

doi: 10.12097/gbc.2023.11.016

2000—2030 年云贵高原碳储量和生境质量时空格局演变

郭佳晖^{1,2}, 刘晓煌^{1,3*}, 李洪宇^{1,3}, 邢莉圆^{1,3}, 杨朝磊^{4,5}, 雒新萍^{1,3}, 王然^{1,3},
王超³, 赵宏慧³

GUO Jiahui^{1,2}, LIU Xiaohuang^{1,3*}, LI Hongyu^{1,3}, XING Liyuan^{1,3}, YANG Chaolei^{4,5}, LUO Xinping^{1,3},
WANG Ran^{1,3}, WANG Chao³, ZHAO Honghui³

1. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055;

2. 新疆大学地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830017;

3. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;

4. 金沙江高山峡谷区水土资源演化与固碳增汇效应云南省野外科学观测研究站, 云南 楚雄 651400;

5. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650111

1. Key Laboratory of Natural Resource Coupling Process and Effects, Ministry of Natural Resources, Beijing 100055, China;

2. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China;

3. Command Center of Natural Resource Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China;

4. Yunnan Province Field Science Observation and Research Station on the Evolution of Soil and Water Resources and the Carbon Sequestration Enhancement Effects in the Alpine Gorge Area of the Jinsha River, Chuxiong 651400, Yunnan, China;

5. Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Kunming 650111, Yunnan, China

摘要: 云贵高原岩溶地质条件导致当地的石漠化严重、生态环境脆弱, 对该地区的生态系统服务功能进行评价有助于改善生态环境问题。基于 InVEST 模型和 PLUS 模型定量评估了云贵高原 2000—2030 年的碳储量和生境质量, 结合自然资源区划, 分析该地区 2000—2030 年碳储量和生境质量的时空变化特征及驱动因子。结果表明: 2000—2030 年云贵高原碳储量均值为 7.323×10^9 t, 多年呈现下降趋势, 共减少 0.471×10^9 t, 空间上呈西部高、东部低的特征, 最高的四级区划是丽江市东部楚雄北部小区; 碳储量贡献率最高的地类是林地 (>60%), 其次是耕地 (>28%); 碳储量空间分异解释力最强的因子是高程, 交互作用最强的因子是土地利用和坡向。2000—2030 年云贵高原生境质量均值为 0.755, 多年呈下降趋势, 共减少 0.016, 空间上呈现西部高、中部和东部低的特征, 最高的四级区划是丽江市西部—怒江傈僳族自治州东南部小区; 林地的生境质量最高, 指数为 0.83。研究结果揭示了云贵高原碳储量与生境质量演变规律及分布格局, 可为该区生态环境建设提供科学依据。

关键词: InVEST 模型; 碳储量; 生境质量; PLUS 模型; 地理探测器; 云贵高原

中图分类号: X171.1; P96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)09-1485-13

Guo J H, Liu X H, Li H Y, Xing L Y, Yang C L, Luo X P, Wang R, Wang C, Zhao H H. Evolution of spatial and temporal patterns of carbon stocks and habitat quality on the Yunnan-Guizhou Plateau during 2000—2030. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(9): 1485–1497

收稿日期: 2023-11-08; 修订日期: 2024-04-11

资助项目: 中国地质调查局项目《自然资源要素监测与综合观测工程》(编号: DD20230112)、《云南中北部干热河谷区土壤侵蚀调查监测与评价》(编号: DD20220888)、《自然资源观测监测一体化技术体系研究》(编号: DD20230514), 中国地质科学院基础科研业务费用专项资金《黄河三角洲滨海盐土植被对浅层地下水变化的响应》(编号: JKYQN202362), 荒漠-绿洲生态监测与修复工程技术创新中心开放基金课题《开孔河流域绿洲耕地扩张的水土资源匹配与生态格局优化研究》(编号: 2023KFKTA001)

作者简介: 郭佳晖(1998-), 男, 在读硕士生, 从事自然资源学和地理信息科学。E-mail: 734908307@qq.com

*** 通信作者:** 刘晓煌(1972-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事自然资源观测研究。E-mail: 15313256806@mail.cgs.gov.cn

Abstract: The karst geological conditions of the Yunnan–Guizhou Plateau have led to serious rocky desertification and fragile ecological environment. Evaluating the ecosystem service function of the region can help to improve ecological environment problems. Based on the InVEST model and PLUS model, the carbon stock and habitat quality of the Yunnan–Guizhou Plateau from 2000 to 2030 are quantitatively evaluated. Combined with natural resource zoning, the temporal and spatial variation characteristics and driving factors of carbon stock and habitat quality in the region from 2000 to 2030 are analyzed. The results show that from 2000 to 2030, the average carbon stock of the Yunnan–Guizhou Plateau is 7.323×10^9 t, showing a downward trend over the years, with a total reduction of 0.471×10^9 t. Spatially, it was characterized by high in the west and low in the east. The highest fourth-level zoning was the subdivision of the northern part of Chuxiong in the eastern part of Lijiang City. The land type with the highest contribution to carbon stock was the forest land (>60%), followed by cultivated land (>28%). The factor with the strongest explanatory power for the spatial differentiation of carbon stocks was elevation, and the factor with the strongest interaction was land use and slope direction. From 2000 to 2030, the average habitat quality of the Yunnan–Guizhou Plateau is 0.755, showing a downward trend over the years, with a total reduction of 0.016. Spatially, it was characterized by high in the west and low in the middle and east. The highest fourth-level zoning was the subdivision in the west of Lijiang City and the southeast of Nujiang Lisu Autonomous Prefecture. The habitat quality of forest land is the highest, with an index of 0.83. The research results reveal the evolution law and distribution pattern of carbon stock and habitat quality on the Yunnan–Guizhou Plateau, which can provide a scientific basis for the ecological environment construction of the region.

Key words: InVEST model; carbon stock; habitat quality; PLUS model; GeoDetector; Yunnan-Guizhou Plateau

碳储量和生境质量是评价生态系统功能的 2 个重要指标。陆地生态系统的碳储量是全球碳储存的重要组成部分,在全球碳循环和气候变化中起着重要的作用(Houghton, 2003)。明晰一个地区的碳储量及其空间分布,对生态环境保护具有重要意义。生境质量可以反映自然资源(李晓秀, 1997; 袁承程等, 2021; 付宇佳等, 2022; 刘晓煌, 2022)及人类赖以生存环境的优劣情况,是生态系统健康水平的重要表征,亦能指示生态系统服务功能的强弱(王有良等, 2022)。因此,明晰碳储量和生境质量的时空变化,有助于为当地政府科学掌握生态环境状况和环境治理提供有效的参考意见。

21 世纪以来,碳储量、生境质量等生态系统相关研究不断涌现,许多学者从不同角度针对单一或综合性生态系统碳储量和生境质量进行了研究。目前,计算碳储量的方法主要有地面清查法(戴子熠等, 2022; 赵虎等, 2023; 詹泽东等, 2024)、遥感估算法(卢雅焱等, 2022; 李彦娥等, 2023)、模型估算法(刘洋等, 2021; 张斌等, 2023; 付宇佳等, 2024)等。从空间尺度上看,有省市级(孙方虎等, 2023)、流域(朱敏等, 2020)及其他尺度。计算生境质量方法主要分为 2 类:一是实地调查法,通过实地调查对研究区的生境质量进行评估,但该方法处理过程繁琐;二是模型模拟法(Yuan et al., 2021),其中 InVEST 模型(刘小玉等, 2024; 郑吉林等, 2024)应用较广泛,该模型基于土地利用数据对研究区的生境质量进行评

估,利用 InVEST 模型进行研究有各类尺度:省(赵博轩等, 2022; 郑艺文等, 2022; 曾真等, 2023)、市(唐娇娇等, 2023; 吴艳霞等, 2023)、县(赵智源等, 2022; 韩宇等, 2023)等,研究内容多从生境质量时空变化、影响因素等方面展开。相比于传统估算方法,InVEST 模型计算碳储量、生境质量的方法凭借其运行速度快、方法简单等优势被广大研究者应用于其他方面的研究(孙方虎等, 2023)。目前,有学者利用 InVEST 模型耦合其他模型进行预测(张凯琪等, 2022),但多数模型仍然存在无法从时空上动态捕捉土地利用斑块演化等缺点,存在一定的局限性,而 PLUS 模型(刘静静等, 2023)能够有效提高预测精度。因此,综合利用 InVEST 模型和 PLUS 模型对云贵高原碳储量和生境质量进行研究。

