

Advances

in Meteorological Science and Technology

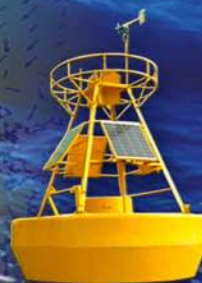
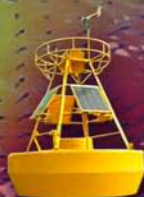
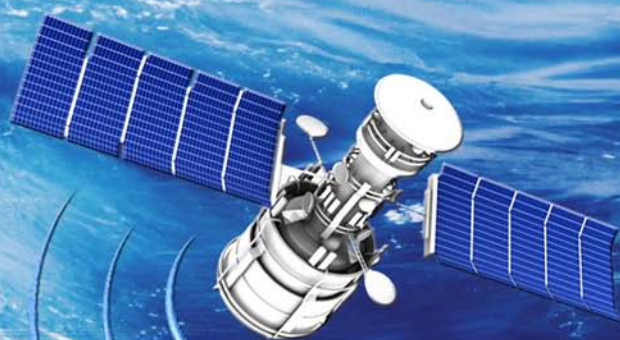
气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.4

2017年8月
第7卷 第4期



海洋气象

气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



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

志强 中国气象局气象干部培训学院
肖子牛 中国科学院大气物理研究所
翟盘茂 中国气象科学研究院
罗云峰 中国气象局
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
孙健 中国气象局公共气象服务中心
费建芳 解放军理工大学
赵立成 国家气象信息中心
张鹏 国家卫星气象中心
管兆勇 南京信息工程大学
何建新 成都信息工程大学
黄建平 兰州大学
廖小平 中国科学院地理科学与资源研究所
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	郭虎	郭学良
李柏	李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉
任小波	沈文海	王存忠	王卫丹	武炳义
杨修群	俞小鼎	张朝林	张庆云	赵平

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈镜明	陈云峰	陈振林	崔春光
崔讲学	董文杰	杜钧	封国林	何金海
何清	胡欣	胡跃文	姜彤	金飞飞
雷小途	李集明	李俊	李良福	李耀辉
李跃清	李忠明	梁旭东	刘晶森	刘黎平
刘立成	刘实	刘征宇	卢乃锰	陆日宇
罗兵	罗亚丽	马舒庆	马耀明	彭莹辉
浦一芬	宋燕	索渺清	汤绪	田红
万齐林	王斌	王斌(海外)	王东海	王元
王建林	王武功	王延青	王迎春	王立广
王自发	卫晓莉	温敏	王翁富忠	吴立广
谢志辉	闫冠华	延晓冬	杨萍	杨崧
杨昭明	姚学祥	伊兰	翟武全	张大林
张广俊	张立祥	张小玲	张跃堂	赵广忠
周定文	周建华	周凌晔	周显信	朱定真
朱小祥	朱玉洁	祝燕德	邹立尧	邹晓蕾

编辑部

张萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民
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://cmalibrary.cn/amst>
投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

ISSN 2095-1973
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7卷 第4期 2017年8月

1 许小峰: 主编语

研究论文

封面报道 海洋气象

- 6 窦芳丽, 商建, 郭杨, 尹红刚, 谷松岩: 卫星遥感海面风技术现状及应用进展
- 12 刘春霞, 赵中阔, 毕雪岩, 袁金南, 温冠环, 黄辉军: 海洋环流与海浪模式的发展及其应用
- 23 谢立安, 管长龙, 谭骏, 武文: 海洋与气象防灾减灾体系中社区恢复力的评估与应用
- 38 王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 邵彩霞: 华南沿海暖区暴雨系统研究进展
- 47 曹敏杰, 刘增宏, 王振峰, 许建平: 台风海域实时海洋监测及其应用研究综述
- 53 黄彬, 赵伟: 国家级海洋气象业务现状及发展趋势

研究进展

- 60 成驰, 陈正洪, 孙朋杰: 光伏阵列最佳倾角计算方法的进展

主编语

《易经》中记载“剡木为舟，剡木为楫”。人类自从发明了简单的水上航行工具后，便开始将对自然的探索从陆地拓展到了海洋。随着科学的不断进步，人类对海洋了解和认知更加全面，开发和利用也更加系统，海洋已成为人类赖以生存不可或缺的重要组成部分。海洋面积占地球面积的70%以上，地球上的生命起源于海洋并永远与海洋有着密不可分的关联，而海洋作为地球天气的天然调节器，更是对人类的可持续发展起到了至关重要的作用。

海洋、陆地和大气共同组成了地球的基本环境。海洋和大气同属于地球系统中的流体，两者相互联系、相互作用，在全球气候变化中扮演着重要角色。海洋调节着全球的气候，创造了人类能够生存的自然环境。科学家们为了探索海洋，进行过现代海—气交换的试验研究。结果表明，海洋以其占地球98%的水体和巨大的热容量，通过海洋与大气的相互作用，不仅控制着气候的状态，而且影响着全球气候的变异。同样，十多万年来，全球气候的冷暖交替带来了海平面的升降变化，海温海流的异常导致大气环流发生变化，厄尔尼诺、拉尼娜等现象频繁出现，全球极端气候事件频发、重发，从而给当今经济社会带来重要影响。

本期封面报道推出的海洋气象主题系列文章，不仅囊括了卫星遥感海面风技术(P6)、海洋环流与海浪模式(P12)、台风海域实时监测(P47)等技术、模式的现状

及应用进展，类似于华南沿海暖区暴雨系统(P38)的有关大气运动机理的研究进展，还介绍了中国国家级海洋气象业务现状及发展趋势(P53)，以及美国海洋与气象防灾减灾体系中社区恢复力的评估与应用(P23)，论坛栏目则刊载了国内外海洋气象组织的现状简介(P66)，对国内外从事海洋气象研究的科技工作者来说，有较强的指导意义。

21世纪是海洋世纪，海洋在全球的战略地位日益突出，海洋经济已成为世界经济发展的新领域、新趋向。随着我国海洋强国战略的实施，特别是“21世纪海上丝绸之路”国家战略和远洋军事活动的实施和开展，远洋或全球重要敏感区或重大海上突发安全事件等海洋气象灾害防御和专业气象保障服务需求日益迫切。特别是产生于海洋的热带低气压、热带风暴、台风以及海雾等灾害性天气对海上远洋航行、海上工程作业、海洋渔业和旅游业等带来巨大威胁，甚至是灾难。伴随着智能化信息时代的来临和智慧气象的发展，海洋气象智能化数值网格预报技术发展迅猛，相信海洋气象防灾减灾工作大有可为。

本期海洋气象专题的出版得到三位特约编辑美国北卡罗莱纳州立大学谢立安教授、中国海洋大学高山红教授、南信信息工程大学王坚红教授，以及本刊常务编委郭虎及天津市气象局的大力支持，在此表示衷心的感谢。

许小峰

论坛

66 王坚红，胡恒，刘刚，杨林：国内外海洋气象组织及其现状简介

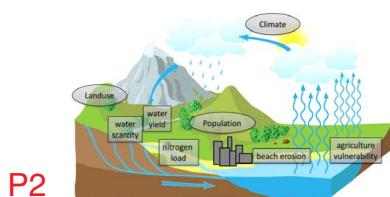
往事钩沉

台站巡礼

71 李仁莉，何琦，曹裕强：抗战时期武汉测候所的西迁之路

科学观察

2 读图 数字 榜单



阅读

P11



信息

- 11 贾朋群：留存此照：世界上第一次各国气象局长会
- 37 新书架
- 65 许小峰：风雨留痕 云助气象
- 75 高被引论文选编
- 76 编辑选编
- 79 涓流细雨
- 封3 媒体扫描

封3



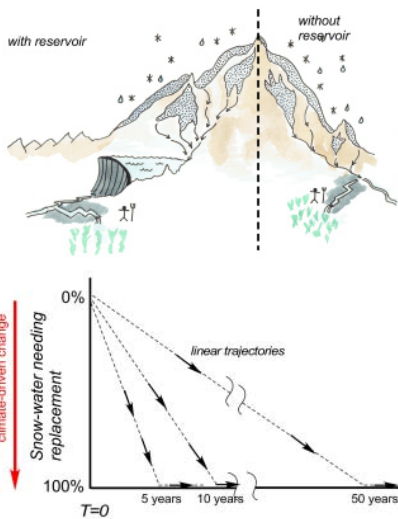
国际“海洋气象”主题被引频次最高的前11篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	ICOADS Release 2.5: extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive	Woodruff, SD	International Journal of Climatology, 2011, 31(7)	179
2	Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe collection	Ishii, M	International Journal of Climatology, 2005, 25(7)	146
3	The accuracy of voluntary observing ships meteorological observations - results of the VSOP-NA	Kent, EC	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 10(4)	92
4	Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean	Bromwich, DH	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2009, 114(D08122)	61
5	Inter-hemispheric decadal variations in SST, surface wind, heat flux and cloud cover over the Atlantic Ocean	Tanimoto, Y	Journal of the Meteorological Society of Japan, 2002, 80(5)	51
6	Interannual variability of the coupled tropical Pacific ocean-atmosphere system associated with the El Nino southern oscillation	Zhang, RH	Journal of Climate, 1997, 10(6)	48
7	Development of NAVDAS-AR: formulation and initial tests of the linear problem	Xu, L	Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography, 2005, 57(4)	45
8	Air-Sea fluxes from ICOADS: the construction of a new gridded dataset with uncertainty estimates	Berry, DI	International Journal of Climatology, 2011, 31(7)	43
9	Spatial and temporal variability of consecutive dry and wet days in Greece	Nastos, PT	Atmospheric Research, 2009, 94(4)	42
10	Early ship observational data and ICOADS	Woodruff, SD	Climatic Change, 2005, 73(1-2)	38
10	Temperature, wind and wave climatologies, and trends from marine meteorological buoys in the northeast Pacific	Gower, JFR	Journal of Climate, 2002, 15(24)	38

来源: SCI-E数据库

检索时间: 2017年7月12日

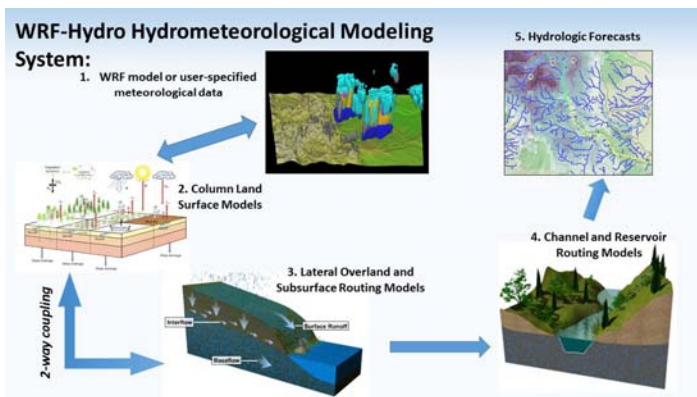
田晓阳 提供



雪价值评估模式: 评估雪的作用

美国学者最新的研究, 从雪提供给人用水和增强地球降温两方面, 以及其在冬季室外娱乐业的支持等角度, 探讨了雪的数亿美元的金融价值。图中给出美国西部山地雪盖在是否建立水库两种情形下形成的灌溉, 以及这些流域以往冬季主要降水方式, 从主要以降雪方式到目前降雨形式增加使得快速径流增加, 导致在5年、10年等时间里雪水损失从0到100%的预测。

来源: Water Resource Research



让WRF模式做水文预报

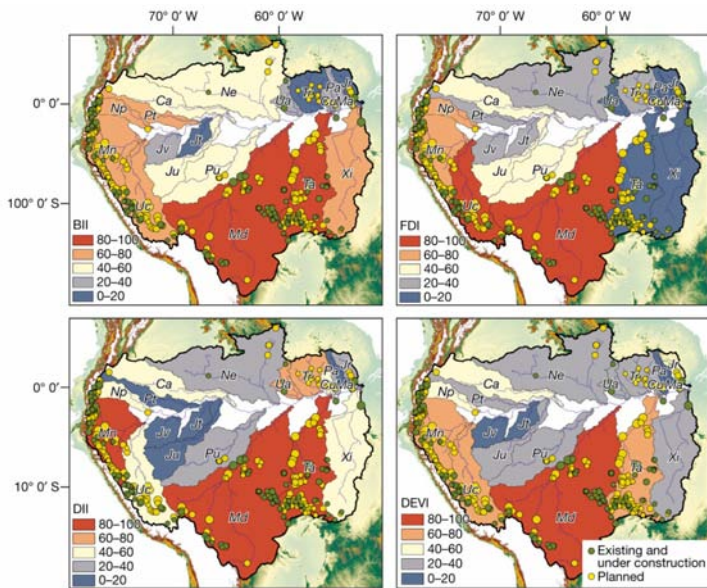
自2000年发布以来, 被很多中国学者熟知的WRF(天气研究和预报)模式, 已经成为世界上应用最为广泛的天气模式之一, 2013年该模式的水文版发布, 如图所示, 不同格点的降水、渗透、融雪、山坡坡面流量和河流径流量等物理过程耦合进入模式, 模式的实时流量数据同化系统, 以及包括积雪、土壤湿度、蒸散、积水、浅层地下水和河流及水库径流等输出能力, 让该模式可以用于全面的水文预报。经过NCAR和NOAA国家水中心合作, 该模式被选为美国国家水文预报的框架模式, 开始了业务化预报。

来源: BAMS

80万 km² 2015—2016年厄尔尼诺事件处于巅峰期时, 2016年1月西南极出现暖空气导致大面积积雪消融, 影响了近80万 km²的区域, 影响区域内冰盖表面呈现冰雪与水混合的状态。

1.2% 来自美国多家机构的学者开展的一项针对气候变化给美国带来损失的估计研究表明, 结合农业、犯罪、沿海风暴、能源、居民死亡率和劳动力等领域的综合估计, 全球温度呈二次方升高, 平均每升高1°C使得GDP损失约1.2%。

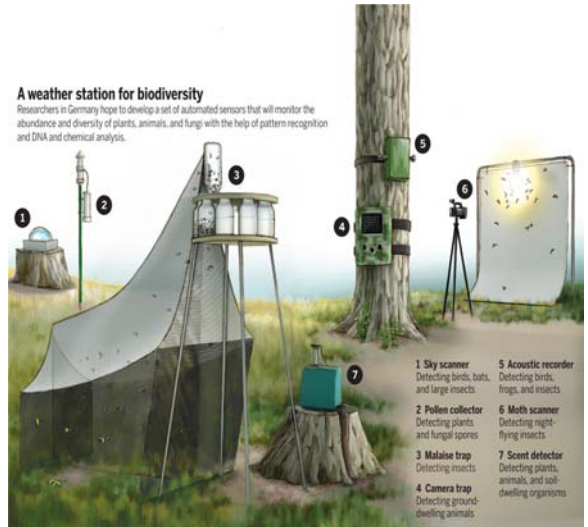
2050年 法国政府日前宣布其信誓旦旦的减排目标: 2050年前成为碳平衡经济体。实现该目标的一系列举措包括在2022年前计划关闭余下的所有燃煤发电厂, 2040年前淘汰柴油和汽油交通工具等。



用指数综合分析亚马孙地区河流水利设施

多国学者合作开展的针对亚马孙河流域水利设施的综合研究中，用多种指数研究了已有和计划建设的大坝对子流域脆弱性的分析。这些指数包括：BII（流域完整性指数）、FDI（河流动力指数）、DII（大坝影响指数）和综合指数DEVI（大坝环境脆弱性指数）。

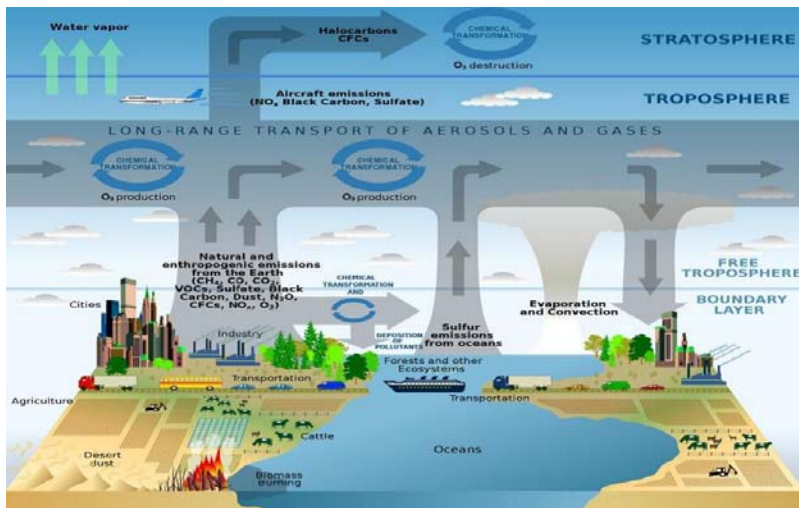
来源：Nature



生物多样性天气站

气象观测已经开始从对人负责，到对人和地球环境负责的转变。德国学者希望开发生物多样性天气站，能对植物、动物及真菌的数量和种类进行监测。如图中所示，这样的天气站加入了花粉采集、昆虫捕获器、动物拍照装置、鸟类等鸣叫记录仪、夜间昆虫飞行探测器和气味探测器等。

来源：Science



英国地球系统模式进展

2013年，由英国气象局和国家环境研究委员会（NERC）共同资助的英国地球系统模拟项目（UKESM）的核心团队成立，2013—2021年项目执行期间，将致力于英国下一代地球系统模式的研发，并将替代HadGEM2-ES模式，参加下一次国际耦合模式相互比较项目（CMIP6）。图中为目前模式大气成分在地球系统中的作用示意图。

来源：UKESM

数字

1000万英镑

英国一项投入1000万英镑，在2017—2022年针对北极海洋如何变化的研究项目日前启动，项目第一支外场研究团队的目标为巴伦支海，来自16个研究机构的20多位学者参与其中，针对该地区快速升温和海冰消失展开研究。

2周

温室气体正在改变地球气候，使得世界上的一些地方，气候特征改变并开始影响人们生活。比如，英国的春天比半个世纪前平均提前了2周，而秋天的结束则推迟了1周。

1.46万年

美国学者通过研究古气候证据和现代气候数据，发现在1.46万年前暖事件时地球热赤道发生北抬，从而改变全球的降水格局，研究者认为类似的情况可能因目前全球变暖北半球强于南半球而发生。

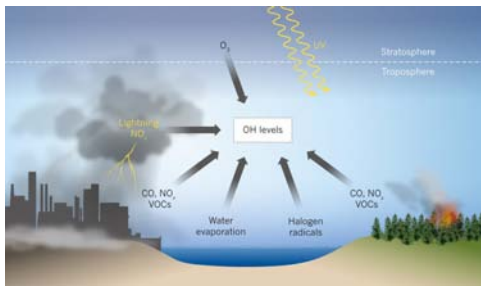
中国“海洋气象”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	1860—1979年期间的厄尼诺年	王绍武	科学通报, 1985/01	72
2	厄尔尼诺现象与我国夏季(6—8月)降水、气温的关系	史久恩	气象, 1983/05	71
3	南海表层水温年际变化的大尺度特征	王卫强	海洋学报(中文版), 2000/07	57
4	海雾过程中海洋气象条件影响数值研究	胡瑞金	青岛海洋大学学报, 1997/07	50
5	南海表层水温和海面热收支的年循环特征	王东晓	海洋学报(中文版), 1997/05	47
6	近20年中国海洋灾害特征、危害及防治对策	左书华	气象与减灾研究, 2008/12	40
6	渤海海冰的数值试验	王仁树	海洋学报(中文版), 1984/10	40
8	中国邻海海一气热量、水汽通量计算和分析	阎俊岳	应用气象学报, 1999/02	37
9	渤海海峡风浪特征统计分析	尹文昱	大连海事大学学报, 2006/11	36
10	海雾生成过程中平流、湍流、辐射效应研究	胡瑞金	海洋学报(中文版), 1998/01	28

来源: CAJD数据库

检索时间: 2017年7月12日

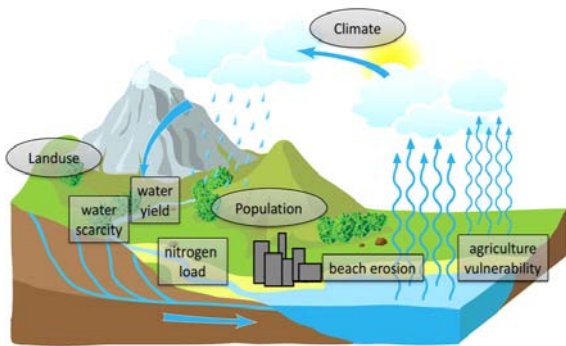
田晓阳 提供



大气自清洁能力

大气具有自清洁能力, 从而避免了某些空气污染物和温室气体的堆积, 防止空气质量变差和引发地球气候灾难。自清洁比率, 也称为氧化能力, 依赖于对流层氧化剂的多寡, 特别是氢氧自由基(-OH)。而-OH的生成又和多种过程相关, 这些因素随着气候变化发生着改变。借助同位素观测, 美国、法国和中国学者的共同研究表明, 羟自由基化学过程和臭氧在平流层和对流层间传播是影响对流层-OH水平的主要因子。

来源: Nature



天气气候数据融入多学科环境决策平台

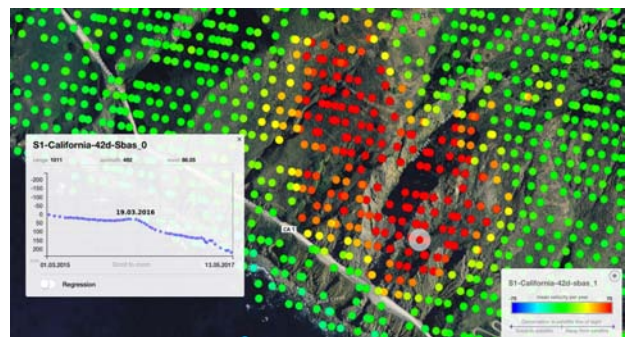
瑞士和西班牙学者针对黑海流域面临的严重人口、气候和土地利用变化引发的污染加剧、水资源危机和海平面升高带来的侵蚀等挑战, 建立了一个综合了黑海流域土地利用、气候、人口、水文和海滩侵蚀网络分析平台, 用详实的监测环境数据、统计和社会-经济发展数据支持决策。

来源: Scientific Data

雷达图揭示滑坡

2017年5月20日, 美国加州沿海1号高速路发生滑坡, 数百万吨泥石流阻塞了公路, 还使得事发地海岸线外新增了大约5公顷陆地。欧洲哨兵-1卫星上的雷达, 在两年之前就捕捉到山体的运动, 借助小基线子集干涉法(Small Baseline Subset interferometry, SBAS)技术处理过的雷达数据, 获得大面积山体移动的高敏感信息。图中红点表示陆地以每年70 mm以上速度远离卫星, 绿点则表示周围稳定。

来源: ESA



40% 通过对1980—2010年热浪和干旱对小麦产量的相对影响, 意大利学者在最新一项研究指出, 极端天气条件和气候变化在全球小麦产量变率中贡献40%。

2h 我国在南海马尼拉海沟首次同时布放2套海啸浮标, 形成海啸监测的“双保险”, 有望为我国大陆和台湾地区, 以及东南亚周边国家赢得2 h左右的预警和疏散时间。

6000万欧元 包括美国学者在内的数百名气候科学家, 申请法国总统马克龙建立的“让我们的星球重新伟大”(Make Our Planet Great Again)项目, 据悉该项目支持为期4年研究课题, 总额高达6000万欧元。

3倍 美国大平原地区以往林火很少发生, 但内布拉斯加州大学学者领衔开展的一项新研究显示, 1985—2014年, 林火增加了3倍, 每年林火次数从大约33次增加到117次。

卫星遥感海面风技术现状及应用进展

窦芳丽 商建 郭杨 尹红刚 谷松岩
(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 在常规观测资料稀少的洋面上, 利用卫星遥感海面风对数值预报模式初始场的构建、海上天气预报精度的提高等具有重要意义。对目前国内外在轨的卫星遥感海面风的各种微波传感器及产品特性做了较全面的评述, 并对比了主被动方式遥感海面风产品的异同。结合近年来卫星海面风反演技术的提高, 总结了卫星遥感海面风产品在数值天气预报同化、台风强度及路径预报改善和气候研究等方面的贡献, 同时展望了卫星遥感海面风技术及其资料在实际应用中的限制和有待进一步研究的内容。

关键词: 海面风, 微波遥感, 散射计, 辐射计

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.001

Satellite Remote Sensing of Sea Surface Winds: Technique Status and Application Progress

Dou Fangli, Shang Jian, Guo Yang, Yin Honggang, Gu Songyan
(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Satellite measurement of sea surface winds (SSW) is important in creating the first field of numerical weather prediction (NWP) and improving the marine forecasting accuracy. This paper reviews the international and domestic satellite SSW measurement missions, and tells the main differences of measured SSW products between the intensive and passive ways. It also describes the contributions of satellite derived SSW products to the NWP data assimilation, forecasting the intensity and path of tropical cyclone, and to climate research. In addition, the restriction in SSW products applications and the direction of further study are discussed here.

Keywords: sea surface wind, microwave remote sensing, scatterometer, radiometer

0 引言

海面风通过驱动海洋环流, 影响全球及局地气候, 是重要的海洋学和气象学参数; 海上极端天气系统的风场更是严重威胁海上交通、军事活动以及渔业安全的重要预报要素。过去对于海面风的观测主要依赖于岛屿台站、船舶和浮标, 无法保证观测的时空连续性, 不能满足海洋灾害监测预警业务、海洋动力过程、气候研究和数值模式对于海面风资料的需求, 因此, 利用卫星来对海面风进行观测尤为重要。极轨卫星遥感设备, 尤其是微波遥感设备, 以其全球覆盖、全天候观测能力, 能够有效实现对全球海面风的连续准确观测。

卫星主动或被动微波仪器观测到的海面风是海面 10 m 高度处的等效中性稳定层结风 (equivalent neutral wind)^[1], 微波传感器测量海面风是基于海面的后向

散射或辐射亮温, 而影响海面散射和发射的海面毛细重力波同时由海面风切变和大气浮力决定, 卫星接收到的相同信号可能对应着不同的海面参考高度真实风速, 因此, 卫星观测到的是一种消除了大气层结状态影响的参考风, 而不是真实的海面风场。

极轨卫星遥感海面风的微波仪器^[2]按观测方式分为主动和被动仪器两类。主动仪器指雷达系统, 通过发射连续或脉冲形式的电磁波, 接收经过海面调制的回波信号, 对后向散射系数进行反演同时获取海面风速和风向; 被动仪器即微波辐射计, 其频点设计在不同的大气窗区, 接收到的海面亮温与风成海面粗糙度、海温、盐度以及大气状况相关, 通过多通道亮温组合反演可以消除其他环境参数的影响, 获得海面风速信息^[3-4], 全极化辐射计也能够对风向进行观测^[5]。近三十年来, 在众多卫星海面风观测任务的连续观测下, 已经获取了长时间序列的全球覆盖的海面风资料, 不同观测方式的微波传感器获得的海面风资料各有其特点和应用限制, 多卫星平台观测的融合海面风产品, 在气候分析等领域也有广泛的应用^[6]。

收稿日期: 2017年2月3日; 修回日期: 2017年6月14日
第一作者: 窦芳丽 (1986—), Email: doufl@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506022)

本文对国内外卫星遥感海面风的各类微波仪器和产品特性进行了较详细的介绍,从产品角度分析了主被动方式观测海面风产品的异同,进而说明主被动联合反演或融合对于海面风应用的意义。结合目前资料在应用中存在的问题,对卫星遥感海面风产品的应用及发展进行了展望。

1 卫星微波仪器遥感海面风现状

极轨卫星微波传感器观测海面风的特点在于卫星能够进行大面积的连续观测,以满足气候及数值预报对于动态观测和长期观测的需求,微波对云和弱降雨的穿透性比较好,受大气的影响较小。星载微波散射计、辐射计、全极化辐射计、高度计和合成孔径雷达均可以对海面风进行观测。

1.1 主动微波仪器观测

当前比较成熟的能够对海面风进行业务观测的主动星载传感器包括微波散射计和高度计系统。微波散射计是能够同时测量海面风速和风向的星载雷达系统,通过精确测量海表的归一化后向散射截面(NRCS),间接测量海面附近的风速,同时在不同方向角测量风元(WVC)的后向散射确定风向。业务化运行的散射计提供的全球、全天候、高时空分辨率、高精度的海面风数据,在海洋学和气象学研究中做出了极大贡献^[7]。微波高度计垂直观测星下点海面的后向散射,能提供沿轨方向高分辨率的风速产品^[8]。其他海面风观测的主动仪器还包括星载合成孔径雷达等。

表1列出了过去和目前国际上的散射计观测计划,并给出了工作频率、分辨率、扫描方式以及服役时间。散射计测量海面风场的可行性于1973年被美国的S-193散射计试验首次证实,之后美国的散射计观测计划包括美国航空航天局(NASA)Seasat-A卫星上的

表1 国际上在轨运行过的散射计观测计划

Table 1 Summary of the international scatterometer missions in orbit

散射计	卫星	频率	扫描方式	服役时间
SASS	SeaSAT	Ku	扇形波束横扫方式	1978年6—10月
AMI	ERS-1	C	扇形波束横扫方式	1991年7月—2000年3月
AMI	ERS-2	C	扇形波束横扫方式	1995年4月—2011年7月
NSCAT	ADEOS-1	Ku	扇形波束横扫方式	1996年8月—1997年6月
Seawinds	QuikSCAT	Ku	笔形波束圆锥扫描	1999年7月—2009年11月
Seawinds	ADEOS-2	Ku	笔形波束圆锥扫描	2002年12月—2003年8月
ASCAT	MetOp-A	C	扇形波束横扫方式	2006年10月—
ASCAT	MetOp-B	C	扇形波束横扫方式	2012年9月—
RapidScat	ISS	Ku	笔形波束圆锥扫描	2014年10月—2016年8月
HY-2	HY-2	Ku	笔形波束圆锥扫描	2011年8月—
OSCAT	OceanSAT	Ku	笔形波束圆锥扫描	2009年9月—2014年2月

SASS, ADEOS-1卫星上的NSCAT, QuikSCAT卫星上的Seawinds以及国际空间站的RapidSCAT, 欧洲的散射计计划包括欧空局(ESA)在ERS-1和ERS-2卫星上装载的AMI, MetOp-A和MetOp-B卫星的ASCAT。其他还包括我国国家海洋局的HY-2散射计, 以及印度的OSCAT散射计等。

散射计反演风场的方法是最大似然估计(MLE)方法^[9], 在整个风矢量二维空间内搜索, 寻找使表征误差联合概率密度的目标函数达到局部最大值的风速和风向, 认为是真实解。由于逆风和顺风方向的探测获得的返回信号的差别不明显, 有可能出现多个模糊风向, 需要利用中数滤波或二维变分等技术对模糊解进行去除, 产品处理整体流程参见图1。

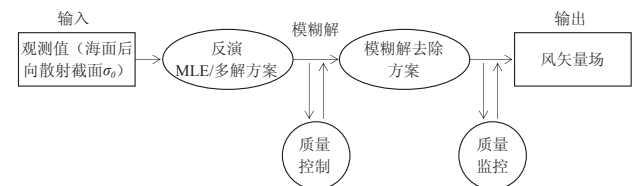


图1 微波散射计风矢量产品处理流程

Fig. 1 Flow chart of scatterometer wind vector product processing

目前业务中能够使用的海面风产品来自在轨运行的HY-2、ASCAT以及RapidSCAT, 它们分别于当地时间06:30/18:30、09:00/21:00、01:00/13:00附近经过中国区域。不同散射计观测频点、观测方式不同, 给出的海面风产品也有所区别。例如HY-2和RapidSCAT散射计采用Ku频段(13.5 GHz), 分辨率高, 对小风的反应更敏感, 但受云和降水的影响比较大, 有降水的风元一般经标识后去除或做重处理, 并且需要在预处理中进行大气校正。其笔形波束圆锥旋转扫描方式能实现更宽的刈幅宽度, HY-2的刈幅宽度内波束为1300 km, 外波束为1700 km。而ASCAT等欧洲研发的散射计采用C频段(5.3 GHz), 对较大风速的敏感性优于Ku频段, 并且对云和降水的穿透性更好, 但较低的频段也导致了较差的分辨率。横扫方式相比于锥扫, 刈幅宽度较窄, ASCAT单侧刈幅仅为550 km, 难以对大面积区域实现覆盖。HY-2的风速反演精度约为1.6 m/s, 风向反演精度约为20°, 风速反演误差的特征表现为在中等风速的情况下优于低风速和高风速, 风向反演误差随交轨方向位置变化, 在低风速情况下误差较大^[10]。ASCAT给出的u、v分量的反演精度约为1.6 m/s^[11]。

除了散射计, 高度计和合成孔径雷达也能对海面风实现业务观测。目前已经发射的星载高度计包括分别装载在ERS-1/2、TOPEX/POSEIDON、Jason-1/2、ENVISAT和我国HY-2卫星上的Altimeter传感器, 能提

供沿轨方向的风速产品，无法提供风向信息，刈幅宽度很窄，优势在于千米级的分辨率优于散射计，Ku波段与C波段同步测量，能够显著减小降雨对风速的影响^[12]。合成孔径雷达主要包括欧空局ERS-1/2上的SAR和ENVISAT上的ASAR，以及加拿大RADARSAT卫星上的SAR传感器，均为C频段。合成孔径雷达的空间分辨率能够达到几十米，但覆盖范围小，刈幅宽度在百千米级，很难满足大尺度海面风监测的需要^[13]。

1.2 被动微波仪器观测

用于海面风观测的微波辐射计包括多通道扫描成像辐射计和全极化辐射计两种。平静海面的微波辐射亮温仅与海温、盐度及电磁参数有关，而真实海面由于海面风的存在表现为不同尺度波构成的粗糙表面，辐射亮温与依赖于表面风的粗糙度及白沫效益相关联，基于这个原理，通过统计海面风与辐射计接收到的亮温之间的关系可以对风速进行反演^[14]。全极化辐射计不但测量微波辐射的正交极化分量，同时测量两个正交极化分量的复相关量，通过后两个Stokes参数来反演风向和去除模糊风向。

第一台多通道微波辐射计是1978年NASA发射的Seasat-A卫星上装载的SSMR，之后的星载微波辐射计包括DMSP系列卫星的SSM/I，TRMM上的TMI，Aqua上的AMSR-E，ADEOS-2上的AMSR，GCOM卫星上的AMSR-2以及我国FY-3B/C星上的MWRI，以及Coriolis上的全极化辐射计WindSat。表2给出了国际上已有微波辐射计的平台、频点设置，以及服役时间的信息。

表2 国际上在轨运行过的微波辐射计观测计划
Table 2 Summary of the international microwave radiometer missions in orbit

卫星	设备	观测频点	服役时间
DMSP-F08/10/11/13/15/16/17/18/19	SSM/I	19.35, 22.235, 37.000, 91.655	1978年—
TRMM	TMI	10.7, 19.4, 21.3, 37.0, 85.5	1997年11月—
Aqua	AMSR-E	6.9, 10.7, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0	2002年5月—
ADEOS-2	AMSR	6.90, 10.65, 18.70, 23.80, 36.50, 89.00, 50.30, 52.80	2002年12月— 2003年10月
GCOM-W1	AMSR-2	6.925, 7.300, 10.650, 18.700, 23.800, 36.500, 89.000	2012年8月—
FY-3B	MWRI	10.650, 18.700, 23.800, 36.500, 89.000	2010年11月—
FY-3C	MWRI	10.650, 18.700, 23.800, 36.500, 89.000	2013年9月—
Coriolis	WindSat	6.8, 10.7, 18.7, 23.8, 37.0	2003年1月—

微波辐射计反演风速的算法一般分为两大类，第一类是经验模型反演，第二类是结合辐射传输模式模拟亮温库的半经验模型反演，同时还有神经网络算法等，FY-3 WMRI海面风速产品的反演方法采用半经验

模型反演，图2给出产品处理流程。全极化微波辐射计的反演方法是首先建立海面辐射的Stokes分量与海面风矢量之间的关系函数，再利用物理统计、牛顿法和最大似然估计方法对风速和风向进行反演^[5]。

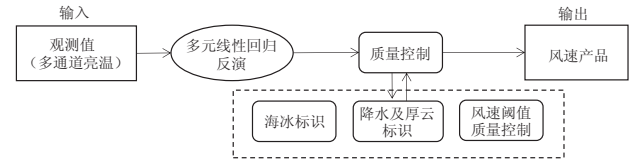


图2 FY-3微波成像仪风速产品处理流程
Fig. 2 Flow chart of FY-3 MWRI wind speed product processing

表2中列出的卫星除了DMSP系列早期已经退役的卫星和日本发射一年后即失效的ADEOS卫星之外，其他均在业务运行。不同微波辐射计的频点设置略有差异，频点差异在产品上反应为，SSM/I、TMI和MWRI等辐射计反演风速需要先做降雨判识，去除掉雨区的无效数据，如果辐射计包含低频6.9和10.7 GHz，结合新的算法能够获取全天候风速产品，减小降雨和云对产品的影响，比如，AMSR-E 6.9和10.7水平极化的两个通道能够用于估计雨区甚至台风外围风暴区的海面风速^[15-16]。微波辐射计风速产品的另一个优势在于刈幅较宽，例如FY-3 MWRI的扫描刈幅为1800 km，因此更适合应用于大、中尺度系统和较长时间平均的海面风场观测。

1.3 主被动观测的比较

根据1.1和1.2节的分析，主动和被动微波仪器观测海面风的机理不同，仪器频点和扫描方式有差别，这些都是导致主被动观测的产品各有其特点的原因。过去的研究表明，散射计相对于被动辐射计风速反演精度更高^[17]，SSM/I、TMI最初反演的风速与NSCAT、QuikSCAT相比存在比较大的系统偏差，一致性在海表发射率模型升级后得到了改善；ADEOS-2卫星上同时装载了散射计Seawinds和辐射计AMSR，对二者同步观测的风速交叉比对结果表明，二者反演的风速一致性较好，但在小于5 m/s的低风速区间，AMSR反演的风速明显偏小^[18]。在高风速下，微波散射计测量的海面后向散射系数会出现饱和现象，即随着风速的增加，高风速下波浪破碎和白沫效应掩盖了布拉格散射信号，后向散射会趋于稳定，不再有明显增长，因此散射计对较大的风速敏感性较差，而Shibata等的研究证明微波辐射计的6.9和10.7 GHz通道对高风速（33~72 m/s）有较好的响应^[16]，再加上低频对云和降雨更好的穿透能力，能够在台风区域进行应用。

利用散射计和同步观测的辐射计进行联合反演,能够结合主被动观测的优势。被动辐射计可以用来为散射计做大气校正, Hilburn等的研究表明可以利用AMSR的数据研究降雨对Seawinds雷达回波的影响,并进行降雨影响去除^[19]; Wentz、Alsweiss等的研究表明, SeaWinds-AMSR联合算法反演的风矢量精度更高,能够用于风暴区域的反演^[20-21],同时AMSR能为海面风产品提供准确的降雨和海冰标识。除了主被动联合反演算法的研发,将多源卫星的主被动风产品进行融合也是应用的主要方向,NASA的物理海洋学分布式档案中心以ECMWF的再分析资料为背景场,采用变分方法同化QuikSCAT、ADEOS、AMSR-E、TMI和SSM/I等多种卫星探测洋面风资料和传统的船舶、浮标资料,合成了一种新的交叉定标多平台海面风场资料(CCMP),在海洋和气象学中得到了广泛应用,该产品能够提供6 h一次的全球格点风场,能够填补一天内的数据空白,又能够校正不同传感器的系统偏差和定标误差^[22]。

2 卫星海面风产品应用进展

卫星海面风资料的主要应用是通过提供近海面的流场信息,使预报员了解大气运动过程,预测海上天气,尤其是用于改进台风的定位、强度及路径的预报。近年来,卫星海面风资料在数值天气预报中发挥了越来越重要的作用,包括欧洲、日本和美国的几大天气预报中心都已将卫星海面风数据同化到业务数值预报模式中^[23]。海面风对于气候研究的重要性也已经被广泛认识,用于季风、厄尔尼诺、大气的辐合性等方面的研究。

2.1 数值天气预报中的应用

Cane等首次证实在数值天气预报模式中同化散射计风产品能够显著提高预报精度^[24]。随后的研究表明散射计海面风产品对全球模式预报的改进效果在南半球和热带更显著^[25-26],对北半球预报改进效果不大,在区域试验例如热带气旋个例试验中能发挥较大的作用:Atlas等的研究表明NSCAT数据的同化能够改善南半球预报^[27],Chang等将NSCAT数据用于改善热带中尺度降水系统的预报^[28],国内的一些学者也针对QuikSCAT资料的同化做了一些研究^[29-30],结果表明散射计风场资料对台风的大风圈、中心位置的分析 and 预报有正效应,王亮等构造非对称台风风场模型,与QuikSCAT资料相结合共同改善模式初始场,台风整层风场的强度和路径模拟都有了很大改进^[31]。Kazumori利用日本气象厅的四维变分同化系统,研究了AMSR-E的亮温和全天候风速产品对热带气旋个例

预报的作用,结果表明对其路径预报没有明显改善,但改进了强度和最大风速的预报^[32]。

限制海面风资料在数值模式中同化效果的原因是反演精度有限,数值预报模式中边界层方案不成熟,同时表面层信息很难向上层传输。

2.2 热带气旋预报中的应用

尽管台风预报技术不断完善,但台风的路径和强度的预报精度却没有质的提高,卫星海面风场资料能够刻画台风的内部近海面流场,分析台风的不对称结构,分析台风外围环流对于分析其走向和强度变化也有一定的作用。

除了2.1节中提到的卫星海面风产品在数值天气预报模式同化中对台风强度、路径预报的应用之外,海面风产品在热带气旋领域的其他应用还包括:Hsu和Liu利用ERS-1散射计数据,计算了台风Oliver的海平面气压场,对台风的强度和路径预报产生正贡献,他们的研究还表明,基于海面风场计算的相对涡度能够用于评估台风的气候态尺度^[33]。Katsaro等利用1999年飓风季的QuikSCAT数据对热带气旋进行监测,发现QuikSCAT提前几天就能够识别热带低压强度的闭合环流,这对于热带气旋生成的监测是非常重要的^[34]。Liu也利用QuikSCAT来追踪海表的涡旋,这些涡旋尺度太小,很难被数值模式预测,散射计被认为是研究和追踪这些小涡旋的最佳工具^[35]。我国的一些学者也就QuickSCAT资料对台风定位、路径分析及暴雨预报的作用做了一些有益的研究^[36-38],表明海面风资料对台风尤其是眼区不明显的弱台风的定位定强,以及强度发展和移动趋势预报能够发挥独特的作用。

2.3 气候应用

海表风应力能够驱动海气之间的热通量、水汽通量、气体通量和海洋环流,从而影响区域和全球气候。气候学研究对于海面风产品的需求对于卫星海面风观测计划的发展是决定性的。Liu等利用6年的ERS散射计和Topex/Poseidon高度计数据,计算了南海的风应力旋度的季节环流和海平面变化,证明了二者之间的负相关与季风后的Ekman抽吸有一致的季节变化^[39];Liu等在厄尔尼诺研究中利用ERS风场和高度计风速产品计算了西太平洋的西风异常和海平面变化,利用NSCAT产品揭示了1997年ENSO现象中西太平洋的西风异常与赤道太平洋暖湿气流之间的联系^[40]。国内的谢强等利用ERS卫星数据和其他资料,比较分析了中国南海海域几种风应力资料的特点,发现卫星遥感产品具有分辨率高、量值合理的特点^[41];蒋兴伟等收集NSCAT、QuikSCAT和SeaWinds的全球海面风矢

量数据,通过对所收集数据的质量控制、滤波处理,构建了气候态的月平均风场、风应力场和风应力旋度场,用于海气相互作用、海洋中小尺度过程等方面的研究^[42]。

3 结论与展望

目前卫星遥感海面风的技术已经日趋成熟,海面风资料的独特性也已经在应用中得以体现。然而,也存在着一些限制应用的条件和技术上需要改进的问题。海面风资料不管应用于数值天气预报,还是用于天气分析和气候研究,其精度是影响应用效果的主要因素。不管是微波散射计、高度计、SAR,还是微波辐射计,在大风和强降雨区域的反演精度仍不能令人满意,这限制了卫星海面风产品对极端天气预报和分析的能力。主被动联合反演算法的研发是改善这个问题的一个主要方向,被动微波辐射计的低频通道观测亮温对大风有更强的响应,并且能够提供辅助的降雨数据,对主动雷达的回波做降雨订正,对极端天气条件下海面风产品的精度提高将会有非常大的帮助。

无论是风应力的计算,热带气旋中心位置的确定还是外围环流的分析,风向的反演精度都极为重要。全极化辐射计和散射计获得的海面信号在逆风和顺风方向的差别不明显,加之大气的影响、仪器的噪声,会造成微波传感器反演的风向存在顺/逆风模糊解问题,目前的解决方案是通过背景场信息来对模糊解进行选择,这在海面风产品应用在同化系统时会造成信息重复的问题。这就需要在仪器扫描方式设计时,在扫描周期内合理分配观测方位角和定标单元,减小模糊解出现的可能^[43]。

单一的卫星传感器提供的海面风资料在时间和空间上的覆盖率有限,日数据的刈幅之间存在数据空白,多星融合产品能够融合众多传感器观测到的海面风场,减小定标偏差和系统偏差,提供时间上连续、空间上实现全球覆盖的海面风资料,也是卫星遥感海面风产品发展的一个重要方向。

参考文献

- [1] Liu W T, Tang W Q. Equivalent Neutral Wind. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory Publ, 1996.
- [2] 李艳兵, 黄思训, 翟景秋. 卫星反演风场进展概述. 气象科学, 2009, 29(2): 277-284.
- [3] Chang A T C, Wilheit T T. Remote sensing of atmospheric water vapor, liquid water, and wind speed at the ocean surface by passive microwave techniques from the Nimbus 5 satellite. Radio Science, 1979, 14(5): 793-802.
- [4] Hollinger J P. Passive microwave measurements of sea surface roughness. Geoscience Electronics IEEE Transactions on, 1971, 9(3): 165-169.
- [5] 王振占, 姜景山, 刘璟怡, 等. 全极化微波辐射计遥感海面风场的关键技术和科学问题. 中国工程科学, 2008, 10(6): 76-86.
- [6] 郑崇伟. 基于CCMP风场的近22年中国海海表风场特征分析. 气象与减灾研究, 2011, 34(3): 41-46.
- [7] 张毅, 蒋兴伟, 林明森, 等. 星载微波散射计的研究现状及发展趋势. 遥感信息, 2010, (6): 87-94.
- [8] 姜祝辉, 黄思训, 刘刚, 等. 星载雷达高度计反演海面风速进展. 海洋通报, 2011, 30(5): 588-594.
- [9] 解学通, 方裕, 陈晓翔, 等. 基于最大似然估计的海面风场反演算法研究. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 30-33.
- [10] 穆博, 林明森, 彭海龙, 等. HY-2卫星微波散射计反演风矢量产品真实性检验方法研究. 中国工程科学, 2014, (6): 39-45.
- [11] Verhoef A, Stoffelen A. Validation of ASCAT 12.5 km winds. Ocean and Sea Ice SAF, 2009.
- [12] 陈戈, 方朝阳, 徐萍. 利用双波段补偿法提高卫星高度计海面风速反演精度. 中国图像图形学报, 1999, (11): 970-975.
- [13] 张毅, 陈永强, 朱敏慧. SAR海面风场反演研究. 电子测量技术, 2007, 30(2):36-38.
- [14] 窦芳丽, 安大伟, 李嘉睿. 基于FY-3B微波成像仪的海面风速反演. 遥感技术与应用, 2014, (6): 984-992.
- [15] Saitoh S, Shibata A. AMSR-E All weather sea surface wind speed. Tenki, 2010, 57: 5-17.
- [16] Shibata A. A wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: wind speed inside hurricanes. J Oceanogra, 2006, 62(3): 351-359.
- [17] Mears C A, Smith D K, Wentz F J. Comparison of Special Sensor Microwave Imager and buoy-measured wind speeds from 1987 - 1997. J Geophys Res Atmos, 2001, 106(C6): 11719-11729.
- [18] Ebuchi N. Evaluation of marine surface winds observed by seawinds and AMSR on ADEOS-II. J Oceanogra, 2006, 62(3): 293-301.
- [19] Hilburn K A, Wentz F J, Smith D K, et al. Correcting active scatterometer data for the effects of rain using passive radiometer data. J Appl Meteor Climat, 2006, 45(3): 382-398.
- [20] Wentz F J, Smith D K, Mears C A, et al. Advanced algorithms for QuikScat and SeaWinds/AMSR. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 3:1079-1081.
- [21] Alswiss S O, Laupattarakasem P, Jones W L. A novel ku-band radiometer/scatterometer approach for improved oceanic wind vector measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3189-3197.
- [22] Atlas R M, Hoffman R N, Ardizzone J V, et al. The cross-calibrated, multi-platform (CCMP) ocean surface wind product: current status and plans. American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, 2009.
- [23] Atlas R, Hoffman R N. Chapter 4 The use of satellite surface wind data to improve weather analysis and forecasting at the NASA Data Assimilation Office// Elsevier Oceanography Series. Elsevier B V, 2000.
- [24] Cane M A, Cardone V J, Halem M, et al. On the sensitivity of numerical weather prediction to remotely sensed marine surface wind data: a simulation study. J Geophys Res Ocea, 1981, 86(C9): 8093-8106.
- [25] Anderson D, Hollingsworth A, Uppala S, et al. A study of the use of scatterometer data in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis-forecast model. 2. Data impact. J Geophys Res Atmos, 1991, 96(C2):2635-2647.
- [26] Yu T W, McPherson R D. Global data assimilation experiments with scatterometer winds from SEASAT-A. Mon Wea Rev, 1984, 112(2): 368-376.
- [27] Atlas R, Bloom S C, Hoffman R N, et al. Geophysical validation of NSCAT winds using atmospheric data and analyses. J Geophys Res Atmos, 1999, 104(C5): 11405-11424.
- [28] Chang C P, Lin S C, Liou C S, et al. An experiment using NSCAT winds in the numerical prediction of tropical mesoscale rainfall systems under the influence of terrain. Geophys Res Lett, 1999, 26(3):311-314.
- [29] 刘春霞, 王静, 齐义泉, 等. 基于WRF模式同化QuikSCAT风场资料的初步试验. 热带海洋学报, 2004, 23(6): 69-74.
- [30] 刘宇迪, 李国义, 任景鹏. 散射计和下投式探空仪资料对台风模拟的影响. 气象科学, 2012, 32(1): 18-28.
- [31] 王亮, 陆汉城, 潘晓滨, 等. 台风模拟中QuikSCAT风场的非对称加强订正及同化应用. 热带气象学报, 2008, 24(6): 658-664.

