

何晓凤, 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 Xiaofeng, Jiang Weimei, Zhou Rongwei. 2009. Development of a single-layer urban canopy model and numerical experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 981-993.

一种单层城市冠层模式的建立及数值试验研究

何晓凤^{1,2} 蒋维楣¹ 周荣卫^{1,2}

1 南京大学大气科学系, 南京 210093

2 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 本文在引进先进的城市地表能量平衡方案 (Town Energy Balance, 简称 TEB) 的基础上建立了一个单层城市冠层模式, 并对南京市典型居民区 1 km² 范围内的局地尺度地表能量平衡各分量进行离线模拟, 将模拟结果与同期观测值作了比对, 发现: TEB 方案对城市地表能量平衡各分量的模拟效果良好, 而该方案的模拟性能受建筑物表面材料反照率取值的影响较大。在离线研究的基础上, 本文又将 TEB 方案成功耦合到南京大学区域边界层模式 (NJU-RBLM) 中, 作为该模式的地表能量平衡参数化方案之一, 分别选取该边界层模式中已有的地表能量平衡参数化方案 SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer model) 和新引入的 TEB 方案对冬夏两季不同个例进行模拟, 以常规近地面气温观测资料和 Landsat 卫星观测的地表反照率资料对模拟结果进行比较, 结果表明: TEB 方案对原大气边界层模式的模拟效果有明显改善, 对近地面热力场的改善效果尤为明显, 可以很好地模拟出城市冠层中的“陷阱效应”。

关键词 地表能量平衡 城市边界层 城市冠层模式 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2009) 05-0981-13

中图分类号 P404

文献标识码 A

Development of a Single-Layer Urban Canopy Model and Numerical Experiments

HE Xiaofeng^{1, 2}, JIANG Weimei¹, and ZHOU Rongwei^{1, 2}

1 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*

2 *National Climate Center, China Meteorology Administration, Beijing 100081*

Abstract This paper introduces the Town Energy Balance (TEB) scheme into a single layer urban canopy model developed by Nanjing University (NJU UCM-S). The TEB scheme is an advanced surface energy balance scheme in the world. The energy fluxes at the local scale of 1 km² area of Nanjing City are simulated with the TEB scheme. The verification results show that every component of urban surface energy balance is well simulated and the TEB scheme is suitable for Chinese cities similar to Nanjing. Moreover, the albedo of building surface material has a great influence on the simulated results with the TEB scheme. Based on these studies, the TEB scheme is successfully coupled with a regional boundary layer model (NJU_RBLM) developed by Nanjing University. In order to compare the simulation ability between the TEB scheme and the traditional SVAT scheme in the NJU_RBLM, two cases for different seasons have been simulated by the NJU_RBLM and the simulation results are compared with observation

收稿日期 2008-04-09, 2008-07-03 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40333027、40775014

作者简介 何晓凤, 女, 1979 年出生, 博士, 主要从事城市气象环境、大气边界层物理、气候资源评估等方面的研究。

E-mail: hexf@cma.gov.cn

data. The results indicate that the coupled model improves the simulation of NJU_RBLM evidently, especially to the thermal process and the surface flux. Furthermore, the differences of surface energy budget and Urban Heat Island (UHI) phenomenon modeled by these two schemes show that the TEB scheme has stronger ability in modeling UHI than the SVAT scheme.

Key words surface energy balance, urban boundary layer, urban canopy layer, numerical simulation

1 引言

随着数值模拟技术的发展,人们开始越来越多地应用数值模式研究城市问题,然而由于城市下垫面的复杂性,使得这些模式中描述地气相互作用的过程过于粗糙且适用性不够,因而在城市区域的模拟往往存在很多问题。我们知道,模式中计算地表能量平衡各项的准确程度对于模拟效果十分重要,它们是改善模式模拟近地面热力、动力分布状况的关键,因而要改善数值模式在城市区域的模拟能力必须不断改进模式中的地表能量平衡参数化方案。前人通过对不同外场观测试验数据的研究,逐渐发展了处理城市地表能量平衡各项的三类参数化方案。第1类方案是运用经验模式:通过对外场观测的地表能量平衡数据的分析得出地表能量平衡方程各项与短波辐射之间的统计关系,再将此关系带入大气模式中计算地表通量。这类模式最准确、最完整的代表是 NARP-LUMPS (Grimmond et al., 2002)。这类方法的优点是不需要过多的驱动力,只要知道下垫面类型、短波辐射就可计算,而且不需要求解许多方程,缺点是系数太多,且不同城市系数可能不同,需要大量外场试验先确定系数。第2类方案是对大气模式中常用的土壤植被大气传输模型 (SVAT) 进行调整:由于前人对 SVAT 的研究相对较成熟,所以这种方法是目前研究城市地表能量平衡的最常用手段,具体应用时是通过对下垫面反照率、鲍恩比以及热量、动量粗糙度等参数的调整来实现对辐射、潜热通量以及储热项等的计算修正。许多学者 (Taha, 1999; 陈燕, 2005; 蒋维楣和陈燕, 2007; 周荣卫等, 2007) 都运用这类方法修正大气模式进而研究城市边界层各种问题。虽然对 SVAT 进行修正后应用到城市下垫面上比较简单,可是其物理基础依然是 M-O 相似理论,而这一理论在城市冠层、粗糙子层以内并不适用。第3类方案是近几年发展起来的城市场地表能量平衡方案 (Town Energy Balance, 简称 TEB) (Masson,

2000), 随后, Kusaka et al. (2001) 将该方案中街渠对短波辐射的影响分为 8 类, 细化了这部分的计算过程, Lemonsu et al. (2004) 又改进了 TEB 方案中的各表面阻抗计算。TEB 方案自提出至今已被许多学者耦合到中尺度气象模式中进行各种研究: Lemonsu et al. (2002) 首先将该参数化方案耦合到了法国的中尺度大气模式 Meso-NH 中, 并以巴黎城为对象进行了在线模拟验证; Kusaka et al. (2004) 用耦合了 TEB 的一个二维静力中尺度模式模拟了理想城市的热岛; Lemonsu et al. (2006a) 用耦合了 TEB 的 Meso-NH 研究城市的存在对海陆风效应的影响。最近, Lemonsu et al. (2006b) 又将 TEB 引入到加拿大的 GEM 和 MC2 模式中, 试图研究北美城市的地表能量平衡状况; Chen et al. (2006) 也在积极将此方案耦合到 WRF 和 MM5 中, 力图通过 TEB 方案的引进改善这两个模式在城市的预报能力。与此同时, Keith et al. (2006) 也正将 TEB 加入到 NCAR 公用陆面模块中, 以便为全球气候模式在城市区域提供更好、更全面的地表能量平衡参数化方案。可见, TEB 方案在国际上的应用和研究已经越来越广泛, 而在国内, 对 TEB 的研究应用尚少, 一般还是采用第 2 类方案实现对城市区域地表能量平衡的模拟。我们认为, 目前引入 TEB 方案并将其应用于中国典型城市问题的模拟研究是有必要的。

本文首先引进了 Masson (2000)、Kusaka et al. (2001)、Lemonsu et al. (2004) 提出并发展的 TEB 方案建立了单层城市冠层模式 (NJU UCM-S) (何晓凤, 2006), 取 2005 年夏季和 2006 年冬季南京城市边界层外场观测试验资料离线驱动 TEB 方案, 将 TEB 模拟所得的地表能量平衡各分量结果和对应的观测结果进行对比分析, 以验证该方案的适用性; 在此基础上, 本研究又将所建 TEB 方案的冠层模式耦合到南京大学区域边界层模式 (NJU-RBLM), 分别选用 NJU-RBLM 中的原有 SVAT 方案和新耦合的 TEB 方案对南京冬、夏两

