

DOI: 10.5846/stxb201603160474

唐泽, 郑海峰, 任志彬, 崔明星, 何兴元. 城市地表热力景观格局时空演变——以长春市为例. 生态学报, 2017, 37(10): - .

Tang Z, Zheng H F, Ren Z B, Cui M X, He X Y. Spatial and temporal changes to urban surface thermal landscape patterns: a case study of Changchun City. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): - .

## 城市地表热力景观格局时空演变 ——以长春市为例

唐 泽<sup>1,2</sup>, 郑海峰<sup>1</sup>, 任志彬<sup>1</sup>, 崔明星<sup>1</sup>, 何兴元<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**城市热环境问题是城市气候和区域气候研究中的热点, 其对城市空气质量和公共健康等有着深远影响, 严重威胁城市的可持续发展。以长春市为例, 基于 3 期 Landsat ETM+影像数据 (2006、2010 和 2014), 应用覃志豪单窗算法和线性光谱混合模型获取长春市区夏季地表温度、长春市不透水面盖度和植被覆盖率, 构建热力景观动态度指数, 分析了 2006—2014 年长春市热力景观格局的时空变化特征, 并探讨地表温度与不透水面盖度和植被覆盖率的关系。结果表明: 研究区城市热环境整体呈恶化趋势, 地表平均温度年均增长 0.15℃; 热力景观整体变化更为剧烈, 2006—2010 年热力景观综合动态度为 45.39%, 2010—2014 年热力景观综合动态度为 52.64%; 城市地表高温等级热力斑块面积和数量都增大, 并向郊区扩张, 热力景观整体呈现破碎化; 低温等级为长春市变化最为剧烈的地表温度等级, 城市地表热力性质复杂化。此外, 统计分析表明: 长春市的不透水面每增加 1%, 地表温度上升 0.06—0.07℃; 植被覆盖率每增加 1%, 地表温度下降 0.07—0.08℃, 植被对地表温度的影响力大于不透水面。  
**关键词:**地表热力景观; 空间格局; 热力景观动态度; 不透水面盖度; 植被覆盖率

## Spatial and temporal changes to urban surface thermal landscape patterns: a case study of Changchun City

TANG Ze<sup>1,2</sup>, ZHENG Haifeng<sup>1</sup>, REN Zhibin<sup>1</sup>, CUI Mingxing<sup>1</sup>, HE Xingyuan<sup>1,\*</sup>

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Urban expansion has caused many more environmental problems to emerge. In particular, the urban thermal environment issue, which has mainly been caused by the concentration of populations in downtown areas, has caused an increase in heat emissions. Today, it poses potential threats to factors that affect urban sustainable development, such as urban air quality and public health. Therefore, a considerable amount of research has focused on urban thermal issues. In this study, three Landsat ETM + image data sets (2006, 2010 and 2014) were used to derive urban land surface temperature (LST) during the summer. The analysis was based on Qin's mono-window algorithm. The impervious surface area (ISA) percentage and the amount of land covered by vegetation (FV) in Changchun City were obtained from the data using the linear spectral mixture model. A thermal landscape dynamic degree (TLDD) index was proposed for the first time which was based on the land use dynamic degree (LUDD) concept. Then, TLDD was used to describe the spatial and temporal changes to the urban surface thermal landscape pattern in Changchun City. Finally, the relationships between LST and the ISA and FV percentage were investigated in order to determine the effects of the different underlying surfaces on

**基金项目:**中国科学院重点部署项目“城市生态服务功能的景观多功能调控技术研究 (KFZD-SW-302-03)”; 中国科学院东北地理与农业生态研究所青年人才基金 (DLSYQ13004); 吉林省科技发展规划 (20140520146JH)

收稿日期: 2016-03-16; 网络出版日期: 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hexingyuan@iga.ac.cn

temperature. The results showed that the urban thermal environment in Changchun City declined between 2006 and 2014. The average land surface temperature was 34.14°C in 2006 and 35.3°C in 2014, which meant that the annual rise in land surface temperature was 0.15°C. This may increase energy consumption and lead to a cycle of environmental decline. The urban thermal landscape has changed very rapidly, especially in low-temperature patches, which means that human activity has been high. The total thermal landscape dynamic degree (TTLDD) reached 52.46% between 2010 and 2014 as against 45.39% between 2006 and 2010. This suggested that there was a greater change in LST between 2010 and 2014 than between 2006 and 2010, which may have negatively affected land surface thermal properties. The area and number of high temperature patches increased and expanded from downtown towards the suburbs, which has caused thermal landscape fragmentation. Large changes to the urban thermal landscape occurred in the low temperature patches and this aggravated the thermal environmental problem. The thermal distribution for Changchun City showed that, the thermal center was not located in downtown area, but was centered near the Dongda Bridge and the Xixin Economic and Technological Development Zone where many industrial companies were to be found. The results obtained by the regression models for ISA and LST, and FV and LST showed that LST would increase by 0.06—0.07°C with each one percentage point increase in ISA, and decrease by 0.07—0.08°C with each one percentage point increase in FV. This suggests that the influence of the area covered by vegetation on LST was much stronger than the influence of ISA on LST. The conclusions in this paper will have guiding significance on urban land use and heat island mitigation.

**Key Words:** Land surface thermal landscape; spatial pattern; TLDD; ISA percentage; FV

全球气候变化以及城市化进程的加剧,对城市环境产生了强烈影响<sup>[1]</sup>。城市热岛作为这些影响的一个重要方面,其改变了城市气候、水文、空气质量、土壤理化性质等,严重威胁了城市居民身体健康<sup>[2-3]</sup>。因此,基于城市化进程下的热环境研究得到国内外学者的广泛关注。随着遥感以及 GIS 技术的发展,运用遥感影像进行城市地表温度反演,综合景观格局指数及相关性分析法探讨城市下垫面性质与城市热岛关系的研究越来越多<sup>[4]</sup>。Weng 利用 Landsat ETM+影像反演美国印第安纳州波利斯城市的地表温度,并利用景观格局指数分析了下垫面性质与城市地表温度之间的关系,得出地表温度与植被覆盖率呈负相关关系,与不透水面积百分比呈正相关关系的结论<sup>[5-6]</sup>。Chen 运用多时相遥感数据提取珠江流域地表温度和土地利用类型,并以深圳市为例构建了地表类型与温度之间的定量关系,认为城市土地利用的高度破碎化是导致城市热岛的重要原因<sup>[7]</sup>。陈云浩借鉴景观生态学的方法,提出了“热力景观”的概念,构建了城市热力景观综合评价体系,并在此基础上运用遥感图像分析了上海市城市热岛空间格局的时空分布,实现对热力景观格局的定量研究<sup>[8]</sup>。郭冠华等人在利用遥感反演珠江三角洲地表温度的基础上,对热力分布图像进行重采样,探讨了斑块类型水平和景观水平上热力景观指数的尺度效应,得到珠江三角洲地区热力景观的最佳研究尺度域为 150 m<sup>[9]</sup>。

