

引用格式: 孙陶然, 徐林, 焦洁洁. 毛竹材用林多目标经营模型与采伐策略[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(6): 1111-1121.
SUN Taoran, XU Lin, JIAO Jiejie. Multi-objective management model and harvesting strategy for *Phyllostachys edulis* timber forests[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(6): 1111-1121.

毛竹材用林多目标经营模型与采伐策略

孙陶然¹, 徐林¹, 焦洁洁²

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院/碳中和学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 【目的】以毛竹 *Phyllostachys edulis* 材用林固碳效益与竹材经济效益为经营目标, 建立协同优化经营方案, 指导毛竹林科学经营管理, 实现毛竹林生产力长期维持与经济效益持续产出。【方法】以浙江省安吉县毛竹材用林为研究对象, 对 30 个野外监测样地进行连续 3 a 的调查, 获取立竹胸径、年龄和立竹度数据, 拟合 Weibull 分布方程建立毛竹生长更新模型; 在此基础上, 选取固碳效益与竹材经济效益构建多目标经营决策模型, 模拟不同采伐策略(采伐年龄、采伐强度、采伐方式)下毛竹材用林碳储量和净现值的变化, 通过对比分析筛选毛竹材用林多目标最优经营方案。【结果】短经营期以快速提升经济效益同时保持碳汇潜力为目标, 采用Ⅰ度竹留养 90%, Ⅱ和Ⅲ度竹分别实施 40% 和 60% 大径阶采伐收获, 最优状态下地上碳储量为 $11.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹林累计净现值为 $12\,853.18 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$; 中经营期以平衡固碳效益与经济收益为目标, 采用Ⅱ度竹 30% 小径阶采伐、Ⅲ度竹 30% 大径阶采伐, 最优状态下地上碳储量为 $11.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹林累计净现值为 $14\,363.43 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$; 长经营期以最大化固碳效益同时兼顾经济收益为目标, 采用Ⅱ度竹 40% 小径阶采伐、Ⅲ度竹 90% 大径阶采伐, 最优状态下地上碳储量达 $11.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹林累计净现值为 $27\,456.99 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。【结论】构建了毛竹材用林多目标经营模型, 提出了固碳效益和经济效益协同实现的采伐与管理经营策略。图 9 表 3 参 33

关键词: 毛竹材用林; 多目标经营; 碳储量; 净现值; 采伐策略

中图分类号: S753 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)06-1111-11

Multi-objective management model and harvesting strategy for *Phyllostachys edulis* timber forests

SUN Taoran¹, XU Lin¹, JIAO Jiejie²

(1. College of Environment and Resources/College of Carbon Neutrality, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] With carbon sequestration benefits and economic benefits of *Phyllostachys edulis* timber forests as operational targets, this study aims to establish a collaborative optimization management plan to guide the scientific management of *Ph. edulis* forests, so as to realize the long-term maintenance of productivity and continuous economic output. [Method] Taking *Ph. edulis* timber forests in Anji County, Zhejiang Province as the research subject, a 3-year continuous survey was conducted on 30 field monitoring plots to obtain data on the diameter at breast height (DBH), age and stand density. A Weibull distribution equation was fitted to establish a growth and renewal model for *Ph. edulis*. Based on this, a multi-objective management model was constructed by integrating *Ph. edulis* timber carbon sequestration benefits with

收稿日期: 2025-06-04; 修回日期: 2025-10-24

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(32471862)

作者简介: 孙陶然 (ORCID: 0009-0002-9058-5526), 从事森林多目标经营研究。E-mail: 1041425596@qq.com。通信作者: 徐林 (ORCID: 0000-0002-4868-7222), 副教授, 博士, 从事森林可持续经营研究。E-mail: xul1210@zafu.edu.cn

economic benefits. The changes in carbon storage and net present value (NPV) of *Ph. edulis* timber forests under different harvesting strategies (harvesting age, intensity, and method) were simulated. Through comparative analysis, the optimal multi-objective management plan was screened. [Result] For short operating period, the goal was to rapidly enhance economic benefits while maintaining carbon sink potential, which involved retaining 90% of I -grade *Ph. edulis*, harvesting 40% and 60% for II -grade and III -grade *Ph. edulis* at large diameter stages. The optimal level could be achieved, with an aboveground carbon storage of $11.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and a cumulative NPV of $12\,853.18 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$. During the intermediate operating period, the goal was to balance carbon sequestration benefits with economic returns by harvesting 30% of II -grade *Ph. edulis* at small diameter stages and 30% of III -grade *Ph. edulis* at large diameter stages. Under optimal conditions, the aboveground carbon storage would reach $11.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, with a cumulative NPV of $14\,363.43 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$. For long-term operating period, the goal was to maximize carbon sequestration benefits while also considering economic returns, 40% of the II -grade *Ph. edulis* harvested at the small diameter stage and 90% of III -grade *Ph. edulis* harvested at the large diameter stage. Under optimal conditions, the aboveground carbon storage would reach $11.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, with a cumulative NPV of $27\,456.99 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$. [Conclusion] A multi-objective management model for *Ph. edulis* timber forests is constructed, and a harvesting and management strategy is proposed to achieve synergistic carbon sequestration and economic benefits. [Ch, 9 fig. 3 tab. 33 ref.]

Key words: *Phyllostachys edulis* timber forests; multi-objective management; carbon stock; net present value; harvesting strategies

竹林被称为世界“第二森林”，全球分布面积达3 500万 hm^2 ，广泛分布于亚洲、非洲和美洲地区，是世界重要的森林资源之一^[1]。中国竹林面积达701万 hm^2 ，有竹子40属，约500多种^[2]，是世界上竹种最多的国家，竹材产量、竹笋产量和竹产业产值都位于世界领先地位。毛竹 *Phyllostachys edulis* 林面积占中国竹林面积的75%，是中国开发利用程度最高、种植规模最大、经济价值最高的竹种。毛竹林强大的碳汇功能和多样的加工利用方式^[3]，使其在中国区域生态安全和乡村共同富裕中发挥着重要作用^[4]。

