

城市化气候效应研究的新进展

冯锦明¹ 王君^{1,2} 严中伟¹

(1 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京100029; 2 中国科学院大学, 北京100049)

摘要: 随着人类社会经济的不断发展, 世界各地特别是中国城市化进程十分迅速。城市化的气候效应已成为一个具有重大现实与科学意义的问题, 不少科技工作者已经利用观测资料和数值模式对城市化的气候效应进行了一系列的研究。首先从观测资料的角度介绍城市化气候效应的具体表现, 然后根据城市化进程影响区域气候的三类主要途径, 即城市土地利用变化、人为热释放和人为气溶胶排放, 对国内外城市化气候效应的研究, 特别是数值模拟研究, 进行了综合回顾与分析。结合作者近几年所做的工作, 系统总结了城市化气候效应研究的新进展以及所面临的问题, 并提出了城市化气候效应的应对策略和未来研究展望。目前的城市化气候效应模拟研究结果还具有较大的不确定性, 随着模式物理过程的改进完善和高性能计算能力的迅速提升, 进行高分辨率和长时间的城市化区域气候效应集合模拟研究将成为解决这一领域关键科学问题的有效途径。

关键词: 城市化, 气候效应, 人为热释放, 数值模拟, 高分辨率

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.002

New Advances in the Research of Climatic Effect of Urbanization

Feng Jinming¹, Wang Jun^{1,2}, Yan Zhongwei¹

(1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia (RCE-TEA), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: With the development of human society and the acceleration of urbanization in the world, especially in China, climatic effect of urbanization has become a realistic issue with important scientific significance. Many scientists have conducted a series of studies on the climatic effect of urbanization using observation data and the numerical simulation. In the paper, firstly, based on the analysis of observation data, the climatic effect of urbanization is introduced, and then, according to the three main ways (the urban land use change, anthropogenic heat release and artificial aerosol emissions), there is a comprehensive review and analysis of the studies on climatic effect of urbanization both in China and abroad, especially in the numerical simulation. Combined with the work of the author in recent years, the new progress in the study on climate effect of urbanization as well its the problems is summarized. The adaptation strategies for climate effect of urbanization and the future research prospects are proposed. There is a large uncertainty in the present simulation results for climate effect of urbanization. Along with the improved physical processes in model and rapid development in high-performance computing technology, the high resolution and long-period ensemble simulation is sure to become an effective way to resolve the key scientific issues in urbanization.

Keywords: urbanization, climatic effect, anthropogenic heat release, numerical simulation, high resolution

1 引言

近百年全球变化已成为各方关注的科学问题^[1]。地表气温上升和极端天气气候事件频发使得人们意识到人类活动正在深刻改变着全球气候系统。二氧化碳、甲烷等温室气体和气溶胶排放, 土地利用方式改变被认为是人类活动影响气候系统的典型方式。然

而, 具体到某些区域或是局地尺度, 城市化等其他类型的人类活动对气候的影响同样是不可忽略的。城市化改变陆面物理属性(如反照率、发射率和热传导率等)和形态特征, 使得城市区域具有更大的热容量、波文比以及粗糙度^[2-3]。城市陆表的不透水性使得水汽蒸发减少, 地表感热增加。加之, 辐射在城市冠层内部的多次反射和吸收使得白天城市吸收的能量在夜晚更难以长波辐射的形式散失。这些陆面特征的变化显著影响地表能量收支、边界层高度和热力结构以及局地/区域大气环流, 从而改变城市及其周边的区域气候^[4-6]。同时, 城市地区的能源消耗所带来的人为

收稿日期: 2013年6月6日; 修回日期: 2013年7月18日

第一作者: 冯锦明(1971—), Email: fengjm@tea.ac.cn

资助信息: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090000);

中国科学院知识创新工程重要方向项目

(KZCX2-EW-202)

热释放显著改变地表能量平衡，导致城市边界层结构变异，从而影响城市区域环境^[7-15]。此外，城市地区也是人为气溶胶排放最剧烈的地区，气溶胶的直接、半直接和间接效应会对城市区域气候产生一定的影响^[16-19]。这些因素的综合效应使得城市区域气候与周边其他地区显著不同，最典型的表现就是城市与乡村之间的温度差异以及城市地区的降水异常分布。

在气候变暖背景下，快速城市化进程已然造成了许多气候环境问题，如持续的高温热浪天气^[20-21]和空气污染事件^[22]。考虑到城市地区人口密集，预期未来会有更多的人口生活在城市，认识城市化的气候效应对提高人们生活舒适度、帮助城市决策者提高应对极端天气的能力以及减少城市地区的能源消耗具有现实的意义。例如，Stone^[23]指出在城市区域，相比单独的温室气体减排，辅以改善城市土地利用方式对缓解气候变化可能会更有效。

当下中国的城市化进程十分迅速，已有的城市化规模巨大，不仅沿海地区三大城市群的城市地域密集连片，中国内陆也呈现大中城市星罗棋布、迅速扩张的面貌。这些不同规模等级广泛分布的城市群实际上会在更大范围的时空尺度对区域气候产生影响，加之城市间密集的道路网，使城市的人为热释放、气溶胶排放延伸至城市外围的大范围区域。2012年冬季中国东部持续长时间和大范围的雾霾天气就是这一现象最好的例证。城市区域尤其是密集的城市群区域对气候变化的影响既具有城市局部的地域特征，也具有更大范围的区域特点。这些特点使得常规观测手段难以获得全面的观测信息，也难以反映不同尺度上存在的气候特征，更不能用以预测未来中国在更加高度城市化情形下的区域气候演变状况。数值天气气候模式正是解决这些问题的重要手段。其中，区域气候模式可以描述不同时空尺度上气候系统、系统内部各组成部分之间的复杂相互作用，通过借助各种参数化模型表达陆面及大气的各种物理过程，因而能够综合反映下垫面改变以及人类活动对气候产生的影响，有助于揭示城市化效应对区域气候的影响机理，寻求改善城市气候环境的途径并对未来的区域气候变化进行科学的预估。

