

孟春雷, 戴永久. 2013. 城市陆面模式设计及检验 [J]. 大气科学, 37 (6): 1297–1308, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12185. Meng Chunlei, Dai Yongjiu. 2013. Development and verification of a bulk urbanized land surface model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1297–1308.

城市陆面模式设计及检验

孟春雷¹ 戴永久²

¹ 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

² 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875

摘 要 针对城市冠层模式 (Urban Canopy Model, UCM) 的各种局限性, 本文首次提出整体城市陆面模式 (Bulk Urbanized Land Surface Model, BULSM) 的概念, 即在现有先进的陆面模式的基础上直接构建城市陆面模式。本文在通用陆面模式 (Common Land Model, CoLM) 基础上构建整体城市陆面模式, 根据城市的特点对 CoLM 进行了发展和重新参数化。模式采用高分辨率地表分类数据; 改进了模式的地表能量平衡方程与水分平衡方程; 对反照率、城市地表粗糙度、城市大气廓线、城市人为热、不透水面水分蒸发及积水深度等进行了重新参数化。模式保留了 CoLM 在自然下垫面的全部特性, 加强了 CoLM 在城市或人为下垫面的模拟和预报能力。区域验证以及 CoLM 对比结果表明整体城市陆面模式模拟结果能够显示出北京城区各参数的空间精细化分布情况, 能够反映出地表分类对模拟结果的影响。单站点验证以及 CoLM 和高分辨率城市陆面同化系统 (u-HRLDAS) 对比结果表明整体城市陆面模式地表温度模拟结果与 CoLM 相比有很大提高; 和 u-HRLDAS 相比大部分站点地表温度模拟结果也有一定的改进。

关键词 整体城市陆面模式 地表分类 人为热 不透水面

文章编号 1006-9895(2013)06-1297-12

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12185

Development and Verification of a Bulk Urbanized Land Surface Model

MENG Chunlei¹ and DAI Yongjiu²

¹ Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

² College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract According to the limitations of the urban canopy model (UCM), this paper puts forward the concept of the bulk urbanized land surface model (BULSM), which is developed directly on the basis of an up-to-date land surface model known as the common land model (CoLM). The high-resolution land surface classification data retrieved by thematic mapper (TM) imagery is used in the model. The land surface energy and water balance models are improved to reflect the characteristics of the urban land surface. The albedo, urban land surface roughness height, urban atmospheric profile, urban anthropogenic heat, impervious surface evaporation, and urban surface water depth are also reparameterized in the model. All of the characteristics of the natural land surface of CoLM are preserved in BULSM, and the simulation and prediction ability in urban or unnatural land surfaces are strengthened. Regional validation results and the comparison with CoLM indicate that the simulation results of BULSM can indicate the refinement distribution of the land surface parameters in urban Beijing and reflect the impact of land cover classification. The single point validation results and the comparison with CoLM and Urbanized High-Resolution Land Data Assimilation System (u-HRLDAS) indicate that the simulation result of land surface temperature is greatly improved over that with CoLM. In most of the stations, the results

收稿日期 2012-10-30, 2013-02-22 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金项目 41005056, 国家科技支撑计划重点项目 2008BAC37B04

作者简介 孟春雷, 1976 年出生, 男, 副研究员, 主要从事城市气象及陆面模式发展及同化研究, E-mail: clmeng@ium.cn

also show improvement compared with u-HRLDAS on the basis of the Weather Research and Forecasting Model/Urban Canopy Model (WRF/UCM).

Keywords Bulk urbanized land surface model (BULSM), Land surface classification, Anthropogenic heat, Impervious surface

1 引言

城市是国家的主要经济实体及人群聚居地,城市气象研究具有非常重要的意义。城市下垫面非常复杂,下垫面又与上层大气存在着复杂的相互作用,因此准确模拟及预测城市天气、城市地表参数,需要对城市下垫面状况(张朝林等, 2007; 苗世光等, 2010)、城市边界层(Zhou et al., 2005; Zhang et al., 2009)有着比较深入系统的了解,并在此基础上对城市陆面过程进行参数化研究。

城市陆面过程参数化研究主要有两种方法:整体模式方法和城市冠层模式(Urban Canopy Model, UCM)方法(Masson, 2006; Salamanka et al., 2011; Committee on Urban Meteorology, 2012)。迄今为止,整体模式方法主要是建立本地城市参数化模型(Taha, 1999; Grimmond and Oke, 2002)或者对陆面模式中的一些参数(粗糙度、热容、热导率和反照率等)进行简单的调整(Liu et al., 2006)。整体模式方法较为简单,没有对地表能量以及水分平衡方程进行重新参数化,未考虑人为热、城市水文模式等影响,没有采用高分辨率城市地表分类数据。

UCM 则是目前城市陆面参数化研究的主要方法(Kusaka et al., 2001; Kondo et al., 2005; 周荣卫等, 2008; 何晓凤等, 2009; 蒋维楣等, 2009; 王咏薇和蒋维楣, 2009)。UCM 研究发展很快,并且已经和天气模式进行了耦合(Kusaka et al., 2004; Chen et al., 2010; Miao et al., 2011; Ryu et al., 2011)用于天气预报。UCM 所考虑的参数和物理过程目前已经比较全面和详细。但是 UCM 通常较为复杂,引入了大量的参数,针对具体的城市,如何得到或反演模式参数是模式局地化或应用中的重要障碍,因此带来了许多系统误差及不确定性问题。另外,国内各大城市采用的天气预报模式大部分为中尺度模式,模式最内层嵌套分辨率一般在 3 km 左右,完全不能反映出城市建筑物等精细化结构的影响。

高分辨率城市陆面同化系统(u-HRLDAS)(Chen et al., 2007; Meng et al., 2012)在 UCM 的基础上收集了大量的(通常为 12~18 个月)数据,

通过长时间起转过程(spun-up),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。另外,UCM 是在城市地表能量平衡模式(Masson, 2000)基础上建立的,对于城市潜热通量、有降水(包括降雨和降雪)时地表温度以及城市积雪的模拟能力不足。

Grimmond (2010; 2011)教授组织了“国际城市地表能量平衡比较计划”,深入比较了全球各种城市地表能量平衡模式,其目的主要是确定最优城市地表能量平衡方案以及探讨何种复杂程度的模式能够对城市冠层进行较准确的模拟。结果表明:没有一种模式对于全部参数的模拟结果优于其它模式;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。

针对 UCM 的各种局限性,本文首次提出了整体城市陆面模式的概念。模式针对城市下垫面及人类活动的特点,对陆面模式进行发展和重新参数化。本文基于通用陆面模式(Common Land Model, CoLM)(Dai et al., 2003)构建整体城市陆面模式(Bulk Urbanized Land Surface Model, BULSM)。BULSM 保留了 CoLM 在自然下垫面的全部特性,加强了模式在城市或人为下垫面的模拟和预报能力。模式采用了 TM (Thematic Mapper) 影像反演的高分辨率地表分类数据;考虑了城市地区的特点,改进了模式的地表能量平衡方程与水分平衡方程;对反照率、植被覆盖率、地表粗糙度、城市大气廓线、城市人为热、不透水面水分蒸发及积水深度等进行了重新参数化。模式采用尽可能简单有效的方法对城市物理过程进行描述并对城市地表参数进行重新参数化,避免引入不确定参数及系统误差。模式最大限度的利用了现有观测数据。模式较为简单,可以很方便的进行敏感性分析以及数据同化研究(孟春雷等, 2012),并且可以和中小尺度气象模式耦合用于天气预报。整体城市陆面模式应用范围主要包括:(1)中小尺度天气预报;(2)城市气候及城市化影响研究;(3)城市下垫面地表过程

