

王迎春,梁旭东,苗世光,等. 城市气象研究动向的思考[J]. 气象,2012,38(10):1232-1237.

## 城市气象研究动向的思考<sup>\* 1</sup>

王迎春<sup>1</sup> 梁旭东<sup>2</sup> 苗世光<sup>2</sup> 李 炬<sup>2</sup> 孟燕军<sup>2</sup> CHEN Fei<sup>3</sup> 刘伟东<sup>1</sup>

1 北京市气象局,北京 100089

2 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089

3 美国国家大气研究中心,博尔德,科罗拉多,美国

**提 要:** 基于近年来城市气象观测与模拟研究的最新进展,展望了城市气象未来的发展方向和重点研究领域,主要包括以下六个方面:城市气象数值模拟、新观测技术及同化应用、观测与数值模拟互动、城市化对天气气候影响机理、城市气候资源利用与热岛效应减缓措施,以及城市化对大气环境及人体健康的影响。指出了城市冠层模式发展、城市水文过程及城市降水、城市边界层及其他模式物理过程和模式评估等方面亟需解决的关键科学问题。

**关键词:** 城市气象, 观测, 数值模拟, 进展, 展望

## Perspective and Prospect of Urban Meteorology Research

WANG Yingchun<sup>1</sup> LIANG Xudong<sup>2</sup> MIAO Shiguang<sup>2</sup> LI Ju<sup>2</sup>

MENG Yanjun<sup>2</sup> CHEN Fei<sup>3</sup> LIU Weidong<sup>1</sup>

1 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

3 National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA

**Abstract:** This paper briefly reviews recent advances in the observation and modeling of urban weather and climate. Then future prospects for several research avenues are speculated, which include the numerical simulation of urban meteorology, new observation technology and assimilation application, the interaction between observation and numerical simulation, the impact of urbanization on weather and climate, the usage of urban climate resources and the mitigation of urban heat island, and the impact of urbanization on the atmospheric environment and human health. Furthermore, the key scientific questions are raised, e. g. the urban canopy model development, urban hydrological processes and urban precipitation, urban boundary layer and other model physics, and model evaluation, etc.

**Key words:** urban meteorology, observation, numerical simulation, advances, prospect

## 引 言

我国是世界上经济发展最快、工业化和城市化进程最为迅速的国家之一。据统计,2010 年底我国城市化水平已达 47.5%。预计我国城市化率在 2013—2015 年将超过 50%,到 2020 年我国的城市

化率将达到 55%。城市化带来的生产、生活活动的集中化,使得气象灾害和大气环境污染造成的影响更为集中且严重。同时,也对大气结构和物理过程造成了明显的影响。另一方面,城市冠层、边界层大气结构是影响城市空气质量的重要因素。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天气的显

\* 国家自然科学基金项目(41110304028 和 41175015)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906026)共同资助

2012 年 2 月 26 日收稿; 2012 年 5 月 7 日收修定稿

第一作者:王迎春,主要从事城市气象短临预报的科研及气象科研管理工作. Email:ycwang@bjmb.gov.cn

著异常,进而引起了局地气候的显著变化<sup>[1-2]</sup>。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。目前,城市气象科学研究与业务应用需求之间存在较大的差距。

2011年7月12—15日,由中国气象学会城市气象学委员会与美国气象学会城市环境委员会共同主办、中国气象局北京城市气象研究所和北京气象学会共同承办的“城市气象观测与模拟国际研讨会”在北京举行。来自中国、美国、英国、加拿大、法国、德国、日本、西班牙、意大利、波兰、中国香港等国家和地区的百余位专家学者参加了为期四天的研讨会。会议主要从城市陆面与边界层过程、城市化对天气气候影响及城市气象观测等方面进行了交流和研讨(会议日程、报告等材料详见会议主页: <http://www.iium.cn/cum-wksp/pdf.html>, <http://www.cms1924.org/cum-wksp/>)。会议专门安排了两次主题讨论,与会人员从城市气象观测选址、多种仪器协同观测,城市基础数据集建设、城市气象模式的评估与参数优化、城市精细化预报模式、城市天气预报,城市气象在城市规划、节能减排、空气质量、人体健康等领域的应用等方面进行了积极的交流。