为全面了解城市化气候效应的研究现状，本文将首先从观测资料的角度介绍城市化气候效应的具体表现，然后重点根据现有的数值模拟研究成果，从城市土地利用、人为热释放和气溶胶等方面来阐述城市化气候效应的成因与机理，最后对相应的应对策略进行适当讨论。

2 城市化气候效应

城市化气候效应的最直接表现是城市地面气温的变化，即所谓的“热岛效应”。早在19世纪，英国学者霍华德就从台站温度记录中发现伦敦市内的气温比周边郊区要高^[24]，这一工作被认为是城市化气候效应研究的开端。此后，不断有研究者通过资料分析发现城市热岛效应的存在，范围遍及各个纬度带以及气候区^[25]。然而，由于传统气象观测台站数量有限、空间分布离散，过去工作在定量研究城市热岛效应强度和范围时得出的结论往往存在差异。近些年越来越多自动观测站被用来检测城市气象要素，这将大大提高城市热岛效应研究结果的准确性^[26]。随着现代观测技术的发展，很多学者也开始使用卫星遥感资料反演城市地表温度，从更细微的尺度来分析研究城市热岛效应的时空演变规律^[27]。

由于城市化发展、能源消耗的增加，城市热岛的强度和范围不断扩大，从而影响局地气温上升趋势^[28-30]和极端温度事件的发生频次^[31]。过去研究对城市化效应对增温趋势贡献大小的结论不统一，主要原因在于所用观测资料的质量和分析方法的不同。为评估温度趋势中的城市化效应，局地气温观测序列的前后一致性（或称均一性）是需要重点考虑的问题。由于站点迁移、观测仪器和规范更改等因素，很多站点观测序列存在非均一性，即某段或某几段时期的观测数值存在系统性的偏差。另一个关键问题如何科学地划分不同类型的站点（如城市站和乡村站）。过去的研究大都采用人口或经济规模^[32]、夜晚灯光指数^[33]以及遥感观测的土地覆盖信息^[34]进行城乡站点划分。不同方法得到的分类结果很不一致，导致城市化效应结论也不一致。此外，城市化气候效应对极端温度事件发生频次也存在一定的影响。Wang等^[31]发现北京地区近30年快速城市化对极端暖夜（冷夜）的增加（减少）趋势贡献为12.7%或2.07d/10a（29.0%或5.06d/10a），对于持续（3d）的极端冷夜事件，城市化效应显著加强了其减少趋势，贡献达34%。

城市化气候效应的另一个重要方面体现在城市降水格局的改变。早期大多数研究侧重于利用地面气象站点、雷达和遥感观测等获得的降水资料揭示城市的存在对区域降水多少和空间分布的影响。一些研究很早就发现城市下风向暖季的降水相比其他地方增多9%~17%^[35-37]。Bornstein等^[4]通过分析亚特兰大地面气象站点资料发现城市热岛能引起近地面的大气辐合上升并诱发暴雨。Shepherd等^[38]发现城市下风向30~60km处的月平均降水比其他地方多出28%。

Chen等^[39]指出城市化使得台北地区下午雷暴频次增加67%，由此引发的降水增加77%。Hand等^[40]利用探空和再分析资料分析揭示奥克拉荷马市下风向地区比其他地方显著湿润，从而印证了城市化效应对降水的影响比起农业活动和地形等因素更占主导地位。Kishtawal等^[41]指出印度季风区强降水的增多与城市化效应引起的降水异常信号有关联。通过分析雷达资料，Niyogi等^[42]发现风暴会在城市上风向分裂，再在下风向聚合。然而，也有研究发现城市化发展会导致城市区域降水减少。例如，Kaufmann等^[43]利用遥感观测以及气象台站资料分析了中国珠三角地区降水减少和城市土地利用的时空关系，发现城市化对当地降水减少起着至关重要的作用，这种效应很可能是由陆面水循环改变所引起的。Zhang等^[44]发现北京东北部地区夏季降水的减少和城市面积快速扩张之间存在显著的相关关系，而夏季气溶胶光学厚度并没有明显的长期变化趋势，因此气溶胶变化和降水减少不存在统计学上的关系。总之，城市化气候效应对降水的影响结论还不统一，这可能与城市所处的区域气候类型（内陆或是沿海）、城市的规模大小以及其他因素（如气溶胶）影响有关。未来研究需要更长时间、更高密度的城市气象观测网络，辅以其他先进观测手段（如卫星遥感），定量出不同地区、不同类型、不同规模的城市对该地区降水的作用。

城市高大的建筑物和城市热岛的加强使得地表粗糙度增加，进而导致城市近地面风场特性的改变。Bornstein等^[45]通过分析纽约地区地面风速资料发现城市和乡村的风速存在差异，差异具有明显的日变化，大小与风向和上游风速大小有关。Li等^[46]通过对比市区和区域平均的风速观测资料发现，近几十年北京城市化发展加剧了市区的风速减弱趋势，其贡献可达区域平均趋势的20%。

3 城市化气候效应的成因

3.1 城市土地利用变化

城市土地利用方式改变是城市化发展影响区域气候最直接的途径。然而，现今用来研究气候变化的全球气候模式因其空间分辨率过粗，不能细致刻画只占地球表面很小部分的城市区域的土地利用状况。因而，我们需要通过分辨率更高的区域气候模式进行更高精度的区域气候模拟，对城市化气候效应给出科学的评估。过去研究为了将城市和其他土地利用类型区分开，简单地改变城市所在区域下垫面的某些物理属性。但是，由于城市建筑物的三维结构对地表反照率、热容量和粗糙度等存在一定的影响，这种简单的

处理方式不足以准确描述城市下垫面和区域大气之间的相互作用。近些年，城市冠层模型被成功引入到区域气候模式中，其对城市区域气候模拟的改进已被很多研究所证实^[47-49]。例如，Jin等^[50]指出了为了将未来气候变化预估结果准确降尺度到一些重要的城市区域，非常有必要将城市冠层参数化方案引入到气候模式中。

