

## 云南省植被固碳提升潜力的多模型评价及空间格局

章译文,何云玲,张增艳,肖安洋,刘萱蔓

(云南大学地球科学学院,昆明 650500)

**摘要:** [目的] 为定量评估云南省植被固碳提升潜力的空间格局,揭示其与国家重点生态功能区的空间关系。[方法] 以植被净初级生产力(net primary productivity)为核心指标,综合运用气候模型、时空替代模型和遥感观测最大值模型,通过多模型模拟结果对比分析,评估植被固碳提升潜力的分布特征。[结果] 1) 云南省植被固碳提升潜力值为68.25~277.44 Mt(以C计),3种模型的评估结果在量值上存在一定差异,时空替代模型最为乐观,遥感观测最大值模型最为保守。2) 植被固碳提升潜力与植被类型及海拔梯度密切相关,潜力核心热点区集中于以普洱市为中心的中南部地区,冷点区分布于滇西北高海拔山地寒温性针叶林地带。3) 植被固碳提升潜力核心热点区与哀牢山、南滚河等国家级自然保护区高度重叠;滇西北的高黎贡山、白马雪山等保护区则与核心冷点区重叠。[结论] 云南省植被固碳提升潜力核心热点区受水热条件驱动高度集中于中南部的低海拔阔叶林区,此格局与国家重点生态功能区的空间关系进一步明确以哀牢山为代表的协同增效区、以白马雪山为代表的保护权衡区,以及以临沧为代表的新潜力区。

**关键词:** 植被生态系统; 固碳潜力; NPP; 多模型对比; 国家重点生态功能区

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)03-0190-10

## Multi-Model Evaluation and Spatial Patterns of Vegetation Carbon Sequestration Enhancement Potential in Yunnan Province

ZHANG Yiwen, HE Yunling, ZHANG Zengyan, XIAO Anyang, LIU Xuanman

(School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to quantitatively evaluate the spatial patterns of vegetation carbon sequestration enhancement potential in Yunnan Province and to reveal its relationship with the national key ecological function zones. [Methods] Net primary productivity (NPP) was used as the core indicator. The climate model, spatiotemporal substitution model, and remote sensing-based maximum observation model were comprehensively applied. Through a multi-model comparison analysis, the distribution characteristics of vegetation carbon sequestration enhancement potential were evaluated. [Results] 1) The vegetation carbon sequestration enhancement potential in Yunnan Province ranged from 68.25 to 277.44 Mt (C). The evaluation results of the three models showed certain differences in magnitude, with the spatiotemporal substitution model being the most optimistic and the remote sensing-based maximum observation model being the most conservative. 2) The vegetation carbon sequestration enhancement potential was closely associated with vegetation type and elevation gradient. The core hotspot areas were concentrated in the central-southern region centered on Pu'er City, while coldspot areas were primarily located in the high-altitude mountainous areas of cold-temperate coniferous forests in northwestern Yunnan. 3) The core hotspot areas of vegetation carbon sequestration enhancement potential highly overlapped with national nature reserves such as Ailao Mountain and Nangun River, while reserves in northwestern Yunnan, such as Gaoligong Mountain and Baima Snow Mountain, overlapped with the core coldspot

收稿日期:2025-10-30

修回日期:2025-12-19

录用日期:2025-12-29

网络首发日期(www.cnki.net):2026-02-04

资助项目:国家自然科学基金项目(42461044);云南大学第十七届研究生科研创新项目(KC-252511901)

第一作者:章译文(2002—),男,硕士研究生,主要从事植被生态系统固碳提升潜力研究。E-mail:13858549066@163.com

通信作者:何云玲(1978—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事区域气候变化及生态效应研究。E-mail:hyl610@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

areas.[**Conclusion**] Driven by hydrothermal conditions, the core hotspot areas of vegetation carbon sequestration enhancement potential in Yunnan Province are highly concentrated in the low-elevation broad-leaved forest areas of the central-southern region. The spatial relationship between this pattern and the national key ecological function zones further identifies synergistic enhancement zones represented by Ailao Mountain, conservation trade-off zones represented by Baima Snow Mountain, and new potential zones represented by Lincang.

**Keywords:** vegetation ecosystem; carbon sequestration potential; NPP; multi-model comparison; national key ecological function zones

**Received:** 2025-10-30

**Revised:** 2025-12-19

**Accepted:** 2025-12-29

**Online**(www.cnki.net): 2026-02-04

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的报告<sup>[1]</sup>揭示,近百年间全球平均气温升高约0.85℃,对自然生态系统和人类社会构成双重威胁。大量化石能源的开采和燃烧、土地利用变化等剧烈的人为活动干扰促使以CO<sub>2</sub>为主的温室气体浓度增加,是气温显著升高的主要原因<sup>[2-3]</sup>。植被生态系统固碳作为关键的自然气候解决方案,吸收约人为CO<sub>2</sub>排放总量的33.7%<sup>[4]</sup>。然而,其长期稳定性正面临气候变化及土地利用变化带来的严峻挑战<sup>[5-6]</sup>。因此,在全球温控目标约束和中国“双碳”战略实施的双重背景下,定量评估植被生态系统固碳潜力即固碳能力上限及其可实现性成为当前的重点研究领域。

植被生态系统固碳指一段时间内植被利用自身光合作用,吸收空气中CO<sub>2</sub>固定在植物体内或者储存在土壤之中的值<sup>[7]</sup>。净初级生产力(net primary productivity, NPP)是植被固碳水平最直观的体现,也是量化植被固碳能力强弱的核心指标<sup>[8]</sup>。现有研究<sup>[8]</sup>多聚焦植被固碳能力现状评估,对其提升潜力的关注较少,然而后者决定固碳量的上限与饱和程度,是实现“碳中和”目标的重要依据。目前有部分研究NPP理论最大值的计算模型<sup>[9-13]</sup>,如徐进勇<sup>[14]</sup>通过Miami模型计算NPP得出中国优先造林地固碳潜力总值为每年6.30亿t;原一荃等<sup>[15]</sup>应用CASA模型计算NPP得出崇明东滩湿地植被固碳潜力每年递增130.24~250.12 t。然而,单一模型往往存在局限性,因此多模型研究逐渐成为发展趋势,如万华伟等<sup>[16]</sup>结合Miami模型和GLASS系列遥感产品估算全国植被固碳潜力,得到广东省是我国固碳能力提升重点区域的结论;WANG等<sup>[17]</sup>通过建立多模型随机森林集成模型评估中国森林生态系统百年固碳潜力。总体来说,学界对植被生态系统固碳潜力的评估已从方法探索进入到深化整合阶段<sup>[18]</sup>,多模型对比与集成分析正是为约束这种不确定性而兴起的重要方向<sup>[19]</sup>。

