

基于用户需求的城市气象研究：进展与展望

苗世光¹ 王迎春²

(1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2 北京市气象局, 北京 100089)

摘要: 城市化是人类社会现代化发展过程中的必然趋势。城市化带来的土地利用/土地覆盖的变化、人为热排放、城市气溶胶和人为温室气体排放增加, 影响着天气、气候和环境; 另一方面, 天气、气候和环境亦影响城市的安全运行和居民的生产生活。简要回顾了城市气象观测和数值模拟研究两方面的主要进展, 分析了城市气象复杂多样的用户需求(例如防灾减灾、宜居城市建设等), 剖析了目前城市气象监测与预报能力的不足。在此基础上, 以不断提高气象科技为经济社会发展 and 人民安全福祉的服务能力作为未来城市气象发展的主线, 给出了城市气象未来发展方向的展望, 主要包括城市气象观测、城市气象基础数据集、城市陆面与边界层过程、城市精细预报、气候与气候变化、城市空气质量与污染扩散、人体健康七个领域的基础研究和应用研究发展趋势。最后, 分析了目前城市气象发展面临的新挑战, 倡导建立城市气象观测与数值模拟以及城市气象研究与用户需求之间的良性互动。

关键词: 城市气象, 用户需求, 进展, 展望

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.001

Advances and Prospects of Urban Meteorology Research: Meeting Users' Needs

Miao Shiguang¹, Wang Yingchun²

(1 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 2 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089)

Abstract: Urbanization is an inevitable trend in the course of human civilization development. There are various ways for urbanization to impact on weather, climate, and the environment, including, land-use/land-cover change, anthropochory heat release, urban aerosols, anthropochory green-house gas emissions and so on. And vice versa, i.e., weather, climate, and the environment influence urban functions and residents' livelihood. In this paper, the advances in observation and numerical modeling of urban meteorology are briefly reviewed. Then the complexities of users' needs for the urban meteorology service are analyzed, outlining the shortages in observing and forecasting capacity. In order to meet end users' needs, the prospects of basic and the applied researches for urban meteorology are given. Finally, challenges in the way of urban meteorology researches are summarized. A closer coupling mechanism between observations and numerical modeling, and between the researches and end users' needs for the urban meteorology development is proposed.

Keywords: urban meteorology, users' needs, advances, prospect

1 引言

城市化是人类社会现代化发展过程中的必然趋势。从全球范围看, 一个国家城市化程度是其经济发达程度, 特别是工业化水平高低的一个重要标志, 发达国家的城市化程度已经普遍超过75%。截至2012年底, 我国城市化率已达到52.6%, 城镇人口突破七亿^[1]。我国城市面积的快速拓展, 特别是城市群发展之迅速, 在世界城市发展史上是罕见的, 其中尤以京

津冀、长江三角洲、珠江三角洲三大城市群的迅猛发展为代表。

城市化带来的土地利用/土地覆盖的变化、人为热排放、城市气溶胶和人为温室气体排放增加, 影响天气、气候和环境^[2-3]; 另一方面, 由于城市系统的脆弱性, 天气、气候和环境状况亦高度影响城市的安全运行和居民的生产生活^[4]。城市的可持续发展、防灾减灾、宜居城市建设和应对气候变化对城市气象服务的需求也越来越高, 城市化进程中出现的“超大城市”、“城市群”造成的天气、气候和大气环境效应研究, 是当前国际社会和科学界所共同关注的重大社会科学和自然科学的前沿课题之一^[5-7]。

本文将基于对城市气象用户需求的梳理, 剖析目

收稿日期: 2013年6月20日; 修回日期: 2013年9月10日
第一作者: 苗世光(1976—), Email: sgimiao@ium.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41175015); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906026)

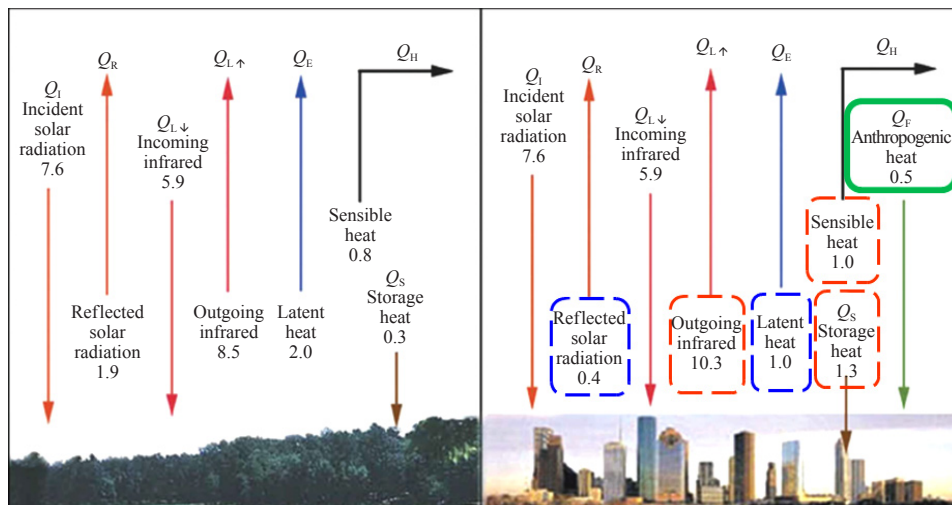
图1 城市多尺度非均匀下垫面带来巨大挑战^[8]

