

城市陆面模式研究进展与展望

孟春雷

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要: 城市陆面模式对于城市精细化天气预报以及城市化气候效应研究至关重要。从城市陆面模式发展、城市陆面模式参数化、城市陆面模式同化、城市陆面模式应用等四个方面总结了近年来国内外城市陆面模式研究进展。指出了当前城市陆面模式发展所面临的主要问题, 并且提出了今后进一步研究的主要方向。

关键词: 城市陆面模式, 城市地气相互作用, 城市精细化天气预报, 城市化气候效应

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.01.003

Review and Prospect of Urban Land Surface Model Research

Meng Chunlei

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

Abstract: Urban land surface model is crucially important in urban refined weather forecasting and research of climate effect of urbanization. This paper reviews the research progress of urban land surface model in four aspects. They are urban land surface model development, urban land surface model parameterization, urban land surface model assimilation, and urban land surface model application respectively. The main problems which exist now referring to urban land surface model development are pointed out, and the main research directions in the future are put forward hereafter.

KeyWords: urban land surface model, urban land-atmosphere interaction, urban refined weather forecast, climate effect of urbanization

0 引言

全球变化研究因为关系到人类社会的未来及可持续发展, 正引起世界各国高度重视。全球气候变暖是全球变化研究的核心问题, 世界各国对此已达成共识。全球变暖的原因起初归结为温室气体的排放, 不过近年来的研究表明, 土地利用的改变(包括城市化、农业化以及森林砍伐), 尤其是城市化导致的全球变暖不容忽视^[1], 在城市化发展迅速的地区, 特别是我国东部地区, 城市化与温室气体排放导致的全球变暖具有相同的量级^[2-3]。目前我国正处于城镇化的快速发展阶段, 快速城市化进程将引起区域气候与环境的变化。如何减缓快速城市化带来的影响, 保证国民经济可持续发展, 建设生态宜居城市, 是目前面临的一个重大课题。

城市地表特征的研究是城市化气候效应研究的核心, 城市地表特征变化改变了城市下垫面动力、热力及水力特性, 改变了地气间辐射收支、动量通量、能量平

衡和水分循环过程, 从而对天气气候产生影响。准确模拟城市地气间能量、动量与水分的交换需要基于城市陆面能量与水分平衡观测试验及分析结果, 建立能够精确描述城市陆气相互作用及陆面能量与水分平衡特征, 并且可以与天气气候模式耦合的城市陆面模式。

1 城市陆面模式发展

通用陆面模式^[4-5]对城市的描述普遍过于简单, 通常只有一种城市地表分类, 把城市作为具有不同热传导特性的平坦裸地(slab), 适用裸地的能量平衡和控制方程。传统上, 陆面模式对于城市效应的处理仅通过改变下垫面动力、热力特征参数来体现^[6-7], 通过改变地表特征参数来隐式体现城市作用, 例如以较大的粗糙度表示城市建筑物对气流的拖曳作用, 以较低的反射率表示城市对辐射的截获作用, 以高热容量表示城市的热储存作用。这种处理的明显缺陷是不能反映城市结构非均一性的影响, 未能详细考虑特殊的城市下垫面几何特征对低层大气动力、热力结构和地表能量平衡的影响, 对城市中重要的人为热排放和建筑热储量没有考虑, 因此导致对城市陆面能量与水分平衡的模拟能力不足, 而成为影响城市气象模拟研究能力的关键因素。为了解决这些问题, 一些学者发展了

收稿日期: 2013年5月31日; 修回日期: 2013年9月9日
作者: 孟春雷(1976—), Email: clemeng@ium.cn
资助信息: 国家自然科学基金项目(41005056; 41375114)

经验模式^[8-9]，这些模式较为简单，可以直接对城市下垫面特征进行模拟，不过它的致命缺陷是这些经验公式都是针对某一个或某一类特殊的城市或区域，不具有通用性。因此，模式不利于进一步推广。

