

峰丛洼地石漠化区景观格局的形态学特征及空间演变规律

林广^{1,2}, 王妍^{1,2}, 刘云根^{1,2}, 徐劲成^{1,2}, 林品^{1,2}

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224;

2.云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要: [目的] 探究峰丛洼地石漠化区景观格局的形态学空间分布特征, 为揭示峰丛洼地石漠化区景观格局动态变化和生态保护的可持续发展提供理论参考和指导。[方法] 利用形态学空间分析(MSPA)方法对岩溶石漠化景观识别、处理、分类得到核心、环线等互不重叠的7类景观类型, 应用景观动态度、景观格局指数、景观转移矩阵和热点分析探究峰丛洼地石漠化区景观格局的形态学时空演变特征。[结果] ①2000年形态学景观类型分布最广(190.60 km²), 2022年分布最少(147.32 km²), 在形态学景观类型中核心是研究区内主要的景观类型, 2000年面积最大为121.62 km², 2022年面积最少为76.05 km², 主要分布在研究区西北部和南部区域; 孤岛在形态学景观类型中面积最小, 其面积1990年最少为1.12 km², 2022年最多为3.07 km², 孤岛和分支等景观类型分散分布在各核心之间。②研究区形态学景观空间分布趋于分散, 且形态学景观多样性、复杂程度和景观破碎化程度增加; 研究时段内, 形态学景观类型单一动态度分别为0.10, -0.18和-2.13, 说明形态学景观面积呈现收缩趋势并且形态学景观类型1990—2000年发育最为剧烈, 2000—2010年发育最为平缓。③形态学景观类型转移方向主要是核心景观类型转移为边缘和孔隙景观类型, 总体来看形态学景观主要转移方向是形态学景观转移为背景, 并且背景的转入量大于转出量。高一高聚集区域呈现出向磨合村、老街村和安乐村扩张的趋势, 低—低聚集区域呈现出向三光村和老街村扩张的趋势。[结论] 研究区形态学景观面积处于快速减少阶段且形态学景观类型趋于复杂, 核心是主要的形态学景观类型, 形态学景观的演变特征主要由核心的变化导致。

关键词: 形态学空间分析; 峰丛洼地; 景观格局; 时空变化; 景观动态度; 热点分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0333-12

中图分类号: P931.5

文献参数: 林广, 王妍, 刘云根, 等. 峰丛洼地石漠化区景观格局的形态学特征及空间演变规律[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 333-344. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.034; Lin Guang, Wang Yan, Liu Yungen, et al. Morphological characteristics and spatial evolution laws of landscape patterns at peak-cruster depressions in rocky desertification areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 333-344.

Morphological Characteristics and Spatial Evolution Laws of Landscape Patterns at Peak-cruster Depressions in Rocky Desertification Areas

Lin Guang^{1,2}, Wang Yan^{1,2}, Liu Yungen^{1,2}, Xu Jincheng^{1,2}, Lin Pin^{1,2}

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University,

Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and

Pollution Control in Mountainous Rural Areas of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: [Objective] The morphological spatial distribution characteristics of landscape patterns at peak-cluster depressions in rocky desertification areas were determined in order to provide theoretical reference and guidance for revealing the dynamic changes in landscape pattern and ecological protection of peak-cluster depression rocky desertification areas. [Methods] Morphological spatial pattern analysis (MSPA) was used to identify, process, and classify rocky desertification landscapes in order to obtain seven non-overlapping

收稿日期: 2023-12-15

修回日期: 2024-02-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“岩溶地区聚落空间格局与石漠生态系统演变耦合关系研究”(32260420); 云南省科技厅计划项目“光伏太阳能利用模式对石漠生态系统碳汇影响效应及其调控策略”(202401AS070014)

第一作者: 林广(1996—), 男(汉族), 云南省曲靖市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: 304059155@qq.com。

通信作者: 王妍(1980—), 女(满族), 河北省承德市人, 博士, 教授, 主要从事脆弱生态系统关键过程与修复、土地利用及景观动态演变等研究。Email: wycaf@126.com。

landscape types such as core and loop lines. Landscape dynamics, landscape pattern index, landscape transfer matrix, and hotspot analysis were applied to determine the morphological spatiotemporal evolution characteristics of landscape patterns in peak-cluster depression rocky desertification areas. [Results] ① In 2000, the morphological landscape types were the most widely distributed (190.60 km^2), and in 2022, they were the least distributed (147.32 km^2). Among the morphological landscape types, the core was the main landscape type in the study area, with a maximum area of 121.62 km^2 in 2000 and a minimum area of 76.05 km^2 in 2022, mainly located in the northwest and southern regions of the study area. The area of isolated islands was the smallest among the morphological landscape types, with a minimum of 1.12 km^2 in 1990 and a maximum of 3.07 km^2 in 2022. Landscape types such as isolated islands and branches were scattered among various cores. ② The spatial distribution of morphological landscapes in the research area tended to be dispersed, and the diversity, complexity, and fragmentation of morphological landscapes increased. During the research period, the single dynamic degrees of morphological landscape types were 0.10, -0.18 , and -2.13 , respectively, indicating a shrinking trend in morphological landscape area. The development of morphological landscape types was most intense from 1990 to 2000, and the development was most gentle from 2000 to 2010. ③ The main direction of morphological landscape type transfer was the transfer of the core landscape type to the edge and pore landscape types. Overall, the main direction of morphological landscape transfer was the transfer of the morphological landscape to the background, and the amount of background transfer in was greater than the amount of transfer out. High-high agglomeration areas showed a trend of expansion towards Runhe, Laojie, and Anle Village, while low-low agglomeration areas showed a trend of expansion towards Sanguang and Laojie Village. [Conclusion] The main monitoring indicators for disaster chain early warning include cumulative rainfall, duration of rainfall, changes in moisture content, and on-site monitoring of slope deformation development. These monitoring parameters are influenced by various factors such as rainfall conditions, soil properties, slope angle, and external dynamic conditions. Therefore, in practical applications, it is necessary to comprehensively consider these factors.

Keywords: morphological spatial pattern; peak-cluster depression; landscape pattern; temporal and spatial changes; landscape dynamics; hot spot analysis

岩溶石漠化是特定的自然环境背景下受到人类活动的干扰和破坏^[1-2],导致严重的土壤侵蚀,基底岩石的广泛暴露,土壤生产力急剧下降以及沙漠状景观的出现的土地退化的过程^[3]。岩溶石漠化也称为“贫困之因”,限制着岩溶地区社会经济的可持续发展^[4],是岩溶地区首要生态问题,其已然成为岩溶地区生态可持续发展的屏障^[5],严重影响长江,珠江流域的生态安全^[6]。中国西南地区的喀斯特地貌分布面积最大、发育最强烈、发育最典型^[7],其中峰丛洼地区不仅是八大石漠化治理分区之一,而且是西南喀斯特地区面积最大的喀斯特地貌类型区^[8],岩溶石漠化最为严重,主要位于云贵高原向广西丘陵过渡的大斜坡地带^[9],该区土地可开垦率很低,耕地资源十分匮乏,出露的碳酸盐岩连片分布,其降水充沛,峰丛洼地与其他喀斯特地貌类型相比较水热条件较好,但是水文系统具有典型的二元结构,导致地表水系缺乏、而地下水系发育较多。兴街镇位于云南省西畴县西南部,是典型的峰丛洼地地区,岩溶石漠化问题一直是兴街镇生态保护和区域可持续发展的首要问题,虽经过“十

一五”“十二五”期间实施石漠化治理措施,石漠化面积削减,但石漠化治理任务依然艰巨、生态保护与区域可持续发展的矛盾依旧突出。

目前,岩溶石漠化的研究主要在石漠化的概念、形成机理、演变特征、提取方法、驱动机制和综合治理修复等方面^[10]。如王世杰^[11],深入探讨了喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵;李阳兵等^[12],以贵州省盘县为研究区定量分析了喀斯特山区石漠化成因的差异性;熊康宁等^[13]以黔东南自治州为主要对象,探讨了区石漠化演变规律与发展趋势;李义夫^[14]利用不同多光谱传感器数据和多端元光谱混合分析方法提取喀斯特地区石漠化信息;王正雄等^[15]利用GIS与地理探测器对石漠化空间分布与驱动因子进行分析;王克林等^[16]针对喀斯特生态系统植被群落稳定性差、土壤生态功能恢复滞后、生态治理成效缺乏可持续性等问题,开展了喀斯特生态系统退化机制及适应性修复研究。上述研究已取得一定进展,但是单独对于大尺度石漠化景观格局的研究较少,目前,传统的石漠化景观格局的研究主要基于景观格局指数反

