

城市地表热通量遥感反演及与下垫面关系分析

刘 越^{1,2}, Shintaro Goto³, 庄大方¹, 匡文慧¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. Risscho University, Saitama 3600194, Japan)

摘要: 选择日本埼玉县熊谷市为研究区, 应用ASTER热红外遥感图像, 采用PCACA模型以及理论定位算法, 对城市地表热通量的相关参数进行反演, 进而分析城市下垫面不同土地覆盖类型对地表热通量以及能量平衡的影响。结果表明, PCACA模型应用于城市区域地表通量估算是可行的。这种算法可以大大减少在下垫面结构复杂的城市区域进行地表热通量估算时所需的参数, 并有效降低研究结果的不确定性。研究发现, 城乡不同下垫面地表覆盖类型对地表热通量的影响差异显著。不同地表下垫面类型的波文比由大到小顺序依次为: 工业用地 > 住宅用地 > 交通过地 > 公共设施用地 > 旱田 > 公共绿地 > 水域。在相同的外部气象条件下, 与城市周边的植被覆盖区相比, 城市人工建筑用地具有较高的显热通量, 较低的潜热通量, 以及较高的波文比。由于城市地表显热通量和波文比明显高于周边植被覆盖地表, 导致城市地表向低层大气供热的增加, 这是城市热岛效应形成的重要机制之一。

关键词: 地表通量; 显热; 潜热; 城市土地覆盖; 遥感; 日本熊谷市

1 引言

土地利用/土地覆盖变化 (LUCC) 是全球环境变化研究的热点问题之一。2005年启动全球土地计划 (Global Land Project, GLP), 强调陆地系统中人类—环境耦合系统的综合集成与模拟研究, 以人类—环境耦合系统为核心的土地利用/土地覆盖动态过程的监测、理解与模拟逐渐成为研究关注的焦点问题, 并成为新兴领域土地变化科学 (Land Change Science, LCS) 研究的新动向^[1-4]。在局地、区域以及全球尺度, 城市高强度的物资消耗与人类活动正改变着地表覆盖状态以及生物多样性与水文系统, 并以累积效应影响全球变化^[5-7]。2005年“全球变化人文因素计划” (International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP) 制定了“城市化与全球环境变化”科学研究计划, 并将其列入全球变化研究的核心项目。该计划强调在局地、区域与全球尺度上的城市化与全球环境变化之间的交互以及后果^[8], 成为当前全球城市生态与环境变化研究的焦点问题^[11-12]。

城市化及其影响下的土地利用/覆盖变化对全球气候变化产生的影响正成为科学家争论的焦点问题^[13-18]。基于观测站点判断, 一种观点认为城市化及其影响下的土地利用/覆盖变化不同程度地对地表增温产生影响^[13-16]; 另一种观点认为大尺度的全球气候增温并非城市化所导致^[17-18]。上述问题的解决还有待于对城市化过程在局地、区域以及全球尺度产生

收稿日期: 2011-11-02; 修订日期: 2011-11-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40901224); 国家“973”计划项目(2010CB950900); 遥感科学国家重点实验室开放基金项目 (2009KFJJ005) [Foundation: The Young Scientist Fund of National Natural Science Foundation of China, No.40901224; National Basic Research Program of China, No.2010CB950900; Opening Fund of State Key Laboratory of Remote Sensing Science, No.2009KFJJ005]

作者简介: 刘越 (1977-), 男, 博士生。主要从事城市生态遥感定量模拟研究工作。E-mail: liuyue@lreis.ac.cn

通讯作者: 匡文慧 (1978-), 男, 博士, 助研。目前主要从事土地利用/覆盖变化、城市生态遥感研究工作。

E-mail: kuangwh1978@sina.com

的地表增温效应的地球物理过程机理的深入研究。因此，准确监测和评估城市化过程对城市热岛强度以及区域地表增温的影响成为当前重要的科学前沿问题^[18-22]。

本研究选择日本埼玉县熊谷市为研究区，该市2007年8月16日创下自日本气温观测以来历史上最高气温观测纪录(最高40.9℃)，这一极端气温的出现倍受科学界的关注^[23]，开展熊谷市城市地表热通量及影响因素研究，对于提高城市热岛效应物理机制的认识具有重要意义。相关学者基于遥感、实地观测或模型等手段对城市热岛强度分布、城市化对气候影响等方面开展了大量的研究^[18-22]。其中，地表热过程的定量遥感模拟是研究地表热量收支的重要手段，广泛应用于植被、土壤等覆盖类型区域地表热通量与水热平衡参数反演。但是，由于城市地表物质能量过程的复杂性，基于热量收支平衡原理对城市热岛强度及其影响因素的研究仍处于起步阶段。

本研究基于物理学热量平衡原理，采用地面观测和ASTER遥感数据分析相结合的方法，应用地表热平衡模型反演研究区地表潜热、显热等热平衡参数。其目的在于进一步分析地表热平衡参数与地表温度以及地表土地利用/覆盖类型之间的关系，进而研究城市热岛效应形成的机制。

2 实验区与数据源

2.1 实验区概况

熊谷市位于日本埼玉县西北部，距离东京市中心约64 km，总面积为160 km²，总人口20万人(图1)。熊谷市气候类型为偏内陆型，冬夏温差显著。1951-2004年期间，平均气温呈逐年上升的趋势，近年来最高气温超过35℃的天数明显增加，而同期空气湿度却呈现降低的倾向。荒川河位于市中心南侧，河流两侧地形平坦。市内有3条铁路东西向横贯全市，并有2条国道分别沿东西向和南北向贯通全市。熊谷市区总面积85.44 km²，市郊水田、旱地与林地分别占全市面积的29.44%、10.44%与0.94%。市区内住宅、商业与工业用地分别占全市面积的20.49%、3.26%与4.73%。而公共设施、道路与公共绿地占市区用地面积的5.02%、10.83%与4.72%。本研究选择熊谷市从城市中心到边缘区东西长7.38 km，南北宽3.28 km的矩形区域作为实验区，总计面积24.26 km²。

