

# 城市不同下垫面的能量平衡及温度差异模拟

崔耀平<sup>1,2</sup>, 刘纪远<sup>2</sup>, 张学珍<sup>2</sup>, 胡云锋<sup>2</sup>, 王军邦<sup>2</sup>

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封 475001; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 城市能量平衡是研究城市热岛效应的物理基础。利用北京市教学植物园 2010 年的实测数据, 设置不同类型下垫面 (植被覆盖类型: 林地、草地和不透水层覆盖类型: 道路、房屋), 利用局地尺度城市气象参数化方案模拟并分析了相同气象条件和净辐射通量输入下, 不同类型下垫面的显热、潜热通量及蒸散降温效应的差异。结果显示: (1) 不同类型下垫面的各能量支出项有明显差异, 植被覆盖区域和不透水层覆盖区域的波文比年均值分别为 0.28 和 4.60, 且在植被生长季差异较大; (2) 城市扩展过程中道路、房屋替换林地、草地的过程, 也是显热增加而潜热减少的过程。植被层向不透水层转换的过程中, 显热通量年均增加 32.74 W/m<sup>2</sup>, 潜热通量减少 38.87 W/m<sup>2</sup>, 储热通量增加 7.95 W/m<sup>2</sup>; (3) 理论上, 植被蒸散的年降温效应使单位面积植被覆盖区域的气温比不透水层区域可低 2.63 °C。

**关键词:** 能量平衡; 城市下垫面; LUMPS; 蒸散; 北京市

文章编号: 1000-0585(2012)07-1257-12

## 1 引言

伴随城市化进程, 城市地表能量收支发生变化, 成为影响城市气候的重要因子。现已证实城乡不同下垫面 (土地利用/土地覆盖) 造成的热量差是城市热岛效应产生的重要原因<sup>[1,2]</sup>。城市各种下垫面类型的热力学性质及动力学特征均存在很大差异, 如热容量、反照率、粗糙度、地表阻抗等, 使其产生的机械湍流对城市内部动量、热量和水汽的湍流输送差异明显。然而城市下垫面对太阳辐射能的重新分配以及城市地表特性对热收支影响的研究, 至今还面临诸多问题。

对地表下垫面进行实测和模拟分析已经持续了几十年<sup>[3,4]</sup>, 但随着城市下垫面结构、类型的不断变化, 复杂性愈来愈高, 对城市能量的测量、模拟和解释等也越来越具有挑战性<sup>[5]</sup>。国内外很多研究通过实测或模拟的方法对城市能量变化特征加以分析, 如 Oke、Grimmond、Masson 等基于能量平衡原理对城市能量收支进行的深入探讨<sup>[6~9]</sup>。但这些研究在分析不同下垫面的气候影响机制方面仍面临一些挑战, 比如, 植被覆盖区域的蒸散发降温效应是影响局地气候的重要因素, 已有研究也证实城市绿地的温度低于不透水层区域<sup>[10,11]</sup>, 但多基于观测数据单纯做分析。Petschauer 等近期也特别撰文指出蒸散对全球温度变化的影响很大, 但很多气候模式在模拟研究中却对此忽略了<sup>[12]</sup>。

收稿日期: 2011-07-07; 修订日期: 2011-12-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2010CB950900); 国家自然科学基金 (40971223); 中国科学院知识创新方向性项目 (KZCX2-EW-306)

作者简介: 崔耀平 (1984-), 男, 河南郸城人, 博士生, 主要研究方向为土地利用变化及区域水、热平衡模拟。

E-mail: cuiyp@lreis.ac.cn

通讯作者: 刘纪远 (1947-), 研究员, 中国自然资源学会理事长, 从事土地利用/土地覆盖变化及其宏观生态效应研究。E-mail: Liujy@igsrr.ac.cn

对应城市不同下垫面的热收支研究要注意尺度问题。当前耦合了城市模块的一些中尺度气候和区域地表模型如 WRF, RAMS 等无法体现城市内部精细的下垫面组成, 城市内部能量变化和局地小气候也不能精确模拟出来<sup>[13]</sup>。而微尺度的研究不仅推广到面上面临很多困难, 还无法有效对应下垫面进行分析。在城市内部的观测试验中, 由于城市过于复杂的立体下垫面, 致使湍流交换频繁, 观测下垫面的代表性难以确定。Blad 等在分析波文比能量平衡法时就曾指出没有足够长的风浪区会导致测得的温、湿度对相应的下垫面就没有足够的代表性<sup>[14]</sup>。然而城市不仅缺乏足够大的均质下垫面, 且单纯的能量观测还受到观测盲区、气象条件等影响, 产生了能量不闭合等诸多问题。并且, 城市冠层中设点观测包含了建筑(屋顶、墙体、玻璃)、道路、植被等产生的小气候层<sup>[15]</sup>。对北京市而言, 很多基于能量平衡的研究也已开展, 一些学者对城、郊区域进行了实测和模拟分析<sup>[16,17]</sup>。这些研究为深入探讨城市的热收支过程提供了很多有益参考, 但均面临着上述问题, 也很少结合下垫面类型进行能量收支差异分析。因此, 在合适的尺度上开展城市能量平衡模拟研究对厘清不同下垫面的热收支效应差异就显得非常必要。

基于以上分析, 本研究以北京市为例, 利用一个局地城市气象参数化方案模拟分析不同类型下垫面的能量支出的变化过程及其差异, 并对比不透水层和植被层的蒸散降温效应, 藉此为从能量平衡角度解释城市热岛效应及为城市规划等提供切实依据。