映石漠化景观整体形态特征和石漠化斑块特征以及石漠化景观格局的分布特征^[17],但是,没有能进一步结合石漠化景观的内部空间特征缺少对石漠化景观内部空间格局的考量^[18]。为此,本研究利用形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)方法将石漠化景观分为核心、环线等 7 种不同形态的景观类型,并利用各类指标量化各类景观类型,并应用景观动态度、景观格局指数、景观转移矩阵和热点分析探究峰丛洼地石漠化区景观格局的形态学时空演变特征。该方法不仅可以反映石漠化景观内部空间结构,还能将不同的景观类型进行可视化分析,从而进一步把形态学空间格局分析(MSPA)方法将应用于峰丛洼地石漠化区的研究和促进峰丛洼地石漠化区生态保护的可持续发展具有重大意义。

1 研究区概况与数据方法

1.1 研究区概况

兴街镇位于云南省西畴县西南部,下辖一个社区与 13 个行政村,镇人民政府距西畴县城 29 km,全镇总面积 250 km²。其以亚热带季风气候为主,降雨多集中于夏季,年均降雨量在 1 000 mm 以上,境内的畴阳河为盘龙河支流,流长 33 km,流域 27.1 km²,流经 6 个行政村与盘龙河交汇。其地势西北低,东南高,侵蚀中低山沟谷和岩溶峰丛溶蚀洼地在境内广泛分布,东部土山区和由北向南的畴阳河流域是坝区,为侵蚀中低山沟谷地形;西部为喀斯特石灰岩岩溶山区和溶蚀洼地地形,石漠化主要分布在畴阳河流域和西部喀斯特石灰岩岩溶山区溶蚀洼地,石漠化面积占研究区土地面积的 2/3。

1.2 数据来源及预处理

采用 1990,2000 和 2010 年 3 期遥感数据来源于地理空间数据云,2022 年遥感影像来源于欧空局

(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>),利用 ENVI 5.2 软件对 4 期遥感影像进行辐射定标(redionetrie calibration)、大气校正[quick atmospheric correction(QUAC)]、裁剪(subset data from ROIs)等方法对影像进行预处理;对预处理的影像利用波段计算器(band math)工具计算研究区归一化岩石指数(NDRI),基于 NDRI 根据像元二分模型计算研究区岩石裸露率(F_r),最后结合研究区实际情况与前人研究,使用波段计算器(Band math)工具对岩石裸露率计算,从而获取研究区石漠化分布数据。

1.3 研究方法

1.3.1 石漠化信息提取 石漠化地区显著特征是岩石裸露,所以岩石裸露率是石漠化提取的一个重要指标^[19],通过计算归一化岩石指数(NDRI)、岩石裸露率(F_r),根据像元二分模型原理提取研究区石漠化信息。张晓伦等,根据植被覆盖度提出利用 Landsat 遥感影像中的近红外(TM4)波段与短波红外(TM7)波段构建归一化岩石指数^[20],NDRI 计算公式为:

$$NDRI = \frac{TM7 - TM4}{TM7 + TM4} \quad (1)$$

式中:NDRI 代表归一化岩石指数;TM7 为短波红外波段;TM4 为近红外波段。

根据像元二分模型原理,选取 NDRI 5% 的像元值为 $NDRI_{soil}$,选取 NDRI 95% 的像元值为 $NDRI_{veg}$ ^[21],计算岩石裸露率,岩石裸露率计算公式为:

$$F_r = \frac{b_1 - b_2}{b_3 - b_2} \quad (2)$$

式中: F_r 为岩石裸露率; b_1 为 NDRI; b_2 为 $NDRI_{soil}$; b_3 为 $NDRI_{veg}$ 。

最后利用 ENVI 5.2 中的 band math 工具对岩石裸露率进行计算,从而获取研究区石漠化分布数据,石漠化分级标准详见表 1。

表 1 石漠化分级标准

Table 1 Classification standard of rocky desertification

石漠化等级	无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	极重度石漠化
岩石裸露率 F_r / %	$F_r < 10$	$10 < F_r \leq 30$	$30 < F_r \leq 50$	$50 < F_r \leq 70$	$70 < F_r \leq 90$	$F_r > 90$

1.3.2 基于 MSPA 方法的石漠化景观格局分析 区别于传统的石漠化分析,本文应用 MSPA 方法分析石漠化景观空间特征,首先,基于研究区石漠化分布图在 ArcGIS 10.2 软件中利用重分类工具将无石漠化用地设为背景值,潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化和极重度石漠化用地设为前景值并导出为石漠化二值栅格数据。将石漠化二值栅格数据导入 Guidos Tool Box 软件中,采用四邻八域

原则,边缘宽度设为 1,对图像进行分析识别,可以将前景分为 7 类互不重叠的景观要素,各要素名称及意义如表 2 所示。将处理结果导入 ArcGIS 10.2 软件中,并结合 MSPA 要素类的名称、颜色代码和字节值图(如图 1 所示)。利用编辑器工具对 Value 值进行编辑,以完成对 MSPA 处理结果进行量化处理,从而获得研究区基于 MSPA 方法分类的石漠化景观分布图。

表 2 形态学景观类型与生态学含义

Table 2 Morphological landscape types and ecological implications

景观类型	生态学含义
核心	前景像元中较大的生境斑块,对生物多样性的保护具有重要意义,是生态网络中的生态源地,本文是指前景像元中石漠化分布较大的斑块
孤岛	彼此间孤立的或连接度较低的、破碎的小斑块
孔隙	核心区和内部无石漠化景观斑块之间的过渡区域,即内部斑块边缘
边缘	核心区和外部无石漠化景观区域之间的过渡区域
环线	连接同一核心的内部廊道,是核心斑块内部进行物种扩散和能量交流的通道
桥接	两个相邻核心之间连接度较高的狭长区域,在生态网络中代表斑块连接的廊道
分支	只有一端与边缘、桥接、环道或者孔隙相连的区域









类型	颜色	RGB	字节值
核心		000/200/000	17, 117
孤岛		160/060/000	9, 109
孔隙		000/000/255	5, 105
边缘		000/000/000	3, 103
环线		255/255/000	65, 67, 69, 165, 167, 169
桥接		255/000/000	33, 35, 37, 133, 135, 137
分支		255/140/000	1, 101
背景		255/255/255	0, 100, 220, 255

图 1 形态学景观类型的名称、颜色代码和字节值

Fig.1 Names, color codes and byte values for morphological types

1.3.3 石漠化景观格局变化 景观格局即景观的空间结构特征^[22],而景观格局指数能够有效地反映景观格局的变化情况^[23],本文应用景观格局指数对石漠化景观格局变化进行分析^[24],结合研究区实际情况与前人研究,在景观水平上选取最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、聚集度(AI)、香农多样性指数(SHDI)以及香农均匀度指数(SHEI)等5个指数;在景观类型上选取斑块密度(PD)、景观形状指

数(LSI)、聚集度(AI)、景观类型面积(CA)4个景观格局指数。

基于Fragstats 4.2软件进行计算各景观格局指数,该软件是基于分类图像的空间格局分析程序,可以用来计算大量景观指数的计算机软件,以反映石漠化景观的结构和空间特征,从而对石漠化景观格局变化进行定量分析,各景观格局指数及生态学意义如表3所示。