云南省于2015年在册的国家重点生态功能区共计有38个县级行政区划<sup>[20]</sup>,生态地位极其重要<sup>[21]</sup>,是我国西南生态安全屏障的核心区。现有针对云南省生态功能区的研究,主要集中在宏观层面的生态补偿和转移支付<sup>[22]</sup>、生态系统服务<sup>[23]</sup>、生态风险评价<sup>[24]</sup>等方面,尚缺乏对固碳潜力这一关键的生态功能与国家重点生态功能区的空间关系进行研究。鉴于此,本文以NPP作为衡量植被固碳能力的指标,综合运用气候模型、时空替代模型和遥观测最大模型,定量评估云南省植被固碳提升潜力的空间分异格局,通过多模型一致性对比进一步分析其与国家重点生态功能区的空间关系,识别“增汇”与“保护”两大目标的协同区与权衡区,为该区域优化国土空间格局、实施差异化生态管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

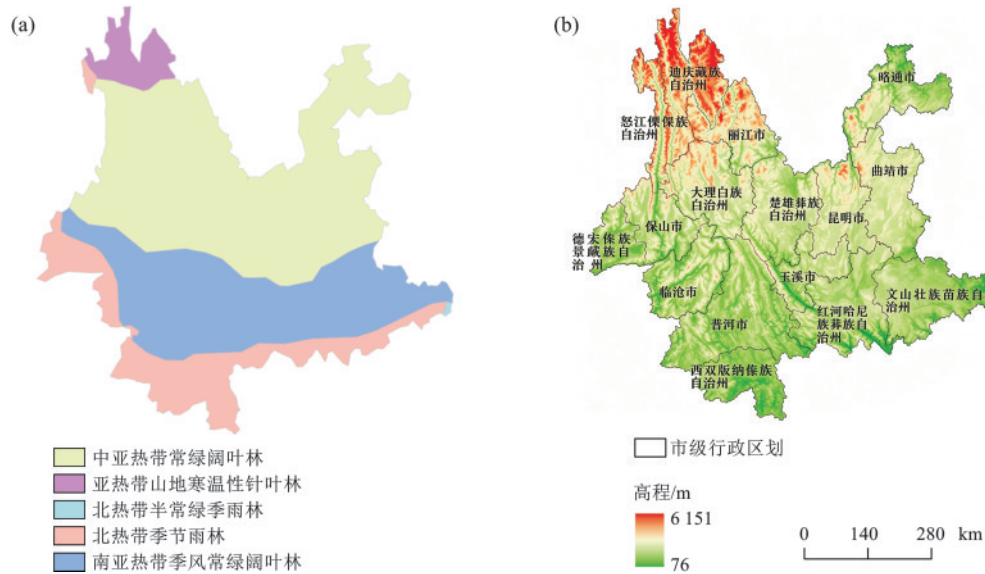
云南省位于中国西南,总面积约39.41万km<sup>2</sup>,地势从西北向东南呈阶梯式下降(图1),海拔高差大,地形以高原、山地为主<sup>[25]</sup>。气候类型复杂多样,兼具热带、亚热带、温带及高山气候特征,受西南季风与地形抬升影响显著,年降水量500~1 000 mm,降水在空间上的不均匀性显著。云南省生态系统类型丰富,森林覆盖率较高,共包含中亚热带常绿阔叶林、南亚热带季风常绿阔叶林、北热带季节雨林、亚热带山地寒温性针叶林、北热带半常绿季雨林5种主要类型,是我国生物多样性最丰富的省份之一和西南生态安全屏障的核心区。

### 1.2 数据来源与预处理

所用数据涵盖植被生产力、气象、地形等多源数据(表1),植被生产力数据为美国国家航空航天局(NASA)提供的2023年MODIS NPP产品,基于经验阈值约束,剔除NPP值高于10 000 g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计)的无效像素点<sup>[26]</sup>,用以表征云南省植被固碳能力的现状基准<sup>[27]</sup>。气象数据包括来源于地球资源数据

云平台的降水和气温,以及国家青藏高原数据中心的潜在蒸散发<sup>[28]</sup>,用于气候模型的NPP计算。地形与土壤数据包括源自地理空间数据云的数字高程模型(DEM)和中国科学院资源环境科学与数据中心的土壤类型数据。结合源自 Google Earth Engine 的

NDVI数据<sup>[29]</sup>、中国科学院资源环境科学与数据中心的 中国植被区划数据及中华人民共和国国务院发布的重点生态功能区划数据。所有栅格数据均通过 ArcGIS 10.8 软件统一坐标系并重采样至 1 km 分辨率,以确保空间分析的一致性。



注:该图基于国家标准地图(审图号为GS20240650)绘制,地图边界无修改。下同。

图 1 研究区域及植被区划

Fig.1 Study area and vegetation zoning

表 1 数据来源基本信息

Table 1 Basic information of data sources

数据种类	初始分辨率	数据来源	时间	数据类型
MODIS NPP	500 m	美国国家航空航天局( <a href="https://search.earthdata.nasa.gov/">https://search.earthdata.nasa.gov/</a> )	2000—2023年	栅格
降水	1 km	地球资源数据云平台( <a href="http://www.gis5g.com">www.gis5g.com</a> )	2023年	栅格
气温	1 km	地球资源数据云平台( <a href="http://www.gis5g.com">www.gis5g.com</a> )	2023年	栅格
潜在蒸散发	1 km	国家青藏高原数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )	2023年	栅格
数字高程模型	30 m	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )		栅格
NDVI	1 km	Google Earth Engine( <a href="https://code.earthengine.google.com/">https://code.earthengine.google.com/</a> )	2023年	栅格
土壤类型	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	2021年	栅格
中国植被区划数据		中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )		矢量
重点生态功能区划		中华人民共和国国务院( <a href="https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5120700.htm">https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5120700.htm</a> )		矢量

