

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.001; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.001.

董文卓, 苏维词, 勾容, 等. 喀斯特山地城市生态敏感性综合评价及其时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 276-285.

Dong Wenzhuo, Su Weici, Gou Rong, et al. Integrated evaluation of ecological sensitivity and its spatiotemporal evolution characteristics of karst mountainous cities[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 276-285.

喀斯特山地城市生态敏感性综合评价及其时空演变特征

董文卓¹, 苏维词^{1,2}, 勾容¹, 黄贤凤¹

(1.重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2.贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)

摘要: [目的]揭示 2000—2020 年贵阳市生态敏感性及时空演变特征, 丰富生态敏感性的系统研究框架, 为贵阳市的“生态立市”和生态文明建设提供科学依据。[方法]根据贵阳市喀斯特生态环境问题及强省会城市发展战略需求, 选取水土流失敏感性、石漠化敏感性、生物多样性敏感性和人为干扰敏感性 4 个维度构建了综合生态敏感性评价体系, 并运用 GIS 技术和空间自相关分析揭示了其时空演变特征。[结果] (1) 贵阳市综合生态敏感性以轻度敏感为主, 轻度敏感区面积占比由 2000 年的 65.19% 上升至 2020 年的 75.65%, 总体呈上升趋势, 而中度及以上等级敏感区面积占比下降, 贵阳市生态环境有所改善; (2) 贵阳市中度及以上等级敏感区大部分位于花溪区东南和西南部、开阳县东部和东北部、息烽县中部、修文县和清镇市的西部, 且分布范围呈波动缩小的趋势, 其他地区敏感性相对较低; (3) 研究时间段内, 贵阳市各维度敏感性程度不同且变化不同步, 石漠化敏感性程度高且呈降低趋势, 水土流失敏感性程度较高且敏感性变化大, 人为干扰敏感性总体呈上升趋势, 生物多样性敏感性低且变化相对缓慢; (4) 贵阳市 2000—2020 年 5 个年份综合生态敏感性的全局 Moran's I 指数依次是 0.737, 0.799, 0.773, 0.733, 0.680, 生态敏感性在空间上呈正相关关系且相关性有所减弱。分布特征以高一高聚集和低—低聚集为主, 但聚集程度在减弱, 生态敏感性的空间分布有向离散化方向发展的趋势。[结论] 贵阳市生态敏感性总体以轻度敏感为主且面积占比呈上升趋势, 中度及以上等级敏感区面积占比下降, 说明贵阳市生态环境还保持较好状态且中度及以上等级敏感区的生态环境有所改善。

关键词: 生态敏感性; 时空演变; 空间自相关; 喀斯特山地城市; 贵阳市

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0276-10

Integrated evaluation of ecological sensitivity and its spatiotemporal evolution characteristics of karst mountainous cities

Dong Wenzhuo¹, Su Weici^{1,2}, Gou Rong¹, Huang Xianfeng¹

(1.College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University,

Chongqing 401331, China; 2.Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the ecological sensitivity and spatiotemporal evolution characteristics in Guiyang from 2000 to 2020, to enrich the systematic research framework of the ecological sensitivity, and to provide scientific evidence for the ‘ecological city’ and the construction of an ecological civilization city in Guiyang. [Methods] Based on the ecological and environmental issues of karst ecosystems in Guiyang and the strategic development needs of a strong provincial capital city, an integrated ecological sensitivity evaluation system was constructed using four dimensions: soil erosion sensitivity, desertification sensitivity, biodiversity sensitivity and human disturbance sensitivity. GIS technology and spatial autocorrelation analysis were employed to reveal their spatiotemporal evolution characteristics. [Results] (1) The overall ecological sensitivity of Guiyang was primarily mild, with the area of mild sensitivity increasing from

收稿日期: 2024-04-13

修回日期: 2024-05-07

接受日期: 2024-05-21

资助项目: 国家自然科学基金(42161052); 贵州省科技支撑计划课题(黔科合支撑[2020]4Y008 号)

第一作者: 董文卓(2002—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特地区生态环境变化和区域经济发展。E-mail: dongzhuo0110@163.com

通信作者: 苏维词(1965—), 男(苗族), 湖南绥宁人, 硕士, 研究员, 主要从事资源环境与可持续发展研究。E-mail: suweici@sina.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

65.19% in 2000 to 75.65% in 2020, showing an overall upward trend, while the proportion of moderately sensitive and higher-grade areas had decreased, indicating an improvement in Guiyang's ecological environment. (2) The majority of moderately sensitive and higher-grade areas were located in the southeastern and southwestern parts of Huaxi District, the eastern and northeastern parts of Kaiyang County, the central part of Xifeng County, and the western parts of Xiuwen County and Qingzhen City, with a fluctuating and narrowing trend in distribution, while other areas had relatively lower sensitivity. (3) During the study period, the sensitivity levels of various dimensions in Guiyang varied and did not change synchronously. Desertification sensitivity was high and showed a decreasing trend, soil erosion sensitivity was relatively high with significant variability, human disturbance sensitivity was generally increasing, and biodiversity sensitivity was low with relatively slow changes. (4) The global Moran's I indices of the comprehensive ecological sensitivity for five time points from 2000 to 2020 in Guiyang were 0.737, 0.799, 0.773, 0.733 and 0.680, respectively. Ecological sensitivity showed a positive spatial autocorrelation and the correlation had weakened over time. The distribution characteristics were dominated by high-high and low-low clustering, but the degree of aggregation was weakening, indicating a trend towards spatial dispersion in the distribution of ecological sensitivity. [Conclusion] The ecological sensitivity in Guiyang was primarily mild and the proportion of this level was increasing, while the area of moderately sensitive and higher-grade areas were decreasing, suggesting that the ecological condition of Guiyang had been well maintained and the ecological environment in moderately sensitive and higher-grade areas had been improved.