前城市气象监测与预报能力的不足。简要回顾城市气象研究的主要进展，以不断提高气象科技为经济社会发展和人民安全福祉的服务能力作为未来城市气象发展的主线，给出城市气象未来发展方向展望。

2 城市气象研究进展概述

城市中不透水的下垫面、建筑物、绿地等的多尺度非均匀分布（图1），改变了城市地表及其下风

向区域的动力、热力、辐射和水文过程，导致了复杂的地气相互作用（图2）。与自然下垫面相比，城市地表增加了对太阳短波辐射的吸收，地表潜热通量减小，再加上人为热排放的影响，使得城市地区温度明显高于乡村，因此向上长波辐射增大，同时地表感热通量和热存储增大。城市建筑环境作为一个热源、粗糙元、较差的储水能力和污染源，是天气—气候系统

图2 城市地表能量平衡与乡村地区的差别^[9]

的一个重要强迫项^[3]。表1给出了城市化对天气-气候的主要影响途径。下面将简要回顾近年来城市气象研究取得的主要进展。

2.1 城市气象观测研究

2.1.1 城市气象观测试验和城市气象观测网

近年来,针对城市气象和城市环境问题,美国、欧洲等地相继组织了一些综合观测试验和研究计划。Grimmond^[10]和王迎春等^[6]分别回顾了城市气象观测研究的进展。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、城市空气污染等内容。这些试验研究提升了城市作用对天气、气候影响机理以及对城市空气质量问题的认识水平。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,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(美国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。

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^[11-12]。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^[13]。另外,北京城市边界层观测试验(BUBLEX, 2004年)^[14],南京市城市边界层观测(2005、2006年)^[15],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”

围绕京津冀城市(群)局地环流与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和边界层结构进行观测。这些试验均是在特定环境条件下开展的短期观测试验,主要针对城市边界层结构、城市空气质量、城市化的天气/气候效应等开展研究,同时亦用于数值模式的发展与检验,并取得不同程度的进展。

Wood等^[16]介绍了长期运行的研究级城市气象观测网——芬兰赫尔辛基城市边界层观测网的仪器配置、初步结果及其局限性。Muller等^[17]总结了近年来与城市气象研究相关的中尺度、城市尺度和小尺度观测网,从数据收集、管理、显示、使用等方面分析了现状和存在的问题,指出今后应关注观测网特征存档、观测方法和指南的标准化,并提出了一个城市气象网元数据协议^[18],包括网络及子网、观测站、观测仪器、网络运行四个方面的内容。

2.1.2 新探测技术及应用

近年来,新探测技术的发展及应用为城市边界层观测提供了新途径。风廓线雷达和声雷达可观测水平风、混合层高度、垂直速度的垂直廓线,多普勒激光雷达可实现边界层三维风场观测,差分吸收激光雷达可实现边界层水汽廓线观测,地基微波辐射计可观测水汽、温度和云水的垂直廓线。另外,光导纤维温度测量等新技术和无人驾驶飞机(UAV)、要素自动采集器(HOBO)等新仪器平台的发展为更高水平及垂直空间分辨率三维大气观测提供了可能^[6]。

李炬等^[19]在北京CBD地区约1.5km²范围内建立了由32个温湿度固定监测站(HOBO)组成的热环境观测网,分析了不同季节、不同天气条件下CBD地区局地热环境精细空间分布特征及变化规律,并开展了温湿度流动观测,研究了流动观测技术在城市热环境监测中的适应性和可靠性(图3)。

基于空基遥感资料,可反演城市土地利用、城市热岛、气溶胶、降水和水文气象参数^[20],为城市气象研究提供新的思路。

表1 城市化对天气-气候的主要影响途径(修改自文献[3])

| | 城市土地利用/土地覆盖 | 城市气溶胶 | 人为温室气体排放 |
|------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 近地面气温与城市热岛 | 土地利用变化及人为热排放改变地表能量平衡特征(SEB) | 气溶胶直接效应 | 辐射增温及反馈 |
| 湍流场、扩散传输 | SEB, 城市形态, 机械湍流 | 气溶胶直接和间接效应及相关热动力过程, 扩散传输 | 辐射增温及反馈 |
| 云和降水 | SEB, 城市热岛引起的不稳定、环流及辐合区 | 气溶胶对云降水微物理的间接影响 | 辐射增温及反馈 |
| 地表水文 | 地表径流, 下渗和蒸腾的减少 | 气溶胶对云微物理和降水过程的间接影响 | 辐射增温及反馈 |
| 碳循环 | 耕地的减少 | 黑碳气溶胶 | 辐射增温及反馈, 二氧化碳通量 |
| 氮循环 | 燃烧、施肥、污水和径流 | 酸雨、硝酸盐 | 辐射增温及反馈, NO _x 排放 |