2.2 数据源

本研究采用的ASTER(高级星载热发射反照辐射计)遥感影像数据获取时间是2006年8月5日12点30分，空间分辨率为90 m。ASTER是第一台用于温度精确测量的星载高空间分辨率多通道热红外成像仪。其传感器为TIR，由可见光近红外传感器(VNIR: Visible and Near-infrared Radiometer)、短波红外传感器(SWIR: Short Wave Infrared Radiometer)、热红外传感器(TIR: Thermal Infrared Radiometer)构成，从可见光到热红外共分为14个波段。在研究中使用的产品处理等级为2B03，该数据产品由美国NASA提

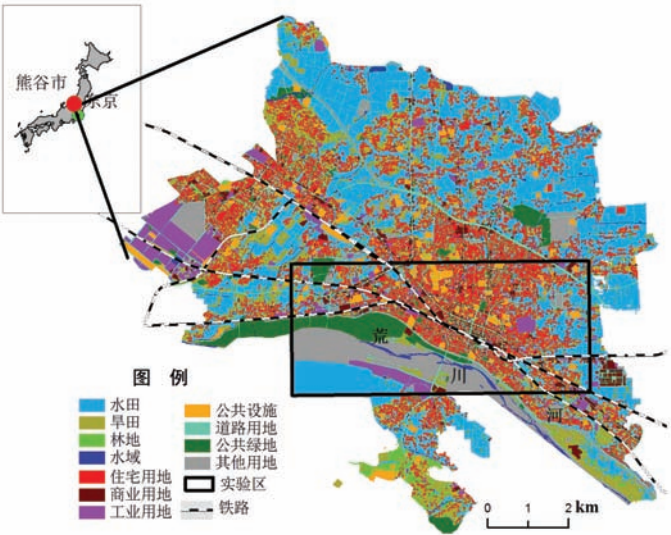


图1 日本熊谷市区实验区与土地利用图(2005年)
Fig. 1 The selected experiment area and land use of Kumagaya city of Japan in 2005

供，是由 ASTER 官方采用温度/比辐射率分离算法 TES (Temperature/Emissivity Separation) 在原始数据经大气校正后生成的地表辐射亮度产品 (2B01T) 的基础上，通过将热红外传感器 (TIR) 观测获得的地表热红外辐射值进行温度与比辐射率的分离处理，反演出的地表温度产品^[24-25]。实验区土地利用数据是日本国土交通省发布的 2005 年 1:1 万土地利用数据现状数据，作者于 2007 年进行了实地调查验证。

3 地表热平衡模型

3.1 地表热平衡模型

近年来，地表热平衡模型的研究取得了较大进展。如由 Bastiaanssen 开发的 SEBAL 模型^[26]，以及在此基础上由 Su 开发的 SEBS 等模型^[27]。SEBAL 模型的一个重要特征是不需要空气温度就可以在模型中建立空气温度与地表辐射温度之间的关系，与 SEBAL 模型相比，SEBS 模型更依赖于非遥感数据。这两个模型主要用于植被覆盖率较高区域的地表热平衡反演，在城市区域内使用存在一定的局限性。Norman 开发的 N95 模型^[28]可以将土壤与植被进行区分后加以计算。张仁华在 N95 模型基础上进行了改良，开发出了 PCACA (Pixel Component Arranging and Comparing Algorithm) 模型^[29]，此模型的重要优点是可以对遥感图像上的所有像元进行逐一计算，反演出地表热通量。其方法是在地表温度与饱和水汽压的倾斜度以及 VFC (Vegetation Fractional Cover) 之间建立关系，计算出波文比值，最后反演出各地表热平衡参数。经模型应用的对比试验发现，与 SEBAL 和 SEBS 模型相比，PCACA 模型具有所需参数较少，数据的获取相对简单，以及计算误差相对较小等优势。

3.2 PCACA 模型

PCACA 模型由张仁华研发^[29-34]，该模型首先对混合像元组分温度进行分解，进而结合干点和湿点定标场的参数测定值，推算到 4 个极端的混合像元真实温度，从而确定在当时气象和生态条件下的梯形框架 (图 2)。并运用分层能量切割算法获取植被蒸腾通量，最终反演出逐像元的波文比值。

该模型最大的特色是能够反演每个像元的植被蒸腾值，运用像元排列对比确认植被蒸腾与冠层温度、植被覆盖率-混合像元地表温度斜率、植被净辐射通量等之间的函数关系。从而可以用每个像元所在斜率线上的温度和绝对干湿线温度构成的波文比去切割净辐射通量。斜率取决于由植被覆盖率变化引起的地表温度变化值。该模型依据遥感获得的红外辐射温度和植被指数作为信息源，摆脱了其他模型需要逐个像元获取通量阻力网参数的难题。

目前许多热通量模型所需阻力网参数过于复杂，即使是在田间尺度上都难以具备操作条件。本研究的目标为下垫面结构复杂的城市区域，如果采用复杂的阻力网计算则需要地表粗糙度、局地风速、大气稳定度、摩擦速度、莫宁-奥布霍夫长度、边界层高等一系列参数。而运用 PCACA 模型，可以免去遥感手段无法获取的地表各种阻力参数，利用波文比切割可利用能量 (净辐射通量减去土壤热通量)，获取显热通量和潜热通量数值。本研究采用 PCACA 模型对显热通量和潜热通量进行了有效的遥感反演。

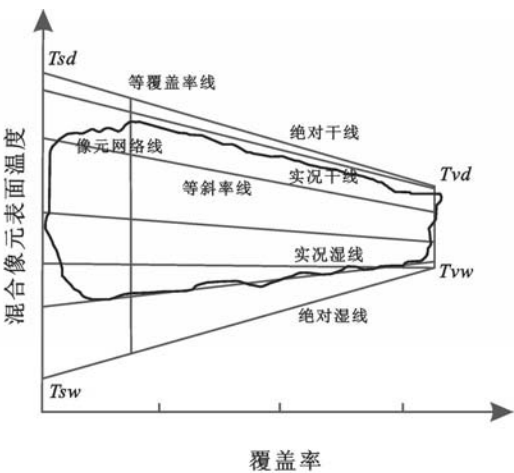


图2 地表能量分割的梯形结构及理论定位
Fig. 2 Trapezia structure and its theory location
of surface energy division

