

# 应用 MODIS 资料对城乡地表热通量的估算

王桂玲<sup>1</sup> 蒋维楣<sup>2</sup> 魏鸣<sup>3</sup> 金赛花<sup>1</sup>

## 摘要

为了揭示城市热岛形成机制,基于 MODIS 资料,结合自动气象站实测的气象资料,利用地表能量参数化方法估算了地表热通量,分析了城乡地表热通量的空间分布及变化特征.结果表明城乡地气热交换差异明显,与相关文献对比证明该方法是可行、有效的.

## 关键词

卫星遥感; MODIS; 地表热通量; 单源模式; 城乡地表

中图分类号 P426.2

文献标志码 A

## 0 引言

地表热通量是指地表与大气之间的感热和潜热交换,这种交换过程发生在近地面附近,是表征下垫面强迫及其与大气相互作用的重要参数.地表热通量与地表温度、土壤湿度及植被状况之间关系最为直接也较为复杂.许多研究者研究地表辐射、湍流传输以确定对地表温度影响,虽然方法多种但在原理上都遵循地表能量平衡.由于城市地表呈现尺度小、类型多的特点,各类地表又有其各自的地表过程,它们的辐射、热力及水汽分布特性各不相同,这就使得城市地区的观测和模式的研究都很困难.目前卫星遥感技术不仅能有效地探测到城市下垫面的温度特征,而且还能获取地表反照率及植被指数等地表特征,是研究城市热力环境的有效手段,因此得到了越来越广泛地应用<sup>[1]</sup>.

由于卫星资料仅反映地表这一层,而热通量的计算需要近地层中两层温度、湿度及风速的资料,为了解决这一矛盾许多学者进行了大量研究<sup>[2-4]</sup>.利用卫星资料对地表热通量的估算通常依据对地表辐射温度处理的不同分为单源模式和双源模式.尽管双源模式物理意义比较合理,但公式中经验系数较多且难以确定,导致误差较大. SEBAL (Surface Energy Balance) 是基于卫星遥感测量的一种较新的地表热通量参数化方法,是在 Brutsaert 等<sup>[2]</sup>提出的单源模式基础上发展而来的,该方法相对简单,计算中除了风速、气温外不需要其他资料,一直被人们广泛应用并获得了较好的结果<sup>[5-7]</sup>.

本文利用南京地区 2004 年 4 月的 MODIS 地表资料和地面自动站实测气象资料,利用 SEBAL 参数化方法估算了地表热通量,并分析了城乡地表热通量的差异.

## 1 研究区域及资料概况

以南京为中心的 83 km × 83 km 作为研究区域,其经纬度范围为 118.36 ~ 119.24°E, 31.63 ~ 32.37°N,包括南京城区及其周边地区.该区域内有多种地表覆盖类型:城市、林地、作物以及水域等.图 1 是研究区域 2004 年 MODIS 地表覆盖类型,从图 1 上可以分辨出穿越南京城区的长江以及玄武湖、紫金山和绿色林地.

卫星遥感对于地表特征分析具有很大的潜在功能.本文利用了研究区域内的 MODIS 资料,所用的卫星遥感资料列于表 1,ESDT 表

收稿日期 2011-11-19

资助项目 解放军理工大学气象学院基础理论研究基金项目;国家自然科学基金(40333027)

作者简介

王桂玲,女,博士,研究方向为城市气候与卫星遥感应用. wanggling@sohu.com

1 解放军理工大学 气象学院,南京,211101

2 南京大学 大气科学学院,南京,210093

3 南京信息工程大学 中美合作遥感中心,南京,210044

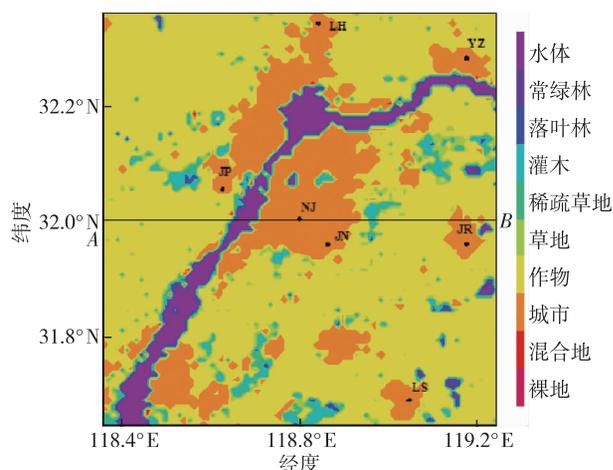


图1 2004年MODIS地表类型及自动站位置

Fig. 1 Land cover classification from MODIS in 2004 and locations of automatic weather station