为了精细描述城市化的天气气候效应，在陆面模式中耦合城市冠层模式是一个重要手段。城市地表最为复杂的特性是建筑物的几何结构及地表特性差异，这些差异导致了城市局地扰动的差异性。在中尺度模式中反映这种差异难度较大，其一是模式的水平、垂直分辨率较低不能显式分辨这些差异，其二是缺乏相应的系统的物理过程方案。因此应将城市冠层作为独立的系统考虑，通过通量交换实现与中尺度模式边界层的相互作用。为模拟城市路面、墙壁和屋顶动力和热力效应，Masson^[10]发展了城市能量平衡模式（TEB），Martilli等^[11]在非静力有限体积模式基础上，发展了包括城市建筑物动力作用的建筑能量参数化模式（BEP），Kusaka等^[12]发展了一个单层城市冠层模式（SLUCM）。随着对城市冠层过程认识的深化，城市冠层模式得到进一步发展，并且更多地应用于数值模式中。中尺度模式WRF最新版本WRFv3.5耦合了Noah陆面模式Noah-MP^[13]和公用陆面模式CLM4.0^[14]。其中Noah-MP中的城市模块包括单层城市冠层模式（SLUCM）^[15-16]和多层城市冠层模式（MLUCM）^[17-18]，用户可以自己做出选择。CLM4.0耦合了城市参数化模块CLMU^[19]。

为了比较不同复杂程度的城市能量平衡模式，Grimmond等^[20-21]组织了“国际城市地表能量平衡比较计划”，目的主要是最优城市地表能量平衡方案的确定以及何种复杂程度的模式能够对城市冠层进行较准

确的模拟。结论表明，没有一种模式对于所有参数的模拟结果优于其他模式；简单模式模拟性能和复杂模式基本一致；总体来说潜热通量模拟能力均为最差；模拟结果与参与者提供信息的详细度有关，而和模式本身复杂程度关系不大。这表明尽管城市冠层模式参数化方案非常精细，但对于城市地表特征的机理方面的认识有待进一步加强。

城市陆面模式的发展还需要考虑对城市地表水分平衡和水循环过程的模拟。Grimmond等^[22-23]最早研究了城市水分平衡，建立了城市地区蒸发—截留关系^[24]。之后一些较为复杂的城市水循环模型相继建立^[25]。然而，这些模型均以流域作为研究对象，为了准确描述城市水循环过程，亟需开展可与城市陆面模式耦合的城市水文模式研究。

另一方面，鉴于城市冠层模式及城市水文模式对局地尺度物理过程描述的复杂性与当前气候模式分辨率较低的矛盾，城市陆面数值模拟的另一种研究思路是发展整体城市陆面模式。整体城市陆面模式^[26]在通用陆面模式（CoLM）基础上构建，不需要耦合复杂的城市冠层及水文模式；模式既能模拟城市地表能量平衡特征，又能够模拟城市水分平衡。目前，整体城市陆面模式还需要进一步发展完善，并与气候模式进行耦合以满足城市化气候效应研究的需要。

2 城市陆面模式参数化

和通用陆面模式相比，由于城市下垫面的特点和人类活动的影响，为了精确模拟城市下垫面物理过程，需要对模式进行重新参数化。表1为通用陆面模式与城市陆面模式参数对比。

下面对几个关键变量的参数化方案做一介绍。

表1 通用陆面模式与城市陆面模式参数比较及城市陆面模式参数化方法

参数	通用陆面模式	城市陆面模式	城市陆面模式参数化方法
空气动力学参数	与地表分类有关	与建筑高度有关	经验公式法、观测数据估算法以及激光雷达测量等
反照率	由土壤湿度和颜色决定	由城市下垫面特征决定	卫星遥感反演或者采用经验数据给定
发射率	经验值	经验值	卫星遥感反演或者采用经验数据给定
人为热	0	与城市化程度、人口密度、经济发展、时间等有关	统计方法、遥感方法以及能量平衡余项方法等
土壤质地	砂粒粘粒含量百分比	对于不透水面没有此项	—
热容	由土壤种类决定	由城市下垫面分类决定	对于不透水面可采用沥青混凝土数据
热导率	由土壤种类决定	由城市下垫面分类决定	对于不透水面可采用沥青混凝土数据
孔隙度	由土壤质地决定	0	—
地表饱和湿度	与孔隙度有关	0	—
入渗	与雨强和土壤质地有关	对于不透水面为0	—
径流	与雨强、土壤蒸发和储水能力有关	与城市排水能力有关	采用城市排水标准参数化
地表蒸发	与地表与空气比湿差成正比	对于不透水面蒸发机理不同	可采用潜在蒸发与地表积水深度较小值

