

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

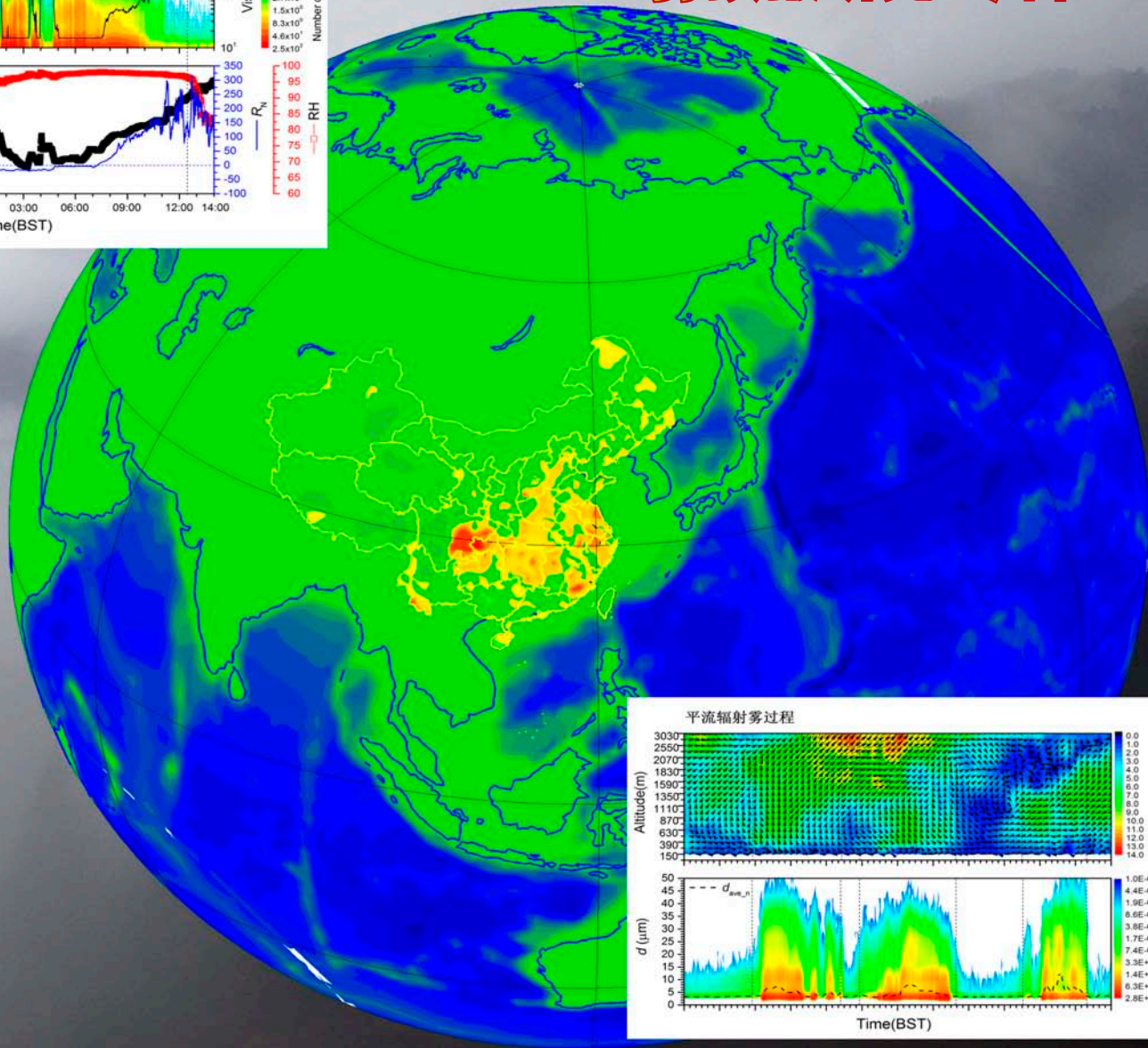
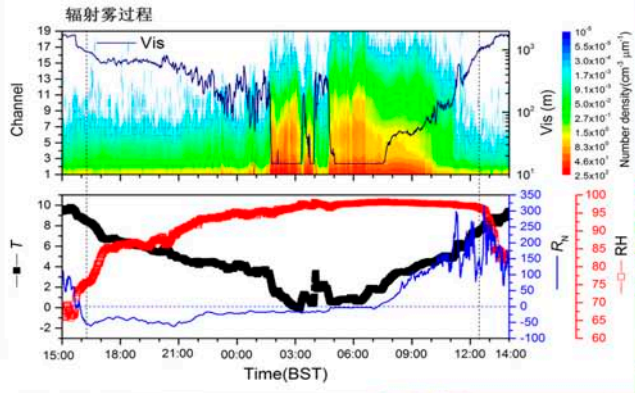
ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.2

2016年4月
第6卷 第2期

雾预报研究 专辑



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

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

常务编委 (按音序排名)

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

编委 (按音序排名)

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

海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张 大林	张广俊	邹晓蕾	

编辑部

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 陈忠美

地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081

电话: (010) 68409927/68409933

邮箱: amst@cma.gov.cn

Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA

网址: <http://cmalibrary.cn/amst>

投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>

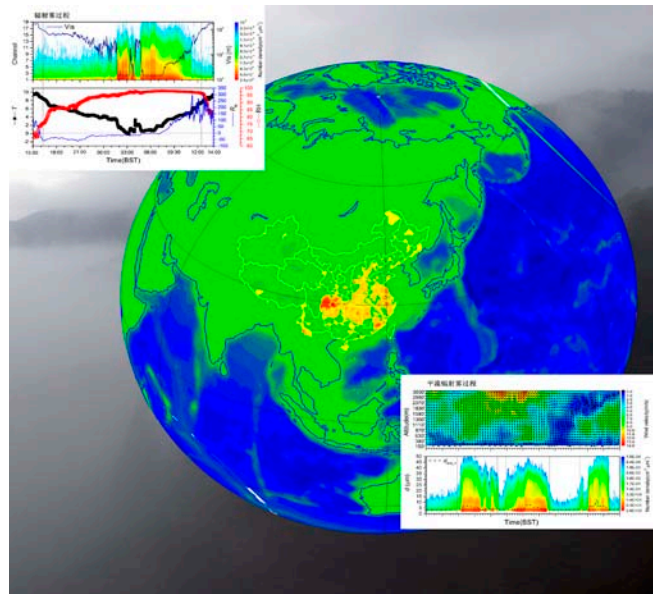
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>

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6卷 第2期 2016年4月

(雾预报研究 专辑)

(本期特约编辑: 杜钧, 周斌斌, 牛生杰)

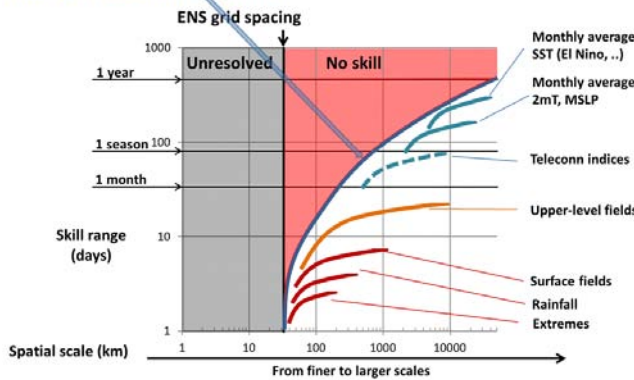
1 许小峰: 主编语

研究论文

研究进展

- 6 牛生杰, 陆春松, 吕晶晶, 徐峰, 赵丽娟, 刘端阳, 岳岩裕, 周悦, 于华英, 王天舒: 近年来中国雾研究进展
- 20 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 高山红: 中国海雾研究简要回顾
- 29 周斌斌, 蒋乐, 杜钧: 航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报
- 42 章国材: 中国雾的业务预报和应用
- 49 史得道, 吴振玲, 高山红, 罗凯: 海雾预报研究综述
- 56 朱彬, 郭婷: 空气污染对雾影响的研究进展
- 64 康志明, 桂海林, 花丛, 张碧辉, 张恒德, 吕梦瑶, 王继康: 国家级环境气象业务现状及发展趋势

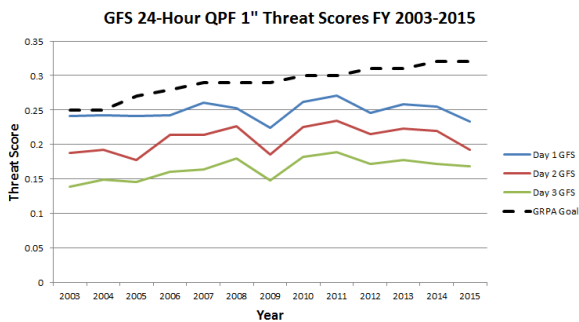
The 'forecast skill horizon'



可预报性新图像：2D化

1969年，著名气象学者洛伦兹提出天气气候可预报性的时限为16.8天，随后大约2周的天气预报可预报性被补充进现代气象学的经典内容中。2016年初美国气象学会年会上，来自欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的学者，从天气气候预报信号等视角，重新审视了可预报性问题，图解了新的可预报性：可预报性随预报系统的空间尺度和预报量的2D分布——预报技巧新蓝图。

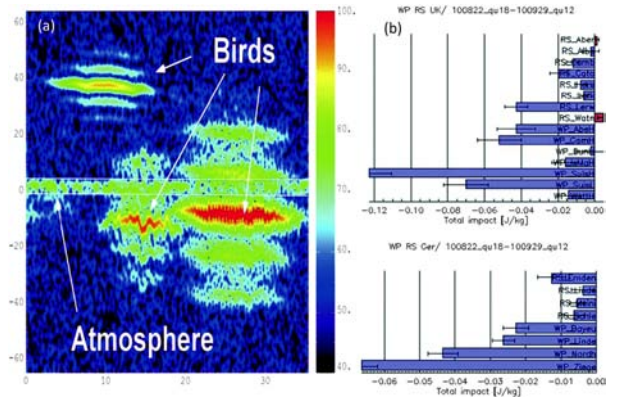
来源：ECMWF



降水预报：渐行渐远？

美国天气局国家环境预报中心（NCEP）2003年以来降水定量预报的准确性，总体上提高并不明显，尤其是近年来不升反降，出现预报质量的滑坡。NCEP的主要预报模式GFS 2015年预报得分的下降，让预报得分与国家目标（黑色虚线）呈现分道扬镳的态势。

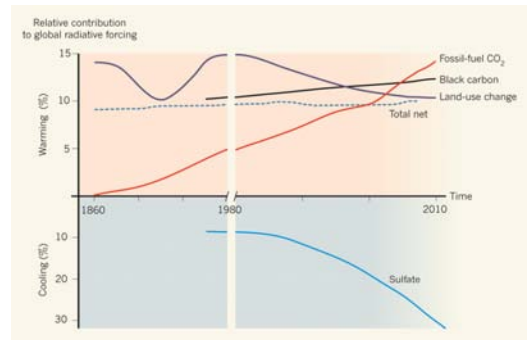
来源：NCEP



雷达风廓线：把鸟群信号移除

自1970年代初发展起来的雷达风廓线仪，目前已经在世界上形成了不多的几处业务网，并且观测的大部分数据成功进入了数值预报模式。分析这类数据的一个难点之一就是在回波中分辨出迁徙鸟群信号。

来源：ECMWF



大气硫排放：抵消温室气体的气候变暖效应

大气温室气体影响地球气候的主要机制是借助“辐射驱动”机制来完成的，那么中国化石燃料导致的二氧化碳增加以及其他导致增温的辐射驱动效应是否会随着排放而大幅度增加？回答却不一定是肯定的。中法学者最近的研究指出，中国对全球辐射驱动的相对贡献，也就是净效果在过去30年基本维持不变（图中蓝色虚线）。这一结论的主要原因是硫酸盐气溶胶（图中蓝色线）的强冷却所致，即其负的辐射驱动抵消了温室效应带来的正辐射驱动。

来源：Nature

数字

4.92亿吨
2014年，全球国际航空业产生了4.92亿吨二氧化碳，已经超过当年英国的产出量，而到2040年飞机数量预计还将增加5.6万架。

2860亿美元
2015年，全球可再生能源投入达到了创纪录的2860亿美元，是煤和天然气发电投入的2倍多，全球在2015年增加了134千兆瓦可再生能源，较2014年增加了26%。

404.02ppm
2016年2月，夏威夷冒纳罗亚观测站（Mauna Loa Observatory）二氧化碳平均浓度高达404.02ppm，比去年同期高出3.76ppm。

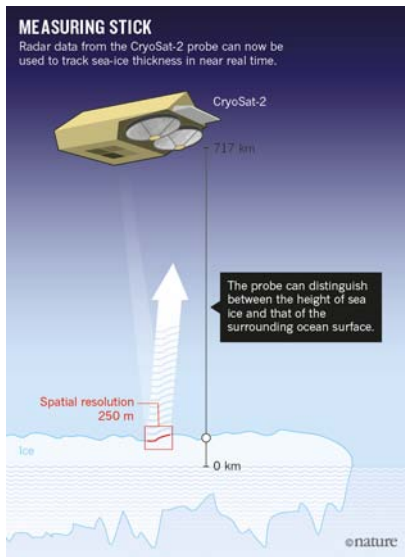
国际“雾预报”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	Fog research: a review of past achievements and future perspectives	Gultepe, I	Pure and Applied Geophysics, 2007, 164(6/7)	121
2	A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid	Ware, R	Radio Science, 2003, 38(4)	71
3	Fog on the US West Coast: a review	Leipper, DF	Bulletin of the American Meteorological Society, 1994, 75(2)	56
4	PATOG - a new efficient forecast model of radiation fog and low-level stratiform clouds	Bott, A	Atmospheric Research, 2002, 64(1/2/3/4)	36
5	Simulation of fog with the ECMWF prognostic cloud scheme	Teixeira, J	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(554)	27
6	Fog forecasting for the southern region: a conceptual model approach	Croft, PJ	Weather and Forecasting, 1997, 12(3)	26
7	Modeling and forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions	van der Velde, IR	Monthly Weather Review, 2010, 138(11)	24
8	Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system	Zhou, Binbin	Weather and Forecasting, 2010, 25(1)	24
9	Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project	Gultepe, I	Pure and Applied Geophysics, 2007, 164(6/7)	24
10	Fog forecasting objectively in the California coastal area using LIBS	Leipper, DF	Weather and Forecasting, 1995, 10(4)	17

来源: SCI-E数据库

检索时间: 2016年3月31日

田晓阳 提供



用CryoSat-2卫星观测海冰厚度

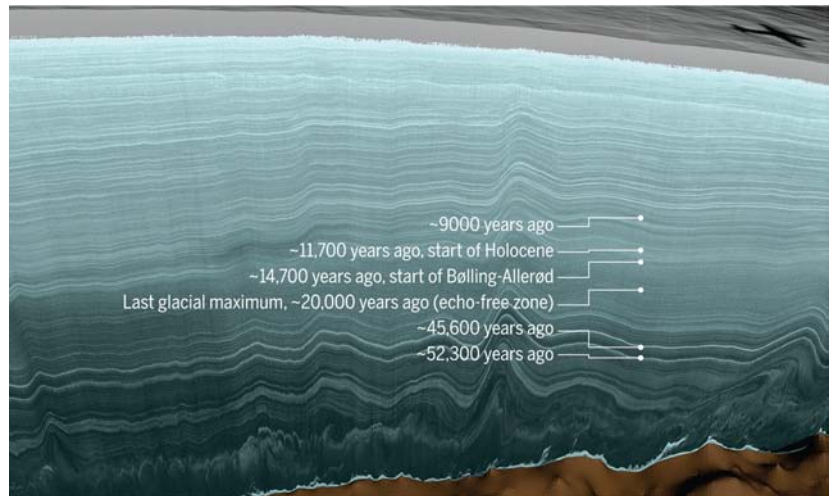
科学家利用欧空局发射的CryoSat-2获得了准实时估计海冰厚度的方法。这种方法通过比较被冰和海面反射的星上雷达信号得到冰厚度信息。目前这种方法得到的海冰厚度信息仅需要3天时间,而且和常规的1个月以后得到的数据的差别在1.5%以内,不仅能用于快速极地冰情分析,还能有效给出极地航道参考。

来源: Nature

机载雷达探测: 揭示冰川的层次

Science杂志刊载的一篇文章中,给出了飞越格陵兰冰川的机载雷达对冰川层次的揭示。冰层的厚度和形状提供了过去的气候变化是如何持续影响冰川的流动的。正是基于这样的雷达地层数据(radar stratigraphy data),研究人员得出过去9000年冰川的流动比今天要快的结论。

来源: Science



2.5 万亿美元

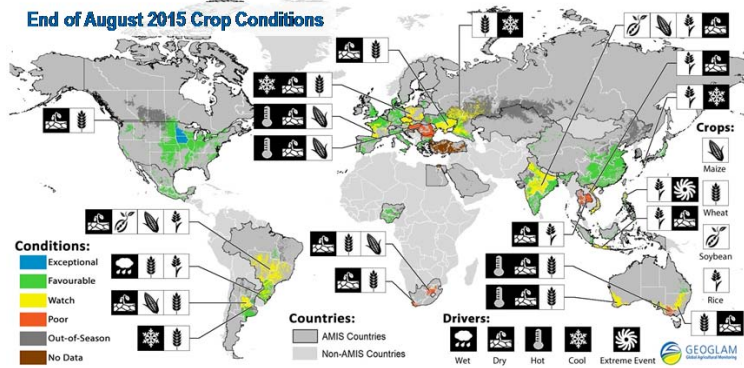
一项最新的利用经济模型的评估指出,气候变化将让2.5万亿美元(1.7万亿英镑)的世界金融资产化为乌有,最坏情况下,这个损失将增加到24万亿美元,占世界金融资产的17%。

3%

科学家针对北极海冰的监测研究表明,自1979年开始卫星监测以来,每年2月北极海冰面积平均减少了3%,2016年2月28日北极海冰面积较1981—2010年均值减少93.8万平方千米。

146分钟

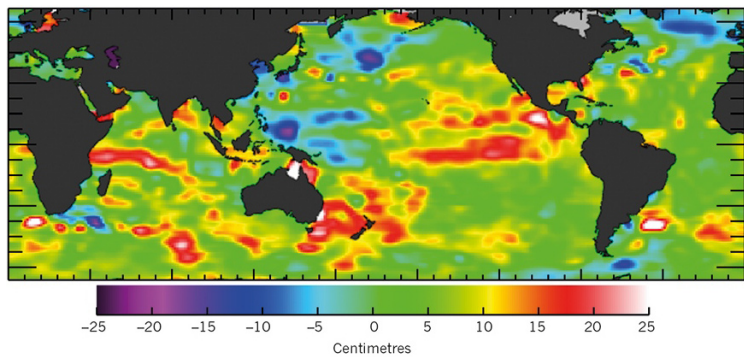
美国播音员2015年播出气候变化相关新闻的平均时间是146分钟,较2014年减少了5%。其中ABS相关广播时间仅13分钟,是最少的;而PBS在夜间播出了58段气候变化相关新闻,是2015年播出条目最多的。



GEOGLAM: 全球作物长势信息服务

2011年G20组织发起，主要利用地球观测数据建立了全球农业市场信息系统（AMIS）并开始了全球农业地球监测项目（GEOGLAM，马里兰大学牵头）。2013年9月AMIS农作物监测上线和业务化，全球24个国家、4个国际组织的40个研究机构参与其中，给出4种AMIS作物（玉米、小麦、大豆和水稻）的长势信息。

来源：GEOGLAM



Jason-3: 最新全球海平面高度图

美国和欧洲合作的海洋卫星Jason-3，在2016年1月17日升空并到达预定轨道，完成在轨仪器的准备后，开始了对全球海平面的升高情况开展观测。图为3月16日发布的，从该卫星前10天观测数据获得的全球海平面高度图。该卫星计划在今后的3年时间里开展观测，以改进全球天气和气候预报。

来源：Jason-3项目

TECHNIQUE	HOW IT WORKS
Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)	Crops grown for the purpose are burnt in power stations (providing energy), and the resulting CO ₂ is captured for secure long-term storage.
Afforestation and reforestation	Large-scale tree plantations increase natural storage of carbon in biomass and forest soil.
'Blue carbon' habitat restoration	The recovery of degraded or over-exploited coastal ecosystems that have a high potential for carbon storage, such as saltmarshes and mangroves.
Biochar	Carbon from partly burnt biomass is added to soil, with potential for agricultural benefits.
Enhanced ocean productivity	Marine photosynthesis and CO ₂ drawdown from the atmosphere is increased, either by adding nutrients to promote phytoplankton growth in the open ocean or through seaweed cultivation in shallow seas.
Enhanced weathering (using silicate rock)	Crushed olivine or other silicate rocks are added to soil surfaces or the ocean for chemical absorption of CO ₂ . (Could help to reduce ocean acidification.)
Direct air capture (DAC)	Chemicals (or possibly low temperatures) are used to extract CO ₂ from ambient air. Safe CO ₂ transport and storage are subsequently required.
Cloud treatment to increase alkalinity	Alkaline rain resulting from cloud treatments reacts with and removes atmospheric CO ₂ .
Building with biomass	A massive increase in the use of biomass (straw and timber) as a building material removes carbon for decades or centuries.

把大气中的二氧化碳抽出来

Nature 杂志的一篇文章，从众多的抽取大气中二氧化碳的地球工程建议中，梳理了其中“靠谱”的9种方法：碳捕捉和存储生物能源法、植树和再造林法、“蓝色碳”栖息地恢复法、生物碳法、海洋生产力增强法、强化天气法（利用硅酸盐石）、直接空气捕捉法、云处理增碱性法和生物质建筑法。

来源：Nature

数字

0.34°C

一项最新的研究考察了分布在世纪各地的235个湖泊，发现湖水温度每10年平均升高0.34°C，高于大气（0.25°C）和海洋（0.12°C）的升高幅度。

2635万人

“十二五”期间中国气象局打造集中国气象频道、气象科普微博群、《中国气象报》、《气象知识》杂志于一体的多元传播平台，全国气象新媒体粉丝数超过2635万人。

1260万人

世界卫生组织最新的估计表明，2012年约有1260万人因在不健康环境中生活或工作而死亡，约占全球死亡总数的1/4。各种环境风险因素，包括了空气、水和土壤污染，接触化学品，气候变化，以及紫外线辐射等。



让愤怒的小鸟快乐!

2016年世界快乐日到来之时，联合国（UN）秘书长潘基文3月18日任命游戏“愤怒的小鸟”中红色小鸟为联合国绿色大使，以鼓励年轻人应对气候变化采取行动。UN希望通过这一广受喜爱的卡通形象，呼吁人们为气候变化采取行动，从而“让愤怒的小鸟变得快乐”。

来源：UN

国际“雾”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	Photolysis of Fe(III)-hydroxy complexes as sources of OH radicals in clouds, fog and rain	Faust, BC	Atmospheric Environment (Part A-General Topics) 1990,24(1)	464
2	Characterization of water-soluble organic compounds in atmospheric aerosol: a new approach	Decesari, S	Journal of Geophysical Research-Atmospheres,2000,105(D1)	241
3	Secondary organic aerosol formation in cloud and fog droplets: a literature evaluation of plausibility	Blando, JD	Atmospheric Environment,2000,34(10)	235
4	Surface tension of atmospheric wet aerosol and cloud/fog droplets in relation to their organic carbon content and chemical composition	Facchini, MC	Atmospheric Environment,2000,34(28)	175
5	Partitioning of the organic aerosol component between fog droplets and interstitial air	Facchini, MC	Journal of Geophysical Research (Atmospheres) 1999,104(D21)	152
6	An improved mellor-yamada level-3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog	Nakanishi, Mikio	Boundary-Layer Meteorology,2006,119(2)	134
7	Design and calibration of a counterflow virtual impactor for sampling of atmospheric fog and cloud droplets	Noone, KJ	Aerosol Science and Technology,1988,8(3)	124
8	Study of humic-like substances in fog and interstitial aerosol by size-exclusion chromatography and capillary electrophoresis	Krivacsy, Z	Atmospheric Environment,2000,34	112
9	Redox chemistry of iron in fog and stratus clouds	Erel, Y	Journal of Geophysical Research (Atmospheres) 1993,98(D10)	107
10	Radiation fog - a comparison of model simulation with detailed observations	Duynkerke, PG	Monthly Weather Review,1991,119(2)	102

来源：SCI-E数据库

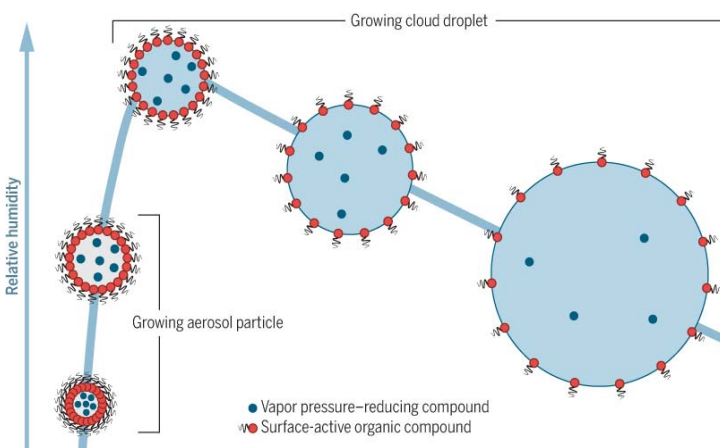
检索时间：2016年3月24日

李靖华提供

气溶胶粒子导致云滴形成机制被揭示

地球大气中，云的形成不仅源于水汽，还可以通过水凝结于气溶胶粒子（即云凝结核，CCN）而形成。美国学者在一项新的实验研究中，揭示了CCN导致云水滴形成过程中表面张力的关键作用。如图，为了形成云滴，气溶胶粒子必须克服图中蓝色曲线表示的最大的能力限制。颗粒中的化学成分可以弱化这样的限制，因此有利于云滴的形成。这种弱化或者通过降低周围的水汽压（Raoult效应，蓝色点表示化合物），或者通过减少其表面张力（有机表面活性，用红色点和有机链表示）。前者已经有了广泛的研究，但表面张力作用一直难以探测到。这项研究用实验给出了表面活性化合物也能够通过减少表面张力弱化能量限制。

来源：Science



432.42_{GW}

2015年底全球风力发电能力达到432.42GW，较上一年增加17%，并且发电能力首次超过核能发电量。风力发电前5位国家分布为中国、美国、德国、印度和西班牙。

50_天

以NCAR科学家为首的一项最新研究表明，北太平洋海表温度异常态势的形成，可以使得提前50天预测美国东海岸夏季热浪的机会增加。

9.8_{亿英镑}

针对整个欧洲1900—2015年龙卷风的调查指出，欧洲在此期间因龙卷风造成的损失，估计为（基于GDP调整后）9.8亿英镑，平均每年840万英镑。

近年来中国雾研究进展

牛生杰¹ 陆春松¹ 吕晶晶¹ 徐峰² 赵丽娟³ 刘端阳⁴ 岳岩裕⁵ 周悦⁶ 于华英¹ 王天舒¹
(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 广东海洋大学, 湛江 524088; 3 厦门市环境监测中心站, 厦门 361000;
4 江苏省气象台, 南京 210008; 5 武汉中心气象台, 武汉 430074; 6 武汉区域气候中心, 武汉 430074)

摘要: 雾对交通运输、人体健康和农产品质量等有着重要的影响, 因此, 系统全面地认识雾过程, 对雾的预警预报、人民身体健康和经济建设, 具有特别重要的研究价值和现实意义。从雾的气候特征、宏观特征、微观特征, 雾与湍流之间的相互作用, 雾的化学特征, 雾的遥感监测, 数值模拟, 以及人工消雾等方面, 对近年来我国在雾研究方面取得的进展进行回顾和展望。

关键词: 雾, 观测, 模拟, 遥感

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.001

Advances in Fog Research in China

Niu Shengjie¹, Lu Chunsong¹, Lü Jingjing¹, Xu Feng², Zhao Lijuan³, Liu Duanyang⁴,
Yue Yanyu⁵, Zhou Yue⁶, Yu Huaying¹, Wang Tianshu¹

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

2 Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088 3 Xiamen Environmental Monitoring Central Station, Xiamen 361000

4 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008 5 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

6 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074)

Abstract: Fog is a severe phenomenon affecting the transport, human health, the quality of agricultural products, and so on. Thus, a good comprehensive understanding of fog processes is quite important and valuable to the early warning and forecast of fog, to human health and economy. In this study, recent progresses in fog studies in China are reviewed in terms including the climatic characteristics, macro characteristics, micro characteristics of fog, the interactions between fog and turbulence, fog chemistry, fog remote sensing, fog numerical simulations and the fog dispersal. Some further studies on fog processes are also suggested.

Keywords: fog, observations, numerical simulations, remote sensing

0 引言

雾是由大量悬浮在近地层空气中的气溶胶粒子、微小水滴(或冰晶)组成的气溶胶系统, 而微小水滴(或冰晶)是近地层空气中水汽凝结(或凝华)的产物。浓雾已成为影响经济和社会发展及人民健康的重要灾害性天气之一。主要危害表现在以下四个方面: 1) 持续性浓雾对交通的危害最为直接, 往往造成高速公路汽车追尾相撞, 航班延误甚至发生空难, 海上轮渡停航甚至相撞, 严重影响交通安全和运输效率; 2) 雾中污染物含量高, 缩短日照时数, 降低农产品产量和品质, 增加植物病虫害的发生概率; 3) 输变电设备外绝缘受到雾中污染物和水分影响, 常常发生

污闪, 造成停电事故, 严重威胁电力供应安全; 4) 雾日的逆温, 使污染物质积聚, 雾中产生的二次污染物毒性更大, 严重损害人体健康。

为了提高对雾害的科学认识, 增强防御雾害的能力, 需要对雾害的成因、影响和监测预警等进行深入研究, 提高模式对雾的模拟预报能力, 减少雾害带来的损失。Niu等^[1]对我国2009年以前雾的研究进行了全面的总结。2009年以来, 国内雾的研究又取得了突出的成果, 本文将从雾的气候特征、宏观特征、微观特征, 雾与湍流之间的相互作用, 雾的化学特征, 雾的遥感监测、数值模拟和人工消雾等方面, 对近年来国内雾的研究进展进行总结, 最后将展望未来雾的研究方向。

1 雾的气候特征

国内外研究雾的气候特征方法很多, 最常用的方法是统计区域内的雾日数^[2-4]。我国自20世纪50年代以来, 地面气象观测站对雾过程有着长期系统的观测, 其形成的长序列资料是研究雾的气候变化的基础。中

收稿日期: 2015年7月27日; 修回日期: 2015年9月22日
第一作者: 牛生杰(1962—), Email: niusj@nuist.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41375138, 41275151, 41305120)

国雾的地理分布较复杂,一般而言,沿海、高山、城市为雾的多发地区,大陆多为辐射雾。雾的全国分布并不具有很强的规律性,但是从年平均雾日数来看,我国雾分布为东南部多西北部少^[5]。年平均雾日数在60d以上的多雾地区集中在辽宁东部沿海、山东半岛沿海、江浙沿海、福建西北及沿海、四川盆地和云南西南部^[1]。

多年来有许多学者对地区性的大雾变化进行了统计,给出局地雾的时空分布与气象因子之间的关系,并提出雾可能出现的原因^[6-9]。吴兑等^[10]提出暖冬造成强冷空气偏弱是雾多发原因之一。刘小宁等^[5]指出中国大多数地区雾日数呈减少趋势,并指出雾日数变化的原因是复杂的,从相对湿度、城市热岛效应、空气污染、降水、生态环境多方面解释雾日数减少的原因。张人禾等^[11]研究了2013年1月中国东部严重的雾和霾天气,指出这次雾和霾事件的逐日演变超过2/3的方差可以由气象条件解释,而雾和霾事件的逐日演变同时受到大气动力因子和热力因子的影响。尹志聪等^[12]揭示了华北黄淮不同等级雾和霾的气候变化特征,并指出雾日数和降水量、相对湿度之间一直保持稳定的正相关关系。于华英等^[13]的研究发现北极涛动(Arctic oscillation, AO)的正异常,使得东亚大槽变弱,不利于冷空气南下,同时长三角地区中层高压异常,有利于大气稳定。La Niña事件有利于中国南海地区水汽增加,可能为南京雾的发生提供了水汽条件。

2 雾的宏观特征

2.1 雾的类型

对雾的分类有许多种,根据雾出现的地点可以分为内陆雾、海雾、沿海雾和山地雾。根据物理过程, Gultepe等^[14]将雾分为辐射雾、高逆温雾、平流辐射雾、平流雾和蒸发雾,王鹏飞等^[15]则将雾分为冷却雾、蒸发雾、混合雾及吸湿雾,又将冷却雾细分为“上坡冷却”、“辐射冷却”、“平流冷却”及“局地膨胀冷却”四种。

沿海雾是由于海上或者沿海冷暖平流相互交汇而使空气饱和形成的雾。内陆雾中的辐射雾是由于地面的强辐射冷却到露点而形成的。辐射雾绝大部分出现在内陆,且通常容易在反气旋控制的晴朗天气下形成^[14],所以辐射雾的主导因素就是辐射冷却。平流辐射雾主要受两种因素影响:辐射冷却和平流。这种雾大都出现在沿海地区^[1, 14, 16],有时也会出现在内陆^[17]。平流雾中平流起到了主导作用^[18]。雨雾(有时称为蒸发雾)的形成则基于以下物理机制:当大的雨滴下落到云下较干的空气中后,液滴蒸发形成水汽,

水汽在冷却后达到露点温度而凝结形成雾^[19-20]。

2.2 雾的形成、维持及消散时间

海雾的形成时间没有明显的特征,既有在中午时分形成,也有傍晚或午夜前后形成^[21-23]。沿海雾的消散时间与其形成时间类似,没有明显的特征。根据在南海北部和黄河的观测发现,海雾的持续时间一般在3~20h。辐射雾具有明显的日变化特征^[24-25],通常在日落以后或者午夜形成,个别的形成于日出前后。辐射雾大部分在日出后或者正午前后消散,维持时间为9~18h(表1、表2)。根据南京雾的观测资料,平流辐射雾和平流雾的维持时间均较长^[18, 25],为16~64h,2006年12月24—27日平流辐射雾过程维持时间超过了64h。平流辐射雾的形成时间与辐射雾类似,并且具有显著的日变化,都是在正午前后减弱或者消散。能见度低于50m的强浓雾一般出现在辐射雾及平流辐射雾中,其均与辐射冷却有关。然而,根据在南京五年的观测中发现,平流雾的最低能见度都要超过50m,即平流雾中没有出现强浓雾。强浓雾的持续时间大都在1~6h,最短的不到0.5h,最长的强浓雾出现在2006年12月24—27日,持续时间接近40h。不同类型雾最低能见度的差异受到雾的微物理过程影响。分析还发现,强浓雾大部分出现在凌晨,在日出前或者日出后的1~2h;还有部分的强浓雾出现在午夜时分。这些强浓雾的形成都与辐射冷却或者蒸发有关系。此外,南京雨雾中的能见度均在250m以上^[26]。

2.3 雾层结构特征

许多研究^[17, 27-29]表明,有些雾形成于离地的空中,接着向下发展及地成雾。Meyer等^[30]对于空中形成的雾给出了两种物理解释:一是雾首先形成于空中,二是雾形成于所有高度,接着平流到观测区域。早期的辐射雾的数值模拟中也发现了此现象^[31]。Zhou等^[32]对此作了理论分析:由于地面湍流和其阈值的存在,雾只能生成在离地面一定的高度上。Ye等^[29]的观测发现,离地形成的雾在地面附近存在一个不稳定层,这一定程度上证实了Zhou等的观点。Zhou等^[32]还认为,离地形成的雾往往预示着发生强度大的雾,这对雾的预报有重要意义,但这一点还需进一步验证。表1给出了南京各类雾宏观特征的观测结果^[18, 25]。南京雾层都比较厚,平流雾和平流辐射雾的厚度最大,这两类雾的5个过程中的最高雾顶高度超过了650m,平均为420m。雾顶高度以平流辐射雾最高,2007年12月20—21日平流辐射雾过程,最高雾顶达1050m;2006年12月24—27日雾过程快消散时(27日07时)雾顶抬升到943m。这样高的雾顶与东南暖湿平流有关^[33-35]。

表1 南京地区雾的宏观结构特征^[18, 25]
Table 1 The macroscopic features of fog in Nanjing

雾类型	日期	形成时间	消散时间	持续时间/ min	最小能见度/m	强浓雾持续时间 (能见度<50m)	形成时风向	形成时风速/ (m·s ⁻¹)	主导风向	风速范围/ (m·s ⁻¹)	强浓雾前 风向	雾顶*					
												平均	范围	平均	范围		
雨雾	2006年12月6-7日	16:15	07:09	894	51		NW	NW				9.7	7.7~11.7	331	261~428	12.8	12.0~13.7
辐射雾	2006年12月9-10日	21:20	09:30	730	290							-0.2	-1.8~3.0	426	262~483	-0.72	-1.4~1.0
辐射雾	2006年12月11-12日	23:00	17:00	1080	15	12日04:26-10:20						4.1	-1.8~6.5	347	192~527	4.9	3.8~6.3
辐射雾	2006年12月13-14日	22:00	12:00	840	15	14日08:37-10:11						5.7	4.8~7.0	526	258~738	5.7	4.6~7.5
平流辐射雾	2006年12月24-27日	22:00	14:14	3840	15	25日00:41-26日12:36 26日19:32-23:10	NW		NW NE		NE-SW/ NE-NW	5.0	0.6~7.0	447	175~653	7.7	5.1~9.7
辐射雾	2007年12月3-4日	18:12	09:11	900	15	04日06:30-06:55	SSE	0.4	N/S	0~2.2	N	3.5	0.6~5.5	144	70~220	4.5	4.0~4.7
辐射雾	2007年12月10-11日	22:31	12:30	840	15	11日07:35-09:35	NW	0.5	N/S	0~3.0	S-N	3.8	1.8~7.7	131	103~150	5.4	5.2~5.8
辐射雾	2007年12月13-14日	19:50	11:21	930	15	14日05:48-09:58	NNE	0.3	SE/SW/N	0~1.0	SW-NW	1.0	-1.1~4.5	223	30~623	3.0	0.2~4.4
辐射雾	2007年12月14-15日	20:48	12:00	902	15	15日04:50-06:12	NE	0.5	S/NW	0~2.7	SW	2.2	-0.3~7.2	106	55~152	5.7	4.3~6.5
辐射雾	2007年12月18日	02:30	11:30	540	15	08:30-10:15	NW	0.4	SW/NW	0~2.0	NW	4.2	2.9~6.6	768	739~840	3.1	2.1~4.0
平流辐射雾	2007年12月18-19日	16:06	12:30	1230	15	19日01:43-04:00 19日04:45-09:25	NW	0.4	S N	0~5.3	S-NW	3.8	-0.2~8.6	477	200~650	5.9	4.3~7.5
平流雾	2007年12月20-21日	17:47	19:07	1520	51		S	0.6	W/N	0~3.3		7.7	6.7~9.7	848	664~1050	6.7	5.6~7.7
辐射雾	2007年12月22-23日	22:10	00:38	149	66		NW	0.2	W-S	0~0.6		7.6	7.3~9.1	124	50~180	9.4	8.6~10.0
辐射雾	2007年12月23日	01:16	05:30	255	15	01:46-03:08	NE	0.3	NE	0~0.8	NE	5.6	5.4~7.7	427	110~780	7.0	5.1~8.6
平流雾	2008年11月4日				52												
平流雾	2009年12月1-2日	19:00	11:20	980	51		NE	2.0		0.4~3.9		3.9	3.0~6.1	555	260~690		
辐射雾	2010年11月17-18日	00:00	09:00	1980			静小	<1.0	静小	<1.0		4.0~8.0		116~450			

注：空白为缺测值；*表中仅包含了雾边界层数据，没有边界层数据的雾个别没有在此列举。

表2 不同地区雾的观测仪器及宏观结构特征
Table 2 The observation instruments and macrostructure of fog in different regions

雾类型	地点	观测仪器	日期	形成时间	消散时间	持续时间/ min	最小能见度/ m	雾过程中地面气象条件				雾顶*		
								形成时风向	形成时风速/ (m·s ⁻¹)	主导风向	风速范围/ (m·s ⁻¹)	平均	范围	平均
辐射雾	北京	系艇 ^[36]	2001年2月22—23日	2:00	2:00	1440		S-SW	<1.6	SW	1.0			
平流辐射雾	北京	铁塔 ^[37]	2002年12月2—4日	0:00	12:00	3600		N	<3.0	N		380~700	0~4	
辐射雾	北京	L波 ^[38]	2006年12月11—12日	19:40	10:40	900	100	S-SW	0.6~2.2	S	2.0	-1~-4	150	-1
辐射雾	北京	微波 ^[39,40]	2007年10月25—26日	20:00	8:00	720						200	10	
辐射雾	天津	铁塔 ^[41]	2006年2月13—14日	7:00	9:00	1560						500		
平流辐射雾	天津	铁塔 ^[42]	2010年11月30—12月2日	19:00	4:00	2040	50	E	1.0~3.0	S-N	1.0~5.0	-2.4~-0.6		
平流辐射雾	天津	铁塔 ^[43]	2010年11月30—12月2日	0:00	4:00	3120	50	NE-E	0.47	E	0.57~1.55			
辐射雾	天津	铁塔 ^[44]	2010年12月22日	2:40	11:00	500		NE	2.0	NW	2.0	0.6~2.5		
海雾	青岛	L波+探空仪 ^[22]	2008年7月7—11日									200~500		
海雾	青岛	L波+探空仪 ^[45]	2008年5月2—3日											
海雾	黄海3站	L波 ^[23]	2010年2月22—25日	20:00	8:00		100	N/SE	6.0~8.0	N/SE	<4			
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[46]	2011年2月23—24日	22:00	12:00		40						390	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月23—24日	21:58	12:01	843	40					1.8	0.8~3.5	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月24—25日	17:17	11:48	1111	10					3.4	0.6~6.3	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月25—26日	23:13	10:55	702	50					4.4	1.8~7.4	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月27—28日	18:37	6:53	736	27					2.3	0.8~4.7	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月28日	17:58	21:46	228	73					2.4	1.0~3.7	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月28—3月1日	23:29	10:00	631	70					1.7	0.0~3.3	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月12—13日	23:37	10:42	665	40					1.5	0.0~2.7	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月13—14日	17:49	9:54	965	50					2.3	0.7~4.7	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月14—15日	23:12	7:54	522	50					1.1	0.0~2.5	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月2日	4:04	14:12	608	100					1.1	0.0~2.2	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月20—21日	14:46	13:09	1343	60					1.5	0.0~3.3	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月21—22日	14:00	6:39	999	60					2.9	1.0~4.5	

注：空白为缺测值；*表中仅仅包含了雾边界层数据，没有边界层数据的雾个例没有在此列举。

表2是北京等地雾边界层的宏观特征, 可以看到, 北京地区雾层厚度差异较大^[38-40], 在150~700m, 其中北京最高雾层出现在2002年的一次平流辐射雾中, 最高雾层700m。海雾雾顶高度的观测较少, 但通过已有的个例来看, 黄海海雾^[22]雾顶高度在200~500m, 南海海雾^[46]高度在390m左右。

辐射雾雾顶也比较高^[17, 25, 33, 34, 47-49], 最高雾顶在500~800m的约占60%, 100~200m的约占40%。高的雾顶常与雾的多层结构有关。例如2007年12月13—14日雾过程, 在地面辐射雾发展的同时, 中高空受冷平流影响形成低云。以后低云不断下降, 地面辐射雾爆发性上升, 结果上下相接而成600m厚的雾层^[50]。雨雾最高雾顶低于前两类雾, 一般为300~400m, 变化幅度较小^[20]。由于雨雾是暖雨下落到近地层冷空气中蒸发而成, 因此它的雾层厚度与近地层冷空气厚度有关。除雨雾外, 南京辐射雾和平流辐射雾的雾顶高度都比国内其他地区(如北京^[51-52]、天津^[53]、景洪^[17, 54]等城市)的雾要高得多, 这给人工消雾试验增加了困难。与国外的研究相比, 南京的雾也高于国外其他地区的雾层厚度, 如Pilié等^[27]分析了11个雾过程的雾层厚度, 平均为60~170m, 而Roach等^[55]分析的平均雾层厚度仅为50m, Holets等^[56]观测到的高逆温雾的厚度为400~550m。

在对南京连续5年的冬季雾观测中, 一共监测到3次双层雾过程, 2006年12月13—14日过程、2007年12月10—11日过程以及2007年12月13—14日过程。在2007年12月10—11日雾过程中出现了双层逆温结构, 从而形成了双层雾, 低空急流将两层雾隔开^[49]。但是在2007年12月13—14日过程中, 近地层雾由地面的辐射冷却形成, 上层雾则是由低空冷平流形成的云层; 接着下层雾向上发展, 上层云向下发展最后连接起来形成深厚的雾层^[50]。

3 雾的微观特征

3.1 内陆雾

刘端阳^[18]利用南京的雾滴谱观测资料(仪器: 美国DMT公司的FM-100雾滴谱仪), 统计了不同类型雾中微物理量和谱分布的差异。平流辐射雾的雾滴数浓度最大, 达到211cm⁻³, 平流雾和辐射雾次之, 分别为108和78cm⁻³, 雨雾的雾滴数浓度最小, 仅3cm⁻³。辐射雾的含水量为0.023g·m⁻³, 与平流雾的0.021g·m⁻³相当, 平流辐射雾的含水量最大, 为0.12g·m⁻³, 约为平流雾和辐射雾的6倍左右。雨雾的含水量最小, 仅0.00004g·m⁻³, 最大值仅0.00021g·m⁻³。平流辐射雾的平均直径最大, 为5.0μm, 辐射雾为3.7μm, 雨雾和平

流雾分别为3.1和3.6μm。与微物理量相对应的, 雨雾的谱分布最窄, 最大雾滴不超过7μm, 平流雾和平流辐射雾的谱宽都超过45μm, 辐射雾的谱型分两种, 一类雾的谱分布较宽, 谱宽超过35μm, 另一类的谱宽不超过15μm。Quan等^[57]在污染地区武清(北京和天津这两个大城市之间)观测到的三场浓雾中, 平均含水量分别为0.20、0.31和0.29g·m⁻³, 数浓度分别为715、782和683cm⁻³, 均高于南京雾中的结果。

浓雾过程往往具有爆发性发展的特征^[18, 34, 45, 58-62], 即在很短时间(约30min)内, 数浓度明显增大, 雾滴谱明显拓宽, 含水量明显增大, 浓雾突变为强浓雾。雾滴谱爆发性拓宽都是在降温(即过饱和度加大)条件下出现的。浓雾阶段, 当地面有弱冷平流时, 最易爆发性增强; 日出后湿地表水分蒸发也易引起雾滴谱爆发性拓宽。浓雾雾滴谱爆发性拓宽的微物理过程是: 在过饱和度增大的条件下, 核化、凝结过程快速进行, 雾滴个数大量增加, 在较强的湍流扩散条件下, 雾滴间相互碰并, 从而使雾滴不断增大, 水滴继续碰并小滴, 致使雾滴谱拓宽, 浓雾增强为强浓雾。这种“拓宽”具有阶梯式的特征。

微物理量之间的关系受到不同物理过程的影响, 因此可以通过微物理关系去研究物理过程。南京雾的观测资料表明, 体积平均半径和数浓度、含水量均为正相关关系, 表明雾过程中的主要微物理过程是凝结并伴随持续的核化过程^[58, 63]。Quan等^[57]在武清观测到的三场浓雾具有类似的微物理关系。Niu等^[63]和Lu等^[58]利用云雨自动转化阈值函数分离出了碰并过程中微物理量之间的关系。

近年来, 我国学者对山区过冷雾微物理特征也进行了深入的研究, 罗宁等^[64]对贵州西部、北部和中部山区过冷云雾的微物理特征进行了对比分析, 发现其没有显著性的地区差异, 过冷云雾滴的平均数浓度为140~312cm⁻³, 液态水含量为0.2g·m⁻³, 且在-6~0℃, 液态水含量随着气温的降低而降低。Niu等^[65]进一步对湖北恩施的过冷雾微物理特征进行分析发现, 云雾滴的微物理特征量变化范围都较小, 数浓度基本处在120~300cm⁻³, 平均半径处在1.5~4.0μm, 含水量为0.01~0.11g·m⁻³, 其导致的积冰厚度大小也与含水量呈正相关关系; 而雨滴数浓度变化范围较大, 但平均半径变化较小, 基本都处在0.2~0.4mm范围内, 雨强为0.02~0.25mm·h⁻¹。贾然等^[66]则分析了恩施一次积冰过程中雨天、雾天和雨夹雪天气下过冷云雾的微物理特征, 发现雾滴平均数浓度雨天最大(223.5cm⁻³), 其次为雨夹雪天

(181.3cm^{-3})，雾天最小(138.7cm^{-3})，且雾天和雨天的雾滴谱均为双峰型，而雨夹雪天为单峰型。Zhou等^[67]进一步分析了过冷雾微物理特征受冻毛毛雨的影响，发现冻毛毛雨的出现会抑制过冷雾的发展，显著减少大雾滴的数浓度，且大雾滴粒径的判断阈值与雨强大小呈正相关关系。

3.2 海雾

与陆地雾相比，中国、加拿大、美国沿海地区海雾的含水量与数浓度均较小^[68]。与中国其他典型海雾的研究结果相比较，南海海雾（如湛江、茂名）具有雾滴数浓度最高的特征，东海的海雾（如舟山）具有含水量及雾滴粒径最大的特征，而黄海的海雾（如青岛）则具有雾滴数浓度、含水量、平均半径、最大半径都最小的特征^[21]。茂名海雾的平均数密度为 57.1cm^{-3} ，平均含水量为 $0.018\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均半径为 $2.4\mu\text{m}$ ，峰值半径为 $1.4\mu\text{m}$ ^[69]。雷州半岛海雾雾滴数浓度的变化范围为 $10^0\sim 10^2\text{cm}^{-3}$ ，含水量为 $0.001\sim 0.23\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均半径为 $1.71\sim 3.28\mu\text{m}$ ，雾滴峰值半径多位于 $1.4\mu\text{m}$ ^[21, 39, 68]。

海雾的微物理特征与边界层稳定度有关^[68]。在夜间急流显著时，边界层不稳定，不利于雾滴生长，含水量较低。风向的转变会引起气团来源的变化，改变雾滴凝结核的来源，对雾的微结构产生影响。风速减弱，稳定的边界层条件和风向、湿度的转变可能是导致含水量和平均半径跃增的原因。张悦等^[70]也指出气象要素突变对厦门海雾微物理起伏特征具有显著影响。

海雾的微物理特性也受天气型影响。雷州半岛地区受冷锋前暖部影响形成的海雾，通常其液态水含量、平均半径、最大半径较大，其次是受低压前部影响而形成的海雾，再次是受鞍型场或均压场影响形成的海雾，最后是受回流天气影响形成的海雾^[68]。此外，无论在有云或无云条件下，茂名博贺的海雾都可发展和维持，但有云条件下的含水量明显小于无云条件下^[71-72]。

与微物理量紧密相关的是雾滴谱。岳岩裕等^[68]分析了雷州半岛海雾不同含水量的振荡周期中，微物理特征量的变化。在第一、二次振荡周期中，雾滴以核化凝结增长为主，水汽不充足时，大量的雾滴凝结核争食水汽，使得数浓度增加而平均半径几乎不变；碰并效率在第三、四次振荡周期明显增大，导致大滴增多，滴谱拓宽，含水量增加显著。在雾的消散阶段雾滴平均半径出现跃增，并在雾结束时达到最大值。

雷州半岛海雾雾滴谱分布被单调递减类型控制，谱宽一般 $> 20\mu\text{m}$ ^[21, 73]，雾滴谱径主要出现在

$2\sim 10\mu\text{m}$ ，峰值位于 $2\mu\text{m}$ 处，岳岩裕等^[68]指出，雷州半岛海雾的雾滴谱也可呈双峰分布，成熟阶段碰并增长明显，大滴增多，雾滴瞬时谱符合Gamma分布。更有研究表明，雷州半岛地区海雾发展的雾滴平均谱符合Junge分布，平均雾滴谱结果为： $N(D) = 24.3D^{-1.33}$ ，拟合优度为 0.96 ^[74]，这一结果与茂名和青岛地区的海雾滴谱分布类似，都符合Junge分布，但与舟山地区差异明显^[69, 74]。而雷州半岛海雾发展过程中雾滴谱谱宽存在突然增宽和迅速减小的现象，雾滴数浓度变化则主要是由半径 $< 5\mu\text{m}$ 的雾滴数浓度的变化引起^[21]。

此外，黄辉军等^[69]在茂名测得的雾滴谱径平均半径 $2.4\mu\text{m}$ ，峰值半径 $1.4\mu\text{m}$ ，并指出轻雾的雾滴谱较窄，而雾的雾滴谱相对较宽；轻雾的质量谱较窄，单峰值出现在 $4.0\mu\text{m}$ 处，而雾的质量谱较窄，呈现出多峰值的特征，最大峰值出现在 $18.7\mu\text{m}$ 处。直径 $10\mu\text{m}$ 以上雾滴的增多是含水量增大的主要原因；随着含水量的增大，雾滴谱分布有向大雾滴方向增宽的趋势，其峰值高度也不断增大^[75]。

在海雾过程中，各微物理量之间往往存在一定联系。Zhao等^[76]利用观测资料，指出贯穿雷州半岛的雾事件中雾滴数浓度、液态水含量、平均半径、雾滴谱分布的标准偏差一般都是彼此正相关的。吕晶晶等^[39]进一步指出，数浓度与平均半径在雷州半岛海雾发展初期（生成、发展）和末期（消散）多呈正相关趋势，而在成熟阶段两者多呈负相关趋势，这与浓雾不同阶段核化、凝结、碰并及沉降的微物理过程交替变化有关。茂名电白海雾过程中的雾滴数的变化趋势与液态含水量变化趋势一致^[77-78]。

4 雾与湍流之间的相互作用

4.1 雾宏观结构与湍流的相互作用

湍流是影响雾过程的重要因素，在不同条件下湍流运动可能促进雾的发展，也可能导致雾的消散^[30-31, 37, 47, 49, 55, 79-80]。较强的湍流运动会加强空气垂直混合并导致雾滴蒸发，抑制辐射雾的形成；在雾形成后湍流运动又会促使雾层垂直向上发展，特别是日出后随着太阳短波辐射对地表加热，露蒸发产生的水汽通过湍流运动向上输送，可以促进雾的发展^[14, 22, 31, 34, 47, 55, 79, 81]。雾发生时的稳定大气层结会抑制垂直湍流运动发展，而雾滴凝结增长会释放凝结潜热，可以增强大气中的湍流运动^[82-83]。强烈的湍流运动会导致强烈的湍流混合，并会对辐射雾及其强度产生决定性的影响。