基于此次研讨会的交流和讨论,本文简要回顾了近年来城市气象观测与模拟研究的最新进展,展望了城市气象未来的发展方向和重点研究领域。

## 1 城市气象研究进展

### 1.1 城市气象观测研究

城市化的影响最早是从认识城市中的污染(如伦敦大雾)和城市化导致的热环境变化(城市热岛效应)开始的,城市化的直接结果是地表特性的改变,从而导致地气交换过程的改变,并通过边界层过程实现与自由大气之间的相互作用,影响到区域天气、气候和大气环境。近年来,针对城市气象和城市环境问题,国际上组织了一些综合观测试验和计划,比较有代表性的有:法国马赛城市边界层试验(UBL-CLU/ESCOMPTE)<sup>[3]</sup>、希腊雅典污染物传输与化学转化试验(MEDCAPHOT-TRACE)<sup>[4]</sup>、欧洲科技合作研究计划(COST 715)<sup>[5]</sup>、美国盐湖城的城市2000试验(URBAN 2000)<sup>[6]</sup>、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(CAP-LTER)<sup>[7]</sup>、美国俄克拉荷马城的城市2003联合试

验(Joint Urban 2003)<sup>[8]</sup>、英国伯明翰的城市大气中的污染物试验(PUMA, <http://urgent.nerc.ac.uk/Air/Projpages/A1.htm>)、瑞典巴塞尔的城市边界层气象项目(BUBBLE)<sup>[9]</sup>、日本的城市气候综合室外模型试验(COSMO)<sup>[10]</sup>、墨西哥的大城市对区域及全球环境的影响研究计划(MIRAGE, <http://mirage-mex.acd.ucar.edu/>)等。这些观测试验涉及到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。这些研究的开展显著提升了城市对天气、气候的影响机理以及对城市空气质量问题的认识水平。世界气象组织(WMO)在全球开展了一系列城市气象和环境研究(GURME, <http://mce2.org/wmogurme/>)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(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。

我国较全面的试验是2001—2003年在北京开展的北京空气污染观测试验(BECAPEX),其针对大气边界层动力、热力和化学开展综合观测试验。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<sup>[1]</sup>;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<sup>[11]</sup>。另外,2004年开展的北京城市边界层观测试验(BUBLEX)<sup>[12]</sup>,2005和2006年开展的南京市城市边界层观测<sup>[13]</sup>,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研究”在我国东部长三角城市群,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。“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<sup>[14]</sup>,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我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),为城市气象观测网建设和城市气象精细预报提供了科学基础。

从国内外相关研究进展可以看到城市气象观测研究呈现出四个发展趋势: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。

## 1.2 城市陆面与边界层过程研究

目前对城市边界层的研究主要集中于对城市近地层结构和湍流特性的认识,近年来开展的一些观测研究形成了“城市冠层-粗糙子层-惯性子层-混合层”的结构认识。关于城市近地层湍流,正如 Roth<sup>[15]</sup>指出,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。近年来的研究工作更多地集中在城市地气物质交换上,美国的 Urban 2000, Joint Urban 2003, 以及欧洲的 BUBBLE 计划都对污染物在冠层内的扩散行为和近地层与冠层之间的交换过程进行研究。

在针对城市边界层不同尺度的数值模拟研究中,对于建筑物冠层的处理方法不同。一般在城市区域尺度的数值模拟中,建筑物冠层是网格尺度不可分辨的。因此,必须采用次网格的参数化方案对建筑物冠层的影响进行考虑,才能进行城市尺度边界层及大气环境的数值研究,合理的模拟城市边界层及气象条件和大气环境等因素的变化。由此,城市冠层模式(Urban Canopy Model, UCM)应运而生。

