

超大城市气象观测网的设计与应用

汤绪

(天气和减灾服务司, 世界气象组织, 日内瓦 1211)

摘要: 城市化通过改变自然状态和人类活动对天气气候产生重大影响, 同时由于城市化带来的生产、生活活动的密集性, 气象灾害对其造成的影响更为集中且严重。建立一个以气象为核心的科学、全面、智能的综合观测网是保障城市安全和智能化、个性化的气象服务的有力支撑。从城市观测的国内外进展、需求、布局的科学性、新设备的应用、大数据背景下的数据应用和服务等方面给出了超大城市(城市群)综合观测网的建设思路。

关键词: 城市, 观测, 应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.04.001

The Design and Application of Meteorological Observation Network in Megacities

Tang Xu

(Weather and Disaster Risk Reduction Service Department, World Meteorological Organization, Geneva 1211)

Abstract: Urbanization has exerted the significant impact on the weather and climate in the process of human activities to change the conditions of natural environment. The effect of meteorological disasters becomes much denser and more severe due to higher intensity of economic production and human habitation and activities in the mega-city areas. So that, It is urgently to build a science based and service driven observation network to support the seamless data processing, impact based forecasting and to serve further the safety of people's life and property in mega cities. This work discusses a conceptual design and possible application about building an integrated meteorological observation network in megacity based on the achievements of science and technology. It includes the application of variety of sensors, deployment for monitoring high impact and high relevant factors, the application for integration technology and the applications of 'big data' and its associated data sourcing.

Keywords: urban, measurement, application

0 引言

大规模城市化(城市群)是我国经济社会发展的重要驱动力和重大战略。进入21世纪,我国城市化水平每年以1.2个百分点增长^[1]。我国城市化发展规模之大、速度之快前所未有的。近年来,伴随着经济高速发展、城市面积快速扩张,我国已形成长三角、珠三角、京津冀、山东半岛、辽中南、中原、长江中游、海峡西岸、川渝、关中等10大城市群。尤其以长三角、珠三角和京津冀三个特大城市群发展迅猛,极大地促进了经济的高度聚集和快速发展,同时也为高度聚集的人口创造了更好的生活居住条件和更佳品质的集中社会服务。然而,随之而来的环境压力和不利的环境效应,城市灾害的承灾能力降低等问题日益突出,对城市可持续发展带来严重挑战。本文从城市观

测的需求、布局的科学性、新设备的应用、大数据背景下的数据应用和服务等方面阐述超大城市(城市群)综合观测网的建设思路。

1 超大城市(城市群)气象观测的目的和需求

1.1 超大城市(城市群)气象观测的目的和内容

超大城市(城市群)综合观测的科学技术目标是观察自然过程,同时为已有模式的验证和运行提供驱动数据、参数和验证数据,并采集高分辨率的数据以将其同化到城市气象、生态、环境和气候模式。因此超大城市(城市群)综合观测系统的设计要充分考虑大气、城市(含城市生态)、城市人群及其活动相互影响痕迹的观察与记录,并且应用于社会实践。超大城市(城市群)气象观测体系建设主要包括城市边界层观测系统、城市参数观测系统、大气环境及高影响要素观测系统和灾害天气观测系统。

通过建立超大城市(城市群)边界层观测系统,

收稿日期: 2015年7月20日; 修回日期: 2016年3月24日

作者: 汤绪(1957—), Email: xtang@wmo.int

资助信息: 上海市科学技术委员会科研项目(16ZR1431700)

为在这一地区进行地表特征参数和能量通量以及近地层的各个参数的卫星遥感参数化和数值模拟提供事实依据，并提供检验卫星遥感参数化和数值模拟结果的真值。表1列出了该系统的主要观测内容。

表1 超大城市（城市群）边界层观测系统的主要观测内容
Table 1 The major elements for boundary measurements in mega-city/city-cluster

观测类别	观测内容
常规气象信息	风、温度、压力、湿度及其廓线
能量和物质交换	辐射（长波和短波）、感热通量、潜热通量、水汽通量 不同下垫面地表温度、近地层气温
边界层结构	边界层高度、夹卷层厚度
大气物理特性	地表反射率、稳定度、垂直速度等

通过建立超大城市（城市群）参数观测系统，将城市物理过程（包括土壤—植被—大气之间水、热、辐射交换，植物、土壤所表征的系统物理特征的变化）和城市水汽循环（降水、蒸发、渗透、径流等）之间的协调变化定量关系，以及城市下垫面—天气相互作用作为研究的内容。当前的城市影响研究也正在倡导这个方面^[2-3]。表2列出了该系统的主要观测内容。

表2 超大城市（城市群）参数观测系统的主要观测内容
Table 2 The major parameters for the measurements in mega-city/city-cluster

观测类别	观测内容
常规气象信息	风、温度、压力、湿度、降水
城市地表特征	植被覆盖度、植被类型、植被密度、叶面指数、土地类型 水汽循环（水汽含量、水汽浓度、水汽垂直分布、土壤含水量、地表透水性、蒸发量、径流量） 地物形态、粗糙度、湿参数、辐射性质、热容量

通过建立超大城市（城市群）大气环境及高影响要素观测系统，实现大气环境污染过程、污染物特征变化趋势解析，有效识别雾霾等级、研究大气污染形成、表现特征以及变化趋势，明确污染原因，依据有效数据发布区域污染预报预警；掌握区域大气污染物基本规律和特征，大气污染物时空演变监测结果，量化特定地区污染物排放总量，了解、分析污染输送过程，确定大气污染物局地 and 区域输送来源；实现对大气环境污染源探索，通过对颗粒物以及大气成分物理、化学特征分析，解析颗粒物主要成分，确定区域内排放源强，科学回答“三个说不清”（污染来源说不清、污染成分说不清、形成机理说不清）。

与此同时，要针对各种高影响天气气候对城市安全运行、城市人居及健康、城市交通及城市人口出行等影响的高关联度要素组织观测与数据获取，开展城市影响要素观测系统的规划、设计与建设，实现多专

