

# 云南省生态环境质量与生态修复区识别

杨雪<sup>1</sup>, 李益敏<sup>1,2</sup>, 赵娟珍<sup>3</sup>, 蒋文学<sup>1</sup>, 李媛婷<sup>3</sup>

(1.云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500; 2.云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心, 云南 昆明 650500; 3.云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** [目的] 分析云南省生态环境时空变化, 识别生态修复优先序, 为该省低碳的可持续发展提供科学依据。[方法] 基于遥感生态指数(RSEI)研究生态环境质量时空变化及空间相关性, 与区域生态系统碳储量及生态保护红线结合识别云南省生态修复优先序。[结果] ①22 a 间云南省 RSEI 均值呈 S 形变化趋势, 分别以 2005 年和 2011 年作为上升和下降的拐点。②2000—2022 年空间上生态环境质量均表现为“西高东低”的态势, 西部地区生态环境质量较好, 而中部城市群及东部喀斯特地区生态环境质量较差。③2000—2005 年受退耕还林政策的影响生态环境质量变好。2005—2011 年则因旱灾和建设用地的剧烈扩张导致生态环境质量大幅下降。2011—2016 年是旱灾后恢复时段, 除中部城市化快速发展地区外, 其他地区生态环境质量在逐渐恢复。2016—2022 年受国家政策的影响, 生态环境质量进一步变好。④云南省生态环境质量在空间上表现出明显的空间全局与局部自相关。⑤2000—2022 年云南省碳储量呈先增加后减少的趋势, 22 a 间总碳储量减少  $2.38 \times 10^7$  t, 在空间上总体表现为“南北高, 中间低”的地带性分布特征。⑥云南省生态修复极优先区主要分布在北部及东部地区, 约占总面积的 18.08%, 生态修复优先区及中等优先区则分布较为广泛, 约占总面积的 70.17%。生态修复一般优先区主要位于普洱市等地, 约占总面积的 11.76%。[结论] 云南省 2000—2022 年生态环境质量在时空上均呈现一定规律, 在此基础上进行生态修复区划分, 因地制宜地治理生态环境, 推进云南省生态及低碳的可持续发展。

**关键词:** 遥感生态指数; 生态环境质量; 生态修复区; 云南省

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2024)02-0277-14

**中图分类号:** X87, X171.1

**文献参数:** 杨雪, 李益敏, 赵娟珍, 等. 云南省生态环境质量与生态修复区识别[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 277-290. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20231024.002; Yang Xue, Li Yimin, Zhao Juanzhen, et al. Ecological environmental quality and identification of ecological restoration areas in Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 277-290.

## Ecological Environmental Quality and Identification of Ecological Restoration Areas in Yunnan Province

Yang Xue<sup>1</sup>, Li Yimin<sup>1,2</sup>, Zhao Juanzhen<sup>3</sup>, Jiang Wenxue<sup>1</sup>, Li Yuanting<sup>3</sup>

(1.School of Geosciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China; 2.Yunnan Provincial University Domestic High Score Satellite Remote Sensing Geological Engineering Research Center, Kunming, Yunnan 650500, China; 3.Institute of International Rivers and Ecological Security, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** [Objective] The temporal and spatial changes of ecological environment quality in Yunnan Province were analyzed, and ecological restoration priorities were identified to provide scientific basis for the low-carbon sustainable development of the province. [Methods] The spatio-temporal change and spatial correlation of ecological environment quality in Yunnan Province were determined based on remote sensing environmental indicators (RSEI), and the priority of ecological restoration in Yunnan Province was identified by combining these results with regional ecosystem carbon reserves and an ecological protection red line. [Results] ① The average value of RSEI in Yunnan Province showed an S-shaped trend over the past 22 years, with 2005 and

收稿日期: 2023-02-27

修回日期: 2023-04-27

资助项目: 云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目“天空地协同的高山峡谷区重大地质灾害隐患识别监测预警研究”(2019FY003017); 国家自然科学基金项目(41161070); 云南省中老孟缅自然资源遥感监测国际联合实验室项目(202303AP140015); 云南大学大湄公河次区域气候变化研究省创新团队(2019HC027)

第一作者: 杨雪(1999—), 女(汉族), 云南省临沧市人, 硕士研究生, 研究方向为自然资源与生态环境遥感。Email: 1282484195@qq.com。

通信作者: 李益敏(1965—), 女(汉族), 云南省昆明市人, 本科, 研究员, 主要从事自然资源与山地遥感研究。Email: 648119611@qq.com。

2011 being the inflection points of increasing and decreasing RSEI, respectively. ② From 2000 to 2022, the spatial eco-environmental quality was characterized as “high in the west and low in the east”. The ecological environmental quality in the western region was good, while the ecological environmental quality in the central urban agglomeration and the eastern karst region was poor. ③ From 2000 to 2005, the ecological environmental quality became better under the influence of the policy of returning farmland to forests. From 2005 to 2011, the ecological environmental quality decreased significantly due to drought and the drastic expansion of construction land. 2011—2016 was a period of recovery after drought. Except for the areas with rapid urbanization in Central China, the ecological environmental quality in other areas gradually recovered. Due to the influence of national policies from 2016 to 2022, the ecological environmental quality was further improved. ④ The ecological environmental quality of Yunnan Province showed obvious spatial global and local autocorrelation; ⑤ The carbon reserves of Yunnan Province initially increased and then decreased from 2000 to 2022, and the total carbon reserves decreased by  $2.38 \times 10^7$  t in 22 years. Carbon reserves showed a zonal distribution characterized as “high in the north and south, and low in the central region”. ⑥ The high priority areas for ecological restoration in Yunnan Province were mainly located in the north and east, accounting for about 18.08% of the total area, while the priority and the medium priority areas for ecological restoration were more widely distributed, accounting for about 70.17% of the total area. The general priority areas for ecological restoration were mainly located in Pu'er City and other places, accounting for about 11.76% of the total area. [Conclusion] The ecological environmental quality of Yunnan Province exhibited distinct patterns in time and space from 2000 to 2022. Based on these results, the ecological restoration area should be divided, and the ecological environment should be controlled according to local conditions in order to promote ecological and sustainable low-carbon development in Yunnan Province.

**Keywords:** remote sensing environmental indicators (RSEI); ecological environmental quality; ecological restoration area; Yunnan Province

云南省是中国重要的生态安全屏障区,在中国“一带一路”倡议中被赋予“生态文明排头兵”的战略定位。在“绿水青山就是金山银山”的理念及碳中和背景下,云南省生态环境保护任务更加凸显,平衡社会经济发展和环境保护已成为该省发展过程中的一个重要问题。因此,开展云南省生态环境质量与生态修复区识别研究具有极其重要的理论和现实意义。随着遥感技术的快速发展,凭借其实时、快速地获取多时段、大范围地表信息的优势在各研究领域得到广泛使用。国内外对于区域生态环境质量的评价有部分采用单一指标评价法<sup>[1-2]</sup>,但单一指标评价法不能准确描述复杂多样的生态环境。关于生态环境的监测和评价愈来愈受到重视,许多专家学者相继提出各种基于多指标的研究方法,主要以“压力—状态—响应”PSR模型<sup>[3-4]</sup>、“生态环境状况指数”EI模型<sup>[5]</sup>及遥感生态指数(RSEI)模型等为代表。PSR模型能够揭示空间尺度较小领域内的人类活动与自然环境间的关系,但对于大尺度综合评价困难较大,而EI指数由于指标权重设置问题,一定程度上会导致评价误差。RSEI自2013年徐涵秋等<sup>[6]</sup>提出以来,以其客观,现势性好,便于大尺度综合评价等优势被普遍用

于区域生态环境质量的动态监测与评价过程中<sup>[7-9]</sup>。鉴于此,本研究借助RSEI指数对云南省生态环境质量时空变化进行研究。此外,当前区域生态环境质量评价单元较为单一,缺乏对区域生态系统特点的综合考虑,本研究考虑到云南省地形以山地高原为主,选取小流域为评价单元以更好地反映其完整的生态环境质量单元和生态系统单元。

国土空间生态修复是实现生态文明建设的重要举措,对于生态保护及修复优先区的识别研究,目前大多通过构建生态安全格局<sup>[10]</sup>或根据生态系统服务功能<sup>[11]</sup>来进行划分。生态修复区识别研究逐渐重视生态系统的完整性,但在研究过程中往往会对国土空间的系统性综合认知受限<sup>[12]</sup>,从而导致过度考虑生态空间修复的综合性而忽略其主要修复目的。此外,现有研究在进行生态修复区识别过程中较少考虑将国家宏观政策与自然因素耦合,同时针对生态修复区识别的主要目的与识别方法较为模糊<sup>[13]</sup>,导致生态保护与修复成效较差。因此,本研究综合考虑云南省生态保护与“双碳”目标,通过集成生态环境质量与碳储量,系统地识别生态修复优先区,使其能够满足云南省实现生态文明建设排头兵目标的同时,又可以促进碳中和目标的达成。碳储量作为生态系统服务的

重要功能,是区域进行生态保护与修复的一个重要指标。目前碳储量评估方法大致分为传统的估算法与模型法,模型法因操作简便,需求数据量少,研究效率高优势被广泛使用,其中 InVEST 模型是较为重要的碳储量评估模型<sup>[14-15]</sup>。因此,本研究利用 2000—2022 年的 MODIS 系列遥感图像反演 5 个时段的生态环境指标,利用主成分分析法构建 RSEI 指数,并以小流域为评价单元,对云南省近 2000—2022 年的生态环境质量进行分析,同时基于碳储量的时空分布讨论云南省生态修复优先序,为未来区域生态及低碳的可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