湍流交换是影响海雾的关键物理过程，在海雾的热量和水汽平衡过程中起重要作用^[84]。垂直湍流运动与海雾发展过程密切相关，在雾层中以热力湍流

界面为分界存在两个湍流层，热力湍流界面以上为长波辐射产生的热力湍流层，热力湍流界面以下为风切变产生的机械湍流层，热力湍流界面的高度通常在 $180\sim 380\text{m}$ ^[85-87]。由风切变产生的湍流混合过程是海洋边界层降温、增湿的主要机制，在海雾生成阶段，弱的湍流交换有利于雾生成^[85, 88-89]。湍流运动太强，不利于海雾的发展与维持，会导致雾层消散^[90-91]。湍流交换的强弱与海雾发展—消散—再发展的周期性变化有密切关系^[78]。海洋大气边界层中湍流混合层向上发展，是导致海雾抬升转化为低云的主要原因^[46]。Ye等^[29]在平流雾的生成期，观测表明湍流动能随时间呈下降趋势。Li等^[92]发现在海雾形成期，正好相反，湍流动能呈加强趋势，表明湍流混合冷却对海雾形成有重要贡献。当雾形成后，不论是平流雾还是海雾，雾内湍流的动量和热力通量随高度增强，造成雾内热量和动量的损失，有效维持了雾内的冷却率和较小的下垫面风速，有助于雾的稳定和发展。

4.2 雾微观结构与湍流的相互作用

湍流过程使得雾滴混合均匀，趋向平均化；同时湍流促使雾体内、外部空气交换，外部空气凝结核化，数浓度升高，雾滴平均半径向 $1.8\mu\text{m}$ 附近集中^[74]。此外，湍流是雾滴碰并增长不可缺少的条件，对雾滴谱的增宽有重要影响^[49, 60]。小尺度的湍流运动会限制云雾滴凝结增长过程，但湍流运动也可以增加云雾滴的碰并效率并有效促进雾滴谱增宽^[93-98]。雾的微物理参量随时间快速变化，这种高频的随机变化过程中存在低频的准周期变化特征，微物理参量的这种高频随机变化是由间歇性的湍流混合过程引起的^[27, 99]。辐射雾发展阶段，在湍流扩散作用下雾水通量谱具有明显的振荡特征，而辐射平流雾的雾水通量谱不存在振荡特征^[100]。雾中含水量的准周期振荡现象主要与湍流对液态水的混合作用与高空海雾液态水大量生成阶段的雾顶长波辐射间接相关^[72]。

4.3 湍流对雾影响的阈值现象

湍流对雾的发展具有正反两方面影响，雾层中存在一个湍流强度临界值，雾发生时的边界层结构（冷却降温率、饱和层厚度等）决定了湍流强度临界值的大小^[32]。当湍流强度小于此临界值时，湍流运动增强会增大雾微物理结构空间分布的不均匀性并促进雾宏微物理结构的发展；而湍流强度超过此临界值时，湍流运动增强会使得雾层微物理结构在近地层混合得更加均匀并抑制雾宏微物理结构的发展，进而促使雾层消散^[82-83]。在雾的形成阶段雾层较薄，湍流运动增强会导致雾滴蒸发，雾滴数浓度和液态含水量减少、雾

滴平均半径也较小；而在雾的发展和成熟阶段雾层较厚，雾层可承受的湍流强度阈值较大，湍流运动增强可加强热量、水汽、雾滴、气溶胶的垂直输送，从而使得雾滴数浓度、含水量和雾滴平均半径的平均值和起伏量增大，可促使雾层垂直向上发展，而雾层厚度增加又可使得湍流强度临界值增大。Li等^[92]借鉴Zhou等^[32]的理论，提出了雾生消过程中湍流动能的阈值，用于解释海雾内的湍流动能的大小对海雾的形成、发展和消散的影响。当湍流动能低于临界值时，湍流有助于含水量的产生。

湍流运动对不同尺度雾滴空间分布的影响不同，雾滴尺度越小，湍流运动对雾滴空间分布的影响越大。湍流对半径大于 $5\mu\text{m}$ 雾滴的空间分布影响很小，雾滴空间分布的不均匀性主要是由半径小于 $5\mu\text{m}$ 的雾滴造成，雾滴空间分布不均匀性随着湍流运动增强而增大，这有利于雾滴起伏凝结增长，促使雾中出现个别尺度较大的雾滴。雾滴最大半径小于 $10\mu\text{m}$ 时，仅通过凝结增长过程，雾滴谱拓宽很慢，雾滴最大半径基本不随湍流强度的增强而增大；而当雾滴最大半径超过 $10\mu\text{m}$ 时，雾滴碰并过程开始发生，不同尺度雾滴在气流中的相对运动速度不同，湍流运动增强可增加雾滴的碰并速率和碰并效率，加强雾滴的碰并增长，雾滴最大半径随湍流强度增强显著增大，导致雾滴谱迅速拓宽。

4.4 雾中湍流统计特征

雾的不同发展阶段湍流强度和湍流动能存在显著差异，雾前湍流由强转弱，雾消散时湍流逐渐转强^[39, 49]。黄海海雾的发展阶段和成熟阶段低空水平风速和垂直风速的平均动能显著减小，而南海海雾的观测结果表明平均动能在雾前和雾中有两次跃增，雾成熟期湍流动能大幅跃增主要是由雾顶辐射冷却产生的热力湍流和风切变引发的机械湍流增强所致^[39, 49]。平流雾生消过程中，大气稳定度参数数值主要集中在弱不稳定到弱稳定范围内，且多呈现弱不稳定状态^[101]。雾中各方向风速能谱密度峰值频率偏于高频段，雾前和雾后风速能谱峰值频率偏向于低频段；雾形成前期温度谱峰值频率变化大于速度谱，雾消散期间温度谱峰值频率更偏向于低频；雾过程中，平均动能较小，但湍流扰动活跃，湍流输送以垂直方向为主^[102]。城区浓雾过程中，大气层结由雾前的强稳定转为雾中的偏中性层结，风速归一化标准差数值随稳定度的变化符合近地面经典湍流相似理论^[103-104]。

5 雾的化学特征

雾是清除大气中污染物的一个重要途径，雾和霾

频发成为中国中东部地区的普遍现象,雾的出现对大气中细小颗粒物的清除起到了一定的作用,但也会导致雾水中包含更多的污染物^[105]。作为酸沉降的一个重要部分,雾水比雨水有更高的污染物浓度^[106],因此,雾水化学可以更好地指示区域排放物成分,在缺少降雨和污染物监测的情况下对于研究远距离输送的空气污染物是一个有效的信息^[107]。同时雾中高浓度的污染物对人体健康也存在潜在的危害^[108]。

在描述雾水时,pH、电导率(EC)和雾水的离子浓度是三个最重要的参数。表3给出了不同地区的pH、电导率和雾水的离子浓度。1984—1990年重庆地区^[109]雾水pH为4.4,<5.6(酸雾的临界阈值)。在清洁地区,如南岭地区^[110]雾水也是酸的,在对闽南地区^[111]的研究中发现,雾水酸度比城市大,而雾水的离子浓度低,属低污染高酸度地区。同时,在表3中的一些城市地区(如云南安宁)雾水pH值高于5.6。因此,pH值不能准确反映污染情况,因为它是雾水中所有阴阳离子共同作用的结果,需要考虑雾水中酸、碱性物质的含量。电导率反映了介质导电的能力,与可溶性离子有着直接联系。在重庆、南京和东海岛等地^[106, 109, 112-113]雾水中电导率很高,超过了 $600\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,与其他地区相比,其雾水中离子浓度也很高。电导率与雾水的总离子浓度相关性最好,呈正相关。

雾水离子成分及浓度与雾水采集位置有着密切的关系^[105]。重庆、南京、上海、广州等地的雾水化学性质分析^[108-109, 114-115]表明,在污染较严重的城市阴离子中以 SO_4^{2-} 为主,而阳离子则以 Ca^{2+} 或 NH_4^+ 最多,总的离子浓度由市中心向外逐渐减少,且冷季雾水离子浓

度要比暖季高。在中国的黄海、东海和南海区域开展的一些海雾化学特征的研究发现,与陆地雾相比较,海雾的各离子所占比例不同,阴阳离子分别以 Cl^- 和 Na^+ 为主,且受到大气环流影响,使得陆地上的污染物对海雾雾水化学组分有一定的影响^[116-118]。而山地雾的化学组成成分与陆地雾的一致, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 或 NH_4^+ 为主,但其离子浓度较低,海洋源和周边地区的气团都会对其造成影响^[119-120]。

雾水化学不仅与空气中污染物浓度相关,而且是多种因子共同作用的结果^[121]。不同的气团轨迹会带来性质不同的污染气团,来自不同区域的空气团具有不同的雾滴凝结核源决定了雾滴的初始成分,进一步会通过吸收可溶性气体和液相化学反应而改变雾水化学成分^[122]。南京地区辐射雾的发生主要受局地大陆气团影响,受南面长江水汽影响,将发展为平流雾;而受东北风带来的海洋气团及附近工业区污染物控制影响下的平流雾,离子浓度会大幅度增加^[123]。Yue等^[124]指出气团路径较短时受到局地影响,离子沉降值高;当气团完全来自于东部洋面时离子浓度和离子沉降都最低。

学者们进一步研究了微物理特征量与雾水化学之间的联系。雾滴形成后,大气中污染气体和部分气溶胶进入雾滴,增加化学成分种类和浓度,这个过程受雾滴的总表面积影响,表面积越大,可溶解的离子成分越多,因此Lu等^[112]提出雾水离子浓度要考虑到雾滴表面积(S),其反映了吸收能力,并根据相关性分析提出了利用 S/LWC (LWC 为含水量)来反映雾滴的清除能力。Yue等^[124]进一步将该参量应用于海雾雾水

表3 不同地区雾水中的pH、电导率EC(单位: $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)和雾水中的各种离子浓度(单位: $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 3 The pH, EC (unit: $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) and several kinds of ion concentration (unit: $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) of fog in different regions

观测地点和时间	pH	EC	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	NH_4^+
南京2006—2007年 ^[112]	5.90	681.0	493.0	1010.0	945.0	3485.0	384.0	1886.0	1282.0	174.0	6654.0
重庆1984—1990年 ^[109]	4.40	815.0	1063.9	2062.3	991.6	6450.0	1019.9	3685.4	1486.4	1482.7	3307.5
上海1993—1995年 ^[125]	6.00		550.0	480.0	2530.0	8650.0	510.0	6610.0	1760.0	3050.0	1630.0
云南景洪1997年 ^[130]	6.30		2734.0	794.0	115.0	1113.0	773.3	518.8	238.3	134.9	3211.0
云南勐养1997年 ^[130]	8.30		258.2	100.4	32.5	330.5	320.1	784.1	31.9	32.4	28.3
闽南1993年 ^[111]	3.60		29.0	214.0	257.0	395.0	91.0	149.0	344.0	53.0	469.0
云南安宁(居民区)1988年12月 ^[131]	6.25		957.9	1474.3	343.2	4355.2	387.0		424.3		5844.0
云南安宁(非居民区)1988年12月 ^[131]	6.71		668.4	582.0	217.3	2681.3	15.9		70.0		2856.0
舟山1987年 ^[116]	6.00			982.3	166.9	205.4	64.7	185.0	961.3	65.4	309.4
湛江东海岛2010年 ^[133]	5.35	1883.0	102.0	12391.0	3602.0	1253.0	627.0	1811.0	11666.0	1801.0	858.0
庐山1987年 ^[119]	5.40		9.1	25.6	73.5	219.9	14.5	212.9	18.9	12.6	323.1
南岭1999年 ^[110]	6.10	220.0	79.0	105.0	250.0	663.0	187.0	255.0	65.0	11.0	1300.0
南岭2001年 ^[110]	5.20	127.0	7.0	9.0	8.0	688.0	103.0	818.0	56.0	26.0	82.0
黄山2009年 ^[120]	6.40	91.8	7.2	115.6	121.4	161.6	40.7	130.0	120.2	19.0	293.5
乌鲁木齐南山2003年 ^[132]	6.40			265.0	122.0	717.0	39.5	86.1		55.5	

注:空白为缺测值。

化学分析中,得到了较好的相关性。

雾过程不同阶段的雾水化学特征是不同的,这主要受雾滴生长和蒸发过程的影响,反映于雾过程中含水量的大小,轻雾和消散阶段的雾通常会呈现高浓度的污染物浓度。徐峰等^[113]对海雾的研究中发现在雾发生前期雾水中各离子成分浓度最高,雾发生期间采集的雾水浓度偏低。李德等^[125]研究了1994年1月9日出现在上海的浓雾,发现pH、电导率和离子浓度与初始阶段相比在雾的后期都有明显下降。

此外,对于有机气溶胶如:多环芳烃(PAHS)等,通常受季节、局地排放、传输和气象条件影响^[129-130]。樊曙先等^[131]通过对比研究雾发生、发展及消散过程对PAHS粒径分布的影响,发现雾对细粒子分布影响明显;且雾天中 $0.65\sim 2.10\mu\text{m}$ 粒子中PAHS质量浓度有增加的趋势,呈现出积聚模态颗粒物富集^[132]。

6 雾的遥感监测

借助遥感技术开展大雾监测具有直观、全面和及时的显著优势,是常规地面观测所无法比拟的。早在20世纪70年代,气象卫星可见光数据已被应用于雾的生消监测^[133-134]。此后Eyer等^[135]和Turner等^[136]基于Hunt^[137]的研究提出了“双波段亮温差法”,该方法不仅在极轨卫星平台上得到广泛应用,而且被推广至具有短波红外通道的静止卫星平台^[138-140],均具有良好的应用表现。中国的大雾遥感监测起步较晚,1988年,郑新江^[141]利用极轨卫星NOAA/AVHRR的可见光和近红外波段对黄海海雾图像特征进行了分析,同时利用静止卫星GMS分析了海雾的演变过程。此后,很多研究学者利用卫星资料针对雾的成因、图像纹理和辐射特性,提出了一系列雾的遥感监测方法,其中较常用的如:多通道组合法^[142-143]、阈值判定法^[144-146]、纹理分形^[147]和神经网络法^[148]等,从而进一步增强了人们对雾遥感监测的理性认识。

近年来,由于中国近海海事活动增多,对海雾监测预报的气象服务需求显著提高。但海雾以平流雾居多,覆盖范围甚广,而由船舶和洋面观测所获得的资料稀疏,很难满足对海雾时空演变分布的监测要求,这无疑为目前时空分辨率俱佳的卫星遥感提供了合适的机会。如:蒋璐璐等^[149]依据FY-3A卫星的VIRR数据,利用多波段阈值法对中国东部沿海地区日间雾进行了遥感监测,并估算了雾的垂直厚度、光学厚度以及能见度等特征参数。Li等^[150]利用MTSAT的IR通道数据,提出了一种基于主成分分析、纹理分析和阈值判别的海雾监测方法,并对2006—2009

年中国近海各月大雾发生频次进行统计分析。张春桂等^[151]结合2000—2010年福建沿海能见度资料和NOAA/AVHRR、FY-1D和MODIS遥感数据,分析了海雾时空变化特征;并针对不同传感器给出白天和夜间海雾遥感监测模型。吴晓京等^[152]基于1989—2008年AVHRR卫星资料,给出黄渤海海雾及云的频数、分布百分率信息,得到了黄渤海海雾季节变化的较全面特征。何月等^[153]结合MTSAT资料和地面观测数据,对2008—2012年浙江及其周边海区的雾进行了专题信息提取,并给出了浙江省陆域、周边海域 $0.05^\circ\times 0.05^\circ$ 网格点的小时尺度的遥感雾产品和频次分布。

此外,由于雾和低云具有相似的微物理本质和辐射特性,在遥感影像中雾和低云分离仍然是个挑战性问题,其中关键是云雾顶高度反演的精度。Bendix等^[154]尝试将MODIS陆地雾和云检测结果与地形高度数据比对,得到云顶高度、厚度及云底高度用于云雾分离,但该方法并不适用于海雾检测。Zhang等^[155]基于中国近海探空资料分析,发现雾和层云的云顶温度与海面温度的差值存在显著不同,并基于此提出了一个海雾动态阈值检测算法。Wu等^[156]利用垂直分辨率高的星载激光雷达CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)数据,实现了黄海海雾和低云的分离。Yi等^[157]利用静止卫星MTSAT-1/2和极轨卫星MODIS水汽及劈窗通道提出了一个黄海云雾顶高度的反演算法,通过将个例反演结果与CALIPSO测量及WRF模拟结果比对,显示出较高精度。可见,主动遥感仪器相比于传统的被动遥感仪器,实现云雾分离更具优势。

7 雾的数值模拟研究

中国雾的数值模拟研究始于20世纪80年代,科学家们建立了一维雾模式^[31, 158-161],分析探讨低层温度、湍流、相变、重力沉降及重力碰并等因子对雾形成的影响。通过建立二维雾模式^[162-163],科学家们研究了大气边界层风场、海陆风环流、水汽的平流输送、湍流混合、长短波辐射、凝结(蒸发)、重力沉降及下垫面对雾生消过程的影响。考虑到重庆和西双版纳地形的复杂性,石春娥等^[164]和黄建平^[165]建立了三维雾模式,模式考虑了湍流交换、地表及大气的长波辐射、短波太阳辐射、水汽的蒸发和凝结以及地表热收支等,研究了植被和气溶胶辐射效应对雾的生消的影响。傅刚等^[166]在大气边界层模式的基础上建立了一个三维雾的数值模式,较好地模拟出黄海海雾的生消过程,对海雾的三维结构有一定的模拟能力。

以上的模式都是针对雾设计的,无法考虑大尺度

环境场变化对雾生消的影响,具有一定局限性。20世纪90年代后,随着中尺度数值模式发展的日趋成熟和完善,人们逐步开始利用中尺度数值模式进行雾模拟研究的尝试^[167-171]。王帅等^[172]利用RAMS模式对黄海的一次海雾过程进行了模拟,计算了雾顶高度和大气水平能见度分布,两者分布形态均与卫星云图所显示的雾区吻合较好。刘现鹏等^[173]用WRF模拟了黄渤海海域的一次海雾过程,结果表明增加模式边界层垂直精度可提高海雾能见度模拟效果,并一定程度上消除低云对雾区模拟的干扰。何晖等^[174]利用非静力中尺度模式MM5,模拟了北京地区的一次辐射雾过程,结果表明:地面的长波辐射冷却促使辐射雾的形成,而短波辐射的加热是辐射雾消散的主要原因。增加模式的垂直分辨率以及选取更加详细的云微物理方案可以使模式模拟的辐射雾的结果有明显的改善。梁爱民等^[175]利用MM5模式,模拟了北京地区一次平流雾过程,结果表明:模拟的雾区范围及其移动基本与实况吻合,显示了中尺度模式预报平流雾的潜在能力。进一步分析表明:雾区的边缘具有明显的水平温度梯度;在贴地面层东南气流被雾区阻挡偏向西,在雾区前沿辐合;雾区的逆温区前沿930hPa以下存在一个明显的垂直热力环流,雾区下沉,雾区前沿上升。王小雁等^[176]利用WRF模式,对沪宁高速公路镇江段团雾过程进行了数值模拟,结果表明:耦合三种不同陆面方案后比没有耦合陆面方案的模拟结果更接近实况。高山红等^[177]利用WRF模式及其先进的3DVAR同化模块,循环3DVAR同化方案能有效改进黄海水雾数值模拟初始场质量,主要体现在增加低层大气温度层结构的稳定性与改变大气边界层下层的风场结构,从而显著改善海雾的模拟结果。胡朝霞等^[178]利用MM5模式,模拟了我国中东部的一次大雾过程,结果表明:MM5可以较好地模拟出这次雾发生、发展的演变过程,基本反映雾的日变化特征,还能够清晰地看到雾的垂直结构。贾星灿等^[179]基于WRF/Chem模式和雾的观测资料,开展了包含和不包含人为污染排放源两种大气背景条件下的数值模拟对比试验。结果表明,在考虑污染排放源时,模式模拟的雾的空间分布和强度变化与卫星、能见度仪和微波辐射计的观测更为接近,污染条件下的边界层结构更有利于雾的形成。

Hu等^[180]利用WRF集合预报系统来研究发生在华北的一次平流雾的数值模拟对初始条件中各要素误差的敏感性。发现初始条件的改善可以有效地改善雾的模拟;模拟雾对与湍流有关联的要素误差比与对流有关联的要素更敏感,对低层要素误差比高层要素更敏

感,对温度和水平风误差比对湿度更敏感。这些结果说明,目前雾的预报能力低下与初始条件的较大误差有关。除了雾对初始条件误差的依赖性以外,雾对模式所采用的物理方案也有较强的依赖。这也可以通过敏感性试验来研究。比如, Lin等^[181]利用WRF对浦东机场的一次平流(海雾)的模拟对WRF所有可采用的微物理和边界层方案以及辐射方案进行了系统的敏感性试验,发现微物理方案对雾的起始时间影响不大,起作用的是边界层和辐射方案;而微物理、边界层和辐射方案对雾的消散都有影响。另外这三种方案还决定了雾的垂直结构。尽管针对一次雾的模拟试验不能确定哪一个方案组合最好,但说明了模式中方案的选取对雾的预报影响很大。Hu等^[180]和Lin等^[181]的敏感性试验表明雾的预报与初始条件中的误差和模式方案的系统误差影响很大。这也是发展雾的集合预报的原因。在美国国家环境预测中心,雾的短期集合预报已存在10年了,并在2008年北京奥运会的天气预报示范项目,显示了比单模式更好的优越性^[182]。国内外的研究都表明,一种物理方案可能只对某一种雾有效,或只在某一局域、某一时间有效。加上对初始条件的误差敏感,所以单一模式的雾预报有很大的局限性。而集合预报技术的发展为提高雾的预报水平带来了曙光。目前随着中尺度模式的发展,越来越多的微物理、边界层等方案可以利用。这也为建立多方案的集合预报系统提供了有效途径。

8 人工消雾

为了抗御该自然灾害的影响,国内进行了多方面的人工消雾试验工作,在冷暖雾消雾技术等方面取得了一定的研究成果^[183-186]。

催化剂方面,高建秋等^[187]测试了新的环保型冷暖雾催化剂RC/XW的消雾性能,并与氯化钙和氯化钠进行对比,结果表明:不同种类的催化剂、同种类不同尺度的催化剂之间消雾效果都存在很大差异。消雾效果与播撒剂量直接相关。RC/XW适用于消除含水量在 $0.3\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的严重影响视程的暖雾。张铮等^[188]鉴定了液氮的成冰性能,实验结果表明:液氮成核率与液氮的播撒量有关,当云雾的温度在 $0\sim-17.0\text{C}$,液氮的适宜播撒量可取 $26.3\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,成核率为 10^{11}g^{-1} 。液氮能使过冷雾迅速冰晶化,播撒液氮2min后,占总量90%左右的冰晶生成。

暖雾催化方面,郭恩铭等^[189]应用喷气发动机改装的热力动力系统在成都双流机场进行人工消暖雾试验,该系统的原理是发动机发射出高温气体,随动力场扩散,形成一个较大范围的高温区,使雾滴蒸发,

达到局部消雾的目的。试验结果表明：喷气发动机开始工作2min后，在影响区内雾滴蒸发了，能见度由试验前30m改善到260m。濮江平等^[190]把飞机涡轮喷气发动机改装成消雾装置，采用多点探测设备对消雾装置的温度、湿度和气流作用场进行了性能测试，首次取得了涡喷发动机消雾装置在单台、双台和多台组合情况下的实测资料，分析了单台涡喷发动机作用场分布以及与实际测试数据的对比情况和消雾效果。

过冷雾催化方面，岳治国等^[191]在临潼机场，采用液态二氧化碳对冷雾进行人工引晶催化。液态二氧化碳的温度可低至-90℃，使得过饱和水汽凝结成小冰晶，继而引起一系列的繁生增长过程。结果雾中产生了降雪，消耗近地层过冷水，从而减小雾滴的数密度，提高能见度，试验取得了明显的效果。何晖等^[192]在中尺度数值模式MM5的Reisner2方案中引入了液氮粒子与云相互作用的过程，在中尺度模式MM5中实现了催化功能。利用该模式对北京地区的一次冷雾天气过程进行了消雾的数值模拟研究。结果表明：催化作业开始9min后，目标区开始显现作业效果，最好的效果出现在作业后24min。消雾机理主要为播撒后人工冰晶通过凝华增长消耗了大量的水汽，导致了水汽通过凝结过程形成雾滴的减少，同时上游作业导致雾滴向下游目标区平流的减少。曹学成等^[193]在首都机场人工消雾作业过程中进行了大气边界层特征的观测，观测结果表明：用喷洒液氮进行人工消雾可以形成小面积降雪从而提高能见度，达到安全飞行的目的。人工消雾作业过程可影响小面积大气湍流特征，使湍流谱略偏离-5/3规律。金华等^[194]在天津市武清区，利用燃烧烟条的方式播撒吸湿性焰剂对暖雾过程实施催化，利用播撒液氮的方式实施冷雾消雾试验。催化前后，雾的微物理量变化显著，催化期间雾滴谱均出现了谱宽加大的现象，雾滴谱发生了单峰分布和双峰分布间的变换，催化结束后谱宽恢复至催化前状态。分析认为：催化后暖雾中发生成熟过程（ripening process），而冷雾催化后则启动了贝吉隆过程（Bergeron process）。

9 结语与展望

近年来，我国科学家从观测分析、数值模拟等方面对雾进行了深入的研究，取得了丰硕的成果，但仍然存在不足，例如目前的数值模式还不能准确地预报雾的发生、发展和消散，原因是对雾的各个影响因子的定量认识不够。目前对雾过程的认识还不能满足经济发展对雾害的监测预警及防灾减灾的业务应用需要。

在未来的研究中，需要进一步加强雾中湍流的研究，定量分析雾与湍流之间的相互作用；气溶胶与雾之间的相互作用也值得深入研究，包括雾与霾之间的相互转化^[195]和区分^[196]等；加强对雾发生阈值的研究，进一步开展雾的集合预报，提高对雾的预报能力，同时研发雾发生频次的短期气候预测方法；研究雾害时空分布规律及雾害灾情的评估方法（对人体健康、交通、电力输送等的影响）；近年来中国气象事业高速发展，雾的探测条件和探测能力不断提高，利用大量新的探测设备，研发基于空间和地面气象信息的雾综合监测预警方法。

参考文献

- [1] Niu S, Lu C, Yu H, et al. Fog research in China: an overview. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(3): 639-662.
- [2] Peace R L. Heavy-fog regions in the conterminous united states. *Mon Wea Rev*, 1969, 97: 116-123.
- [3] Meyer M B, Lala G G. Climatological aspects of radiation fog occurrence at Albany, New York. *J Climate*, 1990, 3: 577-586.
- [4] Muraca G, Maciver D C, Auld H. The climatology of fog in Canada. St. John's, Newfoundland: Conf. Fog and Fog Collection, 15-20 July 2001.
- [5] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 220-230.
- [6] Niu F, Li Z, Li C, et al. Increase of wintertime fog in China: potential impacts of weakening of the Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading. *J Geophys Res*, 2010, 115: D00K20.
- [7] 余庆平, 孙照渤. 长三角地区11月大雾频次变化的天气气候背景. *大气科学学报*, 2010, 33(2): 205-211.
- [8] 孙斌, 马振峰, 牛涛, 等. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征. *气候与环境研究*, 2013, 18(3): 397-406.
- [9] 魏建苏, 朱伟军, 严文莲, 等. 江苏沿海地区雾的气候特征及相关影响因子. *大气科学学报*, 2010, 33(6): 680-687.
- [10] 吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 雾和霾. 北京: 气象出版社, 2009.
- [11] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 27-36.
- [12] 尹志聪, 王会军, 郭文利. 华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(5): 649-655.
- [13] 于华英, 牛生杰, 刘鹏. 2007年12月南京大雾频发的尺度环流特征研究. *热带气象学报*, 2014, 30(1): 167-175.
- [14] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. Fog research: a review of past achievements and future perspectives// Gultepe I. *Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting*. Birkhäuser Basel, 2007: 1121-1159.
- [15] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989.
- [16] Gultepe I, Hansen B, Cober S G, et al. The fog remote sensing and modeling field project. *Bull Amer Meteor Soc*, 2009, 90(3): 341-359.
- [17] 濮梅娟, 李良福, 李子华, 等. 西双版纳地区雾的物理过程研究. *气象科学*, 2001, 21(4): 425-432.
- [18] 刘端阳. 南京冬季雾宏微观物理结构的观测研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [19] Tardif R, Rasmussen R M. Evaporation of nonequilibrium raindrops as a fog formation mechanism. *J Atmos Sci*, 2010, 67(2): 345-364.
- [20] 严文莲, 刘端阳, 濮梅娟, 等. 南京地区雨雾的形成及其结构特征. *气象*, 2010, 36(10): 29-36.
- [21] 吕晶晶, 牛生杰, 赵丽娟, 等. 湛江地区一次冷锋型海雾微物理特征. *大气科学学报*, 2014, 37(2): 208-215.
- [22] 任兆鹏, 张苏平. 黄海夏季海雾的边界层结构特征及其与春季海雾的对比. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(5): 23-30.
- [23] 黄彬, 王皓, 陆雪, 等. 黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征

- 及生消机理分析. 气象, 2014, 40(11): 1324-1337.
- [24] 李子华, 刘端阳, 杨军, 等. 南京市冬季雾的物理化学特征. 气象学报, 2011, 69(4): 706-718.
- [25] Liu D Y, Niu S J, Yang J, et al. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing. Part 1: fog boundary layer. Pure Appl Geophys, 2012, 169(5/6): 809-819.
- [26] 于华英, 牛生杰, 刘鹏, 等. 2007年12月南京六次雨雾过程宏、微观结构演变特征. 大气科学, 2015, 39(1): 47-58.
- [27] Pilić R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. The life cycle of valley fog. Part 1: Micrometeorological characteristics. J Appl Meteor, 1975, 14(3): 347-363.
- [28] Fitzjarrald D R, Lala G G. Hudson valley fog environments. J Appl Meteor, 1989, 28(12): 1303-1328.
- [29] Ye X, Wu B, Zhang H. The turbulent structure and transport in fog layers observed over the Tianjin area. Atmos Res, 2015, 153: 217-234.
- [30] Meyer M B, Lala G G, Justo J E. Fog-82: a cooperative field study of radiation fog. Bull Amer Meteor Soc, 1986, 67(7): 825-832.
- [31] 周斌斌. 辐射雾的数值模拟. 气象学报, 1987, 45(1): 21-29.
- [32] Zhou B, Ferrier B S. Asymptotic analysis of equilibrium in radiation fog. J Appl Meteorol Clim, 2008, 47: 1704-1722.
- [33] 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 南京冬季平流雾的生消机制及边界层结构观测分析. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 520-529.
- [34] 濮梅娟, 严文莲, 商兆堂, 等. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究. 高原气象, 2008, 27(5): 1-8.
- [35] 严文莲, 濮梅娟, 王巍巍, 等. 一次罕见的辐射——平流雾研究 I: 生消物理过程分析. 气象科学, 2009, 29(1): 9-16.
- [36] 张光智, 卞林根, 王继志, 等. 北京及周边地区雾形成的边界层特征. 中国科学:地球科学, 2005, 35(增刊1): 73-83.
- [37] 刘照明, 胡非, 邹海波, 等. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析. 高原气象, 2010, 29(5): 1174-1182.
- [38] 江玉华, 王强, 王正兴, 等. 一次平流辐射雾的边界层特征及雾水离子组分研究. 气象, 2009, 35(2): 19-28.
- [39] 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究. 大气科学, 2009, 33(6): 1174-1186.
- [40] 刘建忠, 张蕾, 杨道侠. 雾日期间边界层特性分析. 干旱气象, 2010, 28(1): 41-48.
- [41] 吴彬贵, 张宏升, 汪靖, 等. 一次持续性浓雾天气过程的水汽输送及逆温特征分析. 高原气象, 2009, 28(2): 258-267.
- [42] 蔡子颖, 韩素芹, 吴彬贵, 等. 天津一次雾过程的边界层特征研究. 气象, 2012, 38(9): 1103-1109.
- [43] 马翠平, 吴彬贵, 李江波, 等. 一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析. 气象, 2014, 40(6): 715-722.
- [44] 吴彬贵, 马翠平, 蔡子颖, 等. 辐射雾局地爆发性增强原因探讨. 高原气象, 2014, 33(5): 1393-1402.
- [45] 张苏平, 龙景超, 尹跃进, 等. 我国东部沿海一次局地海雾抬升成云过程分析. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 1-10.
- [46] 吕晶晶, 牛生杰, 张羽, 等. 湛江东海岛一次春季海雾的宏微观结构及边界层演变特征. 气象学报, 2014, 72(2): 350-365.
- [47] 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析. 大气科学, 2010, 34(4): 681-690.
- [48] 陆春松, 牛生杰, 岳平, 等. 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析. 大气科学学报, 2011, 34(1): 58-65.
- [49] Liu D, Yang J, Niu S, et al. On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing. Adv Atmos Sci, 2011, 28(1): 223-237.
- [50] 杨军, 王蕾, 刘端阳, 等. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和生消物理机制. 气象学报, 2010, 68(6): 998-1006.
- [51] 周小刚, 王强. 北京城市重烟尘雾与水雾过程的边界层结构. 气象科技, 2004, 32(6): 404-409.
- [52] 熊秋芬, 江开军, 王强. 北京一次浓雾过程的边界层结构及成因探讨. 气象科技, 2007, 35(6): 781-786.
- [53] 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 天津南部地区平流雾过程塔层气象要素特征分析. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 3(1): 39-45.
- [54] 黄玉生, 许文荣, 李子华, 等. 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究. 气象学报, 1992, 50(1): 112-117.
- [55] Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. The physics of radiation fog: I - a field study. Quart J Roy Meteor Soc, 1976, 102(432): 313-333.
- [56] Holets S, Swanson R N. High-inversion fog episodes in central California. J Appl Meteor, 1981, 20(8): 890-899.
- [57] Quan J, Zhang Q, He H, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). Atmos Chem Phys, 2011, 11(15): 8205-8214.
- [58] Lu C, Liu Y, Niu S, et al. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs. Acta Meteor Sin, 2013, 27: 832-848.
- [59] 刘霖蔚, 牛生杰, 刘端阳, 等. 南京冬季浓雾的演变特征及爆发性增强研究. 大气科学学报, 2012, 35(1): 103-112.
- [60] 李子华, 刘端阳, 杨军. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件. 大气科学, 2011, 35(1): 41-54.
- [61] Niu S J, Liu D Y, Zhao L J, et al. Summary of a 4-year fog field study in Northern Nanjing, Part 2: fog microphysics. Pure Appl Geophys, 2012, 169(5/6): 1137-1155.
- [62] 郭丽君, 郭学良, 方春刚, 等. 华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析. 中国科学:地球科学, 2015, 45(4): 427-443.
- [63] Niu S, Lu C, Liu Y, et al. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: a case study. Adv Atmos Sci, 2010, 27(6): 1259-1275.
- [64] 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 导线积冰的云雾特征观测研究. 应用气象学报, 2008, 19(1): 91-95.
- [65] Niu S, Zhou Y, Jia R, et al. The microphysics of ice accretion on wires: observations and simulations. Sci China Earth Sci, 2012, 55(3): 428-437.
- [66] 贾然, 牛生杰, 李蕊. 鄂西电线积冰微物理特征的观测研究. 气象科学, 2010, 30(4): 481-486.
- [67] Zhou Y, Niu S J, Lü J J. The influence of freezing drizzle on wire icing during freezing fogs events. Adv Atmos Sci, 2013, 30(4): 1053-1069.
- [68] 岳岩裕, 牛生杰, 赵丽娟, 等. 湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏微观特征分析. 大气科学, 2013, 37(3): 609-622.
- [69] 黄辉军, 黄健, 刘春霞, 等. 茂名地区海雾的微物理结构特征. 海洋学报, 2009, 31(2): 17-23.
- [70] 张悦, 樊曙先, 张舒婷, 等. 海峡西岸一次雾过程微结构及其起伏特征研究. 热带气象学报, 2015, 31(3): 385-394.
- [71] Shen C, Huang J, Liu S D, et al. Characteristics of quasi-periodic oscillations during sea fog events. J Prop Meteorol, 2011, 17(1): 50-57.
- [72] 沈忱, 黄健, 刘寿东. 海雾的准周期振荡特征. 热带气象学报, 2010, 26(1): 71-78.
- [73] 徐峰, 王晶, 张羽, 等. 粤西沿海海雾天气气候特征及微物理结构研究. 气象, 2012, 38(8): 985-996.
- [74] 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 一次南海海雾微物理结构个例分析. 大气科学, 2013, 37(3): 552-562.
- [75] 黄辉军, 黄健, 毛伟康, 等. 茂名地区海雾含水量的演变特征及其与大气水平能见度的关系. 海洋学报, 2010, 32(2): 40-53.
- [76] Zhao L, Niu S, Zhang Y, et al. Microphysical characteristics of sea fog over the east coast of Leizhou Peninsula, China. Adv Atmos Sci, 2013, 30(4): 1154-1172.
- [77] Li X N, Huang J, Shen S H, et al. Evolution of liquid water content in a sea fog controlled by a High-Pressure Pattern. J Prop Meteorol, 2010, 16(4): 409-416.
- [78] 李晓娜, 黄健, 申双和, 等. 一次高压型海雾中的液态含水量演变特征. 热带气象学报, 2010, 26(1): 79-85.
- [79] 张苏平, 杨育强, 王新功, 等. 低层大气季节变化及与黄海雾季的关系. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 689-698.
- [80] 汤鹏宇, 何宏让, 阳向荣. 大连海雾特征及形成机理初步分析. 干旱气象, 2013, 31(1): 62-69.
- [81] 周涛. 上海市金山区平流雾特征分析. 大气科学研究与应用, 2014, (1): 13-30.
- [82] 赵丽娟. 雾宏微观结构与湍流、辐射、气溶胶相互作用. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [83] 牛生杰. 雾物理化学研究. 北京: 气象出版社, 2014.
- [84] 黄健, 王斌, 周发诱, 等. 华南沿海暖雾过程中的湍流热量交换特征. 大气科学, 2010, 34(4): 715-725.
- [85] Huang H, Liu H, Jiang W, et al. Characteristics of the boundary layer structure of sea fog on the coast of Southern China. Adv

- Atmos Sci, 2011, 28(6): 1377-1389.
- [86] Li P, Fu G, Lu C, et al. The formation mechanism of a spring sea fog event over the Yellow Sea associated with a low-level jet. *Wea Forecasting*, 2012, 27(6): 1538-1553.
- [87] Guo J, Li P, Fu G, et al. The structure and formation mechanism of a sea fog event over the yellow sea. *J Ocea Uni China*, 2015, 14(1): 27-37.
- [88] Gao S, Lin H, Shen B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24(1): 65-81.
- [89] Li X, Huang J, Shen S, et al. Evolution of liquid water content in a sea fog controlled by a high-pressure pattern. *J Trop Meteor*, 2010, 16(4): 409-416.
- [90] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄海海雾WRF参数化方案敏感性研究. *应用气象学报*, 2014, 25(3): 312-320.
- [91] 袁夏玉, 高山红. 一次典型高压型海雾过程中海上大气波导的数值模拟. *海洋与湖沼*, 2014, 24(5): 907-917.
- [92] Li Y, Zheng Y. Analysis of atmospheric turbulence in the upper layers of sea fog. *Chinese J Ocea Limnology*, 2015, 33(3): 809-818.
- [93] Vaillancourt P A, Yau M K. Review of particle-turbulence interactions and consequences for cloud physics. *Bull Amer Meteor Soc*, 2000, 81: 285-298.
- [94] Shaw R A. Particle-turbulence interactions in atmospheric clouds. *Annu Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 183-227.
- [95] Wang L P, Ayala O, Kasprzak S E, et al. Theoretical formulation of collision rate and collision efficiency of hydrodynamically interacting cloud droplets in turbulent atmosphere. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 2433-2450.
- [96] Franklin C N. A warm rain microphysics parameterization that includes the effect of turbulence. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 1795-1816.
- [97] Pinsky M, Khain A, Krugliak H. Collisions of cloud droplets in a turbulent flow. Part V: application of detailed tables of turbulent collision rate enhancement to simulation of droplet spectra evolution. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 357-374.
- [98] Wang L P, Grabowski W W. The role of air turbulence in warm rain initiation. *Atmos Sci Lett*, 2009, 10: 1-8.
- [99] 徐杰, 牛生杰, 陆春松, 等. 南京冬季平流雾微结构观测研究. *南京气象学院学报*, 2009, 32(2): 269-276.
- [100] 郑炜, 杨军, 刘端阳, 等. 南京冬季辐射雾雾水沉降特征研究. *干旱气象*, 2014, 32(1): 52-59.
- [101] 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征. *大气科学*, 2010, 34(2): 440-448.
- [102] 吴彬贵, 张宏升, 王兆宇, 等. 平流雾过程湍流微结构与能量输送的分析研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(2): 295-301.
- [103] 吴彬贵, 王兆宇, 解以扬, 等. 秋季天津城区雾中风速、温度和湿度的湍流统计特征. *高原气象*, 2013, 32(5): 1360-1367.
- [104] 李敏娜, 牛生杰, 张舒婷, 等. 南京雾-霾天气个例湍流运动特征的对比研究. *气象学报*, 2015, 73(3): 593-608.
- [105] Wang Y, Zhang J, Marcotte A R, et al. Fog chemistry at three sites in Norway. *Atmos Res*, 2015, 151(0): 72-81.
- [106] 樊曙先, 杨雪贞, 樊韬, 等. 南京冬季雾水金属元素及水溶性阴离子浓度特征. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 1878-1885.
- [107] Błaś M, Polkowska Ż, Sobik M, et al. Fog water chemical composition in different geographic regions of Poland. *Atmos Res*, 2010, 95(4): 455-469.
- [108] 吴兑, 李菲, 邓雪娇, 等. 广州地区春季污染雾的化学特征分析. *热带气象学报*, 2008, 24(6): 569-575.
- [109] 李子华, 彭中贵. 重庆市冬季雾的物理化学特性. *气象学报*, 1994, 52(4): 477-483.
- [110] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究. *气象学报*, 2004, 62(4): 476-485.
- [111] 刘红杰, 王玮, 高金和, 等. 闽南地区酸性雾水特征初探. *环境科学研究*, 1996, 9(5): 30-32.
- [112] Lu C, Niu S, Tang L, et al. Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics. *Atmos Res*, 2010, 97(1/2): 47-69.
- [113] 徐峰, 牛生杰, 张羽, 等. 湛江东海岛春季海雾雾水化学特性分析. *中国环境科学*, 2011, 31(3): 353-360.
- [114] Yang J, Xie Y J, Shi C E, et al. Ion composition of fog water and its relation to air pollutants during winter fog events in Nanjing, China. *Pure Appl Geophys*, 2012, 169(5/6): 1037-1052.
- [115] 鲍宝堂, 束家鑫. 上海城市雾理化特性的研究. *南京气象学院学报*, 1995, 18(1): 114-118.
- [116] 莫天麟, 许绍祖, 陈帆. 舟山地区雾水酸度及其化学组成. *上海环境科学*, 1989, 8(8): 22-26.
- [117] 宋金明, 李鹏程, 詹滨秋. 青岛雾水中的氯离子. *海洋环境科学*, 1992, 11(4): 14-22.
- [118] Yue Y, Niu S, Zhao L, et al. Chemical composition of sea fog water along the South China Sea. *Pure Appl Geophys*, 2012, 169(12): 2231-2249.
- [119] 丁国安, 纪湘明, 房秀梅, 等. 庐山云雾水化学组分的某些特征. *气象学报*, 1991, 49(2): 190-197.
- [120] 文彬, 银燕, 秦彦硕, 等. 2009年夏季黄山云雾水化学特征及来源分析. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2113-2122.
- [121] Collett Jr J L, Bator A, Sherman D E, et al. The chemical composition of fogs and intercepted clouds in the United States. *Atmos Res*, 2002, 64(1/2/3/4): 29-40.
- [122] Raja S, Raghunathan R, Yu XY, et al. Fog chemistry in the Texas-Louisiana Gulf Coast corridor. *Atmos Environ*, 2008, 42(9): 2048-2061.
- [123] 秦彦硕, 刘端阳, 银燕, 等. 南京地区雾水化学特征及污染物来源分析. *环境化学*, 2011, 30(4): 816-824.
- [124] Yue Y, Niu S, Zhao L, et al. The influences of macro- and microphysical characteristics of sea-fog on fog-water chemical composition. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31(3): 624-636.
- [125] 李德, 陈明华, 邵德民. 上海雾天大气污染及雾水组分研究. *上海环境科学*, 1999, 18(3): 117-120.
- [126] 朱彬, 李子华, 黄建平, 等. 西双版纳城、郊雾水化学组成分析. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 316-321.
- [127] 黄玉生, 郭慧光, 刘富兴. 工业区与非工业区辐射雾雾水的化学组成. *地理学报*, 1992, 47(1): 66-73.
- [128] 迪丽努尔·塔力甫, 阿布力克木·阿不力孜. 乌鲁木齐市南山雾水的化学组成及对环境的影响. *城市环境与城市生态*, 2005, 18(6): 7-9.
- [129] He J, Fan S, Meng Q, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with fine particulate matters in Nanjing, China: distributions, sources and meteorological influences. *Atmos Environ*, 2014, 89: 207-215.
- [130] Meng Q, Fan S, He J, et al. Particle size distribution and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons during a heavy haze episode in Nanjing, China. *Particuology*, 2015, 18: 127-134.
- [131] 樊曙先, 黄红丽, 顾凯华, 等. 雾过程对大气气溶胶PM10中多环芳烃粒径分布的影响. *高等学校化学学报*, 2010, 31(12): 2375-2382.
- [132] 顾凯华, 樊曙先, 黄红丽. 南京冬季雾天颗粒物中PAHs分布与气象条件的关系. *中国环境科学*, 2011, 31(8): 1233-1240.
- [133] Gurka J J, Oliver V J. Fog persistence under a cirrus band. *Mon Wea Rev*, 1974, 102(12): 869-870.
- [134] Gurka J J. The role of inward mixing in the dissipation of fog and stratus. *Mon Wea Rev*, 1978, 106(11): 1633-1635.
- [135] Eyre J R, Brownscombe J L, Allam R J. Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery. *Meteor Mag*, 1984, 113: 266-271.
- [136] Turner J, Allam R J, Maine D R. Case study of the detection of fog at night using channels 3 and 4 on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). *Meteor Mag*, 1986, 115: 285-290.
- [137] Hunt G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1973, 99(420): 346-369.
- [138] Ellrod G P. Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. *Wea Forecasting*, 1995, 10(2): 606-619.
- [139] Lee T F, Turk F J. Stratus and fog products using GOES-8/9 3.9- μm data. *Wea Forecasting*, 1997, 12(2): 664-677.
- [140] Turk J, Vivekanandan J, Lee T, et al. Derivation and applications of near-infrared cloud reflectances from GOES-8 and GOES-9.

- J Appl Meteor, 1998, 37(8): 819-831.
- [141] 郑新江. 黄淮海雾的卫星云图特征分析. 气象, 1988, 14(6): 7-9.
- [142] 居为民, 孙涵, 张忠义, 等. 卫星遥感资料在沪宁高速公路大雾监测中的初步应用. 遥感信息, 1997(3): 25-27.
- [143] 李亚春, 孙涵, 李湘阁, 等. 用GMS-5气象卫星资料遥感监测白天雾的研究. 南京气象学院学报, 2001, 24(3): 121-129.
- [144] 邓军, 白洁, 刘健文, 等. 基于MODIS多通道资料的白天雾监测. 气象科技, 2006, 34(2): 188-193.
- [145] 陈林, 牛生杰, 仲凌志. 监测雾的方法及分析. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 448-454.
- [146] 马慧云, 李德仁, 刘良明, 等. 基于MODIS卫星数据的平流雾检测研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(2): 143-145.
- [147] 陈伟, 周红妹, 袁志康, 等. 基于气象卫星分形纹理的云雾分离研究. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 133-139.
- [148] 张顺谦, 杨秀蓉. 神经网络和分形纹理在夜间云雾分离中的应用. 遥感学报, 2006, 10(4): 497-501.
- [149] 蒋璐璐, 魏鸣. FY-3A卫星资料在雾监测中的应用研究. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 489-495.
- [150] Li J, Han Z G, Chen H B. Fog detection over China's adjacent sea area by using the MTSAT geostationary satellite data. Atmos Oceanic Sci Lett, 2012, 5: 128-133.
- [151] 张春桂, 何金德, 马治国. 福建沿海海雾的卫星遥感监测. 中国农业气象, 2013, 34(3): 366-373.
- [152] 吴晓京, 李三妹, 廖蜜, 等. 基于20年卫星遥感资料的黄海、渤海海雾分布季节特征分析. 海洋学报, 2015, 37(1): 63-72.
- [153] 何月, 张小伟, 蔡菊珍, 等. 基于MTSAT卫星遥感监测的浙江省及周边海区大雾分布特征. 气象学报, 2015, 73(1): 200-210.
- [154] 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.
- [155] Zhang S, Yi L. A comprehensive dynamic threshold algorithm for daytime sea fog retrieval over the Chinese adjacent seas. Pure Appl Geophys, 2013, 170(11): 1931-1944.
- [156] Wu D, Lu B, Zhang T, et al. A method of detecting sea fogs using CALIOP data and its application to improve MODIS-based sea fog detection. J Quant Spectrosc Ra, 2015, 153: 88-94.
- [157] Yi L, Zhang S P, Thies B, et al. Spatio-temporal detection of fog and low stratus top heights over the Yellow Sea with geostationary satellite data as a precondition for ground fog detection: a feasibility study. Atmos Res, 2015, 151: 212-223.
- [158] 黄培强, 郭岚. 辐射雾形成的数值模拟. 气象科学, 1986(2): 68-74.
- [159] 尹球, 许绍祖. 辐射雾生消的数值研究 I: 数值模式. 气象学报, 1993, 51(3): 351-360.
- [160] 朱平, 蒋瑞滨. 辐射雾中振荡现象的数值研究. 大气科学, 1995, 19(2): 228-234.
- [161] 周小刚, 王强, 邓北胜, 等. 北京市一次大雾过程边界层结构的模拟研究. 气象学报, 2004, 62(4): 468-475.
- [162] 钱敏伟, 雷孝恩. 长江上空辐射雾的数值研究. 大气科学, 1990, 14(4): 483-489.
- [163] 张利民, 李子华. 重庆雾的二维非定常数值模拟. 大气科学, 1993, 17(6): 750-755.
- [164] 石春娥, 杨军, 孙学金, 等. 重庆雾的三维数值模拟. 南京气象学院学报, 1997, 20(3): 308-317.
- [165] 黄建平, 李子华, 黄玉仁, 等. 西双版纳地区雾的数值模拟研究. 大气科学, 2000, 24(6): 821-834.
- [166] 傅刚, 张涛, 周发琇. 一次黄淮海雾的三维数值模拟研究. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(6): 859-867.
- [167] 石红艳, 王洪芳, 齐琳琳, 等. 长江中下游地区一次辐射雾的数值模拟. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(4): 404-408.
- [168] 樊琦, 吴兑, 范绍佳, 等. 广州地区冬季一次大雾的三维数值模拟研究. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(1): 83-86.
- [169] 胡朝霞. 降水性层状云系与雾的观测和数值模拟研究. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007.
- [170] Fu G, Guo J, Pendergrass A, et al. An analysis and modeling study of a sea fog event over the Yellow and Bohai Seas. J Ocean Uni China, 2008, 7(1): 27-34.
- [171] Fu G, Guo J, Xie SP, et al. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea. Atmos Res, 2006, 81(4): 293-303.
- [172] 王帅, 傅聃, 陈德林, 等. 2009年春季一次黄淮海雾的观测分析及数值模拟. 大气科学学报, 2012, 35(3): 282-294.
- [173] 刘现鹏, 邵利民, 魏海亮. WRF模式垂直分辨率对海雾模拟影响的个例研究. 海洋技术学报, 2014, 33(6): 85-89.
- [174] 何晖, 金华, 刘建忠, 等. 北京地区一次辐射雾的数值模拟. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 390-398.
- [175] 梁爱民, 张庆红, 申红喜, 等. 北京地区一次平流雾过程的分析和数值模拟. 应用气象学报, 2009, 20(5): 612-621.
- [176] 王小雁, 包云轩, 严明良, 等. 不同陆面方案对沪宁高速公路团雾的模拟. 气象科学, 2010, 30(4): 487-494.
- [177] 高山红, 张守宝, 齐伊玲, 等. 利用循环3DVAR改进黄淮海雾数值模拟初始场 II: RAMS数值试验. 中国海洋大学学报, 2010, 40(11): 1-10.
- [178] 胡朝霞, 雷恒池, 董剑希, 等. 一次区域暖雾的特征分析及数值模拟. 气候与环境研究, 2011, 16(1): 71-84.
- [179] 贾星灿, 郭学良. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究. 大气科学, 2012, 36(5): 995-1008.
- [180] Hu H, Zhang Q, Xie B, et al. Predictability of an advection fog event over North China. Part I: sensitivity to initial condition differences. Mon Wea Rev, 2014, 142(5): 1803-1822.
- [181] Lin Y, Zhang Z, Pu Z, et al. Sensitivity of numerical simulations of an advection fog event over the Shanghai Pudong airport to WRF physical parameterization schemes. J Meteor Soc Japan, 2016: in press.
- [182] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. Wea Forecasting, 2010, 25(1): 303-322.
- [183] 孔君, 苏正军. 关于人工影响消减雾霾的思考. 科技导报, 2015(6): 86-90.
- [184] Guo X, Fu D, Li X, et al. Advances in cloud physics and weather modification in China. Adv Atmos Sci, 2015, 32: 230-249.
- [185] Guo X, Zheng G. Advances in weather modification from 1997 to 2007 in China. Adv Atmos Sci, 2009, 26: 240-252.
- [186] 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. 大气科学, 2008, 32(4): 967-974.
- [187] 高建秋, 王广河, 关立友, 等. 新型消暖雾催化剂与传统吸湿性催化剂消雾性能的室内对比试验. 干旱气象, 2008(2): 67-73.
- [188] 张铮, 任婕, 韩光. 液氮消雾成冰性能的实验研究. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(3): 372-378.
- [189] 郭恩铭, 刘钟源, 蒋瑞滨. 人工影响暖雾试验研究. 气象学报, 1990(2): 232-238.
- [190] 濮江平, 魏阳春, 王伟民, 等. 涡喷消雾装置试验研究. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001(5): 87-91.
- [191] 岳治国, 谢军, 李燕, 等. 人工消冷雾试验. 陕西气象, 2003(2): 6-8.
- [192] 何晖, 郭学良, 李宏宇, 等. 人工消除冷雾的个例模拟分析. 大气科学, 2011(2): 272-286.
- [193] 曹学成, 任婕, 周明煜, 等. 北京首都机场的人工消雾及大气边界层特征的演变. 地球物理学报, 1998, (6): 772-779.
- [194] 金华, 何晖, 张蕾, 等. 人工消雾试验中的雾微物理响应. 热带气象学报, 2012(2): 228-236.
- [195] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 一次雾霾转换过程长波辐射特征初步分析. 环境科学, 2010, 31(7): 1425-1431.
- [196] 马楠, 赵春生, 陈静, 等. 基于实测PM2.5、能见度 and 相对湿度分辨雾霾的新方法. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 227-235.

