

全球变暖和城市化背景下的城市热岛效应

李国栋¹ 张俊华¹ 程弘毅² 赵丽萍³ 田海峰¹

(1 河南大学环境与规划学院, 开封 475000; 2 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 3 广东商学院, 广州 510320)

摘要: 随着城市化进程的加快, 城市化对城市各气候要素产生了越来越大的影响, 如城市气候出现“五岛”效应特征, 这对人类的生产生活产生了一系列影响和危害。同时, 在全球变暖背景下, 城市热岛效应对区域平均气温序列的影响问题也引起了广泛重视。开展城市热岛效应的成因、强度、范围、危害等方面的研究, 对认识城市边界层特征和城市能量平衡具有重要的理论意义, 在城市生态环境建设、城市规划设计、人居环境建设等方面具有重要的现实意义。主要综述了在全球变暖和快速城市化的背景下城市热岛效应研究在理论、方法等各方面的研究进展, 并提出了目前城市气候研究中存在的问题。

关键词: 热岛效应, 城市化, 全球变暖

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.06.006

Urban Heat Island Effect against the Background of Global Warming and Urbanization

Li Guodong¹, Zhang Junhua¹, Cheng Hongyi², Zhao Liping³, Tian Haifeng¹

(1 College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475000 2 College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000 3 Guangdong University of Business Studies, Guangzhou 510320)

Abstract: High-speed urbanization exercises an obvious influence on urban climate factors, so urban climate characteristics appear to have “five islands” effects, and they bring a series of impacts on people’s production work and livelihood. The paper summarizes some theories, research methods and focus problems about urban heat island research against the background of global warming and high-speed urbanization, and furthermore, the paper comes up with the problems and gives a prospect of urban climate research. At present, it is important to study the cause, strength, range and impact of urban heat island effect, the researches have an important theoretical significance in the study of urban boundary layer and urban energy balance, at the same time, they have an important application value in terms of urban environment construction, urban planning, urban architectural design, urban energy using and the health of residents.

Keywords: urban heat island effect, urbanization, global warming

1 引言

近百年来, 全球变暖及其原因分析已经引起人们的广泛重视, 它对全球生态系统的结构、功能和过程产生了重要影响, 也对世界各国的社会、经济、政治等产生了重大影响。目前, 全球变暖已成为各国政府、社会公众以及科学界共同关心的重大问题。IPCC最近两次评估报告分别得出过去100年全球平均气温上升0.6℃(0.4~0.8℃)和0.78℃(0.56~0.92℃)的结论^[1, 2]。在全球变暖背景下, 近百年中国气候变化的主要特征与全球气候变化的趋势一致, 其中, 近百年中国年平均地表气温升温幅度约为0.5~0.8℃, 比全

球同期增温略高^[3]。近50年来, 中国年平均地表气温变暖幅度约为1.1℃, 增温速率接近0.22℃/10a, 比全球或北半球同期平均增温速率明显偏高^[4]。气候代用资料研究表明, 20世纪的变暖在全球(或北半球)和中国都可能是近千年中最显著的, 其增暖趋势和增温程度可能高于中世纪温暖期的水平^[5-7]。

城市气候是在区域气候的背景上, 在城市的特殊下垫面和城市人类活动的影响下而形成的一种局地气候。1833年, 英国学者Howard发现伦敦市内的气温比郊区高^[8], Manley在1958年首次提出城市热岛(Urban Heat Island)的概念^[9], 各国研究者在诸多城市进行了城市气候的观测研究^[10]。国内早在宋朝时, 著名诗人陆游就有“城市尚余三伏热, 秋光先到野人家”, 描述了城市热岛效应这种现象。Zsolt等^[11]认为城市热岛效应是人类首次关注城市气候特征的开端。在当前全球变暖背景下, 城市化进程的加快导致城市人口密度急剧增加、人工构筑的下垫面面积急剧扩大、化石

收稿日期: 2011年9月13日; 修回日期: 2012年1月14日

第一作者: 李国栋(1978—)

通信作者: 张俊华, Email: oklgd@163.com

资助信息: 国家自然科学基金(41101088, 40901021); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(12A170002); 广东高校优秀青年创新人才培育项目(LYM10080)