以上研究推动了人们对城市热力景观的认识,但是主要分析地表热力分布与土地利用类型之间关系,侧重于热力景观的最佳研究尺度域分析或者仅仅基于景观指数的地表热力景观格局研究,缺乏不同时间尺度下地表热力景观变化格局与变化程度的综合定量研究。为此,本文以长春市为研究对象,运用 Landsat ETM+影像反演得到 2006 年 8 月、2010 年 8 月和 2014 年 8 月的城市地表温度,采用伪不变特征法(PIF),将多时相数据得到的地表温度图像进行标准化处理,并提出热力景观动态度概念,在此基础上对长春市地表热力景观格局近 10 年间的变化特征进行分析,并揭示了地表热力与不透水面和植被覆盖率的关系。

## 1 研究区及研究方法

### 1.1 研究区概况

长春市位于东北长春平原腹地(图 1),地处东部山地湿润与西部平原半干旱区之间的过渡带,属北温带大陆性半湿润季风气候类型。主城区辖南关、宽城、朝阳、二道、绿园 5 个区。长春市四季分明,雨热同季,夏

季炎热多雨,8 月份平均气温为 28℃,年均最高温度达 39.5℃。近年来,长春市城市发展迅速,主城区由四环快速扩张至五环,市区人口达到 363 万。

1.2 数据来源及预处理

本文从 NASA 官网(<http://glovis.usgs.gov/>)获取 2006 年 8 月 18 日、2010 年 8 月 13 日和 2014 年 8 月 8 日 Landsat7 ETM+(轨道号为 118/29、118/30)遥感影像为数据源。ETM+数据由于 2003 年以后仪器设备出现问题而导致影像出现条带性缺失,本文首先使用自适应局部回归算法(adaptive local regression match, ALR)对其进行修复<sup>[10]</sup>,然后利用长春市五环矢量边界数据进行裁剪,得到研究区影像。应用暗像元法对除 6 波段以外的其它波段进行大气校正,并利用长春市 1:50000 地形图对研究区影像进行几何校正,误差控制在 0.5 个像元以内。

1.3 地表温度反演

本文选取 Landsat ETM+热红外波段的高增益文件,运用覃志豪单窗算法对长春市主城区地表温度进行反演<sup>[11-14]</sup>。研究所需的大气透射率及大气平均作用温度可从 NASA 官网获得(表 1)。为了使 3 期影像具有可比性,需将多时相数据得到的地表温度图像进行标准化处理。本文采用伪不变特征法(PIF),通过人工选取空间上均匀分布、在 3 期图像上土地利用特征保持不变的 100 个研究样本(包括 30 个道路区域、30 个屋顶区域、20 个水体区域和 20 个植被区域),计算每个研究区域内的地表温度平均值,构建参考图像(2014)和目标图像(2006、2010)之间的线性标准化模型,消除 3 期影像由于光照等条件差异引起的辐射变化(图像的标准化方程见表 2)。将归一化后的 3 期地表温度图像按照温度划分成 6 个等级:<28℃、28—31℃、31—34℃、34—37℃、37—40℃和>40℃,温度由高到低分别定义为超高温、高温、次高温、中温、次中温和低温。

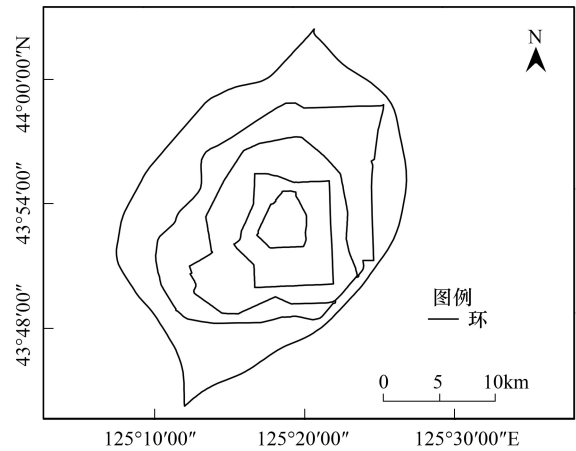


图 1 长春市研究区

Fig.1 The study area of Changchun City

表 1 影像获取时刻气象参数

Table 1 Meteorological parameters when images were acquired

| 年份<br>Year | 大气平均作用温度 /℃<br>Atmosphere average temperature | 大气透过率<br>Atmospheric transmittance |
|------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|
| 2006       | 24                                            | 0.79                               |
| 2010       | 28                                            | 0.5                                |
| 2014       | 27                                            | 0.84                               |

表 2 目标图像标准化方程

Table 2 The image normalization equations for each subject image

| 年份 Year | 回归方程 The regression equation       | $R^2$  |
|---------|------------------------------------|--------|
| 2006    | $LST = 0.9068 \times LST + 5.4505$ | 0.9304 |
| 2010    | $LST = 0.8483 \times LST + 3.3584$ | 0.8596 |

1.4 不透水面及植被覆盖度提取

基于光谱混合分解技术提取地表覆被类型是目前针对土地利用分类的主要方法。本文首先将 2014 年 ETM+影像的 1,2,3,4,5,7 波段由 DN 值转换成反射率,进行波段合成处理,利用修正归一化水体指数(MNDWI)法提取研究区域的水体<sup>[15]</sup>,并将其掩膜,以消除水体对后续分类工作的影响。之后对图像进行最小噪音分量变换(minimum noise fraction transform, MNF),选取前 4 个主成分进行纯净像元指数(pixel purity

index, PPI) 计算, 选取 4 类终端地物: 高反照率地物、低反照率地物、植被和裸土, 进行线性光谱模型分解, 并使分类结果满足总体均方差 (RMS) 平均值小于 0.02 的要求<sup>[16]</sup>。最终得到像元水平上的不透水面盖度和植被覆盖率。

