

# 基于“安全格局-生态健康”框架的滇中城市群 国土空间生态修复分区

付祎<sup>1</sup>, 雷冬梅<sup>1,2</sup>, 高丽萍<sup>1</sup>, 何元斌<sup>1,2</sup>, 李智国<sup>1,2</sup>, 冉玉菊<sup>1</sup>

(1. 云南财经大学 财政与公共管理学院, 昆明 650221; 2. 云南省高原山地土地利用重点实验室, 昆明 650221)

**摘要:** [目的] 滇中城市群是云南省经济增长和生态文明建设的重点区域, 明确其国土空间生态修复分区是协调生态保护与经济发展, 实现可持续发展的重要前提。[方法] 以滇中城市群49个区县为评价单元, 构建“安全格局-生态健康”理论框架, 选择指标体系, 分别评价其生态安全格局和生态系统健康状况, 采用综合指数方法进行国土空间生态修复分区。[结果] (1) 生态安全格局指数( $I_s$ )平均值为0.66, 总体呈“西高东低”的空间分布格局, 其中高值区面积占比为52.66%, 低值区占比为11.53%; (2) 生态系统健康指数( $I_H$ )平均值为0.62, 总体呈现出“四周高中部低”的空间分布格局, 其中高值区面积占比为42.77%, 低值区占比为3.22%; (3) 生态修复综合指数(CEI)平均值为0.53, 总体呈“中部高四周低”的空间分布特征。根据分区结果, 将研究区划分为生态系统重点修复区、生态安全优先修复区、生态健康优先修复区、生态系统优先提升区、生态系统一般修复区, 面积占比分别为1.71%, 6.92%, 46.72%, 25.90%和18.75%, 并提出差异化的分区生态修复策略。[结论] 基于“安全格局-生态健康”的生态修复分区方法, 能准确识别出区域生态安全水平和生态系统健康状况, 实现“空间优化+精准修复”的生态修复分区目标。

**关键词:** 生态修复分区; 生态安全格局; 生态系统健康; 滇中城市群

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0376-10

## Ecological restoration zoning of territorial space in central Yunnan urban agglomeration based on “security pattern-ecosystem health” framework

Fu Hui<sup>1</sup>, Lei Dongmei<sup>1,2</sup>, Gao Liping<sup>1</sup>, He Yuanbin<sup>1,2</sup>, Li Zhiguo<sup>1,2</sup>, Ran Yuju<sup>1</sup>

(1. School of Public Finance and Management, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Plateau Mountain Land Use, Kunming 650221, China)

**Abstract:** [Objective] The central Yunnan urban agglomeration is a key region for economic growth and ecological civilization construction in Yunnan Province. Clarifying its territorial spatial ecological restoration zones is an important prerequisite for coordinating ecological protection with economic development and achieving sustainable development. [Methods] Using 49 districts and counties in the central Yunnan urban agglomeration as evaluation units, a “security pattern-ecological health” theoretical framework was constructed. An indicator system was selected to evaluate the ecological security pattern and ecosystem health status, and a comprehensive index method was employed for ecological restoration zoning of territorial space. [Results] (1) The average value of ecological security pattern index ( $I_s$ ) was 0.66, showing an overall spatial distribution pattern of “high in the west and low in the east”. High-value zones accounted for 52.66% of the total area, while low-value zones accounted for 11.53%. (2) The ecosystem health index ( $I_H$ ) averaged 0.62, with a spatial distribution pattern of

收稿日期: 2025-05-12

修回日期: 2025-07-07

接受日期: 2025-07-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“稳态转换视角下高原湖泊流域生态系统服务演化过程与驱动机制研究”(42361049)

第一作者: 付祎(2000—), 男, 云南普洱人, 硕士, 研究方向为土地生态与土地可持续利用。E-mail: 2697351287@qq.com

通信作者: 雷冬梅(1979—), 女(畲族), 福建三明人, 教授, 研究方向为土地生态学。E-mail: dmllei@ynufe.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

“high in the periphery and low in the center”. High-value zones accounted for 42.77% of the area, while low-value zones accounted for 3.22%. (3) The ecological restoration composite index (CEI) averaged 0.53, demonstrating an overall spatial distribution pattern of “high in the center and low in the periphery”. Based on the zoning results, the study area was divided into five categories: key ecosystem restoration zone, ecological security priority restoration zone, ecosystem health priority restoration zone, ecosystem enhancement priority zone, and general ecological restoration zone. These zones accounted for 1.71%, 6.92%, 46.72%, 25.90%, and 18.75% of the total area, respectively. Differential restoration strategies were subsequently proposed for each zone. [Conclusion] The ecological restoration zoning method based on the “security pattern-ecological health” framework can accurately identify the regional ecological security levels and ecosystem health status, achieving the ecological restoration zoning goal of “spatial optimization + precise restoration”.

**Keywords:** ecological restoration zoning; ecological security pattern; ecosystem health; central Yunnan urban agglomeration

国土空间生态修复是通过自然或人工手段恢复受损的生态系统,促使生态系统功能走向良性循环,是新时期推进生态文明建设、保障国家生态安全的重要举措<sup>[1-2]</sup>,分区则是落实国土空间差异化修复策略和高效开展生态修复的重要前提<sup>[3]</sup>。党的十八大以来,国土空间生态修复分区工作被赋予新的职责,在实现国土空间治理、提升国土空间资源承载力,促进人与自然和谐共生方面发挥重要作用<sup>[4]</sup>。因此,国土空间生态修复分区研究已成为相关领域的研究热点。