燃料大量消耗、各种人为热大量释放，这些因素都使得城市气候诸要素产生明显变化，对人们生产生活的影 响日益突出。因此，开展城市热岛效应的成因、强度、范围、危害等研究，具有十分重要的理论和应用价值。同时，评估城市人类活动引起的增温与全球变暖背景下的自然增温各自对区域气候的影响程度，估算城市热岛效应对区域增温的贡献率问题也是目前气候变化研究中需要探索的难题^[7]。

2 城市化与城市热岛效应

伴随着城市化高速发展的同时，城市化对气候产生了明显的影响。城市人口密集，经济活动高度集中，工业生产以及居民生活向城市大气中排放了大量的人为热量、水汽、烟尘、气溶胶等物质；对下垫面的大幅度改造，导致不透水面积逐渐增大，地一气间的能量交换发生了明显变化；再加上城市下垫面的热力学性质和几何形状与郊区有很大不同，这对城市气温、降水、湿度、日照、能见度和风等气候要素都产生很大影响，导致城市气候出现“五岛”特征，即“热岛”、“湿岛”、“干岛”、“雨岛”和“混浊岛”^[12]，其中，城市热岛效应是城市气候不同于其他地域的最明显特征之一。国内外大量的研究结果表明，世界上所有城市，无论规模大小、纬度高低，位于沿海还是内陆，以及地形、环境如何，均存在城市热岛效应^[10]，即城市气温经常比四周郊区高，尤其当天气晴朗无风时，热岛强度更大，而热岛强度又与城市规模、人口密度、能源消耗量和建筑物密度等关系密切。国家环保总局公布的《中国城市环境保护》报告中列举了城市环保工作面临的三大新问题，其中，城市热岛效应榜上有名。

3 城市热岛效应对区域温度序列的影响

任国玉等^[7]对近54年中国600余个观测站资料分析发现：城市化因素对中国地面平均气温记录具有显著影响，近50年的中国平均气温变化趋势中，在很大程度上包含着城市化因素的影响。全国台站中的城市站均存在城市化对地面气温记录的影响，但在现有的全国和区域平均温度变化分析中一般没有考虑。对增温明显的华北地区95个国家基本/基准站的分析发现：1961—2000年间，由于城市化影响引起的国家基本/基准站年平均气温增加值达到0.44℃，城市热岛增温率为0.11℃/10a，城市热岛增温贡献率达到38%。1961—2000年间，由于热岛效应加强因素引起的北京地区国家基本/基准站平均年温度变化速率为0.16℃/10a，城市热岛增温贡献率达到71%^[13]，这说明北京地区国家基本/基准站记录的地表气温变暖中，大部分为城市化影响所致。湖北省1961—2000

年间国家基本/基准站观测的年平均气温增加速率为0.12℃/10a，城市热岛增温贡献率更是达到了75%^[14]。甘肃省1961—2002年间城市站和国家基本/基准站比乡村站增温趋势显著，城市热岛效应对基本/基准站年平均温度的增温贡献率为18.5%，对城市站年平均温度的增温贡献率为37.6%^[15]。山东省1963—2002年间城市热岛效应增强因素对基本/基准站年平均温度的增温贡献率为27.22%，对城市站年平均温度的增温贡献率为21.71%^[16]。任玉玉等^[17]认为，在中国大陆地区，国家级气象台站年平均地面气温的上升趋势中，至少有27.3%可归因于城市化影响，对于全球或半球陆地平均气温序列而言，可能不超过总增温的10%。

在诸如上述的有关研究中，大多发现城市热岛强度增强因素对当地平均地面气温记录具有不可忽略的影响，需要在气候变化检测和原因分析中给予更多注意，在气候变化研究中如何从时间尺度较长的气候序列中剔除城市热岛强度变化的影响显得非常重要。因此在检测区域和全球平均地面气温变化趋势时，在城市化对地面气温记录影响很大的区域，需要对这种影响的偏差进行订正，获得消除城市化影响的地面气温资料序列。目前，准确估计城市化对单站和区域平均气温序列的影响是十分困难的，还没有任何一种方法可以对每一个测站都进行热岛效应的检验和订正，而且各个国家和地区的经济和城市的发展水平有很大的不同，也给统一订正造成极大困难。目前，对城市化影响的订正研究还比较少，具有代表性的工作有：Hansen等^[18, 19]对全球陆地气温变化中的城市化影响偏差进行了分析和订正，指出城市化对20世纪地面气温趋势的影响不会超过0.1℃，相比于全球变暖，城市化的影响有限，城市化在区域尺度的影响要比在全球尺度的影响明显。在国内，张爱英等^[20]、任国玉等^[21]在中国大陆2300个气象站网中遴选出了138个参考站，把中国划分成6个区域，在对资料进行均一性检验、订正的基础上，对每个分区以及中国平均的国家级站地面气温序列中城市化影响偏差进行了分析评价，结果表明：由国家站资料建立的中国大陆年平均气温序列在44年间线性增温率为0.278℃/10a，而由参考站资料建立的中国大陆年平均气温序列同期增温率为0.202℃/10a，国家级站城市化增温率为0.076℃/10a，占全部增温率的27.33%。该成果在我国地面气温变化的检测分析和城市台站城市化增温评价中有重要的价值。

