

基于 L5/L8 影像成都市热环境特征分析

李海峰^{1,2}, 李永树¹, 卢正²

¹西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;

²四川建筑职业技术学院测绘工程系, 四川 德阳 618000

摘要 以遥感影像为数据源、地表温度为指标,评价成都 1988~2013 年城市热环境特征。结果表明:城市热场中高温区域向外迁移,2013 年转移到三环至绕城区域;特高温类型面积逐年减小,2005~2013 年平均每年减少 1.83 km²,高温和次高温类型面积分别增加 26.90 km² 和 45.35 km²;4 个时段的年际城市热岛强度(UHII)按照先减小后增大再减小的规律变化,2005 年 UHII 最强为 4.37 °C。从一环路以内至绕城高速间,1988 年 UHII 逐渐减弱,最大值为 5 °C,2013 年逐渐增强,最大值为 2.93 °C;沿西向东方向上地温值和植被覆盖度值均呈波动变化,二者呈负相关,确定性系数为 0.5744。

关键词 遥感;城市热环境;Landsat 8 影像;地表温度;成都市

中图分类号 X24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.032801

Study on Urban Thermal Environment of Chengdu City Based on L5 and L8 Images

Li Haifeng^{1,2}, Li Yongshu¹, Lu Zheng²

¹Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu, Sichuan 611756, China;

²Geomatics Engineering Department, College of Architectural Technology, Deyang, Sichuan 618000, China

Abstract In order to evaluate the urban thermal environment of Chengdu city from 1988 to 2013, the land surface temperature and remote sensing images are taken as indexes and data sources. The results show that the high temperature region of urban thermal field migrates outward, and it is transferred to the area between the third ring and circular highway in 2013. The extra-high temperature area decreases year by year, and it is reduced by 1.83 km² annually from 2005 to 2013, the areas of high temperature and sub-high temperature increase by 26.90 km² and 45.35 km², respectively. The change rule of urban heat island intensity (UHII) is first decrease and then increase and finally decrease in four periods, and the strongest of UHII is 4.37 °C in 2005. The UHII is weakened in 1988 and strengthened in 2013 from area of the first ring to circular highway, the maximum values are 5 °C and 2.93 °C respectively in the two years. The change rules of land surface temperature and vegetation coverage values are fluctuant along the west to east direction with negative correlation, and the certainty factor is 0.5744.

Key words remote sensing; urban thermal environment; Landsat 8 image; land surface temperature; Chengdu city

OCIS codes 280.6780; 280.4750; 010.0280

1 引言

城市热环境是城市空间环境在热力场中的综合表现^[1],也是城市生态环境的重要组成部分,通过研究城

收稿日期: 2016-11-08; 收到修改稿日期: 2016-12-02

基金项目: 四川省环境保护重大科技专项(2013HBZX01)、四川省教育厅自然科学重点项目(16ZA0428)、四川省环保科技项目(2010HBY003)、四川省教育厅自然科学创新团队项目(16TD0040)、四川建筑职业技术学院项目(2015KJ13)

作者简介: 李海峰(1980—),男,博士,副教授,主要从事遥感与地理信息系统技术应用等方面的研究。

E-mail: 69359603@qq.com

市热环境能够揭示城市空间结构和城市规模,为城市的健康发展提供引导。目前研究城市热环境的手段主要有三种:地面观测法、遥感监测法和数值模拟法^[2]。遥感监测法由于具有覆盖范围广、时间同步好等优势,被越来越多的学者采纳。目前,学者们使用的遥感数据主要包括 NOAA/AVHRR、ASTER、MODIS 和 Landsat,由于 Landsat 影像具有较高的空间分辨率而备受学者青睐,尤其是 Landsat 8 的成功发射^[3-10]。

