

西咸一体化驱动的咸阳市热力景观格局时空分异分析

冯晓刚, 周在辉, 李凤霞, 李 萌

(西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要:以西咸一体化进程为驱动,以咸阳市 1988~2019 年热力景观格局时空分异演变特征为研究对象,以多时相、多源异构数据为支撑,采用单窗算法反演得到了多时相热环境数据,结合景观生态学理论,运用斑块总数等景观指数及空间格局移动轨迹方法对咸阳市 31 年间的热力景观格局时空演变特征进行了剖析。结果表明:(1)咸阳市 31 年间热力景观类型中常温温区占主导地位,年均占有率为 70.1%;(2)常温温区景观类型变幅最大,31 年间累计减少 104.65 km²;其次是热岛区,31 年间累计增加 99.5 km²;变幅最小的是强绿岛区,31 年间累计减少 2.24 km²;(3)热力景观指数分析表明:31 年间咸阳市整体热力景观斑块形状复杂度降低,斑块趋于规则化。究其原因是城市化进程导致城市用地类型占主导地位及大规模城镇化建设过程区域完成所致。(4)咸阳市热岛景观和强热岛景观整体呈现由西南向东北的方向走势。

关键词:热岛效应;热力景观;格局演变;西咸一体化

中图分类号: TU985.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)03-0413-08

Spatiotemporal differentiation of thermal landscape pattern in Xianyang City driven by the integration of Xi'an and Xianyang

FENG Xiaogang, ZHOU Zaihui, LI Fengxia, LI Meng

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The heat island landscape pattern and dynamic characteristics from 1988 to 2019 in Xianyang were studied by Mono-window Algorithm, based on the thermal band data of the Landsat data. This paper also analysis the changes of heat landscape pattern by landscape indices for 31 years. The results showed that: (1) the normal temperature type was the dominant in the research area from 1988 to 2019, with an annual average share of 70.1%. (2) the normal landscape area increased the most in the past 31 years, the cumulative decreased in 104.65 km², and the second was the heat landscape with increasing 99.5 km²; the green area was the smallest with the cumulative reduction of 2.24 km² in the past 31 years. (3) thermal landscape index analysis showed that: the whole landscape patch shape complexity was reduced in the past 31 years. It was caused by the urbanization land used types predominate and urbanization process which have done. (4) The overall trend of heat island landscape and strong heat island landscape in Xianyang city is from southwest to northeast.

Key words: urban heat island; thermal landscape; pattern evolution; Xianyang and Xi'an city

土地利用类型的急剧变化是快速城镇化最显著的特征^[1]。原有耕地、植被、水体等自然地表类型快速转变为建设用地,地表热通量增大^[2]。同时,伴随区域经济一体化快速发展,人为热排放不断增加,两者共同作用导致近地面热辐射通量交换过程显著变化,城市逆温加剧,导致城市热环境持续恶化。因此,城市热环境研究已经成为当下构建低碳、适宜与可持续发展新型城镇化过程中人居热生态安全研究的热点^[3]。

城市热环境研究起源于 19 世纪初期的英国^[4]。此后,国内外众多学者从多视角、多方法体系对

不同样区分别展开了实验研究^[5-6],其中城市热岛效应的研究最为集中。梳理已有研究成果发现:分形理论、景观生态学理论等与气候学的交叉与融合为城市热环境在机理研究、时空格局演变分析、成因及对策机制等研究中提供了理论支撑,有力的促进了多学科的交叉与融合。陈云浩等采用景观指数对上海市热力景观演变过程进行了剖析,结果表明景观格局指数可以有效表征城市热环境的时空演化特征^[7]。冯晓刚等利用景观格局指数对西安市长时序的热环境展开了剖析,结果表明景观格局指数能够深入刻画景观类型水平下的

收稿日期: 2020-09-24

修改稿日期: 2021-05-07

基金项目: 十三五国家重点研发计划子课题(2018YFC0704505); 国家自然科学基金青年基金(51608419); 陕西省自然科学基金面上基金(2018JM5073); 陕西省教育厅专项基金(18JK0453); 西安建筑科技大学自然科学专项基金(ZR19001)

第一作者: 冯晓刚(1979—),男,博士,副教授,主要从事城市环境遥感及智慧城市设计。E-mail: fendao_ren@163.com.