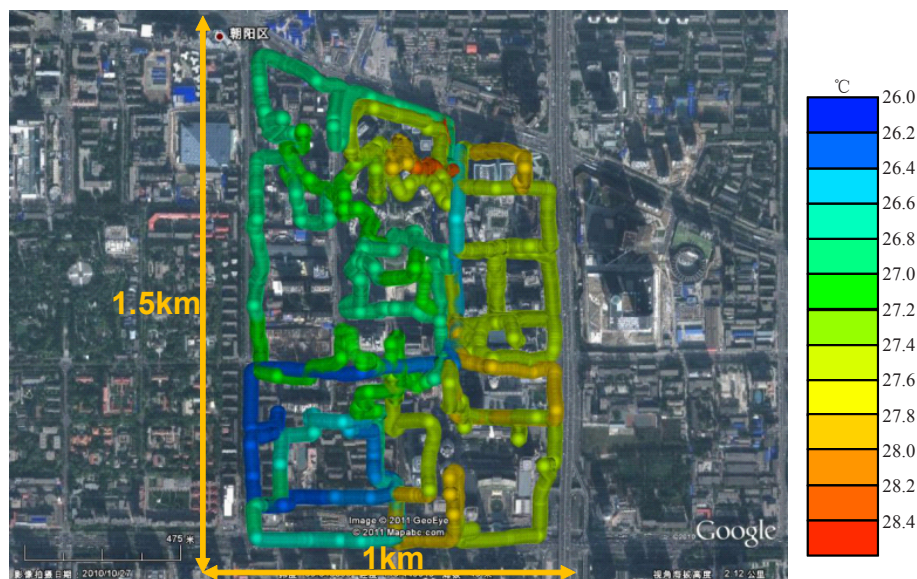


图3 北京市朝阳区CBD温度流动观测 (2011-08-22 21:05—22:22, 北京时)^[19]

2.2 城市气象数值模拟研究

2.2.1 城市陆面与边界层过程数值模拟研究

近年来, 水平非均匀下垫面条件下大气边界层的研究在国际上日益受到重视, 因为它直接关系到对实际地表湍流通量和尺度通量机理的认识、以及如何准确地估算实际地表地气之间物质和能量的交换及其参数化, 从而对陆面过程的研究以及区域和全球尺度模式的发展具有重要影响。由于非均匀地表动力、热力和水份分布的非均匀性, 使得其上的湍流运动比均匀下垫面情形要更加复杂, 无论观测试验还是数值模拟都很困难。尽管国际上已经开展了不少非均匀边界层观测试验、理论和数值模拟研究, 提出了一些新的概念和方法, 例如混合高度 (blending height) 概念, 依此可修正非均匀地面的通量估计中平流作用的影响^[21], 又如“马赛克”方法, 可用于改善次网格通量的估计。但是从目前来看, 就相对均匀边界层问题的研究而言, 非均匀边界层问题的研究比人们预想的还要复杂得多。无论是理论建模, 还是数值模拟和观测试验都遇到较大的困难。当前科学界对非均匀问题的研究和了解仍处于粗浅的阶段, 非均匀下垫面条件下关于大气边界层结构和湍流特性及与之密切相关的边界层物理和能量与物质输送交换特性及其变化规律的研究尚有待深入开展^[22-24]。

城市是最复杂的非均匀下垫面类型之一。目前对城市近地层结构和湍流特性, 形成了“城市冠层+粗糙子层+惯性子层+混合层”的结构认识^[25]。大量的观测研究表明, 城市冠层 (Urban Canopy Layer) 内

建筑物三维表面的能量平衡过程及由此诱发的对近地层大气的通量交换过程与平坦下垫面显著不同^[26], 如果能详细地描述出城市区域尺度数值模拟中城市冠层对上部大气的能量、动量和物质交换的影响, 大气数值模式的预报及诊断效果就能得到很好的改进。对于城市效应及人为活动影响大气运动的可分辨程度及处理方法不同, 小区尺度和微尺度的数值模拟中, 水平分辨率多为数米至十几米, 建筑物是尺度可分辨的。而在城市区域尺度的数值模拟中, 建筑物是尺度不可分辨的, 须采用次网格的参数化方案考虑建筑物对大气运动的影响, 才能合理地模拟城市边界层及气象环境、大气环境等的变化。随着城市规模的扩张, 城市下垫面建筑物覆盖率显著增加, 进行城市环境、城市边界层结构等的数值模拟研究工作必须合理地考虑城市建筑物三维结构对大气运动的影响。由于城市建筑物对空气的黏滞性和摩擦作用, 城市边界层内有其独特的风切变特征。强的风切变特征再加上地表显著的储热特征, 使城市边界层内的湍流得以充分发展成各种尺度的湍流涡旋。这种湍流交换或湍流混合构成了通过边界层向上或向下的质量、能量和热量的交换机制, 从而使一定范围的城市地表对自由大气具有明显的强迫作用。Roth^[25]的研究指出, 城市复杂非均匀下垫面影响边界层结构主要是通过以下两个方面, 其一为由于建筑物的存在对气流产生拖曳影响, 并使更多平均动能向湍流发展; 其二为建筑物对太阳短波辐射的阴影遮蔽影响, 对地气长波辐射的截限影响, 及由于建筑物地表使地气潜热交换减小。粗糙子层的湍流

