

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.019; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.019.

杨也, 李辉, 贾玉婷, 等. 近20年西南地区生态风险演变及其驱动机制:以四川盆地为例[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):284-294.

Yang Ye, Li Hui, Jia Yuting, et al. Evolution of ecological risk and its driving mechanisms in Southwest China over past two decades: a case study of Sichuan Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):284-294.

近20年西南地区生态风险演变及其驱动机制

——以四川盆地为例

杨也^{1,2}, 李辉^{1,2,3}, 贾玉婷^{1,2}, 周启刚^{1,4}, 罗欣玥², 程默²

(1.生态环境数据挖掘与集成应用重庆市重点实验室, 重庆 401320; 2.重庆财经学院公共管理学院, 重庆 401320; 3.西安交通大学管理学院, 西安 710049; 4.重庆工商大学公共管理学院, 重庆 400067)

摘要: [目的] 揭示四川盆地生态风险的时空演变特征及其主导驱动机制, 为区域生态安全保障与土地资源优化配置提供科学依据与实践路径。[方法] 基于2000—2020年多源数据, 构建“驱动力—压力—状态—影响—响应”(DPSIR)分析框架, 综合运用土地利用转移矩阵、景观生态风险指数(ERI)与地理探测器模型, 评估四川盆地生态风险的演变趋势及空间分异驱动因子。[结果] 研究期内, 四川盆地土地利用格局发生显著调整, 耕地面积减少13 542 km², 森林面积增加10 166 km², 不透水地表面积增加3 835 km², 生态用地向建设用地的转移趋势日益明显, 尤以成渝都市圈及周边地区最为突出。生态风险呈现“改善—恶化—恢复”的阶段性波动演变特征: 2000—2005年高风险区一度消失, 较高风险区面积扩展至46%; 2010年高风险区比例激增至65%, 生态系统压力显著上升, 低风险区域明显收缩; 2010—2020年期间风险格局趋于稳定, 高风险区占比持续维持在65%左右, 整体生态风险水平仍处于偏高状态。地理探测结果表明: 高程($q=0.35$)、年度最低温($q=0.34$)、年度最高温($q=0.32$)及人口密度($q=0.22$)是影响生态风险空间分布的主要驱动因素, 其中温度波动对生态系统稳定性具有显著影响。[结论] 四川盆地生态风险整体水平仍居高位, 区域生态系统脆弱性不容忽视。应依据生态风险等级实施差异化管理: 低风险区应加强生态保护, 中风险区重点推进生态修复与连通性提升, 高风险区则需聚焦系统治理与风险预警, 推动区域生态环境质量的持续改善与土地资源的高效利用。

关键词: 生态风险; 多维度; 地理探测器; 驱动因素; 四川盆地

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0284-11

Evolution of ecological risk and its driving mechanisms in Southwest China over past two decades —a case study of Sichuan Basin

Yang Ye^{1,2}, Li Hui^{1,2,3}, Jia Yuting^{1,2}, Zhou Qigang^{1,4}, Luo Xinyue², Cheng Mo²

(1.Chongqing Key Laboratory of Data Mining and Integrated Application for Ecological Environment, Chongqing 401320, China; 2.School of Public Administration, Chongqing Finance and Economics College, Chongqing 401320, China; 3.School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4.School of Public Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the spatiotemporal evolution characteristics and dominant driving mechanisms of ecological risk in the Sichuan Basin, providing a scientific basis and practical pathways for regional ecological security and optimal land resource allocation. [Methods] Based on multi-source data from 2000 to 2020, a Driving-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analytical framework was constructed. The land use transition matrix, landscape ecological risk index (ERI), and geodetector model were comprehensively

收稿日期: 2025-03-27

修回日期: 2025-04-25

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 国家社会科学基金项目“西南粮食主产区生态安全屏障构建及实现路径研究”(22XJY006); 2024年重庆市教育委员会人文社会科学研究一般项目“川渝地区耕地保护协同机制构建研究”(24SKGH361); 重庆市教育委员会科学技术研究项目“基于深度学习的解释性的遥感影像耕地智能提取方法研究”(KJQN20242102)。

第一作者: 杨也(1998—), 女, 四川广安人, 硕士, 助教, 研究方向: 生态环境评价与管理。E-mail: yangye9998@163.com

通信作者: 李辉(1989—), 男, 湖南攸县人, 硕士, 教授, 研究方向: 资源环境评价与管理。E-mail: lh25941630@163.com

http://stbcyj.paperonce.org

used to assess the evolutionary trends and spatial differentiation driving factors of ecological risk across the Sichuan Basin. [Results] During the study period, the land use patterns of the Sichuan Basin underwent significant adjustments. Cultivated land area decreased by 13 542 km², forest area increased by 10 166 km², and impervious surfaces expanded by 3 835 km². The trend of ecological land conversion to construction land became increasingly prominent, particularly in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration and its surrounding regions. Ecological risk exhibited a phased fluctuation pattern of “improvement-deterioration-recovery”. From 2000 to 2005, high-risk zones temporarily disappeared, while relatively high-risk zones expanded to 46%. In 2010, the proportion of high-risk zones surged to 65%, with significant increases in ecosystem pressure and marked contraction of low-risk zones. From 2010 to 2020, the risk pattern tended to stabilize, with high-risk zones consistently accounting for approximately 65%, indicating that the overall ecological risk level remained relatively high. The results of the geodetector analysis showed that elevation ($q=0.35$), annual minimum temperature ($q=0.34$), annual maximum temperature ($q=0.32$), and population density ($q=0.22$) were identified as the key drivers of spatial differentiation in ecological risk, among which temperature fluctuations exerted a significant impact on ecosystem stability. [Conclusion] The overall ecological risk level in the Sichuan Basin remains high, and the vulnerability of its regional ecosystems cannot be overlooked. Differential management should be implemented based on ecological risk levels: low-risk zones should strengthen ecological conservation, medium-risk zones should prioritize ecological restoration and connectivity enhancement, and high-risk zones should focus on systematic governance and early warning mechanisms, thereby promoting the continuous improvement of regional ecological quality and the efficient utilization of land resources.

