

基于 InVEST 模型的乌江流域生境质量 时空演变及其驱动因素分析

朱启莲¹, 方发永¹, 余万洋¹, 韩珍¹, 毛天旭¹, 罗松平², 赵龙山^{1,3}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省水土保持科技示范推广中心, 贵阳 550025;

3. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室(贵州大学), 贵阳 550025)

摘要: [目的] 探讨乌江流域贵州段长时间序列下生境质量的时空变化, 为区域绿色化高质量发展提供理论参考。[方法] 以 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 4 期土地利用数据为主, 通过移动窗口法、InVEST 模型和地理探测器对乌江流域贵州段景观格局与生境质量进行计算和驱动因素分析。[结果] 1) 1990—2020 年, 景观格局在上游南部距干流 30 km 以内区域破碎度和斑块形状复杂度加深, 斑块优势度和景观连通性降低; 在中游南部距干流 30~60 km 处景观破碎度和斑块形状复杂度减弱, 景观连通性增强。2) 生境质量多年平均值为 0.67, 高等生境面积增加 1.67%, 较低和低等生境面积分别增加 0.17% 和 1.46%。其中上游高等生境和中游较低与低等生境的比例增幅最大。距干流 <30 km 处高等生境和 30~60 km 处较低与低等生境的比例增幅最大。3) 生境质量空间异质性驱动因素中土地利用强度为主要因素, 温度和降雨为次要因素。[结论] 乌江流域贵州段生境质量总体较高, 局部地区表现为由生态保护和经济发展权衡关系造成的明显变化。

关键词: InVEST 模型; 生境质量; 景观格局; 时空变化; 乌江流域贵州段

中图分类号: S719

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0371-10

Analysis of Spatio-temporal Evolution of Habitat Quality and Its Driving Factors in the Wujiang River Basin Based on the InVEST Model

ZHU Qilian¹, FANG Fayong¹, YU Wanyang¹, HAN Zhen¹,

MAO Tianxu¹, LUO Songping², ZHAO Longshan^{1,3}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Province Soil and Water Conservation Technology Demonstration and Promotion Center, Guiyang 550025, China; 3. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment of Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] To exploring the spatio-temporal changes of long time series in habitat quality of the Wujiang River Basin in Guizhou Province, in order to provide a theoretical reference for high-quality green development of the region. [Methods] Based on four periods of land use data from 1990, 2000, 2010 and 2020, the landscape pattern and habitat quality of the Wujiang River basin in Guizhou Province were calculated and the driving factors were analyzed, by using the moving window method, InVEST model, and geographic detector. [Results] 1) From 1990 to 2020, the fragmentation and patch shape complexity of the landscape pattern increased within 30 km of the main stream in the south of the upstream, while the patch dominance and landscape connectivity decreased. The fragmentation and patch shape complexity of the landscape decreased at a distance of 30-60 km from the main stream in the south of the midstream, while the landscape connectivity increased. 2) The

收稿日期: 2024-10-31

修回日期: 2024-12-11

录用日期: 2025-01-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(42367045), 贵州省高层次人才计划“百”层次人才项目(黔科合平台人才-GCC[2023]015), 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2022]一般 202)

第一作者: 朱启莲(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态环境建设研究。E-mail: qilian_zhu@126.com

通信作者: 赵龙山(1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态环境建设研究。E-mail: longshanzh@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

annual mean value of habitat quality was 0.67, with an increase of 1.67% in high habitats, 0.17% and 1.46% in medium low and low habitats, respectively. The proportion of high habitats in the upstream and medium low and low habitats in the midstream increased the most. The proportion of high habitats at the distance of less than 30 km from the main stream and medium low and low habitats at the distance of 30-60 km increased the most. 3) Land use intensity was the main driving factor for spatial heterogeneity of habitat quality, while temperature and rainfall were secondary factors. [Conclusion] The overall habitat quality of Wujiang River basin in Guizhou Province is medium high, and the changes in some areas are due to the trade-off between ecological protection and economic development.

Keywords: InVEST model; habitat quality; landscape pattern; spatio-temporal changes; Wujiang River basin in Guizhou Province

Received: 2024-10-31

Revised: 2024-12-11

Accepted: 2025-01-01

Online(www.cnki.net): 2025-03-05

景观格局是指构成景观的生态系统或土地利用/覆被类型的形状、比例和空间配置,它是景观异质性的具体体现,又是各种生态过程在不同尺度上作用的结果^[1]。在自然和人为因素相互作用下,景观格局的改变造成生态系统结构和功能发生变化,从而对生物多样性和生境质量产生影响^[2]。因此,通过分析景观格局时空变化能够反映生境质量变化的内在驱动。

生境质量是指生态系统为生物提供可持续发展条件的能力,是生态系统功能和生态系统服务的基础^[3]。该指标能够反映生物多样性状况和环境对人为活动的适宜性,在评价区域生态健康中发挥着重要作用。生境质量相关研究目前已较为成熟和全面,从方法上主要可分为实地调查法、指标体系法和模型评估法。实地调查法在研究早期被广泛使用,主要是通过取样调查来衡量物种对栖息地的适宜性。这种方法受到研究尺度的限制,不仅需要耗费大量成本,还难以体现生境的大尺度时空变化。指标体系法通过不同区域特征指标建立评价体系进行综合计算^[4]。这种方法局限性在于数据资源获取难度大,指标选取和体系建立主观性强。模型评估法能通过相对统一和综合的程序在宏观尺度进行计算,能弥补以上方法存在的不足^[5]。如计算数据易获取能够节约大量成本,多时相数据同步计算能够展现时空变化,方法原理综合性强能保证客观评价减少误差。其中,InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型由于灵活简便成为模型评估法中被广泛使用的生境质量评价方法^[6]。贾天朝等^[7]通过InVEST模型分析青藏高原生境质量状况,明确气候变化与人类活动对生境质量的深刻影响;YUAN等^[8]通过InVEST模型分析鄱阳湖生境质量时空变化,为协调区域人地关系、优化土地管理政策、促进城市可持续发展提供理论参考。

InVEST模型由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会共同开发。基于地理信息系统理论,该模型能够通过土地利用与生物多样性威胁因素的信息快速进行生境质量评估和预测,并在结果中直观体现多种空间信息,如生境质量、生境退化度、生境稀缺性等^[9]。

