

上海环境气象业务发展概述

■ 耿福海 贺千山 伏晴艳



上海环境气象业务经过十几年的发展，建立了地面观测和卫星遥感相结合的环境气象综合观测站网，发展了以气象化学耦合模式WRF/CHEM为核心的高分辨率区域环境气象数值预报业务系统，完善了以PM_{2.5}、臭氧等空气质量预报预警为切入点、以霾和健康气象预报服务为重点的环境气象业务体系。同时，与环保部门在科研攻关、业务会商、信息发布等方面建立了良好的联动互动机制。

近年来，随着我国经济社会的快速发展，全国各地污染天气逐年增多。对于处在我国四个大气环境恶化高发区（黄淮海地区、长江三角洲、四川盆地和珠江三角洲）之一的上海这个超大城市，重污染天气连续大规模爆发，使得大气颗粒物及其所造成的霾污染成为国内外广泛关注的焦点。夏季以臭氧为特征的光化学污染，冬季以PM_{2.5}为特征的霾天气，已成为困扰市民日常生活的环境气象灾害。

上海市气象局在上海市政府和气象局的帮助下，建立了上海市环境气象中心，着力发展上海地区城市环境气象业务体系。本文将从上海环境气象业务的发展历程、业务构架、技术突破及发展思考等几个方面介绍上海在环境气象领域建设与发展情况。

1 主要发展历程

2005年，上海市气象局积极贯彻落实《中国气象局业务技术体制改革方案》，发展大气成分轨道业务，建立了以VOCs（挥发性有机化合物）分析为核心的大气化学实验室和覆盖上海主要功能区域的大气成分观测站网，开展的观测研究和预报分析涉及天气学、大气物理化学、数值模式、气象观测等领域。

2006年，上海市气象局与美国国家大气研究中心（NCAR）联合主办了“大城市空气质量与区域气候

变化国际研讨会”，成立了“长江三角洲气候变化与化学天气研究科学指导委员会（SRCCC）”，与NCAR签署了合作备忘录，明确在大气成分观测、模式开发和应用、大气成分变化及其对区域和全球环境影响等方面的近期和长期合作项目，形成了不定期举办科学研讨会、互派访问学者和专家等合作机制。

2013年3月，上海市人民政府印发《上海市环境空气质量重污染应急方案（暂行）》的通知，成立上海市环境空气质量重污染应急工作组，上海市气象局为副组长单位。

2013年9月，上海市气象局与上海市环保局签订了《关于进一步加强环保与气象工作的合作协议》，在建立信息共享机制、联合发布上海市空气质量预报、加强长三角区域重污染天气应对能力建设等五个方面达成共识。在此框架下，上海市环境气象中心和上海市环境监测中心作为业务实施单位进一步签订了《上海市环境空气质量预报合作协议》，明确了双方合作的业务内容和业务职责，共同开发了空气质量预报会商平台，建立了日常预报会商制度和流程。

2014年7月25日，上海市第十四届人民代表大会常务委员会第十四次会议审议通过《上海市大气污染防治条例》，其中第二十九条规定“市环保、气象部门应当建立大气环境信息和气象信息共享、预测预

报会商等相关工作机制，并联合发布空气质量预报信息”，通过法律条文明确气象部门在空气污染预报预警、长三角大气污染联防联控等方面承担的职责。

2015年12月，中国气象局同意成立长三角环境气象预报预警中心（上海市环境气象中心），建立了由上海、江苏、浙江、安徽等省市气象局共同参加的环境气象工作管理协调、业务协作和应急联动机制，建立集约化的长三角环境气象业务服务体系。

2 环境气象观测体系

上海市气象局环境气象业务的发展以实际需求为出发点，瞄准大气环境科学前沿，着力解决超大城市发展中出现的大气复合污染问题，建立了地面观测和卫星遥感相结合的环境气象综合观测站网，发展了以气象化学耦合模式WRF/CHEM为核心的高分辨率区域环境气象数值预报业务系统，完善了以PM_{2.5}、臭氧等空气质量预报为切入点，以霾和健康气象预报服务为重点的环境气象业务体系。