线性光谱混合模型及其约束条件为:  $R_i = \sum_{k=1}^N f_k R_{ki} + e_i$  ( $\sum_{k=1}^N f_k = 1, f_k \geq 0$ )

式中,  $R_i$  是第  $i$  波段反射率,  $i=1, 2, 3, 4, 5, 7$ ;  $N$  是端元的数目;  $f_k$  是端元  $k$  的权重, 即一个像元内第  $k$  个端元的反射率所占的比率,  $k=1, 2, 3, 4$ ;  $R_{ki}$  是端元  $k$  在第  $i$  波段的反射率, 可以通过在影像中选取端元  $k$  的纯像元光谱值来获取;  $e_i$  是残差。

### 1.5 热力等级动态度计算

本文借鉴土地利用动态度概念<sup>[17]</sup>提出热力景观动态度指数来定量描述长春市热力景观的动态变化情况。土地利用动态度是土地利用研究中用来描述研究区域土地利用变化程度的指标, 包括单项地类动态度 (Land Use Dynamic Degree, LUDD) 和综合土地利用动态度 (Total Land Use Dynamic Degree TLUDD)。单项地类动态度公式为:

$$LUDD_i = TC_i / (TC_i + P_{ii}) \times 100\%$$

$$TC_i = P_{i*} + P_{*i} - 2P_{ii}$$

其中,  $TC_i$  表示  $i$  类土地利用总体变化量,  $P_{ii}$  表示从第一时刻到第二时刻  $i$  类土地未发生变化的面积,  $P_{i*}$  表示第一时刻  $i$  类土地总面积,  $P_{*i}$  表示第二时刻  $i$  类土地面积。

综合土地利用动态度公式为:

$$TLUDD = D_{\text{总}}(I_{\text{总}}) / S_{\text{总}} \times 100\%$$

其中,  $D_{\text{总}}(I_{\text{总}})$  表示区域内各地类土地利用总减少量 (或总增加量),  $S_{\text{总}}$  表示区域土地总面积。

因此热力景观动态度指数可分为热力景观等级动态度 (Thermal Landscape Dynamic Degree, TLDD) 和综合热力景观动态度 (Total Thermal Landscape Dynamic Degree, TTLDD)。

$$TLDD_i = TC_i / (TC_i + P_{ii}) \times 100\%$$

$$TC_i = P_{i*} + P_{*i} - 2P_{ii}$$

$$TTLDD = D_{\text{总}}(I_{\text{总}}) / S_{\text{总}} \times 100\%$$

其中,  $TC_i$  表示  $i$  热力等级总体变化量,  $P_{ii}$  表示从第一时刻到第二时刻  $i$  热力等级未发生变化的面积,  $P_{i*}$  表示第一时刻  $i$  热力等级总面积,  $P_{*i}$  表示第二时刻  $i$  热力等级总面积。  $D_{\text{总}}(I_{\text{总}})$  表示区域内各热力等级总减少量 (或总增加量),  $S_{\text{总}}$  表示热力景观总面积。

### 1.6 热力格局变化成因分析

本文在长春市地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 分布图、不透水面盖度 (percentage of Impervious Surface Area, %ISA) 分布图和植被覆盖率 (Fraction of Vegetation, FV) 分布图的基础上, 运用 ArcGIS 提取各温度等级对应的不透水面盖度和植被覆盖率, 探讨温度等级与不透水面盖度及植被覆盖率之间的关系; 并将热力等级从低温至超高温定义为 1、2、3、4、5、6 等级, 探讨热力斑块的等级变化数 (如当斑块从低温等级变至超高温等级即认为斑块等级变化数为 5, 从超温等级变至低温等级即认为斑块等级变化数为 -5) 与不透水面变化量及植被覆盖率变化量之间的关系, 阐明温度等级变化的驱动机制。此外, 本文将城市不透水面盖度和植被覆盖率从 0 到 100%, 按照 1% 的递增间距求取各递增空间内对应地表的平均温度, 建立地表温度与不透水面盖度以及地表温度与植被覆盖率之间的线性回归方程。为了进一步探讨不透水面和植被覆盖率对地表温度的综合影响, 本文随机提取 3600 个栅格, 建立地表温度与不透水面盖度和植被覆盖率的多元回归分析方程, 为城市土地的合理利用提供指导。

