

DOI: 10.20103/j.stxb.202403300674

王晓雯, 余智涵, 杨红强. 基于价格随机的苏北杨树人工林多碳库最优轮伐模型构建与评估. 生态学报, 2025, 45(5): 2326-2336.

Wang X W, Yu Z H, Yang H Q. Construction and evaluation of the optimal rotation model for multi carbon storage of poplar plantations in northern Jiangsu based on price stochasticity. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2326-2336.

基于价格随机的苏北杨树人工林多碳库最优轮伐模型构建与评估

王晓雯^{1,2}, 余智涵^{1,2}, 杨红强^{1,2,3,*}

1 南京林业大学经济管理学院, 南京 210037

2 国家林业与草原局林产品经济贸易研究中心, 南京 210037

3 南京大学长江三角洲经济社会发展研究中心, 南京 210093

摘要: 发展林业碳汇、加强人工林的可持续经营是中国实现“碳中和”目标的重要手段。价格随机和价格不确定性是影响森林经营者决策最优轮伐的重要因素。基于拓展的 Faustmann-Hartman 模型, 构建了包含生物量碳库、死亡有机质碳库、木质林产品碳库和生物质能源碳库的多碳库最优轮伐决策模型, 分析了价格随机对苏北杨树人工林最优轮伐期的影响, 评估了多碳库情境下森林经营者营林收益水平。结果表明: (1) 基准情景下, 依次纳入木材收益、生物量、死亡有机质、木质林产品和生物质能源碳库收益的苏北杨树最优轮伐期均在 8—9 年之间, 依次纳入多种碳库收益未对森林经营者的采伐决策产生过多干扰; (2) 在中国现行碳价格水平下, 纳入多碳库收益会持续提高土地期望值, 全面考虑营林过程中的碳汇收益可提升苏北杨树经营者收益约 191%, 经济潜力广阔; (3) 敏感性分析表明, 贴现率、木材和碳汇的长期均衡价格是影响森林经营者管理决策的重要因素。相比之下, 木材和碳价格波动的影响相对较小, 提升市场长期稳定价格意义凸显。研究提出了应加强林业多碳库碳汇能力监测与评估分析、促进木材价格稳定上涨、推动碳配额与中国核证自愿减排量市场有效衔接、兼顾木材和碳汇生产能力以及重视长期经营中多重风险防范的苏北杨树可持续经营对策建议。

关键词: 可持续经营; Faustmann-Hartman 模型; 多碳库; 价格随机; 杨树人工林

Construction and evaluation of the optimal rotation model for multi carbon storage of poplar plantations in northern Jiangsu based on price stochasticity

WANG Xiaowen^{1,2}, YU Zhihan^{1,2}, YANG Hongqiang^{1,2,3,*}

1 College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 Research Center for Economics and Trade in Forest Products, National Forestry and Grassland Administration, Nanjing 210037, China

3 Center for the Yangtze River Delta's Socioeconomic Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Developing forestry carbon sequestration and enhancing the sustainable management of plantations are essential strategies for China to achieve its “carbon neutrality” objectives. Particularly, the optimal rotation age for forests is significantly influenced by price volatility and uncertainty, which are critical factors in forest managers’ decision-making processes. Using an extended Faustmann-Hartman model, this study developed an optimal harvesting decision-making framework that includes multiple carbon pools, such as biomass, dead organic matter, wood forest products, and biomass energy. We have conducted an analysis on the influence of price stochasticity on the optimal rotation periods for poplar plantations in Northern Jiangsu Province and evaluated the potential revenue for forest managers under the multi-carbon pool

基金项目: 国家社科基金重大项目 (23&ZD103); 国家自然科学基金面上项目 (72073064)

收稿日期: 2024-03-30; **网络出版日期:** 2024-12-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhqnfu@aliyun.com

scenario. The results show that: (1) Under the baseline scenario, the optimal rotation periods for poplar plantations in Northern Jiangsu, when considering revenues from timber, biomass, dead organic matter, wood forest products, and biomass energy carbon pool in succession, are consistently found to be between 8 to 9 years. This suggests a relatively stable optimal rotation period despite the inclusion of various carbon pools in the revenue calculations; (2) Under the current carbon price level in China, incorporating revenue from multiple carbon pools successively leads to a continuous increase in the expected land value. This indicates that a comprehensive consideration of carbon sink benefits during forestry operations could significantly enhance the revenue of poplar forest managers in Northern Jiangsu by approximately 191%. This substantial increase underscores the economic potential of integrating carbon sequestration into forest management practices; (3) Sensitivity analysis demonstrates that discount rates and the long-term equilibrium prices of timber and carbon sinks are pivotal factors in shaping forest management decisions. The impact of price fluctuations for both timber and carbon sinks, while important, is found to be relatively minor in comparison. This suggests that forest managers should focus on long-term strategies that consider the stability and growth of timber and carbon markets. Based on these findings, the study proposes several sustainable management strategies for poplar plantations in northern Jiangsu. These including strengthening the monitoring and evaluation of carbon sequestration capacity in forestry, fostering stable increases in timber prices, promoting an effective connection between carbon quotas and China Certified Emission Reduction markets, balancing the production capacity of timber and carbon sequestration, and emphasizing the prevention of multiple risks in long-term management. By implementing these strategies, forest managers can enhance the sustainability and profitability of their operations, contributing to the broader goal of carbon neutrality in China.

