

引用格式: Guo Menghui, Ji Ya'nan, Ke Yinghai, *et al.* Temporal and Spatial Evolvment of Heat Flux in Beijing Under Land Use Change[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(5): 1218-1225. [郭梦辉, 季亚南, 柯樱海, 等. 土地利用变化下北京市热通量的时空演变[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1218-1225.]  
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.5.1218

## 土地利用变化下北京市热通量的时空演变

郭梦辉<sup>1,2</sup>, 季亚南<sup>3</sup>, 柯樱海<sup>3</sup>, 陈少辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 探究土地利用变化对城市热通量的影响, 对城市用地规划和城市热岛缓解具有重要指导意义。利用混合像元组分排序对比和分层能量切割方法, 通过 Landsat 系列数据反演的地表参数, 结合气象再分析资料, 估算了 2004、2009、2014 和 2017 年 4 期 9 月份的北京市地表瞬时热通量, 依据同期的北京市土地利用图, 分析了北京市热通量随土地利用变化的时空演变。结果表明: ①北京市地表温度和热通量分布具有明显的空间异质性, 山区和平原、平原不同土地利用类型之间差异明显; ②在不同时期, 土地利用类型间的地表温度和热通量的高低次序具有一致性, 瞬时潜热通量, 林地最高, 为 347.85~546.95 W/m<sup>2</sup>, 其次为耕地、草地, 建设用地最小, 为 225.23~349.03 W/m<sup>2</sup>, 感热通量和地表温度则相反, 建筑用地最高, 分别为 94.06~189.28 W/m<sup>2</sup> 和 25.18~32.25 °C, 耕地和草地次之, 水体的最低, 分别为 28.15~102.55 W/m<sup>2</sup> 和 19.25~28.38 °C; ③土地利用类型转变引起的城市热通量变化方面, 自然表面转为建设用地时, 潜热通量急剧减少, 感热通量增加, 城区周边耕地的潜热通量受城市热辐射影响而增加, 城市绿地能有效缓解城市热岛效应。

**关键词:** 城市热通量; 潜热通量; 感热通量; 土地利用/土地变化; 遥感蒸散模型

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)05-1218-08

### 1 引言

北京作为中国对外展示的窗口, 随着城市化向国际化的快速推进, 在全球气候变化和经济高速发展双重背景下, 城市不透水层增加造成的城市热岛效应<sup>[1]</sup>等热环境问题成为中国城市化引起环境变化的缩影<sup>[2]</sup>。城市化过程中, 随着自然植被不断被不透水层所取代, 感热通量逐渐在能量平衡中占据较大份额, 从而使城市热环境变差, 伴随土地利用变化产生的热环境问题是城市热岛效应研究的重要方面。由于观测限制、城市下垫面复杂多样, 目前对土地利用变化与城市热环境之间关系的定量描述还比较少, 这限制了对城市地表生态进行科学规

划与管理。

国内学者针对城市热岛效应从不同方面进行了深入细致研究。Hao 等<sup>[3]</sup>通过研究 1990~2014 年北京市不透水层强度与相对年平均地表温度的关系发现, 随着南五环外不透水层面积扩大 50%, 南三环和南五环之间的相对年平均地表温度增加了至少 1.5 K。乔治等<sup>[4]</sup>基于 MODIS 资料分析认为北京市城市热环境风险呈增加趋势, 其中极高风险区面积比例从 9.66% 上升到 12.08%, 极高风险等级区域主要分布于城六区, 并逐渐向东西方向延伸, 斑块数量增加, 聚合程度也有所提高。赵恒谦等<sup>[5]</sup>采用 2006~2016 年 ETM+ 和 Sentinel-2A 数据的

收稿日期: 2018-08-02; 修订日期: 2020-08-17

基金项目: 国家对地观测科学数据中心开放基金(NODAOP2020003); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK1003); 国家自然科学基金(41671368)。

作者简介: 郭梦辉(1993—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事城市遥感研究。E-mail: 1713051786@qq.com

通讯作者: 陈少辉(1976—), 男, 河北保定人, 副研究员, 主要从事数据融合与同化研究。E-mail: chensh@igsrr.ac.cn

研究结果表明北京市通州区建筑用地和城市绿化面积增加,水域面积稳中有升,生态环境质量有了明显改善。杨浩等<sup>[6]</sup>研究发现2003~2013年北京市与天津市的城市热岛效应变化最为明显,热岛面积分别增加7 091 km<sup>2</sup>与4 196 km<sup>2</sup>,空间上呈现出逐年接近连片发展趋势,热岛重心移动轨迹具有明显的时空分异性。