### 1.3 研究方法

1.3.1 植被固碳提升潜力计算方法 采用3种不同模型估算植被固碳提升潜力,计算公式为:

$$NPP_{潜力} = NPP_{max} - NPP_{基} \quad (1)$$

式中: $NPP_{潜力}$ 为植被固碳提升潜力, $g/(m^2 \cdot a)$ (以C计); $NPP_{max}$ 为植被固碳理论最大值, $g/(m^2 \cdot a)$ (以C计); $NPP_{基}$ 为植被固碳现状NPP, $g/(m^2 \cdot a)$ (以C计)。以2023年MODIS NPP数据剔除异常值后得

到的年际累积值作为固碳能力现实值(基线值)。

1)基于气候模型的最大潜力值

采用Miami模型、Thornthwaite Memorial模型和周广胜模型3种成熟的气候模型,计算同时期3个模型中的最大值作为理论最大值。计算公式为:

$$NPP_{maxC} = \max(NPP_M, NPP_T, NPP_Z) \quad (2)$$

式中: $NPP_M$ 为Miami模型得到的NPP值; $NPP_T$ 为Thornthwaite Memorial模型得到的NPP值; $NPP_Z$ 为

周广胜模型得到的NPP值。各气候模型的计算方法见文献[27],参数根据云南省气候阈值获取。

### 2) 基于时空替代模型的最大潜力值

时空替代法假设未受到人类活动干扰的前提下在环境条件相似的区域,生态系统会沿着同样的演替模式进行,将相似环境条件区域内出现的最大固碳量视为这一相似环境条件区域可实现的最大固碳量<sup>[28]</sup>,参考文献[29],选取可综合反映云南省不同地区气象、土壤、地形等影响生态系统碳固碳的环境条件因子:干旱指数、土壤类型、坡度、坡向、NDVI共5类数据图层,通过GIS叠加分析将研究区划分为若干环境条件相似的单元。在每个相似单元内,将所观测到的最高NPP值作为该单元统一的理论最大值。

### 3) 基于遥感观测最大值模型的潜力值

最大值模型的原理是叠加2000—2023年不同时期的MODIS NPP值,在像元尺度上保留各时期最佳NPP值,得到此期间气候与人类活动限制下的NPP最优值空间分布<sup>[16]</sup>,将其作为理论最大NPP值。计算公式为:

$$NPP_{\max H} = \max(NPP_{2000}, NPP_{2001}, \dots, NPP_{2023}) \quad (3)$$

式中: $NPP_{2000}, NPP_{2001}, \dots, NPP_{2023}$ 为2000—2023年云南省Modis NPP数据。

1.3.2 植被固碳提升潜力空间格局的分析方法 以植被分区为面状空间单元,利用分区统计方法分别对3个模型计算的固碳提升潜力在各主要植被类型的总量进行核算;以DEM为基础,将海拔以1000 m作为梯度间隔划分成6个海拔梯级带,并分别核算其固碳提升潜力的总量。

为进一步探究固碳提升潜力的空间集聚模式,应用Getis-Ord  $G_i^*$ 空间热点分析来反映植被固碳潜力在空间上的热点和冷点分布,即高值聚集区和低值聚集区,具体计算方法见王博远等<sup>[30]</sup>的研究。在此基础上,通过空间叠置分析对3个模型的热点与冷点图进行综合判别:将全部3个模型均识别为热点(或冷点)的区域定义为“核心热点(或冷点)区”,代表模型间的最高共识;将任意2个模型识别为热点(或冷点)的区域定义为“次级热点(或冷点)区”,其余则为无共识区。

1.3.3 植被固碳提升潜力与重点生态功能区空间关系分析方法 基于上述方法,提取云南省植被固碳能力提升潜力的空间分布,将其与我国重点生态功能区进行叠加分析。统计提升潜力高低值区域与全国重点生态功能区的重合区域,在空间上揭示“增汇”与“保护”两大目标的协同区与权衡区。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被固碳能力现状

由图2可知,2023年云南省植被总固碳量约为480 Mt(以C计),呈现“西南高,东北低”的分布特征。高值主要集中在在水热条件最优越的滇西南和滇南地区[ $>2000 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计)],覆盖西双版纳州、普洱市、临沧市和德宏州。受高寒气候和地形限制,低值区则主要出现在滇西北的迪庆、怒江等地[ $<100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计)];同时,滇东北的昭通、曲靖一带也偏低。

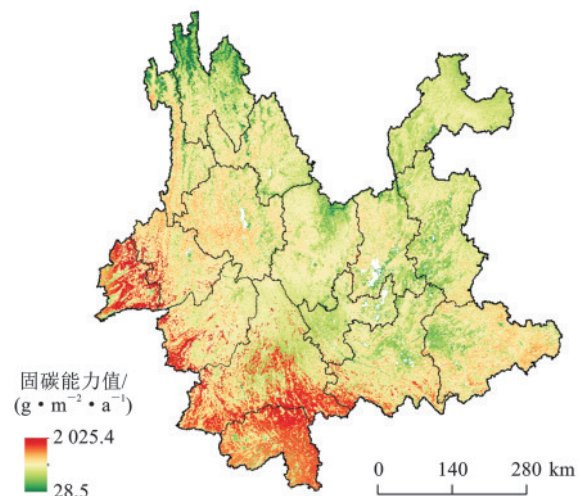


图2 云南省植被固碳能力现状

Fig.2 Current vegetation carbon sequestration capacity in Yunnan Province

### 2.2 植被固碳提升潜力模型模拟

利用3种模型对云南省植被固碳提升潜力进行模拟,为增强不同模型结果在空间分布特征上的可比性,分别将各模型模拟得到的固碳提升潜力按照0~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%、80%~100%分位数划分为极低、较低、中等、较高和高5个等级(图3),结果表明,云南省植被固碳提升潜力总量为68.25~277.44 Mt(以C计)。尽管不同模型对固碳提升潜力的量级刻画存在一定差异,但三者空间格局上存在有较高一致性,即高潜力等级区主要集中于云南省中南部和西南部的低海拔地区,以临沧市和西双版纳州为代表;而滇西北高海拔寒冷地区普遍表现为低潜力等级区。

具体来看,气候模型显示云南省植被固碳提升潜力总量为212.55 Mt(以C计),高值区主要集中在中南部和西部边缘的普洱市、临沧市、德宏州大部分地区,以及西双版纳州的西南部。低固碳提升潜力区则主要分布在西北部的迪庆州、怒江州和西南部的西双版纳州东部区域。滇中地区的固碳提升