特性具有不同于自然下垫面的特征，城市地气（动量和热量）交换过程由于下垫面的复杂结构而远没有被认识清楚。

传统的陆面模式对于城市效应的处理仅通过改变下垫面动力、热力特征参数来体现^[27]，而未能详细考虑特殊的城市下垫面几何特征对低层大气动力、热力结构和地表能量平衡的影响，导致城市陆面能量与水分平衡的模拟能力不足，成为影响城市气象数值模拟研究能力的关键因素。为了精细描述城市化的天气气候效应，2000年以来相继发展了多种复杂程度的城市冠层模式^[28-29]，主要包括：整体城市陆面模式^[27, 30]、单层城市冠层模式^[31-32]和多层城市冠层模式^[33-35]。Grimmond等组织的“国际城市地表能量平衡模式比较计划”研究表明^[36-37]：没有任何一个模式对城市地表能量平衡的所有分量都有好的模拟效果，模式中合理考虑蒸发过程至关重要。

2.2.2 数值模式的城市化

国内外已有许多学者将城市冠层模式引入到中尺度气象模式^[29]、气候模式^[38]以及大气扩散和空气质量模式^[39]中，开展了城市热岛、边界层结构、及其对降水、污染扩散影响等方面的研究工作。英国气象局^[40]和法国气象局^[31]已经或者正在其业务模式中测试城市冠层模式的性能。北京市气象局亦正在开展北京快速更新循环数值预报业务系统BJ-RUCv2.0耦合城市冠层

模式的效果测试，初步结果表明（图4）：耦合后可在一定程度上改善了近地层气象要素的预报效果，有效提高模式对城市边界层特征的模拟能力。

由于城市和非城市区域对气候变化的响应不同，并且城市范围不断扩大，因此，为了更好地研究城市化对全球气候的影响，需要在空间分辨率不断提高的全球气候模式（GCM）中加入对城市陆面过程的描述。目前国际上已经开展了相关研究，但还处于起步阶段。Oleson等^[41-42]在GCM中加入城市参数化方案，并指出简单的陆面模式无法反映城市地表能量平衡，进一步导致无法反映城市化的气候效应，因此建立了一个城市冠层模式，并对城市化的气候效应做了初步评估。Jin等^[43]亦指出，为了对城市天气和气候进行建模，必须在全球和区域气候模式中加入城市地表，并提出可以利用MODIS等卫星资料建立城市方案。McCarthy等^[44]在全球气候模式HadAM3中加入了MOSES（Met Office Surface Exchange Scheme）城市陆面方案^[40]，并对由CO₂引起全球变化影响和城市化影响的贡献比例进行了估计，研究表明：城市化引起的土地利用改变和人为热对气温升幅的贡献在某些地区与CO₂贡献相当，但该结论还有较大不确定性。

2.2.3 空气质量与应急模拟

目前的空气质量预报业务系统大多采用化学传输模式与气象模式离线耦合方式^[45-46]。即，用气象模

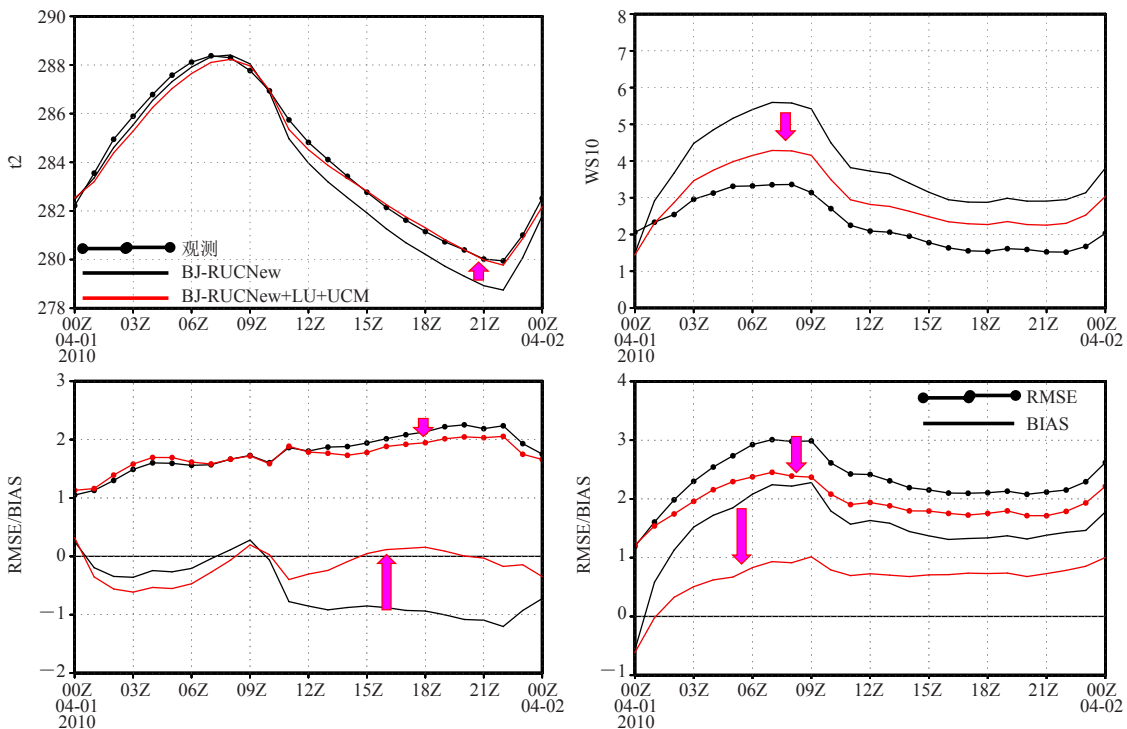


图4 BJ-RUCv2.0中采用新土地利用分类资料和城市冠层模式效果的对比测试
(基于2010年04月30天预报结果的统计分析)

