

城市热岛效应地表通量空间分布研究

王 萍

(淮阴工学院建筑工程系, 江苏 淮安 223001)

摘要:城市化进程的加快促使更多大中城市的产生以及城市面积的扩展,导致更加严重的城市热岛现象。为了更加深入理解城市热岛效应产生根源,以西安市城区为例采用美国陆地卫星遥感数据反演或估算地表温度、植被指数以及地表通量等变量,不仅采用传统的地表温度参数理解城市热岛现象,还着重分析城市建成区和郊区的地表通量空间分布格局及其与地表温度的关系。研究发现西安城市建成区与郊区之间热环境存在显著的差异,地表温度不仅与植被覆盖状况具有密切的关系,还与地表潜热通量和实际蒸散发变量存在显著的反相关关系。详细分析表明拥有众多工厂企业的西安市莲湖区热岛效应尤为显著,而位于市中心的新城区次之,具有较大面积郊区的灞桥区热岛效应并不明显。因此城市绿地不仅影响城市建成区的地表温度空间分布,还对地表通量以及实际蒸散发的空间格局产生重要的影响,在调节城市热岛效应方面具有重要的作用。

关 键 词:热岛效应;地表温度;地表通量;NDVI

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2009)06-0757-09

1 引 言

近年来,随着我国经济的快速发展与城市化进程的加速,城市规模不断扩大人口不断增加,以水泥为主要建筑材料的建筑物和城市交通工具和空调热量排放大量增加,导致了明显的城市热岛效应,已经严重影响了人们的正常社会与经济生活^[1,2]。城市热岛现象是在局地气候变化条件下城市下垫面发生重大改变和人为排放热量共同作用形成的。因此,在全球逐渐变暖的情况下,监测和评估城市“热岛—绿岛”时空分布的相关关系及影响,对改善城市小气候和生态环境进行城市建设和绿化建设规划决策具有十分重要的科学和实际意义。

从局部气候角度讲,气温等观测数据与区域大气模式相结合可以很好地表征城市建成区与郊区热环境的时空变化规律。相关研究结果表明非静边平衡中尺度模式 MM5 在引入实测建筑物高度和土地利用信息的基础上可以较好地模拟北京冬季城市热岛现象,充分表达城市热环境空间分布特征^[3]。气象观测逐时温度资料分析表明城市热岛强度和城市建成区的范围、人口、气温和降水之间同样具有显著

的线性相关关系^[4,5]。另外遥感技术已经被用于获取城市及其附近地区地表温度、植被指数等地表参数空间分布状况,尝试从城区地表参数空间变化规律解读城市热岛效应的形成机理。目前美国 Landsat 卫星遥感数据常用于动态监测城市地面热场的空间分布,研究结果表明城市下垫面性质对地表温度具有直接的影响^[6],地表温度与 NDVI 和城市建成区不透水层百分比参数均存在显著的相关关系,但后者与地表温度的线性相关关系更加明显^[7],说明人类活动在城市工业区热场形成机制中具有不可忽视的作用^[8]。其它传感器遥感数据也越来越多地用于城市热岛效应的遥感监测,ATLAS 航空遥感数据、TABI、MODIS 和 ASTER 多源遥感数据已经被用于获取更加详细的城市热场分布,在社区和区域等多个尺度上进行城市热场分析与监测^[9,10]。为了评价与分析土地利用对城市热场的影响,遥感提取的斑块数、斑块密度、NDVI、NDWI、NDBI 等景观和植被指数已经被广泛用于评价城市景观格局变化对城市热岛效应的影响^[11,12]。

随着城市地区地表温度、NDVI 以及气温降水等参数的变化,城市地表热通量空间格局必然发生

改变,但是城市热场地表热通量时空变化还未引起足够的重视和研究,不同城市土地利用类型也可能对城市地表热通量产生显著影响,有待于进一步评估。因此,本文以西安市城区为例采用美国陆地卫星遥感数据反演或估算地表温度、植被指数以及地表通量等变量,不仅采用传统地表温度理解城市热岛现象,还着重分析城市建成区和郊区地表通量空间分布格局及其与地表温度的关系,试图通过地表温度、植被覆盖、能量通量以及蒸散发之间的相互关系分析与表达城市热岛效应的空间分布特征,深入理解其内在物理机制及产生根源,为缓解及治理城市热岛效应提供科学的决策依据。

2 研究区及数据介绍

西安,古称长安,现为陕西省省会,是全省政治、经济、文化、交通的中心。西安市辖新城、碑林、莲湖、雁塔、灞桥、未央、阎良 7 个区。西安市区面积 861 万 km²,人口 300 万,地处关中平原中部,海拔 400 m,气候属暖温带,四季分明,一月份最冷,平均气温-1.3℃。七月份最热,平均气温为 26.7℃,南依秦岭,北临渭河,古有“八水绕长安”之利,土地肥沃,盛产粮棉。近年来西安市城镇建设急剧扩大,由于城市人口和工业的快速发展扩张,城市的热岛效应非常显著。西安位于我国著名气候分界线秦岭北侧,地形对气候水文状况影响比较明显,对城市热环境造成显著的影响。因此利用遥感技术对西安市热岛效应进行监测与分析,对于城市热环境及今后的城市规划和经济发展具有重要的实际意义。本文采用 2003 年 5 月 23 日获取的美国 Landsat ETM+ 卫星遥感图像、DEM 以及相关站点的气象观测数