Key Words: sustainable management; Faustmann-Hartman model; multi-carbon pool; price stochasticity; *Populus spp.* Plantations

实现碳达峰与碳中和的宏伟目标,可依托两条主要路径并行推进:一是加快工业减排,实现能源消费中的节能增效;二是增加生态碳汇,以及发展碳捕集、利用与封存等负排放技术^[1]。中国当前碳排放基数庞大,而通往碳中和愿景的转型期相对紧迫^[2],生态碳汇的作用显得尤为关键。它不仅能够有效抵减来自交通、建筑以及市民消费等部门所产生的碳排放,还因其成本效益显著及技术可行性的优势^[3],成为中国顺利达成碳中和目标的重要举措^[4]。

包含科学采伐决策在内的森林可持续经营是提升生态系统的碳汇能力的有效途径^[5-6]。自 Faustmann 模型^[7]建立以来,包含木材收益的单一林分森林的最优采伐决策一直是林业经济学的经典议题^[8]。然而,仅基于木材收益的采伐决策范式,往往诱使森林管理者倾向于短期利益最大化的经营目标,实施过度采伐行为,从而背离森林可持续经营的长远目标。Hartman^[9]对 Faustmann 模型在生态服务价值方面进行拓展,形成了同时包含木材收益和碳汇收益的 Faustmann-Hartman 模型框架。据此,森林经营者可基于木材与碳汇双重收益最大化进行最优轮伐期确定,进而促进森林资源的可持续利用。2015 年,中国正式启动核证自愿减排量交易体系,中国森林碳汇作为一种生态产品被赋予价值。作为碳强制减排市场的重要补充,森林经营者可以通过参与林业碳汇项目来认证和出售中国核证自愿减排量(Chinese Certified Emission Reduction, CCER),以获得可观的碳汇收益^[10]。与此同时,森林碳汇价值确定中的量化核算成为中国森林经营者最优轮伐期确定中面临的新的问题。

碳储存会带来收益,碳释放也会带来相应惩罚^[11]。部分研究仅局限于立木生物量碳库^[12],一定程度上削弱了最优轮伐期确定的科学性和精确性^[13-14]。具体而言,将死亡有机质(Dead Organic Matter, DOM)碳库纳入最优轮伐期分析,黑松林的最优轮伐期有所缩短^[15-16],反映了土壤碳动态对于森林采伐决策的重要影响。木质林产品(Harvested Wood Products, HWP)无疑是一个可观的碳库^[17],而其作为长期碳储存库的特性尚未得到充分重视。HWP 不仅具有碳储功能,其生命周期内还按一定的速率进行分解^[18],未将 HWP 碳释放

纳入核算可能导致低估碳汇成本或高估碳汇价值^[19]。同时,生物质能源碳库的简化处理^[4]也限制了对其潜在收益的准确评估。此外,尽管 Ning 等^[20]利用 Faustmann 模型和实物期权理论评估了木材、碳汇和生物燃料联合生产对森林管理的影响,却未能将 HWP 碳库包含在内。为了更全面地理解森林碳循环与经济效益的关系,近期研究开始综合考虑生物量、DOM、HWP 及生物质能源等多个碳库的动态变化及其相互作用^[21-22]。这些研究不仅提升了最优轮伐期预测的准确性,还揭示了森林管理策略在促进碳封存与经济效益平衡方面的潜力。然而,值得注意的是,当前研究多基于静态价格假设,忽略了市场价格波动对森林经营者决策过程的潜在影响。

森林经营者在长期经营中面临一系列不确定性。木材和碳汇是可持续营林目标之下两大主要产品,其价格波动影响森林经营者的采伐决策。首先,中国林业碳汇需求依赖于自愿减排市场^[23],未来其“安全阀”属性增强^[24],导致林业碳价格高度不确定。同时,木材市场价格因其经营周期长、前期投入大而波动明显^[25]。减排政策情景变化亦深刻影响森林经营决策^[26]。森林碳定价虽导致最优轮伐期延长和相应的碳储量增加,但也使之面临更大的森林受损风险^[27]。此外,技术进步不确定性影响林业碳汇项目的投资门槛^[28],进而影响其采伐决策。鉴于中国碳排放权交易市场(以下简称碳市场)重启及碳定价机制有待完善,而木材生产一直是森林经营的最本质目标,现亟需深入研究木材和碳价格波动对营林决策的影响,以构建科学的碳核算体系与采伐政策,实现林业可持续发展。

中国杨树(*Populus spp.*)种植面积超过 800 万公顷,占全国森林面积的 3.7%^[29],不仅是中国种植面积最广的人工林树种^[30],而且也是中国温室气体自愿减排项目中的重要碳汇造林树种^[31]。在江苏省,杨树的成片林面积以及蓄积量更是全国第一^[32],成为江苏人造板产业的主要树种和江苏省二次林产的主要贡献者^[26]。科学的采伐作业不仅是获得木材的主要手段,也是森林抚育经营的重要措施^[5]。而在此基础上,政策制定者该如何制定林业碳核算体系以满足苏北杨树经营者木材和碳汇联合收益最大化目标?不同的核算体系对于苏北杨树经营者采伐决策影响如何?有必要针对这一问题展开研究与探讨。因此,本研究聚焦木材价格和碳价格不确定性,依托经典的 Faustmann-Hartman 模型,探讨木材收益联合碳汇收益的森林可持续经营目标下,木材和碳价格随机对于森林经营者土地期望值(Land Expectation Value, LEV)和最优轮伐决策影响路径,构建依次纳入生物量碳库、死亡有机质碳库、木质林产品碳库和生物质能源碳库收益在内的苏北杨树可持续经营多碳库模型,以期对可持续经营目标下苏北杨树最优轮伐期决策作出有益启示。

1 模型与方法

1.1 模型的理论基础

1.1.1 森林可持续经营和资金的时间价值理论

林地投资的回报是一个具有长期性的过程。在长期中,资金价值往往随时间的推移而发生变化,即资金具有时间价值。因此,在评估森林经营者的经济效益和进行长期的投资决策时,必须将时间因素纳入充分考虑。基于 Faustmann 模型的最优轮伐期分析,强调以森林经营者的 LEV 最大化为原则,来确定最佳的森林管理策略,充分反映了森林经营者在最求经济效益最大化中的理性决策。根据时间价值理论,可以运用贴现率这一关键参数,将未来的收益折算到当前的价值水平,以便进行跨期比较和决策。同时,森林可持续经营强调优化林木采伐管理和提升森林固碳能力。随着碳汇经济价值的提升,有利于激励森林经营者减少短视性的采伐行为,进行更加长期的抚育和管护。

1.1.2 气候变化和多碳库碳收支理论

森林在减缓气候变化方面具有双重作用。一方面,森林生长通过光合作用形成碳汇,以生物质的形式储存在森林中,释放了碳排放空间;另一方面,木材砍伐造成相反方向碳流动,使森林充当碳源角色。然而,除了森林生长,森林经营阶段形成 HWP 同样具有碳储功能,将采伐阶段视作碳的一次性释放可能忽略了“森林-林产品”这一物质流动过程中因碳储功能而形成的时间缓冲价值^[33]。物质流分析(Material Flow Analysis,

