

doi: 10.12029/gc20230906001

涂纯, 罗为群, 陈雅祺, 吴泽燕, 胡兆鑫, 刘绍华, 马琪, 覃礼堂. 2024. 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]. 中国地质, 51(6): 1839–1854.

Tu Chun, Luo Weiqun, Chen Yaqi, Wu Zeyan, Hu Zhaoxin, Liu Shaohua, Ma Qi, Qin Litang. 2024. Zoning management of karst landscape resources in Guilin based on ecosystem sensitivity and service function[J]. Geology in China, 51(6): 1839–1854(in Chinese with English abstract).

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

涂纯^{1,2}, 罗为群^{1,2}, 陈雅祺^{1,2}, 吴泽燕^{1,2}, 胡兆鑫^{1,2}, 刘绍华^{1,2}, 马琪³, 覃礼堂⁴

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 百色 531400; 3. 西安外国语大学旅游学院人文地理研究所, 陕西 西安 710128; 4. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:【研究目的】桂林是全球喀斯特地貌的典型代表,也是中国重要的生态脆弱区,近年来因人类活动导致的喀斯特景观资源退化严重,开展桂林喀斯特景观资源评价与治理研究,对于实现区域生态保护修复和社会经济高质量发展具有重要意义。【研究方法】以桂林国家可持续发展议程创新示范区为研究区,选取水土流失、石漠化、土地利用、岩性进行生态敏感性评价;选取水源涵养、土壤保持、生物多样性、地貌景观进行生态系统服务功能评价。【研究结果】研究区水土流失和石漠化敏感性以轻度 and 一般敏感性为主,占区域喀斯特总面积的 67.04%~76.24%,土地利用和岩性敏感性以高度和极敏感为主导,占比 52.12%~62.21%;水源涵养和土壤保持功能重要性表现为一般重要,占比 36.23%~51.87%,生物多样性维护和地貌景观表现为高度重要,占比 37.99%~44.26%。基于生态系统敏感性与服务功能综合计算的景观保护重要性显示为中等以上等级,其面积占区域喀斯特总面积的 83.57%。【结论】依据景观保护重要性评价结果,将研究区划分为农林景观功能提升区、湿地与水景观修复区、矿山景观修复区、地质景观修复区和石漠化景观修复区等,提出了景观恢复与水资源调控、喀斯特地质景观保护与生态循环产业协同发展等治理模式,研究为桂林市喀斯特景观资源可持续利用、生态环境保护 and 综合规划提供科学依据。

关键词: 喀斯特; 景观资源; 生态系统敏感性; 生态系统服务功能; 环境地质调查工程; 桂林; 广西

创新点: 将生态系统敏感性与服务功能结合,综合评价桂林喀斯特景观资源及其生态空间现状,提出了分区治理的措施和建议,为桂林及其他国家可持续发展议程创新示范区景观资源保护与修复提供借鉴。

中图分类号: P901; P931.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)06-1839-16

Zoning management of karst landscape resources in Guilin based on ecosystem sensitivity and service function

TU Chun^{1,2}, LUO Weiqun^{1,2}, CHEN Yaqi^{1,2}, WU Zeyan^{1,2}, HU Zhaoxin^{1,2}, LIU Shaohua^{1,2},
MA Qi³, QIN Litang⁴

收稿日期: 2023-09-06; 改回日期: 2024-09-11

基金项目: 广西科技重大专项项目(桂科 AA20161004-3)、广西自然科学基金(2022GXNSFAA026471)、国家重点研发计划项目(2019YFC0507504)及中国地质调查局项目(DD20230453)联合资助。

作者简介: 涂纯,男,1986年生,助理研究员,主要从事岩溶生态系统资源环境效应评估; E-mail: tuc.13b@igsrr.ac.cn。

通讯作者: 罗为群,男,1980年生,研究员,主要从事岩溶区生态修复及国土空间规划研究; E-mail: lweiqun@mail.cgs.gov.cn。

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. National Karst Ecosystem Observation and Research Station in Pingguo County, Baise 531400, Guangxi, China; 3. School of Tourism & Research Institute of Human Geography, Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, Shaanxi, China; 4. College of Environment Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] Guilin is a typical and representative karst landform and an important ecological fragile area in China. In recent years, the degradation of karst landscape resources caused by human activities has become severe. Research on the evaluation and management Guilin's karst landscape resources is of great significance for achieving regional ecological protection, restoration, and high-quality socio-economic development. **[Methods]** Taking the national innovation demonstration zone for sustainable development goals of Guilin as the research area, ecosystem sensitivity was evaluated based on factors such as soil erosion, rocky desertification, land use, and lithology, while ecosystem service functions were assessed using indicators like water conservation, soil conservation, biodiversity, and landform landscape. **[Results]** In the study area, the sensitivity of soil erosion and rocky desertification was mainly mild or general, accounting for 67.04%–76.24% of the total karst area. Land use and lithology were predominantly categorized as highly or extremely sensitive, accounting for 52.12%–62.21%. The functional importance of water conservation and soil conservation were generally moderate, representing 36.23%–51.87%, while the conservation of biodiversity and landform landscape were rated as highly important, accounting for 37.99%–44.26%. Based on the comprehensive calculation of ecosystem sensitivity and service function, the importance of landscape protection determined to be at least moderate across 83.57% of karst area. **[Conclusions]** Based on the evaluation results, the study areas are divided into zones for enhancing agricultural and forestry landscape function, restoring wetland and water landscapes, rehabilitating mine and geological landscapes, and addressing rocky desertification. The proposed management models include landscape restoration and water resource regulation, as well as karst geological landscape protection and ecological recycling industry collaborative development. This study provides a scientific basis for sustainable utilization of karst landscape resources, ecological environment protection, and comprehensive planning in Guilin City.

Key words: karst; landscape resources; ecosystem sensitivity; ecosystem service function; environmental geological survey engineering; Guilin; Guangxi

Highlights: By combining ecosystem sensitivity and service function, this study comprehensively evaluated the situation of karst landscape resource and its ecological space in Guilin, and put forward measures and suggestions for regional governance, which can provide reference for landscape resource protection and restoration in Guilin and national innovation demonstration zone for sustainable development goals.

About the first author: TU Chun, male, born in 1986, assistant researcher, engaged in evaluating the effects of karst ecosystem resource and environmental effects; E-mail: tuc.13b@igsnr.ac.cn.

About the corresponding author: LUO Weiqun, male, born in 1980, researcher, engaged in ecological restoration and land spatial planning in karst areas; E-mail: lweiqun@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the Science and Technology Major Project of Guangxi (No. Guike AA20161004-3), Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2022GXNSFAA026471), National Key Research and Development Program (No. 2019YFC0507504), the project of China Geological Survey (No. DD20230453).

1 引 言

景观资源是指能够满足人类精神需求,引起人们进行审美与游览活动,具有开发利用价值的自然资源总称(毛文永, 2001)。随着中国生态文明建设的不断深入,景观资源保护和利用成为目前关注的

重要问题。坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,实施重要生态系统保护和修复,是解决当今景观资源与环境可持续协同发展的主要举措(彭世良, 2021)。桂林是全球喀斯特地貌发育最为典型的地区之一,拥有得天独厚的漓江山水景观资源。然而,桂林喀斯特区也是重要的生态脆弱区,

其本身具有环境容量小、抗干扰能力弱,受干扰后恢复缓慢等特点(马骅和安裕伦, 2010; 凡非得等, 2011c)。近年来,桂林市因人类活动导致的石漠化、湿地退化、旱涝频发、地下河淤塞等生态环境问题逐步突显,面临着生态景观资源持续利用和环境承载力受限的突出矛盾(邵超峰, 2020)。2018年,国务院批复桂林以“景观资源可持续利用”为主题,建设国家可持续发展议程创新示范区,实施自然景观资源保育、生态旅游和生态农业等创新发展。如何准确识别桂林喀斯特地区景观资源的空间结构和突出生态问题,明确亟需生态保护与修复的区域,是目前桂林市喀斯特景观资源保护与修复的重要科学问题。

以景观生态学理论进行区域生态问题识别和生态空间分区治理研究,已成为景观资源保护和国土空间规划的重要手段(熊善高等, 2018; 黄心怡等, 2020)。其中生态敏感性评价和生态系统服务功能评价是目前识别区域生态空间结构和功能,划分空间管制区域,维护生态系统健康稳定发展的重要评价指标(熊善高等, 2018)。生态敏感性评价反映着区域内生态系统遇到干扰时,发生生态环境问题的难易程度和可能性的大小(赵文婷等, 2023);生态系统服务功能评价是对区域生态系统典型服务功能的能力和进行价值进行评估,是人类直接或间接从生态系统获得的利益(赵筱青等, 2022)。国内外关于生态敏感性和生态系统服务功能的评价已开展了大量的理论和实证研究(Huck et al., 2011; Norton et al., 2016; Epanchinnell et al., 2018; Zhang et al., 2023),主要采用因子叠加法进行生态因子的综合和敏感区域的辨识(马骅和安裕伦, 2010; 尤南山和蒙吉军, 2017; 王鹏和赵微, 2022);如凡非得等(2011b)选取了降雨侵蚀力、地形起伏度、土壤类型、植被类型等指标进行了水土流失敏感性分析;张浪等(2021)使用土地利用类型、植被盖度、喀斯特地貌分布等因子进行乌江流域的生态环境敏感性评价;李益敏等(2018)基于土壤侵蚀、生物多样性、水环境的多要素综合敏感性分析,构建了江川区土地利用空间格局的优化配置。目前,生态系统功能评价主要集中对区域生态系统服务类型和价值评价(张明阳等, 2009; 尤南山和蒙吉军, 2017; 孙张涛等, 2023);如赵筱青等(2022)运用食物供给、

