

文山市景观生态安全评价与分区治理

于中原, 黄义忠

(1.昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘要: [目的]针对典型西南岩溶山地特殊景观构建生态安全评价指标体系,开展文山市景观生态安全评价与治理研究,为区域生态保护和可持续发展提供科学依据。[方法]从岩溶山地景观特征出发,建立目标-综合-项目-指标层的景观生态安全评价指标体系,基于几何平均数和 InVEST 模型对生态敏感性和系统服务重要性 2 个综合层进行评价,进而完成生态安全目标层评价并划分生态功能区,提出差异化治理措施。[结果]1)文山市水土流失、地质灾害和石漠化敏感性以轻度 and 中度敏感为主,占总面积的 48.83%~59.13%,极敏感最少,占比 5.92%~7.10%。2)文山市水源涵养和生物多样性保护重要性以轻度 and 中度为主,占总面积的 67.42%~80.31%,土壤保持重要性以不重要为主,占比 55.30%,极重要占比仅为 2.06%~5.22%。3)文山市景观生态安全水平整体不高,1 级、2 级占比仅有 4.82%和 16.74%,集中分布在“文山老君山自然保护区”;3 级面积最多,占比高达 30.43%,主要分布在得厚镇、红甸乡、秉烈乡等地区;4 级、5 级占比分别为 13.59%、25.62%,广泛分布在秉烈乡、东山乡、追栗街镇和开化镇等地。4)将文山市生态功能分区划分为石漠化生态功能修复区、城镇生态协调建设区、生物多样性功能保护区和水源涵养与土壤保持功能提升区等 4 类生态功能区,并针对各区域生态问题提出 4 项治理措施与建议。[结论]将生态敏感性和生态系统服务重要性有机结合综合评价文山市景观生态安全水平,并进行分区治理,为西南岩溶山地构建生态安全格局、区域生态保护和可持续发展提供基础理论支撑。

关键词: 生态敏感性; 生态系统服务重要性; 生态安全评价; 生态功能分区; 西南岩溶山地

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0338-10

Research on Landscape Ecological Security Evaluation and Zoning Management in Wenshan City

YU Zhongyuan, HUANG Yizhong

(Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: [Objective] To establish an ecological security evaluation index system tailored to the distinctive landscapes of typical karst mountainous regions in Southwest China, to conduct a comprehensive study on the landscape ecological security evaluation and governance in Wenshan City, in order to provide a scientific foundation for regional ecological protection and sustainable development. [Methods] Based on the landscape characteristics of karst mountainous areas, a landscape ecological security evaluation index system consisting of target, comprehensive, project, and indicator layers was established. Utilizing the geometric mean and the InVEST model, two comprehensive layers, i. e. ecological sensitivity and system service importance were evaluated. Subsequently, the ecological security target layer, delineated ecological functional zones, and proposed differentiated governance measures were evaluated. [Results] 1) In Wenshan City, the sensitivity to soil erosion, geological disasters, and rocky desertification primarily fell into mild and moderate categories, comprising 48.83%—59.13% of the total area, with the least area being extremely sensitive, accounting for 5.92%—7.10%. 2) In Wenshan City, the significance of water conservation and biodiversity protection predominantly fell into mild and moderate categories, representing 67.42%—80.31% of the total area. The

收稿日期: 2024-09-09

修回日期: 2024-10-03

录用日期: 2024-11-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41761081); 云南省社科重点资助项目 (ZD202315)

第一作者: 于中原 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态系统与生态安全研究。E-mail: 670974758@qq.com

通信作者: 黄义忠 (1972—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事国土空间规划研究。E-mail: 2684690927@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

significance of soil conservation was primarily deemed unimportant, with the unimportant category accounting for 55.30% of the total area, and the extremely important category accounting for merely 2.06%—5.22%. 3) The overall level of landscape ecological security in Wenshan City was low, with merely 4.82% and 16.74% belonging to the first and second levels, respectively, and predominantly concentrated in the Wenshan Laojunshan Nature Reserve. The third-level area occupied the largest proportion, reaching up to 30.43%, and predominantly distributed in Dehou Town, Hongdian Township, Binglie Township, and other regions. The proportions of the fourth and fifth levels were 13.59% and 25.62% respectively, and widely spread across Binglie Township, Dongshan Township, Zhulijie Town, and Kaihua Town. 4) The ecological function zones of Wenshan City were divided into four categories, i. e. the rocky desertification ecological function restoration zone, the urban ecological coordination construction zone, the biodiversity function protection zone, and the water conservation and soil conservation function improvement zone. Four governance measures and suggestions were proposed to address each regional ecological issue. [Conclusion] The study integrates ecological sensitivity and ecosystem service importance to comprehensively evaluate the landscape ecological security of Wenshan City, and conducts zoning governance, the results can provide basic theoretical support for the construction of ecological security patterns, regional ecological protection, and sustainable development in the karst mountainous areas of Southwest China.

Keywords: ecological sensitivity; the significance of ecosystem service function; ecological security assessment; ecological function zoning; southwest karst mountainous area

Received: 2024-09-09

Revised: 2024-10-03

Accepted: 2024-11-15

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

当前中国生态环境形势严峻,生态问题多发,生态安全已成为国家可持续发展战略的关键和重要目标^[1]。我国岩溶地区主要分布在西南的滇黔桂湘鄂川渝等山地地区,以连续面积最大、发育类型最齐全和生态环境最脆弱而著称,岩溶山地石漠化和水土流失严重发育,加上人口众多,人与自然矛盾也异常尖锐^[2],导致生态系统的内部结构遭到破坏,生态环境极其脆弱。因此,如何准确识别岩溶山地突出的生态问题及其空间结构状况,明确其生态安全分异特征,是西南岩溶山地生态保护与修复所面临的重要科学问题。

目前,学者^[3]最常用的景观生态安全评价指标体系是基于 PSR 模型及其衍生模型,从多维度构建指标体系进行评价,也有学者^[4-6]利用模糊数学、灰色关联分析、状态空间向量法和生态足迹法进行评价。同时,也有大量研究^[7]对不同方面的指标进行归一化处理,并用不同方法进行赋值,通过叠加得到综合指标进行景观生态安全评价。生态退化问题与生态系统服务的状态及其变化,作为体现生态安全核心内涵的关注对象,也是识别区域生态问题和维护生态安全的重要评价指标^[8]。对生态退化问题,学者主要用指标体系法^[9]和因子叠加法^[10]进行生态敏感性评估,但在体系的构建和因子的选择上考虑因素较为片面,大都选取地形、降雨、植被覆盖和土地利用类型等,对于一般地区较为适用,而对于生态环境复杂的岩溶地区进行评估略显不足。目前,生态系统服务评估模型有 InVEST

模型、FLUS 模型和 SWAT 模型^[11-12],其中,InVEST 模型有数据需求简单、模拟评估准确、适用范围广等优势,成为学术界应用最多且效果最好的评估模型。由此可见,生态退化问题和生态系统服务是生态安全的关键关注点并已经被学者^[13]和国家高度关注,但已有研究^[14-15]大都利用生态敏感性或生态系统服务功能单方面揭示生态问题和生态系统空间结构,鲜有将二者有机结合并在石漠化治理背景下对景观生态安全进行分析和报道。从研究区域上看,研究成果主要集中在城市、流域和农业区等,而针对西南岩溶地区特殊地貌的关注度较少,尤其是针对岩溶山地从景观生态安全角度建立评价方法进行探讨相对缺乏。

