

典型喀斯特流域景观生态风险驱动因素及预测 ——以打邦河流域为例

何明春^{1,2}, 董慧^{1,2}, 陈罗敏^{1,2}, 周忠发^{1,2}

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550025;
2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 探究打邦河流域景观生态风险分布, 分析典型喀斯特流域景观生态风险驱动因素并进行多情景预测, 为提升该区生态系统稳定性、保护喀斯特生态环境提供理论依据。[方法] 采用景观指数法构建生态风险评估模型, 结合空间自相关分析、最优参数地理探测器及多情景模拟等方法, 对打邦河流域 2013—2023 年的生态风险进行研究。[结果] ① 流域土地利用面积转移最大的是耕地和林地, 转移最剧烈的时间段为 2018—2023 年。② 流域景观生态风险总体逐步改善, 中高风险与高风险区主要在西秀区西部、六枝特区、关岭县西南部及镇宁县中部, 以草地、水域和建设用地为主, 流域生态风险的空间集聚性呈先增强后减弱趋势。③ 流域景观生态风险的单因子探测表明, NDVI(0.37)、夜间灯光(0.16)和植被覆盖(0.11)是解释力最强的 3 个因子, 双因子探测受 NDVI \cap 土壤类型、距铁路距离 \cap NDVI、人口分布 \cap NDVI 交互作用的影响。表明自然与社会因素的共同作用是流域景观生态风险变化的关键。④ 多情景预测中, 经济发展(ED)情景下景观生态风险相对较高, 而生态保护(EP)情景下景观生态风险较低, 且兼顾流域可持续发展与生态保护, EP 情景是流域未来发展的有利路径。[结论] 打邦河流域景观生态风险是自然与社会因素共同作用的结果, 生态保护情景(EP)下景观生态风险相对较低, 是实现可持续发展、建设美丽中国的必然路径。

关键词: 喀斯特流域; 景观生态风险; 最优参数地理探测器; 多情景模拟; 打邦河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0218-12

中图分类号: X826

文献参数: 何明春, 董慧, 陈罗敏, 等. 典型喀斯特流域景观生态风险驱动因素及预测[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 218-229. He Mingchun, Dong Hui, Chen Luomin, et al. Driving factors and prediction of landscape ecological risk in typical karst basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 218-229. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.020; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.020.

Driving factors and prediction of landscape ecological risk in typical karst basin —A case study in Dabang River basin

He Mingchun^{1,2}, Dong Hui^{1,2}, Chen Luomin^{1,2}, Zhou Zhongfa^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] To map the distribution of landscape ecological risks in the Dabang River basin, we conducted in-depth analyses of the factors underlying landscape ecological risk in typical karst river basins and performed multi-scenario predictions to provide a scientific basis for enhancing local ecosystem stability and protecting the karst ecological environments. [Methods] An ecological risk assessment model was constructed integrating spatial autocorrelation analysis, optimal parameter geodetector, and multi-scenario simulation, we examined the ecological risk was examined in the Dabang River basin from 2013 to 2023. [Results] ① The largest land-use area transformation within the basin occurred between cultivated and forest land, with the most intense

收稿日期: 2025-04-21

修回日期: 2025-06-15

采用日期: 2025-06-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“岩溶洞穴系统外源酸对碳汇效应影响机制研究”(42161048); 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2023]一般 258); 贵州省科技计划项目(黔科合平台 YWZ[2025]001)

第一作者: 何明春(2000—), 女(土家族), 重庆市人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特山地风景园林规划设计。Email: 232200171835@gznu.edu.cn.

通信作者: 董慧(1986—), 女(汉族), 贵州省贵阳市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事喀斯特水文与洞穴方面的研究。Email: 201808010@gznu.edu.cn.

period of change from 2018 to 2023. ② Ecological risk in the basin had gradually improved. Medium-high-risk and high-risk areas were mainly located in the western part of Xixiu District, Liuzhi Special District, southwestern part of Guanling County, and the central part of Zhenning County, regions characterized by grassland, water areas, and construction land. Spatial agglomeration of ecological risk in the basin initially increased and then decreased. ③ Single-factor detection of landscape ecological risks in the basin indicated that Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (0.37), night light (0.16), and vegetation coverage (0.11) had the strongest explanatory power. Double-factor detection results were impacted by the interaction of NDVI∩soil type, distance to railway∩NDVI, and population distribution∩NDVI, suggesting that combined effects of natural and social factors are key to explaining changes in landscape ecological risk in the basin. ④ In multi-scenario predictions, overall landscape ecological risk was relatively high in the economic development (ED) scenario and relatively low in the ecological protection (EP) scenario. Considering both sustainable river basin development and ecological protection, the EP scenario offers a favorable path for future development of the river basin. [Conclusion] Landscape ecological risk in the Dabang River basin is mainly driven by interactions between natural and social factors. The ecological protection (EP) scenario results in a relatively low landscape ecological risk, making it an inevitable path for achieving sustainable development and building a beautiful China.

Keywords: karst basin; landscape ecological risk; optimal parameter geodetector; multi-scenario simulation; Dabang River basin

中国共产党第二十届中央委员会第三次全体会议提出,生态文明建设要进一步降碳、扩绿。这彰显了生态文明建设在中国特色社会主义国家治理体系中的重要地位。生态系统为人类提供了丰富的自然资源,其结构与功能的稳定是人类社会赖以生存的物质基础^[1]。全球变暖、海平面上升带来的生态环境变化,对生态系统造成了多方面的深远影响。景观生态风险对提高生态系统稳定性、生态系统服务效能等具有重要意义,作为有效的生态系统管理的工具,景观生态风险正逐渐成为生态领域研究的热点^[2]。

景观生态风险评价最早起源于美国^[3],早期研究集中区域风险方面和生态系统方面。比如结合区域评价和景观生态学理论提出了区域风险评估方法和体系^[4],使用回归模型量化流域地表水中化学胁迫源浓度对生态系统的影响^[5]。随着研究深入,逐渐发展到多种评价体系,到2010年前后,景观生态风险的使用场景、研究手段逐渐多样。如借助生境适宜性分析对美国东北部某高尔夫球场周围进行生态风险评估,强调栖息地适宜性地图(FEM)为生态风险评估提供了帮助^[6]。使用基于生态风险评估框架的贝叶斯网络模型,评估野火、放牧、森林管理活动和昆虫爆发等问题对栖息地的潜在影响^[7],扩大了景观生态风险研究热度。研究对象如长三角地区^[8]、港口^[9]、流域^[10]、国家级自然保护区等^[11]。流域景观生态风险评价研究流域内自然因素和社会因素对其生态系统和生态过程造成的负面影响以及不良后果。作为一个复合生态系统,流域生态风险情况更为复杂,具