式每30min或1h的输出场驱动化学传输模式，没有从化学传输模式到气象模式的反馈过程。这种化学与气象的单向耦合忽略了气溶胶对辐射收支、云微物理和降水等方面的反馈，亦不能体现气象场的连续时间变化。WRF/Chem模式^[47]为双向耦合研究提供了有效模拟手段。Herwehe等^[48]对单双向耦合的对比研究表明：气象模式在陆面、边界层、云物理等方面的变化均对空气质量预报有重要影响。

在城市突发安全事件中（有毒物质泄漏、火灾等），城市环境应急管理需求快速、可靠的气象场和有害物质影响范围信息。计算流体力学（CFD）模式因为计算耗时较多而限制了其在快速响应方面的应用。“超大城市群复杂下垫面边界层过程及精细气象预报关键技术研究”项目组研发了能够在较短时间内（~2min）模拟千米尺度、考虑建筑物动力影响的快速风场诊断模式和包含不同气体处理、可燃性和剂量模拟的高效城市应急扩散模式，基于精细数值预报系统和城市地理信息系统建立了城市环境气象应急响应系统^①。该系统已在北京市气候中心业务试运行。

2.2.4 耦合模拟系统

近年来，利用三维建筑数据库、机载激光雷达、数字高程、卫星等资料建立了高分辨城市形态数据集（例如美国的NUDAPT平台^[49]），并已应用到城市边界层及降水模拟中，取得了较好的效果^[50-53]。

Salamanca等^[51]将建筑物能量模式耦合到WRF模式中，研究了精细城市形态资料 and 不同复杂程度的城市冠层模式对近地层气象要素模拟效果的影响，以及空调系统对气温和制冷能源消耗的影响。Miao等^[52]基于WRF/Noah/SLUCM耦合模拟系统，采用高分辨率城市形态资料，通过对北京城区一次局地暴雨过程的数值模拟及敏感性试验，研究了北京城市化对雷暴生成、发展和移动的影响，以及对降水面积、位置和强度的影响。研究表明：城市冠层精细模拟对城市地区降水模拟的改进较为明显；与对照试验相比，无城市时，降水明显减少；城市使雷暴单体合并，城市化初期（20世纪80年代）使雷暴合并后减弱、降水减少，城市化后期（21世纪）使对流增强，进一步城市化易使降水出现分叉结构；城市热力影响比动力影响更重要；热力影响中，感热和潜热同等重要。

城市街区尺度气象模式^[54-55]或计算流体力学模式，通过与中尺度气象模式相耦合，可以更好地模拟建筑物可分辨尺度的气象环境场特征，为城市气象精

细模拟、气象服务、应急管理等方面提供了一个有效的解决途径^[56-57]。

3 城市气象用户需求分析——防灾减灾和宜居城市建设

城市化给人们生产生活带来便利的同时，也带来了巨大的环境压力和较大的灾害风险。城市面临着高温热浪、楼宇风、城市洪涝、空气污染、水污染、公共健康及社会安全（恐怖活动、污染泄露）等各方面的威胁，沿海城市还面临着海平面上升、风暴潮影响等诸多问题。城市人口、基础设施和生产要素密集，使得城市灾害承载力不断下降，脆弱性不断增加。极端天气事件（如“城市洪涝”）和环境灾害事件（如“城市雾霾”）频发，对城市运行的危机管理和风险管理不断提出挑战。城市管理者为降低城市脆弱性、提高城市应对风险的能力，不断提出新的城市气象服务需求。更好地认识、科学地适应和应对气象及环境问题已成为城市可持续发展面临的迫切任务。

表2列出了目前亟待解决的主要城市气象用户需求，可归纳为以下几个方面。

（1）按照用户需求定制的观测和模式系统：目前，非常缺乏针对城市气象用户需求而开展的观测和数值模拟工作，这将极大地限制城市气象的应用和效益的发挥。

（2）数据共享：很多城市气象用户有自己的观测系统，形成了独立的资料库。然而，各用户之间有共性的数据需求。如果管理部门把各用户的资料规范化、收集、共享，则可以最大限度地发挥各观测系统的作用，避免重复建设和资料使用的不规范。

（3）短期预报更长的预报时效、精度和可信度问题：精准的预报可以有效减少气象灾害造成的损失。因此，延长短期预报的时效、提高精度和可信度，对于减少“空报”带来的人财物损失和“漏报”带来的灾害损失至关重要。