中国海雾研究简要回顾

傅刚 李鹏远 张苏平 高山红
(中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100)

摘要: 海雾是指对海上船舶航行、捕捞、港口作业以及沿海地区的公路运输和电力输送等社会生活的方方面面产生重要影响的天气现象。有研究指出, 由于雾所造成的社会经济和人力资源的损失甚至与台风和龙卷风造成的损失相当。因此对近30a来我国海雾研究领域的重要进展进行了回顾, 并对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等重要问题进行了讨论。

关键词: 海雾, 中国沿海, 微物理学特征, 气候学特征, 数值模拟, 集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.002

A Brief Overview of the Sea Fog Study in China

Fu Gang, Li Pengyuan, Zhang Suping, Gao Shanhong

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: Sea fog is one kind of severe weather phenomenon that exerts important influence on many aspects of social life, such as marine transportation, fishing, port operations, as well as the high-way transportation and the electric power transportation in coastal areas. Previous researches indicated that the financial and human losses related to fogs and low visibility became comparable to the losses resulted from other weather events, e.g., tornadoes or even hurricanes, in some situations. In this paper, some important progresses were reviewed on the sea fog study in China in recent 30 years. Also the authors paid much attention to discuss the following important issues on sea fog researches, i.e., the microphysics of sea fog, the relationship between sea fog and stratus, the sea fog occurrence frequency over the Northern Pacific and Northern Atlantic, the numerical simulation of sea fog, the data assimilation and ensemble forecasting of sea fog. This paper may provide useful information for those who want to know the latest progress of sea fog study in China.

Keywords: sea fog, China seas, microphysical characteristics of sea fog, climatology of sea fog, numerical modeling, ensemble prediction of sea fog

0 引言

海雾是受海洋的影响发生在海上或沿海地区低层大气中的凝结现象, 是悬浮于大气边界层大量水滴或冰晶使大气水平能见度小于1km的天气现象^[1]。

大量的研究表明, 我国黄渤海区域是世界上几个重要的海雾多发区之一^[1-10]。与海雾相伴随的大气低能见度会对海上航行的船舶安全带来很大危害。例如, 据舟山海事局统计, 近200次海上发生的船舶碰撞、触礁等海难事故中, 有70%左右主要是由海雾引起的。

海雾有不同的类型, 如平流雾、混合雾、辐射雾、地形雾等^[1]。中国海洋大学海洋气象系王彬华是国际上海雾研究的先驱者之一, 他从20世纪40年代开

始从事海雾资料的搜集和整理工作。在随后几十年的科研和教学工作中, 他把“海雾”作为海洋气象学课程的内容, 在1966年编纂成讲义。1983年出版了世界上第一部关于海雾研究的专著——《海雾》。该专著对海雾的生成及其分类、世界海雾的分布及变化、海雾发生时的水文气象条件、海雾的物理性质、海雾的预报方法等进行了全面系统的论述。此后该书于1985年由海洋出版社和Springer-Verlag出版集团联合在海外出版发行了英文版^[11]。

我国对海雾比较系统的研究可以追溯至20世纪60—70年代, 原山东海洋学院于1965—1966年和1971—1973年先后在黄海进行了海雾的专项调查, 取得了第一手海雾观测资料。1991—1995年, 中国科学院海洋研究所和原青岛海洋大学共同完成了“八五”国家科技攻关项目《黄东海海雾数值预报方法的研究》。该项目是继《海雾》专著出版以后, 我国首次对海雾进行比较系统全面的研究, 包括海雾过程中大

收稿日期: 2015年9月1日; 修回日期: 2015年10月20日

第一作者: 傅刚(1963—), Email: fugang@ouc.edu.cn

资助信息: 国家自然科学基金(41275049, 41305086, 41175006, 41576108, 41276009)

气和海洋环境背景场、海雾发生时海洋上大气边界层特征、海雾数值预报方法研究和海雾MOS (Model Output Statistics) 预报方法试验等内容。“十五”期间, 由于卫星遥感技术的快速发展, 以发展海雾遥感监测技术为目标的国家863项目“模块化全天候、灾害性海雾遥感监测技术”进行了以海雾光谱特性和纹理特征综合分析识别云雾的技术研究, 标志着我国海雾遥感监测研究新起点。

利用中国知网和其他手段的不完全统计表明, 2001—2015年6月共有49篇与雾研究有关的博士和硕士学位论文, 涉及的机构主要有: 中国气象科学研究院、南京大学、兰州大学、南京信息工程大学、大连海事大学、西安电子科技大学、中国海洋大学, 表明越来越多的年轻学者, 特别是研究生群体逐渐成为我国海雾研究的主力军。

在雾的研究方面, 一些高校的学者们做出了重要贡献。李子华等^[12]基于20世纪80年代末开始的在国内实施的几个大的雾研究计划的研究成果, 详细论述了重庆、西双版纳、南京等地的雾的物理化学特征和生消物理过程。牛生杰^[13]基于对长江三角洲地区雾、广东湛江海雾和南方过冷雾的研究, 介绍了有关中国雾物理化学过程宏观、微观特征的研究成果。Fu等^[8]对渤海、黄海和东海的海雾进行了系统研究, 分析了海雾发生和消散时的天气形势、探空资料、大气边界层结构、卫星图像特征、数值模拟与试验、海雾的季节变化特征、层云与海雾的关系等。

本文主要对近30a来我国海雾研究领域的一些进展进行简要综述, 并对以下问题重点进行讨论: 1) 海雾的微物理学特征研究; 2) 海雾与层云关系的研究; 3) 北太平洋和大西洋上海雾发生频率的气候学特征; 4) 海雾的数值模拟研究; 5) 海雾的数据同化和集合预报研究; 6) 未来海雾研究展望。张苏平等^[14]已从海雾的气候统计、海雾产生的水文气象条件、海雾天气型、大气边界层条件以及海雾年际变化的角度进行了综述。牛生杰等^[15]也对雾的宏微观结构与湍流、辐射、气溶胶相互作用, 以及雾水的化学组分开展了深入研究。因此, 本文不再赘述这两方面的相关内容。

1 中国沿海海雾的微物理特性的观测与分析

由于受观测与雾滴采样手段等的制约, 中国沿海海雾微物理结构的精细观测研究并不多见, 但这些观测资料对于海雾数值预报模式中关于雾的微物理过程的参数化研究是必不可少的。解决这类问题的办法有两种: 一种是在模式中借鉴别的海域已有的观测资料, 另一种是进行现场观测。在为数不多的关于中国

沿海海雾的观测研究文章中, 只找到有限几篇, 下面简要介绍在青岛^[16]、华南沿海^[17]和福建^[18]海雾过程的观测分析结果。

1.1 青岛海雾雾滴谱与含水量的观测与分析

1993年6月下旬至7月初是青岛的海雾多发时期, 徐静琦等利用北京大学原地球物理系大气物理教研室研发的“三用滴谱仪”在青岛市区东部近岸小麦岛(120°25'33"E, 36°3'11"N)上进行了海雾含水量及雾滴谱的观测^[16], 所用仪器的主要工作原理详见赵柏林等的工作^[19]。

小麦岛是位于青岛市东部的一个小岛, 观测是在小麦岛的邮电公寓的楼顶平台上进行的, 该平台距离海岸大约20m, 离海平面高度约15m。本次观测共获得可利用的雾滴谱资料9个, 雾水样品18个。从计算结果与观测值的对比可见, 在海雾的含水量大于0.002g/m³的情况下, 两者吻合程度较好。对于很稀薄的雾, 由于含水量测量不准, 大气能见度数值也较大, 目测误差较大, 所以两者吻合程度较差。另外观测到的海雾的含水量在0.002~0.2g/m³, 在这区间之外需要更多的观测数据来确定。

1.2 华南沿海海雾的微物理特性的观测与分析

2007年3—5月, 中国气象局广州热带海洋气象研究所在广东茂名博贺进行了为期3个月的海雾观测试验, 并且捕捉到2007年3月24—25日华南沿海发生的一次海雾过程。广东茂名博贺位于华南沿海的粤西地区, 是南海发生海雾的主要地区之一。2007年3月24日06时左右观测点的大气能见度下降, 海雾开始发生, 中午消散后傍晚又生成, 并持续到25日11时前后。海雾发生期间, 自动气象站、大气能见度仪、系留探空系统和“三用滴谱仪”等设备对大气能见度、大气边界层结构和雾滴谱等有关特征参量进行了观测。其中, 海雾滴谱分布特征和由雾滴谱数据推算含水量的计算依据的是王鹏飞等的方法^[20]。

此次海雾过程是由于大气低层西南低涡逐渐发展南下, 同时海上副热带高压加强西伸, 二者共同作用下偏南风加强, 使暖湿气流不断地输入到华南沿海地区形成的。来自海上的暖湿空气平流到沿岸水温较低的海面上形成的平流冷却雾。850hPa天气图显示粤西沿海地区位于大陆冷高压、副热带高压与西南低涡、东亚大槽组成的鞍型场中, 而鞍型场控制下的大气往往呈现稳定或中性层结^[1]。

粤西海雾的大气边界层垂直结构特征在冷平流海雾(海表面气温低于海表面水温)和暖平流海雾(海表面气温高于海表面水温)也有所不同, Huang等^[21]

分别针对这两类海雾的大气边界层特征进行了比较系统的分析，认为大气边界层结构的不同与背景环流、雾顶长波辐射和海气界面热量、动量通量有关。

1.3 福建海雾的观测和分析

Li等^[18]利用福建省北部距离海岸14km的崙山岛风塔上(26°57'N, 120°21'E)分别安装在海平面以上390、410、430和450m高度上四个超声风速仪的观测资料，对2011年3月21日02—11时的一次海雾事件进行了仔细分析。研究发现，大气湍流对雾的形成和消散起着至关重要的作用，然而这种湍流的研究通常仅限于超声风速仪低于地面100m以下的观测，较高层雾的湍流特性知之甚少。在该研究中，作者使用了高于海平面约400m的风塔上超声风速仪观测的四个高度层上的数据，并利用这些数据刻画了一次浓雾雾顶上的大气湍流特性，在海雾演变过程中湍流特性的巨大差异被记录下来。结果表明，在雾发生的初期，动能、动量通量以及湍流显热通量迅速增加，之后，在雾的上层可以观测到强的湍流，只要湍流强度不超过临界值，它对于提高冷却速度并保持雾是至关重要的。在雾的生成期间，由湍流所产生的垂直动量通量和感热通量会减弱风速并降低空气温度；在雾的消散阶段，感热通量的垂直分布会发生逆转，在上层会产生向下的动量通量；在雾发生期间，湍流涡的空间和时间尺度比雾发生前和发生后都大。相比低层的雾(390和410m)湍流能量在上层(海平面430和450m)最大，湍流能量的峰值沿平均风方向。研究结果表明，湍流状态在雾层内是复杂的，湍流会使得雾层顶部的动量和感热通量通过减少或增加平均风速，以及提高或降低空气温度的层结来影响雾。

1.4 各地雾的微物理结构特征比较

表1给出了浙江舟山、青岛小麦岛海雾以及云南勐养、重庆等地辐射雾的微物理结构特征对比结果。

表1 各地雾的微物理参量比较

Table 1 Comparison of the micro-physical parameters between different fog cases

观测地点	观测时间	平均数密度/ (个/cm ³)	算术平均直径/ μm	含水量/ (g/m ³)
广东博贺	2007年3月24—25日	56.3	5.20	0.041
青岛小麦岛	1993年6月29—30日	33.8	4.56	0.005
青岛小麦岛	1993年7月2日	143.2	4.45	0.080
浙江舟山	1985年4—5月	37.1	22.10	0.370
云南勐养	1997年11月2—29日	222.0	8.10	0.110
重庆	1989年1月至1990年1月	606.0	3.20	0.070

2 海雾与层云关系的研究

海雾可以看作是底部接海的云，因此海雾与层云

关系的研究受到了学者们的重视。利用观测资料和数值模式，Li等^[22]研究了2011年6月3日发生在黄海和东海的一个海雾与层云转化的事件，研究关注背景环流和“海洋锋”(即海表面温度锋)对层云转化为雾的影响，与高压天气系统相伴随的南风把水汽传送到黄海，为海雾/层云形成创造了有利条件，与高压天气系统相伴随的下沉气流在层云顶部形成一个逆温层，“海洋锋”在大气边界层内驱动一个次级环流，在“海洋锋”低温一侧的次级环流下沉分支会促使层云进一步降低高度到达海面。冷海面的冷却效应抵消了与下沉气流相伴随的非绝热增温。伴随着“海洋锋”逐渐变得平滑，次级环流会逐渐变弱并且海雾面积也迅速收缩。他们提出了一个黄海和东海的层云转化为海雾的概念模型。分析表明，在全球变暖的大背景下，伴随“海洋锋”逐渐平滑和次级环流下沉分支的逐渐变弱，海雾发生频率可能会逐渐变少。

张苏平等利用多种观测数据和数值模拟结果对2011年3月12—13日的一次黄海海雾过程进行分析^[23]。观测数据分析表明：此次过程与东海层云之间存在密切的联系。地面高低压位置为水汽从层云区向北输送提供了有利的环流条件；黄海上空天气尺度下沉运动，加强了海洋大气边界层(MABL)层结的稳定性，MABL顶自南向北高度降低，有利于水汽在向北输送过程中不断向海面聚集；下沉导致的干层以及逆温层对海雾的发生发展起重要作用。模式结果进一步表明，天气尺度下沉运动与MABL内的下沉在29°~30°N同位相叠加，使得该海区上空的下沉运动明显增强，大气边界层高度迅速下降。下沉可能会导致气块温度升高，云滴蒸发，来自层云区的水汽随流场向北向下输送逐渐接近冷海面凝结成雾，近海面水汽的平流输送使海雾进一步向北发展。

3 北太平洋和大西洋上海雾发生频率的气候学特征

北太平洋和大西洋上海雾发生频率的气候学特征受到海雾研究者的关注。宋亚娟利用ICOADS(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)观测资料，对北太平洋以及东亚海域海雾的发生频率进行了分析，并对海雾发生时的多种气象要素特征进行了研究^[24]。在不同格距(北太平洋上格距为2°×2°，东亚海域为1°×1°)的网格上计算了网格内大气能见度低于1000m时的“海雾发生相对频率”，进而对研究海域内的海雾频率时空分布特征进行详尽的描述。利用1909—2008年共100a的资料对北太平洋上海雾发生频率的分析表明，海雾主要发生在中高纬

度海域,从北海道至千岛群岛并延伸到阿留申岛以南海面的带状海域是海雾的频发地带,海雾发生最高频率在40%以上,其次为中国近海和日本海海域。在低纬度海洋上海雾发生频率几乎为零。4—8月是北太平洋上海雾发生频率较高的季节,海雾发生频率大值区随季节变化而移动。中国的渤海、黄海、东海和南海均受到海雾影响,但海雾主要发生在黄海以及东海和渤海的部分海域。4—7月是海雾频发的季节,雾季中海雾频率逐渐增大,6月时黄海西北部即山东半岛以南海域海雾最大频率达到20%。进入8月后,整个海面上海雾发生频率突然降低到5%以下。从时空变化上来看,从南至北雾区有逐渐延迟的特点。

作者还对北太平洋和中国近海海域的若干条重要航线上的海雾发生频率的时空变化进行了分析,为海上航运提供安全保障信息。另外还使用1982—2008年的ICOADS资料,对海雾发生时的风向、风速、气温和露点温度差、气海温差等气象要素进行了分析。发现当海上大气能见度小于1000m时,千岛群岛以东海域和我国近海风向主要以南风为主,其次为东南风和西南风。大洋上风速在3~6级,黄海上风速略小,多数在3~5级。不论在哪个海域,海雾发生时气温接近于露点温度,甚至有部分低于露点温度,表明空气中湿度较大,水汽含量多。海气温差是影响海雾发生的重要物理因素。通过对27a上万次的海雾报告分析,给出了海雾过程中不同海域上气海温差的范围分布。研究表明,北太平洋千岛群岛以东海域上气海温差多在-1~3℃,中国近海海面上适合海雾发生发展的气海温差介于-1~2℃。

Zhang等^[25]的研究发现,7月北海道以东的中纬度西北太平洋海区(40°—50°N, 140°E—170°W)海雾频发的主要原因是西北太平洋副热带高压西侧偏南风将暖湿气流向北输运,越过黑潮延伸体迅速冷却的结果。当副热带高压位置偏东,大量暖湿气流向中纬度西北太平洋输送,同时该海区有高压脊加强导致边界层稳定性增强的年份,海雾偏多;反之,当副热带高压位置偏西偏南,中纬度西北太平洋低压槽加强的年份,海雾发生频率较少。在全球变暖的条件下,该海区海雾频率有下降的趋势。

王冠岚利用同样的资料和方法,分别对北太平洋和北美东海岸海雾发生频率的时空分布特征进行研究^[26],并对在海雾发生过程中起重要作用的各海洋与气象要素特征进行统计分析。作者也利用1909—2008年这100a的ICOADS资料分析了北大西洋海雾发生频率的分布特征,发现海雾主要发生在中高纬度海区,海雾发生频率西部高东部低。海雾频发区位于纽约

长岛至纽芬兰岛附近及以东海域,海雾发生最大频率超过30%。冰岛以东挪威海海域也常有海雾发生,低纬度海域几乎无海雾。北大西洋海雾主要发生在4—8月,7月为海雾鼎盛期。北美东海岸受海雾影响范围主要在纽约以北至拉布拉多海海域,雾区呈现折线形,海雾发生频率具有两个大值中心,分别位于新斯科舍省以南海域和纽芬兰岛以东海域,圣劳伦斯湾为海雾发生频率低值区。雾季为4—8月,其中6—7月为海雾频发期。还对北大西洋及北美东海岸5条重要航线(纽约—伦敦、迈阿密—伦敦、直布罗陀—纽约、迈阿密—波士顿、迈阿密—哈利法克斯)的海雾发生频率进行时空分析,对跨北大西洋两岸的航线进行不同路径对比分析,根据海雾发生频率高低选择合理路径,减小海雾影响。同时使用1982—2008年的ICOADS资料,对长岛至纽芬兰岛附近及以东海域和纽芬兰岛至大不列颠群岛附近海域两个区域海雾发生时的风向、风速、气温和露点温度差、海表面温度以及海气温差等海洋、气象要素的特征进行统计分析。海雾发生时,长岛至纽芬兰岛及以东海域主要风向为偏南风,风速为8m/s左右,风力以3~6级为主。海表面温度为5~15℃时为最适宜海雾的生成;当海表面温度大于25℃时,无海雾发生,空气温度与海表面温度差多在-1~3℃,气温高于海温的频率在55%~70%,表明海雾以平流冷却雾为主。冰岛至大不列颠群岛海域,海雾发生时的主要风向为偏南、偏东风,风速为7m/s,风力以3~5级为主。海表面温度为5~15℃时,最适宜海雾的生成;海表面温度大于20℃时,海雾不易发生,空气温度与海表面温度差以-1~2℃为主。

4 海雾的数值模拟研究

雾是发生在大气边界层内动力和热力过程十分复杂的一种天气现象,依赖常规观测资料研究雾的发生发展机制十分困难。随着计算机数值模拟技术的迅速发展,数值模式成为研究雾越来越重要的有力工具。伴随中尺度大气模式的发展,雾的数值模拟研究也经历了一维、二维到三维高分辨率区域模式研究的过程。

4.1 一维模拟

Fisher等^[27]首次利用一维数值模式对陆地辐射雾进行了模拟,虽然模式没有考虑辐射、液态水的蒸发等物理过程,但其证明了使用数值模拟方法对雾进行研究是可行的。Musson-Genon使用大气边界层一维模式模拟了1977年8月荷兰北部地区Cabawu一次辐射雾过程^[28],模式的物理过程考虑了长短波辐射以及次网格尺度的凝结过程。结果表明,湍流对雾形成与输送

起着重要的作用。Duykerke^[29]建立了一个一维模式研究辐射雾，对植被参数作了特别处理，该参数对气温，尤其是对地温有很大影响。该模式清楚地描述了湍流交换、长波辐射冷却以及在雾发展过程中的重力液滴所带来的影响。

20世纪80年代中期开始，我国学者逐渐使用一维模式对陆地辐射雾开展研究。周斌斌利用一维模式对辐射雾的形成和发展过程进行了数值模拟研究^[30]，模拟结果表明：辐射雾形成后会改变环境风、温度场，反之，风、温度场的改变又影响了辐射雾的发展；辐射雾的发展是在湍流场和辐射场的相互作用下引起的，湍流作用是决定辐射雾形成、发展的重要因子，它一方面阻碍了辐射雾的形成，另一方面它又能促进已形成的雾的发展。彭虎等使用包含详细微物理过程的一维辐射雾模式对发生在重庆的雾进行了模拟研究^[31]，模拟的温度场在低层与观测一致，模拟的雾与观测到的雾的发展趋势相符合。尹球等建立了包括辐射散射参数化方案并较完善地考虑碰并过程微物理方案的一维模式^[32-33]，利用数值模拟结果对陆地辐射雾的生消机制给出了清晰的物理图像。

4.2 二维模拟

由于一维模式存在较大的局限性，如果考虑平流和下垫面等因素的作用，就需要借助于二维模式进行研究。张利民等对重庆地区雾使用二维非定常模式进行了研究^[34]，考虑了长波辐射、地表热收支、雾水沉降和湍流的综合作用，这种模式突出了地形分布、水陆分布、城市热岛等因素在陆地雾形成时的作用以及对雾水平分布的影响。胡瑞金等建立了二维海雾数值模式^[35]，指出黄海、东海海雾生成的机制主要是长波辐射冷却，湍流混合主要发生在海雾的初始阶段，且限于低层。

胡瑞金等使用相对湿度方程和理想的二维数值模式研究了在海雾生成过程中平流、湍流和辐射的效应^[36]。结果表明，海雾生成的主要推动力是长波辐射冷却，湍流冷却在低层主要发生在平流的初始阶段。随着时间的推移，湍流对低层大气很快变为加热作用，不利于海雾的生成。湍流和辐射效应在低层大气中符号相反（仅在海雾生成的初始阶段符号相同）、量级相同，在高层大气中湍流和辐射效应符号相同，但辐射效应占优势。湍流效应和辐射效应是影响海雾生成的主要因素，平流直接作用似乎不大。这种研究方法同时突出了平流、湍流和辐射在海雾形成中的作用，较前人的研究有所进步。但对实际海雾的模拟必须依靠三维数值模式进行。

4.3 三维模拟

与研究其他的天气系统面临同样的问题，即模式的初始场对雾的模拟结果有重要影响。雾是发生在大气边界层内的现象，模式中的大气边界层方案对雾的模拟也是影响雾模拟结果的重要因素。目前比较成熟的几个中尺度数值模式，如MM5、RAMS、WRF和COAMPS等都具有较完善的大气边界层及辐射方案，逐渐成为各国学者研究雾/海雾的重要工具。中国学者开展海雾三维数值模拟研究工作大体可以分为两个阶段：初期的单纯数值模拟工作和后期的数值模拟与数值试验工作。

4.3.1 初期的数值模拟工作

初期的海雾三维数值模拟研究工作以“模拟的相”为主要目的。傅刚等较早地开展了海雾的三维数值模拟研究^[2]，他们利用一个考虑了地形效应、植被影响、长波辐射、地表能量收支、液态水的重力沉降等影响雾的形成和发展主要因子的三维海雾模式，模拟了1995年6月1日发生在黄海的一次实际海雾过程，分析了海雾生长、发展和消亡过程中液态水含量和其他物理量的三维时空分布变化特征。结果表明模式的模拟结果在相当程度上反映了平流冷却雾的形成过程，且该模式能较好地模拟出黄海海域实际的海雾生消过程，对海雾的三维结构有一定的模拟能力。

每年春夏是黄海海域海雾频繁发生的季节，2004年4月11日早上，一次浓密的海雾事件出现在山东半岛周围，这片雾区的空间尺度为几百千米，持续了20多个小时，在一些地方大气水平能见度小于20m，引起了一系列的交通事故，在一条高速公路的沿海路段导致12人受伤。Fu等利用各种观测数据，包括GOES-9卫星图像资料、NCEP客观再分析FNL资料、探空资料以及RAMS-4.4区域大气模式来研究这次海雾个案^[37]；利用GOES-9和NOAA-14可见光卫星云图对海雾的发生范围、演变过程等进行了描述，并对海雾发生前的大气背景场和气海温差场进行了分析；利用青岛和韩国济州岛2个站的探空资料对海雾发生时低层大气的稳定度进行了分析；设计了4km×4km分辨率的RAMS数值模拟。该模式的初始场由FNL资料提供，并用该数据对模拟结果进行验证。从2004年4月10日18时（UTC）开始的积分30h的数值模拟抓住了此次海雾事件的主要特征，模拟的低大气水平能见度区域与从卫星云图所显示的海雾区域吻合得非常合理，平流冷却过程似乎对此次海雾的形成起重要作用。

4.3.2 数值模拟与数值试验工作

在三维海雾模拟能抓住海雾事件的主要特征的基

基础上,研究者开始考虑利用数值模式开展海雾的数值模拟与数值试验工作。樊琦等使用MM5模式对2002年8月21日珠江三角洲地区的辐射雾进行了模拟^[38],结果表明,地面长波辐射冷却是辐射雾形成的主要机制,而太阳短波辐射则是辐射雾消散的主要原因,如果关闭长波辐射,辐射雾就不能形成。如果关闭太阳短波辐射,辐射雾的消散就要推迟。增加模式的垂直分辨率对模拟雾的垂直结构有明显的改善。模式中的下垫面改变为比较真实的城市类型后,雾的消散时间变得与观测比较一致。

王菁茜对2005年3月27日黄渤海海上的一次海雾事件进行了数值模拟研究^[39]。利用GOES-9, MODIS, NOAA和FY-1D可见光卫星云图对海雾发生的范围、形态及变化进行了观测;利用NCEP提供的FNL资料,对海雾发生时的天气形势、气海温差和水汽的南北输送进行了分析;之后,利用RAMS数值模式对此次海雾事件进行了数值模拟,并计算了水平能见度。结果表明:大气能见度水平分布与卫星云图所显示的雾区分部吻合较好,但模拟得到的雾区较大,海雾的出现时间较实际观测出现时间延迟4h左右。大连站模拟大气能见度的变化与地面观测能见度值的变化趋势相一致,模拟大气能见度值显著偏小。此外根据模式结果分析了海表面温度与露点温度的关系,并由此设计了海温(SST)敏感试验。分别对海温进行升高2°C、升高2.5°C、降低3°C,以及将其替换为2m高度上的气温的试验。试验表明:适当升高海温有利于雾的发展,海雾的面积相对较大,垂直高度也较高。当海温升高2.5°C时无海雾生成,过度升高SST破坏了气海温差条件,使下垫面不能起到有效的冷却作用。较低的海温对海雾发展有抑制作用,不利于海雾的垂直发展,海雾消散时间也相对滞后。当用2m高度上的气温代替SST时没有海雾生成,表明海表面温度与低层大气之间存在一定的温度差是海雾生成的必要条件。

Gao等^[40]对2005年3月9日发生在黄海的一次海雾事件进行了研究。该研究利用NOAA-16和GOES-9卫星云图、地面观测资料、海岛和沿海地区探空资料、日本气象局格点观测资料来分析这一海雾事件。结果表明,该海雾可以被归类为平流冷却雾,海雾区域和运动主要特点可以用MM5模式合理地再现。该研究的主要发现是,海雾在相对持久的暖湿的偏南风 and 冷海表面上易于形成,由风切变引起的湍流混合是海洋上大气边界层降温 and 增湿的主要机制。此外敏感性试验

研究表明,数值模拟可以为黄海海雾的预报提供一个有前途的方法。但由于数值模拟结果对模式输入极为敏感,数据同化显得十分重要^[50-51]。

Zhang等对黄海春季海雾和夏季海雾进行了比较系统气候态和个例的对比分析^[41],进一步发现海洋大气边界层稳定性、海气界面的稳定性和海雾厚度的不同与春季和夏季背景环流差异导致雾顶长波辐射强度不同有关。

5 海雾的数据同化和集合预报研究

从全球视野来看,海雾的发生有非常显著的区域性,如加拿大东岸的纽芬兰海域、堪察加半岛以南的海域、美国西岸的加利福尼亚海域、英国苏格兰东北岸海域以及我国黄海等皆是海雾的多发区^[1,42]。国内外海雾的研究也主要集中于这些海域。已有的国内海雾研究大致可以分为3类:海雾微物理特征的研究、海雾时空分布特征的研究,以及海雾形成机制的研究。根据这些研究成果,我们可以这样定义,中国近海海雾是在东亚季风气候背景支配下,由高低压天气系统控制且受海洋影响,发生在海上大气边界层底部的一种水汽凝结导致大气水平能见度低于1km的大气现象。在凝结过程中,近海面的湍流混合、雾顶的长波辐射对海雾的演变起着重要的作用。

20世纪70—80年代,为了获取有关海雾形成的海上大气边界层的详细信息,美国与英国实施了一系列的海雾外场观测计划。其中比较著名的有CALSPAN, CEWCOM与Project Haar^[43-45]。这些外场观测计划拓宽了人们对海雾的认识视野。与此同时,利用这些外场观测数据,开展起了海雾形成机制的数值模拟研究^[45-48]。它们不仅丰富发展了早期的海雾形成机制猜测,还发现了其他新机制,并且第一次尝试了海雾的数值预报^[49]。

有三个主要问题将直接影响海雾的数值模拟质量:大气边界层湍流方案、云微物理方案、初始场。已有的数值模拟研究工作表明:对于前面两者,在模式提供的众多选项中挑选合适的方案,一些较典型的黄海海雾过程可以很成功地模拟再现,如Gao等^[40]采用了MM5模式的研究个例。但当我们再次使用与文献[40]相同的模式分辨率与物理方案运行MM5模拟其他典型黄海海雾个例时,却得不到较理想的结果。究其原因,这很可能是由模拟初始场的质量问题所致。因此,改进海雾数值模拟初始场质量(即海雾的数据同化)应该高度重视,是必须先行的研究任务之一。

① CALSPAN: Cornell航空实验室与海军研究生院合作进行的美国加利福尼亚海岸外场试验; CEWCOM: 美国西海岸海洋与气象学合作试验; Project Harr: 海雾研究计划(Harr是苏格兰东北部海雾的当地叫法)。

只有高质量的初始场才能保证对控制海雾形成的天气系统与大气边界层状态演变过程的准确刻画，才能更好地进行海雾的演变机制研究。

为了充分发挥常规观测探空、地面观测数据的作用，高山红等基于WRF模式及其先进的3DVAR同化模块，设计并构建了循环3DVAR同化方案^[50]。此方案的目的是扩展海雾模拟之前的数据同化窗，让更多的观测数据被同化，从而改进初始场质量。以2006年3月6—8日的一次黄海大范围海雾过程为研究对象，他们利用该同化方案（3h循环一次3DVAR，同化窗为12h）进行了一系列WRF数值模拟对比试验。模拟结果显示，该同化方案能有效改进黄海海雾数值模拟初始场质量，主要体现在增加低层大气温度层结构的稳定性与改变大气边界层下层的风场结构，从而显著改善海雾的模拟结果。针对RAMS模式数据同化能力较弱的缺点，高山红等^[51]提出利用WRF循环3DVAR形成的初始场驱动RAMS模式的思路。RAMS数值模拟的结果表明，WRF循环3DVAR提供的初始场明显优于RAMS模式自身等熵面客观分析方法生成的初始场，它在动力与物理上非常协调且对模拟结果的改善相当显著。这说明WRF循环3DVAR可以为RAMS模式改进其初始场提供一条切实可行的途径。

随着观测技术的发展，雷达、飞机与卫星探测数据已经成为常规数据严重匮乏海域最主要的观测信息来源，特别是卫星数据，所占的比重越来越大。例如，欧洲中期数值预报中心（ECMWF）预报系统所同化的卫星观测数据所占比例达到90%以上。目前在国内，卫星数据在台风、暴雨等强对流天气系统的数值模拟与预报方面的同化研究与业务应用较多，而在具有“弱信号”特征的海雾数值模拟中的同化研究相当少，它们更多地被应用于海雾的监测^[7, 52]。李冉等^[53]在高山红等^[50]工作的基础上，利用循环3DVAR开展了黄海海雾数值模拟的TOVS辐射数据的同化研究。他们针对6次明显的黄海海雾过程，实施了一系列直接同化ATOVS卫星辐射数据的数值试验。结果表明，分别单独同化常规观测数据与卫星辐射数据对模拟雾区的影响互有优劣。总体平均而言，同时同化它们所给出的模拟雾区最好。

李冉等^[53]的研究还发现，尽管同化卫星辐射数据后海上大气边界层的温度结构得到了改善，但是湿度场几乎没有改进。Wang等^[9]提出了一种改进湿度场的思路：如果模拟起点之前已经发生了一片海雾，那么利用MTSAT卫星的红外和可见光卫星探测数据反演这片海雾的水平分布与垂直厚度信息，然后假定海雾

雾体内部的相对湿度为100%，将此湿度信息利用高山红等^[50]构建的循环3DAR方案加以同化。他们首先选取了2个典型海雾个例将此思路付诸于数值预报试验，详细分析了同化效果及其改进的原因。然后进行了10个海雾的同化试验，进一步评估了该方法的综合效果。个例一海雾发生面积大且广泛分布于黄海上，个例二仅局限于青岛沿岸。结果显示，同化海雾湿度信息后，前者的预报雾区集中率POD（Probability of Detection）与公正预兆得分ETS（Equitable Threat Score）分别提高了20%与15%。对于后者，若不同化，海雾则无法预报出来。多个例的数值试验中同化过程运行稳定，12h同化窗的结果显示，POD与ETS的平均改进率分别为76%与72%，大气边界层内的比湿与温度分别改进了16%与9%。Wang等^[9]提出的方法对于海雾的数值业务预报非常有用，因为预报模式每天运行少则2次多则4次，如果碰到海雾天气，其中至少有1次预报的模拟起点之前一定存在海雾。除了通过数据同化手段提高海雾数值模拟的初始场之外，还必须选择合适的大气边界层（PBL）方案与云微物理（CMP）方案。陆雪等利用2005—2011年10个春季黄海海雾个例^[54]，开展了WRF模式的PBL方案与CMP方案的敏感性研究。总体来讲，PBL方案对WRF模式雾区模拟结果起决定性作用，而CMP方案影响较小，主要影响海雾的浓度和高度。大气边界层方案与微物理方案的最佳组合为YSU方案与Lin方案，最差为Mellor-Yamada方案与WSM5方案。Mellor-Yamada方案和QNSE方案模拟的近海面湍流过强，导致大气边界层过高，不利于海雾的发展与维持。而MYNN方案与YSU方案刻画的湍流强度与大气边界层高度合适，有利于海雾发展与维持。

一些研究工作^[9, 50-51, 54]皆是在事先确定好最优CMP，PBL方案以及SST的情形下得到的。陆雪等^[54]的研究表明，MYNN方案虽与YSU方案相当，但在大多数海雾个例中，后者明显优于前者，而在有些个例中却刚好相反。因此对于某一具体海雾个例而言，所用大气边界层方案仍需在他们之中选择最优者。这意味着在对一次海雾进行确定性预报之前，难以知道谁是最优的PBL方案。此外如果没有耦合海洋模式来进行SST的预报，那么在整个海雾数值预报过程中不得不采用固定不变的SST场，这极有可能严重影响预报结果。假若采用集合预报途径，初始场误差、CMP与PBL方案的选择以及SST场等问题，理论上讲皆可以迎刃而解。因为初始场集合体中可以包含不同的初始场误差，在预报过程中不同的集合成员可以采用不

同的CMP与PBL方案以及扰动的SST场。

在雾的集合预报方面，Zhou等的工作^[55]是开创性的。他们利用多模式的区域中尺度集合系统对中国东部的雾事件进行了连续8个月（2008年2—9月）的预报试验，结果表明集合预报，特别是多模式的集合预报可以比单一确定预报提供更全面的有用信息，基于集合预报的中值预报也可以大大地提高雾预报的准确性。现在雾的集合预报方法已在NCEP投入业务运行。在此工作的鼓舞下，高山红等基于WRF模式及其杂合三维变分（Hybird-3DVAR）同化模块，对2006年3月黄海海域发生的一次大范围海雾进行了集合预报尝试^[56]，详细分析了其预报效果，并与确定性预报结果做了比较。此次集合预报采用随机扰动法生成了40个初始成员，海温进行了扰动，在数据同化过程中借助杂合三维变分引入了来自集合体的“流依赖”背景误差信息。研究显示，集合预报50%概率雾区预报的ETS得分优于确定性预报29%左右，集合预报中加入海温扰动非常必要，它对浓雾预报改善作用显著，ETS至少提高10%。在集合预报中混用大气边界层YSU方案与MYNN方案的做法，可以降低只使用其中之一可能导致的预报误差。研究表明，借助Hybrid-3DVAR开展黄海海雾的集合预报技术上可行，集合预报将成为黄海海雾数值预报的一种有希望的途径。

6 结束语

本文对近30a来我国海雾研究领域的一些重要进展进行了回顾，并对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等重点问题进行了总结与讨论。然而必须指出，海雾研究还面临诸多困难和挑战，未来的海雾研究要想取得进展，海雾研究者还必须认真思考以下问题。

1) 海雾可以看作是和海面相接的云。众所周知，云雾的形成、演变和消散过程涉及非常复杂的微物理学过程和化学过程。未来加强对云雾的物理过程、化学过程以及海雾与气溶胶相互作用过程的深入认识，将是推动海雾研究向前发展的一个重要研究方向。

2) 海雾发生在海上的大气边界层内。我们对大气边界层的认识大多来自陆地上大气边界层的研究^[57]。由于缺乏足够的海上直接观测资料，我们对中国近海雾天气过程中的海上大气边界层的结构、海雾特性等认识程度还相当有限，这与美国、加拿大等发达国家尚有较大差距^[42, 58-59]。随着我国对海洋气象观测的逐步加强，如浮标站、自动站的布设和船舶观测资料的积累，有理由相信对海雾的认识程度会逐步加深。

3) 数值模拟不仅是海雾机制研究的重要手段，而且更是海雾客观预报的必然途径。目前被国内外研究者广泛使用海雾研究的数值模式，如RAMS，MM5与WRF等中的大气边界层与微物理方案并不是直接针对海雾研究而设计的。尽管海雾是接海的云，但它与一般意义上的云还是有很大区别。云通常可以看成绝热膨胀降温的产物，而海雾却是底部与海面之间通过湍流混合、雾顶通过长波辐射进行热量交换的一个非绝热过程的产物。因此大力推进能细致地刻画近海面湍流过程的大气边界层方案、精确描述气溶胶作用下雾顶长波辐射过程中的辐射方案，以及水汽凝结的微物理方案的改进工作，是我们亟待努力的重要研究方向。

4) 海雾主要发生在常规观测资料稀少的海上。因此一方面要利用先进的能够体现“流依赖”特性的数据同化方法（如ENKF，Hybrid-3DVAR，4DVAR等）充分消化吸收已有的常规观测的信息，另一方面要尽可能地同化大量分布于海上的非常规观测资料。同化的目的不仅仅是改进控制海雾的高低压天气系统，更重要的是要改善海上大气边界层内的湿度与温度分布状态。当然海雾对初始场、海温以及参数化方案的高度敏感性，决定了集合预报应该是今后要重点关注的一个研究方向。

5) 从社会服务的角度来看，我们不能只满足于海雾的机制研究，以及某片海域上海雾有无的预报。跟海雾有关的社会最迫切的需求是大气水平能见度的预报。因此如何从海雾的数值预报结果中进行大气能见度的准确诊断，是一个看起来简单，实际做起来却非常不易的工作。

6) 在太平洋西岸等的一些国家和地区，由于海雾是以与其相伴随的大气低能见度形式出现的，会对空中、海上和沿岸的交通运输带来严重影响，因此海雾是被当做“灾害”来研究的。在南部非洲的纳米比亚等国家的内陆沙漠地区，受海洋的影响每年有200多天会发生海雾。但由于沙漠地区淡水资源奇缺，这些常年滞留在空气中的雾是被当做珍贵的“空中水源”来对待的，有科学家研究不同材质的“俘获网”在空中取水的效率问题，期盼能利用高效率的“俘获网”从雾中获得更多的淡水资源。如何减少海雾带来的负面影响，提高其作为正面的淡水资源的利用效率？这是值得海雾研究工作者认真思考的另一个重要问题。

致谢：衷心感谢美国NCEP的杜钧博士对本文编写过程的关心和指导。

参考文献

- [1] 王彬华. 海雾. 北京: 海洋出版社, 1983: 1-352.
- [2] 傅刚, 张涛, 周发琇. 一次黄海海雾的三维数值模拟研究. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 859-867.
- [3] 傅刚, 王菁茜, 张美根, 等. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究——以2004年4月11日为例. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 720-726.
- [4] 周发琇, 王鑫, 鲍献文. 黄海春季海雾形成的气候特征. 海洋学报, 2004, 26: 28-37.
- [5] 鲍献文, 王鑫, 孙立潭, 等. 卫星遥感全天候监测海雾技术与应用. 高技术通讯, 2005, 15: 101-106.
- [6] Zhang S P, Xie S P, Liu Q, et al. Seasonal variation of Yellow Sea fog: Observations and mechanisms. *Journal of Climate*, 2009, 22: 6758-6772.
- [7] Gao S H, Wu W, Zhu L, et al. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huanghai Sea Using MTSAT-1R IR Data. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 28(2): 23-35.
- [8] Fu G, Zhang S P, Gao S H, et al. Understanding of Sea Fog over the China Seas. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [9] Wang Y M, Gao S H, Fu G. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea. *Weather and Forecasting*, 2014, 29: 205-225.
- [10] Li Y, Zhang S P, Thies X M, et al. Spatio-temporal detection of fog and low stratus top over the Yellow Sea with geostationary satellite data precondition for ground fog detection-A feasibility. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 212-223.
- [11] Wang B. Sea Fog. Beijing: China Ocean Press, Berlin: Springer-Verlag, 1985.
- [12] 李子华, 杨军, 石春娥, 等. 地区性浓雾物理. 北京: 气象出版社, 2008.
- [13] 牛生杰. 雾物理化学研究. 北京: 气象出版社, 2013.
- [14] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展. 中国海洋大学学报, 2008, 38(3): 359-366.
- [15] 牛生杰, 陆春松, 吕晶晶, 等. 近年来中国雾研究进展. 气象科技进展, 2016, 6(2): 6-19.
- [16] 徐静琦, 张正, 魏皓. 青岛海雾雾滴谱与含水量观测与分析. 海洋湖沼通报, 1994, (2): 174-178.
- [17] 屈凤秋, 刘寿东, 易燕明, 等. 一次华南海雾过程的观测分析. 热带气象学报, 2008, 24: 490-496.
- [18] Li Y, Zheng Y. Analysis of the atmospheric turbulence characteristics near the top layer of sea fog. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33: 809-818.
- [19] 赵柏林, 张霏琛. 大气探测原理. 北京: 气象出版社, 1990.
- [20] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989.
- [21] Huang H J, Liu H N, Huang J, et al. Atmospheric boundary layer structure and turbulence during sea fog on the southern China coast. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 1907-1923.
- [22] Li M, Zhang S P. Impact of sea surface temperature front on stratus-sea fog over the Yellow and East China Seas- A case study with implications for climatology. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(2): 301-311.
- [23] 张苏平, 刘飞, 孔扬. 一次春季黄海海雾和东海层云关系的研究. 海洋与湖沼, 2014, 45(2): 341-352.
- [24] 宋亚娟. 北太平洋海雾发生频率的气候学特征. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [25] Zhang S P, Chen Y, Long J C, et al. Interannual variability of sea fog frequency in the Northwestern Pacific in July. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 189-199.
- [26] 王冠岚. 北大西洋海雾发生频率的气候学特征. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [27] Fisher E L, Caplan P. An experiment in numerical prediction of fog and stratus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20: 425-437.
- [28] Musson-Genon L. Numerical simulation of a fog event with a one-dimensional boundary layer model. *Monthly Weather Review*, 1987, 115: 592-607.
- [29] Duynkerke P G. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations. *Monthly Weather Review*, 1991, 119: 324-341.
- [30] 周斌斌. 辐射雾的数值模拟. 气象学报, 1987, 45: 21-29.
- [31] 彭虎, 李子华. 包含详细微物理过程的一维辐射雾模式. 重庆环境科学, 1992, 14(3): 49-54.
- [32] 尹球, 许绍祖. 辐射雾生消的数值研究(I)——数值模式. 气象学报, 1993, 51(3): 351-360.
- [33] 尹球, 许绍祖. 辐射雾生消的数值研究(II)——生消机制. 气象学报, 1994, 52(1): 60-67.
- [34] 张利民, 李子华. 重庆雾的二维非定常数值模拟. 大气科学, 1993, 17: 750-755.
- [35] 胡瑞金, 周发琇. 海雾过程中海洋气象条件影响数值研究. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(3): 282-289.
- [36] 胡瑞金, 董克慧, 周发琇. 海雾生成过程中平流、湍流和辐射效应的数值试验. 海洋科学进展, 2006, 24: 156-165.
- [37] Fu G, Guo J, Xie S P, et al. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea. *Atmospheric Research*, 2006, 81: 293-303.
- [38] 樊琦, 王安宇, 范绍佳, 等. 珠江三角洲地区一次辐射雾的数值模拟研究. 气象科学, 2004, 24: 1-8.
- [39] 王菁茜. 对2005年春季黄渤海一次海雾的观测分析与数值模拟研究. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 1-69.
- [40] Gao S H, Lin H, Shen B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: Analysis and numerical modeling. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1): 65-81.
- [41] Zhang S P, Li M, Meng X G, et al. A comparison study between spring and summer fogs in the Yellow Sea: Observations and mechanisms. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169 (5/6): 1001-1017.
- [42] Lewis J M, Koraćin D, Redmond K T. Sea fog research in the United Kingdom and United States: A historical essay including outlook. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 395-408.
- [43] Mack E J, Katz U, Rogers C, et al. The microstructure of California coastal stratus and fog at sea. *Calspan Corp Rep, CJ-5405-M-1*, 1974.
- [44] Pilić R, Mack E, Rogers C, et al. The formation of marine fog and the development of fog-stratus systems along the California Coast. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18: 1275-1286.
- [45] Findlater J, Roach W, McHugh B. The haar of North-East Scotland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1989, 115: 581-608.
- [46] Barker E H. A marine boundary layer model for the prediction of fog. *Boundary Layer Meteorology*, 1977, 11: 267-294.
- [47] Oliver D, Lewellen W, Williamson G. The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35: 301-316.
- [48] Nicholls S. The dynamics of stratocumulus: Aircraft observation and comparison with a mixed layer model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1984, 110: 783-820.
- [49] Ballard S, Golding B, Smith R. Mesoscale model experimental forecasts of the haar of northeast Scotland. *Monthly Weather Review*, 1991, 119: 2107-2123.
- [50] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环3DVAR改进黄海海雾数值模拟初始场. I: WRF数值试验. 中国海洋大学学报, 2010, 40(10): 1-9.
- [51] 高山红, 张守宝, 齐伊玲, 等. 利用循环3DVAR改进黄海海雾数值模拟初始场. II: RAMS数值试验. 中国海洋大学学报, 2010, 40(11): 1-10.
- [52] 张纪伟. 基于MODIS的黄海海雾研究. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [53] 李冉, 高山红, 王永明. 直接同化卫星辐射数据的黄海海雾数值试验研究. 中国海洋大学学报, 2012, 42(3): 10-20.
- [54] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄海海雾WRF参数化方案敏感性研究. 应用气象学报, 2014, 25(3): 312-320.
- [55] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. *Weather Forecasting*, 2010, 25: 303-322.
- [56] 高山红, 王永明, 傅刚. 一次黄海海雾的集合预报试验. 中国海洋大学学报, 2014, 44(12): 1-11.
- [57] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [58] Lewis J M, Koracin D, Rabin R, et al. Sea fog off the California Coast: Viewed in the Context of Transient Weather Systems. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D15): 4457, doi:10.1029/2002JD002833.
- [59] Koraćin D, Dorman C E, Lewis J M, et al. Marine fog: A review. *Atmospheric Research*, 2014, 143: 142-175.

航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报

周斌斌^{1, 2} 蒋乐¹ 杜钧²

(1 I. M. Systems Group公司, 美国; 2 美国国家海洋和大气管理局, 美国)

摘要: 简述了对航空运输有危害的天气要素, 包括航线要素和航站要素的业务预报。着重介绍了在美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 业务模式后处理中, 能见度的两种诊断方法和雾的三种后处理再诊断方法。能见度计算的第一种方法是Stoelinga-Warner方法。该方法要求预报模式有四种水溶性物质的输出。通过这些水凝性物质计算消光系数来估算水平能见度。第二种方法是第一种方法的改进, 包括增加了更多的水凝性物质, 用相对湿度估算高湿度时或霾条件下的能见度, 考虑了白天和夜间能见度的不同等。还讨论了以机场跑道为背景的跑道能见度的估计方法。雾的再诊断包括美国联合包裹速递服务公司 (United Parcel Service, UPS) 的方法, NCEP的多重规则法和根据雾内各物理过程间的平衡进行诊断的方法。UPS法根据低层大气稳定指数, 多重规则法则根据模式输出的能见度、云、相对湿度和风速来诊断雾的发生, 但两者均不能判断雾的强弱。物理过程平衡法是根据Zhou-Ferrier的雾层平衡理论所提出的雾发生及稳定时湍流强度小于某临界值的必要条件以及雾层内含水量的垂直分布公式对雾含水量及能见度进行诊断。后两种方法已被试验性地用于NCEP的短期集合预报中。预报验证表明, 后处理中雾的再诊断方法可以有效地提高业务模式雾的预报能力。但总体而言, 雾的预报与其他常规要素的预报相比, 现仍处于较低的水平。最后讨论了模式对能见度和雾预报能力低下的原因和改善的途径。

关键词: 航空气象, 数值预报, 模式后处理诊断, 能见度, 雾

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.003

Aviation Weather and Model-Based Operational Forecasts of Low Visibility and Fog

Zhou Binbin^{1,2}, Jiang Le¹, Du Jun²

(1 I. M. Systems Group, Inc. U.S.A. 2 Environmental Modeling Center, NCEP/NWS/NOAA, U.S.A.)

Abstract: This article introduces the operational predictions of hazardous weather elements to aviation both en-route and in TAF. Two visibility algorithms and three fog diagnostic schemes used at NCEP are discussed in particular. The first visibility algorithm is Stoelinga and Warner method. This method requires outputs of four hydrometeors from a model to estimate optical extinction coefficient and calculate visibility. The second visibility method is an upgrade to the first one by adding more species of hydrometeor. This method can also estimate visibility in high humidity and haze conditions without knowing hydrometers as well as considering the differences between daytime and nighttime. The concept of airport Runway Visibility Range (RVR) is introduced and the relationship between the RVR and horizontal visibility range (HVR) is given. The fog diagnosis includes the UPS method, multi-rule method and physical-process balanced method. The UPS method uses surface-layer stability index. The multi-rule method uses a combination of visibility, cloud, surface humidity and wind speed to diagnose fog occurrence. These two methods do not predict fog intensity. The third method can diagnose both fog occurrence and intensity. It is based on the turbulence condition for fog formation and persistence as well as the explicit formulation of fog liquid water content suggested by a fog's physical balance theory. Both multi-rule and physical-process balance methods have been implemented operationally in the NCEP's regional ensemble forecast systems and showed encouraging results. However, the current skill of low visibility and fog forecasts directly derived from a numerical weather prediction model is generally low comparing to the forecasts of other weather elements such as precipitation. The difficulties are discussed and the ways of improvement are also suggested.

