

城市热岛效应的研究进展与展望^{* 1}

寿亦萱^{1,2} 张大林^{2,3}
SHOU Yixuan^{1,2} ZHANG Da-Lin^{2,3}

- 1. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,国家卫星气象中心,北京,100081
 - 2. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京,210044
 - 3. 美国马里兰大学大气海洋科学系,20742
 - 1. *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration (LRCVES/CMA) National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China*
 - 2. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China*
 - 3. *Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, Maryland 20742, USA*
- 2010-03-04 收稿,2010-09-27 改回.

Shou Yixuan, Zhang Da-Lin. 2012. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(3):338-353

Abstract With the rapid urbanization around the globe, the urban heat island (UHI) effects have become an interdisciplinary issue and were received considerable attention during the past 2-3 decades by scientists from different disciplines. In this article, the state of our knowledge on this subject is assessed in order to help guide future research in this rapidly growing field. First, we summarize the latest advances in observing various UHI effects through field experiments and remote sensing technology, and in developing the urban canopy models as well as computational fluid dynamical models. Then, we review recent achievements in understanding the UHI effects with more focuses on the urban boundary layer, their interactions with topographical driven circulations, and the urban surface energy budget. Finally, future prospects for several UHI research avenues are speculated, which include the UHI effects on regional climate, air pollution, precipitation, fog and lightning production, the improvement of urban weather forecasts, and the development of UHI mitigation measures.

Key words Urban heat island, Urban boundary layer, Energy balance, Research prospects

摘 要 随着世界各国城市化的进展,城市热岛效应已经成为一个跨学科领域的问题,受到包括大气环境、区域气候、水文和生态等多学科科学家的关注。在过去半个多世纪中,城市热岛问题的研究获得了相当丰富的研究成果,通过对这些成果的综合分析,归纳出城市热岛研究中采用的3类主要方法——观测(外场试验和遥感技术)、数值模拟以及实验室仿真法。系统地回顾了城市热岛效应的研究历史,重点对与城市热岛关系最密切的城市边界层、热岛环流与复杂地形的相互作用以及能量平衡研究所取得的成果进行了总结和评述。最后对城市热岛问题未来8个可能的研究方向进行了探讨,其中,包括沿海和复杂地形附近的城市热岛问题、城市群间热岛环流的相互作用、城市化与空气污染问题、城市热岛效应对平均降水的影响、城市化对雾和闪电的影响、城市天气预报的精细化、城市气候变化预测以及城市热岛效应减缓方案的制定,并对其发展前景进行了粗略的展望。

关键词 城市热岛,城市边界层,能量平衡,研究展望

中图法分类号 P404

^{*} 资助课题:国家高新技术研究发展计划(863计划)项目(2009AA12Z150)、2010年人力资源与社会保障部留学人员科技活动项目择优资助(优秀)“长三角城市群热岛与海风环流相互作用的卫星观测和数值模拟研究”、国家自然科学基金项目(41005027、41175023)、气象灾害省部共建教育部重点实验室开放课题(KLME0905)。

作者简介:寿亦萱,主要从事卫星气象、城市气象和中尺度数值模拟研究。E-mail: shouyx@cma.gov.cn

1 引言

从 20 世纪开始,随着全球经济发展,城市化也进入了空前发展的阶段。据联合国人口组织的统计资料显示,到 20 世纪末,世界上城市人口占总人口数的 45%,其中,发达国家中城市人口比例高达 75% (United Nations, 2001)。城市化给自然环境所带来的影响是多方面的,其中,下垫面类型的改变是其造成的最直接的变化之一。城市的下垫面通常是由混凝土、沥青等构成的(三维)建筑物和(二维)道路组成,相对于由水、土和植被构成的自然表面,这些人造表面一般具有较小的反照率、较大的热容性以及很小的蒸发和蒸腾,从而能够更有效地将入射太阳辐射转换为热量并储存。因此,受这种复杂表面的影响,加之工业、交通和商业等人类活动产生的热量,城市气温要比其周围的环境气温高,这种现象就是城市热岛效应 (Chandler, et al, 1976; Oke, 1982)。过去人们习惯用(2 m 高度)百叶箱内的空气温度(即地面气温)来表示城市热岛效应。后来随着卫星遥感资料的广泛使用,地表温度也常被用来研究城市热岛效应。

据统计,到目前为止,世界上在 1000 多个不同规模的城市中发现了城市热岛现象,范围遍及南、北半球各纬度地区 (Magee, et al, 1999; Arnfield, 2003)。虽然城市热岛效应本身不会像热带气旋、暴雨等强烈天气那样直接造成重大的自然灾害,但往往会通过改变局地的能量平衡、水循环过程、大气边界层结构、污染物传播和扩散规律,而对人类生产、生活产生间接的危害。一方面伴随着经济发展,城市化进程加快,而另一方面随着人类文明的进步,人类对生存环境的要求也是有增无减,这两者的矛盾使城市热岛效应成为一亟待解决的课题。从目前的研究现状来看,城市热岛效应已经成为一个跨学科领域的问题,不仅是大气科学研究关注的焦点,而且,还受到环境、地理、水文、生态、卫生和城镇规划等学科学者的关注,有关的研究论文也相当丰富。虽然中国关于城市热岛效应的研究已开展多年(桑建国等, 2000; 胡非等, 2003; 李维亮等, 2003; 徐祥德等, 2004; 佟华等, 2004; 何晓凤等, 2007; 蒋维楣等, 2007; 王迎春等, 2009), 并也取得不少成果。但直至近几年由于中国经济迅速上升带来各城市的

蓬勃发展,城市热岛效应给环境造成的各种问题才引起科学家们的广泛关注和政府的高度重视。为全面地了解国际上城市热岛(UHI)的研究现状,梳理了城市热岛的研究成果以供研究国内城市热岛效应参考。此外,Arnfield(2003)和 Rizwan 等(2008)先后从区域气候和工程角度对城市热岛效应的相关研究进行了不同程度的总结。

2 观测手段和模式发展

和大气科学中的其他学科一样,城市热岛效应的研究进展离不开观测、数值模拟以及实验室仿真手段的进步。

2.1 外场试验和观测手段

由于观测能最直接、客观地揭示城市热岛效应的特征,自 20 世纪 70 年代以来,国际上已组织了多次大型的外场观测实验。如以研究边界层内不同尺度污染物的扩散为目的,在美国犹他州盐湖城举行的 URBAN2000 观测实验 (Allwine, et al, 2002),以研究城市边界层结构为目的在瑞士巴塞尔举行的历时一年的 BUBBLE2001 实验 (Rotach, et al, 2005)和在美国俄克拉荷马进行的主要针对城市边界层、城市街谷中气流扰动 (Pol, et al, 2006)等 5 个方面的科学问题的 JU2003 示踪气体实验。

近年来,中国也先后组织过多次大型的城市观测实验,如 2001—2002 年受中国科学技术部“973 项目”支持,由中国气象局气象科学研究院以及北京城市气象研究所等多家单位联合完成的 BECAPEX 观测实验,着重研究了京津冀地区城市的边界层结构和大气化学成分的分布 (Xu, et al, 2005)。2004 年进行的 BUBLEX 实验,在 BECAPEX 基础上对城市边界层结构进行了重点观测。此外还有 2007 年被 WMO 接收并正式启动的上海城市气象和环境研究示范项目。该项目旨在通过观测以及数值模拟,重点研究上海地区及其周边的不均匀下垫面对城市热岛的形成和城市环境的影响以及空气污染的物理和化学过程等问题 (WMO, 2007)。

上述外场观测试验中既采用了传统的局地观测仪器,也利用了高科技的遥感技术。前者包括地面观测站、风廓线仪、飞机机载仪器等,这些都是研究城市热岛所使用的重要观测工具。利用这些工具通过对城市中某一个站点进行时序观测 (Tereshchenko, et al, 2001),或对多个城乡站点进行对比观测

(Magee, et al, 1999) 和统计分析 (Ackerman, 1985), 再或利用网点和特殊线路观测 (Morris, et al, 2001; Yamashita, et al, 1986; Unger, et al, 2001) 可得到城市热岛的日变化、分布和强度等信息。应该承认这些观测手段在最初发现和认识城市热岛现象中发挥了重要作用, 城市热岛的日变化特征就是根据这些观测数据获得的。但是, 由于气象站点的分布通常较为稀疏, 很难满足研究城市尺度的各类热岛问题的需要, 因此, 目前在城市热岛效应研究中单纯依赖传统观测的研究已经越来越少。

近年来, 随着遥感技术的飞速发展, 研制出大量先进的遥感仪器和设备, 使遥感观测方法在城市热岛的观测研究中逐渐占有一席之地。虽然用于城市气象研究的遥感观测工具很多, 卫星和雷达仍是最常用的两类。卫星主要用于监测城市热岛的温度场变化特征。与常规观测中的地面气温不同, 卫星探测的是地表温度。它与地面气温不同在于其所表示的是陆地水、植被、土壤、岩石等的表面温度, 即地-气界面上的温度。目前, 大部分气象/环境资源卫星均搭载了高分辨率的热红外传感器。如美国的 GOES 静止气象卫星上的热红外通道 (星下点分辨率为 4 km), NOAA 极轨气象卫星上的甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 和 EOS 卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) (星下点分辨率为 1 km), 以及 Landsat-7 上的增强型专题绘图仪 (ETM+) (星下点分辨率为 60 m)。借助热红外数据可以得到辐射亮温, 结合地表比辐射率和无线电探空数据, 就可以反演出比较真实的地表温度。自 Rao (1972) 首次使用卫星反演的地表温度讨论城市热岛效应至今, 这种定量信息已被广泛用于城市热岛强度、日变化特征等与城市热岛相关的研究中 (Johnson, et al, 1994; Hu, et al, 2009)。