2.1 城市空气动力学参数

高低不同的城市建筑导致了城市地表形态的多样性，从而导致地表粗糙度的不均匀性。城市空气

动力学参数包括地表粗糙度、零平面位移、热力学粗糙度等的确定对于城市地气湍流通量及能量平衡研究至关重要。城市空气动力学参数的确定方法包

括经验公式法^[27-28]、观测数据估算法^[29-30]以及激光雷达测量法^[31]等。

2.2 地表反照率与发射率

地表反照率决定了地气间辐射能量分配,从而影响了地表温度、地气间交换通量等参数的模拟。由于城市建筑对光线的多次散射以及辐射截留等作用,城市反照率通常比组成城市的各个表面(例如:道路、墙壁、屋顶)反照率的平均值低^[32]。最简单的反照率参数化方法是直接设定一个比较低的值,例如0.15^[33-34]。反照率的精细参数化需要通过观测来确定^[35-36]或者通过卫星遥感影像^[37-38]来反演。发射率决定了向上长波辐射,从而对地表能量平衡和地表温度产生影响,城市地表由于叶面积指数和植被覆盖率较低,因此发射率偏低,比一般植被覆盖地区偏低4%左右^[37]。

地表反照率与发射率的改变影响了地气间辐射能量收支。地表净辐射可以表示如下:

$$R_n = (1 - \alpha)S_{\downarrow} + (1 - \varepsilon)L_{\downarrow} - \varepsilon\sigma T_g^4, \quad (1)$$

式中, R_n 为地表净辐射, α 为地表反照率, S_{\downarrow} 为下行短波辐射, ε 为地表发射率, L_{\downarrow} 为下行长波辐射, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, T_g 为地表温度。

由式(1)可以看出,除了地表温度以外,与净辐射有关的地表参数主要包括地表反照率和发射率。城市地表反照率与发射率偏低均可以导致净辐射偏高。

2.3 城市人为热

由于人类活动、工业生产、化石燃料燃烧、交通尾气排放等因素导致城市地区特有的人为热排放研究是近年来的热点。人为热影响了地表能量平衡,是形成城市热岛效应的重要原因。人为热可随时间、季节以及不同城市的变化而发生变化。Grimmond等^[39]将人为热排放引入到城市地表能量平衡方程中,人为热参数化方法可分为统计方法^[40, 41-46]、遥感方法^[47]以及能量平衡剩余项方法^[48]等。Sailor等^[49]认为人为热与人口密度有关,共包括交通、热电损耗和新陈代谢三部分。由于太阳短波辐射与地理纬度有关,人为热在地表能量平衡方程中的比重与城市所在地理纬度关系密切。人为热可随时间、季节以及不同城市的变化而发生变化^[46, 50]。

2.4 城市不透水面蒸发

城市化对水文的主要影响是大面积的不透水面取代了自然透水面。不透水面蒸发是城市水文研究的核心,同时蒸散发是陆面模式中最为重要的参数,因为它联系了地表能量平衡与水分平衡。Grimmond等^[22]首先对城市不透水面蒸发进行了参数化。Mitchell等^[51-52]对不透水面蒸发计算方法进行了改进,将不透水面

蒸发定义为潜在水面蒸发与地表积水厚度的较小值。Aquacycle模式中不透水面蒸发计算方法^[51]如下:

$$E_{\text{imp}} = \min\{E_p, \max[0, (P - D_{\text{rain}})]\}, \quad (2)$$

式中, E_p 为潜在蒸发, P 为降水, D_{rain} 为排水, E_{imp} 为不透水面蒸发。

即使降水小于排水时地表积水深度仍可能大于零,因此式(2)修正如下^[53]:

$$E_{\text{imp}} = \begin{cases} E_p & (W > 0) \\ \min\{E_p, \max[0, (P - D_{\text{rain}})]\} & (W = 0) \end{cases} \quad (3)$$

不透水面蒸发的参数化使得城市不透水面地表积水深度的模拟成为可能,地表积水深度可以表示如下:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - E_{\text{imp}} - D_{\text{rain}}, \quad (4)$$