业融合、多关键影响要素汇集的城市高影响要素观测系统的业务运行。超大城市（城市群）高影响要素观测系统可以包括开展对城市不同下垫面热传导及对人群健康影响、气溶胶（如花粉等）对特殊人群的影响、大气对城市生态的影响、暴雨对城市积涝的影响、风对高层建筑及其人居的影响，高影响天气对交通的影响等的观测等等。不同城市可能的影响要素不尽相同，但是其基本的影响特征却是大致相同的，这为设计和规范城市高影响要素观测系统提供了基础。表3列出了该系统的主要观测内容。

表3 超大城市（城市群）大气环境及高影响要素观测系统的主要观测内容

Table 3 The major environmental and high relevant atmospheric elements for the measurement system in mega-city/city-cluster

观测类别	观测内容
常规气象信息	湿度、降水量、云（云高、云厚、云状、云滴谱、云中含水量）、雨滴谱、能见度、雾滴谱、大气电场、日照时数、实景天气成像等
大气环境	痕量气体：O ₃ 、CH ₄ 、NO、NO ₂ 、SO ₂ 、CO、CO ₂ 、VOC、PAN 浓度：TSP、PM ₁ 、PM _{2.5} 、PM ₁₀ ，黑炭、过敏性气溶胶、有毒物质、颗粒物谱分布； 颗粒物光学：散射系数、吸收系数、消光系数、光学厚度、折射率、单次散射反射率、吸湿增长系数等 颗粒物成分分析：硫酸盐、硝酸盐、钙、钾等金属、有机物、OC、EC等 通量：二氧化碳、N ₂ O、CH ₄
城市生态	花粉浓度、细菌浓度、物候观测（开花期）、植被类型、面积与分布等

通过建立灾害天气观测系统，把改进预报作为大气观测的主要目的之一。观测的改进为预报的改进提供了基础条件，但是观测的改进并不一定带来预报的明显改进，观测对预报的贡献依赖于观测的要素、位置、时间、天气形势等多方面的因素。因此，要由观测决定预报转到由预报指引观测的理念，推进观测与预报的互动。国际上开展的THORPEX计划就是通过目标/适应性（targeting/adaptive）加密观测试验，确定观测对于数值预报的敏感区，进而有目的地改进观测系统。同时利用探测手段去真实地了解强对流系统内部的三维结构和与云微物理过程有关的气象参数，包括用两部或三部多普勒雷达建立同步观测网，其同步观测区可覆盖整个城市区域，获取高时空分辨的三维流场资料，对城区外实施单多普勒雷达对移近的灾害天气系统的有效监测。同时，在城区内和近郊布设空间间隔仅8~12km的多部GPS接收站，利用层析分析获取水汽垂直廓线。有条件的再布设1~2部风廓线仪，形成有效的边界层风场与其他气象要素的观测。再加上常规气象观测网，将基本满足对大城市灾害天

气监测的需求。表4列出了该系统的主要观测内容。

表4 灾害天气观测系统的主要观测内容
Table 4 The major measurements on severe weather monitoring in mega-city/city-cluster

观测类别	观测内容
常规气象信息	湿度、降水量、云（云高、云厚、云状、云滴谱、云中含水量）、能见度、大气电场等
大气垂直结构	风廓线、温湿廓线、台风定位、台风路径
边界层结构	边界层高度

1.2 超大城市（城市群）气象观测的需求

由于城市冠层的存在，地气之间的交换过程变得非常复杂。热量交换首先在冠层内的壁面（地面、墙面和屋顶）与空气之间交换，然后再在冠层与粗糙子层之间交换。尽管在数值模拟研究中已发展出多种城市冠层模式，并可以模拟出热岛特征，但模式中的建筑物形态学模型是简单的理想模型，与城市的实际形态学特征之间有很大差异。由于已有的观测研究都是单点观测，不能代表一定范围内的平均状况，因此在有关参数的选取上存在很大的不确定性。同时，城市交通、空调系统等排放的人为热直接影响地表温度和近地层气温，城市人为热排放清单的建立及其在数值模拟中的合理引入是建立超大城市（城市群）气象观测网的一项重要基础性工作。

城市冠层的复杂结构形成的特殊流场（孤立粗糙流、尾流绕流和爬越流）使得冠层与边界层的交换过程异常复杂。如何对该交换过程进行参数化描述是正确模拟城市地气耦合的难点和关键问题之一。城市下垫面的动力学和热力学特性都与自然下垫面存在显著差异，必然影响到城市边界层的整层结构特征。此外，城市边界层顶部夹卷过程的观测研究亦非常重要，它涉及边界层大气与自由大气之间的相互作用。

城市建筑物和不透水路面取代了自然的植被和土壤，减少了蒸发，大大加快了地表径流，改变了土壤下渗。这些城市地区特有的陆面水文过程在陆面模式和城市冠层模式中均还没有较好的描述。城市下垫面通过动力、热力、水文、气溶胶和云物理等过程对降水产生影响，已经开展的研究工作主要针对其中的一个或几个物理过程，并且存在很大的不确定性。这也是超大城市（城市群）气象观测网需要关注的一个重点。

同时应该看到，由于城市复杂的中小尺度地形环境，且引发暴雨的中尺度对流系统存在着多种组织类型。不同复杂地形环境下，不同组织类型的暴雨中尺度对流系统启动、组织、发展、维持和消亡的主要物理机制是什么，它们之间存在着何种差异并不清楚，因而相对于大尺度天气过程引发的降水，对城市暴雨

的预报成功率还不是很^[4]。这说明与影响城市的特大自然灾害的科学预测还有不少距离，其主要原因是目前的灾害预报是在对灾害孕育、发展、发生规律尚不清楚的情况下进行的，这从根本上阻碍了灾害性天气预测预报水平的提高。灾害天气数值预报模式是灾害天气预测预报和机理研究中的重要工具，为了使模式取得最好的预报效果，需要有大气、陆面、动力、植被、与大气有相互作用的海洋系统以及大气化学等诸多过程当前的实际观测状况。同时，从数值天气预报的输出结果中获取客观信息需要观测和预测结果之间的比较，这就需要观测和数值模拟一并考虑。但是，目前的超大城市（城市群）观测系统还没有充分考虑到数值天气预报模式的发展，获得满足利用数值天气预报模式进行灾害性天气预测所需要的各种初始观测资料以及与模式结果比对的观测资料。另一方面，目前的超大城市（城市群）气象观测系统还没有充分考虑到数值天气预报模式中不同圈层相互作用过程的描述对观测资料的需求，无法很好地为模式中参数化方案的建立和发展以及模式本身的发展和评估提供观测依据。

