

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.05.008

# 山地城市热环境及其聚落特征的关联分析

吕志强<sup>a</sup>, 庞容<sup>b</sup>, 朱金盛<sup>b</sup>, 邓睿<sup>a</sup>, 申丽萍<sup>a</sup>

(重庆工商大学 a.旅游与国土资源学院; b.环境与资源学院, 重庆 400067)

**摘要:**以重庆主城区为研究对象,利用 Landsat 8 传感器 OLI 和 TIRS 获取的遥感影像为数据源,进行城市聚落特征包括地形特征、土地利用等与地表温度的差异性分析。结果表明:城市的热环境空间分布差异较大,海拔高度对温度的影响强于地形起伏度;(NDVI、NDBI、MNDWI 等)和地表温度的相关关系呈分段线性关系;不同土地利用类型的热强度和热变异程度差异明显,建设用地的温度最高且斑块温度间的变异性最强,虽然水体的平均温度最低,但斑块温度间的变异性却较高;从格网分析的结果可以看出,格网内部水体的“冷岛效应”明显、建设用地的“热岛效应”显著,耕地与自然植被面积的增加使得各空间格网温度更趋向于稳定。

**关键词:**山地城市;聚落特征;地表温度;格网分析;最佳分析尺度

中图分类号:X87

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)05-060-12

## The correlation analysis of surface thermal environment and settlement characteristics in the hilly city

LYU Zhiqiang<sup>a</sup>, PANG Rong<sup>b</sup>, ZHU Jinsheng<sup>b</sup>, DENG Rui<sup>a</sup>, SHEN Liping<sup>b</sup>

(a. School of Tourism and Land Resources; b. School of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, P.R.China)

**Abstract:** Taking urban district of Chongqing as the research area, we analyzed the relationship between urban settlement characteristics and the surface temperature by using remote sensing image of Landsat 8 sensor OLI and TIRS as data source. The results show that the spatial distribution of the urban thermal environment is significant different. The elevation plays a much more role in affecting the urban land thermal environment than the topography. The correlation between underlying surface parameters and the surface temperature show the piecewise linear relationship. The hot intensity of different land use types and thermal variation are significantly different, and the temperature and its variability of construction land are the highest among different land use types. In addition, the average temperature of water is the lowest, but its temperature variability is the highest. The grid analysis shows the water has obvious Cold Island Effect

收稿日期:2016-12-02

**基金项目:**重庆市社会科学规划培育项目(2014PY63);国家自然科学基金项目(41101155,41301351);重庆市教委科技项目(KJ1400623);教育部人文社科项目(12XJCZH005);重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(2011)。

Supported by Social Sciences Planning Breeding Project of Chongqing(2014PY63), National Natural Science Foundation of China(41101155, 41301351), Commission of Science and Technology Projects of Chongqing (KJ1400623), Humanities Social Science Project from Ministry of Education(12XJCZH005) and Project of the Foundation for Youth Backbone Teachers of Institutions of Higher Learning in Chongqing(2011).

**作者简介:**吕志强(1978-),男,重庆工商大学博士,副教授,主要从事 3S 应用、环境遥感、资源环境经济与农村可持续发展研究,(E-mail)lvzhiqiang@ctbu.edu.cn。

while the construction land has obvious Heat Island Effect. The increase of cultivated land and natural plant covered land stabilizes the analysis grid unit temperature.

**Keywords:** hilly city; settlement characteristic; surface temperature; grid analysis; optimum analysis scale

城市热场分布受地表的物理属性和人类社会经济活动的共同影响,是城市生态环境状况的综合概括与体现<sup>[1]</sup>。随着城市化的发展,原先以植被为主的自然景观逐渐被人为景观所取代,城市建筑群密度增大<sup>[2]</sup>,同时大量人口在城市聚集,人类活动频繁也带来大量温室气体的排放。在全球增温和高速城市化进程的背景下,城市热环境被认为是主导整个城市环境的要素之一<sup>[3]</sup>,其对城市公共健康、空气质量、能源规划等方面已产生深远影响<sup>[4-5]</sup>。重庆作为典型的山地城市,位于四川东部平行岭谷区的低山丘陵地区,地形闭塞、风速小、静风频率高、气流难以流动,导致区域散热功能弱化、热量难以扩散,因此,热环境对于山地城市人居环境的影响,更为显著。

地表温度与下垫面之间的关系一直是城市热岛研究的热点,利用遥感热红外信息来探查地面热场变化,揭示城市热岛空间分布特征已经得到越来越广泛的应用<sup>[2]</sup>。城市热环境是城市自然因素与人为因素综合作用的结果,因此,从城市聚落的角度来研究环境效应<sup>[6]</sup>。现有的研究多是基于土地利用类型与热环境的研究<sup>[2,7-10]</sup>,缺乏地形等自然要素对热环境的影响<sup>[6]</sup>。另外,由于景观单元内部人为活动强度的差异,相同景观组成可能表现出明显的空间异质性<sup>[11]</sup>,Yokohari等<sup>[12-13]</sup>的研究指出降温地类(绿地)斑块越破碎,降温效越差;Connors等<sup>[14]</sup>认为景观多样性与地表温度呈显著正相关,因此,选择有效的定量化研究方法,研究区域单元内部不同土地利用类型间的组合对热环境进行分析也尤为重要。

重庆市地形起伏较大,由南北向长江河谷倾斜,长江、嘉陵江自西向东横贯全境,是较为典型的山水格局的城市。受气候、地形条件和区域土地利用的影响,城市聚落地表热场空间分布的异质性较为明显。文中利用 Landsat8 遥感影像进行地表温度和的反演,在利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)将地表温度进行订正的基础上,展开山地城市地表温度与地形因素的分析。在不同空间分析粒度结果比较基础上,确定了区域格网分析的最佳空间分析尺度,对地表温度和土地利用的空间组合进行相关分析。笔者尝试性地从城市聚落的自然要素和人为要素方面进行城市热环境的空间分布研究,以期找出城市聚落特征与城市热环境之间的相关关系,为山地城市的生态规划决策、建设宜居城市提供参考。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况与数据处理