Kuang等<sup>[7]</sup>研究了城市景观组成与城市地表温度及相关热通量空间模式的关系,提出土地利用/覆盖变化、建筑物结构、建筑材料等都会影响地表温度。显热通量和潜热通量的分配比导致城区不透水层温度比城市绿地高出6~12 K,城区温度比郊区高出3~6 K<sup>[8]</sup>。匡文慧等<sup>[9]</sup>提出了集城市空间结构与地表热环境为一体的城市热岛调控理念,认为不同的土地利用/覆被类型有着不同的能量分层模式,对地表温度的影响也不同,但并没有明确不同土地利用类型之间热通量的差异。为缓解城市热岛效应和适应城市气候变化<sup>[10]</sup>,规范土地利用结构,如增加城市绿地面积,已成为关键举措。然而,因为地气之间的热量交换受下垫面和大气稳定度的影响,即使城市空间差异不大,能量分布仍具有明显的异质性,这就需要对能量分解过程及不同土地利用类型对热量分布的影响机制有机理性的认识<sup>[7]</sup>。早期的城市热环境研究限于空间代表性有限的站点观测数据<sup>[11]</sup>,或者由于地表温度的空间分异,未能深层次地分析地表热通量以及波文比随土地利用类型变化的规律改变<sup>[12]</sup>。

基于遥感的热通量估算研究已广泛开展,较早的SEBAL<sup>[13]</sup>和SEBS<sup>[14]</sup>等大叶模型,适用于高植被覆盖地区,对于空间异质性较大的城市区误差较大。Di等<sup>[15]</sup>利用分层分类从快眼影像提取了北京市西北地区绿地分布,结合Landsat 8影像和SEBS评估了不同植被类型的耗水规律。为研究潜热通量和感热通量的准确分割,Moran等<sup>[16]</sup>在18处不同覆盖率的苜蓿地进行了实验,发现植被指数和地表温度构成了梯形框架,利用该梯形干边和湿边斜率的线性内插,可以定量估算苜蓿地的土壤水分状态。张仁华等<sup>[17]</sup>提出计算更为便捷的混合像元排序对比(Pixel Component Arranging and Comparing Algorithm, PCACA)二层模型,PCACA基于特征梯形法和等斜率线假设来分解混合像元的地表温度和反照率,并分层切割波文比,最终计算出潜热通量和显热通量。此方法的前提在于混合像元地表

温度全部落在由地表温度和植被覆盖度所构成的梯形空间内,混合像元上下包络线之间的等土壤湿度线与等斜率线重合。在城市地区,绝对干边由表面极其干燥的不透水面确定,绝对湿边由闭合冠层绿地的极湿状态确定。本研究中干湿边由包络线法<sup>[18]</sup>确定,当绝对干湿边确定后,即可用梯形的干边和湿边的线性内插来刻画混合地表温度、地表反照率随植被覆盖度的变化率,并进行后续的计算。

为深入理解北京城镇扩张对地表温度的影响及其所造成的热通量时空分布的改变,我们必须了解北京市不同土地利用结构下各能量通量的配额规律,定量分析土地利用转移下热通量的消长,为北京城市热环境的治理提供参考。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

北京市位于华北平原的北部,总面积为16 801 km<sup>2</sup>,林地和草地覆盖的山区约占全部面积的62%,其余为土地利用类型复杂的平原,不透水层面积为1 582.24 km<sup>2</sup>,占城区的76%<sup>[19-21]</sup>。北京地区属于温带大陆性季风气候,气候特点为夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,据记载,夏季最高气温42.6℃,冬季最低气温-27.4℃,年均气温为11℃(<https://en.wikipedia.org/wiki/Beijing>)。至2016年底,北京市常住人口已达2 172.9万人,人口密度为1 324人/km<sup>2</sup>(<http://www.bjstats.gov.cn/>)。为了应对快速城市化带来的严峻的城市热环境问题和空气污染<sup>[22]</sup>,改善城市环境质量,近些年以奥林匹克森林公园为代表的大面积城市绿化工程先后实施,了解城市化进程中各热通量的转变过程很有必要。

### 2.2 数据来源

遥感数据采用2004年9月8日和2009年9月22日的Landsat TM5 30 m分辨率的多光谱和重采样为30 m分辨率的第6热红外波段,2014年9月4日和2017年9月28日Landsat OLI 30 m分辨率的多光谱和重采样为30 m分辨率的第10热红外波段,分别用来计算研究区4期的地表温度、植被覆盖度、比辐射率、地表反照率等参数。2004、2009和2014年气象数据来自中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集,空间分辨率为0.1°,2017年气象数据来自中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)再分析产品“CLDAS-V2.0”,空间分辨率为0.062 5°。通量观测数据来自寒区旱区科学数据中

心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)的海河流域多尺度地表通量与气象要素观测数据集:2009年9月22日的大兴站和密云站的大孔径闪烁仪和涡动相关仪观测,同时间的地表温度和植被覆盖度的验证引用了匡文慧已发表的数据<sup>[7]</sup>。图1中S1-S7为气象观测站,其中S6和S7分别为密云和大兴通量观测站。