## 2 结果与分析

### 2.1 热力景观分布

2006 年 8 月 18 日、2010 年 8 月 13 日和 2014 年 8 月 8 日, 长春市的地表温度 (LST) 反演结果如图 2 所

示。为了更好的讨论城市地表热力分布情况,本文统计了各环路内超高温、高温、次高温、中温、次中温和低温等级斑块分布面积,结果如图 3 所示。

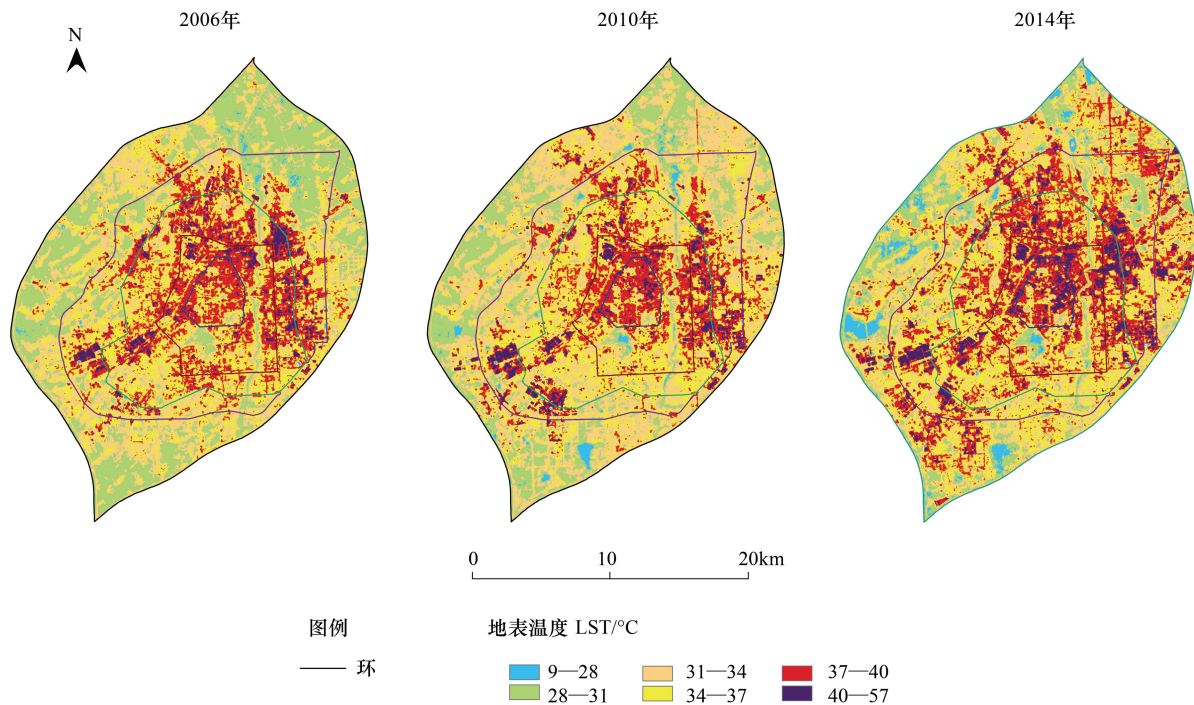


图 2 长春市热力等级分布图

Fig.2 The thermal distribution of Changchun City

2006 年,长春市的次高温及更高温度等级斑块总面积为  $276.7 \text{ km}^2$ ,占长春市总面积的  $52.79\%$ ,且主要分布于三环以内,占三环以内总面积的  $85.57\%$ ,说明三环以内是城市热力性质较差区域。三种温度等级斑块中以高温斑块和次高温斑块分布为主,超高温斑块分布范围较小,零星分布于东大桥附近、伊通河东侧和西新经济技术开发区。与之相反,长春市四环和五环分布大量中温及更低温度等级斑块,总面积达  $129.26 \text{ km}^2$ ,占四环和五环总面积的  $63.05\%$ 。

与 2006 年相比,2010 年长春市超高温和次高温斑块面积稍有增加,分别为  $2.42 \text{ km}^2$  和  $2.06 \text{ km}^2$ ,高温斑块面积大量减少,降幅达  $12.4 \text{ km}^2$ ,地表高温分布总体情况有所改善。其中,三环以内超高温斑块面积减少  $0.97 \text{ km}^2$ ,高温斑块面积减少  $14.63 \text{ km}^2$ ,降幅更为显著。与之相反,长春市的中温及更低温度等级斑块分布情况出现恶化,次中温斑块面积大量减少,中温斑块面积大量增加,分别达到  $36.27 \text{ km}^2$  和  $41.53 \text{ km}^2$ ,远高于低温斑块面积增加量  $1.63 \text{ km}^2$ ,地表总体上呈增温趋势。从空间分布上来看,长春市超高温斑块分布位置未发生改变。高温斑块分布范围较 2006 年缩小,集中于二环以内。次高温斑块主要分布于三环以内,中温斑块分布范围向五环扩张,次中温斑块零星分布于五环内,低温斑块分布范围较 2006 年增加,分布于大面积水体所在区域。

2014 年长春市地表热力情况为历年最差。超高温、高温和次高温斑块总面积达到  $361.16 \text{ km}^2$ ,占全市总面积的  $69.02\%$ ,并且呈现破碎化分布现象。其中,超高温斑块面积达  $34.97 \text{ km}^2$ ,较 2010 年增长  $68.32\%$ ;高温斑块面积达  $135.93 \text{ km}^2$ ,较 2010 年增长  $51.89\%$ 。在分布范围上,超高温斑块在 2010 年分布基础上向四周扩张;高温和次高温斑块由三环内向南郊和北郊大量扩张。城市中温和次中温斑块面积为  $150.93 \text{ km}^2$ ,较 2010 年减少  $98.85 \text{ km}^2$ ,主要分布于四环与五环之间。低温斑块面积有所增加,主要分布于北湖公园、南湖公园、长春西湖、八一水库和西郊农耕地。