据,采用克吕格内插算法获取西安市区的近地表气温的空间分布。

3 研究方法

3.1 遥感数据处理

为了分析城市地区地表温度、植被覆盖和蒸散发空间分布格局以及相互之间的关系,本文采用 2003 年 5 月 23 日获取的美国 Landsat ETM+ 卫星遥感数据进行地表参数反演与估算。遥感数据采用 ENVI 遥感图像处理软件进行处理,结合地形图分别进行图像校准、几何校正、大气校正、地表温度和地表通量遥感反演等处理^[13]。首先根据 Landsat ETM+ 遥感数据头文件增益参数进行图像校准获取星上反射率,再根据地形图进行图像几何精校正,采用 ENVI 软件 FLAASH 大气校正模块分别对 Landsat ETM+ 1~5、6 波段进行大气校正,气溶胶等大气参数采用中纬度夏季典型大气剖面数据,获取西安市城区及效区地表反射率和热辐射率。

3.2 地表温度反演

本研究采用覃志豪^[14]等提出的单窗算法模型反演地表温度,算法假定在天空晴朗且空气比较稳定的情况下,将大气分成几个平行层面,由于缺乏实地观测的大气剖面资料,本文将标准大气数据和当地实时观测的地面气象资料结合起来。如果计算出地表比辐射率 ϵ 、大气等效温度 T_a 和大气透射率 τ 等 3 个参数,则可用以下公式推算地表温度:

LST = {a(1 - C - D) + [(b - 1)

(1 - C - C) + 1]T_b - DT_a} / C

$$\begin{cases} C = \epsilon \cdot \tau \\ D = (1 - \tau)[1 + (1 - \epsilon)\tau] \\ \epsilon = P_v R_v \epsilon_v + (1 - P_v) R_s \epsilon_s + d_\epsilon \\ T_a = 16.0110 + 0.92621 T_0 \\ \tau = 0.97429 - 0.08007 w \end{cases} \quad (1)$$

其中:LST 是地表温度; T_b 为行星亮度温度; T_a 为大气等效温度; a 和 b 是参数系数(当地表温度为 0~70℃ 间时, $a=-67.355351$, $b=0.458606$); C 和 D 是中间变量, ϵ 为地表比辐射率, τ 为大气透射率; R_v 和 R_s 分别是植被和裸土的温度比率; ϵ_v 和 ϵ_s 为植被和裸土的地表比辐射率; d_ϵ 为比辐射率相互作用分量,在地表相对较平整情况下,一般可取 0; T_0 为地表附近气温; w 为大气含水量,单位为 g/cm²。

3.3 地表热通量估算

地表热通量遥感估算算法首先建立地表温度与 NDVI 之间的梯形特征空间,根据有关特征对

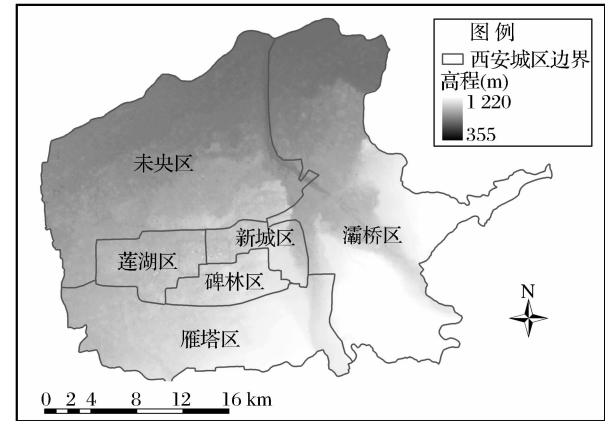


图 1 西安市辖区边界及 DEM 示意图

Fig. 1 The schematic of DET and administrative boundary of districts over Xi'an city, Shaan'xi province, China

Priestly-Taylor 参数进行插值,得到其空间分布情况并计算蒸散发因子,结合净辐射和土壤热通量等变量估算城市地区的实际蒸散发,能量平衡方程如下^[14]:

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \quad (2)$$

其中: R_n 为净辐射 (Wm^{-2}), G_0 为土壤热通量 (Wm^{-2}), H 为感热通量 (Wm^{-2}), λE 为潜热通量 (Wm^{-2})。蒸散发因子为潜热通量与净辐射通量、土壤热通量的和之间的比值,隐式地表示了蒸散发的空间分布状况,定义为^[14]:

$$EF = \frac{\lambda E}{\lambda E + H} = \frac{\lambda E}{R_n + G_0} \quad (3)$$

因此,瞬间实际蒸散发可通过下式进行计算:

$$\lambda E = EF \times (R_n + G_0) \quad (4)$$

只要得到蒸散发因子、净辐射和土壤热通量 3 个变量的空间分布,就可以估算出潜热通量空间分布格局。根据相关研究结果^[15],可以利用地表温度与 NDVI 之间的梯形特征空间对蒸散发因子进行空间插值获得。在如图 2 所示的特征空间中,点 E 为特