Keywords: ecological sensitivity; spatiotemporal evolution; spatial autocorrelation; karst mountainous city; Guiyang City

21 世纪以来,随着人们的生产和生活水平不断提升,对空间的需求也在不断增长,高强度的土地开发以及土地利用方式的快速转变,使得生态空间不断被挤压^[1],生态环境受到高强度的人类活动干扰,产生了水土流失、土地荒漠化(石漠化)、生物多样性减少和景观破碎化等环境问题,影响生态文明建设和生态安全。开展生态敏感性评价研究,能科学揭示生态系统对外界环境干扰的敏感程度,对于促进研究区社会与经济的可持续发展以及生态保护和生态文明建设具有重要的意义。

生态敏感性是指生态系统对自然环境演变和人类活动影响的敏感程度,是衡量生态环境问题与生态系统之间是否失衡的重要指标^[2],因而受到国内外学术界的重视。国外学者对生态敏感性的研究主要体现在两个方面:一是对生态敏感性进行测度和分区评价,从而为不同尺度的空间规划提供依据^[3]。二是集中在宏观尺度上的气候变化和生态敏感性研究,例如水碳平衡对气候变化的敏感性影响^[4];生态气候敏感性对生物圈响应的影响^[5];气候变化对人类活动和生态敏感性、脆弱性的影响等^[6]。国内学者对生态敏感性的研究主要在以下几个方面:一是聚焦干旱区^[7-8]、重要流域^[9]、湿地公园^[10]和喀斯特矿区等^[11]特殊区域的生态敏感性;二是研究视角体现了目标导向,与

生态系统服务功能结合^[12-13],通过敏感性评价研究,划分国土空间和生态管控方案;与社会经济结合^[14],通过敏感性与社会经济耦合研究,为促进研究区生态环境与社会经济的有序和协调发展提供方案或建议;三是在研究方法上,主要是基于 GIS 技术的因子叠加法^[15]和格网等^[16]方法开展敏感性评价分析。目前生态敏感性研究中存在的主要问题:一是生态敏感性研究尺度的选取大多数以宏观尺度为主,对于市县级及其以下的小尺度研究有待进一步补充;二是生态敏感性评价指标选择没有取得共识,普适性不强,评价指标体系如何更好地体现研究区的地域特征值得深入研究;三是在生态敏感性影响因素中,重视自然环境因素而忽视了人为干扰因素的研究^[17]。同时,不同因素(如生态本底自然环境因子、人为干扰因子等)对生态敏感性的影响效应、作用机制的差异性及其贡献的辨析有待深入。

贵阳市是我国喀斯特地貌典型发育区,长期以来在自然因素和人类活动双重影响下,水土流失和石漠化等生态环境问题突出,生态本底脆弱,在一定程度上制约了贵阳市社会经济与生态环境的协同发展。本文以贵阳市为研究对象,选取能反映地域特色的水土流失敏感性、石漠化敏感性、生物多样性敏感性和人类活动强度的人为干扰敏感性来构建生态敏感性评价的指

标体系,基于组合赋权法和空间自相关分析等方法揭示贵阳市 2000—2020 年生态敏感性的时空演变规律,为贵阳市生态环境保护和绿色发展提供相关的参考,促进新时期贵阳市“生态立市”战略的实施。

1 研究区概况

贵阳市位于贵州省的中部,是经中央批准,中国唯一以生态文明为主题的国家级、国际性高端峰会所在地(贵阳国际生态文明论坛),地处 $106^{\circ}07'—107^{\circ}17'E$, $26^{\circ}11'—27^{\circ}22'N$,由云岩、南明、花溪、乌当、白云、观山湖 6 个区和修文、息烽、开阳 3 个县及清镇市 10 个行政区组成。区域内地形地貌多样,以高原,山地和丘陵为主,平均海拔 1 100 m,总地势西南高、东北低,地势起伏较大,地形条件复杂。属于亚热带季风性湿润温和型气候,夏无酷暑,冬无严寒,多年平均降水量为 1 095.6 mm,降水丰沛。全市森林覆盖率达 55.3%,被称为“森林之城”,土地利用类型以林地、草地和耕地为主,面积约占研究区总面积的 90%。碳酸盐岩出露面积达 80%以上,喀斯特地貌发育典型,生态本底脆弱,水土流失和石漠化(含潜在石漠化)等生态环境问题较为严重,是典型的生态脆弱区和敏感区^[18]。近年来,在黔中城市群和“强省会”发展战略的驱动下,贵阳市人口不断增加,常住人口由 2000 年的 337.45 万人增加到 2020 年的 598.98 万人;经济快速发展,贵阳市 GDP 由 2000 年 264.81 亿元增加到 2020 年 4 311.65 亿元;城镇化快速推进,全市城镇化率由 2000 年的 39.7%增长到 2020 年 55.3%,建设用地面积占比由 2000 年的 2.17%增长到 2020 年的 6.75%。在强烈的人类活动影响下,贵阳市的生态系统景观过程、服务功能、安全格局等都发生了系列变化^[19-20],并反过来进一步影响其生态脆弱性和敏感性,基于此开展贵阳市生态敏感性演变的时空规律研究,为贵阳市生态安全分区管控和生态文明城市建设提供一定的参考依据。

2 研究数据与研究方法

2.1 数据来源及处理

本文采用的数据主要包括 DEM 数据,源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 30 m×30 m,利用 ArcGIS 10.8 软件,对 DEM 数据进行处理,得到研究区的地形坡度数据和地形起伏度数据。NDVI 数据源于中国科学院生态学科数据中心(<http://www.nesdc.org.cn>),分辨率为 30 m×30 m,并利用像元二分法处理获得植被覆盖度数据。土地利用数据源于资源环境科学与数据平台(<http://www.resdc.cn>),分辨率为 30 m×30 m。降水量数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),分辨率为 1 km×1 km,利用 ArcGIS 10.8 软件计算获得降水侵蚀力数据。土壤数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.crensdc.ac.cn>)世界土壤数据库(HWSD)提取的中国土壤数据集,利用 ArcGIS 10.8 软件计算获得土壤可蚀性数据。“类 NPP-VII RS”夜间灯光数据集由 Harvard Dataverse 平台(<https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD>)获取,分辨率为 500 m×500 m。人口密度数据和 GDP 数据来源于资源环境科学与数据平台(<http://www.resdc.cn>),分辨率为 1 km×1 km。道路矢量数据来源于 OpenStreetMap(<https://openmaptiles.org/>)和谷歌地图(<http://www.gditu.net/>),利用 ArcGIS 10.8 软件计算获得道路密度数据。同时,所有的数据均重采样为 30 m×30 m 的分辨率,坐标系统一为 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

