#### DOI: 10.20103/j.stxb.202212293695

张廷靖,邵全琴,刘树超,张雄一,宁佳,刘国波,牛丽楠,陈美祺,黄海波.云贵高原生态恢复空间分异及其影响因素.生态学报,2024,44(4): 1374-1388.

Zhang T J, Shao Q Q, Liu S C, Zhang X Y, Ning J, Liu G B, Niu L N, Chen M Q, Huang H B.Spatial differentiation and influencing factors of ecological restoration in the Yunnan-Guizhou Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1374-1388.

# 云贵高原生态恢复空间分异及其影响因素

张廷靖<sup>1,2</sup>,邵全琴<sup>1,2,\*</sup>,刘树超<sup>1,2</sup>,张雄一<sup>1,2</sup>,宁 佳<sup>1</sup>,刘国波<sup>1</sup>,牛丽楠<sup>1,2</sup>,陈美祺<sup>1,2</sup>, 黄海波<sup>1</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室,北京 100101 2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:全面深入评估生态恢复效益并明晰其自然—社会经济驱动机制,对维护区域生态安全、实现可持续发展目标具有重要意 义。然而,在区域尺度量化分析时间序列生态恢复程度及其影响因素的案例研究较少。以云贵高原为研究对象,基于多源遥感 数据,运用模型模拟、时间序列趋势分析等方法,从生态系统宏观结构、质量和服务 3 个层次评估了 2000—2019 年云贵高原地 区的生态恢复效益,使用随机森林方法探究了生态恢复的自然-社会经济影响因素。结果表明:(1)近 20 年云贵高原地区生态 系统宏观结构变化明显,主要表现为森林、草地和聚落生态系统面积的增加,以及农田生态系统面积的减少;(2)生态系统质量 和服务恢复态势总体稳定向好,部分区域转差;(3)云贵高原地区生态系统的恢复程度整体较高。其中,恢复程度中等及以上 的地区占总面积的 35.84%;生态恢复程度有所转差及以下的面积最少,占总面积的 7.54%;(4)地形、气候和土壤等生态本底特 征是云贵高原地区生态恢复最重要的影响因素;在局地尺度,造林面积、人口密度年变化率等人类活动因子对生态恢复具有关 键的作用。未来生态系统管理和生态恢复工程的实施应综合考虑区域生态背景和尺度效应,因地制宜采取恢复措施,以实现生 态与社会经济发展的共赢。

关键词:生态恢复评估;生态系统服务;自然-社会经济影响因素;随机森林

# Spatial differentiation and influencing factors of ecological restoration in the Yunnan-Guizhou Plateau

ZHANG Tingjing<sup>1,2</sup>, SHAO Quanqin<sup>1,2,\*</sup>, LIU Shuchao<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiongyi<sup>1,2</sup>, NING Jia<sup>1</sup>, LIU Guobo<sup>1</sup>, NIU Linan<sup>1,2</sup>, CHEN Meiqi<sup>1,2</sup>, HUANG Haibo<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Yunnan-Guizhou Plateau, located in the ecologically fragile Southwest Karst region, faces urgent ecological and environmental challenges. Its unique topography and landforms have contributed to severe soil erosion, resulting in a highly vulnerable ecosystem and exacerbating the issue of rocky desertification. Furthermore, the Yunnan-Guizhou Plateau plays a critical role as a significant ecological barrier in the southwestern part of China, highlighting its pivotal contribution to the nationwide endeavor to establish a resilient national ecological civilization. It is important to understand the status of ecological environment and ecological restoration benefits in the Yunnan-Guizhou Plateau in the past 20 years. Comprehensively evaluating the ecological restoration benefits and clarifying the natural–socioeconomic driving mechanisms

基金项目:国家社会科学基金重大项目(20&ZD096)

收稿日期:2022-12-29; 网络出版日期:2023-11-27

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shaoqq@.igsnrr.ac.cn

is of great significance in maintaining regional ecological security and achieving sustainable development goals. Nevertheless, there are few case studies on the quantitative analysis of the restoration degree and its influencing factors over a time series at the regional scale. Thus, this study aims to evaluate the ecological restoration benefits of the Yunnan-Guizhou Plateau region from 2000 to 2019 based on multi-source remote sensing data and methods including model simulation and time-series trend analysis. We assessed the ecological restoration benefits on three levels, which are ecosystem macrostructure, ecosystem quality, and ecosystem services. The random forest method was used to explore the natural-socioeconomic influencing factors of ecological restoration. The results showed that: (1) The ecosystems macrostructure changed significantly, as manifested in the increase of forest, grassland and settlement area, as well as in the decrease of farmland area. (2) The restoration tendencies of ecosystem quality and ecosystem services were overall stable and improving, except for some areas that were getting worse. (3) Overall, ecosystem restoration degrees were high. Areas with moderate and above recovery levels accounted for 35.84% of the total area, while areas with worsening and below recovery levels were the least, accounting for 7.54% of the total area. (4) Ecological background characteristics such as topography, climate, and soil properties were the most important factors for ecological restoration. Meanwhile, at the local level, human activities such as afforestation area and population density change rate played a crucial role in ecological restoration. Therefore, regional ecological background and scale effects should be comprehensively considered in ecosystem management and ecological restoration projects. Adopting targeted restoration measures is crucial to achieve win-win situations for ecological and socio-economic development. The research findings can serve as a valuable scientific foundation for the preservation and management of the ecosystem in the Yunnan-Guizhou Plateau.

Key Words: ecological restoration assessment; ecosystem services; natural-socioeconomic influencing factors; random forests

近年来,随着人类活动和全球气候变化的不断加剧,生态环境越来越成为限制我国经济社会可持续发展 的关键因素<sup>[1-3]</sup>。城市化、工业化以及农业集约化的快速发展导致了诸如生物多样性丧失、土地荒漠化、环境 污染等严重的生态问题<sup>[4-5]</sup>。生态恢复作为修复受损生态系统、减轻人类生态足迹和改善生态系统服务的重 要手段之一,已经被广泛应用于全球各个区域的生态环境治理<sup>[6-9]</sup>。为了切实保护生态环境,我国从 20 世纪 90 年代开始,陆续启动实施了天然林资源保护、退耕还林还草等一系列重大生态恢复工程<sup>[10]</sup>。大量研究表 明,我国的生态恢复工程取得了显著成效,整体上有效遏制了生态系统的持续退化,促进了生态系统功能的恢 复和生态系统服务供给能力的持续提升<sup>[11-16]</sup>。然而,有研究表明许多生态恢复工程的成效远不及预期。如 何系统全面地评估生态恢复效益并因地制宜指导区域生态系统管理决策,仍然是相关研究的热点之一<sup>[17-18]</sup>。