成都市作为 2016 年新一线城市,其商业资源聚集度、城市枢纽性等方面的优势直逼北上广深。虽然,北京、上海等城市热环境的研究已经非常深入细致,但是,城市热环境具有很强的地域性和对城市的依附性,研究的成果具有不可替代性。而近年来学者们对成都市热环境状况关注度较低,研究成果相对匮乏,主要研究成果有许辉熙等^[11]运用统计和平面等值线等方法研究成都平原城市热岛效应;但尚铭等^[12]利用 AVHRR 影像研究成都平原城市热岛效应的昼夜和季节特征;但玻等^[13]研究了成都城市热环境的空间特点;张好等^[14]研究了成都市热岛效应与城市空间发展关系;胡平^[15]研究了成都市中心城区城市热岛效应。上述研究主要存在以下不足:早期研究主要以 AVHRR 为数据源,该影像数据空间分辨率低,不适宜进行热场内部分析和定量研究,胡平^[15]虽然使用 Landsat 数据进行了相关分析,但是所选影像数据量少,时间跨度较短,不能很好表现成都市热环境时空变化规律,并且分析也不够深入。本文使用 Landsat 5 和 Landsat 8 共 4 个时期的影像,在反演地表温度(LST)的基础上评价成都主城区 25 年间城市热场、热力景观类型和城市热岛强度变化,同时分析地表温度、植被覆盖度(FVC)变化规律及二者的相关关系。研究的时间跨度更长,具有动态性,结论更加客观、真实。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据源

以成都市中心城区为研究对象,以 Landsat 5 和 Landsat 8(轨道号 129/39)为遥感数据源,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。3 期 Landsat 5 影像,时间分别为 1988-05-01、2000-04-16 和 2005-04-14,过境时间均为 03:05;1 期 Landsat 8 影像,时间为 2013-04-20,过境时间为 03:35。研究区内影像质量好、成像清晰、无薄云覆盖。

2.2 研究方法

研究使用的遥感影像均为 GeoTIFF 格式,使用前需要进行几何精校正以消除非系统性误差,然后进行辐射定标、大气校正和地温反演,对于 Landsat 5 数据,根据 NASA 提供的 TM 传感器增益参数和 COST 模型完成辐射定标和大气校正,这些算法及操作在相关文献已有详细阐述^[16-19]。地温反演采用基于影像的算法(IB 算法),模型参见文献^[20-21]。Landsat 8 影像的相关算法如下。

1) 辐射定标

对于热红外传感器 TIRS 数据根据下式将影像的亮度值转换为大气顶部的光谱辐射值^[4],即

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{\text{cal}} + A_L, \quad (1)$$

式中 L_{λ} 为波段 λ 的大气顶部的光谱辐射值; M_L 和 A_L 都是调整因子,可在头文件(*_MTL.txt)中查得; Q_{cal} 为 16 位量化的 DN 值。

需要注意的是计算完成后需将 TIRS10 求出的辐射亮度值减去 $0.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ^[4,22],以提高地温反演精度。

2) 反射率定标

对于 OLI 数据,通过反射率定标系数获得像元的大气顶部反射率。利用 Chavez^[23]提出的 COST 模型反演大气顶部反射率同时完成大气校正^[3],模型如下:

$$\rho_{\lambda, \text{COST}} = \frac{M_{\rho} (Q_{\text{cal}} - Q_h) + Q_{\rho}}{\cos \theta_z \times \tau}, \quad (2)$$

式中 $\rho_{\lambda, \text{COST}}$ 为校正后的大气顶部反射率; M_{ρ} 和 A_{ρ} 都是调整因子,可在头文件(*_MTL.txt)中查得; θ_z 为太阳天顶角,可以通过太阳高度角计算获得; Q_h 为大气影响的修正值,可以通过最暗像元法获得^[23]; τ 是大气透射率,可通过太阳高度角估算,由于其估算精度很难保证,因此在实际应用中常被忽略^[24]。

3) 地温反演

Landsat 8 的 TIRS 传感器有 TIRS10 和 TIRS11 两个热红外波段。学者们分别采用单窗算法^[5-6]、劈窗算

法^[7]和IB算法^[15]反演地温。徐涵秋^[3,4,8]对单通道算法、劈窗算法等主流算法进行了评述与分析。实际上,由于TIRS数据的定标精度有限,不推荐采用劈窗算法^[3-4],因此,本文选择TIRS10结合IB算法来反演地温。

反演地温前需要反演亮度温度(简称亮温),然后通过NDVI法计算植被覆盖度和地表比辐射率^[25-27],最后利用地表比辐射率对辐射亮温进行修正即得到地温值。亮温反演模型为

$$T = \frac{K_2}{\ln(1 + K_1/L_\lambda)}, \quad (3)$$

式中 T 代表亮温(单位为K), $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$, L_λ 为大气顶部的光谱辐射值,由(1)式计算获得。地温反演模型为^[20]

$$T_s = \frac{T}{1 + (\lambda T/\rho) \ln \epsilon} - 273.15, \quad (4)$$

式中 T_s 为地温(单位为 $^{\circ}\text{C}$), $\lambda = 10.9 \mu\text{m}$, $\rho = hc/\delta = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$, $\delta = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻尔兹曼常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光速, ϵ 是地表比辐射率,273.15为开氏温度和摄氏温度转换常数。