文山市作为第一批被划入桂黔滇喀斯特石漠化防治国家重点生态功能区,生态功能极为重要,岩溶山地景观极具代表性。市内喀斯特岩溶地貌突出,地形复杂多变,土壤贫瘠,碳酸盐岩大面积裸露,近年来,城镇化迅速发展,人类不合理的开发利用,导致水土流失严重、石漠化问题突出、生态变异敏感度高、环境承载力低及抵抗外界干扰能力弱。同时,不合理的土地利用和自然资源消耗加剧,破坏岩溶地区的内部生态系统结构,生态系统服务功能退化和生态安全问题日益突出。因此,以生态敏感性和生态系统服务重要性表征文山市的景观生态安全分异特征,有利于促进西南岩溶山地石漠化治理和生态系统保护政策的制定,对维护区域生态安全和生态文明建设具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

文山市,隶属云南省文山壮族苗族自治州,位于云南省东南部,文山州西部(103°43′~104°27′E, 23°06′~23°44′N),下辖 3 个街道、7 个镇、7 个乡,总面积为 2 967.17 km²,是云南省的东南大门,进入北部湾、珠三角和通往东南亚国际通道的重要交通枢纽(图 1)。文山市地形地貌属于滇东南岩溶山区,喀斯特岩溶地貌突出,地形复杂多变,总体地势西北高、东南低,山峦连绵起伏,河流密布,河谷深切。文山市地处云南省东南部低纬度高原,北回归线横穿境内,市境大部在北回归线以南,属中亚热带季风气候,降水丰沛,温度适宜,复杂的地质构造和自然环境,造就了文山市丰富的矿产资源与生物资源。

1.2 数据来源与处理

DEM 数据、土地利用数据、土壤侵蚀和地质灾害点等数据均来源于《文山壮族苗族自治州国土综合整治与生态修复研究专题报告》;植被遥感影像数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>) Landsat8 OLI_TRIS(时间:2020 年 10 月 25 日);土壤类型、降水量、流域、潜在蒸散发(2020 年)等数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>);土壤属性数据来源于世界土壤数据库(HWSD);岩性数据来源于 1:100 万中华人民共和国数字地质图空间数据库(<http://dc.ngac.org.cn/>);基岩深度数据来源于中山大学陆气相互作用研究组(<http://global-change.bnu.edu.cn/>)。自然保护区数据来源于中国自然保护区标本资源共享平台的地理信息库(<http://www.papc.cn/html/folder/946895~1.htm>)。所

有数据统一栅格大小(30 m)和坐标系(WGS_1 984_UTM_Zone_48 N),以进行模型计算和运行。

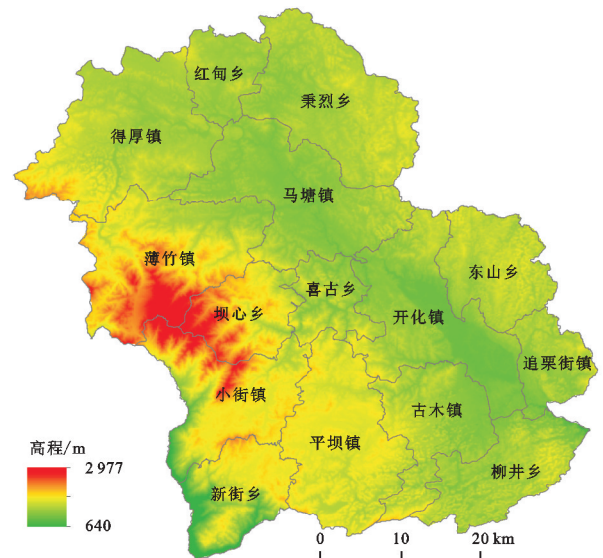


图 1 研究区地理位置

Fig. Location of the study area

1.3 研究方法

1.3.1 景观生态安全评价体系框架 岩溶山地景观总体特征是岩石裸露石漠化与植被覆盖间的交互竞争,而其中水资源、土壤条件是竞争的重要因素,涉及气候降水、土地利用等人类活动、地形变化、地质灾害、土壤侵蚀等其他众多因素。借助生态安全评价的理念并参考相关研究^[16]构建评价体系,本次评价指标体系由目标层、综合层、项目层、指标层构成(图 2)。目标层由生态敏感性、生态系统服务重要性 2 个支撑,综合层又分别由水土流失、地质灾害、石漠化、水源涵养、土壤保持、生物多样性等项目层构成,项目层再由指标层支撑。

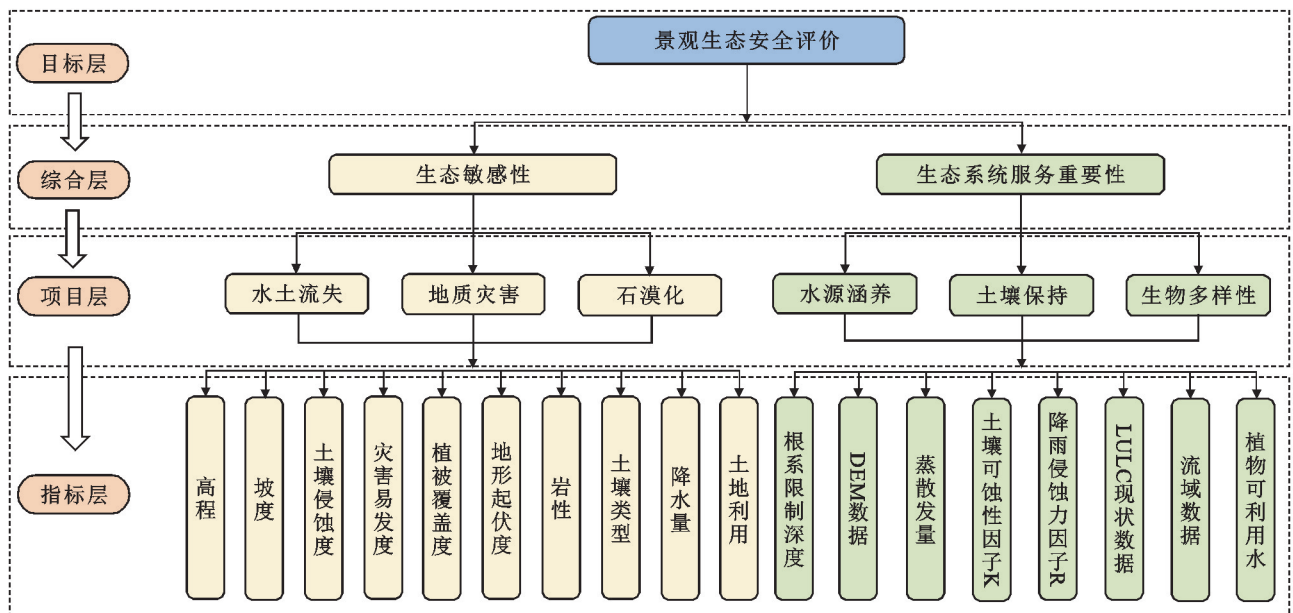


图 2 景观生态安全评价体系框架

Fig.2 Framework of the landscape ecological security evaluation system

1.3.2 基于几何平均数模型的生态敏感性评价 本文参考《生态保护红线划定指南》^[16]和相关研究^[17],并根据研究区岩溶山地景观总体特征对生态敏感性评价模型进行优化,使其更加适用于生态环境复杂、地貌特殊的岩溶山地地区。基于几何平均数模型和水土流失方程的基本原理,对水土流失敏感性评价因子进行调整,将原有的降雨侵蚀力、土壤可蚀性和坡长坡度因子调整为降水量、土壤侵蚀度和地形起伏