城市土地利用方式改变引起的区域气候效应首先体现在地表气温上。Trusilova等^[51]通过数值模拟发现城市土地覆盖导致城市区域夏季气温日较差下降 $(1.26 \pm 0.71)^\circ\text{C}$ ，冬季下降 $(0.73 \pm 0.54)^\circ\text{C}$ 。Hamdi等^[52]通过长时间模拟发现城市化使得布鲁塞尔地区的最高和最低气温上升速率分别增加 $0.05^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.14^\circ\text{C}/10\text{a}$ ，城市土地利用改变导致的增暖效应占区域整体增暖的45%。Zhang等^[53]通过敏感性试验发现城市化效应引起城市地区冬季平均地表气温上升 $(0.45 \pm 0.43)^\circ\text{C}$ ，夏季上升 $(1.9 \pm 0.55)^\circ\text{C}$ 。Feng等^[14]发现城市下垫面改变使得中国区域全年增温 0.13°C ，部分城市化显著的地区（如长三角地区）增温可达 0.84°C 。通过对中国三大城市群高分辨率嵌套模拟，Wang等^[54]发现城市土地利用使得城市地区地表气温上升 1°C 左右，此效应在夏季体现最为明显。城市土地利用方式改变引起区域增温是绝大多数研究所认同的结论，但量化的增温结果仍需未来更高质量的土地利用数据、更完善的气候模式，以及更准确的城市参数和高分辨率的长期气候模拟。

城市土地利用导致的气候效应的另一个体现是对降水发生和分布的改变。近些年，随着数值模式的发展，越来越多的工作试图从数值模拟的角度证实并且解释城市化效应对降水的影响。例如，Shem等^[55]通过WRF模式模拟发现亚特兰大下风向降水有明显增多，这点与之前很多研究结论相符合。Shepherd等^[56]通过模拟一个降水个例发现，在不考虑城市的情况下，休斯敦西北地区的对流性降水相对于考虑城市的情况会变少。Lin等^[57]发现引入正确的土地利用信息对城市降水模拟至关重要，城市化效应能显著影响边界层中大气的热力和动力过程。Miao等^[58]通过不同城市土地利用情景的敏感性数值试验证实城市对于风暴移动路径和降水量起着重要的作用，城市化效应使得城市区域的爬线破裂成对流单体，最终降水量的变化幅度取决于城市化的程度。与之前大多数观测资料分析得到的结果不同的是，近些年有些模拟研究发现城市土地利用可能会使城市地区的降水减少。通过对北京地区两个典型的夏季降水过程进行敏感性试验，Zhang等^[44]发现城市扩张很可能是北京近几十年降水

减少的重要原因，增加植被覆盖有利于降水增加，从而缓解该地区的缺水状况。Wang等^[54]通过高分辨率嵌套模拟同样发现，城市土地利用会使中国长三角和珠三角地区夏季降水显著减少（图1）。降水减少的原因可能是城市土地利用导致自然植被和土壤被不透水层替代，区域蒸发显著减少，水汽供应不足，加之边界层变厚使得水汽在其中混合得更加均匀，导致对流有效位能降低，对流抑制能量增加，从而不利于区域降水的发生（图2）。城市化对降水的影响还具有较大的不确定性，原因在于过去多数研究选取的是个别天气过程进行数值模拟，部分区域气候模拟的时间跨度也不够长。未来更长时间、更多来源的观测资料和长时间高分辨率的气候模拟可为我们提供更为可靠的研究结论。

此外，Hou等^[59]通过敏感性数值模拟试验得出，北京近50年的城市化造成区域平均风速减少0.4m/s，其贡献占整体风速减弱的35%。Lo等^[6]发现准确的的城市土地利用数据和参数化方案对于模拟中国珠三角地区城市化对海陆风环流的影响至关重要，结果表明城市土地利用使得城市地区和周边海域的温差加强，造成夜晚海风能够深入到更加内陆的地区。Chen等^[60]通过敏感性试验发现城市的存在有利于近地面风的停滞，城市土地利用造成的气温变化显著影响休斯敦地

区的风场结构。

城市土地利用还对城市地区某些污染物浓度存在一定的影响。Jiang等^[61]发现未来气候变化将导致休斯敦地区日最高臭氧浓度上升2.6ppb，而城市土地利用却使得日最高臭氧浓度上升3.6ppb，两者对臭氧浓度的作用因地区不同而不同，未来气候变化将使得八月极端臭氧污染日增加1~2天，而城市土地利用却能使其增加2~3天。

3.2 城市人为热释放

所谓的“城市化效应”不单由上述因素所引起，城市区域的人类活动导致的热释放也是一个重要的气候因子。工业能源消耗、商业及居民住宅的热排放、车辆的油料燃烧以及人体新陈代谢是人为热释放的重要来源^[62]。通过能源消耗数据的分析，Ichinose等^[7]发现东京市中心的人为热白天超过400W/m²，冬季最高值可达1590W/m²。Offerle等^[8]发现欧洲地区城市中心的人为热强度可以达到32W/m²。Quah等^[9]发现新加坡的商业区逐时人为热释放最高可达113W/m²，高密度住宅区达17W/m²，低密度住宅区达13W/m²。由于相关数据的缺乏，人为热释放的气候效应研究的难点在于很难准确描述人为热的时空分布。现阶段研究普遍采用基于能源消耗清单和地面能量守恒的方法对人为热释放进行估算，两种方法各有优缺点，需要根据研

