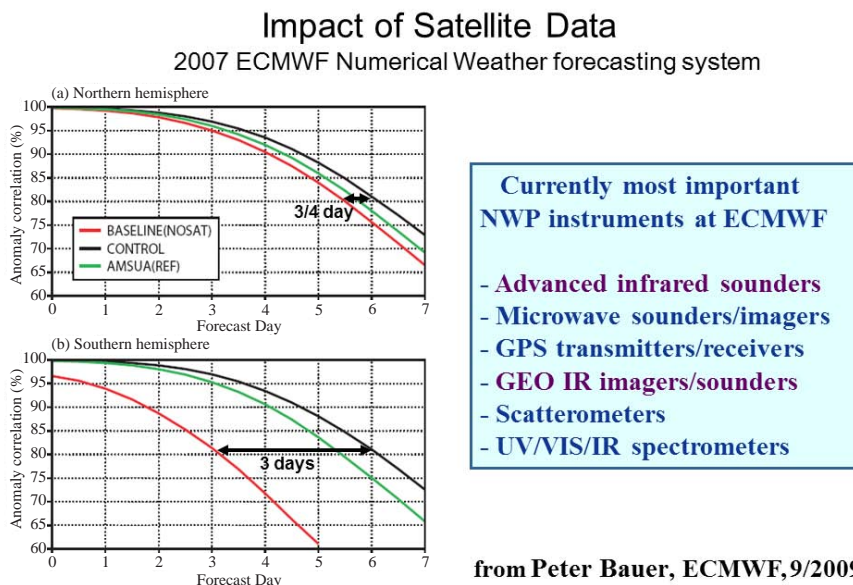


图3 2007年ECMWF业务数值预报模式同化卫星资料后对预报结果的影响 (a) 北半球；(b) 南半球

上的全球臭氧监测仪 (Global Ozone Monitoring, GOME)^[10]; 欧洲空间局 (ESA) 在2002年3月1日发射的大型环境监测卫星 (ENVISAT-1) 上的“扫描成像吸收光谱大气制图仪” (SCIAMACHY); 美国国家航空航天局 (NASA) 于2004年7月15日发射的 Aura 地球观测系统卫星上携带的臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI); 2008年7月25日我国发射的云三号01试验星上搭载的大气成分探测仪 (TOU/SBUS); 2009年1月23日美国发射的温室气体卫星 (GOSAT) 等。

利用这些卫星遥感资料得到的大气温室气体和污染气体的分布和变化, 是环境和气候监测的重要手段。

3.5 环境和自然灾害监测中的应用

监测地球系统五大圈层的现状和演变是对地观测卫星的职能。过去30多年, 已经生成了大量由 AVHRR 加工处理得到的日、候、旬、月平均的 SST 资料, 及其多年平均值和距平。这些资料在 El Niño 等与海洋活动密切相关的重大气候事件的监测中发挥了很好的作用, 并投入业务应用。由 AVHRR 资料加工处理得到的 NDVI 是监测地球表面植被生长状况和进行作物估产的有效手段。已经积累起来的几十年 NDVI 数据是监测全球生物生长状况, 及其季节变化和年际变化的基

本依据。从气象卫星上天开始, 就利用光导摄像云图监测地表积雪和海冰。随着业务气象卫星的连续观测和卫星遥感技术的发展, 不仅积累了长时间序列的全球积雪覆盖和海冰资料, 了解积雪和海冰的季节变化和年变化, 还能监测新雪和旧雪、一年冰和多年冰, 以及雪深和雪水当量。

气象卫星在高温热源、城市热岛和大范围森林火灾监测方面的应用已广为人知。把气象卫星降水估计与卫星对洪涝的监测结合起来, 已经在抗洪抢险中发挥了很好的作用。卫星对沙尘暴和气溶胶的监测也是近年来业务应用服务的内容之一。

4 气象卫星发展变化的启示和讨论

(1) 气象卫星从诞生到现在历经了53年, 以美国为代表的极轨业务气象卫星已进入第五代, 静止气象卫星也已进入第四代, 大约每10年就进行一次更新换代。其他国家的情况大体相当。气象卫星经过这么多年的发展, 目前通过星上遥感探测器波段、探测通道、极化、扫描方式和主、被动遥感等方式的选择和卫星姿态与轨道等的选择, 已经实现了对地球大气气象要素的三维探测, 大气成分探测, 大气中云和气溶胶物理特性探测。对地球系统其余四大圈层的物理、化学特性也具有相当的探测能力。卫星遥感器性能大幅度提高, 探测资料的种类和精度更加适合气象业务的需求。卫星的寿命不断增加, 使更新换代的时间间隔也相应延长。保证气象业务的业务气象卫星和满足各种气象科学试验、科学研究的试验气象卫星并行发展的势头方兴未艾。因此, 气象卫星正在成为地球大气探测系统诸多技术、设备和手段的核心, 它在地球系统科学中的作用和地位将愈来愈重要和显著。

(2) 气象卫星发展的特点是以正确的科学思想 (即以在空间的人造地球卫星作为观测平台, 对地球大气进行遥感探测的可行性) 为指导, 以学科 (大气科学、地球系统科学) 发展和社会、经济需求为牵引, 在高新技术 (空间技术、遥感技术、通信和计算机技术) 的支撑下发展起来的。

(3) 为什么气象卫星发展如此之快? 大气科学、地球系统科学和气象业务与服务对气象卫星有巨大的需求; 气象卫星的强大探测能力和表现出来的勃勃生机, 使它有完成现代大气科学和地球系统科学所赋予它的探测任务; 飞速发展的空间技术、遥感技术和通信计算机技术为气象卫星的更新换代提供了强大的技术支撑; 国家的财力是它能否立项和得到持续发展的基础。所以, 它是需求、能力、技术水平和财力之间的平衡和取舍的结果。

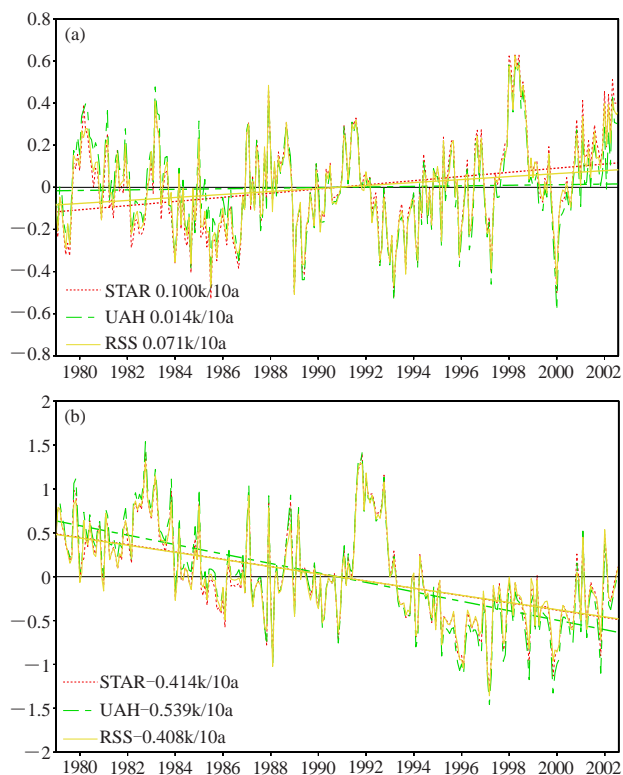


图4 由三个小组处理的MSU数据估计得到的1979—2001年全球高空大气温度变化趋势
(a) 对流层中层, (b) 平流层低层

(4) 研制、发射和运行两类不同轨道的业务气象卫星序列是一项耗资巨大的事业，如何充分论证其需求，如何处理好气象卫星与其他对地观测卫星的关系，切实做到避免重复、资源共享。切不要环境、减灾、资源、海洋和气象等卫星序列满天飞。在国外，气象卫星就是环境卫星。如：美国，在ESSA、GOES、NPOESS等气象卫星的命名中均有“环境”(Environment)一词包含其中。

(5) 大气科学、地球系统科学均有许多未知的领域需要探索。气象卫星本身在发展成熟进入业务阶段之前，也有一些空间技术、遥感技术，甚至一些通信和信息储存技术也需要在卫星上试验。因此，采用业务气象卫星和试验气象卫星同时发展；多功能的综合型大卫星和探测功能的任务相对单一的小卫星同时发展的策略是恰当的。

(6) 研制、发射和运行气象卫星必须走“独立自主、自力更生”的道路。发展气象卫星所需要的高新技术中的关键技术是买不来的。

参考文献

- [1] Rao P K, Holmes S J, Anderson R K, et al. Weather Satellites: Systems, Data, and Environmental Applications. Boston: Amer Meteor Soc, 1990.
- [2] 李俊, 方宗义. 气象卫星的发展——机遇与挑战. 气象, 2012, 38(2): 129-146.
- [3] 杨军. 气象卫星及其应用. 北京: 气象出版社, 2012.
- [4] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. 气象学报, 2009, 67(4): 501-509.
- [5] 陶诗言, 方宗义, 李玉兰, 等. 气象卫星资料在我国天气分析和预报上的应用. 大气科学, 1979, 3(3): 239-246.
- [6] Smith W L, Bishop W P, Dvorak V F, et al. The meteorological satellite: Overview of 25 years of operation. Science, 1986, 231: 455-462.
- [7] Dvorak V F. Tropical Cyclone Intensity Analysis Using Satellite Data. Washington D C: NOAA Tech Rep, NESDIS 11, 1984.
- [8] Eyre J R, Lore A C. Direct use of satellite sounding radiances in NWP. Meteor Maganize, 1989, 118: 13-16.
- [9] 廖蜜, 张鹏, 吴雪宝, 等. 利用MSU序列研究高空大气温度变化的进展. 气象, 2011, 37(9): 1151-1157.
- [10] European Space Agency. GOME Global Ozone Measuring Experiment Users Manual. ESA SP-1182. Noordwijk: ESA/ESTEC, 1995.

新书架 NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Horizons in Earth Science Research
《地球科学研究的视野》

编著者: Benjamin Veress等
出版者: Nova Science
Publishers Inc
出版年: 2014



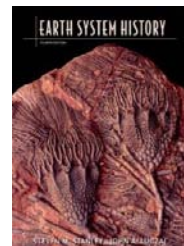
Planetary Climates
《行星气候》

编著者: Andrew P. Ingersoll
出版者: Princeton University
Press
出版年: 2013



Climate Change and Water
Resources
《气候变化与水资源》

编著者: Sangam Shrestha等
出版者: CRC Press
出版年: 2014



Earth System History
(4th Revised edition)
《地球系统历史》(第4修订版)

编著者: Steven M. Stanley
出版者: W.h.freeman & Co Ltd
出版年: 2014

挪威学派气象学家的研究工作和生平： J.皮叶克尼斯、H.索尔伯格和T.贝吉龙

叶鑫欣¹ 焦艳² 傅刚³

(1 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 气候与海气实验室, 北京 100871;
2 国家海洋局北海预报中心, 青岛 266061; 3 中国海洋大学海洋气象系, 青岛 266100)

摘要: 气象学的挪威学派 (Norwegian School, 又称卑尔根学派 (Bergen School of Meteorology)) 由挪威气象学家 V.皮叶克尼斯 (Vilhelm Bjerknes) 创立, 在20世纪大气科学发展中贡献卓著, 他们创立的极锋理论和锋面气旋模型对现代气象学影响深远。本文以挪威学派为线索, 系统介绍了该学派的创立始末、发展历程和主要学术成就, 分别对挪威学派三位重要气象学家 J.皮叶克尼斯 (Jacob Bjerknes)、H.索尔伯格 (Halvor Solberg) 及 T.贝吉龙 (Tor Bergeron) 的生平经历、研究工作和重要研究成果的形成过程进行了回顾, 包括锋面气旋模型和极锋理论、索尔伯格的惯性波研究、贝吉龙冷云降水过程等, 并对其贡献进行了总结。

关键词: 挪威学派, 天气学, 降水物理学

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.004

On the Researches and Life Experiences of Bergen School Scientists: Jacob Bjerknes, Halvor Solberg and Tor Bergeron

Ye Xinxin¹, Jiao Yan², Fu Gang³

(1 Laboratory of Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871 2 North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061 3 Department of Marine Meteorology, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: The Bergen School of meteorology, founded by the Norwegian meteorologist Vilhelm Bjerknes, has played a significant role in the development of modern atmospheric sciences. They put forward several important theories including the polar front theory and the frontal cyclone model, which influenced modern meteorology profoundly. In this paper, the foundation of the Bergen School and the chief academic achievements were reviewed. The life and research experiences of three significant members: Jacob Bjerknes, Halvor Solberg and Tor Bergeron were introduced. We focus on the development process of their theories, including the front-cyclone concept, polar front theory, Solberg's work on inertial wave and Bergeron's dedication to the development of cold-cloud precipitation theory. The contributions of these three greatest meteorologists are also discussed.

Keywords: Bergen School of meteorology, synoptic meteorology, precipitation physics

1 引言

大气科学的发展与人类社会的发展、科学技术的进步和日益增长的社会需求密不可分。自人类文明开始至16世纪, 人们通过观察和记录积累了丰富的气象经验知识。中国古代关于气象经验的记载主要包括大气光象、云雾降水、风雷温湿、物候气候和天气谚语

等, 可以追溯到中国公元前14世纪的殷代^[1]。在古希腊、古埃及和古巴比伦, 对大气现象的探究同样历史久远^[2], 例如, 古希腊阿那克西曼德 (公元前610—前546年) 在一篇关于自然哲学的文章中提出“风是空气的流动”; 亚里士多德所著的《气象》 (*De Meteorologica*, 公元前340年)^[3]是最早的气象学专著, 并被认为是气象学成为一门独立科学的开端^[2]。大气科学的飞跃发展, 得益于近几百年间物理、数学方法和观测手段的进步。14—17世纪航海事业的兴起、天文学和物理学的突破性进展, 以及气象要素测量仪器的陆续发明、气象观测站网的逐步建立, 成为

收稿日期: 2013年9月11日; 修回日期: 2014年4月1日
第一作者: 叶鑫欣 (1987—), Email: xxin.ye@gmail.com
通信作者: 傅刚, Email: fugang@ouc.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金 (41275049)

人们定量描述大气现象、研究大气运动规律的基础。从19世纪20年代第一张天气图的出现，直至20世纪40年代末，大气科学的主要分支学科：天气学、动力气象学、气候学以及云和降水物理学等相继形成^[1]。

诞生于1917年的挪威气象学派（或称卑尔根学派），在天气学理论及现代天气预报业务实践方面均贡献卓著。由挪威气象学家V.皮叶克尼斯（Vilhelm Bjerknes）创立并领导的这支团队，吸纳并培养了J.皮叶克尼斯（Jacob Bjerknes）、T.贝吉龙（Tor Bergeron）、H.索尔伯格（Halvor Solberg）、C.G. 罗斯贝（Carl-Gustav Rossby）等著名气象学家，他们提出的极锋理论、气团学说及锋面气旋模型成为天气分析的基础。随着挪威学派理论和方法的传播，气象学逐渐成为一门独立学科并蓬勃发展。不仅如此，V.皮叶克尼斯和他的门生们在各自的学术领域中亦有独到建树，例如1904年V.皮叶克尼斯就已提出用流体动力学和热力学方程描述大气运动的构想，成为数值天气预报的发端^[4]，并提出大气环流图像^[5]；罗斯贝在美国创立芝加哥学派（Chicago School），门生包括Stommel、Charney等，师徒一起为物理海洋学、现代气象学和大气动力学的发展奠定了基础。V.皮叶克尼斯环流定理、罗斯贝大气长波理论、贝吉龙的冷云降水理论、ENSO理论等都出自挪威学派气象学家。

在近现代大气科学的发展历程中，卑尔根气象学派无疑发挥了重要作用^[6-8]。贾朋群^[9]总结了20世纪初欧洲和美国的气象事业和教育发展，对V.皮叶克尼斯创立挪威学派的情况和团队研究成果做了简要论述；Namias^[10]介绍了挪威学派对天气学在美国发展的早期影响；Friedman^[11]评述了挪威学派的主要成就。挪威学派气象学家的生平历程和研究工作也引起前人的关注，例如Devik等^[12]、Eliassen^[13]为V.皮叶克尼斯撰写了传记，并简述了他所培养的几位学生在卑尔根时的学习和研究情况；Wurtele^[14]整理出版了J.皮叶克尼斯的完整著作；Eliassen^[15]介绍了J.皮叶克尼斯的研究经历；Fiolk^[16]对皮叶克尼斯父子的生平经历和贡献进行了总结。Weickmann^[17]、Liljequist^[18]、Schultz和Friedman^[19]为贝吉龙撰写了传记，Jewell^[20]主要介绍了他在卑尔根时期的生活，并详细介绍了挪威学派发展初期情况；Schwerdtfeger^[21]简述了贝吉龙在天气学分析方面的贡献。

本文结合前人对挪威学派气象学家所作记述和有关学术著作，总结挪威学派的发展历程，着重回顾J.皮叶克尼斯、索尔伯格和贝吉龙三位气象学家的生平经历和学术研究工作。作者希望科学先驱者们独到的学术思想和研究经历能够为大气及海洋科学的学习和研究者带来一定的启发和示范。

2 挪威学派简介

挪威学派创立于1917年，其创始人和领导者V.皮叶克尼斯（Vilhelm Friman Koren Bjerknes，1862年3月14日—1951年4月9日，图1）是现代天气学、大气动力学和天气预报的奠基人之一^[16]。他出生于挪威克里斯蒂安尼亚（1624—1925年奥斯陆的旧称），父亲C. A. 皮叶克尼斯（Carl Anton Bjerknes，1825—1903年）



图1 V.皮叶克尼斯（1862—1951年）^①

是克里斯蒂安尼亚大学数学系教授。1888年，V.皮叶克尼斯在获得硕士学位后留学德国波恩大学，担任物理学家赫兹（Heinrich Hertz）的助手；1892年他获得波恩大学博士学位，并被聘任为斯德哥尔摩大学力学和数学物理学教授，之后在奥斯陆大学（1907—1912年）、莱比锡大学（1912—1917年）工作。

一战爆发后，战争局势使德国的科研环境大不如前。V.皮叶克尼斯于1917年回到挪威，应海洋学家Hansen^②的邀请到卑尔根大学（当时称为卑尔根博物馆）地球物理研究所主持气象学科，这就是挪威学派的雏形。当时跟随他的只有他的儿子J.皮叶克尼斯（Jacob Bjerknes，1897—1975年）和学生H.索尔伯格（1895—1974年）。基于军事气象和农业生产需要，他们将研究重点放在天气预报上，顺利获得政府资助，从而在挪威境内布设了完善的观测站网。1918年11月，J.皮叶克尼斯和索尔伯格在搜集观测数据的过程中结识了四名瑞典学生^③，其中包括T.贝吉龙（1891—1977年）和C. G. 罗斯贝（1898—1957年），他们随即投入V.皮叶克尼斯门下，挪威学派初见雏形。V.皮叶克尼斯曾在给友人的信中写到：

① 参见http://www.history.noaa.gov/stories_tales/bjerknes.html。

② Bjorn Helland-Hansen（1877—1957年），挪威近代海洋学家，他对海洋的物理结构和动力学特性进行了研究，是将海洋学从以描述性为主的科学转变为以物理化学原理为基础的科学先驱。

③ 当时挪威科研人员薪酬较高，由于气象学作为一门科学尚未被广泛接受，很少人会选择从事该领域，但在瑞典的情况恰恰相反，故他们选择到瑞典招募有气象方面兴趣的青年才俊。

“To work on the material which Jack and Solberg have collected from the three Scandinavian countries five young men will now gather here during the coming year. I have every reason to believe that several of them are talented - one of them, Bergeron, you know already. So we shall have a living scientific milieu here too.”

除了上述几位主要科学家，V.皮叶克尼斯在卑尔根期间也培养了众多气象人才。多年之后（1926年）他回到母校奥斯陆大学担任应用力学和数学物理学教授，继续从事教学工作。1946年卑尔根博物馆更名为卑尔根大学（The University of Bergen），如今已成为挪威第二大综合性大学。由卑尔根大学和南森海洋研究所等机构联合成立的皮叶克尼斯气候研究所（The Bjerknes Centre for Climate Research, BCCR）是北欧最大的气候研究中心和欧洲大气科学研究的核心机构之一^①。

在挪威学派的主要科学家中，V.皮叶克尼斯和索尔伯格较为侧重理论研究，J.皮叶克尼斯和贝吉龙则侧重于天气学分析（图2）。他们建立的锋面气旋模型^[22-23]是中纬度天气尺度气旋发展和演变的重要概念模型，索尔伯格提出极锋、气旋族的概念，以及极锋波动发展为气旋的过程，完善了整个理论；贝吉龙提出气旋锢囚理论，使锋面气旋的生命史更加完整^[13]。20世纪20年代，气团、极锋学说、锋面气旋模型被称为“极锋气象学”。锋面气旋和极锋学说是卑尔根大学气象系得名“学派”的主要原因之一。与此同时他们的学术著作极大促进了气象学的发展^[24-25]，其中以*Physikalische Hydrodynamik*（《物理和流体力学》）^[26]一书最为突出。

3 J.皮叶克尼斯的生平和研究工作

J.皮叶克尼斯（Jacob Aall Bonnevie Bjerknes，1897年11月2日—1975年7月7日，图3）是挪威学派的



图2 挪威学派工作和生活地点卑尔根市大街33号冬景^[20]

的学术繁荣时期的代表人物，在锋面气旋模型的建立方面有重要贡献。J.皮叶克尼斯出生于瑞典斯德哥尔摩，1907年跟随父亲V.皮叶克尼斯前往挪威，并在克里斯蒂安尼亚大学和奥斯陆大学学习，在此期间对流体学理论应用于大气运动和天气预报问题产生兴趣。1914—1917年他曾专心帮助父亲在莱比锡和卑尔根的研究工作^[15]，协助了气象观测站网建设，这也是挪威学派创立过程中的重要一环。J.皮叶克尼斯在1918年夏季加入了由V.皮叶克尼斯和T.海塞尔伯格（T. Hesselberg）主持实施的挪威天气预报项目，保障了各地农业生产。当时，J.皮叶克尼斯和索尔伯格分别负责卑尔根、克里斯蒂安尼亚两座城市的天气预报工作。

1924年J.皮叶克尼斯获得奥斯陆大学博士学位。1931年他受聘于卑尔根博物馆的气象系，在锋面气旋方面的研究得到了国际气象界的广泛关注^[13]。1939年7月，他携家人在美国进行为期八个月的学术交流，其中包括加利福尼亚大学洛杉矶分校（The University of California, Los Angeles, 简称UCLA）物理系的气象学和天气预报研究室。1939年9月第二次世界大战爆发后挪威遭受德国入侵，鉴于战事，J.皮叶克尼斯在罗斯贝的推荐下到UCLA工作，并定居美国。1940年，J.皮叶克尼斯成为UCLA的气象学教授并主管气象学事务，UCLA气象系在他的推动下于1945年正式成立^②。1946年J.皮叶克尼斯加入美国国籍。

二战结束后，J.皮叶克尼斯着重对平均大气环流进行了研究。20世纪50年代末，他投入到大西洋和热带太平洋海气相互作用领域，这方面内容在文献[27]中已有总结。J.皮叶克尼斯活跃在大气科学领域长达55年之久，曾先后获得美国地球物理联合会（AGU）威廉鲍伊奖，美国气象学会罗斯贝奖（1960）、国家科学奖（1966）等。在挪威学派发展期间，J.皮叶克尼

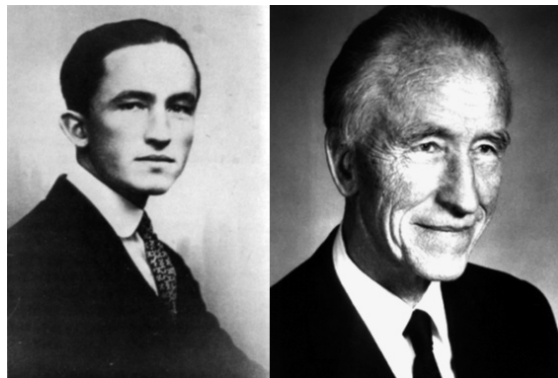


图3 J.皮叶克尼斯（1897—1975年）^[16, 20]

① 参见<http://www.uib.no/bjerknes/en>和<http://www.bjerknes.uib.no/>。

② 美国第四个开设的大学气象系，前三个为罗斯贝最早创建的麻省理工学院（MIT）气象系、加州理工学院和纽约大学气象系。

斯的主要学术贡献包括锋面气旋模型、锋面气旋结构分析等，后期延伸到大气波动等问题，下面将分别介绍。

3.1 锋面气旋模型

在卑尔根工作期间，J.皮叶克尼斯主要关注大气运动的理论研究。在1918年2月刚刚开始天气预报工作时，V.皮叶克尼斯就希望从天气图资料的分析中得出理论解释，从而提高预报水平。丰富的数据和持续的日常分析，为锋面气旋模型的提出和修正奠定了基础。尽管当时信息共享程度不高，法国、英国及大西洋洋面上的观测数据无法利用，J.皮叶克尼斯仍观察到他曾在莱比锡研究过的辐合线^[13]，定义出大气波动发展过程中的两类主要结构，并将其称为“转向线”（steering-line）和“飑线”（squall-line），指出它们可能与高低压系统形成，以及极地和热带的空气交换有关^[22]，也就是后来的“暖锋”和“冷锋”^[28]。

经过数月对欧洲区域天气图的分析，J.皮叶克尼斯在《移动性气旋的结构》^[22]一文中提出了对锋面气旋结构的革命性认识。文章分析了气旋模型的典型流场和“转向线”、“飑线”空间界面（图4），包含气旋区云系和降水区分布特征（图5）。暖空气沿倾斜的锋面抬升并产生云带和降水区、冷空气下沉并沿地面扩散，位能由于垂直运动而减小，这不仅解释气旋形成时的动能来源（与Margules 1903年发表的理论具有一致性），还能够说明气旋为什么总生成于大气不连续面附近及其移动路径规律。文中还提到，气旋中的冷锋可以作为新气旋的暖锋进而形成“气旋串”，成为近极地和热带空气的交换媒介。概念模型中最重要的要素“转向线”和“飑线”在1919年末被更名为“暖锋”和“冷锋”，因为相抗衡的两个气团与一战两军交锋的情形十分相似。Gold^[29]称该文章为“天气学文献中最引人注目的作品”（the most remarkable eight pages in the literature of synoptic

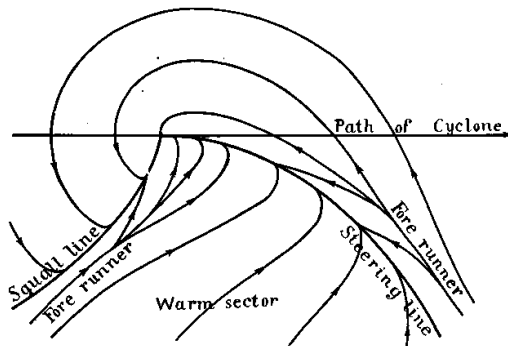


图4 移动性气旋的流线分布^[22]

meteorology)，贝吉龙也曾在给瑞典友人的信中曾称赞道：

“The facts of the matter are that last autumn (in 1918) the institute here took up the problem of local showers with the result that it has been possible to penetrate some of their secrets, something which previously had defied the wits of meteorologists. It turns out that when one properly divides up the problem also these occurrences follow the laws of nature. The honor for this belongs to the young Bjerknes^①.”

1919—1922年，J.皮叶克尼斯、索尔伯格及贝吉龙逐渐掌握了更多观测事实，并针对锋面气旋模型及其垂直结构进行了专门研究，进一步揭示了对流层低层大气不连续面（锋面）结构和气旋形成过程。J.皮叶克尼斯和索尔伯格^[28]论述了降水形成条件，根据斯堪的纳维亚半岛的降水资料指出空气上升冷却凝结是形成降水的关键因素，而能够成雨的上升区多出现在地面气流辐合带、切变线附近且通常出现在冷暖空气交汇处，“冷锋”和“暖锋”的定义首次明确出现。文中共讨论了四类降水及成因，包括与气旋有关

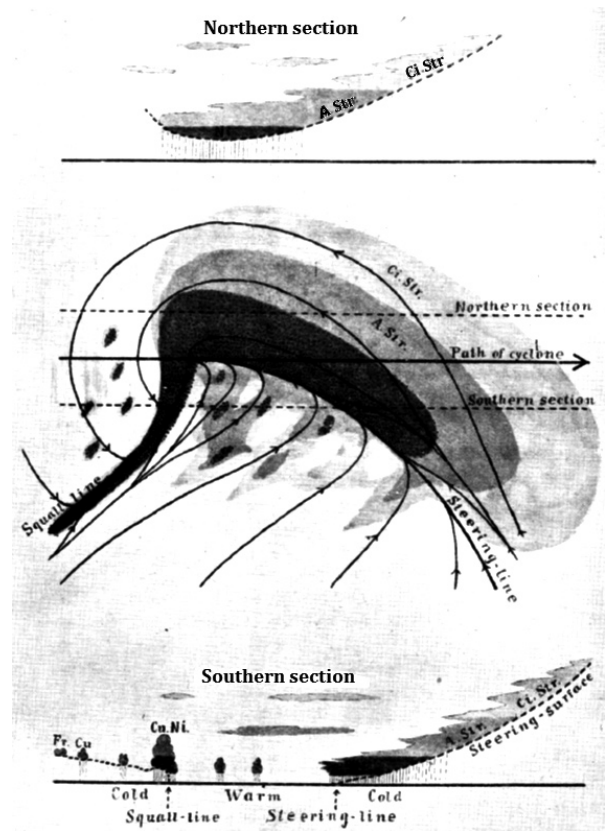


图5 J.皮叶克尼斯的首个气旋模型，包括流线、云系、降水和垂直剖面^[22]

① 引自贝吉龙1919年7月20日寄给Gunnar Rising的信。

的锋面降水、地面辐射增温造成的不稳定降水、低层空气接触冷的下垫面降温导致的“雾状雨”或“毛毛雨”，以及山地上升气流导致的地形降水，并结合锋面气旋云系和降水特征建立了理想气旋模型（图6）。

根据天气图分析，索尔伯格确定了“极锋”和锋上波动结构的存在并观察到“气旋族”的踪迹，贝吉龙则发现了气旋发展的另一过程，即由他命名的“锢囚”过程，这部分会在后文详细涉及。尽管如此，气旋发展各阶段的主要特征在J.皮叶克尼斯1919年的文章^[22]中都已提到。至此，挪威学派完整提出了四维锋面气旋模型^[23]，即以温带移动性气旋理想模型（图6）为基础，包含初生、发展、锢囚各阶段生命周期（图7）。他们认为，气旋形成的关键是冷暖气团同时存在并维持性质差异，暖空气被冷空气抬升并在地转作用下导致气旋形成，冷空气逐渐占据涡旋系统，当其变为冷性涡旋时能量迅速消耗，气旋填塞消亡。由于欧洲大陆所见的气旋大多处于北大西洋气旋的锢囚阶段，故从统计上看，气旋通常具有冷中心且结构较为对称，但考察气旋的发展阶段不难发现其不对称性。他们提到极地气团和热带气团的概念^[23]，指出极地空气与热带空气之间存在“极锋”。近极地气流左侧和邻近的热带气流之间存在“气旋族”（图8），即以气旋路径和发展周期划分的“气旋族”。统计得出的欧洲气旋族周期大约为5.5天，与Defant^[30]得到的降水周期相似。整个中纬度绕极波状环流圈上通常存在约4个气旋族以及中间4个反气旋

（图9），说明地球自转在环流圈形成中起作用，而Defant认为绕极环流是中纬度海陆热力性质不同造成的。事实上两方面因素都存在作用。不足的是，J.皮叶克尼斯和索尔伯格这些细致的概念图大部分仅基于对观测数据的概念化，缺乏具有一定说服力的实际天气个例，气旋的垂直结构是从理论推测所得。同时，该文章在撰写时忽视了对前人工作的探讨，特别是奥地利维也纳学派气象学家的工作^[21]。尽管如此，锋面气旋和极锋学说仍成为他们的经典理论，挪威学派在天气学方面研究成果的开创性价值及其对天气预报业务的指导作用十分深远。

3.2 锋面气旋结构及其动力学成因

1922年J.皮叶克尼斯作为瑞士气象学会特邀顾问来到苏黎世。在瑞士同行的帮助下，他在阿尔卑斯山居住一年并获得了山顶观测数据，从而在垂直达到3000m高度的空间内验证了锋区倾斜面的存在。结合这些数据，J.皮叶克尼斯^[31]详细分析了一次暖锋过程的锋面结构和附近运动场，证实锋面是半球比例的热力不连续面；尝试根据诊断结果和物理方程推断气团运动，从动力学角度讨论了气旋的形成和锋面移动，并通过该研究成果获得奥斯陆大学博士学位。

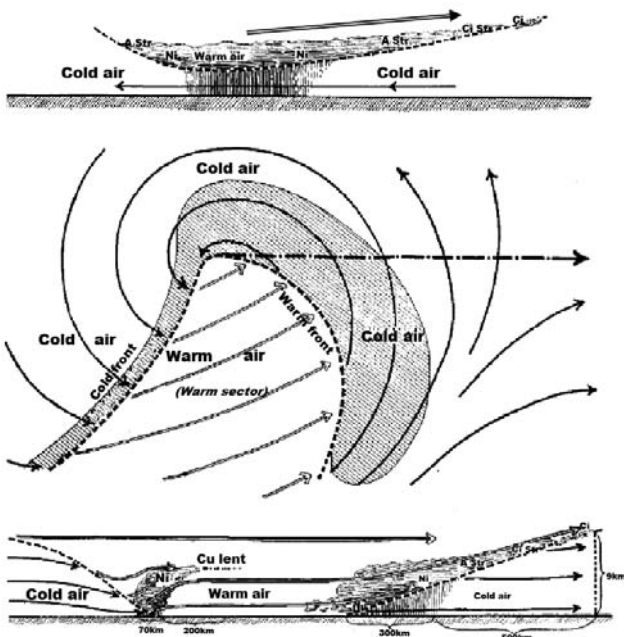


图6 温带气旋理想模型示意图^[28]

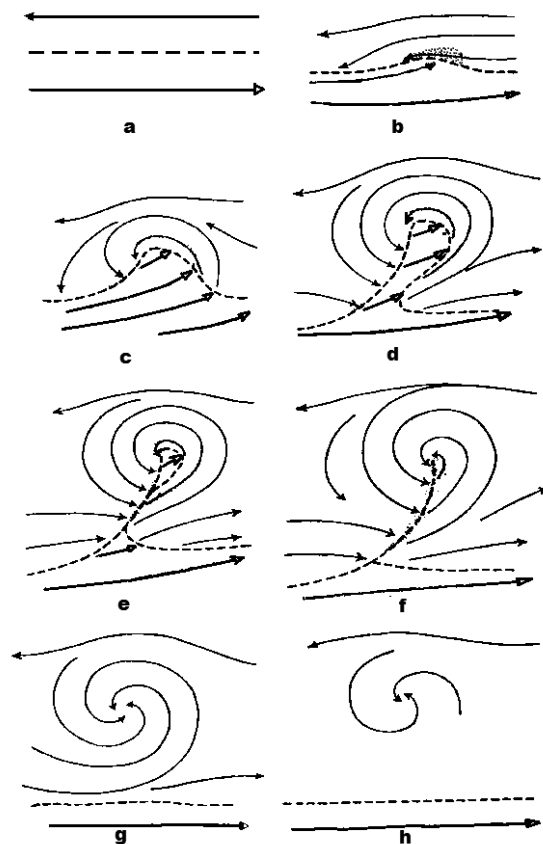


图7 温带气旋生命周期示意图^[23]

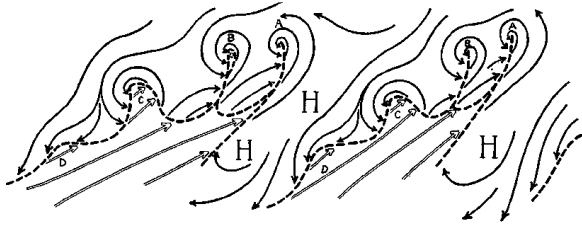


图8 气旋族示意图^[23]

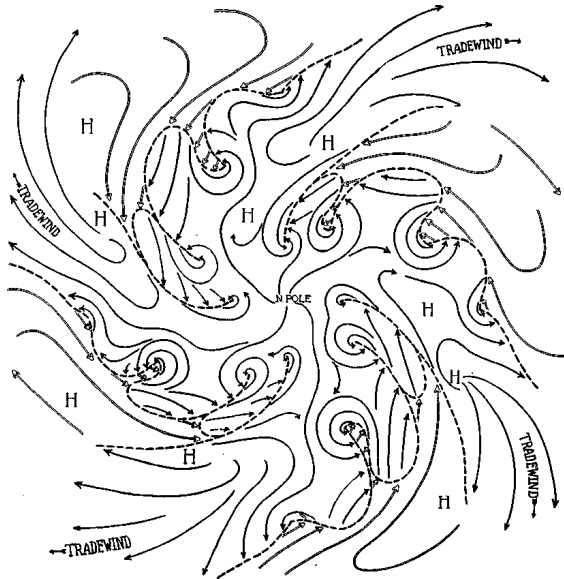


图9 平均温带大气环流^[23]

J.皮叶克尼斯与芬兰地球物理学家Erik Palmén^①合作，分析了多个欧洲大陆气旋过程^②。利用在比利时于克勒(Uccle)施放31个气球探空数据，J.皮叶克尼斯在对1928年12月一次气旋过程的研究中发现^[32]，高空槽常位于地面冷锋上空，槽涡度的形成是由于暖空气沿冷空气倾斜界面向下流动时产生的垂直拉伸。文中描述了与低空气旋有关的对流层高空西风气流波动，是利用动力学观点解释高空大气波动的首次尝试^[13]。此外，J.皮叶克尼斯和Palmén^[33]通过对气旋形成过程的分析描绘出锋区上部的折叠，建立了地面锋区到对流层顶的垂直剖面。

3.3 大气波动和平均大气环流

J.皮叶克尼斯曾着重讨论气旋发展过程中的气压变化问题^[34]，结合对流层高层、叠加在纬向气流上的扰动进行了初步分析，发现中纬度高空波动因大气斜压性而发生相对水平移动，导致地面气旋增强或减弱^[13]。他将气旋生消的原因由锋面波动延伸为对流层

大气波动，并进行了一系列关于高空波的理论研究。他指出，科氏力随纬度的变化是高空大气波动形成的重要动力学因素，该结论启发罗斯贝从理论和观测方面研究了控制天气和大气环流变化的大气长波，从二维无辐散涡度方程出发，求出长波公式并得到符合实际的长波移速和发展率。之后罗斯贝的学生及合作者对大气长波的产生机制进行了深入研究，相继提出斜压不稳定理论^[35-36]、正压不稳定理论^[37]及大气长波的频散理论^[38]，这些成果有助于人们认识大气环流演变过程，为天气预报提供了依据，并成为其后数值天气预报和大气环流数值试验的基础，开辟了现代大气动力学与大气环流研究的新局面。大气波动力学的理论体系被认为是20世纪大气科学理论最重要的研究成果。

为发展温带气旋理论、进一步探讨其形成机制，J.皮叶克尼斯在UCLA期间利用气压倾向方程^[39]分析了西风波动上的气压变化，指出在一般的西风强度下水平散度分布将使波峰和波谷向东移动。通过推导，他得到正压和斜压大气中的波动移动规律，并讨论了高低空气压系统的综合配置。该文章启发UCLA气象系首位博士生J. Charney^[35]得出第一个斜压流体波动解。

20世纪50年代，大气科学进入到计算机应用和高空大气探测阶段，J.皮叶克尼斯倡导利用火箭、卫星图像进行高空大气研究。二战末期，美国飞行员在日本上空的对流层顶附近向西飞行注意到一股高速气流，气象学家研究确定为高空西风急流。后来得到的大气风场观测结果显示，高空西风急流比预想的还要强。英国数学家、地球物理学家Harold Jeffreys曾在1933年提出设想：大气波动和涡旋扰动可以把角动量从低纬度输送到中纬度地区。以此为基础，J.皮叶克



图10 1953年J.皮叶克尼斯(近者)和D.富兹在芝加哥大学流体力学实验室

① Erik Palmén (1898—1985年)，芬兰气象学家，在气象学、地球物理学、海洋学方面都有涉猎。曾协助J.皮叶克尼斯从事气旋和锋面的研究；后前往芝加哥大学成为C.G.罗斯贝创立的芝加哥气象学派一员，在高空急流动力学研究中有突出贡献。
② 气旋个例分析系列包括四篇文章：个例一(1928年3月28—30日)发表于1933年；个例二(1928年12月26—28日)发表于1932年；个例三(1930年12月30—31日)发表于1934年；个例四(1935年2月15—17日)发表于1937年。

尼斯和Yale Mintz^①邀请了多位国外科学家开展了大气平均环流的计算研究项目，收集整个北半球数据，并对角动量和热收支方程各项的时间、空间平均量进行了计算^[40]，验证了Jeffreys的理论，并与当时MIT的Victor Starr^②研究组的结果一致，加深了人们对平均大气环流的认识。

4 H.索尔伯格的生平和研究工作

挪威气象学家H.索尔伯格(Halvor Skappel Solberg, 1895年2月5日—1974年1月31日)出生在挪威海德马克市林萨克区(Ringsaker Hedmark), 1912—1916年在克里斯蒂安尼亚大学学习天文学、化学、力学等课程，并获得天文学学士学位^③，期间曾连续三年作为Lars Vegard和Carl Størmer教授的助手参与极光研究。毕业后索尔伯格前往莱比锡学习并师从V.皮叶克尼斯，成为挪威学派的最初成员之一。当时他致力于理论气象学研究，主要关注气流摩擦。



图11 H.索尔伯格 (1895—1974年)^[13]

1917年秋，索尔伯格跟随V.皮叶克尼斯来到新创立的卑尔根大学气象系，接触到天气预报问题，通过观测分析完善了J.皮叶克尼斯(1919)提出的锋面气旋模型，构建了“极锋气象学”体系。1921—1927年，他前往德国格丁根(Göttingen)和法国巴黎学习流体力学，之后到挪威奥斯陆继续协助V.皮叶克尼斯，进行气旋发展机制的理论研究。1930—1964年他在奥斯陆大学担任教授。从事教学工作同时，索尔伯格继续从数学角度研究流体惯性波动，在描述大气扰动和波的移动方面有所进展，同时对流体稳定性条件做了研究。索尔伯格十分注重培养学生的大气动力学基础，而这样的大气科学教学理念直到二战之后才被世界各国广泛认同。此外，索尔伯格还积极促进计算机的应用，担任数学计算委员会主席多年。

尽管与挪威学派其他几位主要成员相比，索尔伯格的学术成就并不十分突出，但他推动了锋面气旋模型的建立特别是“气旋族”的发现，并在气旋形成机

制的理论研究方面作出了有益的尝试。

4.1 极锋理论和气旋族

在卑尔根工作期间，索尔伯格通过分析船舶观测资料，对北大西洋区域历史天气图进行了重新研究，证实了大气不连续面的存在。通过描绘多个气旋的冷暖锋结构(图12)，他得到一条基本连续的冷暖空气分界线即“极锋”，并认为极锋以弯曲的波状形式存在，索尔伯格认为，这种不同性质空气的分界线与降水形成关系密切，冷暖空气相互作用使其具有弯曲的走向，极锋上的波动可能发展为气旋，进而提出“气旋族”概念。结合这一概念，挪威学派关于温带气旋特征的研究更加完整。

4.2 流体波动与气旋形成机制

索尔伯格用数学物理方法研究流体波动的初衷是揭示气旋的形成和发展过程。除了人们熟知的声波和重力内波，索尔伯格在博士论文^[41]中通过方程式在旋转流体中确定了细胞状内波(cellular internal waves)的存在，但由于解的形式十分复杂，并且未得到气旋波性质的波动，此项工作并未产生很大反响。之后，V.皮叶克尼斯和索尔伯格^[42]共同研究了细胞状内波的

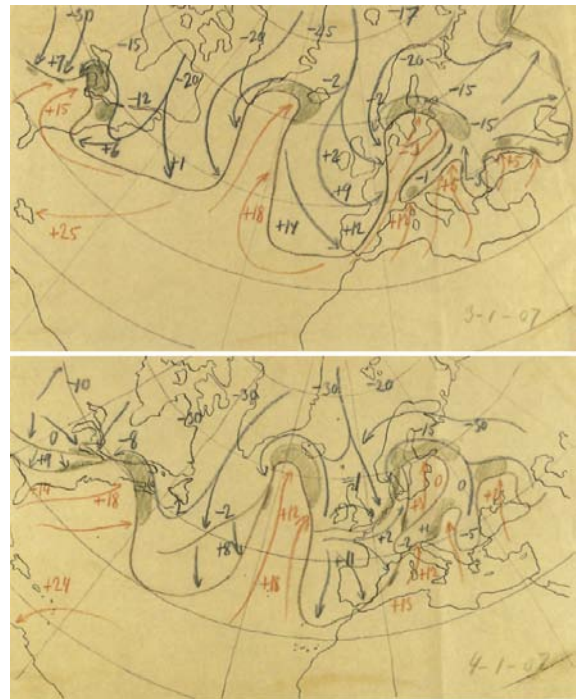


图12 索尔伯格描绘的1907年1月3日和4日(绕极)极锋(绘制于1920年2—3月)

① Yale Mintz是J.皮叶克尼斯的研究生，1949年获得博士学位后留在UCLA工作，20世纪50年代末开始主要从事平均大气环流模式的设计。他所招收的东京大学气象学家Akio Arakawa具有杰出的数学天赋，以研究积云对流参数化闻名。

② Victor Starr是芝加哥大学气象系培养的第二位博士(毕业于1946年夏，第一位是1945年秋毕业的Morris Neiberger)，1947年起在MIT任教。

③ 参见http://www.snl.no/nbl_biografi/Halvor_Solberg/utdypning。

物理性质。

索尔伯格是流体内部惯性波研究的先驱者之一。结合基本的数学物理方程，索尔伯格^[43]讨论了可压大气中两等温面的平行运动，成功得到所有可能的波动类型，其中包括存在于两界面之间、与初生气旋波在波长和传播速度方面相似的不稳定波，即不稳定惯性长波。虽然索尔伯格对锋面波动发展过程的理论研究指出了研究惯性长波不稳定的必要性^[41, 43]，但是动力解释存在缺陷，数学推导过程非常复杂，且无法解释大气长波的不稳定性形成原因。尽管如此，该研究仍被认为是揭示气旋形成机制的重要一步，从最初认为的重力波不稳定或大气不连续面不稳定，过渡到惯性长波不稳定，为大气长波的研究打下了基础。

Godske^[44]总结了索尔伯格关于波动类别及稳定性的主要结论，指出大气中存在的三种相互独立并对波动产生具有关键作用的动力因素。第一种为重力，当空气运动速度具有垂直分量时重力起作用，由于在惯性系统中轻的空气在重的空气之上，故重力是稳定因素；第二种为界面处的速度切变，这是形成不稳定波的常见动力因素，在小尺度运动中表现为层流转化为湍流，大尺度气流切变也有不稳定波形成；第三种为地球旋转，实质为角动量守恒，是稳定波的形成因素之一。图13为上述因素的综合效应示意图，频率的平方（表征稳定度，负值为不稳定）是不连续面上波动波长的函数，当波长约在2km以下时，不稳定性主要决定于锋面切变，当上下两层流体密度不同，并且有不同的切向速度时出现这种不稳定性，在大气中常表现为波状云；当波长超过2km时重力成为主要因素，波动就变为稳定波；地球旋转对短波影响很小，而对波长在几千千米量级的长波，由于空气运动速度的水平分量与垂直分量相比很小，稳定作用主要来自

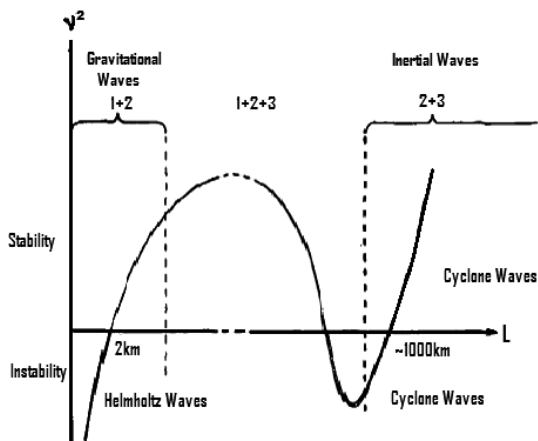


图13 Godske关于大气波动稳定性和不稳定性的示意图^[44]（1为重力稳定，2为切变不稳定，3为旋转惯性稳定）

地球旋转，Godske^[44]称这种波为惯性波，当受到速度切变因素影响时形成不稳定惯性长波。他认为大气中存在两种不稳定波动：（1）短重力波，在大气中表现为波状云，与开尔文—亥姆霍兹不稳定（Kelvin-Helmholtz Instability）有关。（2）不稳定惯性长波，由索尔伯格发现，并认为其实质是气旋波。

5 T.贝吉龙的生平和研究工作

瑞典气象学家T.贝吉龙（Tor Harold Percival Bergeron，1891年8月15日—1977年7月13日，图14）是挪威学派的重要成员之一，在大气科学的诸多分支领域均有开创性贡献，包括锋生问题、气团分类、降水机制等。

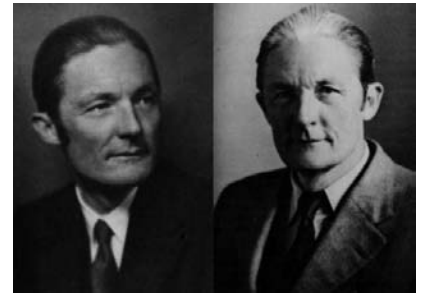


图14 T.贝吉龙（1891—1977年）（左：摄于卑尔根工作时期^[20]，右：摄于20世纪30年代初^[16]）

贝吉龙出生在英国萨里城郊的戈德斯通，父亲Armand经营邮票生意，母亲Hilda Stawe是歌手及声乐教师。1910—1916年，贝吉龙在斯德哥尔摩大学学习数学和物理，期间经常到气象学会学习分析天气图，毕业后他在瑞典气象学会工作。贝吉龙非常注重观测数据的分析，少年时代就热衷于天气现象和云的观测，经常记天气日志，曾经观测到当时教科书中鲜有记录的山脉背风波云系（lee-wave clouds）。他曾在给朋友的信中附加空白表格，用于记录航海过程中的大气能见度、天气现象等，并建议把表格分发给航海人员和山区徒步的人。这些观测数据在新理论验证方面发挥了补充作用，例如，贝吉龙利用大量观测数据发现两个气团之间往往存在明显的边界，从而提出“气团”的设想^[45]。

1918年秋，贝吉龙在J.皮叶克尼斯和索尔伯格的邀请下，来到卑尔根大学气象系学习。1919年末，他前往位于斯德哥尔摩的瑞典气象水文学会任初级气象学家。1922年5月至1929年，贝吉龙回到卑尔根，在挪威气象学会天气预报部门工作，并开办了天气图分析课程，这一举措成为系统化气象教学的开端^[45]。与此同时，他先后到德国莱比锡大学（1923—1925年）和奥斯陆大学（1925—1928年）学习，1928年获得奥斯陆大学博士学位。1936—1947年，贝吉龙在位于瑞典首都斯德哥尔摩的瑞典气象水文研究所（SMHI）工作，通过讲座和天气图分析课程，在短时间内实现

了瑞典气象事业的现代化^[46]。他亲自准备课程计划，安排野外气象学实践课程。在此期间，他还担任了世界气象组织（WMO）天气学委员会委员。1945年随着第二次世界大战的结束，瑞典军事和航空领域缺乏大量的气象人才，气象学逐渐得到国家的重视。贝吉龙也于1947年被聘为乌普萨拉大学天气学系教授及系主任，进行热带气象学^[47-48]、假冷锋、极地气象学等研究。1953年，贝吉龙组织开展了Pluvius降水研究计划，主持这项工作直到晚年。

贝吉龙曾到多国讲学（马耳他、前苏联等），致力于传播挪威学派理念和方法，他掌握的七种语言为学术交流带来了促进作用。1930年9—12月和1931年12—1932年10月，他两次前往莫斯科开办讲座，讲稿由俄国天气学家S. P. Chromow整理，编写成为*Einführung in die synoptische flüently* (Introduction to the Synoptic Flüently) 一书，该书被贝吉龙的密友G. Swoboda翻译为德语版本（1940年），同年还出版了N. Koncek翻译的荷兰语版本。此外，贝吉龙还承担了一些国际援助工作，如国际教科文组织技术援助计划（The UNESCO Technical Aid Program），曾在摩洛哥和南斯拉夫进行天气学教学（1953年9—10月）。

从乌普萨拉大学退休后（1961年），年近七旬的贝吉龙仍在气象学院继续研究工作和国际交流（图15）。1976年秋，贝吉龙不幸罹患胰腺癌，于1977年6月13日在瑞典乌普萨拉逝世，享年85岁。贝吉龙是最后一位辞世的挪威学派代表人物^[45]。第十一届国际气象组织颁奖仪式上贝吉龙的颁奖词，可以说是对其在气象学领域贡献的全面评价：

“In recognition of his Outstanding Contributions to Air Mass Analysis, Physics of Precipitation and Theory of Fronts, his furtherance of International co-operation in the Science of the Atmosphere; and his stimulation of the development of the Science of Meteorology by his lectures and writings.”