到目前为止,国内外学者已从群落<sup>[19-20]</sup>、景观和区域<sup>[21-23]</sup>等多个空间尺度对城市绿地<sup>[24]</sup>、森林<sup>[25]</sup>、沙 漠绿洲<sup>[26]</sup>等不同类型生态系统进行了生态恢复效益的评估。研究主要基于两种评估框架:生态系统综合指 数框架和生态系统服务框架。前者通过整合社会、经济、生态等多层次指标并构建综合指数来实现生态系统 恢复效益的评估,例如生态系统健康指数<sup>[27-28]</sup>、生态脆弱性-风险-恢复力指数<sup>[29-30]</sup>、生态环境质量综合指 数<sup>[31]</sup>皆属于此框架范畴。虽然综合指数方法能较为全面地反映人类-环境系统状态,但由于多源数据时空尺 度差异<sup>[32]</sup>、指标体系不统一<sup>[29]</sup>等因素,研究结果往往尺度较粗,且难以进行比较研究。后者以生态系统服务 为核心,近年来被越来越多地应用于生态恢复评估研究中<sup>[9,33-34]</sup>。目前相关研究主要集中在生态恢复优先 区的识别<sup>[35]</sup>和生态恢复工程对生态系统服务的影响<sup>[36]</sup>等方面,但区域尺度生态恢复效益影响因素的量化研 究较少。明晰区域生态系统的时空演化机制,对于科学构建生态安全格局并最终实现可持续发展目标具有重 要意义<sup>[32,37]</sup>。

云贵高原地处西南喀斯特生态脆弱区,水土流失严重,自然生态环境脆弱特征突出。作为重要的退耕还 林、石漠化综合治理与天然林资源保护工程区,云贵高原生态系统恢复成效的评估具有重要的现实意义<sup>[38]</sup>。 近年来,一些学者在云贵高原生态恢复成效评估方面进行了积极的探索。例如,Guo 等<sup>[39]</sup>基于敏感性—恢复 力—压力框架对 2000—2015 年我国西南喀斯特山区的生态脆弱性进行了综合评估。研究结果表明:研究区 的生态脆弱性呈现先升高后下降的趋势。Zhang 等<sup>[40]</sup>通过构建高质量发展指数评估了云贵高原 2005—2018 年云贵高原社会-生态系统状态的时空分布特征。研究发现,云贵高原高质量发展整体呈现东高西低的空间 格局,演化速度呈现"低速—相对高速"的发展特征。然而,目前缺乏以生态系统服务评估为核心,并综合考 虑生态系统结构、质量和服务的云贵高原生态恢复效益研究。且相关研究往往仅选择单一或少数几个时间节 点,缺乏时间序列的动态分析,这阻碍了对区域生态系统恢复成效的深入认知,影响了生态恢复和管理政策的 实施和调整。

综上所述,本文以云贵高原为研究区,基于生态系统服务研究框架,选取了生态系统宏观结构、生态系统 质量和生态系统服务共3大类、5个一级指标和7个二级指标,采用模型模拟、时间序列趋势分析等方法,对 2000—2019年云贵高原生态恢复程度进行定量评估,最后使用随机森林机器学习算法来揭示生态恢复的自 然-社会经济影响因素。研究的具体目标为:(1)分析云贵高原地区生态系统宏观结构、质量和服务的时空动 态特征;(2)评估云贵高原地区的生态恢复程度;(3)探究云贵高原地区生态恢复的影响因素。研究结果旨在 为云贵高原生态系统保护与恢复以及区域可持续发展决策提供科学依据。

#### 1 研究区与研究方法

#### 1.1 研究区概况

云贵高原地处中国西南部,大致位于东经 100°—111°,北纬 22°—30°之间,是中国四大高原之一。地势 西北高,东南低,海拔一般在 400—3500 m 之间,其间广布山间盆地,大致以乌蒙山为界分为云南高原和贵州 高原两部分。整个区域受纬度、海拔、季风等因素的综合影响,形成四季温差小、干湿分明的高原季风气候。 降水量一般在 600—2000 mm 之间,时空分布不平衡:东西部及南部降水量大,中部及北部降水量少;4—10 月 降水量占全年总降水量的 85%—95%,常发生洪涝灾害;旱季时间长,易出现季节性干旱。年平均气温在 5— 24℃之间,空间分布上呈现出南高北低的趋势。自然条件的差异使得云贵高原植被土壤类型丰富,分布呈现 明显的地带性。为了便于数据收集和分析,本研究选取行政边界作为研究区(包括云南省和贵州省,以下简 称云贵高原地区;图 1),区域总面积约为 57.02 万 km<sup>2</sup>,总人口约为 8400 万人。





Fig.1 Geographic location and spatial distribution of the ecosystem macrostructure in 2020 of the Yunnan-Guizhou Plateau region

# 1.2 主要数据来源

本研究使用的数据主要包括土地利用/覆被数据、气象数据、植被指数数据以及其它遥感和社会经济数据 等。其中,2000年、2010年和2020年共3期土地利用/覆被数据来自国家地球系统科学数据中心(http:// www.geodata.cn/);2000—2019年气象站点观测数据来源于中国气象数据网中国地面气候资料日值数据集 (V3.0;http://data.cma.cn/);2000—2019年1 km 空间分辨率逐月均温、最低温、最高温栅格数据集来源于国 家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/);2000—2019年归一化植被指数(NDVI)数据来自于 MODIS 遥感数据产品中的 MOD13Q1 数据集(https://lpdaac.usgs.gov/),时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m;2000—2019年 NPP 数据来自于 MODIS 遥感数据产品中的 MOD17A3 数据集,时间分辨率为1 a,空间 分辨率为 500 m;中国 1:100 万土壤数据来源于中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/);90 m 空间分辨率地面数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/); 2000—2019 年1 km 空间分辨率 GDP 和人口密度数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc. cn/);1 km 空间分辨率土壤属性数据来源于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)。

1.3 生态系统状况评估指标参数数据获取与验证

参考邵全琴等的研究成果<sup>[41]</sup>,本研究共选取了生态系统宏观结构、生态系统质量、生态系统服务3大类、 5个一级指标、7个二级指标构建了区域生态恢复效益评估指标框架,对2000—2019年云贵高原地区生态恢 复效益进行遥感评估(表1)。

类别	评估指标 Evaluation index			
Category	一级指标 First-level index	二级指标 Second-level index		
生态系统宏观结构 Ecosystem macrostructure	各类生态系统面积	生态系统分类面积		
		变化率		
生态系统质量 Ecosystem quality	植被覆盖度	植被覆盖度		
生态系统服务	净初级生产力	净初级生产力		
Ecosystem services	水源涵养	水源涵养量		
	土壤保持	土壤水蚀模数		
		土壤保持量		

表1 云贵高原地区生态恢复效益遥感评估指标

#### 1.3.1 生态系统宏观结构

基于 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期云贵高原地区土地利用类型数据,根据陆地生态系统宏观结构分类 系统及其与土地利用/土地覆盖分类系统的转换关系<sup>[42]</sup>,将云贵高原地区土地利用数据转化为对应的生态系 统类型数据,空间分辨率为 1 km。