雷达则主要用于对边界层结构的探测。除了普通的天气雷达以外, 声纳雷达、后向散射激光雷达和多普勒激光雷达是目前城市热岛观测研究中较多使用的几类雷达。特别是多普勒激光雷达, 能有效地观测边界层内风的扰动 (Davies, et al, 2004; Collier, et al, 2005)、边界层顶的位置 (Davies, et al, 2004; Collier, et al, 2005), 并能反演得到城市感热通量的分布情况 (Davis, et al, 2008)。

尽管遥感观测相对于传统观测, 具有空间覆盖范围大、时空分辨率高的特点, 却始终存在一个反演

精度的问题, 需要依赖传统观测数据进行交叉验证。因此, 在很多观测分析中常常采用传统观测和遥感观测方法并用的手段。

2.2 实验室仿真试验

在实验室利用实物模型来进行城市热岛效应仿真试验是近几年才开始的一种有效手段。如 Cenedese 等 (2000, 2003) 曾设计了一套温控水箱系统用于研究热岛环流与海风环流的相互作用问题。实验中用一装满水的矩形水槽来代表整个大气环境。为了模拟海陆分布, 将水箱划分为两个区域, 左侧为恒温区 (代表海区), 右侧温度由一个温度可控装置控制, 用于代表陆地。与观测试验以及数值模式相比, 仿真试验的优势在于它易于控制边界条件, 并且, 能够准确地分析出那些无量纲量在控制流场中的作用。但是, 它的缺点也是很明显的, 最重要的一点就是试验中很难构建一套与真实条件下完全一致的参数。比如城市中植被、街道和建筑的细节参数就很难在一个水箱系统中被完全模拟出来, 因此, 实验室仿真试验在城市热岛效应的研究中目前只能作为观测试验和数值模式的一个补充。

2.3 数值模式的发展

Ooka (2007) 和 Martilli (2007) 在回顾中尺度模式发展及其在城市热岛效应研究中的应用现状后指出, 高分辨率中尺度模式的使用和发展使很多城市尺度的天气问题得以发现并被认识。近 20 年来使用模式研究城市效应的文章有很多 (Masson, 2006), 不仅有力地支持了观测分析, 也加深了人们对具体物理过程的理解。目前与中尺度模式嵌套的城市模式主要有两种: 城市冠层模式 (UCM) 和计算流体力学模式 (CFD)。

城市冠层模式是一种基于城市冠层理论建立的物理参数化方案, 是目前城市大气问题数值模拟研究的主流。过去由于计算机资源的限制以及认识的不足, 大部分的城市冠层模拟研究普遍采用的是传统中尺度模式中对植物冠层的模拟方法, 因此, 不可避免地忽略了城市冠层的几何结构以及人类活动对局地大气活动产生的影响。随着认识的深入, 先后建立和发展出数十种城市冠层模式, 有些已经与中尺度天气模式进行了耦合, 并取得了较好的效果。如, RAMS 城市能量平衡模式 (RAMS-TEB) (Lemonsu, et al, 2004)、MM5/WRF 城市冠层模式 (MM5/WRF-UCM) (Kusaka, et al, 2004; Chen,

et al, 2004)、WRF 建筑环境参数化模式(WRF-BEP)(Martilli, et al, 2002; Dupont, et al, 2004)等。虽然上述模式各有特点,但是按照它们的垂直结构特点来划分,大致可以归为两类,即单层和多层城市冠层模式。

单层城市冠层模式(UCM)最早是由 Masson (2000)、Kusaka 等(2001, 2004)提出并建立,后由 Chen 等(2004)以及 Miao 等(2009)将其嵌套到 MM5、WRF 等中尺度模式并进行了改进。单层城市冠层模式的特点在于:(1)计算代价小,效率高。(2)相对于陆面模式,单层城市冠层模式中对城市下垫面进行比较细致的划分,分别根据人口密度和功能区分为低密度人口居住区、高密度人口居住区、工商业和交通区三类。目前一般中尺度模式中使用的全球 24 类土地利用类型数据是由美国地理调查署(USGS)提供的,其最高空间分辨率为 0.925 km。由于该数据库中并没有对城市区域进行具体区分,因此,不能直接用于单层城市冠层模式。目前国际上还没有一套完整的全球范围包含 3 类城市类型的土地利用类型数据,仅美国建立了一套覆盖美国大陆的分辨率为 30 m 的土地利用类型数据库(NLCD),现在最新版本是 NLCD 2001。(3)模式中细致考虑了房屋、道路的朝向、几何特性以及人类活动的影响。(4)一般单层城市冠层模式直接与陆面模式嵌套,例如在 WRF 模式中,单层城市冠层模式嵌套在 NOAH 陆面过程内。在计算城市区域上空的气象场时,单层城市冠层模式主要计算城市人造表面即房顶、墙和道路产生的热通量,而陆面模式主要计算城市内自然表面产生的热量和水汽交换,城市区域单个格点值为两者得到的次网格值的加权平均(Chen, et al, 2004; Kimura, 1989)。

多层城市冠层模式相对于单层模式较为复杂,考虑的因素也较多。该模式是由 Martilli 等(2002)和 Dupont 等(2004)提出的。与单层城市冠层模式相同,它也对城市下垫面进行了比较细致地划分,并直接与陆面模式嵌套。除此之外,它还具有以下 3 个特点:(1)模式中将地面到房顶层之间(冠层)划分为若干层,并按这些层次分层计算房顶层、墙面、道路的能量收支。(2)它对城市特征的描述更准确,更接近真实(Holt, et al, 2007)。模式中甚至考虑了各个格点上建筑物的高度和分布密度的不同。但是,由于模式中考虑的因素较多,因此,多层模式的

计算代价比单层模式要高很多。尽管如此,随着计算机条件的进一步改善,将会出现更多采用多层模式模拟的研究。(3)模式在设置时,允许模式第 1 层高度接近于路面,而在单层模式中,模式第 1 层高度一般须高于建筑物的房顶。

目前计算流体力学(CFD)模式主要用于研究城市大气中气流扰动和污染物扩散问题。与传统的污染物扩散模式相比,计算流体力学模式的特点在于水平分辨率高,通常为 1—10 m。另外,模式中还需要考虑城市内建筑物的三维信息,因此它在研究城市街区气流的小(微)尺度扩散方面更具优势(Hanna, et al, 2006)。虽然计算流体力学模式发展历史并不长,但也产生了很多种计算流体力学模式。其中有 5 种较具代表性:即 CFD-Urban(Coirier, et al, 2005)、FLACS(Hanna, et al, 2004)、FLUENT-EPA(Huber, et al, 2005)、FEM3MP(Calhoun, et al, 2005)、FE-FLO-Urban(Camelli, et al, 2004)。这些模式大多采用雷诺平均模拟法(除 FEFLO-Urban 采用的是大涡模拟法),网格则多使用有限体积元或松散结构。在最初使用时,由于这些模式一般使用基于单个探空站观测的大气廓线对模式进行初始化,因此模式的初始和边界条件具有很大的不确定性(Tewari, et al, 2010)。为解决这一问题,目前比较受推崇的做法是将计算流体力学模式与中尺度模式进行耦合。如 Tewari 等(2010)发展的 WRF-EULAG/CFD-urban 模式就是将 WRF-Noah-UCM 模式与 Coirier 等(2005)设计的 CFD-Urban 模式进行耦合。他们在模式中利用降尺度法将 WRF-UCM 模拟得到的中尺度气象场的分辨率提高到 CFD-Urban 模式可用的微尺度(1—10 m),为后者提供初始和边界条件。从它与观测结果的比较来看,这个改进比较有效地解决了计算流体力学模式初始化问题。另外, WRF-EULAG/CFD-urban 模式中设计了借助升尺度法将 CFD-Urban 得到的微尺度流场粗化重新输入 WRF 的功能,以提高 WRF 模式对城市及其下游区域中尺度预报的准确性。由于计算流体力学模式发展时间较短,因此,有关它的科学和技术问题仍然很多。但是,可以预见的是,该模式在未来城市边界层研究中的前景会非常广阔。

总之,无论是观测分析或是数值模拟或实验室仿真试验,都在城市热岛效应理论发展的各个阶段中起到了很大的推动作用,为研究城市热岛效应取

得理论突破奠定了基础。

3 历史回顾

城市热岛效应的研究最早可以追溯到 19 世纪上半叶。Howard(1883)在研究中首次发现城市热岛现象,由于当时城市热岛还不是一个普遍现象,因此,这个说法在提出后的很长时间都未受到重视。直到 20 世纪 50 年代,Manley(1958)才将这种现象定义为城市热岛效应,也由此正式拉开了城市热岛效应研究的序幕。