在自然与人为双重驱动下,流域由于其综合性与连通性常成为生境质量变化研究的区域单元。乌江流域作为长江上游南岸最大支流,拥有丰富的水、生物、矿产等多种资源,是长江上游重要生态屏障和西南地区经济发展重点区域。从1990年开始,贵州发展由以经济建设为重点转变为高质量可持续发展为重点。人为活动的调整加之气候变化的多重作用,乌江流域生态环境如何响应是目前研究热点。已有学者^[10-11]围绕乌江流域植被、水土流失等方面的变化特征展开研究。但其中缺乏该流域长时间序列下生境质量时空变化分析,使乌江流域生态环境变化情况的研究有待完善。本研究通过收集1990年、2000年、2010年和2020年土地利用及其相关数据,利用移动窗口法、InVEST模型和地理探测器对乌江流域贵州段景观格局与生境质量的变化进行计算和驱动因素分析。旨在明确近1990—2020年乌江流域生境质量变化规律及驱动因素,为区域生态环境的优化提供理论参考,对实现人与自然和谐共生现代化具有重要作用。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域

乌江流域贵州段(26°11'36"~29°13'28"N, 104°15'34"~108°47'20"E)位于贵州西部、中部和东北部,始于贵州西部威宁县,终于贵州东北部沿河县并顺流入川,共覆盖贵阳、遵义、毕节等39个县、市、特区(图1)。乌江流域贵州段全长889 km,流域面积6.68万km²,海拔209~3 034 m。该地属于亚热带湿

润季风气候,年平均气温 14~18℃,年平均降水量 900~1 400 mm,雨季多集中在 5—10 月,雨量充沛,天然降雨年内分布不均匀。

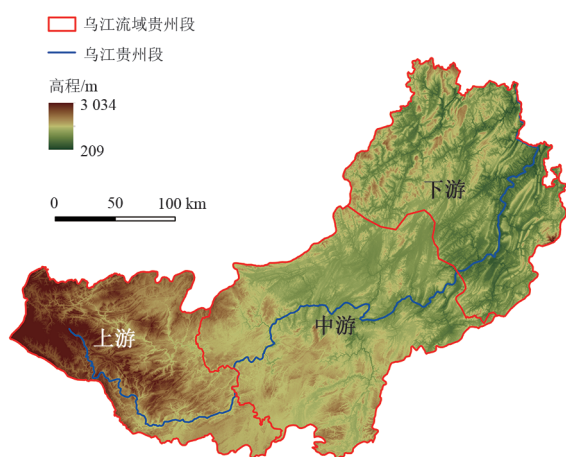


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源

本研究所用土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。以土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2017)^[12]和本研究目的为依据,将数据按照一级地类划分用于景观格局指数计算,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地共6类;二级地类在一级地类基础上进一步划分为22种土地利用类型,用于生境质量计算。人口、地区生产总值、高程、温度、降雨数据分别来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)、地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)、国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)。

1.3 研究方法

本研究首先根据乌江流域不同空间分布情况进行区域划分,以便后期的时空变化规律探讨。其次通过移动窗口法计算研究区斑块密度(patch density, PD)、最大斑块指数(largest patch index, LPI)、斑块形状指数(landscape shape index, LSI)和蔓延度指数(contagion index, CONTAG)。探明乌江流域贵州段景观格局变化情况。再采用 InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块量化生境质量在时间上的变化趋势和空间上的变化特征,找到生境质量变化规律。最后利用地理探测器中的因子探测和交互作用探测功能探明生境质量空间异质性变化的驱动因素。

1.3.1 区域划分 为便于更好地探讨研究区生境质量的空间变化规律,将流域按照2个标准分别进行区域划分。第1个标准按照约定俗成,将该流域划分为3段,其中化屋脊以上为上游,化屋脊至思南为中游,思南以下为下游^[13]。第2个标准按照距干流不同远

近程度进行缓冲区建立。划分标准为:1)各缓冲区内生境质量特征相对一致,各缓冲区间生境质量特征具有差异;2)缓冲区的设立需要覆盖整个研究区域;3)各缓冲区所占面积相对一致。通过设置20、30、35、40 km 4个缓冲间距进行结果比较,选取最能区分生境质量区域特征的缓冲间距。最终确定以30 km为标准进行区域划分,分别为<30、30~60、>60 km共3个区域。

1.3.2 移动窗口法 景观格局指数的计算是对景观格局进行分析评价的方法之一。本文通过 Fragstats 4.2 软件中的移动窗口法进行景观格局指数的计算,具体指数为斑块密度(PD)、斑块形状指数(LSI)、最大斑块指数(LPI)、蔓延度指数(CONTAG)。移动窗口法中窗口大小的选择是重点,合适的窗口大小才能够概括研究区总体变化规律。本研究通过选取不同窗口大小值与所计算的结果进行非线性函数拟合,最终选取窗口大小为4 200 m进行计算。为减小计算数据量,在使用移动窗口法进行计算时将土地利用数据的空间分辨率统一重采样为60 m。

1.3.3 InVEST 模型 本文利用 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块进行生境质量的评估。该模块将人类活动干扰引入到对生境质量评价当中,当人类活动强度加大时生境质量水平明显下降,其原理为结合外界威胁因子及强度和各土地利用类型对威胁因子的敏感度计算出生境质量^[14]。计算结果取值为0~1,数值从小到大代表生境质量从低到高。为便于呈现时空分布特征,本研究通过 ArcGIS 相等间隔法(equal interval)对计算后的生境质量进行等级划分,并统计各等级生境所占面积百分比和生境质量指数平均值^[15]。等级分类具体为0~0.2为低等生境,0.2~0.4为较低生境,0.4~0.6为中等生境,0.6~0.8为较高生境,0.8~1.0为高等生境。相关计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (1)$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (2)$$

$$i_{rxy} = 1 - \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \quad (3)$$

$$i_{rxy} = \exp \frac{-2.99 d_{xy}}{d_{rmax}} \quad (4)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 所受的胁迫水平; k 为半饱和和常数,通常取 D_{xj} 最大值的1/2; H_j 为土地利用类型 j 的生境适合性; z 为归一化常量,通常取2.5;

R 为威胁因子的数量; W_r 为威胁因子的权重值; Y_r 为威胁因子的栅格数量; r_y 为威胁因子的胁迫值; i_{xy} 为威胁因子对生境的胁迫水平; β_x 为威胁因子的可达性; S_{jr} 为生境类型 j 对威胁因子的敏感度; d_{xy} 为空间单元 x 与空间单元 j 的直线距离; $d_{r\max}$ 为威胁因子的最大胁迫距离。

