



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目：川滇生态屏障区景观生态风险评价及其影响因素
作者：高彬嫫, 李琛, 吴映梅, 郑可君, 武燕
DOI: 10.13287/j.1001-9332.202105.018
收稿日期: 2020-12-31
网络首发日期: 2021-02-10
引用格式: 高彬嫫, 李琛, 吴映梅, 郑可君, 武燕. 川滇生态屏障区景观生态风险评价及其影响因素. 应用生态学报. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202105.018>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

川滇生态屏障区景观生态风险评价及其影响因素

高彬嫔¹ 李琛¹ 吴映梅¹✉ 郑可君^{1,2} 武燕¹

(¹云南师范大学地理学部, 昆明 650500; ²云南省社会科学院, 昆明 650000)

*通信作者 E-mail: wuyingmei@hotmail.com

摘要 探究重点生态功能区景观生态风险时空演变特征, 揭示人类活动对景观生态风险恶化的潜在影响, 对防范和化解景观生态风险、促进区域可持续发展具有重要意义。以 2000、2010、2020 年土地覆被数据为基础, 运用 ArcGIS 10.8 和 Fragstats 4.2 等软件, 基于景观格局指数和脆弱度指数构建景观生态风险评价模型, 借助空间分析方法, 揭示川滇生态屏障区景观生态风险时空演变特征, 采用地理探测器测度不同区域范围的自然和社会经济因素对景观生态风险的影响。结果表明: 2000—2020 年间, 研究区人造地表、水体、灌木地面积总体呈上升趋势, 林地、耕地、草地、湿地、裸地、冰川永久积雪面积总体呈下降趋势, 景观类型转移以林地、草地、耕地间转移为主, 其中, 耕地转人造地表最显著; 景观生态风险平均值有所下降, 景观生态风险等级分布与景观类型变化及转移特征较为一致; 研究区整体上以低生态风险、较低生态风险和较高生态风险等级为主; 景观生态风险的时空演化特征总体受高程、降水等自然因素影响, 经济社会及区域可达性对局部风险恶化区的影响较为突出。

关键词 生态风险评价; 景观格局; 影响因素; 川滇生态屏障区

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202105.018

Landscape ecological risk assessment and influencing factors in ecological conservation area in Sichuan-Yunnan provinces, China

GAO Bin-pin¹, LI Chen¹, WU Ying-mei¹✉, ZHENG Ke-jun^{1,2}, WU Yan¹

(¹ Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; ² Yunnan Academy of Social Sciences, Kunming 650000, China)

Abstract Exploring characteristics of temporal and spatial variations of landscape ecology risk of key ecological function zone, and revealing the potential influence of human activity on aggravation of landscape ecological risk is of great significance for preventing and resolving landscape ecology risk and promoting regional sustainable development. Based on the land cover data of 2000, 2010 and 2020, this paper constructed a model of risk assessment on landscape ecology, incorporating a landscape index and an assessment of ecological vulnerability, with the support of ArcGIS10.8 and Fragstats4.2. The spatial analysis method were used to reveal characteristics of temporal and spatial variations of landscape ecology risk in ecological conservation in Sichuan-Yunnan provinces, while using the Geodetector to quantify the impact of natural and social-economy factors in different ranges of region on landscape ecological risk. The results showed that from 2000 to 2020, the area of artificial land surface, water, shrubland in the study area showed an upward trend, while the area of forestland, cultivated land, grassland, wetlands, barren land and permanent snow cover and glacier showed a downward trend. There existed remarkable transfer of landscape types among forestland, grassland and cultivated land, especially the transfer from cultivated land to artificial surface. The mean value of landscape ecological risk had been reducing, and the classes of landscape ecological risk was in accord with the change and shift of landscape. Landscape ecological risk mainly was at lower, low and high levels in ecological conservation in Sichuan-Yunnan provinces. It turned out that natural elements, including elevation and precipitation, generally exerted influence on the temporal-spatial characteristics of landscape ecological risk. In addition, factors like economy, society and regional accessibility could contribute to prominent impact on local area suffering from pejorative risk.

Key words ecological risk assessment; landscape pattern; dominating factors; ecological conservation area in Sichuan-Yunnan provinces.

收稿日期: 2020-12-31

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目(41761037)资助

作者简介: 高彬嫔, 女, 1988 年生, 博士研究生。主要从事城市与区域发展研究。E-mail: 549147219@qq.com

Fund: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41761037).

网络首发时间: 2021-02-10 09:54:46 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20210209.1651.001.html>

生态环境安全作为国家安全的重要组成部分,是经济社会持续健康发展的重要保障,在坚定不移贯彻“五大发展理念”和“两山理论”的背景下,高度重视并有效防范和化解生态环境风险,实现人与自然和谐共生,成为生态文明建设的重要内容。景观生态风险评价摆脱了传统以某一特定自然风险因子表征区域风险状态的局限,逐渐成为生态风险评价研究的一个重要分支^[1],基于景观格局的生态风险评价,重视景观空间结构对生态风险过程的影响,强调生态风险评价的时空异质性和尺度效应,实现多元风险的综合表征和空间可视化^[2],能够综合反映出自然与人为相互作用下造成的生态环境问题^[3]。随着经济发展与生态环境保护矛盾的不断加剧,生态屏障区对生态安全承担着不可替代的作用,揭示景观类型特征与多种自然、人为干扰因素对川滇生态屏障区景观生态风险的综合影响,保障其整体运行能力得到有效管控显得尤为重要。

景观生态风险评价目前已成为国内外研究的热点之一。20世纪90年代Heggen等^[4]使用景观分析方法评估人类土地利用对Tensas河流域生态系统健康状况的影响,随后Kapustka等^[5]将景观生态学理论加入生态风险评价并提出管控策略,Estoque等^[6]分析了加利福尼亚拉梅萨流域景观格局变化特征对生态风险的影响。国内学者对于景观生态风险研究主要围绕流域^[7]、绿洲^[8]、海岸带^[9]、湿地^[2]、城市^[10]等区域开展;评价方法主要采用景观格局指数法^[11-13]、熵值法^[14]、暴露-响应^[15]构建生态风险评价模型并结合GIS空间建模进行空间分析;评价尺度也从单一尺度向多尺度发展,已有学者通过确定适宜空间粒度,探讨景观生态风险的多尺度变化^[16]。目前,对于景观生态风险评价研究区的选择多侧重流域与城市范围,研究内容以景观生态风险模型构建及空间分析为主,缺乏对国家生态安全屏障区景观生态风险评价的重视,更鲜有从整体与局部两种视角进行影响因素的定量分析角度,探索随生态系统整体风险演变过程中局部系统所受的累积效应。基于此,本研究选取国家重点生态功能区川滇生态屏障区为研究对象,运用地理探测器从自然因素、经济社会因素、区域可达性因素出发探究川滇生态屏障区及其局部生态恶化区的景观生态风险的来源和影响程度。