由于观测资料的匮乏,早期城市热岛效应的研究主要是根据单站资料进行简单的分析。从 20 世纪 70 年代开始,为研究大气边界层的温、湿度变化,国际上组织了多项大型观测实验。加之一些大型观测网的建立,使城市热岛效应研究由点上升为面。基于这些观测资料,Unwin(1980)、Magee 等(1999)和 Oke 等(1987)总结并提出了城市热岛效应的日变化特征。如在弱风和无云条件下,相对于周围的乡村,城市具有较小的冷却率(夜间)和加热率(白天);城乡温差在日落后 3—5 h 后达到最大值,之后逐渐减弱,在日出后温差基本消失;热岛强度在午后达到最强;而强度最强的时段通常出现在冬季夜间。以 Ackerman(1985)为代表的一批科学家又对影响城市热岛强度的因素进行了统计分析,认为城市热岛强度除了受不均匀下垫面影响以外,还受到风、云、城市规模和人口数量的影响。平均而言,低层风速(Zajic, et al, 2004; Figuerola, et al, 1998)和城市上空云层覆盖会使城市热岛强度减弱(Magee, et al, 1999; Morris, et al, 2001);而城市规模扩大或人口增多则会加剧城市热岛效应(Oke, 1987),即风速和云量(城市规模和人口数量)与城市热岛强度呈反(正)相关关系。此外,Unwin(1980)和 Morris 等(2001)通过对高空天气图分析,还发现了城市热岛效应通常出现在夏季高压系统控制下的天气条件的特点,并指出高压或反气旋天气使边界层的发展受到抑制,而有利于城市热岛效应的发展。需要指出的是,尽管对上述观测现象都做出了仔细分析和描述,但所涉及的各种物理过程及其之间的相互作用并未得到充分的科学理解。

进入 21 世纪以后,中尺度数值模式的发展和应用对城市热岛效应和边界层的研究起到了极大的促进作用。虽然目前数值模式中的城市边界层物理参

数化过程的描述仍然存在很多有待完善之处,但借助模式能够捕捉到许多高时、空分辨率的物理特征,这是目前观测手段所无法比拟的。如 Miao 等(2009)通过敏感试验发现城市热岛效应对产生具有较强水平涡度的对流卷涡的空间波长和深度都有影响。再如 Ohashi 等(2002)以及 Cenedese 等(2003)先后通过数值模式发现当存在海陆风、山谷风环流时,城市热岛环流可能与这些环流产生明显的相互作用。Zhang 等(2009, 2011)以及 Shou 等(2010)使用耦合的 WRF-UCM 模式在研究华盛顿—巴尔的摩城市热岛问题时发现,在特定风向条件下,巴尔的摩市的城市热岛可能会受到上风方城市热岛的影响而加剧,即存在城市热岛的“上下游效应”。显然,这些城市热岛效应的模式研究结果不仅对以往观测研究进行了很好的补充,而且,也进一步丰富了城市热岛效应的研究内容。

3.1 城市边界层的研究现状

城市边界层(UBL)是行星边界层(PBL)的一种类型,是气流由乡村流向城市过程中,在城市前沿的下风方发展出来的一个内边界。一般来说,城市边界层内部的环流和能量交换过程属于中尺度现象,其结构和特性直接依赖于城市下垫面和建筑物的分布,因此,热岛效应对城市边界层的结构具有重要的影响(Martilli, 2002; Miao, et al, 2009)。目前城市边界层的研究也是城市热岛效应研究领域中的重要课题之一。

城市边界层的三维结构非常复杂(Rotach, 2002)。根据 Oke(1987)绘制的城市边界层三维结构示意图(图 1),在中尺度范围内,城市边界层可以划分为近地面层和混合层(图 1a)。但从局地和小尺度来看,城市边界层可包含城市冠层、粗糙次层、惯性次层和混合层(图 1b、c)。具体来说,从地面到房顶之间称之为城市冠层(UCL),这一层的气流和能量的交换过程主要由微尺度过程控制。在城市冠层之上常出现建筑物的尾流现象,这个扰动尾流层又称为粗糙次层。Roth(2000)通过对很多试验结果的总结发现,这个粗糙次层约为建筑物高度的 2.5—3 倍,而且,该层还有较强垂直切变、尾流扩散以及不均匀表面造成的局地平流现象。在粗糙次层之上是城市近地层(USL),又称惯性次层,这层中扰动通量不随高度变化。城市冠层、粗糙次层和惯性次层共同构成了城市边界层的最低层即近地面层

(Roth, et al, 1989)。位于近地面层之上的是混合层(UML),它一直向上伸展到城市边界层顶。混合层内的天气过程一般具有中尺度特征,白天混合层影响深度可达 1.5 km(图 2a),夜间则降低到 0.3 km 左右。但由于白天存储于建筑物内热量的释

放,近地面会有一超绝热层(图 2b),因此城市内仍有湍流的垂直交换。而在城市外,由于夜间大量长波辐射在近地面形成一逆温层,将抑制湍流引起的垂直交换(图 2b)。这些现象都已能用城市冠层模式模拟出来(Zhang, et al, 2011)。

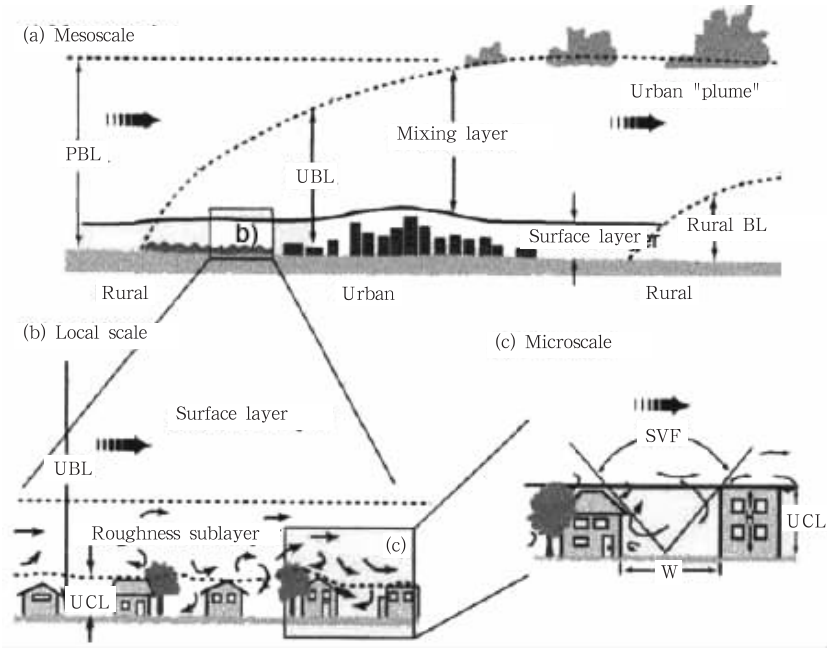


图 1 不同尺度城市边界层结构
(a. 中尺度, b. 局地尺度, c. 微尺度; SVF 表示天空可视因子;
引自 Collier, 2006)

Fig. 1 Vertical structure of the urban boundary layer (UBL) and its sublayers (from Collier, 2006)
(a. mesoscale, b. local scale, c. microscale; Angle SVF is the sky-view factor)

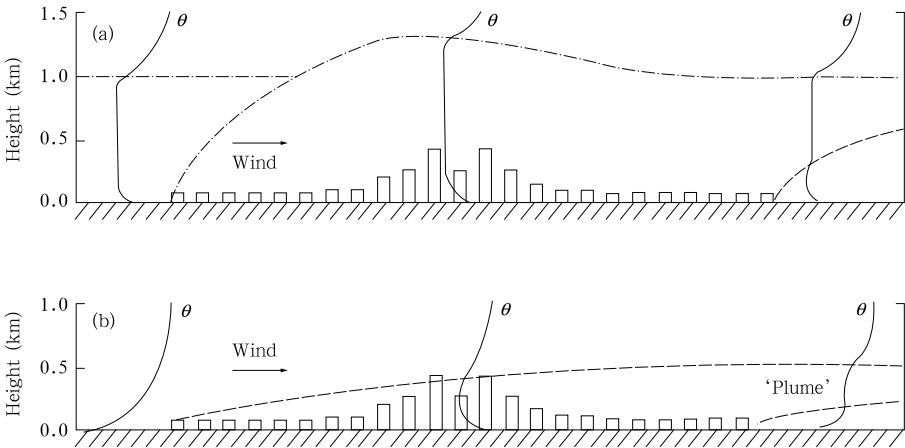


图 2 晴天条件下大城市边界层的热力结构
(a. 白天, b. 夜间;引自 Oke, 1987)

Fig. 2 Vertical thermal structure of the UBL in a large city during fine weather with schematic profiles of potential temperature at the various points by day (a) and at night (b) (from Oke, 1987)

目前人们已经普遍发现,改变城市边界层结构主要决定于动力和热力两个因素(Roth, 2000)。其中,动力因素是由粗糙表面引起的拖曳力作用,而热力因素则是指由下垫面不均匀引起的不均匀加热作用。Ackerman(1974)首次在观测中发现城市边界层内出现的水平对流卷涡,并认为这与城市不均匀下垫面有密切关系。之后,Kropfli等(1978)利用多普勒雷达观测到城市上空气流具有大涡结构特征,并进一步指出,在风速较大的情况下($>6\text{ m/s}$),大涡结构表现为水平对流卷涡,认为这种卷涡是由某些特定的城市表面造成的。Wong(1976)以及Wong等(1978)指出在低于某个临界风速下,热力强迫对边界层结构影响显著,而高于这个临界值时,则主要受动力强迫影响。Martilli(2002)利用数值模拟检验了风速、城市形状以及土壤湿度3个要素对边界层结构的影响后指出,在白天大尺度风较弱的情况下,城市边界层的高度较高且增长迅速。而且这期间城市边界层高度主要受热力因素影响,动力因素几乎可以忽略。但是,夜间城市边界层的结构受动力因素和热力因素的共同影响,热力因素主要影响城市边界层的低层,使城市热岛效应加强,而动力因素则主要影响城市边界层的高层,当风速加大时,会引起逆温层厚度和强度加强。