潜力处于中等水平。时空替代模型下的云南省植被固碳提升潜力总量为 277.43 Mt(以 C 计),其空间分布呈现高、低值区交错特征,高潜力区主要集中于东部及中南部地区,以昭通、曲靖为核心,并向玉溪、红河州中北部及临沧东北部扩展;低潜力区仍主要分布在西北部的迪庆、怒江及西双版纳州东部地区,其余中西部地区以中等潜力为主。遥感观测最大值模型下的植被固碳潜力值相对其他 2 个模型偏低,仅为 68.24 Mt(以 C 计),整体反映出云南省植被固碳提升潜力相对有限,该模型下高潜力区主

要局限于最南部的普洱市和西双版纳州,并在临沧和红河州南部零星分布,而全省大部分地区均表现为低潜力区。

各模型模拟结果的最大值、最小值、平均值及标准差统计特征见表 2。从统计特征看,时空替代模型的固碳提升潜力平均值和总量最高,对云南省植被固碳潜力的评估相对较为乐观;气候模型结果居中;遥感观测最大值模型的平均值和总量最低,反映在现实气候波动和人类活动约束条件下,植被固碳提升的可实现空间相对有限。

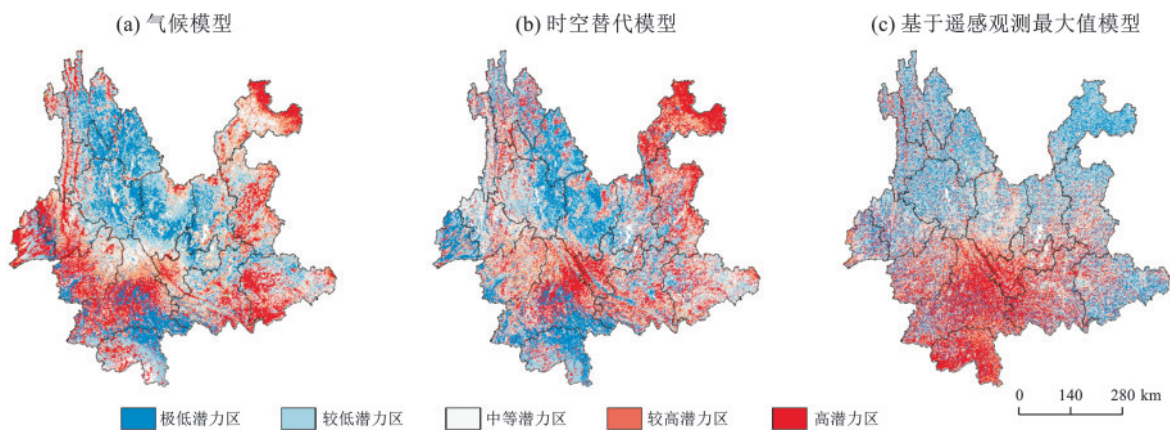


图 3 3 种模型对云南省植被固碳提升潜力的模拟

Fig.3 Simulation of vegetation carbon sequestration enhancement potential in Yunnan Province based on three models

表 2 基于 3 种模型的云南省植被固碳提升潜力统计比较

Table 2 Statistical comparison of vegetation carbon sequestration enhancement potential in Yunnan Province based on three models  $g/(m^2 \cdot a)$

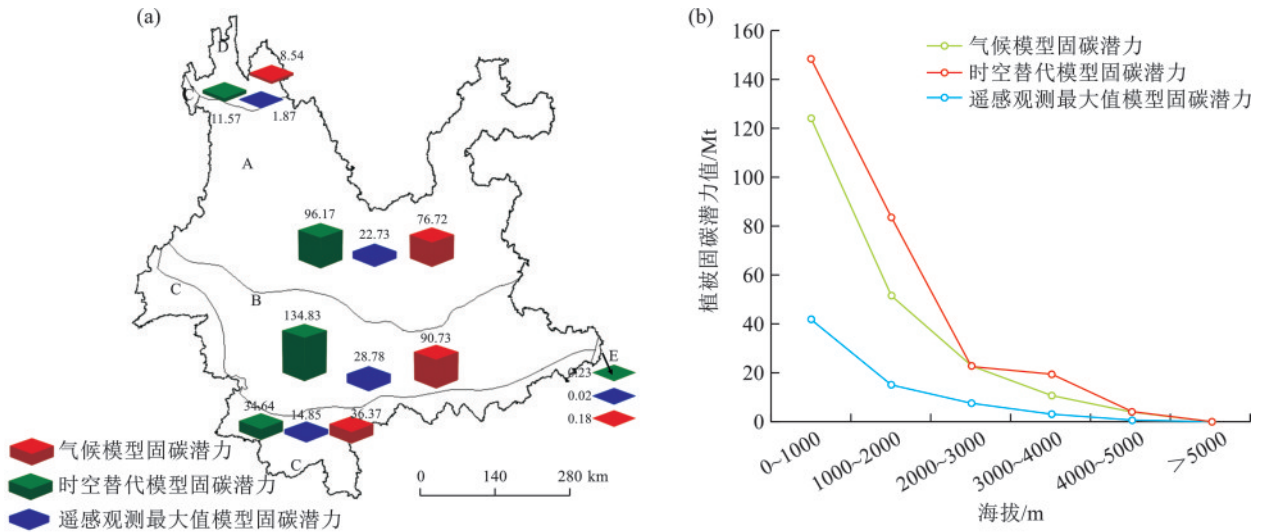
模型	最大值	最小值	平均值	标准差
气候模型	2 115.52	0	471.15	255.32
时空替代模型	1 845.50	0	687.58	301.16
遥感观测最大值模型	1 399.00	0	163.78	146.70
平均值	1 786.67	0	440.84	234.39

### 2.3 植被固碳提升潜力的空间分异特征

图 4 为云南省不同植被带和海拔梯度下植被固碳提升潜力的分异特征。由图 4 可知,不同植被带之间的固碳提升潜力存在显著差异,南亚热带季风常绿阔叶林植被带的固碳潜力最高,在该植被带中时空替代模型固碳潜力总量为 134.83 Mt(以 C 计),气候模型为 90.73 Mt(以 C 计),遥感观测最大值模型为 28.78 Mt(以 C 计);中亚热带常绿阔叶林植被带的固碳潜力仅次于南亚热带季风常绿阔叶林,同样呈现出时空替代模型领先的态势。在北热带季节雨林植被带,时空替代模型的固碳潜力总量达到 34.64 Mt(以 C 计),略低于气候模型的 36.37 Mt(以 C 计);分布于滇西北的亚热带山地