表 3 景观格局指数及其生态学意义

Table 3 Landscape pattern index and its ecological meaning

景观格局指数	生态学意义
最大斑块指数(LPI)	有助于确定景观的优势类型,其值的大小决定着景观中优势种、内部种的丰度等生态特征,其值的变化可以改变干扰的强度和频率,反映人类活动的方向和强弱
景观形状指数(LSI)	景观形状指数越大,景观类型受干扰程度越大
聚集度(AI)	描述景观类型斑块间的集聚程度,值越小集聚程度越低
香农多样性指数(SHDI)	描述景观结构组成的复杂程度,值增大,则斑块在景观中呈均衡化分布
香农均匀度指数(SHEI)	描述景观中各斑块在面积上分布的均匀程度,值越大越均匀
斑块密度(PD)	景观被分割的破碎化程度,空间异质性程度,在一定程度上反映人为对景观的干扰程度
景观类型面积(CA)	描述景观的组分,是计算其他指标的基础,其值大小制约着以此类型斑块作为聚居地的物质丰富度、数量及食物链

1.3.4 景观综合动态度 景观动态度可以反映研究区景观类型在数量上的动态变化特征,分为单一景观

动态度和综合景观动态度。利用单一景观动态度表示一定时间内形态学景观类型面积变化程度,定量描

述形态学景观类型变化的速度^[25],计算公式为:

$$L = \frac{S_a - S_b}{S_b} \quad (3)$$

式中: L 表示单一景观动态度; S_a, S_b 表示研究区内第 i 类景观末期和初期面积。

本文利用景观综合动态度来反映研究区一定时期内形态学景观类型变化的剧烈程度^[26]。根据研究区实际情况与相关研究,在 ArcGIS 10.2 软件中利用渔网工具对研究区进行网格处理,采用 600 m×600 m 网格,网格分辨率为 30 m,总计 781 个网格。分别计算不同时期每个格网的景观综合动态度,探究研究区不同时期内形态学景观类型动态变化的空间差异^[27]。景观综合动态度的计算公式为:

$$L_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta S(a_i - b_i)}{2 \sum_{i=1}^n S} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (4)$$

式中: L_c 为景观综合动态度; S 为研究区初期 i 类形态学景观类型面积; S_{bi} 为研究区初期 i 类形态学景观面积; S_{si} 为研究区末期 i 类景观面积; $\Delta S(a_i - b_i)$ 为研究时段内初期第 i 类形态学景观类型面积转为末期第 i 类景观类型面积的绝对值; T 为研究时段。

1.3.5 热点分析 利用热点分析可以探究景观格局的空间分布特征和演变趋势^[28],本文利用形态学景

观综合动态度进行冷热点统计,采用局部自相关(G_i^* 指数)分析景观格局空间差异特征^[27],其计算过程利用 GeoDa 软件中的空间分析模块完成。

2 结果与分析

2.1 形态学景观类型的时空变化特征

2.1.1 形态学景观类型的分布 研究区形态学景观类型如图 2 所示。从形态学景观类型的角度来分析,1990—2022 年,核心是研究区主要的形态学景观类型,主要分布在研究区西北部和南部,主要以兴街村、老街村、磨合村、甘塘子村、东升村和三光村为主,说明该区域岩溶石漠化发育较为严重;桥接、环线、孤岛等景观类型主要分散分布在各核心之间,以清河村、牛塘子村、兴隆村、江六村、安乐村为主,在 32 a 间核心景观类型面积减少显著且形态学景观类型分化明显。研究区东部由北向南至畴阳河流域是坝区,植被覆盖率较高,石漠化景观较少,容易形成桥接、孤岛等景观类型;西部为喀斯特石灰岩岩溶区和溶蚀洼地,植被覆盖率较低,导致形态学景观类型以核心为主。从空间维度来看,1990—2022 年,研究区形态学景观总面积明显减少,由 188.72 km² 减少至 147.32 km²,表明随着研究区石漠化治理措施的实施,核心斑块逐渐被蚕食,面积不断减少,造成研究区岩溶石漠化面积大幅度减少。

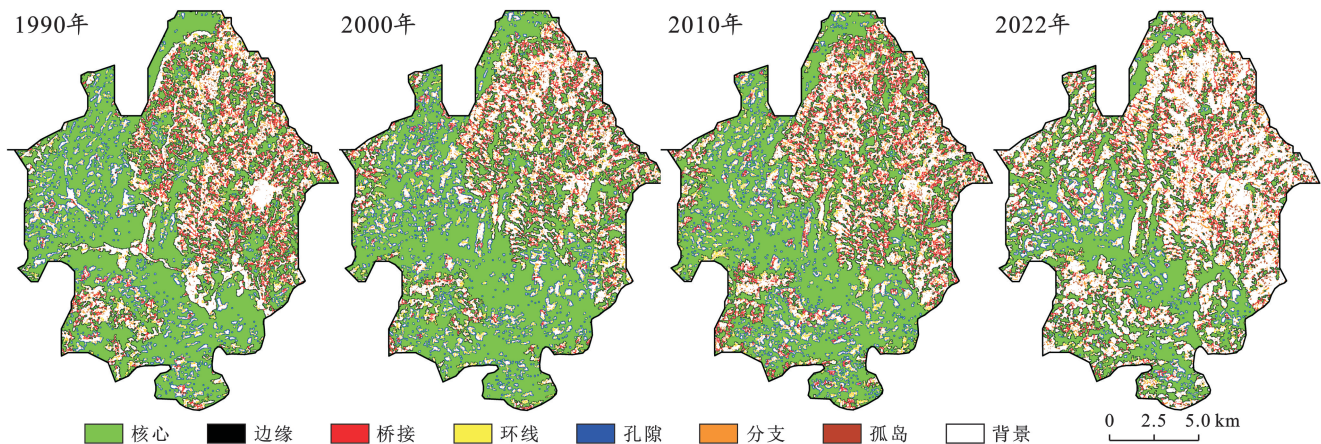


图 2 1990—2022 年云南省西畴县兴街镇形态学景观类型

Fig.2 Morphological landscape type of Xingjie Town, Xichou County, Yunnan Province from 1990 to 2022

2.1.2 形态学景观类型的面积变化 研究区形态学景观类型面积由表 4 所示,研究区 1990,2000,2010 和 2022 年形态学景观类型总面积分别为 188.72, 190.60,187.16 和 147.32 km²,呈现出“先缓慢增加,后持续减少”的趋势,说明研究区在 32 a 间岩溶石漠化面积大幅度减少,岩溶石漠化的治理取得了一定效果。2000 年形态学景观类型总面积最大,为

190.60 km²,占研究区总面积的 76.01%,2022 年形态学景观类型总面积最小,为 147.32 km²,占研究区总面积的 58.75%,在形态学景观类型中核心面积较大是研究区主要的形态学景观类型,其面积占研究区形态学景观总面积的 51.62%~63.81%。1990—2022 年,形态学景观总面积由 188.72 km² 减少至 147.32 km²,面积减少 41.24 km²;形态学景观类型中

核心面积减少 42.53 km², 桥接、环线等形态学景观类型面积增加 1.13 km², 1990—2000 年, 形态学景观总面积由 188.72 km² 增加至 190.60 km², 面积增加 1.88 km²; 形态学景观类型中核心面积增加 3.04 km², 桥接、环线等形态学景观类型面积减少 1.16 km²。2000—2010 年, 形态学景观总面积由 190.60 km² 减少至 187.16 km², 面积减少 3.44 km²; 形态学景观类型中核心面积减少 9.79 km², 桥接、环

线等形态学景观类型面积增加 6.35 km²。2010—2022 年, 形态学景观总面积由 187.16 km² 减少至 147.32 km², 面积减少 39.84 km²; 形态学景观类型中核心面积减少 35.78 km², 桥接、环线等形态学景观类型面积减少 4.06 km²。由此可见, 研究区形态学景观面积变化主要是由于核心景观类型面积的减少而引起的, 在对形态学景观类型的研究中, 应以核心景观类型为主要的研究对象。

表 4 1990—2022 年云南省西畴县兴街镇形态学景观类型面积变化及其所占比例
Table 4 Change and proportion of morphological landscape type area of Xingjie Town, Xichou County, Yunnan Province from 1990 to 2022