MFA)是一种系统的方法,旨在量化和分析物质在特定系统中的流动情况。将 MFA 的思想应用于林业经济学的最优轮伐期确定中,可以帮助理解林业各碳库的动态变化。在林业经营从森林生长到林产品使用的“摇篮到大门”的生命周期中,除了森林生长形成的生物量碳库^[34]外,生长过程产生凋落物和枯死木,这一部分会进入 DOM 碳库^[16, 35]。同时,在采伐年份,只有可销售商品材部分会被砍伐,这部分碳汇会进一步保留在 HWP 碳库中^[36-37],而采伐剩余物则被收集进入生物质能源碳库^[22]。所考虑的碳库的差异会影响森林经营者的土地期望值,进而对最优轮伐期产生影响^[37]。

1.2 模型假设

假设一:裸地造林假设。忽略造林前林地已有的碳汇,同时忽略采伐后碳释放所造成的碳汇收益损失。假设林地在单个轮作周期下生长和采伐,森林经营者希望确定最优轮伐期 T ,以最大限度提高一片裸地的木材收益和碳汇收益的净现值。

假设二:价格随机假设。假设经营成本及与森林生长相关的参数已知,且不随时间变化。而木材价格和碳价格因受到交易环境、政策等影响,具有一定的随机波动性,森林经营者希望在价格波动的市场环境中最大限度地提高其经营收益。

假设三:林业碳库及其碳收支假设。本研究假定,森林生长通过光合作用形成碳汇储存在生物量碳库中,其间产生的凋落物进入 DOM 碳库。在采伐年份,树干部分生物量全部进入 HWP 碳库,剩余部分生物量用作生物质能源加工。其中,HWP 和 DOM 碳库以固定的速率进行衰解,向大气中释放二氧化碳,而生物质能源被视作一次性排放。森林经营者每年会从各个碳库的碳储量增加中获得收入,并因碳储量减少而发生支出。

1.3 模型构建

本研究考虑了四个重要的碳库,分别是生物量碳库、DOM 碳库、HWP 碳库以及生物质能源碳库。考虑到以上碳库生命周期内的碳流动问题,本研究将分别从碳汇收益和碳释放惩罚两个视角进行包含木材价值和碳汇价值的多碳库模型构建。

1.3.1 经典 Faustmann 模型框架

当只考虑木材收益时,林地期望值的净现值 LEV_w 为:

$$LEV_w(t) = P_w \delta \rho V(t) e^{-rt} - C \quad (1)$$

式中, P_w 表示扣除采运成本后的木材价格(元/ m^3); δ 表示出材率; ρ 表示种植密度(株/ hm^2); $V(t)$ 为杨树的生长函数(m^3/hm^2); r 表示贴现率; t 为林分年龄; C 表示林分建立成本。

1.3.2 包含多碳库的 Faustmann-Hartman 模型拓展

(1) 生物量碳库及其价值核算

生物量碳库的净现值包括每年生物量的碳汇增量在其生命周期内的现值之和,再减去第 t 年进行采伐时全部生物量损失的碳惩罚:

$$LEV_b(t) = \int_0^t \gamma P_c B'(s) e^{-rs} ds - \gamma P_c B(t) e^{-rt} \quad (2)$$

式中, γ 表示碳和二氧化碳的质量转化因子; P_c 表示碳价格(元/t); s 表示积分变量; $B'(s)$ 表示 t 时刻生物量碳库的碳变化量; $B(t)$ 表示生物量的碳质量方程(t/hm^2)。

(2) DOM 碳库及其价值核算

DOM 碳库的净现值同样包含两部分:第一部分为每年 DOM 碳库的碳汇增量在其生命周期内的净现值之和,表示为式(3)中的右侧第一项;第二部分为采伐后除采伐部分外的所有树木生物量都转移到 DOM 碳库中的碳汇收益,表示为式(3)右侧第二项。

$$LEV_d(t) = \int_0^t \gamma P_c D'(s) e^{-rs} ds + \gamma P_c [B(t) - \pi \rho V(t)] e^{-rt} \quad (3)$$

式中, $D(t) = e^{-\alpha t} \int_0^t e^{\alpha s} \beta B(s) ds$ 表示 t 时刻 DOM 的碳质量方程(t/hm^2); $D'(s)$ 则表示 t 时刻 DOM 碳库的碳变化量; π 表示树木的碳转化因子。

(3) HWP 碳库及其价值核算

在采伐当年,树干生物量以 δ 的比例转入 HWP 碳库。在采伐之后的若干年内,HWP 会按照一定速率进行分解。分解过程采用一阶衰减法(The First-Order decay method,FOD)进行描述^[38-39]。则第 t 年 HWP 碳库土地期望值净现值表示为:

$$\text{LEV}_h(t) = \gamma P_c \pi \delta \rho V(t) e^{-rt} - C_H \quad (4)$$

式中, T 表示树木采伐年龄; $S_0(t) = \delta \rho V(T)$ 表示在 $t > T$ 时刻,进入 HWP 碳蓄积量; $H'(t) = k e^{-k(t-T)} \pi S_0(t)$ 表示在 t 时刻由于 HWP 分解产生的碳排放量; $C_H = \int_T^{\infty} e^{-rt} P_c H'(t) dt$ 表示 HWP 贴现后的碳排放成本。

(4) 生物质能源碳库及其价值核算

根据本研究假设,加工商品材的剩余废料(树皮等)被收集用作于生物质能源用途。但其包含的碳储会通过燃烧立即释放,则第 t 年的生物质能源收益为:

$$\text{LEV}_e(t) = P_e (1 - \delta) \rho V(t) e^{-rt} \quad (5)$$

式中, P_e 表示生物质能源的价格(元/t)。

因此,综合考虑木材收益、生物量碳库、DOM 碳库、HWP 碳库以及生物质能源碳库收益的 Faustmann-Hartman 模型拓展构建如式(6)所示。此时,需要帮助森林经营者确定最优轮伐期 T ,使得同时包含木材收益和多重碳库收益的 LEV 值最大化。

$$\text{LEV}(t) = \text{LEV}_w(t) + \text{LEV}_b(t) + \text{LEV}_d(t) + \text{LEV}_h(t) + \text{LEV}_e(t) \quad (6)$$