寒温带针叶林植被带固碳潜力较低,3 个模型均不超过 12 Mt(以 C 计);北热带半常绿季雨林植被带受到面积的限制,因此各模型在该植被带的固碳潜力总值都非常低。从海拔梯度看,植被固碳提升潜力随海拔升高整体呈下降趋势(图 4b),高潜力值区域主要集中在 0~1 000 m 的较低海拔地带,随后急剧下降,2 000 m 以上植被固碳潜力衰减幅度变缓。

基于 3 种不同模型得到的植被固碳能力提升潜力热点分析结果见图 5。由图 5 可知,云南省植被固碳能力提升潜力在空间上呈现出集聚特征,不同模型对热点区域的具体位置和范围判定存在一定差异:气候模型的结果显示固碳潜力的热点区域在云南省的南部和西南部,其中以普洱市、临沧市为核心的区域呈现出最强的热点。时空替代模型的热点分布则呈现出截然不同的“东北-中南”格局,滇东北和滇中南是潜力最集中的区域。遥感观测最大值模型唯一显著热点区连片聚集在西双版纳州和普洱市南部的热带区域。三者热点区域的空间位置和面积方面略有差异,但在冷点地区判断上有些共性,即在全省范围西北部高海拔地区为固碳潜力的低值聚积区域。



注:图 a 为不同植被带条件下的植被固碳提升潜力;图 b 为不同海拔梯度条件下的植被固碳提升潜力;A 为中亚热带常绿阔叶林;B 为南亚热带季风常绿阔叶林;C 为北热带季节雨林;D 为亚热带山地寒温性针叶林;E 为北热带半常绿季雨林。

图 4 云南省植被固碳提升潜力的空间分异特征

Fig.4 Spatial differentiation characteristics of vegetation carbon sequestration enhancement potential in Yunnan Province

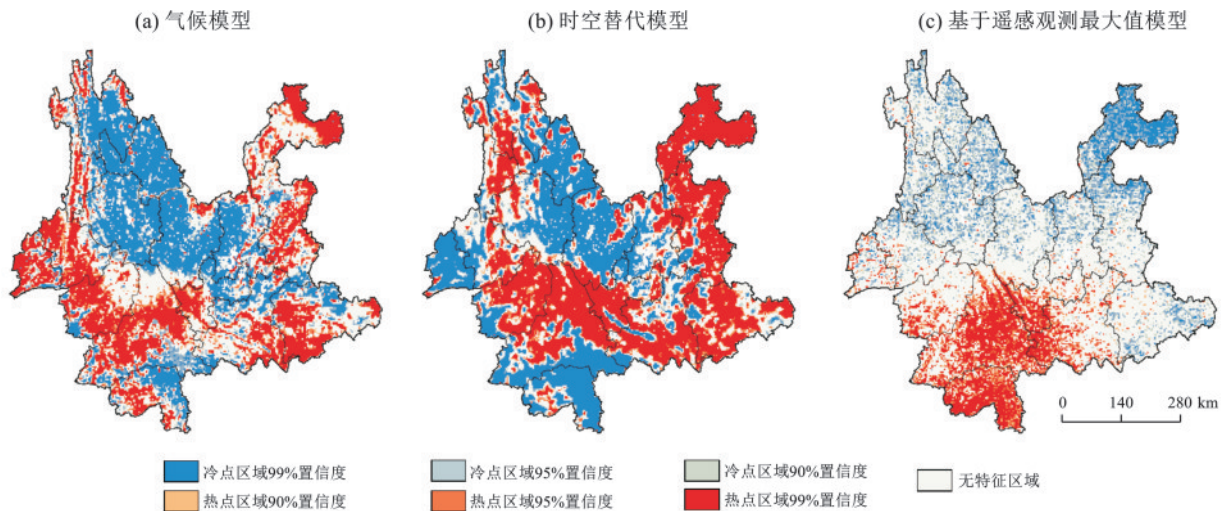


图 5 3 种模型的云南省植被固碳能力提升潜力热点分析

Fig.5 Hotspot analysis of vegetation carbon sequestration enhancement potential in Yunnan Province based on three models

2.4 固碳潜力热点区域与重点生态功能区空间关系分析

图 6 为云南省植被固碳提升潜力多模型热点一致性结果与国家重点生态功能区的空间分布关系。由图 6 可知,云南省重点生态功能区的空间格局依据省内地貌单元与生物地理区划确定。在滇西北地区,以高黎贡山和白马雪山为代表的国家级自然保护区主要生态功能为高山峡谷生态系统完整性维持与珍稀物种多样性保护。滇中地区以哀牢山和苍山洱海为中心,分别代表山地垂直带谱和高原湖泊湿地两类典型生态系统的保护。在滇东北地区,乌蒙山、药山等保护区构成了长江上游重要的水源涵养与生物多样性维护功能区。滇南边境地带以西双版纳、南滚河、文山为核心,重点保护热带、南亚热带森林生态系统及其物种多样性。

由 3 个模型共同识别出的云南省植被固碳提升

潜力的核心热点区域高度集中在中南部地带,以普洱市中部为绝对中心,形成一个大面积、连片的聚集区。这个核心区向西覆盖临沧市的南部,向东辐射至玉溪市和红河州的西南部,并向南延伸至西双版纳州的北部。围绕着这个红色核心区,广泛分布着由任意 2 个模型认定的次级热点区,这些橙色区域形成全省其他区域内重要的潜力斑块,植被类型主要为中低海拔的常绿阔叶林和季雨林,其植被光合效率高,但当前 NPP 距离理论最大值差距大,因此表现出极高的提升潜力。同时,固碳潜力核心冷点区高度集中于西北部,覆盖迪庆州、怒江州及丽江市北部的大部分区域,在核心冷点区的外围,分布着由 2 个模型认定的次级冷点区,不仅构成核心冷点区的扩展带,还向东延伸至大理州北部和楚雄州北部,共同构成北部一条显著的固碳潜力低值带,该区域多位于高海拔气候寒冷,

水分和温度对植被生长的限制作用强,植被类型以高山针叶林、高山灌丛和草甸为主。由于其生态环境本身已接近生理极限,植被固碳潜力提升的空间十分有限,故表现为冷点区。此外,在西双版纳北部和普洱市南部也存在一片次级冷点区,此区域被识别为冷点区的原因是该地现实植被固碳能力已经非常强,因此提升潜力有限。