1.3.2 生态系统质量

对 NDVI 数据进行 Savitzky-Golay 滤波,利用像元二分法计算得到植被覆盖度(FVC),采用最大值合成法 生成 2000—2019 年的 FVC 数据集,经重采样生成云贵高原地区 2000—2019 年逐年空间分辨率为 1 km 的 FVC 数据集。

#### 1.3.3 生态系统服务

(1)净初级生产力

植被净初级生产力(NPP)数据来自于 MODIS 遥感数据产品中的 MOD17A3 数据集。该数据集时间分辨 率为1年,空间分辨率为 500 m。经重采样生成云贵高原地区 2000—2019 年逐年1 km 空间分辨率的植被 NPP 数据集。

(2)水源涵养

基于水量平衡原理,本研究综合应用 InVEST 模型及《生态红线划定指南》中的方法估算云贵高原地区的

2000-2019 年逐年水源涵养服务,如式(1)所示:

$$Q_{wr} = P - ET - R = \left(1 - \frac{ET}{P}\right) \times P - u \times P \tag{1}$$

式中, Q<sub>wr</sub> 是水源涵养量(mm); P 是降水量(mm); R 是地表径流量(mm); ET 是实际蒸散量(mm); u 是径流 系数。其中,实际蒸散量(ET)基于参考蒸散量(ET<sub>0</sub>)和不同生态系统类型的蒸散系数通过 InVEST 手册中年 产水量模型的计算方法估算。基于 2000—2019 年逐月均温、最低温、最高温数据,采用 Hargreaves 公式计算 得到 ET<sub>0</sub><sup>[43]</sup>;不同生态系统类型的蒸散系数采用联合国粮农组织不同土地利用类型蒸散系数的参考值;不同 生态系统类型和土壤类型的径流系数采用美国农业部土壤保持局开发的 SCS 水文模型计算<sup>[44]</sup>,并与相似区 域的已有研究进行了对比验证,结果较为一致<sup>[16]</sup>。

(3)土壤保持

本研究采用修正通用水土流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)估算云贵高原地区的 2000—2019 年逐年土壤保持服务, 如式(2) 所示:

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C) \times P \tag{2}$$

式中, *SC* 是土壤保持量; *R* 是降雨侵蚀力因子(MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>); *K* 是土壤可蚀性因子(t h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>); *LS* 是坡长坡度因子; *C* 是植被覆盖因子; *P* 是水土保持措施因子; *LS*、*C*、*P* 无量纲。其中, *R*采用 Wischmeier 和 Smith 提出的经验公式进行计算<sup>[45]</sup>:

$$R = \sum_{i=1}^{12} \left( 1.735 \times 10^{(1.5l_g \frac{p_i^2}{p})} \right)$$
(3)

式中, p 是年降雨量; p<sub>i</sub> 是月降雨量; K 采用侵蚀-土地生产力影响评估(EPIC)模型进行计算,并与已有研究进行了对比验证,结果较为一致<sup>[46]</sup>; LS 采用 InVEST 模型根据 DEM 数据进行计算; C 采用蔡崇法等提出的经验公式基于植被覆盖度进行估算<sup>[47]</sup>。

$$\begin{cases} C = 1 & f = 0 \\ C = 0.6508 - 0.3436 \log f & 0 < f < 78.3 \\ C = 0 & f > 78.3 \end{cases}$$
(4)

式中, f(%)是植被覆盖度。

1.4 生态恢复程度评估

恢复态势为单个评估指标在 2000—2009 年和 2010—2019 年两时段内的连续变化趋势。采用最小二乘 法计算 FVC、NPP、水源涵养、土壤保持和土壤水蚀模数 5 项指标分别在 2000—2009 年、2010—2019 年的逐像 元变化斜率 P(P>0.05 判定为转好,-0.05 ≤ P ≤ 0.05 判定为基本稳定,P<-0.05 判定为转差;土壤水蚀模数 相反;表 2)。

恢复程度为区域生态恢复的综合评价指数。利用 Sen 趋势分析法计算 FVC、NPP、水源涵养、土壤保持 4 项指标在 2000—2019 年的逐像元变化斜率 P,并利用 Mann-Kendall 方法进行显著性检验<sup>[48]</sup>。获得每项指标转好、基本稳定和转差 3 类空间变化趋势,通过叠加分析得到云贵高原地区的生态恢复程度(表 3)。其中, Sen 趋势分析法的具体计算公式如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), 1 \le i \le n, 1 \le j \le n, j > i$$
(5)

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} Sgn \left( X_{j} - X_{k} \right)$$
(6)

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}, & S > 0\\ 0, & S = 0\\ \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}, & S < 0 \end{cases}$$
(7)

#### http://www.ecologica.cn

式中, $\beta$ 为 Sen 趋势度; Median 为中位数函数; S 为检验统计量; Z 为标准化后的检验统计量。与线性回归方 法相比,该方法对数据的分布无要求且对异常值不敏感,可以在一定程度上提高分析结果的准确性<sup>[49]</sup>。

	Table 2 Criteria for determining the restoration tendencies of ecosystem quanty and ecosystem services								
	判别依据		判别结果		判别依据		判别结果		
序号	Judgeme	ent basis	Judgement result	序号	Judgeme	ent basis	Judgement result		
Number	2000—2009 年	2010—2019 年	2000—2019 年 总体变化趋势	Number	2000—2009 年	2010—2019 年	2000—2019 年 总体变化趋势		
1	转好	转好	持续转好	6	转差	转好	先转差后转好		
2	转差	转差	持续转差	7	转差	基本稳定	先转差后稳定		
3	基本稳定	基本稳定	持续稳定	8	基本稳定	转好	先稳定后转好		
4	转好	转差	先转好后转差	9	基本稳定	转差	先稳定后转差		
5	转好	基本稳定	先转好后稳定						

表 2 生态系统质量和生态系统服务恢复态势判断依据

mining the negtonation tendencies of accounter quality and

戶亏	Judgeme	ent basis	Judgement result		Judgeme	ant basis	Judgement result	
Number	2000—2009 年	2010—2019 年	2000—2019 年 总体变化趋势	Number	2000—2009 年	2010—2019 年	2000—2019 年 总体变化趋势	
1	转好	转好	持续转好	6	转差	转好	先转差后转好	
2	转差	转差	持续转差	7	转差	基本稳定	先转差后稳定	
3	基本稳定	基本稳定	持续稳定	8	基本稳定	转好	先稳定后转好	
4	转好	转差	先转好后转差	9	基本稳定	转差	先稳定后转差	
5	转好	基本稳定	先转好后稳定					
			+ ~ ~ ~ +					