季典型天气下的城市边界层进行模拟比较，并将模拟结果与观测资料以及 Landsat 卫星观测资料作比较，分析两种参数化方案对城市热力环境的模拟能力。

2 城市地表能量平衡方案

单层城市冠层模式 (NJU UCM-S) 是在 TEB 方案的基础上建立的，它可以比较细致地刻画城市下垫面的地表能量平衡参数化过程。TEB 方案假定街渠是构成城市的基本单位，因而其物理过程通常是基于一个有代表性的街渠来考虑的。概括说来，TEB 方案根据城市各表面的几何特征细致地考虑了街渠中的各种辐射效应，如：建筑物各表面对辐射的吸收、反射、遮蔽以及多次反射吸收等过程。街渠中有三种表面，即屋顶、路面和墙面，TEB 方案的特点就是在这三种面上分别建立考虑了各表面几何特征的能量平衡关系，先算出每个面与相接大气间的热通量交换，再依照每种表面占一个街渠单元的面积权重算出每个街渠单元与上部大气之间总的热通量交换。

在具体应用 TEB 方案时，有如下假定：研究区域内所有建筑物高度相同、宽度相同；沿一条道路延伸的相向的两排建筑物与道路同长，且道路长度远大于建筑物宽度；研究区域内任何走向街渠存在的可能性都相同；对三类城市表面的能量平衡虽

然分开处理，但是对两面相对的墙却不分别考虑，因为虽然两面墙的物理过程不尽相同，但是大多数过程却是相同的，比如天空可视因子、墙面热力结构、建筑物内部温度和对散射辐射的吸收等，唯一不同的是到达两面墙上的太阳辐射，这会造成两面墙的表面温度有差异，但是这种差异对街渠整体传递给上部大气的热通量不会产生明显影响。

本文引入 TEB 方案时用 Masson (2000) 的公式计算各表面的净长波辐射、感热通量、潜热通量、冠层内气温、各表面各层间的土壤热通量以及各个表面各层的温度，用 Kusaka et al. (2001) 的公式计算各表面的净短波辐射，而各表面的阻抗则采用 Lemonsu et al. (2004) 改进的公式进行计算，具体的计算流程如图 1 所示。由图 1 可知，驱动 TEB 方案的气象要素主要有：冠层上的实测风速、气温以及向下长、短波辐射通量；必须给定的基本参数包括：街区形态参数（长、宽、高），建筑物各表面整层厚度，建筑物各表面（墙面、路面、屋顶）材料反照率，以及建筑物各表面材料的各种热力系数（热传导系数、比辐射率、热容量），建筑物各表面的热力粗糙度和动力粗糙度。另外，模式开始运行时还必须提供各表面的各层初始温度。上述学者采用 TEB 方案研究不同城市时，这些参数也不尽相同，均根据所研究城市的特点和实际情况给定。下文也给出了适用于南京的一组参数。TEB 方案

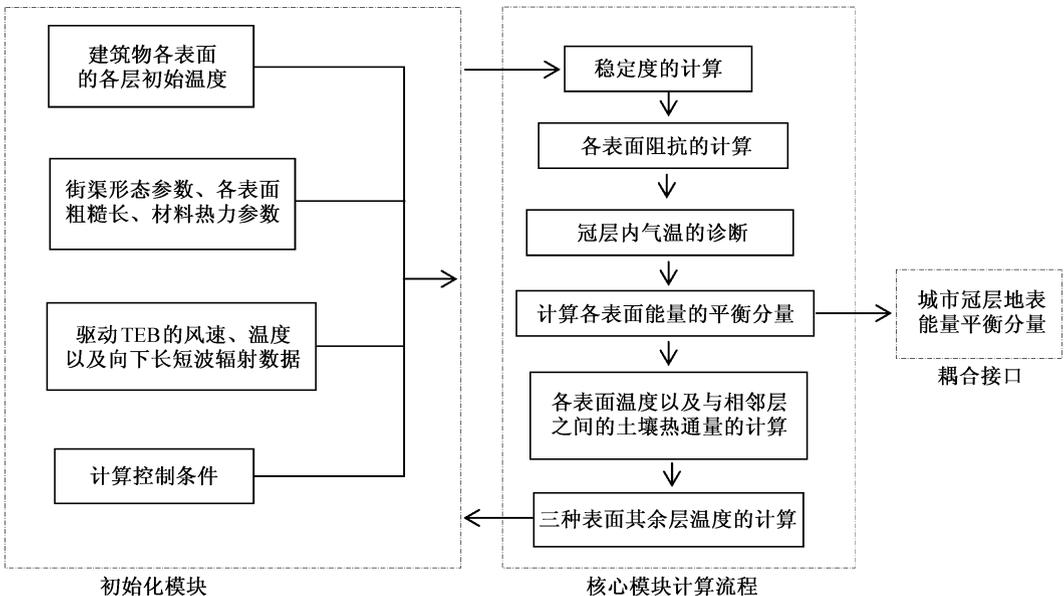


图1 TEB 方案离线计算流程

Fig. 1 Structure and flowchart of the TEB scheme

模拟计算的是各表面的能量平衡各分量,而最终输出的冠层整体地表能量平衡各分量是对各表面模拟结果进行加权后的量值。在城市中,由于垂直存在的墙面无形中增加了城市人为材料的表面积,使得权重不能简单应用三种面的面积比来计算,而应使用公式(1)计算:

$$A_c = 2 \frac{H_b}{(W_r + W_R)} A_w + \frac{W_R}{(W_r + W_R)} A_R + \frac{W_r}{(W_r + W_R)} A_r, \quad (1)$$

式中, A_c 表示冠层整体的各种能量通量(向上长波辐射、向上短波辐射、储热、感热等), A_R 、 A_r 、 A_w 分别表示在屋顶、路面、墙壁上算出的与 A_c 对应的各种能量, H_b 、 W_R 、 W_r 依次表示街渠高度、建筑物宽度及道路宽度。通过这三个表征街渠形态的参数最终可算出城市冠层各类表面所占的权重。

3 外场观测试验

刘红年等(2008)于2005年7月17~31日和2006年2月17日~3月5日在南京分别进行了两次城市边界层外场观测试验。这两次观测在城市(秦淮区市委党校,简称党校)和郊区(南京大学浦口校区)两测点同步展开,本文只介绍与驱动并检验TEB方案有关的城市测点的观测内容。冬、夏两次试验的测点都位于党校教学楼楼顶(32.04°N, 118.79°E),楼高20 m,观测场地为10 m×10 m的楼板。以观测点为中心的1 km²范围内是典型的居民区和商业区,这里街道纵横,建筑物较密集且高低起伏,硬地面积(人为材料下垫面)占总面积的90%以上,植被等自然下垫面较少,这块试验区域可以充分代表城市下垫面的特征。

能量平衡观测项目由涡度相关观测系统和四分量辐射观测仪来完成。涡度相关观测系统具体包括一套超声风速仪(CSAT3)和二氧化碳/水汽脉动分析仪(LI7500, Compell CO., USA),分别用来测量三维脉动风速、虚温和空气中水汽/二氧化碳脉动含量,该仪器的传感器距离楼顶的高度为2.2 m;四分量辐射观测仪器安装距离楼顶1.22 m高度处,主要测量向下、向上的长波辐射和短波辐射。此外,在楼顶上架有一个铁塔,在塔上设有3层风、温、湿梯度观测,这3层分别取在距楼顶的垂直距离为8.5 m、15.2 m和27.7 m处。所有仪器

采集到的数据都是每10分钟自动产生的一组平均值。

在党校楼顶测点周围无明显高大障碍或遮蔽物,故四分量仪测得的向下长、短波辐射可被认为是到达城市表面的长波、短波辐射,而铁塔上测量的气象要素也可被认为是城市冠层之上的风速和气温,所以我们用铁塔上第二层观测的风、温资料和四分量仪测得的向下长波、短波辐射通量数据离线驱动TEB方案。由于观测数据是每10分钟采集1组,所以我们对所有数据进行线性插值,使之每分钟提供1组数据并驱动一次TEB方案。

