

云南边境地区景观生态风险时空演变及驱动力探索

罗芹芹¹, 刘凤莲^{2,3}, 钱婷婷¹, 祁毅¹, 姚伟¹

(1. 云南财经大学 财政与公共管理学院, 昆明 650221; 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)

摘要: [目的] 探究云南边境地区景观生态风险时空演变特征, 阐明影响其变化的主要驱动因素, 进而为推动边境地区生态文明建设和高质量发展提供科学支撑。[方法] 基于土地利用数据, 通过构建景观格局指数评估景观生态风险, 利用地理探测器分析了云南边境地区的景观生态风险变化的驱动力。[结果] (1) 研究区主要景观生态风险类型为中低风险和低风险, 两者之和面积占比在60%以上, 高风险占比在2%左右, 高风险主要分布在研究区东部和西北部。低风险和中高风险变化较显著, 低风险区减少5 881.10 km², 中高风险区增加6 055.61 km²。(2) 80%以上区域风险等级保持不变, 风险等级降低的区域面积有11 450.90 km², 风险等级升高的区域有33 877.94 km²。(3) 景观生态风险变化主要受人为干扰度、GDP密度、夜间灯光和年均降水量等因子的影响, 人为干扰度同其他因子交互作用对景观生态风险变化影响较显著。[结论] 云南边境地区景观生态风险等级整体上升, 应加强风险防范和治理, 降低人为干扰的影响, 平衡好经济发展与生态保护之间的关系。

关键词: 景观生态风险; 土地利用; 时空演变; 地理探测器; 边境地区

中图分类号: P901; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0396-09

Spatiotemporal evolution and driving forces of landscape ecological risk in Yunnan border area

Luo Qinqin¹, Liu Fenglian^{2,3}, Qian Tingting¹, Qi Yi¹, Yao Wei¹

(1. School of Finance and Public Administration, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, 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)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the spatiotemporal evolution characteristics of landscape ecological risks in the Yunnan border area, and to clarify the main driving factors influencing their evolution, so as to provide scientific support for promoting the construction of ecological civilization and high-quality development in the border area. [Methods] Based on land use data, the landscape ecological risk was evaluated by constructing the landscape pattern index, and the driving forces of changes in landscape ecological risk in the Yunnan border area were explored using the geographic detector method. [Results] (1) The main types of landscape ecological risks in the study area were low to medium risk and low risk. The combined area of the two accounted for more than 60%, and the proportion of high risk was about 2%. The high-risk regions were mainly distributed in the eastern and northwestern parts of the study area. The changes in low-risk and medium-high-risk areas were relatively significant. The low-risk area decreased by 5 881.10 km², while the medium-high-risk area increased by 6 055.61 km². (2) More than 80% of the regional risk levels remained unchanged. The area with a reduced risk

收稿日期: 2025-05-05

修回日期: 2025-05-27

接受日期: 2025-06-04

资助项目: 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项目(YNSC24305); 云南省教育厅科学研究资助项目(2025Y0762); 国家社会科学基金(25BJY175)

第一作者: 罗芹芹(1998—), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。E-mail: 2096678241@qq.com

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

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

level was 11 450.90 km², and the area with an increased risk level was 33 877.94 km². (3) The degree of human disturbance, GDP density, nighttime lighting, and the average annual precipitation were the main driving factors. The interaction between the degree of human disturbance and other factors had a significant impact on the changes in landscape ecological risk. [**Conclusion**] The overall landscape ecological risk level in the Yunnan border area shows an increasing trend. It is necessary to strengthen risk prevention and governance, reduce the impact of human interference, and balance the relationship between economic development and ecological protection.

Keywords: landscape ecological risk; land use; spatiotemporal evolution; geodetector; border area

土地是人类生产生活的载体,承担着人类的一切社会经济活动^[1]。随着社会的发展,人类为更好地满足自身发展的需求,加强了对土地的利用开发,由土地组成的自然生态系统直接或间接受到由人类活动带来的压力,资源短缺、环境污染和生态破坏等日益严峻的环境问题对人类未来社会的可持续发展造成重要影响,保护生态环境与维护生态安全成为全球关注的重点问题之一,自然生态系统的稳定是人类实现可持续发展的重要基础^[2]。

景观不仅包含了土地本身,还涵盖了土地上的植被、水体、建筑物和道路等各种自然和人为要素^[3]。20世纪70年代,就有许多学者基于景观进行生态风险研究分析,为景观生态风险研究的发展打下了坚实的基础^[4]。而以景观格局为基础进行的生态风险研究能较好地反映出区域生态过程与空间格局的联系^[5],因此景观生态风险评价被广泛应用在衡量自然和人为活动对生态系统的稳定性及安全性等方面的研究^[6]。国外对生态风险的研究起步较早,最早是基于微观视角进行的生态风险研究,如分析化学污染物在环境中对人体的伤害^[7],基于SOM和PMF分析达卡地区土壤因重金属污染而产生的生态风险等研究^[8]。国内对景观生态风险的研究主要始于20世纪80年代,通过几十年的发展,对景观生态风险的研究趋向于多元化方向发展,研究尺度涉及行政区^[9]、生态保护区^[10]、湖泊流域等^[11];研究方法主要有景观格局指数法^[12]、“源-汇”理论^[13]等评价框架。综上,当前景观生态研究趋势表现为多学科的融合,研究重心转向景观格局与生态过程的关联,注重生态安全格局与可持续发展目标的协同,未来需进一步基于区域特色,整合自然-社会耦合系统视角,探索跨尺度动态模拟与适应性管理。一方面,云南边境地区是我国推进“一带一路”建设的重要战略支撑区和统筹资源安全利用的关键区,是集多元化文化和自然资源于一体的复杂的自然-社会-经济发展矛盾的典型代表区域^[14],对边境地区开展景观生态风险研究对于缓解人地矛盾、维持景观生态系统的稳定、保障区域生态安全和区域可持续发展具有重要意义;另一方面,云南边境