热环境时空演变过程与趋势^[8]。沈中健等探索了绿地景观格局对城市热环境时空分布的影响,结果表明两者间存在显著的空间自相关性^[9]。因此,景观生态学理论的融入为城市热环境的研究提供了时空表征的新思路。

在“一带一路”建设的大背景下,西咸一体化进程不断加快,导致区域热环境恶化趋势明显。本文以景观生态学理论为指导,基于分异性原理,以 Landsat TM/ETM+ 与 Landsat8 为主要数据源,辅以气象与实测数据,综合运用单窗算法^[10]深入剖析了西咸一体化背景下咸阳市 1988~2019 年 31 年间城市热环境的演变过程与趋势特征,以期有效改善西咸一体化进程中的城市热环境问题提供科学参考。

1 数据源与研究方法

1.1 咸阳市概况

咸阳市是中国大地原点所在地,位于陕西省中部(东经 $107^{\circ}38' \sim 109^{\circ}10'$, 北纬 $34^{\circ}11' \sim 35^{\circ}32'$), 东邻陕西省省会西安市,渭水穿南,西接杨凌高新农业示范区,北与铜川、渭南接壤。辖 2 区 2 市 9 县,全市总面积 $10\,196\text{ km}^2$,截止 2019 年底,全市总人口 500 余万,常住人口 435 万人;地势由东南向西北呈阶梯形态势分布。属暖温带大陆性季风气候,南部地区四季分明、雨量充沛;北部地区,气候稍寒。全境年均气温 $9 \sim 13.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高 $41.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低 $-26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,全年降水量 $500 \sim 600\text{ mm}$ ^[11]。

1.2 数据源

以热红外遥感数据 Landsat TM/ETM+ / TIRS 为基础,影像成像时间分别为 1988-6-4、1995-5-4、2016-5-5 和 2019-6-5。轨道号均为 p127r36,多光谱波段、热红外波段与全色波段空间分辨率分别为 30 m、60/120 m 和 15 m。辅助数据包括咸阳市 2016 年 1:1 万地形图,2016 年 SPOT 卫星数据,30 m 分辨率的 DEM 及 1988~2019 年咸阳市统计年鉴数据。

1.3 研究方法

本文以 2016 年 ETM+ 数据为基准与咸阳市 2016 年 1:1 万地形图进行空间配准,配准误差控制在 0.5 个像元内;在进行辐射定标的基础上,基于 MODTRAN5 辐射传输模型对四个时相的多光谱数据分别进行大气辐射校正;然后分别确定多时相遥感数据对应的地表比辐射率、大气平均作

用温度和大气透过率等核心反演参数,最后综合运用基于 Python 自主编写的热环境反演程序计算得到研究区实际地表温度,并根据需要将反演结果依次划分为强绿岛区、绿岛区、常温区、热岛区和强热岛区五种类型^[14],在此基础上,结合景观格局指数对咸阳市 1988~2019 年 31 年间城市热环境时空割据演化特征展开剖析。

2 地表温度反演

基于 Landsat 热红外波段数据计算地表温度,首先需利用亮温模型计算得到亮温温度,然后采用单窗算法计算得到实际地表温度^[12]。

(1) 亮温温度计算

$$L_{\lambda} = DN \times (L_{\max} - L_{\min}) / 255 + L_{\min} \quad (1)$$

$$T_6 = K_2 / \ln(K_1 / L_{\lambda} + 1) \quad (2)$$

式中: L_{λ} 为热辐射强度值, DN 为热波段的像元亮度值; L_{\max} 、 L_{\min} 分别为传感器可探测到的最大、最小辐射亮度;对 Landsat 5: $L_{\max} = 1.560\,0(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ 、 $L_{\min} = 0.123\,8(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ 、 $K_1 = 60.776(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ 、 $K_2 = 1\,260.56(\text{K})$; Landsat 7: $L_{\max} = 17.04(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ 、 $L_{\min} = 0.0(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ 、 $K_1 = 666.09(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ 、 $K_2 = 1\,282.71(\text{K})$ ^[10]。通过 ENVI5.2 构建地表亮温反演模型,计算得到研究区不同年份地表亮温温度。

(2) 参数计算

由于 Landsat 影像大都是混合像元,基于混合像元及其分解理论,确定地表比辐射率 $\epsilon = f\epsilon_v + (1-f)\epsilon_i + d_e$, 其中: ϵ_v 和 ϵ_i 分别为植被比辐射率和裸露地比辐射率,通常取值 0.985 和 0.960^[13]; f 为植被盖度, $f = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min})$; d_e 为地表几何分布和内散射效应, $d_e = 0.06 \times f \times (1-f)$ 。由于研究区位于北半球中纬度地区,因此在获取当日近地面气温 T_0 基础上,利用 $T_a = 16.011\,0 + 0.926\,21\,T_0$ 计算得到大气平均作用温度^[13]。由于大气透过率较难获取,本文借鉴覃志豪^[10]等提出的大气透过率估算方程进行大气透过率参数的估算(表 1)。

(3) 地表温度计算

以地表比辐射率、大气平均作用温度和大气透过率为实际地表温度计算的核心参数,基于上述计算结果,利用公式(3)计算得到实际地表温度。

$$T_s = \frac{1}{C} \{ a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C = D] \times T_b - D \times T_a \} \quad (3)$$