云贵高原是中国的第四大高原,以喀斯特地貌为主,该地区水土流失量大、生态环境脆弱。当前,该地区生态研究主要集中在县级区域尺度(李俊等, 2023; 曾欣怡等, 2023),对云贵高原整体区域研究较少,无法掌握整个区域的生态系统服务功能,因此亟需开展相关评估。本次研究利用 PLUS 模型预测该地区 2025 年、2030 年的土地利用数据,利用 InVEST 模型分析得到该地区 2000—2030 年碳储量和生境质量,选取地形、气候、社会经济等因子探究其对碳储量和生境质量的解释力。对云贵高原的碳储量及生境质量进行评估,为该地区的生态环境治理提出科学的指导方案。

1 研究区概况

研究区为中国自然资源综合区划二级分区(张海燕等, 2020; 赖明等, 2021)中云贵高原亚热带森林亚区(以下简称云贵高原)。云贵高原是世界上喀斯特地貌发育最典型的地区之一, 该地区位于中国的西南部(东经 98°58′~106°53′、北纬 22°50′~30°22′), 地势西北高、东南低(杨乐心等, 2015)(图 1), 海拔为 400~3500 m, 总面积 31.23×10⁴ km², 年平均气温为 3.0~24.0℃, 多年平均降水量为 600~2000 mm(刘晓燕等, 2019), 该地区地质构造复杂, 地层岩性复杂, 近地表岩土体破碎, 不稳定岩土体广泛

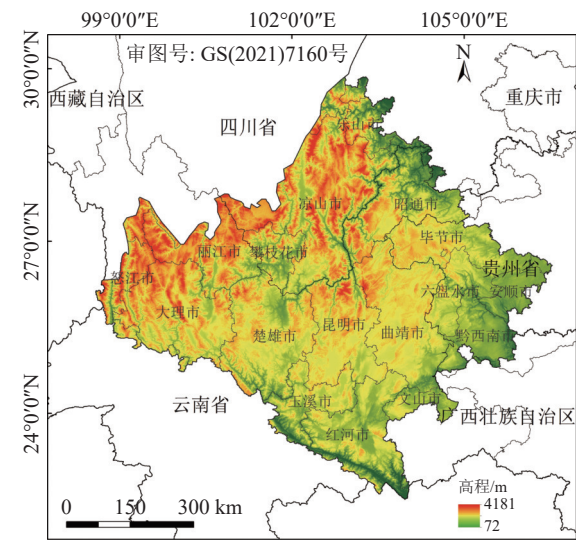


图 1 研究区地理位置及高程
Fig. 1 Geographic location and elevation of the study area

分布, 稳定性差, 水土流失较严重, 生态环境受到破坏。

2 数据来源

本次研究所需数据包括 2 类: 气候环境数据(徐新良, 2018a)和社会经济数据(徐新良, 2018b)。气候环境数据包括年平均实际蒸散量、年降水数据、高程数据、流域数据、归一化植被指数(NDVI)、土地利用数据、土壤数据; 社会经济数据包括人口、国内生产总值、铁路、高速、道路。其来源及时间见表 1。同时, 为保证数据空间精度的异质性, 统一转化为 1 km×1 km 精度的栅格类型, 统一坐标为 WGS_1984_Albers。

本次研究综合利用 InVEST 及 PLUS 模型分析该地区 2000—2030 年的碳储量与生境质量, 具体技术流程见图 2。

3 研究方法

3.1 InVEST 模型碳储量模块

InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型, 指生态系统服务功能与权衡综合评价模型(Sharp, 2020; Babbar et al, 2021)。其中, 碳储量模块将陆地生态系统中的碳储量划分为(刘冠等, 2021)地上(C_{above})、地下(C_{below})生物碳、土壤碳(C_{soil})、死亡有机碳(C_{dead}), 将这 4 个碳库的平均碳密度与相应土地利用类型面积相乘并求和得到总碳储量, 计算公式为:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (1)$$

式中: C_{total} 为研究区总碳储量(t); C_{above} 为地上

表 1 数据来源信息

Table 1 Information sheet on data sources

数据类型	数据名称	数据来源	年份
气候环境数据	年平均实际蒸散量	国家青藏高原数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)	2000—2020年
	年降水数据		
	NDVI	资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI)	2000—2020年
	土地利用数据		
	高程数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/home)	2020年
	流域数据	https://www.hydrosheds.org/	2020年
	土壤数据	国家地球系统科学数据中心(http://soil.geodata.cn/)	2020年
社会经济数据	国内生产总值、人口数据	资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI)	2019年
	铁路数据		
	高速公路数据	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn)	2020年
	国道/二级道路数据		

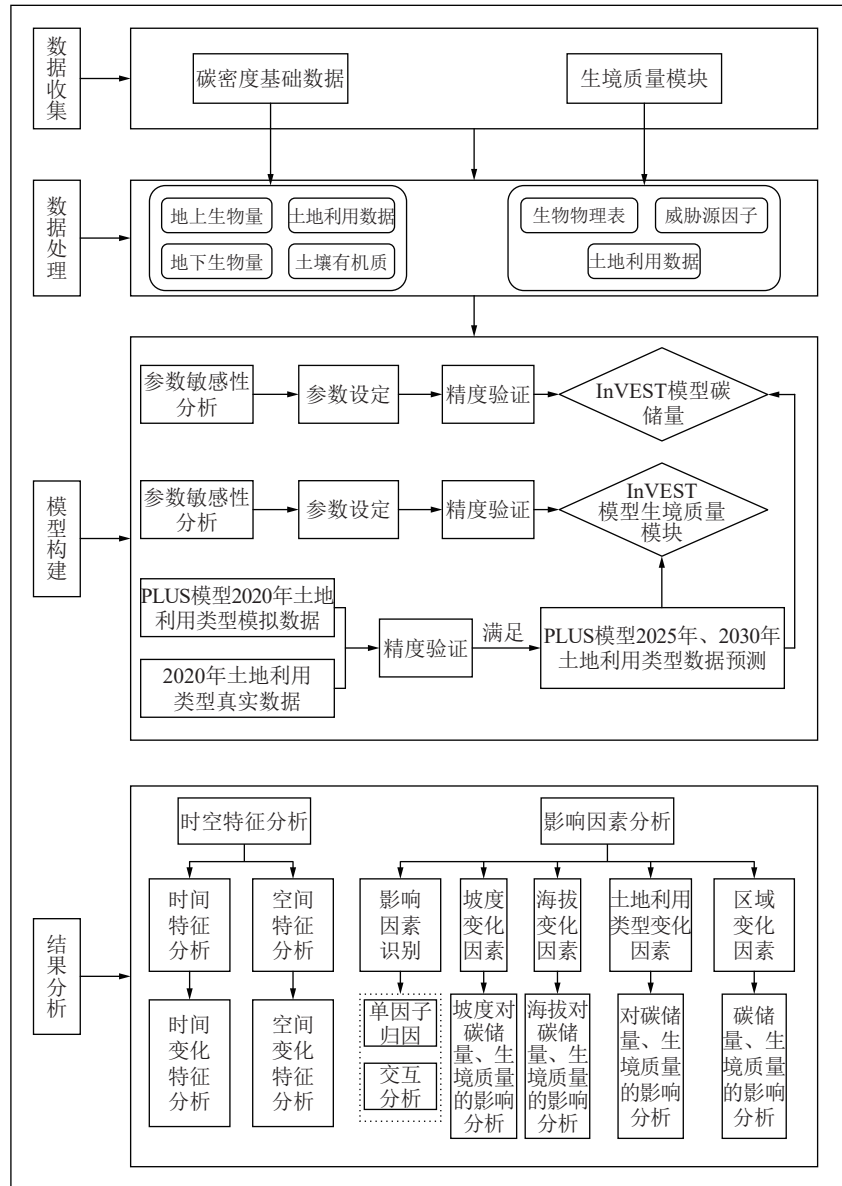


图2 技术流程图

Fig. 2 Technical flowchart

生物碳(t); C_{below} 为地下生物碳(t); C_{soil} 为土壤碳(t); C_{dead} 为死亡有机碳(t)。

基于不同用地类型的碳密度和土地利用数据,计算研究区每种土地利用类型的总碳储量:

$$C_{totali} = (C_{abovei} + C_{belowi} + C_{soili} + C_{dead_i}) \times A_i \quad (2)$$