产水量、土壤植被等指标分析了滇东南喀斯特区生态系统服务的时空格局及分异特征;李月臣等(2013)运用水源涵养、土壤保持、生物多样性保护和营养物质保持等生态系统服务功能为评价内容,建立了区域生态系统服务功能重要性评价模型与方法。上述研究为区域自然生态空间的科学管理提供了有利的理论基础和技术支持,但大多基于生态敏感性或生态系统服务功能单方面表征生态重要性(李晶等, 2020; 王思源等, 2022),从两个或多个方面综合评价景观资源的重要性研究还较少涉及(马骅和安裕伦, 2010; 赵筱青等, 2022; 孙一帆和汪霞, 2023),尤其是在喀斯特地区,围绕景观资源保护与治理的评价方法还处于探索阶段。随着桂林市社会经济发展和景观资源保护的共同需求,如何精细化、有效评估桂林市喀斯特景观资源,已成为桂林市社会经济高质量发展的关键。因此,依据生态系统敏感性和服务功能综合评价结果来进行景观资源的分区分管,有利于促进喀斯特生态系统保护修复政策的制定,对提升桂林市喀斯特景观资源功能和可持续利用途径具有重要意义。

基于上述目的,本研究选取桂林市国家可持续发展议程创新示范区为研究对象,结合区域生态环境状况及主要生态问题,开展示范区生态敏感性和生态系统服务功能评价,揭示桂林市景观资源及生态空间分布特征,在此基础上开展景观保护重要性评价,提出具有针对性的分区保护建议,为桂林市喀斯特景观资源可持续利用、生态环境保护 and 综合规划提供科学依据。

2 研究区概况

本研究选择广西桂林市国家可持续发展创新议程示范区开展研究,涉及桂林市管辖的灵川县、兴安县、阳朔县、平乐县、恭城县以及临桂区、象山区、秀峰区、叠彩区、七星区、雁山区(图 1)。研究区地势西北和东部高、中南部低,行政面积 12159 km²,其中喀斯特面积 4385 km²,总人口 349 万人,占全市总人口 65%。区域为中亚热带季风气候区,多年平均气温为 18~19℃,年平均降水量 1872 mm,年平均蒸发量 1490~1902 mm(周建超等, 2015)。桂林市是 2018 年首批建设的国家可持续发展创新议程示范区之一,境内发育全球最为典型的喀斯特地

貌, 喀斯特景观资源类型丰富多样, 以峰丛、孤峰、孤立的石峰和洞穴为代表, 喀斯特地貌景观形态奇特, 是桂林实施景观资源保护和生态修复最为重要的地区。近年来由于人类活动的影响, 区域内喀斯特景观资源逐步退化, 其中石漠化面积 622 km², 水土流失面积 151 km²。

3 数据来源及研究方法

3.1 数据来源

本研究选用的喀斯特区岩性数据、地貌数据来源于中国地质科学院岩溶地质研究所, DEM 高程数

据来源于地理空间数据云 GDEM V2 30 M 分辨率数字高程数据, 土壤数据、河流湖泊等水系数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心, 土地利用数据来源于桂林市第三次国土调查, 气温降水数据来源于广西桂林市气象局。遥感影像来源于 Google Earth Engine 云平台, 获取的 Landsat8 OLI 遥感影像数据时间为 2021 年 1 月。

3.2 研究方法

依据自然资源部发布的《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》和生态环境部发布的《生态保护红线划定指南》, 同时参考相关

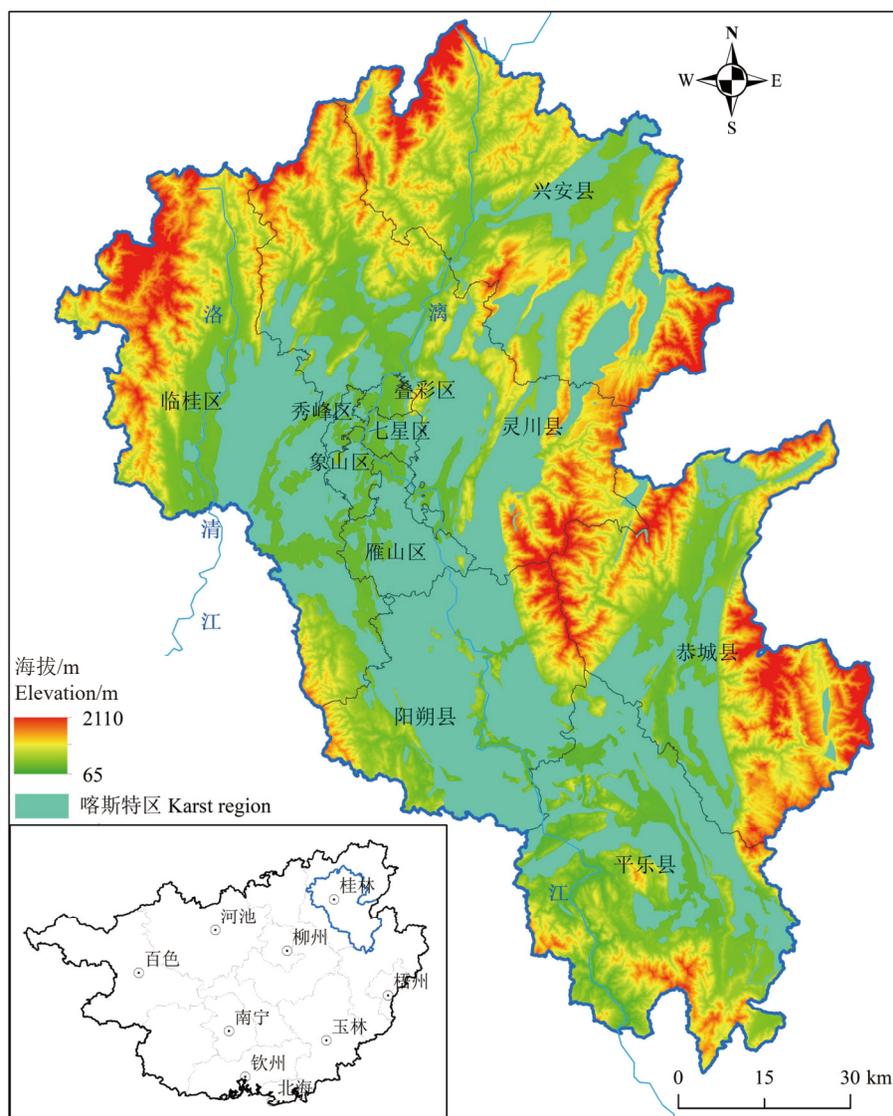


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

文献, 选取水土流失、石漠化、土地利用、岩性作为生态系统敏感性评价指标(李荣彪等, 2009; 凡非得等, 2011a, b; 王鹏等, 2022); 选取水源涵养、土壤保持、生物多样性维护、地貌类型作为生态系统服务功能评价指标(崔宁等, 2021; 肖玖军等, 2022)。

3.2.1 生态敏感性评价

生态敏感性评价揭示的是生态系统在受到自然和人类活动干扰时, 引发生态环境问题的可能性大小, 由此可确定区域内生态环境的敏感程度和空间分布特征。本研究从水土流失敏感性、石漠化敏感性、土地利用敏感性和岩性敏感性 4 个方面进行评价。

(1) 水土流失敏感性: 在喀斯特地区, 由于其生态系统受特殊地质背景制约, 水土流失敏感性评价需考虑碳酸盐岩类型对喀斯特生态系统的影响。参考《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)》及相关研究(凡非得等, 2011b), 本研究水土流失敏感性计算见式(1)。

$$ST = \sqrt[4]{R \times K \times LS \times C \times Y} \quad (1)$$

式中 ST 为水土流失敏感性, R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可侵蚀性因子, LS 为地形起伏度因子, C 为指标覆盖度因子, Y 为岩性因子。使用 ArcGIS 中的叠加分析, 将水土流失敏感性分为一般敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感 5 个等级。

(2) 石漠化敏感性: 石漠化是漓江流域主要的生态环境问题之一, 根据自然资源部颁布的国土空间评价相关技术要求和喀斯特区研究结果(凡非得等, 2011c), 选取碳酸盐岩出露面积、地形坡度、植被覆盖度开展石漠化敏感性计算, 具体见式(2)。

$$RD = \sqrt{D \times P \times C} \quad (2)$$

式中 RD 为石漠化敏感性, D 、 P 、 C 分别为碳酸盐岩裸露面积、地形坡度和植被覆盖度的敏感性分级。上述因子叠加分析后同样将石漠化敏感性分为一般敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感 5 个等级。

(3) 土地利用敏感性: 土地利用是土地覆被变化最重要的影响因素, 人类活动对土地的利用方式直接影响着区域内的生态环境敏感度的大小。参考前人研究结果(曹建军和刘永娟, 2010; 武鹏达等,