2.1 地基综合观测

上海市气象局从2005年开始建设大气成分地面观测站，按照上海区域功能特点结合污染物的空间分布特征以及影响上海的污染输送通道进行站点布局设计，先后建设了11个地面观测站（图1），开展环

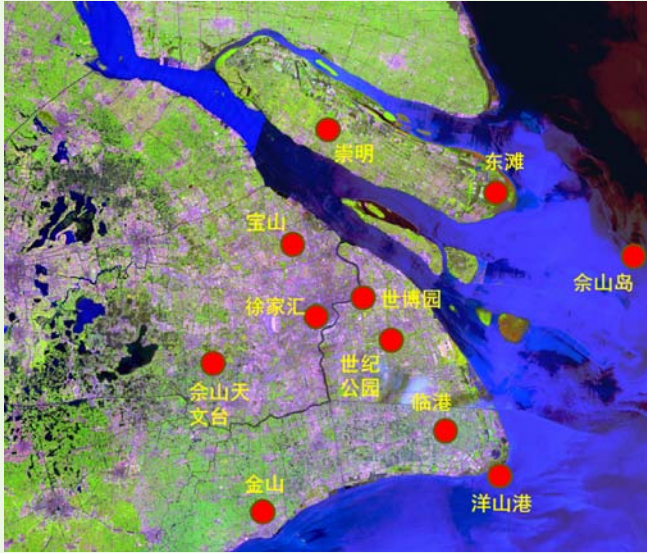


图1 上海环境气象地面观测站网

境气象多要素观测，包括反应性气体（ O_3 ， NO ， NO_2 ， SO_2 ， CO ）和气溶胶（ PM_{10} ， $PM_{2.5}$ ， PM_1 ， BC ， ASC ， AOD ）在线监测，同时在每个站点配备气象要素观测。依托上海城市精细化观测系统，利用风廓雷达、激光雷达、微波辐射计、臭氧探空等地基遥感技术观测大气垂直廓线，完整获取大气边界层的动力、热力、化学综合特征，尤其是水平风的垂直变化和边界层高度的演变特征，综合开展大气动力热力特征对污染物扩散、传输和转化的影响研究。此外，在大气成分的观测工作中尤其重视数据质量保障，充分发挥数据效益。围绕数据的获取、传输、质控、存储建立了一整套完整的运维规范、数据质控规范和考核制度，通过建立大气成分数据监控系统对整个数据流程进行管理，形成了比较完善的大气成分观测业务。目前，上海环境气象地面观测已经成为中国气象局大气成分观测站网的组成部分。其中，2008年，崇明东滩大气综合观测站纳入中国气象局大气成分站网。

2.2 空基遥感观测

为了弥补地面环境气象观测站点的不足，利用卫星观测的优势，基于MODIS、FY-3等卫星产品监测

污染天气的落区和演变，点-面结合、地面-高空结合的环境气象立体观测系统基本建成。目前上海市环境气象中心已经成为国家卫星气象中心FY-3卫星长三角大气环境遥感应用示范基地。

为了配合卫星观测，环境中心平均每月释放臭氧探空1次，用于验证FY-3臭氧廓线的反演精度。建立了FY-3大气成分卫星遥感平台建设（图2），平台集成了包括FY-3气溶胶、臭氧总量在内的多种准实时监测和衍生环境预测预警产品。应用MODIS资料和现有的FY-3数据完成了长三角地区大气环境监测产品和模式预报产