图15 贝吉龙和夫人Vera (摄于1969年)^[18]

贝吉龙在卑尔根期间的主要贡献是发现了“锢囚”现象和“锢囚锋”，从理论方面帮助完善了锋面气旋理论，并从观测事实角度验证了有关理想模型的合理性，还构思出冷暖锋的标记方法。之后他通过观测事实提出了冷云降水机制^[49-51]，即后来所说的魏格纳—贝吉龙—芬代森降水过程（Wegener-Bergeron-Findeisen process）。同时，他在天气学分析和高空气象学方面也有重要贡献^[45]。以下将重点介绍贝吉龙在锋面气旋模型和降水机制方面的研究。

5.1 锋面气旋的锢囚过程

如前所述，J.皮叶克尼斯在1919年发表的文章中提出了理想的热带外移动性气旋结构概念模型。贝吉龙曾经注意到冷锋追上暖锋的迹象，并称其为“Sammenklapping”（即“会聚”或“闭合”），但当时他并不确定这究竟是热带外气旋结构的新形式，还是简单的局地现象^[52]。随着观测数据时空密度的逐渐增加，贝吉龙在1919年11月18日的天气图上发现了“锢囚”现象，并描绘出“锢囚锋”（图16）（大致分布在挪威海岸），冷锋向南延伸至瑞典并使夹在中间的暖空气被抬升，气旋趋于消亡。锢囚概念在J.皮叶克尼斯和索尔伯格1922年的文章^[23]中首次正式出现。

5.2 关于冷暖锋标记

冷暖锋可以说是挪威学派提出的标志性概念，其表示方法也经历过一系列演变。最初的冷、暖锋颜色分别是红、蓝色，与现在通常使用的配色相反。罗斯贝在1919年夏季提出颜色互换的意见。为了在黑白打印稿上标注锋面，贝吉龙构思出圆弧和三角符号，建



图16 首张描绘锢囚现象的天气图：1919年11月18日18 GMT^[20]

议J.皮叶克尼斯在挪威学派发表的文章中使用，这个细节在1924年1月8日贝吉龙寄给J.皮叶克尼斯的明信片上可以看到（图17）。

5.3 冷云降水机制

冰核降水理论的提出，是贝吉龙对于观测现象的又一提炼。1911年，A. Wegener就已经提出在冰、水粒子同时存在的云中可能发生冷水在冰晶上迅速凝结的现象。贝吉龙在Voksenkollen山区（海拔约470m，挪威奥斯陆以北）疗养地观测过程中（1922年2月）观测到了该现象。他发现，气温在 -5°C 至 -10°C 时，雾中的过冷水滴会蒸发，水汽在林木树叶上凝结成霜，从而使山区部分区域的雾滴消散；气温高于 0°C 则没有这种现象（图18）。贝吉龙思考冰晶对成云致雨的作用，认为与上述现象相似的凝结过程也存在于高空。在一定温度条件下，由于冰面饱和水汽压低于水面饱和水汽压，空气中的水汽将凝结在冰核上，使空气的饱和度降低；过冷水滴逐渐蒸发，水汽继续凝结，从而使冰粒子迅速增大，下落形成降水。贝吉龙继续观测，希望找到可能支持该假设的现象。1933年，他在里斯本的地测学和地球物理学会议报告中提到冰核降水理论，引起一定关注，相关文章中也着重阐述了该问题^[49]。1938年，Findeisen从实验角度论证了贝吉龙的降水理论，从而形成贝吉龙—芬代森降水过程（Bergeron-Findeisen process）理论，或称魏格纳—贝吉龙—芬代森降水过程（Wegener-Bergeron-Findeisen process）理论。贝吉龙还论述了

强烈凝结在降水过程中的重要性^[47]，提出此类过程中同时存在的两种云系，其一充当凝结核（seeder cloud），通常是冰晶，其二是水汽源（feeder cloud）。欧洲的降水过程时常与暖锋相联系，卷层云、高层云中产生的冰晶会吸收雨层云中的水滴。如果是对流性降水过程，则冰晶大多生成在上升气流中，并在下降时使云水减少。他认为对于云顶温度在 -12°C 到 -20°C 的浅薄降水系统，冰粒子的形成具有不确定性，存在人工降雨的可能性。贝吉龙过程已成为人工降雨的重要理论依据之一。

6 总结

本文介绍了以挪威气象学派创立背景和发展历程，并对该学派中三位重要成员J.皮叶克尼斯、H.索尔伯格及T.贝吉龙的生平经历和研究工作进行了回顾。挪威学派对20世纪大气科学发展的贡献主要体现在早期工作，即气团概念、锋面气旋模型、极锋学说及天气学分析方法等，该理论体系是现代天气学的基本原理和重要内容之一。其突破性意义在于将天气预报建立在清晰的物理概念和原理的基础上，与过去的经验预报方法相比，更容易应用和推广，从而带来了天气预报业务革命性的转变，也为大气环流与大尺度动力学研究提供了思路。同时，该理论体系也促进了中长期天气预报和数值天气预报的实现。在锋面气旋动力学研究的基础上，大气斜压不稳定等理论相继被提出，成为数值天气预报和大气环流模式的理论依据之一。此外，J.皮叶克尼斯在对北大西洋和赤道太

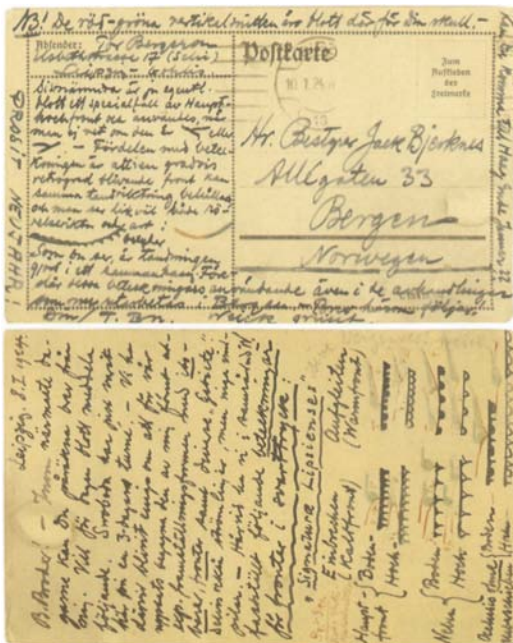


图17 1924年1月8日贝吉龙从莱比锡寄给J.皮叶克尼斯的明信片^[20]

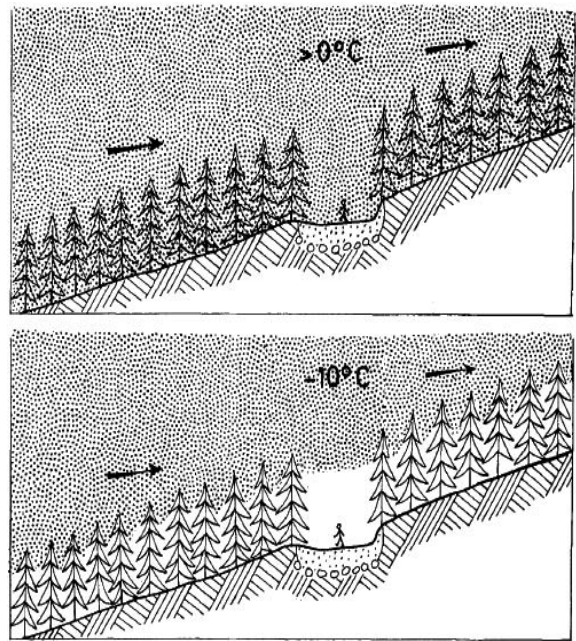


图18 贝吉龙1922年2月在奥斯陆附近的Voksenkollen观测期间绘制的示意图^[50]

平洋海气相互作用的研究,特别是对El Niño现象的研究中也贡献突出,他提出的沃克环流、ENSO概念和Bjerknes正反馈机制影响深远。贝吉龙为天气学分析预报理论的完善和挪威学派理念的传播做出了重要贡献。挪威学派取得卓越成就的原因是多方面的,与新观测技术的推动,社会环境需求以及V.皮叶克尼斯的引导作用密不可分。如今距离挪威学派经典理论的提出已经过去近百年,天气学分析仍是重要的、不可忽视的预报手段,并已成为气象学科的必修课。

参考文献

- [1] 中国大百科全书. 大气科学卷. 北京: 中国大百科全书出版社, 1998.
- [2] Frisinger H. Meteorology before Aristotle. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1971, 52(11): 1078-1080.
- [3] Aristotle. *Meteorologica*. Trans, Lee H D P. Cambridge: Harvard University Press, 1952.
- [4] Bjerknes V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteorologische Zeitschrift*, 1904, 1: 1-7.
- [5] Bjerknes V. The meteorology of the temperature zone and the general atmospheric circulation. *Monthly Weather Review*, 1921, 49(1): 1-3.
- [6] 黄荣辉. 大气科学发展的回顾与展望. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 643-657.
- [7] 黄荣辉. 现代大气科学前沿与展望. 北京: 科学出版社, 1995.
- [8] 黄荣辉, 章国材, 陆则慰. 21世纪初大气科学回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2000.
- [9] 贾朋群. 二十世纪以来气象研究和教育在欧洲和美国的发展. *气象软科学*, 2005, 4: 68-83.
- [10] Namias J. The early influence of the Bergen School on synoptic meteorology in the United States. *Pure and Applied Geophysics*. 1980, 119(3): 491-500.
- [11] Friedman R M. *Appropriating the Weather: Vilhelm Bjerknes and Construction of a Modern Meteorology*. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1989.
- [12] Devik D, Bergeron T, Godske C L, et al. March 14, 1862-April 9, 1951. *Geofysiske Publikasjoner*, 1962, 24: 7-25.
- [13] Eliassen A. Vilhelm Bjerknes and his students. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1982, 14: 1-11.
- [14] Wurtele M G. *Selected Papers of Jacob Aall Bonnevie Bjerknes*. North Hollywood, California: Western Periodicals Co, 1975.
- [15] Eliassen A. Jacob Aall Bonnevie Bjerknes, November 2, 1887-July 7, 1975, *Biographical Memorials of the National Academy of Sciences*. Washington D C: National Academy of Sciences, 1995.
- [16] Firolek A. *Pioneers in modern meteorology and climatology: Vilhelm and Jacob Bjerknes- A selected bibliography*. NOAA Central Library, 2004(1): 1-20.
- [17] Weickmann H K. Tor Harold Percival Bergeron. *Bulletin American Meteorological Society*, 1979, 60(5): 406-414.
- [18] Liljequist G H. Tor Bergeron: A biography. *Pure and Applied Geophysics*, 1981, 119: 409-442.
- [19] Schultz D M, Friedman R M. *Tor Harold Percival Bergeron*. New Dictionary Scientific Biography. New York: Charles Scribner's Sons, 2007.
- [20] Jewell R. Tor Bergeron's first year in the Bergen School: Towards an historical appreciation. *Pure and Applied Geophysics*, 1981, 119: 474-494.
- [21] Schwerdtfeger W. Comments on Tor Bergeron's contributions to synoptic meteorology. *Pure and Applied Geophysics*, 1981, 119: 501-509.
- [22] Bjerknes J. On the structure of moving cyclones. *Geofysiske Publikasjoner*, 1919, 1(2): 1-8.
- [23] Bjerknes J, Solberg H. Life cycles of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geofysiske Publikasjoner*, 1922, 3(1): 3-18.
- [24] Bjerknes V, Sandström J W. *Dynamic Meteorology and Hydrography*. Part I. Statics. Washington, D.C.: Carnegie Institution of Washington, 1910.
- [25] Bjerknes V, Hesselberg T, Devik O. *Dynamic Meteorology and Hydrography*. Part II. Kinematics. German edition. Braunschweig: Springer, 1912.
- [26] Bjerknes V, Bjerknes J, Solberg H, et al. *Dynamic Meteorology and Hydrography*. Part III. *Physikalische Hydrodynamik. Mit Anwendung auf die Dynamische Meteorologie*. Berlin: Springer, 1933.
- [27] 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚. J.皮叶克尼斯及其海气相互作用研究. *气象科技进展*, 2014, 4(5): 78-79.
- [28] Bjerknes J, Solberg H. Meteorological conditions for the formation of rain. *Geofysiske Publikasjoner*, 1921, 2(3): 4-61.
- [29] Gold E. Fronts and occlusions. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1935, 61: 107-157.
- [30] Defant A. Die Veränderungen der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre in den gemässigten Breiten der Erde. *Wiener Sitzungsberichte*, 1912, 121: 379.
- [31] Bjerknes J. Diagnostic and prognostic application of mountain observations. *Geofysiske Publikasjoner*, 1924, 3(6): 4-39.
- [32] Bjerknes J. Exploration de quelques perturbations atmosphériques à l'aide de sondages rapprochés dans le temps. *Geofysiske Publikasjoner*, 1932, 9(9): 3-54.
- [33] Bjerknes J, Palmén E. Investigation of selected European cyclones by means of serial ascents. *Geofysiske Publikasjoner*, 1937, 12(2): 5-62.
- [34] Bjerknes J. Theorie der aussertropischen Zyklonenbildung. *Meteorologische Zeitschrift*, 1937, 54: 460-466.
- [35] Charney J G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J Meteor*, 1947, 4: 135-162.
- [36] Eady E. Long waves and cyclone waves. *Tellus*, 1949, 1: 33-52.
- [37] Kuo H L. Dynamic instability of two-dimensional non-divergent flow in a barotropic atmosphere. *J Meteor*, 1949, 6: 105-22.
- [38] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. *J Meteor*, 1949, 6: 1-16.
- [39] Margules M. Über die Energie der Stürme. *Jahrb Zentralanst Meteor Wien*, 1903: 1-26.
- [40] Bjerknes J. The transfer of angular momentum in the atmosphere. *Scientific Proceedings of the International Association of Meteorology*, 1955, 407-408.
- [41] Solberg H. Integrationen der atmosphärischen Störungsgleichungen 1: Wellenbewegungen in rotierenden, inkompressiblen Flüssigkeitsschichten. *Geofysiske Publikasjoner*, 1928, 5(9): 3-120.
- [42] Bjerknes V, Solberg H. Zellulare Trägheitswellen und Turbulenz. *Videnskabsakademiets Avhandlingar*, 1929, 1(7): 1-16.
- [43] Solberg H. Das Zyklonenproblem. *Proc 3rd int Congr Appl Mech Stockholm*: 1931. 121-131.
- [44] Godske C L. Zur Theorie der Bildung aussertropischer Zyklonen. *Meteorologische Zeitschrift*, 1936, 12: 445-449.
- [45] 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚. 伯杰龙及其在天气学分析和高空气象学的贡献. *气象科技进展*, 2014, 4(2): 74-75.
- [46] Bergeron T. A New Era in teaching synoptic meteorology. *Geografiska Annaler*, 1941, 23: 251-275.
- [47] Bergeron T. De tropiska orkanernas problem. *Installationsföreläsning i Uppsala den 10 april 1948*. [The Problem of the Tropical Hurricanes. Installation Lecture at Uppsala University, April 10, 1948.] *Kosmos*, 1949, 27: 122-160.
- [48] Bergeron T. The problem of tropical hurricanes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1954, 80: 131-164.
- [49] Bergeron T. On the physics of clouds and precipitation. *Proc Fifth Assembly of IUGG, Vol 2, Lisbon, Portugal: Int Union Geod Geophys*, 1935: 156-178.
- [50] Bergeron T. Some autobiographic notes in connection with the ice-nucleus theory of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1978, 59: 390-392.
- [51] Bergeron T. Cloud-Physics research and the future fresh-water supply of the world. *Proceedings of the International Conference on Cloud Physics, August 26-30, 1968, Toronto, Canada. Toronto: 1970*.
- [52] Schultz D M, Friedman R M. *Tor Harold Percival Bergeron*. New Dictionary Scientific Biography. New York: Charles Scribner's Sons, 2007.

大气科学原始创新的学科背景视角

高学浩 陈正洪

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 基于气象科技史的研究, 探索大气科学发展的某些创新规律, 通过对比分析揭示出数学和物理等理科背景对于大气科学的原始创新具有重要作用。这种规律与大气科学自身发展有密切关系, 也是大气科学本质决定的。分析表明学科背景规律对人才培养有重要借鉴和启示。

关键词: 气象科技史, 学科背景, 原始创新, 人才培养

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.005

Original Innovation of Atmospheric Science Based on Discipline Background

Gao Xuehao, Chen Zhenghong

(CMA Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: On the basis of the historical analysis of meteorological science and technology, this paper is characterized by the innovation derived from atmospheric science. It would further promote the original innovation of atmospheric science by the aid of comparative analysis of science background including mathematics, physics, and so on. This characteristic is closely related to the development of atmospheric science and is primarily determined by the nature of atmospheric science. Our results indicate that attention to the discipline background is of significance in talent cultivation.

Keywords: meteorological science and technology history, discipline background, original innovation, talent cultivation

1 引言

气象学经历了漫长的积累后, 在19—20世纪逐渐演变成现代科学意义上的大气科学。大气科学在现代科学知识体系中占有重要的地位, 其学科发展历史展现了这门学科积累和质变的线索, 从大气科学技术史角度研究大气科学, 可以更好地理解原始创新, 而且在通识教育和人文精神培养上具有重要作用。发达国家一些著名的研究机构高度重视科学技术史对原始创新的重要作用。

根据气象科技史的研究, 发现一个规律性的学术现象, 就是在近现代大气科学发展历程中, 很多重大创新成果来自原先从事其他学科领域科学研究的学者, 这批学者转入大气科学领域后做出许多重大原始创新。分析表明这些重大创新与其原先学科背景有直接关系, 分析气象学家不同成长阶段的学历和学科背景, 从科学史视角探索大气科学的发展规律, 这对于未来大气科学发展有独特的启示价值。

收稿日期: 2014年2月26日; 修回日期: 2014年11月10日
第一作者: 高学浩(1958—), Email: gaouxuehao@yahoo.com.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41220001); 中国气象局气象干部培训学院“气象科技史研究”项目

2 现代著名气象学家学科背景分析

大气科学发展至今经历了三个阶段。第一阶段古典大气科学阶段, 以亚里士多德气象学著作 *Meteorologica* (气象学通论) 为代表, 这一阶段主要以哲学思辨和非常朴素的观测方式看待空气现象, 得出的结论具有很多推测和假设。这一阶段的学者普遍具有哲学和博物学知识背景。第二阶段是近代大气科学, 以笛卡尔为代表, 逐渐突破亚里士多德气象学思辨思想的束缚, 注重实际观测和逻辑推理, 气象仪器处于蓬勃发展, 开始形成某些重要的大气科学理论。第三阶段是现代大气科学, 以挪威学派和芝加哥学派为代表, 期间出现了许多重要人物和重大创新理论。

大气科学发展的阶段性证明, 由于现代科学的高度分化, 大气科学的专业化发展需要从“铅与蜡”的业余研究变成“数据和推理”的专业探索。因此在现代大气科学的原始创新中, 气象学家们的原先知识背景和学科培训就显得很重要。现代著名气象学家的学科背景和其大气科学的成就必然存在一定关系, 对其进行枚举和统计分析可以发掘出某些规律。

2.1 国际著名气象学家的数学和物理知识背景

20世纪大气科学发展进程中出现了挪威学派和芝加哥学派, 以极锋理论和长波理论为代表的现代大气

科学知识大厦不断完善。著名气象学家纷纷登场，对大气科学发展做出各自的贡献。国际上著名气象学家的学历背景和其大气科学的重大创新工作存在逻辑关系，这里选择对现代大气科学发展做出重要贡献的代表性学者进行展示和分析（表1）^[1-5]。

对表1经过简单统计和计算，可以分析出表1中100%的气象学家本科学习过数学或物理，数学是必不可少的；50%的气象学家在博士阶段转入学习大气科学。这里不难得出这样一个结论：有物理和数学知识背景的学者转入大气科学领域，将会更快做出成就，也更容易从物理学的角度挖掘大气运动的规律，并用数学物理方程式表示出来。现代大气科学的开拓者们基本上都符合这样的学术成长规律。

每位著名学者的原先知识背景对其在大气科学领域做出重大创新起到重要作用，特别是数学和物理的知识背景几乎必不可少。一方面，数学和物理的理科思维有助于迅速从纷繁复杂的表面现象中概况出事物本质；另一方面，易于利用数学和物理知识把概况的本质简洁表达出来。比如挪威学派的气旋模型和锋面理论提出与皮叶克尼斯父子的长期观察和思考分不开，也得益于物理和数学功底。再如罗斯贝在大气科学多方面做出众多成就，以大气长波理论为代表的每项成就的取得除了他天才的思维，还和他用明确的数

学公式阐述物理过程的能力直接相关。

在一些学者使用数学和物理知识促进大气科学发展的同时，这些重大成就反过来又促进了其他学科的发展，比如洛伦兹提出混沌理论促进了大气科学飞跃，也促进了其他学科的发展，而且带来人类哲学观念的又一次变革；冯·诺依曼促进了计算机在大气科学中的应用，反过来也促进了计算机学科自身的发展。

2.2 中国现代著名气象学家的学科知识背景

中国现代大气科学没有很好改造中国古代传统气象学，多数现代大气科学理论从欧美引进，特别是罗斯贝提出的许多大气科学理论体系传入中国，成为中国现代大气科学的主要理论体系。中国现代气象学家多数有留洋经历，也多数从理科，特别是数学和物理的知识背景中获益。对中国著名代表性气象学家的学历背景分析也能看出这些规律（表2）^[6-7]。

从表2简单统计结果可以看出，100%的中国气象学家本科阶段有理科背景，其中物理、数学是必修课程，经过严格的理科训练。近三分之二的气象学家在硕士阶段转入气象学领域，同样比例的学者在博士阶段继续学习气象学。其中陶诗言是特殊情况，虽然没有硕士和博士学历，但从中国天气预报实践中逐渐成长为一代宗师，其本科的理学背景对其学术成长起到

表1 20世纪国际上代表性气象学家学科背景

国籍	姓名	本科	硕士	博士	工作经历
挪威	V.皮叶克尼斯 (Vilhelm Friemann Koren Bjerknes, 1862—1951年)	数学、物理	/	/	斯德哥尔摩技术大学教授
挪威	J.皮叶克尼斯 (Jacob Aall Bonnevie Bjerknes, 1897—1975年)	/	/	大气科学	Bergen大学地球物理研究所教授
英国	理查森 (Lewis Fry Richardson, 1881—1953年)	物理、化学等	/	/	Eskdalemuir天文台台长
英国	内皮尔·肖 (Sir William Napier Shaw, 1854—1945年)	数学、理学	/	/	大气科学局局长
美国	罗斯贝 (Car-Gustaf Arvid Rossby, 1898—1957年)	数学、物理	数学、物理	/	麻省理工学院，芝加哥大学，斯德哥尔摩气象研究所
美国	查尼 (Jule Gregory Charney, 1917—1981年)	数学、物理	数学、物理	大气科学	普林斯顿大学高级研究院研究员
美国	洛伦兹 (Edward Norton Lorenz, 1917—2008年)	数学	数学、物理	大气科学	麻省理工学院研究工作
荷兰	克鲁岑 (Paul Crutzen, 1933—)	数学、理学	/	大气科学	气象学院计算机程序员，获诺贝尔化学奖
匈牙利	冯·诺依曼 (John von Neumann, 1903—1957年)	数学、化学	/	数学	普林斯顿，借助ENIAC首次实现数值预报
澳大利亚	齐尔曼 (J. W. Zillman, 1939—)	数学、物理、政治科学	大气科学	大气科学	长期在WMO工作，曾任WMO主席

注：工作经历一般选择对其成就影响最大的，由于学制不同或人生经历不同，没有经历的求学阶段用/表示。

表2 20世纪中国著名气象学家学科背景

姓名	本科	硕士	博士	工作经历
蒋丙然 (1883—1966年)	物理	/	气象学	中国气象学会首任理事长
竺可桢 (1890—1974年)	土木工程、农学	/	气象学 (地学院)	浙江大学，中国科学院
涂长望 (1906—1962年)	科学	经济地理学、气象学	地理学	中央气象局
赵九章 (1907—1968年)	物理学	/	地球物理学	中央研究院气象研究所
郭晓岚 (1915—2006年)	数学、地学	气象学	气象学	芝加哥大学教授
叶笃正 (1916—2013年)	理学	气象学	气象学	中国科学院大气物理研究所
谢义炳 (1917—1995年)	理学	气象学	气象学	北京大学教授
陶诗言 (1919—2012年)	气象学	/	/	中国科学院大气物理研究所
顾震潮 (1920—1976年)	气象学	气象学	气象学	中国科学院大气物理研究所

注：工作经历一般选择对其成就影响最大的，由于学制不同或人生经历不同，没有经历的求学阶段用/表示。

重要作用。

中国近代著名气象学家，一般从数学、物理、理学还有地学转入大气科学的较多，这与早年我国一些著名高校重视理学（包括地学）教育有关。良好的物理和数学等理科功底训练使得这些学者在大气科学领域很容易取得突破。

2.3 数学物理背景与大气科学创新的基本规律

考虑到20世纪以前，多数国家的高校和研究机构还没有大气科学的正式学制和专业，而20世纪70年代后，大气科学成为非常普遍的专业。所以选取19世纪末到20世纪区间的著名科学家进行统计分析是合适的，可以考察这个建制化历史过程中，他们的学科背景变化和其大气科学学术成就的关系。

根据可以不用全样本就能得出基本结论的统计规律，没有穷举这一历史时期所有气象学家的情况。同时从反面来验证这种现象，试图寻找非理科背景在大气科学领域做出重大原始创新的学者，但经典性的代表人物比较缺乏。有少数非理科背景学者在大气科学某些领域做出成就，但是要么偏向于综合性研究，要么重新进行理科训练获得理科学位，这也就说明“存在决定意识”，理科背景对于大气科学“硬研究”的不可或缺。

根据对国内外著名气象学家学历背景的统计分析，结合拥有理科背景的人物背景考察，论证了如下一个大气科学原始创新的基本规律：在现代大气科学领域取得重大原始创新的学者，其背景知识结构一般包括数学、物理学和其他理学学科。这样学科背景转入大气科学比较容易，进入大气科学后更容易做出重大的原始创新。尤其数学和物理学是必备知识，这点有较大的可信度。可以把这种创新类型概括为“数理型的创新模式”。

极少数学者情况特殊，比如冯·诺依曼和陶诗言，其中冯·诺依曼虽然没有系统学习大气科学，但是具有深厚的数学功底，所以从计算机角度为大气科学的发展做出重大创新。陶诗言是当代中国气象学的一代宗师，虽然没有硕士和博士学位，但是本科拥有扎实的数学和物理功底。陶诗言学术成长建立在长期的中国天气业务的实践中，经过大量的气象学实践，其实践经验积累大大超出一般气象工作者，他从实践中提出许多重大创新理论。此外，美国“龙卷先生”（T. T. Fujita, 1920—1998年）的著作中很少用到数学公式，而使用大量精美的概念性示意图，却能够很清楚地解释风暴原理，他对数学的悟性为后人称道。这三位著名气象学家说明除了“数理型创新模式”之外，还存在“发现型的创新模式”，如同DNA的发现

一样，同样是重要的原始创新方法。

无论是“数理型”的创新还是“发现型”的创新，都有一个共同特点，就是其知识背景中必然有以数学和物理为主的理科学术训练，而且理论与实践紧密结合。经过物理、数学的训练，分析气象现象的抽象能力和公式构建能力大为提升，更加容易做出重要发现和重要创新。

3 数学和物理促进大气科学创新的逻辑关系

近代大气科学的发展有其自身的规律和特性，之所以物理和数学背景的学者更容易在大气科学领域做出创新，与近代大气科学建制化历程和发展特点有关，这种客观规律使得数学和物理背景更容易发现问题和解决问题。

3.1 现代大气科学发展依赖于自然科学和技术的最新成果

现代大气科学是科学丛林群体突破的一个分支，从别的学科和技术发展中获得养料。由于英国、法国、德国和美国相继完成了工业革命，资本主义在19世纪达到一个高峰，促进了生产和科学技术飞速进步，对整个社会产生了巨大的影响。大气科学的发展离不开科学繁荣的19世纪数学、物理学、测量学等多学科的成果，借助于19—20世纪初自然学科的巨大发展，并结合自身的特点，大气科学的发展逐渐从经验、局部、平面、定性、感性转向理论、全局、立体、定量、理性^[10]。

除了科学，技术的发明对于现代大气科学的促进作用同样非常重要。比如技术发展为大气高空探空仪提供了强有力的技术，20世纪初以卫星探测为代表的探测技术加快了气象观测向全局和立体化的发展。再如高速计算机、气象卫星和气象雷达的出现为数值天气预报、气候模式以及预报技术的高速发展奠定了基础。

现代科学发展一个突出特点就是数学化，越来越多的自然科学分支学科依托最新数学知识得以发展。当代技术的发展走向高、精、尖，更加需要最新物理理论和数学计算的知识。整个当代科学技术发展趋势必然影响到大气科学的发展，要想做出重大科学创新，拥有扎实的自然科学知识是必不可少的，特别是物理和数学背景。所以前文论述的20世纪国外和国内著名气象学家的学历背景分析完全印证了这个规律。

3.2 大气科学问题本质上就是数学和物理问题

现代大气科学的特性和发展规律就是需要把大气现象转化为可以定量求解的物理和数学方程。现代大气科学的开拓者们把握住了本质问题。挪威学派的创始人V.皮叶克尼斯在20世纪初期“大气科学还处于艺术阶段”时，就大胆地将大气科学问题归结为物理

和数学问题,并创造性地将数学物理方法引入研究大气运动。1904年,V.皮叶克尼斯发表了《一种天气预报的理性方法》的演讲,把数学方程式应用到原始大气数据信息中,提出开展数值天气预报的计划。1907年,V.皮叶克尼斯开发了把物理力学应用到大气和海洋环流中的新方法。

科学技术史上的杰出人物都善于从战略角度出发把握未来学科发展的主流方向^[8]。作为挪威学派开创人V.皮叶克尼斯就是一个极具战略思维的科学家,无论是在具体的理论研究方面,还是在整体学科的发展方向上都是如此。V.皮叶克尼斯作为气象学大家的高明之处就在于,把大气科学问题转化为数学和物理问题,从解方程出发,求得特定解,从而做出预报。数值天气预报的出现和成功应用更是把物理和数学嵌进了大气科学大厦的根基中。

3.3 物理和数学最新发展对大气科学有直接的促进作用

现代大气科学建立之初,遍地黄金,杰出的气象学家们非常重视物理、数学、计算机最新成果的应用。物理和数学最新发展对大气科学起到了直接支撑作用。

芝加哥学派创始人罗斯贝,非常注重数学和物理对于研究气象学的重要性,例如他曾经鼓励著名气象学家威利特到普林斯顿大学学习数学、物理最新知识,学成后安排他去Bergen学校学习新的预报理论。罗斯贝本人非常重视物理和数学知识对大气科学的促进作用,在研究高空大气运动时他抓中了长波这一重要特征,取得了理论上的突破。罗斯贝向查尼强调数值天气预报的重要性,并推荐查尼与冯·诺依曼合作,推动了数值天气预报取得成功,这是物理、数学、大气科学、计算机等学科综合取得原始创新的经典案例,也显示了罗斯贝不同寻常的战略眼光^[9]。

从科学技术史角度来看,物理和数学的发展有力促进了大气科学的繁荣。比如流体力学方程成为大气动力学的基础,偏微分方程理论用于建立大气运动和变化的数学语言描述,非线性系统理论使人们认识到随机性背后隐藏的有序性,场论为气象学中的位势理论提供理论工具,概率论为气象的统计预报打下基础,计算数学支撑了气象数值模拟预报技术的实现等。

4 数学、物理背景对人才培养的启示

数学、物理背景对于大气科学原始创新的重要作用,表明对大气科学人才培养需要高度重视物理和数学的专业基础训练。同时也说明从科学技术史角度分析创新规律,对于学科发展战略有独特价值^[11]。

(1) 对优秀大气科学人才的选拔,其知识结构

非常重要。对于从事大气科学前沿研究领域来说,比如组建数值天气预报创新队伍时,应该更多考虑数学、物理学、计算机等学科人才的加入,对数学和物理学的悟性尤为关键。大科学时代,面临大数据的挑战,合理的背景知识结构是推动创新的重要前提。

(2) 从气象学一代宗师陶诗言院士的学术成长来看,没有硕士、博士等高学历,没有国外留学或访学背景,同样可以做出重要成就。气象业务的实践可以在某种程度弥补学历上的一些不足,有助于“发现型”创新型人才的成长;这对于“整天坐办公室”的人员来说,到业务部门接触并积累气象实践非常重要,在实践基础上加强数理功底或许也可以产生一些重要的原始创新。因为理科思维和工作方式的培养会在实践中得到加强。

(3) 随着气象事业发展,未来非气象专业和文科人才将会不断加入气象部门,带来新的创新源泉。对于非气象专业的人才加入气象部门,对其业务培训非常重要,包括预报员培训、气象基础知识培训等。培训内容中,数学和物理学基础知识培训和大气科学其他知识培训同等重要。如果基本数学和物理学知识占到接近一半课程,对于大气科学理解将会更加深入稳固,发掘创新的潜质会更多。

5 小结与展望

从人才培养的综合素质来看,文理交融有助于促进领军人才的成长,数学和物理的理科背景,结合人文精神往往使学者拥有更加宽广的学科视野和洞察力,容易做出重大的原始创新。学科背景对于不同类型的人才成长有重要作用,对于大气科学新领域的开拓和分支学科的延伸也将会产生重要促进作用。这方面的深入研究有待从气象科技史的学科角度进一步探索。

参考文献

- [1] Gold E. Prof. V. F. K. Bjerknes, For. Mem. R.S. Nature, 1951, 167: 838-839.
- [2] Byers H B. Car-Gustaf Arvid Rossby 1898-1957. American Philosophical Society, 1959.
- [3] Allaby M. Encyclopedia of Weather and Climate. New York: Facts on File Inc, 2002.
- [4] Phillips N A. Carl-Gustaf Rossby: His times, personality, and actions. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79: 1097-1112.
- [5] Phillips N A. Jule Charney's influence on modern Meteorology. Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, 63: 492-498.
- [6] 钱伟长. 20世纪中国知名科学家学术成就概览 地学卷 大气科学与海洋科学分册. 北京: 科学出版社, 2011.
- [7] 刘昭民. 西洋气象学史. 台湾: 中国文化大学出版社, 1981.
- [8] 钱永甫, 陈月娟, 王谦谦, 等. 郭晓岚教授对大气科学的杰出贡献. 气象学报, 2006, 4: 405-411.
- [9] 贾朋群, 秦莲霞, 胡晓梅. 罗斯贝和20世纪大气科学的发展. 自然杂志, 2004, 26(3): 163-166.
- [10] 谢志辉, 丑纪范. 大气科学思想史//涂光炽. 地学思想史. 长沙: 湖南教育出版社, 2007.
- [11] 汪前进, 胡维佳. 科技史视角的科技战略研究. 中国科技史杂志, 2007, 28(4): 491-501.

大气科学历史进程中多学科的交叉影响

肖子牛^{1, 2} 叶梦姝¹

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 从科学史与学科分类的视角, 按照历史阶段和融合方式这两个维度, 分析归纳了六组学科领域与大气科学发展的融合与互动: 古代气象学在萌芽阶段曾与天文学和地理学共生; 16—18世纪在因探险活动而兴起的航海学和山地学研究中, 积累了丰富的气象学研究素材; 19—20世纪气象学逐渐吸收了数理科学的成果, 并初步建立了基础理论; 20世纪在计算机技术和遥感技术的推动下, 大气科学在数值预报和气象观测等方面实现了质的飞跃; 20世纪以来, 农业气象、医疗气象等各应用气象领域蓬勃发展, 大气科学得到了更加专业和深入的应用; 21世纪后, 大气科学与政治学、经济学、传播学等社会科学广泛融合, 开启了大气科学崭新的发展阶段。

关键词: 多学科, 大气科学, 科学史, 自然科学, 社会科学

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.006

Multi-Disciplinary Integration in the History of Meteorology

Xiao Ziniu^{1,2}, Ye Mengshu²

(1 CMA Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: This essay analyzes the interaction and relationship between meteorology and some other disciplines of both natural science and technology in science history and the progress of science classification. The science and technology disciplines were grouped by the way of interaction when it happened in the history. There comes six kinds of multi-disciplinary Integration in the history of meteorology: in ancient times meteorology was born together with astronomy geography; from 16th to 18th century, new observation data concerning atmosphere phenomena were recorded and discovered in maritime navigation and mountain studies; in 19th and 20th centuries meteorology gradually absorbed the theoretical achievements from mathematics and physics, especially calculus and hydromechanics, and built up its own basic theory; after 20th century, with the appearance of computers and remote-sensing technology, numerical weather forecast and modern meteorological observation came to reality; also from the 20th century on, more applications of meteorology in agriculture and medicine brought us new knowledge of agricultural meteorology, and medical meteorology; In 21st century, atmospheric science interacts frequently with social sciences such as politics, economics, sociology, communication, which indicates that a new stage of atmospheric science is coming.

Keywords: multi-disciplinary, atmospheric science, history of science, natural science, social science

1 引言

从科学发展的历史进程来看, 所有学科最初都以混沌不分的形态包含于哲学范畴内, 大气科学也不例外。在几乎所有的古代文明中, 天文和气象都被统称为天象, 用以描述所有天上发生的事情。文艺复兴与启蒙运动之后, 最早是天文学和物理学, 然后是化学和生物学等学科逐渐从自然哲学中独立出来, 并随着人类航海、登山等探险活动的增加, 诞生了航海学、山地学、地质学等新的知识领域^[1]。大气科学这门古

老的学科也逐渐明确了自己的研究对象, 并从这些新的知识领域中积累了更多的研究素材。19世纪之后, 知识的分类同我们熟知的现代学科分类已经十分类似了, 几乎所有学科都从数学、物理等基础学科借鉴研究方法, 大气科学还受益于计算技术、遥感技术的大力推动, 实现了客观数值预报与全球天气监测, 发展到了一个新的阶段。在大气科学的社会功能上, 其与医学、农学、交通工程、环境工程等领域交叉, 在服务公众与行业中发挥着越来越显著的社会价值。当天气与气候的问题不仅仅是科学问题, 更成为与政治决策、经济发展、公众生活密切相关的议题时, 大气科学和政治学、经济学、传播学等社会科学的融合又成为了21世纪大气科学新的增长点。

收稿日期: 2014年6月11日; 修回日期: 2014年9月25日
第一作者: 肖子牛(1964—), Email: xiaozn@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局气象干部培训学院“气象科技史研究”项目

本文简要梳理了大气科学在不同历史阶段与不同学科的交融关系，如何从最初的共生萌芽到成熟独立，从吸收引进其他学科的成果到需求引领技术革新，逐渐成为了一个与自然科学和社会科学各相关领域交融渗透、广泛联系的学科，通过以点带面的方式为气象科技史的研究提供一条线索。

2 萌芽期与天文学、地理学共生

在古代文明时期，人类将天气现象和天文现象混在一起认知，并认为天气的规律及变化是对星体运动的响应，可以说，气象学和天文学是在共生中萌芽的。古希腊和古巴比伦的学者用恒星或月亮的运行轨迹、明暗圆缺等来预报天气^[2]。古代中国学者也认为，天气气候是对天文现象的配合，例如《周髀算经》根据天文观测将一年划分出了四时、八节、二十四节气，并认为天文变化决定着地球上四时八节的气象变化，决定着二十四节气的变化。这个时期的天象知识是神圣的、神秘的，被星象师、占星师、司天等少数人掌握，研究天象是为统治者了解“天意”以便顺乎“天命”，祭天祈雨、制定历法、指导农时及战事等。

早期古罗马帝国时代之后，随着人类活动范围的扩大和区域间交往的加深，地理学知识逐渐扩展，在气象学中又加入了地理学的传统，人类开始从更大的时空尺度认识天气现象和规律。古罗马地理学家庞波尼乌斯(Pomponius Mela)是地理气象学的代表人物之一，在他的著作《世界概述》中，他通过推理和计算将全球划分为南北对称的六个气候带，并解释了信风是由于不同纬度接受的太阳辐射不同而形成的固定环流，这是古代地理气象学最重要的成果之一。

天文学和地理学分别代表了大气科学的“动力—因果”和“描述—分类”两种研究范式。在中世纪之后，天文学率先从自然哲学中独立出来，并促成了近代物理学诞生，而气象学和地理学的发展在中世纪和文艺复兴时期都是相对落后的，直到近代才又重新发展起来。现代大气科学和气候学仍然关注天文因子对气候的影响，但其前提假设和研究方法与古代的天文气象学已经毫无关联。

3 在航海等探索实践中逐渐积累

中世纪后“气象”从“天象”中独立出来，其研究对象逐渐明晰，并有了自己的观测仪器和观测方法。在对海洋、高山等地区的探索活动中，积累了基础而重要的气象观测数据，成为了早期气象科学发展的重要研究素材。

15世纪末到17世纪，西欧的商人和科学家为探

索新世界，开展了多次大规模的航海探险，打破了气象研究在空间上的限制，为了解大尺度天气现象的认识奠定了基础。经过了两个多世纪的摸索和积累，人们对信风、洋流、风暴等天气现象有了更加全面的观察，对气象学的认识从局地、分散的天气现象扩展到更广泛空间中相互联系的天气气候系统。英国天文学家哈雷(Edmond Halley, 1656—1742年)在远洋航行中，系统研究了信风和季风，认为太阳辐射是大气运动的根本动力，并注意到了气压读数的变化和风场的关系，阐述了环流理论^[3]；德国博物学家洪堡(Alexander Humboldt, 1769—1859年)首创了世界等温线图，研究了气候带分布、温度垂直递减率、大陆性与海洋气候、地形对气候形成的作用等；美国海军军官莫里(Matthew Maury, 1806—1873年)绘制成了《北大西洋风和海流图》，帮助航海家和商人寻找安全的航线；今天气象工作者熟知的蒲福风级、白贝罗风压定律等也是航海气象学的贡献^[4]。

山地气象学重要的代表人物是瑞土地质学家索绪尔(Saussure, 1740—1799年)，他游历了很多名山大川，其中包括欧洲最高峰勃朗峰。索绪尔在勃朗峰上设立了山地气象观测站，并在该处详细观测天文、气象，调查地质和冰河情况。在《阿尔卑斯山行记》一书中，他提出当地每100m的气温平均递减率为0.64℃，而且随着高度增加空气湿度减小，他还证明了潜热的存在，形成了对大气垂直结构的基础认识^[5]。

大气科学在需求实践的推动下开始形成独立的知识和技能体系。山地气象学和航海气象学这两个交叉领域成为了气象学知识的先锋，使得气象科学不再是空中楼阁，而发展成为了基于大量观测数据和事实的实证科学。

4 吸收数理科学成果建立基础理论

19世纪中叶时，物理学家和数学家在实验和计算中取得了许多重大的成果，力学、光学、热学中的各种现象都能够用数学方法来解释，很多与气象相关的基础理论也相继被证明出来^[6]。瑞士数学家欧拉(Leonhard Euler, 1707—1783年)于1752年和1755年分别推导出了反映质量守恒的连续性方程和反映动量变化规律的流体动力学方程；1834年法国物理学家克拉珀龙(Benoit Clapeyron, 1799—1864年)创立了理想气体状态方程；1849年英国物理学家焦耳(Joule, 1818—1889年)通过实验证明了能量守恒与转换定律；1862年开尔文(Lord Kelvin, 1824—1907年)在理论论证的基础上定量地推导出了干绝热递减率值与饱

和绝热递减率值。可以说，到19世纪中叶时，表征大气基本运动的几个方程的基础理论已经基本完备^[7]。

然而，当时的大气科学并没有立刻消化和应用这些数理基础理论^[8]。在1860年成立的英国气象办公室中，唯一的气象学家勒弗罗伊并不知道这些理论能应用到天气预报业务中来。直到第一次世界大战期间，挪威气象学家皮叶克尼斯及其带领的挪威学派首次尝试用流体力学、热力学方程来描述大气的运动与变化，并推导出了以可测量气象要素为变量的方程组，大气科学才真正吸取了数理科学发展的成果茁壮成长起来。其后的芝加哥学派更加强调数学公式背后的大气运动的物理意义，并用尺度分析等数学方法来判断最主要的动力机制，而非拘泥于数学推导本身^[9]。挪威学派和芝加哥学派将近代关于天气现象的定性解释和零散的知识更新成为了现代大气科学^[10]。

然而大气科学与数理基础理论的融合并没有完结，20世纪的非线性动力学和耗散结构理论等又为大气科学带来了新的视角。几乎每一次大气科学对基础学科理论进展的吸收都会为大气科学带来重要转折或质的飞跃，而且大气运动的复杂现象也促使了基础学科理论的更新和完善，例如洛伦兹的蝴蝶效应推动了非线性动力学的发展^[11]。

5 技术推动实现质的飞跃

随着20世纪上半叶数值预报理论的逐渐成型，当英国数学家理查森（Richardson，1881—1953年）发现了微分方程的数值化近似解法之后，他聘请了上百人进行手工计算，尝试用数值预报的方法算出某地地面气压在6小时后的变化。数日后他得到了结果，竟然是145hPa正变压。虽然理查森的失败主要并不是计算错误，但他的尝试使气象学家们对数值预报的计算量有了直观的认识，计算速度已经成为了制约数值预报发展的最大瓶颈。二战后期美国气象学家查尼（J G. Charney，1917—1981年）和计算机之父冯·诺依曼（von Neumann，1903—1957年）联手，在世界上第一台计算机ENIAC的项目中专门建立了“气象小组”，于1950年在电子计算机上首次成功对北美地区500hPa高度场做出了24小时的预报。随着数值预报业务与资料同化方法的进步，数值预报对计算速度的需求也与日俱增，形成了世界上最先进的计算设备之一应用于气象部门数值预报的“传统”。可以说，没有计算机科学与技术的发展，就没有今天的大气科学^[12]。

20世纪另外一个改变了大气科学面貌的技术是遥感技术，遥感技术利用大气对电磁波的辐射和反射特

性对远距离的对象进行探测，由此诞生了卫星气象学和雷达气象学，全面升级了气象观测的范围和质量，并使更精确的数值预报初始场成为可能。缩短时间和扩大空间是现代技术的两个基本取向，气象卫星可以提供同一时刻全球范围的大气运动状况，天气雷达可以提供当下时刻观测范围内几乎整层的水汽分布及运动状况，刷新了人类能够认识到的大气的空间尺度和时间尺度，推动大气科学在世界天气监测上实现了质的飞跃。

至此，大气科学终于从局地、分散的认识发展成为全球、集中的认识，从感性、定性认识发展成为理性、定量的认识，从静止的、线性的认识发展成为动态的、非线性的认识。

6 应用气象学科迈入新阶段

现代科学具有强烈的实用主义特征，知识的目的是用以解决实际的需求。人类对气象知识的需求起源于近代的航海贸易和军事战争，虽然当时大气科学的理论远不足够精确和完善，但报头的“每日天气报告”栏目已经进入了公众的视野和百姓的生活。20世纪之后，随着大气科学的不断发展，其能够提供服务的对象和产品种类也更加丰富，大气科学在应用的基础上与其他学科领域交叉融合，派生出了农业气象、医疗气象、交通气象、环境气象、航空气象等许多交叉学科。

农业气象是其中起步最早、发展最为成熟的一个交叉学科。农业气象学几乎和农学的历史一样悠久，几乎所有古代文明都根据本地气候特征总结出了自己的一套农业气象经验，这些知识往往以谚语和历法等文化形式表现出来，虽然不够精确，但具有持久的生命力。1735年法国科学家列奥米尔（Réaumur，1683—1757年）发现，可用积温来衡量植物的生长速度，这一学说至今仍是农业气象学的一个重要基础理论。20世纪30—40年代后，现代大气科学和现代农业的再结合为这个古老的领域带来了新的活力，用现代的农业观测手段研究农业生产与气象条件之间的关系，对灾害性天气进行防范措施、进行农业气候区划以服务农业发展与现代化，农业气象学逐步成为一门完整的独立的学科，在经济社会发展中发挥了独特的作用。

医疗气象是另外一个历史悠久的交叉学科。古代中国基于“天人合一”的世界观，往往认为人体健康状况会受到天气气候条件的决定性影响，阿拉伯帝国的学者们也非常重视气象条件和人体健康的关系，例如伊斯兰医学家阿维森纳（Avicenna，980—1037年）

就提出了一系列根据气象条件判断空气是否有利于人体健康的标准^[12]。20世纪下半叶以来,随着人类对环境污染的重视,医疗气象得到了前所未有的关注。尤其是大气逆温条件下发生的严重的空气污染,如1950年代伦敦雾事件以及近年来我国东部城市高发的雾霾事件,又将医疗气象和环境气象推到了舆论的风口浪尖。目前医疗气象的研究方法多以统计分析为主,气象条件作为致病因素及诱发因素的病理分析将是该领域的发展前沿。

7 与社会科学融合推动未来发展

和自然科学相比,社会科学是到了近代才建立起来的十分“年轻”的知识领域。大约在19世纪初,政治学、经济学、法学、社会学等社会科学才建立了各自的概念体系和基本理论。但在整个20世纪,社会科学以极快的速度发展起来,飞速发展和转型的社会形态为社会科学带来了丰富的研究素材。社会科学的目的是解释社会现象、指导社会运行,大气科学在服务现代社会经济、指导百姓生活扮演着不可或缺的角色,因此如何传播大气科学、帮助政府和公众理解和应用大气科学,不仅是大气科学的发展目标,更是社会科学的研究主题。

因此,大气科学与社会学、经济学、政治学、法学、传播学等社会科学的相互渗透可能成为未来重要的知识增长点。在经济学方面,防灾减灾与公共气象服务的社会与经济效益日益凸显,商业天气保险不断应用推广,要使大气科学更好地降低社会运行风险、保障人民生命财产安全,气象经济学的研究十分必要;在政治学方面,虽然以前也有学者对气候变化和文明兴衰的关系进行初步探索,但现代社会的气候资源利用、气候变化减缓及应对要求的行动方案已经远远超出了科学家的工作范围,而是更多地涉及政府管理、公共政策、国际关系等复杂的影响因素,迫切的需要深入研究气候变化的政治学;在法学方面,因为气象信息的制作应用的整个流程需要受到法律的规范,在保证其正常运行的基础上使其应用范围最大化;在传播学方面,大气科学是公众最容易接触到也最容易误解的一门现代科学,如何科学地传播天气信息、提高公民气象科学素养、让天气信息更好地指导公众防灾减灾和生产生活,是气象传播学的研究重点。

8 结语

莱布尼茨曾说:“各门科学的整体可以看作一个海洋,它到处延伸而没有终止和分界,尽管人们想象其中的各个部分,并按自己的方便给它们以名称。”从20世纪后半叶开始,由于研究一些复杂的问题需要

多个学科的知识,学科发展又出现了融合的趋势,一些交叉学科和多学科的研究领域开始大量出现,学科的发展从“合”到“分”,正走向新一轮的“合”,这种“合”不仅是学科发展的趋势,也是学术研究产生重大创新性成果的方式^[13]。

对于大气科学来说,从最初的共生萌芽到成熟独立,从吸收引进其他学科的成果到需求引领技术革新,如今已经成为了一个交融渗透、广泛联系的学科。近年来,传统气象已经向政治气象、经济气象、公共气象、安全气象、资源气象等多学科角度交叉发展,大气科学的研究成果必将成为未来国家政治、经济、军事决策的核心依据,大气科学和社会科学的进一步融合可能成为未来气象领域最有发展潜力的一个增长点,因此迫切需要自然科学家和社会科学家的合作、复合型人才的培养、新的业务和研究领域的拓展。未来地球计划(Future Earth, 2014—2023年)就是最近发起的一个自然科学和社会科学融合的国际研究计划,其目的是为应对全球环境变化给各区域、国家和社会带来的挑战,加强自然科学与社会科学的沟通与合作,为全球可持续发展提供必要的理论知识、研究手段和方法,增强全球可持续性发展的能力,应对全球环境变化带来的挑战。自然科学和社会科学相互的碰撞,有助于提高人的物质生活和精神境界,也意味着科学发展的新时代即将到来。

参考文献

- [1] 伯纳德·科恩. 科学革命史. 北京: 军事科学出版社, 1985.
- [2] Lüdecke C. Astrometeorological weather prediction at the time of the societates meteorological Palatina. Conference of the International Commission on History of Meteorology (ICHM), Germany, 2004.
- [3] Hardley G. An historical account of the trade-winds and monsoons observable in the seas between and near the tropics with an attempt to assign the physical cause of said winds. *Phil Trans*, 1753, 26: 153-168.
- [4] Persson A O. Hadley's principle: understanding and misunderstanding the trade winds. *History of Meteorology* 3, 2006: 17-42.
- [5] 刘昭民. 西洋气象学史. 台北: 中国文化大学出版社, 1981.
- [6] 哈曼. 龚少明, 译. 19世纪物理学概念的发展. 上海: 复旦大学出版社, 2002.
- [7] Feldman T S. Late Enlightenment Meteorology. In: Frängsmyr T, Heilbron J L, Rider R E. *The Quantifying Spirit in the 18th Century*. Berkeley: University of California Press, 1990.
- [8] Gisela Kutzbach. *The Thermal Theory of Cyclones: A History of Meteorological Thought in The Nineteenth Century*. Amer Meteor Soc, 1979.
- [9] 胡永云. 我所知道的芝加哥学派//北京大学物理学院大气科学系. 江河万古流——谢义炳院士纪念文集. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [10] 丑纪范. 大气科学中的非线性复杂性. 北京: 气象出版社, 2002.
- [11] Harper K C. *Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology*. The MIT Press, Reprint edition, 2012.
- [12] 杨萍, 叶梦姝, 陈正洪. 气象科技的古往今来. 北京: 气象出版社, 2014.
- [13] 江晓原. 简明科学技术史. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.

气象科学的发展与时间观变革的初步探索

叶梦姝

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 科学技术的发展往往受到特定社会环境与观念的影响。从科学社会学的角度来看, 气象科技史的发展和时间观念变革关系密切。通过分析古代社会的循环时间观、工业社会的线性时间观中, 人类对天气、气候现象不同的认识规律, 将历史不同时期的时间观念与大气科学发展特点、气象业务开展情况对应起来; 以19世纪天气图的绘制、气候内涵的演变、现代社会对天气预报的强烈需求、人类对待天气和气候的态度这四个事件为例, 阐述气象科技内史及其背后所隐含的时间观; 分析了20世纪之后大气科学研究中对时间性的强调, 以及对时间性问题的处理方式。

关键词: 科学史, 科学哲学, 气象, 时间观

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.007

On Relationship Between History of Meteorology and Ideas of Time

Ye Mengshu

(CMA Training Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: As we know, scientific knowledge of a certain discipline develops in corresponding with social ideas. This paper tries to figure out the relationship between the development of Meteorology and the ideas of Time from a historical perspective of Sociology of Science. It compared the differential weather cognition with weather service under cyclical time conception and linear time conception; the paper analyzed how revolution of social ideas interacted with the scientific progress by recalling four iconic events in the history of meteorology, including the graphing of first weather map, the emergence of modern climatology, booming demand of weather forecast, and the rotational appearance of optimistic/pessimistic attitude among the general public; the essay finally elucidates the emphasis of timeliness in both physics and meteorology in 20th century and how the scientists dealt with the nonlinearity and complexity when they attempted to imitate the motion in the physical world.

Keywords: history of science, philosophy of science, meteorology, ideas of time

1 引言

科学知识社会学的基本问题是科学是如何发展起来的。毋庸置疑, 人类对科学知识的探索和对技术的应用在本质上都是社会行为, 受到生产力发展水平及社会文化观念等的影响。关于在这其中哪些因素起决定性作用, 又在多大程度上影响了科学发展的速度和方向, 科学社会学家的观念有所差异^[1]。以美国社会学家索罗金 (Pitirim A. Sorokin) 为代表的文化学派认为“观念”等文化因素是包括科学发展在内的社会变迁的基本源泉和结果^[2], 与之相对, 以马克思为代表的持唯物史观者认为“生产力与生产关系”是制约整个社会生活和精神生活的“现实基础”。

对于大气科学来说, 影响其发展的物质因素主要有观测技术、信息与计算技术、观测站网的建立等, 影响其发展的文化因素主要有时间、空间的概念, 人与自然的关系, 知识的用途等。简而言之, 前者决定了大气科学能不能发展起来, 后者决定了要不要发展大气科学, 而沟通两者的重要因素就是多元化、层次复杂的社会需求。本文拟就不同历史时期人类对天气气候现象的认识规律与时间观念变革的对应关系做初步探讨。

时间是最重要的哲学概念之一, 对于大气科学来说, 对时间的认识是所有研究无法回避的前提。首先, 接连发生的天气现象表现出明显的时滞相关, 无法和其发生的时间割裂开来认知, 雨过天晴等相继出现的天气现象是人类对时间流逝最直观的认识途径; 第二, 逐日、逐年、年代际和长期的天气气候现象差异巨大, 决定不同时间尺度天气气候现象的物理规律也不尽相同, 人们所能够认知的的时间尺度影响着其所

收稿日期: 2013年8月5日; 修回日期: 2014年5月12日
作者: 叶梦姝 (1987—), Email: yems@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局气象干部培训学院“气象科技史研究”项目

关注的天气气候现象，认为时间的历史只有几百年的人自然不会对千年以上的气候变化产生认知；第三，天气变化、气候变迁和人类活动共存于一个时空，人类可以迁徙，或设计、建造空间，但是却不能摆脱或控制时间；第四，从人类文明发源之始，未知的天气变化就是人类必须面对的挑战和威胁之一，也是关于未来的众多不确定性中最常见的一个，因此对于处于任何发展阶段的社会，天气预报都有巨大的社会价值。

从以上四点可以看出，时间观从很多方面影响着人类如何定义、研究、使用和传播气象相关知识和信息。以下三个部分将分别从古代社会、近代社会和现代工业社会人类的时间观念出发，探讨不同时间观主导下的大气科学发展特点和方向，以及大气科学的研究成果对社会时间观的反向影响，尝试对科学发展与社会观念、技术水平等之间的复杂互动关系进行初步描述。

2 循环时间观与古代气象研究

以四大文明古国为代表的古代人类文明中，最早得到清晰阐述的是时间循环往复的特征，其时间观念以循环观为主。循环时间观强调时间的周期性、稳恒性和无限性。古希腊人是循环观的最典型代表，他们认为，时间是一个周而复始、循环往复的圆圈，过去的事情以后还会继续发生，过去、今天和未来在时间上没有本质区别；古埃及人在天狼星的运动和尼罗河的涨落中，发现了稳定循环的周期年，并最早进行了季节的划分；古代印度将时间的循环由自然世界扩展到了人类社会，他们认为社会生活也是反复进行的，当下、历史和未来没有什么分别，因此也不需要记录已经发生的事情^[3]；古代中国文明很少深入探究时间的本质，其时间观念中既包含线性时间观，也有循环时间观的影子，中国古代认为变化是万事万物的本质属性，中国人寻求的是内心的永恒。

可以说，古代人类对天气现象的记录、传播和研究都十分有限，这一方面受限于古代文明的生产力水平，一方面也受到了循环时间观的影响。

首先，持循环观者相信并珍视永恒，而对瞬息万变的天气现象相对关注度不高。和永恒相比，天气变化可能被看作是较为低级的现象，例如荷马史诗《奥德赛》中曾这样赞美奥林波斯：“奥林波斯，人们说那是诸神之家，永远安全和牢固；没狂风袭击，无暴雨淋漓，雪不飘落在附近，乌云全无”。此外，和自然的历史相比，人类的历史都很短暂，人的一生更是须臾，在万千气象能被研究透彻之前，人类个体甚至

整个种族可能已经消亡和毁灭了。

第二，持循环观者倾向于认为自然界的变化是自给自足的，且不会受到人类活动的影响，因此缺乏气候变化这一概念。例如亚里士多德在《气象学》精确描述了地球上的水循环，他认为降雨和海水蒸发构成了一种平衡，海陆的交替会在淤积和海水侵蚀中不断进行，这种观念和现代人对于河流干涸、湖水枯竭以及气候变化的恐惧形成鲜明对比。

第三，古代循环观倾向于定性认识时间，限制了对天气现象发生发展过程的详细观察和定量描述。古代文明中的时间测量多是以天文现象为载体，人们尚没有把时间和表征其存在的天文现象分离开来，因此没有把天气现象和独立的时间轴相结合。例如，亚里士多德认为时间是质的范畴，只意味着从A到B的一种变化，而变化过程和变化量并不在亚氏的关注范围内。因此，《气象学》研究主要是基于一些浅显的观察，通过逻辑推理，对天气现象的形式因和目的因做出定性的描述，虽然逻辑上能够自洽，实际上却谬之千里^[4]。

第四，循环观主导下人们对片段记录可能拥有的巨大价值的认识往往不够充分。例如，古希腊人认为准确的历史学是不可能的，因为在变化着的世界之中，事物不断地出现和消灭，很难被清楚认知^[5]，因此无论是历法、纪年还是重大历史事件，希腊人都记录甚少，更不用说气候、物候的变化了。虽然在古代中国，官方和民间都有详尽的气候和物候记录，但除了一些表征统计规律的天气谚语外，很少有从天气的记录中总结出的天气变化的因果规律。

昼夜更替、四季循环塑造了人类的循环时间观，同时，日月变化的周期性和天气变化的非周期性，是古代人类面对天气现象时的最大困惑。天文学气象学传统试图将天气现象和规律的天文现象直接关联，即是循环时间观下人类试图理解天气现象的一种努力。

3 线性时间观与近代气象科学的建立

顾名思义，线性时间观与循环时间观相对，线性时间观强调时间流逝的单向性，往往还伴随着测度时间的均匀和有限性。西方文明在继承了古代印度—希腊文明的循环时间观的传统之后，又受到了犹太—基督的线性时间观的强烈影响。文艺复兴和启蒙运动之后，科学知识和人类社会“与时俱进”的发展观念深入人心，精确的时间测度被工业社会的需求推向了极致。19世纪以来，线性观逐渐压倒了循环观，成为了表征现代文化的时间观念^[6]。

科学革命早期的科学研究中就可以看到线性时间观的影响。伽利略的运动定律把时间看成实数一样的连续统(Continuum)，即产生了“时间轴”的概念，把物体的运动过程放到时间轴上去研究，继而定义了匀速运动、加速运动等；化石研究和地理深时(Deep Time)的发现，把人们对时间尺度的认识从几千年、几万年扩展到了数十亿年^[7]，进化论把生物进化史放到了数十亿年的时间坐标中，并规定了严格的时间方向：人由猿进化而来，不可能再循环回去。虽然有很多著名的科学家如牛顿、维柯、尼采等都是坚定的循环论者，但至少在19世纪初，线性时间观作为一种新的社会思想已经得到了广泛传播。

线性时间观为天气现象的观察和理解提供了一个全新的视角。首先，有了可以精确度量的时间轴后，天气现象也可以看成一种运动形式，同一时刻的天气可以绘制成天气图，不同时刻的天气演变则可以在时间轴上进行深入研究，天气的变化过程有了实在的意义；第二，随着人类对不同时间尺度的认识，气候概念的内涵也随之丰富，气候学的研究面貌为之一新；第三，精确度量的时间和准确安排的社会生活，带来了天气预报的强烈需求，极大地促进了大气科学的发展；第四，线性观粉碎了循环观者稳固永恒的世界观念，带来了不确定的未来。自此人类只能依靠过去来定义“正常”，对未来则交替出现乐观主义和悲观主义情绪，或坚信未来能够控制天气、制造天气，或担忧某一天会被极端气候事件所毁灭。

3.1 四维时空与天气图

工业革命之前，人们通过模糊和单一的方式确定自身的存在：对定居的民族而言，地点的确定使时间的流逝成为标注存在的唯一方式；对于犹太人以及其他游牧民族而言，没有稳定的住所，四处漂泊，他们的生活不是通过空间得以开展的，而是通过《圣经》、《古兰经》等传世千年的著作在历史的绵延中展开的。在这样松散的生产生活方式中，时间或空间是天气变化的单独变量，天气系统展开所需要的宏大时空坐标系在古人脑海中并不存在，人类无法在动态的四维时空中全面认识天气现象及天气系统。

19世纪中叶天气图的问世大大延伸了人类认识世界、观察天气的视野，刷新了人类对大气科学的认知。一般认为，电报的发明是促使天气图产生的重要因素，但值得注意的是，电报并不是制作天气图的必要条件，制作天气图的必要条件是统一的时间度量、准确的地图和规范量化的气象要素记录。欧洲大部分地区在16世纪宗教改革之后使用了统一的新历，亚

洲则在几千年里一直使用农历规范的纪年，13世纪24等分昼夜的机械钟已经在欧洲被制造出来，并逐渐由阿拉伯传至东方；16世纪关于世界上大部分地区的地图对于制作天气图来讲已经足够精确；而温度、湿度、气压等基本气象要素在18世纪之前也已经有仪器进行规范测量。然而最早的天气图却是1854年法国天文台长勒弗里埃为研究英法联军在克里米亚战争中的失利而绘制的，比它可能产生的年份至少推迟了百年之久。

究其原因，一个可能合理的解释是，天气图诞生的决定性因素是社会需求而非科学技术。19世纪航海贸易和军事行动对天气预报的强烈需求，极大地推动了对天气现象的观测和研究，欧洲建立了最早的观测站网。勒弗里埃使用书信收集的各地天气信息，天气信息无法赶在天气系统发展之前汇集到一起。19世纪中叶，人类驾驭了以光速传播的电磁波，电报可在几秒之间联通欧洲和美洲。电报的发明彻底解决了这个问题，电报立刻被用在了天气信息的传播中，制作天气地图是电报发明之后首要和最重要的应用之一。此时绘制天气图的目的非常明确，了解天气系统的发展情况，用来预报未来的天气。

天气图相当于表征空间大气运动的气象要素的变化在时间轴上的截面，电报的发明帮助人类用更少的时间换取了更多的空间，连续时间段的天气图扩展了人类认识大气运动的时间尺度和空间尺度，是现代天气学诞生的必要条件。

3.2 气候概念内涵的演变

现代气候描述的是一段时期内气象要素和天气现象的平均或统计状态，其中一段时间可以是月、季、年、百年、万年以至数亿年以上，可以说，明确的时间尺度是所有气候研究的前提。随着人类对自然认识的不断深化和时间观念的不断丰富，气候本身的概念和气候学的研究对象也在一直变化。首先，气候研究由关注不同地区同一时间段的气候，转而关注同一地区不同时期的气候，气候的时间性不断凸显，气候变化的概念逐渐得到认同；第二，从最早关注的日循环的逐时气候变化和年循环的逐日气候变化，逐渐向更短的时间尺度和更长的时间尺度扩展，气候研究的时间尺度不断丰富；第三，气候研究对自然和社会的各类型历史信息的极为重视，气候学的实证主义研究比动力学研究更容易受到广泛关注；第四，人们对气候影响因子的关注由周期性的外强迫逐渐扩大到非周期性的外强迫，循环时间观的影子更加弱化。

英语中“气候(Climate)”一词源自希腊语中的

Klima, 意为倾斜, 意指太阳光线倾斜的角度。古希腊人已经知道气候的冷暖与太阳的入射倾角有关, 极地入射倾角小则冷, 赤道上入射倾角大则暖。可以看出, 以古希腊人为代表的早期气候者在循环时间观的背景下, 假设一地的气候是平稳不变的, 关注的是不同地区的气候差异, 包括气候分类和气候带划分等。而现代气候学体现出强烈的线性观, 强调的是某个特定地区气候的变化, 并在此基础上提出了气候变化和气候异常等概念, 年平均气温的波动曲线不仅是气候学家的研究对象, 也成为了社会关注热点。

对人类来说, 相对较容易察觉到的是气温等要素的日变化和年变化的速率。随着地质学和天文学的发展, 人们有能力研究更长时间段的气候变化, 并形成了更为全面系统的认识。例如气候学家发现, 气温变化的速率是形成大气变量异常波动和异常天气现象的根本原因; 在日、年、年际、年代际、世纪几个时间尺度的周期性循环中, 时间尺度越小, 气温等气象要素的平均变化速率越大^[8], 时间尺度越长, 气候变化的影响越显著; 越大的变化速率, 非线性效应也越大, 在微观世界温度测量的代表性将完全失效, 量子尺度的气温波动规律还有待进一步的科学研究。

线性观影响下的气候变化研究, 导致人类必须求助于历史资料, 来为“正常”和“平均”气候状态下定义。和“天气预报”相反, 很多气候学研究者致力于“天气回报 (Weather Retro-Cast)”, 从冰芯、黏土沉积物、花粉、树木年轮等各类型的地球档案, 以及物候资料、文学作品、私人日记等各类型社会档案中, 尽可能地恢复古代气候^[9]。虽然这些信息存在了数百年, 但在机械论哲学主导自然科学研究的18、19世纪, 历史“是知识的最低形式”, 是数学推理和逻辑分析的婢女^[10], 而现今, 这些信息受到了前所未有的重视。

在气候动力学方面, 最初气候学者关注了气候的周期性循环变化, 并把它们归因于周期性外强迫, 规则性变化是太阳辐射多时间尺度变化以及地球轨道参数变化的结果。当气候学者以“气候变化”的视角思考问题时, 必然需要求助于周期性或非周期性的外强迫, 例如海气相互作用, 以及人类活动等。各种周期性、准周期性、非周期性的外强迫叠加到一起, 影响气候的动力机制变得更加复杂, 单一的、循环的时间轴已经不能满足研究需要。

3.3 精确时间与天气预报

在工业社会之前, 所有人类社会的劳动和休息时间都基本没有规律, 也没有明确的划分, 没有人会为某项活动安排确切的时间和地点。工业社会后, 单向流动和精确计量的时间被植入日常生活, 工作时间和休闲时间被明显地区分开来, 一切都有了固定时间和特殊的场所, 人们在活动的时间安排上更有计划性。在16世纪就被制造出来的较为准确的机械钟表到了20世纪初终于普及到了社会公众, 它暴露了现代社会追求效率的本质和对单调线性增长的依赖。

公共时间的精确度量催生了大众对于天气预报的强烈需求。机械化、每日重复的生产方式和生活方式, 迫使天气——现代生活无法逃避的唯一的自然界因素——也需要按照技术时代的观念被认知。为了一切工作的开展都能“准时”, 保证工作效率, 天气这个不可控因素的影响需要减小到最低, 人们对天气信息的需求越发强烈和细致。钟表创造了一个客观的、数学的、纯粹量的世界概念, 全世界都被放在了一个共同的、单向流逝的时间轴上, “过去”和“未来”被“当下”清晰的分割开来, 当下的意义在于奔向未来, 过去只代表曾经存在, 人们需要实时更新的天气预报, 预报的重要性远远胜于实况, 而当未来成为历史, 预报变成了记录, 就完全不重要了。在普通百姓看来, 昨日的天气或历史天气资料几乎完全没有价值。

3.4 关于天气与气候的乐观与恐慌

循环时间观代表着永恒和安全, 而线性观意味着未来的不确定性。在这里, “一切坚固的事物都烟消云散了”, “自然界不是‘存在着’, 而是‘生成着’并‘消逝着’”^[11], 在公众对大气科学的理解中, 乐观主义和悲观主义的情绪往往交替出现。

20世纪初盛行的未来主义是对单向线性时间观的乐观回应, 它使天气信息很快在大众媒体上站稳脚跟, 成为现代科技服务日常生活的典范。未来成为了先验的, 可以给人无穷无尽的承诺, 虽然大气科学在天气预报上的应用属于“猜测的科学 (Guessing Science)”^{① [12]}, 但是没有人怀疑这种基于科学的猜测准确率会与日俱增。一向严谨的《纽约时报》以《用电子计算机预报乃至控制天气的新计划》为题报道了1946年1月9日计算机之父冯·诺依曼对美国国家气象局具有重大意义的访问^②。气象部门和科学共同

① 加州理工大学Guggenheim Aeronautical实验室的Theodore von Karman命名。

② 原文: Startling but Noteworthy Proposal to Use Von Neumann's Planned Electronic Digital Computer to Forecast and Ultimately to Control the Weather, New York Times, 1946.

