



余智涵,王晓雯,杨红强. 基于林业碳汇额外性的碳基线情景与生态补偿水平[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(6): 156-166. [YU Z H, WANG X W, YANG H Q. Carbon baseline scenarios and ecological compensation levels based on forestry carbon sink additionality [J]. China population, resources and environment, 2025, 35(6): 156-166.]

基于林业碳汇额外性的碳基线情景与生态补偿水平

余智涵^{1,2}, 王晓雯^{1,2}, 杨红强^{1,2,3}

(1. 南京林业大学经济管理学院, 江苏 南京 210037;

2. 国家林业和草原局林产品经济贸易研究中心, 江苏 南京 210037;

3. 南京大学长江三角洲经济社会发展研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要 额外性是开展碳信用额度核算和验证碳抵消项目有效性的基础。在林业碳汇额外性原则下,如何建立科学的碳基线并准确核算净碳汇量,据此确定合理的生态补偿水平,以激励林农参与林业碳汇经营,是当前深化集体林权制度改革亟待解决的现实问题。以中国南方集体林区浙江、福建、江西3省份的杉木人工林为例,依据包含生物量等多碳库的广义Faustmann模型,在林业碳汇额外性视角下,运用蒙特卡罗模拟测度了3种碳基线情景下政府激励林农参与林业碳汇经营的生态补偿水平。研究表明:①固定碳基线、Faustmann碳基线和最大持续产量碳基线下的最优轮伐期分别为22.45 a、24.64 a和26.07 a。②在固定碳基线下,林农会依据利润最大化原则转向碳汇营林;而在Faustmann碳基线和最大持续产量碳基线下,政府则需根据纳入碳库的不同,一次性提供至多2 236.30元/hm²,或每年提供至多162.76元/hm²的生态补偿。③为了激励林农参与具有固定期限的林业碳汇经营,政府需要一次性提供748.83~36 624.47元/hm²,或每年提供59.23~1 927.17元/hm²不等的生态补偿,且最大持续产量碳基线在纳入多个碳库时提供了最低的生态补偿水平。基于研究结果,该研究提出:建立健全碳交易市场体系并对林业碳汇进行精准核算,针对不同林分 and 不同树种建立合理的碳基线,综合木材收益和碳汇收益制定合理的生态补偿政策,是加快提升林业碳汇能力的关键因素。

关键词 碳基线;林业碳汇额外性;最优轮伐期;生态补偿;杉木人工林;森林经营

中图分类号 F307.2 **文献标志码** A **文章编号** 1002-2104(2025)06-0156-11 **DOI**: 10.12062/cpre.20250117

为了有效减缓气候变化、实现人类可持续发展,林业碳汇作为一种基于自然的解决方案(nature-based solutions, NbS)已经引起了社会的广泛关注^[1]。2023年《温室气体自愿减排交易管理办法(试行)》的颁布为林业碳汇的市场化交易提供了制度保障,同时对项目的额外性提出了明确要求。同年,《深化集体林权制度改革方案》强调,“建立健全林业碳汇计量监测体系,形成林业碳汇核算基准线和方法学。支持符合条件的林业碳汇项目开发为温室气体自愿减排项目并参与市场交易,建立健全能够体现林业碳汇价值的生态保护补偿机制”。随着2024年1月22日中国核证自愿减排量(China certified emission reduction, CCER)交易市场正式重启,推动强制碳市场和自愿碳市场互补衔接,可以预期林业碳汇项目仍是中国目前最主要、最具潜力的林业增汇途径,也是未来可进入碳排放权交易市场的合格林业碳汇。激励林农参与森林经营,积极开发林业碳汇项目,是促进林业增汇和提升碳汇水平并助力“碳中和”目标实现的重要途径^[2-6]。

然而,当前的林业碳汇项目由于存在项目基线和额外性界定不清、净碳汇量核算与监测困难、价格偏低且有波动性、固定项目年限无法满足林农利润最大化目标下的采伐预期等问题,林农的参与意愿不强,项目碳汇供给量有限^[7-9]。因此,需更大程度关注人工林种植广泛的集体林区碳汇能力提升问题,激励林农通过森林经营的方式参与CCER项目。本研究在纳入多个碳库的基础上,构建并拓展用于森林经营管理决策的广义Faustmann模型,从林业碳汇额外性的视角评估3种碳基线情景下林农的收益变化及最优轮伐期确定,进而测度生态补偿水平,为确立合理的碳基线政策,激励林农参与林业碳汇经营,进而为充分发挥林业碳汇在“碳中和”目标实现过程中的作用提供理论支撑。

