

引文格式：贾海锋, 马小波, 王万宾, 等. 典型喀斯特地区生态保护与修复空间识别——以石林彝族自治县为例[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(2): 145–154. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202305006](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202305006)

# 典型喀斯特地区生态保护与修复空间识别—— 以石林彝族自治县为例<sup>\*</sup>

贾海锋<sup>1</sup>, 马小波<sup>2</sup>, 王万宾<sup>1</sup>, 刘岳雄<sup>1</sup>, 罗怀秀<sup>3</sup>, 李森<sup>1\*\*</sup>

(1. 云南省生态环境科学研究院, 中国昆明高原湖泊国际研究中心, 云南昆明 650034;  
2. 云南地质工程勘察设计研究院有限公司, 云南昆明 650200;  
3. 云南省林业调查规划院, 云南昆明 650051)

**摘要:**【目的】通过生态系统服务功能重要性和敏感性评价,识别石林彝族自治县生态保护与修复空间,为研究区生态保护与修复工程落地实施提供科学依据。【方法】采用NPP定量指标法和GIS方法对研究区开展生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价,基于国土空间规划自然生态空间范围确定生态保护与修复空间。【结果】研究区生态系统服务功能重要性总体一般,极重要区和重要区占研究区总面积的1.91%;生态敏感性较高,极敏感区和敏感区占研究区总面积的95.05%。依据管控策略,可将自然生态空间管控分区划分为生态保护区、生态修复区、生态保护+生态修复区,分别占研究区自然生态空间管控分区的2.05%、94.98%和2.97%,分别占研究区面积的1.07%、49.57%和1.55%。【结论】通过识别研究区生态保护与生态修复空间,确定生态修复为石林彝族自治县生态系统保护和修复工程实施的重点任务,提出了生态修复工程实施的科学思路,能够为喀斯特地区生态保护与修复提供科学依据。

**关键词:**喀斯特地区;生态敏感性;自然生态空间;生态修复

中图分类号: X171.1 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2024) 02-0145-10

## Spatial Identification of Ecological Protection and Restoration in Typical Karst Area: a Case Study of Shilin Yizu Autonomous County

JIA Haifeng<sup>1</sup>, MA Xiaobo<sup>2</sup>, WANG Wanbin<sup>1</sup>, LIU Yuexiong<sup>1</sup>, LUO Huaixiu<sup>3</sup>, LI Sen<sup>1</sup>

(1. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming China International Research Center for  
Plateau-Lake, Kunming 650034, China; 2. Yunnan Geological Engineering Survey and Design Institute Co. Ltd.,  
Kunming 650200, China; 3. Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650051, China)

**Abstract:** [ Purpose] To identify the ecological protection and restoration space in Shilin Yizu Autonomous County, by evaluating the importance of ecosystem services and ecological sensitivity, providing scientific basis for the implementation of ecological protection and restoration projects in the research area. [ Methods] Using the NPP quantitative indicator method and GIS to evaluate the importance of ecosystem services and ecological sensitivity in the study area, and the ecological pro-

收稿日期: 2023-05-09 修回日期: 2024-04-25 网络首发日期: 2024-05-20

\*基金项目: 云南省科技计划项目重点研发计划(202203AC100001)。

作者简介: 贾海锋(1987—), 男, 甘肃宁县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态环境空间规划研究。

E-mail: [liarjia@sina.com](mailto:liarjia@sina.com)

\*\*通信作者 Corresponding author: 李森(1982—), 男, 陕西商洛人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事生态环境规划与政策研究。E-mail: [215261560@qq.com](mailto:215261560@qq.com)

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240520.1445.005>



tection and restoration space was recognized based on the natural ecological space scope of land spatial planning. [Results] The importance of ecosystem services in the study area was normal, with extremely important areas and important areas accounting for 1.91% of the total area of the study area. The ecological sensitivity was relatively high, with extremely sensitive areas and sensitive areas accounting for 95.05% of the total area of the study area. The natural ecological space control zones could be divided into three types of spaces based on control strategy: ecological protection area, ecological restoration area, and ecological protection+ecological restoration area, accounting for 2.05%, 94.98%, and 2.97% of the natural ecological space control zones in the study area, and 1.07%, 49.57%, and 1.55% of the study area, respectively. [Conclusion] By recognizing the ecological protection and restoration space in the study area, ecological restoration has been identified as a key task for the implementation of ecological system protection and restoration project in Shilin Yizu Autonomous County, a scientific approach for the implementation of ecological restoration project has been proposed, which can provide scientific basis for the ecological protection and restoration of karst areas.

**Keywords:** karst areas; ecological sensitivity; natural ecological space; ecological restoration

为推进山水林田湖草一体化保护和系统治理,国家层面出台了生态保护和修复领域综合型规划——《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》(简称“双重”规划),该规划立足国家生态安全战略格局,提出了“三区四带”为核心的全国重要生态系统保护和修复重大工程总体布局。生态系统保护和修复工程侧重项目落地性和实施成效<sup>[1]</sup>,应具备特定空间范围属性<sup>[2]</sup>,科学识别并确定生态保护与修复空间是“双重”规划落地实施的关键环节<sup>[2-3]</sup>。地方实施生态系统保护和修复工程在宏观尺度上支撑和服务国家生态安全格局重要骨架和关键节点,中观尺度上以流域为系统实施单元,微观尺度上以县域为具体实施单元。相关研究从流域<sup>[4-5]</sup>、省域<sup>[3]</sup>、区域<sup>[6-7]</sup>和县域<sup>[8]</sup>尺度开展了生态保护与修复分区、识别探索,研究方法多以生态功能重要性、敏感性评价<sup>[9-14]</sup>和最小阻力模型<sup>[6-8, 15-18]</sup>为主,为生态保护和修复提供了理论基础和科学借鉴;但仍存在一定不足,如生态功能重要性、敏感性评价方法和评价结果分级分类标准体系不统一,且与国土空间规划体系衔接不紧密,客观上限制了成果落地应用。桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区被纳入“双重”规划布局,未来将实施一批重大生态保护和修复工程,而有关典型喀斯特地区生态保护与修复空间识别的相关研究尚未见报道。