Keywords: ecological risk; multidimensional analysis; geodetector; driving factors; Sichuan Basin

自20世纪80年代以来,中国经济社会快速发展,城镇化和工业化进程持续推进,极大地促进了国民经济增长与社会进步。然而,在粗放型发展模式的主导下,资源高强度开发与土地利用不当等问题日益凸显,导致生态系统承受前所未有的压力,表现为生物多样性加速丧失、生态系统服务功能持续退化以及生态风险水平不断上升。这一系列生态环境问题不仅破坏了区域生态安全格局,还对人类健康与福祉构成潜在威胁^[1]。在生态保护与经济发展矛盾日益突出的背景下,党的二十大报告明确指出,“要严密防控环境风险,提升生态系统多样性、稳定性与持续性”,为新时代生态文明建设指明了方向。如何科学识别与精准评估生态风险,已成为维护生态系统健康与保障区域可持续发展的关键议题。生态风险识别不仅能够识别生态系统潜在的退化危机,还可为生态空间优化配置、环境风险预警及政策制定提供决策依据,成为当前生态安全保障与环境管理的重要研究方向^[2]。

生态风险是指由于自然或人为干扰导致生态系统结构和功能发生退化的可能性^[3]。其系统性评价是制定生态保护策略的基础,经典框架包括风险源识别、暴露—响应评估和风险表征3个核心模块^[4-5]。随着景观生态学理论的发展,Turner等首次将空间异质性纳入风险评价体系,推动研究尺度从单一生态单元

向区域综合拓展^[6]。我国学者曾辉^[1]、彭建^[7]等在此基础上,分别结合国情发展了空间模拟技术和景观格局分析法,为生态风险本土化研究提供了支撑。

目前,生态风险评价方法体系日趋完善,微观层面,Suter等采用“风险源-暴露-受体”范式^[8]、于航等利用生物标志物和毒性测试评估特定生态单元风险^[9];宏观尺度方面,则有学者融合景观指数(如ERI)、空间模型(如CA-Markov)等技术,量化风险时空格局^[10-11]。在生态风险驱动机制研究方面,刘敏等通过地理探测器探讨风险驱动因子^[12]、李璐等利用增强回归树等模型对生态风险进行评估^[13],揭示自然—人为因素的交互作用^[14]。近年来,学者的研究进一步聚焦时空演化规律与分区管控。时空动态研究方面,采用时间序列分析^[15]、空间自相关等技术解析风险演变趋势^[16];对于分区管控研究,针对高风险区进行生态修复^[17],优化低风险区保护策略^[18];同时对二者进行交叉研究,关注生态安全与粮食安全的耦合关系^[19],揭示耕地退化对粮食生产的链式效应。

尽管研究取得进展,但现有研究仍存在一定局限性:其一,多数研究依赖静态指标体系,难以反映生态系统在社会经济动态变化下的响应特征,限制了模型的时空适应性^[20];其二,驱动机制分析多侧重于变量间的统计相关性,尚未深入揭示生态系统内部反馈机制及其复杂非线性关系^[21];其三,在高分辨

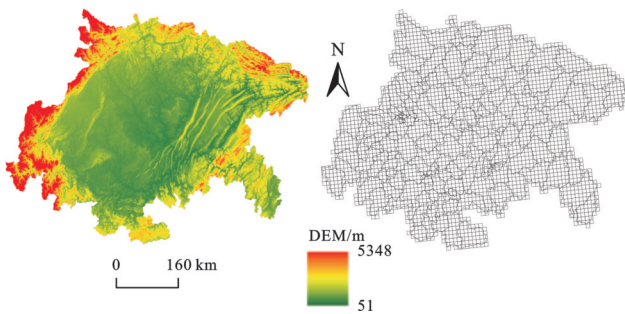
率特征挖掘方面仍显不足,导致生态风险预警的空间靶向性和管理时效性有待提升^[22]。

四川盆地是我国重要的粮食主产区之一,在保障国家粮食安全、支撑区域经济社会可持续发展中具有重要战略地位。随着区域工业化和城市化进程加快,四川盆地面临着耕地资源紧张、土地开发生度过高、生态环境退化等诸多挑战^[23]。本文以四川盆地为研究区域,基于景观生态风险评价(Ecological Risk Index, ERI)模型,结合地理探测器与土地利用转移矩阵,系统分析区域生态风险的时空演变特征,识别生态风险的核心驱动因素及其空间异质性规律。研究旨在为四川盆地生态风险防控、土地资源管理及生态安全格局优化提供科学依据与理论支撑。

1 材料和方法

1.1 区域描述

四川盆地,位于中国西南部,地理坐标约为东经102°—110°、北纬28°—33°(图1),总面积约26万km²。该盆地涵盖四川省的大部分地区及重庆市,主要包括成都市、绵阳市、泸州市、南充市、自贡市、德阳市、广元市、遂宁市、内江市、乐山市、宜宾市、广安市、达州市、雅安市、巴中市、眉山市、资阳市等城市和县域。盆地内的地形特征呈现出明显的梯度变化。盆地中央区域为广阔的平原地带,地势较为平坦。与之相比,盆地的四周被山脉环绕,形成了盆地的外缘地带,这些山地地势陡峭,地质构造复杂,构成了盆地的自然边界。



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

图1 研究区概况及评价单元划分图

Fig. 1 Overview of the study area and division of evaluation units

四川盆地属于亚热带湿润气候区,年降水量丰富,年均气温在15~18℃^[24]。该地区降水季节性强,夏季降水集中,且年降水量具有较大的空间差异,局部地区呈现典型的季风气候特征。盆地内水系发达,主要由长江、嘉陵江、岷江等流域构成,水资源条件优越,为农业生产提供充足的水源保障。土壤类型方面,四川盆地土地肥沃,涵盖紫色土、黄棕壤、水

稻土等,土壤肥沃,具有优越的农业条件,是中国重要的粮食生产基地之一。

1.2 数据来源与处理

本研究以四川盆地5个时间节点(2000年、2005年、2010年、2015年、2020年)的遥感影像为基础数据源。土地利用数据由Google Earth Engine平台提供的Landsat数据构建,数据制作由武汉大学黄昕教授及其团队完成,土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、不透水地表(建筑设施地表、交通基础设施及工程化地表)及其他土地8个类型^[25],空间分辨率为30 m(网址:https://zenodo.org/record/5816591)。行政区划数据来源于国家测绘局地理信息局标准地图底图(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/)。人口密度数据来自美国佛罗里达大学地理系和新型病原研究所提供的WorldPop数据集(网址:https://www.worldpop.org/),分辨率为1 km。经济密度数据来源于2000—2020年期间四川省相关市和重庆市统计年鉴。DEM数据从地理空间数据云平台(网址:http://www.gscloud.cn)下载,空间分辨率为30 m。年降水量数据来源于国家地球系统科学数据中心(网址:https://www.geodata.cn)。气温数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(网址:http://www.resdc.cn)。温室气体排放数据来自欧盟委员会分享的全球大气排放数据库(Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR)空间分辨率为11 km。此外,为了确保数据的空间一致性,所有空间数据在投影处理时统一采用World Geodetic System 1984(WGS1984)坐标系统。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用转移矩阵模型 土地利用转移矩阵(Land Use Transition Matrix)常用于描述土地利用类型在不同时期之间转移过程。它以矩阵的形式展示某一时间段内,各类土地利用类型的转化情况,以量化和描述某一地区在一段时间内土地利用的变化趋势和空间分布的变动。其表达式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n 代表土地利用类型总数; S_{ij} 表示研究初期 i 类用地转为末期 j 类用地的面积。矩阵中的每个单元格表示从某一类型在某一时段转换到另一类型的面积。

1.3.2 生态风险指数核算模型 景观损失度是指自然与人为因素共同作用下,不同景观类型所表征的生态系统自然属性的退化程度。本研究基于表1所示公式构建景观损失度指数(R_i),通过多维指数耦合方法整合景观干扰度(E_i)与景观脆弱度(V_i),形成定