Keywords: aviation weather, numerical weather prediction, model post diagnosis, visibility, fog

收稿日期: 2015年3月26日; 修回日期: 2015年7月27日
第一作者: 周斌斌 (1958—), Email: binbin.zhou@noaa.gov

0 引言

和普通气象预报相比, 现代民用航空对重要 (即对空运有影响的) 天气预报有更高的实时性与准确性

的要求。民用航空由机场、航空公司和空中交通管制（空管）组成。在这样一个讲究安全与效率的实时繁忙的系统中，许多在普通气象中不十分重要的天气现象也会对民航运营产生重大影响，甚至造成大面积的航班延误，导致非常大的直接与间接经济损失。以美国为例，过去10年中有65%~70%的航班延误都直接与天气有关^①。而在所有因天气造成的航班延误中，24%是因为雷雨，17%因为能见度，14%因为风，14%因为低云，9%因为雪，8%因为冻雨，7%因为积冰，7%因为颠簸。如果将低云和能见度放在一起，其影响占整个天气对航班正点率影响的31%^[1]。在所有天气要素当中，由低云和低能见度造成的航空事故伤亡率占最大的比例^[2]；而每年由雾造成的航运经济损失比龙卷风还要高^[3]。

现代商业民用机场，特别是符合国际民航组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）规范的大中型机场，大都配备了自动天气观测系统（AWOS）和跑道视程系统（Runway Visual Range, RVR），（有些机场还配有专业的人工观测人员），能够对云量、云高和跑道能见度进行实时观测。提供及时的临近预报与预警。但是这些观测系统，不能对较长时效的预报（如两小时以上到两三天的预报）提供可靠的指导作用。所以当今发达国家的业务预报，是以数值天气预报和数值预报模式后处理产品为基础的业务天气预报。这和许多发展中国家的基本依赖于人工的以天气图为基础的经验加外推式的预报有着巨大的质的区别。尤其对于民用航空运营，需要机场，航空公司和空管以分钟和小时来动态地把握天气信息，以合理计划与调整在有限空域中航班的空中流量与机场起降。所以重要天气预报的实时化（包括实时快速更新）、准确化和定量化极其重要。这种民航空运业务的要求，已经超过了人工定性经验加外推式预报的极限。自2000年以来，中国民用航空快速发展，但是随着航班量的增大，相对落后的航空气象预报能力成为民用航空进一步发展的巨大制约。本文的讨论，将在基于数值天气预报业务的框架中进行，将综合介绍与航空气象预报有关的重要要素预报，并着重介绍地面大气能见度和雾在NCEP业务模式预报中的诊断方法。

1 航空气象要素预报简介

考虑到航空气象要素的特殊性，航空气象要素预报产品主要从预报模式的一些通用模式输出量再进

行特殊的后处理来产生，这样做的优点是不需要有专门的航空气象预报模式。从其对航运的影响，可分为航路天气要素和航站（机场终端）天气要素预报（Terminal Aerodrome Forecast, TAF）^[4]。从气象要素预报的时效来看，航空气象在很大程度上更加关心的是临近预报（即实时到两小时以内）和短期预报（如2~18h，或到两三天以内），并且强调及时的预报更新，如已经由ICAO附件三规范的大范围航路重要天气预报（Signification Weather Chart），时效6~12h，每6h更新一次；机场（终端区）天气预报时效有6，12和24h，每3~6h更新一次。在美国，目前这些指导预报（Forecast Guidance）是从NCEP的北美中尺度模式（North America Mesoscale, NAM）^[5]，快速更新模式（Rapid Refresh, RAP）^[6]，以及2014年刚刚业务化的高分辨率快速更新模式（High Resolution Rapid Refresh, HRRR）^[7]以及短期集合预报系统（Short Range Ensemble Forecast, SREF）^[8]和用时间滞后技术建立的北美快速更新集合预报（Time-Lagged North America Rapid Refresh Ensemble, NARRE-TL）^[9]中产生。预报员在这些指导预报的基础上再加工出最终的预报产品，使预报业务的效率大大提高。

1.1 航路天气要素及其预报

航路天气要素指在巡航飞行过程中对飞行器产生有害影响的天气要素，包括对流、雷暴、结冰、湍流（颠簸）和飞行约束分类等。在飞行航路控制和航运管理上，美国联邦航空管理局（Federal Aviation Administration, FAA）和ICAO都规定飞行员在飞行之前必须了解航路上有害天气状况，必要时对飞行路线做适当调整来绕过重要天气区域或高度，提高飞行的安全性。

对流和雷暴对飞行的影响包括强上下垂直气流和闪电。在业务预报中通常由对流云和对流性降水的位置和强度来表示。目前由于天气雷达的广泛应用，业务模式也可产生模拟的雷达回波强度以及反映对流云高度的回波云顶高度的区域预报。模拟的雷达反射回波强度（单位：dBz）的计算可根据雨滴谱和冰晶滴谱分布按Rayleigh散射计算的格点回波强度，加上地面降水量估计的对流回波强度^[10]。回波顶高的估算方法可从地面对流回波强度向上升到0℃高度，再从此高度上升到回波衰减20dBz所达到的高度^[11]。除了雷达回波强度的预报，根据NCEP的航空天气中心（Aviation Weather Center, AWC）Bright等的雷暴云

① 来源：美国交通部交通统计局2004—2013年统计结果。

物理参数 (Cloud Physics Thunder Parameter, CPTP) 方法, 用模式的温度廓线、对流有效位能 (CAPE) 和地面降水对闪电和干闪电进行诊断预报^[12]。对流和雷暴除了对航线飞行有影响外, 对飞机起飞和降落也存在很大影响, 所以也是航站天气关心的重要要素。

结冰是航路上常见的重要天气。通常发生在过冷环境中。当飞机进入到高空过冷环境以后, 机身特别是机翼上将发生水汽的接触性凝结。如果时间长, 机翼上的结冰过厚, 将会影响飞机的飞行平衡。如果在过冷环境中本来存在大量的过冷大水滴, 机翼的结冰过程更快和厚度更厚。另外, 机头结冰还将影响飞行员的视线。尽管大型商用飞机都有除冰装置, 但事前知道航路上的结冰条件天气, 对飞行安全至关重要。结冰的预报是对飞行路线上各飞行高度的结冰条件进行预报。目前NCEP的结冰诊断预报有两种方法, 一种是利用模式预报的温度、湿度和上升气流来诊断各飞行高度上的结冰条件, 其预报仍是“是”和“否”的简单预报^[13]。NCEP的区域集合预报系统 SREF和NARRE-TL中的结冰预报就是采用该方法。另一种是采用NCAR发展的模糊逻辑 (Fuzzy-Logic) 预报方法^[14]。其方法是将与结冰有关的温度、湿度、云量、云水等与结冰的可能性相联系, 做成曲线, 找出各种情况下的结冰可能性和结冰强度。AWC正是根据第二种方法从RAP模式产生每小时的结冰预报 (Forecast Icing Product, FIP) 和利用模糊逻辑加上雷达回波和飞行员报告作出每小时的当前结冰分析 (Current Icing Product, CIP)。NCEP受ICAO委托在全球范围预报 (World Area Forecast, WAF) 中所做的全球结冰预报也是采用第二种方法^[15]。

湍流的航空气象术语叫“颠簸”。航路上强烈的颠簸对飞机飞行形成严重威胁, 是航路上航空预报的重要预报对象。颠簸的产生原因有很多, 最常见的是由风垂直切变和气流变形引起的晴空湍流 (clear air turbulence, CAT) 所产生的颠簸。NCEP的全美颠簸单模式预报和短期集合预报采用的是Ellrod方法^[16]; 英国气象局 (UK Met Office) 受ICAO委托在WAF中的全球颠簸预报采用的也是Ellrod方法^[17]。该方法通过计算风场的切变和变形来诊断颠簸的弱、中和强三级强度。要注意的是该方法当初是在粗网格 (100km) 模式下发展的, 其中的许多参数是在粗网格模式中调试的, 运用于细网格模式时, 对这些参数要进行调整。除了CAT, 雷暴、重力波和过山气流等也会产生颠簸。NCAR最近发展了一种综合性的颠簸诊断方法 (Graphical Turbulence Guidance,

GTG)^[18]。GTG不是用1种方法诊断湍流, 而是用12种湍流诊断方法的权重集合。多种方法的权重集合可有效地提高诊断准确率和信心指标 (可能性), 大大降低漏报率。比如12种方法中有9种都诊断为强湍流, 则其可能性为 $9/12=75\%$ 。在不久的将来, NCEP也准备用GTG方法来代替Ellrod方法。AWC已在RAP的后处理中应用GTG预报全美各高度航路上的颠簸强度。

NCEP还准备用模式输出制做航路上“危险或回避区域”的预报, 主要是指被云覆盖的高山范围, 比较云底相对海平面的高度与山地的海拔高度可得到。这一产品实质上同能见度同属一类。

1.2 航站天气要素及其预报

航站天气要素包括那些对飞机起飞和降落有影响的天气^[19], 例如机场水平能见度、雾、降水、云底高度、飞行约束分类、低空风切变、暴雨、大雪和冻雨等 (以机场特殊天气观测系统为手段的如低空风切变、跑道视程和跑道结冰等不包含在常规的机场天气预报TAF中)。这些要素是航班延误的重要原因。准确和及时地预报这些要素可以有效地降低航班的延误率。但另一方面, 这些航站天气要素, 特别是那些与低能见度和云有关的要素, 却是数值天气预报中可预报性较低的要素 (正因如此, 机场的特殊天气观测与预警系统在临近预报中发挥着关键的作用)。

需要指出的是, 这里的“云底高度”在航空气象上是指总云量大于50%时的云底高度^[19]。而当总云量小于50%时, 即使有云, 也不考虑云底高度, 作为晴空处理。原因是当云量小于50%时, 飞行员可以透过破碎的云块向上可见蓝天和向下可见陆地。这时, 云底高度对飞机起飞和降落没有影响。因此, 云底高度的诊断预报同时包括了云底和总云量的诊断。对云底, 不同模式的诊断方法与模式及其系统误差有关, 其中的诊断参数或阈值是通过与大量的实测资料和模式数据相比较和统计确定的。例如, 在NCEP的NAM目前的版本中, 判断云底的云含水量 (液相+冰相) 阈值取为 0.01g/kg ; 当相对湿度大于98%时, 要考虑雪的等量含水量, 其阈值也取为 0.01g/kg ; 诊断是从地面往上对模式各层云含水量搜索, 第一次遇到大于阈值的高度即是云底。而在目前RAP模式的当前版本中, 云底的云含水量阈值比NAM要小得多, 为 0.0001g/kg ; 另外还要对比对流云底、雪的垂直能见度和相对湿度大于95%的行星边界层 (PBL) 高度, 最后在这4种高度中取最低高度作为云底。不论是云底还是总云量, 目前基于数值模式的业务预报的可靠性都很低, 原因是目前业务模式中采用的各种对流方

案和微物理方案等还不够完善。

低空风切变按美国联邦气象手册定义为大气层最低2000ft^①内风的矢量垂直变化率^[19]。它可以通过模式输出的水平经向和纬向风速廓线计算得到，如果在这2000ft高度内，变化达到或大于20节^②，则报告地面有强风切变。飞行约束分类既是航路要素又是航站要素，它与水平能见度和云底高度两者都相关，用来规定在何种能见度和/或云底高度条件下起飞、降落和巡航时是否必须借助仪器的规定，共有LIFR（Low Instrument Flight Rules）、IFR（Instrument Flight Rules）、MVFR（Marginal Visual Flight Rules）和VFR（Visual Flight Rules）4类规定^[19]。其中，在LIFR和IFR类别下，飞行必须由仪表来巡航飞行或导航起飞降落；在VFR类别下，允许飞行可由飞行员目视控制。需要指出的是，在非目视飞行规则下，两架民航飞机之间的最小间距至少要（比在可目视飞行时）增加一倍或以上，以避免飞机过于接近从而威胁飞行安全。飞行约束分类的具体判断方法各国可能有不同的规定，但差别不大。四类飞行约束分类的判断如表1所示。

表1 四类飞行约束分类标准
Table 1 Definition of the four flight restriction categories

类型	云底高度/ft	能见度/mile ^③
LIFR	<500	和/或 <1
IFR	500~1000	和/或 1~3
MVFR	1000~3000	和/或 3~5
VFR	>3000	和 >5

如果业务模式有云底高度和水平能见度的诊断预报，飞行约束类型则可被相应地诊断出来。目前NCEP是利用RAP模式对全美2000多个机场进行每小时更新的飞行约束分类进行预报。而利用NAM模式，有每日四次全美格点的飞行约束分类预报，作为航路飞行约束分类的参考。当前还没有全球范围的飞行约束分类预报，所以应建议ICAO在全球范围预报WAF航空预报中增加飞行约束分类的预报。

2 低能见度和雾的预报方法

据对近年来NCEP的低能见度单模式的区域预报统计^[20]，其表征预报能力的“相当能力评分”（Equitable Threat Score, ETS）在低能见度段（<1000m）和雾条件下，只有5%左右，大大低于同样模式的降水预报评分（≈35%）（见图1）。可见，提高低能见度的预报还有很大的提升空间。值得

注意的是，图1是5年前的结果，近年来，NCEP正致力于模式的改善与更新，能见度的预报水平也有相应提高，特别是原有的RUC模式被新的RAP所替代，其水平分辨率没有变，但低能见度预报的ETS可到达10%以上^[21]。低能见度及雾在模式中的可预报性很低的原因有很多，除了雾的复杂性和目前对雾的机理了解不够外，最重要的原因可能是业务模式只是针对普通气象要素预报进行设计的，所有与云有关的参数化方案都是为非地面云和降水进行开发和调试的。对地面雾，其中的参数调试很少或根本没有经过雾条件下的调试。比如水滴谱，采用的是高层测试的云滴谱和地面的雨滴谱，而不是与雾有关的雾滴谱。滴谱的不同，将影响到水滴的沉降和在雾层中辐射的传输计算；雾中的微物理过程与高层云也不同。所以遇到地面雾时，用云水量来表征雾的地面含水量会有很大的误差，甚至地面完全产生不了雾的含水量。另外，雾本身是地面边界层内阈值天气现象，只有当湿度大于某个阈值以及风速或者湍流小于某个阈值时，雾才会发生。所以雾的数值预报对模式本身的质量和预报的初值和边界条件（包括地表条件）的准确性要求极高。而这两方面目前都不尽人意，所以雾作为模式直接输出的指导预报的条件还不成熟。除了能见度是NCEP的模式指导预报外，雾现在还不是模式指导预报的正式内容。目前，全美各气象台站和机场，主要还是利用NCEP的能见度预报，结合其他要素场的预

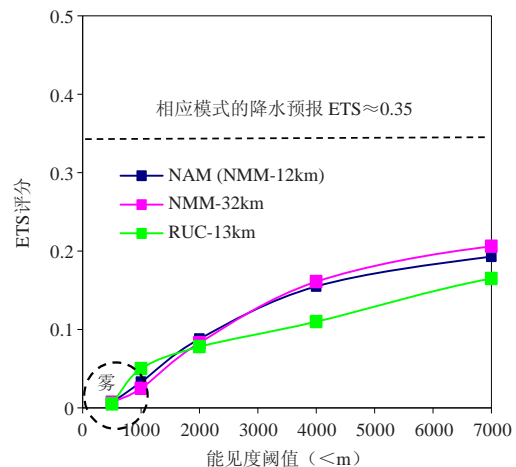


图1 三种模式（NAM，NMM和RUC）整个北美地区能见度预报的验证评分（验证时间2009年11月23日—2010年4月20日）
Fig.1 Visibility prediction verification scores for 3 models (NAM, NMM and RUC) over Continental U.S. from 23 November 2009 to 20 April 2010

① 1ft≈0.3m，下同。
② 1节≈0.5m/s，下同。
③ 1mile≈1.6km，下同。

报以及当地的具体情况对雾进行经验预报。但经验预报含有预报员的主观性，依赖于预报员对各模式的了解和过去模式表现及偏差的长期经验。因此当模式更新时，预报员对模式的状况和偏差的理解也要及时更新。但现在业务模式的更新愈来愈频繁，如NCEP的模式通常每年更新一次。这使得预报员的经验预报往往跟不上快速发展的业务模式的更新。因此，由模式直接进行雾的预报就显得更为迫切，这也是目前要求将雾试验性地加入NCEP的模式指导预报的动力之一。

2.1 水平能见度的预报

地面水平能见度除了与雾有关外，还与其他天气要素例如降水和降雪等有关，所以地面能见度的业务预报包括的天气比雾要广泛。目前NCEP的区域业务模式后处理中有两种地面能见度的估算方法：1) Stoelinga等1999年(SW99)发展的方法^[22]，NAM以前所用的老模式ARW_NMM和目前所用的新模式NEMS-NMMB(Nonhydrostatic Multiscale Model on B-grid)用的是这种方法。2) NOAA ESRL/GSD(NOAA-Earth System Research Lab/Global System Division)方法^[23]，GSD方法是对SW99方法的改进，即考虑了更多的水凝性物质，还考虑了高湿度和霾在风切变下的影响；最近，还将夜间能见度计算做了调整，与白天分开计算，并考虑了太阳天顶角的影响。目前，NCEP的业务模式系统RAP和HRRR中的模式WRF_ARW^[24]使用的是GSD方法。SW99和GSD方法对模式的微物理参数化方案有特殊要求。SW99要求模式能输出4种水凝性物质的含水量：地面云或雾含水量、雨水含水量、冰晶(冰雾)含水量和雪花含水量。GSD方法再增加了小雪粒子(Graupel)的影响。水凝性物质对能见度的影响反映在它们对可见光的削弱及消光系数 β 的影响。水凝性物质的含水量 C (单位： g/kg)与消光系数 β (单位： km^{-1})的关系可表示为

$$\beta = a \times C^b, \quad (1)$$

各种水凝性物质的系数 a ， b 列于表2。

表2 各种水凝性物质的系数 a 和 b

Table 2 Values of coefficients a and b for various hydrometeors

水溶性物质	a		b	
	SW99	GSD	SW99	GSD
雾水	144.70	144.70	0.88	0.88
雨水	1.10	2.24	0.75	0.75
冰晶(冰雾)	163.90	327.80	1.00	1.00
雪花	10.40	10.36	0.78	0.7776
雪粒子	—	8.00	—	0.75

具体做法是在模式的格点上，检查是否存在这些水凝性物质，如果有，则根据其含量计算消光系数 β ，再根据Kunkle公式

$$Vis = -\ln(0.02)/\beta, \quad (2)$$

计算水平能见度(Vis, 单位: km)。从表2可以看出，雾和冰晶具有较大的消光系数。因为它们粒子小，数量大，具有较大面积-体积比。如果格点含有多种水凝性物质，则先分别计算它们的消光系数，然后将它们相加得到总的消光系数，再用总消光系数来计算水平能见度。如果格点上不含这些物质的任何一种，则认为是透明大气，在模式中通常定义一个很大的值，如NCEP模式中定为20km。SW99的水平能见度计算没有考虑气溶胶和霾的影响。霾是由大气中没有完全核化的气溶胶细粒子造成的，在重污染地区，对能见度降低有明显作用。通常霾天气条件下，能见度可降到1~2km或更低。霾污染目前在中国大陆的一些城市相当严重，对能见度及飞行航运的影响也很大，相关研究也很多。但霾的数值业务预报不论在国内还是国外都没有进展。要准确预报霾及其对能见度的影响，业务模式必须要有一套较好的，既包括物理过程也包括化学过程(二次转化)的气溶胶颗粒物的预报方案，还要有较精细的气溶胶颗粒物的初始条件和资料同化方案。目前这两方面在NCEP和其他业务中心都不具备条件。英国气象局开发了一种在业务模式中考虑气溶胶对能见度影响的计算方案^[25]。但气溶胶在业务模式中还不是预报量，所以在该方案中，还是假设气溶胶的分布函数，利用参数化的气溶胶消光系数，通过相对湿度作为输入量来计算能见度。目前参数化的气溶胶消光系数还没有可靠的数据，还需要做大量的工作。在没有定量的气溶胶输出和可靠气溶胶消光系数的情况下，GSD方法则利用相对湿度(q)来估算能见度(Vis)：

$$Vis = 60.0 \times e^{-2.5 \times q}, \quad (3)$$

其中， $q = \min\{80.0, (RH_1/100 - 0.15)\}$ ， RH_1 是模式最低层相对湿度(单位：%)。在95%的相对湿度下，能见度在5km左右。该估算只适用于没有污染的大气如北美地区，对高污染地区并不适用。当有风切变(S)时，该能见度订正为：

$$Vis_{订正} = Vis + (10.0 - Vis) \times S, \quad (4)$$

S 为模式近地面第一层和第四层之间(约15hPa)的水平风垂直切变，单位为m/s。

当考虑昼夜影响时，夜间能见度订正用Rasmussen等建议的方法^[26]：

$$Vis_{夜} = 1.69 \times \{(Vis/1.609)^{0.86}\} \times 1.609, \quad (5)$$

白天时,太阳天顶角因子(Z)对能见度的订正为:

$$Vis = Z \times Vis_{\text{昼}} + (1.0 - Z) \times Vis_{\text{夜}} \quad (6)$$

表2中雾条件下的消光系数实际上采用的是Kunkel^[27]的试验数据。按Kunkel参数计算的能见度(式(2))没有考虑雾滴谱和雾滴总数的影响。据Gultepe等^[28]的研究,仅按含水量计算的能见度的不确定性可达50%以上。要减少不确定性,在计算中必须考虑雾滴谱的影响,但计算费用太大。为减少计算量,Gultepe等^[28]提出了包含雾滴总数 N_d (单位: cm^{-3})和含水量(C)的能见度估算公式:

$$Vis = 1.002 \times (C \times N_d)^{-0.6473}, \quad (7)$$

式中,总粒子数(N_d)和含水量(C)的不确定性分别为30%和15%,由此引起的能见度计算不确定性为29%,大大低于原来的50%^[28]。但在目前的业务预报中,在其后处理中由于没有雾滴总数的输出,还是依照经典的Kunkel参数方法(式(2))。

在NCEP,目前用13km分辨率的RAP和12km分辨率的NAM模式分别进行每小时更新的18h和每天4次更新的84h各航站和全美各区域的能见度预报。同时,NCEP还利用高分辨率(4km)的NEMS_NMMB和WRF_ARW模式进行每天两次更新的36h北美区域能见度预报。自2014年起,NCEP把更高分辨率(3km)的每小时更新的基于WRF_ARW模式的HRRR系统投入业务。由此,各航站和预报台有了每小时更新的15h全美能见度高分辨率区域指导预报。由于低能见度天气和雾往往是小尺度的局地天气,水平高分辨率模式可以有效提高对低能见度的预报能力。此外,利用NCAR的技术,AWC已将各航站的每小时更新的TAF能见度预报(RAP预报)显示在AWC的Aviation Digital Data System(ADDS)网上^[29]: <http://aviationweather.gov/taf>。用户可利用ADDS网站查询各航站的当前能见度和18h能见度预报。

除了能见度的业务模式指导预报,NOAA的MDL(Meteorological Development Lab)还发展了对模式输出的统计预报,如MOS(Model Output Statistics)^[30]和LAMP(Localized Aviation MOS Products)^[31],这两种统计预报产品包含有对地面能见度的分级预报。MOS技术利用NCEP的全球业务模式GFS(Global Forecast System)和NAM等区域模式输出的基本量(如地面温、压、湿、风速和降水等)作为预报因子,观测到的地面能见度作为预报量,利用历史资料进行多元统计回归,用得到的回归公式对模式预报输出进行能见度预报。MOS能见度分为7个等级: <1/2, 1/2~1, 1~2, 2~3, 3~5, 6, >6mile。

由于各种模式的预报误差特性不同,每一种模式的MOS回归公式也不同;同一种模式各版本也不同。模式每次更新,MOS公式要重新进行回归统计,这样需要进行动态的统计计算。MOS预报目前由MDL产生,共有1000多个台站。而LAMP是专门针对航空预报并局地化的GFS-MOS,它扩大到1600多个台站;此外,LAMP充分利用了最近时次的地面观测资料和全美雷达拼图(MOSAIC)资料;最后,除了回归方法,LAMP还利用每小时运行的小模块对区域资料进行处理。

以上介绍的是水平能见度(Horizontal Visual Range, HVR),其背景是天空。在飞机起飞降落时,飞行员看到的是前面下方的跑道。以跑道为背景的能见度叫跑道能见度(Runway Visual Range, RVR)。RVR与HVR的估算不同,它还包括了垂直的分量,要穿越更多的空气质量;但在数值上与HVR有关,可以用Taylor的RVR-HVR经验相关曲线来估算^[32](图2)。

由图2可见,当HVR在1000m以下时,RVR比HVR略大;但大于1000m时,RVR比HVR要小。如在水平能见度为4000m时,飞行员只能看到2000m以内的跑道。

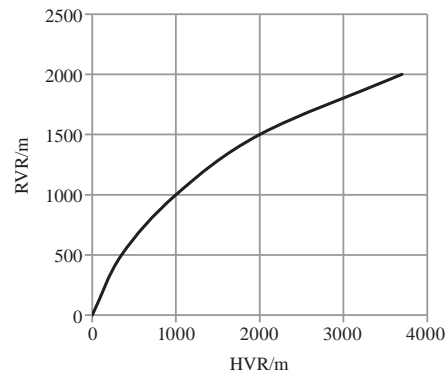


图2 RVR与HVR的经验关系

Fig. 2 The empirical relationship between runway visibility range RVR and horizontal visibility range HVR

2.2 雾的指导预报

雾对航运的影响是不言而喻的,雾的预报也是各个预报中心的挑战之一。目前雾还不是各普通天气预报中心模式指导预报的正式内容。原因是多方面的,其一是目前业务模式中对各种雾的物理过程还缺乏合适的描述,在所有的微物理参数化方案中也没雾的微物理过程。其二,目前的业务模式的水平分辨率比较低,而地面雾往往是小尺度现象,很多局地的因子如局地气流和地形等的影响不能很好地反映在低分辨

率的物理过程中。所以业务中心雾的数值预报精度还很低。尽管过去有很多雾模式的模拟研究，从一维到三维雾模式再到三维中尺度数值预报模式。但要将它们应用到预报中心的业务预报中还有很大的困难。业务预报中心不太可能用某一模式专门进行雾的预报，因为运行和维持费用太高。雾的业务数值预报只能从现有的普通数值预报模式中产生，在模式常规输出量的基础上再进行后处理来诊断雾，这样就可同其他天气要素预报共享一个相同的数值模式。

如前所述，尽管目前雾还不是各天气预报中心正式的模式指导预报，但各台站和航站正积极的要求预报中心提供雾的试验性的模式指导预报。由于雾的数值预报精度低以及雾的经验预报中的缺点，预报员常利用能见度的指导预报来预报雾。但是低能见度在很多情况下并不仅是由雾造成的，其他天气如降水和降雪也会导致地面低能见度。另外低能见度本身的实际可预报性也很低，模式预报的系统性偏差如热偏差（即模式温度常高于实际温度）和干偏差（模式湿度常低于实际湿度）也往往造成业务模式没有可靠的，甚至没有雾含水量的输出。这些都造成在后处理中低能见度计算的困难。现在WRF-ARW模式常常被用于雾的数值研究，但ARW，即使是最新版本，仍有很大的干偏差。例如，NCEP业务运行的北美4km分辨率的最新版本的ARW和以ARW为基础的3km分辨率HRRR模式地面相对湿度预报在2014年7月—2015年1月与北美地面站资料的验证比较表明，HRRR在2014年具有较干的偏差，而ARW在2014年大部分时段，特别是11月以后和2015年1月都是干偏差。模式的干偏差给用模式直接输出的地面云含水量来预报雾带来很大的误差。比如美国空军气象局（Air Force Weather Agency, AFWA）的WRF雾预报研究表明^[33]，当地面大气处于所谓的近雾（Near-Fog）条件下，由于ARW模式的干偏差，不能产生足够量的雾滴；而雾滴的初始形成对雾的进一步发展有至关重要的影响。鉴于这些原因，目前NCEP并不采用模式直接输出的地面云含水量来判断雾，而是着重在模式的后处理中对雾进行再诊断，这样可以大大地提高对雾预报的准确率，甚至可以接近降水预报水平相当的程度^[21, 34]。本节将介绍最近发展的三种雾的诊断方法。

2.2.1 雾的多重规则 (Multi-Rules) 诊断方法

该方法^[34]利用模式输出的能见度或模式最底层的液态水含量（liquid water content, LWC）、云顶和云底高度、地面2m相对湿度和地面10m风速根据以下三条规则和阈值进行诊断。只要满足其中一条规则，就

判断雾会发生：

含水量（能见度）规则：

$$LWC > 0.015 \text{g/kg} \text{ (相当于 } Vis < 1000\text{m)}, \quad (8.1)$$

或云高规则：

$$\text{云底} < 50\text{m} \text{ 和 } \text{云顶} < 400\text{m}, \quad (8.2)$$

或相对湿度-风速规则：

$$2\text{m } RH > 90\% \text{ 和 } 10\text{m 风速} < 1\text{m/s}, \quad (8.3)$$

其中“含水量规则”或“能见度规则”代表了雾的总体判断。1000m能见度是雾的定义，相当于用Kunkel方法（式（2））估计的含水量0.015g/kg。如果模式在某时某地（格点）没有温湿偏差，该条件下模式能很好地预报雾的发生。如果模式在某时某地有温湿偏差，能见度规则不确定，这时相对湿度-风速规则将起作用。对于干偏差模式来讲，相对湿度的阈值可以调到大大低于100%，也就是说，当模式的相对湿度不到100%就可以有雾发生。风速规则是考虑到地面大部分是辐射雾，静风是辐射雾形成的必要条件之一。如果模式有湿偏差，相对湿度的阈值可以取大一些，同时加大风速的阈值以减少误报率。所以，湿度和风速的阈值在不同模式中需要作些微调（参见文献[34]中举例）。相对湿度-风速规则是模式有干、湿偏差时对能见度规则的补偿。如果能见度规则和相对湿度-风速规则同时满足，雾的发生就更加确定了。云高规则是针对其他类型的雾而设立的，特别是平流雾、海雾、下沉雾和雨雾等。这些雾有较厚的厚度，但一般不高于400m。这些雾就由模式来判断，充分利用模式本身对层云的预报功能。如果模式中有层云，其底接地而其厚度低于400m，就判断为雾。云高规则的效果完全依赖于模式对低层云的预报能力。对该方法的长期统计表明，在地面，由能见度规则预报的雾占30%，由云规则预报的雾占20%，由相对湿度-风速规则预报的雾占50%。这样的比例大致反映了地面各种雾类型的比例。

对该方法预报雾的长期客观验证依赖于雾的观测资料。Zhou等利用2008年北京奥运会WMO的研究示范项目^[35]，对NCEP的短期集合系统中15km分辨率的基准模式WRF_NMM和WRF_ARW用能见度（含水量）预报的雾和用多重规则诊断的雾与华北、华东等13个城市的雾实况进行客观验证，为期7个月（2—8月）^[34]。结果表明，用含水量预报，WRF_NMM和WRF_ARW的ETS均在6%左右，而用多重规则诊断，ETS可达20%。由图1可见，仅用能见度来预报雾，NAM和RUC的ETS分别为3.5%和5%，但如用多规则诊断方法，它们的ETS可分别增加到7%和6.5%。可

见，多重规则诊断的雾预报比仅用含水量或能见度来预报，预报效果有明显提高。

2.2.2 UPS 雾诊断方法

UPS空运部门发展了一种用地面相对湿度和地面大气稳定度指数来诊断雾是否发生的方法^[36]。地面大气稳定度指数定义如下：

$$MRi = (T_1 - T_{sfc}) / u^2, \quad (9)$$

式中， T_1 和 T_{sfc} 分别为模式输出的离地面第一层和2米处温度（单位：K）， u 为模式输出的离地面第一层风速（单位：节）。根据 MRi 的数值将大气稳定度分为三种状况。用Eta模式^[37]（早期NCEP NAM所采用的模式）数据时，三种状况的阈值分别为：

$MRi \leq 0.025$ ，表示大气处于充分混合状态。在70m以下湍流混合边界层遏制了冷却。没有雾会发生。如果近地面相对湿度达到饱和，只会有层云形成。

$0.025 < MRi < 0.04$ ，表示大气处于混合和静止状态的过渡区。如果近地面相对湿度达到饱和，雾有50%的可能性会发生。

$MRi \geq 0.04$ ，表示大气极稳定，地面层与高层分离，70m以下地面静止大气导致地面强烈的辐射冷却，如果近地面相对湿度达到饱和，雾一定发生。

要注意的是，以上三种状况下的 MRi 阈值是在Eta模式下调试得到的。如果采用其他模式，阈值需要重新调试才能确定。

2.2.3 根据物理过程平衡的雾诊断

多重规则的雾诊断和UPS的雾诊断，都是诊断雾是否会发生，不能对雾的强弱进行诊断。为诊断雾强弱，根据2008年Zhou等（ZF08）提出的辐射雾的平衡理论^[38]，NCEP发展了一种在模式后处理中对各种雾物理过程之间平衡进行判断的雾诊断方法。ZF08用奇异摄动方法求解雾的含水量非线性方程表明，辐射雾是否形成、发展、稳定和消散由冷却率、湍流强度以及雾滴的重力沉降之间的平衡所决定。雾平衡稳定条件可以用所谓的“临界湍流交换系数” K_c 来表示，并得到了雾层内的含水量垂直分布廓线的显式表达式。只有当实际大气的湍流交换系数 $K < K_c$ 时，雾才可能形成和稳定（维持）。如果实际大气的湍流交换系数 $K > K_c$ ，则雾的平衡被破坏，雾要么不形成，要么形成后很快消散。ZF08的研究对象是辐射雾，没有考虑平流。Zhou在ZF08的基础上进一步考虑了水汽平流的影响^[39]，并得到了包括水汽平流影响的临界湍流交换系数和雾内的含水量 LWC 垂直分布廓线的表达式：

$$K_c = 1.38 \{ \alpha [Adv + \beta(p, T) C_o] \}^{\frac{1}{2}} H^{\frac{3}{2}}, \quad (10)$$

$$LWC(z) = \left\{ \frac{[Adv + \beta(p, T) C_o] H}{\alpha} \right\}^{\frac{1}{2}} \left[\left(1 - \frac{z}{H} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{2}{1 + e^{\frac{z}{\delta}}} \right], \quad (11)$$

式中， α 为雾滴重力沉降系数，可取0.062， $\beta(p, T)$ 为与气压和温度有关的参数，通过Clausius-Clapeyron公式计算：

$$\beta(p, T) = \frac{622 L_v e E_s(T)}{R_v T^2 p}, \quad (12)$$

式中， L_v 和 R_v ，分别为水汽潜热和气体常数， p 为大气压， $E_s(T)$ 是饱和水汽压， T 为雾层平均温度， C_o 为冷却率（单位：°C/s，冷却为正，加热为负）。需要指出的是，这里的冷却率是模式输出的近地面总变温率预报，包含了由长短波辐射引起的冷却或加热，以及由温度平流和湍流混合引起的冷却或加热。其数值完全由预报模式决定。 $Q Adv = -V \cdot \nabla Q$ 为水汽在水平方向上的平流。 V 为模式输出的地面风速（如10m）。 Q 为模式输出的地面总水分量，为液态 LWC 和水汽比湿 q 之和（ $Q = LWC + q$ ）。当 $Adv > 0$ 为湿平流，当 $Adv < 0$ 时为干平流。 z 为离地面的垂直距离。 H 为雾层厚度。如果雾没有形成，可用地面饱和层厚度代替。如果模式有干偏差，大气饱和的定义在后处理中可以定义为相对湿度略小于100%的某一阈值，也就是说，即使模式没有雾的液态含水量的输出，在后处理中也可根据相对湿度小于100%来定义的饱和，通过上式，诊断出雾内含水量的垂直分布，这是本方法的特点之一。 δ 为与实际大气湍流交换系数 K 有关的参数，具有厚度的尺度。

$$\delta = \frac{K}{2 \{ \alpha [Adv + \beta(p, T) C_o] H \}^{\frac{1}{2}}}. \quad (13)$$

根据ZF08的研究， δ 可以认为是雾边界层，其值的大小（厚度）随雾内湍流强度变化而变化。当雾内湍流强度较弱时， δ 较薄。当湍流很强时雾边界层 δ 将从地面向上发展。当 δ 大于雾层厚度时（ $\delta > H$ ），雾将消散。如果在雾形成之前，在饱和层定义的厚度下的 δ 如果很厚，雾也不会形成，最多是形成非接地的层云。只有当 $\delta < H$ 时雾才会形成并稳定。所以，与临近湍流交换系数 K_c 一样， δ 也可用来诊断雾是否形成和消散。含水量式（11）由两项组成：第一项是 $\{ \}$ 的平方根项，它表征了含水量的总体大小和最大值，湿平流越强，冷却率越大，雾层越厚，含水量也越大。第二项是 $[]$ 项，与 z 和 δ 或 K 有关，它决定了含水量及其最大值的抛物线状垂直分布。含水量这种垂直方向的抛物线状分布与实际观测的形状很相似^[38]：完全没有湍流时（ $K=0$ ， $\delta=0$ ），含水量最大值在地面（ $z=0$ ）；当湍流增强时，含水量最大值脱离地面；

湍流越强,含水量最大值位置越高。

大量雾的数值模拟研究和观测都表明,湍流对雾的影响是双重的。一方面,只有当湍流强度很弱时(静风条件)雾才可能形成。另一方面,当雾形成后,适当的湍流可以促进雾的进一步发展。雾的相对湿度必要条件(即相对湿度必须达到饱和阈值)很好理解,但雾的湍流强度必要条件还很模糊。怎样定量地定义“适当”的湍流强度是长期以来悬而未解的问题。ZF08的临界湍流交换系数(K_c)给出了解决此问题的答案:只要湍流强度不超过由临界湍流交换系数 K_c 定义的强度,雾就可以稳定和发展,即 K_c 定义了雾层所能承受的最大湍流强度。从临界湍流交换系数 K_c 的表达式可以看出,雾能承受湍流的能力与近地面的湿平流和冷却率的 $1/2$ 次方和雾厚度 $H^{3/2}$ 成正比。湿平流和冷却率越大, K_c 越大,风速(或湍流)越小,雾越容易形成。雾越厚, K_c 也越大,雾层能承受的湍流也越大,越不易被强湍流和气流吹散,雾也越稳定。由于 K_c 与 H 的 $3/2$ 次方成正比, H 对 K_c 的影响大于平流和冷却率的影响。对薄雾,局地气流的增大(较大的 K),或者干平流和日出(较小的 K_c)等都会导致其迅速消散。在模式后处理的实际操作时,只要应用 $LWC(z)$ 的计算就可以了。当计算的近地面(比如 $z=10\text{m}$)处的 $LWC>0$,可以证明, $K<K_c$ 的条件也自动满足。用表2的系数和式(1)求得消光系数,再用能见度计算公式(2)可将 LWC (含水量 C)转换为实用的能见度大小;如果 LWC 为0,用SW99方法则赋为预定的最大值20km;如用GSD方法则仍可用地面 RH 用式(3)算得(见表3最后两列的例子)。

该方法已经被试验性地用在NCEP的区域集合预报系统SREF和NARRE-TL的雾强度的概率预报中。预报结果定时地发布在一天四次更新的SREF和每小时更新的NARRE-TL网站^①。在具体计算时有几点要注意:第一,为充分利用模式本身对层云的预报,本方法首先检查模式输出是否有云顶低于400m,同时云底低于50m的层状云。如果有,地面层状云有可能转变为下沉雾或者有海雾发生。这时层云将被作为地面雾来处理,雾的厚度(H)就设为云顶的厚度,然后根据湍流交换系数和雾层内的水汽平流和冷却率来计算近地面的含水量。第二,通常的业务模式中的湍流系数采用所谓的长尾稳定度参数来计算。长尾稳定度参数在理查森数 Ri 达到0.25时没有截断(即稳定度参数仍不为0),目的是为了在近地层极为稳定时模

式仍保持温度层的有效性(因为边界层温度计算依赖于这非零的稳定度参数)。在实际极稳定的大气中,地面层与上层气流出现了分离,边界层已经崩溃,稳定度参数应该为0。对辐射雾来讲,长尾稳定度参数可能不利于雾的形成。为此,可以采用短尾稳定度参数,比如Beljaars^[40]和Beare等^[41]的形式。第三,当温度极低时,雾将变为冰雾。在诊断冰雾时,饱和相对湿度的计算要按照以冰面为参考的相对湿度公式,其饱和阈值随着温度的降低而下降,比如在 -20°C 时相对湿度达到80%就开始饱和了。第四,总冷却率的计算依赖雾的厚度。当雾或饱和层较厚时,可以用层内平均的变温率来计算也可以用雾顶附近的变温率来计算^[39]。当雾或饱和层较薄时,可以用地面2m的变温率来计算。

最后介绍2010—2011年冬季(11月—次年2月),加拿大环境厅FRAM(Fog Remote Sensing and Modeling)项目在加拿大北部城市黄刀国际机场进行的冰雾观测实例^[42-43]。该项目用能见度和以此方法同时对NCEP NAM等模式对14场冰雾的预报能力进行了检验和比较。结果表明,在这14场冰雾中,用能见度来预报漏报了一半以上的冰雾,而用此方法,预报有明显地改进。每场雾基本都能报出来,只是起止时间有误差。现用一例来说明,该冰雾发生在12月17日半夜当地时间00:00。地面气温为 -20°C ,雾持续时间为12h,第二天中午12:00消散(表3中第一列的阴影区)。雾形成前静风无云,是典型的辐射雾。冰雾发生时地面冰雾粒子被有效地观测到,能见度低于1000m。NAM对黄刀机场当天的4次能见度预报都在4000m左右。说明模式近地面有饱和凝结,但没有产生足够的冰水量使能见度小于1000m。如果用NAM的输出场在后处理用此方法进行再诊断,雾就被预报出来。尽管预报的雾发生时间提前了4h,消散时间提前了5h(见表3第五、九、十、十一和十二列黑体数字)。为了说明该方法中各过程在诊断过程中的作用,表3列举了NAM 12:00时(当地时间)发布的前25h预报时间内每小时的2m处相对湿度(RH_{2m})和冰相饱和相对湿度(RH_s)、饱和层(雾前)和雾厚度(H)、10m处冰雾含水量(IWC_{10m})、水量的冷却产生率(βC_0)、水量的平流产生率(Adv)、水量的总产生率(冷却和平流之和, $Total$)、湍流和临界湍流交换系数(K 和 K_c)、雾边界层厚度(δ)以及SW99法(Vis_1)和GSD法(Vis_2)计算的两种能见度的诊断数据。

① NCEP SREF航空产品: http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/wd20bz/SREF_aviation/web_site/html_212/fog.html;

NCEP NARRE-TL产品: http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF_avia/FCST/NARRE/web_site/html/fog.html。

表3 NAM 25h预报时间内每小时的地面2m处相对湿度 (RH_{2m}) 和冰相饱和相对湿度 (RH_s)、饱和层(雾前)和雾厚度 (H)、10m处冰雾含水量 (IWC_{10m})、水量的冷却产生率 (βC_o)、水量的平流产生率 (Adv)、水量的总产生率(冷却和平流之和, $Total$)、湍流和临界湍流交换系数 (K 和 K_c)、雾边界层厚度 (δ) 以及SW99法 (Vis_1) 和GSD法 (Vis_2) 计算的两种能见度的诊断数据

Table 3 NAM 25 h hourly outputs for 2m relative humidity (RH_{2m}), saturation relative humidity with respect to ice (RH_s), saturated layer depth (before fog) and fog layer depth (H), ice fog water content at 10m (IWC_{10m}), ice fog water generation rate due to cooling (βC_o), and moist advection(Adv), ice water total generation rate ($Total$), turbulent exchange coefficient and its critical value(K and K_c), fog boundary layer depth (δ), visibility with SW99(Vis_1) and with GSD (Vis_2)

预报时间 (当地时间)	RH_{2m} (%)	RH_s (%)	H (m)	IWC_{10m} (g/kg)	βC_o (g/kg/h)	Adv (g/kg/h)	$Total$ (g/kg/h)	K (m ² /s)	K_c (m ² /s)	δ (m)	Vis_1 (km)	Vis_2 (km)
1 (12时)	85.00	85.50	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	20	10.428
2 (13时)	85.80	84.86	62.6	0	0.0421	-0.0335	0.0087	0.8706	0.2638	142.53	20	10.220
3 (15时)	85.50	85.11	46.2	0	0.0851	-0.0191	0.0660	10.4476	0.4621	720.75	20	10.297
4 (16时)	91.30	84.25	38.6	0	0.0742	-0.0292	0.0451	8.3308	0.2916	760.97	20	8.907
5 (17时)	90.50	83.82	44.2	0	0.0363	-0.0191	0.0172	7.5698	0.2208	1045.35	20	9.087
6 (18时)	90.80	83.45	52.0	0	0.0378	-0.0101	0.0277	6.7604	0.3575	678.54	20	9.019
7 (19时)	91.00	83.01	43.2	0	0.0267	-0.0140	0.0126	4.9333	0.1828	804.23	20	8.974
8 (20时)	90.80	81.67	76.8	0.0531	0.0090	0.0004	0.0094	0.0000	0.3739	0.00	0.449	0.225
9 (21时)	90.30	81.47	74.7	0.0647	0.0148	-0.0004	0.0144	0.0000	0.4443	0.00	0.369	0.184
10 (22时)	90.50	81.25	72.1	0.0764	0.0156	0.0054	0.0210	0.0005	0.5081	0.04	0.321	0.156
11 (23时)	89.80	80.93	72.2	0.1034	0.0225	0.0158	0.0384	0.0000	0.6881	0.00	0.231	0.115
12 (00时)	88.00	80.84	65.1	0.0585	-0.0006	0.0144	0.0138	0.0000	0.3539	0.00	0.408	0.204
13 (01时)	87.30	80.67	59.3	0.0864	0.0183	0.0155	0.0338	0.0000	0.4806	0.00	0.276	0.138
14 (02时)	85.80	80.63	61.9	0.0493	0.0022	0.0083	0.0104	0.0000	0.2849	0.00	0.484	0.242
15 (03时)	84.30	80.73	66.8	0	-0.0301	-0.0040	-0.0341	NA	NA	NA	20	10.611
16 (04时)	84.30	80.73	61.8	0.0679	0.0228	-0.0029	0.0199	0.0004	0.3923	0.04	0.352	0.176
17 (05时)	83.00	80.41	60.6	0.0549	0.0212	-0.0079	0.0133	0.0002	0.3113	0.03	0.435	0.217
18 (06时)	82.00	80.10	58.7	0.0494	0.0205	-0.0094	0.0112	0.0010	0.2721	0.15	0.483	0.242
19 (07时)	81.80	79.88	56.1	0.0485	0.0146	-0.0032	0.0114	0.0030	0.2566	0.45	0.492	0.246
20 (08时)	81.30	79.88	53.2	0	0.0020	-0.0068	-0.0048	NA	NA	NA	20	11.437
21 (09时)	81.00	79.79	49.4	0	0.0039	-0.0061	-0.0022	NA	NA	NA	20	11.523
22 (10时)	80.00	79.81	44.2	0	-0.0005	-0.0068	-0.0073	NA	NA	NA	20	11.815
23 (11时)	80.00	79.78	44.8	0	-0.0005	-0.0089	-0.0185	NA	NA	NA	20	11.815
24 (12时)	79.00	80.20	0	0	0	0	0	NA	NA	NA	20	12.114
25 (13时)	79.00	80.70	0	0	0	0	0	NA	NA	NA	20	12.114

注：阴影表示冰雾的实际发生到消散时间；黑体字表示冰雾期间的诊断数据。

表3左边第一列是预报时间，阴影部分是雾的实际发生到消散时间。NA为当未饱和或水量总产生率为负时不能计算。因为温度为-20℃左右，由气温计算的冰相饱和的相对湿度(第三列)大大小于100%，仅为80%左右。除了第一小时地面还未达到饱和外，其后22h地面相对湿度(第二列)都达到或超过了饱和值(第三列)。地面10m雾含水量 IWC_{10m} 表明，雾在20时开始形成，比观测早了4h。尽管雾形成前6h地面已经饱和了，饱和层厚度(H)为40~60m，但雾没有形成。原因是前6h，实际的湍流交换系数(K)大于临界湍流交换系数(K_c)。 δ 也大于 H 。20时起，湍流交换系数(K)突然降到 10^{-4} 以下，大大小于由饱和厚度、冷却和平流定义的临界湍流交换系数(K_c)， δ 也趋于0而小于 H 。在雾形成前基本是干平

流，但冷却产生的水量还是大于干平流的消耗，所以总的水量产生率是正值。除了在03时干平流的消耗和负的冷却产生率，雾有短暂的消失，04时雾又重新形成。该雾的厚度从形成到消散没有太大的变化，维持在60m左右。冰雾水量在0.05~0.1g/kg。湍流交换系数(K)一直维持在 10^{-4} ~ 10^{-3} (m²/s)的量级，在后期略有增大。 δ 也有所增厚。07时，由于日出，冷却率有所减小。但到10时之前，仍在冷却(北方太阳高度角较低)。由于干平流消耗(负值)仍维持在相同的水平，这导致雾水的总产生从正到负，使预报的雾比实际情况提早消散。虽然这次雾事件预报成功，但雾起止时间的预报误差说明，或许此法还有改进余地，但更有可能是模式输出的那些基本量中存在误差。可见，除了雾的诊断方法好坏，最终雾预报的准确性大

大依赖于数值预报模式的质量。

2.3 改善能见度和雾预报的途径

本节着重讨论了目前,特别是NCEP的能见度和雾的诊断预报方法。总体而言,模式对它们的预报能力仍停留和徘徊在较低的水平上。对数值预报中心而言,提高其可预报性仍有很长的路要走。从能见度和雾本身的特点及目前业务模式的发展状况,提高它们的可预报性有如下七个方面可以考虑:初始场、模式、诊断方法、订正、资料、集合预报和高污染条件下的气溶胶消光系数。

1) 由于初始条件对雾的预报极其敏感,提高模式的初始场精度可有效地减小其误差。这方面改进观测和资料同化手段是关键,目前各中心采用的三维、四维和集合资料同化正是此目的。

2) 改进模式有许多方面,这里只列三方面。①发展适合于雾的微物理参数化方案。目前所有可选用的微物理参数化方案没有充分考虑雾的微物理过程。如果充分考虑雾的微物理过程,雾的预报会有很大提高。比如Kim等对WRF-ARW的Thompson方案进行改进后发现,对冰雾的模拟能力有所提高^[44]。英国气象局改进的针对雾和毛毛雨的微物理参数化方案对雾的预报能力也有所提高^[45]。但对业务模式来讲,这种物理方案的改进不能影响到其他天气要素的预报。所以,如何在普通业务模式的云参数化方案中考虑地面各种类型雾的参数化仍是挑战性的课题。②寻找适合于雾的边界层参数化方案。目前可采用的边界层参数化方案有多种,但没有一种对雾的预报是最适合的。他们对不同的地区和不同的时间以及不同种类的雾,预报表现可能不同。③提高模式的水平和垂直分辨率。较高的水平和垂直分辨率可以有效地提高低能见度等小尺度天气和雾的预报能力。但这对模式本身的性能和计算条件要求较高。

3) 研究和更有效的雾的诊断方法。由于模式的各种偏差和能力不足,对地面含水量的预报有很大的误差,造成地面低能见度计算的困难。用常规场在后处理中对雾进行再诊断不失是一种较实用的方法。但这种方法的精度仍依赖于模式输出的常规场的预报精度。

4) 后处理订正是一种降低时空误差的有效可行方法,这包括偏差订正(时间误差)和降尺度(空间误差)。利用长期观测资料先对常规场的偏差进行订正,然后也可以再对能见度和雾预报的偏差进行订正如类似降水订正^[46]。利用高精度资料进行降尺度,这对目前模式空间分辨率还不够情况下很有必要。

5) 资料问题是上述3)和4)两方面的基础,如不同区域的地面雾和低能见度的长期观测资料的收集对验证和雾诊断方法参数的选取和订正有至关重要的作用。目前这方面的资料很缺乏,特别是偏远地区。这时自动站将发挥有利的作用。比如目前北美有5000多个连续观测的METAR自动站。NCEP每天将每小时包括能见度的资料经过处理放在其ADDS中让公众使用。既可以用作临近预报,也可被用来作为监视和验证模式低能见度和雾的预报效果的参考。除了站点观测资料,也要发展网格的分析资料以便直接用于模式。对于低能见度分析场的研究,NCEP目前用收集到的METAR和其他地面及高空资料结合RAP模式对地面能见度进行分析,得到地面能见度的每小时格点化的分析场。可以用来做模式的客观验证和对雾诊断参数的调整。另外NCEP还发展了全美2.5和5km的实时中尺度分析资料同化系统RTMA(Real Time Mesoscale Analysis),对地面要素和能见度进行分析产生它们的地面格点分析场。该资料已被用于模式的客观验证、模式参数调整以及模式预报的降尺度化等。

6) 进行雾的集合预报。考虑地球大气和模式的混沌性,雾对初始场误差很敏感,以及各种参数化方案的表现与时间、地点和天气系统本身的不同而变化。一种方案不可能在所有情况下都有较好的表现。这种由初始场误差引起的不确定性和各种参数化方案表现不同引起的系统误差是目前低能见度和雾的可预报性较低的重要原因。近年来发展起来的集合预报方法,为减少和量化地表征以上两种误差引起的不确定性提供了很好的途径^[47-48]。NCEP的实践证明,集合预报可有效地提高雾的预报能力和精度^[20, 34]。AWC专门利用区域集合预报SREF建立了全美各大机场TAF的冬季降雪和低能见度造成的重要天气概率预报,称为“冬季航空天气预报仪表操作台”。FAA主导的新一代航空管理系统NextGen也把预报的不确定性作为航空预报的一个重要组成部分以便更科学地来决策^[49]。

7) 结合中国国内雾霾污染的实际,开展对气溶胶粒子的消光系数的参数化的试验和数值模拟研究,寻找符合中国实际的气溶胶消光系数。可靠的气溶胶消光系数是计算高污染天气下能见度的关键。本文介绍的是NCEP的能见度业务预报,对高污染条件可能并不适用。近年来国内开展对雾霾污染的监测已得到充分地重视,积累了大量数据。中国气象局对其业务预报和预警工作正在有效地开展^[50]。大量和可靠的在高污染和雾和霾天气下的气溶胶粒子和能见度资料以及成熟的污染预报业务模式(如CMAQ)为气溶胶粒

子的消光系数的参数化研究提供了基础。对提高在霾条件下能见度的预报有切实意义。

在中国,雾和低能见度的数值模拟研究始于20世纪80年代初,起步较早^[51],但低能见度和雾的数值业务预报似乎还没有完全跟上^[52]。为提高预报中心雾的业务预报能力,建议在国内雾和低能见度数值模拟研究的基础上结合中国的实际,加强业务模式后处理中雾和低能见度的诊断方法的研究,并将过去雾的数值研究中得到的成果考虑在后处理中,加强全国雾观测网资料的收集,进行雾预报的统一验证和台站及航站预报员的自主验证,不断提高雾和低能见度的中心业务预报水平。目前中国气象局数值预报中心也已建立了业务运行的区域集合预报系统,并专门设有航空预报中心,所以可开展能见度和雾的集合预报产品;在民航华东空管局也已有试验性的集合航空预报系统和产品,在2010年上海世博会期间也有试用。因此,来定量描述航空预报中有关要素的可信度其各种条件也已基本成熟。