品的研发。进行了长三角地区典型污染天气的FY-3 卫星遥感跟踪监测及深入分析并向相关部门及公众提供了预警信息和应急技术支持。

3 环境气象预报体系

3.1 气象—化学耦合数值模式系统

上海环境气象业务发展始终坚持以大气化学数值模式为核心，目标是借鉴天气数值预报的发展经验建立比较完善的环境气象数值预报业务，形成核心技术，有效支撑和促进环境气象科研和业务工作的发展。经过充分调研，在2005年确立了以美国NCAR、NOAA等单位联合研究开发的气象-化学耦合模式WRF/CHEM为发展重点，围绕模式发展的需求配置计算条件和人员队伍，通过引进模式、吸收技术、改进配置的方式，建立了国内第一套实现业务运行的WRF/CHEM预报模式系统，预报区域覆盖中国东部地区，水平分辨率为6 km，每天业务运行2次（08时和20时），预报时效72 h，该系统是WRF/CHEM官方网站唯一介绍和推荐的业务系统。图3展示了一次模式面预报产品的个例。2013年初通过了由中国气象局预报与网络司组织的业务验收和准入，被列入区域高分辨率数值模式发展规划给予重点支持，并向其他气象部门辐射和推广。目前按照《中国气象

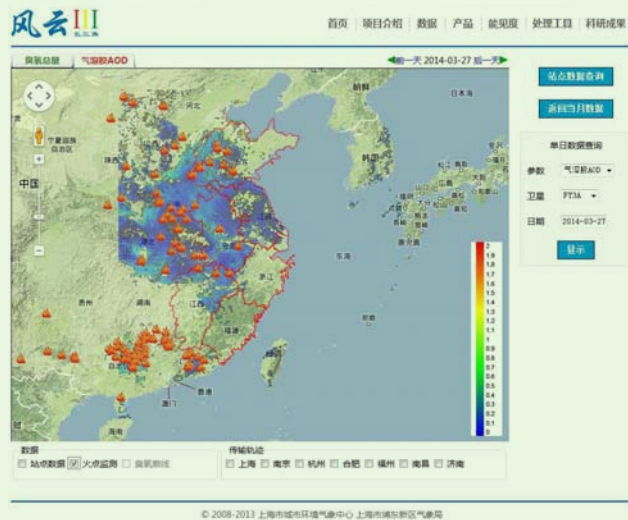


图2 FY3大气成分卫星遥感平台

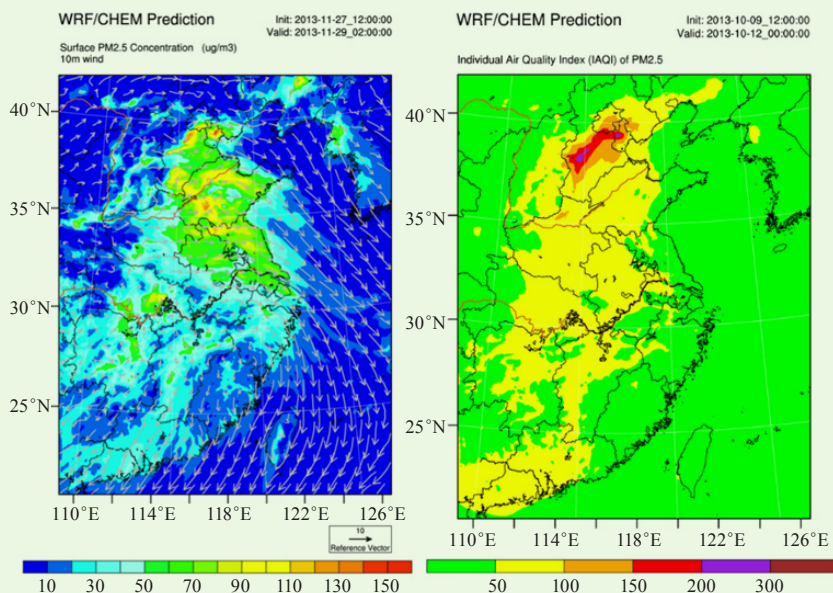


图3 模式面预报产品

局环境气象业务发展规划》，为华东512个县级以上城市提供未来三天逐小时反应性气体和可吸入颗粒物预报产品，以及霾、AQI等客观指导预报产品，每天向长三角气象部门传输模式预报数据，支持各地开展环境气象数值预报释用，充分发挥环境气象数值预报的业务支撑作用。2014年，随着与环保部门合作的深入，每天向上海市环境监测中心推送数值预报产品，为长三角区域环境监测业务单位的空气质量业务预报提供了技术支持。同时，