示地球科学资料类型的简写,DOY表示一年中的第几日.根据MODIS资料对南京地区的地表反照率和其他地表特征资料的估算详见文献[8-9].

表1 选用的2004年MODIS产品及其时空分辨率

Table 1 Selected MODIS products and their spatial and temporal resolutions

资料类型 (ESDT)	产品名称	时间分辨率/d	日期序号 (DOY)	空间分辨率/km
MOD11A2	地表温度	8	089,097,105,113,121	1
MOD13A2	植被指数	16	081,097,113	1
MOD43B1	反照率	16	081,097,113	1

本文利用了7个自动站AWS(Automatic Weather Station)地面气象观测资料,各个站点在研究区域中相应的位置如图1所示,气象资料包括逐时气温、气压、湿度、风速及地温资料及南京站点常规地面辐射观测资料.

## 2 参数化模式

地气系统主要驱动力是辐射强迫,地表热通量的确定对于理解地气能量交换过程有着重要的作用.地表能量来源是净辐射,地表能量(单位:  $W \cdot m^{-2}$ )平衡方程如下:

$$R_n = H + L_E + G.$$

其中,  $R_n$  为地表净辐射,  $H$  为感热通量,  $L_E$  为潜热通量,  $G$  为土壤热通量.

### 2.1 净辐射通量 $R_n$

净辐射通量为地表吸收的太阳短波辐射和地面

有效辐射之和,Eymard等<sup>[10]</sup>评估了由卫星资料估算辐射通量的方法,其误差约为  $25 \sim 50 W \cdot m^{-2}$ ,导致误差的主要原因是  $1 km$  尺度的地表反照率和比辐射率的不确定性.城市区域内实测的辐射通量和反照率的空间分布是非常稀少的,而卫星技术能有效地提供城市区域辐射通量和反照率.本文利用装载MODIS的Terra卫星过境时(即上午11点)的全波段反照率和地表温度及植被指数资料计算净辐射通量,方法如下:

$$R_n = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow = (1 - \alpha) \tau K_{sum} \downarrow - \sigma \epsilon_0 T_s^4 + L \downarrow.$$

$K, L$  分别表示地表短波辐射通量和长波辐射通量,符号  $\uparrow, \downarrow$  分别表示由地表向上传输和来自上方的向下到达地表的物理量,  $K_{sum}$  为大气上界处的太阳辐射(单位:  $W \cdot m^{-2}$ ),  $\tau$  为大气透射率,本研究中利用的卫星资料大多数依据晴天资料合成,因此  $\tau$  取常数为 0.80.  $\alpha$  为地表反照率,并直接利用文献[11]结果,  $\epsilon_0$  为地表比辐射率<sup>[12]</sup>,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $L \downarrow$  为向下的长波辐射通量(单位:  $W \cdot m^{-2}$ ),它主要取决于地面气温和可降水量<sup>[5]</sup>.

### 2.2 感热通量 $H$

SEBAL单源模式中假定植被均匀地分布在土壤上,将地表作为单源或一层来处理,在模式中并不区分植被冠层和土壤地表之间的温度、水汽及能量平衡差异,广泛用于能量平衡遥感模式框架,用于估算地表能量平衡中的感热通量项  $H$ .在计算中卫星观测到的地表辐射温度  $T_r$  等于空气动力学温度  $T_{aero}$ ,也等于地表温度  $T_s$ ,即  $T_{aero} = T_r = T_s$ ,感热通量项  $H$  则按下式求算<sup>[6]</sup>:

$$H = \frac{\rho C_p (T_{aero} - T_a)}{r_{ah}}.$$

$T_{aero}$  为参考高度的空气温度(K),  $\rho, C_p$  分别为空气密度 ( $kg \cdot m^{-3}$ ) 和大气定压比热 ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $H$  为参考高度处的感热通量 ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $r_{ah}$  为大气对热量输送的阻抗系数 ( $s \cdot m^{-1}$ ),它与近地层湍流状况有关,表征了大气对感热输送能力.