2016), 将水域划分极敏感、林地和灌丛为高度敏感、耕地和园地为中度敏感、草地为轻度敏感、建设用地和未利用土地为一般敏感。

(4) 岩性敏感性: 喀斯特地区由于溶蚀作用强烈, 尤其在纯灰岩地区, 喀斯特地貌形态极为发育, 且成土速率缓慢, 土层浅薄、贫瘠且分布不连续, 生态环境较为脆弱。结合前人研究结果(李荣彪等, 2009; 凡非得等, 2011b), 将灰岩、灰岩与白云岩互层划分为极敏感, 灰岩夹白云岩划为高度敏感, 白云岩、碳酸盐岩夹碎屑岩划分为中度敏感, 碳酸盐岩与碎屑岩互层划分为轻度敏感, 碎屑岩夹碳酸盐岩划分为一般敏感。

3.2.2 生态系统服务功能评价

根据研究区主要生态环境状况, 选择水源涵养、土壤保持、生物多样性维护、地貌景观对区域进行整体评价, 评价结果按照一般重要、较重要、中等重要、高度重要、极重要进行分级。计算过程如下:

(1) 水源涵养功能: 喀斯特生态系统通过其特有的生态地质结构与水相互作用, 对降水进行截留、渗透、蓄积, 并通过蒸散发实现对水流、水循环的调控, 主要表现在缓和地表径流、补充地下水、减缓河流流量的季节波动、保证水质等方面。本研究水源涵养功能主要考虑降雨量、地表径流量、蒸散发量, 不同类型生态系统面积等因子, 具体见式(3)。

$$SY = \sum_i^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (3)$$

式中 SY 为水源涵养量(m^3), P_i 为降雨量(mm), R_i 为地表径流量(mm), ET_i 为蒸散发量(mm), A_i 为 i 类生态系统面积(km^2), i 为研究区生态系统类型, j 为研究区生态系统类型数。

(2) 土壤保持功能: 土壤保持是生态系统通过其结构与过程保护土壤, 降低雨水的侵蚀能力, 减少土壤流失的功能。土壤保持功能主要与气候、土壤、地形和植被有关, 通过该项指标评价, 可识别现状和未来承担水土保持功能的重点区域。本研究采用修正的水土流失方程(RUSLE)进行计算, 具体见式(4)。

$$A = R \times K \times L \times S \times (1 - C) \quad (4)$$

式中 A 为水土保持量($t/hm^2 \cdot a$); R 为降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm/hm^2 \cdot h \cdot a$), K 为土壤可侵蚀因子

($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / \text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$), L 、 S 为地形因子, 其中, L 表示坡长因子, S 表示坡度因子; C 为植被因子, 其中植被因子反映生态系统对土壤侵蚀的影响, 为土壤侵蚀的控制因素。

(3) 生物多样性维护功能: 生物多样性与喀斯特区的生态质量密切相关, 生物多样性维护功能是评价喀斯特生态系统与物种保护重要性的关键指标。其计算具体见式(5):

$$S_{\text{bio}} = \text{NPP}_{\text{mean}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times (1 - F_{\text{alt}}) \quad (5)$$

式中 S_{bio} 为生物多样性维护服务能力指数; NPP_{mean} 为年均植被净初级生产力; F_{pre} 为年均降水量; F_{tem} 为年均气温; F_{alt} 为海拔因子。

(4) 地貌景观功能: 地貌类型是生态地理系统中的主要要素, 与生态系统中其他要素如水文、气候等有密不可分的关系, 地貌在不同尺度上影响着气候、生物分布情况, 同时在喀斯特地区, 孤峰、洼地、谷地等地貌景观具有独特的美学价值。结合喀斯特地貌类型和前人研究成果(朱德浩等, 2000; 陈伟海等, 2006; 仲艳, 2015), 地貌景观功能按照生态功能和美学价值, 将区域内丘陵、平原地貌划分为低等重要, 低山地貌划为一般重要, 半喀斯特丘陵地貌划为中等重要, 喀斯特峰丛洼地、谷地划分为高度重要, 中高山、喀斯特峰林地貌为极重要。

3.2.3 景观保护重要性评价及景观资源治理分区

基于各单项指标的评价结果, 采用等级层次分析法对生态系统敏感性和生态系统服务功能中所有单项评价指标进行权重赋值(高俊刚等, 2016; 表1), 然后采用加权算数平均法分别对生态系统敏感性和生态系统服务功能分值进行计算, 最后运用最大极限条件法, 计算得出景观保护重要性分值, 并通过自然断点法将研究区景观保护重要性划分为一般重要、较重要、中等重要、高度重要和极重要5个等级。

为明确各乡镇主导的景观生态功能, 制定差异化的景观资源分区修复措施, 通过统计水土流失、石漠化、土地利用、岩性、水源涵养、土壤保持、生物多样性维护、地貌景观功能等8个单项指标不同等级的面积在各乡镇的占比, 利用SPSS软件的K-means进行聚类分析, 按照相似性、共同性和完整性原则, 结合区域生态问题, 进行喀斯特景观资

表1 桂林可持续发展议程创新示范区景观重要性评价指标权重

Table 1 Weight of indicators used for evaluating the landscape importance in Guilin Sustainable Development Agenda Innovation Demonstration Zone		
因素层	指标层	权重
生态系统敏感性	水土流失	0.13
	石漠化	0.35
	土地利用	0.20
	岩性	0.33
生态系统服务功能重要性	水源涵养	0.15
	土壤保持	0.11
	生物多样性维护	0.28
	地貌景观功能	0.47

源修复区划分。

4 结果分析

4.1 生态系统敏感性评价结果

4.1.1 水土流失敏感性评价结果

桂林可持续发展议程创新示范区水土流失敏感性主要以轻度敏感为主, 面积为 2939.87 km², 占该区喀斯特面积的 67.04%, 主要分布在临桂区、灵川县、兴安县中部地区(图2a); 这些地区地势相对平坦, 植被覆盖度高, 固土保持效果较好。中度、高度和极敏感性水土流失区面积分别为 772.36 km²、444.20 km² 和 65.35 km², 分别占该区喀斯特面积的 17.61%、10.13% 和 1.49%, 主要分布在阳朔县、平乐县和灵川县南部等地区; 这些地区土层浅薄、分布不连续、异质性高, 地形起伏大, 加上碳酸盐岩中酸不溶物含量较低, 使得土壤允许流失量低, 但在降水充沛的情况下仍然对喀斯特地区带来极大危害。

4.1.2 石漠化敏感性评价结果

石漠化发生区一般地表崎岖破碎, 碳酸盐岩成土速率慢, 并叠加人类不合理的土地利用活动。研究显示区域石漠化敏感性以一般敏感为主, 其面积为 3343.20 km², 占该区喀斯特面积的 76.24%, 主要分布在临桂区、兴安县、灵川县中部等不纯碳酸盐岩区(图2b), 这些地区主要是地势相对平坦的工农业活动区, 土地利用以水田和建设用地为主, 喀斯特地貌较少, 其石漠化敏感性较弱。石漠化轻度和中度敏感性区面积分别为 559.83 km² 和 441.98 km², 分别占喀斯特面积的 12.77% 和 10.08%, 主要分布在灵川县南部、阳朔县中部和平乐县北部地区, 这些地区地形起伏大, 土壤分布不连续, 植被主要以

灌丛和草本为主, 地表碳酸盐岩出露面积大; 实地调查显示, 该区山体植被遭砍伐种植砂糖橘、金桔等经济作物, 导致基岩裸露, 区域景观破碎化加重。高度和极敏感区主要在恭城县中部零散布局, 调查发现该区岩性主要为纯灰岩, 溶蚀作用强烈, 同时桃树等经济作物因产量下降遭大量砍伐, 石漠化现象相对严重。

4.1.3 土地利用敏感性评价结果

研究区土地利用敏感性主要以高度敏感性为主, 其面积为 2285.65 km², 占该区喀斯特面积的 52.12%, 分布在灵川县、临桂区、阳朔县等地区(图 2c); 该区主要以灌木地为主, 岩性主要为灰岩、白云岩等溶蚀作用强烈的碳酸盐岩, 土壤条件相对较差, 易受人类活动干扰, 生态系统脆弱。土地利用中度敏感性区面积为 1547.49 km², 占区域喀斯特面积 35.29%, 主要分布在阳朔县和恭城县的中部地区, 其土地利用类型为园地和耕地, 这些地区主要为喀斯特石山区, 受人类活动干扰强烈, 喀斯特景观破碎化严重。极敏感区主要分布在灵川县和兴安县西北部的水库区域以及临桂区南部的湿地区域。

4.1.4 岩性敏感性评价结果

研究区岩性敏感性主要以极敏感为主, 其面积为 2728.10 km², 占该区喀斯特面积的 62.21%, 分布在阳朔县、恭城县和平乐县一带的灰岩地区(图 2d); 灰岩具有的极敏感特征主要是因为连续性灰岩在受力时节理裂隙分布极不均匀、易形成岩石裂隙, 且成土速率低于流失速率, 在所有碳酸盐岩中最易发生石漠化(李瑞玲等, 2003; 凡非得等, 2011c)。岩性中度敏感性区面积为 1076.09 km², 占比为 24.54%, 主要分布在临桂区、灵川县和兴安县中部, 其岩性以碳酸盐岩及碎屑岩为主; 而岩性高度敏感性区面积占比为 5.85%, 分布在临桂区中南部等地区, 其岩性主要为灰岩夹白云岩; 相比纯灰岩具有的极敏感特征, 不纯的碳酸盐岩中存在大量的酸不溶物, 成土速率比连续性碳酸盐岩地区快, 溶蚀作用也相对纯灰岩区发育较弱, 因此生态敏感性相对较低。