为了进一步提升模式的预报能力，不断优化系统的运行流程，利用全球大气化学模式MOZART的预报作为驱动改进WRF/CHEM的侧边界强迫；基于卫星反演的火点产品在模式中增加秸秆等生物燃烧过程对颗粒物的影响；开展了基于GSI的化学资料同化试验，通过三维变分方法同化地面观测的浓度优化模式初始预报场；同时针对我国东部地区排放清单明显的季节特性，采用污染源同化方法制作了分月的排放清单，上述本地化的改进明显降低了

模式对华东城市细颗粒物PM_{2.5}和臭氧的预报偏差，提升了模式对重污染天气的预报能力。

3.2 重污染天气综合分析系统

依托上海市气象局一体化预报平台建设了专业化的环境气象预报预警业务，初步形成从一周污染天气展望、未来三天污染天气潜势预报、未来48 h污染天气精细化预报、以及0~12 h重污染应急预警的预报业务框架。建立了包括实况数据分析、污染天气分析、数值预报释用、主观修正在内的业务技术流程。解决了污染天气图和数值预报释用两项关键技术，基于MICAPS的污染天气图，已成为预报员分析污染天气的形成、影响范围和演变趋势的重要手段。数值预报释用大大提高了大气化学模式定量预报和关键过程预报能力，为预报员主观修正提供了重要依据。实际业务中围绕这两项关键技术，建立了污染天气分析规范，同时开发了霾综合分析图、水平能见度、污染轨迹预报等诊断产品，加深了预报员对模式预报结果的理解，同时也为其他省市气象局开展环境气象预报提供参考和借鉴。图4给出了霾、PM_{2.5}和空气污染气象条件落区预报个例。为了进一步提升重污染天气预警能