受 Landsat 遥感影像覆盖范围的限制,为了尽可能减少由多景遥感数据拼接导致的数据误差,选择 106°14'E~106°55'E、29°7'N~30°7'N 之间的重庆城区部分作为研究区域(见图 1)。主要数据有轨道号为 P128R39、P128R40 的两景 Landsat 8(获取时间为 2014 年 10 月 9 日)遥感影像、覆盖研究区的 DEM 数据和土地利用数据。

### 1.2 地表温度反演及订正

Landsat 8 携带的 TIRS 有 2 个热红外波段。理论上讲,可以用分裂窗算法(split window algorithm)对 Landsat 8 的地表温度进行更为精确的反演<sup>[15]</sup>,但目前为止,还没有相关的研究来进行较为成熟的实践应用,因此,文中仍然采用了 Landsat 影像应用较为普遍的单窗算法<sup>[16]</sup>。在遥感数据前期处理的基础上,根据 TIRS 进行地表温度反演,并将反演结果与重庆市气象局当日实测温度数据进行比较,与陈云<sup>[17]</sup>的研究结论较为一致,热红外波段 10 的结果与实测温度相差较大,而热红外波段 11 的反演结果更接近实际,因此,文中所采用的地表温度为第 11 波段反演的结果。具体反演公式如下:

$$T_s = (67.3554 \times (C + D - 1) + (0.4414 \times (C + D) + 0.4586) \times T_{11} - D \times T_a) / C, \quad (1)$$

式中: $T_{11}$ 是卫星高度上传感器所观测到的亮度温度,K; $T_a$ 是大气平均作用温度,K; $C$ 和 $D$ 是中间变量,中间变量的具体计算公式参考文献<sup>[17]</sup>。

从热力学原理可知,对流层内大气温度随海拔高度的增高而递减。为便于不同气压(或海拔高度)之间的温度场分析,常采用静力学大气状态方程按照绝热过程把气块升降到标准气压(1 000 MPa),这时气块所

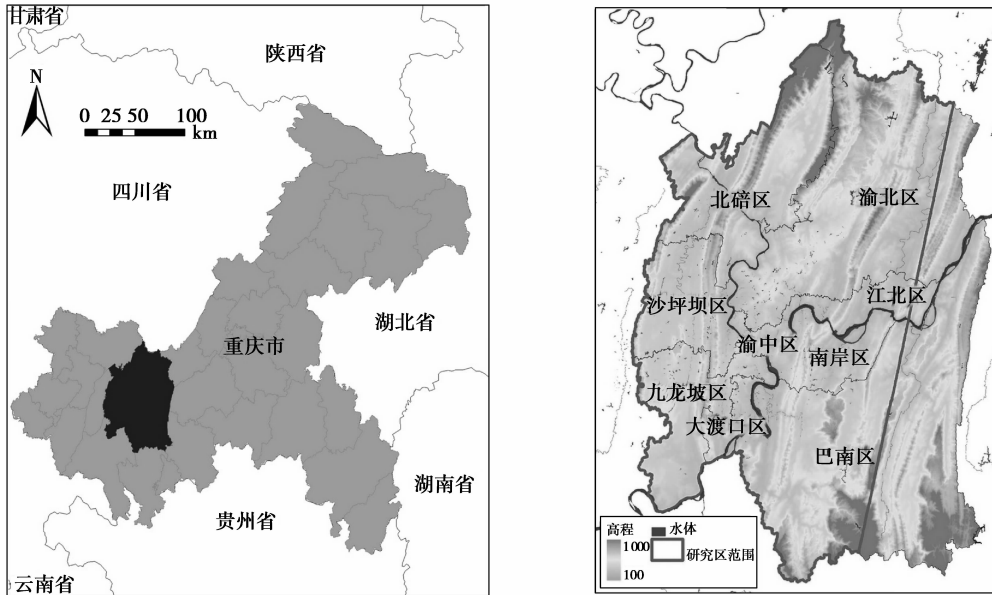


图 1 研究区范围

Fig.1 Location of the study area

具有的温度被称为位温(potential temperature)。针对研究区重庆范围内的“位温”计算参考文献[18]的研究,根据当地高程,定义海拔 300 m 为“位温”计算的基准高度,平均温度直减率为  $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。温度订正值  $t'_{x,y}$  (单位为  $^{\circ}\text{C}$ ) 的计算式为

$$t'_{x,y} = (h_{x,y} - 300)/100 \times \gamma, \quad (2)$$

式中: $h_{x,y}$  为  $x, y$  位置上的海拔高度,  $\text{m}$ ;  $\gamma$  为温度直减系数。将像元的地表温度与  $t'_{x,y}$  相加得到对应像素的最终地表温度(见图 2)。下文中所有的地表温度值均为经过位温订正之后的地表温度。

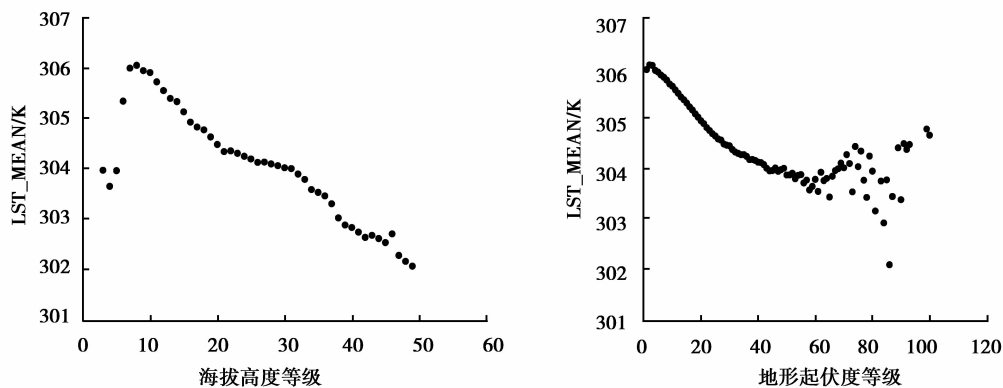


图 2 地表温度与地形特征因子的关系

Fig.2 The surface temperature and topography factor relationship

### 1.3 起伏度及高程的区间划分

所用的地形数据空间分辨率为 90 m 的 STRM(shuttle radar topography mission, STRM)的 DEM 数据。在计算地形起伏度之前需要确定起伏度的计算尺度,张伟<sup>[19]</sup>认为基于 SRTM 和 ASTER DEM 这 2 种不同的数据源选择的适宜计算尺度不同。结合重庆市主城区的自身特征,最终选择 33 的计算窗口进行地形起伏度计算。具体计算公式为

$$RF = H_{\max} - H_{\min}, \quad (3)$$

式中: $RF$  是计算窗口内的地势起伏度; $H_{\max}$  是分析窗口内的最大高程值; $H_{\min}$  是分析窗口内的最小高程值。为了更精确地描述地表热场的分异,将高程和地形起伏度按等距法分别划分为 100 等份,并对这 100 个等份