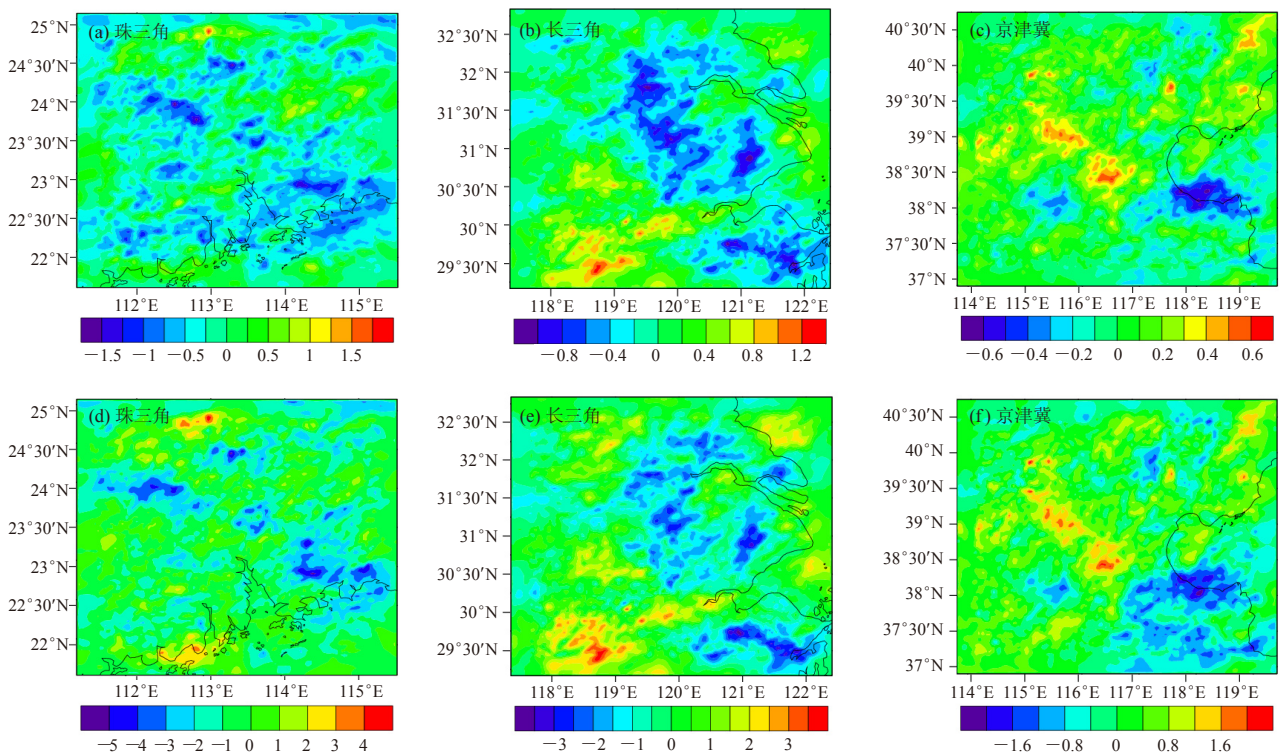


图1 城市土地利用变化导致珠三角、长三角和京津冀地区全年 (a, b, c) 和夏季 (d, e, f) 降水变化 (单位: mm/d)^[54]

究对象的实际情况进行选择。

前人对于人为热释放的研究工作大多集中于使用各种数据精确描述人为热的时空分布特点。近些年随着数值模式的发展,越来越多的研究开始关注人为热释放对城市区域气候的影响。Ichinose等^[7]发现减少城市能源消耗可以使得地表气温下降 0.5°C 。Ohashi等^[10]指出东京商业区内 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 的气温上升是由空调的废热排放造成的。de Munck等^[11]认为可将巴黎市区 0.5°C 的气温上升归结于人为热释放,并且指出空调的使用在地表气温上升中的重要性。Block等^[12]首次进行了人为热释放对区域气候影响的数值模拟分析,研究发现 $2\text{W}/\text{m}^2$ 的人为热释放能使地表气温上升 0.15°C ,在个别地区(德国鲁尔地区),额外 $20\text{W}/\text{m}^2$ 的人为热释放能导致 0.5°C 的增温,但人为热释放对区域降水影响并不显著。然而,此工作仅是对冬季进行了模拟,人为热释放的气候效应在其他季节的情况仍是未知。利用现今和未来人为热释放预估清单,Flanner^[13]指出2100年人为热释放将会使全球地表气温上升 $0.4\sim 0.9^{\circ}\text{C}$ 。Zhang等^[63]发现当前的气候模式模拟的20世纪后半期气候变化趋势相较于观测存在一定偏差,人类能源消耗导致的热释放对大气环流和区域气候造成的影响与这种偏差十分相似,尤其是在冬季和秋季,从而显示人类能源消耗作为一种没有加入气候系统的外部强迫很可能是造成当前的气候模式存在偏差的原因。Feng

等^[14]发现人为热释放导致中国区域气温上升 0.15°C ,在个别城市化明显地区(如长三角地区)增温将达到 0.89°C 。通过使用更加接近实际的人为热释放数据和高分辨率嵌套模拟,Feng等^[15]发现人为热释放使得中国三大城市群城市地区气温上升 $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$,降水分布格局发生变化。图3给出了人为热释放引起的区域降水季节内变化,可以看出,珠三角和长三角地区夏季降水有所增加,在城市区域,这种增加会更加显著,原因是城市地区风场和水汽发生辐合,上升运动增强,对流有效位能增加,从而导致夏季降水显著增多(图4和图5)。京津冀地区的夏季降水变化不太显著,原因可能是与该地区处于季风气候区边缘、地形比较复杂、中高纬度的天气过程频繁、局地对流活动弱等因素有关。

3.3 城市人为气溶胶排放

除城市土地利用变化和人为热释放外,人为气溶胶排放也是引起城市化气候效应的重要因素。人为气溶胶对大气辐射的改变可能会减弱以上两个因素对城市区域增温的影响,人为气溶胶的直接、半直接和间接效应可能对该地区的降水变化(强度和分布格局)存在一定的作用。关于人为气溶胶的直接、半直接和间接效应的研究有很多,但是真正关注人为气溶胶对城市区域气候影响的研究却相对较少。过去由于模式对气溶胶气候效应的参数化不够完善,多数工作采用