云南省昆明市石林彝族自治县(以下简称“石林县”)地处珠江上游,为中国西南喀斯特典型地

区,是桂黔滇喀斯特石漠化防治国家重点生态功能区,受温暖潮湿季风气候和特殊地质背景制约<sup>[19]</sup>,生态系统敏感脆弱,区内石漠化、水土流失、植被退化等生态环境问题突出,严重制约了区域可持续发展。按照《云南省国土空间规划(2021—2035年)》和《云南省重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》布局分区,石林县属滇东滇东南石漠化带,是生态保护和修复重大工程落地实施的重点区域。自然资源环境本底条件客观上决定了生态保护与修复空间布局,石林县自然资源禀赋相对不足势必导致生态保护与修复难度大、成本高,因此,保护与修复应重点关注区域内受损严重、开展修复需求最迫切、恢复效果最明显的重点区域<sup>[20]</sup>。本研究基于ArcGIS 10.5平台,根据《生态保护红线划定指南》(环办生态〔2017〕48号)技术要求,采用NPP定量指标法,对石林县全域开展生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价,结合碳酸盐岩分布、岩溶发育程度及土地利用类型,识别并确定生态保护与修复空间,以期为喀斯特地区生态保护与修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

石林县总面积1680.88 km<sup>2</sup>,地势自东向西倾斜,呈阶梯状逐级下降,区域内石灰岩广布,以石林、石芽、溶洞、洼地、落水洞、地下暗河、盲谷等喀斯特景观为主。全县土地资源匮乏

乏, 耕地以零星斑块状散布于峰丛洼地间, 山地陡坡垦殖现象普遍<sup>[19, 21]</sup>。石漠化和水土流失是制约石林县社会经济可持续发展的重要因素, 也是生态保护与修复需要克服的首要压力。

## 1.2 数据来源与处理

本研究生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价采用 NPP 定量指标评估法, 涉及数据主要包括多年平均植被净初级生产力 (net primary production, NPP<sub>m</sub>)、DEM、归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、土壤、气象、土地利用现状等。其中, 多年平均 NPP<sub>m</sub> (分辨率 30 m) 数据来源于昆明市自然资源局; DEM 数据为 GDEM V3 (分辨率 30 m), 来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>); NDVI 数据 (分辨率 30 m) 由 Landsat 8 OLI\_TIRS (来源于地理空间数据云) 计算得到; 土壤数据来源于石林县农业农村局; 多年平均气温、降水等气象数据来源于 WorldClimate (<http://www.worldclimate.com>) 和云南省 124 个气象站点逐日降雨数据 (2000—2021 年); 土地利用现状数据来源于石林县自然资源局。所有数据投影坐标统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48N。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 评价内容及评价方法

生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价方法直接影响生态保护与修复空间识别结果<sup>[22]</sup>。根据《云南省生态功能区划》, 确定研究区生态系统服务功能重要性评价内容主要包括水源涵养、水土保持和生物多样性维护, 生态敏感性评价内容主要包括水土流失和石漠化。《生态保护红线划定指南》是指导全国生态保护红线划定的技术文件, 其生态系统服务功能重要性、敏感性评价方法体系被《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》直接引用, 并作为指导地方编制国土空间规划和开展生态保护与修复的技术遵循。生态系统服务功能重要性评价一般采用模型评价法<sup>[23]</sup>, 但由于该方法所需模型参数多且对数据精度要求较高, 难适用于监测体系不完善且监测能力较弱的区域。鉴于生态环境监测实际和数据可获取性, 本研究以《生态保护红线划定指南》为技术参考, 采用 NPP 定量指标法对研究区全域开展生态系统服务功能重要性评价, 采用评估模型法开展生态敏感性评价。

### 1.3.2 生态系统服务功能重要性评价

#### (1) 水源涵养服务功能重要性评价

水源涵养是生态系统通过其特有的结构拦截和滞蓄降水, 并通过蒸散发实现水资源的调控, 其主要功能表现为补充地下水、缓和地表径流、减缓河流流量季节波动等<sup>[3]</sup>, 其评价模型为:

$$WR = NPP_m \times F_s \times F_p \times (1 - F_{slo})$$

式中:  $WR$  为生态系统水源涵养服务能力指数;  $NPP_m$  为多年平均净初级生产力;  $F_s$  为土壤渗流因子, 按照土壤质地类型由重黏土到砂土分别在 0~1 之间均等赋值得到, 如重黏土为 1/13, 黏土为 2/13, 粉砂质黏土为 3/13, ……, 砂土为 1;  $F_p$  为多年平均降水量因子, 本文以研究区边界裁剪 WordClimate 气象数据中的年降水量图层, 将其作为研究区多年平均降水量栅格;  $F_{slo}$  为坡度因子, 通过 DEM 坡度分析得到。

以上各因子均重采样为 30 m×30 m 的栅格, 采用最大最小值法归一化, 经栅格计算器利用 Int [(水源涵养服务能力栅格/水源涵养服务能力栅格数据最大值)×100] 计算得到生态系统服务值栅格图, 计算每个栅格像元的累加服务值, 以累加服务值占生态系统服务总值比例的 50% 和 80% 为分级分界点, 将水源涵养服务功能重要性分为极重要、重要和一般重要 3 个等级, 将极重要和重要区作为生态保护空间候选区域。

#### (2) 水土保持服务功能重要性评价

水土保持是生态系统通过其结构与过程减少降雨侵蚀、减少土壤流失、保持土壤的作用, 是生态系统重要服务功能之一<sup>[3, 23]</sup>, 其评价模型为:

$$S_{pro} = NPP_m \times (1 - K) \times (1 - F_{slo})$$

式中:  $S_{pro}$  为土壤保持服务能力指数;  $K$  为土壤可蚀性因子, 根据《生态保护红线划定指南》模型评价法土壤保持服务功能重要性评价  $K$  因子算法, 利用石林县土壤质地数据经普通克里金空间插值得到。