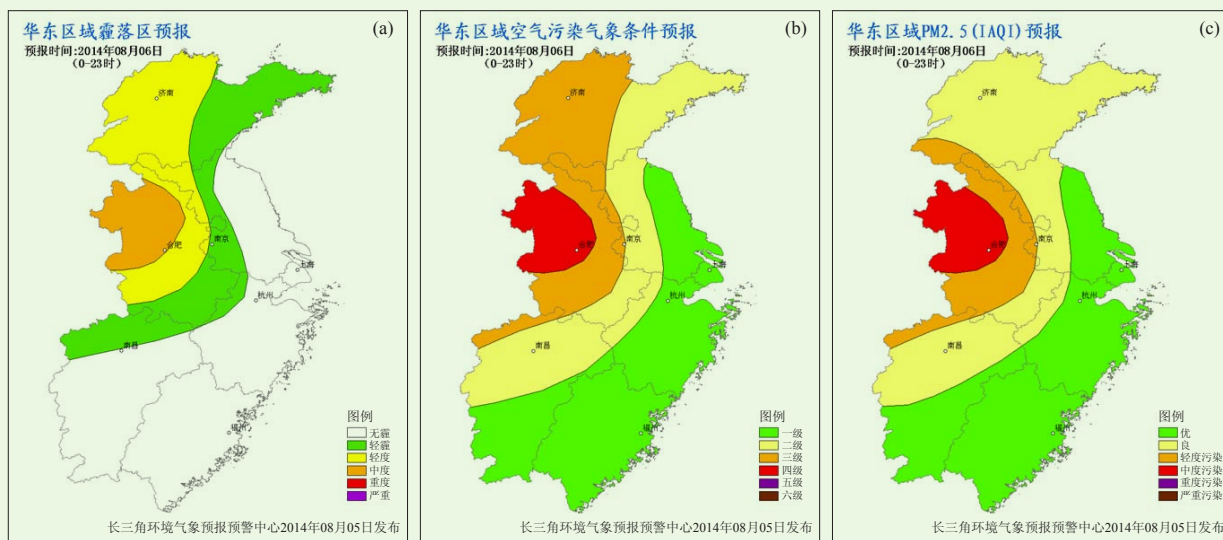


图4 霾 (a)、空气污染 (b) 和PM_{2.5} (c) 气象条件落区预报图

力,重点开展了上海重污染天气个例库建设,根据历史资料筛选了177个污染个例,按照统一的标准收集每个污染个例的资料并开展天气学分析,在传统的主观分析方法基础上结合客观方法进行天气分型,归纳和总结重污染天气学概念模型。目前正在建设重污染个例库的检索和匹配系统,提炼预报指标,为今后重污染天气的预报分析提供支持。

3.3 空气质量预报业务系统

针对长三角地区反应性气体和气溶胶复合污染的特点,尤其是臭氧和细颗粒物的日变化特征,2013年9月上海市气象局和上海市环保局在全国率先联合发布未来24 h AQI分时段预报,将一天分为3个时段(夜间20:00—06:00,早上06:00—12:00,下午12:00—20:00),预报每个时段的污染等级、首要污染物和污染指数,充分考虑了春秋两季臭氧和细颗粒物交替污染的特征,提醒易感人群开展防护。随着双方业务合作的不断深入,实现了AQI滚动预报,根据污染天气的演变情况不断修正和更新预报结果,同时将分时段预报时效从未来24h延伸到了48 h,2017年6月,又进一步拓展到72 h预报,为公众提供更加及时、准确的预报服务产品,并为空气重污染预警奠定了重要的预报基础(图5)。

4 环境气象业务服务体系

4.1 长三角环境气象信息共享服务平台

为了充分发挥部门优势,有效开展长三角区域重污染天气预报预警和应急联动,依托长三角一体化平台推动气象部门环境气象监测数据和预报预警产品共享。共享的观测站点包括上海11个站、江苏3个站、安徽2个站、浙江46个站,共享要素包括PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁、NO₂、NO、O₃、SO₂、CO、散射系数;大气环境客观指导预报产品包括未来96h主要污染物浓度(PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂, CO)、IAQI和霾的区域分布和逐小时变化;华东512个站点未来72 h主要污染物逐小时浓度;以及模式预报效果的在线评估和查询。平台同时提供站点和格点两类模式数据下载功能,为各地开展本地预报效果评估和客观预报释用提供支持。

4.2 长三角环境气象预报服务指导

为了切实履行长三角环境气象预报预警中心对区域重污染天气监测、预报预警和服务的业务指导和技术支撑职能,环境气象中心每天制作长三角环境气象落区预报(未来3d的霾、AQI、PM_{2.5})和华东10个重点环保城市(济南、青岛、南

京、苏州、合肥、杭州、宁波、厦门、福州、南昌)的指导预报(霾、AQI、空气污染气象条件)。制定了长三角环境气象决策服务产品清单,强化重污染天气的决策服务能力,包括《长三角地区一周污染天气展望》、《华东区域环境气象重要天气专报》、《上游重污染天气报告》、《华东重点城市环境气象指导预报》等。表1和表2分别列出了长三角环境气象决策服务产品和长三角环境气象指导预报产品,上述产品均可通过信息共享平台和预报服务平台进行查询。

4.3 健康气象服务

开展健康气象服务是适应现代社会人们关注健康和提高生活质量的迫切需求,是城市气象服务的拓展和延伸。上海健康气象服务工作依托上海市气象与健康重点实验室开展,重点关注天气和大气环境对呼吸系统和心脑血管系统疾病的影响。在上海市公共卫生三年行动计划项目《上海地区主要气象相关疾病的预报服务体系建设》的支持下,研发了分人群感冒(儿童、成年、老人)、儿童哮喘和慢性阻塞性肺炎(COPD)发作气象风险预报产品,建立了健康气象预报服务平台,实现了健康气象业务化运行。与市疾控中心联合在社区卫生服务中心、学校和幼儿园发布感冒、儿童哮喘气象风险预报产品,与民政部门联合在老人日托中心、养老院发布COPD气象风险预报产品。通过加强与卫生部门的合作,探索建立预报预警、医患互动、服务评估为一体的健康气象预报服务模式。目前,与上海交通大学哮喘诊治中心合作开展儿童哮喘城市气象环境精细化服务模式。该模式考虑了病患的个体差异,除每日气象环境哮喘预警服务外,还结合患儿的每日呼吸道生理检测指标和过敏源筛查结果,形成气象风险、医生和患者共同参与的互动式、个体化的健康气象服务模式。图6是儿童哮喘气象风险等