2.2 研究方法

基于贵阳市的喀斯特自然生态环境现状和省会城市强烈的人类活动特征,选取水土流失敏感性、石漠化敏感性、生物多样性敏感性和人为干扰敏感性来研究贵阳市综合生态敏感性,通过 ArcGIS 10.8 软件中的自然断点法将生态敏感性重分类为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感 5 个等级,同时运用空间自相关分析方法综合评价贵阳市的生态敏感性状况以及时空演变过程和特征。

2.2.1 水土流失敏感性

采用降水侵蚀力、土壤可蚀性、地形起伏度和植被覆盖度等因子开展水土流失敏感性评价,公式为:

$$A_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times L_i \times C_i} \quad (1)$$

式中: A_i 为水土流失敏感性指数; R_i 为降水侵蚀力因子; K_i 为土壤可蚀性因子; L_i 为地形起伏度; C_i 为植被覆盖度。

2.2.2 石漠化敏感性 采用生态系统类型、地形坡度和植被覆盖度等因子开展石漠化敏感性评价,公式为:

$$S_i = \sqrt[3]{D_i \times P_i \times G_i} \quad (2)$$

式中: S_i 为石漠化敏感性指数; D_i 为生态系统类型; P_i 为地形坡度; G_i 为植被覆盖度。参考已有研究^[21],结合中国科学院土地利用覆盖分类体系,利用 ArcGIS 10.8 软件对植被覆盖生态系统类型进行重分类。具体分类如下:湿地、水田和建设用地为不敏感区;森林(郁闭度>30%的天然林和人工林、郁闭度>40%的灌木林)为轻度敏感区;疏林地(郁闭度为 10%~30%的林地)和未成林造林地、迹地、苗圃和各类园地

为中度敏感区;草地为高度敏感区;裸岩石质地和旱地为极敏感区。

2.2.3 生物多样性敏感性 最小累积阻力模型(minimal cumulative resistance model, MCR)是某个物种从“源”到达目的地运动过程中所需克服阻力而耗费最小代价的模型^[22],本文采用生物空间流动阻力值表征生物多样性敏感性,最小累积阻力值越大,敏感性越强。参考相关研究^[23]并结合贵阳市的实际现状,确定面积大于40 km²的林地和面积大于1.5 km²的水域作为生态“源”。参考已有研究^[24],土地利用类型和植被覆盖度对生物多样性的影响较大,同时高程和地形坡度也对生物的生存和迁徙有着重要的影响,因此选取土地利用类型、植被覆盖度、高程和地形坡度作为阻力因子。土地利用类型和植被覆盖度对生物多样性保护的重要性较高且具有一致性,因此将两者的权重各设置为0.4,高程和地形坡度的权重各设置为0.1。将4个阻力因子各分为5个类别,5个类别对应不同的阻力系数,乘各自权重叠加生成生物多样性阻力面(表1)。最小累积阻力模型表达式为:

$$MCR = f \times \min \sum_{j=1}^m (D_{ij} \times R_i) \quad (3)$$

式中: f 表示MCR与变量 $(D_{ij} \times R_i)$ 之间的正相关关系; D_{ij} 为物种从源 j 扩散到景观 i 的距离; R_i 为景观单元 i 对物种向某个方向运动的阻力系数。

表1 阻力面指标评价体系

阻力因子	分类	阻力系数	权重
土地利用类型	水域	10	0.4
	林地	30	
	草地、耕地	50	
	裸地	70	
	建设用地	100	
植被覆盖度	>0.8	10	0.4
	0.7~0.8	30	
	0.55~0.7	50	
	0.4~0.55	70	
	<0.4	100	
高程/m	<500	10	0.1
	500~800	30	
	800~1100	50	
	1100~1400	70	
	>1400	100	
地形坡度/(°)	<2	10	0.1
	2~6	30	
	6~15	50	
	15~25	70	
	>25	100	

2.2.4 人为干扰敏感性 采用人口密度、GDP^[25]、道路密度^[26]和夜间灯光指数等^[27]因子开展人为干扰敏感性评价,公式为:

$$Z = \sum_{i=1}^n X_i Y_i \quad (4)$$

式中: Z 为人为干扰敏感性指数; X_i 为第 i 项指标的权重值; Y_i 为第 i 项指标因子; n 为指标个数。

2.2.5 组合赋权法和综合生态敏感性计算 参考相关文献^[28],通过层次分析法方法得到主观权重,熵权法得到客观权重(表2)后,采用线性组合法。设由层次分析法得到的权重值为 W'_i ,由熵权法得到的权重值为 W''_i ,可以得到组合权重值 W_i 。为了使 W'_i 和 W''_i 之间的差异程度与其对应的分配系数 a 和 b 之间的差异程度一致并将主客观确权方法联合起来,引入距离函数来表达这种差异程度。

(1) 组合权重的表达式为:

$$W_i = aW'_i + bW''_i \quad (5)$$

式中: a 和 b 为权重的分配系数, $a+b=1$ 。距离函数的表达式为:

$$d(W'_i, W''_i) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (W'_i - W''_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

a 和 b 之间的差值是分配系数之间的差异,依据以上构建方程组如下:

$$\begin{cases} d(W'_i, W''_i) = (a-b)^2 \\ a+b=1 \end{cases} \quad (7)$$

为了使其中存在的差异程度一致,并使距离函数和分配系数取等式,且为分配系数提出约束条件,构建方程组求出分配系数并得到最终的权重值,上述过程既可以去除人为主观因素的干扰,也可以排除熵权法处理数据时依赖数据自身规律的问题。

(2) 综合生态敏感性计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n E_i F_i \quad (8)$$

式中: P 为综合生态敏感性值; E_i 为运用组合赋权法获得的第 i 项指标的权重值; F_i 为第 i 项指标的敏感性值; n 为指标个数。

表2 贵阳市4个维度敏感性确权

各维度敏感性	层次分析法确权	熵权法确权	组合赋权法确权
水土流失敏感性	0.2812	0.2368	0.2612
石漠化敏感性	0.2976	0.2486	0.2756
生物多样性敏感性	0.1763	0.2845	0.2249
人为干扰敏感性	0.2449	0.2301	0.2383