量化评估景观退化及生态风险的复合指标体系。其数学表达式为:

$$R_i = E_i \times V_i \quad (2)$$

式中: R_i 为景观损失度指数; E_i 表示人类活动与自然扰动对景观系统的综合干扰强度; V_i 反映景观类型自身生态稳定性的固有属性。

基于文献研究^[11-12]并结合四川盆地生态本底特征,本研究构建了景观脆弱度等级评价体系。选取区域主导的 6 类景观类型,通过德尔菲法确定脆弱度序次:耕地(6) > 草地(5) > 其他用地(4) > 林地(3) > 水

域(2) > 不透水地表(1)。采用极差标准化法对原始赋值进行归一化处理,获取各景观类型脆弱度指数 V_i 及其空间权重,具体计算流程详见表 1 技术参数说明。

$$ERI = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (3)$$

式中: R_i 为景观损失度指数; A_{ki} 表示第 k 个风险小区内景观类型 i 的面积; A_k 为第 k 个风险小区的总面积; n 代表景观类型的总数。ERI 表示风险小区 i 的景观生态风险指数,数值越大意味着生态风险越高,反之则表明生态风险较低。

表 1 景观格局指数及其意义

Table 1 Landscape pattern indices and descriptions

指数名称	计算公式	参数意义
景观破碎度指数	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$	A_i 为景观类型 i 的面积; n_i 是斑块数量
景观分离度指数	$N_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A_i}}$	A_i 为景观 i 的总面积; A 为景观总面积 n_i 为景观 i 的斑块数
景观分维数指数	$F_i = \frac{2 \ln(\frac{P_i}{4})}{\ln A_i}$	P_i 是景观类型 i 的周长
景观干扰度指数	$E_i = aC_i + bN_i + cF_i$	a, b, c 为相应各景观指数的权重,且 $a+b+c=1$,根据相关研究 ^[24] ,结合本研究区的实际情况,认为破碎度指数最为重要,其次为分离度和分维数,分别赋以 0.5、0.3 和 0.2 的权重

为了将景观生态风险指数空间化,本研究采用覆盖整个研究区域的网格进行系统采样。根据景观生态学理论,为全面反映采样点周围的景观格局信息,风险区的面积应达到平均斑块面积的 2~5 倍。针对研究区边缘不规则地块的处理方法,面积大于 0.5 个规整样区的地块单独作为一个样区;而面积小于 0.5 个规整样区的地块则并入相邻样区^[26]。基于这一原则,在 ArcGIS 软件的技术支持下,按照景观斑块的平均面积大小,将研究区域划分为 10 km × 10 km 的风险评价单元。通过对四川盆地进行格网化重采样,共得到了 3 005 个评价单元(图 1)。基于这些评价单元以及相关模型,本研究计算四川盆地的生态风险指数,并采用中心点赋值法进行空间插值,以分析四川盆地生态风险指数在过去 20 年中的时空分布特征。

1.3.3 地理探测器 基于景观生态风险指数(ERI)的评估结果表明,四川盆地生态系统健康状况呈现显著时空异质性,但 ERI 指标本身难以揭示其空间分异的驱动机制。为深入解析耕地生态系统风险格局的形成机理,本研究引入地理探测器方法进行归因分析。该方法通过量化驱动因子与生态风险的空间耦合度,可有效辨识关键影响要素及其解释强度,其单因子探测模型表达式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

式中: q 值域为 [0, 1], 表征驱动因子解释力; L 为因子分级数; N_h 为分区 h 内样本数; N 为样本总数; σ^2 与 σ_h^2 分别为流域 ERI 方差以及分区 h 内的 ERI 方差。

1.3.4 驱动因素指标体系构建 生态风险作为人类干扰与自然条件交互作用对景观格局与生态过程产生的非期望后果,本研究在参考前人研究的基础上,结合研究区实际情况,从人类干扰、温室气体、气候条件、自然环境、气候状况 4 个维度选取 9 个因子来探测各因素对四川盆地生态风险影响机理,具体指标体系构成见表 2。

表 2 驱动因素指标体系
Table 2 Indicator system of driving factors

准则	指标	单位
人类干扰	GDP	%
	人口密度	万人/km ²
温室气体	CH ₄	t/(0.1° × 0.1° · a)
	CO ₂	t/(0.1° × 0.1° · a)
	N ₂ O	t/(0.1° × 0.1° · a)
气候条件	年度最高温	°C
	年度最低温	°C
	降水量	mm
自然环境	DEM	m

2 结果与分析

2.1 土地利用时空演化分析

本研究通过对研究区土地利用现状分布格局的

分析,结合土地利用转移矩阵及弦图,深入探讨了区域内土地利用类型的时空变化特征。具体而言,重点分析了农田、森林及不透水地表3种土地利用类型在20年期间的变化趋势及其具体面积变化(图2)。