3 小结

航空天气要素对飞行航运有重要的影响。准确预报这些要素可以有效地提高飞行的安全性,扩大民用飞行空间的使用效率和降低机场的晚点率。航空天气要素分为航路要素和航站要素。航路要素包括哪些对飞机在巡航飞行时有害的天气条件,包括颠簸、结冰和对流等。航站天气包括对飞机起飞和降落有重要影响的天气,如低层风切变、雷暴、云底高度、能见度、雾和飞行约束分类等。在NCEP,除了临近预报外,不论是航路要素还是航站要素,通常都是在模式的后处理中通过不同的方法诊断产生的。本文着重介绍了能见度和雾在NCEP的区域模式中的诊断方法。其中,能见度有两种诊断方法。一种是Stoelinga-Warner方法,该方法要求预报模式有四种水凝性物质的输出。通过这些水凝性物质计算消光系数来估算水平能见度。第二种方法是GSD方法。该方法是前一种方法的改进,包括增加了更多的水凝性物质,用相对湿度估算高湿度时霾条件下的能见度,考虑了白天和夜里能见度的不同等。还讨论了以机场跑道为背景的跑道能见度的估计方法。除了能见度的诊断,NOAA-MDL发展了模式数据的统计预报方法MOS和LAMP。但统计预报要求对迅速更新的模式版本进行及时的动态的参数调整。

目前各预报中心还没有把雾的预报作为模式指导预报中的正式内容。原因是业务模式对雾的可预报性很低。台站和航站预报员往往利用低能见度的预

报或利用模式输出的其他与雾有关的常规要素(包括探空)来进行雾的经验预报。但低能见度有时并非由雾造成,而经验预报则带有很强的主观性,依赖于预报员对模式输出的各种要素场的误差理解。当模式版本更新很快时,预报员的经验有时跟不上模式新版本的变化。因此各台站和航站希望数值预报中心能试验性地提供雾模式指导预报。与其他航空要素一样,雾的模式预报仍是在模式的后处理中诊断的。除了UPS开发的方法,NCEP近年来着重研究和发展的两种雾的诊断方法。一种是多重规则方法,该方法利用能见度、云底、云顶高度、地面相对湿度和风速根据不同的阈值来对雾的发生与否进行诊断,但该方法不能确定雾的含水量和雾的强弱。另一种是根据Zhou-Ferrier的雾层平衡理论提出的雾发生和稳定的湍流强度必要条件以及雾层内含水量的垂直分布公式对雾含水量进行诊断。该条件由冷却率、水汽平流和雾前饱和层或雾层厚度所确定的临界湍流交换系数决定。只有当湍流强度小于该临界值时,雾才可能形成和稳定。

最后,本文讨论了进一步改善能见度和雾的业务模式预报的七种可行途径:减少初始场的误差,改进模式包括研究和选用适合于雾的微物理参数化方案、边界层参数化方案和提高模式分辨率,雾诊断方法的改进,后处理订正,加强雾的观测网和分析场的研究,并强调了雾集合预报的重要性,以及结合中国多污染的实际来开展气溶胶消光系数的研究。总之,目前雾的业务预报能力还有限,还有诸多挑战,有很长的路要走,希望本文能起到一些推动作用。

参考文献

- [1] NOAA NWS. National Weather Service Report. Washington D C: NOAA, 2014.
- [2] Aviation Weather Center. Seminar in 2014 Summer Aviation Experiment Testbed. Kansas City, August, 2014.
- [3] Gultepe I, Tardif R, Michaclides S C, et al. Fog research: A review of past achievements and future perspective. Pure Appl Geophys, 2007, 164: 1121-1159.
- [4] NOAA. Federal Meteorological Handbook, No. 1 (FMH-1). Washington D C: NOAA, 1995.
- [5] NCEP Environmental Modeling Center. NAM model document. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php>
- [6] Benjamin S, Devenyi D, Smirnova T, et al. From the 13km RUC to the rapid refresh. 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology, Atlanta, 2006. Amer Meteor Soc, 2006.
- [7] NOAA Earth system Research Lab. The High-Resolution Rapid Refresh (HRRR). <http://rapidrefresh.noaa.gov/hrrr>.
- [8] Du J, DiMego D, Tracton M S, et al. NCEP short-range ensemble forecasting (SREF) system: Multi-IC, multi-model and multi-physics approach// Cote J. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, Report 33. CAS/JSC Working Group Numerical Experimentation, WMO/TD-No. 1161, 2003. http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/srefWMO_2003.pdf.
- [9] Zhou B, Du J, Manikin G, et al. Introduction to NCEP's time lagged North American Rapid Refresh Ensemble Forecast System (NARRE-TL). Conference on Aviation Range and Aerospace

- Meteorology, Los Angeles, August, 2011. Amer Meteor Soc, 2011.
- [10] Koch S E, Ferrier B, Stoelinga M T, et al. The use of simulated radar reflectivity fields in the diagnosis of mesoscale phenomena from high-resolution WRF model forecasts. 11th Conf on Mesoscale Processes, Albuquerque, Oct 2005. Amer Meteor Soc, 2005.
- [11] Zhou B, Du J, Liu S, et al. Verifications of simulated radar reflectivity and echo-top forecasts at NCEP, 24th Conference on Weather and Forecasting, Seattle, Jan, 2011. Amer Meteor Soc, 2011.
- [12] Bright D R, Wandishin M S, Jewell R E, et al. A physically based parameter for lightning prediction and its calibration in ensemble forecasts. 22nd Conf on Severe Local Storms, Hyannis, Oct, 2004. Amer Meteor Soc, 2004.
- [13] Zhou B, Du J, McQueen J, et al. An introduction to NCEP SREF aviation project. 11th Conf on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, Oct, 2004. Amer Meteor Soc, 2004.
- [14] Bernstein B C, McDonough F, Politovich M K, et al. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(7): 969-986. doi:10.1175/jam2246.1.
- [15] Trojan G. GRIB Aviation Products. WAFC Washington Progress Report, Washington D C, August, 2007.
- [16] Ellrod G P, Knapp D I. An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use. Wea Forecasting, 1992, 7(1): 150-165.
- [17] Turp D J, Macadam I, Bysouth C, et al. Development of GRIB Icing an Turbulence Products for WAFC London: WAFC London Progress Report, London, November, 2006.
- [18] Sharman R, Wolff J, Wiener G. Technical description document for the graphical turbulence guidance product v2 (gtg2). FAA AWRP Turbulence PDT Project Technical Report, Boulder, 2004.
- [19] NOAA/National Weather Service. NWS Instruction 10-813 of TAF. Washington D C: NOAA, 2004.
- [20] Zhou B, Du J, Gultepe I, et al. Forecast of low visibility and fog from NCEP: current status and efforts. Pure and Applied Geophysics, 2011, 169(5/6): 895-909. doi:10.1007/s00024-011-0327-x.
- [21] 杜钧, 周斌斌. 雾的集合预报与集合预报的检验. 气象科技进展, 2016, 待发表.
- [22] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event. J Appl Meteor, 1999, 38(4): 385-404.
- [23] Smirnova T G, Benjamin S G, Brown J M, et al. Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility forecasts. 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, 2000. Amer Meteor Soc, 2000.
- [24] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF, Version 2. NCAR Technical Note, 2005.
- [25] Clark P A, Harcourt S A, Macpherson B, et al. Prediction of visibility and aerosol within the operational Met Office Unified Model. I: model formulation and variational assimilation. Q J R Meteorol Soc, 2008, 134(636): 1801-1816. doi:10.1002/qj.318.
- [26] Rasmussen R M, Vivekanandan J, Cole J, et al. The estimation of snowfall rate using visibility. J Appl Meteor, 1999, 38(10): 1542-1563.
- [27] Kunkel B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. J Climate Appl Meteor, 1984, 23(1): 34-41.
- [28] Gultepe I, Müller M D, Boybeyi Z. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models. J Appl Meteor Climatol, 2006, 45(11): 1469-1480. doi:10.1175/jam2423.1.
- [29] Aviation Weather Center/NCEP. Aviation Digital Data Service. <http://www.aviationweather.gov/adds/cv>.
- [30] Glahn H R, Lowry D A. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. J Appl Meteor, 1972, 11(8): 1203-1211.
- [31] Ghirardelli J E, Glahn B. The meteorological development laboratory's aviation weather prediction system. Wea and Forecasting, 2010, 25: 1027-1051.
- [32] Gardener T. Runway Visual Range. TMS Photometrics, 2007. <http://www.maths-in-industry.org/miis/137/1/runwayvr.pdf>
- [33] Ryerson W R, Hacker J P. The potential for mesoscale visibility predictions with a multimodel ensemble. Wea and Forecasting, 2014, 29: 543-562.
- [34] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. Wea Forecasting, 2010, 25: 303-322.
- [35] Duan Y, Gong J, Du J, et al. An overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP). Bull Amer Meteor Soc, 2012, 93: 381-403.
- [36] Baker R J, Cramer J, Peters J. Radiation fog: UPS Airline conceptual models and forecast methods. 10th Conf on Aviation, Range, and Aerospace. Portland, 2002. Amer Meteor Soc, 2002.
- [37] Black T L. The new NMC Mesoscale Eta Model: Description and forecast examples. Wea Forecasting, 1994, 9: 265-278.
- [38] Zhou B, Ferrier B S. Asymptotic analysis of equilibrium in radiation fog. J Appl Meteor and Climatol, 2008, 47: 1704-1722.
- [39] Zhou B. Introduction to a new fog diagnostic scheme. NCEP Office Note 466, 2011
- [40] Beljaars A. The parameterization of the planetary boundary layer. ECWMF Report, 1992.
- [41] Beare R. An intercomparison of large-eddy simulation of the stable boundary layer. Boundary-Layer Meteor, 2006, 118: 247-271.
- [42] Gultepe I, Zhou B, Milbrandt J, et al. A review on ice fog measurements and modeling. Atmos Res, 2015, 151: 2-19.
- [43] Gultepe I, Kuhn T, Pavolonis M, et al. Ice fog in Arctic during FRAM-Ice fog project: aviation and nowcasting applications. Bull Amer Meteor Soc, 2014, 95: 211-226.
- [44] Kim C K, Stuefer M, Schmitt C G, et al. Numerical modeling of ice fog in interior Alaska using the weather research and forecasting model. Pure Appl Geophys, 2014, 171: 1963-1982.
- [45] Wilkinson J M, Porson A N F, Bornemann F J, et al. Improved microphysical parameterization of drizzle and fog for operational forecasting using the Met Office unified model. Q J R Meteorol Soc, 2013, 139: 488-500.
- [46] 李俊, 杜钧, 陈超君. 降水偏差订正的频率 (或面积) 匹配方法介绍和分析. 气象, 2014, 40(5): 580-588.
- [47] 杜钧. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [48] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革. 气象, 2010, 36(11): 1-11.
- [49] Souders C G, Kays T, Spincic S, et al. NextGen weather requirements: an update. 14th Conf on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Atlanta, 2010. Amer Meteor Soc, 2010.
- [50] 康志明, 桂海林, 花丛. 国家级环境气象业务现状及发展趋势. 气象科技进展, 2016, 6(2): 64-69.
- [51] 李子华. 中国近40年来雾的研究. 气象学报, 2001, 59(5): 616-623.
- [52] 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.

中国雾的业务预报和应用

章国材

(中国气象局, 北京 100081)

摘要: 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, 并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。

关键词: 中国, 雾, 预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.004

The Progress of Fog Forecast Operation in China

Zhang Guocai

(China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: This paper recalls the situation and progress of fog forecasting operation in China. Three stages are experienced: the experiential forecast stage, the subjective forecast combined with the objective prediction stage, and the fine fog monitoring and forecasting stage. It points out that the developmental direction of fog forecast is to establish a regional mode in high resolution system containing advanced data assimilation. At present, it still needs to be developed the explained application method to the numerical prediction products. The experiences of forecasters still play an important role on improving the forecasts of some disastrously heavy fog events.

keywords: China, fog, forecast

0 引言

浓雾是一种发生在近地面层的灾害性天气现象, 严重的视程障碍威胁着城市道路系统、高速公路、航空港和海港航道等的安全。随着我国国民经济的快速发展, 现代化交通工具在我国日益普及, 高速公路、机场、航道对能见度的依赖日趋突出。世界航空史上曾发生过飞机在大雾中滑行相撞而造成严重后果的事故。雾对公路交通的影响是个很复杂的问题, 因为车辆制动后滑行的距离与车速、车重及路面等许多因素有关, 在一条公路行驶的车辆种类繁多, 只要有一辆车出事故, 就可能造成全路交通中断。有雾时如能见度低于200m, 高速公路应实行限速管制; 能见度低于50m, 则司机分辨不清车距而易发生汽车追尾事故, 高速公路应当关闭。近年来高速公路的恶性交通事故时有发生, 严重的甚至造成数十甚至百余辆汽车追尾相撞, 人员伤亡的惨剧。因此, 对浓雾等低能见度天气的监测预报已经成为当前气象预报的重要课题。

我国雾的业务预报大约经历了经验预报、主客观

相结合的雾预报以及精细化雾监测预报三个阶段。本文重点回顾了中国雾业务预报的历程和取得的进展, 对未来雾预报也做了一些展望。

1 经验预报

在没有数值天气预报的时代, 预报员主要根据天气学原理, 依靠天气图及辅助图表的分析和预报经验做雾的预报。由于观测资料的限制, 这个阶段预报员只能开展辐射雾、锋面雾和平流雾的预报, 不可能开展由局地环境引起的雾(蒸发雾、上坡雾等)的预报。

辐射雾主要是因为夜间地面辐射冷却, 当近地表的气温降低到露点或露点以下达到饱和, 水汽凝结而形成雾。预报员根据辐射雾的形成原理, 寻找有利于辐射降温的天气形势, 例如高压楔、高压带、高压中心、高压后部等高压系统, 弱气压场, 低压系统等, 分析地面水汽、风、变温、变压、稳定度等气象条件; 在冬半年, 当地面湿度较大和微风时, 天空晴朗, 夜晚由于辐射降温, 通常预报第二天早晨会出现雾。

平流雾是暖湿空气移到较冷的陆地或水面时, 因下部空气冷却而达到饱和, 水汽凝结而形成的。因此, 预报员通常关注有利于平流雾形成的三种天气形势: 入海变性高压的西部、太平洋高压西部以及气旋

收稿日期: 2015年1月14日, 修回日期: 2015年4月20日

作者: 章国材(1945—), Email: zhanggc@cma.gov.cn

和低槽的东部。在这三种地面形势下，着重分析近地面层的温湿和乱流条件，比较本站和上游站的天气要素，依靠经验做出雾的预报。

锋面雾则根据预报区未来24h为锋前或锋后（暖锋前后发生概率更大），当预报地面风速较小，湿度较大，近地层接近饱和并伴有逆温层时，则预报有雾。

最常见的海雾是由于暖空气平流到冷海面上形成的，因此，关注海面温度和暖空气向海面的输送是海雾预报的着眼点。

在这个阶段，无论是天气形势预报还是气象要素预报都是依靠预报员的经验外推得到的，因此这个阶段一般只能做24h内雾的定性预报，雾的预报准确率较低，在预报中很难区分轻雾和浓雾，更无法预报不同能见度的雾。且只有国家基本气象站有雾的24h人工观测，一般气象站只在白天进行雾的人工观测，因此，这个阶段雾预报的空间分辨率也很低。

2 主客观相结合的雾预报

20世纪80—90年代，由于我国高速公路和机场的快速发展，对提高雾预报准确率提出了迫切的需求，全国各级气象台站大大加强了雾预报的统计研究工作。在许多省20世纪90年代出版的天气预报手册中都可以看到大雾预报的方法，其基本思路是：根据历史大雾观测记录，统计分析大雾生成的气候概况和天气形势，研究大雾发生的气象条件，计算分析大雾形成前各种物理量场的分布，提出各种预报大雾的方法。与此同时，由于经费的限制，这个阶段尚没有能力大规模建设高速公路气象监测系统，因此不能开展精细的雾预报。

2.1 雾生成条件的研究和客观预报方法的建立

浓雾的形成涉及到四个基本因素：水汽、降温、风和凝结核。在这个阶段，预报员仍然不考虑凝结核问题，而是先验地认为凝结核的条件总是被满足的。很多人研究了雾生成的气象条件^[1-3]。第一，对于水汽条件，很显然浓雾只有在相对湿度大的条件下才能形成，前期根据气象站雾和相对湿度观测资料的统计分析，认为地面相对湿度至少 $\geq 80\%$ 才有可能形成雾^[2]；后来根据外场试验精细的观测数据分析进一步得出结论，出现雾时极端最小相对湿度是 91% ^[4-5]。第二，只有当气温降低到露点或露点以下，空气达到饱和和凝结条件时才能形成雾，因此降温预报是预报员需要考虑的第二个因素。第三，风速对雾的形成也有一定影响。如果没有风，就不会使上、下层空气发生交换，冷却效应只发生在贴近地面的气层中，只能生成一层薄薄的浅雾。如风太大，上下层空气交换很快，

流动也大，气温不易降低很多，则难以达到水汽过饱和状态。统计表明：辐射雾和平流雾的地面风速分别以 $1\sim 3$ 和 $3\sim 6\text{m/s}$ 为宜。第四，925与1000hPa这一较薄气层稳定或弱不稳定有利于雾的形成， $\Delta\theta_{se}$ 值在 $-2\sim 6^\circ\text{C}$ 为宜。由此，各级气象台站发展了雾预报的指标法^[1-2]，例如，张德山等^[3]通过分析影响首都机场高速公路能见度的6种典型地面天气形势场，确定将大气稳定度、低层水汽含量和低空大气中悬浮颗粒物3个基本气象要素作为预报因子，得出各月的日能见度预报指标，制作首都高速公路（不分区段）能见度等级（5个等级： $\geq 10\text{km}$ 、 $4\sim 9\text{km}$ 、 $2\sim 4\text{km}$ 、 $1\sim 2\text{km}$ 、 $< 1\text{km}$ ）24h预报，凡首都高速公路出现与预报相同等级的能见度则评定为准确，2000—2001年预报准确率为70%左右。

海洋平流冷却雾是由于暖湿气流输送到冷水面上，低层空气温度下降至露点而成雾，因此，适宜成雾的海面条件主要包括一定的海表面水温(T_w)，适宜的海气温差($T_w - T_a$)。王彬华^[6]给出了平流冷却雾成雾的海气温差范围为 $-3^\circ\text{C} \leq (T_w - T_a) \leq -0.5^\circ\text{C}$ ，而最高海水温界限为 $T_w \leq 25^\circ\text{C}$ 。以后许多作者根据新的资料统计了当地海雾发生的海洋-大气界面热力学条件，这些统计结果一般都没有突破文献^[6]的范围，但要比文献^[6]更具体。适宜的风向和风速将暖湿气流向冷水面输送是海雾产生的重要条件，海雾出现时的具体风向、风速，因不同海区和地形而有差异。

随着20世纪80年代初我国数值天气预报业务的建立，特别是数值天气形势预报质量超过预报员的经验外推预报之后，雾预报进入基于数值天气分析预报的新阶段。无论是客观预报方法还是主观预报，可以用于雾预报的产品不仅有实况观测资料，而且还有上述雾生成气象条件的数值预报产品，除此之外，还有更丰富的与雾生成有关的其他物理量产品，例如垂直速度、散度、涡度、混合层高度、稳定度参数及垂直交换系数等产品。因此，各种数值预报产品解释应用的方法应运而生：1) 完全预报(perfect prediction, PP)方法^[7-8]，这种统计模型是使用历史资料建模，而实际预报时，预报因子的值仅来自数值预报模式输出产品，这种方法的准确率不仅取决于用历史资料建立的统计模型的准确性，还取决于数值模式气象要素预报的准确度。2) 模式输出统计(model output statistics, MOS)法^[9-13]，这种预报方法的预报因子来自数值预报产品、气象观测数据以及气候数据。建模和预报都使用数值预报产品，在建模时已考虑了数值预报的误差和不确定性。因此，模式输出统计法可

看作是用观测值不断纠正模式输出结果误差的过程。

3) 基于支持向量机 (support vector machine, SVM) 方法^[14-15]是一种以统计学习理论为基础的非线性小样本学习方法, SVM的最终决策函数只由少数的支持向量所确定, 计算的复杂性取决于支持向量的数目, 而不是样本空间的维数, 非常适于处理非线性物理问题。

4) 神经网络方法^[16-19]是指由大量类似于生物神经细胞的处理单元 (神经元) 相互连接而成的, 具有一定智能功能的网络。根据神经元在网络中的连接方式、学习方式和信息传递方向的不同而衍生出不同的网络类型。气象上经常采用的网络类型是应用最为广泛的基于误差反向传播 (error back propagation, BP) 学习算法的人工神经网络。例如, 王雷等^[17]选取1980—1992年芜湖机场气象台地面观测资料, 包括风向、风速、能见度、天气现象、温度、露点温度、相对湿度、水汽压、本站气压和海平面气压共10项。还采用了芜湖邻近的南京、安庆、上海和杭州站同时段的地面气象资料。利用BP人工神经网络方法制作芜湖机场雾的预报, 用1991—1992年的资料进行芜湖机场雾的试报, 雾日报对次数为55, 漏报次数为4, 空报次数109, 命中率为33.5%, 空报率为66.59%, 漏报率为6.8%, 临界成功指数为32.7%。需要指出的是, 无论是MOS、SVM还是神经网络方法等统计方法, 当数值预报模式升级时, 都需要使用新的数值预报产品重新建模; 而且对不同的气候区都需要建立不同的统计模型, 工作量大, 这是统计预报的一大缺点。

2.2 雾数值模式的研发

这个阶段我国也研发了一维雾模式。一维雾模式最基本的假设是热力学变量在水平方向上具有均一性, 因此, 雾的演变主要由大气辐射场、湍流混合以及地表的水汽和热量通量驱动, 不考虑水平平流或大尺度沉降等动力过程。周斌斌^[20]在Brown等的雾模式的基础上做了改进, 考虑了风温廓线随时间的变化, 湍流交换系数由风温廓线计算, 分析了辐射雾的形成过程。尹球等^[21-22]对辐射过程、微物理过程和大气湍流交换过程进行了适当的参数化处理, 建立了一个一维辐射雾数值模式, 并用于雾整个生消过程的模拟。

李子华^[23]系统回顾了我国二维和三维雾模式的研发历程, 指出: 20世纪80年代末和90年代初, 中国开始研究二维辐射雾模式, 模式包括大气长波辐射冷却、地表能量收支、液态水重力沉降等影响雾的形成和发展的主要因子, 并采用了一个高度变换坐标系, 有效而简便地将长江两岸的复杂地形引入模式。接着在对重庆雾综合观测试验之后, 又发展了复杂地形二维非定常雾模式, 以实测资料为初始场, 研究了一次

重庆雾的形成和发展过程, 对江河、城市热岛、重庆地形, 以及长波辐射冷却等对雾的影响分别做了模拟试验, 得到一些符合观测事实的结论。其中城市热岛对雾的影响有二重性: 一方面热岛环流可以增强市中心与长江之间的气流辐合上升, 把水汽从低层带入高层, 有利于雾的垂直发展; 另一方面, 城市的高温又不利于雾的形成, 这一重要结论可以解释重庆雾为什么随着城市发展而逐渐减少, 有雾时雾顶很高, 雾层很厚等问题。由于重庆雾分布不均匀, 具有明显的三维结构特征, 且地形复杂而又不对称, 二维模式具有明显的不足。由此发展了复杂地形上雾的三维数值模式。用这个模式模拟重庆的山地、河流和城市热岛而引起的局地环流, 模拟冬季一次雾的生消过程、空间分布特征与实况接近。后来利用这个模式对西双版纳地区的辐射雾研究也获得成功。但是这些雾数值模式都没有应用于雾的业务预报。

3 精细雾的监测和预报

21世纪, 我国高速公路气象监测系统的建设大大促进了雾的精细监测和预报业务的发展。表现在以下几个方面。

3.1 雾形成条件的精细分析

雾形成条件的精细分析是雾精细监测预报的基础。高速公路精细的能见度观测系统为雾形成条件的精细分析提供了基础资料。根据南京交通气象研究所^[4]的统计, 出现雾时, 极端最小相对湿度是91%, 也就是说相对湿度至少要达到90%以上, 才能使雾稳定存在。浓雾形成前最大相对湿度为93%~98%的几率达94.6%。他们还分析了局地“团雾”的生成条件: 1) 1.5h降温幅度可达1℃, 且随能见度波动而波动; 2) 风速在0.8m/s以上, 甚至达到2.0~2.4m/s, 两者都比成片雾大。

冯民学等^[5]经众多浓雾形成的物理过程的历史样本分析研究后, 得出沪宁高速公路有利于近地层成雾的条件为:

1) 具有维持晴空、微风的低层均压场和高层高压脊 (有暖平流) 的大尺度天气形势。

2) 具有稳定的大气层结, 贴近地面和低空存在逆温层。逆温层的平均强度: $\Delta T/\Delta H = (1.5\sim 2.5)^\circ\text{C}/100\text{gpm}$ 。逆温层愈厚愈强则雾愈浓。

3) 具有良好的晴空长波辐射条件。辐射降温率在02—04时 (1.0~1.8) °C/h最有利于雾的形成。且近地层空气净辐射处于负值时间愈长愈有利于辐射雾的形成。

4) 风的脉动作用。经研究分析, 风的脉动有利于雾滴的增长而使能见度降低。因为能见度 $V = \frac{4.98}{\sum n_i r_i^2}$

(式中, n_i 为第 i 组的雾滴数, r_i 为第 i 组的雾滴半径), 能见度距离与雾滴的数量和雾滴的半径的平方成反比。在风的作用下, 因碰并形成雾滴半径的变异, 而使大雾滴迅速形成和增多, 造成能见度急剧下降。从近两年的浓雾监测中也证实了 2min 平均风速在 0.4~1.8m/s 时最有利于雾的形成。

张利娜等^[24]通过对首都国际机场高速公路 21 个月中能能见度最低月资料的分析表明, 大气能见度与湿度间呈明显的幂指数分布关系, 其与气温呈 U 型相关。但在月平均能见度最大月, 能见度则与湿度呈指数关系。200m 以下的低能见度基本上是湿度在 100% 的情况下发生的, 即都是大雾天气影响的直接结果, 但对 200m 以上的低能见度则不同, 200~1000m 能见度只有一半是因为雾, 而 1~4km 的能见度中不到 1/3 是因为雾, 其他主要是由灰霾、沙尘暴等天气现象造成。从物理上来看, 大气能见度与湿度的关系, 主要通过水汽分子的瑞利散射和雾的米氏散射两个方面来表现; 风速则是由于压力阻力卷起大气气溶胶来影响大气能见度的。

吴兑等^[25]分析南岭山区浓雾发生同时段内的周边区域的探空观测资料, 发现形成浓雾的大气结构的主要或关键性特征有: 1) 近地面至 925hPa (约 900m) 高度, 大气层结呈中性状态, 而 925hPa 以上高度层结为稳定状态; 2) 从地面至 400 或 300hPa, 大气相对湿度较大, 接近准饱和状态; 3) 风速的垂直分布为: ① 700hPa 以下为偏西北或偏北风, 其上为西南风; ② 700hPa 以下为偏西南或偏南或偏东南风, 500hPa 以上为偏西南风, 而 700 和 500hPa 上为偏西北风。低层的风速一般都在 16m/s 以下。若大气运动的结构同时满足以上 3 点特征, 则南岭山区一定有浓雾。在此基础上, 建立了南岭山地雾的结构预测方法。将能见度 (V) 分为 5 个等级 ($V \geq 1000\text{m}$, $500\text{m} \leq V < 1000\text{m}$, $200\text{m} \leq V < 500\text{m}$, $50\text{m} \leq V < 200\text{m}$, $V < 50\text{m}$), 规定预测能见度等级与实测等级一致, 得 100 分; 预测的能见度等级与实测等级相差一级, 得 50 分; 预测能见度等级与实测等级相差两级或以上, 得 0 分。则 2003 年 12 月、2004 年 1—3 月和 2004 年 11 月南岭山区能见度预报准确率为 81.1%。

这些研究成果不仅丰富了雾客观预报的气象因子, 也成为雾业务预报的重要指导。

针对气溶胶对雾的形成与发展的作用也进行了一些研究。施晓晖等^[26]指出: 北京及周边地区冬季雾日数和气溶胶光学厚度则呈正相关, 并具有“同位相”的年际变化趋势。石春娥等^[27]在三维雾模式中, 对增加气溶胶粒子与不考虑气溶胶两种情况下雾的形成与

发展过程进行了研究, 结果表明: 气溶胶粒子的存在, 由于其温度效应的存在, 使地面雾形成时间推迟, 低层雾含水量普遍减小; 适量的气溶胶粒子有利于重庆雾向高处发展, 当气溶胶粒子成倍增加后, 对雾的形成与发展有阻碍作用。但是, 在雾预报中如何考虑气溶胶浓度的影响, 还没有得到可以应用的成果。

3.2 雾精细化监测和临近预报

3.2.1 雾的监测

进入 21 世纪, 雾的监测业务大大加强。一是国家气象站全部安装了自动化能见度观测设备, 实现了每分钟能见度的自动观测, 观测精度达到米级。二是高速公路安装了大量能见度的观测设备。沪宁高速公路、京津唐高速公路、沈大高速公路、成渝高速公路和京珠高速公路粤境北段都安装了比较密集的能见度观测设备^[4, 28-29]。南京交通气象研究所^[4]根据沪宁高速公路多年雾的观测研究, 提出了高速公路雾监测的布点方案: 1) 在浓雾多发的山地、水汽和冷空气容易积聚的低谷、易发团雾的河网地区, 监测站的密度要大一些, 间距 3~5km 为宜。2) 在季节性浓雾多发地区, 监测站间距以 10km 左右为宜。3) 在低能见度浓雾偶发地区, 监测站间距可增大到 20~50km。三是建立了卫星反演雾的业务。国家气象站能见度观测是“点”观测, 高速公路能见度观测也仅是“线”观测, 实现能见度“面”观测的手段只有气象卫星, 用气象卫星反演和监测雾已有很多研究成果^[30-33], 国家卫星气象中心在研究成果的基础上, 既用静止气象卫星 (风云二号、MTSET), 也用极轨气象卫星 (风云三号、NOAA 极轨卫星) 反演雾, 通过中国气象局广播系统 (CMACAST) 分发雾卫星监测产品, 各级台站都能实时接收到这些产品。

海洋雾的监测主要依靠气象卫星。由于雾的高度接近或贴近地面, 所以它们的温度和周围环境场的温度十分接近, 在红外卫星云图中很难被识别, 而在可见光云图上由于其反照率与周围环境场存在较大的差别, 雾区较容易辨认, 但是无法识别云下的海雾。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^[34]提出了使用光学厚度定量反演雾顶高度的经验方法。Heidinger 等^[35]对此方法进行了修正。Bendix^[36]和 Bendix 等^[37]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^[38]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 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。但是, 当上空有云层覆盖时, 无法识别云层覆盖下的近海面的雾。

3.2.2 雾的临近预报

以往对浓雾的形成,尤其是低能见度浓雾的形成,由于缺少观测资料,很难做到“定时”。只能在有利于形成雾的天气背景下,从经验和成雾要素指标分析,预报“凌晨”或“下半夜起”有无浓雾(仅指能见度小于1000m),不可能预报浓雾的起始时间和变化。有了每分钟的能见度观测资料,我们对浓雾形成的突发性以及波动性有了新的认识。冯民学等^[5]根据高速公路气象监测站的连续自动监测资料指出:水平能见度的变化并不是一个渐变的过程,监测到的能见度从1000m以上降至100 m以下,一般为25~30min,但有时只有5~10min。能见度的演变也不一定是稳定下降或稳定上升,而可能是反复在1~2km和100~200m波动,这种波动时段少则40min~1h,最长一次达165min。可以根据环境温、湿度条件和雾的波动特征做出雾的临近预报。但是,以上雾的变化特征与局地环境关系很大,需要逐地进行分析。

李永平等^[39]将气象卫星云图雾监测和中尺度数值预报产品相结合制作大雾临近预报,其基本思路是:应用云雾光谱特征和结构特征进行雾区的动态检测和提取,利用地面自动气象站资料,分析雾区变化与多气象要素的关系,然后利用经修正的中尺度数值天气预报模式输出的气象要素产品,对卫星遥感雾区进行0~2h预报,对2009和2010年1—4月的多雾季节的大雾过程应用统计结果表明,该方法对大雾临近预报具有一定的效果。

3.3 雾短期预报

目前雾短期预报有统计预报、数值预报和预报员在此基础上的业务预报三种。

3.3.1 统计预报

数值预报产品的统计释用方法在雾预报业务中得到广泛应用。王在文等^[14]发展了基于SVM的雾精细化预报方法。在MM5 V3模式3km预报范围内,选取预报站点(北京市五元桥)周围4个网格点上975, 925, 850, 500和200hPa的 u , v , T , H , RH , CLW (云水)以及 $PSEA$, RT ($RC+RNC$)共128个数值天气预报因子,以及预报当天预报初始时刻的10m风向和风速、24h累计降水、本站气压、3h变压和总云量共6个实况因子,经归一化处理后的因子值形成符合SVM方法所需要的固定样本集(2006年春季182个理想样本),对3~48h各预报时次(3, 6, 9, 12, ..., 48h)进行建模,用2007年春季五元桥能见度观测资料进行预报检验,40%的大气能见度等级预报与观测一致,90%以上预报的等级偏差在一级之内(含等级

相同),在未来3~48h各种预报时效,大气能见度等级预报效果稳定。

3.3.2 数值预报

我国在2000年以后开始较多地使用中尺度模式进行雾的模拟研究^[40-43],取得了许多成果,认为好的中尺度数值模式(例如WRF)可以较好模拟雾的生成条件,但也存在不少问题,并揭示出模式物理过程和初始资料对雾预报的敏感性。但是,目前业务数值预报模式的直接输出产品中都没有雾的产品,提供业务使用的雾客观预报产品都是数值天气预报解释应用产品。虽然中国气象科学研究所的CUACE模式、北京市气象局的大气化学模式都在业务运行,并根据气象能见度距离与消光系数反比关系(Koschmieder能见度公式)和模式预报的气溶胶的质量浓度,预报能见度,但是并非真正的雾预报。

我国对海雾的数值模拟开展较晚^[44-50],主要使用区域模式(如MM5、RAMS、COAMPS、WRF和GRAPES等)对雾的三维结构以及雾对能见度的影响进行了一系列研究,并对其机制进行了探讨。但是,对各种物理因素,如平流、辐射、湍流和SST等如何相互作用,如何影响海雾的水平和垂直发展,以及海雾和陆地辐射雾相比有什么异同,不同海雾之间的异同,仍然缺乏深入和全面的认识。

国家气象中心基于PSU/NCAR的WRF模式2.2版本,优选模式微物理过程和边界层方案,采用Stoelinga能见度计算方程^[51],建立了黄渤海海雾数值预报系统^[52]。选取2007年3—6月的海上大雾(能见度小于1km)进行数值预报回算试验,利用沿海站点能见度的大雾观测资料进行点对点检验(数值预报的格点能见度预报用双线性内插法内插到沿海站点上),正确率达到80%,说明此海雾数值预报系统对海上大雾有较好的预报能力。

3.3.3 业务预报

预报员的雾预报思路主要采取从大(天气背景场)到小(所在地域范围),从远到近的跟踪判断预报法。短期雾预报既有落区预报也有单点(例如机场)预报,雾的临近预报业务主要在机场、高速公路和大城市开展。

目前国家气象中心每日08和20时提供2次24h全国雾的落区预报。省和省以下业务单位在上级指导产品的基础上,制作辖区内短期雾的预报产品。雾短期预报流程:预报员分析实时能见度观测资料、成雾的天气形势和数值预报解释应用产品→分析数值预报产品

中有关雾生成的气象要素误差并订正之→做出雾的落区预报。

雾临近预报只在省级及以下业务单位开展。雾临近预报流程：分析跟踪每小时卫星云图→根据自动监测系统的能见度、温湿度和风向风速的演变规律→做出浓雾变化的临近预报。

3.4 高速公路雾监测预警服务系统

21世纪,我国已经在多条高速公路上建立了雾监测预警系统^[4, 28-29],而且已经成为雾业务预报的重要组成部分,为高速公路的管理、减少交通事故发挥了重要作用。高速公路雾监测预警服务系统主要由环境气象自动监测系统、通信传输系统、雾预报系统、运营决策管理支持系统和信息发布系统等组成。

高速公路自动环境气象监测系统按3.2节指出的布局原则建设能见度、温度、湿度和风等观测设备,实现每分钟雾的监测。各类环境气象要素监测资料利用公网的GPRS(通用分组无线业务)及时传送到监控中心。根据3.1节获得的知识,利用现代化气象装备(气象卫星云图、气象雷达、各类气象地面及探空观测站、高速公路沿线布设的环境气象监测站)和气象信息综合分析处理系统(MICAPS),建立高速公路低能见度监测预警、预报模型。在沪宁高速公路的雾季,每年10月一次年4月,监测预报人员实行24h值班,如判断午夜后有小于500m的大雾,即在22时发布第一次预警。以后提前1h预测能见度小于200m出现的大致时间,当能见度小于200m时,判断未来能见度变化趋势(维持、加浓、减弱、消散),做出浓雾变化的临近预报,特别是提前预测能见度大于200m的浓雾消散时段,以便及时恢复公路的正常运行,发挥最大的社会效益。高速公路运营管理决策支持系统包括高速公路沿线布设的环境气象监测站的实时监测信息、全省和全国的各类气象信息、高速公路低能见度预报系统制作的预警和预报产品、高速公路路况信息以及交通运营管理规则等。本系统是实现智能交通管理的一个重要子系统,目的是为高速公路提供气象保障信息,并结合公路运营规则,供指挥调度人员制定运营决策提供依据,实现高速公路的科学安全运行。

4 展望

进入21世纪,雾的监测和预报虽然取得了较大进展,但是对雾的时间、空间和量级精细化预报能力和准确率仍然不足,与保障交通安全和提高效益的需求存在明显差距。

由于雾发生、发展过程的复杂性,对不同时间和

空间尺度上雾过程的不完全理解,仍存在不少认识上的必然王国,是制约雾准确预报的重要因素。尽管一维雾模式具有详细的雾物理过程,其与中尺度数值模式的耦合在一定程度上提高了雾的预报能力,在雾的定量预报中已经展示出一定的优势^[53-54]。然而,一维雾模式动力方面明显不足,它需要非常准确的初始和边界条件。在实际应用中常与三维中尺度模式配合,由中尺度模式提供这些条件。三维雾模式也只是为研究雾而设计的,没有考虑大尺度环境因素对雾的生成和消散的影响,因此只有研究价值。目前通常还是用常规的三维中尺度模式来进行雾的模拟和预报。常用的中尺度模式有目前流行的WRF模式和我国自主研发的GRAPES-meso模式。目前中尺度业务模式的地面温、湿度都存在偏差(Bias),在很多情况下雾不能从中尺度模式中产生。这时怎样预报雾,对不完美的中尺度业务模式来说是一种挑战。Zhou等^[55]用“Rule-based”的方法在模式后处理器中进行雾的再诊断是一种尝试。该方法尽管不能预报雾的强度,但对雾是否发生的预报比通常用的中尺度模式(如WRF)有明显的提高。

在中尺度数值模式中,有关雾的微物理过程、湍流过程、辐射过程、边界层结构等的合理描述,对雾的预报至关重要。例如,湍流和辐射过程对雾的形成、发展和消亡具有非常重要的影响,但这些过程具有很大的不确定性,由于模式物理参数化过程的不确定性,模拟有时会得到与观测完全相反的结果^[53]。因此,要更好地进行物理参数化,发展精细化的数值预报系统,需要不同条件下大雾的细致观测,需要加强关于湍流作用、大气与复杂下垫面相互作用的基础研究。

初始条件的准确性在很大程度上会影响模式的预报效果^[54, 56],提高模式初始条件的质量对于准确预报雾的形成和演变具有重要的意义。资料同化技术的研究和新数据源的应用可以提供更好的初始条件,从而使雾的预报更准确。但是,关于雾的资料同化研究还非常少。Wang等^[57],应用三维资料同化方法利用从多功能传输卫星(MTSAT)的红外和可见云图反演得到的相对湿度分布对WRF模式的初始场进行订正,表明可以改善黄海海雾的临近预报。随着观测资料的不断丰富,采用先进的资料同化技术获得精确的模式初值将是雾预报中一项迫切任务。

由于雾的数值预报对初值和物理过程都很敏感,因此,发展多初值和多物理过程的雾的集合预报系统很有必要^[55, 58]。Zhou等^[55]的研究表明集合预报技术的应用对雾的可预报性确实有明显的提高。

即使未来建立了包含先进资料同化系统的高分辨率区域模式,但是数值预报误差仍然存在,因此仍然需要发展数值预报产品解释应用技术和集合预报系统。与此同时,预报员的经验在提高大雾这种灾害性天气的预报准确率方面仍然有用武之地。

参考文献

- [1] 吴洪,柳崇健,邵洁,等.北京地区大雾形成的分析和预报.应用气象学报,2000,11(1):123-127.
- [2] 毛冬艳,杨贵名.华北平原雾发生的气象条件.气象,2006,32(1):78-83.
- [3] 张德山,魏建明,陈廷良,等.首都机场高速公路能见度预报方法.气象科技,2002(6):358-361.
- [4] 田小毅,吴建军,严明良,等.高速公路低能见度浓雾监测预报中的几点新进展.气象科学,2009,29(3):414-420.
- [5] 冯民学,顾松山,卞光辉.高速公路浓雾监测预警系统.中国公路学报,2004,17(3):92-97.
- [6] 王彬华.海雾.北京:海洋出版社,1983.
- [7] 赵玉广,李江波,康锡言.用PP方法做河北省雾的分县预报.气象,2004,30(6):43-47.
- [8] 孔璐,刘承光.气象数据管理与共享技术研究//第七届长三角科技论坛能源分论坛——长三角气象科技论坛论文集,2010:405-408.
- [9] 郭秀英,糜若夫.华南沿海春季海雾与天气型关系的统计分析及其预报.广东气象,1991,13(1):25-27.
- [10] 胡基福,郭可彩,鄢利农.应用模式输出统计作海雾出现判别预报.青岛海洋大学学报,1996(4):53-59.
- [11] 李法然,周之栩,陈卫锋,等.湖州市大雾天气的成因分析及预报研究.应用气象学报,2005,16(6):794-803.
- [12] 黄辉军,黄健,刘春霞,等.用GRAPES模式输出变量因子作广东沿海海雾预报.热带气象学报,2010,26(1):31-39.
- [13] 贺皓,姜创业,徐旭然.利用MM5模式输出产品制作雾的客观预报.气象,2002,28(9):41-43.
- [14] 王在文,张朝林,苏晨,等.基于非线性支持向量机的大气能见度等级预报方法研究//能见度预报经验交流研讨会暨青年科技工作者论坛.2009.
- [15] 贺皓,罗慧.基于支持向量机模式识别的大雾预报方法.气象科技,2009,37(2):149-151.
- [16] 梅珏.人工神经网络在辐射雾预报中的应用.应用气象学报,1999,10(4):511-512.
- [17] 王雷,黄培强.利用人工神经网络预报芜湖的雾.气象科学,2001,21(2):200-205.
- [18] 袁志康,张韧,周树道,等.基于神经网络算法的某机场雾的模式识别预报.解放军理工大学学报(自然科学版),2002,3(4):82-86.
- [19] 王彦磊,曹炳伟,黄兵,等.基于神经网络的单站雾预报试验.应用气象学报,2010,21(1):110-114.
- [20] 周斌斌.辐射雾的数值模拟.气象学报,1987,45(1):21-29.
- [21] 尹球,许绍祖.辐射雾生消的数值研究(I):数值模式.气象学报,1993,51(3):351-360.
- [22] 尹球,许绍祖.辐射雾生消的数值研究(II):生消机制.气象学报,1994,52(1):60-67.
- [23] 李子华.中国近40年来雾的研究.气象学报,2001,39(5):616-624.
- [24] 张利娜,张朝林,王必正,等.北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析.大气科学,2008,32(6):1229-1240.
- [25] 吴兑,邓雪娇,游积平,等.南岭山地高速公路雾区能见度预报系统.热带气象学报,2006,22(5):417-422.
- [26] 施晓晖,徐祥德.北京及周边气溶胶区域影响与大雾相关特征的研究进展.地球物理学报,2012,55(10):3230-3239.
- [27] 石春娥,姚克亚,马力.气溶胶粒子对城市雾影响的模拟研究.气候与环境研究,2001,6(4):485-492.
- [28] 张金满,赵娜,马翠平,等.基于GIS技术的智能化交通气象服务系统的开发研制.山东气象,2014,34(1):68-73.
- [29] 黎颖智,邓英姿,刘世学,等.广西高速公路雾预报系统设计与实现.气象研究与应用,2013,34(3):43-46.
- [30] 李亚春,孙涵,徐萌.卫星遥感在大雾生消动态监测中的应用.灾害学,2001,16(1):45-49.
- [31] 张顺谦,杨秀蓉.基于神经网络和分形纹理的夜间浓雾遥感监测技术.应用气象学报,2005,16(6):804-810.
- [32] 樊建勇,黄玲,祝必琴,等.NOAA/AVHRR遥感数据在夜间雾监测中的应用.江西农业大学学报,2011,33(1):189-193.
- [33] 周小珂,严卫,白衡,等.基于DMSP/OLS数据的夜间低云大雾监测技术研究.遥感信息,2012,27(6):86-90.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 朱小祥,吴晓京,李三妹.海雾判别条件.中国气象局海洋气象预报警报项目技术报告.北京:国家卫星气象中心,2007.
- [39] 李永平,刘晓波,葛伟强,等.一种基于卫星遥感和数值预报产品的雾预报方法.应用气象学报,2012,23(3):340-347.
- [40] 董剑希,雷恒池,胡朝霞,等.北京及其周边地区一次大雾的数值模拟及诊断分析.气候与环境研究,2006,11(2):175-184.
- [41] 梁爱民,张庆红,刘开宇,等.华北地区一次大雾过程的三维变分同化试验.气象学报,2007,65(5):792-804.
- [42] 梁爱民,张庆红,刘开宇,等.华北地区一次大雾过程的三维变分同化试验.气象学报,2007,65(5):792-804.
- [43] 刘汉卫,潘晓滨,臧增亮,等.华东地区一次辐射雾的数值模拟分析.干旱气象,2011,29(2):174-181.
- [44] 傅刚,张涛,周文琇.一次黄海水雾的三维数值模拟研究.青岛海洋大学学报(自然科学版),2002,32(6):859-867.
- [45] 傅刚,王菁茜,张美根,等.一次黄海水雾事件的观测与数值模拟研究:以2004年4月11日为例.中国海洋大学学报(自然科学版),2004,34(5):720-726.
- [46] 胡瑞金,董克慧,周发琇.海雾生成过程中平流、湍流和辐射效应的数值试验.海洋科学进展,2006,24(2):156-165.
- [47] Fu G, Guo J, Xie S P, et al. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea. Atmospheric Research, 2006, 81(4): 293-303.
- [48] Fu G, Guo J, Angeline P, et al. An Analysis and modeling study of a sea fog event over the Yellow and Bohai Sea. J Ocean Univ Chin, 2008,7(1):27-34.
- [49] Gao S, Lin H, Shen B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: Analysis and numerical modeling. Adv Atmos Sci, 2007, 24(1): 65-81.
- [50] Gao S, Wei W U, Zhu L, et al. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huanghai Sea using MTSAT-1R IRdata. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(2):23-35.
- [51] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event. J Appl Meteor, 1999, 38(4): 385-404.
- [52] 黄彬,陈涛,陈炯,等.黄渤海海雾数值预报系统及检验方法研究.气象科技,2009,37(3):271-275.
- [53] Gulpepe I. Fog and boundary layer clouds: introduction. Pure Appl Geophys, 2007, 164(6/7):1115-1116.
- [54] Stolaki S, Pytharoulis I, Karacostas T. A study of fog characteristics using a coupled WRF-COBELOVER Thessaloniki Airport, Greece. Pure Appl Geophys, 2012(5): 961-981.
- [55] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. Wea Forecasting, 2010, 25(1): 303-322.
- [56] Shi C E, Wang L, Zhang H, et al. Fog simulations based on multi-model system: a feasibility study. Pure Appl Geophys, 2012,169(5/6): 941-960.
- [57] Wang Y, Gao S, Fu G, et al. Assimilating MTSAT-derived humidity in now-forecasting sea fog over the Yellow Sea. Wea Forecasting, 2014, 29(2): 205-225.
- [58] Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. Fog research in China: an overview. Adv Atmos Sci, 2010, 27(3): 639-662.

海雾预报研究综述

史得道¹ 吴振玲¹ 高山红² 罗凯¹

(1 天津市气象台, 天津 300074; 2 中国海洋大学, 青岛 266100)

摘要: 从统计预报和数值模拟预报两方面回顾了过去几十年国内在海雾预报技术上的主要研究进展。统计预报方法是中国沿海气象台站预报海雾的除天气学方法外的主要工具, 一定程度上能提高海雾预报准确率, 但无法摆脱自身经验统计的缺陷。随着计算机技术的飞速发展, 海雾数值模拟和预报应用越来越广泛, 并将成为海雾预报主流方法。海雾数值预报模式的发展经历了从一维到三维、从单一大气模式到海气耦合模式的过程。而研发先进的数据同化技术, 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, 将使海雾预报准确率明显提高。

关键词: 海雾, 统计预报, 数值预报, 集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.005

A Summary of Research on Sea Fog Forecasting

Shi Dedao¹, Wu Zhenling¹, Gao Shanhong², Luo Kai¹

(1 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074 2 Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: A review of the research progress over the past few decades is presented here on the sea fog forecasting technique based upon statistical and numerical prediction. The statistical method is a major tool except the synoptic method on the sea fog forecast at coastal meteorological observatories in China. It improves the forecasts of sea fog but have defects of the empirical statistics. With the rapidly development of computer technology, the numerical simulation and prediction on sea fog events are applied widely and will become the main method. Nowadays, the sea fog numerical prediction models are developed from the one-dimensional to three-dimensional and from the single atmospheric model to coupled air-sea model. The advanced assimilation technique, which assimilates the satellite data to overcome the lack of marine observations, together with the ensemble prediction in the three-dimensional numerical prediction model, which uses a higher resolution, selects the most suitable boundary layer and physical parameterization schemes, will greatly improve the sea fog forecasts.