精细模拟；(4) 城市交通、水文等与城市地表有关的各行业中的应用。

2 城市陆面模式

CoLM 是在生物—大气传输模式 (Dickinson et al., 1993)、中国科学院大气物理研究所 1994 年模式 (Dai and Zeng, 1997)、公用陆面模式 (Bonan et al., 2002) 等模式的基础上发展起来的。本文在 CoLM 基础上构建 BULSM。

2.1 城市地表分类

下垫面分类为陆面模式建立的基础，CoLM 仍采用 USGS (US Geological Survey) 1993 年的分类结果，分辨率为 30 s，而且对于城市只有一个分类类型，已经远远不能满足研究城市气象的需求。因此，本文采用 2009 年陆地卫星 TM 30 m 分辨率遥感影像反演结果代替 USGS 地表分类结果。城市地区地表分类分为 7 类，即：高密度城区、低密度城区、水体、裸地、草地、农田和森林。北京城区 TM 地表分类结果如图 1 所示。

TM 分辨率为 30 m，研究区域包含了很多格点，这就导致了运算时间过长的的问题。基于此，本文对 TM 地表分类结果进行了升尺度处理，将分辨率升

尺度为 300 m，升尺度后每个网格点将包含 100 个 30 m 分辨率网格点，最多将包括 7 种地表分类。升尺度处理后网格点输出结果为：

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \times w_i, \quad (1)$$

式中， F 为升尺度后每个网格点模式输出结果， n 为升尺度后每个网格点所包含的地表分类数， $n \leq 7$ ， F_i 为每个网格点中第 i 种地表分类模式输出结果， w_i 为每个网格点中第 i 种地表分类所占面积权重。显然下式成立：

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (2)$$

上述处理方法可以加快模式运行速度，并且最大限度利用精细化地表分类数据。升尺度后北京城区各网格点所占面积最大的地表分类结果（网格数为 150×150 ）与 USGS 地表分类结果（网格数为 45×45 ）如图 2 所示，范围为（ $39.7362^\circ\text{N} \sim 40.1412^\circ\text{N}$ ， $116.1351^\circ\text{E} \sim 116.6613^\circ\text{E}$ ），基本涵盖了北京市城区范围。升尺度后各网格点面积最大地表分类所占网格点面积权重如图 3 所示，各网格点城区（包括低密度与高密度城区）面积所占百分比如图 4 所示。

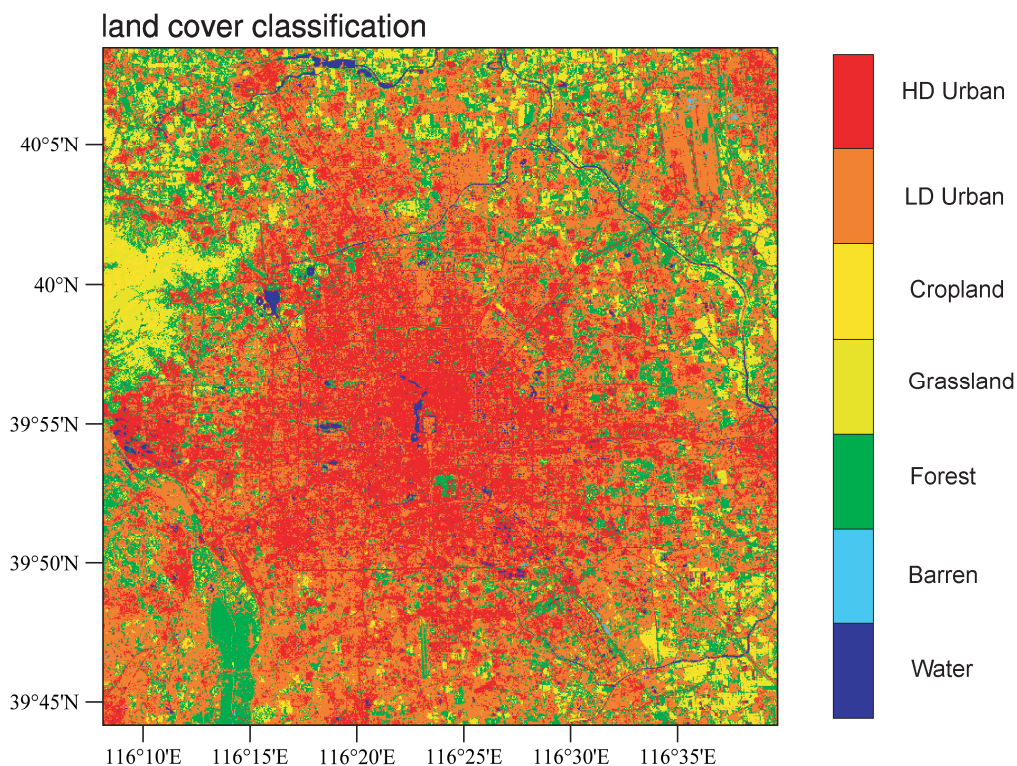


图 1 TM 反演北京城区地表分类（高密度城区、低密度城区、农田、草地、森林、裸地、水体）

Fig. 1 Land cover classifications in Beijing retrieved by TM (Thematic Mapper) image: HD (High Density Urban), LD (Low Density Urban), Cropland, Grassland, Forest, Barren, Water