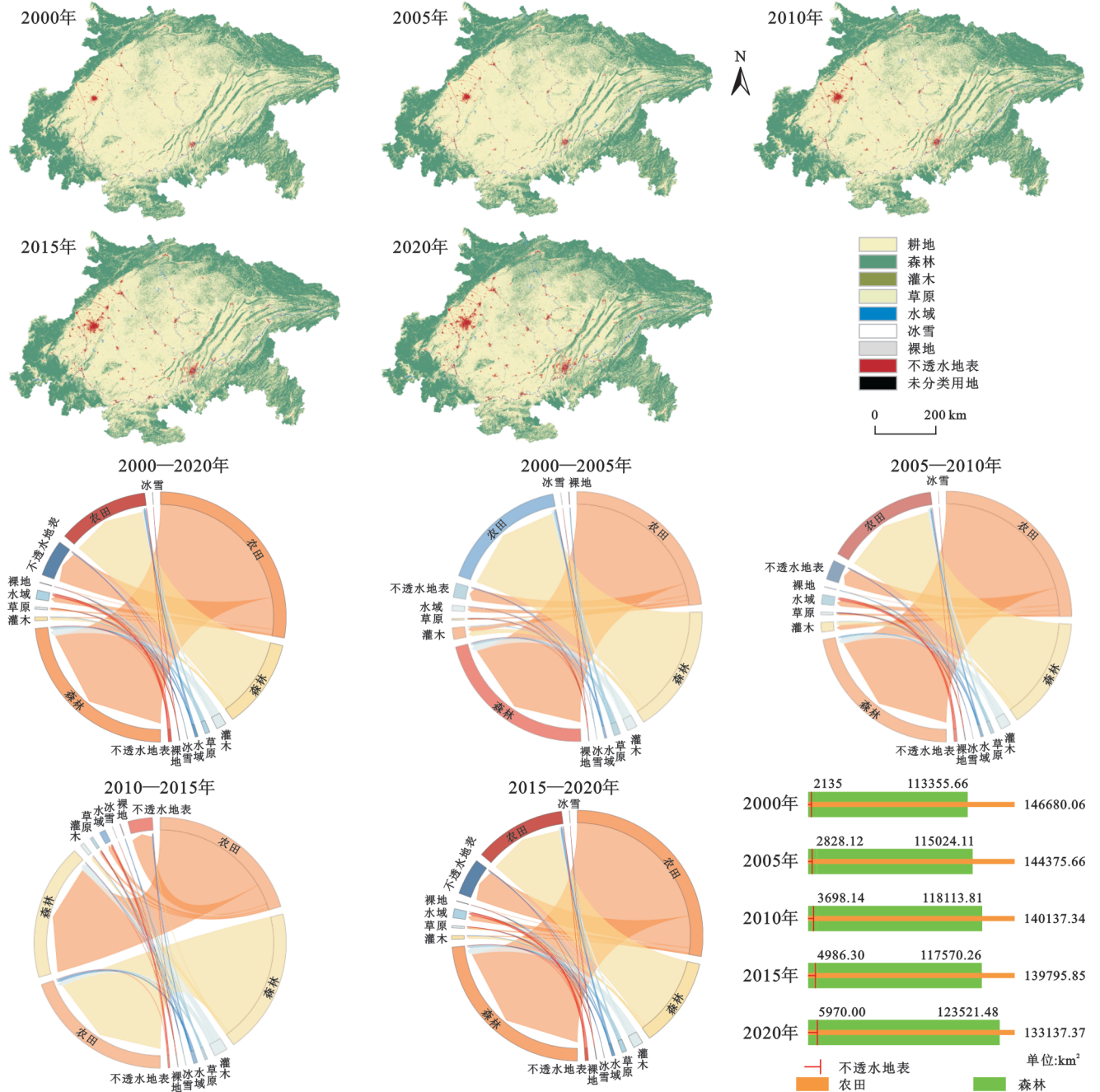


图2 2000—2020年四川盆地土地利用空间格局及变化

Fig. 2 Spatial patterns and changes of land use in Sichuan Basin (2000—2020)

从土地利用现状分布格局(图2)来看,研究区中央广阔的平原地区主要为农田,而盆地四周被山脉环绕,形成了外缘地带,这些区域大多为林地。研究区的西北部与东南部存在较大面积的不透水地表,这些地区主要为成都和重庆等城市及其周边区域。值得注意的是,在2000—2020年期间,不透水地表区域呈现出以成都和重庆为中心,向郊区快速扩展的

趋势,呈现出明显的辐射状发展特征。

农田、森林与不透水地表这3种土地利用类型的面积变化在20年内最为显著。在这段时间内,大规模的农田转化为森林,同时,部分农田转变为不透水地表,且少量农田区域变为水域、草原或灌木等地类。尽管存在一定的农田向森林转化的趋势,部分森林区域也发生了向农田的转变,但其转出的面积

远小于转入的面积。少部分森林转化为灌木,极小部分转化为草原或裸地等其他地类。相比之下,不透水地表的变化幅度较小,但其转入面积显著大于转出面积,表现为大量农田以及部分其他类型土地被转化为不透水地表,而极少面积的不透水地表转变为其他土地类型。

进一步分析 2000—2020 年的不同时间段,发现 2000—2005 年农田与森林的面积变化最为显著。在这一时期,农田的转入面积小于转出面积,而森林的转入面积则大于转出面积。2005—2010 年大量农田转化为森林,同时部分森林转化为农田。2010—2015 年森林与农田之间的转入与转出面积接近,而不透水地表的面积持续稳定增加。

2000—2020 年农田面积由 146 680 km² 减少至 133 137.37 km²,而森林面积则由 2000 年的 113 355.66 km² 增加至 2020 年的 123 521.48 km²,其中 2015—2020 年森林面积的增长最为显著。20 年间不透水地表的变化率最大,从 2000 年的 2 135 km² 增加至 5 970 km²,面积增长接近 3 倍。

2.2 区域生态风险的时空演变特征

为揭示四川盆地生态风险的时空演变特征,本文基于 ArcGIS 平台采用克里金(Ordinary Kriging)空间插值方法,对研究区 3 005 个生态风险评价网格单元在 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 个时点的生态风险指数进行了空间插值分析,获取其预测值分布区间均为 0.0~0.8。为增强各时期生态风险空间分布的可比性,在借鉴相关研究的基础上,结合研究区的实际情况,采用相对指标法将生态风险指数划分为 5 个等级:高生态风险(0.56~0.80)、较高生态风险(0.42~0.56)、中等生态风险(0.28~0.42)、较低生态

风险(0.14~0.28)和低生态风险(<0.14),并据此绘制了五期生态风险时空分布图(图 3)及生态风险等级面积变化图(图 4),从空间和数量两个维度系统刻画了生态风险的演变特征。

从空间分布特征来看,研究区整体生态风险在空间上呈现出明显的异质性。盆地东南部的山地区域生态风险水平显著高于其他地区,尤以重庆市境内表现最为突出;而以成都市区为中心的区域则普遍处于较低风险水平,表现出区域内部生态风险的显著差异性。这种空间差异不仅受到人类活动强度和土地利用类型的影响,还与地形起伏变化密切相关,表明地形地貌因素对生态风险的空间格局具有重要调控作用。

在时间演变方面,2000 年研究区整体生态状况较为良好,大部分区域处于中等及以下风险水平,仅在合川、江津、云阳、奉节等地局部形成条带状高生态风险区,主要沿长江干线分布。至 2005 年,生态风险有所缓解,高风险区基本消失,较低生态风险区面积显著扩大,说明该阶段生态环境呈现向好趋势。然而,2010 年研究区生态风险水平大幅上升,超过 65% 的区域被划为高生态风险区,仅有成都市中心、雅安、乐山、绵阳、泸州等地保留中低风险等级,重庆市仅剩城口、石柱等局部区域处于较低风险状态,反映出生态压力的骤然加剧和环境退化的严峻形势。

进入 2015—2020 年研究区部分区域生态风险有所缓解,低及较低生态风险区域面积回升,尤其在盆地中西部地区表现明显,部分中高风险区域转变为中低等级,显示出生态系统恢复的初步成效。但总体来看,研究区仍有约 65% 的面积处于高生态风险状态,表明生态压力依然严峻,生态系统整体脆弱,恢复成效仍有限。

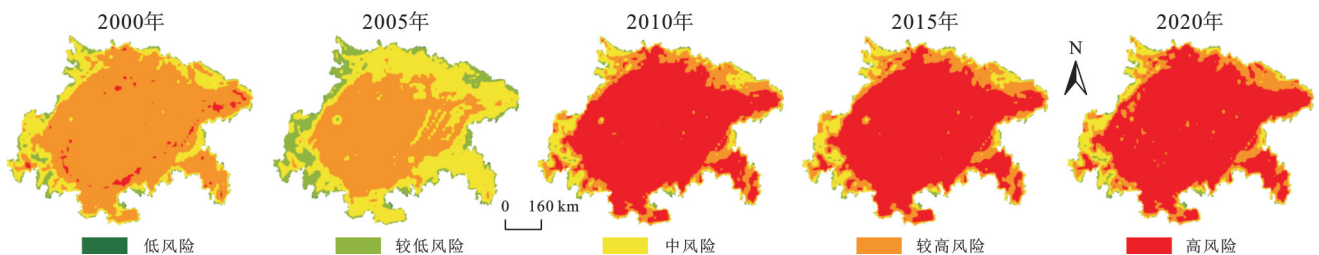


图 3 四川盆地 2000—2020 年生态风险等级时空变化

Fig. 3 Spatiotemporal variation of ecological risk levels in Sichuan Basin (2000—2020)