根据 InVEST 模型使用手册和研究区相关研究^[16-17],对威胁源和敏感度等相关参数进行设置(表 1 和表 2)。

表 1 乌江流域贵州段 InVEST 威胁因子参数

Table 1 InVEST stress factor parameters of the Wujiang River basin in Guizhou Province

最大威胁距离	权重	威胁因子	衰减性
1	0.7	水田	线性
1	0.7	旱地	线性
5	0.6	农村居民点	指数
8	1.0	城镇建设用地	指数
3	0.5	其他建设用地	指数

表 2 乌江流域贵州段不同土地利用类型生境适宜度及其对威胁因子的敏感度

Table 2 Habitat suitability of different land use types and their sensitivity to stress factors in the Wujiang River basin in Guizhou Province

二级名称	生境适宜度	水田	旱地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地
水田	0.5	0	0.5	0.7	0.5	0.5
旱地	0.5	0.5	0	0.7	0.5	0.5
有林地	1.0	0.8	0.6	0.6	0.7	0.7
灌木林	0.8	0.5	0.7	0.5	0.6	0.6
疏林地	0.7	0.5	0.7	0.8	0.6	0.6
其他林地	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6
高覆盖度草地	0.8	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5
中覆盖度草地	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.4
低覆盖度草地	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.3
河渠	1.0	0.8	0.8	0.8	0.4	0.3
湖泊	0.9	0.7	0.7	0.7	0.3	0.5
水库坑塘	0.9	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5
滩地	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
城镇用地	0	0	0	0	0	0
农村居民点	0	0	0	0	0	0
其他建设用地	0	0	0	0	0	0
戈壁	0	0.1	0.1	0	0	0
盐碱地	0	0.1	0.1	0	0	0
沼泽地	0	0.1	0.1	0	0	0
裸土地	0	0.1	0.1	0	0	0
裸岩石质地	0	0.1	0.1	0	0	0
其他	0	0.1	0.1	0	0	0

在这些指标中,除土地利用强度指标需要通过土地利用数据转化计算外,其余指标均可下载后直接使用。因此,对土地利用强度指标计算方法进行

1.3.4 地理探测器 地理探测器是用于揭示空间分异规律及其驱动因素的方法。其假设若某自变量对因变量有重要影响,那么二者具有空间相似性。地理探测器可分为因子探测、交互作用探测、风险区探测及生态探测。其中因子探测能够计算单个自变量对因变量空间分异特征解释作用的大小。交互作用探测能够分析不同因子两两组合后对因变量的解释作用是增强、减弱,还是二者相互独立。本文选取土地利用强度、人口、地区生产总值、温度、高程、降雨 6 个因子作为空间异质性驱动因素进行生境质量的因子探测分析和交互作用探测分析,计算公式为:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2}{n \sigma^2}$$

(5)

式中: q 为驱动因子解释程度; n_h 和 σ_h 为第 h 层驱动因子的样本量和方差; n 和 σ^2 为全部样本量和方差。 q 的取值为 $[0,1]$,值越大表明解释程度越高。

补充说明。土地利用强度为某一时间特定区域内人类活动对土地利用格局的干扰程度^[18]。在该指标计算中,需依据不同土地利用情况进行等级赋值,本研

究将未利用地赋值为1;林地、草地、水域赋值为2;耕地赋值为3;建设用地赋值为4。计算公式为:

$$LUI = \sum_{i=1}^n A_i \frac{S_i}{S} \quad (6)$$

式中:LUI为样本区域土地利用强度综合指数; A_i 为样本区域第*i*级土地利用强度分级指数; S_i 为样本区域内第*i*级土地利用总面积; S 为样本区域内土地利用总面积; n 为土地利用强度分级数。

2 结果与分析

2.1 景观格局变化

选取斑块密度(PD)、斑块形状指数(LSI)、最大斑块指数(LPI)和蔓延度指数(CONTAG)共4个指标来衡量乌江流域贵州段景观格局变化。1990—2020年,流域各景观格局指数平均值变化较为稳定,不同时段间变幅均不足6%(图2)。随着时间变化,流域空间特征变化较为明显,主要体现在上游

CONTAG、LPI上升和LSI、PD下降。1990—2000年,在中游距干流30 km以外区域与下游距干流30 km以内区域景观格局发生变化,景观组成要素分布密集化,景观破碎化增加,连通性降低。2000—2010年,中游距干流30 km以外区域出现景观组成要素由多样化转向单一化的趋势,斑块优势开始有所体现。同时,上游距干流30 km以内区域景观格局受到干扰,部分地区斑块优势有所降低。2010—2020年,中游距干流30~60 km区域在原有趋势上持续推进,景观连通性与斑块优势度明显增强。上游距干流30 km以内区域景观组成破碎化进一步增强,连通性明显降低,为生境多样性提供有利条件。综上,1990—2020年,乌江流域贵州段景观格局在空间上的变化主要体现为上游距干流30 km以内区域景观破碎化增强,连通性降低,中游距干流30~60 km区域景观连通性和斑块优势度增强。景观格局的变化势必造成生态环境的改变,而其中生境质量变化的具体特征如何还需进一步量化。