2.2.6 空间自相关分析 运用GeoDa软件,通过全

局自相关和局部自相关对贵阳市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年综合生态敏感性的空间差异及空间聚集特征进行分析^[29], 计算公式:

Global Moran's I 指数:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Local Moran's I 指数:

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (10)$$

式中: I 为 Moran's 指数; x_i, x_j 为第 i 个、第 j 个格网的综合生态敏感性指数均值; \bar{x} 为全部格网的敏感性均值; W_{ij} 为空间权重矩阵; S 为空间权重矩阵各因素之和。

3 结果与分析

3.1 4 个维度生态敏感性及时空演变分析

经计算, 得到水土流失、石漠化、生物多样性、人为干扰 4 个维度敏感性在 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 5 个不同时间节点的敏感性评价结果(图 1), 利用自然断点法, 把各维度生态敏感性分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感 5 级, 并对各维度敏感性进行分析。

3.1.1 水土流失敏感性分析 (1) 研究时间段内, 贵阳市水土流失敏感性以轻度敏感为主, 除 2005 年因年降水量偏少敏感性降低外, 其他 4 个时间节点的轻度敏感区面积占比均在 50% 以上, 不敏感区、中度敏感区和高度敏感区面积各占约 20%, 10%, 0.5%, 极敏感区面积占比小。(2) 从时间变化看: 2000—2020 年, 轻度敏感区、中度敏感区面积占比先下降后波动上升, 不敏感区、高度敏感区和极敏感区面积占比波动下降, 说明大部分地区敏感性是有所上升的。水土流失受区域内降水条件、土壤属性、植被覆盖度以及人类活动等因素的影响, 其中降水量影响更为明显, 2005 年和 2010 年研究区年平均降水量较少, 降水的侵蚀能力减弱, 水土流失敏感性降低。(3) 从空间分布看: 中度及以上等级敏感区主要分布在花溪区东南部和西南部、乌当区东部、开阳县东部和东北部、息烽县中部、修文县西部、清镇市西北部和西南部。这些敏感性较高的区域地形坡度和起伏度较大且降水丰富, 受其影响土壤易被流水侵蚀, 水土流失敏感性高; 不敏感和轻度敏感等敏感性低的区域主要分布在白云区、观山湖区、云岩区、南明区, 这些区域是贵阳主要建成区, 地形起伏度相对较小, 不透水地面占比大, 降水侵蚀力较弱, 水土流失敏感性低。

3.1.2 石漠化敏感性分析 (1) 研究时间段内, 贵阳

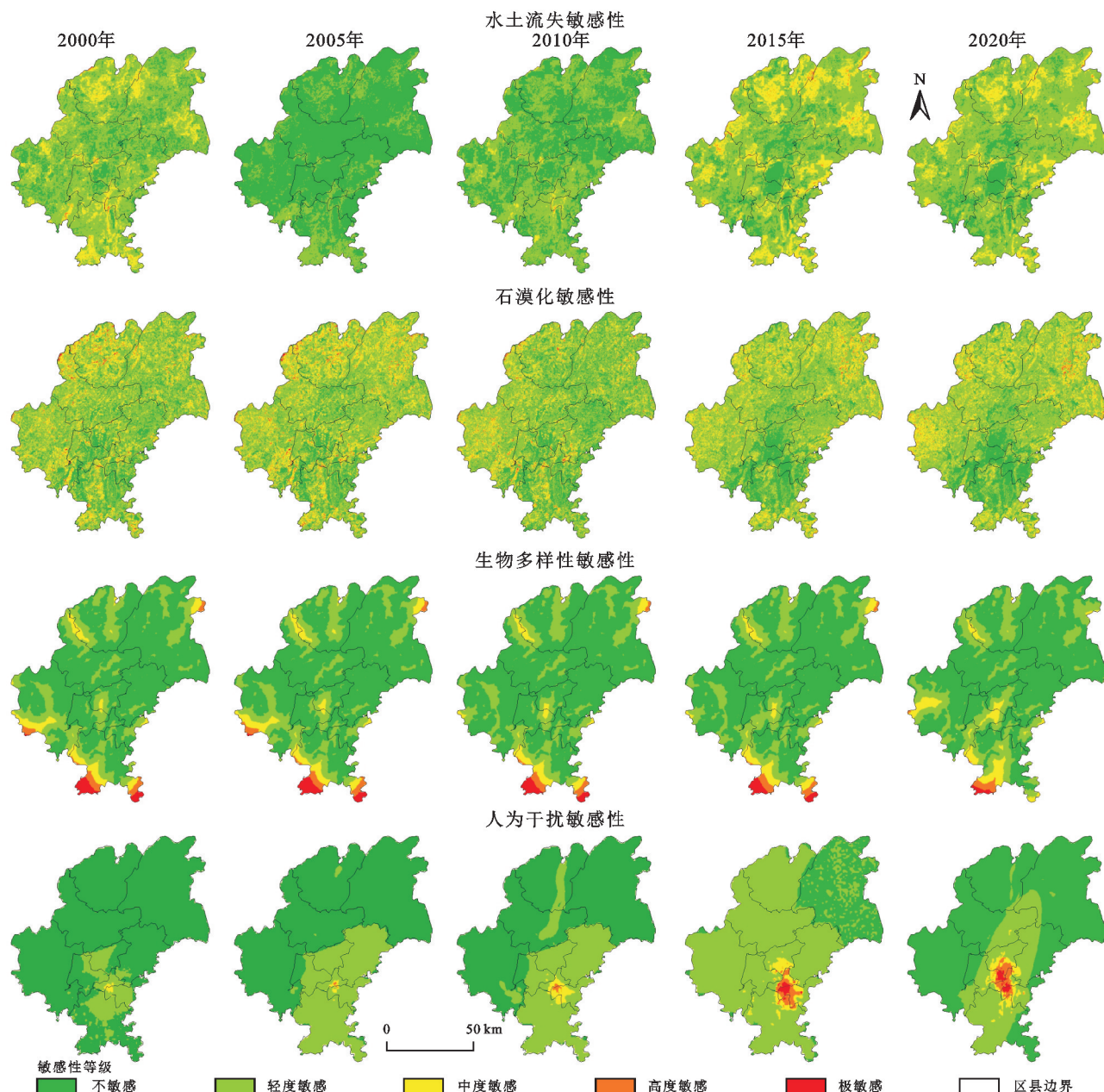
市石漠化敏感性以轻度敏感为主, 其面积占比在 56.16%~58.49%, 不敏感区、中度敏感区和高度敏感区面积各占约 25%, 12%, 3%, 极敏感区面积占比小。(2) 从时间变化看: 2000—2020 年, 轻度和中度敏感区面积占比波动上升, 不敏感区、高度敏感区和极敏感区面积占比波动下降, 其中高度及以上等级敏感区面积占比之和由 2000 年的 4.22% 下降到 2020 年的 3.11%, 说明贵阳市实施天然林保护、退耕还林还草等石漠化综合治理有一定成效。(3) 从空间分布看: 中度及以上等级敏感区主要分布在花溪区东南部和西南部、南明区东北部、乌当区东部、开阳县东部、息烽县中部、修文县和清镇市的西部和西北部, 其他区县零星分布。这些敏感性较高的区域地形比较破碎、坡度大, 旱地面积占比较大且传统的农耕粗放耕作方式比较普遍, 土层较薄, 植被覆盖较少, 受降水的侵蚀和冲刷, 发生石漠化的可能性大, 敏感性高; 不敏感区和轻度敏感区主要分布在白云区、观山湖区、云岩区、南明区等主要建成区, 这些地区地形坡度较小且城镇建设用地面积占比高, 石漠化敏感性相对较低。