4 基于PCACA模型实现地表热通量参数的遥感反演

4.1 地表能量热量收支平衡原理

根据热量收支平衡原理，陆地表层的能量收支平衡应满足地表能量平衡方程：

$$Rn = H + LE + G \tag{1}$$

式中： Rn 为到达地表的净辐射通量， LE 为潜热通量， H 为显热通量， G 为土壤热通量。

由公式 (1) 可知，如果要从热量收支平衡的角度研究不同城市地表覆盖对城市热岛形成的影响，就必须掌握不同城市地表覆盖类型上述 4 个参数的定量差异，特别是直接影响地表温度的显热通量 H 值的定量差异。

4.2 地表净辐射通量计算方法

地表净辐射通量 Rn 通过地表辐射收支方程进行计算：

$$Rn = (1 - \alpha) \times R_{swd} + \epsilon_a \times R_{lwd} - \epsilon_a \times \sigma \times T_0^4 \tag{2}$$

式中， α 为地表反照率， R_{swd} 为向下短波辐射， R_{lwd} 为向下长波辐射， ϵ_a 为地表下垫面比辐射率， σ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)， T_0 为下垫面表面温度。

公式 (2) 中的各项参数值采用气象观测与遥感数据相结合，通过经验方程计算得到。将各参数计算结果代入公式 (2)，求出图像上逐像元点的净辐射通量 Rn 的值。

其中，向下短波辐射 R_{swd} 和长波辐射 R_{lwd} 的计算应用经验方程^[35-36]。

$$R_{swd} = 10 + 1411 \cos \theta - 310 \sqrt{\cos \theta} \tag{3}$$

$$R_{lwd} = \left(\frac{e_0}{T_0} \right)^{\frac{1}{7}} \tag{4}$$

式中： R_{swd} 为向下短波辐射， R_{lwd} 为向下长波辐射， θ 为太阳天顶角； e_0 为近地表大气水汽压 (hPa)， T_0 为近地表大气温度 (K)。其中，空气温度 T_0 和空气湿度 e_0 采用了熊谷市气象台发布的气象观测数据，计算结果 R_{swd} 为 1083.26 W/m^2 ， R_{lwd} 为 408.13 W/m^2 。

从 ASTER 数据产品反演地表宽波段反照率，采用梁顺林^[37]提出的从窄波段到宽波段反照率转换公式生产地表反照率 (α_{short}) 代替公式 (2) α ，即

$$\begin{aligned} \alpha_{short} = & 0.484\alpha_1 + 0.335\alpha_3 - 0.324\alpha_5 \\ & + 0.551\alpha_6 + 0.305\alpha_8 - 0.367\alpha_9 - 0.0015 \end{aligned} \tag{5}$$

地表比辐射率反演时使用了 ASTER 影像图的 10-14 热红外窄波段发射率产品，根据公式 (6) 计算出宽波段发射率^[37]，并最终生成像元比辐射率 (ϵ_b) 代替公式 (2) ϵ_a 。

$$\begin{aligned} \epsilon_b = & 0.014\epsilon_{10} + 0.145\epsilon_{11} - 0.241\epsilon_{12} + \\ & 0.467\epsilon_{13} + 0.004\epsilon_{14} + 0.0128 \end{aligned} \tag{6}$$

对净辐射通量 Rn 的计算，系通过上述计算得出各项参数值，代入方程式 (2) 中，获得图像上逐像元的净辐射通量 Rn 的值，并生成净辐射通量分布图 (图 3)。

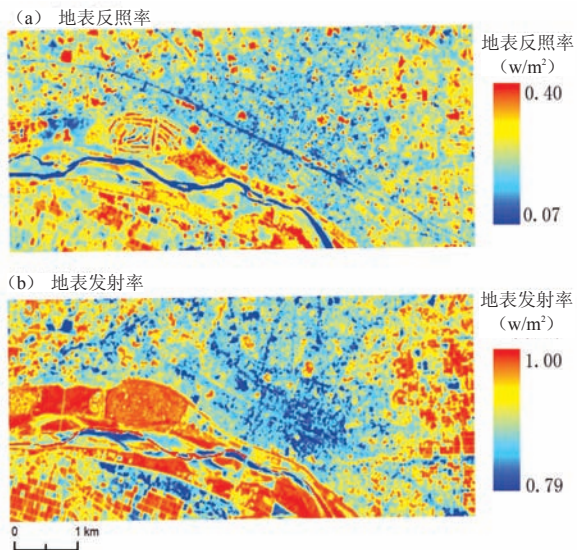


图3 实验区地表反照率和比辐射率空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of surface albedo and radiation ratio of the experiment area

4.3 土壤热通量计算方法

土壤热通量以热扩散系数与垂直方向地温梯度的积来表示。由于遥感卫星无法对地温梯度进行测量,因此使用遥感方法对土壤热通量进行观测难以实现。但是,通过大量野外观测结果的总结,可以获得不同下垫面类型向土壤传导通量所占净辐射通量比例的经验值。

表1 土壤热通量所占净辐射通量的比例 (%)

Tab. 1 The percentage of soil heat flux from net radiance flux (%)

[illegible]

前人研究表明,在干燥的地表面,土壤热通量可以达到净辐射通量的50%。但是在植被覆盖率很高的地区,土壤热通量只占净辐射通量的3-5%^[38]。Kotoda^[38-40]把世界各国学者对不同下垫面的土壤热通量的研究成果进行总结,获得了地下传导能量所占净辐射通量比例的经验值(表1),并得到普遍采用。

将该经验值Cr带入方程式(7)进行计算可以近似的获取土壤热通量值。并最终依据土地利用图或土地覆盖类型图生成土壤热通量分布图。

$$G = Cr \times Rn \quad (7)$$

4.4 地表显热通量、潜热通量以及 Bowen 比计算

根据PCACA模型对在图2中所示的组成梯形结构的关键点、线进行定位。对于梯形图中每个组份混合像元辐射温度而言,其在坐标中的位置实质上是受到热量平衡方程控制的。当地表绝对干燥时,也就是没有土壤水分蒸发,也没有作物蒸腾的极端状态,其热量平衡方程式为^[29]:

$$(1 - Cr)[(1 - \alpha)R_{swd} + \sigma\epsilon_a R_{lwd} - \sigma\epsilon_s T_{AD}^4] = \frac{\rho C_P (T_{SD} - T_a)}{r_{SD,}} \quad (8)$$