Keywords: sea fog, statistical forecast, numerical prediction, ensemble prediction

0 引言

海雾 (sea fog) 是由于受海洋的影响, 发生在海上或沿海地区上空低层大气中凝结的水滴或冰晶, 使大气水平能见度小于1km的一种天气现象^[1]。海雾发生时, 海面水平能见度比较低, 对海上渔业、航运、平台作业及沿岸航空和公路交通等造成很大影响, 是中国近海需要高度关注的灾害性天气之一。

我国从20世纪40年代起开始对海雾进行研究, 60—70年代发展较快, 但主要限于观测与统计分析方面^[1]。20世纪80年代出版了专著《海雾》^[1]一书, 系统

地总结了80年代以前的海雾研究。该书在1985年被翻译成为英文*Sea Fog*, 是20世纪国际海雾研究的经典之作, 至今仍作为海雾研究的主要参考书之一。现今在国内外气象部门业务运行中, 对海雾的预报方法主要有天气学方法、统计方法和数值预报方法。天气学方法主要运用天气学基本原理和天气学分析方法, 考虑天气系统与海雾发生之间的联系, 对预报员的主观经验依赖性高, 预报准确率和可靠性较低; 统计预报方法通过历史资料的统计分析建立海雾与预报因子之间的统计模型对海雾进行预报。但统计预报方法缺乏对海雾过程物理规律的描述, 多依赖于历史观测资料或数值预报资料的质量和数量^[2]。随着计算机技术的进步以及对海雾宏观、微观结构和发生、发展规律的深入认识, 数值模式逐渐成为海雾预报的重要方法。本文主要从统计和数值模式两方面介绍最近几十年海雾预报技术方面取得的成果, 并展望海雾预报未来发展趋势, 为今后

收稿日期: 2015年11月18日; 修回日期: 2015年12月17日

第一作者: 史得道 (1985—), Email: sdd0928@163.com

通信作者: 吴振玲 (1963—), Email: bigwiselyyn@yahoo.com

资助信息: 天津市科技兴海项目 (KJXH2014-20); 天津市科技计划项目 (15ZCZDSF00210)

海雾预报工作提供一定的参考和启示。

1 海雾统计预报

1.1 线性回归方法

统计预报前期主要采用线性回归方法进行数据拟合,之后随着计算机技术的发展又建立了一些新统计方法,比如人工神经网络法、决策树模型法和模糊逻辑法等^[2]。20世纪90年代以来,在海雾统计预报方面开展了一系列的研究工作。王厚广等^[3]以朝连岛为代表站,经过点聚分析选取5个预报因子,然后采用二级判别分析方法建立了海雾预报方程,对未来24h内是否有雾进行预报。在1970和1972年50次海雾预报中,报对41次,报错9次,准确率为82%。该方法选取的预报因子都为相邻站点之间的气温差、气压差等,没有考虑到海洋条件的影响,且只能进行单站预报,推广效果较差。于润玲等^[4]利用MOS (Model Output Statistics)方法^[5]对黄海和东海海雾进行预报,利用黄海和东海沿岸和海岛气象站的观测资料、美国国家环境预报中心(NCEP)海温和气温资料,选取风向、风速、相对湿度、气海温差4个预报因子应用多元回归方法建立海雾等级预报方程。在实际业务中,应用大气环流模式和上海台风研究所运行的WRF^[6]模式预报输出因子,根据回归方程结果和不同等级雾的判据对黄海、东海进行海雾预报。对2007年2—4月72h内预报结果进行检验,多个站预报成功率在50%以上(图1)。该方法的建立考虑到了海洋条件对海雾形成的影响,且利用数值模式输出的海洋和气象要素进行预报,能为海上大范围的海雾预报提供较好的参考依据。但该方法没有对海雾生成类型的不同进行区分,没有建立预报因子和能见度之间的线性关系,只根据拟合得到不同等级雾的判据进行预报,主观性

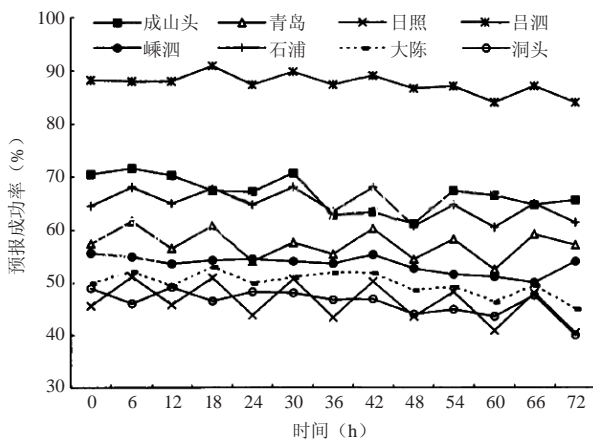


图1 2007年2—4月代表站72h内预报成功率^[4]

Fig.1 Forecast success rate of representative stations within 72 hours from February to April 2007

较强。杨棋等^[7]利用上海小洋山自动站观测资料以及浮标资料和NCEP再分析海温资料,以风向、风速、气温、海温、气海温差和相对湿度等作为预报因子,建立不同类型海雾的相似样本库,采用完全预报方法进行指数归一化及多元线性回归拟合,建立能见度预报方程。按此方法利用数值预报因子值对满足条件的751个历史样本进行后报,结果174个样本准确后有雾,355个样本准确后有雾,准确率70%。此方法能根据不同海洋、气象要素条件下预报因子的不同分类拟合建立适用不同类型海雾的预报方程,能更好反映不同条件下海雾的生成机制,且直接建立预报因子和能见度之间的线性关系,避免了传统上对预报量首先设定阈值进行判断的人为性,更具客观性,且能随着海雾样本的增加及时调整预报方程,有利于预报准确率进一步提高^[7]。

1.2 决策树模型预报方法

20世纪90年代开始,一些非线性的统计建模方法也逐渐用于开发建立雾的预报模型。梅珏^[8]利用人工神经网络建立了冬季辐射雾的预报方法,刘科峰等^[9]引入模糊推理仿真建模方法对青岛海雾发生进行客观预测。但这些方法存在建模过程复杂、预报变量的权重意义模糊、预报流程逻辑结构不清等缺点^[10]。黄健等^[10]利用汕头、珠海、湛江地面观测站的历史观测资料以及同期NCEP再分析资料,采用分类与回归树方法对海雾及其生成前24h的海洋气象条件进行分类分析,建立广东沿岸海雾决策树预报模型。以实测海雾事件作为分类分析的目标变量,以提前24h的海洋和气象要素作为预报变量。根据分类与回归树方法的剪枝原理,以误分率为指标对3个站的决策树进行剪枝处理,得到整体误分率最小、节点数最少的最佳决策树。然后采用交叉检验法对3个站决策树的分类/预测准确性进行检验,24h后有雾的验证成功率(验证有雾样本数/有雾总样本数×100%)分别为83.7%、73.7%和82.4%。根据此方法建立的海雾判别流程更为简洁、实用。比如珠海海雾判别流程(图2),突出了水汽条件和海面冷却作用的重要性,逻辑关系清晰,可在业务预报中应用。

1.3 参数化方法

胡波等^[11]根据Gultepe等^[12]提出的暖雾能见度参数化估算方案建立了沿海大雾预报方法。该方案将能见度作为液态水含量和云滴粒子数密度两者的函数,公式为:

$$Vis = \frac{1.002}{(LWC \times N_d)^{0.6473}}, \quad (1)$$

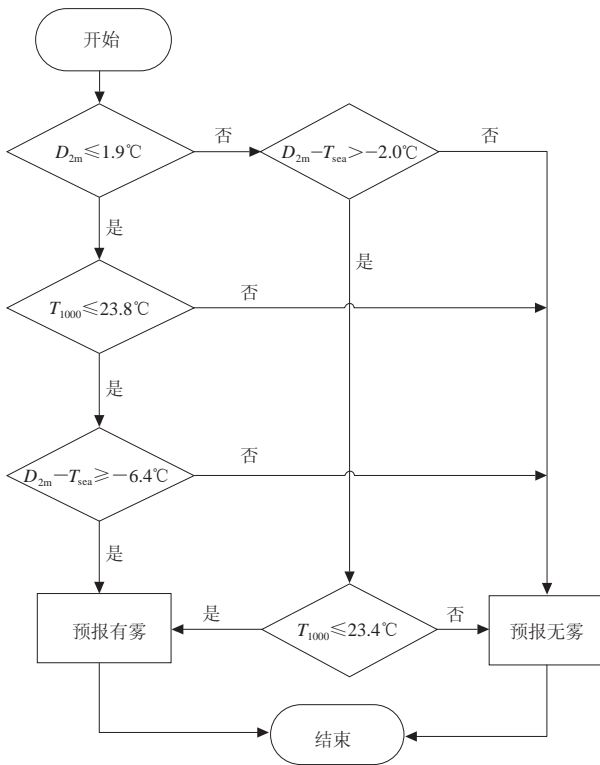


图2 决策树模型方法建立的珠海海雾判别流程图^[10]
Fig.2 The procedure of sea fog forecasting for Zhuhai created by decision tree models

式中, Vis 为能见度, LWC 为液态水含量, N_d 为云滴粒子数密度。液态水含量可以直接利用WRF模式输出的物理量进行计算, 而云滴粒子数密度采用历史经验统计方法解决, 首先利用钟元等^[13]提出的相似预报方法确定相似历史个例, 其次根据能见度公式反推算得到云滴粒子数密度, 公式为:

$$N_d = e^{T_{mp}} \quad (2)$$

$$T_{mp} = \frac{1}{0.6437} \ln\left(\frac{1.002}{Vis_{obs}}\right) - \ln(LWC_{obs}) \quad (3)$$

式中, Vis_{obs} 为相似个例的能见度, LWC_{obs} 为相似个例的液态水含量, 然后利用式(1)得到能见度预报。与应用较广的Stoelinga-Warner方法^[14]进行比较, 304站次能见度在5km以下雾的预报准确率由61%提高到73%。该方法同时考虑了 LWC 和 N_d 参数, 在微物理解释方面更加符合雾的实际发生规律, 有较好的业务应用价值。

统计预报方法相对于传统天气学方法, 一定程度上确实能提高海雾预报准确率, 并在一些沿海台站得到广泛应用, 然而这些方法无法摆脱统计本身的缺陷。对海雾生消的复杂微物理过程、热力、动力过程缺乏细致准确描述, 预报因子的选取以及预报量和预

报因子之间的经验统计关系的不确定性^[2]都是制约预报结果的重要因素。

2 海雾数值模拟与预报

海雾可分为平流冷却雾、蒸发雾和辐射雾等, 不同类型海雾的生成机制也不同。海雾的生消过程是动力学、热力学及微物理过程共同作用的结果, 这种复杂性注定了仅用经验统计方法进行海雾预报是远远不足的, 从20世纪中后期开始, 国内外利用数值模式对海雾进行模拟和预报的研究越来越多, 并且经历了从一维到三维, 从只考虑主要物理过程的简单模式发展到包含了复杂动力、热力以及多种物理过程的区域大气模式, 再到叠加海洋条件的海气耦合模式。

2.1 低维模式应用对海雾研究的作用

20世纪60年代, 以Estoque^[15]的大气边界层模式建立为标志, 海雾的数值模拟研究工作开始起步。Fisher等^[16]使用1-D模式对一次陆地雾过程进行了模拟, 首次证明了用数值方法研究海雾的可能性。此模式考虑了湍流作用和平流作用, 但不考虑辐射作用。Oliver等^[17]对海雾进行了一维模拟, 发现了辐射作用在海雾的形成和发生发展过程中的重要性。之后Findlater等^[18]利用一维辐射传输模式对苏格兰东北海岸的海雾进行了数值模拟, 探讨了辐射冷却在海雾形成、发展过程中的作用。Koracin等^[19]借助一维高阶湍流闭合模式和大量观测资料研究了1999年4月发生在加州沿岸的一个海雾个例的形成机制, 发现云顶辐射冷却和下沉增温是海雾形成的主要原因, 海气界面正的感热和潜热通量也起了一定的作用。20世纪80年代以后, 我国学者开始利用二维数值模式开展海雾数值模拟研究, 胡瑞金等^[20]设计了一个二维数值模式, 研究海温场、气温场、湿度场和风场等海洋气象条件对海雾生成和发展的影响; 之后又利用相对湿度时变方程, 结合二维数值模式研究了海雾生成过程中平流、湍流和辐射的效应^[21], 指出长波辐射冷却是有利于海雾生成的主要因子, 湍流冷却主要发生在平流初始阶段, 且限于低层。可见, 利用一、二维模式对海雾进行数值模拟, 主要用于对海雾发生、发展影响机制的研究, 如辐射作用、平流、湍流以及海洋下垫面的影响等。这些都为以后利用三维高分辨率数值模拟进行更精细化的海雾数值模拟和预报打下了坚实的基础。

2.2 三维模式研究进展

海雾的生消受多种物理过程相互作用影响, 各个因素产生的影响比重也各有不同, 一维、二维模式缺乏完善的边界层、辐射及微物理参数化方案等, 对海雾模拟的精细程度比较有限, 因此, 三维高分辨率数

值模式开始应用到海雾模拟研究中。Stoelinga等^[14]利用MM5数值模式^[22]模拟的结果，建立了计算能见度的经验公式，对于开展海雾的数值模拟研究与预报工作起到很好的推动作用。傅刚等^[23]使用改进的大气边界层模式对我国黄海海雾进行三维数值模拟研究，考虑了地形效应、植被影响、长波辐射、地表能量收支和液态水的重力沉降等因素，较好地模拟出了黄海海域实际的海雾生消过程，分析了海雾生长、发展和消亡过程中液态水含量和其他物理量的三维时空分布变化特征。傅刚等^[24]和王帅等^[25]分别利用RAMS模式^[26]成功模拟了黄渤海海雾过程，计算了大气水平能见度分布，结果表明云水混合比是影响大气水平能见度分布的主要原因，模拟的水平能见度分布与卫星云图观测结果吻合良好。Koracin等^[27]用MM5模拟并探讨了美国加利福尼亚沿岸海雾的形成、发展和消散机制。相比于MM5和RAMS，WRF模式由于其先进的系统构架与同化模块，越来越成为海雾数值模拟的主要模式，并应用到实际业务预报中。黄彬等^[28]利用WRF数值模式，优选模式微物理过程和边界层方案，开发了海雾诊断程序应用到WRF模式中，建立了黄渤海海雾数值预报系统且实现业务运行。由于模式边界层对大雾反应敏感，预报系统对大雾预报准确率较高，对24h预报结果，沿海站点能见度检验准确率80%。

2.3 海气耦合数值试验

在海雾生消过程中，海洋的作用至关重要，因此海雾数值模拟研究中，海温（SST）是不可忽视的关键物理量。WRF模式在处理SST上有两种方案^[29]：其一是在整个模拟过程中，SST始终为初始场中的SST；其二是SST每6h更新一次，更新数据来源于给定SST。前一种方案不能描述SST随时间演变过程，第二种方案虽然能更新SST，但前提是SST已知，这无法满足业务预报的需求^[29]。张苏平等^[30]利用中尺度WRF模式模拟研究表明海雾面积对SST变化比较敏感，湿度较小（比湿小于 $0.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）的薄海雾区，SST增加，近海面气层稳定度减弱，海雾面积缩小；SST下降，稳定度增强，海雾面积增大。孟宪贵等^[31]也通过WRF数值模拟，发现低SST的海水冷却效应可以使海雾发生频率增加15%以上。为更好描述SST随时间演变而减少海雾预报的误差，赵定池等^[29]采用WRF与区域海洋模式POM^[32]构造的中尺度海气耦合模式对一次大范围黄海海雾过程进行模拟预报。初始场SST都来源于NCEP再分析资料，耦合之前整个模拟过程中SST保持不变，耦合之后整个模拟过程中POM模式每2h为WRF模式更新SST，结果发现耦合模式一定

程度上能模拟出黄海表面温度的变化，模拟的雾区与卫星观测比耦合前更趋一致。这一积极结果源于耦合模式对SST的模拟比WRF模式模拟的SST更为精细化。

2.4 数据同化对海雾预报的改善

有学者^[33]指出，海雾数值模拟质量受3个问题直接影响，分别是边界层湍流方案、云微物理方案与初始场。在大气中尺度数值模式不断完善与成熟，选定边界层与微物理方案情况下，利用先进同化方案同化更多更好的观测资料来改善初始场便显得尤为重要。刘宇迪等^[34]利用WRF三维变分系统同化QuikSCAT海面风场资料，以同化前后的数据作为初始场分别进行模拟预报，表明同化后初始场的改进能改善低层要素场，对海雾预报有明显正效应。高山红等^[33]设计了循环三维变分（3DVAR）同化模块改进WRF模式初始场对黄海海雾进行数值模拟，从而增加了低层大气温度层结的稳定性，改变了大气边界层下层风场结构，导致海雾模拟结果显著改善，表明初始场质量对海雾数值模拟的重要性。文中设计的循环3DVAR同化方案的基本思路（图3）是利用前一次3DVAR结果为WRF模式提供初始场，然后模式积分到下一同化时刻接着进行后一次3DVAR，如此重复，通过多次3DVAR可以同化一个时间段内所有观测数据。李冉等^[35]在循环3DVAR同化方案基础上利用WRF模式进行了卫星辐射数据的直接同化试验，能较好地再现影响海雾的天气系统，模拟雾区与实际观测较为吻合，初始温度场和湿度场比不同化任何数据试验有明显改善。Wang等^[36]进一步改进了此循环3DVAR同化流程，同化了MTSAT卫星反演雾区中提取的水汽信息（图4），改

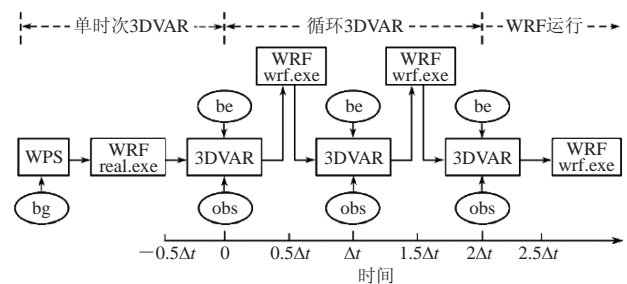


图3 循环3DVAR流程^[33]

（WPS（WRF Preprocessing System）与real.exe形成首次3DVAR所需初始场，wrf.exe驱动WRF向前积分，bg、obs和be分别代表背景场、观测场和背景场误差协方差； 0 、 Δt 和 $2\Delta t$ 为同化时刻）

Fig.3 Flowchart of cycling 3DVAR

（WPS(WRF Preprocessing System) and real.exe together generate initial conditions for the first 3DVAR, wrf.exe forces WRF to integrate forward. The symbols of 'bg', 'obs', 'be' represent background fields, observations, background error covariance respectively, 0 , Δt , $2\Delta t$ are assimilation times.)

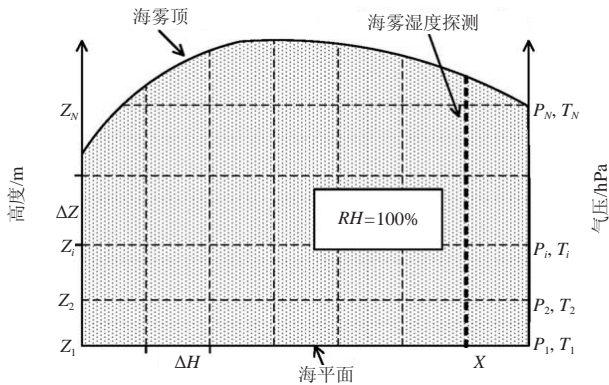


图4 卫星反演雾区中水汽信息的“探空化”处理^[36]

(将雾区在水平方向和垂直方向划分为多个网格点, 间隔分别为 ΔH 、 ΔZ , 对于其中一个格点 X , 上空雾区内湿度垂直廓线可以看做只包含湿度和海拔信息的常规探空曲线, 这样整个雾区就由许多不包含气压和温度信息的湿度探空曲线组成)

Fig.4 Schematic diagram for analyzing and digitizing sea fog humidity soundings

(The sea fog space is allocated to grid points with the horizontal and vertical grid intervals marked as ΔH 、 ΔZ , for a given grid point X , the vertical humidity profile inside the sea fog can be regarded as a routine sounding profile that only contains humidity and elevation information, thus the whole sea fog space consists of a large number of sea fog humidity soundings without pressure and temperature information.)

善了初始场中海上大气边界层水汽通常偏干的状况, 更加真实地再现了边界层的湿度廓线。数值试验模拟结果显示(图5), 只同化观测资料时, 模拟的边界层1km以下比探空观测更干, 100m以下混合比偏少 $1.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同时同化观测资料和卫星提取水汽信息时, 170m以下海雾出现的层次混合比显著提升, 与实际更加接近, 改进了预报效果, 使海雾临近预报的雾区评分命中率(POD)提高了大约20%。

3 集合预报在海雾模拟中的应用趋势

目前我国沿海气象台站的海雾预报仍主要采用统计预报方法, 但伴随计算机能力的不断提高和数值模式的不断完善, 利用三维高分辨率数值模式进行海雾预报已经是未来主要发展方向。已有研究^[37-38]指出海雾数值预报应该考虑采用集合预报的途径。海雾是发生在海上大气边界层内的一种水汽凝结成云的微物理现象, 海雾预报不仅要考虑初始场误差, 还应该关注与成雾过程密切相关的云微物理方案、边界层方案与SST误差等^[38]。海雾数值模拟的初始场误差可以通过先进的数据同化手段和更加丰富的观测资料加以降低^[33-36]。然而, 这些结果皆是在事先确定好最优微物理方案、边界层方案以及SST的情形下得到的。陆

雪等^[39]对10次春季黄海海雾事件进行WRF数值模拟研究, 通过24h预报雾区与卫星反演雾区进行评分检验, 发现雾区预报对边界层方案的敏感度大于微物理方案, 且最优边界层方案依具体海雾过程而异。若采用集合预报, 初始场集合体中可以包含不同的初始场误差, 在预报过程中不同的集合成员可以采用不同的微物理与边界层方案以及扰动的SST场^[38]。国外一些国家从20世纪90年代就开始发展集合预报, 1992年美国国家环境预报中心就建立了全球集合预报系统^[40], 2001年又发展了一个基于区域模式的短期集合预报系统(Short-Range Ensemble Forecast system)^[41], 在此基础上Zhou等^[42]利用两个区域模式10个成员对中国东部地区的雾进行集合预报, 预报结果有了明显改进, 12~36h 40%概率预报的公正预兆得分比确定性预报提高了0.27。这是国际上在雾集合预报方面最早的工作, 也是第一篇有关雾集合预报的文献。巴黎国际机场也建立了本地集合预报系统对雾进行预报^[43], 美国空军气象中心建立了中尺度集合预报系统对加利福尼亚州海岸和山地中的雾进行预报^[44]。高山红等^[38]利用“集合3DVAR”同化技术, 针对一次黄海海雾进行了集合预报试验(图6), 试验中集合预报初始场集合体生成采用蒙特卡罗随机扰动法对模式主要预报变量进行扰动, SST扰动借助EnKF随机扰动工具得到, 最后得到黄海海雾雾区概率预报(图7)。预报评分显示集合预报50%概率雾区预报的命中率优于确定性预报36.6%, 公正预兆得分优于确定性预报28.5%, 源于集合预报所预报的温度、湿度和 wind 等大气边界层状态要优于确定性预报, 并且加入SST扰动也产生正影响。这表明集合预报相比于确定性预报有其不可替代的优越性。

对于海雾的数值预报而言, 首要的工作是做好数据同化工作, 提高数值模式的初始场质量; 其次是选用合适的边界层参数化方案与云微物理方案, 尽可能精确刻画海雾形成的动力与微物理过程; 然后考虑集合预报思路, 降低上述过程中始终存在、不可避免的不确定性。此外, 还得加强海雾的外场观测, 加深对海雾发生机制的认识, 帮助改进数值模式中边界层与微物理参数化方案。

4 小结

1) 统计预报方法是在选择最优影响因子基础上完成的, 计算方法易于掌握, 占用的计算资源和计算时间也相对很少, 因此统计预报方法仍是目前沿海气象台站预报海雾的主要方法之一。但是影响因子的筛选容易受主观经验的影响。

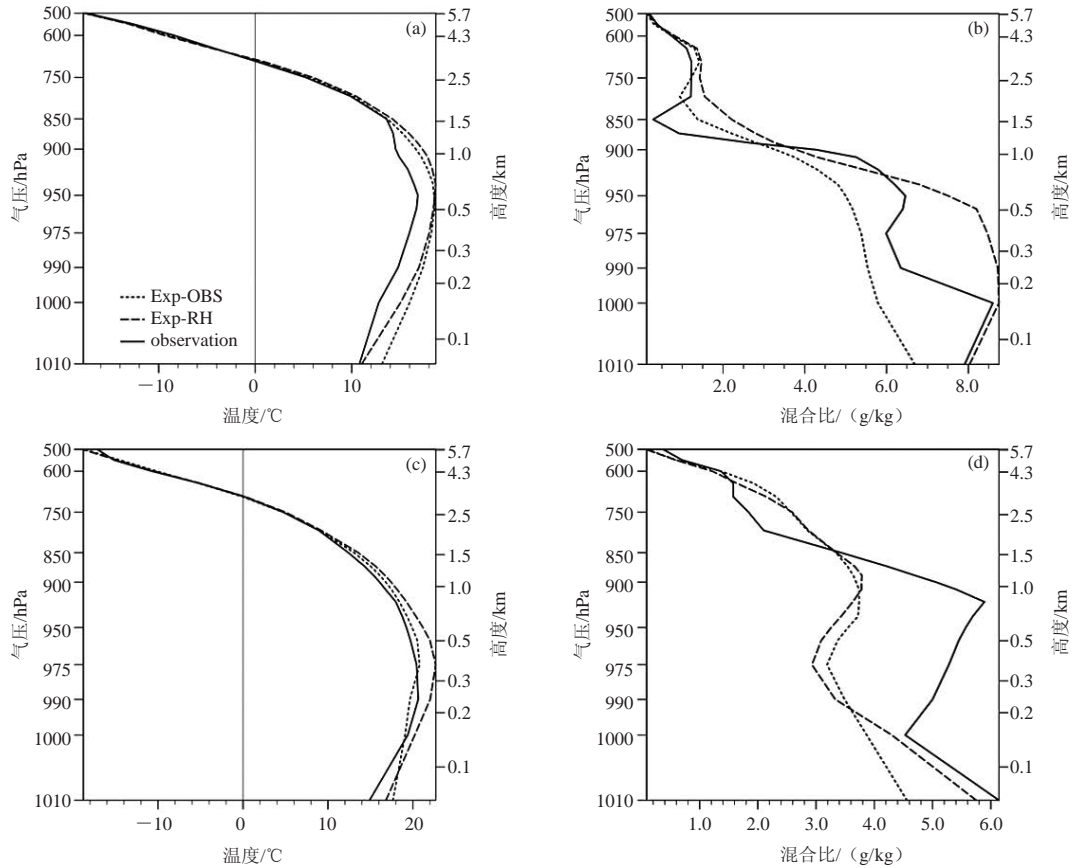


图5 只同化观测资料 (点虚线)、同时同化观测资料和卫星反演水汽信息 (短虚线) 模拟的青岛站 (a, b) 和成山头站 (c, d) 的温度 (a, c)、混合比 (b, d) 垂直廓线与无线电探空仪探测曲线 (实线) 对比图^[36]

Fig.5 Comparison of forecast vertical profiles of temperature(a, c) and mixing ratios(b, d) in two experiments(one assimilating observation data only(dotted lines),the other one assimilating both observation and sea fog humidity sounding data(dashed lines)) with radiosonde observations(solid lines) at Qingdao(a, b) and Chengshantou(c, d) stations

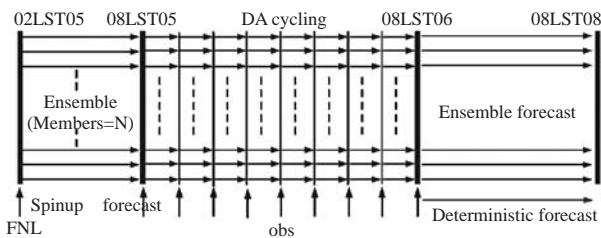


图6 包含N个成员的集合预报试验设计流程^[38]

(集合预报运行分为3部分: 初始集合体生成阶段 (5日 02 LST~5日08 LST); 数据同化阶段 (5日08 LST~6日08 LST); 预报阶段 (6日08 LST~8日08 LST)。初始场扰动相对于同化起点提前了6h, 目的是让集合体各成员在进入同化之前进行动力调整)

Fig.6 Flowchart of the ensemble numerical forecast experiments including N members

(Procedure of ensemble forecast contains three steps:generation of the initial ensemble members,data assimilation cycling,ensemble forecast.The turbulence of initial conditions occurs six hours ahead of data assimilation in order to let ensemble members carry on dynamical adjustment)

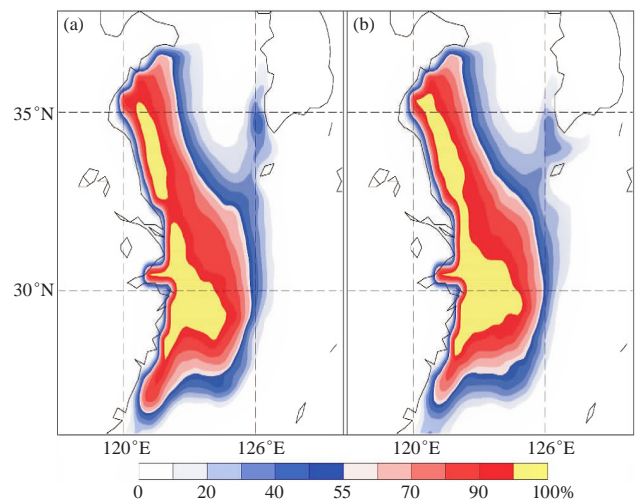


图7 黄海雾区加入SST扰动 (a) 和没有加入SST扰动 (b) 的集合预报试验得到的不同预报概率分布^[38]

Fig.7 Two ensemble forecast experiments(with SST turbulence(a) and without SST turbulence(b)) give forecast Yellow Sea fog area with different probabilities

2) 海雾数值预报的发展不仅推动了海雾生消机理的深入研究, 而且推动了海雾客观预报技术的发展, 它更趋于客观描述海雾发生发展及消亡过程中动力、热力等物理及微物理的变化过程。国内外气象学家已经开始应用三维数值模式开展海雾预报, 通过初始场数据同化、卫星资料应用及海气耦合等技术, 不断提高海雾数值模拟的准确性。

3) 目前, 集合预报技术在海雾数值模拟预报中的应用研究逐渐增多, 相关模拟试验表明, 由于集合预报描述的大气边界层状态更趋于精细和真实, 海雾出现时间、发生范围的预报准确率明显提高。

参考文献

- [1] 王彬华. 海雾. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [2] 冯蕾, 田华. 国内外雾预报技术研究进展. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2014, 6(1): 74-81.
- [3] 王厚广, 曲维政. 青岛地区的海雾预报. 海洋预报, 1997, 14(3): 52-57.
- [4] 于润玲, 王亚男, 李永平. 黄海和东海海雾短期客观预报业务系统. 大气科学研究与应用, 2007, 2: 28-37.
- [5] Glahn H R, Lowry D A. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. Journal of Applied Meteorology, 1972, 11: 1203-1211.
- [6] Scamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3. Boulder, Colorado, USA: NCAR/TN-475+STR, 2008: 125.
- [7] 杨棋, 欧建军, 李永平. 洋山海域海雾客观预报方法研究. 热带海洋学报, 2013, 32(5): 59-64.
- [8] 梅珏. 人工神经网络在辐射雾预报中的应用. 应用气象学报, 1999, 10(4): 511-512.
- [9] 刘科峰, 张韧, 江海英, 等. 模糊逻辑仿真建模及其在青岛海雾分析中的应用. 海洋湖沼通报, 2004(4): 17-25.
- [10] 黄健, 黄辉军, 黄敏辉, 等. 广东沿岸海雾决策树预报模型. 应用气象学报, 2011, 22(1): 107-114.
- [11] 胡波, 杜惠良, 郝世峰, 等. 一种统计技术结合动力释用的沿海海雾预报方法. 海洋预报, 2014, 31(5): 82-86.
- [12] Gultepe I, Miller M D, Boybeyi Z. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, 45(11): 1469-1480.
- [13] 钟元, 潘劲松, 朱红, 等. 一种台风过程雨量的相似预报方法. 热带气象学报, 2009, 25(6): 681-691.
- [14] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 38(4): 385-404.
- [15] Estoque M A. The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. Journal of the Atmospheric Sciences, 1962, 19(3): 244-250.
- [16] Fisher E L, Caplan P. An experiment in numerical prediction of fog and stratus. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20(5): 425-437.
- [17] Oliver D, Lewellen W, Williamson G. The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus. Journal of the Atmospheric Sciences, 1978, 35: 301-316.
- [18] Findlater J, Roach W, McHugh B. The haar of north-east Scotland. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1989, 115: 581-608.
- [19] Koracin D, Lewis J, Thompson W, Dorman C, et al. Transition of stratus into fog along the California coast: Observations and modeling. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58: 1714-1731.
- [20] 胡瑞金, 周发绣. 海雾过程中海洋气象条件影响数值研究. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(3): 282-290.
- [21] 胡瑞金, 董克慧, 周发绣. 海雾生成过程中平流、湍流和辐射效应的数值试验. 海洋科学进展, 2006, 24(2): 156-165.
- [22] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model(MM5). Boulder, Colorado, USA: NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 1994: 117.
- [23] 傅刚, 张涛, 周发绣. 一次黄海海雾的三维数值模拟研究. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 859-867.
- [24] 傅刚, 王菁茜, 张美根, 等. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 720-726.
- [25] 王帅, 傅刚, 陈德林, 等. 2009年春季一次黄海海雾的观测分析及数值模拟. 大气科学学报, 2012, 35(3): 282-294.
- [26] Pielke R A, Cotton W R, Walko R L, et al. A comprehensive meteorological modeling system-RAMS. Meteorological Atmospheric Physics, 1992, 49: 69-91.
- [27] Koracin D, Businger J A, Dorman C E, et al. Formation, evolution and dissipation of coastal sea fog. Boundary Layer Meteorol, 2005, 117: 447-478.
- [28] 黄彬, 陈涛, 陈炯, 等. 黄渤海海雾数值预报系统及检验方法研究. 气象科技, 2009, 37(3): 271-275.
- [29] 赵定池, 李毅, 潘晓滨, 等. WRF-POM耦合模式对一次海雾过程的模拟试验. 海洋预报, 2014, 31(1): 77-85.
- [30] 张苏平, 任兆鹏. 下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响——观测与数值试验. 气象学报, 2010, 68(4): 439-449.
- [31] 孟宪贵, 张苏平. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响. 中国海洋大学学报, 2012, 42(6): 16-23.
- [32] Mellor G L. Users Guide for a Three-Dimensional Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Princeton University, 1992, 34.
- [33] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环3DVAR改进黄海海雾数值模拟初始场: WRF数值试验. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(10): 1-9.
- [34] 刘宇迪, 任景鹏, 周鑫. 散射计风场的三维变分对海雾数值模拟的影响. 应用气象学报, 2011, 22(4): 472-481.
- [35] 李冉, 高山红, 王永明. 直接同化卫星辐射数据的黄海海雾数值试验研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42: 10-20.
- [36] Wang Y M, Gao S H, Fu G, et al. Assimilation MTSAT-derived humidity in now-forecasting sea fog over the Yellow Sea. Weather and Forecasting, 2014, 29(2): 205-225.
- [37] Gao S H, Lin H, Shen B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24: 65-81.
- [38] 高山红, 王永明, 傅刚. 一次黄海海雾的集合预报试验. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(12): 001-011.
- [39] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄海海雾WRF参数化方案敏感性研究. 应用气象学报, 2014, 25: 312-320.
- [40] Tracton M S, Kalnay E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: practical aspects. Weather and Forecasting, 1993, 8: 378-398.
- [41] Du J, DiMego G, Tracton M S, et al. NCEP short-range ensemble forecasting (SREF) system: multi-IC, multi-model and multi-physics approach. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling (edited by J Cote), Report 33, CAS/JSC Working Group Numerical Experimentation(WGNE), WMO/TD-No, 2003, 1161, 5. 09-5. 10.
- [42] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. Weather and Forecasting, 2010, 25: 303-322.
- [43] Roquelaure, S, Bergot T. A local ensemble prediction system (L-EPS) for fog and low clouds: construction, Bayesian model averaging calibration and validation. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47: 3072-3088.
- [44] Ryerson W R, Hacker J P. The potential for mesoscale visibility prediction with a multimodel ensemble. Weather and Forecasting, 2014, 29: 543-562.

空气污染对雾影响的研究进展

朱彬^{1,2} 郭婷¹

(1 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044;

2 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, 南京 210044)

摘要: 近几十年, 随着城市化的加剧, 空气污染已先后成为一些国家和地区面临的主要环境问题, 空气污染已经对城市及周边雾的物理化学特征产生了显著的影响。雾的发生发展还受到局地和大尺度气象条件变化的影响, 各因子综合作用导致不同国家和地区雾的变化较为复杂。对国内外关于雾和空气污染的关系研究进行了回顾, 包括雾水化学组成及来源、雾水化学组成的形成机制、影响雾形成和变化主要因素分析。结果表明, 能源结构及其使用方式、空气污染治理水平是决定城市及周边雾水化学组成及比例的主要因素; 空气污染、城市化和气候变化是雾形成和长期变化的重要影响因素, 诸因子通过改变宏观或微观的气象和环境条件而影响雾发生发展和长期变化, 影响雾长期变化的物理化学机制值得深入研究。

关键词: 雾水化学, 空气污染, 城市化, 气候变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.006

Review of the Impact of Air Pollution on Fog

Zhu Bin^{1,2}, Guo Ting¹

(1 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, NUIST, Nanjing 210044

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044)

Abstract: In recent decades, air pollution has become a major environmental problem following the industrialization and urbanization in many countries and regions. Air pollutants have significant effect on the physical and chemical characteristics of fog in urban and surroundings. This paper reviews the main progresses on the research of relationships between fog and air pollution, including fog-water chemical compositions and their sources, the formation mechanism of chemical composition, the factors influencing fog formation and change. Results show that: the structure and usage ways of energy sources and air pollution control level are the main reasons for chemical composition of fog in the urban and surroundings. The urbanization, climate change and air pollution are the three main factors that affect the formation and the long-term change of fog. Via altering macro and micro meteorological and environmental conditions of fog, the further studies might focus on the physical and chemical mechanism inducing long term variation of fog.

Keywords: fog chemistry, air pollution, urbanization, climate change

0 引言

气象学上, 雾和霾分别对应着不同的天气现象, 在物理化学性质和特征上二者有着显著的区别。而近年来, 无论在报纸、电视等媒体还是学术论文上都能听到或看到雾霾、雾霾天等词, 雾、霾又常常让人联想到空气污染。既然雾和霾有显著的不同, 为什么又经常把它们连在一起呢? 因为它们发生的气象条件很类似; 作为大气中的微粒, 它们又有许多共同点和联系。实际上, 历史上一些著名空气污染事件都与雾、霾以及它们的相互影响有关, 如伦敦烟雾事件^[1]、马

斯河谷烟雾事件^[2]等。

本文拟重点回顾空气污染对雾影响的研究进展, 从雾水化学组成及其来源、雾-气溶胶相互作用、城市化和环境气候变化对雾的影响等方面展开论述, 并指出雾、霾长期变化研究和雾、霾相互作用研究的科学意义。

1 雾水化学组成及其来源

随着全球经济的发展, 工业化和城市化进程的推进, 资源和能源的消耗量日益增加。资源和能源利用率水平较低的地区, 其空气质量管理水平往往亦相对落后, 大量工业废气、汽车尾气和其他人为排放的污染物未经有效处理即排入大气, 导致城市、城市群和区域空气质量严重恶化。

大气中的污染气体和气溶胶可以通过物理和化学

收稿日期: 2015年12月1日; 修回日期: 2016年1月12日
第一作者: 朱彬(1969—), Email: binzhu@nuist.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41575148, 41275143)

过程进入雾滴进而影响雾水化学组成,因此雾水化学成分在一定程度上可以反映一个地区的污染状况^[3]。对雾水化学成分的分析也有利于更好地理解大气中污染物的成分。云水化学与雾水化学分析结合,可以解释和证明空气污染物长距离输送^[4]。

1.1 雨/云/雾水化学的早期认识

对大气中水的化学组成的早期认识可以追溯到19世纪中叶Smith对英格兰降雨化学的研究^[5-6],他首次提出“酸雨(acid rain)”这一术语,建立了降水采集和化学组成的分析方法,发现城市、市郊和乡村降水酸度的差异,指出降水化学组成和燃煤、空气团来向等因子的关系。雾的研究也较早受到大气科学界的关注^[7],而对雾水化学成分的研究大约始于20世纪40年代,Cunningham^[8]发现雾水中氯离子可能源于海洋,因为距离海洋越远的观测站氯离子浓度越低甚至检测不出来。Houghton^[9]发现,相比于氯离子,硫酸根在所有站的雾/云水中都能测出,在大气中分布较均匀,并推测硫酸根是由二氧化硫在大气中经历了氧化过程形成的。20世纪50年代末至60年代初,Mrose^[10]收集分析了德国4个山区站和1个海岸站的大量降水(雨和雪)和雾水样品,发现硫酸盐、铵根、氯离子是大气水物质中的主要离子,钾离子、钠离子和钙离子在雾水中也有检出,雾水中的离子浓度和人为核素(当时在大气中的核试验残留物)远比雨水中的高,

酸化一般也更剧烈,并且明确指出雾水化学成分与空气污染的关系。

1.2 雾水的化学组成及其环境意义

20世纪80年代至今,国内外开展了很多有关雾的宏微观结构和物理化学特征的外场试验和数值模拟研究,雾水化学研究已成为云雾物理研究的重要方面^[11-17],例如国际上“雾、雾收集和露”委员会及会议尤其关注雾水化学及其影响因子研究^[18]。对雾水化学成分研究最多的是其中的水溶性无机和有机离子,表1总结了世界部分地区以及不同时期雾中水溶性离子组成。由表可见,雾水中的主要无机离子组成有:SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、H⁺、Cl⁻等。此外还有甲酸根、乙酸根等有机酸根,它们在植被覆盖率高的地区含量较高。需要指出的是,CO₃²⁻和HCO₃⁻来源于土壤和大气,但由于它们的化学不稳定性(H₂CO₃—HCO₃⁻—CO₃²⁻体系受溶液pH值和气相CO₂浓度影响)以及检测的困难,对其的测量很少,但其含量可能并不低。

雾发生在近地面,雾水中离子成分可以反映地区大气污染特征。海岛或沿海站显示出明显的海洋性特征,Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻离子浓度较高;内陆背景站显示出地壳元素特征,Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺离子浓度较高。如舟山、庐山和南岭大瑶山受人为活动直接影响较小,舟山为海洋站点,受海盐气溶胶影响,其雾水离

表1 国内外部分地区和不同时期雾水化学组成
Table 1 Chemical composition of fog water in different periods in domestic and foreign regions

地区	时间	N	pH	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
舟山 ^[19]	1987年4—5月	31	6.01	64.8	185.1	961.7	65.1	291.5		954.4	205.3	166.9
庐山 ^[21]	1987年4月	60	5.36	14.5	106.5	18.9	12.6	323.1	9.1	25.6	219.9	73.5
重庆 ^[27]	1984—1990年	182	4.39	1019.9	3685.4	1486.4	1482.7	3307.5	1063.9	2062.3	6450	991.6
上海 ^[28]	1993—1995年	80	6.02	510.0	6610.0	1760.0	3050.0	1630.0	550.0	480.0	8650	2530
景洪 ^[38]	1988年12月	6		32.5		44.8		577.6	123.2	133.2	298.8	43.2
景洪	1997年11月	4	6.32	773.3	518.8	238.3	134.9	3211.0	2734.0	794.0	1113	115.0
勐养 ^[31]		8	8.34	320.1	784.1	31.9	32.4	28.3	258.2	100.4	330.5	32.5
南岭	1999年	21	6.10	186.8	255.0	65.1	10.7	1299.8	78.6	104.5	662.5	250.0
大瑶山 ^[22]	2001年	36	5.2	102.7	818.3	55.5	26.0	82.1	7.3	9.1	687.9	8.3
南京 ^[30]	2006年12月	13	5.63	375.10	1508.4	2566.3	144.0	9485.5	539.5	993.7	5634	1567.3
美国Whitetop ^[23]	1997年	552	3.63	2.93	10.28	14.2	3.90	210.8		25.8	328.9	155.9
美国加州中部山谷 ^[24]	1982—1983年		2.5~7.5					5370~10520			1125~2500	3140~5140
	2010—2011年		6.3~7.5					1000			150	580
韩国Daekwanreung ^[25]	2002年	216	4.70	11.50	34.5	65.0	9.75	669		54	248.5	481
	1994—1995年		6.0	50	40	40	10	2500		180	410	120
意大利Po Valley ^[11-12,30]	2001—2002年		5.9	20	30	40	10	1800		120	320	110
	2010—2011年		6.9	20	20	40	20	730		70	100	450
日本Hokkaido ^[33]	2006年		4.48	28	28	254	56	410		288	348	178
	2012年		4.66	14.4	19.8	122	26	312		144	146	102

注: N为样本数。

子 Na^+ 和 Cl^- 绝对值和相对量都很高^[19]；雷州半岛的湛江港附近既表现出海雾特征也显示出人为污染的影响^[20]；而两个山区站总离子浓度较低， Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 相对较高^[21-22]， Ca^{2+} 来源于土壤， NH_4^+ 源于有机腐殖质分解，山区 SO_4^{2-} 主要源于 SO_2 的氧化。与美国^[23-24]、韩国^[25]和日本偏远或乡村地区^[26]雾水离子比较发现，国外这几个地区 Ca^{2+} 浓度很低，是否说明即使在我国乡村地区，人为活动已经显著改变了自然地表，造成地壳物质排放增高？这有待进一步研究。国内外乡村地区 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 并无显著差别，可能是偏远山区 NH_4^+ 、 NO_3^- 主要源于生化自然活动，而 SO_4^{2-} 主要源于区域 SO_2 输送和氧化。我国乡村地区雾水基本未酸化，而国外几个乡村站雾水已酸化，美国Whitetop山站雾水pH值低值3.63，这与它们雾水中碱性物质低浓度有关，如 Ca^{2+} 低^[23]。

城市人为活动地区与乡村地区相比，雾水离子浓度要高得多。重庆^[27]、上海^[28-29]、南京^[30]总离子和 SO_4^{2-} 浓度较清洁地区可高达1个数量级，西双版纳城、郊^[31]雾水离子浓度差别很大，说明人类生产生活对大气环境影响巨大，当今城市雾已远非自然状态的雾了^[32]。这一方面是由于城市污染源强，另一方面是城市雾水含量较低，气体和气溶胶在城市雾水中浓缩。值得一提的是，有大量观测表明，雾水较之云水和降水，化学成分浓度高得多，但雾水并不一定更酸，云水和降水酸化有时更明显^[33-34]。雾发生在近地层，较之云水和降水更易受到地表污染源排放的较高浓度气体和气溶胶物理化学特征的影响。在德国厄尔士山脉多年的观测发现，雾水中 Cl^- 、 Na^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 等离子含量与雨水中离子含量的比值比1992年以来有所降低，说明欧洲地区空气污染明显好转^[35-37]。而雾/云/降水是否酸化主要取决于液水中酸碱离子的相对浓度。前已述及，由于人为和自然源的排放， SO_2 氧化为硫酸的过程在很多地区普遍存在，如果云降水中缺乏碱性离子（ Ca^{2+} 、 NH_4^+ 等），则云降水的 H^+ 浓度高、pH值低，形成酸雨。如我国南方地区土壤酸性强，即使云降水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等致酸离子含量并不比北方高，其雨水也较易酸化。反之，雾水中即使 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 离子浓度很高，但 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 等离子浓度也高，雾水就不一定酸化。

雾水化学组成的长期变化可以反映局地 and 区域环境变化。在我国云南景洪，1988和1997年开展过两次雾的观测试验（表1）^[31, 38]，结果表明，由于城市的发展、人为活动的增加，10a间景洪雾水总离子浓度增加6.9倍；而1997年的西双版纳热带雨林勐养还保持着背景雾水化学的特征。国际上，雾的观测资料积累时

间最长的当属意大利北部波河谷地区^[36]和美国加利福尼亚州中部山谷地区^[24]，近20~30a在这两个地区开展过很多雾的外场综合观测，两地30a来雾水含量都下降较多，雾、浓雾（能见度小于200m）发生频次减少明显，这可能是由于气温升高和空气质量改善引起的凝结核减少所致。波河谷地区^[36]雾水电导率、总离子及三种主要离子（ SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ ）都呈现显著下降趋势。2010/2011年与1993/1994年观测资料对比，电导率、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 分别下降了75%、76%、43%和55%，这与该地区20世纪90年代以后空气质量改善有直接关系，其中 SO_2 大幅减排（减排90%）是 SO_4^{2-} 的急剧下降的主要原因，而 NO_x 只减排了44%，相应地 NO_3^- 降低较少（43%）。

SO_2 和 NO_x 不同程度的减排实际上反映了产业和能源结构的变化，工业排放（以 SO_2 、 NO_x 为主）得到有效控制，而汽车保有量和汽车总排放量增加（以 NO_x 为主），从而使 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比值下降。欧洲、美国、日本等发达地区雾和雨水中 NO_3^- 一般已超过 SO_4^{2-} 浓度水平。加州中部山谷地区雾和雨水中 NO_3^- 也大大超过 SO_4^{2-} 浓度水平，这也是该地区 SO_2 排放大幅减少的结果。近30a，加州中部山谷雾水平均pH值升高了1个多单位，特别是20世纪80年代初可观测到酸化严重的雾水（ $\text{pH}<4$ ），但在近年已经绝迹^[24]。发展中国家城市有较高的 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 和相对较低比例的 NO_3^- （绝对值仍很高），而发达国家表现出较高的 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值和低总离子浓度和电导率，这是由于发展中国家能源结构多以煤为主，而汽车保有量较低， NO_x 排放相对 SO_2 低导致的。由多年历史数据变化也可以看出，发达国家在20~30年前 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值较低，由于硫的排放得到有效控制，而汽车保有量增加， $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值持续增高；我国部分大城市的数据显示，由于同样原因，近20多年表现出 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值增高的现象^[28]。可见，能源使用方式和能源结构是决定城市及周边雾水化学组成比例的主要原因。日本北海道受人为活动影响较小，其2006—2012年的观测除了 NO_3^- 略有下降（认为与人为 NO_x 排放减少有关）外， SO_4^{2-} 可能主要来自火山 SO_2 排放等自然源，未发现 SO_4^{2-} 等其他离子浓度有显著变化^[29]。

在对比分析各地或某地雾水化学组分浓度长期变化时，还应注意考虑雾的液水含量（LWC），污染物不变而LWC较低或下降会导致化学组分浓度增加。不同的LWC下，雾水组分浓度并不一定能反映空气质量的变化。此外，在研究雾水组分的生态环境效应时，更关注的是与LWC关系更大的雾水组分的沉降通量^[39]。

雾水中的主要化学成分除水溶性无机离子外，还

有水溶性有机物 (WSOC), 如有机酸和醛类物质, 以及难溶性悬浮物质, 它们主要包括地壳物质 (低溶解度的碳酸盐、硅酸盐、铝/钙/镁等金属氧化物)、非碳酸盐含碳物质 (黑碳和有机碳)、生物有机物等。波河谷地观测发现的可溶性有机物主要有甲酸、乙酸、草酸、多元酸、醛类等, 这些可溶性有机物占了雾水中可溶物质的25%左右。不溶性物质可以通过滤膜过滤雾水收集分析, 波河谷地研究关注了雾水中悬浮的元素碳 (EC) 和不溶性颗粒有机碳 (POC), 发现EC和POC占了雾水中不溶物质的46%~56%, 其他不溶物质由各类难溶性矿物质组成; EC又占了不溶性碳物质的19% (中值浓度1.2mgC/L), 而POC占了不溶性有机物的大部分 (中值浓度5.8mgC/L), EC和POC主要来自各类人为燃烧活动。如果把总有机碳 (TOC) 定义为WSOC与POC之和, 则WSOC占了TOC的52%~95%, 平均86%^[36]。樊曙先等^[40]还研究了雾的不同阶段气溶胶上多环芳烃的变化特征。

Li等^[15]、Niu等^[16]、牛生杰^[41]从雾水采样、离子分析方法等方面进行系统总结, 并揭示了不同地区、不同类型 (主要为内陆辐射雾和海岸平流雾) 雾和雾中气溶胶的微物理特征、与边界层特征结合的宏观结构特征、雾水化学特征, 以及雾的形成、发展、消散过程的物理机制。这里不再赘述。

1.3 雾水化学组成的形成机制

通过分析雾水化学成分, 不仅可以推测这些成分的来源, 还可以了解其形成过程, 如气溶胶作为雾滴的凝结核触发雾的形成, 之后再通过布朗扩散、直接拦截、惯性碰并、热致电泳、扩散电泳和静电作用使气溶胶粒子进入雾滴^[42]; 而易溶和可溶性气体可以通过气液界面的交换过程 (吸收) 进入雾滴, 从而形成雾的基本化学组成。雾滴中还可以发生液相化学反应, 形成新的化学物质, 如SO₂的液相氧化速率至少高于气相中的1~2个数量级, 这可能是我国雾—霾天SO₃特别高的原因之一^[43-44]。SO₂、NO_x等的液相氧化与反应环境的pH、金属催化剂等关系很大, 如高pH环境以O₃氧化为主、低pH以H₂O₂氧化为主, 这些物理和化学机制已有很多经典研究^[45-46]。

雾滴的微观尺度大小不同 (3~100μm)、比表面积差异大 (小雾滴具有更大的比表面积), 以及对气溶胶和气体碰并、吸收、吸附的物理化学特征也不同, 这都会导致雾滴谱化学组成的差别; 在不同的化学成分、浓度和环境下, 发生的化学反应程度、产物都可能不同; 此外, 不同尺度雾滴沉降速率差异大, 最终导致雾滴谱化学组成的较大差别。由于比表面积

和沉降速率的差异, 表现出雾滴化学和其尺度的依存关系, 如观测发现的平均尺度小的雾滴比大雾滴一般含有较高的总离子浓度^[47-48]。技术上得益于多级雾水采样器的研发^[48-49], 雾滴化学和其尺度的依存关系研究得以有效开展, 进一步揭示雾中发生的物理和化学过程及其相互作用。Hoag等^[50]、孙玉等^[51]发现小雾滴含有较高的总离子浓度、主要离子有SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Fe²⁺/Fe³⁺、Mn²⁺, 雾水pH值也较低; 大雾滴一般含不溶性矿物质较多, 雾水pH值较高; 而H₂O₂在大小雾滴中的浓度差别不大。由于大雾滴的沉降速率较大, 在大雾滴中富集的成分会较快清除, 而在小雾滴中富集的成分在大气中的寿命更长, 表现出化学成分的沉降分馏机制^[52-53], 类似于雨滴谱清除气溶胶谱的机制^[45]。沉降是雾中气体和气溶胶重要的清除机制, 观测发现的气溶胶尺度谱的变化是由雾对气溶胶清除以及随后雾的沉降导致的^[42,53]。

雾水化学数值模式可以考虑到气溶胶凝结活化形成雾滴、气溶胶—气体通过前述物理过程进入雾滴、气相—液相相互作用的化学反应, 以及气溶胶和雾滴的微物理过程及其雾滴的沉降过程。雾滴分档的雾水化学模式基本可以重现雾滴化学的尺度变化, 并且能更好地模拟雾中硫酸盐浓度^[54-55], 而总体雾水化学模式往往低估SO₂的液相氧化率和硫酸盐浓度, 模式模拟进一步确认了分档的雾滴沉降和雾滴化学反应是雾水化学尺度依存关系的主要原因^[56-57]。Schell等^[58]在分析两个不同尺度的云滴化学成分观测资料时发现, 少部分个例表现出大滴浓度高的特征, 数值模式的敏感性试验表明, 新形成的云在一定的气溶胶条件下可以出现此特征。

2 影响雾形成和变化的因素

研究雾的宏观特征时, 一般认为近地层从来都不缺乏气溶胶等凝结核, 雾的形成主要由降温 (如夜间辐射冷却)、增湿 (如暖湿气流输送) 以及两个过程的结合而决定^[59]。但雾的微观研究必须考虑到气溶胶尺度以及由其化学组成决定的吸湿活化能力的不同, 可能在大气未饱和时, 有的气溶胶就开始活化形成雾滴; 或者过量的气溶胶在有限的水汽含量下, 可能处于霾粒子的阶段, 即气溶胶反而抑制了雾的形成。因此, 雾的形成条件至少包含降温、增湿和气溶胶条件及其组合等。

近半个世纪以来, 全球变暖加剧, 全球大部分地区对流层特别是近地层气温显著升高; 城市化带来的土地利用变化、城市热源增加以及由它们所致的地表—大气能量平衡的变化、风速降低, 可形成城市及

其临近地区显著的热岛效应和干岛（部分城市增湿）效应，这些变化和效应均改变雾的形成和维持条件。此外，人类活动和空气污染还显著增加了一次、二次气溶胶在大气中的浓度，如前所述，可能会抑制或促进雾的形成，从而改变大雾、雾、轻雾和霾发生的频率。雾通常在低风速和稳定近地层条件下发生，因此大气环流调整、季风强度的年际变化会引起近地层风速、风向的变化，还会引起温度和水汽的变化，对雾发生频率的年际变化也会产生重要影响。因此，雾的宏微观特征、长期变化趋势、雾—霾相互关系的研究已经不能局限于云物理和气候领域，只有从气候变化、云物理和大气化学等多角度开展综合研究，才能揭示上述这些人为和自然变化因子对雾形成、特征和变化的作用机制。

2.1 城市化和气候变化对雾形成及其长期变化的影响

进入20世纪80年代以后，中国中东部地区快速的城市化、工业化和人口迁入，对该地区的能源、资源和土地使用类型已产生巨大影响。研究发现，由于城市化导致的地表能量平衡变化、人为污染导致的气溶胶增加，以及雾的发生频率、强度皆可能发生变化^[60]。国内外大部分研究发现，城市化导致热岛、干岛^[61-62]，但一些特殊地形，如重庆则呈现热岛伴随湿岛。Li等^[63]认为重庆地形复杂、处于两江交汇处，城市热岛环流可以增强市区与长江之间的水汽辐合上升，形成特殊的“热岛+湿岛”现象，这有利于雾的垂直发展；但城市高温又不利于雾的形成。随着人类活动增加，世界上一些地区植被覆盖率下降，下垫面性质的改变、植物蒸腾作用的减少都不利于雾的形成^[64]。