后来,Li等(2005)在Martilli(2002)理论的基础上,应用MM5研究了北京区域2001年冬季一次典型的城市边界层过程中的结构特征,发现城市结构的动力因子(如建筑物对气流的拖曳及摩擦作用)在夜间对城市边界层结构具有主导作用,而在白天,城市边界层结构主要受城市结构热力因子的影响,如街道峡谷中的建筑物结构对城市表面能量收支的影响,以及城市中人为热量在大气中的释放等。同时他们还指出热力和动力因子之间非线性相互作用对城市边界层结构的影响作用也是不容忽视的。例如在150—200 m的高度内这种相互作用对城市近地层形成强湍流动能具有正贡献,而对城市低层的水平风速具有减速作用。从上述分析可见,城市边界层的结构和质量、能量交换过程复杂,且影响因素多。如研究的现象尺度较小,则需对观测设计和城市边界层模式提出更高的要求。

3.2 热岛环流与复杂地形的相互作用

目前世界上60%的大城市是邻海而建,其他有一小部分处于山谷间,因此,城市热岛和地形引起的

局地环流相互作用问题逐渐受到人们的广泛关注,而且城市热岛效应的研究与早期工作相比更具有挑战性。最早开展这类研究的是一些日本学者(Yoshikado, et al, 1989, 1996; Yoshikado, 1990),他们利用观测和二维数值模式对城市热岛效应和海风环流的相互作用进行初步分析后发现,由于城市热岛的作用,海风环流在进入市区后会滞留在城市朝陆地一侧的边界层内达数小时,在停滞阶段海风风速会加大。此外,城市热岛和海风环流的相互作用会受城市大小、离海岸线的距离以及城市热岛效应强度影响。Kondo(1990)通过数值模拟发现海风和山谷风环流的相互作用会使海风锋向内陆推进,距离海岸线可达100 km左右。Kimura等(1991)(简称KT91)应用三维模式模拟了东京周围环境,模式中包含详细的地理信息和土地利用类型以及人类活动加热。在KT91的研究基础上,陆续又有一些日本学者对日本其他城市进行了类似的研究(如Ohashi, et al, 2002, 2004; Kondo, 1995; Kusaka, et al, 2000)。其中,Ohashi等(2002)用一个区域理想模式研究了两个相邻城市(一个邻海,一个内陆)对局地环流和城市污染物输送的影响。其数值试验结果表明,在两个城市的局地环流之间存在一支由海风-热岛环流共同作用产生的“链式气流”。这支气流能有效地将沿海城市的污染物传送到两个城市之间郊区的近地层以及内陆城市(图3a)。后来,又研究了这两个相邻城市的水汽分布(Ohashi, et al, 2004),发现在白天,由于山谷风的作用使两城市上空形成的热岛环流下沉支出现在两城市之间的郊区,从而使该区域变得干燥(图3b),在A(沿海)和B(内陆)两城市上空山谷风环流对水汽的辐散以及热岛环流(和海风环流)对水汽的辐合作用同时存在,但在两城市之间的郊区,山谷风和热岛环流造成水汽辐合。因此,局地环流对水汽的输送对低层大气变干起重要作用。此外,还发现当两城市相隔40—50 km时,郊区湿度最小,且 SO_2 和 NO_x 的浓度最低,并认为这些现象主要是由山谷风环流和城市热岛环流相互作用所致,海风环流只是改变了局地环流的结构。

除日本学者外,很多其他国家和地区也开展了这方面的研究。如Liu等(2001)和Tong等(2005)先后研究了香港的城市热岛效应与地形环流的相互作用,发现城市热岛会使九龙半岛和香港北部地区

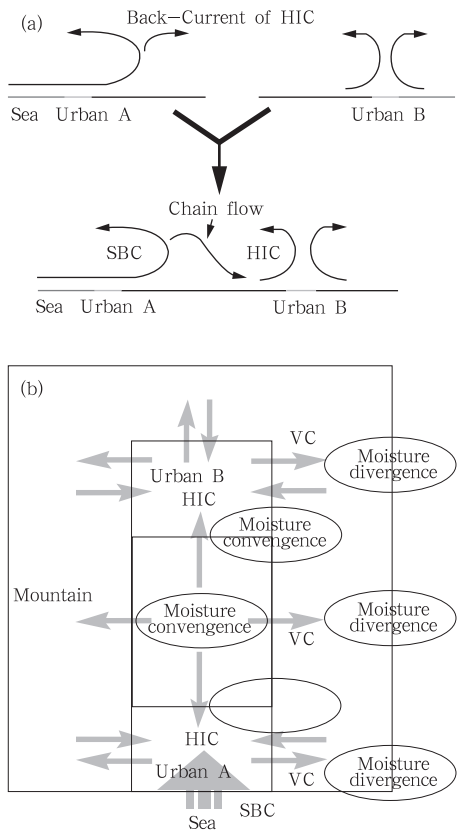


图3 (a)“链式气流”(Chain flow)形成过程示意和(b)白天城市边界层内局地环流对水汽的输送过程 (“SBC”表示海风环流,“HIC”表示热岛环流;引自 Ohashi 等, 2002, 2004)

Fig. 3 (a) Schematic diagram illustrating how the chain flow is formed; and (b) near-surface moisture transport by local circulations during the daytime (from Ohashi, et al, 2002, 2004) (SBC denotes the sea-breeze circulation, and HIC denotes the urban heat island circulation)

的海陆风环流增强。Freitas 等(2007)利用与城市能量收支系统耦合的 RAMS 模式对巴西圣保罗市区冬季局地环流进行了数值模拟研究,发现在海风锋到达市中心以前,城市热岛效应会使海风锋移动速度加快。与没有城市的情况相比,城市的存在会使海风锋移动速度加快约 0.32 m/s,认为这是城市热岛效应和海风锋产生的气压梯度共同作用的结果。显然这些新的研究结果对早期研究进行了很好的补充和修正。

3.3 能量平衡研究

近年来,随着观测仪器的改进和高分辨率数值模式的发展,人们在研究城市热岛现象的同时还发

现,城市热岛在区域地表能量平衡和水循环过程中起着重要作用(Huff, et al, 1972; Bornstein, et al, 2000)。如 Oke(1988)指出由于城市热岛的影响,城市的辐射平衡关系变得更为复杂,除了感热和潜热等项以外,还应考虑人类活动的加热作用。再如 Champollion 等(2009)提出,与乡村相比,日落前城市的感热通量较大,但潜热通量较小,而日落后两者无论在感热和潜热上的差距都较小。由于白天城市的热容量高,夜间城市下垫面仍能维持较弱的向上感热通量。因此,白天城市中的水汽通常低于周围乡村,但夜间特别是后半夜,城市内水汽将会略多于乡村。故城市热岛现象可作为城市下垫面能量平衡关系各种过程的不同表现,在能量平衡关系中任何一部分的变化都会影响到整个边界层的稳定度、热力特性以及混合层高度,因此理解地表能量平衡对研究城市天气和空气污染都具有重要意义。

在早期能量平衡研究中,由于观测手段和分析方法的局限性,城市下垫面与其他自然表面并未被明确的区分开来,其能量平衡关系表示为

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G \tag{1}$$

其中, Q^* 、 Q_H 、 Q_E 、 Q_G 分别表示净辐射、感热通量、潜热通量以及传导热。后来,Oke(1988)在此基础上提出了专门适用于城市区域的能量收支平衡关系,并将式(1)改写为

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_S + Q_A \tag{2}$$

其中, Q_F 是人为加热, Q_S 为局地热存储量,代表进出建筑物表面的净热量, Q_A 则为气柱内热量平流。

对于净辐射 Q^* ,目前普遍认为,城市化效应将使城市中太阳短波辐射逐渐减少,而长波辐射逐渐增多(Oke, 1982; Arnfield, 2003),城市对短波辐射的削减主要是由于污染物的增加。早期的研究,如在圣路易斯、图卢兹、温哥华以及巴塞尔的试验中发现,城市中污染物对短波辐射的削减量一般小于 10%(Peterson, et al, 1980)。但最近的研究发现,在一些城市中短波辐射的削减量超过 10%。如 Stanhill 等(1995)发现香港的短波辐射削减量达到 33%。城市内长波辐射的增加则被普遍认为是城市发展的结果,一方面可能是城市热岛的加热作用,另一方面也有学者认为是由于颗粒状或气态污染物增加引起大气反射率增加所致(Oke, 1982)。不管怎样,这些长、短波辐射量的收支引起城乡净辐射之间的差异不大。

感热通量 Q_H 是城市能量平衡中一个重要分量。Yap 等(1974)以加拿大温哥华市为对象,通过观测实验首次对城市中感热通量的特点进行了详细分析,发现午后城市中感热下降的时间较乡村晚,即使在夜间仍有较弱的感热通量。后来一些研究还发现 Q_H 与城市建筑物有关,如白天城市 Q_H 通常是乡村测量值的 2 倍,而夜间的感热强度和符号大致与建筑物的密度有关等(Christen, et al, 2004)。

除了感热通量外,热存储量 Q_s 是城市能量平衡中另一个重要分量(Oke, 1987)。 Q_s 主要是由于城市的热力特性(如较大的热容以及热传导)以及结构特征(例如建筑物的复杂三维几何表面),使大量多余的能量存储在建筑物中而产生的,其大小变化对城市地面能量平衡有显著意义(Grimmond, et al, 1999)。Christen 等(2004)基于 BUBBLE 实验中 7 个观测试验站点的数据分析了瑞典巴塞尔市中心及其附近存储热的变化规律,发现白天城市的热存储量为周围乡村的 2—3 倍,而夜间市中心的热存储量通常是乡村的 2 倍。对于夜间能量平衡而言,热存储量是变化最显著的一项。