- [32] Kazumori M. Impact studies of AMSR-E ocean surface wind speed data in NWP at JMA. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010, 2: II-801-II-804.
- [33] Hsu C S, Liu W T. Wind and pressure fields near tropical cyclone Oliver derived from scatterometer observations. J Geophys Res Atmos, 1996, 101(D12): 17021-17027.
- [34] Katsaros K B, Forde E B, Chang P, et al. QuikSCAT's sea winds facilitates early identification of tropical depressions in 1999 hurricane season. Geophys Res Lett, 2001, 28(6): 1043-1046.
- [35] Liu W T, Hu H, Song Y T, et al. Improvement of scatterometer wind vectors-impact on hurricane and coastal studies. WCRP/SCOR Workshop on Intercomparison and Validation of Ocean-Atmosphere Flux Fields, Bolger Center, May 21-24, 2001.
- [36] 吴晓京, 陈云浩, 郑新江, 等. 洋面风场的QuikSCAT/SeaWinds遥感探测. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 7-15.
- [37] 方翔, 咸迪, 李小龙, 等. QuikSCAT洋面风资料及其在热带气旋分析中的应用. 气象, 2007, 33(3): 33-39.
- [38] 邹巨洪, 林明森, 潘德炉, 等. QuikSCAT在台风监测中的应用. 遥感学报, 2009, 13(5): 840-853.
- [39] Liu W T, Xie X. Spacebased observations of the seasonal changes of south Asian monsoons and oceanic responses. Geophys Res Lett, 1999, 26(10): 1473-1476.
- [40] Liu W T, Tang W, Fu L L. Recent warming event in the Pacific may be an El Niño. Eos Trans, 1995, 76(43): 429-437.
- [41] 谢强, 王东晓, 王卫强, 等. 南海几种海面风应力资料的比较分析. 热带海洋学报, 2001(1): 91-100.
- [42] 蒋兴伟, 宋清涛. 基于微波散射计观测的气候态海面风场和风应力场. 海洋学报, 2010, 32(6): 83-90.
- [43] 王振占, 刘璟怡, 殷晓斌, 等. 一种消除全极化微波辐射计顺/逆风向遥感模糊性的新方案——星上定标和扫描机制设计的有关考虑. 遥感学报, 2009, 13(2): 190-196.

留存此照：世界上第一次各国气象局长会

■ 贾朋群

最近, 国际大地测量学与地球物理学联合会2016年年报发表, 其中联合会历史工作组在报告中报道了被重新发现的, 125年前召开的世界上第一次各国气象局长会的照片(图1)。

有组织的国际气象活动, 可以追溯到160多年前的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, 世界气象组织(WMO)的前身国际气象组织(IMO)的成立, 为最具有广泛意义的国际气象合作奠定了基础。

在1879年召开了第二次国际气象大会后, 国际气象活动进入发展阶段。同时, 在英国1854年和美国1871年相继成立了国家气象机构前后, 欧洲更多的国家建立了国家气象局。IMO从民间向“官方”过度的势头开始出现。例如, 法国提出IMO的活动要有气象局长参与其中, 但德国表示反对, 认为气象局长即使参与也是以个人名义。

经过各方努力, 1891年8月26日—9月2日, 第一次各国气象局长会议终于在德国的慕尼黑召开。参会的34位代表的会议合影, 实际上记录了一次极大提升国际气象合作的重要事件。正是这次会议, 建立了第一个常设技术委员会, 并为之后设立辐射委员会、气象电报委员会等打下伏笔。

参加这次会议的34人中, 来自东道主德国的有11人, 人数最多。其余除美国5人、法国2人外, 荷兰、澳大利亚、英国、芬兰、罗马尼亚、瑞典、挪威、奥地利、波兰、爱沙尼亚、丹麦、俄国、保加利亚、瑞士和西班牙各有1人参加。其中, 俄国参会代表为时任IMO主席, 而法国代表之一为1896—1907年IMO主席。

这次非政府的国际气象会议, 实际上成为各国政府的气象部门走到一起开始合作的新纪元, 之后, 自1896年开始, 到1951年WMO宣告成立, 又召开了第二届到第九届气象局长会。图中34位早期气象学者, 为随后国际气象事业的大发展贡献了最初的智慧。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

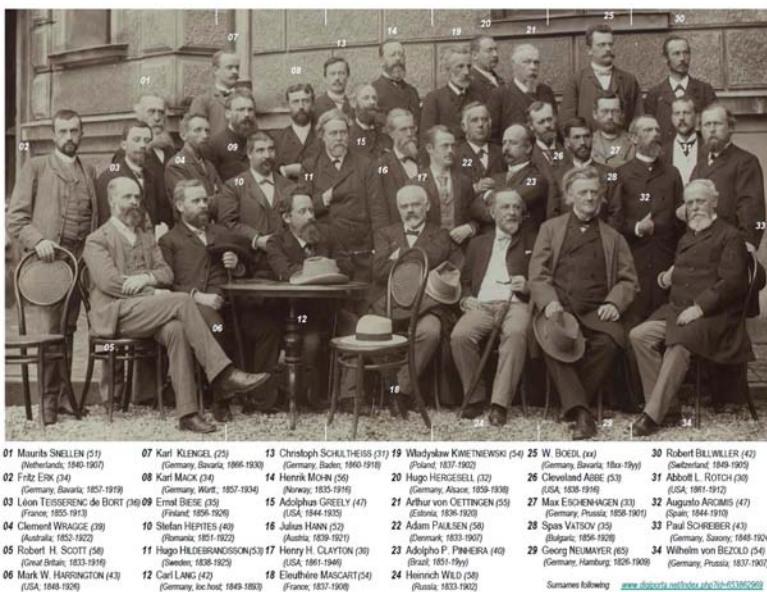


图1 1891年在德国召开的世界上第一次气象局长会34位会议代表合影

海洋环流与海浪模式的发展及其应用

刘春霞 赵中阔 毕雪岩 袁金南 温冠环 黄辉军

(中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080)

摘要: 通过对海洋环流模式、海浪模式、风暴潮模式研究现状和世界海洋强国当前运行业务模式系统的调研, 发现无论是全球模式还是区域模式, 海洋环流模式和海浪模式的分辨率越来越高, 全球海洋模式空间分辨率小于10 km, 达到涡可分辨程度, 海浪模式水平和波谱空间的分辨率都在提高。通过调研, 发现随着海洋各类观测资料的同化和数值模式分辨率的提高, 近年来加强了远海、近海及海岸带各种物理过程精细化研究, 海洋环流模式垂向采用混合坐标提升了模式对不同海域海洋内部物理过程的解释能力, 海洋模式、海浪模式、风暴潮模式中无结构网格的应用提高了模式对近海浅水区和岸界地形描述的能力, 加深对海岸带海洋物理过程的认识。文中提出海洋环流-海浪-潮汐耦合模式系统建立是近年来风暴潮模式发展的趋势, 将来大气-海洋-海浪-潮汐模式的耦合可细化对海洋各种物理过程的解释, 是业务模式系统发展的主要方向。

关键词: 海洋模式, 海浪模式, 风暴潮模式

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.002

Research and Application of Ocean Circulation and Wave Models: A Review and Prospects

Liu Chunxia, Zhao Zhongkuo, Bi Xueyan, Yuan Jinnan, Wen Guanjuan, Huang Huijun

(Institute of Tropical and Marine Meteorology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080)

Abstract: Based on the investigation of ocean models, wave models, storm surge models and the current operational model systems, it is found that both the global model and the regional model have higher and higher resolution in ocean circulation model or wave model. The resolutions of these wave models are improved in horizontal and spectral space, the grid interval of the global ocean model is less than 10 km and up to eddy resolution. According to the survey, the physical processes in the ocean, off shore and coastal zone have been refined by assimilating ocean observational data and using the higher resolution model. And the hybrid coordinate in the oceanic circulation model has been adopted to understand the internal physical ocean processes in detail over different ocean regions. The unstructured grids in the ocean, wave and storm surge models have been used to describe the detailed topography over shallow water or coastal areas, then the detailed physical ocean process in coastal zone has been known. The current storm surge model is ocean-wave-tide coupled model system. In the future, the main trend of improvement in the operational ocean model system is going to develop atmosphere-ocean-wave-tide coupled model for better interpretation of the ocean physical processes.

Keywords: ocean model, wave model, storm surge model

0 引言

早在20世纪60年代初期, 就已经开始了海洋数值预报的研究和试验工作。早期的海洋模式以理论模型和二维模型为主, 从20世纪70年代中期开始开展三维海洋温、盐、流数值模拟方法研究, 如在国际上应用

非常广泛的海洋环流模式POM就是在1977年由美国普林斯顿大学研发的。随着海洋观测技术、计算机技术的发展, 海洋模式发展进入了百花齐放阶段, 国际上出现了众多不同坐标系、不同离散计算方案的全球海洋模式和区域海洋模式, 这些模式应用在海洋环流、潮汐、泥沙堆积、海洋生态等方面。海浪的数值预报研究始于20世纪50年代后期, 60年代中期开始进行数值计算实验。80年代初, 世界上多个国家联合研发了第三代海浪模式, 在此基础上, 目前世界各国多基于第三代海浪模式发展自己国家的海浪数值模式。风暴潮数值计算始于20世纪50年代, 发展到现在, 建立了

收稿日期: 2017年2月5日; 修回日期: 2017年6月27日
第一作者: 刘春霞(1968—), Email: cxliu@grmc.gov.cn
资助信息: 2014年中国气象局小型业务化项目“全国海洋气象精细化预报业务系统建设(一期)”; 2015广东山洪地质灾害防治气象保障工程建设项目(GDX1526S/YD15G0512)

许多二维或三维的风暴潮数值模式，美国、英国、法国、荷兰、日本、印度等国家开展的风暴潮数值模式研究和业务应用比较早，我国也已经建立了业务风暴潮模式系统。关于国内外海洋环流模式的发展，赵艳玲等^[1]、方长芳等^[2]、王辉等^[3]已经就国际上流行的海洋环流模式、我国海洋环流模式研究及全球海洋业务化模式系统进展给出了比较详尽的综述。闻斌等^[4]回顾了海浪数值模型和国内外数值模式。尹尽勇等^[5]和黄彬等^[6]总结了国际上及我国海洋气象业务涉及的海浪、风暴潮模式的发展。本文目的是针对国际上常用海洋环流模式、海浪模式、风暴潮模式进行梳理，给出了各国预报中心现在运行的业务数值预报模式，为未来海洋气象专业模式发展提出建议。

1 三维海洋环流模式研究进展及业务应用

从20世纪70年代开始至今，世界上不同的研究团体研发了众多的海洋模式，21世纪初常用的模式包括POM (Princeton Ocean Model)、HAMSOM (Hamburg Shelf Ocean Model)、MOM (Modular Ocean Model)等，从21世纪初到现在，随着计算能力和数值模式技术的提高，三维海洋环流模式发展迅速。目前常用的具有代表性的模式有区域模式POM、ROMS (Regional Ocean Model System)、FVCOM (Finite-Volume Coastal Ocean Model)和全球模式NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean)、HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model)、MOM，也有一些研究工作将全球模式应用到区域海洋环流数值模拟中。我国从20世纪80年代开始海洋环流数值模式研究，21世纪初建立了第四代全球环流模式LICOM 1.0和区域海洋环流模式。

1.1 区域海洋模式

国际上常用于区域海洋数值模拟和预报的模式主要有POM、HAMSOM、ROMS和FVCOM等。POM模式是1977年由美国普林斯顿大学研发的，从模式发布之日起，广泛地应用于区域海洋环流、潮汐、风暴潮等数值模拟^[7-11]。HAMSOM是由德国汉堡大学于20世纪80年代针对大陆架研发的非线性原始方程模式，多用于边缘海以及陆架海域的数值模拟^[12-13]。21世纪初由Rutger大学和UCLA共同研发的区域海洋模式ROMS，分为Rutger-ROMS版本、法国IRD ROMS_AGRIF和UCLA版本，在海盆或海岸带海洋环境数值模拟和预报中广泛应用^[14-17]。由美籍华人陈长胜教授研发的无结构网格海洋环流模式FVCOM，由于其在近岸高分辨率以及小尺度计算问题上优势明显，多应用于河口、海岸等区域的海洋环流模拟，更多地应用

于潮流和风暴潮预报^[18-23]。

纵观区域海洋环流模式，这些模式都是基于静压近似和Boussinesq近似的自由海表面的原始方程模式，坐标系和网格点设置各有特点^[24-28]。图1给出了几种海洋模式开始释放时间以及模式采用的垂向坐标和离散计算方案。由图1可知，在几种常用的区域海洋模式中，POM和FVCOM垂向采用 σ 坐标，HAMSOM垂向则采用Z坐标，ROMS垂向采用S坐标；POM、HAMSOM、ROMS离散化计算方案采用Arakawa C有限差分，FVCOM离散化计算方案采用了非结构三角网格有限体积方法。在不同垂向坐标系中，Z坐标系对于浅水区混合层的描述方面具有一定的优势， σ 坐标可以刻画海底地形，但是对于浅水区的混合层描述得不好，使得POM模式模拟的混合层厚度较浅，温跃层现象不明显，同时在陡峭的地形处水平压力梯度计算误差偏大；针对POM模式的缺点，ROMS垂向采用了S坐标系，与 σ 坐标相比，S坐标系在温跃层和底边界层具有很好的解析度，ROMS模式中使用了新的水平压力梯度计算，以减少陡峭地形区域水平压力梯度的计算误差。4个区域模式中ROMS和FVCOM在水平方向都采用了非结构网格，与结构网格点相比，非结构网格在近岸和远海可采用不同分辨率，近岸采用细网格，远离岸基或远海区域采用分辨率比较粗的网格，在提高海岸线和河口等复杂地形解析度的同时，还可以提高计算效率。与ROMS相比，FVCOM采用三角网格有限体积离散计算方案，对于复杂地形岸界的计算问题可以保证质量守恒性，因此该模式对于近岸高分辨率和小尺度物理过程数值模拟优于其他海洋环流模式。由上述4个模式研发时间可以看出，ROMS

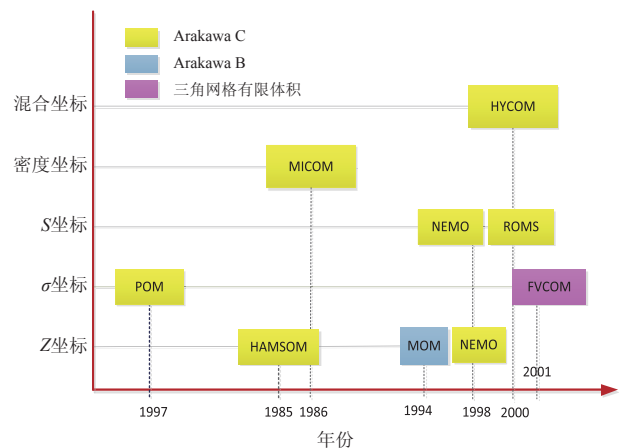


图1 国外常用海洋模式开始释放时间以及模式采用的垂向坐标和离散计算方案

Fig. 1 The first release time of some commonly used ocean models, the vertical coordinates and discrete schemes used in the models

和FVCOM是在2000年以后释放并得到应用,从时间上来看,区域模式的水平网格点开始走向非结构网格点设计,从而提高对近岸复杂地形的刻画能力。

国内20世纪末也开展了海洋环流模式研究,90年代初开始研发三维斜压海洋环流模式。模式采用 η 坐标系,水平离散化采用Arakawa C网格,分辨率达到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂直为24层,主要用来模拟南海海域的海洋环流^[29]。

1.2 全球海洋模式

目前国际上常用的全球海洋环流模式主要有MOM、NEMO、HYCOM等。NEMO是由法国、英国和意大利共同研发的,应用于27个国家。MOM是由GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 研发的全球环流模式, HYCOM是由FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)、NRL (Naval Research Laboratory)、NCEP (National Centers for Atmospheric Prediction) 多家研究机构合作研发的。图1给出了MOM、NEMO、HYCOM三个模式垂向坐标和离散化计算方案的特点^[30-32], MOM水平采用可变的经纬度网格点,离散化计算方案却采用Arakawa B网格; NEMO和HYCOM采用正交曲线坐标,水平离散化采用Arakawa C网格计算方案, NEMO模式将网格极点移动到亚洲和北美洲大陆,以避免在计算中出现奇点问题^[31]。MOM模式是由GFDL于20世纪90年代开始研发的,从MOM1到MOM4垂向都采用Z坐标,由于Z坐标在处理地形时有明显的不足,从MOM5开始垂向坐标考虑随地形坐标。NEMO是ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 再分析系统中的海洋环流模式^[33-36],其垂向采用两种坐标系,即Z坐标或S坐标,正如前面所说, S坐标是传统 σ 坐标的改进。2000年开始释放的HYCOM模式是基于迈阿密等密度坐标海洋模式MICOM^[37]而研发的原始方程海洋环流模式,其垂向坐标在原有的等密度面基础上,增加了Z坐标和 σ 坐标,在开阔海洋仍保留等密度面,在浅海或陆架区域采用 σ 坐标提高对复杂地形的解析度,改进由于陡峭地形引起的水平压力梯度的计算误差,在混合层或层化不明显区域采用Z坐标,可以更好地描述层化海洋的垂直结构。对应于不同坐标系, HYCOM模式提供了各种不同的垂直混合方案供选择,其中KPP非刚盖垂直混合方案可有效地刻画从海洋边界层到海洋内部的弱的垂直混合过程,将诸如海洋内部的背景场内波、不稳定剪切混合和双扩散过程,海表边界层的风生混合、海表浮力通量和对流不稳定等难以解析的物理过程参数化^[38-39]。目前

HYCOM被多个学术团体和业务中心应用,不仅应用于全球模式,同时也应用于区域和海盆模式^[40-44]。

在国内,中国科学院大气物理研究所地球流体力学国家重点实验室(简称IAP/LASG)早在20世纪80年代便开展了海洋环流模式的研发,21世纪初,基于IAP/LASG第三代全球海洋环流模式,研发了准全球涡相容的原始方程模式LICOM。模式水平方向采用球坐标系,垂直方向为 η 坐标。目前该模式已经发展到LICOM2.0,与大气模式耦合构成一个海气耦合系统^[45]。LICOM2.0分辨率达到了10 km,可以描述中尺度涡等海洋内部的中尺度物理过程。

1.3 各预报中心业务海洋模式

随着海洋数值模式发展和数值计算机能力的提高,现阶段以美国和欧洲各国为代表的海洋大国都已经建立了全球和区域海洋预报系统,王辉等^[3]非常详细地描述了这些国家的全球海洋业务预报系统和我国海洋业务预报系统建设。本文针对主要的海洋预报系统,如美国NCEP全球实时海洋预报系统RTOFS (Real-Time Ocean Forecast System)、英国气象局的业务预报系统FOAM (The Forecast Ocean Assimilation Model)、法国麦卡托海洋中心海洋预报系统等,给出其最新进展^[46-48]。美国全球实时海洋预报系统RTOFS中早期采用的业务海洋模式是MOM4,现在运行的业务系统是在HYCOM基础上建立的,2011年开始在NCEP业务化运行,2013年在美国海军业务化运行。在NCEP业务运行的RTOFS系统中包括全球和大西洋区域海洋模式,分辨率为 $(1/12)^\circ$;美国海军运行的海洋业务预报系统不仅包括全球海洋模式和大西洋区域海洋模式,还包括太平洋和印度洋区域海洋模式,与NCEP相比,全球模式水平分辨率差不多,大约为 $(2/25)^\circ$,区域模式分辨率为 $(1/25)^\circ$,明显高于前者。两者采用同样的同化系统即多变量三维变分海洋资料同化系统,分析变量包括温度、盐度、水位、流速矢量。FOAM海洋业务预报系统是英国气象局业务海洋分析和预报系统,现业务运行的系统以NEMO海洋模式为核心,可提供深海和沿岸近海海洋预报,包括北大西洋、印度洋和地中海区域模式,其中全球模式水平分辨率为 $(1/4)^\circ$,区域模式水平分辨率为 $(1/12)^\circ$,采用NEMOVAR同化系统每天同化48 h内的卫星和现场观测海水温度、盐度、海面高度、海冰浓度等。法国麦卡托海洋中心(Mercator Océan)是法国提供业务海洋预报的主要机构,与英国FOAM系统一样,其业务运行的全球和区域海洋分析预报系统都以NEMO为核心海洋模式,其中全球海

洋分析系统有两种不同分辨率即 $(1/4)^\circ$ 和 $(1/12)^\circ$ ，区域海洋预报系统水平分辨率达到了 $(1/36)^\circ$ ，系统同化方案采用了SEEKF (Singular Evolutive Extended Kalman Filter) 和三维变分偏差订正，可同化观测资料包括卫星探测的海表温度、海面高度和现场温盐廓线等。中国国家海洋预报中心现在业务运行的全球和区域业务海洋模式分别基于MOM4和ROMS建立，全球模式分辨率为 $(1/4)^\circ$ ，大洋区域模式(印度洋)分辨率为 $(1/12)^\circ$ ，西太平洋和南海区域海洋模式分辨率为 $(1/30)^\circ$ ，海洋模式系统采用集合最优插值同化技术，该系统从2013年开始业务运行^[3, 49]。

纵观国际上现代海洋业务模式，从模式分辨率来看，模式分辨率越来越高，全球海洋模式分辨率从 1° 发展到 $(1/12)^\circ$ ，区域模式分辨率已达到 $(1/36)^\circ$ ；从水平网格点来看，无结构网格点在更多区域模式中得到应用，如ROMS和FVCOM等；从地形坐标来看，为了比较好地考虑地形作用、混合层及大洋物理海洋过程的特点，引入了混合坐标，即使MOM采用的Z坐标也在MOM5进行了改进；从海洋模式同化技术来看，采用同化方法有最优插值、三维变分和KF (Kalman Filter) 等。

2 海浪模式研究进展及业务应用

2.1 海浪数值模式发展

海浪数值预报模式早在20世纪50年代就已经开始。法国1956年基于海况谱分解建立了预报北大西洋海浪的数值模式，称为第一代海浪模式。第一代海浪模式特点是没有明确地考虑非线性项，非线性项隐含在输入和耗散过程中，70年代第一代模式发展为半球海浪模式，模式缺点是过高估计风的输入，低估了非线性传播的增长。随着海浪谱观测研究的深入和海浪谱型的发现，发展了第二代海浪模式如美国SAIL (Sea-Air Interaction Laboratory) 模式，与第一代海浪模式相比，第二代海浪模式采用限定谱型如JONSWAP谱的参数化方式处理非线性相互作用项。尽管在第二代海浪模式中考虑了非线性传播参数化，但是，第二代模式不能很好地模拟风场突然改变时风浪复杂的生长过程，难以处理风浪和涌之间的过渡问题。针对前两代海浪模式存在的问题，1980—1983年，由美国、英国、德国、荷兰、日本等国的海洋专家组成了SWAMP (Sea Wave Modeling Project Group) 研究组，针对世界各国的代表性海浪模式，进行分类和试验。1983—1986年德国、荷兰、英国、法国、挪威等西欧国家40多名海洋专家研究发展了适用于全球深水和浅水的海浪数值计算模式，称为第三

代海浪模式。与前两代海浪模式相比，第三代海浪模式最大的不同是显式地描述了非线性相互作用项，其优点是对谱形不加任何限制，而是通过基本谱的传输方程积分计算浪谱，将影响浪谱发展的物理过程通过源函数的方式显示地描述出来，方便数值计算和对波浪谱增长物理过程的理解^[50]。目前国际上流行的海浪模式WAM (Wave Model)、WAVE WATCH III和SWAN (Simulating Waves Nearshore) 等都是基于第三代海浪模式建立的。

WAM海浪模式是由世界各国联合组织的WAMDI (The Wave Model Development and Implementation Group) 研究组共同研发的第一个二维谱空间传播的海浪模式，WAM模式分为浅水或深水模式，在深海考虑风输入项、非线性作用项、白冠耗散项，浅水模式中还增加了海底摩擦项。现在WAM模式已发展到4.5版本，主要由德国研发。目前欧洲很多国家如德国、法国等业务模式都采用WAM系统，ECMWF海浪业务模式系统也是基于WAM建立的^[51-53]。

WAVE WATCH III (简称WW3) 是由NCEP研发的第三代海浪模式，与WAM模式最大不同体现在风输入函数的计算，在WW3模式中风输入函数有多种方案，包括了WAM3、WAM4风输入函数计算方案和Tolman and Chalikov计算方案，WW3最早仅适用于深水区，现在模式已进行了浅水区订正。WW3 V3.14及以前的版本水平网格点采用球面坐标，目前比较成熟的4.18版本不仅考虑浅水引起的浪的破碎，更加将坐标系改为无结构网格点或球面多元网格点 (Spherical Multiple-Cell, SPC) ^[54-55]。目前，WW3在美国NCEP、英国气象局、韩国气象局等多个业务中心使用^[56-58]。

SWAN模式是荷兰Delft大学基于第三代海浪模式研发的，与WAM、WW3相比，SWAN是针对近岸环境研发的海浪模式，坐标系包括球面直角坐标和无结构网格，更多考虑了浅水区物理过程如波浪浅化、折射、绕射、破碎等。模式采用隐式格式计算，使得模式更适用于近岸海浪增长和传播的数值模拟^[59]。

还有一些国家基于第三代海浪模式研发了自己的海浪模式，如日本气象厅研发的适用于深水的海浪模式MRI-III^[60]，我国袁业立等^[61-62]改进了国际盛行的WAM模式，发展了基于正交笛卡尔平面下的LAGFD-WAM海浪模式，以及后来在此基础上建立了球坐标系下的MASNUM (Key Laboratory of MARine Science and NUMerical Modeling) 海浪模式^[63]。

2.2 各国业务海浪模式

表1给出了世界主要国家业务海浪模式概况。ECMWF海浪业务模式是建立在第三代海浪模式WAM基础上,1992年海浪模式开始业务运行,目前ECMWF运行海浪模式有三类,单一全球模式HERS-SEW、耦合全球模式HRES-WAM及集合预报模式ENS-WAM,2016年11月业务运行海浪高分辨率模式HRES-WAM水平分辨率从0.25°提高到0.125°,集合预报ENS-WAM 0~15天预报的水平分辨率从0.5°提高到0.25°,HERS-SEW水平分辨率为0.1°,分为36个波向,36个波数^[64]。德国海浪预报系统也是在WAM基础上发展的,包括全球、欧洲区域以及北海和德国湾近岸模式系统等,即将业务化的近岸海浪模式最高分辨率约900 m,德国湾近岸海洋预报系统频率从0.042~0.66 Hz共30个频段,24个方向^[65]。法国业务海浪模式MFWAM,是2009年基于ECMWF海浪模式WAM建立的,水平分辨率为0.5°,30个波数和24个方向,采用最优插值方法同化了高度计资料,现在运行的区域模式分辨率为0.1°。MFWAM新一代近岸海浪预报系统是基于WW3 V4.18建立的,水平网格距从10

km到200 m,波谱空间为24个方向和30个波数^[66]。

美国、英国、澳大利亚、韩国等国家业务模式是基于WW3建立的(表1),包括全球、区域等模式^[56]。美国目前运行的业务模式是WW3 V2.2,全球和区域(飓风)模式水平分辨率为1.25°×1°和0.25°(0.25°),波谱空间是25波数,24个方向。从2008年开始,英国气象局海浪业务预报模式是基于WW3建立的,2013年开始运行的欧洲和英国区域模式是基于WW3 V3.14建立的。2016年11月英国气象局发布了新的全球海浪预报系统,该模式系统基于WW3 V4.18建立,采用了WW3 V4.18多元网格点和新的源函数,全球模式从远离海岸到近岸分辨率为25, 12, 6 km,英国区域模式从远离海岸到近岸分辨率为12, 6, 3 km,36波数,36个方向^[57, 67]。澳大利亚2016年4月全球海浪模式AUSWAVE-G升级为第三个版本,前两个版本运行分别为2010和2012年;新运行的业务全球海浪模式从WW3 V3.14升级到V4.18,模式中源函数也做了改进,模式分辨率从40 km升级到25 km^[68]。现在运行的区域模式AUSWAVE-R从2013年4月开始运行,水平分辨率为0.1°^[69]。韩国气象局从2008年开始业务运行

表1 国际上主要海浪业务模式
Table 1 Mainly operational wave models in the world

预报中心	预报模式名称	模式名称	区域	水平格点分辨率	波数, 方向数
ECMWF	HERS-SEW		全球	0.1°	36, 36
	HERS-WAM	WAM4	全球	0.125°	36, 36
	ENS-WAM		全球	0.25°/0.5°	30, 25
美国 NOAA/ NCEP	NWW3		全球	1.25°×1.0°	
	AKW/WNA /ENP/NAH /NPH	WW3 V2.22	Alaskan/西北大西洋/ 东北太平/北大西洋飓风/ 北太平洋飓风	0.25°	25, 24
法国 Meteo-France	WAM		全球/区域	0.5°	30, 24
	MFWAM	WW3 V4.18	近岸非结构网格	10 km~200 m	30, 24
日本 JMA	深水模式	MRI-III	全球	0.5°	25, 36
	浅水模式	WAM4	8个区域	1'	35, 36
韩国 KMA		WW3	全球	50 km	
		WW3	亚洲	8 km	25, 36
		WW3	近岸	1 km	
英国	S36125	WW3	全球	从远离海岸到近岸分辨率为25, 12, 6 km	
			区域	从远离海岸到近岸分辨率为12, 6, 3 km	
德国 气象局		WAM4	北海区域	5 km	30, 24
			德国湾	900 m	
澳大利亚 气象局	AUSWAVE-G		全球	25 km	25, 24
	AUSWAVE-R	WW3	区域	0.1°	
中国 国家海洋预报中心	全球海浪模式	WW3	全球	(1/3)°	
	印度洋海浪模式	WW3	印度洋	(1/6)°	
	西北太平洋海浪模式	SWAN	西太平	(1/10)°	25, 24
	南海海浪模式		南海	(1/30)°	

WW3海浪模式，现业务运行V2.2版本，新的海浪预报系统将开始运行WW3 V4.18版本，共有3套模式即全球、亚洲区域和近岸区域，水平分辨率为50、8和1 km，可提供10天、3天、1天预报^[58]。

日本气象厅和我国国家海洋环境预报中心业务模式也有不同。日本气象厅现在运行的业务海浪模式有3套，即全球、近岸和浅水区模式，近岸模式（CWM）针对日本海，全球和近岸是日本气象厅（JMA）气象研究所（MRI）自主研发的第三代海浪模式MRI-III模式，浅水模式是针对日本沿海岸基于WAM浅水模式建立的海浪模式。其水平分辨率分别为 0.5° 、 0.05° 、 $1'$ ，频率为25、25、35频段，方向为36、36、36^[70]。中国国家海洋环境预报中心业务海浪模式建立在WW3和SWAN基础上，其中全球和印度洋模式建立在WW3基础上，西北太平洋和南海区域模式由于考虑近岸地形，是基于SWAN模式基础上发展起来的。全球、印度洋、西北太平洋、南海区域海浪模式水平分辨率分别为 $(1/3)^\circ$ 、 $(1/6)^\circ$ 、 $(1/10)^\circ$ 和 $(1/30)^\circ$ ，预报时效为120 h^[3]。

回顾海浪模式发展，海浪模式分辨率越来越高，ECWMF全球模式分辨率为 0.1° ，法国气象局近岸区域海浪模式达到200 m。针对高分辨率模式的发展，海浪模式网格点发生了变化如WW3 V4.18发展的球形多元网格。近年来，基于观测研究，在源函数、考虑浅水效应引起破碎和海浪最大值预报等方面也有了明显改进。最近几年欧洲多个国家和研究团体联合开展Mywave研究计划，包括法国气象局、德国Helmholtz中心、西班牙Puertos del Estado、意大利ISMAR（the Institute of Marine Sciences）、荷兰DeltaRes和KNMI（荷兰皇家气象研究协会）等，目的是建立一个包括新的或改进的海浪物理过程在内的欧洲统一的海浪数值预报系统。

3 风暴潮模式研究进展及业务应用

风暴潮的数值模拟始于20世纪50年代，经过几十年的发展，已经形成了很多风暴潮的数值预报系统，如美国的SLOSH（Sea, Lake and Overland Surges from Hurricane）、英国的STWS（Storm Tide Warning System），日本、澳大利亚、荷兰等很多沿海国家也都建立了自己的风暴潮预警系统。20世纪风暴潮模式系统多为二维模式，21世纪开始，随着数值方法和计算机技术的飞速发展，三维海洋环流数值模式如POM、FVCOM、ADCIRC（Advanced Circulation Model For Oceanic）等被应用于风暴潮数值模拟和业务预报。直到近年来，各国开始大力发展风暴潮一潮

汐—海浪耦合模式系统，随着波流耦合和波浪近岸增水研究的发展，越来越多的学者将风暴潮中风浪过程对近岸增水和近岸流场的影响也考虑到风暴潮的数值模拟当中。

3.1 二维风暴潮模式

早期风暴潮数值模式以二维深度积分模型为主，如日本气象厅业务风暴潮模式、美国NCEP业务模式SLOSH、印度风暴潮模式等。世界上已经报告的风暴潮模式接近75%是二维模式，如表2所示，到2011年为止，多数国家的业务和准业务风暴潮模式为二维模式^[71]。

美国的风暴潮模式最早是由Jelesnianski于1972年建立的SPLASH模式。进入20世纪80年代后，在SPLASH模式的基础上进行了SLOSH模式的研究，并提供业务预报产品如风暴潮淹没指导产品^[72]。SLOSH模式是以运动和连续方程深度积分为基础建立的，在模式中根据风暴路径、最大风速半径、风暴中心和环境场气压差建立模型风场，计算风应力。SLOSH采用双曲线或椭圆格点类型，使得靠近岸界和海湾分辨率高，深水区域分辨率降低。早期的SLOSH模式没有考虑天文潮、波增水和波浪爬高，Stockdon等^[73]给出了波增水和波浪爬高的经验参数化计算方案，指出在风暴条件下，波增水和波浪爬高作用使得岸边水位抬升超出风暴潮两倍，目前美国业务预报模式中不包括波增水和波浪爬高等物理过程。美国NWS（National Weather Service）现在业务风暴潮概率指导预报产品就是由SLOSH模式提供的^[74-75]。

亚洲国家开展风暴潮数值模式研究和业务应用相对于欧美地区比较晚，比较有名的是印度IIT（Indian institution of technology）二维风暴潮模式和日本气象厅二维风暴潮模式。印度IIT风暴潮模式于20世纪80年代开始研发，后应用于印度洋阿拉伯海的风暴潮预报，该模式采用的坐标与SLOSH不同，为直角笛卡尔坐标，计算时水陆分开^[76-77]，现已在整个北印度洋得到应用^[78]。日本气象厅研发的二维风暴潮模式也是采用直角坐标，数值计算中将水陆分离，采用的网格点是可变的，即在浅水区采用细网格，深水区采用粗网格，系统还可以提供集合预报产品，2016年该系统开始提供多场景风暴潮预报^[79]。上述两个模式作为WMO向亚洲各国推荐的风暴潮模式，在亚洲多个国家和地区业务风暴潮预报中应用。

欧洲各国在20世纪80年代就开始建立风暴潮模式系统，如英国、荷兰、丹麦等国家都建立了自己的风暴潮预警系统^[80]。荷兰从20世纪80年代中期开

表2 各大风暴潮业务模式概况
Table 2 Features of operational storm surge models

国家	模式	区域	类型	格点
西班牙	HAMSOM Nivmar	地中海和伊比利亚半岛	二维深度积分正压模式	10'
丹麦	Mike 21	北海、波罗的海	二维流体动力学方程	9, 3, 1, (1/3) nmi
加拿大	耦合海洋-海冰模式NPAC	40°—62°N, 120°—160°W	POM (三维环流模式)	1/8°
日本	JMA风暴潮模式	23.5°—46.5°N, 122.5°—146.5°E	二维线性深度积分浅水方程	1'
韩国	KMA风暴潮模式	20°—50°N, 115°—150°E	基于POM二维正压风暴潮和潮流模式	1/12°
葡萄牙	NIVEMAR	葡萄牙沿海	二维深度积分浅水方程	1'
阿根廷	SMARA风暴潮	32°—55°S, 51°—70°W和Rio de la Plata	二维深度平均	(1/3)°, (1/20)°
德国	BBH环流—BBH风暴潮	东北大西洋、北海、波罗的海	三维静压环流模式和二维正压风暴潮模式	北海及波罗的海6 nmi, 德国海岸西部1 nmi
哈萨克斯坦	Caspian风暴潮	Caspian Sea 36°—48.5°N, 45°—58°E; North Caspian Sea 44.2°—48°N, 46.5°—55.1°E	基于MIKE21二维流体力学	10 km×2 km
瑞典	HIROMB/NOAA	东北大西洋、波罗的海	三维斜压模式	24 nmi
荷兰	DCSM98	陆架48°—62°N, 12°—13°E	二维深度积分浅水方程	(1/8)° × (1/12)°
法国	源自MOTHY漏油漂移模型	近欧洲大西洋8.5°—10°E, 43°—59°N	二维非线性浅水方程	5'
香港	SLOSH	距香港130 km南海区域	二维深度积分	极坐标 1~7 km
俄罗斯	短期海平面和海流预报	里海和近岸低洼地带	三维静力斜压模式	3 nmi
印度	IIT	印度东西海岸	非线性二维深度积分方程	12.8 km
英国	CS3	西北欧陆架水域	二维垂直平均	12 km
美国	SLOSH	美国沿大西洋和墨西哥湾海岸带	二维深度积分	625 m

始，研发了数值流体动力学模式DCSM (the Dutch Continental Shelf Model)，该模式是深度积分浅水方程，利用商业软件WAQUA软件包计算，模式驱动场由高分辨率有限区域气象模式提供，90年代早期开始利用KF方法同化潮汐并观测资料，预报荷兰沿岸水位及其概率预报^[81-82]。英国气象局风暴潮业务预报模式CS3X是潮汐—风暴潮模式，在业务的风暴潮模式系统中考虑潮汐和风暴潮相互作用，近年来发展了风暴潮集合预报系统^[83]。法国风暴潮模式是基于球面非线性浅水方程建立的，为了解决岸界问题，采用C网格差分格式，强迫风场采用Holland模型，模式从20世纪90年代开始业务化运行^[84]。

综上所述，二维风暴潮模式都是基于深度积分的浅水方程，形式简单，不同的模式采用的网格点不同，有采用双曲线型如SLOSH模式，有选取直角坐标如JMA和IIT风暴潮模式，所有的风暴潮模式没有考虑天文潮和近岸过程引起的波爬升、波增水等物理过程，其采用的风强迫多为经典风压关系计算得到的。但是二维模式的优点是形式简单、易于计算，在业务预报中广泛使用。为了解决物理过程、风强迫带来的不确定性，现在二维业务预报系统逐渐向集合预报和概率预报发展。

3.2 三维风暴潮模式

预报风暴潮最常用的三维模式有POM、ROMS、

FVCOM、ADCIRC、Delft3D等，这些模式广泛应用于近岸水文和海洋环境的数值模拟和预报中。如加拿大业务风暴潮模式采用的就是POM，上海台风研究所的近岸风暴潮模式也是在POM的基础上建立的^[11]。POM、FVCOM特点已经在前面描述，下面主要介绍比较常用的三维风暴潮模式，如ADCIRC、Delft3D等。

ADCIRC模式是由北卡罗来纳大学海洋科学研究所的Luettich教授和美国圣母大学的Westerink教授联合研制的，可应用于海洋、海岸、河口跨尺度区域的水动力计算的数学模型。模式基于Boussinesq和静压近似，包括二维模式和三维模式，二维模式ADCIRC-2DDI通过求解垂直积分动量方程得到平均流速和潮汐，三维模式基于广义拉伸垂直坐标系，利用标准圆柱投影，将球面控制方程转换为笛卡尔坐标中的等效方程组来求解；模式采用有限元方法进行离散化数值计算^[85]。ADCIRC已经发展为完善的模式系统，被大量地应用于近岸工程的海洋环境的模拟^[86-88]，美国新一代近岸/飓风登陆的风暴潮业务模式就是建立在ADCIRC基础上，可提供比SLOSH更精细的预报^[89]。

Delft3D是目前世界上最为先进的完全的三维水动力—水质模型系统，Delft3D是由荷兰Delft大学WL Delft Hydraulics开发的一套功能强大的软件包。Delft3D-FLOW可以提供3种坐标系，即笛卡尔直角

坐标、正交曲线坐标和球面坐标，在垂直方向上提供Z坐标和 σ 坐标，采用有限元离散化数值计算^[90]。Delft3D支持所有主要的操作系统如Windows, Unix, Linux, Mac等，已经发展成为非常完善的商业软件。Delft3D系统在国际上应用十分广泛，如荷兰、俄罗斯、波兰、德国、澳大利亚、美国、西班牙、英国、新西兰、新加坡、马来西亚等，尤其是美国已经有很长的应用历史，Delft3D系统在我国风暴潮数值模拟等方面也得到应用^[91-92]，该模式更多地应用于泥沙输送和水质的数值计算中。

三维模式不仅可以模拟海洋环流和三维风暴潮，还考虑了更加完善的海洋物理过程对风暴潮的影响。You等^[93]研究显示基于ROMS三维模式预报风暴潮与二维模式相比，可以更好地描述风暴潮空间和时间的变化。Zheng等^[94]基于FVCOM二维/三维模式风暴潮模拟研究发现，采用相同的海底拖曳系数计算公式，三维风暴潮模式模拟的风暴潮略大于等效二维风暴潮模式。其原因是，用于二维模式中计算海底应力的速度大于三维模式中的速度，导致了二维风暴潮模式计算的海底摩擦应力偏大，抵消了表面应力，与三维模式相比海平面梯度减少。正是由于三维模式具有比较完善的海洋物理过程，一些国家未来的风暴潮模式开始向三维模式发展，如英国气象局将在NEMO三维海洋环流模式基础上发展业务风暴潮模式系统^[95]。但是三维风暴潮模式需要非常多的计算资源，而且目前大范围三维风暴潮模式不是主流，三维模式更多可能用于特殊区域敏感性试验。

3.3 风暴潮模式发展的新趋势

近年来，无结构网格点风暴潮模式得到越来越广泛的应用，如FVCOM、ADCIRC、SELFE (Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Element model)、Delft3D-FLOW等。商业模式像MIKE (DHI公司)、Tuflow (BMT-WBM公司) 广泛应用于水文和海洋环境领域。这些无结构网格点的优点是具有灵活的网格分辨率，在浅的海岸带采用细网格，在海水深的地带采用粗网格，非常适用于沿海岸带风暴潮数值模拟和预报。随着计算机运算能力的提高，模式细网格分辨率已经达到几百米，可以详细地模拟海水漫滩的过程。

风暴潮—潮汐—海浪耦合模式系统是近年来业务风暴潮模式系统发展的又一个新趋势。单独的风暴潮模式预报结果具有很多的不确定性，这些不确定性包括多种因素，如风和气压等大气强迫不确定性，以及潮汐、近岸浪的爬升和增水、海底摩擦、潮流等海洋物理过程的不确定性。因此越来越多的业务系

统与大气高分辨率模式耦合，获得比较好的风场和气压场。同时，单独的风暴潮模式开始与潮汐、海浪模式耦合，如Qi等^[96]利用FVCOM和近岸海浪模式SWAVE发展了耦合模式系统，Roland等^[97]利用海洋环流模式SELFE和海浪模式耦合，Dietrich等^[98]利用海洋环流模式ADCIRC和海浪模式SWAN发展了耦合系统模拟飓风风暴潮，Westhuysen等^[99]利用海洋环流模式ADCIRC分别和海浪模式SWAN、WAM耦合，这些模式的模拟结果显示耦合系统可以给出合理的风暴潮和海浪预报，而且高分辨率模式还可以模拟出波增水这种小尺度现象。Forbes等^[100]的研究给出在NHC (National Hurricane Center) 实施的风暴潮漫滩模式SLOSH和海浪模式SWAN耦合模式检验结果，发现海浪在模式中对风暴潮预报的作用非常明显。Yoon等^[101]基于FVCOM和海浪模式耦合试验结果显示，当风暴潮模式和海浪模式耦合后，风暴潮模拟结果得到明显改善，同时指出，近岸波浪对于风暴增水极大值最大贡献可以达到18% (表3)，但是对于海浪有效波高影响不明显。

表3 考虑陆地摩擦耗散 (SOL) 和考虑陆地摩擦耗散与海浪耦合 (SWL) 模拟的最大风暴潮及观测最大风暴潮^[101]
Table 3 The maximum surge heights of the simulations from SOL and SWL experiment and of the observed (SOL: storm surge simulation using wind stress including land dissipation effects; SWL: coupled storm surge and wave simulation using wind stress including land dissipation effects)

站名	观测最大风暴潮 (cm)	模拟最大风暴潮 (cm)		海浪对风暴潮影响 (cm)
		SOL	SWL	SWL-SOL
Goheung	63.9	37.0	48.6	11.6 (18.2%)
Gwangyang	100.5	69.6	68.4	-1.2 (-1.2%)
Yeosu	73.7	72.9	73.4	0.5 (0.7%)
Tongyeong	87.7	77.8	80.1	2.3 (2.6%)
Masan	106.1	116.1	113.2	-2.9 (-2.7%)
Geoje	66.7	54.2	52.5	-1.7 (-2.5%)
Gadeok	65.0	53.1	58.3	5.2 (8.0%)
Busan	59.7	48.3	59.5	11.2 (18.0%)

随着WMO推动风暴潮观测网络的不断建设和完善，风暴潮测站资料和卫星探测水位资料同化技术研究工作在各国陆续开展，目前采用的同化有最优插值、变分同化等方法。Huang等^[102]利用变分同化方法将上海黄浦测站的合成潮位资料在FVCOM中同化，模拟预报的台风0515号风暴潮改进了27.9%~61.9%。Zheng等^[103]采用自由伴随四维变分同化方法，同化了潮位资料，比较好地模拟出德国北海风暴潮。Kristine等^[104]首先将潮位计数据和卫星高度计近岸海平面观测

数据合并,再采用集合最优插值方法同化合并的海平面数据,利用潮位计独立样本检验,发现2年的模拟试验的海平面均方根误差减少了7%~43%,相关系数改进1%~23%,意味着通过同化可以改进风暴潮的预报。综上所述,海平面实际观测资料的同化可以有效地改善风暴潮模式的初值条件,减少初值不确定性对风暴潮预报结果的影响。

4 未来展望

1) 无论是海洋环流模式、海浪模式还是风暴潮模式,高分辨率模式是未来海洋模式发展的主流。全球海洋环流模式已经发展到了(1/12)°,达到海洋中尺度涡可分辨尺度,区域海洋环流模式分辨率更高。全球海浪模式分辨率达到0.1°,区域海浪模式分辨率各国不一致,大多小于10 km,近岸海浪模式最高分辨率达到200 m(如法国气象局近岸海浪模式)。风暴潮模式预报达到几百米。

2) 海底高度分布不均一及岸界不规则等复杂地形对海洋环境要素影响明显,模式坐标系及网格点的选取直接影响了对海洋物理过程描述的程度,从而影响了海洋环境的数值模拟和预报。未来海洋环流模式垂向坐标倾向于利用混合坐标,这样可以发挥不同坐标系优点。在水平方向上,无论海洋环流模式、海浪模式还是风暴潮模式,为了利于处理海岸线不规则给计算带来的误差,在近岸地区,越来越多的数值模拟和业务预报采用无结构网格点模式。

3) 近岸区域海浪的中小尺度过程如波浪爬升和增水等,对风暴潮影响非常明显,采用耦合的风暴潮—潮汐—海浪耦合模式系统预报沿岸水位变化和漫滩是业务风暴潮数值模式现在的发展趋势,甚至大气—海洋环流—潮汐—海浪全耦合模式系统预报近岸海洋环境将可能是业务预报中心解决近岸海洋环境预报的发展方向。

4) 随着海洋各类观测资料不断增多,资料同化各种方法如变分同化、集合最优插值、KF等,海洋资料如海表温度、海面高度、海浪、潮位等在同化分析中得到应用,海洋资料同化技术发展也是将来海洋模式发展的重要方向。

参考文献

[1] 赵艳玲,张铭,司广宇.海洋环流模式研究回顾与展望.解放军理工大学学报(自然科学版),2006,7(3):281-290.
[2] 方长芳,张翔,尹建平.21世纪初海洋预报系统发展现状和趋势,2013,30(4):93-102.
[3] 王辉,万莉颖,秦英豪,等.中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应用.地球科学进展,2016,31(10):1090-1104.
[4] 闻斌,刘俊.海浪数值模式研究回顾与进展.海洋预报,2006,23(4):76-81.
[5] 尹尽勇,徐晶,曹越男,等.我国海洋气象预报业务现状与发展.气

象科技进展,2012,2(6):17-26.
[6] 黄彬,阎丽凤,杨超,等.我国海洋气象数值预报业务发展与思考.气象科技进展,2014,4(3):57-61.
[7] 钱永甫,王谦谦,朱伯承.海底地形对南海海流、海面高度和海温影响的数值试验.热带气象学报,1999,15(4):289-296.
[8] Jacobs G A, Hur H B, Riedlinger S K. Yellow and East China Seas response to winds and currents. J Geophys Res, 2000, 105(C9): 947-968.
[9] 张静,孙省利,林建国,等.深圳湾海域环境容量及污染总量控制研究——I.潮汐、潮流数值模拟.海洋通报,2010,29(1):22-28.
[10] Niwa Y, Hibiya T. Numerical study of the spatial distribution of the M2 internal tide in the Pacific Ocean. J Geophys Res, 2001, 106(C10): 441-449.
[11] 李永平,于润玲,郑运霞.一个中国沿岸台风风暴潮数值预报系统的建立与应用.气象学报,2009,67(5):884-891.
[12] Harms I H. Water mass transformation in the Barents Sea-application of the Hamburg shelf ocean model (HamSOM). ICES J Marine Science, 1997, 54(3): 351-365.
[13] Vander M J, Gerrits J, De Swart H E. Modelling the morphodynamics of a tidal shelf sea. Continental Shelf Research, 2004, 24(4): 483-507.
[14] Lim H S, Kim C S, Park K S, et al. Down-scaled regional ocean modeling system (ROMS) for high-resolution coastal hydrodynamics in Korea. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(9): 50-61.
[15] Powell B S, Moore A M, Arango H G, et al. Near real-time ocean circulation assimilation and prediction in the Intra-Americas Sea with ROMS. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2009, 48(1): 46-68.
[16] Fan W, Song J, Li S. A numerical study on seasonal variations of the thermocline in the South China Sea based on the ROMS. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(7): 56-64.
[17] 王晓红,俞志明,樊伟,等.基于水动力ROMS与BOX耦合模型的长江口及邻近水域水通量及水体交换特性.海洋与湖泊,2015,46(1):118-132.
[18] Chen C, Gao G, Qi J, et al. A new high-resolution unstructured grid finite volume Arctic Ocean model (AO-FVCOM): an application for tidal studies. J Geophys Res Ocea, 2009, 114(C8): 1-20.
[19] 林作梁,朱学明,鲍献文,等.基于FVCOM的泉州湾海域三维潮汐与潮流数值模拟.海洋学报,2013,35(1):15-24.
[20] 赵晓东,王亮,沈永明.基于GIS和FVCOM数值模型的近海岸水动力计算——以渤海为例.地理科学进展,2011,30(9):1152-1158.
[21] 王建丰,王玉,王刚.基于FVCOM数值模拟和观察资料的长江淡水转向机制分析.地球科学进展,2012,31(2):194-201.
[22] Wan Z, Wan Z, Ren Z, et al. Application of unstructured grid finite-volume coastal ocean model (FVCOM) to the Yangtze River hypoxic zone. Internat J Numerical Meth Heat & Fluid Flow, 2016, 26(8): 2410-2418.
[23] Yoon J J, Shim J S. Numerical experiments of storm surge and coastal inundation by unstructured grid finite volume model FVCOM. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 2013, 13(5): 337-346.
[24] Mellor GL. Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Princeton: Princeton University, 2002.
[25] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
[26] Backhaus J O. A three-dimensional model for the simulation of Shelf Sea dynamics. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 1985, 38: 165-187.
[27] Chen C, Liu H, Robert C B. An unstructured grid finite-volume three-dimensional primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. J Atmos Ocea Tech, 2003, 20(1): 159-186.
[28] Chen C, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-