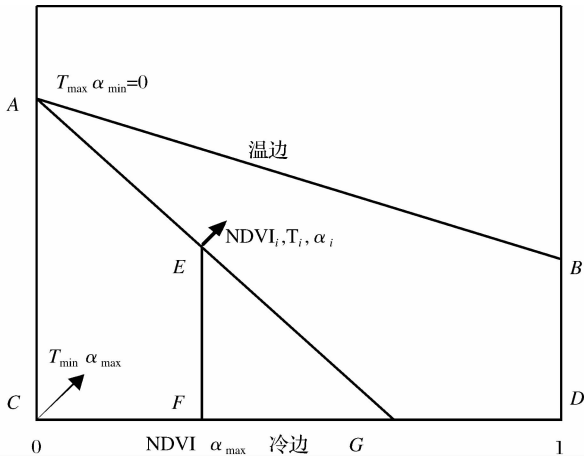


图 2 地表温度和 NDVI 之间的梯形特征空间示意图

Fig. 2 The feature space of land surface temperature and DVI derived from Landsat ETM+ image over the Xi'an city

征空间中任意一点,温边和冷边分别是梯形的 AB 和 CD 边,边 AG 的长度等于 $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$,边 AE 的长度等于 $\alpha_i - \alpha_{\min}$ 。根据三角形 AGC 和 EFG 之间存在的相似几何关系以及边 AG 和 AE 长度的物理意义,可以推出梯形特征空间中任意点即遥感图像上的任意像元蒸散发因子的计算公式如下^[15]:

$$EF = (\Delta / (\Delta + \gamma)) \times$$

$$\left[\frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max} - T_{\min}} (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) + \alpha_{\min} \right] \quad (5)$$

其中: T_{\max} 、 T_{\min} 、 α_{\max} 、 α_{\min} 分别为热点和冷点处的地表温度与 Priestly-Taylor 参数。

净辐射变量可以通过地表温度、近地表气温、地表反照度、地表比辐射率以及大气比辐射率之间的关系进行估算,计算公式如下^[16]:

$$R_n = (1 - \alpha) E_n + \epsilon_a \sigma T_a^4 + \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (6)$$

其中: α 为地表反照度(无量纲单位), E_n 为入射短波太阳辐射 (Wm^{-2}), ϵ_s 为大气比辐射率, σ 为波尔—兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^2 \text{K}^4$), ϵ_s 为地表比辐射率, T_a 、 T_s 分别为近地表气温和地表温度 (K)。

土壤热通量通过以下公式计算^[16]:

$$G_0 = 0.35 R_n (1 - P_v) + 0.05 R_n P_v \quad (7)$$

其中: R_n 为净辐射 (Wm^{-2}); P_v 为植被覆盖度,可以通过与 NDVI 之间的关系进行估算。

地表反照度可以利用植被区与非植被区波段地表反射率之间不同线性组合获取,本文采用梁顺林计算方法^[16],公式如下:

$$\alpha = 0.52 R_s(2) + 0.36 R_s(4) + 0.11 R_s(7) \quad (8a)$$

$$\text{NDVI} \geq 0.3$$

$$\alpha = 0.221 R_s(1) + 0.162 R_s(2) + 0.102 R_s(3) + 0.422 R_s(4) + 0.059 R_s(5) + 0.0195 R_s(7)$$

$$\text{NDVI} < 0.3$$

$$(8b)$$

其中: α 表示地表反照度, $R_s(i)$ 为 Landsat ETM+ 图像第 i 个波段的反射率。

入射短波太阳辐射可以采用以下公式进行计算^[16]:

$$E_n = G d r_{sw} \cos \theta \quad (9)$$

其中: G 为太阳常数 (1367Wm^{-2}); $d r$ 为日地距离; τ_{sw} 为大气透射率; $\theta = 90^\circ - \beta$, θ 和 β 分别为太阳天顶角和高度角 ($^\circ$);

根据 Satterlund 方程^[17],大气比辐射率与气温 (T_a) 和水汽压 (E_0) 具有显著的相关关系:

$$\epsilon_a = 1.08 \times (1 - \exp(-E_0^{T_a/2016})) \quad (10)$$

$$E_0 = 0.6108 \exp(17.27(T_a / (T_a + 273.3))) \quad (11)$$

4 结果与分析

4.1 西安市热环境空间分析

本文采用 Landsat ETM+ 遥感图像反演或估算西安城区及其周边地区地表温度、地表潜热通量、蒸散发等重要地表参数的空间分布信息,不仅仅从地表温度的传统角度研究城市热岛效应,而且从地表通量以及蒸散发等能量与水分的角度分析城市热岛现象。图 3 为遥感反演获取的西安市城区地表参数的空间分布格局,分别为日蒸散发、地表温度、NDVI、瞬间蒸散发、潜热通量、蒸散发因子、感热通量和土壤热通量变量,其中每幅图中均叠加了西安