1 文献综述与理论分析

《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》均要求稳定大气中的CO₂浓度,其中,基于清洁发展机制(clean

收稿日期:2024-07-08 修回日期:2025-02-07

作者简介:余智涵,博士生,主要研究方向为气候变化与林业碳中和。E-mail: yuzhihan@njfu.edu.cn。

通信作者:杨红强,博士,教授,博导,主要研究方向为气候变化与林业碳科学。E-mail: yhqnfu@aliyun.com。

基金项目:国家社会科学基金重大项目“碳中和全球治理主要挑战与国际合作的中国方案研究”(批准号:23&ZD103)。

development mechanism, CDM)的碳汇林项目是碳排放大国抵消CO₂排放、履行CO₂减排义务的重要途径;此外,以森林经营为代表的非CDM项目对减缓气候变化具有更加重要的意义。但是,将这部分林业碳汇纳入碳交易的前提是在额外性原则下形成科学的碳基线和方法学^[10]。随着世界各国碳抵消市场的发展,额外性作为一项关乎碳信用额度核算和CO₂抵消有效性的关键问题逐渐受到学者和政府的关注^[11]。林业碳汇经营中的额外性通常被定义为:超过预先确定碳基线的净碳汇量^[12]。这种额外性可以通过经营碳汇实际发展过程中的周期性变化减去基线碳汇量的周期性变化来计算^[6]。如果忽视额外性,由于无法区额外与非额外的碳汇量,企业可能会在购买碳信用时支付更多费用,却未能获得相应的实际减排效果,从而导致企业面临更高的减排成本和更低的实际减排量^[10,13-14]。然而,由于碳基线的主观性,证明林业碳汇项目的额外性可能很困难,因此设计一个准确的碳基线十分重要。一般来说,与林业碳汇项目相关的碳基线有两种类型。第一种类型采用固定基线法,即使用固定水平的碳储量作为碳基线。这通常是项目开始前的土地碳储量,但无论该固定碳储量为多少,基线情景下的碳储量变化量始终为0,因此不会对林业碳核算造成任何影响。第二种类型采用反事实的一切照旧(business-as-usual, BAU)方法,即通过比较项目碳储量的变化与假定在项目未实施的情况下发生的碳储量变化来计算项目减排量^[6,12,15]。就中国而言,生态环境部为推动CCER重启而颁布的《温室气体自愿减排交易管理办法(试行)》也强调了额外性的重要性,要求CCER项目根据额外性原则签发减排指标,以更好地服务于CCER市场的良性发展。

Mason等^[13]和Bento等^[16]基于额外性原则,监测了森林生物量碳库的碳储量变化,并分析了碳抵消机制在减缓气候变化方面的成本有效性。Coffield等^[17]和Stapp等^[18]也基于遥感数据测算了额外性原则下美国加利福尼亚州林业碳抵消项目生物量碳库部分的气候效益。然而,森林除了生物量碳库外,还包括由土壤、枯死木、枯落物等在内组成的死亡有机质(dead organic matter, DOM)碳库^[15,19]。Sedjo等^[14]指出,在额外性原则下,忽视DOM碳库可能导致对净碳汇量的低估。此外,出于林业碳汇的永久性(即被封存的碳是否会过早地重新释放回大气)考虑,也有必要核算木质林产品(harvested wood products, HWP)碳库在其生命周期内的碳释放^[10,20]。《森林经营碳汇项目方法学》也强调了DOM和HWP碳库存在净碳汇量时对其进行核算的必要性。在中国,已有学者从价值评估^[21-22]、成本核算^[23]、减排监测^[24]、经营风险^[7]等视角对林业碳汇经营展开了研究,但忽略了额外性原则,也均忽略了DOM和HWP