式中 W 为地表积水深度。

3 城市陆面模式同化

为了提高陆面模式模拟能力,需要将遥感观测资料与陆面模式结合,同时对陆面模式进行同化。自然下垫面下的陆面模式同化已经得到了广泛开展,但城市陆面模式同化仍面临很大挑战^[54]。主要原因是由于城市冠层模式非常复杂,此外由于城市地表特征的高度异质性和破碎性,遥感与观测数据的准确性和代表性很难得到保证。高分辨率城市陆面同化系统(u-HRLDAS)^[55]在UCM的基础上收集了大量(通常为12~18个月)的数据,通过长时间起转过程(spinner),得到比较稳定的地表参数及通量输出结果。u-HRLDAS能够对晴空下城市地表温度做出较为准确的模拟,但是需要大量、长时间的观测、遥感及再分析数据作为支撑,并且运行时间较长,很难实现业务化运行^[56]。除了地表温度和土壤湿度以外,遥感反演许多其他参数可以应用到城市陆面模式中,以提高模式模拟精度。Jin等^[57]总结了作为气候模式的下垫面,城市陆面模式可利用的遥感可反演参数。

随着整体城市陆面模式的建立,使得传统同化算法(如变分和滤波等)的应用成为可能。国内外很多学者采用变分及滤波方法同化地表温度以及土壤湿度,并且把能量和水分平衡方程作为约束条件^[58-63]。这些方法大多适用于城市陆面模式同化,同时由于城市陆面模式自身的特点,传统同化算法需要进行调整。

4 城市陆面模式应用

4.1 城市精细化天气预报

城市陆面模式与区域数值预报模式耦合可以研究城市化对天气的影响。Liu等^[7]采用加入城市参数化方案的Noah陆面模式与MM5中尺度模式进行耦合,

研究城市化对大气边界层的影响。结果表明,加入城市参数化方案的模式可以显著减少地表风速及白天边界层高度预报偏差。Kusaka等^[64]将UCM与中尺度模式耦合研究城市街谷结构对夜间城市热岛的影响。结果表明,城市街谷结构由于具有墙壁的高热容和较低的天顶视角等特性对夜间城市热岛产生了影响。敏感分析表明,墙壁的高热容在白天起降温作用,在夜间则起到增温作用。较小的天顶视角增加了白天气温。Miao^[65-66]等将WRF/Noah LSM/UCM耦合,研究城市化对城市热岛、降水和边界层的影响。结果表明,城市化显著的影响了水平对流卷(HCRs)的形成。城市对风暴移动与雨强起重要作用,降水的改变程度与城市化程度有关,其中城市的热力作用明显比动力作用重要。Zhang等^[67]采用WRF与Noah LSM耦合,引入精细化北京地表分类数据,研究城市化及未来绿化对北京城区降水的影响。结果表明,城市扩展会导致蒸发的减少、地表温度升高、感热通量增加和较深厚的边界层。这些导致了较少的水蒸气以及边界层内水蒸气更加充分的混合,从而使得对流有效位能降低。总的来说,这些都导致城市降水的减少。城市绿化会导致降水的增加,相对而言,种草对降水的影响比种树更大。Salamanca等^[18]分别将三种不同复杂程度的城市陆面模式与WRF进行耦合,并对模拟结果进行了比较分析。结果表明,简单的整体城市参数化方案足以模拟2m城市气温,不过对于城市热岛效应缓解策略的评估需要采用更复杂的城市陆面参数化方案。Chen等^[68]对WRF城市模拟系统进行了系统的介绍,并且分析了该系统在城市规划、城市环境的等方面的应用前景。

4.2 城市化气候效应研究

城市陆面模式与全球气候模式耦合可以研究全球尺度的城市化气候效应。Oleson等^[19, 69]在全球气候模式(GCM)中加入城市参数化方案,并对城市化的气候效应做了初步评估。结果表明,相对于准确城市区域结构的参数化,模式输入数据的准确性同样重要。城市化导致日最低气温比日最高气温上升得更快。城市热岛的强度与产生时间极大地受到优势气象条件和周边农村环境的影响。McCarthy等^[70]在全球气候模式HadAM3中加入了MOSE^[71]城市陆面方案,并对由CO₂引起全球变化影响和城市化影响的贡献比例进行了估计,研究表明,城市化引起的土地利用改变和人为热对气温升幅的贡献在某些地区与CO₂贡献相当。