大气对热量输送的阻抗系数  $r_{ah}$  可由以下表达式求得:

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u} \left[ \ln \left( \frac{z - d_0}{z_{0m}} \right) - \psi_m \right] \times \left[ \ln \left( \frac{z - d_0}{z_{0m}} \right) + kB^{-1} - \psi_h \right],$$

则

$$H = \rho C_p k^2 u_h \frac{T_s - T_{aero}}{\left[ \ln \frac{z - d_0}{z_{0m}} + kB^{-1} - \psi_h \right] \cdot \left[ \ln \frac{z - d_0}{z_{0m}} - \psi_h \right]},$$

$$kB^{-1} = \ln \frac{z_{0m}}{z_{0h}},$$

其中  $u_h$  为冠层参考高度的风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\psi_m$ 、 $\psi_h$  分别是热量、动量的总体稳定度函数,  $d_0$  为零平面位移,  $k$  为 Karman 常数.

地表类型若不是城市建筑的地表, 其动力学粗糙度  $z_{0m}$  可根据遥感卫星资料得出, 本文利用由反射率确定粗糙度的方法<sup>[5]</sup>:

$$z_{0m} = \exp(-5.809 + 5.62I_{\text{SAV}}).$$

$I_{\text{SAV}}$  为土壤调整植被指数 (soil-adjusted vegetation index):

$$I_{\text{SAV}} = \frac{a_{\text{nir}} - a_{\text{vis}}}{a_{\text{nir}} + a_{\text{vis}} + L}(1 + L),$$

$L$  为土壤调整因子且  $L=0.5$ .

地表类型若是城市建筑地表, 其动力学粗糙度  $z_{0m}$  则由下式确定<sup>[11]</sup>:

$$z_{0m}/h_0 = 0.4\lambda, \quad \lambda \leq 0.5;$$

$$z_{0m}/h_0 = 0.4(1 - \lambda), \quad \lambda > 0.5.$$

$\lambda$  为建筑物的密度,  $h_0$  为建筑物的平均高度. 文中城市建筑物平均高度取 15 m, 建筑物的密度取为 0.25.

### 2.3 土壤热通量 $G$

土壤热通量是用于加热或冷却地表以下层土壤的热量, 主要由土壤热传导率和土壤温度梯度决定, 它并不能直接由遥感测得. 对于单源模式, 土壤热通量  $G$  可认为与到达地表净辐射成正比, 其比例系数可由遥感获得的植被特征估算得出<sup>[13]</sup>:

$$G = \Gamma R_n = \frac{T_s - 273.15}{\alpha} (0.32\alpha + 0.62\alpha^2) (1 - 0.978I_{\text{NDV}}^2) R_n.$$

$T_s$ ,  $\alpha$ ,  $R_n$  意义同上, 因为标准化差值植被指数 (NDVI) 对太阳位置敏感及随土壤反射率因子而变, 所以利用以下方程以减少 NDVI 误差<sup>[5]</sup>:

$$G = \Gamma R_n = \frac{T_s - 273.15}{\alpha} (0.00028 + 0.0050\alpha + 0.00875\alpha^2) (1 - 0.978I_{\text{MSAV}}^2) R_n.$$

$I_{\text{MSAV}}$  为修正的土壤调整植被指数, 是由 Huete<sup>[14]</sup> 提出以减小土壤背景影响的.

$$I_{\text{MSAV}} = \frac{2\alpha_{\text{nir}} + 1 - \sqrt{(2\alpha_{\text{nir}} + 1)^2 - 8(\alpha_{\text{nir}} - \alpha_{\text{vis}})}}{2},$$

$\alpha_{\text{vis}}$ ,  $\alpha_{\text{nir}}$  分别为可见光和近红外波段的地表反照率, 并直接利用文献<sup>[11]</sup>结果.