在此需要指出的是,直接测量热存储量较为困难,通常的做法是通过扣除能量平衡方程中可以直接观测到的 Q^* 、 Q_H 和 Q_E 项来获得。但是,由于测量 Q^* 、 Q_H 以及 Q_E 过程中存在很多不确定性,加上热存储量的变化时间尺度长,以及受人为热源干扰等原因,因此,精确评估热存储量的大小目前仍然有相当的难度。

植被是城市中水汽的主要来源。长久以来,由于植被覆盖率较低,城市蒸发潜热 Q_E 一直被视为整个能量平衡中的一个小量,至少相对于乡村来说城市 Q_E 要低很多,因此,未受到过多地重视。然而,近几年的研究表明,城市中的 Q_E 比原本想象要高很多。Oke(1987)对城市中一个灌溉草坪的能量分布进行观测分析后提出,除非是可蒸发的水量不足,上游干、暖空气的平流往往会增加城市中植被的蒸腾和地表的蒸发,即所谓的“绿洲效应”。这个概念提出以后,有关城市蒸发潜热问题的研究开始重新受到重视。在此基础上,一些学者开展了较为精细的研究,如 Hagishima 等(2007)通过试验证明在相同的户外条件下,城市中一盆孤立的盆栽植物产生的 Q_E 是该植物在一植物丛中产生的 Q_E 的两倍。这些结果表明城市中单位植被面积上的蒸发可随植

被区域覆盖率而变化,当然也受人为浇灌影响。

与其他热通量相比,人为加热与人类活动的关系最密切,量级较小且变化缓慢,但与城市热岛效应的强度关系密切。据测算,在 20 世纪 60—70 年代中,一个中纬度普通城市的 Q_F 年平均值在 15—50 W/m^2 ,对区域温度的直接影响较小(Oke, 1988)。但从 80 年代开始,在一些大都市如伦敦(Harrison, et al, 1984)、纽约(Clark, et al, 1985)和东京(Ichinose, et al, 1999), Q_F 有明显的增长。如 Ichinose 等(1999)通过模拟研究发现,东京白天 Q_F 最大值为 400 W/m^2 ,冬季甚至可达到 1590 W/m^2 ,它对区域温度提高的直接影响可达到 $1^\circ C$ 。 Q_F 的大小也与人类活动的时、空变化直接相关。如受 Q_F 的影响,工作日与非工作日的温差可高达 $1^\circ C$ (Simmonds, et al, 1997)。最近,Ryu 等(2012)使用中尺度单层城市冠层模式研究显示人为加热、不可渗透表面以及城市的三维几何特征是影响城市热岛效应强度的 3 个关键因素。在 3 个要素中人为加热和不可渗透表面全天都对城市热岛效应强度具有正贡献,前(后)者对夜间(白天)城市热岛效应强度贡献最大,而城市三维几何特征只有在夜间才有正贡献,且这部分正贡献主要是来自垂直墙面内的存储热。

4 未来研究方向与展望

综上所述,有关城市热岛问题的研究在过去半个世纪中已取得很多可喜成果,这为城市热岛效应深入研究打下了很好的理论基础。在城市热岛的基本特征逐渐为人们所认识的同时,一些学者也开始对城市热岛问题的未来研究方向进行思考。从近 10 年的研究成果看,城市热岛研究不仅在深度有了明显加深,而且,广度也显著扩展,这其中包括探讨城市热岛对天气、气候和环境的影响。事实上,当今科学技术发展迅速,不确定因素较多,对未来城市热岛研究方向做出准确预测是很困难的。因此,这里根据一些国际上热点问题对城市热岛效应未来数十年的研究作一粗略展望。

4.1 沿海和复杂地形附近的城市热岛问题

将沿海(或湖、江、河)城市热岛作为一单独问题提出来,是因为世界上很多大城市都位于海岸附近,且往往都是工商业中心与人口和建筑物密集区,在世界经济、文化方面具有非常重要的影响。另一方面,与内陆城市不同,沿海城市的空气运动除了受热

岛环流的影响,还不可避免地受到海陆风的影响,两种环流的相互作用,可能改变城市能量平衡,并对气候变化、极端天气、污染物传播产生影响,因此,需要给予特别关注。

依山而建城市的热岛效应与附近地形产生的环流相互作用是另一异常复杂的科学问题。众所周知,不同地形高度的热力、动力差异能形成不同形式的山谷风、坡风和绕流,加上中尺度天气强迫可导致风向、风速、大气稳定度的日变化。在这些时、空多变的环流与城市热岛环流的非线性相互作用以及对城市地表温、湿度要素和风场、降水、大气边界层、湍流能量,空气污染物的三维空间扩散、雾和霾的产生和消亡的影响中存在许多有待解决的问题。如简单使用对水平均匀、平坦地形成立的边界层相似理论显然是不合适的。

目前沿海和复杂地形下的城市热岛这两个研究课题已经在一些地区开展,并得到部分科学家的重视,但是,研究深度和广度还远远不够。从研究内容看,如何区分城市热岛环流与海陆风和复杂地形产生的环流在气候变化、极端天气、污染物传播中所起的具体作用也是沿海(湖、江、河)或依山而建城市的热岛问题研究的重要内容。

4.2 城市群间热岛环流的相互作用

世界城市化进程加快的最明显表现就是单个城市面积的迅速扩大,城市之间的空间距离缩短,从而在局地范围上形成城市群或城市带。城市群的建立,使城市热岛环流不再是一个局地天气现象。在某些天气条件下,城市群区热岛环流之间相互作用可能加强热岛现象(如产生热浪)或有上风和下风位置的热岛效应之差别,故对温、湿和污染物的分布产生重要影响。此外,城市群热岛环流对能量平衡、边界层结构的影响,以及与盛行风向、风速的关系问题也值得展开深入思考。由于城市群的概念是在近几年才被提出来的,因此,这个课题是当前城市热岛问题研究中新的挑战和发展方向之一。至于如何估算局地热存储量和人为加热项在城市能量平衡关系中的大小还有待于很多细致的观测和模式研究工作。

4.3 城市化与空气污染的问题

城市和工业区中人类活动是城市大气污染物的主要来源,这些大气污染物与城市热岛效应之间具有相互影响的关系。一方面,由城市中车辆、空调以及工厂等排放出来的大量煤灰、粉尘以及 CO_2 、

N_2O 、 CH_4 、CFC 等温室气体在城市上空形成一层屏障,它们吸收长波辐射,使温度升高,从而加重城市热岛效应。另一方面城市热岛效应又对污染物的产生和分布具有重要影响。近年来开展了很多专门针对城市上空大气污染的外场观测实验,从观测结果来看,污染物的空间分布和时间演变特征主要受城市上空热力和动力过程驱动。最近 Agarwal 等(2010)利用一个二维数学模型研究在城市热岛条件下空气污染物分布和扩散特征时指出,城市热岛效应引起的中尺度风场有助于污染物的水平输送和向上扩展。此外,还特别分析了污染物的浓度分布与大气稳定度的关系,结果发现在大气稳定状态下,城市热岛效应会使污染物大量聚积在污染源的下风方向上,而当大气处于不稳定状态时,污染物则会较多集中在污染源附近。

就城市热岛效应而言,高温、弱风、相对湿度小以及晴空少云是其发展的重要局地天气条件,而这些大气条件又常常在空气污染产生和分布中起着关键作用(Yoshikado, et al, 1996)。Solecki 等(2004)在研究中发现城市温度与二级污染物 O_3 的形成有密切关系,城市温度升高常常会伴随 O_3 浓度的增高。徐祥德等(2006)分析了北京市区和郊区大气边界层对比观测试验结果后发现,城市热岛群中出现的多个辐合、辐散中心与城市建筑群“冠层”边界内的湍流垂直输送共同作用可导致城市大气污染局地“堆积”、“滞留”,呈非均匀分布特征。

一些研究还特别指出,某些大尺度天气背景下不仅很容易产生城市热岛效应,而且,与城市热岛效应相配合更易于空气污染的产生(Cheng, et al, 1998)。例如,Cheng 等(1998,2001)指出在台湾,当大陆高压东移,中心位于 125°E 时,或者热带低压或台风影响台湾时,台中市会出现 O_3 污染事件。

由此可见,城市中空气污染的未來研究須加强污染物的监测,通过外场观测和使用气象、大气化学模式来理解污染物间的化学反应、它们与热岛环流、周围地表不均匀产生的环流以及较大尺度系统的相互作用。所造成空气污染的分布可因时、因地不同,其结论也可能对不同城市而不同。

4.4 城市热岛效应对平均降水的影响

城市热岛效应对年、季、月平均降水率的影响主要表现在使城市中心及其下风地区降水增加。这一现象最早是由 Changnon(1968)以及 Holtzman 等

(1970)发现的。此后,在1971—1975年的城市气象实验(METROMEX)中,科学家们专门针对圣路易斯市及其周边的暴雨增强机制作了研究(Huff, et al, 1978)。结果发现受城市热岛效应的影响,深湿对流易在圣路易斯下风约40 km处增强。Changnon(1980)对1931—1976年连续时间序列降水进行订正后发现,随着芝加哥城市的发展,夏季年降水量增加了约0.4 mm。