式中: T_s 为实际地表反演温度; T_a 为大气平均作用温度; T_b 为亮度温度; C 和 D 为中间过程变量, $C = \varepsilon\tau$, $D = (1 - \tau) \times [1 + (1 - \varepsilon)\tau]$; a 和 b 为

拟合系数, 通常取 $-67.355\ 351$ 和 $0.458\ 606$; ε 和 τ 分别为地表比辐射率和大气透过率^[8]. 基于(3)计算得到咸阳市 1988、1995、2006 和 2019 年四个时期的地表温度数据. 在对计算结果进行归一化处理^[14]的基础上得到咸阳市归一化温度数据(图 2).

表 1 大气平均作用温度与近地面气温关系式(覃志豪, 2003)^[13]

大气剖面	水分含量 $\omega/\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	大气透过率估计方程	相关系数平方/ R^2	标准误差/SEE
高气温	0.4~1.6	$\tau_6 = 0.974\ 290 - 0.080\ 07\omega$	0.996 11	0.002 368
	1.6~3.0	$\tau_6 = 1.031\ 412 - 0.115\ 36\omega$	0.998 27	0.002 539
低气温	0.4~1.6	$\tau_6 = 0.982\ 007 - 0.096\ 11\omega$	0.994 63	0.003 340
	1.6~3.0	$\tau_6 = 1.053\ 710 - 0.141\ 42\omega$	0.998 99	0.002 375

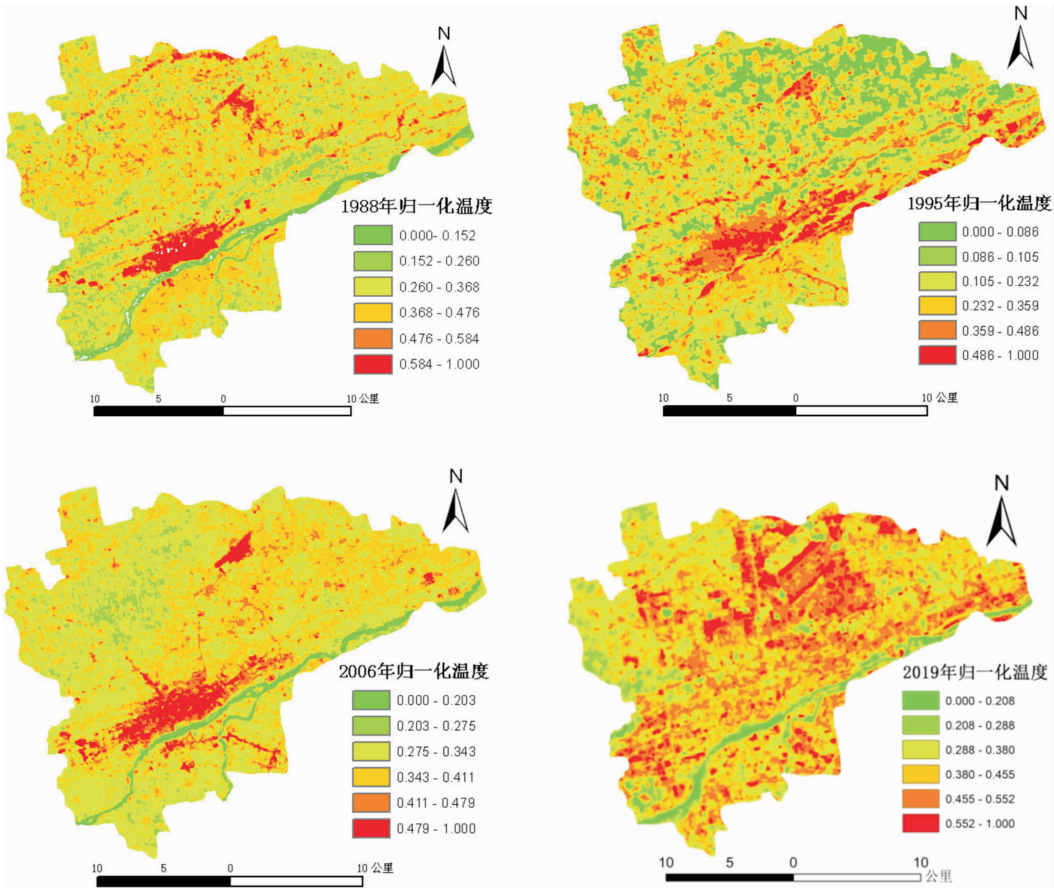


图 1 基于中误差划分的咸阳归一化温度时空分布图

Fig. 1 TheSpatiotemporal distribution of normalized temperature in Xianyang based on MSE

3 分析与讨论

3.1 热力景观格局变化分析

基于上述得到的咸阳市 1988、1995、2006 和 2019 年温度数据. 运用 Vector Utilities 模块, 将影像由 Raster 转换为 Vector 格式, 并在 Arc-GIS10.5 平台下, 经归一化处理后分别得到不同时

相的热环境数据, 结果见表 2.