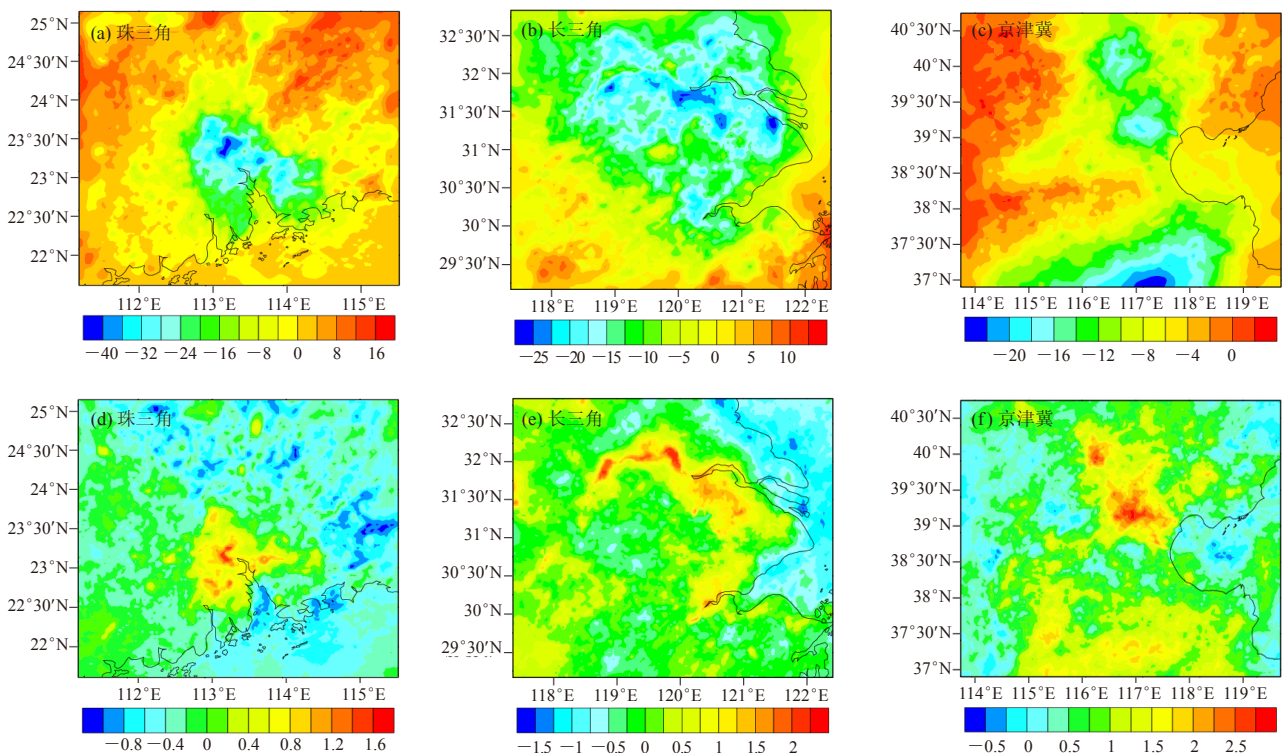


图2 城市土地利用变化导致夏季对流有效位能(a, b, c)和对流抑制能(d, e, f)的变化(单位: J/kg)^[54]

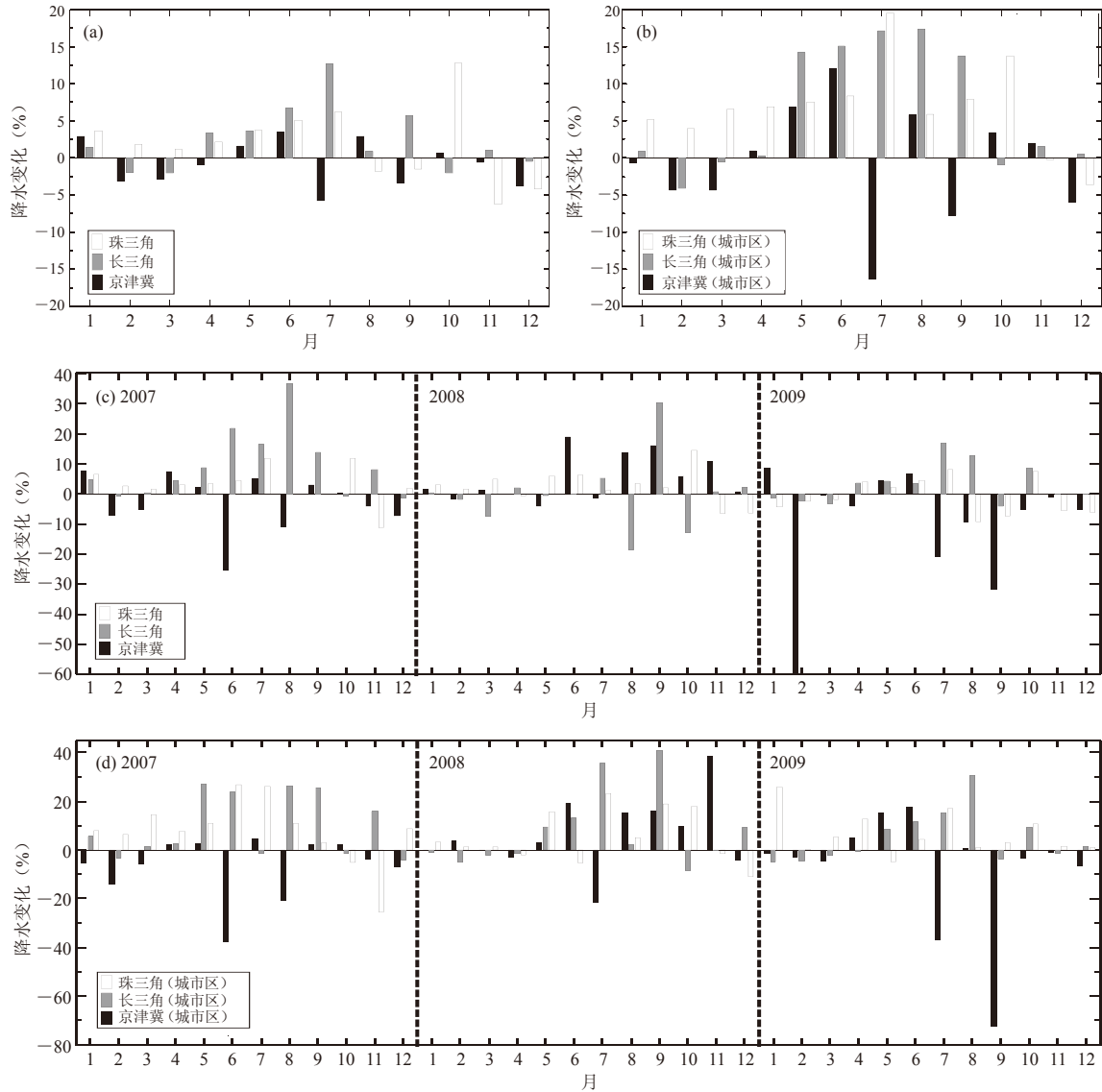


图3 人为热释放引起的模拟区域平均 (a, c) 和城市地区平均 (b, d) 的月降水变化百分比^[15]