就其成因而言,目前主要有如下3种观点:(1)城乡温差。认为城市中心较暖,大气稳定度较小,因此,在城市中心及其下风区易形成辐合,这有利于水汽和污染物的向上输送,在湿度足够大的情况下,就会形成云和降水。(2)城市建筑物使下垫面粗糙度增加。为验证这一降水成因,Thielen等(2000)在一个三维模式中对感热和潜热以及城市粗糙度进行参数化,并用来研究巴黎地区降水特征。模拟结果表明,由于城市下垫面粗糙度的增加确实引起环流变化而导致市区降水增强。(3)城市排放的气溶胶粒子大小分布和化学特性发生变化。气溶胶通常就是云凝结核和冰核,与降水具有密切关系。早期研究认为,燃烧植物产生的高浓度的云凝结核有利于小云滴核化,而小的云滴形成后导致云的反照率增大,从而对降水产生抑制。Rosenfeld(1999, 2000)利用TRMM和AVHRR卫星资料来佐证这一观点。但是近年来,一些学者认为城市产生的气溶胶也有助于降水增强。如Bréon等(2002)认为,气溶胶浓度的增加会使雨滴体积减小,并使暖雨碰并过程减少,从而增加云水含量。Andreae等(2004)分别考察了巴西有烟和无烟气溶胶粒子的组成及其浓度变化后指出,气溶胶可能在该地污染过渡季节具有一定激发对流的作用。

由此看来,城市热岛效应对降水影响的研究中仍然有很多问题有待解决,正如Shepherd(2005)强调,只有使用更为先进的观测系统才有可能解释气溶胶以及地表不均匀对降水的影响。加上与地形、较大水面产生的环流相互作用,使城市热岛效应对降水的影响更为复杂。

4.5 城市化对雾和闪电的影响

雾和闪电作为重要的天气现象,与人们出行等日常生活息息相关。如在2008年1月8—10日,中国安徽、山东南部、河南东部和江苏大部分地区出现的一次大雾天气过程,共造成20多个航班延误,36

起交通事故,近4000车辆滞留,400余艘各类船舶一度因雾停航。可以说,在经济高速发展的今天,这两类天气现象所带来的危害已经不亚于干旱、洪涝等灾害性天气。

雾和闪电的成因是多方面的,已知的原因包括风、温、湿以及大气中污染物(Oke, 1987)。近年来,一些学者在对雾和闪电进行深入研究时发现,城市热岛效应对雾和闪电也具有不可忽视的作用(李子华等,1994)。如Du等(1991)研究云南西双版纳地区景洪市的辐射雾特征时发现,辐射雾最先出现在城市上空几十米高的地方,1 h后才逐渐弥漫整个盆地,且雾的消散也是从城市上空开始的。Naccarato等(2003)以圣保罗市为例,通过观测研究城市热岛效应对闪电的影响。结果显示,强闪电区与主城区以及地表温度较高的区域相对应。目前,城市热岛效应能够改变雾和闪电活动规律的观点已经得到广泛认同,但是,其中复杂的物理机制仍然是学者们争论的焦点。

从目前大量观测和统计结果看,城市效应对雾的主要影响是使城市大雾发生频率呈逐年下降的趋势(Sachweh, et al, 1995)。有学者认为,造成这种现象主要是由于城市热岛效应加强,城市边界层内的水汽减少,温度增加所致(Du, et al, 1991; Tardif, et al, 2007)。也有一些学者认为,这与城市上空气溶胶浓度增加有关。如Shi等(2008)认为,气溶胶增多,虽然一方面使凝结核增多,有利于雾滴形成。但另一方面,由于气溶胶粒子能够吸收和散射辐射,会使大气逆辐射增加,在城市上空形成一层屏障。这种屏障作用使夜间城市低层热量无法向外释放,导致热岛效应加剧,进而阻碍雾的形成。

城市效应对闪电的主要影响则是使城市上空及其下游地区成为强闪电的多发区。这个现象是Westcott(1995)在研究美国中部芝加哥市上空电闪活动时首次发现并提出的。在此后20年中,在世界很多地方科学家陆续通过观测事实证实了其普遍性。对于这一现象科学家们也提出了多种可能的解释,其中最具代表性的是3种观点:(1)认为是人类活动产生的热量和水汽使大气稳定度减小造成的;(2)认为是由城市中建筑物等人造表面增加,下垫面粗糙度增大,引起城市周围低层风场辐合加强导致的;(3)认为可能是城市上空气溶胶浓度和粒子半径增加引起水汽凝结物动力特性改变的结果。近年

来,有些学者在上述3个观点的基础上,又对这种现象给出了新的物理解释,即城市热岛效应与人类活动产生的气溶胶的共同作用结果(Orville, et al, 2001; Van Den Heever, et al, 2007)。他们认为,地表摩擦与城市热岛效应之间存在非线性相互作用,即当热岛效应加强以及下垫面粗糙度增大时,就会导致低层气流辐合加强,稳定度减小。一旦对流产生,气溶胶会使云内小水滴的碰并过程减慢,导致更多的液态水被抬升到高层。升高的小水滴在冻结过程中会释放出大量潜热,进而使云内对流加强,电荷分离过程加快。

值得注意的是,早期有关城市效应对雾和闪电影响的研究大部分选取的城市地形分布相对简单,且多为平原,地形起伏不大。但是,近年来的一些研究发现城市地形相对复杂可能会导致某些特殊现象发生(Rose, et al, 2008)。因此,在考虑城市效应的影响时,也应当关注其与其他要素相互作用产生的可能影响。

4.6 城市天气预报的精细化

精细化天气预报是当前气象工作的重大任务之一。随着模式模拟水平尺度的减小,影响模式预报准确性的因子就可能成倍增加。城市是在天气预报精细化需求背景下,不可忽略的重要因素之一。如何在模式边界层、城市冠层以及陆面过程中对城市热力、动力学以及人为加热非线性过程进行合理的参数化,都是今后城市天气预报模式精细化研究值得注意的课题。

中国在2008年奥林匹克运动会期间,在结合高分辨率的观测资料、简单预报工具和预报员经验用于城市精细化预报方面积累了很多经验。但在如何将高分辨率的观测资料同化以改善短时预报,以及对台风、龙卷、暴雨、大雪、冻雨等极端天气经过城市时所造成的风、雨、雪的大小、分布和湍流强度做出精细化预报方面,仍有很多挑战性研究课题。无论在预报方法还是在可预报性上都有许多科学问题值得探讨。对于上述城市下边界的不确定性,可从中尺度预报场采取降尺度方法来预报城市各分区的天气变化,或使用高分辨率的集合模式来预报产生各种天气现象的概率。

4.7 城市气候变化预测

在全球气候变化的背景下,城市气候作为区域气候的重要内容正受到越来越多的科学家的重视

(陈隆勋等,2004)。最近,有科学家利用14个全球气候模式尝试对纽约市未来100年的高温天进行评估预测。结果表明,到2050年,纽约市的高温天数将是现在的4倍,到2080年将可能增加7倍。城市热岛强度会继续发展抑或有所缓解将是未来研究城市气候变化预测中一个重要课题。另外,要想对城市气候变化进行准确预测,首先需要了解城市发展对区域地表显热和潜热、降水、辐射梯度、水汽辐合带的强度影响和再分布,其次需要理解城市热岛微气候与区域气候的联系以及多尺度之间的相互作用。在现在气候研究和业务预报中,区域气候模式是一个重要工具,它在极端气候事件的模拟预测中效果显著。但是,目前利用区域气候模式准确模拟和预测城市气候变化方面的研究工作并不多,这可能与城市所涉及的动力热力过程较为复杂有关。如何在模式边界层、近地面层、城市冠层以及陆面过程中准确描述出人类活动驱动下的城市热力、动力学非线性过程及其与自然生态环境之间的相互作用,如何准确获取最新的城市下垫面信息(如道路、工厂、房屋、树木、停车场、公园等),如何将城市排放的气溶胶对大气辐射和降水的影响参数化,又如何验证各物理过程参数化的合理性,这些都是在城市气候变化预测问题的研究中对区域气候模式改进和完善的重点。

4.8 城市热岛效应减缓方案的制定

随着人们对城市热岛效应给自然环境、区域气候造成负面影响的认识,开始有更多的科学家和政府官员思考如何治理这种天气现象以改善人类生活环境。目前,国际上主要推崇的几种治理方案包括:(1)增加城市绿地和森林覆盖面积;(2)采用新型的建筑材料;(3)减少空调、汽车等人为加热;(4)建造节能房屋和低能耗汽车等。尽管这些方法看上去非常合理简单,但是这其中也包含了很多科学问题需要认真和深入思考。如在增加城市绿地和森林覆盖时,在哪个区域种哪类树对城市热岛减缓以及污染物的抑制更加有效。除了采用新型的建筑材料以外,材料的颜色是否也有一定的影响,已有研究证实当城市用白色屋顶时将使热岛效应显著减弱。如考虑某些盛行风条件,如何合理设计卫星城市的分布以减小城市热岛引起的负作用也是一有意义的研究课题(Zhang, et al, 2009, 2011)。

5 结 语

本文在对近 50 年来城市热岛方面研究成果进行总结的基础上,概述了与城市热岛效应有关的研究方法,以及与之关系最密切的城市边界层、热岛环流与复杂地形的相互作用以及能量平衡等理论研究的进展和不足。最后对沿海和复杂地形附近的城市热岛问题、城市群间热岛环流的相互作用等当前 8 个城市热岛研究的热点问题进行了探讨,并对其发展前景进行了粗略的展望。

