

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.045.

邹永偲, 兰安军, 范泽孟, 等. “三生空间”视角下贵州省景观生态安全评价及其耦合特征分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 432-442.

Zou Yongcai, Lan Anjun, Fan Zemeng, et al. Evaluation of Landscape Ecological Security and Its Coupling Characteristics Analysis in Guizhou Province from the Perspective of Production-Living-Ecology Space[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 432-442.

“三生空间”视角下贵州省景观生态安全评价及其耦合特征分析

邹永偲¹, 兰安军¹, 范泽孟², 陶倩¹, 钱方艳¹

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室 北京 100101)

摘要: [目的] 探究喀斯特生态脆弱区景观生态安全格局演变规律, 对喀斯特区域生态文明建设和生态风险防控具有指导意义。[方法] 以贵州省为研究对象, 从“三生空间”视角出发, 基于景观生态学理论, 借助耦合协调模型, 分析了贵州省近 20 年景观生态安全时空变化机理和耦合协调特征。[结果] (1) 2000—2020 年, 贵州省以林地生态空间为主, 占国土空间总面积 53% 以上, 工业生产和城镇生活用地快速增长, 导致城乡生活空间向外扩张挤占农业生产和林地生态空间。(2) 2000—2020 年期间贵州省景观生态安全整体处于向好发展, 南部景观生态安全等级总体优于北部地区。(3) 2000—2020 年贵州省景观生态安全的 Moran's I 值分别为 0.340, 0.400, 0.414, 空间相关性显著, “高一高”和“低一低”值为主要空间集聚模式, 局部空间自相关分布格局与景观生态安全分布有较高的一致性。(4) 贵州省“生产—生活—生态”空间景观生态安全的耦合协调度水平良好, 在空间上呈现出“西高东低, 北高南低”的分布特征。[结论] 人类经济活动和城镇化的快速推进会改变区域土地利用格局, 从而影响区域景观生态安全及耦合协调性, 因此需要优化区域生产—生活—生态空间格局, 提高土地资源使用效率, 促进贵州省生态安全建设和土地资源可持续发展。

关键词: 喀斯特; “三生”空间; 景观生态安全; 耦合协调度; 贵州省

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0432-11

Evaluation of Landscape Ecological Security and Its Coupling Characteristics Analysis in Guizhou Province from the Perspective of Production-Living-Ecology Space

Zou Yongcai¹, Lan Anjun¹, Fan Zemeng², Tao Qian¹, Qian Fangyan¹

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University,

Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the evolution of landscape ecological security pattern in karst ecologically fragile areas, which is of guiding significance for the construction of ecological civilization and ecological risk prevention and control in karst regions. [Methods] Guizhou Province was taken as the research object. From the perspective of production-living-ecology space, based on the theory of landscape ecology and with the help of coupling coordination model, the spatiotemporal variation mechanism and coupling coordination characteristics of landscape ecological security in Guizhou Province in the past 20 years were analyzed. [Results] (1) From 2000 to 2020, The ecological space of forest land in Guizhou Province was dominant, accounting for more than 53% of the total land space, and the rapid growth of industrial produc-

收稿日期: 2023-06-05

修回日期: 2023-06-26

资助项目: 国家自然科学基金“生态过渡带土地覆盖变化情景模拟及归因研究”(41971358)

第一作者: 邹永偲(1998—), 男, 贵州盘州人, 硕士研究生, 主要研究方向为地理信息系统与遥感。E-mail: 1121073517@qq.com

通信作者: 兰安军(1974—), 男, 贵州黔南人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事喀斯特环境遥感研究。E-mail: 493486980@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

tion and urban living land led to the expansion of urban and rural living space and crowded out agricultural production and forest land ecological space. (2) From 2000 to 2020, the overall landscape ecological security of Guizhou Province was in a good development, and the overall level of landscape ecological security in the south was better than that in the northern region. (3) The Moran's I values of landscape ecological security in Guizhou Province from 2000 to 2020 were 0.340, 0.400 and 0.414, respectively, with significant spatial correlations, and the values of 'high-high level' and 'low-low level' were the main spatial agglomeration patterns, and the local spatial autocorrelation distribution pattern was consistent with the distribution of landscape ecological security. (4) The coupling and coordination level of ecological security of 'production-life-ecology' spatial landscape in Guizhou Province was good, and it showed the distribution characteristics of 'high level in the west and low level in the east, high level in the north and low level in the south' in space. [Conclusion] The rapid advancement of human economic activities and urbanization will change the regional land use pattern, thereby affecting the regional landscape ecological security and coupling coordination, so it is necessary to optimize the spatial pattern of regional production-life-ecology, improve the efficiency of land resource use, and promote the ecological security construction and sustainable development of land resources in Guizhou Province.

Keywords: karst; production-living-ecology space; landscape ecological security; coupling coordination; Guizhou Province

生态安全是指区域赖以生存和发展的生态环境不受生态条件变化的威胁而处于正常发展的状态^[1-2],研究生态安全对区域社会发展和生态文明建设具有重要意义。景观格局是指由大小、形状不相同的景观要素在空间上的排列^[3-4],景观格局的演替在一定程度上影响着区域生态系统的稳定性,是维持区域生态安全的关键因素^[5]。土地利用和景观格局是外延上的从属关系^[6],土地利用方式和强度的改变所产生的生态影响具有区域性和累积性^[7],与区域景观生态安全密切相关。因此,可以根据土地类型结构进行区域生态风险评价^[8]。党的十八大提出“三生空间”发展理念,将“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”作为目标和要求^[9-10],依照土地利用的主要功能对国土空间类型进行划分,能够缓解土地利用变化对景观格局的影响,从而有效降低区域生态风险,维护区域生态环境系统的安全^[11],将“三生空间”演化与区域生态安全进行内部各要素的耦合协调研究,将有利于区域实现生态—经济协调高质量发展。目前关于三生空间的研究仍然处于起步阶段,且研究多集中在土地利用冲突^[12]和碳储量效应分析等^[13]视角,基于“三生空间”视角将三生空间理念与耦合协调模型相结合,对喀斯特生态脆弱区进行景观生态安全的研究还较少。

生态安全是国家安全的重要支撑与组成部分,是促进经济社会可持续发展的关键^[14]。近些年来关于景观生态安全的研究已取得丰富的成果,从研究对象看包括流域^[15]、湖泊^[16]、城市等^[17]人地关系复杂的