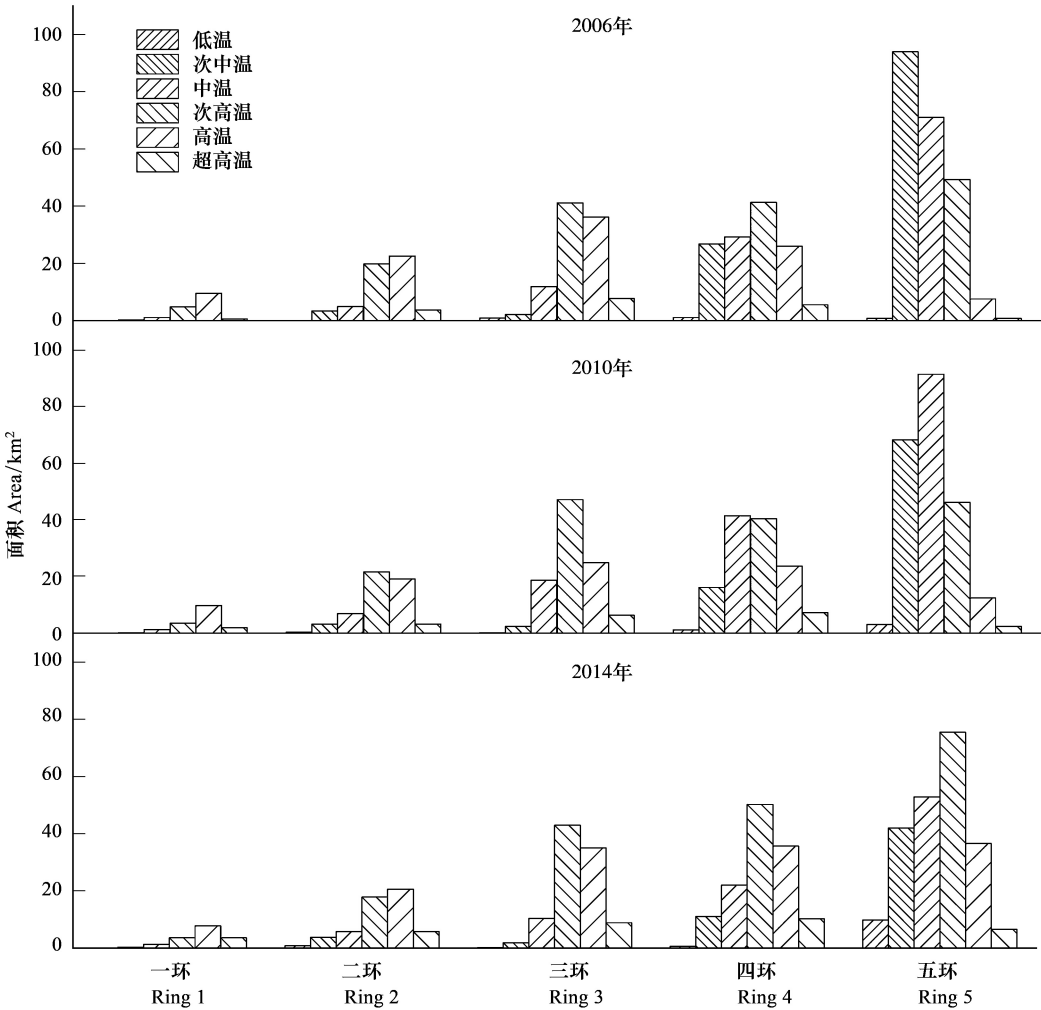


图3 2006年、2010年、2014年不同环路各热力等级斑块面积  
Fig.3 Area of different thermal patches between different rings in 2006,2010 and 2014

2.2 热力景观动态度

通过对2006年、2010年和2014年各热力等级斑块面积统计,得到2006年至2010年和2010年至2014年热力景观动态度,结果如表3所示。

表3 热力景观等级动态度 (单位: %)

| Table 3 Dynamic degree of thermal landscape |                       |                               |                          |                             |                        |                               |             |
|---------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------|
| 年份<br>Year                                  | 低温<br>Low temperature | 次中温<br>Sub-medium temperature | 中温<br>Medium temperature | 次高温<br>Sub-high temperature | 高温<br>High temperature | 超高温<br>Ultra-high temperature | 综合<br>Total |
| 2006—2010                                   | 91.81                 | 55.47                         | 66.61                    | 62.04                       | 61.05                  | 71.70                         | 45.39       |
| 2010—2014                                   | 83.76                 | 65.07                         | 73.20                    | 66.93                       | 68.02                  | 71.18                         | 52.64       |

从表3可以看出,2006年至2014年间,各热力等级斑块之间相互转换频繁,面积变动较大。2006年至2010年间,低温、次中温、中温、次高温、高温、超高温斑块的动态度分别为91.81%、55.47%、66.61%、62.04%、61.05%、71.70%。低温斑块的动态度达到最大,远高于其它热力等级斑块,说明低温斑块面积及空间分布范围变化强度在所有等级斑块中最为剧烈。2006年至2010年长春市热力等级斑块的综合动态度为45.39%,热力景观变化巨大,有大面积斑块发生了热力等级的转移。2010年至2014年间,低温、次中温、中温、次高温、

高温、超高温斑块的动态度分别为 83.76%、65.07%、73.20%、66.93%、68.02%、71.18%，各热力等级斑块的动态特征与上一阶段基本保持一致，除超高温和低温斑块动态度低于上一阶段，其余热力等级斑块动态度均上升，说明高温、次高温、中温和次中温斑块温度变化加剧。2010 年至 2014 年，热力景观综合动态度也大幅上升，达 52.64%，表明该阶段有更多面积斑块发生了热力等级转移，反映了强烈的人类活动影响。

### 2.3 热力景观与下垫面性质关系

为了探讨不透水面和植被覆盖情况对地表热力景观的影响，本文提取得到 2006 年、2010 年和 2014 年长春市不透水面盖度和植被覆盖率，结果如图 4、5 所示。