度,并增加土地利用类型因子进行评价,通过自然现状因子能够更加直观地反映水土流失空间分布特征。根据石漠化形成机理和研究区石漠化景观特征对评价因子进行优化,将碳酸盐出露面积百分比调整为岩性因子,增加降水量和土壤类型因子进行评价,使得石漠化敏感性评价更加准确科学。考虑到文山市地质灾害频发,因此,选取坡度、灾害易发度等 5 项因子对研究区进行地质灾害敏感性评价(表 1、表 2)。

表 1 原生态敏感性评价模型

Table 1 Original ecological sensitivity evaluation model

生态敏感性	公式及参数
水土流失	$ST = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i}$ 。ST 为水土流失敏感性指数; R_i 为降雨侵蚀力; K_i 为土壤可蚀性; LS_i 为坡长坡度,°; C_i 植被覆盖度, %
石漠化	$SM = \sqrt[3]{D_i \times P_i \times C_i}$ 。SM 为石漠化敏感性指数; D_i 为碳酸盐出露面积百分比, %; P_i 为地形坡度,°; C_i 植被覆盖度, %

表 2 优化后生态敏感性评价模型

Table 2 The optimized ecological sensitivity evaluation model

生态敏感性	公式及参数
水土流失	$ST = \sqrt[5]{QF_i \times R_i \times Z_i \times QS_i \times L_i}$ 。ST 为水土流失敏感性指数; QF_i 为地形起伏度, m; R_i 为降水量, mm; Z_i 为植被覆盖度, %; QS_i 为土壤侵蚀度; L_i 为土地利用类型
地质灾害	$DZ = \sqrt[5]{P_i \times G_i \times QF_i \times Z_i \times H_i}$ 。DZ 为地质灾害敏感性指数; P_i 为坡度,°; G_i 为高程, m; QF_i 为地形起伏度, m; Z_i 为植被覆盖度, %; H_i 为灾害易发度
石漠化	$SM = \sqrt[5]{P_i \times R_i \times Z_i \times Y_i \times TR_i}$ 。SM 为石漠化敏感性指数; P_i 为坡度,°; R_i 为降水量, mm; Z_i 植被覆盖度, %; Y_i 为岩性; TR_i 为土壤类型

根据优化后的模型,选择地形起伏度、降水量、植被覆盖度、土壤侵蚀度和土地利用类型共 5 项因子评价水土流失敏感性;选取坡度、高程、地形起伏度、植被覆盖度和灾害易发度共 5 项因子评价地质灾害敏感性;选取坡度、降水量、植被覆盖度、岩

性和土壤类型共 5 项因子评价石漠化敏感性。参考相关研究^[10]将各因子划分为 5 个等级,并分别赋值,根据模型计算出敏感性指数,将敏感性等级划分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感共 5 个等级(表 3)。

表 3 敏感性评价指标体系

Table 3 Sensitivity evaluation index system

敏感性	地形起伏度/m	降水量/mm	植被覆盖度/%	土壤侵蚀度	土地利用类型	坡度/°	高程/m	灾害易发度	岩性	土壤类型
不敏感	<50	<1 200	≥80	微度	林地	<8	<1 000	不易	非碳酸盐岩	—
轻度敏感	50~100	1 200~1 300	60~80	轻度	建设、未利用地	8~15	1 000~1 500	低	非纯碳酸盐岩 A	水稻土
中度敏感	100~200	1 300~1 400	40~60	中度	草地	15~25	1 500~2 000	中	非纯碳酸盐岩 B	红壤、棕壤、赤红壤
高度敏感	200~300	1 400~1 500	20~40	强度	水域	25~35	2 000~2 500	高	纯碳酸盐岩 A	黄壤、黄棕壤
极敏感	≥300	≥1 500	<20	极强	耕地	≥35	≥2 500	极易	纯碳酸盐岩 B	紫色土、石灰土

注:纯碳酸盐岩 A 包括白云岩、灰岩;纯碳酸盐岩 B 包括灰岩夹白云岩、白云岩夹灰岩、白云岩与灰岩互层;非纯碳酸盐岩 A 包括碳酸盐岩夹碎屑岩;非纯碳酸盐岩 B 包括碎屑岩夹碳酸盐岩、碳酸盐岩与碎屑岩互层。

1.3.3 基于 InVEST 模型的生态系统服务重要性评价 参考相关研究^[18-19],选取评估模拟准确,适用范围广泛的 InVEST 模型,利用 Annual Water Yield 模块、Sediment Delivery Ratio model 模块和 Habitat Quality 模块分别评价水源涵养、土壤保持和生物多样性保护功能重要性(表 4),并划分重要性等级,以

反映研究区的生态系统和其服务功能的重要性程度,可有效明确生态系统服务的空间分布状态。

1.3.4 景观生态安全评价体系指标构建与功能分区 本文选取等级层次分析法^[20]对水土流失、地质灾害、石漠化、水源涵养、土壤保持和生物多样性 6 个项目层的结果进行权重赋值(表 5),加权得出综合生态敏

感性、系统服务重要性指数,最后对二者进行空间叠加分析,得出景观生态安全等级空间分布特征。参考相关研究^[21]并根据敏感性与重要性等级,利用自然断点法将景观生态安全等级依次划分为 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级共 5 个等级,1 级为最高安全等级,5 级为最低安全等级。

表 4 生态系统服务重要性评价模型
Table 4 Evaluation model of ecosystem service function importance

生态系统服务重要性	公式及参数
水源涵养	$SY_{xj} = P_x - AET_{xj}$ 。 SY_{xj} 为森林景观类型 j 中单元格 x 上的年水源供给量,mm; P_x 为单元格 x 上的年降水量,mm; AET_{xj} 为森林景观类型 j 中单元格 x 上的年实际蒸散量,mm
土壤保持	$SD = RKLS - USLE = R \times K \times LS(1 - C \times P)$ 。 SD 为土壤保持量; $RKLS$ 为潜在土壤流失量; $USLE$ 是实际土壤流失量; R 为降水侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为土壤保持措施因子
生物多样性	$Q_{xj} = H_j \{1 - [D_{xj}^z / (D_{xj}^z + K^z)]\}$ 。 Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; H_j 为土地利用类型 j 的生境适合度; D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度; K 为半饱和常数,取 D_{xj} 最大值的 1/2; z 为季节性因子

表 5 景观生态安全评价指标体系 Table 5 Index system for evaluating landscape ecological security		
因素层	指标层	权重
生态系统敏感性	水土流失	0.31
	地质灾害	0.25
	石漠化	0.44
生态系统服务重要性	水源涵养	0.28
	土壤保持	0.33
	生物多样性保护	0.39