表 3 生态恢复程度判断依据 Table 3 Criteria for determining of ecosystem restoration degrees

			8	8	
序号 Number	生态恢复程度 Ecosystem restoration degree	判断条件 Judgement basis	序号 Number	生态恢复程度 Ecosystem restoration degree	判断条件 Judgement basis
1	基本稳定	$S_i \ge 3$	5	恢复程度高	$B_i = 4$
2	有所转差	$W_i = 2$	6	恢复程度较高	$B_i = 3$
3	较明显转差	$W_i = 3$	7	恢复程度中等	$S_i < 3$ and $W_i < 2$ and $B_i = 2$
4	明显转差	$W_i = 4$	8	部分要素恢复部分要素 转差	$S_i < 3$ and $W_i < 2$ and $B_i = 1$

 $W_i$ :转差的指标个数 Worse;  $B_i$ :转好的指标个数 Better;  $S_i$ :基本稳定的指标个数 Steady;  $i \leq 5$ 

# 1.5 生态恢复影响因素分析

本研究综合考虑研究区自然地理特征、社会经济状况和前人的研究成果[50-51],选择了16个潜在自然-社 会经济因子作为预测变量,以生态恢复程度作为分类结果,利用随机森林模型进行生态恢复的影响因素分析 (表4)。分析所使用的变量栅格数据空间分辨率均为1km。随机森林是一种"集成学习"方法,与其他分类 器相比(如神经网络、判别分析等),该方法具有高性能、处理高维数据和防止过度拟合等优势<sup>[52-53]</sup>。其中, 预测变量的相对重要性由去除该变量对预测结果精度的影响程度来反映,具体计算公式为:

$$\operatorname{Im} p(\operatorname{var}_{i}) = \frac{\sum_{j=1}^{n} (\operatorname{errOOB2}_{ij} - \operatorname{errOOB1}_{ij})}{n}$$
(8)

式中, Im  $p(var_i)$  是变量 i 的重要性; errOOB1 "是从分类树 j 中变量 i 的袋外数据计算的误差; errOOB2"是从袋 外数据和变量 i 的噪声干扰计算的误差; n 是分类树的数量,此处设置为 500。

#### 2 结果分析

#### 2.1 生态系统时空变化分析

# 2.1.1 生态系统宏观结构变化分析

森林和农田是云贵高原地区最主要的生态系统类型,约占研究区总面积的94%。2020年,森林生态系统 面积最大,占总面积的67.76%;荒漠生态系统面积最小,仅占0.01%(表5)。在2000—2020年间,云贵高原地 区生态系统宏观结构变化明显,主要表现为森林、草地和聚落生态系统面积的增加,以及农田生态系统面积的 减少。其中,聚落生态系统的增加最为显著。其他生态系统向森林、草地和聚落生态系统的转变是云贵高原 地区主要的生态系统变化类型(图 2)。其中,森林生态系统在贵州省西部、南部和东北部、以及云南省东南部 地区增加最为显著,而在云南省北部和西南部地区则出现了明显的退化;聚落生态系统的增加主要集中在昆明市、贵阳市及周边地区,表明了城市化进程中省会城市的集聚效应。

序号	变量	变量描述	数据来源
Number	Variable	Variable description	Data source
1	PRE_mean	2000—2019 年平均年降水量/mm	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
2	PRE_change	2000—2019 年平均年降水量变化率/%	_
3	TEM_mean	2000—2019 年年平均气温/℃	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
4	TEM_change	2000—2019 年年平均气温变化率/%	—
5	ET_mean	2000—2019 年平均年实际蒸散量/mm	美国国家航空航天局(https://earthdata.nasa.gov/)
6	ET_change	2000—2019 年平均年实际蒸散量变化率/%	—
7	DEM	高程/m	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
8	Slope	坡度/(°)	—
9	TN	土壤总氮含量/(g/kg)	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
10	TP	土壤总磷含量/(g/kg)	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
11	ТК	土壤总钾含量/(g/kg)	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
12	SOC	土壤有机质含量/(g/kg)	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
13	PH	土壤酸碱度	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
14	GDP_change	2000—2019年 GDP 年变化率/%	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
15	Afforestation	2000—2019 年造林面积/km <sup>2</sup>	_
16	POP_change	2000—2019年人口密度年变化率/%	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www. resdc.cn/)

表4 生态恢复影响因素数据来源及说明

Table 4	Data sources and	descriptions	for the	factors	influencing	ecological	restoration
Table 4	Data sources and	ucscriptions.	ior unc	iactor 5	minucineing	ccological	1 cotor ation



图 2 2000—2020 年云贵高原地区生态系统宏观结构变化空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of changes in the ecosystem macrostructure of the Yunnan-Guizhou Plateau region from 2000 to 2020

#### 2.1.2 生态系统质量时空变化

云贵高原地区 2000—2019 年 FVC 整体呈增加趋势,主要集中在贵州省中部、西部和云南省东南部,平均 增长速率为 0.59%/a。其中,贵州省西部 FVC 的增长速率最快,最大值为 4.49%/a。部分地区有所减少,要集 中在云南省东部和北部地区,平均减少速率为-0.44%/a。其中,云南省东部 FVC 的减少速率最快,最小值为 -5.29%/a(图 3)。

# 2.1.3 生态系统服务时空变化

云贵高原地区 2000—2019 年 NPP 的变化特征为:总体稳定增加、局部地区减少。NPP 的增加主要集中 在贵州省西部、云南省东部和西部,平均增长速率为 7.39 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。贵州省西部 NPP 的增长速度最快,最高 可达 32.44 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;NPP 的减少主要集中在云南省南部,平均减少速率为-6.65 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(图 3)。 表 5 2000—2020 年云贵高原地区生态系统面积和变化率

	Table 5	Area and change ra	te in the ecosystem	n of Yunnan-Guizho	ou Plateau region fro	om 2000 to 2020	
年份 Year		农田 Cropland	森林 Forest	草地 Grassland	水体与湿地 Water and wetland	聚落 Settlement	荒漠 Desert
2000	面积/km <sup>2</sup>	156944	396005	31517	2236	942	43
	比重/%	26.71	67.38	5.36	0.38	0.16	0.01
2010	面积/km <sup>2</sup>	156888	390660	35422	2220	2454	42
	比重/%	26.70	66.46	6.03	0.38	0.42	0.01
2020	面积/km <sup>2</sup>	149533	398245	33459	2226	4181	43
	比重/%	25.44	67.76	5.69	0.38	0.71	0.01
2000-2010	面积/km <sup>2</sup>	-56	-5344	3905	-15	1511	-1
	动态度/%	-0.04	-1.35	12.39	-0.68	160.43	-2.02
2010-2020	面积/km <sup>2</sup>	-7354	7584	-1963	6	1726	1
	动态度/%	-4.69	1.94	-5.54	0.25	70.35	2.89
2000-2020	面积/km <sup>2</sup>	-7410	2240	1941	-8	3238	0
	动态度/%	-4.72	0.57	6.16	-0.43	343 64	0.81



图 3 云贵高原地区 2000—2019 年生态系统质量和服务变化速率空间分布图

Fig. 3 Spatial distributions of change rates of ecosystem quality and ecosystem services in Yunnan-Guizhou Plateau region from 2000 to 2019