- volume coastal ocean model: FVCOM. *Oceanography*, 2006, 19(1): 78-89.
- [29] 李荣凤, 游小宝. 海洋环流模式的发展和应用 II. 近海和区域环流模式. *大气科学*, 2003, 27(4): 729-737.
- [30] Griffies S M. Elements of the Modular Ocean Model (MOM). Princeton: NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 2012.
- [31] Madec G, Delecluse P, Imbard M, et al. OPA 8.1 Ocean General Circulation Model Reference Manual. Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, 1998.
- [32] Bleck R, Halliwell G R, Wallcraft A J, et al. Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) user's manual: details of the numerical code. HYCOM Consortium, 2002.
- [33] Storkey D, Blockley E W, Fuener R, et al. Forecasting the ocean state using NEMO: the new FOAM system. *J Operational Ocean*, 2010, 3(1): 3-15.
- [34] Drévilion M, Bourdallé-Badie R, Derval C, et al. The GODAE/Mercator-Ocean global ocean forecasting system: results, applications and prospects. *J Operational Ocean*, 2008, 1(1): 51-57.
- [35] Kristian M, Magdalena A B, Anthony W. The NEMOVAR ocean data assimilation system as implemented in the ECMWF ocean analysis for System 4. ECMWF, 2012.
- [36] Drillet Y, Lellouche J M, Levier B, et al. Forecasting the mixed layer depth in the north east Atlantic: an ensemble approach, with uncertainties based on data from operational oceanic systems. *Ocean Sci Discuss*, 2004, 11: 1435-1472.
- [37] Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, 2002, 37(4): 55-88.
- [38] Halliwell G R. Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the HYbrid-Coordinate Ocean Model (HYCOM). *Ocean Modelling*, 2004, 7(3): 285-322.
- [39] Chassignet E P, Smith L T, Halliwell G R, et al. North Atlantic simulations with the Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and thermobaricity. *J Phys Oceanogr*, 2003, 33(12): 2504-2526.
- [40] 郑沛楠, 吴德星, 陈学恩, 等. 基于HYCOM的风生大洋环流模拟及季节变化分析. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(1): 7-12.
- [41] Zhang Y, Du Y. Seasonal variability of salinity budget and water exchange in the northern Indian Ocean from HYCOM assimilation. *Chinese J Oceanol Limnol*, 2012, 30(6): 1082-1092.
- [42] Mehra A, Rivin I. A Real Time Ocean Forecast System for the North Atlantic Ocean. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2010, 21(1): 211-228.
- [43] Chassignet E P, Hurlburt H E, Smedstad O M, et al. Ocean prediction with the hybrid coordinate ocean model (HYCOM)// Ocean weather forecasting. Springer Netherlands, 2006: 413-426.
- [44] Metzger E J, Hurlburt H E, Xu X, et al. Simulated and observed circulation in the Indonesian Seas: 1/12 global HYCOM and the INSTANT observations. *Dyna Atmos Oceans*, 2010, 50(2): 275-300.
- [45] 张学洪, 俞永强, 刘海龙. 海洋环流模式的发展和应用 I. 全球海洋环流模式. *大气科学*, 2003, 27(4): 607-617.
- [46] Metzger E J, Smedstad O M, Thoppil P G, et al. US Navy operational global ocean and Arctic ice prediction systems. *Oceanography*, 2014, 27(3): 32-43.
- [47] Blockley E W, Martin M J, McLaren A J, et al. Recent development of the Met Office operational ocean forecasting system: an overview and assessment of the new Global FOAM forecasts. *Geosci Model Dev Discuss*, 2013, 6: 6219-6278.
- [48] Lellouche J M, Le Galloudec O, Drévilion M, et al. Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan. *Ocean Science*, 2013, 9(1): 57-81.
- [49] Zhu X, Wang H, Liu G, et al. Comparison and validation of global and regional ocean forecasting systems for the South China Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(7): 1639-1655.
- [50] Group T W. The WAM model a third generation ocean wave prediction model. *J Phys Oceanogr*, 1988, 18(12): 1775-1810.
- [51] Behrens A. Development of an ensemble prediction system for ocean surface waves in a coastal area. *Ocean Dynamics*, 2015, 65(4): 469-486.
- [52] Aouf L, Lefèvre J M. On the impact of the assimilation of SARAL/AltiKa wave data in the operational wave model MFWAM. *Marine Geodesy*, 2015, 38(sup1): 381-395.
- [53] Bidlot J R. Present status of wave forecasting at ECMWF. ECMWF Workshop on Ocean Waves, June 25-27, 2012.
- [54] Tolman H L. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III TM Version 3.14. MMAB, 2009.
- [55] Tolman H L. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 4.18. MMAB, 2014.
- [56] NWS. NWW3 implementations. NWS, 2012. <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.shtml>
- [57] Saulter A. Assessment of WAM Cycle-4 based source terms for the Met Office global-regional wave modelling system. Forecasting Research Technical Report, 2015.
- [58] Son G, Park J S, Lim B. Validation and sensitivity experiments comparing the physical parameterization of numerical wave model. OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. IEEE, 2015: 1-3.
- [59] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [60] Ueno K, Kohno N. The development of the third generation wave model MRI-III for operational use. Proc 8th Int Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting 2004, G2: 1-7.
- [61] 袁业立, 潘增弟, 华锋, 等. LAGFD-WAM海浪数值模式——I. 基本物理模型. *海洋学报*, 1992, 13(5): 1-7.
- [62] 袁业立, 华锋, 潘增弟, 等. LAGFD-WAM海浪数值模式——II. 区域性特征线嵌入格式及其应用. *海洋学报*, 1992, 13(6): 12-24.
- [63] 杨永增, 乔方利, 赵伟, 等. 球坐标系下MASNUM海浪数值模式的建立及其应用. *海洋学报*, 2005, 26(2): 1-7.
- [64] Haiden T, Janousek M, Bidlot J, et al. Evaluation of ECMWF Forecasts, Including the 2016 Resolution Upgrade. ECMWF, 2016.
- [65] Staneva J, Behrens A, Wahle K. Wave modelling for the German Bight coastal-ocean predicting system. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2015, 633(1): 012117.
- [66] French operational coastal wave forecasting system and application to a wave-current interaction study. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, and 5th Coastal Hazard Symposium. , November 8-13, 2015.
- [67] Saulter A, Bunney C, Li J G. Application of a refined grid global model for operational wave forecasting. Met Office, 2016.
- [68] Bureau National Operations Centre. Operational Upgrade to the AUSWAVE Global Wave Model (AUSWAVE-G). Bureau National Operations Centre, 2016.
- [69] NMOC. Operational Upgrade to the AUSWAVE Regional Wave Model (AUSWAVE-R). NMOC, 2013.
- [70] Japan Meteorological Agency. Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Japan Meteorological Agency, 2013.
- [71] WMO. Guide to Storm Surge Forecasting. WMO, 2011.
- [72] Jarvinen B R, Lawrence M B. An evaluation of the SLOSH storm-surge model. *Bull Amer Meteor Soc*, 1985, 66(11): 1408-1411.
- [73] Stockdon H F, Holman R A, Howd P A, et al. Empirical parameterization of setup, swash, and run up. *Coastal engineering*, 2006, 53(7): 573-588.
- [74] Zachry B C, Booth W J, Rhome J R, et al. A national view of storm surge risk and inundation. *Weather, Climate, and Society*, 2015, 7(2): 109-117.
- [75] Zachry B C, Rhome J. Operational Storm Surge Forecasting at the National Hurricane Center. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting & 5th Coastal Hazard Symposium, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [76] Dube S K, Sinha P C, Roy G D. Numerical simulation of storm surges induced by tropical storms impinging on the Bangladesh coast. *Coastal Engineering Proceedings*, 1984, 1(19): 190-198.

- [77] Dube S K, Sinha P C, Rao A D, et al. Numerical modelling of storm surges in the Arabian Sea. *Applied Mathematical Modelling*, 1985, 9(4): 289-294.
- [78] Dube S K, Jain I, Rao A D. Recent developments in storm surge prediction models for the North Indian Ocean. First JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Seoul, Republic of Korea, October 2-6, 2007.
- [79] Hasegawa H. Development of JMA storm surge model. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [80] Flather R A. Existing operational oceanography. *Coastal Engineering*, 2000, 41(1): 13-40.
- [81] Verlaan M, Zijderfeld A, de Vries H, et al. Operational storm surge forecasting in the Netherlands: developments in the last decade. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 363(1831): 1441-1453.
- [82] Hans de Vries. Probability forecasts for water levels at the coast of the Netherlands. First JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Seoul, Republic of Korea, October 2-6, 2007.
- [83] Flowerdew J, Mylne K, Jones C, et al. Extending the forecast range of the UK storm surge ensemble. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2013, 139(670): 184-197.
- [84] Daniel P, Haie B, Aubail X. Operational forecasting of tropical cyclones storm surges at Meteo-France. *Marine Geodesy*, 2009, 32(2): 233-242.
- [85] Luettich R A, Westerink J J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44 XX. R Luettich, 2004.
- [86] 李雪, 王智峰, 武双全, 等. 近岸浪-风暴潮耦合模型在天津沿海的应用. *海洋通报*, 2016, 34(6): 657-665.
- [87] Xie D M, Zou Q P, Cannon J W. Application of SWAN+ADCIRC to tide-surge and wave simulation in Gulf of Maine during Patriot's Day storm. *Water Science and Engineering*, 2016, 9(1): 33-41.
- [88] 赵长进, 葛建忠, 丁平兴. 长江口及其邻近海区无结构网格风暴潮预报系统的研制与分析. *海洋科学进展*, 2015, 33(2): 182-194.
- [89] Feyen J, Vinogradov S, Asher T, et al. Development of operational storm surge guidance to support total water predictions. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [90] Hydraulics D. Delft3D-FLOW user manual: simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Technical Report, 2014.
- [91] 储麇. Delft3D在天文潮与风暴潮耦合数值模拟中的应用. *海洋预报*, 2004, 21(3): 29-36.
- [92] 俞亮亮, 陈可锋, 陆培东, 等. 海平面上升背景下辐射沙脊风暴潮增水研究. *水利水运工程学报*, 2014, 35(6): 52-57.
- [93] You S H, Lee W J, Moon K S. Comparison of storm surge/tide predictions between a 2-D operational forecast system, the regional tide/storm surge model (RTSM), and the 3-D regional ocean modeling system (ROMS). *Ocean dynamics*, 2010, 60(2): 443-459.
- [94] Zheng L, Weisberg R H, Huang Y, et al. Implications from the comparisons between two-and three-dimensional model simulations of the Hurricane Ike storm surge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(7): 3350-3369.
- [95] Furner R, Williams J, Horsburgh K, et al. Adapting NEMO for use as the UK operational storm surge forecasting model. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [96] Qi J, Chen C, Beardsley R C, et al. An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): implementation, validations and applications. *Ocean Modelling*, 2009, 28(1): 153-166.
- [97] Roland A, Zhang Y J, Wang H V, et al. A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C11): 1-18.
- [98] Dietrich J C, Tanaka S, Westerink J J, et al. Performance of the unstructured-mesh, SWAN+ ADCIRC model in computing hurricane waves and surge. *J Scienti Comput*, 2012, 52(2): 468-497.
- [99] Westhuysen A, Anselmi C, Calzada R, et al. A Wave, Surge and Inundation Modeling Testbed For Puerto Rico and the US Virgin Islands. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [100] Forbes C, Van der Westhuysen A, Mattocks C, et al. Implementation of coupled storm surge plus waves modeling system at National Hurricane Center. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [101] Yoon J J, Jun K C. Coupled storm surge and wave simulations for the Southern Coast of Korea. *Ocean Science Journal*, 2015, 50(1): 9-28.
- [102] Huang S, Xu J, Wang D, et al. Storm surge model based on variational data assimilation method. *Water Science and Engineering*, 2010, 3(2): 166-173.
- [103] Zheng X, Mayerle R, Xing Q, et al. Adjoint free four-dimensional variational data assimilation for a storm surge model of the German North Sea. *Ocean Dynamics*, 2016, 66(8): 1037-1050.
- [104] Madsen K S, Høyer J L, Fu W, et al. Blending of satellite and tide gauge sea level observations and its assimilation in a storm surge model of the North Sea and Baltic Sea. *J Geophys Res: Oceans*, 2015, 120(9): 6405-6418.

海洋与气象防灾减灾体系中社区恢复力的评估与应用

谢立安¹ 管长龙² 谭骏³ 武文²

(1 北卡罗来纳州立大学海洋、大气与地球科学系, 罗利 27695; 2 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100;
3 国家海洋局海洋减灾中心, 北京 100194)

摘要: 自然灾害对于人类所造成的危害和威胁正日益加剧。导致成千上万人死亡以及数万亿美元经济损失的超级灾害频发表明人类面对自然灾害的脆弱性。脆弱性和恢复力是防灾减灾研究中的两个相关的重要概念, 但迄今没有统一的定义。脆弱性是衡量一个系统受灾之后有可能受到的破坏程度, 而恢复力则是衡量一个系统抵御灾害和灾后恢复的能力。受自然灾害影响的系统可分为生态系统、工程系统(房屋设施)和社会系统。对于不同的系统, 恢复力有着不同的具体含义和评估方法。对于一个社区而言, 恢复力包含了抗灾和灾后重建、恢复的能力。恢复力既可以描述一个社区某一时刻的状态, 也可以认为是社区应对自然灾害的一个持续过程, 或者两者兼而有之。不同的定义决定评估方法和评估指标的选择不同。从实用角度讲, 人们更愿意将恢复力看成是一个社区应对自然灾害从灾前防御到灾后重建、应变, 到应对下一次灾害的整个过程。当一个自然灾害发生后, 一个社区应对灾害的脆弱性和恢复力决定是否进一步引发自然灾害以及灾难的程度。在灾害发生以前增强恢复力、降低灾害风险, 以及在灾后反思和改进今后的应对措施, 进一步增强恢复力, 对于社区重建的质量与速度都有着重要意义。

重点评述社区恢复力的评估及其在美国防灾减灾体系中的应用, 并通过飓风安德鲁(Andrew)和卡特里娜(Katrina)个例加以说明。

关键词: 脆弱性, 恢复力, 防灾减灾, 风险管理, 灾害管理

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.003

Community Resilience Assessment with Application to Marine and Meteorological Disaster Mitigation

Xie Lian¹ Guan Changlong² Tan Jun³ Wu Wen²

(1 Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University, Raleigh 27695
2 College of Ocean and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100
3 Marine Disaster Mitigation Center, China National Ocean Administration, Beijing 100194)

Abstract: The explosive growth of economic activities in the coastal zone and human exploration of marine resources led to rapid increases of the exposure of human life and property to the threat of marine disasters. As a result, marine disaster prevention, reduction and mitigation become an increasing challenge facing the human society. A risk is a vulnerable condition which may turn into a disaster. Understanding the vulnerability of a region and building resilience are steps that can be taken to prevent a risk from turning into a disaster or to minimize disaster impact. Risk management becomes disaster management when a disaster is eminent, occurring or has occurred. For an eminent disaster, such as those associated with a landfalling tropical cyclone, disaster management decisions depend on solid information from disaster prediction to social, economic, and geographic conditions. During and shortly after the occurrence of a disaster, search and rescue becomes the core of action, followed by recovery and resilience building measures.

In this article, marine and weather disaster management strategies and methods for vulnerability analysis and resilience building are discussed by using past cases as illustrations.

Keywords: risk management, hazard, marine disaster, vulnerability, resilience

收稿日期: 2017年3月23日; 修回日期: 2017年7月4日
第一作者: 谢立安(1961—), Email: lian.xie@yahoo.com
资助信息: 国家海洋局海洋减灾中心项目; 国家重点研发计划项目(2016YFC140140005)

0 引言

联合国世界气象组织(WMO)的调查报告显示^[1], 由于人口在海洋与气象灾害频发的沿海地区高速增长, 海洋与气象灾害对于人类生命财产与生态系统所造成的危害和威胁正在日益加剧。据统计,

2000—2012年各种海洋与气象灾害影响了超过27亿人口，死于灾害的人数超过110万，经济损失超过13000亿美元。根据国际政府间气候变化专门委员会（IPCC）的报告^[2]，由于气候变暖，极端天气灾害将更为频繁。人类将无法避免地面临更频繁的海洋与气象灾害。

当自然灾害发生后，是由社会的脆弱性和恢复力强弱决定是否进一步引发自然灾害、受灾程度及灾后重建的速度。无防御的灾害过程将破坏包括救灾体系在内的社会经济体系，从而削弱应对灾害的能力，使灾害持续发展，恢复过程缓慢，导致恶性循环；而主动的防灾减灾措施可以增强受灾社会体系的抗灾能力和恢复力，减少灾害损失，加速恢复过程。因此在灾害发生以前增强恢复力、降低灾害风险，对于社区的重建质量与恢复速度都有着直接作用。例如在2016年全球由于自然灾害所导致的经济损失就高达2098.6亿美元（<http://catastropheinsight.aonbenfield.com>），超过了全球GDP的2%，严重地消耗了社会可用于灾后重建的社会资源和个人资源，也减缓了社会经济的发展。全球范围内居高不下的灾害死亡率以及财产损失表明人类应对自然灾害的能力还不足，十分有必要采取有效的防灾减灾措施增强社区的恢复力来避免或降低损失。

防灾减灾是个复杂的系统工程，牵涉到灾前防御措施、灾害过程中的紧急应对措施和灾后恢复重建过程^[3-9]。本文旨在评述社区恢复力的评估及其在美国防灾减灾体系中的应用。文章重点介绍社区恢复力的概念，分析方法与计算模型，并通过安德鲁飓风和卡特里娜飓风个例加以说明。

1 恢复力的概念与评估

1.1 恢复力（Resilience）的概念

脆弱性和恢复力是防灾减灾研究中的两个相关的重要概念，但迄今在不同的应用领域这两个概念的定义仍存在极大的差异^[10-11]。比如，IPCC于2007年给出的脆弱性定义是衡量一个系统受气候变化和极端天气现象影响之后有可能受到的破坏程度^[12]。该定义显然将脆弱性与灾害现象本身相联系。IPCC在2012年对脆弱性进行了重新定义，强调了受灾系统本身抵御自然灾害能力的不足，不再与灾害现象本身的强弱挂钩^[13]。恢复力则是衡量一个系统能够抵御灾害和灾后恢复的能力。同样，恢复力在不同的领域有着不同的具体含义。对于一个社区，恢复力则包含了人与自然非线性相互作用状态下的抗灾能力和灾后重建、恢复的能力。

尽管恢复力的概念被广泛地使用，但是对它的理解仍存在一定的不足。例如如何定义并发展那些可以精确地测量恢复力的指标，恢复力的区划图如何定量绘制，又应该使用什么单位来量化恢复力等。只有恢复力的概念框架内包含的各类指标能够明确描述并定量测算，恢复力对于防灾减灾决策才是有益的。

在过去的10年中，已经有许多作者强调需要对调查研究和防灾减灾对策制定中使用的恢复力的概念进行调整^[5-6]。恢复力这一术语曾被描述为“bouncing back”（反弹）的能力，它来自于拉丁词根“resilere”，表示弹跳回来的意思。目前各文献中一致认为恢复力的概念发源于40年前的生态学领域。Holling首先在生态学领域使用并定义恢复力^[14]。Holling定义生态系统中的恢复力为：一个生态系统对于吸收灾害影响并仍然保持其功能的能力的程度。同时他还定义了稳定性（stability）：一个系统在受到短暂的扰动后，回到平均状态的能力。一个系统越是能快速回到平均状态，这个系统就越是稳定。随后他将恢复力和稳定性进行了比较：恢复力和稳定性是一个生态系统两个不同的重要的性质。一个系统可以具有很大的恢复力但却波动得很剧烈，也就是具有较低的稳定性。在Holling的工作之后，涌现出了很多恢复力生态学上的定义。20年后，Holling又重新审视了他的定义，并提出恢复力是受灾系统对灾害影响的缓冲能力或是系统吸收由灾害导致的系统扰动（比如灾害）的能力，亦或是多少量级的扰动可以在一个系统改变自身变量和结构之前被吸收。

总而言之，所有生态学定义都在强调系统不发生改变时可以吸收的扰动量。很明显可以看出当时人们更多地关注系统对扰动的响应以及压力的抵抗能力和恢复到平衡点的速度。尽管在社会系统和生态系统之间存在着明显的行为和结构不同，生态学理论中的恢复力概念还是可以扩展到社会系统。这意味着一个有恢复力（弹力）的社会系统应该能够吸收灾害冲击并且重建，以保证社区保持受灾之前的功能状态。有着高恢复力（弹力）的社会系统应该能够重新调整自身，在初级生产力和经济繁荣等重要功能方面没有明显的衰退。

目前恢复力的概念得到越来越多的关注和认可，并在防灾减灾中广泛使用。在人与自然存在复杂关联的系统灾害管理中，恢复力的重要性日益显著。Timmerman定义恢复力为一个系统或部分系统在灾害事件中吸收灾害影响并重建的能力^[15]。随着Timmerman的工作，越来越多灾害领域的恢复力定义

出现。尽管有了许多定义，但在理论研究和实践者之间却没有一致的概念。McEntire 等认为之所以无法形成一致的普遍适用的概念是因为在不同的社会体系与制度下，不同个人、组群、社区各自拥有着不同程度的恢复力和决定恢复力的要素^[6]。同时，在研究缓慢变化的气候变化问题时人们采用的恢复力概念也往往与研究剧烈的灾害问题时不同。

如图 1 所示，恢复力的概念与脆弱性（vulnerability）和应变力（adaptive capability）在不同的研究中存在差异和相似^[6]。在气候变化研究领域，人们更侧重脆弱性的研究，并将应变力和恢复力作为脆弱性的一部分。Adger^[17]和Birkman^[11]等将恢复力视为应变力的一部分（图1a），另一些人则会将应变力作为确定脆弱性的重要部分（图1b）^[18-19]；Gallopin^[20]和Turner等^[21]则将应变力嵌套在恢复力之中，并将后者嵌套在脆弱性之中（图1c）。在灾害研究领域，人们更重视恢复力的研究，并将灾前防御，灾期的救援和灾后重建等一系列防灾减灾措施作为增强恢复力的重要组成部分。Manyena^[10]将恢复力可以作为防灾减灾措施的结果，因而可视为减少脆弱性的途径（图1d）；更多学者将恢复力视为动态的过程，其中包含了系统对灾害的应变力建设（图1e）。Cutter等^[6]则将恢复力与脆弱性定义为两个部分重叠的独立概念（图1f）。

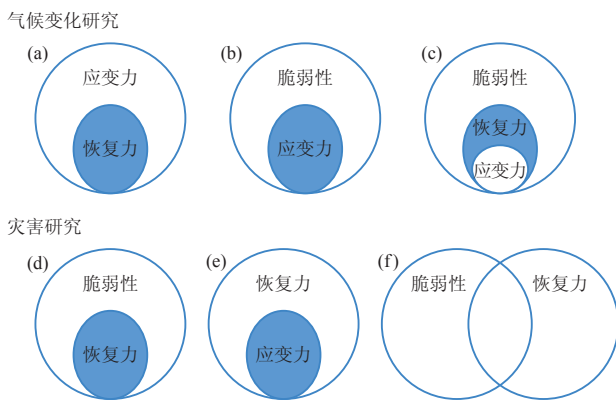


图1 恢复力的定义及其与脆弱性和应变力的关系(a—f)
(根据文献[6]绘制)

Fig. 1 The definition of resilience and relationships to vulnerability and adaptive capability (a—f)^[6]

综观各领域对恢复力的研究，一些作者采用了生态学的观点，并将他们的定义聚焦在一个系统的观点：一个系统的功能性与它自身的重建能力。Pendall 等指出一个系统具有内部和外部两种因素，都可以起到加强系统防灾减灾功能的作用^[22]。众多定义倾向于关注内部因素的改善，从而来加强系统的抗灾功能。此外，采用生态学观点的学者将灾害的恢复力作为一

个过程，而非一种结果或产物。这种观点的优点是，在灾难发生时，它可以对社区的重建过程起到促进作用。也有一些定义采取更长期的动态观点。例如有不少学者将灾害恢复力认为是灾后一个长期重建的过程，即恢复力可以通过其恢复到灾前状态所花费的时间来进行测量。在这种观点下，一个具有恢复力的社区应该能够快速恢复到之前的社会经济发展轨道。

有一些学者将应变力的概念放入在他们的定义中。当在恢复力定义中，应变力的概念起主要作用时，它将更多地考虑受灾和重建过程，这对政策有着重要的影响。这意味着社会系统可以自我重建，来维持基础的结构，并处理包括应对和应变的过程。因此这些学者们认为应变力的概念是合适的，因为它将通过学习与处理来增加社会的抗灾能力。

还有一些学者将灾害恢复力的概念与可持续性的概念联系起来。可持续性是指长期存在且不降低生活的质量。可持续性的一个重要特征就是高度依赖于自然资源。可持续性的观点也是合适的，因为它促进社区资源的可持续性使用。

在某些情况下，恢复力被理解成脆弱性的对立面。这意味着哪里的脆弱性高，哪里的恢复力就低，反之亦然。Klein等提出，按这种方法定义恢复力所引起的难题是它自身将进入一种循环论证中，社区容易受到伤害是因为它没有恢复力，它之所以没有恢复力是因为它易受伤害。这样概念化恢复力无法增加我们对恢复力的理解，因此是不恰当的^[23]。

由于灾害恢复力定义种类繁多并且被许多学科所共享，要有一个统一的定义非常困难。Cutter查阅了美国使用的评估恢复力的各种方法，认为至少有27种^[3]。Sharifi则发现在国际上至少有36种分析和评估社区恢复力的方法^[9]。这些方法从恢复力的定量表达方式可以分为三类：1) 指数法；2) 评分法；3) 工具（包括模型）法。因此在评估恢复力时，在不同的区域内、不同的条件下，需要根据当地的社会结构和灾害管理系统的特征形成一个最适合的定义，选择合适的特征指标来进行评估。

1.2 海岸地带社区恢复力

本节的内容主要取自Lam等的研究^[24]。海岸地区在百年以来已经成为人类发展的中心。海岸，特别是河流三角洲，为建筑、商业、渔业、水产养殖业、农业、林业提供了大量发展机会，还为物流提供了便利。世界人口的40%居住在海岸向内陆100 km的区域，而住在低海拔处的居民更占了世界人口的10%。

20世纪以来，从农村向城镇迁移的人口不断增

加，以2008年为例，美国有20个大城市，城镇区域人口超过1000万，而这20个城市中有14个位于海岸地带。根据USACE（美国规模最大、历史最悠久的水资源管理部门，The US Army Corps of Engineers）统计，到2010年，已经有超过50%的美国人口（1.64亿）居住在沿海地带；此外每年有1.8亿的人来旅游。全球GDP的944万亿美元来自于海平面至1 m海拔地区，1802万亿来自于其余平均海拔5 m的地区。在美国，2000年GDP的约75%来自于沿海地区；沿海州GDP的约50%来自于沿海郡；2004年，所有海岸线邻近郡的GDP为4.68万亿，美国国家海洋经济GDP为1383亿（www.oceaneconomics.org）。沿海地区经济和海洋经济对国家经济而言十分重要，而且占的比重相当大。

沿海地区经济大多是由于连接开阔水域以及商业贸易机会。然而与开阔海域相连，同样也会把社区、资源等暴露在海岸灾害中，例如风暴、洪水、飓风、海啸以及海水侵蚀。灾害事件可以造成人员损伤，摧毁建筑、商业、工业、损坏道路、社区服务，给人类带来极大威胁，但它又是海岸地区正常自然过程的一个部分：温和的海浪构建了沙滩、与海岸进行能量交换、营养物质交换；但强劲的海浪则会侵蚀沙滩、冲刷房屋地基、淹没桥梁与道路、摧毁建筑。

各类飓风、台风、洪水、冬季风暴和厄尔尼诺现象都可被看作是海岸带灾害。这使人们越来越关心海岸带地区灾害，以及如何建设海岸地区才能将未来的灾害最小化。灾害恢复力的概念得到越来越多的认可与使用。社区为人民提供了一系列服务，从供水、废物处理到民防、教育、路面清洁、土地使用规划、环境保护等。在海岸地区，社区还要承担防洪、沙滩保护、近岸水资源等服务。对于海岸地带社区，其恢复力可以从以下6个方面进行测量评估：交通、电力、

水资源、通信、紧急疏散和建筑。

1.3 社区灾害恢复力分析框架

由于人类、社区、社会和自然界存在相互作用，评估社区恢复力是一个复杂的过程。目前存在许多的概念框架用以测量恢复力。如果把恢复力当成一个过程，大多数学者认为恢复力应包括准备（prepare），抵御（resist），重建（recover），应变（adapt）4个阶段。

图2a将恢复力描述成在扰动的作用下，这4个关键过程的循环。准备环节是自然的过程或者是人为活动，是系统为应对下一次扰动所进行的准备。准备工作包括对社区成员的灾害教育、完善基础设施、增加森林或者湿地、维护防洪设施等；抵抗环节是抵抗并吸收扰动，以及维持一定程度的功能性的能力。在这里功能性是指由系统提供的服务，类似于栖息地、疏散路线、遏制洪水和波强度的减小等；如果功能性在一个扰动中有所下降，那么系统就会有重建的过程。如果时间足够长，重建可以是自然的过程，而人为干涉会加快恢复的过程；循环的最后一步即是应变，系统将会在下一轮的扰动中有更强的抵抗力以及更快的恢复力。图2b描绘了恢复力概念随时间的一个演化。应变是一个很关键的过程，它使得在面对同样程度的灾害时，系统能有更强的抵抗力和更快的重建过程。对于系统的长期进化，像海平面的改变或者风暴频率、强度的增加，调整的程度将会随着时间变化。

其他许多研究将脆弱性和恢复力的概念联系在一起，一些认为脆弱性延伸的定义中包含着恢复力，而有的认为脆弱性是恢复性的一部分。美国国家研究委员会（National Research Council, NRC）报告中认为恢复力是由脆弱性和应变力共同组成的^[26]。其框架如图3所示。

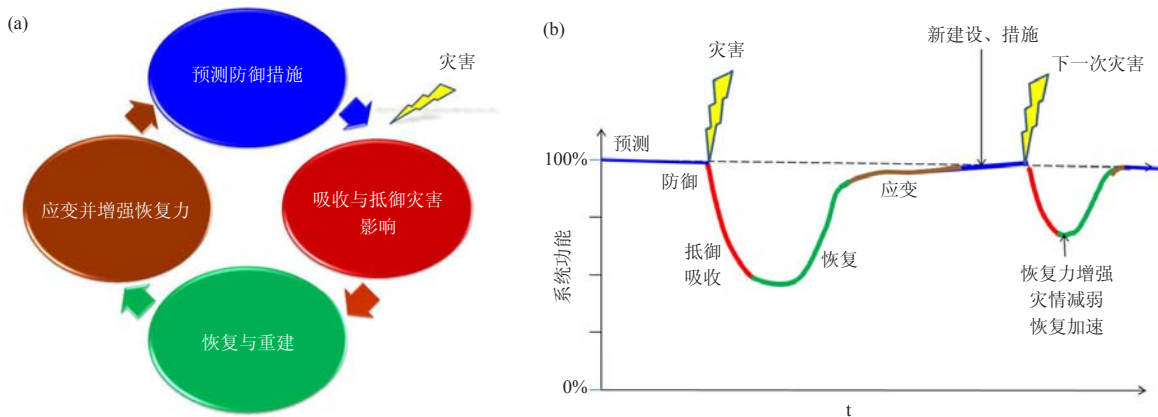
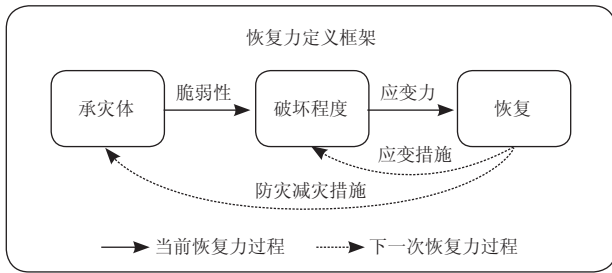


图2 恢复力4个阶段 (a) 以及恢复力概念随时间的一个演化示意图 (b) (根据文献[25]绘制)
Fig. 2 Sketch maps of the 4 stages of resilience (a) and evolution of resilience with time^[25]

图3 NRC恢复力框架示意图^[26]Fig.3 Sketch map of the NRC resilience^[26]

总的来说,大多数框架都以类似的方法对灾害恢复力进行概念化,即都主要关注能够减小脆弱性、增加社区恢复力的因素,包括经济资源、设备与技能、信息与知识、网络支持等。但大部分的框架存在的问题是,往往只关注灾害恢复力的某些或者某一个维度,并没有采用更加广泛的观点。因此构建有效的、全面的、合理的恢复力框架对于恢复力的定义、恢复力的评估测量是一个重大挑战。

1.4 数据的获取以及处理

在确定恢复力的框架后,即可确定恢复力的指标,不同的框架所确定的指标当然是大相径庭的。像对于海岸地带社区的恢复力,指标包括交通、水利、沟通交流、建筑、电力、紧急疏散等几个方面。而在每个指标下,又可以根据当地的特征、实际情况,细分出更多的组成部分(elements)。

一般通过问卷调查或者实地考察获得相关数据,也可从历史资料中进行分析。问卷调查方法简单、成本低、范围广,被各个组织广泛使用,但是也存在缺陷。首先问卷调查存在很大的主观性,没有人能完全客观地回答问题,而更没法保证答案的真实性,不排除被调查者随意作答的情形。实地考察中会有相关专家参与,专业的知识背景使得客观性增强,数据更为精确;但其对人力、财力的需求很大,同时在现实中我们无法对所有地方进行实地调查,对于时间的耗费过大。从历史资料中分析不失为一种简便、客观的方法,但由于随着全球变暖、海平面上升等气候变化,历史的资料未必能反映出未来灾害的模式。

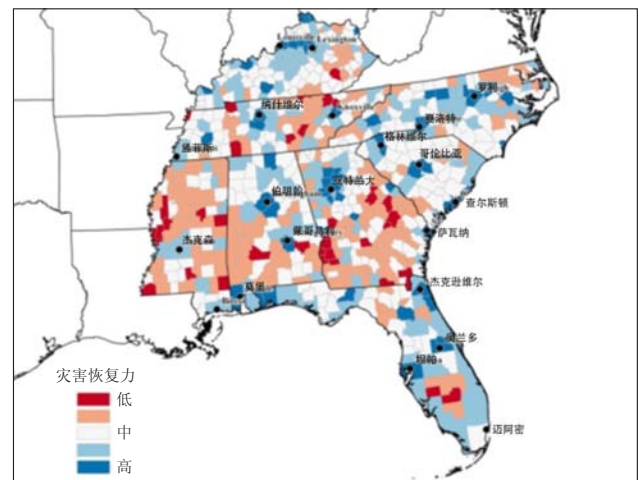
在搜集各类数据后,由于各个因素之间有着不同的尺度、不同的单位,且相互之间还可能存在着相互作用,如何进行汇总、如何将各因素合成一个指标是一个巨大挑战。通常将所有因素的单位都转换成百分比、人均或者无因次量,使得不同因素也可以进行比较或者计算。根据大量研究^[6, 8, 24-25, 27],可以归总为两大类方法。

1) 权重法。根据指标中各因素对指标影响的大

小,进行排序,留下重要因素,舍去次要因素,既可以使得数据处理变得简便,又保证了指标的科学性。根据确定因素权重方法的不同,又可以分成两种方法:主观法、客观法。主观法在筛选因素重要性时,是根据目前研究所达成的一致观点进行排序。此方法与现实能有较好的一致性,但却有着较大的人为主观因素,是人类根据自己的认识、理解,进行权重的分配;而客观法是通过数学方法来研究各因素与指标之间的相互关系,例如计算相关系数、回归分析等。根据数学计算进行权重排序,毋庸置疑排除了人的主观因素,但是却有可能引起偏差:可能存在着与指标的相关系数很大的因素,但现实中可能与指标并无对应关系。若是引入这样的因素,最后得到的恢复力指数不一定能反映真实情况。

2) 无权重法。一些学者认为由于自然界和社会系统存在着复杂的相互关系,并没有明确的证据可以说明哪些因素更为重要,因此认为各因素无权重。统一进行标准化,将每一个指标都转化成范围在0~1的数字,之后再相加。无权重法考虑了所有因素的影响,相比权重法更为全面,但可能存在着某些因素的影响被弱化或者被强化的可能。

在各个指标都计算完成并且标准化后,将其相加便可得到恢复力的指数(resilience index)。根据恢复力指数我们便可以将直观地看到各地区应对灾害的能力(图4)。也可以再进一步分析社会、经济、基础设施、政府资源、民间资源等分别对恢复力的贡献。通过各地区之间各因素的贡献对比,得知哪些地方、哪些方面不足,有待提高;哪些地方、哪些方面做得优秀,值得提倡。为日后灾害做好更充足的准备。

图4 美国东南地区社区恢复力分布(深蓝表示强恢复力,深红表示弱恢复力)^[6]Fig.4 Map of community resilience in the East South of USA (blue denote strong, red indicate weak one)^[6]

2 美国防灾减灾机构

美国灾情调查及防灾减灾主要由各级政府应急管理机构和 社会救灾机构共同承担。联邦政府由联邦应急管理局 (Federal Emergency Management Agency, FEMA) 牵头, 联合其他联邦政府部门 (交通部、中小企业局、美国陆军工程兵、国家海洋与大气管理局、国防部等) 及各级地方政府应急管理部门负责组织协调灾情应急管理^[28, 32]。非政府机构, 包括红十字会、教会、学校、医院等也都在政府应急管理部门指导下参与防灾减灾与救灾工作。本节重点介绍 FEMA 的功能。

为了更好地应对灾害, FEMA 需要做好以下几件事: 1) 增强州政府和当地政府应对灾害的能力; 2) 与其余 26 个为应对灾害提供资源的联邦机构相协调; 3) 直接给予灾害重建的居民援助; 4) 对州政府和当地政府授权财政援助; 5) 领导发放津贴、洪涝区域的管理以及其他能够减轻损害的活动。

大多数人了解 FEMA 是因为它有应对灾害并援助受灾人群的职能。FEMA 另一个重要贡献就是在灾后对于建筑物性能的研究, 从而更好地了解自然事件和人为事件是如何影响建筑环境的。这些研究出于减少灾害死亡数并且减少灾害对当地经济冲击的目的, 而且有助于在灾后重建对灾害有抵抗力的新建筑。

从 1980 年中期开始, FEMA 就派遣灾害减缓评定组 (Mitigation Assessment Team, MAT) 前往总统宣布的灾害区域去评估建筑性能。MAT 研究现行建筑标准的妥善性、其他施工要求, 以及建筑方法与材料。基于受灾地区灾害的潜在类型与严重程度事前资料和预期危险的量级, FEMA 确定潜在需要并派遣一个或者几个 MAT 去观测并评估对于建筑物的损害, 例如由风、降水、洪涝引起的损害。只有当 FEMA 认为来自于现场观测的发现与建议能够提供设计与施工指导, 不仅可以提高受影响州或地区建筑环境的灾害抵抗力, 对于所有灾害易发生区域还有着重大意义时, 才会派出 MAT 去评估。

然而飓风安德鲁和伊尼基带来的巨大损失, 以及之前的飓风雨果、洛马普列塔地震, 使 FEMA 受到了强烈的批评。FEMA 对于飓风安德鲁的应对措施使公众怀疑 FEMA 是否有能力应对巨大灾难, 是否从之前应对飓风雨果和洛马普列塔地震中吸取了教训。

应对严峻灾害的联邦战略之所以不充分, 是由于应对计划不能全面地评估灾害以及灾民的需要; 并且当灾民对于食物、避难所等基础服务的需求超过州或当地的资源时, 计划缺乏相应应对机制。此外包

含了 26 个不同联邦机构的联邦战略在发出灾难的提前预警时无法做出充足准备, 原因是准备活动只有在总统发布灾害宣布后才被明确授权。为了进一步提高 FEMA 应对灾害的能力, 认为 FEMA 需要一个专门的灾难单位, 其主要任务就是为巨大灾难做出计划并应对灾难。这个单位的任务可以是双重的: 首先当发出灾害预警或者灾害一发生时, 需要承担像是估计损害范围、救济需要这样的职责, 使得关键决策者能够有充足的信息来请求和指挥联邦援助; 其次在没有积极从事灾害应对时, 该单位需要对各种各样的巨大灾害持续的制定计划、预报灾害效应。该单位应该包含 FEMA 的核心员工以及其他参与的联邦机构员工。在日常准备工作和实际灾害过程中, 该灾害单位应当与白宫灾害管理办公室紧密联系。

对于强度不是很大的灾害, 红十字会以及众多的志愿者或许可以很好地提供大量服务并且协调其他联邦机构, 就像应对路易斯安那州的飓风安德鲁灾害。在南佛罗里达, 依旧响应飓风安德鲁受灾民众的需要, 为那些从南佛罗里达撤离的人提供庇护, 在灾害后提供庞大的服务。然而在南佛罗里达, 对于这样大量级的灾害, 在直接需求和可以调动的志愿者资源中间存在巨大缺口是不可避免的。对于这样的灾害, 美国国防部 (DOD) 是唯一有能力提供运输和分发充足必需品的部门。

DOD 拥有经过训练的医药、工程人员, 可移动的医疗单位, 食物仓库, 临时庇护所, 意外事故技巧以及指挥能力等。灾难救济活动可以反映出 DOD 战时支持任务: 士兵有着类似的训练经历, 而灾难救济又为士兵提供了额外的训练机会。巨大灾难响应, 类似于飓风安德鲁, 要比军事作战的强度小许多, 因此从短期而言并不会明显影响 DOD 的军队状态。由此可见, DOD 在灾害响应中扮演着非常重要的角色。但是并不提倡将全部的灾害应对、救济、重建工作交给军队。DOD 的首要任务是保卫国家安全, 专职应对灾害必然会妨害到首要任务; 其次如果将防灾减灾工作一味地交由军队处理, 那么军队就有可能插手或者管理国内政策, 这与美国军队不干预内政的指导原则是背离的。

3 美国灾害评估方法

3.1 灾害预评估

3.1.1 灾害应对计划

联邦紧急应对计划 (The Federal Response Plan) 是 FEMA 所设计的应对所有灾害和紧急事件的蓝图。为了在各类灾害、紧急事件发生时能有效提供联邦援助, 这个计划作为合作协定, 由 26 个联邦机构和美国

红十字会共同签署。随着灾害事件的发生,计划本身也在进行调整。1992年的飓风安德鲁事件第一次全面启动该计划。按照计划,当灾害一发生,红十字会主要承担向民众提供食物与避难所的工作,同时还要协调美国国防部、美国农业部以及其他自发组织的职责安排。

FEMA采取联邦应对计划以及州政府接收维持生命的服务和其他公共服务,都要求地方长官获得总统对于重大灾害或紧急事件出现的宣布。在总统宣布灾害出现后,FEMA才可以补充当地政府的资源,而这应该是灾害发生时所采取的第一响应措施。这样的制度也导致了应对计划实施的不及时、效果不如预期。

3.1.2 计划清单

为了促进有效且合适的应对飓风灾害计划以及实行相关措施,建议紧急灾害管理人员采取一系列计划清单措施,这些详细目录对于灾害管理部门事前安排、采取行动等提供了不可或缺的指导。清单包括:总体计划、疏散、培训、资源、设备和信息交互等方面,各政府或灾害应对组织可以根据清单内容来判断当地应对灾害工作是否到位、是否妥当,进而提高对飓风灾害的抵抗性。

这些清单同时也可以提供对于灾害响应措施始终应该理解的一些定义。虽然这些清单不能包含一切,但他们仍可为灾害的计划、评估提供一个总的框架结构以及相关的知识基础。清单对于经验丰富或是缺乏经验的灾害应对部门处理飓风危险的价值在于,清单上的信息都来自于那些对抗过飓风安德鲁的部门和组织。按照计划清单制定相应防灾减灾、评估灾害的相关活动,准备工作会更加充分,响应措施会更加及时。

3.2 恢复力的量化

正如前面所讨论的,目前研究已经意识到一个国家必须增强应对短期灾害和长期气候演变的恢复力,因此就需要有一种可重复的、合理的、易懂的方法来量化恢复力。目前美国有多达27种方法可用于定性和定量评估恢复力^[3],而国际上更有多达36种方法^[9]。本文着重介绍基于专家启发(expert elicitation, EE)的量化法和从数据中推导(data-driven, DD)方法。DD方法又可以分为根据历史资料进行分析的DD-H法和根据计算进行分析的DD-C法。EE是基于不断发展的科学上的一致结论,它更多地用在当存在大量不确定性的时候。当发生罕见事件时,其数据很难获得,时间、费用花费很大,此时多采用EE方法进行分析。当有各领域专家交流、工作透明度高时,EE确实是

一种有效的方法。基于历史数据和基于模拟数据的DD-H和DD-C方法更加有效、易懂,但是也更加耗费时间;如果是用历史数据进行分析,数据集可能因此受到限制,而且比过去扰动更加强烈的未来的扰动无法被考虑到。

3.2.1 EE 方法的应用

美国国家海洋与大气管理局(NOAA)、路易斯安那州海洋研究管理机构、密西西比-亚拉巴马海洋拨款机构对于墨西哥湾社区开发了一个基于EE方法的自测,用来评估社区在经历灾害后是否可以维持并重建其功能性。这个自测提供了相对的恢复力指数,分为低、中、高三级,依据历史风暴和未来更强的风暴会对社区的功能性造成怎样的影响。进行评估的功能性因素包括:关键基础设施、设备、交通运输。该评估对于发现社区薄弱之处有着重要作用,并能督促社区减小缺陷,使得恢复力提高。这个自测的方法优势在于能够简单的使用,并且已经在墨西哥湾北部的许多社区进行了测试,为测量恢复力提供了一种方法。其缺陷是:这种方法只能针对特定的社区,而对灾害的选取也是基于人的主观认识,获得的数据也是根据专家的一致意见,所有这些都可能会对结果造成偏差。

3.2.2 DD 方法的应用

1) BRIC(The baseline resilience indicator for communities)由Cutter等提出^[5],并在随后进行扩展^[27],提供了一种用DD方法去评估社区内在恢复力的指标,通过一种多层面的方法,将社会、经济、制度、社区、环境、基础设施6个子指标进行平均。该方法要求指标的选择、精准数据的采集、恢复力指数的结构、数据转化以及标准化。最终恢复力指标介于0~1,每一个郡的分数相对于其他区域的分数都有意义。

2) Schultz等将DD方法应用于计算海岸工程恢复力^[29]。对一个完整的海岸系统,考虑每一个成分的功能性能(是否稳健)以及恢复性(是否快速)。这个方法基于概率性的分析(DD-C)或者历史的数据(DD-H)。在他们的分析中,Schultz和其他人意识到工程系统其自身是没有应变能力的,在测试时将其从人类干预中隔绝开,只是唯一一种可能使工程系统产生应变的方法。然而他们还讨论认为这种方法能够被拓展应用到其他一些能够自我构建和应变的领域,包括社区系统、生态系统。计算的方法有着一系列的步骤:①定义一个完成海岸系统中的成分;②建立稳健性和快速性的目标,建立易损性曲线,确定每个成分之间的相关性;③确立在系统遭受一系列扰动时,实现稳健性和快速性的概率。研究者意识到这个方法

的概率性应用非常强，对于计算可能会要求大量的时间。一个非概率性的方法也能够被应用去测量系统的恢复力，即通过分析直接指标（例如在历史灾害发生时或之后的重建阶段，历史事件的数据）或者间接指标。这些非概率方法能够更加简单地运用且容易交流。但只能提供数量有限的历史事件的性能以及恢复力。

3.2.3 USACE 分层结构

美国陆军工程兵团（US Army Corps of Engineers, USACE）根据国会的批准进行了一系列的研究。利益相关者以及合作伙伴会提供一系列可能的备选因素，这些因素都遵循关于选项子集的基础分析。最初结果将会被应用于一个实验性的计划。一旦这个实验性计划表现良好，并且国会批准更进一步的研究，更多细节性的可实行验证的研究将展开。最终根据利益相关者和合作伙伴提供的支持以及实证分析，备选因素将有可能应用于最终的设计与施工中。USACE同样也负责海岸系统的使用和维护，包括沉淀物的疏浚和布置，海岸建筑物和项目的重建。

为了测量海岸地区的恢复力，提出了包含三个测量方法的分层结构。层级1基于Linkov等^[30]的工作，在文献[31]中被提出。其采用EE方法进行恢复力的计算，在确定输入项、优先顺序方面有较大优势。层级2是一种正在发展的评估方法，它基于经验数据、简单模型、社区评估（由层级1提供）、现场数据，因此是DD-C或者DD-H方法。若是考虑到未来的情形，可将EE方法用于对假设强迫条件的外推。基于层级1所提供的社区评估结果，层级2将被应用于可行性层级的评估，来量化系统尺度的恢复力，这与实验性计划和所有校正相关联。层级3是利用了基于Schultz等提出的概率性分析方法的一个严格评估^[29]。它对于可行性的研究、操作、工程设计是恰当的。

Rosati等初步研究了针对于层级1和层级3的适用性^[25]。研究区域选择了牙买加湾，其原因如下：①牙买加湾有着活跃的社区、生态学和设计的基础设施，能提供综合的测试；②那有着许多正在持续的针对飓风桑迪的评估和研究。这些研究为NGO和外部机构数据、建议的合作提供了可能。

层级1分析关注在牙买加湾的生态系统、建筑物、避难所的功能性。对于这些功能性，从4个系统特征进行评估：准备、抵抗和吸收损害、重建、应变。这4个特征包括了物理系统、数据分析方法、决策支持系统、交流和社会系统等方面。结果表明生态系统总体来说有着中到高的恢复力，但在应变相对海

平面高度时表现较差。建筑和庇护所被列入中到高恢复力，其决策支持系统和重建功能性被列入低标准，其原因是重建所需时间、信息沟通指导、分散的经济支持、用于安置被疏散人口的庇护所不充足，缺乏对于气候变化的指导计划。

层级3关注于对于人身安全、住宅、公共事业（饮用水、废水处理、电力）和交通的社区功能性评估。3个来增强恢复力的备选因素也被评估，包括广阔的海滩和沙丘系统、湿地的完整修复、顺从率95%的强制疏散规定。应用的数据来源于数值计算的海浪数据、十字形海岸侵蚀模型计算、人口普查、税收资料、关键基础设施等方面。对于每个功能性成分和风暴强度，开发了一个贝叶斯网络来评估满足功能性能（稳健性）和恢复性（快速性）的联合概率。数据在功能性成分如何响应和重建随不同风暴强度变化的方面存在一定局限性。最终结果表明，牙买加湾社区对于25~30年一遇的风暴有着较高的恢复力。公共设施是系统中最脆弱的部分，它阻碍了社区恢复正常运作。而3个备选因素并未明显地提高系统的整体恢复力，其原因是对于通过Rockaway Inlet的风暴潮和洪水，牙买加湾是最容易被影响的目标（图5）。由于大量关于系统性能、损害、重建的数据被综合起来，因此调查结果被当作是这一方法的范例。