3 结果与分析

3.1 城市热场空间格局

根据上述方法完成地温反演,图1所示为成都市4个年份绕城高速以内的城市热场空间格局。整体而言,1988~2013年间成都市热场变化明显。4个时段高低温差明显。1988年热场中高温区域集中在一环内,以及一环至三环之间东侧,三环路以外区域温度较低,只有极少的高温区域和零星的高温缀块分布出现;2000年一环内的高温现象有所缓解,同时高温逐渐向外扩展,已经占领了二环路的绝大部分,三环至绕城间区域温度仍然较低,由二环路向外辐射出多条带状高温区域,整体构成螃蟹状;2005年二环路以内的高温区域进一步减少,并且高温区域向外已经扩展到三环路以外;2013年成都市三环路以内基本成功逃离高温统治,仅有少数面状的高温区 and 高温缀块,而三环至绕城大部分区域已经被高温霸占。

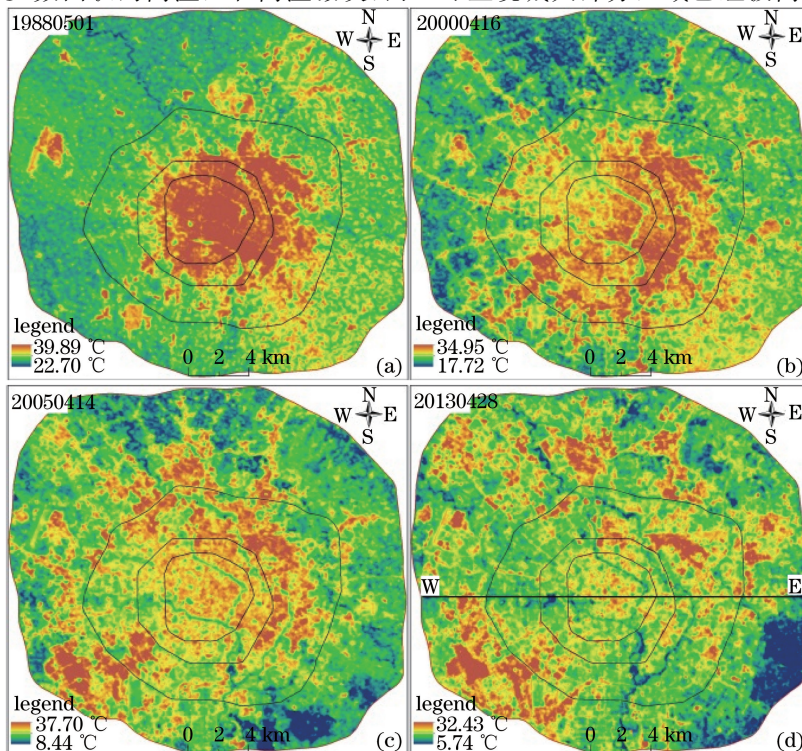


图1 城市热场空间格局

Fig. 1 Spatial patterns of urban thermal field

针对图 1 热场数据,利用 ArcGis 软件提取 4 个年份在一环路以内、一环至二环间、二环至三环间和三环至绕城间的热场数据,然后统计每个年份在上述 4 个区域的地表平均温度(简称平均温度)并绘制平均温度变化曲线,如图 2 所示。4 个年份中三环至绕城区域平均温度都最低。1988 年从一环路以内到三环至绕城区域平均温度呈直线式下降,且斜率较大;2000 年一环路以内平均温度值为 $24.99\text{ }^{\circ}\text{C}$,一环至二环间平均温度值为 $25.00\text{ }^{\circ}\text{C}$,二者值基本相同,二环以外两个区域温度逐渐下降;2005 年从一环路以内到三环至绕城区域平均温度呈下降趋势,一环路以内到二环至三环间下降非常缓慢,统计数据显示它们只相差 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,仍是一环路以内区域温度最高,三环至绕城区域温度下降明显;2013 年从一环路以内到三环至绕城区域平均温度呈波浪式变化,经历了先减小后增大再减小的变化过程,变化幅度较小,其中最大值出现在一环路以内,与平均温度次高的二环至三环区域相差 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