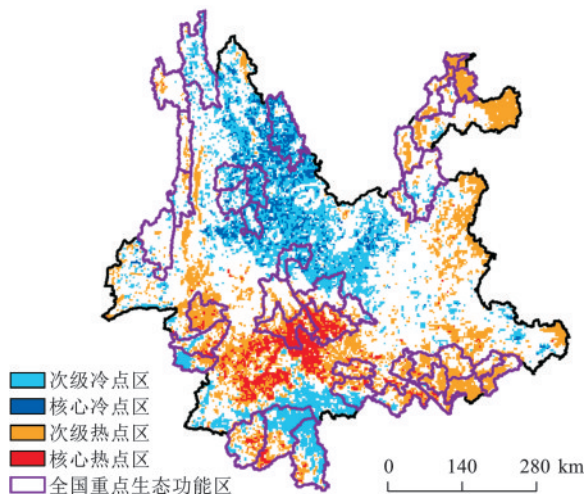


图 6 云南省植被固碳提升潜力多模型冷热点一致性与重点生态功能区空间叠置

Fig.6 Spatial overlay of multi-model coldspot and hotspot consistency for vegetation carbon sequestration enhancement potential and key ecological function zones in Yunnan Province

从固碳提升潜力的多模型一致性结果来看,由 3 个模型共同识别的核心热点区与重点生态功能区重叠部分占全部重点生态功能区总面积的 5.71%,主要覆盖哀牢山和南滚河国家级自然保护区的关键区域,表明在云南省中南部地区实施固碳增汇项目和措施,能够在生态保护与碳汇提升之间产生显著的协同效益,是实现“双赢”目标的优先布局区域。在此核心区外围,以及滇东北的乌蒙山和滇东南的文山等生态功能区内,还广泛分布着次级热点区,它们与重点生态功能区的重叠面积占比达 22.29%,构成潜力提升的重要补充和扩展地带,在兼顾生态功能维护的前提下,具备进一步挖掘固碳潜力的现实可能性。相比之下,重点生态功能区中与固碳提升潜力冷点区重叠的区域占比相对较低,其中核心冷点区和次级冷点区分别覆盖重点生态功能区总面积的 2.86% 和 16.97%。其中滇西北的苍山洱海、白马雪山等重要生态屏障与模型一致认定的核心冷点区高度重叠,在这些高海拔区域,其生态系统核心价值在于现有的生态功能与生物多样性保护,而非固碳提升潜力,应以“保护为主,审慎干预”,即应以保护生态系统完整性为主,审慎评估增汇措施的适宜性。

此外,在云南省西南部及东北部还识别出大片固碳核心热点区和次级热点区,但其并不属于现有的国家重点生态功能区。这些区域显著的固碳潜力也预示着在未来的“双碳”战略和国土空间规划中应当占据重要位置。

### 3 讨论

#### 3.1 多模型评估结果的差异性与共识性解读

本研究所获得的气候模型、时空替代模型和遥感观测最大值模型评价结果在量值上存在一定差异,主要归因于 3 种模型所建立的理论基础及评价方法的不同。时空替代模型是以生态演替原理为基础,假设在相似环境条件下植被均可演替至顶极群落并达到最大固碳水平,其实质是评估生态系统理想状态下的理论潜力上限,因此评估结果最为乐观,平均提升潜力最大[ $687.58 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)];遥感观测最大值模型是以历史遥感影像记载的 NPP 最大值为依据,反映在气候波动和人类活动干扰下植被曾经达到的最佳状态,代表基于现实条件的“可实现”潜力,因此为 3 种模型中最保守的评估结果,平均提升潜力最小[ $163.78 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)];气候模型侧重于水热平衡机制对生产力的驱动,评估结果介于上述二者之间。上述模型间的差异性与万华伟等<sup>[16]</sup>的研究结论相似,凸显单一模型在评估复杂生态系统固碳潜力时存在的固有局限性和不确定性。

但是 3 个模型的评估结果也表现出高度共识性。所有模型均显示,低海拔区的固碳提升潜力主要集中在南亚热带季风常绿阔叶林和中亚热带常绿阔叶林两大植被带。通过对热点区域的叠置分析,本研究识别出一个位于滇中南,以普洱市为中心,覆盖临沧、西双版纳、玉溪和红河部分地区的“核心热点区”。从光合生理机制角度分析,该核心高潜力区位于热带-亚热带过渡带,区域内光能利用效率与水分利用效率具有较强的协同作用。同时,受部分森林仍处于次生演替阶段的影响,其生物量积累尚未达到饱和状态,表现出一定程度的光合潜力冗余。无论从气候适宜性、生态演替潜力还是历史最优植被状态来看,该区域都具备最优越的固碳增汇条件,其作为未来固碳增汇优先区的可靠性极高。

#### 3.2 固碳潜力与生态功能区的空间关系及政策启示

将固碳潜力热点与国家重点生态功能区进行空间耦合,是本研究的核心创新点之一,其结果为统筹气候变化应对与生态保护两大国家战略提供重要的空间决策依据。分析发现,位于滇中南的核心热点区与哀牢山、南滚河等国家级自然保护区高度重叠,展现出最高的潜力可实现性。此处的“可实现”不仅

指理论层面的可行性,更体现为与当前国家生态保护战略之间的政策协同效应。在该区域推进生态工程,既能依托国家生态转移支付等政策支持,又可凭借其在生物多样性维护与水源涵养方面的显著协同效益<sup>[31]</sup>,获得更高的项目优先级,从而有效推动理论潜力向现实碳汇的转化。

滇西北核心冷点区植被生态系统长期受高寒气候、短生长季及土壤养分贫乏等因子的共同制约,多已接近其生理极限或处于顶级或近顶级演替阶段,固碳潜力的可实现空间相对有限。因此,将此类区域排除在重点增汇干预范围之外,实施战略性的“舍弃”,本质上是对高寒脆弱生态系统承载能力的科学尊重,亦体现在“保护优先”原则下对固碳潜力实现路径的理性选择。

研究还识别出部分非生态功能区的固碳潜力热点区域,这些区域虽具备较高的理论固碳潜力,但由于未被划入国家级重点保护区范围,其固碳潜力释放可能面临土地利用冲突及生态建设投入不足等挑战。然而,其“非保护区”属性为潜力挖掘提供了更大的政策与操作空间。可通过布局新的碳汇林项目、推动林业碳汇市场交易,或在未来国土空间规划修编中提升其生态定位,均可作为将理论潜力转化为实际碳汇的关键路径<sup>[32]</sup>。不仅是对现有生态功能区划体系的有效补充,更是从“双碳”战略视角对国土空间资源价值的再认识与再评估。