式中: C_{abovei} 、 C_{belowi} (存在于植物活根系统中的碳)、 C_{soili} 和 C_{dead_i} 为每种土地利用的平均碳密度; A_i 为该土地利用的面积; C_{totali} 为每种土地利用类型的总碳储量。

本次研究使用的碳密度数据是根据众多学者的研

究结果(陈海鹏等, 2017), 总结出适用于研究区的碳密度数据, 并参考了元谋县和永仁县的实测数据(表2)。

3.2 InVEST 模型生境质量模块

InVEST 生境质量模块通过结合景观类型敏感性和外界威胁强度进行综合计算。计算公式如下(武丹等, 2020; 景晓玮等, 2021; 李子等, 2021):

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\omega_r / \sum_{r=1}^R \omega_r \right) r_y i_{xy} \beta_x S_{jr} \quad (3)$$

式中: D_{xj} 为生境类型 j 中 x 栅格的生境退化度; R 为威胁源个数; ω_r 为威胁源 r 的权重; Y_r 为威胁源

表 2 云贵高原不同土地利用类型碳密度

Table 2 Carbon intensity of different land use types on the Yunnan-Guizhou Plateau t/hm²

土地类型	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	1.97	0.38	23.93	1.00
林地	20.36	67.72	171.50	7.80
草地	6.48	17.83	71.00	0
建设用地	0.08	0	0	0
未利用地	0.04	0	0	0

的栅格数; r_y 为栅格 y 的胁迫值; β_x 为威胁源对栅格 x 的可达性(β_x 的取值在 0~1 之间); S_{jr} 为生境类型 j 对威胁源 r 的敏感度; i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫值 r_y 对栅格 x 的胁迫水平, 分为线性衰减和指数衰减 2 种(表 3)。

参考相关文献(景晓玮等, 2021; 曾欣怡等, 2023)后, 将耕地、建设用地和未利用地作为威胁因子(表 4)。

3.3 PLUS 模型

采用 PLUS(Patch-Generating Land Use Simulation)模型对 2025 年、2030 年的云贵高原土地利用变化进行了预测。PLUS 模型(胡丰等, 2022)通过分析 2 期土地利用数据间各类用地扩张部分及驱动因子空间特征, 进行采样计算, 逐一获取各类用地发展概率, 再获取土地利用变化综合概率, 最后结合随机斑块生成、过渡转移矩阵和阈值递减机制实现优化, 确定最终用地方式(孙欣欣等, 2023)。

表 3 各威胁源的敏感性及生境适宜度

Table 3 Sensitivity and habitat suitability of each threat source

生境类型	生境适宜度	$D_{耕地}$	$D_{建设用地}$	$D_{未利用地}$
耕地	0.5	0.3	0.4	0.4
林地	1	0.45	0.8	0.2
草地	0.7	0.45	0.6	0.3
水域	0.9	0.6	0.8	0.3
建设用地	0	0	0	0
未利用地	0.2	0.2	0.2	0.2

表 4 胁迫因子最大影响距离及权重

Table 4 Maximum impact distance and weight of stressors

威胁因子	耕地	建设用地	未利用地
最大胁迫距离/km	4	10	2
权重	0.6	1	0.5
空间衰退类型	指数	指数	指数

3.3.1 土地扩张分析策略 (LEAS)

LEAS 是对 2 个日期的土地利用数据进行分析, 获取各土地利用类型的发展概率。计算公式(Liang et al., 2020)为:

$$P_{i,k(X)}^d = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(X) = d]}{M} \quad (4)$$

式中: X 为由驱动因子组成的向量; M 为决策树数量; d 取值为 0 或者 1, 0 表示其他地类不可以转变为地类 k , 1 表示其他土地利用类型可以转变为土地利用类型 k ; $h_n(X)$ 为决策树为 n 时计算得到的土地利用预测类型; $I[h_n(X) = d]$ 为决策树的指数函数; $P_{i,k(X)}^d$ 为空间单元 i 处 k 类土地利用类型增长的概率。

3.3.2 基于多类随机斑块种子的 CA 模型 (CARS)

CARS 是一个场景驱动的土地利用模拟模型。土地利用类型 k 的转化总概率($P_{O,i,k}^{d=1,d}$)公式(Liang et al., 2020)为:

$$P_{O,i,k}^{d=1,d} = P_{i,k}^{d=1} \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t \quad (5)$$

式中: $P_{i,k}^{d=1}$ 为土地利用类型 k 在单元格 i 上的增长概率; $\Omega_{i,k}^t$ 为单元格 i 的领域效应; D_k^t 为未来土地利用 k 需求的影响。

3.3.3 精度验证

将预测的 2020 年土地利用类型数据与现有 2020 年的土地利用类型数据进行对比, 得到的 kappa 系数为 0.81, 表明该模型所预测的结果准确度较高, 可以利用该数据进行后续研究分析。

3.4 地理探测器

地理探测器用于度量不同因子对碳储量时空分异的影响程度大小。公式如下(王劲峰, 2017):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中: q 表示自变量对因变量时空分布的影响程度大小; L 为影响因子数; N_h 、 N 表示 h 类和整个研究区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 表示区 h 和整个区域的方差。

4 结果与分析

4.1 云贵高原碳储量变化

4.1.1 碳储量时空分布

云贵高原 2000—2030 年每 5 年的碳储量分别为 7.40×10^9 t、 7.39×10^9 t、 7.40×10^9 t、 7.41×10^9 t、

7.43×10^9 t、 7.30×10^9 t 和 6.92×10^9 t, 整体呈下降趋势。2000—2005 年下降了 0.01×10^9 t, 下降幅度较小; 2005—2020 年呈上升趋势, 从 7.39×10^9 t 上升到 7.43×10^9 t, 上升了 0.04×10^9 t; 2020—2030 年呈现下降趋势, 下降了 0.49×10^9 t。

云贵高原碳储量空间格局整体呈现西部高、东部低的特征(图 3), 具有显著的空间异质性。2000—2025 年, 云贵高原碳储量在空间分布格局上整体保持不变, 2030 年预计该地区碳储量整体会有所下降, 碳储量密度最高值为 26566 t/km^2 。碳储量整体分布状况与区域内的土地利用类型有很大关联, 高值区域主要位于林地、草地等植被覆盖较高的地区,

低值区域主要位于耕地、建设用地等固碳能力较弱的地区。

分析云贵高原四级区划的碳储量变化(图 4)。2020 年碳储量排在前三的是攀枝花市—凉山中南部山地针叶林小区、乐山市东部—凉山北部—雅安市东南部山地阔叶林小区、大理白族自治州山地针叶林灌丛小区, 碳储量分别为 0.670×10^9 t、 0.560×10^9 t 和 0.559×10^9 t, 这些地区主要为林地、草地, 植被覆盖率比其他地区高, 碳存储能力强。3 个小区碳储量总和为 1.789×10^9 t, 占总碳储量的 24.08%, 是该地区主要碳储存的资源小区。云贵高原四级区划的碳储量分布不均, 碳储量最高的地区比最低的地区碳储

