

滇西北高山峡谷区景观生态风险评价及驱动力识别

杨博文^{1,2}, 刘凤莲^{2,3}, 罗芹芹², 高梓燚⁴

(1. 河南大学 地理科学与工程学部 地理科学学院, 郑州 450046;

2. 云南财经大学 国土资源与持续发展研究所, 昆明 650221; 3. 云南财经大学

云南省服务计算重点实验室, 昆明 650221; 4. 云南财经大学 国际工商学院, 昆明 650221)

摘要: [目的] 对滇西北高山峡谷区景观生态风险进行评估可构建区域生态安全格局基础, 为筑牢我国西南生态安全屏障提供重要参考依据。[方法] 基于土地覆被数据, 采用景观生态风险评价模型、轨迹分析和地理探测器对滇西北高山峡谷区的景观生态风险时空演变格局和驱动力进行研究。[结果] 林地是研究区的优势景观, 草地次之, 耕地、水域、建设用地和其他用地占比相对较少。研究区的风险水平常呈现出以高水平风险区域为中心风险水平由内向外逐级递减的环状分布状态。景观生态风险稳定型变化类型所占面积较大。自然因素是影响滇西北高山峡谷区景观生态风险空间分布的主要原因, 特别是高程和年均气温影响力较大; 因子间的交互作用均呈现出双因子增强和非线性增强, 年均气温与高程交互作用显著增强。[结论] 滇西北高山峡谷区景观生态风险整体较低, 但高风险区域的分布与人类活动区域高度重合, 高程和年均气温对景观生态风险空间分布的影响较大。

关键词: 景观生态风险; 风险评价; 驱动因素; 转移路径; 滇西北高山峡谷

中图分类号: P901

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0374-12

Assessment of landscape ecological risk and identification of driving forces in alpine-canyon region of northwestern Yunnan

Yang Bowen^{1,2}, Liu Fenglian^{2,3}, Luo Qinqin², Gao Ziyi⁴

(1. College of Geographical Sciences, Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China; 2. Institute of Land & Resources and Sustainable Development, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Service Computing, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China; 4. International Business School, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China)

Abstract: [Objective] Assessing the landscape ecological risk in the alpine-canyon region of northwestern Yunnan can lay a foundation for constructing regional ecological security patterns and provide important references for strengthening the ecological security barrier in southwestern China. [Methods] Based on land cover data, the spatiotemporal evolution patterns and driving forces of landscape ecological risk in the alpine-canyon region of northwestern Yunnan were studied using landscape ecological risk evaluation model, trajectory analysis, and geodetector. [Results] Forest was the dominant landscape in the study area, followed by grassland, while the proportions of cultivated land, water areas, construction land, and other land types were relatively small. The risk level of the study area often showed a circular distribution pattern where the risk level gradually decreased outward with high-risk areas at the center. The stable change type of landscape ecological risk occupied a relatively large

收稿日期: 2025-06-17

修回日期: 2025-07-09

接受日期: 2025-07-25

资助项目: 国家社会科学基金一般项目(25BJY175); 国家乡村振兴局委托项目(80026091881); 云南省服务计算重点实验室开放课题(YNSC24305); 云南省教育厅科学研究资助项目(2025Y0762, 2024J0634); 云南财经大学科学研究基金项目(2025JD01); 云南财经大学引进人才项目(2024D50)

第一作者: 杨博文(1997—), 女, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事景观生态学研究。E-mail: 1342350538@qq.com

通信作者: 刘凤莲(1981—), 女, 山东临清人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事土地利用与区域可持续发展研究。E-mail: zz2105@ynufe.edu.cn

area. Natural factors were the main reasons affecting the spatial distribution of landscape ecological risks in the alpine-canyon region of northwestern Yunnan, with elevation and annual average temperature having particularly strong effects. The interactions among factors all showed two-factor enhancement and nonlinear enhancement, and the interaction between the annual average temperature and elevation was significantly enhanced. [Conclusion] The overall landscape ecological risk is relatively low in the alpine-canyon region of northwestern Yunnan, but the distribution of high-risk areas is highly consistent with human activity areas. Elevation and annual average temperature have a significant impact on the spatial distribution of landscape ecological risk.

Keywords: landscape ecological risk; risk assessment; driving factors; transfer trajectory; alpine-canyon region of northwestern Yunnan

土地资源是人类赖以生存的物质基础,是人类生产和生活的依托,人类为了满足生产生活的需要,对土地覆被进行大范围、深程度的开发利用,人类频繁改变土地利用格局,成为局部区域景观生态风险变化的重要因素^[1],威胁着社会和自然系统的可持续发展^[2],随着我国生态文明建设的推进以及筑牢西南安全屏障的建设,景观生态风险评价为区域生态安全格局构建、生态环境修复等工作的进行和相关决策制定提供了重要依据^[3]。

景观生态风险评价是景观生态学与生态风险评价理论的交叉应用领域。Hunsaker等开创性地将景观生态学和生态风险评价框架融合,为解决生态环境问题提供新的思考方向^[4]。Ayre基于生态风险评估框架,研究流域的景观生态风险^[5]。我国景观生态风险评价的研究始于20世纪80年代,景观生态风险的研究已经成为目前研究的热点问题,主要集中在景观生态风险的时空演变^[6]、驱动力分析等^[7]方面,研究方法多采用景观生态风险评价模型的构建来评价区域景观生态风险^[8]。丁金华等通过构建景观生态风险评价模型,分析了苏南水网景观生态风险的时空分异特征^[9]。杨帆等立足风险发生的“历史—现状—未来”动态视角探讨景观生态风险的空间分异格局,继而制定空间分区管控策略^[10]。针对景观生态风险驱动因素,较多的研究成果大致可以分为定性分析和定量分析。从定性研究方面看, Mattson等对田纳西河流域进行研究,强调人类诱发的压力源的频率和严重程度,以及生物驱动因素对流域景观生态风险的影响程度^[11]。张辉等基于景观生态风险评估体系,表明农用地开发政策是塔里木河干流景观生态风险增加的主要因素^[12]。纪雨欣等认为朝阳县景观生态风险是耕地转为城镇用地和森林退化导致的^[13]。从定量研究方面看,学者对于区域景观生态风险驱动因子的探测主要使用普通最小二乘法^[14]、地理加权回归^[15]和地理探测器等^[16]方法对自然因素和社会经济因素^[17]进行探究。Mondal等使用

OLS和GWR模型,利用Landsat 5(TM)和Landsat 8(OLI)数据,将城市扩张导致的景观破碎化评价与土地利用/土地覆盖脆弱性评价相结合,建立了城市边界扩展风险评价指标体系^[18]。关于景观生态风险已有丰富的研究成果,但也存在一定不足,其一是针对我国西南高山峡谷区的研究相对较少,虽然景观生态风险大多处于一个低风险和中低风险水平,但滇西北高山峡谷区因其特殊地理位置,影响着国内外水域生态安全,生态脆弱度和环境敏感度较高,对其进行监测十分必要。其二是现有研究大多从行政区划角度去分析局部景观生态风险,但本研究采用水文分析方法对研究区进行流域提取,突破以往按照行政区划进行研究边界的划分,避免了因为行政边界对于区域生态的研究出现急剧分割的情况,使景观生态风险研究更加具有完整性。