云贵高原地区 2000—2019 年水源涵养量整体呈减少趋势,部分区域有所增加。减少区域主要集中在云南省、贵州省西部和东北部,平均减少速率为-1.49×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。其中云南省西南部减少最明显,最低可达-4.53×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。增加区域主要集中在云南省东南部、贵州省中部和西北部,平均增加速率为 0.42×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(图 3)。

整体上,云贵高原地区 2000—2019 年土壤保持量呈增加趋势,土壤水蚀模数呈减少趋势,表明土壤保持服务供给能力稳定提升。具体来看,云贵高原地区的土壤保持量年均增加速率为 2.66 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,其中贵州省 西部增加最明显,最高可达 15.14 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;土壤水蚀模数年均减少速率为-1.46 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(图 3)。

2.2 生态系统恢复态势和恢复程度分析

2.2.1 生态系统恢复态势及空间差异

(1)生态系统质量

整体上,云贵高原地区 2000—2019 年 FVC 的恢复态势呈向好的趋势。其中,持续稳定的面积最大,占总 面积的 26.31%;先转差后转好面积最小,占总面积的 2.50%(表 6)。空间分布上,持续转差的区域主要分布 在云南省北部和昆明、贵阳等城市集中分布的地区,持续转好的区域主要分布在云南省东南部和贵州省 (图 4)。

Table 6 Statistics table of the restoration tendencies of ecosystem quality and ecosystem services								
恢复态势 Restoration tendency	FVC 不同恢复态势 的面积占比 Proportion of area for different restoration tendency types of FVC/%	NPP 不同恢复态势 的面积占比 Proportion of area for different restoration tendency types of NPP/%	水源涵养不同恢复 态势的面积占比 Proportion of area for different restoration tendency types of water retention/%	土壤保持不同恢复 态势的面积占比 Proportion of area for different restoration tendency types of soil conservation/%				
持续转好 Continuously improving	22.39	9.35	0.01	0.03				
持续转差 Continuously worsening	2.50	0.02	1.23	0				
持续稳定 Steady	26.31	51.32	74.67	93.87				
先转好后转差 First Improving-and then worsening	8.57	0.16	0.07	0				
先转好后稳定 First improving and then steady	14.75	16.13	0.13	0.53				
先转差后转好 First worsening and then improving	6.57	0.66	0.53	0.06				
先转差后稳定 First worsening and then steady	2.89	1.12	9.19	0.40				
先稳定后转好 First steady and then improving	10.50	20.58	2.48	5.02				
先稳定后转差 First steady and then worsening	5.52	0.66	11.69	0.09				

表 6 生态系统质量和服务恢复态势统计表

FVC:植被覆盖度 Fractional vegetation cover; NPP:净初级生产力 Net primary production

(2) 生态系统服务

云贵高原地区 2000—2019 年 NPP 的恢复态势整体稳定向好。其中,持续稳定的面积最大,占总面积的 51.32%;持续转差面积最小,占总面积的 1.19%;整体转好的面积(包括持续转好、先转好后稳定和先稳定后 转好)占总面积的 46.06%(表 6)。空间分布上,云南省东北部和贵州省西部地区的转好态势最为显著 (图 4)。

云贵高原地区 2000—2019 年水源涵养服务的恢复态势表现为整体稳定,部分区域转差。其中,持续稳定 的面积最大,占总面积的 74.67%;持续转好的面积最小,占总面积的 0.01%;整体转差的面积(包括持续转差、



图 4 云贵高原地区生态系统质量和服务恢复态势空间分布图

Fig.4 Spatial distributions of restoration tendencies of ecosystem quality and ecosystem services in the Yunnan-Guizhou Plateau region

先转差后稳定和先稳定后转差)占总面积的 22.11%(表 6)。空间分布上,云南省西南部的转差态势最为显著(图 4)。

云贵高原地区 2000—2019 年土壤保持服务的恢复态势表现为整体稳定向好。其中,持续稳定的面积最大,占总面积的 93.87%;持续转差的面积为 0;整体转好

的面积占总面积的 5.58%(表 6)。空间分布上,云南省 北部、东部和贵州省的转好态势最为显著;云南省西部 和南部极少部分地区有所转差(图 4)。

# 2.2.2 生态系统恢复程度及空间差异

2000—2019年,云贵高原地区生态系统的恢复程 度整体较高(图5,图6)。恢复程度基本稳定的面积最 大,占总面积的41.83%,主要分布在云南省中西部和贵 州省东部地区;恢复程度中等及以上(包括恢复程度中 等、较高和高)的地区占总面积的35.84%,主要分布在 云南省东北部和西南部、以及贵州省大部分地区,其中 云南省东北部和贵州省西部的生态恢复程度最高;生态 恢复程度有所转差及以下(包括有所转差、较明显转差 和明显转差)的面积最少,占总面积的7.54%,主要分布 在云南省中部、南部和北部以及贵州省中部地区。从石 漠化程度上看,恢复程度有所转差及以下的地区,表





明石漠化综合治理工程实施取得了显著的成效。

2.3 生态恢复的自然-社会经济影响因素

随机森林的分析结果表明,地形、气候和土壤等生 态本底特征是生态恢复最重要的影响因素,自然因子的 影响远大于人类活动因子(图7)。具体来看,多年平均 降水量和多年平均气温对生态恢复的影响最为重要。 其中,多年平均年降水量的相对重要性最高,为45.2%; 多年平均气温次之,为44.2%。多年平均年降水量变化 率和多年 GDP 年均变化率的相对重要性最低,均为 9.8%。这可能是由于 2000—2019 年间研究区降水量 变化较小,且 GDP 变化主要集中在局部城市区域,对区 域整体的影响有限。此外,土壤理化性质、DEM、坡度 等因子都有较高的重要性,是生态恢复中主要的限制因 素。在年均变化相关因子中(包括 GDP、人口、年均气 温、年降水量、年蒸散量和造林面积),造林面积的相对 重要性最高,为21.1%,表明了生态恢复工程对云贵高 原地区生态恢复的重要促进作用;多年人口密度年变化 率次之,为18.5%,表明了人口增长对生态恢复具有不 可忽视的影响。

# 3 讨论

3.1 生态恢复的背景和尺度依赖性

整体上,生态恢复程度由区域生态本底特征决定,



图 6 云贵高原地区生态恢复程度分石漠化程度统计图 Fig.6 Statistical chart of ecosystem restoration degrees categorized by rocky desertification degrees in the Yunnan-Guizhou Plateau region