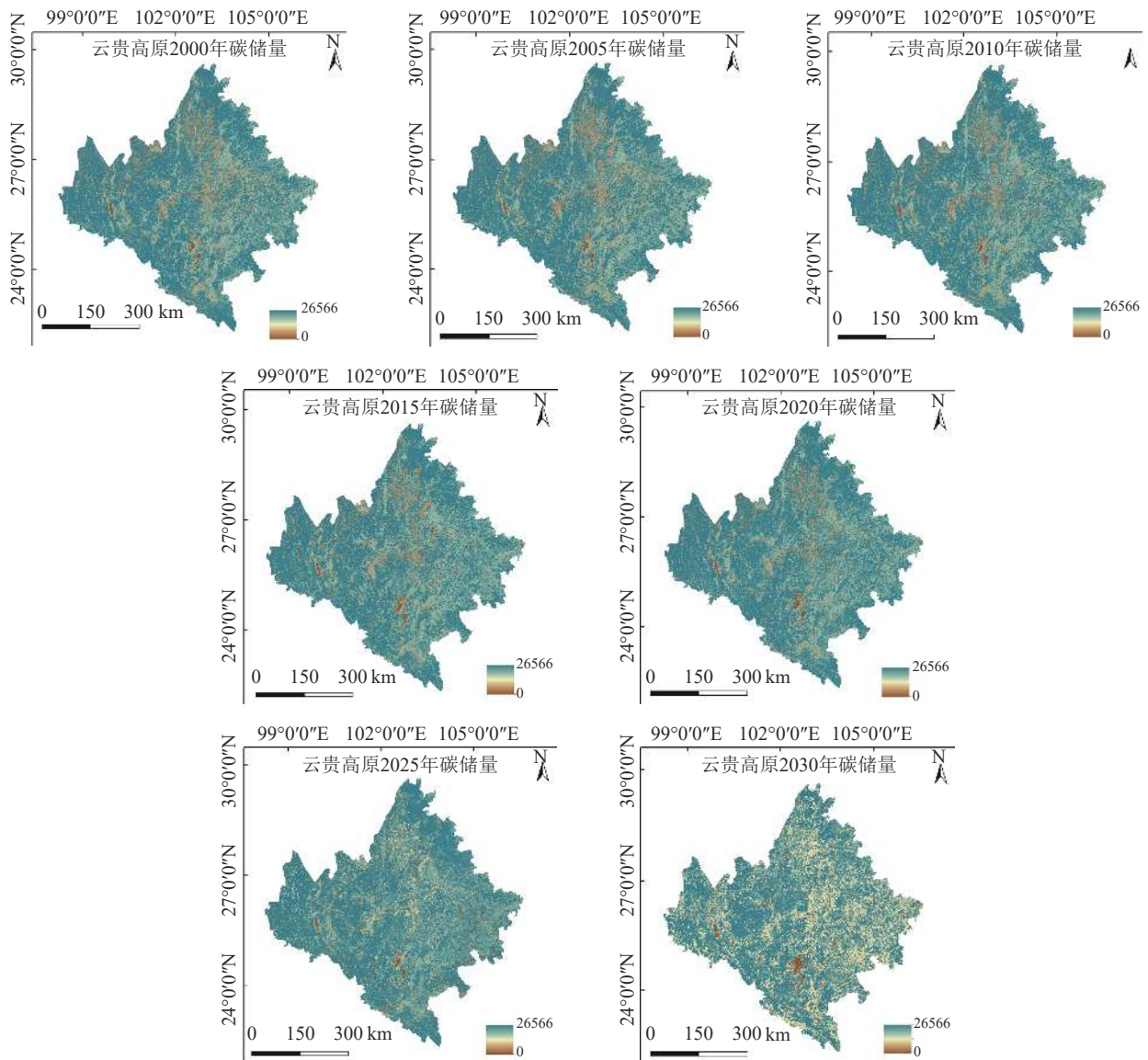


图 3 云贵高原 2000—2030 年碳储量空间分布(碳储量单位为 t/km^2)

Fig. 3 Spatial distribution of carbon stocks on the Yunnan-Guizhou Plateau during 2000—2030

量高 0.42×10^9 t。

4.1.2 各土地利用类型碳储量分析

由图 5 可知, 2000—2020 年碳储量贡献率最高的地类是林地, 其次是耕地, 其贡献率分别稳定在 60% 和 28%; 2000—2020 年, 林地和耕地是云贵高原碳储量的主要贡献地类, 总贡献占比高于 85%; 草地的贡献率在 5% 左右; 建设用地和未利用地的贡献率极低, 小于 0.5%, 可忽略不计。2000—2020 年, 耕地、林地和建设用地的碳储量分别增加了 1.37×10^8 t、 4.98×10^7 t 和 6.06×10^6 t, 草地和未利用地的碳储量分别减少了 1.60×10^8 t 和 4.24×10^4 t。除建设用地外, 其余 5 个地类在这 20 年间的碳储量变化不大。

碳储量贡献由大到小的地类分别是林地、耕地、草地、建设用地、未利用地和水域。研究区林地面积最大时为 193013 km^2 , 占总面积的 61.80%, 碳储量为 4.90×10^9 t。从土地利用类型变化看, 虽然林地、耕地的面积及其碳储量有所减少, 但仍是研究区最重要的碳库。

4.1.3 云贵高原碳储量驱动因素分析

将云贵高原产水量、高程、坡度、坡向、蒸散发、降雨、NDVI、土地利用 8 个驱动因子作为自变量, 碳储量作为因变量输入地理探测器模型, 因子探测结果如表 5 所示。 q 值越大, 说明因子对碳储量分异性解释力越强。 q 值从大到小分别是高程、坡向、降雨、土地利用、坡度、NDVI、蒸散发、产水量。对云贵高原碳储量解释力最强的是高程。

地理探测器中的交互探测可以评估 2 种因子共同作用对碳储量是增强还是削弱。各因子交互作用探测结果如图 6 所示。交互作用较强的是土地利用和坡向、降雨和坡向、高程和坡向, q 值分别是 0.889、0.889、0.877。植物有效含水量和坡向单独作用于产水量是 q 值较低, 解释力较弱, 而与降水量共同作用时产水量均呈现明显增强。

4.2 云贵高原生境质量分析

4.2.1 云贵高原生境质量时空分析

云贵高原 2000—2030 年每 5 年的平均生境质量指数分别为 0.770、0.765、0.760、0.757、0.753、0.730、0.754, 整体呈下降趋势。2000—2025 年生境质量指数从 0.770 下降到 0.730, 下降了 0.040; 2025—2030 年呈上升趋势, 上升了 0.024。

云贵高原生境质量空间格局呈现西部高、中东部低的特征(图 7)。2000—2030 年高等级生境质

量主要分布在研究区西部, 包括丽江市西部—怒江傈僳族自治州东南部山地针叶林小区、丽江市东部—楚雄北部山地针叶林灌丛小区、楚雄彝族自治州西部山地针叶林灌丛小区等地区, 其他地区零散分布, 用地类型以林地为主; 低等级生境质量主要分布在曲靖市中部黄土梁峁农作物小区、曲靖市南部—文山西北部黄土梁峁农作物小区北部地区、昆明市东南部—红河东部黄土梁峁热性草丛类小区等地区。

30 年间云贵高原生境质量在空间分布上总体变化不大。西部地区高程较高、林地的覆盖面积大, 受人类活动影响较小, 因此生境质量指数相对较高; 中东部地区大多数为耕地, 受人为扰动影响较大, 现代化工业设施的建立使草地、林地面积不断减少, 因此生境质量较低。

分析云贵高原四级区划的碳储量变化, 2020 年生境质量排在前三的是丽江市西部—怒江傈僳族自治州东南部山地针叶林小区、丽江市东部—楚雄北部山地针叶林灌丛小区和乐山市东部—凉山北部—雅安市东南部山地阔叶林小区, 生境质量指数分别为 0.922、0.858、0.821。生境质量指数最低的地区为曲靖市中部黄土梁峁农作物小区, 生境质量指数为 0.638。

由图 8 可知, 云贵高原四级区划下的生境质量分布不均, 差别较明显, 生境质量最高的地区比生境质量最低的地区高 0.284。

4.2.2 各土地利用类型生境质量分析

明晰各地类的生境质量, 可为当地政府进行针对性治理提供有效的科学依据。利用分区工具得到如下结果(图 9): 2000—2020 年该地区林地的生境质量最高, 2000—2020 年生境质量指数均在 0.830 以上, 其次是草地和水域, 二者生境质量指数均在 0.670 以上, 耕地和未利用地的生境质量指数分别稳定在 0.59 和 0.49, 建设用地的生境质量最低, 指数与年份呈现负相关, 2000—2020 年生境质量指数由 0.36 下降到 0.31。2000—2020 年该地区各地类生境质量都呈现下降的趋势, 耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地分别减少了 0.007、0.018、0.016、0.017、0.057 和 0.057。生境质量贡献度由高到低的地类分别是林地、草地、水域和建设用地。