4 城市热岛效应的危害

城市气候效应导致城市的气温、湿度、降水、风速和气压等气候要素出现不同程度的变化，城市气候

要素的改变,尤其是城市热岛效应会对人类的生产生活产生一系列危害,这些危害表现在以下方面。

(1) 城市气候效应带来的热岛效应可以造成局部地区气候异常:冬季干燥、夏季燥热,夏季的高温天气持续时间较长,城市高温出现的频率和高温灾害加重,城市气候舒适度变差。

(2) 由于城市热岛环流的存在,释放到大气中的污染气体和气溶胶被带向城市中心,加重市区空气污染的程度。这会导致光化学烟雾的形成速率加快,产生“雾岛”或灰霾天气^[22],容易引发“酸雨”现象;同时也会导致空气质量恶化,对人们的身体健康产生严重危害。

(3) 加大城市高温出现的频率,加剧了能源消耗,对社会生产、国民经济带来损失。Fung等^[23]研究表明,香港夏季月平均气温升高1℃,香港家庭电力消耗、商业电力消耗、工业电力消耗将分别增加9.2%,3.0%,2.4%,相应经济方面的影响达17亿港元。

(4) 城市气候效应导致产生暖冬,无霜期延长,使植物的发芽和开花期提前,植物生长期延长,绿化程度提高。此外,也可能会诱发流行性病毒的大规模爆发。

5 国内外城市热岛效应研究的方法、理论

二战后,随着工业化高速发展,城市化进程的加快,城市规模的急剧扩大,城市气候效应越来越明显,城市气候问题开始被广泛关注。随着城市气候观测手段的日益现代化,城市气候研究在深度、广度和方法上得到了快速发展。Landsberg^[24]发表的《城市气候》一书,系统地分析了城市和郊区气候的差异及形成原因,并对世界,特别是发达国家城市气候研究工作进行了总结。城市热岛效应是人类关注城市气候特征的开端,对城市热岛效应的研究一直是城市气候研究乃至气候学研究的重要课题。Oke^[25]研究表明,在中纬度城市理想状况下,大中城市都存在着热岛现象。Arnfield^[26]较为系统的总结了近20年来国际上城市热岛研究的成果。以下为国内外城市热岛效应研究中一些典型的理论、方法。

(1) 对比法。对比法是城市气候研究中最传统的方法,也是最经典的方法,对比法通常可分为城郊对比法、历史对比法和城市内部不同性质下垫面对比法。最常见的就是对城区和郊区的长期气象站观测资料的对比分析来研究热岛的变化规律,城市化气候效应最初的发现和研究就是通过收集城郊气象站观测资料来对比分析热岛强度和分布的^[8,9]。

(2) 定点观测法。定点观测法可以从水平和垂直方向两个方面考虑。城市气候要素分布特征的研究

一般是选用城郊若干个典型的位置,进行数项气候要素指标的测定比较^[27],或者利用横穿城市剖面进行观测研究^[28,29]。城市气候垂直结构的特征研究多是使用探空气球、飞机等进行观测^[30]。定点观测法的优点是可以进行同时间高精度的各气象因子的测定;缺点是受局部环境影响较大,缺乏代表性,工作量大,受到人力、物力限制,难以获取大面积区域同步的观测资料^[31]。