由表 2 可知: 1988 年常温区面积为 431.31 km², 占咸阳市总面积的 79.75%; 热岛区和强热岛区面积为 57.86 km², 占总面积的 10.66%; 绿岛区和强绿岛区面积为 51.97 km², 占总面积的 9.87%, 由此可见 1988 年咸阳市常温区占主导地位, 其次为热岛区域, 最后为绿岛区

表 2 不同年份咸阳市归一化温度面积统计表

Tab. 2 The Statistical table of normalized temperature area in Xianyang in 1988、1995、2006 and 2019

类型年份	咸阳市					
	强度分级	强热岛区	热岛区	常温区	绿岛区	强绿岛区
1988 年	面积/km ²	18.59	39.27	431.31	39.40	14.17
	比例/%	3.42	7.24	79.46	7.26	2.61
1995 年	面积/km ²	21.57	69.01	361.24	80.50	10.42
	比例/%	3.97	12.72	66.56	14.83	1.92
2006 年	面积/km ²	21.75	35.81	451.55	23.22	10.41
	比例/%	4.14	6.82	86.05	4.43	1.99
2019 年	面积/km ²	36.66	138.52	326.66	27.10	11.93
	比例/%	6.75	25.52	60.19	4.99	2.54

域. 1995 年常温区面积为 361.24 km², 占咸阳市总面积的 66.56%; 热岛区和强热岛区面积为 90.58 km², 占总面积的 16.69%; 绿岛区和强绿岛区面积为 90.92 km², 占总面积的 16.75%, 表明 1995 年咸阳市常温区继续占主导地位, 其次为热岛区域, 最后为绿岛区域. 2006 年常温区面积为 451.55 km², 占咸阳市总面积的 86.05%; 热岛区和强热岛区面积为 57.56 km², 占总面积的 10.96%; 绿岛区和强绿岛区面积为 33.65 km², 占总面积的 6.42%, 表明 2006 年咸阳市常温区继续占主导地位, 且面积显著较 1995 年增加, 其次为热岛区, 最后为绿岛区. 2019 年常温区面积为 326.66 km², 占咸阳市总面积的 60.19%; 热岛区和强热岛区面积为 175.18 km², 占总面积的 32.27%; 绿岛区和强绿岛区面积为 39.03 km², 占总面积的 7.53%, 由此表明尽管 2019 年咸阳市常温区继续占主导地位, 但热区域显著增加, 常温区减少面积主要流向了热区域; 同时, 绿区域较 2006 年表现为微小幅度增加的趋势. 由此可见, 1988~2019 年间咸阳市始终常温区占主导地位, 且 2006 年占比最大为 86.05%, 2019 年占比最小为 60.19%; 热区域面积次之, 且 2019 年占比最大为 32.27%. 综合分析: 1988~2019 年 31 年间热区域变化幅度不大, 绿区域占总面积最小, 但整体呈现下降的趋势.

3.2 热力景观数量变化分析

为了进一步剖析 1988~2019 年咸阳市热力景观的变化情况, 以 1988、1995、2006 和 2019 年为时间节点分别计算咸阳市不同热力斑块的变化情况(图 3). 结合图 3 和表 2 可知: 1988~1995 年, 咸阳市常温区和强绿岛区面积持续减少, 且常温区面积减幅最大, 累计减少 70.07 km², 年均减少

10.01 km². 绿岛区、热岛区和强热岛区面积均增加, 其中绿岛区面积累计增加 41.1 km², 年均增加 5.88 km²; 强热岛区面积增幅最小, 累计增加 2.98 km². 通过转移矩阵分析发现: 常温区减少的面积主要流向绿岛区和热岛区, 强热岛区面积的增加主要源自于热岛区域. 1995~2006 年, 常温区和强热岛区面积持续增加, 其中常温区增幅最为显著, 累计增加 90.31 km², 年均增加 10.03 km². 同时, 热岛区、绿岛区和强绿岛区均表现为减少的趋势; 热岛区和绿岛区面积减幅显著, 9 年间热岛区和绿岛区累计减少 33.2 km²和 57.28 km², 强绿岛区面积基本保持不变. 通过转移矩阵分析发现, 减少的热岛区和绿岛区均流入常温区. 因此, 2006 年咸阳市整体热环境较 1995 年呈现恶化的趋势. 2006~2019 年, 除了常温区面积急剧减少外, 强热岛区、热岛区、绿岛区和强绿岛区均表现为面积增加的趋势, 且热岛区增幅最为显著, 13 年间累计增加 102.71 km², 其次为强热岛区域, 累计增加 14.91 km², 绿岛区和强绿岛区变幅最小, 累计增加面积 3.88 km²和 1.52 km². 综合分析 1988~2019 年 31 年间咸阳市不同热力景观面积变化特征, 发现 31 年间热岛区域显著增加, 累计增幅 99.25 km², 强热岛区增加 18.07 km²; 同时, 常温区减幅最为显著, 31 年间累计减少 104.65 km², 变化比占咸阳市总面积的 19.28%. 进一步分析发现, 咸阳市 31 年间热环境整体表现为加剧的趋势, 同时, 局部热环境恶化显著.