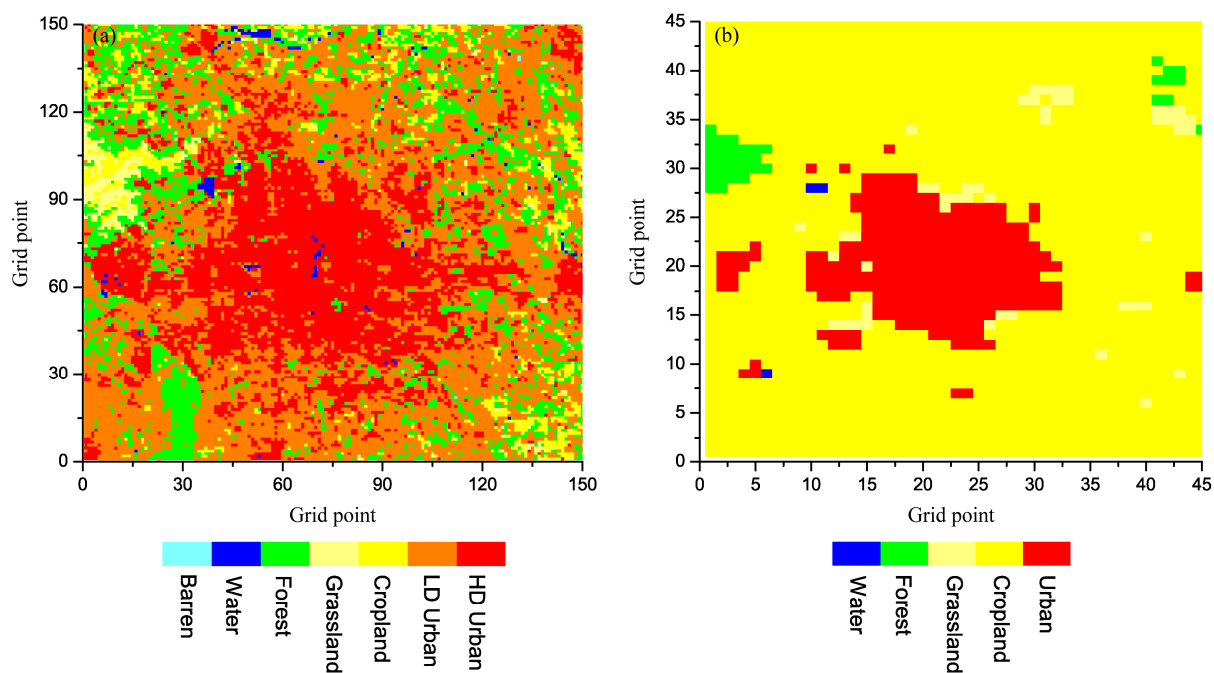


图2 北京城区地表分类: (a) TM 图像升尺度分类结果; (b) USGS 分类结果

Fig. 2 Dominant land cover types in Beijing from (a) TM image after upscaling and (b) USGS

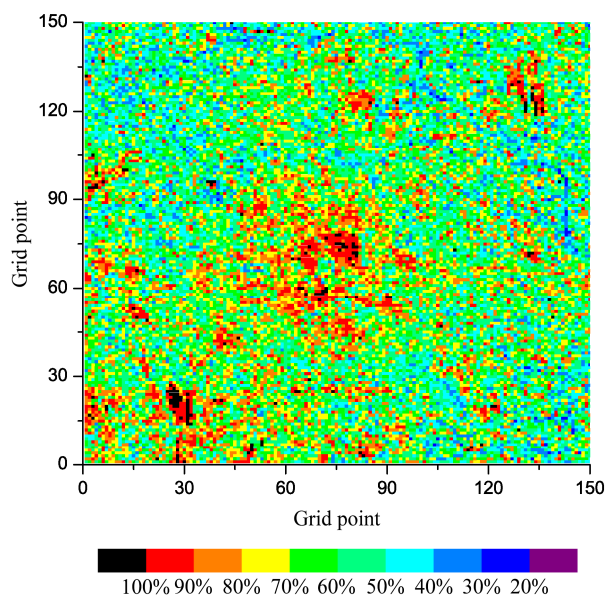


图3 各网格点面积最大地表分类所占网格点面积权重

Fig. 3 Area weight of the dominant land cover type

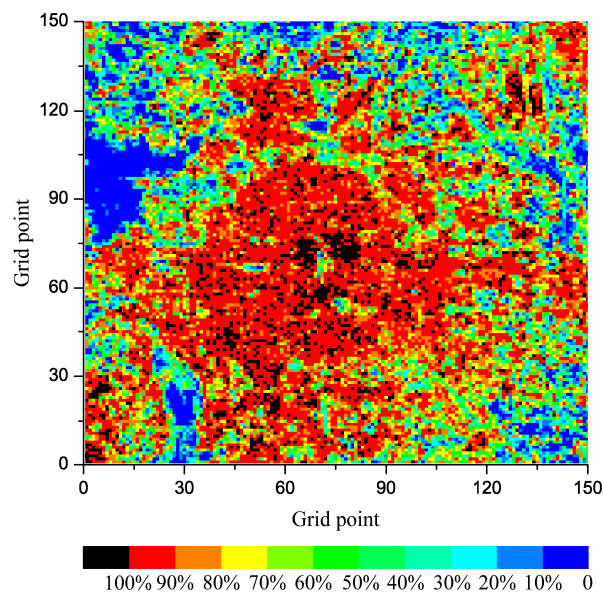


图4 各网格点城区面积所占权重

Fig. 4 Area weight of the urban category

由图2可以看出, USGS 分类分辨率很低, 城区面积较小, 其他地表覆盖类型主要为农田。由图2、图3和图4可以看出, TM 地表分类分辨率很高, 中心区域地表分类较单一, 城区所占比例很大; 其他地区各网格点地表分类较多元化。高密度城区分类中城区(包括低密度与高密度城区)面积所占百分比较高, 普遍超过80%; 低密度城区分类中城区(包括低密度与高密度城区)面积所占百分比变

化较大, 在50%到80%之间。中心城区及西南部林区网格点面积最大地表分类所占网格点面积权重较大, 表明地表分类比较均一; 其它区域网格点面积最大地表分类所占网格点面积权重较小, 表明这些网格点包含两种或多种地表分类。

2.2 模式物理过程

2.2.1 能量平衡方程

CoLM 中地表能量平衡方程分为两部分: 植被

能量平衡与地表能量平衡, 本文对其中的地表能量平衡方程加以改进, 加入人为热的影响。

CoLM 地表能量平衡方程可表示如下:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = F_1 - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (3)$$

式中, C 为土壤体积热容, T 为地表温度, λ 为热导率, F_1 为表层入射能量通量, t 为时间, z 为表层土壤深度, 公式 (3) 右端第二项为表层与第二层土壤之间的热传导通量。表层入射能量通量可以表示如下:

$$F_1 = R_{n,g} - H_g - L_v E_g, \quad (4)$$

式中, $R_{n,g}$ 为净辐射通量, H_g 为显热通量, $L_v E_g$ 为潜热通量, L_v 为水的蒸发潜热, E_g 为水分蒸发通量。

考虑人为热因素的影响, 表层入射能量通量可以改写为:

$$F_1 = R_{n,g} - H_g - L_v E_g + R, \quad (5)$$

式中, R 为人为热通量。

2.2.2 水分平衡方程

CoLM 表层水分传输方程可表示如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = q_{\text{inf}} - \frac{\partial}{\partial z} K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right), \quad (6)$$

式中, θ 为体积含水量, K 为导水率, ψ 为土水势, q_{inf} 为入渗率, 公式 (6) 右端第二项为表层与第二层土壤之间水分传输通量。

城市下垫面可分透水面和不透水面两种, 对于透水面, 公式 (6) 保持不变, 对于不透水面, 表层体积含水量为零, 因此水分平衡方程可简化为:

$$\theta = 0. \quad (7)$$

入渗率可以表示如下:

$$q_{\text{inf}} = G_w - E_g - R_s, \quad (8)$$

式中, G_w 为有效降水, R_s 为表层径流。

对于不透水面, 表层入渗量为零, 即:

$$q_{\text{inf}} = 0, \quad (9)$$

$$G_w = E_g + R_s. \quad (10)$$

2.3 模式物理量参数化

2.3.1 反照率

CoLM 反照率包括三部分: 积雪反照率、植被反照率和裸土反照率。其中裸土反照率由土壤湿度和颜色决定。对于不透水面, 裸土反照率由土壤颜色这一个因素决定, 然后查找表求得。由于城市不透水面普遍颜色较深, 因此将土壤颜色分级设为 8, 即为最深; 反照率可设为 0.15 (江晓燕等, 2007;