4.3 城市交通

城市陆面模式研究在交通上的应用主要是模拟城市地表温度和积雪深度^[72-73]。城市地表温度不仅可以

估计夏季爆胎指数,对于城市积雪融化与结冰的参数化也非常重要。城市积雪深度模拟和预报对于中高纬度国家冬季交通至关重要。

4.4 城市水资源与减灾防灾

城市建筑物和不透水路面的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。城市陆面模式^[26, 51]可以模拟城市水循环,从而对城市水资源进行管理,并且预防城市水文灾害,如城市内涝等。

5 展望

目前国内外城市陆面模式发展已经取得了长足的进步,主要包括发展了城市冠层模式并且和中尺度模式耦合进行了业务化天气预报;发展了高分辨率城市陆面同化系统;初步开展了城市化气候效应研究等。但是,和目前国内外城市快速发展进程和各行业需求的紧迫性相比,仍存在很大的不足。未来城市陆面模式研究应重视以下几个方面。

1) 城市地表分类仍较粗糙,使得高分辨率城市地表分类数据无法得到有效利用。Stewart等^[74]提出了城市本地气候区域(Local Climate Zone, 简称LCZ)的概念,即按照类型、形态和功能相近的原则将城市区域划分为不同的本地气候区域,按照本地气候区域类型分别对不同城市地区进行精细地表参数化,是城市地表分类发展方向之一。

2) 由于城市地表分类的多样性,城市地表特征数据库^[75]的建立显得异常重要。模式比较结果也表明,城市数据库详尽程度对于城市陆面模式模拟精度至关重要。

3) 目前国内对于城市地表特征研究仅限于城市冠层模式,对于城市水文模式研究非常缺乏,未来需要建立耦合城市冠层模式与城市水文模式的城市陆面模式。

4) 目前城市气象观测数据已经较为完备,相比较而言,城市地表观测数据包括各种通量观测与地表温湿度观测数据的严重不足,制约了城市陆面模式的发展与验证。遥感观测数据同化是提高城市陆面模式模拟精度的重要手段,目前遥感观测数据利用效率很低,成为城市陆面模式发展的瓶颈之一,城市陆面模式同化还未得到广泛开展。

5) 城市陆面模式发展需要考虑尺度效应问题。不同尺度的天气气候模式对于城市陆面模式复杂程度的需求不同。目前城市陆面模式对于提高城市精细化天气预报准确率的贡献尚不够明确,最新的WRF模式WRF3.5耦合了最新一代陆面模式CLM4.0^[76],今后可