川滇生态屏障作为我国“两屏三带”生态安全格局的重要组成部分,是全国重要生态系统保护和修复重大工程之一。筑牢川滇生态安全屏障,防范和化解生态环境风险,做好景观生态风险评价,维护其生态系统的稳定与健康,是践行人与自然生命共同体理念、推进绿色发展的重要内容。本研究在景观生态学和地理学理论的指导下,利用2000、2010及2020年土地覆被数据,在系统分析景观类型特征的基础上,构建景观生态风险评价模型,借助空间分析方法对景观生态风险时空演变特征进行分析,探究影响川滇生态屏障区及其局部生态恶化区景观生态风险演变的主要影响因素,试图揭示景观生态风险与自然环境、人为活动的内在联系,以为生态屏障区景观资源保护、生态系统优化与管控策略的制定提供决策依据,为其他重要生态安全屏障区景观生态风险评价与风险防范提供借鉴,对丰富全国重要生态系统保护与可持续发展研究、落实主体功能区战略、衔接国土空间规划具有一定的理论与实践意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

川滇生态屏障区地跨云南、四川两省,位于云南西北部和四川中部(26°32'—34°19' N, 98°03'—104°58' E),东北紧临陕西省,西与西藏自治区毗邻,包含四川省76个县(区)和云南省17个县(区),总面积23.67万km²。区内地形交错复杂,包括四川盆地、横断山脉和云贵高原等,在地貌上属青藏高原的东延部分,地势由西北到东南逐步下降。气候类型以高原山地温带、亚热带季风气候为主,年降水量500~1400 mm,平均气温地区差异性较大,全区年均气温可相差20℃以上。境内河流较多,水系发育多呈树枝状或羽毛状分布,主要有金沙江、雅砻江、大渡河、岷江等。

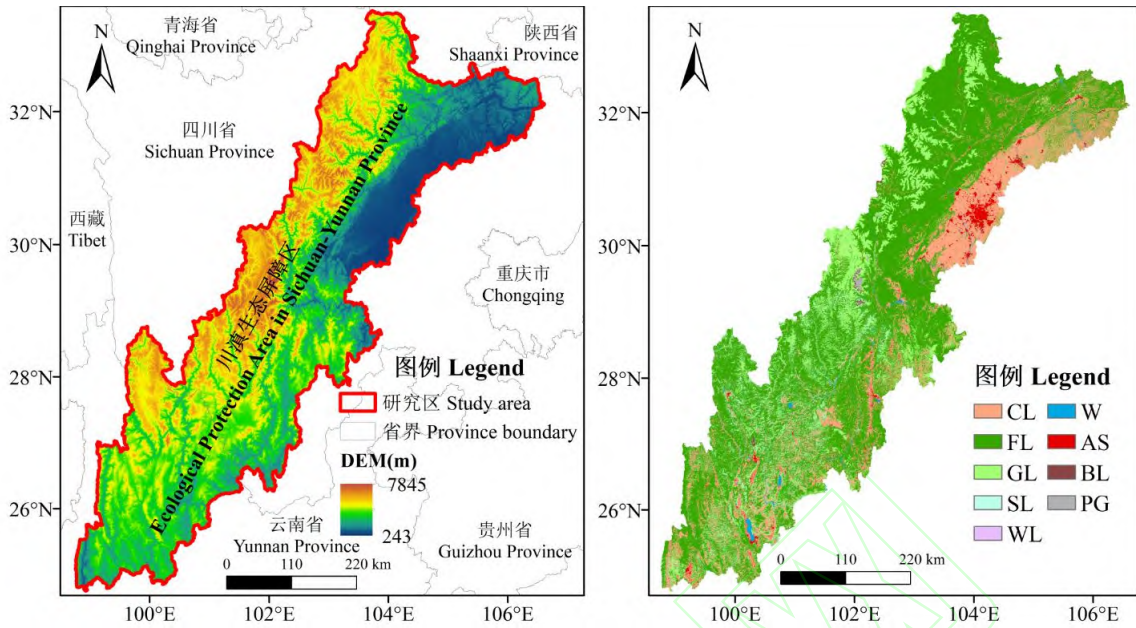


图1 研究区地理位置及土地覆被类型
Fig. 1 Geographical location of study area and land cover type.

DEM: 数字高程模型 Digital elevation model; CL: 耕地 Cultivated land; FL: 林地 Forestland; GL: 草地 Grassland; SL: 灌木地 Shrubland; WL: 湿地 Wetland; W: 水体 Water; AS: 人造地表 Artificial surfaces; BL: 裸地 Barren land; PG: 冰川和永久积雪 Permanent snow cover and glacier. 下同 The same below.

1.2 数据来源与处理

土地覆被数据源于 Globeland30 全球地表覆被数据库 (<http://www.globallandcover.com/>), 包括 2000、2010 和 2020 年 3 期数据, 空间分辨率为 30 m×30 m, 该数据集时间跨度较长、精度较高。全区土地覆被类型包括耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表、裸地、冰川永久积雪共 9 种。高程数据来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>); 年降水量、年平均气温、地貌数据、GDP 空间分布千米网格数据来自 WorldClimv2.0 及中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>); 土壤数据来自中国科学院南京土壤研究所中国土壤数据库 (<http://vdb3.soil.csdb.cn>); 人口密度数据来自美国宇航局社会经济数据和应用中心 (SEDAC) (<https://sedac.ciesin.columbia.edu>); 夜光遥感数据来自 Scientific data 公开发表的全球夜光遥感数据集 (<https://www.nature.com/sdata>); 2020 年国家发展改革委自然资源部印发的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划 (2021—2035 年)》^[17]。

1.3 评价单元划分

为了将景观生态风险指数空间化, 结合研究区实际情况, 在 ArcGIS 10.8 中进行网格化处理。本研究采用 15 km×15 km 的格网, 把川滇生态屏障区划分为 1208 个评价单元, 利用 Fragstats 4.2 软件分别计算每一评价单元的景观生态风险指数值, 作为样地中心点的生态风险值。