区域,也有自然保护区^[18]和矿区等^[19]生态环境脆弱区;研究尺度涵盖格网、城市群和经济带;研究内容包括景观安全格局构建、生态安全监测等。目前,景观生态安全研究已经从理论分析、动态变化转向更深层次的空间优化和景观内部结构的研究。随着研究内容不断延伸,一些学者开始以三生空间为切入点,对区域三生空间背景下的生态安全展开了研究,如赵越^[8]、郭彦君^[20]、杨湘^[21]。另外也有结合耦合协调模型对重庆市万州区^[22]、湖北省宜昌市^[23]三生空间景观生态安全的耦合协调程度进行研究,研究结果表明合理布局土地资源有利于三生空间景观生态安全协调发展。整体上看,现有对景观生态安全的研究多集中在东部经济发达地区或长江、黄河流域周边地区,西南喀斯特地区是自然环境、经济发展、生态建设等矛盾突出的交汇点,其景观生态安全研究却鲜有报道。特别是,贵州省作为西南地区重要节点城市和国家生态文明试验区,境内石漠化现象突出,造成区域生物多样性减少和水土流失加剧等一系列生态问题,生态系统结构和功能受到破坏,生态安全受到一定的威胁,但其景观生态安全评价及耦合特征的研究尚较缺乏。鉴于此,本文将在剖析“三生空间”演变规律的基础上对其进行景观生态安全评价及耦合特征分析,这对区域生态风险管控和景观格局优化具有积极的现实意义。

贵州省是珠江和长江流域生态屏障的重要组成部分,由于地质背景特殊,加上不良人为活动,景观破碎严重,生态环境极为脆弱。近20年来,在工业化和

城镇化快速发展过程中,贵州省土地利用和生态格局发生显著变化。基于此,本研究从“三生空间”视角出发,选取贵州省 2000 年、2010 年、2020 年三期土地利用数据,利用 ArcMap, Fragstats, Geoda 软件,结合地统计学原理方法和全局自相关模型,对贵州省景观生态安全格局进行耦合协调分析,以期对贵州省国土空间优化和生态保护提供科学参考。

1 研究区概况

贵州省简称“黔”,地处中国西南部,是长江经济带重要组成部分和国家生态文明建设先行区,同四川省、重庆市、湖南省、广西壮族自治区、云南省接壤。位于 $103^{\circ}36' - 109^{\circ}35'E, 24^{\circ}37' - 29^{\circ}13'N$ (图 1), 气候属亚热带湿润季风气候,年平均气温 $15^{\circ}C$ 左右,年降雨量在 $1\ 000 \sim 1\ 400\ mm$ 。全省河流处于长江和珠江流域上游交错地带,是两江上游重要的生态安全区域。境内地势西高东低,地表崎岖破碎喀斯特地貌发育典型,自中部向北、东、南 3 面倾斜,土地资源以山地和丘陵为主。全省地形破碎加之人类不合理的生产方式,加剧了水土流失和石漠化等环境问题,导致全省生态环境极为脆弱。

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

数字高程模型 (DEM) 数据来自贵州省山地资源

与环境遥感应重点实验室;贵州省 2000—2020 年 (2000 年、2010 年、2020 年) 三期土地利用遥感监测数据,是基于美国陆地资源卫星 Landsat TM 影像通过人机交互解译而得到,来自于中国科学院资源环境数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 $30\ m$ 。利用 ArcGIS 10.8 软件对土地利用遥感监测数据进行裁剪得到贵州省三期土地利用类型数据。结合研究区实际情况并且参照《土地利用现状分类 (GB/T 21010-2017)》, 借鉴已有研究成果^[20, 24], 将“三生”空间划分为农业、工业生产空间、城乡生活空间和水域、草地、林地和其他生态空间 8 大类, 方便后续研究 (表 1)。

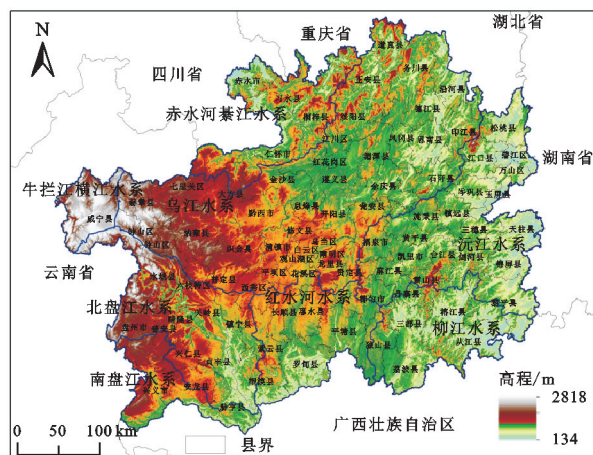


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表 1 “三生空间”分类体系

Table 1 Classification system of production-living-ecology space

一级地类	二级地类	三级分类
生产空间	农业生产空间	水田、旱地
	工业生产空间	工矿建设用地
	城镇生活空间	城镇住宅用地
	农村生活空间	农村宅基地
生活空间	林地生态空间	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地 (苗圃及各类园地)
	草地生态空间	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地
	水域生态空间	河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地等
生态空间	其他生态空间	沙地、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地等

2.2 研究方法

2.2.1 景观生态安全评价模型构建 景观格局能够反映人类活动对区域的影响程度和揭示区域生态系统状况与空间分异特征^[25]。景观格局指数则是描述景观格局分布和组成的定量化指标^[26], 其中景观脆弱度和干扰度指数与景观生态安全存在相关关系^[27], 可以反映区域景观结构与生态安全内部之间的联系。基于此, 从景观格局出发, 参考已有研究成果并结合贵州省实际情况, 选用景观脆弱度指数、景观干扰度

指数建立研究区景观生态安全计算模型^[28-29], 具体过程如下:

(1) 景观干扰度是不同景观类型受到干扰后的损失度。本文通过景观破碎度、分离度和优势度求得景观干扰度指数。公式为:

$$U_j = xC_j + yF_j + zD_j \quad (1)$$

式中: U_j 为景观干扰度指数; C_j 景观破碎度指数, $C_j = \frac{N_j}{A_j}$; F_j 景观分离度指数, $F_j = \frac{A}{2A_j} \sqrt{\frac{N_j}{A}}$; D_j 景观

优势度指数, $D_j = aL_j + bP_j$, $L_j = \frac{N_j}{N}$, $P_j = \frac{A_j}{A}$ 。根据夏照亮等^[11]、施厚军^[30]对喀斯特区域的研究经验将景观干扰度指数中参数 x, y, z (x, y, z 依次为破碎度、分离度和优势度的权重) 赋值为 0.5, 0.3, 0.2; L_j 为景观类型相对密度; P_j 为景观类型相对盖度; a, b (a 为相对密度的权重; b 为相对盖度的权重) 分别赋值 0.4, 0.6; N_j 为斑块数量; A_j 为斑块面积; A 为景观总面积; N 为景观斑块总面积。