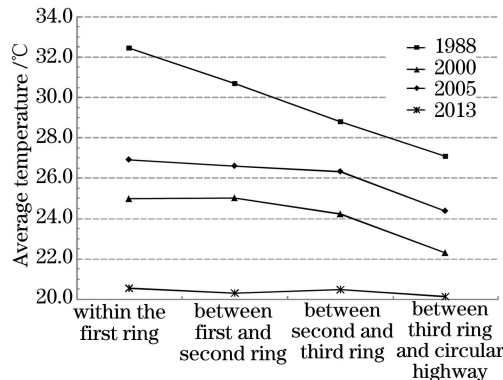


图 2 LST 变化曲线

Fig. 2 Change curve of LST

3.2 热力景观类型分析

借鉴城市热岛分级的原理与方法,采用均值-标准差法将热力景观划分为 6 种类型^[28],结果如图 3 所示。同时,将 4 个年份不同热力景观类型面积及所占比例统计于表 1 中。

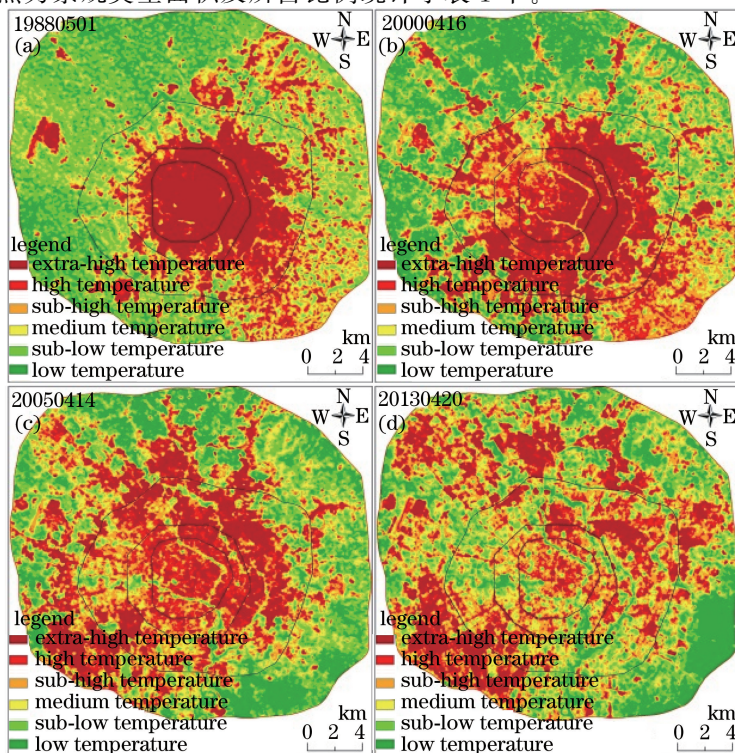


图 3 热力景观类型划分。(a) 1988-05-01;(b) 2000-04-16;(c) 2005-04-14;(d) 2013-04-20

Fig. 3 Classification of thermodynamic landscape. (a) 1988-05-01; (b) 2000-04-16; (c) 2005-04-14; (d) 2013-04-20

表1 热力景观类型面积统计表

Table 1 Statistics area of different thermal landscape types

Thermal landscape type	1988-05-01		2000-04-16		2005-04-14		2013-04-20	
	Area /km ²	Percentage /%	Area /km ²	Percentage /%	Area /km ²	Percentage /%	Area /km ²	Percentage /%
Extra-high temperature	94.45	17.46	92.70	17.14	86.63	16.02	72.02	13.32
High temperature	49.58	9.17	72.32	13.37	82.15	15.19	76.48	14.14
Sub-high temperature	71.44	13.21	98.54	18.22	96.40	17.82	116.79	21.59
Medium temperature	106.77	19.74	91.04	16.83	100.40	18.56	116.51	21.54
Sub-low temperature	156.08	28.85	86.91	16.07	88.21	16.31	84.36	15.60
Low temperature	62.56	11.57	99.37	18.37	87.09	16.10	74.72	13.81