从目前的研究现状来看,城市热岛所涉及的问题很多,要对城市热岛效应充分认识还需要很长的时间。特别是中国城市热岛的深入研究刚刚起步,与国际的相关工作相比,除了上面所述及的具有挑战性的研究问题外,还需做大量的基础性工作。如首先利用卫星遥感资料建立包括地形、土地使用、植被、土壤条件的地表信息库,然后需在有代表性的城市开展地表通量、城市冠层特征和生态环境综合观测以建立高分辨率的交通、工商业、三维建筑物分布、树木、公园以及人口分布的城市类型数据库,这些信息还须能与现有城市模式中的各参数相对应。尽管如此,随着中国更多科学家的参与,特别是每年有很多优秀研究人员的加入,相信在不久的将来会看到许多与城市热岛效应研究有关的高水平研究成果。同时,随着观测手段的不断发展,数值模式的完善、精细化和陆面过程的合理参数化,人们对中国各城市的热岛效应将有深入理解,这必将改善中国城市热岛效应的预报和诊断能力,并促进各城市采取有力措施以减缓对城市热岛效应给自然环境、区域气候造成的负面影响。

致谢:感谢苗世光博士、董春卿先生提出的宝贵意见和建议。

参考文献

陈隆勋,周秀骥,李维亮等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. 气象学报, 62(5): 634-646

何晓凤,蒋维楣,陈燕等. 2007. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究. 地球物理学报, 50(1): 74-82

胡非,洪钟祥,雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展. 大气科学, 27(4): 712-728

蒋维楣,陈燕. 2007. 人为热对城市边界层结构影响研究. 大气科学, 31(1): 37-47

李维亮,刘洪利,周秀骥等. 2003. 长江三角洲城市热岛与太湖对

局地环流影响的分析研究. 中国科学 D 辑, 33(2): 97-104

李子华,彭中贵. 1994. 重庆市冬季雾的物理化学特性. 气象学报, 52(4): 477-483

桑建国,张治坤,张伯寅. 2000. 热岛环流的动力学分析. 气象学报, 58(3): 321-327

佟华,刘辉志,桑建国等. 2004. 城市人为热对北京热环境的影响. 气候与环境研究, 9(3): 409-421

王迎春,郑大玮,李青春. 2009. 城市气象灾害. 气象出版社:北京, 312pp

徐祥德,丁国安,卞林根等. 2004. BECAPEX 科学试验城市建筑群落地边界层大气环境特征及其影响. 气象学报, 62(5): 663-671

徐祥德,丁国安,卞林根. 2006. 北京城市大气环境污染机理与调控原理. 应用气象学报, 17: 815-828

Ackerman B. 1974. Wind fields over the St. Louis metropolitan area. J Air Pollut Control Assoc, 24: 232-236

Ackerman B. 1985. Temporal march of the Chicago heat island. J Climatol Appl Meteor, 24: 547-554

Agarwal M, Tandon A. 2010. Modeling the effects of urban heat islands generated mesoscale wind on air pollution dispersion in a patchy atmosphere. Natural Resource Modeling, 23(1): 48-78

Allwine K J, Shinn J H, Streit G E, et al. 2002. Overview of urban 2000: A multiscale field study of dispersion through an urban environment. Bull Amer Meteor Soc, 83(4): 521-536

Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. 2004. Smoking rain clouds over the Amazon. Science, 303(5662): 1337-1342

Arnfield A J. 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. Int J Climatol, 23(1): 1-26

Bornstein R, Lin Q L. 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. Atmos Environ, 34(3): 507-516

Bréon F M, Tanre D, Generoso S. 2002. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite. Science, 295(5556): 834-838

Calhoun R, Gouveia F, Shinn J, et al. 2005. Flow around a complex building: Experimental and large-eddy simulation comparisons. J Appl Meteor, 44(5): 571-590

Camelli F E, Hanna S R, Löner R. 2004. Simulation of the MUST field experiment using the FEFLO-Urban CFD model // Fifth Symposium on the Urban Environment. Vancouver, BC, Canada: American Meteorological Society

Cenedese A, Miozzi M, Monti P. 2000. A laboratory investigation of land and sea breeze regimes. Exp Fluids, 29(S1): S291-S299

Cenedese A, Monti P. 2003. Interaction between an inland urban heat island and a sea-breeze flow: A laboratory study. J Appl Meteor, 42(11): 1569-1583

Champollion C, Drobinski P, Haefelin M, et al. 2009. Water vapour variability induced by urban/rural surface heterogeneities during convective conditions. Quart J Roy Meteor Soc, 135 (642): 1266-1276

- Chandler T J, Gregory S. 1976. *The Climate of the British Isles*. London, UK: Longman, 390pp
- Changnon S A Jr. 1968. The La Porte weather anomaly: Fact or fiction? *Bull Amer Meteor Soc*, 49: 4-11
- Changnon S A Jr. 1980. Evidence of urban and lake influences on precipitation in the Chicago area. *J Appl Meteor*, 19(10): 1137-1159
- Chen F, Kusaka H, Tewari M, et al. 2004. Utilizing the coupled WRF/LSM/Urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the greater Houston area // Fifth Conference on Urban Environment. Vancouver, BC, Canada: Amer Meteor Soc
- Cheng W L, Bai J L. 1998. Relationship between high ozone concentration and synoptic patterns in Nantou, Taiwan. *Tunghai J*, 39: 117-40
- Cheng W L, Pai J L, Tsuang B J, et al. 2001. Synoptic patterns in relation to ozone concentrations in west-central Taiwan. *Meteor Atmos Phys*, 78(1-2): 11-21
- Christen A, Vogt R. 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *Int J Climatol*, 24(11): 1935-1421
- Clark E C, Bornstein R D, Tam Y T. 1985. Current and potential anthropogenic moisture effects on the New York City planetary boundary layer. *J Air Pollut Control Assoc*, 35(8): 831-835
- Coirier W J, Fricker D M, Furmacyk M, et al. 2005. A computational fluid dynamics approach for urban area transport and dispersion modeling. *Environ Fluid Mech*, 15(5): 443-479
- Collier C G, Davies F, Bozier K E, et al. 2005. Dual-Doppler lidar measurements for improving dispersion models. *Bull Amer Meteor Soc*, 86(6): 825-838
- Collier C G. 2006. The impact of urban areas on weather. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 132(614): 1-25
- Davies F, Collier C G, Pearson G N, et al. 2004. Doppler lidar measurements of turbulent structure function over an urban area. *J Atmos Ocean Tech*, 21(5): 753-761
- Davis J C, Collier C G, Davies F, et al. 2008. Spatial variations of sensible heat flux over an urban area measured using Doppler lidar. *Meteor Appl*, 15(3): 367-380
- Du M Y, Ueno K, Yoshino M. 1991. Heat island of a small city and its influences on the formation of a cold air lake and radiation fog in Xishuangbanna, tropical China. *Energy Buildings*, 15(1-2): 157-164
- Dupont S, Otte T L, Ching J K S. 2004. Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model. *Bound Layer Meteor*, 113(1): 111-158
- Figuerola P I, Mazzeo N A. 1998. Urban-rural temperature differences in Buenos Aires. *Int J Climatol*, 18(15): 1709-1723
- Freitas E D, Rozoff C M, Cotton W R, et al. 2007. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. *Bound Layer Meteor*, 122(1): 43-65
- Grimmond C S B, Oke T R. 1999. Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. *J Appl Meteor*, 38(7): 922-940
- Hagishima A, Narita K I, Tanimoto J. 2007. Field experiment on transpiration from isolated urban plants. *Hydrol Proc*, 21(9): 1217-1222
- Hanna S R, Hansen O R, Dharmavaram S. 2004. FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. *Atmos Environ*, 38(28): 4675-4687
- Hanna S R, Brown M J, Camelli F E, et al. 2006. Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An application of five computational fluid dynamics models. *Bull Amer Meteor Soc*, 87(12): 1713-1726
- Harrison R, McGoldrick B, Williams C G B. 1984. Artificial heat release from Greater London, 1971-1976. *Atmos Environ*, 18(11): 2291-2304
- Holt T, Pullen J. 2007. Urban canopy modeling of the New York city metropolitan area: A comparison and validation of single- and multilayer parameterizations. *Mon Wea Rev*, 135(5): 1906-1930
- Holtzman B G, Thom H C S. 1970. The la Porte precipitation anomaly. *Bull Amer Meteor Soc*, 51: 335-337
- Howard L. 1883. *The Climate of London Deduced from Meteorological Observations (3rd Ed)*. Vol. 1. London: Harvey and Darton, 348pp
- Hu Y H, Jia G S. 2009. Influence of land use change on urban heat island derived from multi-sensor data. *Int J Climatol*, 30(9): 1382-1395
- Huber A, Freeman M, Spencer R, et al. 2005. Applications of CFD simulations of pollutant transport and dispersion within ambient urban building environments: Including homeland security // AWMA 98th Annual Conference. Minneapolis, MN: AWMA
- Huff F A, Changnon S A Jr. 1972. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis. *J Appl Meteorol*, 11(5): 823-842
- Huff F A, Vogel J L. 1978. Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region. *J Appl Meteor*, 17(5): 565-577
- Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmos Environ*, 33(24-25): 3897-3909
- Johnson G L, Davis J M, Karl T R, et al. 1994. Estimating urban temperature bias using polar-orbiting satellite data. *J Appl Meteor*, 33(3): 358-369
- Kimura F. 1989. Heat flux on mixture of different land-use surface: Test of a new parameterization scheme. *J Meteor Soc Japan*, 67(3): 401-409
- Kimura F, Takahashi S. 1991. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metro-