观测资料来研究气溶胶与城市降水的关系。例如, Jin等^[16]通过分析纽约和休斯敦各个时间尺度的MODIS云量观测、AERONET气溶胶观测、PM_{2.5}站点观测和TRMM降水数据发现,城市云量和气溶胶存在反位相关关系,而气溶胶对降水变化不存在显著的影响。Jin等^[17]再次通过遥感观测资料发现,气溶胶对水云粒子大小存在显著影响,除小于2.5mm/d的小雨外,气溶胶对其他类型的降水没有影响。近些年也有研究试图通过数值模式探索气溶胶对城市地区降水的影响,如Heever等^[18]通过中尺度模式模拟发现,城市下风向的暴雨大多是由城市热岛引起的辐合所致,而与气溶胶的增加没有显著关系。Carrio等^[19]发现城市降水量随着城市化进程呈现单调增长,原因在于城市土地利用

对海陆风环流的加强作用,然而城市降水并不随着气溶胶浓度的增加呈现线性的变化。

以上研究大多是基于遥感观测分析和针对个别天气过程的模拟,要想真正揭示气溶胶对城市区域气候的影响,需要高分辨率的长期的气候模拟。随着人们对气溶胶气候效应认识的加深,模式对气溶胶在气候系统中所起的作用将描述得更加清晰,这将帮助我们了解人为气溶胶对城市区域气候的影响。

4 城市化气候效应的适应对策

城市化气候效应研究的意义在于它能使人们更清晰地认识其发生的特点及原因,从而制定科学的对策减缓和适应城市化发展带来的不利影响。随着人们对周围环境和生活质量要求的提高,越来越多的学者

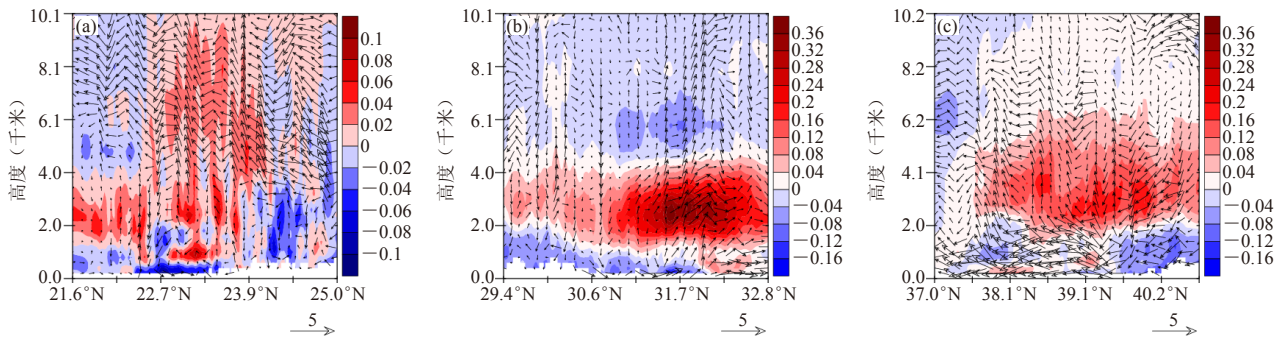


图4 人为热引起的沿珠三角 (a)、长三角 (b)、京津冀 (c) 西南-东北方向垂直剖面上水汽混合比和场 (v 、 w) 变化^[15] (水汽混合比单位: g/kg, 垂直风速单位: dm/s, 水平风速单位: m/s)

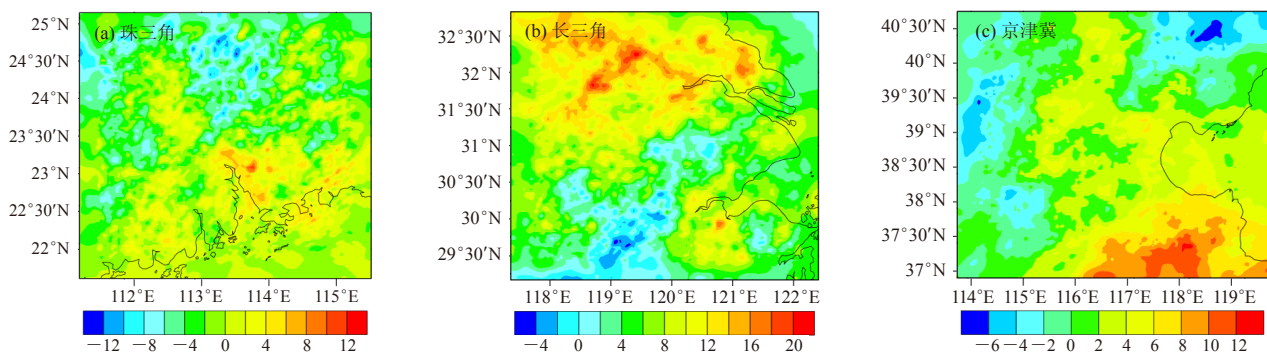


图5 人为热释放引起的夏季对流有效位能变化空间分布^[15] (单位: J/kg)