云南省位于东经 97°31′—106°11′,北纬 21°8′—29°15′,国土面积约  $3.94 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,地势西北高、东南低。该省属亚热带、热带高原季风气候,干湿季节较为分明,夏季受印度洋西南季风和太平洋东南季风的影响,气候多变,湿润多雨,冬季则干燥少雨。云南省是中国自然资源丰富的省份之一,生物多样性丰富,素有“生物多样性绿洲”之称。“十四五”期间,云南省将争当绿色低碳循环发展排头兵作为战略目标,把碳达峰、碳中和纳入经济发展和生态文明建设整体布局。该省作为中国西南地区重要的生态安全屏障,在维护国家生态安全、履行保护全球生物多样性及实现碳中和任务中具有十分重要的作用<sup>[16]</sup>。

### 1.2 数据源与预处理

本研究使用的数据主要包括遥感数据、土地利用数据及碳库数据,主要有:①遥感数据。选取 2000—2022 年共 5 期(2000,2005,2011,2016 和 2022 年)的 MODIS 系列遥感图像为数据源(具体数据产品详见表 1),为保证数据的完整性及研究结果的可靠性,故选取研究区范围内无云且处于植被生长期<sup>[17]</sup>的遥感影像,均来自美国航空航天局 NASA 官方遥感数据网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。该数据使用 ENVI 软件进行预处理,将投影转换为 WGS84 坐标系后,根据研究区矢量数据对其进行拼接和裁剪,并对研究区较大水体及西北部积雪/冰川进行掩膜;高程数据则来源于地理空间数据云官网([www.gscloud.cn](http://www.gscloud.cn))提供的 SRTM(shuttle radar topography mission)数字高程模型。②土地利用数据。使用中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)提供的云南省 2000—2022 年 5 期的土地利用数据,人工目视解译总体精度均在 95%以上,该数据集包含了 6 种一级地类(建

设用地、未利用地、林地、水域、耕地、草地),均采用 WGS84 坐标系。③碳库数据。InVEST 模型的碳储量(Carbon)模块主要考虑各土地利用类型的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度和死亡有机物碳密度,不同地类的碳密度主要通过参考文献中的实测数据,优先选择与研究区相同或自然资源相似的文献,主要参考孙兴齐等<sup>[18]</sup>的香格里拉研究结果、李俊等<sup>[19]</sup>的昆明市碳密度估算结果,以及 2010 年中国陆地生态系统碳密度数据集,并采用 Alam 等<sup>[20]</sup>研究的降水因素修正公式和 Giardina 等<sup>[21]</sup>的碳密度与气温的关系模型进行修正,修正公式为:

$$C_{SP} = 3.3968 \times MAP + 3996.1 \quad (1)$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{(0.0054 \times MAP)} \quad (2)$$

$$C_{BT} = 28 \times MAT + 398 \quad (3)$$

式中:MAP 为年均降雨量;MAT 为年平均温度; $C_{SP}$ , $C_{BP}$ 为根据年均降雨量修正后的土壤碳密度和生物量碳密度; $C_{BT}$ 为根据年平均温度修正得到的生物量碳密度。

$$K_{BP} = \frac{C_{BP}^1}{C_{BP}^2} \quad (4)$$

$$K_{BT} = \frac{C_{BT}^2}{C_{BT}^1} \quad (5)$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} \quad (6)$$

$$K_S = \frac{C_{SP}^1}{C_{SP}^2} \quad (7)$$

式中: $K_{BP}$ , $K_{BT}$ 分别为生物量碳密度年均降水因子与年均温度因子修正系数; $C^1$ , $C^2$ 为碳密度待修正地区和碳密度已知地区根据年均降水量与年平均温度计算得到的数据; $K_B$ , $K_S$ 分别为生物量碳密度修正系数与土壤碳密度修正系数。根据云南省气象厅发布的水资源公报(<http://wcb.yn.gov.cn/>)与气候公报(<http://yn.cma.gov.cn/>),得到云南省、香格里拉、昆明市的平均降雨量分别为 1180.3,997.3 和 939.5 mm;平均温度分别为 17.4 °C,13.9 °C,15.3 °C。最终得到云南省土地利用类型碳密度数据库(表 2)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 RSEI 指数的构建

##### (1) 分量指标计算。

① 绿度指标(NDVI)。本研究采用归一化植被指数表示绿度指标。NDVI 是表示植物生长状况和绿色生物量的重要指标,与植物生物量、叶面积指数、植被覆盖度密切相关<sup>[22]</sup>。可直接从植被指数数据 MOD13A1 数据中获取,其表达式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}) \quad (8)$$

式中： $\rho_{\text{NIR}}$ 、 $\rho_{\text{RED}}$  分别表示各影像所对应的近红外波段和红外波段的反射率。

② 湿度指标 (WET)。湿度指标可以通过缨帽变换获取,能够较好地反映植被和土壤湿度<sup>[23]</sup>。可通过 MOD09A1 数据反演得到,具体计算公式为:

$$\begin{aligned} \text{WET} = & 0.114 7\rho_1 + 0.248 9\rho_2 + 0.240 8\rho_3 + \\ & 0.313 2\rho_4 - 0.312 2\rho_5 - \\ & 0.641 6\rho_6 - 0.508 7\rho_7 \end{aligned} \quad (9)$$

式中： $\rho_i$  ( $i=1,2,3\cdots 7$ ) 为 MODIS09A1 各地表反射率波段。

表 1 研究指标及 MODIS 数据产品

Table 1 Research indicators and MODIS data products

| 指标    | 产品      | 空间分辨率/m | 时间分辨率/d | 数据时相              |
|-------|---------|---------|---------|-------------------|
| NDVI  | MOD13A1 | 500     | 16      | 20000305—20220218 |
| LST   | MOD11A2 | 1 000   | 8       | 20000321—20220306 |
| WET   | MOD09A1 | 500     | 8       | 20000313—20220218 |
| NDBSI |         |         |         |                   |

注:NDVI(绿色指标),LST(热度指标),WET(湿度指标),NDBSI(干度指标)。

表 2 云南省不同土地利用类型的碳密度

Table 2 Carbon density of different land use types in Yunnan Province

| 土地利用类型 | kg/m <sup>2</sup> |       |       |          |
|--------|-------------------|-------|-------|----------|
|        | 地上碳密度             | 地下碳密度 | 土壤碳密度 | 死亡有机物碳密度 |
| 耕地     | 2.56              | 4.03  | 2.53  | 0        |
| 林地     | 17.02             | 11.14 | 7.31  | 0.13     |
| 草地     | 8.16              | 4.45  | 5.21  | 0.05     |
| 水域     | 0.26              | 0     | 0     | 0        |
| 建设用地   | 0.16              | 0     | 0.27  | 0        |
| 未利用地   | 0.08              | 0     | 0.23  | 0        |

③ 干度指标 (NDBSI)。建筑用地和裸土能够表示地表的“干化”情况<sup>[24]</sup>,因此使用建筑指数 (IBI) 和裸土指数 (SI) 来综合构建干度指标,可通过 MOD09A1 数据反演得到,计算公式为:

$$\text{NDSI} = (\text{SI} + \text{IBI}) / 2 \quad (10)$$

$$\text{SI} = \frac{(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{Red}} - (\rho_{\text{Blue}} + \rho_{\text{NIR}}))}{(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{Red}}) + (\rho_{\text{Blue}} + \rho_{\text{NIR}})} \quad (11)$$

$$\text{IBI} = \left\{ 2\rho_{\text{SWIR1}} / (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) - \left[ \rho_{\text{NIR}} / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}) + \rho_{\text{Green}} / (\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR1}}) \right] \right\} / \left\{ 2\rho_{\text{SWIR1}} / (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) + \left[ \rho_{\text{NIR}} / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}) / \rho_{\text{Green}} / (\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR1}}) \right] \right\} \quad (12)$$

式中： $\rho_{\text{Red}}$ 、 $\rho_{\text{Blue}}$ 、 $\rho_{\text{SWIR1}}$ 、 $\rho_{\text{Green}}$ 、 $\rho_{\text{NIR}}$  分别对应红、蓝、短波红外 1、绿、近红外波段的反射率。

④ 热度指标 (LST)。本研究采用地表温度来表示热度指标,在研究区范围内对区域生态环境在总体上起到负向作用,可使用地表温度数据 MOD11A2 反演得到,表达式如下:

$$\text{LST} = 0.02 \times \text{DN} - 273.15 \quad (13)$$

式中:DN 为陆地地表温度的灰度值。

(2) 综合指数的构建。本研究拟构建的遥感生态指数 RSEI 是由上述 4 个生态指标通过主成分分析

法耦合生成。主成分分析法是将多个特征分量集中到少数几个主成分上,从而实现降维并隔离噪声的效果,最大的优点是指标的权重不是人为确定,而是根据各指标对第一主成分  $\text{PC}_1$  的贡献度自动确定<sup>[25]</sup>。研究表明, $\text{PC}_1$  包含了各变量最大信息量<sup>[17]</sup>,且  $\text{PC}_1$  中前两个波段(绿度、湿度)载荷值为正,后两个波段(干度、热度)载荷值为负,与现实情况相符。因此,本研究以  $\text{PC}_1$  作为 RSEI 的信息来源,一定程度上保证了研究结果的客观性和合理性。

