

何晓凤, 蒋维楣, 刘红年, 等. 应用城市地表能量平衡方案研究城市冠层结构对城市热岛的热力影响. 大气科学, 2008, 32 (6): 1445~1457  
He Xiaofeng, Jiang Weimei, Liu Hongnian, et al. A study of thermal effect of urban canopy structure on urban heat island with town energy balance scheme. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (6): 1445~1457

# 应用城市地表能量平衡方案研究城市冠层结构 对城市热岛的热力影响

何晓凤<sup>1, 2</sup> 蒋维楣<sup>1</sup> 刘红年<sup>1</sup> 周荣卫<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> 南京大学大气科学系, 南京 210093

<sup>2</sup> 国家气候中心, 北京 100081

**摘要** 用南京大学区域边界层模式 NJU-RBLM, 通过对一组理想试验的模拟, 研究了 TEB 方案 (town energy balance) 和 SVAT 方案 (soil-vegetation-atmosphere transfer) 模拟城市热岛现象的差异及本质原因, 发现 TEB 方案对城市热岛 (UHI) 尤其是夜间 UHI 模拟效果更优, 这是由于 TEB 方案具备较强模拟城市储热项的能力形成的。此外, 深入探讨 UHI 对大气边界层热力结构的影响, 发现 UHI 现象使城市和郊区的近地层位温廓线在清晨和傍晚都存在明显差异, 同时使城市区域气温全天高于郊区, 且日间城乡温差能达到的高度明显高于夜间。分析人为热源和建筑物冠层对 UHI 的影响时发现: 人为热源对 UHI 的影响在夜间强于白天, 而建筑物对白天城市湍能的影响强于人为热源的作用。

**关键词** 城市热岛 城市边界层 城市冠层 数值模拟 地表能量平衡

**文章编号** 1006-9895 (2008) 06-1445-13

**中图分类号** P463

**文献标识码** A

## A Study of Thermal Effect of Urban Canopy Structure on Urban Heat Island with Town Energy Balance Scheme

HE Xiaofeng<sup>1, 2</sup>, JIANG Weimei<sup>1</sup>, LIU Hongnian<sup>1</sup>, and ZHOU Rongwei<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093

<sup>2</sup> National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

**Abstract** To study the difference and the reasons of simulating the Urban Heat Island (UHI) with the Town Energy Balance (TEB) scheme and with the SVAT (soil-vegetation-atmosphere transfer) scheme, some ideal numerical experiments are performed with a regional boundary layer model, which is developed by Nanjing University. Results show that because of the great ability of simulating urban heat storage, the TEB scheme is better than the SVAT scheme in simulating the UHI phenomenon. Moreover, the UHI obviously affects the thermal structure of urban boundary layer, that is, there is obvious difference of surface potential temperature profile between urban and rural areas in the morning and the evening. At the same time, urban temperature is higher than rural temperature all through the day. The reaching height of the temperature difference between urban and rural areas in the daytime is higher than that in the nighttime. The anthropogenic heating and building structure play an important role in the

**收稿日期** 2007-03-19, 2007-06-21 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40333027

**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

UHI. The effect of anthropogenic heating on the UHI in the nighttime is greater than that in the daytime. As far as the turbulence in the daytime over the urban areas is concerned, the effect of buildings is larger than that of the anthropogenic heating.

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

## 1 引言

自 1818 年人类发现城市热岛现象以来,对其成因的探索以及对城市热岛(UHI)相关问题的研究就从未停止过。Oke<sup>[1]</sup>对热岛成因做了概括,他认为热岛现象是由以下 7 个方面的原因造成的:(1) 由于城市的天空可视因子变小,导致释放的长波辐射减少;(2) 城市上空温度较高,增大了向下的长波辐射;(3) 由于城市街渠三维结构的存在,使得城市区域对于向下短波辐射具有陷阱效应,从而减小反射出去的短波辐射,即减少了城市的有效反照率,最终增大了到达城市表面的净辐射;(4) 由于城市植被较少,导致了城市释放的潜热减小;(5) 人为热源在大气中的排放使得近地面大气中多了一部分热量的收入;(6) 城市建筑物表面材料的热力性质增大了城市储热效应;(7) 城市下垫面建筑物对风速的削减作用使得热量平流减小,从而对热岛现象的生成起到促进作用。我们对上述 7 个方面进行对比分析后发现,热岛现象的成因主要由两类人为活动支配:一是人为热源向低层大气的直接排放,二是人为建筑物带来的城市冠层效应对近地面热力场的影响。那么这两类人为活动到底是如何影响 UHI 的?仅由外场试验观测资料还无法回答上述问题,因为外场观测得到的相关数据已是两种人为活动综合作用的结果,我们不可能分开测量二者对热岛的作用,所以,要想弄清这个问题还应借助数值模拟手段来实现。我们知道,对城市地表能量平衡各项进行准确计算是数值模式合理模拟 UHI 的关键。到目前为止,大多数数值模式都是通过“土壤植被大气传输模式(SVAT)”中相关参数的修正来实现对城市地表能量平衡的模拟,这种方法被称为“传统方案”。SVAT 被应用于城市时,对其参数的修正一般依赖于以下思路:因认为城市是由水泥表面构成的,故相关热力参数的量值由这些下垫面材料的性质确定;因城市中比较干燥,其潜热很小,故在城市区域取较大的波文比

(波文比指感热通量与潜热通量之比);城市地物高低起伏导致城市下垫面的粗糙度很大,所以在城市区域往往取较大的粗糙度。但是上述修正不能很好地刻画城市建筑物几何结构对地表能量平衡的影响,即无法描述建筑物的热力效应,但可以引入人为热源的作用,许多气象工作者<sup>[2~8]</sup>都选择以 SVAT 方案研究人为热源对热岛带来的影响。随着前人对城市地表能量平衡问题的研究进展,一种新的参数化方案 TEB (town energy balance) 由 Masson<sup>[9]</sup>首先提出,此后 Kusaka 等<sup>[10]</sup>和 Lemonsu 等<sup>[11]</sup>对该方案做了部分修正。TEB 方案的物理机制与 SVAT 方案具有本质区别:TEB 将城市考虑成三维的,而 SVAT 将城市考虑成一块水泥平板。概括说来,TEB 方案是根据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。TEB 方案认为街渠中有三种表面:屋顶、路面和墙面,其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,先分别算出每个面与相接大气间的热通量交换,再依照每种表面的面积权重算出整个街渠与上部大气之间总的热通量交换。TEB 方案的上述特点使得它能够同时用来研究人为热源和人为建筑物对 UHI 的热力作用。

因而本文通过一组数值试验,用耦合了 SVAT 方案和 TEB 方案的边界层模式(NJU-RBLM)同时模拟研究 UHI 现象,主要分析 TEB 方案与 SVAT 方案模拟 UHI 的本质差异以及原因,并对 TEB 方案模拟的 UHI 结果进行深入讨论,进而研究人为热源和城市建筑物三维结构对 UHI 的热力作用以及 UHI 对城市边界层结构的影响。

## 2 数值模式及检验

### 2.1 模式介绍

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, 此外模式中还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, 并分别耦合 TEB 方案和 SVAT 方案作为城市下垫面上的地表能量平衡参数化方案。该模式可广泛运用于  $\beta$  中尺度到  $\gamma$  中尺度的数值模拟研究<sup>[12~17]</sup>。对人为热源的处理分为两种: 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 TEB 计算的地表能量平衡各项均产生影响, 而其余各类人为热源被加入大气模式第一层。

### 2.2 TEB 方案

TEB 方案的计算流程如图 1 所示。由图 1 可知驱动 TEB 方案的气象要素主要有: 冠层之上的风速、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长和动力粗糙长; 此外模式开始运行时还必须提供各表面的各层初始温度。TEB 方案模拟的是各表面能量平衡各分量, 而最终输出的城市冠层整体地表能量平衡各分量是对各表面模拟结果进行权重后的量值。在城市中由于垂直墙面