式中: C_r 为地下传导能量所占净辐射通量比例的经验值, T_{sd} 为干裸地表面温度, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, T_a 为气温, ρ 为空气密度, C_p 为定压比热, r_{sd2} 为干裸地上空的空气动力学阻力, ε_s 为干裸地表面比辐射率, ε_a 为空气比辐射率, α 为地表反照率。

根据PCACA模型应用公式(9)来确定干裸地(T_{sd})地表温度,进而由图2地表能量分割的梯形结构及理论定位,通过改变各类型的空气动力学阻力以及土壤热通量,计算完全植被覆盖裸地(T_{vd})、湿裸地(T_{sw})、湿植被覆盖(T_{vw})的地表温度。其中,干裸地(T_{sd})地表温度计算公式为^[29]:

$$T_{SD} = \frac{(1 - Cr)[Q_0](1 - \alpha)R_{swd} + \alpha\epsilon_a R_{lwd} + \frac{\rho C_p}{r_{SD2}}}{\frac{\rho C_p}{r_{SD2}} + 4(1 - Cr)\sigma\epsilon_a T_{AD}^3} \quad (9)$$

像元的4个极端地表温度值确定后,干线和湿线中的坐标位置就可以确定。梯形结构中的横轴代表植被覆盖率。植被覆盖率图使用ASTER影像的近红外和可见光波段采用以下公式计算得到的。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (10)$$

通过对公式 (10) 的计算可得到植被覆盖率分布(图4)。

利用上述方程式, 带入研究区实际数据加以计算, 再使用地表温度图与植被覆盖率图就可以得到如下梯形结构(图 5)。

通过计算散点图上每个像元点距离干边和湿边的位置,对可利用能量(地表净辐射通

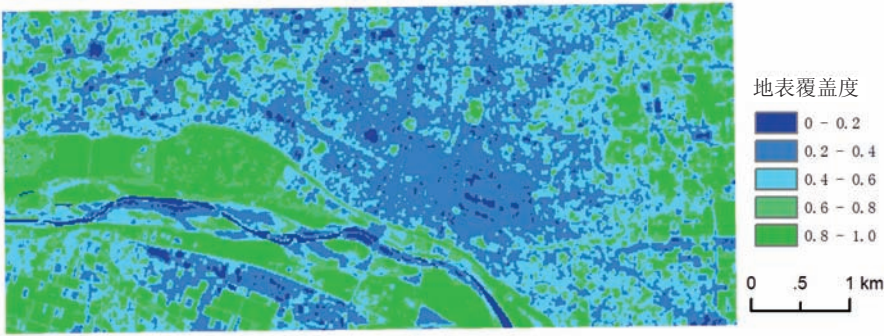


图4 实验区植被覆盖度空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of vegetation cover degree of the experiment area

量—土壤热通量) 进行切割, 在同样覆盖度条件下, 像元离干边越近则表示显热通量越大, 离湿边越近表示潜热通量越大。最终, 通过对以下表达式的计算可获得显热通量与可利用能量之比, 即显热比的分布图。

$$HF = (wet \Rightarrow dry - pix \Rightarrow dry); \quad (11)$$
$$(wet \Rightarrow dry) = H(Rn - G)$$

式中, HF 为显热比, $wet \Rightarrow dry$ 为湿边到干边的距离, $pix \Rightarrow dry$ 为像元点到干边的距离。

同理, 使用以下方程我们也可以获得潜热通量与可利用能量之比。

$$EF = (wet \Rightarrow dry - pix \Rightarrow wet)(wet \Rightarrow dry); \quad (12)$$

式中, EF 为潜热通量与可利用能量之比, $pix \Rightarrow wet$ 为像元点到湿边的距离。

根据公式 (11) 和 (12) 得到了显热比与潜热比, 由引入波文比公式 $\beta = H/LE$ 可知, 波文比 β 也可以表述为 HF 与 EF 之比, 通过计算可以得到波文比分布图。

通过利用上述计算获得了逐像元的波文比值, 进而可以对显热通量加以计算。并得到显热通量分布图。

$$H = \frac{\beta(Rn - G)}{(\beta + 1)} \quad (13)$$

根据前面的计算, 得到了显热通量, 净辐射通量以及土壤热通量。最后, 利用余项法, 通过公式 (13) 的计算, 可以获得潜热通量。

5 城市地表覆盖类型与地表热通量的关系分析

应用PCACA模型, 基于ASTER遥感影像反演日本熊谷实验区 90 m 空间分辨率地表净辐射通量、土壤热通量、地表潜热与显热通量空间分布图 (图6)。

由图7分析表明, 实验区地表净辐射通量平均值为 740 W/m², 统计频率呈现正态分布, 主要集中于 670~800W/m²。位于城市边缘区的水田具有相对较高的地表净辐射通量,

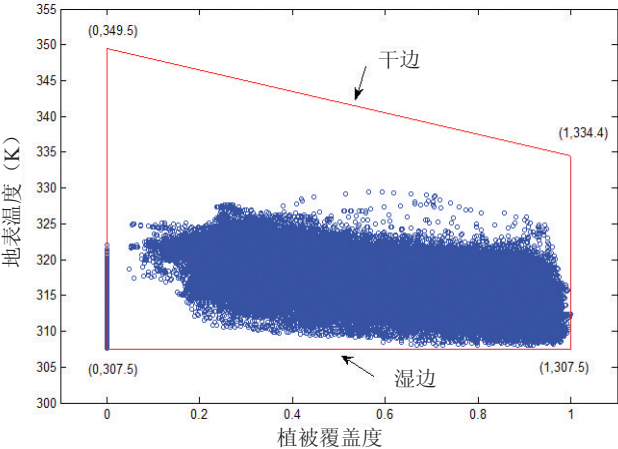


图5 实验区植被覆盖度与地表面温度相关梯形结构
Fig. 5 Trapezia structure of relativity on vegetation coverage and surface temperature of the experiment area