(2) 景观脆弱度指数表示各个景观所代表的生态系统对外界扰动的抵御能力。根据已有研究成果^[31]和研究区实际情况, 将 8 类景观按照脆弱性从高到低排序并赋值: 其他生态空间=8, 工业生产空间=7, 水域生态空间=6, 农业生产空间=5, 草地生态空间=4, 林地生态空间=3, 农村生活空间=2, 城镇生活空间=1, 进行归一化后得到各景观的脆弱度指数。

(3) 景观损失度是各个景观类型所代表的生态系统在受到外界干扰时其自然属性损失程度。公式为:

$$R_j = \sqrt{U_j \times Q_j} \quad (2)$$

式中: R_j 为景观损失度指数; U_j 为景观干扰度指数; Q_j 为景观脆弱度指数。

(4) 景观生态安全指数 (ERI), 计算公式为:

$$ERI = \frac{\sum_{j=1}^N K_{ej} R_j}{\sum_{j=1}^N K_e} \quad (3)$$

式中: ERI 为第 e 个风险小区的景观生态安全指数; K_{ej} 为第 e 个风险小区第 j 类景观的面积; K_e 为第 e 个风险小区总面积。

2.2.2 评价单元的划分 为了更加直观地分析贵州省景观生态安全在空间上演变规律, 将生态安全指数进行可视化表达。参照已有研究^[32]格网宜采用平均斑块面积的 2~5 倍, 因此在综合考虑研究区实际情况和区域风险指数提取的便捷性, 利用 ArcGIS 10.8 中的渔网工具将贵州省按照 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的像元大小进行了格网尺度上的风险小区网格化划分, 得到 1 962 个生态风险小区 (图 2)。使用 Fragstats 4.2.1 软件计算得到各时期样本小区 (渔网) 的生态风险指数值, 将生态风险值赋值于每个样本小区中心点利用空间插值法得到研究区景观生态安全格局分布情况。

2.2.3 耦合协调度模型构建 “三生” 视角下, 区域生态安全由生产空间景观安全、生活空间景观安全和生态空间景观安全组成, 区域生产—生活—生态空间在空间上彼此间相互依赖、相互作用和相互制约。因此, 为进一步剖析研究区景观生态安全在三生空间上的耦合协调情况和演变规律, 引入物理学中的耦合协调度模型对生产空间、生活空间和生态空间在空间上

的耦合协调程度进行解析, 从时间和空间两个维度探讨研究区“三生空间”耦合协调度的演变特征。计算公式如下^[22, 33]:

$$C = \left[\frac{K_1 \times K_2 \times K_3}{(K_1 + K_2) \times (K_1 + K_3) \times (K_2 + K_3)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$T = aK_1 + bK_2 + cK_3 \quad (5)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

式中: C 为生活—生产—生态空间耦合度; K 表示指标体系各指标值分别对应生产、生活和生态空间的景观生态安全值; D 为协调度; T 为协调度指数; a, b, c 为三生空间景观生态安全对应权重, 根据已有研究成果^[23], 赋值为: $a = b = c = \frac{1}{3}$ 。

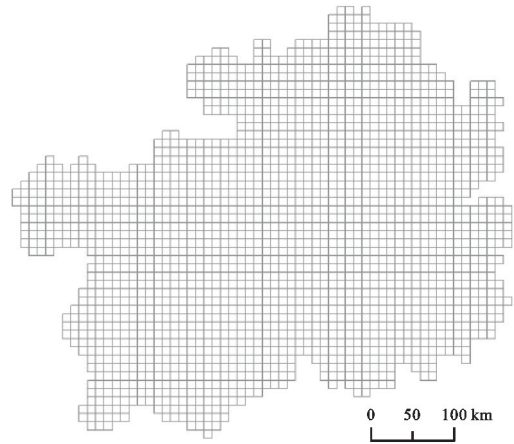


图2 研究区生态风险小区划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the division of ecological risk communities in the study area

2.2.4 地统计分析 空间自相关分析可以表征某一变量在空间位置的相关程度^[34], 包括全局空间自相关和局部空间自相关。空间自相关分析方法已经广泛运用于生态风险研究, 并且结果表明生态风险与土地利用的类型和人类社会活动密切相关^[35]。因此, 本研究借助 GeoDa 软件, 选取 Moran's I 指数来表示区域景观生态安全值在空间上的整体分布状况和集聚程度, 选用局部空间关联指标 (LISA) 表征某一评价单元与周边地区的景观生态安全值在局部空间上的关联和差异程度。地统计分析常用变异函数对生态风险分布的空间特征以及不同方向的变异情况进行描述^[36], 既能反映区域化变量的结构性, 又能反映其随机性。本文选用球状模型^[11, 37]对景观生态安全指数进行半变异函数拟合, 采用普通克里金插值法得到研究区景观生态安全分布图。半变异函数计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2K(h)} \sum_{j=1}^{K(h)} [Z(X_{j+h}) - Z(X_j)]^2 \quad (7)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半变异函数; $K(h)$ 为样本对数; $Z(X_{j+h})$ 表

示空间位置 X_{j+h} 处风险值; $Z(X_j)$ 表示 X_j 处的生态风险值; h 表示样本距。

3 结果与分析

3.1 “三生空间”土地利用类型演变

为探究贵州省“三生空间”演变规律,对研究区 2000—2020 年“三生空间”面积及变化情况进行统计(表 2)。由表 2 可得,2000—2020 年贵州省以林地生态空间为主,面积占比均达到了 53%,其次为农业生产空间和草地生态空间,面积占比分别达到了 27% 和 17%,三者共同占总面积的 97% 左右,构成贵州省的主要土地利用类型。近二十年以来,贵州省三生空间用地面积变化显著。生态空间中林地、草地和其他生态空间的面积均在减少,其中草地生态空间面积减少最多,减少了 851.63 km²;林地生态空间呈现出先增加后减少的态势,草地生态空间和其他生态空间呈现出先减少后增加的态势;而水域生态空间的面积在不断增加,从 2000 年的 408.79 km² 增加到了 2020 年的 1 192.17 km²,增幅达 191.64%。2000—2010 年林地生态空间面积的增长很大程度上受益于贵州省 2000 年实施的退耕还林工程和 2008 年开始的石漠化治理工程,而 2010—2020 年林地面积出现轻微的下降,其原因是为贯彻 2020 年全面脱贫的战