另外，社会需求对城市天气预报提出了更高可信度的要求，而模式评估是模式发展中的一个重要环节，大量观测资料的使用为模式评估提供了有力支撑。在城市气象模式评估中垂直廓线资料尤为重要，它可以为评价模式对城市边界层高度及垂直结构的模拟能力提供依据。目前还没有一个能够对城市气象模式预测能力进行系统、客观检验的观测系统。超大城市（城市群）观测资料要用于支持对未来天气的预估，必须要考虑到人类活动对天气的影响以及未来气候对人类的影响^[5]。超大城市（城市群）大气观测系统必须超越大气观测本身，还应包含加工和支持系统，以便产生可靠和有用的产品^[6]。现有的地面观测站网尽管提供了非常宝贵的资料，但还要确定这些站点的空间代表性，以便更好地用于模式评估。城市小区域尺度气象模式或计算流体力学模式，通过与中尺度模式相耦合，可以显式分辨出城市下垫面的空间非均匀性对站点观测的影响，为解决城市地区站点观测的代表性问题提供了一个有效的解决途径。

针对灾害性天气、城市边界层、气候生态系统等问题的研究，对观测项目提出了更高要求，需要更高的精度和合理分布，也需要新一代的观测仪器代替目前的常规观测仪器来完成。观测的项目也更加广泛，其中包含生态、陆面、大气与陆面、水文、大气成分及其化学物质等，必须通过科学设计、优化布局，从

地点分布、设备技术、内容要素等方面, 增强和改善城市及周边地区大气综合观测体系。

应该注意到, 在当前的超大城市(城市群)运行过程中, 仅有天气预报是不够的, 人们要求更多的信息以确保他们的财产和人身安全, 但在超大城市(城市群)观测项目中缺乏水文气象灾害的影响和后果的相关信息。为了让政府、经济部门和公众采取适当的行动, 需要知道水文气象学的多种危险会如何影响他们的生活、生计、财产和经济。因此, 加强和改善城市水文气象相关的风险信息调查和收集是降低不利影响的前提。例如, 预测降水在高峰时段对道路交通的可能影响, 或者由于强风关闭机场对乘客的影响, 可以通过使用脆弱性和暴露的数据集以及气象信息开发一个客观影响模型。理解和预测城市水文气象灾害风险影响一般超出了气象学家和水文学家的职责, 需要与多种相关专业结合。有效的风险预警需要结合其他必要的专业知识、资源和经验(如人口数据、人群分类技术、地理信息系统、互操作性、第三方数据集成和使用)提供服务。从服务用户的角度来看, 收集的数据要包括超大城市(城市群)中最容易受到灾难影响的信息。

2 城市综合气象观测的进展和前景

2.1 国内外城市综合气象观测的进展和经验

随着城市化带来的生产、生活活动的集中化, 气象灾害和大气环境污染造成的影响更为集中且加重。同时, 城市化也通过这一特殊的下垫面改变的进程对大气结构和物理过程造成了明显的影响。一方面, 超大城市(城市群)高层建筑的增多导致冠层、粗糙度和边界层大气结构产生变化。研究表明: 城市区域的大气具有“热岛”、“干岛”、“空气穹窿”等特殊结构, 这些结构导致了城市区域的天气显著异常, 进而引起了局地气候的显著变化^[7-8]。另一方面, 城市化使得城市区域天气预报更为复杂, 而城市居民对天气预报精度亦有更高的要求。气象观测是气象预报预警研究的基础, 其目的是要为气象预报预测、气象服务和气象科学研究提供高质量、可靠的观测数据^[9]。目前, 城市气象观测与业务应用需求之间仍然存在较大的差距。针对城市的观测研究主要集中在边界层以内, 北美自2000年开始这方面的研究, 在欧洲则更是近几年内才开始实施的。近年来, 国际上进行的城市综合观测实验主要有法国马赛城市边界层试验(UBLCLU/ESCOMPTE)、希腊雅典污染物传输与化学转化试验(MED CAPHOT-TRACE)、欧洲科技合作研究计划(COST71)、美国盐湖城的城市

2000试验(URAN 2000)、美国凤凰城的试验亚利桑那中部-凤凰城长期生态研究计划(CAPLTER)、美国俄克拉何马城的城市2003联合试验(Joint Urban 2003)、英国伯明翰的城市大气中的污染物试验(PUMA)、瑞典巴塞尔的城市边界层气象项目(BUBBLE)、日本的城市气候综合室外模型试验(COSMO)、墨西哥的大城市对区域及全球环境的影响研究计划(MIRAGE)等。这些观测试验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、城市对降水的影响和城市空气污染等内容。世界气象组织也在全球组织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内容的气象观测, 这些项目包括北京大气环境污染控制机制研究项目、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(NOAA)、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。

中国专门针对城市边界层而进行的观测试验研究中较全面的试验是2001—2003年在北京开展的北京空气污染观测试验(BECAPEX), 这是针对大气边界层动力、热力和化学开展的综合观测试验。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。另外, 2004年开展的北京城市边界层观测试验(BUBLEX), 2005和2006年开展的南京市城市边界层观测, 国家科技部“973”项目“中国东部大规模城市化的气候效应及对策研究”在中国东部长三角城市群区, 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, 设计和开展了多过程的协同强化观测试验。“十二五”国家科技支撑重点计划“京津冀城市群高影响天气预报中的关键技术研究”围绕京津冀城市(群)局地环流及其对城市高影响天气过程影响开展综合观测科学试验, 重点对城市(群)山谷风环流、热岛环流和海陆风环流及边界层结构进行观测。这些试验主要针对城市边界层结构、城市空气质量、城市化的气候效应和城市化的天气效应等开展研究并取得不同程度的进展。通过这些大型项目的实施, 逐步形成了“城市冠层—粗糙子层—惯性子层”的城市近地层垂直结构认识, 对其中物质、能量的分布和交换规律的研究, 为数学模型和数值模式的建立及其业务应用奠定了基础。国内的城市气象观测研究增强了对中国城市气象个性化问题的认识(如城市与地形相互作用对强对流天气的影响), 为超大城市(城市群)气象观测网建设和城市