从数量上看,2000 年高生态风险区占比仅为 3%,中生态风险区占主导地位,低及较低生态风险区合计占比约为 12%;到 2005 年,高风险区消失,较高风险区面积由 17% 上升至 46%,而中风险区面积缩减一半,低风险区比例显著增加至 20%。

然而,在 2005—2010 年期间,大面积耕地向林地和不透水地表转化,导致景观格局进一步破碎化。尽

管林地具备一定的生态涵养能力,但初期转化的林地多为结构单一、生物多样性较低的人工林,短期内难以有效承担完整的生态服务功能,生态系统恢复能力有限。加之不透水地表比例上升进一步削弱了生态连通性与稳定性,最终使得区域生态风险显著上升,高风险区面积骤增至 65%,中低风险区面积显著缩减,生态形势明显恶化。2010 年之后,生态风险分布

趋于稳定,至2020年,高生态风险区仍维持在65%左右,低及较低生态风险区比例稳定在9%左右,反

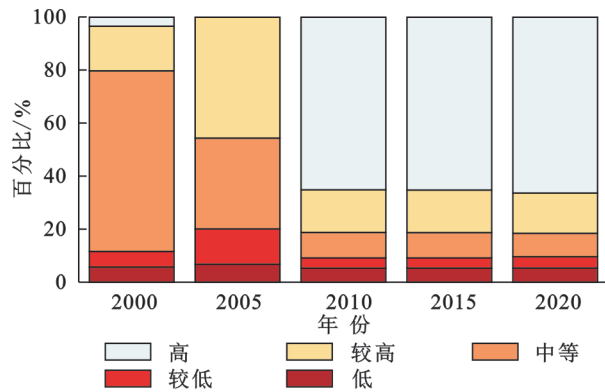


图4 2000—2020年四川盆地生态风险等级面积变化

Fig. 4 Changes in area of ecological risk levels in Sichuan Basin (2000—2020)

综上所述,2000—2020年研究区生态风险演化呈现出“先改善—后恶化—再缓慢恢复”的动态变化过程,整体表现为复杂的时空差异性。尽管近年来部分区域生态风险水平有所缓解,但高风险区依旧广泛分布于盆地核心地带,区域生态系统面临长期而持续的压力。为推动区域生态环境的根本改善,应针对高风险区实施差异化、精准化的生态修复与保护措施,增强生态系统韧性,保障区域生态安全和粮食安全的可持续发展。

2.3 生态风险驱动力分析

驱动因子在不同时间尺度下对研究区生态风险

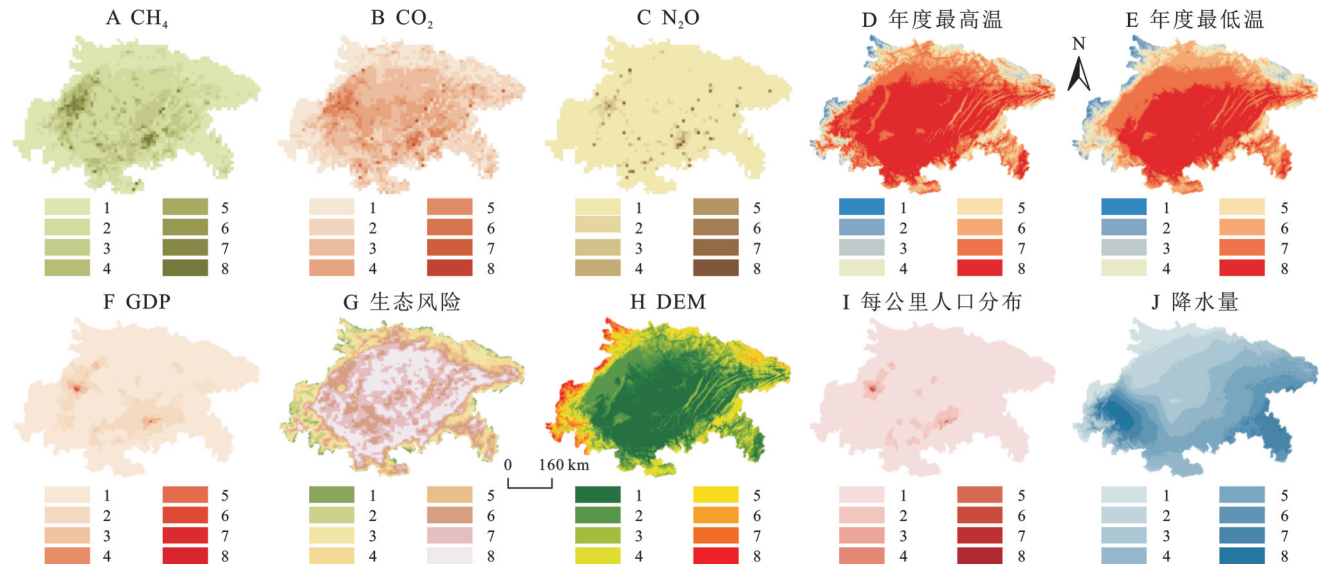
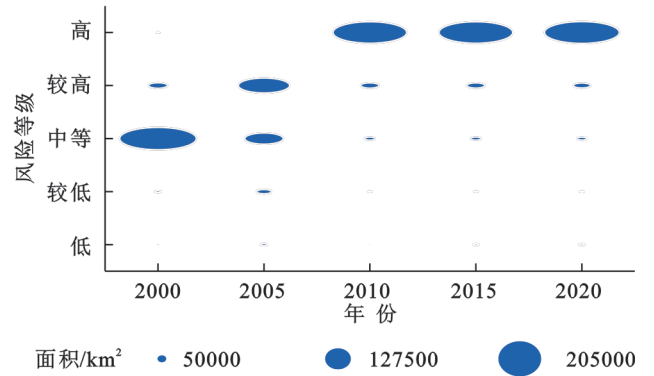


图5 四川盆地生态风险驱动因子等级分类

Fig. 5 Classification of ecological risk driving factor levels in Sichuan Basin

本文基于2000—2020年研究区的地理探测器分析结果(图6)揭示了不同驱动因子对该区域生态风险的影响程度及其空间分布特征。研究表明,研究区的生态风险主要受自然环境、气候条件、温室气体排放以及人类活动等因素的影响,其中自高程、温度、人口密度等因素在生态风险形成中的作用较突