略目标,贵州省出台一系列帮扶政策如易地扶贫搬迁和新改建公路铁路,导致林地生态空间被生活和生产空间挤占;水域生态空间面积的增加主要受水利工程的影响如修建水库、储水池和水塘等。生活空间中城镇和农村生活空间面积都表现出增加态势,尤其是城镇生活空间的面积由 2000 年的 252.70 km² 增至 2020 年的 767.68 km²,增加了 514.98 km²,增幅达 203.79%。生产空间中农业生产空间面积呈现减少态势,减少了 1 395.59 km²,而工业生产空间在迅速扩张,变化程度活跃增幅最为显著,从 2000 年的 107.07 km² 增加到 2020 年的 1 330.82 km²,增幅高达 1 142.93%。城乡生活空间和工业生产空间的面积快速增加,究其原因 2000 年国家实施西部大开发战略,大力发展现代化工业和旅游业,加快了贵州省的发展,自 2000 年以来贵州省常住人口城镇化率从 2000 年的 23.87% 上涨到 2020 年的 53.15%,全省地区生产总值从 1 029.92 亿元增加到 2020 年的 17 826.56 亿元,增幅较大,经济的快速发展推动城镇化进程加快,大量农村居民进城务工或移居城市,城市建设用地不断向外扩张,导致农业生产空间逐渐缩小,与此同时城市的快速发展导致工矿和交通建设用地需求不断增加,迫使工业生产空间不断向外挤占林地、草地生态空间。

表 2 贵州省 2000—2020 年“三生空间”面积及变化情况

Table 2 The area and changes of production-living-ecology space in Guizhou Province from 2000 to 2020

“三生”空间	面积/km ²			2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2020 年	
	2000	2010	2020	面积变化/km ²	比例/%	面积变化/km ²	比例/%	面积变化/km ²	比例/%
农业生产空间	49804.34	49564.97	48408.75	-239.37	-0.48	-1156.22	-2.33	-1395.59	-2.80
工业生产空间	107.07	245.2	1330.82	138.13	129.00	1085.61	442.74	1223.75	1142.93
城镇生活空间	252.7	359.57	767.68	106.87	42.29	408.12	113.50	514.98	203.79
农村生活空间	241.6	271.39	321.46	29.79	12.33	50.08	18.45	79.86	33.06
林地生态空间	93889.37	95882.59	93533.63	1993.23	2.12	-2348.96	-2.45	-355.73	-0.38
草地生态空间	32022.44	29722.7	31170.81	-2299.74	-7.18	1448.11	4.87	-851.63	-2.66
水域生态空间	408.79	692.26	1192.17	283.48	69.35	499.91	77.21	783.38	191.64
其他生态空间	40.4	29.88	30.16	-10.52	-26.03	0.28	0.94	-10.24	-25.34

3.2 景观生态安全时空变化

利用 ArcGIS 软件中的空间分析工具,对 1 962 个风险小区的 ERI 结果进行克里金插值,先采用自然断点法再结合研究区实际情况进行细微调整阈值,将 3 个时期生态安全指数结果按照同样标准划分成 5 个等级:1 级安全区($ERI \leq 0.094$),2 级较安全区($0.094 < ERI \leq 0.099$),3 级中等安全区($0.099 < ERI \leq 0.104$),4 级较不安全区($0.104 < ERI \leq 0.113$),5 级不安全区($ERI > 0.113$)。得到贵州省 2000 年、2010 年和 2020 年景观生态安全等级分布图(图 3)和各时期不同安全等

级面积占比及变化情况(表 3)。由图 3 可知,贵州省景观生态安全在空间分布上总体呈现出北高南低的分布规律。不安全区主要集中分布在黔中地区的贵阳市,安顺市北部的西秀区与平坝区,和黔北地区毕节市东部的黔西市和金沙县。贵阳市作为贵州省的行政中心,近 20 年以来城镇化发展迅速,城镇建设用地迅速扩张,产业建设活动最为频繁导致其生态风险状态始终处于高位。而安顺市作为贵州省地势最为平坦的中西部,种植条件优越且人类活动频繁受人为因素干扰后耕地破碎化程度较高。毕节市东部为石漠化地

区^[38],生态环境较为脆弱,不适宜植被生长且传统耕作方式对土地使用率较低,使得林地和耕地为主的破碎度和分离度增大,生态风险增加。较不安全区主要分布在北盘江流域、乌江流域中下游如兴仁县、织金县和正安县等,沅江流域、赤水河流域上游和下游边缘地区如凯里市、七星关区和仁怀市等;这些区域绝大部分靠近不安全区域周边,较不安全区域用地类型以耕地为主,其余用地类型零星分布,耕地景观破碎

度高,加上水域生态空间极为脆弱,容易受到外界干扰并且不易恢复,导致干扰度指数较高。较安全区及中等安全区在全省零散分布,几乎全省都有其分布。安全区主要分布在非喀斯特区域的黔东南州西南部、黔西南州的东部区域和黔南州的南部如榕江县、望谟县和罗甸县。这些区域草地林地所占面积比重大植被覆盖度较高,自身稳定性较好且景观破碎度和分离度小,故此区域景观生态安全度较高。

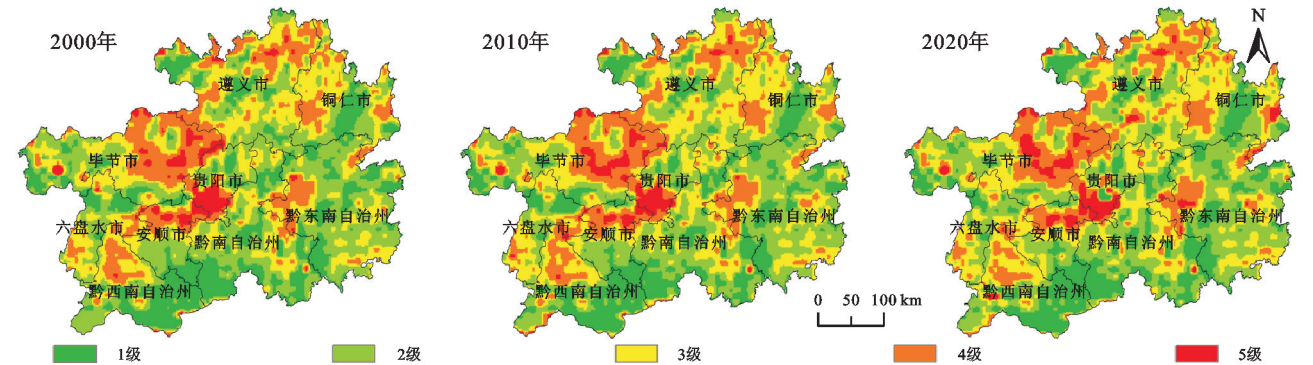


图 3 贵州省 2000—2020 景观生态安全等级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of landscape ecological security levels in Guizhou Province from 2000 to 2020