为揭示研究区域生态系统特征的空间差异,协调土地利用与生态环境保护间的关系,实现生态保护的可持续发展目标,本研究根据敏感性与重要性等 6 个项目层指标在不同区域空间内的分布规律,划分出能够反映生态问题的区域单元,并制定差异化的生态空间分区治理措施。统计出各项指标不同等级的面积在各行政村的占比以 SPSS 中的 K-means 进行聚类分析^[22],按照综合性、相似性与差异性、可持续发展和实用性与管理性原则划分出不同景观生态安全功能区,以便于对研究区进行管控治理。

2 结果与分析

2.1 生态敏感性评价结果

文山市水土流失敏感性评价结果中,主要以不敏感和轻度敏感为主,不敏感地区面积为 859.707 0 km²,占比达到 28.98%,轻度敏感地区面积为 911.750 4 km²,占比达到 30.73%(表 6),二者主要分布在北部平坦地区和中西部自然保护区(图 3)。中度敏感面积达到 537.080 4 km²,占比 18.10%,分布较为分散。高度敏感和极敏感面积分别为 447.664 5、210.797 7 km²,占比分别为 15.09%、7.10%,主要分布在东山乡、开化镇、新街乡和薄竹镇等文山市东部和南部地区,土层

浅薄,地形起伏大,碳酸盐岩中酸性不溶物质量分数低,土壤流失的可能性较大。因此,敏感性等级较高。

地质灾害敏感性评价结果中,轻度敏感和中度敏感面积最大,分别为 870.325 2、884.090 7 km²,占比分别为 29.33%、29.80%,主要分布在文山市秉烈乡、东山乡、追栗街镇和柳井乡等地区。不敏感地区面积为 644.552 1 km²,占比 21.72%,主要分布在红甸乡、马塘镇北部、开化镇北部等地区。高度敏感和极敏感面积占比较少,分别为 392.288 4、175.743 6 km²,占比分别达到 13.22%、5.92%,主要分布在得厚镇、薄竹镇、喜古乡和小街镇等地区,此部分区域地势起伏明显,坡度较陡,地质灾害发生可能性较高。

石漠化敏感性以中度敏感为主,其面积为 891.218 7 km²,占比高达 30.04%,主要分布在秉烈乡、小街镇和新街乡等地区。不敏感和轻度敏感面积分别为 478.277 1、833.520 6 km²,分别占总面积的 16.12%和 28.09%,主要分布在红甸乡、马塘镇西部、坝心乡西部等地区。高度敏感和极敏感面积分别为 570.276 0、193.707 6 km²,分别占总面积的 19.22%、6.53%,主要分布在东山乡、追栗街镇、柳井乡和古木镇等文山市东南部地区,植被覆盖率低,土壤较为贫瘠,岩性以纯碳酸盐岩为主,容易受到侵蚀且很难恢复。因此,石漠化敏感性等级较高。

2.2 生态系统服务重要性评价结果

文山市水源涵养功能重要性整体呈南部高于北部(图 3),其中,轻度重要和中度重要面积最多,分别为 993.300 3、1 007.111 0 km²,占比分别为 33.48%、33.94%(表 6),主要分布在薄竹镇、坝心乡、喜古乡和东山乡等文山市中部地区。不重要地区面积为 460.384 2 km²,占比有 15.52%,主要分布在得厚镇、红甸乡、秉烈乡和马塘镇等文山市北部地区。高度重要和极重

要地区面积分别为 351.303 3、154.901 2 km²,分别占总面积的 11.84%、5.22%,主要分布在开化镇、平坝镇、新街乡和柳井乡等文山市南部地区,该部分地区植被覆盖度高,降雨丰富,蒸散发量相对不高,水源涵养服务功能较好。

土壤保持功能重要性以不重要为主,面积为 1 308.647 7 km²,占总面积的 44.11%,主要分布在红甸乡、秉烈乡、马塘镇和开化镇等地区。轻度重要和中度重要地区面积分别为 589.032 0、698.842 8 km²,分别占总面积的 19.85%、23.55%,主要分布在东山乡、追栗街镇、柳井乡和平坝镇等地区。高度主要和极重要地区面积较少,分别为 300.870 0、69.607 5 km²,分别占总面积的 10.14%、2.35%,主要分布在薄竹镇、坝心乡、小街镇和新街乡等地区,此部分地区植

被覆盖度高,坡度平缓、土壤质地相对较高,所以土壤保持功能较好。

生物多样性保护功能重要性评价结果中,轻度重要和中度重要分布最为广泛,面积分别为 1 127.585 0、1 255.276 0 km²,占比分别达到 38.00%、42.31%,二者面积占比更是达到文山市土地面积的 80%以上,是由于文山市耕地面积占比较多,人类耕种活动影响生物迁移,导致物种单一,所以,整体生物多样性保护功能较弱。不重要等级面积较少,占比仅有 2.77%,主要分布在马塘镇和开化镇等人类活动频繁地区。高度重要和极重要占比分别仅有 11.78%和 2.14%,主要分布在薄竹镇、坝心乡和小街镇的交界处,也是国家级自然保护区所在地,此地物种丰富,丛林茂密,生物多样性保护功能重要性等级较高。

表 6 生态敏感性和系统服务重要性各等级面积占比

敏感性/ 重要性	水土流失		地质灾害		石漠化		水源涵养		土壤保持		生物多样性保护	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
不敏感/重要	859.707 0	28.98	644.552 1	21.72	478.277 1	16.12	460.384 2	15.52	1 308.647 7	44.11	171.306 9	5.77
轻度敏感/重要	911.750 4	30.73	870.325 2	29.33	833.520 6	28.09	993.300 3	33.48	589.032 0	19.85	1 127.585 0	38.00
中度敏感/重要	537.080 4	18.10	884.090 7	29.80	891.218 7	30.04	1 007.111 0	33.94	698.842 8	23.55	1 255.276 0	42.31
高度敏感/重要	447.664 5	15.09	392.288 4	13.22	570.276 0	19.22	351.303 3	11.84	300.870 0	10.14	349.380 0	11.78
极敏感/重要	210.797 7	7.10	175.743 6	5.92	193.707 6	6.53	154.901 2	5.22	69.607 5	2.35	63.452 1	2.14