3.1.3 生物多样性敏感性分析 (1) 研究时间段内, 贵阳市生物多样性敏感性低, 以不敏感为主, 其面积占比约为 70%, 轻度敏感区和中度敏感区面积各占约 20% 和 4%, 高度敏感区和极敏感区面积占比小。(2) 从时间变化看: 2000—2020 年, 不敏感区面积占比波动下降, 轻度敏感区和中度敏感区面积占比波动上升, 高度敏感区和极敏感区面积占比波动下降。(3) 从空间分布看: 生物多样性敏感性较高的区域主要分布在花溪区的西南和东南部、开阳县东北部、息烽县西南部、修文县西北部和清镇市西南部。这些地区地势较高、林地和生境(包括生态廊道)斑块破碎化明显, 生物多样性敏感性高; 白云区、观山湖区、云岩区、南明区和花溪区中北部零星分布着中度敏感性区域, 主要原因是这些地区人口密度大, 经济发达, 城镇的建设用地面积增长快(建设用地面积占比由 2000 年的 4.67% 上升为 2020 年的 15.43%), 动植物生存的自然条件易受干扰, 生物多样性敏感性相对较高, 其他大部分地区属于轻度或不敏感区。总体来看研究时段贵阳市高敏感性区域面积占比和分布范围虽有缩小, 但成效还不够稳定, 如 2020 年贵阳市的中度敏感区较前几个时间节点有所提升。

3.1.4 人为干扰敏感性分析 (1) 研究时间段内: 贵阳市人为干扰中度及以上等级敏感区面积占比增加, 轻度敏感区面积占比波动增长, 不敏感区面积占比明显减少。作为省会城市和黔中城市群核心区域, “人口虹吸”作用较强, 近 20 年来贵阳市总人口及城镇

化率快速上升,人口密度提升,以及系列重大基础设施工程(高速铁路、公路、黔中水利枢纽工程等),对生态环境造成一定程度的干扰和破坏,人为干扰敏感性提升。(2)从空间分布看:不敏感区和轻度敏感区主要位于开阳县、息烽县、修文县和清镇市。这些地区人口密度相对较低,林地和草地面积广,人类活动对自然环境的影响相对较小,人为干扰敏感性较低;中度及以上等级敏感区主要分布在观山湖区、云

岩区、南明区以及白云区、乌当区等主要建成区,人类聚居度高,人口密度大,经济发展较快,土地的高强度开发以及土地利用方式的转变(林、草地面积占比由2000年的62.37%下降至2020年的57.76%;城市建设用地面积占比由2000年的4.67%上升为2020年的15.43%),城市的扩张(如部分房地产建设对贵阳环城林地的破坏),对生态环境造成相当大的干扰,人为干扰敏感性高。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 2000—2020年贵阳市4个维度生态敏感性演变

Fig. 1 Evolutionary maps of the four dimensions of ecological sensitivity in Guiyang City from 2000 to 2020

3.2 综合生态敏感性时空演变分析

将组合赋权法确定的各维度敏感性的权重和各维度生态敏感性计算结果加权叠加,利用 ArcGIS 10.8 的自然断点法进行分区,得到 2000 年、2005 年、

2010 年、2015 年和 2020 年 5 个时间节点的贵阳市综合生态敏感性评价结果(图 2,表 3),各维度敏感性程度及其变化(图 3)。

(1) 贵阳市综合生态敏感性总体较低,以轻度敏

感为主。随时间演变,生态敏感性整体上升,具体来说研究时段内,不敏感区面积占比先上升后又下降,总体下降明显;轻度敏感区面积占比明显上升;中度及以上等级敏感区面积占比波动下降。从 2000—2020 年整体看,因各种人为干扰因素增多,敏感性增强,各维度敏感性中不敏感区面积占比明显下降,贵阳市生态敏感性程度整体上升。(2) 从空间分布看:中度及以上等级敏感区主要位于花溪区东南和西南部、开阳县东部和东北部、息烽县中部、修文县和清镇市的西部,其他区县也有零星分布。这些地区海拔

高,地形坡度和地形起伏度较大,降水丰富,受降水侵蚀易发生水土流失;农业用地中旱地面积较多,传统的粗放耕作方式比较普遍且土层较薄,受降水的侵蚀和冲刷,使碳酸盐岩出露的可能性增大,易产生石漠化等生态环境问题,生态环境脆弱,生态敏感性高。(3) 从图 3 可以看出,在研究时间段内,4 个维度生态敏感性程度不同且变化不同步,石漠化敏感性程度高且呈降低趋势,水土流失敏感性程度较高且敏感性变化大,人为干扰敏感性总体呈上升趋势,生物多样性敏感性低且变化相对缓慢。

