

# 基于遥感的西安市热力景观格局演变

杨丽萍<sup>1</sup>, 王乐<sup>1,2</sup>, 孙晓辉<sup>1</sup>, 刘晶<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 航天天绘科技有限公司西安分公司, 西安 710100)

**摘要:**基于 1992—2013 年 3 期 Landsat 系列遥感影像,反演出了西安市的地表温度,采用温度归一化分级方法对地表温度进行等级划分,并引入景观生态学中景观格局的研究方法,通过热力景观指数分析,对西安市热力景观格局及其演变特征进行了探讨。结果表明:1992—2013 年西安市的热岛效应逐年增强,热力景观格局呈现出较大的时空差异。20 多年来,热力景观从以次中温区为优势斑块连片分布的空间格局,转变为以次高温区、中温区等多种热力斑块镶嵌散布的空间格局,热力景观的破碎化程度不断提高,各热力斑块分配的均匀度、景观格局的丰富度和复杂度均稳步增加,人类活动对热环境的扰动持续而稳定。

**关键词:**地表温度;热环境;景观格局;遥感;西安市

**中图分类号:**TP79; X16

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)01-0250-06

## Evolution of the Thermal Landscape Patterns in Xi'an City Based on Remote Sensing

YANG Liping<sup>1</sup>, WANG Le<sup>1,2</sup>, SUN Xiaohui<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University,

Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Aerospace Remote Sensing Data Technology Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Three Landsat images of Xi'an from 1992 to 2013 were used to retrieve land surface temperatures (LST), which were then classified into 5 classes by means of a normalized classification method. The thermal landscape patterns and the evolution characteristics were discussed through the analysis of thermal landscape indexes by using the research method introduced from landscape ecology. The results showed that the heat island intensity increased and the thermal landscape pattern presented great spatiotemporal difference. Dominated by large areas of sub-middle temperature region in 1992, the thermal landscape has changed to a mosaic distribution pattern mixed by multi-thermal landscape patches, including sub-high temperature region, middle temperature region and so on in 2013. The fragmentation degree intensified, and the degree of uniformity, richness and complexity enhanced steadily. Human activities have long term and steady disturbance to the urban thermal environment.

**Keywords:** land surface temperature; thermal environment; landscape pattern; remote sensing; Xi'an City

随着城市化进程的加快,城市人口迅速膨胀,城市规模不断扩大,城市的下垫面和冠层结构发生急剧变化,由此所引发的城市热岛效应及热环境问题日益突显,已成为城市生态环境效应的研究热点。热环境的空间分布格局和演变规律的研究对于认识城市环境和城市气候,缓解城市热岛带来的负面效应,促进城市社会经济的可持续发展具有重要意义。

作为地表与大气之间能量交换的重要影响因子,陆地表面温度(Land Surface Temperature, LST)综合了地气之间相互作用过程中物质与能量交换的结果,是地表通量(显热、潜热和 CO<sub>2</sub> 等通量)、土壤水

分、作物估产、长势和缺水状况监测等遥感模型的重要参数,也是城市热环境监测的重要参数<sup>[1-2]</sup>。传统的城市热环境研究是基于气象站点的监测数据拟合得到城市地区的地表温度,但由于观测站点数量有限、空间分布连续性差,因而具有较大的局限性。目前遥感技术已成为地表温度定量反演和城市热环境研究的重要技术手段。

景观生态学是将地理学的景观理论和生态学的生态理论相结合,研究景观单元的类型组成、空间配置以及与生态学过程相互作用的综合性学科<sup>[3]</sup>。陈云浩等<sup>[4]</sup>借鉴景观生态学的研究方法,提出“热力景

观”的概念,分析了热力景观的动态变化和热力景观类型的组分转移过程;黄聚聪等<sup>[5]</sup>利用厦门市 1987—2007 年同时相的 5 景 Landsat TM/ETM+ 影像进行了地表温度的反演,进而利用景观格局指数分析了厦门城市热岛景观格局随城市化进程演变的趋势;孟丹等<sup>[6]</sup>选取近 10 年 MODIS 的夜晚地表温度 (LST) 产品 MOD11A2,采用质心迁移、景观格局指数、空间自相关等方法研究了京沪穗 3 地近 10 年不同等级热力景观的质心迁移演变、格局变迁和空间集聚特征。在城市热环境研究中,景观生态学研究方法的融入,为深入认识城市热环境的空间格局及其演变特征提供了新的研究思路。