3.3 热力景观格局演变分析

景观格局既是景观异质性的体现, 又是人类活动与各种生态过程在不同尺度上综合作用的结果. 城镇热环境景观是城镇与周围环境相互作用而形成的, 是人工干预城镇局地生态系统导致局

地气候变异的热力学表现^[15]. 本文从斑块、类型和景观三个层次择斑块总数(*NP*)、景观形状指数(*LSI*)、周长-面积分维数(*PAFRAC*)和聚集度指数(*CONTAG*)4 个指标^[16]用以分析咸阳市 1988~2019 年 31 年间热力景观格局的演变特征. 基于

ENVI5.2 平台, 采用中误差划分的方法将研究区热力景观类型划分为五大类, 利用 ARCGIS10.5 平台将分类后数据转化为 ARCGRID 格式, 最后利用景观分析软件 FRAGSTATS4.2 分别计算了不同时相反演结果的景观指数(表 3, 表 4).

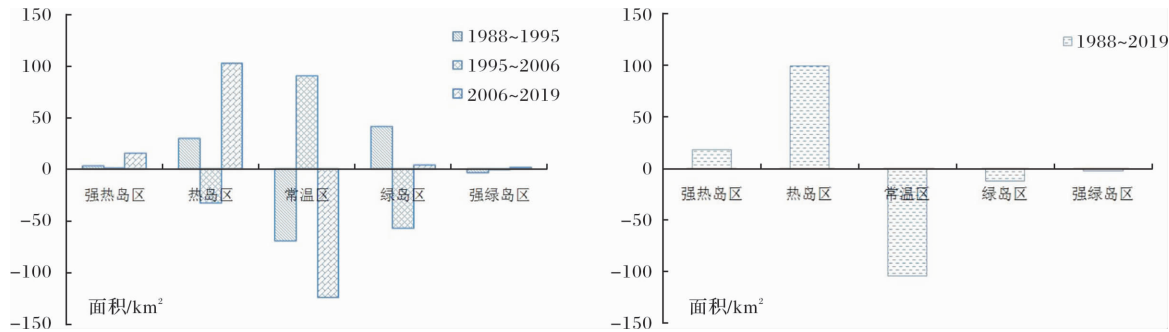


图 2 1988-2019 年咸阳市不同热岛类型数量变化图

Fig. 2 The changes of the different urban heat island types of Xianyang City from 1988 to 2019

表 3 咸阳市热力景观格局统计表

景观类型	NP					LSI				PAFRAC			
	1988~2019					1988~2019				1988~2019			
强绿岛区	24	30	51	39	13.7	6.2	10.7	9.4	1.5	1.3	1.1	1.2	
绿岛区	1 215	945	1 404	1 372	46.5	34.7	43.9	44.3	1.3	1.3	1.4	1.5	
常温区	1 004	1 134	1 701	1 554	54.9	56.4	47.1	49.5	1.4	1.5	1.3	1.3	
热岛区	723	676	542	772	43.3	47.9	34.8	44.1	1.4	1.5	1.4	1.2	
强热岛区	176	375	151	214	13.2	22.3	13.8	16.2	1.2	1.2	1.3	1.4	

表 4 咸阳市聚集度指数统计表

Tab. 4 The statistics table of CONTAG index of Xianyang City				
年份	1988	1995	2006	2019
CONTAG	51.224	49.651	54.918	59.254
-1.573(1988-1995)				
指数变化	5.267(1995-2006)			
	4.336(2006-2019)			