1.4 景观生态风险指数构建

景观格局反映了人类对自然生态系统的影响方式与程度, 其产生的生态影响具有区域性和积累性特征, 生态风险的大小取决于不同景观所代表的生态系统受到外部干扰强度和内部抵抗能力的大小^[18]。基于此, 本研究从景观格局的角度出发, 利用景观干扰度指数、景观脆弱度指数及景观组分的面积比重构建景观生态风险评价模型^[19], 计算公式如下:

$$ERI_i = \sum_{k=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (1)$$

式中: ERI_i 为第 i 个样本单元内的景观生态风险指数; A_{ki} 为第 k 个样本单元内景观类型 i 的面

积; A_k 为第 k 个样本单元的面积; R_i 为景观损失度指数。

基于景观破碎度指数、景观分离度指数和景观优势度指数构建景观干扰度指数 (U_i) [20], 计算公式如下:

$$U_i = aC_i + bS_i + cD_i \quad (2)$$

式中: U_i 为景观干扰度指数; C_i 为景观破碎度指数; S_i 为景观分离度指数; D_i 为景观优势度指数; a 、 b 、 c 分别为 3 类指数的权重, 且 $a+b+c=1$ 。结合已有研究和研究区实际情况 [21-22], a 、 b 、 c 分别赋值为 0.5、0.3、0.2。

景观脆弱性反映了不同景观类型抵抗外界干扰的敏感度, 借鉴已有研究成果, 通过专家打分法, 对确定的 9 种景观类型的脆弱性赋值 [23], 由高到低依次为人造地表 9、裸地 8、耕地 7、草地 6、冰川永久积雪 5、灌木地 4、湿地 3、水体 2、林地 1, 最后进行归一化处理得到各类景观的脆弱度指数 (F_i) 值, 分别为 0.20、0.18、0.16、0.11、0.09、0.07、0.04、0.02。

景观损失度指数 (R_i) 表示景观类型受到干扰后出现生态损失的程度 [24], 计算公式如下:

$$R_i = U_i \times F_i \quad (3)$$

1.5 探索性空间数据分析

探究景观生态风险指数的空间异质性特征, 运用 ArcGIS 地统计分析模块对点数据进行半变异函数拟合, 得到最佳拟合模型 [25], 选取指数克里金插值法分别对 3 期数据进行空间插值 [26], 生成景观生态风险空间分布图, 利用转移矩阵模型分析不同时期景观生态风险等级转移情况; 为了进一步分析相邻区域风险属性是否存在空间关联性, 通过全局空间自相关 Moran's I 指数表征景观生态风险指数在空间上的集聚效应, Moran's I 值在 -1~1, 大于 0 表示正相关, 小于 0 表示负相关, 等于 0 表示不相关 [27]。

1.6 地理探测器归因分析

参考相关成果 [15,28], 结合川滇生态屏障区地形地势起伏较大、区域经济发展较快等实际情况, 从自然因素、社会经济因素和可达性 3 方面共选取高程、坡度、年降水量、年平均气温、地貌类型、土壤有机质含量、人口密度、千米网格 GDP、夜光遥感、距道路距离、距水域距离及距城镇中心距离 12 个影响因子, 分析景观生态风险与地理环境因子的内在联系。在 ArcGIS 中将所有影响因子栅格化并统一投影坐标系, 利用地理探测器中的因子探测, 测度全局及局部景观生态风险恶化区与各影响因子之间的关系及影响程度 [29]。

2 结果与分析

2.1 景观类型特征与变化

2000—2020 年, 川滇生态屏障区景观类型以林地、耕地和草地为主。其中, 林地是最主要的景观类型, 占研究区总面积的 59% 以上; 其次为耕地, 占总面积的 18% 以上, 而人造地表面积在全区总面积占比不足 2%。全区景观类型变化特征总体表现为: 人造地表、水体面积持续增加, 林地、冰川永久积雪持续减少, 耕地、灌木地、裸地面积先增加后减少, 草地、湿地面积先减少后增加。人造地表、水体、灌木地面积总体呈上升趋势, 林地、冰川永久积雪等六类景观类型面积总体呈下降趋势。其中, 人造地表面积增加最明显, 为 2544.02 km², 占总变化量的 35.0%; 其次是水体面积, 增加 778.88 km², 占总变化量的 10.7%; 林地、冰川永久积雪及耕地面积下降幅度较大, 林地面积减少 1535.22 km², 占总变化量的 21.1%, 冰川永久积雪面积减少 1153.02 km², 占总变化量的 15.8%, 耕地面积减少 626.47 km², 占总变化量的 8.6%。2000—2010 年, 各景观类型面积变化最明显的是草地, 减少 1192.83 km², 占总变化量的 37.9%; 2010—2020 年, 各景观类型面积变化最明显的是人造地表, 增加 2146.88 km², 占总变化量的 26.8%。

2000—2020 年, 研究区景观类型转移以林地转移为草地、耕地, 耕地进一步转移为人造地表为主。2000—2010、2010—2020 年, 均以林地、草地及耕地转移为主, 林地主要转为耕地、草地、灌

地理探测器正确引用:

- [1] Wang JF, Li XH, Christakos G, Liao YL, Zhang T, Gu X & Zheng XY. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science* 24(1): 107-127.
- [2] Wang JF, Zhang TL, Fu BJ. 2016. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators* 67:250-256.
- [3] 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报* 72(1): 116-134.
- [Wang JF, Xu CD. 2017. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica* 72(1):116-134.]

木地，草地主要转为林地、灌木地、耕地，而耕地则持续转移为人工地表。20年间伴随着我国快速城镇化建设，川滇生态屏障区人工地面积持续增加，以林地、耕地、草地转移为主的景观类型动态变化特征与“天然林保护工程”、“退耕还林、退田还湖工程”等一系列国家重大工程有关，一定程度上反映了社会经济发展与人为政策干预对景观结构变化的影响。

2.2 景观生态风险时空演变特征

2.2.1 景观生态风险的空间表达

由图2可以看出，2000、2010、2020年研究区全局 Moran I 值分别为 0.7410、0.7605、0.7374，且 P 值均小于 0.01，说明研究区景观生态风险指数整体呈显著正相关，在空间上表现为聚集分布，且相互之间存在影响。全局 Moran I 值随时间推移先上升后下降，2000—2010年 Moran I 值有所增加，2010—2020年有所下降，但整体呈下降趋势，表明空间自相关程度有所减弱，空间趋同性逐渐降低。2000、2010、2020年研究区景观生态风险以高-高聚集（H-H）和低-低聚集模式（L-L）为主且分布较为稳定，较少出现低-高聚集（L-H）和高-低聚集（H-L），表明景观生态风险指数呈现出明显的空间分布差异，高值在屏障区中部和东南地区聚集，低值主要在北部和西北地区聚集。