为更深入探索贵州省景观生态安全面积增减变化情况,对不同时期各等级生态安全区的面积和比例进行计算(表 3)。研究时段内贵州省主要以安全、较安全和中等安全区为主,共占面积的 78% 以上,而较不安全和不安全区面积占比较少不足 22%,这主要得益于国家生态文明战略的实施,且自 2000 年以来贵州省先后开展了退耕还林还草和石漠化治理等一系列生态工程项目,使得景观生态安全区的面积始终占据主导地位。20 年以来贵州省较安全区面积占比

最高,不同时期均在 32% 以上,不安全区面积占比最小,各时期均未超过 4%。在各等级的变化中,安全和较安全区出现小幅度的下降趋势,2000—2020 年期间面积占比由 55.58% 下降到 50.62%。中等安全、较不安全和不安全区面积占比呈现出不同程度的增加,中等安全区面积及占比变化幅度最大,20 年间面积增加了 3 364.89 km²,而较不安全和不安全区仅增加了 1 866.41 km² 左右,表明贵州省整体景观生态安全状况在向好的方向发展。

表 3 2000—2020 年贵州省景观生态安全等级面积及占比

Table 3 Area and proportion of landscape ecological security level in Guizhou Province from 2000 to 2020

安全等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
1 级(安全)	35714.79	20.23	32932.59	18.66	32182.06	18.23
2 级(较安全)	58867.61	33.35	58293.31	33.03	57176.01	32.39
3 级(中等安全)	45576.84	25.82	47804.03	27.09	48941.73	27.73
4 级(较不安全)	30858.10	17.48	31889.28	18.07	32034.53	18.15
5 级(不安全)	5493.67	3.11	5552.80	3.14	6183.65	3.50

3.3 景观生态安全地统计分析

3.3.1 空间自相关分析 以贵州省 2000 年、2010 年、2020 年景观生态安全指数为基础,利用 GeoDa 软件计算得到研究区 2000—2020 年生态风险小区土地生态安全值的 Moran's I 指数,结果显示,2000—2020 年 3 个时期 Moran's I 指数值分别为 0.340, 0.400, 0.414, 均大于 0, 且 p 值 <0.05 , 表明贵州省景

观生态安全在空间上呈集聚分布,空间正相关显著。3 个时期的 Moran's I 指数值呈现出增加的趋势,说明空间自相关程度逐渐增加,空间趋同趋势持续增强。为了更加直观显示 4 种空间关联模式,采用 LISA 聚类图对贵州省景观生态安全指数进行可视化,得到 LISA 分布图(图 4)。由图 4 可得,贵州省 3 个时期景观生态安全呈现出高一高和低—低聚集为主

的空间分布格局,低—高和高—低聚集则零星分布。高—高聚集区主要分布在贵阳市南部、毕节市和遵义市东北部地区,主要原因是这些区域用地类型为生产空间和生活空间用地,生态环境脆弱度较高,与景观生态安全等级中不安全区空间分布有较高的一致性。

低—低聚集区主要分布在黔西南州东南部、黔南州的西部和黔东南州西南部区域,这些区域主要以林地和草地生态空间用地为主,景观损失度较低,生态环境脆弱度也较低,与景观生态安全等级中安全区空间分布有较高的一致性。

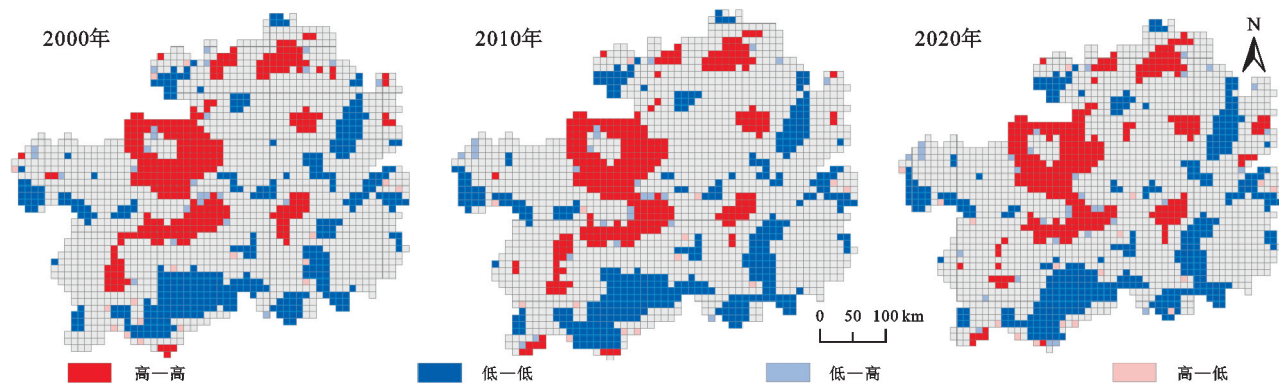


图 4 景观生态安全 LISA 聚集

Fig. 4 Landscape ecological security LISA gathers

3.3.2 三生空间景观生态安全耦合特征分析 为进一步探究贵州省景观生态安全在生产—生活—生态空间上的耦合协调程度,基于“三生空间”分类体系和景观生态安全指数,结合耦合协调度模型,利用 Arc-Map 10.8 栅格计算器工具参照公式(7)计算得到贵州省生态安全耦合协调度指数,利用自然断点法将耦合协调度划分为 5 个等级: $D \in (0, 0.156]$ 严重失调; $D \in (0.156, 0.232]$ 中度失调; $D \in (0.232, 0.266]$ 基本协调; $D \in (0.266, 0.290]$ 中度协调; $D \in (0.290, 0.341]$ 高度协调,最终得到贵州省景观生态安全耦合协调度等级分布图(图 5)和“三生空间”景观生态安全耦合协调度等级面积统计图(图 6)。

2000—2020 年贵州省“三生空间”景观生态安全耦合协调度整体水平良好(图 5),在空间上呈现出北高南低和西高东低的分布状况。研究时段内贵州省各级景观生态安全耦合协调度等级面积变化明显,严重失调区面积呈现出先增后减的态势,20 年来面积增加了 224.33 km²,主要分布在非喀斯特区域的黔东南州西南部、黔西南州的东南部和黔南州南部如雷山县、册亨县和荔波县,这是由于该区域主要以草地、林地生态空间为主,景观生态安全在生活空间与生产空间上差异明显,发展不协调导致耦合协调度较低。高耦合协调区面积呈现出稳步上升的趋势,从 2000 年的 57 523.05 km² 增加到了 2020 年的 62 467.60 km²,增加了 4 944.55 km²,增幅高达 8.6%,也表明研究区“三生空间”耦合协调度逐渐趋于平衡,主要分布在大多数区县以及各地级市主城区,且有向周边扩散的趋势,这是由于该区域“三生空间”布局较为合