而城市内部居住等用地类型地表净辐射相对较低。

实验区显热通量平均值为 211.13 W/m^2 ，主要分布区间为 $145\sim300\text{ W/m}^2$ 。显热通量值较大的土地利用类型主要分布在住宅用地、商业用地、工业用地、公共设施用地和道路用地，其H值分别是 250 W/m^2 、 238 W/m^2 、 240 W/m^2 、 244 W/m^2 和 244 W/m^2 。

潜热通量平均值为 385.15 W/m^2 ，主要分布区间为 $250\sim580\text{ W/m}^2$ 。潜热通量值较大的土地利用类型主要分布在水田、水域和公共绿地，其LE值分别是 488 W/m^2 、 455 W/m^2 和 504 W/m^2 。而人工建筑用地的潜热通量值则偏低。

从熊谷市实验区城乡各通量分量分布情况可知，地表不同下垫面用地类型对地表净辐射、地表潜热、显热、土壤热通量影响较大，城乡差异显著。由于下垫面净辐射由太阳总辐射、地表反射率、大气逆辐射和地面长波辐射决定。城市人工建筑用地与乡村地表自然覆盖状态相比，短波辐射与长波辐射收入差异不大，城市人工建筑用地具有较高的反射率与地面发射率。因此城市地区具有相对低的净辐射通量，特别是工业区地表净辐射最低，而城市周边绿地覆盖、水域、水田等具有相对高的净辐射通量。同时，城市与乡村在地表能量分配方面具有较大的差异，在城市高密度人工建筑区，不透水地面大量增加，导致用于蒸发的潜热通量变小；而城市边缘区高植被覆盖区具有较高的潜热通量。

波文比即地表显热与潜热通量之比，是刻画与表征城市、乡村不同下垫面地表热量收支与分配的重要指标。由实验区不同土地利用类型的波文比值可以看出（图8），工业用地、住宅用地、商业用地、交通用地和公共设施用地，在遥感图像获取时间的波文比值分别为1.30、0.82、0.80、0.77和0.76；而水田、水域、公共绿地和旱田分别为0.16、0.22、0.31和0.61。对应于图9和图10，人工建筑地表总体上显热通量大于潜热通量；半人工和绿地覆盖的土地利用类型波文比相对于人工建筑用地明显较小，在热通量空间分布图中呈现出低显热通量与高潜热通量的特征；水域和水田的波文比在所有土地利用类型中最小，其范围分别为0.1~0.31和0.09~0.22。

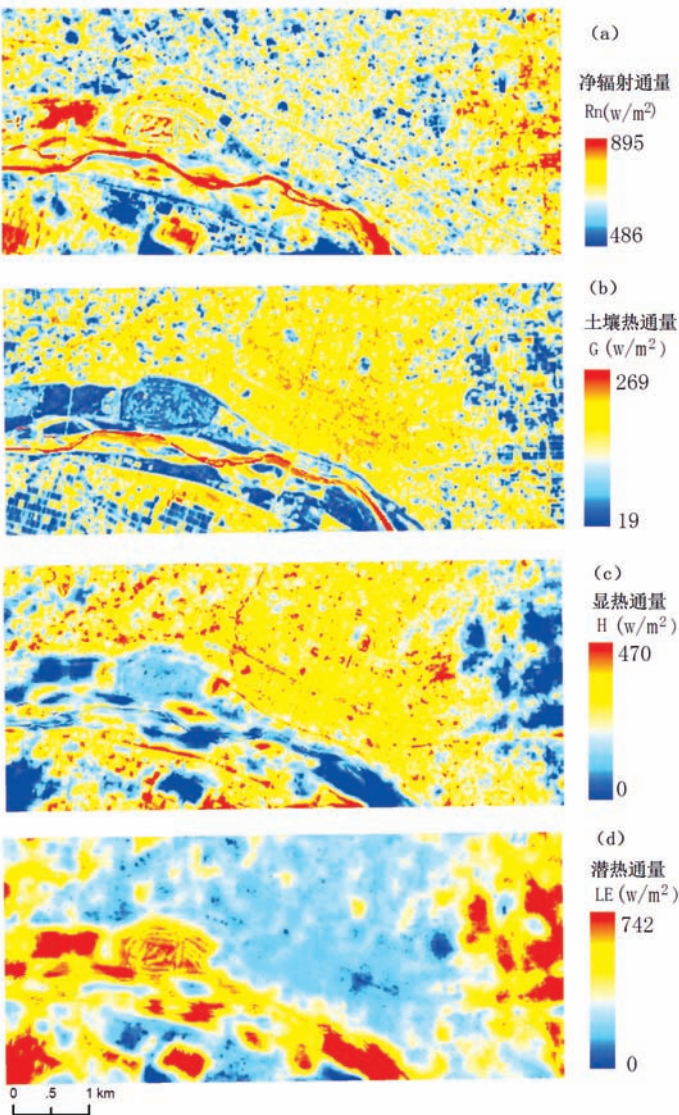


图6 实验区地表与土壤热通量空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of surface and soil heat flux of the experiment area