根据对城市冠层内物理机制考虑的不同,当前研究建立了很多种城市冠层方案。考虑城市冠层的动力或热力效应,可分为动力或热力冠层模式;考虑冠层内分层或不分层,可分为单层和多层冠层模式;基于对次网格参数化方案中建筑物分布形态的不同,又存在分别基于二维街渠建筑物假设和三维建

筑物形态分布所建立的冠层模式<sup>[16-17]</sup>。

Masson<sup>[18]</sup>建立了单层城市冠层模式。该方案冠层内不分层,而是总体考虑建筑物不同表面对热通量的贡献,计算过程较为简单,需要确定的参数相对较少。然而由于这种方案在冠层内不分层,无法考虑建筑物形态结构对气流的拖曳作用以及对湍能生消的影响。Martilli 等<sup>[19]</sup>和 Kondo 等<sup>[20]</sup>分别基于二维和三维建筑物分布假设建立了多层城市冠层模式,并将其与中尺度数值模式耦合。Chen 等<sup>[21]</sup>总结了已经耦合于 WRF 模式中的三种城市冠层模式。

国内外已有很多学者将城市冠层模式引入中尺度大气模式,用于研究城市热岛、边界层结构及其对降水的影响等<sup>[22-25]</sup>,并取得了一定效果。近年来, Grimmond 等<sup>[26-27]</sup>组织了一个“国际城市地表能量平衡模式比较计划”,该计划取得了初步成效,推进了这一领域研究的发展,中国气象局北京城市气象研究所和南京大学参与了该项研究计划。

对城市边界层的数值模拟研究始于 20 世纪 60 年代, Myrup<sup>[28]</sup>首先提出了城市边界层能量平衡模式, Carlson 等<sup>[29]</sup>发展了用于研究城市气候特征的边界层模式,并在之后的许多研究中不断对其改进和完善。国内, Jiang 等<sup>[30]</sup>详细考虑了城市的热力和动力作用,建立了精细的边界层模式,模拟研究了青岛和香港等地区大气边界层内的风场、温度及湍流特征。

## 1.3 城市化对天气气候的影响研究

国内外关于城市化对天气过程的影响研究主要集中在以下方面:(1)城市热岛效应。早在 19 世纪初,科学家就已经发现城市区域的气温明显高于郊区。从 20 世纪 70 年代开始,各国学者对不同纬度、不同类型城市做了大量的城、郊气温的对比观测分析,印证了城市热岛是城市地区普遍存在的天气现象<sup>[31-32]</sup>。许多学者针对城市化进程对城市气温的影响进行了大量的深入研究,指出城市热岛效应的加剧与近年来城市化进程和城市建设的快速发展有关<sup>[33-36]</sup>。(2)城市化对城市大气边界层风场的影响。研究表明,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,使得城区近地面的风力明显减小,导致城区“静稳”天气概率的增加,非常不利于城区污染物的扩散和清除<sup>[37-38]</sup>。(3)城

市化对降水的影响。近年来,国际上也大量开展了城市化对局地降水影响的研究。多数研究者认为城市的动力、热力作用使城区和城市下游地区降水增加<sup>[39]</sup>,也有部分研究者认为城市大气污染物的微物理过程使城市下游地区的降水减少<sup>[40]</sup>。我国就城市化对降水的影响也开展了很多研究,得到的结论也不尽相同<sup>[25,41-43]</sup>。(4)城市化进程对强对流天气发生发展的影响。有学者研究认为,由于城市规模的扩大和城市热岛效应的加强,会引起城市强对流天气的强烈发展<sup>[22,25]</sup>。(5)“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”<sup>[2]</sup>。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。

国内开展的相关研究,如苗世光等<sup>[43]</sup>通过一个月的数值模拟及敏感性试验研究了北京城市化对边界层的月平均影响。杨修群模拟研究了长三角城市化的气候影响。Cheng<sup>[44]</sup>对珠三角城市化对降水的影响研究表明:在冬季强季风和夏季弱季风条件下,城市降水变少的可能性较大。