碳库。事实上,上述研究可以视为在固定碳基线下计算了林业碳汇经营的额外性,即使用固定碳储量(0或项目开始前的土地碳储量)作为整个生命周期的碳基线,这种假设在开展林业碳汇经营前的无林地碳储量极低时是合理的^[23]。但当原有土地上存在一定数量植被时,这种假设忽略了无林业碳汇经营情景下土地碳储量本身的动态变化,可能造成碳汇量的高估^[12]。同时,上述研究对DOM和HWP碳库的忽视也可能造成碳汇量的低估,从而对林业碳汇项目的经营决策、价值评估、碳汇核算等造成影响。

林农作为“理性人”会根据利润最大化原则作出林业经营决策。从木材生产的角度出发,林农可以基于Faustmann模型来确定达到私人最优状态的林分采伐时间^[25]。政府出于社会最优的角度考虑,通常会规定一个固定的林业碳汇经营期限(例如,20~60 a),这种社会最优状态通常与林农的私人最优状态相冲突,林农也可能因此缺乏参与林业碳汇经营的意愿^[25-26]。一般来说,决定林农是否愿意参与林业碳汇经营的一个主要因素是能否获得足够的货币回报,因此,要求林农参与林业碳汇经营至少应满足碳汇营林的收入大于经营传统用材林的收入^[27],否则应给予一定的生态补偿,使之为保障林业生态价值达到社会最优状态的林农得到经济上的转移支付以抵消其成本^[28-30]。而中国学者目前多基于纳入了碳汇收益的Faustmann模型来计算林业碳汇经营的综合效益或碳汇量^[8-9,31],对激励林农参与林业碳汇经营的生态补偿水平却缺乏关注。事实上,生态补偿机制与额外性也密切相关。为了限制公共资金支出,政府希望避免为非额外的碳抵消支付生态补偿^[6,13]。Niinimäki等^[32]和Pihlainen等^[33]在林分水平的实证研究表明,如果忽略额外性,裸地的价值可能增加2~4倍,从而给公共财政带来巨大负担。

在实际经营过程中,林农的决策还会面临包括资源风险(如火灾等)^[34-35]、市场风险(如价格波动等)^[26,36]、决策者偏好风险(如政策不确定性等)^[37-38]在内的多种风险。2021年、2022年中国火灾起数和受害森林面积持续保持在历史性低位。随着《关于全面加强新形势下森林草原防灭火工作的意见》的颁布,预期森林火灾风险会越来越小,在林业碳汇经营过程中可以忽略不计。而由于中国木材市场的区域性特征,碳排放权交易市场也处于起步和发展阶段,价格波动是林农面临的最主要风险^[39]。同时,中国目前与林业碳汇相关的政策不确定性主要体现在碳配额的缩减上,并最终通过供需关系的变化传导到碳价格波动上^[40]。因此,有必要结合价格波动更加精确地核算林农收益及最优轮伐期,为制定合理的林业管理决策提供依据。

基于上述分析,本研究以在中国集体林改区浙江、福

建和江西3省被广泛用作林业碳汇树种的南方杉木人工林为例开展研究。首先,绘制充分考虑生物量、DOM和HWP碳汇收益下的碳基线;其次,构建包含林业木材和碳汇收益的广义 Faustmann 模型并求解林农利润最大化的一阶条件,在林业碳汇额外性原则下结合木材及碳价格波动核算土地期望值(land expectation value, LEV)和最优轮伐期;最后,就政府所期望达到的社会最优状态而制定的经营期限与林农在利润最大化目标下设置最优轮伐期而达到的私人最优状态不一致加以探讨,并根据不同的碳基线情景测度生态补偿水平,为开展准确的林业碳核算、制定合理的林业碳基线方法学、激励林农参与林业碳汇经营提供科学依据。

2 研究方法数据来源

杉木是中国重要的人工林树种,已在作为集体林改区的浙江、福建和江西3省林业碳汇经营中被广泛种植,选取其作为研究对象具有一定的代表性^[9]。本研究以杉木人工林为例,考虑3种碳基线情景。

(1)假设林业碳汇经营未实施时,土地的碳储量恒定,即固定碳基线。需要指出的是,不论假设该固定碳储量为多少(0或项目开始前的土地碳储量),固定碳基线下的基线碳储量变化量始终等于0^[12]。因此,在额外性原则下,林业碳核算所考虑的净碳汇量等于林分碳储量变化量。在中国,多数以林业碳汇项目为对象的研究均使用了固定碳基线^[8-9,31,36]。