景观类型	1990 年		2000 年		2010 年		2022 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
核心	118.58	62.83	121.62	63.81	111.83	59.75	76.05	51.62
分支	7.57	4.01	7.24	3.80	8.41	4.49	11.09	7.53
桥接	14.39	7.63	12.30	6.45	16.73	8.94	14.32	9.72
环线	6.87	3.64	8.31	4.36	8.84	4.72	4.53	3.07
孔隙	13.02	6.90	15.47	8.12	14.40	7.69	6.70	4.55
孤岛	1.12	0.59	1.16	0.61	1.32	0.71	3.07	2.08
边缘	27.17	14.40	24.50	12.85	25.63	13.69	31.56	21.42
合计	188.72	75.25	190.60	76.01	187.16	74.63	147.32	58.75

2.2 形态学景观格局的动态分析

2.2.1 景观格局变化特征 研究区形态学景观类型水平的景观格局指数如图 3 所示, 1990—2022 年, 背景斑块景观类型面积指数增长幅度最大, 表明研究区形态学景观总面积减小, 研究区岩溶石漠化发生好转; 边缘、分支、孔隙、桥接和孤岛的景观类型面积指数增长明显, 其中, 分支增加最为明显, 表明研究区核心斑块面积减小, 破碎化程度加深; 核心和环线的景观类型面积指数有所降低, 其中, 核心降低幅度最大, 表明, 研究区大面积岩溶石漠化斑块减少。边缘、背景、分支、环线和孤岛集聚度指数增加, 表明其分布集中且呈现扩张趋势, 其中, 背景集聚度指数增加最大, 表明研究区形态学景观整体上呈现分散的分布趋势; 核心、孔隙和桥接集聚度指数减小, 表明其集聚程度减小分布离散, 其中, 核心集聚度指数有所降低, 但是, 核心集聚度指数在形态学景观类型中较大, 表明核心集聚程度相对度高, 分布集相对中。核心、边缘、分支、孔隙和孤岛景观形状指数增加, 其中, 边缘景观形状指数较大, 表明边缘的形状复杂程度较高, 背景、环线和桥接景观形状指数减小表明其形状复杂程度较低, 核心景观形状指数相对于其他形态学景观类型变化较为平缓, 表明研究区核心形状相对简单。核心、分支、孔隙和孤岛斑块密度指数增加, 表明其在单

位面积内的斑块数量增多, 边缘、背景、环线和桥接斑块密度指数减小, 表明其在单位面积内的斑块数量减少。

研究区形态学景观水平景观格局指数如表 5 所示, 1990—2022 年, 研究区景观格局指数变化明显, 但是变化波动较小。研究区最大斑块指数在 1990—2022 年经历了先增加, 再持续减少的过程, 但是其变化波动较小, 由 1990 年的 22.173 9 增加到 2000 年的 22.403 3 之后持续减少至 2022 年的 22.091 0。这说明研究区大面积斑块趋于分散减小, 在岩溶石漠化治理的过程中景观破碎化程度在增加。研究区景观形态指数在 1990—2022 年经历了先减小再增加然后再减小的过程, 但是从整体来看呈增加趋势, 由 1990 年的 64.658 8 增加至 2022 年的 65.790 2。这表明研究区形态学景观形状趋向于复杂化并且景观破碎度加深, 研究区集聚度指数在 1990—2022 年经历增加, 减小再增加的过程, 但变化波动较小总体上呈减小的趋势, 由 82.320 3 减少至 81.690 6。这表明研究区形态学景观斑块趋于分散, 景观破碎化程度加剧, 研究区香农多样性指数与香农均匀度指数在 1990—2022 年持续增加, 分别由 1.658 8 增加至 1.811 2, 由 0.536 7 增加至 0.586 0。这说明研究区景观类型变得丰富, 景观分布趋于均匀。

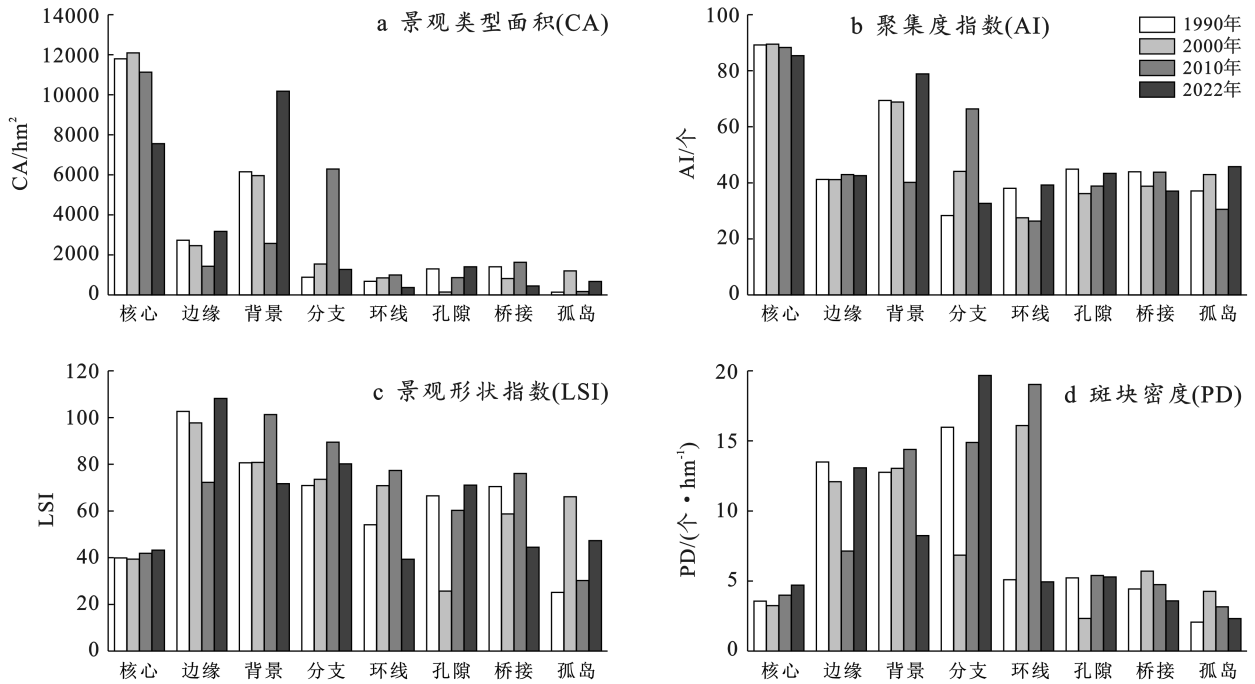


图 3 1990—2022 年云南省西畴县兴街镇形态学景观类型水平景观格局指数变化
 Fig.3 Changes in morphological landscape type horizontal landscape pattern index of Xingjie Town, Xichou County, Yunnan Province from 1990 to 2022

表 5 云南省西畴县兴街镇 1990—2022 年景观水平景观格局指数变化分析

Table 5 Analysis of changes in landscape horizontal landscape pattern index of Xingjie Town, Xichou County, Yunnan Province from 1990 to 2022

项目	LPI	LSI	AI	SHDI	SHEI
1990 年	22.179 3	64.658 8	82.320 3	1.658 8	0.536 7
2000 年	22.403 3	64.338 7	82.642 2	1.659 6	0.536 9
2010 年	22.307 0	70.694 0	80.848 6	1.726 3	0.558 5
2022 年	22.091 0	65.790 2	81.696 0	1.811 2	0.586 0

注:LPI 为最大斑块指数; LSI 为景观形状指数; AI 为聚集度指数; SHDI 为 Shannon 多样性指数; SHEI 为 Shannon 均匀度指数。

2.2.2 景观动态度分析 研究区形态学景观类型单一景观动态度变化如表 6 所示,单一景观动态度可以分为 3 种演变特征:①动态度持续增大,主要景观类型为边缘、分支、孤岛和背景,景观类型和背景面积呈