基于初步研究的结果，CERB进一步渴望更加深入的研究，测试并且验证快速筛选功能的层级1和层级2评估的有效性，层级2只是被提到但还未经过检测。层级1方法之所以非常吸引CERB，是因为它能够通过一种快速、完善交流的方法来捕获社区的输入因



图5 Rockaway Inlet和Jamaica Bay地理位置^[25]
Fig.5 Locations of Rockaway Inlet and Jamaica Bay^[25]

素。然后，有人担心层级1方法中所包含的主观性会使结果偏差。因此关于这一方法还需要进一步的研究和论证。层级3被认为是合适设计需要的。但一致认为，为了更广泛的使用，层级3中的易损性函数库、损害、回复函数都需要进行公式化。

3.2.4 RIM 方法

RIM (Resilience Inference Measurement) 框架将认为恢复力是一个宽泛的概念(图3)，既包括脆弱性也包括随时间调整的能力。具体而言包含3个成分：暴露(exposure)、毁坏(damage)和恢复(recovery)，以及两个关系：脆弱性和应变力。暴露和毁坏当灾害发生时能够被显著观测到，而恢复却要间接通过人口或经济的增长才能体现。

脆弱性和应变力是3个成分之间的潜在关系。脆弱性是暴露和毁坏之间的潜在关系，而应变力是毁坏和恢复之间的潜在关系。如果一个社区(例如一个县)对于危险有着高暴露(high exposure)，但却遭受很少的损害，则认为社区有着较低的脆弱性；同样地，如果一个社区遭受严重的损害但重建非常快(例如人口返回很快)，则认为这个社区有着较高的应变力。恢复力就是通过这两种方法进行评估的。脆弱性除以应变力的值，越大说明社区恢复力越低，越小说明社区的恢复力越高。

将恢复力划分为4个程度：脆弱(susceptible)、可恢复(recovering)、防御性(resistant)、强恢复(usurper)。脆弱系统是指一个社区在一个扰动之后，如飓风或者大规模洪水，无法完全的重建；可恢复系统意味着社区会遭受破坏，但能够从灾害中完全恢复；一个社区若是其受到扰动较小的影响或者损失，则可以

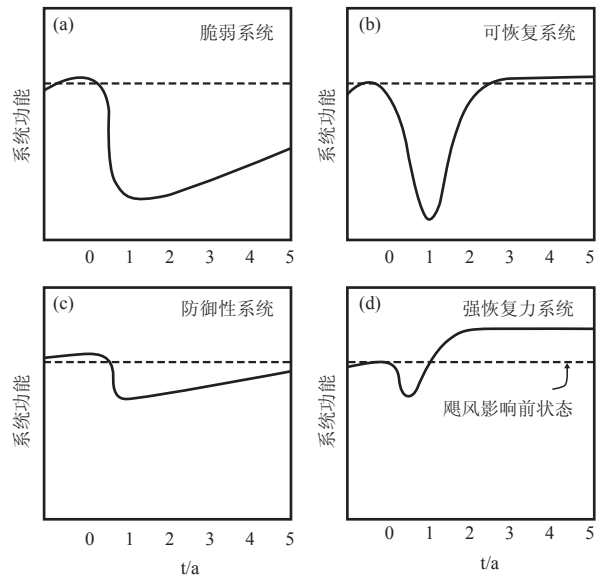


图6 恢复力的4个程度，即脆弱(a)、可恢复(b)、防御性(c)、强恢复力(d)系统与恢复时间的关系示意图(根据文献[24]绘制)

Fig.6 Four contents of resilience: susceptible (a), recovering (b), resistant (c), and usurper (d) systems evolution with time in years^[24]

称为防御性系统；强恢复力社区所受灾害小，并且灾后重建的程度甚至能超过灾前的水平(图6)。

图7表明了RIM中这4个状态之间的普遍关系。x轴包含3个成分：承灾度(exposure)、破坏度(damage)、恢复度(recovery)；y轴表示3个变量偏离平均(0值线)的程度。使社区将事件损害最小化的能力称之为脆弱性，通过承灾度与破坏度之间的斜率表示。当斜率很大且向上时，则表明高的脆弱性。类似的，社区恢复到原先水平的能力可以用破坏

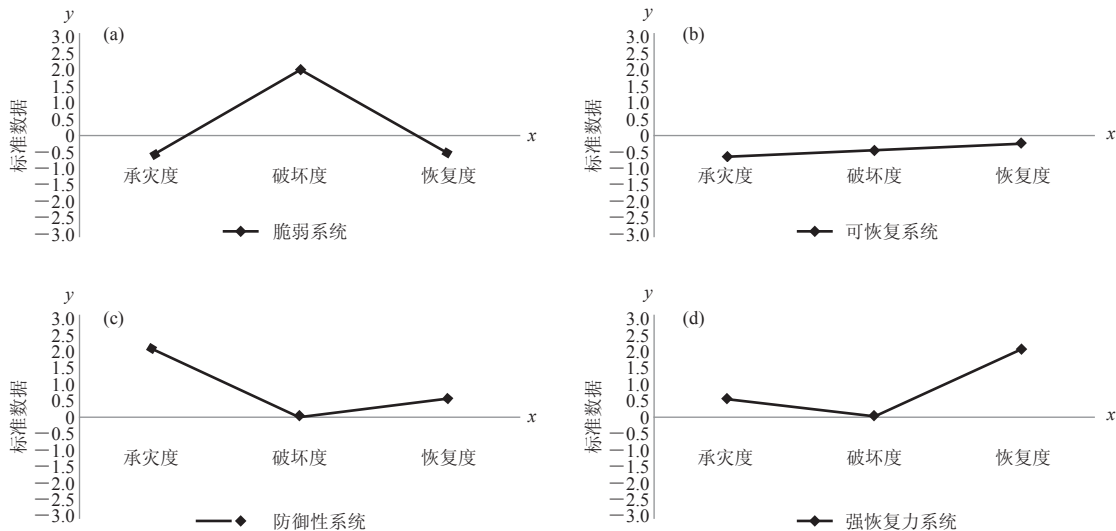


图7 RIM中四个状态之间的普遍关系(a—d)(根据文献[24]绘制)

Fig.7 Common relationships among the 4 statutes (a-d) in RIM^[24]

度与恢复度之间的斜率表示，也就是应变能力。斜率越大且朝着向上方向时，应变力越强。脆弱系统（如恢复力系统）被认为是恢复力最差的系统，因为它有着高脆弱性以及低应变力。可恢复系统有着差不多的脆弱性和应变力，总是接近0线（或高一些或低一些）。防御性系统有低脆弱性和平均的应变力，而强恢复力系统有着低脆弱性和非常高的应变力。从恢复力的这些分级来看，应变力显得更为重要。

RIM模型采用了K平均算法和判别分析来确定选取的恢复力指标是否能够被刻画，以及判定一个社区所处于的恢复力程度。因为其采用了统计的计算方法，该模型也可应用于其他的区域。对美国墨西哥湾北方的52个海岸郡县进行了恢复力的评估。这些郡县属于5个州：得克萨斯州、路易斯安那州、密西西比州、亚拉巴马州、佛罗里达州。数据的时间长度从1998—2008年。每个郡县有3个成分，分别定义为：①暴露在危险的程度，由社区被飓风或是气象相关灾害袭击的次数所表示；②暴露在危险中所引起的损害，由财产损失表示；③重建程度，由人口的增长来表示。

为了更加精确地体现暴露程度，需要对危险事件进行权重分析，从而对数量进行应变。因为像飓风卡特里娜这样的事件其严重程度要远大于一个雷暴事件。对于一个事件 i ，其权重 w_i 的定义为事件 i 所引起的全部损失与所有事件所引起的全部损失之比。在计算暴露程度时，每一个事件都乘以其权重。

每个郡县的损害变量是将这个郡县的全部损失除以在事件发生时郡县的人口，即转化为人均；恢复程度变量通过测量1998—2008年的人口增长率来表示。用人口的变化来作为表示恢复程度的指标是存在一定异议的。实际上，研究者对于扰动后恢复程度的各种资料进行了分析，却无法确定一个用来测量恢复程度最好的方法。恢复程度的指标一般可以分为4类：经济、环境、基础设施和社会。环境和基础设施指标包括建筑环境、道路、投入公共设施的能力。经济指标可以通过当地营业场所雇佣员工人数、返回的或者是新的商业数量、居民中等家庭平均收入等。返回受扰动影响社区的人口数能够表示社会的恢复程度。这4类恢复程度是相关联的，修复基础设施就有助于支持返回的人口和商业，社会的恢复鼓励基础设施的重建。因此恢复程度的指标是不同维度变量的联合。在这里采用人口随时间的变化作为恢复程度的指标，其基本原理是人口随时间的变化能大致反映出个人和商户所做的是继续留在灾区还是搬离的决定。这是恢复程度的一个大范围的指标，它将受灾区域居民和企

业的选择及合理行为都纳入了考虑范畴。因此人口变化可以反映出恢复过程的大致程度。从实际应用的角度而言，人口变化的数据是最有可能获得的，用它作为恢复程度的指标能够使恢复力测量在空间和尺度上进行对比时更加简便。

在获得暴露程度、损失、人口变化的数据后需要通过使用中值以及绝对平均误差（absolute average deviation, AAD）进行标准化。由于损失变量值的分布存在着极端值，而中值法对于极端值并不敏感，因此采用中值和AAD方法进行标准化要比传统的0~1标准化更加精确。最终确定的各类指标如文献[6]所示。随后对标准化进行K平均分析，分别将4, 20, 14, 14个郡县分入到4组中（susceptible, recovering, resistant, and usurper）。在对不同区域进行对比后发现，抵抗力高的社区，通常有着高的平均劳动力，以及较高的海拔；越高的人均劳动力会对重建和恢复过程带来更多的帮助，而海拔越高使得受到海岸灾害的可能性越小。分析恢复力的4组分级，高的恢复力地区总是伴随着高的人均劳动力以及高的海拔；低恢复力地区总是存在着财产多但教育低下，或以女性为户主的家庭所占比例高的情况。墨西哥湾东边郡县的恢复力要高于西边城市。

初步研究表明RIM方法还是值得发展的，同时也需要更多的研究来改善这个方法。RIM最主要的优点是它能够被应用于不同研究区域、不同时空尺度、不同灾害类型的社区恢复力的分析中。暴露、毁坏和恢复这三个成分的指标以及社会的生态承载力的指标都将随着不同研究区域发生变化。目前RIM方法运用在不同的区域，例如加勒比海、中国、荷兰，并针对各类灾害，包括美国西南的干旱、中国的地震等。

3.2.5 DROP 模型

为了量化恢复力，必须要应用一个理论框架，从而为变量的选择、权重、合成提供基础。局地内在灾害恢复力（disaster resilience of place, DROP）模型提出了脆弱性和恢复力之间的关系，并且服从经验的测试（图8）。而且，DROP框架主要关注前期状况，尤其是那些与内在恢复力有关的状况。前期状况是一个地区特殊的、多尺度过程的产物，通常存在于自然系统、建筑环境和社会系统之间。大多数研究认为恢复力是在自然系统之内的（例如保护湿地完整或控制自然界开发），然而社会的恢复力以及组织体系的恢复力也是同样显著的。与自然系统的改善减小灾害一样，灾害的影响可能通过增强社会和组织系统因素，如广泛的灾害保险、社交网络的改善、增强社区参与

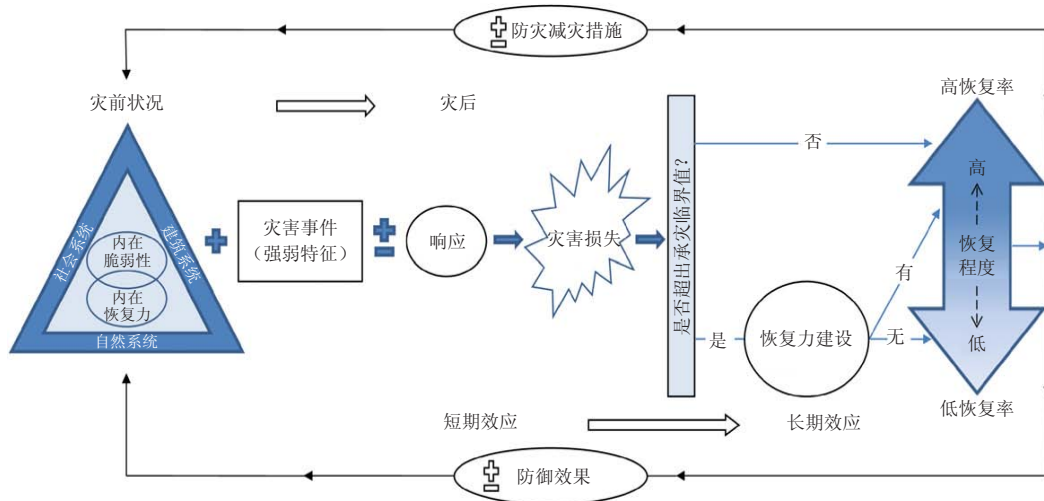


图8 DROP模型示意图(根据文献[6]绘制)
Fig. 8 Sketch map of the DROP^[6]

以及地方的风险认识而被减小。

变量选取的如何直接关系到最终复合指标质量的好坏,因此在选取恢复力相关变量时,要满足相关性、稳定性、有代表性。选取的标准在不同领域都有所不同,目前没有统一的选择标准,但是被广泛认可的要求是:变量必须要多层次。所有变量分为5个部分:社会、经济、制度、基础设施、社区能力。社区恢复力包括了人口统计等方面;经济恢复力包括合理收入、员工雇佣、贸易规模等;制度部分包括减轻损失措施、计划的特征、以前灾害经验等;基础设施类别包括庇护所、医疗设施、道路等;社区能力表达了个人和社区之间的存在关系,包括社区意识、场所依赖、公民参与等三方面。具体的各变量选取如文献[5]所示。

在研究中将生态系统的恢复力不予纳入考虑,其理由是若是把生态系统因素列入变量中,那么对于那些本身就不存在湿地、沙丘的地区而言,意味着恢复力必然减少,这是不准确的。因此生态系统因素应根据研究区域的特点进一步考虑。在选定各类变量后,将所有原始数据转化成可以进行比较的尺度,例如百分比、人均、密度函数等。将每一个变量通过Min-Max方法转换成0~1的值,再将每一类的变量进行聚合,得到每一类的恢复力值。由于这5类次指数所包含的变量数量不同,因此需要每一类次指标作平均(即除以该类中变量的个数)。最终将5个次指标相加,得到恢复力值(范围在0~5,越大恢复力越高)。

选取的研究区域是美国东南区域,其结果表明恢复力存在着明显的空间分布,尤其在农村和城市之间

区别显著:城市往往有着更高的恢复力。而社会、经济、制度、基础设施、社区能力这5个次指标差异就更为显著。

4 历史灾害分析

根据Cutter等提出的社区恢复力评估模型^[6],恢复力的评估可分别对社会系统、建筑系统和生态系统的恢复力进行评估。完整的灾情调查和恢复力评估可综合考虑诸如DROP模型所示的各领域及相关要素,由于篇幅所限,本节以飓风安德鲁和卡特里娜对建筑物的破坏为例介绍美国灾情调查方法和建筑系统的恢复力建设措施。

4.1 飓风安德鲁

4.1.1 灾情介绍

本节内容大多引自美国FEMA的灾情调查报告^[28]。1992年8月24日,飓风安德鲁给美国佛罗里达州南部的戴德县带来了毁灭性的灾害。安德鲁引起了巨风并伴随巨大的风暴潮,造成财产损失高达26.5亿美元,7.5万居民住宅受灾,8000个商业建筑受灾,使20万佛罗里达州居民流离失所,并对政府服务工作等社会正常机能产生严重持续性影响。安德鲁引起的洪水泛滥灾害,影响区域较小;而由风引发的损害影响区域更广,因此公众更为关注它所引起的实际风速。安德鲁在飓风上的级别划分为第四类,也就是中心风速在131~155 mph。

除了物理上的损害,对于经济的损害也是不可忽视的。到1992年9月24日,估计有8.6万人失业,7800个商铺长期或临时关闭。旅游业由于汽车旅馆、餐厅、公园、交通业的损害,受到重创。

为了应对飓风安德鲁，政府第一次全面使用了FEMA制定的联邦灾害应对计划，但却依旧造成了巨大损失。原因可以归结为如下几点：

①应对计划不能全面地评估灾害以及灾民的需要。

②当灾民对于食物、避难所等基础服务的需求超过州或当地的资源时，计划缺乏相应应对机制。

③未对提前的灾害预警做出充分准备，原因是只有当总统进行灾害宣布后，相关准备活动才能被授权，因此缺乏灵活性。

④各级政府信息传递错误、职责混淆。

正是这些原因使得灾害应对计划没有发挥其预期的效果。

4.1.2 调查方法

1992年9月，FEMA对受灾区域房屋毁损情况进行实地现场调查，组成一支房屋性能评测组。评测组包括FEMA指挥部与区域负责人、专家工程师与戴德县的建筑办公室。评测组的任务是调查在风暴路径上居民住宅的性能，从而为戴德县的建筑工程标准提供发现与建议。现场勘查、准备资料、评估损害投入时间超过1500个人工时。最终形成的资料包括野外记录、照片资料以及视频资料。

评测工作选取了受损房屋以及相似建筑类型的未受损房屋进行对比，从而研究确定房屋的缺陷。但评测工作没有进行房屋建筑材料测试以及房屋系统测试。为了支持评测组的工作，联邦灾害应对部门提供了地理信息系统（GIS），该系统包含着定义持续受到风与洪涝灾害地区的地图，从而形成FEMA与评测小组相互协调、相互辅助的模式。

4.1.3 结论与建议

房屋的负荷，也就是可以承担外界给予的强迫力，主要取决于承重墙、屋顶结构、地基等因素，不仅依赖它们各自的强度，还受到它们之间联接是否恰当的影响。大多数住宅建筑的损害最主要是由设计的不充分引起的，设计的不适当将会引起负载传递时的不稳定。当负荷传递路径存在较为明显的崩坏时，建筑物的受损程度就会大大增加。其次低标准的工艺以及各类建筑材料的滥用也会导致建筑的损害。而房屋的地势高度则对洪涝灾害有着关键影响，高地势或者第一层地势抬高都能有效减少洪涝损害。

总体来说，砌石墙（混凝土结构）和木制模块建筑在飓风中有着较好性能。1~2层轻木结构建筑损毁要比其他房屋结构更多，而木制三角结构房顶在飓风中存在脆弱性，具有被损毁的倾向。

具体建议：1）提高建筑工艺质量：提升有关正

确建筑技巧的知识，提高相关人员对灾害后果以及房屋负荷的认识并为通过学习的人颁发证书，从而使其制度化；2）对承包人提供关于传递负载的正确方法的必要指导；3）加强对建设施工的监管以及巡查；4）将GIS进一步完善，使获得的地理数据更为精确；5）提高建筑底层最低高度标准，从而减少洪涝损害；6）提高公众对房屋关键结构的认识，从而使民众能在灾害前或灾害中及时发现建筑隐患，并做出紧急处理或者及时撤离。

4.2 飓风卡特里娜

4.2.1 灾情介绍

卡特里娜飓风的灾情报告在FEMA文件^[30]里有详细记载。飓风卡特里娜是在过去100年中影响美国海岸的最强、最具破坏力的飓风之一。2005年8月25日，卡特里娜首次在佛罗里达东南海岸登陆，此时飓风等级为一级；随后卡特里娜穿过南佛罗里达向墨西哥湾移动，随之强度增强至五级飓风；在减弱并在路易斯安那州的东南方二次登陆之前，强度维持在三级飓风；在登陆路易斯安那州后，卡特里娜继续向北移动，将风暴潮带入亚拉巴马州、路易斯安那州、密西西比州的海岸地带。最终在密西西比州的Pearlington以三级飓风强度第三次登陆（图9）。卡特里娜给墨西哥湾海岸、路易斯安那州东南方以及亚拉巴马州与密西西比州的海岸都带来了普遍的毁灭性损害。

卡特里娜所引起的风暴潮导致庞恰特雷恩湖保护新奥尔良的堤坝系统损毁，因此估计新奥尔良80%的城区都被淹。对亚拉巴马州、路易斯安那州和密西西比州海岸地区造成的重大损害使得卡特里娜成为美国历史上最具毁灭性的自然灾害。

据估计超过1700人遇难，其中约有1500人在路易斯安那州遇难，约230人在密西西比州遇难。其他可直接或间接归因于卡特里娜的死亡事件在佛罗里达州、佐治亚州、肯塔基州和俄亥俄州都有所报道。因此卡特里娜成为美国第三致命的飓风，仅排在1900年得克萨斯州的飓风（6000人遇难）和1928年佛罗里达州的飓风（2500人遇难）之后。

卡特里娜造成总经济损失超过125亿美元，被保险的损失为40.6亿美元，远高于安德鲁的26.5亿美元、查理的15亿美元、伊凡的14.2亿美元、弗朗西丝的8.9亿美元损失以及雨果的7亿美元损失，使得卡特里娜成为美国历史上最昂贵的自然灾害。到2006年4月，亚拉巴马州、佛罗里达州、密西西比州和路易斯安那州总的洪水保险索赔超过21万件，总计超过17亿美元，其中超过17.5万件索赔来自于路易斯安那州。



图9 卡特里娜飓风路径（红线）及灾情察看飞机航线（蓝线）^[30]

Fig.9 Track of Hurricane Katrina (red line) and the flight line of disaster observation (blue lines) ^[30]

初步估计卡特里娜导致如下损失：对基础设施（例如道路、桥梁）损害达5.5亿美元；30~35万辆交通工具被摧毁，约2400艘船只失事；45万名难民；80万名路易斯安那州的居民要求来自联邦的或者州政府的救济。根据美国红十字会的统计总共有352930个建筑被摧毁，139376个建筑受到较大损害，170452个建筑受损较小。

4.2.2 调查方法

由卡特里娜引起的洪水，水位远超过FEMA洪水保险费率图（Flood Insurance Rate Maps, FIRMs）阐述的现行设计洪水事件（也就是100年一遇的事件）。而卡特里娜的风速在大多数区域都要小于基于标准规则（International Building Code, IBC; International Residential Code, IRC）和工程标准（ASCE 7）所提及的建筑标准的设计风速。除了密西西比海岸的一些地区之外，卡特里娜是低于设计风速的。MAT希望通过调查能够确定根据新建筑标准建设的建筑物的性能，并且收集关于建筑损害的相关信息，能够使风速和建筑性能相互关联。

在新奥尔良，FEMA特别关注洪水对于建筑物的

结构性和非结构性成分的长期作用。因此FEMA派出一部分MAT前往新奥尔良，去观测和评估洪涝对居民建筑、重要设施、基础设施的损害。新奥尔良的MAT同样包含着来自洪水恢复工业的专家。

2006年9月11和12日，MAT执行了空中侦察，来估测受卡特里娜影响的区域里全部的建筑损害。从亚拉巴马州的多芬岛，顺着密西西比的墨西哥湾，越过新奥尔良，向内陆到达至路易斯安那州的斯莱德尔和曼德维尔以及密西西比的哈蒂斯堡（图9）。

用于评估受灾地区建筑条件的初步现场调查在9月17—21日开展。基于空中侦察和初步现场调查搜集的数据，对于MAT关注的区域被更完整地定义了。全部MAT调查从9月26号开展，持续两周，进行了广阔区域的观测。对于单个和多家家庭建筑、制造完毕的住房、商业地产、历史建筑的损害都进行了观测。并且对重要设施与基础设施，包括消防站、派出所、医院、养老院等，都进行了评估，更好地说明建筑性能和由于卡特里娜所引起的功能缺失。

4.2.3 结论与建议

卡特里娜造成了巨大的风暴潮，强降水导致洪涝灾害。由洪水引发的建筑物损害可以分为结构性损害与非结构性损害。结构性损害是对建筑物关键结构的损害，导致建筑物坍塌或者不再适宜居住。在所有调查结果中这类损害占少数，原因是由于建筑物的阻碍，洪水水位的上涨得到抑制，使得洪水本身不会对建筑物有很大冲击，其次建筑物存在的通风口、车库门都使得房屋内外水压近似守恒，没有大的压强差，从而减少了负荷墙所承载的水压。而非结构性损害就要普遍得多，像是石灰脱落、金属生锈、地板浸泡，以及墙面装饰物损毁。此外，由于洪涝持续时间长，从而引起了建筑材料的恶化以及生物、化学污染，包括细菌污染、真菌污染、重金属污染、农药污染等。

对于洪水损害有以下建议：

- 1) 规范和标准：提高建筑的建设标准，推荐采用IBC、IRC以及NFPA5000标准。
- 2) 完善损害确定机制：
 - ① 评估现有的风暴潮模型，修正潮汐频率分析，运用模式来估计受影响区域的水位。
 - ② 重新定义损害概念，并且修正灾害分布图的绘制方法。
- 3) 设计与建筑：
 - ① 在设计中考虑进洪涝的影响。
 - ② 规范建设材料、地基、最底层高度。
- 4) 洪涝保险：要全面考虑保险规定以及保费。

由于卡特里娜的风速在绝大部分地区都小于设计风速，因此强风引起的损害要小一些。各种建筑设施残骸是诱发风损害的主要原因，在高风速下，房屋外面的装饰物、屋顶瓦片以及其他残骸会破坏门窗、伤及居民。对于风引起的损害，提出下列建议：

1) 房屋规范：按照现代的建筑规范建造，从而增强对风的抵抗性。

2) 设计与建筑：妥善设计屋顶、墙面包层、窗户、门等。

3) 已建成建筑物的减缓措施。

① 对房屋进行专业检测。

② 住户考虑重新安装金属的连接，升级屋顶的各种配件。

③ 加固窗户，或者替换成抗冲击的窗户。

对于政府与灾害应对部门而言，继续深入地研究，加强对设计和建筑施工的指导以及提供设计师、监督员的训练同样是不可或缺的。

4.3 小结

FEMA对于飓风安德鲁和卡特里娜建筑系统的灾情调查和分析，提出了建筑系统应对飓风灾害进行恢复力改进的相应对策。根据联合国环境项目的研究^[31]，提高建筑物的质量和制定建筑物防灾标准是增加社区系统恢复力的有效环节之一。如图10所示，各种应对飓风灾害的防御措施所投入的成本和能起到的社会与经济效益存在着较大差异。比如修建沿海防护堤对于减少飓风灾害的经济效益和社会效益都是首选措施，但成本也是最高的。避难所具有较高的社会效益，但对于减少灾害的经济损失作用不大。因此，各国家和地区应根据自身条件和灾害的主要类型采取恰当的防灾减灾措施。

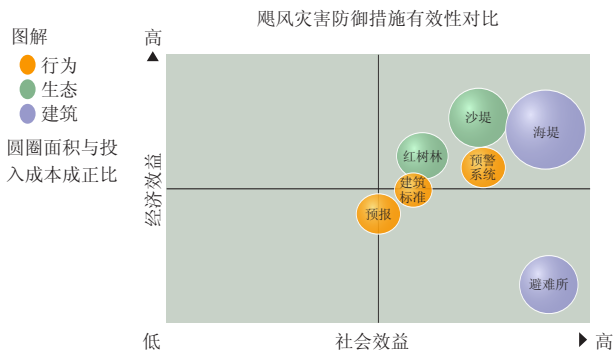


图10 不同飓风灾害防御措施社会及经济效益对比 (根据文献^[31]绘制)

Fig.10 Comparisons of prevention operations and social efficiency among different hurricanes^[31]

5 结语

恢复力的概念在各领域及不同国家和地区有着

不同的定义。根据Cutter最近的总结^[3]，至少存在27种不同的恢复力定量和定性评估方法。这些方法虽然各不相同，但大多考虑了社区的资产（经济、社会、环境、基础设施）和功能（社会资本、社区功能、交通与通信联系、规划）。恢复力在防灾减灾领域得到越来越多的关注和广泛使用。在防灾减灾工作中，我们不仅需要考虑到社区、企业、单位及家庭等为主的自发的、自下而上的恢复力建设措施，而且要加大自上而下的、以各级政府为主导的措施。各级政府部门在对社区应对自然灾害的脆弱性有了充分认识的基础上有必要采取有效措施在提高防灾减灾工程质量和社区恢复力建设上增加投入。众览各国，往往存在灾害前恢复力的投入与灾害后用于救济和重建花费的资金不平衡的现象。决策者往往在大灾难发生后，在民意的压力下才意识到需要增加防灾减灾救灾投入的“亡羊补牢”现象。在经济上，用于恢复力上的投入可以减少重建时的花费。据美国科学家估算，在社区恢复力建设上每投入一美元，在重建工作中就能节约4美元^[32]。因此，灾害发生之前进行恢复力建设和其他防灾减灾工作，无论是在经济效益还是社会效益上都可以获得正面的回报。

无论恢复力如何定义和定量估算，也无论科学家们提出多少恢复力建设的方案，这些方案本身并不能增强社区的抗灾能力。要真正起到防灾减灾的效果，不仅要加强防灾减灾的研究，提出切实可行的防灾减灾方案，而且要切切实实地既从上到下又从下到上落实这些方案，让政府制定出有科学依据的决策，同时社区和民众能够自发地执行这些与他们切身利益相关的政策和措施。

致谢：感谢国家海洋局减灾中心为本工作所提供的支持；感谢天津市气象局和天津市气象科学研究所在本文写作过程中给予的鼓励与支持。

参考文献

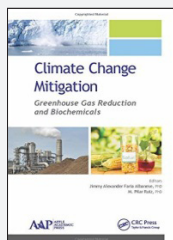
- [1] WMO. UN System Task Team on the Post-2015 Development Agenda: Disaster Risk and Resilience. Thematic Think Piece. UNISDR, WMO, 2012. <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/27462>.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Cutter S L. The landscape of disaster resilience indicators in the USA. *Nat Hazards*, 80: 741, doi:10.1007/s11069-015-1993-2.
- [4] Cutter S L. Resilience to what? For whom? *The Geographical Journal*, 2016, 182(2): 110-113, doi: 10.1111/geoj.12174.
- [5] Cutter S L, Burton C G, Enrich C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2010, 7 (1): 1271-1283, doi: 10.2202/1547-7355.1732.
- [6] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global*

- Environmental Change, 2008, 18: 598-606.
- [7] Matyas D, Pelling M. Disaster Vulnerability and Resilience: Theory, Modelling and Prospective. Government Office of Science, 2012.
- [8] Benjamin B. A comparative analysis of disaster risk, vulnerability and resilience composite indicators. Plos Curr, 2016, doi: 10.1371 / currents.dis.453df025e34b682e9737f95070f9b970.
- [9] Sharifi A. A critical review of selected tools for assessing community Resilience. Ecological Indicators, 2016, 69: 629-647.
- [10] Manyena S B. The concept of resilience revisited. Disasters, 2006, 30(4): 433-450.
- [11] Birkmann J.. Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies. Tokyo: United Nations University Press, 2006.
- [12] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [13] Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [14] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [15] Timmerman P. Environmental Monograph No. 1, Institute for Environmental Studies. University of Toronto, 1981.
- [16] McEntire D A, Fuller C, Johnston C W, et al. A comparison of disaster paradigms: the search for a holistic policy guide. Public Administration Review, 2002, 62(3): 267-281.
- [17] Adger W N. Vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16:268-281.
- [18] Ian B, Saleemul H, Bo L, et al. From impacts assessment to adaptation priorities: the shaping of adaptation policy. Climate Policy, 2002, 2(2):145-159
- [19] O'Brien K, Leichenko R, Kelkar U, et al. Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. Global Environmental Change, 2004, 14(4):303-313.
- [20] Gallopin G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. Global Environmental Change. 2006,16: 293-303.
- [21] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14):8074-8079.
- [22] Pendall R, Foster KA, Cowell M. Resilience and Regions: Building Understanding of the Metaphor. University of California, 2007.
- [23] Klein R J T, Nichols R J, Thomalla F. Resilience to natural hazards: how useful is this concept? Environmental Hazards, 2003,5: 35-45.
- [24] Lam N S, Reams M, Li K, et al. Measuring community resilience to coastal hazards along the Northern Gulf of Mexico. Natural Hazards Review, 2016, 17(1):04015013.
- [25] Rosati J D, Touzinsky K F, Lillycrop W J. Quantifying coastal system resilience for the US Army Corps of Engineers. Environment Systems and Decisions, 2015, 35(2):196-208.
- [26] National Research Council. Disaster Resilience: A National Imperative. Washington, D C: National Academies Press, 2012.
- [27] Cutter S L, Ash K D, Emrich C T. The geographies of community disaster resilience. Global Environmental Change, 2014, 29: 65-77.
- [28] Federal Emergency Management Agency. Building Performance: Hurricane Andrew in Florida: Observations, Recommendations and Technical Guidance. FEMA, 1993.
- [29] Schultz M T, McKay S K, Hales L Z. The Quantification and Evolution of Resilience in Integrated Coastal Systems. US Army Corp of Engineers, 2012.
- [30] Federal Emergency Management Agency, 2006: Hurricane Katrina in the Gulf Coast: Mitigation Assessment Team Report. FEMA, 2006.
- [31] UN Environmental Program. Building Disaster-Resilient Communities and Economies: Part One of A Research Series by the UNEP FI Principles for Sustainable Insurance Initiative. UNEP Finance Initiative, 2014.
- [32] Multi-Hazard Mitigation Council. Natural Hazard Mitigation Saves: An Independent Study to Assess the Future Savings from Mitigation Activities. Multi-Hazard Mitigation Council, 2005.

新书架

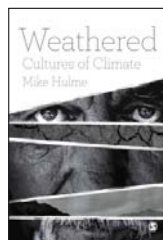
NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Climate Change Mitigation: Greenhouse Gas Reduction and Biochemicals
《气候变化减缓：温室气体减排与生化制剂》

编著者：Jimmy Alexander Faria Albanese 等
出版者：Apple Academic Press
出版年：2016



Weathered: Cultures of Climate
《饱经风霜的气候文化》

编著者：Mike Hulme
出版者：SAGE Publications Ltd
出版年：2016



《公众气象服务效益评价理论与
与实践》

编著者：姚秀萍，吕明辉
出版者：气象出版社
出版年：2017



《观天测地话卫星》

编著者：李慧，等
出版者：气象出版社
出版年：2017

华南沿海暖区暴雨系统研究进展

王坚红¹, 杨艺亚², 苗春生¹, 邵彩霞³

(1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;

2 江西省气象信息中心, 南昌 330096; 3 国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘要: 重点介绍了活跃在华南沿海暖区暴雨系统的研究和进展, 主要系统为华南沿海暖区两类低层辐合线系统(偏南向低层辐合线与西南向低层辐合线系统), 以及在华南登陆的中低层暴雨东风波系统。目前研究主要是背景环流下暴雨系统活动空间分区特点, 系统分类与追踪、系统基本结构、动力热力及水汽条件特征, 环境因子影响的数值模拟, 暖区暴雨动力和热力机制数值模拟等方面。综合研究显示, 客观判定方法有助于确定暖区暴雨系统, 有助于跟踪系统发展过程。暖区暴雨系统的热力发展机制主要是中层潜热释放。环境影响因子包括暖海温和沿海山脉地形对暖区暴雨系统有增强以及位置引导作用。环境因子与系统配置将影响暴雨的位置、强度及持续时间。

关键词: 华南沿海地区, 暖区暴雨, 低层辐合线, 暴雨东风波, 热动力机制, 地形影响

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.004

The Research Progress of the Systems of Warm-Sector Heavy Rainfall in South China Coasts

Wang Jianhong¹, Yang Yiya², Miao Chunsheng¹, Shao Caixia³

(1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Jiangxi Province Meteorological Information Center, Nanchang 330096

3 The National Marine Information Center, Tianjin 300171)

Abstract: The research and progress of the warm-sector heavy rainfall in the south China coasts are introduced here. The main systems are the warm-sector convergence lines (the south convergence line and southwest convergence line) at low level and the landing easterly waves with rainstorm at medium-low level. The research is currently focusing on the features of division areas of the rainstorm system under background circulation, the classifying and detecting of systems, the system structure, the characteristics of the thermodynamics and moisture conditions, and the numerical simulations on environmental factor influence, the dynamic and thermodynamic mechanisms of the warm-sector heavy rainfall, etc. The results show that the objective identification method helps to determine the warm-sector rainstorm systems and to follow their evolution. The latent heat release at the medium level is a main thermodynamic mechanism of the warm-sector rainstorm systems. The environmental factors including the sea surface temperature(SST) and the orographic forcing can increase intensity and lead trajectory to warm-sector rainstorm systems. Furthermore the configuration of influence factors and the systems can impact the intensity, location and duration of the warm-sector rainstorm.

Keywords: South China coasts, warm-sector heavy rainfall, convergence lines, rainstorm easterly waves, thermodynamics mechanism, the orographic forcing.

0 引言

华南地区在行政区划上涵盖了广东、广西、海南、福建、台湾等省(区), 南面为南海宽阔海域, 东面濒临东海及广大的西太平洋。所以华南地区海洋性气候显著, 主要影响系统为强度减弱的中纬度天

气系统和低纬度天气系统。华南雨量充沛、暴雨频次多, 是我国年平均雨量最大地区, 并且汛期时间长, 强降雨多集中发生在每年的4—6月。在这个时期, 低纬度暖湿气团势力增强、不断向北推进, 中高纬度冷干气团则强度不断减弱、逐步北退。使得冷暖气团交界面位置更多地停滞在中高纬度, 于是华南地区形成更多远离锋面区的暖区暴雨。每年5月发生在广东西部沿海地区的暴雨强降水就多属于这一类。

影响暖区暴雨的天气系统与中纬度温带天气系统最主要的区别是前者活跃在同一暖湿气团中, 而后者

收稿日期: 2017年5月16日; 修回日期: 2017年7月9日
第一作者: 王坚红(1956—), Email:1597706505@qq.com
资助信息: 江苏高校优秀学科建设工程项目(PAPD); 南京信息工程大学教改重点课题(J201503)

则是冷暖气团交界面系统，所以暖区系统表现为一些非斜压性的天气系统，如台风、东风波、低层气流辐合线等。其中台风是一类超强系统，在远离华南地域的西南太平洋海上就可以准确跟踪。而东风波沿海上副热带高压南侧西进，通常在500 hPa上，副热带高压的强度与势力较为稳定，东风波易于辨识与跟踪。但是以500 hPa为基础，东风波可以分为中高层和中低层两类，其中造成暴雨的是中低层东风波系统，在500 hPa以下的层次，这些系统表现得不太稳定、不易跟踪，而那些中高层东风波并非是直接造成暴雨的热带系统，因此增加了系统预报预警难度。沿海低层辐合线系统是一类与暴雨强降水配合的低层浅薄系统，但是该系统由于位于暖区，温度场特征不显著，流线辐合区较宽阔，且风向切变不明显而系统不易被确定与标示，所以这类系统也成为暖区暴雨预报预警的难点。由于暖区暴雨系统的上述特点，使得暖区暴雨系统一直以来是暖区暴雨研究的重点内容。考虑台风系统的易于辨识，本文将重点介绍沿海低层辐合线与登陆暴雨东风波两类暖区暴雨系统的研究进展。

1 华南降水分区特征

对于华南地区暴雨及其系统的活动范围，有各种空间分析研究：吴丽姬等^[1]和张启绍等^[2]均通过EOF和相关分析法对华南前汛期夏季风爆发前后区域持续性暴雨及汛期平均总降水量进行了空间分型，分别得到几种空间分布，并注意到EOF第一主成分时间系数的变化与前汛期降水量距平的变化同步。伍红雨等^[3]、彭丽英等^[4]和陆红等^[5]采用线性趋势分析、Mann-Kendall检验和小波分析等统计诊断方法，分析近48年来华南暴雨气候特征，表明华南年平均暴雨日数的地理分布总体呈由沿海向内陆递减的趋势。王坚红等^[6]对2009—2013年的华南72站前汛期4—6月的逐日（20时—次日20时）降水资料进行了暴雨的空间分布统计分析，图1为月平均暴雨日数的空间分布。

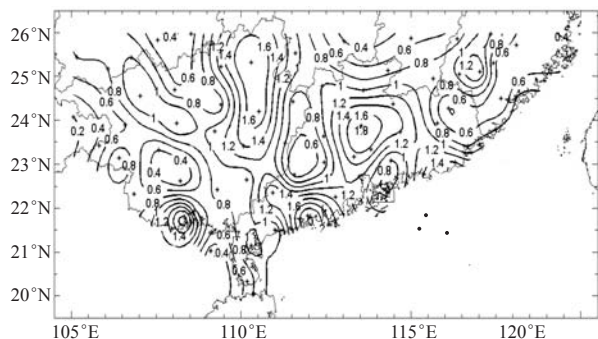


图1 华南72台站2009—2013年前汛期月平均暴雨频次^[6]
Fig.1 Rainstorm monthly frequency at 72 stations in South China during the first rain season for 2009–2013^[6]

图1显示，前汛期月平均暴雨频次最大的地区集中分布在广西西南地区、广西东北部、广东阳江沿海地区以及广东珠三角北部地区，而其中暴雨频次最多的中心区在广东阳江，月平均暴雨天数为2.2 d。即广东有南北两个暴雨频次中心。

同时，2009—2013年华南地区前汛期年平均暴雨降水量的分布特征如图2所示。总体上，主要的暴雨中心位于华南中部，尤其是广东省。且最强中心在广东沿海的阳江，其高值中心单站前汛期年平均暴雨日的降水量达到700 mm以上。显然，暴雨频次多的地区，其降水总量也大，暴雨降水量与暴雨频次成正比。

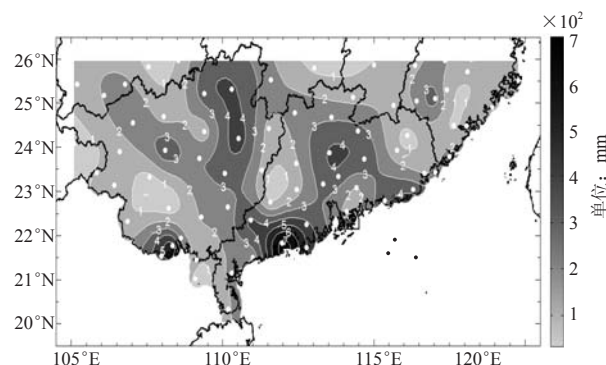


图2 华南前汛期各台站2009—2013年前汛期年平均暴雨总降水量分布（白色实心圆代表台站）^[6]
Fig.2 The total average rainfall distribution in South China during the first rain season for 2009–2013 (the white dots indicate the station positions)^[6]

进一步分析华南前汛期暴雨不同空间区域降水特征，利用逐日降水资料，将华南区域（104.5°—120.5°E，19.5°—26.5°N）细分为0.25°×0.25°精度网格，将华南72个台站降水资料转为经纬度网格点数据。对2009—2013年前汛期逐日降水资料（总计455 d）进行EOF分析^[7-8]。对EOF各模态的特征值依照大小排序，并进行North检验^[9]，前5个模态通过了检验，而其余未通过检验的模态为不显著模态，因此不采用。进一步对这前5个模态进行方差最大经验正交旋转（REOF）分析^[10]，确定主导区域。经REOF旋转后各模态的特征值及方差贡献率中，前5个荷载向量的累积贡献率已达43.5%。这5个荷载向量将华南地区前汛期降水划分为5种暴雨强降水分布类型，如图3所示，其中高荷载区域（荷载值>0.5的区域）以彩色区标出。

为了理解各区域模态配置，按照模态高荷载值所在位置，将它们集成表现，如图3f。比较这5个模态的分布，基本表达了图1和图2所显示的华南5个主要暴雨区，其中广东省的南北两个模态具有较强的中心

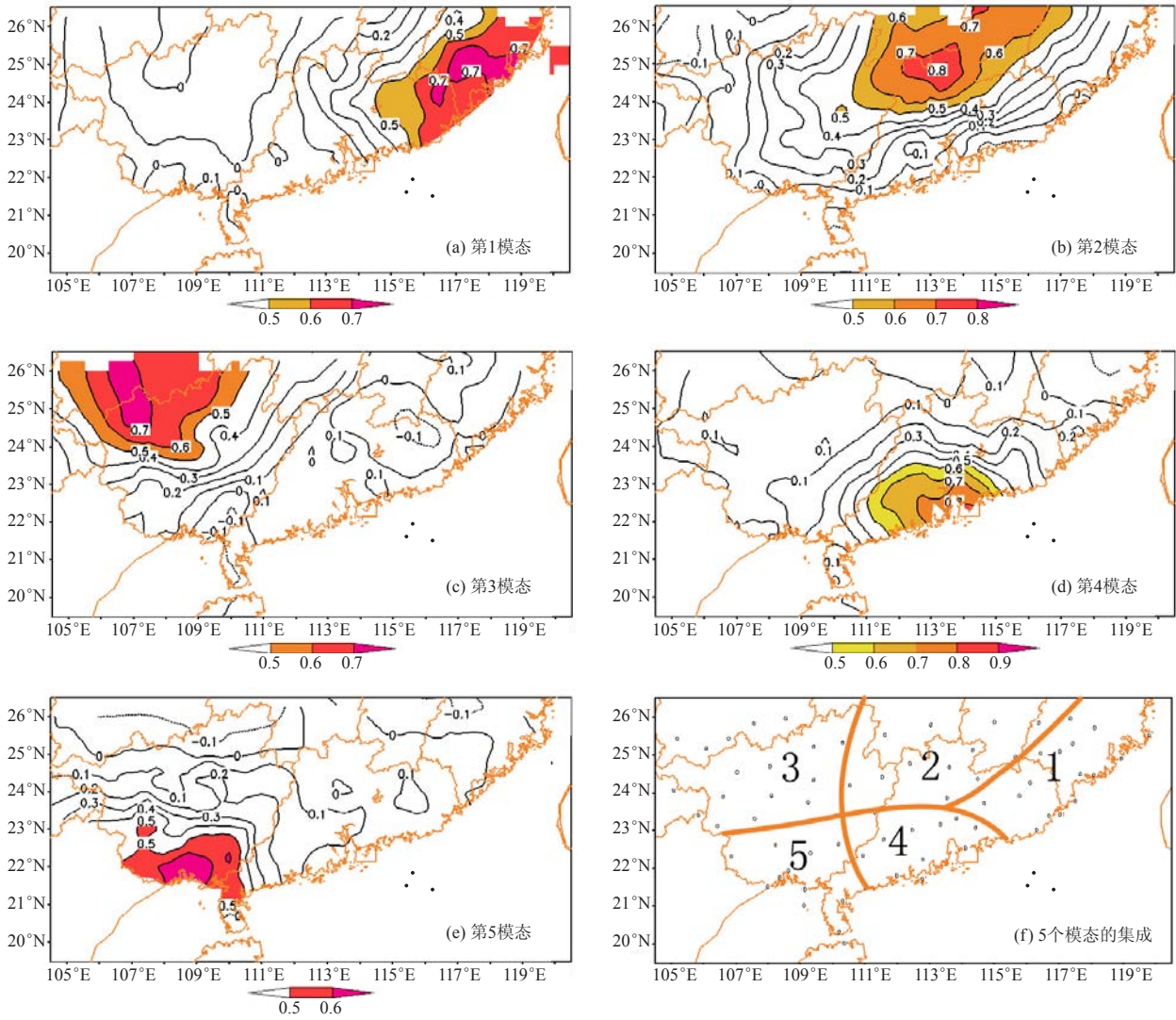


图3 2009—2013年华南前汛期暴雨降水量REOF场前5个空间模态^[6]

Fig. 3 The first 5 spatial modes of REOF analysis of storm rainfall in South China during the first rain season for 2009–2013^[6]

荷载，均为0.8以上。由于是降水量的REOF模态，因此，高荷载代表了雨量多、雨强大。2009—2013年华南前汛期共有24次特大暴雨，其中14次发生在广东，所占比例达58.3%，且这些特大暴雨的平均降水量达253.02 mm，多数位于沿海。对这南北两个暴雨强降水模态，考察相应的时间序列，并取模态时间系数值达5倍标准差以上的显著过程各11个进行合成环流场分析，如图4所示。

图4显示，在广东北部暴雨区（第2模态）高层形势场西风带系统更强，东亚槽和高原槽的经向度更大；而广东沿海暴雨区（第4模态）高层形势场上两槽经向度均相对弱一些，其副热带系统较北部模态更强，副热带高压西伸北抬的幅度更大。即暖区系统势力控制为主。对应850 hPa低层形势，北部模态是气旋

族和变形场控制，南部沿海模态为一致的西南气流。因此，北部地区系统仍然具有中纬度斜压锋面性质，而南部沿海地区是暖区热带系统主导地区。

2 华南暖区暴雨及低层辐合线系统

华南暖区暴雨发生在华南地面锋面的南侧暖区，或是在南岭至南海北部没有锋面存在，有时发生在西南气流和东南气流的汇合处，即使有锋面，暴雨区往往位于地面锋区以南200~300 km处^[11]。赵玉春等^[12]研究表明，锋面暴雨与暖区暴雨不仅在动力结构、不稳定机制和大气加热结构等方面有差异，而且在水汽输送、中尺度环境以及垂直环流等方面也存在差异，这些差异可能是造成锋前暖区暴雨难以模拟和预报的主要原因。华南暖区暴雨具有热带系统降水特征，因此，其充沛的水汽条件及热力触发作用等应是暴雨维

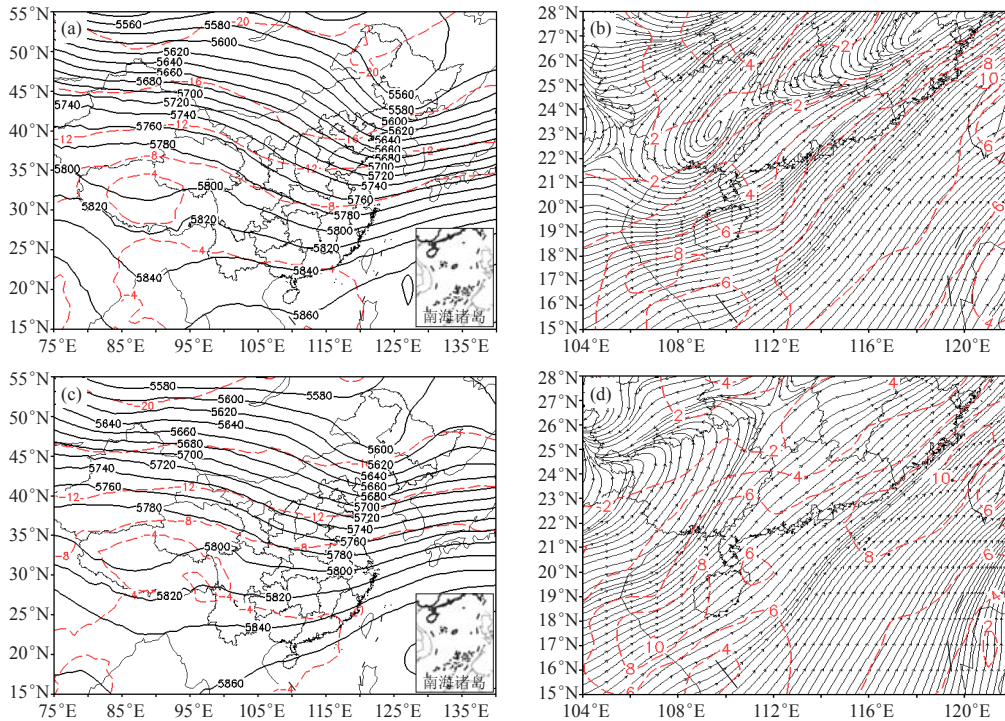


图4 第2 (a, b) 和第4 (c, d) 模式过程500 hPa合成温度场 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 及合成位势高度场 (实线, 单位: gpm) (a, c), 以及850 hPa风速合成流场 (虚线为全风速, 单位: m/s) (b, d) [6]