以考虑在CLM4.0的基础上构建城市陆面模式，提高城市精细化预报准确率。

6) 城市化的区域气候效应已经很明确了，但全球尺度上城市化的气候效应仍需进一步研究。

参考文献

- [1] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528-531.
- [2] Zhou L, Dickinson R E, Tian Y, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *P Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 9540-9544.
- [3] Yang X, Hou Y, Chen B. Observed surface warming induced by urbanization in east China. *J Geophys Res*, 2011, 116(D14), doi:10.1029/2010JD015452.
- [4] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 569-585.
- [5] Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. The Common Land Model. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 1013-1023.
- [6] Lynn B H, Carlson T N, Rosenzweig C, et al. A modification to the Noah LSM to simulate heat mitigation strategies in the New York city metropolitan area. *J Appl Meteorol Clim*, 2009, 48: 199-216.
- [7] 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 Clim*, 2006, 45: 912-929.
- [8] Taha H. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk-parameterization approach. *J Appl Meteorol*, 1999, 38: 466-473.
- [9] Grimmond C S B, Oke T. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observation and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *J Appl Meteorol*, 2002, 41: 792-810.
- [10] Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound-Lay Meteorol*, 2000, 94: 357-397.
- [11] Martilli A, Clappier A, Rotach M W. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Bound-Lay Meteorol*, 2002, 104: 261-304.
- [12] Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound-Lay Meteorol*, 2001, 101: 329-358.
- [13] Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J Geophys Res*, 2011, 116, D12109, doi: 10.1029/2010JD015139.
- [14] Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM). NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 2010, 257 pp.
- [15] 李晓莉, 何金海, 毕宝贵, 等. MM5模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验. *气象学报*, 2003, 61(5): 526-539.
- [16] 何晓凤, 蒋维楣, 周荣卫. 一种单层城市冠层模式的建立及数值试验研究. *大气科学*, 2009, 33(5): 981-993.
- [17] 王咏薇, 蒋维楣. 多层城市冠层模式的建立及数值试验研究. *气象学报*, 2009, 67(6): 1013-1024.
- [18] Salamanca F, Martilli A, Tewari M, et al. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. *J Appl Meteorol Clim*, 2011, 50: 1107-1128.
- [19] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities. *J Appl Meteorol Climatol*, 2008, 47: 1038-1060.
- [20] Grimmond C S B, Blackett M, Best M, et al. The international urban energy balance models comparison project: First result from phase 1. *J Appl Meteorol Clim*, 2010, 49: 1268-1292.
- [21] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. Initial results from phase 2 of the international urban energy balance models comparison project. *Int J Climatol*, 2011, 31: 244-272.
- [22] Grimmond C S B, Oke T R, Steyn D G. Urban water balance 1. A model for daily totals. *Water Resour Res*, 1986, 22(10): 1397-1403.
- [23] Grimmond C S B, Oke T R. Urban water balance 2. Results from a suburb of Vancouver, British Columbia. *Water Resour Res*, 1986, 22(10): 1404-1412.
- [24] Grimmond C S B, Oke T R. A evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resour Res*, 1991, 27(7): 1739-1755.
- [25] Mitchell V, Mein R, McMahon T. Modelling the urban water cycle. *J Environ Model Softw*, 2001, 16: 615-629.
- [26] 孟春雷, 戴永久. 城市陆面模式设计及检验. *大气科学*, 2013, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12185.
- [27] Grimmond C S B, King T S, Roth M, et al. Aerodynamic roughness of urban area derived from wind observations. *Bound-Lay Meteorol*, 1998, 89: 1-24.
- [28] Grimmond C S B, Oke T. Aerodynamic properties of urban area derived from analysis of surface form. *J Appl Meteorol*, 1999, 38: 1261-1292.
- [29] 高志球, 卞林根, 逯昌贵, 等. 城市下垫面空气动力学参数的估算. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊): 26-33.
- [30] Kanda M, Kanega M, Kawai T, et al. Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46: 1067-1079.
- [31] Holland D E, Berglund J A, Spruce J P. Derivation of effective aerodynamic surface roughness in urban areas from airborne Lidar terrain data. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47: 2614-2626.
- [32] Masson V. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theor Appl Climatol*, 2006, 84: 35-45.
- [33] Taha H. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energ Buildings*, 1997, 25: 99-103.
- [34] Kanda M. Progress in urban meteorology: A review. *J Meteorol Soc Jpn*, 2007, 85B: 363-383.
- [35] 陈燕, 蒋维楣. 南京城市化进程对大气边界层的影响研究. *地球物理学报*, 2007, 50(1): 66-73.
- [36] 江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——一个例分析. *气象学报*, 2007, 65(2): 301-301.
- [37] Jin M, Dickinson R E, Zhang D L. The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS. *J Climate*, 2005, 18: 1551-1565.
- [38] Xu W, Wooster M J, Grimmond C S B. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature-emissivity separation approach. *Remote Sens Environ*, 2008, 112: 3493-3510.
- [39] Grimmond C S B, Cleugh H A, Oke T R. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmos Environ*, 1991, 25B(3): 311-326.
- [40] Taha H. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energ Buildings*, 1997, 25: 99-103.
- [41] Block A, Keuler K, Schaller E. Impacts of anthropogenic heat on regional climate patterns. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L12211, doi:10.1029/2004GL019852.
- [42] 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 城市人为热对北京城市热环境的影响. *气候与环境研究*, 2004, 9(3): 409-421.
- [43] 蒋维楣, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响的研究. *大气科学*, 2007, 31(1): 37-47.
- [44] Narumi D, Kondo A, Shimoda Y. Effects of anthropogenic heat release upon the urban climate in a Japanese megacity. *Environ Res*, 2009, 109: 421-431.
- [45] Smith C, Lindley S, Levermore G. Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat fluxes for UK cities: The case of Manchester. *Theor and Appl Climatol*, 2009, 98(1/2): 19-35.
- [46] Allen L, Lindberg F, Grimmond C S B. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: Model and variability. *Int J Climatol*, 2010, 31(13): 1990-2005.