在进行主成分变换之前,由于各指标量纲不同,需要对 4 个生态指标进行标准化处理,使分指标数值范围固定在 0~1 之间,具体计算公式为:

$$\text{NI} = (I - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \quad (14)$$

式中:NI 为处理后的标准值; $I_{\text{max}}$ 、 $I_{\text{min}}$  分别为该指标的最大值和最小值; $I$  为该指标的数值大小。

对各指标标准化处理后,在 ENVI 软件中进行主成分分析,利用  $\text{PC}_1$  构建初始生态指数  $\text{MRSEI}_0$ ,计算公式为:

$$\text{RSEI}_0 = \text{PC}_1 [f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDSI})] \quad (15)$$

随后,为便于对不同年份的 RSEI 指数进行比较,需将  $\text{RSEI}_0$  进行标准化处理至 0~1 之间,得到最终的 RSEI,其值越大表示生态环境质量越好。

(3) 评价单元选取。目前,对于生态环境质量的评价大多以栅格<sup>[26]</sup>、县域或乡镇<sup>[27]</sup> 为单元,考虑到云南省山地地形地貌及生态系统特征<sup>[28]</sup>,小流域更能反映一个生态环境质量的系统性和完整性。因此本文选取小流域为评价单元,利用 ArcGIS 中的水文分析模块,将研究区划分为 1 081 个不同面积的小流域单元,计算小流域单元上的 RSEI 值,开展云南省生态环境质量与动态变化研究。

1.3.2 空间自相关分析 生态环境质量的空间相关

性分析可以用来描述和研究区域内生态环境的空间同质性分布<sup>[29]</sup>,它是检验一个空间单元的生态环境质量与其相邻空间的生态环境质量是否相关的一个重要指标。本研究在 ArcMap 上将 RSEI 数据与 1 081 个小流域链接,得到每个小流域单元上的 RSEI 值,后基于小流域尺度进行生态环境质量的空间关联性分析。采用全局自相关 (Moran's  $I$ )、局部空间自相关 (Anselin local Moran's  $I$ ) 来分析 RSEI 的空间相关性,分析过程均在 ArcGIS 软件中进行。

1.3.3 基于 InVEST 模型的碳储量计算 基于 InVEST 模型的碳储量 (carbon) 模块是使用土地利用/覆盖类型栅格数据,以及在 4 个碳库 (地上生物量、地下生物量、土壤、死亡有机物) 中的碳储量来估算<sup>[30]</sup>,以此得到某一时段某一区域内碳的净储量。计算原理是根据不同土地利用类型地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡有机碳库的碳密度,并与相应的地类面积相乘,即可得到研究区的总碳储量  $C_{tot}$ <sup>[31]</sup>,计算公式为<sup>[32]</sup>:

$$C_i = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead} \quad (16)$$

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n (C_i \times S_i) \quad (17)$$

式中:  $C_i$  为第  $i$  种土地利用类型的碳密度;  $C_{i-above}$ ,  $C_{i-below}$ ,  $C_{i-soil}$ ,  $C_{i-dead}$  分别为第  $i$  种土地利用类型的地上、地下、土壤及死亡有机物碳密度;  $C_{tot}$  为区域内总碳储量;  $S_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积;  $n$  为总的土地利用类型数量。

## 2 结果与分析

### 2.1 云南省生态环境质量综合评价

绿色度、湿度、热度及干度等生态指标能够反映生态环境质量状况。图 1 为云南省 2000—2022 年 5 个时期 4 个生态指标以及 RSEI 的变化情况。由图 1 可知,RSEI 呈 S 形变化趋势,分别以 2005 和 2011 年作为上升及下降的拐点;绿色度指标的变化趋势与 RSEI 相似;湿度指标以 2011 年为拐点,呈先下降后上升的变化趋势;干度指标变化趋势与 RSEI 及绿色度指标的变化趋势相反;热度指标以 2011 年及 2016 年为拐点,呈上升—下降—上升的趋势。

由云南省各行政区的 RSEI 箱型图 (图 2) 可以看出,2000—2022 年保山市、普洱市、临沧市、西双版纳州、德宏州、怒江州、迪庆州的生态环境质量高于研究区平均水平;昆明市、曲靖市、玉溪市、昭通市、丽江市、楚雄州、红河州、文山州、大理州的生态环境质量低于研究区平均水平。其中,生态环境质量最好的是德宏州和西双版纳州,德宏州位于大盈江—瑞丽江水源涵养生态保护区,受西南季风影响,常年雨量充沛,

森林资源丰富,西双版纳州雨热充沛,热带雨林自然保护区众多;生态环境质量最差的是曲靖市,其次为昭通市,据云南省统计年鉴 (<http://stats.yn.gov.cn/tjsj/tjnj/>),昭通市与曲靖市人口密度分别居全省第 2 和第 3,且森林覆盖度低。2020 年曲靖市森林覆盖率仅为 44.27%,居全省倒数第 1,2020 年昭通市森林覆盖率仅为 47.20%,居全省倒数第 3。从时间上看 (图 2),RSEI 值 2000—2005 年波动最大,2016—2022 年波动最小,总体上年均生态环境质量呈上升—下降—上升的趋势。从遥感影像来看,2000 年植被覆盖率较低,多为裸地或耕地而导致生态环境质量较差,低于平均水平;2005 年则因退耕还林、植树造林工程使生态环境质量好于 2000 年,并高于平均水平;2011 年受建设用地扩张及 2009—2011 年连旱的影响,生态环境质量低于平均水平;而 2016 年及 2022 年生态环境质量较好,高于平均水平,主要归功于国家对生态保护力度的加大。

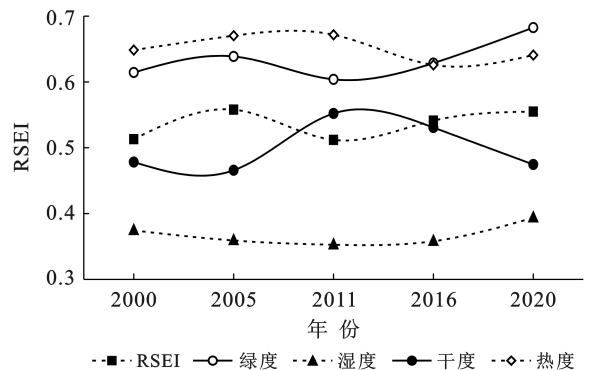


图 1 云南省生态指标及 RSEI 变化趋势

Fig.1 Ecological indicators and RSEI trend of Yunnan Province

### 2.2 云南省生态环境质量分级及动态变化分析

2.2.1 生态环境质量分级 对研究区生态环境质量的时空变化进行深入分析,参考相关学者的研究<sup>[33-34]</sup>,将 RSEI 根据最大值与最小值分为 5 个等级,分别为:优 ( $>0.6753$ )、良 ( $0.5476 \sim 0.6753$ )、中等 ( $0.4199 \sim 0.5476$ )、较差 ( $0.2922 \sim 0.4199$ )、差 ( $<0.2922$ )。该部分以 1 081 个小流域为评价单元进行分析。如表 3 所示,2000—2016 年云南省生态环境质量以“良”、“中等”及“较差”等级为主,2022 年以“良”和“中等”等级为主。2000 年云南省内有 348 个小流域 (32.19%) RSEI 高于平均水平 (“优”、“良”等级),2005 年有 484 个 (44.78%),2011 年有 378 个 (34.97%),2016 年有 470 个 (43.48%),2022 年有 564 个 (52.17%),总体呈增加—减少—增加的变化趋势,与 RSEI 均值的变化趋势相似。