结合图3和表1比较发现,1988~2013年间特高温类型面积呈现逐年下降的趋势,下降幅度逐渐增加,2005~2013年平均每年下降1.83 km²;高温类型面积在1988~2005年间增加迅速,而2005~2013年面积有所减少,但与1988年相比仍然增加26.90 km²;次高温类型面积与中温类型面积在1988~2013年间分别增加45.35 km²和9.74 km²;次低温类型面积在1988~2013年间下降71.72 km²;低温类型面积在2000年时增加到最大为99.37 km²,然后开始逐渐减小,2013年达到最小值,与1988年相比仍增加12.16 km²。

3.3 城市热岛强度分析

城市热岛强度是评价城市热岛效应强弱的核心指标,而城市热岛效应又是城市热环境变化的集中体现。目前,计算城市热岛强度的算法主要有三种:城乡平均温度对比法、热岛区与低温区对比法^[29]和热岛面积指数法^[30],本文选择热岛区与低温区对比法,算法见文献[29],定义特高温类型、高温类型和次高温类型所在区域为城市热岛区。将不同年份城市热岛强度进行统计,并绘制成曲线,如图4所示。

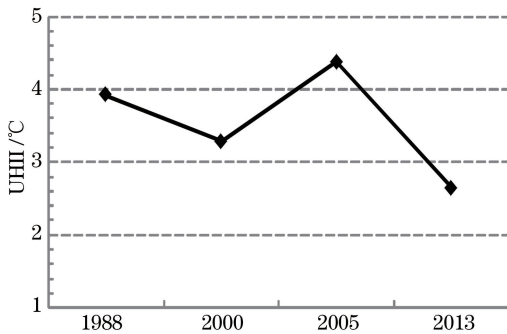


图4 城市热岛强度年际变化曲线

Fig. 4 Change curve of UHII in different years

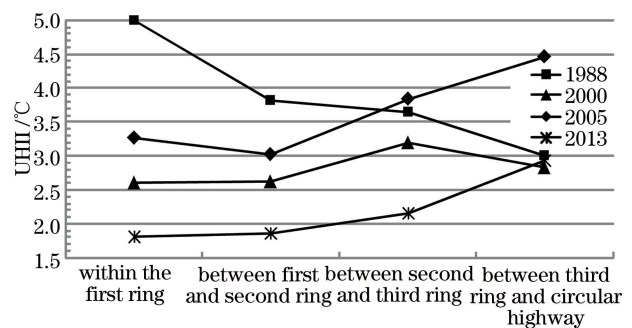


图5 城市热岛强度区域变化曲线

Fig. 5 Change curves of UHII in different regions

图4反映出从1988~2013年间成都城市热岛强度呈波浪式变化,1988~2000年强度减弱,2000~2005年强度有所增强,在2005~2013年强度再次减弱,在所选时段中2005年城市热岛强度最强为4.37 °C,2013年城市热岛强度最弱为2.64 °C。

为进一步研究成都市一环路以内、一环至二环间、二环至三环间和三环至绕城间热岛强度变化规律,利用ArcGis软件空间分析功能提取1988~2013年在上述4个区域的热岛区平均温度和低温区平均温度,然后计算各个年份的城市热岛强度值,并对结果进行统计,绘制区域城市热岛强度变化曲线,如图5所示。1988年从一环路以内至绕城高速间热岛强度逐渐减弱,其中一环路以内热岛强度值达到5 °C;2000年4个区域热岛强度值比较接近,最大值3.10 °C出现在二环至三环间;2005年三环至绕城间热岛强度值最大为4.46 °C,一环至二环间热岛强度值最小为3.02 °C;2013年城市热岛强度的变化规律与1988年刚好相反,从

一环路以内至绕城高速间热岛强度逐渐增强,最大值达到 $2.93\text{ }^{\circ}\text{C}$,一环路以内和一环至二环间热岛强度分别为 $1.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.86\text{ }^{\circ}\text{C}$,二者与最大价值之差均超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,由此说明,1988~2013年间成都市通过增加城市绿化、工厂企业外迁等措施成功地改善了二环路以内的城市热环境状况。

3.4 地温与植被覆盖度分析

通过剖面分析法研究自西向东(W→E)方向地温和植被覆盖度的变化情况,和二者之间的相关关系。该方向经过城市中心繁华区域和植被覆盖较好区域,具有较强代表性,剖面具体位置如图1(d)所示。地温数据和植被覆盖度数据利用 ArcGis 软件提取,并在 MATLAB 软件中绘制像元-地温、植被覆盖度变化曲线,如图6所示,为使图幅更加直观,绘制曲线时植被覆盖度值扩大20倍。