气象精细预报提供了科学基础。与此同时，许多省市气象部门根据服务需要组织开展了观测适应性试验和高影响要素观测，极大地丰富了观测业务，增强了服务的针对性，受到地方政府和社会的广泛好评。

综合起来，国内外关于城市下垫面不同尺度的观测研究主要集中在以下方面：1) 城市五岛效应对天气过程的影响。近年来，人们逐渐发现城市化引起的干岛、湿岛、混浊岛和雨岛等现象，与城市热岛一起，形成了所谓的城市五岛效应，它们在很大程度上是互相关联的并且与变化的天气条件相互作用，日益明显地影响着城市的天气和环境条件；2) 城市化对城市大气边界层风场的影响。城市密集高耸的建筑物特征和大量的人为活动，会对边界层大气动力场产生影响，从而影响大气边界层的风向和风速变化；3) 城市化对降水的影响；4) 城市化进程对强对流天气发生发展的影响；5) 城市对气候观测的影响以及历史气候数据在城市气候服务中的应用问题。

在观测的时间和频率上应该遵循国际通用的标准^[10-14]。需要关注的水平观测尺度有3个等级^[15]，如图1所示。

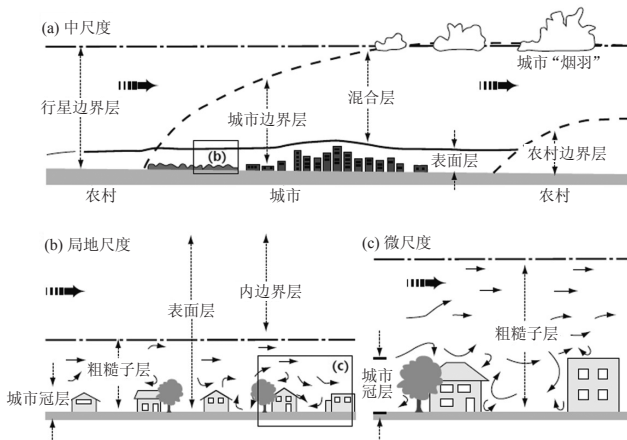


图1 城市观测多尺度概念图

Fig. 1 The conceptual map on multi-scale urban measurement

1) 微尺度：每种下垫面及其上的物体都有其自己的微气候特征和周边环境，相距不远的陆面和空气温度有时会相差几度，而很小的物体也会造成空气的扰动。典型的城市微气候尺度从厘米跨越到几百米，与每个个体的尺度都有关系，包括建筑、树木、道路、街道、院落、花园等等。

2) 局地尺度：这是标准气候站的设计观测尺度，重点关注大地形特征带来的周边环境的平均信息，如地表覆盖、建筑物的尺度和间隔、人为活动的影响等。典型的尺度跨距从1km到几千千米。

3) 中尺度：典型的尺度跨距从几十千米到上万千米。需要多站的信息融合分析。

在需要关注的垂直观测尺度方面，由于城市不同于农村和海洋等较为平坦的下垫面，其动力、热量和湿度的垂直交换不仅仅由单一地面特征决定，而是一定厚度层的综合贡献，该层称为城市冠层（UCL），其高度约为主要建筑物和树木的平均高度。在其上仍有混合发生，观测和理论研究表明，这种混合的顶高在密度建筑物地区是城市冠层的1.5倍，而在低密度建筑物地区是城市冠层的4倍^[16-17]。位于其下的仪器设备能够观测到微气候特征，而架设在这种混合顶高以上的设备能够获得代表局地尺度的空间平均特征信息。同样，有地形粗糙度引起的内边界层也要在观测时考虑进去。总的来讲，垂直方向覆盖了整个对流层。

2.2 城市综合气象观测的发展趋势

从国内外相关研究进展可以看到城市气象观测研究与应用实践呈现出五个发展趋势：观测从描述城市大气基本状态到更多关注地气之间的能量和物质交换；研究尺度上强调对不同尺度进行观测和研究；新科技推动了对城市地气相互作用的观测，新的传感器、新技术和新方法被大量采用；观测上更多地采用业务观测和科研观测相结合的方式，力争获取较长时间的观测资料；应用上，城市基础设施与城市生态、人类活动的高影响要素观测及其相关大数据的获取越来越成为未来城市观测、数据应用系统设计与业务的导向^[18]。

随着观测手段的发展和科技水平的进步，城市气象观测的发展趋势也由人工观测转向自动化遥测遥感，从定性观测到定量观测，从单一的大气观测到地气及其相互作用的综合观测；综合利用多种手段、多种技术，实现高精度、高时空分辨率、连续、自动、一体化定量观测。为了满足城市精细化气象服务的需求，探测设备空间网格更密，垂直层次更多更高，资料时间密度更高，大数据特征更加显著。在观测方式上，呈现出以下几个转变，即从大尺度的天气观测向中小尺度天气观测发展的转变，从二维观测向三维立体观测发展的转变，从离散数据分时获取向多光谱连续扫描获取发展的转变，从固定观测向固定与移动观测及连续移动扫描并重方向转变，从分学科专业的观测向多专业学科的综合观测方向转变，从单纯追求把握大气及其与城市边界层相互作用特征向把握这一特征对城市人群及城市经济社会发展影响并重的方向转变，从观测业务的自我包揽一条龙形式向更加开放各

种社会资源兼收并蓄的数据获取方式转变。

3 超大城市(城市群)气象综合观测网设计

鉴于城市结构的复杂性和灾害的多样性,针对超大城市(城市群)的灾害相关观测系统应该既是严谨的专业化系统,又是开放的系统,可以有多种模块化观测和层面观测的加入。因此,超大城市(城市群)观测网的设计思路应该分基本层面的观测和多拓展层面的观测。