随着全球气候变化与人类生态系统服务需求的增加，森林经营目标已从单一木材产出转向增加碳汇能力、保持生物多样性等多目标协同^[5]。BACKÉUS等^[6]基于线性规划对瑞典320万 hm^2 的北方林区构建了森林碳储量与木材产量的双目标优化模型，实现了碳材协同管理的情景模拟。KELEŞ等^[7]构建了包含不同木材产品全生命周期的木材生产和碳储量多目标森林规划模型。董灵波等^[8]采用模拟退火算法作为经营优化技术，建立了兼顾森林木材生产、碳储量和经营措施时空分布的多目标规划模型。毛竹具有爆发式生长、隔年采伐和可再生生长的特性，通常采用采伐老竹和施肥的方式提高毛竹林的生产力，增加竹材产出^[9-10]。李翀^[11]通过设计施肥和采伐留养双因素随机区组试验，发现大量施肥中度采伐最有利于新竹生长，中等施肥中度采伐更有利于大径竹材培育。马少杰等^[12]研究了毛竹林土壤有机碳活性对不同经营模式的响应，发现施入有机无机肥结合留养和采伐等措施能够维持毛竹林生态系统稳定，显著提高毛竹林生产力。徐林^[13]通过生物质炭施用试验分析外源碳对毛竹林生态系统碳汇能力的影响，发现适量的生物质炭输入能够显著提高毛竹林生态系统净碳汇能力。但前期研究大多侧重于毛竹林经营管理措施对单一目标的影响，如关注生态系统净碳汇能力以分析经营对碳汇功能的影响，或关注新竹生长以分析采伐措施对竹材产出的影响，均未进行毛竹林生态系统多目标经营策略的研究分析。

本研究以浙江省安吉县毛竹材用林为研究对象，通过定期监测毛竹林样地，获取样地生物量等数据，建立林分更新生长模型，设置不同采伐策略和经营期，构建以毛竹林地上碳储量和净现值为主要目标的优化经营模型，建立毛竹林固碳效益和经济效益协同优化的经营方案，为毛竹林多目标经营管理决策提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省湖州市安吉县杭垓镇和孝丰镇 (30°30′22.61″~30°38′31.28″N, 119°17′35.7″~119°32′24.76″E)。该区域属于亚热带季风气候, 年平均气温为 17.9 ℃, 年平均降水量为 1 529.5 mm, 年平均日照时数为 1 651.7 h。植被区划属亚热带东部常绿阔叶林亚区, 森林覆盖率达 70.3%, 林地面积为 13.5 万 hm², 其中竹林占 6.7 万 hm², 毛竹林占竹林总面积的 86.7%, 立竹量为 1.8 亿株^[14-15]。

1.2 样地设置

2022 年 8 月建立野外调查样地 30 个, 其中有 25 个在 2022 年处于毛竹林出笋大年, 每个监测样地大小为 20 m×20 m (400 m²)。

1.3 数据收集和整理分析

从 2022 年 8 月、2023 年 8 月和 2024 年 8 月完成 3 次样地数据调查。每次样地调查的主要内容包括: 立竹年龄、胸径、立竹度。立竹年龄用“度”进行测量, 定义 I 度竹为当年新竹, II 度竹为 2~3 年生, III 度竹为 4~5 年生, 实际调查根据竹秆皮色法推算年龄^[16]。立竹胸径采用测量离地面 1.3 m 处毛竹直径获得, 单位为 cm。样地立竹度为样地内立竹总株数除以样地面积, 单位为单位面积上的株数。

本研究中样地总地上碳储量由样地毛竹地上生物量累加再乘以毛竹含碳系数 (0.5042) 得到, 其中单株毛竹生物量采用毛竹单株二元异速生物量生长模型^[17]来估算。计算公式如下:

$$B = 747.787D^{2.771} \left(\frac{0.148A}{0.028 + A} \right)^{5.555} + 3.772. \quad (1)$$

式 (1) 中: B 为单株毛竹生物量干质量 (kg·株⁻¹); D 为胸径 (cm); A 为年龄 (度)。

对以上调查数据经最小显著差异法进行事后多重比较检验, 显著性水平设定为 0.05。由显著性检验发现样地各年龄、立竹度及碳储量在 3 期调查中没有显著差异, 可用作毛竹生长更新模型的构建。

1.4 林分多目标经营模拟系统

1.4.1 毛竹生长更新模型构建 应用三参数 Weibull 函数^[18]模拟新增幼竹的径阶分布, 构建毛竹林更新生长模型。

$$f(D) = \left(\frac{c}{b} \right) \left(\frac{D-a}{b} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{D-a}{b} \right)^c \right]. \quad (2)$$

式 (2) 中: D 为毛竹胸径 (cm); a 为位置参数; b 为尺度参数; c 为形状参数。 D 、 a 、 b 、 $c > 0$ 。对 2022—2024 年 30 个监测样地数据进行 Weibull 参数拟合, 通过 SPSS 非线性回归构建毛竹林 Weibull 参数 a 、 b 、 c 的预测模型。

1.4.2 多目标模拟框架设计 ①采伐策略设计。应用 Matlab 软件编写代码, 构建不同年龄毛竹林采伐策略矩阵, 主要包括采伐强度和采伐方式, 其中采伐强度用 0~100% 表示, 采伐方式分为均匀伐、两端伐、上层伐和下层伐等 4 种。具体策略设计如表 1 所示。②经营期策略设计。由汤孟平等^[19]采用时间序列谱分析法研究可知: 毛竹林生长过程中的重要时间分界点存在 2 和 6 a 周期, 因此本研究将毛竹材用林经营策略分为短经营期 (2~6 a)、中经营期 (6~12 a)、长经营期 (12~18 a) 等 3 种假定情况进行讨论。具体的经营期策略设计如下: 短经营期以快速提升经济效益、同时保持碳汇潜力为目标, 优先采伐大径阶 III 度竹, 获取高价值竹材; II 度竹生物量积累显著, 选择性采伐成熟度高的个体, 可优化林分空间结构; I 度竹生长速率快且固碳潜力大, 保留大部分以维持竹林更新能力, 疏除密度过高的幼竹, 避免过度拥挤, 间接提升未来竹材质量。中经营期以平衡经济收益与碳汇能力、优化资源可持续性为目标, 采伐林冠层高大、完全木质化的 III 度竹, 经济回报率高; 淘汰低效 II 度竹个体, 提升保留竹的质量与碳汇效率; I 度竹正处于固碳速率峰值期, 采取零采伐原则。长经营期以最大化碳汇功能、兼顾稳定经济收益为目标, 尽量保持 40% I 度竹、30% II 度竹、30% III 度竹的合理结构, 优化林分地上空间分布。由此依据不同年龄的生物学特性和经营期目标, 设计采伐策略如表 2 所示。由于 3 种经营期所对应的采伐策略不同, 各经营期之间可能年份重合, 但不影响结果产生。③采伐过程模拟。初始经营模拟综合考虑毛