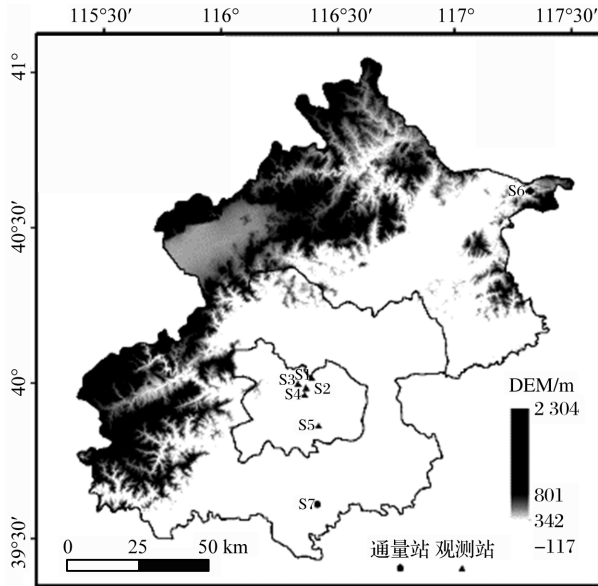


图1 北京市高程图及气象通量观测站点

Fig.1 DEM of Beijing, stations of observation and heat flux

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 地表温度

基于大气校正法<sup>[23]</sup>也称辐射传导方程反演地表温度 $T_s$ ,卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 $L_\lambda$ 为:

$$L_\lambda = [\varepsilon_\lambda B(T_s) + (1 - \varepsilon_\lambda) L \downarrow] \tau_\lambda + L \uparrow \quad (1)$$

其中: $\lambda$ 为波长( $\mu\text{m}$ ), $\varepsilon_\lambda$ 为地表比辐射率, $T_s$ 为地表真实温度(K), $B(T_s)$ 为黑体温度为 $T_s$ 时热辐射亮度( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ), $\tau_\lambda$ 为大气在波长 $L_\lambda$ 处的透过率。将上式变换得到温度为 $T_s$ 的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(T_s)$ 为:

$$B(T_s) = [L_\lambda - L \uparrow - \tau_\lambda (1 - \varepsilon_\lambda) L \downarrow] \quad (2)$$

则 $T_s$ 可以用普朗克公式获取:

$$T_s = K_2 \cdot \ln \left[ \frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right] \quad (3)$$

对于Landsat5 Band6, $K_1=607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ , $K_2=1260.56 \text{ K}$ ,对于Landsat8 Band10, $K_1=774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ , $K_2=1321.08 \text{ K}$ 。在NASA提供的网站(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>)中,输入成像时间

以及中心经纬度可以获取大气剖面参数 $L \uparrow$ , $L \downarrow$ 和 $\tau_\lambda$ ,如表1所示。

表1 2004、2009、2014和2017年的大气剖面参数  
Table 1 Atmospheric profile parameter of 2004, 2009, 2014 and 2017

年份	$\tau_\lambda$	$L \uparrow$	$L \downarrow$
2004	0.89	0.84	1.44
2009	0.89	0.82	1.38
2014	0.85	1.22	2.06
2017	0.96	0.27	0.48

### 2.3.2 比辐射率

本文采用覃志豪等<sup>[24]</sup>提出的分类阈值法来计算地表比辐射率 $\varepsilon$ ,混合像元的地表比辐射率估算如下:

$$\varepsilon = vfc \times R_v \times \varepsilon_v + (1 - vfc) \times R_s \times \varepsilon_s + d_e \quad (4)$$

其中: $\varepsilon_v=0.986$ 是典型植被冠层的平均比辐射率, $\varepsilon_s$ 是非植被覆盖区水面、裸土、不透水面的比辐射率,分别为0.995、0.972、0.970。 $R_v$ 、 $R_s$ 和 $R_m$ 分别为植被被、裸土和不透水面的温度比率。本研究中,由覃志豪提出的经验公式得到:

$$R_v = 0.9332 + 0.0585 \times vfc \quad (4.1)$$

$$R_s = 0.9902 + 0.1068 \times vfc \quad (4.2)$$

$$R_m = 0.9886 + 0.1287 \times vfc \quad (4.3)$$

在地表相对较平整情况下,一般可取误差 $d_e=0$ ,本文使用如下经验公式来估计 $d_e$ :

$$d_e = 0.0038 \times vfc \quad (vfc < 0.5) \quad (4.4)$$

$$d_e = 0.0038 \times (1 - vfc) \quad (vfc > 0.5) \quad (4.5)$$

$$d_e = 0.0019 \quad (vfc = 0.5) \quad (4.6)$$

利用2004、2009、2014和2017年4期Landsat数据,参照Google Earth将土地利用分成不透水面、自然表面和水体3种,来计算对应的比辐射率。