3.1 基本层面的观测

基本层面的观测包括所有的超大城市(城市群)气象观测体系,同时为了发挥超大城市(城市群)观测系统的最大潜力,必须仔细考虑观测所需的设备和整个观测系统,包括设备类型、位置和技术参数等。另外,不同观测设备的相互配合相比单一设备的观测可以发挥更大的作用。因此需要合理安排观测设备的类型、数量以及安放位置。同时所有观测系统的元数据(描述数据的数据)也非常重要,尤其对于设备升级和观测环境改变等情况。超大城市(城市群)观测网络设计时首先要对观测目标和观测目的有一个清晰的理解,因为这对于研究和业务中如何使用这些观测数据十分重要,所以需要有一个方法去客观评价观测系统设计的合理性。系统设计应该包含三个方面:应用、观测和模拟。在现代城市中最重要观测目标是大气化学和高影响天气。按照这个目标,最重要的变量包括:地表通量、大气热动力特征、全相态水成物、空气质量参数(气溶胶光学和微物理属性)。对于城市复杂的下垫面条件,对这些变量的观测需要获得其三维分布信息。垂直尺度从地面到低对流层,时间分辨率达到小时级甚至分钟级。

在观测网络的设计时还应利用已有的观测或模式结果充分考虑超大城市(城市群)的当前天气和气候统计特征,进而明确对于超大城市(城市群)重要的上游区域和敏感点。根据这些信息确定观测网络的疏密程度和覆盖范围以及不同设备之间的搭配方式。通过影响研究或观测系统模拟试验(OSSEs)分析不同设计方案(密度、覆盖范围、设备类型)对预报的提升作用。结合几类有代表性的超大城市(城市群)高影响天气事件,如台风和暴雨,确定所关心预报对象的预报敏感区,通过一定数量的数值试验,从模拟观测和实际观测两条途径来分析敏感目标区加强观测对高影响天气预报的可能影响。适应性观测结果可能因季节、地域、天气系统时空尺度以及数值预报系统的差异而不同。评估不同适应性观测方法对城市高影响天气数值预报的适用范围,为建设超大城市(城市

群)交互式观测预报系统提供合理的可行性分析。

观测网络的设计需要考虑土壤和地表的原位传感器和遥感系统的配合。地面网络应达到一定密度以满足一些气象参数的网格化需求,如温度和降水。同时也需要在一些点增加土壤湿度、地表通量和辐射的测量,目的是获得气溶胶和城市大气物理因子的相互影响。针对超大城市(城市群)中不同服务目的,应考虑不同环境下的观测,如温度的观测应有严格按照标准的观测(百叶箱),也应有树荫下、建筑遮挡处、完全暴露在不同下垫面上的观测等。交通安全在超大城市(城市群)气象保障中具有非常重要的作用,对不同路面(柏油、水泥、土路和砂石路等)摩擦系数的观测是保证交通安全的必要手段。对于降水的观测,除了常规气象站观测外,还应针对城市安全运行需求在不同代表性的区域放置测雨装置,甚至在关键节点(排涝泵、高架下匝道、地下通道等低洼处)放置积水深度观测设备。对于风的观测,一方面要获得不同高度的风,手段包括风廓线仪的遥感和超大城市(城市群)中不同高度建筑物顶部的测风,另一方面要关注街区尺度的风的变化,这是因为城市建筑林立,空气流动会形成“狭管效应”,在建筑之间有可能存在急流、强风等影响城市安全现象。对于城市街区尺度的观测设计,应在城市的建筑之间以及建筑顶部布置温湿观测设备,同时考虑盛行风向的影响应建设顺风成线观测阵列。同时在沿海的大城市更应该关注台风对城市的影响观测,涉及的观测内容主要包括风和降水等参数。

由于城市环境下复杂的小尺度特征(建筑物、建筑稠密度和形状、植被类型),足迹的测量与气象条件密切相关。不同变量的足迹也是不同的,考虑能量闭合时需要明确这些足迹是否重叠以及如何重叠。图2给出了传感器观测辐射源和湍流通量源影响足迹的概念示意图。利用涡度相关仪和辐射观测设备测量人为

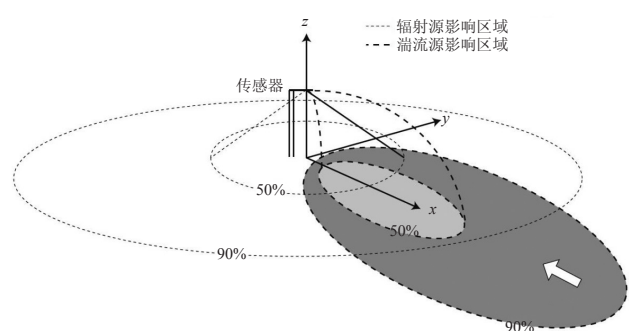


图2 传感器观测辐射源和湍流通量源影响足迹的概念示意图
Fig. 2 Conceptual map of sensor measurement on the impact footprint of the radiation source and turbulent flux source

热通量，同时考虑模式验证和改进的需求做通量升尺度测量，进行城市冠层参数化测试，利用卫星和地面观测数据获取地面温度场信息。

近年来，很多主被动的遥感技术已经在城市观测中得到了应用。像微波辐射计（MWRs）和傅里叶传输红外光谱仪（FTIR）这些被动遥感设备可以获得温湿廓线，但这些技术的最大缺陷是对初值的依赖而造成结果的不唯一性。另外由于遥感反演的独立信息受到辐射传输方程核函数宽度的限制，微波辐射计在大气边界层范围内只能获得4层水汽，而傅里叶传输红外光谱仪仅能有6~8层水汽反演结果^[19]。这种技术无法获得城市边界层的细微结构。另一种被动遥感技术全球定位系统（GPS）接收信号中的相位延迟和弯曲角数据中也包含了水汽信息，更多的接收器可以保证天顶总延迟（ZTD）或大气可降水量（IWV）以及倾斜延迟（STDs）的测量精度，其中倾斜延迟包含更丰富的低层水汽场信息，使用层析技术也可以获得三维水汽场，也可以直接同化在数值预报中，但倾斜延迟信息的同化效果还需进一步研究。在GPS建站的时候，应考虑周围的净空情况和电磁环境，以确保不受高楼遮挡。在城市中心，一般选择在楼顶，而楼层的高度会有限制。楼顶的GPS基座在大楼建设时就会考虑，会将基座和大楼整体浇筑在一起，如果是在已有的楼顶建设，也要构筑一个2m左右高度的基座，和楼顶浇筑在一起，以确保稳定性。