### 2.4 潜热通量 $L_E$ 及波恩比 $r_B$

利用剩余项法可以求取潜热能量及波恩比:

$$L_E = R_n - H - G,$$

$$r_B = H/L_E.$$

## 3 结果分析

图 2 为 2004 年 4 月月平均净辐射通量分布. 比较城乡之间净辐射可以发现, 城乡差异并不明显. White 等<sup>[15]</sup> 的实测资料结果也得出了同样的结论, 即城市与郊区的净辐射差异较小. 由于水面的反照率最小, 所以其净辐射最大, 在图 2 中表现为高值区. 图 3 表示感热通量、潜热通量、土壤热通量和波恩比的计算结果. 感热通量表示地表与大气进行热量传递的特征量, 反映了大气湍流热交换的状况, 而潜热通量主要受地表水汽蒸发和植被蒸腾的共同影响. 城市地区因地表温度与气温差大于其他类型地表, 植被和地表湿度较少, 所以城市区域感热通量最大. 城郊潜热通量因植被覆盖率高, 地表湿度大, 所以城郊潜热通量比城市高. 水面上水汽充分, 其空气动力学阻力小, 因此潜热通量最大. 地表吸收的太阳净辐射除了以感热和潜热形式影响大气外, 其余部分则向下传递给深层土壤. 由于城市地表温度高, 向深层土壤传送的热量多, 因此城市地区比其他地表类型的土壤热通量要大. 从分布图上看, 城市区域的感热通量、土壤热通量及波恩比都为高值区, 而潜热通量为低值区.

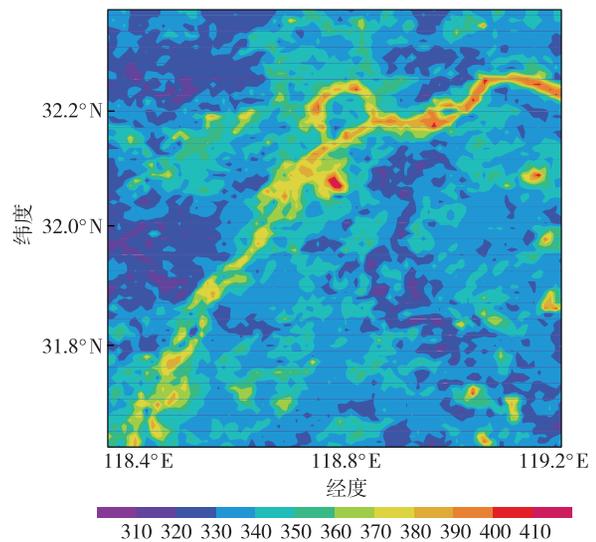


图 2 2004 年 4 月月平均净辐射通量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
Fig. 2 Monthly mean net radiation from MODIS in April of 2004 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