4.2.3 生境质量与高程的关系

为探究生境质量与高程的关系, 利用分区工具

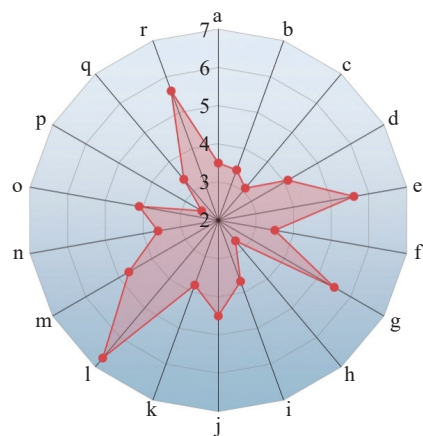


图 4 云贵高原 2000—2020 年不同区划碳储量

Fig. 4 Carbon stocks in different zones of the Yunnan–Guizhou Plateau during 2000–2020

a—红河哈尼族彝族自治州山地热性草丛类小区; b—昆明市东南部-红河东部黄土梁茆热性草丛类小区; c—曲靖市南部-文山西北部黄土梁茆农作物小区; d—玉溪市-昆明市西南部山地针叶林小区; e—大理白族自治州山地针叶林灌丛小区; f—昆明市西部-楚雄东北部山地针叶林小区; g—楚雄彝族自治州西部山地针叶林灌丛小区; h—曲靖市中部黄土梁茆农作物小区; i—六盘水市南部-黔西南山地热性草丛小区; j—六盘水-毕节-安顺山地灌丛小区; k—丽江市东部-楚雄北部山地针叶林灌丛小区; l—攀枝花市-凉山中南部山地针叶林小区; m—六盘水市西部-昆明市东北部山地热性灌丛类小区; n—毕节市西部-邵通市西南部山地温性山地草甸草原小区; o—丽江市西部-怒江傈僳族自治州东南部山地针叶林小区; p—凉山彝族自治州东部山地温性山地草甸草原小区; q—邵通市中部山地热性草丛类小区; r—乐山市东部-凉山北部-雅安市东南部山地阔叶林小区

得到如下结果(图 10): 各生境质量等级在不同海拔分布不均, 较低等级的生境质量在海拔 0~2000 m 的占比最高, 其面积达到 67376.93 km², 高等级的生境质量在海拔 2000~3500 m 的占比最高, 其面积分别为 9268.63 km²、1229.00 km² 和 32.56 km²。随着海拔的升高, 高等级生境质量占比明显增高, 说明在低海拔地区, 受人类活动的影响生境质量等级较低。

5 讨 论

本次研究利用 InVEST 模型进行碳储量和生境质量评估, 利用 PLUS 模型预测该地区土地利用状况, 借助土地利用类型数据结合 InVEST 模型实现对

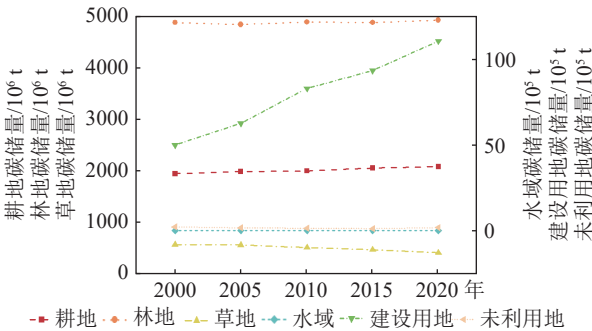


图 5 各土地利用类型的碳储量

Fig. 5 Carbon stocks by different land-use types

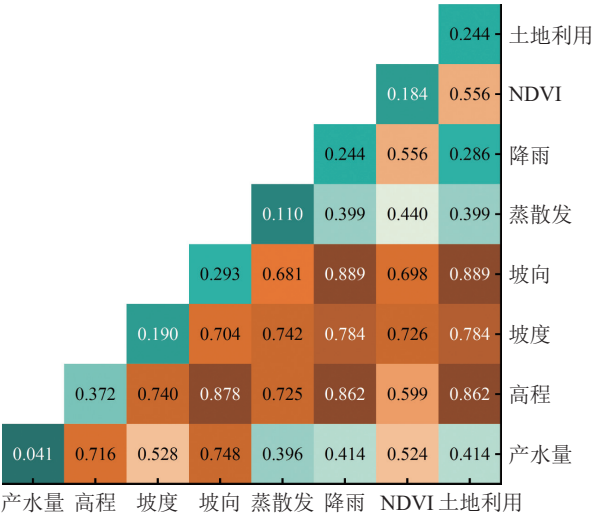


图 6 碳储量驱动因子交互探测结果

Fig. 6 Carbon stock driver interaction detection results

碳储量和生境质量的预测。本次研究表明, 土地利用变化对碳储量和生境质量有显著影响, 生态保护对于恢复生态系统功能具有重要作用, 亦可为治理生态环境提出有效的参考依据。

本次研究应用 InVEST 模型和 PLUS 模型对云贵高原碳储量和生境质量进行了分析。该地区为中国生态屏障做出重要贡献, 山地、林地是该地区的主要土地利用类型, 云南省人均用地率较低, 25°以上的陡坡土地占全省土地总面积的近 40%(许开鹏等, 2016)。该地区碳储量在 2000—2005 年呈现下降趋势, 下降了 0.01×10⁹ t, 2005—2020 年呈现上升趋势, 上升了 0.04×10⁹ t。根据其土地利用类型的分布(许

表 5 驱动因子探测结果

Table 5 Driver detection results

因子	产水量	高程	坡度	坡向	蒸散发	降雨	NDVI	土地利用
q	0.041	0.372	0.190	0.293	0.110	0.243	0.184	0.243

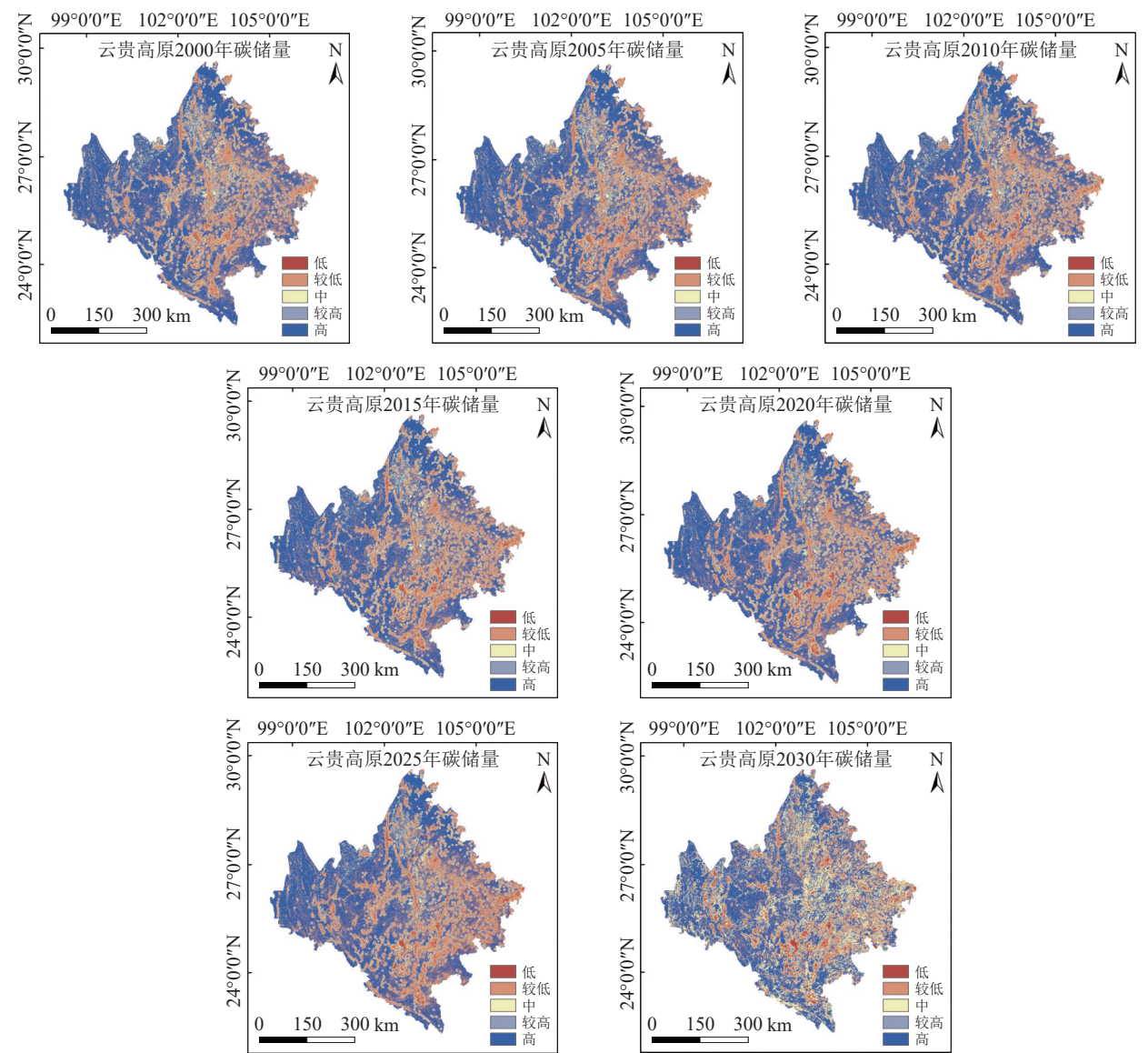


图 7 云贵高原 2000—2030 年生境质量等级空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of habitat quality classes on the Yunnan-Guizhou Plateau during 2000—2030