的存在, 无形中增加了城市人为材料的表面积, 使得权重不能简单地应用三种表面的面积比来计算, 而应用公式 (1) 进行计算:

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

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。

TEB 方案计算各表面的短波辐射、长波辐射时均考虑了建筑物几何形态带来的遮蔽、多次反射吸收等效应, 短波部分的处理参照 Kusaka 等<sup>[10]</sup>修正后的公式, 对各表面阻抗的计算参考 Lemonsu 等<sup>[11]</sup>修正的公式, 其余各种能量通量的计算均使用 Masson<sup>[9]</sup>给出的原始公式。

### 2.3 模拟效果检验

本文对南京市及周边地区  $83 \text{ km} \times 83 \text{ km}$  范围内 2002 年 7 月 12 日晴天算例进行模拟, 模拟域中心为  $(32.0^\circ\text{N}, 118.8^\circ\text{E})$ , 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。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

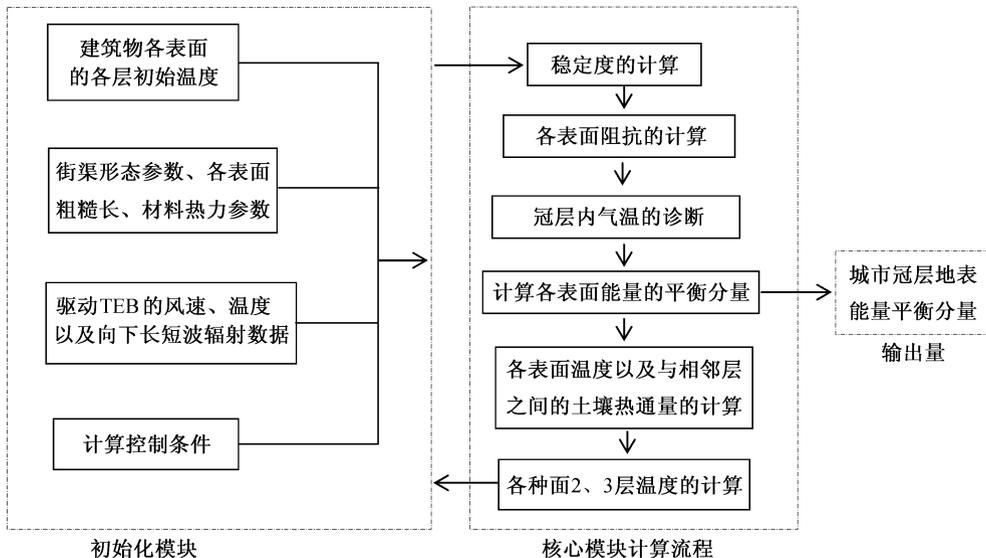


图 1 TEB 方案离线计算流程

Fig. 1 Structure and flowchart of the Town Energy Balance (TEB) scheme

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  $3\text{ s}$ ，积分时间  $24\text{ 小时}$ ，边界条件取无梯度边界条件。分别取 SVAT 和 TEB 两种地表能量平衡参数化方案对该算例进行模拟。两次模拟都考虑了南京的人为热源，其中，交通热源为  $10\text{ W/m}^2$ ，其余热源为  $40\text{ W/m}^2$ 。

图 2 为 2002 年 7 月 12~13 日近地面气温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。由图 2 可知，SVAT 方案模拟的气温与观测值偏差较大，尤其是 17 时（北京时，下同）后 SVAT 模拟的气温开始明显下降，与观测值的偏差越来越大，最大偏差  $4\text{ K}$  左右；而 TEB 方案模拟的气温日变化趋势与观测结果较一致，且量值接近，最大偏差为  $1\text{ K}$  左右。由于 TEB 方案可以很好地刻画城市冠层白天储存热量、日落后释放热量的物理过程，故该方案对近地层气温模拟结果最明显的改善体现在 17 时之后。

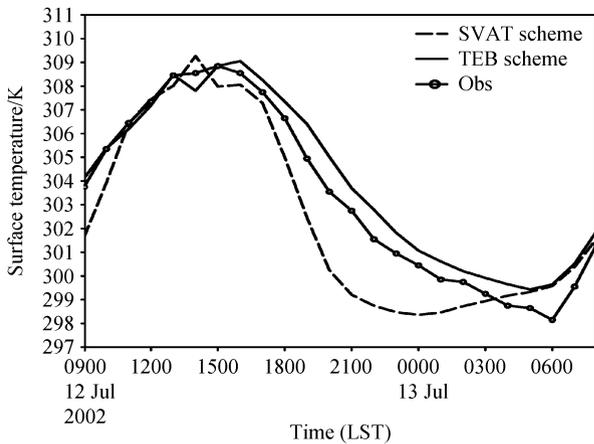


图 2 2002 年 7 月 12~13 日不同方案模拟近地层气温的检验  
Fig. 2 Validation of the surface temperatures simulated by SVAT (soil - vegetation - atmosphere transfer) and TEB schemes for 12 - 13 Jul 2002

### 3 数值试验及结果分析

#### 3.1 敏感性试验设计

以南京 2002 年 7 月 12 日气象场为模拟算例，以南京地理位置为基准，但是由于地形、水域等特殊下垫面的存在会诱生一些局地环流，从而对模拟结果产生一定影响，不利于突出研究人为热源和建筑物冠层两类因子对热岛的作用，所以在以下敏感性试验中假定研究范围内地形平坦，没有水域和山脉，为理想下垫面，以此滤除上述额外影响。所有试验的模拟范围均为  $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ ， $36 \sim 65\text{ km}$  之间是一边长为  $30\text{ km}$  的正方形城市，其余均为农作物下垫面，模式分辨率为  $2\text{ km}$ ，时步为  $9\text{ s}$ ，积分时间  $24\text{ 小时}$ 。为了解释 TEB 与 SVAT 方案模拟 UHI 的差异及原因、分析 UHI 对城市边界层的影响、研究人为热源和城市冠层对 UHI 的作用，本文设计了 5 个算例（表 1）。

所有算例引入人为热源时均未考虑其日变化，而是以格点人为热源日均值计算，其值取为  $50\text{ W/m}^2$ ，其中  $40\text{ W/m}^2$  是工业热排放造成的， $10\text{ W/m}^2$  是由交通工具排放的废热造成的，而对非城市网格点人为热源取为 0。我们还假定：所有城市格点的建筑物高度、密度、冠层形态、材料等参数均一致，只要算例中引入建筑物，我们就考虑计入建筑物对气流的拖曳作用。算例 1 是一个基础试验，认为整个模拟范围都是农作物；算例 2 则在模拟域中心设计了一个  $30\text{ km} \times 30\text{ km}$  的城市，建筑物平均高度为  $15\text{ m}$ ，但选择 SVAT 方案处理地表能量平衡过程，即：将城市考虑为一个粗糙的水泥平板；算例 3 在算例 2 的基础上加了人为热源；算例 4 和算例 2 情况相同，但是将城市处理成具有三维形态的建筑物冠层而非水泥平板，即：选用 TEB 方案；算例 5 在算例 4 的基础上增加了人为热源，也选用 TEB

表 1 敏感性试验一览表

Table 1 Sensitivity experiments

算例编号	算例名称	热源量值/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	冠层高度/m	城市形态	方案
1	UHI01	0	0	无城市	SVAT
2	UHI02	0	15	水泥平板	SVAT
3	UHI03	50	15	水泥平板	SVAT
4	UHI04	0	15	三维冠层	TEB
5	UHI05	50	15	三维冠层	TEB