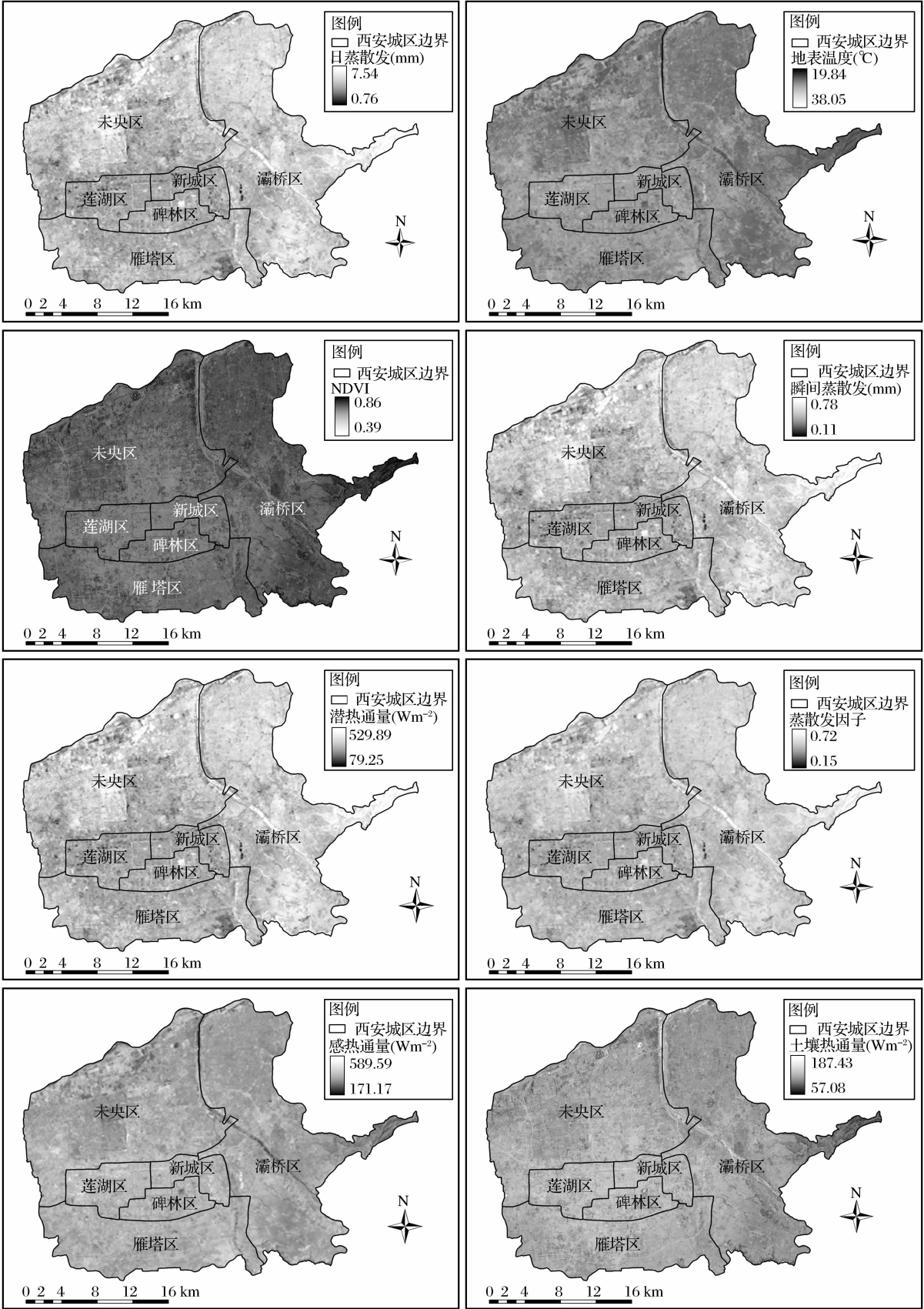


图 3 西安市辖区遥感估算地表热通量空间分布特征

Fig. 3 The spatial distribution of land surface temperature, NDVI, land surface fluxes and evapotranspiration derived from Landsat ETM+ data over the Xi'an city

市区级行政边界。从图 3 中可以看出城市建成区与周围林地和农田的热环境存在显著的差异,尤其在地表温度、蒸散发以及潜热通量空间分布图中,西安市建成区的轮廓非常清晰,建成区与郊区之间的边界明确。

由于大部分地表下垫面为柏油或水泥等不透水层,城市建成区的地表温度明显高于郊区植被覆盖区域,尤其是莲湖区、碑林区和新城区 3 个完全为建成区的行政区,热岛效应更加显著,同时也可以发现主要道路与片状的建筑也具有明显的差异。由于只有不透水层的表层水分可以形成蒸发,土壤中的水分难以变成水汽扩散到大气中,同时也没有植被的蒸腾作用,使得城市建成区的蒸散发量相对于具有植被覆盖的郊区而言显著降低,从而导致城区的潜热通量也明显减少,隐式表达地表蒸散发能力的蒸散发因子也显示了相似的空间分布特征。另外由于地表没有植被覆盖,地表粗糙度减小,容易形成强烈的大气湍流运动,从而导致城市建成区的感热通量相对于郊区显著增加。城市建成区地表不透水层的固有特征也阻碍了土壤与大气之间的水分与能量交换,只有很薄的地表表层能够真正参与能量与水分循环,而且其保持能量的能力较弱,使得城市建成区地表能量的吸收与释放速度明显加快,表现为较高的土壤热通量。空间分析结果表明在莲湖区的莲湖