玉凤等, 2018), 应在北部地区加强对林地的保护; 在中部地区, 应科学合理的发展建设用地, 适当减缓对生态的破坏速度; 在南部地区, 适当增加林地、草地的覆盖面积。工业化城市的发展破坏原有的土地类型, 使生境质量指数高的地类转为生境质量低的地类, 生境质量指数有所下降。本次研究的生境质量时空分布结果与前人(陈艳等, 2022; 胥丽等, 2023; 曾欣怡等, 2023)的研究结果较接近, 碳储量的时空分布结果与陈海鹏等(2017)和李俊等(2023)研究结果较接近, 说明本次研究结果较符合云贵高原的实际情况, 能够反映近年来云贵高原碳储量及生境质

量的变化。本文创新性地利用 PLUS 模型预测该地区土地利用状况, 实现了对碳储量、生境质量的预测, 分析未来 10 年的碳储量与生境质量发展情况, 能够更好地为未来云贵高原生态发展提供科学的指导意见。综上所述, 研究区 2000—2030 年碳储量与生境质量一直处于较高水平。

本次研究应用的是传统评估模型, 参数设置可能存在一定的主观性。获取实测数据分析该地区的生态系统服务功能是今后的研究内容, 并且拟通过多种模块对该地区的生态系统服务进行评价, 以便解释云贵高原生态系统功能的发展规律。

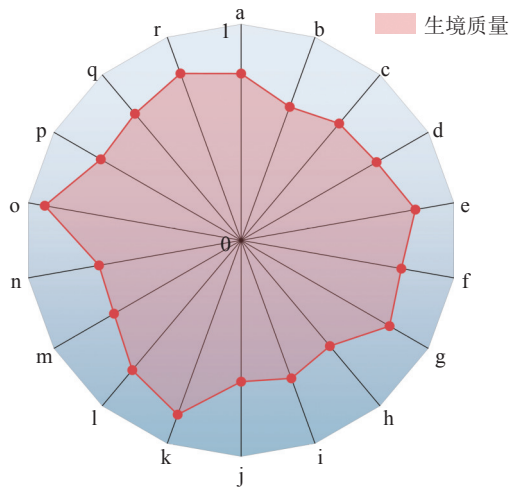


图 8 云贵高原 2000—2020 年各四级区划生境质量指数雷达图

Fig. 8 Habitat quality index radar map of the Yunnan-Guizhou Plateau at four levels of zoning during 2000—2020

a—红河哈尼族彝族自治州山地热性草丛类小区; b—昆明市东南部-红河东部黄土梁热性草丛类小区; c—曲靖市南部-文山西北部黄土梁农作物小区; d—玉溪市-昆明市西南部山地针叶林小区; e—大理白族自治州山地针叶林灌丛小区; f—昆明市西部-楚雄东北部山地针叶林小区; g—楚雄彝族自治州西部山地针叶林灌丛小区; h—曲靖市中部黄土梁农作物小区; i—六盘水市南部-黔西南山地热性草丛小区; j—六盘水-毕节-安顺山地灌丛小区; k—丽江市东部-楚雄北部山地针叶林灌丛小区; l—攀枝花市-凉山中南部山地针叶林小区; m—六盘水市西部-昆明市东北部山地热性灌丛类小区; n—毕节市西部-邵通市西南部山地温性山地草甸草原小区; o—丽江市西部-怒江傈僳族自治州东南部山地针叶林小区; p—凉山彝族自治州东部山地温性山地草甸草原小区; q—邵通市中部山地热性草丛类小区; r—乐山市东部-凉山北部-雅安市东南部山地阔叶林小区

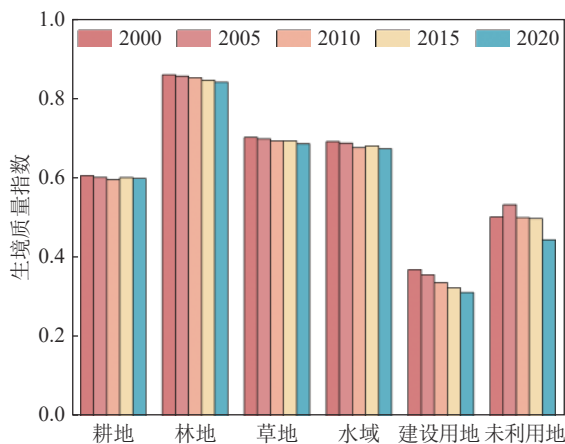


图 9 云贵高原 2000—2020 年各地类生境质量指数

Fig. 9 Habitat quality indices for various species on the Yunnan-Guizhou Plateau during 2000—2020

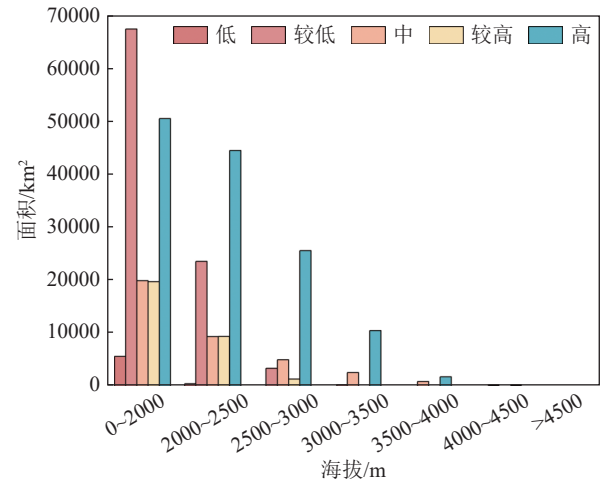


图 10 云贵高原不同海拔下生境质量指数分布

Fig. 10 Distribution of habitat quality indices at different elevations on the Yunnan-Guizhou Plateau

6 结 论

本次研究借助 InVEST 和 PLUS 模型对云贵高原 2000—2030 年的碳储量和生境质量进行了评估, 主要结论如下。

(1) 云贵高原 2000—2030 年的碳储量分别为 7.40×10^9 t、 7.39×10^9 t、 7.40×10^9 t、 7.41×10^9 t、 7.43×10^9 t、 7.30×10^9 t 和 6.92×10^9 t, 整体呈现下降的趋势。2020 年碳储量最高的四级区划为攀枝花市—凉山中南部山地针叶林小区, 储量为 0.670×10^9 t。

(2) 林地对碳储量的贡献率最高(>60%), 未利用地的贡献率极低(<0.0024%)。

(3) 对云贵高原碳储量解释力最强的因子是高程, q 值为 0.372, 交互作用最强的是土地利用和坡向, q 值为 0.889。

(4) 云贵高原 2000—2030 年的生境质量分别是 0.770、0.765、0.760、0.757、0.753、0.730 和 0.754。整体呈现下降—上升的趋势。生境质量最高的地区为丽江市西部—怒江傈僳族自治州东南部山地针叶林小区, 生境质量指数为 0.922; 生境质量指数最低的地区为曲靖市中部黄土梁农作物小区, 生境质量指数为 0.639。