开始考虑如何在城市区域尺度改善气候变化和城市化效应带来的负面影响。Akbari等^[64]认为增加城市反照率可以降低夏季气温,进而使得空气质量转好、空调使用量下降。通过相关数据的统计分析发现,在全球尺度上,增加城市屋顶和不透水铺砌表面的反照率所导致的负辐射强迫效应相当于44Gt二氧化碳的减排所产生的效果。Oleson等^[65]使用耦合城市冠层模型的全球气候模式模拟研究发现,如果将全球城市的房屋屋顶变成白色,全球平均的城市热岛强度将下降33%,城市日最高气温将下降0.6℃、日最低气温将下降0.3℃。由于高纬度地区冬季太阳辐射较弱,白色屋顶对该地区热岛效应的减缓效果不太明显。Auer^[66]建议用绿地将城市中的工业区、商业区和居民区分隔开,可以缓解城市化气候效应。Zhang等^[44]通过数值模拟试验认为增加植被覆盖能够缓解北京地区夏季降水减少的趋势,相比种植树木而言,种草的改善效果更明显。Zhang等^[67]发现在西南盛行风条件下,巴尔的摩市相比华盛顿市存在更高的地表气温和更差的空气质量,其原因在于上风向地区卫星城的城市化发展对下风向地区区域气候存在影响,合理设计卫星城市的位置对于减少城市化气候效应引起的负面影响具有一定的作用。

5 未来研究展望

本文回顾了观测记录中城市化气候效应的综合表现,并从三方面总结了城市化气候效应模拟研究方面的成果,概述了与城市化气候效应有关的研究方法、结论不确定性以及存在的不足。从现有的研究来看,城市化气候效应研究还有很长的路要走,特别是考虑到中国现阶段快速的城市化进程,国内对城市化气候效应模拟研究的工作还相对较少,与国际的相关研究还存在一定差距,具备广阔的研究空间。过去研究对城市土地利用变化、人为热释放的温度效应研究较多,结论也比较明确,但它们对区域降水的影响还没有完全认识清楚,更精细的能源利用数据以及更合理的参数化方案是解决这个问题的基础。将来研究可以从以下几方面提高对城市化气候效应的认识:首先,发展更加精确描述城市下垫面土地利用类型的遥感资料集,这对模拟城市土地利用方式改变影响区域气候至关重要。其次,着重改善现有城市冠层模型的模拟性能,针对区域城市特点,改进并完善各类城市参数,包括热力参数与形态参数等,并对城市下垫面与区域大气相互作用的相关过程进行更合理的参数化。再次,收集更多、更精细的能源消耗数据以及借助自动站、遥感观测数据对人为热释放的时空分布进

行准确描述, 并将人为热释放更合理地引入到城市冠层模型中。最后, 应该加强城市人为气溶胶对城市区域气候影响的相关研究。

可以看出, 目前的模拟研究结果还具有较大的不确定性。随着模式物理过程的改进完善和高性能计算能力的迅速提升, 进行高分辨率和长时间的城市化区域气候效应的集合模拟研究将成为解决这一领域科学问题的有效途径。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2007.
- [2] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Q J R Meteorol Soc*, 1982, 108: 1-24.
- [3] Porson A, Harman I N, Bohnenstengel S I, et al. How many facets are needed to represent the surface energy balance of an urban area? *Boundary-Layer Meteorol*, 2009, 132: 107-128.
- [4] Bornstein R, Lin Q L. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmos Environ*, 2000, 34: 507-516.
- [5] Liu Y B, 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. *J Appl Meteorol Climatol*, 2006, 45: 912-929.
- [6] Lo J C F, Lau A K H, Chen F, et al. Urban modification in a mesoscale model and the effects on the local circulation in the Pearl River Delta region. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46: 457-476.
- [7] Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmos Environ*, 1999, 33: 3897-3909.
- [8] Offerle B, Grimmond C S B, Fortuniak K. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *Int J Climatol*, 2005, 25: 1405-1419.
- [9] Quah A K L, Roth M. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore. *Atmos Environ*, 2012, 46: 92-103.
- [10] Ohashi Y, Genchi Y, Kondo H, et al. Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46: 66-81.
- [11] de Munck C, Pigeon G, Masson V, et al. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *Int J Climatol*, 2013, 33: 210-227.
- [12] Block A, Keuler K, Schaller E. Impacts of anthropogenic heat on regional climate patterns. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L12211, doi:10.1029/2004GL019852.
- [13] Flanner M G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L02801, doi:10.1029/2008GL036465.
- [14] Feng J M, Wang Y L, Ma Z G, et al. Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China. *J Clim*, 2012, 25: 7187-7203.
- [15] Feng J M, Wang J L, Yan Z W. Impacts of anthropogenic heat release on regional climate in three vast urban agglomerations in China. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31: 1-11.
- [16] Jin M L, Shepherd J M, King M D. Urban aerosols and their variations with clouds and rainfall: A case study for New York and Houston. *J Geophys Res*, 2005, 110: D10S20, doi:10.1029/2004JD005081.
- [17] Jin M L, Shepherd J M. Aerosol relationships to warm season clouds and rainfall at monthly scales over east China: Urban land versus ocean. *J Geophys Res*, 2008, 113: D24S90, doi:10.1029/2008JD010276.
- [18] Heever S C, Cotton W R. Urban aerosol impacts on downwind convective storms. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46: 828-850.
- [19] Carrio G G, Cotton W R, Cheng W Y Y. Urban growth and aerosol effects on convection over Houston. Part 1: The August 2000 case. *Atmos Res*, 2010, 96: 560-574.
- [20] Barriopedro D, Fischer E M, Luterbacher J, et al. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 2011, 332: 220-224.
- [21] Robine J M, Cheung S L K, Roy S L, et al. Death toll exceeded 70000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biol*, 2008, 331(2): 171-178.
- [22] Ma J Z, Chen Y, Wang W, et al. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China. *J Geophys Res*, 2010, 115: D18204, doi:10.1029/2009JD013065.
- [23] Stone B. Land use as climate change mitigation. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 9052-9056.
- [24] Howard L. *The Climate of London Deduced from Meteorological Observations (3rd edition)*. London: Harvey and Dorton Press, 1833.
- [25] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int J Climatol*, 2003, 23(1): 1-26, doi: 10.1002/joc.859.
- [26] Yang P, Ren G Y, Hou W, et al. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing municipality based on a high-density AWS dataset. *Int J Climatol*, 2013, 33(13): 2769-2780, doi:10.1002/joc.3622.
- [27] Chen X L, Zhao H M, Li P X, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104: 133-146.
- [28] Böhm R. Urban bias in temperature time series: A case study for the city of Vienna, Austria. *Clim Change*, 1998, 38: 113-128.
- [29] Gaffin S R, Rosenzweig C, Khanbilvardi R, et al. Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theor Appl Climatol*, 2008, 94: 1-11, doi:10.1007/s00704-007-0368-3.
- [30] Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L05711, doi:10.1029/2006GL027927.
- [31] Wang J, Yan Z W, Li Z, et al. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978-2008. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1-7, doi:10.1007/s11434-013-5976-y.
- [32] Hua L J, Ma Z G, Guo W D. The impact of urbanization on air temperature across China. *Theor Appl Climatol*, 2008, 93: 179-194.
- [33] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and global surface temperature change. *J Geophys Res*, 2001, 106(D20): 23, 947-23, 963, doi:10.1029/2001JD000354.
- [34] Gallo K P, McNab A L, Karl T R, et al. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *J Appl Meteorol*, 1993, 32: 899-908.
- [35] Changnon S A. The LaPorte weather anomaly-Fact or fiction? *Bull Amer Meteor Soc*, 1968, 49: 4-11.
- [36] Landsberg H E. Man-made climate changes. In *Proc Symp Phys and Dyn Climatology of the World Meteorol Org.* WMO: 1974, 347: 262.
- [37] Huff F A, Changnon S A. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis. *J Appl Meteor*, 1972, 11: 823-842.
- [38] Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *J Appl Meteor*, 2002, 41: 689-701.
- [39] Chen T C, Wang S Y, Yen M C. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46: 1324-1340.
- [40] Hand L M, Shepherd J M. An investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma City: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *J Appl Meteorol Climatol*, 2009,