云南省是构建国家生态安全的关键区域之一^[19],肩负着筑牢西南生态安全屏障,争当生态文明建设排头兵的重任。滇西北高山峡谷区特殊的地理和气候条件造成地震、地质、气象等各类灾害多发频发,影响着国内外水域生态安全,生态脆弱度和环境敏感度较高,导致区域生态十分脆弱,因此需要利用土地利用数据对景观生态风险进行相关研究,为区域生态安全保护工作提供依据,维护地区生态安全。因此,本研究以2000—2020年的土地利用数据为基础,对区域景观生态风险进行评价,探究景观生态风险的时空演变、迁移路径以及影响因素。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

滇西北高山峡谷区(24°55′27″—29°13′30″N, 98°07′57″—100°35′29″E)涵盖了“三江并流”世界自然遗产核心区,属青藏高原南延、向云贵高原过渡的横断山脉的纵谷地带,研究区山高坡陡,气候多样,形成了“一山分四季,十里不同天”的地理奇观,云集了多种气候类型和动植物群落类型,也因其海拔高差较大,自

然灾害频发,导致适宜居住空间较为有限,各种因素造成研究区生态敏感性高、人地矛盾突出,经 GIS 水文分析提取的研究区面积约为 4.6 万 km²(见图 1)。



图 1 研究区区位图

Fig. 1 Location map of study area

1.2 数据来源

土地利用数据、高程数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。行政边界来自标准地图(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)。NDVI 数据根据美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)逐月平均 NDVI 数据计算整理(<https://www.earthdata.nasa.gov>), PM_{2.5} 排放量数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdac.ac.cn>)。城镇中心点数据来自地理遥感生态网(<https://www.gisrs.cn>)。河网数据、年均气温、年均降水量、夜间灯光数据、地均 GDP 及人口密度数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。不透水面数据(Global Artificial Impervious Area, GAIA)来自中国农业大学土地科学与技术学院的城市环境监测及建模团队(https://www.x-mol.com/groups/li_xuecao)。

1.3 数据预处理

1.3.1 流域提取 基于 ArcGIS 水文分析模块对研究区数字高程进行流域提取,首先依照云南行政边界对全国 DEM 图像进行裁剪;其次对裁剪过后的数字高程进行填洼、水流方向和流量计算等操作;再利用栅格计算器对研究区流量 $\geq 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 的河流进行提取,并进行研究区河网的构建;依据河网和流向数据

对所有水域进行盆域分析,然后,依据中国科学院地理所发布的中国一级河流空间分布数据集确定滇西北高山峡谷区的位置,并选择对应的盆域。

1.3.2 驱动因素数据处理 对选定的驱动因子栅格数据进行投影处理,其次裁剪出研究区的驱动因子栅格数据,并按照自然断点法对各驱动因素栅格数据进行离散化处理,将各年份的景观生态风险值与离散后的驱动因子数据采样到区域景观生态风险评价单元中心点上,最后将采样的景观生态风险数据和驱动因子数据导入地理探测器中探测各因子对区域景观生态风险的作用力大小以及各因子交互后对研究区景观生态风险的解释力大小。

2 研究方法

2.1 景观生态风险评价模型

2.1.1 评价小区划分 在景观生态学中,评价小区面积为平均斑块面积的 2~5 倍为最佳^[20]。滇西北高山峡谷区的最佳评价小区面积为 0.66~173.15 km²,考虑到研究区景观空间异质性较大,区域景观生态风险需要细化处理,综合考虑数据处理的便捷性与研究的科学性,将最佳斑块面积划分为 3 km × 3 km 的评价单元。

2.1.2 景观生态风险评价 景观生态风险评价模型(Ecological Risk Index, ERI)表达在生态系统中,各景观类型在自然和人类活动的影响下所受到生态损失大小。计算公式如下:

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

式中:ERI 为景观生态风险指数; n 为评价单元内景观类型的数量; A_{mi} 为评价单元中第 m 类景观的面积; A_k 为评价单元的面积; R_i 为景观损失度,各指数计算过程及指标含义见表 1。

2.2 空间地理探测器

2.2.1 指标选取 共选取包括“自然因素—区域可达性—社会经济”3 个维度 12 项具体评价指标进行测度,自然因素中选择高程(X_1)、坡度(X_2)、NDVI(X_3)、PM_{2.5} 含量(X_4)、年均气温(X_5)和年均降水量(X_6)6 项指标,因研究区地形与气候环境复杂多样,气候与地形因素对于研究区的景观生态风险可能存在较大的影响,因此选择高程、坡度、年均气温和年均降水量等指标是为了探索自然作用力对景观生态风险的影响力大小,PM_{2.5} 含量探寻主要的近地表空气污染物对景观生态风险的影响力的影响的大小,NDVI 为归一化植被指数,表示植被覆盖程度及其生长活力,与研究区景观类型覆盖程度可能存在协同作用,因此探究其影响力大小和影响程度;区域可达性对于

区域景观生态风险的空间分布可能存在相关关系,选择距城镇中心距离(X_7)和距河流距离(X_8)2项指标作为区域可达性因素,探测道路与河流分布对于区域景观生态风险的驱动力大小;景观生态风险不仅与自然因素和区域可达性指标密切相关,人类活动对区域景观生态风险的影响程度也越来越大,因此选择人口

密度(X_9)、地均GDP(X_{10})、不透水面(X_{11})和夜间灯光指数(X_{12})4项指标进行因子探测,探究人类的社会经济活动强度对于滇西北高山峡谷区的景观生态风险的影响程度,其中人口密度和地均GDP可以广泛代表人类活动强度,不透水面和夜间灯光指数可以代表区域建设强度和资源使用程度。

表1 景观风险值计算表
Table 1 Calculation of landscape risk values

景观风险评价	计算方程	指标含义
景观干扰度 E_i	$E_i = aC_i + bN_i + cD_i$	a, b 和 c 分别为 C_i, N_i 和 D_i 的权重,且 $a + b + c = 1$,根据相关参考文献 ^[21-22] 对 a, b 和 c 这3个指标分别赋以 0.5, 0.3, 0.2 的权值
景观损失度 R_i	$R_i = E_i \cdot F_i$	—
景观脆弱度 F_i	归一化处理	将研究区景观类型的脆弱性分为6级,从高到低依次为其他用地、水域、耕地、草地、林地、建设用地,根据相关研究 ^[23] 进行归一化处理后得到各景观的脆弱度指数 F_i
景观破碎度 C_i	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$	n_i 为景观类型 i 的斑块数; A_i 为景观类型 i 的总面积
景观分离度 N_i	$N_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A}}$	n_i 为景观类型 i 的斑块数; A_i 为景观类型 i 的总面积; A 为景观总面积
景观优势度 D_i	$D_i = \frac{Q_i + M_i}{4} + \frac{L_i}{2}$	Q_i 为斑块 i 出现的样方数/总样方数; M_i 为斑块 i 的数目/斑块总数; L_i 为斑块 i 的面积/样方的总面积

