

上海城市气象综合观测网应用及展望

高伟¹ 陈浩君² 谈建国^{3,4}

(1 长三角环境气象预报预警中心, 上海 200030; 2 上海气象信息技术与支持中心, 上海 200030;
3 上海市气候中心, 上海 200030; 4 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200030)

摘要: 上海气象观测历史悠久, 已基本建立了综合城市气象观测网络, 为城市运行提供了关键气象信息应用和服务。未来, 上海市气象局将以开展超大城市综合观测试验和智能气象为重点, 提高城市气象观测的探测水平 and 应用能力。

关键词: 城市气象, 观测, 应用和服务, 展望

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.012

Application and Prospect of Urban Integrated Meteorological Observation Network in Shanghai

Gao Wei¹, Chen Haojun², Tan Jianguo^{3,4}

(1 Yangtze River Delta Environmental Weather forecast and Warning Center, Shanghai 200030

2 Shanghai Meteorological Information Technology and Support Center, Shanghai 200030

3 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

4 Key Laboratory of Cities' Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, CMA, Shanghai 200030)

Abstract: Shanghai meteorological observation has a long history, and has basically established a comprehensive urban meteorological observation network, which provides the key meteorological information application and service for the city operation. In the future, Shanghai Meteorological Bureau will be focus on the comprehensive observation and intelligent meteorology of large cities, and improve the detection level and application ability for urban meteorological observation.

Keywords: urban meteorology, observation, application and service, future

0 引言

上海是中国的经济、金融、贸易和航运中心。据统计, 上海已有超过2300万的人口和260万辆以上的汽车, 地区生产总值27466.15亿元, 30 m以上高楼32000多栋, 其中1200多栋超过100 m^[1]。随着上海经济社会的快速发展, 城市化进程给城市地球环境带来了巨大的改变, 以城市下垫面的改变最为直接^[2]。城市化进程的加快, 使得城市热岛等现象越来越显著, 也改变了城市局地的能量平衡、边界层结构和大气成分, 导致局地天气、气候及环境的变化^[3]。产业和人口的高度密集, 气象灾害影响连锁效应和放大效应明显增强^[4]。气候变化和城市化的双重影响, 使得上海这座超大城市频繁受到台风、暴雨、高温、雷电、大雾、风暴潮和其他灾害性天气影响, 且发生的频率和强度越来越严重。

近年来, 针对越发严重的城市气象和环境问题, 美国、欧洲等地相继开展了一些综合观测试验和研究计划。大规模、跨学科的城市气候科学试验相继实施, 推动了城市气象观测理念、方法和技术的不断进步, 如在美国盐湖城开展的Urban 2000、瑞士巴塞尔的BUBBLE 2001、法国马赛的ESCOMPTE 2001、美国俄克拉荷马的Joint Urban 2003、英国伦敦的DAPPLE 2004和日本东京的TOMACS 2011等^[1,5]。这些观测试验都涉及城市地表参数的获取(反照率、粗糙度、湿参数)、地表能量平衡、城市边界层结构、城市热岛效应、城市环流与中尺度局地环流相互作用、城市对降水的影响、城市空气污染等内容。美国国家研究委员会2008^[6]和2010年^[7]发表的两份报告分别强调了城市大气边界层廓线观测和城市气象科学试验基地建设的重要性。2008年, 世界气象组织为城市地面观测网的设计和站点的选址编制了指南^[8]。WMO 在全球开展了一系列城市气象和环境研究(GURME)项目, 主要针对空气质量及其相关的气象观测。这些项目包括: 北京大气环境污染控制