Fig. 4 The composite element fields of the two strong REOF modes at 500 hPa and 850 hPa: (a) potential height and temperature at 500hPa for the second mode; (b) streamline and wind speed at 850hPa for the second mode; (c) potential height and temperature at 500hPa for the fourth mode; (d) streamline and wind speed at 850hPa for the fourth mode [6]

持与发展的重要机制。苗春生等^[13]根据低纬度环流特征, 以低层流场形势对沿海暖区暴雨进行分类, 以6 h 累计降水为样本, 对2009—2014年的6年前汛期降水进行统计, 得到两类辐合线型暖区暴雨: 偏南向辐合线型暖区暴雨 (简称偏南向型, 共439个样本); 西南向辐合线型暖区暴雨 (简称西南向型, 共302个样本)。

2.1 两类华南暖区暴雨及辐合线环流系统

1) 暖区暴雨及分类

第一类偏南向型暖区暴雨 (图5a), 低层主要由东南、偏南、西南三支气流汇合, 形成经向性偏南向辐合线。前汛期华南沿海尤其是广东珠江口以西形成的暴雨、局地大暴雨和特大暴雨多为此类背景环流。

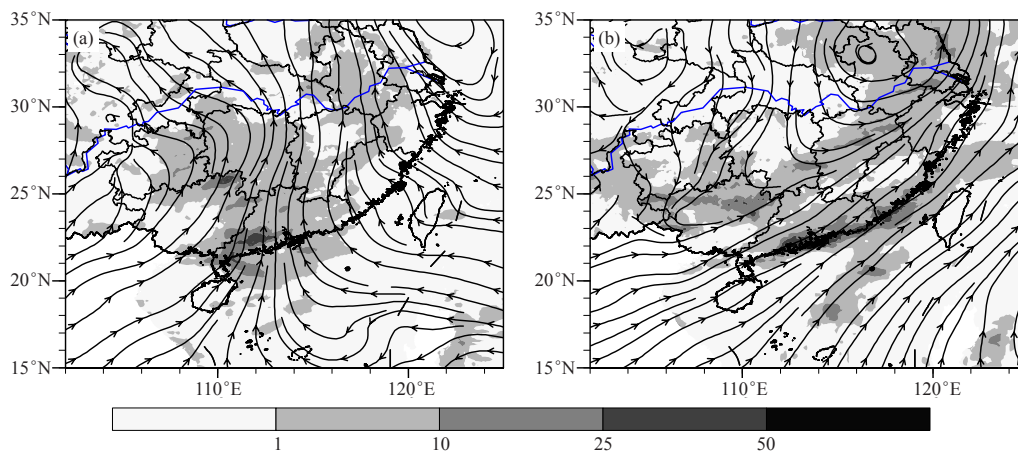


图5 5个典型样本合成的6h降水与850 hPa流场

(a) 偏南向型; (b) 西南向型 (色谱为降水量, 单位: mm) [13]

Fig. 5 The 6 h rainfall and streamlines composite fields at 850 hPa for 5 typical samples: (a) southly convergence pattern; (b) southwesterly convergence pattern (the shadows denote rainfall, unit: mm) [13]

其降水持续时间较短，多数在6 h以内，雨量集中，大部分6 h降水量大于30 mm，甚至大于40 mm。降水落区多呈现块状或团状，尺度一般仅几十到上百千米，多出现在广东的阳江、江门一带。此类型在华南没有锋面，雨区受暖气团控制，有时入海变性冷高压后部的东南气流较强，回流暴雨特征明显。

第二类西南向型暖区暴雨（图5b），主要是由偏西风、西南风两支气流汇合，形成纬向性西南向辐合线，在华南沿海形成局地大暴雨到特大暴雨。此类型多与切变线、低涡和沿海低空急流相联系，持续时间较长，间歇性降水可维持十几小时，甚至更长。降水呈狭长带状，多出现在珠江口至粤东沿岸，可达几百千米，6 h降水量可达40 mm以上。往往是锋面尚在长江附近，华南沿海就出现极强的暴雨，此时的雨区位于锋面以南的高温、高湿和不稳定区域。南海西北部和中南半岛有西南气流，华南沿海是一致的西南气流，南海北部为低空急流，其左侧气旋式切变对应华南沿海，有利于暴雨发生与维持。

6 h暴雨样本的统计显示，2009—2014年华南前汛期的6 a中偏南向型平均每年73.2次，西南向型平均每年50.3次。两种类型暖区暴雨在南海夏季风爆发后的发生频数都有明显增加。

2) 两类辐合线系统客观判定

华南沿海暖区暴雨是单一暖气团降水，其中辐合线降水系统的确定是个难点。两类辐合线客观判定主要依据低层风场的风向角度和风速的大小^[14]。华南沿海暖区地处低纬度地区，等高线稀疏，高度场上无法确定明显的影响系统，因此，从流场角度分析，考虑偏南向辐合区由西南、偏南、东南三支气流汇合，此类经向辐合线的辐合轴左右两侧分别为倾角相对的气流，即气流的 v 分量均为向北，而辐合轴两侧 u 分量相反。据此采用定量计算客观地确定偏南向辐合轴线；类似地考虑西南向辐合区由偏西和偏西南两支气流汇合，相对于纬向 x 方向，偏西气流的角度小于西南气流的角度，且气流均为自西向东，通过确定相对于 x 的最大角度矢量，同样可以经计算客观地确定西南向辐

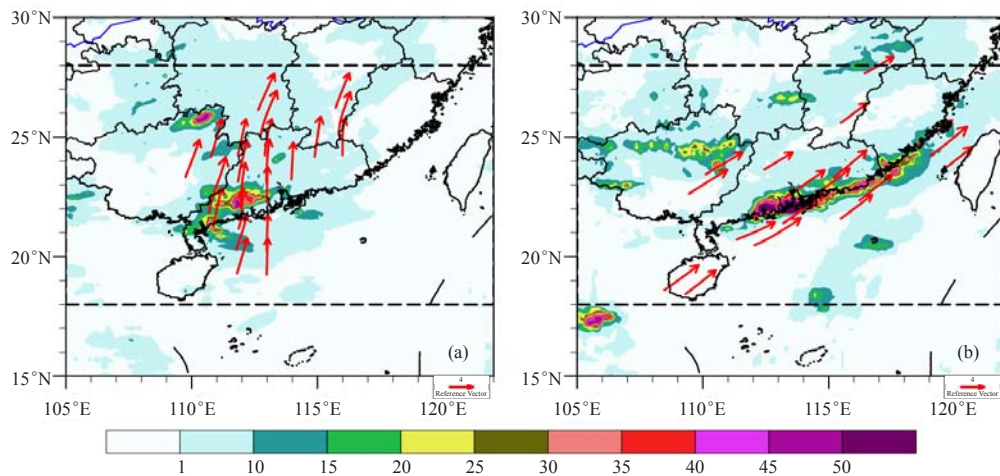


图6 两类华南沿海暖区辐合线暴雨的合成平均降水分布与客观分析的辐合线系统轴线（850 hPa）^[14]
 (a) 偏南向型；(b) 西南向型（色谱为5个典型样本暴雨合成平均降水量，单位：mm；红色箭头为客观判定的辐合线，虚线为研究区域的南北边界）

Fig. 6 The composite average rainfall distribution of two types of warm-sector rainstorms at South China coasts and the convergence lines by the objective analysis at 850 hPa^[14]

(a) southerly convergence pattern; (b) southwesterly convergence pattern (the color bar is the average storm rainfall of five typical sample composite fields, unit: mm; the red arrows are convergence lines by objective analysis, the dash lines are the south and north boundaries of the study area)

合线轴线。图6显示了客观判定的两类辐合线形态。

2.2 两类暖区暴雨辐合线系统热力发展机制

暖区暴雨辐合线系统为较强烈的浅薄低值系统，垂直剖面上暴雨区对应强盛的垂直速度中心，可伸展到400 hPa高度。雨区辐合层强烈，表现为几个垂直叠置的辐合中心，显示动力和热力的共同作用，即低

层地形与环流的动力作用以及高层凝结潜热的热动力作用。

两类华南沿海暖区暴雨区，均为水汽充沛、对流不稳定能量层次较厚，因此，均有较强的凝结潜热释放，有利于暴雨区形成暖心系统，造成气柱增暖拉伸，维持暴雨辐合线低值系统强度以及维持强烈的辐

合及上升气流。其中西南向型的凝结潜热释放较偏南向型更强，偏南向型的中高层暖平流强度强于其凝结潜热释放。

探讨两类华南沿海暖区暴雨热力发展机制的数值模拟显示^[13]，华南前汛期暖区暴雨降水环境的水汽条件充沛，为凝结潜热释放提供了良好环境，而凝结潜热释放促使气柱增温、拉伸，维持暴雨区的强低值系统特征及其垂直速度厚度与强度，进一步的凝结潜热增强暴雨区低层辐合环流，减弱中层辐散环流，其影响力达到30%~50%，有力促进暖区暴雨的发展。因此，低层辐合系统依托充沛水汽条件，促进中层凝结潜热释放，通过热力作用增强雨区低值系统强度，并影响中低层环流特征是华南沿海暖区辐合线暴雨的重要发展机制之一。

2.3 两类暖区暴雨辐合线系统地形动力机制

华南沿海地势大体北高南低，境内山脉众多、海岸曲折，海上气流登陆，地形阻挡与抬升是直接强迫；同时濒邻宽阔海域，水汽丰沛，持续输送。地理位置处于低纬，形成沿海暖区高温高湿。降水多集中于两个区域，分别为粤西沿岸，以及珠江口至粤东沿岸。前述两种类型暖区暴雨发生地的位置如图6所示。更具体地，粤西主要有呈团状的云雾山以及天露山，其主峰海拔高度达1704 m，是粤西南最高峰。对南来的海上气流形成正面阻挡与强迫抬升，而粤东则为莲花山呈东北—西南带状，绵延300 km，北面还有九连山、青云山和罗浮山等，均呈带状平行分布。它们对海上西南气流形成侧面阻挡和引导。

王坚红等^[14]通过多种方案数值试验，讨论了两种类型华南沿海暖区辐合线暴雨发展过程中地形影响的作用，得到如下结论。

1) 对两类辐合线暴雨分别进行粤西与粤东地形影响试验。结果显示，沿海山脉对形成与维持暖区辐合线系统，确定辐合线暴雨落区、降水的范围、雨强量级都具有重要作用。此外通过与辐合线系统中的辐合上升运动配合，地形抬升造成了抬升迅速、范围集中、层次深厚的增强上升运动层，利于凝结潜热释放增加，进而又反馈维持辐合线低值系统的强度以及暖区暴雨的强度。

2) 对偏南向型辐合线系统，如果无粤西云雾山正面阻挡，系统直接向北推进。在原有山脉位置处对应的降水雨带也随辐合线的北上向北推进，降水量显著减小，减小量可达50%。因此，山脉地形正面抬升对华南暖区辐合线系统的影响是双重性的：首先地形强迫抬升直接影响山脉迎风处降水的形成，而降水伴

随凝结潜热释放，又反馈增强辐合线低值系统暖心结构和加强其垂直运动层厚，所以地形与环流配合形成的辐合线系统是华南沿海暖区暴雨的关键系统。

3) 数值模拟结果还显示，云雾山与其东南邻近的天露山造成的地形狭管效应对系统辐合风速的影响力达13%~25%。地形正面抬升效应与狭管辐合上升效应的配合，为偏南向辐合线系统及对应的暴雨强降水提供了进一步增强的环境，造成此处华南暖区暴雨的频繁发生。

4) 对西南向型辐合线系统，数值试验显示，地形侧向摩擦作用影响西南气流辐合上升运动，当减弱山脉表面粗糙度，即减小侧向摩擦，将减弱沿山脉气流的垂直上升运动强度、伸展厚度，以及持续时间。也将减少和减弱沿海气团强比湿分布范围，进而减小降雨区的强度与分布。

3 华南沿海暴雨东风波系统

东风波是出现在副热带高压南侧东风气流中的槽或者是气旋性曲率最大的区域，其呈波状形式自东向西移动^[15]。影响我国的东风波主要生成在西太平洋或者近海区域的副热带高压南侧，随后向西传播影响登陆我国华南、东南沿海，影响范围可达长江中下游及西南地区^[16-17]。单纯的东风波会带来对流性降水，而在西南季风、台风等的配合下则可能造成更为持久的暴雨强降水^[18-20]。

王坚红等^[21]聚焦登陆影响我国南部沿海的暴雨东风波特征与影响机制研究。通过对1999—2013年夏季7—9月影响我国华南地区的暴雨东风波进行活动范围与活动特征分类，以及分类综合特征的合成分析，诊断各类东风波的环流背景、动力、热力结构特征以及主要环境影响因子。进一步对登陆华南东部的典型暴雨东风波过程进行数值模拟，探讨暴雨东风波关键因子的影响机制，尤其是海表海温SST在登陆东风波暴雨过程中对东风波维持发展及其降水强度、降水分布位置的各项机制效应。

3.1 影响华南的暴雨东风波分类及基本特征

1) 东风波的分类

早期Chang等^[22]利用光谱分析技术分析西太平洋上空的东风波动，给出两种不同类型的东风波扰动。一种特征为对流层低层波动位相向上传播，200 hPa以上则向下传播。认为这种波动是混合罗斯贝重力波在热带地区的表现。第二种扰动位置偏西，其特征是没有垂直位相的传播，潜热释放则是这种扰动重要的能量来源。梁必骥^[23]依据东风波伸展的高度，将影响我国华南地区的东风波分为三类：中低层东风波、高

层东风波和深厚东风波。其中出现次数最多的是中低层东风波（约占总数的58%）。但是许多研究^[24-26]显示，各类东风波的动力和热力结构以及大尺度天气背景环流形势都存在明显差异，并且与Riehl的东风波经典模型不完全相同，有的甚至完全相反。因此，对东风波的有效分类研究仍然是一个值得深入的问题。

王坚红等^[21]对15年来影响我国南部沿海地区的副高南侧东风带波动进行统计，对其中的中低层且发展深厚的，并在沿海登陆带来大到暴雨的中低层东风波过程进行分析，共诊断10个暴雨东风波个例。依据东风波槽线的移动路径，以及登陆位置、形成源地等，将此10个东风波过程分为三类，如图7~9所示。

图7~9显示了三类登陆并造成华南沿海暴雨的中

低层东风波：一类为偏南路径，此类东风波常在巴士海峡以东的西太平洋洋面形成，随后沿20°N副热带高压南侧向西平移到华南沿海，在广东南部沿海附近登陆后继续西移，影响广东、广西及海南。另一类东风波活动纬度明显偏高，接近30°N，其生成源地也是西太平洋，归为西行路径。第三类形成源地在浙闽近海，路径西北，定为近海东风波。其中偏南路径和西行路径东风波登陆之后，往往可持续移动，深入到内陆。而近海东风波在台湾岛附近的近海生成，槽线移动范围较小，主要影响福建和浙江两省沿海区域。

2) 东风波的特征

东风波的正涡度中心与其槽线纬向高度偏差在位置和数值上均有很好的对应关系^[21,27]：纬向高度偏差

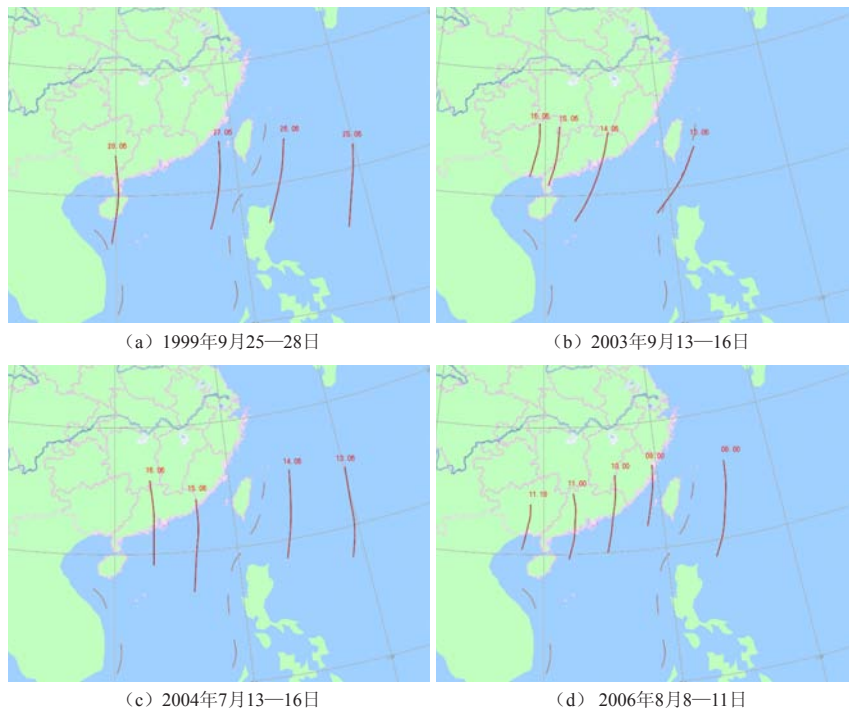


图7 偏南路径东风波过程槽线移动图^[27]

Fig. 7 The southerly trajectories of the easterly waves^[27]

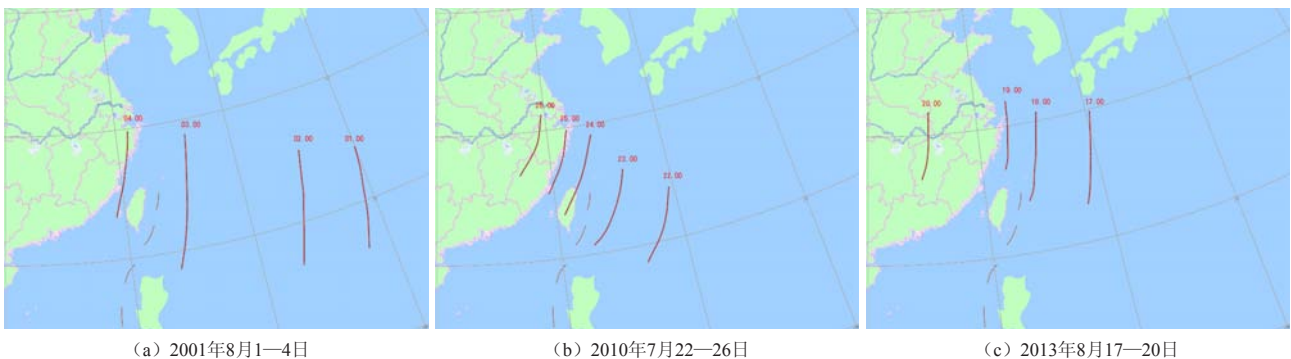
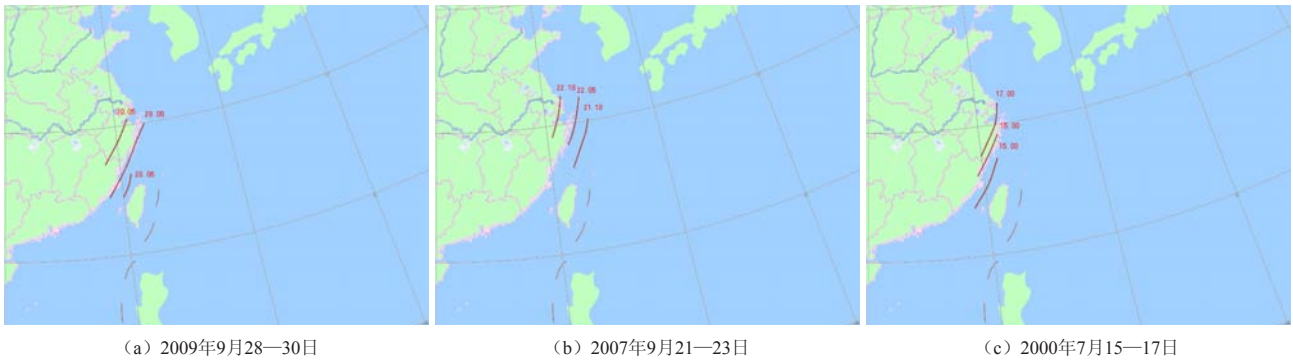


图8 西行东风波槽线移动路径^[27]

Fig. 8 The westerly trajectories of the easterly waves^[27]

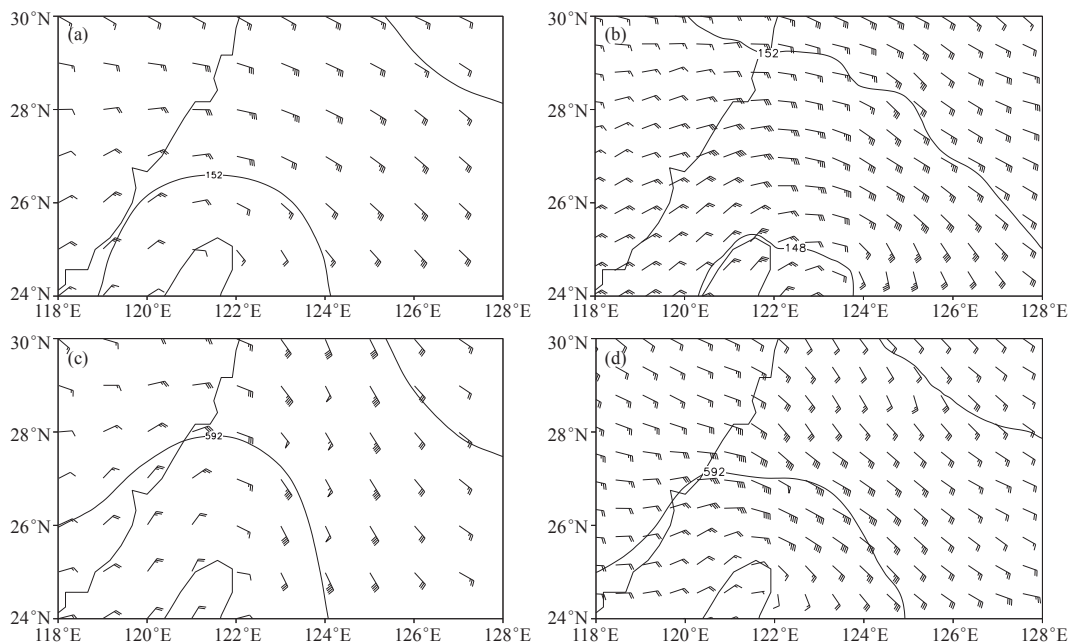
图9 近海东风波过程槽线移动路径^[27]Fig. 9 The near coast trajectories of the easterly waves^[27]

的负中心与正涡度中心位置基本重合；从数值上看，正涡度数值越大，对应的纬向高度负偏差值越大。负偏差中心为低值系统中心，即东风波槽线附近。正涡度区指示东风波波槽位置，正涡度值的大小指示东风波强度，所以用正涡度作为东风波定量指标，比较合适。此外分析显示这三类暴雨东风波的最强中心可以出现在中层500 hPa高度，但绝大多数位于低层900 hPa附近，因此，登陆暴雨东风波多数为中低层系统。

通过对水汽通量、垂直速度以及地形的综合效果分析，结果显示登陆东风波槽后的东南急流带来海上充沛水汽、槽后均有低层辐合产生的系统性深厚的强上升运动，登陆时沿海地形强迫抬升，这三者的综合作用维持了登陆东风波的暴雨强降水。登陆时的东风波波轴随高度基本垂直，有的甚至随高度向西倾斜，

这与经典东风波模型不同，应与登陆过程中东风波下垫面从平滑的海洋变为粗糙的陆地以及我国南部沿海多为丘陵地带有关。上层气流登陆西移而低层环流受地形阻挡移速显著减小，甚至停滞，造成登陆东风波西倾结构，更有利于沿海暴雨过程的维持。有关东风波发展机制，分析显示海洋表层的凝结潜热与感热输送以及东风波中层的暖中心，持续对东风波系统的增暖作用，有利于东风波低值系统的发展。

在登陆暴雨东风波中，垂直速度、风场辐合和垂直方向的水汽通量及通量辐合层次都较深厚，可达700 hPa以上，因此，暴雨东风波中的水汽条件、垂直上升运动条件，以及不稳定条件等均保持充沛与强盛。在能量方面，由于东风波中心附近有整层上升运动，即 $\omega < 0$ ，又有位温在东风波西行登陆过程中梯

图10 2001年8月3日20时(北京时)高度场(单位: dagpm)与风场^[21]Fig. 10 The potential height and wind fields at 20:00 BT on 3 August 2001^[21]

度加大,因此,在东风波涡度增强的环境下,整层扰动位能在西行过程中是增强的,即 $C_k > 0$ (能量转化项),即有扰动动能向分层扰动位能一阶矩项转化能量。到东风波登陆后,摩擦、降水等造成东风波强度减弱形成 $C_k < 0$,则有分层扰动位能一阶矩项减弱,能量向扰动动能转化^[21,27]。

由于东风波沿着副高南侧气流自东向西由海上向陆地推进,因此,海面SST直接影响东风波活动,主要特点是东风波低值系统对SST的响应有趋暖特征。

3.2 海温 SST 对东风波移动及其暴雨的影响机制

采用WRF模式的典型登陆暴雨东风波数值模拟结果显示^[21](图10),东风波位于台湾岛附近,850 hPa上模拟高度场强度略弱于实况,位置略偏东,模拟的风速则与实况较为一致。500 hPa上高度场和风场模拟与实况相近。

关于SST对东风波及其暴雨的影响机制数值模拟显示,随着SST暖中心的升高,可以通过增强海表感热与潜热输送促使东风波槽强度加强。

此外,SST的增温使得东风波在槽底位置的低值系统特征得到增强。由此加强了槽底区域的风场在东风波低层辐合成分,进一步维持和增强东风波系统内的垂直上升运动。这也是SST升高后雨区偏北,雨强增大的原因之一。

同时,模拟结果还显示东风波槽区螺旋度增强对应东风波的增强,显示暴雨东风波登陆后因底摩擦和暴雨强降水,螺旋度减弱。东风波纬向位温偏差显示东风波在热力场上具有“上暖下冷”(中层潜热释放增暖)的垂直结构。东风波西移涡度增强时,整层扰动位能增强,有扰动动能向分层扰动位能转化。东风波登陆强度减弱,则有分层扰动位能减弱,能量向扰动动能转化。

4 小结与讨论

对华南暖区强对流系统低层辐合线和登陆暴雨东风波的分析与研究,获得的进展可总结如下。

1) 华南暖区暴雨关键系统需要重视风场低值系统,尤其是低层特征。两类辐合线属于浅薄系统,登陆暴雨东风波也主要为中低层系统。采用风场定量计算的客观判定方法有助于确定低层辐合线系统,有助于跟踪系统和诊断系统强度,以及做出暴雨预报预警。

2) 暖区暴雨系统的热力发展机制主要是中层潜热释放,由于暖区水汽充沛,关键低值系统(包括低层辐合线系统和低层登陆暴雨东风波系统)的辐合垂直上升层次较深厚,有利于维持水汽垂直输送和在中层通过凝结潜热的释放,加强这些低值系统的强

度,进而支持更强的伴随暴雨强降水。

3) 环境影响因子中暖海温对东风波低值系统有增强作用,以及位置引导作用,进一步影响与低值系统配置的暴雨的位置及强度。沿海地形影响通过动力阻挡、喇叭口效应、侧向摩擦、侧向绕流等作用影响暖区低层辐合线低值系统的类型与强度,进而影响伴随的暴雨位置、范围、强度以及持续时间。

参考文献

- [1] 吴丽姬,温之平,贺海宴,等.华南前汛期区域持续性暴雨的分布特征及分型.中山大学学报(自然科学版),2007,46(6):108-118.
- [2] 张启绍,黄先成,王建新,等.基于EOF分析华南前汛期降水的时空分布特征.河南科学,2012,30(10):1512-1515.
- [3] 伍红雨,杜尧东,秦鹏.华南暴雨的气候特征及变化.气象,2011,37(10):1262-1269.
- [4] 彭丽英,王谦谦,马慧.华南前汛期暴雨气候特征的研究.南京气象学院学报,2007,29(2):249-253.
- [5] 陆虹,陈思睿,郭媛,等.近50年华南地区极端强降水频次的时空变化特征.热带气象学报,2012,28(2):219-227.
- [6] 王坚红,徐碧裕,刘刚,等.华南前汛期广东暴雨分区动力特征及特大暴雨分析.气象与环境学报,2014,30(6):43-51.
- [7] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术.北京:气象出版社,1999.
- [8] 许薇,汤强,陈欢欢.1962—2010年广东高温天气时空变化特征分析.气象与环境学报,2013,29(6):68-74.
- [9] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function. Mon Wea Rev, 1982, 110(7): 699-706.
- [10] 苗春生,赵文宁,王坚红,等.近53 a 云东南部春季旱涝及其环流距平波列影响.干旱区研究,2014,31(2):250-260.
- [11] 黄士松,李真光,包澄澜,等.华南前汛期暴雨.广州:广东科技出版社,1986:227-228.
- [12] 赵玉春,李泽椿,肖子牛.华南锋面与暖区暴雨个例对比分析.气象科技,2008,36(1):47-54.
- [13] 苗春生,杨艺亚,王坚红,等.两类华南沿海暖区暴雨特征及热力发展机制对比研究.热带气象学报,2017,33(1):53-63.
- [14] 王坚红,杨艺亚,苗春生,等.华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究.大气科学,2017,41(4):doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16182.
- [15] 朱乾根,林敬瑞,寿绍文,等.天气学原理与方法(第四版).北京:气象出版社,2007.
- [16] 包澄澜.影响长江中下游的东风波个例分析.南京大学学报,1974,(2):75-88.
- [17] 张端禹,郑彬,汪小康,等.华南前汛期持续暴雨环流分型初步研究.大气科学学报,2015,38(3):310-320.
- [18] 陆桂荣,王文,郑美琴,等.海南台风暴雨的时空分布特征.大气科学学报,2015,38(5):710-715.
- [19] 王黎娟,任晨平,崔晓鹏,等.碧利斯暴雨增幅高分辨率数值模拟及诊断分析.大气科学学报,2013,36(2):147-157.
- [20] 钱卓蕾,郭品文.2013年浙江两次汛期暴雨过程对比分析.大气科学学报,2016,39(2):253-259.
- [21] 王坚红,曾喻,彭模,等.中国南部沿海暴雨东风波特征及SST影响机制研究.大气科学学报,2017,40(3):333-345.
- [22] Chang C P, Morris V F, Wallace J M. A statistical study of easterly waves in the western Pacific: July-December 1964. J Atmos Sci, 1970, 27(2): 195-201.
- [23] 梁必强.南海热带大气环流系统.北京:气象出版社,1991:64-67.
- [24] 吴贤笃,冉令坤,李娜,等.一次东风波暴雨的动力因子预报研究.高原气象,2013,32(5):1339-1348.
- [25] 吴阳,周毅.影响我国的东风波特征分析.海洋通报,2005,24(3):88-91.
- [26] 肖文俊.东风波天气区域分布与基本气流垂直切变的关系.北京大学学报,1990,26(3):333-339.
- [27] 曾喻.华南沿海暴雨东风波与南海及西太平洋低纬SST关系研究.南京:南京信息工程大学,2014.

台风海域实时海洋监测及其应用研究综述

曹敏杰^{1,2} 刘增宏^{1,2} 王振峰³ 许建平^{1,2}

(1 国家海洋局卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012; 2 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;
3 上海海洋气象台, 上海 201300)

摘要: 简要阐述了台风海域实时海洋监测及其对台风预测预报的重要意义, 以及利用卫星跟踪的自动剖面浮标实时监测海洋环境要素的必要性和迫切性; 同时也回顾了国内外学者利用少量来自海上的自动剖面浮标观测资料, 在天气/气候领域的基础研究中所取得的初步成果, 呈现了自动剖面浮标在台风海域组网实施实时海洋监测及其有望提高对台风强度和路径, 乃至生成源地预测预报水平的广阔前景。

关键词: 自动剖面浮标, 实时海洋监测, 海洋环境, 台风, 预测预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.005

A Review of Real-Time Ocean Monitoring in Typhoon Region and Research Applications

Cao Minjie^{1,2}, Liu Zenghong^{1,2}, Wang Zhenfeng³, Xu Jianping^{1,2*}

(1 State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012

2 Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012

3 Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201300)

Abstract: In this paper, real-time ocean monitoring in typhoon genesis region and its importance for typhoon forecasting, as well as the necessity and urgency of monitoring marine environmental elements in real-time with satellite-tracked autonomous profiling floats are reviewed. Meanwhile, preliminary results in basic research on atmosphere/climate using observations from a few profiling floats are also reviewed. These efforts have effectively demonstrated the broad prospects of autonomous profiling float in real-time ocean monitoring, it improves the prediction and forecasting of typhoon intensity, moving track, and even its genesis location.

Keywords: autonomous profiling float, real-time ocean monitoring, marine environment, typhoon, prediction and forecast

0 引言

我国毗邻西北太平洋, 该海域是全球热带气旋(台风)发生最为集中的区域。据世界气象组织统计, 每年大概有占一半以上的热带气旋发生在北太平洋海域, 这其中约有80%会发展成台风^[1]。

热带气旋是影响我国的主要灾害性天气之一, 通常伴随巨浪、暴雨、狂风和风暴潮, 造成洪涝, 冲毁水库, 引发山体滑坡和泥石流, 对经过地区人民的生命、财产和生产活动造成巨大威胁, 对海上作业、海洋渔业和海水养殖业等造成重大安全隐患和经济

损失。如2015年, 我国沿海共发生台风风暴潮过程6次, 直接经济损失72.18亿元, 死亡7人。随着沿海经济带经济的迅速发展和全球气候变暖, 台风灾害有愈演愈烈之势, 已成为我国海洋经济可持续发展的一个制约因素^[2-3]。

国际Argo计划是人类历史上建成的首个全球海洋立体观测系统, 从2000年启动以来, 在美国、日本、法国、英国、德国、澳大利亚和中国等30多个国家和团体的共同努力下, 已经在全世界大洋中建成了由近4000个Argo剖面浮标组成的实时海洋观测网, 用来监测上层海洋内的海水温度、盐度和海流, 以帮助人类应对全球气候变化, 提高防灾减灾能力, 以及准确预测诸如发生在太平洋的台风等极端天气和海洋事件^[4]。

由此可见, 台风对我国所造成的灾害和损失巨大, 有必要加大对相关基础研究的投入, 深化对台风生成与发展机理的认识, 提高对台风的实时监测和预报能力, 减少台风和风暴潮等气象和海洋灾害对我国

收稿日期: 2016年11月6日; 修回日期: 2017年5月8日
第一作者: 曹敏杰(1987—), Email: caominjie@sio.org.cn
通信作者: 许建平(1956—), Email: sioxjp@139.com
资助信息: 科技基础性工作专项(2012FY112300); 国家自然科学基金项目(41606003); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室自主项目(SOEDZZ1514)

沿海社会经济和人民生命财产带来的重大损失，无疑是国家防灾减灾的重大需要。

1 海洋与台风相互作用过程研究进展与问题

台风路径和台风强度预报是台风预报中的两个关键因子。过去几十年，随着卫星遥感技术、数值模拟和数据同化技术的发展，台风路径预报水平有了显著提高，但有关台风强度的预报水平发展仍相对缓慢，其原因在于台风强度变化不但与大气复杂的涡旋动力学、热力学过程紧密联系，而且与海气相互作用密切相关^[5-7]。海洋内部不同动力过程对台风的响应将调制海面状态，从而影响海气界面交换，进而影响台风结构和强度变化。在台风影响下，海洋的中尺度环流会显著加强局地的动力和热力过程，通过将大量的机械能输入到海洋内部使得局地的海洋混合加强，从而改变温盐度结构；由埃克曼（Ekman）抽吸、夹卷和湍流混合引起的次表层冷水上翻，使海表温度降低，通过海气界面交换将抑制台风的增强。因此，加强对台风条件下上层海洋的认识，将有助于人们了解由台风引起的海洋夹卷、湍流混合及近惯性内波等不同尺度过程的机制。

无论对于海洋科学还是大气科学，海洋与台风的相互作用过程都是当前的研究热点和难点，也将是今后相当一段时间内的科学前沿问题。近年来，国际海洋与大气科学界进行了一系列大规模的热带气旋研究计划。例如，美国科学家在北大西洋进行了“耦合边界层海气交换”（CBLAST）试验，目的是认识热带气旋与海洋的相互作用并改善预报模式，同时与台湾科学家合作，在台湾以东实施了“太平洋台风对海洋影响”（ITOP）计划^[8-9]。目前，我国对台风的监测主要针对台风的登陆过程，海上观测极为罕见。台风登陆后，主要利用沿海地区自动气象站、高空探测、沿海多普勒雷达以及特种观测设备（GPS/MET水汽监测和边界层气象梯度探测）对台风进行监测。近年来，我国开展的有关台风的观测或科研项目主要有：2001年实施的中国登陆台风试验（CLATEX）^[10]；2009年启动的国家重点基础研究发展规划（973计划）项目“台风登陆前后异常变化及机理研究^[11]”；2013年启动实施了一个973计划项目“上层海洋对台风的响应和调制机理研究”^[12]。这些研究计划或项目的一个重要特点是利用综合立体观测手段，试图了解上层海洋对热带气旋的响应机制和调制作用，并探讨利用海洋观测资料提高预报能力的可能性^[12]。

长期以来制约台风研究和影响台风预报精度的根本原因，除了台风过程中气象资料的缺乏，还在于缺

乏台风生成源地或路径附近海域长时间序列的实时海洋（次表层）观测资料，以及台风天气和恶劣海况下观测海洋环境要素的有效手段和方法，从而阻碍了人们对海洋与台风相互作用过程的深入了解和准确模拟，更无法获得台风预报所需要的、可靠的海洋初始场。

众所周知，台风路径附近上层海洋在台风过境后产生较为复杂的流场，导致台风路径两侧以及台风最大风速半径内外存在不同的响应过程，而且台风前海洋的初始状态不同也能导致不同的响应过程，因此，如果在台风路径附近能获取实时的、大面积范围内（300 km）的上层海洋观测资料，对研究上层海洋对台风的响应和调制机理，进而提高台风预报精度能起到重要作用。所以，有必要通过国家业务主管部门的支持，利用业已研制成功的、适合在恶劣环境下观测的新颖海洋仪器设备，以便能大范围、长时间、高分辨率和实时地获取台风天气条件下的上层海洋环境资料，为发展和完善海洋与台风相互作用的理论方法、耦合数值模式等相关基础研究提供充分的数据源，从而为提高我国对台风的研究及其预报水平奠定基础。

2 发展Argo海洋观测网，成功实施台风海域实时海洋监测

过去，适合台风条件下海洋观测的手段主要有使用飞机投放的抛弃式温度测量仪（AXBT）和抛弃式海流剖面观测仪（AXCP）^[13]。但这种通过飞机投放的观测设备，一方面投放成本非常大，另一方面其观测寿命比较短，无法获取长时间序列的资料。一些锚碇浮标的观测资料也被用于偶然经过的台风对海洋影响的研究，虽然这种浮标可携带多种海洋或气象传感器，但其成本和维护费用都相当大，且容易受到人为因素的破坏以及恶劣天气的影响，难以构建用来专门观测台风的阵列或观测网^[13]。常规的船只走航或定点海洋观测，也只能在台风发生前或过境后实施，尤其是台风发生前的海洋调查，不是离台风生成日期或源地、路径太远，就是离台风太近，形成的大风大浪导致调查船无法实施观测，而且也十分危险。近年来，卫星遥感技术的发展似乎给恶劣天气下的海洋观测带来了曙光，其反演资料被广泛应用于热带气旋对海洋上层影响的研究^[14-15]。但卫星遥感只能观测海洋表面的温、盐度等海洋环境要素，而无法获取人们更关心的上层海洋（如1000 m水深以上）的环境要素资料。

于是，人们把眼光投向了21世纪初开始在全球海洋中构建的实时海洋观测网（核心Argo）。国际Argo计划自2000年启动以来，已经于2007年10月在

全球无冰覆盖的大洋上建成了一个由3000多个Argo剖面浮标组成的观测网，每个浮标能每隔10天自动观测1条0~2000 m水深内的温、盐度剖面，并通过卫星将观测资料经地面接收站和数据处理中心及互联网传递给用户^[16-17]。虽然，Argo观测网中浮标的分布密度（约300 km）、剖面观测周期（约10天），以及剖面测量过程和采样间隔等还不能完全满足海洋和大气科学家的要求，但也为人们带来了观测台风作用下的海洋是如何变化的希望和新思路^[18-19]。早期的Argo浮标，大部分使用Argos卫星进行单向通信，即无法在台风到达前或经过时能随时改变浮标的观测周期等技术参数实施对海洋的加密观测，以更多地获取台风路径附近海域上层海洋环境要素，而且数据传输速率较慢（<1 bytes/s），无法满足高分辨率观测数据的传输要求。于是，人们开始尝试使用具有双向通信、高速率传输（180~300 bytes/s）功能的铱卫星（IRIDIUM）通信系统。目前，在全球海洋中约40%的Argo浮标采用铱卫星传输数据，而我国也已经在西北太平洋海域布放了51个该型浮标，目前仍有约9个浮标在海上正常工作，在2012—2015年台风季节期间通过铱卫星双向通信功能，获取了一批加密Argo剖面资料，并已应用到上层海洋对台风响应过程（图1）的研究中。所以，Argo剖面浮标将会是今后较长一段时间内有能力监测台风海域实时海洋环境的重要手段。

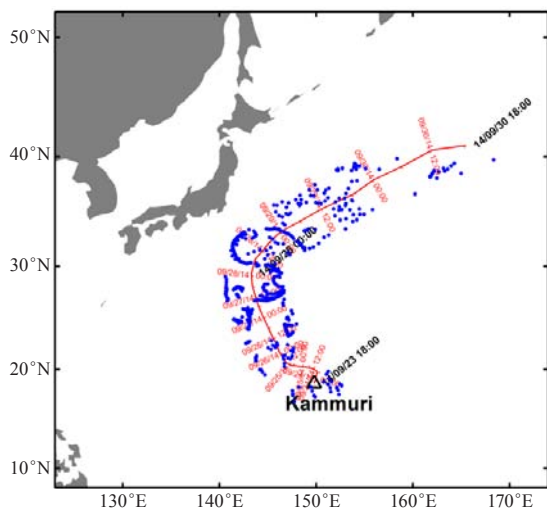


图1 2014年Kammuri台风路径附近Argo浮标剖面位置
Fig. 1 Positions of Argo floats near the track of Typhoon Kammuri in 2014

表1列出了上述各种观测仪器设备或观测系统的特点和优劣势对比。可以看到，使用卫星双向通信功能的剖面浮标构建海洋观测阵，对台风作用下的海洋进行大范围、长期、连续、实时监测，将是一种最理想、最有效的观测手段。

表1 台风天气条件下不同海洋观测方式比较

Table 1 Comparison of various ocean observing methods in situ under typhoon conditions

观测设备	观测要素	优点	缺点
AXBT、AXCP	温度、盐度、海流	价格便宜	投放成本大、使用寿命短，8级以上大风天气无法投放
锚碇浮标	温度、盐度、海流、风速、湿度和气温等	观测要素多	成本及维护费用大，易受人为破坏及恶劣天气的影响
船载CTD、ADCP仪	温度、盐度、海流	观测深度可超过2000 m，采样间隔密集	8级以上大风天气无法观测
卫星遥感	海表温、盐度、风场、降水、水汽等	覆盖面广，可全天候观测	仅观测海表面
常规Argo剖面浮标	温、盐度（可加溶解氧、叶绿素等传感器）	成本低、观测深度达2000 m，易于组成观测阵	使用国外卫星导航系统，定位、通信受制于人，且只能单向通信，数据传输速度较慢，剖面垂向分辨率不高
铱卫星Argo剖面浮标	温、盐度（可加溶解氧、叶绿素等传感器）	成本低、观测深度可达2000 m，可双向通信，剖面垂向分辨率高，易于组成观测阵	使用国外卫星导航系统，定位、通信受制于人

在国外，除了美国早期开发的APEX型剖面浮标和法国研制的ARVOR型剖面浮标可以专门用于台风海域的实时海洋环境监测外，美国伍兹霍尔海洋研究所还成功开发出了一种专门用于台风观测的微型空投浮标（ALAMO），可以在台风来临之前利用飞机快速、准确地布放在台风海域，以便获取更大范围内、更多的现场观测资料。

在国内，台风海域的实时海洋监测也越来越受到人们的广泛重视，除了相关的973计划项目和基础性工作专项等已在西北太平洋台风海域陆续布放了一批常规（利用ARGOS单向通信）Argo剖面浮标外，还布放了数十个可以双向通信（利用IRIDIUM卫星系统）的剖面浮标。需要指出的是，2015年9月，由中船重工七一〇研究所自主研发的HM2000型剖面浮标，采用了我国的北斗卫星系统（BEIDOU）定位和传输观测资料，并具备与铱卫星相同的双向通信功能，同样可用于台风海域的实时海洋监测。第一批（6个）HM2000型剖面浮标已经由中国科学院海洋研究所率先布放在西北太平洋西边界流海域（吕宋岛以东），并得到了国际Argo信息中心（AIC）的认可。部分资料经过中国Argo实时资料中心严格质量控制后，已经通过全球通信系统（GTS）和互联网（WWW、FTP），与世界气象组织（WMO）和国际Argo计划成员国共享。这标志着HM2000型剖面浮标已经走出国门，正式成为Argo剖面浮标大家庭中的一员，打破了长期以来Argo海洋观测网由欧美浮标一统天下的局面，从而实现了我国海洋观测仪器设备用于

国际大型海上合作调查计划“零”的突破。同时期筹建的“北斗剖面浮标数据服务中心（中国杭州）”，也已成为继ARGOS卫星地面接收中心（法国图卢兹）和IRIDIUM卫星地面接收中心（美国马里兰）后，第三个有能力为全球Argo实时海洋观测网提供剖面浮标观测数据传输的服务中心。

3 自动剖面浮标观测资料在天气/气候学研究领域中的应用

3.1 热带气旋（台风）研究

早在2010年11月，我国就开始使用铱卫星Argo剖面浮标，在西北太平洋海域开展了台风季节Argo剖面浮标加密观测试验，获取了台风路径附近海域0~500 m、间隔2~3天的大量加密剖面资料，这些新颖的第一手现场观测资料为研究上层海洋对台风的响应提供了丰富的数据来源^[4]。

国内外众多学者利用西北太平洋海域的Argo资

料，开展了台风过境海洋上层响应过程的相关研究工作^[13, 20-28]。刘增宏等^[13]通过对西北太平洋Argo浮标观测资料分析发现，由台风影响的混合层盐度变化在台风路径两侧分布对称；许东峰等^[20]在研究了西北太平洋暖池区夏季Argo浮标观测资料后得到，台风经过暖池区时，往往会导致海面盐度的下降，其主要原因为热带气旋带来的淡水输入；Liu等^[25]通过铱卫星Argo浮标加密观测资料分析显示，2012年Bolaven台风路径左右两侧海洋表层和次表层呈现不同的温盐度变化过程（图2）；Pei等^[28]通过Argo观测资料结合卫星和模式的研究发现，海洋上混合层深度在台风作用下会增加，并向大气释放潜热；Lin等^[21, 22, 26]通过分析台风过境海域Argo现场观测资料，研究了海洋热含量对于热带气旋强度及其对风暴潮影响的预测，并建立了新的热带气旋预报因子。此外，McPhaden等^[29]利用Argo和RAMA（印度洋的热带锚系观测网）资料来研究2008年Nargis热带气旋的形成过程。

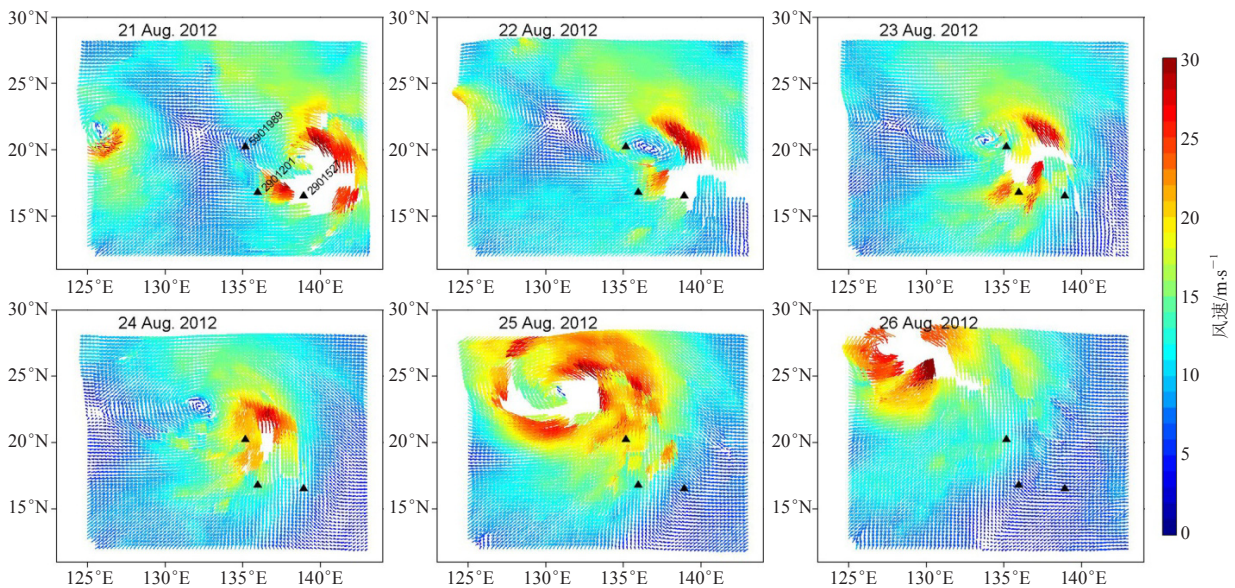


图2 2012年8月21—26日台风Bolaven期间的逐日风矢量分布^[25]

（彩色阴影为风矢量；黑色三角形为采取铱卫星双向通信的Argo剖面浮标）

Fig. 2 Daily wind vector distributions of Typhoon Bolaven during August 21—26, 2012(wind speeds are shaded by colors; the three selected Iridium profiling floats are marked with black triangles^[25])

3.2 海洋对热带气旋响应和反馈研究

上层海洋对热带气旋（TC）的响应和反馈是一种极端天气条件下的中尺度海气相互作用，对于其相互作用机制和过程的了解有助于更好地理解TC的产生、发展以及强度、路径变化等原因，进而为TC预报、预警提供依据。尽管短暂的天气现象并不是Argo的观测重点，但是Argo浮标通过全天候的观测，能帮助人们