王开存等, 2008)。

2.3.2 土壤相关参数

CoLM 中与土壤有关参数主要包括与土壤质地、颜色、热导率、热容、孔隙度等。对于不透水面, 土壤孔隙度为零, 热导率和热容可以采用沥青混凝土材料数据。

CoLM 土壤质地采用 USGS 数据, 分辨率为 30 s。对于透水面, 土壤质地数据改用中国土壤特征数据集数据 (Shangguan et al., 2011)。图 5 和图 6 分别为 CoLM 以及 BULSM 土壤质地中砂粒与粘粒含量百分比。

2.3.3 地表粗糙度与零平面位移

地表粗糙度与零平面位移对于地气交换通量的计算至关重要, CoLM 将城市下垫面地表粗糙度统一设为 0.1 m, 显然不能满足需要。目前对于地表粗糙度仍没有较为完美的解决方案, 尤其是在缺乏城市建筑高度数据的情况下。本文采用 Grimmond and Oke (1999) 的方法确定地表粗糙度和零平面位移, 此方法最为简便易用:

$$z_0 = 0.1 h; \quad z_d = 0.5 h, \quad (11)$$

式中: z_0 为地表粗糙度, z_d 为零平面位移, h 为建筑物平均高度。对于高密度城区, 建筑物平均高度可设为 60 m, 约 20 层楼高度; 低密度城区为 20 m, 约 6 层楼高度。

2.3.4 大气廓线

本文采用 Zhou et al. (2005) 的方法对城市大气廓线进行参数化:

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = 1.73 \left(1 - 1.0 \frac{z'}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (12)$$

$$\frac{\sigma_T}{T_*} = 0.88 \left(-\frac{z'}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

式中, z'/L 为无量纲化高度, u_* 为摩擦速度, T_* 为特征温度, σ_u 、 σ_T 分别为速度方差和温度方差。

2.3.5 人为热

人为热是地表能量平衡中的重要因子 (蒋维楣和陈燕, 2007; 何晓凤等, 2007), 对城市地表温度的计算至关重要。城市人为热的参数化采用 Sailor and Lu (2004) 的方法, 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。北京地区人为热日变化如图 7 所示, 数据来自 UCM 模式 (Miao et al., 2009; 2011), 时间为北京时间。

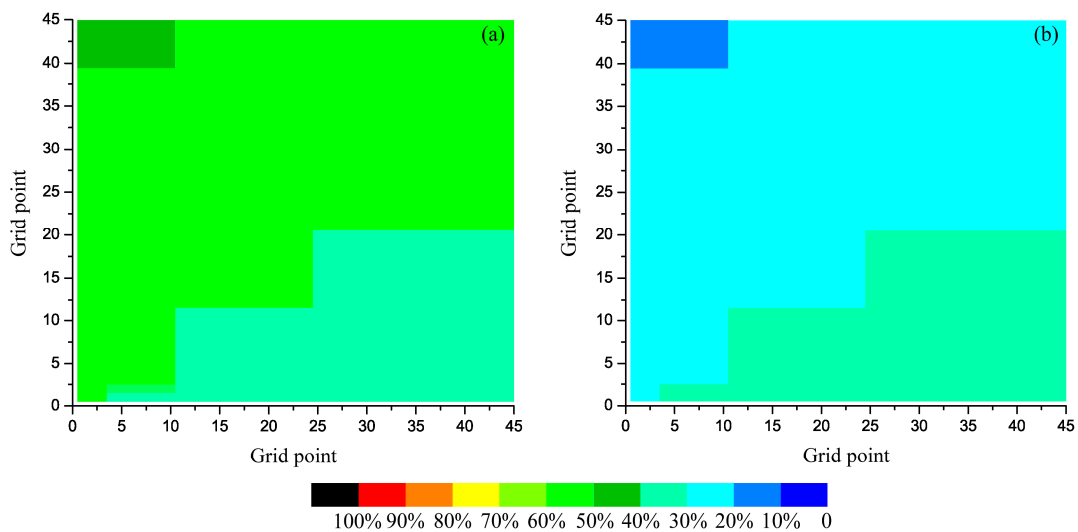


图 5 USGS 土壤质地: (a) 砂粒含量百分比; (b) 粘粒含量百分比

Fig. 5 Soil texture in USGS: (a) Sand percent; (b) clay percent

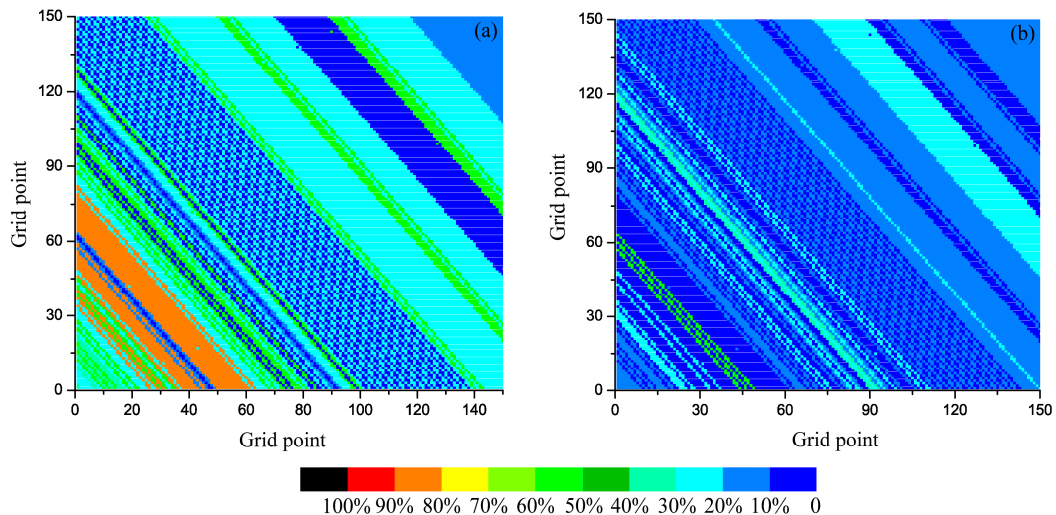
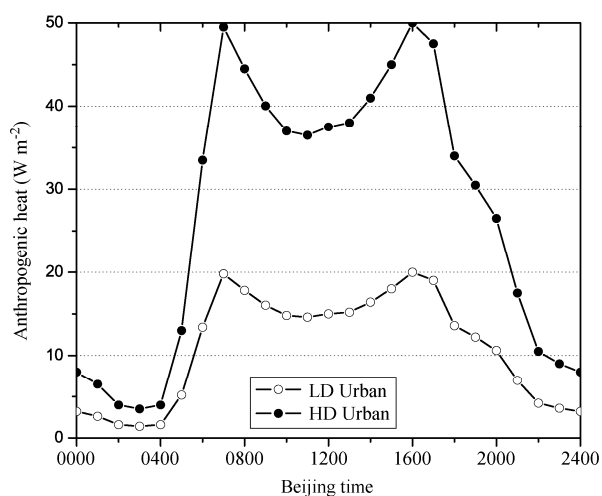