有自然、社会与经济等多组分相耦合的特性^[12]。流域景观生态风险是多种因素影响下的结果,研究流域景观生态风险,有利于探究多因素复合影响下的景观生态风险演变规律及各因子相互作用情况。揭示景观生态风险背后的驱动因素,有助于更全面进行生态风险分析和未来生态风险预测,为流域风险管治提供参考,实现流域可持续发展的生态目标。常用驱动因子探测手段有多尺度地理加权回归^[13]、地理探测器、主成分分析法等^[14],其中,地理探测器以使用场景多样、数据类型广泛等特点,被广泛地应用于各领域。作为探测空间分异以及驱动因子的常用方法,它能判断两因子是否存在交互作用,以及交互作用的强度、方向、线性还是非线性^[15]。探测流域生态风险的影响因素有利于提高多情景模拟时的精度,结合生态风险评价模型能更准确预测未来土地利用的分布,指导流域风险防控。与其他预测模型相比,PLUS模型的土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子模型(CARS),拥有更高的模拟精度^[16],增加数据结果真实性。此外,PLUS模型还能预测土地利用转换规律,高效实现多种情景的模拟预测。

目前综合西南喀斯特典型地貌下的流域景观生态风险、驱动因子探测和多情景预测的研究还比较欠缺。中国是世界上喀斯特分布面积最大的国家,拥有最齐全的喀斯特地貌类型,但存在生态环境脆弱、石漠化后恢复慢等问题^[17],研究其生态风险有利于保护喀斯特景观及其生态环境,减少水土流失、石漠化加剧现象。该研究以打邦河流域2013,2018和2023年土地利用数据为基础,综合生态风险评价模

型、最优参数地理探测器,识别景观生态风险分异特征以及驱动因素,并利用PLUS模型探索未来自然发展(ND)情景、经济发展(ED)情景和生态保护(EP)情景下生态风险布局 and 演变,有利于提高生态环境质量、遏制生态风险,促进区域协调和可持续发展,提升生态系统的稳定性和抗风险能力。

1 研究区概况

打邦河流域主要位于贵州省安顺市(东经 $105^{\circ}10' - 106^{\circ}20'$, 北纬 $25^{\circ}27' - 26^{\circ}32'$), 面积约 $6\,701.53\text{ km}^2$, 地形以峰丛洼地和河间盆地为主, 整体西高东低, 属典型喀斯特地貌, 干支流上建有水库, 满足居民饮水、灌溉需要^[18]。气候以亚热带季风气候为主, 河流落差大且集中, 形成了黄果树瀑布、龙宫岩溶洞穴等 5A 级自然风景名胜区。流域内植被主要包括针叶林、灌丛、草丛和栽培植被 4 种, 土壤以黄壤和石灰(岩)土为主, 农业人口所占比例较高, 矿产资源丰富, 沪昆铁路和滇黔公路干线等交通要道穿过, 社会经济活动较为活跃。然而, 随着生产和旅游等经济活动发展和人口增长, 流域生态压力逐渐增大。加之资源开采频繁, 使得流域生态系统愈加不稳定, 生态保护与经济活动的冲突进一步加剧。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

研究数据来源详见表 1。河流结合实际情况提取, 土地覆被数据使用武汉大学 CLCD 数据集分类系统, 将研究区按照耕地、林地、草地、水域、未利用地、建设用地, 重分类为 6 类。结合《土地利用现状分类(GB/T 21010—2017)》, 将 CLCD 数据集中的林地和灌木聚合为林地, 建设用地为分类系统中的人造地表, 未利用地为分类系统中的裸地, 其他土地类型则与 CLCD 数据集分类系统一致。CLCD 数据集相对于现有的土地覆盖产品实现了更高的总体精度, 准确率达到 79.31%, 其整体精度优于 MCD12Q1 和 GlobeLand 30 等土地覆盖产品^[19]。为了研究生态风险驱动因子并进行多情景预测, 综合选取数字高程数据(DEM)、降水、气温、坡度、坡向、植被覆盖度、NDVI、土壤类型等作为自然方面研究要素, 人口空间分布、夜间灯光指数、GDP 值、到公路和铁路的距离等作为社会因子, 并使用 WGS_1984_UTM_Zone_48N 条带进行投影处理。其中公路、铁路数据源于全国地理信息资源目录服务系统, 到公路、铁路的距离采用欧式距离生成。

表 1 研究数据类型及来源

Table 1 Research data types and sources

种类	数据	来源
土地利用	1999, 2011, 2013, 2018 和 2023 年 5 期, 分辨率 30 m	武汉大学 CLCD 数据集 https://zenodo.org/records/12779975
行政区划	全国区县级行政区划数据	全国地理信息资源目录服务系统 www.webmap.cn
自然环境因素	高程(DEM)	地理空间数据云 www.gscloud.cn
	降水、气温、植被覆盖度、NDVI	国家青藏高原科学数据中心 data.tpdc.ac.cn
	土壤类型	国家地球系统科学数据共享平台 土壤科学数据中心 http://soil.geodata.cn
	河流水系	基于全国地理信息资源目录服务系统 www.webmap.cn 提取
	坡度、坡向	基于 DEM 提取
	夜间灯光	国家地球系统科学数据中心 https://www.geodata.cn/oldindex
	GDP 值	中国科学院资源环境科学与数据中心 www.resdc.cn
社会经济因素	人口空间分布	美国橡树岭国家实验室 https://landsat.ornl.gov/
	到铁路的距离 到公路的距离	基于全国地理信息资源目录服务系统 www.webmap.cn 提取

2.2 土地利用动态度

土地利用演变可反映人为活动及干扰所导致的自然景观变化^[20],因而在景观生态风险评价体系中被广泛使用,而土地利用类型与土地利用动态度之间的转换能够进一步表征景观生态风险的演变^[21]。土地利用动态度分为单一土地利用动态度和综合土地利用动态度。

2.2.1 土地利用单一动态度

用于表示一段时间内,单一土地利用类型的动态转化程度,计算公式为

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为单一动态度指数; U_a 、 U_b 为研究时间段的研究初、末期的某一土地利用类型的面积; T 为研究时间段长度。

2.2.2 土地利用综合动态度

用于表示一段时间内,多种土地利用类型的相互动态转化,计算公式为

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: M 为综合动态度指数; U_i 为研究初期第*i*类土地类型面积; ΔU_{i-j} 为研究时段内第*i*类土地利用类型转为非*i*类地类面积的绝对值。

2.3 景观生态风险评价体系

2.3.1 构建生态风险评价模型

基于景观指数法构建的模型无需依赖大量实测数据,即可实现对多源风险的综合表征,适用于流域景观生态风险评价^[2],参张学斌等^[22]的研究,在综合考虑研究区大小、实际情况和计算强度下,将研究区划分为4 993个1.2 km×1.2 km的评价单元。选取景观破碎度指数(C_i)、景观分离度指数(N_i)、景观优势度指数(D_i)、景观干扰度指数(E_i)、景观损失度指数(R_i)等常用指标构建评价体系,计算得到景观生态风险指数(landscape ecological risk index, ERI),各指标及计算公式如下。