光学和微波主动遥感技术可以达到对城市边界层细观测的目的。激光雷达具有很高的时空分辨率，多普勒激光雷达能够获得大气动力变量，拉曼雷达和差分吸收雷达可以获得温湿廓线信息和部分大气痕量气体的信息，微脉冲激光雷达还能够获得城市气溶胶的光学属性，结合最新的扫描动力系统可以获得这些参数的三维分布，同时时间分辨率可达到小时级甚至分钟级。其反演技术可以获得更高精度的结果。

微波波段的雷达可以获得云和降雨的微物理信息，在定量降水估计（QPE）和预报（QPF）中发挥了重要的作用，而双偏振雷达能够获得包括云或降水滴谱分布在内的更多信息。在极端天气预警和降水机制研究中由于其高精度和高时空分辨率，能够发挥更大作用。常规雷达对大中尺度天气系统（例如3km以上的飑线）的观测表现很好，但它的时空分辨率有限，另外对低空的观测能力也不足，而这些要素正是超大城市（城市群）观测的最大需求。小型雷达组网可以弥补这个缺陷，X波段和C波段组网观测可以获得高时空分辨率的降水信息，配合激光雷达观测可以对

超大城市（城市群）高影响的降水和大风天气起到监测和预警作用。与传统雷达相比，这种观测十分有利于小尺度极端天气的探测，可以提供更精确的定量降水估计和短期定量降水预报。在雷达网的设计中应考虑多用户以及多应用需要，如降水预报、数值同化、大型活动服务及灾害天气临近预报。因此与该雷达网相配合的观测还应包括闪电定位测量和卫星以及布点观测。风廓线仪可以获得对流层内高时空分辨率的风和反射率廓线，但数据质量受降水的影响较大。多种雷达相互配合在超大城市（城市群）观测中能够发挥更大作用。目前多家天气预报中心（如德国气象局和瑞士气象局）已经在业务中使用了垂直指向的雷达系统。

不同天气条件下需要不同的大气垂直信息。对于已有的或邻近的降雨事件，常规雷达发挥了重要作用，但对正在发展的天气系统，能够获取高时空分辨率风、温、湿廓线和大气稳定度等热动力信息的激光雷达更有效。这两种设备的相互补充可以获得更多的信息。因此首先要确保观测、分析、模拟和应用之间相互匹配。

在超大城市（城市群）中还应考虑建立几个测试基地和对应不同目标的大气环境监测站，包括背景站、城市尺度站和街区尺度站。为保障地区大气污染、重污染天气预警预报和精细化预报的正常开展，以及中小尺度监测、临近预报、灾害预警分析、发布、检验和模式预报等提供重要支撑。采用多种手段测量城市边界层高度，如激光雷达、云高仪、声雷达和风廓线仪，测试不同遥感手段（光学和微波）的特性和配合观测效果。建立一个激光雷达网并在几个关键位置增加扫描功能，能够获得气溶胶光学属性以及温湿分布。由于初始条件对于模式预报的结果具有重要影响，因此观测的三维气象参数对于提高初始场精度很关键。进行气溶胶吸湿性和不同尺度粒子吸湿增长因子的测量，这在霾天气预报中非常重要。多种地面气溶胶测量设备应和常规观测协同观测。在塔上分层次安装辐射测量设备获得气溶胶和其他城市大气因子对辐射的影响。在超大城市（城市群）的敏感地区应建立超级站，站内包含地面观测和遥感的协同观测，另外要有移动观测，以满足突发事件需求，如危险品泄露、火灾和化工厂爆炸等。在超大城市（城市群）中尺度观测网框架中，还要考虑超大城市（城市群）对气候观测的影响以及历史气候数据在超大城市（城市群）气候服务中的应用问题。鉴于人类对气候系统认识的深化和对气候变化问题强烈的关注，应参

照全球气候观测系统（GCOS），采取地基观测与空基观测、直接测量与遥感相结合的方法探测整个气候系统。表5列出以上基本观测所涉及的仪器设备的一些功能参数。

表5 基本观测仪器设备的功能参数
Table 5 The functional parameters of the instruments for basic measurements

仪器名称	空间范围	空间分辨率	时间分辨率	观测内容
微波辐射计（MWRs）	地面上10km 大气剖面	0~500m, 50m 500m~2km, 100m 2~10km, 250m	可编程，一般为 30~300s	温度、RH、水汽、液态水
傅里叶传输红外光谱仪（FTIR）	对流层	1km	30s	温度廓线、湿度廓线、CO ₂ , CH ₄
GPS水汽仪	整层大气	与建网密度有关	数据更新率20Hz	水汽总量水汽廓线
多普勒测风激光雷达	3.5km 6km 10km	3.5km（空间分辨率：积分时间为1s时50m） 6km（空间分辨率：积分时间为1s时50m） 10km（空间分辨率：积分时间为1s时150m）	0.5~10s（默认积分时间为1s）	边界层三维风场测量 自动三维气溶胶/云识别
气溶胶拉曼雷达	0.4~18km（信号修正范围）； 0.4~20km（反向散射/消光系数）	最小7.5m（原始信号）	最小12s	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 光学厚度 ◆ 消光/后散射比率 ◆ 水汽量 ◆ 大气分子 ◆ 气溶胶类型（灰尘、烟、城市污染物、军事污染等） ◆ 气溶胶微物理特性（体积、表面浓度、反射系数等） ◆ 气溶胶反照率
臭氧监测雷达——差分吸收激光雷达	40km（信号修正范围）；0.4~12km（反向散射/消光系数）	<90 m（高2km）；<300m（高5km）；<500m（高12km）	最小12s	测量大气臭氧
气溶胶微脉冲激光雷达	地面上20km	30m	30s	气溶胶消光系数、边界层高度、云底高度
C波段天气雷达	>80km 3~4km 垂直廓线	距离分辨率 精度 <150m（200km范围） 50m 测高分辨率 精度 21km范围 分辨率 100m 200m（<100km） 300m（100~200km）	60s	监测/跟踪/预警强雷雨、冰雹、下击暴流、晴空风切变等中小尺度天气系统并充分考虑了航空气象保障的需求
X波段天气雷达	监测范围：150km（强度）； 定量探测：75km（强度、速度、谱宽、偏振参数）； 方位：0°~360°，仰角：-2°~90°； 测高范围：0~20km； 观测模式：分组网同步扫描与非组网扫描两大类。在每一类扫描中包括体扫，扇扫，PPI，RHI	75m	60s	在100km范围内能较准确地估测降水强度分布，根据回波信息能准实时地对各类灾害性天气进行自识别、跟踪，对冰雹、龙卷、强风切变、下击暴流等恶劣天气，能提供多种监测、预警产品。应用双线偏振技术能获取ZDR、ΦDP、KDP、ρHV、LDR等物理量，通过分析可识别各种降水粒子的形状、相态、大小、类别等特性。
闪电定位仪	360km, 360°	/	1s	内部云，云对云，云对地
边界层风廓线仪	3~5km	60m	3波束指向：指向 分钟5波束指向：指向分钟	不同垂直高度的风要素等
云高仪	30m~15km	15m	5s... 60 min（可编程）	<ul style="list-style-type: none"> - 云高（前置：三层） - 穿透深度 - 垂直能见度 - 行星边界层高度