（4）长期预报更好地预报极端事件和趋势：传统的长期预报中没有包含城市的影响。需发展可考虑城市影响的预报方法和降尺度技术，以满足用户的需求。

（5）环境干预措施影响评估：目前，亟需在不同尺度上开展城市绿地、垂直/空中花园、白色墙壁/屋顶、透水路面等环境干预措施影响的定量评估。然而，基于现有数值模拟方法尚不能给出明确的结论。

（6）城市气象模式与其他模式的耦合：发展陆

① “超大城市群复杂下垫面边界层过程及精细气象预报关键技术研究”项目组，基于精细数值预报系统的城市环境气象应急响应系统测试报告，2013年4月25日

表2 亟待解决的用户需求^[6]

| 用户 | 亟待解决的需求 |
|------|---|
| 城市积涝 | 降雨/融雪产生的地表径流量，城市透水地表储水能力，水汽输送通道 |
| 应急响应 | 街道尺度雨洪及其时间变化趋势信息，城市冠层及以上高时空分辨率风湿数据 |
| 交通管理 | 街渠风速，降水及相态、路面状况，地面观测代表性，高空间分辨率预报（如道路尺度），道路表面温度、能见度 |
| 电力 | 评价能源需求及电网负荷所需的气温，新能源评价所需风和辐射数据 |
| 健康 | 与健康应用尺度匹配的太阳辐射、风、湿度、气温，热岛空间分布，极端降水、极端高温/低温预报，街道尺度空气质量 |
| 节能 | 供暖节能所需局地尺度温度、湿度、风速、辐射精细预报 |
| 保险 | 精确及时的极端事件预报，风速及登陆后的衰减情况 |
| 商业 | 农业所需辐射、降水、空气质量，街渠风速 |
| 城市规划 | 植被作用，城市空气质量，绿色屋顶、植树等城市热岛减缓措施评价，城市和区域的气候变化减缓与适应战略 |
| 安全 | 高时空分辨率资料（城市边界层结构、混合层高度、雷达-雨量计定量降水估计等），城市地理信息资料 |

地—海洋—城市耦合模式满足海岸城市的用户需求，发展大气化学—气象耦合模式（包含污染物对气象场的影响）满足气象和大气化学双方用户的需求，等等。

4 基于用户需求的城市气象研究展望

随着科学技术的飞速发展，城市气象的发展正面临如下方面的新挑战。

（1）城市气象观测新技术：如何利用PDA网络（包括智能手机）、机动车等新技术，实现全边界层的观测。

（2）非常规的信息传播技术：通过网络（社交网站、视频网站等）、短信等多种方式，实现重要信息报告/资料获取。

（3）动态城市：城市GIS资料的定期更新。

（4）“城市”信号与气候：缺乏长期的城市气候记录，城市影响与温室气体影响的区分，GCM的“城市化”，GCM结果的降尺度。

（5）数值模式系统的“城市化”：天气/气候/空气质量模式的城市化、城市地区模拟结果的检验方法。

（6）城市气象—决策支持综合体系构建：将城市气象科学研究与业务应用紧密结合，形成有机整体，主要包括以下各方面：

① 城市气象观测与数值模拟研究计划、观测与数值模拟的互动；

② 城市气象专家与用户之间的有效沟通/交流机制；

③ 城市气象试验基地（Testbed）；

④ 研究成果业务应用框架（及时将研究成果落地）。

面对上述挑战，城市气象服务一方面需要基础研究为其提供科技支撑，另一方面需要应用研究为其提供工程技术支持。在上述城市气象用户需求分析、研究进展评述和面临挑战剖析的基础上，给出了基于用户需求的城市气象研究展望（表3），包括基础研究和应用研究两个方面。

城市地表变化是城市化最显著的表现之一。城市

化使自然地表变为人工地表，通过下垫面与大气之间进行的动量和能量交换，改变了低层大气物理过程。城市生产生活的集中排放，改变了城市地区大气成分、增加大气浑浊度、消减太阳辐射、降低能见度，在加剧大气污染的同时为云、雾和降水的形成提供了丰富的凝结核。城市化从热力、动力和化学成分等多个方面影响了城市天气气候和环境。因此，研究城市气象和环境问题重点需要以下几个方面的科技支撑。

（1）城市气象观测研究

城市边界层是最复杂的非均匀大气边界层之一，开展边界层观测是认识这一复杂大气边界层的有效途径。针对城市陆面与边界层过程多尺度非均匀性的特点，发展新探测技术与设备，研究城市气象观测方法，开展城市气象综合观测试验，建立观测网。

为了满足现代化城市运行管理的基本目标，气象要素要成为城市运行态势监控与危机应对实时信息采集系统之组成部分，必须在传统气象观测基础之上，通过城市气象观测系统工程建设，建立起以用户需求为导向、预警与预报相结合、定点与机动互补的城市气象观测体系。

（2）城市气象基础数据集的建立

城市气象基础数据集建设是开展城市气象研究的重要基础性工作。开展基于遥感资料的城市气象基础数据反演方法研究，建立人为热排放清单（包括感热和潜热两部分）。同时，研究适用于业务系统的城市气象基础数据获取方法，实现数据的共享和有效管理。