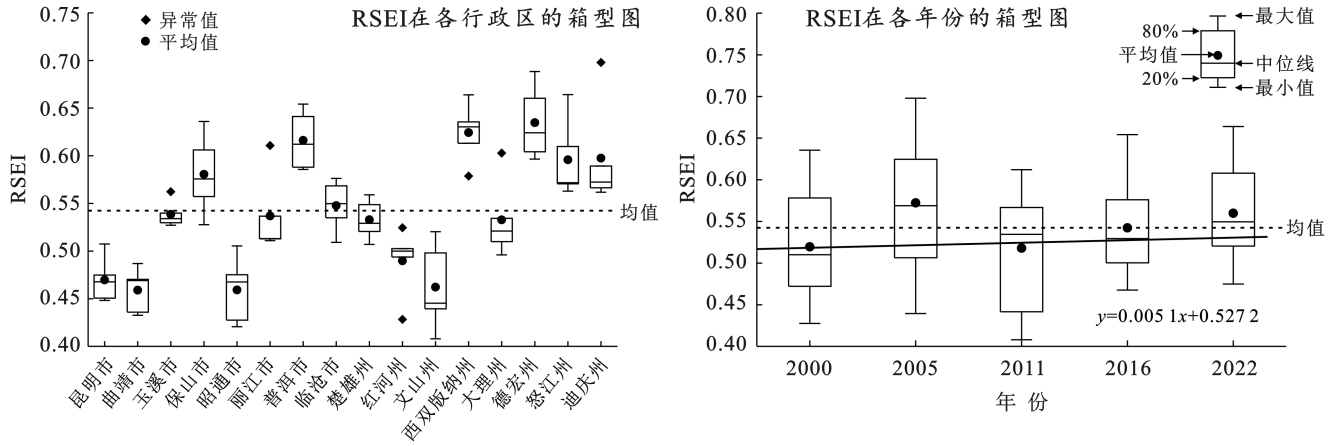


图 2 RSEI 在云南省各行政区和各年份的箱型图

Fig.2 RSEI box plot by borough, and year of Yunnan Province

表 3 云南省 2000—2022 年 RSEI 等级及其比例

Table 3 RSEI rate and percentage in Yunnan Province in 2000—2022

| RSEI 等级 | 优     |      | 良     |       | 中等    |       | 较差    |       | 差     |      |
|---------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|         | 小流域/个 | 比例/% | 小流域/个 | 比例/%  | 小流域/个 | 比例/%  | 小流域/个 | 比例/%  | 小流域/个 | 比例/% |
| 2000 年  | 35    | 3.24 | 313   | 28.95 | 555   | 51.34 | 173   | 16.00 | 5     | 0.46 |
| 2005 年  | 87    | 8.05 | 397   | 36.73 | 465   | 43.02 | 120   | 11.10 | 12    | 1.11 |
| 2011 年  | 30    | 2.78 | 348   | 32.19 | 462   | 42.74 | 212   | 19.61 | 29    | 2.68 |
| 2016 年  | 69    | 6.38 | 401   | 37.10 | 480   | 44.40 | 126   | 11.66 | 5     | 0.46 |
| 2022 年  | 93    | 8.60 | 471   | 43.57 | 395   | 36.54 | 105   | 9.71  | 17    | 1.57 |

图 3 统计了 2000—2022 年云南省 5 个年份 RSEI 等级的空间分布情况,其中,积雪/冰川区单独剔除不参与分析。云南省 5 个年份的生态环境质量总体表现出“西高东低”的态势,西南部生态环境质量相对较好,西北部自然保护区众多,植被茂密,但一定程度上受积雪及永久冻土的影响导致生态环境质量分析结果偏低;东北部是云南省人口密集区,也是低植被覆盖区,生态环境质量较差;东南部是典型的喀斯特地区,生态环境质量也较差。2000 年总体生态环境质量较差,2002 年中国“退耕还林”工程政策实施,2005 年生态环境质量显著变好,特别是研究区中部及北部地区,但东南部喀斯特地区治理效果不显著,有少量区域生态环境变差;2009—2011 年中国西南地区遭遇百年一遇的特大旱灾,东南部喀斯特地区生态脆弱,旱灾进一步加剧生态环境恶化,同时,干旱引起的高温使西北部高海拔地区植被覆盖度下降,大面积土地裸露,生态环境质量变差,加之 2005—2011 年是云南省城市化与经济发展的关键阶段,城市化率从 2005 年的 27.17% 增长到 36.8%,年均增长 1.6%,建设用地显著扩张,从 2005 年的 2 164.676 km<sup>2</sup> 增长到 3 076.786 km<sup>2</sup>,导致中部城市群的生态环境质量较 2005 年急剧下降;2016 年生态环境质量在灾后逐渐恢复,南部及东南部地区恢复效果最为明显,但中部地区建设用地扩张显著,经济与人口快速发展,

生态环境质量进一步恶化;近年,国家对生态保护力度加大,围绕“山水林田湖草沙”系统治理思路,开展生态综合治理,成效显著,2022 年生态环境质量进一步提高,其中,云南中部及东北部地区在国家筑牢长江上游生态安全屏障的大背景下,积极调整人口、经济发展与生态环境之间的关系,生态环境质量显著变好,同时,云南省对于西南部喀斯特地区生态保护力度加大,生态保护成效明显。

2.2.2 生态环境质量动态变化分析 基于 2000, 2005, 2011, 2016 和 2022 年的 RSEI 水平分类结果,得到云南省不同时期的 RSEI 时空变化结果(表 4, 图 4)。可以看出,2000—2005 年受生态保护政策的影响生态环境质量大幅变好,变好和不变的区域分别占研究区总面积的 23.02% 和 70.11%,生态环境变好区域主要位于迪庆州、丽江市、大理州、保山市、德宏州、临沧市、楚雄州、昆明市、曲靖市、昭通市,生态环境变差区域主要位于西双版纳州、文山州、红河州。2005—2011 年受旱灾及建设用地快速扩张的影响,较大面积区域生态环境质量变差,占研究区总面积的 23.06%,主要位于丽江市、迪庆州、大理州、保山市、西双版纳州、红河州、文山州、昆明市、曲靖市、昭通市。2011—2016 年为旱灾后恢复时段,有 26.60% 的区域生态环境质量变好,生态环境质量未发生变化的区域约占研究区总面积的 69.06%,而大理州、楚雄

州、昆明市、曲靖市、玉溪市部分区域受人口与经济影响导致生态环境质量变差,怒江州北部可能因积雪/冰川部分融化使得裸土裸露而导致生态环境质量部分变差。2016—2022 年生态环境质量在保持稳定的同时变好,生态环境质量保持不变的区域占研究区总面积的 76.58%,约 17.17%的区域生态环境质量变好。

2000—2022 年生态环境质量变化以 2005 年及

2011 年为拐点,前期生态环境质量变好主要得益于“植树造林”“退耕还林”工程的实施,林地无论在数量还是在质量上得到显著提升,对生态环境有一定的促进作用;中期由于受全省范围内严重旱灾及建设用地快速扩张的影响,生态环境质量大幅下降;后期灾后生态环境的恢复过程,以及新一轮“退耕还林”的推进,国家生态文明建设对生态保护力度的加强,使得生态环境质量逐渐变好。

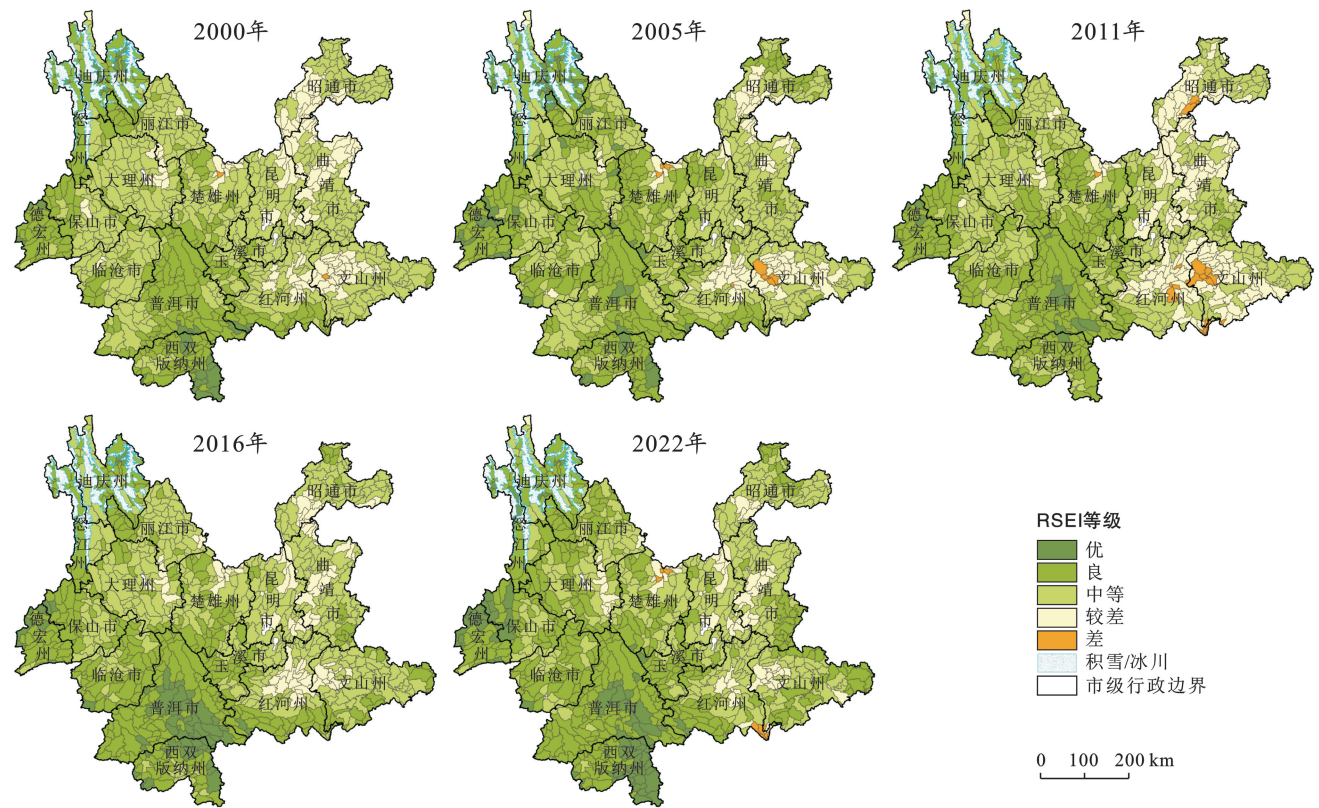


图 3 云南省 2000—2022 年 RSEI 等级分布

Fig.3 RSEI grade distribution in Yunnan Province from 2000 to 2022

表 4 云南省 2000—2022 年 5 个时段 RSEI 变化面积比例

Table 4 Percentage of RSEI changes in five periods from 2000 to 2022 of Yunnan Province

| 项目 | 不同年份 RSEI 变化/% |           |           |           |
|----|----------------|-----------|-----------|-----------|
|    | 2000—2005      | 2005—2011 | 2011—2016 | 2016—2022 |
| 变好 | 23.02          | 6.41      | 26.20     | 17.71     |
| 不变 | 70.11          | 70.53     | 69.06     | 76.58     |
| 变差 | 6.87           | 23.06     | 4.73      | 5.71      |