方案。所有算例中街渠宽度均相同, 为 15 m, 且假定所有街渠走向存在的可能性都相同。

### 3.2 TEB 方案与 SVAT 方案对城市热岛模拟的差异及原因剖析

本节通过对算例 1 至算例 5 模拟结果的对比分析, 讨论两种方案对 UHI 模拟的差异, 再从地表能量平衡和地气热通量交换的角度分析存在差异的原因。从图 3a 看出 UHI02、UHI03、UHI04 和 UHI05 模拟的日间气温都比 UHI01 模拟结果高, 这是因为农作物和水泥材料的热力性质有很大差别, 所以白天这两种下垫面的温差较明显, 且水泥表面的气温比农作物表面的气温要高, 但是用 SVAT 方案将城市处理成粗糙平板模拟的日间近地面气温比用 TEB 将城市处理成三维冠层模拟的气温高; 到了夜间, 两类方案的结果出现本质区别: TEB 方案模拟的夜间近地面气温降温率比农作物下垫面上的低, 而 SVAT 模拟的夜间近地面气温降温率比农作物下垫面的高, 即: TEB 方案可以模拟出夜间热岛现象, 而 SVAT 方案较难做到这一点。在两种方案中考虑人为热源的作用都会对 UHI 的模拟效果有影响, 但影响程度不同。由图 3b 可知, 两类方案模拟的地温全天都比农作物下垫面要高, 但是 TEB 方案可以模拟出白天城市建筑物及道路表面的高温, 相较而言, SVAT 方案模拟的地表温度与农作物下垫面的地温相差不大, 几个算例的结果在夜间的差异没有白天明显, SVAT 方案模拟的地温低, 而 TEB 方案模拟的结果高一些。TEB 对地温模拟的改善能将城市白天储存热量、夜间释放热量的现象把握得更到位。

图 4 是几个算例模拟的夜间 02 时过  $X = 54$  km 中心线的近地面气温分布曲线, 实线是 UHI01 的结果, 从图中看出, 当下垫面完全是农作物时, 自南向北的模拟域中心线气温近似为直线, 其南北温差最大不超过 0.5 K, 而 SVAT 不论是否考虑人为热源, 模拟出的夜间城市区域近地面气温总比周边农作物区域近地面气温低 0.5 K 左右; TEB 方案不考虑人为热源的作用时, 模拟的夜间气温比郊区高 0.5 K, 考虑人为热源作用时, 城市区域近地面气温则比郊区近地面气温高 2.0 K 左右, 这是典型的夜间城市热岛现象。从图 4 中还可发现, 用 TEB 方案模拟的夜间近地面气温受人为热源影响较明显, 人为热源使城市气温升高 1.5 K。

为了更好地探讨人为热源对城市热岛现象的作用, 我们在图 5 中给出了 UHI03 和 UHI02 模拟的城市中心点气温日变化差值曲线以及 HUI05 和 UHI04 的城市气温差值曲线, 因为试验 UHI03 和 UHI05 与试验 UHI02 和 UHI04 的基本差别就是“是否在模式中考虑人为热源”, 所以由此图可以分析在 TEB 方案和 SVAT 方案中考虑人为热源对模拟结果的影响。从图 5 的曲线可见, 选取 TEB 方案时考虑人为热源的作用会使近地面气温在日间增加 0.7 K 左右, 夜间增加 1.6 K 左右; 而选 SVAT 时考虑人为热源的作用会使白天近地面气温增加大约 0.5 K, 夜间则只有 0.2 K 的增温。这个现象是因为两种方案对热源的处理不完全一致造成的, TEB 方案将交通排放的废热加入到冠层大气内, 将工业排放的热量加到大气模式第一层, 而 SVAT 方案

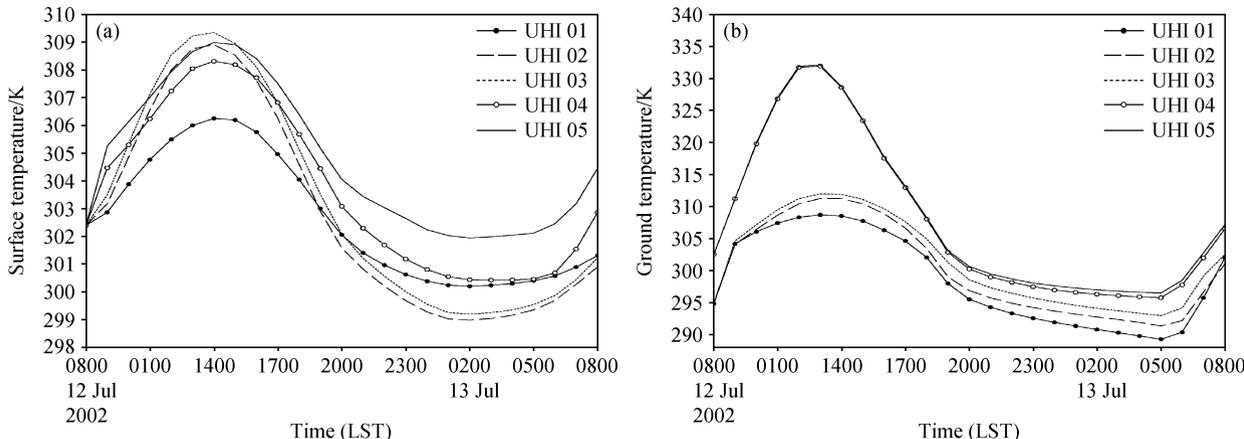


图 3 不同算例模拟的近地面热力场日变化曲线: (a) 近地面气温; (b) 地温

Fig. 3 Diurnal variations of the modeled surface thermal variables: (a) Surface air temperature; (b) ground temperature

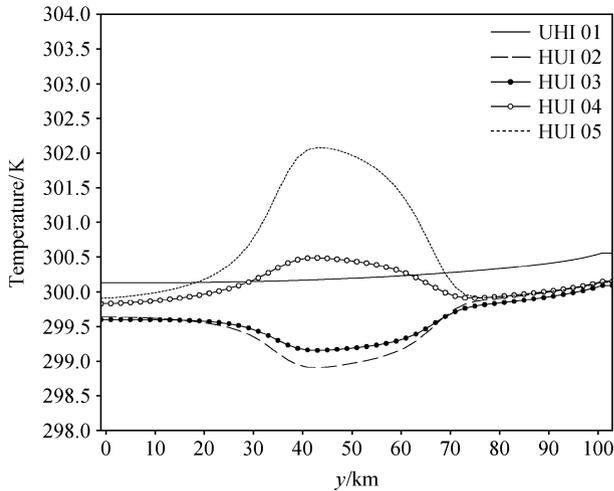


图 4 X=54 km 轴线的夜间近地面气温

Fig. 4 Surface temperature at nighttime on the cross section of X=54 km for different cases

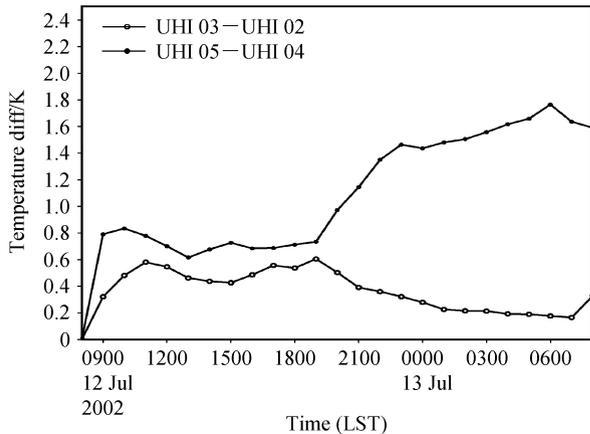


图 5 不同方案间的城市点气温差

Fig. 5 The differences of surface temperature between different cases at a city point

将交通热源加入地表, 将其余热源加入大气模式第一层。对人为热源引入方法的上述差异使得 TEB 方案考虑的人为热源不仅仅作用于上层大气, 还影响街渠内的能量平衡、冠层内的气温, 进而加强街渠与上部大气的感热交换作用, 所以人为热源对气温的影响在选 TEB 方案时表现得更显著。此外, 在 TEB 方案中, 由于交通工具排放的热源直接加入到街渠中, 使得这些热量一部分加热街渠大气, 另一部分则加热街渠内的表面, 并被这些表面储存起来, 到了夜间又释放出来与夜间的人为热源一起加热大气, 所以选 TEB 方案时, 人为热源对气温的影响在全天表现出的形式为: 对气温的作用白天