收稿日期: 2017年6月30日; 修回日期: 2017年10月28日

第一作者: 高伟(1982—), Email: gao9989@163.com

通信作者: 谈建国(1969—), Email: jianguot@21cn.com

机制研究项目、莫斯科超大城市可持续发展气象服务、用被动采样仪进行空气质量观测、拉丁美洲城市空气质量预报的改进以及上海城市气象和环境研究示范等^[9]。国内较全面的试验是2001—2003年在北京开展的大气边界层动力、热力、化学综合观测试验（BECAPEX），该试验获取了北京城市大气动力和大气化学三维结构特征^[10]。国家自然科学基金“九五”重大项目“长江三角洲地区低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用”在长江三角洲地区开展了水、热与物质通量输送和转化的综合观测试验^[11]。另外，南京市城市边界层观测（2005、2006年）^[12]，国家科技部“973”项目“我国东部大规模城市化的气候效应及对策”在我国东部长三角特大城市群区，针对地表物理特性、陆面过程、城市冠层和大气边界层、大气污染物及其辐射特性等，设计和开展多过程的协同强化观测试验，国家科技支撑计划“京津冀城市群高影响天气预报中的关键技术研究”。

上海是世界上最早开始气象观测的城市之一。1872年12月1日，上海徐家汇观象台开始了气象观测，标志着上海连续140年不间断气象观测记录的开端^[13]。经过百年气象的发展，上海已经建立了符合城市发展需求的城市气象综合观测网络，并在气象预报、预警和服务上发挥了重要的作用。

本文主要从上海城市气象综合观测网、应用个例、未来发展和结论四个方面，对上海城市气象综合观测系统做一个简要的概述。

1 上海城市气象综合观测网

1.1 上海城市综合观测网络组成

为充分理解城市与大气过程之间的相互作用，改善天气预报、大气污染和气候变化的城市适应性，更好的为城市运行提供关键气象信息服务，上海根据城市自身的特点和发展模式，建立了包括自动气象站、天气雷达、风廓线雷达、铁塔气象站、大气成分站等综合性的城市气象观测网（图1、表1），满足精细化预报和专业气象服务对城市气象观测提出了新的要求。

在地面气象观测方面，共建成了260多个自动气象站，空间间距达到区县5~6 km、市区4 km；各区县云、能、天自动化观测改造全部完成；在重要站点和各区县气象台站共设有天气实景观测系统27套、雨滴谱7套、雾滴谱2套、天气现象仪12套、天空成像1套，建成了覆盖全市的雷电闪电定位系统和地面大气电场观测网。在雷达气象观测方面，建成国内先进的青浦多普勒天气雷达，完成浦东南汇雷达双偏振多普