#### (3) 生物多样性维护功能重要性评价

生物多样性维护功能是生态系统在维持遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性方面发挥的作用<sup>[3, 4]</sup>, 其评价模型为:

$$S_{bio} = NPP_m \times F_p \times F_t \times (1 - F_a)$$

式中:  $S_{bio}$  为生物多样性维护服务能力指数;  $F_p$

为多年平均降水量因子,  $F_t$  为多年平均气温;  $F_a$  为海拔因子。

#### (4) 生态系统服务功能综合评价

开展生态系统服务功能重要性评价, 有利于分析生态系统服务功能空间分布规律, 明确生态服务功能重要区域, 为国土空间开发和生态保护提供科学依据<sup>[24]</sup>。由于无法确定各生态系统服务功能在总生态系统服务功能中的贡献, 因此不存在对各生态系统服务功能进行权重选择<sup>[23]</sup>, 为客观、中立、综合评价研究区生态系统服务功能, 采用生态系统服务功能综合指数 (comprehensive indexes of ecosystem services, CIES) 作为评价指标, 其计算公式为:

$$CIES = WR + S_{pro} + S_{bio}.$$

### 1.3.3 生态敏感性评价

#### (1) 水土流失敏感性评价

水土流失按土壤侵蚀发生动力条件可分为水力侵蚀和风力侵蚀, 水力侵蚀是造成西南喀斯特地区水土流失的主要原因<sup>[19]</sup>, 其评价模型为:

$$SE_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i}.$$

表 1 水土流失敏感性评价因子分级赋值

Tab. 1 Classification and assignment of soil erosion sensitivity

指标 indexes	降雨侵蚀力 rainfall erosivity	土壤可蚀性 soil erodibility	地形起伏度 relief amplitude	植被覆盖度 vegetation coverage	分级赋值 graded assignment
一般敏感 general sensitive	<100	石砾、沙、粗砂土、细砂土、黏土 sand, loamy sand, sandy loam, sandy clay, clay	<50	≥0.6	1
敏感 sensitive	100~600	面砂土、壤土、沙壤土、粉黏土、壤黏土 silt loam, loam, sandy clay loam, silt clay loam, clay loam	50~300	0.2~0.6	3
极敏感 extremely sensitive	>600	砂粉土、粉土 silt loam, silt	>300	≤0.2	5

已有研究表明: 建设用地、水体、居民地及道路在遥感影像解译提取研究区碳酸盐岩出露面积百分比时易产生误判<sup>[25]</sup>。石漠化是自然背景与人类活动共同作用下形成的一种特殊地质现象, 岩性是发生石漠化的基础因素, 而遥感影像解译只能提取出露地表的碳酸盐岩, 忽视了掩藏于植被和土层之下的主体基岩, 无法整体反映典型喀斯特地区岩性基底。为弥补以上不足, 本研究在依据《生态保护红线划定指南》推荐方法开展石漠化敏感性评价的同时, 基于《1:20万宜良幅区域水文地质普查报告》, 按照研究区碳酸盐岩的实际分布范围及其岩溶发育强弱程度(强、中、弱)开展石漠化敏感性评价分级, 分为极敏感、敏感、一般敏感3个等级。碳酸盐岩岩溶发

式中:  $SE_i$  为  $i$  空间单元水土流失敏感性指数;  $R_i$  为降雨侵蚀力因子, 根据《生态保护红线划定指南》水土流失敏感性评估模型, 利用云南省124个气象站点逐日降水数据(2000—2021年)分别计算各站点  $R$  值, 再经协同克里金空间插值(辅助变量为高程)得到;  $K_i$  为土壤可蚀性因子;  $LS_i$  为坡度坡长因子,  $C_i$  为植被覆盖度, 均由 Landsat 8 OLI\_TIRS 影像提取 NDVI 计算得到。水土流失敏感性评价因子分级标准见表 1。

#### (2) 石漠化敏感性评价

石漠化导致生态系统稳定性减弱、敏感性增强, 影响区域生态系统服务和产品供给, 开展石漠化敏感性评价可定量描述石漠化对人类活动的敏感程度, 《生态保护红线划定指南》推荐评价模型为:

$$S_i = \sqrt[3]{D_i \times P_i \times C_i}.$$

式中:  $S_i$  为  $i$  空间单元石漠化敏感性指数;  $D_i$  为碳酸岩出露面积百分比, 通过遥感影像解译计算求得;  $P_i$  为地形坡度, 利用 DEM 开展坡度计算得到。石漠化敏感性评价因子分级标准见表 2。

发育强弱程度与石漠化敏感性对应关系及其赋值规则见表 3。

表 2 石漠化敏感性评价因子分级赋值

Tab. 2 Classification and assignment of stony desertification sensitivity

指标 indexes	碳酸岩出露 面积百分比/% percentage of exposed area of carbonate rock	地形 坡度/(°) terrain slope	植被覆盖度 vegetation coverage	分级赋值 graded assignment
一般敏感 general sensitive	≤30	≤8	≥0.6	1
敏感 sensitive	30~70	8~25	0.2~0.6	3
极敏感 extremely sensitive	≥70	≥25	≤0.2	5

表3 碳酸盐岩岩溶发育程度与石漠化敏感性对应关系

Tab. 3 Corresponding relationship between the degree of carbonate rock development and the sensitivity of rocky desertification