3.2 多拓展层面的观测

多拓展层面的观测在超大城市（城市群）气象观测体系中更多侧重城市参数观测系统和高影响要素观测系统。超大城市（城市群）综合气象观测网所涉及的影响预报和风险预警的一个关键要素是暴露度数

据。暴露度指的是领域内可能发生危险事件时可能会受到影响的对象。如果人口和经济资源没有处于（暴露）潜在危险的范围内，就不存在灾害风险。暴露是决定风险的必要因素，但不是充分因素。暴露是与时间（ t ）和空间（ x ）相关的。影响预报和风险预警的

一个关键要素是脆弱性，它是指暴露的敏感性元素，比如人类，他们的生命和财产遭受不利影响时影响的风险。脆弱性与素质、敏感、脆弱、弱点、不足或缺乏能力等易于遭受不利影响的因素有关。脆弱性是随情况而变的，与危害交互产生的风险。因此脆弱性也可能依赖于时间和空间。脆弱性评估可以提供理想的基础设施脆弱性数据来源。风险数据是根据暴露风险和脆弱性对人类，生命和资产造成的危害的概率和大小。风险的大小可以通过减少暴露度和脆弱性而降低。然而，气象学家通常不会了解脆弱性、暴露度和突发灾害管理。因此，必须有政府、国际组织、科研机构与当地社区的合作和支持才能做出有效的风险评估，提高监测、预警和应对灾害的能力。需要与城市安全有直接责任的组织建立关键合作伙伴关系。他们可以帮助评估暴露度、潜在影响和应急措施。风险预警的标准是基于特定天气条件、风险评估、地理信息和社会经济数据等多种因素制订的，包括风险信息、暴露度和脆弱性信息，同时也需要一种手段来监控和应对不断变化的情况，以确保信息的更新。同时观测方案可能也需要不断调整，以便把更新的数据应用到预测系统中。

应该看到，随着气象服务社会化进展，仅靠气象部门的数据很难满足各行各业及公众对气象服务的需求。在大数据时代，遍布城市的工业设备、汽车、电表上有着无数的数码传感器，随时测量和传递着有关位置、温度、湿度乃至空气中化学物质的变化。这些信息都可以用于超大城市（城市群）气象观测和服务。气象数据要和行业数据、地理信息数据结合起来才更能发挥作用。例如，预报降雨对大坝的影响，就必须了解当地地形、周边设施、上下游情况等。如今，简单的晴雨气温预报早已无法满足社会的需要。针对不同领域、不同行业、不同群体，气象部门要制作相应的气象产品，例如提供给政府的决策气象服务，水利、电力、交通、农业等部门对气象也各有需求，各类企业对气象信息的需求也不一样，有的关注降水，有的关注气温，有的关注灾害，有的关注风速风向，而且在不同时间、不同地域，各行各业对气象的需求也不一样。气象产品越来越庞杂，内容越来越丰富，也构成了气象大数据中的一部分。针对能源方面，可以通过分析电力负荷历史，加上气象数据进行用电量估算；在农业领域，可以通过某一地的农耕历史加上气候信息就可以进行农作物结构调整指导；对于交通运输，航班准点率历史加上机场历史天气特征，就可以得到航班延误预测；结合公共卫生，通过

门诊量和药品销量加上气象历史就可以推测发病率趋势。一般公众对天气预报的需求也不限于是否下雨、温度如何升降了，他们渴望更精细、更准确、更长时效的预报，甚至需要气象部门直接指导他们的生活。需要突破数据不能充分共享以及共享渠道阻塞成为大数据时代下不可忽视的难题。事实上，气象信息、高精度的地理信息是受到法律保护的具有较高机密级别的信息。除此之外，各行各业都握有大量的行业数据，但这些数据往往局限在部门内部，很难流通。在实现气象大数据的过程中，“数据壁垒”是一个实实在在的障碍。气象观测数据在进行融合处理后会进入信息数据库，使用者可以根据自身的安全等级获得相应安全等级的数据，进行延伸使用。如何令有关管理部门和责任人确信这些数据是安全的，是打通数据孤岛的必要科学性问题。需要建立双方及多方的信息基础环境进行数据融合，对各个行业的数据都需要融合深度分析。真正做到数据共享，才能更大地实现气象大数据的价值，从而更大程度减轻灾害损失，为社会创造更多的财富。