并受人类活动和气候变化的影响。本研究表明,区域地形、土壤和气候特征是云贵高原地区生态恢复最重要 的影响因素,这与前人在区域尺度的研究结果一致<sup>[54-56]</sup>。云南省西北部生态恢复程度较差,主要是因为该区 域邻近青藏高原,气温和降水是植被生长的关键限制因素。高海拔区域的低温环境减缓了植物光合速率和土 壤的养分释放,缩短了植物的生长季;海拔升高导致降水量减少,影响水的可利用率,抑制植被生长<sup>[57-58]</sup>;另 外,复杂的地形和小气候也加大了生态恢复工程实施的难度。云南省西部和南部也有部分区域的生态系统状 况所有转差,这些地区普遍海拔较低,水热条件优越,生态系统整体状况良好,恢复潜力较低;其次,德宏和西 双版纳是桉树、咖啡豆等经济树种的重要种植区,而在研究期间这些经济树种的采伐和更新可能是导致 NPP 趋于下降的重要原因(图 2)。此外,云南省中部和贵州省中部存在部分明显转差的区域,主要原因是城市化 的发展,建设用地的扩张直接改变了地表下垫面的性质,导致了自然生态空间的减少和多种生态系统服务的 丧失<sup>[59-61]</sup>。贵州省西部生态恢复效果最好,这是因为该地区广泛分布草地生态系统,也是云贵高原石漠化程 度较为严重的区域,具有较高的生态恢复潜力。石漠化综合治理、退耕还林等生态工程的实施使森林面积和 植被覆盖度显著增加,同时也促进了生态系统服务的提升<sup>[62]</sup>。值得一提的是,本研究考虑了不同人类活动因 子对生态恢复的作用。结果显示造林面积的相对重要性略高于社会经济因子,表明在区域尺度上生态工程的 实施可能会削弱甚至抵消人类活动对生态恢复的消极影响,这也强调了在提及人类活动对生态系统的影响 时,区分人类活动具体方面的重要性<sup>[63-64]</sup>。

自然-社会经济因子对生态恢复的影响具有尺度依赖性。Huo和 Sun 对云南西北部地区植被动态的影响因素研究中发现,气候因子对植被变化的影响并不显著<sup>[65]</sup>。而本研究表明,年均降水量和年均气温是云贵高原地区生态恢复的关键影响因子,这是因为本研究选取的研究幅度较大,气候因子具有明显的空间分异,从而

导致了不同区域的不同响应。另一方面,研究粒度的不 同也可能导致影响因子作用强度的变化。Zhang 等的 研究表明,城市建成区面积和人均 GDP 是云贵高原地 区社会-生态高质量发展的主要驱动力<sup>[40]</sup>,而本研究结 果显示社会经济因子对生态恢复的影响较低。除评估 指标选取差异外,主要原因可能是该研究以地级市为研 究单元,本研究则以1km 栅格为单元,而不同自然-社会 经济因子的空间分布特征及其相互作用关系随研究粒 度变化[66]。

#### 3.2 建议和展望

生态恢复效益评估为区域生态系统管理和生态恢 复工程的实施提供了重要的信息。建设用地的扩张和 集聚发展是云贵高原地区未来经济社会发展的必然趋 势。因此,决策者需要将城市生态安全与城市发展规划 相统筹,以实现区域稳定发展<sup>[67]</sup>。例如,大量研究表明 城市绿地为城市区域提供多种重要的生态系统服务,能 够显著改善城市生态环境,合理的绿地建设布局是城市 生态恢复的有效途径<sup>[68-70]</sup>。对于生态恢复已经取得显 著成效的地区如贵州省西部地区,这些区域虽然取得了 阶段性的生态恢复成果,但生态环境脆弱,具有潜在的 生态退化风险,因此应继续坚持实施退耕还林等系列生 态恢复工程。生态恢复较差的区域如云南省南部和西 部地区,应该加大生态工程的投入力度并结合生态补偿 等措施,遏制森林生态系统的持续退化[71];同时应推进 产业结构的优化升级与生态旅游资源的开发,以求实现 经济发展与生态保护的共赢<sup>[72]</sup>。云南省北部由于海 拔、地形和气候因素的限制,生态恢复成效欠佳,且生态 系统对人类活动和气候变化敏感,应在落实生态恢复措



图 7 不同影响因素对云贵高原地区生态恢复的相对重要性 Fig.7 Relative importance of different influencing factors on ecological restoration in the Yunnan-Guizhou Plateau region PRE\_change: 2000-2019 年平均年降水量变化率; GDP\_change: 2000-2019年 GDP 年变化率; ET\_change: 2000-2019 年平均年 实际蒸散量变化率;TEM\_change: 2000—2019 年年平均气温变化 率; POP\_change: 2000-2019 年人口密度年变化率; Afforestation: 2000-2019 年造林面积; TN: 土壤总氮含量; Slope: 坡度; PH: 土 壤酸碱度;TP:土壤总磷含量;TK:土壤总钾含量;DEM:高程; TEM\_mean: 2000-2019 年年平均气温: SOC: 土壤有机质含量: ET \_mean:2000-2019 年平均年实际蒸散量; PRE\_mean:2000-2019 年平均年降水量

施的同时减少人类活动的消极干扰,逐步实现生态恢复的目标。

本研究在综合考虑数据空间分辨率、数据可得性等因素的基础上,选择 2000—2019 年作为研究的时间跨 度,在反映气候变化影响等方面存在一定的不确定性。今后应在收集更精细数据的基础上,综合利用多源遥 感数据扩展研究的时间尺度,以实现更长时间序列的生态效益评估,提高评估结果的准确性。此外,本研究只 考虑了包括 NPP、水源涵养和土壤保持在内的三种关键的生态系统服务,没有考虑生物多样性和其它服务相 关指标,未来应纳入更多指标进行综合评估。另一方面,为了最大限度反映多种指标的综合效应,本研究将所 有指标权重设置为1,未来的研究可通过专家评分法、层次分析法等方法设置指标的权重,进一步提高生态系 统恢复程度评估的合理性和针对性。最后,生态恢复还受到政策、生态保护和建设项目资金投入等方面的影 响,未来应收集相关数据进行更深入的驱动机制分析。

#### 4 结论

本文从生态系统宏观结构、生态系统质量和生态系统服务三个层面系统评估了云贵高原地区近 20 年来 的生态恢复效益及其自然-社会经济影响因素。主要结论如下:

(1)2000—2020年,云贵高原地区生态系统宏观结构变化明显,主要表现为森林、草地和聚落生态系统面积的增加,以及农田生态系统面积的减少。其中,聚落生态系统的增加最为显著,动态度为343.64%。

(2)云贵高原地区生态系统质量和服务变化和恢复态势总体稳定向好,部分区域转差。2000—2019年, 植被覆盖度和净初级生产力整体呈增加趋势,局部区域降低;水源涵养服务整体稳定,但部分地区下降明显; 土壤保持服务整体稳定向好,极少部分区域呈下降趋势。

(3) 云贵高原地区生态系统的恢复程度整体较高。其中,恢复程度中等及以上的地区占总面积的 35.84%,主要分布在云南省东北部和西南部、以及贵州省大部分地区;生态恢复程度有所转差及以下的面积 最少,主要分布在云南省南部和北部地区。