## 2 研究方法

### 2.1 LUMPS 介绍

局地尺度城市气象参数化方案(Local-scale urban meteorological parameterization scheme, LUMPS)是由著名城市气候学家 Oke、Grimmond 等历经多年予以完成的一个参数化方案, 用于模拟城市空间的能量平衡<sup>[18,19]</sup>。LUMPS 已在全球不同区域、不同纬度的多个城市进行了验证, 并与全球范围多个不同类型城市能量平衡模型进行了比对<sup>[20]</sup>, 能较好地模拟城市能量平衡各分量的变化特征。这里列出其主要公式:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_S + Q_A \approx Q_H + Q_E + Q_S \quad (1)$$

式中,  $Q^*$  为净辐射,  $Q_H$ 、 $Q_E$  分别是显热通量、潜热通量,  $Q_S$  表示城市地表热通量(储热通量),  $Q_A$  为平流。对一般城市而言, 源区面积在测点周边  $10^4 \sim 10^6 \text{ m}^2$ , 本研究范围在站点周边 100 m 内, 局地尺度的平流可以忽略<sup>[18]</sup>。

#### (1) 净辐射通量

$$Q^* = K_{\downarrow}(1 - \alpha) + \epsilon(L_{\downarrow} - \delta T_a) - 0.08K_{\downarrow}(1 - \alpha) \quad (2)$$

式中,  $K_{\downarrow}$  是下行短波辐射,  $L_{\downarrow}$  是下行长波辐射,  $\alpha$  为地表反照率,  $\epsilon$  为比辐射率,  $T_a$  为地表气温, 最后一项是对地表温度和近地表温度的纠正。城市地表覆盖类型复杂, 反照率、比辐射率等参数通常采用下垫面的实测特征值来取代, 在 LUMPS 中, 对城市中常见的几种地表类型就可以采用他人的研究总结: 林地、草地、道路、房屋的反照率为 0.18、0.25、0.125、0.224; 比辐射率分别为 0.975、0.93、0.95、0.91 等特征值。但由于本研究关注的是不同下垫面的能量支出差异, 因此, 这里直接用统一的净辐射观测数据, 暂不涉及地表反照率、比辐射率等参数的取值问题。

#### (2) 城市储热通量

采用 OHM (objective hysteresis model) 方法计算<sup>[18]</sup>。

$$Q_s = \sum_{i=1}^n (f_i a_{1i}) Q^* + \sum_{i=1}^n (f_i a_{2i}) \left( \frac{\partial Q^*}{\partial t} \right) + \sum_{i=1}^n (f_i a_{3i})$$

(3)

其中， $f_i$  表示  $n$  种类型的下垫面覆盖面积比例， $a$  是相应下垫面的计算系数，本文采用的具体系数值见下表（表 1）。

表 1 城市不同下垫面的储热系数

Tah 1 The storage heat coefficient of different underlying surfaces

储热系数		$a_{1i}$	$a_{2i}$	$a_{3i}$	引用文献
植被层	林地	0.11	0.11	-12.30	[22]
	草地	0.32	0.54	-27.4	[23]
不透水层	房屋	0.24	0.43	-16.69	[24~28]
	道路	0.70	0.33	-38.28	[23, 29]

(3) 显热和潜热通量

$$Q_H = \frac{(1-\alpha) + (\gamma/S)}{1 + (\gamma/S)} (Q^* - Q_s) - \beta$$

(4)

$$Q_E = \frac{\alpha}{1 + (\gamma/S)} (Q^* - Q_s) + \beta$$

式中， $S$  表示饱和水汽压随温度变化曲线的斜率（单位： $\text{Pa K}^{-1}$ ）， $\gamma$  是干湿表常数（单位： $\text{Pa K}^{-1}$ ），可根据 Penman-onteith 相关公式求解。 $\alpha$  取决于地表湿度和与剩余能量（ $Q^* - Q_s$ ）转化相关的系数， $\beta$  代表了其他不相关的能量贡献部分（单位： $\text{W/m}^2$ ）。 $\alpha$ 、 $\beta$  控制了潜热、显热能量的划分，其中  $\alpha$  的增加（表现为额外的湿度）直接增强了潜热限制了显热。能量划分系数  $\alpha$ 、 $\beta$  及是  $S$ 、 $\gamma$  可由下式分别计算得到：

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_{int} + \alpha_{slope} \times f_{veg} \times V(doy) \\ \beta &= \beta_{int} + \beta_{slope} \times f_{veg} \times V(doy) \\ \alpha_{int} &= 0.2; \beta_{int} = 3 \text{ W/m}^2 \\ \alpha_{slope} (f_{veg} > 0.9) &= 0.8; \alpha_{slope} (f_{veg} \leq 0.9) = 0.686 \\ \beta_{slope} &= 17 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

(5)

$$s = \frac{4098 \times [0.6108 \times e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}]}{(T+237.3)^2}$$

(6)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

(7)

式（6）和（7）中， $T$  表示气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $P$  为大气压（ $\text{kPa}$ ）， $c_p$  是常压下的比热容，值为  $1.013 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ， $\epsilon'$  是水与空气的分子量之比，取值为  $0.622$ 。

(4) 植被物候

LUMPS 包含一个植被覆盖面积分量的物候模块，用来指示季节性蒸散发：

$$V_{(doy, Northernhemisphere)} = \frac{1}{1 + 10^{k(s(d_s - doy)})} \times \frac{1}{1 + 10^{k(f(doy - d_f))}}$$

$$d_s = \frac{S_{start} + S_{stop}}{2}; d_f = \frac{f_{start} + f_{stop}}{2}; k_s = \frac{\log(\frac{1 - V_0}{V_0})}{d_s - s_{start}}; k_f = \frac{\log(\frac{1 - V_0}{V_0})}{f_{stop} - d_f}$$

(8)