### 2.3 云南省生态环境质量空间关联性分析

为了分析生态环境质量的空间关联性,以小流域为评价单元,从全局自相关性来看,云南省 2000—2022 年 RSEI 空间 Moran's  $I$  值均分别为 0.723 8, 0.680 8, 0.705 6, 0.678 2 和 0.702 3,说明云南省 RSEI 在空间分布上呈现出一定的聚集现象。LISA

集聚图(图 5)显示,RSEI 高一高集聚区域主要分布在生态环境质量较好的德宏州、普洱市、西双版纳州。低—低集聚区域则主要分布在昭通市、曲靖市、昆明市、楚雄州、红河州及文山州。2005 年之前主要分布在东北部,2000—2011 年低—低集聚区由东北部向南部扩张,2016 年开始低—低集聚区范围逐渐缩小。云南省生态环境质量的空间分布与土地利用方式及人类活动密切相关,RSEI 高值集聚区与生态环境质量较好地区对应,显著低值区与生态环境质量相对较差的区域对应,云南中部及东部城市群城镇化水平较高,人口密度大,建设用地多,国土空间开发强度大导致生态用地较为破碎,东南部则为喀斯特地貌区,植被覆盖度低。RSEI 集聚不显著的区域位于云南省中部,与生态环境质量处于中等水平的区域对应。

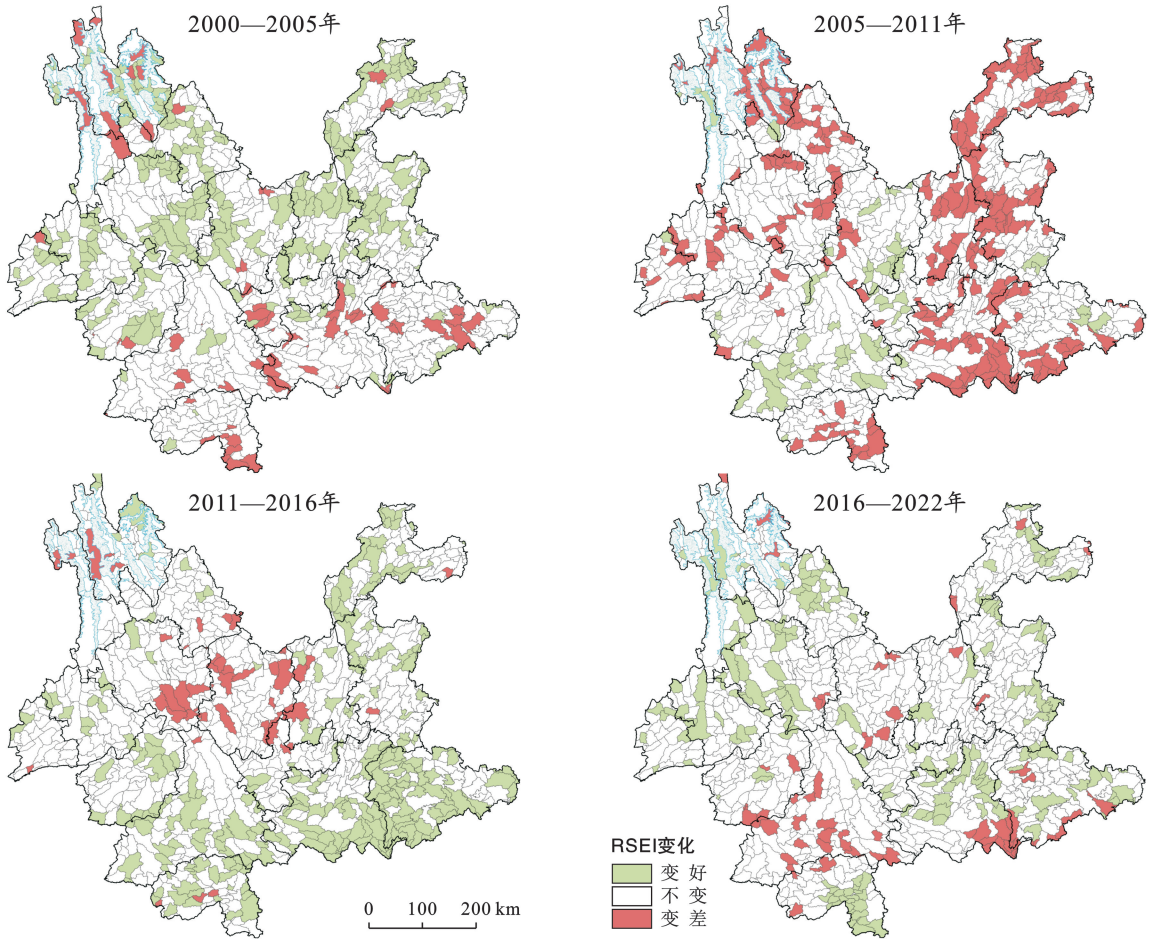


图 4 云南省 2000—2022 年 RSEI 变化

Fig.4 RSEI change in Yunnan Province from 2000 to 2022

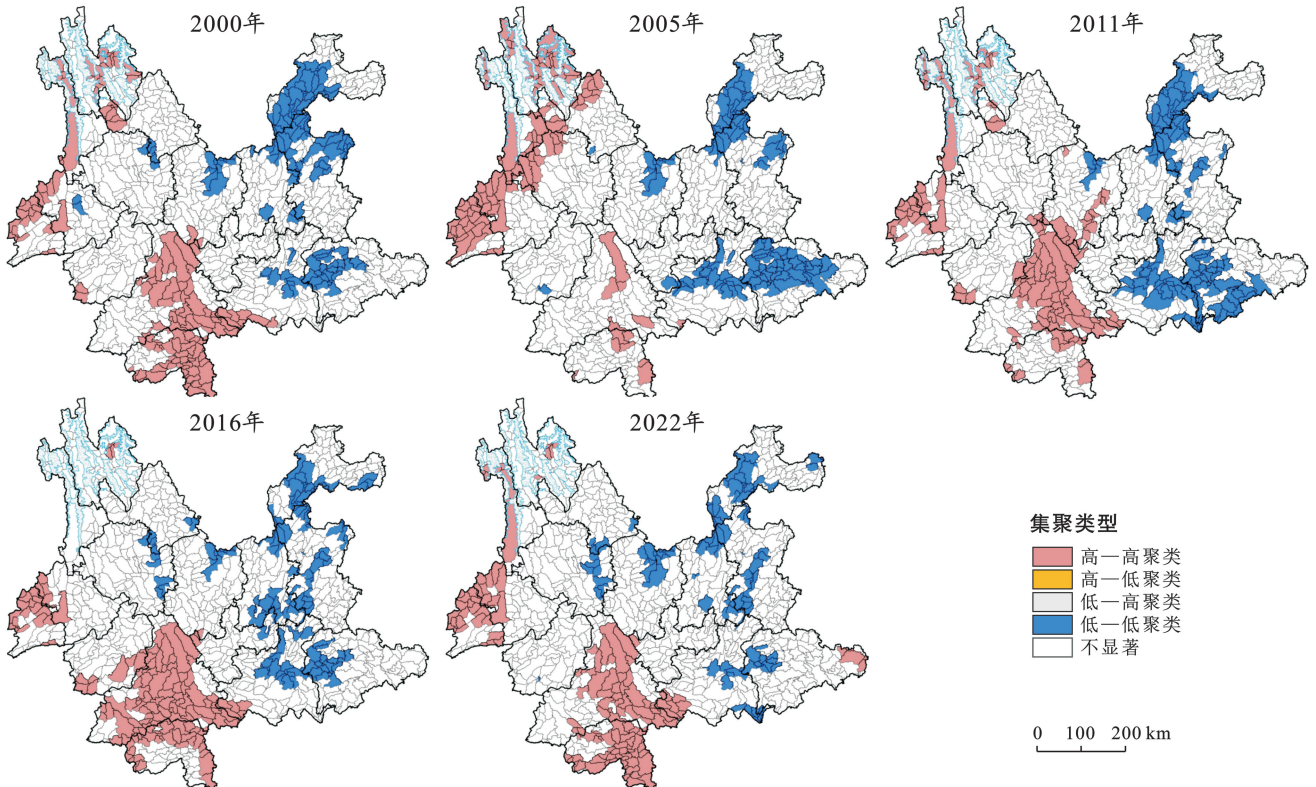


图 5 云南省 2000—2022 年 RSEI 的 LISA 集聚图

Fig.5 LISA agglomeration map of RSEI in Yunnan Province from 2000 to 2022

## 2.4 云南省生态修复优先序识别

2.4.1 生态系统碳储量时空变化特征 利用 InVEST模型中的 Carbon 模块分别计算得到云南省 2000, 2005, 2011, 2016 和 2022 年的碳储量数据。云南省 2000—2022 年 5 个时期的总碳储量分别为  $9.988 \times 10^9$  t,  $9.988 \times 10^9$  t,  $10.011 \times 10^9$  t,  $9.997 \times 10^9$  t 和  $9.964 \times 10^9$  t, 呈先增加后减少的趋势, 22 a 间总碳储量减少  $2.380 \times 10^7$  t。将原始碳储量数据按小流域单元进行平均值提取后, 进行等间距划分为 5 个等级, 得到各年的碳储量时空分布特征(图 6)。云南省生态系统碳储量在空间上表现为“南北高中间低”