(5) 林地的生境质量指数最高, 其值 20 年来在 0.83 左右, 建设用地的生境质量指数最低, 其值 20 年来为 0.31。

References

Babbar D, Areendran G, Sahana M, et al. 2021. Assessment and

- prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India[J]. *Journal of Cleaner Production*, 278: 123333.
- Chen H P, Dou M. 2017. Study on carbon storage and spatial pattern based on InVEST model in Xiaojiang River Basin of Yunnan Province[J]. *Journal of Anhui Agriculture Sciences*, 45(12): 51–54(in Chinese with English abstract).
- Chen Y, Wu R, Ma Y W, et al. 2022. Spatial and temporal differentiation and simulation of habitat quality in typical karst areas[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 38(12): 1593–1603(in Chinese with English abstract).
- Dai Z Y, Liao L R, Liang J H, et al. 2022. Blue carbon stocks of mangrove from 1988 to 2018 in Beihai, Guangxi[J]. *Marine Environmental Science*, 1: 8–15(in Chinese with English abstract).
- Fu Y J, Tan C H, Liu X H, et al. 2022. Definition, classification, observation and monitoring of natural resources and their application in territorial planning and governance[J]. *Geology in China*, 49(4): 1048–1063.
- Fu Y J, Liu X H, Sun X L, et al. 2024. Spatial-temporal variation of ecosystem carbon storage driven by land use in northwest inland desert resource region in recent 30 years[J]. *Geological Bulletin of China*, 43(2/3): 451–462 (in Chinese with English abstract).
- Han Y, Mao Y F, Yang L, et al. 2023. Dynamic responses of habitat quality to LUCC in the Dongting Lake Basin[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 43(6): 148–157(in Chinese with English abstract).
- Houghton R A. 2003. The contemporary carbon cycle[J]. *Treatise on Geochemistry*, 8: 473–513.
- Hu F, Zhang Y, Guo Y, et al. 2022. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions[J]. *Arid Land Geography*, 45(4): 1125–1136(in Chinese with English abstract).
- Jing X W, Zhao Q J. 2021. Research on temporal and spatial changes of habitat quality in Guizhou Province based on InVEST Model[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2021,(5): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Lai M, Wu S Y, Zhang H Y, et al. 2021. Analysis on the characteristics of natural resources dynamic changes in Southwest China based on comprehensive regionalization[J]. *Geological Survey of China*, (2): 83–91(in Chinese with English abstract).
- Li J, Yang D H, Wu F Z. 2023. 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*, 43(1): 378–387(in Chinese with English abstract).
- Li X X. 1997. Evaluation system of ecological environment quality in Beijing mountain area[J]. *Resources Science*, 19(5): 31–35(in Chinese with English abstract).
- Li Y E, Wang H Q, Liu J, et al. 2023. Spatial and temporal distribution and driving factors of ecosystem carbon sink in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 56(4): 185–195(in Chinese with English abstract).
- Li Z, Zhang Y F. 2021. Spatiotemporal evolution of ecosystem services in the main and tributaries of Weihe River Basin based on InVEST model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 35(4): 178–185 (in Chinese with English abstract).
- Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. 2021. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 85: 101569.
- Liang X, Liu X, Chen G, et al. 2020. Coupling fuzzy clustering and cellular automata based on local maxima of development potential to model urban emergence and expansion in economic development zones[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(10): 1930–1952.
- Liu G, Li G Q, Li J, et al. 2021. Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model[J]. *Arid Zone Research*, 38(1): 267–274 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Li X, Peng P H. 2023. Landscape ecological risk assessment of Ya'an-Kangding Expressway based on PLUS model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 43(3): 148–158 (in Chinese with English abstract).
- Liu X H. 2022. Preface to the album of integrated observations and studies of natural resource elements[J]. *Pratacultural Science*, 39(12): 2470(in Chinese with English abstract).
- Liu X Y, Li X Y, Gao Y F, et al. 2019. Changes of rainfall threshold for sediment producing in the loess hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. *J. Hydraul. Eng.*, 50: 1177–1188(in Chinese with English abstract).
- Liu X Y, Li S J, He H Y, et al. 2024. Analysis of land use change and habitat quality evolution based on InVEST and PLUS models: Example from Hanzhong Basin[J]. *Northwestern Geology*, 57(4): 271–284(in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Zhang J, Zhou D M, et al. 2021. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 41: 4052–4065 (in Chinese with English abstract).
- Lu Y Y, Xu X L, Li J C, et al. 2022. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model[J]. *Arid Zone Research*, 39(6): 1896–1906 (in Chinese with English abstract).
- Sharp R, Douglass J, Wolny S, et al. 2020. InVEST 3.8.7 User's Guide[R]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, the nature conservancy, and World Wildlife Fund: Stanford, CA, USA.
- Sun F H, Fang F M, Hong W L, et al. 2023. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model[J]. *J. Soil Water Conserv.*, 37: 151–158 (in Chinese with English abstract).
- Sun X X, Xue J H, Dong L N. 2023. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 39(1): 41–51(in Chinese with English abstract).
- Tang J J, Yu C, Zhang W W, et al. 2023. Habitat quality assessment and prediction in Suzhou based on CLUE-S and InVEST models[J]. *J.*

- Environ. Eng. Technol., 13(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Wang J F, Xu C D. 2017. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 72(1): 116–134 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y L, Lin K M, Song C S, et al. 2022. Short-term effects of thinning on carbon storage in Chinese fir plantation ecosystems[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 46(3): 65–73(in Chinese with English abstract).
- Wu Y X, Liu F N, Chen B T. 2023. Spatial and Temporal Evolution and Drivers of Habitat Quality of Urban Agglomeration in Lower Yellow River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 43(4): 396–404 (in Chinese with English abstract).
- Xu K P, Wang J J, Chi Y Y, et al. 2016. Spatial optimization and sustainable use of land based on an integrated ecological risk in the Yun-Gui plateau region[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(3): 821–827(in Chinese with English abstract).
- Xu L, Guo C S, Luo S L. 2023. Predicted habitat quality of Kunming City based on PLUS and InVEST Model[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 8(1): 102–112(in Chinese with English abstract).
- Xu X L. 2018. Spatial distribution dataset of annual Vegetation index (NDVI) in China[DS]. Resource and environmental science data registration and publication system (<http://www.resdc.cn/DOI>). DOI: 10.12078/2018060601 (in Chinese).
- Xu X L. 2018. Dataset of river basin and river network in China extracted based on DEM[DS]. Resource and environmental science data registration and publication system(<http://www.resdc.cn/DOI>). DOI:10.12078/2018060101(in Chinese).
- Xu Y F, Chen C, Chen H S. 2018. Dynamic variations of land use of Yunnan-Guizhou Plateau in the period of 2001–2013[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018, (11): 44–48(in Chinese with English abstract).
- Yang J, Huang X. 2021. The 30 m annual landcover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 13(8): 3907–3925.
- Yang L X. 2015. Temporal-spatial characterization of atmospheric environment and climatic resources over the Yunnan-Guizhou Plateau[D]. Master's thesis, Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Yuan B D, Fu L N, Zou Y A, et al. 2021. Spatio temporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI[J]. Journal of Cleaner Production, (Suppl 1): 126995.
- Yuan C C, Gao Y, Liu X H. 2021. Current situation and consummate suggestions for natural resources classification systems in China[J]. Geological Survey of China, 8(2): 14–19(in Chinese with English abstract).
- Zeng X Y, Song Y H. 2023. Temporal and spatial evolution of habitat quality in Kunming based on InVEST model[J]. Agriculture and Technology, 43(8): 47–51(in Chinese with English abstract).
- Zeng Z, Ai J W, Chen L Y. 2023. Research on the temporal and spatial evolution of habitat quality and terrain gradient effect in mountainous city: Taking the urban area of Sanming as an example[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 46(1): 100–109(in Chinese with English abstract).
- Zhan Z D, Xi G Y, Ren B Z, et al. 2024. A Study on the spatial changes of carbon storage and carbon fixation potential in five counties of Qiqihar, Heilongjiang Province[J/OL]. Geological Bulletin of China, 1–18[2024-08-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20240322.1127.004.html>(in Chinese with English abstract).
- Zhang B, Xia Q Y, Dong J, et al. 2023. Research on the Impact of land use change on the spatio-temporal pattern of carbon storage in metropolitan suburbs: Taking Huangpi District of Wuhan City as an example[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 39(6): 699–712(in Chinese with English abstract).
- Zhang H Y, Fan J W, Huang L, et al. 2020. Theories and technical methods for the comprehensive regionalization of natural resources in China[J]. Resources Science, 42(10): 1870–1882(in Chinese with English abstract).
- Zhang K Q, Chen J J, Hou J K, et al. 2022. Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model[J]. China Environ. Sci, 42(6): 2799–2809(in Chinese with English abstract).
- Zhao B X, Li S J, Ma J, et al. 2022. Evaluation of habitat quality in Jilin Province based on InVEST model[J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition), 54(2): 132–141(in Chinese with English abstract).
- Zhao H, Zhao C Q, Yuan H, et al. 2023. Determination of peak age of carbon storage in Larix kaempferi plantations in Western Hubei[J]. Journal of Forest and Environment, 43(2): 132–138(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z Y, Wu G S, Lin H H. 2022. Research on the habitat quality of Changting County based on LUCC and InVEST model[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 17(4): 37–45(in Chinese with English abstract).
- Zheng J L, Cai Y L, Guo X Y, et al. 2024. Study on land use change and carbon stock in northern Shanxi Province based on InVEST model[J]. Geological Bulletin of China, 43(1): 173–180(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y W, Liu X H, Xiong M Q, et al. 2022. Spatial-temporal characteristics of ecological-living-productive land and its carbon emissions in Xinjiang from 1990 to 2018[J]. Pratacultural Science, 39(12): 2565–2577(in Chinese with English abstract).
- Zhu M. 2020. Study on the Carbon Fixation Evaluate of the Green-land System in the Xi'an Chanba Eco-region[D]. Xi'an University of Architecture and Technology master's degree thesis (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈海鹏, 窦苗. 2017. 基于 InVEST 模型的云南小江流域生态系统碳储量及空间格局研究[J]. 安徽农业科学, 45(12): 51–54.
- 陈艳, 吴睿, 马月伟, 等. 2022. 典型喀斯特地区生境质量的时空分异与模拟研究[J]. 生态与农村环境学报, 38(12): 1593–1603.
- 戴子熠, 廖丽蓉, 梁嘉慧, 等. 2022. 1988—2018 年广西北海红树林蓝