体当时也曾向大众传递过这种乐观、野心勃勃的科学主义信念：“气象工作者正在倾注全力向天气进行斗争，要了解它、研究它、掌握它直至利用它，使它按照人类的意图驯服地为我们服务，人工造雨、人工消雾、人工消雹终究要先后实现的”^[12]。

然而，人们对资本主义发展过程中“美好的速度”的夸赞并没有持续很久，资本主义经济危机后未来主义破灭引发的担忧也同样反映到了对天气信息的态度上。在19世纪，人们还觉得地球是年轻的；到了20世纪中期，人们就觉得地球已经要毁灭了。对天气信息报道的时间从过去逐渐转向未来，时间段也越来越精细：过去的信息的所有价值就是用来界定什么是“正常”，以确保明日依旧安全。美国天气频道2006年推出了“明天可能发生（It Could Happen Tomorrow）”系列节目，关于未来大灾难的幻想呼吁观众在“后911时代”为可能的灾难做好准备，学会面对生活中越来越多的风险。

4 科学中的时间性与20世纪后的大气科学

按照对时间的处理方式，可以把科学理论划分成强时间性科学和弱时间性科学。在以牛顿力学为代表的古典自然科学，在机械决定论的指导下寻求对力学现象的解释，其动力学方程中时间参数都是在平方项中出现的，描述或可逆或平衡的过程和状态，其自然概念中并不包括“时间性”这个维度^[13-14]。爱因斯坦的相对论虽然取消了绝对时空的假设，但并没有引入对时间性的强调，相对论强调的是时间的广延概念，把时间和空间对等，宇宙是在引力和斥力的作用下呈现出一个恒定状态的，他也认为“时间性”对于物理并没有本质的意义^①。它们都属于古典自然哲学的范畴，在其指导下的科学理论属于弱时间性的科学。

与其相对应的是强时间性的科学。对时间性的强调是20世纪以来自然哲学和科学哲学最重要的主题之一^[15]，时间性的引入不仅是实验观测所要求的解决方案，更是观念转变的结果。将时间的不可逆性作为一个基本事实，是一种哲学信念的表达，具有强烈的方法论特征^[16]。热力学第二定律是客观世界的强时间性向古典自然科学体系发出的第一次冲击。虽然热力学第二定律本身并不涉及时间变量，但它描述了一个不可逆的、有明确方向的过程，其他内部蕴含着一个时间之矢^[17]。洛伦兹的混沌理论描述了计算数学中初值误差随时间的增长情况，揭示了非决定论的普遍

性^[18]。普里戈金的耗散结构理论将时间性较为系统地引入到了物理世界。

大气科学的研究对象具有很强的时间性。天气变化是永不重复的，大气运动时刻伴随着能量的补充和耗散，包括摩擦、辐射、湍流等非绝热的物理过程，具有内在随机性。20世纪，随着大气科学的理论体系不断成熟，其内部的时间性问题也逐渐凸现出来。在旋转坐标系下的大气运动基本方程组中，只有理想气体状态方程是诊断方程，其他的方程都有时间导数项。这就决定了大气科学在理论上是一门十分复杂的科学^[19]。虽然早在17世纪，科学革命的先驱笛卡尔就已经开始关注了气象这个领域，并把气象学研究作为推广他实证主义科学新方法的范例，但是气象学的革命并未随着天文学、物理学革命一并到来，也晚于之后的生物学、化学革命。这一方面是由于缺少用于研究的观测资料，从本质上来说，也是由于大气运动的种种现象，皆是由大气回归平衡态前后暂时的波动造成，不在经典物理学的研究范畴内。

在天气预报的实用主义需求推动下，大气科学研究者采取了各种技术方法来削弱大气运动中的时间性带来的复杂影响。例如在现代数值预报中，就是通过地转平衡、静力平衡等前提假设在物理上对大气运动过程进行简化，再通过尺度分析等方法在数学上去掉时间导数项，以及缩小资料的时间尺度等技术方法，把非线性偏微分方程组变成一个常系数的线性方程组而进行求解的。这种弱化时间性、求助于决定论的方法在实践中取得了相当大的成功，但也面临着一个两难：如果完全取消时间性，大气运动变成完全地转平衡的、静力平衡的、绝热无辐散的，那就意味着所有的天气现象就不存在了。归根结底，这个无法回避之矛盾的根源在于，目前气象业务的核心预报业务所追求的可预报性，其本质就是要和大气运动的时间性、混沌、非线性相抗衡。

5 初步结论

纵向看历史变迁，从循环的时间到线性的时间、从无限时间到有限时间、从随意流逝的时间到精确度量的时间、从松散的时间到严格安排的时间、从单一尺度的时间到各种尺度时间的综合，随着人类文明的进步，人类对时间的认识也在不断丰富。从本质上来说，时间观的变化是近代人和世界关系的变化的一個具体体现。在现代社会，人类一方面深刻认识到，自

① 爱因斯坦悼念青年时代好友贝索时说：“对于我们有信仰的物理家来说，过去、现在和未来之间的分别只不过有一种幻觉的意义而已，尽管这幻觉很顽强。”^[15]

然先于人类存在，并在自足的独立中运转，人的命运取决于自然^[20]，另一方面更加强烈地向自然索取，利用自然、控制自然。在公众对大气科学的理解和应用上，这种态度表现为面对气候变化和极端天气事件时的无力和恐慌，与对天气预报的强烈依赖和在时间和空间上对天气预报更加精细化的需求。

气象科技史和气象事业发展中的多次重要转向和重大进步，都是基于特定的时间观念而完成的，大气科学在19世纪后半叶至20世纪的迅速发展，以及现代社会中气象部门以天气预报和气候预测、灾害性天气预警、天气信息服务为主的业务格局，正是在线性的、单向的、有限的、精确测量的、多尺度的时间观念中逐渐发展成形。当下，细化观测场等资料的时间维度是以数值预报资料同化技术为代表的大气科学前沿研究的一个重要的突破方向，未来，大气科学的发展将继续从时间观念的革新与对时间性的强调中获得关键性推动。

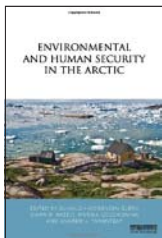
横向看社会因素的复杂互动，在大气科学发展史上，社会观念等文化因素曾经是其发展的主要动力源泉。时间观等社会观念或者直接作用于自然科学研究，主导其研究问题；或者通过催生强烈的社会需求，引发技术变革，提高生产力水平，而反作用于科学发展。理清观念与科学的互动关系，对于理解气象科学的发展，乃至所有自然科学和应用技术的发展，都有着深刻的启示意义。

参考文献

- [1] 默顿R K. 科学社会学. 北京: 商务印书馆, 2003.
- [2] Sorokin P A. Social and Cultural Dynamics. Sargent (Porter) Publisher, 1957.
- [3] 丹尼尔·布尔斯廷. 发现者: 人类探索世界和自我的历史. 上海: 上海译文出版社, 1995.
- [4] 亚里士多德. 气象论宇宙论. 北京: 商务印书馆, 2010.
- [5] 柯林武德. 历史的观念. 北京: 中国社会科学出版社, 1986.
- [6] 吴国盛. 时间的观念. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [7] Gould S J. Time's Arrow, Time's Cycle: Myth and Metaphor in the Discovery of Geological Time. Harvard University Press, 1987.
- [8] 钱维宏. 多时间尺度气候变化. 气象科技进展, 2013, 3(2): 36-40.
- [9] 沃尔夫冈·贝林格. 气候的文明史. 北京: 社会科学文献出版社, 2012.
- [10] 罗伊·波特. 剑桥科学史(第四卷): 十八世纪科学. 河南: 大象出版社, 2010.
- [11] 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局. 马克思恩格斯选集(第三卷). 北京: 人民出版社, 1995.
- [12] 中央气象台服务组编. 收听广播气象的常识. 北京: 财政经济出版社, 1956.
- [13] Savitt S F. Is Classical Mechanics Time Reversal Invariant? The British Journal for the Philosophy of Science. 1994, 45(3): 907-913.
- [14] Hutchison K. Is Classical Mechanics Really Time-Reversible And Deterministic? The British Journal for the Philosophy of Science, 1993, 44(2): 307-323.
- [15] 吴国盛. 20世纪的自然哲学和科学哲学: 实现时间性. 自然辩证法通讯, 1999(1): 2-3.
- [16] Willis F O. The Arrow of Time and the Cycle of Time: Concepts of Change, Cognition, and Embodiment. Psychological Inquiry, 1994, 5(3):69-83.
- [17] Michael C M. Time's Arrow: The Origins of Thermodynamic Behavior. Courier Dover Publications, 2003.
- [18] Lorenz E N. Irregularity: A fundamental property of the atmosphere. Tellus A, 1984, 36A(2): 98-110.
- [19] 丑纪范. 大气科学的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002.
- [20] 埃德温·伯特. 近代物理科学的形而上学基础. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2012.

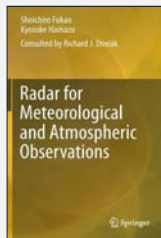
新书架 
NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



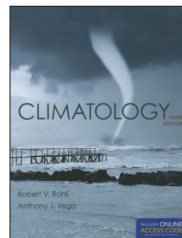
Environmental and Human Security in the Arctic
《北极环境与人类安全》

编著者: Gunhild Hoogensen Gjørsv等
出版者: Routledge
出版年: 2012



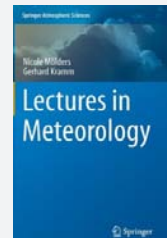
Radar for Meteorological and Atmospheric Observations
《气象和大气观测雷达》

编著者: Shoichiro Fukao等
出版者: Springer
出版年: 2013



Climatology (third edition)
《气候学》(第3版)

编著者: Robert V. Rohli等
出版者: Jones & Bartlett Learning
出版年: 2013



Lectures in Meteorology
《气象学讲座》

编著者: Nicole Mölders等
出版者: Springer
出版年: 2014

1949年以前我国气象台站创建历史概述

吴增祥

(国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 由于时代的特殊性, 1949年以前我国气象台站的创建背景及发展历程非常复杂、曲折, 具有明显的半殖民地半封建的多元化特征。辛亥革命前的气象台站多为外国人所建, 清末年间我国开始在一些农林试验场创办测候所。“中华民国”建立后, 开创了我国气象台站建设新纪元。由于战争、动乱或经济等多方面原因, 气象台站建设艰难曲折, 发展很不平衡。20世纪20—30年代中期, 在民国“中央观象台”、“中央研究院气象研究所”的积极推动下, 气象台站建设曾有辉煌时期。1937年因抗日战争爆发, 许多地方气象台站遭受破坏或被迫停止工作, 国家气象台站建设计划严重受挫。为军事气象保障服务的国防、航空气象台站, 成为这一时期我国气象台站网的主体。

关键词: 气象台站, 建设

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.008

A Brief Introduction to the Establishment of Meteorological Stations in China Before 1949

Wu Zengxiang

National Meteorological Information Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: Due to the peculiarity of the times, before 1949 there were full of ups and downs in the making of meteorological stations of our country in terms of the background of their establishment. Their development progress is very complicated, bearing multi-elementary characteristics of semi-colonialism and semi-feudalism. Before the Revolution of 1911, meteorological stations were mostly set up by foreigners. Towards the end of the Qing Dynasty, weather observatories were run by some agriculture and forest experimental yards. After the founding of “the Republic of China”, meteorological stations in China ushered in a new era in terms of their construction. Owing to wars, social unrest, shaky and unstable economy, the construction course was tortuous and unbalanced. Not until the middle of the 20’s and 30’s of the 20th century did meteorological stations enter into a prosperous period, thanks to the active promotion of “the Central Observatory” and “the Meteorological Institution of the Central Research Institute” at that time. The War of Resistance against Japan broke out in 1937. As a result, many local meteorological stations were destroyed or forced to stop their operation. However, meteorological stations for the purpose of national defense and aviation or in the service of militarily meteorological safeguard became the mainstay of the meteorological station net in that period.

Keywords: meteorological stations, establishment

1 辛亥革命前的气象台站多为外国人所建

1.1 外国传教士把西方近代气象仪器和观测方法传入中国

我国近代气象观测起步较早。17—18世纪, 温度、气压、湿度、雨量、风速等气象观测仪器在欧洲陆续被发明和应用, 气象观测台站应运而生。不久, 随着中西文化交流及商贸往来, 近代气象观测仪器和观测方法开始传入我国。

明万历年间, 中国实行开教, 西方传教士开始络绎不绝来到中国。这些传教士大多受过西方近代高等教育, 既是传教士, 又是科学家, 他们将基督教思想

传播给中国的同时, 也带来了西方近代科学和文化。其中, “观天”、“修历”是西方传教士最重要的活动领域, 他们以“钦天监”为活动中心, 积极传播西方近代观象理论和方法, 对中国的天文、气象科学有着重要的影响。从中国气象科学发展史来看, 明清时期正是我国古代气象科学与西方近代气象科学的交融时期, 也是我国近代气象观测的开创时期。

最早把西方近代气象仪器和观测方法传入中国的是比利时传教士南怀仁(Ferdinand Verbiest), 他于清顺治十五年(公元1658年)来到澳门, 次年进入内地传教, 1660年奉召进京纂修历法。当年, 他在呈献给顺治皇帝的贡品中, 就有西方早期的温度计和湿度计。清康熙八年(公元1669年), 南怀仁担任钦天监监副, 次年受清圣祖之命改建北京古观象台。期间,

收稿日期: 2014年3月17日; 修回日期: 2014年3月31日
作者: 吴增祥(1945—), Email: zll_352@126.com

他制造了包括“验燥湿器”（湿度计）和“验冷热器”（温度计）等天文气象仪器，并在他撰写的《灵台气象志》中，详细介绍了温度计、湿度计的制作、使用和校验的方法。

现存的气象观测记录表明，最早在我国使用温度计进行观测的是法国传教士宋君荣（Antoine Gaubil），也就是竺可桢先生在《前清北京之气象记录》中所说的哥比神父。他于1743年7月开始使用酒精温度表在其北京寓所进行气象观测，并留下了大约250组的气温观测记录^[1-2]。此后，法国耶稣会及俄国东正教会教士在北京、上海等地一些教堂陆续进行气象观测活动。

清道光二十一年（公元1841年），俄国东正教会组织在北京开始进行连续的气象观测，观测的气象要素有气压、气温、湿度、风向、雨/雪量、天空状况等，这是我国最早定时、系统的气象观测。1849年俄国东正教会正式建立“北京地磁气象台”（39°57'N、116°28'E），为外国教会组织在中国创建的第一个气象台，其观测记录从1841年开始，断断续续一直延续到1914年。

清同治四年（公元1865年），巴黎耶稣会神父在上海董家渡修道院进行气象观测。1872年12月，在徐家汇建立观象台。次年7月，迁入新址（31°12'N、121°26'E）进行气象观测。徐家汇观象台的机构随着科研、业务的发展，先后建成外滩、佘山、葭葭浜三个附属台。其观测业务、科研领域广泛，涉及天文、气象、地磁、地震、授时、重力、大气物理等科学，成为远东和国际著名的综合性观象台。同时，上海徐家汇观象台也是近代西方教会组织及外国殖民者在华进行气象科学交流和气象情报活动的中心，对我国近代气象观测和气象科学事业有着重要的影响。徐家汇观象台的气象观测项目从少到多，从地面到高空不断拓展。自1872年建台以来，气象观测记录从未中断，一直延续到建国后，是我国近代气象观测连续记录最长、保存最完整的气象台站。

除了北京地磁观象台、上海徐家汇观象台外，据不完全统计，从19世纪中叶至20世纪40年代，外国传教组织、学校和传教士在我国设立的气象观测站点有80余处，其足迹遍布大半个中国^[3]。其中，许多教堂是为徐家汇观象台所托进行气象观测，有的地区的气象观测持续数十年。他们多数按照徐家汇观象台的要求，定期将观测记录传报到徐家汇观象台。除提供徐家汇观象台天气预报外，由徐家汇观象台汇编出版，并为西方教会国家定期寄发气象资料。

1.2 外国殖民者建立的气象台站

16世纪初，欧洲殖民主义者到东方寻找殖民地。明嘉靖年间，葡萄牙人首先来到我国，以租借为名占据澳门。此后，西班牙、荷兰、英国、法国殖民者接踵而来。18世纪，英国逐渐垄断了对华贸易。为了榨取中国更多的财富，英国把鸦片贩运到中国，并于19世纪中叶前后两次发动侵略中国的鸦片战争。由于清政府的无能，被迫与英、法、美等国签订一系列不平等条约，使我国丧失了许多主权，从此独立的封建的中国逐步沦为半殖民地半封建社会。此后，沙皇俄国、德国、日本等列强也不甘落后，通过各种借口，武装入侵中国，争夺势力范围。他们在强占的租界地或势力范围内，建立了各种类型的气象观测站、测候所，收集气象情报，直接为列强的军事、航运及商贸等活动提供气象保障服务。据笔者不完全统计，辛亥革命前外国殖民者曾在我国建立的气象台站有上百个（含清政府海关及港澳台气象观测站点）。这些台站的大部分观测记录比较完整，观测年代比较长，连续气象观测30年以上的台站有70多个。其中，最为著名的有港英政府建立的“香港皇家天文台”和德国海军建立的“青岛观象台”。

香港天文台（22°18'N、114°10'E）于1884年元旦开始正式观测，1912年由英皇佐治五世颁赐予“香港皇家天文台”称号。其业务范围除了气象观测、地磁观测和天文观测外，在地球物理学、天文学、海洋学、航空气象学、空气污染气象学等科学的观测、研究和服务方面，做了大量的、有成效的工作，为近代远东著名的气象台之一。

青岛观象台（36°04'N、120°19'E）于1898年3月1日开始气象观测，始称“青岛气象天测所”，1911年1月更名为“皇家青岛观象台”。自建立以来，归属经历几次变动，但其气象观测记录仍然比较连续、完整。青岛观象台的业务广泛，特别是在国人掌管期间，工作涉及天文观测与报时、气象观测和预报、农业气象与物候观测、海洋观测和海洋生化研究、地震及地磁观测等多学科。青岛观象台是中国气象学会的诞生地，是我国近代地球科学观测、研究和科学普及教育的重要机构。

1.3 殖民色彩浓厚的海关气象观测站

气象和船舶航行的安全有着密切关系，为了获取我国重要口岸的气象情报，清政府海关总税务司决定在各地海关机构及沿海重要灯塔站进行气象观测。虽然当时海关归属清政府总理各国事务衙门领导，但是此时的中国海关实际上已成为一个外国资本主义和中

国封建主义相结合、由外籍人员进行管理的畸形的行政机关。海关气象观测站也不例外，是近代中国半殖民地半封建社会里由外国殖民者越俎代庖的产物，殖民色彩尤为浓厚。

清同治八年十月（公元1869年11月），时任清政府海关总税务司赫德（Robert Hart，北爱尔兰人）提出在我国沿海、长江重要口岸海关及近海岛屿灯塔附设气象观测站的建议^①。此后，清政府海关及民国政府海关相继在我国沿海重要口岸、岛屿（含台湾地区）及长江沿岸、边关商埠城镇建立气象观测站70多处，其中连续观测记录30年以上的达46处^[3]。具体有：牛庄、秦皇岛、塘沽、猴矶岛灯塔、芝罘、成山头灯塔、镆铘岛灯塔、镇江、佘山灯塔、吴淞灯塔、花鸟山灯塔、大戢山灯塔、小龟山灯塔、宁波、镇海、北渔山灯塔、温州、芜湖、汉口、宜昌、岳州、长沙、九江、东涌岛灯塔、东犬岛灯塔、福州、牛山岛灯塔、乌邱屿灯塔、北碇岛灯塔、厦门、青屿灯塔、东碇岛灯塔、汕头、石碑山灯塔、鹿屿灯塔、南澎岛灯塔、表角灯塔、三水、广州、琼州、临高、北海、梧州、龙州、腾越、重庆。

有文献认为，台湾地区气象观测“最早始于清光绪十一年（1885年）”，“1885年，首任台湾省巡抚刘铭传开始创办气象观测站”^[4]。根据海关气象档案资料，台湾地区早在1885年之前就有气象观测记录。其中淡水气象观测始于1879年12月，安平、渔岛、基隆、南角等地的气象观测资料也早于1885年。刘铭传是1884年以“巡抚衔”被清政府派驻台湾，可见这些气象观测站并非刘铭传所创。台湾地区早期的气象观测站，是清海关气象观测网的组成部分，与大陆的海关气象观测站同为一脉。由于“中日甲午战争”失败，日本于1895年占领台湾，台湾地区的海关气象观测也就此终止。

海关气象观测是在海关总税务司直接管理下进行的，主要为船舶航运服务。19世纪，海关气象观测还缺乏统一的制度，各气象观测站使用的仪器、观测要素和观测时次也不尽相同。1903年，海关气象观测工作明确由海关总署海岸稽查处统一管理。1905年首次颁发《海关气象工作须知》，要求各海关气象观测站执行，从此海关气象观测有了一个系统的制度。这个《海关气象工作须知》后来经过几次修订，一直延用到20世纪40年代。由于海关严格的管理制度和优越的

通信条件，使各地海关和灯塔气象观测形成了一个比较完整和独立的气象观测网体系。

海关气象观测站除了日常气象观测，还担负着编发气象报告和发布大风信息警报的任务。徐家汇观象台进行天气预报绘制的东亚地区天气图，其中有许多气象资料是来自海关气象观测站。海关气象观测记录按月编制成报表，寄送海关总署、上海徐家汇观象台及香港、东京、马尼拉等地区。通过多年的观测，形成、积累了大量的历史气象资料，其观测记录年代之长，保存资料之完整，在近代我国气象观测史上是少有的。

2 我国创建气象台站历程艰难曲折

2.1 我国最早创建的气象台站始于清末年间

19世纪90年代中日甲午战争后，中国民族危机日益加深，民族资本主义不断发展，资产阶级改良思潮逐渐高涨，一股兴农兴邦的社会潮流成为维新变法的一项重要内容。为了仿效西方、日本等先进国家的农政管理经验，推行农业变革，清光绪二十九年（公元1903年）9月，光绪皇帝根据康有为等人的建议，颁布诏令在京师设立“商部”（后称“农工商总局”、“农工商部”）。为了“振兴农务”，商部提出“清地亩，辨土宜，兴水利，广畜牧，设立农务学堂、农事试验场”、“凡土质之化分，种子之剖验，肥料之制造，气候之占测，皆立试验场，逐一讲求，纵人观览”^[5]，积极倡导各省设立农事试验场，推广和传播农业新科技，发展近代新型农业。清光绪三十四年（公元1908年）3月，农工商部“奏定推广《农林章程》二十二条，酌定官办、民办、官民合办三等办法，责成各该地方官划定荒区，测验气候、土性，绘图、列表，报部核夺”^[6]。此后，国立农工商部农事试验场和省立农事试验场、农业专科学校，私立农场相继建立。为农业生产和研究试验，一些农事试验场在场内附设有测候所，进行气象观测，以测气候之变化。许多农科学校也开办气象、气候课程，有的还设有测候所。这些测候所，可以说是近代我国国人最早创办的、利用气象仪器观测的、直接服务于农业的气象台站。

晚清年间，有多少农事试验场设立了测候所，已很难考证清楚。从清廷商部1903年颁发的《通飭各省振兴农务》要求“气候之占测，皆立试验场”，及1908年颁发的《农林章程》二十二条的旨意看，已

① Circular No. 28 of 1869, Inspectorate General of Customs, Peking, 12th November, 1869.

把测候工作列入农林机构试验场的重要任务之一。宣统元年（公元1909年），宾州（今哈尔滨）农林试验场制定的《农林试验场章程》总纲第四条明确规定：

“试验农林须有气候之实验。本场又附设测候所，实测温度、湿度、雨雪量、风霜信等，随时报告，以便农林之试验及农家之防备”^①。章程还具体规定了测候员编制、职责的条款，如：“第九条测候员一员。关于了望、测候及列表、报告等，凡属于测候所全部分事皆其专责。……第三十八条测候员须将按日实测之气候与变相等，随时列表报告，并征集他处之报告，汇列比较。……”在章程中，还附有详尽的《测候报告表》格式。由此可见，当时对测候工作的重要性，已有充分的认识，在农事试验场设立测候所，属非个别所为。

作者查阅了许多历史气象档案和文献资料，目前已发现并有文字在案的晚清时期农事试验场或农林学校设立的测候所有：南通博物苑测候所、迪化（今乌鲁木齐）农林试验场测候站、宾州（今哈尔滨）农林试验场测候所、广东省地方农林试验场测候所、福建农事试验场测候所（福建省立高级农业学校测候所）、农工商部农事试验场测候所（北京）。

应该指出，以上测候所只是当时各地农林机构设立的测候所的一部分，其余还有待进一步挖掘。由于农事试验场的测候工作，主要是为农业试验、研究之用，晚清政府还没有设立一个专门气象机构，统一管理和指导这些测候所工作。因此，各测候所的气象观测工作因地制宜，并不规范，观测记录未能有效地保存。

2.2 民国北洋政府机构创办的气象台站

1912年1月，“中华民国”南京临时政府成立，蔡元培先生出任临时政府教育总长。在蔡先生的提议下，南京临时政府参议院决议设立“中央观象台”。11月，“中央观象台”在北京建国门古观象台遗址成立，隶属于北京临时政府教育部，高鲁先生首任台长。“中央观象台”下设天文、历数、气象、磁力四科，集天文台、气象台、地球物理台及经纬局为一体，为近代我国官办的第一个综合性国家观象台，是近代中国气象事业发展史上的重要里程碑。

1913年7月，“中央观象台”气象科成立，蒋丙然先生出任科长。为使气象观测工作标准化，蒋丙然先生依据万国公用标准准则，撰写了《气象观测规程》，规程明确规定了气象观测的时间标准、时次、各气象要素的单位及精度等。从1914年元旦起，正式

开始气象观测，观测结果定期在“中央观象台”《气象月刊》发布。除定时气象观测外，“中央观象台”气象科于1915年开始每日绘制天气图，试作天气预报，次年正式向社会发布北京地区天气预报，第一张中国人发布的天气图，即为蒋丙然先生所绘。

“中央观象台”为加强气象测候工作，于1918、1920年分别向教育部提出了全国气象分区计划及《扩充全国测候所计划书》，提议“以省为单位，每省设一总站及若干测候所，并普设测雨站”。与此同时，举办为期3个月的气象训练班，培训了30多名测候人员，为扩充测候所培养人才。

1913年，张謇先生出任北京政府农林、工商（后合并为农商部）总长兼全国水利局总裁。他积极提倡新学，以期科学救国、实业救国。他意识到，农业与气象有着密切的关系，要发展新农业，必须重视农业气象工作。在他的领导下，农商部积极推进全国农业气象工作，至1920年前后在农商部农事试验场设立观测总所，在直隶省及各省农林机构设立了观测分所26处^[3]。

此外，北洋政府水利、航空、海军等部门也相继设立水文、航空、海洋气象观测站，我国的航空气象、水文气象事业也从此应运而生。其中北洋政府海军部海岸巡防处于1926年7月在东沙岛设立气象台，这是我国海军首建的第一个气象台。东沙岛位于南海航海要道，位置十分重要，正如蒋丙然先生所说，“英法殖民者久欲越俎代庖，海军部乃决于该岛设立灯塔及气象无线电台，以免外人有所藉口，亦我国气象事业中之伟大者也”。东沙岛气象台“设备齐全，附有无线电台，收发气象电报，对于飓风报告，尤为重要，香港、菲律宾各台均视此台成立，为对于东亚气象工作，有极大之贡献”^[7]。

由于北洋军阀统治，各派系混战，导致国家财政枯竭，气象事业发展的良好开端，受到了严重的挫折。“中央观象台”测候所建所计划最终因人员、交通、经费等原因难以实施，最终只设立了张北、开封、西安三个测候所。许多地方农林试验场因经费短缺，未能正常维持，逐渐荒废，其附设观测分所也大多于1920年前后停止工作，只有少数台站观测延续下来。

2.3 “国立中央研究院气象研究所”、“民国中央气象局”的气象台站网建设

南京国民政府成立后，1929年1月“国立中央研究院气象研究所”正式成立，竺可桢先生首任所长。

① 哈尔滨市人民政府地方志办公室. 农林试验场章程.

“国立中央研究院气象研究所”是我国第一个国家级气象科学研究机构，也是未冠名的全国气象行政中心。在竺可桢所长领导下，气象研究所对近代中国气象台站建设、气象观测、天气预报、气象科学研究，以及气象专业人才的培养方面，做了大量的工作，为我国现代气象科学的发展打下了良好的基础，做出了卓越的贡献。

在气象台站建设方面，气象研究所除了在南京北极阁建立气象台，在各地设立28个直属测候所外，竺可桢先生还提出了《全国设立气象测候所计划书》。他认为，气象台站建设不仅是为了气象学术研究，而且关系到国计民生和国防大业，“有裨民生利益与幸福也”，对农业生产、航海航空、防灾减灾、破除迷信、社会教育无不有益。他提议“我国地方辽阔……如欲得气象上之精确调查统计，则全国至少须有气象台十所，头等测候所三十所，二等测候所一百五十所，雨量测候所一千处”。为此，他提出了三年计划和十年计划，希望在十年内完成预期的气象测候网建设。

为了促进全国气象测候网的建设，竺可桢先生及其领导下的气象研究所与其他系统有关单位积极合作，在创建测候所、人员培训、仪器代购、业务指导等方面做了大量的工作。1930年4月，竺可桢先生呈请“中央研究院”出面，在南京召开了全国气象机关联席会议（又称“全国气象会议”），研究和商讨全国气象测候事业发展工作中共同关心的一些重大议题，其中包括：统一气象电码、无线电气象电报转发、天气预报术语及暴风警告方法、统一气象观测和气象报告时间、气象观测仪器标准及计量单位、增设测候机构等重要议案。此后，“中央研究院”与气象研究所又于1935年4月、1937年4月在南京召开了第二届、第三届全国气象机关联席会议，这对当时全国气象测候网建设和气象观测工作的规范化，起到了重要的促进作用。

在竺可桢先生的积极推动和气象研究所的极力帮助、指导下，全国测候站网及农林、水利、航空等专业气象台站建设蓬勃发展，至抗日战争爆发前夕，民国“中央政府部门”及地方政府所属机构相继建立了一批气象台站，其中江苏、山东、四川等一些省份，基本上实现县县都有测候所，形成了较为密集的测候站网^[3]。

1937年抗日战争爆发，许多气象台站遭受破坏或停止工作，气象研究所的全国气象测候网建设计划实施受到严重挫折。

1941年10月，南京国民政府在重庆成立“中央气

象局”，为“全国民用气象之最高机关”，负责“掌理全国气象行政及技术事宜”。民国“中央气象局”成立后，采取“一面接收、一面增设”的策略，积极进行全国测候网建设。在民国“中央气象局”建立初期，因抗战时局所限，只好“人少事繁”，工作“勉力维持”，“所管辖区域，祇及西南诸省”，直属气象台站只有29处，督导测候所68处。抗战胜利后，“测候业务，正谋开展”，民国“中央气象局”制定了“五年建设计划”，计划五年之后，成立头等测候所32所、二等测候所119所、三等测候所355所、四等测候所1500所、雨量站30000所，“凡三等以上之测候所均备有水银气压表与气压计及电信设备，期能准时发出气象电报”、“如此数量之测候所拟分十一个气象区，由各该区之区气象所承本局之命，直接管理之”。1947年，吕炯局长又提出了“中央气象局业务纲要及改进计划”。可是，在解放战争的枪炮声中，随着国民党军队的节节败退，民国“中央气象局”已似风中之烛，维持旧有的事业已属不易，更无能力来完成和实现这些计划和规划。

2.4 著名的院校及民办气象台站

我国近代有许多农林专科学校、航空学校和一些综合性大学的农科、理科开设有气象学、气候学，为了便于教学和学生实习，专门设立有气象台或测候所。这些院校气象台站大部分观测仪器设备先进、观测方法规范、观测记录完整，不少院校还专门出版气象专刊，定期向社会发布气象观测资料。

据不完全统计，近代中国院校设立的气象台站有30多所，其中北京清华大学气象台、南京金陵大学气象观测所、南京东南大学气象观测所、浙江大学农学院测候所、厦门大学气象台、武汉大学测候所、广州岭南大学裴文气象台、广州中山大学农学院测候所、成都华西大学测候所、四川大学理学院测候所、重庆大学测候所、西北农学院测候所等院校气象台站，在近代中国气象台站中都是非常著名的。

1906年，清朝末代状元、教育家、实业家张謇先生在江苏南通创建博物苑，内设测候室，从日本自购气象仪器进行气象观测。1913年，他成立南通甲种农业学校，开设气候课程，并将博物苑的观测仪器移至农校，设立测候所。1916年，创建南通军山气象台，“为中国私家气象台之鼻祖”。南通军山气象台规模宏大、设备齐全、工作杰出，在国际上负有相当声誉，曾被列入英国出版的《国际气象台名册》中。由于张謇先生对气象事业做出的贡献，1924年10月被公推为首届中国气象学会名誉会长之一^[8]。

南通军山气象台观测资料除每日定时传报徐家汇观象台、北京“中央观象台”外，还定期刊印出版气象月报、季报和年报，并与四十多个国家进行交换，深受国内外气象同行的赞誉。

1911年，云南省气象、天文、地震事业的先驱陈秉仁（又名陈一得）先生自制或购买一些简单仪器，在其寓所一间小楼上设立瞭望台，以夫人为助手，定时进行观测和记录气象变化。1927年7月，在昆明正式创办“昆明私立一得测候所”，又称“昆明市代用气象测候所”。测候所设主任1人（陈一得亲为主任）、测算员2人、助理员1人，均由陈一得先生家属兼任。从1930年开始，每年定期编发《昆明市气象年报》、《昆明市代用测候所概览》等，对各项气象要素都做详细整理出版，并发送昆明市政府、“国立中央研究院气象研究所”、徐家汇观象台等著名气象台站。

2.5 抗战时期的军事、航空气象台建设

1928年11月，南京国民政府成立军政部，直隶行政院，掌理全国陆海空军行政事宜。军政部下设有总务厅、陆军署、海军署、航空署、军需署、兵工署等机构。1929年7月，海军署改组为海军部，并直隶行政院。1933年11月，航空署改隶军事委员会。

军政部航空署成立后，设置专门人员主管空军气象工作，并在南京太平巷建立航空测候所。1930年底，航空署迁往杭州，1933年又迁至南昌，并在南昌建立测候所。1934年夏，航空署扩编为国民政府航空委员会，成为国民党空军系统的最高行政机构。南京、南昌两测候所分别更名为航空委员会第一、第二测候所。

1937年“七七事变”后，为适应抗日形势需要，航空委员会进行改组，成立空军指挥部，在参谋处下设有气象科（第四科）。同年8月，“中央航空学校”西迁昆明，后改名为昆明空军军官学校，在校设有测候训练班和气象台。

1939年1月，航空委员会迁至重庆，鉴于气象情报和预报对航空飞行活动的重要性，成立了航空委员会气象总台，负责向航空委员会及有关部门提供气象情报和气象预报，并综管全国各地空军气象台站的技术督导工作。为了配合联军对日作战，航空委员会在全国各军事重镇设立16个空军总站，总站设有测候区台，测候区台下设若干机场测候台，并在我国西南地区建立了较为密集的测候站网，以开展气象观测和空军飞行气象保障服务。

1941年12月8日珍珠港事件发生后，美国向日本

宣战。为了美国太平洋舰队对日作战需要，美军方与国民政府军事委员会调查统计局（简称“军统局”）商讨有关交换军事情报、培训中方人员、训练游击队挺进日军后方以及协助美军在中国沿海登陆作战等事宜。为此，于1943年4月正式成立了中美特种技术合作所，简称“中美合作所”。鉴于气象情报在战争中的重要作用，开展气象技术合作成为“中美合作所”重要的核心项目之一。

“中美合作所”的气象技术合作，主要有两方面：一是成立气象训练班，培训气象人员；二是建立气象总站和气象台站，进行气象观测和天气预报，为美军提供气象情报，实施气象保障服务。“中美合作所”前后培训了二百多名气象人员，相继在全国设立了165个气象台站和通信电台^[9]。为同盟国及美国太平洋舰队打击日本军队提供了大量的气象情报，对抗日战争的胜利有着积极的贡献。

抗日战争胜利后，“中美合作所”完成了其历史使命，奉命停止在中国的活动。1946年3月，“中美合作所”宣布解散。8月，所属气象机构由民国国防部二厅接管。1947年6月，这部分气象台站改属民国“中央气象局”管辖。

此外，1944年7月，美军派出了以D.包瑞德上校为团长的美军观察组来到延安，开始了与共产党八路军的情报联系和合作。9月，美军观察组在延安凤凰山建立气象台，进行地面和高空气象观测。1945年3月，在美军观察组的协助下，中共中央军委在延安清凉山成立气象训练队。延安气象训练队培养了共产党八路军第一批气象工作者，是解放区气象事业诞生的标志，具有重要的历史意义。

随着国共合作及中美联合抗日形势的发展，为了联合对日作战的需要，中央军委与美军合作在陕甘宁边区及晋冀鲁豫军区先后建立了6个气象观测站。1945年8月，日本宣布无条件投降，延安美军观察组气象台的使命即告结束。

抗日战争期间，军事及航空气象台站成为我国气象台站的主体，无论是数量或装备都超过当时“中央气象局”及地方创建的气象台站，这是我国气象台建设发展史上的一个重要特色。遗憾的是由于处于战争时期，军事及航空气象台站观测的记录，基本上没有编辑出版，现在也很难找到原有的观测资料。

2.6 解放战争时期的气象台站

解放战争期间，我国气象台站的构成主要有三部分。

(1) 民国“中央气象局”所属气象台站

抗战胜利后，1946年直辖测候所增至52处，督

导测候所94处。1948年9月,据民国“中央气象局”统计,直接管辖的气象台站有123处,但实际只有93处。至1949年4月解放军横渡长江南京解放前夕,民国“中央气象局”直属气象台站只剩下69处^[3]。

(2) 民国空军所属气象台站

1946年8月,国民政府航空委员会改组成立空军总司令部,并将全国划分为5个空军军区。各军区司令部分别设立气象总台、测候区台、测候台。1947年2月,空军总司令部所属气象总台、测候区台、测候台,分别改编为气象总队、气象大队及气象支队。至1948年上半年,空军总司令部所属气象机构已有120多处、空军气象技术人员两千多人^[10],成为近代中国气象台站重要的一支队伍。

(3) 解放区创建的气象台站

日本投降后,延安美军观察组气象台的使命即告结束,人员也将撤离。中央军委决定接收美军观察组气象台。为此,将这项任务下达给军委三局,并指定由张乃召负责,选调人员接收并组建延安气象台工作。1945年9月,接管了美军观察组气象台,正式成立了八路军总部延安气象台,张乃召任台长。

延安气象台是中共及其军队建立的第一个气象台,人民的气象事业由此起步。在短暂的几年中,延安气象台不仅出色完成了应予履行的气象保障任务,而且培养了一批气象科技骨干力量。

1946年3月,在中共东北局和东北民主联军总部领导下,在吉林通化成立了东北民主联军航空学校,在训练处下面设立气象台。4月,气象台随航校转移到黑龙江牡丹江。1949年6月,中共中央军委航空局即以牡丹江航校气象班毕业学员为骨干,在东北地区分别设立了沈阳北陵机场、齐齐哈尔机场、牡丹江海浪机场、长春、公主岭5个机场气象台,并着手建立东北地区的气象台站网。

1948年秋冬,随着解放战争的节节胜利,华北地区大中城市相继解放,中央军委三局气象队和解放

区人民政府先后接收了北平气象台(又称“华北气象台”)及华北地区的原国民党政府及空军所属的气象台站。

1949年4月,中国人民解放军百万雄师南渡长江,南京、上海相继解放。与此同时,解放大军挺进西北、西南,开始了解放全中国的战斗。随着各大城市的解放,为做好各地气象机构的接收工作,中共中央军委三局特地指派由延安气象台台长张乃召及部分气象台人员为领导和骨干,参与各地气象台站的接收工作。在各大军区军事管制委员会的领导下,相继接管了国民党驻宁、沪空军和“中国航空公司”、“中央航空公司”气象机构,以及上海气象台、南京气象台、杭州气象台。此外,各地军事管制委员会及地方政府机构也分别接收了各地设立的气象台站。据不完全统计,新中国成立前后(1949年8—12月)全国约有气象台站232处,其中接收、恢复和重建气象台站189处、新建的气象台站40处,尚未接管的气象台站3处^[3]。

1950年以后,全国气象台站除个别专业台站外,统一由军委气象局和各大军区气象处进行管理和建设,中国的气象事业从此进入一个崭新的发展时代。

参考文献

- [1] 曹冀鲁. 中国乾隆年间的气象仪器及观测记录//中国近代气象史资料编委会. 中国近代气象史资料. 北京: 气象出版社, 1995.
- [2] 张德二. 在欧洲新发现的我国早期18世纪气象观测记录//朱祥瑞. 中国气象史研究文集(二). 北京: 气象出版社, 2005.
- [3] 吴增祥. 中国近代气象台站. 北京: 气象出版社, 2007.
- [4] 温克刚. 港澳台气象事业概况//中国气象史. 北京: 气象出版社, 2004.
- [5] 赵泉民. 论清末农业政策的近代化趋向. 文史哲, 2003(4): 41-47.
- [6] (清)农工商部. 奏遵章臚列第二年农工商筹备事宜. 中国第一历史档案馆藏, 宣统元年八月二十四日.
- [7] 蒋丙然. 二十年来中国气象事业概况. 科学, 1936, 20(8).
- [8] 徐南侠. 张謇与南通军山气象台 //中国近代气象史资料编委会. 中国近代气象史资料. 北京: 气象出版社, 1995.
- [9] 吴增祥. 中美特种技术合作所的气象台站 //朱祥瑞. 中国气象史研究文集(二). 北京: 气象出版社, 2005.
- [10] 赵恕. 国民政府航空委员会的气象机构及其沿革//中国近代气象史资料(续编). 北京: 气象出版社, 1999.

竺可桢与我国气象台站的建设

王东 丁玉平

(南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 气象台站建设是发展气象事业和科学的基础。基于我国气象台站分散落后的事实, 竺可桢通过回收外人气象台站、直接建设台站所和派人指导地方测候所建设等方式实施了中国气象台站网络建设的规划。尽管因多种原因最终未能完成计划书的布局, 但到1937年, 中国至少已有139个气象台站, 初步形成了我国早期的测候网。这为我国近现代气象事业的繁荣发展奠定了基础。

关键词: 竺可桢, 气象台站, 收回, 建设

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.009

Chu Coching and the Construction of Meteorological Stations

Wang Dong, Ding Yuping

(Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: The construction of meteorological stations is the basis of the development of meteorological science and technology. In view of the under-developed meteorological work, Chu Coching called on the government to resume the construction of meteorological stations, put forward a plan for the construction of meteorological stations and institutes, and led the staff to resume the construction of these meteorological stations. Thanks to all these efforts, he made a great contribution to the development of Chinese modern meteorological work.

Keywords: Coching Chu, meteorological stations, resumption, construction

1 我国近代气象台站建设基本状况

我国现代气象科学奠基于民国时期, 而民国时期的气象台站^①建设则是其中最为重要的环节。近代中国是一个半殖民地半封建的国家, 国家的主权独立、领土完整都受到了列强的染指, 更何况气象台站等社会经济与科技方面的事业。清末时期绝大部分的气象台站几乎为外人所设置并管理, 这些气象台站包括有, 俄国教会在我国境内建立的北京地磁气象台(1849年), 英国人赫德以清朝海关总税务司身份在我国沿海、长江重要口岸海关及近海岛屿灯塔所附设的气象观测所(1869年开始, 其影响一直影响到建国前)^[1], 法国教会设立的徐家汇观象台(1872年), 英国政府设立的香港天文台(1883年)、亚东春丕气象站(1894年), 日本建立的台北测候所(1896年)、大连观测所(1904年)、营口观测所(1904年)、天津测候所(1904年)、南京测候所(1904年)、

杭州测候所(1904年)、芝罘(烟台)观测所(1904年)、奉天观测所(1905年)、汉口测候所(1905年)、沙市测候所(1905年)、济南测候所(1916年)、上海测候所(1919年)^[2], 德国海军设立的青岛观象台(1898年), 俄国设立的哈尔滨测候所(1898年)等, 共有四十多处测候所^[3]。这些气象台站尽管先进, 配备有精准优良的仪器设施, 但是它们的设立目的并不是为了服务于中国社会, 也不是为了发展中国气象科技事业。它们的基本性质是为列强侵略扩张提供气象信息服务, 它是我国半封建半殖民地状况的一种标志与症候。清末也有极少数中国政府设立的观测机构。维新变法开始前后, 一些官办的农事试验场和高等农业学堂附设有测候所, 如南通博物院测候所、迪化(乌鲁木齐)农林试验场测候站、宾州(哈尔滨)农林试验场测候所、福建省立高级农业学校测候

收稿日期: 2013年9月9日; 修回日期: 2014年3月10日

第一作者: 王东(1973—), Email:kings_east@163.com

资助信息: 中国气象局华风气象影视中心“中国台站史研究”(sk20140035); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306064)

① 气象台站是气象台和气象观测站的总称。气象台是观象台的一种, 后者是对观测天文、气象、地磁、地震等现象的机构总称, 按其观测的项目不同, 可具体称为天文台、气象台、地磁台和地震台等。观测站则指观测天文、地理、气象等项目的站点场所, 测候所是指观测天气现象的站点场所, 是观测站的一种。根据1932年气象研究所草拟的《全国气象观测实施规程》, 测候所可分为五级, 即头等测候所、二等测候所、三等测候所、四等测候所和雨量站。

所等。这些台站利用气象仪器观测，为的是农业生产和研究试验^[4]。

在民国早期，我国也自主设立了少数的气象台站，如民国政府设立的“中央观象台”（1912年）、张謇在南通设立的军山气象台（1916年）。此外，还有农业、水利等部门设立的一些气象测候所。这些气象台站虽然有一定的作用，但是因为其装备、经费、体量、技术人员等方面的局限，还不足以支撑起中国气象事业。当时仍是军阀分立，气象台站也“各为其主”，各自为政，其应发挥的作用也受到抑制。不久，“中央观象台”和仅有的几处测候所也相继停顿。

总体上，我国近代气象台站建设状况比较复杂。首先，与中国半殖民地半封建社会一致，早先的气象台站建设也主要为外国殖民势力所主控。其次，气象台站建设主体和隶属机构复杂。在国民政府时期，除了列强殖民势力之外，还有国民“中央政府”机构、地方政府机构、高等学校、私人等建设和管理主体。即便在列强殖民势力中，也有各种不同的机构主持，比如日本在中国建设和管理的气象台站就有关东厅、驻华使领馆、南满洲铁道株式会社、日本军部、日伪机构等不同主体，气象台站都成为其各自殖民侵略任务的服务工具。再次，气象台站时空分布不均。辛亥革命以前，气象台站数量增长很缓慢，而到20世纪20—30年代中期，则是我国气象观测和台站发展的鼎盛时期，到抗日战争爆发后，气象台站又大量减少。从空间上看，大部分都在东部沿海沿江口岸城市，中西部地区很少。这主要取决于列强通商贸易和海上活动的需要，海关气象观测所就是一个典型例子。以致有专家说：“海关开展气象观测客观上开创了我国的近代气象观测，半个多世纪内为我国积累了大量可用的气象资料”，因此，他谨慎地认为中国近代气象事业始于清末中国海关气象观测台站的设立，说：“民国元年北京‘中央观象台’的设立，……，是国人自主建设我国近代气象事业的开始。而中国海关气象观测则是中国近代气象事业的一个组成部分。^[1]”抗战爆发后，西南区的气象台站网络建设取得了巨大发展，原因之一是国民政府西迁。最后是观测方法的差异和复杂性。因为建设管理和观测主体不同，目的不同，观测项目不同，所用的方法、观测仪器、观测时段、观测记录的统计方法等差异，都导致气象资料和数据的不统一^[5]。“在当时（指清朝末期），

各地测候所几乎全都掌握在外国人手中，为他们各自的目的而服务，即没有统一规格的仪器，也没有统一的管理制度和观测规范。”“（民国时期）测候所的布局极不均衡，除国家建立的测候所外，各省的建设厅（实业厅）、水利单位、农林试验场以及少数大学与师范学校也都纷纷设立了自己的气象测候所。可惜缺乏统一指导，所用仪器类型和工作制度也没有统一的规定。……大都仪器型号混杂，记录残缺不全。我国气象观测网的全面建设是在新中国成立以后才正式开始的。^[6]”

2 我国气象台站建设的意义

从气象事业与科学本身来说，气象台站是发展气象事业的基础，这是通行于世界的真理。从天气预报而言，台站所提供的温度、湿度、风力、风向、气压等要素，能为天气形成提供基础数据支撑。天气形成和发展的规律及其预报就成为服务于社会各项事业的核心内容之一。它能在日常生活、农业、航空、航海等领域中发挥重要保障作用。正是因为这个基本功能和意义，诸多西方发达国家都不惜资本争相在其国家及其属地建立气象测候所和气象台。这些按照气象科学要求建设的台站，为气象观测、天气预报、气候灾害预警等提供了不可替代的科学支撑，不仅给当地的农业生产和人民生命财产安全提供了基本保障，而且还为国家安全和政治军事提供气象保障。当时欧美发达国家航空事业的成绩斐然，是离不开气象台站及其天气观测和预报的。比如1929年，美国航空线有700千米，是1929年中国铁道线的两倍，而且晚上亦能飞行。这都受益于气象台站及其天气预测技术。“沿航空线每六十里^①有一气象测候所，对天气每三小时有一次预告，可确知六小时内天气之情形。^[7]”

我们都知道，欧洲的气象科学事业发展最早，17世纪之后是其高速发展时期。1664年，巴黎气象台就是世界上最早使用科学气象观测仪器进行气象观测工作的气象台。1650—1756年，一位耶稣教士在布拉格市区中心建立了天文气象观测所，配有学校和图书馆，使用的是现代观测仪器。1773年查理大学从耶稣教会^②^[8]接手管理该观测所，成为布拉格气象台的前身。19世纪随着电话、无线电等科技的发明发展，气象观测技术及其台站建设也获得了很大发展，对农业、航海等事业有很大的促进作用。比如英国的气象学家葛雷舍（James Glaisher，1809—1903年）利用载

① 1里=500m，下同。

② 耶稣教会是推动世界气象台站和气象学工作的重要力量。17和18世纪，耶稣教会建立了观象台近30个，分布在中欧、法国、意大利、西班牙和匈牙利等地。到1814年，1773年被禁的耶稣教会恢复，就迎来了兴建观象台的第二波高峰，如1824年在罗马大学建立的观象台、1838年在英格兰斯通赫斯特大学建立的天文台、1841年在华盛顿乔治敦大学建立的天文台等。

人自由气球亲自观测高空气象，他开创了英国气象学会，在英国率先用电报发表气象报告，并且在伦敦气象学会的协作下，在英国各地筹建了气象台站网络。这不仅直接促进了现代气象学的飞速发展，而且为经济发展和国际合作保驾护航。美国在1780年成立巴拉基纳气象学会时，东部已经建有4个气象台站，此后气象台站网络建设更为密集。1870年，美国成立了阿布贝（Cleveland Abbe, 1838—1916年）主持的气象统一管理机构“美国气象服务处”，使得气象台站建设工作更为有序。1884年在波士顿建立的蓝山气象台也成为了美国最早的气象学术研究中心。20世纪之后，整体科技水平又得到了飞跃，飞机、雷达、电视、太空卫星、计算机等发明都使气象科技力量得以迅速发展，并且在航空、航海、农业、国防、战争等需求的推动下，气象台站网络的建设更为细密^[9]。而气象台站网络的建成又为航空、航海、农业、国防等国计民生事业提供了一种保障。

气象台站建设在我国有着特殊的意义。首先，气象台站建设客观上推进了我国气象科学工作。即便是外人所建立的气象台站，在除去其为侵略意图之外，也客观上刺激了我国气象事业的发展^[4]。其次，气象台站建设对中国人民财产生命安全提供了保障。虽然说，我国近代建设气象网站的主体多种多样，但是，气象台站建设及其所发布的天气预报和气象报告，客观上都有利于民众。比如，1879年夏，上海徐家汇观象台准确预报有台风袭击上海，并向商船发出了台风预警报告，使社会都有获益^[4]。这样，我们就有必要说一下教会在我国所设立的气象台站问题。首先，教会在我国所设立的台站很多，前后有80处之多。其次，他们设立的动机有变化，吴增祥^[4]先生认为，以鸦片战争为界，前后传教士的态度和素养有变化，前期多为宣传科学知识，而后期则借助殖民大炮的淫威变得傲慢无礼。有人认为，像法国教会在上海设立的徐家汇观象台等，都是耶稣会士的一种科技活动扩张和“世界实验室”运动，并不属于直接的民族侵犯范畴。只不过伴随欧美殖民侵略，订有不平等条约之便利，这些气象台因为民族立场会更为方便地为政治军事组织提供气象等信息的。其实，教会在欧洲、北美、亚洲以及澳大利亚等各地都有气象台站的建设和运作，足迹不仅遍布在传教区国家（Mission Country），而且也在英国、法国等许多强国中运作。也就是说，除却中国鸦片战争失败后被迫开放通商口岸的背景，耶稣会和传教士在中国建立气象台都是当时社会和科技潮流的一部分，直接目的不是侵略，这不同于外国政府和军方所建立的气象台站^[10]。

就我国自有建设的气象台站而言，其意义更为重大。它不仅推动了气象科学事业发展本身，即没有气象台站网络所提供的观测数据等基础信息，就难以对天气、气候发展规律做出深刻的认识；而且也显示了我国对抗西方列强的决心，展示了我国气象科技人士爱国强国的行动价值。