竹年龄、立竹度和胸径，选取了位于杭垓镇唐舍村的 9 号样地。样地数据具有典型性和普遍性，其初始状态如表 3 所示。

表 1 采伐策略设计

Table 1 Harvesting strategy design

参数类型	采伐方式	策略说明	参数类型	采伐方式	策略说明
类型1	均匀伐	各径阶按比例采伐，保持原分布形态	类型3	上层伐	优先采伐大径阶(择伐成熟竹)
类型2	两端伐	优先采伐最小/最大径阶(各占50%)	类型4	下层伐	优先采伐小径阶(疏伐弱势竹)

表 2 经营期策略设计

Table 2 Operating period strategy design

经营期	采伐度数	采伐方式	采伐强度/%	经营期	采伐度数	采伐方式	采伐强度/%
短期	I	下层伐	10~20	中期	Ⅲ	上层伐	20~70
	Ⅱ	上层伐	20~50	长期	I	无	0
	Ⅲ	上层伐	40~70		Ⅱ	下层伐	10~30
中期	I	无	0		Ⅲ	上层伐	70~90
	Ⅱ	下层伐	10~30				

表 3 典型样地林分因子统计信息

Table 3 Statistical information of stand factors in typical sample plot

年龄/度	平均胸径/cm	立竹度/ (株·hm ⁻²)	地上碳储量/ (t·hm ⁻²)	年龄/度	平均胸径/cm	立竹度/ (株·hm ⁻²)	地上碳储量/ (t·hm ⁻²)
I	9.99	1 200	0.42	Ⅲ	9.95	875	0.32
Ⅱ	9.84	650	0.23	总计	9.94	2 725	0.97

根据采伐策略设计，生成保留立竹和采伐原竹 2 种概率矩阵，并计算伐前、伐后林分结构指标。同时更新当前林分状态，依据经营期策略设计进行多次模拟，得到相应采伐结果。

1.4.3 经营目标值计算 ①固碳效益计算。将采伐后保留立竹和更新的立竹生物量相加，结合含碳系数（I 度竹为 0.508 9 g·g⁻¹，Ⅱ度竹为 0.514 0 g·g⁻¹，Ⅲ度竹为 0.487 5 g·g⁻¹[20]），累计得到总地上碳储量，用于固碳效益评价。②经济效益计算。根据调查数据收集整理得到浙江省安吉县材用毛竹价格为 12.75 元·株⁻¹，以本研究 30 个毛竹林样地的单株毛竹平均生物量，结合竹秆的干质量比 (0.44)[21]，得到单株毛竹平均鲜质量，获得竹材单价为 0.32 元·kg⁻¹，贴现率设置为 0.03。本研究不考虑采伐成本，根据采伐周期折现未来收益，用于经济效益评价。毛竹林净现值 (V_{NP}) 计算公式如下：

$$V_{NP} = \sum_{t=1}^R \frac{I_t - C_t}{(1+i)^t}。$$

(3)

式 (3) 中： V_{NP} 为净现值； t 为采伐周期； I_t 为采伐周期 t 内的收入； C_t 为采伐周期 t 内的支出； i 为贴现率； R 为经营期。

1.4.4 模型迭代与优化 ①根据经营周期策略设计和采伐策略设计，将传统的“一次采伐循环”部分扩展为多周期迭代，模拟多目标情境下毛竹林长期经营效果，实现经济效益与固碳效益的总体最优。②对输出的碳储量与毛竹林净现值进行制图分析，引入帕累托前沿 (Pareto Front) 分析其最优解。

2 结果与分析

2.1 毛竹生长更新模型

根据一般 Weibull 分布参数值的性质和可能变动范围，选取初始值进行多次迭代，得到 3 个参数 a 、 b 、 c 分别为 5.312、2.895 和 1.101，此时决定系数 (R^2) 为 0.996，同时引入 K-S 拟合优度检验，得到 $P>0.05$ ，满足精度要求。

2.2 毛竹林多目标经营方案

2.2.1 短经营期采伐结果分析 由图 1 可知：短经营期内 2 a 采伐周期碳储量随Ⅱ和Ⅲ度竹的采伐比例增加明显下降。当Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ度竹的采伐比例分别为 10%、20%、40% 时，碳储量达到最大值，为 $17.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；采伐比例分别为 20%、50%、70% 时，碳储量最小，为 $16.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。4 a 采伐周期碳储量较 2 a 采伐周期时下降约 20%，当Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ度竹的采伐比例分别为 20%、20%、40% 时，碳储量最大，为 $15.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；当Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ度竹的采伐比例分别为 10%、50%、60% 时碳储量最小，为 $12.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。6 a 采伐周期碳储量较 4 a 采伐周期下降约 18%，当Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ度竹的采伐比例分别为 20%、20%、40% 时，碳储量最大，为 $12.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；当Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ度竹的采伐比例分别为 10%、40%、70% 时，碳储量最小，为 $11.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

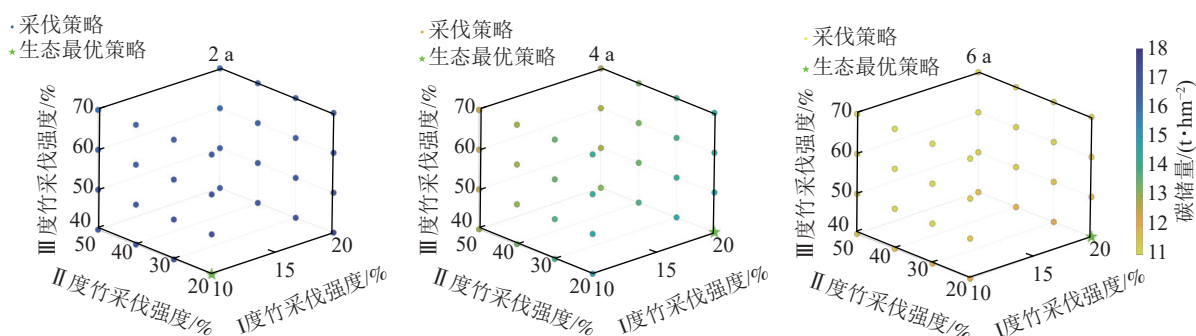


图 1 短期采伐强度与碳储量的三维关系

Figure 1 Three-dimensional relationship diagram between short-term harvesting intensity and carbon storage

由图 2 可得：短经营期内 2 a 采伐周期毛竹林净现值随Ⅱ度竹和Ⅲ度竹的采伐比例增加明显上升，当Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ度竹的采伐比例分别为 20%、50%、70% 时，毛竹林净现值达到最大值，为 $5\,532.71 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；当Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ度竹的采伐比例分别为 10%、20%、40% 时，毛竹林净现值最小，为 $3\,064.68 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。4 a 采伐周期经济收益随采伐周期延长大幅提升，在相同采伐比例时毛竹林净现值最大为 $10\,477.26 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，最小为 $6\,351.32 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。6 a 采伐周期经济收益达到 2 a 周期的 4 倍以上，在相同采伐比例时毛竹林净现值最大为 $14\,374.15 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，最小为 $9\,996.68 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