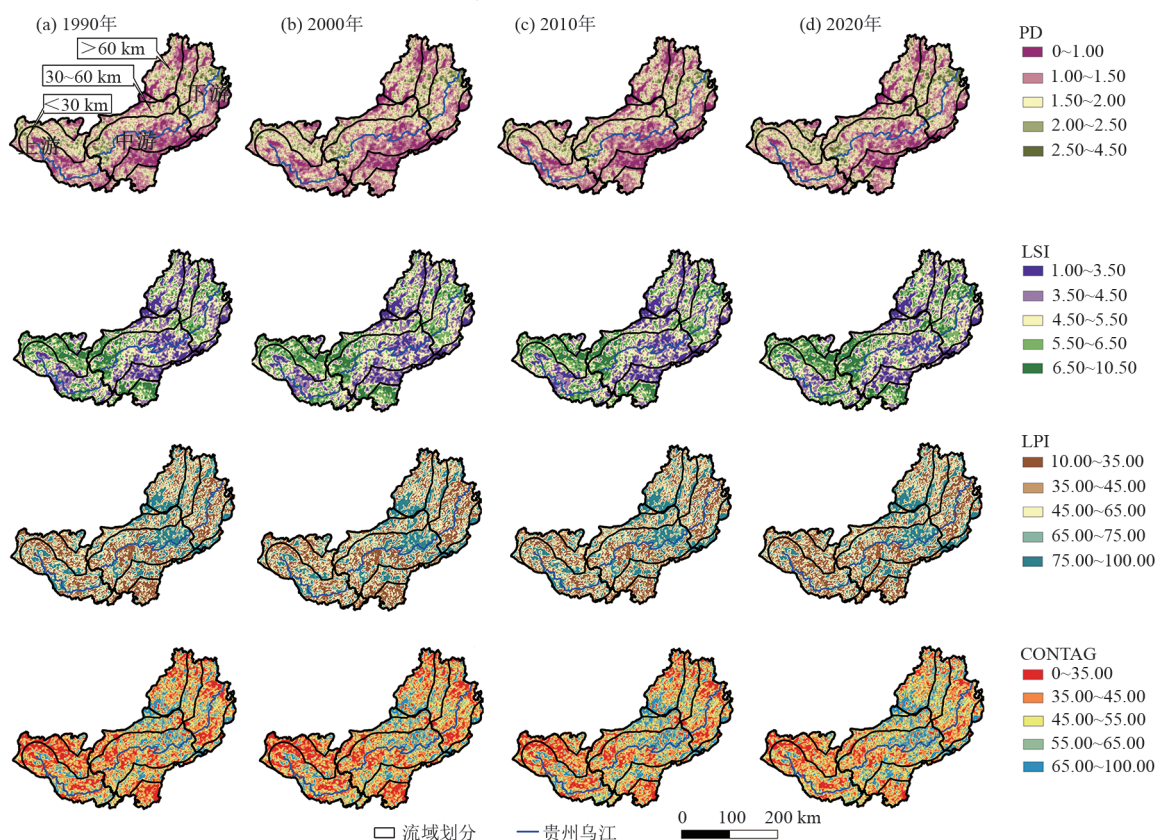


图2 乌江流域贵州段1990—2020年景观格局指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of landscape index in the Wujiang River basin in Guizhou Province from 1990 to 2020

2.2 生境质量变化

2.2.1 生境质量时间变化 乌江流域贵州段4个时期生境质量平均值为0.669,不同时段生境质量平均值变化均未超过0.010,处于较高等级且变化稳定(表3)。在不同生境质量等级中,各等级所占比例相

对固定。较高生境占比最大,平均值为53.00%,其次为中等生境和高等生境的占比,平均值分别为34.07%和11.88%。随着时间推进,生境质量等级变化有向两极发展的趋势,特别在2010—2020年尤为明显。生境质量变化较为明显的是高等生境所占面

积波动上升 1.67%，其中在 2010—2020 年上升面积占总上升面积的 68.10%。较低生境所占面积持续增加，总增量大于原有的 2.5 倍，其中 2010—2020 年的增幅为原有量的 1 倍以上。低等生境所占面积持续增加，增幅大于原有量的 2 倍，其中 2010—2020 年增幅为原有量的 1.5 倍以上。生境质量标准差持续增加 14.65%，其中 2010—2020 年增幅量占总增幅量的 73.91%。说明生境质量在向两极化发展的同时也增强其空间异质性。综上，1990—2020 年乌江流域贵州段生境质量在时间上平均值变化稳定，但不同生境质量等级间异质性增强，有向两极发展的趋势。

表 3 乌江流域贵州段 1990—2020 年生境质量参数
Table 3 Parametric statistics of habitat quality in the Wujiang River basin in Guizhou Province from 1990 to 2020

参数	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
低等生境占比/%	0.472	0.500	0.707	1.933
较低生境占比/%	0.065	0.087	0.157	0.234
中等生境占比/%	33.992	34.362	34.237	33.701
较高生境占比/%	54.111	53.799	53.006	51.101
高等生境占比/%	11.360	11.252	11.893	13.031
平均值	0.672	0.670	0.671	0.662
标准差	0.157	0.158	0.163	0.180

2.2.2 生境质量空间变化 乌江流域贵州段生境质量等级分布特征总体较为稳定，但在局部地区变化明显(图 3)。总体上，较高与中等生境在整个流域分布均匀，高等生境在中下游交界处分布集中，低等与较低生境在中游距干流 30~60 km 处分布集中。1990—2020 年，生境质量等级在空间上的变化主要表现为上游距干流 30 km 以内区域高等生境面积破碎化增加，中游距干流 30~60 km 区域低等生境面积扩张。1990—2000 年，流域生境质量变化稳定，比较明显处在中游距干流 30 km 以外与下游距干流 30 km 以内的局部地区中等生境逐级转化为较低生境。在此阶段流域所受干扰范围较小，干扰程度较低。2000—2010 年，生境质量变化特征开始显现，中游距干流 30~60 km 区域中等生境跨级转化为低等生境，上游距干流 30 km 以内区域原有生境质量等级向更高等级转化。外部干扰对流域生境质量影响作用开始浮现。2010—2020 年，生境质量变化特征明显，主要表现为中游距干流 30~60 km 区域低等生境大面积扩大和上游距干流 30 km 以内区域高等生境面积大幅增加。流域所受干扰进一步加强，使得生境质量朝着两极化趋势发展。由此可知，1990—2020 年乌江流域贵州段生境质量等级在空间上分布特征总体较为稳定，但在局部地区向两极发展趋势表现为由弱到强。