理,发展比较均衡,“生态—生产—生活”空间整体耦合协调度较高。中度协调区、基本协调区和中度失调区分布范围较广,散落分布在研究区内。其中,中度协调区始终占据主导地位,面积占比始终在 38.18% 以上,在面积变化上,2000—2020 年期间呈现出减少的趋势,减少了 2 170.09 km²;基本协调区面积同样呈现持续减少趋势,且减少幅度最大,从 2000 年的 36 471.18 km² 减少到 2020 年的 33 664.60 km²,减少了 2 806.57 km²;中度失调区面积呈现出先增加后减少的趋势,整体上看,面积减少了 161.358 64 km²,在一定程度上表明不协调区域面积呈现下降趋势,也表明研究区“三生空间”耦合不协调区域正在向耦合协调区域转变。总的来说,2000—2020 年贵州省生产—生活—生态空间的景观生态安全耦合协调度主要以中度和高度协调为主,中度失调区面积整体在不断减少,而高度协调区面积在稳步上升,说明研究区生活—生产—生态空间景观生态安全耦合协调度水平呈上升趋势,某种程度上也反映出贵州省“三生空间”生态环境质量向好发展。

4 讨论与结论

4.1 讨论

贵州省地处中国西南腹地,地跨长江、珠江两大水系是两江上游地区的重要生态屏障,其生态安全将直接影响湖南、广西及重庆、四川等地。在新时代生态文明建设背景下,加强对生态系统的保护和山水林田湖草的系统治理,筑牢“两江”上游生态安全屏障防化解生态风险,对区域人居环境的改善和维护

国家生态安全具有重要意义。根据《贵州省国土空间规划》意见并结合区域实际,对贵州省生态风险的管理调控提出以下建议:对于风险较低的安全和较安全区,应该增强对生物多样性的维护和自然山林的保护;提升区域土壤保持和水源涵养能力;合理布局生活、生产空间并有序扩张,促进区域生活—生产—生态空间协调发展。对于中等安全区,应该加强对天然林的保护和公益林建设,提升植被覆盖度;严格把控

城镇开发边界、永久基本农田、生态保护红线三条控制线,将开发建设强度控制在合理区间。对于风险较高的不安全区和较不安全区,首先应该继续实施退耕还林还草、封山育林等生态工程,以小流域为基本单元,对水土流失和石漠化进行综合治理,逐步提高绿化面积;其次统筹优化城乡生活空间、工农业生产空间、生态空间,科学合理利用土地资源,构建国土空间开发保护新格局。

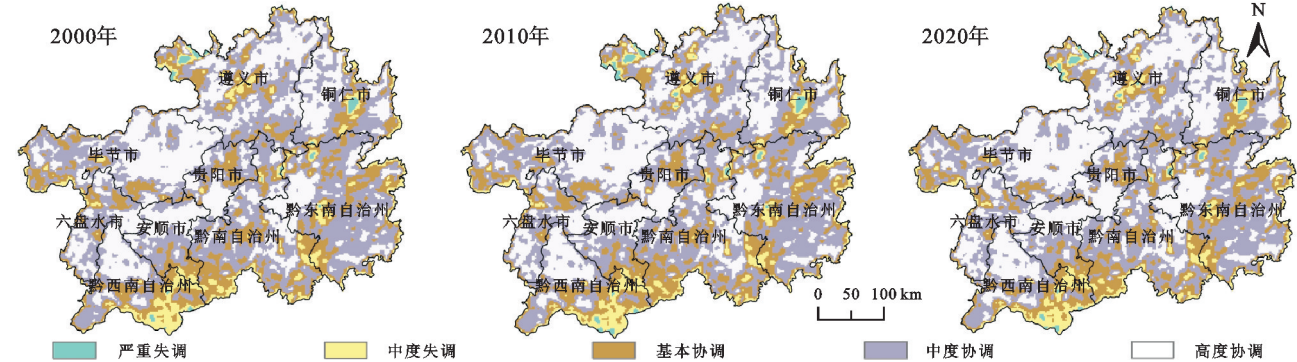


图 5 生产—生活—生态空间景观生态安全耦合协调度等级分布

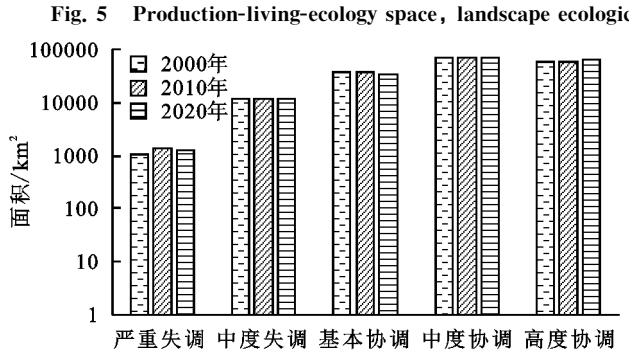


图 6 生产—生活—生态空间景观生态安全耦合协调度等级面积

Fig. 6 Production-living-ecology space, landscape ecological security coupling coordination degree level area

本研究基于贵州省 2000—2020 年三期土地利用数据,从“三生空间”视角出发,借助地统计学方法和空间自相关模型,揭示了贵州省近 20 年以来“三生空间”演变趋势和生态风险的时空变化规律,有效挖掘贵州省景观生态安全空间信息和定量评价,为贵州省优化生态安全格局、合理配置三生空间及区域三生功能关系协调发展提供一定的参考价值。但也存在一定的不足,区域生态安全是受气候、地形地貌和社会经济活动等多因素影响,仅从土地利用视角构建生态风险评价存在一定的局限性,后续应综合考虑多种因素的影响,对生态安全进行多尺度综合评价。目前关于“三生空间”的研究还处于持续完善的阶段,三生空间土地分类体系尚未完全统一,本文根据已有成果和研究区实际情况对三生空间进行分类,但归类的方式

过于简化,后续需要细化分类体系,构建更加合理的分类体系。此外,本文缺少对景观生态风险演变的驱动因素进行探究,因此分析影响景观生态风险变化的驱动机制,应是今后进一步研究的关键问题。