本文采用单窗算法对西安市 3 期 Landsat 系列遥感影像进行地表温度反演,利用温度归一化分级方法进行热力景观等级的划分。在此基础上,引入景观生态学的研究方法,基于景观结构数量化软件包 Fragstats 3.3 计算各期影像的 5 类热力景观指数,对西安市热力景观格局及其演变特征进行分析,为城市的可持续发展及生态城市建设提供参考。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

西安市 (33°39′—34°45′N, 107°40′—109°49′E) 地处关中平原中部,北临渭河,南依秦岭,东西长约 204 km,南北宽约 116 km,面积约为 9 983 km<sup>2</sup>,其中市区面积 1 066 km<sup>2</sup>。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 13~13.7℃,年平均最冷气温为 -1.2~0℃,年平均最热气温为 26.3~26.6℃,多年平均降雨量为 606.8 mm,全市辖 10 区 3 县,截止 2013 年,常住人口 858.81 万人,较 1992 年增长了 235.61 万人<sup>[7]</sup>。本文以西安市未央区、灞桥区、莲湖区、新城区、碑林区、雁塔区为研究区。

### 1.2 数据来源及预处理

结合城市发展现状及遥感影像的可获取性,选择 1992 年 7 月 17 日、2006 年 7 月 24 日的 Landsat 5/TM 及 2013 年 6 月 26 日的 Landsat 8/TIRS-OLI 共 3 期影像,影像来源于 <http://glovis.usgs.gov/>。利用 ENVI 5.1 对影像进行了辐射校正、大气校正、几何校正与配准,利用西安市行政区划矢量数据分别对 3 期影像进行裁剪,提取出本文研究区。

## 2 研究方法

### 2.1 地表温度反演

基于 Landsat 系列热红外数据进行地表温度反演的算法主要包括辐射传输方程法<sup>[8-9]</sup>、单窗算

法<sup>[10]</sup>、单通道算法<sup>[11]</sup>、劈窗算法<sup>[12-13]</sup>。其中,劈窗算法主要用于具有两个热红外通道的 Landsat 8 TIRS 数据的地表温度反演<sup>[12,14]</sup>。美国地质调查局 USGS 曾指出,由于 Landsat 8 卫星发射运行时间较短,其第 11 波段的热红外数据尚存在定标不稳定性的问题,因而不建议运用劈窗算法进行地表温度反演,而是建议仍采用 TM/ETM+ 的单波段方式来计算地表温度<sup>[15-16]</sup>。由于单窗算法根据热辐射传导方程,把大气和地表的影响直接包括在演算式中,在计算出辐射亮温的基础上,应用地表比辐射率、大气透过率和大气平均作用温度 3 个参数进行地表温度反演,简单易行,因此,采用单窗算法进行地表温度反演。

#### 2.1.1 辐射亮温的计算 辐射亮温的计算方法如下<sup>[10]</sup>

$$T_b = K_2 / \ln \left( \frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right) \quad (1)$$

$$L_\lambda = \text{gain} \cdot \text{DN} + \text{offset} \quad (2)$$

式中:  $T_b$  为辐射亮温(K);  $L_\lambda$  为热辐射强度值[W/(m<sup>2</sup> · sr · μm)];  $K_1$  和  $K_2$  为校订系数,对于 Landsat 5,  $K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ,  $K_2 = 1260.56 \text{ K}$ <sup>[10]</sup>; 对于 Landsat 8 TIRS 10 波段,  $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ,  $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ <sup>[15]</sup>; DN 为以 DN 表示的经过量化标定的像元值; gain 为波段增益系数[W/(m<sup>2</sup> · sr · μm · DN)], offset 为偏移系数[W/(m<sup>2</sup> · sr · μm)], 以上参数可从影像的头文件中获取。

2.1.2 比辐射率、大气透过率和大气平均作用温度的估算 采用 Valor 等<sup>[17]</sup>提出的混合像元的比辐射率估算方法进行比辐射率的估算。

$$\epsilon = f\epsilon_v + (1-f)\epsilon_i + d_e \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_v$  代表植被的比辐射率,一般取 0.985;  $\epsilon_i$  代表裸露地表的比辐射率,一般取 0.960;  $f$  是植被覆盖度,可通过 NDVI 的关系得出;  $d_e$  表示地表几何分布和内散射效应,  $d_e = 0.06f(1-f)$ <sup>[17]</sup>。