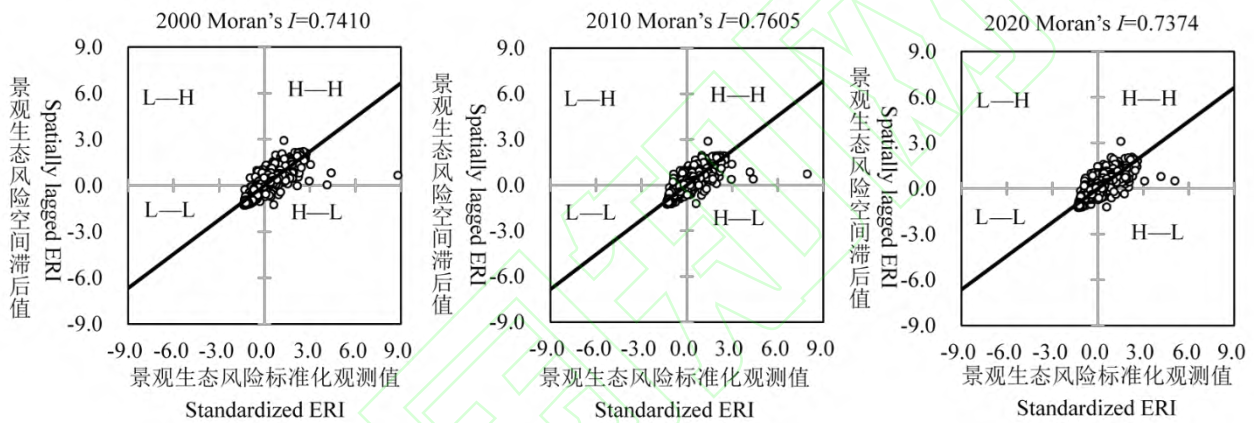


图2 2000—2020年川滇生态屏障区景观生态风险 Moran I 散点图

Fig.2 Landscape ecological risk Moran's I scatter diagram of ecological conservation area in Sichuan-Yunnan provinces, 2000-2020.

H-H: 高-高的空间集聚类型 High-high space agglomeration type; L-L: 低-低的空间集聚类型 Low-low space agglomeration type; H-L: 高-低的空间集聚类型 High-low space agglomeration type; LH: 低-高的空间集聚类型 Low-high space agglomeration type

采用指数克里金插值法进行空间插值，得到3期景观生态风险空间分布情况，运用自然间断点法将2020年景观生态风险值划分为5个等级：低生态风险区（ $ERI < 0.0623$ ）、较低生态风险（ $0.0623 \leq ERI < 0.1378$ ）、中生态风险区（ $0.1378 \leq ERI < 0.2037$ ）、较高生态风险区（ $0.2037 < ERI \leq 0.2679$ ）、高生态风险区（ $ERI \geq 0.2679$ ）（图3、表1），其他2期数据均采用2020年的分级区间，便于3期数据比较分析。川滇生态屏障区3个时间点的景观生态风险分布特征相似，总体呈东南高、西北低的变化规律。高风险区与低风险区分别位于研究区南、北半区，较高风险区主要分布于高风险区周围，较低风险区主要分布于低风险区周围。

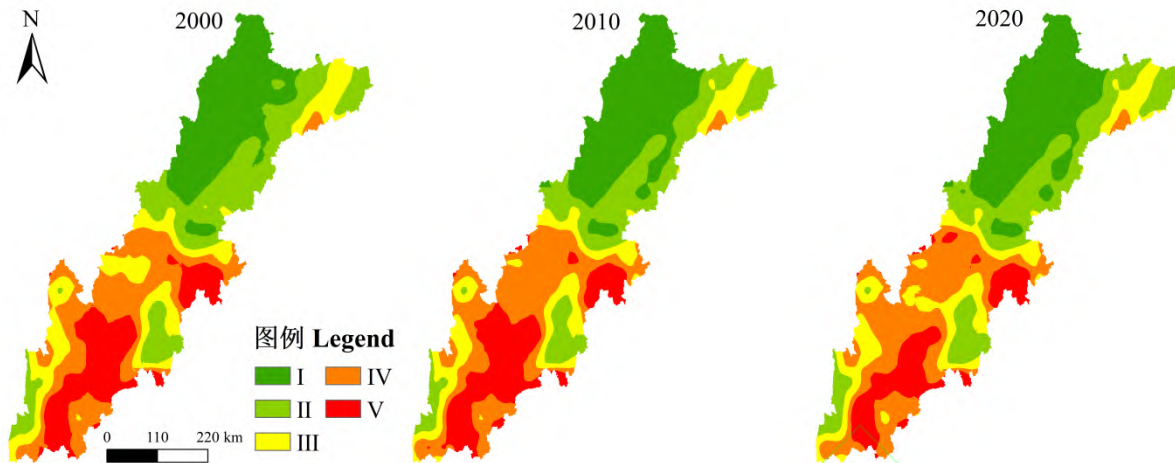


图3 2000—2020年川滇生态屏障区景观生态风险的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of landscape ecological risk of ecological conservation area in Sichuan-Yunnan provinces, 2000-2020.

I: 低生态风险区 Lower ecological risk region; II: 较低生态风险区 Low ecological risk region; III: 中等生态风险区 Medium ecological risk region; IV: 较高生态风险区 High ecological risk region; V: 高生态风险区 Higher ecological risk region. 下同 The same below.

表1 2000—2020年川滇生态屏障区景观生态风险等级面积及占比

Table 1 Area and proportion of landscape ecological risk classes of ecological conservation area in Sichuan-Yunnan provinces, 2000-2020

风险等级 Ecological risk class	2000		2010		2020	
	面积 Area (km ²)	占比 Proportion of total area (%)	面积 Area (km ²)	占比 Proportion of total area (%)	面积 Area (km ²)	占比 Proportion of total area (%)
I	55606.33	23.5	61067.83	25.8	61312.24	25.9
II	55645.82	23.5	50943.05	21.5	53302.93	22.5
III	38977.44	16.5	33047.87	14.0	36739.26	15.5
IV	51187.46	21.6	54626.44	23.1	58858.89	24.9
V	35252.56	14.9	36984.42	15.6	26456.29	11.2

I: 低生态风险区 Lower ecological risk region; II: 较低生态风险区 Low ecological risk region; III: 中等生态风险区 Medium ecological risk region; IV: 较高生态风险区 High ecological risk region; V: 高生态风险区 Higher ecological risk region. 下同 The same below.