因能量平衡观测系统的仪器设置高度较低,故观测项目中除了向下的长波和短波辐射通量可以代表城市冠层整体状况以外,向上长、短波辐射通量、感热通量等只能代表屋顶上的通量,所以对TEB方案进行检验时,将这些量与模拟的屋顶各通量结果进行对比。因TEB方案的模拟结果包括各表面的能量平衡各分量以及冠层整体的能量平衡各分量,故对屋顶模拟结果的检验也能说明TEB方案的性能。

4 模拟试验

冬、夏两次试验中共有18天为非雨雪天气,且当天所有数据资料采集完整,其中夏季算例6个,冬季算例12个。为了对TEB方案进行较全面的检验,我们将这18天算例的模拟结果与观测值进行了对比,因篇幅限制,本文只给出几个典型各例的结果。它们是2005年7月17日(晴)、7月26日(多云)、2006年2月20日(多云)、3月1日(雪后初晴,15时之前有积雪)、3月2日(晴,无积雪)。根据南京实际情况,本文对TEB方案输入参数在此做了简化处理:认为街渠各种表面的反照率和热力参数量值都相同(各参数取值见表1),其中各表面的动力粗糙度和热力粗糙度参考Lemon-su et al. (2004)和Masson et al. (2002)中的取值。此外,根据实地观察,认为观测区域内建筑物高度、街道宽度以及屋顶宽度差别不大,均取为15 m。为了简化,在TEB方案中只考虑了工业热源和交通热源两类,且未考虑人为热源的日变化,二者的日均值分别为30 W/m²和10 W/m²。建筑物内壁温度是模式的内边界条件,也未考虑其日变化,取为当天观测气温的日平均值。

表 1 TEB 方案输入参数一览表

Table 1 Input parameters of TEB scheme

	反照率	比辐射率	热容量/ $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$	热传导系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	各表面厚度/m	各表面特征尺度/m	动力粗糙度/m	热力粗糙度/m
路面	0.2	0.9	2.5×10^6	2.5	0.5	15	0.05	2.5×10^{-4}
墙面	0.2	0.9	2.5×10^6	2.5	0.3	15	0.05	2.5×10^{-4}
屋顶	0.2	0.9	2.5×10^6	2.5	0.3	15	0.15	7.5×10^{-4}

4.1 对党校楼顶感热通量的模拟检验

楼顶感热通量的检验如图 2 所示。从图 2a 的观测曲线看出,夏季晴天的日间楼顶感热通量峰值可达 $150 W/m^2$,出现在北京时间 15 时左右;夜间感热通量较小,约为 $30 W/m^2$,即楼顶感热通量全天向上输送。从模拟结果来看,夜间屋顶感热通量模拟结果略微偏小,模拟的感热通量日变化趋势与观测结果吻合较好,量值也与观测值偏差不大。由图 2b 可知夏季多云天气观测的楼顶感热通量全天最大值约为 $120 W/m^2$,夜间依然为正,但是量值比晴天个例小一些,约为 $15 W/m^2$ 左右,此算例模拟的楼顶感热通量日变化曲线也与观测情况基本一致,从量值上来看,模拟结果白天略微偏大,其他时段一致性较好。对所有夏季观测资料进行分析发现:楼顶感热通量全天向上的现象在夏季普遍存在,而 TEB 方案能够很好的模拟出这一点。冬季夜间楼顶观测到的感热通量基本在 $0 W/m^2$ 左右,有时还会出现负值,而 TEB 方案模拟的冬季算例楼顶感热通量结果在夜间还是正值,从后面几幅图中均可看出这一点。

2 月 20 日(图 2c)全天晴到多云,观测到的楼顶感热通量波动较大,白天量值范围在 $40 W/m^2$ 到 $80 W/m^2$ 之间,明显小于两个夏季算例,而且夜间感热通量维持在 $0 W/m^2$ 左右。从模拟结果来看,全天楼顶感热模拟略微偏大,但是在日出后和日落前的一段时间里,楼顶感热的变化趋势模拟得较好。

在 2006 年 2 月底南京出现了一次雨雪天气过程,3 月 1 日是雪止后的第一个晴天,由于模式没有考虑城市对雨、雪等的储存,所以在积雪融化前[15 时(北京时,下同)之前],城市冠层各个表面反照率的取值在此算例(图 2d)中与实际情况相比是偏小的,这使得诊断的冠层气温偏高。从图 2d 中也可以看出,下午 15 时之前,由于诊断的冠层内温度偏高,故与冠层上部大气的热交换比实际情

况剧烈,所以得出的感热通量结果偏大,积雪融化之后,积雪对反照率的影响减小,模拟结果与实测的差异亦减小,可见 TEB 方案对反照率的变化十分敏感。

3 月 2 日,城里积雪已完全融化,从图 2e 中可以看出,白天模拟的感热与观测值吻合很好,但是夜间模拟结果偏高,这与算例的内边界条件有关。所有算例都认为建筑物内壁温度全天保持不变,取为模拟算例的全天观测温度平均值,而雪后天气初晴,夜间温度明显低于全天观测气温平均值,此时仍取全天平均温度作为内边界条件,这种取法在夜间比实际情况偏高较多,从而导致高估了建筑物夜间释放的热量,进而增大与上部大气之间的热量交换,所以在此算例中,我们模拟的夜间感热通量会比观测值偏大,由此可知,TEB 的模拟结果对内边界条件敏感性亦较强。

通过对楼顶感热通量观测结果的分析以及与模拟结果的对比可知:楼顶感热通量夏季全天为正值,但冬季观测的夜间情况不完全符合此结论;夏季白天的楼顶感热通量大于冬季;TEB 方案对楼顶感热通量的模拟效果较好,模式结果对建筑物表面反照率和建筑物内壁温度的敏感性较强。

4.2 对党校楼顶储热的模拟检验

楼顶储热 ΔQ_s 是指楼顶接受的净辐射通量与楼顶释放的感热通量 H_s 、潜热通量 L 之差,即:

$$\Delta Q_s = S_d + L_d - S_u - L_u - H_s - L, \quad (2)$$

式中 L_d 、 S_d 为向下长、短波辐射通量, L_u 、 S_u 为向上长、短波辐射通量。用观测的向下长、短波辐射通量和向上长、短波辐射通量以及观测的感热通量和潜热通量带入(2)式,算出观测的储热项,由于上述几个地表能量平衡中的分量都是在楼顶上观测的,所以算出的储热被认为是楼顶的储热,而不能作为冠层整体的储热。同样,将模拟出的楼顶向上短波辐射通量、向上长波辐射通量、楼顶感热通量以及观测到的向下长、短波辐射通量带入(2)式得出