映出研究区生态风险水平持续偏高,整体未见根本性改善。



的影响呈现出明显的规律性与差异性。为深入探讨各因子对研究区生态风险的驱动机制,本研究采用地理探测器方法对2000—2020年的生态风险进行多维度探测,旨在定量评估各变量对生态风险的贡献度。考虑到人类活动(如人口密度、GDP)、温室气体排放(如CH₄、CO₂、N₂O)、气候条件(如年度最高温、年度最低温及降水量)和地形条件等多个关键因子,本研究对这些影响因子进行了重分类,并将其划分为1至8级。

通过空间可视化的方式,分别展示了每个因子的分级结果,如图5所示。

出,各驱动因子q值见表3。

从自然环境的维度来看,高程对研究区生态风险的影响最大,其q值为0.3477,表明地形高差和地势起伏对生态风险的驱动作用非常显著。研究区地形复杂,较为脆弱的生态环境容易受到外界自然灾害和人为活动的影响,导致生态风险加剧。

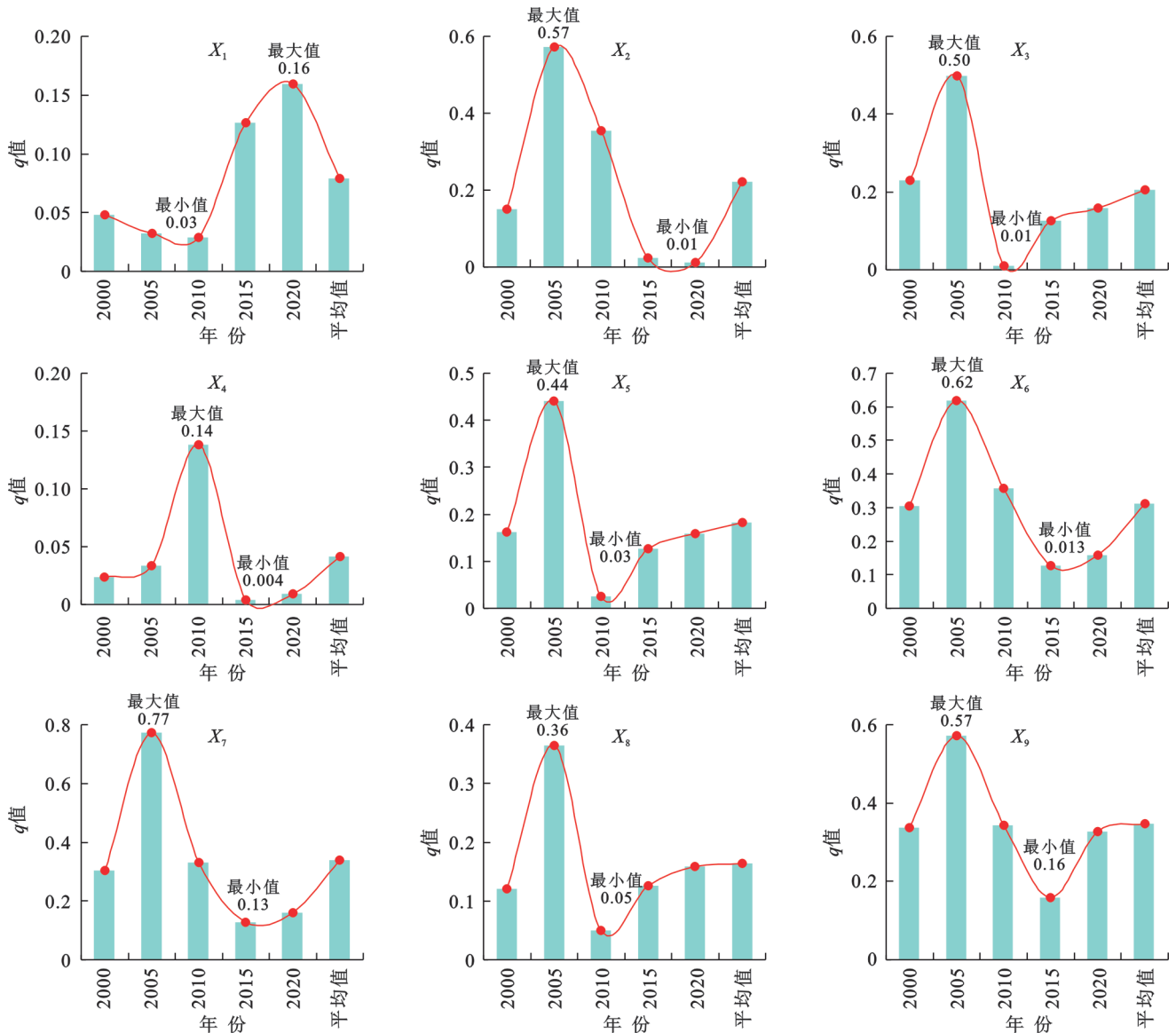


图 6 四川盆地 2000—2020 生态风险驱动因素指标

Fig. 6 Indicators of ecological risk driving factors in Sichuan Basin (2000—2020)

在人类活动方面,人口密度(q 值为 0.222 6)是研究区生态风险的主要驱动力。特别是在 2005 年和 2010 年,人口密度的 q 值分别达到了 0.571 7, 0.355 3 的峰值,表明随着城镇化进程的加快和人口数量的增加,对土地资源的开发利用显著增强,进而对生态环境造成了巨大压力。人口密度的增加促使大规模的城市化扩张,导致农田、森林等自然生态系统的占用和改变,增加了生态脆弱性。此外,随着工业化和城市化的推进,排放的温室气体和污染物也加剧了生态风险。

从温室气体的角度分析, CO_2 对研究区生态风险的驱动作用较小,其 q 值仅为 0.017。尽管二氧化碳是全球气候变化的重要因素,但其对研究区生态风险的直接影响相对较弱。与此相比,甲烷(CH_4)和一氧化二氮(N_2O)对研究区生态风险的影响较显著, q

值分别为 0.204 7, 0.182 8, 表明这两种温室气体的排放对生态环境的影响较大。尤其是在 2005 年,温室气体排放的增加可能导致气候异常和生态系统功能的下降,从而显著增加生态风险。

从气候条件角度分析,温度对研究区生态风险的影响尤为强烈。尤其是在 2005 年,年度最低温和年度最高温的 q 值分别为 0.772 0, 0.617 7, 远高于其他因子。这表明温度的变化,特别是温度极端值的波动,对研究区的生态系统产生了显著的影响。气温的变化可能导致水资源分布不均、物种栖息地改变以及农业生产的波动,这些都直接影响到生态系统的稳定性与可持续性。而降水量对生态风险的影响较弱, q 值为 0.164 1, 排名第 7, 这表明降水量在研究区生态风险中的作用较小,可能是由于该区域降水相对稳定,且降水对土地利用和气候变化的反馈作用较为缓和。