式（8）中， $doy$  表示儒历日， $s$ 、 $f$  分别表示了植被生长季开始和结束的时间， $d$  表示生

长季的中间时刻,  $k$  是生长斜率,  $V_0$  是植被生长的衰败系数。

## 2.2 能量与温度的表达

这里为了分析能量和温度的关系, 设定一个非实际的理想状态。即, 不考虑温度转移和传递的阻抗, 将能量和温度的关系简单表示为:

$$Q = c \times m \times \Delta T \quad (9)$$

式中,  $Q$  为物体接收或吸收的能量, 单位 J, 主要来自太阳辐射;  $c$  为物体的比热容, 单位 J/(Kg·K);  $m$  为质量, 单位 Kg;  $\Delta T$  为物体升高 (或降低) 的温度差, 单位为 K。假设能量瞬时是完全传递, 不透水层和植被层温差可用下式简单表示:

$$\Delta T = \Delta T_{veg} - \Delta T_{imp} = \frac{Q_{veg}}{c_{veg} \times m_{veg}} - \frac{Q_{imp}}{c_{veg} \times m_{imp}} \quad (10)$$

式中, 下标分别代表了植被 (veg) 和不透水层 (imp);  $\Delta T$  即是不透水层和植被层的温差。

可以假设地表蒸散消耗的热量全部来自于周边的空气, 则由式 (9) 可推导出以下方程式:

$$\begin{aligned} \Delta Q_e &= \Delta Q_e(imp - veg) = c_{air} \times m_{air} \times \Delta T_{air}(imp - veg) \\ \Delta T_{air} &= \Delta T_{air}(imp - veg) = \frac{\Delta Q_e}{c_{air} \times m_{air}} \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $\Delta Q_e$  是植被覆盖层与不透水层的潜热差异, 单位 W/m<sup>2</sup>;  $c_{air}$  是空气的比热容;  $m_{air}$  表示空气质量;  $\Delta T_{air}$  即是植被层与不透水层作用于气温的差异。

## 2.3 模拟试验方案

本文所用气象及辐射实测数据由中国科学院生态环境研究中心, 北京城市生态系统研究站提供。站点设在北京市教学植物园中, 该植物园位于北京中心城区, 靠近天坛和龙潭公园, 是一处比较连片的城市公园绿地区, 其周边 1km 范围的地表类型主要是林地、草地及部分水域等。实测数据包括常规气象和辐射指标: 气温、气压、降水、相对湿度、风速、风向及净辐射等, 这些数据为 2010 年整一年的连续观测值, 时间间隔是 10 分钟, 本研究在具体应用时将其处理为小时均值。为了更加弱化平流的影响, 这里对当日风速超过 3 m/s 的观测数据进行剔除处理<sup>[21]</sup>。对于植被物候模块的输入参数, 可由物候观测或连续时间序列的植被指数确定, 本研究采用长时间序列 NDVI 的拟合结果。

在模拟试验中, 设定四种不同类型的下垫面数据, 分别是林地、草地、道路和房屋, 其中林地、草地为植被层, 道路和房屋为不透水层。在气象条件及其他条件都一样的条件下, 用一样的净辐射观测数据, 模拟四种下垫面的能量支出差异。

# 3 结果分析

## 3.1 不同下垫面的能量平衡

城市不同下垫面的辐射平衡存在很大差异, 但由于本文侧重分析不同下垫面对能量分配的影响, 因此这里不分析地表辐射平衡, 而取相同的实测净辐射值, 只对能量的支出项进行分析。

图 1 分月显示了不同下垫面各能量支出项的差异 (从左到右, 从上到下, 依次按小写英文字母 a, b, c, ... 排列, 下同)。图 1a 是显热通量的差异, 从中可以看出, 四种类型下垫面的显热通量在月均值上差异很大, 房屋和道路的显热通量随季节变化明显, 冬季最

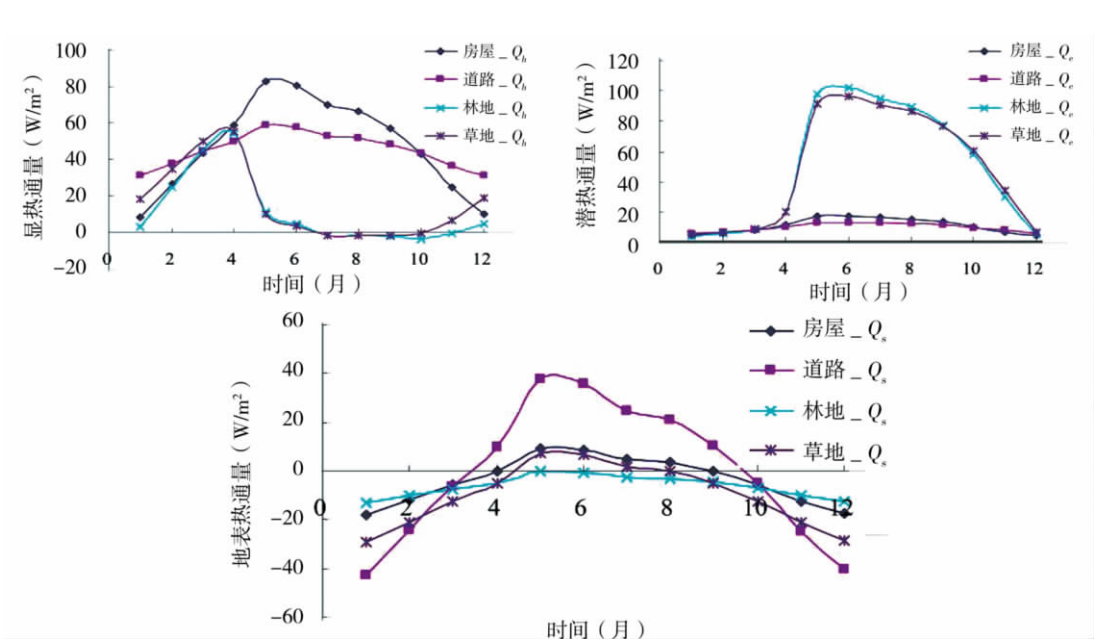


图 1 不同下垫面的能量支出差异 (a. 显热通量; b. 潜热通量; c. 储热通量)  
Fig. 1 The differences of energy expense of different underlying surfaces  
(a. sensible heat flux; b. latent heat flux; c. urban surface flux)