岩溶发育等级 level of karst development	主要碳酸盐岩地层时代 main carbonate rock strata age		敏感性 sensitivity	分级赋值 graded assignment
	地质时代 geological era	地层 strata		
弱 weak	泥盆系 Devonian	一打得组 Yidade formation	一般敏感 general sensitive	1
	石炭系下统 the lower Carboniferous	万寿山组 Wanshoushan formation		
	寒武系下统 the lower Cambrian	沧浪铺组 Canglangpu formation 筇竹寺组 Qiongzhusi formation 龙王庙组 Longwangmiao formation		
	寒武系上统 the upper Cambrian	陡坡寺组 Douposi formation 双龙潭组 Shuanglongtan formation		
	志留系上统 the upper Silurian	玉龙寺组 Yulongsi formation		
	泥盆系中统 the middle Devonian	曲靖组 Qujing formation		
中 medium	震旦系 Sinian	灯影组 Dengying formation	敏感 sensitive	3
	石炭系下统 the lower Carboniferous	上司段组 Shangsiduan formation		
	石炭系中统 the middle Carboniferous	威宁群 Weining group		
	石炭系上统 the upper Carboniferous	马平组 Maping formation		
	二叠系下统 the lower Permian	阳新组 Yangxin formation		
强 strong			极敏感 extremely sensitive	5

### (3) 生态敏感性综合评价

生态敏感性是指区域出现生态环境问题的可能性和可能程度<sup>[11, 24, 26]</sup>, 开展生态敏感性评价是对研究区各类生态敏感区进行识别并将潜在生态问题聚焦落地到具体空间区域的过程<sup>[24, 27-28]</sup>, 是区域开展生态修复的基础, 其评价模型为:

$$SSI = SE_i + S'_i$$

式中: SSI 为生态敏感性综合指数;  $S'_i$  为石漠化敏感性指数, 由碳酸盐岩岩溶发育强弱等级划分赋值得到。

#### 1.3.4 自然生态空间管控分区

生态系统服务功能重要性和生态敏感性可直观表征区域生态系统质量和生态产品供给能力, 利用 ArcGIS 软件的 Union 工具将研究区生态系统服务功能重要性、生态敏感性图层联合, 可得出生态系统服务功能重要性和生态敏感性分区图。根据《自然生态空间用途管制办法(试行)》中自然生态空间的有关定义, 提取土地利用数据中对应森林、草地、河流、湖泊、滩涂和荒地的

地类作为研究区自然生态空间; 以自然生态空间为边界, 裁剪生态系统服务功能重要性、生态敏感性分区结果可得到自然生态空间管控分区。

#### 1.3.5 生态保护与修复空间识别

山水林田湖草生命共同体是特定条件下不同类型生态系统在空间范围内相互作用形成的空间组合<sup>[2]</sup>, 识别并确定生态保护与修复空间旨在保护和提升现有生态系统服务功能<sup>[3, 29-30]</sup>。区域生态系统服务功能重要性越高, 生态敏感性越高, 则其对国土空间开发的约束力越强<sup>[23]</sup>, 识别并确定生态保护空间和生态修复空间是区域生态系统服务功能“保优提质”的重要前提。生态系统服务功能极重要区和重要区是维系区域生态系统结构完整、生态服务功能持续稳定的关键区, 是优质生态服务供给区, 也是生态建设工程实施的重点区域; 生态极敏感区和敏感区是保障区域生态系统结构完整、生态服务功能不降低的热点区, 是生态服务提质区, 也是生态修复工程落地的核心区域<sup>[27, 31-34]</sup>。

通过对研究区进行生态系统服务功能重要性

和生态敏感性评价,将生态系统服务功能综合指数划分为极重要、重要和一般重要,将生态敏感性综合指数划分为极敏感、敏感和一般敏感,构建生态系统服务功能重要性和生态敏感性交叉判

断矩阵(表4),根据各栅格单元生态系统服务功能重要性和生态敏感性组合,将自然生态空间管控分区划分为三类空间,即生态保护区、生态修复区、生态保护+生态修复区。

表4 生态系统服务功能重要性和生态敏感性交叉判断矩阵

Tab. 4 Crossed judgment matrix of ecological service function importance and ecological sensitivity

敏感性 sensitivity	重要性 importance		
	一般重要区 general important area	重要区 important area	极重要区 extremely important area
一般敏感区 general sensitive area	无需管控 no need to control	生态保护 ecological protection	生态保护 ecological protection
敏感区 sensitive area	生态修复 ecological restoration	生态保护+生态修复 ecological protection and restoration	生态保护+生态修复 ecological protection and restoration
极敏感区 extremely sensitive area	生态修复 ecological restoration	生态保护+生态修复 ecological protection and restoration	生态保护+生态修复 ecological protection and restoration

注:表中内容为生态系统服务功能重要性和生态敏感性分区两两交叉区域的管控策略。

Note: The table contains are the control strategies of two intersecting areas of ecosystem service function importance and ecological sensitivity.

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统服务功能重要性

研究区水源涵养功能重要性评价结果(图1a)总体为一般重要,其中,极重要区和重要区零星分布于西街口镇北部和鹿阜街道北部降雨量和植被覆盖度较高的区域,面积共计1.39 km<sup>2</sup>,仅占研究区面积的0.08%。水土保持功能重要性评价结果(图1b)总体为一般重要,其空间分布格局与水源涵养功能重要性非常相似,极重要区和重要区集中连片分布于鹿阜街道,零星分布于板桥、大可、长湖等6个乡镇(街道),面积共计7.81 km<sup>2</sup>,占比仅为0.46%,这主要是因为研究区为典型喀斯特地区,长期岩溶作用形成了特有的地表、地下立体双层结构,该结构渗透强烈,造成地表非地带性干旱<sup>[35]</sup>,加之碳酸盐岩风化成土