较小而夜间较大。

由于 UHI03 和 UHI02 都用 SVAT 方案, 模拟原理类似, 而 UHI05 和 UHI04 都用 TEB 方案, 情况也相似, 故在图 6 中只给出 UHI01、UHI03 和 UHI05 的地表能量平衡四分量的日变化规律, 图中点线是 UHI01 的模拟结果, 表示农作物下垫面上的地表能量平衡四分量, 在具体分析中认为该曲线代表郊区情况。纵观图 6 可知: 两种方案模拟出的城市表面净辐射通量都比农作物下垫面上的净辐射通量小, 城市储热均比郊区下垫面储热大, 城市感热通量也都比郊区下垫面的大, 而潜热通量比郊区的小。对比 UHI03 和 UHI05 的结果发现, 二者最明显的区别是对储热项和潜热项的模拟差异, 此外感热通量的模拟差异也较大。TEB 方案模拟的储热白天远大于 SVAT 方案的结果, 表明城市区域白天有一大半能量储存在冠层各表面中, 夜间 TEB 方案模拟的储热为负, 表示热量的释放; 而 SVAT 方案模拟的储热白天仅为 TEB 方案模拟结果的三分之一, 夜间在  $0 \text{ W/m}^2$  左右, 其全天的变化趋势与郊区情况类似, 所以 SVAT 方案模拟未能模拟出热岛现象。TEB 方案计算的城市潜热很小, 约为郊区的 0.05 倍, SVAT 方案模拟的潜热也比郊区小, 但是比 TEB 方案计算的结果大。由于 TEB 方案白天将大部分热量储存起来, 所以白天释放的感热比储热小, 在夜间, 建筑物表面储存的热量释放到大气中, 使得冠层内气温升高, 最终与上部大气之间以感热的形式进行热量交换, 表现为夜间感热通量为正。而 SVAT 方案模拟的夜间感热通量在  $0 \text{ W/m}^2$  左右, 对上部大气没有明显加热作用, 所以 SVAT 方案对夜间热岛现象的模拟不如 TEB 方案的模拟结果清晰。

图 7 给出与图 4 相同的轴线上的近地面热通量的分布, 从图中看出, 不论城市区域还是农作物区域, 14 时热通量均为负值, 即中午各种下垫面均加热大气, 但是粗糙水泥平板 (UHI03) 的加热更强烈, 其次是建筑物冠层 (UHI05), 最小的是农作物下垫面 (UHI01), 这由图 6 的感热通量日变化对比结果可以说明。日落之后, 郊区热通量为正, 向下输送, 而 SVAT 模拟的城市区域热通量也为正, 且大于郊区热通量的量值, 说明向下输送的热通量更多。TEB 方案模拟的城市热通量此时仍为负值, 表明地表继续加热大气, 正是因为这一点, TEB 方

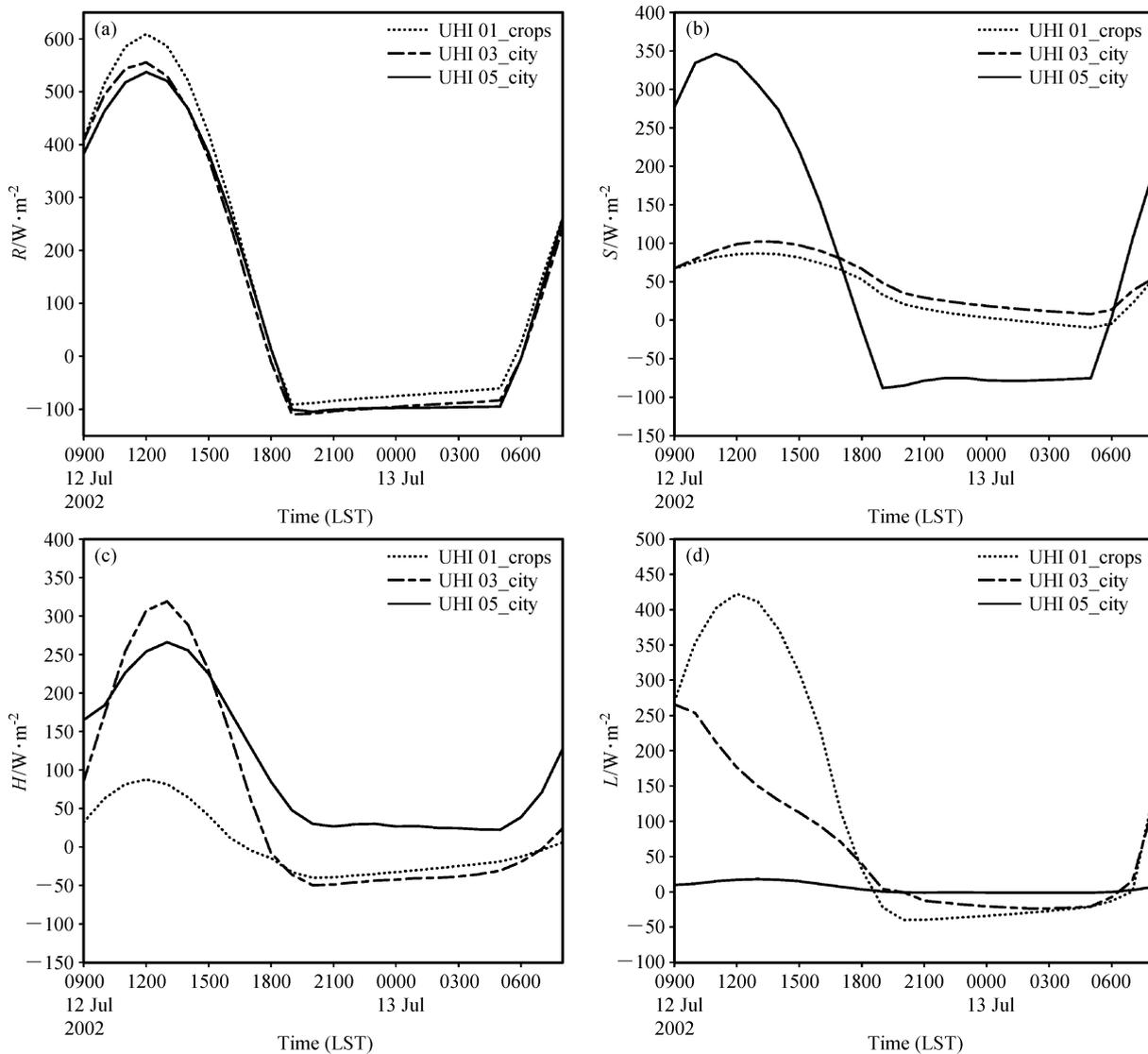


图 6 不同算例模拟的地表能量平衡：(a) 净辐射通量 ( $R$ )；(b) 储热项 ( $S$ )；(c) 感热通量 ( $H$ )；(d) 潜热通量 ( $L$ )  
Fig. 6 The simulated surface energy balance budget: (a) Net radiation flux ( $R$ ); (b) storage heat flux ( $S$ ); (c) sensitive heat flux ( $H$ ); (d) latent heat flux ( $L$ )

案才有效地减缓了城市区域日落后的降温速率，使得城市降温比郊区缓慢，从而开始逐渐表现出城乡温差的加大。02 时情况与 20 时类似，两种方案的地表热通量均比 20 时强度减弱一些，但是输送方向保持不便，即 TEB 方案在夜间仍然有向上的热通量，但是对城市的加热作用已不如在 20 时强。早上 08 时与 14 时情况一致，两种方案模拟的城市地表热通量都为负值，开始加热上部大气，但是由于此时日出不久，SVAT 方案的城市地表还没有被强烈加热，所以对上部大气的感热输送依然没有 TEB 方案的明显。