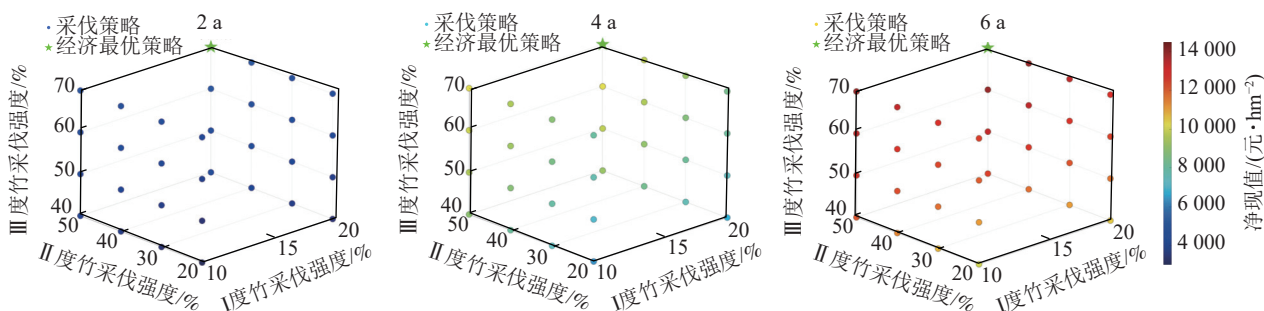


图 2 短期采伐强度与毛竹林净现值的三维关系

Figure 2 Three-dimensional relationship diagram between short-term harvesting intensity and net present value

将短经营期 32 种采伐策略下毛竹材用林的固碳效益和经济效益综合分析，绘制帕累托前沿 (图 3)。图 3 中灰色散点表示在约束条件下的所有采伐策略解集，红色折线为帕累托前沿，指在碳储量和毛竹林净现值中至少在 1 个目标上优于其他解且在另一目标上不劣于其他解的解。对红色折线包含的多个散点进行对比分析可知：短经营期毛竹林净现值增速放缓，碳储量降幅提高，毛竹林生态环境功能显著降低。在Ⅱ和Ⅲ度竹的采伐比例较低时能够维持高碳储量，但经济收益较低，而连续的高强度采伐则可能会使 6 a 周期的碳储量跌破阈值，触发生态系统退化。同时考虑到Ⅰ度竹应尽量维持采伐比例为 10%，以保障幼竹更新能力，由此选取达到短经营期固碳效益和经济效益协同最优的采伐策略为：Ⅰ度竹采伐 10%，Ⅱ度竹采伐 40%，Ⅲ度竹采伐 60%。这时碳储量为 $11.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，毛竹林净现值为 $12\,853.18 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.2.2 中经营期采伐结果分析 由图 4 可知：中经营期内 6 a 采伐周期在Ⅱ和Ⅲ度竹的采伐比例分别为

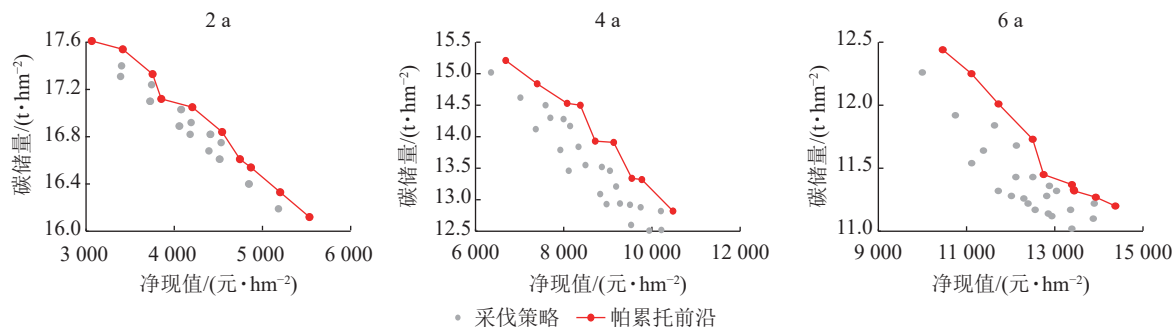


图 3 短期不同采伐策略下的帕累托前沿

Figure 3 Pareto frontiers under different short-term harvesting strategies

30% 和 20% 时碳储量最大, 达 $15.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 采伐比例分别为 10% 和 70% 时碳储量最小, 为 $11.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。8 a 采伐周期在相同采伐比例下碳储量最大为 $14.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最小为 $11.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。10 a 采伐周期碳储量则在采伐比例为 30% 和 20% 时达到最大, 为 $13.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在 10% 和 50% 时最小, 为 $10.92 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。12 a 采伐周期碳储量同样在采伐比例为 30% 和 20% 时达到最大, 为 $12.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在 10% 和 40% 时最小, 为 $10.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

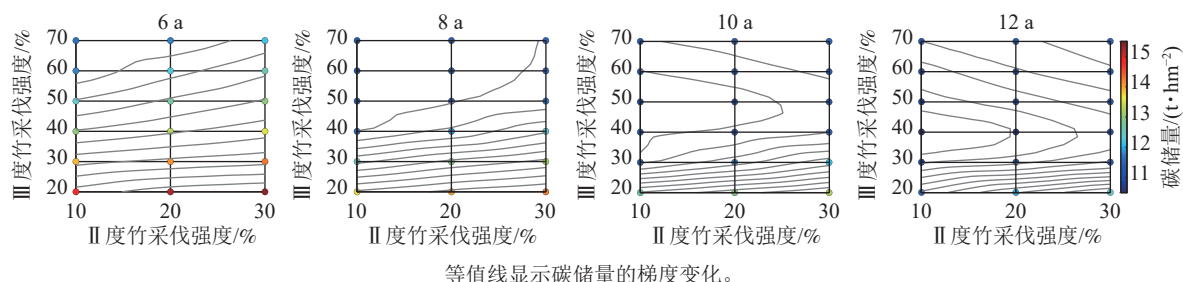


图 4 中期采伐强度与碳储量的散点关系

Figure 4 Scatter plot of mid-term harvesting intensity and carbon storage

由图 5 可知: 各个采伐周期的毛竹林净现值分布规律都呈现采伐强度越大毛竹林净现值越高的趋势, 最高值均出现在 II 度竹采伐 30%、III 度竹采伐 70% 时, 但毛竹林净现值增长速率随采伐周期增加而减缓, 中经营期内 8 a 采伐周期增长 23.1%, 10 a 周期增长 18.3%, 12 a 周期则为 13.5%, 毛竹林净现值最高值由 $11\,840.25 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 提升至 $18\,835.72 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