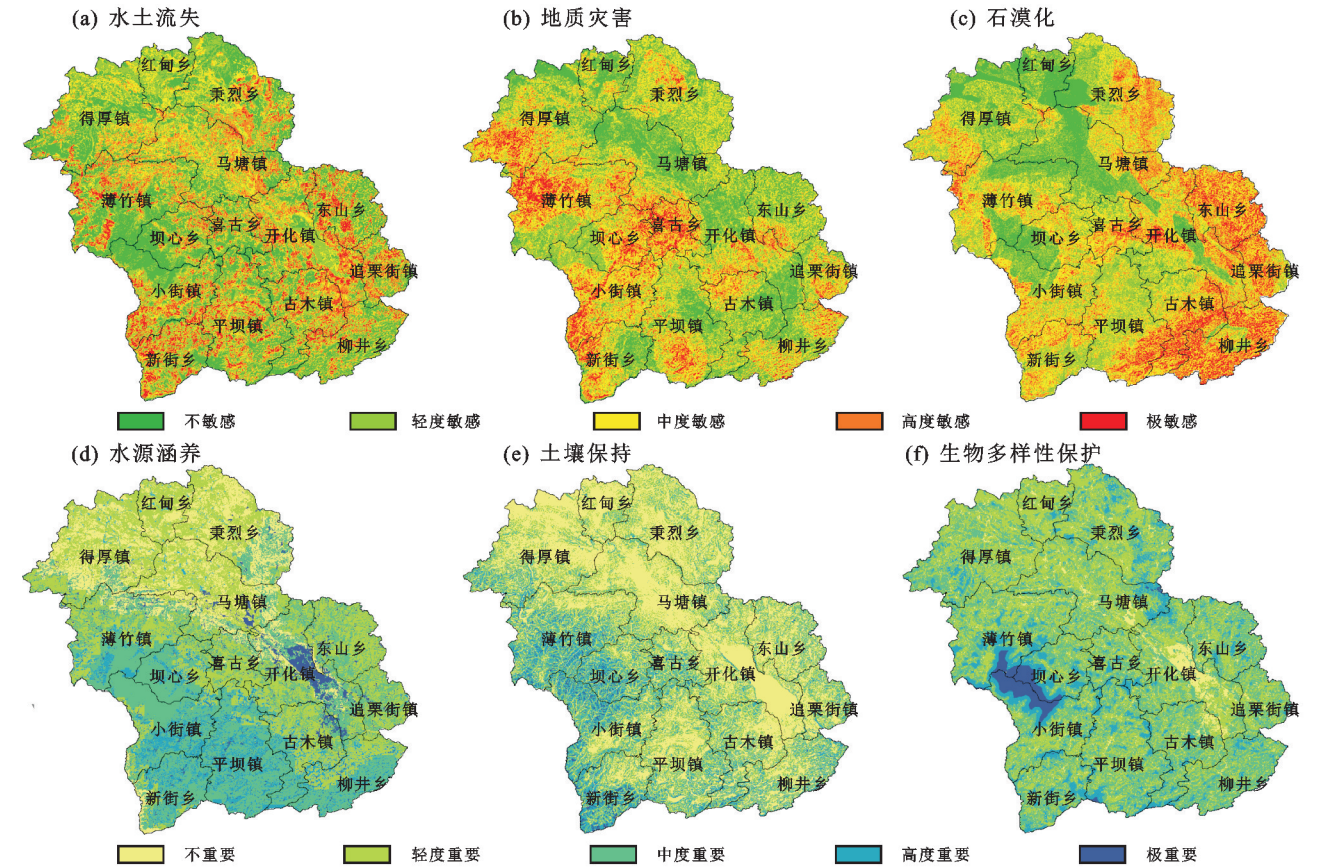


图 3 生态敏感性和系统服务重要性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecological sensitivity and importance of system services

2.3 景观生态安全评价结果

基于层次分析法计算出综合生态敏感性和综合生态系统服务重要性指数,并划分等级,综合生态敏感性除文山市北部和生态保护区较低外,其他地区敏感性都较高(图 4);综合生态系统服务重要性等级较高的分布在文山市西南地区,东部和北部较低。

(a) 综合生态敏感性 (b) 综合生态系统服务重要性

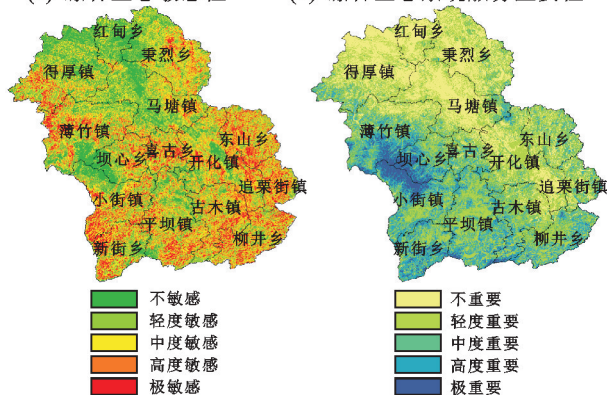


图 4 综合生态敏感性与综合系统服务重要性等级空间分布
Fig.4 Spatial distribution of comprehensive ecological sensitivity and importance level of comprehensive system services

文山市生态安全等级整体水平不高(图 5),1 级和 2 级面积分别为 211.564 5、689.086 8 km²,分别占总面积的 4.82%、16.74%,集中分布在薄竹山、老君山、西华山,位于薄竹镇、坝心乡和小街镇的交界处,该部分地区主要为乔木林地,也是国家级自然保护区“文山老君山自然保护区”的所在地,是综合生态系统类别森林生态系统类型和野生生物类别野生植物类型的自然保护区,区内森林茂密,水资源丰富,动植物种类繁多,人类活动较少,故生态安全水平较高。3 级面积最多,为 902.936 7 km²,占总面积的 30.43%,主要分布在得厚镇、红甸乡、秉烈乡、薄竹镇等文山市北部地区,该部分地区土地利用类型主要为耕地,坡度较低,水资源较好,水利设施较多,所以水源涵养功能较好,但由于长期的灌溉排水和碳酸盐岩、石灰土分布广,导致该地区土壤侵蚀和水土流失严重,故生态安全水平一般。4 级和 5 级面积分别为 760.261 5、403.150 5 km²,分别占总面积的 13.59%、25.62%,主要分布在秉烈乡、东山乡、追栗街镇、开化镇、柳井乡、古木镇等文山市东部地区。该部分地区土地利用类型中耕地、草地和未利用地占比较多,其中,草地和未利用地面积占比更是达到文山市草地和未利用地的 90% 以上,林地也主要是灌木林地,植被覆盖度较低。同时,该地区地表崎岖,地表碳酸盐岩出露面积大,岩性主要为白云岩和灰岩,土壤类型主要为石灰土和紫色土,溶蚀作用强烈,导致水土流失严重,石漠化问题突出。该部分地区水土流失敏感性和石漠化敏感性等级

较高,水源涵养和生物多样性功能相对较弱,自然环境和生态条件较差,故生态安全水平也相对较低。

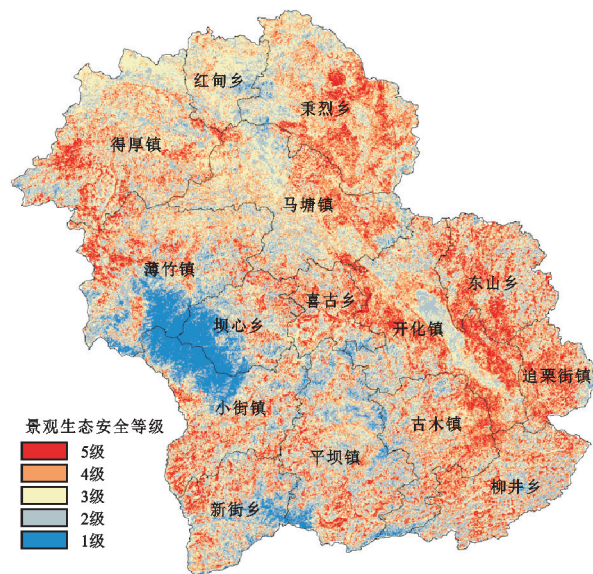


图 5 景观生态安全等级空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution characteristics of landscape ecological security level