的地带性分布特征。具体表现为云南省西北部、西南部地区碳储量最高。西北部地区虽受高海拔极端气候的影响, 但城市化水平较低, 土地利用开发程度小, 加之高黎贡山与碧罗雪山自然保护区内森林覆盖率高, 生物量丰富, 地下生物碳密度较高, 西南部地区则森林资源丰富, 植被质量高, 降水充足, 水热条件较好, 固碳能力突出, 地上及地下生物碳密度较高。中部地区包括昆明市南部、曲靖市中部、玉溪市东北部, 以及昭通市南部地区碳储量最低。这些地区由于城市化水平较高, 人口密集而对建设用地需求较高, 因此固碳能力弱。

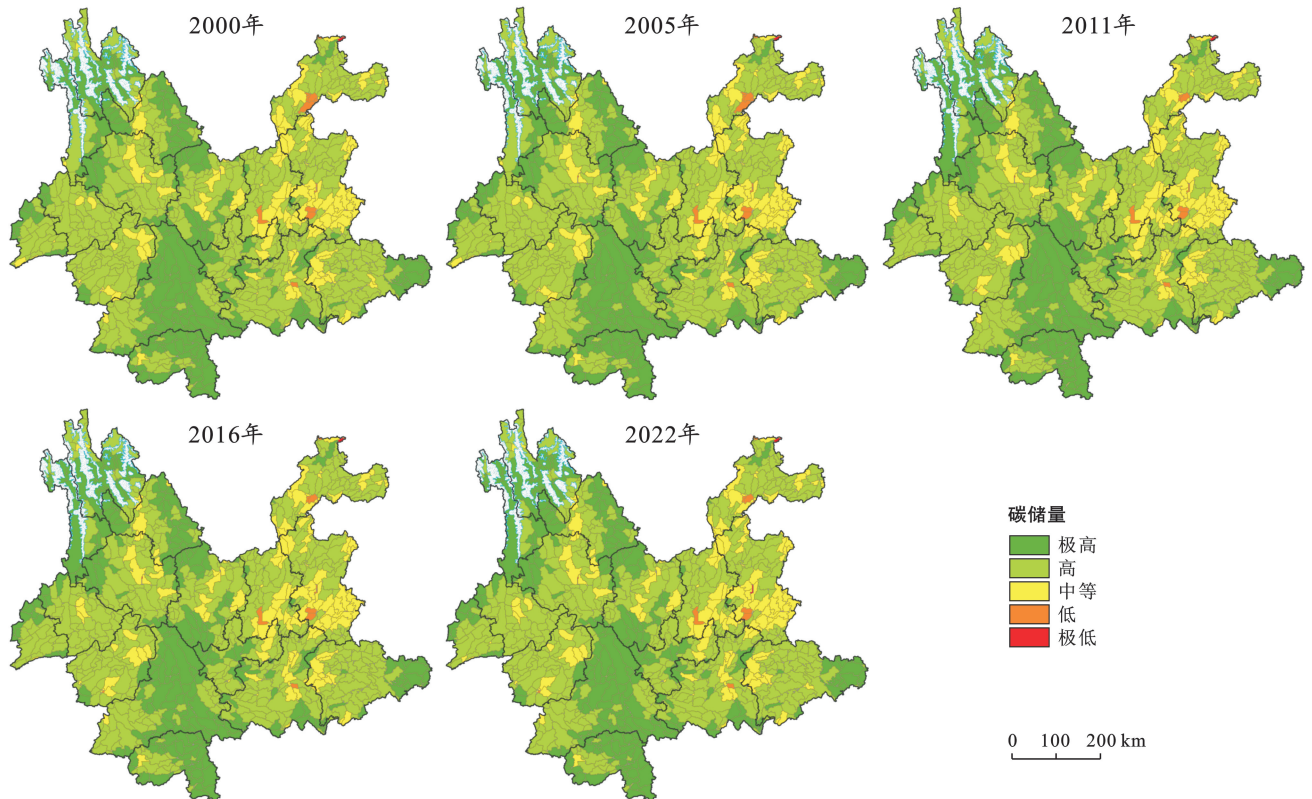


图 6 云南省生态系统碳储量时空分布

Fig.6 Spatial and temporal distribution of ecosystem carbon storage in Yunnan Province

2.4.2 云南省生态修复优先序识别 基于 RSEI 与碳储量等级, 结合云南省生态保护红线, 将生态修复优先序划分为: 极优先、优先、中等优先和一般优先 4 个层次<sup>[32, 35]</sup>, 具体分类标准如表 5 所示。

2022 年云南省生态修复优先序识别结果如图 7 所示。由图 7 可以看出: ①迪庆州、怒江州、丽江市、大理州、楚雄州、昆明市、玉溪市、曲靖市、昭通市、红河州、文山州的部分地区作为生态修复极优先区。面积为  $6.71 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 约占总面积的 18.08%。其中, 中部(昆明市、曲靖市、楚雄州、玉溪市)生态修复极优先区主要受城市化的影响, 人为高强度的土地利用开

发加剧了生态系统的敏感程度, 应严格控制建设用地开发强度与开发规模, 尽可能提高土地利用集约性, 科学进行国土空间开发工作; 东南部(文山州、红河州)生态修复极优先区位于云南省东南部喀斯特地带, 属珠江上游及喀斯特地带水土保持生态红线内, 石漠化土地分布面积广, 水土流失严重, 应积极实施退耕还林、植树造林工程, 保护生态用地完整, 禁止人为的开发性活动, 提高林草资源质量及丰富度; 西部(大理州)生态修复极优先区位于高原湖泊及牛栏江上游水源涵养生态保护区, 应促进高原湖泊流域经济社会发展全面绿色转型, 推进高原湖泊面山及流域

林草生态修复治理;西北部(怒江州、迪庆州、丽江市)生态修复极优先区属青藏高原南缘滇西北高山峡谷生态屏障区,已建有多个自然保护区与国家公园,该区域应严格控制人类活动,加强构建以国家公园为主体,自然保护区为基础的自然保护地管理体系;东北部(昭通市)生态修复极优先区位于金沙江下游一小江流域水土流失控制区,森林覆盖率低,人口密度大,应对该区域开展修建梯田、封山育林、植树种草等措施有效改善生态质量。②生态修复优先区及中等优先区在研究区内广泛分布。面积为  $2.61 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占总面积的 70.17%。其中,临沧市、普洱市、红河州、文山州生态修复优先区及中等优先区属水土保持生态保护区,该地区应加强保护水土资源,以充分发挥水土资源的生态效益、经济效益和社会效益;中部(昆明市、玉溪市、楚雄州、曲靖市)生态修复优先及中等优先区涉及了高原湖泊水源涵养生态保护红线、水土保持生态保护红线,滇中地区集中了云南省主要的人口和 GDP,是省内经济发展的重要引擎,该区域应坚持生态保护优先,以自然生态安全为底线,根据不同区域自然条件差异优化调控生态保护与经济发展之间的关系;南部(西双版纳州)生态修复优先及中等优先区属南部边境热带森林生态屏障区,常年高温高湿,森林资源丰富,生态环境质量较好,应以生态保护为主,提高生态工程实施的空间潜力,筑牢生态安全屏障;西部(德宏州、保山市)生态修复优先及中等优先区属大盈江—瑞丽江水源涵养生态保护红线内,具有较强的水源涵养功能,生态环境质量较好,德宏州为云南省生态环境质量最优的州市,州内的云南铜壁关省级自然保护区是中国唯一属于伊洛瓦底江水系流域的保护区,也是中国水热条件最优越的区域,应提高和巩固该区域的主导生态服务功能,推动生态环境保护体系不断健全完善;西北部(怒江州、迪庆州)生态修复优先及中等优先区位于三江并流世界遗产地腹地,森林覆盖率达 77% 以上,是该省海拔最高的地区,常年冰雪覆盖,作为云南省生物多样性热点地区之一,应在保护区深入践行“冰天雪地也是金山银山”的管理理念,全力守护西北部高原生物基因库。③生态修复一般优先区主要位于研究区南部的普洱市,面积为  $4.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占总面积的 11.76%。该地区属澜沧江中山峡谷水土保持生态保护区、哀牢山—无量山山地生物多样性维护与水土保持生态屏障区,以中山河谷地貌为主,降水丰富,具有较强的水土保持功能,应把保护水土资源、植被资源及生物资源作为该区域生态保护的主要任务。