2.2.2 地理探测器应用 地理探测器广泛应用于环境影响因子探测,进一步可以探索区域景观生态风险驱动因子及其相互关系^[24],其中因子探测和交互探测是重要组成部分。因子探测用于识别区域景观生态风险是否具有空间分异性,以及探测各因子对景观生态风险空间分异的解释程度;交互探测用于识别影响因子两两作用时增加或减弱对景观生态风险的解释力。

km²;草地面积变化趋势与林地相反,净减少面积超过 350.00 km²;因研究区地形因素导致耕地占比相对较少,整体呈现出先增后减的变化趋势;水域在研究区的占比较少,呈现出先减后增的变化趋势;建设用地呈现出持续增长状态,尤其在 2005—2020 年增长比率较高;其他用地呈现出逐渐下降的变化趋势,面积净减少量超过 400.00 km²。

3 结果与分析

3.1 景观时空演变

通过滇西北高山峡谷区的各类景观面积数量 and 变化趋势可知(表2)。林地是研究区的优势景观,20年间整体呈现出增加趋势,净增加面积超过 500.00

将两个时期的景观类型分布图相交得到研究时段内景观变化情况(表3),可视化展现各景观图斑的转移情况(图2),为景观生态风险水平的转变提供追溯依据。研究区景观变化强度呈现出“增—减—增”的变化态势,较为突出的是怒江下游出现集聚性的草地转为耕地的景观类型变化。

表2 不同景观类型面积变化
Table 2 Variations in area of different landscape types

年份	景观类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	其他用地
2000年	面积/km ²	2515.25	29655.46	12457.22	381.93	25.25	1717.01
	变化面积/km ²	—	—	—	—	—	—
2005年	面积/km ²	2518.67	29658.16	12451.82	381.73	25.29	1716.48
	变化面积/km ²	3.42	2.7	-5.4	-0.2	0.04	-0.53
2010年	面积/km ²	2732.12	30241.17	12101.54	380.21	40.04	1257.05
	变化面积/km ²	213.45	583.01	-350.28	-1.52	14.75	-459.43
2015年	面积/km ²	2724.88	30236.43	12095.55	379.42	57.90	1257.94
	变化面积/km ²	-7.24	-4.74	-5.99	-0.79	17.86	0.89
2020年	面积/km ²	2696.10	30232.55	12088.77	403.19	87.26	1244.25
	变化面积/km ²	-28.78	-3.88	-6.78	23.77	29.36	-13.69

分时段来看,2000—2005年研究区的景观变化程度较弱,在空间上的分布可忽略不计;2005—2010年研究区的景观变化情况有了显著的提升,特别是草地和其他用地的流转在研究区均有了明显的集聚情况,其中草地的流转大部分集中在怒江流域的下游地区,

其他用地的流转主要集中在金沙江的右侧;2010—2015年各景观的转移情况明显减少,表明在该阶段研究区的景观结构趋于稳定;在2015—2020年各景观流转幅度相较于前一时期有所升高,但在空间上的分布较为扩散,没有明显地出现地类流转的集聚状态。

表 3 景观转移面积
Table 3 Landscape transfer area

km²

景观转移	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2020年	2000—2020年
耕地—林地	2.70	62.48	13.04	103.78	148.87
耕地—草地	1.68	153.46	8.19	98.21	208.21
耕地—水域	0.27	2.03	1.12	9.79	15.75
耕地—建设用地	0.06	14.93	6.59	16.59	35.23
耕地—其他用地	0.01	9.91	0.08	0.35	7.83
林地—耕地	3.24	59.58	12.45	107.46	147.95
林地—草地	12.01	231.42	63.43	542.83	716.23
林地—水域	0.17	5.53	1.37	21.90	25.40
林地—建设用地	0.02	2.33	5.82	12.07	15.80
林地—其他用地	0.56	6.43	2.61	18.53	22.09
草地—耕地	4.52	390.62	7.92	72.91	426.66
草地—林地	14.99	820.15	64.01	540.43	1291.13
草地—水域	0.21	3.42	1.48	25.81	26.36
草地—建设用地	0.01	2.26	5.71	8.60	16.54
草地—其他用地	0.79	22.00	4.12	43.49	58.71
水域—耕地	0.32	1.79	1.03	12.55	13.20
水域—林地	0.26	1.43	1.31	26.82	26.94
水域—草地	0.26	11.63	1.41	14.96	24.27
水域—建设用地	0.00	0.01	0.04	0.19	0.21
水域—其他用地	0.01	0.07	1.08	0.44	0.41
建设用地—耕地	0.05	2.82	0.31	3.53	4.08
建设用地—林地	0.01	1.05	0.09	3.51	1.34
建设用地—草地	0.01	1.69	0.04	1.64	1.90
建设用地—水域	—	0.00	0.01	0.09	0.05
建设用地—其他用地	—	0.00	0.00	0.12	0.05
其他用地—耕地	0.01	1.42	0.07	0.61	1.79
其他用地—林地	0.67	3.10	2.57	25.47	37.14
其他用地—草地	1.23	490.04	4.14	31.37	504.93
其他用地—水域	0.01	2.43	0.09	21.22	18.82
其他用地—建设用地	—	0.79	0.15	0.83	1.67

3.2 景观生态风险时空演变

目前对景观生态风险等级划分没有统一标准,为了研究滇西北高山峡谷区景观生态风险情况,依照 ArcGIS 自然断点法将 2000 年的景观生态风险值划分成 5 类(表 4),其他研究时期的景观生态风险值依据 2000 年的分类标准进行手动分类。

通过景观生态风险评价模型对滇西北高山峡谷区的景观生态风险进行识别(图 3),总体来看,研究区的景观生态风险大多处于一个低风险和中低风险水平,高风险区域具有明显的聚类情况,高风险区域的分布与人类活动区域高度重合,主要集中在怒江下游地区、金沙江东部的香格里拉市以及哈巴雪山

和玉龙雪山等旅游资源较为丰富的区域,主要有人类生产需求改变景观类型、城镇建成区面积的扩张和人与自然旅游资源的交互活动3种形式的景观改变导致研究区景观生态风险高风险的聚集。中风险区域主要集中在怒江下游地区以及澜沧江两岸地区,且研究区的风险水平常呈现出以高水平风险区域为中心风险水平由内向外逐级递减的环状分布状态。2000年研究区的高风险区相对较少,主要集中在香格里拉市县城中心和玉龙雪山和哈巴雪山等经济发展较为快速的地方,中高风险区域主要集中在澜沧江和金沙江之间以及研究区的东北部其他用地转移较多的地方,中风险区域主要分布在

研究区的河流两岸,其他地区多以低风险和中低风险为主。2005年该时期的景观生态风险水平分布与上一阶段相比没有发生明显的空间分布变化。2010年高风险区域在空间上的分布具有了明显的扩张趋势,特别是怒江下游地区发生了明显的风险升高情况,部分前一时期的中风险区域上升到中高风险地区和高风险地区,研究区的东北部中高风险以及高风险区域在该时期明显降低为中低风险和低风险区域。2015年各水平的景观生态风险空间分布与2010年具有相似性。2020年的高风险区域相较于前一时期具有明显的扩展趋势,特别是香格里拉市的高风险区域扩张明显。