(2)假设林业碳汇经营未实施时,林农将按照木材收益最大化原则(Faustmann原则),以林分经济成熟为目标周期性种植并采伐林分,因此土地上的碳储量变化将构成一条碳基线,即 Faustmann 碳基线。这种碳基线是在经济学视角下根据反事实模型构建的,它扣除了林业碳汇经营过程中林农为了获取木材收益而维持原有经营状态时固有的碳汇量,已经在国际上得到了广泛应用^[6,12]。只有当林农作出 Faustmann 原则以外的经营决策调整时,项目情景和基线情景之间的碳汇量差异才被视为林业碳汇额外性原则下的净碳汇量。

(3)假设林业碳汇经营未实施时,林农将按照最大持续产量(maximum sustainable yield, MSY)原则,以林分数量成熟为目标周期性种植并采伐林分,因此土地上的碳储量变化将构成一条碳基线,即 MSY 碳基线。这种碳基线是在生态学视角下根据反事实模型构建的,旨在促进木材利用的最大化,同时确保林分的再生能力不受损害以维持森林资源的持续再生和利用。虽然 MSY 原则不如 Faustmann 原则那样对林农和林业投资者具有吸引力,但从长远来看,它对森林的可持续发展和维持生态平衡至

关重要^[12,39]。只有当林农作出 MSY 原则以外的经营决策调整时,项目情景和基线情景之间的碳汇量差异才被视为林业碳汇额外性原则下的净碳汇量。依次纳入生物量、DOM和HWP碳库,使用蒙特卡罗模拟确定木材及碳价格波动时的 LEV 和最优轮伐期,最后根据不同的碳库数量及碳基线测度相应的生态补偿水平。

2.1 广义 Faustmann 模型构建

Faustmann^[41]最早为评估林业投资的经济可行性提供了一种系统性方法。Faustmann 模型假设林农是“经济理性人”,会依据利润最大化原则确定最优轮伐期 T ,使得 LEV 最大化。之后, Hartman^[42]将生态系统服务价值纳入 Faustmann 模型中,并由 Van Kooten 等^[43]扩展至碳汇收益。参考 Asante 等^[15]和 Holtmark 等^[19]的研究,单个轮伐期下的 LEV 由包含木材、生物量、DOM 和 HWP 碳库收益在内的 4 部分构成。它们对应的净现值 $N_w(t)$ 、 $N_b(t)$ 、 $N_d(t)$ 和 $N_h(t)$ 分别见式(1)~式(4)。

$$N_w(t) = (P_w - C_v)\lambda Q(t)e^{-rt} - C_r \quad (1)$$

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

$$N_d(t) = \int_0^t \delta P_c D'(s)e^{-rs} ds + \delta P_c [B(t) - \gamma Q(t)]e^{-rt} \quad (3)$$

$$N_h(t) = \int_t^{+\infty} \delta P_c H'(s)e^{-rs} ds + \delta P_c \gamma \lambda Q(t)e^{-rt} \quad (4)$$

式(1)中,木材收益表示为收入减去重置成本 C_r (单位:元/hm²)。其中,木材价格 P_w (单位:元/m³)需要扣除采运成本 C_v (单位:元/m³),商品材体积表示为蓄积量 $Q(t)$ (单位:m³/hm²)乘以出材率 λ , r 为折现率, t 为时间。

式(2)中,生物量碳汇收益表示为森林生长过程中累积的碳汇价值减去采伐过程中的碳汇损失。其中, P_c 为碳价格(单位:元/t), $B(t)$ 为生物量方程(单位:t/hm²); $B'(s)$ 表示生物量方程在 s 时刻的一阶导数; s 代表与时间相关的积分变量; δ 为碳与 CO₂ 之间的转换系数(单位:t/t)。

式(3)中,DOM 碳库受到初始碳储量 $D(0)$ 的影响,将以恒定的速率衰减,生物量碳库每年也以固定比例凋落物的形式转移至 DOM 碳库中,且采伐后生物量碳库中除了被采伐部分外,全部转移至 DOM 碳库中。因此,DOM 碳汇收益表示为 DOM 碳库中累积的碳汇价值加上采伐过程中转移到 DOM 碳库中的碳汇价值。其中, $D(t)$ 是 t 时刻 DOM 碳库的碳储量方程(单位:t/hm²); $D'(s)$ 表示 DOM 碳库碳储量方程在 s 时刻的一阶导数; γ 为树木的碳转换因子(单位:t C/m³)。