表 3 驱动因素指标体系
Table 3 Indicator system of driving factors

准则层	因子层	q 值					均值	排名
		2000年	2005年	2010年	2015年	2020年		
人类活动	GDP 增长率(X_1)	0.0478**	0.0322**	0.0289**	0.1264**	0.1591**	0.0789**	8
	人口密度(X_2)	0.1510**	0.5717**	0.3553**	0.0238**	0.0112**	0.2226**	4
温室气体	CH ₄ (X_3)	0.2295**	0.4989**	0.0093**	0.1264**	0.1591**	0.2047**	5
	CO ₂ (X_4)	0.0235**	0.0338**	0.1379**	0.0040**	0.0091**	0.0417**	9
	N ₂ O(X_5)	0.1628**	0.4403**	0.0255**	0.1264**	0.1591**	0.1828**	6
气候条件	年度最高温(X_6)	0.3034**	0.6177**	0.3568**	0.1264**	0.1591**	0.3127**	3
	年度最低温(X_7)	0.3034**	0.7720**	0.3299**	0.1264**	0.1591**	0.3382**	2
	降水量(X_8)	0.1206**	0.3643**	0.0498**	0.1264**	0.1591**	0.1641**	7
自然环境	高程(X_9)	0.3361**	0.5717**	0.3441**	0.1589**	0.3278**	0.3477**	1

注:**表示 $p < 0.01$, 结果显著。

综上所述,研究区的生态风险主要受到自然环境、气候条件和人类活动的综合作用。温度、地形(高程)等自然因素对生态风险的影响尤为突出,人口密度则是推动生态风险变化的重要因素。特别是在 2005 年和 2010 年,人口密度的高峰期伴随着温室气体排放增加,导致生态风险显著加剧。相对而言,GDP 增长率和 CO₂ 排放对生态风险的影响较为微弱。整体来看,气候变化和自然环境特征是研究区生态风险的主要驱动因素,而人口密度、温室气体排放等人类活动因素也对生态环境产生了一定的压力。未来的生态保护工作应重点关注气候变化和人口增长对生态风险的影响,采取适当的保护和管理措施,以减少不利因素对研究区生态环境的影响。

3 讨论

本研究以 2000—2020 年四川盆地为研究区域,综合利用土地利用数据、社会经济指标及生态环境参数,构建 DPSIR 理论分析框架,融合土地利用转移矩阵、景观生态风险指数(ERI)模型与地理探测器方法,系统探讨了耕地生态风险的时空演化特征及其驱动机制。以下从土地利用变迁与生态风险之间的耦合关系、生态风险的时空演变模式、驱动因素的识别及其作用路径 3 个方面展开深入讨论。

3.1 土地利用变化与生态风险的耦合关系

土地利用格局的演变不仅是区域生态环境变化的直观体现,更是生态风险水平变动的核心驱动因子之一。研究表明,2000—2020 年四川盆地整体土地利用格局呈现出“生态用地向建设用地”转移的趋势,尤其是在成都、重庆等大都市圈及其外围区域,该过程表现为剧烈的城市扩张与空间重构。大规模建设用地的侵占直接导致耕地和林地等生态功能强的土地类型持续压缩,生态系统的空间完整性和功能连通性遭到破坏,

造成景观破碎化、生态调节能力下降,显著推高区域生态风险水平。与已有文献研究结果相一致,城市扩张与土地覆盖变化是当前生态风险加剧的重要诱因^[27]。此外,本研究还发现生态风险的空间分布呈边缘集聚特征,即城市边缘带、丘陵过渡区以及资源开发强度大的区域,是生态风险上升的热点区。这一空间分异格局反映出城市扩张对生态系统的扰动呈“向外渗透”态势,生态压力具有明显的空间异质性和扩散性。

3.2 生态风险的时空演变规律

从时间维度看,四川盆地 2000—2020 年的生态风险演化呈现出明显的阶段性特征,整体可划分为“改善—恶化—恢复”3 个阶段:2000—2005 年受益于国家实施的“退耕还林”“天然林保护”等生态工程,区域生态系统得以恢复,ERI 水平相对较低,生态风险呈下降趋势;2005—2015 年随着“西部大开发”“成渝城市群”等国家战略的纵深推进,建设强度大幅提升,大面积耕地向林地和不透水地表转化,导致景观格局进一步破碎化,生态用地持续减少,生态连通性与稳定性降低,生态系统稳定性受损,生态风险水平快速上升;2015—2020 年部分地区通过实施生态补偿、土地整治、山水林田湖草沙工程等生态修复措施,ERI 出现回落,高风险区域略有缩减,但从整体趋势看,生态风险仍维持在较高水平。这一结果表明,生态风险的演变不仅受自然因素的影响,还与政策调控、经济发展和社会活动密切相关^[28]。

3.3 生态风险驱动因素的识别与作用机制

借助地理探测器模型,本研究对生态风险的驱动机制进行了定量识别,发现高程、温度与人口密度为影响四川盆地生态风险水平的核心因子,具体表现如下:四川盆地地形结构复杂,地势起伏较大。高海拔地区生态系统类型单一、恢复能力弱,易受到自然灾害与人类活动的双重干扰,生态系统稳定性差,成为

生态高风险的敏感区;气候变暖背景下,温度波动增强,极端气候频发,导致区域生态系统面临更大的适应性挑战,从而加剧了其脆弱性;人口密集区域通常也是建设活动最频繁、资源消耗最集中的区域。人口增长带动建设用地扩展,直接引发生态用地减少,进而显著提升生态风险水平。上述结果表明,自然地理条件构成生态系统承载力的基本框架,而人类活动则通过土地利用方式的改变加剧生态系统的脆弱性,是当前区域生态风险加剧的主导因子之一^[29]。

4 结论

四川盆地生态系统结构持续演变,空间格局趋于复杂化。过去20年间,生态用地持续向建设用地转移,城市扩张与产业聚集主导了土地利用格局重构,以成都、重庆等中心城市及其都市圈周边最为显著。该过程导致耕地资源压缩、景观连通性削弱与生态系统破碎化加剧,区域生态脆弱性上升,生态风险水平显著提升。

生态风险变化呈现阶段性波动,受政策调控与发展战略的双重影响。研究发现,生态风险在2000—2020年经历了“初步缓解—快速上升—局部恢复”的动态过程。这一演化趋势不仅反映出国家重大生态政策(如退耕还林)与区域开发战略(如西部大开发)的阶段作用,也提示生态系统对人类活动响应存在显著滞后性和区域异质性,政策执行的成效亦具有空间不均性。

自然条件与人类活动共同塑造生态风险格局,交互作用显著。高程与温度等自然地理因素决定了生态系统的敏感性与承载力,是构建生态本底风险的重要基础;而人口密度作为人类活动强度的典型代表,显著影响建设用地扩张与生态用地压缩,成为推动生态风险加剧的核心驱动因子。生态风险的形成是“自然脆弱性—人类扰动—土地变迁”链式机制共同作用的结果。

综上所述,本研究不仅从多维视角揭示了四川盆地生态风险演变的复杂性和系统性,而且通过机制解析和风险分区管理建议,为生态文明建设、国土空间优化与区域可持续发展提供了科学支撑。然而,当前模型在驱动因子选取与非线性交互效应识别方面仍有待完善,未来研究应加强政策变量、制度变革等社会驱动因素的量化表达,并结合前沿方法深化生态风险演化的预测能力,以实现更高精度的生态安全预警与调控。