### 2.3.3 植被覆盖度

采用像元二分模型计算植被覆盖度(Vegetation Fractional Coverage,  $vfc$ ),公式如下:

$$vfc = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (5)$$

其中: $\text{NDVI}_{\min}$ 和 $\text{NDVI}_{\max}$ 分别为研究区NDVI的最小值和最大值,本文取置信度为5%和95%处的NDVI值作为 $\text{NDVI}_{\min}$ 和 $\text{NDVI}_{\max}$ ,这样可以避免遥感数据不确定性产生的误差。混合像元的归一化植被指数为:

$$\text{NDVI} = \frac{B_{\text{Nir}} - B_R}{B_{\text{Nir}} + B_R} \quad (6)$$



其中: $B_{Nir}$ 和 $B_R$ 分别为Landsat数据近红外和红光波段的反射率。

#### 2.3.4 地表反照率

因Landsat5与Landsat8传感器的差异,采用两种算法计算地表反照率。2004年9月8日和2009年9月22日的地表反照率估算参考Liang<sup>[25]</sup>的方法,利用Landsat 5 TM数据中5个不同波段的反射率进行加权,得到宽波段的地表反照率:

$$\alpha = 0.356\alpha_1 + 0.130\alpha_3 + 0.373\alpha_4 + 0.085\alpha_5 + 0.072\alpha_7 - 0.0018 \quad (7)$$

其中: $\alpha_1$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$ 、 $\alpha_7$ 分别为Landsat 5 TM第1、3、4、5、7波段的反射率, $\alpha$ 为地表反照率。

2014年9月4日和2017年9月28日的地表反照率估算参考<sup>[26]</sup>的方法,利用Landsat 8 OLI数据中的6个不同波段的反射率进行加权,得到宽波段的地表反照率结果:

$$\alpha = 0.3\alpha_2 + 0.277\alpha_3 + 0.233\alpha_4 + 0.143\alpha_5 + 0.036\alpha_6 - 0.012\alpha_7 \quad (8)$$

式中: $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$ 、 $\alpha_6$ 、 $\alpha_7$ 分别为Landsat 8 OLI第2、3、4、5、6、7波段的反射率。

#### 2.3.5 净辐射通量

地表净辐射通量根据地表辐射平衡方程求得:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s \downarrow + \varepsilon_a \delta T_a^4 - \varepsilon_s \delta T_s^4 \quad (9)$$

其中: $R_n$ 为地表净辐射( $W/m^2$ ), $\alpha$ 为地表反照率, $R_s \downarrow$ 为入射到地表的太阳短波辐射( $W/m^2$ ), $\varepsilon_s$ 为地表比辐射率, $T_s$ 为地表温度(K), $\delta$ 为斯蒂芬—波尔兹曼常数,取值 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ , $\varepsilon_a$ 为无云状态下的大气有效比辐射率,是空气水汽压 $e_a$ 和参考高度(一般距地面2 m)空气温度 $T_a$ (K)的函数,可表示为:

$$\varepsilon_a = 1.24 (e_a / T_a)^{1/7} \quad (10)$$

空气湿度 $e_a$ :

$$e_a = \frac{p \cdot q}{0.622} \quad (11)$$

其中: $p$ 是大气压强(hPa), $q$ 是空气比湿(g/g)。

#### 2.3.6 土壤热通量

本研究中,土壤热通量 $G$ 根据土壤热通量与净辐射通量的简化关系求得:

$$G \approx 0.3 \times (1 - 0.9vfc) \times R_n \quad (12)$$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 结果验证

地表温度和植被覆盖度采用匡文慧已发表的2009年9月22日的数据来验证<sup>[7]</sup>,其中,地表温度的

RMSE为 $1.15^\circ C$ ,植被覆盖度的RMSE为0.06,结果比较好。表2中,净辐射通量的总体误差为 $25.35 W/m^2$ ,密云站净辐射通量的结果低于观测值 $35.75 W/m^2$ 。潜热通量的估算结果偏高,RMSE为 $94.04 W/m^2$ ,感热通量则偏低,RMSE为 $58.60 W/m^2$ ,土壤热通量偏高,RMSE为 $25.47 W/m^2$ 。

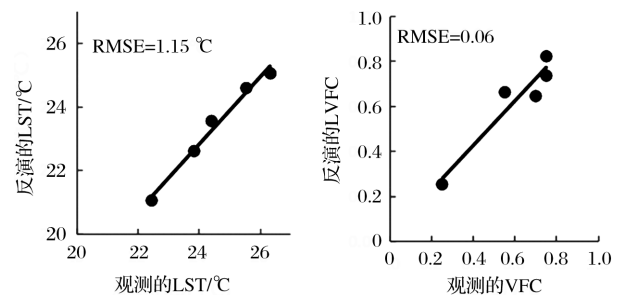


图2 地表温度和植被覆盖度验证

Fig. 2 The validation of land surface temperature and vegetation fraction cover

表2 热通量验证

Table 2 The validation of heat fluxes

通量(单位: $W/m^2$ )		Rn	LE	H	G
大兴	观测值	476.07	234.26	209.39	33.62
	估算值	480.57	267.17	153.61	59.86
密云	观测值	521.20	256.99	212.97	29.07
	估算值	485.63	261.69	170.20	53.74
RMSE		23.35	94.04	58.60	25.47