NP 指数变化分析: 咸阳市强绿岛区斑块数 1988~1995 年呈现小幅增加的趋势, 1995~2006 年呈现较大幅度增加的趋势, 11 年间斑块数累计增加 21 个; 2006~2019 年, 强绿岛区 *NP* 个数呈现减少的趋势, 13 年间累计减少 12 个. 分别提取强绿岛区并利用 ArcGIS 空间叠加分析功能, 对比分析 1988 年和 1995 年 *NP* 变化发现, 该时间段增加的强绿岛斑块主要集中在渭河沿岸地区. 绿岛区斑块数 1988~1995 年呈现减少的趋势, 7 年累计减少 270 个. 1995 年之后呈现较大幅度增加的趋势, 截至 2006 年, 绿岛区斑块数较 1995 年增加 459 个, 2019 年绿岛斑块数较 2006 年呈现小幅度减少的趋势, 13 年间累计减少 32 个. 分析原因主要是由于城市的快速发展, 使得具有高吸热的建

设用地取代自然地表覆盖所致. 常温区 2006~2019 年 13 年间, *NP* 指数呈现先增加后减少的趋势, 1988~2006 年, 该时间段常温区 *NP* 指数增加明显, 累计增加斑块 697 个, 主要是由于土地利用方式的改变所致, 通过空间叠加对比发现, 变化最为剧烈的区域主要集中在城市周边地区. 2006 年之后, 常温区斑块数表现为减少的趋势, 13 年间累计减少 147, 分析原因在于耕地等较低热熔的土壤覆被类型被水泥、沥青等高吸热材料代替所致. 热岛区斑块指数呈现先持续减少, 后较大幅度增加的趋势, 且变化的区域主要集中在咸阳市的东北方向. 同时相比 1988 年, 高温区变化主要呈现基于原热区域的片状扩展与延伸. 强热岛斑块呈现先增加后持续减少的趋势, 1988~1995 年累计增加 199 个, 之后截止到 2006 年, *NP* 指数累计减少 124, 之后表现为增加的趋势, 13 年间累计增加强热岛斑块 63 个. 分析原因在于土地利用类型的转变导致的区域地表热辐射平衡被打破所致.

(2)*LSI* 变化分析: 咸阳市强绿岛区景观形状

指数 1988~1995 年 7 年间持续减少, 1995~2006 年 11 年间又急剧增加, 之后 2006~2019 年 13 年间较大幅度减少, 表明强绿岛区斑块形状在城市化的不同阶段整体趋于简单化。绿岛区 1988~1995 年 7 年间斑块复杂度总体表现为降低的趋势, 累计减少 11.8, 表明在改革开放不久后的咸阳市该时间段绿岛区景观形状趋于规则化, 与当时的农业经济发展模式相一致。1995 年后绿岛区景观形状指数呈现持续上升的趋势, 至 2019 年累计增加 9.6, 表明自 1995 年后市场经济发展以来, 咸阳市绿岛区景观形状伴随经济市场复苏与多元化发展模式, 绿岛区斑块逐渐趋于破碎化和复杂化, 这与城市在这一时间段开始规模化建设起步相一致。常温区 1988~2006 年 18 年间斑块形状指数持续变小, 表明常温斑块在这一时期趋于复杂化; 2006 年后则呈现规则化特征, 前者是因为组成常温地表覆被不断遭遇无序建设与开发的结果, 而后者则是城镇化体系及其空间格局基本形成, 同时城镇化建设更加注重规划、有序开发的结果。热岛区景观形状指数 1988~2019 年 31 年间呈现先小幅增加, 后大幅度降低, 降幅为 13.1, 之后又增加的趋势, 分析原因在于 2002 年西咸一体化政策实施后, 城市开发强度和速度不断加快, 城市地表覆被急剧变化, 且已有的城镇空间格局中城镇生态建设中的公园、绿地等低容物质的大量出现, 使得城镇热岛区域形状复杂度降低后又增大的趋势。热岛区景观形状复杂度指数呈现先升高, 后降低又持续走高的趋势, 分析原因一方面是由于城市组团类型建筑在 2000 年后不断涌现, 另一方面城市开发强度、空间和格局更加紧凑的结果。

(3)PAFRAC 变化分析: 31 年间咸阳市强绿岛区斑块分维数呈现小幅降低的趋势, 表明强绿

岛区的斑块趋于规则化, 主要原因是城市进一步开发建设使得城市水体及高密度绿化区呈现单一化、有序化。绿岛区和强热岛区呈现较为相近的变化规律, 即先持平后小幅增加。常温区和热岛区则整体表现为小幅增加的趋势, 表明改革开放经济快速增长的同时, 热斑块复杂度增加, 城市土地利用异质性加剧; 2006 年后又表现为小幅减少的趋势, 表明西咸一体化进程不断加快过程中, 咸阳市通过合理的城市规划、增加绿化及水域面积等相关措施使得常温区域斑块趋于规则化。