（3）城市陆面与边界层过程研究

城市陆面与边界层过程研究是开展城市气象研究与应用的基础。针对我国城市及其地理、气候特点，研究城市非均匀地表非线性相互作用机理，发展能够合理反映城市化影响的城市陆面模式和边界层参数化方案，并实现与天气、气候、空气质量及污染扩散模式的耦合。在精细模拟方面，发展建筑物能量模式，

表3 基于用户需求的城市气象研究展望

| 研究领域 | 基础研究 | 应用研究 |
|-------------|--|--|
| 城市气象观测 | 新探测技术与设备; 城市气象观测方法; 城市气象综合观测试验与观测网 | 针对城市气象服务需求(用户需求)的观测网设计** |
| 城市气象基础数据集 | 土地利用/土地覆盖类型; 建筑形态学资料; 人为热排放清单; 城市发展模型 | 适用于业务系统的城市气象基础数据获取方法** |
| 城市陆面与边界层过程 | 城市非均匀地表非线性相互作用机理; 城市陆面模式及陆面资料同化系统; 分布式城市水文模式; 城市边界层特征及参数化方案 | 交通气象预报系统; 城市沥涝模型* |
| 城市精细预报 | 短时、临近预报系统的“城市化”; 城市热岛效应及成因; 城市化及城市过程对降水的影响机理; 小尺度数值模式与模拟 | 灾害性天气短时、临近预报系统; 城市安全运行气象影响预报技术*; 城市气象灾害监测预警、风险区划与管理*; 城市供暖(制冷)气象节能技术*; 风能、太阳能精细预报技术* |
| 气候与气候变化 | 区域及全球气候模式的“城市化”; 城市化对气候及气候变化的影响机理 | 风能、太阳能资源评估*; 城市地区气候变化适应对策*; 气候适应及减缓措施效果评估*; 城市环境气候图、城市规划建设气候可行性论证技术方法与业务平台* |
| 城市空气质量与污染扩散 | 空气质量及污染扩散模式的“城市化”; 城市气溶胶对辐射、云雾物理及降水过程的影响机理; 城市(持续性)雾霾天气成因 | 城市化对大气环境的影响评价及调控技术*; 城市应急管理支撑技术* |
| 人体健康 | 城市气候特征对人体健康的影响机理; 城市空气污染对人体健康的影响机理 | 极端天气和大气污染人体健康预警系统** |

注: *应用于减灾; **应用于宜居

研究城市能源消耗与气象条件的反馈过程。发展分布式城市水文模式,与城市陆面模式耦合,建立城市沥涝模型。

(4) 气象—化学耦合模拟

除城市下垫面改变和人为热排放影响外,城市污染(气溶胶等)对辐射及降水的影响亦非常重要。需发展气象模式与大气化学模式在线、双向耦合技术,研究城市气溶胶对辐射、云雾物理及降水过程的影响机理。

(5) 城市气象决策支持系统

城市管理者需要基于风险管理要求建立相应的决策支持系统,极端天气和大气污染对各行各业和人民生活的影响评估是其重要组成部分。开展城市气象灾害发生发展演变规律研究,加强城市气象灾害监测预警、风险区划与管理;开展城市交通、管网等基础设施和运行系统的脆弱性、暴露度和承灾能力的评估;开发城市安全运行(供电、供暖、供水、交通等)和大气环境、公共健康等领域气象影响预报技术;开发智能化的专业气象服务产品的制作和发布技术;开展城市气候变化影响评估和城市应对气候变化措施研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2012年国民经济和社会发展统计公报. 北京: 国家统计局, 2013.
- [2] 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用. 中国科学D辑: 地球科学, 2005: 145-155.
- [3] Seto K C, Shepherd J M. Global urban land-use trends and climate impacts. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2009, 1(1): 89-95.
- [4] 谢璞, 李青春, 梁旭东. 大城市气象服务需求与关键技术. 气象科技进展, 2011, 1(1): 25-29, 34.
- [5] 中国气象学会城市气象学委员会. 城市气象科学技术发展的思考. 中国气象报, 2009-09-22.
- [6] 王迎春, 梁旭东, 苗世光, 等. 城市气象研究动向的思考. 气象, 2012, 38(10): 1232-1237.
- [7] Chen F, Bornstein R, Grimmond S, et al. Research priorities in observing and modeling urban weather and climate. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(11): 1725-1728.
- [8] Committee On Urban Meteorology Scoping the Problem D T N. Urban Meteorology: Forecasting, Monitoring, and Meeting Users' Needs. Washington DC: The National Academies Press, 2012: 176.
- [9] Shepherd J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. Earth Interactions, 2005, 9(12): 1-27.
- [10] Grimmond C S B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. Theoretical and Applied Climatology, 2006, 84(1-3): 3-22.
- [11] 徐祥德, 周秀骥, 丁国安, 等. 城市环境综合观测与大气环境动力学研究. 北京: 气象出版社, 2010.
- [12] 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. BECAPEX科学试验城市群落边界层大气环境特征及其影响. 气象学报, 2004, 62(5): 663-671.
- [13] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究. 北京: 气象出版社, 2004.
- [14] 李炬, 舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析. 地球物理学报, 2008(2): 360-368.
- [15] 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴泞, 等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析. 南京大学学报(自然科学版), 2008(1): 99-106.
- [16] Wood C R, Järvi L, Kouznetsov R D, et al. An overview on the Urban Boundary-layer Atmosphere Network in Helsinki. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(11): 1675-1690.
- [17] Muller C L, Chapman L, Grimmond C S B, et al. Sensors and the city: A review of urban meteorological networks. International Journal of Climatology, 2013, 33(7): 1585-1600.
- [18] Muller C L, Chapman L, Grimmond C S B, et al. Towards a standardised metadata protocol for urban meteorological networks. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(8): 1161-1185, doi: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00096.1.
- [19] 李炬, 张子曰, 李艳, 等. 北京中央商务区热环境流动观测试验.