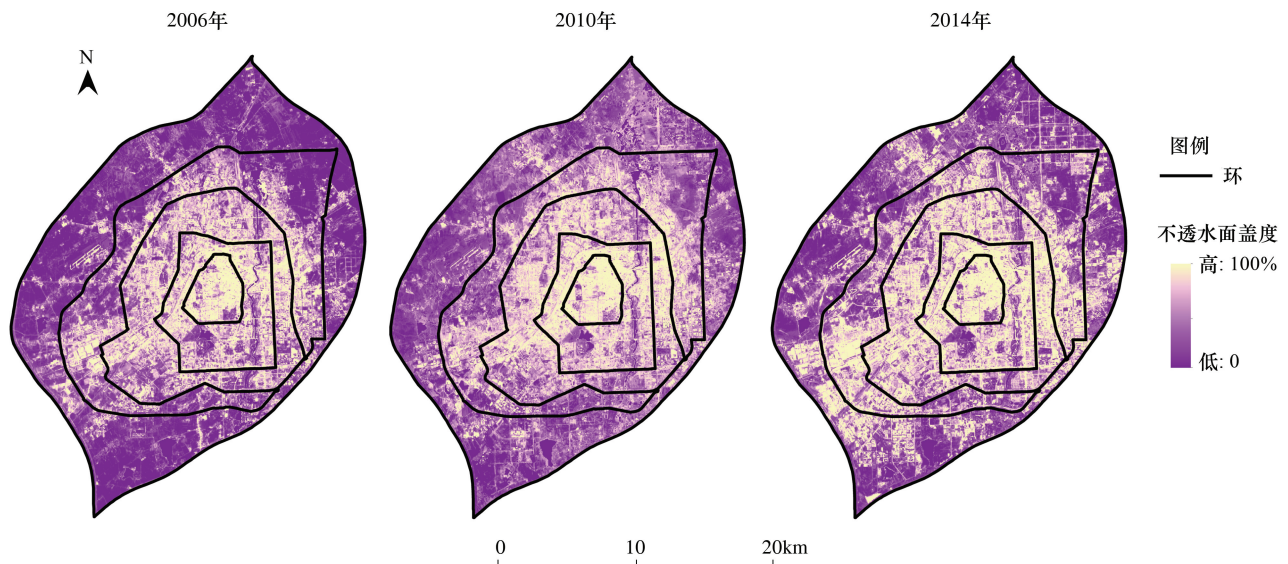


图 4 长春市不透水面盖度分布图

Fig.4 The percentage of impervious surface area of Changchun City

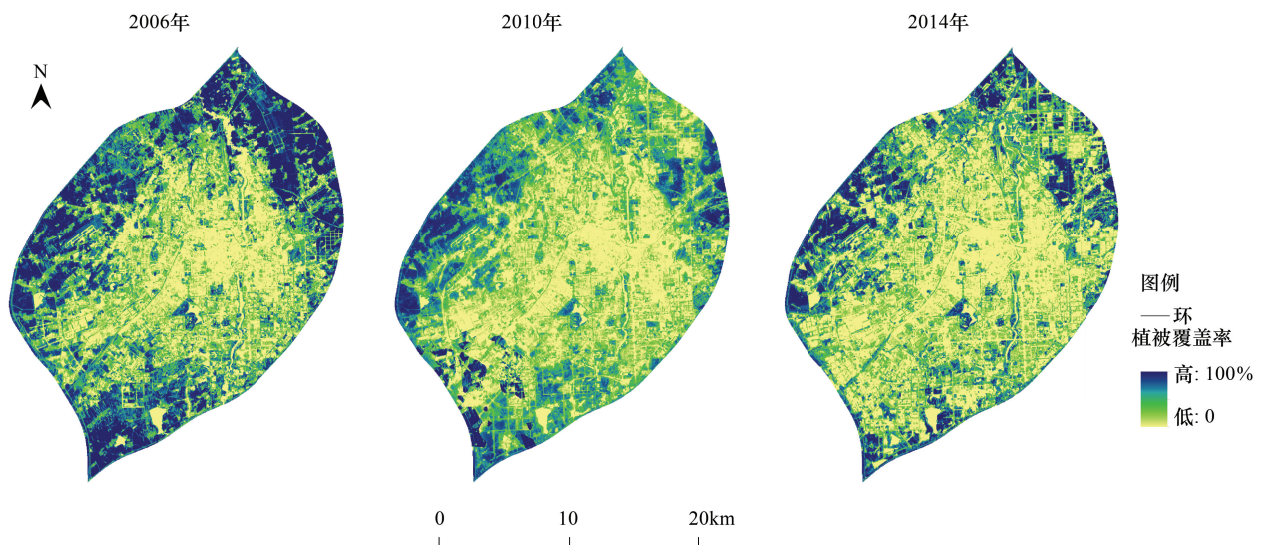


图 5 长春市植被覆盖率分布图

Fig.5 The vegetation fraction of Changchun City

从图中可知，2006—2014 年间，不透水面盖度呈现从市中心向郊区减少，植被覆盖率呈现从市中心向郊区增加的分趋势。随着城市扩张，郊区不透水面盖度迅速上升，植被覆盖率迅速下降。主要表现为城市东

北郊区和南部郊区不透水面积的大量增加及植被覆盖率的大幅下降,这与城市的扩张力历程相符合。长春市不透水面盖度从 2006 年的 42.98% 上升到 2010 年的 52.69% 和 2014 年的 55.92%,植被覆盖率从 2006 年的 45.42% 下降至 2010 年的 30.30% 和 2014 年的 30.65%,变化显著,且前一阶段变化速率明显强于后一阶段。2006 年至 2014 年间,热力斑块的等级变化数与植被覆盖率变化量呈负相关关系,相关系数为  $-0.491 (P < 0.05, n = 21)$ ,与不透水面盖度变化量呈正相关关系,相关系数为  $0.512 (P < 0.05, n = 210)$ 。表明植被覆盖率每提高 0.157,地表热力等级降低一个级别,不透水面盖度每升高 0.151,地表热力等级上升一个级别。

为了进一步探讨长春市地表热力景观与不透水面盖度和植被覆盖率之间的关系,本文得到了地表温度与不透水面盖度以及地表温度与植被覆盖率之间的线性回归方程。从回归方程(表 4)可以看出,城市地表温度与城市不透水面盖度呈显著正相关关系,与植被覆盖率呈显著负相关关系。总体上,不透水面盖度每增加 1%,地表温度上升  $0.06\text{—}0.07^{\circ}\text{C}$ ,植被覆盖率每增加 1%,地表温度下降  $0.07\text{—}0.08^{\circ}\text{C}$ 。进一步的分段分析结果(表 5)表明,低密度不透水面覆盖( $<30\%$ )时,不透水面盖度每增加 1%,地表温度上升超过  $0.12^{\circ}\text{C}$ ,高密度不透水面覆盖( $>70\%$ )时,不透水面盖度每增加 1%,地表温度上升  $0.06\text{—}0.1^{\circ}\text{C}$ ,地表温度对不透水面积变化的响应在低密度不透水面盖度时更为敏感。地表温度对植被覆盖率的响应曲线表明,植被覆盖率每增加 1%,高密度植被覆盖( $>70\%$ )下的地表温度下降  $0.1^{\circ}\text{C}$  以上,降幅大于低密度植被覆盖( $<30\%$ )时的  $0.07^{\circ}\text{C}$ 。可见高密度植被覆盖时,增加植被具有更显著的降温效果。此外,地表温度与不透水面盖度和植被覆盖率的多元回归方程表明,每降低 1% 不透水面盖度,增加 1% 植被覆盖率,地表温度下降  $0.08\text{—}0.09^{\circ}\text{C}$ 。表明综合调节不透水面积和植被覆盖率的降温效果优于单纯降低不透水面盖度或者增加植被覆盖率的降温效果,这将为