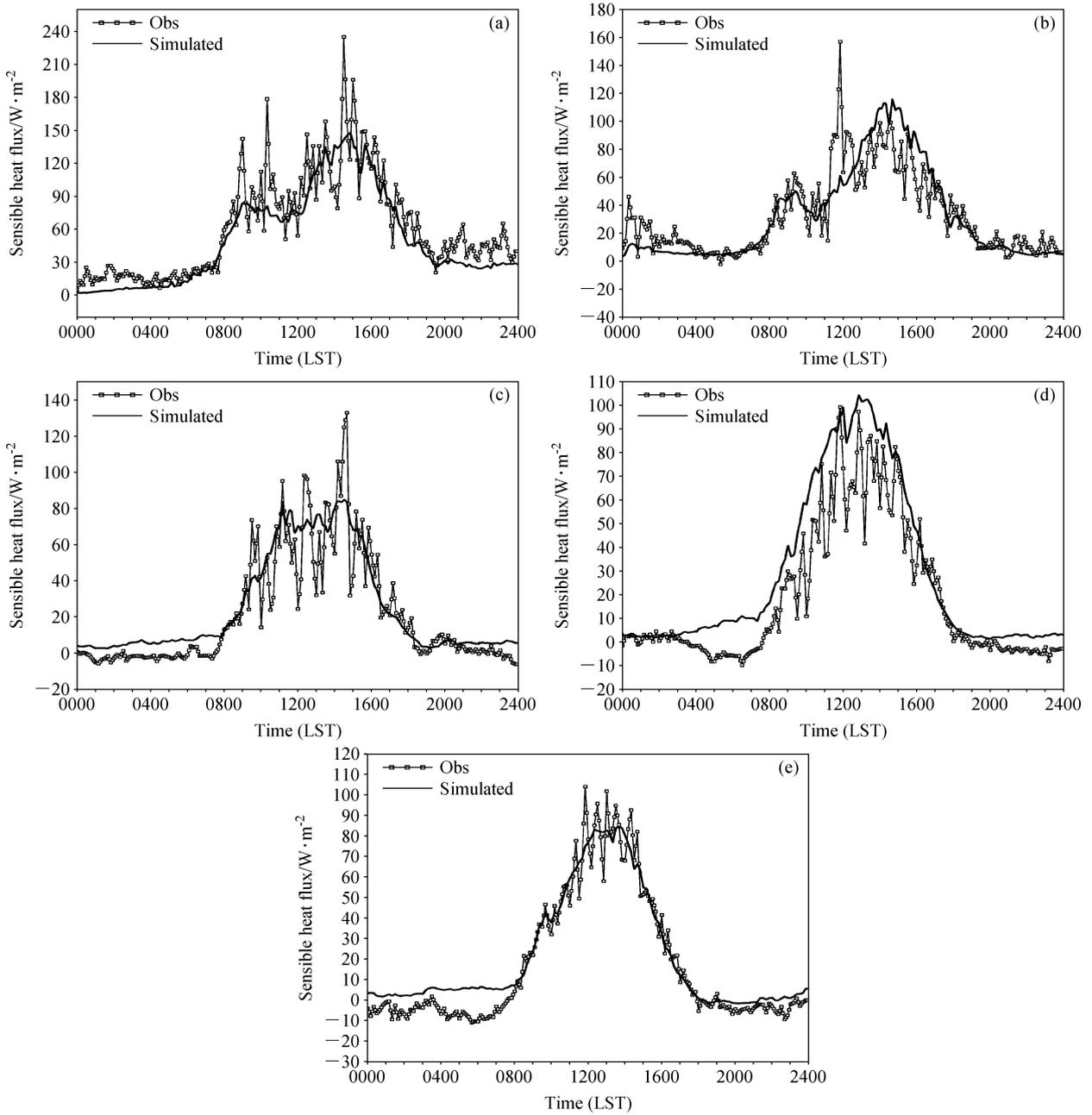


图2 TEB模拟感热通量与观测值的对比检验: 2005年(a)7月17日、(b)7月26日; 2006年(c)2月20日、(d)3月1日、(e)3月2日
Fig. 2 Contrast of sensible heat flux between simulated results by TEB scheme and observations on (a) 17 Jul 2005, (b) 26 Jul 2005, (c) 20 Feb 2006, (d) 1 Mar 2006, and (e) 2 Mar 2006

TEB方案计算的楼顶储热, 并将观测结果和模拟结果做了对比(见图3)。

由图3a发现, 夏季晴天楼顶储热观测结果白天可达 $350 W/m^2$, 日出前和日落后的时段内为负值, 量值在 $-100 \sim -50 W/m^2$ 范围内。正值表示对能量的储存, 负值表示对能量的释放, 因而, 白天城市建筑物表面吸收能量, 而夜间这部分能量又

释放出来。模拟结果与观测值相比, 晚上偏差较小, 白天模拟结果偏大, 最大偏差在正午前后, 可达 $100 W/m^2$ 。从图3b可知, TEB方案在多云天气对楼顶储热的模拟和晴天时情况类似, 白天储热模拟结果与观测结果的偏差也较大。此外, 多云天气建筑物屋顶白天储存的热量最大在 $300 W/m^2$ 左右, 夜间储热的量值在负 $50 W/m^2$ 附近, 均比晴天

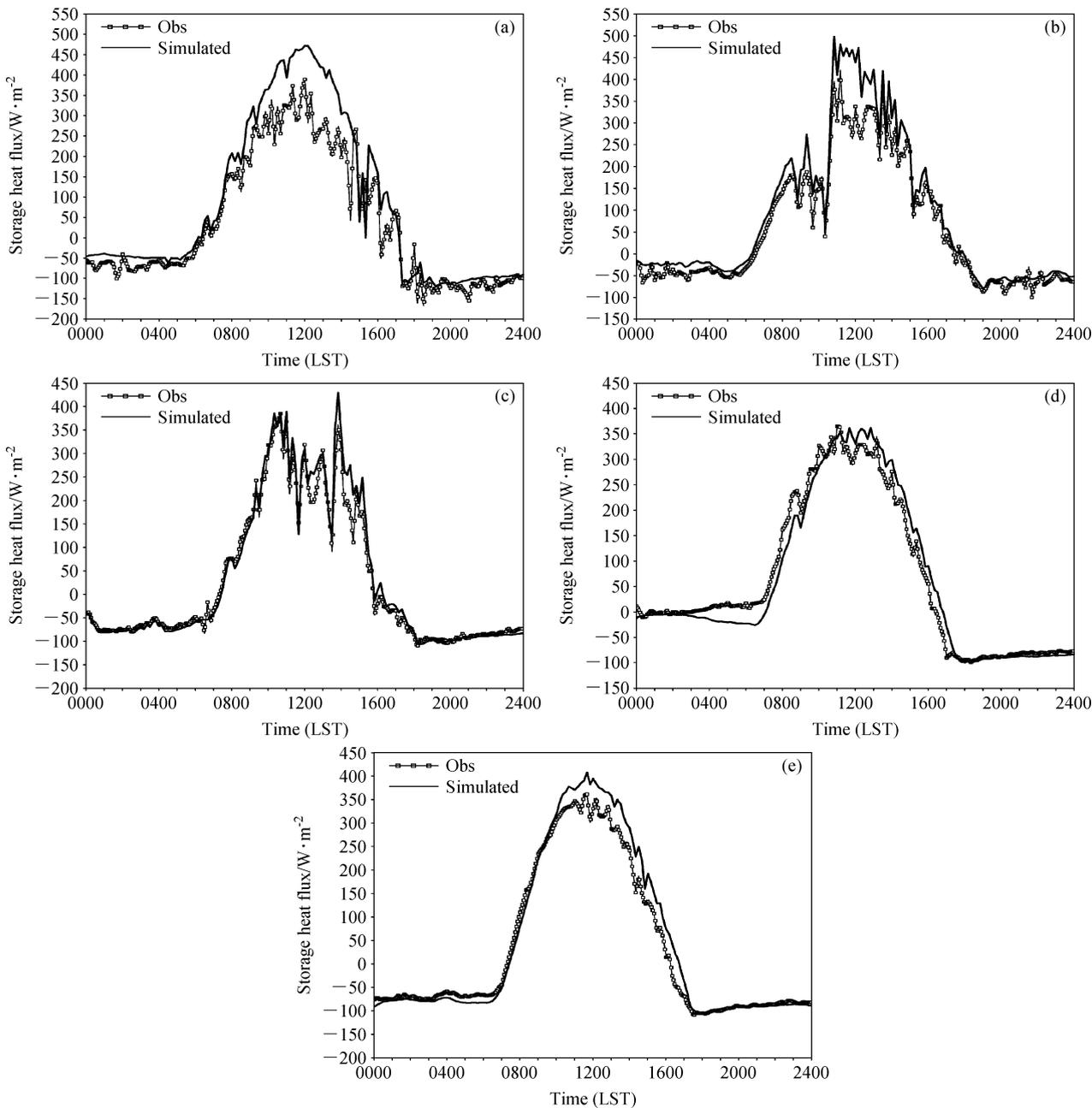


图3 同图2, 但为储热通量

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for storage heat flux

的储热小。这说明：晴天日间建筑物表面储存的热量大于多云或阴天储存的热量，夜间释放的热量也比阴天大。图 3c 是冬季多云天气的模拟结果。由于该算例全天都是晴到多云状态，白天短波辐射受云的影响较大，所以白天的短波辐射量值波动较大，因而结合观测资料算出的储热白天波动也较大，其量值在个别时刻最大可达 350 W/m²，但是基本上白天储热量值都在 250 W/m² 左右，比夏季