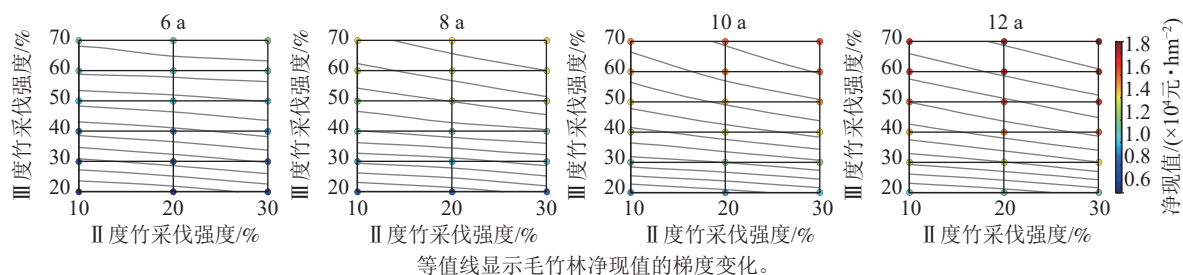


图 5 中期采伐强度与毛竹林净现值的散点关系

Figure 5 Scatter plot of mid-term harvesting intensity and net present value

对中经营期的 18 种采伐策略进行帕累托前沿分析 (图 6), 可知各周期帕累托前沿呈明显负斜率。6 a 采伐周期斜率为 $-2.8 \text{ t} \cdot \text{千元}^{-1}$, 8 a 周期降至 $-1.5 \text{ t} \cdot \text{千元}^{-1}$, 10 a 周期毛竹林净现值 $< 14\,000 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时斜率为 $-1.2 \text{ t} \cdot \text{千元}^{-1}$, 毛竹林净现值 $> 14\,000 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时斜率为 $-2.1 \text{ t} \cdot \text{千元}^{-1}$, 12 a 周期前沿退化为近似垂直线, 斜率为 $-0.3 \text{ t} \cdot \text{千元}^{-1}$ 。可以看出经济和生态的矛盾强度随时间增加而加剧, 8~10 a 是调整采伐策略的关键时期。由此选取中经营期固碳效益和经济效益协同最优的采伐策略为对 II 和 III 度竹均采伐 30%, 用 II 度竹采伐稳定林分结构, III 度竹采伐保持经济收益。

2.2.3 长经营期采伐结果分析 由图 7 可知: 长经营期碳储量随 II 和 III 度竹的采伐比例增加而上升, 各

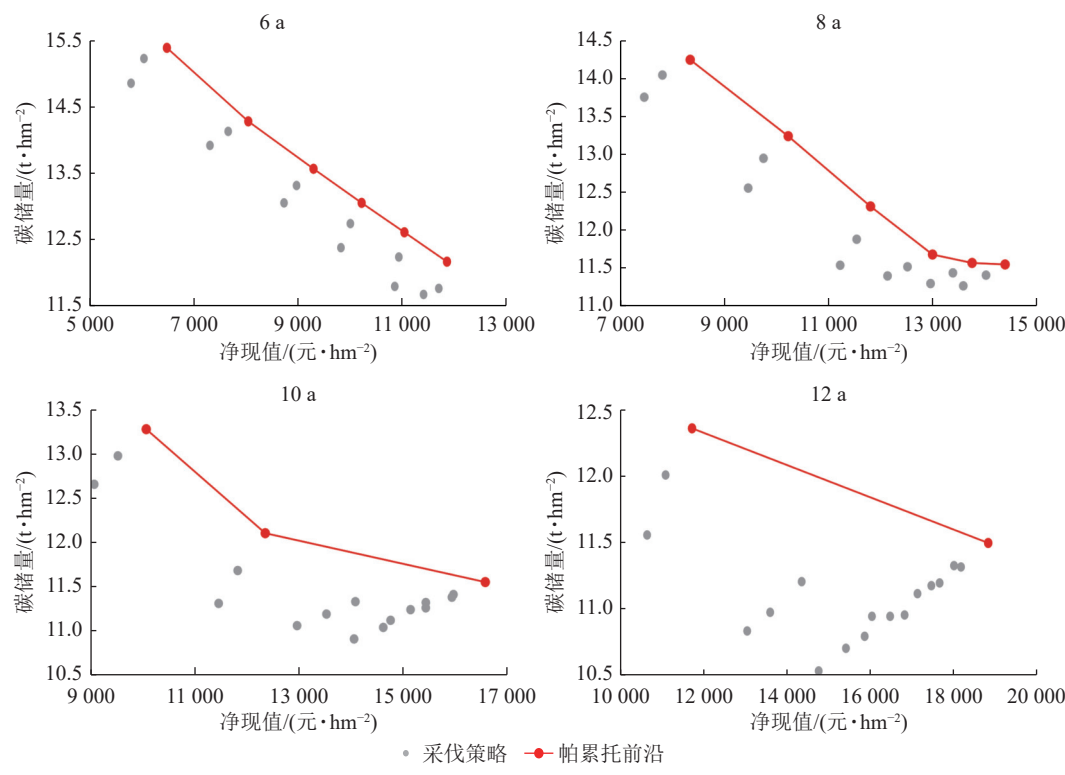


图 6 中期不同采伐策略下的帕累托前沿

Figure 6 Pareto frontiers under different mid-term harvesting strategies

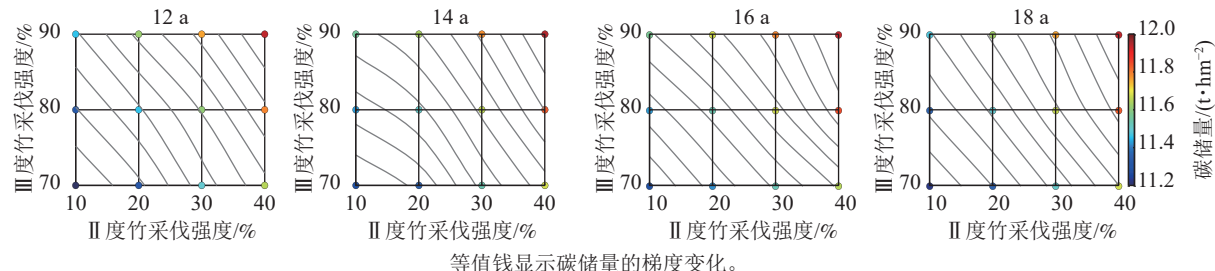


图 7 长期采伐强度与碳储量的散点关系

Figure 7 Scatter plot of long-term harvesting intensity and carbon storage

个采伐周期碳储量最大值都位于Ⅱ度竹采伐 40%、Ⅲ度竹采伐 90% 时。Ⅲ度竹占主导地位，是提升碳储量的关键，当Ⅱ度竹的采伐比例 $\geq 30\%$ 时，碳储量增速放缓。