Qin 等<sup>[18]</sup>运用 Lowtran 7 大气模拟程序,对大气水汽含量在 0.4~6.4 g/cm<sup>2</sup> 区间内的大气透过率进行了模拟,建立了大气水汽含量与大气透过率之间的相关关系,以大气水汽含量来估算大气透过率  $\tau$ 。采用该方法估算出 1992 年 7 月 17 日的大气透过率。对于 2006 年 7 月 24 日和 2013 年 6 月 26 日的大气透过率,采用 NASA 官网的大气校正参数计算器计算得到(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)。

在天气比较晴朗,没有明显的大气垂直涡旋作用条件下,可由近地面气温  $T_0$  近似计算大气平均作用温度<sup>[18]</sup>。基于中纬度夏季平均大气表达式,参考与遥感数据同期的气象数据,计算得到 3 个时段的近地面平均大气温度。

2.1.3 地表温度反演 地表温度反演的算法如下<sup>[18]</sup>。

$$T_s=\frac{1}{C}\{a(1-C-D)+[b(1-C-D)+C+D]T_b-DT_a\}$$

(4)

式中: $T_s$  为实际地表温度(K); $T_b$  为卫星高度上遥感器所观测到的亮度温度(K); $T_a$  为大气平均作用温度(K); $C$  和  $D$  是中间变量,其计算式分别为  $C=\epsilon \cdot \tau$ ,  $D=(1-\tau)[1+(1-\epsilon)\tau]$ ;  $a$  和  $b$  是根据热辐射强度拟合出的系数,当温度介于  $0\sim70^{\circ}\text{C}$  时,  $a=-67.355351$ ,  $b=0.458606$ ;  $\epsilon$  和  $\tau$  分别为热红外波段的地表比辐射率和大气透过率<sup>[18]</sup>。

## 2.2 热力景观等级划分

考虑到 3 期影像成像时刻的差异,无法直接对反

演得到的地表温度进行对比,为此参考徐涵秋等<sup>[19]</sup>提出的标准化处理方法,将地表温度经过运算统一到  $0\sim1$ ,记作  $N_i$ 。将归一化后的地表温度等间距划分为低温区( $0\leq N_i<0.2$ )、次中温区( $0.2\leq N_i<0.4$ )、中温区( $0.4\leq N_i<0.6$ )、次高温区( $0.6\leq N_i<0.8$ )和高温区( $0.8\leq N_i<1$ )5 种热力景观类型,后 3 类热力景观对热岛效应起主导作用<sup>[6]</sup>。

## 2.3 热力景观指数计算

景观格局指数高度浓缩了景观格局信息,能够反映其结构组成和空间配置特征,是景观格局定量分析的基础。国内外学者提出了许多量化的景观格局指数<sup>[2-3]</sup>,为对比研究区不同年份间城市热岛效应和热力景观的动态变化,选择以下指数进行分析(表 1)。

表 1 景观指数

景观指数		生态意义	公式
聚集度指数	反映同类型斑块的聚集程度,越小,聚集度越低,破碎度越高。范围: $0\leq AI\leq 100$		$AI=\frac{g_{ij}}{\max g_{ij}}\times 100$ <p><math>g_{ij}</math> 为斑块类型 <math>i</math> 的同类相邻的像元数;<math>\max g_{ij}</math> 为斑块类型 <math>i</math> 的同类相邻的最大邻接数</p>
面积—周长分维数	描述分形结构的特征指标,可反映斑块形状的复杂度,取值一般在 $1\sim2$ ,越接近 1,斑块形状越简单,表明受人为干扰程度越大;越接近 2,斑块形状越复杂,受人为干扰程度越小		$PAFRAC=\frac{2\lg \frac{P}{4}}{\lg A}$ <p><math>P</math> 为斑块周长;<math>A</math> 为斑块面积</p>
蔓延度指数	描述景观中不同类型景观成分的团聚程度或延展趋势。值越大,景观中某优势斑块类型形成了良好的连接性;反之,景观具有多种要素的散布格局,碎化程度较高。单位为%,范围: $0\sim100$		$CONTAG=1+\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nP_{ij}\ln P_{ij}}{2\ln n}$ <p><math>P_{ij}</math> 表示同 <math>j</math> 类型元素相邻的 <math>i</math> 类型元素所占的比例;<math>2\ln n</math> 代表了最大可能邻接度</p>
均匀度指数	描述景观中各类斑块分配的均匀程度,值越大,表明各组分配越均匀。无单位,范围: $0\leq SHEI\leq 1$		$SHEI=\frac{-\ln[\sum_{i=1}^m(P_i)^2]}{\ln m}$ <p><math>m</math> 为景观类型数目;<math>P_i</math> 为景观类型 <math>i</math> 所占的面积比例</p>
多样性指数	可综合反映景观格局的丰富度和复杂度。无单位,范围: $SHDI\geq 0$ , $SHDI=0$ ,表明整个景观仅由 1 个斑块组成, $SHDI$ 增大,说明斑块类型增加或各斑块类型在景观中呈均衡化分布		$SHDI=-\sum_{i=1}^mP_i\log_2 P_i$ <p><math>m</math> 为景观类型数目;<math>P_i</math> 为景观类型 <math>i</math> 所占的面积比例</p>