两条曲线均呈波浪式变化,波峰、波谷交替出现。地温值在 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化,两侧的绕城高速附近区域地温值明显低于中间区域。植被覆盖度方面:一环路以内的植被覆盖度整体偏低,东西两侧的绕城高速附近区域植被覆盖良好。地温值较大的像元对应的植被覆盖度值较小,二者呈明显的负相关。将两类数据用线性函数进行拟合,如图7所示,函数模型为 $y = -8.8376x + 22.652$,斜率为 -8.8376 ,验证二者的负相关性,确定性系数达到 0.5744 。可见植被在缓解城市热环境状况中的重要作用。

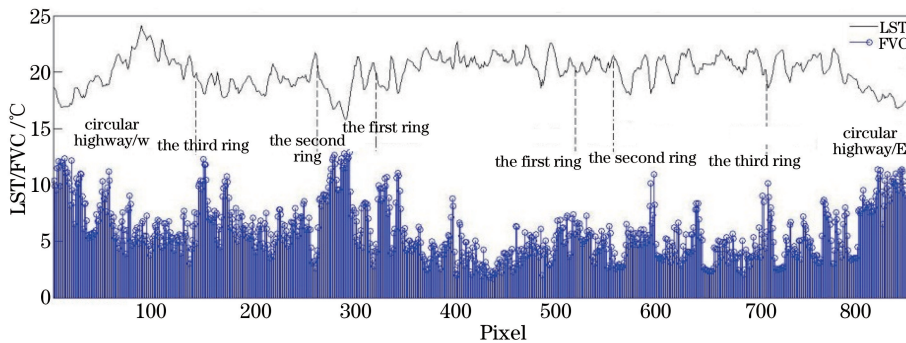


图6 LST和FVC变化曲线

Fig. 6 Change Curve of LST and FVC

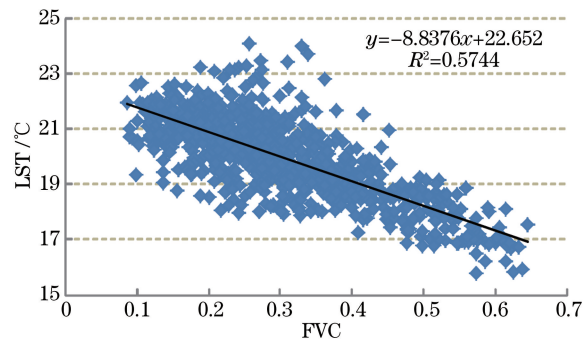


图7 LST和FVC相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of LST and FVC

4 讨论

虽然不同城市所处的地理位置以及城市内部结构的差异,导致热环境特征差异较大。但是大量研究结果表明,城市热环境状况与城市土地利用类型存在较强的相关性。道路、建筑物等不透水面由于其热传导性差,对城市热岛的形成起到很大促进作用。而植被覆盖度较高的区域,由于植被具有显著的降温增湿效果^[31],所以能很好地缓解热岛效应带来的负面影响。城市重心与热力重心在空间上也存在较强的一致性。

成都市热环境状况不同于其他城市。由于其位于成都平原,四周地势高中间低导致热量不容易扩散而容易形成城市热岛效应。1988年左右由于大量的工厂集中在一环路区域,所以该时期主城区地温显著高于四周,热岛效应明显,随着城市“摊大饼”式的发展导致高温区逐渐向外扩展,2005年伴随城市功能区的重新

划分和完善,温度较高的区域转移到三环路和绕城高速间,这时热岛中心已经由单中心发展为多中心。热岛区的面积没有显著增加或减少。另外,1988年和2000年城市热环境中高温区主要呈面状分布,而2005年开始随着热力景观斑块破碎度的增大,主要呈缀块状分布,人为因素干扰增强。城市人口逐步由市中心向郊区迁移也是导致高温区外迁的重要因素。

5 结 论

1) 1988~2013年成都市热场变化较大。城市热场中高温区域逐渐向外迁移,1988年城市热场中高温区域主要集中在一环路以内,2013年大部分高温区域已经转移到三环至绕城区域。