现扩张趋势;②动态度持续减小,主要景观类型为核心、环线、孔隙,景观类型面积呈现减小趋势;③动态度先增后减,景观类型为桥接。其中,孤岛单一动态度变化最大,桥接的单一动态度变化最小,单一动态度最大值为 13.20,最小值为 -1.45。1990—2000 年,形态学景观单一动态度为 0.10%,说明,研究区形态学景观面积呈现扩张趋势且研究区形态学景观面积增加,即反映出岩溶石漠化面积增大,各个形态学景观类型中环线面积扩张速率最大,桥接面积缩减速率最大,2000—2010 年与 2010—2022 年,形态学景观单一动态度分别为 -0.18% 和 -2.13%,说明形态学景观面积呈现缩减趋势且形态学景观面积持续减少,即岩溶石漠化面积持续减少,并且 2010—2022 年岩溶石漠化面积减小速率大于 2000—2010 年。

表 6 云南省西畴县兴街镇 1990—2022 年形态学景观类型单一动态度

Table 6 Single dynamic degree of morphological landscape type of Xingjie Town, Xichou County, Yunnan Province from 1990 to 2022

项目	单一景观动态度/%							
	边缘	分支	孤岛	核心	环线	孔隙	桥接	形态学景观
1990—2000 年	-0.99	-0.43	0.35	0.26	2.08	1.88	-1.45	0.10
2000—2010 年	0.46	1.62	1.40	-0.81	0.64	-0.69	3.60	-0.18
2010—2022 年	2.31	3.18	13.20	-3.20	-4.88	-5.35	-1.44	-2.13

研究区综合形态学景观类型景观动态度如图 4 所示,研究区在 1990—2022 年,景观综合动态度(L_c)

>0.08 的网格面积占研究区的 2.82%, $0.4 \leq L_c \leq 0.7$ 的网格面积占研究区的 37.39%, $0 \leq L_c \leq 0.3$ 的网格

面积占研究区的 59.8%，在空间分布上存在差异性，研究区岩溶石漠化景观演变过程复杂、变化幅度大。1990—2000 年，景观综合动态度变化最剧烈，高动态度区域占比最大形态学景观类型演变剧烈，其中 $L_c > 0.08$ 的网格面积占研究区的 4.10%，其分布主要在东部与东南部的江六村委会和老街村委会， $0.4 \leq L_c \leq 0.7$ 的网格面积占研究区的 19.46%，其分布主要在研究区北部、中部、西南部， $0 \leq L_c \leq 0.3$ 的网格面积占研究区的 76.44%，主要分布在研究区的西部、北部和东南部。2000—2010 年，景观综合动态度变化较为稳定，只在研究区东北部小范围内出现较高景观综合动态度网格，研究区整体以低动态度为主。这说明该阶段形态学景观类型演变平稳，其中 $L_c > 0.08$ 的

网格面积占研究区的 0.77%，分布在研究区的北部， $0.4 \leq L_c \leq 0.7$ 的网格面积占研究区的 8.32%，主要分布在研究区的北部和东部， $0 \leq L_c \leq 0.3$ 的网格面积占研究区的 90.91%，主要分布在研究区的西部和南部，2010—2022 年，景观综合动态度有明显变化，主要向研究区西北部和南部扩展，较高景观综合动态度明显减少，其中 $L_c > 0.08$ 的网格面积占研究区的 0.26%，在研究区中部有少量分布， $0.4 \leq L_c \leq 0.7$ 的网格面积占研究区的 14.08%，主要分布在研究区西北部、东部和西南部， $0 \leq L_c \leq 0.3$ 的网格面积占研究区的 85.66%，主要分布在研究区的中部，研究区 1990—2022 年间景观综合动态度先是变化减缓然后变化加剧。

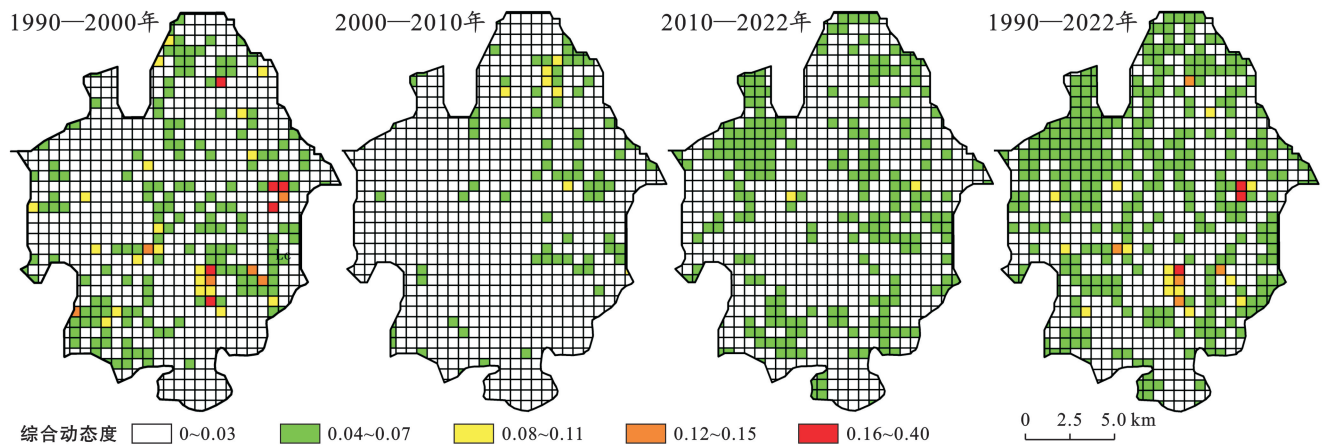


图4 云南省西畴县兴街镇 1990—2022 年形态学景观类型综合动态示意图

Fig.4 Comprehensive dynamic diagram of morphological landscape types of Xingjie Town, Xichou County, Yunnan Province from 1990 to 2022

2.3 形态学景观类型的迁移转化特征分析

2.3.1 形态学景观类型转移分析 如图 5 所示，1990—2022 年形态学景观类型之间转化明显。总体来看，1990—2022 年，研究区的转移方向主要是核心转移为背景，转移面积为 38.41 km^2 ；形态学景观类型的转移过程主要是核心向边缘的转移，转移面积为 15.59 km^2 。

总之，背景转移为形态学景观类型的面积 30.64 km^2 小于形态学景观类型转移为背景的面积 72.02 km^2 ，说明研究区形态学景观面积不断减少，岩溶石漠化治理取得一定效果，研究区生态环境得到改善；而分支、桥接景观类型的面积增大，说明研究区形态学景观破碎化程度加剧。1990—2000 年，研究区的转移方向主要是背景向核心的转移，转移面积为 21.03 km^2 ；形态学景观类型之间的转移方向主要是核心向孔隙的转移，转移面积为 8.78 km^2 ；背景转

移为形态学景观类型的面积为 39.07 km^2 大于形态学景观类型转移为背景的面积 37.19 km^2 ，说明研究区形态学景观面积增加，岩溶石漠化出现恶化。2000—2010 年研究区的转移方向主要是核心转移为边缘，转移面积为 8.13 km^2 ；形态学景观类型的转移方向也是以核心转移为边缘为主；形态学景观类型转移为背景的面积 23.21 km^2 大于背景转移为形态学景观类型的面积 19.79 km^2 ，说明研究区形态学景观面积减少，岩溶石漠化在 2000 年恶化后出现好转。2010—2022 年研究区的转移方向主要是核心转移为背景，转移面积为 16.63 km^2 ，形态学景观类型之间的转移方向主要是核心转移为边缘，转移面积为 14.95 km^2 ，形态学景观类型转移为背景的面积 52.45 km^2 大于背景转移为形态学景观类型的面积 12.62 km^2 ，说明研究区形态学景观面积持续减少，岩溶石漠化持续好转。