低，且最低值均出现在 1 月份，分别为 8.0 和 31.0 W/m<sup>2</sup>，而两者的最高值均出现在 5 月份，其值分别达到 82.8 和 58.7 W/m<sup>2</sup>。它们的年均值分别为 47.6 和 45.3 W/m<sup>2</sup>，其中 4 ~ 10 月，显热通量分别为 65.5 和 51.8 W/m<sup>2</sup>；而在 11 ~ 3 月的值分别为 22.5 和 36.3 W/m<sup>2</sup>。在植被生长季，林地和草地的显热大幅下降，平均值分别为 8.7 和 9.0 W/m<sup>2</sup>。全年的平均值为 11.5 和 16.0 W/m<sup>2</sup>。林地和草地的变化趋势在植被生长季开始与不透水层表现出明显不同，但林地、草地两者的变化趋势很相似，它们的最高值分别为 54.4 和 55.1 W/m<sup>2</sup>，而林地、草地的最低值分别为 -3.3 和 -2.0 W/m<sup>2</sup>。有学者观测到夏季北京郊区（顺义）的显热通量夜间为负值，日均值为 22.9 W/m<sup>2</sup>，只占到净辐射的 1/5。该站点毗邻国际机场，建筑屋顶占 36.4%，不透水层占 11.6%，植被覆盖层大概占 52.0%<sup>[16]</sup>。本文在 7、8 月份的平均值模拟结果为负值（大于 -3.3 W/m<sup>2</sup>），究其原因，是高比例的植被覆盖层导致的。在夏季，一般植被层温度要低于大气温度，温度梯度由大气指向植被层，这个结果同样得到了观测结果的证实<sup>[30]</sup>，也能在对不同下垫面温度差异性的分析中看出。可见植被是造成城市不同下垫面的显热通量出现差异的主要因素，房屋与道路、林地与草地的显热通量年差异不大，但林地、草地等有植被覆盖区域的值要明显低于道路、房屋等不透水层区域，并且这种差异主要出现在植被生长季内。

与对显热通量的分析对应，林地、草地的潜热通量月变化趋势一致，而不透水层类型的变化趋势相似（图 1b）。相对而言，不透水层全年的潜热通量波动不大，仅在夏季稍高，房屋和道路的年均值分别为 10.7 和 9.5 W/m<sup>2</sup>。林地和草地的潜热通量年均值分别达到了 49.4 和 48.6 W/m<sup>2</sup>，明显高出不透水地表。植被类型下垫面的潜热通量在植被生长季明显升高，在 5 ~ 6 月份达到最大值，并随后进入一个稳定时期，而后再缓慢下降，这个趋势也对应植被的生长过程，其中林地在植被生长季的均值为 77.2 W/m<sup>2</sup>，而草地

为  $74.6 \text{ W/m}^2$ ，在非植被生长季它们的均值分别为  $10.6$  和  $12.1 \text{ W/m}^2$ ，略大于同时期房屋的  $5.8$  和道路的  $6.7 \text{ W/m}^2$ ，充分体现出潜热通量本身受到的植被因素的影响。

作为能量支出的关键项之一，储热通量既受到净辐射的影响，又与下垫面的热力学性质直接相关。图 1c 显示了不同下垫面的储热通量，比较发现，道路储热通量的值波动最大，由 5 月份达到的最大值  $37.7 \text{ W/m}^2$ ，到 1 月份的最小值  $-42.5 \text{ W/m}^2$ ，而其余的林地、草地、及房屋的值波动相对较小。就年均值来看，四种类型下垫面的值均为负，说明它们的能量虽然不大，但更多是从深层土壤传递到地表，具备传送能量到大气中的潜力。年均值依次为：道路 ( $-0.2 \text{ W/m}^2$ ) > 房屋 ( $-3.7 \text{ W/m}^2$ ) > 林地 ( $-6.3 \text{ W/m}^2$ ) > 草地 ( $-9.9 \text{ W/m}^2$ )，其中，道路和房屋的值略低于有植被覆盖的区域，而由于不透水层较快的热传导率，使得其值波动较大，但普遍较低，其差异和趋势不甚明显。

波文比是反映能量支出分配的重要指标，由英国物理学家 Bowen 在研究自由水面的能量平衡时提出的<sup>[31]</sup>。他认为水分子的蒸发扩散过程同水面向空气中的热量输送过程是相似的，于是提出波文比概念，即水面与空气间的湍流交换热量与自由水面向空气中蒸发水汽的耗热量之比。表 2 给出了四种类型的下垫面在各个时段的波文比，从中可以看到，道路和房屋的值在全年各个时期均保持较高，其年均值分别达到了  $4.75$  和  $4.44$ ；而林地和草地的值则很低，分别为  $0.23$  和  $0.33$ 。说明在不透水层的能量支出中，显热通量，也即地表与空气间湍流交换的能量所占比重很大。

表 2 不同下垫面的波文比  
Tab. 2 The Bowen ratio of different underlying surfaces

	春季	夏季	秋季	冬季	植被生长季	无植被期	年均值
林地	3.657	0.048	-0.041	2.269	0.113	1.455	0.232
草地	4.030	0.041	0.026	4.091	0.121	2.131	0.329
道路	5.514	4.396	4.539	5.592	4.463	5.449	4.749
房屋	5.140	4.646	4.204	3.085	4.610	3.868	4.442