的热环境的特征进行空间分析。

#### 1.4 选择

由于下垫面类型、性质的复杂性及温度的时空变异性,城市热岛与下垫面关系异常复杂,文中利用3个NDBI<sup>[20]</sup>(normalized difference building index, NDBI)、NDVI<sup>[2]</sup>(normalized difference vegetation index, NDVI)、MNDWI<sup>[21]</sup>(modified normalized difference water index, MNDWI)对地表热环境进行定量描述。

归一化建筑指数NDBI(normalized difference building index, NDBI)能很好地反映水泥、沥青和混凝土等不透水面的空间分布特征,且NDBI不易受到季节性变化的影响,能够更为客观地反映地表温度与土地利用类型之间的相关性。

$$\text{NDBI} = (R_{\text{SWIR1}} - R_{\text{red}}) / (R_{\text{SWIR1}} + R_{\text{red}}), \quad (4)$$

式中: $R_{\text{SWIR1}}$ 为Landsat8中红外波段反射值; $R_{\text{red}}$ 为红色波段的反射值。

植被信息提取采用归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index),通常用来监测植被生长和分布状况。

$$\text{NDVI} = (R_{\text{red}} - R_{\text{blue}}) / (R_{\text{red}} + R_{\text{blue}}), \quad (5)$$

式中: $R_{\text{red}}$ 表示红色波段的反射值; $R_{\text{blue}}$ 表示蓝色波段的反射值。

城市水体信息的提取参考Xu的改进归一化差异水体指数MNDWI(modified normalized difference water index) {Xu, 2006 #32},能够较为精准的反映地表含水量的高低水平。

$$\text{MNDWI} = (R_{\text{green}} - R_{\text{SWIR1}}) / (R_{\text{green}} + R_{\text{SWIR1}}), \quad (6)$$

式中: $R_{\text{green}}$ 为Landsat8的绿光波段反射值; $R_{\text{SWIR1}}$ 为中红外波段反射值。为了降低单个像素之间数值的差异性,尽可能用更多的断点值来反映真实地表状况,通过指数区间分段来分析地表热场与的相关关系。将进行等间距划分成100等分。

#### 1.5 格网空间单元划分

为了揭示土地利用格局与城市热环境的空间分布规律,参考吕志强等<sup>[22]</sup>对景观格局的最佳分析尺度的研究,在900 m×900 m和3 000 m×3 000 m 2种粒度的基础上,分析格网的热特征与土地利用组合的相关关系,通过比较相关性来确定后续分析的最佳分析尺度。

## 2 结果与分析

区域生态环境受到海拔高度和地形条件的作用,山地气候随着海拔高度和地形起伏的不同表现出不同的气候变化。地形对气象、水文等要素及地表生态过程具有重要的作用,文中基于重庆主城区1:5万DEM数据中提取研究区的高程和地形起伏度信息,以分析LST的地形梯度带的变化规律。

### 2.1 地表温度与地形特征的关联分析

从温度在不同的海拔高度等级和地形起伏度等级的特征来看(见图2),海拔高度增加对温度的影响平滑,说明海拔高度的增加能持续降低地表温度;而反应地形起伏度增加对温度影响的曲线则呈现出较为显著的拐点且后续趋于水平,说明地形起伏度虽然在一定程度上降低地表温度,但随着起伏度的持续增加温度的降低趋势越发不显著。虽然温度随海拔高度和地形起伏度的升高而降低,但温度随海拔高度升高而降低的趋势更明显,说明海拔和地形起伏度都有一定的降温作用,海拔对温度的影响程度比地形的起伏来讲更明显。

### 2.2 地表温度与的关联分析

等级的划分在一定程度上弱化了问题的复杂性,同时保留了温度变化的总趋势,更有利于地表温度与的内在关联性分析,从而为研究地表温度与的关系提供新的视角,将划分100等份,分析不同等级与地表温度特征的关联性。总体来看,NDBI/NDVI/MNDWI与地表温度及其标准差相关关系较为复杂,不能用简单的线性关系来描述。从图3中可以看出,在10%~70%区间范围内对应的建设用地指数NDBI值范围是-0.22~0.21,与此对应的温度值变化最大,当建设用地指数大于0.21,区间范围内温度变化较小,由于NDBI在不透水面的饱和性特征,使得建设用地密度与各区间的温度均值并非简单地线性关系。在地表温度与归一化植被指数NDVI的关系图中看出,在0.01间隔尺度上地表温度与NDVI关系复杂,呈分段线性变化;在

区间范围 0~30% 对应的 NDVI 指数值小于 0.08, 线性关系大体呈正相关, 指数值在 0.08~0.21 时对应的区间范围为 30%~50%, 各区间的温度均值与 NDVI 呈负相关关系, 基本对应了耕地、林地等下垫面类型。当 NDVI 值大于 0.21 时, 各区间的温度均值与 NDVI 相关关系不明显, 耕地(水田、旱地)、草地、林地自身对应的 NDVI 虽然较高, 但随季节性变化裸地的普遍存在也使得归一化植被指数相对偏低, 造成各区间的温度均值与 NDVI 相关关系较为复杂。在地表温度与归一化水体指数 MNDWI 的关系图中看出, 当 MNDWI 指数值小于 -0.32, 对应的区间范围是 0~30%, 水体密度与各区间的温度均值关系较为复杂, 数据较为离散, 指数值大于 -0.32 时, 水体密度与各区间的温度均值呈显著负相关关系, 这一现象主要源于长江、嘉陵江横穿重庆主城, 河流、湖泊等对应的 MNDWI 较高, 同时山地城市植被大量覆盖也保持了土壤水分, 地表含水量的增加使得 MNDWI 值与地表温度的相关性更加明显。