由图 8 可知：长经营期毛竹林净现值随 2 种年龄采伐强度增加而上升，各个采伐周期毛竹林净现值最大值依然位于Ⅱ度竹采伐 40%、Ⅲ度竹采伐 90% 时。Ⅲ度竹采伐比例每提升 10%，毛竹林净现值平均增长 12.3%，Ⅱ度竹采伐比例 $>30\%$ 后边际收益递减，毛竹林净现值增幅仅 3.2%。

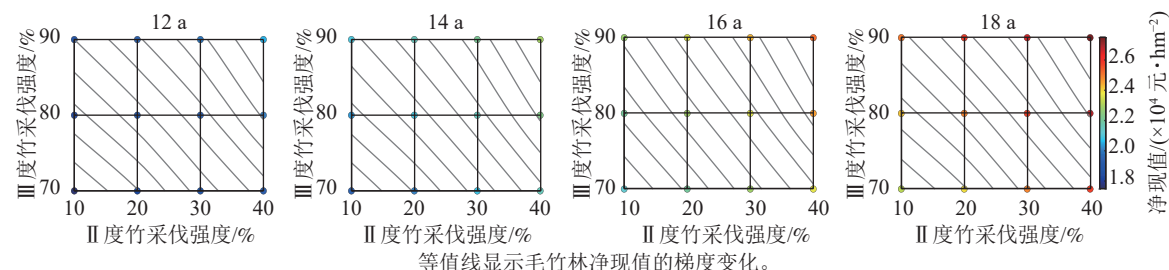


图 8 长期采伐强度与毛竹林净现值的散点关系

Figure 8 Scatter plot of long-term harvesting intensity and net present value

对长经营期的 12 种采伐策略进行帕累托前沿分析 (图 9)。可知长经营期帕累托前沿与短经营期和中经营期不同，呈现绝对最优解，即Ⅱ度竹采伐 40%、Ⅲ度竹采伐 90%。长经营期内 12 a 采伐周期时最大

碳储量为 $11.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹林净现值达 $20\,583.35 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。14 a 周期时最大碳储量为 $11.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹林净现值达 $22\,904.94 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹林净现值的提升主要得益于Ⅲ度竹的采伐。16 a 周期时最大碳储量回到 $11.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹林净现值达 $25\,158.92 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, Ⅲ度竹采伐比例每增加 10%, 毛竹林净现值提升 8.2%, 碳储量同步增长 1.3%。18 a 周期时最大碳储量依然保持 $11.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹林净现值达 $27\,456.99 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 线性回归分析表明毛竹林净现值与碳储量呈强正相关, 决定系数 (R^2) 达 0.98 ($P < 0.001$)。

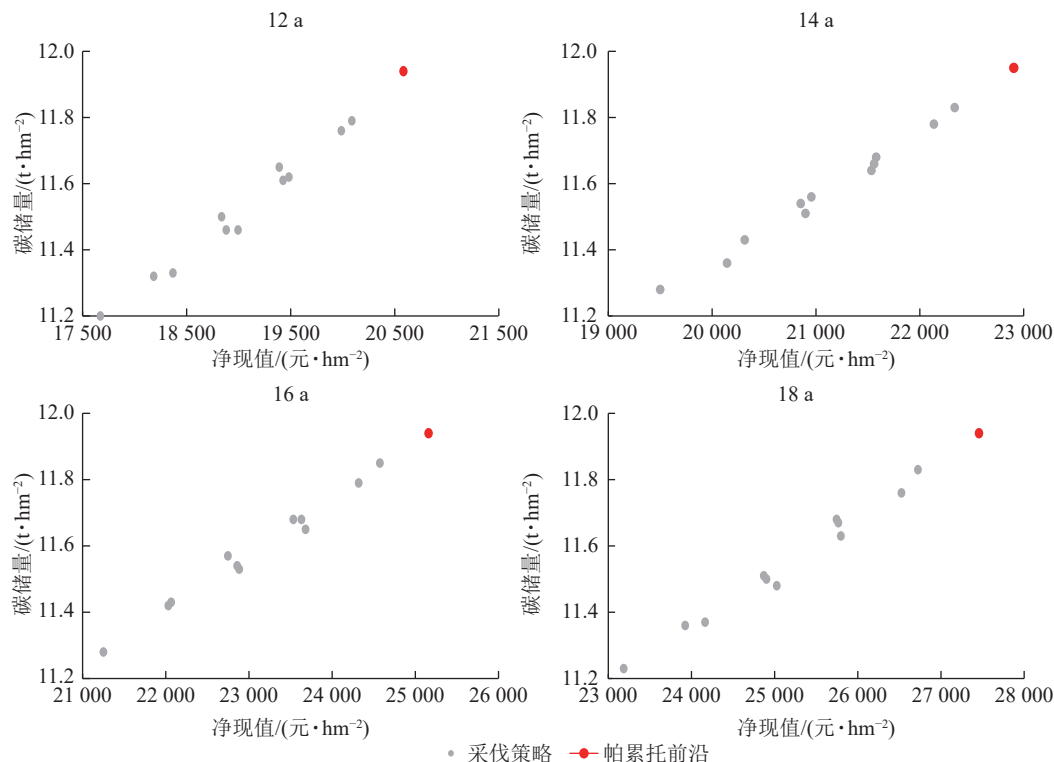


图 9 长期不同采伐策略下的帕累托前沿

Figure 9 Pareto frontiers under different long-term harvesting strategies

3 讨论

毛竹林科学的经营措施包含施肥、挖笋、钩梢和择伐等^[22-23], 能够提高竹林碳汇能力和经济收益, 尤其是择伐, 对林分结构、植被碳储量、养分分配等具有重要影响^[24]。因此, 本研究主要分析采伐年龄、采伐强度和经营期对毛竹材用林固碳效益和经济效益的影响, 以探寻协同优化经营方案。本研究在设定毛竹材用林采伐经营周期时将采伐 1 次的最小周期设为 2 a, 与毛竹林大小年生长特性相符, 也符合诸多学者关于采用该择伐年限来提高毛竹林立地生产力的建议^[25]。本研究建立的 3 种经营期的采伐状态, 通过帕累托前沿量化固碳效益和经济效益替代率, 对竹林经营中生态与经济协同优化进行了定量研究^[26], 证实了毛竹林经营管理中 2 种目标相对达到最优的可行性。