2) 按照均值-标准差法将热力景观划分为6种类型。特高温类型面积呈现逐年下降的趋势,2005~2013年平均每年下降 1.83 km^2 ,高温类型面积在1988~2013年间增加 26.90 km^2 ;次高温类型面积增加 45.35 km^2 。

3) 1988~2013年城市热岛强度按照先减小后增大再减小的规律变化,在所选时段中2005年城市热岛强度最大为 $4.37 \text{ }^\circ\text{C}$,2013年城市热岛强度最弱。1988年从一环路以内至绕城高速间热岛强度逐渐减弱,最大值为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$;2000年4个区域热岛强度值比较接近;2005年三环至绕城间热岛强度值最大为 $4.46 \text{ }^\circ\text{C}$;2013年从一环路以内至绕城高速间热岛强度逐渐增强,热岛强度值最大值 $2.93 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4) 通过剖面分析方法研究W→E方向地温和植被覆盖度的变化情况。地温值在 $15\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化。一环路以内的植被覆盖度偏低,西一环至三环间的植被覆盖状况明显好于东一环至三环间。地温值较大的像元对应的植被覆盖度值较小,用线性函数进行拟合证实二者的负相关性,确定性系数达到0.5744。

致谢 遥感数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Chen Yunhao, Shi Peijun, Li Xiaobing. Research on spatial thermal environment in Shanghai City based on remote sensing and GIS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(2): 139-144.
陈云浩, 史培军, 李晓兵. 基于遥感和GIS的上海城市空间热环境研究[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 139-144.
- [2] Hu Jiacong, Zhu Qijiang. Urban heat island: progress of the field[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(2): 186-192.
胡嘉骢, 朱启疆. 城市热岛研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 186-192.
- [3] Xu Hanqiu. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3): 741-747.
徐涵秋. 新型Landsat 8卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 741-747.
- [4] Xu Hanqiu. Change of Landsat 8 TIRS calibration parameters and its effect on land surface temperature retrieval[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2): 229-235.
徐涵秋. Landsat 8热红外数据定标参数的变化及其对地表温度反演的影响[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 229-235.
- [5] Hu Deyong, Qiao Kun, Wang Xingling, et al. Land surface temperature retrieval Landsat 8 thermal infrared data using mono-window algorithm[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(6): 964-976.
胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 等. 单窗算法结合Landsat 8热红外数据反演地表温度[J]. 遥感学报, 2015, 19(6): 964-976.
- [6] Jiang Dalin, Kuang Honghai, Cao Xiaofeng, et al. Study of land surface temperature retrieval based on Landsat 8-with the sample of Dianchi lake basin[J]. Remote Sensing Technology and application, 2015, 30(3): 448-454.
蒋大林, 匡鸿海, 曹晓峰, 等. 基于Landsat 8的地表温度反演算法研究-以滇池流域为例[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(3): 448-454.
- [7] Li Yao, Pan Jinghu. Spatial pattern on urban heat environment using split window algorithm and spectral mixture analysis based on Landsat 8 images: a case of Lanzhou city[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(1): 111-119.
李瑶, 潘竞虎. 基于Landsat 8劈窗算法与混合光谱分解的城市热岛空间格局分析-以兰州市中心城区为例[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 111-119.