# 3 结果与分析

## 3.1 地表温度的时间变化特征

地表温度反演结果见表 2,1992 年 7 月 17 日、2006 年 7 月 24 日和 2013 年 6 月 26 日西安市地表温度分别为  $20.96\sim36.70^{\circ}\text{C}$ ,  $22.74\sim42.97^{\circ}\text{C}$  和  $23.36\sim45.88^{\circ}\text{C}$ 。1992—2013 年,最低温上升幅度相对较小为  $2.40^{\circ}\text{C}$ ,最高温上升可达  $9.18^{\circ}\text{C}$ ,平均温度上升了  $5.75^{\circ}\text{C}$ 。其中,1992—2006 年最低温、最高温和平均温度的增温幅度均为 2006—2013 年的两倍之多。相关研究表明,1971 年以前西安城市热岛效应很弱,几乎可以忽略;1972—1994 年随着经济快速发展,城市热岛效应显现;1995 年后,尤其是 2000 年以后,随

着国家经济发展战略的大转移,在西部大开发战略的带动下,陕西经济进入快速发展阶段,西安城区不断扩大,建设用地规模迅速增加,城市人口和人口密度急剧增加,大气污染不断加重,使得城市热岛效应越发明,并有逐年增强的趋势<sup>[9,20]</sup>。2006—2013 年,随城市建设的快速发展,为改善城市环境,在不断加强街道和居住区公共绿地建设和改造的同时,通过新建、改建等方式建成了大唐芙蓉园、曲江池遗址公园、城市运动公园和大明宫遗址公园等多个大型园林景观主题公园,辽阔的水面和较高的植被覆盖度,对城市温度的上升均有一定的抑制作用。

## 3.2 热力景观类型的空间分布特征

采用温度归一化方法将地表温度划分为 5 种热

力景观类型(图 1),统计出各热力景观类型的像元个数,最终计算出各类所占面积百分比,结果见图 2。

表 2 西安市地表温度反演结果 ℃

项目	时间		
	1992 年 7 月 17 日	2006 年 7 月 24 日	2013 年 6 月 26 日
最小值	20.96	22.74	23.36
最大值	36.70	42.97	45.88
平均值	28.87	32.85	34.62

由图 1 和图 2 可见,1992 年西安市约 84.19% 的面积为次中温区所覆盖,主要分布于明城墙以外的广大地区;中温区约占 11.93%,主要分布于莲湖区、新城区、碑林区,以及未央区东南和灞桥中西部地区;低温区比例不高,但集中分布于灞河沿岸及其西南、渭河沿岸及灞桥东部山地;次高温区 and 高温区零星分布于莲湖区西北、新城区东部、未央区西南部和灞桥区中西部。至 2006 年,中温区向明城墙外围大面积扩散,面

积增加了 31 169.97 hm<sup>2</sup>(增加比例达 37.56%),在雁塔区、灞桥区中南部和未央区南部增加明显;次中温区面积下降了 36 412.7 hm<sup>2</sup>,所占比例降至 40.32%;次高温区较 1992 年也有较大增加,所占比例达到了 8.91%,从 1992 年的零星分布于主城区发展至连片状覆盖于主城区。由于经济的快速发展,城市中心建筑密集,人口高度集中,高温区面积也逐渐增加,而次中温区面积则大幅下降;1992 年分布于灞河西南的低温区已不复存在,渭河沿岸和灞桥东部山地的低温区也明显减小。2013 年次高温区面积大幅增加,覆盖了城市 50% 以上的地区,高温区增幅也较为明显,二者合计可占全市面积的 65%;中温区面积快速下降,以灞桥北部地区斑块面积较大,其余地区则呈镶嵌状散落于次高温区中,次中温区面积也大幅下降;低温区面积与 2006 年相比略有增加,与城市生态环境的改善有较大关系。