3 竺可桢的气象台站建设贡献

我国近代气象科学事业的奠基人之一竺可桢（1890—1974年，图1）对气象台站网络建设有着卓越的功勋。

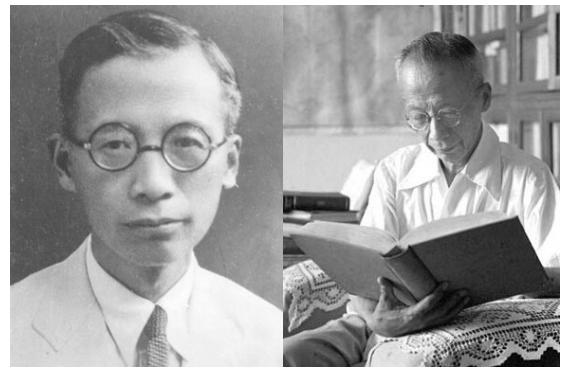


图1 竺可桢（1890—1974年），中国卓越的气象学家、地理学家和教育家

20世纪20年代前，我国因为没有较为合理的统一的气象台站布局建设，影响了气象事业的发展。这是气象工作者所公认的事实。因此，“中央观象台”于1918年就向北洋政府教育部提出全国气象分区计划，提议“以省为单位，每省设一总站及若干测候所，并普设测雨站”，以便建立起气象台站观测网。因为经费的限制，教育部只采纳了各省普设测雨站的意见。当时，中国自有自管的气象台站除了1912年建立的“中央观象台”、农林、水利等部门在1914年设立的26处气象测候分所、张謇个人在南通设立的军山气象台等外，大部分都为外国的教会、军政部门和社会团体所设。这给我国的气象台站网络的自主建设和统一规划管理带来了一些障碍。要发展气象事业，必须要有自己的气象观测台站网络。为此，1920年，“中央观象台”又向政府提出了一个“扩充全国测候所意见书”，拟增加设立40个测候所。由于经费和社会局势等原因，一直未能实现。1921年，竺可桢也撰文《论我国应多设气象站》发表在《东方杂志》第15期，向政府吁请气象台站网络建设的重要性。

随着民族独立进程的深入，收回这些气象台站就成为我国气象台站网络建设的道路之一。竺可桢为此做了不少工作。1922年，在中国政府收回青岛管辖

权之际，竺可桢认为此时收回青岛观象台主权已是理所应当之事。于是在济南召开的中华教育改进社年会上，竺可桢提出“拟请教育部或中华教育改进社管理青岛观象台并加以扩充案”，提案建议应该收回青岛观象台的管辖权，并努力使其发展成为能够与徐家汇气象台科技水平相均衡的气象台^[11]。竺可桢的提案受到了知识界和政府的高度重视。1922年12月，山东省长兼督办熊炳岐电邀竺可桢作为气象科技人员去青岛襄助收回气象台^[12]。日本起初以中国缺乏气象人才为由拒绝交出气象台主权。竺可桢为摧毁日本人所谓的借口，就将此前亲自调查的在青岛气象台工作的日本人气象素养，连同这次接收情形写成报告《青岛接收之情形》，发表于《史地学报》第2卷2期；并倡议在青岛成立了中国气象学会（1924年）。1924年，日方再无借口，终于交还了青岛观象台之主权。接收后的青岛观象台面临经费不足等问题，竺可桢先生为此与蔡元培先生“多方筹措，除了从‘中央研究院’的天文、气象两所每月各拨500元予以补助外，还多次动员青岛历任市长，为观象台筹集、增拨经费。”^①这样，青岛气象台的正常业务才得以顺利运行下去。

除了收回外人设立的气象台站，还有更重要的自建途径。竺可桢对此也做了很多努力。1920年，竺可桢在南京高等师范学堂（东南大学、“国立中央大学”）建立了气象测候所，成为民国期间20多所院校气象台站中的重要一个。在建设和使用这个测候所过程中，竺可桢不仅自己指导学生参与观测，而且还聘请了专职人员鲁直厚来测候所进行气象观测和指导。从开始观测之日始，该测候所气象观测便“无复间断”。竺可桢还“经常亲自监督恶劣天气及夜间等容易失误情况下的观测记录”；在“取得完整资料的基础上，竺可桢亲自分析数据，撰写报告。翌年即编发《气象月报》，与徐家汇等外人主持的气象机构进行交换。”^[12]”这些气象台站建设实践为竺可桢后来的气象台站建设规划及其指导实践提供了丰厚经验。

竺可桢对气象台站建设的主要贡献源于其主持气象研究所。1928年春，竺可桢负责筹建“中央研究院”气象研究所的工作，提出了《全国设立气象测候所计划书》这一规划布局性的计划书，制定的目标是在10年内在全国完成“至少须有气象台十所，头等测候所三十所，二等测候所一百五十所，雨量测候所一千处”的任务，以便为我国农业、水利、航海、航空、国防等服务。同时，这样也为中国气象事业发展能奠定扎实的基础^[13]。这个计划书实际上也就成为中

国近代气象事业的纲领性文件。竺可桢也是基本按照这个规划书进行我国气象事业工作的。

3.1 建设北极阁气象台

北极阁有着悠久的历史观测史和良好的基础。为此，竺可桢将气象研究所的办公室和观测站从南京成贤街大学院内迁至钦天山北极阁，并积极建设北极阁这一综合性气象台（图2）。竺可桢筹措资金、做规划设计，在北极阁成立了气象台，于1928年10月1日起正式开始观测。北极阁气象台从此成为了国立“中央研究院”气象研究所办公、科研、学员培训以及气象观测的场所。在竺可桢任职期间，北极阁气象台的建设在职员配备、气象仪器、观测项目、科学研究和出版及人才培养等方面都有巨大突破和贡献。

职员方面。1928年是十五人，分别为“所长一人、兼任研究员一人、观测员八人、助理员一人、兼任助理员一人、无线电收发一人、图书管理员一人、统计员一人。”职员少，任务重是发展的一个制约条件。很多人都是一身多职，如“观测员除担任观测外，同时兼任制图预报、仪器管理及文牍会计出版等职，研究员及助理员亦同时兼理所务行政焉。”^[14]”为此，竺可桢不断争取人员编制，以适应气象科技事业发展的需求。1935年，职员发展到56人，分别为“专任研究员兼所长一人、专任研究员二人、通讯研究员二人、专任编辑员一人、测候员九人、图书管理一人、制图员一人、无线电收发员二人、统计生九人、测候生二十四人、工程技术员一人、会计庶务员一人、预报生二人。”^[15]”气象研究所中职员人数的增加，使任务分工更细更专门化。这有利于提高技术质量和气象业务水平。

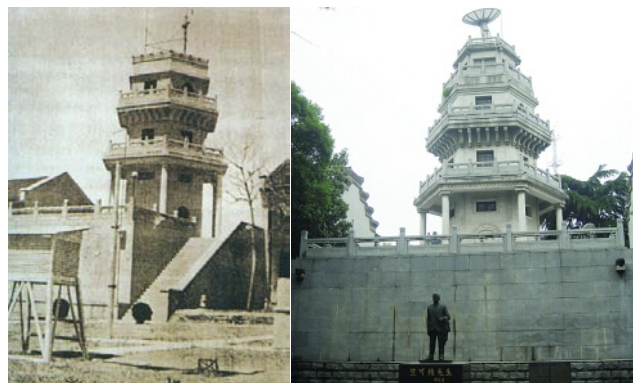


图2 1928年竺可桢倡导并建立南京北极阁气象台，开创了我国近代气象科学研究的先河，现在的北极阁气象台前有一个竺可桢的石像，为了纪念他对我国气象事业发展所做出的贡献

① 百度百科.青岛观象台. <http://baike.baidu.com/view/980280.htm>

气象仪器方面。1928年的“测候仪器，大小共计九十余件，总值二万五千余元，多自德英法三国购来。^[14]”发展到1935年，“计历年所置者已有二百数十件，总值约十二万元。^[15]”还有1935年当年度新增的重要仪器就有二百四十余件。

观测项目方面。气象研究所开始观测的项目都是地面观测，包括气温、气压、湿度、降水量、风向风速、云状云量、蒸发量等，后来利用气球（图3）、风筝和飞机进行高空探测，增加了太阳辐射观测、物候观测、地震观测、微尘观测、日射观测、空中电子观测等项目。从1930年元旦开始，气象研究所开始发布天气预报和台风预警，从而结束了外人垄断我国天气预报的历史，为实现我国气象事业的独立自主迈进了里程碑性质的一步。

科学研究和出版方面。气象研究所是气象科学的最高学术机构，为鼓励气象科学研究，竺可桢领导制定了《“中央研究院”气象研究所的论文奖金章程》，从而在制度上促进和保障了气象科研人员在学术、理论和实践上的创新工作，取得了丰硕成果。从1928年气象研究所成立至1949年的22年间，研究所科研人员共发表论文178篇^[4]。为了收集、发掘和整理分析全国各地历史气象资料，对气候物候进行调查研究工作，竺可桢自1928年开始将本所直属台站观测记录及海关测候所、各省厅、各学校测候记录汇编出版在《气象季刊》（1929年起改为《气象月刊》）、《气象年报》上。1930年后还汇编出版了《高层气流观测记录》、《地震季刊》等。1936年，竺可桢会同涂长望、张宝堃、吕炯等著名气象学家编印出版了《中国



图3 从1930年1月开始，竺可桢组织气象研究所进行高空气球探测试验，图为北极阁气象台施放高空测风气球的场景

之雨量》，1940年出版了《中国之温度》。前者所载有350个站的气象记录，后者则达到600个站点，记录所跨的时间最长65年，是当时年代最久、站点最多、最为完整的资料。这一工作影响深远，此后一直保持着中国雨量、气温等气候资料的汇编出版工作。

人才培养方面。为了满足国家和社会的要求，气象研究所在南京前后创办了四期气象学习班，共输送123个测候骨干，造就了一批近、现代著名的气象学家和高层气象管理人才，其中有黄厦千、赵九章、吕炯、涂长望、张宝堃、朱文荣、朱炳海、卢鋈、程纯枢、叶笃正、陶诗言、顾震潮等，成为了全国气象科技人才的“摇篮”之一。

3.2 在全国积极筹建直属测候所

根据计划书，竺可桢便先后在全国筹建了28个直属测候所，详细情况见表1^[6]。

这28个气象台站，有11个建成于1937年之前，17个建成于1937年及以后，其中一部分测候所（如上海测候所、同心测候所、灌县测候所等）在抗战时期都曾迁址，而后继续恢复气象观测。气象台站建设工作从未曾停止过。竺可桢不但没有放弃气象台站的建设，反而是加大筹建的力度。1941年10月中华民国“中央气象局”在重庆成立，除了部分停顿的气象测候所之外，气象研究所于1942年元旦将剩余的17个直属测候所移交给民国“中央气象局”管辖^①。在这里，不得不提的是，由于竺可桢的主持和支持，我国才参加了国际气象组织第二次国际极年活动（1932年8月1日—1933年8月31日），取得了很好的国际影响效果。这次气象国际合作涉及亚洲、欧洲、美洲、大洋洲的几十个国家。当接到国际极年委员会主席丹麦气象学家考尔博士的函请时，竺可桢出于国家声誉和气象事业发展的需要决定参加。为此，他不仅在南京和北平增设了风筝、飞机等高空测候项目，也增加了测候的次数，而且还决定在峨眉山和泰山建立高山测候所。在经费因为战争和时局而大幅减少的情况下，竺可桢坚持在峨眉山和泰山建立高山测候所。他一方面求助于中华教育文化基金会等机构解决气象仪器和设备、资金问题，另一方面又函请四川、山东建设厅致函峨眉、泰山县政府为观测所建设预先提供场地和房屋，以便完成极年观测活动任务。极年活动观测的气象信息在1935年以《峨眉山泰山国际极年观测报告》的形式出版。

① 这17个测候所分别是南郑测候所、榆林测候所、肃州（酒泉）测候所、拉萨测候所、西宁测候所、中宁测候所、武汉头等测候所、西安头等测候所、华山测候所、商县测候所、大理测候所、都兰测候所、广元测候所、安西测候所、松潘测候所、保山测候所、昌都测候所。

表1 竺可桢在全国筹建的28个直属测候所

序号	建设方式	测候所名称	成立时间	归属省份	
1		北平测候所	1929年6月	北京	
2	接管	南郑测候所	1938年11月	陕西省	
3		榆林测候所	1938年11月	陕西省	
4		上海测候所	1933年元旦	上海	
5	独立创办	峨眉山测候所	1932年8月	四川省	
6		泰山测候所	1932年8月	山东省	
7		肃州(酒泉)测候所	1934年7月1日	甘肃省	
8		拉萨测候所	1935年5月中旬	西藏自治区	
9		西宁测候所	1936年11月16日	青海省	
10		定海测候所	1937年元旦	浙江省	
11		同心测候所	1938年3月中旬	宁夏回族自治区	
12		中宁测候所	1939年12月	宁夏回族自治区	
13		与航空公司合作创建	郑州测候所	1935年6月	河南省
14			包头测候所	1935年7月	内蒙古自治区
15			宁夏(银川)测候所	1935年11月	宁夏回族自治区
16			贵阳测候所	1935年11月	贵州省
17	与水利处合作创建	武汉头等测候所	1937年元旦	湖北省	
18		西安头等测候所	1938年9月	陕西省	
19		华山测候所	1939年7月	陕西省	
20		商县测候所	1939年7月	陕西省	
21		大理测候所	1939年12月	云南省	
22		都兰测候所	1940年元旦	青海省	
23		灌县测候所	1940年1月	青海省	
24		广元测候所	1941年9月5日	四川省	
25		安西测候所	1940年3月	甘肃省	
26		松潘测候所	1940年4月1日	四川省	
27		保山测候所	1941年1月	云南省	
28		昌都测候所	1941年1月	西藏自治区	

3.3 倡导各省建设地区测候所

除了组织筹建这些直属的气象台站外，竺可桢还积极倡导各省建设地区测候所，并提供技术、人员和物质等方面的支持。为培养气象台站技术人员，竺可桢写信邀请各省选派一定额的气象学员来气象研究所进行实习培训。同时，为了提高测候水平，竺可桢还组织气象研究所人员编制《全国气象观测实施规程》、《测候须知》等工具书，并及时寄送各地。以湖南省为例说明。1930年2月21日写信给曾凤冈，随信函附有湖南省气象测候所计划书一通，希望其向政府提出筹建湖南省气象测候所的计划。这份计划书引起了当局的重视，决定配合气象研究所的计划，筹建湖南省的气象台站。1932年5月20日，竺可桢写信给刘粹中，阐明将于长沙、常德和衡州三分设三个测候所，并决定派邹祥伦、章克生、邹新助、周朝阳诸同学进行测候所的测候指导工作^[17]。1932年6月，长沙、常德和衡阳测候所成立；1937年南岳测候所成立。这些气象台站的筹建为湖南气象事业的发展奠定了基础。

3.4 统一气象台站技术规范

建设等级不同的气象观测台站所网络，仅仅提供建筑、仪器等硬件是远远不够的，还要在技术、规范等方面做出统一的、合乎国际先进趋势的标准。为此，竺可桢领导气象研究所起草了《全国气象观测实施规程》，详细规定了各级测候所的观测细则、记录格式等，并且通过“全国气象机关联席会议”^①在统一气象电码、无线电气象电报转发、天气预报术语及暴风警告方法、统一气象观测和气象报告时间、气象仪器标准及计量单位、增设测候机构等方面统一了意见，并且通过“中央研究院”提请国民政府行政院以令的形式，颁发到全国各省、市、县级政府施行，使之具有行业规范的行政法律效力。《测候须知》、《航空气象概要》、《国际云图节略》、《气象学名词中外对照表》、《气象电码》、《气象常用表》等技术手册、规范、工具书，也都是为配合统一规范和格式而进行的相应成果。这些统一观测规程、统一电码格式及传递速度，培养观测人才队伍的工作头绪复

① 在气象台站建设和观测工作规范化方面，气象研究所分别在1930年4月，1935年4月，1937年4月在南京主办了第一、二、三届“全国气象机关联席会议”。

杂,牵涉面广。这对于只有二三十人的气象研究所来说,任务十分艰巨。其最终能圆满完成这些全国气象观测台站网络建设的“软件”工作,确实令人钦佩。竺可桢这一主持和领导工作,在短短的几年内便“在仪器设备、图书刊物、人员素质、业务范围、科技水平和国际影响等方面超过当时外国人在我国创办的规模最大的上海徐家汇观象台”,以致气象研究所实际上成为了“我国气象研究的中心和实际上的业务指导中心,……气象人才培养的重要基地”,从而“奠定了我国现代气象事业的基础”^[18]。

竺可桢领导的国立“中央研究院”气象研究所是我国第一个国家级气象科学研究机构,“它对近代中国气象台站建设、气象观测、天气预报、气象科学研究,以及气象专业人才的培养方面,做了大量的工作,为我国现代气象科学的发展打下了良好的基础,做出了卓越的贡献,在中国近代气象科学发展史写下了辉煌的一页。^[4]”

1940年,竺可桢等提出了“建设全国测候网,请自西南始”的提案,气象研究所也提供了《建设西南测候网计划》。据此,民国“中央气象局”依照统筹全国民用机构气象台站职责之要求,采取了“一面接收、一面增设”的策略来建设全国气象台站网络^[4]。竺可桢所制定的《全国设立气象测候所计划书》仍然是“中央气象局”进行气象台站网络建设的重要文献,并且,“中央气象局”根据时局形势也开始了西南测候网建设。为此,抗战胜利后,“中央气象局”还制定了“五年建设计划”,计划五年之后,能够成立头等测候所32所、二等测候所119所、三等测候所355所、四等测候所1500所、雨量站30000所,“凡三等以上之测候所均备有水银气压表与气压计及电讯设备,期能准时发出气象电报”^[4]。

总之,在竺可桢的组织和倡导下,中国气象事业有了很大的进步。第一,气象台站网已初具规模。据统计,到1937年,我国至少有气象台站139个,达到空前的规模^[19]。这些气象台站建设的经验、技术和设施等为新中国气象事业的迅猛发展奠定了基础,也为

我国现代气象事业的长远发展和气象科学研究实力提升夯实了基础。第二,在国际合作与交流方面取得了重要成就。无论从人才选用和培训、仪器设备、气象观测台站建设标准和规范、气象项目交流与合作等都是与先进国家紧密同步的。

当然,由于时局、战乱,以及自己所处的位置(气象研究所只是一种学术性的机构,并不是全国气象事业的行政管理机构,其所长职位也不负有统筹建设气象台站的职责^[16]),竺可桢对于气象台站网络的建设目标也就不可能基本实现。这个任务还只能在新中国才得以成为现实。

参考文献

- [1] 方齐. 海关气象观测的兴衰及其在中国近代气象发展史上的地位//朱祥瑞. 中国气象史研究文集(二). 北京: 气象出版社, 2005.
- [2] 吴增祥. 日本侵略者在中国大陆地区的气象观测//朱祥瑞. 中国气象史研究文集(二). 北京: 气象出版社, 2005.
- [3] 章基嘉. 我国近代气象事业的创始人——竺可桢//竺可桢逝世十周年纪念会筹备组编. 竺可桢逝世十周年纪念会论文集. 北京: 科学出版社, 1985.
- [4] 吴增祥. 中国近代气象台站. 北京: 气象出版社, 2007.
- [5] 吴增祥. 中国近代气象观测特点分析//朱祥瑞. 中国气象史研究文集(二). 北京: 气象出版社, 2005.
- [6] 杨贤为, 何素兰, 崔伟强, 等. 气象台站网合理分布概论. 北京: 气象出版社, 1989.
- [7] 竺可桢. 航空与天气. 地理杂志, 1929, 2(6): 6-8.
- [8] Udías A. Searching the Heavens and the Earth: The History of Jesuit Observatories. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [9] 刘昭民. 西洋气象学史. 台北: 中国文化大学出版社, 1981.
- [10] 吴燕. 近代欧洲科学扩张背景下的徐家汇观象台——1873—1950. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [11] 竺可桢. 拟请教育部或中华教育改进社管理青岛观象台并加以扩充案//竺可桢全集(第1卷). 上海: 上海科技教育出版社, 2004.
- [12] 李玉海. 竺可桢年谱简编. 北京: 气象出版社, 2010.
- [13] 竺可桢. 全国设立气象测候所计划书. 科学, 1928, 13(7): 998-1000.
- [14] 国立中央研究院文书处. 气象研究所报告//国立中央研究院十七年度总报告. 中国科学印刷公司, 1928.
- [15] 国立中央研究院文书处. 气象研究所报告//国立中央研究院二十四年度总报告. 中国科学印刷公司, 1935.
- [16] 陈学溶. 竺可桢先生与我国气象台站的建立//中国近代气象史资料编委会. 中国近代气象史资料. 北京: 气象出版社, 1995.
- [17] 晨露夕舟. 1929—1941年间竺可桢发展地方测候事业相关信函选. 民国档案, 2012(1): 16-18.
- [18] 竺可桢传编辑组. 竺可桢传. 北京: 科学出版社, 1990.
- [19] 陈德群, 陈学溶. 气象研究所的天气预报业务和服务史实概述. 南京气象学院学报, 1996, 19(2): 257-262.

二战后美国三个大气模式中心的美日组合

■ 闻新宇 朱清照

著名计算机科学家高德纳（Donald E. Knuth）曾经这样定义科学与艺术的边界：“科学是那些我们理解得足够清楚，以至于可以描述成计算机语言的知识；而艺术则是其他还未达到这种程度的认知。（Science is what we understand well enough to explain to a computer; Art is everything else we do.）”从这个意义上讲，现代气象学的发端似乎不是20世纪初以V. Bjerknes为首的挪威学派，而应是二战后的1950年。

从1950年Charney首次在ENIAC上成功试验了正压涡度方程开始，发展数值模式就成为了那个时代大气科学领域最激动人心的主旋律。Rossby于1947年从美国回到瑞典斯德哥尔摩大学，领导发展了全世界第一个业务化的正压预报模式，在瑞典BESK计算机上一周三次地预报北大西洋地区的天气状况。然而由于诸多原因，欧洲在模式研发的道路上虽然赢在了起跑线上，却输在了途中。美国最终以蓬勃向上的绝对优势，领导了二战后数值模式的研发方向。特别地，美国在1950—1970年代，先后诞生了三个具有里程碑意义的模式研发中心：位于科罗拉多州博尔德市的美国国家大气科学研究中心（NCAR）、位于加州洛城的加州大学洛杉矶分校（UCLA）和位于新泽西州普林斯顿市的地球流体力学实验室（GFDL）。其中最耐人寻味的是，这三个模式中心中最早领导模式研发工作的，都是一个美国学者和一个日本学者的组合：NCAR的Warren Washington和栗原秋良（Akira Kasahara）（图1）、UCLA的Yale Mintz和荒川昭夫（Akio Arakawa），以及GFDL的Joseph Smagorinsky和真锅淑郎（Syukuro Manabe）。这种固定的“美日组合”究竟有哪些优势？这种优势如何推动了大气环流模式的早期发展？这样的组合在特殊的历史年代又有怎样的必然性？当我们回望这段历史，仔细考察这三个模式中心早期的发展经历时，就会更深入地理解这些看似巧合的故事其实都孕育在某种必然中。（图2）。

一、国家大气科学研究中心（NCAR）

NCAR作为美国高校大气科学联盟（UCAR）下属的研究中心始建于1960年，其红色建筑由华裔著名建筑师贝聿明设计，坐落在美丽的博尔德市西南郊Mesa路尽头的小山上。在NCAR发展早期，领导其模

式研发工作的是美国黑人气象学家Warren Washington和日本学者笠原秋良（Akira Kasahara）。

笠原秋良于1926年生于日本东京，1944年考入东京大学修习气象学专业，1948年毕业后师从日本著名气象学家正野重方（Shigekata Shyono）攻读研究生。当时的日本处于战后恢复期，美国盟军在东京建立图书馆大肆传播西方文化和价值观，也向东大提供了许多美国最新的气象学杂志，这些专业杂志使得包括笠原在内的很多日本学者，了解到美国正在积极发展一种称为“数值模式”的计算机与程序相结合的设备。正野重方敏锐地意识到这一革命性的新方向对于弥合动力学与经验天气预报之间的鸿沟具有重要意义，并开始思考如何发展日本自己的数值模式。正野教授当时与自己的研究助理、学生和日本气象厅（JMA）的相关研究人员一起成立了一个数值天气预报小组，定

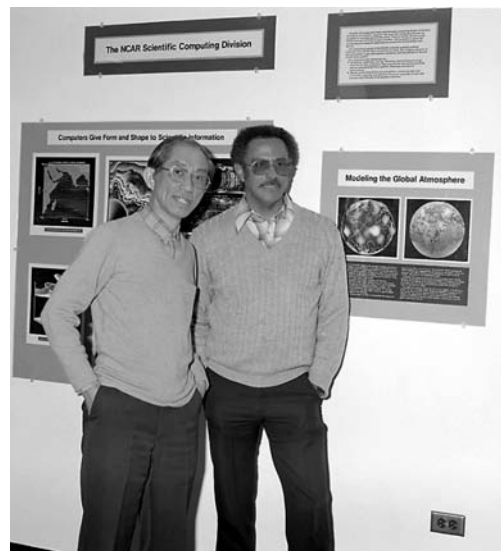


图1 1975年Warren Washington和笠原秋良的合影（见于NCAR档案）

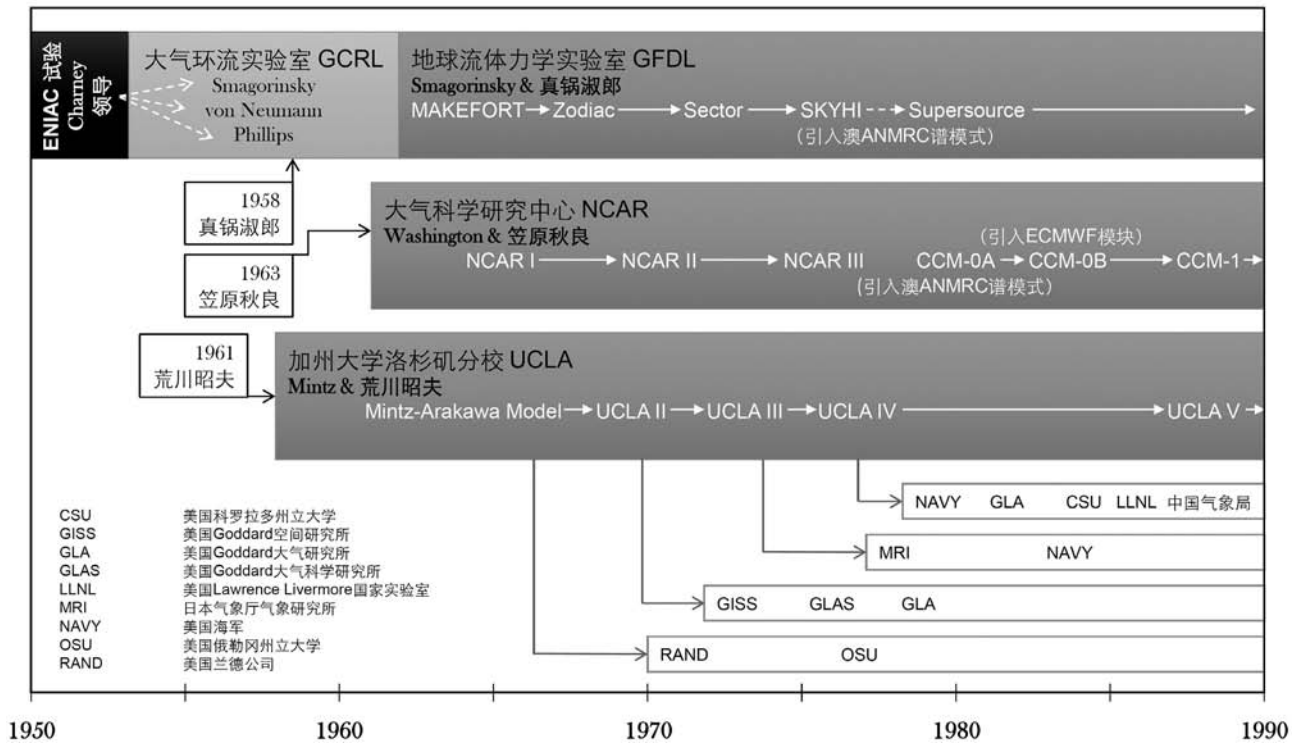


图2 1950—1990年GFDL、NCAR和UCLA有关模式发展和模式传播的示意图（修改自Randall D (2000) 第二章Fig 1）

期讨论相关问题。笠原曾生动地回忆道：那是1949年的一天，正野教授兴奋地举着Charney的论文冲进教室，激动地说：“看！气象学将因这篇文章而真正实现现代化！”1952年，正野重方的研究助理岸保勘三郎（Kanzaburo Gambo）因在长波频散和数值预报理论方面的工作受邀去美国普林斯顿大学高级研究所与Charney合作两年，期间他经常写信给笠原，告诉他Charney那边在模式发展方面的工作进展。1954年，岸保堪博士回到东京和正野教授共同组建了更大规模的数值预报小组，共包括25名研究生和日本气象厅雇员，他们每月都要集中讨论和汇报进展。这个活跃而充满激情的小组，在整个1950年代一直活跃在日本数值预报领域的最前沿。后人称之为“东京NWP小组”。

正是由于出身于正野教授的NWP小组，笠原接受了广泛的学术熏陶和良好的专业训练。1956年，笠原受Platzman的邀请到芝加哥大学参与热带气旋的研究，并在那里工作了6年。当时芝加哥大学的计算设备并不好，笠原经常要跑到位于首都华盛顿的美国气象局去完成计算任务。1961年，美国国家自然科学基金会（NSF）和日本学术振兴会（JSPS）达成协议，共同促进美日在尖端科学领域的交流与合作。两年后，笠原秋良受此计划资助前往NCAR工作，NCAR则承诺将提供最好的研究环境和计算设备。在笠原到达NCAR工作后的第三个月，他遇到了同样新加入NCAR的黑人

青年：沃伦·华盛顿（Warren Washington）。

沃伦·华盛顿于1936年生于美国俄勒冈州波特兰市，1960年毕业于俄勒冈州立大学获气象学硕士学位，1964年毕业于宾夕法尼亚州立大学获气象学博士学位，成为美国历史上第二位获得大气科学博士学位的非洲裔美国人。据华盛顿自己回忆，1963年8月28日，他正在驱车前往NCAR报到的路上，在汽车旅馆的电视里看到了马丁·路德·金（Martin Luther King）的著名演讲“I Have a Dream”，这段演说极大地激发了他作为一位非裔美国人在科学研究领域中争取平等的热情，这对他后半生的事业都产生了很大的影响。

在华盛顿加入NCAR不久后的一天，他主动向笠原提出共同建立一个大气环流模式（GCM）的想法，这让笠原感到非常震惊，因为那时华盛顿还只是一个刚刚毕业的青年学生。尽管笠原一直关注着GCM的发展，但此时NCAR在模式方面已经落在了后面。GFDL、UCLA和LLNL气象学家Chuck Leith都已经发展了自己的数值模式。笠原认为1917年理查森的手算试验不能算是完全的失败，他所使用的控制方程在本质上应该可以用计算机计算并得到更精确的解。于是笠原提出，NCAR的模式研发要采用理查森的原始方程组，全球覆盖，这可以使NCAR的大气环流模式研发趋向科学意义上的真正完善和成熟。

1964年5月，华盛顿和笠原秋良共同向NCAR主

任汤普森 (Thompson) 提出建立一个气候模式的想法, 并得到了支持。他们最终决定购买一台先进的 CDC3600 计算机用于数值计算。在模式发展初期, 他们两人主要专注于科学方面的研究, 由大量程序员负责编写和完善代码。整个团队几乎每天都要开会讨论模式的输出结果并确定第二天的改进方向, 模式在这种不断地修改中也变得越来越稳定。最终在科学家和程序员的共同努力下, 笠原和华盛顿共同署名于 1967 年发表了基于原始方程、覆盖全球的 GCM 论文, 在这篇文章里他们系统介绍了 NCAR 比较复杂的气候模式的动力框架、物理过程和初步的模拟结果。作为 NCAR 第一代大气环流模式, 这个 5° 分辨率的两层模式也被称为 Kasahara-Washington Model 或 NCAR 1。之后的 1970 年, 他们进一步大幅改进了模式的灵活性, 发布了第二代的 NCAR 2, 这一代模式默认分辨率仍为水平 5° , 但垂直增加到 6 层。1973 年他们又发布了 NCAR 3, 重点改进了差分算法。纵观 Kasahara-Washington 大气环流模式的发展历程, 他们始终在计算方法稳定性、极点处理, 以及如何控制计算机舍入误差方面给予了更多的关注。

1970 年代后期, NCAR 逐渐放弃了 Kasahara-Washington 模式系列, 转而开发给美国所有大学使用的新一代气候模式 CCM (Community Climate Model), 这一方面是出于更好地服务 UCAR 的需求, 另一方面也是因为澳大利亚数值预报研究中心 (ANMRC) 发展了具有里程碑意义的谱模式。CCM 系列一直发展至今, 经历了 CCM0B, CCM0A, CCM1, CCM2, CCM3, CSM1, CCSM2, CCSM3, CCSM4, 是今天 CESM1 一脉的源头。

从 1964 年至今, NCAR 一直努力延续着模式研发的传统, 使得今日 NCAR 的全系列数值模式, 包括气候模式 CESM、化学模式 MOZART、天气模式 WRF 等, 被世界范围内的众多科学家所广泛使用。今天 NCAR 的诸多数值模式都已成为美国模式领域最重要的风向标。

二、加州大学洛杉矶分校 (UCLA)

加州大学洛杉矶分校的大气科学系是由挪威学派的 J. Bjerknes (Jacob Bjerknes) 于二战期间建立的。1940 年 4 月, 挪威刚刚被德军占领, J. Bjerknes 便接受美国的邀请, 着手在 UCLA 建立气象系为美国空军培养气象预报员。这里成为当时美国 5 个基于大学的紧急军事气象训练基地之一。从那时起, UCLA 气象系逐渐成为美国最重要的大气科学研究中心之一, 在动力气象、大气环流模式、海气相互作用、边界层气

象、平流层物理化学等很多领域都保持了领先的研究水平。

荒川昭夫 (Akio Arakawa) 生于 1927 年, 中学时他就对自然科学, 特别是物理很感兴趣。二战结束后的 1947 年, 近 20 岁的荒川考取了东京大学物理系, 一直接受纯粹的物理学训练。1950 年荒川本科毕业, 也曾考虑过继续读研究生, 但由于当时刚刚订婚, 迫于生计需要他还是选择了工作。与他同班毕业的有 30 名同学, 但当时日本经济惨淡, 根本没有招收物理系毕业生的工作岗位, 全班只有 3 个工作机会, 其中之一便是去日本气象厅。荒川恶补了气象学知识, 没想到面试时主要被问了很多物理和数学问题, 他被顺利录取了。对于自己的教育背景, 荒川曾这样回忆道: 我从来没读过研究生, 也没有获得过硕士、博士学位 (实际上 1961 年他被授予东京大学名誉博士学位), 我本科也没接受过气象学训练。在步入 JMA 工作之前, 我对气象学一无所知, 也毫无兴趣。

荒川自己也没想到, 他毕业后进入 JMA 后的第一份工作, 却是随船出海。在经过半年的培训后, 荒川和另外几名入职新人被送上了 JMA 气象监测船。在之后一年的时间里, 他随船往返于日本东北部 X-Ray 测站 (152°E , 39°N , 测美日之间的天气状况) 和西南部的 Tango 测站 (135°E , 29°N , 测台风)。船上的生活并不紧张, 由于他们几个新人是被作为未来 JMA 中层领导人员进行培养的, 因此荒川有很多时间观察中纬度海面风暴路径上的锋面气旋云系和低纬度的强对流云团, 而且还能经常见习其他 15 名真正的气象员每天开展日常观测、手绘天气图、并进行相关天气讨论等活动。正是这一年内 6~7 次的随船出海, 使荒川真正爱上了气象学。

一年期的出海结束后, 荒川面临两个选择, 或者去 JMA 做统计员, 或者继续随船做海洋观测。此时 JMA 下属的气象研究所 (MRI) 主任荒川秀俊 (Hidetoshi Arakawa) 教授突然主动邀请荒川昭夫加入 MRI 从事天气预报、分析工作。当时 MRI 没有计算机, 所有预报工作都依赖在 500hPa 天气图上应用挪威人 Fjortoft (1952) 的匀速平流公式。而 1950 年代中期, 国际气象学界最前沿的领域是对大气环流的研究, 比如 Fultz 的转盘试验, 这深深吸引了荒川的关注。1958 年荒川将国际上对大气环流的研究进行了总结, 用日语出版了单行本《大气环流的现代理论》, 向日本气象学界介绍国际上有关大气环流的最新进展, 这本书直到今天仍被很多看过的人大加称赞。

到了 1959 年, MRI 几经权衡从美国购买了 IBM

704计算机, 这比MRI原来的富士通电脑能力强很多。荒川也从业务预报部门转到了新成立的数值预报(NWP)部门。新部门没有程序员, 荒川就从零学起, 对这台计算机的硬件和刚刚诞生的Fortran语言(1957年, Fortran语言诞生在IBM 704机器上)逐渐有了全面的了解, 并开始用计算机解决工作中的具体问题。要知道, 当时即使IBM驻日本分公司里也没几个人懂Fortran语言。同时, 开始接触数值计算的荒川也开始规律地参加“东京NWP小组”的每月讨论, 并受到了正野重方教授的赏识。1960年, 国际数值预报大会(NWP Symposium)在日本东京召开(亦称东京NWP大会)。这是一次具有里程碑意义的大会, 当时国际上著名的有关NWP和大气环流方面的权威专家几乎悉数到场, 包括: Bolin, Charney, Doos, Eliassen, Fjortoft, Gates, 郭晓岚, Lorenz, Mintz, Namias, Pfeffer, Phillips, Platzman, Shuman, Smagorinsky, Wurtele等。在这次大会上, 东大的正野教授与Mintz有过深入的交流, Mintz表明他想发展能模拟季节变化、可长期稳定积分的大气环流模式的宏大愿望, 正野便向他推荐了荒川昭夫。Mintz在拜读了一些荒川的日语论文的英译本后, 决定邀请荒川去UCLA进行为期2年的访问研究, 其核心目的就是帮助他发展大气环流模式。

Yale Mintz (1916—1991年) 于1937年毕业于达特茅斯学院的人类学系, 1942年于哥伦比亚大学获得地质学的硕士学位, 然后到纽约大学气象系工作了2年, 又考到美国西岸的UCLA师从创建气象系的J. Bjerknes。Mintz是个热情奔放、兴趣广泛、智力过剩的年轻人, J. Bjerknes曾生动地回忆道: 他来报到的时候, 除了人之外, 就是满满一大车的书。1949年, Mintz获得气象学博士学位, 这是该校历史上第二个获此学位的人(第一个是Charney)。之后, Mintz留校工作, 并作为J. Bjerknes的得力助手参与很多UCLA气象系的建设和管理工作。

1950年代, 天气预报多是局地、大陆尺度的预报, 刚刚兴起的NWP预报通常也只能报2天。而受到逐渐兴起的有关大气环流的研究的启发, Mintz想发展能长期稳定积分的GCM, 并把预报推广到全球。1961年荒川受邀来到UCLA, 他们两人便开始了一段长达20年的合作。他们两人的工作风格其实天差地别, Mintz由于教育背景的限制并不是一个彻底的气象学家, 但他眼界宽广, 因此他只关心宏大图景, 专注于不断拓展GCM的功能。他总觉得荒川工作进度很慢, 而荒川总是不得不说服Mintz慢下来, 并告诉他目前工

作的难点在哪里。荒川曾回忆道: “我们每天都要讨论1个小时, 或者是在电脑前, 或者是在电话旁, 他每天都有很多新想法, 我通常要否定一多半, 而剩下的都是非常好的点子。”由于当时UCLA比那些国家实验室(如NCAR, GFDL, LLNL等)小很多, 甚至连程序员都没有, 而Mintz又有野心要与他们竞争, 所以荒川几乎承担了全部的代码开发工作, 而且每个周末都要加班赶工。当时UCLA刚刚购买了一台很先进的IBM 709, 荒川凭借自己在日本积累的编程经验, 很小心地编写Fortran程序卡片, 实际的工作进展并不慢。

1961—1963年, 荒川和Mintz主要解决了平流方程中常见的雅可比算子(Arakawa's Jacobian operators)难题, 并顺利发展出了第一代UCLA两层模式, 也称Mintz-Arakawa Model。到了1963年, 荒川由于学者(J)签证到期不得不返回日本, 并且2年之内不得再入境, 荒川便回到了JMA工作。离开荒川的Mintz失落不已, 专门请了程序员Dennis Subsay才能继续开展工作, 同时急切地每个月给荒川写一封信, 希望他能尽快返美。1965年, 荒川再次赴美, 并获得了UCLA的永久教席。他们两人的再次合作爆发了前所未有的能量, 如向模式里加入水汽、完善格点设计、改进守恒性更好的差分算法等。

UCLA的大气环流模式在1965年之后发展很快, 但两人都没有时间停下来撰写论文, 以至于有关UCLA模式的论文是三个模式中心发表最晚的; 不仅如此, 荒川和Mintz凑巧一生都没有共同署名的文章发表。但是, 这没有妨碍UCLA的模式成为世界上传播最广泛的模式。这一方面是由于UCLA作为大学相比于那些国家实验室更自由、更友好的开放态度所致。事实上, 1965年之后, 全世界各地的学生和访问学者纷纷去UCLA交流访问, 他们毕业或回国后又把模式代码带到了世界各地。另一方面是由于IBM公司对UCLA提供了巨大的技术支持, IBM大规模科学计算部的工作人员每周从加州圣何塞(San Jose)到UCLA来听课、调程序, 并最终帮助他们撰写了高质量的文档, 这些文档里甚至包含了完整的源代码, 这使得世界各地的科学家可以轻易地复制UCLA的模式。

第一代UCLA的大气环流模式是原型模式, 大体于1965年成型, 没有水汽过程, 水平分辨率 $7^{\circ} \times 9^{\circ}$, 垂直两层, 物理过程方面也很不完善, 荒川称之为UCLA I。第二代模式UCLA II于1960年代后期完成, 这是第一个可以称得上是“产品级”的代码, 水平分辨率 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$, 使用B格点, 同样只有两层。UCLA II流

传很广，是因为1970年Mintz的研究生Lawrence Gates毕业后将模式带到了兰德公司（RAND Corp.，美国智库），并将其应用在很多美国国防部的项目中，这个兰德公司的版本后来又被进一步带到了俄勒冈州立大学。第二代模式的垂直扩展版UCLA II-3L在第二代模式的基础上，主要把垂直分层增加到3层，这一版本后来又增加垂直分层后扩散到了三个NASA中心：1972年，一个9层版本传播到NASA/GISS；几年后又传播到NASA/GLAS和NASA/GLA。第三代模式UCLA III重新设计了混网格，采用C格点，这也是后来UCLA模式一直沿用的格点设计，垂直方向增加到6或12层。1970年代中期，UCLA III被传播到美国海军和日本气象厅MRI。第四代模式UCLA IV从1980年代早期开始研发，重新设计了 σ 垂直坐标，这一版标志着UCLA模式基本走向成熟。这一版代码被传播到美国海军、NASA/GLA、DOE/LLNL，甚至中国气象局，其中荒川的学生David Randall将这一版的模式代码带到科罗拉多州立大学（CSU），CSU成为后来最重要的模式发展分支之一。

Mintz于1977年退休。他在1980年代一直在NASA/GSFC担任科学顾问，但转而关注陆面过程和水循环。他于1990年获得Rossby奖，于1991年4月27日在以色列死于癌症。荒川早在1977年就获得了Rossby奖，于1998年从UCLA退休，但他一直留在UCLA继续工作至今。他的学生David Randall将荒川退休纪念会上的很多科学家的发言结集出版（*General Circulation Model Development: Past, Present, and Future*），这是一份全面回顾UCLA模式发展的文献。

三、地球流体力学实验室（GFDL）

GFDL的前身是美国气象局于1955年在von Neumann倡议下建立的大气环流研究部（General Circulation Research Section, GCRS），位于马里兰州的Suitland市，距离气象局的联合天气预报小组（Joint NWP Unit）非常近，Joseph Smagorinsky受邀担任主任。当时这个部门的成立主要是为了与von Neumann继续合作开发滤波模式。1959年该部门改名为大气环流研究实验室（General Circulation Research Laboratory, GCRL）并迁至首都华盛顿，从这时起，Smagorinsky开始独立研发9层原始方程模式。1963年，GCRL更名为现在的名字GFDL，并于1968年再次迁至现在的普林斯顿。今天的GFDL已经成为美国最重要的大气科学研究中心之一，其在气候动力和模式模拟方面都具有领先地位。

真锅淑郎（Syukuro Manabe）于1931年生于日本

爱媛县，并分别于1953，1955和1958年获得东京大学的本科、硕士和博士学位。同他的学长笠原秋良一样，他研究生阶段的导师也是著名的正野重方教授。在研究生阶段，真锅就在正野教授和岸保堪教授的指导下，在日本气象学报上发表了几篇论文，其聪颖、活跃的性格深得正野教授喜爱。特别地，他在“东京NWP小组”里也异常活跃，这都为他今后从事数值模式研发方面的工作打下了坚实基础。受导师正野教授的推荐，真锅在博士毕业的1958年就收到了来自美国Smagorinsky的邀请，毕业后直接飞赴美国加入Smagorinsky领导的GCRS。

Joseph Smagorinsky于1924年生于美国一个油画商之家。二战时他正在纽约大学读大二，他毅然选择参加空军，并先后被派到布朗大学学习数学和物理，以及MIT跟随Lorenz学习动力气象。在这期间，他能亲身感受到战争对气象信息的巨大渴求，也积累了很多实际的气象观测经验。于是二战结束后，他决定继续深造气象学。在一次由Charney主讲的天气预报课程上，Smagorinsky在提问环节问了一系列令人印象深刻的问题，Charney认可他的才华，便邀请他到普林斯顿的高级研究所去用计算机来验证他的一系列想法。1950年4月，年轻的Smagorinsky参加了Charney领导的著名的ENIAC试验，这使得Smagorinsky成为最早一批亲身参与1950年ENIAC数值试验的学者之一。之后他便正式加入普林斯顿高级研究所，与Charney和von Neumann合作，共同推进数值试验方面的工作。1953年，时年29岁的Smagorinsky得到了一个美国气象局下属的联合数值天气预报中心的工作机会。两年后，美国气象局又在von Neumann的建议下新成立了一个大气环流研究部（GCRS），由Smagorinsky直接领导。如上文所述，之后，他领导的这个机构几度搬家，并最终GFDL的名字迁至新泽西州的普林斯顿。

Smagorinsky在1955—1956年，通过与von Neumann、Charney和Phillips合作，已经发展出两层半球模式；从1959年开始，他又与真锅合作着手发展9层半球原始方程模式。尽管当时他们的模式使用了过多的黏性耗散，使得模拟的结果看起来更平滑漂亮，但计算不稳定一直是GFDL模式头疼的问题。在GFDL，由于有大量的程序员的支持，真锅得以全身心投入科学方面的思考中，特别是对很多物理过程如何在模式中表达，他做了海量的调查研究工作。比如真锅最早发展的对流调整方案，就是对辐射传输和积云对流过程简洁的高度抽象。除了模式研发本身，真锅还最早提出了使用模式进行CO₂加倍试验，这成为

今天利用模式进行全球变暖研究的起点。Smagorinsky并不具体负责模式代码的发展，他更多地关注方向性的问题。比如他最早意识到气候模式不能只有大气分量，海洋在长期气候模拟中起着举足轻重的作用。为此他于1961年邀请海洋模式方面的专家Kirk Bryan加入GFDL（当时叫GCRL），这使得GFDL的模式最早于1970年代就成为了耦合的海气模式。

1960年代中期以后，Smagorinsky的精力更多地转移到WMO下属的全球大气研究计划（GARP）的规划中，使得真锅成为GFDL模式研发方面实际意义上的领军人物。从这时起直到1998年真锅从GFDL退休，他成为世界上领导模式发展时间最长、最富有进取精神的领袖。在漫长的30多年的岁月中，一大批围绕在真锅身边的合作者也逐渐成为模式研发领域的翘楚，包括：Kurihara, Strickler、Wetherald、Holloway、Stouffer和Bryan等。

GFDL模式的命名不像其他单位那么自成一体，主要包括如下系列：MARKFORT系列，由Smagorinsky最早领导开发的9层半球原始方程模式，1960年代很多有影响力的论文都是基于这个系列；Zodiac系列，这是GFDL第二代模式，主要引入了Kurihara设计的新一代全球减网格，这一代模式一直使用到1970年代；Sector系列，这是一个东西方向只有60个经度的非全球GCM，且海陆分布也高度理想化；SKYHI系列，是从1975年之后开始发展的垂直高分辨率GCM，包含对流层、平流层和中层；GFDL谱模式系列，这是GFDL在1970年代中期以后，从澳大利亚数值气象研究中心（ANMRC）引入的，当时ANMRC的Bourke等人在1970年代早期发展的谱模式大有席卷全球之势；Supersource系列，1970年代后期，Holloway等人重写GFDL的谱模式代码，大大增加模块化和用户可选项，使其成为GFDL模式延续至今的一个谱模式系列，直到2000年之后，才被林山建等发展的有限体积动力框架所取代。

Smagorinsky于2005年9月去世，享年81岁。Smagorinsky一生著作等身、获奖无数，并于1972年获得Rossby奖。真锅于1998年退休，之后曾回到日本担任全球变化尖端研究院的科学顾问，但由于深感不适应日本僵化的学术氛围，他于2002年又返回GFDL继续从事研究工作至今。

四、对美日组合的反思

1950—1970年这20余年间，美国在模式研发领域，除了以上所述的三大中心外，还曾诞生过三个富有个人英雄主义色彩的开拓者，比如1950年领导

ENIAC试验的Charney；1956年全世界第一个真正意义使用原始方程开展GCM试验的Phillips；在LLNL发展出LAM模式、并用电影胶片展示其漂亮结果的Cecil Leith（外号“Chuck” Leith）。他们都曾经对模式发展起到过重要的推动作用，但最终遗憾地没能留下代码遗产。

本文所记述的三大模式中心NCAR、UCLA和GFDL，为什么能站在那个年代模式发展的最前沿，为什么又恰巧都是一个美国人和一个日本人的“美日组合”，却是很值得深入探讨的问题。除却一些泛泛的原因外，我们想提出至少四个最重要的理解角度。

第一，二战后特殊的日本经济状况与美日战略同盟。二战后日本作为战败国经济十分困窘，据“东京NWP小组”的回忆，当时东京大学的老师们薪水很低（除了岸保堪三郎工资较高之外），他们不得不利用课余时间去中学代课。当时为了维持NWP小组每月一次的活动，他们还到外面去拉赞助，比如当时的《朝日新闻》出版社就曾经资助他们2800美元（他们自己都不知道为什么会从《朝日新闻》得到这笔慷慨的资助）。困窘的经济使得优秀的日本青年不得不直面生活的挑战，荒川就是因此接受JMA的工作走上气象监测船的。当时更多的日本优秀青年学者都愿意赴美工作，他们大都承认有相当一部分原因是迫于生计。而恰巧当时受冷战影响，美日结成了特殊的同盟关系，美国不仅可以卖给JMA当时最先进的IBM计算机，还把国际性的NWP会议放到日本东京去开，两国甚至达成协议促进尖端领域的科技合作……这都反映出当时的美日关系是亲密无间的。正是在这样的时代背景下，很多优秀的日本年轻学生纷纷踏上去往美利坚的航船，在遥远的大洋彼岸继续寻找他们的科学之路。

第二，计算机成为战后尖端科学发展的有力武器。美国在战后最先发展出世界领先的计算机工业，诞生了像IBM、Cray等先进的计算机制造商，这为大气环流模式的研发提供了必备的硬件平台。当时的瑞典、日本都有自己的计算机品牌，但由于速度不够快，都只能做NWP的短期预报。比如当时日本的NWP就可以完成2天的计算，却无法更长。只有美国生产的高速计算机，才能真正支撑起大规模的GCM计算。这种硬件上的领先，为美国在GCM研发领域领先世界打出了足够的提前量。使得只有美国才最终成为了GCM研发最好的土壤。

第三，美日在人才培养方面的天然差别与互补。日本在战后把教育放在了最重要的基础地位，并于1947年重新颁布《教育基本法》，强调教育对完善人

格、提升个人价值和培养自立精神的巨大作用，在学制、教材、教学方法上也努力与世界全面接轨。这使得日本即使在最贫穷的战后恢复时期，也保证了学生能学到全世界最先进的知识，并以日本人特有的严谨、扎实的学习习惯内化到年轻人的头脑中。这一切，使得当时的日本年轻人，在个人知识层面似乎并没有因战争而经历任何“断层”。诸如荒川昭夫等人在来到美国后，可以直接上手最先进的计算机，并用最新的Fortran语言进行编程，再加上日本人特有的严谨、求实、脚踏实地，使得他们可以很好地完成与编程相关的工作。而美国的教育体制则更注重对人宏观判断力和领导力的培养，这导致三个模式中心无一例外都是美国人担任宏观领导角色，负责设计模式发展的大方向，因为他们对总体的把控力和对未来的想象力都大大领先于日本人。如此一来，美日组合脱胎于各自的教育体系，尽管有着与生俱来的差别和短长，但却具有天然的互补性。

第四，一个人，一个小组，一次国际会议，成为历史的关键节点和契机。这个人就是东京大学的正野重方教授；这个小组就是由正野重方与岸保堪三郎共同领导的“东京NWP小组”；这次会议就是1960年在日本东京召开的国际NWP大会。正是由于正野教授经常鼓励自己的学生关注模式发展前沿、鼓励他们大胆实践、推荐他们到美国最顶尖的实验室去合作，正是由于有东京NWP小组这样的研讨氛围，才孕育出训练良好的笠原秋良、荒川昭夫和真锅淑郎这一批模式专家。不仅这三人，还有很多同时代的日本气象学家皆出自这一血脉，比如Kurihara和Matsuno等。正是由于有1960年“巨星”云集的东京NWP大会这样的平台，使得东京NWP小组得以向世界展示其研究水平和人才储备，并因此走出了像荒川昭夫等许多优秀的年轻

人。因此从某种意义上说，美国三大模式中心的美日组合现象，应当归功于东京大学正野重方教授的远见和推动，应当归功于一个人、一个小组、一次国际会议这样的关键性枢纽。

20世纪中期，模式发展的浪潮将日渐成熟的动力学应用在传统的天气学分析之上，彻底改变了天气预报和气候预测的面貌，使得大气科学最终站上了现代科学的舞台。一个时代渐渐远去，但那些五彩斑斓，甚至有些激动人心的故事并没有因此被人们忘记。细细品味他们背后的种种偶然，感慨之余不免发现其实一切又在必然中。

致谢：感谢中科院战略先导专项（XDA05080801）和国家自然科学基金（41005035, 41130962, 41130105）对本文的支持。并特别感谢日本早稻田大学水上弘子女士对本文日文资料的翻译和整理。

（作者单位：北京大学物理学院大气与海洋科学系）

深入阅读

- Anon. “Suki” Manabe, Pioneer of Climate modeling. IPRC Climate, 2005, 5(2): 11-15. http://iprc.soest.hawaii.edu/newsletters/iprc_climate_vol5_no2.pdf
- Johnson D R. 1996. On the scientific contributions and insight of Professor Yale Mintz. J Climate, 9: 3211-3224.
- Lewis J M. 1993. Meteorologists from the University of Tokyo: Their exodus to the United States following World War II. Bull Amer Meteor Soc, 74(7): 1351-1360.
- Randall D. 2000. General Circulation Model Development: Past, Present, and Future. Utah: Academic Press.
- Smagorinsky J. 1983. The beginnings of numerical weather prediction and general circulation modeling: Early recollections. Advances in Geophysics, 25: 36.