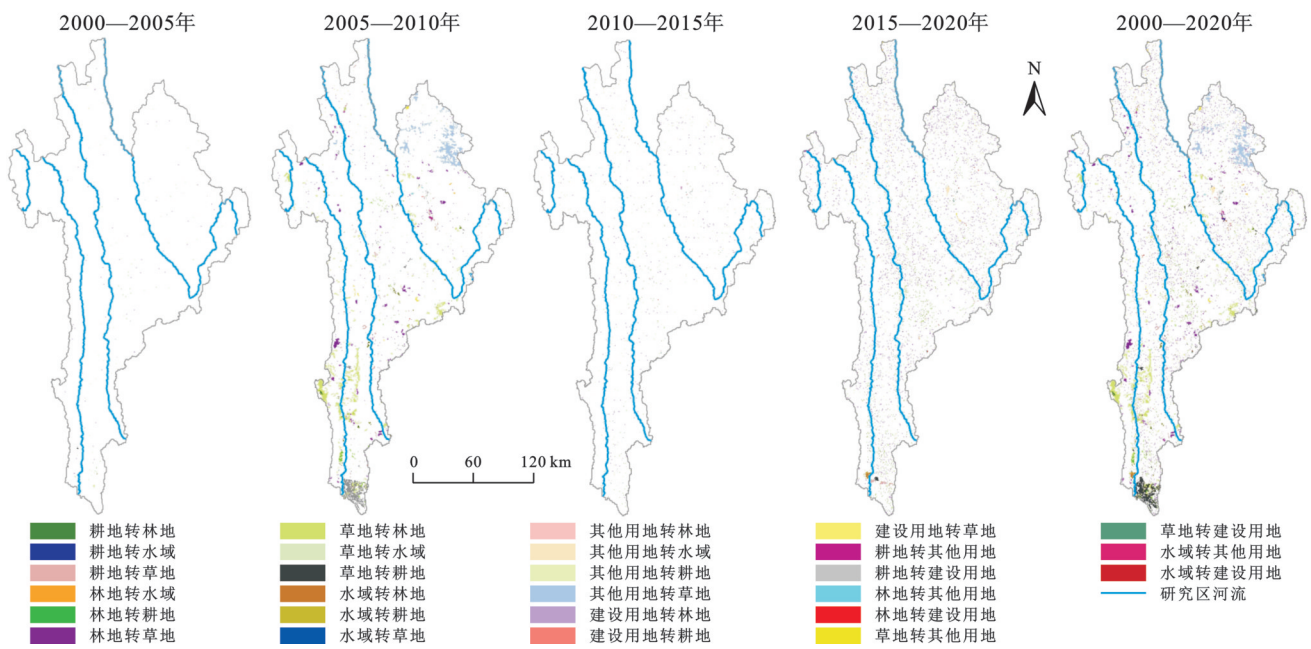


图2 研究区景观流转图

Fig. 2 Landscape transfer map of study area

表4 景观生态风险划分标准

Table 4 Classification criteria of landscape ecological risks

风险水平	取值范围
低风险区	$0 \leq ERI < 0.0308$
中低风险区	$0.0308 \leq ERI < 0.0505$
中风险区	$0.0505 \leq ERI < 0.0781$
中高风险区	$0.0781 \leq ERI < 0.1411$
高风险区	$0.1411 \leq ERI < 1$

通过统计各风险水平不同时期的面积情况,得到研究区景观生态风险的变化趋势(图4)。低风险区域面积整体呈现增加状态,在2010年低风险水平面积达到最大为23 101.62 km²,同时中高风险和高风险面积也呈现出增加态势,中高风险区域20年间面积净增加量为225.67 km²,高风险区域面积净增加量达到165.99 km²。中风险区域出现大幅减少的

情况,特别是2010年的面积相较于2005年减少了1 653.38 km²,中低风险区域20年间总体面积变化较小,整体呈现出“减—增—减”的变化趋势。

研究区景观生态风险升高的区域主要集中在怒江下游,在研究区其他空间上的分布较为分散,风险降低区域主要集中在怒江中下游以及研究区的东北部地区(图5)。分时间段来看,在2000—2005年研究区景观生态风险变化程度较为微弱,景观生态风险水平变化没有明显的空间集聚情况,风险升高和风险降低的区域在研究区零星分布;在2005—2010年该时期的景观生态风险出现大范围的变化情况,风险升高的区域主要集中在怒江下游地区有突出的空间集聚分布、澜沧江和金沙江两岸具有小范围的聚类情况,风险降低区域主要集中在怒江中下游地区以及研究区的东北部,在研究区的中部和南部也具有小范围的积聚性分布。在2010—2015

年该时段的景观生态风险变化较前一时期有明显的减少,表明该时期的风险变化水平趋于稳定,没有明显的风险变化空间聚类情况,零星的高风险区域在澜沧江和金沙江两岸分布。在2015—2020年研究区的景观生态风险变化相较于前一时期有所

扩大,且该时期景观生态风险升高的区域在空间上的聚类情况明显多于景观生态风险降低的区域,风险升高大的区域主要集中在金沙江的右侧香格里拉市的市中心区域,景观生态风险降低的区域在研究区的分布较为扩散。