(3) 流动观测方法。流动观测方法是研究城市局地小气候的有效工具,如,Wong等^[32]应用汽车流动观测方法研究了新加坡热岛效应和绿地的降温作用;Unger等^[33]应用流动观测方法研究了匈牙利塞格德市城市下垫面与近地面气温之间的关系;郭勇等^[34]采用车载气象观测仪器研究了北京城区内不同城市地表覆盖物对城市局地小气候的影响;李国栋等^[35]采用汽车携带便携式气象仪器开展了兰州市四季城市气候流动观测。流动观测方法的优点是可以弥补固定观测站点数量不足和遥感反演实际气温准确度不高的缺点,灵活机动的观测城市不同区域真实环境的小气候特征,对监测局地范围的环境变化有十分明显的优势。流动观测的方法也存在一些缺点:首先,观测要素不是同期测定,不便于比较,需要进行订正;其次,受到局部环境及交通工具影响,代表性较差,存在测试条件不易控制、很难重复再现、费用昂贵、通用性差等不可克服的困难。

(4) 气候模型模拟。气候模型在城市气候形成机制和变化机理的研究中得到较为广泛的应用,有着不可替代的作用,可以减少大量的现场观测,从理论上揭示城市热岛产生及其发展的机理。目前,城市气候研究常用模型包括统计模型、能量平衡模型、数值模型、解析模型和物理模型。代表性的研究如:Baik^[36]用多元回归模型对韩国六个最大城市的热岛效应进行了分析;Mihalakakou等^[37]用神经网络模型研究低对流层的天气环流对雅典城市热岛的影响;Streutker^[38]用高斯模型、Atwater^[39]用欧拉静力学模型为城市气候的分析和预测做了较好的尝试。目前,边界层模式应用较为广泛,是主要以城市边界层地气能量平衡为基础开展的,以城市下垫面和空气之间的能量交换为基础,能较为清楚地分析城市气候形成的根源,具有代表性的工作有:Myrup提出的具有两层垂直结构的近地层能量平衡模式^[40]和Carlson等^[41]提出了考虑了近地面层与上层边界层相互作用的4层结构模式。但模型模拟存在一定的局限性:①城市热岛复杂多变,而模型通用性差;②模型模拟也需要一定数量的观测数据,但现场观测的实验条件不易控制,重复

性较差；③统计模型和能量平衡模型只能从宏观上考虑其影响因素，难以从时空上体现多种要素的作用过程^[31]；④一些数值模式和数学模型，由于受到复杂城市地面动态变化的影响，模式模型所需要的有关城市下垫面一大气界面参数的设定有很大的不确定性，这对城市气候的模拟和预测的准确性有很大的影响。

(5) 遥感反演。热红外遥感可探测到以像元为单位的下垫面辐射温度(亮温)，而卫星亮温、地温、气温三者之间关系密切，因而基于遥感技术的城市热岛监测方法便成为进行城市热岛研究最常用、最直观的方法，一些学者相继发展出简化后的反演算法，并在实际应用中取得了较好的结果^[42-47]。热红外遥感数据与常规的观测数据相比有其优势，主要表现在：①回归周期短，便于连续观测、长期观测；②图像覆盖面积范围大，成本不高；③资料的同步性、点位的密集性和均匀性较好。因此，利用多平台多时相的遥感信息进行城市气候的研究前景很广阔。在GIS, RS技术的支持下，一些学者又进一步尝试用景观生态学的观点来研究城市热环境，探索不同景观的热力学特性，建立了一套热环境空间格局与过程的研究方法和评价指标体系^[48-51]。城市人为热对城市气候有一定的影响，Fung等^[23]在人为热对城市气候的影响方面做了较详细的调查研究，但目前在城市气候的研究中，由于影响人为热的人类活动的不确定性、人为热空间分布的非均匀性，如何准确量化人为热是一大难题。

国际社会在城市气候研究领域也开展了一些大的研究项目。美国一些高校和研究机构在20世纪共同拟定一项为期5年的大规模城市气象观测计划，称为“METROMEX”(大都市气象观测计划)。美国宇航局(NASA)和环保署(EPA)共同发起的“Urban Heat Island Pilot Project”计划，旨在利用地面观测和遥感技术开展针对夏季城市热岛的研究与治理工作；加拿大也启动了旨在缓解城市热岛效应的“Cool Toronto Project”计划；此外，日本、西欧也在开展类似的研究工作。这些大的研究计划和项目很好的推进了城市气候研究在理论、方法上的创新和进步^[12]。