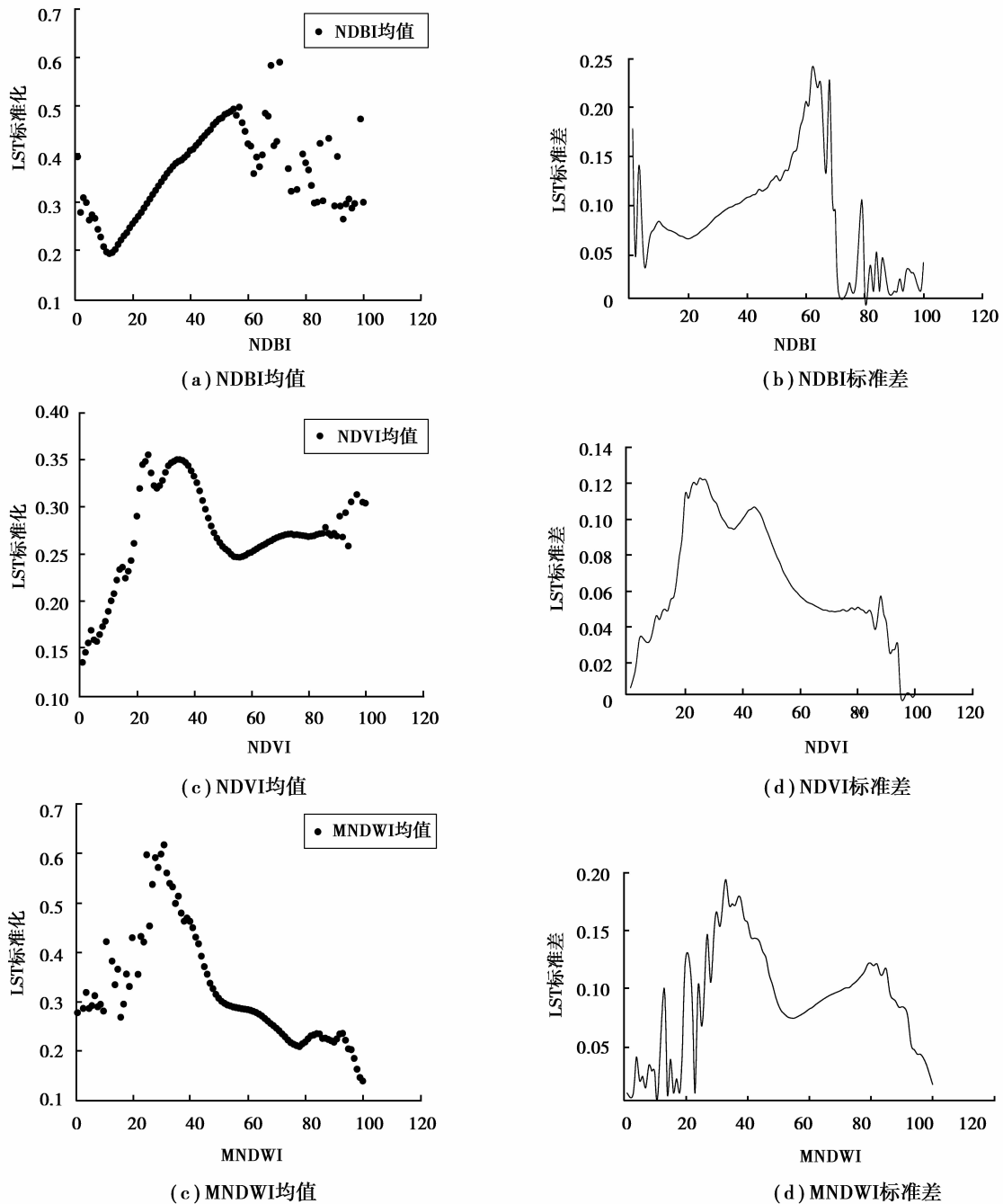


图 3 地表温度及标准差关系图

Fig.3 Correlation between surface temperature & the standard deviation and parameters

## 2.3 地表温度与土地利用的关联分析

### 2.3.1 不同土地利用类型的温度特征分析

从图4可以看出水体均温最低仅为31.24℃,明显低于所有像元均温,水的热容量比地面的热容量大,水体的湍流交换和潜热交换使其吸收、蓄积大量热能,在吸收相同热量的情况下,水体升温慢,有利于调节水体自身及周边环境的热效应。其次,林地、草地、未利用地也低于所有像元均温。耕地(水田和旱地)、建设用地高于所有像元均温。随着城市化的发展,建设用地增多,建筑物、沥青、混凝土等不透水面逐渐代替了农田、林地、河流、湖泊等自然景观,区域植被覆盖状况可直接影响辐射、热动力以及土壤水分等多种地表特征,地表水分含量和植被覆盖的减少导致地表温度偏高。