公园、新城区的革命公园以及碑林区的兴庆公园、动物园和大雁塔等呈现显著的地表温度低值,在这些地区的蒸散发、潜热通量表现为明显的高值,形成城市热岛中的绿岛,主要原因是大量绿地的存在,植被的蒸腾作用消耗了大部分的能量,增加了地表水分的蒸发与散发。进一步的分析发现上述区域的地表反照率比建成区明显偏低,说明公园中的绿地吸收了更多的热量,而主要由建筑物和柏油水泥等不透水层组成的区域反照率显著偏高,将太阳辐射更多反射到大气中,增加了大气温度,形成热岛效应,从而导致较高的地表温度与较低的潜热通量值。由于大部分能量被植被用于蒸腾作用,只有少部分能量被重新输送到大气中,从而形成感热通量在公园地区的相对低值,同样由于植被的存在,土壤层的能量吸收和释放并不如不透水层地表那样剧烈,因此土壤热通量在公园地区保持在较低的水平。另外还可以发现城市建成区道路的地表温度、蒸散发以及潜热通量具有不同的特征,尤其是西安内城区域的环城公路,通过调查发现其原因是由于道路均有高大树木覆盖,与不透水层的热环境具有显著不同的特征。详细的分析表明西安周围的小城镇并不会产生明显的热岛效应,这种现象说明城市建成区只有具体一定的规模与面积才会产生城市热岛现象,也为缓解大中城市热岛效应问题提供一定的思路与方法。

表 1 遥感反演或估算地表参数之间的相关系数矩阵

Table 1 The relation coefficients matrix of land surface parameters estimated from satellite data over the Xian city

	地表温度	NDVI	瞬间蒸散发	潜热通量	感热通量	土壤热通量	蒸散发因子
地表温度	1.00	0.51	0.97	0.98	0.91	0.48	0.99
NDVI		1.00	0.60	0.60	0.27	0.98	0.51
瞬间蒸散发			1.00	1.00	0.83	0.55	0.98
潜热通量				1.00	0.27	0.55	0.98
感热通量					1.00	0.27	0.91
土壤热通量						1.00	0.47
蒸散发因子							1.00

大部分研究仅仅分析了城市热岛效应中地表温度与植被指数之间的关系,说明城市建成区与郊区之间植被和热环境的差异。本文着重分析地表温度与潜热通量、蒸散发等能量与水分变量之间的关系,阐述城市热岛效应在能量通量方面的表现。图 4 分别表达了在图 3 中展示的随机选取剖面上地表温度与 NDVI、蒸散发因子、瞬间蒸散发和潜热通量之间的关系,其中剖面轨迹如图 3 中日蒸散发分布图中所示(如图 4 所示)。从图 4 中可以看出,在西安建

成区的剖面线上,其地表温度明显高于其它地区,形成一个温度窗口,同时地表温度与 NDVI 表现出显著的反相关关系,其相关系数的平方达到 0.51。地表温度与瞬间蒸散发、潜热通量、感热通量和蒸散发因子的相关系数达到 0.97、0.98、0.91 和 0.99(如表 1 所示)。这种现象说明地表温度相对于 NDVI 植被指数与地表通量变量具有更加强烈的相关关系,城市热岛效应中地表温度的变化引起了地表能量通量以及蒸散发变量的一系列时空变化。在城市

建成区与郊区交界处地表温度显著上升,NDVI 与蒸散发以及潜热通量明显降低,表现出两者的反相关关系。但是地表温度与感热通量和土壤热通量的关系却表现出正相关关系(如图 5 所示),统计分析表明,城市建成区地表温度与感热通量之间的相关系数为 0.9,而郊区两者的相关系数为 0.8,说明植被的存在降低了两者的相关性。另外也可以从图 5

中看出,地表温度与感热通量之间的相对差值在城市建成区和郊区也有较大的区别。地表温度与土壤热通量之间的相关性并不是太明显,相关系数仅为 0.48,但在城市建成区和郊区的变化趋势是一致的。