### 3.3 城市热岛对边界层热力结构的影响

由于城市区域热岛现象的存在，使得城郊边界层结构有差异，尤其是热力边界层结构的差别比较明显。由上述分析可知：TEB 方案对城市热岛现象的模拟较好，引入人为热源的作用后模拟结果更贴近实际情况，由于 UHI05 既选用 TEB 方案又引入人为热源的作用，故本小节主要以 UHI05 的模拟结果为基础，讨论城郊边界层热力结构的差异。此算例的建筑物高度以及人为热源量值都与中等城市(如南京)情况相近，我们试图通过对 UHI05 的分析与讨论，得出城市热岛对边界层热力结构影响

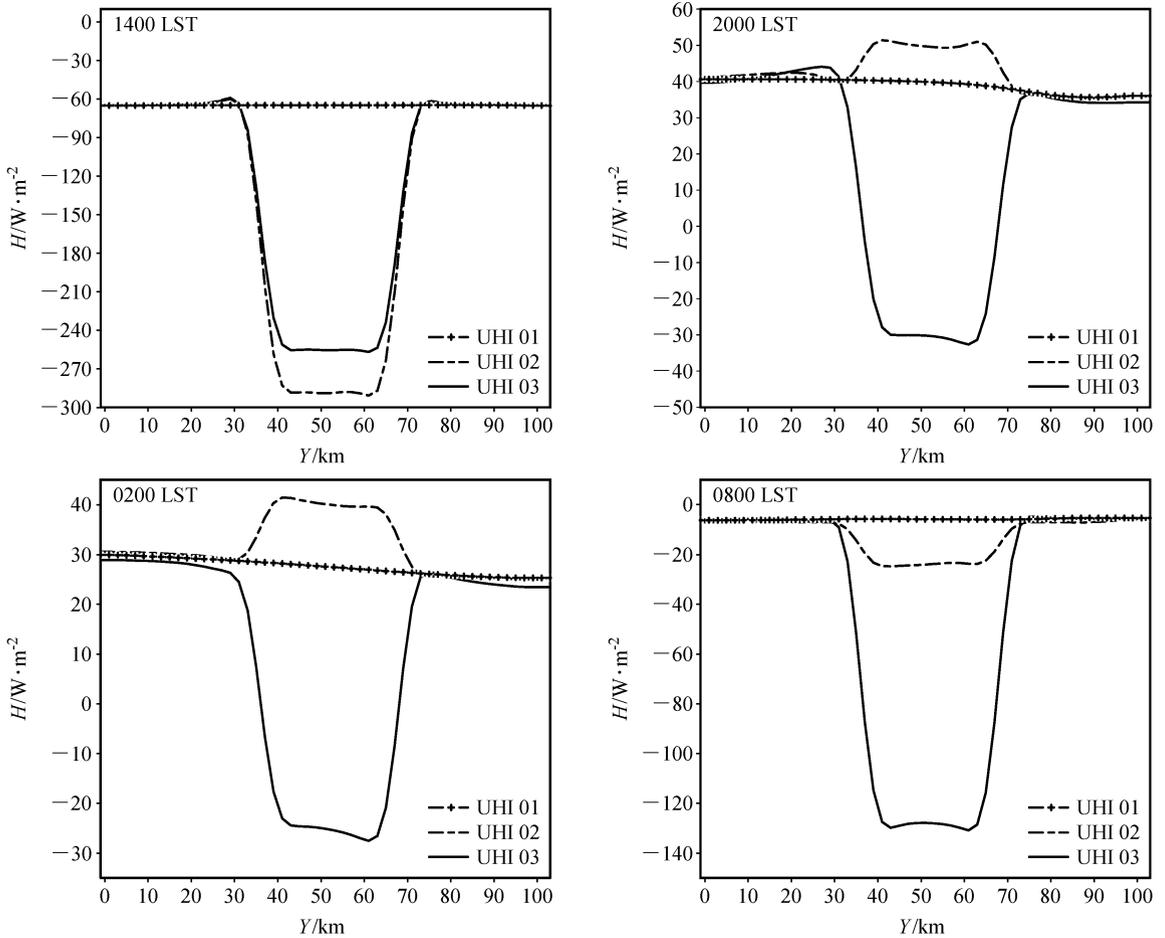


图 7 不同方案模拟的 Y-Z 轴线上近地面热通量 ( $X=54$  km, 负值代表向上输送)

Fig. 7 Surface heat fluxes on the cross section of  $X=54$  km for different cases

的一些共性结论。主要从城市对清晨及日落后边界层逆温结构的破坏作用、对夜间和中午的位温垂直结构的影响以及城乡地表能量平衡差异等角度来讨论这个问题。

图 8 给出城郊位温廓线的对比, 城市点取在模拟区域的中心, 坐标为 (27, 27), 郊区点取在距城市中心 30 km 处, 坐标为 (27, 42)。由图 8 可知, 郊区在 07 时和 20 时均为稳定层结, 而两个时段在 200 m 高度之下城区均为不稳定层结, 位温递减率约为 0.5 K/100 m, 在 200 m 高度之上, 城市和郊区的稳定性差异不明显。07 时城市比郊区的近地面位温高 3 K, 20 时则高 4 K 左右。可见城乡温差在日落后更明显。

地表能量平衡各分量的分配状况与热岛现象有关, 如果能对城乡地表能量平衡做出较全面的对比分析, 有助于更好地了解热岛的形成机制。图 9 给

出城乡两点地表能量平衡的日变化曲线, 图 9a 代表郊区地表能量平衡四分量日变化规律, 图 9b 代表城市地表能量平衡四分量的日变化关系。对比图 9a 和 9b 发现, 城郊地表能量平衡最明显的区别就是城市潜热很小, 而郊区潜热较大, 这是由于城市与郊区相比常常为“干岛”、水汽含量很少造成的; 另一个明显差别就是储热项, 城市白天储热较大, 故日落后有较多的热量释放回大气, 这使得城市的感热项在日落后的很长一段时期内都保持正值, 从而持续加热城市上空大气。而郊区由于白天储热较小, 故日落后释放的储热较少, 这使得日落后的感热通量成为负值。这段时间城乡感热通量之间的明显差异是导致产生热岛现象的部分原因。城市感热项在日落后对大气加热作用能持续多久, 取决于街渠几何形状、城市规模和位置、天气状况、季节以及人为活动等多个因素。

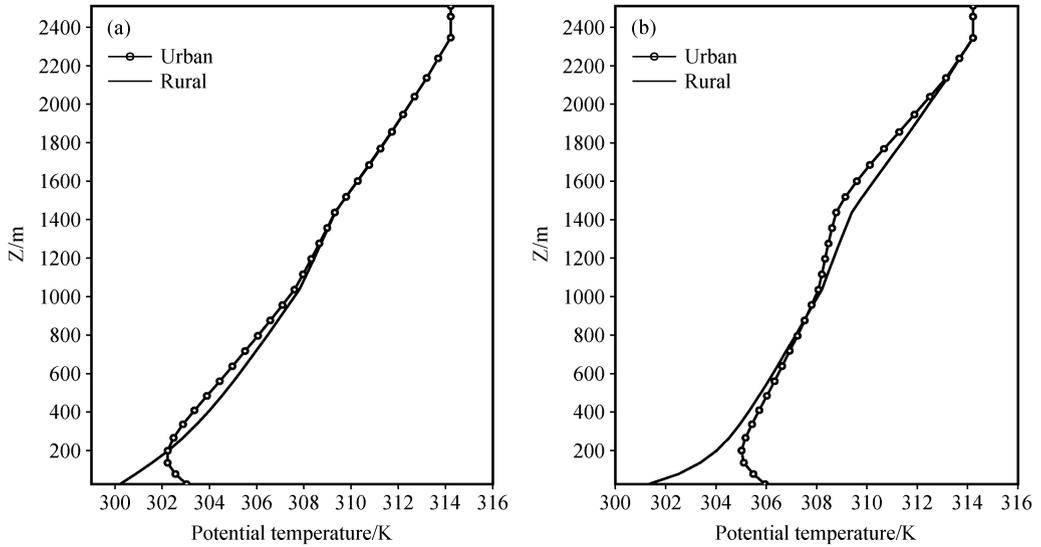


图 8 城乡位温廓线差异：(a) 07 时；(b) 20 时

Fig. 8 The comparison between urban and rural potential temperature profiles: (a) 0700 LST; (b) 2000 LST