更好地了解TC生成海域的海洋内部状态以及发展过程中附近海域的海气热交换、淡水通量变化等过程。

Argo浮标由于不受恶劣环境的影响，适用于上层海洋响应和反馈研究，特别是TC经过的海洋存在着强烈的海气相互作用，往往发生强烈的混合、夹卷等过程。在台风经过之前、经过时和经过之后，海洋的响应是不同的，台风经过时主要是垂向的湍流混合，而

台风过后则主要是近惯性流引起的埃克曼涌升和惯性抽吸^[30]。Price通过模式结果研究发现,台风导致的海表降温主要是由于上升流或深层海水混合,而不是海表失热^[31]。Cheng等^[27]基于Argo资料研究了全球尺度范围内海洋热状态对TC的响应,研究表明:在热带风暴经过的3天内,海洋向大气提供能量以维持热带风暴,其年平均总值约为 9.1 W/m^2 ,其中 3.2 W/m^2 来自于热带风暴,剩余的 5.9 W/m^2 来自台风,且在台风经过后(平均4~20天),海洋获得能量,而热带风暴经过后,海洋则损失能量,揭示了超强TC和强TC对于海洋热状态影响的不同。Park等分析台风经过前后混合层温度(Mixed Layer Temperature, MLT)和混合层厚度(MLD)变化后发现,北太平洋混合层温度平均下降 1°C ,混合层厚度平均加深 56 m ^[32]。比较台风经过前后海洋近表层和次表层热含量变化表明:强TC下,垂向混合导致次表层的升温 and 近表层的冷却量级相当;在弱TC下,近表层(海水深度1 m以上)的冷却显著,但次表层(表层以下,以跃层为界,厚度一般为 $200\sim 300 \text{ m}$)升温不明显,这说明在弱TC里海气热交换和垂向对流作用更显著^[30]。Park等研究发现,近表层热含量恢复时间(大于30天)要远远长于海表温度的恢复时间(仅需10天)^[33]。许东峰等指出台风经过时海表盐度(Sea Surface Salinity, SSS)的变化取决于降雨、蒸发增加、混合层内混合增强和跃层涌升等4个效应间的竞争结果,而Argo剖面观测显示在西北太平洋暖池区的绝大部分台风往往引起SSS的下降^[20]。台风强度变化除了与海表温度有关,还与海洋的垂向温盐结构特征有关。台风在经过有障碍层海域时,稳定的海洋层结减弱了垂向的混合冷却,热量从海洋传向大气导致台风强度增强,同时盐度结构也可以作为海洋状态的指示来预报台风强度变化^[34]。

4 面临的挑战与展望

Argo的核心目标是观测与气候变化密切相关的海洋信息,包括海洋温度与热容量、盐度和淡水容量、相对于总海平面的海面比容高度,以及大尺度环流等的区域性和全球变化。Argo资料的成功应用大大加深了对台风活动的认识。利用Argo剖面浮标,我们有能力对台风海域海洋环境进行实时监测,从而可以大范围、长时间、高分辨率和实时地获取台风天气条件下的上层海洋环境资料。这些数据源对发展和完善海洋与台风相互作用的理论方法、耦合数值模式等相关基础研究具有重要意义。

然而,作为今后较长一段时间内有能力监测台风海域实时海洋环境的重要手段,Argo计划目前正

面临着重大挑战。一是今后10年以温盐观测为主的常规观测网的维持问题,预计每年仍需投放 $800\sim 900$ 个浮标。像Argo计划这样的全球海洋观测系统至少需要持续数十年才能体现其潜在的价值,这也正是气候变化研究所必需的。Argo观测网若不能持续稳定,业务化海洋服务、气候服务、季节和年代际预测预报等都无法持续。二是扩展Argo观测网的覆盖区域,将由目前的“核心Argo”向“全球Argo”扩张,包括高纬度海域、边缘海和西边界海域,布放浮标的数量也将从目前的3000多个增加到近4000个,这是Argo计划未来10年的发展目标。按照国际Argo信息中心(AIC)的估算,在由“核心Argo”向“全球Argo”扩张的过程中,除了需要新增加约1000个浮标外,每年还需要补充布放约1000个浮标,才能维持由4000个浮标组成的全球Argo实时海洋观测网。然而目前由30多个Argo成员国每年布放的浮标数量只有800个左右。美国承诺为维持该观测网提供约1/2的浮标,其他参与国也都在为维持该观测网的长期运行而积极争取政府的支持。

中国Argo计划虽然是在国务院正式批复“我国可加入Argo全球海洋观测计划”以后,由科技部基础研究司、国际合作司和国家海洋局科技司等部门共同管理实施的一项国家计划,但没有如其他国家设置专项那样分配相应的资金,而是由科技部和国家海洋局负责实施的已有研究专项或计划(如“国家重点基础研究发展规划前期研究专项”“国际科技合作重点项目计划”“海洋公益性行业科研专项”和“科技基础性工作专项”等)中调剂部分经费给予一次性资助,缺乏固定的支持渠道和经费保障。目前,我国Argo大洋观测网的维护和浮标补充布放主要依赖科研项目的支持,缺少长期稳定的经费支撑,导致每年布放的浮标数量十分不稳定,甚至有些年份(如2005和2007年)无标可放,与一个海洋大国的地位尚有距离。我国参与全球Argo实时海洋观测网建设,不仅仅是在尽一个国际Argo计划成员国的义务,也是在全球自然灾害频发的今天肩负起一个海洋大国的责任,而更为重要的是,对此有着十分迫切的国家需求。事实上,许多Argo成员国(如美国、法国、德国、英国、日本和韩国等国家)的浮标布放计划,都得到了来自国家海洋气象部门的经费支持。为此,中国Argo计划应该得到国家海洋和气象主管部门的高度重视和大力支持。

值得指出的是,全球Argo实时海洋观测网的建设目标主要是为了获取大洋表层到中层(约 2000 m),甚至到深层(约 6000 m)范围内的温、盐度剖面资料,以便帮助科学家了解大尺度实时海洋的变化,提

高天气和海洋预报的精度，有效防御全球日益严重的天气和海洋灾害（如飓风、台风、龙卷、冰雹、洪水和干旱，以及风暴潮、赤潮等）给人类造成的威胁。然而，Argo资料在我国相关领域（特别是天气、气候研究）的应用却还未能引起足够的重视。当然，海洋观测网的时间序列与气象观测网相比还不够长、缺少海表温度（SST）资料（目前大部分剖面浮标还只能观测离海面3~5 m以深的温度资料），以及不能业务化提供高质量、格点化浮标资料等问题，也是制约气象学家大规模应用Argo资料开展相关研究的障碍。但从我们了解的情况来看，要突破障碍和解决上述问题不在于技术或方法的缺乏，而主要受到体制和机制的约束，特别是要统一和提高对全球Argo实时海洋观测网长期建设必要性的认识。

为此，气象部门应充分利用我国成功开发北斗剖面浮标的契机，在邻近我国的西太平洋（台风）海域构建起我国的实时海洋监测系统。通过北斗卫星或铱卫星及时调整浮标观测参数，以获取更多的加密观测资料，以及快速检索台风路径附近海域的Argo资料并自动生成相关数据产品，为国内气象服务部门准实时提供台风海域的相关海洋环境数据和信息服务。同时，该监测系统中的北斗剖面浮标或其他采用铱星通信的剖面浮标，其常规（每隔10天获取的一个深水剖面）观测资料，以及已经漂移离开台风影响海域的浮标观测资料，可以作为中国Argo计划的一部分，与WMO和国际Argo计划成员国共享，不仅可以提高我国对深海大洋长期、连续、高时空分辨率和高精度观测的能力，而且还可以提升我国在国际Argo成员国中的地位和作用。

参考文献

- Peduzzi P, Chatenoux B, Dao H, et al. Global trends in tropical cyclone risk. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 289-294.
- 陈光华, 黄荣辉. 西北太平洋热带气旋和台风活动若干气候问题的研究. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 610-616.
- 雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 等. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法. *气象学报*, 2009, 67(5): 875-883.
- 刘增宏, 吴晓芬, 许建平, 等. 中国Argo海洋观测十五年. *地球科学进展*, 2016, 31(5): 445-460.
- D'Asaro E A, Black P G, Centurioni L R, et al. Impact of typhoons on the ocean in the Pacific. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(9): 1405-1418.
- Emanuel K A. Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, 1999, 401(6754): 665-669.
- 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. *大气科学*, 2001, 25(3): 420-432.
- Chen S S, Price J F, Zhao W, et al. The CBLAST-hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere wave ocean models for hurricane research and prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 88(3): 311-317.
- D'Asaro E, Black P, Centurioni L, et al. Typhoon-ocean interaction in the western north Pacific: Part 1. *Oceanography*, 2011, 24(4): 24-31.
- Chen L S, Zhou M Y, Xu X D. A tropical cyclone landfall research program (CLATEX) in China: 26th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, Miami, May 3-7, 2004. Amer Meteor Soc, 2004.
- 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 台风登陆前后异常变化的研究进展. *气象学报*, 2014, 72(5): 969-986.
- 陈大可, 雷小途, 王伟, 等. 上层海洋对台风的响应和调制机理. *地球科学进展*, 2013, (10): 1077-1086.
- 刘增宏, 许建平, 朱伯康, 等. 利用Argo资料研究2001—2004年期间西北太平洋海洋上层对热带气旋的响应. *热带海洋学报*, 2006, 25(1): 1-8.
- 胡潭高, 张登荣, 王洁, 等. 基于遥感卫星资料的台风监测技术研究进展. *遥感技术与应用*, 2013, 28(6): 994-999.
- 刘广平. 海洋上层对热带气旋响应的研究. 厦门: 厦门大学, 2009.
- Riser S C, Freeland H J, Roemmich D, et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 145-153.
- 许建平, 刘增宏, 孙朝辉, 等. 全球Argo实时海洋观测网全面建成. *海洋技术学报*, 2008, (1): 68-70.
- 陈大可, 许建平, 马继瑞, 等. 全球实时海洋观测网(Argo)与上层海洋结构、变异及预测研究. *地球科学进展*, 2008, 23(1): 1-7.
- Liu Z, Xu J, Sun C, et al. An upper ocean response to Typhoon Bolaven analyzed with Argo profiling floats. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 90-101.
- 许东峰, 刘增宏, 徐晓华, 等. 西北太平洋暖池区台风对海表盐度的影响. *海洋学报*, 2005, 27(6): 9-15.
- Lin I, Goni G J, Knaff J A, et al. Ocean heat content for tropical cyclone intensity forecasting and its impact on storm surge. *Natural Hazards*, 2013, 66(3): 1481-1500.
- Lin I I, Black P, Price J F, et al. An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(9): 1878-1882.
- Sun L, Li Y X, Yang Y J, et al. Effects of super typhoons on cyclonic ocean eddies in the western North Pacific: a satellite database evaluation between 2000 and 2008. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(9): 5585-5598.
- Wang X, Wang C, Han G, et al. Effects of tropical cyclones on large-scale circulation and ocean heat transport in the South China Sea. *Climate Dynamics*, 2014, 43(12): 3351-3366.
- Liu Z, Xu J, Sun C, et al. An upper ocean response to Typhoon Bolaven analyzed with Argo profiling floats. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 90-101.
- Lin I I, Pun I F, Lien C C. "Category-6" supertyphoon Haiyan in global warming hiatus: contribution from subsurface ocean warming. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(23): 8547-8553.
- Cheng L, Zhu J, Srivier R L. Global representation of tropical cyclone-induced short-term ocean thermal changes using Argo data. *Ocean Science*, 2015, 11(5): 719.
- Pei Y, Zhang R, Chen D. Upper ocean response to tropical cyclone wind forcing: A case study of typhoon Rammasun (2008). *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58(9): 1623-1632.
- McPhaden M J, Foltz G R, Lee T, et al. Ocean-atmosphere interactions during cyclone nargis. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2009, 90(7): 53-54.
- 安玉柱, 张初, 陈奕德, 等. Argo资料处理及其在海洋热动力学研究中的应用与进展. *Argo科学研讨会论文集*. 北京: 海军出版社, 2014.
- Price J F. Upper ocean response to a hurricane. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(2): 153-175.
- Park J, Park K, Kim K, et al. Statistical analysis of upper ocean temperature response to typhoons from ARGO floats and satellite data. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 2005, 13(7): 2564-2567.
- Park J J, Kwon Y O, Price J F. Argo array observation of ocean heat content changes induced by tropical cyclones in the north Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(C12): 210-222.
- Balaguru K, Chang P, Saravanan R, et al. Ocean barrier layers' effect on tropical cyclone intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(36): 14343-14347.

国家级海洋气象业务现状及发展趋势

黄彬 赵伟

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 近几年, 我国海洋气象预报业务有了长足的发展, 建成了国家级、区域中心、省、地(市)四级, 集监测、分析、预报、预警、服务为一体较完整的海洋气象监测预报预警业务体系。对海洋气象预报业务的现状及其发展进行了简要回顾, 结合《海洋气象发展规划(2016—2025年)》中海洋气象业务面临的挑战和需求, 探讨了当前海洋气象业务存在的不足及未来的发展方向。

关键词: 海洋气象, 海雾, 数值模式, 精细化, 业务现状, 发展规划

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.006

Current Status and Development Trend of National Marine Meteorological Service

Huang Bin, Zhao Wei

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: In recent years, operational marine weather forecasting in China has developed considerably, an integrated marine weather monitoring, analysis, forecasting and early warning system has been built, which includes national, regional, provincial and city (4-level) centers. This paper briefly reviews the current status and future development of China's operational marine meteorological forecasting services, and discusses the challenges, needs as well as future directions based on the Marine Meteorology Development Plan (2016-2025).

Keywords: marine meteorology, sea fog, numerical model, refinement, current status, development plan

0 引言

我国海洋气象水文预报业务主要由中国气象局和国家海洋局承担, 中国气象局主要负责海洋气象预报, 国家海洋局负责海洋水文预报, 通俗地讲, 在分工上气象部门承担水面以上的业务, 海洋部门负责水面及以下的业务。2007年3月, 中国气象局台风与海洋气象预报中心成立, 作为专设机构从事海洋气象预报业务, 现已初步建成了国家级、区域中心(天津、上海和广州)、省、地(市)四级, 集监测、分析、预报、预警、服务为一体的较完整的海洋气象监测预报预警业务体系, 预报范围涵盖了我国近海海域和全球海上遇险安全系统(GMDSS)公海责任区的XI海区(印度洋海域)。2012年, 尹尽勇等^[1]对海洋气象预报业务的现状及其发展进行了简要回顾, 阐述了当时海洋气象监测技术手段, 以及国内外在海雾、海上大风、海浪和风暴潮等海洋气象灾害预报技术方面的发展, 本文再对国家级海洋气象业务的开展情况进行

梳理和总结, 并结合2016年国家发展和改革委员会、中国气象局、国家海洋局联合印发《海洋气象发展规划(2016—2025年)》中海洋气象业务面临的挑战和需求, 阐述国家级海洋气象发展趋势。

1 国家级海洋气象业务和技术进展

1.1 国家级海洋气象业务体系建设

海洋气象综合观测体系建设初具规模。中国气象局建立以沿岸海域为主的海洋气象观测系统, 已经建设了304个海岛(海上平台)自动气象站、200个强风观测站、39个船载自动气象站、33个锚系浮标气象站、26个天气雷达站、10个探空站、17个风廓线雷达站、75个全球卫星导航定位水汽观测(GNSS/MET)站、37个雷电监测站、6个地波雷达站, 并建立了监控运行及保障天气雷达、自动气象站、探空雷达、GNSS/MET等气象装备的信息化业务应用系统(ASOM)。

海洋气象监测预报业务系统基本建成。近年来, 建立了基于静止气象卫星、极轨气象卫星、多普勒天气雷达、地面常规观测、沿海地面自动站加密观测、海岛自动站观测、海上石油平台观测以及海上浮

收稿日期: 2017年1月22日; 修回日期: 2017年7月11日
第一作者: 黄彬(1971—), Email: hbzj199928@163.com

标观测等多源观测资料的海上大风和海雾实时监测系统；建立了以MICAPS或CIMISS等为系统框架的国家级和省级海洋气象实时监测及预报业务平台。预警类产品涵盖海上大风预警、海雾预报及世界气象组织（WMO）责任海区海事天气公报，精细化网格预报产品开展了近海及沿岸5~10 km和XI责任海区25 km分辨率风、浪、天气现象和能见度等海洋气象要素预报。

海洋气象专业数值预报模式日臻完善，构建了海洋气象专业数值预报模式体系框架，不断完善和优化海洋专业模式参数化方案，形成了0~15天“无缝隙”海洋气象预报预警的全方位技术支撑保障，现有的海洋气象专业数值预报模式主要包括全球和区域海面风场数值模式、中国近海海雾数值预报模式、全球海浪预报模式、西北太平洋区域海浪模式、黄渤海精细化风浪数值预报模式，以及中国近海风暴潮数值模式等。

1.2 海雾监测及预报技术发展

2012年，尹尽勇等^[1]对海洋气象业务技术发展做了介绍，重复的不再赘述。由于地面监测资料的匮乏，以及海洋监测资料如浮标等建设和维护的高成本，近几年着力挖掘开发卫星监测资料在海洋气象预报技术的应用，这里对卫星在海雾监测应用最新进展和海雾预报技术的进展做简要介绍，卫星监测资料在洋面风的应用进展已另成文介绍。

1.2.1 海雾监测应用技术取得进展

岸基监测对于海雾的代表有局限性和不确定性，具有良好空间和时间数据分辨率的卫星影像数据是填补这个差距的较为理想的数据源。卫星观测数据受

日夜变化辐射特征影响明显，夜间和白天的雾监测具有完全不同的方法。20世纪90年代以来，通过卫星观测定量反演雾形态以及水平能见度的工作逐步开展，Minnis等^[2]提出了使用光学厚度定量反演雾顶高度的经验方法。Heidinger等^[3]对此方法进行了修正。Bendix^[4]和Bendix等^[5]使用可见光反照率资料建立了反演光学厚度的方法。朱小祥等^[6]采用F1-D多通道综合判别海雾，能够确定图像上每个像素点上是否有雾，监测产品的空间分辨率可达 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 。白天有可见光辅助以判断，根据海雾的监测特征识别标准容易判别，而夜间缺失了可见光通道的监测，难以分析海雾，夜间雾（含低层云）监测的方法是根据在中波、长波红外波段中小粒子不透明水云发射率不同的理论^[7]建立的检测夜间雾（含低层云）的双通道差值法（BTD）^[8]，该方法目前仍是夜间雾监测的基础。Wu等^[9]建立了卫星夜间海雾监测技术，实现了海雾自动判别业务，采用极轨和静止卫星5种数据源的海雾业务产品（表1）监测，形成了全天候海雾卫星监测和反演产品（图1），并于2014年利用卫星垂直探测技术反演海雾垂直厚度。

表1 5种数据源的海雾业务产品
Table 1 The sea fog products from five data sources

卫星/仪器	时间频次	空间分辨率	覆盖范围	数据格式	图像格式
FY-3B/VIRR	2次/日	1.1 km	中国海域	AWX	BMP
TERRA/MODIS	2次/日	1.25 km	中国海域	AWX	JPG
NOAA-18/AVHRR	2次/日	1.25 km	中国海域及部分印度洋	AWX	JPG
FY-2E/VSSR	24次/日	1.25 km	中国周边海域	AWX	PNG
葵花-8号/JAMI	48次/日	1.25 km	中国周边海域	AWX	PNG

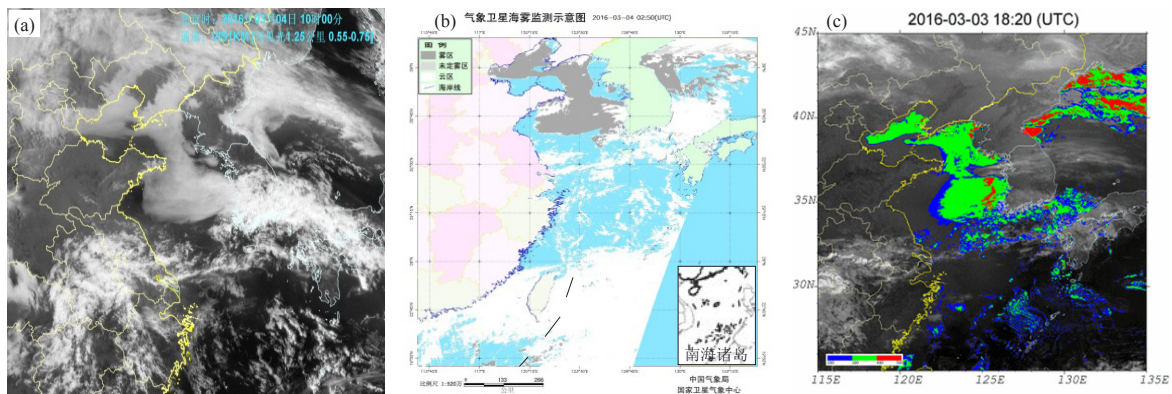


图1 2016年3月4日海雾卫星监测及反演产品

(a) 2016年3月4日10时（北京时）风云可见光卫星监测；(b) 2016年3月4日02:50（世界时）卫星反演产品；(c) 2016年3月3日18:20（世界时）海雾垂直厚度监测

Fig. 1 Marine fog satellite monitoring and inversion products on March 4, 2016

(a) the visible satellite monitoring at 10 BT March 4, 2016; (b) satellite inversion products at 02:50 UTC March 4, 2016; (c) sea fog vertical thickness monitoring at 18:20 UTC March 3, 2016

1.2.2 海雾预报技术不断完善

海雾的预报一直是海洋气象预报工作的难点，对其预报方法一直没有得到很好的解决。海雾数值预报在近几年取得较快发展，并且随着集合预报的发展，海雾模式未来在集合预报的应用将有更大的进展空间。傅刚等^[10]对近30年来我国海雾的微物理学特征、海雾与层云的关系、北太平洋与大西洋上海雾发生频率的气候学特征、海雾的数值模拟、海雾的数据同化和集合预报的重要进展进行了回顾。章国材^[11]回顾了我国雾业务预报发展的三个阶段（经验预报、主客观相结合的雾预报和精细雾监测预报）的情况及进展，指出雾预报的发展方向是建立包含先进资料同化系统的高分辨率区域模式系统，在近期仍然需要发展数值预报产品解释应用技术，预报员的经验在提高对大雾这种灾害性天气的预报准确率方面仍然有用武之地。史得道等^[12]认为，同化更好的卫星资料弥补海上观测缺少的不足，选择最合适的边界层与微物理参数化方

案，进行高分辨率三维数值模式集合预报，将使海雾预报的准确率明显提高。近两年，国家气象中心研发了海雾客观预报技术方法。目前在业务预报中比较常用的预报方法包括气候统计法、天气学方法、数值预报方法以及MOS方法。在这几个方向的海雾预报中，气候统计和天气学方法只能给业务预报提供参考，可以定性使用而不能做定量预报，动力统计方法是指在数值预报的输出产品当中筛选预报因子，对有雾和无雾时影响该区域雾生成的各要素进行统计对比分析，并结合海雾的天气气候学研究结果，分析各要素的敏感性和代表性，选取适用于该区域的海雾预报变量因子（表2），并将预报因子量化，最后给出该海区各季节的出雾判别条件与因子阈值。利用统计方法建立海雾的预报方程，从而做出海雾的预报（图2），这种方法的优点是既考虑了数值模式本身和计算的误差，同时也将局地的特定气候特点考虑进去。

表2 各季节与海雾出现显著相关的因子
Table 2 Significant factors correlated to sea fog in 4 seasons

	渤海、渤海海峡、 黄海北部	黄海中部和南部	东海	台湾海峡、台湾以东	北部湾、南海
春	925 hPa相对湿度、 1000 hPa相对湿度、 $T-T_d$	10 m风向、925 hPa风向、 1000 hPa风向、925 hPa相对 湿度、850 hPa相对湿度、 1000 hPa相对湿度、 925~1000 hPa相对湿度变 化、 $T-T_d$	1000 hPa相对湿度、 925~1000 hPa温差、 850 hPa相对湿度、 925 hPa相对湿度、 925~1000 hPa相对湿度变 化、 $T-T_d$	850 hPa风向、925~1000 hPa温差、 1000 hPa相对湿度、925~1000 hPa相 对湿度变化、925 hPa风速、1000 hPa 风速、 $T-T_d$ 、700~850 hPa风切变	10 m风向、850 hPa风向、 925 hPa风向、1000 hPa相 对湿度、925~1000 hPa 温差、 $T-T_d$
夏	1000 hPa相对湿度、 $T-T_d$	10 m风向、925 hPa风向、 1000 hPa相对湿度、 $T-T_d$	1000 hPa相对湿度、 $T-T_d$	$T-T_d$	$T-T_d$
秋	850~925 hPa温差、 925~1000 hPa温差、 1000 hPa相对湿度、 925~1000 hPa相对湿度 变化、 $T-T_d$	850~925 hPa温差、 925~1000 hPa温差、 1000 hPa相对湿度、 925~1000 hPa相对湿度变 化、 $T-T_d$	850~925 hPa温差、 925~1000 hPa温差、 1000 hPa相对湿度、 925~1000 hPa相对湿度变 化、 $T-T_d$	850 hPa风向、850~925 hPa温差、 925~1000 hPa温差、925~1000 hPa 相对湿度变化、1000 hPa相对湿度、 10 m风速、925 hPa风速、1000 hPa风 速、 $T-T_d$ 、700~850 hPa风切变	$T-T_d$
冬	850~925 hPa温差、 925~1000 hPa温差、 1000 hPa相对湿度、 $T-T_d$	850~925 hPa温差、 925~1000 hPa温差、 1000 hPa相对湿度、 $T-T_d$	1000 hPa相对湿度、 925~1000 hPa温差、 850~925 hPa温差、 $T-T_d$	850~925 hPa温差、925~1000 hPa温 差、925~1000 hPa相对湿度变化、 10 m风速、925 hPa风速、1000 hPa风 速、700~850 hPa风切变、 850~925 hPa风切变	10 m风向、850 hPa风向、 925 hPa风向、 925~1000 hPa温差、 1000 hPa相对湿度、 $T-T_d$

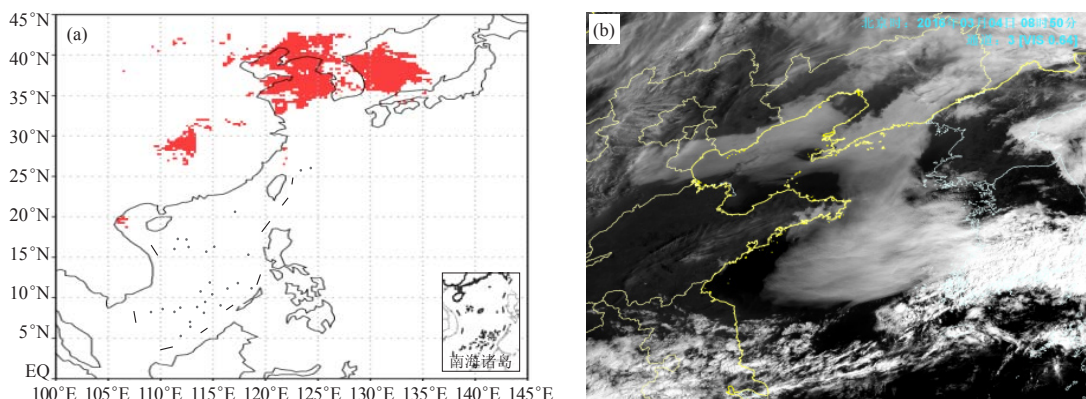


图2 2016年3月4日08时海雾客观预报产品 (a) 和卫星监测海雾雾区 (b)

Fig. 2 Objective forecast product of sea fog(a), and satellite monitoring sea fog area at 08 BT March 4, 2016

3 海洋气象服务需求分析

3.1 进一步提升我国履行国际气象保障义务能力的需求

我国作为WMO的创始国和执行理事会成员之一，加强国际气象合作、承担履行相应的国际责任和义务是我国的长期宗旨。国家气象中心承担制作和发布WMO/IMO（国际海事组织）全球海上遇险安全系统（GMDSS）XI责任海区（印度洋海域）海洋气象预报信息的责任和义务。

随着我国海洋强国战略的实施，特别是“21世纪海上丝绸之路”国家战略的实施和开展，不仅近海，对远海甚至全球海洋气象保障服务提出了迫切需求。

3.2 经济全球化亟须提高我国全球海洋专业气象精细化水平

我国沿海地区南北纵跨热带、亚热带和温带，影响海上大风的天气系统有冷空气大风、温带气旋大风、热带气旋大风，而且海上大风出现的季节和区域有所不同。在中国近海从12月至次年2月的南海盛雾期，到4—6月东海、黄海的雾季期，雾季变化有从冬春季到春夏季向北方海域推送的特征，我国海域灾害天气呈现多样化、复杂化的特点，对海上灾害性天气发生发展的机理认知还不足。海上搜救、港口及跨洋航运、海上石油开发、海上风能开发、渔业养殖、海上捕捞、海洋旅游等需要海洋精细化专业服务产品，远洋航运的经济全球化需要以数值预报释用技术为基础的海洋气象要素客观预报产品的多样化和精细化。建立和完善我国全球海洋气象监测预报预警系统和相关业务平台及配套设施建设，逐步开展全球海洋灾害性天气和全球海洋气象要素的精细化监测预报预警业务，提升我国全球海洋气象的精细化监测预报能力，无疑对保障我国参与全球政治、经济、军事活动，维护国家安全具有十分重大的意义。

3.3 应对全球气候变化和保护海洋生态环境需求增大

海洋是全球气候系统的重要组成部分，我国南海及周边地区是影响北半球天气气候的关键区域之一。完善海洋气候监测和全球海域气候影响分析业务，提高海洋气候预测能力，将有助于我国在应对和评估全球气候变化影响时，准确把握海洋天气气候演变规律，提高我国海洋和海岸带生态系统的监管能力，以进一步提升我国沿海地区抵御海洋灾害的能力，并为我国海洋气候资源开发利用、涉海重大工程等海洋经济建设需要气候条件评估、气候可行性论证等气象服务为科学决策提供参考依据。

4 海洋气象业务发展目标及重点工作

4.1 海洋气象监测与分析能力建设

基于卫星、沿海雷达、海洋浮标、海岛自动站、船舶自动站、风廓线仪、飞机观测等多种不同时空分辨率的海洋气象探测资料，发展多源资料快速客观分析技术，实现海上大风、海雾、强对流、海冰等灾害的多资料融合实时分析，特别是强化卫星资料在海洋气象灾害监测中的分析应用，形成高时空分辨率的海洋气象要素格点数据，为预报预警业务开展提供基础支撑。

1) 洋面风

利用已有及新建沿海自动站、浮标站、船舶站、海上平台站、海岛站、沿岸风廓线仪、沿海雷达等海洋气象观测资料、极轨卫星反演风场和风场快速同化资料，进行多源资料的融合分析。在多源卫星资料偏差订正的基础上，实现基于卫星产品的我国海区温带气旋、强冷空气等造成的海上大风的监测和预警；研究多种海上气象观测资料的数据融合技术，实现多源观测数据的优势互补，初步形成覆盖我国责任海区高时空分辨率的风场融合产品（图3）。

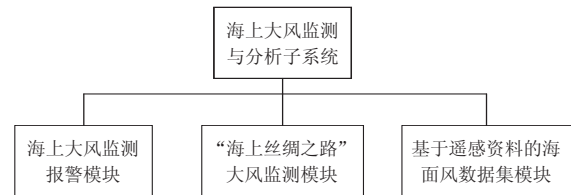


图3 海上大风监测与分析结构示意图

Fig. 3 Structure scheme of offshore wind monitoring and analysis

2) 海雾

基于极轨、静止气象卫星按照夜间和白天不同的光学辐射条件分别开发的全天候海雾自动监测技术以及海雾定量反演产品，结合沿岸站点、海岛、船舶、浮标等地面观测数据实现高时空分辨率的海雾监测产品（图4）。

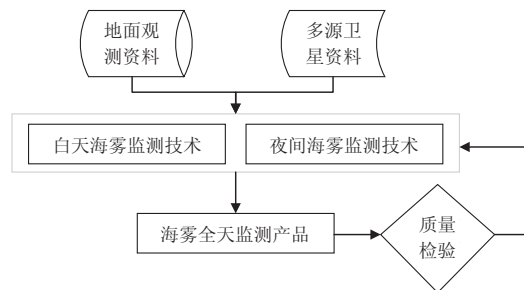


图4 海雾监测与分析流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of marine fog monitoring and analysis

3) 海上强对流

基于沿海天气雷达探测的基本反射率因子、组合反射率因子、垂直液态含水量等物理量场，实现强对流天气系统及其属性监测；基于气象卫星探测的云顶亮温、亮温梯度等辐射特征和随时空演变特征，监测中尺度对流系统的云型分布、移动、生消合并等特征；实现闪电分布特征的监测；基于常规和自动站等观测，实现近海雷暴大风和短时强降水天气的监测（图5）。

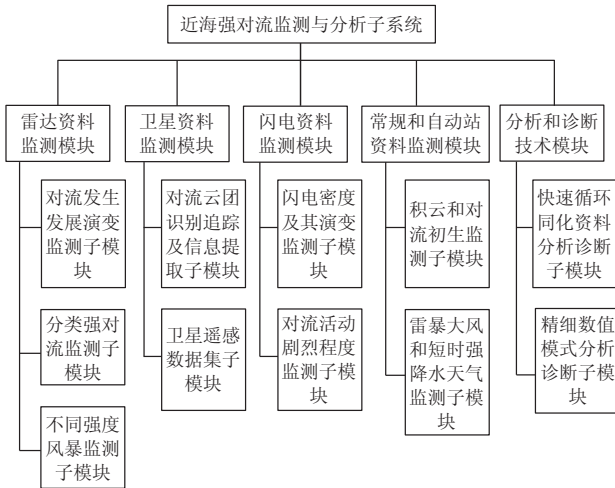


图5 近海强对流监测与分析结构图

Fig. 5 Schematics of offshore strong convection monitoring and analysis

4.2 区域快速循环同化建设

建立沿海区域高时空分辨率的快速循环同化系统，提供精细化海上大风、强对流天气监测产品，建立更适应沿海区域预报的高分辨率数值模式模块，提供更为精细的分析预报结果，是对现有模式系统的物理过程和参数化方案进行优化完善，使得物理过程和参数化方案更适应模式系统模块的分辨率，从而获得更好的分析和预报效果（图6）。

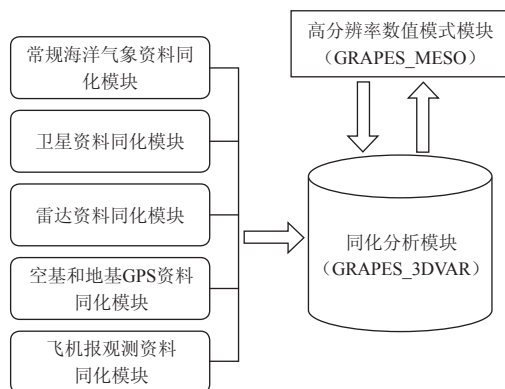


图6 区域快速循环同化系统结构图

Fig. 6 Structure chart of regional rapid cycling assimilation system

4.3 海洋气象精细化要素预报

以高分辨率海洋气象数值模式产品为核心，以资料融合分析技术、数值模式评估和解释应用技术为基础，建立和改进适用于精细化网格的海洋气象要素客观预报方法，利用格点精细化编辑平台实现海洋气象要素的格点精细化预报，实现预报产品的智能化生成、一键式分发等功能。并对重点岛屿（包括钓鱼岛、南海诸岛等）、关键海洋区域（包括近海、责任海区、西北太平洋以及“21世纪海上丝绸之路”沿线等海域）等开展精细化的海洋气象要素预报（包括天气现象、洋面风、能见度等天气要素）（图7）。

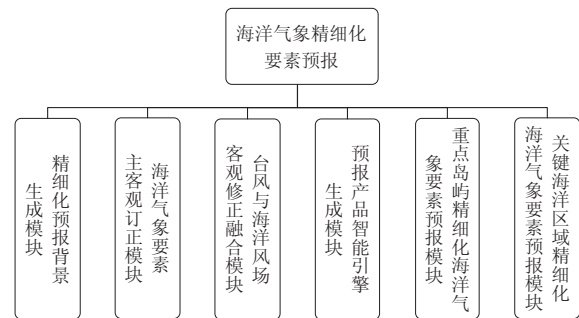


图7 海洋气象精细化要素预报结构图

Fig. 7 Forecast structure of marine meteorology for precise elements

4.4 海洋气象目标观测指导业务平台建设

目标观测平台是指国际上提出的目标观测方法，用于观测系统和可预报性之间对应研究的平台，改进海洋气象数值模式的预报质量。对某一特定时间和区域的预报对象，通过数值模拟方法，找到其上游敏感区，对所需种类的资料适时加强观测，将新的大气观测“敏感”信息通过资料同化方案应用于海洋气象数值预报模式的初值，提高模式的初值质量，进而提高模式的预报准确率。将奇异向量方法应用于海洋气象目标观测，建立基于GRAPES全球SVS奇异向量方法的目标观测敏感区诊断（或估计）算法和敏感区产品算法，针对目标观测指导业务平台核心技术需要，集成GRAPES全球集合预报扰动方法，改进SVS奇异向量计算方案，提高计算效率，集成全球集合概率预报产品和检验程序，建立目标观测业务平台核心全球集合预报模式，集合预报模式水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，垂直方向60层，集合成员20~30个，目标观测敏感区奇异向量计算分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。集成集合预报模式和敏感区计算模式成果，建立海洋气象目标观测指导业务平台（图8）。

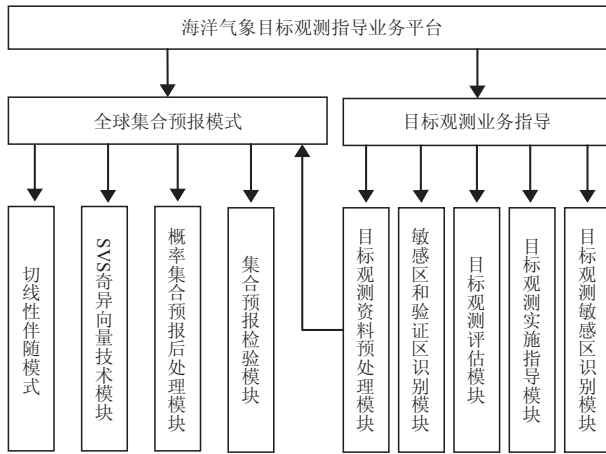


图8 海洋气象目标观测指导业务平台结构图

Fig. 8 Structure chart of guide business platform for marine meteorological target observation

4.5 海上污染物扩散数值预报模式研发

为了更好地支撑海洋气象污染预报服务的需求，以全球模式和高时空分辨率中尺度数值模式数据为基础，以HYSPLIT污染扩散模式、数值预报产品释用和预报员经验为依托，在原有系统上开发海洋气象污染数值模式预报系统，通过运用源项评估和剂量评估技术等提升并完善海洋气象污染扩散预报业务能力，满足响应时效性要求。全球扩散预报提供分辨率为 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$ 、时效为7天的预报产品，我国境内扩散预报提供分辨率为 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 、时效为3天的预报产品，局部沿海地区达到分辨率为 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 、时效为3天的预报产品（图9）。

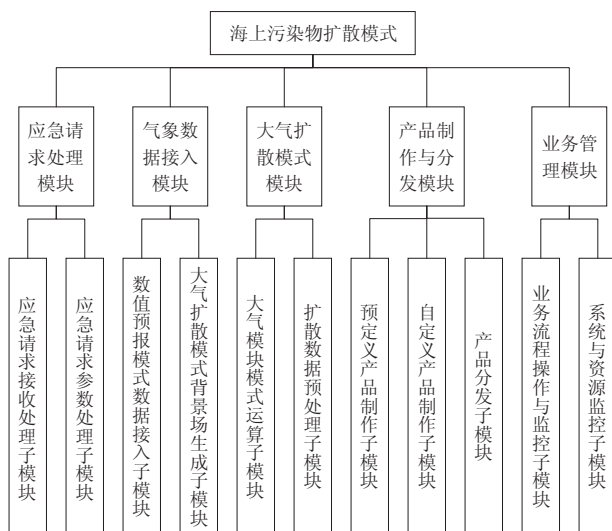


图9 海洋气象目标观测指导业务平台结构图

Fig. 9 The structure chart of the business platform for ocean meteorological observation guidance

4.6 海洋气候监测预测系统建设

1) 全球海气系统监测

利用多源海洋观测及同化资料，进一步丰富海洋事件监测指标产品，实现对多时间尺度海洋事件的指标监测，重点开展太平洋关键海区海表温度、次表层海温监测等；基于再分析大气环流数据实现对多时间尺度的海气系统的实时监测；通过对ENSO事件发展有重要影响的关键区域海温和大气环流异常的监测，实现对ENSO事件异常演变的监测。

2) 全球海温主模态诊断预测

针对各主要关注海区（如热带太平洋、印度洋、北太平洋、北大西洋），开展面向全球海洋主要气候现象（海洋变率主要模态，如IOD、NAO、PDO）的预测系统建设，形成包含主要指数和变量场的海洋诊断和预测业务产品，形成全球海洋主要海温模态诊断预测模块。拓展全球海洋主要气候现象预测，建立基本涵盖全球海洋变率模态的预测系统。开展针对全球海洋主要模态的多模式集合预测系统建设。

3) 海洋模式模块

基于全球洋流模式背景场数据进行区域洋流模式水深、模式格点等基础数据处理；对全球大气模式GFS预报场数据进行解压、通量场校正和插值处理，生成区域洋流模式所需的大气驱动场数据；对全球洋流模式分析场数据进行预处理，生成区域洋流模式温、盐、流初始场；对全球洋流模式分析场和预报场进行预处理，生成区域洋流模式所需开边界条件数据。

使用法国CERFACS中心研发的OASIS（Ocean Atmosphere Sea Ice Soil）耦合器，来实现GRAPES_TYM和区域洋流模式的耦合，其技术主要是通过分别在大气模式和洋流模式中完成对耦合器库的调用来实现不同模式之间的数据传递。

4.7 国家级和省级海洋气象业务协调发展

国家气象部门已经初步建成了国家级、区域中心、省、地（市）四级上下联动的业务反馈机制。未来为了更好地推进海洋气象精细化预报业务建设目标，应加强总体设计和筹划，发挥各自优势，合理分工。在海洋气象数值预报发展中，加强海洋气象数值预报业务不同重点领域攻关的合理布局。国家级发展高分辨率的近海、远海全海域的海洋气象数值预报，海洋区域中心在国家级海洋气象数值预报的基础上运行或发展近岸沿海更高分辨率的海洋气象模式向市县一级辐射的三级海洋气象数值预报的框架体系。在业务体系中，形成国家级指导产品下发到省级和市级，省级和市级根据局地天气特点订正的反馈机制，最后形成

统一的预报产品开展预报服务。

5 结语

通过对国家级海洋气象业务的回顾和分析,气象部门初步建立了由观测、预报、服务、信息网络等组成的海洋气象业务体系,并初步建成了国家级、区域中心、省、地(市)四级上下联动的业务反馈机制。但是,面对服务需求的快速增长和《海洋气象发展规划(2016—2025年)》纲要,海洋气象预报业务能力在综合监测分析、精细化预报、快速循环同化、海洋气候监测等方面仍存在明显不足,这些也将是未来海洋气象业务发展的重点。重点任务的实施还需加强海洋气象的客观定量监测分析能力、精细化预报预警能力和相应的技术支撑平台和配套设施建设,进而从整体上提升我国在海洋灾害性天气监测预报预警的精细化水平和预报准确率,实现我国海洋气象业务由近海—远海—全球的跨越式发展,为维护我国海洋权益、海洋防灾减灾、发展海洋经济和资源开发、海上交通安全、海上军事行动提供海洋气象综合保障服务。

本文综述的是国内气象部门承担的水面以上的海洋气象业务,有关水面及以下的海洋气象模式与应用详见文献[13]。然而海洋和大气间存在着持续的动量、热量和物质交换,海洋给予大气热量与水汽,为大气运动提供能源;在大气环流的形成、分布和变化上共同影响着全球的气候。因此,海洋气象从理论体系上是不可分割的,把两者结合起来,作为交叉学科共同发展和谋划,会给海洋气象带来更广阔的发展空间。

参考文献

- [1] 尹尽勇,徐晶,曹越男,等.海洋气象预报业务现状与发展.气象科技进展,2012,2(6):17-28.
- [2] Minnis P, Heck P W, Young D F, et al. Stratocumulus cloud properties derived from simultaneous satellite and island-based instrumentation during FIRE. *J Appl Meteor*, 1992, 31(4): 317-339.
- [3] Heidinger A K, Stephens G L. Molecular line absorption in a scattering atmosphere. Part II: Application to remote sensing in the O₂ A band. *J Atmos Sci*, 2000, 57(10): 1615-1634.
- [4] Bendix J. A case study on the determination of fog optical depth and liquid water path using AVHRR data and relations to fog liquid water content and horizontal visibility. *Int J Remote Sens*, 1995, 16(3): 515-530.
- [5] Bendix J, Thies B, Cermak J, et al. Ground fog detection from space based on MODIS daytime data—a feasibility study. *Wea Forecasting*, 2005, 20(6): 989-1005.
- [6] 朱小祥,吴晓京,李三妹.海雾辨识条件.中国气象局海洋气象预报项目技术报告.北京:国家卫星气象中心,2007.
- [7] Hunnt G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths. *Quar J Roy Meteor Soc*, 1973, 99(420): 346-69.
- [8] Eyre J, Brownscombe J, Allam R. Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery. *Meteorological Magazine*, 1984, 113(1346): 266-271.
- [9] Wu X, Li S. Automatic sea fog detection over Chinese adjacent oceans using Terra/MODIS data. *Int J Remote Sens*, 2014, 35(21): 7430-7457.
- [10] 傅刚,李鹏远,张苏平,等.中国海雾研究简要回顾.气象科技进展,2016,6(2):20-28.
- [11] 章国材.中国雾的业务预报和应用.气象科技进展,2016,6(2):42-48.
- [12] 史得道,吴振玲,高山红,等.海雾预报研究综述.气象科技进展,2016,6(2):49-55.
- [13] 刘春霞,赵中阔,毕雪岩,等.海洋环流与海浪模式的发展及其应用.气象科技进展,2017,7(4):12-22.

光伏阵列最佳倾角计算方法的进展

成驰 陈正洪 孙朋杰

(湖北省气象服务中心/湖北省气象能源技术开发中心, 武汉 430205)

摘要: 为了提高光伏电站运行效率, 增加发电量, 需要综合考虑各种因素, 计算并确定电站光伏阵列安装的倾角。针对固定角度安装的并网光伏发电系统最佳倾角设计, 如果不能直接获取水平面上总辐射量和直接辐射量, 则首先需要利用其他气象资料进行水平面上太阳辐射量的气候学计算, 然后采用某种辐射模型计算阵列斜面辐射量, 进而计算最佳倾角。通过对计算中各个步骤的方法进行分类总结, 比较不同方法的优缺点, 给出了计算方法适用条件和建议。还比较了国内常用的光伏电站设计辅助软件特点。最后总结了目前最佳倾角计算领域新的研究方向和实际应用中亟待解决的问题等。

关键词: 光伏发电, 辐射模型, 最佳倾角

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.007

Advances in Calculation Method of the Optimal Tilted Angle for PV Array in Solar Resource Assessment

Cheng Chi, Chen Zhenghong, Sun Pengjie

(Hubei Provincial Meteorological Service Center/Meteorological Energy Development Center of Hubei Province, Wuhan 430205)

Abstract: In order to improve the efficiency of photovoltaic (PV) power plant and increase the power generation capacity, it is required to consider various factors for calculating and determining the installation angle of the PV array of power plant. In design of optimal tilted angle of fixed grid connecting solar PV array, if the total radiation and direct radiation on the horizontal plane could not be used directly, the first thing needed to do is calculating the horizontal solar radiation by using other meteorological data in climatology; then to calculate the total solar radiation of inclined plane by using some radiation models; and then calculate the optimal tilted angle. Through the classifying and summarizing each step of the calculation method, we compare the advantages and disadvantages between different methods, tell calculation methods applicable conditions and recommendations. Finally we compare the characteristics of commonly used photovoltaic power plant design software, and discuss the direction of research and urgent problems of practical application in the optimal tilted angle calculation methods.