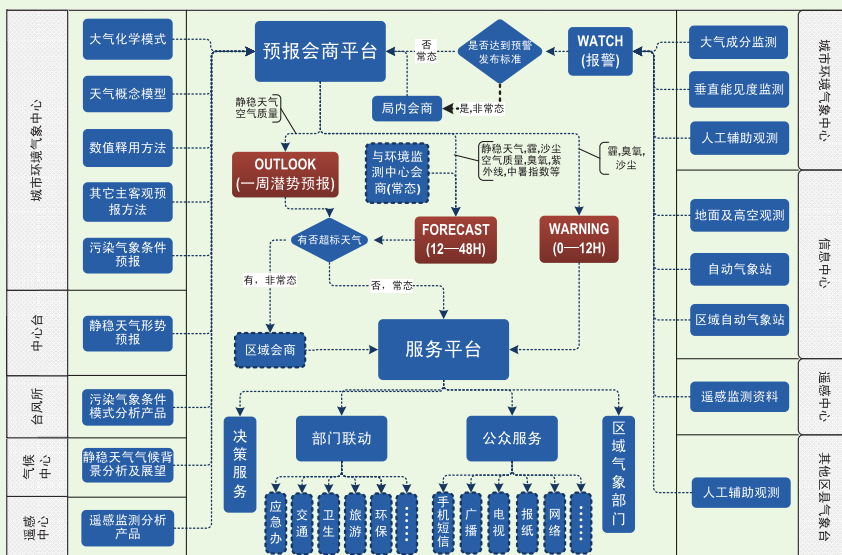


图5 空气质量预报业务流程

表1 长三角环境气象决策服务产品列表

序号	产品名称	启动和发布条件	内容
1	上游污染天气报告	华北出现区域性重度及以上污染天气、上游两个以上省份发布霾预警	污染天气实况、预警情况、未来可能持续时间、对长三角的可能影响和未来3天预报结论
2	华东区域环境气象重要天气专报	预报未来3d可能出现区域性重度或严重污染或重度霾天气	污染天气系统分析、未来3d预报结论、关注重点、污染天气图、落区预报图
3	节假日污染天气专报	国庆、五一、春节放假前	长假期间天气过程描述、逐日预报结论
4	长三角空气污染专报	长三角2个或者2个以上省发生重度及以上	污染实况和预报结论

表2 长三角环境气象指导预报产品列表

序号	产品名称	发布频次	内容
1	AQI、霾、空气污染气象条件落区预报 (图片)	每天1次, 13时	华东未来24h AQI、霾、空气污染气象条件的落区
2	华东重点城市环境气象指导预报 (文档)	每天1次, 17时	华东10个重点城市未来24h AQI、霾、空气污染气象条件预报
3	长三角一周污染天气展望	每周1次, 周一17时	未来一周污染天气过程描述、未来一周逐日预报结论
4	长三角一周空气质量展望	每周1次, 周一17时	长三角主要城市未来一周AQI预报

级预报产品。

4.4 民生气象服务

气象生活指数预报是上海民生气象服务的重要内容之一, 一直受到公众的普遍关注和好评。近年来, 根据公众的实际需求和反馈意见, 不断筛选和更新产品内容, 在保留传统的日晒、洗车、晚锻炼、感冒、紫外线等指数产品的基础上, 新增和开发了中小學生户外锻炼、空调、霉变、人体舒适度等贴近百姓日常生活的指数产品, 其中人体舒适度指数是2013年上海市气象局六件便民实事之一, 该产品在考虑温度、风速、相对湿度影响的基础上, 结合当前公众对雾霾天气的关注, 增加了雾霾、空气质量对人体的影响, 在产品评审会上得到环保和卫生部门专家的高度评价。在服务过