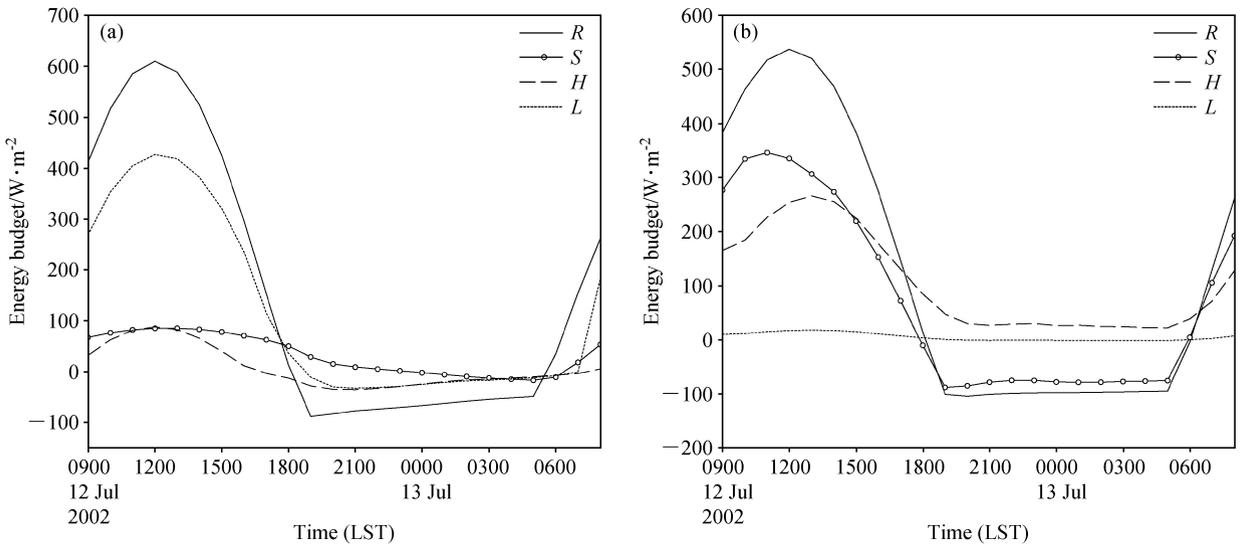


图 9 城乡地表能量平衡差异：(a) 郊区；(b) 城市

Fig. 9 The surface energy balance budget in (a) rural and (b) urban areas

### 3.4 人为热源和城市建筑物对城市热岛的贡献

人为热源和城市冠层这两个因子是城市热岛现象的主要成因，本节为了深入探讨这两个因子对 UHI 的生成起何种作用，主要分析 UHI01、UHI04 和 UHI05 的模拟结果。从两因子对城乡温差垂直廓线、城乡温差日变化曲线、城市湍能廓线、城市区域三个方向的风速等要素场的影响出发，分析人为热源和建筑物的存在对热岛现象的影响。

图 10 给出 UHI04 和 UHI05 城乡位温差的垂

直廓线图，由于 UHI04 是只考虑现状建筑物冠层作用的模拟算例，而 UHI05 是考虑现状建筑物和现状人为热源综合作用的模拟算例，所以从二者结果的差异可以分析人为热源和建筑物冠层对 UHI 的影响。图 10a、b 的城乡温差是用城市一点的位温垂直分布廓线减去郊区一点的位温垂直分布廓线而得，主要研究不同算例模拟的城乡位温差差异所能到达的高度。由图 10 可知：没有人为热源作用时 UHI04 模拟的夜间城乡近地层位温差异约为 1 K，

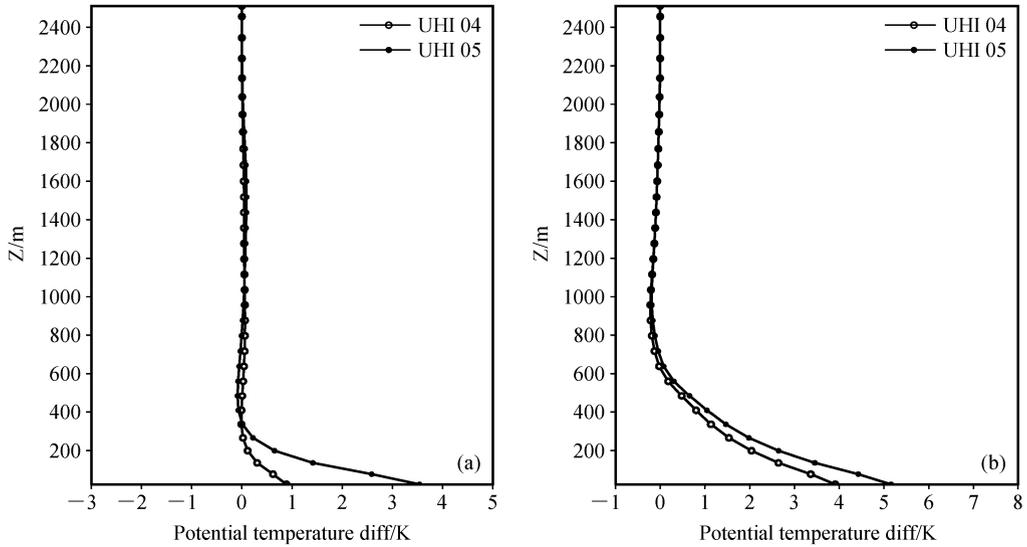


图 10 UHI04 和 UHI05 的城乡位温差垂直廓线: (a) 02 时; (b) 14 时

Fig. 10 The vertical profiles of the differences of surface potential temperature between urban and rural areas; (a) 0200 LST; (b) 1400 LST

而增加了人为热源作用后, UHI05 模拟的近地面位温差达到 3.5 K, 假如城市不存在, 则可认为所取两点的近地面位温差异为 0, 由此可粗略判断, 3.5 K 的温差中有 1 K 来自于冠层效应, 而 2.5 K 来自于人为热源的作用, 可见夜间热岛强度中人为热源的作用占到了 70%, 但在实际情况下, 人为热源的排放是有日变化的, 夜间量值明显小于白天, 所以实际情况下人为热源对夜间城市热岛强度的贡献应小于 70%。城乡位温差持续为正值的高度在夜间也略有差异, 考虑人为热源作用时, 城乡温差约持续到 400 m 高度。从 14 时的结果来看, 只考虑冠层效应时城乡近地层位温差约为 4 K, 而加入人为热源作用后城乡位温差约为 5 K, 由此推知: 5 K 的差值中热源起到的作用约占 20%。白天城乡位温差值持续为正的高度受热源的影响不大, 不论是否考虑人为热源的作用, 此差异都能达到 800 m 左右。两图结论对比后发现, 人为热源对夜间热岛的生成作用很大, 而对白天生成热岛的作用较小。

图 11 为 UHI04 和 UHI05 模拟的城乡近地层气温差值日变化曲线, 由图可见, 只考虑冠层效应时, 白天热岛强度最大可达 2 K, 夜间强度基本在 0.5 K 左右, 而加入人为热源的影响后, 热岛强度白天最高可达 2.8 K, 其余时段都在 2.0 K 之上。从图 11 中还可看出, 人为热源的作用从日落时开始越来越强, 凌晨 5 时最强。但是从本文图 3 中可