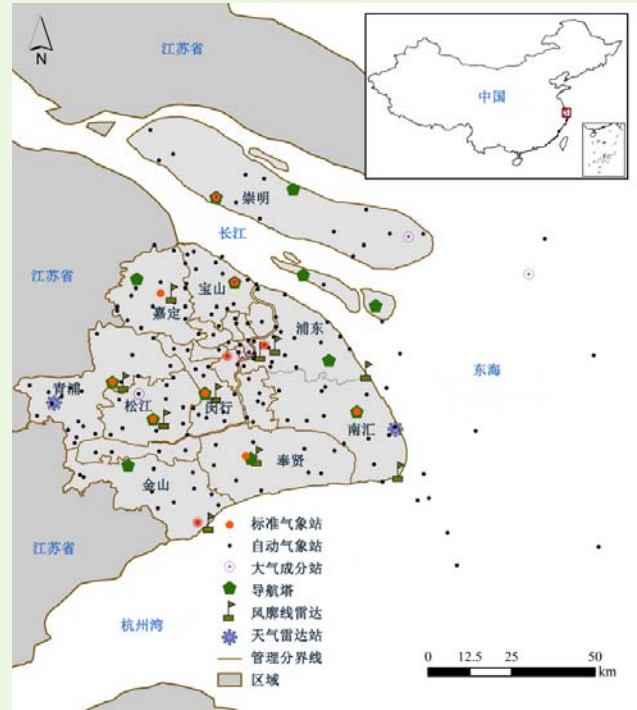


图1 上海城市气象观测网

Fig. 1 Urban meteorological observation network in Shanghai

勒技术升级改造，成为国内第一部业务化使用的S波段双偏振多普勒天气雷达。增设浦东临港地区一部X波段双偏振雷达。在城市边界层观测方面，全市共建成10部大气边界层风廓线雷达，组成较完善的边界层风廓线观测网；增设了2部近地面低空激光测风仪；利用区县电视塔和风能测风塔建成了11个70~100 m多层梯度气象观测系统；初步建立了由2部激光雷达、1部微波辐射计、10部云高仪组成的城市边界层垂直结构观测网；布设了2部涡动通量系统，集成红外气体分析仪和超声风速仪、四分量辐射观测仪组成的辐射、水热的涡动通量观测。在环境气象观测方面，建设有12个环境气象多要素不等的观测站、1个臭氧探空站、2个酸雨观测站、3个负氧离子站、1个花粉站和1个温室气体站等。在卫星遥感气象观测方面，建成了FY3、FY4、葵花、NOAA系列、TERRA和AQUA接收业务系统；整合了华东区域地基GNSS/Met网超过200个站点，站点平均分辨率50~100 km，长三角地区分辨率可达10~15 km。在海洋气象观测方面，建成（含共享站）由40个海岛自动气象观测网、10个海洋浮标观测网、4个船舶自动气象站、4个波浪观测站、14个潮位站、7个温盐流站等组成的海洋气象观测网。在移动气象观测方面，建成5部移动气象观测系统和应急卫星通信系统，除常规气象要素

表1 上海城市综合观测网络组成

Table 1 Composition of urban integrated meteorological observation network in Shanghai

序号	观测系统	项目名称	数量	观测要素
1	地面气象观测	自动气象站	260	温、风、雨、湿、压、能见度
		天气实景监测	27	天气实景显示
		天气现象仪	12	天气现象+ (天空成像、雨滴谱、雾滴谱、闪电定位、大气电场)
2	天气雷达气象观测	S波段天气雷达	2	反射率、径向速度、谱宽、差分反射率、差分相位、相关系数
		X波段天气雷达	1	反射率、径向速度、谱宽、差分反射率、差分相位、相关系数
3	城市边界层观测	边界层风廓线雷达	10	0~3km垂直风向风速
		激光测风仪	2	30~200m不同高度10层风向风速
		梯度观测站	11	不同高度风向风速 (总高度为70~100m不等)
		激光雷达	2	130m~6km垂直消光系数, 边界层高度
		云高仪	10	0~6km垂直消光系数, 云底高度, 边界层高度
		微波辐射计	1	温、湿和水汽廓线
		L波段雷达探空	1	0~30km温、湿、压、风垂直廓线
4	卫星遥感观测	卫星	6	FY3、FY4、葵花、NOAA系列、TERRA和AQUA的数据和产品
		GPS/MET	200+	大气整层水汽含量
5	环境气象观测	大气成分观测	12	反应性气体 (O ₃ , NO _x , SO ₂ , CO, VOC)、气溶胶(PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁)+(浊度、黑碳、气溶胶化学组分(硫酸盐、硝酸盐、铵盐、氯化物等)、UVAB和AOD不等
		臭氧探空站	1	O ₃ 垂直分压、浓度廓线和臭氧总量
		酸雨观测站	2	电导率、PH值
		负氧离子站	3	负氧离子浓度
		花粉站	1	花粉数量和类别
6	海洋气象观测	温室气体站	1	CH ₄ , CO ₂ , N ₂ O浓度
		海岛自动气象	40	温、风、雨、湿、压、能见度
		船舶自动气象站	4	温、风、雨、湿、压、能见度
		波浪观测站	4	波浪大小、形态
		潮位站	14	潮位高度
		温盐流站	7	温盐含量
7	移动气象观测	应急监测车	5	常规气象要素+ (天气雷达、风廓线、云高仪、激光雷达和天气实景等)

移动观测外, 具备移动天气雷达、移动风廓线雷达和天气实景观测等。

1.2 上海城市综合观测网络特点

为了充分理解城市陆面和大气过程之间的相互作用, 认识影响城市的高影响天气系统, 针对天气对城市的影响和特殊用户需求等目标, 上海城市气象综合观测网络 (图2) 具有如下特点:

1) 多目标: 观测不仅满足对城市边界层、认识高影响天气的科学认识, 而且满足城市安全和环境、健康等多种用户的需求; 观测对象关注高影响天气、高关注地域和高敏感用户, 以上海地理坐标、以天气系统和用户需求等三个坐标关注城市与天气相互作用, 实现气象观测从要素型向功能型转变。

2) 多尺度: 观测网络兼顾天气尺度、中尺度、城市尺度的综合, 未来继续关注街区尺度、建筑物尺度和室内环境。

3) 多要素: 观测网络不仅是热力学、动力学的

观测, 而且是大气化学和生物气象学、物候学、城市生态学的观测;

4) 多手段: 观测网络采用了自动遥测、地基遥感、微型遥感、在线观测和采样等多种观测平台和多

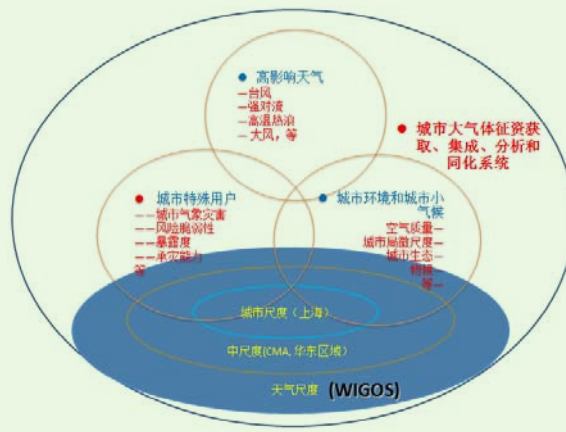


图2 上海城市综合气象观测框图

Fig. 2 Logic diagram of urban comprehensive meteorological observation in Shanghai

种观测手段的综合应用。

5) 同化和融合: 通过资料集成、多源观测资料融合、模式的同化等手段实现观测资料的应用服务。

2 综合观测网应用个例

2.1 高影响天气监测应用

观测网的设计应首先满足城市高影响天气系统的监测。一方面提高强对流、台风、暴雨、高温、寒潮、雾霾等高影响天气的监测应用; 另一方面为数值模式提供观测支撑, 提高高影响天气预报准确率和精细化水平。

例如, 基于上海城市气象综合观测网, 通过对变分的三维质量守恒风场调整模式融合9部风廓线雷达、9座铁塔梯度观测资料和200余个加密地面自动站测风资料来反演精细化的三维风场诊断分析海风锋结

构和演进。以2016年7月26日双支海风锋在上海浦东新区触发的热对流过程为例。由诊断的风场可知, 在13:15时双支海风锋中的北支位于浦东新区北部和宝山区, 而南支海风锋推进更深, 已经越过了市区到达市区西北部和闵行北部(图3a); 红色曲线为双支海风锋位置, 与2 h之后的雷达窄带回波对应(图3c); 海风锋交叉位置为显著风向辐合中心。这说明反演风场与真实风场非常接近, 能很好地反映出海风锋位置和风场辐合中心。风场散度大值区反映出北支海风锋与环境风场辐合更加强烈, 风场辐合最强处位于宝山区(图3b)。提前120 min诊断出的风场辐合中心位置落在热对流初生位置偏北约10 km处。实现了利用改进后的三维风场模型诊断精细化风场的业务中试运行, 可为定位海风锋和风场辐合中心、预判热对流初生位置提供参考。