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 J, Dang W X, Liu Y X, et al. Review on landscape

- ecological risk assessment[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015,70(4):664-677.
- [2] 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.
- [3] Assessment E R. Guidelines for Ecological risk assessment[R]. Washington, D C: US Environmental Protection Agency, 1998.
- [4] Suter G W. Endpoints for regional ecological risk assessments[J]. *Environmental Management*, 1990,14(1):9-23.
- [5] Norton S B, Rodier D J, van der Schalie W H, et al. A framework for ecological risk assessment at the EPA[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1992,11(12):1663-1672.
- [6] Turner M G. Landscape ecology: the effect of pattern on process[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989,20(1989):171-197.
- [7] 曾辉,刘国军.基于景观结构的区域生态风险分析[J].中国环境科学,1999,19(5):454-457.
Zeng H, Liu G J. Analysis of regional ecological risk based on landscape structure[J]. *China Environmental Science*, 1999,19(5):454-457.
- [8] Suter G W. Ecological risk assessment[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [9] 于航,刘学录,赵天明,等.基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学,2022,41(2):99-107.
Yu H, Liu X L, Zhao T M, et al. Landscape ecological risk assessment of Qilian Mountain National Park based on landscape pattern[J]. *Ecological Science*, 2022,41(2):99-107.
- [10] Du L D, Dong C, Kang X C, et al. Spatiotemporal evolution of land cover changes and landscape ecological risk assessment in the Yellow River Basin, 2015—2020[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023,332:117149.
- [11] 魏鹏,余敦,胡海洋,等.立体空间视角下景观生态风险时空演化及影响因素分析[J].农业工程学报,2024,40(19):250-261.
Wei P, Yu D, Hu H Y, et al. Spatial-temporal evolution of landscape ecological risk and its influencing factors from the perspective of three-dimensional space[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024,40(19):250-261.
- [12] 刘敏,蔡海生,张学玲,等.基于Geodetector-GTWR的江西省景观生态风险及驱动因素[J/OL].环境科学,2024:1-14.(2024-12-24).<https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202409113>.
Liu M, Cai H S, Zhang X L, et al. Landscape ecological risk and its driving factors in Jiangxi Province based on geodetector-GTWR[J/OL]. *Environmental Science*, 2024:1-14.(2024-12-24).<https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202409113>.

- [13] 李璐,段存存,龚逸伟,等.城市生态环境风险评估方法与模型研究进展[J].中国环境科学,2025,45(7):4124-4134.
Li L, Duan C C, Gong Y W, et al. Research progress on urban ecological environment risk assessment methods and models [J]. China Environmental Science, 2025, 45(7):4124-4134.
- [14] 杨霏,周玉,陈银银,等.长江经济带土地利用-产业-交通-环境系统耦合协调及驱动力研究[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2025,43(4):74-83,96.
Yang F, Zhou Y, Chen Y Y, et al. Study on the coupled coordination and driving force of land use-industry-transportation-environmental systems in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2025, 43(4):74-83, 96.
- [15] 成勤,万君,王清龙,等.2000—2021年长江流域植被NPP特征及其对气候变化的影响[J].三峡生态环境监测,2024,9(2):27-36.
Cheng Q, Wan J, Wang Q L, et al. Characteristics of vegetation NPP and response to climate change in the Yangtze River basin from 2000 to 2021[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2024, 9(2): 27-36.
- [16] 冯少茹,黄木易,舒莹,等.1995—2020年长江流域安徽段景观生态风险评估及地理探测[J].安徽农业大学学报,2024,51(6):1042-1050.
Feng S R, Huang M Y, Shu Y, et al. Landscape ecological risk assessment and geographic exploration in the Anhui section of the Yangtze River Basin from 1995 to 2020 [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2024, 51(6):1042-1050.
- [17] 印建文.生态敏感区铁路隧道风险因素分析[J].土木工程学报,2024,57(S1):80-87.
Yin J W. Analysis of risk factors for railway tunnels in ecologically sensitive areas[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(S1):80-87.
- [18] 勾容,苏维词,黄贤凤.基于景观生态安全评价的贵州省生态安全网络构建及多情景模拟[J].环境科学,2025,46(7):4580-4591.
Gou R, Su W C, Huang X F. Construction of ecological security network and multi-scenario simulation in Guizhou Province based on landscape ecological security assessment [J]. Environmental Science, 2025, 46(7): 4580-4591.
- [19] 周伟,石吉金,范振林.基于粮食安全和生态安全的耕地生态保护研究[J].中国土地科学,2023,37(7):125-134.
Zhou W, Shi J J, Fan Z L. Research on ecological protection of cultivated land based on food security and ecological security[J]. China Land Science, 2023, 37(7):125-134.
- [20] 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.
- [21] 陈彬森,袁丹晶,毛怡然,等.长江上游流域生态风险评价及生态分区建设[J/OL].环境科学,2024:1-15.(2024-11-27). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202407276>.
Chen B S, Yuan D J, Mao Y R, et al. Ecological risk evaluation and ecological zoning construction in the Upper Yangtze River basin[J/OL]. Environmental Science, 2024: 1-15. (2024-11-27). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202407276>.
- [22] 许静,陈根.黄河下游粮食主产区生态风险演化及其驱动因素非平稳性[J].安全与环境学报,2024,24(12):4881-4893.
Xu J, Chen G. Dynamics of ecological risk and spatial-temporal non-stationarity of its driving factors in the major grain-producing areas of the lower Yellow River [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(12): 4881-4893.
- [23] 李辉,周启刚,李斌,等.近30年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):654-666.
Li H, Zhou Q G, Li B, et al. Spatiotemporal change and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Three Gorges Reservoir area in the past 30 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(3):654-666.
- [24] 冯浩鹏,康平,张文倩,等.四川盆地夏季区域性持续性臭氧过程垂直变化差异及气象成因[J].环境科学学报,2023,43(4):14-26.
Feng H P, Kang P, Zhang W Q, et al. Vertical variation and meteorological causes of regional persistent ozone processes over Sichuan Basin during summer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(4):14-26.
- [25] Yang J, Huang X. 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.
- [26] 卢远,苏文静,华瑾,等.左江上游流域景观生态风险评估[J].热带地理,2010,30(5):496-502.
Lu Y, Su W J, Hua C, et al. Landscape ecological risk assessment for upper Zuojiang River Basin[J]. Tropical Geography, 2010, 30(5):496-502.
- [27] Zhang W, Chang W J, Zhu Z C, et al. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change[J]. Applied Geography, 2020, 117:102174.
- [28] Wang S S, Tan X, Fan F L. Landscape ecological risk assessment and impact factor analysis of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19):4726.
- [29] Xie H L, Wang P, Huang H S. Ecological risk assessment of land use change in the Poyang Lake eco-economic zone, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2013, 10(1):328-346.