学者们对生态修复分区进行了大量理论与实践的探索,研究涉及区域<sup>[5]</sup>、市(县)域、城市群<sup>[6]</sup>、省域<sup>[7]</sup>及功能区不同空间尺度<sup>[8]</sup>。随着国土空间生态修复概念的持续深化,已逐步从微观单元内针对污染土壤、石漠化土地、废弃矿山等单一要素受损生态系统的靶向修复,向涵盖全域、全过程、全要素等大尺度开展国土空间生态修复分区及对策研究拓展。研究方法上,现有国土空间生态修复分区研究主要从生态安全格局建构<sup>[9]</sup>、生态系统服务主导功能辨识<sup>[10]</sup>、生态系统健康状态诊断<sup>[11]</sup>以及综合性指标体系评价等方面展开。其中,面向保障国土空间生态系统健康和开展国土空间生态修复分区的研究,有助于从系统性和整体性视角推动自然生态系统和社会经济系统的整体保护与协同治理<sup>[12]</sup>;综合指标体系评价因其灵活性与综合性,也成为实现国土空间生态修复分区的重要方法之一<sup>[13]</sup>。然而,目前针对城市群国土空间生态修复分区研究仍显不足,现有方法多局限于单一维度,或主要基于生态安全格局的空间辨识<sup>[14]</sup>,或侧重于生态系统健康的状态评估来划分分区<sup>[11]</sup>,尚未形成“安全格局-生态健康”协同耦合的一体化分区框架与实践。相较于其他区域生态系统,城市群生态系统内的人类社会经济活动影响

更为显著,城市化进程导致景观破碎化,生态安全格局空间连通性下降和重要生态功能区被侵占、生态系统健康状态持续恶化等问题更突出<sup>[15]</sup>,其国土空间生态修复分区探索具有紧迫性和必要性。

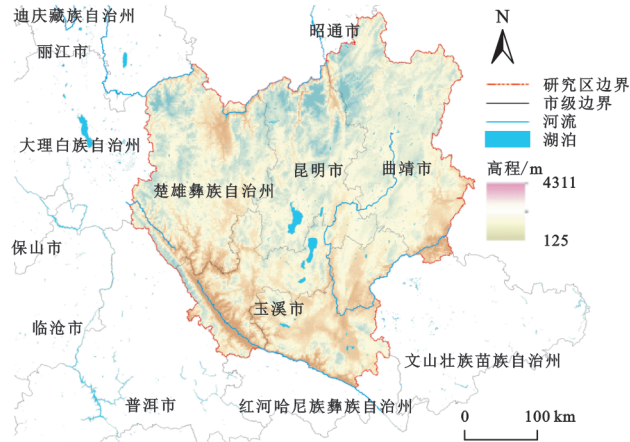
滇中城市群作为国家“两横三纵”城镇化战略格局重要组成部分,是典型的高原山地城市群。高原山地固有的复杂地形、高资源约束性强与高生态敏感性等特点,加之城市群发展带来的巨大资源消耗压力,导致人地关系矛盾突出<sup>[16]</sup>。近年来,随着城镇化进程的加快,生态系统发生不同程度的退化,使得滇中城市群生态系统安全和健康受到严重影响<sup>[17]</sup>,国土空间面临着发展与保护矛盾激化的风险<sup>[18]</sup>,亟需开展生态修复分区研究<sup>[6]</sup>。因此,本文从生态系统完整性视角出发,构建“安全格局-生态健康”的理论框架,选择指标体系,分别评价滇中城市群的生态安全格局和生态系统健康状况,采用综合指数方法进行国土空间生态修复分区,并进一步提出分区修复策略。旨在为区域生态安全格局完善、生态系统健康水平提升和生态修复政策实施提供理论支撑和实践指导。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

滇中城市群位于云贵高原中部(22°59'34"—27°3'19"N,100°43'7"—104°49'40"E),包括昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄彝族自治州及红河哈尼族彝族自治州北部的蒙自市等区域,下辖49个区县市,面积约13.55万km<sup>2</sup>,约占云南省总面积的29%(图1)。地势由北向南逐渐降低,海拔125~4311m,属高原湖盆岩溶地貌,以山地和盆地为主,土地利用类型以耕地、林地和草地为主<sup>[15]</sup>。属亚热带低纬度高原山地季风气候,年平均气温约为15℃,年平均降雨量约为

950 mm。境内河流湖泊众多,分布有南盘江、金沙江及元江等三大河流和滇池、抚仙湖及阳宗海等六大高原湖泊。自 2020 年以来,随着城镇化水平的提高,城镇与蓝绿系统空间格局失衡,生态系统服务功能下降,现有生态修复措施实施效果欠佳,有必要进一步探究生态修复分区,实现精准修复。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)4312 号的标准地图制作,底图未做修改,下同

图 1 滇中城市群区位图

Fig. 1 Location of central Yunnan urban agglomeration

1.2 研究方法

1.2.1 基于“安全格局-生态健康”的理论框架 综合已有研究,本文认为国土空间生态修复分区应以生态系统的健康状态和生态安全格局为基础<sup>[19]</sup>。此外,与一般城市群不同,滇中城市群作为山地城市群,因高度生态脆弱性和高海拔资源梯度特殊性,其国土空间生态修复分区要更加关注区域经济与生态均衡发展的需求,确保生态系统的健康状态和区域生态安全。因此,提出基于“安全格局-生态健康”的生态修复分区理论框架(图 2)。首先,生态安全格局的构建需要有效识别区域生态修复保护的关键位置<sup>[20]</sup>,其主要由生态源地、廊道、阻力面构成。其次,生态系统健康状态评估则需明晰区域生态系统服务功能退化、结构紊乱等问题,可以从生态系统活力、生态系统组织力、生态系统恢复力和生态系统服务力等方面进行评估<sup>[21]</sup>。该理论框架认为维持区域生态安全格局的重要程度越高,生态系统越不健康,生态修复重要性与优先级越高,通过评价能明晰生态系统特征与生态修复重要性等级,从而实现“空间优化+精准修复”的生态修复分区目标。