2.2.2 景观生态风险等级分布特征

2000—2020年,川滇生态屏障区整体上以低生态风险、较低生态风险和较高生态风险为主,三者的总面积占比较大,为全区景观生态风险等级总面积的68.6%~73.3%。2020年,一部分高生态风险区分布在研究区南部的盐源县、鹤庆县、宁蒗彝族自治县、洱源县、漾濞彝族自治县等地,此区域为纵向高山峡谷区,海拔高差较大,纬向地带性和垂直地带性明显,以林地为主的景观类型呈分散状、细碎、零散分布,形成明显的垂直带谱,景观斑块破碎化特征明显,破坏了生态系统的整体性和稳定性,导致生态风险偏高;另一部分高生态风险区分布在研究区中西部的喜德县、越西县、甘洛县、美姑县等地区,其中大部分地处横断山脉与四川盆地西南边缘交汇处,河流纵横,景观分离度高。较高生态风险区位于高生态风险区向中等生态风险区过渡区域,分布较广泛,主要在大理市、盐边县、香格里拉市、木里藏族自治县、九龙县等地区,较低生态风险区主要分布在研究区东北部、中部地区以及西昌市、德昌县、米易县、盐源县、兰坪县、云龙县等地,景观类型以人造地表为主,尽管人为干扰度较大,但由于城市扩张到中后期阶段,建设用地集中成片稳定性强,较难受环境变化和人类活动的影响而发生改变,从而使景观生态风险降低。低生态风险区集中分布在研究区西北部的九寨沟县、平武县、松潘县、茂县、黑水县、理县、汶川县等地,以林地、草地为主,该区自然景观保存完好不易受人为干扰,景观损失度较低。

2.2.3 景观生态风险等级转移特征

2000—2020年，景观生态风险等级总体呈下降趋势，高和较高生态风险区总面积减少 1124.84 km²，低和较低生态风险区总面积增加 3363.02 km²。从景观生态风险等级转移矩阵看出，低生态风险等级面积所占比率增加，由 23.5% 增加到 25.9%，面积共增加 5705.9 km²；较低生态风险等级大部分转移为低生态风险等级，中等生态风险等级较为均匀地转移为较高和较低生态风险等级，较高生态风险等级大部分转移为中等生态风险等级，高生态风险等级大部分转移为较高生态风险等级（表 2）。中等生态风险等级区域转化过程较为复杂，生态稳定性较弱，应重点关注该区域生态系统稳定性的维护，避免景观破碎化加剧使其向较高风险等级转化。

表2 2000—2020年川滇生态屏障区景观生态风险等级转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of landscape ecological risk level of ecological conservation area in Sichuan-Yunnan provinces, 2000-2020 (km²)

风险等级 Ecological risk class	2020					总面积 Total area
	I	II	III	IV	V	
2000 I	55077.0	529.3	0.0	0.0	0.0	55606.3
II	6235.2	48491.0	919.7	0.0	0.0	55645.8
III	0.0	4282.7	28969.4	5720.2	5.3	38977.4
IV	0.0	0.0	6838.5	42957.2	1391.7	51187.5
V	0.0	0.0	11.8	10181.5	25059.3	35252.6
总面积 Total area	61312.2	53302.9	36739.3	58858.9	26456.3	236669.6

2.3 景观生态风险的影响因素

综合自然环境、人类活动与景观生态风险的内在联系，从自然因素、经济社会因素、区域可达性因素选取 12 个影响因子，采用因子探测器测度各因子对景观生态风险的解释力。由表 3 可以看出，各因子对景观生态风险的影响均较为显著，但从整个研究区来看，景观生态风险时空演变过程中自然因素占主导地位，其中，2000 年高程、年降水量、年平均气温的因子贡献量均在 10% 以上，成为景观生态风险的主要影响因子；2010、2020 年自然因素有所降低，且年降水量变化最显著，主要受 2010 年西南地区持续大旱的影响；2000—2020 年经济社会和区域可达性对景观生态风险整体影响较小，由于研究区景观类型以林地为主，人造地表面积仅占全区总面积的 1.8%。研究期间，随着社会需求的日益增长，人类活动不断加剧，自然因素影响在不断减弱，经济社会及区域可达性影响在不断增强。

表3 景观生态风险影响因素地理探测器探测结果

Table 3 Geographic detector detection results of factors affecting landscape ecological risk (%)

影响因素 Influencing factor	因子 Factor	2000	2010	2020
自然因素 Natural factor	高程 Elevation	10.4	9.7	8.5
	坡度 Slope	2.1	2.0	2.1
	年降水量 Annual precipitation	29.0	11.2	5.9
	年平均气温 Annual average temperature	11.6	10.6	6.8
	地貌类型 Type of landform	1.8	1.8	1.7
社会经济因素 Social and economic factor	土壤有机质含量 Content of soil organic matter	7.0	7.0	6.2
	人口密度 Population density	1.5	1.7	1.6
	千米网格 GDP 总产值 Kilometer grid GDP	4.4	4.3	3.6
区域可达性因素 Regional accessibility factor	夜光遥感 Luminous remote sensing	0.9	1.3	2.2
	距道路距离 Distance from road	1.7	1.4	3.5
	距水域距离 Distance to water	2.9	0.3	0.3
	距城镇中心距离 Distance from town center	2.6	3.2	3.2

由于景观生态风险特征具有明显的尺度效应^[30], 对研究区宏观层面影响因素的分析无法全面反映出局部区域景观生态风险变化的主要原因, 本研究进一步针对局部区域景观生态风险变化特征进行影响因素分析。将 2020 年景观生态风险指数最低值 ($ERI_{2020MIN}=0.06$) 作为景观生态分析变化阈值, $ERI_{2020}-ERI_{2000}>0.06$ 时, 定义为景观生态风险恶化区, $ERI_{2020}-ERI_{2000}<-0.06$ 时, 定义为景观生态风险改善区, 其余地区为景观生态风险稳定区。恶化区是当前亟需改善和优化的地区, 进一步将景观生态风险恶化区面积大于最小评价单元面积的 10 个区域命名为重点生态风险恶化区 (图 4), 并针对这 10 个重点生态风险恶化区 (a~j), 分别进行影响因素探测, 结果发现: 景观生态风险恶化区受自然环境因素影响的时, 经济社会因素及区域可达性因素超过自然因素占主导地位。由表 4 可以看出, 人口密度影响最显著的为 a、b 恶化区, 分布在隆阳区、巍山彝族回族自治县、漾濞彝族自治县境内; 千米网格 GDP 影响最显著的为 b、g、j 恶化区, 分布在巍山彝族回族自治县、漾濞彝族自治县、彭山区、双流区、龙泉驿区、青白江区、青川县、江油市、剑阁县境内; 夜光遥感影响最显著的为 g、i 恶化区, 分布在苍溪县、彭山区、双流区、龙泉驿区、青白江区境内; 距道路距离影响最显著的为 a、g 恶化区, 分布在隆阳区、彭山区、双流区、龙泉驿区、青白江区境内; 距城镇中心距离影响最显著的 a、b、g 恶化区, 分布在隆阳区、巍山彝族回族自治县、漾濞彝族自治县、彭山区、双流区、龙泉驿区、青白江区境内。除受人为因素干扰之外, 自然因素中的高程对 b、g、j 恶化区影响较明显, 降水对 i、g、j 恶化区的影响显著。结合恶化区实际情况分析发现, 以 a、b 为代表的城镇化快速扩张区, 由于受山区地形条件限制, 建设用地较为分散, 人类活动相对集中频繁, 景观干扰度较高, 整体景观生态风险恶化过程受人为因素影响显著; 以 g、h 为代表的城市扩张边界区, 自然和人造景观斑块的空间邻近形成明显的边缘效应, 由于两种不同性质的生态系统间相互作用剧烈, 人地生态系统冲突明显导致该区景观生态风险恶化; 以 f 为代表的自然景观为主的区域, 景观生态风险恶化显著受坡度、年降水量、年平均气温自然因素影响的时, 也受千米网格 GDP 等人为因素的影响。综上所述, 在局部区域内, 景观生态风险恶化是人为活动和自然因素共同影响, 但以人为活动影响为主导。