在采伐策略设计上, 本研究发现: 短经营期时, 为了快速提升经济效益, 同时保持碳汇潜力, 采用Ⅰ度竹留养 90%、Ⅱ和Ⅲ度竹分别实施 40% 和 60% 大径阶的采伐收获策略, 可以实现固碳效益和经济效益的短期协同优化, 主要原因在于对Ⅰ度竹的留养能够较好地选留壮笋、伐去弱笋, 对新竹进行密度调控, 释放竹林生长空间^[27]。对Ⅱ和Ⅲ度竹实施的大径阶采伐, 在获得竹材收益的同时可调控竹林地上空间结构, 减少聚集竞争, 促进毛竹林碳汇能力提升。

在中经营期时, 采用Ⅱ度竹 30% 小径阶采伐、Ⅲ度竹 30% 大径阶采伐策略, 能够达到固碳效益与经济效益协同优化的目标, 主要原因在于对Ⅱ度竹的小径阶采伐有选择性地移除部分弱势个体, 优化林分结构, 降低密度压力, 为保留的Ⅱ度竹和后续新竹(Ⅰ度竹)提供更优的生长环境和光照资源, 促进了碳积累效率的提升。对Ⅲ度竹实施的大径阶采伐, 在获取经济价值较高的成熟竹材的同时, 适度疏伐了

上层林冠,有效调控了林分地上空间结构,既避免了过度采伐对碳储量的显著削减,又促进了保留竹和新竹的固碳效率^[28],维持了竹林生产力的稳定和碳汇功能的持续增强。

在长经营期时,采用Ⅱ度竹 40% 小径阶采伐、Ⅲ度竹 90% 大径阶采伐策略,能够最大化固碳效益同时兼顾经济收益,主要原因在于对Ⅱ度竹实施的小径阶采伐强度略高于中经营期,更主动地筛选淘汰竞争力较弱的个体,优化林分年龄结构和径阶分布,为长期碳汇能力提供保障。对Ⅲ度竹实施的大径阶采伐,虽然移除了大量现存碳储量,但最大程度地释放了林分空间资源,高效地促进了新竹更新与生长,提升了林分系统的生产力,从而实现竹林碳汇功能的最大化^[29]。同时,采伐获得的大量高价值成熟竹材也带来了长期的经济收益,支撑了经营的可持续性^[30-31]。

本研究对于林分辅助采伐方式未进行深入研究,在实际操作过程中应该持续监测土壤和种群^[32],设置林分密度、竹笋产量等多种约束指标,配合进行翻耕、施肥、劈山抚育等多种培育措施,改善竹林生长环境^[33],为林分可持续发展提供更合理精确的经营管理优化方案。

4 结论

本研究构建了毛竹材用林多目标经营模型,提出了固碳效益和经济效益协同实现的采伐与管理经营策略。针对研究区典型样地可得,短经营期时最优采伐策略为:Ⅰ度竹 10% 小径阶密度调控,Ⅱ和Ⅲ度竹分别实施 40% 和 60% 的大径阶采伐。中经营期时最优采伐策略为:Ⅱ度竹 30% 小径阶密度调控,Ⅲ度竹 30% 大径阶采伐。长经营期时最优采伐策略为:Ⅱ度竹 40% 小径阶采伐,Ⅲ度竹 90% 的大径阶采伐。

5 参考文献

- [1] FAO. *World Bamboo Resources: A Thematic Study Prepared in the Framework of the Global Forest Resources Assessment* [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.
- [2] 李华, 辉朝茂. 中国竹类多样性特征及其保护研究进展[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2008, 30(增刊 1): 443-445.
LI Hua, HUI Chaomao. Bamboo diversity and conservation development in China[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 30(suppl 1): 443-445.
- [3] 汤俊彤. 乡村振兴背景下的竹产业规划与布局研究——以浙江安吉为例[J]. 城市建筑, 2023, 20(16): 95-98.
TANG Juntong. Research on the planning and layout of bamboo industry under the background of rural revitalization: a case of Anji in Zhejiang Province [J]. *Urbanism and Architecture*, 2023, 20(16): 95-98.
- [4] 汪浙锋, 沈月琴, 王枫, 等. 毛竹碳汇造林经营模式及其效益分析[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(6): 943-948.
WANG Xifeng, SHEN Yueqin, WANG Feng, et al. Carbon-fixing oriented management patterns of *Phyllostachys pubescens* and their benefits [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2011, 28(6): 943-948.
- [5] DONG Lingbo, LU Wei, LIU Zhaogang. Developing alternative forest spatial management plans when carbon and timber values are considered: a real case from northeastern China [J]. *Ecological Modelling*, 2018, 385: 45-57.
- [6] BACKÉUS S, WIKSTRÖM P, LÄMÅS T. A model for regional analysis of carbon sequestration and timber production [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 216(1/3): 28-40.
- [7] KELEŞ S, BAŞKENT E Z. Modelling and analyzing timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: a case study [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2010, 16: 473-479.
- [8] 董灵波, 孙云霞, 刘兆刚. 基于碳和木材目标的森林空间经营规划研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 52-61.
DONG Lingbo, SUN Yunxia, LIU Zhaogang. Integrating carbon and timber objective into forest spatial planning management [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 52-61.
- [9] 孟海月, 刘强, 吴伟光. 不同经营类型毛竹林经营效益及固碳能力分析[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(6): 959-964.
MENG Haiyue, LIU Qiang, WU Weiguang. Study on the cost-benefit and carbon sequestration capacities of *Phyllostachys edulis* plantations under different types of management [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2014, 31(6): 959-964.
- [10] LÜ Shaofeng, YUAN Ning, SUN Xiaobo, et al. Estimating carbon sequestration potential and optimizing management strategies for moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests using machine learning[J/OL]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2024, 7: 1338795[2025-05-04]. DOI: 10.3389/ffgc.2024.1338795.