较慢<sup>[19]</sup>,降雨侵蚀加剧土壤侵蚀,导致水源涵养和水土保持功能较弱。生物多样性维护功能重要性评价结果(图1c)显示:极重要区主要分布于圭山国家森林公园,重要区主要分布于西街口、圭山两镇交界植被覆盖度较高的杨梅山山区,极重要区和重要区面积共计24.35 km<sup>2</sup>,占研究区面积的1.45%。为系统表征研究区生态系统服务功能,将水源涵养、水土保持和生物多样性维护3种服务功能评价结果进行空间叠加计算并分级,结果(图1d)显示:研究区生态系统服务功能重要性总体一般,极重要区主要位于鹿阜街道北部区域和圭山国家森林公园一带,重要区分布范围与生物多样性维护功能重要区基本重叠,生态系统服务功能极重要区和重要区面积共计32.18 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的1.91%,这主要是因为研究区特殊的喀斯特生态系统异常敏感脆弱,严重制约了其

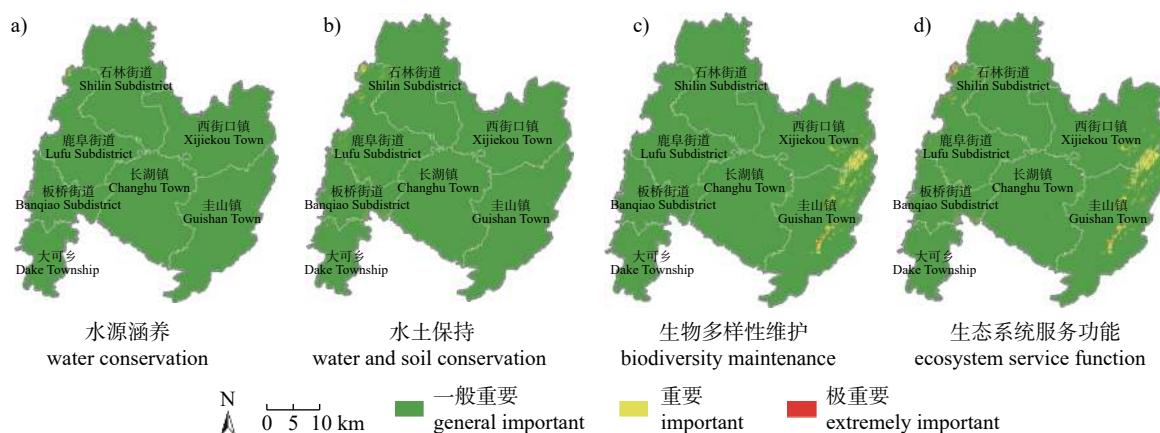


图1 生态系统服务功能重要性评价

Fig. 1 Evaluation of the importance of ecological services

生态系统调节服务功能。

## 2.2 生态敏感性

水土流失敏感性评价结果(图2a)显示:研究区水土流失敏感性呈现明显的东西差异,即中部和东部水土流失敏感性明显高于西部,极敏感区和敏感区面积共计 $1414.08\text{ km}^2$ ,占研究区总面积的84.13%。石漠化敏感性评价结果(图2b)显示:石漠化极敏感区主要位于西街口镇,这与实际情况不符,主要是因为建设用地、裸地、耕地、道路等在提取碳酸盐岩时会产生误判,进而导致区域碳酸盐岩出露百分比可能高于碳酸盐岩出露面

积较大的区域。因此,根据碳酸盐岩分布和岩溶发育强弱程度开展石漠化敏感性评价分级,结果(图2c)显示:极敏感区和敏感区广泛分布于研究区全境,面积共计 $1256.81\text{ km}^2$ ,占研究区总面积的74.77%。为系统表征研究区生态敏感性,将水土流失敏感性和石漠化敏感性进行空间叠加计算并进行分级,结果(图2d)显示:研究区生态敏感性较高,极敏感区连片分布于中北部和西南部、斑块状分布于西部区域,敏感区广泛分布于大部分区域;极敏感区和敏感区面积共计 $1597.62\text{ km}^2$ ,占研究区总面积的95.05%。

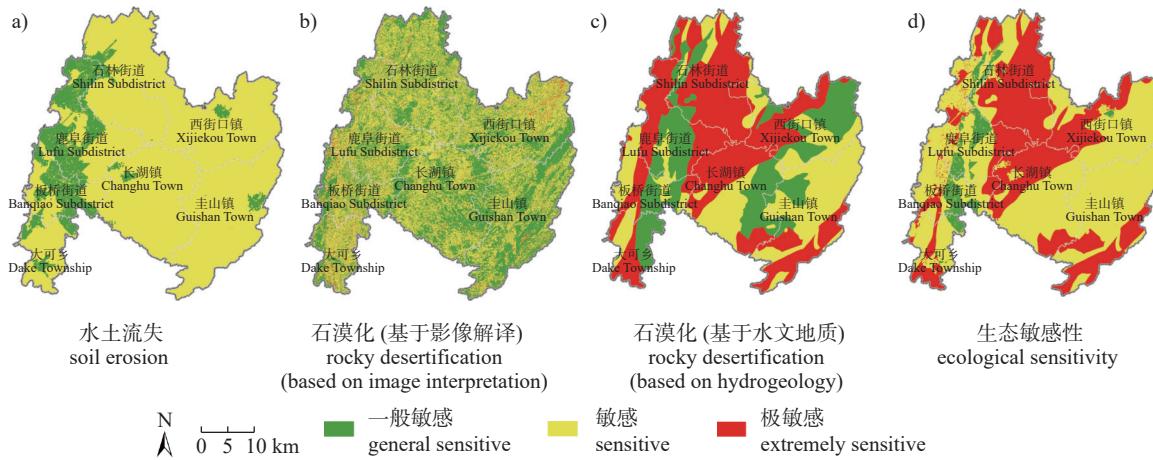


图2 生态敏感性评价

Fig. 2 Evaluation of ecological sensitivity

## 2.3 自然生态空间管控分区

生态系统服务功能重要性和生态敏感性分区见图3a,经土地利用数据提取的研究区自然生态空间见图3b。以自然生态空间为边界,裁剪生态系统服务功能重要性、生态敏感性分区结果得到自然生态空间管控分区(图3c)。