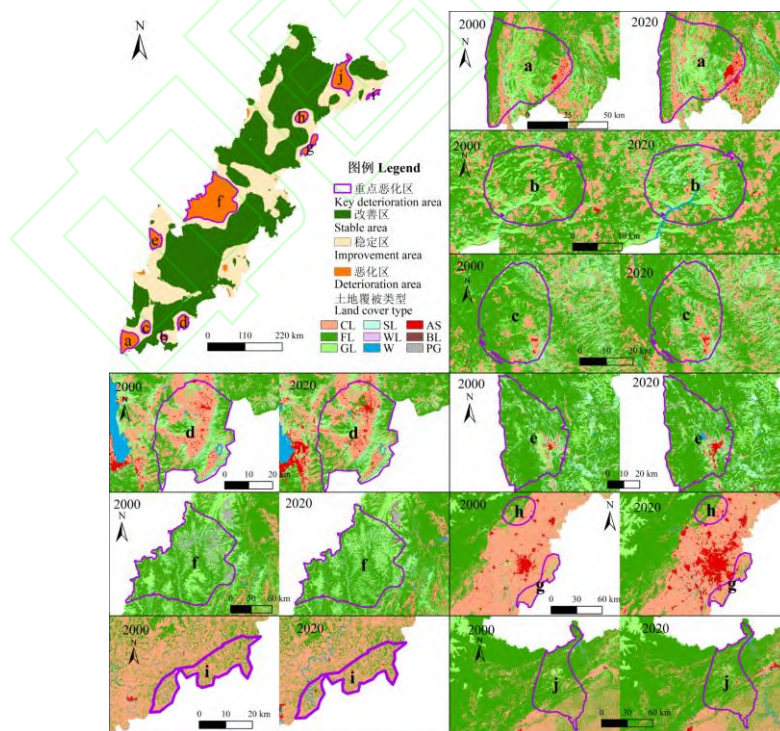


图 4 2000—2020 年川滇生态屏障区景观生态风险变化及恶化区土地覆被变化

Fig. 4 Changes in landscape ecological risk in ecological conservation area in Sichuan-Yunnan provinces and changes in land cover in deteriorating areas, 2000-2020.

表4 景观生态风险恶化区影响因素地理探测器探测结果

Table 4 Geographic detector detection results of factors affecting landscape ecological risk deterioration areas (%)

景观生态风险 恶化区 Landscape ecological risk deterioration area	高程 Elevation	坡度 Slope	年降水量 Annual precipitation	年平均气温 Annual average temperature	地貌类型 Type of landform	土壤有机质含 量 Content of soil organic matter	人口密度 The population density	千米网格 GDP Kilometer grid GDP	夜光遥感 Luminous remote sensing	距道路距 离 Distance from road to water	距水域 距离 Distance	距镇中心距 离 Distance from town center
a	6.5	5.2	14.3	7.5	10.3	12.3	41.7	34.8	6.7	12.4	1.1	73.9
b	37.2	3.9	35.4	26.8	2.6	63.9	59.9	69.9	11.2	5.8	12.3	70.2
c	8.8	9.7	16.0	12.9	15.2	2.9	29.9	16.3	10.0	0.1	78.3	17.2
d	10.4	1.4	27.7	10.0	2.4	4.8	5.7	1.5	5.9	1.2	2.2	21.4
e	6.2	3.3	19.2	6.8	21.1	5.0	8.3	8.3	19.1	5.3	15.3	36.7
f	8.5	10.4	21.7	10.4	1.8	2.7	13.5	16.8	1.8	3.3	1.9	24.6
g	40.5	29.3	49.1	46.0	1.8	16.4	30.8	46.9	35.9	45.1	62.2	53.9
h	14.3	3.4	13.2	16.4	0.3	11.5	12.8	17.4	3.6	1.3	13.8	14.4
i	22.6	3.4	75.8	27.4	6.1	0.0	27.6	6.2	24.8	5.0	26.6	3.0
j	30.4	13.2	52.9	30.7	36.4	40.5	18.8	56.3	10.9	5.2	18.4	26.6

a~j 恶化区见图4 a-j risk deterioration area was shown in Figure 4.

3 讨 论

川滇生态屏障区作为我国重点生态功能区，研究期间景观生态风险值总体呈下降趋势，说明我国长期以来坚持生态文明建设，取得了一系列成效，为景观生态系统的改善提供了良好条件，然而一直以来人类活动加速了景观类型的演变，以林地、草地、耕地为主的景观类型结构与质量的变化成为川滇生态屏障区生态稳定性的关键。研究区中部和东南部的复杂地理环境造就了明显的垂直地带性特征，林地等各类型景观斑块交错分布，分离度较高、破碎化严重，连通性变差，不同景观之间的相互作用受阻，导致生态风险偏高，加之该区域农业生产方式较落后，长期不合理的农业生产活动使景观组分之间频繁转化，整体生态环境质量下降，使该区成为高生态风险区，结合研究区景观生态风险评价结果和影响因素识别结果，重视景观格局对生态过程和功能的影响，针对川滇生态屏障区风险防范与生态环境治理提出以下对策建议：

1) 对于高风险区和较高风险区，一方面，要以景观生态系统综合整治和自然修复为基础，加强林地、草地、耕地的整体性保护与破碎化修复，立足横断山区生物多样性保护，继续实施天然林保护、退耕退牧还林还草，开展水土流失石漠化综合治理，恢复受损区域景观覆被完整性；另一方面，统筹协调林地保护与利用的关系，在经济林建设过程中避免盲目发展、经营管理不善、监督不力等问题，因地制宜、适地适树、合理布局，利用地理资源优势与生态环境协调发展。同时，转变该区农业发展方式，推进农业结构调整，在农业景观脆弱区开展生态型复合种植，科学合理利用耕地资源，不断提升农业机械化、信息化水平和资源配置效率，避免低效的农业经济活动造成生境质量的下降。

2) 对于中等生态风险区因其转化过程较为复杂，生态稳定性较弱，需加强林地、草地与各类景观类型的有机联系，继续实施封山育林、增加林草覆被，保护生态系统完整性，适时调整景观结构及其功能，减少大规模的工农业生产和建设活动，增强生态系统稳定性，避免中风险区向较高风险区转移。