(1) 景观破碎度指数(C_i):

$$C_i = \frac{n_i}{A_i} \quad (3)$$

式中: n_i 为第*i*类景观斑块的数量; A_i 为土地利用*i*类景观斑块的面积。

(2) 景观分离度指数(N_i):

$$N_i = \sqrt{\frac{n_i}{A}} \times \frac{A}{2A_i} \quad (4)$$

式中: A 为景观总面积。

(3) 景观优势度指数(D_i):

$$D_i = \frac{Q_i + M_i}{4} + \frac{L_i}{2} \quad (5)$$

式中: Q_i 为斑块频度,指斑块*i*出现的样方数占总样方数的比; M_i 为斑块密度,为*i*类景观斑块数量占总斑块数量的比值; L_i 为斑块*i*的面积占斑块总面积的比值。

(4) 景观干扰度指数(E_i):

$$E_i = aC_i + bN_i + cD_i \quad (6)$$

式中:权重系数 $a+b+c=1$ 参考前人研究^[23],对 a 、 b 、 c 3个系数分别赋值为0.5、0.3、0.2,表示外部因素对流域的干扰程度。

(5) 景观损失度指数(R_i):

$$R_i = E_i \cdot F_i \quad (7)$$

式中: F_i 为景观脆弱度指数。据已有研究^[24],将景观脆弱度对建设用地、林地、草地、耕地、水体、未利用地依次赋值为1,2,3,4,5,6后进行归一化处理得到。

(6) 景观生态风险指数(ERI):

$$ERI = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (8)$$

式中:ERI为网格评价单元的景观生态风险指数; n 为土地利用类型数量; A_{ki} 为第*k*个风险小区内*i*类景观的面积; A_k 为第*k*个风险小区的面积。

2.3.2 空间自相关分析

为进一步确定研究区域内景观生态风险是否存在相关性,运用空间自相关Moran's I 指数进行分析。空间自相关性是指在地理空间上越靠近的事物或现象越相似^[25]。全局莫兰指数反映整体的空间集聚特征,局部空间自相关指数呈现局部空间详细集聚特征。Moran's I 取值范围为 $[-1, 1]$,当Moran's $I > 0$ 时,表示存在空间正相关,且数值越接近1,说明集聚程度越高,反之空间差异越大。当Moran's I 为0时,表示不存在空间自相关性。

2.4 最优参数地理探测器

最优参数地理探测器能减少人为主观误差,提高各因子解释力。地理探测器要求所输入的自变量为类型量,数值量需进行离散化处理^[15],离散方法、分类数的解释力不同,所得到的结果也不同,将离散化方法设置为等间隔分类法、几何间距法、分位数法、自然断点法4种,分类数设置为3,5,7,9类,分别计算各个驱动因素在不同分类方法以及分类数下的解释强度 q 值,选取 q 值最高的离散方法、分类数作为该因子的离散化方法, q 值计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (9)$$

式中: q 取值范围在 $[0,1]$ 间, q 值越大表明影响因素作用越强; L 为研究区研究对象的分类数量; N_h , N 分别为第 h 类研究区样本数量和研究区整体样本数量; σ_h , σ 分别为第 h 类研究区景观生态风险方差和研究区整体景观生态风险方差。

2.5 PLUS 模型预测

2.5.1 PLUS 参数预设与多情景

为 PLUS 模拟预测共设置 3 种情景:自然发展(ND)情景,不受未来政策和规划影响,流域保持正常发展;经济发展(ED)情景,考虑现代化和经济发展需要,采取建设用地扩张策略;生态保护(EP)情景,减少生态用地向其他用地类型转换,旨在保护当地生态环境。参考雒舒琪等^[26]的研究,以及研究区实

际情况,调整后的转换成本矩阵设置详见表 2。

2.5.2 验证模型精度

相关研究^[26]表明,在 PLUS 模型中 kappa 和 OA 系数越接近 1,说明模拟精度越高。FOM 系数在 0.2 以上则说明模拟结果较可靠。kappa 系数、FOM 系数是精度验证的主要指标之一,OA 系数表明分类的正确性,也是验证精度的重要佐证之一。基于 1999 和 2011 年土地利用数据,先模拟至 2023 年土地利用情景,调整模型参数,精度达标后再预测 2035 年多情景下的景观生态风险。预测结果显示,kappa 系数为 0.68,OA 结果为 0.90,FOM 系数为 0.38,说明模型模拟效果较好,参数适配度较高,可以用于预测 2035 年 3 种情景下的景观生态风险分布和发展趋势。

表 2 打邦河流域 3 种情景下的转换成本矩阵

Table 2 Transfer cost transformation matrix under three scenarios in Dabang River basin

项目	自然发展(ND)情景						经济发展(ED)情景						生态保护(EP)情景						
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
d	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
e	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1

注:其中 a, b, c, d, e, f 分别代表耕地、林地、草地、水域、未利用地、建设用地等土地类型。

3 结果分析

3.1 土地利用动态演变趋势

打邦河流域土地利用类型分布以林地、耕地为主(图 1)。土地利用动态能有效反映土地类型变化的速度和剧烈程度。由图 2 可知,2013—2018 年和 2018—2023 年,变化最大的均为耕地转林地,转移面积为 223.51 和 329.58 km²,其次为林地转耕地,面积分别为 192.26 和 194.45 km²,草地、水域主要转为耕地,未利用地主要转为草地,建设用地主要转为水

域。其中未利用地、水域、建设用地类型转移较少,因此体现较不明显。

由表 3 可知,2013—2018 年,单一动态变化最剧烈的类型均为未利用地。2013—2023 年间,耕地面积持续减少,总体减少 178.81 km²,林地、未利用地、建设用地面积持续增加,其中林地共增加 212.29 km²。

草地在 2018—2023 年面积减少较大,为 71.17 km²。综合动态中,演变最激烈的时间段为 2018—2023 年,表明其土地利用转移更加频繁。

表 3 打邦河流域 2013—2023 年土地利用动态度

Table 3 Land use dynamics in Dabang River basin from 2013 to 2023

单位:%

研究时段	单一动态度(K)						综合动态度(M)
	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	
2013—2018年	-0.50	0.31	1.26	1.76	77.14	7.76	1.67
2018—2023年	-0.59	1.04	-8.61	-3.75	39.41	2.84	1.97

3.2 景观生态风险演变趋势

3.2.1 景观生态风险时空分异

景观生态风险分布与土地利用类型分布息息相

关。将生态风险结果使用克里金法进行平滑处理,并用自然断点法分类得到图 3。由图 3 可知,高风险区域主要分布在关岭县、六枝特区的西南部水域和

草地周围,中高风险区、中风险区则主要集中在西秀区。镇宁县高风险分布在草地密集处,中高风险分布在建设用地处。研究时段内,关岭县风险呈现先高后低趋势,镇宁县高风险面积先降低后增高,西秀区、六枝特区总体面积动态变化明显,西秀区在 2023 年出现新增高风险点。10 a 间,镇宁县高风险面积出现扩散,到 2023 年,中部形成明显高风险点,面积有外扩趋势。流域中高风险、中风险分布整体与草地、建设用地有关,低风险分布与林地密切相关。如西秀区建设用地