程中将指数预报和天气预报有机衔接, 按照天气预报的更新频率及时修正指数预报, 通过上海天气网滚动发布, 提高了指数服务的及时性和覆盖面。同时建立了基于气象信息员的指数预报服务评价制度, 将指数预报作为环境气象预报质量评定的重要内容之一进行评分和满意度评价, 保障产品的质量, 不断完善产品形式和内容。

4.5 气象—环境—健康—一体化效益评估

开展对空气污染气象条件的研判分析, 2014年初, 气象与环保部门联合对外发布《春节期间烟花爆竹燃放气象条件预报》, 呼吁市民在不利气象条件下减少烟花爆竹燃放, 保护大气环境, 防止重污染天气的发生。根据绿化市容环卫部门

统计, 除夕夜上海爆竹燃放减少200吨, 取得显著成效。

与教育部门合作在10家幼儿园开展的健康气象服务评估一体化的试点工作, 通过手机短信、电邮等方式向家长及老师提供预报产品, 根据缺课率、患病率等数据开展服务效益评估。2014年已经将试点扩大到浦东新区281所学校, 同时与疾控中心达成共识将健康气象服务模式覆盖到全区46家社区卫生服务中心。通过幼儿园一年的试点评估, 在排除个体和社会因素干扰, 接受健康气象预报服务的儿童每年由感冒而引起的缺课天数较比未受服务的下降2.6天, 感冒次数降低了10%, 说明健康气象服务对降低服务对象发病率有显著的帮助, 具有巨大的经济和社会价值。

5 环境气象技术研究进展

5.1 大气扩散指数反演技术

大气的水平和垂直扩散能力是决定污染水平的重要条件。在出现静稳天气时, 大气扩散能力主要由垂直扩散条件决定。受到观测资料的限制, 垂直扩散条件的综合判定一直是污染预报的难点。借鉴美国环保部门广泛使用的大气扩散指数(VI), 通过将气溶胶激光雷达观测和风廓线雷达观测相融合, 建立了大气扩散指数的实时反演方法:

$$VI = \int_{i=sc}^{i=mh} WS_i \times \Delta z$$

该指数定义为边界层内不同高度水平风速的积分。实际计算时边界层高度由激光雷达反演获取, 不同高度的水平风速由风廓线雷达获取, 该指数综合考虑了水平和垂直两个方向的扩散能力, 对于在实际业务中判别静稳天气的形成和维持提供了重要参考依据。

5.2 化学资料同化技术

基于Grid-Point Statistical Interpolation (GSI) 同化系统, 采用三维变分同化(3D-Var)方法, 同化地面观测的PM_{2.5}质量浓度, 通过给定目标函数的极小化过程,



图6 儿童哮喘风险等级预报

调整背景场和观测场之间的权重比例,使分析场对背景场和观测场均达到最佳拟合状态,从而改进WRF/CHEM模式的PM_{2.5}初始条件,减小由于初始浓度偏差导致的模式预报偏差。一次重污染天气试验表明,同化地面观测资料后,模式预报的未来12 h长三角地区PM_{2.5}均方根偏差从153.6 μg/m³降低到120.4 μg/m³,相关系数从0.42提高到0.48,有效改进了模式对重污染天气的预报能力。

5.3 环境气象数值诊断分析技术

基于污染天气图的分析结果,检验环境气象数值模式对污染天气形势预报的可信度。通过开发霾综合预报图等数值诊断产品,检验模式预报偏差和预报一致性,分析空气污染关键气象要素如水平风速风向、相对湿度、边界层高度预报的可信度;开发了轨迹预报产品和污染过程预报产品,定量计算本地排放、化学反应、传输、扩散对污染物浓度的贡献,解释污染过程的形成机制,分析模式预报的不确定性,在此基础上开展客观预报修正。