3.2 下垫面转类的能量支出分析

不同下垫面之间的类型转换在城市化及城市内部土地覆盖的发展调整过程中持续存在，这种下垫面之间的转类将最终影响到城市的能量分配过程。为了分析下垫面转类带来的能量分配差异，本文对四种类型下垫面的相互转类情况逐一进行分析。图 2 给出了 6 种转类类型的显热通量、潜热通量及储热通量的差值，表 3 是相应的年均值，在做类型反转分析时，对应的值的正负号也相反。

表 3 各转类类型的能量支出项年均值差异 (单位:  $\text{W/m}^2$ )  
Tab. 3 The differences of energy expense of different underlying surface change types

类型	房屋			道路			林地			草地		
	$Q_h$	$Q_e$	$Q_s$	$Q_h$	$Q_e$	$Q_s$	$Q_h$	$Q_e$	$Q_s$	$Q_h$	$Q_e$	$Q_s$
房屋	—	—	—	2.259	1.169	-3.428	36.116	-38.729	2.613	31.612	-37.850	6.238
道路	-2.259	-1.169	3.428	—	—	—	33.857	-39.898	6.041	29.353	-39.019	9.666
林地	-36.116	38.729	-2.613	-33.857	39.898	-6.041	—	—	—	-4.505	0.879	3.626
草地	-31.612	37.850	-6.238	-29.353	39.019	-9.666	4.505	-0.879	-3.626	—	—	—

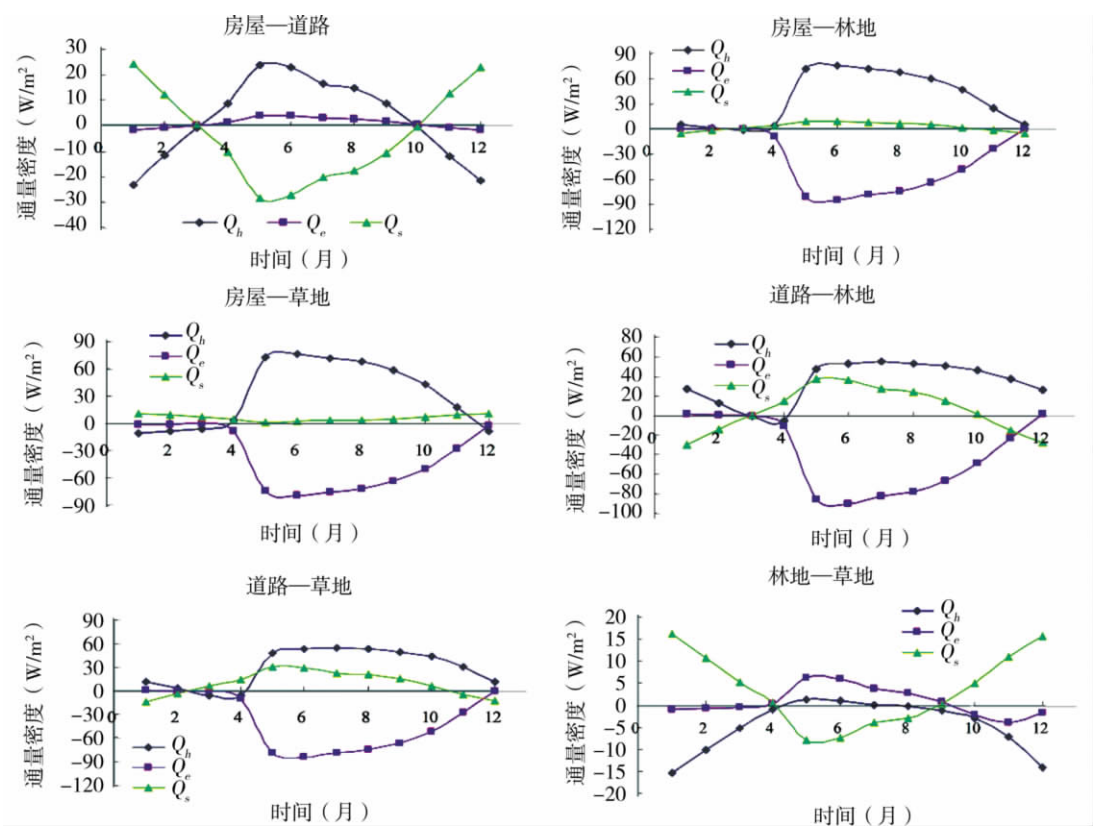


图 2 不同下垫面之间转类的能量支出差值图

Fig. 2 The differences of energy expense of different underlying surface change types

图 2a 是“房屋—道路”转类的能量支出差值图（“房屋—道路”表示从房屋转换成了道路类型，以下类同）。从图中可以看出，潜热通量的差异很小，为  $1.169 \text{ W/m}^2$ （表 3）。显热通量差值的月变化趋势几乎和储热通量的变化趋势相反，显热通量在 5 月份的差值达到最大，为  $24.115 \text{ W/m}^2$ ，此时储热通量的差值为负值，但绝对值最大，达到了  $28.359 \text{ W/m}^2$ 。显热通量的差值仅在 3 ~ 10 月份为正，而储热通量却刚好相反。在城市绿化过程中，如果实施植树造林，即原不透水层转换为林地，能量支出最大的差异项为显热通量和地表显热通量，年均差值的绝对值分别达到了  $36.116$  和  $38.729 \text{ W/m}^2$ ，而储热通量的差异相对很小，为  $2.631 \text{ W/m}^2$ 。显热通量的差值在 4 月份以后开始升高，而潜热通量的差值在 4 月份陡然下降为负值（图 2b）。“房屋—草地”转类类型的能量支出项差值的月变化趋势基本和房屋—林地的一致（图 2c），均反映出植被对能量分配的重大影响。