地区作为生物多样性热点、生态脆弱和贫困地区交互重叠区域,从社会经济和自然两方面探索影响区域景观生态风险变化的驱动因子,为边境地区生态修复、生态补偿机制的建立以及优化自然保护区布局等提供科学的建议,实现边境地区生态保护和经济发展协调发展,促进区域高质量发展。

生态安全是维持国土空间稳定和推进高质量发展的基础,随着人类需求的增加,土地开发利用持续增强,对区域生态安全带来较大冲击^[15]。云南边境地区是我国西南重要生态屏障区,同时作为共建“一带一路”和“桥头堡”建设的关键交汇点,其生态安全稳定对于维护区域生态平衡具有重要意义^[16]。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

云南边境地区包含文山壮族苗族自治州(以下简称文山州)、红河哈尼族彝族自治州(以下简称红河州)、普洱市、西双版纳傣族自治州(以下简称西双版纳州)、临沧市、保山市、德宏傣族景颇族自治州(以下简称德宏州)、怒江傈僳族自治州(以下简称怒江州)8个与缅甸、老挝、越南接壤的市级行政区,位于我国西南部,高程范围为83~4 946 m,陆地边境线长约4 060 km,国土面积占云南省的50.9%,该地区GDP占比约为全省的30%,边境贸易繁荣,主要出口农产品,依托“云茶”“云花”“云药”和“云咖”等特色产业,边境地区种植养殖产业持续优化;同时,旅游和开放驱动区域经济发展。云南边境地区多为山地,地形复杂,以林地、草地和耕地为主,包含少量的水域、建设用地和裸地,区域气候复杂多样,兼具季风气候、低纬气候和高原气候特征,全域大部分区域无霜期较长,因其特殊的地理条件呈现出多样的立体气候,充沛的光温水热条件和肥沃多样的土壤等优越的自然条件,赋予了农业得天独厚的发展优势;云南省边境地区主要为少数民族聚集区,其生态环境优越,生物多样性极为丰富,是我国西南地区重要的生态屏障;研究区植被茂盛,生物多样性丰富,但随着经济社会的发展,城镇化进程的加快,资源开发

力度不断加强,生态脆弱性与生态保护复杂性相互交织,云南边境地区生态保护与经济建设的矛盾日益突出,推进区域生态保护对实现边境地区社会经济可持续具有重要意义。

1.2 数据来源

云南省边境地区行政边界数据来自标准地图服务系统[GS(2019)1822号],土地利用数据的主要来自中国科学院(<https://www.resdc.cn>)2000—2020年公布的5期数据,参考现有《土地利用现状分类》标准(GB/T 21010—2017)对研究区土地利用类型进行分类;自然因子和社会经济因子数据分别为2000年、2005年、2010年、2015年和2020年共5期数据,其中,高程和坡度数据主要由地理空间数据云GDEM V3提供(<https://www.gscloud.cn>),分辨率为30 m;NDVI和GDP密度数据来源于资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn>),NDVI分辨率为250 m,GDP密度分辨率为1 km;人口密度数据来源于Worldpop(<https://www.worldpop.org>),分辨率为1 km;年均降水量和年均气温主要由国家气象科学数据服务中心(<http://data.cma.cn>),分辨率均为1 km;夜间灯光数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/data>),分辨率为500 m。

1.3 研究方法

1.3.1 景观生态风险评价模型

(1) 风险评价小区建立。根据相关学者关于景观生态学的研究表明,景观评价样本应为斑块平均面积的2~5倍^[17],云南省边境地区面积约为195 000 km²,斑块平均面积范围为95.08~5 672.07 km²,因此基于区域实际情况,利用ArcGIS 10.2创建风险10 km×10 km评价小区,最终得到2 236个评价小区。

(2) 景观格局指数选取。景观格局指数是指景观生态系统在结构、功能以及其他方面的多样性,反映景观类型的丰富度和复杂度^[18]。

① 景观破碎度指数(P_i):反映景观斑块的数量增减、形状规则度以及斑块间的连接性。

$$P_i = n_i / A_i \quad (1)$$

② 景观分离度指数(K_i):反映区域内某一景观类型的斑块异质性水平。

$$K_i = \frac{1}{2} \times \frac{A}{A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A_i}} \quad (2)$$

③ 景观优势度指数(T_i):反映景观类型在区域内的综合优势程度。

$$T_i = \frac{S_i + U_i}{4} + \frac{L_i}{2} \quad (3)$$

④ 景观干扰度指数(G_i):反映景观类型在受到外部干扰时的程度,干扰度越大,生态风险越大。

$$G_i = aP_i + bK_i + cT_i \quad (4)$$

⑤ 景观脆弱度指数(W_i):反映当景观生态系统面临外部干扰时的敏感性程度和恢复能力。根据相关研究^[19-20],建设用地=1,林地=2,草地=3,耕地=4,水域=5,其他土地=6。

⑥ 景观损失度指数(D_i):综合景观脆弱度和干扰度指数,综合反映景观类型受外界干扰时景观生态系统的稳定性和恢复能力。

$$D_i = G_i \times W_i \quad (5)$$

⑦ 基于景观格局指数,通过“生态损失×风险概率”计算泾河流域生态风险指数(Ecological Risk Index, ERI)^[21]:

$$ERI = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A} \times D_i \quad (6)$$