1.4 数据来源与参数说明

1.4.1 数据来源及其说明

CCER 市场作为碳配额市场的重要补充^[40],现其交易主要靠协商定价为主,目前尚难以获得可用于未来分析的价格序列。而 CCER 和碳配额价格具有长期趋同的趋势^[41],因此,本研究的碳价主要选取碳配额价格,数据来源于上海环境能源交易所日度碳排放权配额(Chinese Emission Allowances,CEA)收盘价(<https://www.cneeex.com/jysj>)。为减轻数据误差影响,后续对碳价格进行了敏感性分析;其次,当前国内碳市场的碳价格最高只在 70 元/t CO₂ 左右,而国际碳市场比如欧盟的碳市场碳价格已多次突破 100 欧元/t CO₂,约相当于人民币 782.5 元。国内国际碳市场存在巨大的价差。随着资本市场开放和全面引进外资,外资会进入套利。只要存在套利空间,价格差就会缓慢消除^[42]。针对这一现象,本研究将进一步模拟分析欧盟碳价格下的中国森林经营者经营管理决策情况。欧盟碳价格数据来源于英为财经网站(<https://cn.investing.com>)发布的欧洲能源交易所碳配额交易月度收盘价。

1.4.2 参数说明

首先需要确定杨树材积生长函数来计算木材收益,目前国内主要用 Richard 和 Logistic 两种模型对杨树动态生长规律进行模拟。本研究采用周忠诚等^[43]建立的南方型杨树南林 895 (*Populus × euramericana* “Nanlin895”)的材积生长规律模型: $V(t) = 0.57 \div (1 + e^{3.717 - 0.770t})$;本研究使用生物量扩展因子法来评估杨树在第 t 年时的生物量, t 时刻树干的生物量(t/hm²) $Q(t) = apV(t) + b$, a 和 b 分别表示与杨树相关的特定参数; t 时刻总的生物量(t/hm²) $B(t) = \text{BEF} \times Q(t)$ 。

均值回复过程(Mean Reversion,MR)和几何布朗运动(Geometric Brownian Motion,GBM)是林业经济研究中描述价格波动最常见的两个随机过程^[14, 20]。GBM 假设每年的价格都会之前的水平上随机增加。然而,由于价格上涨的期望值和方差不受约束,且当某一时刻的价格为 0 时,价格将始终保持为零,这会对价格产生不切实际的影响。相较而言,MR 过程使得每一期价格稳定在均值附近^[44],比 GBM 更能描述中国木材和碳汇的价格变化。因此本研究采用 MR 过程来描述木材和碳价格的未来走势。以木材价格 P_w 为例,MR 过程的基本形式为: $dP_w = v(\mu - P_w) dt + \sigma P_w dz$ 。通过将其进行离散近似,可以估计出相应的参数取值。MR 建模结果将应用于利用蒙特卡洛模拟方法进行木材及碳价格波动时的 LEV 和最优轮伐期的确认。模型中涉及的其他具体的相关参数含义、取值和来源见表 1。

表 1 相关模型参数及其来源
Table 1 Applied model parameters and their references

参数 Parameter	含义 Implication	取值 Value	数据来源 Data sources
P_w	木材价格	572 元/m ³	Zhang 等 ^[26]
δ	出材率	0.6000	Zhang 等 ^[26]
ρ	造林密度	417 株/hm ²	周忠诚等 ^[43]
r	贴现率	0.0500	Ferguson ^[45]
C	造林成本	24544 元/hm ²	Zhang 等 ^[26]
γ	碳和二氧化碳的质量转化因子	3.6667t/t	—
P_c	碳价格	56.4109 元/t	数值模拟
α	DOM 碳库和采伐剩余物的衰减速率	0.7150	程学刚 ^[46]
β	从生物量碳库向 DOM 碳库中转移的速率	0.0100	程学刚 ^[46]
π	树木的碳转化因子	0.1600t/t	苏伟 ^[47]
k	FOD 下的衰减常数	0.0167	Dong 等 ^[13]
P_e	生物质能源价格	200 元/t	实地调研
a	与杨树相关的特定参数	0.4754	Fang 等 ^[48]
b	与杨树相关的特定参数	30.6303	Fang 等 ^[48]
BEF	生物量拓展因子	1.5460	苏伟 ^[47]
μ_w	长期均衡木材价格	572 元/m ³	Zhang 等 ^[26]
σ_w	木材价格波动率	0.1500	Yu 等 ^[14]
θ_w	木材价格回复速率	2	Yu 等 ^[14]
μ_c^C	中国长期均衡碳价格	59.4100 元/t	数值模拟
σ_c^C	中国碳价格波动率	0.1200	数值模拟
θ_c^C	中国碳价格回复速率	5.8902	数值模拟
μ_c^E	欧盟长期均衡碳价格	699.0840 元/t	数值模拟
σ_c^E	欧盟碳价格波动率	0.3450	数值模拟
θ_c^E	欧盟碳价格回复速率	0.6598	数值模拟

DOM:死亡有机质 Dead organic matter;FOD: 一阶衰减法 The First-Order decay method

2 结果与分析

2.1 基于价格随机的多碳库杨树最优轮伐期和 LEV 分析

表 2 给出了价格随机下仅考虑木材收益(情境一)、木材收益和生物量碳库碳汇收益(情境二)、木材收益、生物量碳库和 DOM 碳库碳汇收益(情境三)、木材收益、生物量碳库、DOM 碳库和 HWP 碳库碳汇收益(情境四)以及在情境四基础上纳入生物质能源碳库碳汇收益(情境五)的最优轮伐期和 LEV。

表 2 基准情境下的最优轮伐期和 LEV
Table 2 Optimal rotation period and LEV under the base scenario

情境 Situation	情境一 Situation one	情境二 Situation two	情境三 Situation three	情境四 Situation four	情境五 Situation five
最优轮伐期 Optimal rotation period/a	8.25	9.00	8.92	8.92	8.92
LEV/(×10 ⁴ 元/hm ²)	2.59	3.40	6.11	6.38	7.54