- 碳储量变化分析[J]. 海洋环境科学, 41(1): 8–15, 23.
- 付宇佳, 谭昌海, 刘晓煌, 等. 2022. 自然资源定义、分类、观测监测及其在国土规划治理中的应用[J]. 中国地质, 49(4): 1048–1063.
- 付宇佳, 刘晓煌, 孙兴丽, 等. 2024. 近 30 年西北内陆荒漠资源大区土地利用驱动下生态系统碳储量时空变化[J]. 地质通报, 43(2/3): 451–462.
- 韩宇, 毛逸飞, 杨伶, 等. 2023. 洞庭湖流域生境质量对 LUCC 的动态响应[J]. 中南林业科技大学学报, 43(6): 148–157.
- 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 2022. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 45(4): 1125–1136.
- 景晓玮, 赵庆建. 2021. 基于 InVEST 模型的贵州省生境质量时空变化研究[J]. 国土与自然资源研究, 2021(5): 1–5.
- 赖明, 吴淑玉, 张海燕, 等. 2021. 基于综合区划的中国西南地区自然资源动态变化特征分析[J]. 中国地质调查, 8(2): 83–91.
- 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 2023. 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, 43(1): 378–387.
- 李晓秀. 1997. 北京山区生态环境质量评价体系初探[J]. 资源科学, 19(5): 31–35.
- 李彦娥, 王化齐, 刘江, 等. 2023. 西北地区生态系统碳汇时空分布特征及相关驱动因子分析[J]. 西北地质, 56(4): 185–195.
- 李子, 张艳芳. 2021. 基于 InVEST 模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J]. 水土保持学报, 35(4): 178–185.
- 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 2021. 基于 InVEST 模型的 1999–2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 38(1): 267–274.
- 刘静静, 李旭, 彭培好. 2023. 基于 PLUS 模型的雅康高速路段景观生态风险评价[J]. 水土保持通报, 43(3): 148–158.
- 刘晓煌. 2022. 自然资源要素综合观测和研究专辑序言[J]. 草业科学, 39(12): 2470.
- 刘晓燕, 李晓宇, 高云飞, 等. 2019. 黄土丘陵沟壑区典型流域产沙的降雨阈值变化[J]. 水利学报, 50(10): 1177–1188.
- 刘小玉, 李士杰, 何海洋, 等. 2024. 基于 InVEST 和 PLUS 模型下的土地利用变化及生境质量演变分析: 以汉中盆地为例[J]. 西北地质, 57(4): 271–284.
- 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 2021. 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, 41(10): 4052–4065.
- 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 2022. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 39(6): 1896–1906.
- 孙方虎, 方凤满, 洪炜林, 等. 2023. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J]. 水土保持学报, 37(1): 151–158.
- 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 2023. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 生态与农村环境学报, 39(1): 41–51.
- 唐娇娇, 余成, 张宏伟, 等. 2023. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的苏州市生境质量评估及预测[J]. 环境工程技术学报, 13(1): 377–385.
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 72(1): 116–134.
- 王有良, 林开敏, 宋重升, 等. 2022. 间伐对杉木人工林生态系统碳储量的短期影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 46(3): 65–73.
- 吴艳霞, 刘方南, 陈宝童. 2023. 黄河流域下游城市群生境质量时空演变及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 43(4): 396–404.
- 胥丽, 国朝胜, 罗绍龙. 2023. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的昆明市生境质量研究[J]. 三峡生态环境监测, 8(1): 102–112.
- 许开鹏, 王晶晶, 迟妍妍, 等. 2016. 基于综合生态风险的云贵高原土地利用优化与持续利用对策[J]. 生态学报, 36(3): 821–827.
- 许玉凤, 陈宸, 陈洪升. 2018. 2001–2013 年云贵高原土地利用动态变化分析[J]. 中国水土保持, 2018(11): 44–48.
- 徐新良. 2018a. 基于 DEM 提取的中国流域、河网数据集[DS]. 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>). DOI: 10.12078/2018060101.
- 徐新良. 2018b. 中国年度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集[DS]. 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>). DOI: 10.12078/2018060601.
- 杨乐心. 2015. 云贵高原区域大气环境及气候资源时空特征分析[D]. 南京信息工程大学硕士学位论文.
- 袁承程, 高阳, 刘晓煌. 2021. 我国自然资源分类体系现状及完善建议[J]. 中国地质调查, 8(2): 14–19.
- 曾欣怡, 宋钰红. 2023. 基于 InVEST 模型的昆明市生境质量时空演变分析[J]. 农业与技术, 43(8): 47–51.
- 曾真, 艾婧文, 陈凌艳, 等. 2023. 山地城市生境质量时空演变及地形梯度效应研究——以三明市区为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 46(1): 100–109.
- 詹泽东, 西广越, 任柄璋, 等. 2024. 黑龙江省齐齐哈尔五县碳存储量空间变化规律及固碳潜力研究[J/OL]. 地质通报, 1–18[2024–08–26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20240322.1127.004.html>.
- 张斌, 夏秋月, 董捷, 等. 2023. 大都市郊区土地利用变化对碳储量时空格局影响研究: 以武汉市黄陂区为例[J]. 生态与农村环境学报, 39(6): 699–712.
- 张海燕, 樊江文, 黄麟, 等. 2020. 中国自然资源综合区划理论研究与技术方案[J]. 资源科学, 42(10): 1870–1882.
- 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 2022. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. 中国环境科学, 42(6): 2799–2809.
- 赵博轩, 李淑杰, 马剑, 等. 2022. 基于 InVEST 模型的吉林省生境质量评价[J]. 东北师大学报(自然科学版), 54(2): 132–141.
- 赵虎, 杜超群, 袁慧, 等. 2023. 鄂西日本落叶松人工林碳储量成熟龄研究[J]. 森林与环境学报, 43(2): 132–138.
- 赵智源, 武国胜, 林惠花. 2022. 基于 LUCC 和 InVEST 模型的长汀县生境质量研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 17(4): 37–45.
- 郑吉林, 蔡艳龙, 郭晓宇, 等. 2024. 基于 InVEST 模型的晋北土地利用变化与碳储量研究[J]. 地质通报, 43(1): 173–180.
- 郑艺文, 刘晓煌, 熊茂秋, 等. 2022. 1990–2018 年新疆“三生”用地时空变化特征及其碳排放效应[J]. 草业科学, 39(12): 2565–2577.
- 朱敏. 2020. 西安浐灞生态区城市绿地空间植被碳储量估算研究[D]. 西安建筑科技大学硕士学位论文.