式中: n_i 为*i*类景观类型的数量; A_i 为*i*类景观的面积(km²); A 为景观生态风险评价小区的总面积(km²); S_i 为景观类型*i*样方占总样方比例; U_i 为景观类型*i*的斑块数占总斑块数的比例; L_i 为景观类型*i*占总面积比例; a, b, c 为权重值,分别赋值0.5, 0.3, 0.2;ERI为生态风险指数。

1.3.2 地理探测器模型 本文利用地理探测器对生态系统与风险因子之间的关系进行分析^[22],在一定程度上能够较好地反映景观类型空间布局模式与环境影响因素之间的关系。利用地理探测器模型中因子探测模型分析景观生态风险的空间分异性和各驱动因子的解释力^[23],主要使用单因子探测和因子交互探测,分析云南省边境地区景观生态风险时空演变及驱动因素之间的关系,并帮助识别出影响研究区景观生态风险变化的主要驱动因子。

(1) 单因子探测模型。主要用于探测变量的空间分层异质性,评估影响因子对变量因子的解释力程度。具体模型及公式如下:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} \times \frac{N-L}{N-1} \quad (7)$$

式中:SSW为层内方差之和;SST为全区总方差; N 为样本总数; L 为分层数; q 的取值范围为(0, 1], q 值越大则表示影响因子对变量的空间分异解释力越强,反之则越小。

(2) 因子交互探测模型。主要用于探测不同因子之间的交互作用,在一定程度上能较好地量化分析不同因子之间交互作用对研究现象的空间分布格局的影响,旨在通过交互探测,可以全面地、系统地

了解不同景观生态风险等级变化的影响机制,为维护生态安全制定合理、科学和可行的措施提供依据,促进生态系统朝着健康可持续发展。因子交互作用主要有非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、非线性增强和相互独立。

(3) 影响因子的分类。高程采用分位数法,分为 7 类;植被覆盖率采用分位数法,分为 4 类;年均降水量、夜间灯光和人为干扰度采用自然断点法,分为 9 类;年均气温采用分位数法,分为 6 类;GDP 密度采用分位数法,分为 6 类;人口密度采用 1/2 标准差分类法,分为 6 类。

(4) 人为干扰度。人为干扰度是反映人类活动对生态环境的影响强度,其计算通常基于与人类活动相关的指标,如土地利用变化、建筑物密度和工业活动等^[24]。基于景观类型面积计算人为干扰度,具体公式及含义如下:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n G_i \times A_i}{A} \quad (8)$$

式中: H 为评价单元的人为干扰度; G_i 为*i*类景观类型的干扰度值; A_i 为*i*类景观类型的面积(km^2); A 为景观生态风险管理小区的总面积(km^2)。

2 结果与分析

2.1 景观生态风险时空变化分析

2.1.1 景观生态风险时空分布特征 利用 fragstats 软件并根据景观生态风险的相关公式进行 ERI 的计算,并采用自然断点法对景观生态风险值进行分类,利用 ArcGIS 10.2 将景观生态风险值进行风险评价小区的链接,为更美观地展示研究区景观生态风险值的空间变化特征,采用克里金插值法将景观生态风险值进行插值计算划分为低风险、中低风险、中风险、中高风险和高风险 5 种风险类型(表 1 和图 1)。根据表 1 可知,研究区中低风险区占比在 30% 以上,低风险区占比在 30% 左右,中风险区占比在 25% 左右,中高风险占比在 10% 左右,高风险面积较小,占比在 2% 左右。2000—2020 年低等级风险面积呈减少趋势,其中低风险面积呈单调递减趋势,整体上减少 5 881.10 km^2 ;中低风险则为先增后减,整体为减少,研究期间共减少 3 035.79 km^2 ;中风险和中高风险面积表现为先增后减再增趋势,整体上呈增加趋势,20 年中风险共增加 1 240.63 km^2 ,中高风险共增加 6 055.61 km^2 ,是研究区风险面积增加最多的风险类型;高风险面积占比则呈单调递增趋势,整体上共增加 1 620.36 km^2 。

表 1 云南省边境地区景观生态风险等级面积结构

Table 1 Area structure of landscape ecological risk levels in Yunnan border area

类型	2000年		2005年		2010年		2015年		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/%
低	62796.51	32.15	61637.94	31.56	61551.81	31.51	59437.57	30.43	56915.41	29.14
中低	63463.08	32.49	63787.08	32.66	65757.36	33.67	63477.25	32.50	60427.30	30.94
中	47922.21	24.54	48393.72	24.78	47233.30	24.18	47212.30	24.17	49162.85	25.17
中高	17267.02	8.84	17588.22	9.00	16343.76	8.37	19964.63	10.22	23322.63	11.94
高	3866.89	1.98	3908.75	2.00	4429.50	2.27	5223.94	2.68	5487.25	2.81