从乡镇来看,小街镇和坝心乡 1 级面积占比最高,分别达到 21.37%、28.85%(图 6)。2 级面积占比最多的是新街乡和平坝镇,面积占比均超过 30%。3 级面积最多的是红甸乡,面积占比高达 52.46%。4 级面积占比超过 30% 的有古木镇、追栗街镇、开化镇、东山乡和秉烈乡 5 个乡镇。5 级面积最多的是追栗街镇,面积占比为 27.99%,值得注意的是,其 4 级面积占比相对较高,1 级面积占比也相对较少,是文山市景观生态安全等级最差的乡镇,生态问题较为严重。

2.4 景观生态安全功能分区与治理

2.4.1 景观生态安全功能分区结果 将研究区划分为石漠化生态功能修复区、城镇生态协调建设区、生物多样性功能保护区和水源涵养与土壤保持功能提升区等 4 类生态功能区(图 7)。石漠化生态功能修复区规模最大,包含 53 个行政村,占研究区面积的 41.82%,主要分布在文山市东部和南部,西北部和西南部也有分布。城镇生态协调建设区包含 28 个行政村,占研究区面积的 11.54%,主要分布在文山市中部地区。生物多样性功能保护区包含 14 个行政村,占研究区面积的 14.13%,主要分布在中部靠西地区。水源涵养与土壤保持功能提升区包含 44 个行政村,占研究区面积的 35.21%,主要分布在北部地区和中南部地区。

2.4.2 功能分区治理建议 1) 石漠化生态功能修复区。该区域集中分布在东部和南部地区,基岩裸露率高、纯碳酸盐岩分布广泛、植被覆盖度低、土壤分布不连续。因此,石漠化问题突出,生态变异敏感度高,生

态系统服务功能自然恢复困难。针对此区域具体问题,提出“石漠化修复+生态农林效益体系”治理措施,通过封山育林、退耕还林等相关措施提升植被覆盖度。同时,加强林业管理提升林木质量,种植生长迅速的喜钙树种和耐旱型中草药,以此促进生态系统

快速恢复,从而改善修复石漠化问题;调整农业产业结构,通过发展林药结合、种草养畜等生态农业模式,并结合石漠化治理生态工程发展花椒、金银花、核桃、红豆杉等特色经济林,研发具有文山特色的农产品,实现生态环境和经济效益的双重改善。

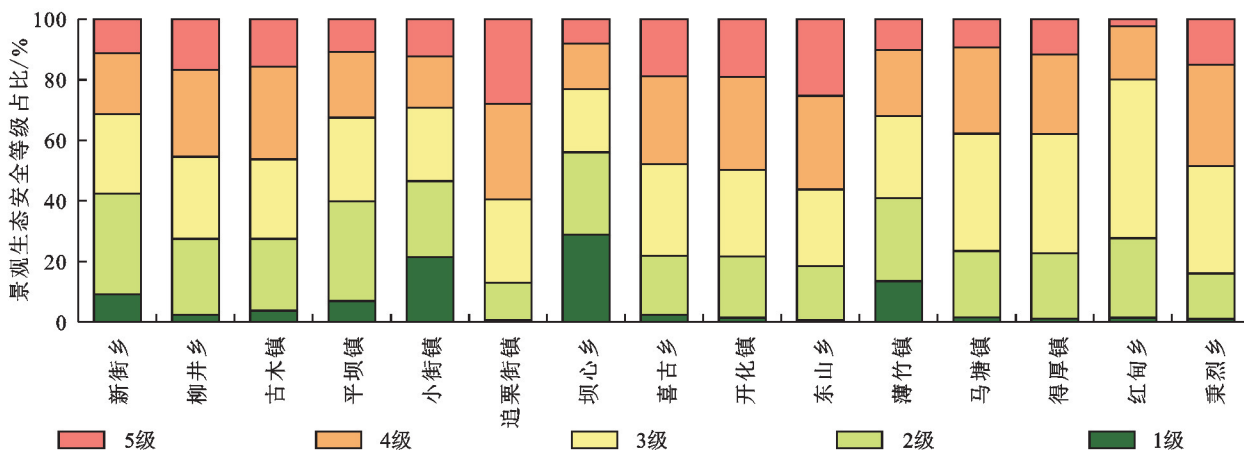


图 6 各乡镇景观生态安全等级占比

Fig.6 Proportion of landscape ecological security level in each township

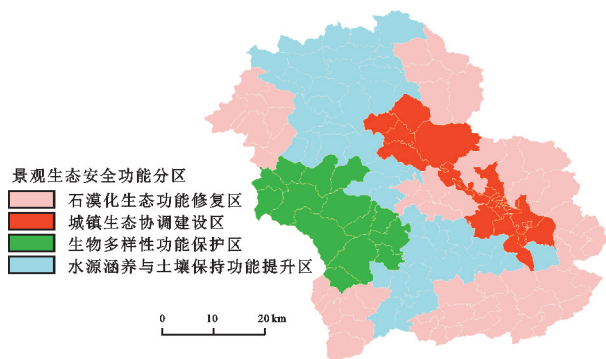


图 7 景观生态安全功能分区

Fig.7 Landscape ecological security function zoning

2)城镇生态协调建设区。该区域分布在中部地区,第二产业发达,城镇建设用地占比高,经济发展最迅速,但在经济高速发展的同时,并未兼顾生态环境,因此,造成大气、土壤、水资源污染严重等问题。针对此区域具体问题,提出“构建经济循环体系”措施,加快中心城区建设,推动绿色低碳发展,大力发展循环经济,加快以马塘园区为核心的工业园区循环改造,推动重点行业和重要领域绿色化改造,并推进主城区环文山生态屏障建设,坚持生态保护优先,严守生态保护红线。

3)生物多样性功能保护区。该区域主要分布在西部地区,与“文山老君山自然保护区”空间范围一致,区内野生动植物种类繁多,水资源丰富,易受到人为活动干扰。因此,需加大自然保护区的保护力度。针对此区域提出“核心区-缓冲区-试验区”3区分管措施,核心区严格禁止任何形式的干扰和破坏;缓冲区禁止生产经营,可适当进行科学研究与教学实习;试

验区可进行旅游、科研、教学等相关活动。并通过工作宣传,提高公众对生物多样性的认知度。

4)水源涵养与土壤保持功能提升区。该区域主要分布在北部和中部地区,地势平坦,灌溉基础设施较为完善,是关系粮食安全的重要区域,但由于长期不良耕作和排水灌溉,导致部分区域土壤侵蚀和水土流失问题严重。因此,针对此区域具体问题,提出“固土蓄水体系”治理措施,防止水土流失提升水源涵养,以保证区域内农业生产稳定高效。通过拦沙坝、山坡截流沟和谷坊等工程措施,植树造林等生物措施,等高耕作、套种间作、覆盖种植等农业措施提升固土能力;通过梯田、水平沟、小型水库等措施减少地表径流以提升蓄水能力。