表 5 云南省生态修复优先序划分标准

Table 5 Ecological protection prioritization criteria in Yunnan Province

| RESI 等级 | 碳储量等级 | 是否于生态红线内 | 生态修复优先序   |
|---------|-------|----------|-----------|
| 优       | 极高    | 是/否      | 中等优先/一般优先 |
|         | 高     | 是/否      | 中等优先/一般优先 |
|         | 中等    | 是/否      | 优先/中等优先   |
|         | 低     | 是/否      | 极优先/优先    |
|         | 极低    | 是/否      | 极优先/优先    |
| 良       | 极高    | 是/否      | 中等优先/一般优先 |
|         | 高     | 是/否      | 优先/中等优先   |
|         | 中等    | 是/否      | 极优先/优先    |
|         | 低     | 是/否      | 极优先/优先    |
|         | 极低    | —        | 极优先       |
| 中等      | 极高    | 是/否      | 优先/中等优先   |
|         | 高     | 是/否      | 极优先/优先    |
|         | 中等    | 是/否      | 极优先/优先    |
|         | 低     | —        | 极优先       |
|         | 极低    | —        | 极优先       |
| 较差      | 极高    | 是/否      | 极优先/优先    |
|         | 高     | 是/否      | 极优先/优先    |
|         | 中等    | —        | 极优先       |
|         | 低     | —        | 极优先       |
|         | 极低    | —        | 极优先       |
| 差       | 极高    | 是/否      | 极优先/优先    |
|         | 高     | —        | 极优先       |
|         | 中等    | —        | 极优先       |
|         | 低     | —        | 极优先       |
|         | 极低    | —        | 极优先       |

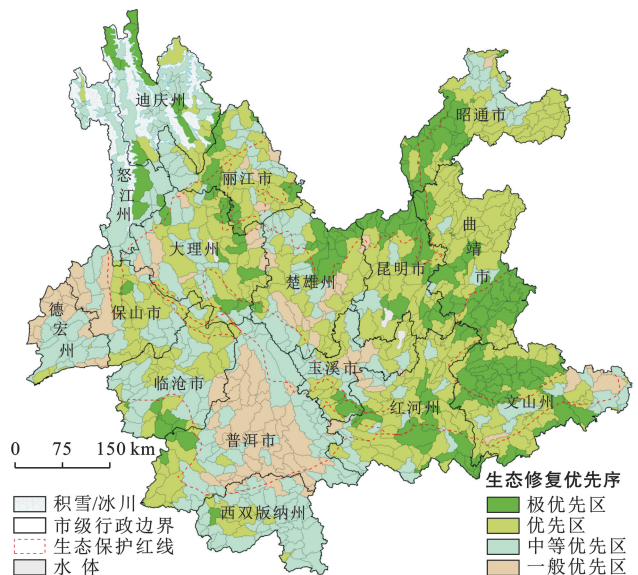


图 7 云南省 2022 年生态修复优先序识别

Fig.7 Identification of priority ecological protection areas in Yunnan Province in 2022

## 3 讨论

### 3.1 研究结果准确性检验

本研究结果表明,云南省生态环境质量于2000—2022年表现为S形波动上升趋势,这与农兰萍等<sup>[36]</sup>对于滇中生态环境质量的研究结果基本一致,说明研究区整体生态环境质量变好,这与云南省生态安全研究相符<sup>[37]</sup>。此外,云南省森林面积2000年为 $1.29 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,2005年 $1.50 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,2011年为 $1.82 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,呈逐渐上升趋势,但由于2010年云南省特大旱灾导致植被长势、密度受影响而2011年绿度指标大幅下降,这与文中绿度指标和研究区生态环境质量变化趋势相吻合。

### 3.2 优势与不足

遥感生态指数作为评价区域生态环境质量的主要手段,其中的4个生态因子均能通过遥感技术直接获取,保证了研究结果的现势性。同时,RSEI是利用主成分分析法将各指标进行耦合,保证了计算结果的客观性及稳定性。目前对于生态环境质量评价单元大多以栅格、县域或乡镇为主,考虑到云南省境内地形以山地高原居多,小流域更能反映一个完整的生态环境质量单元和生态系统单元,因此,本文在后续研究过程中均采用小流域单元来进行。

云南省作为中国西南地区重要的生态安全屏障,是实现“碳中和”目标的“主力军”,但对于云南省生态修复关键区识别的研究较少,如覃彬桂等等<sup>[38]</sup>基于生态安全格局理论,识别出昆明市的生态夹点与生态障碍点作为生态修复关键区;陈相标等<sup>[39]</sup>通过构建生态安全格局对滇中五大高原湖泊流域的生态保护修复关键区进行识别。可见,目前云南省生态修复区识别研究的主要问题在于识别方法单一,缺乏大范围区域生态修复区的综合识别。本研究则充分考虑了云南省生态文明建设的两大重要目标——即实现生态环境质量保护与“双碳”目标,将陆地生态系统碳储量与区域生态环境质量结合,同时在参考生态保护红线的基础上,识别云南省生态修复优先序,相较于传统的基于生态安全格局或生态系统服务功能的生态修复区识别方法,这一研究将国家宏观政策与区域自然条件相耦合,更加具有针对性,为后续生态保护与修复区识别研究提供新思路。

本文尚存在不足之处。首先,MODIS遥感图像数据会受云量的影响导致数据缺失,研究过程中尽可能选取无影像缺失的数据作为数据源,故不能保证各年份的原始数据时相完全一致,一定程度上可能会影响数据的可比性;其次,使用绿度、湿度、干度、热度

4个生态指标构建生态指数,忽略了社会经济因素对生态环境质量的影响,在后续研究中可加入GDP和人口等指标对生态环境质量进行综合评价。此外,使用InVEST模型计算碳储量存在一定的局限性,生态系统碳储量受多种因素的影响,InVEST模型仅将土地利用作为计算碳储量的唯一要素,忽略了其他条件的影响,且忽略了碳密度年际变化和区域差异带来的影响,未来研究可考虑使用气候、地形、水文等因素修正碳密度数据,根据不同年份、不同地区的自然条件对各年份碳密度数据进行更新,下一步条件成熟后还可考虑将岩溶碳库纳入陆地生态系统碳储量计算中。

## 4 结论

(1) 云南省2000—2022年RSEI均值呈S形趋势变化,分别以2005和2011年作为上升及下降的拐点。空间上5a的生态环境质量基本表现为“西高东低”的态势,西南部与西部地区生态环境质量较好,西北部受积雪和永久冻土的影响导致生态环境质量评价结果偏低,中部城市群及东部喀斯特地区则生态环境质量较差。

(2) 2000—2005年受生态保护政策的影响生态环境质量大幅变好,2005—2011年受旱灾及建设用地快速扩张的影响,较大面积区域生态环境质量变差,2011—2016年为旱灾后恢复时段,有26.60%的区域生态环境质量变好,部分区域受人口与经济的影响导致生态环境质量变差,2016—2022年生态环境质量在保持稳定的同时变好。

(3) 云南省2000—2022年RSEI存在明显的空间全局自相关性,在局部空间上则存在聚类特征,其中,RSEI高一高集聚区主要分布在西南部、西部地区,低一低集聚区则主要分布在中部及东部地区。

(4) 云南省2000—2022年5个时期的碳储量分别为 $9.988 \times 10^9$  t, $9.988 \times 10^9$  t, $10.011 \times 10^9$  t, $9.997 \times 10^9$  t和 $9.964 \times 10^9$  t,呈先增加后减少的趋势,22a间减少了 $2.380 \times 10^7$  t。在空间上表现为“南北高中间低”的地带性分布特征,其中,西北部、西南部地区碳储量最高,中部城市化水平较高,碳储量也最低。

(5) 云南省生态修复极优先区、优先区及中等优先区、一般优先区约占总面积的18.08%,70.17%,11.76%。生态修复极优先区位于迪庆州、怒江州、丽江市、大理州、楚雄州、昆明市、玉溪市、曲靖市、昭通市、红河州、文山州的部分地区,优先区和中等优先区在研究区内广泛分布,一般优先区则主要位于普洱市等地区。