#### 3.2 空间差异性

以2014年9月8日地表温度和热通量为例,图3展示了北京市瞬时地表温度和能量平衡分量的空间分布。从图3可以看出,地表温度和各热通量具有强烈的空间异质性,山区和平原差异十分明显,平原地区不同土地利用类型之间的差异也十分明显。以土地利用类型复杂的城六环为例,研究发现,同为建设用地的城区南部和北部的地表温度和热通量有明显差异,北城地表温度和感热通量低于南城,潜热通量则高于南城,这可能是由于北部存在大量以奥林匹克森林公园、圆明园及颐和园等为主的城市绿地的生态效应所致。主城区、陶然亭公园和天坛地区呈现地表温度和感热通量低洼、潜热通量高出的现象,类似的现象也存在于水体周围。可见,城市绿地和水体对于缓解城市热环境,提高居民生活质量具有重要意义。

利用ENVI5.3监督分类将土地利用类型分为耕地(耕),林地(林),草地(草),建设用地(建),水体(水)和未利用地。由图4可知,不同土地利用类

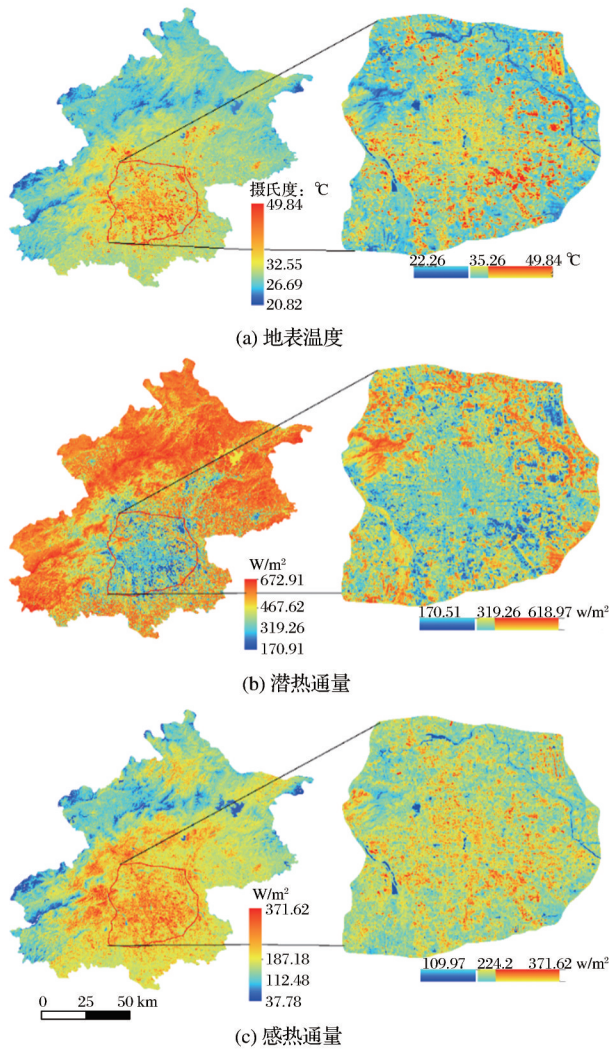


图3 2014年地表温度和热通量空间分布图

Fig.3 The spatial distribution in 2014

型的地表温度、热通量差异明显。在本文选取的研究时刻,建设用地的地表平均温度最高,2004年9月8日、2009年9月22日、2014年9月4日及2017年9月28日年分别为32.25、26.94、33.31、25.18℃,耕地或草地次之,林地或水体的平均温度最低,2004年9月8日和2009年9月22日水体的平均温度最低,分别为25.79℃和20.7℃,2004年9月8日和2017年9月28日年则为林地的平均温度最低,分别为24.2℃和19.25℃。净辐射通量从大到小的顺序为水体、林地、耕地、草地、建设用地,净辐射通量受到地表反照率的影响较大,水体的反照率和温度都很低,净辐射通量为最高,达到641.89~739.39 W/m<sup>2</sup>,虽然植被的反照率较高,但温度较低,所以净辐射通量次之,建设用地的反照率和温度都很高,净辐射通量为最低的544.87~636.87 W/m<sup>2</sup>,水体与建设用地的净辐射通量相差约100 W/m<sup>2</sup>。潜热通量因

受到热力驱动、动力驱动和土壤水分含量三大因素的影响,建设用地不透水层蓄水能力差,用于蒸发耗热的土壤水分供应不足,大部分净辐射用于加热不透水层,造成较大的陆气温差,感热通量显著。城市自然表面(林地、草地、耕地)则因土壤透水性及孔隙率高于不透水层,有较多的水分用于消耗土壤升温存储的热量,所以自然表面的地表温度低于不透水层,水体的潜热通量虽受到动力因素和空气湿度的制约,潜热通量较高。