在雾的长期变化上，Sachweh等^[64]发现，德国慕尼黑及周边地区自1949—1990年雾频减少约50%，主要原因是城市化加剧、植被减少、下垫面改变而使热储存率下降、人为热增加、湿度源减少，导致城市热岛和干岛：温度增加、比湿下降效应。他们的研究还指出，在发达国家城市，风速降低和空气污染带来的吸湿性凝结核是有益于雾的形成的，但发达国家空气污染轻，风速降低和凝结核增加效应不足以抵消升温、减湿效应。而发展中国家空气污染严重得多，城市导致的热岛、干岛、污染岛都会使雾频下降。Vautard等^[65]采用更新更广泛的数据进行研究并发现，整个欧洲雾、轻雾、霾发生频次自20世纪80年代以后均在下降，能见度增加，认为欧洲空气质量的改善在其中起到较大的作用。Dai^[66]利用大量站点气候资料和再分析资料，研究了全球地表湿度的变化特征及其影响因素。

在我国，孙丹等^[67]分析了1956—2001年雾频的变化，发现除华北平原雾整体增加外，其他地区基本呈减少趋势或者变化不大，雾频明显减少的时间在1994年前后；陈潇潇等^[68]得到类似结果。吴兑等^[69]分析了1951—2005年中国大陆雾、轻雾的长期变化趋势并发现，长江以南各省的轻雾日数明显多于长江以北地区，而且20世纪80年代以后轻雾日有明显增加。在研究华北平原雾长期变化趋势时，Fu等^[70]发现，1995年以前华北雾频是增加的，1995—2003年相对平缓，2003年之后雾频急剧下降。而Niu等^[71]针对我国中东部研究指出，近30a中国中东部雾日数翻倍，并认为这是由于东亚冬季风减弱，即冷空气不活跃、地面风速减小造成的。Shi等^[72]研究安徽雾的长期变化时发现，安徽大部分城市20世纪60—80年代中期雾频增加，之后则减少；老城市和新城市雾的变化又有不同，新城市雾频基本是持续增加的，即城市发展不同阶段或者空气污染条件的不同可导致雾的不同变化特征；其还发现，最近30a城市雾的消散时间明显推后，平均持续时间增加。史军等^[73]发现在1961—1980年和1981—2007年期间，华东多数地区的雾日数分别呈现出增多和减少的变化趋势，而霾日数则在两个时期都表现为增多的趋势。田心如等^[74]研究发现，江苏省年雾日数在20世纪80年代前中期为鼎盛期，之后呈较快的下降趋势；大雾持续时间呈显著增长趋势，主要表现为雾消时间的推迟。伍红雨等^[75]发现，1961—2008年华南雾日数下降而霾日数增加明显；云南的雾和霾日数呈一致减少趋势。而同期我国绝大多数地区霾的长期变化则是显著增加的，特别是1980年以后^[76-77]。

研究雾、霾长期变化特征时，要用到气象测站相对湿度、能见度、温度、风和天气现象记录等气象要素的长期资料，要求测站周边观测环境最好长期维持相对不变。但我国大部分测站不仅观测环境变化很大，测站本身位置也多次迁移。因此在利用长期数据进行气候统计分析时，往往要考虑观测点代表性、观测环境变化等因素的影响^[78]。孙丹等^[67]、Fu等^[70]和Niu等^[71]对华北和中国中东部地区雾长期趋势研究得出的不同结论可能就与站点的选择不同有关。在采用气象站长期数据进行气候统计分析时，往往要考虑观测点代表性、观测环境变化等因素的影响^[79]。

2.2 空气污染、气溶胶与雾的关系

霾和雾既可单独存在，也可以共存。近年来我国很多城市霾往往持续数日，在此期间，当空气湿度达到或接近饱和时，雾就可能出现。当空气湿度降低

时,雾会蒸发消散,霾粒子又会再次大量出现,即存在雾—霾转化现象^[80-81]。雾过程中那些未活化的粒子常被称为间隙气溶胶粒子。成雾之后,通过一系列后续过程(包括液相化学反应、气溶胶粒子与雾滴的碰并以及雾滴之间的碰并),还将继续改变雾滴和气溶胶的化学和物理性质。由此,当相对湿度下降,雾蒸发后的气溶胶粒子的化学成分和尺度谱分布将与之前的状态有很大不同^[53,82]。

在发展中国家,伴随城市化和工业化而来的就是空气污染。机动车尾气、工业废气等空气污染物排放量都在不断增加,不仅使城市空气质量恶化,而且使形成雾的凝结核产生微物理和化学成分的改变。气溶胶浓度较低时,随着凝结核的增加,雾滴数浓度增加,人为气溶胶的吸湿性有利于雾的形成;但在高气溶胶浓度时,随着气溶胶增加,过多的凝结核争夺水汽,反而不利于雾的形成^[16,54]。目前我国的气溶胶水平常发达国家的10倍左右,这么高的气溶胶水平所导致的雾的变化与发达国家的清洁地区应有很大不同之处^[71]。Quan等^[83]研究了华北1954—2009年雾、霾长期变化的关系,发现霾频次在40d/a以下时,雾、霾发生频次有强的正相关;而当霾的发生频次超过75d/a时,雾、霾的关系不明显。至于促进或抑制气溶胶浓度的临界值是多少,尚需大量观测和数值模拟研究确认。这个问题实质上等同于在气溶胶—云相互作用研究中,气溶胶是促进还是抑制云降水的发展以及气溶胶正负效应的临界值是多少的问题^[84]。气溶胶的辐射效应还可以改变环境温度,在夜间吸收地表红外辐射,温度升高,不利于夜间成雾^[85]。

目前的气象和大气化学双向耦合模式已可以考虑宏观云雾物理和云雾/气溶胶微物理化学过程以及各过程之间的反馈。WRF-Chem是中尺度气象和大气化学双向耦合模式的代表,充分考虑了地表与边界层物质能量交换、气溶胶直接辐射效应以及气溶胶凝结核成云成雾过程,可用于研究城市化和气溶胶直接和间接效应对雾发生发展的影响以及气象要素之间的反馈关系。贾星灿等^[86]应用该模式研究了我国华北和华东地区冬季的一次严重雾—霾过程,认为通过微物理、热力和动力作用,人为污染条件下的边界层结构更有利于雾的形成,人为大气污染物使雾的范围最大增加50%,强度加大、持续时间延长。Gao等^[87]应用该模式研究了2013年1月华北平原气溶胶与边界层温湿风结构的反馈过程,表明在严重霾污染下,地表短波辐射明显下降,边界层上部则增温,由此导致大气稳定度加强、边界层下降,抑制对流和扩散,从而使得污染加剧。王自发等^[88]应用WRF-NAQPMS双向耦合模

式,研究了同期我国中东部的持续强霾过程,发现静稳天气仍旧存在显著的区域污染输送,指出气象—大气污染双向反馈机制对强霾的形成非常重要,忽视之会导致模式对污染物浓度的较大低估。

3 空气污染对雾影响研究的展望

IPCC历次报告越来越确认,全球大部分地区对流层特别是近地层气温显著升高;同时城市化可形成城市及其邻近地区显著的热岛、干岛和空气污染;大气环流的调整也会引起近地面风、温、湿等要素的变化,这些变化和效应均会改变雾的形成和其维持条件。气候变暖、城市化和空气污染都与人为活动增加有关,要区分它们各自的作用并不容易。因此,研究空气污染对雾的影响要从云雾物理、大气化学和气候变化多角度开展综合研究,才能揭示这些人为和自然变化因子对雾形成、特征和变化的作用机制。IPCC第四次评估报告^[89]和第五次评估报告^[90]都有专门的章节,对气溶胶—云和气溶胶—气候相互作用的研究进展进行评述和展望,而对气溶胶—雾的关系则几乎没有涉及。尽管雾可看作是接地的云,但其受区域气候、地表类型改变和人为污染影响更大、响应信号更强,因而值得深入研究。

雾化学组成研究要与雾的物理化学过程和机制研究、微观过程与宏观变化相结合^[54-55, 91]。只有把雾中的液相化学和非均相化学过程和物理过程相结合,才能解释观测到的复杂多变的雾水化学组成特征,发现新的观测事实并提出新的科学假设。雾的物理化学模式模拟可以进一步揭示雾水化学组成形成的机制,深入认识空气污染对雾的影响。观测资料还可以验证模式,新的机制可以改进模式。因此,一方面要继续开展雾水化学长期观测、积累各地各时期复杂多变的组成特征,分析其隐含的环境气候变化意义;另一方面要发展三维分档云雾化学模式,在模式不同尺度过程结合、机制不确定性和计算效率上都存在很大挑战^[92]。

气溶胶中有机成分的确认是气溶胶化学组成研究的最不确定之处,也是大气环境研究的重点和热点之一。同样,雾中有机化合物的组成和化学特征值得关注,液相的有机物和有机化学反应也是气相有机物的源或汇^[93]。在云凝结核的核化能力的研究上,有学者认为其尺度效应比其化学效应更重要^[94]。但对于雾水,其化学成分的浓度更高、组成更复杂,除了含有吸湿性的盐核,也有具有表面活性的有机物^[95-97],高浓度盐核和表面活性有机物都会改变雾凝结核的活化能力、影响雾的形成和维持。因此,雾凝结核的尺度和

其化学组成何者决定其活化能力还未有定论, 需要进一步的观测和理论模拟研究。对雾凝结核的物理化学性质的认识也是对云雾物理机制认识的深化和推进。

由于各地的气候条件、城市化水平和空气污染条件不同, 甚至对全球变暖的响应也不同, 所以不同地区雾的气候特征并不一致, 甚至存在较大差异。有必要利用各代表性站点^[80]的长期气象与环境资料, 揭示各地区雾频次与区域气候变化、城市化和空气污染的关系。利用天气—大气化学耦合模式, 模拟分析典型雾和霾个例, 探讨城市化和空气污染对雾和霾演化的影响, 揭示诸因子相互作用影响雾发生的机制。研究结果不仅对认识雾与气候环境变化的关系具有科学意义, 也可为气溶胶—云相互作用的理论研究提供直接证据。

参考文献

- [1] Wilkins E T. Air pollution aspects of the London fog of December 1952. *Journal of Royal Meteorological Society*, 1954, 80(344): 267-271.
- [2] Nemery B, Hoet P H M, Nemmar A. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The Lancet*, 2001, 357(9257): 704-708.
- [3] Sasakawa M, Uematsu M. Chemical composition of aerosol, sea fog, and rainwater in the marine boundary layer of the northwestern North Pacific and its marginal seas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, doi: 10. 1029/2001JD001004.
- [4] Błaś M, Polkowska Z, Sobik M, et al. Fog water chemical composition in different geographic regions of Poland. *Atmospheric Research*, 2010, 95(4): 455-469.
- [5] Smith R A. On the air and rain of Manchester. *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society*, 1852, 10(Series 2): 207-217.
- [6] Smith R A. Air and rain: the beginnings of a chemical climatology. Longmans, Green, and Company, 1872.
- [7] Taylor G I. The formation of fog and mist. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1917, 43(183): 241-268.
- [8] Cunningham R H. Chloride content of fog water in relation to air trajectory. *Bull Amer Meteor Soc*, 1941, 22: 17-22.
- [9] Houghton H G. On the chemical composition of fog and cloud water. *Journal of Meteorology*, 1955, 12(4): 355-357.
- [10] Mrose H. Measurements of pH, and chemical analyses of rain-, snow-, and fog-water. *Tellus*, 1966, 18(2/3): 266-270.
- [11] Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al. Seasonal trend of fog water chemical composition in the Po Valley. *Environmental Pollution*, 1992, 75(1): 75-80.
- [12] Fuzzi S, Castillo R A, Justo J E, et al. Chemical composition of radiation fog water at Albany, New York, and its relationship to fog microphysics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1984, 89(D5): 7159-7164.
- [13] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(6/7): 1121-1159.
- [14] 李子华, 刘端阳, 杨军, 等. 南京市冬季雾的物理化学特征. *气象学报*, 2011, 69(4): 706-718.
- [15] Li Z, Yang J, Shi C, et al. Urbanization effects on fog in China: Field research and modeling. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169(5/6): 927-939.
- [16] Niu S, Lu C, Yu H, et al. Fog research in China: An overview. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27: 639-662.
- [17] Wang X, Chen J, Sun J, et al. Severe haze episodes and seriously polluted fog water in Ji' nan, China. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 133-137.
- [18] Herckes P, Eugster W, Gultepe I, et al. Special Issue: Sixth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew Preface. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 1-1.
- [19] 莫天麟, 许绍祖, 陈帆. 舟山地区雾水酸度及其化学组成. *上海环境科学*, 1989, 8(8): 22-26.
- [20] 徐峰, 牛生杰, 张羽, 等. 湛江东海岛春季海雾雾水化学特性分析. *中国环境科学*, 2011, 31(3): 353-360.
- [21] 丁国安, 纪湘明, 房秀梅, 等. 庐山云雾水化学组分的某些特征. *气象学报*, 1991, 49(2): 190-197.
- [22] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究. *气象学报*, 2004, 62(4): 476-485.
- [23] Anderson J B, Baumgardner R E, Mohnen V A, et al. Cloud chemistry in the eastern United States, as sampled from three high-elevation sites along the Appalachian Mountains. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(30): 5105-5114.
- [24] Herckes P, Marcotte A R, Wang Y, et al. Fog composition in the Central Valley of California over three decades. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 20-30.
- [25] Kim M G, Lee B K, Kim H J. Cloud/fog water chemistry at a high elevation site in South Korea. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2006, 55(1): 13-29.
- [26] Yamaguchi T, Katata G, Noguchi I, et al. Long-term observation of fog chemistry and estimation of fog water and nitrogen input via fog water deposition at a mountainous site in Hokkaido, Japan. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 82-92.
- [27] 李子华, 董韶宁, 彭中贵. 重庆雾水化学组分的时空变化特征. *南京气象学院学报*, 1996, 19(1): 63-68.
- [28] 李德, 陈明华, 邵德民. 上海雾天大气污染及雾水组分研究. *上海环境科学*, 1999, 18(3): 117-120.
- [29] Li P, Li X, Yang C, et al. Fog water chemistry in Shanghai. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(24): 4034-4041.
- [30] 李一, 张国正, 濮梅娟, 等. 2006年南京冬季浓雾雾水的化学组分. *中国环境科学*, 2008, 28(5): 395-400.
- [31] 朱彬, 李子华, 黄建平, 等. 西双版纳城, 郊雾水化学组成分析. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 316-321.
- [32] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾—霾成因及其治理的思考. *科学通报*, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [33] 秦瑜, 赵春生. *大气化学基础*. 北京: 气象出版社, 2003.
- [34] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New York: Wiley-InterScience, 2006.
- [35] Lange C A, Matschullat J, Zimmermann F, et al. Fog frequency and chemical composition of fog water—a relevant contribution to atmospheric deposition in the eastern Erzgebirge, Germany. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(26): 3731-3739.
- [36] Zimmermann L, Zimmermann F. Fog deposition to Norway Spruce stands at high-elevation sites in the Eastern Erzgebirge(Germany). *Journal of Hydrology*, 2002, 256(3): 166-175.
- [37] Giulianielli L, Gilardoni S, Tarozzi L, et al. Fog occurrence and chemical composition in the Po valley over the last twenty years. *Atmospheric Environment*, 2014, 98: 394-401.
- [38] 黄玉生, 郭慧光, 刘富兴. 工业区与非工业区辐射雾水的化学组成. *地理学报*, 1992, 47(1): 66-73.
- [39] Thalmann E, Burkard R, Wrzesinsky T, et al. Ion fluxes from fog and rain to an agricultural and a forest ecosystem in Europe. *Atmospheric Research*, 2002, 64(2): 147-158.
- [40] 樊曙先, 黄红丽, 顾凯华, 等. 雾过程对大气气溶胶PM10中多环芳烃粒径分布的影响. *高等学校化学学报*, 2010, 31(12): 2375-2382.
- [41] 牛生杰. *雾物理化学研究*. 北京: 气象出版社, 2014.
- [42] 王瑛, 朱彬, 康汉青, 等. 气溶胶云下清除理论及观测研究. *中国科学院研究生院学报*, 2014, 31(3): 306-313, 321.
- [43] He H, Wang Y S, Ma Q X, et al. Mineral dust and NO_x promote the conversion of SO₂ to sulfate in heavy pollution days. *Scientific Reports*, 2014, 4(8): 4172.
- [44] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 15-26.
- [45] Rattigan O V, Jill R, Judd C D, et al. Sulfur dioxide oxidation in clouds at Whiteface Mountain as a function of drop size. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D15): 17347-17358.
- [46] Seinfeld J I. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. *Environment Science & Policy for Sustainable Development*, 2006, 51(2): 212-214.
- [47] Lu C, Niu S, Tang L, et al. Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics.

- Atmospheric Research, 2010, 97(1): 47-69.
- [48] Collett J, Iovinnelli R, Demoz B. A three-stage cloud impactor for size-resolved measurement of cloud drop chemistry. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(10): 1145-1154.
- [49] Moore K F, Sherman D E, Reilly J E, et al. Development of a multi-stage cloud water collector Part 1: Design and field performance evaluation. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(1): 31-44.
- [50] Hoag K J, Collett Jr J L, Pandis S N. The influence of drop size-dependent fog chemistry on aerosol processing by San Joaquin Valley fogs. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(29): 4817-4832.
- [51] 孙玉, 樊曙光, 张健, 等. 南京2013年冬季三级分粒径雾水化学特征. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 1019-1031.
- [52] Moore K F, Sherman D E, Reilly J E, et al. Drop size-dependent chemical composition in clouds and fogs. Part I. Observations. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(10): 1389-1402.
- [53] Moore K F, Sherman D E, Reilly J E, et al. Drop size-dependent chemical composition of clouds and fogs. Part II: Relevance to interpreting the aerosol/trace gas/fog system. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(10): 1403-1415.
- [54] Fahey K M, Pandis S N. Size-resolved aqueous-phase atmospheric chemistry in a three-dimensional chemical transport model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D22): 2015-2023.
- [55] Fahey K M, Pandis S N, Collett J L, et al. The influence of size-dependent droplet composition on pollutant processing by fogs. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(25): 4561-4574.
- [56] Pandis S N, Seinfeld J H, Pilinis C. The smog-fog-smog cycle and acid deposition. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D11): 18489-18500.
- [57] Pandis S N, Seinfeld J H, Pilinis C. Chemical composition differences in fog and cloud droplets of different sizes. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1990, 24(7): 1957-1969.
- [58] Schell D, Wobrock W, Maser R, et al. The size-dependent chemical composition of cloud droplets. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(16): 2561-2576.
- [59] 盛裴宣, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [60] 徐祥德, 施晓晖, 张胜军, 等. 2005. 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应. *科学通报*, 50(22): 2522-2530.
- [61] Sachweh M, Koepke P. Radiation fog and urban climate. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1073-1076.
- [62] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. *气象学报*, 2012, 70(3): 338-353.
- [63] 李子华. 中国近40年来雾的研究. *气象学报*, 2001, 59(5): 616-624.
- [64] Sachweh M, Koepke P. Radiation fog and urban climate. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1073-1076.
- [65] Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh G J. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience*, 2009, 2(2): 115-119.
- [66] Dai A. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *J Climate*, 2006, 19(15): 3589-3606.
- [67] 孙丹, 朱彬, 杜吴鹏. 我国大陆地区浓雾发生频数的时空分布研究. *热带气象学报*, 2008, 24(5): 497-501.
- [68] 陈潇潇, 郭品文, 罗勇. 中国不同等级雾日的气候特征. *气候变化研究进展*, 2008, 4(2): 106-110.
- [69] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 中国大陆1951—2005年雾与轻雾的长期变化. *热带气象学报*, 2011, 27(2): 145-151.
- [70] Fu G Q, Xu W Y, Yang R F, et al. The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(21): 11949-11958.
- [71] Niu F, Li Z, Li C, et al. Increase of wintertime fog in China: Potential impacts of weakening of the Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D7): 1485-1490.
- [72] Shi C, Roth M, Zhang H, et al. Impacts of urbanization on long-term fog variation in Anhui Province, China. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(36): 8484-8492.
- [73] 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析. *地理学报*, 2010, 65(5): 533-542.
- [74] 田心如, 白莉娜, 唐红昇, 等. 江苏省大雾持续时间及相关要素的周末效应. *环境科学与技术*, 2012, 35(12J): 117-122.
- [75] 伍红雨, 杜尧东, 何健, 等. 华南霾日和雾日的气候特征及变化. *气象*, 2011, 37(5): 607-614.
- [76] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化. *气象学报*, 2010, 68(5): 680-688.
- [77] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12: 779-799. doi: 10.5194/acp-12-779-2012.
- [78] 刘勇, 王东勇, 田红, 等. 气象观测环境的变化对气温序列的影响分析. *气象科学*, 2006, 26(4): 436-441.
- [79] 郭建侠. 地面气象要素观测环境标准研究. *中国科技成果*, 2014(15): 30-32.
- [80] William M J, Jacob D J, Waldman J M, et al. Fogwater chemistry in an urban atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C9): 5109-5121.
- [81] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征. *环境科学*, 2010, 31(7): 1425-1431.
- [82] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. Fog and cloud induced aerosol modification observed by the Aerosol Robotic Network(AERONET). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D7): 107-116.
- [83] Quan J, Zhang Q, He H, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(15): 8205-8214.
- [84] Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 2008, 321(5894): 1309-1313.
- [85] Bott A. On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs. *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, 21(1/2): 1-31.
- [86] 贾星灿, 郭学良. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究. *大气科学*, 2012, 36(5): 995-1008.
- [87] Gao Y, Zhang M, Liu Z, et al. Modeling the feedback between aerosol and meteorological variables in the atmospheric boundary layer during a severe fog-haze event over the North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15(11): 1093-1130.
- [88] 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 3-14.
- [89] Solomon S. *Climate change 2007: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change viii*, 996. Cambridge, UK, and New York: Cambridge Univ Press, 2007.
- [90] Qin D, Plattner G K, Tignor M, et al. *Climate change 2013: the physical science basis*. Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [91] Yue Y, Niu S, Zhao L, et al. The influences of macro- and microphysical characteristics of sea-fog on fog-water chemical composition. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(3): 624-636.
- [92] Tost H, Jockel P, Kerkweg A, et al. Global cloud and precipitation chemistry and wet deposition: tropospheric model simulations with ECHAM5/MESy1. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2007, 7(10): 2733-2757.
- [93] Herckes P, Valsaraj K T, Collett J L. A review of observations of organic matter in fogs and clouds: Origin, processing and fate. *Atmospheric Research*, 2013, 132(10): 434-449.
- [94] Dusek U, Frank G P, Hildebrandt L, et al. Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles. *Science*, 2006, 312: 1375-1378.
- [95] Facchini M C, Decesari S, Mircea M, et al. Surface tension of atmospheric wet aerosol and cloud/fog droplets in relation to their organic carbon content and chemical composition. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(28): 4853-4857.
- [96] Collett J L, Herckes P, Youngster S, et al. Processing of atmospheric organic matter by California radiation fogs. *Atmospheric Research*, 2008, 87(3): 232-241.
- [97] Reyes-Rodriguez G J, Gioda A, Mayol-Bracero O L, et al. Organic carbon, total nitrogen, and water-soluble ions in clouds from a tropical montane cloud forest in Puerto Rico. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(27): 4171-4177.

国家级环境气象业务现状及发展趋势

康志明 桂海林 花丛 张碧辉 张恒德 吕梦瑶 王继康

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 环境气象业务关注与人民健康直接相关、与人类活动密切联系的大气环境质量问题。近年来, 大气污染等环境问题引起全社会的广泛关注, 环境气象业务也得以迅速发展。2014年3月, 中国气象局为了更好地提供环境气象监测预报服务, 整合国家级业务单位资源, 成立了中国气象局环境气象中心。回顾了国家级环境气象业务的发展历史, 着重介绍了目前国家级环境气象业务现状以及主要技术手段。通过分析和总结目前环境气象业务面临的需求以及能力的不足和差距, 讨论了国家级环境气象业务的未来发展趋势和重点方向。

关键词: 环境气象, 大气污染, 业务现状

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.007

China's National Environment-Meteorological Services and Their Developmental Trend

Kang Zhiming, Gui Hailin, Hua Cong, Zhang Bihui, Zhang Hengde, Lü Mengyao, Wang Jikang

(National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The environment-meteorological services in China are concerned with atmospheric environmental quality, which is directly related to human activities and affects human health. In recent years, air pollution and other environmental problems have attracted the nationwide attention in China, so that the environment-meteorological services have been developed rapidly. The Environment-Meteorological Centre of the China Meteorological Administration was established in March 2014 by integrating the resources of various national service units to provide better meteorological monitoring and forecasting services. In this paper, we review the developments of China's national environment-meteorological services and highlight their current status including major technological capabilities. We also explore future trends of the national environment-meteorological services by analysing the capabilities, deficiencies and gaps in supply to the demands of the current environment-meteorological services.

Keywords: environment-meteorology, air pollution, current status

0 引言

传统的环境气象预报业务包括雾、霾和沙尘等天气, 与之相对应的监测、预报及预警等业务也相对较为成熟。近年来, 随着中国社会经济的快速发展, 以高细颗粒物浓度为主要特点的空气污染问题日益严重^[1-4], 雾、霾和沙尘天气频繁出现, 环境问题越来越受到社会各界的关注。我国一些大中城市在传统的雾、霾及沙尘预报业务基础之上, 积极开展了多种形式的环境气象服务, 环境气象业务不断发展, 已经形成了一定的业务规模。

2014年3月, 中国气象局环境气象中心成立, 主要负责提供国家级环境气象监测预报服务并协调与之

相关业务工作。环境气象中心以国家气象中心为基础, 联合国家卫星气象中心、国家气候中心、中国气象局气象探测中心、中国气象科学研究院、中国气象局公共气象服务中心等单位, 以“小实体、大网络”方式运行。国家级环境气象中心的成立, 整合了国家级环境气象业务、服务和技术研发资源, 规范了国家级环境气象业务, 加强了对各级环境气象业务的指导, 提升国家级环境气象业务能力和服务水平, 为国家大气污染防治工作提供更有保障。本文对国家级环境气象业务的开展情况进行梳理和总结, 并结合环境气象业务面临的挑战和需求, 探讨国家级环境气象业务的发展趋势。

1 环境气象业务现状

1.1 环境气象产品体系

环境气象的业务产品主要可分为监测、预报预警及评估三大类。

收稿日期: 2015年6月14日; 修回日期: 2015年8月6日
第一作者: 康志明(1978—), Email: kangzm@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局气象关键技术集成与应用(重点)项目(CMA GJ2013Z05)

1.1.1 环境气象监测

环境气象监测是指基于地面及高空气象观测、大气成分监测、卫星遥感等观测数据,形成的对雾、霾、沙尘、重污染等过程发生、发展、消散及影响范围、强度的监测分析产品。

1.1.2 环境气象预报预警

目前,国家级环境气象业务基于数值天气预报和环境气象数值预报产品,结合天气分析、概念模型判断、释用技术和检验评估分析等技术方法,制作并发布全国空气污染气象条件、全国地级以上城市空气质量、能见度、雾、霾以及沙尘落区预报预警产品。针对春节节日,开展烟花爆竹燃放气象指数预报业务。同时,中央气象台还与国家环境监测总站联合开展京津冀及周边地区重污染天气监测预警业务。

2014年10月,环境气象中心整合国家级环境气象业务、服务和技术研发资源,制作并发布《环境气象公报》,打造集监测、分析、评估、预报和预警为一体的国家级环境气象综合产品。

1.1.3 环境气象评估

大气污染气象条件评估主要内容是利用大气成分及相关气象观测数据,对大气污染实况、污染天气、气象条件的特征及变化趋势进行客观分析,利用历史比对及数值模拟的方法,对大气污染防治措施效果进行评估,为相关决策部门提供大气污染防治对策及建议,形成评估报告。

1.2 环境气象业务技术体系

1.2.1 环境气象综合观测与分析应用

20世纪80年代以来,中国气象局逐步建设形成了一定规模的大气成分观测网,包含1个全球大气本底站、6个区域站以及241个具有颗粒物观测能力的雾霾观测站以及365个酸雨观测站。在边界层气象观测方面,中国气象局建有120个L波段雷达探空观测站,可提供每日00和12时的秒级探空数据。此外,43部风廓线雷达组成的业务试验网,可实现垂直风场的分钟级全天候、连续观测。同时,中国气象局在卫星遥感监测方面也开展了大量的研究工作,并形成了一定的业务能力。基于风云极轨和静止气象卫星,开展霾(光学影像监测)、霾污染指数、霾光学厚度、雾、沙尘(光学影像、沙尘指数、沙尘光学厚度定量监测)等的实时监测,利用全球卫星的环境气象相关产品(二氧化氮、二氧化硫、二氧化碳、甲烷),定期开展中国区域大气空气质量、温室气体等时空分布和长期变化趋势的评估等。

除中国气象局建成的环境气象综合观测系统外,环境保护部也在全国范围内建成了覆盖地级以上城市

的环境空气质量监测网。目前,环境保护部在全国布设的环境空气质量监测点位数已经由最初的661个增加到1436个。两部委建成的环境空气观测系统在对大环境监测方面起到了相互补充、相互配合的最优资源综合利用。

环境气象中心基于中国气象局环境综合观测系统的监测数据及环境保护部环境空气质量监测网的国家环境空气质量自动监测点空气质量资料(包括PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁、SO₂、NO₂、CO、O₃逐小时浓度和AQI指数),结合常规气象要素观测,实现全国雾和霾实况、大气成分实况及超标日、重点区域及重点城市空气质量状况等实时监测。在综合地面常规观测资料应用的同时,加强非常规资料的应用。例如,用L波段秒探空资料诊断分析大气边界层结构特征;用整层逆温强度判断能见度变化情况,进而用于雾、霾天气预报。初步开展铁塔和风廓线观测资料应用研究,从更高的时间及垂直分辨率上分析城市边界层特征演变情况。此外,卫星遥感资料,在包括大气气溶胶(霾、沙尘暴等)、温室气体、污染气体等大气成分的监测及评估中也发挥了重要的作用,同时还可对火山灰云、秸秆燃烧等大气环境事件进行监测和评估。

1.2.2 大气化学模式

大气化学模式是开展环境气象业务的重要技术支撑,是提高环境气象预报业务精细化和定量水平的关键。当前,国家级业务部门运行CUACE雾和霾、CUACE沙尘和污染物扩散模式等为空气污染、沙尘、核扩散等环境气象预报业务提供科技支撑。此外,部分省(市),通过引进CMAQ、WRF-Chem等区域大气化学模式,建立了化学天气数值预报系统,为区域和城市空气质量、能见度及霾等的预报预警提供了技术手段和科技支撑。

由于排放源、大气化学过程等不确定性与边界层天气过程不确定性的叠加,目前大气化学模式的预报能力还有明显的提高空间,所以基于模式产品的检验订正尤为重要。环境气象中心对CUACE模式预报性能进行了单站和区域的定量检验,分析了能见度、PM_{2.5}、温度和相对湿度等气象要素预报的平均偏差、平均误差、预报与实况相关性等统计量,为模式开发人员提供改进建议,同时也为业务人员应用提供依据。针对定量化应用需求,在模式输出要素基础上,采用了滑动订正、集合卡尔曼滤波等多种方法,结合实况观测,对空气质量要素预报进行订正,以提高站点定量预报的准确率。

1.2.3 大气污染气象条件分析

污染排放是造成大气污染的根本原因,在一定的

时间尺度内, 污染排放一般变化不大, 气象条件成为影响最终污染状况的决定因素, 分析相关气象条件是准确了解和掌握大气污染发展趋势的关键^[5-7]。因此, 气象条件分析既是大气污染中长期预报的关键环节, 也可以通过定量分析大气污染与气象条件的关系及其变化趋势, 为政府大气污染防治提供科学决策依据。可以说, 大气污染气象条件分析是气象部门开展环境气象业务的优势所在。

1) 污染气象条件诊断分析

污染气象条件分析主要是针对大气污染, 基于气象观测或大气模式预报产品, 对能反映大气污染物扩散、输送、沉降、清除等作用的气象因子进行诊断分析。比如混合层高度、垂直交换系数、通风系数、理查孙数、小风区和空气滞留区等。这些诊断产品为雾、霾及空气质量等环境气象预报提供了重要的分析依据。

2) 污染气象条件综合指数

2014年以来, 环境气象中心针对近年发生的典型雾、霾和污染过程, 分区域进行统计, 并结合不同天气过程的特点, 提炼典型天气学特征和概念模型, 在此基础上研究可综合反映气象条件作用的关键指标。

典型污染天气往往发生在静稳的天气形势下, 静稳天气指数 (SWI) 就是通过综合考虑湿度、风速、逆温强度、混合层高度等反映大气湿温条件及动力状况的物理要素, 用来定量评估大气静稳程度, 表征大气对污染物的水平与垂直扩散能力。指数的构建基于统计分析, 结合预报员经验, 筛选对静稳天气具有较好指示意义的特征物理量, 确定各物理量阈值及权重。雾和霾天气多发生在地面相对湿度高、近地层风速小、边界层高度低且存在逆温、无较强天气系统影响的背景下, 因此选取2m相对湿度、10m风速、边界层高度、低层逆温强度、850hPa垂直速度及散度等物理量。在统计过程中, 以各物理量不同区间内雾、霾天气发生概率相对气候态的倍数为指标, 衡量其对静稳天气的指示意义, 并作为各物理量不同区间值对应的权重, 具体算法如下:

$$W_{in} = \frac{a_{in}}{a_{in} + b_{in}} \cdot \frac{a}{a + b} \quad (1)$$

式中, a_{in} 为统计时段内物理量*i*在区间*n*内雾和霾出现站次, b_{in} 为相应的晴好站次; a 为统计时段内总的雾和霾站次, b 为总的晴好站次。以北京为例, 2m相对湿度对雾和霾及晴好天气的区分能力最高, 当相对湿度高于88%时权重系数最高, 达到3.4, 即雾和霾发生概率是气候态的3.4倍; 逆温强度、10m风速和边界层高度的区分能力依次次之, 最高权重分别为2.1, 1.9和1.8。

静稳天气指数不仅仅在预报中为业务人员提供气象条件的定量判断, 同时在重大气象服务和过程评估

中也发挥了积极的意义。2014年11月5—11日, APEC会议在北京召开, 10月刚刚经历4次严重雾和霾天气的北京, 空气质量好坏成为当时政府决策者最为关心的问题之一。“静稳天气指数”作为具有气象特色的环境气象分析方法技术, 在多次的决策气象服务中发挥了重要的作用, 也受到了各方的好评。

图1给出2014年10月7日—11月23日北京地区平均PM_{2.5}浓度与静稳天气指数演变。由图可知, 静稳天气指数的演变与PM_{2.5}浓度之间有良好的对应关系, 10月4次严重的雾和霾天气都分别与静稳指数峰值相对应。同时, 静稳天气指数也可直观地反映出减排措施发挥的作用。例如, 10月28—30日, 政府开始采取一定的防控措施, 虽然静稳指数与10月前期3次污染过程相当, 但实际PM_{2.5}浓度明显偏低。APEC期间, 随着防控力度的加大, PM_{2.5}浓度进一步降低。在APEC结束后的评估报告中, 静稳天气指数被进一步用来定量评估气象条件的作用。定义PI=PM_{2.5}浓度/静稳天气指数 (Pollution Index, PI), 代表一定气象条件下出现的污染程度。通过对比分析2014年10—11月APEC会议前后两段时间内的PI与无减排措施情况PI, 10月, 平均PI为9.8, 11月1—10日平均PI为4.9, 仅为10月的一半。说明在同样的气象条件下, 11月1—10日与10月相比, 污染程度明显降低, 体现出11月上旬APEC会议期间采取有力防控措施取得了明显效果。

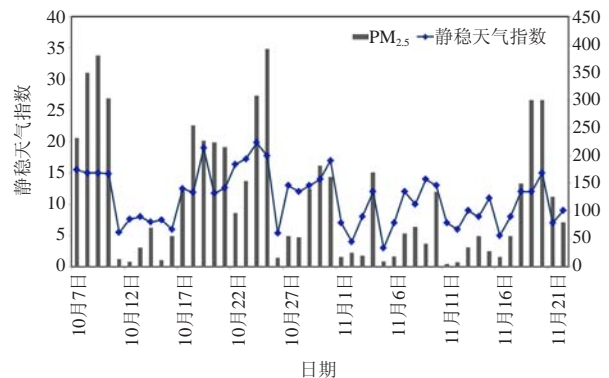


图1 2014年10月7日—11月23日北京地区平均PM_{2.5}浓度与静稳天气指数演变

Fig.1 Average PM_{2.5} concentration (bars) and stable weather index (curve) in Beijing during October 7 to November 22, 2014.

除了静稳天气形势对污染物起到重要积聚作用以外, 污染物区域输送也是影响污染浓度的重要因素^[8-13], 平流输送对某地污染的形成具有重要作用。污染物自边界层向上抬升后停留时间变长, 通过平流输送可以扩散至其他地区, 影响该地的空气质量。结合PM_{2.5}排放源强度、污染物输送概率等因子, 构建了

表征污染物传输强度的指数，可代表输送能力的空间分布情况。

$$T_l(i, j) = R_l(i, j) \cdot E(i, j) \cdot W_d(i, j) \cdot W_t(i, j) \cdot PSCF \quad (2)$$

式中， T 为传输强度， R 为输送概率， E 为 $PM_{2.5}$ 排放强度（单位： t/a ）， W_d 为距离权重函数， W_t 为时间权重函数， $PSCF$ 为潜在源贡献因子。下标 l 和 (i, j) 分别是对应的轨迹和网格。

图2为2013年11月—2014年3月北京的污染物传输强度分布。除北京南部对北京市区有强的传输影响外，天津、河北中南部、山东西北部及河南北部传输强度大于1，说明上述地区的污染物也可通过区域传输对北京产生较明显影响。尤其是河北中部、天津西部距离北京近，工业发达，排放强度较高，且经过这两个区域的气流到达北京后，易与燕山和太行山脉形成地形辐合，使污染物难以扩散，进一步加重污染程度，因此传输作用最为明显。工业较为发达的太原、济南和郑州等周边省会城市，由于较少有气团轨迹经过或距离较远等原因，对北京的传输作用并不明显。

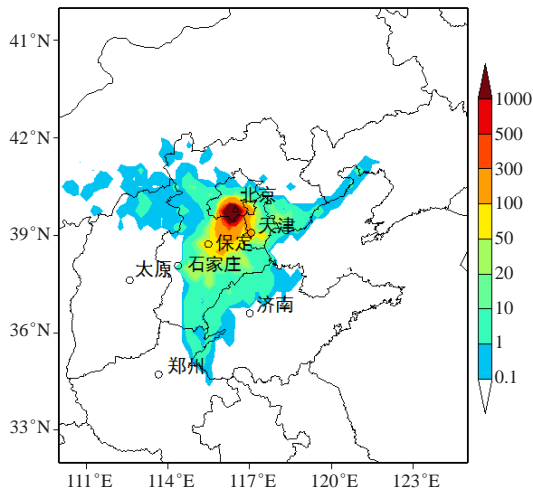


图2 2013年11月—2014年3月北京污染物传输强度指数分布
Fig.2 Distribution of the average index of pollutant transports strength in Beijing during November 2013 to March 2014.

1.2.4 环境气象客观预报技术

与降水相比，数值模式对雾、霾这类灾害性天气预报能力更为有限，甚至缺乏具有直接参考意义的预报产品，实际业务中主要依靠预报员的经验，预报难度非常大。因此，总结预报经验，建立预报模型，开发客观预报产品具有实际意义。目前，开展了基于人工神经网络、多指标叠套、多元回归等方法的客观预报技术研发和应用。统计分析物理量、参数、排放源与雾、霾、沙尘、空气质量、光化学污染的关系，提取预报因子，基于天气学模型，结合实况及业务模式

产品，设立相应判据和预报指标，建立预报模型、方程和流程，计算基本物理量和大气边界层特征参数，匹配指标权重，进行指标叠套运行、拟合试验和回归计算等，并进一步优化因子组合和运行试验，进而得到客观预报产品。

1.2.5 环境气象业务系统平台

环境气象属交叉学科，涉及数据种类繁多、来源广泛，分析方法也与常规天气预报有较大不同。相关数据库以及平台建设滞后成为影响环境气象业务进一步发展的重要制约因素。围绕建设国家级环境气象监测预报预警服务综合一体化业务平台的目标，环境气象中心初步开展了环境气象基础数据库的建设，整理编辑和重建历史资料，建立环境气象数据集，包括大气成分资料、空气质量数据、卫星产品、地面常规及非常规观测资料，通过数据整理、计算分析和格式转化，建设监测系统，实现实时监测空气污染信息功能。搭建环境气象业务平台，在主流天气分析业务平台MICPAS的框架下进行二次开发，针对环境气象的特殊需求，实现环境气象监测、诊断及产品制作等功能。

2 国家级环境气象服务面临的问题及未来发展

2.1 国家级环境气象服务面临的新需求

国家级环境气象服务面临的需求按照不同的对象可分为以下3个方面：

1) 决策服务需求。作为国家级业务单位，如何为政府决策提供更科学的依据成为国家级环境气象服务面临的重要课题。政府决策部门对环境气象服务的需求来源于大气污染防治、重大社会活动保障、国际环境外交谈判等方面，这些需求主要集中在长时效、重大过程预报、科学定量评估及对比分析等方面。在国务院《大气污染防治行动计划》出台之后，各级政府需要在实际大气污染的科学评估基础上制定相应减排政策，需要中长期的过程预报来实现对重污染过程的减排调控。由于大气污染与气象条件密切相关，准确了解和掌握大气污染的实况及相应气象条件，定量分析大气污染与气象条件的关系及其变化趋势，科学描述实际减排效果，是制定未来污染防治措施的科学基础。

2) 公众服务需求。在公众不断提高健康意识后，人们更加希望有精细的环境气象预报产品进行科学指导从而安排他们的生活出行等。所以公众服务需求主要体现在精细化的环境气象预报产品上。

3) 业务指导需求。国内气象部门除北京、上

海、广东等地区外，大部分台站环境气象业务起步晚，技术基础相对薄弱，亟待国家级技术与产品的指导。业务指导需求体现在预报技术、诊断分析方法、业务规范等方面。

2.2 环境气象业务能力的不足之处

与需求相比，环境气象业务能力不足主要体现在：

1) 环境气象部分业务标准不统一，预报服务还需进一步规范。

2) 环境气象监测能力有待提高，与常规气象要素相比，大气成分观测站点数量明显不足，与大气污染紧密相关的边界层气象观测手段有限。在监测分析技术上，还未能实现多源资料的融合分析，没能实现各种观测资料优势互补的目的。

3) 大气化学模式与数值天气模式的融合发展还需加强，对相关物理化学过程以及机制机理认识还有待深入，大气成分监测资料的同化技术在业务模式中的应用明显滞后，污染源排放信息基础数据和动态更新技术比较薄弱。模式应用能力不高，预报员对不同模式的认知和理解不足，检验订正能力不高；模式解释应用产品精度仍然不高，技术方法有待改进。

4) 对静稳天气、重污染、霾的形成机理认识仍比较欠缺，尤其是边界层的物理化学过程认识还有待深入。

5) 环境气象评估能力较弱。环境气象观测资料综合分析利用能力不足，评估方法和手段不够丰富，量化水平和科技含量不高。

6) 环境气象业务基础保障能力仍然较弱，体现在业务数据及平台支撑能力不足。

2.3 环境气象业务发展目标及重点工作

国家级环境气象业务要充分发挥各成员单位的优势，建立和完善环境气象业务中心的工作流程和有效的运行机制，形成功能较为完备、布局较为合理、技术较为先进的国家级环境气象业务体系；初步建立集监测、预报、预警和评估服务于一体的集约化、规范化的环境气象业务流程；进一步提升国家级环境气象观测、预报预警服务及对省级部门环境气象业务的指导能力。

2.3.1 环境气象监测与分析能力建设

逐步建成覆盖全国、重点地区的大气成分观测站网，并加强边界层气象观测建设。开展我国主要污染气体和温室气体等卫星载荷指标优化论证，开展主要污染气体、温室气体以及气溶胶（气溶胶光学厚度等）等卫星资料处理关键技术预研，建立高时空分辨率中国区域卫星大气成分观测资料库。改进和提高霾

的卫星遥感监测识别技术方法和定量监测评估技术。

开展多源资料融合技术攻关，发挥地面观测和卫星遥感监测的各自优势，重点是加强卫星反演技术及其与地面观测的校准技术研究，实现具备覆盖全国区域的大气成分监测能力。同时，加强边界层常规、非常规气象观测资料的综合分析应用，诊断分析边界层结构特征，提高对霾、沙尘暴、光化学烟雾等发生发展机制的认识，改进霾及沙尘暴客观预报技术。

2.3.2 发展大气化学模式

改进气溶胶及气态化学机理，优化模式方案；充分利用现有的网络化观测与卫星遥感数据进行排放源的反演研究，对排放源清单进行改进；发展资料同化技术，同化应用环境观测资料并改进模式初值；实现环境气象模式系统的三个子模式（气象模式-污染源模式-化学模式）的协同发展，建立一体化可预报多要素大气成分的环境气象数值模式综合系统。

开展多模式的检验、比较、评估与本地化研发工作，研发多模式集成应用技术，提高模式解释应用能力。

2.3.3 发展雾、霾及重污染中长期预报技术

发展中长期预报是提高决策服务能力的关键环节。以动力统计为基础，依据静稳天气综合判定指标，结合排放源数据及模式产品，利用连续积分和阈值控制，建立能反映水汽、气溶胶累积、扩散过程效应的雾、霾潜势预报产品；研制边界层关键气象要素的数值产品订正技术和集合预报产品释用技术，提高与雾和霾相关的边界层气象要素在中期时段的预报水平；结合雾、霾潜势、能见度客观预报产品、气象要素预报订正产品，逐步开展雾和霾中长期分类分级预报。

2.3.4 环境气象评估及预评估

大气污染评估及预评估是政府部门科学应对大气污染的依据。目前，国家级环境气象业务部门从气象部门的特色和优势出发，已初步开展了大气污染气象条件的评估工作。主要是利用大气成分及相关气象观测数据，对大气污染实况、污染天气、气象条件的特征及变化趋势进行客观分析，利用历史比对及数值模拟的方法，对大气污染防治措施效果进行评估。

大气污染气象条件的评估重点是科学定量地描述气象条件在大气污染中所起的作用，目前主要有两个途径，一是利用气象观测，分析与大气污染相关的气象要素或综合指数；二是通过数值模拟的方法，利用同一大气化学模式，在不改变排放源的情况下，针对不同气象条件进行模拟预报，比如模拟预报大气污染防治措施实施期间及历史同时段大气污染状况，通过模拟预报的结果综合分析不同气象条件下对大气污染

防治措施对污染物浓度的贡献。

环境气象预评估是指在预测有重污染天气过程或重大活动的气象保障时,提前对所关心区域的污染状况、采取一定减排措施后的可能污染状况以及不同区域排放的输送影响等进行详细的分析,提供给决策部门作为减排调控的参考。预评估主要通过模式模拟的途径来完成。目前为止,预评估业务还未实时开展。

2.3.5 环境气象业务拓展

出于健康角度,社会公众对环境气象预报产品有极高的关注度。但是目前环境预报产品的针对性仍然不强,比如霾的定义主要是基于能见度,与健康影响之间无直接关系,而空气污染气象条件则只是污染的一种潜势预报。研究霾、重污染等对人体健康的影响,并结合其他气象条件,发展健康气象等环境气象业务,将提高环境气象预报服务的针对性。

基于基本数据库、评价指标体系及等级指标、评估模型等,研制环境气象条件对人体健康影响评估业务系统,可实现环境气象对健康效应发生的范围、强度、持续时间、综合影响等做出客观定量评价,提供及时客观的健康影响评价产品及环境气象健康风险预警产品。开展环境气象因子及各大气成分浓度对区域人体健康影响定量评估业务,针对特殊环境气象事件,为决策部门提供及时客观的健康影响评价服务产品。

3 结语

通过对国家级环境气象业务的回顾和分析,可以看到,在各方面的高度关注下,环境气象业务发展迅速,已经形成了一定的业务产品和技术支撑体系,

并在气象服务中发挥了重要的作用。但是,面对服务需求的快速增长,环境气象预报业务能力的提高刻不容缓,在综合监测分析、精细化预报、中长期趋势预报、评估及预评估技术等方面仍存在明显不足,这些也将是未来环境气象业务发展的重点。

参考文献

- [1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾—霾成因及其治理的思考.科学通报,2013,58:1178-1187.
- [2] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. Atmos Chem Phys, 2012, 11: 26571-26615.
- [3] 张磊,金莲姬,朱彬,等.2011年6—8月平流输送对黄山顶污染物浓度的影响.中国环境科学,2013,33(6):969-978.
- [4] 苏福庆,高庆先,张志刚,等.北京边界层外来污染物输送通道.环境科学研究,2004,17(1):26-29.
- [5] 张人禾,李强,张若楠.2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析.中国科学:地球科学,2014,44(1):27-36.
- [6] 杨德宝,王武功,黄建国.兰州市大气污染与气象条件的关系.兰州大学学报(自然科学版),1994,30(1):132-136.
- [7] Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al. Haze trends over the United States, 1980-1995. Atmos Environ, 2001, 35: 5205-5210.
- [8] Karaca F, Anil I, Alagha O. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM10 profile of a megacity. Atmos Environ, 2009, 43(36): 5713-5722.
- [9] Begum B A, Kim E, Jeong C H, et al. Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode. Atmos Environ, 2005, 39(20): 3719-3724.
- [10] Baker J. A cluster analysis of long range air transport pathways and associated pollutant concentrations within the UK. Atmos Environ, 2010, 44, 563-571.
- [11] Chiapello I, Bergametti G, Chatenet B, et al. Origins of African dust transported over the northeastern tropical Atlantic. J Geophys Res, 1997, 102: 13701-13709.
- [12] 徐祥德.北京及周边地区大气污染机理及调控原理研究.中国基础科学,2002,8:19-22.
- [13] 苏福庆,任阵海,高庆先,等.北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇.环境科学研究,2004,17(1):21-25.