图 2d 和图 2e 分别是道路向林地和草地上垫面转换的能量支出项的差值图。两个图基本一致，其中潜热通量的差值随月份变化而变化，其值在夏季为正，且绝对值最高，而在冬季值为负；“道路—林地”和“道路—草地”的显热通量的差值几乎全年为正值，年均差值分别达到了  $33.857$  和  $29.353 \text{ W/m}^2$ ；而潜热通量差值趋势与此相反，几乎全为负值，其绝对最大值也是出现在夏季，年均差值分别为  $-39.898$  和  $-39.019 \text{ W/m}^2$ 。说明当有这两种转类类型发生时，对应的是潜热的绝对增加和显热的绝对减少。

图 2f 是“林地—草地”转类的能量支出差值图。其中，潜热通量差值在夏季稍大，而在其余不明显，年均值为  $0.879 \text{ W/m}^2$ ；显热通量在冬季差异明显，且值为负，年均值为  $-4.505 \text{ W/m}^2$ ，说明林地到草地转变时显热通量是略有增加的。储热通量的差值在夏季呈现负值，整个夏季的均值为  $-6.354 \text{ W/m}^2$ ，而其余季节为正值，年均值  $3.626 \text{ W/m}^2$ 。显示了除夏季外，林地的储热通量稍高于草地类型的下垫面。

3.3 不同下垫面的温度差异性

下垫面引起气温升高的主要原因之一既是城市中的具有不同比热容的大量不透水层地表受到太阳辐射后散发的热量。城市中常见的材料中，在  $298.15 \text{ K}$  和  $1$  个大气压下测定的砂、柏油（沥青）、混凝土、木材、水、空气的比热容依次为  $795.5$ 、 $1674.8$ 、 $837.4$ 、 $1256.1$ 、 $4182$ 、 $1013.0 \text{ J/(Kg} \cdot \text{K)}$ <sup>[32]</sup>。路面、建筑等可以简单理解为由砂、柏油（沥青）、混凝土等组成，而植被可以简单理解为由木材和水组成，植被的水含量会占到鲜重总量的  $70 \sim 90\%$ 。太阳辐射是能量的主要提供者，式（10）中的  $Q$  可以简单理解为净辐射，只有  $\Delta T$  为未知数，可求得理论值。不透水层的热容量小于植被层的，因此，在接受同等能量下，植被层的温度升高值依然要低于不透水层的，从而出现了地表温度的差异。

由 3.1 和 3.2 节的模拟分析可知，蒸散主要来自于植被层，植被蒸腾和地表蒸发共同作用于植被层，而不透水层的蒸散主要来自于降水（或人工洒水）后的地表蒸发作用。

式 11 中的  $\Delta Q_e$  更多表示了植被的蒸腾作用，可以简单理解为潜热通量（图 3）， $m_{air}$  可以用一定高度的单位面积的空气质量来表示，则可求得式（11）中  $\Delta T$  的理论值。参照城市生态学的相关研究，取底面积为  $1\text{m}^2$ ，厚度为  $100\text{m}$  的空气柱作为计算单元，空气密度取标准状态和常温状态下（ $1.205$  和  $1.293 \text{ kg/m}^3$ ）的平均值  $1.249 \text{ kg/m}^3$ 。计算得到的理论结果显示：当“房屋—道路”、“林地—草地”、“植被层—不透水层”等转类类型发生时，是可以使近地表空气温度升高的，同对图 3 的结果和分析相符。其中，植被层的“林地—草地”和不透水层的“房屋—道路”之间的转类致使气温变化不大，年降温效应分别为  $0.057$  和  $0.076^\circ\text{C}$ ；而“林地—房屋”、“林地—道路”、“草地—房屋”及“草地—道路”等四种转类发生时，年降温效应差异明显，其值均大于  $2.5^\circ\text{C}$ ；对比不透水层，单位植被层的年降温效应可达  $2.628^\circ\text{C}$ （图 4，立柱表示转类后的潜热通量年差值，折线表示温差）。这个结果也类似他人对城市林地及道路等不同下垫面类型的实测温差结果<sup>[30]</sup>。

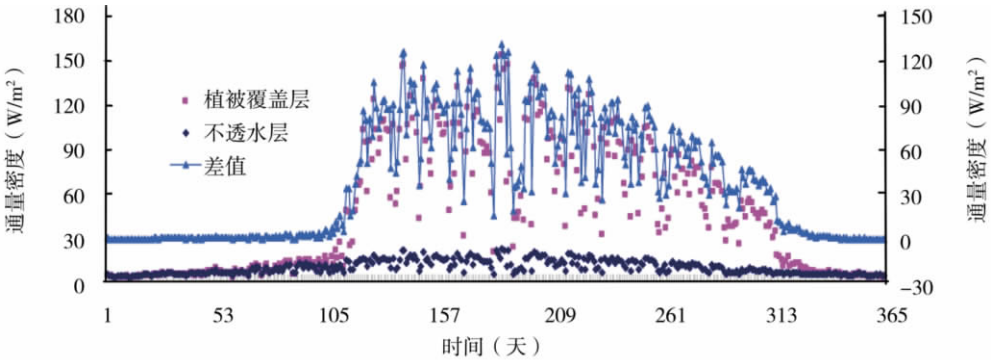


图 3 不透水层和植被层的潜热通量差异

Fig 3 The differences of latent heat flux of impervious surface and vegetation cover surface