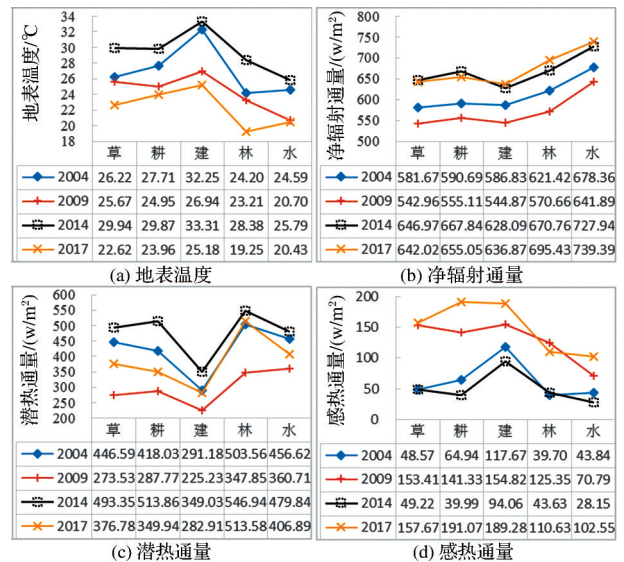


图4 不同土地利用类型地表温度和热通量统计数据

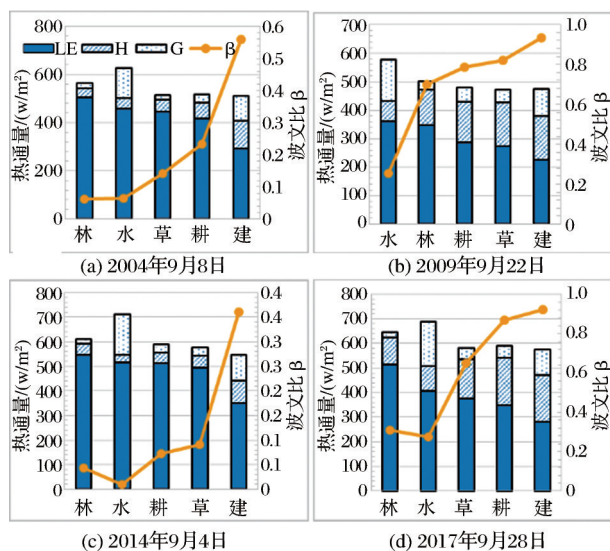
Fig.4 The LST and heat flux of different land use types

感热通量与潜热通量呈现相反的规律,与地表温度的规律相似,这是因为忽略相对较少的人为热排放,城市地表能量基本守恒,当净辐射通量和土壤热通量一定时,潜热通量越大,感热通量则越小,反之亦然。建设用地的感热通量最高,为94.0~189.28 W/m<sup>2</sup>,林地或水体的感热通量最低,为28.15~125.35 W/m<sup>2</sup>。另外,由图4(a)可以看出,2014年9月4日地表温度比2004年9月8日升高了1.2~3.7℃,由图4(c)可以看出,2014年9月4日年相比2004年9月8日、2017年9月28日相比2009年9月22日,潜热通量分别上升了23.22~95.84 W/m<sup>2</sup>、46.18~165.72 W/m<sup>2</sup>,其中,因为可利用水分基本不变,建设用地的潜热通量变化稳定,都在57 W/m<sup>2</sup>左右,而水体水分供应充足,潜热通量变化也较小,为23.22 W/m<sup>2</sup>和46.18 W/m<sup>2</sup>。变化较大的为自然表面,自然表面的潜热通量受到热量、水分和动力的影响,情况比较复杂,城市热岛效应对周边耕地和市内林地的地表温度升高具有一定的正反馈,间



接削弱了城市热环境,加速了水分的蒸散。

图5反映了各期潜热通量、感热通量和土壤热通量之间的涨落关系。土壤热通量表现为水体最大,这是由于本研究用土壤热通量和净辐射热通量的简化关系来求解土壤热通量,大面积水体的植被覆盖度为0,最终求得水体的土壤热通量为最大。其次为建设用地,不透水层的蓄水能力虽差,但却是性能优良的储热库,升温快,降温慢,具有较高的土壤热通量,覆盖度较高的林地、耕地和草地的土壤热通量则相对较小。波文比的大小反映了可利用能量的分配,即潜热通量和显热通量的相对关系。建设用地的波文比最大,为0.36~0.93之间,而林地和水体的波文比最小,为0.01~0.30之间。本采用地表温度和植被覆盖度的散点图的包络线法确定梯形特征空间的“干”边、“湿”边,求得的“干”边低于理论“干”边,进而确定的波文比值偏小,导致估算的潜热通量偏大,感热通量偏小,另外,计算时未考虑土壤含水量,也使得潜热通量的计算偏大,这也是本研究有待改进的地方。



(LE是潜热通量,H是感热通量,G是土壤热通量,β是波文比)

图5 不同土地利用类型热通量对比

Fig. 5 Comparison of LE, H, G and  $\beta$  across different land use types

### 3.3 土地利用变化的影响

图6以2004年和2014年土地利用变化影响潜热通量变化为例,分析土地利用变化对潜热通量的影响,从图6左可以看出,西部山区土地利用变化不大,仍以林地为主,潜热通量急剧变化的地区主要集中在中南部平原。其中,潜热通量急剧减少的地区为城区边缘、由耕地转化为建设用地的地区、首