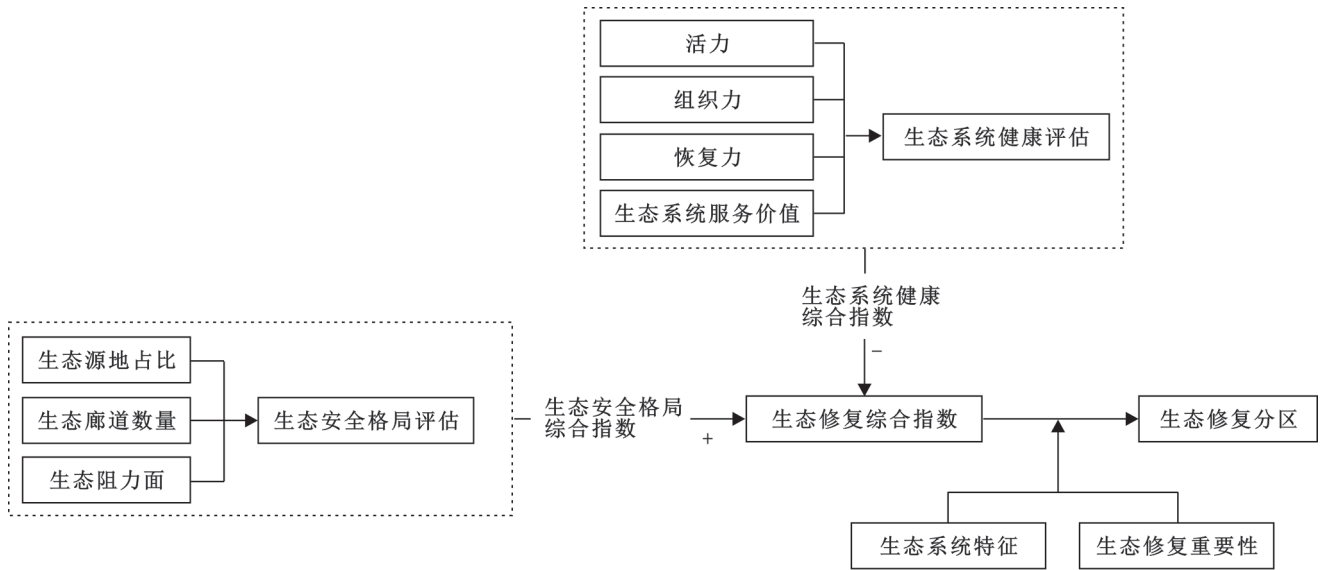


图 2 理论框架

Fig. 2 Theoretical framework

1.2.2 评价指标体系构建 遵循全面性、客观性、可获得性和可操作性等原则,结合研究区自然环境、经济发展和人类活动的实际情况,选取生态源地、生态阻力面、生态廊道等 7 个指标,构建研究区国土空间生态修复分区评价指标体系(表 1)。

1.2.3 指标标准化处理 鉴于各指标之间存在量纲差异,需对其进行标准化处理。采用极差标准化方法将指标转换为无量纲形式,取值范围为 0~1。计算公式为:

正向指标

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

负向指标

$$y_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

式中: $y_{ij}$ 为第  $i$  个变量中第  $j$  个指标归一化后的数值; $x_{ij}$ 为第  $i$  个变量中第  $j$  个指标实际值; $\max(x_j)$ 和  $\min(x_j)$ 为  $x_{ij}$ 的最大值和最小值。

表 1 滇中城市群生态修复分区评价指标体系及权重值  
Table 1 Evaluation indicator system and weight values for ecological restoration zoning in central Yunnan urban agglomeration

目标层	准则层	指标层	计算公式	含义	指标属性	权重
滇中城市群生态修复分区评价	生态安全格局	生态源地占比	—	指发挥多重生态功能的重要性区域 <sup>[20]</sup> 。用生态源地在研究区各区县的面积占比表征	+	0.16
		生态阻力面	$R_i = \frac{T_i}{T_a} \times R$	指不同源地间进行物质交换、能量流动或生物水平空间移动时遭遇的阻碍及程度 <sup>[22]</sup>	—	0.18
		生态廊道数量	—	指研究区内维持生态流动、生态过程以及生态功能连通性的载体 <sup>[23]</sup> 。用生态廊道在研究区各区县的分布数量表征。	+	0.14
	生态系统健康	活力	$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t)$	衡量生态系统功能完整性的指标。采用 NPP 指标表征活力	—	0.15
		组织力	—	指维持生态系统内部结构稳定性的能力。由景观异质性和景观连通性表征,采用景观格局指数计算 <sup>[21]</sup>	—	0.12
	生态系统健康	恢复力	$E = \sum_{i=1}^n \frac{A_n \times T_n}{A}$	指在生态胁迫下维持生态系统稳定的能力。采用生态弹性度 $E$ 表征恢复力 <sup>[21]</sup>	—	0.13
		生态系统服务价值	$ESV = \sum_{i=1}^n VC_i \times A_i$	指生态系统为人类社会直接或间接提供利益或服务价值的的能力 <sup>[24]</sup> ,生态系统服务价值越大,所提供的服务力越强 <sup>[11]</sup> 。采用生态系统服务价值量 $ESV$ 表征	—	0.12

注:(1)生态阻力面中, $R_i$ 为地形位指数修正后栅格  $i$  的生态阻力系数; $T_i$ 为栅格  $i$  的地形位指数,采用研究区高程和坡度计算,公式为: $T_i = \ln\left[\left(\frac{E_i}{\bar{E}} + 1\right) \times \left(\frac{S_i}{\bar{S}} + 1\right)\right]$ ,其中  $E_i$ 、 $S_i$  分别为栅格  $i$  的高程、坡度; $\bar{E}$ 、 $\bar{S}$  分别为研究区平均高程、坡度; $T_a$ 为栅格  $i$  对应土地利用类型  $a$  的平均地形位指数; $R$ 为栅格  $i$  的基本阻力系数;(2)活力中,NPP为净初级生产力; $x$ 为空间位置; $t$ 为时间;NPP( $x, t$ )表示像元  $x$  在  $t$  月份的净初级生产力,APAR( $x, t$ )为该像元  $x$  在  $t$  月份吸收的光合有效辐射; $\epsilon(x, t)$ 则为像元  $x$  在  $t$  月份的实际光能利用率;(3)恢复力中, $E$ 为生态弹性度; $A_n$ 为景观类型  $n$  的面积; $A$ 为景观总面积; $T_n$ 为景观类型  $n$  的弹性分值;(4)生态系统服务价值中,ESV表示生态系统服务的总价值;VC <sub>$i$</sub> 表示第  $i$  类土地利用类型单位面积的生态服务价值系数; $A_i$ 为第  $i$  类土地利用类型的面积。