- [11] 李翀. 毛竹林碳积累特征与碳汇功能经营调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
LI Chong. *Research on the Management Regulation and Control of Carbon Accumulation Characteristic and Carbon Sink Function in Moso Bamboo Forest* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [12] 马少杰, 李正才, 王斌, 等. 不同经营模式对毛竹土壤活性有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 674–679.
MA Shaojie, LI Zhengcai, WANG Bin, *et al.* Effects of different management models on soil active organic carbon of bamboo forests [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 674–679.
- [13] 徐林. 生物质炭和硅肥对毛竹林土壤温室气体排放及生态系统碳汇能力影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
XU Lin. *Effect of Biochar and Silicon Fertilizer on Soil Greenhouse Gas Emissions and Ecosystems Carbon Sequestration Capacity in Moso Bamboo Forest* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [14] 刘小丽, 朱霖. 安吉竹林碳汇项目的实践、成效与启示[J]. 竹子学报, 2024, 43(3): 72–78.
LIU Xiaoli, ZHU Lin. Practice, effects, and insights of the Anji bamboo forest carbon sink project [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2024, 43(3): 72–78.
- [15] 冷利松, 周熠, 董婉君, 等. 毛竹林大小年经营模式对土壤有机碳组分含量的影响[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(4): 29–34.
LENG Lisong, ZHOU Yi, DONG Wanjun, *et al.* Effect of on-year and off-year management models on soil organic carbon componen contents in moso bamboo forest [J]. *World Bamboo and Rattan*, 2024, 22(4): 29–34.
- [16] 裴晶晶. 毛竹林受高温干旱影响的特征及其自恢复能力研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.
PEI Jingjing. *Study on the Characteristics and Self-recovery Ability of Moso Bamboo Forest by High Temperature and Drought* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2017.
- [17] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
ZHOU Guomo. *Carbon Storage, Fixation and Distribution in Mao Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) Stands Ecosystem* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [18] BAILEY R L, DELL T R. Quantifying diameter distributions with the weibull FunctionFree [J]. *Forest Science*, 1973, 19(2): 97–104.
- [19] 汤孟平, 沈利芬, 赵赛赛, 等. 基于谱分析的天目山毛竹林生长周期[J]. 林业科学, 2014, 50(9): 184–188.
TANG Mengping, SHEN Lifen, ZHAO Saisai, *et al.* Growth cycle of *Phyllostachys edulis* stand in tianmu mountain based on spectrum analysis [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(9): 184–188.
- [20] 刘应芳, 黄从德, 陈其兵. 蜀南竹海风景区毛竹林生态系统碳储量及其空间分配特征[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(2): 136–140.
LIU Yingfang, HUANG Congde, CHEN Qibing. Carbon storage and allocation of *Phyllostachys edulis* ecosystem in scenic spot within the southern Sichuan bamboo sea [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2010, 28(2): 136–140.
- [21] 顾蕾, 沈振明, 周宇峰, 等. 浙江省毛竹竹板材碳转移分析[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 186–190.
GU Lei, SHEN Zhenming, ZHOU Yufeng, *et al.* Analysis of carbon transfer in moso bamboo plank in Zhejiang Province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(1): 186–190.
- [22] 刘鹏, 黄云峰, 朱玉兰, 等. “双碳”目标下浙江安吉毛竹林碳汇经营模式[J]. 世界竹藤通讯, 2023, 21(2): 59–62.
LIU Peng, HUANG Yunfeng, ZHU Yulan, *et al.* Carbon sink targeted management models of moso bamboo forest towards carbon peaking and neutrality goals in Anji County, Zhejiang Province [J]. *World Bamboo and Rattan*, 2023, 21(2): 59–62.
- [23] 杨传宝, 倪惠菁, 苏文会, 等. 经营措施对毛竹林土壤不同组分有机碳、氮及化学结构的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 25–34.
YANG Chuanbao, NI Huijing, SU Wenhui, *et al.* Effects of management measures on organic carbon, nitrogen and chemical structure of different soil fractions in *Phyllostachys edulis* plantations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 25–34.
- [24] 朱强根, 金爱武, 王意锟, 等. 不同营林模式下毛竹枝叶的生物量分配: 异速生长分析[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 811–819.
ZHU Qianggen, JIN Aiwu, WANG Yikun, *et al.* Biomass allocation of branches and leaves in *Phyllostachys heterocycla* ‘Pubescen’ under different management modes: allometric scaling analysis [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(9): 811–819.

- [25] 毛方杰. 毛竹林生态系统碳循环时空模型构建及应用研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
MAO Fangjie. *Construction and Application of Spatiotemporal Carbon Cycle Model of Moso Bamboo Forest Ecosystem* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.
- [26] BOURQUE C P A, NEILSON E T, GRUENWALD C, *et al.* Optimizing carbon sequestration in commercial forests by integrating carbon management objectives in wood supply modeling [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, **12**(7): 1253–1275.
- [27] WEN Guosheng, ZHANG Liyang, ZHANG Ruming, *et al.* Temporal and spatial dynamics of carbon fixation by moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) in subtropical China [J]. *The Botanical Review*, 2011, **77**(3): 271–277.
- [28] 李翀, 周国模, 施拥军, 等. 不同经营措施对毛竹林生态系统净碳汇能力的影响[J]. 林业科学, 2017, **53**(2): 1–9.
LI Chong, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, *et al.* Effects of different management measures on the net carbon sequestration capacity of moso bamboo forest ecosystem [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, **53**(2): 1–9.
- [29] 曹先磊, 张颖, 石小亮, 等. 竹子造林 CCER 项目碳汇价值动态评估及敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(2): 247–256.
CAO Xianlei, ZHANG Ying, SHI Xiaoliang, *et al.* Study on the dynamic value of carbon sequestration of bamboo forestation project in CCER market and its sensitivity [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(2): 247–256.
- [30] 陈幸良, 窦亚权. 发展竹林林下经济 做大做强竹业产业[J]. 世界竹藤通讯, 2023, **21**(5): 1–7.
CHEN Xingliang, DOU Yaquan. Developing non-timber bamboo-forest-based economy for building a strong and bigger bamboo industry [J]. *World Bamboo and Rattan*, 2023, **21**(5): 1–7.
- [31] 王兴友, 王小兵, 伍丽萍, 等. 南川区竹林资源生态产品价值实现空间策略研究[J]. 安徽农业科学, 2024, **52**(16): 101–106.
WANG Xingyou, WANG Xiaobing, WU Liping, *et al.* Research on the spatial strategy to realize the value of bamboo ecological products in Nanchuan, Chongqing [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, **52**(16): 101–106.
- [32] 崔瑞蕊, 杜华强, 周国模, 等. 近 30 a 安吉县毛竹林动态遥感监测及碳储量变化[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(3): 422–431.
CUI Ruirui, DU Huaqiang, ZHOU Guomo, *et al.* Remote sensing-based dynamic monitoring of moso bamboo forest and its carbon stock change in Anji County [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2011, **28**(3): 422–431.
- [33] 李德月, 舒琪. 基于碳中和愿景的竹林生态系统管理思考[J]. 世界竹藤通讯, 2022, **20**(2): 71–74.
LI Deyue, SHU Qi. Thoughts on bamboo forest ecosystem management based on the vision of carbon neutrality [J]. *World Bamboo and Rattan*, 2022, **20**(2): 71–74.