3 讨论

3.1 敏感性与重要性结果验证

本文从岩溶山地景观特征出发,建立目标-综合-项目-指标层的景观生态安全评价指标体系。根据文山市地质灾害、土壤侵蚀、石漠化问题严重的生态系统特征,基于几何平均数模型和《生态保护红线划定指南》中的生态敏感性评价方法,参考已有研究^[23],并剖析各类生态问题的成因,对评价因子进行优化调整,将土壤侵蚀度、土地利用类型、土壤类型和碳酸盐岩类型等纳入评价指标中,针对岩溶山地特殊的地貌景观结构,进行生态敏感性评价,以提升景观生态安全评价的精确性与科学性。InVEST模型实现了生态系统服务功能定量评估的空间化,被广泛地应用于生态系统服务领域。水源涵养、土壤保持和生物多样性服务重要性空间分异情况与赵筱青

等^[24]的产水量、土壤保持服务、生境质量空间分布情况基本吻合。因此,本研究生态敏感性与生态系统服务重要性评价结果可信度较高,能够反映文山市的景观生态安全现状。

3.2 自然保护区叠加验证

敏感等级较低的地区生态条件较好,在受到外界干扰时,发生生态问题的可能性较小。生态系统服务重要性等级较高的地区,表示该地区生态服务功能较强,在生态系统遭到破坏时,能够依靠自身快速恢复。

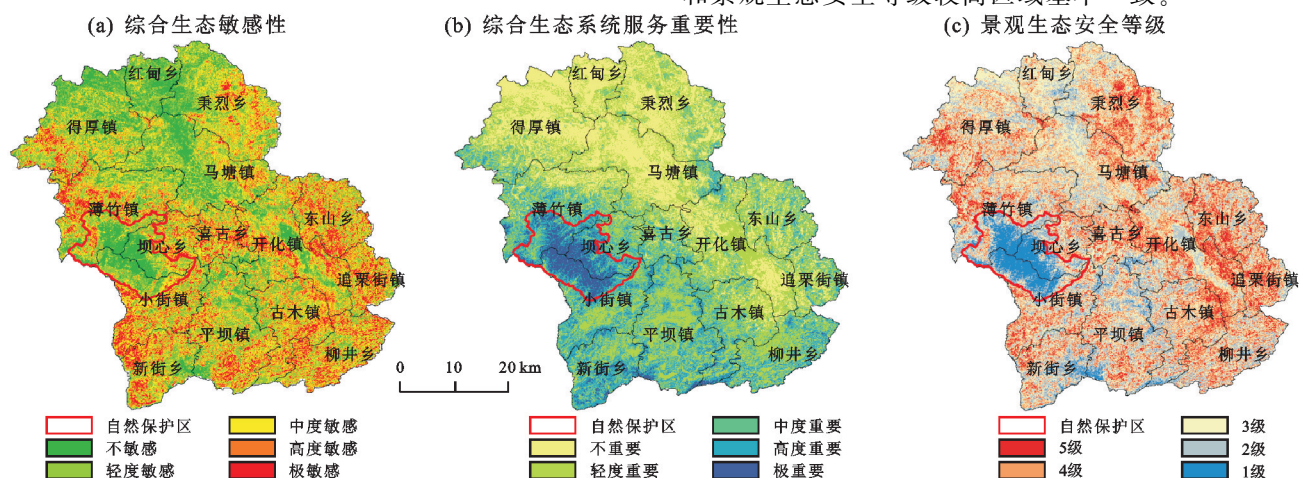


图 8 自然保护区叠加结果

Fig.8 Overlay results of nature reserves

3.3 研究不足与展望

结合生态敏感性与生态系统服务重要性评价研究区的景观生态安全等级,但仍存在不足之处,即在生态敏感性评价时指标层因子没有更全面地考虑到人类活动的影响,对社会经济方面的影响也考虑较少。因为生态系统过程是非线性和多样性的,受人类活动作用并反过来影响人类福祉,且未来的生态系统易受到现在气候的影响。因此,未来应重点考虑生态系统与人类福祉层面生态安全的联系,构建同时具有相对性和动态性的生态安全指标,并科学开展气候变化情景下的生态安全相关预测,从而采取适应性的保障措施,促进区域经济社会可持续发展,为国家生态安全和生态保护的研究与实践提供科学参考。

4 结论

1) 文山市水土流失、地质灾害和石漠化敏感性以轻度和中度敏感为主,占总面积的 48.83%~59.13%,主要分布在得厚镇、秉烈乡、薄竹镇、平坝镇等地区;极敏感最少,占比 5.92%~7.10%,主要分布在东山乡、追栗街镇。

2) 文山市水源涵养和生物多样性保护重要性以轻度和中度为主,占总面积的 67.42%~80.31%,集中分布在小街镇、坝心乡和开化镇;土壤保持重要性以不重要为主,占比为 55.30%,分布较为广泛;极重

而自然保护区生态系统较为完善,内生物种类繁多,生物物种的扩散和交流能够得到保障,故生态敏感性等级较低,生态系统服务重要性等级较高,景观生态安全等级也相应较高。因此,为进一步验证生态敏感性、系统服务重要性和景观生态安全的空间分布结果,将“文山老君山自然保护区”范围与研究结果进行叠加,根据叠加结果(图 8)可以看出,自然保护区范围与敏感性等级较低区域、服务重要性等级较高区域和景观生态安全等级较高区域基本一致。

要占比仅有 2.06%~5.22%,分布在“文山老君山自然保护区”。

3) 文山市景观生态安全水平整体不高,1 级、2 级占比仅分别为 4.82%和 16.74%,集中分布在“文山老君山自然保护区”;3 级面积最多,占比高达 30.43%,主要分布在得厚镇、红甸乡、秉烈乡等地区;4 级、5 级占比分别为 13.59%、25.62%,广泛分布在秉烈乡、东山乡、追栗街镇和开化镇等地。

4) 将文山市生态功能分区划分为石漠化生态功能修复区、城镇生态协调建设区、生物多样性功能保护区和水源涵养与水土保持功能提升区等 4 类生态功能区,并结合各区域生态问题提出 4 项差异化治理措施与建议。

参考文献:

- [1] XIE B, JONES P, DWIVEDI R, et al. Evaluation, comparison, and unique features of ecological security in southwest China: A case study of Yunnan Province [J]. Ecological Indicators, 2023, 153: e110453.
 - [2] 余梦, 李阳兵, 罗光杰. 中国西南岩溶山地石漠化演变趋势 [J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4267-4283.
- YU M, LI Y B, LUO G J. Evolution trend of rocky desertification in karst mountainous areas of southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4267-4283.