- 城市气象论坛(2012年):城市与气候变化,深圳,2012年11月24日.北京:中国气象学会城市气象学委员会、北京气象学会,2012.
- [20] Hand L M, Shepherd J M. An investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma city: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(2): 251-269.
- [21] Arola A. Parameterization of turbulent and mesoscale fluxes for heterogeneous surfaces. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(4): 584-598.
- [22] 胡非,洪钟祥,雷孝恩.大气边界层和大气环境研究进展. *大气科学*, 2003(4): 712-728.
- [23] 刘红年,刘罡,蒋维楣,等.关于非均匀下垫面大气边界层研究的讨论. *高原气象*, 2004(3): 412-416.
- [24] 刘罡,蒋维楣,罗云峰.非均匀下垫面边界层研究现状与展望. *地球科学进展*, 2005(2): 223-230.
- [25] Roth M. Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126(564): 941-990.
- [26] 苗世光,窦军霞,Chen F,等.北京城市地表能量平衡特征观测分析. *中国科学D辑:地球科学*. 2012, 42(9): 1394-1402.
- [27] Liu Y, Chen F, Warner T, et al. Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma city area during the Joint Urban 2003 field project. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45(7): 912-929.
- [28] 王咏薇,蒋维楣,刘红年.大气数值模式中城市效应参数化方案研究进展. *地球科学进展*, 2008(4): 371-381.
- [29] Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 273-288.
- [30] 孟春雷,戴永久.城市陆面模式设计及检验. *大气科学*, 2013, 37(6): 1297-1308.
- [31] Masson V. A Physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 94(3): 357-397.
- [32] Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 101(3): 329-358.
- [33] Martilli A, Clappier A, Rotach M W. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 104(2): 261-304.
- [34] Salamanca F, Martilli A. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3-4): 345-356.
- [35] Salamanca F, Krpo A, Martilli A, et al. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-Part I. Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3-4): 331-344.
- [36] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase I. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(6): 1268-1292.
- [37] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 244-272.
- [38] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(12): 1848-1865.
- [39] Baklanov A, Grimmond S, Mahura A, et al. *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas*. Berlin: Springer, 2009: 183.
- [40] Best M J, Grimmond C S B, Villani M. Evaluation of the urban tile in MOSES using surface energy balance observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118(3): 503-525.
- [41] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(4): 1038-1060.
- [42] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part II: Sensitivity to input parameters and the simulated urban heat island in offline simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(4): 1061-1076.
- [43] Jin M, Shepherd J M. Inclusion of urban landscape in a climate model: How can satellite data help? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(5): 681-689.
- [44] Mccarthy M P, Best M J, Betts R A. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(9): L9705.
- [45] 王自发,谢付莹,王喜全,等.嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用. *大气科学*, 2006, 30(5): 778-790.
- [46] Fenger J. Air pollution in the last 50 years: From local to global. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 13-22.
- [47] Grell G, Peckham S, Schmitz R, et al. Fully coupled 'online' chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(37): 6957-6975.
- [48] Herwehe J A, Otte T L, Mathur R, et al. Diagnostic analysis of ozone concentrations simulated by two regional-scale air quality models. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(33): 5957-5969.
- [49] Ching J, Brown M, Mcpherson T, et al. National urban database and access portal tool. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 1157-1168.
- [50] Miao S, Chen F, Lemone M A, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3): 484-501.
- [51] Salamanca F, Martilli A, Tewari M, et al. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(5): 1107-1128.
- [52] Miao S, Chen F, Li Q, et al. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(4): 806-825.
- [53] Miao S, Chen F. Formation of horizontal convective rolls in urban areas. *Atmospheric Research*, 2008, 89(3): 298-304.
- [54] 苗世光,蒋维楣,王晓云,等.城市小区气象与污染扩散数值模式建立的研究. *环境科学学报*, 2002(4): 478-483.
- [55] Miao S, Jiang W, Wang X, et al. Impact assessment of urban meteorology and the atmospheric environment using urban sub-domain planning. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118(1): 133-150.
- [56] Liu Y S, Miao S G, Zhang C L, et al. Study on micro-atmospheric environment by coupling large eddy simulation with mesoscale model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 107-108: 106-117.
- [57] Wyszogrodzki A A, Miao S, Chen F. Evaluation of the coupling between mesoscale-WRF and LES - EULAG models for simulating fine-scale urban dispersion. *Atmospheric Research*, 2012, 118: 324-345.