算例的白天储热小，夜间储热释放量值在 (-90 ~ -70 W/m²) 之间，与夏季夜间储热释放的量值相当。从模式模拟效果来看，全天情况都较好，夜间效果更优，白天模拟的储热与观测结果的偏差略大，但仍比夏季算例的偏差小。图 3d 是 3 月 1 日雪后晴天算例的模拟结果。由于 2 月 28 日下大雪，使得建筑物各表面在 28 日白天储存的热量很少，故在 3 月 1 日日出前，可释放的热量也较少，所以

观测的储热在这段时间几乎为零,但是建筑物表面经过 3 月 1 日整个白天对热量的吸收作用后,自日落时分又开始释放出热量,因为天气晴好,白天到达冠层的净辐射较大,使得冠层储热较大,峰值可达 350 W/m^2 ,所以夜间储热释放也较多,达到 -70 W/m^2 左右。该算例的全天模拟结果位相都略微有些偏移,在日出前模拟的储热明显为负,这是由该时段感热模拟偏大导致的(如图 2d),日落后的模拟结果得到明显改善。图 3e 是 3 月 2 日冬季晴天算例的模拟结果。全天模拟的状况都比较好,白天模拟的储热在正午时分与观测结果偏差最明显,偏差量值在 50 W/m^2 之内。日间观测的储热较大,量值可达 350 W/m^2 ,与夏季晴天情况相当,夜间储热为负,也与夏季晴天夜间释放的储热量值相当。通过对各算例的楼顶储热项对比分析可知,冬、夏晴天算例观测的储热量值相差不大,而多云、阴天储热略小一些。TEB 方案对储热项的变化规律模拟较好,但量值存在一定偏差,尤其是白天结果明显偏大。

4.3 误差分析

从上述分析可知,TEB 方案对建筑物材料反照率的取值以及室内温度量值较敏感,故本节专门结合观测点的实际情况对反照率这一因子进行分析,以讨论模拟偏差存在的原因。此外,TEB 方案没有考虑潜热的影响,故在本小节对潜热导致的误差也进行了讨论。

在上述所有模拟中都假定屋顶、墙壁、路面的反照率取相同,均为 0.2,而实际情况是楼顶观测场地的表面铺有一层白色隔热材料,这样的材料会

增大局地反照率,从而达到降低楼顶温度的作用。我们根据向上短波辐射和向下短波辐射实测资料做出对应算例的楼顶反照率(如图 4 所示)。

由图 4 可知,不论冬季夏季还是晴天阴天,日出后到日落前的时段内楼顶反照率都大于 0.2,这说明我们对屋顶反照率的取值偏小,这会低估向上短波辐射的量值、从而高估净辐射通量,最终使得储热模拟结果偏大。从图 4 中还可发现,夏季晴天的反照率最大,夏季多云天气的反照率次之,冬季晴天、阴天反照率差别不大,且与我们 0.2 的取值较接近;此外,夏季短波辐射明显大于冬季短波辐射,这两个因素是导致夏季晴天算例储热偏差最大而冬季算例白天储热模拟较好的主要原因。

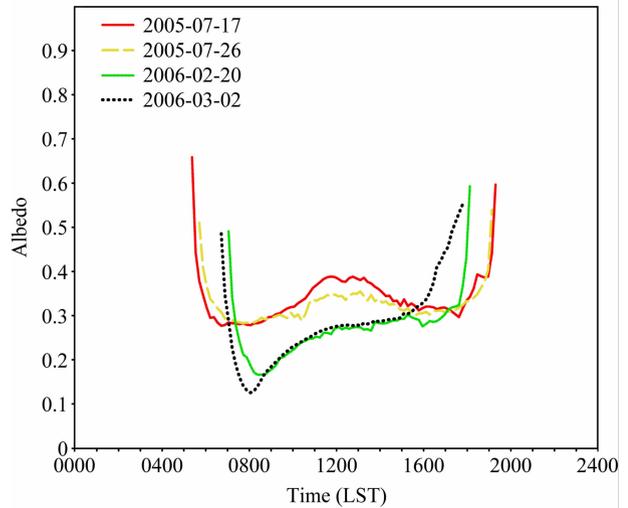


图 4 不同算例屋顶反照率观测结果

Fig. 4 Observed albedos at the building roof for different cases

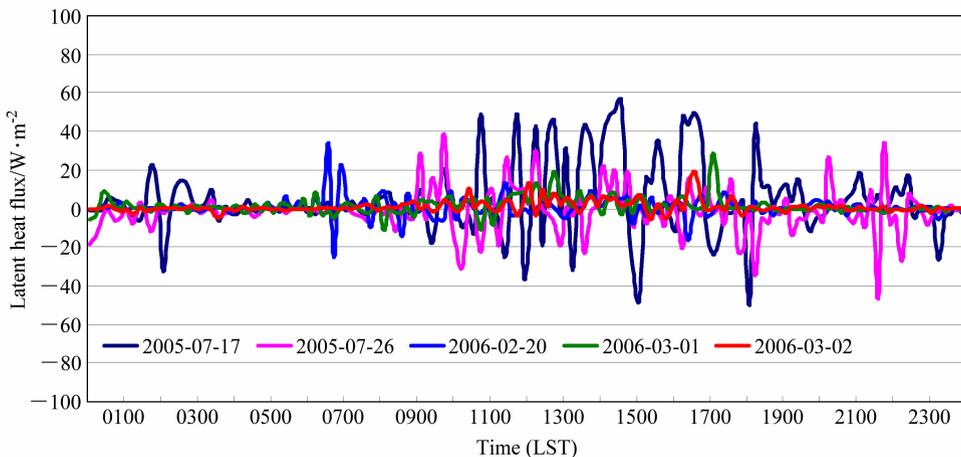


图 5 不同算例中观测的楼顶潜热通量

Fig. 5 Observed latent heat fluxes at the building roof for different cases

潜热通量是地表能量平衡中的一个重要分量,在植被下垫面其量值较大,但是在城市下垫面量值较小,王成刚等(2007)研究表明,城市下垫面上的潜热在夜间基本为零,白天最大值亦不超过 10 W/m^2 ,在城市地表能量平衡中所占比重很小,几乎可以忽略不计。图 5 给出了与本文分析算例同时刻观测到的潜热通量日变化曲线,总体来看,城市潜热通量量值较小,2005 年 7 月 17 日波动最大,在 $\pm 50 \text{ W/m}^2$,其次是 2005 年 7 月 26 日,其余几天基本都在 $\pm 10 \text{ W/m}^2$ 以内。对比图 3 发现,2005 年 7 月 17 日和 7 月 26 日的储热模拟结果偏差最明显,这与 TEb 方案未考虑潜热通量的计算有一定关系。

5 区域边界层模式与城市地表能量平衡方案的耦合

由上文对 TEb 方案离线模拟结果的对比分析可知,该方案可有效模拟城市区域地表能量平衡各分量,故将其引入气象模式中研究其对模拟性能的改善很有意义。本项研究实现了 TEb 方案与城市尺度边界层模式 NJU-RBLM 的耦合。