图 6 同图 5, 但为城市陆面模式

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for soil texture in bulk urbanized land surface model

图 7 北京城区人为热日变化图 (单位: W m^{-2})Fig. 7 Diurnal variation of the anthropogenic heat in Beijing (Unit: W m^{-2})

2.3.6 不透水面蒸发及地表积水深度

由于城市中存在着大量的不透水面, 不透水面蒸发机理与透水面不同, 因此有必要对不透水面蒸发进行重新参数化, 城市水循环 (Mitchell et al., 2001) 模式中不透水面蒸发计算方法如下:

$$E_{imp} = \min \{ E_p, \max [0, (P - D_{rain})] \}, \quad (14)$$

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。

由于即使降水小于排水时地表积水深度仍可能大于零, 因此式 (14) 修正如下:

$$E_{imp} = \begin{cases} E_p & (W > 0) \\ \min \{ E_p, \max [0, (P - D_{rain})] \} & (W = 0) \end{cases}. \quad (15)$$

地表积水深度可以表示为:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - E_{imp} - D_{rain}, \quad (16)$$

式中 W 为地表积水深度。

3 模式检验

3.1 北京城区模拟

本部分分别采用 CoLM 和 BULSM 对北京城区地表参数进行模拟。模拟区域为 $39.7362^{\circ}\text{N} \sim 40.1412^{\circ}\text{N}$, $116.1351^{\circ}\text{E} \sim 116.6613^{\circ}\text{E}$, 模式时间分辨率为 1 小时。CoLM 空间分辨率为 30 s (受 USGS 分辨率限制), 网格点数 45×45 ; BULSM 空间分辨率为 300 m, 网格点数为 150×150 。模式模拟时间为 2009 年 5 月 13 日 00:00 至 5 月 17 日 11:00 (北京时间, 下同)。模式采用北京市气象局快速更新循环预报系统 (BJ-RUC) (陈敏等, 2010; 2011) 预报的气象强迫场驱动。

图 8、9、10 分别为 5 月 17 日 11:00 北京城区地表温度、潜热通量以及表层土壤相对湿度模拟结果。可以看出, BULSM 由于分辨率高, 能够显示出北京城区各参数的空间精细化分布情况; 模拟结果能够反映出地表分类对模拟结果的影响。城区地表温度较高, 潜热通量很低, 表层土壤湿度几乎为零; 植被覆盖较多区域正好相反, 地表温度较低, 潜热通量较高, 表层土壤湿度较高。CoLM 空间分辨率较低, 地表分类不够精细, 因此模拟结果不能反映城市地区各参数的空间精细化分布。由图 5、9、10 可以看出, 非城区表层土壤湿度和潜热通量结果明显受到土壤质地的影响。

3.2 地表温度检验

为了定量检验 BULSM 对地表温度模拟结果, 我们把 BULSM、CoLM 以及 u-HRLDAS 的模拟结果与自动气象站观测结果进行比较。气温、气压、风速、风向、降水、空气湿度等强迫变量采用自动站观测结果; 向下长波与短波辐射采用全球陆面同化系统 (GLDAS) 再分析资料。GLDAS 是由美国航空航天局 (NASA) 戈达德空间飞行中心 (GSFC) 和美国海洋和大气局 (NOAA) 国家环境预报中心 (NCEP) 联合发展的全球陆面数据同化系统, 它融合了来自地面和卫星的观测数据来提供最优优化近实时的地表状态变量 (Rodell et al., 2004; 陈莹莹等, 2009)。

u-HRLDAS 已经进行了改进与本地化 (Meng et al., 2012), 包括引入了中国土壤特征数据集数

据、GLDAS 气象强迫数据、自动站与卫星 (CMORPH/FY-2E) 融合降水数据、中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 地表分类数据和风云卫星积雪覆盖率数据等。u-HRLDAS 起转过程 (spin-up) 起始时间为 2008 年 1 月 1 日, 城市陆面模式运行初始时间为北京时间 2009 年 5 月 1 日 00:00, 模拟结束时间为 5 月 21 日上午 0 点, 结果比较时间为北京时间 5 月 11 日 0 点到 5 月 21 日 00:00。也就是说, 城市陆面模式起转过程仅为 10 d, 而 u-HRLDAS 起转过程为 16 个多月。

选择的观测站点及其基本信息如表 1 所示, 所选择站点均为常规站点, 覆盖类型为低密度城区, 选区水泥地面温度观测结果对模式进行检验。

表 1 自动气象站基本信息

Table 1 Basic information of the automatic weather stations

站点名称	纬度 ($^{\circ}\text{N}$)	经度 ($^{\circ}\text{E}$)	高度 (m)
朝阳	39.95	116.50	36.5
石景山	39.94	116.20	67.1
观象台	39.80	116.47	32.5
海淀	39.99	116.29	46.9
顺义	40.13	116.62	29.6
丰台	39.87	116.25	57.0

由图 11 和表 2 可以看出, 相对于 CoLM、BULSM 和 u-HRLDAS 对于地表温度 (尤其是白天温度较高时的地表温度) 的模拟精度均有了明显提高。主要原因是人为热的引入以及不透水面的参数化。相对于 u-HRLDAS, BULSM 能够更好的模拟白天温度较高时的地表温度, 主要是由于地表分类的精细化以及不透水面蒸发的改进。u-HRLDAS 对于商业区、高密度城区和低密度城区的城市不透水面覆盖率统一设定为常数, 即 0.95、0.9 和 0.5, 显然会带来一定的误差。BULSM 对于夜间温度模拟有些偏低, 应该由于人为热的参数化不够精细的缘故。由表 2 可以看出, 除了朝阳站 BULSM 模拟误差略高于 u-HRLDAS 以外, 其余 5 个站点 BULSM 模拟效果均明显好于 u-HRLDAS, 这进一步证明了 BULSM 是简单有效的。

4 结论和讨论

本文在通用陆面模式基础上, 发展了适用于城市地区的整体城市陆面模式 (BULSM)。验证结果表明了 BULSM 能够改进城市地区地表参数及通量的模拟。主要结论如下:

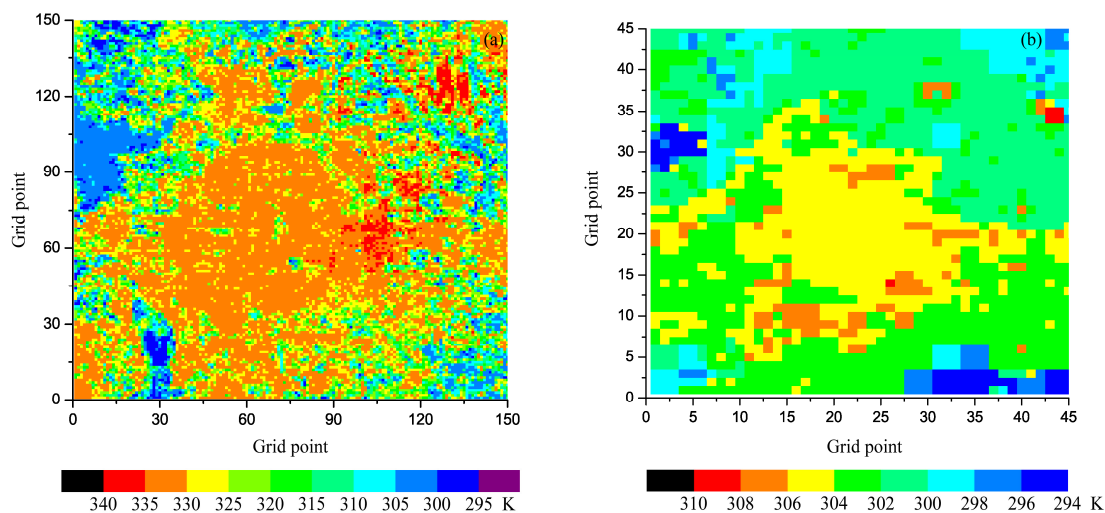


图 8 北京城区地表温度模拟结果: (a) 城市陆面模式; (b) CoLM。单位: K

Fig. 8 Ground surface temperature in urban areas of Beijing simulated with (a) Bulk Urbanized Land Surface Model and (b) CoLM. Unit: K

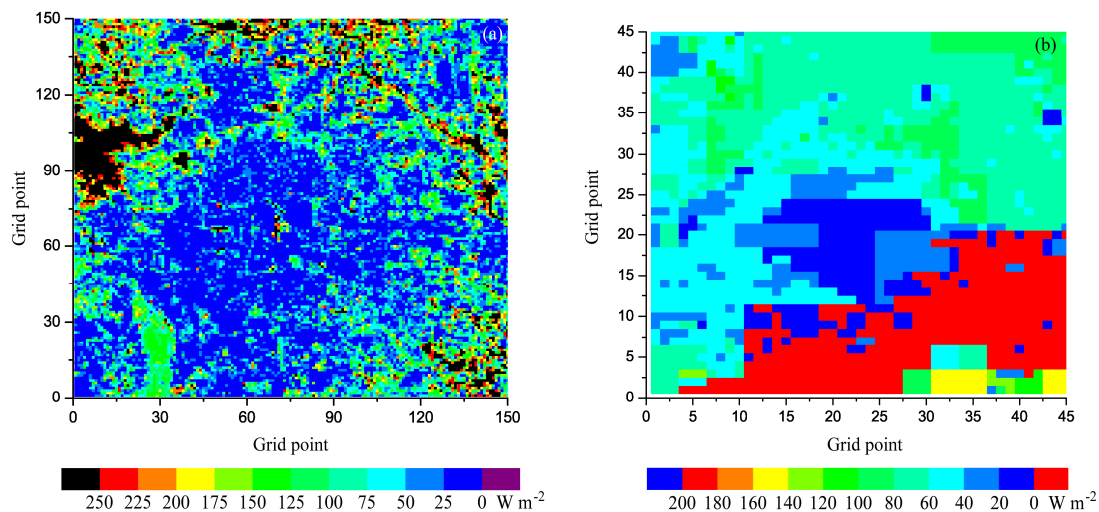


图 9 同图 8, 但为潜热通量模拟结果。单位: W m^{-2}

Fig. 9 Same as Fig.8, but for evapotranspiration simulation result. Unit: W m^{-2}

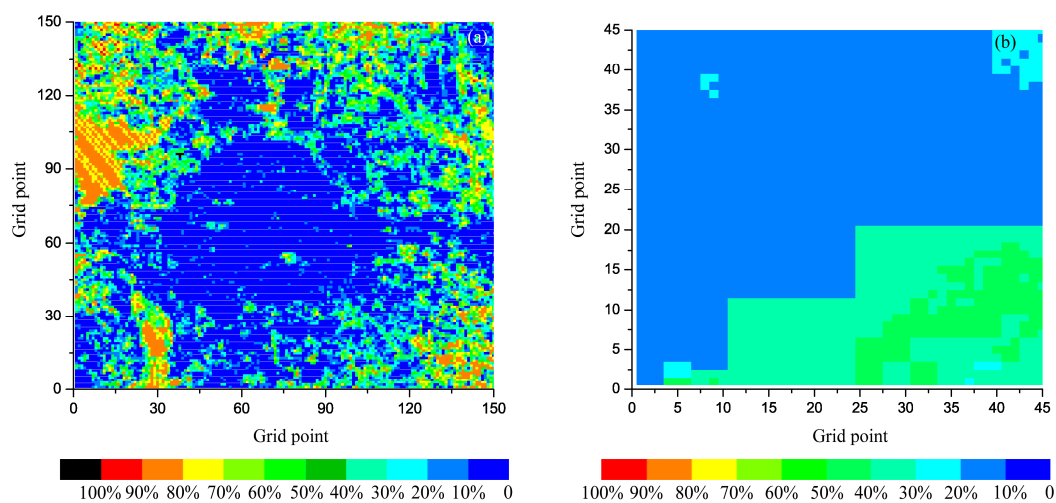


图 10 同图 8, 但为表层土壤相对湿度模拟结果

Fig. 10 Same as Fig.8, but for surface layer volumetric soil moisture simulation result