## 2 城市气象未来的研究方向展望

### 2.1 城市气象数值模拟

#### (1) 城市冠层模式发展

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。由于城市冠层的动力学效应,使得城市近地层出现了粗糙子层,传统的莫宁-奥布霍夫相似理论不再适用。

城市中的建筑物与植被相互影响,使得城市中的植被与自然下垫面的植被在冠层能量平衡和水分收支等方面有较大的不同,该过程的数值模拟工作尚有待开展。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开展城市气象研究的一项重要的基础性工作。

#### (2) 城市水文过程及城市降水

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未有较好的描述。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。

#### (3) 城市边界层及其他模式物理过程

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。

#### (4) 模式评估

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。卫星遥感为城市冠层模式对地表温度模拟效果的评估提供了重要的二维水平分布观测资料。城市地区现有的地面观测站网亦提供了非常宝贵的资料,当前的首要任务是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。

### 2.2 新观测技术及同化应用

激光雷达、声雷达和光导纤维温度测量等新技术为更高水平及垂直空间分辨率三维大气观测提供了可能。同时,也出现了无人驾驶飞机(UAVs)、要素自动采集器(HOBOs)等新仪器平台。这些都为城市气象研究提供了新的机遇。此外,基于地理信

息系统的手机定位和汽车温度报告等技术,将为城市气象研究提供更多的观测资料。

由于城市下垫面的多尺度非均匀性及城市地区观测资料的空间代表性问题的提出,使得科研人员需要解决传统的资料同化技术对城市地区观测资料的同化是否适用这一问题。

### 2.3 观测与数值模拟互动

从事气象观测与数值模拟的研究人员都需要对观测实施的条件、限制及可能的应用等方面有清醒的认识,这就需要双方加强沟通和交流。以城市冠层气温观测为例,双方可讨论确定气温观测地点的可行性、观测结果在模式评估中的应用方式等。反之,数值模拟可以对外场观测提供参考依据,数值模拟研究人员可以通过模式模拟解答观测研究中遇到的一些问题:哪儿的变化最大或最小?观测放在哪儿最好?哪儿的观测具有或没有空间代表性?空间代表性随风向如何变化?

### 2.4 城市化对天气气候的影响机理

城市化通过热力、动力和微物理等过程影响天气系统的发生、发展和移动,形成了独特的城市天气和气候特征。城市过程对降水形成和发展的影响类型和定量影响及其在区域气候变化中的贡献等方面的问题,需进一步深入开展研究工作。

### 2.5 城市气候资源利用与热岛效应减缓措施

城市太阳能资源的利用,在提供绿色能源的同时,光电(PV)技术的广泛使用将减小城市冠层吸收的太阳辐射,减缓城市热岛效应。另外,屋顶绿化和白色墙壁等措施的实施对城市热岛效应影响的效果评估有待深入研究。

### 2.6 城市化对大气环境及人体健康的影响

城市化及城市冠层/边界层结构是影响城市空气质量的重要因素。需开展城市气候特征对大气环境及人体健康的影响与适应对策研究。另外,城市大气污染物对辐射及降水的影响亦是亟待研究的热点问题之一。