1.2.4 指标权重确定 为避免主观因素对评价指标权重赋值产生的影响,本文采用熵值法计算各指标权重值(表 1)。熵值法反映信息量的变化程度,如果评价指标变化度越大,则所含信息量越大,指标所占权重就越大<sup>[25]</sup>。计算公式为:

$$M_j = -\frac{1}{\ln t} \sum_{i=1}^t \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^t y_{ij}} \times \ln \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^t y_{ij}} \quad (3)$$

$$W_j = \frac{1 - M_j}{\sum_{j=1}^n (1 - M_j)} \quad (4)$$

式中: $M_j$ 为信息熵值; $t$ 为指标剖分研究区的各个单元; $y_{ij}$ 为第  $i$  个变量中第  $j$  个指标归一化后的数值; $W_j$ 为指标权重值; $n$ 为评价指标个数。

1.2.5 生态修复综合指数模型 基于综合指数法对

研究区生态修复综合指数进行计算。通过对生态安全格局和生态系统健康的评价指数加权求和,构建分区综合指数 CEI,计算公式如下:

$$CEI = (I_S W_S + I_H W_H) \quad (5)$$

式中: $I_S$ 为安全格局指数值; $W_S$ 为安全格局权重值; $I_H$ 为健康状态指数值; $W_H$ 为健康状态权重值。

安全格局指数值  $I_S$ ,计算公式如下:

$$I_S = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (6)$$

健康状态指数值  $I_H$ ,计算公式如下:

$$I_H = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (7)$$

式中: $W_i$ 为安全格局和健康状态子系统的指标权重; $N_i$ 为标准化后的指标值。

当前国土空间生态修复分区评价分级没有统一

的划分标准,参考相关研究<sup>[21]</sup>,本研究将评价结果CEI分为 I—V 5个等级,等级越高,生态修复重要性和优先级越低(表 2)。此外,采用自然断点法,将安全格局

指数值 $I_s$ 和健康状态指数值 $I_H$ 也划分为 I—V 5个等级,其中, I 级区,即低值区,是指数区间值最低区域; V 级区,即高值区,是指数区间值最高区域。

表 2 滇中城市群生态修复分区分级标准

Table 2 Classification criteria for ecological restoration zoning in central Yunnan urban agglomeration

综合指数等级	生态修复优先级	数值	生态系统特征及修复目标
I	很高	0.8~1.0	区域生态安全格局极其重要,生态系统健康呈病态,是进行生态修复优先级最高的重点区域。修复目标是重点保护生态安全格局水平,并修复提升生态系统健康水平
II	较高	0.6~0.8	区域生态安全格局比较重要,生态系统不健康,是进行生态修复优先级较高的区域。修复目标是着重对生态安全进行修复,提高生态源地与生态廊道面积和数量,减少生态阻力面的扩张
III	一般	0.4~0.6	区域生态安全格局一般重要,生态系统亚健康,是进行生态修复优先级一般的区域。修复目标是着重提升生态系统健康水平,提高生态系统完整性、稳定性和自我恢复能力
IV	较低	0.2~0.4	区域生态安全格局不太重要,生态系统健康,是进行生态修复优先级较低的区域。修复目标是维持生态系统健康状况,加强对生态源地保护,提高生态系统抵御外部干扰能力
V	很低	0~0.2	区域生态安全格局重要性极低或不重要,生态系统很健康,生态修复优先级很低。修复目标是着重以保护生态系统为主

### 1.3 数据来源

基础数据包括:(1)生态安全格局图。基于本项目组前期研究,从生态源地、阻力面及关键夹点等方面,评价获得研究区生态安全格局图<sup>[26]</sup>(图 3)。(2)生态系统健康评价涉及的土地利用数据、气象数据与 NDVI 数据。均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),前者空间分辨率为 30 m,时间年限为 2020 年,后者数据精度为 1 000 m。(3) DEM 数据。来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m。(4)土壤数据,来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<https://www.ncdc.ac.cn/>)。为消除不同数据精度带来的计算偏差,通过 ArcGIS 10.5 重采样工具将栅格精度统一为 30 m,采用 WGS\_1 984\_Mercator 投影坐标。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态安全格局指数

研究区生态安全格局各评价指标和综合指数 $I_s$ 的评价结果见图 4 和表 3。从图 4 可以看出,研究区 49 个区县中生态廊道、生态源地、生态阻力面及综合指数的空间分布特征不同。图 4A 显示,生态廊道数量>4 条的最高等级区域主要分布于元江干热河谷及六大高原湖泊地带,呈现中部集聚的分布特征;图 4B 显示,生态源地占比指数高值区域,主要分布在哀牢山、无量山等生态良好的主要横断山脉及国家森林公园等区域,生态源地占比指数低值区域主要分布于昆明市、曲靖市等地,总体呈现西南高东北低的分布格局;图 4C 显示,生态阻力面分布呈现东高西低的空间格局;图 4D 显示, $I_s$ 平均值为 0.66,呈现出西

高东低的空间分布格局。



图 3 滇中城市群生态安全格局图  
Fig. 3 Ecological security pattern of central Yunnan urban agglomeration

采用自然断点法将 $I_s$ 分为 5 个等级,结果见表 3。从表 3 可以看出, I 级区(即低值区)主要分布在会泽县、宣威市、官渡区和开远市,面积占比为 11.53%,该区域对维持生态安全格局的重要性很低; V 级区(即高值区)面积占比为 52.66%,主要分布在西部的大姚县、永仁县和楚雄市等 23 个区县中,该区域对维持生态安全格局空间结构和功能稳定极其重要。

### 2.2 生态系统健康指数

研究区生态系统健康各评价指标和综合指数 $I_H$ 的评价结果见图 5 和表 3。从图 5 可以看出,研究区生态系统健康状况及不同指标等级空间格局差异明

显。图 5A 显示,活力指数高值区域主要分布于除元谋县和呈贡区外的研究区西部,呈现西高东低的分布格局;图 5B 显示,组织力指数高值区域主要分布于研究区中部,空间上呈中部和南部高、西部和北部低

的特征;图 5C 和图 5D 中,恢复力与生态系统服务价值指标空间分布特征相似,整体呈现中部低四周高的特征;图 5E 显示,  $I_H$  平均值为 0.62,空间格局总体呈现出四周高中部低的分布特征。