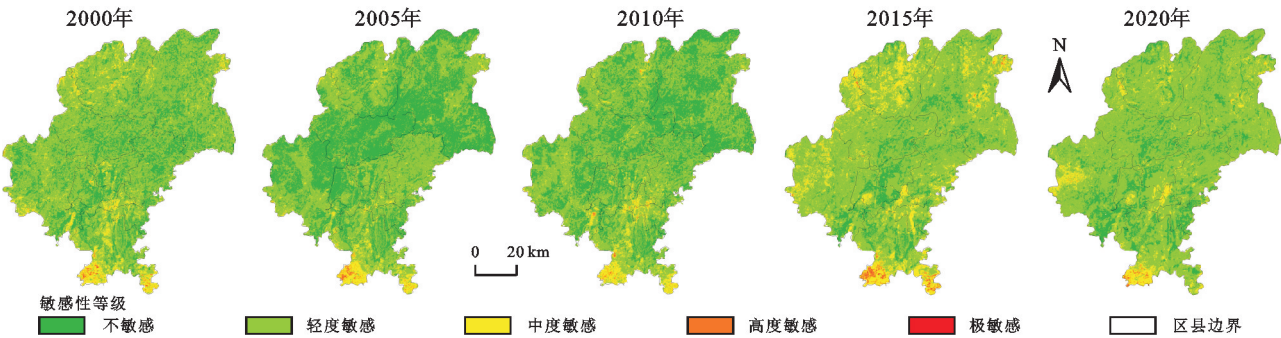


图 2 2000—2020 年贵阳市综合生态敏感性演变图

Fig. 2 Evolutionary map of the comprehensive ecological sensitivity in Guiyang City from 2000 to 2020

表 3 2000—2020 年贵阳市综合生态敏感性分区面积

年份	不敏感		轻度敏感		中度敏感		高度敏感		极敏感	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
2000 年	2253.9	28.02	5243.9	65.19	491.7	6.11	49.1	0.61	4.4	0.07
2005 年	3714.2	46.18	3984.6	49.54	303.9	3.78	37.5	0.47	2.8	0.03
2010 年	3234.4	40.21	4429.6	55.08	345.3	4.29	32.3	0.41	1.4	0.01
2015 年	1215.8	15.12	5822.2	72.39	898.3	11.17	98.6	1.23	8.1	0.09
2020 年	1487.1	18.49	6084.7	75.65	436.9	5.43	32.1	0.41	2.2	0.02

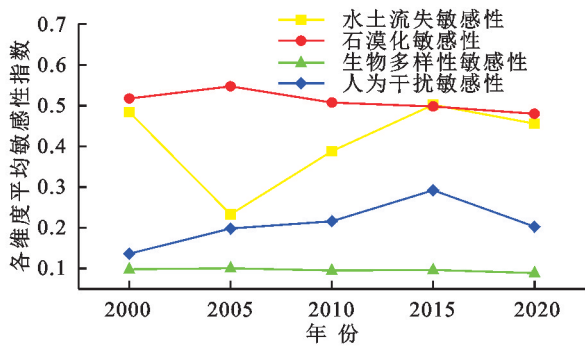


图 3 2000—2020 年各维度敏感性程度及其变化

Fig. 3 Chart of sensitivity levels and changes across dimensions from 2000 to 2020

3.3 空间自相关分析

3.3.1 生态敏感性全局自相关分析 利用 GeoDa 软件对贵阳市 2000—2020 年综合生态敏感性进行空间自相关分析,结果见表 4。全局 Moran's $I > 0$,表明在研究时段内贵阳市综合生态敏感性在空间上具有正相关关系。从时间上来看,2000—2005 年,全局 Moran's I 增

大;2005—2020 年,全局 Moran's I 逐渐减小,总体下降明显,表明贵阳市综合生态敏感性在空间上的正相关关系随时间的演变有所减弱。在研究时段内, p 值均小于 0.01,表明其通过 99% 的置信度检验; Z 值均大于 2.58,表明在 99% 的置信度下贵阳市综合生态敏感性在空间分布上极其显著,其变化趋势与全局 Moran's I 相似,随时间的演变总体呈下降趋势,表明贵阳市综合生态敏感性的空间集聚特征有所减弱。

表 4 2000—2020 年贵阳市生态敏感性全局 Moran's I 指数统计值

Table 4 Global Moran's I Index statistics for ecological sensitivity in Guiyang City from 2000 to 2020					
年份	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
Moran's I	0.737	0.799	0.773	0.733	0.680
Z 值	45.1948	49.0132	47.4129	44.9705	41.7556
p 值	0.001***	0.001***	0.001***	0.001***	0.001***

注:*** 代表在 1% 的显著性水平上显著。

3.3.2 生态敏感性局部自相关分析 运用 GeoDa 软件对贵阳市生态敏感性进行局部 Moran's I 指数计算和空间聚类分析(图 4),贵阳市生态敏感性的空间聚集性特征明显且高一高聚集和低一低聚集比较突出,低一高聚集和高一低聚集分布较少;高一高聚集的分布区域与综合生态敏感性较高的分布区域相关,低一低聚集的分布区域与综合生态敏感性较低的区域相关。从时间上看:不显著的网格数量由 2000 年 703 个网格波动上升至 2020 年 718 个网格;高一高

聚集的网格数量由 2000 年 161 个网格波动下降至 2020 年 130 个网格;低一低聚集的网格数量由 2000 年 148 个网格波动上升至 2020 年 167 个网格。高一高聚集反映了生态环境风险需要警惕,低一低聚集反映了生态环境的改善。2000—2020 年,贵阳市高一高聚集的网格数量下降,低一低聚集的网格数量呈小幅度上升趋势,表明贵阳市生态环境有所改善。由图 4 看出,贵阳市生态敏感性的聚集程度在减弱,呈向离散化方向发展的趋势。