气候变化专门评估机构——IPCC发展历程

■ 郑秋红

一、IPCC的诞生及工作机制

1. IPCC的成立背景、目的

在人类活动已经对复杂的全球气候系统产生干扰的背景下，决策者们需要有关气候变化成因、潜在环境和社会影响，以及可能的对策等的客观信息来源。基于此，联合国环境规划署（UNEP）和世界气象组织（WMO）于1988年建立了政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC），专职负责气候变化评估工作。

IPCC的目的即是为世界提供一个关于气候变化现状及其影响、应对的科学视角。需要指出的是，IPCC本身并不进行科学研究工作，也不对气候变化及其影响进行监测，其主要工作是在全面、客观、公开和透明的基础上，对世界上有关气候变化的科学、自然和社会经济影响、减缓和适应对策的最新进展进行综合评估。

作为联合国（UN）主持下的政府间机构，IPCC位于WMO日内瓦总部。它向UN和WMO所有成员国开放，目前有195个成员国。

2. IPCC的工作机制与流程

IPCC在大约每年一次的委员会全会上，就它的结构、原则、程序和工作计划做出决定，并选举主席和主席团。全会使用六种联合国官方语言。IPCC设有三个工作组：

第一工作组（WGI）评估气候系统和气候变化的科学问题；

第二工作组（WGII）主要评估气候变化导致的社会经济和自然系统的脆弱性、气候变化的正负两方面影响后果及其适应方案；

第三工作组（WGIII）评估限



IPCC第一次评估报告的中国作者仅9人，之后第二至五次评估分别是11人、19人、28人和43人，数量直线上升。

制温室气体排放和减缓气候变化的方案。

IPCC还设立一个国家温室气体清单专题组（TFI）。另外，支持影响和气候分析的资料与情景任务组（TGICA），协助气候变化相关数据和情景的分发和应用。

每个工作组（专题组）设两名联合主席，分别来自发展中国家和发达国家，其下设一个技术支持组。秘书处负责协调所有IPCC的工作及政府联络。

IPCC的报告力求确保平衡地反映现有各种观点，并具有政策相关性，但不具有政策指示性。IPCC已编写了一系列出版物，这些出版物现已成为决策者、科学家及其他相关专家学者广泛使用的参考书目。

IPCC的报告涵盖了气候变化相关的不同领域。来自各领域的数以百计的学者专家志愿贡献他们的时间和技术专长，担当“主要作者协调人”和“主要作者”，开展评估工作。并另行征集了数百名专家，作为“撰写作者”，补充提供具体领域的专门知识。

IPCC的报告要经过数轮起草和评审。报告的初稿是作者们根据各科学杂志和其他相关出版物中的文献起草的，针对现有研究结果，作者团队在评估结论中使用明确界定的语言，描述它们的确定性。此“第一稿”由专家评审。IPCC鼓励所有感兴趣的专家提交评论。各工作组、作者团队成员、各国政府、各IPCC观察员组织和其他组织均可

鼓励专家们注册为评审者，并协助专家们尽量广泛地参与、表达各种观点、专业知识和地域代表性。

经过第一轮专家评审后，作者团队结合收到的评审意见，编写报告的第二稿；并一并编写报告的“决策者摘要”（SPM）的第一稿。它们要由专家和政府同时审议。注册审议报告第一稿的专家会自动进入这一轮审议；其他专家也可以在这一阶段注册。

收到评审意见后，作者团队随即结合收到的评审意见，编写报告全文和“决策者摘要”的最终稿。报告最终稿要分发给各国政府，请它们对“决策者摘要”进行最后一轮的书面评论。

最后，各国政府要在全体会议上逐行批准“决策者摘要”并接受“综合报告”。

通过这个审议流程提交的所有评论均由作者提出，有关第一稿和第二稿的评论意见均会得到书面回复，供以后发表。

二、IPCC的发展壮大

IPCC迄今已经经历了近26年的发展历程，发布了5次气候变化评估报告，其不断推出各类评估报告的过程亦是其逐步壮大与完善的过程。在2013年9月IPCC第五次评估第一工作组报告（AR5 WGI）发布之际，《Nature》杂志特别刊出《IPCC的25年》一文，用图表形式生动展示了IPCC的发展壮大过程（表1），并指出了IPCC发展的4个特点。

不断发展壮大：IPCC第一工作

组报告从第一次评估到第五次评估内容不断充实完善，报告的长度从第一次评估的412页到第五次评估的2014页，增长了近4倍。主要作者的人数也从第一次评估的34位增加到第五次评估的258位。

处理复杂问题的能力不断增加：气候变化预报模型变得越来越详细，越来越复杂，相关模式也越来越多，目前已经涵盖海洋生物学、土壤过程和大气化学等多学科领域。IPCC集合各学科领域的专家来解决这一复杂问题，为各界提供最新进展成果和有价值的信息。

进展不平衡：对当前气候的模拟越来越精确，但对“气候敏感性”的评估几乎没有明显进展，例如：如果大气二氧化碳浓度相比工业化革命前的270ppm倍增，温度将升高多少度？

信心增强：IPCC通过系列评估，越来越明确人类活动是导致近期气候变暖的主要原因。

三、IPCC的重要成果及效益

IPCC的主要工作是定期推出气候变化评估报告（Assessment Reports），此外，IPCC还不定期发布特别报告（Special Reports）、方法报告（Methodology Reports）和技术报告（Technical Papers）。所有IPCC报告的推出都遵循严格的程序。

大约6年一次的综合评估报告是IPCC的重要产品成果，通常包括三卷，外加一个综合报告。综合报告强调并整合评估报告和特别报告中的材料，包括一个长报告和一个决策者摘要，以非专业人士易于理解

的方式编写，以供决策者和其他政策相关者参考。

IPCC每轮评估报告的发布都产生了广泛的科学和社会影响，尤其是在推动国际气候变化谈判中发挥着重要的科技支撑作用。鉴于IPCC自成立以来对推动气候变化的全球治理做出了不可磨灭的贡献，2007年10月12日当地时间上午11时，瑞典皇家科学院诺贝尔奖委员会宣布将2007年度诺贝尔和平奖授予美国前副总统戈尔与IPCC。

IPCC历次评估报告的成果及重要效益、影响详见表2。

四、中国对IPCC评估的贡献

IPCC历次评估报告的撰写，中国从未缺席，且参与度逐渐增强。

首先，从参与报告撰写人员上看，IPCC第一次评估报告的中国作者仅9人，之后第二至五次评估分别是11人、19人、28人和43人，数量直线上升。从第一工作组来看，第四次报告中国作者有9人，占总数（170人）的5.3%，第五次报告有18人（包括联合主席秦大河院士），占总数（258人）的7%。继丁一汇院士任第三次评估第一工作组的联合主席后，秦大河院士担任第四次和第五次评估第一工作组的联合主席。2013年10月21日，秦大河院士被授予沃尔沃环境奖，该奖项代表了实践环境科学领域的最高奖励，被称为环境与可持续发展领域的“诺贝尔奖”，秦大河院士是获此殊荣的第一位中国人。

其次，从中国引文数量上看，中国的科研成果被引逐步增加，标

志着中国的声音在提高。以第一工作组报告为例，第四次评估报告中中国大陆作者为第一作者的引文数为87篇，占比1.4%，第五次评估报告增长到257篇，占比2.8%，翻了一番。

从参与领域来看，中国作者参与的研究领域越来越广泛，第五次评估报告第一工作组报告的每一章都有中国作者参与撰写。

中国气象局作为IPCC国内牵头组织单位，代表中国政府参与IPCC所有活动，包括组织推荐中国作者、组织中国政府对报告全文和决策者摘要的政府和专家审议等。

五、关于IPCC的争议

虽然全球气候变暖已成为科学界的主流观点，但气候变化支持者与怀疑者之间的斗争从未停止过。自从IPCC第一份评估报告发布以来，就遭到了那些持批评态度的科学家的质疑与批判，尤其是在IPCC第四次评估报告发布以后，相继出现了“气候门”、“冰川门”、“亚马逊门”、“荷兰门”、“中国门”等事件。这些丑闻事件的接连曝光，使IPCC陷入有史以来最严重的信任危机。这些事件不仅暴露出IPCC报告在引用文献上的不严谨，这些结论能够顺利通过多次评审，也暴露出了IPCC在审查工作上的漏洞。

此外，还有学者从理论上质疑气候变暖。非政府间国际气候变化专门委员会（NIPCC）于2008—2014年出版了4次关于全球气候变化的评估报告，其观点与IPCC

表1 IPCC发展壮大历程

基本特征	第一次评估报告 (FAR)	第二次评估报告 (SAR)	第三次评估报告 (TAR)	第四次评估报告 (AR4)	第五次评估报告 (AR5)
发布年份	1990, 1992年发布补充报告	1995	2001	2007	2013—2014
WGI报告篇幅 (页)	412	584	892	1006	2014
WGI报告主要作者人数	34	78	122	178	258
模型最高分辨率 (km)	500	250	180	110	50
所用模型数量	2	20	20	20	45
对人类致气候变暖的认识	“人类活动导致的排放确实增加了大气中温室气体的浓度……将增加温室效应，导致平均额外的变暖”	“有证据表明人类活动对全球气候造成了可辨识的影响”	“过去50年观测到的大多变暖可能（概率>66%）由温室气体浓度的增加导致”	“20世纪中期以来大多全球平均温度的增加很可能（概率>90%）由人为温室气体浓度的增加导致”	“1951—2010年观测到的多半全球平均表面温度的增加极可能（概率>95%）由人类影响导致”

注：来源：Nature, 501(7467): 298—299, 本表由原图表整理而成。

表2 IPCC历次评估报告成果及效益

IPCC历次评估报告成果	重要效益、影响
第一次评估报告 (FAR) 包括: 科学评估气候变化 (WGI)、气候变化影响评估 (WGII)、IPCC 的响应 (WGIII) 三个报告和第一次评估报告概述。此后IPCC又在1992年出版了对FAR的补充报告: 对IPCC科学评估的补充报告、对IPCC影响评估的补充报告和IPCC1990和1992评估。	报告确认了对有关气候变化问题的科学基础, 指出人类活动引起的排放正在显著增加大气中温室气体的浓度。它促使联合国大会做出制定《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 的决定。该公约于1992年在里约热内卢举行的地球峰会上签署并于1994年3月生效。
第二次评估报告 (SAR) 包括: 气候变化科学 (WGI)、气候变化影响、适应和减缓: 科学—技术分析 (WGII)、气候变化的经济和社会维度 (WGIII) 和IPCC第二次评估。	提出人为气候变化是可辨别的, 气候变化的社会经济影响被确定为新主题。“气候变化1995”提交给了UNFCCC第二次缔约方大会, 为系统阐述UNFCCC的最终目标提供了坚实依据, 推动了1997年《京都议定书》的通过。
第三次评估报告 (TAR) 包括: 自然科学基础 (WGI)、影响、适应和脆弱性 (WGII)、减缓气候变化 (WGIII) 和综合报告。	进一步明确过去50年大部分变暖现象可能归因于人类活动, 促使UNFCCC谈判确立适应和减缓两个议题, 推动了谈判进程, 为《京都议定书》的生效和执行提供了一定的科学支撑。
第四次评估报告 (AR4) 包括: 自然科学基础 (WGI)、影响、适应和脆弱性 (WGII)、减缓气候变化 (WGIII) 和综合报告。	明确提出过去50多年的气候变化很可能归因于人类活动, 推动了“巴厘路线图”的诞生, 为国际气候变化应对机制安排提供了科学依据。
第五次评估报告 (AR5) 包括: 自然科学基础 (WGI)、影响、适应和脆弱性 (WGII)、减缓气候变化 (WGIII) 和综合报告。	提出更多的观测和证据证实全球气候变暖, 指出要实现2℃温控目标, 须及早实施全球长期减排路径。将为2015年国际气候谈判及2020年后国际减排行动提供重要依据。
特别报告: 提供对具体问题的评估, 与评估报告的章节结构和编制流程相同, 每份特别报告也都包括决策者摘要。IPCC迄今已发布了10个特别报告。	
方法报告: 主要描述制定温室气体清单的方法与作法, 其目的是满足UNFCCC缔约方清单报告的需求。方法报告亦遵循评估报告的编写和审查过程, 该报告被委员会采纳。IPCC迄今已发布11个方法报告。	
技术报告: 是为特定主题而准备, 它们以IPCC评估报告和特别报告的内容为基础, 并不经过工作组或委员会接受、批准或采纳。IPCC迄今已发布6个技术报告。	

针锋相对, 认为“相对于自然变化, 人类活动对气候的影响要小得多”。2010年, 北京大学遥感与地理信息系统研究所承继成等发布了一份题为《关于全球气候变化问题的争论——对IPCC报告的科学性质疑》的报告, 认为“近百年来, 气温的上升和全球气候的变化属于正常波动范围。”“温室气体、温室效应和气温的关系复杂, 它们与气候变化存在多大相关性, 还尚待研究……”。北京大学物理学院的钱维宏亦对IPCC报告提出质疑, 表明二氧化碳排放与全球变暖并无确实因果关系。有媒体质疑, “IPCC对那些与人类活动影响无关的观点毫无兴趣”。

2014年3月31日IPCC第五次评估报告第二工作组报告发布之后, *Nature* 杂志指出, 当前针对“碳社会成本”的估算模型忽略了几个和气候变化相关的主要风险, 可能低估

了未来的损失。9月10日, *Nature* 杂志发表评论文章指出, 随着IPCC评估工作越来越繁杂, 单靠自愿工作无法维系IPCC开展未来评估工作, 呼吁对作者进行制度支持, 同时延长报告的周期。可见, 气候变化研究及IPCC的未来评估任重而道远。

本文由科技支撑项目“气候变化国际谈判与国内减排关键技术研究与应用”第五课题“IPCC第五次评估对我国应对气候变化战略的影响”(2012BAC20B00)资助。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

深入阅读

- 李婧华, 吴灿, 郑秋红. 2014. IPCC第五次评估报告第三工作组报告中国引文计量分析. 气候变化研究进展, 10(5): 355-357.
- 吕晓莉, 缪金盟. 2011. IPCC在气候变化全球治理中的作用研究. 国际论坛, 13(6): 34-40.
- 吴灿, 贾朋群. 2014. 中国的声音在提高——基于IPCC第五次评估第一工作组报告的文献计量分析. 气候变化研究进展, 10(1): 65-66.
- 郑秋红, 王小玲, 吴灿, 等. 2014. IPCC第五次评估报告第二工作组报告中国引文计量分析. 气候变化研究进展, 10(3): 208-210.
- 中国气象局. 2014. IPCC报告常识. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2014zt/20140507/2014050704/201405/t20140507_245476.html
- Jones N. 25 years of the IPCC. *Nature*, 2013, 501(7467): 298-299.
- Revesz R L, Howard P H, Arrow K, et al. Global warming: Improve economic models of climate change. *Nature*, 2014, 508(7495): 173-175.
- Stocker T F, Plattner G K. Climate policy: Rethink IPCC reports. *Nature*, 2014, 513(7517): 163-165.

日本气象大学的沿革及气象科学史课程

张改珍 李期位 马婧

日本的大学分为“省厅所属大学”和“部局所属大学”，日本气象大学是日本省厅大学之一。省厅大学根据日本中央省厅（文部省以外）等政府机构的需求设立，基于《学校教育法》以外的法令对该系统全国职员进行专业教育、培训、研修，如气象大学为气象厅与全国气象系统职员提供气象专业教育、研修。据统计，日本“省厅大学”1991年为36种51所。这类大学“十分重视基础理论教育和实际动手能力的培养”，具有“专业与课程设置注重实用性、教学方法多样化、注重在职研修等特点”。

一、日本气象大学的沿革

日本气象厅直属的气象大学^①（图1）位于日本千叶县，包括大学部和研修部。除承担全国气象系统职员的上岗培训、知识更新培训、现场培训、干部培训和定期轮岗培训外，还培养气象专业大学生。大学部为四年制，培养将来在气象厅



图1 日本气象大学

日本气象大学在“科学史”一课的课程概要介绍中指出“对于在社会中运用科学技术承担气象业务的人来说，从外部观点出发，运用多种尺度和角度来评估科学变得越来越重要。如果以‘科学论’（Science Studies）作为运用这个领域的观点看待科学的总称，运用历史的方法来研究科学就可以称为‘科学史’”。

工作的职员，对将要成为国家公务员的未来气象职员进行气象相关知识、技术的教育，包括地球科学、基础学术、一般教养等课程，也包括防灾等具有气象部门特色的课程。研修部为1年以内，对气象厅的在职人员进行气象知识和技术的在职培训。日本气象大学最早创立于1922年9月，为提升地方气象工作人员的层次而设立，确保气象人才培养和成长的中央气象台测候技术官养成所；1924年从专门学校升格为高等专门学校；1951年4月改为中央气象台研修所；1956年7月随着中央

气象台更名为气象厅改为气象厅研修所；1962年4月改为气象大学，直属于气象厅。其办学宗旨是“对气象部门的职员进行从事气象业务工作所必要的教育和训练”；1964年4月起，大学部的学制改为4年，并增设函授部，学制为2年；1991年12月起，本科毕业生开始授予理学学士学位。气象大学几易其名，仍然发挥重要作用。

1968年3月，日本气象大学大学部首届15名四年制本科生毕业，并都在毕业前做了毕业论文；1970年，气象厅根据气象大学建校以来存在的问题和气象科学技术发展情况，对办学方针、学校的各项规章制度和课程设置作了进一步修订。

1965年，气象大学研修部为在职人员开设过电传、甚高频（VHF）通信和传真三个研修班，各班的研修时间从20天到两个月不等。

1972年，气象厅规定凡是刚到气象部门工作的新职员（初级职员），都必须先到研修部接受短期轮训；1973年，气象厅又推行新的研修制度：通过把职员安排到研修部轮训的办法，使所有初级职员经过初任职员研修→普通科研修→技术科研修→专攻科研修等研修阶段，逐步使学员具有较高的业务水平。

^① 见日本气象大学网站<http://www.mc-jma.go.jp/mcjma/educational/syllabus1.htm>，也有人翻译为“日本气象大学校”。

二、日本气象大学的气象科学史课程

据所搜集到的资料显示^①，1981年，日本气象大学大学部的课程设置呈现为公共基础课程、专门课程和特修课程三类。前两者参照一般大学同类课程的要求开设，分为必修课和选修课；特修课程教授气象业务所必要的专门知识和技术，均为必修课。当时，气象大学要求学生必须在公共基础课程和专门课程这两类课程中修满至少158学分，在特修课程中修满300学时以上才能申请毕业。公共基础课程分为人文科学、社会科学、外语、保健体育和自然科学5类，后3类大部分为必修课，前两类为选修课。历史课程包括在作为选修课的人文科学和社会科学中。公共基础课程中历史课设置情况见表1。

到1995年，气象大学大学部本科生的课程设置呈现为必修科目、选修科目、特修课程三个方面。必修科目和选修科目又分为教养课程和专门课程两类，特修课程属必修的实习科目，必须保证300学时以上方能毕业。选修科目的人文科学系列和社会科学系列中仍然保留了历

史学和社会思想史课程。

根据日本气象大学官方网站最新的资料和数据，2014年，气象大学大学部根据文部科学省的规定设置教养系列、基础系列和专门系列三种课程，并通过讲授和实习等特修科目让学生掌握气象业务的基础知识。毕业所需教育课程为153学分，特修课程为500学时。毕业生授予理学学士学位。教养系列包括人文科学、社会科学、英语和第二外国语四种选修或必修课；基础系列包括数学、物理学、情报科学和化学四种课程，大部分是必修课；专门系列包括气象学、地震火山、地球环境科学、研讨和毕业研究五种，大部分是必修课。改为科学史的历史课程包含在人文科学选修课中。教养系列课程中历史课设置情况见表2。

日本气象大学的专门系列课程富有特色且非常重视气象科学史教育。如大学设置了持续半年的“数值预报论”必修课。日本的数值预报业务已经开展了50多年，已经成为气象厅进行天气预报和气候预测的基础技术，课程通过各种模型学习，要求学生熟练掌握并有效应用数值预报方法，也对数值预报在日

本的发展历程做了教学规定；日本有着易受台风、大雨、地震、海啸、火山喷发等灾害影响的自然条件，气象大学设置了半年必修的地震火山概论、通年必修的地震学、半年必修的地震学演习课程；设置了1年的气象业务概论课作为全面了解和了解气象厅所有业务的基础，同时设置了2年的气象防灾概论，学习自然灾害发生的机制和灾害对策基础知识，同时也关注其历史和最新动向。在气象灾害概论中，为了减轻自然灾害的影响，确保人们生活 and 交通安全、工业发展的目的，学生不仅要学习气象、海洋、地震、火山学的知识，还要学习气象、海洋、地震、火山现象和自然灾害的关联性，自然灾害发生的危害及其对策，防灾情报的应用等。

从日本气象大学大学部历史课程设置及其变化来看：（1）尽管历史课在不同时期被不同地称为公共基础课或教养系列课，但是从未被撤销，可见气象大学对气象大学生历史教育的重视一以贯之；（2）尽管历史课在不同时期均以选修课的形式出现，从趋势来看，该课被选中的概率从1981年的0.5（表1，“历史学”和“社会思想史”均为6无序选3）上升为2014年的0.67（表2，“科学史”3无序选2），即，在人文科学科目有所削减的情况下，科学史课程仍然得以保留，可见气象大学对历史教育的重视有所增加；（3）从质的方面看，课程设置由“历史学”、“社会思想史”进一步具体化为与气象专业学生更为相关的“科学史”，历史教育更具针对性、更为具体化；（4）大学的专门系列课程除了教育学生掌握技术、方法、模型，还重视对相关领域气象科学史的讲授和教育，以使更客观全面地看待一门理工科课程或一门技术性课程。

气象大学在“科学史”一课的

表1 1981年日本气象大学大学部公共基础课程历史课设置情况

类别	性质	课程名称	学年数	周时数(讲课)	学分	毕业应修满的学分
人文科学	选修	哲学概论	1	2	4	12学分以上
		逻辑学	1	2	4	
		心理学	1	2	4	
		教育学	1	2	4	
		历史学	1	2	4	
		文学	1	2	4	
社会科学	选修	法学	1	2	4	12学分以上
		政治学	1	2	4	
		社会学	1	2	4	
		经济学	1	2	4	
		社会思想史	1	2	4	
		地理学	1	2	4	

表2 2014年日本气象大学大学部教养系列课程历史课设置情况

类别	课程名称	学年数	性质
人文科学	伦理学	1	选修(2科目以上)
	科学史	1	
	文学	1	
社会科学	社会学	1	选修(2科目以上)
	政治学	1	
	公共经营学	1	

① 作者只收集到1981、1995和2014年的资料，故仅对此三个年份的课程设置进行说明和比较。

课程概要介绍中指出“对于在社会中运用科学技术承担气象业务的人来说，从外部观点出发，运用多种尺度和角度来评估科学变得越来越重要。如果以‘科学论’（Science Studies）作为运用这个领域的观点看待科学的总称，运用历史的方法来研究科学就可以称为‘科学史’。课程以现在和过去对于‘科学’理解范式的不同为提示，从而加深我们的相对科学观。希望通过这样的视角培养人才。与此相关，如何普及科学，科学的交流问题，不管对于专家，还是对于一般民众来说，都值得探讨”。寥寥数语，阐释了社会、科学技术、气象业务三者之间的关系，即从事气象行业的人们在社会中运用科学技术工具承担气象业务；还指出了气象从业人员探讨科普和科学交流问题的重要性；对“科学史”的学科定位和理解极其到位、深刻，要培养“相对的科学观”。我们可以看到，气象大学大学部设置“科学史”课程极具战略眼光。

此外，防灾气象业务的开展，需要与相关单位和负责人之间进行沟通，良好的沟通显得尤为重要。为此，气象大学专门设置持续4学年的演习课程，请气象厅和外部门的专家来进行业务中必不可少的沟通能力训练。实习课程的内容为参观气象厅各机构和防灾相关单位，并完成观测单位和工作单位实习。

三、讨论

尽管日本气象大学不同于一般的学历教育，基于《学校教育法》以外的法令运行，其沿革和对历史课程的重视也深受战争，特别是第

二次世界大战和其他因素引发的教育改革的影响。培养气象厅职员的教育目的也决定了大学部的特色专业课与日本气象厅所开展业务和与应对日本客观自然条件的需要紧密结合的特点。其重视基础理论教育和实际动手能力培养相结合，专业与课程设置注重实用性、教学方法多样化等特点值得我国气象教育培训事业借鉴。

二战后，为了铲除战前天皇制国家主义和军国主义教育，战败国日本在美国的强制要求下开始推行资产阶级民主主义教育，1947年3月31日颁布施行了《教育基本法》，确定了“培养尊重个人尊严、追求真理和希望和平的人”的总目标和以自由、民主、平等、和平为核心的民主主义的教育基本理念。日本学者杉原诚四郎在评价《教育基本法》的意义时认为：“战前日本的教育体制并非完全否认个人的尊严和价值，但是由于在天皇制教育之下，总体上重视的是与社会的协调，所以个人的尊严、个人的价值不能说充分地受到了尊重。战后，在民主主义之下，教育是从个人的尊严和个人的价值出发的。这是与战前教育的根本区别之所在。”1951年，前身为中央气象台测候技术官养成所和高等专门学校的日本气象大学更名为中央气象台研修所，“研修”意味着办学目的由国家主义的技术养成转型为同时注重对个性的尊重和人格的完善。同时，大学在公共基础课程部分设置了一定比例的人文科学、社会科学、外语、保健体育等助益于完善人格、尊重个性的选修课。到1984

年，大学明确了“教养课程”的提法，“教养”一词表达了不仅教育知识和技术，还要全面培育人格和个性。

2006年，日本又颁布施行了经过全面修改的《教育基本法》，确定了“培养尊重个人尊严、追求真理和正义、尊重公共精神、具有丰富的人性和创造性的人”的总目标和以“公共”、“传统”和“爱国心”为核心的国家主义的教育基本理念。与此相关，气象大学大学部设置教养系列、基础系列和专门系列三种课程，讲授和实习等特修科目以“落实”这一国家目标和理念，特别是设置大量实习和沟通能力训练课程以落实“公共”这一核心理念；历史、科学史、气象科学史的设置，甚至历史课愈来愈受重视，正是日本气象大学实现“教养”、培养“世界性”日本人的重要途径和方式。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

深入阅读

- 梁忠义. 1998. 日本高等职业技术教育的一环——大学校述评. 比较教育研究, (2): 46.
- 林师敏. 2009. 日本“省厅大学校”的特点及其启示. 河北大学成人教育学院学报, 2(11): 57.
- 王晓茜, 等. 2007. 日本教育基本法的修改与教育基本理念的转变. 外国教育研究, (7): 6-13.
- 杨永歧. 1995. 日本气象大学校简介. 辽宁气象, (1): 36-38.
- 张菊生. 1981. 大学气象教育和培训. 气象科技, (S3): 118-122.

WMO教育培训历史、现状与发展

■ 陈金阳

一、世界气象组织 (WMO) 教育培训历史与背景

1958年, 阿根廷Buenos Aires大学向拉丁美洲学生免费开放气象课程之后成为WMO首个区域培训中心。1960年, WMO综合培训计划形成, van Mieghem教授(比利时籍)于1962年提出四大分级系统, 1965年WMO成立教育培训专家组, 于次年由WMO执理会(EC)审议通过, 并决定由van Mieghem教授担任组长。1970年于罗马举办了主题为“气象高级教育与培训”的首届WMO教育与培训大会(SYMET), 1976年教育培训司在WMO秘书处内组建。

1. WMO执行理事会教育培训专家组(EC Panel of Experts on Education and Training)。EC规定“专家组向WMO秘书处提供指导以协调所有WMO气象教育与培训领域的活动, 并提升与加强各国特别是发展中国家气象水文局的人员培训, 并向培训中心建议最合适的培训教材。”1966年于日内瓦召开的首次专家组会议上, 专家组对如何评选与监管WMO区域培训中心进行探讨。过去的几年里, 专家组定期向EC建议新区域培训中心名单, 并通过与东道国联合起草协议等方式促进WMO区域培训中心的成立。

2. WMO教育培训大会(SYMET)。首届SYMET会议于1970年在罗马举办, 主题为“气象高级教育与培训”。逐渐形成4年举办一届的传统。研讨会对于WMO成员国开展和发展气象继续教育和培训工作具有重要的指导意义, 这是WMO在教育培训计划下最重要的会议。一般来说, 会议的主要目标是确定和分析当前和未来重要气象服务领域的教



目前全球共有38家WMO认定的区域培训中心(RTC), 以帮助各发展中国家教育与培训气象科技人才, 帮助各国水文气象局提升能力建设, 更好地提供天气气候服务, 减轻灾害风险。

育培训需求; 对厘清WMO区域培训中心职责的进展情况进行回顾; 检查WMO资质和能力的规划; 回顾拓展远程学习机会的进展情况和制定未来拓展规划; 为培训管理发展和培训能力框架制定计划。会议最终目标是协助WMO成员国, 尤其是其水文气象局, 应对当前和未来5~10年气象教育培训的挑战。2006年在南京举办的第10届WMO教育培训大会围绕“气象水文防灾减灾教育培训”主题。此次研讨会的总体目标: 促进和推动防灾减灾文化在各国气象水文部门、决策部门、信息用户和公共社会的建立。其目的是让气象水文培训机构的领导掌握有关减少灾害风险的最新培训需求, 积极协助当地政府和社会, 保护人民的生命和财产安全, 最大限度地减少灾害所带来的损失, 尤其是降低遇险人群的脆弱性, 开展更具恢复性的经济活动, 降低赈灾费用。2010年在印度尼西亚举行的第11届WMO教育培训大会(SYMET-11)重点关注WMO258号文件的更新、气象业务人员的资格和能力、远程教育及其应用、航空气象人员培训等事项。第12届WMO教育培训大会(SYMET-12)于2013年9月2—6日在法国图卢兹召开, 会议主题为“带着目的培训”(Training with a Purpose), 着眼于如何进一步发挥WMO现有区域培训中心的作用, 以更好帮助各国提升能力建设。

3. 各国气象水文局培训机构领导

人常务会议(SCHOTI)。SCHOTI于1990年成立, 是一个非政府国际组织, 其成员主要为发达国家气象水文培训机构领导人, 其主要目标是提供论坛和机制, 使成员国的国家气象局在教育培训领域合作, 特别是在引进和探讨教育培训新方法和技术方面。SCHOTI与WMO紧密合作, 旨在支持提高世界天气服务的专业发展。SCHOTI选举有一个国家气象局培训机构领导人协调委员会(Coordinating Committee of Heads of Training Institutions of National Meteorological Services, 简称CoCOM), CoCOM在每次会议期间负责会议的组织等事项, 直到下一次会议为止。CoCOM成员为6个培训机构领导人(其中至少有4个代表发达国家气象局), 另有1个来自WMO认定的区域培训中心(RTC), 共由7人组成。WMO教育培训办公室主任和最近离任的前CoCOM主席作为当然成员。SCHOTI按其宗旨向WMO建议其4年一次的教育培训研讨会的主题和组织, 以及与WMO成员国有关的教育培训问题。CoCOM主席可以按照教育培训专家组的要求参加其会议。

二、WMO区域培训中心现状与发展

目前全球共有38家WMO认定的区域培训中心(RTC), 以帮助各发展中国家教育与培训气象科技人才, 帮助各国水文气象局提升能力

建设，更好地提供天气气候服务，减轻灾害风险。每个RTC与其本身所在区域协会相连，一区协（非洲地区）拥有RTC数最多，达到11个。大部分RTC采取传统的面授方式，一些已开始利用远程学习技术，开展远程教育及培训（图1）。

RTC的申请程序为：首先由成员国提出申请，由WMO秘书处以及EC专家组进行审核，最终由EC审议通过。现有的RTC每8年还要通过如下2个步骤进行重新确认资质：RTC实施自评，由EC专家与区域协会联合对RTC进行外部评估。

2002年8月，WMO正式确认中国气象局气象干部培训学院作为WMO北京区域培训中心，并于2003年4月通过世界气象组织的首次外部评估。2011年4月WMO区域培训中心评估专家组分别访问南京区域培训中心（南京信息工程大学）和北京区域培训中心，对中国两大培训中心进行外部评估。外部评估专家组由哥斯达黎加大学维尔马·卡斯特罗教授（Vilma Castro）任组长，WMO教育培训办公室奖学金处处长尹卡·阿迪拜尤（Yinka Adebayo）和北京大学物理学院大气与海洋科学系副主任张庆红教授为评估组成员。

时隔8年，北京区域培训中心再次接受WMO外部评估。外部评估专家组对北京中心给予高度评价，认为北京中心通过各种培训课程有效弥补了高校教育和实际业务能力之间的空白，为WMO区域培训提供了成功经验，评估组希望北京中心在此方面做更多的工作，为世界气象培训事业贡献更大力量。

在WMO教育培训专家组有关区域培训中心的最新统计中，最为活跃的三大RTC分别为北京区域培训中心，南京区域培训中心与俄罗斯圣彼得堡区域培训中心。

自1958年成立第一个RTC以来，

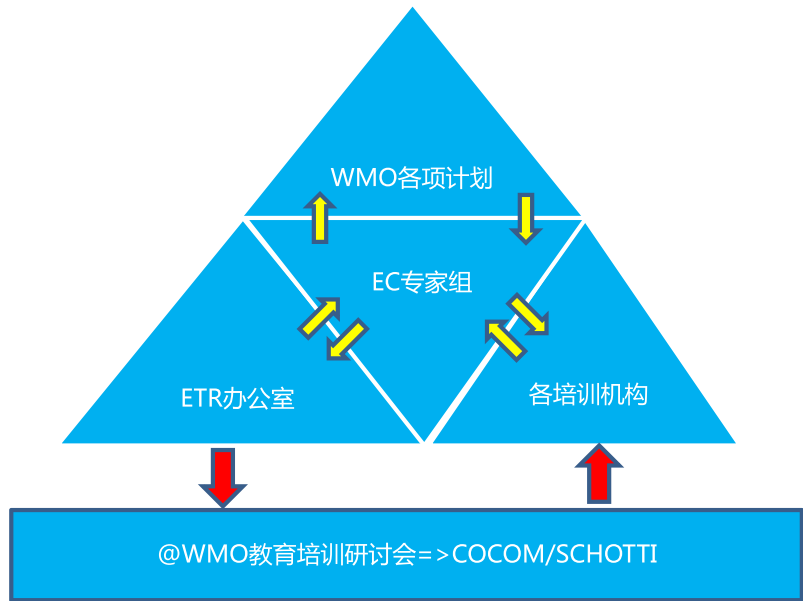


图1 WMO教育培训关系图

发展至今，RTC目前存在如下问题：RTC之间缺乏合作沟通机制；需要对RTC未来的发展进行持续的引导与支持；RTC实施培训的标准不一；RTC本身没有能力预估未来10年的培训需求等。

鉴于RTC这些亟待改进的问题，在法国SYMET12大会上，WMO提出，由各RTC为实施主体，将全球所有RTC、相关科研机构、相关高校教育培训资源重新整合，成立WMO全球学校（WMO Global Campus），并提请大会就成立全球学校问题进行讨论。

全球学校旨在建立一个全球性教育培训大网络，实现各国国家级培训中心与WMO区域培训中心更有效运转。全球学校目前对各大RTC在其中所要扮演的角色、职能分工等尚未给出明确的阐述，对成员国、EC专家组等做出如下职责分配。

1.WMO成员国：通过各种方式充分支持本国国家级培训中心，对培训中心优先发展计划提供指导，以便培训中心能够提供所需的高质量教育与培训活动。

2.WMO区域协会：积极开发本区域教育与培训优先发展领域，参与各自区域培训中心的调研，并为参训学员提供帮助。更为关键的是致力于形成区域核心联系与协调中心，并引入新机构加入全球学校，以便更好满足需求。

3.WMO技术委员会：提供气象学家能力指导文件，并对其进行定期更新，并致力于促进区域内相关机构的合作以丰富WMO成员国的教育培训资源。

4.EC专家组：设立并不断完善全球学校的相关政策，并指导成立一个独立的全球学校指导委员会，以确保全球学校倡议顺利开展并取得成功。

5.WMO执行理事会：为全球学校提供资金支持或协助全球学校取得相关资金支持。

6.WMO秘书处：与全球学校指导委员会密切合作。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

《气象知识》创刊以来的探索发展回顾

■ 任珂 邵俊年 杨静

2014年10月10日，是中国气象学会成立90周年纪念日，《气象知识》与中国气象学会渊源深厚。1978年，在中国气象学会在京理事会上，提出由中国气象学会创办一本全国性、公开发行的气象科普刊物——《气象知识》。后设立《气象知识》编审委员会，筹备《气象知识》的创刊及内容审定。1981年2月25日《气象知识》创刊号（图1）正式出版发行，以刊物为载体，开展气象科学技术的普及工作。



图1 《气象知识》创刊号封面

回顾《气象知识》的创刊及发展，《气象知识》与时俱进，不仅在外观、印刷质量得到提高，在栏目、选题策划战略上也不断调整。

本文通过回顾《气象知识》在“栏目规划”和“主题策划”的探索与发展之路，分析为适应读者阅读需求及发展特点而做出的调整和改变；并通过与当前具有较好口碑，在内容上较相似的杂志进行对比，探索《气象知识》在未来栏目



1978年，在中国气象学会在京理事会上，提出由中国气象学会创办一本全国性、公开发行的气象科普刊物——《气象知识》。后设立《气象知识》编审委员会，筹备《气象知识》的创刊及内容审定。

规划和主题策划发展道路中的模式及新思路。

一、不同时代背景下的《气象知识》

科技的发展引发科学普及热，而科普期刊正是科学普及的重要途径。1978年3月，中共中央、国务院在北京召开了全国科学大会，会上指出，“科学技术是生产力”。《气象知识》杂志就在这股“科学的春风”下酝酿而出。采用简约朴素的风格，文章较为简短，以文字叙述为主，多服务于农业生产生活与气象工作者，内容专业性较强，较少使用插图，多是创作绘制一些简易明了的题图。

到20世纪90年代，颁布实施了《中共中央、国务院关于加强科学技术普及工作的若干意见》，要求科普工作的对象重点放在青少年、农村干部群众和各级领导干部身上。读者群更为宽泛，《气象知识》结合时代特征，探索读者定位，文字语言上追求形象生动，版面上追求活泼有生气，增强吸引力和可读性，使杂志更接近通俗刊物。

步入21世纪，此时的社会环境和出版环境都发生了巨大的变化。随着印刷技术的发展，期刊市场的动荡，读者口味的骤变，《气象知识》实施了4次刊物的改版。从32页、小16开、黑白印刷发展到今天的64页、大16开、全彩色印刷；从

单纯纸媒、铅字排版到胶版印刷，经历了自身的文化蜕变。在保留文字实力之外，加强杂志的视觉表现力，使图片兼具叙事性、说明性和表现性等特点，杂志的文本风格和视觉表现等方面日臻成熟。办刊理念从单纯传授式转变为更适宜现代社会节奏的互动式。稳中求新，形成自己的固定风格，打造自身品牌（图2）。

伴随信息技术的飞速发展和数字技术的推广，传统媒体与新媒体的界限正越来越模糊，大众传媒正式步入新媒体时代。《气象知识》开通官方网站、博客、微博、微信等，探索在新媒体强势发展形势下，刊网联动，走多元化经营的道路。

二、《气象知识》栏目规划之路

栏目规划是杂志品质规划的重要组成部分，很大程度上决定了杂志的可读性和阅读效果。精心策划的优秀栏目能将各类文稿科学、有机地加以组合，构建出合理的阅读梯次、内容梯次和视觉节奏。

《气象知识》从创刊到现在共编辑出版了近200期，先后开辟过近百个栏目。创刊之初的80年代，栏目设置处在不断探索阶段，反映同一内容的栏目名较多，例如“中小学生气象科普”主题的栏目就有“中学生学气象”“教与学”“学习·攀登”“初学者园地”“青少年

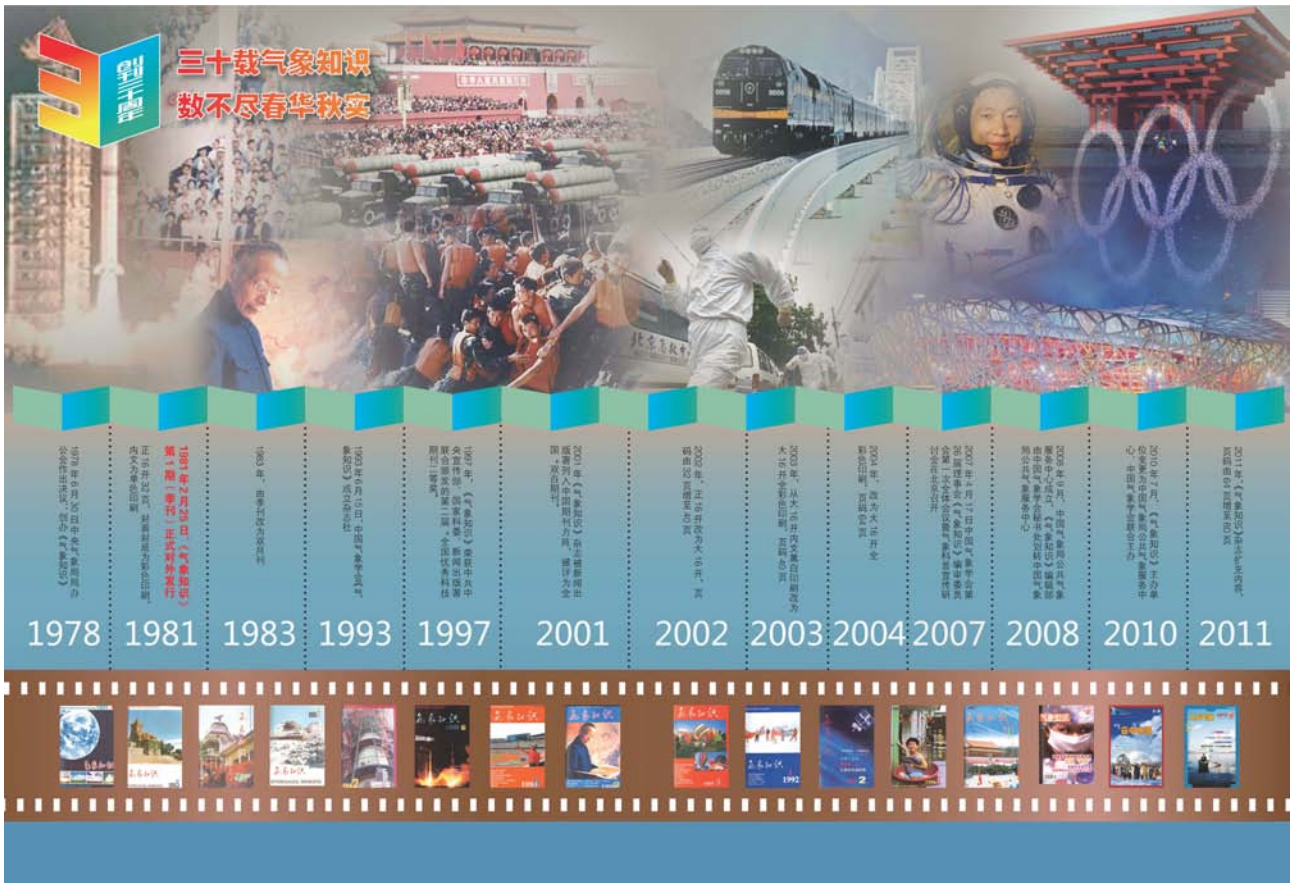


图2 《气象知识》2011年第2期30周年宣传页

气象园地”等多个栏目，各栏目之间辨识度不高，同一主题文章分散在不同的栏目之中，不易形成品牌栏目。

与学术类期刊相比，科普期刊更注重信息组合方式，栏目设置既要推陈出新又要保留基本。20世纪90年代，《气象知识》把原先细碎的栏目进行了有效的组合，形成了“本刊特稿（本期视点）”“防灾减灾”“气候变化”“农业气象”“气象与生活”“气象万千”等几大板块。每期板块固定，而栏目则根据稿源的不同灵活设置。这样的设置一是化繁就简，突出重点；二是眉目清晰，功能鲜明；三是框架稳定，灵活可变。

进入21世纪，《气象知识》面向大众调整期刊定位，期刊内容倾向性增强。栏目的策划设置上也更加有针对性，增设“气象信息员

园地（风采）”栏目，保留“校园百叶箱”“世界气象日”栏目的同时，出版“校园增刊”与“科普活动增刊”。

三、《气象知识》选题策划之路

选题策划是期刊的生命之源和持续发展的动力，办好一本杂志就必须首先做好选题策划。大多或者全部只讲一个主题，大部分文章都是围绕某一主题或某一区域进行展开，每篇文章既独立又相互联系，共同组成一个整体。

《气象知识》杂志在创刊之初的选题意识比较薄弱，每期杂志只是多个独立栏目的组合。1986年开始设立“世界气象日”栏目，针对“世界气象日”主题文章分散在当年每期杂志上，只有寥寥数页，不能作为当期杂志的主打栏目，甚至主题思想。1994年设立“本刊特

稿”栏目，开始针对某一事件或某一天气现状进行较为全面的讲述。1995年第4期在“本刊特稿”中以“75·8”河南暴雨事件为主题，用近20页的内容回顾了“75·8”暴雨及其相应的气象防灾减灾科普知识。之后，这种以某一事件或某一天气现状为主题的策划专栏日益增多，且内容分量能够占一期杂志的1/3，甚至1/2。进入21世纪，《气象知识》编辑们选题策划意识逐步增强，仅以“世界气象日”选题的策划为例，2006年第2期的“世界气象日”专栏就占了当期杂志的5/6页面。2011年更以“增刊”形式全面地围绕2011年世界气象日主题——“人与气候”进行选题策划。

2011年《气象知识》编委会会议上确立了2012年的选题依据，结合气象的区域特色，确定了“根据不同区域，突出气象科普杂志的区

域服务特色”的策划思路。并且随着全球气候变暖,极端天气气候事件频发,《气象知识》也在不断探索“围绕天气、气候热点事件及特点,灾害防御提示,突出气象科普杂志的天气、季节服务特色”。

四、保持《气象知识》选题内容的专业性、独特性

当前众多生活、地理、科技等杂志选题策划操作方式重视“事件+知识”“由头+知识”,而气象与人们生产生活的方方面面有密切的联系,同时,由于全球气候变化造成极端天气气候事件频发,天气气候事件则成为众多非气象专业的杂志期刊选题策划的“由头”。当非专业性期刊也在向“专业性”进军时,《气象知识》如何应对才能取得不可替代的一块气象科普阵地,这是个很重要的问题。

《气象知识》不仅需要提前选定长期策划方案,结合当前热点天气气候事件的具有一定时效性的选题策划也必不可少。《气象知识》在“事件”的展开及双月刊的周期如何与类似杂志竞争呢,这就要求在专业性、独特性方面下功夫。

《中国国家地理》的李栓科讲到认识地理有三部曲,即与日常衣食住行有关的基础地理,有助于提高各种商业抉择、政府决策的准

确性和科学性的实践地理,关于版图与人与自然相处等原则的地理哲学。气象与地理的联系千丝万缕,地理资源的千差万别,自然景观的千姿百态,而造成这些差异的因素中气象元素是必不可少的,地域地形的差异也造成了天气气候、风俗习惯的差异性、独特性。《气象知识》在区域气象专题策划上则要突出气象专业性、独特性,做到与其他杂志类似选题内容联系又有区别,可侧重与衣食住行有关的天气气候、气象应用、气象人文等,区别于《中国国家地理》的地理侧重点。

《三联生活周刊》在2012年7月21日发生北京特大暴雨之时,迅速组织策划增刊,仅用4天时间完成了稿件的策划、组织、采写,并充分利用其优势,视角侧重于在暴雨面前,不同人的见闻及对其的影响。

《气象知识》则利用自身资源优势,选取不同的视角,“此次特大暴雨产生的原因”“天气预报员难忘的一天”“教你雷达识别暴雨”这些都是《气象知识》所特有的,不同于《三联生活周刊》关于当天不同人员遭遇暴雨见闻的选题策划,体现其专业性、独特性。

当前,数字媒体对纸质媒体的冲击力很大,新媒体对期刊杂志的价值主要体现在传播效率和营销功能。《气象知识》在维护官方网站

的同时,开发校园气象网站,结合《气象知识》校园气象增刊,开展线上线下活动;同时开发数字气象科普馆网站,将《气象知识》杂志上的科普内容数字化,并结合视频、游戏等方式将气象科普知识形象化、趣味化,具有互动性。开通《气象知识》官方微博和微信,不断探索在新媒体强势发展形势下,如何结合杂志策划及内容,充分利用其自主、直接、交互性的传播方式向公众传播气象科普信息。

(作者单位:任珂,中国气象局气象宣传与科普中心;邵俊年,气象出版社;杨静,中国气象局公共气象服务中心)

深入阅读

- 李栓科. 2002. 认识地理三部曲. 中国国家地理, (12): 20.
- 邵俊年, 武蓓蓓. 2014. 逆境求生——科普期刊《气象知识》近年来探索实践的启示. 科技与出版, (5): 124-127.
- 王亚男, 刘德生, 俞敏. 2012. 现代科普期刊栏目规划研究. 编辑学报, 2(2): 112-115.
- 薛万合. 2001. 一个好栏目一片天. 编辑之友, (4): 31-32.
- 张光斌. 2012. 科普期刊的微博内容分析及其应用研究——以新浪微博为例. 科技与出版, (6): 106-109.
- 庄肃明. 2011. 梦恋读者 醒恋读者. 气象知识, (2): 10-12.

“气象史”主题文献计量指标分析

吴灿 郑秋红

一、数据来源及统计方法

气象史研究的范畴较为广泛，按研究内容大体可分为三个方面：

(1) 大气自然史研究，主要研究大气的成分、性质、结构及环流型等的形成和演变史，例如：行星大气形成史、气候演变史、第四纪冰期气候史、历代旱涝史等。(2) 大气科学技术史，主要研究的是气象科学技术领域内的历史发展，主要收集并鉴定大气科学技术史实，研讨人类对大气规律的认识史和利用、预报、影响大气过程的技术史，例如：天气预报方法史、大气探测史、大气化学史、气象学史等。

(3) 气象社会史，主要探讨历史上气象科学技术的社会影响及社会对气象科学的促进和限制的历史，如气象教育史、气象组织沿革史、气象灾害预防史、气象政策法规史、气象史学史、气象服务的经济及社会效益史、气象学会史、气象科普工作史、大气科学思想发展史、气象人物传记等。本次检索的文献主要针对大气科学技术史和气象社会史领域（检索结果涉及范围较广，但内容均包含气象史研究）。

利用中国知网学术期刊网络出版总库（CAJD）和ISI Web of Science平台以及美国气象学会（AMS）期刊数据库^①，检索统计国内外“气象史”相关的主题文献（上述数据库收录的文献来源为期刊和会议论文，因此本次检索的结果不含“气象史”方面的专著）。在CAJD中，采用的检索式为：(TI%'



19世纪后期，国际学术界便有了关于“气象史”的文献研究，其中最早的一篇研究论文——*The present condition and recent progress of climatology*刊登在1895年出版的*Monthly Weather Review*上。

气象史') OR (SU%(挪威学派' + '芝加哥学派' + '卑尔根学派') AND SU%('气象' + '大气' + '天气')) OR (TI%('发展历程' + '发展回顾' + '研究回顾'))，（检索日期：2014年11月13日）。在ISI Web of Science中，选择SCI-E、SSCI、A&HCI、CPCI-S和CPCI-SSH数据库，选用高级检索方式，采用的检索式为：TI=(histor* or progress* or review* or look* or develop*) and (meteorolog* or scien* or techn* or research* or stud* or forecast*) AND WC=Meteorology & Atmospheric Sciences，年限选择所有年，不限定文献类型（检索日期为2014年11月14日）。在AMS期刊数据库中，选用高级检索方式，采用的检索式为：TI=(histor* or progress* or review* or look* or develop*) and (meteorolog* or scien* or techn* or research* or stud* or forecast*)，年限选择所有年（检索日期为2014年11月14日）。由于检索结果还涉及部分大气自然史和气象观测数据分析方面的文献，为了准确反映大气科学技术史和气象社会史领域的发展状况，我们对初次检索结果进一步进行了人工筛选。经筛选后，并剔除ISI数据库、AMS期刊数据库重

复收录的文献，共得到“气象史”外文文献509篇（AMS数据库收录236篇，ISI数据库收录459篇，（其中研究论文（Article）和综述类（Review）文献为352篇，约占文献总数的76.7%）；CAJD国内文献为127篇^②。

二、统计结果与分析

1. 论文产出年代分布

检索结果表明，19世纪后期，国际学术界便有了关于“气象史”的文献研究，其中最早的一篇研究论文——*The present condition and recent progress of climatology*刊登在1895年出版的*Monthly Weather Review*上。从检索结果来看，1895—1903年，被AMS期刊数据库收录的国际有关“气象史”研究的文献均刊载于*Monthly Weather Review*，但这些文献均未被ISI数据库收录。在ISI数据库中，检索到的最早的一篇关于“气象史”研究的文献*Progress in wireless telegraphy*发表在1904年出版的第70期*Nature*期刊上。CAJD收录的国内最早有关“气象史”记载的文献为《锋与界面之理论经验》，刊登于1938年的《气象杂志》。

图1给出了1966—2014年ISI和

① AMS数据库收录美国气象学会连续创办发行的全部12种气象学专业技术期刊，包括：Journal of Climate, Journal of the Atmospheric Sciences, Journal of Applied Meteorology and Climatology, Journal of Physical Oceanography, Monthly Weather Review, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Weather and Forecasting, Journal of Hydrometeorology, Earth Interactions, Bulletin of the American Meteorological Society, Meteorological Monographs Series, Weather, Climate, and Society。

② 检索式具有一定局限性，故本检索结果及结果分析仅适用于本文所用检索式，不代表ISI和CAJD数据库所收录的全部气象史主题文献的统计结果。

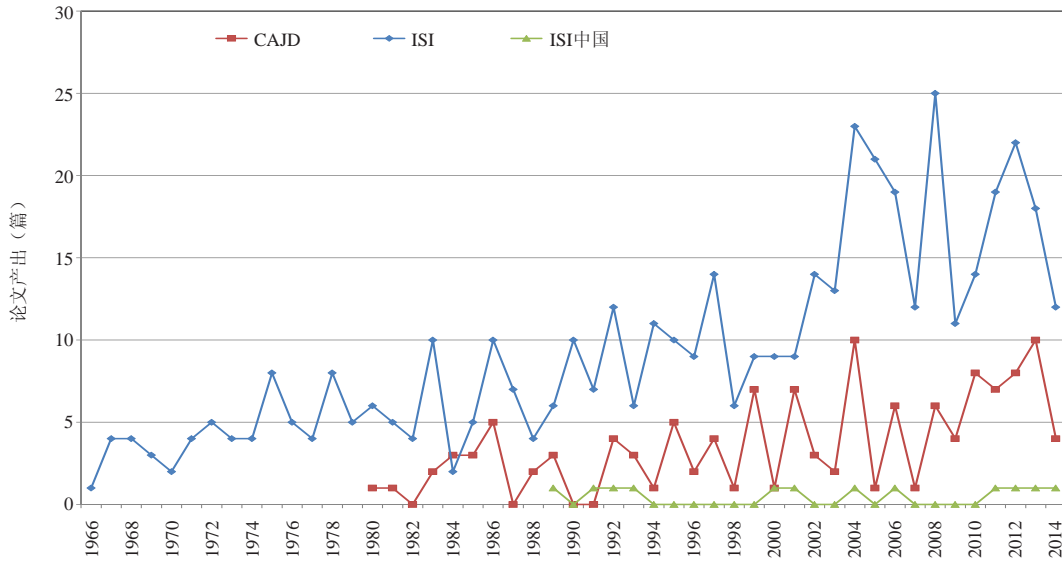


图1 1966—2014年ISI和CAJD “气象史”主题文献年代分布

CAJD数据库“气象史”主题文献的产出时间分布。整体来看，无论是国际还是国内，“气象史”主题文献的产出数量均呈增加趋势，20世纪90年代之前，国际“气象史”文献的年均产出量不超过10篇次/年，90年代后逐渐增多，尤其是2000年后，国际上关于“气象史”研究的文献数量有了台阶式的增长，年均产出量增长了约一倍，接近20篇次/年。国内数据库的检索结果与国际情况相似，90年代之前，CAJD数据库收录的“气象史”相关的文献数仅23篇，1990—2013年，文献量则达到了104篇，可以说，进入21世纪“温故知新”成为探讨气象科学发展之路的重要范式。此外，在“气象史”研究的国际学术界也有我国学者参与的身影。此次，在ISI、AMS数据库共检索到13篇由我国学者参与编写的“气象史”文献^①。

2. 国家与机构产出和影响力分析

ISI“气象史”主题文献产出量排名前10国家的总被引次数、篇均被引次数和h指数见表1。由表可知，美国在该领域拥有绝对优势，其文献产出量271篇，超过了“气象史”文献总量的一半，遥遥领先

于第二位的英国。此外，在“气象史”领域，以色列的文献产出位居第五，但其篇均被引次数是10个国家中最低的，篇均被引次数最高的国家为法国，其次依次为英国、澳

大利亚、美国和日本。中国在该领域的发文量（13篇）位列第七，篇均被引次数排名第九。

表2给出了“气象史”主题文献产出量较多的国内外机构。ISI数据

表1 国际“气象史”主题文献产出量排名前10的国家及其影响力指标 (ISI数据库)

序号	国家/地区	产出 (篇)	总被引次数	篇均被引次数	h指数
1	美国	271	9114	33.63	46
2	英国	31	1429	36.10	15
3	德国	30	718	23.93	13
4	加拿大	22	494	22.45	12
5	以色列	17	157	9.24	5
6	法国	16	696	43.50	10
7	中国	13	163	12.54	6
8	西班牙	12	213	17.75	6
9	澳大利亚	12	426	35.50	7
10	日本	11	369	33.55	7

注：h指数——一个国家（学者、机构）发表某学科的n篇论文中有h篇论文每篇至少被引用h次，其余（n-h）篇论文每篇的被引用次数均小于h次。

表2 “气象史”主题文献产出量较多的国内外机构

ISI数据库		CAJD数据库	
机构	产出 (篇)	机构	产出 (篇)
NOAA	82	南京信息工程大学	13
NCAR	49	中国科学院大气物理研究所	8
NASA	35	中国气象科学研究院	7
美国能源部 (DOE)	25	中国气象局	5
美国威斯康星大学系统 (UWEC)	28	中国科学院兰州高原大气物理研究所	5
美国内华达州高等教育系统	28	新疆气象局	4
美国科罗拉多大学系统 (US-CO)	26	中国科学院寒区旱区环境与工程研究所	4
美国国防部 (DOD)	15	国家气候中心	4
美国加州大学系统 (UCLA)	15	上海长望气象科技有限公司	4
以色列希伯来大学	14		

① 部分文献存在作者、作者机构等信息不完整的情况，因此本文基于可知信息统计得出的结论可能与实际情况略有出入。

库的检索结果显示，“气象史”领域文献发文量最多的10所机构中的前9所均来自美国，其中美国国家海洋和大气管理局（NOAA）、美国国家大气研究中心（NCAR）和美国国家航空航天局（NASA）是发文量最多的3所机构。其余6机构分别来自高校、其它政府部门和军方。以色列希伯来大学是唯一上榜的非美机构，位列第十。CAJD数据库的检索结果显示，在国内开展“气象史”研究的机构中，南京信息工程大学（13篇）是产出文献最多的机构，其次为中国科学院大气物理研究所和中国气象科学研究院。在国内排名前10位的发文机构中，有4所均来自气象局系统，且从发文机构的总体分布情况来看，大部分发文机构均隶属于气象局系统，可以说气象局系统是开展该领域研究的主要力量。

3. 主要作者与期刊分析

在ISI发表“气象史”主题文献5篇及以上的作者有10人，发表文献数最多两位作者Neumann和Lewis分别来自以色列希伯来大学大气科学系和美国国家强风暴实验室。表3列出了国内外在“气象史”领域的主要发文作者。刊载“气象史”主题文献的主要期刊见表4。*Bulletin of the American Meteorological Society*是刊载该领域文献最主要的来源期刊，其刊载的文献数占ISI数据库该领域文献总数的38.6%。

三、结果讨论

19世纪后期，国际学术界便

表3 “气象史”主题国内外主要作者

ISI数据库		CAJD数据库	
作者	产出 (篇)	作者	产出 (篇)
Neumann J	13	何金海	4
Lewis JM	10	陶大文	4
Schultz DM	6	汤懋苍	4
Holland MM	6	刘熙明	3
Anonymous	6	王武功	2
Russell PB	5	傅敏宁	2
Lindgren S	5	任国玉	2
Holben BN	5	傅敏宁	2
Danabasoglu G	5		
Alados-Arboledas L	5		

表4 ISI和CAJD数据库发表“气象史”主题文献的主要来源期刊

ISI数据库		CAJD数据库	
期刊	载文量 (篇)	期刊	载文量 (篇)
Bulletin of the American Meteorological Society	177	气象科技	12
Journal of Climate	25	气象科技进展	7
Journal of Geophysical Research Atmospheres	17	气象学报	7
Monthly Weather Review	14	高原气象	6
Weather and Forecasting	11	气象	5
Journal of Applied Meteorology	10	气象与减灾研究	5
Atmospheric Environment	10	新疆气象	5

有了关于“气象史”的文献研究。美国在“气象史”领域拥有绝对优势，其文献产出量占该领域文献总量的一半以上，遥遥领先于其他国家，且在发文量最多的前10所机构中，有9所均为美国机构。以色列在“气象史”领域也有不俗表现，其发文量位居世界第五，且在“气象史”领域发文量最多的作者来自以色列希伯来大学。

国际上，中国在“气象史”领域的发文量位列第七，为13篇，但属于我国学者独立撰写的文献仅6篇（其中2篇为香港学者贡献），且学术影响力指标也不理想。与美国、

英国、德国等传统气象研究强国比，中国在气象史方面还存在较大差距。目前我国气象界人士研究中国气象史的队伍还不够强大，研究者多埋头专业业务研究，而忽略对气象史料的研究。所谓一切史的研究“对象”都是“过去史实”，目的都是“更好地发展未来”。建议号召各方关心气象史研究，提高对史料的分析研究的能力，总结有价值的成果，为未来气象科学事业指出进展的正确方向。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

卡尔-古斯塔夫·罗斯贝——对其导师制的研究

■ John M. Lewis

【摘要】

回顾了气象学家罗斯贝 (Carl-Gustaf Rossby) 作为导师的历程。为了准确地评价他, 依据现存的有关该主题的文献和最近科学史中的关键例子, 讨论了导师—学生概念。除正规来源的材料外, 还使用了约25位罗斯贝的学生与助手提供的口述历史和回忆性函件。

研究表明, 罗斯贝期望他的学生保持高度独立, 但他也希望以己之力鼓励学生们发挥聪明才智——科学地激发学生研究他认为重要的问题。一旦他们投身其中, 罗斯贝便倾向于不再太细致地跟踪他们的工作。

罗斯贝周围有一批能力超强的老师, 与他的启发式指导风格交相辉映, 他进而利用他的影响力为研究所建立起一支稳定的一流访问学者队伍。在这样充满思想与话语碰撞的环境中, 学生们茁壮成长。