4.2 西安市城区城市热岛效应分析

为了分析不同行政区之间热岛效应之间的差别,对每个区的地表参数进行了统计分析(如表 2 和

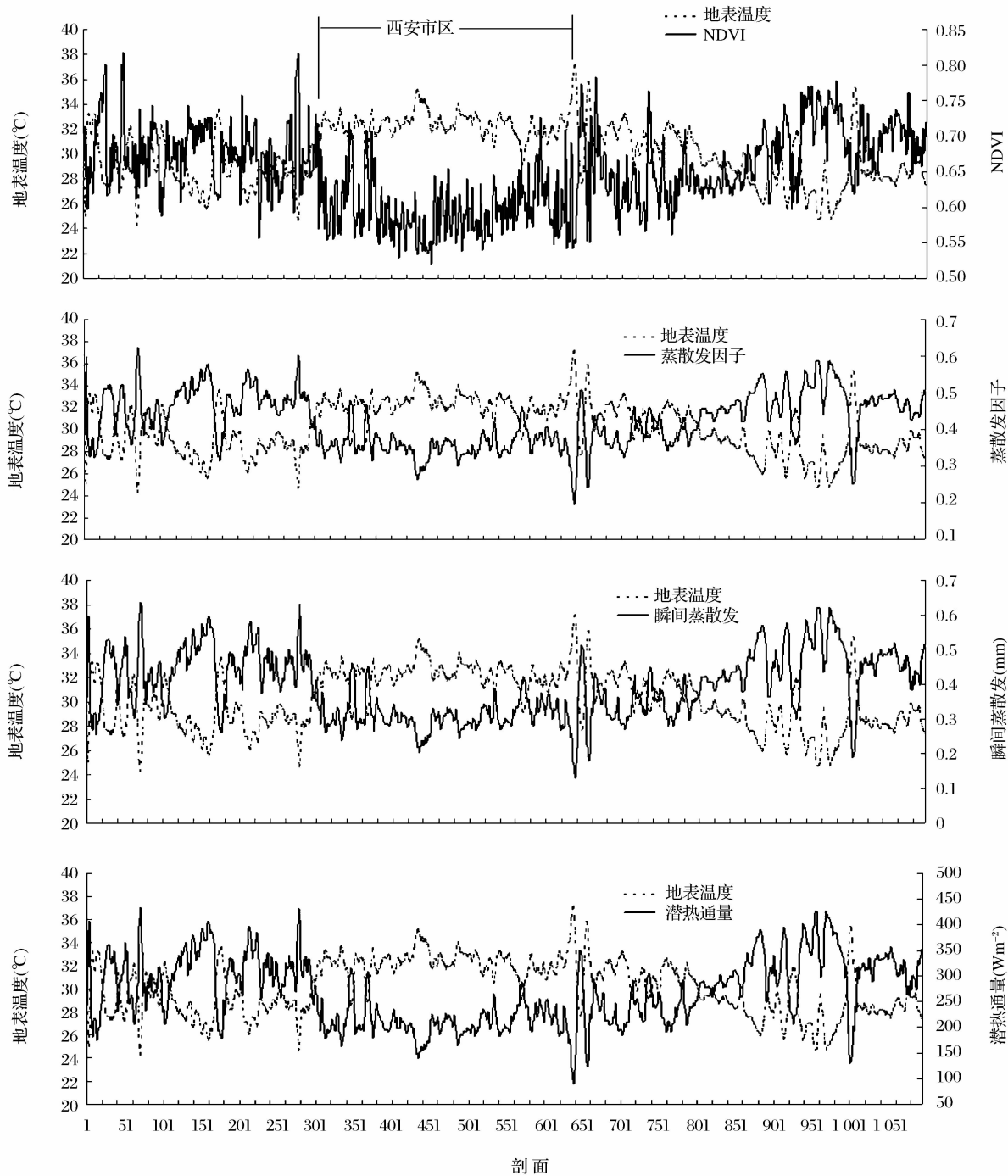


图 4 西安城区热岛效应剖面示意图

Fig. 4 The relationships of land surface temperature and NDVI, evaporative factor, latent heat flux in the typical urban island profile over the Xi'an city

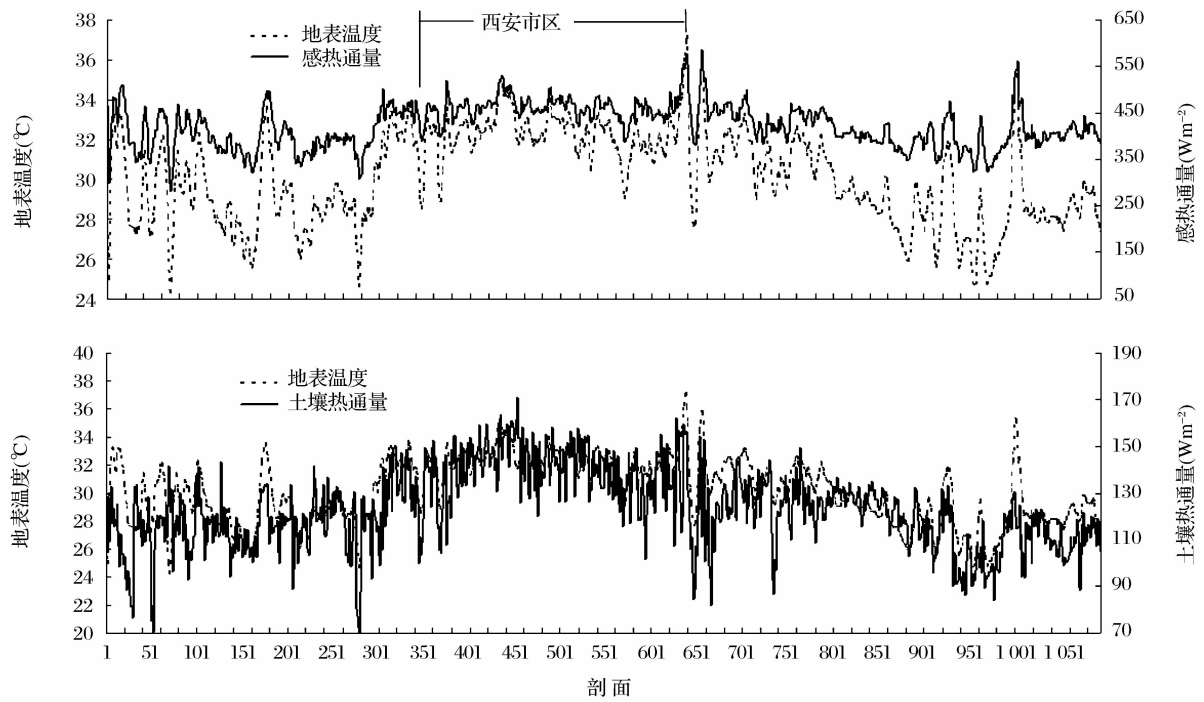


图 5 西安城区热岛效应剖面示意图

Fig. 5 The positive relationship of land surface temperature and sensible heat flux, soil heat flux indicated in the urban island of Xi'an city