- [8] Song Ting, Duan Zheng, Liu Zhijun, *et al.* Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 451-464.
宋挺, 段峥, 刘志军, 等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对比[J]. *遥感学报*, 2015, 19(3): 451-464.
- [9] Zhou Xiaoli, Guo Jiawei, Liu Kunming. Water body extraction based on PCA and OLI imagery: a case study of Poyang lake region[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080104.
周小莉, 郭加伟, 刘铭. 基于陆地成像仪影像和主成分的水体信息提取-以鄱阳湖区为例[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080104.
- [10] Qiu Ganggang, Li Xin, Wei Wei, *et al.* Radiometric calibration experiment and analysis for remote sensors on-orbit based on automated observation technology in site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0701001.
邱刚刚, 李新, 韦玮, 等. 可见近红外波段自动化观测在轨辐射定标[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0701001.
- [11] Xu Huixi, Dan Shangming, He Zhengwei, *et al.* Remote sensing analysis of urban heat island effect in Chengdu plain [J]. *Environment Science & Technology*, 2007, 30(8): 21-23.
许辉熙, 但尚铭, 何政伟, 等. 成都平原城市热岛效应的遥感分析[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(8): 21-23.
- [12] Dan Shangming, Dan Bo, Yang Xiurong, *et al.* Dynamic characteristics of urban heat-island in Chengdu plain by satellite remote sensing[J]. *Environment Science & Technology*, 2009, 32(7): 10-13.
但尚铭, 但波, 杨秀蓉, 等. 卫星遥感成都平原城市热岛效应的动态特征[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(7): 10-13.
- [13] Dan Bo, Zhao Xijin, Dan Shangming, *et al.* Spatial feature and countermeasures of urban thermal environment in Chengdu[J]. *Sichuan Environment*, 2011, 30(5): 124-127.
但波, 赵希锦, 但尚铭, 等. 成都城市热环境的空间特点及对策[J]. *四川环境*, 2011, 30(5): 124-127.
- [14] Zhang Hao, Xu Hanqiu, Li Le, *et al.* Analysis of the relationship between urban heat island effect and urban expansion in Chengdu, China[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(1): 70-78.
张好, 徐涵秋, 李乐, 等. 成都市热岛效应与城市空间发展关系分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(1): 70-78.
- [15] Hu Ping. Study on urban heat island in the central city of Chengdu based on Landsat 8 [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 19-31.
胡平. 基于 Landsat 8 的成都市中心城区城市热岛效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015: 19-31.
- [16] Chi Hongkang, Zhou Guangsheng, Xu Zhenzhu, *et al.* Apparent reflectance and its applications in vegetation remote sensing[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 74-80.
池宏康, 周广胜, 许振柱, 等. 表观反射率及其在植被遥感中的应用[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 74-80.
- [17] Makham B L, Barker J L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, atmospheric reflectance and at-satellite temperature[J]. *EO-SAT Landsat Technical Notes*, 1986: 3-8.
- [18] Li Haifeng. Study on thermal environment of the medium-sized city using multi-source remote sensing data [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 20-24.
李海峰. 多源遥感数据支持的中等城市热环境研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 20-24.
- [19] Li Haifeng, Li Yongshu, Lu Zheng, *et al.* Analysis of the thermal environment effect of river corridor landscape[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(4): 51-54.
李海峰, 李永树, 卢正, 等. 河流廊道景观的热环境效应分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(4): 51-54.
- [20] Artis D A, Carnahan W H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, 12(4): 313-329.
- [21] Yue Wenze. Study on urban landscape pattern and its thermal environment effect based on remote sensing image [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005: 86-90.
岳文泽. 基于遥感影像的城市景观格局及其热环境效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005: 86-90.
- [22] USGS. Landsat 8 Data[EB/OL]. [2015-07-29]. <http://landsat.usgs.gov>.
- [23] Chavez Jr P S. Image-based atmospheric corrections-revisited and revised[J]. *Photogram Eng Remote Sens*, 1996, 62(9): 1025-1036.
- [24] Ramsey R D, Wright Jr D L, McGinty C. Evaluating the use of Landsat 30 m enhanced thematic mapper to monitor vegetation cover in shrub-steppe environments[J]. *Geocar to International*, 2004, 19(2): 39-47.

- [25] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D22): 4688.
- [26] Sobrino J A, Raissouni N, Li Z L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(2): 256-266.
- [27] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [28] Chen Songlin, Wang Tianxing. Comparison analyses of equal interval method and mean-standard deviation method used to delimitate urban heat island[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(2): 145-150.
陈松林, 王天星. 等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(2): 145-150.
- [29] Wang Tianxing, Chen Songlin, Yan Guangjian. Estimation of land surface parameters and spation-temporal characteristics of urban heat island[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(5): 697-702.
王天星, 陈松林, 阎广建. 地表参数反演及城市热岛时空演变分析[J]. *地理科学*, 2009, 29(5): 697-702.
- [30] Yang Yingbao, Su Weizhong, Jiang Nan. Application of remote sensing to study urban heat island effect [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(5): 36-40.
杨英宝, 苏伟忠, 江 南. 基于遥感的城市热岛效应研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(5): 36-40.
- [31] Sun Zhongqiu, Zhao Yunsheng. The investigation of polarized reflectance of vegetation canopies basing on polarized reflectance model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 102802.
孙仲秋, 赵云升. 基于地表反射模型的植被冠层偏振反射特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 102802.