3) 低等级和较低等级生态风险区，虽然林地面积广泛、植被覆盖度高，但该区林种结构单一、土壤保持、水源涵养等生态功能不强等问题突出，一旦遭受人类活动的破坏修复难度很大。因此，该区应加强生态环境建设，严格控制开发强度，重视空间开发利用管制，制定有针对性的区域发展政

策,持续改善生态环境,做到生态优先、绿色发展,增进人民福祉和强化民族团结。

4) 针对景观生态风险等级存在明显的空间分异性,在生态风险管理措施中可通过合理调整土地利用规划,适度降低风险集聚程度来缓解景观生态风险压力,从国土空间治理上加以管控,根据不同集聚区域主体功能定位,科学统筹,分类施策,进行差别化的规划引导。

5) 景观生态风险恶化区主要受距城镇距离、GDP 等人为因素的影响,说明人类活动在短时间内对景观生态风险影响程度较大。应以解决人地矛盾问题出发,着重开展恶化区资源环境承载能力评价,优化国土空间结构,树立生态安全格局构建、生态恢复和治理、法律法规建设意识,促进人与自然和谐共生。

总体来看,研究区景观生态风险时空演变受自然因素与人为因素共同作用,但人类活动是导致景观生态风险趋于恶化的主要原因,随着城市化进程的不断推进,应高度重视人类活动密集区景观生态系统的压力,针对风险恶化区需逐步降低不合理人为干扰对生态风险的累积效应,避免大规模城市扩张对景观格局的剧烈扰动,造成城市边缘区景观斑块的破碎化,从而导致景观结构和功能的改变。因此,研究区今后应从自然、社会、经济多重视角对景观生态风险进行整合修复与综合管控,不断巩固国家生态屏障功能,促进区域可持续发展。本研究从全局和局部两个视角进行了景观生态风险的影响因素探究,但考虑景观生态系统各层级压力与损耗产生的复杂性,未来有必要结合多尺度综合评价,重视不同影响因素尺度效应的深入探究,有效整合多尺度评价结果,进一步提高景观生态风险的评价精度揭示影响机理。

4 结 论

本研究以川滇生态屏障区为例,通过构建景观生态风险评价模型,分析景观生态风险时空演化特征,采用地理探测器测度自然因素与经济社会因素对研究区整体与局部恶化区景观生态风险的解释力,结果表明:1) 林地、耕地和草地为川滇生态屏障区主要景观类型。2000—2020 年景观类型变化较为明显,人造地表、水体、灌木地总面积增加,以林地为主的其他 6 类景观类型总面积减少,研究期内景观类型转移以林地、草地、耕地为主,林地与草地、耕地之间转移明显,耕地转为人造地表面积最大。在生态风险管理和生态建设过程中,应重点关注林地、草地、耕地景观类型的结构和质量变化情况。2) 研究期间,川滇生态屏障区景观生态风险平均值有所下降,生态状况整体向好。高生态风险区与较高生态风险区面积减少,低生态风险区与较低生态风险区面积扩大。中等生态风险等级区域转化过程较为复杂,需重点关注避免景观斑块破碎化导致的生态风险进一步恶化。3) 川滇生态屏障区整体以低生态风险、较低生态风险和较高生态风险为主,高生态风险集中分布在研究区中部和东南部,低生态风险集中分布在研究区北部和西北部地区。景观生态风险指数在空间分布上不仅表现出显著的正相关性,且高低值聚集区域具有明显的空间分布差异性和相对稳定性。4) 景观生态风险的演变过程是自然因素与人为因素共同作用的结果。从整个研究区范围来看,自然因素的高程、年降水、年平均气温、土壤有机质含量等因子对景观生态风险变化影响程度最强;从局部生态恶化区来看,人为因素的人口密度、千米网格 GDP、距道路距离、距城镇中心距离等因子影响程度最强,尤其是城镇化快速扩张导致边缘地区景观破碎化程度激增,生态风险随之升高;城市景观与自然景观交界处,由于一系列大规模工程建设项目的开展,导致景观类型转化频率和强度增加,生态风险相对偏高。

责任编辑 杨 弘

参考文献

- [1] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437 [Li Q-P, Zhang Z-D, Wan L-W, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1420-1437]
- [2] 娄妮, 王志杰, 何嵩涛. 基于景观格局的阿哈湖国家湿地公园景观生态风险评价. 水土保持研究, 2020, 27(1): 233-239 [Lou N, Wang Z-J, He S-T. Assessment on ecological risk of Aha Lake National Wetland Park based on landscape pattern. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 233-239]
- [3] 韩晓佳, 刘小鹏, 王亚娟, 等. 基于景观格局的干旱区绿洲生态风险评价与管理——以青铜峡市为例. 水土保持研究,