表 3 如示)。统计分析表明每个区的地表参数差别明显,其中莲湖区的平均地表温度最高,达到 32.48℃,其标准偏差仅为 1.56℃,灞桥区的平均地表温度仅为 28.84℃,标准偏差达到 3.06℃,说明莲湖区的地表温度普遍较高,相反灞桥区的地表温度普遍较低,进一步分析表明,莲湖区属于工业与城市建筑物最为密集的地区,尤其在莲湖区的西部,分布着西安钢铁厂、化工厂、冶金机械厂等重要工业企业,地表温度的高值均出现在这个区域,而灞桥区则存在较大面积的郊区,这是两者地表温度相差较大的主要原因,也是城市热岛效应的集中体现。莲湖区的平均潜热通量为 204.87 Wm⁻²,其标准偏差为 40.46 Wm⁻²,仅高于新城區,而灞桥区平均潜热通量达到 299.65 Wm⁻²,其标准偏差为 67.46 Wm⁻²,

雁塔区平均潜热通量甚至达到 230.77 Wm⁻²。潜热通量的统计分析表明城市建成区由于下垫面均为硬化的柏油或水泥不透水层,用于蒸散发的水分较少,因此其潜热通量较低。但是在植被覆盖的郊区,更多的水通过土壤和植物根系输送到大气中,消耗更多的热量,表现为较高的潜热通量值。还可以看出在莲湖区日平均蒸散发量仅为 2.89 mm,其标准偏差为 0.57 mm,但灞桥区日平均蒸散发量则达到 4.22 mm,其标准偏差为 0.95 mm。其它日平均蒸散发量较高的为未央区,达到 3.73 mm,标准偏差为 0.97,空间变化更为强烈。以上结果表明具有植被覆盖的行政区均具有较高的日蒸散发量和潜热通量,其城市建成区的比例越高,日平均蒸散发和潜热通量越低,地表温度越高,形成典型的孤立热岛。

表 2 西安市建成区地表参数平均值统计表

Table 2 The statistic of land surface parameters in terms of mean in the built in area of Xi'an city									
	地表温度 (℃)	NDVI	瞬间蒸散发 (mm)	潜热通量 (Wm ⁻²)	感热通量 (Wm ⁻²)	土壤热通量 (Wm ⁻²)	蒸散发因子	近地气温 (℃)	日蒸散发 (mm)
未央区	30.22	0.64	0.39	264.66	417.57	123.17	0.42	20.34	3.73
灞桥区	28.84	0.67	0.44	299.65	400.17	114.01	0.46	19.50	4.22
新城區	32.28	0.60	0.31	208.11	459.45	137.03	0.36	20.41	2.94
碑林区	31.64	0.60	0.33	225.92	447.23	136.67	0.38	20.37	3.19
雁塔区	30.93	0.62	0.34	230.77	433.97	125.72	0.38	19.73	3.25
莲湖区	32.48	0.60	0.30	204.87	466.69	137.27	0.35	20.61	2.89

表 3 西安市建成区地表参数标准偏差(STD)统计表

Table 3 The statistic of land surface parameters in terms of STD in the built-in area of Xi'an city

	地表温度 (℃)	NDVI	瞬间蒸散发 (mm)	潜热通量 (Wm ⁻²)	感热通量 (Wm ⁻²)	土壤热通量 (Wm ⁻²)	蒸散发因子	近地表气温 (℃)	日蒸散发 (mm)
未央区	2.56	0.06	0.10	68.96	52.87	16.41	0.08	0.71	0.97
灞桥区	3.06	0.07	0.10	67.46	53.98	17.90	0.08	1.86	0.95
新城区	1.49	0.04	0.06	38.65	35.64	13.59	0.05	0.46	0.54
碑林区	1.53	0.05	0.06	42.49	33.44	14.19	0.05	0.39	0.60
雁塔区	3.70	0.08	0.08	52.52	57.57	18.46	0.07	2.16	0.74
莲湖区	1.56	0.05	0.06	40.46	37.92	13.99	0.05	0.44	0.57

5 结 语

研究表明,西安建成区与郊区热环境存在非常显著的差异,尤其在地表温度、蒸散发以及潜热通量空间分布图中,西安市建成区以及相关道路的轮廓非常清晰,建成区与郊区之间的边界明确,拥有众多工业企业的莲湖区西部在热环境方面呈现出明显的城市热岛效应,而分散分布的革命公园、兴庆公园、大雁塔和动物园等植被覆盖较多区域呈现较低的地表温度,较高的蒸散发和潜热通量,形成独特的城市热岛中的绿岛。因此工业与建筑物密集的莲湖区城市热岛现象最为显著,占有较大面积郊区的灞桥区的城市热岛效应最不明显。

因此,本文通过采用遥感反演与估算地表温度和地表通量的方法监测城市热岛效应,分析了城市热岛效应的内在物理机制及其发生原因,显示了植被在缓解和治理城市热岛效应方面具有独特的重要地位,具有重要的理论意义与实用价值。由于观测数据的缺乏,本文不足之处在于没有对估算地表通量进行验证,有待于今后进一步研究。

参考文献:

[1] Zheng Zuofang, Liu Weidong, Wang Yingchun. Distributive Character of Urban Heat Island Effect in the Beijing Region [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29 (5): 694-699. [郑祚芳,刘伟东,王迎春.北京地区城市热岛的时空分布特征[J].南京气象学院学报,2006,29(5):694-699.]

[2] Hung T, Uchiama D, Ochi S, *et al.* Assessment with Satellite Data of the Urban Heat Island Effects in Asian Mega Cities [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006, 8: 34-48.