都机场地区等,减少了60~500 W/m<sup>2</sup>,潜热通量急剧增加的地区有永定河地段,2004年永定河河岸为裸地,在2012年北京市平原地区大造林工程后,成为林地和耕地,潜热通量增加明显的地区,为位于城市边缘的城南耕地区,受城市热辐射影响,空气温度升高,水分加速蒸散。另外,北京市内新增的一些公园绿地也使潜热通量急剧增加,比如由撂荒地发展起来的奥林匹克森林公园,一方面奥林匹克森林公园使北城的绿地面积从2004年至2014年跳跃式增加了12 km<sup>2</sup>,另一方面城市热环境也促进了水分蒸散,使得潜热通量明显增加。

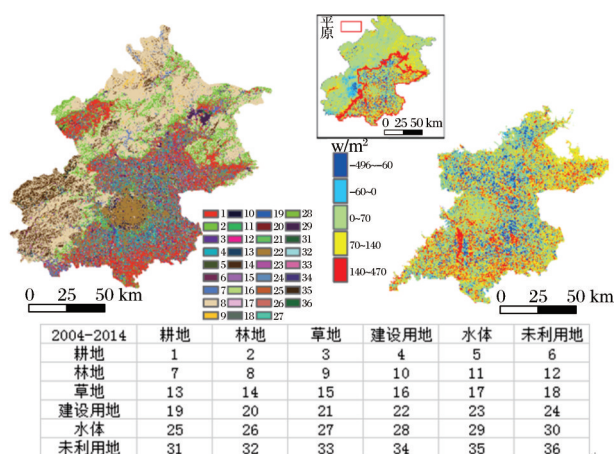


图6 土地利用变化下的潜热通量变化分析

Fig. 6 Areas of LE change with varying degrees

## 4 结论

北京市区地表温度和各热通量具有较强的空间异质性,山区和平原地区之间的差异明显,城区南部和北部的地表温度和热通量也存在明显的差异,城市内部的公园和水体会降低周围的空气温度和感热通量,增加潜热通量。不同土地利用类型的地表温度和潜热通量差异明显,建设用地地表温度和感热通量最高,潜热通量最低,林地和水体则相反。草地和耕地则处于它们之间,耕地的地表温度和热通量受作物状态和土壤水分的影响,地表温度和潜热通量有一定变化。

土地利用变化会造成地表温度和热通量的变化,当郊区耕地转为建设用地,潜热通量急剧减少,城市扩张使得地表温度升高,周边耕地的蒸散加剧,潜热通量随之变大。北京市内大量绿地的出现,改变了周边的热环境,城市绿地潜热通量明显高于周边建筑用地,对缓解城市热环境、增加空气湿度和提高居民幸福指数具有重大意义,城市用地

规划应该着重考虑公园的布局 and 规模。

# 参考文献 (References):

- [1] Qiao K, Zhu W Q, Hu D Y, *et al.* Examining the Distribution and Dynamics of Impervious Surface in Different Function Zones in Beijing[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5): 669-684.
- [2] Zheng Z F, Ren G Y, Wang H, *et al.* Relationship between Fine-Particle Pollution and The Urban Heat Island in Beijing, China: Observational Evidence [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2018, 169(1): 93-113.
- [3] Hao P Y, Niu Z, Zhan Y L, *et al.* Spatiotemporal Changes of Urban Impervious Surface Area and Land Surface Temperature in Beijing from 1990 to 2014[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2015, 53(1): 63-84.
- [4] Qiao Zhi, Sun Zongyao, Sun Xihua, *et al.* Prediction and Analysis of Urban Thermal Environment Risk and Its Spatio-Temporal Pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 649-659.[乔治, 孙宗耀, 孙希华, 等. 城市热环境风险预测及时空格局分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 649-659.]
- [5] Zhao Hengqian, Jia Liang, Yin Zhengran, *et al.* Dynamic Monitoring of Land Use and Ecological Environment based on Multiple Remote Sensing Data: A Case Study of Tongzhou District, Beijing [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2019, 35(1): 38-44.[赵恒谦, 贾梁, 尹政然, 等. 基于多源遥感数据的北京市通州区土地利用/覆盖与生态环境变化监测研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(1): 38-44.]
- [6] Yang Hao, Meng Na, Wang Jing, *et al.* Spatial-Temporal Morphology Simulation of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Thermal Environment based on Support Vector Machine [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(2): 190-200.[杨浩, 孟娜, 王婧, 等. 基于支持向量机的京津冀城市群热环境时空形态模拟[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(2): 190-200.]
- [7] Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, *et al.* Quantifying the Heat Flux Regulation of Metropolitan Land Use/Land Cover Components by Coupling Remote Sensing Modeling with In Situ Measurement [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2015, 120(1): 113-130.
- [8] Zhao G S, Dong J W, Cui Y P, *et al.* Evapotranspiration-dominated Biogeophysical Warming Effect of Urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(1-2): 1231-1245.
- [9] Kuang W H, Yang T R, Liu A L, *et al.* An EcoCity Model for Regulating Urban Land Cover Structure and Thermal Environment: Taking Beijing as an Example[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2017, 47(7): 847-859.[匡文慧, 杨天荣, 刘爱琳, 等. 城市地表覆盖结构组分与热环境调控模型(EcoCity)研究一以北京城市为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(7): 847-859.]
- [10] Shahid N, Cao C X, Khunsa F, *et al.* Landscape Greening Policies-based Land Use/ Land Cover Simulation for Beijing and Islamabad—An Implication of Sustainable Urban Ecosystems [J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1049. doi:10.3390/SU10041049.
- [11] Cui Y P, Liu J Y, Hu Y F, *et al.* Modeling the Radiation Balance of Different Urban Underlying Surfaces[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(9): 1046-1054.
- [12] Chen S H, Su H B, Zhan J Y. Estimating the Impact of Land Use Change on Surface Energy Partition based on the Noah Model[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2014, 8(1): 18-31.
- [13] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, *et al.* The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 1 Formulation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212 (98): 801-811.
- [14] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat Fluxes[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85-99.
- [15] Di S C, Li Z L, Tang R L, *et al.* Urban Green Space Classification and Water Consumption Analysis with Remote-sensing Technology: A Case Study in Beijing, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 40 (5-6): 1909-1929.
- [16] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, *et al.* Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-air Temperature and Spectral Vegetation Index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246-263.
- [17] Zhang Renhua, Sun Xiaomin, Wang Weimin, *et al.* An Operational Two-layer Remote Sensing Model to Estimate Ssurface Flux in Regional Scale: Physical Background[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2004, 34(S2): 200-216.[张仁华, 孙晓敏, 王伟民, 等. 一种可操作的区域尺度地表通量定量遥感二层模型的物理基础[J]. *中国科学: 地球科学*, 2004, 34(增刊2): 200-216.]
- [18] Tang Ronglin. Retrieval of Land Surface Evapotranspiration from Remotely Sensed Surface Temperature-Fractional Vegetation Cover Characteristic Space [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.[唐荣林. 基于地表温度-植被覆盖度特征空间的地表蒸散发遥感反演方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.]
- [19] Kuang W H. Simulating Dynamic Urban Expansion at Regional Scale in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 317-330.
- [20] Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X, *et al.* Spatiotemporal Dynamics of Impervious Surface Areas Across China during the Early 21st Century [J]. *Science Bulletin*, 2013, 58 (14): 1691-1701.
- [21] Kuang W H. Spatio-temporal Patterns of Intra-urban Land Use Change in Beijing, China between 1984 and 2008 [J]. *Chinese Geographical Science*, 2012, 22(2): 210-220.
- [22] Ke X L, Zhan J Y, Ma E J, *et al.* Regional Climate Impacts of Future Urbanization in China[M]. Berlin: Springer, 2014.