4.2 生态系统服务功能评价结果

4.2.1 水源涵养评价结果

研究区水源涵养功能整体呈东高西低的分布格局, 以一般重要性为主, 主要分布在临桂区、阳朔县、恭城县和兴安县中部(图 3a), 其面积为 2274.46 km²,

占区域喀斯特面积的 51.87%。其次高度和中等重要性分布面积分别为 1246.52 km² 和 675.65 km², 其占比分别为 28.43% 和 15.41%, 这些地区主要以灌木和乔木为主, 植被覆盖度和河网密度相对较高, 主要河流包括漓江、潮田河、恭城河, 其中在灵川县中南部喀斯特区与海洋山自然保护区毗邻, 处于漓江流域中上游段, 水源丰富, 因此水源涵养功能相对整个喀斯特区较强。

4.2.2 土壤保持评价结果

研究区土壤保持功能以一般重要和极重要为主, 面积分别为 1588.58 km² 和 1229.96 km², 占区域喀斯特面积的 36.23% 和 28.05%; 其中一般重要区主要连续分布在临桂区、灵川县和兴安县中部地区(图 3b), 这些地区地势相对平坦, 为城市建设用地和农田为主; 极重要区主要沿漓江两岸自北向南分布于灵川县南部、阳朔县中部和平乐县北部, 该地区是漓江世界自然遗产保护区所在地, 区域保护力度较大, 植被覆盖在整个喀斯特地区属于较高水平, 土壤质量和数量相对较高。

4.2.3 生物多样性维护评价结果

研究区生物多样性维护重要性功能总体呈现东高西低的分布格局, 其高度重要和一般重要性面积分别为 1940.93 km² 和 1635.67 km², 占比分别达到 44.26% 和 37.30%; 其中生物多样性高度重要分布区集中在兴安县和灵川县南部、阳朔县北部(图 3c), 这些地区土地利用类型以灌木地和林地为主, 其面积达到 1491.53 km², 属于海洋山自然保护区和漓江自然遗产保护区范围, 植被和物种多样性相对其他地区更为多样, 生境质量相对较好。而一般重要分布区集中在兴安县、临桂区、阳朔县和恭城县中部, 这些地区土地利用类型以园地为主, 受人为耕种活动干扰频繁, 物种相对单一。

4.2.4 地貌景观功能评价结果

通过调查研究区地质地貌景观的分布状况, 发现区域地貌景观功能重要性以高度重要和极重要为主, 其面积分别为 1666.06 km² 和 1482.91 km², 占区域喀斯特面积的 37.99% 和 33.82%, 这些地区主要以喀斯特峰丛洼地、谷地和喀斯特峰林地貌为主, 在漓江流域呈“C”字型分布, 是漓江流域喀斯特主要分布区(图 3d), 同时也是漓江自然遗产保护区所在地, 由溶蚀作用形成的特殊喀斯特孤峰、峰林

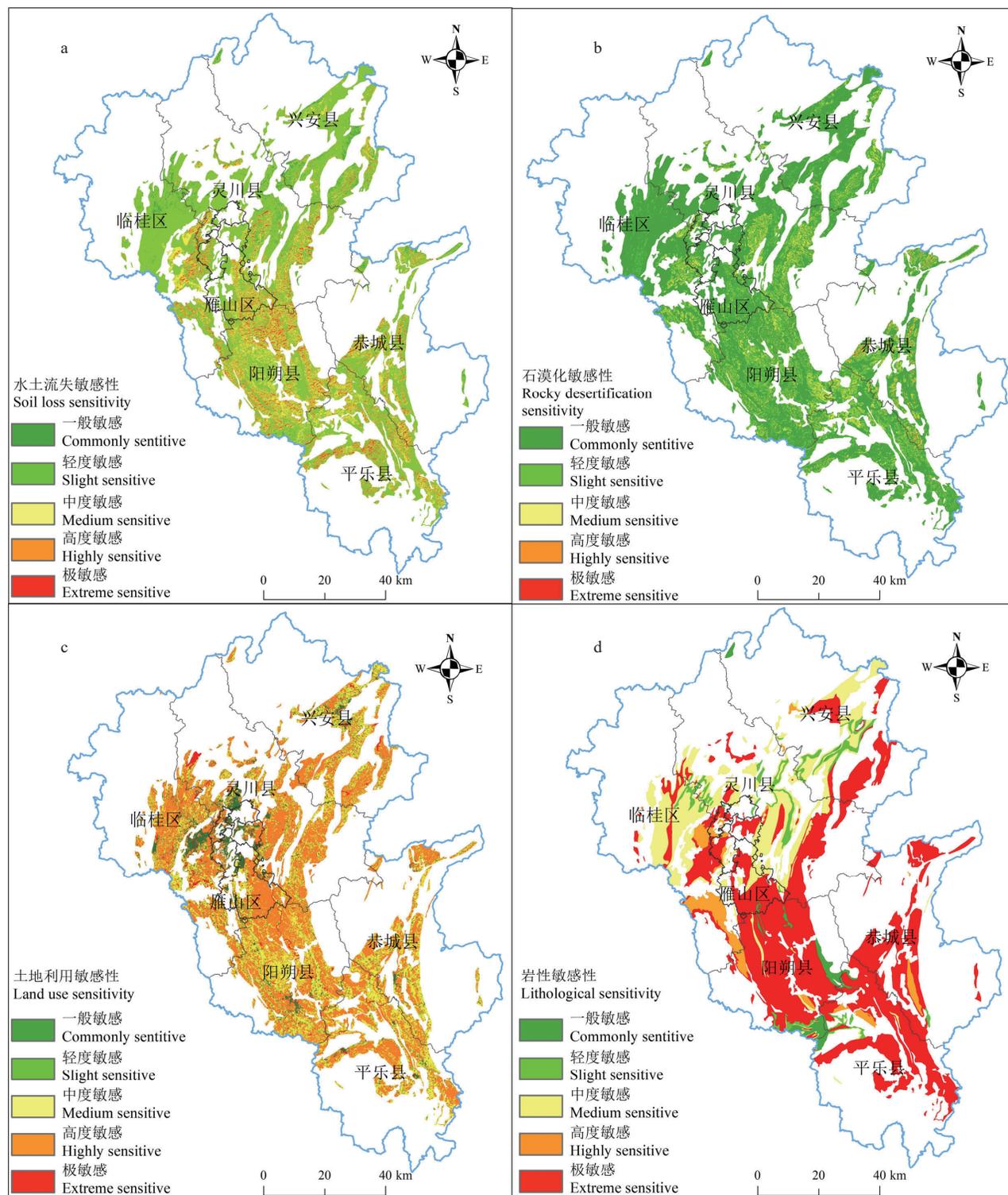


图2 桂林可持续发展议程创新示范区生态系统敏感性空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem sensitivity in Guilin Sustainable Development Agenda Innovation Demonstration Zone

4.3 桂林可持续发展示范区景观保护重要性评价

基于生态敏感性和生态系统服务功能综合计

算, 桂林可持续发展示范区景观保护一般重要、较重要、中等重要、高度重要和极重要面积分别为 128.71 km²、591.92 km²、1360.07 km²、1131.76 km²