[3] Yang Yuhua, Xu Xiangde, Weng Yonghui. Simulation of Daily Cycle of Boundary Layer Heat Island in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(1): 61-68. [杨玉华,徐祥德,翁永辉.北京城市边界层热岛的日变化周期模拟[J].

应用气象学报,2003,14(1):61-68.]

[4] Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. Impact of Urban Growth on the Heat Island in Beijing [J]. Journal of Geophys., 2006, 49(1): 69-77. [季崇萍,刘伟东,轩春怡.北京城市化进程对城市热岛的影响研究[J].地球物理学报,2006,49(1):69-77.]

[5] Zhang Ling, Xu Zongxue, Ruan Benqing. Effect of Urban Heat Island on the Air Temperature and Precipitation in Beijing Region [J]. Journal of Nature Resources, 2006, 21(5): 746-755. [张玲,徐宗学,阮本清.北京城市热岛效应对气温和降水量的影响[J].自然资源学报,2006,21(5):746-755.]

[6] Zhao Yunsheng, Du Jia, Song Kaishan, *et al.* A Study on Urban Thermal Field of Changchun City in Summer Based on Satellite Remote Sensing [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(1): 70-74. [赵云升,杜嘉,宋开山,等.基于卫星遥感的夏季长春市城区热场分析[J].地理科学,2006,26(1):70-74.]

[7] Yuan F, Bauer M E. Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106: 375-386.

[8] Kato S, Yamaguchi Y. Analysis of Urban Heat-island Effect Using ASTER and ETM+ Data; Separation of Anthropogenic Heat Discharge and Natural Heat Radiation from Sensible Heat Flux [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99: 44-54.

[9] Gluch R, Quattrochi D A, Luvall J C, *et al.* A Multi-scale Approach to Urban Thermal Analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104: 123-132.

[10] Pu R L, Gong P, Michishita R, *et al.* Assessment of Multi-resolution and Multi-sensor Data for Urban Surface Temperature Retrieval [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104: 211-225.

[11] Ma Yonggang, Tashpolat Tiyp, Huang Yue, *et al.* Effects of Landscape Pattern Change on Urban Heat-island Effect in Arid Areas [J]. Arid Zone Research, 2006, 23(1): 172-176. [马勇刚,塔西甫拉提·特依拜,黄粤,等.城市景观格局变化对城市热岛效应的影响——以乌鲁木齐市为例[J].干旱区研究,2006,23(1):172-176.]

[12] Chen X L, Zhao H M, Li P X, *et al.* Remote Sensing Image-

- Based Analysis of the Relationship between Urban Heat Island and Land Use/Cover Changes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104: 133-146.
- [13] Huo Yanjie, Wei Haiyan, Xue Liang, *et al.* Study on Spatio-temporal Changes of Land Use in Xi'an City Based on RS and GIS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(6): 672-676. [霍艳杰, 卫海燕, 薛亮, 等. 基于遥感和 GIS 的西安市土地利用时空变化研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(6): 672-676.]
- [14] Qin Z, Karnieli A, Bediner P. A Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-egypt Border Region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719-3746.
- [15] Wang K, Li Z, Cribb M. Estimation of Evaporative Fraction from a Combination of Day and Night Land Surface Temperature and NDVI: A New Method to Determine the Priestley-Taylor Parameter[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102: 293-305.
- [16] Liang S. Narrowband to Broadband Conversion of Land Surface Albedo. I. Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76: 213-238.
- [17] Zhang W C, Zhang Y S. Observation and Estimation of Daily Actual Evapotranspiration and Evaporation on a Glacierized Watershed at the Headwater of the Urumqi River, Tianshan, China[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(11): 1589-1601.

Spatial Analysis of Land Surface Temperature and Fluxes in Urban Heat Island over Xi'an City

WANG Ping

(Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China)

Abstract: The rapid development of urbanization spurred the production of more large cities and the expansion of urban area, which resulted in the deteriorated urban heat island. Satellite remote sensing imagery was used to estimate the spatial information of land surface temperature and vegetation index as well as land surface fluxes over the urban area in Xi'an city. In order to understand the inner mechanism of urban heat island, not only the relationship between land surface temperature and NDVI, but also the spatial structure of land surface fluxes also has been analysed in the built-in and suburb region. A practical evapotranspiration estimation algorithm and the mono-window algorithm were utilized to calculate land surface fluxes and temperature from Landsat ETM+ image respectively in this paper. The spatial characteristic of evapotranspiration factor was obtained with interpolation method according to the feature space of land surface temperature and NDVI, then the land surface fluxes and actual evapotranspiration could be acquired by combining with energy balance equation and Priestly-Taylor formula.

The results showed that there were large differences of thermal environment between built-in and suburb area of Xi'an city, and land surface temperature not only was related with NDVI negatively, but also related with land surface latent heat fluxes and actual evapotranspiration negatively, meanwhile it also was related with land surface sensible heat fluxes and soil heat fluxes positively. Further detailed analysis indicated that more obvious urban heat island appeared over Lianhu district where more factories distributed, on the contrary, urban heat island phenomena became unapparent over Baqiao district where more vegetation covered. So it could be concluded that urban heat island could be monitored using Landsat ETM+ image in terms of land surface temperature, NDVI, land surface fluxes and actual evapotranspiration perfectly, which could provide better bases for reducing effects of urban heat island on human being's life.

Key words: Urban heat island; Land surface temperature; Land surface fluxes; NDVI