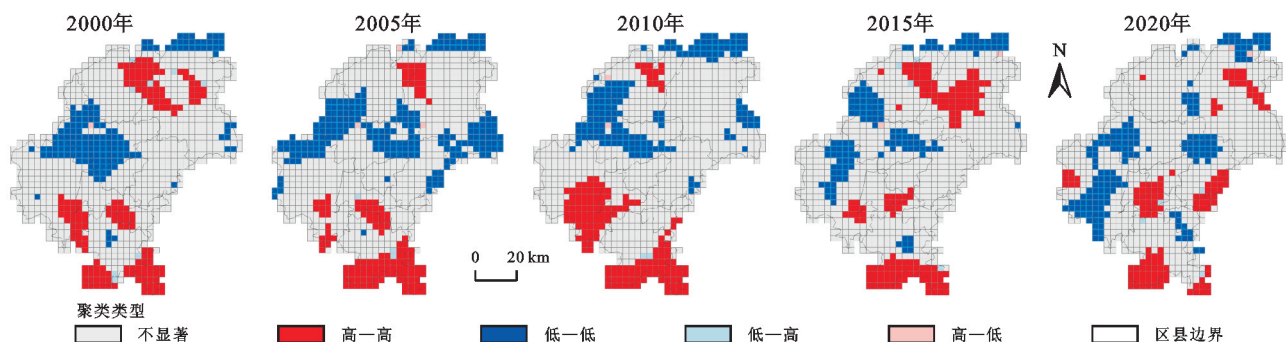


图 4 2000—2020 年贵阳市生态敏感性 LISA 聚类图

Fig. 4 Local indicators of spatial association (LISA) cluster maps of ecological sensitivity in Guiyang City from 2000 to 2020

4 讨论和结论

4.1 讨论

研究区是贵州省会城市和国家明确的黔中城市群的核心区域,也是贵州—贵安国家级新区的主体区域,人类活动强烈,城镇化发展较快,又是典型喀斯特地区,生态本底脆弱,在这种背景下探讨其生态敏感性变化规律,对于科学制定贵阳市生态安全分区分管方案有重要参考意义。

基于自然因素和人为干扰因素的双重影响,本文从水土流失、石漠化、生物多样性和人为干扰等视角构建指标体系,较好反映了贵阳市喀斯特自然环境本底和人类活动的影响,比较切合实际。从时间变化来看,研究区水土流失敏感性、石漠化敏感性和生物多样性敏感性中轻度敏感区面积占比总体上升明显,高度和极敏感区面积占比总体呈下降趋势,受其影响综合生态敏感性轻度敏感区面积占比上升,中度及以上等级敏感区面积占比下降,表明贵阳市生态环境还保持较好状态,且中度及以上等级敏感区的生态环境有所改善。在研究时间段内,贵阳市社会经济的发展、人口密度提升、城镇化发展以及基础设施建设等,人为干扰不断加强,人为干扰中度及以上等级敏感区面积占比增大,受其影响,原本敏感性不高的区域生态环境有所退化。从各维度敏感性程度及其变化来看,石漠化敏感性和水土流失敏感性程度较高,生物多样性敏感性程度较低,人为干扰敏感性增幅较大。石漠

化和水土流失是研究区重要的生态环境问题,敏感程度较高,在研究时间段内,因退耕还林还草和石漠化治理、生态文明城市建设等原因,高度和极敏感区面积占比均有所下降,水土流失和石漠化问题有所改善;水土流失敏感性受自然气候条件(如极端降水变化)等因素影响变化最大,人为干扰敏感性受社会经济条件(如人口密度提升、城镇化发展和基础设施建设)等因素影响变化较大,石漠化敏感性得到抑制,生物多样性敏感性在研究时间段内变化较小。

研究的不足之处在于在水土流失敏感性因子当中没有充分考虑喀斯特地区地表流失和地下漏失(喀斯特地区具有地表地下双层水文-地质-地貌-生态系统)侵蚀特征和土壤侵蚀容许量(阈值);同时缺乏对生态敏感性的演变机理、驱动机制等研究,需要在后续的研究中完善和深化。

4.2 结论

(1) 从时间上来看,贵阳市生态敏感性以轻度敏感为主,其面积占比呈上升趋势,中度及以上等级敏感区面积占比略有下降,表明贵阳市中度及以上等级敏感区的生态环境有所改善,水土流失和石漠化治理工作成效显著。但因人为干扰因素的加强,不敏感区面积占比呈下降趋势,部分不敏感区域生态环境有所退化。

(2) 从空间上来看,生态敏感性高的区域大部分位于花溪区东南(高坡苗族布依族乡一带)和西南部、开阳县东部和东北部、息烽县中部、修文县和清镇市的西部,这类地区海拔高、地表起伏大,人口密度虽然

相对较小,但多数属于粗放式的经营利用土地,导致石漠化、水土流失等生态退化问题比较突出。这些区域应加快生态环境的治理,推进水土保持以及石漠化治理工作,转变传统粗放式经营模式,发展生态农业和生态旅游(含农旅)等,同时注意对城市环城林带的保护与合理开发。

(3) 贵阳市生态敏感性在空间分布上具有较强的正相关关系,且聚集性较明显,以高一高聚集和低一低聚集为主。但随时间演变,生态敏感性在空间上的正相关关系有所减弱,聚集程度也在减弱,生态敏感性的空间分布逐渐趋向离散化。

参考文献(References):