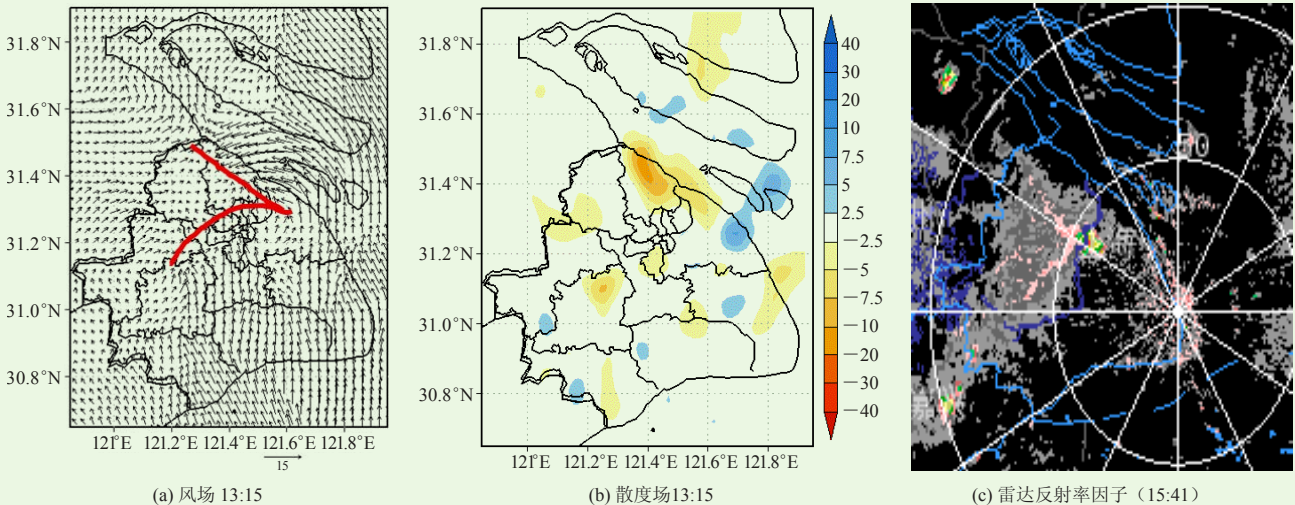


图3 基于实况诊断的2016年7月26日 (a) 风场、(b) 散度场和 (c) 雷达反射率因子

Fig. 3 The chart of (a) wind field, (b) divergence field and (c) radar reflectivity factor on July 26, 2016 based on live diagnostics

2.2 城市边界层和大气环境监测应用

上海城市综合气象观测网第二大功能是认识城市边界内大气热力、动力、大气化学和生物生态特征的变化(城市下垫面、城市热平衡、边界层垂直结构、城市热岛、大气环境(城市气溶胶、臭氧等)。通过了解城市地表下垫面特征、城市边界层结构来认识城市边界层与城市空气质量的相互作用, 提供城市热岛、城市风环境(包括海陆风)、城市空气质量状况提供实时的观测信息, 为城市多尺度模式(城市尺度、街区尺度、建筑物尺度等)提供观测支撑; 为城市空气质量模式、污染扩散传输模式、应急响应等提供观测支撑。

典型的应用范例为2010年上海世博会园区的气象综合性气象保障系统综合应用(图4)^[14]。世博园区精细化观测网配合上海多普勒雷达和激光云高仪、雷电预警系统等观测资料, 基本实现了从过去对天气系统动力、热力状况的平面监测向三维立体、综合跟踪监测转变, 显著提高了对中小尺度天气系统的诊断能力。在2010年8月25日的局地强对流冰雹天气过程前, 微波辐射仪通过对相对湿度、水密度、0℃层高度、-20℃层高度等数据的分析, 提前1h判断当天产生冰雹可能性很大, 预报结果结合实况突出了精细化观测网的应用结果。



图4 世博园区精细化气象观测网站点布局

Fig. 4 Map of the small-scale weather observation sites in the Expo area in Shanghai

2.3 卫星遥感观测示范应用

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、葵花8等卫星产品监测污染天气的落区和演变，形成点-面结合、地面-遥感结合的环境气象立体观测系统。例如，为丰富大气环境卫星监测产品，开发了霾、能见度、臭氧总量、PM_{2.5}浓度等应用产品。同时，利用卫星反演的NO₂、CO等柱浓度对长三角排放清单进行验证和修正，建立了污染排放的月变化曲线。进行了长三角地区典型污染天气的FY3卫星遥感平台（图5），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。目前，上海市城市环境气象中心已成为国家卫星气象中心FY-3卫星长三角大气环境遥感应