## 2.4 生态保护与修复空间

按照管控策略(表4),可进一步将自然生态空间(图3)划分为生态保护区、生态修复区、生态保护+生态修复区(图4)。生态保护区主要分布于石林街道中部、鹿阜街道北部、西街口镇中部及板桥街道东南部与大可乡接壤的山区,面积 $17.95\text{ km}^2$ ,占研究区自然生态空间管控分区的2.05%,占研究区总面积的1.07%。生态保护区水源涵养、水土保持、生物多样性维护等生态系统服务功能较其他区域更为显著,生态敏感性一般,是生态保护工程实施的重点区域。按照《自然生态空间用途管制办法(试行)》要求,该区应

严格控制各类开发利用活动对生态空间的占用和扰动,确保生态系统结构稳定,生态功能不降低。生态修复区广泛分布于研究区大部区域,面积 $833.26\text{ km}^2$ ,占研究区自然生态空间管控分区的94.98%,占研究区总面积的49.57%。该区水源涵养、水土保持、生物多样性维护等生态系统服务功能一般,但生态敏感性较高,石漠化和水土流失并存,是生态修复工程布局的重点区域。生态保护+生态修复区主要分布于鹿阜街道北部、圭山国家森林公园及圭山镇与西街口北部接壤的杨梅山山区,面积 $26.08\text{ km}^2$ ,占研究区自然生态空间管控分区的2.97%,占研究区总面积的1.55%。该区生态系统服务功能显著且敏感脆弱,需同时实施生态保护工程和生态修复工程。