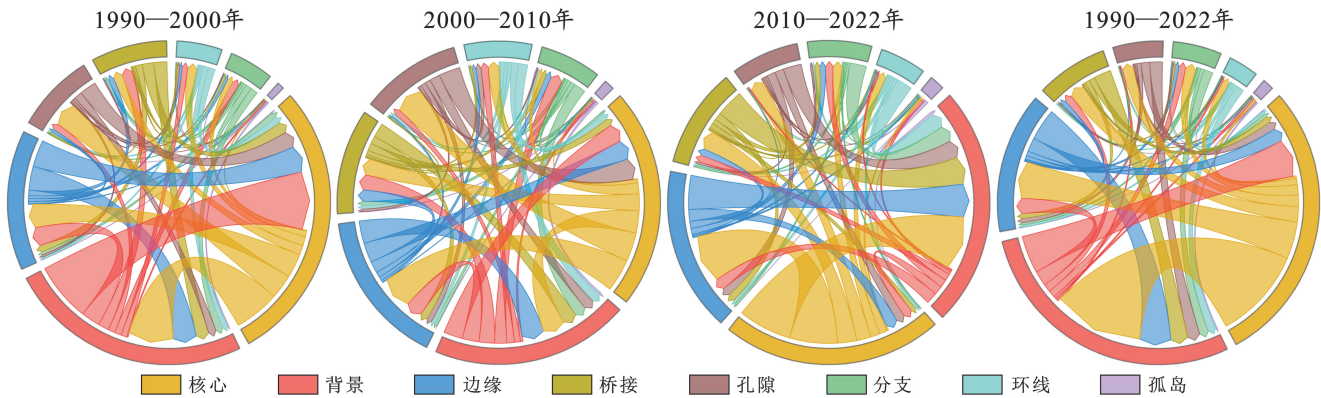


图 5 云南省西畴县兴街镇 1990—2022 年形态学景观类型转移图

Fig.5 Morphological landscape type transfer map of Xingjie Town, Xichou County, Yunnan Province from 1990 to 2022

2.3.2 景观类型演变的热点分析 研究区形态学景观类型发育热点图如图 6 所示,1990—2022 年,研究区形态学景观类型发育具有明显的聚集,主要以高一高聚集和低—低聚集为主,高一高聚集区域主要分布在磨合村、安乐村和老街村,表明该区域形态学景观类型演变波动较大,形态学景观类型丰富,形态学景观类型主要向研究区东北部发展;低—低聚集区域主要分布在三光村,说明该区域形态学景观类型演变波动平缓,形态学景观类型较少,而高一低聚集与低—高聚集散乱分布于低—低聚集区域与高一高聚集区域之间。1990—2000 年,低—低聚集主要分布在磨合村和三光村,高一低聚集主要分布在老街村和安乐村,表明形态学景观类型主要向东部区域发展,高一高聚集和低—高聚集主要分布三光村、老街村、安乐村和龙坪村,冷热点区域差异显著。

2000—2010 年,研究区低—低聚集主要分布于磨合村、新街村、老街村和安乐村,高一低聚集主要分布于龙坪村,高一高聚集和低—高聚集主要分布在龙坪村和安乐村;与前一研究时段相比低—低聚集区域明显增多,低—低聚集区域向新街村方向扩张,高一高聚集区域有所减少,并且高一高聚集区域向龙坪村方向扩张表明形态学景观类型主要向东北部区域发展。2010—2022 年,研究区低—低聚集区域主要分布在兴街村、东升村,高一低聚集区域主要分布在磨合村,高一高聚集区域和低—高聚集区域主要分布在磨合村、龙坪村、安乐村和三光村,与前一研究时段相比低—低聚集区域有所减少,但分布范围扩大,而高一高聚集区域明显增加,高一高聚集区域向磨合村方向扩张,表明形态学景观类型主要向西北方向发展。

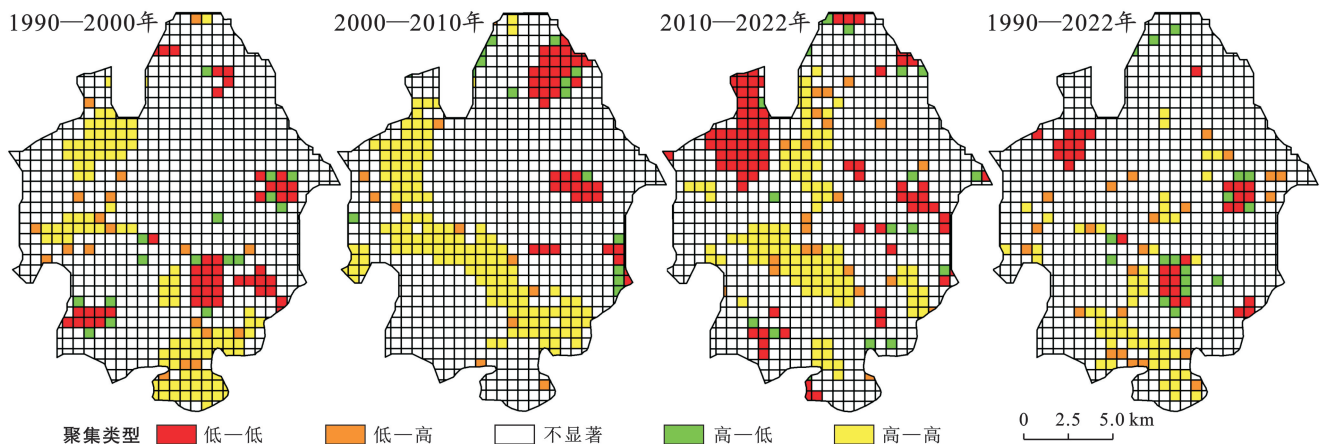


图 6 云南省西畴县兴街镇 1990—2022 年形态学景观类型发育热点图

Fig.6 Development hotspots of morphological landscape types of Xingjie Town, Xichou County, Yunnan Province from 1990 to 2022

3 讨论

形态学空间格局分析方法是一种基于数学原理的对栅格数据进行识别、度量和分析的一种栅格图像

处理方法^[29],具有数据量少,分析简单,结果可视化等优点^[30]。越来越多的研究利用形态学空间格局分析方法分析景观格局的演变特征。如于亚平等^[31]基于 1988,2000,2013 年 3 期遥感影像利用 MSPA 对

南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析,熊畅等^[32]基于“空间形态—破碎化—聚集度”探究了粤港澳大湾区森林景观格局时空演变。在峰丛洼地石漠化区应用形态学空间分析方法对景观格局分析,可以解决传统的景观要素识别过程中忽略了景观格局的内部空间特征,这一方法充分考虑了岩溶石漠化景观格局的内部空间结构特征,是峰丛洼地石漠化区景观格局时空变化分析的一个新的研究方法。

兴街镇位于西畴县西南部,属于典型的峰丛洼地区。形态学景观呈现“先增加,再减少”的趋势,2000年形态学景观类型分布最广(190.60 km²),2022年分布最少(147.32 km²),这与徐红枫等^[33]对西畴县岩溶石漠化演变趋势一致。研究时段内,形态学景观类型单一动态度分别为 0.10, -0.18 和 -2.13,说明形态学景观面积呈现收缩趋势,表明研究区岩溶石漠化“先恶化后持续好转”且岩溶石漠化收缩速率逐渐增大,形态学景观类型 1990—2000 年发育最为剧烈,表明兴街镇岩溶石漠化演变方式多样;2000—2010 年发育最为平缓,表明兴街镇岩溶石漠化演变方式较为单一。这与陈棋等^[34]对云南省石漠化演变分析中,石漠化演变方式多样的研究结果一致。总体来看形态学景观主要转移方向是转移为背景,形态学景观类型转移方向主要是核心景观类型转移为边缘和孔隙景观类型,表明研究区岩溶石漠化面积减少,无石漠化景观面积增加,这与田湘云等^[35]对云南省岩溶地区土地利用对石漠化景观格局演变的影响分析中,无石漠化地区面积逐年增加,云南省石漠化面积总体向良性方向发展的研究结果一致。总之,经过“十二五”“十三五”期间大规模的生态保护与建设及 2016 年制定《西畴县全面深化生态文明体制改革实施方案》的提出使得研究区非石漠化景观面积大幅度增加,研究区岩溶石漠化状况发生好转。核心是研究区主要的景观类型,在对研究区岩溶石漠化的治理过程中应重点对核心区实施封山育林、植树造林、坡改梯等措施,并在核心区继续推行了“六子登科”“五法治水”的石漠化综合治理模式。由于植树造林是巩固土壤、减少水土流失的有效措施,应加大对核心区植树造林与经济林营造的扶持力度,在治理石漠化的同时增加人民的收入。