式(4)中,HWP 碳库以采伐后用作商品材部分的生物量为初始碳储量,并在之后的生命周期过程中按一定的速率分解。因此,HWP 碳汇收益表示为在采伐过程中转移到 HWP 碳库中的碳汇价值减去 HWP 在未来生命周期

中分解所造成的碳损失。其中, $H'(s)$ 表示HWP碳储量方程(单位: t/hm^2)在 s 时刻的一阶导数。

进一步地,本研究参考Chang^[44]的做法,将首个轮伐期之后的LEV汇总至可以直接从市场交易数据中获得的未来土地价值 L_2 (单位:元/ hm^2)中,从而将Faustmann模型拓展至广义Faustmann模型。该模型更加适用于处理林业经营管理中的风险问题,其对土地利用用途假设的放松也更加符合集体林权制度改革下“放活林地经营权”的要求^[26, 44-45]。广义Faustmann模型下的 $L(t)$ 见式(5)。

$$L(t) = N_w(t) + N_b(t) + N_d(t) + N_h(t) + L_2 e^{-rt} \quad (5)$$

使用 $L(t)$ 对时间 t 求导并令其等于0,即可以得到广义Faustmann模型下林农利润最大化的一阶条件,见式(6)。

$$\begin{aligned} & \lambda P_w Q'(t) + \delta P_c [B'(t) + D'(t) + f(t)] \\ & - \delta P_c \gamma (1 - \lambda) Q(t) \\ & = r [\lambda V(t) - \delta P_c \gamma (1 - \lambda) Q(t)] + r L_2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $Q'(t)$ 、 $B'(t)$ 、 $D'(t)$ 分别表示蓄积量方程、生物量方程、DOM碳库碳储量方程在 t 时刻的一阶导数。 $f(t) =$

$$\frac{\partial \left[e^{rt} \int_t^{+\infty} H'(s) e^{-rs} ds \right]}{\partial t} - r e^{rt} \int_t^{+\infty} H'(s) e^{-rs} ds,$$

表示多个轮伐期内HWP碳库由于延迟衰减而对碳储量产生的边际贡献。式(6)表明,林农应在边际收益和边际成本相等时采伐林分以实现利润最大化目标。其中,式(6)的左侧表示边际收益,即由于森林生长而选择等待所获得的额外收益,这部分收益包括木材收益($\lambda P_w Q'(t)$)、生物量碳库收益($\delta P_c B'(t)$)、DOM碳库收益($\delta P_c D'(t)$)、HWP碳库收益($\delta P_c f(t)$)以及采伐时的碳损失($-\delta P_c \gamma (1 - \lambda) Q(t)$);式(6)的右侧表示边际成本,包括持有树木的成本($r [\lambda V(t) - \delta P_c \gamma (1 - \lambda) Q(t)]$)和持有土地的成本($r L_2$)。

2.2 额外性原则下的林业碳核算

当考虑额外性原则时,一片林分在 t 时刻的净碳汇量应该等于 t 时刻的碳储量变化量减去基线碳储量变化量^[12]。就生物量和DOM碳库而言,式(2)和式(3)等号右边第一项均表示每年净碳汇量所对应的价值总和。为了便于描述,本研究使用 $C'_{net}(t)$ 表示生物量和DOM碳库的净碳汇量,使用 $C(t)$ 表示生物量和DOM碳库在 t 时刻的总碳储量。给定碳基线 $C_{base}(t)$,则额外性原则下的净碳汇量 $C'_{net}(t)$ 见式(7)。

$$C'_{net}(t) \approx \Delta C_{net}(t) = [C(t+1) - C(t)] - [C_{base}(t+1) - C_{base}(t)] \quad (7)$$

其中, $\Delta C_{net}(t)$ 为 $C'_{net}(t)$ 的离散形式。在计算碳基线 $C_{base}(t)$ 时,由于发生基准采伐后,林分会被重新建立,因此林龄会被周期性重置为1。其中,在固定碳基线下,不论假