处中高风险分布明显,六枝特区建设用地处分布中高风险区域,关岭县西部边缘草地密集处出现块状高风险区域。由表 4 可知,流域生态风险中低风险、中风险面积占比都在 87% 以上,说明流域整体景观生态较好。10 a 间高风险面积先增大后减小,总体减少,所占比例下降到 0.5%,中风险面积逐渐减少,比例由 8.55% 减少到 7.1%。研究时段内,以 2018 年中高风险区域、高风险区域面积最大,以六枝特区和关岭县最明显,2023 年中低风险区域、低风险区域面积最大。

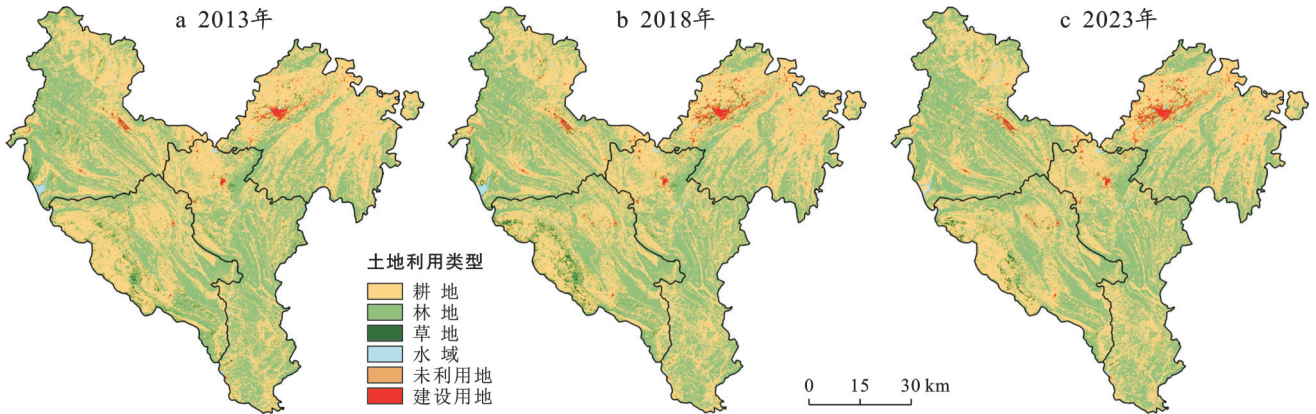


图 1 打邦河流域 2013—2023 年土地利用空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land use in Dabang River basin from 2013 to 2023

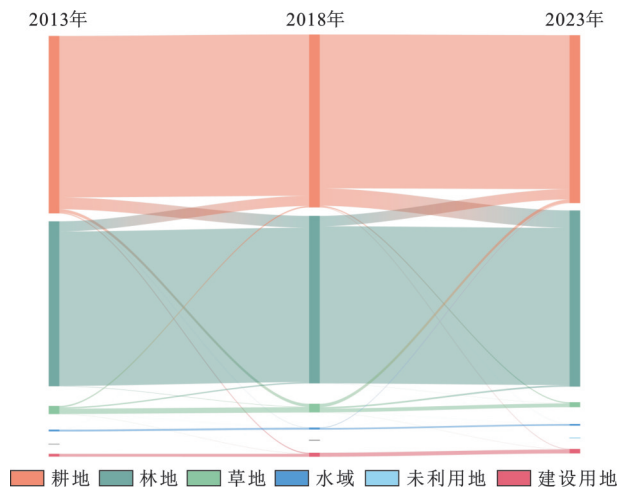


图 2 打邦河流域 2013—2023 年土地利用转移矩阵

Fig.2 Land use transfer matrix in Dabang River basin from 2013 to 2023

3.2.2 景观生态风险空间相关性

研究结果显示,2013—2023 年的全局莫兰指数结果均为正值,说明流域生态风险指数在地理空间上呈现集聚现象,具有由点到面辐射性扩散的特征,所得 p 值、 Z 得分均通过显著性检验。局部空间自相关结果显示,2013—2023 年, Moran's I 分别为 0.561, 0.662, 0.504, 表明流域生态风险指数的空间相关性先增强后减弱,局部空间关联程度分析图(local

indicators of spatial association, LISA)(图 4)显示,流域生态风险在空间上的分布主要以高-高集聚和低-低集聚为主,零星分布高-低集聚和低-高集聚。低-低集聚主要分布在林地处,以镇宁县面积最大。高值集聚主要分布在草地、水域、建设用地处,以关岭县面积最大。10 a 间,低-低集聚面积先增加再减少,呈现整体增加,而高-高集聚面积出现逐渐下降的特点。

3.3 景观生态风险驱动因子探测

流域景观生态风险具有集聚相似特征,可以利用地理探测器进一步分析流域景观生态风险背后的驱动因素,流域最佳离散方法及分类数如图 5 所示。生态风险单因子探测结果表明(图 6), NDVI(0.37)、夜间灯光(0.16)、植被覆盖(0.11)是驱动因素中解释力最强的 3 个因子。夜间灯光是社会因素中的重要指标,其值越高通常意味着更繁荣的社会发展程度以及更频繁的人类活动,而生态系统服务功能则有下降的可能。NDVI、植被覆盖度是生态系统功能的重要反映,表征植被对区域生态风险的影响程度。除坡向(0.001)外,其余因子在生态风险变化中均发挥重要作用。单因子探测结果表明,打邦河流域生态风险主要受自然因素影响,其次是社会因素的影响。生态风险双因子交互结果(图 7)为双因子增强

和非线性增强,其 q 值强于任何单一驱动因子,表明流域景观生态风险变化是不同因子交互产生的结果。解释强度最大的3个交互因子分别为土壤类型 \cap NDVI(0.452)、到铁路距离 \cap NDVI(0.441)、人口分布 \cap NDVI(0.434),其中,土壤类型和NDVI的交互作用对流域景观生态风险变化最为关键。土壤类型和人口分布都能一定程度上影响NDVI,土壤土质会

影响NDVI指数,土质肥力好、营养相对较高的地区,NDVI指数会相应增加,从而减少景观生态风险。到铁路距离、人口分布因子则反映了人为干扰和NDVI的关系,两个因子在建设用地处分布区域较为重合,影响了NDVI指数。交互探测结果表明NDVI和社会因素的复合作用对研究区生态风险变化的影响最为关键。