- politan area: A numerical experiment. *Atmos Environ*, 25(2): 155-164
- Kondo H. 1990. A numerical experiment on the interaction between sea breeze and valley wind to generate the so-called "Extended sea breeze". *J Meteor Soc Japan*, 68: 435-446
- Kondo H. 1995. The thermally induced local wind and surface inversion over the Kanto plain on calm winter nights. *J Appl Meteor*, 34(6): 1439-1448
- Kropfli R A, Kohn N M. 1978. Persistent horizontal rolls in the urban mixed layer as revealed by dual Doppler radar. *J Appl Meteor*, 17(5): 669-676
- Kusaka H, Kimura F, Hirakuchi H, et al. 2000. The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area. *J Meteor Soc Japan*, 78(4): 405-420
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single layer urban canopy model for atmospheric models; Comparison with multi-layer and Slab models. *Bound Layer Meteor*, 101(3): 329-358
- Kusaka H, Kimura F. 2004. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island; Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model. *J Appl Meteor*, 43(12): 1899-1910
- Lemonsu A, Grimmond C S B, Masson V. 2004. Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city; Marseille. *J Appl Meteor*, 43(2): 312-327
- Li X L, Bi B G, Li Z C. 2005. Numerical study of winter urban boundary layer structure over Beijing area. *Acta Meteor Sinica*, 19(3): 317-331
- Liu H P, Chan J C L, Cheng A Y S. 2001. Internal boundary layer structure under sea-breeze conditions in Hong Kong. *Atmos Environ*, 35(4): 683-692
- Magee N, Curtis J, Wendler G. 1999. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska. *Theor Appl Climatol*, 64(1-2): 39-47
- Manley G. 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quart J Roy Meteor Soc*, 84(359): 70-72
- Martilli A. 2002. Numerical study of urban impact on boundary layer structure; Sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture. *J Appl Meteor*, 41(12): 1247-1266
- Martilli A, Clappier A, Rotach M W. 2002. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Bound Layer Meteor*, 104(2): 261-304
- Martilli A. 2007. Current research and future challenges in urban mesoscale modeling. *Int J Climatol*, 27(14): 1909-1918
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound Layer Meteor*, 94(3): 357-397
- Masson V. 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theor Appl Climatol*, 84(1-3): 35-45
- Miao S G, Chen F, Lemone M A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *J Appl Meteor Climatol*, 48(3): 484-501
- Morris C J G, Simmonds I, Plummer N. 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *J Appl Meteor*, 40(2): 169-182
- Naccarato K P, Pinto O Jr, Pinto I R C A. 2003. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. *Geophys Res Lett*, 30: 1674, doi: 10.1029/2003GL017496
- Ohashi Y, Kida H. 2002. Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas; A numerical study with a mesoscale atmospheric model. *J Appl Meteor*, 41(1): 30-45
- Ohashi Y, Kida H. 2004. Local Circulations Developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas. part II; Effects of urban and mountain areas on moisture transport. *J Appl Meteor*, 43(1): 119-133
- Oke T A. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quart J Roy Meteor Soc*, 108(455): 1-24
- Oke T A. 1987. *Boundary Layer Climates* (2nd Ed). London and New York: Methuen
- Oke T R. 1988. The urban energy balance. *Prog Phys Geogr*, 12(4): 471-508
- Ooka R. 2007. Recent development of assessment tools for urban climate and heat island investigation especially based on experience in Japan. *Int J Climatol*, 27(14): 1919-1930
- Orville R E, Huffines G, Nielsen-Gammon J, et al. 2001. Enhancement of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas. *Geophys Res Lett*, 28(13): 2597-2600
- Peterson J T, Stoffel T L. 1980. Analysis of urban-rural solar radiation data from St. Louis, Missouri. *J Appl Meteor*, 19(3): 275-283
- Pol S U, Brown M J. 2006. Flow patterns at the ends of a street canyon: Measurements from the Joint Urban 2003 field experiment//Sixth Symposium on the Urban Environment. Atlanta, GA: Amer Meteor Soc
- Rao P K. 1972. Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bull Amer Meteor Soc*, 53: 647-648
- Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C H. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. *J Environ Sci*, 20(1): 120-128
- Rose L S, Stallins J A, Bentley M L. 2008. Concurrent cloud-to-ground lightning and precipitation enhancement in the Atlanta, Georgia (United States), urban region. *Earth Interact*, 12(11): 1-30
- Rosenfeld D. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophys Res Lett*, 26(20): 3105-3108
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban air pollution. *Science*, 287(5459): 1793-1796

- Rotach M W. 2002. Overview on the Basel Urban Boundary Layer Experiment-BUBBLE// AMS 4th Symposium on the Urban Environment. Norfolk VA
- Rotach M W, Vogt R, Bernhofer C, et al. 2005. BUBBLE-an urban boundary layer meteorology project. *Theor Appl Climatol*, 81(3-4): 231-261
- Roth M, Oke T R, Emery W J. 1989. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *Int J Remote Sens*, 10(11): 1699-1720
- Roth M. 2000. Review of atmospheric turbulence over cities. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(564): 941-990
- Ryu Y H, Baik J J. 2012. Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity. *J Appl Meteor Climatol*, 51(5): 842-854
- Sachweh M, Koepke P. 1995. Radiation fog and urban climate. *Geophys Res Lett*, 22(9): 1073-1076
- Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interact*, 9(12): 1-27
- Shi C N, Roth M, Zhang H, et al. 2008. Impacts of urbanization on long-term fog variation in Anhui province, China. *Atmos Environ*, 42(36): 8484-8492
- Shou Y X, Zhang D L. 2010. Impact of environmental flows on the daytime urban boundary layer structures over the Baltimore metropolitan region. *Atmos Sci Lett*, 11(1): 1-6
- Simmonds T, Keay K. 1997. Weekly cycle of meteorological variations in Melbourne and the role of pollution and anthropogenic heat release. *Atmos Environ*, 31(11): 1589-1603
- Solecki W D, Cynthia R, Gregory P, et al. 2004. Urban Heat Island and Climate Change: An Assessment of Interacting and Possible Adaptations in the Camden, New Jersey Region. Trenton, New Jersey: Environmental Assessment and Risk Analysis Element Research Project Summary. New Jersey Department of Environmental Protection Division of Science
- Stanhill G, Kalma J D. 1995. Solar dimming and urban heating at Hong Kong. *Int J Climatol*, 15(8): 933-941
- Tardif R, Rasmussen R M. 2007. Event-based climatology and typology of fog in the New York city region. *J Appl Meteor Climatol*, 46(8): 1141-1168
- Tereshchenko I E, Filonov A E. 2001. Air temperature fluctuations in Guadalajara, Mexico, from 1926 to 1994 in relation to urban growth. *Int J Climatol*, 21(4): 483-494
- Tewari M, Kusaka H, Chen F, et al. 2010. Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion. *Atmos Res*, 96(4): 656-664
- Thielen J, Wobrock W, Mestayer A, et al. 2000. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: A sensitivity study in 2D in the meso- γ scale. *Atmos Res*, 54(1): 15-39
- Tong H, Walton A, Sang J G, et al. 2005. Numerical simulation of the urban boundary layer over the complex terrain of Hong Kong. *Atmos Environ*, 39(19): 3549-3563
- Unger J, Sümeghy Z, Zoboki J. 2001. Temperature cross-section features in an urban area. *Atmos Res*, 58(2): 117-127
- United Nations. 2001. Compendium of Human Settlements Statistics 2001 (Sixth Issue). New York: United Nations Publication, 255pp
- Unwin D J. 1980. The synoptic climatology of Birmingham's urban heat island, 1965-1974. *Weather*, 35: 43-50
- Van Den Heever S C, Cotton W R. 2007. Urban aerosol impacts on downwind convective storms. *J Appl Meteor Climatol*, 46(6): 828-850
- Westcott N E. 1995. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major Midwestern urban areas. *J Appl Meteor*, 34(7): 1633-1642
- Wong K K. 1976. Urban Perturbations on the Mixing Layer Airflow in St. Louis. M. S. thesis, Atmos. Sci. Dept., Laramie; University of Wyoming
- Wong K K, Dirks R A. 1978. Mesoscale perturbations on airflow in the urban mixing layer. *J Appl Meteor*, 17(5): 677-688
- WMO. 2007. Shanghai WMO GURME pilot project. Shanghai, China.
- Xu X D, Zhou L, Zhou X J, et al. 2005. Influencing domain of peripheral sources in the urban heavy pollution process of Beijing. *Sci China Series D: Earth Sciences*, 48(4): 565-575
- Yamashita S, Sekine K, Shoda M, et al. 1986. On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan. *Atmosph Environ*, 20(4): 681-686
- Yap D, Oke T R. 1974. Sensible heat fluxes over an urban area-Vancouver, B C. *J Appl Meteor*, 13(8): 880-890
- Yoshikado H, Kondo H. 1989. Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo. *Bound Layer Meteor*, 48(4): 389-407
- Yoshikado H. 1990. Vertical structure of the sea breeze penetrating through a large urban complex. *J Appl Meteor*, 29(9): 878-891
- Yoshikado H, Tsuchida M. 1996. High levels of winter air pollution under the influence of the urban heat island along the shore of Tokyo Bay. *J Appl Meteor*, 35(10): 1804-1813
- Zajic D, Fernando H J S, Princevac M, et al. 2004. Flow and turbulence in urban canopies// Fifth Conference on the Urban Environment. Vancouver, B C, Canada: American Meteorological Society
- Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R. 2009. Upstream urbanization exacerbates urban heat island effects. *Geophys Res Lett*, 36: L24401, doi: 10.1029/2009GL041082
- Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R, et al. 2011. Impact of upstream urbanization on the urban heat island effects over the Washington-Baltimore metropolitan region. *J Appl Meteor Climatol*, 50(10): 2012-2029