LEV:土地期望值 Land expectation value

假设木材价格和碳价格均服从 MR 过程进行波动。总体来讲,与仅考虑木材收益相比,综合考虑多个碳库的碳汇收益提高了森林经营者的 LEV,每加入一个碳库,LEV 就会进一步增长,这一趋势与 Asante 等^[16]和 Dong 等^[37]一致。纳入 DOM 碳库对于 LEV 的提升最为明显,全面包含生物量碳库、DOM 碳库、HWP 碳库、生物质能源碳库收益在内的森林经营者 LEV 可提升 191%。在提升经营者 LEV 的同时,杨树的最优轮伐期也

会相应延长。具体来看,加入生物量碳库会延长杨树最优轮伐期至 9 年,而依次纳入 DOM 碳库、HWP 碳库、生物质能源碳库收益,杨树的最优轮伐期稳定在 8.9 年。

2.2 敏感性分析结果

2.2.1 贴现率的敏感性分析

碳汇林的经营投资是一个周期较长的过程,贴现率作为森林经营者成本投入的机会成本之一,对农户的经营决策有直接影响^[49]。表 3 的数值分析表明,当其他参数不变时,不论加入何种碳库,贴现率越低,杨树的最优轮伐期越长,LEV 越大。当利率处于较低水平时,等待成本较低,理性的森林经营者会选择延长轮伐期以获取更高 LEV。当考虑不同的碳库收益时,当贴现率从 2% 增加到 8%,最优轮伐期变动均在 1.41—2.08 年之间,考虑完整碳库收益的最优轮伐期变动对贴现率的敏感性并不高。与最优轮伐期相比,贴现率变动对纳入不同碳库的 LEV 的影响更为明显。当贴现率从 2% 变动至 8% 时,仅纳入生物量碳库收益的 LEV 从 4.59 万元/hm² 变动至 2.52 万元/hm²,变化幅度为 2.07 万元/hm²。但同时考虑生物量碳库、DOM 碳库、HWP 碳库和生物质能源碳库的 LEV 从 9.92 万元/hm² 变动到 5.82 万元/hm²,变化幅度为 4.10 万元/hm²。

表 3 不同贴现率的敏感性分析结果
Table 3 Sensitivity analysis results of different discount rate

情境 Situation		情境一 Situation one	情境二 Situation two	情境三 Situation three	情境四 Situation four	情境五 Situation five
$r=0.02$	最优轮伐期/a	9.75	10.33	10.33	10.33	10.33
	LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	4.12	4.59	8.06	8.39	9.92
$r=0.08$	最优轮伐期/a	7.75	8.92	8.25	8.25	8.25
	LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	1.52	2.52	4.69	4.90	5.82

2.2.2 木材价格的敏感性分析

木材价格的敏感性分析结果表明,当其他参数保持不变时,长期均衡木材价格对于杨树最优轮伐期影响敏感。当长期均衡木材价格较低时,最优轮伐期波动幅度大,而当长期均衡木材价格较高时,无论纳入何种碳库收益,均不会影响杨树的最优轮伐期。长期均衡木材价格正向影响 LEV。不论加入何种收益,随着长期均衡木材价格的升高,LEV 均会增大。表 4 还显示了 LEV 与木材长期均衡价格之间的线性关系,均衡价格每增加 50%,LEV 增加约 2.50 万元/hm²。相比之下,木材价格波动率对于杨树最优轮伐期与 LEV 的影响均不敏感。

表 4 木材价格的敏感性分析结果
Table 4 Sensitivity analysis results of different timber prices

情境 Situation		情境一 Situation one	情境二 Situation two	情境三 Situation three	情境四 Situation four	情境五 Situation five
$\mu_w \times 50\%$	最优轮伐期/a	8.08	49.67	9.42	9.08	9.08
	LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	0.07	1.10	3.60	3.87	5.03
$\mu_w \times 150\%$	最优轮伐期/a	8.08	8.67	8.67	8.67	8.67
	LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	5.11	5.89	8.60	8.87	10.04
$\mu_w \times 200\%$	最优轮伐期/a	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50
	LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	7.62	8.39	11.11	11.38	12.55
$\sigma_w \times 50\%$	最优轮伐期/a	8.25	9.00	9.00	9.00	9.00
	LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	3.39	6.10	6.36	7.53
$\sigma_w \times 150\%$	最优轮伐期/a	8.00	9.7	9.00	9.00	9.00
	LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.59	3.41	6.11	6.38	7.55
$\sigma_w \times 200\%$	最优轮伐期/a	8.50	8.92	8.92	8.92	8.92
	LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.60	3.42	6.12	6.39	7.56

2.2.3 碳价格的敏感性分析

(1) 长期均衡碳价格的敏感性分析

由于情境一未考虑碳汇收益,故最优轮伐期和 LEV 并无变化。而加入碳汇收益时,长期均衡碳价格会对最优轮伐期和 LEV 产生正向影响。包含完整林业碳库碳汇收益时,当碳价格分别为长期均衡价格的 50%、150%、200%时,LEV 分别能够提升 3.06 万元/hm²、6.86 万元/hm²、8.77 万元/hm²,为仅考虑木材收益下的 LEV 的 118.60%、265.89%、339.92%。相比之下,最优轮伐期对此影响不敏感,当碳价格分别为长期均衡价格的 50%、150%、200%时,最优轮伐期分别延长 0.33 年、0.83 年、1.00 年,为仅考虑木材收益下的最优轮伐期的 4%、10.06%、12.12%,这说明现行价格下碳汇收益对最优轮伐期影响较小。