Keywords: photovoltaic power generation, radiation model, the optimal tilted angle

0 引言

地面应用的光伏发电系统, 特别是固定式光伏阵列, 光伏组件倾斜角度的不同会使得方阵面接收的年总太阳辐射量不同, 造成发电量的不同。在光伏电站设计中, 为了获得最大的年发电量, 除了建筑集成应用中需考虑功能和美观外, 光伏阵列设计都是朝向赤道按一定角度倾斜放置的。

太阳光线穿过大气层到达地表, 受大气中各种组成成分、云、水汽、尘埃等的反射、散射、吸收等作用, 方向和能量均发生改变, 不再全部以平行光线的形式到达光伏阵列表面。光伏阵列斜面上接收到的太

阳总辐射由直接辐射、天空散射辐射及地面反射辐射三部分组成。对直接辐射而言, 通常由水平放置增加倾角至垂直太阳光线的角度会增加直接辐射量, 而后继续增加角度又会减小; 对散射辐射而言, 由水平放置增加倾角意味着减小阵列对应天空的开阔程度, 导致接受的散射辐射量减小; 增加倾角还会增加少量反射辐射量。此外, 增加倾角会导致阵列面对应的实际日出、日落时间发生变化, 使得阵列斜面上一天的日照时间变短, 也导致接收辐射量的变化。

因此在光伏电站设计中, 为了提高运行效率, 增加发电量, 需要综合考虑各种因素, 计算并确定电站的最佳倾角。

1 研究历史与现状概述

光伏阵列表面接受辐射量的计算和最佳倾角的研究本质上是对斜面辐射的计算研究, 而最早开展此类

收稿日期: 2015年8月17日; 修回日期: 2016年3月24日
第一作者: 成驰(1981—), Email: chc8108@126.com
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306048);
气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014M34)

研究的是山地气候学领域中对坡面辐射的计算。由于倾斜面或坡面上辐射观测资料极少,所以一般都采用理论计算方法获取。我国20世纪50年代起,傅抱璞曾对坡面辐射进行了卓有成效的开创性研究^[1-2]。1981年,朱志辉采用与相应天文辐射比值的方法计算坡面辐射^[3],1988年朱志辉给出了一个任意纬度各时段斜面辐射总量的计算方法,并给出了全球范围内天文辐射各时段总量的分布图像^[4]。李怀瑾等提出了一个类似的计算方案^[5],其散射辐射采用各向同性,结论认为,晴天大气透明状况对坡地太阳辐射强度和日总量影响很大,特别对南坡影响更显著,且大气透明系数对坡地总辐射强度和总辐射日总量的影响比直接辐射要小。

翁笃鸣等^[6-7]、孙治安等^[8]研究了实际云天条件下我国坡面总辐射和直接辐射的分布特征,采用的方法中考虑了总云量、低云量和地形遮蔽等的影响,研究表明,海拔高度、坡度坡向以及由此带来的日照时数变化都会对坡面上实际太阳总辐射状况造成影响。翁笃鸣在其研究中提出了“最热坡度”的概念,亦即太阳能利用中的最佳倾角。李占清等^[9]利用坡面散射辐射观测资料,对散射辐射的各向异性问题做了较为详尽的分析,并研究了坡面散射辐射量随坡度坡向变化的基本规律。以上这些研究对于指导山区农业生产对光、热等气候资源的利用有着巨大的价值。

随着光伏发电从20世纪80年代起在国际上逐步走向成熟和商业化,研究人员专门针对光伏电站设计而开始开展最佳倾角研究^[10]。而国内从90年代起针对太阳能集热器、离网或并网光伏发电系统等最佳倾角研究开始出现,包括最佳倾角的计算模型和方法、时空分布特点等。朱超群以月代表日的日总辐射量计算为基础,以一月内到达斜面总辐射最大作为最佳倾角条件,先后采用散射辐射各向同性^[11]和各向异性模型^[12-13],研究了最佳倾角的时空分布变化特点,给出了最佳倾角的解析表达式,以及全国主要站点不同季节和全年的最佳倾角等结果。对于并网光伏发电系统,杨金焕采用散射辐射各向异性的Hay模型,给出了方位角为0和不为0两种情况下的斜面总辐射量和最佳倾角的计算方案^[14-15],对方位角为0的情况,采用了对斜面辐射计算式求导的方法,给出了最佳倾角的解析表达式。

以上对最佳倾角的计算,对并网光伏发电系统而言是以斜面年辐照度最大为条件的,对离网光伏发电系统则需考虑辐射的年分布特性、蓄电池容量和负载情况等。杨金焕^[16]在综合考虑斜面太阳辐射量的连续性、均匀性和极大性的基础上,研究了离网光伏发

电系统最佳倾角计算方法。汪东翔等^[17]则将辐射全年分布的均匀性进行量化,在倾角计算时兼顾了均匀性和极大性。而近年来最新的研究更是引入了多目标优化的方法,充分考虑辐射均匀性^[18]或是倾角对间距系数的影响、不同倾角的安装成本等发电量以外的因素^[19-23],从光伏电站效益最大化出发,进行最佳倾角的设计。

通常光伏阵列都是固定倾角安装的,而为了获取更多的斜面辐射量,近年来也出现了按季节或按月对倾斜角度进行调整的光伏阵列最佳倾角的研究。王民权等^[24]在晴天假设的基础上,分别计算了西北和内蒙古部分地区按月、季度和半年调整倾角,相对于水平面增加的辐射量百分比。对于实际天气条件下,韩斐等^[25]以杭州为例,计算得到按季节调整的阵列得到的斜面辐射量比全年固定的阵列增加了约5%。黄天云等^[26]分析格尔木某实际电站的半年运行数据发现,按季节调整的阵列发电量比固定式大了8%,而额外增加的人工成本不到增加发电收入的4%。陈正洪等^[27]通过武汉地区不同倾角光伏组件一年的实验结果发现,一年之中只需在春、秋过渡季节调节2次,就能使得光伏阵列基本保持在最佳倾角状态,达到较高的发电效率。

近年来,除了采用月平均辐射数据进行最佳倾角计算外,也有部分研究利用逐时辐射数据开展研究,有研究^[28-29]利用中国气象局和清华大学共同出版的《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中的典型气象年逐时水平面总辐射量和散射辐射量进行了最佳倾角的计算,发现我国大部分地区方位角应朝东偏离正南一定角度可增加斜面辐射量^[28]。魏子东等^[30]利用美国能源部提供的银川市中国标准气象数据中的逐时辐射量也进行了类似的研究。利用逐时辐射数据计算可反映太阳辐射在正午前后的非对称性分布,因此在计算最佳倾角的同时,还可以计算最佳方位角,计算结果更接近于实际情况,但由于逐时辐射观测数据的缺乏,在工程实际应用中利用逐时数据进行计算的还较为少见。

总的来说,根据对象的不同,最佳倾角计算方法可分为针对离网系统和并网系统两类;根据安装方式不同,可分为针对固定安装和可调式安装两种情况;根据光伏阵列安装方位角的不同,可以分为方位角为0和不为0两种情况。根据所采用辐射数据的不同,又可分为利用月数据和逐时数据两类。由于目前并网光伏发电系统已成为光伏利用的主流,且逐时辐射数据较难以获得,因此本文主要介绍利用月辐射数据、针对固定安装的并网光伏系统的最佳倾角计算方法。

2 最佳倾角计算方法

2.1 最佳倾角的计算

最佳倾角的计算一般分为两类,即数值法和解析法。

数值法即以一定角度为计算间隔,分别计算不同倾角的斜面上太阳总辐射月总量,最后逐月累加得到年总量。月辐射量最大的倾角即为该月最佳倾角,年辐射量最大的倾角即为年最佳倾角,此倾角上的平均年总辐射量即为最佳倾角斜面上的总辐射量^[31]。

文献[11]和[14]均采用解析法得到最佳倾角的数学表达式,其方法为利用斜面总辐射量的公式对倾角 β 求导,导数为0时求解倾角的解析式即可计算最佳倾角^[20]。

但解析法只适合方位角为0的斜面最佳倾角计算,若方位角不为0则只可通过数值法计算,因此在实际应用中数值法更为常见。计算不同倾角斜面太阳总辐射量为数值法计算最佳倾角的基础,2.2—2.3节介绍了计算水平面和斜面月太阳辐射量的基本方法。

2.2 斜面辐射量的计算

斜面上接收到的太阳总辐射量 Q_s 由直接辐射量 D_s 、天空散射辐射量 S_s 及地面反射辐射量 R_s 三部分组成,即

$$Q_s = D_s + S_s + R_s. \quad (1)$$

斜面与水平面的直接辐射之间的关系如下:

$$D_s = D_H \cdot R_b, \quad (2)$$

其中方位角为0时,斜面和水平面直接辐射量比值 R_b 可用以下公式计算:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \frac{\pi}{180} \omega \cdot \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \frac{\pi}{180} \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta}. \quad (3)$$

地面反射辐射表达式为

$$R_s = G \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \cdot \rho, \quad (4)$$

以上式中: G 为太阳总辐射, D_H 为水平面太阳直接辐射, β 为斜面倾角, ϕ 为地理纬度, δ 为太阳赤纬, ω 为日落时角, ρ 为地面反射率,不同的地面反射率会有所不同。天空散射有两种辐射模型:一类是各向同性模型,此模型较简单,即认为天空中的散射辐射分布是均匀的,如Liu-Jordan模型^[32];另一类是各向异性模型:如Hay模型、Perez模型等。Hay模型认为水平面上的散射辐射包含两个部分,即光盘辐射部分与各向同性的穹顶散射部分^[33]:

$$S_s = (G - D_H) \left((D_H / G) R_b + (1 - D_H / G) \frac{1 + \cos \beta}{2} \right). \quad (5)$$

Perez模型^[34-35]认为倾斜面上的散射辐射由三个部分组成:光盘辐射部分、穹顶散射部分与受水平面亮

度影响的部分。

根据天空各向异性模型理论,在北半球,南面天空的平均散射辐射要比北面天空大,所以各向异性模型推算的朝南斜面获取的能量比值要大于同性模型的结果。

2.3 水平面太阳辐射量的计算

由上节可知,要进行斜面辐射量和最佳倾角的计算,首先应获取水平面上总辐射量 G 和直接辐射量 D_H 。如若不能,则需要利用其他气象资料进行水平面上太阳辐射量的计算反演,即基于地面气象站的日照百分率资料或卫星遥感资料,建立太阳辐射量与其相关关系,利用这种相关进而间接计算气候条件类似站点的太阳辐射量。

在按月计算太阳辐射量时,一般使用表1中的日期作为各月代表日,由此求得辐射各月平均值。代表日期是依据最接近该月日平均天文辐射值的原则来选取的,这种方法计算简便,能满足工程需要^[36]。

表1 各月代表日和对应赤纬取值
Table. 1 The representative day and corresponding declination values in each month

月份	代表日	n (日序数) (平年/闰年)	δ (°) (平年/闰年)
1月	17日	17	-21.1
2月	16日	47	-13.0
3月	16日	75/76	-2.5/-2.1
4月	15日	105/106	9.1/9.5
5月	15日	135/136	18.4/18.7
6月	11日	162/163	22.9/23.0
7月	17日	198/199	21.5/21.3
8月	16日	228/229	14.3/14.0
9月	15日	258/259	3.7/3.3
10月	15日	288/289	-7.8/-8.2
11月	14日	318/319	-17.8/-18.0
12月	10日	344/345	-22.7/-22.8

在利用地面观测资料反演辐射量时,一般可以通过与辐射相关较好的日照百分率数据进行计算^[37-40],目前常用的推算公式形式为

$$G = \left(a_g + b_g \frac{n}{N} \right) R_a, \quad (6)$$

$$D_H = \left[a_d \left(\frac{n}{N} \right)^2 + b_d \left(\frac{n}{N} \right) \right] R_a, \quad (7)$$

式中, G 为太阳总辐射,单位为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; D_H 为水平面太阳直接辐射,单位为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; n 为实际日照时数,单位为 h ; N 为理论可照时数,单位为 h ; n/N 为日照百分率; R_a 为起始计算辐射。

可以以天文辐射、理想大气总辐射、晴天太阳辐

射等为起始计算辐射,有研究发现^[41],以天文辐射起始计算,所需输入数据较少,计算简便的同时效果也较好,适合工程应用。但在地形较为复杂的地区,采用晴天总辐射作为 R_a ,物理意义更为明确,计算误差明显降低^[42-43],但这种方法需要考虑云、气溶胶、水汽和各种气体成分对太阳辐射的散射、吸收、反射等作用,存在计算过程较复杂,所需参数较多的缺点。

a_g 、 b_g 、 a_d 、 b_d 为系数,通过有太阳辐射和日照时数观测的站点统计确定,然后可应用到周边气候条件类似的无太阳辐射观测的地区,计算太阳总辐射和直接辐射。

也有研究^[44]在利用日照百分率建立相关的同时,引入了如云量、气温日较差、降水量等修正项,也能使反演效果有所提高,但存在相关系数不稳定的情况,因此更多的研究仍是采用结构简单、物理意义清晰的经典日照百分率模型。

2.4 最佳倾角的实验验证

由于计算方法、所用数据种类、所取时段的不同,不同的研究计算的理论最佳倾角有很大差异。以武汉地区为例,不同的研究给出的最佳倾角理论计算值为 $18\sim 45^\circ$ ^[27],因此对斜面辐射量或发电量及最佳倾角开展观测实验研究,验证理论计算结果,十分必要。

常泽辉等^[45]设计了一种具备倾角调整装置的太阳能光伏发电测试系统,将实际观测值与理论计算值进行了比较。文献[25]利用3块相同的电池板分布放置在水平面、理论计算年最佳倾角和季节调整最佳倾角处,对比观测一年,验证了其理论计算值。李潇潇等^[46]在沈阳某大楼楼顶建设了人工倾角调节式光伏并网发电实验系统,验证了按季节调整倾角系统比固定倾角系统发电量有明显提升。

以上实验采用倾角调整的方式,验证了斜面辐射计算模型的准确性。还有一些研究采用了多角度光伏发电组件对比的方式,可以验证最佳倾角理论计算的准确性。如陈维等^[47]对广州地区8块不同朝向和倾角的光伏组件输出情况进行了为期一年多的测试,结果发现全年以 22° 倾角组件产出电能最多,与理论模拟计算结果(19°)相吻合。陈正洪等^[27]在武汉开展了从水平面(0°)到南墙面(90°)共15个不同倾角和朝向的光伏组件发电情况测试,分析得到各月最佳倾角与理论计算最佳倾角变化趋势基本保持一致,实验得到的各月最佳倾角要大于或等于理论推算最佳倾角。 30° 倾角为实验年度的实际最佳倾角,比理论计

算值偏大。这种情况可能是由于光伏电站倾角较小的光伏组件较易积灰,影响光伏组件接收太阳辐射。

散射辐射模型是最佳倾角理论计算中的难点,以上研究通过与实验验证对比多发现采用各向异性散射辐射模型计算结果更为准确^[27, 45, 47],其中Perez模型计算效果最好,但过程也最为复杂,实际应用难度较大^[35]。

目前的研究中,实验得出的最佳倾角角度通常是仅在一年左右的数据的基础上统计出来的,时间序列较短,随机因素影响较大,如要得到更精确的结果,需要收集更长时间资料进行深入分析。

3 光伏电站设计软件中的最佳倾角计算

目前国内电力设计行业进行光伏组件倾角设计、斜面辐射量和理论发电量计算主要是通过RETScreen[®]、PVSystem[®]、上海电力学院太阳辐射计算软件^[48]等辅助设计软件进行,由于其对象多是并网光伏发电系统,因此计算最佳倾角的基本原则均是年斜面辐射量和年发电量最大化。下面将常用软件及其所用辐射数据介绍如下。

1) RETScreen

RETScreen是一款清洁能源项目分析软件,用于评估各种可再生能源的能源生产量、节能效益、寿命周期成本、减排量和财务风险等。该软件由加拿大政府通过加拿大自然资源能源多样化研究所向全世界提供,可免费使用。该软件更为侧重项目财务分析,计算光伏发电系统的最佳倾角和发电量只是其功能之一。

该软件中自带的辐射数据来自于NASA数据库,与中国气象部门提供的地面辐射观测数据相比通常偏大。

2) PVSystem

PVSystem是目前光伏系统设计领域另一个比较常用且历史悠久的软件,来自瑞士日内瓦大学,它能够较完整地对光伏发电系统进行研究、设计和数据分析。涉及并网、离网、抽水和直流光伏发电系统,可提供初步设计、项目设计和详细数据分析3种进展程度的光伏系统设计和研究。

该软件自带辐射数据城市站点较少,在进行设计时可以直接联网从NASA数据库下载辐射数据,也可以自行导入不同格式的辐射数据。

3) 上海电力学院太阳辐射计算软件

该系统软件由上海电力学院采用C语言编制而成。主要有3个模块:太阳能辐射计算模块、并网系统设计模块和独立系统设计模块。计算最佳倾角时,既可自己输入数据,也可用软件自带的数据库。

① RETScreen软件主页: <http://www.retscreen.net/zh/home.php>。

② PVSystem软件主页: <http://www.pvsyst.com/>。

该软件的气象数据库是由国家气象中心发布的1981—2000年中国气象辐射资料年册统计整理而来。

王淑娟等^[49]比较了以上3个系统采用统一的气象辐射数据计算的某地最佳倾角和斜面年太阳辐射量。结果如表2所示。

表2 不同设计软件计算的结果
Table 2 Results from 3 calculating softwares

软件	最佳倾角 (°)	斜面年太阳辐射量
RETscreen	37	2241.0
PVSystem	35	2252.2
上海电力学院软件	33	2159.8

造成这种差异的原因可归结为斜面辐射计算时所采用模型的不同。有文献^[50]指出,上海电力学院软件与RETscreen软件计算结果数据比对,其计算得到的最佳倾角一般偏小2°~4°。这是由于该软件太阳辐射计算模块采用了散射辐射各向同性模型计算倾斜面上的太阳辐射量所引起的。

总的来说,选择不同的软件进行设计,计算的发电量和最佳倾角结果差异较大,从而影响预期收益。而且所用数据会影响到最终计算的结果,目前一般认为NASA所提供的数据较国内气象台站观测数据偏大,导致最佳倾角的计算也偏大。而且采用不同时段的辐射数据进行设计也会影响结果,因此在设计计算时,应采用气象台站近年的辐射和日照观测数据进行,并需要对所采用的数据进行分析 and 甄别。

4 结论与讨论

在对光伏电站光伏阵列斜面辐射量和最佳倾角研究历史和现状进行充分调研的基础上,较为全面地论述了光伏电站可行性研究中太阳辐射资源分析和最佳倾角设计计算各个步骤的计算方案,并进行了分类总结和优缺点分析;并比较了不同方法的优缺点。在针对单个光伏电站开展的设计计算中,在没有现场或周边辐射观测的情况下,仍推荐采用日照百分率数据进行气候学计算。在斜面辐射量计算中,理论和实践均证明,散射辐射的天空各向异性模型明显较各向同性模型接近实际情况。此外还归纳最佳倾角的计算方法为解析法和数值法两类,并比较了国内常用的光伏电站设计软件特点,给出了使用中的建议。

近年在最佳倾角的研究中,部分研究开始引入了多目标优化的方法,即并非简单地将设计目标定为斜面接收到的年辐射量最大,而是充分考虑倾角对间距系数的影响、不同倾角的安装成本、电站用地成本等太阳辐射量以外的因素,从光伏电站效益最大化出发,采用博弈论等方法进行最佳倾角的设计。这种新

的研究方向值得进一步完善和优化。

许多涉及最佳倾角的观测和实验验证表明,理论计算的最佳倾角并不等于实际的最佳倾角,倾角的变化除了引起斜面接收到的辐射量和辐射成分比例的变化以外,还会引起雨水、风对组件表面灰尘清除能力的变化,并引起光伏阵列间相互遮挡造成阴影影响的变化,这些因素大多都没有在目前的设计研究中体现,也是未来最佳倾角研究中亟待解决的问题。

参考文献

- [1] 傅抱璞. 论坡地上的太阳辐射量总量. 南京大学学报(自然科学版), 1958, 2: 47-82.
- [2] 傅抱璞. 山地气候. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] 朱志辉. 任意方位倾斜面上的总辐射计算. 太阳能学报, 1981, 2(2): 209-212.
- [4] 朱志辉. 非水平面天文辐射的全球分布. 中国科学B辑, 1988, 10: 1101-1110.
- [5] 李怀瑾, 施永年. 非水平面上日射强度和日射总量的计算方法. 地理学报, 1981, 36(1): 79-89.
- [6] 翁笃鸣, 孙治安, 史兵. 中国坡地总辐射的计算和分析. 气象科学, 1990, 10(4): 348-357.
- [7] 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候. 北京: 气象出版社, 1990.
- [8] 孙治安, 史兵, 翁笃鸣. 中国坡地太阳直接辐射特征. 高原气象, 1990, 9(4): 371-381.
- [9] 李占清, 翁笃鸣. 坡面散射辐射的分布特征及其计算模式. 气象学报, 1988, 46(3): 349-356.
- [10] Gopinathan, K K. Solar radiation on variously oriented sloping surface. Solar Energy, 1991, 47(3): 173-179.
- [11] 朱超群, 虞静明. 我国最佳倾角的计算及其变化. 太阳能学报, 1992, 13(1): 38-44.
- [12] 朱超群, 任雪娟. 太阳总辐射最佳倾角的时空分布. 高原气象, 1993, 12(4): 409-417.
- [13] 朱超群. 估计南向坡面总辐射最佳倾角的表示式. 南京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 623-630.
- [14] 杨金焱, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 1032-1036.
- [15] 杨金焱, 于化从, 葛亮. 太阳能光伏发电应用技术. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [16] 杨金焱. 固定式光伏方阵最佳倾角的分析. 太阳能学报, 1992, 13(1): 86-92.
- [17] 汪东翔, 董俊, 陈庭金. 固定式光伏方阵最佳倾角的选择. 太阳能学报, 1993, 14(3): 217-221.
- [18] 沈洲, 杨伟, 易成星, 等. 基于交互式多目标决策方法的固定式光伏阵列最佳倾角优化. 电网技术, 2014, 38(3): 622-627.
- [19] 王建民, 张晓威, 孔静. 改进的固定支架光伏阵列最佳倾角确定方法. 可再生能源, 2013, 31(2): 108-110.
- [20] 钟天宇, 刘庆超, 杨明. 并网光伏电站光伏组件支架最佳倾角设计研究. 发电与空调, 2013, 34(1): 5-7.
- [21] 丁明, 刘盛, 徐志成. 光伏阵列改进优化设计方法与应用. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 2-8.
- [22] 成珂, 杨洁, 吴自博. 光伏阵列安装角度与安装节距的优化选择. 可再生能源, 2014, 32(6): 743-748.
- [23] 叶任时, 刘海波, 李德, 等. 光伏组件倾角和阵列间距的多因素综合计算方法. 人民长江, 2015, 46(5): 39-42.
- [24] 王民权, 邹琴梅, 黄文君. 太阳能电池板安装倾角间歇性优化调节的研究. 太阳能学报, 2015, 36(1): 113-119.
- [25] 韩斐, 潘玉良, 苏忠贤. 固定式太阳能光伏板最佳倾角设计方法研究. 工程设计学报, 2009, 16(5): 348-353.
- [26] 黄天云, 白盛强. 倾角可调光伏支架结构的研究. 太阳能, 2013, 15: 34-36.
- [27] 陈正洪, 孙朋杰, 成驰, 等. 武汉地区光伏组件最佳倾角的实验研究. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 98-105.
- [28] 申政, 吕建, 杨洪兴, 等. 太阳辐射接受面最佳倾角的计算与分析. 天津城市建设学院学报, 2009, 15(1): 61-75.

- [29] 朱丹丹, 燕达. 太阳能板放置最佳倾角研究. 建筑科学, 2012, 28(增刊2): 277-281.
- [30] 魏子东, 霍小平, 贺生云, 等. 固定式光伏最佳水平倾角及朝向的模拟分析——以宁夏银川地区为例. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(5): 700-706.
- [31] 孙韵琳, 杜晓荣, 王小杨, 等. 固定式并网光伏阵列的辐射量计算与倾角优化. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1587-1601.
- [32] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, 1960, 4(3): 1-19.
- [33] Hay J E. Calculating solar radiation for inclined surfaces: practical approaches. Renewable Energy, 1993, 3(4-5): 373-380.
- [34] Perez R, Ineichen P, Seals R, et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy, 1990, 44(5): 271-289.
- [35] Li D H W, Lam J C. Evaluation of slope irradiance and illuminance models against measured Hong Kong data. Building and Environment, 2000, 35(6): 501-509.
- [36] 王炳忠. 太阳辐射计算讲座 第三讲: 地外水平面辐射的计算. 太阳能, 1999, 4: 12-13.
- [37] 中国气象局. 太阳能资源评估方法 QX/T89—2008. 北京: 气象出版社, 2008: 1-7.
- [38] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. 气象学报, 1964, 34(3): 304-315.
- [39] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算. 太阳能学报, 1980, 1(1): 1-9.
- [40] 成驰, 陈正洪, 李芬, 等. 湖北省咸宁市光伏电站太阳能资源评价. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1067-1072.
- [41] 邓艳君, 邱新法, 曾燕, 等. 几种水平面太阳总辐射量计算模型的对比分析. 气象科学, 2013, 33(4): 371-377.
- [42] 王炳忠, 申彦波. 自然环境条件对太阳能资源计算影响的再思考. 应用气象学报, 2012, 23(4): 505-512.
- [43] 申彦波, 张顺谦, 郭鹏, 等. 四川省太阳能资源气候学计算. 应用气象学报, 2014, 25(4): 493-498.
- [44] 刘可群, 陈正洪, 夏智宏. 湖北省太阳能资源时空分布特征分析及区划研究. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 888-893.
- [45] 常泽辉, 田瑞. 固定式太阳能电池方阵最佳倾角的实验研究. 电源技术, 2007, 31(4): 312-324.
- [46] 李潇潇, 赵争鸣, 田春宁. 基于统计分析的光伏并网发电系统最佳倾角的计算与实验研究. 电气技术, 2012, 8: 1-6.
- [47] 陈维, 沈辉, 刘勇. 光伏阵列倾角对性能影响实验研究. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1519-1522.
- [48] 杨金焱, 葛亮. 太阳辐射量与光伏系统优化设计软件. 阳光能源, 2005(12): 34-36.
- [49] 王淑娟, 汪徐华, 高赞, 等. 常用于最佳倾角计算的光伏软件的对比研究. 太阳能, 2010, (12): 29-31.
- [50] 周治, 吕康, 范小苗. 光伏系统设计软件简介. 西北水电, 2009, (6): 76-79.

风雨留痕 云助气象

■ 许小峰

在世界气象组织(WMO)和美国天气局(NWS)于美国新奥尔良举办的大数据研讨会上, 亚马逊公司(Amazon)曾介绍过一个案例。

在各类气象资料中, 天气雷达数据的存储与传输显然是具有挑战性的。大约每6 min一部雷达就会完成一次体扫, 形成一个完整的局地数据集, 数据量达10 MB以上。美国有160部天气雷达, 从1991年开始投入业务使用, 至今连续运转20多年了, 累计的数据量估计已是天文数字。实时调用这些数据, 特别是20多年来积累的历史数据, 处理起来不是一件简单的事情。

美国海洋和大气管理局(NOAA)在其大数据发展计划中将这一任务的实现托付给了亚马逊公司, 要求所有的历史和实时运行的雷达信息资料都可以随时调用。亚马逊利用他们在云技术领域的优势将这一目标顺利实现了, 展现出了现代科技的魅力。

亚马逊有非常强大的网络服务系统Amazon Web Services(AWS), 构成了他们云技术的基础。但雷达数据的存贮与应用也绝非易事, 需要多方面的技术支持。亚马逊在做介绍时谈到了他们一起开发的合作伙伴, 除了NOAA外, 还包括Unidata、The Weather Company、The Climate Corporation和CartoDB等。一些学生与研究人员也参与了该系统的应用开发。亚马逊介绍说, 在众多企业与科技人员共同参与的过程中, 同时也创建了围绕这些资料应用的生态系统, 这

些开发者同时也是未来的使用者。

雷达资料的解决仅是一个案例, 在气象业务中, 还有大量其他实时探测信息, 包括数据量很大的卫星产品, 或许依照云技术思路, 可以设计出合理的解决方案, 满足未来海量气象信息存储与应用的需求。

Total amount of Level-II NEXRAD data accessed from NCEI and Amazon Web Services in terabytes (TB)

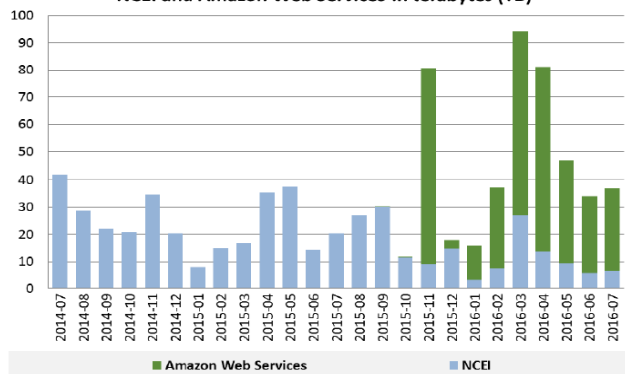


图 从单一的NCEI(国家环境信息中心)平台过渡到可通过亚马逊平台共享后, 美国新一代雷达二级数据访问量被大幅度提升的统计结果

(作者单位: 中国气象局)

本文摘自许小峰新浪博客(2016年4月17日); 图片摘自Ansari S, Del Greco S, Kearns E, et al, 2017. Unlocking the potential of NEXRAD data through NOAA's Big Data Partnership. Bull Amer Meteor Soc, doi:10.1175/BAMS-D-16-0021.1, in press.

国内外海洋气象组织及其现状简介

■ 王坚红 胡恒 刘刚 杨林

自1861年2月英国开始通过电报通信对海运提供预警服务，从1911年开始英国气象局通过无线电通信发布英国周边海域的海洋气象预报，包括大浪和风暴警报。该项服务延续至今，仅在一战和二战期间有过间断。

海洋气象学是研究海上大气物理特征和动力特征，以及海洋与大气相互作用规律的学科。由于海洋气象学既涉及大气又涉及海洋，因此它是大气科学和海洋科学共同研究的领域。由于海洋水体也处于持续的运动中，研究海洋与大气的相互作用，需要将大气动力学和海洋动力学相结合，将大气物理化学性质和海洋物理化学性质相对应，进行分析与诊断，探讨海洋与大气间的驱动与响应、耦合与反馈。这就决定了海洋气象学涉及的内容涵盖海洋、大气及它们之间的相互作用，以及它们与边缘海岸带的相互影响等多种复杂领域。这是一个多学科结合领域，在我国还处于积极发展阶段。本文将简要介绍一些国内与国际海洋气象组织，以及国际海洋学与海洋气象学联合技术委员会的组织框架、职能活动及现状的信息，并由此提出一些目前在我国海洋气象领域出现的问题，以期对我国海洋气象学的进一步发展提供有意义的参考。

1 中国海洋气象领域发展现状

随着地基空基监测设备与仪器的发展，以及经济和社会对海洋气象专业服务需求的迅速增长，我国海洋气象学科依托大气科学和海洋科学的深厚学科理论，正在兴旺发展。但是由于海洋气象是大气与海洋两个学科的边缘学科与交叉学科，因此在学科分类和归属方面还存在模糊，例如在国务院学位委员会2014年出版的《学位授予和人才培养一级学科简介》中，所列海洋科学一级学科（编号0707）的范围共涵盖5项：物理海洋学、海洋化学、海洋生物学与生物海洋学、海洋地质学，以及海洋技术，并不包含海洋气象学。在大气科学一级学科（编号0706）的范围，共涵盖3项：气象学、气候学，以及大气物理和大气环境。仅在气候学中提到气候学的理论基础是气象学、大气物理、大气化学、海洋学、生态学、地理学和水文学等，没有明确的海洋气象学分类学科。根据互联网检索，在我国高等学校的专业教育中，仅有中国海洋大学的海洋与大气学院、北京大学大气与海洋科学

系、南京信息工程大学海洋科学学院、厦门大学海洋与地球学院，以及广东海洋大学海洋与气象学院开设海洋气象学课程。

在科学研究方面常用的中图分类号中：在总类天文学和地球科学的目录P下，大气科学目录P4中有海洋气象学编号P47。但没有进一步的次级分类。而在海洋学目录P7中，海洋气象的内容相当丰富，如P714+.2海洋气象，P716+.3海洋气象观测仪器，P732海洋气象学，P732.1海上气象基本要素，P732.2海洋天气，P732.3海洋热带气象，P732.4海洋天气预报，P732.5海洋气候，P732.6海洋与大气的相互关系，P732.7海洋动力气象学。因此海洋气象学涉及大气科学和海洋科学两个领域，附属于这两个学科，分类较为复杂。

在学术研究组织中，中国海洋学会下设了24个分会或委员会，其中包括海洋水文气象仪器分会、海气相互作用专业委员会，与海洋气象学内容相关。国家海洋局的局属单位中，国家海洋环境预报中心主办的学术期刊《海洋预报》更多关注海洋气象学研究论文，其他海洋科学期刊也刊登海洋气象学论文。

中国气象学会下设35个学科委员会和4个工作委员会，其中包括热带与海洋气象学委员会。中国气象局局属科研单位“一院八所”（中国气象科学研究院、北京城市气象研究所、沈阳大气环境研究所、上海台风研究所、武汉暴雨研究所、广州热带海洋气象研究所、成都高原气象研究所、兰州干旱气象研究所和乌鲁木齐沙漠气象研究所）中，广州热带海洋气象研究所较为关注海洋气象学研究。该研究所还主办了学术期刊《热带气象学报》，更关注海洋气象学研究论文的发表。其他大气科学期刊也刊登海洋气象学论文。

中国目前涉及海洋气象预报业务工作的机构主要有3类：中国气象局、国家海洋局，以及沿海省份的海洋与渔业局。具体业务单位在气象局为海洋气象台，在海洋局和海洋与渔业局为海洋环境预报台。

2 国外海洋气象发展概况

目前,美国国家气象局(The National Weather Service,是美国商务部下属的国家海洋和大气管理局(NOAA)内的一个分支)、英国气象局(United Kingdom Met Office,为英国商业、能源,以及工业战略部所属政府机构)和日本气象局(Japan Meteorological Agency,为日本土地、基础设施、交通和旅游部所属的政府机构)均制作北半球的海洋气象预报。英国的海洋气象预报可追溯到1859年英国皇家蒸汽机航船在威尔士外海安格爾西岛附近的海难事故,灾难中有450人遇难。由此自1861年2月英国开始通过电报通信对海运提供预警服务,从1911年开始英国气象局通过无线电通信发布英国周边海域的海洋气象预报,包括大浪和风暴警报。该项服务延续至今,仅在一战和二战期间有过间断。美国的海洋气象预报起源于路易斯安那州的新奥尔良,美国陆军信号队在新奥尔良港口收集各航次带来的海洋气象信息。1904年海洋气象预报的业务转给了美国国家气象局。1912年泰坦尼克号的沉船海难事故,对全球海洋气象预报的合作起着关键作用,由于这次悲剧,一个国际委员会建立起来,主要为协调各国,建立公认的更安全的海上航行规则。1914年该委员会的工作促成了国际海上生命安全公约的确立。1957年美国气象局开始向涉海人员出版双月刊气象记录,报告北半球过去一段时间的海洋信息,尤其是海上热带气旋的信息,提供每月海上气候特征,鼓励和组织志愿船进行海上气象观测。在美国国内,从1971年开始,天气图正式由官方在纽约、旧金山、火鲁努几个城市公开出版,而1972年北太平洋预报也以同样的方式公开出版。1986—1989年海洋中心作为美国国家气象中心的所属单位,负责美国国家气象局的海洋气象预报。1989—1995年,美国国家气象局的海洋预报部也开始提供海洋要素客观分析和预报产品。1995年在国家环境预报中心下成立了海洋预报中心,该分中心承担北大西洋和北太平洋的海洋预报预警工作。

由于海洋是连接世界各大洲的水域,海上航行是世界性、国际间的经济活动与人文交流,而海洋气象是海上活动的保障,并且需要国际间的协作。因此参与国际间海洋气象组织的协调与运作非常重要。在中国的“一带一路”发展中,海洋气象学领域肩负着重要使命与蕴含着现代活力,因此需要更多地认识国际相关组织并积极地与之交流。

3 国际海洋气象组织的建立

国际海洋气象组织的建立要追溯到1853年8月在

比利时布鲁塞尔召开的首届国际海事会议,出席会议的有各国政府官员、海军官员、行业代表、科学家,他们来自比利时、丹麦、法国、英国、荷兰、挪威、葡萄牙、俄罗斯、瑞典和美国。会议的主题是筹建规范统一的海上海洋气象观测系统,并建立起对海洋风和洋流观测的总体计划。会议的发起人和召集人是美国海军军官马休·莫雷(Matthew Fontaine Maury, 1806—1873),他是美国海军学院奠基者,国际知名的海洋学家、地理学家、天文学家和气象学家。他被称为现代海洋学和海军气象学之父。他提出的海洋风和海洋洋流的图形绘制方法,得到海军船舰和商船船队的广泛使用。这次国际会议对船舶气象日志、随船气象仪器、观测要素的标准化等达成一致规范,包括24 h的云量云属、干湿球温度、风力、海表温度以及不同水深的水温等海气要素的监测与记录。这些可以被视为全球天气监测的最初基础。会议目的是通过建立国际海上监测系统,加强对海洋气象理论的进一步认识,同时为海上航行与海上作业确立更适合自己的环境条件。此次会议后来被评价为首次国际海洋气象会议,是业务气象学和海洋学方面国际合作与国际协调的先驱。2003年11月在比利时阿尔伯特二世国王的赞助下,在比利时国王王宫召开了为期2天的研讨会,纪念和庆祝1853年召开的具有历史意义的首届海事会议150周年。会议公认1853年的会议是首次关于海洋气象的国际大会,是国际合作与协调的典范。1853年的会议促成了1873年在维也纳召开的首届国际气象大会,以及WMO的前身国际气象组织(IMO)的成立。因此首届海事大会成为当代业务气象学和海洋学发展的重要里程碑。图1为美国海军军官马休·莫雷博士。



图1 美国海军军官Matthew Fontaine Maury

1952年,海洋气象技术委员会(Technical Commission on Maritime Meteorology, CMM),在新生的世界气象组织(World Meteorology Organization, WMO)赞助下成立。在接下来的45年内,几乎每

4年都有大会召开，CMM的主要的任务是：1) 海上观测的数据传输；2) 海上观测的标准；3) 气候数据；4) 为公共海事提供服务。CMM第2届会议（1956年）也非常值得一提，它讨论了一些与其他组织或者项目开展合作的工作，例如支持国际地球物理年（International Geophysical Year），与航空气象学委员会（Commission for Aeronautical Meteorology）合作制定契机的条件，与观测工具和方法委员会（Commission for Instruments and Methods of Observation）进行的有关海上自动观测站的合作。

尽管CMM在国际海洋气象方面做了很多贡献，但在实际协调操作中，在现代技术迅速发展过程中，以及快速增长的海洋气象需求中仍显示出了局限性。因为那时CMM和海洋学的观测网、资料管理、应用计划、服务项目等都是通过两个独立的机构进行国际间协调的。这两个分别独立的机构，一个是隶属WMO的海洋气象委员会，另一个是隶属联合国教科文组织的政府间海洋委员会（IOC）。这两个委员会通过全球海洋集成服务系统（IGOSS）进行相关国际事项协调。因此，1999年，在13届WMO大会和20届IOC会议上正式确定成立“WMO/IOC海洋学与海洋气象学联合技术委员会（The Joint WMO/IOC Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology, JCOMM）”。初期阶段是将CMM和IGOSS合并为新机构，这个机构目前属WMO的8个技术委员会之一。图2为JCOMM的会标。



图2 海洋学与海洋气象学联合技术委员会会标
(其中上排左方为世界气象组织徽标，上排中间为联合国教科文组织徽标，上排右方为国际海洋组织徽标)

JCOMM的职能是为世界海洋观测、数据管理、服务系统的充分集成，进行国际间协调、发展和推荐各种标准与规范化流程。JCOMM主要任务是在各种国际合作的项目、计划、任务、活动中促使其成员与成员国的利益最大化。

4 国际海洋气象组织的框架结构

JCOMM是在WMO和IOC联合技术委员会框架下

建立的全球海洋气象和涉海政府单位及组织的合作机构，通过该机构，联系国际气象学和海洋学领域，通过海洋气象相关数据管理与共享，交流各种海洋气象服务产品，共同应对国际海洋观测与服务面临的各种需求。

JCOMM委员会由一位气象学家和一位海洋学家担任联合主席，这反映了该委员会对气象学和海洋学各类研究项目的集成责任。在他们的联合领导下，组成一个管理委员会，指导各方面的任务开展与监督项目进展。JCOMM委员会主要负责的3个领域的工作：1) 观测网；2) 服务和预报系统；3) 资料管理。JCOMM的长期目标为：增加海洋和海洋气象服务，以增强海上和沿海地区海上生命与财产的安全；增强基于经济、商业和工业活动的海上风险管理；增强海洋和海岸带管理；协调和扩展资料、信息、产品和服务的提供，满足气候研究、气候变率确认和预报等方面的需求。

目前JCOMM的两位主席分别为：Nadia Pinardi教授，海洋学联合主席，来自意大利Bologna大学，学术背景：水动力数值模拟和海洋生物化学圈及数据同化；主要职责：海洋预报与分析能力培养。Johan Stander先生，海洋气象学联合主席，来自南非气象局，专业背景：南非海洋气象局管理，包括预报、观测、系统、研究，以及南极与岛屿；主要担任：海洋气象联合主席，浮标资料合作委员会副主席，联合航行协议执行委员会成员。

各分委会的组成情况大致如下：

管理分委会的共9位成员，分别来自意大利、南非、英国、澳大利亚、肯尼亚、希腊、美国，还有两位来自俄罗斯。海洋能力需求培养分委会共6名成员，分别来自澳大利亚、芬兰、坦桑尼亚、加拿大和美国，其中澳大利亚有两位成员。观测项目领域分委会共有581位成员，其中有多位来自中国气象局和国家海洋局的专家。资料管理项目领域分委会共有69位成员，其中有2~3位中国专家。服务与预报系统项目领域分委会共有223位成员，其中有多位中国专家。气候变化专家团队共11位成员，有1位中国气象局的专家。天气、气候与渔业专项团队，共9名成员，没有中国专家参与。卫星资料需求团队，共7名成员，没有中国专家参与。

5 国际海洋气象组织的职责范围

5.1 进一步发展观测网

在IOC和WMO有关的科学和业务计划指导下，促进、维持、协调及指导全球海洋气象和海洋观测系

统以及这些机构的支持性通信设施的运作,以满足IOC和WMO计划的需要,特别是全球海洋观测系统(GOOS)、全球气象观测系统(GCOS)以及世界天气监测网(WWW)等的需要。持续地评价整个观测系统的效率,并建议和协调该系统进行改进。

5.2 贯彻落实资料管理系统

与基本系统委员会(CBC)、国际资料与信息交换委员会(IODE)、国际科学联合会理事会(ICSU)以及其他有关的资料管理机构合作发展和落实衔接的资料管理系统,以满足目前的业务系统以及全球观测系统的实时作业需求;与这些机构合作,寻求必要的数据集成、质量控制及后续分析中心运作的赞助,以实现为用户提供必要的、适合用户需要的、多时间尺度的数据集。

5.3 提供产品与服务

与其他有关的机构合作,为各国和国际分析中心提供指导、帮助以及鼓励,制定和提供国际科学和业务计划,为WMO成员国以及IOC成员国提供所需的资料产品与服务。监测各类观测资料及导出产品的使用情况,并就改进资料与产品质量所做出的变更提出建议。协调国际海上人身安全公约(SOLAS)(全球海难与安全系统的主要部分),以及与安全有关的海洋气象及相关的海洋服务。

5.4 为成员国提供能力培养

审议和分析IOC成员国和WMO成员对于教育与培训,以及在技术委员会职责范围内的技术转让和实施支持方面的各类需求。提供为满足这些需求所需的必要技术出版物、指导材料,以及各类讲座的演讲专家、讲习班的教员。开发旨在增强成员国参与WMO和IOC海洋气象和海洋计划,并增强产品效益的能力培训项目。

5.5 帮助编制和管理国际系统中的资料

与IOC、ICSU、WMO的资料管理机构,如IODE,以及气候学委员会(CCI)和ICSU的世界资料中心等做出合作性安排,提供为满足资料的二次用户今后长期研究的需求所需的、具有高水平的质量控制,以及长期的资料文件编制和归档的综合性数据集(包括实时的和延迟模式的资料)。

这些职责不包括由其他的WMO组成机构或相应的IOC机构专门负责处理的事项。

JCOMM各附属机构的职责范围如下:

1) 管理委员会。向两位主席提供有关JCOMM工作计划的短期和长期规划以及该计划实施情况的

建议;向两位主席提供有关实施工作计划所需的资源以及确定这些资源的方法建议;帮助两位主席协调和综合通过各工作小组、专家组以及报告起草人实施的JCOMM工作;审议委员会的内部结构和工作方法,包括其与WMO和IOC内外的其他机构的关系,提出关于进行适当调整的建议;提交给JCOMM,由WWW、WCP、GOOS、GCOS等计划采取行动的活动和项目实施情况提出建议,特别包括GOOS/GCOS的实行动计划;根据需要为WMO的长期规划过程提供帮助,特别是有关海洋计划部分的发展及对实施情况的监测。

2) 服务协调组。检查服务工作计划的有效性、协调性及运作情况,并提出建议,包括服务及时性、服务规范化、工作质量及公众用户需求的切合性等方面的意见与评论;通过归纳由专门服务小组及JCOMM其他方案领域确定的众多需求,提出有关需要实施或中止的JCOMM服务项目的建议;开展与有代表性的用户集团的联系,以便监测现有服务的优势和局限;确保在服务提供方面与CBS、GOOS及GCOS的有关团体和机构的协调与合作;保持与外部机构的联系,特别是那些代表用户团体的机构。

3) 能力建设组。规划、启动及实施ETIS工作计划,特别是包括JCOMM能力建设战略;检查现有的培训和指导材料(文件和电子版)并就更新的程度以及新材料的开发提出建议;监测区域性的能力建设需求,并开展适当的区域性计划;与其他领域以及外部机构和计划(如WMO ET/TCO、IOC-TEMA、GOOS、GCOS、IGOS)配合,开展并实施综合性的培训和资助活动。

4) 资料管理协调组。规划和启动DM(资料管理)工作计划并监督其实施情况;就为实施、维持及向用户提供全面综合海洋/大气数据流所需要采取的行动,包括确定所需的资源等提出建议;确保与其他资料管理机构和计划,包括IODE、CBS、CCI、CEOS、GOSSP以及WDC的充分而有效的合作、协调及一致性;审议并鼓励使用海洋资料管理方面的先进信息技术;鼓励并帮助各国识别、抢救海洋气象和海洋学历史资料,并加以数字化和归档;在可能的情况下,开发JCOMM资料的类属、质量控制、基础数据集、分析数据集、数据传输及数据交换的标准、格式及程序;检查各业务中心对于实时、综合海洋资料传递的需求,并开发和推荐改进的程序,确保以适当的及时性和质量向这些中心提供资料和元数据;与CBS合作发展和维护实时数据质量以及数据流监测和后续的程序。

6 JCOMM提供的各种服务与活动

6.1 海洋气象数据库及服务

JCOMM建有海洋气象数据库并在主页上提供有指导的下载资料链接网页。该网页包括的资料有7大类：

1) 海洋资料入口。网址为 <http://www.oceandataportal.org/>，界面如图3所示。此处的海洋资料来自美国国家海洋资料中心，并具有国际海洋资料与信息交换协议保障。



图3 JCOMM海洋数据库网页示例

2) WMO信息系统。网址为 <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WIS/>，提供统一坐标系的来自WMO和相关国际项目与计划的全球共享数据。

3) 与JCOMM活动相关的资料系统。网址为 http://www.jcomm.info/index.php?option=com_content&view=article&id=331，提供来自JCOMM组织的各项调查活动所获取的多种海洋气象数据。

4) 实时的海洋和海洋气象观测网资料系统。http://www.jcomm.info/index.php?option=com_content&view=article&id=15&Itemid=0，是 NOAA业务应用的

海洋与海洋气象资料监测网数据，由WMO全球电信系统传输与维护。

http://www.jcomm.info/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=30，其中实时监测网如图4所示。

5) 海洋与海洋气象服务。网址为 <https://www.godae.org/Ocean-products.html>，为全球海洋与海洋气象资料同化数据产品、海洋再分析资料。以及定期公式的电子公告，内容包括海事安全、海上事故搜救、海洋污染和应急响应、海冰灾害、风浪灾害，以及风暴潮信息。

6) 现场海洋资料系统。资料来自现场监测，包括各种海洋监测网系统获得的海上现场资料数据集。例如浮标、Argo、船舶、锚系仪器、海冰观测、船舶资料等。

7) 元数据标准。网址为 <https://marinemetadata.org/references/marineprofile19115>，海洋元数据标准 ISO—19115由澳大利亚海洋资料中心制定。

6.2 标准与实践

JCOMM为国际海洋气象界提供了行业标准以及培训实践，包括：1) 手册与指南；2) 观测标准；3) 资料标准；4) 服务标准；5) 培训计划与实践项目。支持了国际海洋气象的系统性、专业化发展。

6.3 能力发展

开展海洋气象和海洋学服务能力培养，以及对各项海洋气象类国际协作计划的组织与经费支持。

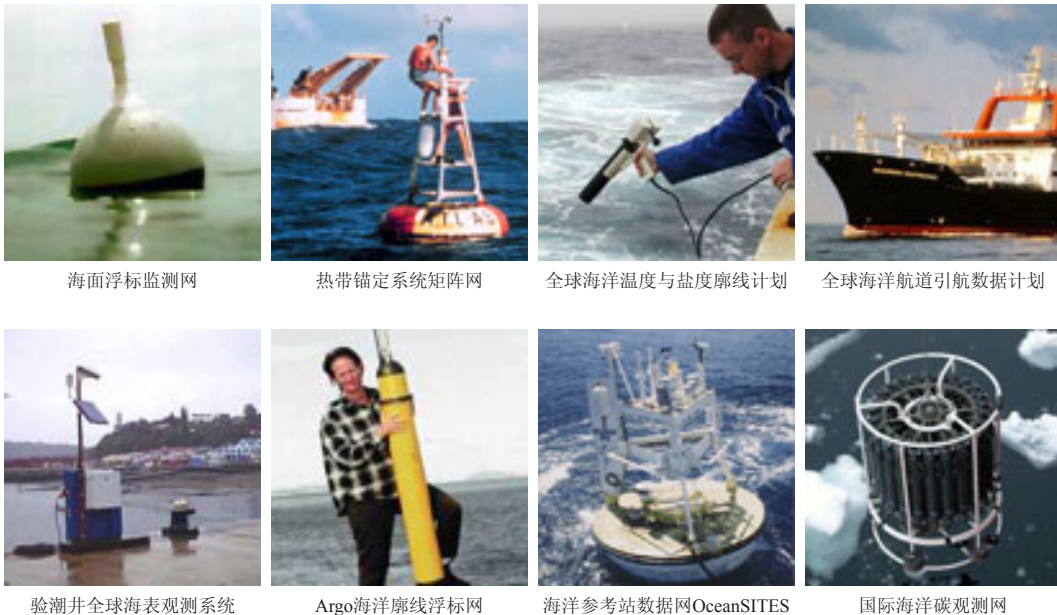


图4 实时监测网

(下转80页)

抗战时期武汉测候所的西迁之路

■ 李仁莉 何琦 曹裕强

1937年7月7日，日本军队发动了震惊中外的卢沟桥事变，中国的抗日战争全面爆发。为了保存国家实力，延续民族经济与人文命脉，坚持抗战到底，许多中东部沦陷区的国家机关、事业单位、科研机构、学校、工商企业不得不选择南下西进，踏上漫漫艰辛的迁移之路。

武汉头等测候所，危难时期西迁到了贵州省遵义市湄潭县，在高原山间的破屋陋室中坚持开展一系列教学科研、气象观测和抗日救亡等活动，留下了大量的气象观测记录和科研论文，是一笔珍贵的气象历史文化遗产和精神财富。

1 武汉头等测候所的筹建

“国立中央研究院”气象研究所武汉头等测候所，是“国立中央研究院”评议员李仪祉在1936年首次评议会上提出筹建建议，由“国立中央研究院”与“全国经济委员会”上层协议，通过气象研究所所长、“国立浙江大学”校长竺可桢的努力和武汉大学的协助，由气象研究所提供技术、仪器、图书和业务管理人员，“全国经济委员会”水利处提供经费，在湖北武昌联合建立^[1]。当时，一起建立的还有西安头等测候所，是当时仅有的两个头等测候所。两个测候所建立的最初目的是为了配合水利部门，做好长江和黄河流域气象观测、天气预报和水情预测，后来也服务于市政建设、防空军事行动等。

武汉头等测候所所址最先设在武昌大东门外华中协和神学院一栋楼房（即后来的武汉市第二师范学校所在地），后在武昌起义门内紫阳湖南岸石灰堰征地新建（即后来的武昌石灰堰115号武汉市第二针织厂所在地）。其房屋建筑为二层楼房，有办公室和宿舍十余间，观测场就位于办公楼大门前西南方空地上（图1）。



图1 1938年武汉头等测候所
(测候员尹世勋之子尹炳武提供)