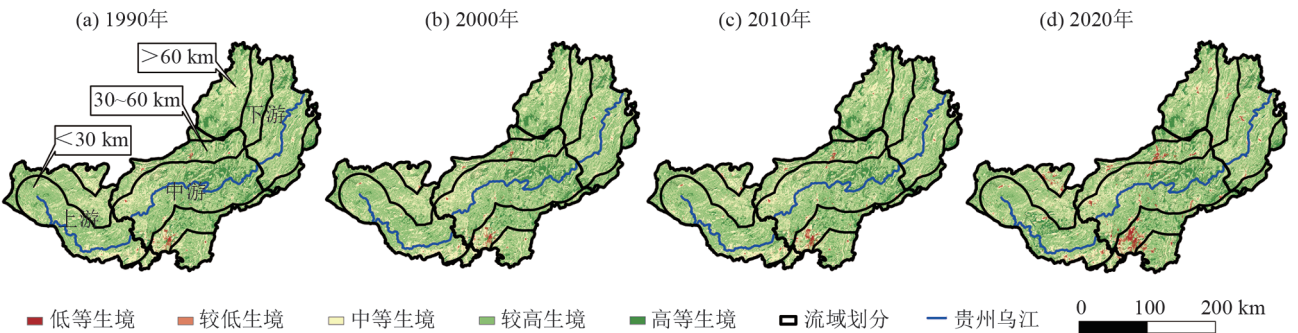


图 3 乌江流域贵州段 1990—2020 年生境质量等级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of habitat quality grade in the Wujiang River basin in Guizhou Province from 1990 to 2020

从上游、中游、下游生境质量等级分布情况(表 4)来看，总体上中游空间分布差异性强于上游和下游。高等生境比例在中游最大，平均值为 16.16%；同时较低和低等生境比例在该区域同样最大，平均值分别为 0.19% 和 1.59%。1990—2020 年，不同生境质量等级在上游和中游发生明显变化。高等生境在上游增幅最大，为 4.50%，其从 2000 年开始持续增加，表现出生态环境逐渐向好现象。较低和低等生境在中游增幅最大，增量分别为 0.22% 和 2.40%，均从 1990 年开始持续增加并分别在 2000—2010 年和 2010—2020 年达到最大增幅，表现出生态环境所受干扰程度加强现象。从

距干流不同范围区域(表 5)来看，总体上距干流 30~60 km 处生境质量等级空间分布差异性最强，其高等、较低和低等生境比例均为最大，年平均占比分别为 12.64%、0.18% 和 1.62%。表明随着与干流距离越远，影响生境质量的因素复杂程度越强。在研究时段内，生境质量在距干流 <30、30~60 km 处发生明显变化。高等生境在 <30 km 处增幅最大，为 2.45%，其从 2000 年开始增加，并在 2010—2020 年达到最大增幅。说明距离干流越近处，生境质量恢复效益越好。较低和低等生境在 30~60 km 处增幅最大，分别为 0.22% 和 2.35%，从 1990 年来持续增加，增幅最大在 2010—

2020 年。说明在距干流一定范围以外区域,生境质量退化日趋严峻。综上,在中游距干流 30~60 km 区域生境质量等级分布特征复杂,空间异质性强。随着时间变化,上游距干流较近处高等生境质量增幅最大,生态恢复效益最明显;中游距干流较远处较低和低等生境面积增幅最大,生态恶化日趋严峻。

表 4 乌江流域贵州段 1990—2020 年生境质量等级在不同区域变化

Table 4 The changes of habitat quality levels in different regions of the Wujiang River basin in Guizhou Province from 1990 to 2020

区域	生境质量等级	生境质量等级占比/%			
		1990年	2000年	2010年	2020年
上游	低等生境	0.244	0.285	0.464	1.468
	较低生境	0.048	0.093	0.144	0.251
	中等生境	36.361	36.439	36.347	35.847
	较高生境	58.540	58.432	57.535	53.124
	高等生境	4.807	4.750	5.510	9.310
中游	低等生境	0.886	0.920	1.271	3.281
	较低生境	0.097	0.111	0.229	0.318
	中等生境	32.661	32.798	32.674	31.637
	较高生境	50.436	50.393	49.426	48.210
	高等生境	15.920	15.777	16.400	16.554
下游	低等生境	0.143	0.155	0.204	0.639
	较低生境	0.041	0.050	0.079	0.116
	中等生境	33.697	34.597	34.444	34.501
	较高生境	55.034	54.220	53.729	53.032
	高等生境	11.086	10.978	11.544	11.713

2.3 生境质量驱动因素

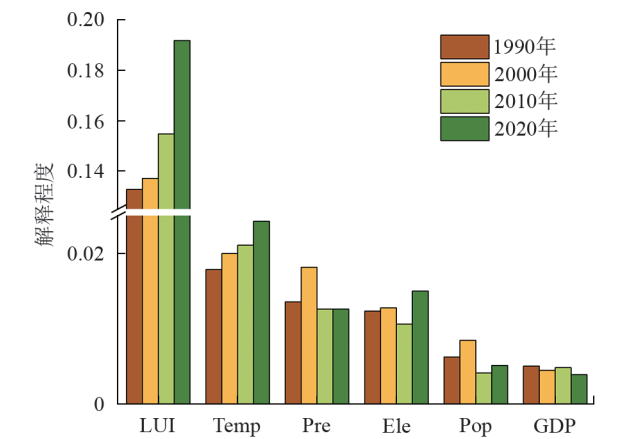
在因子探测分析中,所有因子均通过显著性检验且 $p<0.01$ 。解释程度最强的因子是土地利用强度,年平均值为0.15。说明相较于其他因子,土地利用强度能够最大程度解释生境质量空间异质性。其次,温度和降雨也影响生境质量空间分布特征,二者解释程度年平均值分别为0.02和0.01。高程、人口和GDP解释程度相对较弱。从时间变化来看,土地利用强度和温度对生境质量的解释程度持续上升,其中土地利用强度的解释程度在2020年比1990年高出44.37%,温度的解释程度在2020年比1990年高出33.33%。其他因素解释程度变化为无明显规律的波动状态(图4)。在因子交互作用探测分析中,所有因子交互作用的解释程度均大于单因子(图5)。解释程度最大的是土地利用强度与其他各因子的组合,其中土地利用强度与降雨的交互作用在历年中最

高,年平均值为0.17。土地利用强度与其他因子交互作用的解释程度也在持续增强。说明在交互作用中,土地利用强度对生境质量空间异质性的解释程度仍然占据领先优势。因此,在生境质量空间异质性解释程度中,土地利用强度不管是在因子探测还是交互作用探测中都表现出明显优势,其次温度和降雨也具有不可忽视的重要作用。

表 5 乌江流域贵州段 1990—2020 年生境质量等级在距干流不同范围的变化

Table 5 The changes of habitat quality levels of the Wujiang River basin in Guizhou Province at different distances from the main stream from 1990 to 2020