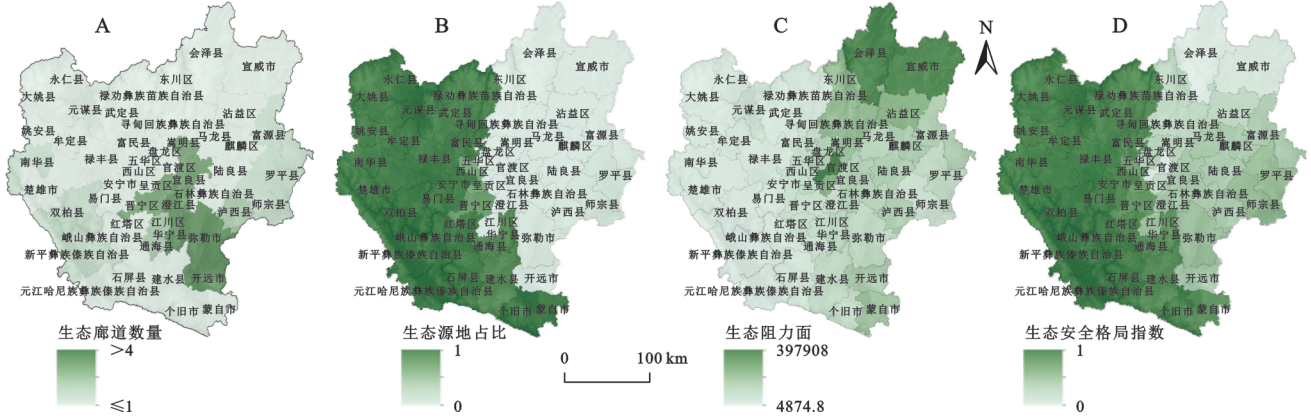


图 4 滇中城市群生态安全格局评价

Fig. 4 Evaluation of ecological security pattern in central Yunnan urban agglomeration

表 3 滇中城市群生态安全格局与生态系统健康指数评价结果

Table 3 Evaluation results of ecological security pattern and ecosystem health in central Yunnan urban agglomeration

评价指数	等级	状况	指数值	占总面积比例/%
$I_s$	I	不重要	0~0.20	11.53
	II	不太重要	0.20~0.40	24.51
	III	一般重要	0.40~0.60	9.31
	IV	比较重要	0.60~0.80	1.99
	V	很重要	0.80~1.0	52.66
$I_H$	I	病态	0~0.21	3.22
	II	不健康	0.21~0.38	10.46
	III	亚健康	0.38~0.54	23.79
	IV	健康	0.54~0.73	19.77
	V	很健康	0.73~1.0	42.77

基于自然断点法的  $I_H$  分级结果显示(表 3), I 级区(低值区)主要分布在峨山、石林等 4 个区县,面积占比为 3.22%,生态系统健康呈病态;V 级区(高值区)主要分布于研究区北部的宣威市和西部的大姚县、楚雄市等 12 个区县,面积占比为 42.77%,生态系统很健康。

### 2.3 生态修复分区

在上述生态安全格局和生态系统健康评价的基础上,采用综合指数法,计算研究区生态修复综合指数(CEI),并将综合指数的 5 个等级(表 2),对应 5 类生态修复分区:生态系统重点修复区、生态安全优先修复区、生态健康优先修复区、生态系统优先提升区、生态系统一般修复区,得到研究区生态修复分区

结果并提出差异化修复策略(图 5F 和表 4)。结果显示,研究区 CEI 平均值为 0.53,呈中部高四周低的空间分布特征,5 个分区的面积占比高低顺序为生态健康优先修复区>生态系统优先提升区>生态系统一般修复区>生态安全优先修复区>生态系统重点修复区(表 4)。

(1) 生态系统重点修复区。该区位于研究区中部的峨山彝族自治县,面积 2 320.48 km<sup>2</sup>,占总面积的 1.71%,是 5 类分区中面积最小的区域。该区对维持生态安全格局极其重要,生态系统健康呈病态。

(2) 生态安全优先修复区。该区涉及石林彝族自治县、元谋县和牟定县等 5 个区县,面积 9 372.35 km<sup>2</sup>,占总面积的 6.92%。该区对维持生态安全格局比较重要,生态系统不健康。

(3) 生态健康优先修复区。该区涉及大姚县、建水县和石屏县等 20 个区县,面积 63 311.84 km<sup>2</sup>,占总面积的 46.72%。该区是分区中面积占比最大的区域,空间分布较为分散,生态安全格局重要性一般,生态系统亚健康。

(4) 生态系统优先提升区。该区主要位于五华区、西山区和澄江市等的 16 个区县,面积 35 098.91 km<sup>2</sup>,占总面积的 25.90%。该区对维持生态安全格局不太重要,生态系统健康状况良好。

(5) 生态系统一般修复区。该区位于会泽县、弥勒市和宣威市等 7 个区县,面积 25 408.07 km<sup>2</sup>,占总面积 18.75%。作为生态修复重要性和优先级最低区域,该区对维持生态安全格局的重要性极低,生态系统健康状况极好。