3.3 超大城市（城市群）观测网服务应用

城市是人口、经济要素和社会活动高度密集的载体。大气与城市人群、城市生态、城市经济的相互作用必然会影响到城市的经济效益和社会发展的。为促进气象信息服务市场发展，满足日益增长的社会需求，在对现行气象资料共享管理政策、气象资料提供使用情况梳理的基础上，需要制订超大城市（城市群）气象资料和产品开放共享政策。需要解决的问题包括在资料开放是否应征求军队和安全部门意见、是否应分批逐步开放、涉外开放策略、用户分类管理、对气象服务业务影响及资料服务能力建设等方面。通过制订超大城市（城市群）基本气象资料和产品面向社会开放目录和使用政策，完善基本气象资料和产品开放共享平台，促进气象信息资源共享和高效应用。超大城市（城市群）气象综合观测网应考虑建设面向全社会的气象服务大数据平台，提高全社会气象服务信息利用能力和水平。建立气象观测资料获取、存储、使用监管制度，维护气象数据安全。制订气象信息资源产权保护和激励政策，加强气象信息资源产权保护。

为了充分发挥超大城市（城市群）综合观测的作用和效益，应积极引导气象信息服务和气象科普等气象服务消费，形成不同层面、不同群体的城市气象服务市场消费主体。利用市场机制，改进气象服务供给方式。推行政府购买、附加商业价值开发等气象服务供给方式，实现气象服务供给主体和供给方式多

元化。推动将公共气象服务纳入各级政府向社会力量购买公共服务的指导性目录,制订政府购买公共气象服务管理办法,开展政府购买公共气象服务。制订鼓励和支持社会资本参与公共气象服务提供以及公共气象服务设施建设和运营管理的相关政策,探索建立公共气象服务设施社会化运营管理机制。探索超大城市(城市群)气象服务产业示范园或示范基地建设,鼓励和引导各类市场主体参与气象服务产品市场和气象服务技术、资本、人才、信息、产权、版权等要素市场竞争。建立气象服务产业发展情况统计和信息发布制度。

以世界气象组织服务提供战略实施计划为指导框架,对接国际社会气象和水文部门(NMHS)的气象服务标准,建立以用户为导向,涵盖监测、预报、需求获取、产品研发、产品制作、服务提供、服务反馈、服务改进等服务环节的气象服务标准体系。通过建立符合ISO9000系列标准的质量管理体系(QMS)来驱动服务改进,促进气象服务企业更好地为用户提供国际化、高标准的天气、气候相关服务。加强公众气象服务、专业气象服务、气象工程服务等的标准体系建设,形成以标准引领市场、以标准管理市场的制度体系。

4 结论

超大城市(城市群)气象观测网的设计和应用是一个复杂而宏大的工程,应从科学的基础性、技术的可用性和服务的导向性等方面综合考虑,在设计之初应有比较全面系统的安排,同时在后续的应用过程中还应该根据新的情况和需求不断补充和完善。

本文从超大城市(城市群)观测的需求、布局的科学性、新设备的应用、大数据背景下的数据应用和服务等方面给出了超大城市(城市群)综合观测网的建设思路。为了全面了解超大城市复杂的下垫面及其对边界层和中小尺度天气系统的影响,提出了超大城市(城市群)气象观测网需要包括城市边界层观测系统、城市参数观测系统、大气环境及高影响要素观测系统和灾害天气观测系统等四大系统。在具体观测内容上,不仅要考虑到基本层面的观测,即常规地气系统信息的观测,还要顾及以城市参数观测系统和高影响要素观测系统为代表的多拓展层面的观测。尤其应

该注意这些观测数据的服务应用,以最大限度发挥出超大城市(城市群)综合观测的作用和效益。

按照中国今后的城市化进程,城市安全和智能化、个性化的气象服务保障越来越迫切地摆在眼前,建立一个以气象为核心的科学、全面、智能的综合观测网是满足城市发展和社会进步的有力支撑。

致谢:感谢上海市气象局在这项工作中的协助支持和大力帮助。审稿人的意见非常有助于提高这篇文章的质量,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 李善同. 十二五时期至2030年我国经济增长前景展望. 经济研究参考, 2010 (43): 2-26.
- [2] Hudjes R W A, Kabat P, Running S W, et al. Biospheric aspects of the hydrological cycle - preface. J Hydrology, 1998, 212: 1-21.
- [3] Moore B. Sustaining Earth's life support system- the challenge for the next decade and beyond. IGBP Newsletter 41, May, 2000.
- [4] 崔春光, 林春泽, 王晓芳, 等. 2000年以来我国长江中游区域暴雨研究进展. 气象科技进展, 2014, 4(2): 6-15.
- [5] Goody R M, Anderson J, Karl T, et al. Why monitor the climate? Bull Amer Meteor Soc, 2002, 83: 873-878.
- [6] Trenberth K E, Karl T R, Spence T W. The need for a systems approach to climate observations. Bull Amer Meteor Soc, 2002, 83: 1593-1602.
- [7] 徐祥德, 汤绪, 等. 城市化环境气象学引论. 北京: 气象出版社, 2002.
- [8] Wang G, Wang X, Miao S, et al. Research and application on the technology system of multi-scale assessment of the impact on the atmospheric environment by urban planning. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2005, 52:173-184.
- [9] WMO. 气象仪器和观测方法指南(第六版). 2005.
- [10] WMO. Guide to Climatological Practices. Second edition, WMO-No. 100, Geneva, 1983.
- [11] WMO. Technical Regulations. Volume I, WMO-No. 49, Geneva, 1988.
- [12] WMO. Manual on Codes. WMO-No. 306, Geneva, 1995.
- [13] WMO. Manual on the Global Observing System. WMO-No. 544, Geneva, 2003.
- [14] WMO. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites (T.R. Oke). Instruments and Observing Methods Report No. 81, WMO/TD-No. 1250, Geneva, 2006.
- [15] Oke T R. Methods in urban climatology //Applied Climatology (Kirchofer W, Ohmura A, Wanner W, eds). Zurcher Geographische Schriften, 1984.
- [16] Grimmond C S B, Oke T R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. J Appl Meteor, 1999, 38(9): 1262-1292.
- [17] Rotach M W. On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. Atmos Environ, 1999, 33: 4001-4008.
- [18] WMO. 第十七次大会文件, 文件9.8, 议题9. 未来的挑战与机遇: WMO城市活动综合方法, 2015.
- [19] WMO. GAW Report No. 208, WMO GURME Workshop on Urban Meteorological Observation Design, 2013.