设该固定碳储量为0或项目开始前的土地碳储量, $C_{base}(t+1)$ 和 $C_{base}(t)$ 始终保持相等,即 $C_{base}(t+1) - C_{base}(t) = 0$,因此林分的净碳汇量等于碳储量变化量。而在Faustmann碳基线和MSY碳基线下,当仅考虑生物量碳库时,通过给定基准采伐时间 T_{base} ,碳基线 $C_{base}^B(t)$ 可以由式(8)得到。

$$C_{base}^B(t) = B(t \bmod T_{base}) \quad (8)$$

式中,mod表示取余符号,用于计算时间 t 相对于最近一次基准采伐过去了多久。 $B(t \bmod T_{base})$ 表示考虑生物量碳库时的碳基线 $C_{base}^B(t)$ 会以生物量方程 $B(t)$ 的形式展现,并根据基准采伐时间 T_{base} 发生周期性变化。

进一步考虑DOM碳库时,由于采伐时本质上只损失了采伐部分的生物量,其碳基线 $C_{base}^{BD}(t)$ 也会高于仅考虑生物量碳库的情景,见式(9)。

$$C_{base}^{BD}(t) = C_{base}^B(t) + D(t \bmod T_{base}) + \lfloor t/T_{base} \rfloor [B(T_{base}) - \gamma Q(T_{base})] \quad (9)$$

式中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整符号,用于计算已经经历了几次基准采伐。式(9)等号右边的前两项表明,考虑生物量和DOM碳库时的碳基线 $C_{base}^{BD}(t)$ 会以生物量方程 $B(t)$ 和DOM碳储量方程 $D(t)$ 之和的形式展现,并根据基准采伐时间 T_{base} 发生周期性变化;式(9)等号右边的第三项表明,相较于仅考虑生物量碳库,每经历一次基准采伐,都会有数量为 $B(T_{base}) - \gamma Q(T_{base})$ 的生物量转移至DOM碳库中,从而逐渐提高碳基线。需要指出的是,此时DOM碳库的初始碳储量 $D(0)$ 应该等于上个轮伐期采伐时刻的DOM碳储量(假设首个轮伐期的 $D(0) = 0$)^[12, 15]。

进一步考虑HWP碳库时,采伐时本质上只损失了非商品材部分的生物量,其碳基线 $C_{base}^{BDH}(t)$ 也会进一步升高,见式(10)。

$$C_{base}^{BDH}(t) = C_{base}^{BD}(t) + \lfloor t/T_{base} \rfloor [\gamma \lambda Q(T_{base})] \quad (10)$$

式(10)右侧的第二项表明,相较于仅考虑生物量和DOM碳库,每经历一次基准采伐,都会有数量为 $\gamma \lambda Q(T_{base})$ 的商品材转移至HWP碳库中,从而逐渐提高碳基线。就HWP碳库而言,式(4)等号右边第一项本质上反映了HWP在采伐后的生命周期过程中由于分解而损失的碳汇价值。考虑到 $C'_{net}(t)$ 仅能反映各碳库的净碳汇量,还需要定义HWP碳基线 $H_{base}(t)$,以便在额外性原则下核算HWP分解所带来的碳损失量 $H'_{net}(t)$,见式(11)和式(12)。

$$H'_{net}(t) \approx \Delta H_{net}(t) = [H(t+1) - H(t)] - [H_{base}(t+1) - H_{base}(t)] \quad (11)$$

$$H_{base}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq T_{base} \\ \lfloor \frac{t}{T_{base}} \rfloor \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{t}{T_{base}} \rfloor} H(t - (i-1)T_{base}), & t > T_{base} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\Delta H_{\text{net}}(t)$ 为 $H'_{\text{net}}(t)$ 的离散形式, t 表示当前处于第 i 个轮伐期内。式(11)表明 HWP 碳库在 t 时刻的碳损失量应该等于 t 时刻的 HWP 碳储量变化量减去基线 HWP 碳储量变化量。就式(12)而言, 当 $t \leq T_{\text{base}}$ 时, HWP 碳基线 $H_{\text{base}}(t)$ 始终为 0, 因为此时基准采伐尚未发生, HWP 也尚未生产; 当 $t > T_{\text{base}}$ 时, HWP 碳基线 $H_{\text{base}}(t)$ 应为每次基准采伐所收获 HWP 中碳储量的总和。其中, $\lfloor t/T_{\text{base}} \rfloor$ 用于计算已经经历了几次基准采伐, 而求和符号 Σ 用于将每次基准采伐所收获 HWP 中的碳储量加总。