我国在城市气候方面的研究起步较晚，周淑贞、张超等是我国城市气候的先行者，取得了丰硕的研究成果。我国的相关研究，最初大多是利用不同时间尺度的城郊气象资料，来分析城市气候的“五岛”效应特征。随着中国各地城市化进程的加快，全国各大城市都纷纷开始了具有各自特色的城市气候研究。我国城市气候的研究队伍不断壮大，研究成果逐渐增多，研究方法和理论各具特色，但技术力量尚未形成

规模。城市气候的研究对象主要集中于大城市，对于中小规模城市，特别是干旱区城市的研究缺乏重视。国内的城市气候研究受国外的影响很大，理论、方法还缺乏自身的创新。

6 存在的问题和展望

纵观城市气候效应研究的发展历程，综合分析相关成果发现：研究队伍不断壮大；研究成果逐年增多；技术手段也从早年的定性描述到目前的定量分析，有关城市气候研究的技术手段不断改进加强。但目前城市气候研究还面临一些挑战，存在以下主要问题。

(1) 许多研究大多依靠城郊气象站的观测数据，利用传统的城郊对比法和历史对比法来开展城市气候研究。大多数据的时间、空间分辨率较低，缺乏具有针对性的、长期的城市气候观测试验和第一手的试验数据。城市气候要素空间分布特征的研究相对较少。单个城市的研究较多，缺乏开展大区域的协作研究，如开展都市圈、城市带的城市气候效应大型观测试验研究。

(2) 近年来热红外遥感反演的方法被广泛应用，但在反演算法的创新和反演结果的准确性方面有待进一步完善。需要结合其他研究方法，优劣势互补，系统开展各种方法的集成研究。

(3) 许多研究注重对城市气候效应的特征分析，缺乏其形成机制的研究，尤其是缺乏利用数值模型和实验室模型对城市气候效应的形成机制和变化机理进行模拟预测。此外，由于模型通用性较差，所需要的有关城市下垫面一大气界面参数的设定有很大的不确定性，这对模拟和预测的准确性有很大的影响，这一问题需要重视。

(4) 结合区域气候对全球气候变化的响应，评估城市热岛效应对区域平均气温序列的影响和城市热岛效应对区域增温的贡献率问题是目前需要重视的问题。其次，人为热的准确估算问题，由于影响人为热的人类活动的不确定性、人为热空间分布的非均匀性，如何准确量化人为热也是一大难题。

目前，城市热岛效应研究在理论和方法上已经逐步走向成熟和完善。在今后的研究中，有关城市热岛效应的形成机制和变化机理的数值模拟和仿真模拟，城市热岛效应演变过程的监测及其发展做出预测和评价，以及城市热岛效应对区域温度序列的影响等问题，将是需要进一步去探索和创新的内容。同时，在生产生活中如何通过各种工程、生态等综合措施来预防和减轻城市热岛效应的影响和危害也将是需要去探索的问题。