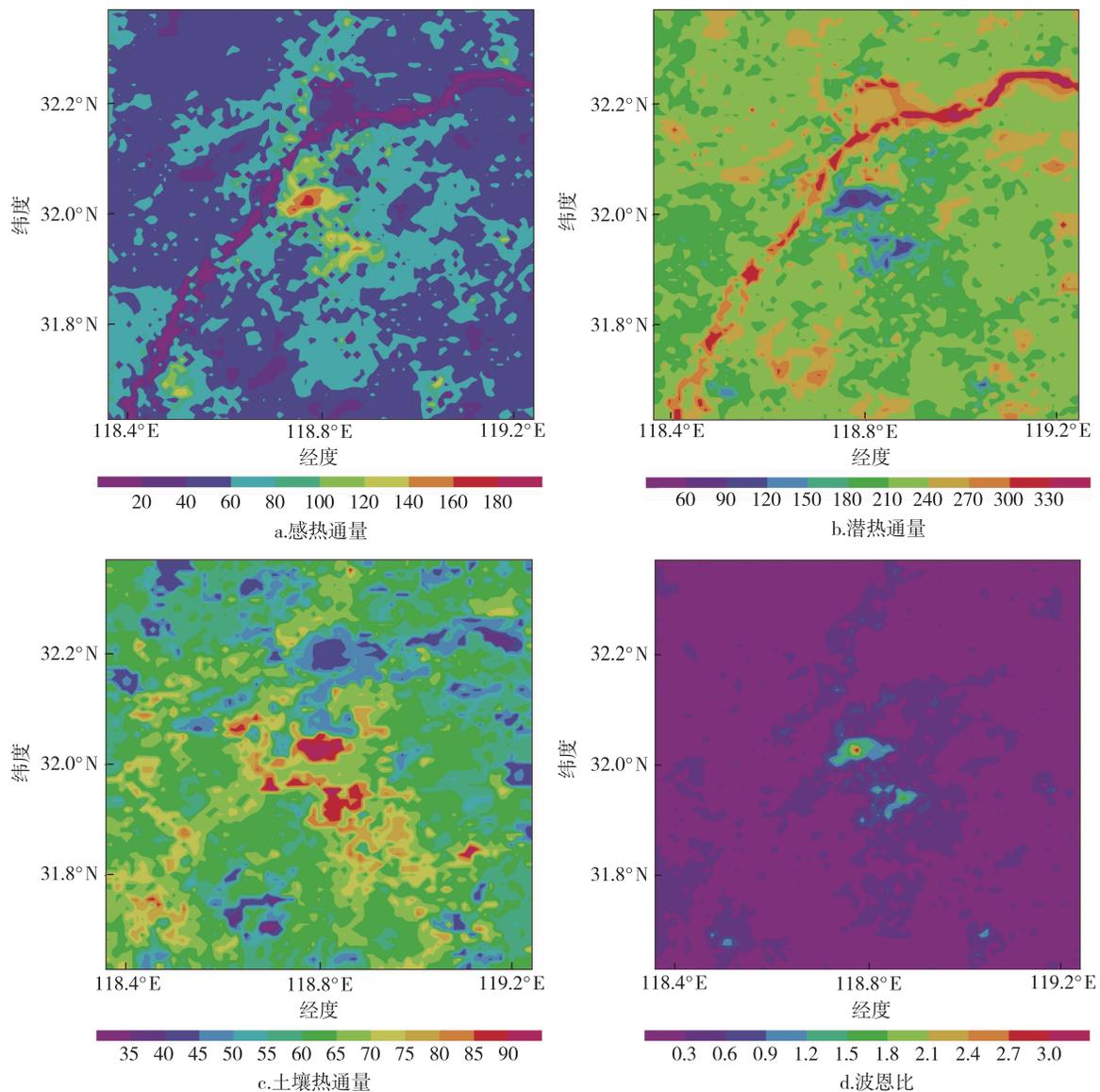


图3 2004年4月地表月平均热通量( $W/m^2$ )及波恩比

Fig. 3 Monthly mean surface heat fluxes and Bowen ratio from MODIS in April of 2004

表2为3种不同下垫面类型的地表通量及波恩比的比较.由表2可见:城乡平均净辐射差异不大,相对差值小于3%;城市地表的土壤热通量最高,而作物地与混合林两者较接近.混合林、作物和城市平均感热通量分别为45.48、58.35和87.36  $W/m^2$ ,城市地表的感热通量最大,分别比作物和林地高约33%和48%;城市的土壤热通量分别比作物和混合林高约8%和10%;潜热通量城市最小,城市地表的值分别比作物和林地小约13%、27%;城市地表的波恩比最大,分别比作物和林地高约39%和59%;在能量平衡各分量中,城乡感热通量差异最大,其次为潜热通量,净辐射最小.

表2 3种不同下垫面地表能量平衡分量及波恩比的比较

Table 2 Comparison of surface fluxes and Bowen ratio among different land uses

下垫面	$S_0/(W/m^2)$	$G_0/(W/m^2)$	$H_s/(W/m^2)$	$L_E/(W/m^2)$	$r_B$
混和林	347.39	59.57	45.48	242.34	0.19
作物	334.45	60.92	58.35	215.19	0.28
城市	344.51	66.35	87.36	190.80	0.46

表3为自动站的地表热通量计算结果,并与文献[16]城郊典型值进行对照.从表3中可以看出,自动站58333(江宁站)比58238(南京站)更接近于城区典型值.这主要是因为江宁站位于南京新城区,该