从空间分布看(图 1),中低风险主要分布在研究区中部和西北部,在西双版纳州、普洱市和怒江州呈集中连片分布;中风险和较高风险主要分布在文山

州、临沧市、保山市和德宏州;高风险主要分布在红河州、文山州、保山市城区和怒江州西部区域,呈逐年增加趋势。

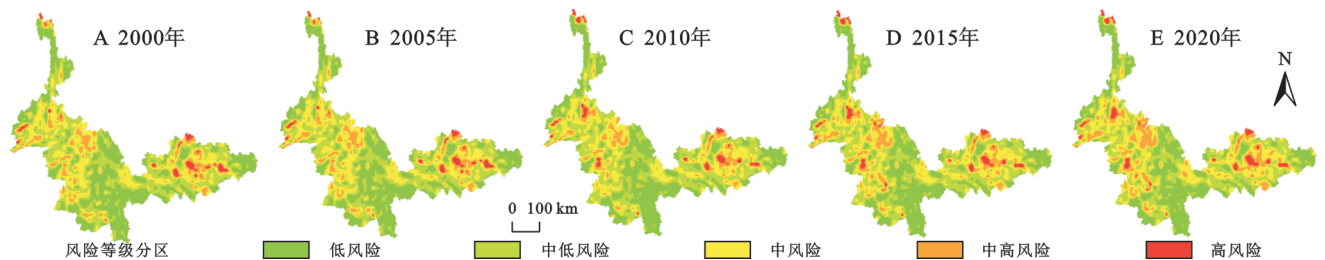


图 1 云南边境地区景观生态风险时空分布

Fig. 1 Spatiotemporal distribution of landscape ecological risks in Yunnan border area

2.1.2 景观生态风险等级时空变化分析 为更好了解云南省边境地区景观生态风险等级变化趋势,计算景观生态风险变化趋势表并制作变化图,见表 2 和图

2。2000—2005 年研究区 98.29% 的区域未发生风险等级变化,可以看出云南省边境地区生态风险较为稳定;发生风险等级变化的面积有 3 340.91 km^2 ,占总面积

积不足 2%；风险等级升高面积高于风险等级降低面积，风险等级变化区域零散分布在研究区内，空间变化不显著。2005—2010 年 84.61% 的区域未发生风险等级变化，同上一时期相比，风险等级变化面积占比增加，但总的变化面积少于上一时期；该时期风险等级升高面积低于上一时期，主要分布在文山州、红河州、德宏州北部和保山市以及临沧市；风险等级降低面积则高于上一时期，主要发生在西双版纳州纳勐海县往西北怒江方向，整体上看该时期生态系统呈改善发展。2010—2015 年生态环境较上一时期呈恶化状态，主要表现在风险等级升高面积大于风险等级降低面积，风险等级升高区域主要发生在普洱市糯扎渡水电站水库区域和临沧市凤庆县与保山市昌宁县相接处小湾电站水库区域。2015—2020 年研究区 91.07% 的区域风险

等级较为稳定，风险等级升高面积持续高于风险等级降低区域面积。2000—2020 年研究区大部分区域风险等级较为稳定，但生态系统面临较大威胁，主要表现在风险等级升高区域面积远远高于风险等级降低区域的面积。整体上看，云南省边境地区风险等级升高区域主要发生在怒江州北部生态环境脆弱和普洱市、保山市、临沧市等人为活动程度较强区域；在西双版纳州东部、普洱市东中部以及怒江州中部等区域，风险等级较低且风险等级较为稳定，原因是该区域主要植被类型为林地和草地，生态环境较好。此外，根据变化情况看，水库周围是风险等级变化的主要区域，水库具有重要的储存和调节，作为重要的水域生态系统，其生态保护对于维护区域生态系统的稳定性平衡至关重要，应加强对水库周围环境的生态保护。

表 2 研究区景观生态风险等级变化趋势面积

Table 2 Area of change trends in landscape ecological risk levels in study area

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%
不变	191974.54	98.29	165263.16	84.61	179848.42	92.08	177859.64	91.07	149985.88	76.79
降低	471.46	0.24	14837.95	7.60	2342.62	1.20	2641.95	1.35	11450.90	5.86
升高	2869.45	1.47	15213.95	7.79	13124.07	6.72	14813.45	7.58	33877.94	17.35

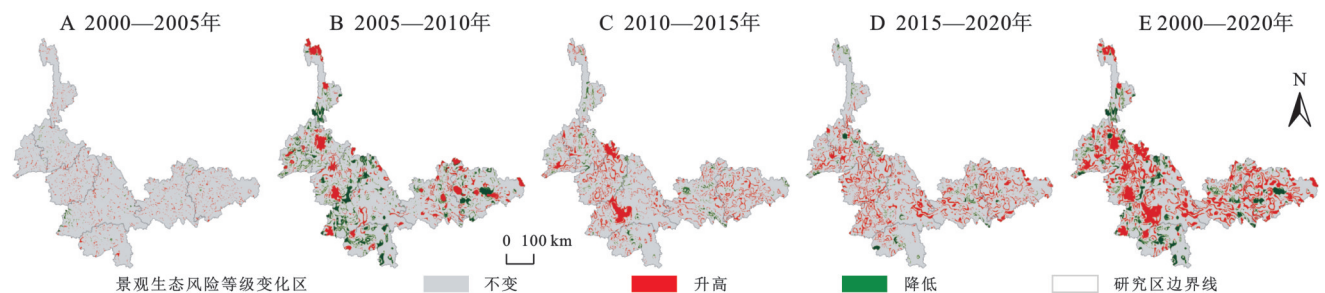


图 2 云南省边境地区景观生态风险变化

Fig. 2 Changes in landscape ecological risk in Yunnan border area

2.2 景观生态风险驱动力分析

为更好了解区域景观生态风险的影响因素，根据云南省边境地区的实际情况和相关研究，选取自然和社会经济两类因素共 8 个指标进行分析，自然因素有高程 (X_1)、NDVI (X_2)、年均降水量 (X_3)、年均气温 (X_4)；社会经济因素有 GDP 密度 (X_5)、人口密度 (X_6)、夜间灯光 (X_7)、人为干扰度 (X_8)。