- 48: 251-269.
- [41] Kishtawal C M, Niyogi D, Tewari M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. *Int J Climatol*, 2010, 30: 1908-1916.
- [42] Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region. *J Appl Meteorol Climatol*, 2011, 50: 1129-1144.
- [43] Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, et al. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit. *J Clim*, 2007, 20: 2299-2306.
- [44] Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area. *J Geophys Res*, 2009, 114: D02116, doi:10.1029/2008JD010328.
- [45] Bornstein R D, Johnson D S. Urban-rural wind velocity differences. *Atmos Environ*, 1977, 11: 597-604.
- [46] Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960 - 2008 based on homogenized observations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28: 408-420.
- [47] Masson V. A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol*, 2000, 94: 357-397.
- [48] Martilli A, Clappier A, Rotach M W. An urban surface exchange parameterization. *Boundary-Layer Meteorol*, 2002, 104: 261-304.
- [49] Kusaka H, Kimura F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *J Meteor Soc Japan*, 2004, 82(1): 67-80.
- [50] Jin M L, Shepherd J M. Inclusion of urban landscape in a climate model: How can satellite data help? *Bull Am Meteorol Soc*, 2005, 86: 681-689.
- [51] Trusilova K, Jung M, Churkina G, et al. Urbanization impacts on the climate in Europe: Numerical experiments by the PSU-NCAR mesoscale model (MM5). *J Appl Meteorol Climatol*, 2008, 47: 1442-1455.
- [52] Hamdi R, Deckmyn A, Termonia P, et al. Effects of historical urbanization in the Brussels Capital Region on surface air temperature time series: A model study. *J Appl Meteorol Climatol*, 2009, 48: 2181-2196.
- [53] Zhang N, Gao Z Q, Wang X M, et al. Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China. *Theor Appl Climatol*, 2010, 102: 331-342.
- [54] Wang J, Feng J M, Yan Z W, et al. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China. *J Geophys Res*, 2012, 117: D21103, doi:10.1029/2012JD018226.
- [55] Shem W, Shepherd M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmos Res*, 2009, 92: 172-189.
- [56] Shepherd J M, Carter M, Manyin M, et al. The impact of urbanization on current and future coastal precipitation: A case study for Houston. *Environ Plan*, 2010, 37B: 284-304, doi:10.1068/b34102t.
- [57] Lin C Y, Chen W C, Chang P L, et al. Impact of the urban heat island effect on precipitation over a complex geographic environment in northern Taiwan. *J Appl Meteorol Climatol*, 2011, 50: 339-353.
- [58] 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 Appl Meteorol Climatol*, 2011, 50: 806-825.
- [59] Hou A Z, Ni G H, Yang H B, et al. Numerical analysis on the contribution of urbanization to wind stilling: An example over the Greater Beijing Metropolitan area. *J Appl Meteorol Climatol*, 2013, 52: 1105-1115.
- [60] Chen F, Miao S G, Tewari M, et al. A numerical study of interactions between surface forcing and sea breeze circulations and their effects on stagnation in the greater Houston area. *J Geophys Res*, 2011, 116: D12105, doi:10.1029/2010JD015533.
- [61] Jiang X Y, Wiedinmyer C, Chen F, et al. Predicted impacts of climate and land use change on surface ozone in the Houston, Texas, area. *J Geophys Res*, 2008, 113: D20312, doi:10.1029/2008JD009820.
- [62] Sailor D J, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmos Environ*, 2004, 38: 2737-2748.
- [63] Zhang G J, Cai M, Hu A X. Energy consumption and the unexplained winter warming over northern Asia and North America. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 466-470, DOI: 10.1038/NCLIMATE1803.
- [64] Akbari H, Menon S, Rosenfeld A. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Clim Change*, 2009, 94: 275-286.
- [65] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L03701, doi:10.1029/2009GL042194.
- [66] Auer A H. Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *J Appl Meteorol*, 1978, 17: 636-643.
- [67] Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R. Upstream urbanization exacerbates urban heat island effects. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L24401, doi:10.1029/2009GL041082.