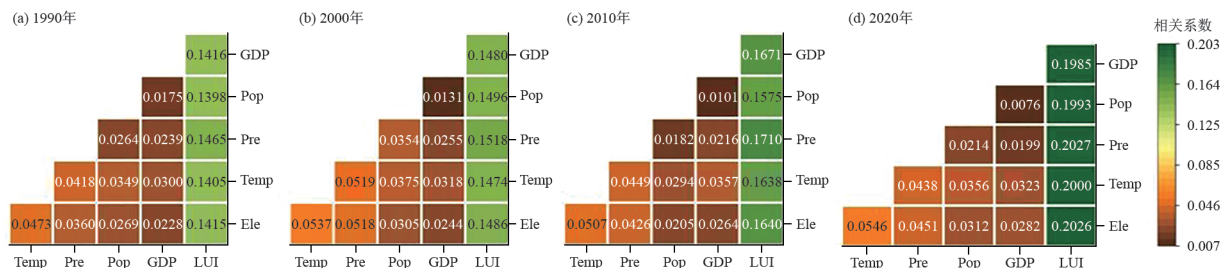
距干流范围/km	生境质量等级	生境质量等级占比/%			
		1990年	2000年	2010年	2020年
<30	低等生境	0.274	0.299	0.406	1.192
	较低生境	0.048	0.060	0.119	0.201
	中等生境	33.452	34.073	34.174	33.881
	较高生境	55.355	54.805	53.879	51.404
	高等生境	10.871	10.764	11.422	13.323
30~60	低等生境	0.925	0.961	1.341	3.271
	较低生境	0.088	0.104	0.203	0.310
	中等生境	33.686	33.810	33.649	32.916
	较高生境	52.780	52.678	52.002	50.717
	高等生境	12.521	12.446	12.806	12.786
>60	低等生境	0.278	0.305	0.515	1.876
	较低生境	0.082	0.140	0.198	0.203
	中等生境	36.323	36.331	35.534	34.568
	较高生境	52.510	52.589	52.013	50.824
	高等生境	10.806	10.634	11.739	12.529



注:Temp 为温度;Pre 为降雨量;Pop 为人口密度;GDP 为地区生产总值;LUI 为土地利用强度。

图 4 乌江流域贵州段 1990—2020 年生境质量异质性因子探测结果

Fig. 4 Results of detecting habitat quality heterogeneity factors in the Wujiang River basin in Guizhou Province from 1990 to 2020



注: Temp 为温度; Pre 为降雨量; Pop 为人口密度; GDP 为地区生产总值; LUI 为土地利用强度。

图 5 乌江流域贵州段 1990—2020 年生境质量驱动因素因子交互作用

Fig. 5 Interaction of driving factors affecting habitat quality in the Wujiang River basin in Guizhou Province from 1990 to 2020

3 讨论

乌江流域是长江上游南岸最大支流,也是贵州最大流域。通过对乌江流域长时间序列下生境质量时空变化及驱动因素进行分析,不仅能够探明流域尺度下不同阶段人为活动与气候变化交互作用对生境质量的影响,还能为当地及长江周围地区的生态保护规划提供理论支撑。本研究认为,1990—2020 年乌江流域贵州段生境质量变化不大,多年平均值为 0.67,属于较高生境范畴,YANG 等^[19]的结果与之类似,但其生境质量均值略高,原因可能是其研究范围为整个乌江流域,而在超出本研究的局部地区生境质量较好,因此其生境质量略高^[20]。黄国金^[21]计算的乌江流域遵义段生境质量平均值为 0.61,总体为上升趋势,与本研究结果有所出入。一方面可能是由于研究区面积尺度不同造成的差异,遵义局部地区生境质量状况无法完全体现在本研究的全局尺度中;另一方面,威胁源的设置也是造成研究结果形成差异的原因。本研究通过参考多份研究,设置威胁源权重相对较高,造成二者计算结果有所差异。

乌江流域贵州段生境质量的时空变化是贵州部分地区自然与人为相互作用、经济建设与生态保护相互平衡的体现。本研究乌江流域贵州段生境质量总体上变化浮动较小,但在不同等级和局部地区中变化较大,可从多个角度进行探讨。从景观格局与土地利用变化角度分析,景观格局变化区域反映生境质量变化区域,土地利用演替方向反映生境质量变化方向^[22]。景观格局变化最明显部分为 2010—2020 年上游南部距干流 30 km 以内区域破碎化增强、斑块形状复杂化、斑块优势度和景观连通性下降(图 2)。但由于其土地利用变化主要为草地转为林地的正向演替,导致景观格局变化区域生境质量增加,生态环境日益向好。相反,在同样时间段内景观格局在中游南部距干流 30~60 km 处破碎化减弱、斑

块形状简单化、景观连通性增强。但由于其土地利用变化为不利于生态发展的建设用地增加,导致相应区域生境质量下降,生态环境日趋严峻。

从驱动因素分析,土地利用强度及其与其他因子的交互作用是影响生境质量空间异质性最主要的因素,其中土地利用强度与区域发展规划息息相关^[23](图 5 和图 6)。从 1990—2000 年,乌江流域主要以强开发为主。“工业立省战略”的落实使区域煤炭、电力、化工等产业优先发展。该阶段中土地利用强度高的地方以耕地扩张、磷矿资源开采、水资源开发为主^[24-25]。其带来的消极作用造成较高生境转向中等生境,且生境质量总体下降(表 3 和图 3)。其中距干流 30 km 以内区域由于可获取资源量大丰富,造成该阶段生境质量下降比例最大(表 5)。2000—2010 年,乌江流域进入生态修复阶段。“退耕还林(草)工程”“乌江流域水土保持综合治理工程”等生态工程的实施造成良性的土地利用强度增加,生态保护初见成效,高等生境占比增加的趋势也由此开始。特别在距干流 30 km 以内区域,经济发展重心逐步向距干流以外延伸,生境质量变化以下降为主转变为以上升为主^[26]。2010—2020 年,乌江流域进入保护发展有机统一阶段^[27]。一方面,贵州生态文明示范区的设立与《贵州省乌江流域水环境保护规划(2015—2020 年)》^[28]的实施提供生态恢复的条件,局部地区高等生境持续转入和提升,主要表现为上游南部距干流 30 km 以内区域的毕节纳雍县和六盘水六枝特区;另一方面,“工业强省”战略与公路建设“三年会战”等任务引起建设用地扩张、人口聚集,导致土地利用强度在距干流 30~60 km 区域的贵阳、遵义等部分地区持续增加,造成多地低等生境所占面积迅速增大^[29]。因此,该阶段生境质量在局部地区取得显著优化,但由于经济发展导致多个地区生境质量下降明显,造成生境质量总体下降的现象。温度和降雨作为生物生存的必要条件,是乌江流域贵州段生境质量空间异质性中解释程度最强的自然因素(图