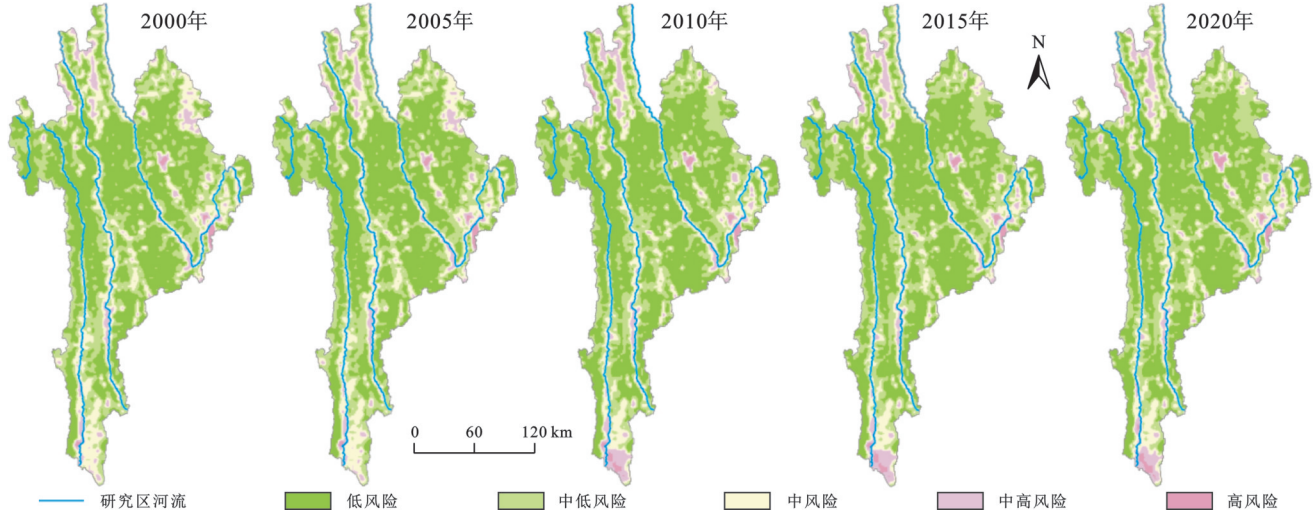


图3 景观生态风险分布

Fig. 3 Distribution of landscape ecological risks

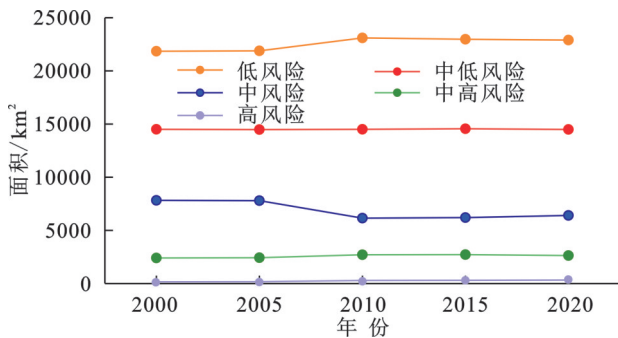


图4 各景观生态风险水平变化趋势

Fig. 4 Variation trends of different landscape ecological risk levels

从景观生态风险水平变化面积来看(表5),2000—2020年景观生态风险不变的区域占据风险区域总面积的85%以上;风险升高的区域面积达到2 628.81 km²,占据景观生态风险水平面积的5.62%;风险降低区域的面积大于风险升高的面积,占据风险区域面积的8.45%。为了细致研究各时期研究区景观生态风险变化状态,分时段来看,在2000—2005年风险不变的面积占据研究区总面积的99.61%,该时期景观生态风险相对稳定;在2005—2010年研究区景观生态风险具有大范围的变动,风险升高区域面积相较于上一时期净增加2 227.82 km²,面积增长24.89倍,风险降低区域表现更加突出,相较于前一时期面积仅增加3 987.51 km²,面积增长43.63倍,在该时期的面积占风险总面积的8.72%,表明该时期的景观生态风险大部分向好发

展。在2010—2015年该时期的景观生态风险变动情况趋于稳定,变化面积约为370.21 km²,风险升高的面积(289.08 km²)大于风险降低的面积(81.13 km²)。在2015—2020年该时期的景观生态风险变动较前一时期相对剧烈,风险升高区域面积达到890.57 km²,占据研究区景观生态风险总面积的1.90%,风险降低区域面积达到647.18 km²,占据研究区景观生态风险总面积的1.38%。

3.3 景观生态风险迁移轨迹

为了明确研究区景观生态风险水平的变化情况,使用五期遥感数据提取5种景观生态水平的变化轨迹共126条,依照变化轨迹主要类型,将其分为稳定型和波动型两大类变化轨迹,并对其细化为持续稳定型、波动回归型、降低型波动、升高性波动和跨越性波动5个亚类(表6)。

对滇西北高山峡谷区景观生态风险水平变化轨迹的面积变化分析可知,稳定型变化轨迹所占面积较大,约占风险水平变化总面积的85.93%,其中持续稳定型面积达到39 333.27 km²,占稳定型变化轨迹面积的84.11%,波动回归型面积约为849.54 km²,相较于持续稳定型面积占比,该轨迹类型在研究区的分布较少;波动型依照波动趋势分为降低性波动、升高性波动和跨越性波动3种亚类,其中升高性波动面积占所有变动类型面积的比例(5.61%)略小于降低性波动面积占比(8.42%),跨越式波动面积较小为

18.65 km²,面积占比约为0.04%,表明研究区的景观生态风险变化的幅度较为平缓。以20 a为整体来看,

研究区大部分区域的景观生态风险没有发生变化,景观生态风险升高的区域较小。

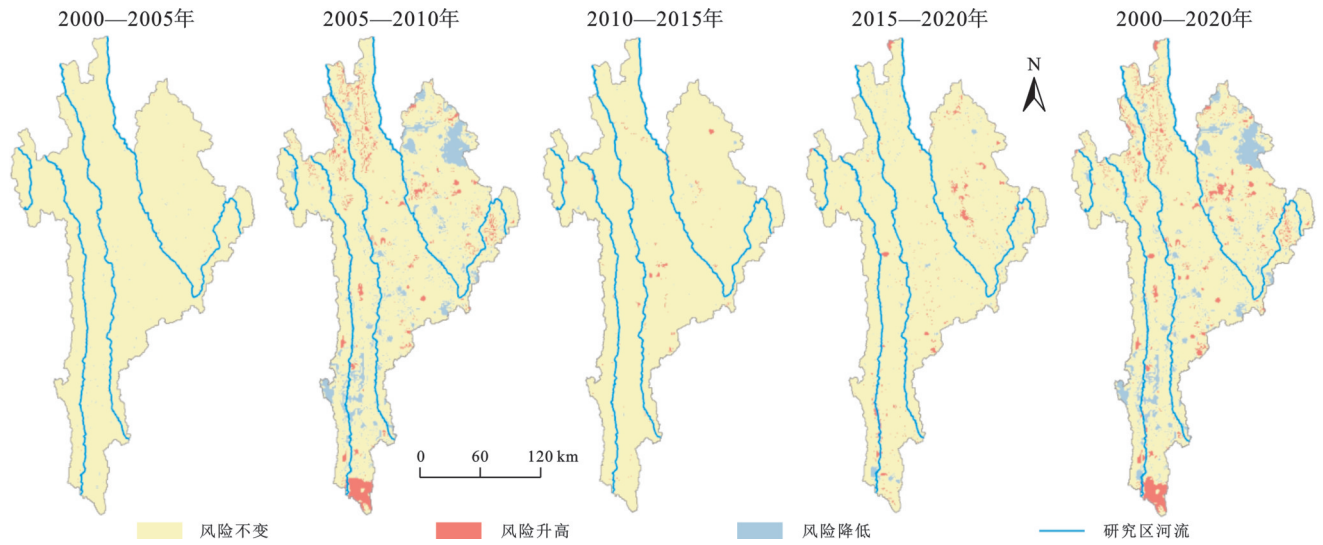


图5 景观生态风险水平变化
Fig. 5 Variations in landscape ecological risk levels

表5 景观生态风险水平面积变化

Table 5 Variations in area of landscape ecological risk levels

风险类型	2000—2005年		2005—2010年		2010—2015年		2015—2020年		2000—2020年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
风险不变	46581.84	99.61	40366.52	86.32	46392.54	99.21	45225.01	96.71	40180.94	85.93
风险升高	89.52	0.19	2317.34	4.96	289.08	0.62	890.57	1.90	2628.81	5.62
风险降低	91.39	0.20	4078.90	8.72	81.13	0.17	647.18	1.38	3953.00	8.45
总计	46762.75	100.00	46762.75	100.00	46762.75	100.00	46762.75	100.00	46762.75	100.00