5.1 NJU-RBLM 模式

NJU-RBLM 是一个三维非静力区域边界层模式。模式采用 ARPS 的雷诺平均大气运动控制方程组,包括动量方程、热流量方程、完全弹性连续方程和标量方程,采用湍能 1.5 阶和 $E-\epsilon$ 湍流闭合方案,此外,模式中详细考虑了建筑物对气流的动力拖曳作用和人为热源对大气的加热作用。该模式原有地表能量平衡参数化方案为 SVAT 方案,通过对有关参数的修正进而应用到城市下垫面上。该模式可广泛运用于 β 中尺度到 γ 中尺度的数值模拟研究(徐敏,2002;陈燕等,2005;蒋维楣等,2007)。

本项研究在 NJU-RBLM 中耦合了新的 TEb 方案,作为城市下垫面的地表能量平衡参数化方案的又一选项。模式中人为热源的处理对应于两种地表能量平衡参数化方案也分为两种:当模式选用 SVAT 方案时,交通热源被直接加入地表能量平衡方程中,而其余热源加入大气模式第一层;当选用 TEb 方案时,交通热源加入 TEb 方案中处理,此时交通热源对 SEB 各项的计算均有影响,而其余人为热源被加入大气模式第一层。

5.2 TEb 方案与 NJU-RBLM 的耦合

TEb 方案是用大气的风、温、湿资料和向下长、短波辐射资料进行驱动,计算输出冠层整体与上部大气交换的热通量,所以我们在具体实现 NJU-RBLM 和 TEb 的耦合时,将边界层模式在大气中的第一层风、温、湿、辐射的计算结果作为 TEb 方案的驱动资料,而 TEb 方案计算的热通量结果又反馈给上部大气第一层,从而使得边界层模式的下边界通量每一步都被 TEb 方案计算结果更新,值得注意的是,由于 TEb 方案中没有考虑街渠内与水汽相关的物理过程,所以我们根据几次外场观测的结果,认为冠层中的潜热通量是感热通量的 0.1 倍,最终将修正后的潜热通量和 TEb 方案算出的感热通量一起传递给上部大气。

在 NJU-RBLM 中一共考虑了 15 种下垫面类型,城市是其中一种,我们只对“城市”这类下垫面调用 TEb 方案进行处理,而其余 14 种都调用 SVAT 方案计算。由于研究城市区域时常常取较高的模式分辨率,而下垫面类型资料分辨率具有局限性,不能给出如此细的网格中每种下垫面类型所占比例,所以,为计算简便,假定每个网格中的下垫面类型只有 1 种,即:一个格点如果是城市下垫面,那么模式中就不考虑这个格点上的草、水、树等其他下垫面的影响,故城市格点上算出的地表能量平衡各分量只与人为下垫面的作用有关。

5.3 TEb 方案与 SVAT 方案的对比

如前所述,TEb 方案最大的特点是将城市考虑成三维的,即对城市区域的三种表面分别建立能量平衡关系,同时结合城市各表面的几何特征细致考虑了街渠中的各种辐射效应,如:建筑物各表面对辐射的吸收、反射、遮蔽以及多次反射吸收等过程,通过对这些物理过程的刻画使得 TEb 方案对各表面的地表能量平衡各分量具有很好的模拟能力。而 SVAT 方案将城市考虑成“水泥平板”,仅通过对相关参数的调整使之应用于城市下垫面,认为到达地表的太阳辐射部分被“平板”吸收,部分被反射,该方案对物理过程的描述十分简略,无法刻画真实城市街渠里发生的复杂物理过程。二者在物理过程上的本质区别会导致最终模拟结果的明显差异。

6 数值模拟与结果分析

为对比 NJU-RBLM 中原有参数化方案 SVAT

和新引入的 TEB 方案对城市区域近地面热力场的模拟能力差异, 本小节分别选用上述两个方案对相同个例进行在线模拟, 并将模拟结果与观测资料进行对比。

6.1 模拟算例及资料

本文对南京市及周边地区 $83 \text{ km} \times 83 \text{ km}$ 范围内的 2 个不同季节晴天算例进行了模拟。2002 年 7 月 12 日 2006 年 3 月 2 日分别是南京夏季和冬季的一个典型晴好天气, 初始气象场由当天的模拟范围内地面站观测资料和南京站探空资料经 BARNES 插值和客观分析而成。模式水平分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 积分时步 3 s, 积分时间 24 小时, 边界条件取无梯度边界条件。由于选取 TEB 方案时需要给定建筑物分布资料以及建筑物密度、街渠高宽比等详细数据, 现有条件无法满足这一点, 故作如下假定: 城市中每个格点建筑物高度相同、街渠形态相同、密度相同, 即每个格点上的街渠形态比完全相同, 我们将城市建筑物高度、街渠宽度、楼房宽度均取为 20 m。SVAT 和 TEB 方案对两个算例的模拟在城市区域都引入了人为热源的作用, 为了突出比较选择不同参数化方案对模拟效果的影响, 在所有模拟中考虑了同样量值的人为热源, 即: 白天平均工业热通量密度和民用热通量密度之和为 40 W/m^2 , 而夜间为 20 W/m^2 , 交通热通量密度平均值为 10 W/m^2 。

模拟域中心经纬度为: (32.0°N , 118.8°E), 下垫面类型资料取自 MODIS 卫星观测数据 (1 km 分辨率), 地形资料由全球 $30'$ 地形数据得出 [图 6 (见文后彩图)]。从图 6 中可以看出, 模拟范围中除包含南京市外, 还包括其周边几个县市。南京主城区东面、南面有地形存在。

6.2 对两种方案模拟近地面气温效果的对比检验

首先, 对两种方案模拟的冬、夏个例的气温日变化结果做检验分析, 此外, 用 Landsat 卫星观测的地表反照率对 TEB 方案的模拟结果进行验证。

图 7a 为 2002 年 7 月 12 日近地面气温日变化模拟结果和观测结果的对比图, 观测点位于南京主城区南部的解放军理工大学, 用空心圆标记的曲线代表观测结果, 选取 SVAT 方案的模拟结果以虚线表示, 选取 TEB 方案时的模拟结果以实线表示。由图 7a 可知, TEB 方案引入 NJU-RBLM 后, 气温模拟效果得到明显改善, 尤其是气温日变化趋势模

拟得很好。从量值上看, 白天 TEB 方案模拟结果与观测结果相差不大, 但日落后一直偏高, 最大偏差在 1 K 左右, 这是由于观测点位于南京市南部郊区, 此地建筑物的实际高度、密度明显小于模式假定的高度、密度, 所以导致了 TEB 方案模拟的日落后气温偏高; 而 SVAT 方案的模拟中虽然考虑了人为热源的作用, 其模拟结果却依然从日落后就开始明显降温, 与观测结果偏差越来越大。TEB 方案对气温模拟结果最明显的改善正是体现在这段时间, 这是因为选择 TEB 方案可以很好地计算城市冠层白天储存热量、日落后释放热量的物理过程。图 7b 为 2006 年 3 月 2 日用两种方案模拟的城区气温日变化曲线和模拟域内 5 个站点的气温观测结果对比情况, 图中 5 条虚线代表 3 月 2 日在南京市鼓楼区、雨花区、江宁区、迈皋桥、白下区测得的气温日变化曲线 (见图 6 中标定的该 5 点的位置), 以空心圆标注的实线 (ave_obs) 是对这 5 条虚线求平均后的结果。之所以将模拟结果与 5 点观测结果的平均值做对比, 而不是用 5 个站点的模拟结果与对应点的观测结果一一比对, 是因为没有非均匀建筑物及街渠分布资料, 所以用 TEB 方案算出的气温分布结果在城市区域不能很好体现非均匀分布状况。由图 7b 可知, SVAT 方案在白天升温阶段模拟的气温与平均观测结果吻合较好, 但是自 15 时气温开始下降后, 其模拟的气温降温率明显大于实际观测情况, 在晚上 21~22 时左右, 偏差最大, 比观测结果低 5 K 左右, 其余时段都比观测值低 2~3 K, 由于 SVAT 方案将城市考虑成二维平面, 无法很好地描述城市冠层储热效应, 故降温时段不能释放出储热以缓解城市的降温速率。TEB 方案白天模拟的气温略微偏低, 是因为假定的建筑物高度偏高, 夸大了建筑物白天对短波的遮蔽作用, 使温度模拟偏低, 其他时段与观测结果吻合较好, 但是在 22 时左右, TEB 方案模拟的气温会偏低 2 K 左右, 夜间其他时刻模拟值与观测值基本吻合, 偏差不大于 0.5 K。由上述对比可知, TEB 方案对冬、夏算例气温模拟结果均有明显改善。