2.2.1 单因子探测 根据单因子探测结果看(表 3)，自然因素中年均降水量对云南省边境地区景观生态风险的影响最大，其贡献率分别为 10.69%，11.79%，9.48%，16.53%，11.57%，整体上呈上升趋势；社会经济因素中人为干扰度的影响力最大，年均贡献度在 30% 以上，2000 年贡献度最高，其贡献度占比为 39.25%。从整体贡献率看，社会经济因素的总贡献率高于自然因素的总贡献率，与 2000 年相比，2020 年

自然因素贡献度均有所增加。除 2015 年，研究区景观生态风险的贡献率排名前 3 的均是人为干扰度、GDP 密度和夜间灯光，2015 年，排名前 3 的影响因子分别是人为干扰度、GDP 密度和年均降水量。自然生态系统本身较为复杂，各要素之间相互作用、相互关联，而随着社会经济的发展，人类活动对自然环境的干扰加强，如土地利用方式的改变和经济活动的加强等，导致生态环境面临威胁，在此情况下，人类更加注重自然生态环境保护。

2.2.2 因子交互探测 因子交互探测可以探测出不同风险因子之间相互作用时对研究对象的影响，通过因子交互探测可以识别出关键影响因子的组合。根据因子交互探测结果(图 3)可知，2000 年因子交互探测值前三的是人为干扰度 $X_8 \cap$ GDP 密度 X_5 (0.353 4)、人为干扰度 $X_8 \cap$ 年均降水量 X_3 (0.340 1) 和人为干扰

度 $X_8 \cap$ 高程 X_1 (0.312 9), 人为干扰度同高程、年均温度等的交互作用影响着研究区的景观生态风险值的变化, 而人为干扰度同社会经济因素的交互作用则加剧了区域景观生态风险的变化。2005年, 从交互结果看, 人为干扰度同其他因子交互值均呈上升趋势, 交互探测值前三的是人为干扰度 $X_8 \cap$ GDP 密度 X_5 (0.357 1)、人为干扰度 $X_8 \cap$ 年均降水量 X_3 (0.365 6) 和人为干扰度 $X_8 \cap$ 人口密度 X_6 (0.324 7)。2010年的主要驱动因子为人为干扰度 $X_8 \cap$ GDP 密度 X_5 (0.344 3)、人为干扰度 $X_8 \cap$ 年均降水量 X_3 (0.317 6)、人为干扰度 $X_8 \cap$ 年均气温 X_4 (0.286 5)。2015年人为干扰度 $X_8 \cap$ GDP 密度 X_5 (0.352 3)、人为干扰度 $X_8 \cap$ 年均降水量 X_3 (0.351 5) 和人为干扰度 $X_8 \cap$ 夜间灯光 X_7 (0.338 7) 位列前3, 同时, GDP 密度 (X_5) 同自然因素的交互作用也在增强。2020年因子交互作用前3分别为人为干扰度 $X_8 \cap$ 年均降水量 X_3 (0.324 5)、人为干扰度 $X_8 \cap$ 夜间灯光 X_7 (0.320 2)、人为干扰度 $X_8 \cap$ GDP 密度 X_5 (0.310 1)。综上, 人为干扰度同其他影响因素相互作用是影响研究区景观生态风险变化的主要原因; 2000—2020年自然因素交互作用中, 除高程 X_1 同年均降水量 X_3 交互值有所下降之外, 其他自然因素之间交互作用增强, 人为干扰度同其他因素交互作用解释力整体上呈下降趋势, 除个别因素交互作用降低外, 各因子间交互作用解释力均有所增强。

表3 研究区景观生态风险驱动因素单因子贡献度

Table 3 Single-factor contribution of landscape ecological risk driving factors in study area %

类别	影响因子代码	贡献度				
		2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
自然因素	X_1	2.10	1.87	2.25	2.03	2.88
	X_2	3.89	5.12	6.77	5.62	6.47
	X_3	10.69	11.79	9.48	16.53	11.57
	X_4	5.39	4.38	5.15	5.10	6.52
社会经济因素	X_5	19.60	17.95	21.12	21.68	20.94
	X_6	6.93	11.54	9.36	4.69	5.97
	X_7	12.15	13.30	11.63	14.49	14.94
	X_8	39.25	34.05	34.24	29.86	30.71

3 讨论

3.1 景观生态风险变化原因分析

中低风险是云南省边境地区的主要景观生态风险类型, 面积占比保持在30%以上, 低等级风险面积整体上呈下降趋势; 高风险面积占比最少, 整体上面积呈增加趋势。从空间上看, 低风险和中低风险集中在西双版纳州、怒江州中部和普洱市等区域, 低风险呈聚集分布, 在西双版纳州和普洱市等区域, 因

区域经济发展特色, 该区域多种植橡胶树、咖啡树和茶树等多年生林木, 区域主要植被类型为林地和草地, 具有森林覆盖率较高、生态环境较好等特点, 杜佳衡等^[19]指出林草植被覆盖率较高的区域生境质量较好, 生态系统较稳定, 因此区域生态风险较低; 而怒江州福贡县因受其地形地貌的影响, 多为高山峡谷, 区域土地利用难度大, 加之福贡县内有国家级自然保护区, 其保护面积高达280 km², 该区域还处于“三江并流”世界遗产地, 随着环保意识的深入, 当地居民积极投身到生态保护的行动中, 为区域生态环境的持续向好发展提供有力的保障。高等级风险呈现扩张连接趋势, 主要发生在文山州和临沧市, 这些区域主要景观类型为耕地和建设用地, 景观破碎度较高, 人为活动干扰较强, 周慧园等^[25]也指出人类活动是加剧景观生态风险等级升高的主要原因。风险等级升高区域在普洱市糯扎渡水电站水库、临沧市与保山市北部小湾电站水库区域集中分布, 该区域具有水资源、物种多样性丰富以及交通较为便捷等特点, 人类活动较为剧烈, 景观脆弱度指数较高, 因此导致区域景观生态风险等级较高, 刘可暄等^[21]关于密云水库的研究也印证了水源保护区附近由于景观脆弱度较高导致景观生态风险值较高, 水域周围是生活用地的主要区域, 是景观生态风险恶化的主要发生地^[26]。