## 3 讨论

### 3.1 治理理念

以往生态修复相关研究多以单要素或单功能

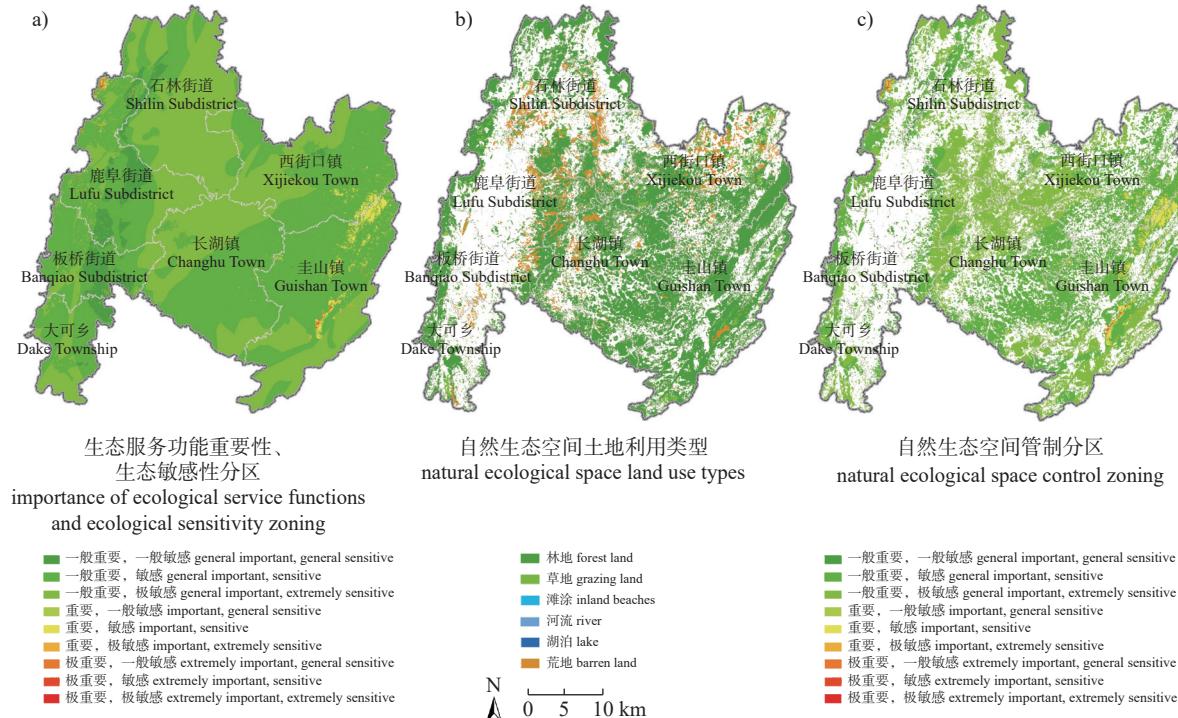


图3 自然生态空间管控分区

Fig. 3 Natural ecological space control zones

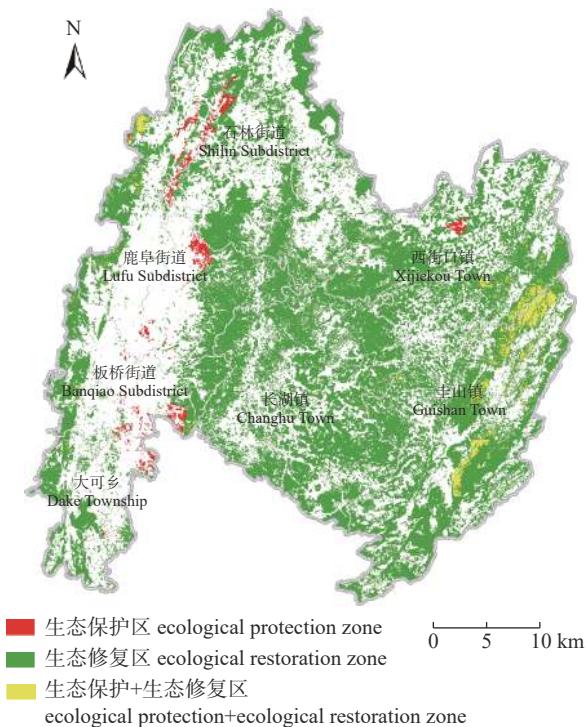


图4 生态保护与修复空间分区

Fig. 4 Ecological protection and restoration spatial zoning

修复为主<sup>[3]</sup>，缺乏从系统性和完整性角度识别生态保护与修复空间，注重单一工程典型示范但对生态系统认识不足，生态修复措施缺乏系统应对

性<sup>[1]</sup>。当前，生态保护与修复的主体是山水林田湖草生命共同体<sup>[2]</sup>，核心目标是通过人为干预维持生态系统结构稳定和提升服务功能。喀斯特生态系统是受特殊地质背景、水文条件及人为干扰多重因素制约的生态系统，其生态承载力低，对国土资源开发的干扰高度敏感，基于研究区全域生态系统服务功能重要性和生态敏感性评估识别生态保护与生态修复空间的方法，遵循山水林田湖草一体化保护和系统治理思路，综合考虑生态系统服务功能重要性和生态敏感性，将研究区生态保护与修复的重点聚焦于自然生态空间，较传统方法具有更强的系统性和针对性，为喀斯特地区生态环境保护和国土空间开发提供科学支撑。

### 3.2 评价方法

已有相关研究<sup>[15-18]</sup>在开展生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价时，选取的评价方法各不相同，评估分级标准不统一。《生态保护红线划定指南》有关生态系统服务功能重要性、敏感性评价标准体系作为国土空间规划编制和开展生态保护与修复的技术遵循，在评价方法和评价分级方面作了具体要求。本研究以此作为参照，开展生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价，发现圭山国家森林公园位于自然生态空间管控分

区的极重要、极敏感区, 充分说明基于生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价识别生态保护与修复空间方法的科学性和适用性。本研究还发现《生态保护红线划定指南》推荐的石漠化敏感性评价模型有其局限性, 采用碳酸盐岩出露百分比作为重要评价因子, 关注了出露地表的碳酸盐岩, 但对喀斯特地区岩性基底考虑不足, 该模型基于遥感影像解译提取出露碳酸盐岩的方法易受遥感影像分辨率限制和地物光谱反射率不同而导致分类结果误判<sup>[25]</sup>。喀斯特地区石漠化差异程度主要受区域地质构造影响, 本研究结合水文地质资料, 综合考虑碳酸盐岩实际分布范围和岩溶发育程度, 弥补了石漠化敏感性评价模型设计的不足。

### 3.3 规划衔接

与国土空间规划体系衔接, 是生态保护与修复空间识别研究成果落地实施的重要前提<sup>[1]</sup>。为确保生态保护与修复空间分区结果可用于地方生态保护和修复实际, 本研究构建了生态系统服务功能重要性和生态敏感性交叉判断矩阵, 将生态系统服务功能综合评价结果、生态敏感性综合评价结果与研究区自然生态空间进行空间叠加, 将生态保护与修复空间重点聚焦到自然生态空间, 对应市县国土空间规划分区的生态保护与保留区, 该区核心管控目标为保护与修复, 因此, 本研究确定的生态保护与修复空间同国土空间规划实施保护与修复的空间范围一致, 有利于指导生态保护与生态修复工程落地实施。

### 3.4 修复策略

研究区生态保护与修复三类空间中, 生态修复区分布范围最广、面积最大, 是生态保护和修复工程重点布局和实施的区域。岩性基底是影响岩溶地区生态环境的关键因素<sup>[36]</sup>, 由于生态修复区碳酸盐岩广泛发育, 岩性较脆弱, 易遭风化溶蚀, 地表发育出宽大的溶蚀沟槽及溶蚀裂隙、落水洞、洼地等, 地下发育出规模较大的溶洞、暗河管道系统, 地表土壤随雨水运移进入地下溶洞暗河, 加剧水土流失。因此, 该区应严格禁止布局与生态修复目标不符的建设项目, 特别是重污染涉水项目; 同时, 应严格管控农业种植, 逐步减少化肥农药使用, 避免造成地下水污染; 大力实施退耕还林还草, 提升森林质量, 提高区域生态服务价值。生态修复工程实施应开展生态系统服务权衡分析, 综合考虑用地类型、自然地理单

元连续性和完整性, 确定生态修复总体目标, 确保主导生态服务功能及其他功能协同发挥<sup>[22]</sup>, 结合区域主要生态环境问题细致划分修复单元, 进而确定生态修复单元目标和差异化修复措施, 探索关键要素控制、全要素耦合的系统治理成效考核指标, 制订基于山水林田湖草系统治理的修复方案, 确保生态投资回报率在合理区间, 提升生态修复成效。

### 3.5 存在不足

本研究为喀斯特地区生态保护与修复空间识别提供了科学参考, 然而, 研究成果能否应用于具体生态保护和修复决策, 还需进一步科学论证。生态修复的对象本质上是生态系统, 直观上则是作用于景观, 因此在对自然生态空间进行人工修复和自然修复的同时, 可借鉴景观生态学“斑块—廊道—基质”理论, 以生态保护与修复空间为斑块, 科学构建生态廊道, 发挥非自然生态空间作为基质的景观动态主导作用, 提升生态保护和修复成效。生态保护工程主要以生物多样性维护为主, 科学建立和完善生态廊道, 维持和提高生境斑块的景观连通性。生态修复工程以提升森林质量为基础, 坚持保护优先, 自然修复为主, 开展人工促进、天然更新等措施。

## 4 结论

本研究基于碳酸盐岩分布和岩溶发育强弱程度设计的石漠化敏感性评价方法, 弥补了《生态保护红线划定指南》石漠化敏感性评价模型在水文地质因素方面设计的不足; 采用生态系统服务功能综合评价和生态敏感性综合评价相结合的方法, 衔接国土空间规划自然生态空间, 识别了生态保护区、生态修复区、生态保护+生态修复区三类空间, 面积分别为 17.95、833.26 和 26.08 km<sup>2</sup>, 为研究区生态保护和修复工程布局和实施提供了落地空间参考; 明确了研究区生态保护和修复工程的重点方向, 针对研究区资源环境禀赋现状, 从治理理念和修复策略探讨了生态修复基本思路, 为确保和提升生态修复成效提供了思路。