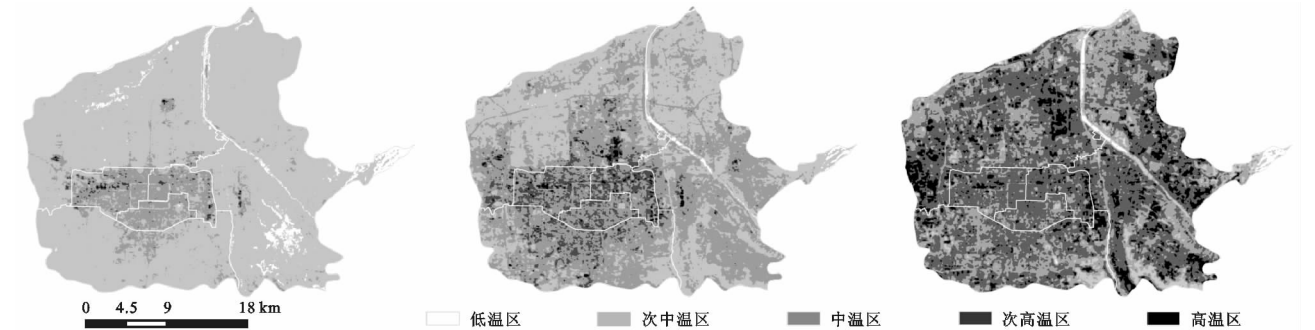


图 1 西安市热力景观分类

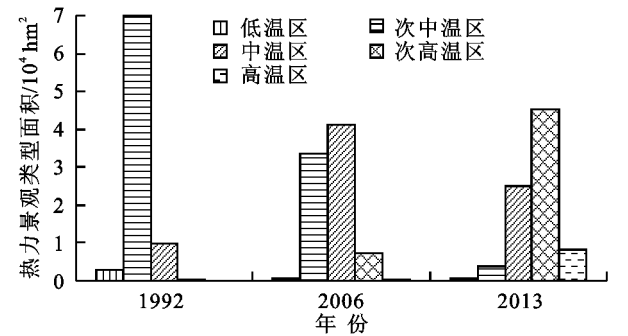


图 2 热力景观类型面积变化

总体来看,1992 年西安市绝大多数地区为次中温区;到 2006 年地表温度升高,中温区比例大幅增加,次中温区也广泛分布;2013 年,整个城市热环境格局发生了很大的改变,次高温区占据城市大部分面积,与高温区、中温区镶嵌分布,使整个城市处于较高的热力等级之中。

3.3 斑块类型指数的变化特征

3.3.1 聚集度指数分析 由图 1 和图 3 可见,1992 年次中温区和中温区两类热力景观类型的聚集度指数较高,分别为 97.665 6,88.631 4,以次中温区为最高,在空间上呈大面积连片状分布;次高温区、高温区和低温区

虽然面积有限,但聚集度指数均接近 80,说明这 3 种热力景观类型在空间分布上倾向于小范围的集中分布。2006 年除次中温区聚集度指数下降外,其余各热力景观类型的聚集度指数均有所上升,但次中温区仍具有最高的聚集度,中温区紧随其后,二者的聚集度指数均超过 90,由此表明原来大面积连片分布的次中温区被具有较高热力等级的中温区所扰动,开始趋于分裂破碎,仅在城市北部地区较为集中,而中温区在向外扩散的过程中,体现出集中、连片的分布趋势;次高温区、高温区相较于 1992 年聚集度指数上升幅度较大,从空间上看,两类型呈现出斑块状散布的特点;低温区仅集中分布于灞河沿岸和灞桥东部山地,因而聚集度指数有较大增加。至 2013 年,次高温区、中温区 and 高温区的聚集度指数均超过 91,其他两种热力景观类型的数值也在 88 以上,各热力景观类型聚集度指数间的差距变小。综上,从 1992—2013 年,次中温区聚集度指数持续稳步下降,聚集度降低,破碎度增加;次高温区、高温区稳步上升,聚集度增加,分布范围扩大;低温区虽稳步上升但范围有限;中温区聚集度指数在 1992—2006 年间有所上升,后略有回落,但聚集度指数整体较高。

总体来看,20 年间除次中温区外,其余各热力景观类型的聚集度指数均在增加、聚集度指数间的差距逐渐缩小,各热力景观类型内部趋于集中分布,各个类别与覆盖范围大的次高温区镶嵌分布,使热力景观整体的破碎度增加。