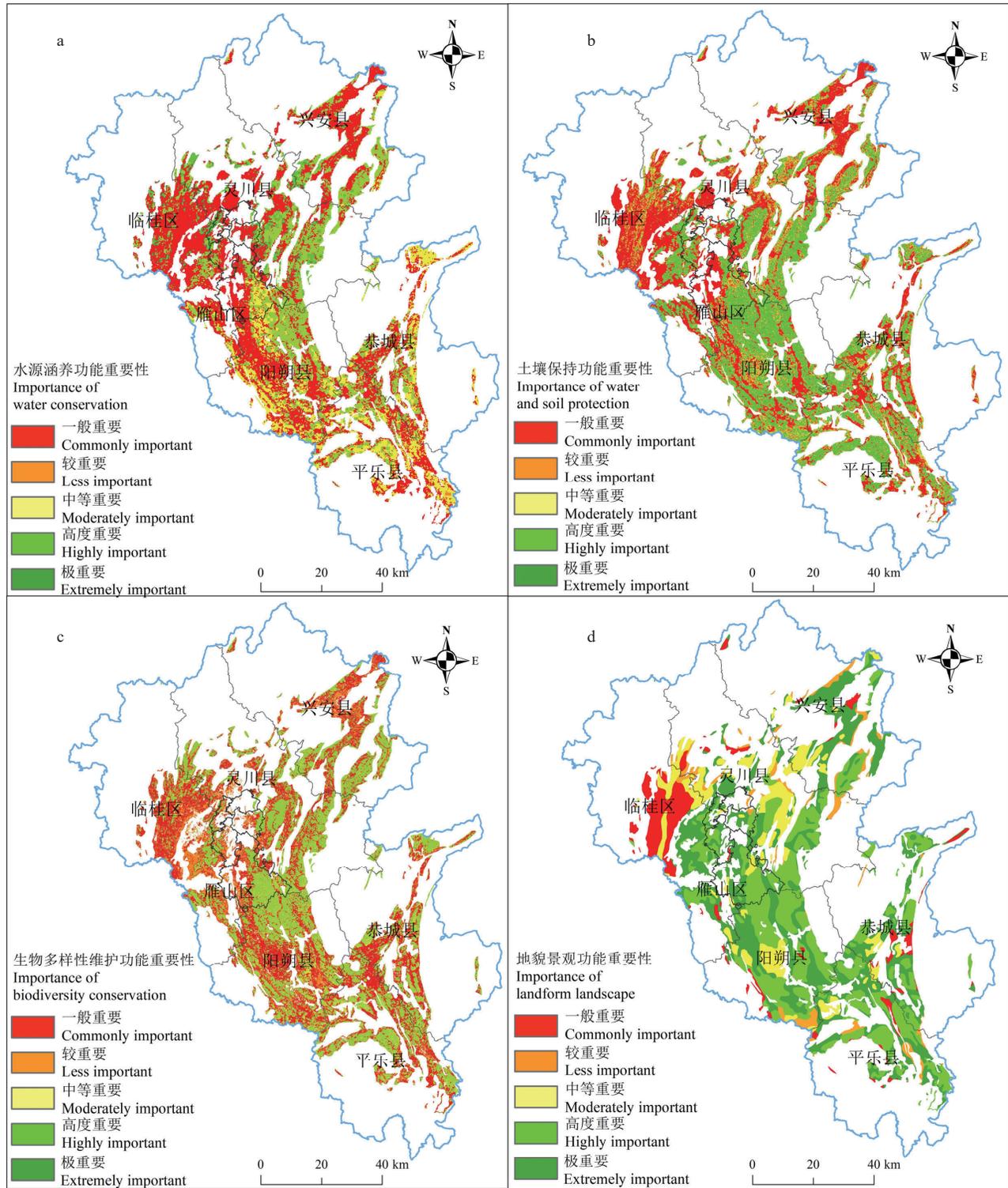


图 3 桂林可持续发展议程创新示范区生态系统服务功能空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service function in Guilin Sustainable Development Agenda Innovation Demonstration Zone and 1172.55 km², occupying 2.94%, 13.50%, 31.02%, 25.81% and 26.74% (Fig. 4). Except for the relatively low importance of landscape protection in the northwest, other areas all show moderate to high importance, indicating that landscape protection in the Guilin Sustainable Development Demonstration Zone has significant importance.

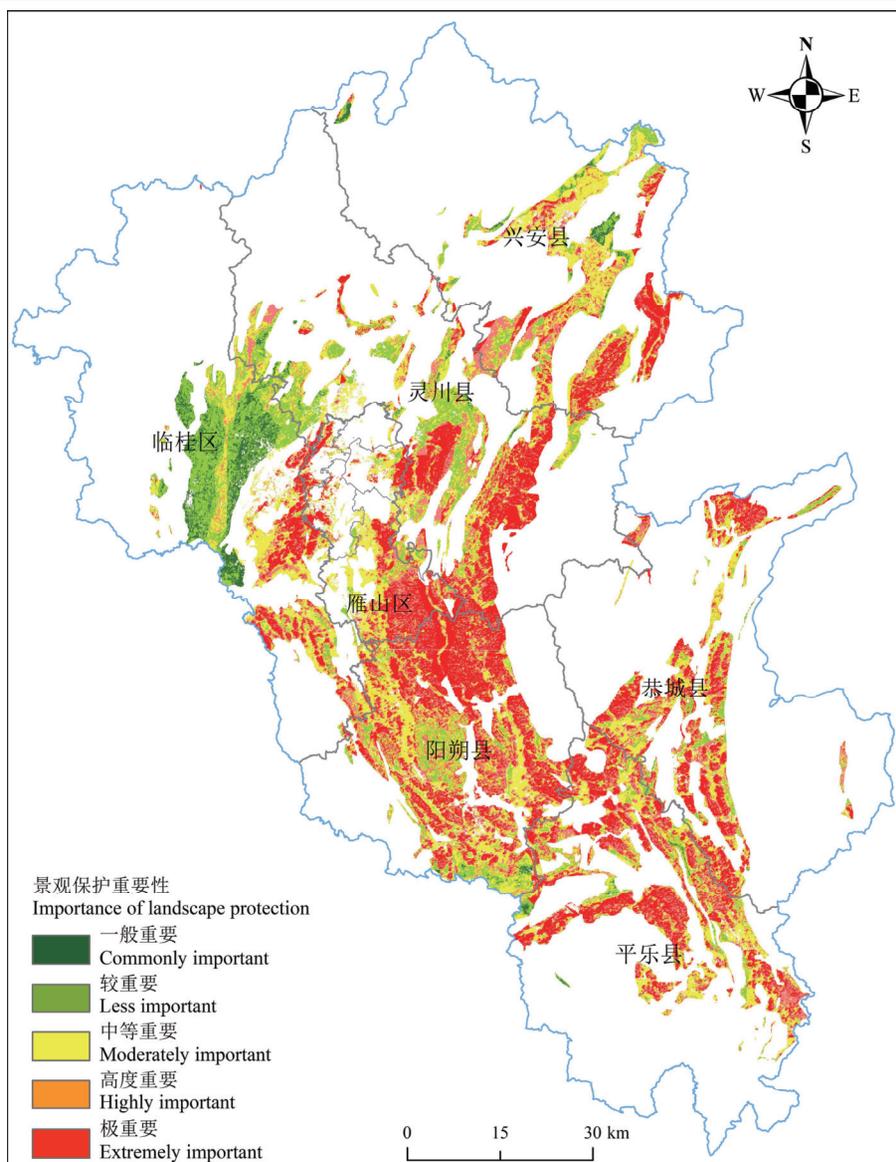


图4 桂林可持续发展议程创新示范区景观保护重要性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of landscape protection level in Guilin Sustainable Development Agenda Innovation Demonstration Zone

从空间分布来看,景观保护一般重要和较重要地区集中在临桂区和灵川县中部,该区地势相对平坦,为岩溶岭丘和峰林平原等地貌景观,岩性主要是碳酸盐岩夹碎屑岩,土地利用类型以灌木、园地和林地为主,区域工农业发展相对较快,其水土流失生态敏感性和水源涵养、土壤保持、生物多样性维护等生态系统服务功能相对较弱,需总体提升该区生态功能。景观保护中度重要性地区相对集中在兴安县中部,调查显示,该区人为采石导致的石漠化和水土流失造成景观破坏严重。高度重要和极重要性地区分布在临桂区南部、灵川县中南部、

雁山区西南部和阳朔县北部等地区,该区分布有会仙国家湿地公园、海洋山自然保护区和漓江自然遗产保护区,是桂林市喀斯特景观资源保护的重点地区;但近年来该区出现湿地景观退化、岩溶湖泊逐渐消减,旱涝严重,水资源时空配置不均等问题(蔡德所等,2009),影响到漓江水资源的合理利用和区域生态安全。在雁山区西南部和阳朔县北部地区,因长期陡坡种植砂糖橘等经济作物,造成一定程度的石漠化和水土流失,形成相对严重的地下河管道淤塞和水土漏失现象;影响漓江两岸旅游景观功能;通过调查发现,该区部分村落仍处于经济落后

状态, 人地矛盾、经济发展与景观保护矛盾突出, 制约了该区喀斯特景观的可持续利用。在恭城县中西部和平乐县中北部地区, 其景观保护重要性主要显示中等重要性以上, 调查发现该区主要生态地质问题为石漠化和水土流失导致的景观破坏, 主要原因是矿山开采, 种植砂糖橘、桃李等经济作物导致石漠化。

4.4 桂林可持续发展示范区景观生态修复分区

依据景观保护重要性评价结果, 针对各地区存在的生态地质问题, 本研究以漓江流域乡镇为单位, 将示范区划分为农林景观功能提升区、湿地与

水景观修复区、矿山景观修复区、地质景观修复区和石漠化景观修复区等 5 类喀斯特景观生态修复区(图 5)。其中农林景观功能提升区主要涉及临桂区和灵川县中部以及兴安县西北部共 11 个乡镇, 该区土地利用类型以灌木、园地和林地为主, 需针对农林景观生态功能偏弱等问题, 制定科学合理的农林生态产业规划, 提升区域水源涵养、土壤保持和生物多样性功能。水景观修复区涉及临桂区东南部和城区 14 个乡镇(街道), 主要针对湿地景观退化和水资源时空匹配不均等问题, 建议开展喀斯特