本文的研究存在着一定不足,只选取岩石裸露率提取石漠化信息,石漠化信息提取参考指标较少以及 MSPA 方法分析结果受到计算机软件的影响;虽然本文在形态学空间分析方法的基础上结合转移矩阵与热点分析探究了研究区石漠化景观类型的转化过程与空间分布范围和热点,但是没有更加深入地研究。其

次是 MSPA 方法多应用于生态网络构建和生态安全格局分析的方法体系中,对景观格局的变化分析应用相对较少,使得本文研究具有不确定性。综上所述,在岩溶地区如何构建更加科学有效的石漠化景观格局指标体系,探索将 MSPA 方法与其他测度方法在岩溶石漠化地区的综合应用,并融入人—地关系要素,是之后岩溶石漠化地区将要深入分析和解决的重要问题。

4 结论

(1) 1990—2022 年研究区形态学景观总面积呈现“先增加,后持续减少”的趋势,总体上形态学景观总面积减少了 41.4 km²,2000 年形态学景观类型分布最广,2022 年分布最少。1990—2022 年研究区形态学景观类型中桥接、环线等石漠化景观类型面积增加 1.13 km²,桥接和环线等景观类型分散分布在各核心之间,核心景观类型的面积减少了 42.53 km²,但是核心依旧是研究区主要的形态学景观类型,主要分布在研究区西北部、南部;并且形态学景观面积减少主要表现为核心景观类型的减少。

(2) 研究区 1990—2022 年,形态学景观聚集度减小,空间分布分散,并且形态学景观多样性和复杂程度以及景观破碎化程度增加。形态学景观类型单一动态度分别为 0.10, -0.18 和 -2.13,表明研究区形态学景观发育面积呈现收缩趋势。综合景观动态度分析表明 1990—2022 年,在研究时段内 1990—2000 年,形态学景观类型发育最为剧烈,2000—2010 年形态学景观类型发育最为平缓,主要表现在研究区西北部、东北部、东南部等地区。

(3) 在 32 a 间形态学景观类型相互转移频繁,在形态学景观类型相互转移过程中,主要是由核心向边缘、孔隙等景观类型的转移,说明大面积岩溶石漠化斑块转移为孤立破碎的小面积岩溶石漠化斑块;总体来看 1990—2022 年研究区主要转移方向为形态学景观向背景转移,转移面积为 72.02 km²,并且背景的转入量大于背景的转出量,表明研究区形态学景观面积减小。1990—2022 年,高一高聚集区域呈现出向磨合村、老街村和安乐村扩张的趋势,低—低聚集区域呈现出向三光村和老街村扩张的趋势。

(4) 形态学空间格局分析法可以对栅格数据进行识别、处理和分割得到 7 类不同形态的景观类型,并可以对不同形态的景观类型进行定量分析。本研究应用形态学空间格局分析法对石漠化景观格局进行识别、处理和分割,分析 1990—2022 年兴街镇石漠化景观格局的形态学特征及演变,旨在利用形态学空

间格局分析法以促进峰丛洼地区石漠化区生态保护的可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] 陈燕丽,莫建飞,莫伟华,等.近 30 年广西喀斯特地区石漠化时空演变[J].广西科学,2018,25(5):625-631.
Chen Yanli, Mo Jianfei, Mo Weihua, et al. Temporal and spatial distributions of rocky desertification in Guangxi Karst Area in the past 30 years [J]. Guangxi Sciences, 2018, 25(5): 625-631.
- [2] Ma Tianshu, Deng Xiangwen, Chen Liang, et al. The soil properties and their effects on plant diversity in different degrees of rocky desertification [J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 139667.
- [3] Wang S J, Liu Q M, hang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, land use, impact and rehabilitation [J]. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 115-121.
- [4] 冉晨,白晓永,谭秋,等.典型喀斯特地区石漠化景观格局对土地利用变化的响应[J].生态学报,2018,38(24): 8901-8910.
Ran Chen, Bai Xiaoyong, Tan Qiu, et al. Response of landscape pattern of karst rocky desertification to land-use change in a typical karst area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8901-8910.
- [5] 罗旭玲,王世杰,白晓永,等.西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J].生态学报,2021,41(2):680-693.
Luo Xuling, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in southwest karst area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 680-693.
- [6] 余梦,李阳兵,罗光杰.中国西南岩溶山地石漠化演变趋势[J].生态学报,2022,42(10):4267-4283.
Yu Meng, Li Yangbing, Luo Guangjie. Evolution trend of rocky desertification in karst mountainous areas of southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4267-4283.
- [7] 许胜兵,彭旭东,戴全厚,等.喀斯特高原石漠化区露石岩—土界面与非岩—土界面土壤入渗特性差异[J].水土保持学报,2022,36(5):136-143.
Xu Shengbing, Peng Xudong, Dai Quanhou, et al. Differences of soil infiltration characteristics between exposed rock-soil interface and non-rock-soil interface in rocky desertification area of Karst Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 136-143.
- [8] 刘宇杰,敖利满,李春茂,等.喀斯特峰丛洼地坡地橘园与梯田橘园土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2023,37(3):296-303.
Liu Yujie, Ao Liman, Li Chunmao, et al. Variation characteristics of soil moisture in slope citrus orchard and terraced citrus orchard in karst peak-cluster depression area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 296-303.
- [9] 张雪梅,祁向坤,岳跃民,等.喀斯特峰丛洼地石漠化治理自然地域分区[J].生态学报,2020,40(16):5490-5501.
Zhang Xuemei, Qi Xiangkun, Yue Yuemin, et al. Natural regionalization for rocky desertification treatment in karst peak-cluster depression regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5490-5501.
- [10] 王世杰.喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J].中国岩溶,2002,21(2):101-105.
Wang Shijie. Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification [J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 101-105.
- [11] 李阳兵,邵景安,周国富,等.喀斯特山区石漠化成因的差异性定量研究:以贵州省盘县典型石漠化地区为例[J].地理科学,2007,27(6):785-790.
Li Yangbing, Shao Jing'an, Zhou Guofu, et al. Genesis difference of rocky desertification in Karst Mountains: A case study of Panxian County, Guizhou Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(6): 785-790.
- [12] 白晓永,王世杰,陈起伟,等.贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价[J].地理学报,2009,64(5):609-618.
Bai Xiaoyong, Wang Shijie, Chen Qiwei, et al. Spatio-temporal evolution process and its evaluation method of karst rocky desertification in Guizhou province [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(5): 609-618.
- [13] 熊康宁,陈起伟.黔东南生态文明建设试验区石漠化演变规律与发展趋势研究[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2010,28(3):8-12.
Xiong Kangning, Chen Qiwei. Variation and evolutionary trends of karst rocky desertification in Qiandongnan Autonomous Prefecture [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2010, 28(3): 8-12.
- [14] Li Yifu, Sun Bin, Gao Zhihai, et al. Extraction of rocky desertification information in karst Area by using different multispectral sensor data and multiple end-member spectral mixture analysis method [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 996708.
- [15] 王正雄,蒋勇军,张远瞩,等.基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析[J].地理学报,2019,74(5):1025-1039.
Wang Zhengxiong, Jiang Yongjun, Zhang Yuanzhu, et al. Spatial distribution and driving factors of Karst rocky desertification based on GIS and geodetectors [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 1025-1039.
- [16] 王克林,陈洪松,岳跃民.桂西北喀斯特生态系统退化机制与适应性修复试验示范研究[J].科技促进发展,2015