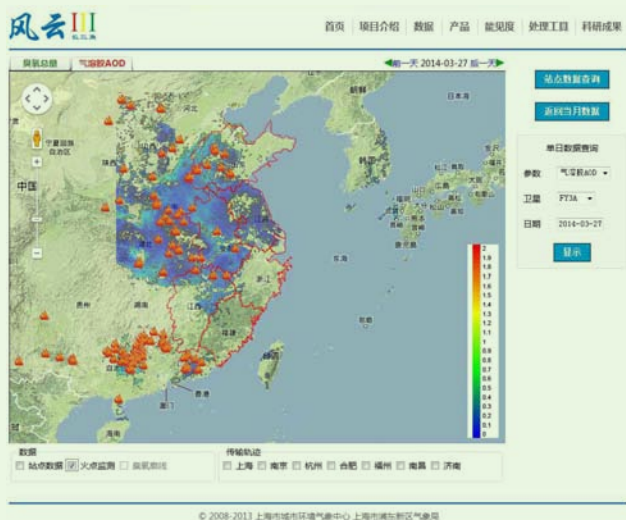


图5 FY3大气成分卫星遥感平台

Fig. 5 Platform of the FY3 atmospheric component satellite remote sensing

用示范基地。

2.4 特殊对象需求的观测应用

城市综合气象观测网络还有一个功能是认识城市天气、城市气候对城市的影响，为城市的各行各业提供气象观测服务。安全和应急响应部门需要了解城市发生的极端天气，详细的街道洪水信息、及时和准确的高时空分辨率的风、温度和湿度信息；交通运输部门关于强风、强降水和降水形式的信息（如雨、冻雨、毛毛雨或雪），道面状态（比如干、湿、冰盖）等信息；电力网运营商和公用事业需要高分辨率的空气温度来计算能源消耗和用电负荷，可再生能源的评估需要精细化的风和太阳辐射资料；城市规划设计部门需要有关城市热岛、植被指数、城市空气质量和通风廊道等信息；公共卫生部门关注空气质量、花粉和高温热浪的监测预测信息。

例如，为了满足市民健康安全需要，上海气象部门开展了紫外辐射观测、负氧离子、微生物、花粉和酸雨采样分析，为市民提供紫外线、负氧离子和花粉等监测服务（图6）。



图6 健康气象观测

Fig. 6 Weather observation for health

3 上海城市气象综合观测网的未来发展方向

未来几年，上海市气象局将以开展超大城市综合观测试验和智能气象为突破和抓手，提高城市气象观测的探测水平和应用能力，将重点放在超大城市综合观测试验和智能气象观测两方面。

3.1 超大城市综合观测试验

城市大气温、湿度和风速等多要素垂直廓线观测资料十分重要，是验证气象模式对边界层高度及垂直结构模拟能力的重要依据，也可以同化后作为气象模式初始场的输入资料。现有的观测资料在垂直空间和时间上缺乏高分辨率，不能满足模式高精度时间和垂直分辨率的需求。通过建立超大城市综合气象观测站

(超级站), 综合开展毫米波测云仪、风廓线雷达、激光多普勒测风雷达、微波辐射计、拉曼温湿度激光雷达等新型观测设备观测, 并协同天气雷达和地面气象观测站等观测资料, 积累长序列、稳定、高质量的综合观测数据集。我们将实现多种设备的协同观测, 获得有云和降水天气下反演温湿和风垂直廓线的数据融合技术。完成多要素垂直廓线时空分辨率一致性的确定, 连续得到从地面到对流层顶部的连续准确的大气温湿、风廓线; 实现大气廓线在数值模式中的快速同化分析, 为模式的稠密资料同化, 及智能预报工具开发提供基础。实现三维垂直廓线资料对模式参数化方案验证及对物理过程改进。