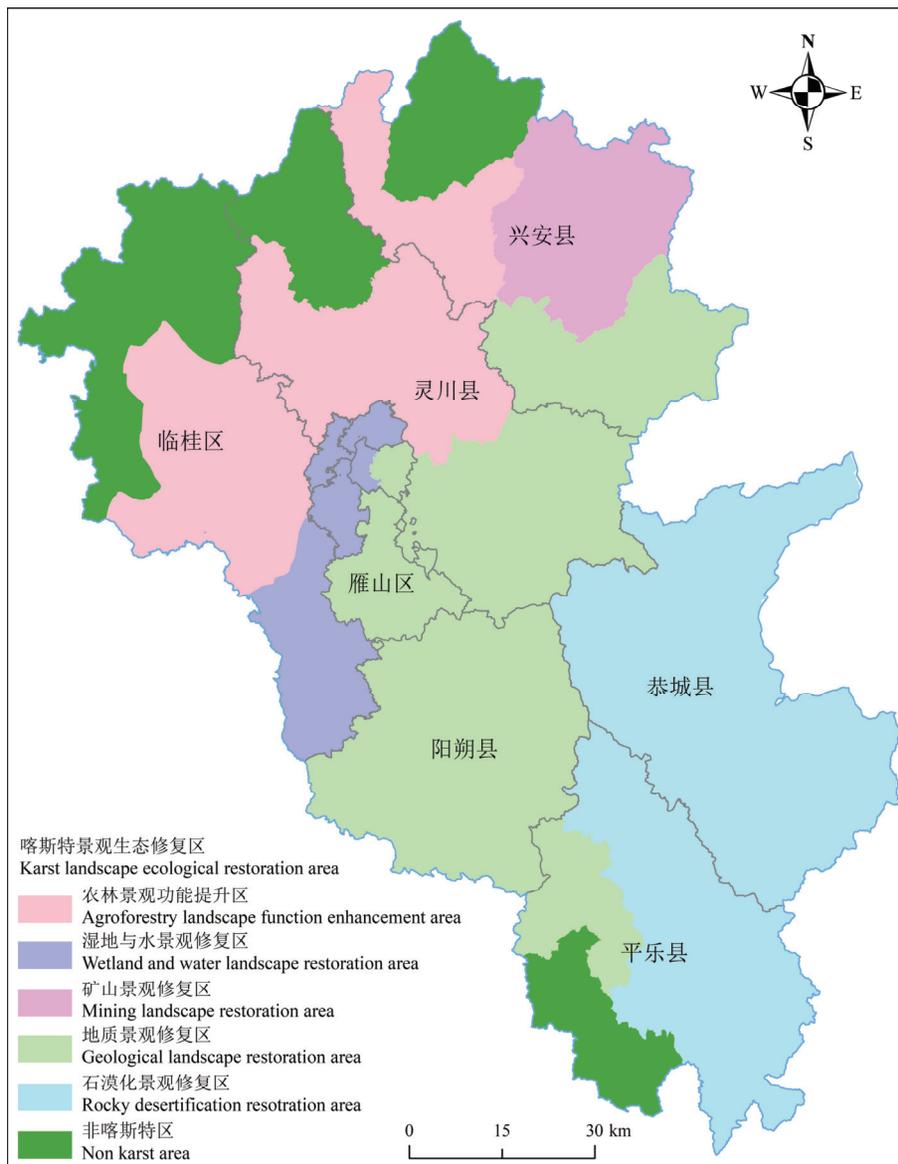


图 5 桂林可持续发展议程创新示范区喀斯特景观生态修复分区

Fig.5 Karst landscape ecological restoration zoning in Guilin Sustainable Development Agenda Innovation Demonstration Zone

景观恢复与水资源调控治理,建立特色湿地生态产业,提高区域生态旅游经济效益。矿山景观修复区涉及兴安县中部4个乡镇;主要针对矿山开采导致的景观资源破坏,实施矿山立体生态修复。地质景观修复区涉及兴安县和灵川县南部、七星区和雁山区、阳朔县和平乐县西北部地区,共计22个乡镇;该区需针对石漠化、水土流失、景观资源破坏、地区经济发展水平低等问题,实施喀斯特地质景观保护与生态循环产业协同发展,提升区域地质景观旅游价值和生态经济综合效益。石漠化景观生态修复区涉及恭城县和平乐县东部17个乡镇,主要针对喀斯特区砂糖橘、桃李等经济作物种植结构调整导致的石漠化问题,建议开展喀斯特区农业生态系统优化与复合农林模式构建技术,加强地表植物和裸露岩石的附生植物恢复,提升该地区生态蓄水保肥能力,促进喀斯特植被景观恢复。

5 讨 论

5.1 桂林喀斯特景观保护重要性评价指标构建

生态敏感性和生态系统服务功能评价是建立国土空间规划体系的重要技术方法,在生态安全格局构建(景永才等,2018)、生态保护红线划定(杨姗姗等,2016;汤峰等,2020)、土地利用优化配置(李益敏等,2018)和国土空间生态修复(刘春芳等,2020)等方面已有广泛研究。本研究围绕桂林喀斯特景观资源保护为切入点,将生态问题和生态功能有机融合,为喀斯特地区生态空间的优化和国土空间规划精细化落地提供重要的技术支撑。研究根据桂林喀斯特区域生态系统特征,将碳酸盐岩类型和地貌景观功能纳入到生态评价指标中,主要考虑了碳酸盐岩性和喀斯特地质地貌景观的特殊性。研究显示桂林喀斯特地区的水土流失的敏感性处于高度敏感,主要原因是喀斯特植被类型以灌木为主,土层浅薄,植被抗干扰能力弱,一旦遭受破坏就难以恢复(凡非得等,2011c);而且,喀斯特区由于碳酸盐岩具有的特殊岩溶作用和溶蚀效应,导致地表崎岖破碎,形成地表-地下二元水文结构,土层浅薄且分布不连续,在人类不合理的土地利用叠加影响下,将会导致土壤迅速流失并形成严重的石漠化(曹建华等,2004)。另外,桂林喀斯特地区大多为纯灰岩区,强烈岩溶作用塑造形成孤峰、溶洞、天坑、石

林等喀斯特地貌景观(邓亚东等,2021),其丰富多彩的景观美学价值构成了桂林独具特色的生态景观功能。因此,对于喀斯特地区进行景观资源保护和生态安全评价时,应重点考虑碳酸盐岩等地质条件的制约作用,以提升景观资源保护和生态空间划定的精确性和针对性。

5.2 桂林喀斯特景观资源分区治理建议

本研究显示桂林市景观资源保护评价总体处于中度重要性以上,表明桂林喀斯特地区是区域国土空间规划的重要地区。《桂林市可持续发展规划(2017—2030年)》要求加强景观资源保育,持续开展喀斯特石漠化治理与修复,加强漓江两岸景观保护提升和漓江流域水土治理保护,构建区域生态安全新格局,显示了桂林作为全国重点功能区和生态脆弱区,在国土空间生态保护中意义重大,需根据不同的分区类型,因地制宜地制定相应的保护修复措施,维护喀斯特生态系统结构的完整和功能的稳定性。

研究依据景观资源保护重要性评价结果,将临桂区和灵川县中部以及兴安县西北部划分为农林景观功能提升区,主要原因是该区土地利用以灌木、园地等受人为活动影响较大的农林景观为主,其土壤保持等生态功能偏低。有研究认为,维持喀斯特生态系统的平衡,应发展因地制宜的立体生态农业模式,建立节水型集约化生态农业生产体系,提高喀斯特农业资源生产力和生态系统稳定性(熊康宁和池永宽,2015)。因此,构建立体生态农业模式,形成适宜的喀斯特山地石漠化防治与农林复合经营模式,可有效提升喀斯特景观的生态功能和经济效益。研究将临桂区东南部地区划分为湿地与水景观修复区,主要考虑该区会为会仙国家湿地所在地,近年来湿地景观和岩溶湖泊退化严重,湿地生态调节服务功能价值逐年下降(蔡德所等,2009;唐月等,2019),需针对性开展湿地植被重建、退化栖息地改造和蓄水拦坝等生态修复和水资源调控工程措施(吴应科等,2006)。在兴安县中部划分为矿山景观修复区,主要由于露天石灰岩矿山开采较为严重,破坏了原有喀斯特山水景观,同时易引发崩塌、滑坡、含水层破坏等生态地质问题,影响区域生态环境安全,需针对性开展边坡治理、适生林草植被恢复等生态工程措施(韩淑朋和许少伟,2012)。

在漓江两岸灵川县和阳朔等地区划分为地质景观修复区, 该区包括漓江世界自然遗产保护区和遇龙河自然保护区, 是漓江喀斯特景观的精华所在地; 调查发现漓江沿岸部分景观因人为种植柑橘等经济作物, 导致喀斯特景观遭到破坏, 而且部分村落人地矛盾、经济发展与景观保护矛盾突出, 制约了该区喀斯特景观的可持续利用。建议实施休闲观光与种养研学体验旅游、岩溶景观恢复与生态循环产业协同发展模式, 通过调整产业结构, 减少对漓江自然保护区内土地的过度依赖, 提高群众经济收益和区域生态效益。在恭城和平乐县划分为石漠化景观修复区, 其依据是该区灰岩分布广泛、岩溶作用强烈, 加上该区长期种植桃树、李树等经济作物形成连作障碍, 经济果林产量下降遭大面积砍伐, 形成中度和重度石漠化现象。建议实施喀斯特区农业生态系统优化与复合农林模式构建技术(李先琨等, 2008), 在现有果树林下种植耐旱性中草药, 加强地表植物和裸露岩石的附生植物恢复, 提升该地区水土保持功能, 促进喀斯特植被景观恢复。

6 结 论

本研究通过开展生态敏感性和生态系统服务功能综合评价, 量化研究了桂林市可持续发展议程创新示范区喀斯特景观资源的空间分布格局。主要结论如下: 石漠化、水土流失、土地利用和岩性敏感性较高的区域主要分布在阳朔县北部、恭城县中西部、灵川县中南部等喀斯特发育相对广泛的地区, 这些地区主要受到岩性、地貌等喀斯特地质条件的影响和制约, 加上人类活动的干扰, 水土流失和石漠化等生态问题相对严重。从生态系统服务功能来看, 临桂区、灵川县和兴安县中部地区, 水源涵养、土壤保持和生物多样性维护功能总体偏弱, 需加强喀斯特景观资源保育和植被修复。基于喀斯特景观保护重要性综合评价分析, 将桂林可持续发展议程创新示范区划分为农林景观功能提升区、湿地与水景观修复区、矿山景观修复区、地质景观修复区和石漠化景观修复区, 提出了景观恢复与水资源调控、喀斯特地质景观保护与生态循环产业协同发展等多种治理模式, 为桂林市喀斯特景观资源保育和可持续利用提出了可操作的措施和建议, 对于喀斯特生态脆弱区资源环境的分区保护修复具