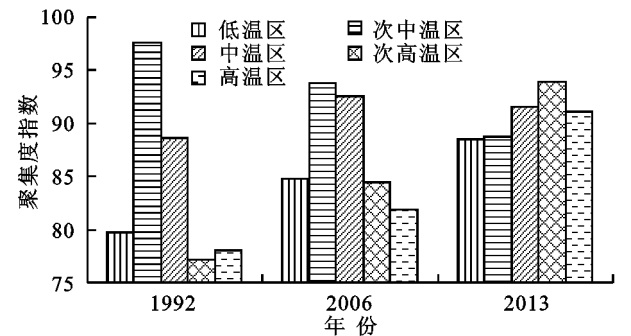


图 3 聚集度指数变化

3.3.2 面积—周长分维数分析 由图 4 可见,1992 年,低温区具有最高的分维数,其斑块形状复杂,说明受人为干扰程度较小,这与其于河流沿岸和灞桥东部山地分布的空间特征相吻合;次中温区和中温区次之,人为干扰也相对较小;而高温区和次高温区分维数小,斑块形状简单,人类干扰特征明显,由图 1 可见,高温区和次高温区以厂矿地区较为集中。到 2006 年,低温区、次中温区和中温区分维数均有所降低,以低温区降低幅度最大,说明这 3 类热力景观类型受人类干扰程度有增大的趋势;高温区和次高温区分维数有所增加,由于基数较低,因而人类干扰一直较大,主要分布于城市人口、建筑高度密集和厂矿集中的区域。到 2013 年,低温区和次中温区分维数进一步降低,次高温区变化不大,中温区 and 高温区分维数有所增加,其中,高温区分维数虽已达 3 年最大值,但仍是所有热力景观类型分维数中的最小值,指示人类活动对这一热力景观类型具有最强烈的影响;次高温区和中温区分维数基本稳定,表明人类活动对他们的影响持续而稳定存在,这两类区域以建筑用地、居民地、道路为主,人类影响较大,斑块形状相对简单;低温区和次中温区分维数持续降低,斑块形状逐渐趋于规则化,由图 1 可见,两类区域以耕地、林地、城市绿地和水域为主,随城市 and 经济发展,这些地类受人类影响增大,因而不断向单一化、有序化和规则化方向发展,从另一个侧面说明了人类的干扰在持续增强。

综上,1992—2013 年低温区和次中温区分维数在逐年降低,人类对其影响在增强;高温区和次高温区分维数在逐年增高,高温区受人类影响最大,低温区受人类扰动较小。2006—2013 年次高温区和中温区分维数逐渐趋于稳定,其斑块形状亦趋于稳定,说明人类的扰动持续而稳定地存在。

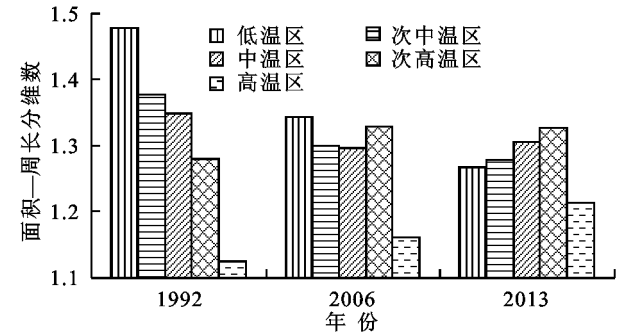


图 4 面积—周长分维数变化

3.4 景观类型指数的变化特征

采用蔓延度指数 (CONTAG)、均匀度指数 (SHEI) 和多样性指数 (SHDI) 从景观水平分别反映各热力景观类型中景观成分的团聚程度(即景观的连通性)、各类斑块分配的均匀程度和景观格局的丰富度和复杂度,景观类型指数计算结果见表 3。