### 3.3 研究局限性与未来展望

本研究的“固碳潜力”是基于NPP计算的,反映的是植被的碳吸收潜力,而未考虑土壤呼吸和微生物分解等异养呼吸过程所释放的CO<sub>2</sub>。使得研究结果是“总碳汇”潜力而非“净碳汇”潜力,可能导致对区域的实际固碳潜力存在一定程度的高估<sup>[33]</sup>。未来的研究应尝试更复杂的生物地球化学模型,以更精确地评估净生态系统生产力的提升潜力。其次,本研究基于2023年的现状数据进行潜力评估,反映的是一个静态时间断面的结果,可能存在一定的偶然性;植被的生长和固碳能力随气候波动和人类活动发生年际变化<sup>[34]</sup>,通过分析其历史演变趋势,能更全面地理解区域固碳潜力的稳定性与脆弱性,为制定更具前瞻性的长期生态管理策略提供依据。

## 4 结论

1) 云南省植被固碳提升潜力总值为68.25~277.44 Mt(以C计),3种模型的评估结果在空间上表现出一定共识:潜力核心热点区高度集中于以普洱市为中心的中南部地区,而潜力冷点区则稳定分布于滇西北高海拔地带。

2) 固碳提升潜力格局与植被类型及海拔梯度密切相关,潜力主要贡献来自南亚热带季风常绿阔叶林和中亚热带常绿阔叶林,且集中在0~1 000 m的较低海拔地带,表明适宜的水热条件和广阔的土地面积是形成高潜力区的基础。

3) 固碳提升潜力与国家重点生态功能区的空间关系揭示协同增效与空间权衡并存的格局。潜力核心热点区与哀牢山、南滚河等保护区高度重叠,形成固碳增汇与生态保护协同增效的双赢区域。滇西北的苍山洱海、白马雪山等重要生态屏障为冷点区,管理策略应以维持生态系统原真性保护为主。临沧、昭通等非生态功能区的潜力热点,为未来国土空间规划和生态功能区划的优化调整提供新的科学视角。

### 参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, Edenhofer O. Climate change 2014: Mitigation of climate change: working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] GLEICK P H, ADAMS R M, AMASINO R M, et al. Climate change and the integrity of science [J]. Science, 2010, 328(5979): 689-690.
- [3] EDENHOFER O, PICHES-MADRUGA R, SOKONA Y, et al. Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working Group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1-30.
- [4] KEENAN T F, WILLIAMS C A. The terrestrial carbon sink [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2018, 43: 219-243.
- [5] WANG Y H, SONG C Q, GAO Y F, et al. Integrating national integrated assessment model and land-use intensity for estimating China's terrestrial ecosystem carbon storage [J]. Applied Geography, 2024, 162: e103173.
- [6] JIANG Y C, OUYANG B, YAN Z G. The response of carbon storage to multi-objective land use/cover spatial optimization and vulnerability assessment [J]. Sustainability, 2024, 16(6): e2235.
- [7] 冯悦, 岳永杰, 赵鹏武. 碳中和愿景下森林碳储量核算及固碳潜力评价研究进展 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 93-100.  
FENG Y, YUE Y J, ZHAO P W. Research progress in accounting for forest carbon storage and evaluating carbon Sequestration potential evaluation under the vision of carbon neutrality [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 93-100.
- [8] 廉杰. 江西省陆地植被碳汇驱动因素及时空异质性研究

- [D].南昌:江西财经大学,2025.
- LIAN J. Study on driving factors and spatio-temporal heterogeneity of terrestrial vegetation carbon sink in Jiangxi Province [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2025.
- [9] 孙善磊,周锁铨,石建红,等.应用三种模型对浙江省植被净第一性生产力(NPP)的模拟与比较[J].中国农业气象,2010,31(2):271-276,309.
- SUN S L, ZHOU S Q, SHI J H, et al. Calculation and comparison of vegetation net primary productivity(NPP) in Zhejiang Province with three models[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2):271-276, 309.
- [10] SEINO H, UCHIJIMA Z. Global distribution of net primary productivity of terrestrial vegetation [J].Journal of Agricultural Meteorology, 1992, 48(1):39-48.
- [11] 周广胜,张新时.自然植被净第一性生产力模型初探[J].植物生态学报,1995(3):193-200.
- ZHOU G S, ZHANG X S. A natural vegetation NPP model [J].Chinese Journal of Plant Ecology, 1995(3):193-200.
- [12] 王旭洋,李玉强,连杰,等.CENTURY模型在不同生态系统的土壤有机碳动态预测研究进展[J].草业学报, 2019, 28(2):179-189.
- WANG X Y, LI Y Q, LIAN J, et al. Progress in application of the CENTURY model for prediction of soil carbon levels in different ecosystems [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(2):179-189.
- [13] LIU X W, ZHANG R P, GUO J, et al. Analysis of the spatiotemporal dynamics of grassland carbon sinks in Xinjiang via the improved CASA model[J].Ecological Indicators, 2025, 170:e113062.
- [14] 徐进勇.中国潜在造林地及其气候生产潜力空间分布估算[J].地理学报,2023,78(3):677-693.
- XU J Y. Estimation of the spatial distribution of potential forestation land and its climatic potential productivity in China[J].Acta Geographica Sinica, 2023, 78(3):677-693.
- [15] 原一荃,薛力铭,李秀珍.基于CASA模型的长江口崇明东滩湿地植被净初级生产力与固碳潜力[J].生态学杂志, 2022, 41(2):334-342.
- YUAN Y Q, XUE L M, LI X Z. Net primary productivity and carbon sequestration potential of salt marsh vegetation in Chongming Dongtan of the Yangtze estuary based on CASA model[J].Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(2):334-342.
- [16] 万华伟,李灏欣,高吉喜,等.我国植被生态系统固碳能力提升潜力空间格局研究[J].生态学报,2022,42(21):8568-8580.
- WAN H W, LI H X, GAO J X, et al. Spatial pattern analysis of carbon sequestration potential of vegetation ecosystem in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21):8568-8580.
- [17] WANG Z S, LIR, GUO Q C, et al. Learning ensembles of process-based models for high accurately evaluating the one-hundred-year carbon sink potential of China's forest ecosystem[J].Heliyon, 2023, 9(6):e17243.
- [18] 刘坤,张慧,孔令辉,等.陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J].生态学报,2023,43(10):4294-4307.
- LIU K, ZHANG H, KONG L H, et al. An overview of terrestrial ecosystem carbon sink assessment methods towards achieving carbon neutrality in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10):4294-4307.
- [19] 王锴,朴世龙,何悦,等.中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布特征及驱动机制[J].中国科学:地球科学, 2023, 53(2):216-226.
- WANG K, PIAO S, HE Y, et al. Spatial variations and mechanisms for the stability of terrestrial carbon sink in China[J].Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(2):216-226.
- [20] 侯鹏,翟俊,曹巍,等.国家重点生态功能区生态状况变化与保护成效评估:以海南岛中部山区国家重点生态功能区为例[J].地理学报, 2018, 73(3):429-441.
- HOU P, ZHAI J, CAO W, et al. Evaluation on ecosystem changes and protection of the national key ecological function zones in mountainous areas of central Hainan Island[J].Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3):429-441.
- [21] 白杨,李晖,王晓媛,等.云南省生态资产与生态系统生产总值核算体系研究[J].自然资源学报, 2017, 32(7):1100-1112.
- BAI Y, LI H, WANG X Y, et al. Evaluating natural resource assets and gross ecosystem products using ecological accounting system: A case study in Yunnan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7):1100-1112.
- [22] 邹芸姿,邹再进.基于碳汇视角的森林康养产业发展生态补偿机制研究:以云南省为实证案例[J].林业勘查设计, 2025, 54(1):66-71.
- ZOU Y Z, ZOU Z J. Research on the ecological compensation mechanism for the development of forest health and wellness industry from the perspective of carbon sink: Empirical evidence from Yunnan Province [J]. Forest Investigation Design, 2025, 54(1):66-71.
- [23] 陶明扬,刘春学.云南省水域湿地生态服务价值评估[J].国有资产管理, 2025(5):60-74.
- TAO M Y, LIU C X. Evaluation of ecological service value of water wetland in Yunnan Province [J]. State Assets Management, 2025(5):60-74.
- [24] 谢佐清,黄义忠.耦合土地利用变化与生态系统服务的云南省生态风险评价[J].水土保持学报, 2025, 39(3):224-234.
- XIE Z Q, HUANG Y Z. Ecological risk assessment of Yunnan Province by coupling land use change and ecosystem services[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):224-234.
- [25] LÜ F C, SONG Y K, YAN X D. Evaluating carbon sink potential of forest ecosystems under different climate change scenarios in Yunnan, southwest China[J].Remote