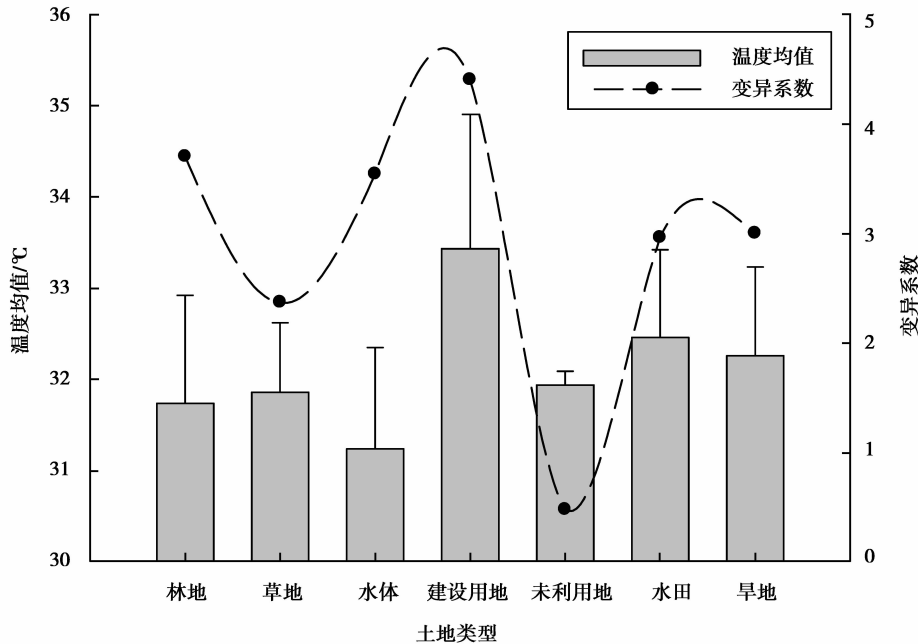


图4 不同土地利用类型均温及其变异系数

Fig.4 Mean temperature of different land use types and its variation coefficient

利用变异系数表征各类土地利用方式不同像元间温度的变化特征,从图4可看出,建设用地变异系数最大,可能源于旧城区与新建城区的不透水程度不同,不同的建筑物以及商业与居住区的绿化程度不同,此外,重庆属于典型的山城,建筑群中个别遮荫处也造成内部异质性较强。林地的变异系数次之,表明林地不同像元间温差较大,主要是受到周边环境的影响。密集分布的建设用地周边的绿化区,大量人为热的排放,导致其平均温度要高于那些高山、农作物等植被覆盖区,林地周边不同地类空间组合特征造成其变异系数较高。此外,水体的变异系数也较大,长江、嘉陵江横贯重庆主城,不同河段所特有的环境特征,使地表温度值发生变化,导致其标准差偏大。草地、未利用地、耕地(水田和旱地)的变异系数相对较小,表明其地表温度受周边环境影响较小,不同像元间温度变化相对稳定。

### 2.3.2 地表温度与土地利用的关联性分析

不同土地利用类型的地表温度不同,说明城市热环境与土地利用类型密切相关,为深入探讨不同土地利用类型的空间格局对城市热环境的影响,利用格网将研究区域划分为若干个样本,统计格网内各土地利用的温度均值,利用格网内不同土地利用类型所占的面积比例来表征土地利用格局,分析其对热环境的影响。为了解地表温度与土地利用关联性的尺度依赖性,将研究区划分为900 m×900 m、3 000 m×3 000 m,两种分析粒度作为不同的空间分析尺度。在两个空间尺度的格网空间单元内,对各格网空间单元内地表温度均值、变异系数分别与各土地利用类型所占格网面积百分比做 Pearson 相关性检验,结果见表1。

表 1 温度均值/变异系数与各地类面积比例的相关性

Table 1 Mean temperature &amp; variation coefficient and around the area proportion of the relationship

土地利用	与温度均值的相关性		与温度变异系数相关性	
	900 m	3 000 m	900 m	3 000 m
水田	-0.063**	0.141	-0.096**	-0.279**
旱地	-0.128**	0.003	-0.136**	-0.347**
林地	-0.044**	-0.541**	-0.098**	-0.202**
草地	0.014	-0.037	0.025	-0.059
水体	-0.011	-0.048	0.035**	0.195
建设用地	0.210**	0.521**	0.280**	0.565**
未利用地	0.005	-0.030	-0.011	-0.005

注:\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

检验结果显示,在两种粒度大小确定的分析尺度水平上,温度均值与林地面积占比均呈现显著负相关,与建设用地面积占比呈显著正相关,从图 5 也可以看出,建设用地自身变异系数较其他地类最高达到 0.044,表明建设用地内部异质性明显。水体、草地、未利用地面积占比与温度均值无显著相关关系。耕地(水田和旱地)面积占比与温度均值的相关关系,在 900 m×900 m 分析尺度上,呈现显著负相关,在 3 000 m×3 000 m 分析尺度上,温度均值显著性较低。

在两个分析尺度上,温度变异系数与耕地(水田和旱地)、林地面积占比均呈现显著负相关,与建设用地面积占比呈显著正相关。表明耕地、林地、建设用地随斑块面积的增大带来格网单元内部热场异质性的变化,草地、未利用地面积占比与温度均值无显著相关关系,表征草地、未利用地地表温度变化相对稳定,不受斑块大小的影响。水体面积占比在 900 m×900 m 小尺度水平上与温度变异系数呈显著正相关;在 3 000 m×3 000 m 大尺度上,与温度变异系数无显著相关关系。表明水体在小尺度水平上对格网单元内部热场异质性的变化起明显作用,随着格网单元的增大带来内部景观特征多样性,水体对各单元内部地表温度影响减弱,单元内温度变化受各种土地利用方式共同作用。

从格网单元中各地类温度特征及其变异系数综合来看,水体可形成冷岛,增加温度变幅;林地降低周围地类温度,并使地类趋于稳定;建设用地提高了格网单元温度,建设用地自身变异系数较其他地类最高,建设用地内部异质性明显;耕地均温与研究区所有像元均温较接近,其自身变幅较大,受单元内景观特征的影响较大;各地类对格网单元热场分布差异显著。

从不同尺度格网空间单元地表温度均值、变异系数分别与各土地利用类型所占格网面积百分比的 Pearson 相关性检验中可以看出,在较小尺度 900 m×900 m 水平上,格网单元热场分布与各土地利用方式具有明显的相关关系。因此,为了更为凸显他们之间的相关性,可将 900 m×900 m 这一粒度确定的格网大小作为研究的最佳分析尺度,在此基础上对不同土地利用类型面积比例地表温度特征进行定量描述,探讨格网内各种土地利用方式空间组合特征对地表热场的影响。

### 2.3.3 最佳分析尺度下的格网热环境与地类组合的关联分析

在研究区域 900 m×900 m 格网单元内,分别计算每个格网内部由 30 m 分辨率像元所组成的格内部地表温度之间的标准差和单个格网的温度与覆盖研究区所有格网平均温度的距平,并分析地表温度标准差和平均温度距平的相关关系。如图 5 所示,总体来看,格网内部像素温度差异的变异性性和格网之间温度的变异性都较为显著,其中 10% 网格的格网内部的温度标准差超过 1 ℃,30% 网格的温度距平绝对值超过 1 ℃。从两者的相关关系来看,网格距平和格网内部温度标准差之间呈较为显著的正相关关系,格网内部温度标准差较小的格网其距平也较小,而格网内部标准差越大,格网的温度距平也就越大;同时,格网内部像元间的温度差异的增加在一定程度上会导致格网间温度差异的显著化增强。