表 3 自动站地表通量及与相关文献典型值对照

Table 3 Comparison of monthly average surface fluxes over urban area between automatic weather stations and those in literature

类型	$R_n/(W \cdot m^{-2})$	$G_0/(W \cdot m^{-2})$	$H_s/(W \cdot m^{-2})$	$L_E/(W \cdot m^{-2})$	$r_B$	$G_0/R_n$	$H_s/R_n$	$L_E/R_n$
58235	355.48	69.37	85.05	201.06	0.42	0.20	0.24	0.57
58237	335.98	84.17	105.40	146.40	0.72	0.25	0.31	0.44
58238	338.65(362.78)	69.47	106.01	163.17	0.65	0.21	0.31	0.48
58242	340.23	60.66	58.42	221.14	0.26	0.18	0.17	0.65
58333	323.92	90.02	129.82	104.08	1.24	0.28	0.42	0.30
58340	327.18	77.98	74.46	174.73	0.43	0.24	0.23	0.53
58344	351.60	74.83	125.06	151.72	0.82	0.21	0.36	0.43
主城区	344.29	94.81	143.90	105.58	1.36	0.28	0.42	0.31
近郊典型值 <sup>[16]</sup>	539	—	216	216	1.00	0.22	0.39	0.39
远郊典型值 <sup>[16]</sup>	540	—	150	305	0.50	0.15	0.28	0.57
城区典型值 <sup>[16]</sup>	516	—	240	150	1.50	0.27	0.44	0.29

注:括号里为实测值

城区发展迅速,其周围建筑和道路增多,而 58238(南京站)观测场位于小校场附近,观测场及其周围大多数是自然地表状态.由表 3 可知在南京主城区中心附近,地表热通量接近于城区地表典型值,其波恩比为 1.36,土壤热通量、感热通量和潜热通量分别占净辐射的 28%、42% 和 30%,而城区波恩比典型值为 1.50,土壤热通量、感热通量和潜热通量值分别占净辐射的 27%、44% 和 29%.

图 4 是经过中心点取东西向截面 AB(图 1)地表热通量的空间变化,可反映地表热通量与城市热岛的对应关系,从图 4 中可以看出由于地表非均匀性导致各个通量的变化.中心附近是主城区,在主城区感热通量、土壤热通量明显地发生变化,表现为中间凸起的峰线,潜热通量在主城区表现为中间下凹的谷线,而净辐射比较平缓.在水面附近感热通量较小,而净辐射及潜热较大,林地附近其潜热通量较大,其值仅小于水面,截面图两侧地表类型大多数是作物,其感热通量和潜热通量介于水面和城市之间.

#### 4 结论

利用 SEBAL 地表通量的参数化方法,针对城市地表特征对模式进行了改进,估算了城乡地区地表热通量,分析了城市及其周边地区的地表热通量特征,结论如下:

1) 城市地表的平均净辐射与作物地表之间差异较小,其感热通量差异最大,分别比作物和林地高约 33% 和 48%;

2) 城市地表的土壤热通量最高,比作物和混合林高约 8% 和 10%,而作物地与混合林地的土壤热

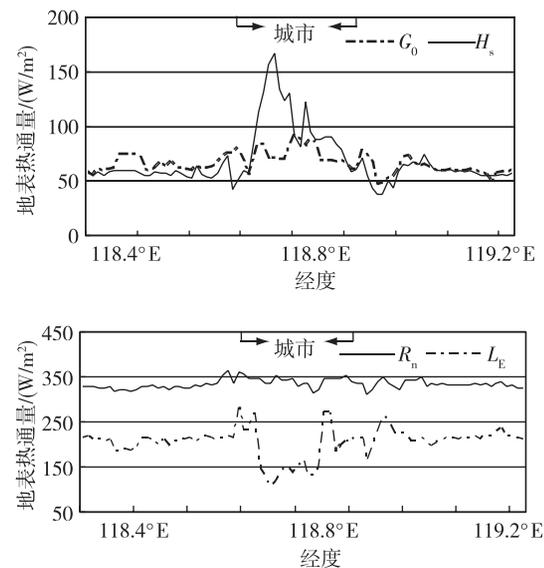


图 4 2004 年 4 月南京月平均地表通量在 AB 截面上的分布

Fig. 4 Spatial profiles of surface fluxes along transect AB in typical urban island profile over Nanjing city

通量比较接近;

3) 城市的潜热通量最小,比作物和林地小约 13% 和 27%,其波恩比最大,比作物和林地高约 39% 和 59%,在能量平衡各分量中城乡感热通量差异最大,其次为潜热通量,净辐射最小.