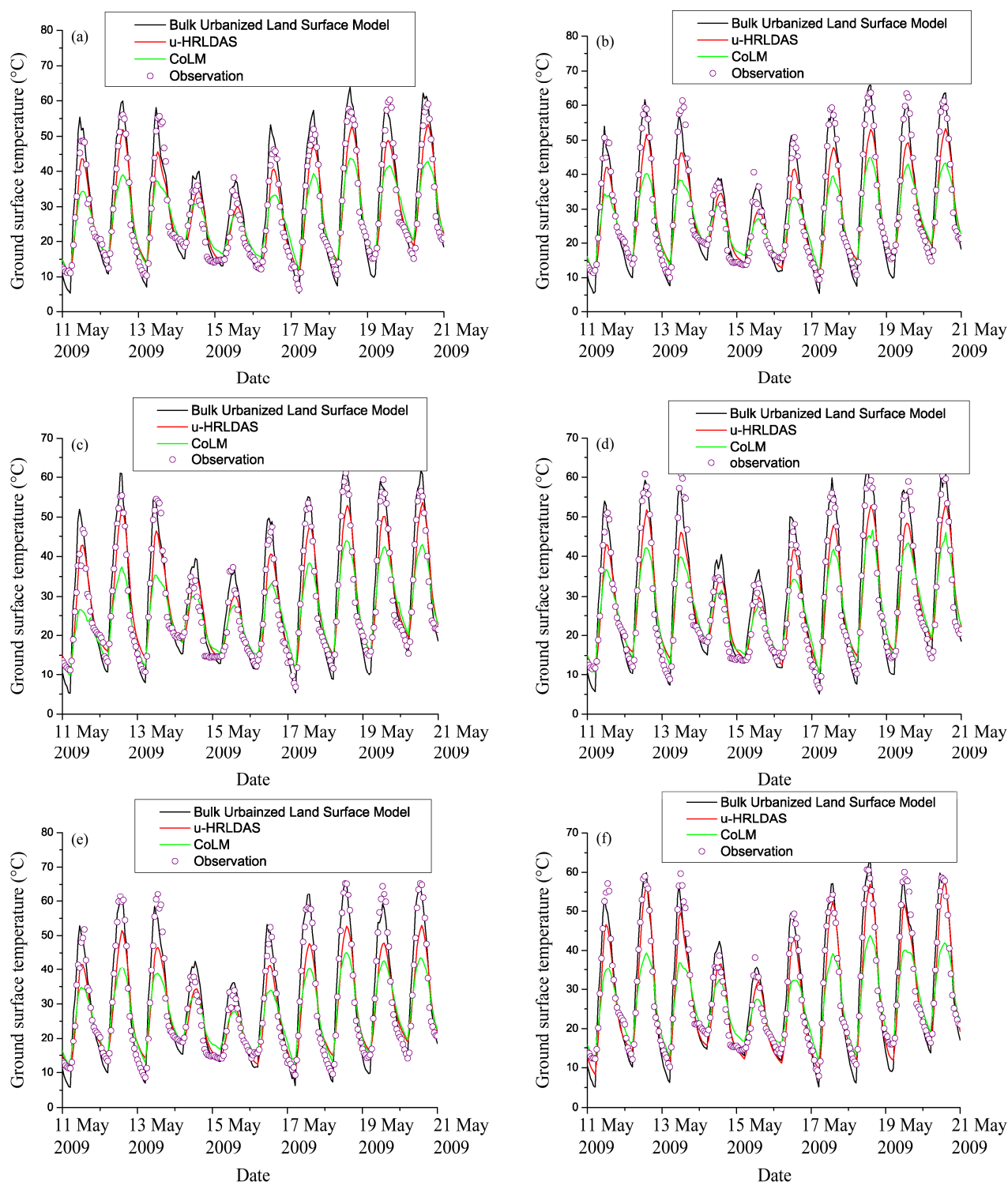


图 11 BULSM、u-HRLDAS、CoLM 模拟的地表温度与观测值的比较：(a) 朝阳站；(b) 丰台站；(c) 观象台站；(d) 海淀站；(e) 石景山站；(f) 顺义站

Fig. 11 Comparison between the simulated ground surface temperature by Bulk Urbanized Land Surface Model, u-HRLDAS, and CoLM with the observations at stations (a) Chaoyang (b) Fengtai (c) Guanxiangtai (d) Haidian (e) Shijingshan (f) Shunyi

(1) 针对 UCM 的各种局限性，本文首次提出 BULSM 的概念。BULSM 在先进的 CoLM 基础上建立，耦合了城市水文模式，致力于提高城市潜热

通量、有降水（包括降雨和降雪）时地表温度以及城市积雪模拟能力。模式较为简单，可以通过数据同化进一步提高模拟能力，并且可以和中尺度气象

模式耦合用于天气预报。

表 2 BULSM、u-HRLDAS、CoLM 地表温度模拟结果与观测值之间的平均误差、均方根误差和相关系数

Table 2 Mean errors (MEs), root mean square errors (RMSEs), and correlation coefficients (R) between the simulated ground surface temperature by Bulk Urbanized Land Surface Model, u-HRLDAS, CoLM and the observations

	平均误差 (K)	均方根误差 (K)	相关系数
朝阳站 BULSM	3.87	4.72	0.965
朝阳站 u-HRLDAS	3.57	4.53	0.962
朝阳站 CoLM	5.50	7.21	0.943
丰台站 BULSM	3.03	3.72	0.974
丰台站 u-HRLDAS	4.58	6.01	0.951
丰台站 CoLM	6.09	8.59	0.942
观象台站 BULSM	3.54	4.21	0.973
观象台站 u-HRLDAS	3.72	4.65	0.949
观象台站 CoLM	5.41	7.44	0.916
海淀站 BULSM	3.49	4.33	0.969
海淀站 u-HRLDAS	4.39	5.56	0.953
海淀站 CoLM	5.51	7.29	0.948
石景山站 BULSM	3.40	4.25	0.970
石景山站 u-HRLDAS	4.83	6.29	0.961
石景山站 CoLM	6.38	8.78	0.949
顺义站 BULSM	3.26	3.85	0.971
顺义站 u-HRLDAS	3.19	4.15	0.968
顺义站 CoLM	5.87	8.30	0.935

(2) 精细地表分类数据以及升尺度处理算法的运用使得 BULSM 对北京城区模拟结果能够显示出北京城区各参数的空间精细化分布情况; 模拟结果能够反映出地表分类的影响。

(3) BULSM 能够很好的模拟地表温度尤其是城市下垫面地表温度, 和 CoLM 相比, 模拟结果得到了很大提高。

(4) 和 u-HRLDAS 相比, BULSM 比较简单, 地表分类精细, 模式中大部分参数都利用了遥感观测数据, 不确定性物理参数引入较少, 不需要大量、长时间的观测、遥感及再分析数据作为支撑, 并且起转过程时间很短。

(5) 和 u-HRLDAS 相比, BULSM 能够更好的模拟白天温度较高时的地表温度; 并且对于大部分站点而言, BULSM 对于整个模拟时间段地表温度模拟效果明显好于 u-HRLDAS。

下一步将对城市陆面模式进行进一步发展和

研究: 采用 MODIS 反演地表反照率; 考虑采用遥感与地理信息系统相结合的方法反演城市建筑物平均高度; 采用遥感反演灯光亮度对人为热进行参数化; 对模式地表蒸散、有降水时地表温度等模拟能力进行进一步检验; 和 u-HRLDAS 进行进一步的对比; 与数值预报模式进行耦合等。

致谢 感谢卢丽萍博士的 TM 影像地表分类工作。

参考文献 (References)