本文还给出了罗斯贝学生的名单和他们的博士学位论文题目。

1 研究动机

科学从一代向下一代传承的过程一直以来是令我着迷的课题。当我读研究生时, 我打算把自己打造成一名科学研究人员, 现在我认识到那时我对将要到来的科研训练极为无知。我只是把它当作一项课堂教学中消化吸收研讨内容的更具有挑战性的工作。然而, 从既定任务到“研究”之间的过渡或跳跃, 对我而言充其量是模糊的。幸运的是, 我受到一名教授的影响, 他把我带入他的科学思想过程中, 帮助我认识到自己的优缺点, 鼓励我成为他的研究团队中有贡献的成员。如此科学的社会化, 如果不是最基础的, 也是科学传播中的重要组成因素。它是更复杂的被称为“导师制^①”的一部分。

本文研究的主题是罗斯贝^② (1898—1957年), 一位著名的气象学家, 从20世纪20年代后期到50年代初, 他先后在麻省理工学院、芝加哥大学、斯德哥尔摩大学建立研究项目。由于他天性具有感召力并投身于国际事务, 在他即将去世

前 (1956年) 登上了美国《时代周刊》杂志的封面并成为一篇特写文章的主角 (图1)。

我一直关注罗斯贝有几方面的原因。尽管我个人并不曾认识他, 20世纪60年代早期, 从芝加哥大学的教授们和往届研究生们那里听到的有关“罗斯贝”的故事激起了我的兴趣, 我收集到的有关罗斯



图1 1956年12月17日, 罗斯贝的画像出现在《时代周刊》杂志的封面上, 背景是一张天气图。期刊的编辑后来收到3位气象爱好者的来信, 指出地图上的不一致 (1957年1月14日发表)

贝的点点滴滴更是让我充满好奇。客观地讲, 这样的研究得益于公共领域有关罗斯贝的大量书面材料。而且, 他科学上的接班人正陆续退休, 他们还能为了解罗斯贝的为师之道提供直接的信息和证据。

我将用罗斯贝学生和助手的口述历史资料补充传统来源的材料。在获取口述历史资料时, 为了少走弯路, 我遵循了David DeVorkin的指导 (DeVorkin, 1990), 他是史密森学研究所天文学史的馆长。

2 导师制

2.1 理想化的导师—学生概念

导师 (mentor) 一词源自希腊神话。在荷马史诗《奥德赛》中, 聪明勇敢的勇士奥德修斯参加特洛伊战争, 他把他的家、家人和奴隶托付给了“王子奥德修斯的导师 (Mentor)、战友, 当时的一位老人”。这位老人就像是奥德修斯年幼儿子忒勒马科斯的护卫和家庭教师。由于这样的监护与教导的关系, mentor一词广泛用于任何提出好建议的人 (World Book, 1961)

① 译者注: 导师制是师徒相授的教育制度, 文化传承制度, 是一种新型的教育教学制度, 这种制度要求在教师和学生之间建立友好的互动关系, 针对学生的个性差异, 因材施教, 指导学生的思想、学习与生活。

② 译者注: 为了准确, 著名的人名、地名译成了中文, 部分译者不太熟悉的人名、地名保留了原英文书写形式, 下同。

……成功导师制的关键要素……与其说是从导师那里获得的知识或者技能，不如说是一种“思维方式”，是发现并解决问题的能力。

在“mentor”被更泛指的意义下，导师制启发了大量的研究人员和作家探索导师制本身。Hermann Hesse的工作尤其令人关注，他分别以Demian和Ludi作为主要例子（Hesse, 1965; 1970）。在两部小说中，两位主角Emil Sinclair和Joseph Knecht各自找寻道德高尚、文化精深的大师，帮助他们摆脱令Hesse反感的西方唯物主义的桎梏。

耶鲁的心理学家Daniel Levinson和合作者（Levinson等, 1970）基于一系列长达10多年的个案研究，全面解读了导师制过程。他们强调在支持和帮助学生“实现梦想”过程中导师角色的重要性。导师“通过信任，分享年轻人的梦想和给予祝福等方式呵护年轻人事业发展”。他们还说“像所有爱的关系一样，导师—学生关系的过程很少有顺畅的……，其中有很多值得探讨的地方，导师一方的低估、嫉妒，感到窒息和受压迫；学生一方的贪婪，追逐荣誉，不承认恩情，傲慢而忘恩负义。” Kanigel（1986）从新的、快速发展的神经药理学领域令人信服地捕捉到这种导师和学生之间相互作用关系。

尽管社会学家Harriet Zuckerman将其研究限于科学精英，她还是得出与成功的导师制实践有关的关键因子（Zuckerman, 1977）。她强调这一因子与其说是从导师那里获得的知识或者技能，不如说是一种“思维方式”，并且发现问题和解决问题一样重要。在怀念Niels Bohr时，James Franck（1963）专注于其在这样的传承过程中的作为，Franck说，“通过例子和讨论，Bohr传授给他们的是一种能力，为此他提供模型、深入思考问题的前前后

后……在这里‘教（teach）’一词已经不能概括所有，因为性格特点无法真正通过教得到；但是性格特点是非常重要的，因而导师唤醒这些具有潜质，但还在沉睡的人们，激励出他们的潜力。”

历史上最伟大的教师之一的苏格拉底（Socrates），精辟阐述了帮助学生实现其梦想和识别学生主要潜能的能力。在柏拉图对话泰阿泰德篇（Theaetetus）中，苏格拉底与年长的数学老师（Theodorus）和十几岁的学生（Theaetetus）一起讨论了导师制。因为苏格拉底的母亲Phaenarete是助产士，他用职业化的语言表述自己下面的思想就是很自然的了。

我助产的艺术……是我的病人是人……我关注的是……在分娩阵痛中的灵魂。我的艺术的至高境界，是获取这样的力量，能用任何测试证明年轻人思想的结果是错误的幻影，还是与生俱来的真理……大量令人赞叹的真理被从内部发现。但传播真理是上帝和我的事情。

2.2 近期科学史的路标

Niels Bohr（French等, 1985; Aaserud, 1990）和Louis Agassiz（Cooper, 1917; Lurie, 1960）被列举为在导师制方面成功的科学家。然而，在导师—学生这个方程中有无数个变量，因此在这样复杂的任务中做到完美，即使有过也实属罕见。Aaserud（1990）明确指出，Bohr发现用优雅的长篇独白形式表述他的物理推理很困难，需要与能产生共鸣的人互动才能释放出他的智慧。多数施助者承认后见之明的作用是人生中最伟大的经历之一。然而，Victor Weisskopf从同一本书中引用道：“这种经历并不总是正面的，会影响一些年轻的物理学家进行独立思考。”

像Bhor和Agassiz这样杰出的导师通常在公共演讲或者教室给人

以启发。他们的风格迥异，Bohr的讨论慢条斯理，Agassiz的演讲雄辩而流畅。然而，启发的效果一般与风格无关，而是来自被教师通过适当强调主题的审美和逻辑基础而激发出的热情与兴奋。已故的美国加州理工学院物理学教授Richard Feynman是伟大教师的一位代表，他既能授课又能编写教材。他的同事David Goodstein（1989）回忆道：“我认为Dick是一位真正伟大的老师，甚至可能是他所处的时代以及我们所处的时代中最伟大的一位。这并不意味着他总是成功，正如他在《费因曼物理学讲义》一书（Feynman等, 1965）的前言中所强调的……他非常善于用图示实例的方法来阐述如何思考和解释物理问题。”麻省理工学院研究生Robert Woolf（1988）的短笺证实了Goodstein的观点。

我发现一件有趣的事，Feynman通过他的书和演讲鼓舞了大批同时代的人，却没有培养出一位像Niels Bohr这样的学生。David Goodstein（1991，个人通信^①）详细地阐述了原因：“问题的答案是Feynman没有培养学生。他喜欢独自工作，尽管他确实有大量的研究生。研究生们找到他，提出他们的问题，Feynman会认真负责地帮他们解答，但没有投入太多的热情。”与此相反，诺贝尔奖得主S. Chandrasekhar与世界顶级精英为伍，但他说“与这些伟人一起工作很有趣，但与学生合作是必需的，多数情况下是极为重要的，我很容易想象到如果不与Fermi或者冯·诺依曼一起工作，我也不会失去任何事物；但我不能保证，不与我的学生一起工作，不会失去任何东西”（Wali, 1990）。

3 罗斯贝简介

尽管导师—学生关系过程中，性格特点所起的作用尚不清晰，但是本文在阐述罗斯贝的科学特征的

① 译者注：文中的“个人通信”（personal communication）是指资料来源是非公开出版的资料，来自采访对象的口述或者函件。

同时，也讲了罗斯贝的性格，希望这有助于评估他的导师制。人们在德国的库茨巴赫（Kutzbach, 1975）找到了简明有趣的罗斯贝的传记摘要，其中概述了他的科学人生，我认为贝吉龙（Bergeron）对年轻时的罗斯贝的回忆非常有价值（Bergeron, 1959）。

3.1 罗斯贝的科学背景和研究方法

Zuckerman（1977）确信导师—学生链与科学进程密切相关。科学史上最引人瞩目的导师—学生链是关于19世纪德国化学家Justus von Liebig的。Zuckerman还讨论了该导师—学生链的发展，而Holmes（1989）进一步详述了该导师—学生链。由于学者们的著作通过导师—学生链追溯了科学演进过程，它们含有丰富的信息，适合简要追溯罗斯贝的科学家谱^①。从贝吉龙回忆录（Bergeron, 1959）可以清楚地了解到，罗斯贝的导师Vilhelm Bjerknes——值得敬重的卑尔根（Bergen）气象学校的校长。他们从1918年冬天到1920年夏天，在挪威卑尔根地球物理研究所超过一年半的密切来往。罗斯贝对卑尔根研究团体的贡献是他不断地透彻剖析传统观点，特别是地球物理学中的流体动力部分，他成为一位关注最重要问题的专家，并使他自己和其他人都能研究这些重要问题，并一同发展这些理论（Bergeron, 1959）。

Vilhelm Bjerknes受到他父亲Carl Anton Bjerknes和德国物理学家Heinrich Hertz（Devik, 1961; Pihl, 1975a,b; Friedman, 1989）的教育与指导。1890—1892年，Vilhelm曾与赫兹（Herz）一起学习，3年后赫兹发现了电磁波。赫兹是获得赫尔曼·冯·亥姆霍兹

（Hermann von Helmholtz）奖学金的学生（Segre, 1984; Turner, 1975）。就在1855年，法国数学家Gustav Lejeune Dirichlet继任传奇人物Carl Friedrich Gauss后不久，C. A. Bjerknes与Dirichlet在哥廷根一起学习。

尽管罗斯贝对气象学与海洋学表现出广泛的兴趣，关注的焦点问题却与海洋和大气中的行星环流有关。他的成功在于他极大地简化了旋转流体系统的机制（Bolin, 1957）。他的学生George Platzman在Symons纪念讲座中，以“罗斯贝波”为题恰当地陈述了该观点。论文在1968年4月3日投给英国皇家气象学会（Platzman, 1968）：

罗斯贝波常被称为行星波，行星波这一命名让人们联想到罗斯贝波由于大气或海洋的旋转和地球球形而形成。把 β 平面近似看作一个简单的数学近似是错误的，它其实并不只是一个简单的数学近似，在某种意义上它代表了罗斯贝的研究风格。他总是倾向于利用简化的数学公式来解释大气运动物理意义，而不是过于强调数学推导本身。在 β 平面近似的情况下，罗斯贝波是不受边界条件拖累的平面波动，其频散关系中的波数是连续的，而不是像球坐标关系式中的波数是离散的。

Platzman（1990，个人通信）在我采访他时重申这一观点，他说罗斯贝的风格是，他运用仅需的数学运算，这样对于物理意义的描述将更加直观。罗斯贝与著名科学家，如普朗特（Ludwig Prandti）、海森堡（Werner Heisenberg）齐名（von Karman, 1954; Bloch, 1976）。

3.2 罗斯贝的性格

当我请罗斯贝的学生和助手描述他的性格时，友好、热情、令

人信服是最常用的词语。通过查阅科学史文献，我了解到，物理学家Robert Millikan也具有几乎同样的性格特征。Millikan的风格由Charles Holbrow（1981）简洁地记录如下：

他交际甚广，感召力强，能明显地感觉到物理学中的重要人员与事物，能把杰出员工和访问学者吸引到Pasadena（加州理工学院）……或直接或间接地吸引了一批优秀的研究生。

然而，罗斯贝与Millikan的不同在于处理日常管理事务方面，Millikan天生具有财务管理与处理大科研机构里其他管理事务的才能（Goodstein, 1991），而罗斯贝在忽视财政收支与管理细节问题方面是出了名的。早期他在美国气象局的工作就表现出这些特征（Bates, 1989），后来在麻省理工学院（Clapp, 1991，个人通信）和芝加哥亦是如此（Saucier, 1991，个人通信）。在处理私人财务时，这些特征依然存在。据Byers（1960）回忆：“从事实层面上讲，罗斯贝主要的缺点就是存不上钱，在孩子教育和家庭出行方面花钱很随意，喜欢过度花钱请朋友和同事去昂贵的餐馆。”

尽管罗斯贝不喜好运动，身体矮壮，但他步履轻快，说话充满激情而且带有斯堪的纳维亚口音，对工作也是乐此不疲——

罗斯贝性格外向，是个工作狂，他必须一刻不停地忙着。我们在瑞士的3年间，他早上5到6点钟起床，坐电车到总站，买报纸、喝咖啡，然后去学校，足足早到一个小时（Hubert, 1991，个人通信）。

罗斯贝非常专注于他所做的事。他习惯于傍晚邀请同事去他在伍兹霍尔（Woods Hole）租住的房

^① 通过从Bergeron（1959）和Pekeris（1991，个人通信）中提取信息，我们了解到罗斯贝受到瑞典的两位杰出的数学家（Ivar Fredholm和Torsten Carleman）的影响。罗斯贝接受他们的培养，1918年获得学士学位，1925年获得硕士学位。罗斯贝回忆道“Fredholm（Fredholm）博士是他在斯德哥尔摩最好的老师”（University of Chicago, 1943）。罗斯贝正规的学校教育1925年结束，但他被授予荣誉理学博士学位，于1939年由凯尼恩学院（美国俄亥俄州）授予。他被授予荣誉是由于“他对天气预报的贡献，天气预报已经证明对航空有重要益处”（Kenyon Collegian, 1939; Jarrett, 1990，个人通信）。另一位获得荣誉理学博士学位的学者是Marshall Harvey Stone，哈佛著名的数学家，他的名著涉及希尔伯特（hilbert）空间。

子，他们在厨房的桌子上中推导公式，一直待到过了午夜（Stommel, 1991, 个人通信）。

罗斯贝在私人生活与科学生涯中均表现出较强的感召力。私人生活中的例子来自他的妻子：

罗斯贝强调，待在一个地方不要超过10年。他在多数情况下都没有在一个地方待满10年。我认为中东是他计划下一个要去的地方。对于家庭而言，这几乎是流浪。一个家庭要换地方、学校和语言，绝不是件容易的事。而通过他的精心游说，我们认识到被提议的搬迁变成我们最期待做的事（Woodcock, 1991, 个人通信）。

科学生涯中的例子：Verner Suomi记得有一次去罗斯贝办公室讨论一个有关移动气球的项目，罗斯贝形象地比喻就像“从我背上拿走短衫，我感觉很受启发”（Suomi, 1990, 个人通信）。

贝吉龙回忆到，罗斯贝有广泛的兴趣，包括宗教、艺术，也包括科学。他的业余爱好是研究兰花。斯德哥尔摩一名罗斯贝的学生回忆道：

他的一个爱好是为野兰花拍照。他的目标是寻找和拍下生长在斯堪的纳维亚的每种知名的野兰花（图2）。他儿子（Stig）是一位优秀的摄影师，常与罗斯贝的家人以及学生（或学生的配偶）同行，一年几次去哥特兰岛寻找稀有物种。罗斯贝还是历史爱好者，喜欢带学生去古老遗址、著名城堡等。所有学生都经常去乌普萨拉喝维京蜂蜜，去看古墓，去哥特兰岛西岸参观老围城维斯比（Visby）（Hubert, 1991, 个人通信）。

4 培养学生的方法

有关罗斯贝教学的回忆性函件与口述的历史资料大多集中在1941—1954年，这段时间罗斯贝在芝加哥大学。因此，本文重点关注这一时期，捎带地提到更早期（1928—1941年）罗斯贝在麻省理工学院的时候，以及更晚期

（1948—1957年）在斯德哥尔摩大学的时候。1948—1954年，罗斯贝定期在芝加哥和斯德哥尔摩往返上班，供职于这两家机构。

4.1 演讲与课堂教学

1952年，在给查尼（Jule Charney）一封涉及哲理的信中，罗斯贝这样概括自己的教学方法：

有时我会自觉或不自觉地带学生自己思考一些问题。如果你总是灌输一些完美无暇的大论，你就无法让你的学生成为独立的思考者（Rossby, 1952）。

“我记忆中罗斯贝的课堂让我们感觉到，他在讲台前似乎总是在发现什么新的东西。这种探求的课堂气氛会感染每一位听课人，使我们加入到探索的行列中”（Phillips, 1991, 个人通信）。

教学风格跟他最相似的是荷兰物理学家Paul Ehrenfest，他于20世纪20年代晚期到30年代在莱顿（Leiden）指导量子物理学家进行仪器实验，他的一个学生Geroge Uhlenbeck（1956）回忆道：

但他总能成功地给出主题的概览，让人清楚什么是已经实现的，什么是尚未实现的……他通常概述论据，让人觉得有可能如此，因而使人对该主题有自己的理解。

Uhlenbeck把Ehrenfest与莱顿的另一位著名物理学家Hendrik Lorentz相比较：“Lorentz讲课条理非常清晰，但太流畅了，学生很难抓住真正的论点，导致讲课结束时学生已经忘记了讲课的核心内容。”

与上文提及的Ehrenfest和Lorentz不同，罗斯贝认识到他的培养风格是启发式的。为了互补，他请了两位年轻的力学家（Victor Starr和其年轻的同事George Platzman）在芝加哥大学与他一起教授动力气象学（图3）。罗斯贝说，Platzman的方法是“比我要系统得多、完整得多、有条理得多”（罗斯贝，1952），而Victor Starr课堂展示动力学的方法是“清楚、精确，没有

废话，体现做了相当充足的准备”（Phillips, 1991, 个人通信）。然而，有时候精确得过了头，Phil Thompson记得曾有“一种要替他说出下一句话的冲动”（Thompson, 1990, 个人通信）。

在更大众的演讲或者概论课程中，罗斯贝讲得清楚、明白。Phil Thompson（1990, 个人通信）回忆起罗斯贝在1942年（那时Thompson还是伊利诺斯大学高年级本科生）受美国科学研究协会（Sigma Xi）之邀到伊利诺斯州大学讲授主题为大气环流的课程的时候，说道：“当我走出课堂时，我相信气象学是物理学科中最有趣、最具挑战性的学科。他（罗斯贝）向来是优秀的演说家”

第二天Thompson找遍伊利诺斯大学图书馆，发现气象学书籍很少。后来他与地理系的C. L. Page商讨此事，C. L. Page告知了年轻的Thompson关于芝加哥大学的研究所以及其见习生培养计划。Thompson给罗斯贝写信，受邀访问了该研究所。一天，Thompson搭乘铁路前往芝加哥，下午与罗斯贝进行了谈话。Phil回忆道：“与罗斯贝的谈话让人感到轻松愉快，他似乎对我从Mak Black学习形式逻辑的经历感兴趣。”（Thompson, 1990, 个人通信）。这次访问的结果是，



图2 罗斯贝在根据兰花的有关书籍辨别兰花，此图于1955年摄于哥特兰岛的一个牧场（C. L. Pekeris和G. W. Platzman提供）

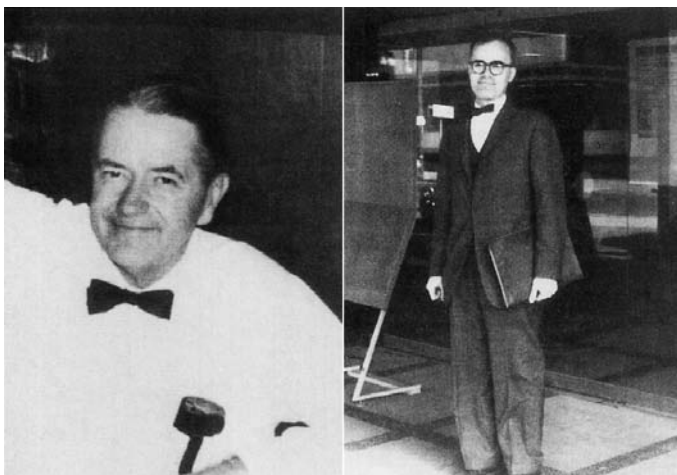


图3 在芝加哥大学辅佐罗斯贝教学的两位力学家
(左: Victor Starr; 右: George Platzman)

Thompson申请并获许加入该研究所的见习生计划,并于1942年9月开始在芝加哥大学学习。

4.2 在课堂外与学生的交往

罗斯贝对博士学位论文的选题的态度是评估他与学生互动的一个重要背景。

芝加哥大学物理科学学院的布告中,用精确的措辞做了如下陈述:

选择一个论文主题,在一位教员的监督下开始为学位论文做调查研究。学生需要论证论文的独创性,并自选论文主题,以求获得院系主任的认可,还需为自己的研究寻找基金支持。

“我猜这是罗斯贝本人的观点”

(Phillips, 1991, 个人通信),根据芝加哥大学档案管理助理Richard Popp的描述,“‘学生自选论文主题’是气象系特有的,是罗斯贝或者院里的其他人提出的要求”(Popp, 1991, 个人通信)。“督促学生(博士生和硕士生都是如此)自己设计自己的论文方案是常见的——事实上,我在所有老师还没想到该主题时就已经快完成了,而很多人跟我一样”(Saucier, 1991, 个人通信)。

与罗斯贝的学生讨论发现,罗斯贝从不为学生的博士论文限定主

题。我认为,George Platzman代表了罗斯贝是怎样激励学生确定研究选题的。

灵感的激发来自来访科学家、教师和学生每天的天气会商。在天气会商前,George Cressman已经用电传打字机和绘图仪绘制好了从太平洋到乌拉尔山脉的天气图(海平面和700hPa)。天气会商从下午4时左右开始,有时候很简短,有时候进行好几个小时直到晚餐时间。Platzman(1990, 个人通信)回忆这

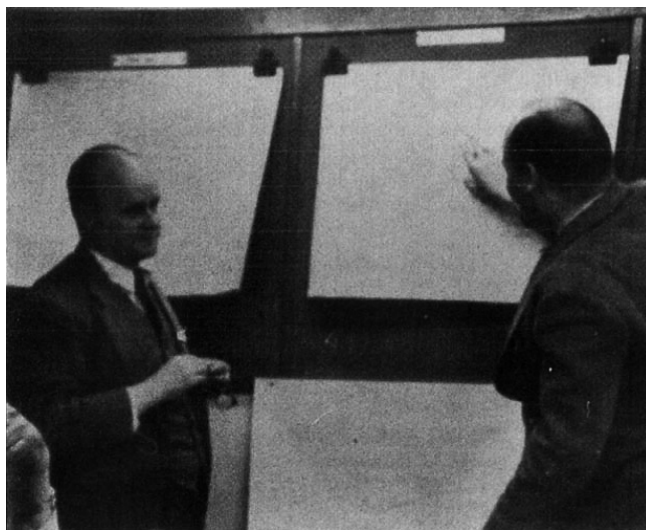


图4 贝吉龙、Erik Palmén和罗斯贝在芝加哥大学进行天气会商(摄于1948年,拍摄者未知,George Cressman提供)

些会商时,认为那是一个观看激烈辩论的极好地方,不变的参加者是Palmén和罗斯贝,而来访学者(图4)是随机的参与者。他回忆道,讨论常涉及急流在大气环流中的作用,人们很高兴能看到随和而儒雅的Erik Palmén打断罗斯贝,并与其争论。

Platzman详细地告诉我他曾与罗斯贝的一次争论,当时,罗斯贝试图辩护他的行星尺度涡动混合理论及该过程中急流的作用。该次讨论最终在1947年一篇关于大气环流的著名论文中精彩呈现(Staff Members, 1947)。Platzman说,此次讨论及后来的论文是激发他的博士论文选题的因素。

我相信Jerome Namias的例子也代表了罗斯贝与学生交往的一种典型方式^①。1936年秋天,罗斯贝提供给Namias一个在麻省理工学院做研究助理的职位。罗斯贝那时正在发展大气中的天气尺度波的传播理论,因缺少高空行星尺度观测资料而感到沮丧。据Namias说:“一天,罗斯贝找到我,说‘你为什么不尝试了解我们没有高空资料的海洋上空的大气状况?’”循着这一方向,Namias绘制了一张覆盖太平

^① 来自Namias(1983)提供的材料和他在麻省理工学院气象系成立50周年纪念之际做的演讲(Woodcock, 1991, 个人通信)。尽管他没有正式在罗斯贝指导下获得学位,但我认为Namias是罗斯贝的学生。不幸的是,Namias最近身体有恙,没能与他交谈。

洋、北美和大西洋的10000英尺高度的高空天气图(Namias, 1983)。“我用海表数据和差分法估计了海洋上空的垂直递减率。10000英尺的效果图立即激起罗斯贝的兴趣,因为长波很明显,罗斯贝立即尝试根据天气图和他的频率公式计算这些长波的运动”(Namias, 1983)^①。Namias是著名的气象学家,他进一步根据罗斯贝的频率公式对延伸期预报做出了重要贡献(Namias等, 1944; Clapp, 1992,个人通信)。

确切地说,罗斯贝与有些学生之间的互动不令人满意。采访Reid Bryson教授时(Bryson, 1990,个人通信)了解到,他与罗斯贝之间的师生关系的特点是强烈的意见分歧与精神上的极度痛苦。Bryson虽然是在芝加哥做毕业论文,但他的理论几乎没有内容源自罗斯贝。他声称:“我在关岛(Guam)的时候已经差不多写完了我的博士论文,1945年秋我回到芝加哥大学开始毕业生的工作,罗斯贝说他将是我的论文指导老师,1946年春,我修改好了我的论文并扩充了,但罗斯贝没有时间读它。”据Bryson说,直到1948年初,罗斯贝才看Bryson的论文。得到了Erwin Biel(一位供职于罗格斯大学和芝加哥大学的气候学家)的帮助,Bryson才获得该学位。在我与Bryson的讨论中,爱恨交加的这个词语让人联想到Levinson等(1978)对罗斯贝导师制的心理学研究结果。

据胡永云(2007)描述^②,Bryson在1947年基本完成了论文并在UW-Madison找了工作,临走之前把论文交给罗斯贝,放在他的书桌上,一年之后,即1948年,Bryson回学校准备答辩,来到罗斯贝办公室,发现论文仍原封不动地放在那里,上面落满了灰尘。罗斯贝把论

文拿起来,吹掉封面上的浮尘后翻了几页,然后对Bryson说:“我估计你无法通过答辩。”后来他找到Biel, Biel答应帮助他,说“明天你的报告结束之后,我准备问你20个问题,不给罗斯贝提问的机会。如果这20个问题你回答得很好,答辩委员会一定会让你通过的。”在答辩会上, Biel的提问果然持续了差不多两个小时,罗斯贝在旁边始终没有提问的机会, Bryson最终通过了答辩。

Joanne Simpson是曾师从罗斯贝的唯一女博士(表1,见第6节),也是美国气象学界的第一位女博士。

她在罗斯贝的指导下硕士毕业后,希望得到资助并继续攻读博士学位,而罗斯贝建议她回家照顾丈夫和孩子,告诉她“我很难想象谁将来会雇佣一个女博士”(胡永云, 2007)^②。

Simpson也谈论了师从罗斯贝的困难(Simpson, 1973; 1991,个人通信)。她在向纽约科学院致辞时说(Simpson, 1973):“我的教授罗斯贝是一位斯堪的纳维亚的名人,是活在人们心中最伟大的气象学家,他创造性强、博闻强识,能他具有组织和激励人们的能力,是我一直努力模仿的楷模。但他觉得气象学不需要女人。他坦诚地对我说,如果我开创了女生读博士不寻常的先例,我非但不成名还将出丑,那样我将是荒谬的、可怜的,我的丈夫和孩子也会因为我而牺牲他们的利益,对他们太不公平。”Simpson因为在这方面与罗斯贝有分歧,在博士期间换了导师,从罗斯贝转到Herbert Riehl,她相信Riehl能帮助她完成博士学位论文。

我找到物理学家Vera Kistiakowsky的一篇文章(1980),其中提供了关于

1920—1950年间社会对女物理学家所持态度的有价值的历史观点。我认为其中一个观点是特别深刻的:

二战期间,尽管上百万的女人出去工作,但是女人念研究生并不被看作是恰当的爱国举动。二战后大规模的宣传运动倡导女人回归家庭,给那个时代的女人一个明确的信息,暗示丈夫和家庭是第一位的,这应该是对女人仅有的关心。

Simpson毫无疑问也体会到了主流态度的影响,我猜罗斯贝是屈从于主流态度的。但他反对性别歧视,从他写给查尼的关注普林斯顿教职工问题的信中可以佐证:

在天气方面,我认为你在Chester Newton和他妻子(Harriet)的协助下将做得很好。他能力强、机智、对此感兴趣;他的妻子就算说没有与他相当的能力,能力也是相当强的(罗斯贝, 1952)。

作为这部分的结尾,我希望举实例说明罗斯贝的因材施教——善于识别学生的优点并鼓励他们转到发挥他们强项的研究计划中。Dave Fultz回忆道:“一天,罗斯贝请我去他在‘5727大学’的办公室见他,Victor Starr也在,他们建议我运用半球框架来探索湍流混合”

(Fultz, 1990,个人通信)。后来Fultz的流体力学实验模拟了大气流动,成为动力气象领域具有里程碑意义的工作。图5是Fultz给罗斯贝演示一个流体动力实验,当时罗斯贝一行参观了在罗森沃尔德大厅地下室流体力学实验室。

4.3 罗斯贝导师制继承发扬了优良的教育传统

Otto Warburg是Liebig科学家族的成员,他说:“一个年轻科学家在生活中的一个重大事件是与伟大科学家进行私下的亲密交流”

^① George Platzman从历史角度讨论过这项工作(Platzman, 1968)。

^② 译者注:此段是译者在翻译时参考了北京大学物理学院大气科学系教授胡永云(2007年)所写的《我所知道的“芝加哥学派”》一文,他本人毕业于芝加哥大学。该文刊载于北京大学物理学院大气科学系·江河万古流:谢义炳院士纪念文集·北京:北京大学出版社,2007。

(Zuckerman, 1977, P128)。Niel Bohr领导下的理论物理研究所中发生了一些科学界精英汇聚的经典案例。尽管范围更小，但是Vihelm Bjerknes在卑尔根地球物理研究所也秉承同样的原则(Bergeron, 1959; 1961)。罗斯贝继承这一传统，事实上我采访的罗斯贝的每个学生与助手都提到这一点。Walter Saucier和Chester Newton的回忆抓住了罗斯贝的培养方式对学生影响的本质：

访问学者有短期的也有长期的，其中E. Palmén, T. Bergeron, E. Biel, A. Nyberg, H. Ahlmann, E. Høiland, C. Godske, Z. Sekera, P. Queney等等，他们中有些人(Biel, Palmén)教常规课程，有的(Bergeron)教部分课程，其他的人仅仅做一些讲座或小组讨论。当然，国际科学家显露出的气息让学生受益匪浅(Saucier, 1991, 个人通信)。

对我们来说，运用扩展的高空和地面观测资料，结合理论工具，

取得新发现的机会似乎是无限的，那是件令人兴奋的事。于是，罗斯贝、Palmén……给我们的第一课让我们记忆犹新(Newton, 1990, 个人通信)。

培养的传统随罗斯贝传到斯德哥尔摩。“更重要的是……罗斯贝在瑞典期间间接影响了欧洲气象学。以下科学家在斯德哥尔摩国际气象研究所待了至少半年，这注定显著地促进了二战后欧洲气象学的研究”(Bolin, 1991, 个人通信)。Bolin列举了16名科学家，多数是20世纪50年代的气象精英。

4.4 学生的简单讲述

我已努力汇编了有关罗斯贝与学生互动的材料。但作为第4部分的结尾，我想给读者提供原汁原味的学生对罗斯贝的反映。选择Chaim Pekeris和 Yi-ping Hsieh (谢义炳)以描述罗斯贝师生互动。

Chaim Pekeris:

我是罗斯贝在麻省理工学院的第一个博士研究生，我的毕业论文

题目是“大气热平衡理论的现状与发展”……罗斯贝是一位极好的老师，他的多数学生都是美国海军军官，1931和1932年我曾给他们做过讲座。1932年秋，罗斯贝给我奖学金，让我师从L. Weitman教授在莱比锡做博士后。随着希特勒的崛起，这种安排变得不可能。后来我去了奥斯陆大气物理实验室跟随Svein Rosseland教授做研究。Rosseland 20世纪20年代早期在Bohr研究所从事研究和教学(Moore, 1985)工作，1919年在卑尔根地球物理研究所与罗斯贝是同事(Bergeron, 1959)。罗斯贝自己掏腰包给我50美元一月的工资，让我勉强在奥斯陆维持生活。

罗斯贝晚年最著名的学生之一是Jule Charney (查尼)。我在巴黎的美国军事机场见过Jule。他当时刚从斯德哥尔摩返回，带给我罗斯贝去世的坏消息，他说：“罗斯贝的离去，令我的世界从此黯淡无光”^①(Pekeris, 1991, 个人通信)。

Yi-ping Hsieh (谢义炳):

1941年是我本科生涯的最后一年，那年，我阅读了麻省理工学院一系列论文。我不能完全理解，但得知可能在罗斯贝门下学习，我很兴奋。1946年9月我作为一名研究生来到芝加哥大学，罗斯贝为我安排了研究生助学金。罗斯贝没有详细建议我研究生阶段做什么工作，让我自己计划我自己的出路。罗斯贝给我的印象是，他不仅是一名科学家，而且是一名伟大的老师和哲学家……我们沿密歇根湖游泳，在湖与国际饭店之间找一家小饭馆吃晚饭。这给我提供机会了解并追随罗斯贝的哲学。我完成学位后回国，1950—1978年没有与国外的朋友联系，但是阅读了美国和欧洲的

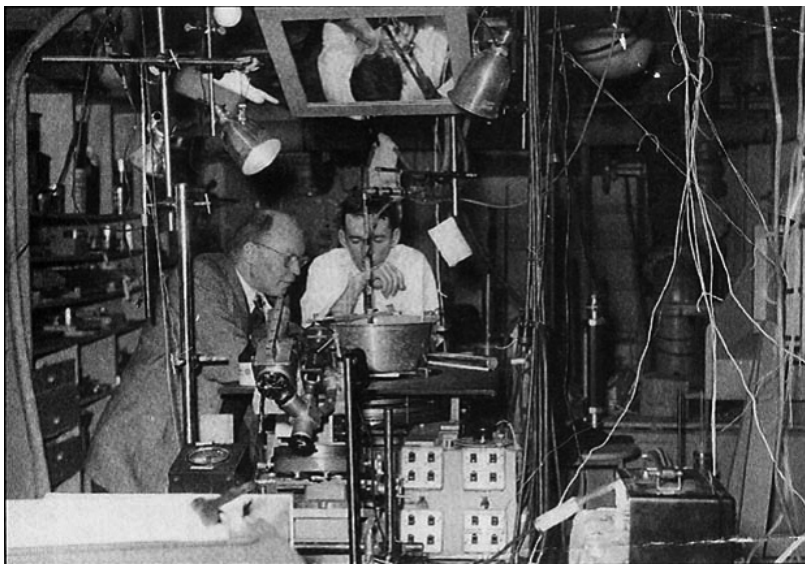


图5 罗斯贝和Fultz凝视模拟大气环流的一个转盘(1953年摄, Dave Fultz提供)

^① 既然查尼在Jorgen Holmboe的指导下毕业于加州大学洛杉矶分校(UCLA)，Pekeris把Charney看作是罗斯贝的学生令我很惊讶。但重新读了George Platzman对查尼的采访(Platzman, 1990, P36)，并结合来自Norman Phillips的资料(Phillips, 1990a, b; 1991, 个人通信)，我相信Pekeris的看法是正确的。Phillips这样陈述：我也附上罗斯贝与Charney1947—1957年的信件概要……来自麻省理工学院。我相信这些信有助于你了解罗斯贝与Charney的互动(在开始的时候有点师生的味道)(Phillips, 1991, 个人通信)。Phillips补充道：“罗斯贝这样描述他自己的教学方法‘……(详见4.1节)’，这个哲理同样具有罗斯贝论文的特点，并且看来对查尼的思想有长远的影响”(Phillips, 1990b)。

科技期刊。我过去40年的教育和科研工作主要是追随罗斯贝和Palmén (Hsieh, 1991, 个人通信)。

5 评价导师罗斯贝

罗斯贝是一名不错的课堂教学的老师，但与Feynman或Ehrenfest相比，罗斯贝可能还不够优秀。当然，他是异常受欢迎的讲师。从实用主义和课堂教学技能来划分导师等级的观点看，我认为罗斯贝能让人很好地概览该学科，让人觉得这门学科有趣——正如Ehrenfest问他的学生，什么是（让学生接受他的观点的）主要的推动力？“突出的一点”（Uhlenceck, 1956）。然而，罗斯贝没有把材料以一种正规的、深思熟虑的、流畅的样子呈现出来。他依靠芝加哥大学的Starr和Platzman，或许还有斯德哥尔摩的其他人来完成这项工作。

在帮助学生开展研究和做毕业论文方面，难以对罗斯贝进行分类。因为与有条不紊的Agassiz相比的话，就会发现，罗斯贝的方法是非常规的（Cooper, 1917, P35-44）。Agassiz吸引了大量具有创造性的人，成功激发他们对研究的兴趣。我相信罗斯贝在芝加哥的学生Platzman和斯德哥尔摩的学生Bolin准确地说明了罗斯贝这方面的优点。在我采访Platzman时，他说“罗斯贝因材施教，能说服你，引导你进入他当前感兴趣的领域，不仅仅与你合作，而且把他的热情传给你。”下面是Bolin转达给我的类似的印象：

他所想的是不断发展他的理论，这些基于实验的理论会提供给他周围的工作团队，供大家讨论、改进或否定，但总能推动工作团队的行动，结果使团队与领导之间有强的凝聚力（Bolin, 1957）。

他还在引导人们发挥个人天赋方面表现出较强能力（Fultz (1990, 个人通信)、Suomi (1990, 个人通信)和Newton (1990, 个人通信)

就是很好的例子），他这样做遵循了苏格拉底的声明（灵魂助产）。

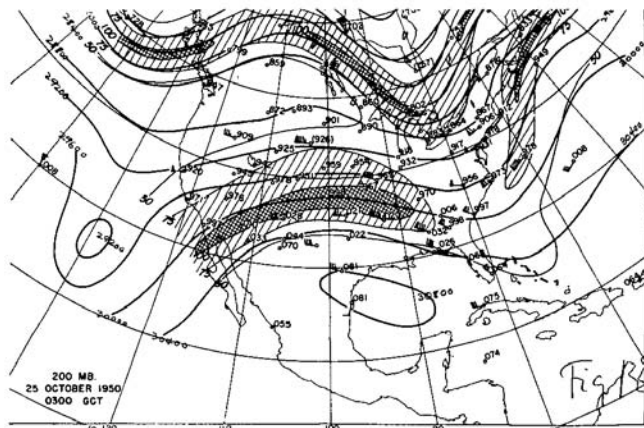
通过为研究所留住一群稳定的世界气象精英和相当有影响力的教职工（如Erwin Biel和Erik Palmén），罗斯贝为更好地开展气象学研究奠定了基础。通过鼓励、领导小组讨论和天气会商中的激烈争论，罗斯贝使科学家们与学生的互动变得更加方便。通过他在波士顿、芝加哥和斯德哥尔摩居住地举行的定期晚会，进一步增强了教职工、来访学者和学生之间的科学进展方面的信息交换（分别来自Woodcock (1991)、Newton (1990)和Hubert (1991)的个人通信）。

罗斯贝风格的缺点是，一旦他的学生产生了最初的热情后，师生间就会缺乏亲密协作。部分原因是他的哲学就是鼓励学生高度地独立，另一个原因是他的个人时间会被国内外的政治—科学活动所占据（罗斯贝，1945；1946）。从这个意义上说，罗斯贝的路线与其他成

功的科学领袖是一致的。Frederic Holmes (1989)写文章指出，世界闻名的化学家Justus von Liebig也是同样：

由于日益增多的其他事务占据了Liebig的时间，他自己的研究变得断断续续。他发现维持自己的研究动力变得越来越难，可能就会自觉不自觉地开始依靠学生去探究一些他不再有时间研究的问题。

尽管日益增多的其他事务占用了罗斯贝的时间，在他离开研究所后，他通过帮助指明研究方向来与他的团队保持联系。Chester Newton很有远见，保留大量罗斯贝给他的信件，20世纪50年代中期罗斯贝亦是如此（Newton, 1990, 个人通信）。图6给出了一张天气图，源自他们之间的信件。除了师生之间明显的和睦关系外，最令我印象深刻的是罗斯贝在普林斯顿、伍兹霍尔高级研究所、研究中心为Chester Newton寻找便于进一步研究的职位，他进行了持久的努力。



Dear Chester,
I would like to have this chart done over in the drafting room. It like some of the charts you are now preparing, is supposed to bring out the wind-streak at the 200 mb level. Therefore, the lines of equal wind velocity should be heavy, the contours on the other hand should be feable (thin). ...
Could you
return it to me as soon as possible?
Best Wishes
Should I push a Princeton offer for you?
C. G. R.

图6 罗斯贝绘制的200hPa天气图及1953年罗斯贝写给Chester Newton的信（字母是信件的部分内容）

6 罗斯贝的学生和他们的毕业论文研究

表1列出了在罗斯贝指导下做博士论文的学生,是根据授予学位的机构进行区分的。表1还列出了学位授予年份和论文标题。对于有些学生,罗斯贝是联合培养的导师之一,但他对学生培养过程的努力足以把该学生列为他的学生(个人观点)。表1最后的3人毕业于罗斯贝去世以后,但被认为是他的学生(Bolin, 1991, 个人通信)。

图7给出了罗斯贝的“科学家谱”。图上,学生位于最下一排,罗斯贝科学上的前人(3.1节讨论过)在图谱中位于他的名字之上,他的学生按照博士学位授予时间的年代顺序排列,第一位学生Pekeris,最后一位Döös,另外两位是Jarome Namias和查尼,已经增补到图谱中,列于Döös之后,他们没有在罗斯贝

的指导下获得学位,但列入“家谱”的依据分别在4.2和4.4节。

毫无疑问,还有其他人值得列入“家谱”中。我早期手稿中的一位采访对象回忆说:“你的图有一个缺点,就是把罗斯贝的导师—学生关系仅限于获得博士学位的学生。应考虑更广范围的导师—学生关系:(1)受他影响较大但在别的地方获得博士学位的学生……,如查尼, Phil Tompson, Phil Church, Hurd Willett, Henry Houghton, 等等;(2)受到罗斯贝指导但没有被授予博士学位的很多杰出科学家与专家,如Jerome Namias, Vincent Oliver, 等等。”我没有理由不同意他的观点,但是我没有亲自做进一步调查,故没有把他们列入表中(查尼和Namias除外)。事实上,罗斯贝的很多助手,我采访过或者写信向他们索要过回忆录,都指

出:尽管罗斯贝没有指导过他们的论文,但“我们那儿(芝加哥)的每一个人都是罗斯贝的学生,因为他无处不在”(Baum, 1991, 个人通信)。

7 结语

从罗斯贝鼎盛时期以来短短50多年的时间,他的学生(及他学生的学生)毋庸置疑已经在世界各地的教学、研究、管理等重要岗位上担任要职。麻省理工学院的气象系20世纪50年代繁荣起来,中心人物有力学家Victor Starr, 查尼, 洛伦兹(Edward Lorenz, 是Starr的学生),更不用说深受罗斯贝影响的教职工Henry Houghton与Hurd Willett了。在美国以外,罗斯贝的影响也是深远的,不仅在斯堪的纳维亚与西欧,还影响到中国(通过谢义炳与叶笃正)。

罗斯贝的学生群体不仅数量巨大,而且具有相似的研究志趣。罗

表1 罗斯贝在麻省理工学院、芝加哥大学和斯德哥尔摩大学指导的博士生及论文题目

学生	导师	论文题目	毕业年份	所在学校
Chaim Pekeris	罗斯贝	Development and present status of the theory of the heat balance in the atmosphere	1934	麻省理工学院
Horace Byers	罗斯贝	Changes in air masses during lifting	1935	
Raymond Montgomery	罗斯贝	Isentropic analysis of the upper layers of the southern North Atlantic Ocean	1938	
Harry Seiwel	罗斯贝	Application of the distribution of oxygen to the physical oceanography of the Caribbean Sea region	1938	
Ritchie Simmers	罗斯贝/Willett	Isentropic analysis of a case of anticyclonogenesis	1938	
Harry Wexler	罗斯贝	Observed transverse circulations in the atmosphere and their climatological implications	1939	
Morris Neiburger	罗斯贝	Physical processes associated with summer stratus in California	1945	
Victor Starr	罗斯贝	A quasi-Lagrangian system of hydrodynamical equations	1946	
Dave Fultz	罗斯贝	Upper-air trajectories and weather forecasting	1947	
Reid Bryson	Biel/罗斯贝	On disturbances in the easterlies	1948	
郭晓岚 (Hsial-Lan Kuo)	罗斯贝	Dynamic instability of two-dimensional nondivergent flow in a barotropic atmosphere	1948	芝加哥大学
George Platzman	罗斯贝/starr	Oscillations of a jet stream	1948	
叶笃正 (Tu-Cheng Yeh)	罗斯贝	On energy dispersion in the atmosphere	1948	
Geroge Cressman	罗斯贝	On forecasting of the long waves in the upper westerlies	1949	
谢义炳 (Yi-Ping Hsieh)	罗斯贝/Plamen	An investigation of a selected American cold vortex	1949	
Joanne Malkus (Simpson)	Riehl/罗斯贝	Certain features of undisturbed and disturbed weather in the tradewind region	1949	
Chester Newton	Palmén/罗斯贝	Structure of Shear lines near the tropopause in summer	1951	
John Freeman	罗斯贝/Byers	The flow under an inversion in middle latitudes	1952	
Dan Rex	罗斯贝	On atmospheric blocking action :a study in dynamical climatology	1951	
Bert Bolin	罗斯贝	On the interaction between the wind and pressure fields in the atmosphere and application to numerical weather forecasting	1956	
Erik Eriksson	罗斯贝	Atmospheric transport of oceanic constituents and their circulation in nature	1959	斯德哥尔摩大学
Aksel Wiin-Nielsen	罗斯贝	On atmospheric flow of planetary scale in some simple short-range prediction models	1960	
Bo Döös	罗斯贝	On perturbations of atmospheric motion with regard to exchange of sensible heat and topographic effects	1962	

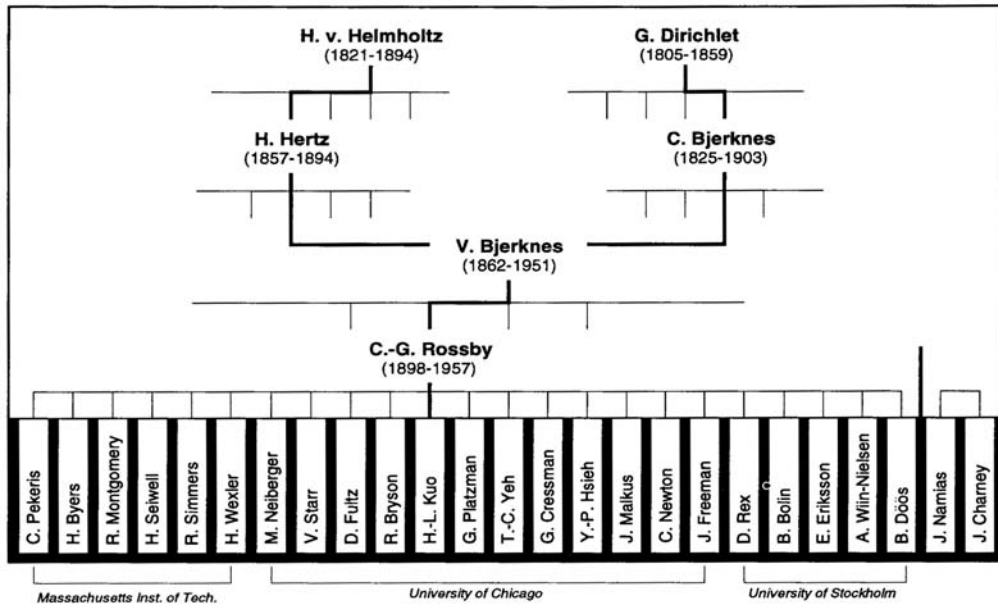


图7 罗斯贝的“科学家谱”（学生列在最下面一行，从左向右根据博士学位获得的时间依次排列）

斯贝表现出的创造性和广博性是他的大量学生试图模仿的，结果，他教授的是一种“思维方式”，是导师制中最好的传统。

致谢：我的同事、诗人Don Lee Petersen在过去20多年，慷慨地与我分享他的想法，影响了我对导师制研究。我还要感谢Duane Roller，因为他让我重燃对科学史的兴趣，他举例子告诉我科学史研究中收集和处理数据的方法。我们实验室的两位专家Joy Walton（执行秘书）和Mary Meacham（馆员）也付出了辛勤的努力。Joy处理了与本项目有关的大量信件，并在本论文的主要修订过程中付出了不倦的支持。

当然，罗斯贝的学生和助手为我提供了主要的第一手资料，如果没有他们的帮忙，我的研究将变得不可能，至少远没有这么深入。对于他们每一个人都致以最诚挚的谢意，我按照姓氏的字母顺序列出了他们的名字，其中“*”表示他们提供的是口述历史资料（括号里

是日期），“+”表示他们花时间写了一份回忆罗斯贝的函件。

Frances Ashley⁺——罗斯贝的秘书

Werner Baum⁺

Dorothy Bradury^{*} (6/3/91)

Bert Bolin⁺

Reid Bryson^{*,+} (5/13/90)

Philip Clapp^{*,+} (4/8/92)

Heinz Fortak⁺

John Freeman^{*} (4/21/92)

Dave Fultz^{*} (5/16/90)

Yi-Ping Hsieh⁺

William Hubert⁺

Edward Lorenz^{*} (10/12/90)

Thomas Malone⁺

Keitaro Mohri⁺

Chester Newton^{*,+} (6/17/90)

Chaim Pekeris⁺

Norman Philips⁺

George Platzman^{*,+} (5/16/90)

Herbert Riehl⁺

Walter Saucier^{*,+} (5/16/91)

Joanne Simpson⁺

Henry Stommel⁺

Verner Suomi^{*} (5/17/90)

Philip Thompson^{*} (5/18/90)

Harriet Woodcock⁺——罗斯贝的妻子

与项目有关的其他资料由以下

人员提供：Elizabeth Andrews（麻省理工学院档案管理员），David Goodstein（加利福尼亚理工学院副院长），Marsha Goodman（俄克拉何马大学负责科学史资料收集的图书管理员），Scott Jarrett（凯恩恩学院档案管理助理），Jane McNabb（麻省理工学院气象与海洋物理中心行政首长），Richard Popp（芝加哥大学档案管理助理）和Judith Roode（明尼阿波里斯艺术设计学院教授）。

（作者单位：美国国家强风暴实验室）

译者：尹仔锋，新疆维吾尔自治区气象局

译校：沙天阳，广东省气象台

本文译自John M. Lewis. Carl-Gustaf Rossby: a study in mentorship. Bull Amer Meteor Soc, 1992, 73: 1925-1439.

编辑部致谢：感谢原作者John M. Lewis博士及美国气象学会（American Meteorological Society）对本刊发表文章中文版的同意和支持。感谢美国国家强风暴实验室郜吉东研究员在获得该文中版权过程中给予的帮助。

参考文献

- Aaserud F. 1990. Redirecting Science: Niels Bohr, Philanthropy, and the Rise of Nuclear Physics. Cambridge University Press: 356.
- Bates C C. 1989. The formative Rossby-Reichelderfer period in American meteorology, 1926-1940. *Wea Forecasting*, 4: 593-603.
- Bergeron T. 1959. The young Carl-Gustaf Rossby. In: Bolin B. *The Atmosphere and the Sea in Motion*. Rockefeller Institute Press: 51-55.
- Bergeron T. 1961. The Bergen school. *Bjerknes' Memorial Volume. Geofysiske Publikasjoner*, 24: 16-21.
- Bloch F. 1976. Heisenberg and the early days of quantum physics. *Phys Today*, 29(12): 23-27.
- Bolin B. 1957. Necrology, C.-G. Rossby. *Tellus*, 9 (3): i-ii (unnumbered).
- Byers H R. 1960. Carl-Gustaf Arvid Rossby. *Biogr Mem (Natl Acad Sci USA)*, 34: 249-270.
- Cooper L., 1917. *Louis Agassiz as a Teacher*. Comstock Publishing Company: 90.
- Devik O. 1961. Vilhelm Bjerknes (Mar. 14, 1862-Apr. 9, 1951). *Geofysiske Publikasjoner*, 24: 7-10.
- DeVorkin D H. 1990. Interviewing physicists and astronomers: Methods of oral history. In: John Roche. *Physicists Look Back*. Adam Hilger Publishing Co: 393.
- Feynman R P, Leighton R B, Sands M. 1965. *The Feynman Lectures in Physics*. Addison-Wesley, 3 volumes.
- Franck J. 1963. A personal memoir. In: French A P, Kennedy P J. *Niels Bohr: A Centenary Volume*. Harvard Univ Press: 16-18.
- French A P, Kennedy P J. 1985. *Niels Bohr: A Centenary Volume*. Harvard Univ Press: 403.
- Friedman R M. 1989. *Appropriating the Weather: Vilhelm Bjerknes and the Construction of Modern Meteorology*. Cornell Press: 251.
- Goodstein D L. 1989. Richard P. Feynman, teacher. *Phys Today*, 42(2): 70-75.
- Goodstein J R. 1991. *Millikan's School: A History of the California Institute of Technology*. W W Norton & Co: 317.
- Hesse H. 1965. *Magister Ludi (The Bead Game)*. Frederick Ungar Publishing Company: 502.
- Hesse H. 1970. *Demian: The Story of Emil Sinclair's Youth*. Bantam Books Inc: 141.
- Holbrow C H. 1981. The giant cancer tube and the Kellogg Radiation Laboratory. *Phys Today*, 34(7): 42-49.
- Holmes F L. 1989. The complementarity of teaching and research in Liebig's laboratory. Olesko K M. *Science in Germany: The Intersection of Institutional and Intellectual Issues*. *Osiris*, second series, 5: 121-166.
- Homer. 1990. *Odyssey*. Book II. Macmillan: line 235-312.
- Kanigel R. 1986. *Apprentice to Genius: The Making of a Scientific Dynasty*. Macmillan: 286.
- Kenyon Collegian (Gambier, OH). 1939. Pres. Chalmers confers honorary degrees. 19 June, front page.
- Kistiakowsky V. 1980. Women in physics: Unnecessary, injurious and out of place. *Phys Today*, 33(2): 32-40.
- Kutzbach G. 1975. Carl-Gustaf Arvid Rossby. In: Gillispie C C. *Dictionary of Scientific Biography*, vol 11. Chas Scribner's Sons: 557-559.
- Levinson D J, Darrow C N, Klein E B, et al. 1978. *The Seasons of a Man's Life*. Alfred A Knopf, Inc: 363.
- Lurie E. 1960. *Louis Agassiz: A Life in Science*. University of Chicago Press: 449.
- Moore A. 1985. *Niels Bohr: The Man, His Science, and the World They Changed*. MIT Press: 436.
- Namias J. 1983. The history of polar front and air mass concepts in the United States-An eyewitness account. *Bull Amer Meteor Soc*, 64: 734-755.
- Namias J, Clapp P F. 1944. Studies of the motion and development of long waves in the westerlies. *J Meteor*, 1(3): 57-77.
- Ore O. 1975. Gustav Dirichlet. In: Gillispie C C. *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 4. Chas Scribner's Sons: 123-127.
- Phillips N A. 1990a. Diary of correspondence between C.-G. Rossby and Jule Charney, March 1947-July 1956. Taken from Jule Gregory Charney Papers, MC184, Institute Archives and Special Collections, MIT Libraries, Cambridge.
- Phillips N A. 1990b. A biographical memoir on Jule Charney. *Biogr Mem (Natl Acad Sci USA)* (accepted for publication).
- Pihl M. 1975a. Carl Anton Bjerknes. In: Gillispie C C. *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 2. Chas Scribner's Sons: 166-167.
- Pihl M. 1975b. Vilhelm Bjerknes. In: Gillispie C C. *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 2. Chas Scribner's Sons: 167-168.
- Plato. 1963. *Theaetetus*. Hamilton E, Cairns H. *Collected Dialogues of Plato*. Pantheon Books: 855.
- Platzman G W. 1968. The Rossby Wave. *Quart J Roy Meteor Soc*, 94: 225-248.
- Platzman G W. 1990. Charney's recollections. In: Lindzen R S, Lorenz E N, Platzman G W. *The Atmosphere-A Challenge: The Science of Jule Gregory Charney*. Amer Meteor Soc: 11-82.
- Rossby C G. 1945. Letter to Dr. E. C. Aucther of the Pineapple Research Institute, Honolulu, HI, 15 June 1945. *Presidential Papers (1945-1950)*. University of Chicago Archives.
- Rossby C G. 1946. Letter to A. M. Hutchins concerning involvement in the International Meteorological Organization, 14 March 1946. *Presidential Papers (1945-1950)*. University of Chicago Archives.
- Rossby C G. 1952. Letter to Jule Charney, dated April 16, 1952. *Jule Gregory Charney Papers, MC184*. Institute Archives and Special Collections, MIT Libraries, Cambridge.
- Segré E. 1984. *From X-Rays to Quarks: Modern Physicists and Their Discoveries*. W H Freeman and Company: 337.
- Simpson J. 1973. Meteorologist: Joanne Simpson. *Ann N Y Acad Sci*, 208: 41-46.
- Staff Members of the Department of Meteorology, University of Chicago. 1947. On the general circulation of the atmosphere in middle latitudes. *Bull Amer Meteor Soc*, 28: 255-280.
- Turner A S. 1975. Hermann von Helmholtz. Gillispie C C. *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 6. Chas Scribner's Sons: 241-253.
- Uhlenbeck G E. 1956. Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest. *Amer J Phys*, 24: 431-433.
- University of Chicago. 1943. Biographical summary: C.-G. Rossby. Summary Apr. 17, 1943. *Presidential Papers (1940-1946)*. University of Chicago Archives.
- University of Chicago. 1950. Division of Physical Sciences, Univ of Chicago, Announcements, 50, (8): 25 June 1950, 36.
- von Kármán T. 1954. *Aerodynamics*. McGraw-Hill: 203.
- Wali K C. 1990. *Chandra: A Biography of S. Chandrasekhar*. University of Chicago Press: 360.
- Wolf A S. 1988. Note on A. P. Feynman. *Phys Today*, 41 (5): 136.
- World Book. 1961. *Field Enterprises Educational Corporation*. "mentor", 12: 334; "Odysseus", 13: 507.
- Zuckerman H. 1977. *Scientific Elite: Nobel Laureates in the United States*. Free Press: 335.