4.2 结 论

(1) 2000—2020 年,贵州省林地生态空间占比最大,其次为农业生产空间,两者所占面积比例之和均在 79% 以上。在“三生空间”用地面积变化上,农业生产空间面积逐渐缩小,生态空间面积逐年下降,城乡生活空间和工业生产空间的面积大幅提升,累积增加 1 818.59 km²;农业生产空间主要转变为城乡生活和工业生产空间是土地流出量最多的类型。

(2) 2000—2020 年,贵州省景观生态安全整体处于较高水平,安全、较安全和中等安全区面积之和占 78% 以上,构成景观生态安全状况的主体,生态安全等级上升的趋势大于下降的趋势,整体安全状况有所缓和。景观生态安全在空间分布上有明显的异质性,整体上表现出北高南低,即在北部地区不安全和较不安全区呈块状分布,而在南部地区安全和较安全区集中分布的格局。

(3) 2000—2020 年贵州省景观生态安全在空间上表现出正相关性且趋于聚集,各时期的 Moran's I 值呈现出逐渐上升的趋势,且空间趋同性持续增强,空间分布格局以高一高和低—低集聚为主,年份间变化不明显。

(4) 贵州省生产—生活—生态空间景观生态安全的耦合协调度水平良好,在空间上呈现“西高东低”的分布状况,耦合协调度高值区主要为贵阳市主城区和部分地级市主城区,并逐步扩散到周边区县,对于贵州省大多数区县而言生产空间或生活空间功能的不足是其耦合协调水平较低的主要原因。

参考文献(References):

- [1] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容[J].应用生态学报,2002,13(3):354-358.
Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concept and research content of ecological security[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 354-358.
- [2] 陈星,周成虎.生态安全:国内外研究综述[J].地理科学进展,2005,24(6):8-20.
Chen X, Zhou C H. Ecological security: A review of domestic and foreign research[J]. Progress in Geography, 2005, 24(6): 8-20.
- [3] Liu X, Li X, Chen Y, et al. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data[J]. Landscape Ecology, 2010, 25(5): 671-682.
- [4] 雷越,张学斌,罗君等.基于不同样带的干旱区城市景观格局时空演变特征:以张掖市为例[J].生态学报,2023, 43(05):2034-2048.
Lei Y, Zhang X B, Luo J, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of urban landscape pattern in arid area based on different zones: A case study of Zhangye City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(05): 2034-2048.
- [5] 宁启蒙,欧阳海燕,汤放华,等.土地利用变化影响下洞庭湖地区景观格局的时空演变[J].经济地理,2020, 40(9):196-203.
Ning Q M, OuYang H Y, Tang F H, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in Dongting Lake area under the influence of land use change[J]. Economic geography, 2020, 40(9): 196-203.
- [6] 于淑会,康园园,邓伟,等.太行山东部县域“三生”用地转型与景观生态风险分析:以河北省平山县为例[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(7):1113-1122.
Yu S H, Kang Y Y, Deng W, et al. Transformation of ‘three-life’ land use and landscape ecological risk analysis in eastern Taihangshan County: A case study of Pingshan County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English), 2022, 30(7): 1113-1122.
- [7] 王有小,刘少坤,陆汝成,等.“三生”空间视角下近40年广西边疆地区景观生态风险及地形梯度分析[J].生态与农村环境学报,2021,37(12):1586-1595.
Wang Y X, Liu S K, Lu R C, et al. Ecological risk and topographic gradient analysis of landscape in Guangxi border area in the past 40 years from the spatial perspective of ‘three lives’ [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(12): 1586-1595.
- [8] 赵越,罗志军,李雅婷,等.赣江上游流域景观生态风险的时空分异:从生产—生活—生态空间的视角[J].生态学报,2019,39(13):4676-4686.
Zhao Y, Luo Z J, Li Y T, et al. Spatial and temporal differentiation of landscape ecological risks in the upper reaches of the Gan River: from the perspective of production-life-ecological space [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4676-4686.
- [9] 黄金川,林浩曦,漆潇潇.面向国土空间优化的三生空间研究进展[J].地理科学进展,2017,36(3):378-391.
Huang J C, Lin H X, Qi X X. Research progress of three-life space for land space optimization [J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 378-391.
- [10] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].地理学报,2022,77(3):534-546.
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Spatial layout and supporting system framework of land based on resource efficiency [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 534-546.
- [11] 夏照亮,兰安军,范泽孟,等.“三生”空间视角下喀斯特山区流域景观生态风险的时空分布特征[J].水土保持通报,2023,43(2):256-266,276.
Xia Z L, Lan A J, Fan Z M, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of landscape ecological risk in karst mountain watershed from the spatial perspective of “Sunshine” [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 256-266, 276.
- [12] 罗莎莎,赖庆标,林彬,等.“三生”空间视角下东南丘陵地区土地利用冲突识别[J].水土保持通报,2022,42(3):148-156,397.
Luo S S, Lai Q B, Lin B, et al. Identification of land use conflicts in southeast hilly areas from the perspective of “three lives” [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 148-156, 397.
- [13] 韦绍音,陆汝成,张利国,等.碳中和目标下的广西边境地区“三生”空间转型及碳储量效应[J].水土保持通报,2023,43(1):399-408.
Wei S Y, Lu R C, Zhang L G, et al. Spatial transformation of “three lives” and carbon storage effect in Guangxi border area under the goal of carbon neutrality [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43