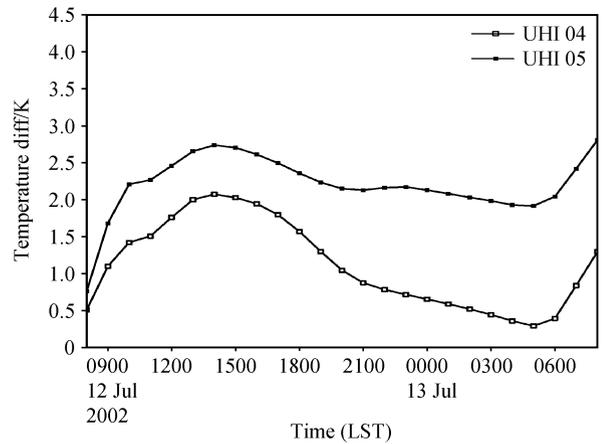


图 11 不同算例的城乡温差日变化曲线

Fig. 11 Diurnal variations of the differences of surface temperature between urban and rural areas for different cases

知, 在没有冠层结构的粗糙水泥平板上加入热源对气温升高起到的作用很小。综合上述考虑可认为: 建筑物冠层结构和人为热源的存在对 UHI 的生成都很重要, 人为热源对热岛现象的产生会起到促进加剧的作用, 建筑物冠层结构和人为热源量值的变化都会使城市热岛现象发生变化, 两个因子都很重要, 不论缺少哪一个都会明显削弱夜间 UHI 强度。

图 12 研究了建筑物冠层和人为热源对白天 (14 时) 城市区域湍能的影响, UHI04 与 UHI01 的差值表示中心区域由农作物变为城市以后湍能廓

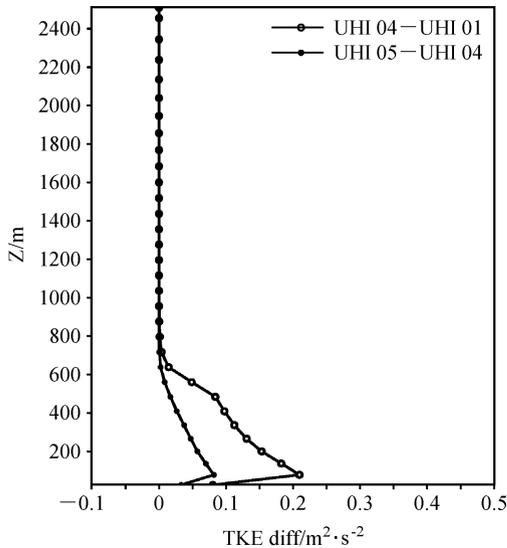


图 12 14 时不同算例的城市湍能差值廓线

Fig. 12 The vertical profiles of the differences of the turbulent kinetic energy (TKE) between different cases at 1400 LST

线的差异, 可用来讨论冠层作用对湍能的影响; UHI05 与 UHI04 的差值表示引入人为热源作用后城市区域湍能的变化, 可用来讨论人为热源对城市湍能的作用。由图 12 可知, 模拟域中心由农作物变成城市建筑物冠层时, 该区域湍能白天最大增加  $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 当城市冠层内加入现状人为热源时, 其上空湍能最大增量不到  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 可见冠层综合效应对城市湍能的影响大于人为热源对湍能的影响。

图 13 为 UHI04 和 UHI05 模拟的 X、Y、Z 三个方向速度相对于 UHI01 的夜间 (02 时) 剖面速度差值图, 分析  $u$  和  $w$  风速时, 取  $Y=54 \text{ km}$  垂直剖面, 分析  $v$  风速时, 取  $X=54 \text{ km}$  剖面, 可由该图探讨城市冠层热力效应和人为热源对城市热岛环流的影响。02 时近地面流场以西北风为主。由图 13a 可知, 城市冠层对气流的动力拖曳作用和对辐射的综合效应使得夜间城市区域整体  $u$  风速减小, 在城市上游方向减小  $0.1 \text{ m/s}$ , 而在下游方向减小  $0.3 \text{ m/s}$ , 城市上、下游之间的这种差异是由于夜间城市热岛现象造成的, 夜间城市温度相对郊区为高值, 近地面气流表现为辐合, 这就使得城市上风向加速、下风向减速, 但由于冠层动力拖曳对风速的减小作用强于热岛效应对风速的辐合作用, 最终表现出的形式为: 城市区域 X 方向的上风处  $u$  风速减小量值小于下风处的减小量值。同样, 从图 13b 中可明显看出, 在城市区域 X 轴向上风方  $u$  风速

增加  $0.2 \text{ m/s}$ , 下风方则最大减小  $0.6 \text{ m/s}$ , 上、下风向风速发生变化的范围也向东西向明显扩张。由此现象可知, 人为热源的引入明显增强了夜间城市热岛强度, 进而使得近地面气流辐合更明显。

由图 13c 知, UHI04 中建筑物冠层对气流的动力作用和热力作用最终使得城市区域及其北部上风方的  $v$  风速增大, 最大增量为  $0.2 \text{ m/s}$ , 而城市南部的  $v$  风速几乎不变。由图 13d 看出, 在建筑物冠层中加入人为热源后, 上风方向  $v$  风速增加最大可达  $0.4 \text{ m/s}$ , 下风方向明显减小  $0.2 \text{ m/s}$ 。从图 13c 和 13d 的对比分析可知, 人为热源对城市上、下风方向  $v$  风速变化起到的作用与冠层效应及动力拖曳作用的比重相当。从图 13e、f 可知, 建筑物冠层的动力、辐射综合效应使得城市上空垂直速度增大  $0.25 \text{ cm/s}$ , 城市上风方向垂直速度减小  $0.05 \text{ cm/s}$ , 垂直速度增加的范围可持续到  $800 \text{ m}$  高度左右; 而人为热源作用和冠层效应二者共同使城市区域的垂直风速增大  $1 \text{ cm/s}$ , 高度持续到  $1000 \text{ m}$  左右, 在城市上风方向垂直速度减小  $0.2 \text{ cm/s}$ 。可见, 人为热源对热岛环流垂直结构的影响比冠层作用明显。

## 4 结论

本文首先对 TEB 和 SVAT 模拟的 UHI 结果进行对比, 分析二者对 UHI 模拟效果存在差异的原因, 并用 TEB 模拟的结果进一步研究 UHI 对边界层热力结构的影响, 最后讨论了人为热源和城市冠层结构两类因子对 UHI 的贡献, 得出以下结论:

(1) TEB 方案可以很好地模拟出 UHI 现象, 尤其是对夜间 UHI 的模拟效果更优。产生这种结果的本质原因是 TEB 方案能模拟出城市区域日落热通量向上的现象, 而 SVAT 则不能做到这些。此外, 从人为热源对两方案模拟 UHI 效果的改善程度来看, SVAT 方案对 UHI 的模拟结果受人为热源影响不大, 而人为热源对 TEB 方案模拟夜间 UHI 效果的改善很明显。

(2) UHI 现象的存在使清晨和傍晚时分城市区域近地层位温廓线与郊区位温廓线之间存在明显差异, 且这种差异傍晚强于清晨。此外, UHI 现象的存在使得城市区域气温全天高于郊区, 且日间城乡温差能达到的高度明显高于夜间。城乡地表能量平衡之间的差异是产生热岛现象的主要原因之一, 其中储热项的差异是关键。