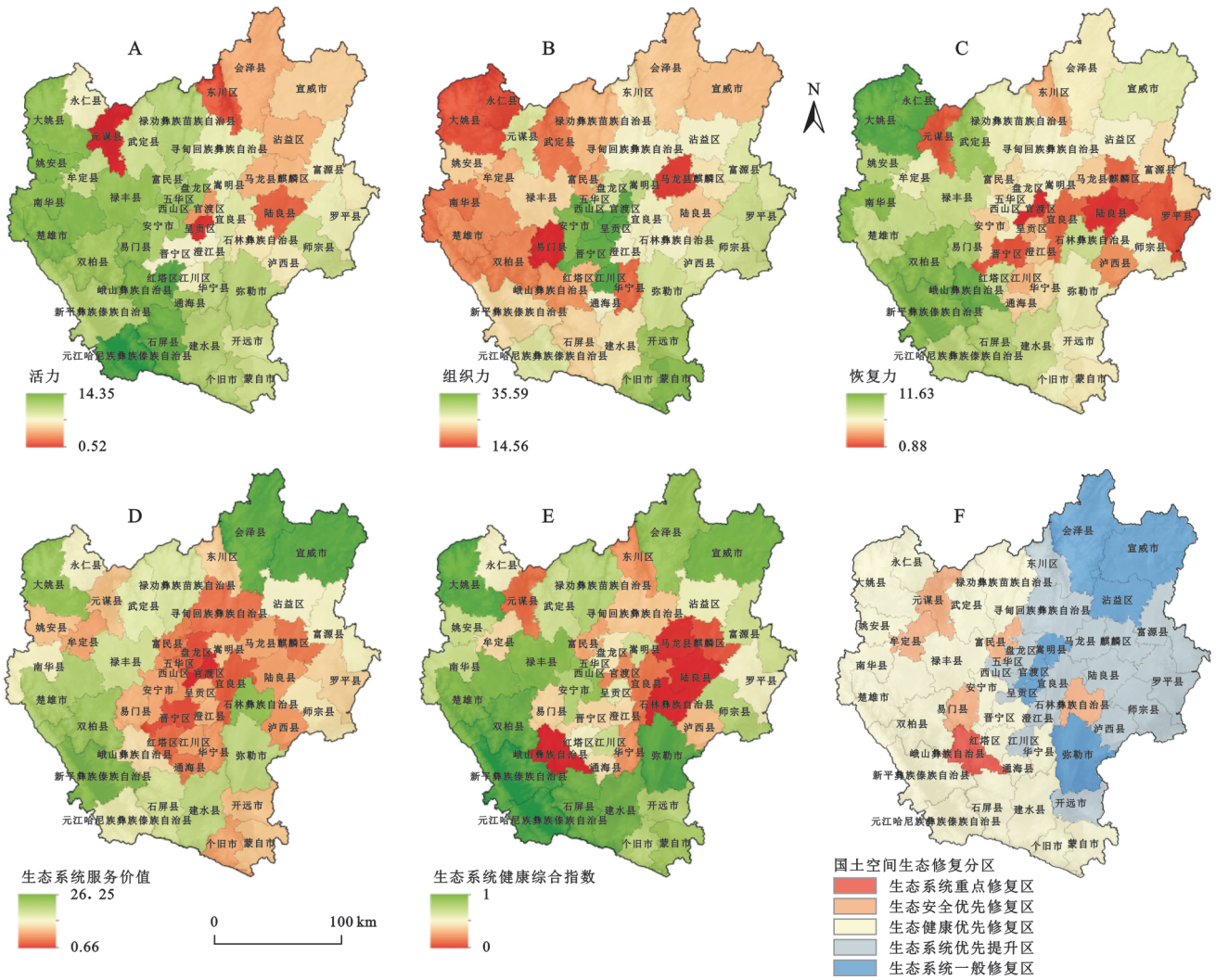


图 5 滇中城市群生态系统健康评价及生态修复分区空间分布  
 Fig. 5 Evaluation of ecosystem health and spatial distribution of ecological restoration zones in central Yunnan urban agglomeration

### 3 讨论

本文提出的“安全格局-生态健康”生态修复分区的双维度研究框架,体现出滇中城市群作为山地城市群在生态修复分区中对区域生态安全格局构建和生态系统健康状态的要求。具体而言,滇中城市群位于高原山地,其水文特征表现为以高原湖泊为核心,水系众多但水资源时空分布不均且总量相对不足,在快速城镇化发展需求下面临着水资源短缺与水生态脆弱问题<sup>[16]</sup>;气候呈现干湿季极端分明的降水格局、强日照与高蒸发并存,以及垂直差异显著的山地气候特征,城市热岛效应加剧局地气候变化<sup>[17]</sup>,导致区域生态安全格局呈现出“西高东低”的空间分布特征(图 4D),生态系统健康状况呈现出“四周高中部低”的空间分布特征(图 5E),因此,与一般城市群不同,其生态修复分区需要确保生态系统的健康状态和区域生态安全<sup>[19]</sup>。

本文基于“安全格局-生态健康”框架,把滇中城市群的国土空间划分出 5 个不同等级的修复分区,研究结果证明该分区方法具有可行性,体现高原山地城市群的特殊性,即推进国土空间生态修复分区须将区域生态安全格局的系统性构建与生态系统健康水平的全面提升作为核心目标<sup>[20]</sup>。此外,该分区方法总结以往生态修复分区研究思路<sup>[27-28]</sup>,以生态安全格局与生态系统健康评估为基础,得到生态修复分区体现国土空间生态修复满足生态安全格局的塑造需求<sup>[9]</sup>;同时体现国土空间生态修复是解决生态系统健康问题的基础路径,也是提升生态系统健康水平的重要手段<sup>[11]</sup>。

本文生态修复分区结果也体现出较高的合理性和可靠性。首先,将分区结果与《云南省国土空间生态修复规划(2021—2035 年)》《云南省国土空间规划(2021—2035 年)》和《云南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》等现

有规划文本对比,发现生态修复Ⅲ—Ⅴ级区,即生态健康优先修复区、生态系统优先提升区和生态系统一般修复区是未来生态保护与经济发展重点区域,证明分区结果与相关规划拥有较高的一致性,因此提出差异化分区修复策略能为不同地区提供针对性政策指导,进一步提升区域生态系统安全水平和健康状况。其次,以生态系统重点修复区—峨山县为例(表4),分区结果表明该区域生态安全格局重要性最高,生态系统健康状态极差,这与峨山县区位条件、社会经济发展水平、自然资源禀赋特征及工业发

展导致的环境污染严重情况基本吻合<sup>[15]</sup>;而与生态系统重点修复区相比,生态系统一般修复区生态安全格局重要性最低,生态系统很健康,该区的7个区县在城市扩张的过程中生态用地侵占较少,主要以农业和人文旅游业为主,较为合理的城市土地利用结构是导致该区域生态系统健康处于高水平的重要原因之一,这与相关研究结果一致<sup>[29]</sup>,如高彬嫔等在探究滇中城市群城市扩张动态演变对生态系统健康的影响中得出2020年生态系统健康均值最高的为曲靖市,最低的为楚雄市<sup>[29]</sup>。

表4 滇中城市群生态修复分区与修复策略

Table 4 Ecological restoration zones and strategies in central Yunnan urban agglomeration