- (2): 179-183.
- Wang Kelin, Chen Hongsong, Yue Yuemin. Experiment and demonstration on degraded mechanism and its adaptive restoration of karst ecosystems in Northwest Guangxi [J]. *Science & Technology for Development*, 2015(2):179-183
- [17] 严宁珍, 李阳兵. 石漠化景观格局分布特征及其影响因素分析: 以贵州省盘县为例 [J]. *中国岩溶*, 2008, 27(3): 255-260.
- Yan Ningzhen, Li Yangbing. The landscape pattern distribution of karst desertification and its influencing factors: A case in Panxian, Guizhou [J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(3): 255-260.
- [18] 陈明, 戴菲. 基于形态学空间格局分析的城市绿地对热环境的影响研究 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 125-134.
- Chen Ming, Dai Fei. The influence of urban green spaces on thermal environment based on morphological spatial pattern analysis [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 125-134.
- [19] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策 [J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- Song Tongqing, Peng Wanxia, Du Hu, et al. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [20] 张晓伦, 甘淑. 基于 NDRI 像元二分模型的石漠化信息提取研究 [J]. *新技术新工艺*, 2014(1): 72-75.
- Zhang Xiaolun, Gan Shu. Research on extracting rocky desertification information based on NDRI dimidiate pixel model [J]. *New Technology & New Process*, 2014(1): 72-75.
- [21] 习慧鹏, 王世杰, 白晓永, 等. 西南典型喀斯特地区石漠化时空演变特征: 以贵州省普定县为例 [J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8919-8933.
- Xi Huipeng, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Spatio-temporal characteristics of rocky desertification in typical Karst areas of Southwest China: A case study of Puding County, Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8919-8933.
- [22] 许笑笑. 辽河口湿地景观格局演变及其对水文连通性的影响 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.
- Xu Xiaoxiao. Evolution of wetland landscape pattern in Liaohe estuary and its impact on hydrological connectivity [D]. Shenyang, Liaoning: Shenyang University, 2022.
- [23] 周锐, 李月辉, 胡远满, 等. 基于高分辨率影像和 GIS 的辛庄镇景观动态变化 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(5): 1000-1007.
- Zhou Rui, Li Yuehui, Hu Yuanman, et al. Dynamic changes of landscape in Xinzhuang town based on high-resolution remote image and GIS [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(5): 1000-1007.
- [24] 马银, 郑敏睿, 郑新奇, 等. 基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析: 以京津冀城市群为例 [J]. *生态学报*, 2023, 43(16): 6785-6797.
- Ma Yin, Zheng Minrui, Zheng Xinqi, et al. Prediction and spatiotemporal evolution analysis of green infrastructure based on CA-Markov and MSPA: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6785-6797.
- [25] 张新长, 梁金成. 城市土地利用动态变化及预测模型研究 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(2): 121-125.
- Zhang Xinchang, Liang Jincheng. Study on change of urban land-use and forecasting model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(2): 121-125.
- [26] 吴燕芳, 陈耀亮, 陆灯盛. 近 30 年福建省土地利用时空演变的海陆梯度分异规律 [J]. *热带地理*, 2023, 43(7): 1411-1425.
- Wu Yanfang, Chen Yaoliang, Lu Dengsheng. Examining differentiation regularity of sea-land gradient in spatiotemporal evolution of land use in Fujian Province over the past three decades [J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(7): 1411-1425.
- [27] 刘玉卿, 张华兵, 孙小祥, 等. 1980—2018 年江苏里下河平原景观格局时空变化及其热点分析 [J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(1): 105-114.
- Liu Yuqing, Zhang Huabing, Sun Xiaoxiang, et al. Spatial-temporal variations of landscape pattern and hot spot analysis in the Lixiahe Plain of Jiangsu Province from 1980 to 2018 [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2022, 39(1): 105-114.
- [28] 顾子平. 1990—2018 年泰安市市辖区土地利用演变时空格局分析 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- Gu Ziping. Analysis of the spatial and temporal patterns of land use evolution in Taian City municipality from 1990 to 2018 [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2021.
- [29] 哈力木拉提·阿布来提, 阿里木江·卡斯木, 祖拜旦·阿克木. 基于形态学空间格局分析法和 MCR 模型的乌鲁木齐市生态网络构建 [J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(5): 106-114.
- Halimulati · Abulaiti, Alimujiang · Kasmu, Zubaidan · Akemu. Construction and optimization of Urumqi ecological network based on the morphological spatial pattern analysis and MCR model [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(5): 106-114.

- [30] 陈妍,乔飞,江磊.基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究:以北京为例[J].北京大学学报:自然科学版,2016,52(3):553-562.
Chen Yan, Qiao Fei, Jiang Lei. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: A case study in Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016,52(3):553-562.
- [31] 路亚方,李红波.2000—2020 年基于土地利用变化的生境质量时空动态演变:以武汉城市圈为例[J].水土保持研究,2022,29(6):391-398.
Lu Yafang, Li Hongbo. Temporal and spatial dynamic evolution of habitat quality based on land use change from 2000 to 2020: Taking Wuhan metropolitan region as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):391-398.
- [32] 周德志,关颖慧,张冰彬,等.基于土地利用变化的陕北地区生境质量时空演变及其驱动因素[J].北京林业大学学报,2022,44(6):85-95.
Zhou Dezhi, Guan Yinghui, Zhang Bingbin, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Northern Shaanxi Province of northwestern China based on land use change and its driving factors [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022,44(6):85-95.
- [33] 黄鑫,程文仕,李晓丹,等.甘肃省生境质量变化的图谱特征[J].应用生态学报,2020,31(9):3131-3140.
Huang Xin, Cheng Wenshi, Li Xiaodan, et al. Spectrum characteristics of habitat quality changes in Gansu Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(9):3131-3140.
- [34] 张丹红,王效科,张路,等.大比例尺土壤保持服务制图分级方法研究[J].生态学报,2021,41(4):1391-1401.
Zhang Danhong, Wang Xiaoke, Zhang Lu, et al. Research on the classification methods of ecosystem service of soil retention for large-scale choropleth mapping [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(4):1391-1401.
- [35] 张永民,程维明.快速城镇化背景下耕地城镇化的时空格局模拟与分析:以郑州地区为例[J].江苏农业科学,2020,48(2):233-238.
Zhang Yongmin, Cheng Weiming. Simulation and analysis of the spatial and temporal pattern of cultivated land urbanization under the background of rapid urbanization: A case study of Zhengzhou City [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020,48(2):233-238.

(上接第 344 页)

- [30] 周士锋,唐蒲霞,郭悦,等.基于 MSPA 的城市绿色基础设施景观格局时空变化分析[J].河南科学,2022,40(6):914-921.
Zhou Shifeng, Tang Puxia, Guo Yue, et al. Spatial and temporal change analysis of urban green infrastructure landscape pattern based on MSPA [J]. Henan Science, 2022,40(6):914-921.
- [31] 于亚平,尹海伟,孔繁花,等.基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析[J].生态学杂志,2016,35(6):1608-1616.
Yu Yaping, Yin Haiwei, Kong Fanhua, et al. Analysis of the temporal and spatial pattern of the green infrastructure network in Nanjing, based on MSPA [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(6):1608-1616.
- [32] 熊畅,吴卓,曾梓瑶,等.基于“空间形态—破碎化—聚集度”的粤港澳大湾区森林景观格局时空演变[J].生态学报,2023,43(8):3032-3044.
Xiong Chang, Wu Zhuo, Zeng Ziyao, et al. Spatiotemporal evolution of forest landscape pattern in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on “Spatial Morphology-Fragmentation-Aggregation” [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(8):3032-3044.
- [33] 徐红枫,王妍,刘云根,等.基于 Google Earth Engine 的典型峰丛洼地石漠化时空演变与驱动因子分析:以西畴县为例[J].水土保持研究,2022,29(4):407-414.
Xu Hongfeng, Wang Yan, Liu Yungen, et al. Analysis of the spatial and temporal evolution and driving factors of rocky desertification in typical cluster depression areas in the past 30 years based on google earth engine: Taking Xichou County as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):407-414.
- [34] 陈棋,张超,田湘云,等.云南省 2000—2020 年石漠化时空演变分析[J].浙江农林大学学报,2023,40(2):417-426.
Chen Qi, Zhang Chao, Tian Xiangyun, et al. Spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Yunnan Province from 2000 to 2020 [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2023,40(2):417-426.
- [35] 田湘云,张超,陈棋,等.云南省岩溶地区土地利用对石漠化景观格局演变的影响分析[J].林业资源管理,2022(1):61-69.
Tian Xiangyun, Zhang Chao, Chen Qi, et al. Influence of land use on landscape pattern evolution of rocky desertification in karst areas of Yunnan, China [J]. Forest Resources Management, 2022(1): 61-69.