进一步考虑接近欧盟长期碳价格时,最优轮伐期随着长期均衡碳价格的提升变得敏感。如表 5 所示:包含完整林业碳库碳汇收益的杨树最优轮伐期随着长期均衡碳价格的提高而延长,当碳价格分别为长期均衡价格的 50%、150%、200%时,最优轮伐期分别延长 2.08 年、4.08 年、6.58 年。此时的长期均衡碳价格变动也会正向影响 LEV,然而,碳价格变动带来的收益甚至远超木材收益,在长期均衡价格为现行价格的 150%且纳入生物量碳库时出现了永不采伐的情况,根据本研究假设,将此情形下的最优轮伐期设置为 50 年,但这可能会影响采伐树木和保持树木生长以吸收更多碳之间的平衡^[26],不利于苏北杨树的可持续经营。当继续纳入 HWP 碳库和生物质能源碳库,杨树最优轮伐期又恢复至正常水平,这说明为了同时提升森林经营者收益和保证木材和碳汇均衡供给,有必要将完整的林业碳库纳入 LEV 核算之中。

表 5 长期均衡碳价格的敏感性分析结果

Table 5 Sensitivity analysis results of different long-term equilibrium carbon price levels

情境 Situation	情境一 Situation one	情境二 Situation two	情境三 Situation three	情境四 Situation four	情境五 Situation five
$\mu_c^C \times 50\%$ 最优轮伐期/a	8.25	8.75	8.67	8.67	8.58
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	2.97	4.33	4.46	5.64
$\mu_c^C \times 150\%$ 最优轮伐期/a	8.25	10.00	9.25	9.17	9.08
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	3.84	7.87	8.27	9.44
$\mu_c^C \times 200\%$ 最优轮伐期/a	8.25	49.92	9.50	9.50	9.25
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	4.66	9.67	10.20	11.35
$\mu_c^E \times 50\%$ 最优轮伐期/a	8.25	49.92	11.92	11.08	10.33
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	17.31	24.04	25.50	26.61
$\mu_c^E \times 150\%$ 最优轮伐期/a	8.25	50.00	49.75	12.33	12.33
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	55.43	70.78	72.20	73.23
$\mu_c^E \times 200\%$ 最优轮伐期/a	8.25	50.00	50.00	22.92	14.83
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	74.3	94.95	95.84	96.72

结合杨树的生长规律^[30, 43],本研究假设杨树人工林的经营时间不超过 50 年,即在第 50 年时必须进行采伐

(2) 碳价格波动的敏感性分析

如表 6 所示,在中国当前价格水平下,考虑多重碳库收益时,最优轮伐期和 LEV 对碳价格波动均不敏感。当碳价格处于欧盟平均价格水平时,碳价格波动率对于杨树 LEV 的影响虽仍不明显,但此时碳价格波动导致了纳入不同林业碳库收益时最优轮伐期的巨大差异。当仅纳入生物量碳库收益时,依然出现了永不采伐的情形,根据本研究假设,仍将此情形下森林经营者的最优轮伐决策设置在第 50 年时进行采伐。当进一步纳入 DOM、HWP 以及生物质能源碳库时,森林经营者的最优轮伐期开始逐渐缩短。当考虑完整的碳库收益时,碳价格波动率越大,森林经营者会越早进行采伐。

表 6 碳价格波动率的敏感性分析结果

Table 6 Sensitivity analysis results of different carbon price volatilities

情境 Situation	情境一 Situation one	情境二 Situation two	情境三 Situation three	情境四 Situation four	情境五 Situation five
$\sigma_c^C \times 50\%$ 最优轮伐期/a	8.25	9.17	9.00	8.92	8.83
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	3.39	6.09	6.36	7.53
$\sigma_c^C \times 150\%$ 最优轮伐期/a	8.25	9.33	9.00	9.00	8.83
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	3.39	6.09	6.36	7.53
$\sigma_c^C \times 200\%$ 最优轮伐期/a	8.25	9.17	9.00	8.92	8.83
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	3.39	6.09	6.36	7.53
$\sigma_c^E \times 50\%$ 最优轮伐期/a	8.25	50.00	49.83	11.92	11.75
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	36.41	46.73	48.87	49.91
$\sigma_c^E \times 150\%$ 最优轮伐期/a	8.25	50.00	48.67	11.67	11.67
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	36.22	46.46	48.62	49.68
$\sigma_c^E \times 200\%$ 最优轮伐期/a	8.25	50.00	49.58	11.92	11.25
LEV/($\times 10^4$ 元/hm ²)	2.58	36.42	46.72	48.89	49.96

3 讨论

中国林业碳汇生态产品的核算体系与交易机制尚待完善,这一现状通过调控森林经营者的预期收益现值,进而对其最优轮伐期决策产生影响,最终反馈于林地的木材产量与碳汇储量,对全球气候变化应对策略构成间接挑战。木材一直是森林经营最本质的目标,而本研究通过建立多碳库林地期望值核算模型,验证了与仅考虑木材收益相比,全面考虑营林过程中的碳库收益对森林经营者经济收益的正向影响,并确定了逐渐纳入完整林业碳库的杨树最优轮伐期年限。完成了本文的边际贡献之一,完善森林经营多碳库模型,为林业碳汇生态产品价值实现和森林经营者预期收益确定提供核算依据。然而,与杉木人工林^[4]的研究结论不同,进一步纳入 DOM、HWP、生物质能源碳库之后杨树的最优轮伐期并未进一步延长,而是略微降低并保持不变。这说明依次加入 DOM 碳库、HWP 碳库和生物质能源碳库可以在不改变杨树经营者决策的前提下提升其收益,有助于激励其参与林业碳汇交易。

与此同时,鉴于采伐决策的复杂性,本研究聚焦于贴现率、木材市场价格及碳交易价格三大核心因素进行敏感性分析,完成了本文的边际贡献之二,预测未来市场环境变化下的森林经营者采伐决策,为制定灵活高效的森林可持续经营政策提供理论依据。具体而言,贴现率作为衡量等待成本的关键指标,对最优轮伐期的确定高度敏感;木材价格的稳定上涨则成为激励经营者在不改变既定轮伐策略下,积极投身于碳汇林经营的重要驱动力;在当前中国碳价格走势下,不论考虑何种碳库,长期均衡碳价格的变动均能有效增加杨树经营者的经济收益,这与 Ning 等^[20]数值模拟的结果一致。值得注意的是,受国内较低碳价格水平制约,碳价格波动对经营者最优轮伐期决策的影响有限,这与 Yu 等^[14]的研究结论一致;通过引入欧盟碳价趋势进行数值模拟与敏感性分析,本研究揭示出随着碳价上升,最优轮伐期延长趋势显著,同时反映出高碳价环境下碳排放成本的凸显对经营者决策行为的深刻影响,这与 Zhou 等^[36],Dong 等^[13]的研究结果一致。在此情境下,考虑碳收益后的 LEV 增至仅考虑木材收益时的 37.49 倍,凸显了碳汇收益的潜力,同时也说明,碳汇收益的提升有利于激励森林经营者延迟采伐进而充分参与碳汇营林;针对碳价格波动幅度的考量则揭示了另一层面影响:随着波动范围的扩大,尽管对实际的 LEV 并未产生较大影响,杨树最优轮伐期却缩短 4.26%,这反映了高碳价波动带来经营者感知上的不确定性,促使其倾向于缩短轮伐周期而进行风险规避。根据本文的研究结果,对苏北杨树可持续经营提出以下建议和展望:

(1) 鼓励运用遥感技术和地理信息系统与人工智能相融合,加强对杨树各碳库固碳能力的科学监测和分析。特别应重视对 DOM 碳库碳储功能的科学评判,同时,应加快森林伐后 HWP 碳库^[50]纳入林业碳汇的碳收

支核算,为既有的可持续经营最优轮伐期决策理论纳入新的约束条件。此外,政府还应注重木质生物质能源推广与利用,加强生物质能源替代减排,拓宽森林经营者增收渠道;(2)政策制定者应采取措施稳定木材价格波动,促进木材价格稳定上涨,使得森林经营者不改变决策的前提下,稳步提升森林经营者收益。同时,要厘清 CCER 与碳配额市场的交互关系,利用区块链技术以及机器学习等方法确保林业碳汇定价公正合理,助力碳配额与 CCER 价格走向统一。同时,要探索建立碳价稳定机制,减少市场波动对森林经营的不利影响;(3)要坚持当前与长远利益兼顾的伦理价值目标,遵循树木成长成熟规律,避免极端的保护和采伐。要扭转森林采伐是单纯取材利用的错误认知,同时也不能一味强调延长轮伐周期以获取更多碳汇价值而忽略森林结构的调整;(4)本研究结合中国实际,只探讨了当前森林经营中最重要的价格随机因素,而在现实中,森林经营者决策仍受到政策和灾害等其他因素的影响,应鼓励在期权思想下进一步展开多重不确定下的模拟研究,为政策制定提供更多参考依据。同时,政府应鼓励价格保险和期货合约等风险管理工具创新,帮助森林经营者规避价格波动风险,稳定经营预期收益。

4 结论

(1)总体来讲,包含完整碳库碳汇收益的杨树最优轮伐期会延长。在现行的中国碳价格水平下,依次纳入木材收益、生物量碳库收益、DOM 碳库收益、HWP 碳库收益和生物质能源收益时,苏北杨树的最优轮伐期分别为 8.25 年、9.00 年、8.92 年、8.92 年和 8.92 年。

(2)与仅考虑木材收益相比,综合考虑多个碳库的碳汇收益提高了 LEV。五种情景下 LEV 分别为 2.59 万元/hm²、3.40 万元/hm²、6.11 万元/hm²、6.38 万元/hm²、7.54 万元/hm²。依次纳入四个碳库可以分别提高 LEV31.27%、79.71%、4.23%和 15.38%。

(3)贴现率负向影响杨树最优轮伐期和 LEV,木材价格上涨可以促进森林经营者收益提升,同时稳定其最优轮伐决策;在中国现行碳价格基础之上,长期均衡碳价格变动明显刺激经营者收入,而对最优轮伐期影响较小;而进一步提升碳价格至欧盟水平,则碳价格波动率会对最优轮伐期产生较大影响。

参考文献 (References):

- [1] 庄贵阳, 窦晓铭, 魏鸣昕. 碳达峰碳中和的学理阐释与路径分析. 兰州大学学报(社会科学版), 2022, 50(1): 57-68.
- [2] 张中祥. 碳达峰、碳中和目标下的中国与世界——绿色低碳转型、绿色金融、碳市场与碳边境调节机制. 人民论坛·学术前沿, 2021(14): 69-79.
- [3] 徐晋涛, 易媛媛. “双碳”目标与基于自然的解决方案: 森林碳汇的潜力和政策需求. 农业经济问题, 2022, 43(9): 11-23.
- [4] 余智涵, 宁卓, 杨红强. 随机价格下杉木人工林的碳汇收益及最优轮伐期确定. 自然资源学报, 2022, 37(3): 753-768.
- [5] 岳庆敏, 何怀江, 张春雨, 赵秀海, 郝珉辉. 阔叶红松林林木与林分生长对采伐干扰的响应. 生态学报, 2024, 44(5): 2019-2028.
- [6] 张小全, 谢茜, 曾楠. 基于自然的气候变化解决方案. 气候变化研究进展, 2020, 16(3): 336-344.
- [7] Faustmann M. Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry//Economics of Forestry. London: Routledge, 2018: 1-40.
- [8] Amacher G S, Ollikainen M, Koskela E. Economics of Forest Resources. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2009: 424.
- [9] Hartman R. The harvesting decision when a standing forest has value//Economics of Forestry. London: Routledge, 2018: 295-302.
- [10] 刘宇, 羊凌玉, 张静, 张金珠, 李欣蓓, 朱能高, 周梅芳. 近 20 年我国森林碳汇政策演变和评价. 生态学报, 2023, 43(9): 3430-3441.
- [11] Bullock E L, Woodcock C E. Carbon loss and removal due to forest disturbance and regeneration in the Amazon. Science of the Total Environment, 2021, 764: 142839.
- [12] Foley T G, Richter D D, Galik C S. Extending rotation age for carbon sequestration: a cross-protocol comparison of North American forest offsets. Forest Ecology and Management, 2009, 259(2): 201-209.
- [13] Dong L B, Lu W, Liu Z G. Determining the optimal rotations of larch plantations when multiple carbon pools and wood products are valued. Forest Ecology and Management, 2020, 474: 118356.
- [14] Yu Z H, Ning Z, Chang W Y, Chang S J, Yang H Q. Optimal harvest decisions for the management of carbon sequestration forests under price uncertainty and risk preferences. Forest Policy and Economics, 2023, 151: 102957.
- [15] Asante P, Armstrong G W, Adamowicz W L. Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision: a dynamic programming approach considering biomass and dead organic matter. Journal of Forest Economics, 2011, 17(1): 3-17.
- [16] Asante P, Armstrong G W. Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: a comparative statics analysis.