另外, 对于雾霾的形成机理及演化机制是目前公众和学术界关注的热点问题, 也是亟待解决的环境科学问题, 雾霾的垂直变化和边界层精细结构之间的关系是解决上述问题的关键所在。通过对拉曼-米散射激光雷达和MPL的协同观测, 解决消光后向散射比和边界条件的假设问题, 获得准确的消光系数廓线, 并利用消光后向散射比的垂直变化信息, 获得上海不同气溶胶的分层传输特征。同时订正MPL和CLIPSO的观测结果, 以便充分发掘其历史数据的科学价值。建立超大城市雾霾综合观测站, 组合不同的地基遥感设备, 通过数据对比和融合, 获得地面到边界层顶连续的气溶胶、水平风、温度和湿度廓线。利用高分辨率卫星资料反演地面PM_{2.5}质量浓度, 利用地面观测数据对卫星反演场进行三维变分, 获得更加准确的分析场, 利用区域大气环境模式开展化学资料同化。

3.2 智能气象观测系统

充分利用社会资源, 不断探索社会化气象观测业务发展新模式。通过云计算、物联网、移动互联、大数据、智能等新技术的深入应用引导气象观测的智能化发展。建设可穿戴式的移动气象站, 挖掘智能手机等各类移动智能终端、汽车船舶等交通工具、楼宇道路等已有潜在气象观测信息; 建立气象信息员、志愿者辅助观测机制, 建立灾害性天气现象社会化辅助观测体系, 增强灾害性天气信息的获取能力, 激发社会力量参与综合气象观测的活力, 有效增强灾害性天气监测能力; 建立气象与政府部门、科研机构、企业、社会间气象相关观测数据互助共享协作体制机制, 统

筹应用社会化观测资源, 收集相关的自然科学数据、行业数据、社会数据, 满足跨学科、跨行业的观测数据融合与综合分析, 增强大城市综合体征获取能力。

4 结论

本文介绍了上海城市气象综合观测网的建设历史、组成和应用实践。总的来讲, 上海已基本建立了综合性城市气象观测网络, 包括地面、天气雷达、大气边界层、环境气象、卫星遥感、海洋气象和移动气象等七大观测体系。利用综合观测网数据的综合性使用, 实现了对高影响天气等的预判和监测, 显著提高了对中小尺度天气系统的诊断能力和多方面气象服务内容的能力和认知。未来几年, 将以开展超大城市综合观测试验和智能气象为突破和抓手, 超大城市综合观测试验和智能气象观测为重点, 进一步提高城市气象观测的探测水平和应用能力。

参考文献

- [1] Tan J G, Yang L M, Grimmond C S B, et al. Urban integrated meteorological observations: Practice and experience in Shanghai, China. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(1): 85-102.
- [2] 徐祥德, 汤绪, 等. 城市化环境气象学引论. 北京: 气象出版社, 2002.
- [3] 蒋维楣, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究. *大气科学*, 2007, 31(1): 37-47.
- [4] 穆海振, 史军, 贺芳芳. 上海城市气象灾害特点及巨灾防范浅析. *上海保险*, 2015(8): 23-24.
- [5] 李炬, 冀军霞. 北京城市气象观测试验进展. *气象科技进展*, 2014(1): 38-47.
- [6] NRS. *Observing weather and climate from the ground up: A nationwide network of networks*. Washington, DC: National Academies Press, 2008.
- [7] World Meteorological Organization. *Urban observations. in: guide to meteorological instruments and methods of observation*, WMO No-8. Geneva: WMO, 2008.
- [8] WMO. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and observing methods report No. 81, WMO/TD-No. 1250*, Geneva, 2006.
- [9] 汤绪. 超大城市气象观测网的设计与应用. *气象科技进展*, 2016, 6(4): 8-17.
- [10] 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. BECAPEX科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响. *气象学报*, 2004, 62(5): 663-671.
- [11] 周秀骥. 长江三角洲低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用. *Annual Report of CAMS*, 2000(00): 28-29.
- [12] 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴宁, 等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析. *南京大学学报(自然科学)*, 2008(1): 99-106.
- [13] 支星, 刘欧萱. 徐家汇观象台的历史地位及贡献. *中国气象学会年会*, 2013.
- [14] 胡平, 尹春光. 世博园区气象观测网的设计与建设. *中国气象学会年会*, 2012.