3.2 景观生态风险驱动因素分析

(1) 从单因子探测结果看, 云南省边境地区的景观生态风险主要受社会经济因素影响, 且社会经济因素中人为干扰对研究区景观生态风险的变化起主导作用, 这与杜华栋等^[23]研究结果相佐证。自然因素中, 研究区自然因素的各项指标的贡献率整体呈增加趋势, 其中, 年均降水量是影响研究区景观生态风险变化的主要自然因素, 张师赫等^[27]认为适宜的降水条件能积极地影响区域生态环境的质量, 云南省边境地区的降水情况具有较显著的地域和季节差异, 南部和西部降水较多, 靠近哀牢山区域局部则呈现干热河谷气候, 研究区降水量时空分布不均, 对植被生长、河流水文特征、局部小气候调节以及土壤质地造成较大的影响, 进而通过影响区域景观格局的分布, 改变生态系统的结构和功能, 间接影响区域生态系统的稳定。社会经济因素中, 人为干扰度贡献率较高, 人为干扰度能较好地反映区域人为活动对生态系统结构和功能的影响^[28], 高强度的人为干扰, 如大规模的城市建设、农业开垦、修建水坝和生态保护政策的实施等^[29], 将原本连续的自然景观进行分割, 改变景观的组成, 干扰自然生态系统的物质循环, 降低生态系统的稳定性, 增加景观生态风险。

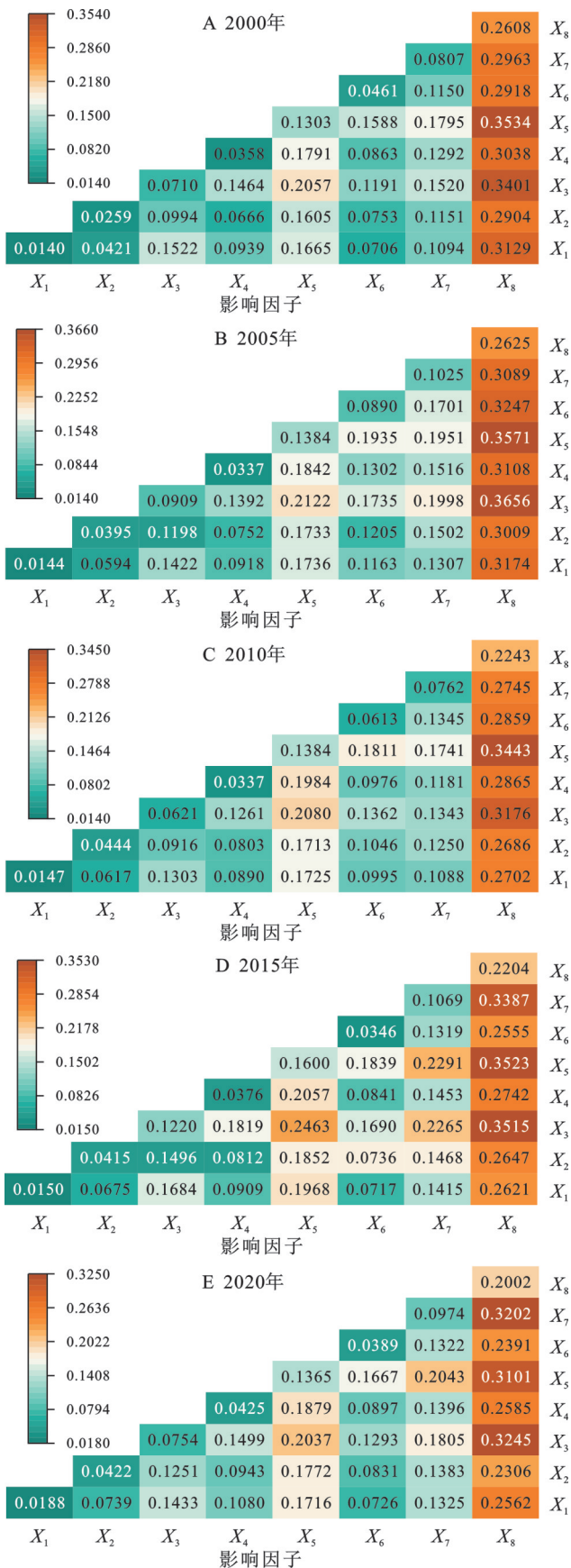


图3 云南省边境地区景观生态风险驱动因子交互作用探测结果

Fig 3 Results of interaction detection of landscape ecological risk driving factors in Yunnan border area