- Journal of Forest Economics, 2012, 18(2): 145-156.
- [17] 杨红强, 季春艺, 杨惠, 聂影, 陈幸良. 全球气候变化下中国林产品的减排贡献: 基于木质林产品固碳功能核算. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2023-2033.
- [18] 臧颖, 黄锦程, 刘洪生, 欧阳勋志, 姜俊, 宁金魁. 杉木人工林碳汇木材多功能经营的最优轮伐期. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 120-128.
- [19] 黄宰胜, 陈钦. 基于造林成本法的林业碳汇成本收益影响因素分析. 资源科学, 2016, 38(3): 485-492.
- [20] Ning Z, Sun C Y. Carbon sequestration and biofuel production on forestland under three stochastic prices. Forest Policy and Economics, 2019, 109: 102018.
- [21] Hoel M, Holtmark B, Holtmark K. Faustmann and the climate. Journal of Forest Economics, 2014, 20(2): 192-210.
- [22] 董灵波, 蔺雪莹, 张一帆, 刘兆刚. 兼顾碳汇和木材生产的长白落叶松人工林最优轮伐期. 林业科学, 2022, 58(5): 18-30.
- [23] 龙飞, 沈月琴, 祁慧博, 刘梅娟. 基于企业减排需求的森林碳汇定价机制. 林业科学, 2020, 56(2): 164-173.
- [24] 徐浩, 岳超, 朴世龙. 科学规划植树造林把握森林碳汇对“碳中和”战略的服务窗口期. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(12): 3010-3014.
- [25] 曹先磊. 碳交易机制下造林碳汇项目投资时机与投资期权价值分析. 资源科学, 2020, 42(5): 825-839.
- [26] Zhang N, Ning Z, Zhang H, Yang H Q. Optimal rotation period of *Populus* plantations considering multiple carbon pools and carbon cap policies in Jiangsu, East China. Forestry: an International Journal of Forest Research, 2023, 96(2): 249-263.
- [27] Ekholm T. Optimal forest rotation under carbon pricing and forest damage risk. Forest Policy and Economics, 2020, 115: 102131.
- [28] 曹先磊, 任玉鹤, 许骞骞, 吴伟光. “双碳”背景下林业碳汇项目经营不确定性对投资者投资门槛的影响——以 4 省份林业碳汇项目为例. 中国农业大学学报, 2023, 28(12): 177-193.
- [29] Yun R X, Jin Y T, Li J X, Chen Z J, Lyu Z Y, Zhao Y, Cui D. The annual rhythmic differentiation of *Populus davidiana* growth-climate response under a warming climate in The Greater Hinggan Mountains. Global Ecology and Conservation, 2021, 27: e01549.
- [30] 曾伟生, 陈新云, 杨学云. 我国人工杨树生物量建模和生产力分析. 林业科学, 2019, 55(11): 1-8.
- [31] 张阳, 解玉磊, 李超慈, 伏亚萍, 李鱼. 清洁发展机制造林项目碳汇优化模型研究. 可再生能源, 2010, 28(6): 71-75.
- [32] 田子凡. 苏北杨树产业碳库系统及碳价值评估[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [33] Geng A X, Yang H Q, Chen J X, Hong Y X. Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. Forest Policy and Economics, 2017, 85: 192-200.
- [34] van Kooten G C, Binkley C S, Delcourt G. Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. American Journal of Agricultural Economics, 1995, 77(2): 365-374.
- [35] Holtmark B, Hoel M, Holtmark K. Optimal harvest age considering multiple carbon pools-A comment. Journal of Forest Economics, 2013, 19(1): 87-95.
- [36] Zhou W, Gao L. The impact of carbon trade on the management of short-rotation forest plantations. Forest Policy and Economics, 2016, 62: 30-35.
- [37] Dong L B, Bettinger P, Qin H Y, Liu Z G. Optimizing rotation lengths for maximizing carbon balance of larch plantations in Northeast China. Journal of Cleaner Production, 2022, 343: 131025.
- [38] Pingoud K, Wagner F. Methane emissions from landfills and carbon dynamics of harvested wood products: the first-order decay revisited. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(5): 961-978.
- [39] 杨红强, 余智涵. 全球木质林产品碳科学研究动态及未来的重点问题. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2021, 45(4): 219-228.
- [40] 鲁政委, 栗晓春, 钱立华, 尹春哲. “碳中和”愿景下我国 CCER 市场发展研究. 西南金融, 2022(12): 3-16.
- [41] 穆亚丽, 郭建龙, 杨红强. 基于双重关联市场的林业 CCER 相关研究进展及问题. 资源开发与市场, 2024, 40(4): 503-510.
- [42] 陈佳怡. 北京绿色交易所副董事长梅德文: 中国碳价格或将在碳达峰之后与国际趋同. 上海证券报, 2023-12-11(011). [2024-03-30].
- [43] 周忠诚, 王瑞文, 张兴虎, 叶中亚. 杨树不同品种材积生长规律研究. 中国农学通报, 2018, 34(33): 61-66.
- [44] 余智涵, 张楠, 杨红强. 基于价格随机 Faustmann 模型的最优轮伐期决策方法及演进. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(10): 211-220.
- [45] Ferguson I. Discount rates for corporate forest valuations. Australian Forestry, 2018, 81(3): 142-147.
- [46] 程学刚. 连作杨树人工林土壤有机碳储量与碳循环过程研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [47] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报; 北京·2013. 北京: 中国经济出版社, 2013.
- [48] Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [49] 董捷, 曾咪. 基于碳汇收益和木材收益损失的碳汇造林补偿标准研究. 浙江农业学报, 2022, 34(4): 790-800.
- [50] 张小标, 逯非, 杨红强, 欧阳志云. 森林伐后碳减排核算方法演进与展望. 生态学报, 2023, 43(9): 3392-3406.