修复区 (面积占比)	区域范围	CEI 平均值	生态系统特征	建议修复策略
生态系统 重点修复区 (1.71%)	峨山县	0.91	该区对维持区域生态安全格局极其重要,生态系统健康呈病态,分布哀牢山生态屏障和红河河流生态廊道,经济发展主要依靠农业和工业。高强度的矿产资源开发、农业发展和喀斯特地貌生态脆弱性使得该区石漠化、矿产污染严重,生态源地被破坏、河流廊道破碎化,面临荒漠化和水资源枯竭的风险	需加强工业污染、农业面源污染治理,实施工业园区重点修复工程,推动石漠化/荒漠化治理,全面提升区域的生态系统健康水平,维护区域生态安全
生态安全 优先修复区 (6.92%)	元谋县、牟定县、富民县、 易门县、石林县	0.73	该区对维持区域生态安全格局重要性较高,生态系统呈不健康状态,分布龙川江和绿汁江两大水系,土地和矿产资源丰富,经济发展主要以农业和工业为主。长期的干旱、历史遗留矿山、森林资源过度采集及河流污染等问题,导致生态源地被破坏减少,廊道断裂,生态安全面临威胁	需重点开展历史遗留矿山修复工程及河流湖泊修复工程,实现山体复绿;推广生态农业,减少农业污染;发挥人文旅游优势,优化产业结构;恢复生态源地、河流生态廊道的生态功能和连通性,完善区域生态安全格局
生态健康 优先修复区 (46.72%)	大姚县、禄丰县、个旧市、 楚雄市、红塔区、双柏县、 石屏县、建水县、新平县、 元江县、姚安县、蒙自市、 通海县、武定县、安宁市、 晋宁区、华宁县、永仁县、 南华县、禄劝县	0.55	该区的生态安全格局重要性一般,生态系统健康为亚健康,经济发展主要以工业、高原特色农业和制造业为主,分布有杞麓湖和异龙湖两大高原湖泊,良好的自然条件构成西南生态安全屏障。但快速的发展带来植被破坏、水环境质量下降和污染等问题,使得生态系统健康面临恶化风险	需建立限制开发区,划定生态保护红线,建立高原湖泊生态廊道,对湖泊、湿地进行保护和修复,提升生态系统健康水平
生态系统 优先提升区 (25.90%)	曲靖市马龙区、澄江市、 富源县、开远市、陆良县、 盘龙区、西山区、寻甸县、 东川区、麒麟区、宜良县、 江川区、师宗县、五华区、 泸西县、罗平县	0.37	该区的生态安全格局不太重要,生态系统呈健康状态,主要位于城市发展核心地带,分布滇池、抚仙湖、星云湖和阳宗海4大高原湖泊,经济发展主要以制造业和旅游业为主。城市扩张和高强度人类活动,带来的工业污染与土地侵占等问题,导致生态源地面积占比较低、生态廊道阻塞、生态阻力增大	需充分发挥城市经济发展优势,提高区域生态系统服务供给能力,探索政府转移支付、生态补偿等方式,建立土地退让机制和河湖保护修复机制,从多路径提升区域生态源地面积和质量、提高生态廊道连通性、降低生态阻力
生态系统 一般修复区 (18.75%)	会泽县、官渡区、沾益区、 弥勒市、呈贡区、嵩明县、 宣威市	0.19	该区的生态安全格局重要性极低,生态系统很健康,经济发展以第三产业为主。受南盘江水系影响及省会城市周边生态红线和工业发展的控制,使得区域自然基底较好,生态人文旅游资源丰富,土地利用结构合理	需牢固自然本底,建立自然保护区,实施人工造林、封山育林等措施,提高生态安全水平,维持区域生态系统健康状况

## 4 结论

(1) 滇中城市群  $I_s$  平均值为 0.66, 总体呈西高东低分布;  $I_H$  平均值为 0.62, 总体呈四周高中部低分布; CEI 平均值为 0.53, 总体呈中部高四周低分布, 各评价指标空间分布特征存在差异。

(2) 基于“安全格局-生态健康”框架, 划分得到 5 个生态修复分区, 即生态系统重点修复区、生态安全优先修复区、生态健康优先修复区、生态系统优先提升区、生态系统一般修复区, 并提出差异化生态修复策略。其中, 生态健康优先修复区面积占比最高, 为 46.72%, 应对杞麓湖和异龙湖等高原湖泊和湿地进行保护和修复, 提升生态系统健康水平。

本文的“安全格局-生态健康”双维度框架, 不同于单维度视角只关注某一生态系统特征, 而是围绕滇中城市群在生态安全格局构建和生态系统健康提升两方面的要求进行构建, 并准确识别出 5 个修复分区, 提出差异化生态修复策略, 实现“空间优化+精准修复”的生态修复分区目标, 能够为山地城市群等特殊区域生态修复提供空间指引与借鉴。但是, 该双维度框架在其他城市群和区域的国土空间生态修复分区应用还需进一步实践。此外, 本文是以行政区作为评价单元, 鉴于滇中城市群内水系密布、流域众多的特点, 建议今后从流域尺度出发, 基于完整独立的地理单元进一步探究生态修复分区。