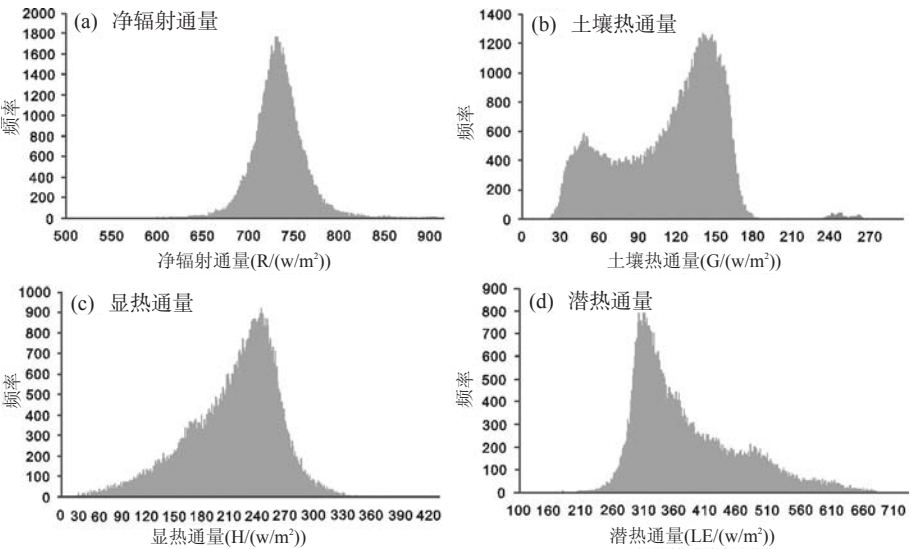


图 7 地表热通量分布直方图

Fig. 7 The histogram of surface energy flux distribution

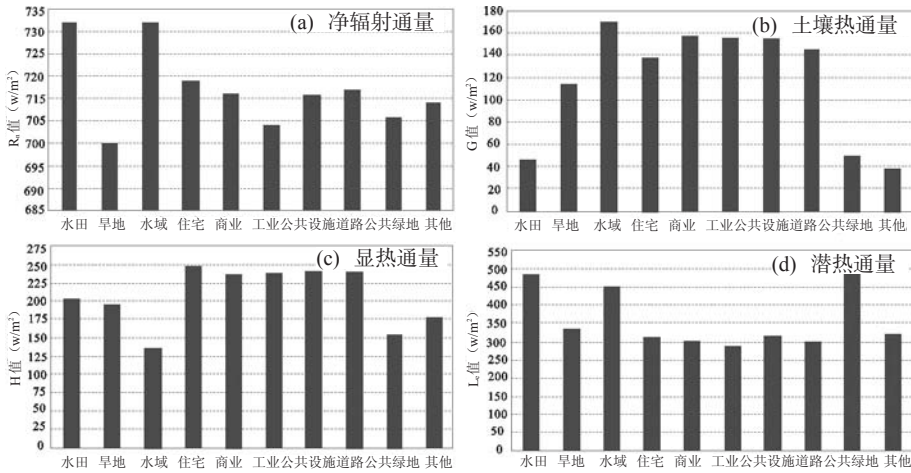


图 8 土地利用类型地表热通量柱状图

Fig. 8 The histogram of surface flux from different land use types

分析结果表明，城市市区人工建筑地表波文比明显高于城市边缘区其他土地利用类型。其中，出现极高波文比的用地类型为工业用地，其波文比为1.63；出现极低波文比的用地类型为水域，其波文比为0.006。人工建筑用地显热相对大于潜热。与人工建筑用地相反，半人工、绿地覆盖潜热相对大于显热。而由于植被覆盖率高，加大了地表水分蒸散量，潜热通量增加，下垫面向低层大气供热传输的辐射通量随之减小。

6 地表热通量遥感反演结果的比较分析

由于城市特殊的下垫面以及复杂的局地气候，城市地表通量在不同时刻、不同地点发生着变化。实验观测时段2006年8月5日白天中午12:30为东南风到南风，风速介于2.2~2.9 m/s(表2)，研究发现，中央公园、高尔夫球场等绿地波文比在其位置的西北一侧出现极低值，这与大气水平平流有关。由于遥感观测的每个90 m像元内除包括房屋建筑外，还包括部分面积的绿地，导致地表蒸散发消耗的潜热较大，所以城市内部的混合像元波文

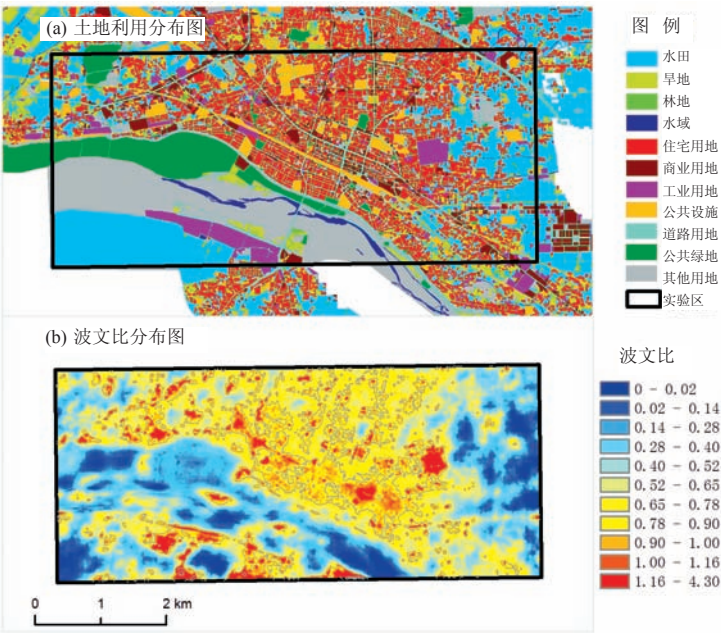


图 9 实验区土地利用图与波文比对应空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution of land use and its Bowen ratio of the experiment area

比会小于 1。Oke 等学者研究城市、近郊区波文比值分别为 0.5~(> 4.0) 和 0.25~2.5^[41]，说明在统一的外在气象气候条件下，城乡不同下垫面波文比存在着显著的规律性与区域差异。这印证了本实验反演的地表各通量数据在空间分布格局上是合理的，符合遥感图像获取时的实际情况。

将本研究成果与前人研究日本城市实地观测与模拟结果进行比较(表 3)，表明本研所得结果中水田的显热比和潜热比平均值与近藤纯正 2000 年观测的水体表面结果比较接近^[42]，而城市区域的显热比平均值较其它研究的结果略低，潜热比则略高，呈现出更接近于裸地水平的状况。这与熊谷市城市规模较小，与基督城、名古屋、千叶等城市相比市内人工不透水地面比例较小有关。