### 参考文献

- [1] 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[J]. 气象学报,2004,62(5): 663-671.
- [2] 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[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2005(S2): 173-184.
- [3] Mestayer P G, Durand P, Augustin P, et al. The urban boundary-layer field campaign in marseille (UBL/CLU-ES-COMPTE): Set-up and first results[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 114(2): 315-365.
- [4] Ioannis C Z. The mediterranean campaign of photochemical tracers-transport and chemical evolution (MEDCAPHOT-TRACE): An outline[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(12): 2045-2053.
- [5] Fisher B, Kukkonen J, Piringer M, et al. Meteorology applied to urban air pollution problems: Concepts from COST 715 [J]. Atmos Chem Phys, 2006, 6(2): 555-564.
- [6] Allwine K J, Shinn J H, Streit G E, et al. Overview of URBAN 2000: A multiscale field study of dispersion through an urban environment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(4): 521-536.
- [7] Brazel A, Selover N, Vose R, et al. The tale of two climates—Baltimore and Phoenix urban LTER sites[J]. Climate Research, 2000, 15(2): 123-135.
- [8] Allwine J, Leach M. EDITORIAL[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(12): 2017-2018.
- [9] Rotach M W, Vogt R, Bernhofer C, et al. BUBBLE—an Urban Boundary Layer Meteorology Project[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 81(3): 231-261.
- [10] Kanda M, Kanega M, Kawai T, et al. Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(7): 1067-1079.
- [11] 罗云峰,周小刚. 重大项目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所取得的成果[J]. 中国科学基金, 2005, (1): 37-39.
- [12] 李炬,舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 360-368.
- [13] 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[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 99-106.
- [14] 苗世光, 窦军霞, Chen Fei, 等. 北京城市地表能量平衡特征观测分析[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2012, 待发表.
- [15] Roth M. Review of atmospheric turbulence over cities[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2000, 126(564): 941-990.
- [16] 蒋维楣,王咏薇,张宁. 城市陆面过程与边界层结构研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(4): 411-419.
- [17] 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[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 371-381.
- [18] Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models[J]. Boundary-Layer Meteorology

- gy, 2000, 94(3): 357-397.
- [19] Martilli A, Clappier A, Rotach M W. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 104(2): 261-304.
- [20] Kondo H, Genchi Y, Kikegawa Y, et al. Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 116(3): 395-421.
- [21] Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 273-288.
- [22] Bornstein R, Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(3): 507-516.
- [23] Miao S, Chen F. Formation of horizontal convective rolls in urban areas[J]. *Atmospheric Research*, 2008, 89(3): 298-304.
- [24] 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[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3): 484-501.
- [25] 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[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(4): 806-825.
- [26] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(6): 1268-1292.
- [27] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 244-272.
- [28] Myrup L O. A Numerical Model of the Urban Heat Island[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8(6): 908-918.
- [29] Carlson T N, Boland F E. Analysis of urban-rural canopy using a surface heat flux/temperature model[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(7): 998-1013.
- [30] Jiang W, Zhou M, Xu M, et al. Study on development and application of a regional pbl numerical model[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 104(3): 491-503.
- [31] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1972, 53(8): 647-648.
- [32] Matson M, McClain E P, McGinnis D F, et al. Satellite detection of urban heat islands [J]. *Monthly Weather Review*, 1978, 106(12): 1725-1734.
- [33] 郑祚芳, 刘伟东, 王迎春. 北京地区城市热岛的时空分布特征[J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(5): 694-699.
- [34] 王郁, 胡非. 近10年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 61-68.
- [35] 杨元建, 涛石, 苟尚培, 等. 基于遥感资料研究合肥城市化对气温的影响[J]. *气象*, 2011, 37(11): 1423-1430.
- [36] 陆琛莉, 范晓红, 宋文英, 等. 杭州湾北岸持续热浪天气特点及城市化发展的影响[J]. *气象*, 2012, 38(3): 329-335.
- [37] 曲绍厚, 宋锡铭, 李玉英, 等. 北京城区的气象效应[J]. *地球物理学报*, 1981, 24(2): 229-237.
- [38] 周淑贞, 余碧霞. 上海城市对风速的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1988, (3): 67-76.
- [39] Shepherd J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future[J]. *Earth Interactions*, 2005, 9(12): 1-27.
- [40] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 2000, 287 (5459): 1793-1796.
- [41] Guo X, Fu D, Wang J. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City[J]. *Atmospheric Research*, 2006, 82(1-2): 112-126.
- [42] 王喜全, 王自发, 齐彦斌, 等. 城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响[J]. *中国科学(D辑)*, 2008, 36(11): 1438-1443.
- [43] 苗世光, Fei Chen, 李青春, 等. 北京城市化对夏季大气边界层结构及降水的月平均影响[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1580-1593.
- [44] Cheng K M. Impacts of land-use changes on the climate over the Pearl River Delta[R]. 北京: 城市气象观测与模拟国际研讨会, 2011.