以上分析不仅可以说明城市中大量不透水层的存在会造成环境温度急剧升高，同时也解释了为什么城市公园比建筑群区更凉爽，人体舒适度也较高。

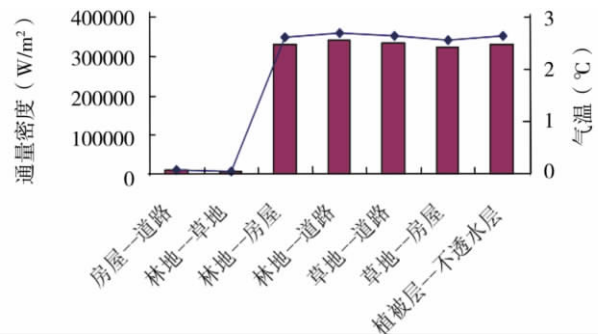


图 4 下垫面转类导致的气温升高值

Fig. 4 Increasing air temperature caused by different underlying surfaces changes

地表温度是一个综合体，它受到了各个方面的影响，单纯的分析比热容只涉及到了一个方面。局地的气温受到的影响因素也很多，除了湍流交换（显热、潜热）的调节作用外，还受到储热通量及地物长波发射能量等的影响<sup>[33]</sup>。因此，它包括地表热惯量、能量平衡各项及气象因子的综合影响。本研究对不透水层和植被层的地表温度、空气温度之差进行简单的理论分析，揭示了能量作用于温度的过程。现实条件是非常复杂的，城市热岛效应是地表不同类型下垫面的能量收支与温度、平流、地表温度和空气温度相互作用的过程。同时，地表和近地表大气之间时刻进行着能量的相互传递和转化。因此，式（10）和式（11）只是在一个非常理想的状态下对城市热岛效应的简单表达。

4 讨论

本文用到的气象和辐射数据是来自城市公园的实测数据，参数的本地化也是根据北京市教学植物园的情况考虑的，加之北京地处半湿润气候区，因此本研究的结果可能更好地代表了绿化程度较好的北方城市的情况。

当前几乎所有能量平衡模拟，包括气候数据拟合和遥感反演，均存在储热通量计算的误差问题，而储热通量作为地表能量支出的一部分，其对潜热和显热通量的计算精度会产生一定影响，且在计算潜热通量的过程中这个误差是累计的。之前的研究发现储热通量与净辐射存在密切的线性关系，后来证实存在一定的滞后性（hysteresis）。而这里所用 LUMPS 的 OHM 计算储热通量具有明显的比较优势<sup>[34]</sup>，减小了方案的系统误差和储热通量对显热、潜热值的干扰。由于在北京市没有同步获取单类型的下垫面通量观测数据，本研究就模拟的显热、潜热通量及波文比等结果的值域和趋势，与他人的观测结果、遥感反演结果比较，均对应显示出很好的一致性<sup>[1, 16, 30, 35]</sup>。

本文还探讨了潜热对大气温度的重要作用。一些气候学家从全球能量收支角度对潜热对温度的重要作用加以定量分析，并指出当前的研究对潜热降温效应的分析较少，形成了气候学的一个盲点（Climate Science’s Blind Spot），并以此对 IPCC 相关论断提出新的见解<sup>[12]</sup>。为进一步分析潜热对温度的作用，本文结合不透水层和植被层的相应差值，

对不同类型下垫面的潜热和温度关系进行简单探讨。事实上,不透水层的地表温度上升很快,起到加热空气的作用,而植被层起到冷却大气温度的作用。此外,植被层产生的较大的潜热在相变过程中也具有很强的吸热作用。然而,尺度推绎到实际的城市和郊区尺度的对比中,两个区域的下垫面也不可能完全为不透水层或者植被层,并且它们的能量分配过程还会受到地表粗糙度、风速、风向等气象因子的强烈影响,不能简单套用此能量和温度表达式求算。

## 5 结论

本文主要结论有:

(1) 城市不同类型下垫面的显热、潜热、储热通量存在明显差异。其中,不透水层的显热大潜热小;而植被层的显热小潜热大,它们的波文比年均值分别为 4.60 和 0.28,且它们能量支出的差异主要出现在植被的生长季。就储热通量而言,两者差异不大。

(2) 城市扩展过程中常见的道路、房屋替换林地、草地的过程,也是显热增加而潜热减少的过程。从年均值看,植被层向不透水覆盖层转换的过程中,显热通量增加  $32.74 \text{ W/m}^2$ ,潜热通量减少  $38.87 \text{ W/m}^2$ ,储热通量增加了  $7.95 \text{ W/m}^2$ 。说明伴随城市化进程,不透水层增加带来的显热增加是产生城市热岛效应的主要原因之一。

(3) 对植被层和不透水层温度差异的对比分析结果表明,植被层不仅可以通过自身较大的比热容保持较低的地表温度,还可以利用较大的蒸散发量,通过蒸散降温效应使得其周边气温保持较低。理想状态下计算的理论值显示,仅单位面积的植被层蒸散的年降温效应就可以使其近地表气温比不透水层的周边气温值低  $2.63^\circ\text{C}$ 。

## 参考文献:

- [1] Oke T. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108(455): 1~24.
- [2] 刘纪远,战金艳,邓祥征. 经济改革背景下中国城市用地扩展的时空格局及其驱动因素分析. *人类环境杂志*, 2005, 34: 444~449.
- [3] Businger J, Wyngaard J, Izumi Y, *et al.* Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1971, 28: 181~189.
- [4] Dabberdt W, Lenschow D, Horst T, *et al.* Atmosphere-surface exchange measurements. *Science*, 1990, 260: 1472~1481.
- [5] Massman W, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 121~144.
- [6] Oke T. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *International Journal of Climatology*, 1981, 1(3): 237~254.
- [7] Masson V, Grimmond C, Oke T. Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(10): 1011~1026.
- [8] 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.
- [9] Grimmond C, Oke T. Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(4): 873~889.
- [10] Huang L M, Li J L, Zhao D H, *et al.* A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 7~17.
- [11] 钱乐祥,崔海山. 归一化水汽指数与地表温度的关系. *地理研究*, 2008, 27(6): 1358~1366.