- [1] 熊善高,秦昌波,于雷,等.基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究:以南宁市为例[J].生态学报,2018,38(22):7899-7911.
Xiong S G, Qin C B, Yu L, et al. Methods to identify the boundary of ecological space based on ecosystem service functions and ecological sensitivity: a case study of Nanning City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (22):7899-7911.
- [2] 李振亚,魏伟,周亮,等.基于空间距离指数的中国西北干旱内陆河流域生态敏感性时空演变特征:以石羊河流域为例[J].生态学报,2019,39(20):7463-7475.
Li Z Y, Wei W, Zhou L, et al. Temporal and spatial evolution of ecological sensitivity in arid inland river basins of northwest China based on spatial distance index: a case study of Shiyang River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20):7463-7475.
- [3] Yilmaz F C, Zengin M, Tekin Cure C. Determination of ecologically sensitive areas in Denizli Province using geographic information systems (GIS) and analytical hierarchy process (AHP)[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020,192(9):589.
- [4] Raupach M R, Haverd V, Briggs P R. Sensitivities of the Australian terrestrial water and carbon balances to climate change and variability [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013,182/183:277-291.
- [5] Williams J W, Huntley B, Seddon A W R. Climate sensitivity and ecoclimate sensitivity: theory, usage, and past implications for future biospheric responses [J]. *Current Climate Change Reports*, 2022,8(1):1-16.
- [6] Albo-Puigserver M, Bueno-Pardo J, Pinto M, et al. Ecological sensitivity and vulnerability of fishing fleet landings to climate change across regions [J]. *Scientific Reports*, 2022,12:17360.
- [7] 郭泽呈,魏伟,石培基,等.中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局[J].地理学报,2020,75(9):1948-1965.
Guo Z C, Wei W, Shi P J, et al. Spatiotemporal changes of land desertification sensitivity in the arid region of Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75 (9):1948-1965.
- [8] 张广创,王杰,刘东伟,等.基于 GIS 的锡尔河中游生态敏感性分析与评价[J].干旱区研究,2020,37(2):506-513.
Zhang G C, Wang J, Liu D W, et al. Analysis and evaluation of the ecological sensitivity in the middle reaches of the Syr Darya River based on GIS[J]. *Arid Zone Research*, 2020,37(2):506-513.
- [9] 刘海龙,王伟桥,王跃飞,等.汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征[J].生态学报,2021,41(10):3952-3964.
Liu H L, Wang W Q, Wang Y F, et al. Comprehensive evaluation of ecological sensitivity and the characteristics of spatiotemporal variations in Fenhe River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(10):3952-3964.
- [10] 丁徽,赵小敏,郭熙,等.江西省鄱阳湖区生态敏感性评价[J].水土保持研究,2020,27(1):257-264.
Ding H, Zhao X M, Guo X, et al. Evaluation of ecological sensitivity in Poyang Lake area of Jiangxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020,27(1):257-264.
- [11] 杨柳,索萌萌,柴娇娇,等.2000—2020 年喀斯特地区煤矿资源城市生态敏感性的时空演变[J].水土保持通报,2022,42(4):338-346.
Yang L, Suo M M, Chai J J, et al. Temporal and spatial evolution of ecological sensitivity at coal mining cities in a Karst region during 2000—2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(4):338-346.
- [12] Yang Y P, Chen J J, Huang R J, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecological protection: a case study of Guangxi, a Karst region in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022,19(9):5699.
- [13] Jin X X, Wei L Y, Wang Y, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem service functions and ecological sensitivity assessment: a case study in Fengxian County of Jiangsu Province, China[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021,23(1):563-590.
- [14] 董晓媛,胥德泽,施小斌,等.黄河流域甘肃段生态敏感性评价研究:以广河县为例[J].干旱区地理,2024,47(4):599-611.
Dong X Y, Xu D Z, Shi X B, et al. Ecological sensitivity evaluation of the Gansu section of the Yellow River: a case study of Guanghe County[J]. *Arid Land Geography*, 2024,47(4):599-611.
- [15] 张伟,王家卓,任希岩,等.基于 GIS 的山地城市生态敏感性分析研究[J].水土保持研究,2013,20(3):44-47,54.

- Zhang W, Wang J Z, Ren X Y, et al. GIS-based ecological sensitivity analysis of mountainous areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 44-47, 54.
- [16] 王贝贝, 丁明军, 管琪卉, 等. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5460-5472.
Wang B B, Ding M J, Guan Q H, et al. Gridded assessment of eco-environmental vulnerability in Nanchang city [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5460-5472.
- [17] 邓晓红, 宋玉琳, 李宗省, 等. 河西地区生态敏感性演变格局及分区治理[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 232-240.
Deng X H, Song Y L, Li Z X, et al. Evolution pattern of terrestrial ecological sensitivity in the Hexi region and its zoning governance [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(5): 232-240.
- [18] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6353-6362.
Fan F D, Wang K L, Xiong Y, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6353-6362.
- [19] 蒙古军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
Meng J J, Wang Y, Wang X D, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based on MCR model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [20] 程玉卓, 王志杰, 班先娅, 等. 城市化和生态文明建设对喀斯特山地城市景观生态风险的影响评价: 以贵阳市花溪区为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 351-357.
Cheng Y Z, Wang Z J, Ban X Y, et al. Evaluation of the impact of urbanization and ecological civilization construction on landscape ecological risk in Huaxi district of Guiyang characterized as karst mountain city [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 351-357.
- [21] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 等. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建: 以广西河池为例[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2596-2608.
Gao M W, Hu Y C, Li X, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem services and environmental sensitivity in karst mountainous areas: a case study in Hechi, Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2596-2608.
- [22] 杨远琴, 任平, 洪步庭. 基于生态安全格局的三峡库区腹地低丘缓坡土地开发利用[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 305-310, 317.
- Yang Y Q, Ren P, Hong B T. Development and utilization of gentle-slope hilly land based on ecological security pattern theory of Three Gores Reservoir Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 305-310, 317.
- [23] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437.
Li Q P, Zhang Z D, Wan L W, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [24] 翟香, 兰安军, 廖艳梅, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域定量识别: 以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 322-329.
Zhai X, Lan A J, Liao Y M, et al. Quantitative identification of key areas of land space ecological restoration based on the ecological security pattern: a case study of Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 322-329.
- [25] 李振亚, 魏伟, 周亮, 等. 中国陆地生态敏感性时空演变特征[J]. 地理学报, 2022, 77(1): 150-163.
Li Z Y, Wei W, Zhou L, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of terrestrial ecological sensitivity in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(1): 150-163.
- [26] Luo Q Y, Bao Y, Wang Z T, et al. Vulnerability assessment of urban remnant mountain ecosystems based on ecological sensitivity and ecosystem services [J]. Ecological Indicators, 2023, 151: 110314.
- [27] 李帆, 贾夏, 赵永华, 等. 基于 DPSIR 模型的黄土高原生态敏感性演变格局及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 241-251.
Li F, Jia X, Zhao Y H, et al. Evolutionary pattern and driving forces of ecological sensitivity in the Loess Plateau using DPSIR model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(9): 241-251.
- [28] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 831-836.
Zhang C, Wang Q, Chen J P, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 831-836.
- [29] 辛亮, 苏维词. 基于景观格局的 FAST 宁静区生态风险时空演变分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5475-5487.
Xin L, Su W C. Spatial and temporal evolution of ecological risk in FAST Radio Quiet Zone based on landscape pattern [J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5475-5487.