(2) 从双因子探测结果看,探测结果为双因子增强和非线性增强,表明两个因子共同作用时对因变量的解释力大于各自单独作用时的解释力。从因子交互结果,人为干扰度同其他影响因子相互作用对云南省边境地区景观生态风险影响结果最显著, GDP密度和年均降水量、夜间灯光相互作用也是影响研究区景观生态风险变化的重要驱动因素^[30],随着经济的快速发展和城镇化进程的加快,大量土地被应用于工业、商业和居住等,改变景观格局的同时加剧了区域景观的破碎化程度,高强度的人类活动和资源的过度开发,改变土地的利用方式的同时,使得矿资源、水资源和土壤资源被过度使用和污染,自然生态系统服务功能受损,导致风险不断累积和扩大。在全球气候变化的大背景下,年均降水量会通过影响土地的适宜性和植被的生长,进而影响景观的类型和分布,使区域经济生产结构也产生相应的变化, GDP密度和年均降水量、夜间灯光的相互作用就可能使土地利用格局的变化更加复杂,进一步加剧景观生态风险。从综合结果看,除人为干扰度同其他因子交互作用较强之外,人为干扰度同其他因子交互作用在减弱,大部分社会经济因子同其他因子交互作用强于自然因子间交互作用。研究表明云南省边境地区景观生态风险的时空变化受社会经济因素的主导,因此在边境地区的生态保护与建设中,要平衡好经济发展与生态建设,推进云南省作为生态文明排头兵任务的建设,巩固边境地区生态屏障的建设,为区域实现可持续发展打下坚实基础。

4 结论

(1) 研究区主要景观生态风险类型是中低风险。低等级风险面积整体上呈缩减趋势,中高等级风险整体上扩张趋势。景观生态风险等级较高区域主要分布在怒江州北部自然生态环境较脆弱区域、文山州和红河州地势较平坦区域以及各地市州经济较发达区域,低等级风险主要分布在怒江州中部、普洱和西双版纳林木覆盖率较高区域,低等级风险区主要以林地和草地为主,自然生态环境较好,应防止低等级风险向高等级风险转移。

(2) 研究区大部分区域未发生风险等级变化。风险等级升高区域的面积持续大于风险等级降低的面积,整体景观生态风险呈现恶化状态,研究区景观生态风险升高区域主要在糯扎渡水电站水库和小湾水电站水库区域,水域附近受人为活动干扰较强,景观脆弱度较高,因此应注意水域周围的生态环境保护。

(3) 社会经济因素和自然因素中人为干扰度和

年均降水量是影响研究区景观生态风险变化的主导因子,人为干扰度同其他因子交互作用是景观生态风险变化的主要原因。研究期间,人为干扰度同其他因子交互作用在减弱,其他大部分社会经济影响因子的驱动力在增强。

参考文献(References):

- [1] 李石华,周峻松,王金亮.1974—2014年抚仙湖流域土地利用/覆盖时空变化与驱动力分析[J].国土资源遥感,2017,29(4):132-139.
Li S H, Zhou J S, Wang J L. Spatio-temporal LUCC and driving force in Fuxian Lake watershed from 1974 to 2014[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2017, 29(4):132-139.
- [2] 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 J, Dang W X, Liu Y X, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(4):664-677.
- [3] 杨磊,刘凤莲.“三生空间”视角下滇中城市群景观生态风险评价及驱动因素研究[J].西南林业大学学报:自然科学,2024,44(4):73-85.
Yang L, Liu F L. Landscape ecological risk assessment and driving factors of urban agglomeration in central Yunnan from the perspective of production-living-ecological space[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2024,44(4):73-85.
- [4] 赵斌,朱四喜,杨秀琴,等.贵州草海菜地表层土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].生态环境学报,2018,27(4):776-784.
Zhao B, Zhu S X, Yang X Q, et al. Characteristics of heavy metals pollution and ecological risk assessment of the surface soils in the vegetable fields around Caohai in Guizhou[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(4):776-784.
- [5] 张子涵,王瑾杰,丁建丽,等.基于PLUS模型的艾比河流域景观生态风险分析及预测[J].干旱区地理,2025,48(2):308-322.
Zhang Z H, Wang J J, Ding J L, et al. Analysis and prediction of landscape ecological risk in Ebinur Lake Basin based on PLUS model[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(2):308-322.
- [6] Bao T T, Wang R F, Song L H, et al. Spatio-temporal multi-scale analysis of landscape ecological risk in Minjiang River Basin based on adaptive cycle [J]. Remote Sensing, 2022,14(21):5540.
- [7] Pastorok R A, Akçakaya R, Regan H, et al. Role of ecological modeling in risk assessment[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2003,9(4):939-972.
- [8] Hossain Bhuiyan M A, Chandra Karmaker S, Bodrud-Doza M, et al. Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of Dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods[J]. Chemosphere, 2021,263:128339.
- [9] 陈心怡,谢跟踪,张金萍.海口市海岸带近30年土地利用变化的景观生态风险评价[J].生态学报,2021,41(3):975-986.
Chen X Y, Xie G Z, Zhang J P. Landscape ecological risk assessment of land use changes in the coastal area of Haikou City in the past 30 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(3):975-986.
- [10] 许静,廖星凯.黄河流域甘肃段生态风险时空分异及驱动力分析[J].生态科学,2025,44(3):124-134.
Xu J, Liao X K. Temporal and spatial differentiation and driving force of ecological risk in Gansu section of the Yellow River Basin [J]. Ecological Science, 2025, 44(3):124-134.
- [11] 黄翰林,瞿德业,陆文静,等.鄱阳湖生态经济区景观生态风险评价及预测[J].环境科学与技术,2024,47(10):216-228.
Huang H L, Qu D Y, Lu W J, et al. Landscape ecological risk evaluation and prediction in Poyang Lake ecological economic zone [J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(10):216-228.
- [12] 巩小维,周冬梅,张军,等.“三生空间”视角下庆阳市景观生态风险评价及耦合协调度[J].干旱区研究,2025,42(3):556-567.
Gong X W, Zhou D M, Zhang J, et al. Landscape ecological risk evaluation and degree of coupling coordination in Qingyang City from the perspective of production-living-ecological space [J]. Arid Zone Research, 2025,42(3):556-567.
- [13] Ma R M, Xie M M, Yun W J, et al. Evaluating responses of temperature regulating service to landscape pattern based on ‘source-sink’ theory[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020,9(5):295.
- [14] 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 C X, Gong Y J, Zhang G J, 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.
- [15] 杭佳,石云,贺达汉,等.黄土丘陵区土地利用变化动态与景观格局分析:以彭阳县为例[J].水土保持研究,2013,20(6):203-208,2.
Hang J, Shi Y, He D H, et al. Dynamic of land use/cover changes and the analysis of landscape pattern in hilly and Gully Region of the Loess Plateau: a case study of Pengyang County in south of Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(6):203-208,2.