6 发展与思考

上海环境气象业务经过十几年的发展,目前已经形成了从观测到应用到服务的一整套完整的业务体系。该项业务瞄准国家需求,紧跟国际环境科学发展前沿,在多项关键科学技术问题上取得突破,推出了内容丰富、较为准确的环境气象预报产品。在政府决策、民生服务以及行业引领方面发挥了显著作用。同时也应该看到,随着科技水平的不断提高和社会需求的不断增加,上海环境气象业务仍有许多不足和上升空间。主要表现在以下几个主要方面:技术亟需加强标准建设。环境气象业务标准建设比较薄

弱。以霾为例,虽然几经修改但是现行的观测、预报标准还不完善。最突出的问题就是各地霾日数的判定还存在相互矛盾的现象,说明现行标准在各地的适用性上不一致。因此,在以后的工作中需要特别重视环境气象业务标准建设。而当前亟需解决和出台霾的观测和预报预警标准,必须保证该标准的科学性和在各地的适用性。亟需重视顶层设计,加强与天气业务的融合。环境气象从业务内容上包含了观测、预报、服务和数值模式,从时间尺度上涵盖了临近、短期、中期甚至延伸期和季节内,是一项相对比较完整和独立的业务,同时又和天气、气候业务关系紧密。环境气象业务如何融入天气业务,如何在预报、服务和数值模式等方面实现与天气业务的衔接是需要重点考虑的问题。环境气象工作刚刚起步,在业务规范、流程、技术等方面还很薄弱,只有通过和天气业务的融合,学习其经验,吸收其优势,借用其资源,才能体现“环境”中的“气象”特色和优势。加强与环保部门的合作,推动数据共享与合作。环境气象的预报需要有不断更新的大气污染物排放清单的支持以及地面实时环境观测数据的融合应用。环境保护部门在地面大气环境监测点位、超级站网建设以及排放清单的业务化方面有着良好的基础,因此有必要加强跨部门合作,推进数据实时交换和共享,共同改进空气质量数值预报的精度和准确度,为环境气象的业务预报提供技术支持。业务基础薄弱,缺少核心技术支持和人才储备。环境气象业务刚刚起步,在系统平台、技术方法、预报经验等方面还很薄弱。重污染天气预报预警是现在和未来很

长时间内环境气象所面临的难题。一方面需要不断发展和优化数值模式作为核心技术支撑,还需要通过预报经验的累积、关键预报指标的提炼提高对重污染天气的预报水平。此外,在环境气象预报服务尤其是决策服务方面缺少人才储备,服务能力明显滞后,迫切需要在核心技术开发、人才培养等方面加强配置和支持。

在当前全球气候变暖的背景下,环境问题已经上升到国家利益层面,上海的环境气象业务也同样承担了巨大的压力,而这同时也为这项工作提供了强劲的发展动力。上海环境气象业务将继续围绕长三角环境气象业务指导和协作、重污染天气预报预警、核心预报技术攻关开展工作,进一步推动区域环境气象科技进步和业务发展。

致谢: 本文由上海市自然科学基金项目(16ZR1431700)资助。

深入阅读

- Song Y F, Liu Y J, Ding Y H. 2012. A study of surface humidity change in China during the recent 50 years. *Acta Meteorol Sin*, 26: 541-553.
- 丁一汇, 柳艳菊. 2014. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. *中国科学: 地球科学*, 44: 37-48.
- 官莉, 谭桂容. 2007. 中国气象局业务技术体制改革简介. *气象教育与科技*, (2): 1-4.
- 钱佳丽, 朱昊辰, 贺文智, 等. 2015. 上海的雾霾天气特征及影响因素. *上海节能*, (8): 424-430.
- 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候特征. *气候与环境研究*, 18: 307-406.

(作者单位: 耿福海, 上海市气象局应急与减灾处; 贺千山, 上海市闵行区气象局; 伏晴艳, 上海市环境监测中心)