- (1):399-408.
- [14] 应凌霄,孔令桥,肖燧,等.生态安全及其评价方法研究进展[J].生态学报,2022,42(5):1679-1692.
Ying L X, Kong L Q, Xiao Y, et al. Research progress on ecological security and its evaluation methods [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5):1679-1692.
- [15] 和春兰,普军伟,沈金祥.2005—2018年澜沧江下游流域景观生态安全时空变化及其驱动因素[J].水土保持通报,2020,40(4):219-227.
He C L, Pu J W, Shen J X. Spatial-temporal changes and driving factors of landscape ecological security in the lower Lancang River basin from 2005 to 2018[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(4):219-227.
- [16] 陈昆仑,齐漫,王旭,等.1995—2015年武汉城市湖泊景观生态安全格局演化[J].生态学报,2019,39(5):1725-1734.
Chen K L, Qi M, Wang X, et al. Evolution of ecological security pattern of urban lake landscape in Wuhan from 1995 to 2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5):1725-1734.
- [17] 于婧,汤昇,陈艳红,等.山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建:以张家界市为例[J].生态学报,2022,42(4):1290-1299.
Yu J, Tang B, Chen Y H, et al. Ecological risk assessment and ecological security pattern construction of mountain water resources urban landscape: A case study of Zhangjiajie City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4):1290-1299.
- [18] 王原,何成,刘荣国,等.宁夏沙坡头自然保护区鸟类景观生态安全格局构建[J].生态学报,2017,37(16):5531-5541.
Wang Y, He C, Liu R G, et al. Construction of ecological security pattern of bird landscape in Shapotou National Nature Reserve, Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16):5531-5541.
- [19] 郭成久,刘宇欣,李海福,等.抚顺西露天矿区景观格局变化与生态安全格局构建[J].沈阳农业大学学报,2021,52(4):442-450.
Guo C J, Liu Y X, Li H F, et al. Change of landscape pattern and ecological security pattern construction in Fushun West open-pit mining area[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2021, 52(4):442-450.
- [20] 郭彦君,郭文炯.“三生空间”视角下山西中部盆地城市群景观生态风险分析[J].生态学杂志,2022,41(9):1813-1824.
Guo Y J, Guo W J. Ecological risk analysis of landscape of urban agglomeration in central Shanxi Basin from the perspective of “three-life space”[J]. *Journal of Ecology*, 2022, 41(9):1813-1824.
- [21] 张湘,张仕超,张煊赞,等.“三生空间”视域下近40年长江经济带景观生态安全时空演变及其影响因素[J/OL].中国生态农业学报(中英文):1-15[2023-10-09].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1432.S.20230607.1542.006.html>.
- [22] 刘顺鑫,黄云.“三生空间”视角下万州区景观生态安全评价及其耦合特征分析[J].水土保持研究,2020,27(6):308-316.
Liu S X, Huang Y. Landscape ecological security assessment and coupling characteristic analysis of Wanzhou District from the perspective of ‘Three-life space’[J]. *Research on soil and water conservation*, 2020, 27(6):308-316.
- [23] 陈斌,徐尚昭,周阳阳,等.“三生空间”视角下宜昌市景观生态安全评价及其耦合特征分析[J].水土保持研究,2022,29(4):344-351.
Chen B, Xu S Z, Zhou Y Y, et al. Evaluation of landscape ecological security and its coupling characteristics analysis in Yichang City from the perspective of ‘three-life space’[J]. *Research on soil and water conservation*, 2022, 29(4):344-351.
- [24] 王亚楠,肖潇,蒲金芳,等.40年来长江经济带“三生”空间时空演化特征[J].农业机械学报,2022,53(11):215-225.
Wang Y N, Xiao X, Pu J F, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of ‘three lives’ in the Yangtze River Economic Belt over the past 40 years[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(11):215-225.
- [25] 年雁云,王晓利,陈璐.1930—2010年额济纳三角洲土地利用景观格局变化[J].应用生态学报,2015,26(3):777-785.
Nian Y Y, Wang X L, Chen L. Changes in land use landscape pattern in Ejina Delta from 1930 to 2010[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3):777-785.
- [26] 时卉,杨兆萍,韩芳,等.新疆天池景区生态安全度时空分异特征与驱动机制[J].地理科学进展,2013,32(3):475-485.
Shi H, Yang Z P, Han F, et al. Spatial-temporal dif-

- ferentiation characteristics and driving mechanism of ecological security in Tianchi scenic area in Xinjiang[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(3): 475-485.
- [27] 于佳, 张磊. 土地利用景观格局动态效应分析: 以长春市为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(12): 98-103.
- Yu J, Zhang L. Analysis of dynamic effects of land use landscape pattern: A case study of Changchun City[J]. *Agricultural Resources and Regional Planning in China*, 2016, 37(12): 98-103.
- [28] 何钊全, 尚雪, 张铜会, 等. 近 20 年陕北黄土丘陵区景观生态风险时空变化及其冷热点格局[J/OL]. *生态学报*: 1-15 [2023-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230327.1110.006.html>.
- He Z Q, Shang X, Zhang T H, et al. Temporal and spatial changes of landscape ecological risk and its cold and hot spot pattern in the loess hilly area of northern Shaanxi in the past 20 years[J/OL]. *Journal of Ecology*: 1-15 [2023-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230327.1110.006.html>.
- [29] 杜文涛, 李新萍, 宋佳伟, 等. 黄河流域景观生态风险分析及预测[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 105-113.
- Du W T, Li X P, Song J W, et al. Landscape ecological risk analysis and prediction in the Yellow River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 105-113.
- [30] 施厚军. 北盘江流域土地利用变化及生态效应研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- Shi H J. Research on land use change and ecological effect in Beipanjiang River Basin[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [31] 奚世军, 安裕伦, 李阳兵, 等. 基于景观格局的喀斯特山区流域生态风险评估: 以贵州省乌江流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 712-721.
- Xi S J, An Y L, Li Y B, et al. Ecological risk assessment of karst mountain basin based on landscape pattern: A case study of Wujiang River Basin in Guizhou Province[J]. *Resources and environment in Yangtze River Basin*, 2019, 28(3): 712-721.
- [32] 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 change in coastal zone of Haikou City in the past 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 975-986.
- [33] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. *地理研究*, 2018, 37(6): 1100-1114.
- Wang C, Tang N. Spatial-temporal characteristics and pattern evolution of spatial function coupling and coordination in rural areas in Chongqing[J]. *Geographical research*, 2018, 37(6): 1100-1114.
- [34] 颜瑜严, 杨辽, 王伟胜, 等. 伊犁河谷景观生态风险时空变化及其地形梯度分析[J]. *生态科学*, 2020, 39(4): 125-136.
- Yan Y Y, Yang L, Wang W S, et al. Spatiotemporal variation of landscape ecological risk and topographic gradient analysis in Ili River Valley[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(4): 125-136.
- [35] 万慧琳, 王赛鸽, 陈彬, 等. 三江平原湿地生态风险评价及空间阈值分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(16): 6595-6606.
- Wan H L, Wang S G, Chen B, et al. Ecological risk assessment and spatial threshold analysis of wetlands in Sanjiang Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6595-6606.
- [36] 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[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 213-220.
- Yu D, Liang Z B, Xiao Z J, et al. Spatial-temporal characteristics of land ecological risk in Nanchang based on landscape ecological thinking[J]. *Research on soil and water conservation*, 2020, 27(1): 213-220.
- [37] 孙丽蓉, 马静, 周冬梅, 等. 石羊河流域景观生态风险时空分布特征[J]. *生态科学*, 2022, 41(2): 194-203.
- Sun L R, Ma J, Zhou D M, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of landscape ecological risks in Shiyang River Basin[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(2): 194-203.
- [38] 文林琴, 栗忠飞. 2004—2016 年贵州省石漠化状况及动态演变特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 5928-5939.
- Wen L Q, Li Z F. Status and dynamic evolution of rocky desertification in Guizhou Province from 2004 to 2016[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 5928-5939.