- [16] 张忠伟,郭晋廷,张军,等.基于多源数据的云南省水源涵养能力评估及影响因素研究[J].西北林学院学报,2025,40(1):165-177.
Zhang Z W, Guo J T, Zhang J, et al. Assessment of water conservation capacity and influencing factors in Yunnan Province based on multi-source data[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025,40(1):165-177.
- [17] Ludewig W, Shoko C. The effect of climatic events and land-use land-cover changes on evapotranspiration in a semiarid region of South Africa [J]. Journal of Arid Environments, 2024,225:105268.
- [18] 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.
- [19] 杜佳衡,王影雪,潘悦,等.高原河谷县域景观生态风险评价与生态安全格局构建:以云南省大理州永平县为例[J].生态学杂志,2024,43(5):1509-1520.
Du J H, Wang Y X, Pan Y, et al. Ecological risk assessment and ecological security pattern construction of county-level landscape in plateau valley: a case study in Yongping County, Dali Prefecture, Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(5):1509-1520.
- [20] 罗芹芹,刘凤莲.赤水河流域(贵州段)景观生态风险时空演变及驱动力探索[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(3):550-562.
Luo Q Q, Liu F L. Spatial-temporal evolution and driving forces of landscape ecological risk in the Chishui River Basin (Guizhou section) [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025,33(3):550-562.
- [21] 刘可暄,王冬梅,魏源送,等.密云水库流域多尺度景观生态风险时空演变趋势[J].生态学报,2023,43(1):105-117.
Liu K X, Wang D M, Wei Y S, et al. Spatio-temporal evolution trend of multi-scale landscape ecological risk in Miyun Reservoir watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(1):105-117.
- [22] 陈俞池,何源, Ahmd Ehab Talat, 等.基于PLUS-CSLE模型的窟野河流域不同土地利用变化情景的土壤侵蚀分析及预测[J].环境科学,2025,46(8):4971-4981.
Chen Y C, He Y, Ahmd Ehab Talat, et al. Analysis and prediction of soil erosion under different land use change scenarios in Kuye River Basin based on PLUS-CSLE model [J]. Environmental Science, 2025,46(8):4971-4981.
- [23] 杜华栋,刘云龙,毕银丽,等.1995—2021年榆神府矿区景观生态风险时空异质性研究[J].煤炭科学技术,2024,52(6):270-279.
Du H D, Liu Y L, Bi Y L, et al. Spatial-temporal heterogeneity of landscape ecological risk in Yushenfu Mining Area from 1995 to 2021 [J]. Coal Science and Technology, 2024,52(6):270-279.
- [24] Karimian H, Zou W M, Chen Y L, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factor analysis in Dongjiang River watershed [J]. Chemosphere, 2022, 307:135835.
- [25] 周慧园,罗文霞,谢跟踪,等.海南热带雨林国家公园40年来景观生态风险时空分布与变化特征[J].生态学报,2025,45(15):7401-7414.
Zhou H Y, Luo W X, Xie G Z, et al. Characteristics of landscape ecological risk in National Park of Hainan Tropical Rainforest over the past 40 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(15):7401-7414.
- [26] 王舒,刘凤莲,杜汶胶,等.滇西北高原湖泊流域景观生态风险时空演变及驱动力识别[J].环境科学,2025,46(5):3114-3126.
Wang S, Liu F L, Du W J, et al. Spatial-temporal evolution of landscape ecological risk and driving forces in the plateau lake basin of northwest Yunnan [J]. Environmental Science, 2025,46(5):3114-3126.
- [27] 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.
- [28] 刘春艳,张科,刘吉平.1976—2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J].生态学报,2018,38(11):3729-3740.
Liu C Y, Zhang K, Liu J P. A long-term site study for the ecological risk migration of landscapes and its driving forces in the Sanjiang Plain from 1976 to 2013 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(11):3729-3740.
- [29] 汪左,鞠森,王畅畅,等.江苏省景观格局时空演变及对人为干扰度的响应[J].遥感技术与应用,2023,38(2):264-273.
Wang Z, Ju S, Wang C C, et al. Temporal and spatial evolution of landscape pattern and its response to human disturbance in Jiangsu Province [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023,38(2):264-273.
- [30] 张文静,孙小银,单瑞峰,等.1975—2018年南四湖流域景观生态风险时空变化及其驱动因素研究[J].生态科学,2020,39(3):172-181.
Zhang W J, Sun X Y, Shan R F, et al. Spatio-temporal quantification of landscape ecological risk changes and its driving forces in the Nansihu Lake basin during 1975—2018 [J]. Ecological Science, 2020,39(3):172-181.