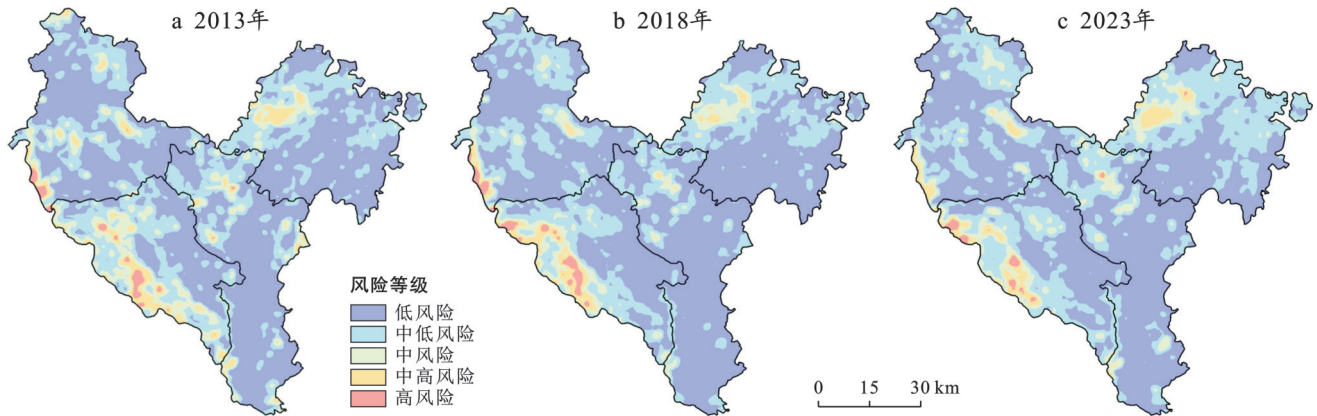


图3 打邦河流域2013—2023年景观生态风险空间分布

Fig.3 Spatial distribution of landscape ecological risk in Dabang River basin from 2013 to 2023

表4 打邦河流域2013—2023年流域景观生态风险面积与比例

Table 4 Area and proportion of landscape ecological risk in Dabang River basin from 2013 to 2023

风险类型	2013年		2018年		2023年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低风险区	4 363.051	65.11	3 723.101	55.56	3 871.664	57.77
中低风险区	1 541.600	23.00	2 124.850	31.71	2 151.926	32.11
中风险区	573.184	8.55	549.023	8.19	467.027	7.10
中高风险区	183.537	2.74	234.983	3.51	166.874	2.49
高风险区	40.160	0.60	69.575	1.04	35.043	0.52

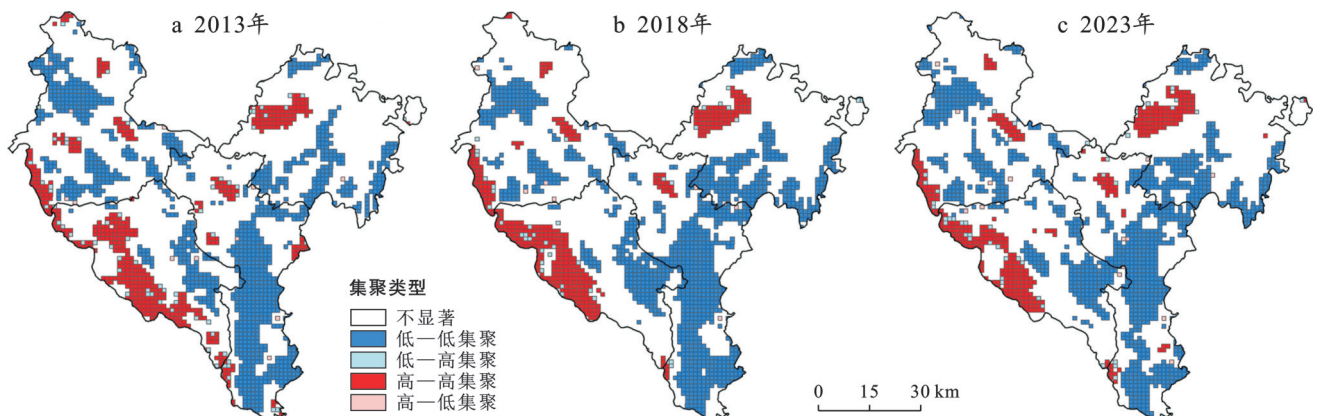


图4 打邦河流域2013—2023年流域空间关联程度分析(LISA)

Fig.4 Local indicators of spatial association (LISA) analysis of Dabang River basin from 2013 to 2023

3.4 多情景预测下的景观生态风险

基于土地利用、景观生态风险分布和驱动因子探测,可以预测常见的3种情景下的景观生态风险。将基于PLUS生成的2035年ND,ED,EP这3种情景

的土地利用数据,按照上文处理得到2035年流域景观生态风险时空分布图(图8),并以2023年景观生态风险值为标准,对3种情景的生态风险值进行重分类。3种情景预测下,高风险、中高风险的与目前流域

景观生态风险分布较类似。ED情景下,景观生态风险高风险区面积最大,低风险区面积最小(表5),EP情中高风险面积最低,低风险面积最大,因而3种情景中,EP情景景观生态风险最低。3种模拟情景下,关岭县边缘的高风险区面积最大,风险总体较高。

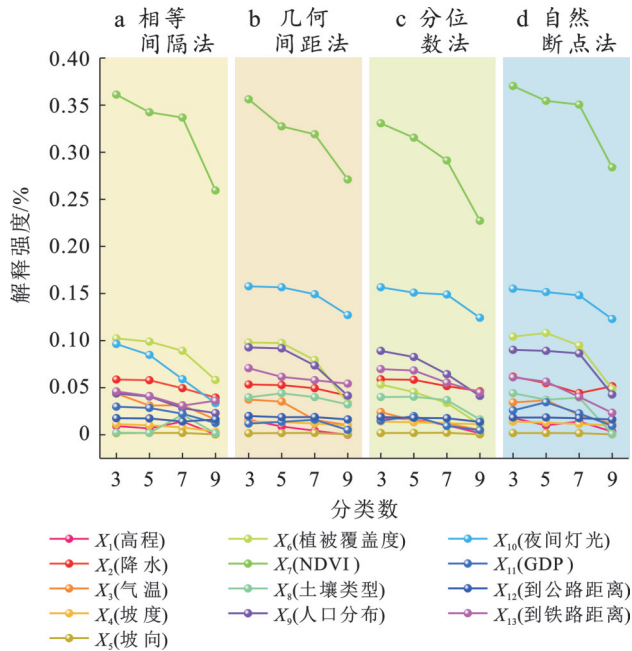


图5 打邦河流域景观生态风险各驱动因子分类数及离散结果

Fig.5 Classification numbers and discrete results of each driving factor of landscape ecological risk in Dabang River basin

与2023年相比,ND和ED情景下,高风险都有不同程度的增加,但西秀区、镇宁县高风险区域整体转化为中高风险,两区县整体风险出现下降,同样下降的还有六枝特区东部,其中高风险区域向中风险转移,中低风险面积出现相应增加。EP情景与2023年相比,镇宁县中部的高风险转化为中高风险,西秀区高风险区域分布转移,关岭县中高风险降低,整体生态好转。EP情景是未来较为可能的发展路径,只有EP情景景观生态风险比2023年略低,其余情景高风险、中风险面积增加,结合流域内经济林业发展的背景,可以通过进一步发展林业和立体农业耕作体系提高区域经济收入。