(4)地形、气候和土壤等生态本底特征是云贵高原地区生态恢复最重要的影响因素。其中,多年平均年降水量的相对重要性最高,为45.2%;GDP年均变化率的相对重要性最低,为9.8%。造林面积、人口密度年变化率等人类活动因子对局域生态恢复有关键作用。

致谢:刚成诚副研究员、王卓楠博士对研究给予帮助,特此致谢。

#### 参考文献(References):

- [1] Runting R K, Bryan B A, Dee L E, Maseyk F J F, Mandle L, Hamel P, Wilson K A, Yetka K, Possingham H P, Rhodes J R. Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions: a review. Global Change Biology, 2017, 23(1): 28-41.
- [2] 傅伯杰,田汉勤,陶福禄,赵文武,王帅.全球变化对生态系统服务的影响研究进展.中国基础科学,2020,22(3):25-30.
- [3] 邬建国,郭晓川,杨稢,钱贵霞,牛建明,梁存柱,张庆,李昂.什么是可持续性科学?应用生态学报,2014,25(1):1-11.
- [4] Foley J A, Defries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. Science, 2005, 309(5734): 570-574.
- [5] MEA. Ecosystems and Human Well-being//: Island Press/World Resources Institute, Washington, DC, 2005.
- [6] Demir S, Demirel Ö, Okatan A. An ecological restoration assessment integrating multi-criteria decision analysis with landscape sensitivity analysis for a hydroelectric power plant project: the Tokat-Niksar case. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(12): 818.
- [7] Doren R F, Trexler J C, Gottlieb A D, Harwell M C. Ecological indicators for system-wide assessment of the greater Everglades ecosystem restoration program. Ecological Indicators, 2009, 9(6): S2-S16.
- [8] Ma T F, Luo H J, Huang K B, Pan Y, Tang T, Tao X Q, Lu G N. Integrated ecological risk assessment of heavy metals in an oil shale mining area after restoration. Journal of Environmental Management, 2021, 300: 113797.
- [9] 张毅茜,冯晓明,王晓峰,傅伯杰,周潮伟.重点脆弱生态区生态恢复的综合效益评估.生态学报,2019,39(20):7367-7381.
- [10] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 杨帆, 刘华, 杨秀春, 许明祥, 侯鹏, 郭兴健, 黄麟, 李愈哲. 重大生态工程生态效益监测与评估研究. 地球科 学进展, 2017, 32(11): 1174-1182.
- [11] Chen X, Yu L, Du Z R, Xu Y D, Zhao J Y, Zhao H L, Zhang G L, Peng D L, Gong P. Distribution of ecological restoration projects associated with land use and land cover change in China and their ecological impacts. Science of the Total Environment, 2022, 825: 153938.
- [12] Cui W, Liu J G, Jia J L, Wang P F. Terrestrial ecological restoration in China: identifying advances and gaps. Environmental Sciences Europe, 2021, 33: 1-14.
- [13] Hua F Y, Wang X Y, Zheng X L, Fisher B, Wang L, Zhu J G, Tang Y, Yu D W, Wilcove D S. Opportunities for biodiversity gains under the world's largest reforestation programme. Nature Communications, 2016, 7: 12717.
- [14] Li Z W, Ning K, Chen J, Liu C, Wang D Y, Nie X D, Hu X Q, Wang L X, Wang T W. Soil and water conservation effects driven by the implementation of ecological restoration projects: evidence from the red soil hilly region of China in the last three decades. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 121109.
- [15] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [16] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. Science, 2016, 352 (6292): 1455-1459.
- [17] Jones H P, Schmitz O J. Rapid recovery of damaged ecosystems. PLoS One, 2009, 4(5): e5653.

- [18] Maron M, Hobbs R J, Moilanen A, Matthews J W, Christie K, Gardner T A, Keith D A, Lindenmayer D B, McAlpine C A. Faustian bargains? Restoration realities in the context of biodiversity offset policies. Biological Conservation, 2012, 155: 141-148.
- [19] 邱燕宁,任世钰,王鑫,杨鹏浩,李媛媛,李世寒,伍锡林,吴书翰,徐志伟,李国旗,黄成,徐驰.基于无人机影像的草方格生态恢复区 植被空间格局演化研究.生态学报,2019,39(24):9058-9067.
- [20] 张久丹, 李均力, 包安明, 白洁, 刘铁, 黄粤. 2013—2020 年塔里木河流域胡杨林生态恢复成效评估. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1824-1835.
- [21] Dodds W K, Wilson K C, Rehmeier R L, Knight G L, Wiggam S, Falke J A, Dalgleish H J, Bertrand K N. Comparing ecosystem goods and services provided by restored and native lands. BioScience, 2008, 58(9): 837-845.
- [22] 叶璇, 康帅直, 赵永华, 韩磊, 项曦明, 李帆. 陕北黄土高原植被恢复与生态系统服务的时空关系. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2760-2768.
- [23] 朱青,周自翔,刘婷,白继洲.黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究——以延河流域为例.生态学报,2021,41(7): 2557-2570.
- [24] 付迎春, 郭碧云, 王敏, 覃小玲. 社会—生态系统适应性治理视角下绿地空间恢复力的演化——广州旧城区更新案例. 自然资源学报, 2022, 37(8): 2118-2136.
- [25] 秦会艳,刘婷婷,黄颖利.我国省域尺度森林生态系统恢复力评价及敏感性分析.生态与农村环境学报,2022,38(3):281-288.
- [26] 王川, 张勇勇, 赵文智. 黑河下游额济纳绿洲近二十年生态输水的生态水文恢复效应. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2180-2187.
- [27] Li Y Z, Wu Y X, Liu X G. Regional ecosystem health assessment using the GA-BPANN model: a case study of Yunnan Province, China. Ecosystem Health and Sustainability, 2022, 8(1): 2084458.
- [28] Lv T Y, Zeng C, Lin C X, Liu W P, Cheng Y J, Li Y B. Towards an integrated approach for land spatial ecological restoration zoning based on ecosystem health assessment. Ecological Indicators, 2023, 147: 110016.
- [29] Berrouet L M, Machado J, Villegas-Palacio C. Vulnerability of socio—ecological systems: a conceptual Framework. Ecological Indicators, 2018, 84: 632-647.
- [30] 卓静, 胡皓, 何慧娟, 王智, 杨承睿. 陕北黄土高原生态脆弱性时空变异及驱动因素分析. 干旱区地理. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060. 2023.027.
- [31] Wang D L, Ding W L. Spatial pattern of the ecological environment in Yunnan Province. PLoS One, 2021, 16(6): e0248090.
- [32] 傅伯杰, 刘焱序. 系统认知土地资源的理论与方法. 科学通报, 2019, 64(21): 2172-2179.
- [33] 康婷婷,李增,高彦春.西北干旱区山地-绿洲-荒漠系统生态恢复综合效益评估.生态学报,2019,39(20):7418-7431.
- [34] 孙泽兴,李汶怡,刘嘉敏,曹淑慧,张伟娟,王浩.陕西省生态恢复综合效益评估.生态学报,2022,42(7):2718-2729.
- [35] Feng S Y, Liu X, Zhao W W, Yao Y, Zhou A, Liu X X, Pereira P. Key areas of ecological restoration in inner Mongolia based on ecosystem vulnerability and ecosystem service. Remote Sensing, 2022, 14(12): 2729.
- [36] Tan Q Y, Gong C, Li S J, Ma N, Ge F C, Xu M X. Impacts of ecological restoration on public perceptions of cultural ecosystem services. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(42): 60182-60194.
- [37] 于贵瑞,郝天象,杨萌.中国区域生态恢复和环境治理的生态系统原理及若干学术问题.应用生态学报,2023,34(2):289-304.
- [38] 王壮壮,王浩,冯晓明,王晓峰,张立伟,傅伯杰.重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系.生态学报,2019,39(20): 7356-7366.
- [39] Guo B, Zang W Q, Luo W. Spatial-temporal shifts of ecological vulnerability of Karst Mountain ecosystem-impacts of global change and anthropogenic interference. Science of the Total Environment, 2020, 741: 140256.
- [40] Zhang Z Y, Hu Z N, Zhong F L, Cheng Q P, Wu M Z. Spatio-temporal evolution and influencing factors of high quality development in the Yunnan-Guizhou, region based on the perspective of a beautiful China and SDGs. Land, 2022, 11(6): 821.
- [41] 邵全琴,刘树超,宁佳,刘国波,杨帆,张雄一,牛丽楠,黄海波,樊江文,刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估.
   地理学报, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [42] 邵全琴, 樊江文. 三江源生态保护和建设工程生态效益监测评估. 北京: 科学出版社, 2018.
- [43] Droogers P, Allen R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1): 33-45.
- [44] 徐苏, 张永勇, 窦明, 花瑞祥, 周宇建. 长江流域土地利用时空变化特征及其径流效应. 地理科学进展, 2017, 36(4): 426-436.
- [45] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning (US Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC). Agricultural Handbook 537, 1978.
- [46] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [47] 蔡崇法,丁树文,史志华,黄丽,张光远.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究.水土保持学报,2000, 14(2):19-24.
- [48] 易浪,任志远,张翀,刘雯.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系.资源科学,2014,36(1):166-174.
- [49] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价. 遥感学报, 2009, 13(6): 1170-1186.
- [50] Lyu R F, Clarke K C, Zhang J M, Feng J L, Jia X H, Li J J. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: a case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. Applied Geography, 2019, 108: 64-73.