武汉头等测候所，危难时期西迁到了贵州省遵义市湄潭县，留下了大量的气象观测记录和科研论文，是一笔珍贵的气象历史文化遗产和精神财富。

武汉头等测候所首任所长由气象研究所委派沈次由担任，测候员有徐勉钊、尹世勋。该所相当于负责长江中下游一带气象观测的中心气象台，有当时全国较强的技术力量和先进的仪器设备。1937年1月1日正式开始地面气象观测，每天从06—21时，每小时观测一次，深夜22时至次日05时则采用自记仪器记录，对气压、温度、湿度、风向风速、雨量、蒸发以及天气现象等进行观测记录，每天06和14时拍发气象电报。每月底，还将各项记录统计编为月报，致送江汉工程局扬子江水利委员会及气象研究所，以供随时稽考。此外湖北省政府及武昌市政处亦按月前来索取观测记录。

1937年7月，武汉头等测候所又配备了一台无线电收报机、一名预报员（许鉴明）、一名报务员（洪绍甫），并与江汉工程局商定合作办法，开始负责抄收国内外气象广播，并于8月1日开始正式预报华中天气和开展水文预报。同时，每日下午复印天气图及天气水文预报各两份送交该局。

抗日战争全面爆发后，形势日渐紧张，武汉防空司令部为了解华中天气情况，便派该部参谋处长到武汉头等测候所请求协助。从此，武汉头等测候所开始每日06时送三份天气图及预报给防空司令部，当时的预报范围涉及日本和中国台湾、华北、华中、华南、华西诸区未来天气变动的情形。当敌机将临之际，又将当时本地风向风速实况告知该部，以作为防空部队射击飞机时之参考。同时，还将观测预报情况抄送给通讯社和汉口市广播电台播报。直到1938年7月20日武汉头等测候所无法正常工作才停止该项服务。

从1937年1月1日起，到1938年7月20日，武汉头等测候所在湖北武昌石灰堰所址工作了1年零7个月20天。

2 武汉头等测候所的四次迁移

1938年春夏日寇进逼，武汉形势日趋紧张，空袭轰炸频繁。1938年7月21日，武汉头等测候所不得不忍痛丢弃刚在湖北武昌紫阳湖南岸石灰堰建好的新所址，由主任沈次由率领全体职员，分批携带各项仪器设备、图书资料等，冒暑趁夜搭乘火车南下530多千米外的湖南衡阳，踏上艰难漫漫的第一次西迁之路，在颠沛流离中谋

求生存和事业的发展。

7月23日，武汉头等测候所辗转迁徙抵达湖南衡阳。在衡阳小住期间，敌机仍每天轰炸不已。当时，竺可桢先生正为浙江大学从江西泰和向广西迁移事宜频繁来往于赣、湘、桂。当他得知衡阳也并非久留之地时，又决定将该所向桂林迁徙。为此，竺可桢还特地商请前期迁到桂林的“国立中央研究院”地质研究所所长李四光，要其设法派车到衡阳，将滞留衡阳的武汉头等测候所接去桂林。李四光所长经与当时的广西省政府接洽，派一辆大型客车到达衡阳，于8月5日将在衡阳停留了12天的全所职员及部分图书仪器等接到，向距离衡阳320千米外的广西桂林开始第二次迁移。

武汉头等测候所到达桂林后，租住在城内体育场西首美仁路4号，但因需修缮，沈次由临时住在华南饭店。因战事紧张，交通不便、道路堵塞，8月29日，许鉴明及勤务陈忠尧才携带滞留衡阳的仪器到达，在桂南路兴盛巷2号租赁小屋三间暂时住下来，等待原租定的城内体育场西首美仁路4号房屋修建完毕。直到10月15日，才勉强搬入新址，至10月20日才开始部分观测工作。

武汉头等测候所迁至桂林期间，日寇飞机仍在那里进行了多次轰炸，导致桂林也不能成为立足之地。而早在1938年8月底，浙江大学就决定从江西泰和再次迁往广西宜山。为此，1938年11月9日，竺可桢指令该所向宜山迁移。

12月27日，武汉头等测候所除洪绍甫“租定文昌门文明路一〇五号楼上”，暂留桂林开展气象电报译密工作外，其余均根据气象研究所复谕令，前往宜山。由此，武汉头等测候所只在桂林作145天的短暂停留之后，又于12月28日从桂林出发，开始了250千米行程的第三次迁移。期间，因战乱和气候等因素的影响，同样遭遇到了很多难以预料和想象的困难。12月31日，武汉头等测候所抵达广西宜山。

1939年元旦，武汉头等测候所暂借宜山标营浙江大学学生宿舍开始观测，并每日按时致送报告于航委会驻宜山电台，转往成都。后来，按照竺可桢的计划，武汉头等测候所再选择与标营浙江大学学生宿舍隔河为邻的小龙乡蓝靛村乌龟咀农场作为临时所址。

武汉头等测候所在宜山开始观测及预报工作后，浙江大学竺可桢校长和涂长望教授常来所内指导工作。并要求按月将宜山气候概况根据观测资料进行整理叙述，交由浙江大学校刊登载。

在宜山期间，条件虽然艰苦，武汉头等测候所仍然克服困难开展工作。然而，1939年2月5日11时许，日寇竟用18架飞机对该地进行了轮番轰炸。首先在南门外、西门外以及城内，然后至东门外标营。当时，浙江大学在东门外标营旁沿江江边建有多幢席棚草房作为教室，日机竟以这一带为目标，进行了集中轰炸。当日轰炸三

次共投弹约118枚，除一人受轻伤外幸无人员死亡。武汉头等测候所只有福丁式水银气压表被震坏。

在宜山，沈次由因长期工作繁重，加之频繁迁移而过度劳顿得病，出现神经错乱，于1939年3月告假回沪休养，后因医治修养不愈，5月10日在上海跳楼自杀。武汉头等测候所主任暂聘请浙江大学秘书诸葛振代理，所中事务由许鉴明具体负责。10月，徐勉钊因事辞职，其职务由浙江大学涂翔甲、李成章二人暂时代理。竺可桢另派已随“国立中央研究院”气象研究所迁到重庆北碚的研究员卢鋈，前往宜山担任武汉头等测候所所长，其夫人曾广琼到所任测候员。11月27日，卢鋈及其夫人到所任职。

1939年11月15日，日寇在广西北海龙门港登陆，防城、钦州相继失守，广西战事变得异常紧张。11月25日，南宁随之陷落。此时的宜山，每天警报声不停。在宜山的武汉头等测候所与浙江大学师生再次面临着迁移的问题。因当时车辆多征作军用，难以包雇。12月，武汉头等测候所先将笨重及不甚急需之图书什物，移运至宜山城西北15千米的毛岗村吴尚清家度藏存放，由许鉴明的岳父、当地士绅申季燊代为照管。

1940年1月，竺可桢指示：遇必要时可迁贵州遵义工作。1月31日，卢鋈派曾广琼先行入黔筹备。2月12日，曾广琼抵达遵义，随即赁定老城煤市街25号为临时办公处。

2月10日，在广西宜山的武汉头等测候所，又开始踏上前往贵州省遵义市800多千米的崎岖之路，进行第四次迁移。因公路局客车稀少，人满为患，客车车票不容易买到，卢鋈只好嘱咐所中同仁自行北上入黔至遵义集合。2月17日，尹世勋、许鉴明分别搭客车先行。

2月18日，卢鋈在宜山将各项事务结束之后，亦携带大部仪器、图书，搭乘中国运输公司货运专车启程离开宜山。2月21日，当车行至贵阳附近的马场坪乾把哨时，竟遭覆车之祸，所幸身体受伤不重，气象仪器损坏不大。2月23日，他到达贵阳后，进行了几天的休养，待他身体伤痛痊愈和仪器修理完后启程，于3月1日才抵达遵义。尹世勋、许鉴明二人亦先后到达。

由于遵义老城煤市街临时办公处附近的场地过于狭小，不合观测之用。竺可桢发来电报要武汉头等测候所改迁至距遵义城东72千米的湄潭。卢鋈得到电报后，即于3月13日启程亲赴湄潭勘察所址，筹备迁移。到达湄潭后，在县政府及当地士绅的鼎力协助下，选定湄潭县城义泉镇北门外的玉皇阁作为所址。该处地临湄江河附近，较为开阔，很适合观测之用。与各方商洽定妥之后，3月21日，卢鋈立返回遵义，征集民夫，整顿行装，并于3月27日率尹世勋、许鉴明、曾广琼三人启程前往湄潭，于29日到达。

因当时百叶箱早已在遵义制作好了，所以只经过两天的筹备，于1940年4月1日在玉皇阁新址开始恢复观测

工作，改名为“湄潭武汉测候所”。当时编制职员5人，其中主任卢鋈，预报员许鉴明，测候员曾广琼、尹世勋4人到湄潭，而报务员洪绍甫留桂林担任译电员，未随迁遵义和湄潭。

自此，武汉头等测候所先后在沈次由、卢鋈两位主任的率领下，经历一迁湖南衡阳，二迁广西桂林，三迁广西宜山，四迁贵州遵义和湄潭，费时1年零8个多月，行程达1900千米，终于在贵州湄潭落户定居下来，并在此进行了长达6年半的观测和科研工作。

3 武汉头等测候所在湄潭

武汉头等测候所西迁至湄潭的所址玉皇阁，是当时湄潭县城外的一座古老的大庙宇。走进阁内，正面是正殿，为重檐式歇山顶木结构建筑；左右两面为厢房，左面当时为浙江大学附属小学教室，右面为武汉头等测候所办公室和住房。观测场则建立在正殿后面靠围墙的菜地中，面积约有100 m²（图2）。



图2 1942年湄潭武汉测候所所址——湄潭玉皇阁
(湄潭浙江大学西迁陈列馆提供)

当时湄潭物质条件虽然极为艰苦，但测候所的工作人员没有因此而懈怠自己的工作。他们住在玉皇阁狭小的房间内，在微弱的煤油灯下坚持工作，每天24 h连续观测，每小时实测1次。天气报告先是通过发报传至迁移重庆的“国立中央研究院”气象研究所，后又采用电报形式传送。发黄的牛皮纸上这样写道：“1943年4月22日，马厂、牛场等九个乡冰雹如卵，继以旋风，民房受损。1944年7月3日，湄潭大雨滂沱，测候所在县城实测雨量196.3毫米，洪水为患，湄江桥被冲垮，沿河房屋、田禾多被淹没……”一张张牛皮纸上记录着的气象数据，见证了测候所职员辛勤的劳动。

据尹世勋的儿子尹炳武回忆，玉皇阁原有一名护庙人，大家都叫他“看守”，相当于保安人员。当时，院内除了住着卢鋈、曾广琼夫妇和许鉴明外，还有尹世勋一家4口（后在此增至7口）。玉皇阁围墙外有一大片茂盛的竹林，每年春天，这里会长出一些竹笋，就成为他们佐饭的美味菜肴，那里的蛇、鼠也特别多，经常有蛇

盘卧在书柜上、书箱里，甚至床上，这也时常成为他们大饱口福的“山珍”。

最初，卢鋈除了担任湄潭武汉测候所主任外，还在浙江大学史地系兼授气象学课程。1942年8月，卢鋈正式应聘为浙江大学史地系副教授，湄潭武汉测候所也改属国民政府“中央气象局”管辖，由许鉴明代任主任。1946年5月，卢鋈、曾广琼夫妇随浙江大学离开湄潭，许鉴明则返回南京北极阁，玉皇阁就只剩下尹世勋一家了。但他仍然坚持气象观测、发报工作。

在湄潭期间，竺可桢十分关心测候所的工作，尽管浙江大学的工作忙，他依旧关注支持测候所，依旧坚持气象观测，依旧做好笔记。竺可桢的日记里有记载：“晨七点半起。上午阅尹世勋著《湄潭之气候》，系根据民国廿九年四月至卅一年年底之记录。知湄潭高度为760 m。平均气压十二月最高，气温为15度^①，与南京相近。雨量以五、八两月为最多。春多于秋，与重庆异。下雨多在晚间，自21点至6点约占51%，尤以清晨4点—6点为多，雷雨又占多数，与成都夜雨66%及宜山夜雨50%相似。雨日以十月为多，占17日。三年之中，湄潭天无片云之日只七天，云量之多，胜于重庆。”

除此以外，浙江大学史地系涂长望等教授也经常来到所内开展观测和研究活动。浙江大学史地系硕士生叶笃正和郭晓岚等还常在那里看书学习，并进行一些试验研究和观测活动。

1946年8月，“湄潭武汉测候所”改名为“湄潭测候所”，隶属于贵州气象所。1947年7月，国民政府“中央气象局”正式任命尹世勋为湄潭测候所主任、技士。为了解决所里气象人员极端缺乏的问题，尹世勋还手把手教其夫人刘文淑学会气象观测、发报、编制报表等业务，成为他工作上的得力助手^②。

1947年7月1日起，湄潭测候所将每天的观测改为6次，分别为06、09、12、14、18、20时。其观测项目主要有：气压、气温（干、湿球温度，最高和最低温度）、湿度（绝对湿度、相对湿度）、风（风向、风速）、云（云量、云状、云向）、降水量、能见度、日照时数、天空状况等，并将每天观测的气象情报编为电报拍发指定单位。1949年5月1日起改发广州，10月21日起改发台北。尹世勋夫妇俩一直坚持不懈地工作，于1949年11月19日迎来解放军进城，26日湄潭县人民政府成立，27日湄潭县人民政府接管湄潭测候所。

武汉头等测候所从1940年3月西迁至湄潭，到1946年7月离开，在这个相对安宁的小县城，进行了近6年半的气象观测和科研工作，与浙江大学史地系师生一起，取得了辉煌的成果，为湄潭气象事业的发展奠定了坚实的基础，也为湄潭、遵义，乃至贵州、全国留下了一笔不

① “15度”即15℃。

② 2011年9月湄潭县气象历史文化采访组到贵阳采访尹世勋的儿子尹炳武时，尹炳武所述。

可多得的物质和精神文化遗产。

4 深远的影响、荣耀与传承

武汉头等测候所和浙江大学史地系西迁至遵义和湄潭，竺可桢、吕炯、涂长望、卢鋈、么枕生、叶笃正、郭晓岚、谢义炳、周恩济、姚宜民、束家鑫、吕东明、尹世勋等一批国内外著名的气象学家云集这里，胸怀报国之志，投身气象事业，使这里成为了抗日战争时期中国气象高等教育与科研实践中心，对湄潭、遵义、贵州乃至中国近现代气象科学事业的发展产生了深远的影响。

他们身居破旧房舍，点亮昏暗油灯，腹裹素食简餐，在湄潭从事教学科研、学习科学知识、利用测候资料开展气象科学研究，创造了辉煌的成果，发表了与气象相关的论文34篇。

一张张牛皮纸记录着一天的气象，科学的圣火在湄江河畔燃烧。1944年10月，在湄潭召开的中国科学浙大分社年会上，竺可桢先生发表了《二十八宿起源之年代与地点》《历史上星座之变迁》《徐霞客之时代》三篇论文。同年，浙江大学史地系涂长望教授《气候学研究法》、卢鋈副教授的中国第一本《天气预告学》和第一本《中国气候图集》《中国气候概论》等相继发表。接着尹世勋的《湄潭之气候》付印。

在遵义、湄潭期间，浙江大学史地系涂长望教授的著作还有《中国高空探测的一些成果》《气团分析与天气模式》《何以贵州天无三日晴》等。其史地系硕士研究生的论文达26篇之多，如郭晓岚的《大气中之长波辐射》，叶笃正的《湄潭之大气电位》，谢义炳的《贵州之天气与气候》，余泽忠的《中国棉作与气候》，文焕然的《秦汉时代黄河中下游气候之蠡测》，束家鑫、史以恒的《遵义的气候》等，不仅为当地的经济文化建设提供了有价值的参考资料，同时为以后中国气象科学的研究开辟了道路，为新中国气象事业的发展奠定了坚实的基础。

浙江大学农学院在科研活动方面更是得益于武汉测候所的气象观测资料，特别是所开课程中就有《农业气

象》，根据当地实际情况，结合气象观测开展教学和研究，在湄潭完成和取得了如水稻、玉米、小麦、茶叶、水果、蔬菜及其他很多与农业方面有关的教学科研成果，这些重要的科研成果，对以后的农业发展产生了深远的影响。

新中国成立后，竺可桢、叶笃正先后担任中国科学院副院长，涂长望、卢鋈先后分别担任中央气象局第一任局长、副局长。叶笃正潜心致力于大气科学研究，在全球变化、大气环流和气候变化等方面进行了开创性的研究，成为国际上大气科学界的一代宗师，获得了2005年度国家最高科学奖。谢义炳、么枕生分别担任了北京大学、南京大学气象学教授等，为新中国气象事业的建立和发展做出了历史性的重大贡献。

1959年3月，时任中央气象局副局长的卢鋈先生专程到湄潭，寻访当年足迹，留下了“留得他年寻旧梦，随百鸟、到湄江；胸怀报国之志，患难图兴邦”的题词和诗句。中国气象局原副局长骆继宾，抗战时随亲人在湄潭度过了6年时光，1995年4月和2007年10月他先后两次来到湄潭，为湄潭县气象局题写了“加强自我发展能力，不断提高工作质量，为发展气象科技和本地经济做出更大贡献”和“继往开来，自强不息”的题词。既是希望，更是传承。

武汉头等测候所在特殊时期西迁，为中国气象事业的文脉保存和发展进步，殚精竭虑、负笈拼搏，在中国气象科学历史上镌刻了一座座丰碑，留下了不可磨灭的历史记忆。

深入阅读

《湖北气象》编辑部, 1995. 晚清及建国前的湖北气象事业// 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.

竺可桢, 2005. 竺可桢日记. 上海: 上海科技教育出版社.

(作者单位: 李仁莉, 贵州省湄潭县气象局; 何琦, 贵州省湄潭县人大常委会; 曹裕强, 贵州省茶文化生态博物馆)

高被引论文选编

“海洋气象”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2015—2016年

使用实测数据和全球产品评价 GCOM-W1/AMSR2反演的海表温度和风速数据——Evaluation of sea surface temperature and wind speed observed by GCOM-W1/AMSR2 using in situ data and global products. *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 164.

日本宇宙航空研究开发机构 JAXA 于 2012 年 5 月 18 日发射了搭载有先进微波扫描辐射计 (AMSR2) 的全球变化观测任务第一期水循环观测卫星 (GCOM-W1)，并于 2012 年 7 月 3 日开始获得观测数据。GCOM-W1 的主要任务是利用 AMSR2 观测降水量、水汽、海上风速和海表温度等要素。日本东海大学的 Hihara 等通过与系泊浮标数据或全球产品进行比较的方法，评价了 JAXA 发布的第一版 AMSR2 海温 (SST) 和海表风速 (SSW) 数据。基于 AMSR2 和 TRITON 浮标数据的对比，可以发现，SST 和 SSW 的平均差异分别为 0.21°C 和 0.30 m/s，均方根 (RMS) 差异分别为 0.49°C 和 1.25 m/s。在白天低风速条件下，AMSR2 的 SST 显著高于 TRITON，这意味着 AMSR2 的 SST 受到昼夜加热的强烈影响。从南大洋全球产品的比较来看，AMSR2 的年平均 SSW 比其他 SSW 产品高出 1 m/s。来自 AMSR2 的 SSW 数据与其他产品的 SSW 数据具有相似的准确性，但与其他产品相比，AMSR2 数据具有丢失数据更少的优点。此外，通过比较 WindSat、AMSR2 和 JAXA 提供的 AMSR-E 数据，研究进一步检查了年平均值的差异。对于南大洋，研究发现 SST 和 SSW 的年平均值有显著的差异。在北半球强洋流区域，AMSR2 的 SST 低

于 WindSat，AMSR-E JAXA 的 SST 高于 WindSat。研究认为，如果将 AMSR2、AMSR-E JAXA 和 WindSat 数据连续使用的话，可能会产生错误的趋势。

南海中尺度水文和海洋气象观测网的发展历程——Toward a mesoscale hydrological and marine meteorological observation network in the South China Sea. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, Vol. 96, No. 7.

中国南海 (South China Sea, SCS) 的海气交互作用对周边地区的天气和气候在各时空尺度上都有直接的影响。原位观测在探索区域环流和海气交互作用的动态特征方面起着至关重要的作用。遥感和区域模拟将为海-气耦合研究提供高分辨率数据；为确保这些高分辨率数据的质量，使用原位观测对其进行仔细验证和校准是非常必要的。经过十年的努力，SCS 的海洋观测网络以及海气观测系统区域观测站已经开始建立。早年，针对 SCS 的观测很少且学科领域较窄。自 2004 年以来，中国科学院南海海洋研究所 (SCSIO) 根据 SCS 的海洋环流和海气相互作用的动态特征，精心设计并在每年夏末举办了开放的海洋科考。自 2006 年以来，海洋科考船搭载了辐射计和无线电探空仪，标志着 SCS 海洋气象观测的新时代。固定观测站已建立长期持续的数据记录。通过网络，观测数据已被用于海洋大气边界层的区域海洋环流和过程研究。今后，将在固定观测站进行大量的多机构、协同科学巡航和观测，以在 SCS 建立中尺度水文和海洋气象观测网。

南太平洋温带强迫对 ENSO 的影响及其与北太平洋的比较——The impact of South Pacific extratropical forcing on ENSO and comparisons with the North Pacific. *Climate Dynamics*, 2015, Vol. 44, No. 7-8.

以往的研究表明，北太平洋温带大气变率通过季节性足迹机制 (SFM) 影响厄尔尼诺/南方涛动 (ENSO)。中国科学院大气物理研究所的丁瑞强等证实，中纬度南太平洋大气变率引起的温带南太平洋四极体海表温度 (SST) 变率也可能对 ENSO 有额外的影响。在热带，ENSO 有关的纬向风和 SST 异常对温带南太平洋强迫的响应演变与 SFM 假说一致。也就是说，南太平洋温带海平面气压 (SLP) 异常的太平洋—南美 (PSA) 模态在南半球夏天在海洋上形成了 SST 足迹 (即四极 SST 模态)。在接下来的南半球冬季，这个 SST 足迹随后沿着赤道对纬向风异常产生强迫，最终在热带地区的海-气耦合下，在随后的南半球夏季，导致 ENSO 事件的发生。本研究表明，南太平洋和北太平洋温带大气变率对 ENSO 的影响是不同的、相对独立的。它们可能共同或单独地影响 ENSO 事件的发生，南太平洋强迫启动 ENSO 事件的重要性与北太平洋强迫相当。研究还建立了基于南太平洋和北太平洋信号综合指数的 Niño3.4 指数的经验模型，结果表明，该模型可以用于对 Niño3.4 指数的预测技巧，提前时间长达 1 年。

太平洋 SST、Z₅₀₀ 气候变率和美国西部季节性径流的关系——Pacific Ocean SST and Z₅₀₀ climate variability and western US seasonal streamflow. *International Journal of Climatology*, 2016, Vol. 36, No. 3.

美国 Atkins 北美公司水资源部的 Sagarika 等评估了美国西部六个水文区域太平洋气候变率与美国西部径流之间的关系，这六个水文区

域是由美国地质调查局定义的,包括:格兰德河、上科罗拉多、下科罗拉多、大盆地、太平洋西北部和加利福尼亚。研究采用奇异值分解(SVD)技术,对50年(1960—2010年)SST、500 hPa位势高度(Z_{500})和美国西部90个站点的径流数据进行了分析,为美国西部各主要水文区域与太平洋海洋变率建立了时空关系。研究基于3~9个月的超前时间,即利用前一年7—8月的SST/ Z_{500} ,前一年10—12月SST/ Z_{500} ,来预测今年春夏季(4—9月)、春季(4—6月)和夏季(7—9月)的径流量。研究确定了影响美国西部水文变化的太平洋的显著区域,包括传统的ENSO和太平洋十年振荡区,以及俄罗斯东部、加拿大不列颠哥伦比亚省以及日本东海岸的“Hondo”地区。 Z_{500} 显示超前3个月时,与径流明显相关,而SST为6个月。本研究获得的结果有助于改进当前水资源管理预测模型。

大风浪条件下船舶风险状况动态评估预警系统——《中国航海》2015年第38卷第1期

为有效减少大风浪条件下中国北方海域的恶性船舶翻沉事故的发生次数,针对目前国内缺乏个性化、可视化且具有动态显示和风险评估功能的海事气象保障服务产品的现状,刘大刚等根据前期建立的大风浪条件下的渤海海域重点船舶风险评估模型和船舶一大风浪区动态显示系统,研制了一种可对大风浪条件下船舶的风险状况进行动态评估的预警系统。该系统综合应用了现代数值天气和海浪预报技术、风险分析技术和现代计算机技术,可在天津市气象局的“天津海洋气象精细化预报综合业务平台”上动态显示小型散杂货船等特定船舶未来72 h内的风险状况,能对减少大风浪条件下中国北方海域船舶事故的发生次数起到重要作用。

北斗卫星通信在南海海洋气象观测中的应用——《气象水文海洋仪器》2015年第1期

甘志强等以海南省无人值守海岛自动气象站为例,阐述了北斗卫星通信在南海海洋气象观测中的实际应用。重点介绍了根据海洋气象观测特殊环境条件而设计的海岛自动气象站的结构、数据上传模式、信息处理流程、系统集成方法及其稳定性。分析了利用北斗卫星通信构建南海海洋气象监测网的优越性及重要意义,为海洋气象建设提供了一套稳定可行的气象采集应用模式。北斗卫星通信方式在海洋气象探测中及特殊条件下的数据通信上具有广阔的应用空间。这些无人值守自动气象站将我国的气象探测业务向南推进了100多海里,从而使南海气象监测越来越全面,覆盖面越来越广,解决了南海海洋气象资料匮乏的窘境。

基于BMP085模块的海洋气象观测气压传感器设计——《仪表技术与传感器》2015年第1期

BMP085模块是一款高精度、超低能耗的大气压力传感模块。郭发东等基于该芯片设计了一款新型智能输出的气压传感器。该传感器采用混合信号系统级芯片C8051F021作为数据采集处理器,进行新型海洋气象观测气压传感器的研制。该传感器的量程为300~1100 hPa,精度为0.3 hPa,传感器输出采用RS232接口,ASCII码输出,数据刷新频率最高1.8 Hz。文中对系统的硬件组成、软件设计进行了详细描述。对该气压传感器的样机标定试验表明,经校准后误差在0.3 hPa以内,已经达到国外同类传感器水平。该传感器具有性价比高、精度高、稳定性好、功耗低、安装使用简便等优点,可广泛应用于气象站、船舶气象仪器、大型海洋资料浮标等场所。

基于CESM气候模式的同化模拟实验——《海洋预报》2015年第32卷第3期

李熠等利用nudging方法将GODAS次表层海温资料同化到“通用地球系统模式”(CESM)中,并分析了同化后的海温、降水、海表面气压等海洋、气象要素。结果表明,同化后的模拟结果与GODAS、NCEP、GPCP等资料的结果较为一致,较好地再现了中低纬海洋和大气的平均特征和随时间演变的规律,NINO3指数的相关系数达到0.90。但模拟结果仍存在一些问題,如大西洋西边界流偏强,赤道辐合带降水偏多等。

基于WebGIS和Flex的青岛市海洋气象服务平台的研发——《地理信息世界》2015年第3期

为进一步完善和发展青岛海洋气象预报工作,王会蒙等构建了青岛市海洋气象信息预报服务平台。该平台以Flex和Web GIS技术为支撑,依托丰富的气象服务产品,综合运用GIS服务器的空间数据处理能力和GIS的专题地图显示功能,编辑与分析多种与海洋相关的气象产品的时空要素特征。平台实现了多种海洋气象实况要素与地理信息的叠加、近海区域的天气预报与预警信息、海洋生态与船舶信息、台风实况路径查询、卫星和雷达图的动态显示等功能,提高了青岛市海洋气象综合观测、预警服务能力,为促进海洋经济结构的调整和优化提供气象保障。

编辑选编

21世纪中国地区干旱灾害的预估——Projection of drought hazards in China during twenty-first century. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, in press.

在气候变暖背景下,干旱灾害持续增加。为了解我国干旱灾害在未来的发生及其变化情况,南宁

市气象局的梁玉莲等利用气象观测数据和CMIP5提供的全球气候系统模式输出数据,基于PDSI干旱指数,预估了3种代表性浓度路径(RCP2.6, RCP4.5和RCP8.5)情景下中国21世纪的干旱频率及干旱强度变化趋势。结果表明,以PDSI等级定义的干旱时期可以准确再现90%以上的历史干旱事件。预估结果表明,在RCP4.5和RCP8.5情景下,中国的干旱频率在21世纪将会有所增加。在21世纪中前期(2021—2050年),3种情景下的干旱频率大致相同,年干旱时长约为3.5~4个月;到21世纪末期(2071—2100年),在RCP8.5情景下,中国的西北地区、东部沿海地区和南方地区年干旱时长会持续5个月以上。整个21世纪,中国地区的干旱灾害趋势在RCP2.6情景下表现为轻微的减弱;而在RCP8.5情景下,绝大部分地区的干旱灾害都有趋于严重的趋势。

使用基于卫星观测的太阳诱导叶绿素荧光了解北方高纬度森林植被物候和功能的大规模变化——Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale variations in vegetation phenology and function over northern high latitude forests. *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 190.

美国加州理工学院JPL实验室的Jeong等使用遥感太阳诱导叶绿素荧光(SIF)、归一化植被指数(NDVI)和基于观测的2009—2011年初级生产力(GPP)数据,评估了春季和秋季北方高纬度森林(40°—55°N)的大规模季节性物候和生理机制变化。研究发现,基于GPP和SIF时间序列确定的生长季长度都要短于由NDVI确定的生长季长度。这主要是由于与SIF相比,高NDVI值延长了约46 d(±11 d),这表明了生理活性和秋季绿度变化的大规模季节性解耦。除了物候特

征以外,平均季节性NDVI和SIF在整个生长季对温度变化具有不同的响应。NDVI和SIF在整个春季随着温度的升高而线性增加。然而,在秋季,虽然NDVI线性响应于温度的升高,但SIF和GPP并没有随着温度的升高而线性增加,这意味着在整个生长季节,北方生态系统的SIF和GPP呈现出对温度变化的季节性滞后响应。大尺度上植被的季节性滞后与已知的光照限制了秋季北方森林生态系统生产力的现象是一致的。本研究结果表明,陆地生态系统模型对于GPP的过高估计可能源于其使用的LAI或基于NDVI的物候学参数,而使用基于SIF的“生理学物候”参数可能有助于减少GPP模拟时的这种偏差。

灌木在北极苔原的增长和扩张:使用循证方法评估控制因素——Shrub growth and expansion in the Arctic tundra: an assessment of controlling factors using an evidence-based approach. *Environmental Research Letters*, 2017, in press.

过去几十年来,在泛北极苔原生物群系,木本灌木的生物量已经增加,分布区域也有所扩张,这些变化与生物群系观测到的生产力提高有关。基于实验、观测和生态学的研究表明,气温和降水(影响较小)是木本灌木变化的主要驱动力。然而,又有一些研究指出这些驱动因素与北极植被生产力的关系正逐渐降低,并且自2010年以来,植被生产力也一直在下降。为此,英国牛津大学的Martin等开展了循证研究,通过寻找北极灌木生长和扩张的证据基础,以确定灌木生长和扩张的可能控制因素。研究发现了23种直接影响灌木生长和扩张的环境状态参数,这些参数又主要集中在四种控制因素(气温、土壤水分、食草动物和雪动力)。在所有证据中,86%的证据是通过观测得

到的,14%的证据是通过实验方法得出的。然而,65%的证据都来自于最温暖(7月温度>9℃)的苔原区域,33.5%的证据来自于阿拉斯加苔原,而阿拉斯加苔原仅占北极苔原总面积的3.96%。研究结果表明,目前的证据对于回答泛北极灌木变化的关键问题,显得不够稳健或不够全面。研究给出了未来可以加强证据的四个方向:时间序列融合、直接测量控制因素、使用古生态和古环境数据、机制模拟,以推动对北极灌木环境变化的关键机制的了解。

1959—2015年芬兰月平均和最大风速时间序列的均一化和趋势分析——Homogenization and trend analysis of monthly mean and maximum wind speed time series in Finland, 1959—2015. *International Journal of Climatology*, 2017, in press.

芬兰气象研究所的Laapas等对基于芬兰144个站点观测的近地表月平均和最大风速时间序列进行了均一化处理。其中,33个站点覆盖了均一化处理的全部时间段:1959—2015。然后,使用该均一化序列评估了不同时期风速时间序列的线性趋势,并分析了年度和季节趋势。基于统计均一化,通过应用HOMER均一化工具和使用站点的历史元数据,发现95%的时间序列至少在某种程度上不均一。几乎一半检测到的不均一性需要利用元数据进行验证,其中大部分是由于台站位置和风速计高度的变化。对检测到的不均一性进行调整后,生成了时间和空间上更一致的时间序列,从而提高了风速观测时间序列的质量。统计分析发现,在整个研究区域,均一化风速时间序列在平均和最大值上的趋势总体上是负的。1959—2015年,33个气象台站的年平均风速和最大风速的平均线性趋势分别为-0.09和-0.32 m·s⁻¹/10 a ($p < 0.05$)。

全球变暖背景下ENSO特征的变化——《科学通报》2017年第62卷第16期

夏杨等利用1895—2014年HadISST月平均海温资料和CO₂浓度加倍前后600年海气耦合模式CESM试验结果,对比分析了全球变暖前后厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)特征(强度及其中心位置、生命期与频率)的变化及其可能原因。主要结论如下:全球变暖后,在观测和模拟中气候平均的海温增暖中心分别位于热带西太平洋(类拉尼娜型增暖)和热带东太平洋(类厄尔尼诺型增暖),引起热带太平洋低层东风信风相应地增强和减弱,从而改变了热带太平洋最强海—气耦合的位置,决定了ENSO演变特征的不同变化。ENSO事件强度中心位置在类拉尼娜型增暖背景态下更倾向于发生在赤道太平洋中部,形成“中太平洋ENSO”,而在类厄尔尼诺型增暖背景态下则更偏向赤道东太平洋,形成“东太平洋ENSO”。两种气候态的改变都会造成全球变暖后El Niño事件生命期的明显延长,其中,类厄尔尼诺型增暖的影响更大,最大可延长约3个月,极端El Niño事件生命期的增长更显著。其主要原因是:全球变暖一方面使热带西太平洋异常西风更早出现,有利于El Niño事件的提早发生发展,另一方面会减小热带太平洋温跃层的平均深度和热带中东太平洋赤道内外平均海温梯度,分别减慢了海洋次表层负反馈Kelvin波的东传速率和减弱了El Niño暖信号的“放电”速率,使El Niño事件衰亡速度减缓,持续时间更长。另外,观测和模式结果均表明,ENSO事件强度和频率在全球变暖背景下明显增强和增多,并且类拉尼娜型和类厄尔尼诺型增暖背景态会分别导致极端La Niña事件和极端El Niño事件频率显著增多。该文研究结果很好地统一

了观测和模式中不同气候背景态下ENSO特征变化的现象和机理,为理解和预估全球变暖后ENSO特征的变化及其气候影响奠定了重要的科学理论基础。

雷达资料同化在局地强对流预报中的应用——《大气科学》2017年第41卷第4期

薛谔彬等采用ARPS模式的资料分析系统ADAS同化多普勒雷达径向速度和反射率因子资料,分析两者对初始场的改进作用,并应用于WRF中尺度模式中对2012年8月21日江西省一次局地强对流过程进行了模拟试验。分析结果表明:1) ADAS同化系统能够利用雷达径向速度和反射率因子资料有效增加初始场中的中小尺度风场信息和云、水物质含量,并通过湿绝热或非绝热初始化对温度场、湿度场和风场进行调整,使初始场在动力和热力学上达到平衡。2) 同化径向速度后对改善模式初始场的动力场有重要贡献,而对大气水凝物和降水的预报影响较小;同化反射率因子的主要作用是调整初始场中的水凝物场和热力场,有效缩短了模式的“spin-up”时间,明显改进了定量降水预报;同时同化雷达径向速度和反射率因子后,初始场中快速调整出了中小尺度风场水平辐合、垂直运动以及合理的温、湿分布,对3 h内雨带形状、降水落区及定量降水的预报与实况更接近。3) 模拟试验表明,同时同化径向速度和反射率因子能成功模拟出本次对流单体风暴的 β 中尺度三维空间分布结构及其演变过程,中低层切变线的辐合抬升强迫作用是对流单体风暴组织、发展和维持的主要动力机制之一,对流凝结潜热加热在对流单体风暴的发生发展中发挥了重要作用。因此,雷达资料同化对提高临近数值天气预报的准确率以及对强对流天气系统的模拟能力具有重要意义。

强对流天气预报的一些基本问题——《气象》2017年第43卷第6期

郑永光等分析了对流有效位能和对流抑制能量与抬升气块温湿状态的关系、对流温度的物理意义、对流发展所需的水汽条件;然后提出了我国重大强对流天气的定义,给出了强对流天气时空分布的一些规律、极端强降水与地面露点的关系、雷暴大风产生机制、冰雹融化层高度与湿球温度之间的物理联系、超级单体风暴和龙卷的环境条件、龙卷的形成机理等;最后对涡度和风矢端图及其与龙卷、中气旋发展的关系进行了分析说明。文中列举的对各个概念不尽相同的解释和阈值以及我们的一些认识和理解,可供相关人员学习和比较。

近50年中国霾年代际特征及气象成因——《应用气象学报》2017年第28卷第3期

潘玮等根据1961—2013年全国745个国家基准站的长期观测资料,分析了中国霾日数年代际变化特征及可能的气象成因。结果表明:近50年来,中国霾天气主要集中在东部从华南到华北的大部分地区,霾日数呈增加趋势。秋冬两季是霾天气发生最频繁、变化最明显的两个季节。中国东部淮河以南地区秋冬两季霾日数在2000年前呈增加趋势,其后增加趋势变得较为平缓,20世纪90年代前霾日数与近地面风速呈显著负相关关系,90年代后则与大气相对湿度呈显著负相关关系,随着90年代前近地面风速减小和90年代后大气相对湿度降低,该区域霾日数表现出明显的增加趋势。中国东部从淮河到华北大部分地区秋冬两季霾日数1980年后增加趋势变得不明显,这可能与该区域近地面风速和大气相对湿度的变化趋势较为平缓有关。

《《 涓流细雨 》》

“The resources associated with these two labs are unlike anything else in the world. We are absolutely thrilled to have them as founding partners of The Innovation Corridor.”

“这两个实验室拥有的资源在全球都是唯一的，我们非常高兴把它们列入‘创新走廊’创办合作方。”

——一个试图将政府、联邦实验室与私人企业界联系起来的项目——科罗拉多创新走廊，吸纳NCAR和美国能源部国家可再生能源实验室（NREL）作为联合创办者。UCAR和NREL也将因此通过地产商FORMATIV新的世贸中心丹佛开发这一全球市场合作平台，与私企更加紧密地联系在一起。FORMATIV的全球战略主席和首席法律官员对这一合作发表了上述看法。

“You want to put a telescope up? You want to do atmospheric monitoring? You want to study the sun? You want to look down on the oceans or land? Across these and a whole series of other research fields there are just immense applications.”

“你想把望远镜带入高空？你想监测大气？你想研究太阳？你想从上往下看海洋或陆地？所有这些和其他所有研究领域都存在巨大应用空间。”

——美国亚利桑那州图森市，有一家名为“世界观察公司（World View Enterprises）”的企业，向科学家提供乘气球飞越平流层的服务，让学者用廉价手段到大气边缘开展科学研究。这是科学服务的意义，公司的首席科学家Alan Stern如是说。

“We found more urban development in the inland flood zones than the coastal areas between 2000-2011, which is a worrisome trend. The implications are that people living in the coastal zone want to migrate inland, but don't realize they are still vulnerable if they live in the flood zones in inland areas.”

“我们发现2000—2011年很多城市开发在内地洪水带比沿海更普遍，这是一个令人担忧的趋势。这意味着居住在沿海带的居民想移民到内地，但他们不知道，如果居住在内地洪水带区域，他们依然脆弱。”

——路易斯安那州立大学的学者通过收集美国各郡县的洪水灾害、人口调查、暴露度和脆弱性等信息，研究了2000—2011年美国发展趋势，研究者之一，沿海和环境学院环境科学系的Nina Lam解释了他们的研究和发现的问题，提出加强未来洪水带的规划，切实减小移居者的灾害风险。

“We particularly predict that Norwegian air temperature will decrease over the coming years, although staying above the long-term (1981-2010) average. Winter Arctic sea ice extent will remain low but with a general increase toward 2020.”

“我们特别预测未来挪威气温将降低，尽管依然高于长期（1981—2010年）平均。冬季北极海冰范围将维持低值，但直到2020年将保持增加态势。”

——挪威皮尔根大学学者在和英国同行开展的一项合作研

究中，基于海洋状况对西北欧洲和北极气候做出了预测。他们的研究论文近期在《自然-通信》上发表，文章的主要作者，该校皮叶克尼斯气候研究中心的Marius Årthun表达了上述预测意见。

“We found that it is not just a matter of more burning with higher temperatures. The reality is more complex: higher temperatures also spur more thunderstorms. Lightning from these thunderstorms is what has been igniting many more fires in these recent extreme events. We expect an increasing number of thunderstorms, and hence fires, across the high latitudes in the coming decades as a result of climate change.”

“我们发现不仅是较高温度带来更多林火问题，现实情况更为复杂：更高温度还诱发更多雷暴。雷暴中的闪电在近期这些极端事件中，是很多林火的始作俑者。我们预计气候变化将在未来数十年给高纬度带来更多雷暴，从而引发更多林火。”

——一项由NASA支持的针对美国阿拉斯加和加拿大北部近期林火的研究表明，气候变化让风暴路径北抬，可能给这些区域的景观带来改变。研究者利用NASA的Terra和Aqua卫星数据，解读2014年加拿大西北部和2015年阿拉斯加地区因闪电引发的林火，并对比1975年以来的闪电林火记录进行分析。研究负责人、来自阿姆斯特丹自由大学的Sander Veraverbeke和合作者、来自美国林洞研究中心的Brendan Rogers对他们最新发表在《自然-气候变化》上的研究成果进行了上述介绍。

“The biggest thing we worry about here is the L-band will be severely impacted in this kind of event. L-band is critical. Anyone who has used a satellite phone has probably used an L-band device.”

“我们这里最为担忧的事情是L波段在这类事件中将造成的严重影响。L波段很关键。任何使用卫星电话的人可能会用到L波段设备。”

——美国上一届政府总统奥巴马签署的最后一项行政令，是协调国家应对空间天气事件。之后，联邦应急管理局（FEMA）和国防部（DOD）合作重新制定了更为全面的应对重要太阳异常事件的战略。最近在华盛顿举办的空间天气发展论坛上，FEMA灾害应急通信局国家反应协调官员Mark MacAlester做出了上述旨在提高空间天气意识的表述。

“This is a major public-private partnership that will advance weather prediction and generate significant benefits for businesses making critical decisions based on weather forecasts. We are gratified that taxpayer investments in the development of weather models are now helping U.S. industries compete in the global marketplace.”

“这是一个重要的公共-私人伙伴关系，将推进天气预报并让企业基于天气预报的重要决策受益匪浅。我们很高兴纳税人在天气模式上的投入现在是在帮助美国业界在全球市场上的竞争。”

——美国UCAR宣布与IBM所属的天气公司开展一项旨在改进全球天气预报的新合作。这项合作将融合NCAR计算机模拟最前沿技术、天气公司的气象科学研究以及IBM先进计

算设施。在这项合作中，天气公司将基于NCAR等机构开发的MPAS (Model for Prediction Across Scales) 模式开发全球预报模式。针对这项合作，UCAR主席Antonio J. Busalacchi如是说。

“The Met Office Flash Briefing skill provides another great local service for customers in the UK. This will enable Alexa users to personalize their Flash Briefing content to an even greater degree, providing highly-detailed 24-hour forecasts specifically focused on the region of their choice.”

“英国气象局新闻简报技巧为英国客户提供了另一个重要的局地服务。这项技术能让Alexa用户将其新闻简报的内容在更大程度上个性化，获得针对其所选择的区域高度精细化的24 h预报。”

——亚马逊于2014年11月推出Echo和Alexa语音技术，使得智能语音控制系统进入家庭，其中新闻简报是核心功能之一。英国气象局2017年7月初宣布，入驻亚马逊这一语音平台，开展针对英国本土的天气预报语音服务。亚马逊Alexa Skills Kit欧洲总经理Fabrice Rousseau如此盛赞英国气象局的融入。

(上接70页)

6.4 组织研讨与会议交流

每年JCOMM都组织各类国际交流会议，例如2016年“第4届历史海洋气候资料应用及发展国际研讨会”（英国南安普顿）；2017年“第一届风浪、风暴潮和海岸灾害国际研讨会”（英国利物浦）等。

包括海洋及海洋气象联合技术委员会内部会议，平均每个月有3~5个会议，为国际海洋气象活动及发展做出了积极贡献。

7 JCOMM的专家团队

JCOMM组建了几个专业服务的专家团队对技术需求国家提供专业服务与咨询。并实际前往各国进行技术指导，以及与当地专业人员开展研讨。

目前JCOMM有4个专家团队：1) 海事安全专家团队；2) 波浪和海岸灾害预报系统专家团队；3) 海冰专家团队；4) 业务海洋预报专家团队。

8 小结

综上所述，JCOMM为国际海洋气象的发展与交流做出了卓越贡献。同时可以注意到，中国的海洋气象学领域目前存在分属中国气象局和国家海洋局两个事业单位的情况，同时在海洋气象学的高等教育和学

术研究方面也存在边缘交叉，可能需要理清结构，增强协同合作的具体措施。另外，中国海洋气象领域在依托国际海洋气象组织方面还可以更广泛、更深入地参与。通过积极融入国际合作，推动中国的海洋气象研究与业务迅速发展。

致谢：感谢江苏高校优秀学科建设工程项目（PAPD）；江苏省大创项目（201410300055，201510300052）；南京信息工程大学教改重点课题（J201503）共同资助。

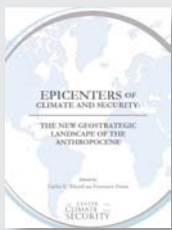
深入阅读

David Feit, 2008. Ocean Prediction Center: Overview. Ocean Prediction Center.
Harper K C, 2008. Weather By the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology. The Massachusetts Institute of Technology Press.
Met Office, 2012. National Meteorological Library and Fact Sheet 8-The Shipping Forecast. Met Office.
Wilson E E, 1973. Historic Letter Establishing Marine Program at New Orleans. NOAA, 17(2): 85.

(作者单位：王坚红、刘刚，南京信息工程大学海洋科学学院；胡恒、杨林，福建省气象局)

《气候和安全的焦点》 2017年6月

这本由专注于各种气候安全风险研究的机构——美国气候与安全中心最新发表的报告，阐述了目前12个气候风险的“焦点区域”，涉及海平面上升、海峡险境、原子能、健康安全、沿海超大城市、北极、移民和水资源等气候变化问题的深入分析。

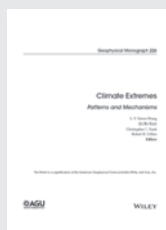


《气候变化对世界珊瑚礁遗产的影响》 2017年6月

联合国教科文组织发表的这篇评估报告，如报告封面上的提示：是世界上第一份针对珊瑚礁的全球科学评估报告。此前，美国NOAA宣布，全球从2015年开始的因海洋温度升高造成珊瑚礁变白趋于结束。这份16页的分析评估报告则指出，列入世界遗产目录的所有珊瑚礁地点都将在2100年前被摧毁，除非CO₂减排得到落实。

《地球物理论文集 系列号 226》 2017年6月

《地球物理论文集》系列出版物 (*The Geophysical Monograph*) 是美国地球物理学会不定期出版的主题论文集。最新一期的主题是“气候极值：态势和机制”。该期文集分气候极值的驱动、气候极值的过程、区域气候机制和气候机制预测4个部分，共有22篇论文收录其中。



《AMS 年报2016》 2017年7月

这份年报全面介绍了美国气象学会 (AMS) 一年里的活动。其中，2016年在论文发表方面，AMS旗下技术期刊总共接到了3450多篇投稿，为历年新高，全年有近创记录的1913篇文章进入出版流程，发表了总计1895篇论文。此外，AMS所有技术期刊发表量总计34794页，是历史最高值。

媒体扫描

MEDIA SCAN

《全球海洋科学报告》 2017年6月

联合国教科文组织第一次发表的这份关于海洋科学的报告指出，中国、美国和德国在海洋研究者绝对人数上全球领先，而挪威和比利时则在每百万人口海洋学者数中占据前两位。



《过去全球变化杂志》 2017年6月

最新一期为“年代际气候变率”专辑，专辑的13篇文章瞄准年代际气候变量和可预报性展开评述，总结了在这个领域的研究进展。专辑文章基于2015年在意大利召开的相同主题的国际会议的成果。

《科学和技术问题》 2017年春季刊

美国科学院编辑的这本期刊，本期以“气候工程”为主题，组织了11篇文章和2篇书评，全面对主题进行了审视。其中主题用更加明确的“气候工程”而不是采用以往常用的“地球工程”，似乎让这个领域更加明确了应对气候变化的主旨，也许也预示着迎来了新的转折点。



《地理学》 2017年7月

本期特别报告的主题为我们呼吸的空气深入探讨了英国和整个欧洲不良的空气质量问题。世界卫生组织认为，该区域只有10%的居民呼吸着“相对安全”的空气。而在澳大利亚情况也好不到哪儿去，那里的大量矿企在采矿停止后相当长的时间里依然向空气中排放有害物质。

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-in-Chief

Wang Zhiqiang
Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Luo Yunfeng
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Sun Jian
Fei Jianfang
Zhao Licheng
Zhang Peng
Guan Zhaoyong
He Jianxin
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuwen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin

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 Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

- 1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief
Article
6 Dou Fangli, Shang Jian, Guo Yang, Yin Honggang,
Gu Songyan/ Satellite Remote Sensing of Sea Surface
Winds: Technique Status and Application Progress
12 Liu Chunxia, Zhao Zhongkuo, Bi Xueyan, Yuan Jinnan,
Wen Guanhuan, Huang Huijun/ Research and Application
of Ocean Circulation and Wave Models: A Review and
Prospects
23 Xie Lian, Guan Changlong, Tan Jun, Wu Wen/ Community
Resilience Assessment with Application to Marine and
Meteorological Disaster Mitigation
38 Wang Jianhong, Yang Yiya, Miao Chunsheng, Shao Caixia/
The Research Progress of the Systems of Warm-Sector
Heavy Rainfall in South China Coasts
47 Cao Minjie, Liu Zenghong, Wang Zhenfeng, Xu
Jianping/ A Review of Real-Time Ocean Monitoring in
Typhoon Region and Research Applications
53 Huang Bin, Zhao Wei/ Current Status and Development
Trend of National Marine Meteorological Service
60 Cheng Chi, Chen Zhenghong, Sun Pengjie/ Advances in
Calculation Method of the Optimal Tilted Angle for PV
Array in Solar Resource Assessment

Forum

- 66 Wang Jianhong, Hu Heng, Liu Gang, Yang Lin/ A Brief
Introduction of Activities and Organizations of Marine
Meteorology in China and World

History

Station

- 71 Li Renli, He Qi, Cao Yuqiang/ The Way of the Wuhan
Meteorological Observatory Moving to West During the
World War II - Resistance Against Japanese Invaders

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Reading

Information

- 11 Jia Pengqun/ The Rediscovery of a Group Photograph of
the International Meteorological Conference in 1891
65 Xu Xiaofeng/ Access NEXRAD Data through Amazon
Web Service
75 Selected Papers