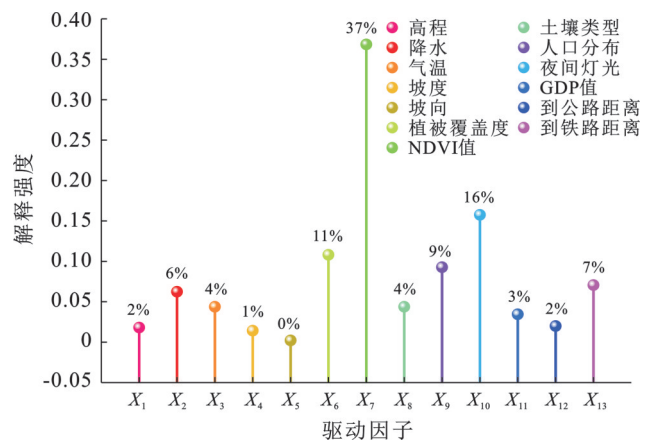


图6 打邦河流域景观生态风险单因子探测结果
Fig.6 Single-factor detection result of landscape ecological risk in Dabang River basin

表5 2035年流域多情景模拟下景观生态风险面积与比例

Table 5 Landscape ecological risk area and proportion under multi-scenario simulation of basin in 2035

风险类型	自然发展情景(ND)		经济发展情景(ED)		生态保护情景(EP)	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低风险区	3 630.748	54.18	3 612.124	53.90	4 017.086	59.94
中低风险区	2 457.848	36.68	2 484.193	37.07	2 041.509	30.46
中风险区	460.134	6.87	452.440	6.75	453.342 3	6.76
中高风险区	109.636	1.64	107.851	1.61	159.244	2.38
高风险区	43.167	0.64	44.925	0.67	30.350	0.45

4 讨论

4.1 土地利用演变分析

整个研究时段,耕地面积持续减少,林地面积持续增加,这可能与流域经济发展、农业转型、生态保护政策有关。一方面打邦河流域林地、草地、水域类型转入耕地面积较大,可能是流域人口增长产生大量的粮食生产、农业发展需求;另一方面是当地政府引导推进了农业现代化、科技化发展^[27],土地生产力提高,使得耕地面积出现下降。林地面积增加来源

于耕地、草地的持续转入,当地退耕还林工程、生态保护政策的实施与强化,使得一批不适合耕种的土地(如坡度大于25°的耕地)恢复成林地,促使林地面积出现大幅上升。未利用地其面积持续增加主要来源于草地、耕地类型的转移(图2),其中以草地转移面积最大。未利用地单一动态率最高,是因为其短时间内面积增长较快,相比2018年,2023年未利用地面积增长更大,但因为2013—2018时间段内未利用地的初期面积较小,因此反映出来的单一动态率反而比2018—2023年高。

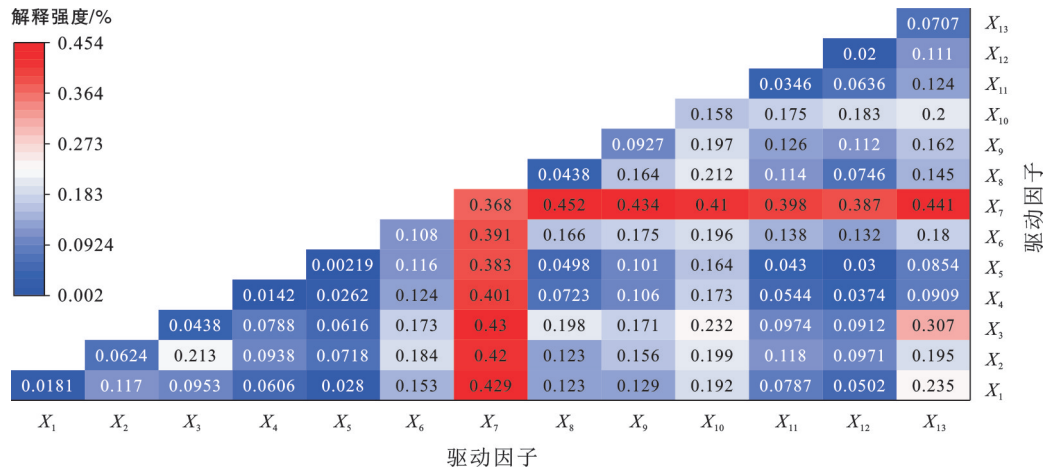


图 7 打邦河流域景观生态风险因子交互探测结果

Fig.7 Interactive detection results of landscape ecological risk factors in Bangbang River basin

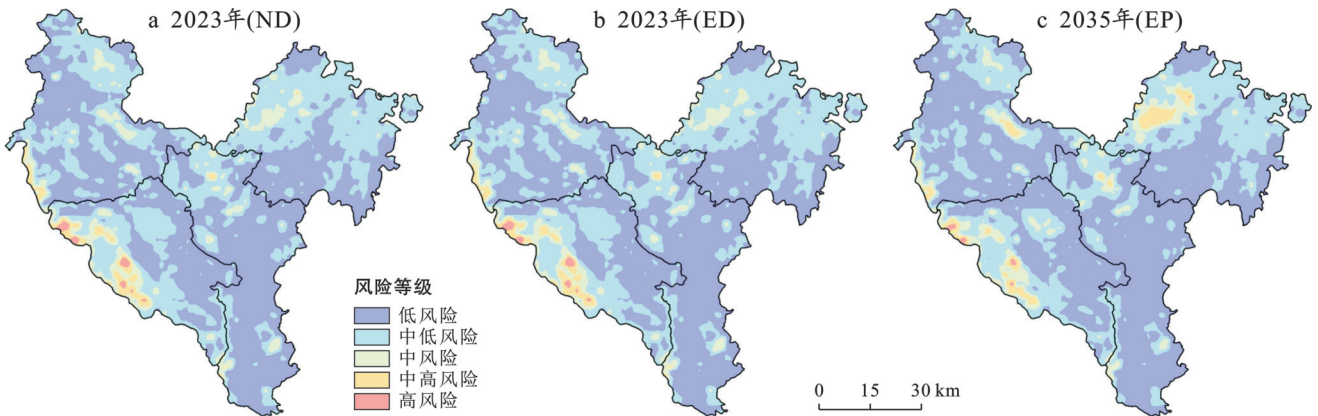


图 8 打邦河流域多情景预测下景观生态风险空间分布

Fig.8 Spatial distribution of landscape ecological risk under multi-scenario prediction in Dabang River basin

4.2 景观生态风险分析

流域林地分布集中处,生态风险分布相对较低。林地人为干扰较弱,生态连通性功能较好,容易出现低-低空间集聚现象,而高风险、中高风险、中风险分布总体与草地、水域、建设用地分布相类似,形成高-高集聚现象。中高风险和高风险区分布与植被覆盖较低的草地一致,这可能是因为流域内草丛的斑块面积较小,数量多,破碎度较大,随着草地退化,斑块越发孤立,导致生态系统内部连通性和物质交换水平受到一定影响,难以维持生态系统稳定,导致高风险、中高风险程度加剧,典型代表如关岭县、六枝特区。水域蒸发大,其周围人类活动频繁,导致面积变化波动较大,因此景观生态风险程度总体较高,如西秀区西部、六枝特区西南部等地。建设用地与草地穿插的区域风险较高(如西秀区),但单一的建设用地处则风险较低(如六枝特区西南部、镇宁县中部),这可能与单一建设用地地类生态稳定性较高有关。