### 参考文献 (References):

- [1] 易行, 白彩全, 梁龙武, 等. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 37-52.  
Yi X, Bai C Q, Liang L W, et al. The evolution and frontier development of land ecological restoration research [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 37-52.
- [2] Waltham N J, Elliott M, Lee S Y, et al. UN decade on ecosystem restoration 2021—2030: what chance for success in restoring coastal ecosystems [J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 71.
- [3] 高梦雯, 胡业翠, 刘新卫, 等. 多维视角下水生态修复分区划定: 以典型喀斯特地区河池市为例[J]. 应用生态学报, 2024, 35(6): 1661-1670.  
Gao M W, Hu Y C, Liu X W, et al. Delineation of water ecological restoration zoning from a multi-dimensional perspective: a case study in Hechi, a typical karst region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(6): 1661-1670.
- [4] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 3-13.  
Peng J, Lyu D N, Dong J Q, et al. Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 3-13.
- [5] 阚恒, 丁冠乔, 郭杰, 等. 基于生态安全格局分析的国土空间生态修复关键区域识别: 以环太湖城市群为例[J]. 应用生态学报, 2024, 35(8): 2217-2227.  
Kan H, Ding G Q, Guo J, et al. Identification of key areas for ecological restoration of territorial space based on ecological security pattern analysis: a case study of the Taihu Lake city cluster [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(8): 2217-2227.
- [6] 金贵, 邓祥征, 张倩, 等. 武汉城市圈国土空间综合功能分区[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 541-552.  
Jin G, Deng X Z, Zhang Q, et al. Comprehensive function zoning of national land space for Wuhan metropolitan region [J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 541-552.
- [7] 刘春芳, 李鹏杰, 刘立程, 等. 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, 2020, 36(17): 254-263.  
Liu C F, Li P J, Liu L C, et al. Ecological restoration zoning of provincial territorial space in the ecologically fragile areas of northwest China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17): 254-263.
- [8] 叶菁, 谢巧巧, 谭宁焱. 基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 262-271.  
Ye J, Xie Q Q, Tan N Y. National land spatial pattern distribution method based on ecological carrying capacity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 262-271.
- [9] 马世发, 劳春华, 江海燕. 基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟: 以粤港澳大湾区为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3441-3448.  
Ma S F, Lao C H, Jiang H Y. Ecological restoration zoning of territorial space based on the pattern simulation of eco-security scenario: a case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3441-3448.
- [10] 王林艳, 夏敏, 邹伟. 耦合生态服务供需的县域农业空间生态保护修复分区: 以宜兴市为例[J]. 自然资源学报, 2024, 39(4): 858-877.  
Wang L Y, Xia M, Zou W. Ecological conservation and restoration zoning of county-level agricultural spatial ecology coupled with ecological service supply and demand: a case study of Yixing [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(4): 858-877.
- [11] 曾晨, 程轶皎, 吕天宇. 基于生态系统健康的国土空间生态修复分区: 以长江中游城市群为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3118-3135.  
Zeng C, Cheng Y J, Lyu T Y. Research on land-space

- ecological restoration zoning based on ecosystem health: a case study of the urban agglomeration in the middle reaches along the Yangtze River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12):3118-3135.
- [12] Liu C L, Li W L, Xu J, et al. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: a literature review and bibliometric analysis [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137:108734.
- [13] 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):2403-2417.
- Wang P, Zhao W. Ecological restoration zoning of territorial space in typical karst region: a case study of Maotiao River Basin in Guizhou [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(9):2403-2417.
- [14] Cong Z X, Yang S, Zhu B K, et al. Identification of key ecological restoration areas based on ecological security patterns and territorial spatial ecological restoration zoning: a case study of the middle and lower reaches of the Yellow River in China[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2025, 84:126793.
- [15] 虞涵, 吴映梅, 李琛, 等. 滇中高原山地城市群土地利用及生境质量的时空演变与多情景模拟[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(10):2842-2852.
- Yu H, Wu Y M, Li C, et al. Spatial and temporal evolution and multi-scenario modeling of land use and habitat quality in highland mountainous urban agglomeration of central Yunnan, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(10):2842-2852.
- [16] 陈俏雄, 陈国平, 赵俊三, 等. 滇中城市群生态“韧性—风险”安全状态等级构建与分区[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3):241-250, 269.
- Chen Q X, Chen G P, Zhao J S, et al. Construction and zoning of ecological ‘resilience-risk’ safety status classification in the Central Yunnan Urban Agglomeration [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3):241-250, 269.
- [17] 冉玉菊, 雷冬梅, 刘林, 等. 滇中城市群2000—2020年土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4):310-322.
- Ran Y J, Lei D M, Liu L, et al. Impact of land use change on ecosystem service value in urban agglomeration of central Yunnan Province during 2000—2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4):310-322.
- [18] 范峻恺, 徐建刚. 基于神经网络综合建模的区域城市群发展脆弱性评价: 以滇中城市群为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(12):2875-2887.
- Fan J K, Xu J G. Vulnerability assessment of urban agglomeration based on neural network model: a case study of Central Yunnan Urban Agglomeration[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(12):2875-2887.
- [19] 谢余初, 张素欣, 林冰, 等. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1):217-229.
- Xie Y C, Zhang S X, Lin B, et al. Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1):217-229.
- [20] 周璟, 王宏卫, 谈波, 等. 开都河流域生态安全格局构建与生态修复分区识别[J]. *生态学报*, 2022, 42(24):10127-10137.
- Zhou J, Wang H W, Tan B, et al. Construction of ecological security pattern and identification of ecological rehabilitation zones in Kaidu River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(24):10127-10137.
- [21] 高丽萍, 雷冬梅, 莫金宵, 等. 基于PSR模型和景观格局指数的滇池流域生态系统健康评价[J]. *环境科学导刊*, 2023, 42(4):84-90.
- Gao L P, Lei D M, Mo J X, et al. Ecosystem health assessment of the Dianchi Lake Basin based on PSR model and landscape pattern indexes [J]. *Environmental Science Survey*, 2023, 42(4):84-90.
- [22] 翟香, 兰安军, 廖艳梅, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域定量识别: 以贵州省为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6):322-329, 343.
- Zhai X, Lan A J, Liao Y M, et al. Quantitative identification of key areas of land space ecological restoration based on the ecological security pattern: a case study of Guizhou Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6):322-329, 343.
- [23] Yang R L, Bai Z K, Shi Z Y. Linking morphological spatial pattern analysis and circuit theory to identify ecological security pattern in the Loess Plateau: Taking Shuozhou City as an example [J]. *Land*, 2021, 10(9):907.
- [24] 刘林, 雷冬梅, 冉玉菊, 等. 基于生态系统服务功能的滇池流域关键性生态用地识别[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11):277-284.
- Liu L, Lei D M, Ran Y J, et al. Identification of critical ecological land in Dianchi Watershed based on the perspective of ecosystem service function [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11):277-284.
- [25] 韩灵新, 王雨春, 包宇飞, 等. 基于PSR模型的长江流域生态系统健康评价[J]. *环境科学学报*, 2025, 45(5):503-514.
- Han L X, Wang Y C, Bao Y F, et al. Assessment of ecosystem health of the Yangtze River basin based on the pressure-state-response model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025, 45(5):503-514.