## [参考文献]

- [1] 程功, 吴左宾. 县域国土综合整治与生态修复框架及实践 [J]. 规划师, 2020, 36(17): 35. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0022.2020.17.005.
- [2] 彭建, 吕丹娜, 张甜, 等. 山水林田湖草生态保护修复的

- 系统性认知[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8755. DOI: 10.5846/stxb201905311152.
- [3] 王文静, 逯非, 欧阳志云. 国土空间生态修复与保护空间识别: 以北京市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2074. DOI: 10.5846/stxb202103150692.
- [4] 田野, 冯启源, 唐明方, 等. 基于生态系统评价的山水林田湖草生态保护与修复体系构建研究: 以乌梁素海流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8826. DOI: 10.5846/stxb201911222531.
- [5] 王鹏, 赵微. 典型喀斯特地区国土空间生态修复分区研究: 以贵州猫跳河流域为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2403. DOI: 10.31497/zrzyxb.20220914.
- [6] 柳建玲, 李胜鹏, 范胜龙, 等. 基于生态安全格局的厦漳泉地区国土空间生态保护修复区与预警点识别[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8124. DOI: 10.5846/stxb202012013074.
- [7] 张海铃, 叶长盛, 胡梦姗. 基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复关键区域识别及修复策略[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 393. DOI: 10.13869/j.cnki.rswe.2023.02.012.
- [8] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区: 以徐州市贾汪区为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204. DOI: 10.31497/zrzyxb.20200117.
- [9] 魏婵娟, 蒙吉军. 中国土地资源生态敏感性评价与空间格局分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 157. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2021.091.
- [10] 彭春花, 周启刚, 孟浩斌, 等. 基于LECI的三峡库区重庆段景观生态敏感性分析及关键修复区识别[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 325. DOI: 10.13869/j.cnki.rswe.2021.03.035.
- [11] 张广创, 王杰, 刘东伟, 等. 基于GIS的锡尔河中游生态敏感性分析与评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 506. DOI: 10.13866/j.azr.2020.02.27.
- [12] 刘海龙, 王炳桥, 王跃飞, 等. 汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3952. DOI: 10.5846/stxb202101190204.
- [13] 白天, 王鑫宇, 吴雅文, 等. 基于GIS-FLUS的漯河市域生态敏感性时空演变特征研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(4): 710. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202201012.
- [14] 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. DOI: 10.11821/dlxb202201011.
- [15] 屠越, 刘敏, 高婵婵, 等. 大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7056. DOI: 10.5846/stxb202108272408.
- [16] 王浩, 马星, 杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1705. DOI: 10.5846/stxb202001080068.
- [17] 邬志龙, 杨济瑜, 谢花林. 南方丘陵山区生态安全格局构建与优化修复: 以瑞金市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3998. DOI: 10.5846/stxb202106061490.
- [18] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 等. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建: 以广西河池为例[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2596. DOI: 10.5846/stxb202005071133.
- [19] 王世杰. 喀斯特石漠化: 中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2802.2003.02.007.
- [20] 张笑千, 王波, 王夏晖. 基于“山水林田湖草”系统治理理念的牧区生态保护与修复: 以御道口牧场管理区为例[J]. 环境保护, 2018, 46(8): 56. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2018.08.014.
- [21] 陈俊松, 赵磊磊, 朱仕荣, 等. 云南石林县石漠化综合治理分区及治理方向[J]. 亚热带水土保持, 2018, 30(1): 20. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2651.2018.01.006.
- [22] 周妍, 陈妍, 应凌霄, 等. 山水林田湖草生态保护修复技术框架研究[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 14. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.10.23.
- [23] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 1065. DOI: 10.5846/stxb201811152474.
- [24] 李怡, 赵小敏, 郭熙, 等. 江西省南昌市生态敏感性空间分异研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 65. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2020.10.07.
- [25] 王丹, 丁文荣. 基于RS和GIS的云南石林县石漠化时空变化特征分析[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(2): 354. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9057.2021.02.015.
- [26] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 9. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2000.01.002.
- [27] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 中国生态环境敏感区评价[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1607. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.10.001.
- [28] 凡非得, 王克林, 宣勇, 等. 西南喀斯特区域生态环境敏感性评价及其空间分布[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(11): 1394.
- [29] 孙丽慧, 刘浩, 汪丁, 等. 基于生态系统服务与生态环境敏感性评价的生态安全格局构建研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(11): 2508. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.10.11.
- [30] GÓMEZ-BAGGETHUN E, TUDOR M, DOROFTEI M, et al. Changes in ecosystem services from wetland loss and restoration: an ecosystem assessment of the Danube Delta (1960-2010)[J]. Ecosystem Services, 2019, 39(1): 100965. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.100965.
- [31] 甘琳, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 近20年粤港澳大湾区生态敏感性变化[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2453. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201808.028.
- [32] 李益敏, 管成文, 郭丽琴, 等. 基于生态敏感性分析的江川区土地利用空间格局优化配置[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 267. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.20.034.
- [33] 杨柳, 索萌萌, 柴娇娇, 等. 2000—2020年喀斯特地区煤矿资源城市生态敏感性的时空演变[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 338. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.042.
- [34] 李志英, 李媛媛, 薛梦柯, 等. 昆明市景观格局变化及其生态环境效应研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(7): 152. DOI: 10.11929/j.swfu.202203063.
- [35] 王玉红, 高儒学, 戴全厚, 等. 喀斯特区石漠化坡耕地产流产沙模拟试验[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(4): 78. DOI: 10.16843/j.sswc.2021.04.009.
- [36] 白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等. 贵州碳酸盐岩岩性基底对土地石漠化时空演化的控制[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(4): 691. DOI: 10.3799/dqkx.2010.084.