表6 景观生态风险水平变化轨迹分类

Table 6 Classification of variation trajectories of landscape ecological risk levels

类型	划分标准	面积/km ²	占比/%	
稳定型	持续稳定型	在整个研究时段区域景观生态风险水平没有发生变化的部分	39333.27	84.11
	波动回归型	研究期初和期末景观生态风险水平保持一致,且研究期间发生景观生态风险变化的部分	849.54	1.82
波动型	降低性波动	以2000年景观生态风险水平为基准,研究期出现景观生态风险降低的部分	3938.08	8.42
	升高性波动	以2000年景观生态风险水平为基准,研究期出现景观生态风险升高的部分	2623.21	5.61
	跨越性波动	研究期内同时出现高于和低于2000年景观生态风险水平的部分	18.65	0.04

依照景观生态风险变化趋势对不同变化轨迹进行归类整理(图6),持续稳定型景观生态风险分布在滇西北高山峡谷区的大部分区域。波动回归型在研究区的分布较少且较为扩散,在研究区没有明显的聚集情况,其空间分布主要围绕在其他景观生态风险变化的周围。升高性波动在研究区呈现出“小集聚、大离散”的分布状态,该变化型的空间分布出现小面积的集聚状态,但从整个研究区域范围来看,各

集聚范围呈现出离散状态,其中较大的集聚范围出现在怒江下游的东岸地区。降低型波动主要集中在怒江中下游地区和研究区的东北部地区,该景观生态风险变化类型在澜沧江中下游地区也有离散分布,跨越性波动在研究区的面积占比较小,在研究区内没有显著的聚集状态。

3.4 驱动因素分析

3.4.1 单因子探测 对研究区各评价单元的景观生

态风险值进行“自然因素—区域可达性—社会经济”3维度要素评价(表7)。结果表明自然因素是影响滇西北高山峡谷区的景观生态风险空间分布的主要原因,特别是高程(X_1)和年均气温(X_5)影响力较大,高程反映了地形特征与海拔,因土地利用强度和转变程度在一定程度上受到地形与海拔的限制,因此高程是制约景观演变的关键因素,年均气温对于植被的生长速度和生长周期影响较大,能够改变植被带分布,从而影响研究区土地利用分布情况,因此对景观生态风险分布影响较大。在2010年,社会经济因子的平均贡献度超过了区域可达性因素,随着城镇化的建设和社会经济的高速发展,为满足社会发展的用地需求,不透水面的面积不断扩展,随之夜间灯光也逐渐加强,加之人口密度(X_8)、地均GDP(X_9)的上升,使得社会经济因素对景观生态风险空间分布的解释力逐渐增强。

3.4.2 因子交互探测 通过因子交互探测结果可知(图7),因子间的交互作用均呈现出双因子增强和非线性增强,表明研究区的景观生态风险是在自然因素—区域可达性—社会经济等多重要素的综合影响下形成的,自然因素与其他因子的交互作用对于研究区景观生态风险解释力占据主要地位,因研究区地处滇西北高原峡谷地带,土地类型以林地和草地为主,乡镇的分布较少且较为分散,自然因素之间的交互作用对景观类型的改变作用力较强,不透水面

与夜间灯光等社会经济因素与其他因子的交互作用对研究区的景观生态风险的解释力较弱。特别是年均气温与高程($X_5 \cap X_1$)的交互影响相较于单因子探测时对研究区景观生态风险的解释作用大幅增强,年均气温的高低决定了植被类型的空间分布和生长发育过程,直接影响林地和草地的空间分布,对景观生态风险的分布起到了关键作用,高程是决定植被类型的决定性因素之一,高程的差异会引起气温和局部气候的不同,滇西北高山峡谷区因巨大的海拔高差产生了多种气候类型在局部范围内集聚,也造就了研究区植被类型的丰富多样性。因此年均气温与高程的交互作用对景观生态风险的解释力较强。

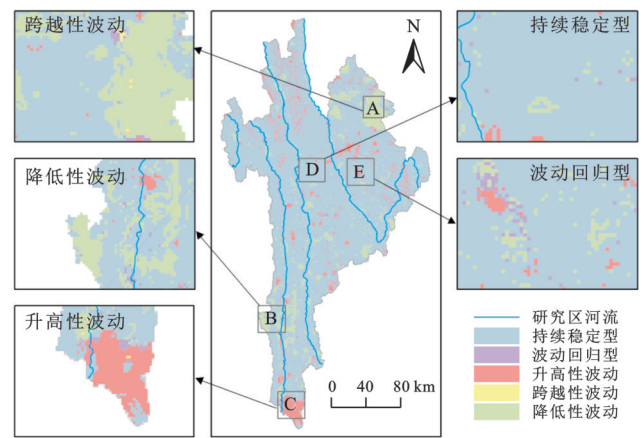


图6 景观生态风险变化轨迹类型
Fig. 6 Variation trajectory types of landscape ecological risk

表7 单因子贡献度
Table 7 Contribution degree of single factors

要素层	序号	指标层	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	%
自然因素	X_1	高程	24.6281	21.6985	17.3229	18.6350	18.1943	
	X_2	坡度	0.9140	0.9427	0.7159	0.7810	0.8920	
	X_3	NDVI	4.2781	4.3706	3.5119	2.9635	2.6178	
	X_4	PM2.5含量	5.6782	7.9613	10.9880	9.6350	11.9362	
	X_5	年均气温	24.7448	22.5041	17.8632	17.7007	20.1595	
	X_6	年均降水量	13.2426	14.0800	18.5385	18.3796	8.4917	
区域可达性	X_7	距城镇中心距离	5.2309	4.3534	5.1597	5.5620	5.4677	
	X_8	距河流距离	6.7282	5.8188	3.0661	3.3212	3.1762	
社会经济	X_9	人口密度	5.6879	7.1214	8.2191	8.8832	10.8267	
	X_{10}	地均GDP	5.6782	7.9613	10.9880	9.6350	11.9362	
	X_{11}	不透水面	1.4098	1.1826	1.4182	1.7518	2.1175	
	X_{12}	夜间灯光指数	1.7793	2.0053	2.2084	2.7518	4.1842	