- [47] Kato S, Yamaguchi Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sens Environ*, 2005, 99: 44-54.
- [48] 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.
- [49] Sailor D, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmos Environ*, 2004, 38: 2737-2748.
- [50] Hamilton I G, Davies M, Steadman P, et al. The significance of the anthropogenic heat emissions of London's buildings: A comparison against captured shortwave solar radiation. *Build and Environ*, 2009, 44: 807-817.
- [51] Mitchell V, Mein R, McMahan T. Modelling the urban water cycle. *J Environ Model Softw*, 2001, 16: 615-629.
- [52] Mitchell V G, Cleugh H A, Grimmond C S B, et al. Linking urban water balance and energy balance models to analyse urban design options. *Hydrol Process*, 2008, 22: 2891-2900.
- [53] Meng C L, Zhang C L, Miao S G, et al. Localization and validation of an urbanized high-resolution land data assimilation system (u-HRLDAS). *Sci China Earth Sci*, 2013, 56(6): 1071-1078.
- [54] Chen F, Bornstein R, Grimmond C S B, et al. Research priorities in observing and modeling urban weather and climate. *Bull Amer Meteor Soc*, 2012, 93(11): 1725-1728.
- [55] Chen F, Manning K W, LeMone M A, et al. Description and evaluation of the characteristics of the NCAR high-resolution land data assimilation system. *J Appl Meteorol Clim*, 2007, 46: 694-713.
- [56] Committee on urban meteorology. *Urban Meteorology: Forecasting, Monitoring, and Meeting Users' Needs*. Washington D C: The National Academies Press. 2012.
- [57] Jin M, Shepherd J M. Inclusion of urban landscape in a climate model: How can satellite data help? *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(5): 681-689.
- [58] Caparrini F, Castellì F. Variational estimation of soil and vegetation turbulent transfer and heat flux parameters from sequences of multisensor imagery. *Water Resour Res*, 2004, 40, W12515, doi:10.1029/2004WR003358.
- [59] Margulis S A, Entekhabi D. Variational assimilation of radiometric surface temperature and reference-level micrometeorology into a model of the atmospheric boundary layer and land surface. *Mon Wea Rev*, 2003, 131, 1272-1288.
- [60] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system. *Bull Amer Meteor Soc*, 2004, 85: 381-394.
- [61] Caparrini F, Castellì F, Entekhabi D. Mapping of land-atmosphere heat fluxes and surface parameters with remote sensing data. *Bound-Lay Meteorol*, 2003, 107: 605-633.
- [62] Meng C L, Zhang C L, Tang R L. Variational estimation of land-atmosphere heat fluxes and land surface parameters using MODIS remote sensing data. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 608-621.
- [63] Meng C L, Li Z L, Zhan X W, et al. Land surface temperature data assimilation and its impact on evapotranspiration estimates from the Common Land Model. *Water Resour Res*, 2009, 45, W02421, doi:10.1029/2008WR006971.
- [64] Kusaka H, Kimura F. 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 Meteorol*, 2004, 43: 1899-1910.
- [65] Miao S G, Chen F, Margaret A, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *J Appl Meteorol Clim*, 2009, 48: 484-501.
- [66] Miao S G, Chen F, Li Q C, 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 Clim*, 2011, 50: 806-825.
- [67] 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.
- [68] Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int J Climatol*, 2011, 31: 273-288.
- [69] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part II: Sensitivity to input parameters and the simulated urban heat island in offline Simulations. *J Appl Meteorol Climatol*, 2008, 47: 1061-1076.
- [70] McCarthy M P, Best M J, Betts R A. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophys Res Lett*, 2010, 37(9), doi: 10.1029/2010GL042845.
- [71] Best M J, Grimmond C S B, Villani M G. Evaluation of the urban tile in MOSES using surface energy balance observations. *Bound-Lay Meteorol*, 2005, 118: 503-525.
- [72] Crevier L P, Delage Y. METRO: A new model for road-condition forecasting in Canada. *J Appl Meteorol*, 2001, 40: 2026-2037.
- [73] 孟春雷, 张朝林. 路面气象数值预报模型及性能检验. *应用气象学报*, 2012, 23(4): 451-458.
- [74] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull Amer Meteor Soc*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [75] Ching J, Brown M, Burian S, et al. National urban database and access portal tool. *Bull Amer Meteor Soc*, 2009, 90(8): 1157-1168.
- [76] Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model. *J Adv Model Earth Sys*, 2011, 3, doi: 10.1029/2011MS000045.