5)。温度较高、降雨丰沛地区由于能够提供更好的水热条件和生存环境,生境质量较高^[30]。中游和下

游区域温度与降雨条件均优于上游,因此二者的高等生境占比大于上游的。

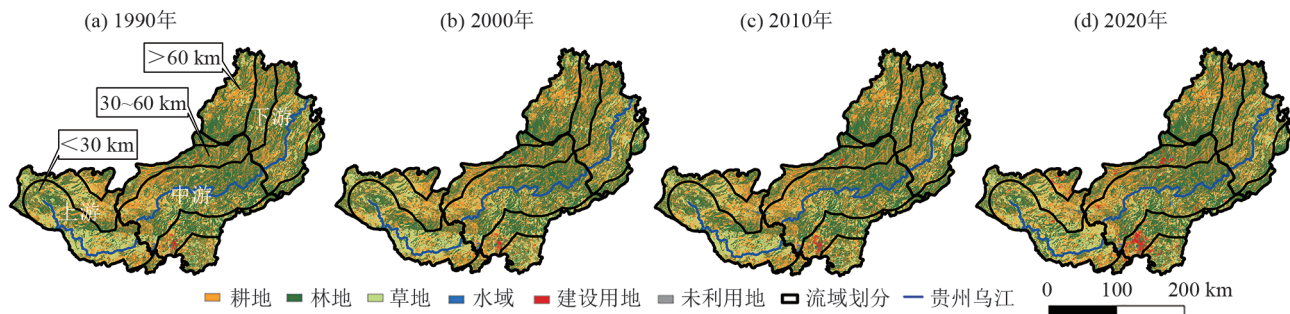


图6 乌江流域贵州段1990—2020年土地利用分布

Fig.6 Spatial distribution of land use in the Wujiang River basin in Guizhou Province from 1990 to 2020

本研究发现,乌江流域贵州段在经济快速发展的同时,生态保护建设正处于奋力持平的关键阶段。在该阶段应持续深入高等和较高生境质量地区保护,通过生态廊道的补充增加景观连通性和斑块优势度,为生境质量的优化注入潜力。加强中等和较低生境质量地区的修复,通过保护区建立或土地利用调整等措施使区域进行自然或人工修复,为生境质量的提升提供条件。防止低等生境质量地区的恶化,通过建立环境保护限制和生态任务,为生境质量的恶化设定防线。

4 结论

1)1990—2020年,乌江流域贵州段景观格局总体变化稳定。局部地区表现为由林地增加造成的景观格局破碎化加深和由建设用地持续扩张造成的景观格局连通性增强。

2)生境质量总体较高,多年平均值为0.669。时间变化下生境质量表现出向两极分化的趋势。上游距干流较近处受到生态保护影响,高等生境占比提升;中游距干流较远处受到经济发展需求作用,较低与低等生境面积增加。

3)生境质量空间异质性变化驱动因素中土地利用强度解释程度最强,其次为温度和海拔。未来,应按照不同生境质量等级区域具体情况进行土地利用和景观格局调整,在高质量发展的同时兼顾高水平保护。

参考文献:

- [1] 刘佳依,许大为,徐嘉.基于 InVEST 模型的蒲河流域景观格局及生境质量时空演变分析[J].水土保持学报,2024,38(2):258-267.
- LIU J Y, XU D W, XU J. Analysis of landscape patterns and spatio-temporal evolution of habitat quality in the PU River basin based on the InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):258-267.

- [2] PU J, SHEN A R, LIU C X, et al. Impacts of ecological land fragmentation on habitat quality in the Taihu Lake basin in Jiangsu Province, China [J]. Ecological Indicators, 2024, 158: e111611.
- [3] 冀泳帆,贾鲁净,杨联安,等.耦合 InVEST-PLUS 模型的榆林市生境质量时空演变及预测分析[J].水土保持学报,2023,37(1):123-132.
- JI Y F, JIA L J, YANG L A, et al. Spatio-temporal evolution and prediction analysis of habitat quality in Yulin City coupled with InVEST-PLUS model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 123-132.
- [4] 张坤,李卫明,陈圣盛,等.基于大型底栖动物的黄柏河河流健康评价[J].长江流域资源与环境,2022,31(10):2218-2229.
- ZHANG K, LI W M, CHEN S S, et al. River health assessment based on macroinvertebrates in Huangbai River, a tributary of Yangtze River, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(10): 2218-2229.
- [5] 温煜华.2011—2021年甘肃省生态环境质量综合评价及时空演变特征分析[J].干旱区资源与环境,2024,38(6):110-119.
- WEN Y H. Assessment and spatial-temporal evolution of ecological environment in Gansu Province from 2011 to 2021 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(6):110-119.
- [6] ZHAO J Q, YU L, NEWBOLD T, et al. Trends in habitat quality and habitat degradation in terrestrial protected areas [J]. Conservation Biology, 2024: e14348.
- [7] 贾天朝,胡西武,杨海娟,等.生境质量对气候变化与人类活动的空间响应:以青藏高原为例[J].水土保持学报,2024,38(5):203-211.
- JIA T C, HU X W, YANG H J, et al. Spatial response of habitat quality to climate change and human activities: Taking the Qinghai-Tibet Plateau as an example [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5):