他曾让NASA和卫星探测陷入尴尬

——记发现南极臭氧洞的英国科学家法曼

■ 贾朋群

如果有人问20世纪最重要的大气探测发现是什么？很多人会提及南极臭氧洞的发现。如果再问20世纪科学界和国际社会最完美的合作有哪些？更多的人会列举出南极臭氧洞的发现、研究和1995年人类保护臭氧层的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》的出台。而这一切，都与2013年5月11日不幸去世的英国学者法曼（Joseph Charles Farman, 图1）有密切的联系。正是他，仅仅依靠对英国南极站一个点的臭氧观测资料的分析和推断，在1985年和同事一起提出了南极臭氧洞的存在，从而加快了科学家对人类活动破坏大气臭氧层的过程和严重程度的认识，并成功促成国际社会采取了还算及时的应对措施。而在世界科学共同体中，法曼和他的同事，通过对单站资料的严谨分析，不仅揭露了一个重要的大气层观测事实，而且，这样一个事实，是因为各种原因一直被埋在掌握最多大气层卫星探测资料的NASA的资料库里的事实。这一过程也让人时常思考：当大气探测已经进入卫星时代的时候，科学家们面对海量数据最需要思考和实践的到底是什么？也许法曼批评管理者在观测

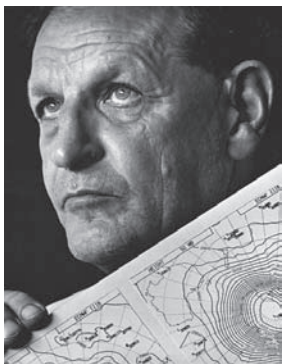


图1 英国科学家法曼（Joseph Charles Farman, 1930—2013年）



法曼和他的同事，通过对单站资料的严谨分析，不仅揭露了一个重要的大气层观测事实，而且，这样一个事实，是因为各种原因一直被埋在掌握最多大气层卫星探测资料的NASA的资料库里的事实。

和模式模拟研究资源分配不合理的话，应该不时让我们想起：“现在有更多的钱投到气候模拟，而在基本科学观测上投入不足，有太多的变量计算机是不可能给出准确预报的……”

一、观测会说话

1930年8月7日，法曼，出生于英国中部小城诺里奇。法曼的父亲是一位个体建筑师，母亲是护士，这位住在父亲亲手建造的家中，从小就喜欢数学，热衷于摆弄无线电设备的淘气男孩，后来在诺里奇有名的高中——爱德华国王中学接受高中教育时，迷上了一本高中生很少涉及的书，讲述相对量力论的《基本理论》。正是这本书，让法曼意识到，人类对自然的认识，是没有疆界的。也许正是受到这本书的启发，后来法曼在剑桥读大学时，选择了数学和自然科学专业。1953年大学毕业后，他先在一家公司工作了3年，1956年进入位于剑桥的英国南极局的前身福克兰岛调查局担任科学官员。在他进入南极局后不久，就赶上了国际地球物理年（IGY）大规模观测活动，法曼随即被派往南极法拉第站度过了两个冬季，从1957年3月到1959年3月。1958—1959年，他还担任南极站长。在南极，他的主要任务，是监督在南极开展的所有物理观测项目。在法拉第站的2年多时间里，法曼目睹和实践着人类对地球环境的监测活动，以及各种监测手段的升

级换代，他还亲自用Dobson光谱仪，在南极开展了最初的臭氧层观测，这样的观测活动，为他日后的重点观测发现埋下了伏笔。

经过了初期学科快速发展和中期进入卫星探测时代的辉煌，到了20世纪晚期，国际地学界似乎进入一种平静期，大规模的探索在有条不紊地部署中，令人振奋不已的事情有些渐行渐远，或者说难以企及。在这样的背景下，当1985年5月16日，法曼和他的同事（图2）在*Nature*杂志上发表了关于发现南极臭氧洞的论文时，不仅赞誉难见，还招来了大气科学界乃至更多领域学者的惊异和随后而来的质疑声。一时间就像平静的环流突然生成了一个活力无比的气旋，正在搅乱已经建立的秩序。为什么？怎么可能就是这样？或者，即使是这样，难道NASA不清楚吗？

这样的反应，一方面源于科学界早就注意到了大气臭氧层和人类活动可能的关系，因此对臭氧层的观测并找寻其是否在减少的努力被很多人知晓。科学家们致力于对平流层环流和化学过程进行研究，并用建立的模式模拟臭氧的变化。但是这些主要由日光驱动的平流层化学反应的模式，都没有指出在南极会出现臭氧层的异常。而且，那时人类对平流层臭氧层的影响，多数人想当然地期待先在白天的热带平流层中发生的化学反应体现出来，而极地平流层低层是排在第二位的



图2 法曼（左1）和1985年*Nature*杂志关于南极臭氧减少的论文另外两位作者（Brian Gardiner（中）和Jon Shanklin（右））在一起

区域，而且要在没有紫外线的黑夜里才有可能。极区甚至被看作是化学反应惰性区域。模式模拟结果主导的结论让科学家们似乎很乐观：人类影响带来的臭氧减少可能仅有2%~3%，这样小的比例甚至很难探测得到。

质疑的另一面，也许更为重要的是，为什么*Nature*的文章仅来自一个英国位于的南极陆地观测站？言外之意是，世界上已经建立了200多个臭氧探测站，即使是在南极，也有17个臭氧测站，这些站大多在1957—1958年国际地球物理年后建立起来，累计观测了相对较长的时间，如果有臭氧含量的显著下降，不该，也不会只有一个站有记录数据。更为匪夷所思的是，人类已经进入卫星大气探测时代，NASA的卫星早就开始了全球臭氧探测，关于大气臭氧层变化的最早、最权威和最全面的信息，难到不该出自那里吗？然而，这些质疑声中，对于作者而言，最有“分量”的是：既然论文给出的数据说明南极臭氧在春季的减少早在1977年就出现了（图3），为什么8年以后才发表文章？作为一种变化趋势的揭示和分析，如果臭氧仅仅是在南极，在春季，突然在1976或1977年开始减少，那么资料累计到1980年就基本可以确认，1981年，最迟1982年就可以发表的文章为什么耽搁了这么长的时间，

作者们在干什么？

二、会让观测说话的法曼

作为*Nature*论文第一作者的法曼，他在英国南极局以对科研工作认真和相对保守而著称，但是在国际大气科学界，在20世纪80年代中期却鲜有人知道其人。面对质疑声，天生严谨且着重于细节的法曼并没有过多辩解。而1986年NASA科学家同样在*Nature*上发表的基于Nimbus-7卫星观测得到的南极春季臭氧减少的论文（图4），更是让很多质疑者为法曼的睿智和探索精神而击掌，后来逐渐被人们所知晓的法曼发现南极臭氧洞的细节，在被人们津津乐道的同时，也带给科技界更多的思考。

在IYG期间全球地面臭氧观测站网建设的热潮，随着IGY的结束而逐渐冷却。很多站后来在人员和仪器，特别是仪器校准等方面，都无法得到资金保障。这使得很多站只能间歇和不定期地报告臭氧观测结果。这一情况到了20世纪70年代初，因为估计到臭氧可能减少而略微有所好转，一些新的臭氧观测站加入全球站网，填补了一些瘫痪或半瘫痪站带来的空白。但是在南极地区，臭氧站大多位于南极圈以外，高纬度站除了英国哈雷湾站以外，法国的迪蒙·迪维尔站那时正处于关闭状态，苏联南极站因恶劣天气也处于找寻新站址的观测不稳定

期，美国位于南极点的南极站，其观测每每到关键时刻就出现仪器问题，这些因素都让英国南极站的臭氧观测，成为揭示新现象最为珍贵的渠道。

在卫星臭氧观测方面，虽然那时卫星每天可以收集覆盖全球的大约14万个观测数据，但是由于当时计算机数据处理水平相对低下，卫星臭氧观测数据先要经过质量控制处理，之后被记录到数据磁带上交给感兴趣的科学家进一步处理。由于那时候还没有可以快速生成全球臭氧分布图的软件，获取的数据磁带大多被堆积在资料库里。

在南极其他站以及卫星臭氧观测过程中发生的情况，实际上也同样发生在英国南极哈雷湾站。一方面，站上使用很长时间的臭氧观测仪甚至需要在冬季盖上层羽绒被才勉强工作，观测数据出现些问题看来很“正常”；另一方面，因为南极站获得的大量观测数据中，臭氧资料没有被英国南极局列为优先处理、分析的资料（原因之一是当时科学界认为，平流层臭氧即使减少，也最可能先在赤道地区发生），因此在位于剑桥的南极局，臭氧资料进入计算机进行分析和归档就存在一个5~7年的“滞后

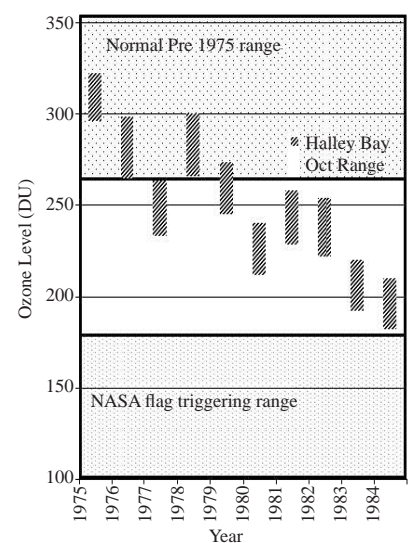


图3 英国南极哈雷湾站1975—1984年的臭氧观测结果以及与1975年前臭氧含量均值（图上部直线）和NASA“臭氧低值”阈值（图下部直线）的对比

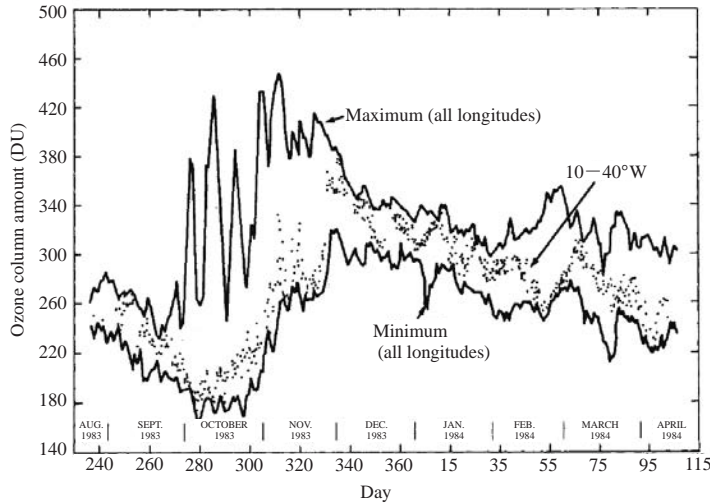


图4 NASA学者1986年在*Nature*上发表论文，用卫星资料证实了法曼的南极臭氧观测结果

期”，即南极臭氧观测资料磁带在运回英国本土几年以后，才会被集中处理。1981年，被积累了好几年的南极臭氧原始资料，终于等到了被送入计算机按照程序进行处理和分析，计算机程序将分光计读数转化为实际臭氧含量并进行分析。而这个批次处理的资料，覆盖了南极臭氧最初开始减少的关键年份。已经出现几年的南极春季臭氧减少，这时才被法曼真实地发现。尽管如此，法曼开始并没有马上确信这样的结果，他首先想到的是控制南极春季的非常不稳定和有时很难预测的环流型，以及伴随的南极冬季极涡的爆发。他感觉，可能春季臭氧水平很不稳定。法曼曾在此前的一篇文章里，阐述南极秋季臭氧变化最能代表全球臭氧含量的改变，因为南极秋季臭氧特别稳定，很少受到其他因素的影响。面对资料显示的春季臭氧快速下降，严谨的法曼也怀疑观测仪器使用的时间太久，或许会发生问题。于是，法曼购置了一台新的Dobson 臭氧仪，被带到南极进行观测。结果，转年南极臭氧观测结果给出了更低的结果。“这真的让人发疯”法曼回忆道，几乎一半的臭氧不见了。他随后让自己静下心来，系统梳理了1975年以来的南极各站臭氧观测记录，发

现只有哈雷湾站出现下降，其他站并未受到影响。于是，转年他又和他的团队来到距离哈雷湾站西北1000英里^①的地方进行观测，同样发现了臭氧减少。这些观测事实，以及从最早发现南极臭氧减少时，法曼就开始找寻南极春季臭氧减少的化学原因，并大胆推测氯氟烃（CFCs）——这种人为制冷剂是导致臭氧减少的罪魁祸首，都坚定了他是时候将这一观测事实发表出来信念。

在1984年底向*Nature*投送只有3页多一点的论文前，法曼向自己提出了3个问题：（1）结果是否有至少另外一个春季结果证实变化趋势？（2）是否对哈雷湾站光谱仪进行了再校准和更换以避免仪器带来的虚假？（3）是否对为何NASA团队还没有注意到臭氧减少给出很好的解释？

在回答这些问题时，法曼认为，哈雷湾站光谱仪的更换，完全排除了仪器问题，而三个季节的数据不仅肯定了异常，而且表明这种减少的趋势还在继续增强。遗憾的是，在试图和NASA科学家取得联系的时候，法曼无功而返。

法曼的论文于1984年12月24日送达*Nature*，后者排除众议，以较快的速度于1985年3月28日接受，并在

同年5月16日刊出。正是这篇经历了坎坷的文章，又一次让全世界关注地球环境问题。

三、法曼带给我们很多

法曼的科研经历，或许可以加上传奇的标签。他的离去，更让我们看清楚了一位敬业学者的风貌。

1. 注重细节的同时，那份执着更珍贵

首先，法曼一生科研经历表现出的最重要的品质，就是注重细节并且执着地坚持自己的主见。他和同事在1985年发表的轰动世界的论文，实际上几近无法发表。其中，不仅有来自权威的NASA不经意间的漠视，更有当时法曼的直接领导试图阻止论文发表的态度。该领导在写给英国气象局的函件里指出：“这篇文章不能发表，因为如果他们的推理是错误的话将会让人耻笑。”虽然目前我们还无法获悉这一表态的具体情况，但是在20世纪后期国际科学界逐步走向中规中矩的场景时，在英国出现这样的抑制创新性科研成果的情况，似乎并不难理解。难得的是，法曼并没有在发现臭氧减少的第一时间就发表，而是在两次赴南极校准资料，并在大气化学领域充分探索了臭氧减少的可能原因，从而更加坚信自己的观测事实之后才提交论文。而*Nature*杂志也没有盲从当时的所谓主流看法，从而让这一开始并不被看好的结果改写了人类认识环境的进程。据传，日本南极站的科学家几乎走了和法曼完全相似的路线，即在日本南极站发现臭氧减少后，首先怀疑仪器问题，接着来回更换和重新标定仪器，甚至还在一定范围内展示了臭氧减少的观测结果，但他们最终没有在科技论文中阐述这一关键的科学事实。也许法曼和日本科学家，在面对原始观测资料的谨慎态度上是相似的，但那份抓住细节的执着和敏锐，让具有更深厚的科

① 1英里约为1.609千米。

学探索传统的英国学者占了上风。

也许全球气象界乃至整个科学界，有很多整天和观测仪器打交道的人，相比较而言，其中成功的人却不多。就南极臭氧洞观测而言，法曼和很多其他学者，特别是NASA握有卫星观测一手资料的学者无疑都等到了机会，这时只有法曼获得了成功，就说明同是观测，面对观测结果，用心思考和执着求解的不挠精神有多么珍贵。如果观测者都是“公事公办”地面对仪器读取的数据，启发人类进步的观测事实的发现，就很难和观测网的完善与观测数据的骤增划上等号。

2. 英国南极站观测设计让法曼能够和NASA平等对话

1995年，也就是法曼发现南极洞的文章发表后10年，当年诺贝尔奖颁发给了提出平流层臭氧减少是受人类活动影响机理的两位环境科学家和一位大气化学家，人们没有在诺奖名单中看到法曼的名字，不少人难以理解并为他鸣不平。实际上，法曼1985年的文章，其最宝贵，也最具有科学价值的内容，是在给出臭氧减少的观测事实之后，科学地预测了这一现象可能的原因。而法曼能够给出南极臭氧减少是因为人为CFCs导致的推测，在很大程度上得益于英国哈雷湾南极站在建立臭氧观测站时，同时开展了包括CFCs在内的大气痕量气体的观测，因此让法曼等科学家不仅仅能得到臭氧观测记录，还能基于CFCs的记录开展臭氧减少原因的分析。这一点从法曼1985年的论文中，用了很多篇幅给出了CFCs记录的分析就不难发现，或许正是这样的分析打动了期刊和论文评阅人。法曼等基于这样的分析，果断推论南极臭氧洞出现的原因是非自然的，而是人为的结果。法曼的工作无疑为科学家们，包括后来获得诺奖的学者更好地揭示南极平流层臭氧减少的机制，打下了坚实的基础。而法曼基于南极一个站的数据，就能给出相当全面的分析，无疑和哈雷湾站

开展了持续、多要素的大气成分观测直接有关。法曼从1957年进入南极局一直到1990年退休一直从事南极观测工作（他在1990年退休前，最后一次赴南极工作），则体现了科学家一生献给科学观测事业的奉献精神。

3. NASA的教训在21世纪更有现实意义

实际上，早在南极平流层臭氧维持正常的20世纪70年代初，科学家就提出了臭氧减少的猜想。但是，后来NASA科学家用卫星探测资料否认了这一猜想，认为其与观测事实并不符合。然而，另NASA懊恼的是，在法曼文章发表后，再次准备反击的NASA却发现，其卫星资料不仅支持法曼的发现，在反复核查南极卫星臭氧观测结果后，更是补充说明在南极出现了一个与美国国土面积相当，并且还在不断扩大的臭氧洞。如果说法曼发现了南极臭氧洞中一个点的深度，那么NASA就更完整地描述了这个洞的范围之大，让臭氧洞更加清晰和准确地展现在世人面前。仅仅是因为大意，让更具资料优势的NASA没能最早指出南极臭氧减少的事实。其中，NASA将臭氧减少的标准定得过低（图3），使得其资料自动处理系统无法被激活并给出提示，是一个很重要的技术原因。还好，NASA就是NASA，他们在法曼发表南极臭氧洞论文后的同年8月公布了南极上空臭氧洞的卫星观测照片，为法曼文章的观点提供佐证，1986年又同样在*Nature*杂志上发表了支持前者观测结果的文章（图4），在平息了争执和让不少圈内人感动的同时，也让人对NASA刮目相看。

然而，NASA当初的惯性、傲慢和忽视给科学界带来的尴尬，在今天几十、上百颗气象卫星在天上飞的所谓“大数据”时代，应该更具有警示意义。技术的进步也许不会再有资料分析的“滞后期”，多平台的观测结果，可以通过实时的多媒体显示，让科学家们可以用指尖

容易地获取。然而，正如NASA制定的臭氧低值的标准很不靠谱一样，一切依靠机器和自动化的资料处理机制总存在弱点，永远也无法百分百地替代“关注细节”和“有责任心”的科学家的工作。气象科学的发展，无疑需要更多法曼式的负责的科学家，甘于在资料的海洋里遨游（图5），第一时间发现关键的科学事实，这样才能让多平台观测网建设的投入，发挥其应有的作用。

此外，在法曼发现南极臭氧洞的过程中，国际著名期刊*Nature*也功不可没。*Nature*作为一份高度国际化的期刊，很难设想法曼论文的审阅者名单里，没有来自NASA的专家，而即使是参与评审的英国本土专家，也不大可能会是一边倒的赞扬声（包括来自作者机构领导的怀疑）。但是期刊的编辑坚信，作者至少在揭示一个站的观测事实上，是经得住考验的。面对这篇没有任何基金资助的文章，期刊还是以较快的速度接受并刊发。更有意思的是，一年以后来自NASA科学家的文章，成功地将法曼文章揭露的科学观测事实，从一个点升级到整个南极地区，从而止住了质疑，转向引导采取国际化行动的国际政治和科学探讨，并最终促成了国际协议的签订和取得实效（链接-1）。

南极臭氧洞被发现的过程，让我们认识了法曼，见证了科学家必须面对的种种挑战，即使到了晚年，法曼念念不忘的，还是第一手观测（图6）。在大气层观测技术

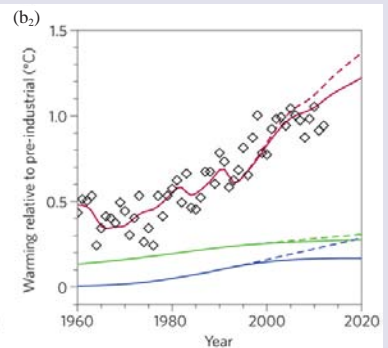
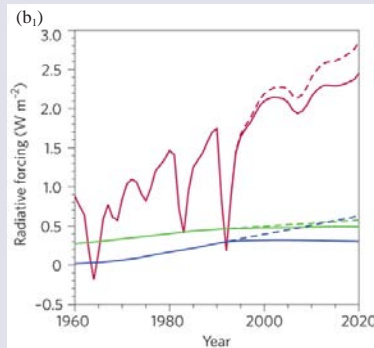
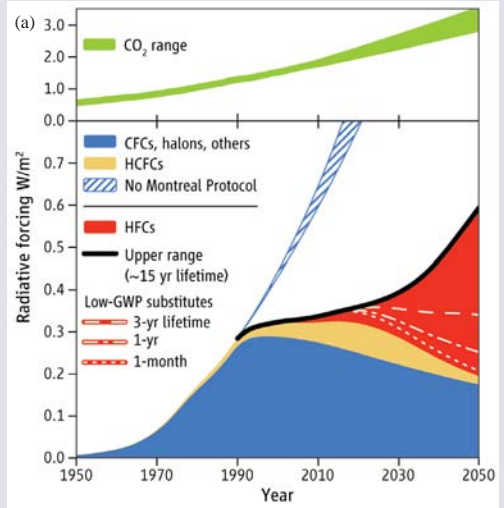


图5 面对大量从南极返回的观测数据，法曼的投入就是深入其中、关注细节

链接-1 《蒙特利尔议定书》的力量：0.1℃

1987年9月16日开始签署，1989年1月1日起生效的《蒙特利尔议定书》可能是最成功的国际环境协议，它有效地抑制了臭氧消耗物（ODSs），例如碳氟化合物（CFCs）和氢氯氟碳化合物（HCFCs）的生产和消费。而氢氟碳化物（HFCs）不破坏平流层臭氧，被认为是ODSs的长期替代物，并没有包括在协议中。但因为大多数HFCs是高效温室气体（GWP），因此《京都议定书》对其进行了限制。尽管如此，《蒙特利尔议定书》对CFCs、HCFCs等的限制已经有效控制了ODSs的辐射强迫作用。图a中显示，如果没有蒙特利尔条约，ODSs产生的辐射强迫在2010年可能会达到0.60~0.65W/m²。而在未来如果可以修订《蒙特利尔议定书》控制HFCs，将能进一步保证其带来的气候效益。

IPCC最新的气候变化评估报告（AR5）更加肯定了人类活动对全球变暖带来的影响，同时IPCC致力于回答影响决策的科学研究到底能否改变什么，显然《蒙特利尔议定书》不容置疑地提供了正能量。图b中描述了《蒙特利尔议定书》通过约束CFCs对全球变化趋势起到的明显减缓作用。不同要素影响着地球能量平衡，其中包括大气甲烷（绿线）和CFCs等其排放受到《蒙特利尔议定书》限制的气体浓度（蓝线）。所有要素共同决定了总的不断变化的辐射强迫（红线），而《条约》的执行拉低了CFCs浓度和辐射强迫（虚线为没有条约的情景）（图b₁）的同时，也改变了温度升高的进程（图b₂，能量平衡模式模拟结果，红线为温度变化，其他同图b₁），即《蒙特利尔议定书》让温度几乎降低了0.1℃，图中方块给出观测到的年均温度及其与模式温度的偏移。



走向成熟，特别是卫星气象观测已经业务化的时候，南极臭氧洞的发现匪夷所思地被延缓了数年，确实给气象界，乃至全球科技界带来了很好的警示，需要汲取的教训耐人寻味。最新的观测显示，南极臭氧洞正在缓慢恢复，但是因为已经进入大气层的CFCs的长生命期，要到

大约2070年才能恢复到其1975年以前的水平。也许逝去的法曼会带着一份无法看到南极臭氧洞复合的遗憾，但他的精神和事业，无疑会激励着更多后来人。

本文由2012年中国科学技术协会学会能力提升专项（优秀科技社团奖）项目资助。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）



图6 2011年，法曼在英国南极局操作Dobson光谱仪

深入阅读

Childs M. 2013. Joe Farman: Scientist who first uncovered the hole in the ozone layer. The Independent, 21 MAY 2013.

Christie M. 2004. Data collection and the ozone hole: Too much of a good thing? In: Proceedings of the International Commission on History of Meteorology 1.1

Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. Nature, 315 (6016): 207-210.

Joseph Farman. 2010—2011. Interviewed by Paul Merchant, National Life Stories, An Oral History Of British Science <http://sounds.bl.uk>.

Pretis F, Allen M. 1993. Climate science: Breaks in trends. Nature Geoscience, 6: 992-993.

Pyle J, Harris N. 2013. Joe Farman (1930-2013) Discoverer of the ozone hole. Nature, 498 (7455): 435.

Stolarski R S, Krueger A J, Schoeberl M R, et al. 1986. Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. Nature, 322: 808-811.

Velders Guus J M, Ravishankara A R, Miller M K. 2012. Preserving montreal protocol climate benefits by limiting HFCs. Science, 335(6071): 922-923.

现代数值天气预报之父

——记美籍匈牙利数学和气象学家冯·诺依曼

■ 贾朋群 张萌

1946年8月29—30日，在美国位于新泽西州的普林斯顿大学的高级研究院，召开了一次对现代气象学发展具有历史意义的重要会议，这次被认为是世界上第一次数值天气预报（NWP）学术会议的组织者和主持人，不是当时著名的气象学专家，却是普林斯顿大学高级研究院的数学教授冯·诺依曼博士。在这次之后的几年里，在冯·诺依曼博士的周围，总是聚集着一支来自美国乃至世界各地最优秀的气象学家队伍和电子工程师，他们的目标只有一个：用刚刚诞生的数字电子计算机做出准确的天气预报。这个目标终于在1950年4月初，在世界上一台电子计算机ENIAC（电子数字积分器和计算器）的输出结果中实现。在以1949年1月31日观测记录为初值，进行欧洲地区24小时数值预报的试验中，数值预报首获成功。计算机输出的结果将位于欧洲西部的风向转换和反映大气斜压特征的低槽延伸现象都正确进行了预报。冯·诺依曼博士用他数学家的头脑，战略家的韬略，在不长的时间里，帮助气象学家完成了至少从20世纪初开始的梦想：用物理定律计算和预报天气，而他本人，无论他是否在意，也成为气象学家队伍中令人尊重和自豪的人物。

约翰·冯·诺依曼（John von Neumann, 1903—1957年，图1）1903年12月28日出生于匈牙利首都布达佩斯，他是当地一位小有成就和名气的银行家家中的第一个男孩，神采奕奕的父亲在他出生前，就花钱为他买了个头衔，诺依曼家族的后代也就首次获得冯·诺依曼的姓氏。冯·诺依曼没有辜负父亲的苦心，从小就表现出其他孩子想都不



这些气象界“大腕”和当局的所谓主流观点，却在冯·诺依曼项目取得成功，并从9年之后的1955年开始，陆续成为各国天气预报的主要手段的事实面前不攻自破。

会想的数学天赋。一次，母亲漫无目的看着前方时，只有6岁却可以心算两个8位数乘除法的冯·诺依曼感到奇怪，就问到：“妈妈你在算什么？”，他幼小的心里几乎所有一切都和数有关系。除了数学，冯·诺依曼8岁时还迷上了历史，家中44卷本的大学历史全书被他通读了一遍，似乎是向人证明他的大脑会在逻辑数学和社会应用两个领域显示才智。冯·诺依曼的天生数学天赋很令父母吃惊，但他们始终鼓励自己的孩子全方面发展，特别是培养他良好的人格。

1914年，刚刚10岁的冯·诺依曼就进入大学预科班学习，但由于一次大战的爆发，冯·诺依曼随全家离开匈牙利，虽然学习受到影响，但在战后参加结业考试时，他还是以优异的成绩毕业。1921年冯·诺依曼17岁时，他的第一篇数学研究论

文在德国数学学会杂志上发表，就在这一年，他还和父亲达成一致，除了数学还要学习化学。于是冯·诺依曼进入柏林大学，两年后又转入苏黎世大学学习化学工程。与此同时，头脑灵活的冯·诺依曼没有忘记自己最喜爱的数学，他还在布达佩斯大学注册了数学博士课程。然而，身在苏黎世的冯·诺依曼并不听数学课，只是按时参加考试。1926年，22岁的冯·诺依曼同时获得了化学工程学学士和数学博士学位。获得学位后，冯·诺依曼来到哥廷根大学，成为著名数学家希尔伯特的助手，1927—1929年又成为柏林大学和汉堡大学的兼职讲师。在此期间，他致力于研究数理逻辑、集合代数和集合论等纯数学理论，取得了公认的成绩。1927—1929年，冯·诺依曼以每个月发表1篇论文的速度在所研究的领域获得许多成果，到1929年论文累计达到了32篇。他还积极参加各种学术活动，成为国际数学界知名的人物。1929年末，冯·诺依曼得到美国普林斯顿大学的邀请，对方希望通过邀请欧洲最优秀的数学家赴美国工作，刺激美国的数学界。1930年，冯·诺依曼首次赴美，成为美国普林斯顿大学客座讲师。1933年，33岁的冯·诺依曼博士成为著名的普林斯顿大学高级研究院聘任的包括爱因斯坦在内的6位教授中最年轻的一位。1937年，冯·诺依曼加入了美国国籍，同时因为他在数理逻辑和量子力学方面突出的



图1 约翰·冯·诺依曼（John von Neumann, 1903—1957年）

研究工作，成为美国科学院院士。

正是从1933年任普林斯顿大学教授开始，冯·诺依曼将自己的研究领域逐渐从纯数学向应用数学转换，开始在脑子里酝酿研制计算机的计划。1937年冯·诺依曼作为顾问，开始与美国军方弹道研究实验室合作，针对弹道的研究面临很多计算问题，更加坚定了他要通过构建计算机代替人类完成科学计算的任务决心。而当时在数学界，更多的数学家沉溺于数学方程完整解的研究，对数学计算很是轻视，对计算机更认为那不过是更大更快的计算器而已。从小就对数学，尤其是数字计算特别敏感的冯·诺依曼却越来越清晰地认识到计算机高速和准确的计算，不但会给数学家，还会给自然科学各学科带来意想不到的结果和突破。1944年，冯·诺依曼来到宾夕法尼亚大学摩尔工程学院，正式成为美国第一台通用电子计算机ENIAC（图2、图3）研制项目的顾问，他也因此被誉为现代数值分析——计算数学的缔造者之一（链接-1）。1945年末，他成功地说服了高级研究院主任和理事会，在名义上和财政上（拨款10万美元，而当时的美国无线电公司也仅值10万美元）支持ENIAC项目。

冯·诺依曼大约在1945年末或更晚些时候，注意到了气象领域。他

很快就意识到，数值天气预报是计算机在数学应用领域面临的最重要的挑战之一。1946年5月，他向美国军方提出建议，在项目内成立气象组，同样期待着更为准确的天气预报的美国军方非常明智和快速地支持了冯·诺依曼的建议，从1946年7月开始支持和ENIAC项目捆绑的数值天气预报计划。于是，包括罗斯贝、查尼等一批美国当时最有思想的气象学家，通过文章开始讲述的那次有重要历史意义的会议走到了一起（链接-2），并且取得了不仅在气象科学领域，而且在应用数学和自然科学都具有划时代意义的成果。

1946年，罗斯贝在给赖克尔德弗的信中，更加深刻地认识和评价了冯·诺依曼气象项目的意义。曾经在1942年和冯·诺依曼一起讨论过预报问题的罗斯贝写到：“在某些情形下，冯·诺依曼的工作可以比肩数学在处理电学线性微分方程中的成功以及量子力学中数学在处理流体动力学非线性微分方程中的失败，他表现出这样的自信，即后者在计算机辅助的数值实验将带来不仅仅是实际上，更是数学上的进步。”在这里，罗斯贝意识到，冯·诺依曼可能带来的数值实验的方法，一方面能让科学家避免在似乎完美的数学定律面前，面对实际

问题无计可施；另外，也能从数值实验中，审视用微分方程或方程组表示的所谓自然规律是否真的很完美，其不足可能在数值实验中被昭示。冯·诺依曼的这一思想，被称为“启发式计算”，它从60年代开始，被更多的气象学者认识到并逐渐成为气象学科最先构筑的标准方法。数值模式也从单一的天气预报被赋予更多和更加丰富的职能，可以说数值模式的研制和应用，改变了气象学科的面貌，数值实验的开展，使得理论得以拓展，而更加合理和准确的理论或计算方案，又在不断改进着数值天气预报。可以说数值天气预报的成功随后带来的一系列改进，例如，大气运动偏微分方程数值解、数值模式各种近似和参数化等，都见证了大约70年前冯·诺依曼的初衷和罗斯贝的洞察。

1955年，一直关注数值天气模式进展的冯·诺依曼，在一次会议上总结了数值气象研究的3个方向：即短期天气预报（1~14天）、长期预报和大气环流模拟。其中大气环流研究会因为计算的加入而更加有效。然而，就在这年夏天，X射线检查说明在工作中容易感到疲劳的冯·诺依曼患有癌症，18个月以后的1957年2月8日，年仅53岁的冯·诺依曼英年早逝，令人痛惜不已。回顾冯·诺依曼一生的科学事业，与

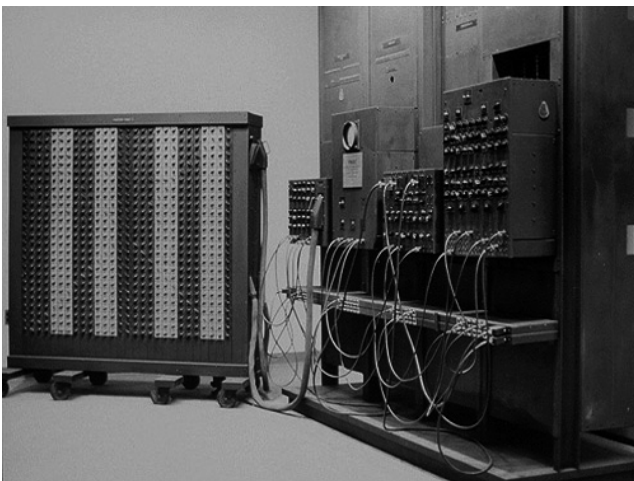


图2 世界上第一台电子计算机——ENIAC

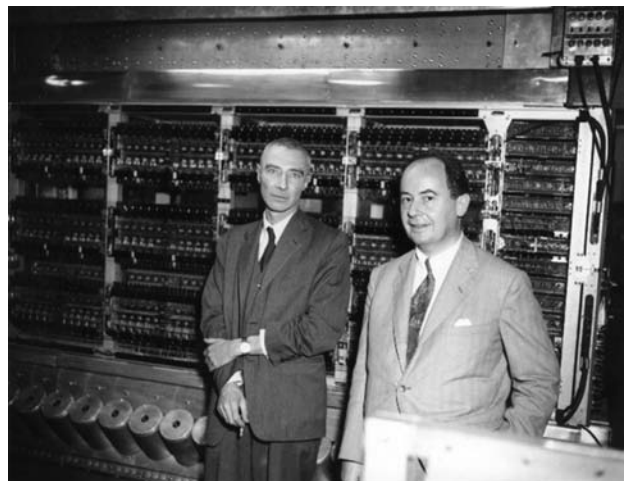


图3 冯·诺依曼（右）和同事Robert Oppenheimer（左）在位于普林斯顿的高级研究所第一台计算机前

集合论、量子理论及应用于经济和社会的对策论等多项数学理论的创立，以及在氢弹等核武器研究中的巨大贡献相比，组织和实施数值天气预报仅是他一生学术成就的很小一部分，甚至只是一段插曲而已。然而，正是由于这项工作，冯·诺依曼和一组优秀的气象学家一起改变了天气预报的历史。他在这项研究中提出并解决了计算机程序编制问题，即让快速运转的计算机自己读懂用所谓接近计算公式的“高级语言”编写的计算指令。冯·诺依曼是现代数值分析中计算数学的缔造者之一，他以数值天气预报为突破口，对非线性方程的离散化及计算稳定性等重要的数学应用问题，形成了一套理论和解决方案，其应用价值和受益领域远远不局限于气象科学。

回顾冯·诺依曼及其领导的团队，在开启了数值天气预报成功之门的历程中，在几次需要科技创新

和环境引领的时候，冯·诺依曼个人的超人智慧和协调能力，在保证气象项目的经费支持、在高级研究所成功立项、确保第一台电子计算机资源用于气象预报试验以及在全球范围吸纳最优秀和适合的气象学者加入其中等方面，都起到了不可替代的作用。冯·诺依曼个人，无论是科学层面还是在技术路线上，也无愧于领军者的角色。首先，在电子计算机研制阶段，就着手思考其应用价值并成功地与气象结合起来，是冯·诺依曼这位“全能型”科学家最难得的思想^①。正是这一点，使得“一战”期间理查森的计算天气之梦是一个人在“单打独斗”，变为“二战”前后数值天气预报实践成为美国军方支持和科学界、舆论关注的事件，也让一直在美军方操控下的第一台电子计算机，为NWP成功做出了贡献。

再有，冯·诺依曼在加入ENIAC项目之初，就一直思考计算机的

“编程”问题。1945年6月，他的《EDVAC报告》初稿，第一次完整和详尽阐述了数字计算机编程的概念。正是他最先赋予的计算机“编程”能力，让依据物理偏微分方程反复和循环计算天气演变的数值预报模式方程，得以在电子计算机里持续演算。

冯·诺依曼一生涉猎领域众多，但他的主要研究领域数学、物理，尤其是流体动力学只是他感兴趣的领域之一。这样的全学科科学家，在气象科学的重大突破过程中，其“领袖”的作用是不可替代的。尤其难得的是，NWP项目中，冯·诺依曼借助了当时以查尼为代表的，最具活力、年轻和创新能力极强的团队。正是这样的组织架构，才让NWP作为20世纪下半叶气象领域最为重要的扩展领域之一，持续发展下去。其中，查尼在NWP成功的第二年（1951年），就洞察到和提出利用理查森所用的“原始方

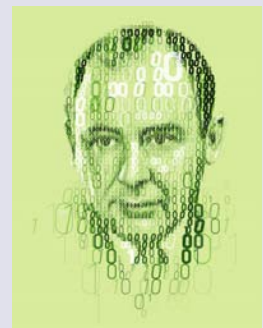
链接-1 ENIAC项目和冯·诺依曼

ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) 是电子数值积分计算机的缩写，简称为伊尼亚克，是世界上第一台通用电子计算机。在二战期间，美国军方资助了ENIAC项目，其设计和建造合同在1943年6月签订，实际的建造在7月以“PX项目”为代号秘密开始，在宾夕法尼亚大学穆尔电气工程学院进行。建造完成的机器在1946年2月14日公布，并于次日在宾夕法尼亚大学正式投入使用。ENIAC包含了17468个真空管、7200个晶体二极管、1500个继电器、10000个电容器，还有大约五百万个手工焊接头。它的重量达27吨，体积大约是2.4m×0.9m×30m，占地167m²，耗电150千瓦，其计算速度较之前的计算器提高了1000倍，其可编程能力也令科学家们激动不已。ENIAC在1946年11月9日关闭，并在1947年转移到了马里兰州的阿伯丁试验场。1947年7月，它在那里重新启动，继续工作到1955年10月。

ENIAC为美国军方的弹道研究实验室(BRL)所使用，但其最初的应用不仅局限于弹道的计算，也用于天气预报、原子能量计算、热燃烧、随机数研究、风洞涉及等其他领域。其中，在计算天气方面的应用，与ENIAC的主要贡献者冯·诺伊曼有直接的联系。

1944年，在洛斯阿拉莫斯国家实验室研究氢弹的冯·诺伊曼，在ENIAC项目进行了一年后注意到这台计算机，以他的敏感，他所在的实验室随后深入参与了ENIAC项目，以至于对ENIAC的第一次测试运行是计算氢弹相关数据。

随后来到位于普林斯顿高级研究所的冯·诺伊曼，将该项目研制的重要目的之一一定为，用一个实际的科学问题，展示计算机潜在的革命性力量。这时他的目光投向了气象。1946年，就在ENIAC研制成功之际，他也在高级研究所建立了气象项目。到1956年气象项目结束时，冯·诺伊曼开始时的所有预期，都伴随数值天气预报的成功得以实现：即项目表面，基于物理定律的数值算法可以用于预报大尺度大气运动，借此进行的天气预报。准确性与预报员水平相当。计算机能使这种计算足够快和准确，从而用于天气预报。



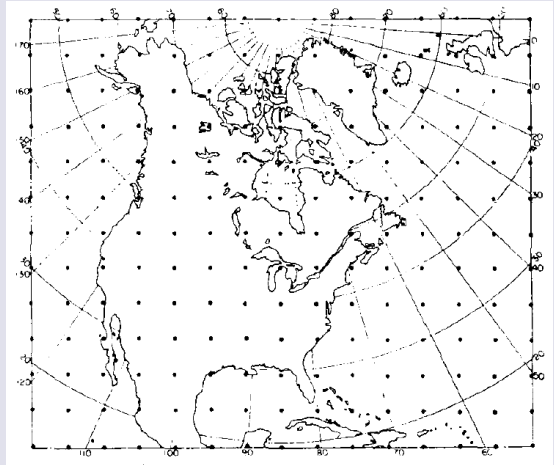
^① 作为计算数学创始人的冯·诺依曼，在介入电子计算机项目之初，就明确了其目的之一就是“要用一个实际的科学问题，展示计算机潜在的革命性力量”。虽然他最早找寻的领域并非气象，瞄准的是包括弹性力学和塑性力学理论、光学、电动力学以及原子和分子的量子理论等。他最终选择气象，可以说既是气象界的幸运，也是他本人最大的“胜算”之一，因为数值天气预报推进了一个学科并使大众受益，也是这位科学巨匠辞世前最关心的科学问题之一。

链接-2 数值天气预报 (NWP) 的发端

1945年底,有着“电视之父”称号的,俄裔美国人Vladimir Zworykin和有着“计算机之父”称号的冯·诺伊曼见面,后者讲述了如果将初步研制成功的电子计算机用于天气预报,将会带来什么样的改变。主要关注人工影响天气,但对于在电视节目里及时向观众预告天气变化也感兴趣的Zworykin,听取了冯·诺伊曼的建议,决定支持冯·诺伊曼的数值天气预报项目。让二人一拍即合的根源还在于,他们共有一个梦想,就是让电视和电子计算机以某种形式联系在一起,而天气的演化和预报,正是联系电视和电子计算机的最好应用领域。二人随后共同参加了美国气象学会的年会,作为“外行”,他们在会上靠近了气象学者,和他们共同感悟和领会气象学者们的工作,从而找寻进一步的灵感。

正是这次会面,让冯·诺伊曼坚定了用计算机开展天气预报的信念。1946年初,他先和罗斯贝的研究团队取得了联系,找寻数值天气预报之路。后者向冯·诺伊曼解释了为什么纬向平均的动力模式无法工作,进而建议冯·诺伊曼用Victor Starr在1941年提出的正压模式。然而,后者当时并不满足较为简单的正压方法,依靠新研制出来的电子计算机,他希望能够更加准确,或者说尽可能少地采取近似的方法计算天气的演化。

1946年夏,本文开始描述的对NWP具有历史意义的会议在普林斯顿召开。然而,会后很长一段时间,项目组毫无进展。而在这关键时候,曾经参加了普林斯顿会议,并在会上提出了用少数几层来表示整个大气的垂直结构思想的查尼,在前往挪威的途中访问了芝加哥,从而与项目组建立了更加紧密的联系。后来加入这个团队的查尼,参考了1922年理查森用手算预报天气实践的经验,确定了第一次用电子计算机进行预报试验采用J. Bjerknes的趋势方程的方案。最终,在1948—1949年间,借助冯·诺伊曼在计算机上“存储程序”,即编程,项目组利用一个一层正压过滤模式,历史上第一次利用位于马里兰美军基地的世界上第一台电子计算机ENIAC,进行了24h天气预报。预报的区域和格点分布在图中给出。



程”模式进行NWP的可行方案及其带来的预报技巧的提升。

此外,在这样的过程中,冯·诺伊曼的“非气象学者”身份,也帮助了团队不顾当时美国“主流”学者的观点,坚持进行数值预报实践。就在本文开始描述的普林斯顿会之后4个月,1946年12月在芝加哥大学召开的一次气象学术会上,作为会议主题之一讨论了数值天气预报问题,但会议给出的结论却是“目前构建数值预报系统的时机还不成熟”,会议给出的主要原因是,这样的预报基于“粗燥的”(brutal assault)大气运动方程,后者中的地转项和其他项比较大得多,但其他项也对天气变化起重要作用。同月举行的另一次会上,美国气象学会主席也指出:完全基于正确的物理定律的客观预报方法目前还遥不可及。美国加州理工学院年轻气象学者埃利奥特(Robert D Elliott)甚至模仿理查森的做法,

通过简化算法,写成名为《计算的天气预报》于1943年提交给美国气象局,但是当局对这位热心探索的青年气象学家的创新实践,却没有任何表示。然而,这些气象界“大腕”和当局的所谓主流观点,却在冯·诺伊曼项目取得成功,并从9年之后的1955年开始,陆续成为各国天

气预报的主要手段的事实面前不攻自破。

本文由2012年中国科学技术协会学会能力提升专项(优秀科技社团奖)项目资助。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

深入阅读

- Bochner S. 1958. John von Neumann (1903—1957), A Biographical Memoir. Washington D C: National Academy of Sciences.
- Charney J, Fjörtoft R, von Neumann J. 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2(4): 237-254.
- Harper K C. 2008. *Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Kalnay E. 2002. *Atmospheric Modeling Data Assimilation and Predictability*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Metropolis N. 1980. *A History of Computing in the Twentieth Century: A Collection of Essays with Introductory Essay and Indexes*. Waltham: Academic Press, INC.
- Nebeker F. 1995. *Calculating the Weather: Meteorology in the 20th Century*. Waltham: Academic Press.
- Uccellini L W, Kocin P J, Sienkiewicz J M. 1999. Advances in forecasting extratropical cyclogenesis at the National Meteorological Center. In Shapiro M, Grønås S. *The Life Cycles of Extratropical Cyclones*. AMS/Canterbury Press.

海洋学之父莫里和国际气象合作的开端

■ 贾朋群

环绕地球的大气层与覆盖地球表面70%的海洋之间存在着紧密的联系，这一点在人类对大气和海洋的认识历程中都准确无误地表现出来。160年前的1853年，第一次国际海洋气象会议在比利时的布鲁塞尔召开，会议的参加者虽然只有来自比利时、丹麦、法国、英国、荷兰、挪威、葡萄牙、瑞典和美国等9个国家的主要是海军军官的12名代表，但正是在这次会议上，讨论并就航行于全球海洋上的船只进行气象和海洋观测达成了一致意见，意义巨大的统一的海洋气象观测网在这次会议之后逐渐形成，为全球的海洋运输业的大发展创造了条件。对气象学家来说更为重要的是，这次会议直接导致了20年以后的1873年第一次国际气象大会在巴黎召开和世界气象组织（WMO）的前身国际气象组织（IMO）的成立，为最具广泛意义的国际气象合作奠定了基础。布鲁塞尔会议的倡导者和组织者，是被称为海洋学之父的美国海洋学家莫里，一个受到当代海洋学家，同时也受到全球气象学者尊敬的先驱者。

美国海军上尉马修·方丹·莫里（Matthew Fontaine Maury，1806—1873年，图1）1806年1月14日出生于美国弗吉尼亚。这位种植园主的后代，是家中的第7个孩子，从小就争强好胜的莫里，因为他的一个哥哥成为了美国海军军官，为了与哥哥比高下，1824年刚刚达到入伍年龄的莫里也顺理成章地成为了美国海军学校的一员。1825—1834年，莫里参加了3次远



莫里的航海图让人们看到了观测的重要性，领会到点滴的观测汇集起来，能够具有不可替代的巨大价值。

航，到达了南太平洋、欧洲并完成了全球航行。在这些航行实践中，莫里切身体会到了海洋洋流和风场对于航行的重要意义。1939年，已经晋升为海军上尉的莫里在一次事故中不幸腿部致残。不适合服役远航的莫里在1842年被任命为主管海图和仪器库的负责人。事实证明，这次任命是将一个最为适宜的人在最适宜的时候放在了最适宜的位置，一个伟大的海洋气象学家应运而生。莫里在大量船只报告档案中，开始研究和综合全球海洋洋流、风场和天气数据。为了收集更多的有效资料，他还通过向船长们分发专门定制的包括各种海洋气象要素观测格式的航海日志，试图将观测规范化。为了让更多的船只参与观测，他还坚持将绘制的包括各海区风场、洋流图的航海图免费提供给船长们，唯一的条件是和他们

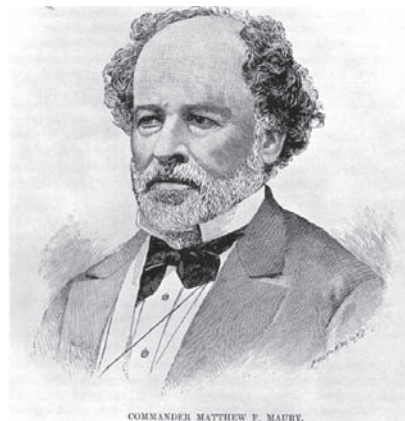


图1 马修·方丹·莫里（Matthew Fontaine Maury，1806—1873年）

交换最新的航海日志。这样所有实施观测的船只能够从莫里手中优先获得最新的海图，而他们提供的资料，又成为莫里订正和补充海图的信息来源。莫里的海图很快闻名全球，与船长之间这一有效和在自愿基础上互利互惠的合作的方式也在无形中锻造了国际气象界公开交换环境资料的传统。1843年莫里开始发表能够帮助船只缩短航程和节省燃料的航海图（图2）。这些包括了风速和洋流等海上航行最重要要素的航海图，是莫里最初编制的基于船只航海日志得到的数据进行提炼、融合后得到的，对于远航的船长来讲具有巨大的实用价值。随着获得资料的增加和内容的丰富，莫里海图的内容和种类也逐渐增加，海图有6种类型：序列A：航路图；序列B：贸易风图；序列C：导航图；序列D：热量图；序列E：风暴和降水图；序列F：鲸鱼图。正是这一工作，让人们看到了观测的重要性，领会到点滴的观测汇集起来，能够具有不可替代的巨大价值。可以说，莫里是最早通过对“大数据”的挖掘，获取巨大价值的实践者（链接-1），正是受到莫里思想的启发和实践的引导，促成了1853年布鲁塞尔会议的召开，从而将包括气象观测在内的全球观测网的组织、协调和管理，逐渐变为世界各国的共同事业。

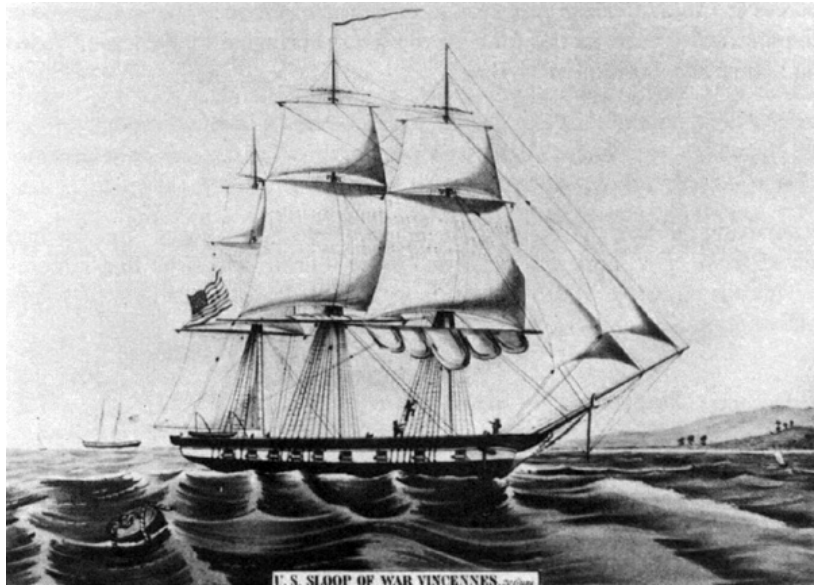


图2 莫里1852年发表的风和洋流图之一 (a) 以及19世纪中叶船只在海上航行的情景 (b)。莫里和系列航线图覆盖了大西洋、太平洋和印度洋海域, 莫里在美国水文局的授权下出版这些海图, 这些珍贵的原始海图, 被美国地理学会图书馆收藏, 在美国一些大学的数字化图书管里可以通过网络查阅 (例如, 本图来自威斯康星大学图书馆, 网址为<http://www4.uwm.edu/libraries/AGSL/>)

最早提出建立国际气象大会制度全盘考虑气象观测统一系统建议的, 是英国特种兵团的工程师詹姆士上尉。这个建议虽然当时得到了英国政府的支持, 但由于“遇到一些困难而无法立即实施”。在分析和收集海洋气象资料并在海运中成功应用中经验丰富的莫里, 提出了一个变通但更为全面的建议:

“所有沿海国家的海军应该合作, 使气象观测达到统一, 使位于世界上任何地方的船只之间的观测可以互相参考和比较。而且, 由于要征召各国海洋商业和军队船只自愿合作加入这一观测和研究体系, 由各主要参与者共同制定所用 (用于交流观测结果) 的航海日志的格式, 怎样描述所用仪器, 观测的项目和仪器生产厂家以及观测的方法和方式, 不仅是适宜的, 也是有远见的。”

1853年8月23日, 在布鲁塞尔国际海洋气象会议上, 讨论了莫里

的提案。会议通过了船只观测记录的标准形式以及进行必要观测项目的指南。指南只限于保证一致性的最低要求。24行的观测记录的形式则较为全面, 观测的要素包括: 气压、湿球和干球温度、风速和风向。需要列出的信息有: 云量、云状、云移动的方向、海表和海水温度。补充信息包括以下天气现象的描述: 飓风、海上龙卷风和极光等。会上就观测量使用的单位和建议使用仪器进行了艰苦的讨论, 会议认为当时还无法统一计量单位, 在观测仪器方面, 会议提倡使用非液体气压计, 各国使用的各种标准仪器应该交换。这次会议的成果, 为今后100多年气象资料的国际规范化和有效交换奠定了基础。

160多年前的布鲁塞尔国际海洋气象会议, 是当时海洋科学和现代气象科学在全球海运业的迅速发展的背景下, 在海洋气象方面找到了共同点和结合点的标志。这次会议

更为深刻的意义在于, 无论是气象学还是海洋学的发展, 必须通过开展国际合作才有可能。在很少有领地划分的海洋上, 布鲁塞尔会议促成的海洋气象观测国际合作成功的例子, 尤其值得气象学家们思考。人类工业化革命以来, 世界各国认识到气象在人类挽救自身生命和财产的努力中的独特作用, 对气象信息和气象预报需求逐步提高。到19世纪初期, 已经可以根据陆地气象观测网资料绘制出生动描述天气状态和变化的天气图, 这使气象学家们看到了认识和掌握天气运动和变化的规律并进而进行天气预报的希望。但由于天气图都是根据事后得到的资料制作的, 气象学家们认识到要实时进行天气预报, 必须解决两个问题, 即分散在各处的观测网在统一的规范下开展观测和各地观测到的结果必须用统一的格式和方式传送到天气分析中心。1843年电报的发明最后解决了这两个问题的

链接-1 莫里航海图：最早的大数据实践

莫里本是一位很有前途的海军军官。1839年一场意外事故，让他的腿留下了残疾，无法继续在海面上工作。美国海军任命他为图表和仪器厂的负责人。然而，具有海上航行经历的莫里，曾经对船只在水上绕弯儿不走直线感到十分不解。当他向船长们问及这个问题时，他们回答说，走熟悉的路线比冒险走一条不熟悉而且可能充满危险的路线要好得多。他们认为，海洋是一个不可预知的世界，人随时都可能被意想不到的风浪困住。

但是从他的航行经验来看，莫里知道这并不完全正确。他经历过各种各样的风暴。莫里在海军军官学校当学生时，就总是不断地向老船长学习经验知识，这些经验知识（他从这些老船长那里学到了潮汐、风和洋流的知识）都是在军队发的书籍和地图中无法学到的。相反，海军依赖于陈旧的图表，有的都使用了上百年，其中的大部分还有很重大的遗漏和离谱的错误。在他新上任为图表和仪器厂负责人时，他确定的目标就是解决这些问题。

他清点库房里的气压计、指南针、六分仪和天文钟。他发现，库房里存放着许多航海书籍、地图和图表；还有塞满了旧日志的发霉木箱，这些都是以前的海军上尉写的航海日志。刚开始的时候，他觉得这些都是垃圾，但当他拍掉被海水浸泡过的书籍上的灰尘，凝视着里面的内容时，莫里突然变得非常激动。这里有他所需要的信息，例如对特定日期、特定地点的风、水和天气情况的记录。大部分信息都非常有价值。莫里意识到，如果把它们整理到一起，将有可能呈现出一张全新的航海图。这些日志是无章可循的；页面边上尽是奇怪的打油诗和乱七八糟的信手涂鸦，与其说它们是对航海行程的记录，还不如说它们是船只在航海途中无聊的娱乐而已。尽管如此，仍然可以从中提取出有用的数据。莫里和他的20台“计算机”——那些进行数据处理的人，一起把这些破损的航海日志里记录的信息绘制成了表格，这是一项非常繁重的工作。

莫里整合了数据之后，把整个大西洋按经纬度划分成了五块，并按月份标出了温度、风速和风向，因为根据时间的不同这些数据也有所不同。整合之后，这些数据显示出了有价值的模式，也提供了更有效的航海路线。

有经验的海员有时依靠经验能安全航海，但有时也会陷入危险之中。在从纽约到里约热内卢这条繁忙的航线上，水手们往往倾向于与自然斗争而不是顺应自然。美国船长一直被劝导前往里约热内卢不能通过海峡，因为那样存在很大风险，所以船长会选择在东南方向的航线上航行，再穿过赤道驶向西南方向。而这样一来，航行的距离就相当于穿越大西洋两次。这是很荒谬的，其实直接沿着海峡向南航行就可以了。

通过分析这些数据，莫里知道了一些良好的天然航线，这些航线上的风向和洋流都非常利于航行。他所绘制的图表帮助商人们节省了一大笔钱，因为航海路程减少了三分之一左右。一个船长感激地说：“我在得到你的图表之前都是在盲目地航行，你的图表真的指引了我。”有一些顽固的人拒绝使用这个新制的图表，而当他们因为使用旧方法航行到半路出了事故或者花费的航行时间长很多的时候，他们反而帮助证明了莫里系统的实用性。

1855年，莫里的权威著作《关于海洋的物理地理学》（The Physical Geography of the Sea）出版，当时他已经绘制了120万数据点了。莫里写道，在这些图表的帮助下，年轻的海员们不用再亲自去探索和总结经验，而能够通过这些图表立即得到来自成千上万名经验丰富的航海家的指导。

他的工作为第一根跨大西洋电报电缆的铺设奠定了基础。同时，在公海上发生了一次灾难性的碰撞事件之后，他马上修改了他的航线分析系统，这个修改后的系统一直沿用至今。

——摘自《大数据时代》，作者：维克托·迈尔-舍恩伯格等，翻译：盛杨燕、周涛



技术难点。然而，两个条件都需要排除国家界限，即只有通过国际合作实现统一观测和观测结果共享才有可能使天气预报出现转机，将气象学推向新的高度，让人类从频繁的天气灾害中解脱出来。地球大气及其变化并不认同政治和领地的疆界，所谓“自然”的气象灾害更不可能仅和某些党团势力作对而和他无关。于是，气象服务在国家内部的“公益”性质和国际上的共享和互惠互利性，在布鲁塞尔会议后

的20年里，也成为气象界的共识，并且促成了最早的气象国际合作的引领者和实施机构，WMO的前身——国际气象组织于1873年，也就是莫里辞世的同一年成立。

本文由2012年中国科学技术协会学会能力提升专项（优秀科技社团奖）项目资助。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

深入阅读

维克托·迈尔-舍恩伯格，肯尼思·库克耶. 2013. 大数据时代：生活、工作与思维的大变革. 杭州：浙江人民出版社.