将本研究结果与中国城市热通量观测数据进行了比较。王修信等人在北京海淀公园应用涡度相关法观测城市公园地表热通量，表明在初夏晴朗白

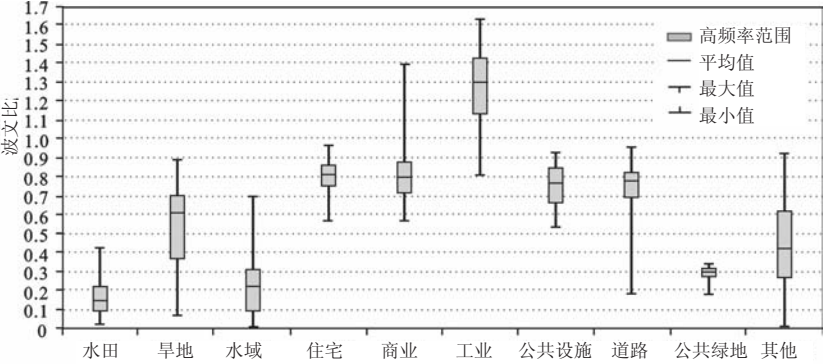


表 2 实验观测时期气象状况

Tab. 2 Weather conditions of the experiment measure period

时刻	气温 (°C)	水气压 (hPa)	湿度 (%)	风速 (m/s)	风向
9:00	30.3	28.9	67	1.4	东北
10:00	31.8	28.6	61	1.8	东
11:00	33.8	26.3	50	2.4	东北
12:00	35.4	27.1	47	2.2	东南
13:00	36.1	25	42	2.9	南
14:00	36.3	23.5	39	2.5	东南
15:00	37	25.2	43	3.1	东南
16:00	35.9	24.9	42	3.5	东南

天, 公园范围的潜热大于显热, 折算波文比值约0.5^[43], 略高于本研究城市绿地波文比平均值0.3, 这表明在同类土地覆盖条件下本文反演的基本结论, 即夏季晴空白天城市绿地潜热通量明显大于显热通量, 与观测值在趋势上一致。

7 结论与讨论

(1) 本研究将PCACA模型应用于城市区域的地表热通量遥感反演, 并通过反演结果与已有文献的对比分析, 证明本文所获结果基本趋势合理, 并说明PCACA模型应用于城市区域地表热通量估算是可行的。这种算法可以减少在下垫面结构复杂的城市区域进行地表热通量估算时所需的输入参数, 提高了城市区域地表热通量的空间分布反演计算的可操作性。

(2) 对本研究遥感反演结果与地表土地利用/覆盖状况进行叠置分析表明, 城市下垫面不同地表覆盖对地表热量分配与能量平衡产生重要影响。城市人工建筑用地具有较高的显热通量和较低的潜热通量, 以及较大的波文比; 而城市边缘区的农田具有较低的显热通量和较高的潜热通量, 以及较小的波文比。

(3) 由于城市扩展引起的人工建筑硬化不透水地表的增加, 可显著加大城市地表显热通量, 从而引起城市气温的升高, 这是城市热岛效应形成的重要机制之一。

(4) 由于实时地面观测验证的条件所限, 本研究依据他人研究成果对本研究成果的数据准确性进行了比较分析。该方法正应用在北京城市开展不同下垫面类型涡度相关通量观测系统与多尺度遥感的同步观测, 研究城市不同下垫面地表热通量多尺度特征及其机理。

致谢: 感谢张仁华研究员在遥感模型方面给予的指导, 感谢李全峰、迟文峰同学在分析结果制图中给予的帮助。

参考文献 (References)

[1] IGBP Secretariat. GLP science plan and implementation strategy. Stockholm, IGBP Report No.53/IHDP Report No.2005, 2005.

[2] McMahon G, Benjamin S P, Clarke K et al. Geography for a changing world: A science strategy for the geographic research of the U.S. Geological Survey, 2005-2015, Sioux Falls, SD: U.S. Geological Survey Circular, 2005, 1281: 1-76.

[3] Rindfuss R, Walsh S, Turner B L et al. Developing a science of land change: Challenges and methodological issues. PNAS, 2004, 101: 13976-13981.

[4] Foley A. Global consequences of land-use. Science, 2005, 309: 570-574.

[5] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E et al. Global change and the ecology of cities. Science, 2008, 319: 756-760.

[6] Alberti M. Advances in urban ecology integrating humans and ecological processes in urban ecosystems. New York: Springer science + business media, 2009.

[7] Pickett S A, Cadenasso M L, Grove J M et al. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress. Journal of Environment Management, 2011, 92: 331-362.

[8] IHDP. Urbanize and global environment change. Germany: International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, 2005.

[9] Bierwagen B G, heobald D T, Pyke C R et al. National housing and impervious surface scenarios for integrated climate impact assessments. PNAS, 2010, 10: 1073-1078.

[10] Parrish D, Zhu Tong. Clean air for megacities. Science, 2009, 326(30): 674-675.

[11] Batty. The size, scale, and shape of cities. Science, 2008, 319: 769-771.

[12] Agardy T, Alder J, Dayton P. Ecosystems and human well-being: Coastal systems. MA, 2003: 513-549.

表3 本文结果与参考文献值的对比^[39]
Tab. 3 Comparison with this results and relevant value from the literatures

对比资料来源	地表覆盖类型	季相	H/Rn	LE/Rn
Spronken-Smith (2002)	城市 (基督城)	夏晴	0.46	0.22
近藤纯正 (1994)	城市 (千叶市)	夏晴	0.45	0.28
	裸地 (筑波市)	初夏晴	0.34	0.35
	裸地 (千叶市)	夏晴	0.26	0.42
本文 (2006)	城市 (熊谷市)	夏晴	0.33	0.43