6.3 对城市地表能量平衡方案模拟地表反照率效果的检验

城市建筑物的存在不仅改变了 SEB 中的感热通量、潜热通量与储热之间的分配关系, 还对太阳短波辐射有重要作用, 如“城市陷阱效应”, 此效应

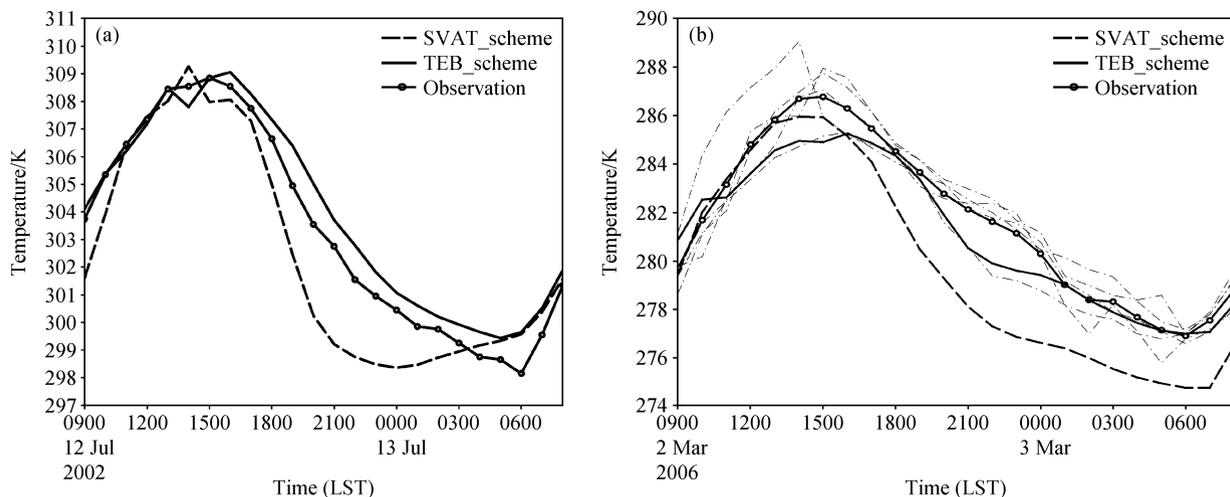


图7 近地面气温模拟结果与观测值的对比: (a) 2002年7月12日; (b) 2006年3月2日

Fig. 7 Contrast between simulated surface air temperatures and observed data: (a) 12 Jul 2002; (b) 2 Mar 2006

会减小城市冠层整体的向上短波辐射通量,进而改变城市冠层等价反照率和净辐射通量,所以本文用Landsat卫星观测资料对TEB方案模拟的城市冠层等价反照率进行验证,以表明TEB方案对“城市陷阱效应”的模拟能力,并由此检验TEB方案对净辐射通量的模拟效果。

图8(见文后彩图)给出了2002年7月12日上午10:30 Landsat卫星过境时的地表反照率和使用TEB方案后用模拟出的向上短波辐射和向下短波辐射的比值间接算出的地表反照率空间分布。由于TEB方案只在城市格点调用,所以向上短波辐射量值只有城市区域才能计算,因此图中只能给出城市区域的反照率,为了突出对比结果,非城市格点画图时反照率假定为零。从图8a看出,Landsat反演的城市区域反照率并非均一值,在城区多为0.12~0.14,部分区域为0.16,而我们用TEB方案得到的城市区域反照率是均匀的,量值为0.14,这是由模拟时对建筑物资料的假设造成的,因为我们假定整个城市建筑物形态以及街渠形态完全相同,则每个格点算出的向上短波辐射几乎没有差异,而在这样的模拟范围内,太阳向下短波辐射的差别也不大,故得出图8b所示的结果——反照率较均匀。但是,如果能提供建筑物详细资料,冠层参数化方案具有模拟出每个网格上反照率的能力。从上述分析中可知,TEB方案对反照率量值的模拟是比较准确的,进而说明TEB方案对城市区域的向上短波辐射模拟较好,即可以准确地模拟城市冠层白天

对短波辐射的遮蔽、多次反射吸收等物理过程。

7 结论

本文引进先进的TEB方案,建立了一个单层城市冠层模式,并以南京城市边界层外场观测试验资料对该模式进行离线驱动、检验以及误差分析,有如下主要结论:

(1) TEB方案离线模拟的楼顶感热通量和楼顶储热与观测结果吻合较好,不论冬季还是夏季,晴天还是多云天气,模拟结果都与观测结果趋势较一致,量值较接近,说明该方案适用于中国城市地表能量平衡问题的研究。

(2) 模式中屋顶反照率取值比实际观测场地屋顶反照率量值偏小,这是模拟偏差主要原因之一,以后应用该方案时反照率的取值应尽可能贴近实际情况。TEB方案中未考虑潜热的计算也是造成误差的原因之一,但是影响不大。

用NJU-RBLM中的SVAT方案和新引入的TEB方案分别对冬夏不同算例条件下的南京城市边界层进行模拟,其模拟结果与同期的地面气温观测资料以及Landsat卫星观测的地表反照率资料做了进行对比,可得出以下结论:

(1) TEB方案模拟的24小时近地面气温日变化曲线不论冬季还是夏季的效果都比SVAT方案好,尤其是对日落后的气温模拟结果有较大改善。

(2) TEB方案模拟的地表反照率与Landsat卫星观测资料量值接近,在城市区域均为0.14左右。

这说明 TEB 方案对城市冠层“陷阱效应”模拟较好,能改进对城市区域短波辐射的模拟能力。由此可见,TEB 方案对城市净辐射通量的模拟有直接改进。

参考文献 (References)