Douglas A E. 1888. Matthew Fontaine Maury. Nature, 38(980): 339.

Wexler H. 1962. Dedication to Matthew Fontaine Maury. In Wexler H, Rubin M J, Caskey JR J E. Antarctic Research, The Matthew Fontaine Maury Memorial Symposium. Geophysical Monograph Number 7, American Geophysical Union, NAS.

WMO的首任主席弗·乌·赖克尔德弗博士

贾朋群 徐虹

1963年10月1日，弗·乌·赖克尔德弗博士（Dr. Francis Wilton Reichelderfer）在担任美国气象局局长25年之后正式退休时，荣幸地收到了时任美国总统肯尼迪的信函，对这位赫赫有名的，在长达4位总统任期间一直担任气象局长的工作，合众国总统褒奖有嘉：“你在为美国服务的45年里，无论是当海军军官、任气象局局长，还是作为国际合作的领头人，都取得了出色的成绩。”

弗·乌·赖克尔德弗（图1）1895年8月6日出生在美国印地安那州东北部小城Harlan的一个牧师家庭。1913年他中学毕业时，全家迁到芝加哥北部的Evanston，这样父亲得以进入著名的Protestant学院当管理员，赖克尔德弗进入西北大学接受高等教育。赖克尔德弗在回忆起大学时代的生活时，不无感慨地说，



图1 弗·乌·赖克尔德弗博士（Dr. Francis Wilton Reichelderfer, 1895—1983年）



深受挪威学派影响，可以称为经典气象学家的赖克尔德弗，在其长达1/4个世纪领导国家气象机构时，面对新技术依然保持满腔热忱，这是让人敬仰和难忘的。

“在中学时我就对数理化感兴趣，进入大学和现在不少青年人只选修在能够毕业前提下最少和最简单的课程不一样，我选修了当时所有的可选课程，比正常要求多出大约25%。”赖克尔德弗很早就立志成为一名化学家，但他选修的课程除了物理和化学以外，还有英国文学、数学、动物学、心理学，特别是他还选修学习了3年古希腊文课程。他觉得最后一项让许多学生一听就皱眉头的课程，却让他受益匪浅。授课老师独特的人格魅力和渊博的知识令他终生难忘。老师的教诲不仅让他学到了古希腊文字的奥妙，更大大拓展了他的思维空间。

赖克尔德弗在获得学士学位以后，1917年6月在位于芝加哥的一家制作发酵粉公司的化学实验室里工作。因为他和当时许多的年轻人一样，梦想着在蓝天里翱翔，而第一次世界大战的爆发似乎给实现这一梦想提供了机会。于是他很快就根据美国的宪法，和大学的一位好友一起志愿加入了美国海军飞行预备军服役。为了更快开赴正在与德国交战的英国，以便利用战争实现梦想，他和伙伴没有循规蹈矩地一步步学习怎样当一名飞行员，而是决定走一条捷径，参加气象强化培训班。然而历史给赖克尔德弗开了一个玩笑，这个玩笑却改变了他的一生。当时一个英国官员在审核培训班参加人员名单时，念到：“赖……，这不是一个德国名字

吗，难道你们就找不到有更英国化名字的人？”就这样赖克尔德弗被轻率地从培训名单中删除，正好海军的一个机场缺一气象人员，他被补了进去。

赖克尔德弗来到这个军用机场，却发现这里没有任何气象仪器和设备。机场的飞机频繁起降找寻敌方潜水艇，他为确保飞机安全，就与加拿大气象局联系，可以获得最多不超过十来份的天气报告，根据这些报告，他做出了最简陋的天气预报。几个月以后战争结束了，赖克尔德弗又积极要求参加飞行，上级同意了。他被送到飞行学校参加飞行训练。但这一次他不得不再一次终止了训练，原因是美国进行第一次水上飞机跨越大西洋的试航，赖克尔德弗依靠那几次简陋的天气预报的经历，被派驻到这次试航的终点里斯本负责天气预报。十分偶然，在试航出发点担任同一工作的，正是赖克尔德弗任美国气象局局长的前任Gregg。那时候美国研究气象的人数极少但却有很好的合作精神，他们相互熟知，配合默契，在十分困难的条件下，仍然使气象服务受到各方的赞扬。正是这种精神带来对气象工作的期望，战争结束后，赖克尔德弗没有回到那家化学公司，而是继续从事气象工作。

如果说是战争让赖克尔德弗走进气象并深刻了解气象服务的重要意义，那么让他感知大气运动的

奥妙，领悟大气探测的作用则是在1919年及以后他多次乘热气球飞行的经历。那一年，美国海军决定参加全国热气球竞赛，为了赢得比赛，飞行小组里需要一位气象学家观测风速和判断可能的天气变化。这时由于军队中大部分气象官员都已经退伍回到地方，赖克尔德弗成了当然的人选。之后，他又在1923年参加了一次国际热气球比赛。比赛的名次对赖克尔德弗来说已经不重要，但这两次在完全受大气运动摆布的热气球中且圆了他飞行梦的旅行经历让他终生难忘，尤其是高空大气强烈的垂直运动使他和气球一起经受的空中颠簸，以及国际比赛时另一只气球上他的同胞因受到雷电袭击而身亡，更使他深切知道了大气圈层的厉害和大气探测的重要性。

20世纪20年代初，赖克尔德弗阅读了V.皮叶克尼斯（V. Bjerknes，挪威气象学家和物理学家，近代天气预报科学奠基人之一，1921年完成了《环流涡旋动力学及其在大气斡旋和大气波动中的应用》这一经典著作，以建立了中高纬天气动力学中的极锋理论而闻名）关于移动气旋中锋结构和风切变线概念的论文。他敏锐地感到这一套在当时是创新的理论，很可能用于天气分析和预报方法的改进。于是他找出所有皮叶克尼斯的文献阅读，并在日常天气图上按照皮氏理论标出气旋中的锋面位置。这是美国气象业务中的一批画出锋面的天气图。1923年赖克尔德弗接管了美国海军气象服务，这使得他与美国气象局保持更多的联系。一件有意义的事是在美国气象局遇见了当时还是瑞典人的罗斯贝（Rossby，瑞典—美国气象学家，以提出高空西风带气流中的大气长波即罗斯贝波并阐明了急流的主要理论而闻名）。与这位小他3岁，都具有强烈创新意识的同行在一起，他们都发现了他们共有的许多特点和各自的优势。正是

这两位当时只有30出头的年轻人，开创了被后人认为是美国气象形成时期的罗斯贝—赖克尔德弗时期（1926—1940年）。期间美国开始了航空气象服务，启动了国家气象科学研究项目，开始培养气象专业研究生一级的高质量人才，并开始全面拓展联邦气象服务的领域和提高服务水平。

1938年12月15日，赖克尔德弗被罗斯福总统任命为美国气象局局长。那时的气象局仅有不到200人，分布在美国各地的观测人员在1500~2000人。他上任后感到气象局存在的最大问题，是气象业务服务没有跟上气象学快速发展的脚步。他认为气象学实际上是一个包括了物理学和数学的科学问题，所以他上任后做的第一件事情，就是与IBM公司联系，开发可用于采用数值方法进行天气预报的计算机。

赖克尔德弗在气象学新思想和

新技术方面的敏锐，让他很快就和罗斯贝、冯·诺依曼等科学家成为好朋友，他还积极参与和支持了冯·诺依曼的数值天气预报项目，让美国气象局能在第一时间跟上预报技术的变革。1950年4月4日，在数值预报试验取得成功的第一时间，赖克尔德弗就参观了用ENIAC进行的预报试验，面对第一台电子计算机在数值天气预报方面取得的成功，他更加坚定了之前他的“气象学实际上是一个包括了物理学和数学的科学问题”认识，他写道：“我们所见让人相信，一个天气预报的新时代正在来临——一个应用高速自动化计算机的时代。”

为了在气象局尽快开展数值天气预报业务，赖克尔德弗广纳人才，同时将看好数值预报新技术的思想传播给同行和同事。1952年，赖克尔德弗在写给刚刚在麻省理工学院（MIT）获得博士学位，后来加入美国气象

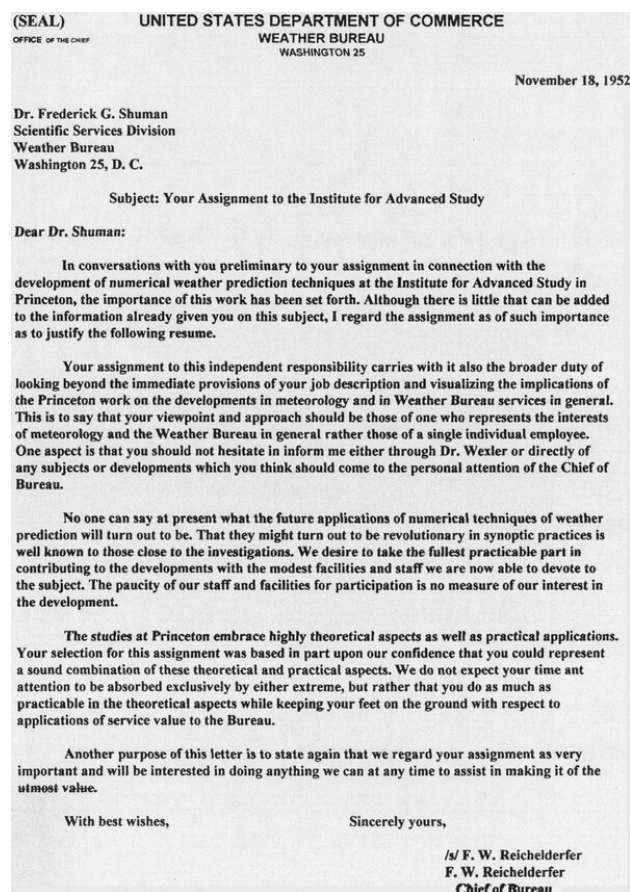


图2 1952年11月18日赖克尔德弗致信舒曼

局并成为气象大家的舒曼 (Frederick Shuman) 的信中 (图2), 即表现出他作为气象局局长求贤若渴的心情, 更用数值天气预报未来的大发展激励年轻人。正是这封信, 让收信人坚定了从事数值天气预报事业的信心, 感悟到气象局局长一直在寻求客观天气预报的可行之路, 并且看好新的数值预报方法。信中赖克尔德弗希望舒曼能够严肃地评估数值天气预报方法替代气象局已有预报方法的前景, 而正是后者的评估, 促成了美国气象局1954年决定加入主要是美国军方组织和参与的数值天气预报联合组, 并在1955年实现了数值天气预报的业务化。而赖克尔德弗完成的这一切, 是在当时一些预报员怀有抵触情绪, 而新的预报方法是否能成功在业务上应用还是未知数的情况下实现的。

赖克尔德弗在积极推进美国气象局工作的同时, 也积极投身于国际气象事务。1946年, 当时的国际气象组织 (IMO) 在伦敦召集各国家的气象局局长举行了一次特别会议。在这次会议上, 赖克尔德弗作为IMO的副主席, 再次与IMO的最后两位主席, 挪威气象局局长赫塞尔伯格 (1935—1946年任IMO主席) 和英国气象局局长约翰逊 (1946—1951年任IMO主席) 见面。他们及其他IMO高级官员在这次会上和同年6月在巴黎召开的第二次会议上, 共同就大部分由赫塞尔伯格起草的将IMO由非政府组织转变成政府组织的 (世界气象组织) 公约的大部分条款, 进行了有效而深入的讨论。正是这两次会议, 制定了向1947年华盛顿局长会提交的巴黎草案。而赖克尔德弗在这个过程中为新组织的成立做出了重要贡献, 他的工作获得了IMO的两位主席的高度评价。赖克尔德弗也在

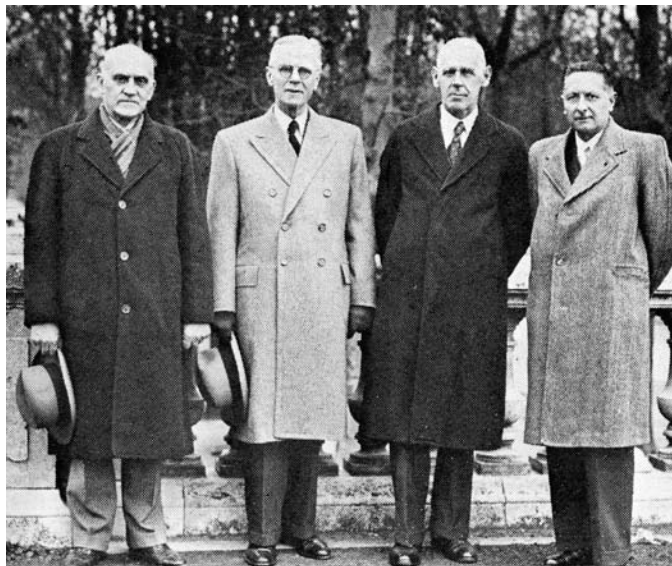


图3 第一次世界气象组织大会上, (从左到右) 赖克尔德弗 (1951—1955年任WMO主席) 与赫塞尔伯格 (1935—1946年任IMO主席), 约翰逊 (1946—1951年任IMO主席), 维奥 (1955—1963年任WMO主席) 在一起

1951年WMO第一次大会 (图3) 上当选为第一任主席 (1952—1955年)。他在当选后的发言中, 强调了气象研究工作对提高气象服务的重要性。他认为WMO应该在气象应用研究方面积极发挥作用, 特别是通过新闻出版或不定期刊物, 使全体会员了解各国应用研究的成果。WMO 50多年的历史正是按照这位首任主席的意愿去做的。1981年当赖克尔德弗接受记者采访时谈到WMO的地位和前途, 他认为, 任何人只要想到严酷的天气和气候灾害对人类和其他生灵带来的巨大危害, 就一定会知道这样一个致力于国际气象水文的组织一定是最重要的机构之一。

深受挪威学派影响, 可以称为经典气象学家的赖克尔德弗, 在其长达1/4个世纪领导国家气象机构时, 面对新技术依然保持满腔热忱, 这是让人敬仰和难忘的。正如在NOAA成立200周年, 被评为该组织 “十大最有影响的人”

之一的赖克尔德弗, 在人物的目录页, 对他的介绍只是短短的一句话: “将现代技术引入天气预报” (Brought modern technology to weather forecasting)。

本文由2012年中国科学技术协会学会能力提升专项 (优秀科技社团奖) 项目资助。

(作者单位: 贾朋群, 中国气象局气象干部培训学院; 徐虹, 浙江省气象学会)

深入阅读

Bates C C. 1989. The formative Rossby-Reichelderfer Period in American meteorology, 1926-40. *Weather and Forecasting*, 4(4): 593-603.

Lewis J M. 2005. Roots of ensemble forecasting. *Mon Wea Rev*, 133: 1865-1885.

Reichelderfer F W. 1970. The atmospheric sciences and the American Meteorological Society the early years. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 51(3): 206-211.

新中国气象事业发展的壮美画卷

——简评《全国基层气象台站简史》

■ 温克刚 李德善 刘立成

《全国基层气象台站简史》(以下简称《简史》)自2009年启动编撰以来,历时5年,于2014年初正式出版与读者见面了。《简史》卷帙浩大,共31部,2400多万字,记录了2600多个基层台站的历史沿革和建设历程。《简史》的编撰和出版为新中国成立以来首次,是气象文化建设的重大成果,是中国特色社会主义气象事业发展的壮美画卷的精彩呈现。

一、《简史》是一座丰富的气象台站资料宝库

《简史》名“简”,其实体例详备。它以省(区、市)为单位独立成卷,每卷概述本单位气象台站建设的由来、进程及现状,大致反映出60多年来气象台站体制、机构、人员、观测、预报、服务、法规建设以及党建、文化、荣誉等诸多方面的变化和发展。

《简史》是我国基层气象台站60多年来抗击气象灾害的经验总结。我国是世界上自然灾害最为严重的国家之一,有重视自然灾害记载的传统,尤以方志记载蔚为大观。《简史》秉承这一传统,记录了60多年来发生在我国各地的重大气象灾害,全景式地展示了气象台站积极探索当地气象灾害规律,主动、科学地做好气象服务,夺取抗灾救灾斗争胜利的历史过程,总结了在防灾救灾斗争中积累的成功经验。这对于我们更好地认识自然规律,进一步做好气象防灾减灾和应对气候变化工作,更好地为我国经济社会发展做出新的贡献,有着重要的指导和借鉴作用。

《简史》是我国基层气象事业发展的历史见证。它记录了广大



新中国成立前夕,全国气象台站只有101个(包括解放区的29个);仪器设备简陋,几乎全部依赖进口;气象专业技术人才奇缺,全国仅600多人;整个气象事业处于支离破碎的状况。

基层台站综合气象观测系统不断进步、气象预报预测系统不断创新、公共气象服务系统不断发展和科技支撑保障系统不断演进的发展过程。一个气象台站的简史,是气象事业发展的一个缩影;分省写就的31部《简史》,则组成了中国特色社会主义气象事业发展的壮美画卷。新中国成立前夕,全国气象台站只有101个(包括解放区的29个);仪器设备简陋,几乎全部依赖进口;气象专业技术人才奇缺,全国仅600多人;整个气象事业处于支离破碎的状况。到1957年,全国建成气象台站1647个。20世纪50年代的台站建设史,基本上反映了中国特色社会主义气象事业艰苦奋斗、创业发展的壮举(图1)。20世纪60—70年代,全党全民办气象,全国农业气象观测网迅速发展,在大规模发展气象台站的基础上“缩短战线”,将民航、盐业、海洋气象台站移交相关部门管理,这一时期的台站建设史基本上反映了中国特色社会主义气象事业经受干扰、曲折发展的历程。20世纪70年代后期至今,气象工作的重点转移到以提高气象服务经济效益为中心的轨道上来,转移到气象现代化建设上来,气象台站调整结构、深化改革,气象业务、服务蓬勃发展,这一时期的台站建设史基本上反映了中国特色社会主义气象事业改革开放、快速发展的成就。基层兴则事

业兴,基层稳则事业稳。《简史》为我们加强气象部门基层工作提供了有益的借鉴。

《简史》是我国基层气象干部职工精神风貌的生动展现。60多年来,在气象台站创建和发展进程中,广大气象工作者艰苦创业、无私奉献,爱岗敬业、团结协作,严谨求实、崇尚科学,勇于改革、开拓创新,为气象事业贡献自己的青春和力量,涌现出许多先进典型。

“自古方志半人物”,《简史》继承了这一传统,记载了数百个先进人物的主要事迹和高尚精神。如金龙浩、田志发、隋金堂、覃国振、陈素华、陈金水、崔广等,还有一大批获得省部级以上劳模称号表彰的先进典型,都可以在相关台站史中找到他们的事迹。这是“准确、及时、创新、奉献”气象精神的具体阐释,是气象部门极为宝贵的精神财富,是我们进行社会主义核心价值观教育的生动教材。

二、《简史》的出版是中国气象事业发展史上的一件大事

《简史》填补了我国气象台站史编撰的空白。盛世修志。随着国民经济的日益繁荣,气象事业的蓬勃发展,气象史志鉴工作也取得了显著进步。如果说,《中国气象史》填补了我国气象史研究方面的空白;《中国气象灾害大典》是我

国近3000年各种气象灾害资料的集大成者；《简史》则首次以史鉴形式记载了全国基层气象台站的发展历程、辉煌业绩、先进人物，总结了60多年来气象台站发展中的宝贵经验，浓缩了数以万计中国气象人的奋斗精神，展示了60多年来气象科技的巨大变化，可谓填补了气象台站史编撰的空白，是继前两者之后又一份宝贵的气象文化遗产。

《简史》的出版在我国气象史上具有重要的意义。基层气象工作是气象事业发展的根基。基层气象台站在整个气象事业布局中处于基础地位，是气象综合探测的载体，拓展公共服务的重要前沿。历史要求我们把气象台站的过去记录下来，把气象台站的新变化、新发展、新事物记载下来，把成功的经验和失败的教训记载下来，通过史志传给后人，以资借鉴。《简史》对于我们准确地认识台站建设的历史和现状，加强基层台站建设，推进县级气象机构改革，全面推进气象现代化，具有重要的现实意义和长远意义。

《简史》的出版，与众多气象文化工程一道成为我国气象事业软实力的重要组成部分。编史修志在我国有着悠久的历史，具有独特的历史文化价值和经世致用的价值，是我国社会主义文化建设及人文社会科学的重要组成部分。《简史》的出版，是气象史志鉴工作的创新，是气象事业的组成部分，是精神文明和气象文化建设中的重要内容，适应了中国特色社会主义气象事业的发展潮流，丰富了气象事业的内容。

三、充分发挥《简史》在全面推进气象现代化建设中的重要作用

编史修志，重在发挥其“资治、教化、存史”功能，重在传播和使用。《简史》作为一种气象历史文化积累的载体，要真正实现其价值，则需大力传播。编者花了那

么多精力，把这些历史资料挖掘出来，编辑出版，如果束之高阁，将是一种极大的浪费。只有通过多渠道广为发行，尽快与读者见面，才能发挥其资政育人的重要作用。各级气象部门应从贯彻落实中国气象局党组《气象文化建设纲要》和《中共中国气象局党组关于推进气象文化发展的意见》的高度，着眼于创建学习型部门，加强《简史》的发行工作，纳入图书阅览室配置计划，纳入“一流台站”建设范围。

随着《简史》的出版，要广泛开展读史用史活动。要利用报纸和网络等传媒，宣传《简史》的作用，选载《简史》中的优秀章节。各基层台站，要把自己的台站史输入网络，让每一位职工熟记于心，并作为今后新职工入局教育的必备教材。要借鉴本站或其他台站开展气象服务的典型事例，总结经验教训，

为做好气象服务工作提供借鉴。要运用本单位历史上的先进人物的事迹作为活的教材，开展实实在在的学习先进活动，弘扬气象精神。

总之，要通过各种行之有效的措施，用好《简史》，充分发挥其应有作用，不断推动基层气象机构综合改革顺利进行，全面推进气象现代化，为建设中国特色社会主义气象事业、实现中国梦而贡献力量！

（作者单位：温克刚、李德善，中国气象局；刘立成，湖北省气象局）



图1 湖北武汉涂长望陈列馆中的展板照片

深入阅读

- 《新中国气象事业60年》编写组. 2009. 新中国气象事业60年主要成就和基本经验. 中国气象报, 2009-09-25.
- 杨泽彬. 2004. 全国气象史志鉴工作研讨会在兰州召开. 年鉴信息与研究, (6): 56-56.

浅谈气象史料积累的意义

——《全国基层气象台站简史》丛书编辑手记

■ 白凌燕

【编者语】

2009年,中国气象局开始组织编纂《全国基层气象台站简史》丛书(每省1本,共31本),《全国基层气象台站简史》以全国所有基层气象台站的机构历史沿革(含:始建、站址迁移、历史沿革、管理体制、机构设置、单位名称及主要负责人变更等情况)、气象业务与服务、气象法规建设与社会管理、党建与气象文化建设、台站建设等方面为框架撰写,主要反映新中国成立60年来中国气象工作的发展变化情况,对新中国成立前就已存在的中国早期的气象台站及新中国成立后的接手情况在相应的台站也有简单的介绍,基本把握新中国成立前略写,新中国成立后详写;曾经存在过的台站(后因各种原因被取消或合并)略写,延续至今的台站详写的编写原则。

历时5年,这套由全国2600多个基层气象台站5000余人广泛参与资料整编、撰写并正式出版的图书,是新中国气象历史的缩影,亦是一部具有留存价值的气象台站史料文献。组织出版《全国基层气象台站简史》,体现出中国气象局对气象文化建设的重视。

史是以探索和总结某区域或某行业历史发展规律为基本任务的著述;志是记载某行政区划范围或某个领域内自然和社会、历史与现状的综合资料著述。史是在志的基础上对历史的科学归纳和总结。《全国基层气象台站简史》丛书(以下简称丛书)是对新中国成立60年来气象行业基础性工作发展规律的记载和著述,是兼顾史志功能的史料图书。

文化是在协调人与自然和人与人之间关系的过程中,能够体现人类价值的一切有目的的创造过程和结果。气象文化是在气象行业发展和方式和发展过程中凝练出来的,是气象历史的积淀。气象文化是中国先进文化的组成部分,是气象人创造的物质文明和精神文明成果的总汇,凝聚着气象人精神。

一、基层气象台站的发展是气象史料积累的源泉

在整个气象事业的布局中处于基础地位的基层气象台站,对气象事业长远发展起着基础性的作用。新中国成立之初,我国只有百十来个气象台站,经过60年的发展,现在已有遍布全国的2600多个各类气

象台站,并且形成了由近3万个无人值守的区域自动气象观测站组成的气象观测网络。正是这张大网,每天能向中国气象局汇聚大量的观测数据,为气象科研人员预报天气、研究气候变化提供了有效的基础性资料。

组织出版丛书,是中国气象局以战略眼光宏观考察中国气象事业发展,微观考察每个基层气象台站的发展历史和发展规律,汇聚源泉、以史为鉴、科学发展的重要举措。

二、气象史料的积累推动气象文化的发展

人类的进步,得益于人们对历史经验的总结和对文化遗产的继承。史志是对文化延续的最好记载,是资源丰富的文化宝库。刚刚出版齐的《全国基层气象台站简史》,是新中国成立至今继《中国气象灾害大典》之后又一套大型史志类丛书,是对中国基层气象台站文化遗产抢救工程的成果,是对中国气象史的续写与延续,它为气象史料的积累又注入了新的内容。

三、丛书的出版与气象文化传承的作用

丛书的出版,为气象文化宝库

注入了新的内容,为广大气象工作者了解气象史、检索气象业务发展变化情况、解读业务发展对人员素质的要求等多方面提供了素材和数据,具有如下几个方面的作用。

决策参考作用。丛书中的许多数据反映出了气象业务、服务和管理等工作的发展和变化过程,这就为领导借鉴历史、决策未来提供了数据资料,对专家学者也能起到信息管家、职业助手、战略顾问、市场参谋的作用,因此具有重要的决策参考价值。

科学发展作用。丛书中记载了不少关于气候特点、气象业务与服务的典型事例,客观反映了气象与国民经济、社会发展、人民生活、国防建设等多领域、多层次的密切关系,既突出特殊性,又兼顾一般性,研究好基层气象台站发展的历史,对于总结过去,规划未来,拓展领域,科学、可持续发展都起到了积极的作用。

激励鼓舞作用。丛书既反映出新中国气象事业60年的创业史、奋斗史,又记载了为气象事业甘于奉献的优秀儿女可歌可泣的感人事迹,起到了宣传英模、激励后人、鼓舞士气的作用。

承上启下作用。丛书起到了综观各个地区气象事业的发展变化，传承气象文化资源及其精神财富的作用。一种文化，只有在传承的过程中，才会有所发展，有所创新。丛书对气象文化的重构与创建具有系统性的参照作用，承上启下、经世致用。

四、对气象史料积累的几点建议

编纂《全国基层气象台站简史》丛书旨在回顾和总结新中国气象事业发展历程，借鉴和促进气象业务科学发展。但通过这一次编纂，笔者发现了一些基层气象台站在史料积累方面的漏洞和问题：首先是不注意对有价值资料的收集和保存，资料保存不完整；其次是资料管理人员变动频繁，移交手续不完善。这些问题显现在编纂过程中资料缺项、时间不准确或无从考证。客观原因是时间跨度大、机构变化频繁、外加一些天灾人祸，主观原因是资料的收集、整理、归档、移交不够重视，重业务、轻管理，重眼前、轻久远。为了气象文化建设和传承，建议各基层气象台站在如下几个方面予以加强。

1. 在重视程度上予以加强

气象史志工作是气象事业的一部分，是气象文化建设和精神文明建设的重要内容。正如国家领导人所述：“编纂新方志，不是一件可有可无的工作，而是一项认识过去、服务现在、开创未来的意义重大的事业，不仅有近期的社会效益，而且有久远的社会效益”（江泽民）。修史编志工作要承担

起“认识世界、传承文明、资政育人、服务社会的职责”（胡锦涛）。由此可见编史修志是一项适应时代潮流，符合开创中国特色社会主义事业需要的工作。一定要引起业内人士，特别是领导层面的高度重视，要切实实地搞好编史修志工作。

2. 在科学发展认识上予以加强

一要加强史料收集。要认识到气象史志研究必须紧紧围绕气象事业发展，要将那些能够反映气象工作发展的真实情况，反映气象事业发展规律或发展趋势，有时代特点、借鉴作用、考察作用、教育作用和存史作用，经得起时间考验的材料入志存史。这就要求我们从档案的管理抓起，不但要收集、整理、建档；甄别、保存、收藏，还要利用现代化科技手段加强电子文献的收集与检索，提高档案资料的使用率。同时还要建立、健全完善

的档案移交程序和借阅手续，以便收集到的档案资料能在史志研究中得到合理、长期的使用。只有在收集、整理、保存、使用等方面联合互动，才能为我们的后人在历史的长河中挖掘和研究历史留存更多有价值的东西。

二要加强气象史志研究。要积极开展学术研讨和交流，有效推动气象史志研究工作不断创新。

3. 在无私奉献精神上予以加强

编史修志工作看似简单，实则辛苦。做这项工作的同志既要淡泊名利、求真务实，又要解放思想、勇于探索。要有无私奉献的精神，要在长期的工作中注意收集，在浩瀚的资料中清晰梳理，在繁杂的事务中精心整编。做到去粗取精、去伪存真，将真实的气象事业发展史详细留存，将气象文化代代相传。

（作者单位：气象出版社，本文作者为《全国基层气象台站简史》丛书责任编辑）



图 参观云南昆明太华山气象站（一得测候所）

编辑选编

中国气象学会成立90周年纪念专刊
——《气象学报》2014年第72卷第5期

为庆祝中国气象学会成立90周年,《气象学报》出版了纪念专刊。专刊刊载了17篇论文来回顾和综述近10年来中国气象/大气科学领域的诸多创新研究成果,展示了中国气象学者在气候和全球变化、地球/气候系统动力学及其数值模拟、大气环流理论和遥相关、锋面气象及台风动力学、数值预报和数据同化、海陆气相互作用、大气物理和探测理论等若干领域的研究进展,并立足国际视野,对有关研究方向的未来发展进行了预示和展望。

其中,陶祖钰等参照流体力学发展的4个阶段,以锋面气旋模型为例将天气学也分为:“古代”、经典、近代和现代4个发展阶段。文中指出“古代”天气学的代表是1863年航海家Fitz Roy绘制的第一个风暴概念模型,它是对实践经验的总结,但不失其科学性;100年前挪威气象学派锋面气旋模型是基于牛顿力学的经典天气学代表,确立了斜压性是天气变化机理的核心,但将锋面视为物质面是其有悖流体连续性原则的重大缺陷;50年前芝加哥学派的锋面气旋三维模型是基于对准地转动力学理论深刻物理洞察力的近代天气学代表;20世纪末暖锋后弯卷入爆发性气旋模型是高科技时代基于大规模数值计算的现代天气学代表。在大数据时代,现代天气学需要学习和继承近代天气学用深刻的物理洞察力来分析天气学问题。

李崇银等指出热带大气季节内振荡(包括MJO)是大气环流的重要系统,它的活动及异常既对其他系统有一定的作用,也对长期天气和短期气候有明显影响。因此,热带大气季节内振荡一直是大气科学的前沿研究课题之一,李崇银等对近5~10年中国学者的有关研究工作及其进展做了简要回顾和综合,主要包括:(1)

热带大气季节内振荡特别是MJO的动力学机制;(2)热带大气季节内振荡以及MJO的数值模拟问题,特别是大气非绝热加热廓线对模式模拟MJO的重要作用;(3)热带大气季节内振荡和MJO,特别是在赤道西太平洋地区,与ENSO的相互作用关系;

(4)热带大气季节内振荡(包括MJO)及其流场形势对西太平洋台风活动的重要影响,即MJO对西北太平洋台风生成数的调制作用,以及热带大气季节内低频气旋性(LFC)和反气旋性(LFAC)流场对西太平洋台风路径的影响;(5)热带大气季节内振荡(包括MJO)的活动及异常对东亚和南亚夏季风建立、活动异常的影响,以及它们与中国降水异常的密切关系。

丁一汇等对近年来中外关于东亚冬季风(EAWM)年代际变化问题研究进展做了回顾和评述,主要包括以下3个方面:(1)东亚冬季风明显受到全球气候变化的影响,从20世纪50年代开始,中国冬季气温经历了一次冷期(从20世纪50年代延续到80年代初中期),一次暖期(从20世纪80年代初中后期延续到21世纪初)和近10~15年(约从1998年开始)出现的气候变暖趋缓期(也称气候变暖停顿期)。(2)东亚冬季风主要表现为强—弱—强3阶段的特征,即从1950年到1986/1987年,明显偏强;从1986/1987年冬季开始,东亚冬季风减弱;约2005年之后,东亚冬季风开始由弱转强。与东亚冬季风的年代际变化特征相对应,东亚冬季大气环流以及中国冬季气温和寒潮都表现出一致的年代际变化。(3)东亚冬季风的年代际变化与大气环流和太平洋海表温度(SST)的区域模态变化密切相关。当北半球环状模/北极涛动(NAM/AO)和太平洋年代际振荡(PDO)处于负(正)位相,东亚冬季风偏强(弱),中国冬季气温偏低(高)。此外,北大西洋年代尺度振荡(AMO)对东亚冬季风也有重要影响,在AMO负位相时,对应东亚

冷期(强冬季风),正位相对应暖期(弱冬季风)。因而海洋的年代际变化是造成东亚冬季风气候脉动的主要自然原因,而全球气候变暖对东亚冬季风强度的减弱也有明显影响。

任荣彩等系统地介绍了近年来应用等熵位涡理论研究平流层对流层动力相互作用所发现的一些新的事实和机理,包括平流层冬季极涡振荡过程中平流层、对流层环流异常的时空传播特征,以及等熵质量理论框架下的平流层对流层动力耦合机理,还介绍了影响平流层环流年际尺度异常的因子及影响过程。回顾了夏季青藏高原的热力作用所激发的负位涡强迫源对东亚及全球大气环流的影响。并基于对夏季高原周边等熵位涡经向输送垂直分布的诊断进一步说明,夏季青藏高原的存在使高原东缘及东亚地区成为平流层和对流层物质交换的独特区域,探讨了夏季青藏高原影响平流层对流层动力耦合的一种重要途径及其影响全球气候的重要意义。

秦大河等指出冰冻圈是全球气候变化的显著因子和指示器,也是对气候系统影响最直接和最敏感的圈层,在地球气候系统中占据举足轻重的地位。在全球变暖背景下,冰冻圈研究受到前所未有的重视,成为气候系统研究中最活跃的领域之一;冰冻圈变化正在引起的一系列社会经济影响是当前全球变化和可持续发展最为关注的热点之一。文中给出了气候变暖背景下近几十年来全球和中国冰冻圈的变化特征,以及未来可能的变化趋势;着重从气候效应角度,综述了青藏高原和欧亚积雪、北极和南极海冰、冻土与冰川变化对中国气候影响的研究成果;并讨论了中国冰冻圈科学研究的未来发展方向。

从气旋和反气旋谈正、负阻尼
——《大气科学》2014年11月第38卷第6期

刘式达、刘式适等指出在定常条件下,利用简化的大气运动控制

方程,分析了气旋与反气旋的基本特征。在此基础上,利用常微分方程的定性分析与求解,获得了气旋和反气旋轨道的解析解。接合气旋与反气旋的基本特征,论证了正负阻尼在气旋和反气旋运动中具体体现,并从物理机理上说明产生气旋和反气旋运动中正负阻尼的差异在于水平辐合在低层的不同。

人类活动对全球典型干旱半干旱区气候变化的影响——《科学通报》2014年第59卷第30期

李春香等基于CMIP5多模式的历史试验(考虑所有驱动因子)以及单因子强迫气候归因试验结果,评估了温室气体、气溶胶、土地利用及所有人类活动对全球典型干旱半干旱区气候变化的影响。结果表明,所有人类活动和温室气体强迫会引起全球陆地显著增温,特别是由温室气体强迫引起的北半球中高纬地区近60年的增温幅度几乎是历史变化的2~3倍,气溶胶的降温效应则对近60年来的全球变暖具有明显的抑制作用,土地利用在大多数干旱半干旱区具有微弱的降温作用。所有人类活动和温室气体强迫会使大多数陆地及干旱半干旱区的降水增加,而气溶胶和土地利用的影响则存在明显的区域差异和不确定性。近60年,中国北方干旱半干旱区的气温和降水变化受人类活动的影响最为显著。基于集合经验模态分解(EEMD)的结果,大多数地区气温和降水的年代际和多年代际变化特征均是所有人类活动综合作用“同步叠加”在自然变化之上的一种结果;其中,气溶胶在大多数地区显著促进温度的多年代际变化,土地利用在澳大利亚地区则起到明显的抑制作用;对降水的多年代际变化而言,气溶胶的贡献相对比较突出,而温室气体和土地利用对全球降水的多年代际尺度特征有明显的促进作用。

气候序列的均一化: 定量评估气候变化的基础——《中国科学: 地球科学》2014年第44卷第10期

严中伟等撰文指出长期气象观测序列是反映气候变化的最基本依据。然而,几乎所有气象站都要经历迁址或观测仪器、规则和方法等方面的变更,导致观测序列相应时段的系统性偏差。均一化就是要校订这类系统性偏差,以确切评估时间序列中的变化趋势。近年来随着气候变化研究的深入,均一化也从早期主要着眼于平均态校订发展到更注重极端天气气候信息的校订。文章结合理想的和实际的气候序列分析,演示均一化的基本思路;简介近年来就中国区域气候序列的均一化研究取得的一些新认识,并就该领域存在的(特别是涉及气候极值或极端天气以及多要素物理联系等方面)问题,展望进一步研究。

影响中国及关键经济区热带气旋降水的气候趋势及极端性特征——《大气科学》2014年第38卷第6期

巢清尘等利用中国气象局上海台风研究所整编的《热带气旋年鉴》(1951—2010年)最佳路径资料,分析影响我国和关键经济区热带气旋(TC)降水量、降水强度以及不同等级降水TC频数的气候变化趋势,研究结果表明,影响全国的TC总降水量的年际变化幅度大,年际差异显著。长江三角洲、珠江三角洲地区影响TC过程雨量年极值自1970年代开始缓慢上升,表明近年来TC引起的极端性降水存在增加的可能。全国范围内自1970年代开始,过程雨量大于250mm的TC频数也在增加,但长江三角洲、珠江三角洲地区发生极端性降水的TC频数并没有明显的增长。TC造成的24小时降水极值的气候变化趋势不明显,但是1980年代全国范围内的24小时降水极值存在跃变。长江三角洲、珠江三角洲地区日降水极值超过250mm的TC频数自1980年代开始

有缓慢增加趋势。全国范围、长江三角洲及珠江三角洲内TC小时降雨量年极值呈现振荡的周期变化,而在年代际上没有明显的变化趋势。

高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征——《气象》2014年10月第40卷第10期

徐祥德等基于云南省大理2008年3、5、7月GPS加密探空试验时段(14和02时)资料,结合边界层铁塔综合观测资料,采用温度梯度法、逆温强度法和涡动相关法分别计算高原东南缘对流边界层(convective boundary layer, CBL)及稳定边界层(stable boundary layer, SBL)顶高度,通过计算获取感热通量、潜热通量、湍流动能、切变项以及浮力项与大气动力、热力过程垂直相关特征综合分析,可发现湍能方程中浮力项、感热、潜热通量与NCEP再分析资料计算获取的大气视热源相关特征显著,这某种程度反映了高原东南缘近地层大气湍流动量、热量输送对低层大气视热源Q1的重要贡献。低层视热源Q1亦表现出与湍能方程分量类似的日变化周期,此特征反映了高原东南缘大气热源变化与下垫面水热过程及其湍流输送日变化密切相关;浮力项与湍能等项对大气低层热源与涡动特征、热力混合结构的形成有重要作用;低层大气视热源、水汽汇均与边界层高度有显著相关,综合分析结果某种程度描述了青藏高原东南缘近地层湍流动量、热量输送状况与低层大气热源,热力混合边界层结构的综合相关物理图像,初步探索了高原东南缘对流活跃区大气湍流运动与大气动力、热力过程相互作用特征。研究表明近地层湍流通量变化某种程度可反映未来局地大气视热源垂直结构变化的“强信号”特征。上述研究结论也可启发进一步关注近地层湍流通量异常变化特征及其对局地降水过程大气热源结构演变的影响问题。

MLS观测和气候模式模拟的平流层水汽的年际变化——Interannual variations of stratospheric water vapor in MLS observations and climate model simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, Vol. 71, No. 11.

通过分析来自于NASA Aura卫星搭载的微波临边探测器（Microwave Limb Sounder, MLS）传感器获取的几乎长达10年的水汽数据，以及对最先进的气候模式模拟结果的详细诊断分析，日本海洋—地球科学和技术中心的Kawatani等证实了在早期有关研究中讨论的赤道平流层水汽年际变化的概念图。赤道的水汽年际异常与准两年振荡（QBO）强烈相关，本研究给出了赤道水汽异常的时间—高度结构的第一QBO组分。水汽异常显示，在约10 hPa以下的区域，向上传播方式类似于缓慢平均上涌引起的向上平流（“录音机”式传播），但在更高的层，表现出明显的向下传播。然后，本研究检测了MIROC-AGCM和CMIP5的4个模式模拟的这些水汽变化。通过对MIROC-AGCM数据的诊断分析，以及CMIP5几个模式模拟结果之间的比较，证实了QBO引起的对流层温度异常对于平流层低层水汽变化的重要性，以及平流层上层的水汽异常在很大程度上是由受垂直风QBO年际波动影响的水汽平均垂直梯度的平流驱动的。

某一深度的土壤含水量是否能用来估计一个点或坡面范围的土壤剖面的平均土壤含水量——Can soil water measurements at a certain depth be used to estimate mean soil water content of a soil profile at a point or at a hillslope scale? *Journal of Hydrology*, 2014, Vol. 516.

土壤含水量测定是农业气象观测中的一项重要工作，土壤剖面（或不同深度）含水量对灌溉计划的制定、根系吸水计算、感热与潜热分配等意义重大。然而，对土壤剖面的水分测定往往费时、费钱。为此，加拿大萨斯喀彻温大学的胡伟等研究了是否可以利用时间稳定性分析找到某一点的

某一深度的土壤含水量，去估算点和坡面尺度上的土壤剖面平均含水量。试验数据来自利用中子仪测定的黄土高原一个典型坡地的28个样点（4年共测定37次）0.1~3.8m剖面的土壤含水量。研究首先利用秩相关系数，评价了土壤水分垂直格局的时间稳定性。然后，利用时间稳定性指数——相对误差绝对值的均值和前两年的土壤含水量数据确定了时间稳定性深度，后两年数据用来检验该稳定性深度是否可以预测点尺度和坡面尺度的土壤剖面平均含水量。结果表明，土壤水分在垂直剖面方向上也具有较强时间稳定性。平均含水量的预测误差依采样点和剖面深度而异。对于垂直格局时间稳定性最强的采样点而言，时间稳定性最强深度可以很好地预测不同剖面（0~1.0m、0~2.0m、0~3.0m和0~3.8m）土壤平均含水量，其相对误差在点和坡面尺度上分别小于5%和10%。将该方法进一步应用到加拿大草原景观，也取得很好效果。因此，该研究表明，利用时间稳定性最强的土壤深度可以用来预测点和坡面（或流域）尺度的土壤剖面平均含水量，这将大大减小土壤水分测定工作量。

红外、微波以及无线电掩星卫星观测对数值天气预报业务模式的影响——Impact of infrared, microwave, and radio occultation satellite observations on operational numerical weather prediction. *Monthly Weather Review*, 2014, Vol. 142, No. 11.

NOAA的Cucurull等比较了红外（IR）、微波（MW）以及无线电掩星（RO）观测对NCEP全球预报业务模式的影响。模拟时段为2013年2月21日—3月31日。模拟发现，总体上，不同卫星系统产生的影响格局基本相似，但其中MW对分析产生的影响最大，RO产生的影响最小。若没有RO观测的话，卫星辐射率的修正会过高或偏低，即RO扮演了锚定观测的角色，减少了全球的预报偏差。三种卫星观测系统对温度产生的影响

存在正的相关，说明它们以一种相似的方式影响全球温度。然而，三种观测系统对对流层低层温度的影响的相关非常的小（小于0.5）。基于三种卫星观测系统的湿度场在对流层低层的相关也较小。另外，不同卫星观测对500hPa位势高度的预报在北半球与南半球也存在很大差异：在北半球，所有三种观测叠加在一起产生了一个小的正的影响（同没有卫星观测相比），其中单独同化IR和MW时，会产生小的正的影响，而单独同化RO时，其影响没有显著意义；在南半球，所有三种观测叠加在一起会产生大的正影响，而单独同化IR、MW和RO时，都会产生相似的显著影响。

干旱期间蒸发变冷效应减弱对气温升高的贡献——The contribution of reduction in evaporative cooling to higher surface air temperatures during drought. *Geophysical Research Letters*, 2014, in press.

气象干旱与气温升高通常同时出现。对此，一般有两种解释。第一种是，气温的增加引起了蒸发的增加，使环境变得更干。第二种是，干旱期间，降水的减少引起了可利用水分的减少，从而导致了蒸散的下降，并随之又导致蒸发变冷效应的减弱，使气温变得更高。为了检验这两种解释哪个正确，清华大学的Yin等使用CRU TS3.21的气温和降水数据，以及近来发布的包括了入射、射出长波和短波地面辐射通量的CERES数据，研究了位于澳大利亚、美国和巴西的4个样点的气象干旱事件，其中，蒸散的计算基于Budyko近似。结果显示，对于位于干旱区的3个样点，第二种解释更为合理；而对于位于巴西的湿润区样点，温度与蒸散、降水都没有明显的关系，尽管在该样点，观测到随降水的减少，入射短波辐射有所增加，但这并没有转化为射出长波辐射（例如，地表温度）的增加。该分析还表明，干旱引起的温度增加和CO₂浓度上升引起的温度增加分别伴随了不同的辐射特征：干旱期间，（局

地)入射短波辐射增加,入射长波辐射减少;而温室气体增加导致入射长波辐射增加,入射短波几乎没有变化(全球平均)。

21世纪澳大利亚野火增加背景下碳汇依然在增强——Enhanced Australian carbon sink despite increased wildfire during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 2014, Vol. 9, No. 10.

气候预测显示,21世纪澳大利亚显著变暖,大部分地区降水减少。这种变化通常被认为会导致野火风险增加。然而,澳大利亚麦考瑞大学的Kelley等研究表明,烧毁面积在澳大利亚南部会增加,但在澳大利亚北部会降低。总体上,火灾预计增长较小(占国土面积的0.72%~1.31%,取决于所使用的气候情景),并且不会导致碳储存的减少。实际上,碳储存会增加3.7~5.6Pg C(取决于所使用的气候情景)。采用基于过程的植被动态、植被—火相互作用和碳循环模型进行模拟发现,火增加促进了树木繁茂地区的树种向更适应火灾的树木转变,它们还会侵占草原,导致森林面积总体增加3.9%~11.9%,这些变化都增加了碳的吸收和储存。木本植被的增加导致粗大凋落物的增加,它们的分解比细凋落物更慢,因此导致异养呼吸整体相对减少,进一步降低了碳损失。CO₂直接效应又使木本覆盖、水利用效率和生产力增加,从而使碳储存增加了8.5~14.8Pg C(与CO₂保持目前浓度值下的模拟相比)。在干旱地区,CO₂效应往往会增加烧毁面积、导致碳损失,但在树木繁茂地区,会增加植被密度和减少烧毁面积。

MODIS植被参数特征及其对区域气候模拟的影响——MODIS consistent vegetation parameter specifications and their impacts on regional climate simulations. *Journal of Climate*, 2014, Vol. 27, No. 22.

美国马里兰大学的Xu等使用CWRf模式,评价了源于MODIS的

一套植被参数数据对北美区域气候模拟的影响。这套植被参数数据包括叶面积指数(LAI)、茎面积指数(SAI)、土地覆盖类型(LCC)、植被覆盖度(FVC)、反照率等多种变量。和先前的AVHRR数据相比,MODIS LCC在中西部和中部大平原分别增加了耕地和草地的比例,而在东南部,常绿针叶林变成了混交林,加拿大的混交林变成了常绿针叶林。FVC在中部大平原减少了0.05~0.3,而在落基山脉北部、加拿大和美国东南部,FVC增加了0.1~0.35。MODIS LAI比AVHRR通常低了2~6,除了在中部大平原、落基山脉东部和墨西哥中部以外。模拟显示,中部大平原LCC和FVC的变化使变暖减少了0.71℃、降水减少了0.36mm/d。LAI的大幅下降使潜热和感热通量分别下降了0.78~5.81W/m²和0.91~6.54W/m²。它们还减少了控制试验(旧的植被、反照率数据)模拟到的夏季美国墨西哥湾沿岸地区和东南部的偏冷,以及北美季风区和加拿大的偏湿特征。在包括加拿大东部、俄亥俄河谷和亚特兰大中部在内的植被稠密区域,由于LAI下降引起了蒸散发—降水—土壤湿度的正反馈,从而导致这些区域春季和夏季的降水减少、温度增加。相反,在植被稀疏区域(如大平原),FVC减少引起了反照率—蒸散发—降水—土壤湿度的负反馈,导致这些区域降水和温度都出现了下降。

气溶胶对瑞典和芬兰陆地低层云的间接影响——Aerosol indirect effects on continental low-level clouds over Sweden and Finland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, Vol. 14.

结合气溶胶地面观测数据和云、降水遥感数据,瑞典隆德大学的Sporre等研究了气溶胶对北欧国家低层云的影响。其中,大气边界层的气溶胶数浓度数据来自于瑞典和芬兰的两个气溶胶观测站的10年的气溶胶粒度分布观测数据,云遥感数据来自于MODIS数据,降水数据来自于波罗的海试验的天气雷达数据。另

外,也使用ECMWF的再分析数据研究了气象条件是如何影响云的。结果显示,当气溶胶数浓度增加时,云滴有效半径减小,然而,云光学厚度没有随边界层气溶胶数浓度的变化而变化。此外,用来度量云活性粒子数浓度是如何影响云滴有效半径的一个参数——气溶胶—云交互参数(ACI),被发现某些区域该值在0.10与0.18之间,当使用直径大于130nm的粒子数浓度代表云凝结核数据时,ACI的幅度最大。气象雷达图像上低的降水强度与较高的气溶胶数浓度有关。另外,Hyytiälä观测站观测到的粒子数浓度在没有出现降水时一般比发生降水时要高。因此,气溶胶第一间接效应没有在本研究中被证实,而第二间接效应在本研究中是显著的。

德国地区气溶胶对冷锋过后对流云的影响——Impact of aerosol on post-frontal convective clouds over Germany. *Tellus B*, 2014, Vol. 66.

为检测改进气溶胶数据对天气预报业务模式预报能力的改善,德国卡尔斯鲁厄理工学院的Rieger等使用预定义的和交互式的两种情景下的气溶胶分布数据,利用COSMO-ART模式进行了模拟研究。该研究关注了2008年4月25日一道冷锋过后的对流积云的发展。同冷锋前的情形相比,冷锋过后的偏北气流导致了海盐气溶胶浓度的增加。交互式情景下的高气溶胶数浓度代表了典型的污染条件下的场景。与预定义的陆地和海上气溶胶情景相比,交互式的气溶胶分布导致了如云滴半径、数浓度等云特征的显著变化。对对流积云覆盖的区域进行平均,发现随着气溶胶数浓度的增加,降水出现了系统性的下降。降水和有关的非绝热效应的系统性差异缓冲了云覆盖、短波辐射和云顶高度的差异。与实测降水相比,交互式气溶胶情景和预定义的海上气溶胶情景都表现出了很好的一致性。该研究表明,气溶胶对冷锋过后的积云特性和降水有系统性的影响,业务模式对气溶胶较好地再现能改善锋过后的预报。

《科学》

2014年10月17日

本期的封面报道和一个专栏，其主题是“瞄准太阳”。封面照片给出2014年5月9日一次日冕物质抛射被IRIS (the Interface Region Imaging Spectrograph) 捕捉到的紫外图像。NASA于2013年6月发生了IRIS，这就为科学家研究太阳表面和外层大气之间复杂的交界面提供了便利。专栏的5篇研究报告，从不同层面对太阳及交界面的演变进行了分析。



《纽约客》

2014年10月13日

本期“金融”栏目，刊发了题为“气候交易”的文章，指出在刚刚结束的联合国气候峰会上，挪威承诺给予利比亚1.5亿美元的援助，前提是后者承诺停止破坏其境内森林植被。这样的“交易”背后是减少碳排放思路的重大转变。和这样的转变相对的，是峰会上妙语不断，然而却是“人人在抱怨天气，但是没有人为天气做些什么”，包括美国总统奥巴马在内的全球领袖们发出了正确的声音，但是在行动上乏善可陈。

DoD: 《2014气候变化适应路线图》

2014年10月13日

美国国防部 (DoD) 发表的这份报告，将气候变化视为国家安全的直接风险，可能使得传染病和恐怖活动的威胁加剧。DoD的官员称，不断攀升的全球温度、上升的海平面和极端天气世界将使粮食和水短缺恶化、流行病蔓延和全球政治不稳定。DoD将继续将气候变化风险综合进其业务中加以考虑，包括评估武器存储和关键供给地点战略等。



IPCC AR5《综合报告》

2014年11月2日

IPCC第五次评估报告 (AR5) 在过去的10个月期间，IPCC分别完成和发表了第五次评估的三个工作组报告 (分别涵盖了气候变化自然科学、气候变化影响和适应与脆弱性、减缓气候变化的措施)。综合报告对三个工作组报告的内容进行整合，有830位作者、1200位贡献者以及3700位专家参与了本份报告的撰写。报告的研制过程中，对超过3万份研究报告文献和14.3万条专家评议进行了评估。报告确认，世界各地都出现了气候变化，气候系统的变暖是不可辩驳的。自1950年以来的数十年中观察到的气候变化是在过去数千年里都未曾出现过的。

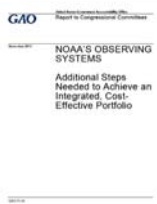
媒体扫描

MEDIA SCAN

《NOAA的观测系统》

2014年11月17日

这份报告的副标题是“实现综合、投入高效体系还需要的步骤”。报告指出，NOAA在海洋、沿海和大湖地区拥有41个观测系统，其中OAR和国家海洋局负责其中的25个系统，其余16个系统则由NOAA的4个其他下属机构负责。大部分观测系统是在利用三个平台——浮标站、卫星和船只中的一个开展观测，生成各种产品。2012—2014年财年，NOAA为运行和维持这些系统年投入约4.3亿美元，占年预算的约9%。报告认为，NOAA并没有实施所有的步骤改进其观测系统的效率，尽管早在2002年NOAA就提出向综合的观测体系迈进的理念。GAO为此在本报告中，提出了NOAA有效整改其观测系统应该实施的措施建议。



《自然》

2014年10月23日

本期封面文章报道了法国学者针对引发太阳爆发的磁场环境的特征和预测的研究成果。封面为依据NASA太阳动力探测器 (NASA Solar Dynamics Observatory) 获得的数据建立的太阳磁模型给出的一次太阳喷发之前的情形。

《全天候微波湿度探测同化》

2014年11月

欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 出版的技术备忘录系列技术报告，受到气象界，尤其是气象业务人员的关注。这份在ECMWF网站上可以下载电子版出版物，最新出版第741期，探讨了针对湿度微波探测的同化问题。报告认为，近期在辐射传输模拟 (尤其是冻结颗粒散射) 和陆地及海冰区域地面辐射方面的进展，能够在全球大部分地区全天候同化微波湿度探测资料，从而增加很多敏感区域的观测资料。



MACC-II项目: 中期实施报告

2014年10月

MACC-II (Monitoring Atmospheric Composition and Climate - Interim Implementation, 监测大气成分和气候: 中期实施) 报告日前发表，MACC-II是哥白尼大气监测服务 (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS) 计划先期重要组成部分，后者的业务化计划在2015—2020年实现。MACC-II实现了连续和细化的大气服务，通过直接提供大气数据和信息或增值下载服务，让欧洲各城市受益，也为全球气候监测系统做出了关键贡献。

Advances in Meteorological Science and Technology (Bimonthly)

Vol.4 No.6, December, 2014 (end of vol.4)

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors

Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Luo Yunfeng
Wang Huijun
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Fei Jianfang
Guan Zhaoyong
He Jianxin
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Lü Shihua
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Peng, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Feng Guolin, Guo Hu, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yurong, Hu Yuewen, Jiang Tong, Lei Xiaotu, Li Hui, Li Jiming, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Shi, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Li, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Mao Hengqing, Peng Yinghui, Pu Yifen, Shi Guangyu, Song Yan, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Xiaoyun, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zaizhi, Wang Zifa, Wen Min, Wen Hongtao, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yande, Zou Liyao

Overseas Editors

Chen Jingming, Li Jun, Liu Zhengyu, Jin Feifei, Wang Bin, Weng Fuzhong, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Chen Zhongmei

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China
Tel: +86-10-68409927/68409933
Email: amst@cma.gov.cn
http://library.cma.gov.cn/amst
http://weibo.com/2115232930/profile

Printed by

Beijing Baochang Color Printing Limited Corporation

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
RMB 30.00

Main Contents

(Special Issue: Study on the Meteorological History)

- 1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief
Article
6 Xu Xiaofeng, Zhang Meng/ Some Reviews and Inspirations on the Development of Meteorological Science and Technology
13 Du Jun, Qian Weihong/ Three Revolutions in Weather Forecasting
27 Fang Zongyi/ The Evolution of Meteorological Satellites and the Insight from It
35 Ye Xinxin, Jiao Yan, Fu Gang/ On the Researches and Life Experiences of Bergen School Scientists: Jacob Bjerknes, Halvor Solberg and Tor Bergeron
46 Gao Xuehao, Chen Zhenghong/ Original Innovation of Atmospheric Science Based on Discipline Background
50 Xiao Ziniu, Ye Mengshu/ Multi-Disciplinary Integration in the History of Meteorology
54 Ye Mengshu/ On Relationship Between History of Meteorology and Ideas of Time
60 Wu Zengxiang/ A Brief Introduction to the Establishment of Meteorological Stations in China Before 1949
67 Wang Dong, Ding Yuping/ Chu Coching and the Construction of Meteorological Stations

Forum

- 74 Wen Xinyu, Zhu Qingzhao/ The Joint Leadership by An American and A Japanese in the Three American Atmospheric Model Centers after World War II

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

- 81 Zheng Qihong/ Special Climate Change Assessment Agency: Evolution of IPCC
84 Zhang Gaizhen, Li Qiwei, Ma Jing/ The History of Japan Meteorological University and Its History of Meteorological Sciences Courses
87 Chen Jinyang/ The History, Current Situation and Prospect of WMO Education and Training (ETR)
89 Ren Ke, Shao Junnian, Yang Jing/ The Review of Exploration and Development of *Meteorological Knowledge* Since the Start of Publication
92 Wu Can, Zheng Qihong/ A Bibliometrical Analysis of History of Meteorology

Reading

People

- 95 John M.Lewis/ Carl-Gustaf Rossby: A Study in Mentorship
106 Jia Pengqun/ Joseph Charles Farman: A British Scientist Who Discovered A Hole in the Ozone Layer over the Antarctic
111 Jia Pengqun, Zhang Meng/ The Father of Modern Numerical Weather Prediction: John von Neumann
115 Jia Pengqun/ Matthew Fontaine Maury: His Contribution to the Cooperation in Meteorology
118 Jia Pengqun, Xu Hong/ The First Chair of WMO: Dr. Francis Wilton Reichelderfer