- [51] Zhang Y S, Lu X, Liu B Y, Wu D T, Fu G, Zhao Y T, Sun P L. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: a case study in the Yellow River Basin. Science of the Total Environment, 2021, 766: 142480.
- [52] Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [53] Prasad A M, Iverson L R, Liaw A. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. Ecosystems, 2006, 9(2): 181-199.
- [54] Jiao L, Yang R, Zhang Y L, Yin J A, Huang J Y. The evolution and determinants of ecosystem services in Guizhou—a typical Karst mountainous area in southwest China. Land, 2022, 11(8): 1164.
- [55] Qiao J M, Yu D Y, Cao Q, Hao R F. Identifying the relationships and drivers of agro-ecosystem services using a constraint line approach in the agro-pastoral transitional zone of China. Ecological Indicators, 2019, 106: 105439.
- [56] 黄欣,彭双云,王哲,黄帮梅,柳璟.基于地理探测器的云南省生态系统产水服务的空间异质性及驱动因素.应用生态学报,2022,33 (10):2813-2821.
- [57] Du J Q, Shu J M, Yin J Q, Yuan X J, Jiaerheng A, Xiong S S, He P, Liu W L. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in vegetation growth during recent decades in Xinjiang, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38: 216-228.
- [58] Liu L B, Wang Y, Wang Z, Li D L, Zhang Y T, Qin D H, Li S C. Elevation-dependent decline in vegetation greening rate driven by increasing dryness based on three satellite NDVI datasets on the Tibetan Plateau. Ecological Indicators, 2019, 107: 105569.
- [59] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 706-714.
- [60] Peng J, Wang X Y, Liu Y X, Zhao Y, Xu Z H, Zhao M Y, Qiu S J, Wu J S. Urbanization impact on the supply-demand budget of ecosystem services: Decoupling analysis. Ecosystem Services, 2020, 44: 101139.
- [61] Zhang Y, Liu Y F, Zhang Y, Liu Y, Zhang G X, Chen Y Y. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: a case study in Wuhan, China. Science of the Total Environment, 2018, 637/638: 780-790.
- [62] Niu L N, Shao Q Q. Soil conservation service spatiotemporal variability and its driving mechanism on the Guizhou Plateau, China. Remote Sensing, 2020, 12(14): 2187.
- [63] Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, Li S S, Ma Y Q, Nie J. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(1): 45-58.
- [64] 金凯,王飞,韩剑桥,史尚渝,丁文斌. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [65] Huo H, Sun C P. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: a case study of the northwestern Yunnan Plateau, China. Ecological Indicators, 2021, 130: 108005.
- [66] Shen J S, Li S C, Liu L B, Liang Z, Wang Y Y, Wang H, Wu S Y. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Journal of Cleaner Production, 2021, 290: 125193.
- [67] Ye Y Q, Bryan B A, Zhang J E, Connor J D, Chen L L, Qin Z, He M Q. Changes in land-use and ecosystem services in the Guangzhou-Foshan Metropolitan Area, China from 1990 to 2010: implications for sustainability under rapid urbanization. Ecological Indicators, 2018, 93: 930-941.
- [68] Chang J, Qu Z L, Xu R H, Pan K X, Xu B, Min Y, Ren Y, Yang G F, Ge Y. Assessing the ecosystem services provided by urban green spaces along urban center-edge gradients. Scientific Reports, 2017, 7: 11226.
- [69] Derkzen M L, van Teeffelen A J A, Verburg P H. REVIEW: Quantifying urban ecosystem services based on high-resolution data of urban green space: an assessment for Rotterdam, the Netherlands. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(4): 1020-1032.
- [70] Evans D L, Falagán N, Hardman C A, Kourmpetli S, Liu L, Mead B R, Davies J A C. Ecosystem service delivery by urban agriculture and green infrastructure-a systematic review. Ecosystem Services, 2022, 54: 101405.
- [71] Liu P, Li W W, Yu Y, Tang R C, Guo X M, Wang B, Yang B, Zhang L. How much will cash forest encroachment in rainforests cost? A case from valuation to payment for ecosystem services in China. Ecosystem Services, 2019, 38: 100949.
- [72] 黎喜,杨胜天,罗娅,李超君,周柏池,娄和震,张宇嘉,张军.国家生态文明试验区(贵州)经济增速与植被恢复协调发展.中国环境科学,2022,42(9):4333-4342.