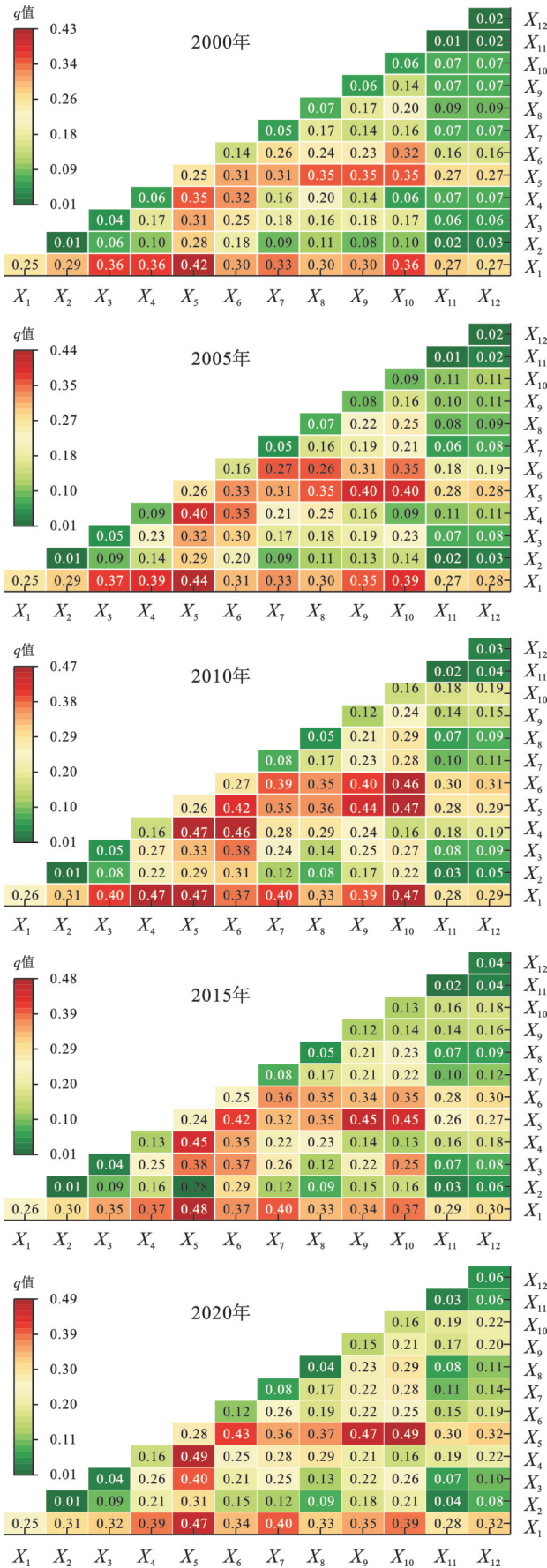


图 6 景观生态风险因子交互探测

Fig. 6 Interactive detection of landscape ecological risk factors

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 景观类型分析 滇西北高山峡谷区位于我国西南山区,属青藏高原南延、向云贵高原过渡的横断山脉的纵谷地带,是构建我国生态安全战略格局的重要支撑区域,各时期林地景观面积占比均在63%以上,20年间净增加量达到577.09 km²;草地景观占研究区面积的25%以上,20年间减少量达到368.45 km²,耕地、水域和建设用景观呈现出增加趋势,特别是建设用地20年间增长率达到245.58%;其他用地面积总体呈现出减少趋势,20年间减少量达到472.76 km²。与澜沧江和金沙江的源头三江源地区相比^[23],优势地类存在差异,三江源地区以草地为主,滇西北高山峡谷区以林地为主,相同的是耕地和建设用景观类型在两个地区占比均较小,并且建设用地的扩张态势同样显著。滇西北高山峡谷区在2005—2010年林地景观出现较大幅度的面积增长情况,这是由于“十一五”期间,云南省围绕构建森林生态、林业产业、生态文化三大体系,完成营造林约7 300 km²,通过实施天然林保护、退耕还林、防护林体系建设等重点生态工程,实现林地景观的大面积增加。怒江下游存在大范围的草地转为耕地的景观转变,随着人口的增长,人类活动对地类的用途转变加剧,人类的粮食需求对农业用地结构的调整 and 草地的易改造特点使得草地景观转为耕地景观的情况集聚发生。

4.1.2 景观生态风险分析 对景观生态风险评估可以识别重点风险区域,为区域可持续发展与空间规划提供理论依据。滇西北高山峡谷区整体处于一个低风险水平,高风险区域的分布与人类活动区域高度重合,怒江下游地区由于大面积的草地转为耕地,景观的转变造成景观脆弱度上升引起景观生态风险的集中性升高,香格里拉市作为建成区,在20年间建设用地持续扩张侵占耕地和其他用地,造成景观干扰度不断提升。哈巴雪山和玉龙雪山等旅游资源较为丰富的区域有集聚型的水域分布,此种景观类型的脆弱度和损失度较高,加之随着旅游产业的兴旺,人为对该区域进行过度开发,旅游活动范围不断扩展,造成该区域景观生态风险持续处于高水平状态。中高风险区域主要分布在中高风险区域周围,中风险区域集中在怒江下游地区、澜沧江两岸地区以及高风险和中高风险区域周围,且风险水平从高风险到低风险大致呈环状分布。与研究区包含的怒江流域相比^[24],两个研究较为相似的是大部分区域的景观生态风险都处于低风险和中低风险水平,因两者所

处的地理位置高山峡谷纵横,且未受第四纪冰期大陆冰川的覆盖,是欧亚大陆生物物种主要的通道和避难所,形成了植物和动物大面积富集的局面,区域林地和草地景观的破碎度、干扰度和脆弱度均较低,因此研究区呈现出以低风险和中低风险分布为主。景观生态风险高值区域主要集中在人类活动较为突出的区域,这是由于人类活动通常通过对土地覆被的改造和开垦,来满足自身生产和生活所需,常以林地、草地、未利用地转向耕地、建设用地等土地利用类型的转变形式呈现,研究区地形限制等因素,导致人口密度较小、分布较为分散,建设用地斑块面积较小、分布较为分散,景观破碎度、分离度较高导致的景观生态风险呈现高值状态。与我国长江中下游生态屏障的三江源国家公园相比^[25],三江源国家公园景观生态风险具有显著的空间异质性,表现出从中央到边缘逐渐增高的梯度变化趋势,滇西北高山峡谷区作为我国西南生态安全屏障的重要区域之一,景观生态风险大多处于低风险状态,在景观生态风险突出区域,风险水平从高风险到低风险大致呈环状分布。

4.1.3 驱动因子分析 滇西北高山峡谷区景观以林地和草地为主,因植被的分布和类型主要受气候、地形和水热条件的影响,绝大部分区域的景观类型分布受到自然因素的驱动,影响着景观脆弱度等指标,进而影响景观生态风险,自然因素是影响滇西北高山峡谷区景观生态风险空间分布的主要原因。同时,由于研究区高山峡谷的陡峭地形,人类活动空间有限,对景观的改造和影响仅存在局部区域,通常是朝着利于人类生产和生活的耕地和建设用地流转,导致景观的干扰度增大,优势度降低,因此在这些人类活动较为频繁的区域景观生态风险呈现高值状态。对于滇西北高山峡谷区的整个区域来讲,自然因素是景观生态风险空间分布的主导因素,特别是高程和年均气温影响力较大,这与滇西北高原湖泊流域^[26]景观生态风险驱动力具有一致性,两个研究区位置相近、景观分布相似,林地和草地景观占比均较高、分布较广泛,高程和年均气温是制约植被生长和空间分布的主要因素,因此自然因素是影响两者景观生态风险分布的主导因素,在因子交互过程中,高程和年均气温的交互作用在两个研究区的解释作用均显著提升;两个研究不同的是,滇西北高山峡谷区从2010年后社会经济因子的平均贡献度超过了区域可达性因素,滇西北高原湖泊流域从2010年后区域可达性因素对景观生态风险的解释作用超过社会经济因素。与同处云贵高原的赤水河流域^[27]相比,两者均处于高山峡谷区,但景观生态风险的驱动因