- 陈燕. 2005. 城市下垫面若干非均匀特征对大气边界层结构影响的研究 [D]. 南京大学博士学位论文. Chen Yan. 2005. The influence of urban inhomogeneities on atmospheric boundary layer [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University.
- 陈燕, 蒋维楣, 徐敏, 等. 2005. 城市规划中绿化布局对区域环境影响的数值试验研究 [J]. 地球物理学报, 48 (2): 265 - 274. Chen Yan, Jiang Weimei, Xu Min, et al. 2005. Simulation of greenbelts effect on meteorological environment in urban planning [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (2): 265 - 274.
- Chen Fei, Tewari M, Kusaka H, et al. 2006. Current status of urban modeling in the community weather research and forecast (WRF) model [R/OL]. http://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/paper_98678.htm
- 何晓凤. 2006. 一种城市陆面过程参数化方案的建立与应用研究 [D]. 南京大学博士学位论文. He Xiaofeng. 2006. Study on establishment and application of a land-surface process parameterization scheme in urban areas [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University.
- Grimmond C S B, Oke T R. 2002. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS) [J]. J. Appl. Meteor., 41: 792 - 810.
- 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 Weimei, Chen Yan. 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, 刘罡, 等. 2007. 多尺度城市边界层数值模式系统 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 43 (3): 221 - 237. Jiang Weimei, Wang Yongwei, Liu Gang, et al. 2007. Mutil-scale urban boundary layer modelling system [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science) (in Chinese), 43 (3): 221 - 237.
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with mutil-layer and slab models [J]. Bound.-Layer Meteor., 101: 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]. J. Appl. Meteor. 43: 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]. J. Appl. Meteor., 43: 312 - 327.
- Lemonsu A, Masson V. 2002. Simulation of a summer urban Breeze over Paris [J]. Bound.-Layer Meteor., 104: 463 - 490.
- Lemonsu A, Pigeon G, Masson V, et al. 2006a. Sea-town interactions over Marseille: 3-D urban boundary layer and thermodynamic fields near the surface [J]. Theor. Appl. Climatol., 84 (1 - 3): 171 - 178.
- Lemonsu A, Hidalgo J, Belair S, et al. 2006b. Application of meso-scale atmospheric modeling to the comparison of urban processes above North-American and European cities [R/OL]. http://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/paper_100131.htm.
- 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴宁, 等. 2008. 南京城市边界层微气象特征观测与分析 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 44 (1): 110 - 117. Liu Hongnian, Jiang Weimei, Sun Jianning, et al. 2008. An observation and analysis of the micrometeorological characteristics of the Nanjing urban boundary layer, eastern China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science) (in Chinese), 44 (1): 110 - 117.
- Masson V. 2000. A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. Bound.-Layer Meteor., 94: 357 - 397.
- Masson V, Grimmond C S B, Oke T R. 2002. Evaluation of the town energy balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities [J]. J. Appl. Meteor., 41: 1011 - 1026.
- Oleson K, Bonan G, Feddema J. 2006. Development of an urban parameterization for a global climate model [R/OL], http://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/paper_100843.htm
- 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.
- 王成刚, 孙鉴宁, 胡非, 等. 2007. 城市水泥下垫面能量平衡特征的观测与分析 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 43 (3): 270 - 279. Wang Chenggang, Sun Jianning, Hu Fei, et al. 2007. Observation and analysis of the characteristics of urban concrete surface energy balance [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science) (in Chinese), 43 (3): 270 - 279.
- 徐敏. 2002. 大气边界湍流结构和气象环境的数值模拟——从区域尺度到微尺度 [D]. 南京大学博士学位论文. Xu Min. 2002. Numerical simulation on the turbulence structures and meteorological environment in atmospheric boundary layer: From regional scale to micro-scale [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University.
- 周荣卫, 蒋维楣, 刘罡, 等. 2007. 热力粗糙度引入精细城市边界层模式的初步应用 [J]. 大气科学, 31 (4): 611 - 620. Zhou Rongwei, Jiang Weimei, Liu Gang, et al. 2007. A study of introducing temperature roughness length into a fine urban boundary layer model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 611 - 620.

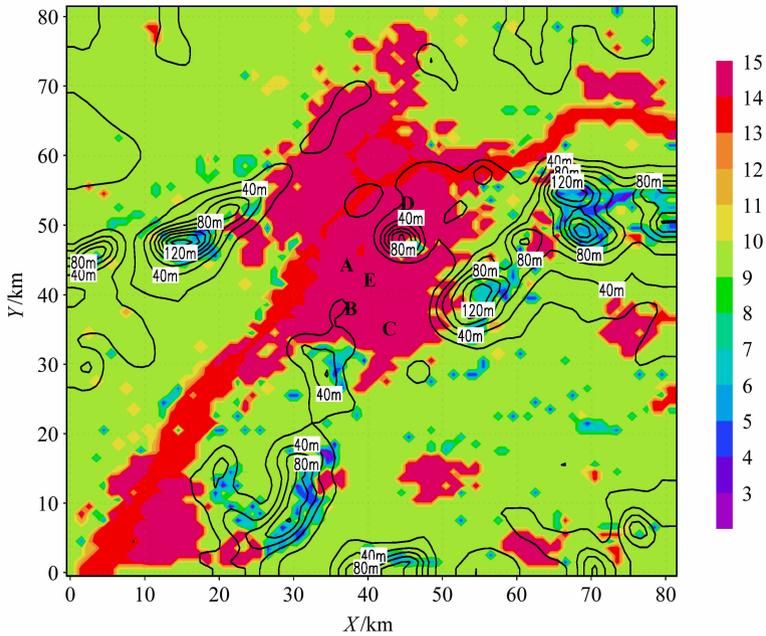


图 6 模拟域下垫面类型及地形高度(等值线)图。A: 鼓楼区, B: 雨花区, C: 江宁区, D: 迈皋桥, E: 白下区; 3: 草地, 4: 灌木覆盖草地, 5: 树覆盖草地, 6: 落叶林, 7: 常绿林, 8: 雨林, 9: 冰面, 10: 庄稼, 11: 沼泽, 12: 短灌木, 13: 半沙漠, 14: 水面, 15: 城市
 Fig. 6 Land use and terrain (isolines) of the study domain. A: Gulou, B: Yuhua, C: Jiangning, D: Maigao Qiao, E: Baixia; 3: Grassland, 4: Grassland with shrub cover, 5: Grassland with tree cover, 6: Deciduous forest, 7: Evergreen forest, 8: Rain forest, 9: Ice, 10: Crop, 11: Bog, 12: Dwarf shrub, 13: Semi-desert, 14: Water, 15: Urban areas

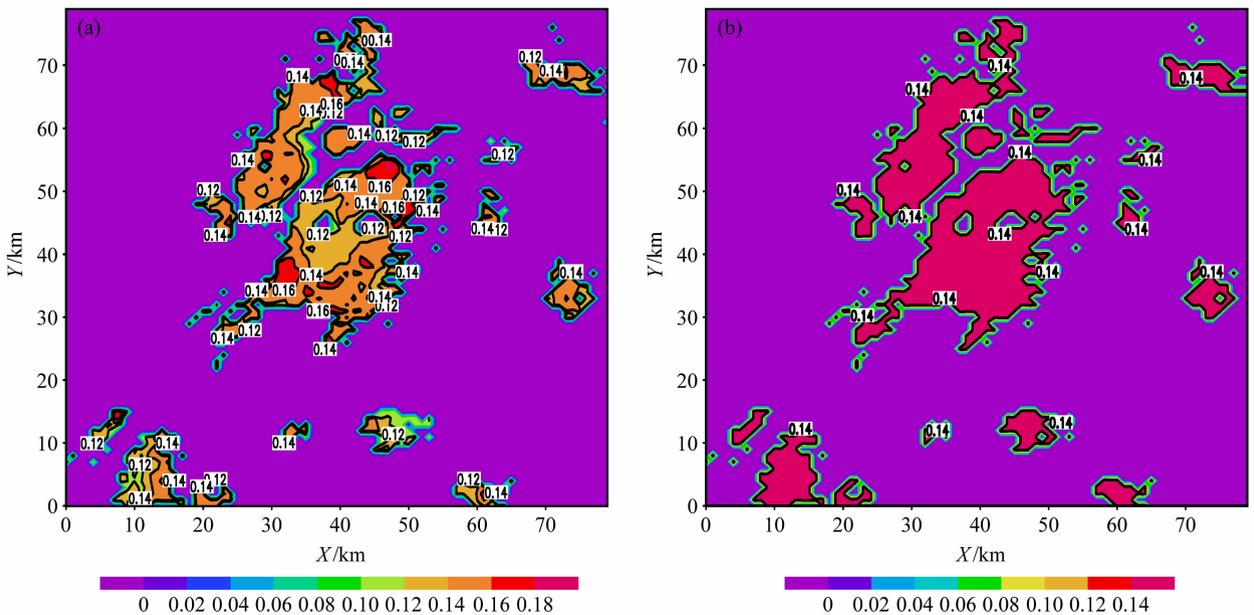


图 8 (a) 2002 年 7 月 12 日 10:30 Landsat 卫星反照率与 (b) TEB 方案模拟的城市地表反照率
 Fig. 8 (a) Observed albedo by Landsat at 1030 LST 12 Jul 2002 and (b) simulated albedo by TEB scheme