表 3 景观类型指数

年份	CONTAG	SHEI	SHDI
1992	77.8514	0.3367	0.5420
2006	59.7498	0.6177	0.9941
2013	56.3340	0.6839	1.1008

由表 3 可知,CONTAG 从 1992—2013 年在不断下降,意味着在 1992 年次中温区这一优势斑块类型形成了良好的连接性,随后,热力景观逐渐转变为次高温区、中温区等多种斑块散布分布的空间格局,热力景观的破碎化程度进一步增高。20 年来,均匀度指数不断上升,1992 年 SHEI 较低,为 0.336 7,与当时以次中温区为主的热力景观格局相吻合,随城市规模不断扩大,城市快速发展,人口迅速增加,SHEI 也在不断增加,次高温区、中温区等各类斑块面积增加,次中温区面积大幅减少,各个斑块类型分配的均匀度不断增加,热力景观各组分分配越来越均匀。SHDI 从 1992—2013 年也在不断上升,说明热力景观的丰富度和复杂度不断增加,异质性不断提升,热力景观更加趋于多样化,景观间能量交换也更加便利。总体来看,1992—2006 年 3 个指数的变化幅度均明显大于 2006—2013 年的变化幅度,说明 1992—2006 年各景观成分的团聚程度要高于 2006—2013 年,景观成分分布的均匀度与丰富度均低于 2006—2013 年。景观成分团聚程度降低、破碎度增加,均匀度、丰富度不断增高,使各热力景观类型的空间分布发生明显改变,尤其是高热力等级的类型,从城市中心迅速向四周扩散,从而使整个城市的热环境格局发生了显著变化。这一变化过程与西安市城市热岛强度呈分段式增加的特点有着较好的一致性。最新研究表明,1993—2006 年西安市热岛强度的增长幅度明显大于 2007—2012 年的增长幅度,1993—2012 年的 20 年间西安市常

住人口、人口密度以及建城区面积分别增加了 35.56%, 24.53%和 329.9%,热岛强度与这 3 项指标之间的相关系数分别达到 0.779, 0.835, 0.682, 在 0.01 水平(2-tailed)上呈显著相关,与三者间的灰色关联度分别为 0.851 7, 0.837 9, 0.821 7, 均在 0.80 以上。单位 GDP 能耗、房屋建筑竣工面积、全社会机动车辆数等也是导致热岛强度增加、热力景观格局发生变化的重要因素<sup>[21]</sup>。

## 4 结 论

(1) 从 1992—2013 年,西安市地表最低温、最高温和平均温度均有不同程度的增加,城市热岛效应呈逐渐增强的趋势,且 1992—2006 年的增温幅度明显大于 2006—2013 年的增温幅度。

(2) 从热力景观类型的空间分布看,1992 年西安市以次中温区为主;到 2006 年地表温度升高,中温区占据主要地位,次中温区也广泛分布;到 2013 年,整个城市热环境格局发生了很大的改变,次高温区占据城市大部分面积,中温区与次高温区镶嵌分布,使整个城市处于较高的热力等级之中。

(3) 从斑块类型指数的变化特征看,20 年间除次中温区外,其余各热力景观类型的聚集度指数均在增加,聚集度指数间的差距逐渐缩小,各热力景观类型与次中温区镶嵌分布,使城市热力景观整体的破碎度增加;从 1992—2013 年,低温区和次中温区分维数逐年降低,高温区和次高温区分维数逐年增高,高温区受人类影响最大,低温区受人类扰动较小。2006—2013 年次高温区、中温区和次中温区分维数逐渐趋于稳定,斑块形状亦趋于稳定,说明人类的扰动持续而稳定存在。

(4) 从景观类型指数看,1992—2013 年蔓延度指数不断下降,均匀度指数和多样性指数不断上升,热力景观格局时空差异较大。20 多年来,热力景观从以次中温区为优势斑块连片分布的空间格局,转变为以次高温区、中温区等多种热力斑块镶嵌散布的空间格局,热力景观的破碎化程度不断提高,各热力斑块分配的均匀度、景观格局的丰富度和复杂度均稳步增加。

景观格局指数能够有效地表达城市热力景观类型的组成、空间配置及演变特征,是分析城市热环境格局及其演变过程的重要工具。深入理解各热力景观类型相互转换的过程、热力景观格局演变与人口、城镇化等影响因素之间的相互关系,对改善城市热环境状况、建设宜居生态城市具有重要意义,也是今后需要进一步探讨的问题。

### 参考文献:

[1] 陈云浩,李京,李晓兵.城市空间热环境遥感分析:格局、

过程、模拟与影响[M].北京:科学出版社,2004.