(4)CONTAG 变化分析: 咸阳市景观聚集度指数由 1988 年的 51.224 减少到 1995 年的 49.651, 表明咸阳市 7 年间土地利用整体趋于复杂化与破碎化, 进而导致许多离散小斑块的产生, 究其原因是大面积优势斑块被不断扩张的离散型城镇建设用地不断替代和冲击的结果; 到 2006 年 CONTAG 指数增加到 54.918, 较 1995 年增加了 5.267; 至 2019 年景观聚集度指数则高达 59.254, 1988~2019 年 31 年间 CONTAG 指数整体增加 8.03, 表明咸阳市热环境景观格局趋于整体化, 究其原因是咸阳市大规模建设过程相对完成, 地表覆被格局已基本形成所致。

3.4 热力景观的空间演变特征分析

为了进一步剖析不同时间节点, 咸阳市强热岛区和热岛区两类热力景观的空间演化过程, 基于 GIS 提供的度量地理分布功能, 采用中心要素和利菲弗方向性分布算法, 刻画不同时间节点的热环境区域空间位置及伴随时间的推移轨迹, 结果见图 3 所示, 用以分析随时间变化和城市发展, 城市强热岛区和热岛区两类热力景观的空间演变特征。

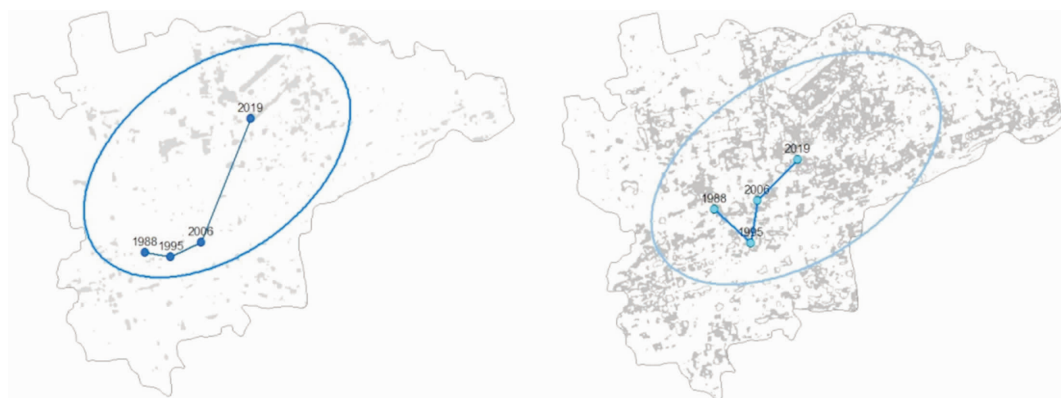


图3 强热岛区(左)和热岛区(右)1988~2019年重心分布空间移动轨迹图

Fig. 3 Spatial movement track of gravity center distribution in strong heat island area (left) and heat island area (right) from 1988 to 2019

由图3可知,1988~1995年7年间强热岛区中心分布呈现由西向东的趋势,之后向咸阳市东北方向偏移,2006~2019年13年间强热岛区中心点位继续向东北方向偏移,且该时间段偏移量最大。结合咸阳市地图可以看出,2019年咸阳市强热岛区的中心点位已经由原咸阳市旧城区开始转向空港新城方向,特别是2010年以后空港新城的高强度开发与建设已经导致该区域成为新的强热岛区域,由于该区域的存在与影响,整体导致咸阳市强热岛区域的空间走向偏向东北方。对于热岛区而言,1988~1995年7年间咸阳市热岛区域中心偏向东南方向,之后偏向北方,2006年以后,热岛区域继续偏向东北方,但增加幅度小于强热岛区,进一步分析发现,强热岛区和热岛区的空间发展方向相一致,但强热岛区比热岛区的发展空间跨度更大,表明在空港附近由原有的低热容的地表覆盖被高热熔的水泥、柏油等下垫面所取代,具有高热容吸热、储热能力强的建筑材料的广泛使用,使得咸阳市强热岛区和热岛区变化显著。以标准差椭圆走势可以看出,无论是强热岛区还是热岛区,它们的宏观走势均由西南方向走向东北方向。且热岛区域在偏向东北方的同时,更多的偏向东方,即西咸一体化所在的西咸新区。由此表明,咸阳市空间热力景观格局随着西咸新区、空港新城等的不断建设与完善,已经形成了新的热力格局。认识和了解咸阳市热力中心的动态演变有利于后期合理规划和制定相应的缓解城市热环境的策略。

4 结论

本文以1988、1995、2006和2019年四个时相的热红外波段为主要数据源,基于单窗算法和中误差划分方法得到了不同时相地表温度数据,归一化处理后,借助景观生态学理论和地理空间度量方法对咸阳市1988~2019年31年间的热力景观格局变化特征进行分析,得到以下结论:

(1) 咸阳市1988~2019年31年间不同热力景观类型面积大小整体表现为:常温区>绿岛区>热岛区>强热岛区>强绿岛区;2019年常温区和绿岛区占地面积较1988年减少了21.75%,且主要流向热岛区和强热岛区,表明咸阳市热力环境呈现恶化的趋势。

(2) 常温区是咸阳市1988~2019年31年间热力景观斑块变化数量最多的类型,累计减少面积104.65 km²;其次是热岛区,31年间累计增加

99.5 km²;变化幅度最小的是强绿岛区,31年间累计减少了2.24 km²。经过对比分析不同热力景观格局的演变过程,发现热岛区增加的面积主要源自于常温区。

(3) 热力景观指数分析表明:1988~2019年31年间咸阳市常温区热力景观类型占主导地位;景观斑块形状复杂度整体降低,这与周长~面积分维数指数和聚集度指数反映结果相一致。分析其成因最根本的是城市化进程导致城市用地类型占主导地位及城镇化大规模建设过程基本完成所致。

(4) 咸阳市热岛景观和强热岛景观整体呈现由西南向东北方向的走势。其中强热岛区中心点位的走势受空港新城版块的建设显著,而热岛区走势受西咸一体化政策影响显著。

参考文献 References

- [1] 陈利顶,孙然好,刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.
CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives[J]. Acta Ecological Sinica, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [2] 江学顶,夏北成. 珠江三角洲城市群热环境空间格局动态[J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1461-1469.
JIANG Xueding, XIA Beicheng. Spatial characteristics and dynamic simulations of urban heat environment of cities in Pearl River Delta[J]. Acta Ecological Sinica, 2007, 27(4): 1461-1469.
- [3] 马瑞明,谢苗苗,勋文聚. 城市热岛“源-汇”景观识别及降温效率[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3328-3337.
MA Ruiming, XIE Miaomiao, XUN Wenju. “Source-sink” landscape identification of the urban heat island and the cooling efficiency[J]. Acta Ecological Sinica, 2020, 40(10): 3328-3337.
- [4] STATHOPOULOU M, CARTALIS C. Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data An application to major cities in Greece[J]. Solar Energy, 2007, 81(3): 358-368.
- [5] RAJASEKAR Umamaheshwaran, WENG Qin hao. Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: A case study of Indianapolis [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64: 86-96.
- [6] 宫阿都,徐捷,赵静,等. 城市热岛研究方法概述[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 96-99.
GONG Adu, XU Jie, ZHAO Jing, et al. A survey of

- study method for urban heat island[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(6):96-99.
- [7] 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):318-322.
CHEN Yunhao, LI Xiaobing, SHI Peijun, et al. Study on spatial pattern of urban heat environment in Shanghai City[J]. *Scientia geographica sinica*, 2002, 22(3):318-322.
- [8] 冯晓刚, 石辉. 西安城市热环境格局的动态演变[J]. *生态学杂志*, 2011, 31(11):2821-2925.
FENG Xiaogang, SHI Hui. Dynamic changes of urban heat environment pattern in Xi'an of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 31(11): 2821-2925.
- [9] 沈中健, 曾坚, 梁晨. 闽南三市绿地景观格局与地表温度的空间关系[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1309-1317.
SHEN Zhongjian, ZENG Jian, LIANG Chen. Spatial relationship of greenspace landscape pattern with land surface temperature in three cities of southern Fujian [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1309-1317.
- [10] 覃志豪, ZHANG Minghua, ARNON Karnieli 等. 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, ARNON Karnieli, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM6 data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4):456-466.
- [11] 陕西师范大学地理系编. 咸阳市地理志[M]. 西安: 陕西省人民出版社, 1991.
Shaanxi Normal University geography department. Geographical ambition of Xianyang City[M]. Xi'an: Shaanxi Province People's Publishing, 1991.
- [12] JENNIFER F, KAYA A. R. Spatial relationships between snow contaminant content, grain size, and surface temperature from multispectral images of Mt. Rainier, Washington (USA)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86:216-231.
- [13] 覃志豪, LI Wenjuan, ZHANG Minghua, 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. *国土资源遥感*, 2003, 56(2):37-43.
QIN Zhihao, LI Wenjuan, ZHANG Minghua, et al. Estimating of the essential atmospheric parameters of Mo No-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat TM6[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*[J]. 2003, 56(2):37-43.
- [14] 冯晓刚, 杨鑫, 撒利伟. 不同热岛类型的划分方法适用性研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(12): 41-43.
FENG Xiaogang, YANG Xin, SA Liwei. Applicability research on different types of heat island division[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012, 35(12):41-43.
- [15] ENRIC Valor, VICENTE Caselles. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 57(3):167-184.
- [16] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度及等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
WU Jianguo. Landscape ecology: pattern and process, the scale and level[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

(编辑 吴海西 沈 波)