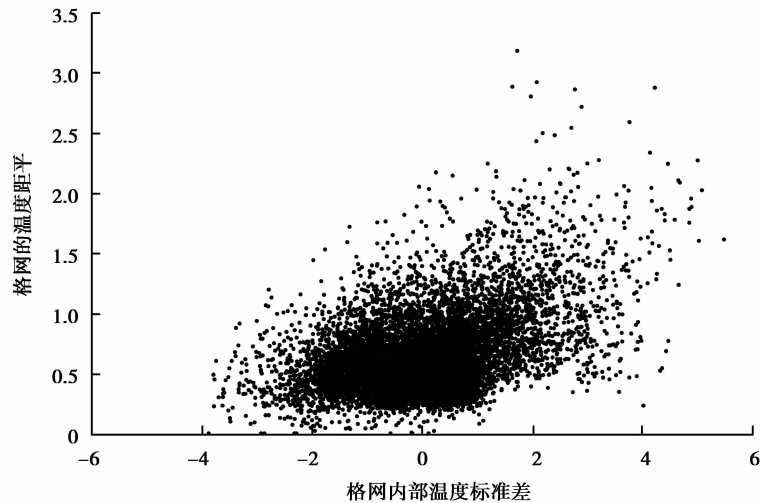


图 5 研究区样方温度距平和样方温度标准差的关系

Fig.5 Relationship between temperature departure of the quadrat and temperature standard deviation

统计每个格网内各种土地利用类型在格网内所占面积比例以及每个格网内地表温度平均值和标准差,在进行相关性分析的基础上,将重庆市土地利用重新合并为自然植被、水体、建设用地、耕地 4 类。统计各地类在每个格网中的面积比例,以间隔为 0.1 筛选出每种地类在不同比例下所在格网的温度均值、标准差(见图 6)。

从不同土地利用类型平均地表温度排序看,在 900 m 格网内随着面积比例的增大,总体呈现出建设用地>耕地>自然植被>水体。水体、建设用地在格网中所占面积百分比对空间单元温度影响最大,由于水体热容量较大,格网温度随水体在格网中所占面积百分比增大而减小,降温作用明显。从不同土地利用类型地表温度标准差大小来看,地表温度标准差差异显著。水体、建设用地的地表温度的空间差异明显高于耕地、自然植被地表温度的空间差异。

从不同土地利用类型不同比例下地表温度平均值变化曲线来看,耕地在格网单元内温度较为稳定,在不同面积比例下温度变幅最小,温度变幅仅为 0.47 °C,在格网单元内,地表温度随建设用地所占面积百分比的增大而升高,地表植被覆盖少、含水量小、透水量差的土地利用类型(如建设用地),热容量较小,升温快,在格网中随着所占面积比例的增大,地表温度随之上升,当建设用地比例高于 90%时,格网内部温度之间的差异不明显。同时,自然植被、水体温度随格网面积百分比的增大,平均地表温度呈明显下降趋势,地表植被覆盖程度和地表含水量是影响格网空间单元地表温度的重要原因。

从不同土地利用类型不同比例下地表温度标准差变化曲线来看,水体、建设用地变化显著,尤其水体变化最为显著,不仅水体温度的空间差异较大,且波动也较大。从重庆市土地利用现状图可以看出,长江、嘉陵江贯穿重庆主城,河流流经区域下垫面的不均质性存在混合像元现象。以渝中半岛及周边地区最为典型,建设用地密集,其中以江景房最为突出。同时,水体在面积比例较大的格网数较少,从数据分析可知,在 900 m×900 m 格网尺度水平上,研究区域共划分为 5 583 个格网,面积比例大于 50%的格网数仅为 113 个。建设用地面积比例在 50%以下时,标准差显著,这与建设用地热容量小、升温快,人类活动更为频繁具有重要的关系。当所占面积百分比达到 50%以上,建设用地自身地表温度的空间差异较为均衡,说明随着建筑群密度的增加,周边土地利用类型斑块破碎化程度更高,格网空间单元内景观特征多样化,使得空间单元内地表温度相对稳定。随着耕地、自然植被随面积比例的增加,地表温度标准差减小,表明耕地、自然植被地表温度空间差异不仅较小,且总体呈现缩小趋势,说明自身较少受到其他地类的影响。

综上所述,耕地、自然植被面积的增加使得各空间单元温度趋于稳定。水体可形成冷岛效应增加温度变幅,建设用地作为热力景观增加周围地物的平均温度。



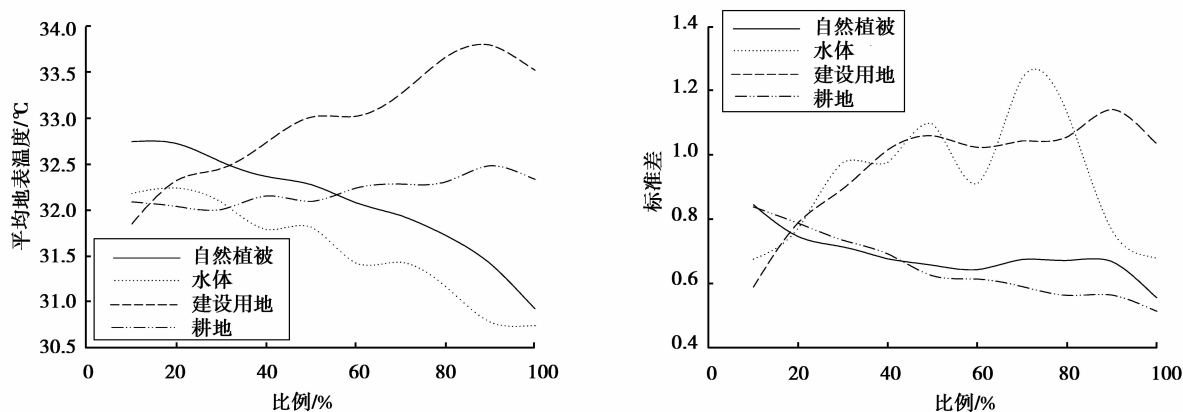


图 6 不同土地利用类型地表温度均值及标准差的变化曲线

Fig.6 Curves of different land use surface temperature and standard deviation

#### 2.4 地类均温与景观因子的冗余分析

景观格局指数是分析城市热岛空间格局的一种新方法,利用景观因子分析城市热场的特征分布,定量描述城市下垫面景观组成对地表温度的影响程度。这里选择较大粒度  $3\ 000\text{ m}\times 3\ 000\text{ m}$  的尺度大小作为空间单元。为进一步分析影响各地类温度的景观因子的作用,在  $3\ 000\text{ m}\times 3\ 000\text{ m}$  的格网空间单元内,格网内各土地利用类型温度的均值和变异系数作为因变量,影响热场分布的相关因子作为自变量,对 2 个单独变量进行冗余分析,分析每种土地利用类型的地表温度均值与景观因子的关系。通过对地表温度及变异系数(物种数据)的 DCA(detrended correspondence analysis)分析和梯度计算,选择 RDA(redundancy analysis)线性模型进行冗余分析。结果显示,前 2 个排序轴特征根为 0.643 7 和 0.134 4,物种和环境因子前 2 个排序轴相关系数为 0.920 4 和 1,模型满足显著性条件,效果理想。