4.3 流域景观生态风险驱动因素分析

景观生态风险解释力最强的单一驱动因素主要

为NDVI、夜间灯光、植被覆盖度。夜间灯光是人类活动和干扰的反映,其解释力较强,说明流域的景观生态风险受人为干扰作用较大,这与杨荣钦等^[28]的研究分析一致。而植被覆盖度和NDVI因子是流域内植被覆盖度和生长情况的重要指标,植被覆盖度低,NDVI低的地方相应的景观生态风险较高。如六枝特区西部边缘、西秀区北部和关岭县西部的NDVI值、植被覆盖度较低,景观生态风分布为中风险、中高风险。单因子探测中解释力较强的社会因素还包括人口分布(9%),作为影响景观生态风险的重要社会因子,人口密集区域往往伴随着更高的土地利用强度和人类活动程度。流域低风险、中风险分布与人口分布因子有关,多个人口分布处景观生态风险多为中低风险,只有个别人口密度大的区域景观生态风险升为中风险。但其单因子解释力不高,可能是因为流域人口密度不大,对生态系统的扰动较低,整体生态风险变化影响较小。到铁路距离(7%),也是一个重要的社会驱动因素,其铁路建设和运营会对周边生态环境产生影响。例如,铺设轨道、运营等

干扰了原有生态循环、物质交换过程,降低了生态廊道的连通性,增加周围的生态风险。沪昆铁路线横穿整个流域,是重要的交通基础设施路线,经过六枝特区、关岭县、西秀区等中高风险区域,特别是建设用地分布处。这与建设用地分布处一般经济发展较好,人口集中,交通需求较大有关,人口与需求影响铁路路线的布局,而铁路布局又会加剧周围人口聚集、人为干扰和景观破碎程度,进一步扰动当地生态系统。景观生态风险与铁路运营、布局有关的结论与沙清泉等^[29]相似,虽然该研究区位于青藏高原,但铁路修建运营后,周围景观生态风险确实升高,说明了即使在高原区域,景观生态风险升高与铁路运营布局依然有关。双因子探测中,NDVI与其他因子交互的解释力均较高,这与王成武等^[30]的结论一致。根据图7可知,在交互因子探测中,交互作用解释力超过40%的因子有8个,自然因素个数与社会因素个数相差不大,说明两者在景观生态风险驱动中均发挥重要作用。值得注意的是,没有两个社会因素的因子交互作用超过40%,对社会因子交互结果进行排序,发现两个社会因子交互作用最大只达到20%,约为NDVI \cap 其他因子的1/2,而单纯的自然因素交互解释力虽然比社会因子大,除土壤类型 \cap NDVI(0.452),其他均未超过人口分布 \cap NDVI(0.434),表明流域景观生态风险变化是自然因素与社会因素共同作用的结果,并且自然因素贡献相对较大,而非单纯社会因素造成的结果。

4.4 多情景景观生态风险分析

ED情景景观生态风险最高,ED情景与ND情景发展较相似,只有在高风险、中风险上有些许不同,比如西秀区中高风险面积ND情景大于ED情景,说明以当下两种模式发展而不加以管控和保护,流域整体生态风险将会扩散。而EP情景下景观生态风险比2023年稍低。这是因为在生态保护情景下,生态功能增强,物质能量交换阻力较小,良好遏制了生态风险扩张。但是与其他情景相比,EP情景中高风险面积最高、中低风险面积最低,这可能与预测时对草地的成本矩阵和需求量参数设置有关。草地类型具有一定的生态价值,是生态保护过程中的重要部分,参数调整时增加了其需求量,导致EP情景下中高风险出现一定的扩散。一般情况下,经济发展会导致大量的土地转移成建设用地或者工业用地,以满足现代化、科技化的发展需要,使得斑块更加破碎和分离,导致景观生态风险大幅度升高,但ED情景下预想的高风险面积、中高风险面积扩张并未出现。虽然ED情景生态风险在多情景预测

中高风险区面积最大。生态风险未出现大面积扩散的现象与李保杰等^[31]研究预测结果相似,该研究认为建设用地扩张整合了破碎的土地斑块,使得景观斑块更稳定。ED情景中,建设用地扩张,挤压草地空间,建设用地景观损失度较低,其扩张会整合斑块,使其生态系统总体稳定,缓解生态风险。按照流域目前的发展,在短时间内进行经济建设和建设用地扩张,虽然一定范围内会导致中高风险区域增加,但不会造成大面积风险升高。3种情景中,EP场景更适合流域将来的发展道路,一方面该情景实现了绿色发展,提高了生产效率,另一方面其能有效平衡生态保护,践行生态文明保护理念,缓解生态保护和经济发展间的冲突,实现人地关系的和谐,推动流域可持续发展。

研究探讨了喀斯特流域景观生态风险分布、成因以及未来多情景预测下的景观生态风险状况,完善了喀斯特流域景观生态风险方面的相关研究,为喀斯特流域景观生态风险防治提供了一定的参考和借鉴,具有一定创新性和价值。受限于篇幅,该研究不足之处和未能解决的问题在于,弱化了当下生态风险、未来生态风险的管治措施以及有效管治措施的进一步探讨,未来建议结合生态修复理论、生态价值理论等进一步探讨有效的风险分级管治措施,进一步转化高风险区域,降低流域景观生态风险,增强生态系统抗干扰能力。该研究前景广阔,虽然探讨了喀斯特流域景观的生态风险,但随着全球气候变化和城市化的加剧,喀斯特流域景观生态风险依旧面临诸多挑战和影响,如何化解其生态风险依然是重要的课题。

5 结论

(1) 土地利用转移中,转移最大的两者为耕地和林地,两者动态变化与当地农业转型和生态环境保护相关。流域生态风险的空间集聚性先增强后减弱。

(2) 流域高风险、中高风险区主要出现在关岭县、六枝特区边缘处和西秀区西部等草地、水域、建设用地分布密集处。流域景观生态风险是自然因素与社会因素交互影响的结果,其中,NDVI是单因子探测中解释强度最大的因子,交互解释力最强为土壤类型 \cap NDVI。

(3) 预测情景中,ED情景景观生态风险最高。EP情景下,景观生态系统稳定性高,生态风险最低,兼顾流域可持续发展和生态保护,是推进美丽中国建设、可持续发展最可取的道路。

参考文献(References)