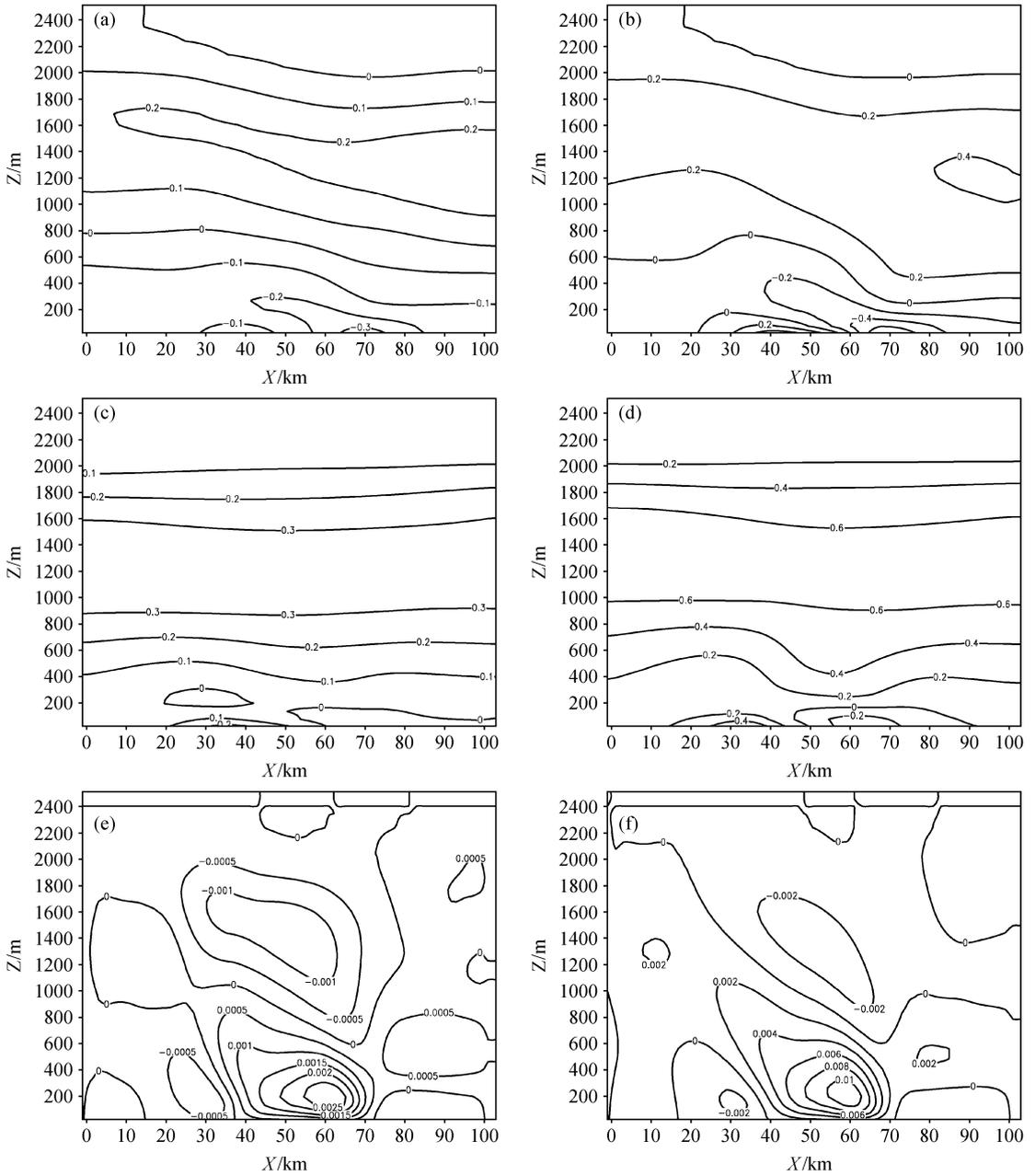


图 13 UHI04 (a, c, e) 和 UHI05 (b, d, f) 模拟的夜间 (02 时) X、Y、Z 三个方向速度相对于 UHI01 差值的剖面图: (a, b)  $Y=54$  km 剖面  $u$  风速差; (c, d)  $X=54$  km 剖面  $v$  风速差; (e, f)  $Y=54$  km 剖面  $w$  风速差

Fig. 13 Vertical cross sections of the wind speed differences between (a, c, e) UHI04, (b, d, f) UHI05 and UHI01 at 0200 LST: (a, b) The differences of  $u$  speed at  $Y=54$  km; (c, d) the differences of  $v$  speed at  $X=54$  km; (e, f) the differences of  $w$  speed at  $Y=54$  km

(3) 人为热源和建筑物的存在对 UHI 的产生都很重要,前者对 UHI 的生成有推进和加剧的作用。在建筑物热力和动力效应以及人为热源的共同作用下,城市区域有出现热岛环流的趋势。在本文理想试验条件下,人为热源对 UHI 的影响在夜间强于白天,而建筑物对白天城市湍能的影响强于人为热源的作用,但当人为热源排放强度和城市结构

参数发生变化时,其结果可能不同。

### 参考文献 (References)

- [1] Oke T R. The surface energy budgets of urban areas. In: Hosker P R, Ed. *Modeling the Urban Boundary Layer*. Boston: Amer. Meteor. Soc., 1987. 1~52
- [2] Atkinson B W. Numerical modeling urban heat-island intensity. *Bound.-Layer Meteor.*, 2003, **109**: 285~310

- [3] 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 城市人为热对北京热环境的影响. 气候与环境研究, 2004, **9** (3): 409~421  
Tong H, Liu H Z, Sang J G, et al. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (3): 409~421
- [4] Fan H L, Sailor B D J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 73~84
- [5] Best M J. Representing urban areas within operational numerical weather prediction models. *Bound.-Layer Meteor.*, 2005, **114**: 91~109
- [6] Tong H, Walton A, Sang J G, et al. Numerical simulation of the urban boundary layer over the complex terrain of Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 3549~3563
- [7] 蒋维楣, 陈艳. 人为热源对城市边界层结构的影响. 大气科学, 2007, **31** (1): 37~47  
Jiang W M, Chen Y. The study on the impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 37~47
- [8] 何晓凤, 蒋维楣, 陈艳, 等. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究. 地球物理学报, 2007, **50** (1): 74~82  
He X F, Jiang W M, Chen Y, et al. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the urban boundary layer. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2007, **50** (1): 74~82
- [9] Masson V. A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteor.*, 2000, **94**: 357~397
- [10] Kusaka H, Kondo H. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteor.*, 2001, **101**: 329~358
- [11] Lemonsu A, Grimmond C S B, Masson V. Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille. *J. Appl. Meteor.*, 2004, **43**: 312~327
- [12] 徐敏. 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. 南京大学博士学位论文, 2002  
Xu Min. Numerical simulation on the turbulence structures and meteorological environment in atmospheric boundary layer: From regional scale to micro-scale. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University, 2002
- [13] 徐敏, 蒋维楣, 季崇萍, 等. 北京地区气象环境数值模拟试验. 应用气象学报, 2002, **13** (特刊): 61~68  
Xu M, Jiang W M, Ji C P, et al. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (Suppl.): 61~68
- [14] Fang X Y, Jiang W M, Miao S G, et al. The multi-scale numerical modeling system for the research on the relationship between urban planning and meteorological environment. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21** (1): 103~112
- [15] 陈燕. 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. 南京大学博士学位论文, 2005  
Chen Y. Study of urban inhomogeneities' effect on atmospheric boundary layer. Ph. D. dissertation (in Chinese). Nanjing University, 2005
- [16] 陈燕, 蒋维楣, 徐敏, 等. 城市规划中绿化布局对区域气象环境影响的数值试验研究. 地球物理学报, 2005, **48** (2): 265~274  
Chen Y, Jiang W M, Xu M, et al. Simulation of greenbelts effect on meteorological environment in urban planning. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (2): 265~274
- [17] 周荣卫, 蒋维楣, 刘罡, 等. 热力粗糙度引入精细城市边界层模式的初步应用. 大气科学, 2007, **31** (4): 611~620  
Zhou R W, Jiang W M, Liu G, et al. A study of introducing temperature roughness length into a fine urban boundary layer model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (4): 611~620