- [13] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528-531.
- [14] Russell S V, Thomas R K, David R E et al. Impact of land-use change on climate. *Nature*, 2004, 427: 213-214.
- [15] Hansen J E. A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 23947-23963.
- [16] Gallo K P, Owen T W, Easterling D R et al. Temperature trends of the US historical climatology network based on satellite-designated land use/land cover. *Journal of Climate*, 1999, 12(5): 1344-1348.
- [17] David E P. Large-scale warming is not urban. *Nature*, 2004, 432: 290-290.
- [18] Thomas C P. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *Journal of Climate*, 2004, 16(18): 2941-2959.
- [19] He J F, Liu J Y, Zhang D F et al. Assessing the effect of land use/land cover change on the change of urban heat island intensity. *Theoretical and Applied Climatology*, 2007, 90: 217-226.
- [20] Oke T. The surface energy budgets of urban areas//Hosker P R. *Modeling the Urban Boundary Layer*. Boston: AMS, 1987.
- [21] Lu D S, Weng Q. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 157-167.
- [22] Shao Quanqin, Sun Chaoyang, Liu Jiyan et al. Impact of urban expansion on meteorological observation data and overestimation to regional air temperature in China. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1292-1302. [邵全琴, 孙朝阳, 刘纪远 等. 中国城市扩展对气温观测的影响及其高估程度. *地理学报*, 2009, 64(11): 1292-1302.]
- [23] Watarai Y, Nakagawa K, Fukuoka Y. Numerical simulation of the intense heat over the central Kanto plain in 15-16 August 2007, using the regional meteorological model. *Japanese Journal of Biometeorology*, 2009, 46(1): 35-41.
- [24] Gillespie A R, Rokugawa S. Temperature/Emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4 [M/OL]. Prepared under NASA Contract NAS5-31372, 1999. <http://eosps.gsfc.nasa.gov/eos-homepage/for-scientists/atbd/docs/ASTER>.
- [25] Li Haitao, Tian Qingjiu. An introduction to ASTER data and ASTER mission. *Remote Sensing Information*, 2004, (3): 53-56. [李海涛, 田庆久. ASTER 数据产品的特性及其计划介绍. *遥感信息*, 2004, (3): 53-56.]
- [26] Bastiaanssen W G M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. The Netherlands, Wageningen: Agr Res Dept, 1995, Report 109.
- [27] Su Z. The surface energy system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85-99.
- [28] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77: 263-293.
- [29] Zhang Renhua. *Quantity Infrared Remote Sensing Model and the Ground Experiment Base*. Beijing: Science Press, 2009. [张仁华. 定量热红外遥感模型及地面实验基础. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [30] Zhang R H. An operational two-layer remote sensing model to estimate surface flux in regional scale: Physical background. *Science in China: Series D*, 2005, 48(Suppl.1): 225-244.
- [31] Zhang Renhua. Thermal inertia of soil moisture model and its application. *Chinese Science Bulletin*, 1991, (12): 924-927. [张仁华. 土壤含水量的热惯量模型及其应用. *科学通报*, 1991, (12): 924-927.]
- [32] Zhang Renhua, Li Zhaoliang, Sun Xiaomin et al. On the applicability of Kirchoff's law and the principle of heat balance in thermal infrared remote sensing: A non-isothermal system. *Science in China: Series D*, 2004, 34(4): 350-358. [张仁华, 李召良, 孙晓敏 等. 非同温系统中基尔霍夫定律的适用性和热量平衡原理. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(4): 350-358.]
- [33] Zhang R H, Sun X M, Zhu Z L et al. A remote sensing model for monitoring soil evaporation based on differential thermal inertia and its validation. *Science in China: Series D*, 2003, 46(4): 342-355.
- [34] Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Yuan Guofu et al. Calibration method of eddy covariance flux in heterogeneous surface conditions and their application in ChinaFLUX. *Science in China: Series D*, 2004, 34 (Suppl. II): 37-45. [朱志林, 孙晓敏, 袁国富 等. 非平坦下垫面涡度相关通量的校正方法及其在 ChinaFLUX 中的应用. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 37-45.]
- [35] Anderson M C, Norman J M, Diak G R et al. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60: 195-216.
- [36] Niemela S. Comparison of surface radiative flux parameterizations (Part I): Longwave radiation. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 1-8.
- [37] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76: 213-238.
- [38] Kotoda K. Estimation of river basin évapotranspiration. *Univ. Tsukuba, Environ Res (Center Papers)*, 1986.
- [39] Kotoda K, Sakura Y, Hayashi Y et al. On the observation and data acquisition system for the heat and water balance studies of ERC experimental field. *Bull. Environ. Res. Cent. Univ. Tsukuba*, 1978, 2: 65-89.
- [40] Kotoda K. A simple method to estimate total solar radiation on a slope surface considering direct and diffuse

components. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1986, 42: 249-259.

- [41] Oke T R, Fuggle R F. Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology*, 1972, 2: 290-308.
- [42] Kondo J. *Atmospheric Science near the Ground Surface*. Tokyo: University of Tokyo Press, 2000.
- [43] Wang Xiuxin, Zhu Qijiang, Chen Shenghai et al. Analysis of water, heat and CO₂ fluxes on urban green space. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3232-3239. [王修信, 朱启疆, 陈声海 等. 城市公园绿地水、热与 CO₂ 通量观测与分析. *生态学报*, 2007, 27(8): 3232-3239.]

Urban Surface Heat Flux Inversion Based on Infrared Remote Sensing and the Relationship with Land Cover

LIU Yue^{1,2}, Shintaro Goto³, ZHUANG Dafang¹, KUANG Wenhui¹

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Rissho University, Saitama 3600194, Japan)*

Abstract: This study extracted urban surface heat flux parameters based on PCACA model using ASTER infrared remote sensing image, and then analyzed the impacts on urban surface heat flux and energy balance from different land cover types in the experimental area of Kumagaya City, Saitama Prefecture of Japan. The results indicate that this method on application PCACA model to estimate surface flux in urban areas is feasible. This algorithm can greatly reduce the complexity of the underlying surface structure of the urban areas of surface heat flux estimates, and decrease the uncertainty of the results. The study found that urban and rural areas of different land cover types on the surface heat flux were significantly different. According to urban land use and cover types, Bowen ratio is industrial, residential, traffic, establishment, dry field, public green and water body in a descending order. In the same weather conditions, surrounding vegetation and urban areas compared to urban land has a high sensible heat flux, the lower the latent heat flux, and the higher Bowen ratio. The urban surface sensible heat flux and Bowen ratio was significantly higher than that of the surrounding vegetation surface, leading to urban surface heating of the lower atmosphere. This is an important mechanism for the formation of urban heat island effect.

Key words: surface flux; sensible heat; latent heat; urban land cover; remote sensing; Kumagaya city of Japan