- Bonan G B, Oleson K W, Vertenstein M, et al. 2002. The land surface climatology of the community land model coupled to the NCAR community climate model [J]. *J. Climate*, 15: 3123–3149.
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2010. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. *Int. J. Climatol.*, 31 (2): 273–288, doi: 10.1002/joc.2158.
- Chen F, Manning K W, LeMone M A, et al. 2007. Description and evaluation of the characteristics of the NCAR high-resolution land data assimilation system [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46: 694–713.
- 陈敏, 范水勇, 仲跻芹, 等. 2010. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验 [J]. *气象学报*, 68 (4): 450–463.
- Chen M, Fan S Y, Zhong J Q, et al. 2010. An experimental study of assimilating the global position system-precipitable water vapor observations into the rapid updated cycle system for the Beijing area [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (4): 450–463.
- 陈敏, 范水勇, 郑祚芳, 等. 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探 [J]. *气象学报*, 69 (1): 181–194.
- Chen M, Fan S Y, Zheng Z F, et al. 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (1): 181–194.
- 陈莹莹, 施建成, 杜今阳, 等. 2009. 基于 GLDAS 的中国区地表能量平衡数值试验 [J]. *水科学进展*, 20 (1): 25–31. Chen Y Y, Shi J C, Du J Y, et al. 2009. Numerical experiments of surface energy balance over China area based on GLDAS [J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 20 (1): 25–31.
- Committee on Urban Meteorology. 2012. Urban meteorology: Forecasting, Monitoring, and Meeting Users' Needs [M]. Washington, D. C.: The National Academies Press.
- Dai Y J, Zeng Q C. 1997. A land surface model (IAP94) for climate studies. Part I: Formulation and validation in off-line experiments [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 14: 433–460.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The Common Land Model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84: 1013–1023.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to Community Climate Model [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-387+STR, 72 pp.
- Grimmond C S B, Oke T. 1999. Aerodynamic properties of urban areas

- derived from analysis of surface form [J]. *J. Appl. Meteor.*, 38: 1261–1292.
- Grimmond C S B, Oke T. 2002. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observation and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS) [J]. *J. Appl. Meteor.*, 41: 792–810.
- Grimmond C S B, Blackett M, Best M, et al. 2010. The international urban energy balance models comparison project: First result from phase1 [J]. *J. Appl. Meteor. Climate*, 49: 1268–1292.
- Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. 2011. Initial results from phase 2 of the international urban energy balance models comparison [J]. *Int. J. Climatol.*, 31: 244–272.
- 何晓风, 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 [J]. *地球物理学报*, 50 (1): 74–82. He X F, Jiang W M, Chen Y, et al. 2007. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 50 (1): 74–82.
- 何晓风, 蒋维楣, 周荣卫. 2009. 一种单层城市冠层模式的建立及数值试验研究 [J]. *大气科学*, 33 (5): 981–993. He X F, Jiang W M, Zhou R W. 2009. Development of a single layer urban canopy model and numerical experiments [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (5): 981–993.
- 蒋维楣, 陈燕. 2007. 人为热对城市边界层结构影响研究 [J]. *大气科学*, 31 (1): 37–47. Jiang W M, Chen Y. 2007. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 37–47.
- 蒋维楣, 王咏薇, 张宁. 2009. 城市陆面过程与边界层结构研究 [J]. *地球科学进展*, 24 (4): 411–419. Jiang W M, Wang Y W, Zhang N. 2009. Research on urban land-surface process and boundary layer structure [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24 (4): 411–419.
- 江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 2007. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——个例分析 [J]. *气象学报*, 65 (2): 301–307. Jiang X Y, Zhang C L, Gao H, et al. 2007. Impacts of urban albedo change on urban heat island in Beijing—A case study [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (2): 301–307.
- Kondo H, Genchi Y, Kikegawa Y, et al. 2005. Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis on energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 116: 395–421.
- 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]. *J. Appl. Meteor.*, 43: 1899–1910.
- 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 [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 101: 329–358.
- Liu Y B, Chen F, Warner T, et al. 2006. Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma city area during the joint urban 2003 field project [J]. *J. Appl. Meteor. Climate*, 45: 912–929.
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 94: 357–397.
- Masson V. 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 84: 35–45.
- 孟春雷, 张朝林, 刘长友. 2012. CoLM 模式地表温度变分同化研究[J]. *大气科学*, 36 (5): 985–994. Meng C L, Zhang C L, Liu C Y. 2012. Variational assimilation of land surface temperature from Common Land Model (CoLM) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (5): 985–994.
- Meng C L, Zhang C L, Miao S G, et al. 2012. Localization and validation of an urbanized high-resolution land data assimilation system (u-HRLDAS) [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 56 (6): 1071–1078.
- 苗世光, Chen Fei, 李青春, 等. 2010. 北京城市化对夏季大气边界层结构及降水的月平均影响 [J]. *地球物理学报*, 53 (7): 1580–1593. Miao S G, Chen F, Li Q C, et al. 2010. Month averaged impacts of urbanization on atmospheric boundary layer structure and precipitation in summer in Beijing area [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 53 (7): 1580–1593.
- Miao S G, Chen F, Li Q C, et al. 2011. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006 [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50: 806–825.
- Miao S G, Chen F, Margaret A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48: 484–501.
- Mitchell V, Mein R, McMahon T. 2001. Modelling the urban water cycle [J]. *Environmental Modelling and Software*, 16: 615–629.
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85: 381–394.
- Ryu Y, Baik J, Lee S. 2011. A new single-layer urban canopy model for use in mesoscale atmosphere models [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50: 1773–1794.
- Sailor D, Lu L. 2004. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas [J]. *Atmos. Environ.*, 38: 2737–2748.
- Salamanka F, Martilli A, Tewari M, et al. 2011. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50: 1107–1128.
- Shangguan W, Dai Y J, Liu B Y, et al. 2011. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China [J]. *Geoderma*, 171–172: 85–91.
- Taha H. 1999. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk-parameterization approach [J]. *J. Appl. Meteor.*, 38: 466–473.
- 王开存, 王建凯, 王普才, 等. 2008. 用 MODIS 反演北京城市地区地表反照率精度以及算法改进 [J]. *大气科学*, 32 (1): 67–74. Wang K C, Wang J K, Wang P C, et al. 2008. The accuracy of MODIS albedo over Beijing urban area and its algorithm improvement [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 67–74.
- 王咏薇, 蒋维楣. 2009. 多层城市冠层模式的建立及数值试验研究 [J]. *气象学报*, 67 (6): 1013–1024. Wang Y W, Jiang W M. 2009. Numerical study on development of a multi-layer urban canopy model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (6): 1013–1024.
- 张朝林, 苗世光, 李青春, 等. 2007. 北京精细下垫面信息引入对暴雨模拟的影响 [J]. *地球物理学报*, 50 (5): 1373–1382. Zhang C L, Miao S G, Li Q C, et al. 2007. Impacts of fine-resolution land use information of

- Beijing on a summer severe rainfall simulation [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 50 (5): 1373–1382.
- Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. 2009. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area [J]. J. Geophys. Res., 114, D02116, doi:10.1029/2008JD010328.
- Zhou M Y, Yao W Q, Xu X D, et al. 2005. Vertical dynamic and thermodynamic characteristics of urban lower boundary layer and its relationship with aerosol concentration over Beijing [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 48 (suppl. II): 25–37.
- 周荣卫, 蒋维楣, 何晓凤, 等. 2008. 应用城市冠层模式研究建筑物形态对城市边界层的影响 [J]. 气象学报, 66 (4): 489–499. Zhou R W, Jiang W M, He X F, et al. 2008. Study on effects of buildings morphology on urban boundary layer using an urban canopy model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (4): 489–499.