表 2 RDA 线性模型检验

Table 2 RDA linear model test

Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.048 4	0.023 1	0.643 7	0.134 4
Explained variation (cumulative)	4.84	7.15	71.53	84.96
Pseudo-canonical correlation	0.296 5	0.335 2	0	0
Explained fitted variation (cumulative)	90.68	100	—	—

研究发现(见图 7),格网单元温度均值(MEAN)与最大斑块指数(LPI, largest patch index)呈显著负相关,在格网空间单元内,斑块指数越大,说明景观的破碎化程度越低,人类干扰的程度较小,受人为活动的影响较小。RDA 分析可以看出,格网单元温度均值与平均斑块大小(MPS, mean patch size)之间几乎垂直,说明两者相关性较小,甚至不相关,格网内平均斑块大小不具有代表性,格网内部的异质性较强。格网单元温度均值与平均邻接度指数(MPI, mean proximity index)、斑块数量(NumP, number of patches)、斑块大小标准差(PSCoV, patch size coefficient of variation)、面积加权的平均形状指数(AWMSI, area-weighted mean shape index)、香农多样性指数(SDI, simpson's diversity index)、香农均匀性指数(SEI, shannon's evenness index)呈显著正相关性。其中,与斑块数量(NumP)、香农多样性指数(SDI)、香农均匀性指数(SEI)相关性最强,格网空间单元内斑块数量越多,说明景观的破碎化程度越高,人类活动强度越大,对地表热环境的影响更为明显。香农多样性指数(SDI)是基于信息理论的测量指数,反映景观异质性,高的 SDI 表明较为丰富的景观多样性和更高强度的人类干扰,对地表温度的影响也较大。香农均匀性指数(SEI)反映景观中各缀块在面积上分布的不均匀程度,表明空间异质性越大,对地表温度的影响较大。

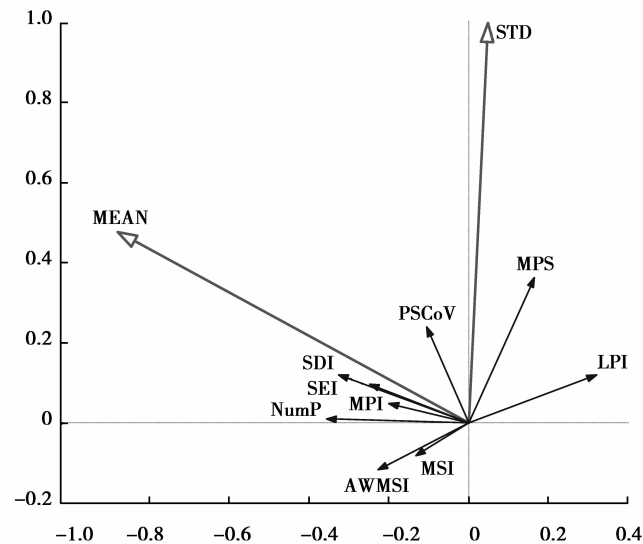


图 7 地类均温及其标准差与景观因子的相关关系

Fig.7 The correlation between the mean temperature and its standard deviation and landscape factors

这里选取 8 种常用的景观指数,描述各个空间单元的景观结构特征对热场分布的影响。综上所述,热场分布不仅由土地利用类型决定,其中,斑块大小、形状等空间结构特征也影响区域热环境分布。可以预测,未来随着城市化进程的加快,人类活动的强度将不断加强,城市下垫面的地表组成将会出现更大的变动。高强度的人类活动造成景观破碎化程度加剧、景观多样性增加,斑块之间连通性也增大,各斑块类型组成结构更为复杂,城市热环境状况将更加严峻。因此,合理配置景观空间格局,科学规划土地利用,减少建筑用地、道路等不透水性土地利用类型的大面积集中分布,同时增加设置林地、湿地、草地等的面积,从而缓解城市热环境。

### 3 结 论

通过研究山地城市重庆的地表温度与城市聚落地表特征(地形特征、地表参量、土地利用)之间的空间特征,得出以下几点结论:

1) 地表温度的空间差异性较大,特别是地形因素对温度的空间分布有重要的影响。地形特征包括海拔高度和地形起伏度对地表温度的影响较大,海拔高度的影响程度更显著,而随着起伏度程度的增加温度降低的趋势有减缓的趋势甚至不显著。

2) 重庆主城区城市热岛现象显著,且空间分布差异较大,重庆主城建成区温度明显高于城郊地区,其中,江北机场热岛最强,成为典型的热岛中心。同时,重庆主城区城市热岛受土地覆被影响较大,土地覆被类型地温分布由高到低依次为建设用地、耕地、未利用地、草地、林地、水体;利用 Landsat 8 热红外波段 11 进行地表温度反演,能够很好地揭示各土地利用类型地表温度的空间分布特征,为城市热环境改善提供参考。

3) 地表温度和(NDBI/NDVI/MNDWI)相关关系非常复杂,不能用简单的线性关系来描述,总体上看,研究区所有像元平均温度与 NDBI/MNDWI 分别呈显著的线性正相关和线性负相关关系,但平均温度与 NDVI 的关系较为复杂,呈明显变化。

4) 地表温度与土地覆盖类型的关系呈明显的尺度效应。通过将研究区的土地利用和地表温度格网化,研究区土地利用划分为 900 m×900 m、3 000 m×3 000 m 两个不同尺度的格网单元作为样本数据,对地表温度特征与土地利用类型做相关性检验,其中,在较小尺度 900 m×900 m 水平上,格网单元热场分布与各土地利用方式具有明显的相关关系。在确立最佳分析尺度的基础上,定量描述各地类空间组合格局对地表温度的影响,其中,水体、建设用地在格网中所占面积百分比对空间单元温度影响最大。