- [23] Alan G, Shuichi R, Tsuneo M, *et al.* A Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 36(4): 1113-1126.
- [24] Qin Z H, Li W J, Xu B, *et al.* The Estimation of Land Surface Emissivity for Landsat TM6[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004, 16(3): 28-32. [覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28-32.]
- [25] Liang S L. Narrowband to Broadband Conversions of Land Surface Albedo I: Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 213-238.
- [26] Silva Bernardo B Da, Braga Alexandra C, Braga Célia C, *et al.* Procedures for Calculation of the Albedo with OLI-Landsat 8 Images: Application to the Brazilian Semi-arid[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi, 2016, 20(1): 3-8.

## Temporal and Spatial Evolvement of Heat Flux in Beijing Under Land Use Change

Guo Menghui<sup>1,2</sup>, Ji Ya'nan<sup>3</sup>, Ke Yinghai<sup>3</sup>, Chen Shaohui<sup>1</sup>

(1. *Key laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

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

3. *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)*

**Abstract:** Exploring the impact of land use change on urban heat flux has important significance for urban land use planning and urban heat island mitigation. Using the pixel component arranging comparing algorithm, four Beijing surface instantaneous heat fluxes in Septembers of 2004, 2009, 2014 and 2017 are estimated by the surface parameters retrieved from Landsat series data and meteorological reanalysis data, and the spatiotemporal variation of heat fluxes in Beijing is analyzed with the change of land uses during the same period. Results show: (1) the distribution of surface temperature and heat flux in Beijing has obvious spatial heterogeneity, and the difference between mountainous areas and plains and among different land use types in plains is obvious; (2) the order of surface temperatures or heat fluxes between different land use types has consistency at these four moments. For latent heat flux, the highest is 347.85~546.95 W/m<sup>2</sup> for forest land, followed by cultivated land and grassland, and the minimum is 225.23~349.03 W/m<sup>2</sup> for construction land. For sensible heat flux and surface temperature, the order is reversed, the highest for construction land is 94.06~189.28 W/m<sup>2</sup> and 25.18~32.25 °C, followed by cultivated land and grassland, the lowest is 28.15~102.55 W/m<sup>2</sup> and 19.25~28.38 °C for water body; (3) in terms of change in urban heat fluxes caused by land use transformation, when natural surface is converted to construction land, latent heat flux is reduced and sensible heat flux increases. The latent heat flux of the arable land around the city is increased by the influence of urban heat radiation, and the urban green space can effectively alleviate urban heat island effect.

**Key words:** Urban heat flux; Latent heat flux; Sensible heat flux; Land use and change; Remote sensing ET model