- [2] 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[M].北京:科学出版社,2008.
- [3] 郭建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [4] 陈云浩,李晓兵,史培军,等.上海城市热环境的空间格局分析[J].地理科学,2002,22(3):317-323.
- [5] 黄聚聪,赵小锋,唐立娜,等.城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征:以厦门市为例[J].生态学报,2012,32(2):622-631.
- [6] 孟丹,王明玉,李小娟,等.京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究[J].生态学报,2013,33(5):1545-1558.
- [7] 西安市统计局.西安统计年鉴 2014[Z].北京:中国统计出版社,2014.
- [8] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,90(4):434-440.
- [9] 杨丽萍,孔金玲,郭玉芳,等.西安城区地表温度的遥感反演与时空演变分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2015,51(3):388-396.
- [10] 覃志豪.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(4):456-466.
- [11] 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):2015-2023.
- [12] Rozenstein O, Qin Z, Derimian Y, et al. Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm[J]. Sensors, 2014,14(4):5768-5780.
- [13] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Skokovic D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014,11(10):1840-1843.
- [14] Yu X, Guo X, Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS: Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. Remote Sensing, 2014,6(10):9829-9852.
- [15] 徐涵秋.新型 Landsat8 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.
- [16] 蒋大林,匡鸿海,曹晓峰,等.基于 Landsat8 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.
- [17] Valor E, Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas[J]. Remote Sensing of Environment, 1996,57(3):167-184.

(下转第 264 页)

通过变权理论和物元可拓模型的改进构建耕地生态安全预警模型,动态分析了新郑市耕地生态安全预警等级和预警指标的预警等级,提出主要障碍因子对耕地生态安全预警未来发展的影响。但是在构建指标体系时,由于数据的难以获取和局限性,在指标的选取方面仍存在不足和缺陷;经典域目前没有统一的标准,在制定的过程中必定会存在一定的主观性,而这些不足都会导致预警结果的偏差,因此需要进一步研究并改善。文章仅从时间上对新郑市耕地生态安全预警进行研究,空间上的研究以及预警系统的建立将是今后进一步研究和探讨的方向。

#### 参考文献:

- [1] 张利,陈影,王树涛,等. 滨海快速城市化地区土地生态安全评价与预警:以曹妃甸新区为例[J]. 应用生态学报,2015,26(8):2445-2454.
- [2] Tian J, Gang G. Research on regional ecological security assessment[J]. Energy Procedia, 2012,16:1180-1186.
- [3] Han B, Liu H, Wang R. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing—Tianjin—Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods[J]. Ecological Modelling, 2015,318:217-225.
- [4] Liang P, Liming D, Guijie Y. Ecological security assessment of Beijing based on PSR model[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010,2:832-841.
- [5] Hua Y E, Yan M A, Limin D. Land ecological security assessment for Bai autonomous prefecture of Dali based using PSR model-with data in 2009 as case[J]. Energy Procedia, 2011,5:2172-2177.
- [6] 赵文晖,杨伟州,王利香,等. 基于可拓优度评价模型的耕地生态安全评价:以保定市为例[J]. 河南农业科学, 2015,44(2):60-65.
- [7] Li X, Tian M, Wang H, et al. Development of an ecological security evaluation method based on the ecological footprint and application to a typical steppe region in China[J]. Ecological Indicators, 2014,39:153-159.
- [8] 蔡银莺,罗成. 江汉平原耕地资源生态安全状况及空间集聚格局[J]. 华中农业大学学报:社会科学版,2015(5):110-120.
- [9] 蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,1997:202-209.
- [10] 李泓泽,郭森,唐辉,等. 基于改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价[J]. 电网技术,2013(03):653-659.
- [11] Wu G C, Niu X. Application of an evaluation model based on Punishing variable weight for early warning of land ecological security[J]. Resources Science, 2010, 32(5):992-999.
- [12] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报:理学版,2004,39(2):25-29.
- [13] 王金南,吴舜泽. 环境安全管理:评估与预警[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [14] 荣联伟,师学义,高奇,等. 黄土高原山丘区土地生态安全动态评价及预测[J]. 水土保持研究,2015,22(3): 210-216.
- [15] 周彬,钟林生,陈田,等. 基于变权模型的舟山群岛生态安全预警[J]. 应用生态学报,2015,26(6):1854-1862.
- [16] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报,2013,33(16):5090-5100.

(上接第 255 页)

- [18] Qin Z H, 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[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(18):3719-3746.
- [19] 徐涵秋,陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法[J]. 遥感技术与应用,2003, 18(3):129-133.
- [20] 董妍,李星敏,杨艳超,等. 西安城市热岛的时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(8):107-112.
- [21] 刘宇峰,原志华,孔伟,等. 1993—2012 年西安城区城市热岛效应强度变化趋势及影响因素分析[J]. 自然资源学报,2015,30(6):974-985.