5) 景观格局指数是分析城市热岛空间格局的一种新方法,利用景观因子分析城市热场的特征分布,定量

描述城市下垫面景观组成对地表温度的影响程度。研究发现,热场分布不仅由土地利用方式决定,景观格局特征也影响区域热环境分布。

#### 参考文献:

- [1] Yue W Z, Xu J H, Xu L H. An analysis on eco-environmental effect of urban land use based on remote sensing images: a case study of urban thermal environment and NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1450-1460.
- [2] 徐涵秋.基于城市下垫面参数变化的城市热岛效应分析[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 3890-3901.  
XU Hanqiu. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3890-3901. (in Chinese)
- [3] Oke T R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects[M]// *Wind climate in cities*. Berlin: Springer Netherlands, 1995.
- [4] Quattrochi D A, Luvall J C, Rickman D L, et al. A decision support information system for urban landscape management using thermal infrared data: Decision support systems[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(10): 1195-1207.
- [5] Stone B, Norman J M. Land use planning and surface heat island formation: A parcel-based radiation flux approach[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(19): 3561-3573.
- [6] 张新乐,张树文,李颖,等.城市热环境与土地利用类型格局的相关性分析——以长春市为例[J]. *资源科学*, 2008, 30(10): 1564-1570.  
ZHANG Xinle, ZHANG Shuwen, LI Ying, et al. Correlation between urban thermal environment effect and land use pattern in Changchun[J]. *Resources Science*, 2008, 30(10): 1564-1570. (in Chinese)
- [7] 张新乐,张树文,李颖,等.土地利用类型及其格局变化的热环境效应——以哈尔滨市为例[J]. *中国科学院大学学报*, 2008, 26(6): 756-763.  
ZHANG Xinle, ZHANG Shuwen, LI Ying, et al. Study on the thermal environment effect of land use type and pattern changes: Harbin city[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2008, 26(6): 756-763. (in Chinese)
- [8] 张小飞,王仰麟,吴健生,等.城市地域地表温度-植被覆盖定量关系分析——以深圳市为例[J]. *地理研究*, 2006, 25(3): 369-377.  
ZHANG Xiaofei, WANG Yanglin, WU Jiansheng, et al. Study on land surface temperature vegetation cover relationship in urban region: a case in Shenzhen city[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 369-377. (in Chinese)
- [9] 苏伟忠,杨英宝,杨桂山.南京市热场分布特征及其与土地利用/覆被关系研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(6): 697-703.  
SU Weizhong, YANG Yingbao, YANG Guishan. Distributional characteristics of urban thermal space and relations with land use/cover of Nanjing[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(6): 697-703. (in Chinese)
- [10] 岳文泽,徐丽华.城市土地利用类型及格局的热环境效应研究——以上海市中心城区为例[J]. *地理科学*, 2007, 27(2): 243-248.  
YUE Wenze, XU Lihua. Thermal environment effect of urban land use type and pattern: A case study of central area of Shanghai city[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 243-248. (in Chinese)
- [11] 周雅星,刘茂松,徐驰,等.南京市市域热场分布与景观格局的关联分析[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(8): 2199-2206.  
ZHOU Yaxing, LIU Maosong, XU Chi, et al. Correlation between thermal field and landscape pattern in the Nanjing metropolitan region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(8): 2199-2206. (in Chinese)
- [12] Yokohari M, Brown R, Kato Y, et al. Effects of paddy fields on summertime air and surface temperatures in urban fringe areas of Tokyo, Japan[J]. *Landscape & Urban Planning*, 1997, 38(1/2): 1-11.
- [13] Zhang X Y, Zhong T Y, Feng X Z, et al. Estimation of the relationship between vegetation patches and urban land surface temperature with remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(8): 2105-2118.

- [14] Connors J P, Galletti C S, Chow W T L. Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(2): 271-283.
- [15] 俞宏,石汉青.利用分裂窗算法反演陆地表面温度的研究进展[J].*气象科学*,2002,22(4):494-500.  
YU Hong, SHI Hanqing. Progress in split-window algorithms for retrieving land surface temperature [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2002, 22(4): 494-500. (in Chinese)
- [16] 覃志豪,Zhang M H, Karnieli A, et al.用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. *地理学报*,2001,56(4): 456-466.  
QIN Zhihao, ZHANG Minghua, Karnieli A, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM6 data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466. (in Chinese)
- [17] 陈云.基于 Landsat 8 的城市热岛效应研究初探——以厦门市为例[J].*测绘与空间地理信息*,2014,37(2):123-128.  
CHEN Yun. A preliminary study on the urban heat island effect based on Landsat 8: Case of Xiamen City[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, 37(2): 123-128. (in Chinese)
- [18] 但尚铭,安海锋,但玻,等.基于 AVHRR 和 DEM 的重庆城市热岛效应分析[J].*长江流域资源与环境*,2009,18(7): 680-685.  
DAN Shangming, AN haifeng, DAN bo, et al. An analysis of urban heat island effects in Chongqing based on AVHRR and DEM[J]. *Resources and environment in the Yangtze basin*, 2009, 18(7): 680-685. (in Chinese)
- [19] 张伟,李爱农.基于 DEM 的中国地形起伏度适宜计算尺度研究[J].*地理与地理信息科学*,2012,28(4):8-12.  
ZHANG Wei, LI Ai'nong. Study on the optimal scale for calculating the relief amplitude in China based on DEM[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(4): 8-12. (in Chinese)
- [20] Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 583-594.
- [21] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [22] 吕志强,吴志峰,张景华.基于最佳分析尺度的广州市景观格局分析[J].*地理与地理信息科学*,2007,23(4):89-92.  
LV Zhiqiang, WU Zhifeng, ZHANG Jinghua. Landscape pattern analysis of Guangzhou based on optimization scale[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(4): 89-92. (in Chinese)
- [23] 王勇,李发斌,李何超,等.RS 与 GIS 支持下城市热岛效应与绿地空间相关性研究[J].*环境科学研究*,2008,21(4):81-87.  
WANG Yong, LI Fabin, LI Hechao, et al. Study of spatial correlation between UHI and VF based on RS and GIS[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4): 81-87. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)