- [3] MA L B, BO J, LI X Y, et al. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: The middle and lower reaches of Shule River Basin as an example[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 674: 424-438.
- [4] ZHONG J L, LI Z G, ZHANG D, et al. An evaluation framework for urban ecological compensation priority in China based on meta-analysis and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: e111284.
- [5] 吴浩, 江志猛, 林安琪, 等. 基于隐性-韧性-显性的武汉城市资源环境承载力空间特征[J]. *地理学报*, 2021, 76(10): 2439-2457.
- WU H, JIANG Z M, LIN A Q, et al. Analyzing spatial characteristics of urban resource and environment carrying capacity based on Covert-Resilient-Overt: A case study of Wuhan city[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(10): 2439-2457.
- [6] ZHANG J J, HAO X M, LI X W, et al. Evaluation and regulation strategy for ecological security in the Tarim River Basin based on the ecological footprint[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, e435140488.
- [7] GHOSH S, DAS CHATTERJEE N, DINDA S. Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models: A case study on Kolkata Metropolitan Area, India[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 68: e102773.
- [8] 应凌霄, 孔令桥, 肖赓, 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. The research progress and prospect of ecological security and its assessing approaches[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5): 1679-1692.
- [9] 李振亚, 魏伟, 周亮, 等. 中国陆地生态敏感性时空演变特征[J]. *地理学报*, 2022, 77(1): 150-163.
- LI Z Y, WEI W, ZHOU L, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of terrestrial ecological sensitivity in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 150-163.
- [10] 魏柏浩, 阿里木江·卡斯木, 如克亚·热合曼, 等. 天山北坡城市群生态承载力演变与生态敏感性分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(4): 1399-1411.
- WEI B H, KASIMU ALIMUJIANG, REHEMAN · RUKEYA, et al. Ecological carrying capacity evolution and ecological sensitivity analysis of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1399-1411.
- [11] 刘景红, 郑晓, 樊俊美, 等. 基于 SWAT 模型的浑河中上游水源涵养服务价值评估[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3905-3912.
- LIU J H, ZHENG X, FAN J M, et al. Evaluation of the value of water retention service in the middle and upper reaches of Hunhe River based on SWAT Model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3905-3912.
- [12] ZHANG C Y, JIA Q, LIU Y J, et al. Evaluation and multi scenario simulation of ecosystem service value in Zhengzhou Metropolitan Area based on PLUS model[J]. *Measurement: Sensors*, 2024, 32: e101079.
- [13] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.
- FU B J. Several key points in territorial ecological restoration[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(1): 64-69.
- [14] BIAN H N, LI M R, DENG Y L, et al. Identification of ecological restoration areas based on the ecological safety security assessment of wetland-hydrological ecological corridors: A case study of the Han River Basin in China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 160: e111780.
- [15] ZHANG M N, AO Y, LIU M, et al. Ecological security assessment based on ecosystem service value and ecological footprint in the Pearl River Delta urban agglomeration, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: e109528.
- [16] 涂纯, 罗为群, 陈雅祺, 等. 基于生态系统敏感性与服务功能的桂林喀斯特景观资源分区治理研究[J/OL]. *中国地质*, 2024, 51(6): 1839-1854.
- TU C, LUO W Q, CHEN Y Q, et al. Zoning management of karst landscape resources in Guilin based on ecosystem sensitivity and service function[J]. *Geology in China*, 2024, 51(6): 1839-1854.
- [17] LUO Q Y, BAO Y, WANG Z T, et al. Vulnerability assessment of urban remnant mountain ecosystems based on ecological sensitivity and ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 151: e110314.
- [18] WANG R Y, ZHAO J S, CHEN G P, et al. Coupling PLUS-InVEST model for ecosystem service research in Yunnan Province, China[J]. *Sustainability*, 2022, 15(1): e271.
- [19] 杨君, 周鹏全, 袁淑君, 等. 基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 267-272.
- YANG J, ZHOU P Q, YUAN S J, et al. Land ecosystem service functions for Dongting Lake Ecological Economic Zone based on InVEST model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1): 267-272.
- [20] ZHAO L F, MA R, YANG Z J, et al. Ecosystem health risk assessment of lakes in the Inner Mongolian Plateau based on the coupled AHP-SOM-CGT model[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 156: e111168.

- 观格局及生境质量时空演变分析[J].水土保持学报, 2024, 38(2): 258-267.
- LIU J Y, XU D W, XU J. Analysis of landscape patterns and spatio-temporal evolution of habitat quality in the PU river basin based on the in VEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 258-267.
- [22] 许诺瑾, 丁兵兵, 余新晓, 等. 基于土地利用变化的黄河上游四川段生态系统服务价值评价[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 178-189.
- XU N J, DING B B, YU X X, et al. Ecosystem service functions in the upper reaches of the Yellow River in Sichuan based on land use change value evaluation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 178-189.
- [23] 刘玉卿, 张华兵, 孙小祥, 等. 1980—2018 年江苏里下河平原景观格局时空变化及其热点分析[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 105-114.
- LIU Y Q, ZHANG H B, SUN X X, et al. Spatial-temporal variations of landscape pattern and hot spot analysis in the Lixiahe Plain of Jiangsu Province from 1980 to 2018 [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(1): 105-114.
- [24] 葛莹, 朱国慧, 王华辰, 等. 基于 Ripley's K 函数浙江城市空间格局及其影响分析[J]. 地理科学, 2014, 34(11): 1353-1360.
- GE Y, ZHU G H, WANG H C, et al. Pattern and impact of urban spatial distribution in Zhejiang Province based on Ripley's K function [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(11): 1353-1360.
- [25] 罗君, 孙振元, 张学斌. 基于 Ripley's K 函数的绿洲景观格局演变分析: 以张掖市甘州区为例[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 224-231.
- LUO J, SUN Z Q, ZHANG X B. Analysis of the characteristics and changes of landscape pattern of oasis in Ganzhou district of Zhangye City based on Ripley's K function[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 224-231.
- [26] BESAG J. Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, 1974, 36(2): 192-225.
- [27] 李红波, 张小林, 吴江国, 等. 苏南地区乡村聚落空间格局及其驱动机制[J]. 地理科学, 2014, 34(4): 438-446.
- LI H B, ZHANG X L, WU J G, et al. Spatial pattern and its driving mechanism of rural settlements in southern Jiangsu[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(4): 438-446.
- [28] 任平, 洪步庭, 刘寅, 等. 基于 RS 与 GIS 的农村居民点空间变化特征与景观格局影响研究[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3331-3340.
- REN P, HONG B T, LIU Y, et al. A study of spatial evolution characteristics of rural settlements and influences of landscape patterns on their distribution using GIS and RS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3331-3340.
- [29] 王成, 费智慧, 叶琴丽, 等. 基于共生理论的村域尺度下农村居民点空间重构策略与实现[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 205-214.
- WANG C, FEI Z H, YE Q L, et al. Rural settlement space reconstruction strategy and implementation based on symbiosis theory on village scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 205-214.
- (上接第 347 页)
- [21] 祁兰兰, 王敏, 王卿, 等. 基于 SDR 模型的抚仙湖流域生态安全空间分异特征研究[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9527-9538.
- QI L L, WANG M, WANG Q, et al. Spatial differentiation characteristics of ecological security in Fuxian Lake Basin based on SDR model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9527-9538.
- [22] 张鑫, 张丹, 张广森, 等. 关中平原城市群生态系统服务时空特征及生态功能区划分[J]. 干旱区地理, 2024, 47(9): 1587-1595.
- ZHANG X, ZHANG D, ZHANG G S, et al. Spatiotemporal characteristics of ecosystem services and ecological function areas in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(9): 1587-1595.
- [23] SUN M Y, ZHANG L, YANG R J, et al. Construction of an integrated framework for assessing ecological security and its application in Southwest China[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: e110074.
- [24] 赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 736-756.
- ZHAO X Q, SHI X Q, LI Y H, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 736-756.