## 参考文献 (References)

- [1] Li Yurui, Cao Zhi, Long Hualou, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us sandy land, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142:697-715.
- [2] 徐勇, 郑志威, 郭振东, 等. 2000—2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 [J]. *环境科学*, 2022, 43(7):3730-3740.
- Xu Yong, Zheng Zhiwei, Guo Zhendong, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7):3730-3740.
- [3] 张国兴, 王涵. 基于 PSR 模型的黄河流域中心城市水生态文明建设评价 [J]. *生态经济*, 2022, 38(2): 211-216, 222.
- Zhang Guoxing, Wang Han. Evaluation of water ecological civilization construction in central cities of the Yellow River Basin based on PSR model [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(2):211-216.
- [4] Wang Di, Li Yuman, Yang Xiaodi, et al. Evaluating urban ecological civilization and its obstacle factors based on integrated model of PSR-EVW-TOPSIS: A case study of 13 cities in Jiangsu Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 133:108431.
- [5] 欧阳玲, 马会瑶, 王宗明, 等. 基于遥感与地理信息数据的科尔沁沙地生态环境状况动态评价 [J]. *生态学报*, 2022, 42(14):5906-5921.
- Ouyang Ling, Ma Huiyao, Wang Zongming, et al. Dynamic evaluation of ecological environment in Horqin sandy land based on remote sensing and geographic information data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14):5906-5921.
- [6] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用 [J]. *生态学报*, 2013, 33(24):7853-7862.
- Xu Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [7] 章程焱, 杨少康, 董晓华, 等. 基于 RSEI 指数的长江上游流域生态环境质量时空演变及影响因子研究 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1):356-363.
- Zhang Chengyan, Yang Shaokang, Dong Xiaohua, et al. Research on spatiotemporal evolution and influencing factors of ecological environment quality in the Upper Yangtze River Basin based on RSEI index [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1):356-363.
- [8] 何天星, 田宁, 周锐, 等. 基于 GEE 和 RSEI 的长三角一体化示范区生态环境质量动态评估 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42(2):436-444.
- He Tianxing, Tian Ning, Zhou Rui, et al. Dynamic assessment of eco-environmental quality in Yangtze River delta integration demonstration area based on GEE and RSEI [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(2):436-444.
- [9] 吴小波, 范晓雨, 刘晓敬, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42(3):759-768.
- Wu Xiaobo, Fan Xiaoyu, Liu Xiaojing, et al. Temporal and spatial variations of ecological quality of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on Google Earth Engine cloud platform [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(3):759-768.
- [10] 袁媛, 白中科, 师学义, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复优先区确定: 以河北省遵化市为例 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41(4):750-759.
- Yuan Yuan, Bai Zhongke, Shi Xueyi, et al. Determining priority areas for ecosystem preservation and restoration of territory based on ecological security pattern: A case study in Zunhua City, Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(4):750-759.
- [11] 封志雪, 周键, 杨飞龄, 等. 集成生态系统服务与生物多样性的系统保护规划 [J]. *生态学报*, 2023, 43(2):522-533.
- Feng Zhixue, Zhou Jian, Yang Feiling, et al. Systematic conservation planning by integrating ecosystem services and biodiversity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2):522-533.
- [12] 孙传璋, 王梓辰, 李景刚, 等. 基于生态系统多维特征的粤港澳大湾区国土空间生态保护修复分区研究 [J]. *生态学报*, 2023, 43(5):2061-2073.
- Sun Chuazhun, Wang Zichen, Li Jinggang, et al. Ecological protection and restoration zoning of territorial space in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on multidimensional ecosystem features [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5):2061-2073.
- [13] 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):7056-7067.
- Tu Yue, Liu Min, Gao Chanchan, et al. Construction of ecological sources identification system for metropolitan areas and diagnosis of key areas for ecological restoration in nationally spatial areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17):7056-7067.
- [14] Wang Chaoyue, Li Tingzhen, Guo Xianhua, et al. Plus-InVEST study of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration's land-use change and carbon storage [J]. *Land*, 2022, 11(10):1617.
- [15] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(10):

- 4052-4065.
- Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(10):4052-4065.
- [16] 吕金平,李茜茜.建设人与自然和谐共生的美丽云南[N].*人民政协报*,2022-06-06(1).
- Lu Jinping, Li Xiqian. To build a beautiful Yunnan with harmonious symbiosis between man and nature [N]. *CPPCC Daily*, 2022-06-06 (1).
- [17] 徐涵秋,邓文慧. MRSEI 指数的合理性分析及其与 RSEI 指数的区别[J].*遥感技术与应用*,2022,37(1):1-7.
- Xu Hanqiu, Deng Wenhui. The rationality analysis of MRSEI index and its difference with RSEI index [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37 (1): 1-7.
- [18] 孙兴齐.基于 InVEST 模型的香格里拉市生态系统服务功能评估[D].云南 昆明:云南师范大学,2017.
- Sun Xingqi. Evaluation of ecosystem service function in Shangri-La based on InVEST model [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan Normal University, 2017.
- [19] 李俊,杨德宏,吴锋振,等.基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J].*水土保持通报*,2023,43(1):378-387.
- Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):378-387.
- [20] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. *Journal of Arid Environments*, 2013,89:67-76.
- [21] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000,404(6780):858-861.
- [22] 胡思汉,姚玉增,付建飞,等.基于 RSEI 指数的东北矿区生态质量变化评价:以辽宁弓长岭区为例[J].*生态学杂志*,2021,40(12):4053-4060.
- Hu Sihan, Yao Yuzeng, Fu Jianfei, et al. Evaluation of ecological quality variation in mining area of Northeast China based on RSEI Index: A case study of Gongchangling District, Liaoning Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021,40(12):4053-4060.
- [23] Chen Chao, Fu Jiaoqi, Zhang Shuai, et al. Coastline information extraction based on the tasseled cap transformation of Landsat-8 OLI images [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019,217:281-291.
- [24] 刘栩位,周启刚,周浪,等.基于 RSEI 的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J].*水土保持研究*,2021,28(5):278-286.
- Liu Xuwei, Zhou Qigang, Zhou Lang, et al. RSEI-based dynamic monitoring of ecological quality of the soil and water conservation functional area in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28 (5):278-286.
- [25] 陈勉为,冯丹,张仕凯,等.基于 RSEI 和 ANN-CA-Markov 模型的伊宁市生态环境质量动态监测及预测研究[J].*干旱区地理*,2023,46(6):911-921.
- Chen Mianwei, Feng Dan, Zhang Shikai, et al. Dynamic monitoring and prediction of eco-environmental quality in Yining City based on RSEI and ANN-CA-Markov model [J]. *Arid Land Geography*, 2023,46(6):911-921.
- [26] An Min, Xie Ping, He Weijun, et al. Spatiotemporal change of ecologic environment quality and human interaction factors in Three Gorges ecologic economic corridor, based on RSEI [J]. *Ecological Indicators*, 2022,141:109090.
- [27] Xiong Yuan, Xu Weiheng, Lu Ning, et al. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: A case study in Erhai Lake Basin, Yunnan Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,125:107518.
- [28] 马振刚,李黎黎,杨润田,等.京张区域生态系统健康评价与应对策略[J].*干旱区研究*,2019,36(1):228-236.
- Ma Zhengang, Li Lili, Yang Runtian, et al. Assessment and countermeasures of ecosystem health in the Beijing-Zhangjiakou Area [J]. *Arid Zone Research*, 2019,36(1):228-236.
- [29] Liao Weihua, Jiang Weiguo. Evaluation of the spatio-temporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index [J]. *Remote Sensing*, 2020,12(15):2462.
- [30] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性 & 预测:以广东省为例[J].*中国环境科学*,2022,42(10):4827-4839.
- Lin Tong, Yang Muzhuang, Wu Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model-a case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(10):4827-4839.
- [31] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].*地理学报*,2019,74(3):446-459.
- Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping, et al. As-

- essment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 446-459.
- [32] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1214-1232.  
Wang Tianfu, Gong Zhiwen, Deng Yuanjie. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi Province based on land use change [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1214-1232.
- [33] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 91-97, 294.  
Xu Hanqiu. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(7): 91-97.
- [34] 岳奕帆, 陈国鹏, 王立, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的甘肃舟曲县生态环境质量动态监测与评价[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1608-1614.  
Yue Yifan, Chen Guopeng, Wang Li, et al. Dynamic monitoring and evaluation of ecological environment quality in Zhouqu County, Gansu, China based on Google Earth Engine cloud platform [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1608-1614.
- [35] 吴树荣, 潘换换, 姬倩倩, 等. 基于生态系统服务的山西黄河流域保护优先区识别[J]. *生态学报*, 2022, 42(20): 8126-8137.  
Wu Shurong, Pan Huanhuan, Ji Qianqian, et al. Identification of priority conservation areas in the Yellow River Basin of Shanxi Province based on ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(20): 8126-8137.
- [36] 农兰萍, 王金亮, 玉院和. 基于改进型遥感生态指数 (MRSEI) 模型的滇中地区生态环境质量研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(8): 972-982.  
Nong Lanping, Wang Jinliang, Yu Yuanhe. Research on ecological environment quality in central Yunnan based on MRSEI model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(8): 972-982.
- [37] 施馨雨, 赵筱青, 普军伟, 等. 基于斑块尺度的云南省景观生态安全时空演变及归因[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8087-8098.  
Shi Xinyu, Zhao Xiaqing, Pu Junwei, et al. Spatio-temporal evolution and attribution of Landscape Ecological Security at patch scale in Yunnan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8087-8098.
- [38] 覃彬桂, 林伊琳, 赵俊三, 等. 基于 InVEST 模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(2): 809-820.  
Qin Bingui, Lin Yilin, Zhao Junsan, et al. Identification of key areas for the ecological restoration of territorial space in Kunming based on the InVEST model and circuit theory [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(2): 809-820.
- [39] 陈相标, 丁文荣. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别: 以滇中五大高原湖泊流域为例[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6): 2248-2260.  
Chen Xiangbiao, Ding Wenrong. Identification of key areas for ecological restoration of territorial space based on ecological security pattern: A case of five plateau lake basins in central Yunnan [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(6): 2248-2260.
- Huang Guoping, Zhang Wentai, Chen Jingmei, et al. Influence of rainfall characteristics on runoff and sediment yield in Ili valley [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2021, 56(3): 109-116.
- [22] 周国逸, 闫俊华, 申卫军, 等. 马占相思人工林和果园地表径流规律的对比研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 451-458.  
Zhou Guoyi, Yan Junhua, Shen Weijun, et al. Surface flow in an *Acacia mangium* plantation and an orchard in Heshan, Guangdong Province, China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(4): 451-458.

(上接第 136 页)

- [20] 熊美, 周秋文, 孙荣国. 1951—2021 年贵州气温和降雨变化特征[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2023, 62(6): 22-30.  
Xiong Mei, Zhou Qiuwen, Sun Rongguo. Characteristics of the temperature and rainfall variations in Guizhou during 1951—2021 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2023, 62(6): 22-30.
- [21] 黄国平, 张文太, 陈景梅, 等. 伊犁河谷次降雨特征对坡面产流产沙的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2021, 56(3): 109-116.