- [1] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.
Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment [J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(4):664-677.
- [2] 曹祺文,张曦文,马洪坤,等.景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK[J].地理学报,2018,73(5):843-855.
Cao Qiwen, Zhang Xiwen, Ma Hongkun, et al. Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services: ESRISK [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(5):843-855.
- [3] 陈辉,刘劲松,曹宇,等.生态风险评价研究进展[J].生态学报,2006,26(5):1558-1566.
Chen Hui, Liu Jinsong, Cao Yu, et al. Progresses of ecological risk assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(5):1558-1566.
- [4] Hunsaker C T, Graham R L, Suter G W, et al. Assessing ecological risk on a regional scale [J]. Environmental Management, 1990,14(3):325-332.
- [5] Wallack R N, Hope B K. Quantitative consideration of ecosystem characteristics in an ecological risk assessment: A case study [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2002,8(7):1805-1814.
- [6] Ahrens C, Chung J, Meyer T, et al. Bentgrass distribution surveys and habitat suitability maps support ecological risk assessment in cultural landscapes [J]. Weed Science, 2011,59(2):145-154.
- [7] Ayre K K, Landis W G. A Bayesian approach to landscape ecological risk assessment applied to the upper grande ronde watershed, Oregon [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2012,18(5):946-970.
- [8] 方林,方斌,刘艳晓,等.长三角地区景观生态风险与人类活动强度的响应及其时空关联[J].农业工程学报,2022,38(22):210-219.
Fang Lin, Fang Bin, Liu Yanxiao, et al. Scale response and spatiotemporal correlations between landscape ecological risk and human activity intensity in the Yangtze River delta region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(22):210-219.
- [9] Kanwar P, Bowden W B, Greenhalgh S. A regional ecological risk assessment of the kaipara harbour, New Zealand, using a relative risk model [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2015,21(4):1123-1146.
- [10] 邓楚雄,龚雅菁,张光杰,等.基于景观生态风险评价的湘江流域生态安全格局构建[J].水土保持通报,2024,44(3):145-158.
Deng Chuxiong, Gong Yajing, Zhang Guangjie, et al. Construction of an ecological security pattern in Xiangjiang River basin based on landscape ecological risk assessment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):145-158.
- [11] Wang Hong, Liu Xingming, Zhao Chuanyan, et al. Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National Nature Reserve in Gansu Province, China [J]. Ecological Indicators, 2021,124:107454.
- [12] 许妍,高俊峰,赵家虎,等.流域生态风险评价研究进展[J].生态学报,2012,32(1):284-292.
Xu Yan, Gao Junfeng, Zhao Jiahu, et al. The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(1):284-292.
- [13] Mondal B, Sharma P, Kundu D, et al. Spatio-temporal assessment of landscape ecological risk and associated drivers: A case study of Delhi [J]. Environment and Urbanization ASIA, 2021,12(1_suppl):S85-S106.
- [14] 张学渊,魏伟,周亮,等.西北干旱区生态脆弱性时空演变分析[J].生态学报,2021,41(12):4707-4719.
Zhang Xueyuan, Wei Wei, Zhou Liang, et al. Analysis on spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in arid areas of Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(12):4707-4719.
- [15] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [16] 杨智勇,牛健植,樊登星,等.基于SWAT和PLUS模型的窟野河流域径流对土地利用变化的响应及预测[J].水土保持学报,2024,38(1):289-299.
Yang Zhiyong, Niu Jianzhi, Fan Dengxing, et al. Response and prediction of runoff to land use change in kuye river basin based on SWAT and PLUS models [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):289-299.
- [17] 苏维词.贵州喀斯特山区生态环境脆弱性及其生态整治[J].中国环境科学,2000,20(6):547-551.
Su Weici. Eco-environmental fragility in Guizhou karst mountain region and its ecological rehabilitation [J]. China Environmental Science, 2000,20(6):547-551.
- [18] 刘洪,伍金雄.浅析打邦河流域径流变化的影响因素[J].中国水运,2008,8(7):91-92.
Liu Hong, Wu Jinxiong. Analysis on influencing factors of runoff change in Dabang River basin [J]. China Water Transport, 2008,8(7):91-92.

- [19] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [20] Kang Lanxin, Yang Xu, Gao Xin, et al. Landscape ecological risk evaluation and prediction under a wetland conservation scenario in the Sanjiang Plain based on land use/cover change [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 162:112053.
- [21] 张强, 陆荫, 郭翔, 等. 基于土地利用变化的甘南藏族自治州景观生态风险评估[J]. *草业科学*, 2024, 42(5): 1301-1312.
Zhang Qiang, Lu Yin, Guo Xiang, et al. Landscape ecological risk assessment of water conservation areas based on land use change: A case study of Gannan Tibetan Autonomous Prefecture [J]. *Pratacultural Science*, 2024, 42(5):1301-1312.
- [22] 张学斌, 石培基, 罗君, 等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析: 以石羊河流域为例[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(3):410-419.
Zhang Xuebin, Shi Peiji, Luo Jun, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: A case study on Shiyang River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 410-419.
- [23] 司琪, 樊浩然, 董文明, 等. 新疆叶尔羌河流域景观生态风险评价及预测[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(4):684-696.
Si Qi, Fan Haoran, Dong Wenming, et al. Landscape ecological risk assessment and prediction for the Yarkant River basin, Xinjiang, China [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(4):684-696.
- [24] 吕乐婷, 张杰, 孙才志, 等. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J]. *生态学报*, 2018, 38(16): 5952-5960.
Lü Leting, Zhang Jie, Sun Caizhi, et al. Landscape ecological risk assessment of Xi River basin based on land-use change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5952-5960.
- [25] 龚建周, 夏北成, 刘彦随. 基于空间统计学方法的广州市生态安全空间异质性研究[J]. *生态学报*, 2010, 30(20):5626-5634.
Gong Jianzhou, Xia Beicheng, Liu Yansui. Study on spatial-temporal heterogeneities of urban ecological security of Guangzhou based on spatial statistics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20):5626-5634.
- [26] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(2):300-314.
Luo Shuqi, Hu Xiaomeng, Sun Yuan, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled PLUS-InVEST model [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2):300-314.
- [27] 蔡甫格, 陈红艳, 张秀伟. 安顺市农业科技园区高质量发展现状与策略研究[J]. *智慧农业导刊*, 2024, 4(6): 42-45.
Cai Fuge, Chen Hongyan, Zhang Xiuwei. Research on the current situation and strategies for high-quality development of Anshun Agricultural Science and Technology Park [J]. *Journal of Smart Agriculture*, 2024, 4(6): 42-45.
- [28] 杨荣钦, 肖玉磊, 池苗苗, 等. 近 20 a 塔里木河流域人类活动及景观生态风险时空变化[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(6):1010-1020.
Yang Rongqin, Xiao Yulei, Chi Miaomiao, et al. Temporal and spatial variations of human activities and landscape ecological risks in the Tarim River basin, China, during the last 20 years [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(6):1010-1020.
- [29] 沙清泉, 黄麟, 樊江文, 等. 青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险时空动态及其驱动机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(19):8726-8736.
Sha Qingquan, Huang Lin, Fan Jiangwen, et al. Spatio-temporal dynamics and their driving mechanisms of the landscape ecological risk along the Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet railway [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19):8726-8736.
- [30] 王成武, 尧良杰, 汪宙峰, 等. 2000—2020 年三江源地区景观生态风险评价及驱动因素[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(11):1908-1920.
Wang Chengwu, Yao Liangjie, Wang Zhoufeng, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factors analysis in the three river source region from 2000 to 2020 [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(11): 1908-1920.
- [31] 李保杰, 杜欣颖, 褚帅. 淮海经济区景观生态风险多情景模拟[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(4):2112-2121.
Li Baojie, Du Xinying, Chu Shuai. Multi-scenario simulation of landscape ecological risk assessment in Huaihai economic zone [J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(4):2112-2121.