表 4 不透水面及植被覆盖率与地表温度关系方程

Table 4 The regression models of ISA and LST, Fv and LST, LST and ISA and Fv

| 年份<br>Year | 地表温度与不透水面盖度线性回归模型<br>The regression models of ISA and LST | <i>R</i> | 地表温度与植被覆盖率线性回归模型<br>The regression models of Fv and LST | <i>R</i>  | 地表温度与不透水面盖度和植被覆盖率的多元回归模型<br>The multiply linear regression models between LST and ISA and Fv | <i>R</i> |
|------------|-----------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 2006       | $LST = 0.071ISA + 31.357$<br>( <i>n</i> = 101)            | 0.986 ** | $LST = -0.0763Fv + 37.809$<br>( <i>n</i> = 101)         | -0.988 ** | $LST = 0.0459ISA - 0.0364Fv + 33.8384$<br>( <i>n</i> = 3600)                                 | 0.998 ** |
| 2010       | $LST = 0.073ISA + 30.533$<br>( <i>n</i> = 101)            | 0.989 ** | $LST = -0.0702Fv + 36.353$<br>( <i>n</i> = 101)         | -0.953 ** | $LST = 0.0517ISA - 0.0417Fv + 32.8832$<br>( <i>n</i> = 3600)                                 | 0.999 ** |
| 2014       | $LST = 0.061ISA + 32.033$<br>( <i>n</i> = 101)            | 0.957 ** | $LST = -0.0811Fv + 36.353$<br>( <i>n</i> = 101)         | -0.97 **  | $LST = 0.0454ISA - 0.0363Fv + 33.9507$<br>( <i>n</i> = 3600)                                 | 0.999 ** |

\*\* 表示在 0.01 水平下呈显著性相关

表 5 不透水面及植被覆盖率与地表温度关系的分段分析

Table 5 The regression models of ISA and LST, Fv and LST at different levels of ISA and Fv

| 年份<br>Year | 不透水面盖度<br>%ISA | 地表温度与不透水面盖度线性回归模型<br>The regression models of ISA and LST | <i>R</i> | 植被覆盖率<br>Fv | 地表温度与植被覆盖率线性回归模型<br>The regression models of Fv and LST | <i>R</i> |
|------------|----------------|-----------------------------------------------------------|----------|-------------|---------------------------------------------------------|----------|
| 2006       | 0—30           | $LST = 0.1227ISA + 30.515$                                | 0.951 ** | 0—30        | $LST = -0.0745Fv + 37.618$                              | 0.975 ** |
|            | 70—100         | $LST = 0.0616ISA + 32.221$                                | 0.995 ** | 70—100      | $LST = -0.1054Fv + 40.085$                              | 0.999 ** |
| 2010       | 0—30           | $LST = 0.1201ISA + 30.955$                                | 0.929 ** | 0—30        | $LST = -0.0768Fv + 36.653$                              | 0.991 ** |
|            | 70—100         | $LST = 0.1014ISA + 28.297$                                | 0.995 ** | 70—100      | $LST = -0.1054Fv + 40.085$                              | 0.998 ** |
| 2014       | 0—30           | $LST = 0.1333ISA + 30.791$                                | 0.979 ** | 0—30        | $LST = -0.0726Fv + 37.485$                              | 0.998 ** |
|            | 70—100         | $LST = 0.0663ISA + 31.384$                                | 0.989 ** | 70—100      | $LST = -0.1284Fv + 41.625$                              | 0.998 ** |

\*\* 表示在 0.01 水平下呈显著性相关

城市土地利用规划提供一定指导。

### 3 讨论

大量研究结果表明,城市地表温度普遍存在由中心城区向郊区递减趋势,并且低温一般分布于大面积绿地和水体所在区域<sup>[8,18-20]</sup>,高温中心并不一定位于市中心,可能分布于工业区以及商业密集区<sup>[21-22]</sup>。本文研究也得出相同结论,长春市郊区地表温度低于中心城区 5℃ 以上,低温分布于南湖公园、北湖公园、长春西湖、八一水库以及郊区农田等地,中等级别温度分布于城乡结合带等城市新开发地区。长春市热场中心分布于东大桥附近、伊通河东侧以及西新经济技术开发区,这与张新乐、赵云升<sup>[23-24]</sup>等人对长春市热力分布格局的研究结果相一致。

随着城市扩张,城市地表热力景观格局出现巨大变化。Li 等人研究漳州城市热岛分布时得到漳州市随着城市化进程地表温度升高,热岛面积加大,新增高温区域与城市新开发区域相一致的结论<sup>[25]</sup>。Dai 等人对上海城市热力场研究也得出相似结论<sup>[26]</sup>。本文对长春市热力景观时空变化特征研究后得出与上述相似的结论:随着城市扩张,长春市地表温度逐渐升高,地表平均温度从 2006 年的 34.14℃ 上升到 2014 年的 35.33℃,年均升温达 0.15℃。高温等级热力斑块面积大幅增加,并呈现从市区向郊区扩张的趋势。郊区低温范围缩小,温度上升显著,热力景观整体呈现破碎化发展趋势,表明长春市地表热力性质恶化。

此外,本文借鉴了土地利用动态度概念,创新性地提出了热力景观动态度指数,包括热力景观等级动态度和热力景观总体动态度,分别用来描述地表热力景观各温度等级以及总体的变化剧烈程度。根据上述指标,本文得到长春市 2006—2014 年间,低温等级为变化最为剧烈的温度等级,除低温和次中温等级变化减缓以外,其余温度等级动态度均上升,变化程度加剧。长春市 2006—2010 年热力景观总体动态度为 45.39%,2010—2014 年为 52.64%,热力景观整体变化更为剧烈,地表热力性质复杂化。