《气象科技进展》创刊5周年纪念刊即将推出

■ 本刊编辑部

《气象科技进展》于2011年6月创刊,至今已走过5年的历程。为纪念创刊五周年,本刊拟于2016年6月第3期推出“创刊五周年纪念刊”,部分论文及作者介绍如下,敬请读者关注。

昆明准静止锋的发现和研究——索渺清,丁一汇

西南涡研究和观测试验回顾及进展——李跃清,徐祥德

极端气象灾害间接经济损失内涵、发生机理与评估方法研究——胡爱军,李春华,史培军

关于太阳系外行星的宜居性——胡永云

近50年中国风速减小的可能原因——赵宗慈,罗勇,江滢,黄建斌

南极臭氧洞的发现、研究和启示——陆龙骅

雾的集合预报与集合预报的检验——杜钧,周斌斌

超大城市气象观测网的设计与应用——汤绪

雾主题文献计量分析

李婧华 田晓阳

一、数据来源和统计方法

利用中国知网学术期刊网络出版总库（以下简称CAJD）和Web of Science平台SCI-E数据库，检索了国内外有关“雾”的研究论文，分析了全球和我国的雾预报和研究的现状，试图揭示近年来雾预报和研究的进展和未来研究方向。CAJD数据库中采用检索式为主题=(雾-霾)，学科类别限定为气象学，SCI-E数据库中检索式为TS=fog，学科类别为气象与大气科学，数据年限截至2015年12月，文献类型均选择论文和综述，检索命中该领域国内和国际论文分别为1504篇和1456篇（检索日期均为2016年3月24日）。

二、统计结果和分析

1 研究总量增长趋势

SCI-E最早收录有关“雾”的研究论文是1932年Ashmore S E发表在*Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*上的*The occurrence of fog with unsaturated air at Grayshott*。CAJD收录该主题最早的研究论文是1943年发表在《气象学报》题为《重庆之雾》和《湖南近五年来之雾》的两篇文章。图1给出1960—2015年“雾”的研究文



在“雾”研究领域，我国在论文产出上处于世界前列，而影响力还有很大提升空间。中国研究团队的形成与国内高校在“雾”研究方面的研究团队建设密不可分。

献发文量分布。根据SCI-E数据库可以看出，1960—1990年发文数量较少；从1990年开始，国际上关于雾的研究论文在波动中平稳增加，其中2015年发表最多，达到83篇。在该主题下SCI-E中国作者发文量逐年增加，2010年后，年均发文量大于10篇，2015达20篇。CAJD数据库方面，国内“雾”主题论文产出主要有三个阶段，1979年之前，年均发文量低于10篇；1980—2006年发文量呈现平稳增加；2007年以来，该领域发文量迅速增长。

2 国家和机构产出及影响力分析

表1给出了“雾”主题论文产出量排名前10国家的总被引次数、篇均被引次数和h指数。SCI-E收录美国参与发表的“雾”主题论文495篇，约占SCI-E总发文量的34%，是排名第二的德国的3倍之多。德国、中国和日本分列第二至第四，产出均大于100篇，其中，中国的篇均被引次数较德国和日本低。在排名前10的其他国家中，意大利、英国、加拿大和瑞

典均被引次数较高。从综合影响力（h指数）来看，美国影响力最高，印度最低，中国等其他国家影响力位于第二集团。

在机构（表2）方面，国际机构中，SCI-E发文量最多的前10所机构中，美国机构4所，中国机构2所，意大利、法国、瑞典和英国机构各1所。其中，美国国家海洋和大气管理局及意大利国家研究院产出均大于50篇，分列第一和第二。中科院和中国气象局是SCI-E“雾”主题论文产出最多的国内机构。在CAJD数据库中，南京信息工程大学产出最多，产出量是排名第二的中国海洋大学的近4倍，约占国内该主题论文总量的10%。

3 来源期刊和高产作者分析

表3给出国内外刊载“雾”主题论文较多的期刊。SCI-E数据库中，*Atmospheric Environment*刊载228篇，位列第一，*Atmospheric Research*和*Journal of Geophysical Research Atmosphere*刊载“雾”主题论文量分列第二和第三，其余期刊刊载该主题论文均低于100篇。CAJD数据库中，刊载“雾”主题最多的是《气象》，刊载量为101篇，随后是《气象科技》和《气象学报》。表4给出的是国内外“雾”研究主题论文的高产作者。SCI-E数据库中“雾”主题论文产出10篇及以上的学者共30位。CAJD数据库中，产出大于10篇及以上的学者共6位，其中有4位来自南京信息工程大学。SCI-E“雾预报”主题及“雾”主题被引频次较

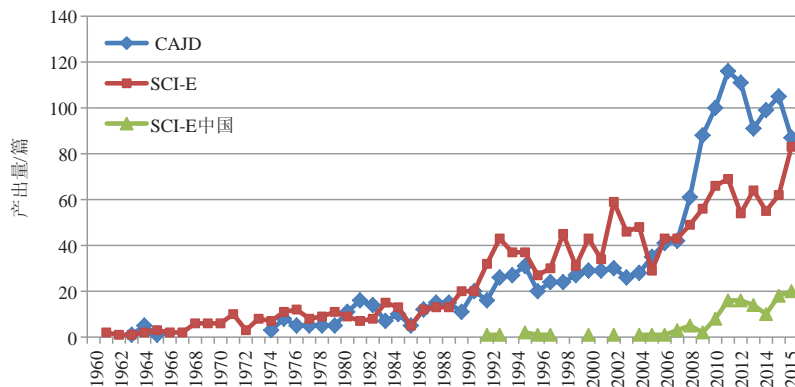


图1 1960—2015年SCI-E和CAJD数据库“雾”主题文献发文量分布

表1 “雾”主题论文 (SCI-E) 产出排名前10的国家/地区及其影响力

序号	国家和地区	产出 (篇)	总被引次数	篇均被引次数	h指数
1	美国	495	14109	28.5	59
2	德国	154	3219	20.9	31
3	中国	129	1604	12.43	25
4	日本	103	1751	17	22
5	法国	80	1454	18.17	25
6	意大利	79	2189	27.71	24
7	英国	77	1956	25.08	28
8	加拿大	77	1909	24.79	25
9	印度	56	591	10.55	14
10	瑞典	55	1952	35.49	26

表2 SCI-E和CAJD数据库“雾”主题论文的产出机构

产出机构 (SCI-E)	产出 (篇)	产出机构 (CAJD)	产出 (篇)
美国国家海洋和大气管理局	66	南京信息工程大学	151
意大利国家研究院	56	中国海洋大学	39
美国国防部	47	中科院大气所	31
美国科罗拉多州立大学	47	北京大学	30
美国加利福尼亚大学	42	解放军理工大学	29
法国国家科学研究院	38	中国气象科学研究院	26
中国科学院	37	中国气象局	24
中国气象局	37	广州热带海洋气象研究所	22
瑞典斯德哥尔摩大学	34	国家气象信息中心	19
英国气象局	34	重庆市气象局	18

表3 SCI-E和CAJD数据库刊载“雾”主题论文的主要期刊

来源出版物 (SCI-E)	产出 (篇)	来源出版物 (CAJD)	产出 (篇)
Atmospheric Environment	228	气象	101
Atmospheric Research	135	气象科技	69
Journal of Geophysical Research Atmospheres	102	气象学报	49
Water Air and Soil Pollution	60	气象与环境科学	46
Atmospheric Chemistry and Physics	59	气象研究与应用	38
Journal of Applied Meteorology	53	大气科学学报	38
Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	43	安徽农业科学	36
Journal of The Atmospheric Sciences	40	气象科学	34
Journal of Aerosol Science	39	陕西气象	34

表4 国内外“雾”主题论文的高产作者

国外作者	单位	SCI-E产出 (篇)	中国作者	单位	CAJD产出 (篇)	SCI-E产出 (篇)
Collett JL	美国科罗拉多州立大学	34	李子华	南京信息工程大学	28	5
Fuzzi S	意大利国家研究委员会	33	杨军	南京信息工程大学	19	7
Facchini MC	意大利国家研究委员会	28	牛生杰	南京信息工程大学	18	11
Hansson HC	瑞典斯德哥尔摩大学	19	张苏平	中国海洋大学	12	7
Klemm O	德国明斯特大学	18	刘端阳	南京信息工程大学	12	3
Anastasio C	美国加州大学戴维斯分校	17	黄健	广州热带海洋气象研究所	11	6

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

高的热门文献分别在本期P3、P5页榜单给出。

4 学位论文分析

1988年以来, 共有109篇有关雾的学位论文, 其中博士论文19篇, 硕士论文90篇。1988—2007年, 每年该主题学位论文小于2篇; 2008年开始, 学位论文数量略有增长, 平均每年为11.4篇。南京信息工程大学共产出63篇学位论文, 中国海洋大学产出41篇, 其余论文产自南京大学、兰州大学、西安电子科技大学和中国气象科学研究院。南京信息工程大学中牛生杰和杨军团队产出最多, 分别为20和18篇, 而中国海洋大学中张苏平团队产出最多, 为16篇。学位论文中对雾的研究内容主要集中在: 雾的物理和化学特性、演变特征及数值模拟等方面, 而针对雾的预报方面研究较少^①。

三、结果讨论

根据检索结果发现, 在“雾”研究领域, 我国在论文产出上处于世界前列, 而影响力还有很大提升空间。中国研究团队的形成与国内高校在“雾”研究方面的研究团队建设密不可分。同时, 这些高校科研团队的研究成果在国际“雾”研究领域也初具影响力。因此, 未来要进一步加强高校和科研单位之间的合作, 不断提升我国在“雾”研究领域的科研实力。

^① 本节参考了南京信息工程大学牛生杰教授提供的“南京信息工程大学与雾相关的研究生学位论文数据清单”, 以及中国海洋大学傅刚教授提供的“2001—2015年雾作为研究内容的研究生学位论文数据清单”。

《海雾观测和预报进展及其面临的挑战》介绍

■ 侯美亭

2016年, Springer即将出版的由Koračín和Dorman主编的*Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations and Forecasting* (《海雾观测和预报进展及其面临的挑战》)一书, 对海雾的观测和预报研究进行了全面梳理, 给出了海雾研究未来的机遇和挑战。

全书一共包括11个章节, 分别邀请各有关领域的专家撰写, 介绍了海雾研究的众多层面, 包括世界海洋气象观测的发展史(Koračín和Dorman)、全球海雾的发生与气候(Dorman, Mejia, Koračín和McEvoy)、雾的观测技术(Dorman)、湍流对海雾的影响(Kim和Yum)、辐射对海雾的影响(Kim和Yum)、与海雾有关的天气过程(张苏平和Lewis)、微物理性质(Gultepe, Milbrandt和周斌斌)、降水和雾的关系(Tardif)、海雾模拟与预报(Koračín)、集合预报(杜钧和周斌斌)以及遥感(Wilcox)等。这里将本书的主要内容简述如下。

本书前两章为引言以及对世界海洋气象观测发展史的介绍。19世纪中期, 航海船舶日志里开始出现了海洋天气的基本信息, 包括对晴天、雾、雨或雪等基本天气特征的描述。根据这些信息, 美国人Maury在1855年首次对世界海洋的洋流、温度和天气进行了分析。20世纪40—50年代的SYNOP(地面天气观测)代码的提出及其普遍被接受, 是世界海洋气象发展的另一个关键阶段。SYNOP代码极大地便利了标准化大气条件的记录。以SYNOP代码为基础的海洋气象观测至今仍在继续, 这为研究世界海雾的分布提

供了数据。

雾的观测实际上是以能见度为基础的。20世纪中期, SYNOP代码将水平能见度小于1km的天气条件定义为雾, 介于1~10km为薄雾等。大雾的严重程度也可以通过船舶或其灯光在多大程度上能被看清楚来判断, 类似这样的技术至今仍在沿用, 尽管雾自动检测系统已经开始出现在海洋世界(见本书第三章)。

在行星边界层, 湍流在动量、热和水分交换中扮演了重要角色, 是影响海雾形成的关键因素(第四章)。在稳定的条件下(有利于平流雾的形成、维持和耗散), 风切变可以诱导湍流混合, 平流暖空气从而可以因感热通量辅散而变冷。不同于陆地上的雾, 海雾的另一个主要贡献因素来自于海表的潜热通量, 其有利于水汽饱和。通过观测识别湍流在海雾形成中的角色开始于20世纪早期。过去30多年来, 配备了精密仪器的科研船舶和航空器的观测试验已经用于识别海雾的微物理和微气象特征。

第五章介绍了辐射在海雾形成和演变中的作用。辐射对于陆地上雾的形成当然是至关重要的。而在一些特殊条件下, 辐射热损失也是海雾形成中的一个重要因素。平流雾形成过程中, 湍流动能通常是由风产生的, 因为它一般发生在热稳定的条件下。然而, 由于风速很弱, 海面上方空气的湍流冷却和(或)变湿不可能有效地进行。在此条件下, 从平流暖空气到冰冷海水表面, 长波辐射导致的空气冷却也可以使水汽饱和。在陆地和海洋表面, 辐射可以解释雾层的垂直发



以SYNOP代码为基础的海洋气象观测至今仍在继续, 为研究世界海雾的分布提供了数据。

展: 一旦海面形成雾, 雾的演变将关键取决于雾顶的辐射冷却。本章也给出了雾顶辐射冷却对雾演变产生影响的一个观测实例。

第六章讨论了西北太平洋和中国、韩国附近海域海雾的天气过程, 特别关注了海雾形成和消散的复杂性, 及其对人类活动的显著影响。除了天气条件, 也考虑了海表温度(SST)的作用, 因为SST是雾过程的一个重要影响因素。本章旨在为理解海雾的发生和天气预报提供有用的信息。

雾过程中微物理特性的变化在第七章中进行了介绍。理解雾形成过程中的微物理性质, 主要基于陆地和海洋上专门的外场试验, 同陆地相比, 在海洋上进行试验充满了更多挑战。但这些试验证实并强调了微物理特性(包括能见度、液态水含量、颗粒分布、液滴大小分布、液滴浓度、过饱和度、辐射、热通量和动量)对雾的形成、演变和消散过程的重要性。

基于早期和近期有关降水与雾关系的研究, 第八章概述了目前所理解的降水形成的雾及其演化过程中的一些关键物理规律, 例如暖锋降水、降水蒸发、暖湿水汽平流及湍流混合等可能导致雾形成的一种机制。降水与雾的关系是当前雾研究中虽认识有限, 但非常重要的一个方面。

海雾预报仍然存在很大的不确定性(第九章)。原则上, 海雾预报一般属于次级的天气预报。不过在现实中, 次天气尺度边界层中海洋观测的缺乏制约着雾预报。小尺度的一些变量, 如大气颗粒物和

(下转74页)

《雾物理化学研究》简介

■ 陆春松 黄红丽



气象出版社，2014年

雾是大量微小水滴（或冰晶）浮游空中，使近地层水平能见度小于1km的天气现象。目前，雾的危害日益突出，严重危害人体健康、交通运输安全和电力供应安全等。为了提高对雾害的科学认识，增强防御雾害的能力，需要对雾害的成因、影响、防御和治理等进行深入研究。

长江三角洲地区是我国雾的高发区之一。2007—2012年，在中国气象局公益性行业（气象）科研专项“长江三角洲雾害监测预警及灾情评估方法研究”和国家自然科学基金面上项目“南京市郊区雾理化特性及酸化机理的观测和数值研究”的资助下，南京信息工程大学牛生杰教授、杨军教授、樊曙先教授、朱彬教授、魏鸣教授和江苏省气象局曾明剑研究员等项目组主要成员带领年轻教师和研究生，对南京浓雾的宏观和微观结构进行了综合观测。利用南京雾观测研究经验，在国家科技部科技支撑计划“南方冰冻雨雪天气监测预警技术研究”项目的支持下，项目组于2009和2010年赴湖北恩施对形成电线积冰的气象条件进行了实时监测，并对过冷雾微物理过程进行了综合观测；2011、2012和2013年项目组还分别赴广东湛江、福建厦门对海雾微结构进行了综合观测，收集了大量第一手资



介绍了著者有关中国雾物理化学过程宏观、微观特征的最新研究成果，深化了对雾宏微观物理结构的认识，深入研究了雾的生消机制、理化特征以及预报预警方法。

料，并对这些资料进行分析研究，建立了一套业务技术方法，取得了创新理论成果。

基于以上研究所取得的理论成果，牛生杰教授撰写了《雾物理化学研究》专著。该书介绍了著者有关中国雾物理化学过程宏观、微观特征的最新研究成果，深化了对雾宏微观物理结构的认识，深入研究了雾的生消机制、理化特征以及预报预警方法，为提高雾的预报精度、有效实施人工消雾、制定雾灾应急方案提供了新的理论基础。内容涉及：

1) 宏观特征：辐射雾具有显著的日变化特征，平流雾和平流辐射雾的维持时间较长，并在正午前减弱或者消散，亦具有一定的日变化特征。南京雾层较厚，平流雾和平流辐射雾的厚度最大。辐射雾的形成和发展与贴地逆温层紧密相关，深厚雾层的形成与低空逆温及逆温层下的低云有关。平流辐射雾也是在逆温层下形成的，但雾顶的逆温常不因中午前后太阳辐射的增强而消失，与辐射雾不同。南京辐射雾和平流辐射雾中，雾形成前的风速都比较小，且风向大都是西北风或者东南风。

2) 微观特征：南京辐射雾的雾滴谱可分为宽谱和窄谱两种。平流辐射雾过程中，雾滴活化和凝结增长是占主导的微物理过程。雾霾转化过程中的主要发生顺序为霾—轻雾—湿霾—雾—湿霾—轻雾—霾，湿霾持续时间在雾后较雾前短。雷州半岛海雾的雾滴谱较宽，雾滴谱谱型以单调递减谱为主。与南京雾类似，在海雾过

程中，最主要的微物理过程是雾滴活化和凝结增长过程。湍流对雾的发展具有正反两方面的影响，雾层中存在一个湍流强度临界值，低于或高于该临界值可促进或削弱雾过程的发展。在既定的大气环境中，气溶胶数浓度也存在一个临界值，促进或者抑制雾微物理的发展。

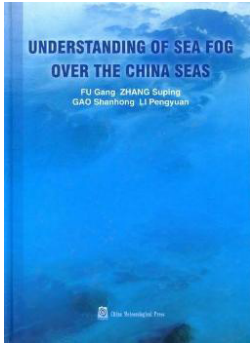
3) 化学特征：南京雾水中浓度最高的阴离子在2006和2007年均均为 SO_4^{2-} ，而阳离子在2006和2007年分别为 NH_4^+ 和 Ca^{2+} ，阳离子的变化主要是由2007年观测点附近房地产建筑工地的增多引起的。2010年广东省湛江市东海岛海雾中阴阳离子分别以 Cl^- 和 Na^+ 为主，2011年主要的阴离子是 NO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ，主要的阳离子 Na^+ 、 NH_4^+ 和 H^+ 。平流辐射雾中雾水离子总浓度高于辐射雾。雾前，大气气溶胶 $\text{PM}_{9.0}$ 中16种多环芳烃的总质量浓度为 $44.06\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ；雾过程中， $\text{PM}_{9.0}$ 中的多环芳烃总质量浓度明显增加；雾消散后， $\text{PM}_{9.0}$ 中多环芳烃的总质量浓度显著下降。

4) 过冷雾：2010年1月9—11日积冰过程的雾滴微物理特征表明，积冰增长期雾滴的平均液水含量要明显大于其他阶段，降水出现时的积冰增长率明显大于无降水时的值。由于冻毛毛雨的影响，过冷雾微物理量的发展受到了抑制。在受降水影响较小的个例中，微物理量之间都为正相关关系；而在受冻毛毛雨影响较大的过程中，微物理量之间出现了弱的正相关甚至负相关关系。

（作者单位：陆春松，南京信息工程大学；黄红丽，气象出版社）

Understanding of Sea Fog over the China Seas简介

李鹏远



气象出版社，2012年

海雾是悬浮在海上和沿岸地区上空大气边界层内的大量水滴（或冰晶），使得大气水平能见度小于1km的天气现象。由于与海雾相伴的大气低能见度往往会对海上或近海的人类各种活动产生重要影响，甚至会导致海上或沿海公路上的交通事故，因此海雾在沿海地区受到广泛关注。

大量的观测事实和研究表明，中国的渤海、黄海以及东海是海雾频发的区域。已故的中国海洋大学王彬华教授在海雾研究方面做出了开创性贡献，被学术界公认为是中国第一个系统研究海雾的杰出专家，他1983年出版的专著《海雾》一书，受到广泛好评。周发琇教授

（上接72页）

液滴分布、热和水汽通量、三维垂直和水平运动、三维湍流，以及它们在大气边界层中的层级分布等等，对理解雾过程非常重要。近些年开展的针对陆地和海洋的雾的集合预报已经取得了一些进展（第十章），例如，巴黎国际机场的雾的局地集合预报系统，NCEP短期集合



黄海和东海海雾雾季起始于4月，8月结束，雾季的开始源于局地海陆温差形成的浅的反气旋，而8月雾季的结束和东亚—西太季风的大尺度变化有关，黄海盛行风由南风向东风转变，终止了海雾维持所需要的从南部平流而来的暖湿气流。

等作为第二代海雾研究工作者，对我国海雾研究的发展也做出了重要贡献。中国海洋大学的傅刚、张苏平、高山红教授和李鹏远博士作为第三代海雾研究工作者，在最近十多年中为推动我国海雾研究的发展做了有益尝试，该海雾研究团队于2012年1月在气象出版社出版了英文专著*Understanding of Sea Fog over the China Seas*一书。该书集中收录了四位作者最近十多年在国际学术期刊，如*Journal of Climate*，*Atmospheric Research*，*Meteorology and Atmospheric Physics*，*Advances in Atmospheric Sciences*，*Pure and Applied Geophysics*等发表的12篇论文，是21世纪最初十多年该海雾研究团队在监测和模拟中国海海雾、提高对海雾认识水平等方面取得的重要研究成果的集中总结。

全书共215页，由两部分组成：第一部分是案例研究；第二部分是综合研究。

1) 案例研究：黄海海雾以平

流冷却雾为主，主要发生在每年的4—7月。研究者主要利用RAMS和MM5模式对春、夏季黄海海雾个例的形成机制进行研究，并结合GOES-9卫星资料，对海雾的演变特征进行了深入分析。还利用MTSAT-1R卫星资料对夜间黄海海雾进行了分析。观测资料结合卫星资料可以较好地描述海雾的形成和演化过程，为模式模拟结果验证提供依据。

2) 综合研究：主要研究黄海和东海海雾的气候特征、大尺度环流场的作用、春夏季海雾的对比分析、大气边界层变化特征、海洋锋在海洋边界层中的作用等。黄海和东海海雾雾季起始于4月，8月结束，雾季的开始源于局地海陆温差形成的浅的反气旋，而8月雾季的结束和东亚—西太季风的大尺度变化有关，黄海盛行风由南风向东风转变，终止了海雾维持所需要的从南部平流而来的暖湿气流。

（作者单位：中国海洋大学）

预报系统（SREF）等。

第十一章介绍了卫星遥感技术在雾研究中的不断增加的应用，探讨了Aqua卫星的微波成像仪反演的SST和MODIS提供的可见和红外数据在检测雾和低云方面的协同效果。事实上，对全球范围的海洋SST的微波观测就始于2002年的Aqua卫

星。不过，极轨卫星较长的重复采样时间严重制约着雾的遥感检测，建设能在静止卫星轨道检测来自洋面的微弱微波信号的传感器，将能很好地解决采样时间分辨率的问题，这是一个重大的工程挑战。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

气象史学科建设的坚实一步

——《气象科技史》评介

■ 贾朋群 张萌



科学出版社，2015年

2015年末，屠呦呦获得诺贝尔奖让中国学术界在激动过后，有机会深入思考一些问题，例如：中国科技发展的历史遗产在世界科技舞台上的意义和作用是否要重新审视？一些其他领域类似屠呦呦挖掘的基于中国传统科学技术发展的成果是否还有待开采？这样的思考或许是让中国科技史上有可能依然沉寂的更多成果早日让世人所知的一次机会。

在归属于自然科学，且是典型的西学东进学科的我国气象科学领域中，如果要开始上述的思考，尤其是结合中外气象科学交错发展的历史进程进行梳理和尝试获取新的认知时，一个不错的起始选择是从阅读2015年9月由科学出版社出版的《气象科技史》开始。

这本专著的作者张静，来自南京信息工程大学。这所具有长久气象渊源的高等学府，也是新中国最早设立气象史研究学科的高校。如果说，2012年南京信息工程大学在专业设置和气象科技史学科建设上迈出了第一步，那么《气象科技史》的出版则是让气象科技史学科发展走出了坚实的下一步：这一步能让学术界更多的人感知气象科技史学科，特别是通过这部专著，认识到气象科技史的理论



《气象科技史》的出版，为我们提供了一个初步标尺，可以用来作为审视我国早期气象学者在本领域科学思想的萌芽和与世界气象科学发展的融合。

体系建设或许走向活跃并吸引更多成果问世。

本书分为八章，在前两章介绍了古代对天气现象（风、云雨、雷电）、大气光象（虹、海市蜃楼、晕、宝光）的认识之后，作者深入介绍了气象科学理论的方方面面。在第三章，作者以科学家及时间为线索，对风暴理论、云降水理论和大气环流理论的发展历程进行了介绍。第四章主要讲述了对天气现象的利用和干预。首先概述了古代人们在生产、生活以及战争中对天气条件的利用，之后从中西方人工消雹、降雨、避雷等的技术发展方面做了简要介绍。第五至七章，作者从现代气象业务的三大方面——天气预报、气候预测和气象观测入手，对其发展脉络进行了梳理。其中，第五章着重介绍了天气预报从经验预报逐步向数值预报的转变；第六章从国内外对物候的观测与研究到对气候变化及其规律的认识等方面进行了阐述；第七章主要介绍了国内外古代观象台到现代气象台站的建立，以及观测手段的发展。最后一章，则将重点放在了气象人物及典籍的介绍上。

针对中国气象与国际气象发展融合和共同发展，作者在一些章节，巧妙地将中西方进展对比放在一起阐述。如，2.1.2节在晕的成因探究上，我国学者在17世纪中叶已做出比较接近现代科学的解释，而在17世纪后半叶，法国科学家对晕象生成的解释也基本上被当今气象学界所认同。又如，在7.3节先后讨论了西方的气象传感器和中国的测风仪和量雨计，揭示了中国先人在量化气象

要素观测方面并非毫无建树，而是曾经比肩西方最先进水平。

当然，由于作者主要的研究方向是在社会文化领域，著作中的一些说法还需准确把握。例如，谁是现代天气预报之父？作者的结论值得商榷。此外，作者在书中对西方传教士在中国推广现代气象科学理念进行了较为详尽的描述，但对中国学者在西方气象科学建立之初，就有涂长望、赵九章、叶笃正和谢义炳等优秀学者海外求学，且赵九章在现代气象科学刚开始走向成熟的20世纪40年代，就提出了斜压不稳定概念，并首次将数学物理方法引入我国气象学，开创了中国的动力气象学；叶笃正于1949年提出的罗斯贝长波频散理论，现已被广泛应用于天气预报业务中。这些中国科学家对现代动力气象学的成型贡献了一己之力等事实，作者着墨不多，这可能影响人们对现代气象科学走向成熟之时中国科学家实质性贡献的把握。

无论怎样，《气象科技史》的出版，为我们提供了一个初步标尺，可以用来作为审视我国早期气象学者在本领域科学思想的萌芽和与世界气象科学发展的融合。而中国固有的人与自然关系的见解，即在本书中描述的——当前盛行的可持续发展理念更是中国古代天人合一思想的回归。期待这部专著能让更多的学者在阅读中引发深入的思考，让中国气象科学发展的遗产更多地通过“温故知新”的方式回报社会，同时这也是这部专著的作者以及众多读者共同的期待。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

高被引论文选编

“雾预报”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2014—2015年

MTSAT湿度反演数据在黄海海雾临近预报中的同化——Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea. *Weather and Forecasting*, 2014, Vol. 29, No. 2.

中国海洋大学的王永明等发展了一种基于WRF模式的扩展的三维变分资料同化(3DVAR)方法，同化了我国黄海海域海雾初始阶段的卫星湿度数据。海雾的属性，包括其水平分布和厚度，利用经验方法从MTSAT卫星的红外和可见光云图中反演得到。海雾中的相对湿度可认为是100%，湿度反演相当于测定海雾的水平分布和垂直厚度。研究针对两次海雾事件开展了试验，一次是广泛分布在黄海的海雾，另一次海雾的分布主要是沿海岸呈狭长分布。

对于第一种雾广泛分布的情况，MTSAT数据的同化大大提高了对海雾区域的预报，这种改善归因于一个更加真实的海洋边界层(MBL)的再现，以及对湿度和温度廓线的更好描述。对于第二种雾狭长分布的情况，如果不同化MTSAT湿度数据，模式将完全不能重现这次海雾事件。然后，研究又将本3DVAR方法应用到10个以上的海雾事件中，以评价它对模拟的影响。结果发现，MTSAT湿度数据同化不仅提高了海雾预报，而且为MBL提供了更好的湿度和温度结构信息。

2012/13 ParisFog外场试验期间依赖于与大小有关的颗粒活化效应——Size-dependent particle activation properties in fog during the ParisFog 2012/13 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, Vol. 14, No. 19.

大雾导致的能见度下降是导致

交通事故的一个重要原因，因此有必要更好地了解雾的形成，以提高对雾的预报能力。而雾预报能力的改善，需要加深对雾从形成到消散过程中的众多复杂机制的了解。2012年冬季(2012年10月2日—2013年1月7日)，在巴黎西南20km的典型的半城市区域开展了一场以雾研究为目的的外场试验，试验被命名为ParisFog。试验中测量的雾参数包括：1)两个不同进气系统后面的总的、填隙(非活性)干颗粒数量及尺寸分布；2)周边环境的填隙水合气溶胶和雾液滴的大小分布；3)不同超饱和度的云凝结核数浓度。对于本次外场试验检测到的总计17次雾事件，气溶胶粒子通过它们的吸湿特性、雾液滴激活特征和对光散射的贡献进行了表征。瑞士的保罗·谢尔联邦研究所的Hammer等的分析结果表明，这些雾事件中，粒子吸湿能力总体较低，吸湿性参数平均值为0.14，这可能是由当地交通和木材燃烧排放造成。对环境气溶胶粒度分布的测量发现，临界湿直径(大于该直径，水合气溶胶会被激活成雾滴)是相当大的(中间值为 $2.6\mu\text{m}$)，而对于不同雾事件，该值的变化也很大($1\sim 5\mu\text{m}$)。因此，活性雾滴的数量是非常少的，非活性水合粒子对光散射有显著贡献，从而导致能见度的下降。

冰雾观测和模拟综述——A review on ice fog measurements and modeling. *Atmospheric Research*, 2014, Vol. 151, No. SI.

冰雾是高海拔、高纬度地区低温时节经常出现的一种现象。冰雾可导致能见度下降，这是引起航空事故

的一个重要原因。根据加拿大交通部的资料，当仅考虑天气因素时，加拿大北方高纬度区域航空事故的发生率可能是加拿大全国航空事故发生率的25倍。而仅考虑低能见度引起的航空事故时，这个数字为31倍。在加拿大北方的冬季，约1/4的时间都会出现冰雾。为了预防冰雾导致的能见度下降，需要对冰雾的预报和监测有较好理解。为此，这篇由加拿大环境部的Gultepe等撰写的冰雾观测和模拟的综述文章，回顾了目前对冰雾的微物理过程的认识，展望了冰雾观测、微物理性质的遥感反演、冰雾数值预报面临的挑战。

雾的消光能力和液态水含量之间的关系——Relationship between optical extinction and liquid water content in fogs. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, Vol. 7, No. 5.

20世纪70年代末的研究表明，雾的红外消光能力和液态水含量(LWC)之间存在简单的线性关系。这种关系使得利用后向散射激光雷达检测LWC的垂直廓线成为可能。不过，该研究有一个很大的不足：由于研究使用的通风收集管的局限，导致半径 $>15\mu\text{m}$ 的颗粒有所损失(只有部分被检测到)，所以无法评价较大液滴对雾的影响。为此，法国国家科学研究院的Klein等利用最先进的仪器重新研究了这种线性关系。结果表明，该线性关系仍然适用(至少对于试验间所观测到的大多数辐射雾)。同时，研究也使用更准确的液滴折射率数据，分析了液滴折射率对线性关系系数的影响。以往研究在涉及雾滴折射率时，通常的做法是将其假设为纯水。这种假设对于大的液滴可能是有效的，但对于小的液滴，其可信性值得怀疑，因为液滴通常是由具有高度可变的化学组份组成的凝结核所形成。本研究表明，凝结核性质将主要影响到具有小液滴和较少液态水含量的轻雾。

贝叶斯决定性网络在墨尔本机场雾预报中的应用——Fog forecasting for Melbourne Airport using a Bayesian decision network. *Weather and Forecasting*, 2015, Vol. 30, No. 5.

澳大利亚墨尔本机场每年大约会出现12次雾事件。准确的雾预报对于降低航空业的安全风险具有重要意义。然而，由于雾物理过程的复杂性和局地地理、天气条件的影响，雾预报存在不小的难度。贝叶斯网络（Bayesian networks, BNs）方法是一种广泛用于许多应用领域的预测、诊断和风险评价的概率推理工具。以往研究曾关注过几种BNs方法在概率天气预报中的应用，但迄今为止，没有任何一种BNs应用在天气预报业务中。澳大利亚莫纳什大学的Boneh等基于34年（1972—2005年）的数据，发展了一种用于墨尔本机场雾预报的贝叶斯决定性网络（这里称作贝叶斯客观雾预报信息网络，简称为BOFFIN）方法。通过参数的标定，以保证贝叶斯网络具备与先前的业务预测方法同等或更好的性能，使其能被用作业务决策支持工具。基于BOFFIN方法，本研究评价了8年的时段内（2006—2013年）贝叶斯网络的业务应用效果。结果显示，贝叶斯网络的应用显著提高了雾预报的准确率。而且，因为BOFFIN的技巧、可视化和解释组件，该方法已经被预报员接受。

针对沿海沙漠地区交通安全的雾预测：机器学习方法对短时临近预报技巧的改进——Fog prediction for road traffic safety in a coastal desert region: Improvement of nowcasting skills by the machine-learning approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, Vol. 157, No. 3.

基于机器学习算法-决策树理论，斯洛伐克Microstep-MIS公司的Bartoková等提出了一种针对迪拜

海岸沙漠地区的临近雾预报模式。所研究区域自动气象站的高频观测被用作模式分析的数据库。研究发现，与耦合WRF模式和PAFOG雾模式相比，决策树提高了前6h的预报技巧。而且，通过将耦合雾预报模式的模拟结果集成在决策树的训练数据库中，可进一步提高决策树的效果：检测概率、错报比和Gilbert技巧评分分别达到了0.88、0.19和0.69。基于这些，研究认为，对于提前6h的迪拜区域的雾预报，最好的方法就是本研究新发展的机器学习算法，而超过6h的预报，耦合数值模式是最好的选择。

2002—2005年和2007年巴西北部海港马塞约机场的雾事件——Fog events at Maceio Airport on the northern coast of Brazil during 2002–2005 and 2007. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, Vol. 172, No. 10.

巴西Alagoas-UFAL联邦大学的Fedorova等以巴西马塞约机场2002—2005年和2007年发生的全部8次雾事件为例，研究了雾形成的物理过程、PAFOG雾模式效果，以及植被对雾预报的可能影响。研究发现，对于8次雾事件，NCEP/DOE II、ECMWF和WRF模式都能识别到低层弱的抬升。高层的下沉在ECMWF和WRF模式中占据主导。根据WRF模式，雾的典型温度廓线可分为3层：1）很薄但具有很高湿度的逆温层（上达166m, 985hPa）；2）条件性不稳定层（985~860hPa）；3）干燥稳定层（860hPa以上）。能见度在200~300m的中等强度的雾的形成常伴随着海洋冷却，而弱雾与海洋变暖有关。利用3次雾事件，检验了PAFOG模式的效果，其中2个是令人满意的。雾持续时间和强度的满意结果可提前9h得到。而植被方面，研究指出，快速生长的甘蔗对低能见度预报没有显著影响。

我国近年雾研究方法及其研究热点——《气象科技》2014年第42卷第1期

王博妮等对近年来雾的各项研究的最新进展和研究成果进行总结和概括，包括气候统计方法对雾特征的研究、数值模拟方法对雾的机制研究、雾微物理结构研究、雾的监测识别与预报技术研究。在此基础上，针对目前雾研究领域的热点和未来可能的研究方向进行了分析，包括高速公路大雾天气的研究、霾研究、雾与城市化相互作用以及沿海和复杂地形地区雾的研究。文章指出，要做到对雾的生消、维持和微物理特征等方面的全面彻底的了解，及对特殊区域雾的监测，还需要大量实测资料的积累和进行更深入的研究。1）在完善数值模式的基础上，设置合理精细化的陆面过程参数；2）针对不同区域找出相应的方法对现存棘手的城市雾多发地区开展近地面的微物理结构观测；3）利用卫星遥感监测资料，实现对雾的全天候监测；4）研究气象条件对大气污染物扩散能力的影响，有效调控污染物的排放，可探求出城市雾治理的新方法。

华北平原一次严重区域雾霾天气分析与数值预报试验——《中国科学院大学学报》2014年第31卷第3期

张小玲等针对2013年1月27—31日中国华北平原地区持续5d的雾和霾天气进行综合分析和数值预报。研究表明，雾和霾过程期间华北平原高空以平直纬向环流为主，没有明显冷空气活动，地面多为风速小、相对湿度较大等不利于污染物扩散和稀释的弱气压场；大气层结构稳定、低空逆温频率高强度大，且存在明显的低层逆湿条件，边界层内污染物的水平和垂直扩散能力差。稳定、高湿的气象条件对细粒子PM_{2.5}质量浓度的形成、积聚和维持比较有利，造成严重的区域性低能见度及雾和霾天气。气象化学耦合模式WRF-Chem预报系统对此次雾和霾过程期间天气系统演变和PM_{2.5}质量浓度的空间分布及高浓

度持续时间、消散减弱等过程做出了较好的预报。模式预报出雾和霾期间PM_{2.5}质量浓度在京津冀平原地区达到300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 严重污染,主要分布在北京城区及以南的河北、天津等重点城市和区域,部分地区可达400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上,与华北地形和城市群分布有很好的对应关系,在华北平原山前容易形成气流的辐合区和高污染区。

北京2013年雾霾天气特点和服务应对措施——《气象科技》2014年第42卷第3期

石增云等对2013年1月北京出现的持续严重雾和霾天气的成因及特点做了分析,结果表明持续雾和霾天气是由于稳定的层结、持续偏南风及较低的气温共同影响造成。依据服务经验,重点对雾和霾天气的预报及服务措施进行了细致的分析。在预报上,利用气象部门数值模拟和天气预报的技术优势,针对雾和霾的区域性分布特点,为政府部门提供准确的预报和直观的产品;在服务上,注意抓好时机,利用气象部门的特殊角色,对政府部门、公众和专业用户,根据他们的需求特点,提供相关的服务。另外,还对今后雾和霾服务气象部门需要加强的工作,提出了相关的建议:1) 加强污染气象条件基础性研究,提高污染气象条件的预报能力;2) 为政府部门治污措施提供科学的决策依据;3) 开展有针对性的科普宣传措施,提高环保意识;4) 制定相关空气污染气象条件行业标准;5) 启动应急机制。

从京津冀雾霾天气浅议我国能源结构调整的紧迫性——《中国科技信息》2014年第7期

近年来,雾和霾对我国环境所造成的影响已经不容忽视,尤其是京津冀地区雾和霾天气尤为严重,其关乎亿万中国人的健康问题。对雾和霾的治理刻不容缓。甄春阳等研究了雾和霾的产生原因、危害,并从治理计划、日常监测预报、政

策法规、预防知识四个方面解读雾和霾治理现状,着重从能源结构调整的角度分析我国雾和霾治理的必要性及紧迫性,并给出了应对雾和霾等环境突出问题的合理化建议。文章指出我国石油进口依赖和煤炭主导的经济模式必须改变。1) 大力发展煤炭洁净使用技术,大力开发可替代清洁能源,推进光伏产业、生物混合燃料的推广;2) 提高对环保企业的扶持力度,向大众推广环保理念;3) 普及雾霾预防知识,研发成本低且能有效预防PM_{2.5}的口罩;4) 完善相关法律法规制度。

降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法——《气象》2014年第40卷第5期

李俊等针对AREM模式降水预报的偏差特征,开展了基于频率(或面积)匹配方法的降水偏差订正试验,重点介绍了该方法的原理和实现过程,并对订正前后的结果进行了系统检验,深入分析了该方法的优缺点并指出了可能的改进方向。经过3个月降水集中期(2012年6—8月)的逐日试验分析结果表明:1) 该方法能显著改善模式降水预报中雨量和雨区范围的系统性偏差,订正后降水预报的范围和平均强度与实况更加接近;2) 偏差愈大订正效果愈好;3) 原理上此法不能订正降水的落区位置偏差,但通过改变雨区范围的大小,订正后降水预报的TS和ETS的评分也有一定程度提高,尤其是小雨量段,订正使数值预报的“有雨或无雨”的定性降水预报的质量得到明显改善。针对该方法“不能改进降水落区偏差”的局限性,提出了5种可以改进和尝试的方法,同时指出,该方法和原理可以用于单站降水预报、雾和水文的流域预报的偏差订正。

2014年9—11月T639、ECMWF及日本模式中期预报性能检验——《气象》2015年第41卷第2期

赵晓琳对2014年9—11月T639、

ECMWF及日本数值模式的中期预报产品进行了对比分析和检验。结果表明:3个模式对亚洲中高纬环流形势的调整和演变及850hPa温度转折性变化具有较好的中期预报性能,但对北方的温度预报偏差明显大于南方。对于副热带高压脊线的位置,T639和EC模式都有较好的预报能力,EC模式比T639模式偏差小。EC模式对于1416号台风凤凰的路径及强度预报效果与零场接近,T639和JP模式预报与实况相差较大。T639和EC模式对有利雾和霾发生的静稳天气形势均有较好的中期预报能力,但对驱散雾和霾的冷空气,EC模式预报与零场更加一致。

江西一次大雾天气诊断分析和ECMWF集合预报产品释用——《气象与减灾研究》2014年第37卷第1期

肖安等利用常规气象资料,对2013年11月15日出现在江西省北部地区的一次大雾天气过程进行了诊断分析,并利用ECMWF集合预报产品对该大雾天气过程的预报进行了解释应用。诊断结果表明,该次大雾天气过程是一次典型的辐射雾。14日傍晚到夜间,江西省北部地区转处冷高压控制,阴转晴,冷空气和地面辐射共同造成的冷却作用明显;大雾发生时的逆温层高度大约在981hPa;1~3m/s的风速有利于形成较厚的冷却层;地面相对湿度大,水汽充足。通过对ECMWF集合预报的气温、地面湿度、地面风速和天空总云量预报产品的释用,可以在大雾出现的前日判断出江西省西北部地区同时满足辐射雾出现4个条件(水汽、晴空辐射冷却、微风、近地层的稳定层结)的概率最大,因此出现大雾的可能性最大;江西其他地区不能同时满足4个条件,出现大雾天气的可能性很小。随着对集合预报产品的不断深入挖掘,可以进一步提高集合预报对大雾等灾害性天气的预报能力。

《《 涓流细雨 》》

“In some ways we know more about Mars than our own oceans yet they do govern everything from regional climate to economics”

“在一些方面我们对火星的了解要多于对地球海洋的认识, 尽管海洋控制着从区域气候到经济的方方面面。”

——近日, 全球海洋观测伙伴 (the Partnership for Observation of the Global Oceans, POGO) 发表了新的观测战略, 战略的目标是在2030年前新的全球监测系统到位, 同时研制新的传感器以更好地监测全球海洋变化, 给出全球海洋健康的图像。在战略发布会上, POGO主席, 来自德国魏格纳极地和海洋研究所的Karen Wiltshire发表了上述看法。

“We are delighted to have been selected to work in close partnership with Nordsee One and Veja Mate to provide timely and accurate forecasts which will help facilitate confident, safe decision-making during the construction of these large offshore wind farms. Following the Met Office’s successful launch into Germany at Wind Energy Hamburg in 2014, considerable investment has been made to appoint local representation in Hamburg and integrate fully into renewable energy clusters and working groups across Germany. This helps to ensure that the Met Office fully understands and responds to the needs of clients.”

“我们很高兴被选为Nordsee One和Veja Mate公司的密切合作伙伴, 为其提供及时和准确的预报, 这些预报产品在大型海上风电场建设期间能帮助决策更加自信和安全。2014年英国气象局通过“汉堡风能”项目成功进入德国之后, 我们又提高投入制定汉堡地方代表并综合成跨德国的可再生能源群体和工作组。这样做能帮助英国气象局确保对客户需求的准确理解和快速反应。”

——日前英国气象局官方宣布, 已经和两家德国海上风电场建设项目签订了在电厂建设和试运行期间提供预报服务的合同。据悉, 这两份合同涉及的海上风电场, 均位于北海德国湾的西南部。其中, Nordsee One GmbH公司建设的54涡轮发电机年发电3.32亿瓦项目计划将在2017年4月完成; 而Veja Mate公司承担的Array Cable项目的建设大约从2016年8月开始到2017年3月完成, 包含67个涡轮发电机, 总计年发电能力达4.02亿瓦。在谈到这两份合同时, 英国气象局欧洲商业开发部负责人Hayley Wallbank做了如上表述。

“Until now, no studies have documented this large-scale phenomenon using weather radars. Our analyses are based on detection of millions of migrating birds, as many as five million on a single night.”

“截至目前, 利用天气雷达对如此大尺度现象开展研究还没有文献报道。我们的分析基于对数百万迁徙鸟进行的探测, 单个夜晚鸟数量多达500万。”

——美国学者通过分析多普勒天气雷达数据, 分析北美东部夜间迁徙的鸟类如何面对飞行中的障碍: 侧风和海洋。开发出可以利用雷达数据开展鸟类夜间迁徙研究的Oklahoma大学的Kyle Horton解释了这项研究。据悉, 这项研究利用了美国东部3台位于沿海和3台位于岛屿上的多普勒极化雷达2013和

2014年秋季数据, 6台雷达每5~10min给出数据, 55个夜晚的雷达数据给出了160万个样例。

“It’s just the few wettest days every year which determines whether we’re in drought or flood, and those wettest days come from these atmospheric river events. We’re sending in those data to be assimilated by global forecast models to reduce uncertainties in the atmospheric river water vapor content, which is the greatest source of uncertainty in terms of predictions.”

“每年只有不多的几个最湿天, 就决定了是干旱还是洪涝, 而这些最湿天来自那些‘大气河流’事件。我们正在将这些数据用全球预报模式进行同化以减少‘大气河流’水汽含量的不确定性, 这正是预报不确定性的最大来源。”

——每年冬季在太平洋都有一条狭窄 (平均宽度400~600km) 和快速流动的大气水汽通道, 给美国西海岸带来暴雨, 还经常带来风灾和引发泥石流。这条水汽通道被学界称为“大气河流 (atmospheric rivers) ”, 每年传输水汽的量, 相当于26条密西西比河, 对于美国西部的水汽供给有决定性影响和重要的经济意义, 在2016年这样的强厄尔尼诺期间, 更加温暖的太平洋能对通道提供更多能量, 注入更多的水汽。2016年, 飓风猎人 (Hurricane Hunter) 飞机首次对太平洋上空的水汽通道开展风行观测, 该项目的协调人, 来自斯克列普斯 (Scripps) 海洋研究所的Ralph如此解释了水汽通道及观测意义。

“Frequency compatibility has been achieved with GPS, IRNSS, QZSS and BeiDou.”

“频率兼容已经和GPS, IRNSS, QZSS和北斗系统达成一致。”

——欧洲伽利略项目安全、信号和频率组负责人Jeremie Godet在接受《GPS世界》杂志的采访时, 就欧洲伽利略全球定位系统与包括中国北斗系统在内的其他系统之间频率兼容性问题时, 做出上述阐述。

“More than 80% [of our climate scientists] will be cut. This is not about myself, it’s about my people and the capability we spent 40 years to build. It will be going overnight.”

“80%以上的气候科学家将失去工作。这不是关系到个人, 而是我们花费了40年建立起来的人员和能力。转眼间将就不复存在了。”

——澳大利亚政府调整了其气候科学研究的战略, 导致5000多人规模的CSIRO (澳大利亚联邦科学与工业研究组织) 在2015年6月前的2年里减少了1300个岗位, CSIRO一个现有130位科学家的部门未来2年将有110个岗位被裁掉, 一位匿名研究者无奈地给出了对此事的看法。据悉, 2014年CSIRO今后4年的联邦预算被减少了1.15亿澳元, 而针对CSIRO已经完成了气候科学研究, 我们将转向适应和减缓的说法, 一些资深学者认为这是错误的, 是在误导科学。

“US type storms are rare over UK, although when they do occur they can be high impact, so few cases to verify and assess the UM.”

“美国类型的风暴 (即强风暴) 在英国出现不多,

第80页评刊

来信截至 2016年4月10日

丁一超

看到《我国风云四号气象卫星与日本Himawari-8/9卫星比较分析》一文中“向日葵-8/9和风云四号试验星观测资料种类对比”一表后，发现风云四号的有效载荷和观测资料种类较向日葵-8/9更多。那为什么风云四号是第二代，向日葵-8/9属于第三代，差别是二维成像观测一个是AH1一个是AGRI吗？

回复（from作者）

风云四号是我国静止气象卫星的第二代，第一代是风云二号；向日葵-8/9是日本静止气象卫星的第三代，第一代是向日葵-1~5，第二代是MTSAT。

夏旭东

我对于2013年那场高温和第十二号台风“潭美 (Trami)”印象特别深刻，想问《2013年浙江夏季异常高温及环流特征分析》的作者，为什么在当时如此高的SST、低风切的条件下，台风北部的云系会如此之少？这与副高的强盛又有何关系呢？

回复（from作者）

1) “潭美”诞生在季风槽里，西南季风为其源源不断地输送水汽，其西南侧有“长长的尾巴”，明显比北侧云系旺盛。在“潭美”成熟阶段，云系分布相对对称，且存在无云眼区。在登陆前，中心无云眼区开始扩大，登陆后眼区北侧连续密蔽云区云系迅速减弱、结构变松散，南侧云区则逐渐由圆形变为椭圆形向外发散的云带。

2) “潭美”位于带状副高南侧，受强盛的副高偏东气流影响西移，而该东风气流较为干燥；在其活动过程中，中高层有下沉气流逼近台风中心，500hPa副高的下沉气流削弱了台风中心偏北象限上升气流，对流发展向上伸展的高度受限。

（上接79页）

而一旦出现可能造成高影响，对统一模式而言这样的天气个例太少，无法验证和评估（该模式对美国类型风暴的预测能力）。”

——2015年，英国气象局利用NOAA灾害天气试验平台，将其统一模式的区域版本移植到美国本土开展试验，让美国预报员和科学家在美国实时验证英国气象局模式的性能。这一合作虽然可以在模式设置、共享模式研发和数据处理技术等多方面让合作双方受益，但来自英国气象局的Steve Willington在一次学术会上的话，一语道破了移植模式形式的合作更重要目的：让美国更多强风暴天气个例验证和改进UM模式。

“We are honored by this recognition from CO-LABS and the Governor, and proud of our team—which includes federal and academic partners—for their very high-impact research on the HRRR. They have put a high-resolution weather model in the hands of forecasters across the country, who are using it to help save lives and property by getting more accurate weather guidance to emergency managers, pilots, wind farm operators and others.”

“我们很荣幸得到CO-LABS和组织者认可，也为我们的团队——由联邦和学术界的合作者构成——而自豪，因为他们把很有影响的研究转化为HRRR。团队把一个高分辨率的天气模式交给了全国的预报员，帮助他们通过做出更加准确的天气预报，为应急管理人员、飞行员、风电操作者和其他人使用，挽救了生命和财产。”

——NOAA地球系统研究实验室（ESRL）凭借高分辨率快速更新系统（High-Resolution Rapid Refresh, HRRR）荣获了2015年CO-LABS的可持续性奖。获奖后ESRL的Stephen Weygandt博士发表了上述看法。据悉，CO-LABS是一家位于美国科罗拉多州，从事向公众、企业家、教育机构和政府实体展示联邦支持的实验室价值的机构。

“[Philippines’s first micro-satellite is] a giant leap for Philippine science and technology.”

“（菲律宾的第一颗微卫星是）菲律宾科学和技术的一次大飞跃。”

——2016年3月22日，菲律宾的第一颗微卫星——Diwata-1发射升空。该卫星是菲律宾高校、菲律宾科技部及日本东北和北海道大学合作研发的，通过对国际空间站再补给项目进入空间站，之后将被放入轨道。该卫星将传回天气形态和陆地及水资源图像。谈到Diwata-1，菲律宾驻美国大使Jose Cuisia在话语中充满自豪。

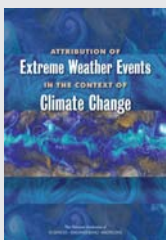
“We have a bold vision that subseasonal to seasonal forecasts, which look two weeks to up to a year in advance, will be as widely used a decade from now as daily and weekly weather forecasts are today, even if such information never matches the level of confidence associated with tomorrow’s weather forecast, it could still be used by individuals, businesses, and governments to make a large array of important decisions. The path to realizing this vision and its inherent value will require focused effort on Earth system processes and predictions by both physical and social scientists. It’s time to step up investment in building next-generation Earth system prediction capabilities.”

“我们可以大胆前瞻，提前2周到一年的季节内和季节预报，从现在开始10年里将如今天逐日和周预报一样被广泛应用，尽管这类信息很难达到像明天的天气预报那样的信度水平，它们还是会被个人、企业和政府用于大量重要决策中。认识这一愿景及其内在价值的方式，需要物理学者和社会科学家共同瞄准地球系统过程和预测。现在是在加大投入建设下一代地球系统预报能力的时候。”

——美国科学院（NAS）最新出版了关于季节内和季节预报的研究报告，报告描绘了今后10年开展这一研究的四大研究战略，以提高季节内和季节预报的准确性。谈到这份报告，NAS负责报告起草的美国推进季节内到季节预报研究议程研制委员会（Committee on Developing a U.S. Research Agenda to Advance Subseasonal to Seasonal Forecasting）主任Ban如是说。

《气候变化背景下极端天气事件归因》 2016年6月

2012年开始，美国气象学会通过《美国气象学会会刊》(BAMS)发表年度特别年报，梳理上一年度极端天气事件，让极端天气事件的归因研究这一较新的领域被更多科学家认知，2012—2015年，这份年报的研究团队的投稿量增加了5倍。美国科学院出版的这份报告，梳理了气候变化背景下极端天气事件归因研究领域的发展。报告所附词汇方便读者了解文献主题与本领域研究之间一些对应的概念和科学方法。



《计量学》杂志 2016年2月

本期推出“关键气候可观测变量测量的计量挑战”专题，4篇综述文章分别讨论了海洋盐分、酸碱度、大气相对湿度等要素观测的计量学科学问题。

《ENSO与健康》 2016年1月27日

世界卫生组织(WHO)和WMO共同发表的这份文件，对健康和ENSO之间的关系进行了简要说明。两家机构共同成立的气候和健康办公室，通过发布这份文件，试图在目前厄尔尼诺事件发生过程中，让高风险国家认知和更好应对气候事件带来的健康问题。



《NOAA 2017财年预算》 2016年2月

NOAA公布了2017财年预算报告，报告由8章和2个附录组成，梳理了年度内和近期卫星发射等大的投资项目和技术改造工程，预算需求为58.51亿美元。另据美国Science杂志报道，2016财年，NOAA获得57.66亿美元联邦预算，较上一年增加了5.97%。

媒体扫描

MEDIA SCAN

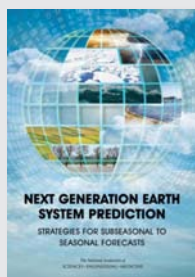
《经济学家》 2016年3月12日

这本经济学杂志本期的主题看似有点“跑题”——讨论了理工科更关心的主题——计算的未来在哪里？本期文章围观了“摩尔定律”，更指出速度不是一切，未来计算机的发展还体现在其他3个方面：软件、云处理和基于专门用途的硬件结构。也许未来计算能力没有了时间规律，但计算机和其他设备会以多元化的方式变得更强。



《S2S预报战略》 2016年4月

美国科学院的这份《下一代地球系统预报》系列报告之一，瞄准季节内到季节预报，指出未来该领域发展的方向和可行方略。



《技术生活新闻》 2016年3月

这个技术类期刊本期封面瞄准了气候：在科学栏目里报道了世界各地的一些大学，开始开设“气候小说”课程，成为校园一大亮点。

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors

Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Luo Yunfeng
Wang Huijun
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Fei Jianfang
Guan Zhaoyong
He Jianxin
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Lü Shihua
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

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

Editors

Bi Baogui, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Feng Guolin, Guo Hu, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yurong, Hu Yuewen, Jiang Tong, Lei Xiaotu, Li Hui, Li Jiming, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Shi, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Li, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Mao Hengqing, Peng Yinghui, Pu Yifen, Shi Guangyu, Song Yan, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Xiaoyun, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zaizhi, Wang Zifa, Wen Min, Wen Hongtao, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yande, Zou Liyao

Overseas Editors

Chen Jingming, Li Jun, Liu Zhengyu, Jin Feifei, Wang Bin, Weng Fuzhong, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Chen Zhongmei

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,

Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

<http://library.cma.gov.cn/amst>

<http://weibo.com/2115232930/profile>

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

(Special Issue: Fog Study and Its Prediction)

(Invited Editors: Du Jun, Zhou Binbin, Niu Shengjie)

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Niu Shengjie, Lu Chunsong, Lü Jingjing, Xu Feng, Zhao Lijuan, Liu Duanyang, Yue Yanyu, Zhou Yue, Yu Huaying, Wang Tianshu/ Advances in Fog Research in China
- 20 Fu Gang, Li Pengyuan, Zhang Suping, Gao Shanhong/ A Brief Overview of the Sea Fog Study in China
- 29 Zhou Binbin, Jiang Le, Du Jun/ Aviation Weather and Model-Based Operational Forecasts of Low Visibility and Fog
- 42 Zhang Guocai/ The Progress of Fog Forecast Operation in China
- 49 Shi Dedao, Wu Zhenling, Gao Shanhong, Luo Kai/ A Summary of Research on Sea Fog Forecasting
- 56 Zhu Bin, Guo Ting/ Review of the Impact of Air Pollution on Fog
- 64 Kang Zhiming, Gui Hailin, Hua Cong, Zhang Bihui, Zhang Hengde, Lü Mengyao, Wang Jikang/ China's National Environmental-Meteorological Services and Their Developmental Trend

Survey

2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

70 Li Jinghua, Tian Xiaoyang/ A Bibliometrical Analysis of the Scientific Literature on Fog

Reading

Book Review

- 72 Hou Meiting/ Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations and Forecasting
- 73 Lu Chunsong, Huang Hongli/ Study on Physical Chemistry of Fog
- 74 Li Pengyuan/ Understanding of Sea Fog over the China Seas
- 75 Jia Pengqun, Zhang Meng/ A History on Meteorologic Science and Technology