子具有一定差异性,人为干扰度是影响赤水河流域景观生态风险变化的主要因素,自然因素是滇西北高山峡谷区景观生态风险变化的主导因素,表明赤水河流域人类活动的强度要高于滇西北高山峡谷区,在因子交互作用方面,两者均呈现出双因子增强和非线性增强效果,赤水河流域的社会经济因素交互作用较为明显,因为该流域人类活动强度较高,为满足人类生产生活所需,通过改变土地利用方式影响景观生态风险的空间分布,滇西北高山峡谷区自然因素的交互作用较为突出,因该区域人口密度较小,人类活动在整个区域的影响范围有限。

4.2 结论

(1) 林地是研究区的优势景观,呈增加趋势;草地占比仅次于林地,面积变化趋势与林地相反;耕地、水域、建设用地和其他用地占比相对较少,但建设用地增长速度突出。景观变化强度呈现出“增—减—增”的变化态势,2005—2010年怒江下游草地出现大面积集聚型流转。研究区内林地和草地景观分布密集,且此种景观的生态风险较低,要常规化景观转变监控,防止林草地流失带来的景观生态风险升高。

(2) 研究区的景观生态风险大多处于一个低风险和中低风险水平,高风险区域的分布与人类活动区域高度重合,研究区的风险水平常呈现出以高水平风险区域为中心风险水平由内向外逐级递减的环状分布状态。景观生态风险升高的区域主要集中在怒江下游,景观生态风险转移路径为持续稳定型、波动回归型、降低型波动、升高性波动和跨越性波动5种类型,稳定型变化轨迹所占面积较大。景观生态风险的升高与局部人类活动有较高的关联程度,应对此区域进行重点监测与管控,提高城市用地的节约集约利用水平,并限制旅游目的地的人类活动强度,防止高风险区域的进一步扩张。

(3) 自然因素是影响滇西北高山峡谷区景观生态风险空间分布的主要原因,特别是高程和年均气温影响力较大;在2010年,社会经济因子的平均贡献度超过了区域可达性因素。因子间的交互作用均呈现出双因子增强和非线性增强,年均气温与高程($X_5 \cap X_1$)交互作用显著增强。在探寻景观生态风险的驱动因素时,要注意研究区景观的本底特征,有针对性地寻找影响景观生态风险的变化因素,并对区域气候的长期变化对景观生态风险分布的影响以及植被对气候的适应状态进行监测,注意突发极端气候对景观的破坏并根据历史自然灾害数据有针对性地制定应对措施。

参考文献 (References):

- [1] Liu Y S, Ou C, Li Y R, et al. Regularity of rural settle-

- ment changes driven by rapid urbanization in North China over the three decades [J]. *Science Bulletin*, 2023, 68(18):2115-2124.
- [2] 卿希,李巍,陆中桂. 黄河流域城市群土地利用变化与生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(2):984-991.
Qing X, Li W, Lu Z G. Land use change and ecological risk assessment of the urban agglomerations in the Yellow River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(2):984-991.
- [3] 郝军,田雅楠,戈锋,等. 流域土地利用与景观生态风险响应关系研究[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(11):6132-6140.
Hao J, Tian Y N, Ge F, et al. Correlational relationship between land use and landscape ecological risks in Inner Mongolia section of middle Nenjiang River [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(11):6132-6140.
- [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] 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*, 2012, 18(5):946-970.
- [6] 孟祥源,王子昊,王冰,等. 呼包鄂生态系统服务价值与景观生态风险时空动态变化及关联性[J]. *环境科学*, 2025, 46(9):5941-5950.
Meng X Y, Wang Z H, Wang B, et al. Spatiotemporal dynamics and correlations between ecosystem service values and landscape ecological risks in Hohhot-Baotou-Ordos [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(9):5941-5950.
- [7] 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 Q Q, Huang L, Fan J W, 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.
- [8] 罗芹芹,刘凤莲,朱柯权,等. 赤水河流域(贵州段)景观生态风险时空分异及空间自相关分析[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3):282-290.
Luo Q Q, Liu F L, Zhu K Q, et al. Spatiotemporal differentiation and spatial autocorrelation analysis of landscape ecological risk in the Chishui River Basin (Guizhou section) [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3):282-290.
- [9] 丁金华,汪大庆.“三生”空间视角下苏南水网乡村景观生态风险评价:以石头潭片区为例[J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(2):265-273.
Ding J H, Wang D Q. Ecological risk assessment of rural landscape of southern Jiangsu Water Net from the perspective of “Ecology-Production-Living” space: a case study of stone pool area [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(2):265-273.
- [10] 杨帆,金晓斌,刘晶,等. 时空动态视角下快速城市化地区景观生态风险评价与分区[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(18):253-261.
Yang F, Jin X B, Liu J, et al. Assessing landscape ecological risk in rapidly urbanized areas from the perspective of spatiotemporal dynamics [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(18):253-261.
- [11] Mattson K M, Angermeier P L. Integrating human impacts and ecological integrity into a risk-based protocol for Conservation Planning [J]. *Environmental Management*, 2007, 39(1):125-138.
- [12] Zhang H, Xue L Q, Wei G H, et al. Assessing vegetation dynamics and landscape ecological risk on the mainstream of Tarim River, China [J]. *Water*, 2020, 12(8):2156.
- [13] Ji Y X, Bai Z K, Hui J W. Landscape ecological risk assessment based on LUCC: a case study of Chaoyang County, China [J]. *Forests*, 2021, 12(9):1157.
- [14] 张师赫,李宝银,林玉英,等. 基于生态系统服务的景观生态风险评价及其驱动因素研究:以福建省为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6):174-182.
Zhang S H, Li B Y, Lin Y Y, et al. Research on landscape ecological risk assessment and driving factors based on ecosystem services: a case study of Fujian Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6):174-182.
- [15] Mann D, Anees M M, Rankavat S, et al. Spatio-temporal variations in landscape ecological risk related to road network in the Central Himalaya [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2021, 27(2):289-306.
- [16] 孙丽蓉,周冬梅,岑国璋,等. 基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(5):1384-1395.
Sun L R, Zhou D M, Cen G Z, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factors of the Shule River Basin based on the geographic detector model [J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(5):1384-1395.
- [17] Sun L L, Xu D L, Mu Z Q, et al. The spatio-temporal evolution of ecological risk and its drivers in the Weihe River Basin landscape from 1990 to 2020 [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2024, 15(4):1004-1014.
- [18] 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.
- [19] 王舒,刘凤莲,陈威廷,等. 滇中高原湖泊流域景观生态风险评价及驱动因素识别[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(3):391-404.
Wang S, Liu F L, Chen W T, et al. Landscape ecological risk evaluation and driving factors in the lake basin of Central Yunnan Plateau [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(3):391-404.