参考文献

- [1] IPCC. IPCC Third Assessment Report: Climate Change, 2001 (TAR). <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/index.htm>.
- [2] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change, 2007 (AR4). http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm.
- [3] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [4] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63(6): 942-955.
- [5] 王绍武, 闻新宇, 罗勇. 近千年中国温度序列的建立. 科学通报, 2007, 52(8): 958-964.
- [6] 赵宗慈, 王绍武, 徐影. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 808-817.
- [7] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701-716.
- [8] Howard L. Climate of London Deduced from Metrological Observations (3rd edition). London: Harvey and Dorton Press, 1833.
- [9] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84(359): 70-72.
- [10] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology, 2003, 26(1): 15-18.
- [11] Zsolt B A, Andrea K S, Andor S, et al. The relationship between built-up areas and the spatial development of the mean maximum urban heat island in Debrecen, Hungary. International journal of climatology, 2005, 25: 405-418.
- [12] 周淑贞, 束炯. 城市气候学. 北京: 气象出版社, 1994.
- [13] 初子莹, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响. 气象学报, 2005, 63(4): 534-540.
- [14] 陈正洪, 王海军, 薛铃, 等. 湖北省城市热岛强度变化对区域气温序列的影响. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 771-779.
- [15] 白虎志, 任国玉, 张爱英, 等. 城市热岛效应对甘肃省温度序列的影响. 高原气象, 2006, 25(1): 90-94.
- [16] 张爱英, 任国玉. 山东省城市化对区域平均温度序列的影响. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 754-762.
- [17] 任玉玉, 任国玉, 张爱英. 城市化对地面气温变化趋势影响研究综述. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1301-1310.
- [18] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and global surface temperature change. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 23947-23964.
- [19] Hansen J, Ruedy R, Glascoe J, et al. GISS analysis of surface temperature change. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(D24): 30997-31022.
- [20] 张爱英, 任国玉, 周兴江, 等. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差. 气象学报, 2010, 68(6): 957-966.
- [21] 任国玉, 张爱英, 初子莹, 等. 我国地面气温参考站点遴选的依据、原则和方法. 气象科技, 2010, 38(1): 79-85.
- [22] 张恩洁, 张晶晶, 赵昕奕, 等. 深圳城市热岛研究. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 19-24.
- [23] Fung W Y, Lam K S, Hung W T, et al. Impact of urban temperature on energy consumption of Hong Kong. Energy, 2006, 31: 2623-2637.
- [24] Landsberg H E. The Urban Climate. New York: Academic Press, 1981.
- [25] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1-24.
- [26] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology, 2003, 26(1): 15-18.
- [27] 邓莲堂, 束炯, 李朝颐. 上海城市热岛的变化特征分析. 热带气象学报, 2001, 17 (3) : 273-280.
- [28] 何云玲, 张一平, 刘玉洪, 等. 昆明城市气候水平空间分布特征. 地理科学, 2002, 22 (6): 724-729.
- [29] 陈云浩, 李京, 李晓兵. 城市空间热环境遥感分析. 北京: 科学出版社, 2003.
- [30] Clarke J F. Nocturnal urban boundary Layer over Cincinnati, Ohio. Mon Wev Rev, 1969, 97: 582-589.
- [31] 肖荣波, 欧阳志云, 张兆明, 等. 城市热岛效应监测方法研究进展. 气象, 2005, 31(11): 3-6.
- [32] Wong N H, Yu C. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. Habitat International, 2005, 29: 557-558.
- [33] Unger J, Sümeghy Z, Zoboki J. Temperature cross-section features in an urban area. Atmospheric Research, 2001, 58: 117-127.
- [34] 郭勇, 龙步菊, 刘伟东. 北京城市热岛效应的流动观测和初步研究. 气象科技, 2006, 34(6): 656-661.
- [35] 李国栋, 王乃昂, 张俊华, 等. 兰州市城区夏季热场分布与热岛效应研究. 地理科学, 2008, 28(5): 709-714.
- [36] Baik J. Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. Theory Appl Climatol, 2004, 79: 151-164.
- [37] Mihalakakou G, Santamouris M, Papanikolaou N. Simulation of the urban heat island phenomenon in mediterranean climates. Pure and Applied Geophysics, 2004, 161: 429-451.
- [38] Streutker D R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (13): 2595-2608.
- [39] Atwater W A. Urbanization and pollutant effects on the thermal structure in four climate regimes. Journal of Applied Meteorology, 1977, 16(9): 888-895.
- [40] Myrup L O. A numerical model of the urban heat island. Journal of Applied Meteorology, 1969, 27(6): 123-127.
- [41] Carlson T N, Dodd J K, Benjamin S G. Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20: 67-87.
- [42] 覃志豪, Zhang M H, Arnon K. 用陆地卫星TM6数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.
- [43] 周红妹, 葛伟强, 周成虎. 基于遥感和GIS的城市热场分布规律研究. 地理学报, 2001, 56(2): 189-197.
- [44] Qin Z, Kamieli A. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. International Journal of Remote Sensing, 2002, 22(18): 3719-3746.
- [45] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 370-384.
- [46] Sobrino J A, Jimnez-Munoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5. Remote Sensing of Environment, 2004, 90: 434-446.
- [47] Weng Q H. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue. Remote Sensing of Environment, 2006, 104: 119-122.
- [48] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 上海城市热环境的空间格局分析. 地理科学, 2002, 22(3): 317-322.
- [49] 张书余. 石家庄市环境形态的热效应分析. 气象, 2002, 28(10): 18-21.
- [50] Hadas S, Eyal B D, Arie, et al. Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. Landscape And Urban planning, 2000, 48: 1-18.
- [51] Khan S M, Simpson R W. Effect of a heat island on the meteorology of a complex urban airshed. Boundary Layer Meteorology, 2001, 100: 487-506.