不透水面盖度和植被覆盖率严重影响着地表热力分布。Li 等人通过对上海市地表热力场研究,认为地表温度与不透水面盖度呈正相关关系,与植被覆盖率呈负相关关系,并且地表温度与植被覆盖率的相关性强于地表温度与不透水面的相关性<sup>[27]</sup>。林云杉等人对泉州市地表温度研究发现不透水面值每提高 0.1,地表温度上升 1.2℃ 以上<sup>[28]</sup>。John Rogan 等人研究 Massachusetts 地区地表温度与下垫面性质时发现植被覆盖率每降低 10%,地表温度上升 0.7℃<sup>[29]</sup>。Xu 等人对厦门市地表温度研究发现每降低 10%的不透水面积,增加 10%的植被覆盖率能够降低地表温度 2.9℃<sup>[30]</sup>。本文研究发现,长春市地表温度与不透水面呈显著正相关关系,与植被覆盖率呈显著负相关关系,不透水面盖度每增加 1%,地表温度上升 0.06—0.07℃,植被覆盖率每增加 1%,地表温度下降 0.07—0.08℃,植被覆盖率的变化对地表温度的影响强于不透水面对地表温度的影响。此外,每降低 1%不透水面盖度,增加 1%植被覆盖率,地表温度下降 0.08—0.09℃,降温效果优于单纯降低不透水面积或增加植被覆盖的效果,说明综合调控不透水面积和植被覆盖率具有更佳的降温作用,这为城市土地利用规划提供了一定的指导依据。但是,本文得出的结论是针对夏季的中纬度地区,对于其他纬度地区以及其他季节是否适用还有待进一步的研究。

### 4 结论

本文运用 3 期 ETM+遥感影像反演得到长春市近十年来的地表温度分布图。在探讨热力景观空间分布之后,提出热力景观动态度概念,分析了近十年间长春市热力景观格局的动态变化特征。并运用线性光谱分解技术提取得到城市不透水面盖度和植被覆盖率,探讨地表热力景观与二者之间的关系。得到以下结论:

(1)近 10 年来,长春市地表热环境随城市扩张呈现恶化趋势,地表平均温度年均增长 0.15℃,高温区域向郊区扩展,热力景观整体呈现破碎化;

(2)不透水面盖度和植被覆盖率是城市地表温度的重要影响因素。同时降低 1%不透水面积,增加 1%植被覆盖率,长春市地表温度下降 0.08—0.09℃;

(3)通过 ETM+遥感影像获取地表温度是进行城市地表热力景观格局时空演变研究的有效手段;

(4)本文提出的热力景观动态度是定量评价地表热力景观各温度等级以及总体变化剧烈程度的有效指标,它能够综合考虑地表温度等级空间转移和等级变化的过程,能更客观的反应温度等级变化的实际情况。

**致谢:**感谢在本文撰写过程中,何兴元研究员、郑海峰副研究员和任志彬助理研究员提供的帮助与指导!

#### 参考文献 (References):

- [1] 李秉成. 中国城市生态环境问题及可持续发展. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 1-6.
- [2] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, TARVER G Jr, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. 生态学报, 2005, 25(8): 2055-2060.
- [3] Oke T R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects//Cermak J E, Davenport A G, Plate E J, Viegas D X, eds. Wind Climate in Cities. Netherlands: Springer, 1995: 81-107.
- [4] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [5] Weng Q H, Liu H, Lu D S. Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States. Urban Ecosystems, 2007, 10(2): 203-219.
- [6] Weng Q H, Lu D S, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 467-483.
- [7] Chen X L, Zhao H M, Li P X, Yin Z Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2): 133-146.
- [8] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 何春阳. 上海城市热环境的空间格局分析. 地理科学, 2002, 22(3): 317-323.
- [9] 郭冠华, 陈颖彪, 魏建兵, 吴志峰, 容晓臻. 粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响. 生态学报, 2012, 32(12): 3764-3772.
- [10] 何报寅, 丁超, 杨小琴, 梁胜文. Landsat7 ETM+SLC-OFF 数据的修复及其在武汉东湖水质反演中的应用. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 90-95.
- [11] 王倩倩, 覃志豪, 王斐. 基于多源遥感数据反演地表温度的单窗算法. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 24-26, 62-62.
- [12] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 陈仲新, 刘佳. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计. 国土资源遥感, 2004, (3): 28-32, 36-36, 41-41.
- [13] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719-3746.
- [14] Xian G, Crane M. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2): 147-156.
- [15] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [16] Wu C S, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 493-505.
- [17] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨. 资源科学, 2010, 32(8): 1544-1550.
- [18] 杨英宝, 苏伟忠, 江南. 南京市热岛效应时空特征的遥感分析. 遥感技术与应用, 2006, 21(6): 488-492.
- [19] 戴晓燕, 张利权, 过仲阳, 吴健平, 栗小东, 朱燕玲. 上海城市热岛效应形成机制及空间格局. 生态学报, 2009, 29(7): 3995-4004.
- [20] Xu L Y, Xie X D, Li S. Correlation analysis of the urban heat island effect and the spatial and temporal distribution of atmospheric particulates using TM images in Beijing. Environmental Pollution, 2013, 178: 102-114.
- [21] Li Y Y, Zhang H, Kainz W. Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing Shanghai metropolis, China: using time-series of Landsat TM/ETM+ data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 19: 127-138.
- [22] 张好, 徐涵秋, 李乐, 樊亚鹏. 成都市热岛效应与城市空间发展关系分析. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 70-78.
- [23] 张新乐, 张树文, 李颖, 谢云峰, 匡文慧. 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. 资源科学, 2008, 30(10): 1564-1570.
- [24] 赵云升, 杜嘉, 宋开山, 胡新礼. 基于卫星遥感的夏季长春市城区热场分析. 地理科学, 2006, 26(1): 70-74.
- [25] Hua L Z, Wang M. Temporal and spatial characteristics of urban heat Island of an Estuary City, China. Journal of Computers, 2012, 7(12): 3082-3087.
- [26] Dai X Y, Guo Z, Zhang L Q, Li D. Spatio-temporal exploratory analysis of urban surface temperature field in Shanghai, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(2): 247-257.
- [27] Li J X, Song C H, Cao L, Zhu F G, Meng X L, Wu J G. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3249-3263.
- [28] 林云杉, 徐涵秋, 周榕. 城市不透水面及其与城市热岛的关系研究——以泉州市区为例. 遥感技术与应用, 2007, 22(1): 14-19.
- [29] Rogan J, Ziemer M, Martin D, Ratick S, Cuba N, DeLauer V. The impact of tree cover loss on land surface temperature: a case study of central Massachusetts using Landsat Thematic Mapper thermal data. Applied Geography, 2013, 45: 49-57.
- [30] Xu H Q, Lin D F, Tang F. The impact of impervious surface development on land surface temperature in a subtropical city: Xiamen, China. International Journal of Climatology, 2013, 33(8): 1873-1883.