有重要的参考作用。

References

- Cai Desuo, Mazu Lu, Zhao Xianggui, Wang Kui. 2009. Remote sensing supervision on spatio-temporal evolution of karst wetland in recent 40 years in Huixian District of Guilin, China[J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 27(2): 111-117 (in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Zhangcheng, Jiang Zhongcheng. 2004. Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China[J]. Earth and Environment, 32(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Cao Jianjun, Liu Yongjuan. 2010. Ecological sensitivity of Shanghai City based on GIS spatial analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 21(7): 1805-1812 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weihai, Zhu Xuewen, Zhu Dehao, Huang Baojian. 2006. Evaluation on landscape features and world natural heritage value of Wulong karst in Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 25(S1): 106-112 (in Chinese with English abstract).
- Cui Ning, Yu Enyi, Li Shuang, Tang Mingfang, Wu Gang. 2021. Protection measures of plateau lake based on ecosystem sensitivity and importance of ecosystem function: The case of Lake Dalinor Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 41(3): 949-958 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yadong, Meng Qingxin, Lü Yong, Luo Shuwen, Pan Ming. 2021. Characteristics of geological heritage landscapes in Guilin and their protection and development strategies[J]. Carsologica Sinica, 40(5): 783-792 (in Chinese with English abstract).
- Epanchinnell R S, Boyd J W, Macauley M K, Scarlett L, Shapiro C D, Williams B K. 2018. Integrating Adaptive Management and Ecosystem Services Concepts To Improve Natural Resource Management: Challenges and Opportunities[M]. Virginia: U. S. Geological Survey Circular, 1-61.
- Fan Feide, Luo Jun, Wang Kelin, Chen Hongsong, Zhang Wei. 2011a. Assessment and spatial analysis of ecosystem service importance in karst area of Northwest Guangxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 30(4): 804-809 (in Chinese with English abstract).
- Fan Feide, Wang Kelin, Xiong Ying, Xuan Yong, Zhang Wei, Yue Yuemin. 2011b. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 31(21): 6353-6362 (in Chinese with English abstract).
- Fan Feide, Wang Kelin, Xuan Yong, Yue Yuemin. 2011c. Eco-environmental sensitivity and its spatial distribution in karst regions, Southwest China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 20(11): 1394-1399 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jungang, Wu Xue, Zhang Yuli, Liu Linshan, Wang Zhaofeng, Yao Zhijun. 2016. Ecological function regionalization in the lower Jinsha River Basin using analytic hierarchy process method[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(1): 134-147 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Han Shupeng, Xu Shaowei. 2012. Summaries of geological environment protection and governance recovery work—A case study on an opencast limestone ore mine[J]. *Mineral Exploration*, 3(1): 111–116 (in Chinese with English abstract).
- Huck M, Drzejewski W O, Borowik T, Drzejewska B, Nowak S, Ajek R W. 2011. Analyses of least cost paths for determining effects of habitat types on landscape permeability: Wolves in Poland[J]. *Acta Theriologica*, 56(1): 91–101.
- Huang Xinyi, Zhao Xiaomin, Guo Xi, Jiang Yefeng, Lai Xiahua. 2020. The natural ecological spatial management zoning based on ecosystem service function and ecological sensitivity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(3): 1065–1076 (in Chinese with English abstract).
- Jing Yongcai, Chen Liding, Sun Ranhao. 2018. A theoretical research framework for ecological security pattern construction based on ecosystem services supply and demand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(12): 4121–4131 (in Chinese with English abstract).
- Li Jing, Wang Yuan, Yin Shouqiang, Cui Lüyuan, Deng Xiaojuan. 2020. Evaluation of ecological conservation importance and regionalization of dominant ecological function in Zhangjiakou[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 51(2): 280–288 (in Chinese with English abstract).
- Li Rongbiao, Hong Hanlie, Yin Ke, Li Yangbing, Yang Guangbin, An Yulun. 2009. Evaluation on karst eco-environment sensitivity—A case study in Duyun city[J]. *Carsologica Sinica*, 28(3): 300–307 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruiling, Wang Shijie, Zhou Dequan, Zhang Dianfa, Li Fengquan, Zhou Zhongfa, Xiong Kangning. 2003. The correlation between rock desertification and lithology in karst area of Guizhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 58(2): 314–320 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiankun, He Chengxin, Tang Jiansheng, Jiang Zhongcheng, Huang Yuqing. 2008. Evolution and ecological processes of karst ecosystem of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 15(1): 80–86, 91 (in Chinese with English abstract).
- Li Yimin, Guan Chengwen, Guo Liqin, Zhu Jun, Duan Yaping, Xie Yaya. 2018. Optimization of land use spatial pattern in Jiangchuan district based on ecological sensitivity analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(20): 267–276, 316 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuechen, Liu Chunxia, Min Jie, Wang Caijun, Zhang Hong, Wang Yang. 2013. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(1): 168–178 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunfang, Li Pengjie, Liu Licheng, Wang Weiting. 2020. Ecological restoration zoning of provincial territorial space in the ecologically fragile areas of northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(17): 254–263 (in Chinese with English abstract).
- Ma Hua, An Yulun. 2010. Analysis on ecological sensitivity and value of ecosystem service of karst areas based on GIS[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(21): 11340–11344 (in Chinese with English abstract).
- Mao Wenyong. 2001. Assessment and conservation of landscape resources[J]. *Research of Environmental Sciences*, 14(6): 54–56 (in Chinese with English abstract).
- Norton L, Greene S, Scholefield P, Dunbar M. 2016. The importance of scale in the development of ecosystem service indicators[J]. *Ecological Indicators*, 61(1): 130–140.
- Peng Shiliang. 2021. Comprehensive Evaluation and Ecological Restoration Strategy of Geopark Landscape Resources System—A Case Study of Meijiang National Geopark[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 1–182 (in Chinese with English abstract).
- Shao Chaofeng. 2020. Challenges and countermeasures for sustainable utilization of landscape resources in Guilin[J]. *China Sustainability Tribune*, (7): 41–43 (in Chinese).
- Sun Yifan, Wang Xia. 2023. Research on spatial restoration based on ecosystem service functions and ecological sensitivity[J]. *Beijing Planning Review*, (3): 101–106 (in Chinese).
- Sun Zhangtao, Yu Zhengwei, Shu Siqi, Liu Jiafeng, Fan Jinghui, Zhang Zhiguang, Miao Miao. 2023. The evaluation of ecosystem service of Yanqing Global Geopark in Beijing and the suggestions for ecological geology[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(4): 657–667 (in Chinese with English abstract).
- Tang Feng, Wang Li, Zhang Pengtao, Fu Meichen. 2020. Construction of county-level ecological security pattern based on ecological protection red line and network in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(9): 263–272 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yue, Li Yuting, Chen Zhixiu, Huang Cuilin, He Yuting, Zhou Bangsong. 2019. Dynamic evaluation of service function value of Huixian karst wetland ecosystem in Guilin[J]. *Environmental Ecology*, 1(5): 57–63 (in Chinese with English abstract).
- Wang Peng, Zhao Wei. 2022. Ecological restoration zoning of territorial space in typical karst region: A case study of Maotiao River Basin in Guizhou[J]. *Journal of Natural Resources*, 37(9): 2403–2417 (in Chinese with English abstract).
- Wang Siyuan, Zhao Minmin, Diao Yujie, Ma Xin, Fu Lei, Wang Xuqing, Liu Ting, Chen Guan, Guo Peng. 2022. Application and study of the evaluation method of ecological protection in the Changdu City of the east of Qinghai Tibet Plateau[J/OL]. *Geology in China*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20221121.1816.008.html>.
- Wu Yingke, Mo Yuanfu, Zou Shengzhang. 2006. Ecologic problem and protection method of karst wetland in Huixian, Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 25(1): 85–88 (in Chinese with English abstract).
- Wu Pengda, Lu Xuejun, Hou Wei, Yan Changqing. 2016. Evaluation of land ecological sensitivity based on land quality and ecological