- Sensing, 2023, 15(5):e1442.
- [26] DELUCIA E H, GOMEZ-CASANOVAS N, GREENBERG J A, et al. The theoretical limit to plant productivity[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(16):9471-9477.
- [27] 周平, 武威, 王瑞, 等. 不同草地 NPP 估算模型对中国草地的模拟计算分析[J]. *草业科学*, 2018, 35(10):2381-2388. ZHOU P, WU W, WANG R, et al. Analysis of grassland simulation using different estimation models of grassland net primary productivity in China [J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(10):2381-2388.
- [28] 汪晓珍, 呼海涛, 吴建召, 等. 2000—2020年陕西省陆地生态系统 NPP 时空变化与潜力[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3):325-334. WANG X Z, HU H T, WU J Z, et al. Spatial and temporal variation and potential of NPP in terrestrial ecosystems in Shaanxi Province from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3):325-334.
- [29] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(17):6786-6799. LI M Y, SHANGGUAN Z P, DENG L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17):6786-6799.
- [30] 王博远, 岑应健, 肖革新, 等. 基于 Getis-Ord  $G_i^*$  方法的中山市粮食及其制品食品安全空间分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(8):2425-2428. WANG B Y, CEN Y J, XIAO G X, et al. Spatial analysis of food safety of grains and their products in Zhongshan City based on Getis-Ord  $G_i^*$  method [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(8):2425-2428.
- [31] 杜世勋, 刘海江, 张梦莹, 等. 水源涵养型国家重点生态功能区生态系统服务功能评估[J]. *生态学报*, 2022, 42(11):4349-4361. DU S X, LIU H J, ZHANG M Y, et al. Assessment of ecosystem services in the national key ecological function areas for water conservation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11):4349-4361.
- [32] LI X, NING Z, YANG H Q. A review of the relationship between China's key forestry ecology projects and carbon market under carbon neutrality [J]. *Trees, Forests and People*, 2022, 9:e100311.
- [33] ZHANG D N, ZHAO Y H, WU J S. Assessment of carbon balance attribution and carbon storage potential in China's terrestrial ecosystem [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189:e106748.
- [34] KONDOH A, TATEISHI R, RUNTUNUWU E, et al. Relating vegetation activity to climatic variation and atmospheric  $CO_2$  content [J]. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 2002, 15(2):128-138. HU L, DU W, CHANG B K, et al. The surface properties of Lou soil with different phosphorus levels and their effects on the loss of phosphorus [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(2):424-434.
- [35] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4):577-583. YAN F L, SHI Z H, CAI C F, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on ultisols [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4):577-583.
- [36] 吴新亮. 几种典型地带性土壤团聚体稳定机制及坡面侵蚀响应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. WU X L. Aggregate stabilization mechanism and slope erosion characteristics of several typical zonal soils [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [37] 沈心涛, 涂保华, 刘朝阳, 等. 酸性逆境土壤中根际微生物调控植物根系构型的作用机制[J]. *环境科学*, 2025, 46(1):570-578. SHEN X T, TU B H, LIU C Y, et al. Mechanisms of rhizosphere microorganisms in regulating plant root system architecture in acidic soils [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(1):570-578.
- [38] 胡良, 杜伟, 常博焜, 等. 不同磷水平壤土的表面性质及其对磷素流失特征的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(2):424-434. LI J W, LIU K L, YU X C, et al. Regulation of carbon and potassium distribution in soil aggregates of red soil slope farmland by rice straw mulching and vetiver hedge-row [J]. *Soils*, 2022, 54(4):787-792.
- [39] ZHU X C, GAO L, WEI X R, et al. Progress and prospect of studies of Benggang erosion in southern China [J]. *Geoderma*, 2023, 438:e116656.

上接第 166 页