- 2017, 24 (5): 285-290 [Han X-J, Liu X-P, Wang Y-J, et al. Ecological risk assessment and its management of oasis in arid area based on landscape pattern: A case study in Qingtongxia. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24 (5): 285-290]
- [4] DT Heggem, CM Edmonds, AC Neale, et al. A landscape ecology assessment of the Tensas River Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 64: 41-54
- [5] Kapustka LA, Galbraith H, Luxon BM. et al. Using landscape ecology to focus ecological risk assessment and guide risk management decision-making. *Toxicology and Industrial Health*, 2001, 17: 236-246.
- [6] Estoque RC, Murayama Y, Lasco RD, et al. Changes in the landscape pattern of the La Mesa Watershed: The last ecological frontier of Metro Manila, Philippines. *Forest Ecology and Management*, 2018, 430: 280-290
- [7] 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. *生态学报*, 2018, 38 (16): 5952-5960 [Lyu L-T, Zhang J, Sun C-Z, et al. Landscape ecological risk assessment of Xi River Basin based on land-use change. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (16): 5952-5960]
- [8] 梁二敏, 张军民, 杨卫红. 新疆玛纳斯河流域绿洲景观生态脆弱性时空分异. *干旱区研究*, 2017, 34 (4): 950-957 [Liang E-M, Zhang J-M, Yang W-H. Spatiotemporal variation of landscape ecological vulnerability in oasis in the Manas River basin, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2017, 34 (4): 950-957]
- [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. *生态学报*, 2021, 41 (3): 1-12 [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. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (3): 1-12]
- [10] 余敦, 梁珍宝, 肖志娟, 等. 基于景观生态思维的南昌市土地生态风险时空特征分析. *水土保持研究*, 2020, 27 (1): 213-220 [Yu D, Liang Z-B, Xiao Z-J, et al. Temporal and spatial characteristics of land ecological risk in Nanchang City based on landscape ecology. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27 (1): 213-220]
- [11] 巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 等. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评估与管理. *应用生态学报*, 2014, 25 (7): 2041-2048 [Gong J, Zhao C-X, Xie Y-C, et al. Ecological risk assessment and its management of Bailongjiang watershed, southern Gansu based on landscape pattern. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (7): 2041-2048]
- [12] 黄木易, 何翔. 近 20 年来巢湖流域景观生态风险评估与时空演化机制. *湖泊科学*, 2016, 28 (4): 785-793 [Huang M-Y, He X. Landscape ecological risk assessment and its mechanism in Chaohu basin during the past almost 20 years. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28 (4): 785-793]
- [13] 刘世梁, 刘琦, 张兆苓, 等. 云南省红河流域景观生态风险及驱动力分析. *生态学报*, 2014, 34 (13): 3728-3734 [Liu S-L, Liu Q, Zhang Z-L, et al. Landscape ecological risk and driving force analysis in Red river basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (13): 3728-3734]
- [14] 王瑞杰, 裘钱玲琳, 李国祥, 等. 宁波月湖水体中抗生素的分布与生态风险评价. *湖泊科学*, 2018, 30 (6): 1616-1624 [Wang R-J, Qiu Q-L-L, Li G-X, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of selected antibiotics in Moon Lake, Ningbo City. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30 (6): 1616-1624]
- [15] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于景观结构的生态移民安置区生态风险评价——以宁夏红寺堡区为例. *生态学报*, 2018, 38 (8): 2672-2682 [Wang P, Wang Y-J, Liu X-P, et al. Ecological risk assessment of an ecological migrant resettlement region based on landscape structure: A case study of Hongsibu in Ningxia. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (8): 2672-2682]
- [16] 张玲玲, 史云飞, 刘玉华. 空间粒度变化对沂蒙山区景观格局指数的影响. *生态学杂志*, 2013, 32 (2): 459-464 [Zhang L-L, Shi Y-F, Liu Y-H. Effects of spatial grain change on the landscape pattern indices in Yimeng Mountain area of Shandong Province, East China. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32 (2): 459-464]
- [17] 国家发展改革委自然资源部. 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划 (2021—2035 年) [EB/OL]. (2020-06-03) [2020-12-31]. http://gi.mnr.gov.cn/202006/t20200611_2525741.html [National Development and Reform Commission, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. National Master Plan for Major Ecosystem Protection and Restoration Projects (2021-2035) [EB/OL]. (2020-06-03) [2020-12-31]. http://gi.mnr.gov.cn/202006/t20200611_2525741.html]
- [18] 谢小平, 陈芝聪, 王芳, 等. 基于景观格局的太湖流域生态风险评估. *应用生态学报*, 2017, 28 (10): 3369-3377 [Xie X-P, Chen Z-C, Wang F, et al. Ecological risk assessment of Taihu Lake basin based on landscape pattern. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (10): 3369-3377]
- [19] 张月, 张飞, 王娟, 等. 基于 LUCC 的艾比湖区域生态风险评估及预测研究. *中国环境科学*, 2016, 36 (11): 3465-3474 [Zhang Y, Zhang F, Wang J, et al. Ecological risk assessment and prediction of Ebinur Lake region based on land use/land cover change. *China Environmental Science*, 2016, 36 (11): 3465-3474]
- [20] Zhang F, Yu SJ, Wang DF. Ecological risk assessment due to land use/cover changes (LUCC) in Jinghe County, Xinjiang, China from 1990 to 2014 based on landscape patterns and spatial statistics. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77: 491
- [21] 李谢辉, 李景宜. 基于 GIS 的区域景观生态风险分析——以渭河下游河流沿线区域为例. *干旱区研究*, 2008, 25 (6): 899-903 [Li X-H, Li J-Y. Analysis on regional landscape ecological risk based on GIS: A case study along the lower reaches of the Weihe River. *Arid Zone Research*, 2008, 25 (6): 899-903]
- [22] 张雅洲, 谢小平. 基于 RS 和 GIS 的南四湖生态风险评价. *生态学报*, 2015, 35 (5): 1371-1377 [Zhang Y-Z, Xie X-P. Ecological risk assessment of Nansi Lake based on RS and GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (5): 1371-1377]
- [23] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. *地理学报*, 2015, 70 (7): 1052-1067 [Liu Y-X, Wang Y-L, Peng J, et al. Urban landscape ecological risk assessment based on the three-dimensional framework of ecological adaptability cycle. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70 (7): 1052-1067]
- [24] 魏伟, 石培基, 雷莉, 等. 基于景观结构和空间统计方法的绿洲区生态风险分析——以石羊河武威、民勤绿洲为例. *自然资源学报*, 2014, 29 (12): 2023-2035 [Wei W, Shi P-J, Lei L, et al. Ecological risk analysis of oasis area based on landscape structure and spatial statistics method: Taking Shiyang River Wuwei and Minqin Oasis as examples. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29 (12): 2023-2035]

- [25] Jin X, Jin YX, Mao XF. Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use land cover changes: Case study of Delingha City. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 185-191
- [26] 肖琳, 田光进. 天津市土地利用生态风险评价. *生态学杂志*, 2014, 33 (2): 469-476 [Xiao L, Tian G-J. Ecological risk assessment of land use in Tianjin. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33 (2): 469-476]
- [27] 常小燕, 李新举, 李西灿, 等. 矿区土地利用生态风险的时空异质性. *生态学报*, 2019, 39 (9): 3075-3088 [Chang X-Y, Li X-J, Li X-C, et al. Spatial and temporal heterogeneity of ecological risks in land use in mining areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (9): 3075-3088]
- [28] 杨丰硕, 杨晓梅, 王志华, 等. 江西省典型县域经济差异影响因子地理探测研究. *地球信息科学学报*, 2018, 20 (1): 79-88 [Yang F-S, Yang X-M, Wang Z-H, et al. Research on geographical exploration of influencing factors of economic differences in typical counties in Jiangxi Province. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20 (1): 79-88]
- [29] 奚世军, 蔡沛伶, 安裕伦. 2000—2018 年贵州喀斯特山区小流域综合生态风险变化及其驱动因素. *生态与农村环境学报*, 2020, 36 (9): 1106-1114 [Xi S-J, Cai P-L, An Y-L. Changes in integrated ecological risks and their driving factors in small watersheds in Guizhou karst mountainous areas from 2000 to 2018. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36 (9): 1106-1114]
- [30] 王洁, 摆万奇, 田国行. 青藏高原景观生态风险的时空特征. *资源科学*, 2020, 42 (9): 1739-1749 [Wang J, Bai W-Q, Tian G-H. Temporal and spatial characteristics of landscape ecological risks on the Qinghai-Tibet Plateau. *Resources Science*, 2020, 42 (9): 1739-1749]