- index[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 41(2): 81–86 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jiujun, Wu Kai, Zhang Lanyue, Li Kexiang, Chen Yang, Xie Gang. 2022. Spatial differentiation of importance of ecosystem services in karst area of Yunnan—Guizhou Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 42(6): 332–342 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Kangning, Chi Yongkuan. 2015. The problems in Southern China karst ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. *Ecological Economy*, 31(1): 23–30 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Shangao, Qin Changbo, Yu Lei, Lu Lu, Guan Yang, Wan Jun, Li Xin. 2018. Methods to identify the boundary of ecological space based on ecosystem service functions and ecological sensitivity: A case study of Nanning City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(22): 7899–7911 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shanshan, Zou Changxin, Shen Weishou, Shen Rungping, Xu Delin. 2016. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: A case study of Jiangxi Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 35(1): 250–258. (in Chinese with English abstract).
- You Nanshan, Meng Jijun. 2017. Ecological functions regionalization and ecosystem management based on the ecological sensitivity and ecosystem service in the middle reaches of the Heihe River[J]. *Journal of Desert Research*, 37(1): 186–197 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lang, He Zhonghua, Xia Chuanhua, Ren Rongyi. 2021. GIS—based evaluation of ecological sensitivity of karst areas[J]. *Guizhou Science*, 39(2): 45–52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mingyang, Wang Kelin, Chen Hongsong, Zhang Chunhua, Liu Huiyu, Yue Yuemin, Fan Feide. 2009. Quantified evaluation and analysis of ecosystem services in karst areas based on remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(11): 5891–5901 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenting, Cheng Wenshi, Ji Xiongjuan. 2023. Evaluation of land ecological sensitivity in Suzhou District based on GIS[J]. *Territory & Natural Resources Study*, (5): 36–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiaoqing, Shi Xiaoqian, Li Yuhao, Li Yimin, Huang Pei. 2022. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of Southeastern Yunnan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 77(3): 736–756 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z, Li T, Li L, Li S, Rong Y, Bao R, Fu X, Tang M, Wu G. 2023. Integrating ecosystem service importance and ecological sensitivity to identify priority areas for ecological conservation and restoration in Miyun Reservoir Basin[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 30(8): 925–937.
- Zhong Yan. 2015. Global Comparative Analysis on Landscape aesthetics and World Heritage Values of South China Karst[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 1–91 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianchao, Qin Jungan, Zhang Qiang, Zhang Chunlai, Jiang Shiqing. 2015. Vegetation, climate and depositional environment changes since the Middle Holocene in the karst area of Guilin, Guangxi[J]. *Chinese Science Bulletin*, 60(13): 1197–1206 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dehao, Zhu Xuewen, Yan Zhiwei, Zhang Yuanhai, Han Daoshan. 2000. The types and essential characteristics of karst tourism resources in Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 19(3): 79–87 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡德所, 马祖陆, 赵湘桂, 王魁. 2009. 桂林会仙岩溶湿地近 40 年演变的遥感监测[J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 27(2): 111–117.
- 曹建华, 袁道先, 章程, 蒋忠诚. 2004. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. *地球与环境*, 32(1): 1–8.
- 曹建军, 刘永娟. 2010. GIS 支持下上海城市生态敏感性分析[J]. *应用生态学报*, 21(7): 1805–1812.
- 陈伟海, 朱学稳, 朱德浩, 黄保健. 2006. 重庆武隆喀斯特景观特征及世界自然遗产价值评价[J]. *中国岩溶*, 25(S1): 106–112.
- 崔宁, 于恩逸, 李爽, 唐明方, 吴钢. 2021. 基于生态系统敏感性与生态功能重要性的高原湖泊分区保护研究——以达里湖流域为例[J]. *生态学报*, 41(3): 949–958.
- 邓亚东, 孟庆鑫, 吕勇, 罗书文, 潘明. 2021. 桂林地质遗迹景观特征及其保护开发策略研究[J]. *中国岩溶*, 40(5): 783–792.
- 凡非得, 罗俊, 王克林, 陈洪松, 张伟. 2011a. 桂西北喀斯特地区生态系统服务功能重要性评价与空间分析[J]. *生态学杂志*, 30(4): 804–809.
- 凡非得, 王克林, 熊鹰, 宣勇, 张伟, 岳跃民. 2011b. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. *生态学报*, 31(21): 6353–6362.
- 凡非得, 王克林, 宣勇, 岳跃民. 2011c. 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*, 20(11): 1394–1399.
- 高俊刚, 吴雪, 张懿铨, 刘林山, 王兆锋, 姚治君. 2016. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区[J]. *生态学报*, 36(1): 134–147.
- 韩淑朋, 许少伟. 2012. 矿山地质环境保护与治理恢复——以某露天石灰岩矿山为例[J]. *矿产勘查*, 3(1): 111–116.
- 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 江叶枫, 赖夏华. 2020. 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*, 40(3): 1065–1076.
- 景永才, 陈利顶, 孙然好. 2018. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架[J]. *生态学报*, 38(12): 4121–4131.
- 李晶, 王媛, 殷守强, 崔绿园, 邓晓娟. 2020. 张家口市生态保护重要性评价及主导生态功能分区研究[J]. *土壤通报*, 51(2): 280–288.
- 李荣彪, 洪汉烈, 殷科, 李阳兵, 杨广斌, 安裕伦. 2009. 喀斯特生态环境敏感性评价——以都匀市为例[J]. *中国岩溶*, 28(3): 300–307.
- 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 张殿发, 李凤全, 周忠发, 熊康宁. 2003. 贵

- 州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J]. 地理学报, 58(2): 314-320.
- 李先琨, 何成新, 唐建生, 蒋忠诚, 黄玉清. 2008. 广西岩溶山地生态系统特征与恢复重建[J]. 广西科学, 15(1): 80-86, 91.
- 李益敏, 管成文, 郭丽琴, 朱军, 段亚苹, 谢亚亚. 2018. 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, 34(20): 267-276, 316.
- 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋. 2013. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态学报, 33(1): 168-178.
- 刘春芳, 李鹏杰, 刘立程, 王伟婷. 2020. 西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区[J]. 农业工程学报, 36(17): 254-263.
- 马骅, 安裕伦. 2010. 基于 GIS 的喀斯特地区生态敏感性及其生态系统服务功能价值分析评价——以贵州省毕节地区为例[J]. 安徽农业科学, 38(21): 11340-11344.
- 毛文永. 2001. 景观资源的评价与保护[J]. 环境科学研究, 14(6): 54-56.
- 彭世良. 2021. 地质公园景观资源系统综合评价及生态修复策略研究——以湖南涓江国家地质公园为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 1-182.
- 邵超峰. 2020. 桂林景观资源可持续利用面临的挑战和对策[J]. 可持续发展经济导刊, (7): 41-43.
- 孙一帆, 汪霞. 2023. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的空间修复研究[J]. 北京规划建设, (3): 101-106.
- 孙张涛, 余正伟, 舒思齐, 刘稼丰, 范景辉, 张志光, 苗森. 2023. 北京延庆世界地质公园生态系统服务价值评价和生态地质调查工作建议[J]. 地质通报, 42(4): 657-667.
- 汤峰, 王力, 张蓬涛, 付梅臣. 2020. 基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建[J]. 农业工程学报, 36(9): 263-272.
- 唐月, 李宇婷, 陈治秀, 黄翠霖, 何钰婷, 周帮松. 2019. 桂林市会仙岩溶湿地生态系统服务功能价值动态评估[J]. 环境生态学, 1(5): 57-63.
- 王鹏, 赵微. 2022. 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, 37(9): 2403-2417.
- 王思源, 赵敏敏, 刁玉杰, 马鑫, 付雷, 王旭清, 刘廷, 陈冠, 郭鹏. 2022. 青藏高原东部昌都市生态保护重要性评价方法研究及应用[J/OL]. 中国地质, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20221121.1816.008.html>, 1-19.
- 吴应科, 莫源富, 邹胜章. 2006. 桂林会仙岩溶湿地的生态问题及其保护对策[J]. 中国岩溶, 25(1): 85-88.
- 武鹏达, 鲁学军, 侯伟, 严长清. 2016. GIS 支持下土地生态环境敏感性评价——以金坛市为例[J]. 测绘科学, 41(2): 81-86.
- 肖玖军, 吴凯, 张蓝月, 李可相, 陈阳, 谢刚. 2022. 云贵高原岩溶区生态系统服务功能重要性空间分异研究[J]. 水土保持通报, 42(6): 332-342.
- 熊康宁, 池永宽. 2015. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J]. 生态经济, 31(1): 23-30.
- 熊善高, 秦昌波, 于雷, 路路, 关杨, 万军, 李新. 2018. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例[J]. 生态学报, 38(22): 7899-7911.
- 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 沈润平, 徐德琳. 2016. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例[J]. 生态学杂志, 35(1): 250-258.
- 尤南山, 蒙古军. 2017. 基于生态敏感性和生态系统服务的黑河中游生态功能区划与生态系统管理[J]. 中国沙漠, 37(1): 186-197.
- 张浪, 贺中华, 夏传花, 任荣仪. 2021. 基于 GIS 的喀斯特地区生态环境敏感性评价[J]. 贵州科学, 39(2): 45-52.
- 张明阳, 王克林, 陈洪松, 章春华, 刘会玉, 岳跃民, 凡非得. 2009. 喀斯特生态系统服务功能遥感定量评估与分析[J]. 生态学报, 29(11): 5891-5901.
- 赵文婷, 程文仕, 吉雄娟. 2023. 基于 GIS 的肃州区土地生态敏感性评价[J]. 国土与自然资源研究, (5): 36-40.
- 赵筱青, 石小倩, 李馥豪, 李益敏, 黄佩. 2022. 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, 77(3): 736-756.
- 仲艳. 2015. 中国南方喀斯特景观美学全球对比及其世界遗产价值研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 1-91.
- 周建超, 覃军干, 张强, 张春来, 蒋仕清. 2015. 广西桂林岩溶区中全新世以来的植被、气候及沉积环境变化[J]. 科学通报, 60(13): 1197-1206.
- 朱德浩, 朱学稳, 闫志为, 张远海, 韩道山. 2000. 广西岩溶旅游资源类型及基本特征[J]. 中国岩溶, 19(3): 79-87.