- [12] Petschauer R J. Climate Science's Blind Spot -Evaporation Cooling. <http://climateclash.com/2011/01/19/climate-science%E2%80%99s-blind-spot-%E2%80%93evaporation-cooling/>, 2011-01-09.
- [13] 佟华, 陈仲良, 桑建国. 城市边界层数值模式研究以及在香港地区复杂地形下的应用. 大气科学, 2004, 28(6): 957~978.
- [14] Blad B L, Rosenberg N J. Lysimetric calibration of the bowen ratio-energy balance method for evapotranspiration estimation in the central great plains. Journal of Applied Meteorology, 1974, 3: 227~236.
- [15] Oke T R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In: Cermak J E. Wind Climate in Cities. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. 81~107.
- [16] 窦军霞, 刘伟东, 苏晨, 等. 北京城郊地区能量平衡特征研究. 见: 中国气象学会. 2008 年年会城市气象与城市可持续发展分会, 2008. 53~57.
- [17] 王修信, 朱启疆, 陈声海, 等. 城市公园绿地水、热与 CO<sub>2</sub> 通量观测与分析. 生态学报, 2007, 27(8): 3232~3239.
- [18] Grimmond C, Oke T. Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38: 922~940.
- [19] Grimmond C, Oke T. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(7): 792~810.
- [20] Grimmond C, Blackett M, Best M, *et al.* The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(6): 1268~1292.
- [21] 王喜全, 王自发, 郭虎. 北京“城市热岛”效应现状及特征. 气候与环境研究, 2006, 11(5): 627~636.
- [22] McCaughey J. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario: A case study. Boundary-Layer Meteorology, 1985, 31(1): 89~101.
- [23] Doll D, Ching J, Kaneshiro J. Parameterization of subsurface heating for soil and concrete using net radiation data. Boundary-Layer Meteorology, 1985, 32(4): 351~372.
- [24] Yoshida A, Tominaga K, Watatani S. Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season. Energy and Buildings, 1990, 15: 417~423.
- [25] Yoshida A, Tominaga K, Watatani S. Field investigation on heat transfer in an urban canyon. Heat transfer-Japanese Research, 1991, 20: 230~244.
- [26] Meyn S. Heat fluxes through roofs and their relevance to estimates of urban heat storage. The University of British Columbia, Doctoral Dissertation, Vancouver, 2001.
- [27] Yap D. Sensible heat fluxes in and near Vancouver, BC. The University of British Columbia, Doctoral Dissertation, Vancouver, 1973.
- [28] Taesler R. Studies of the development and thermal structure of the urban boundary layer in Uppsala, Part I: Experimental program; and Part II: Data, analysis and result. Uppsala University, Uppsala, 1980.
- [29] Asaeda T, Ca V. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: A numerical model. Boundary-Layer Meteorol, 1993, 65: 159~178.
- [30] 唐罗忠, 李职奇, 严春风, 等. 不同类型绿地对南京热岛效应的缓解作用. 生态环境学报, 2009, 18(1): 23~28.
- [31] Bowen I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Physical Review, 1926, 27(6): 779.
- [32] 贾刘强. 城市绿地缓解热岛的空间特征研究. 成都: 西南交通大学博士学位论文, 2009.
- [33] 张仁华. 改进的热惯量模式及遥感水分. 地理研究, 1990, 9(2): 101~112.
- [34] Rigo G, Parlow E. Modelling the ground heat flux of an urban area using remote sensing data. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 90(3): 185~199.
- [35] 王修信, 朱启疆, 陈声海, 等. 城市绿地水热通量的遥感反演与实验验证. 地域研究与开发, 2010, 29(3): 63~66.

## Modeling urban energy balance and temperature differences of different underlying surfaces

CUI Yao-ping<sup>1,2</sup>, LIU Ji-yuan<sup>2</sup>, ZHANG Xue-zhen<sup>2</sup>, HU Yun-feng<sup>2</sup>, WANG Jun-bang<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Urban energy balance is a physical basis of studying urban heat island effect. Underlying surfaces have a significant effect on urban thermal budget. In this study, different types of underlying surface, namely vegetation cover types (forest and grassland), impervious overlay types (roads and houses), and meteorological data measured in Beijing teaching botanical garden in 2010, were used to study urban energy balance and temperature differences of different underlying surfaces with a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). The results showed that: 1) urban underlying surfaces had a large impact on energy expenditures. Therein, the annual average Bowen ratio of vegetation cover regions was 0.28, while that of impervious layer regions reached 4.60. Moreover, the differences of energy expenditure mainly appeared in the vegetation growing season; 2) the common process of urban sprawl was that grassland or forest were replaced by houses and roads. This process was accompanied by the significant changes of energy expenditures, namely the process of sensible heat increased and latent heat decreased. For example, in the process of conversion of vegetation surface to impervious surface, the sensible heat flux increased by  $32.74 \text{ W/m}^2$ , the latent heat flux decreased by  $38.87 \text{ W/m}^2$ , and the surface heat flux increased by  $7.95 \text{ W/m}^2$ ; 3) corresponding to the differences of latent heat and temperature, the results displayed that the vegetation cover regions had lower temperature than impervious cover regions due to their different specific heat capacity and energy assignment. And only the cooling effect of evapotranspiration could make the air temperature of vegetation cover regions  $2.63^\circ\text{C}$  lower than impervious cover regions in theory.

**Key words:** energy balance; urban underlying; LUMPS; evapotranspiration; Beijing