- 203-211.
- [8] YUAN W R, CHEN L K, CHEN H X, et al. Assessing habitat quality at Poyang Lake based on InVEST and Geodetector modeling [J]. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(12):e10759.
- [9] 汪东川, 张威, 王志恒, 等. 拉西瓦水电站建设对区域景观格局与生境质量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3):200-205.
- WANG D C, ZHANG W, WANG Z H, et al. Impact of Laxiwa hydropower station construction on the regional landscape pattern and habitat quality [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3):200-205.
- [10] 刘伟, 焦树林. 喀斯特流域极端气候变化特征及对 NDVI 的影响 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5):220-232.
- LIU W, JIAO S L. Characteristics of extreme climate change in karst basin and its impact on NDVI [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):220-232.
- [11] 郭文献, 赵瑞超, 付体江, 等. 乌江流域水沙变化趋势及驱动力分析 [J]. *人民长江*, 2021, 52(9):71-78.
- GUO W X, ZHAO R C, FU T J, et al. Trend and driving force of water-sediment changes in Wujiang River basin [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(9):71-78.
- [12] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Natural Resources and Territory Spatial Planning. GB/T 21010—2017 Current land use classification [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [13] 杨俊毅, 李俊生, 关潇. 乌江流域固碳服务时空格局及驱动机制 [J]. *环境科学研究*, 2023, 36(4):757-767.
- YANG J Y, LI J S, GUAN X. Spatio-temporal pattern and driving mechanism of ecosystem carbon sequestration services in the Wujiang River basin [J]. *Research of Environment Sciences*, 2023, 36(4):757-767.
- [14] ZHANG H, ZHANG C, HU T, et al. Exploration of roadway factors and habitat quality using InVEST [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 87:e102551.
- [15] 吴楠, 陈红枫, 冯朝阳, 等. 基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5):1119-1127.
- WU N, CHEN H F, FENG C Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality based on land cover change in Anhui Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(5):1119-1127.
- [16] XU G Y, XIONG K N, SHU T, et al. Bundling evaluating changes in ecosystem service under karst rocky desertification restoration: Projects a case study of Huajiang-Guanling, Guizhou Province, Southwest China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(10):e302.
- [17] 景晓玮. 基于 InVEST 模型的贵州省生态系统服务计量及价值评估研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2022.
- JING X W. Research on the measurement and valuation of ecosystem services in Guizhou Province based on InVEST model [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022.
- [18] 曾志伟, 杨华, 宁启蒙, 等. 洞庭湖区土地利用强度演变及其对生态系统服务的影响 [J]. *经济地理*, 2022, 42(9):176-185.
- ZENG Z W, YANG H, NING Q M, et al. Temporal and spatial evolution of land use intensity and its impact on ecosystem services in Dongting Lake zone [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(9):176-185.
- [19] YANG J Y, LI J S, FU G, et al. Spatial and temporal patterns of ecosystem services and trade-offs/synergies in Wujiang River basin, China [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16):e4099.
- [20] 诸正彪. 基于多源遥感数据的云南省经济水平与生态质量耦合性研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2024.
- ZHU Z B. Research on coupling between economic level and ecological quality in Yunnan Province based on multi-source remote sensing data [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2024.
- [21] 黄国金. 基于 InVEST 模型喀斯特流域生态系统服务功能评估 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- HUANG G J. Evolution of ecosystem services in karst basin on InVEST model: A case study the Zunyi section of the middle reaches of the Wujiang River basin in Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [22] ZHAO L, YU W, MENG P, et al. InVEST model analysis of the impacts of land use change on landscape pattern and habitat quality in the Xiaolangdi Reservoir area of the Yellow River basin, China [J]. *Land Degradation and Development*, 2022, 33(15):2870-2884.
- [23] GE B M, ZHOU J, YANG R P, et al. Lower land use intensity promoted soil macrofaunal biodiversity on a reclaimed coast after land use conversion [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 306:e107208.
- [24] 奚世军, 安裕伦, 李阳兵, 等. 基于景观格局的喀斯特山区流域生态风险评估: 以贵州省乌江流域为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3):712-721.
- XI S J, AN Y L, LI Y B, et al. Ecological risk assessment of karst mountain watershed based on landscape pattern: A case study of Wujiang River basin in Guizhou Province [J]. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3):712-721.

(下转第 391 页)

- 2022,42(6):889-901.
- Mu L L, WANG X R, WANG C X. Coupling coordination of population-economy-housing rental market: An analysis based on data from 35 large and medium-sized cities[J]. Tropical Geography, 2022, 42(6): 889-901.
- [27] 张扬,陈雨露,张杨,等.成渝城市群“三生空间”时空格局与耦合协调分析[J].地域研究与开发,2022,41(5): 119-125.
- ZHANG Y, CHEN Y L, ZHANG Y, et al. Coupling coordination and spatio-temporal pattern analysis of the “production-living-ecological” space in Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Areal Research and Development, 2022, 41(5): 119-125.
- [28] 和军,张依,张勇之.我国共同富裕水平测度与时空演化特征[J].当代经济研究,2023,331(3):77-89.
- HE J, ZHANG Y, ZHANG Y Z. Measurement and space-time evolution characteristics of common prosperity in China[J]. Contemporary Economic Research, 2023, 331(3): 77-89.
- [29] 陈明星,梁龙武,王振波,等.美丽中国与国土空间规划关系的地理学思考[J].地理学报,2019,74(12):2467-2481.
- CHEN M X, LIANG L W, WANG Z B, et al. Geographical thinking on the relationship between beautiful China and land spatial planning[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2467-2481.
- [30] 张晓玲,吕晓.国土空间用途管制的改革逻辑及其规划响应路径[J].自然资源学报,2020,35(6):1261-1272.
- ZHANG X L, LYU X. Reform logic of territorial space use regulation and the response path of land spatial planning[J]. Journal of Nature Resources, 2020, 35(6): 1261-1272.
- (上接第380页)
- [25] PAL S, TALUKDAR S, GHOSH R. Damming effect on habitat quality of riparian corridor[J]. Ecological Indicators, 2020, 114: e106300.
- [26] XIE B, ZHANG M M. Spatio-temporal evolution and driving forces of habitat quality in Guizhou Province[J]. Scientific reports, 2023, 13(1): e6908.
- [27] JIAO L, YANG R, CHEN B, et al. Variation, Determinants and prediction of carbon emissions in Guizhou, a new economic growth pole in southwest China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: e138049.
- [28] 贵州省环境保护厅.贵州省乌江流域水环境保护规划(2015—2020年)[Z].贵州,2015.
- Environmental Protection Department of Guizhou Province. water environment protection plan for the Wujiang River Basin in Guizhou Province (2015—2020)[Z]. Guizhou, 2015.
- [29] SUN M Y, LI X H, YANG R J, et al. Comprehensive partitions and different strategies based on ecological security and economic development in Guizhou Province, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: e122794.
- [30] 程静,王鹏,陈红翔,等.渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素[J].干旱区地理,2023, 46(3):481-491.
- CHEN J, WANG P, CHEN H X, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in the Weihe river basin and its topographic gradient effects and influencing factors[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 481-491.