传统方法计算地表热通量只针对某个地点进行,而用遥感卫星资料可以估算某区域的地表热通量,因此该方法具有快捷方便的优点,但是遥感技术容易受到大气状况的影响,特别是缺乏同期的近地层通量观测,所以结果分析还不够透彻,尚待更完整的观测资料进一步验证.

## 参考文献

## References

- [ 1 ] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [ J ]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9 (1/2): 161-173
- [ 2 ] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation [ J ]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212/213: 198-212
- [ 3 ] Kustas W P, Humes K S, Norman J M, et al. Single-and dual-source modeling of surface energy fluxes with radiometric surface temperature [ J ]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35(1): 110-121
- [ 4 ] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [ J ]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85-99
- [ 5 ] Ma Y M, Tsukamoto O. Combining satellite remote sensing with field observations for land surface heat fluxes over inhomogeneous landscape [ M ]. Beijing: China Meteorological Press, 2002
- [ 6 ] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229(1/2): 87-100
- [ 7 ] 王桂玲, 王艳红. 长三角地区城市用地扩展及城乡热环境的特征分析 [ J ]. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2011, 3(3): 227-231  
WANG Guiling, WANG Yanhong. Analysis of urban growth and associated thermal characteristics using remote sensing data in the Yangtze river delta [ J ]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition*, 2011, 3(3): 227-231
- [ 8 ] Wang G L, Jiang W M, Wei M, et al. Analysis for urban/rural albedo from MODIS over East China [ J ]. *Proceedings of SPIE*, 2006(6199): 123-134
- [ 9 ] 王桂玲, 蒋维楣, 魏鸣. 城市热岛效应的卫星遥感分析 [ J ]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(3): 201-207  
WANG Guiling, JIANG Weimei, WEI Ming. An assessment of urban heat island effect using remote sensing data [ J ]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(3): 201-207
- [ 10 ] Eymard L, Taconet O. The methods for inferring surface fluxes from satellite data and their use for atmosphere model validation [ J ]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(11): 1907-1930
- [ 11 ] 张强, 吕世华. 城市表面粗糙度长度的确定 [ J ]. *高原气象*, 2003, 23(1): 24-31  
ZHANG Qiang, LÜ Shihua. The determination of roughness length over city surface [ J ]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(1): 24-32
- [ 12 ] Boegh E, Soegaard H, Thomsen A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface [ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 329-343
- [ 13 ] Van de Griend A A, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for nature surfaces [ J ]. *Int J Remote Sensing*, 1993, 14(6): 1119-1131
- [ 14 ] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295-309
- [ 15 ] White J M, Eaton F D, Auer Jr A H. The net radiation budget of the St. Louis Metropolitan area [ J ]. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(5): 593-599
- [ 16 ] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island [ J ]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108(455): 1-24

## Estimation of surface fluxes from MODIS data over urban and rural areas

WANG Guiling<sup>1</sup> JIANG Weimei<sup>2</sup> WEI Ming<sup>3</sup> JIN Saihua<sup>1</sup>

1 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

3 Sino-American Cooperative Remote Sensing Center, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** In an attempt to understand the land-atmosphere feed back invoked by urban and rural heterogeneous surface, the parameterized model of surface energy balance is used with both MODIS and AWS ( Automatic Weather Station) meteorological data to calculate surface fluxes in this paper. Surface energy fluxes are analyzed in order to explain the detailed energy differences between urban and rural areas. The results show that the model is feasible and effective. The solution is approximately in agreement with the literature data. This, thereby, provides a useful method for researches on urban climate and environment.

**Key words** satellite remote sensing; MODIS; surface fluxes; single source model; urban and rural areas