2.3 生态补偿模型构建

一般来说, 林农在林业经营中面临 3 种选择: ①以木材收益最大化为目标的传统营林模式; ②以木材和碳汇收益最大化为目标的碳汇营林模式; ③参与具有固定期限的林业碳汇经营模式。

其中, 前两种可以视为林农通过选择合适的采伐时间以达到私人最优状态, 而最后一种则可以视为政府通过给定固定的采伐时间以达到社会最优状态。为了激励林农由经营用材林向碳汇林转变, 甚至参与具有固定期限的林业碳汇经营以完成私人最优向社会最优转变, 政府需要给予林农一定的生态补偿, 使得转换经营模式后的经济收益与生态补偿之和不少于转换前的经济收益^[28-30]。因此, 生态补偿水平可以定义为转换经营模式后的经济收益与机会成本之差。在此标准下, 激励林农由用材林转向碳汇林经营和参与具有固定期限林业碳汇经营的生态补偿水平 M_c 和 M_s 分别见式(13)和式(14)。

$$M_c = L(T_w) - L(T_c) \quad (13)$$

$$M_s = L(T_c) - L(T_s) \quad (14)$$

式中, T_w 、 T_c 和 T_s 分别表示林农经营用材林的最优轮伐期、林农经营碳汇林的最优轮伐期和林业碳汇经营的固定期限。值得注意的是, 此处的 M_c 和 M_s 均表示一次性给予林农生态补偿的净现值。此外, 结果分析部分还以年金的形式提供了每年应给予林农的生态补偿水平, 为政府合理制定激励林农参与林业碳汇经营的生态补偿政策提供参考。

2.4 价格波动建模

本研究使用林业经济学家常用的均值回复过程(mean reversion, MR)来描述木材和碳价格波动^[46]。MR 是完全竞争市场假设下的一个特例。在完全竞争市场中, 商品的较高价格会促使成本较高的厂商也参与市场竞争中, 从而增加商品的总供给量, 导致商品价格下降; 相反, 当价格低迷时, 高成本厂商的退出会导致商品的总供给量减少, 从而引起价格上升^[47]。相较于另一种基于有效市场假说的几何布朗运动(geometric Brownian mo-

tion, GBM), MR 会使得价格稳定在均值附近波动, 且其期望值和方差不会无限放大, 因此更加符合实际^[48]。MR 的一般形式见式(15)。

$$dP = v(\mu - P)dt + \sigma Pdz \quad (15)$$

式中, dP 为价格增量; v 为回复速率, μ 为长期均衡价格, σ 为波动率, dz 为维纳过程的增量。根据余智涵等^[39]的研究, 参数 v 、 μ 和 σ 可以通过结合离散近似和线性回归的方式获得。

就碳价格而言, CCER 市场尚未与国际市场接轨, 但作为中国碳排放权交易市场的重要补充, 其价格与碳配额价格具有长期趋同的趋势^[49]。因此, 本研究使用全国碳排放权交易市场 2021—2023 年碳排放权配额日度数据来代表碳的市场价格, 并进行 MR 建模。如图 1 所示, 模拟的木材价格和碳价格分别在 1 115 元/ m^3 和 70 元/ t CO_2 附近波动, 符合均值回复的特征。进一步, 使用蒙特卡罗模拟法进行 2 000 次迭代以确定木材及碳价格波动时的 LEV 和最优轮伐期, 并根据不同的碳库数量及碳基线测度相应的生态补偿水平。

2.5 模型参数

本研究模型中所涉及的数据主要包括经营成本、林木成长方程和生物量方程等, 见表 1。

3 结果分析

3.1 林业碳汇额外性视角下的碳基线

分别依据 Faustmann 原则和 MSY 原则, 计算出 Faustmann 碳基线和 MSY 碳基线下的基准采伐时间分别为 20.77 a 和 23.22 a。由此可以得到考虑不同碳库时未来 100 a 的 Faustmann 碳基线和 MSY 碳基线, 如图 2 所示。其中, 由于林分的经济成熟时间短于数量成熟时间, Faustmann 碳基线会比 MSY 碳基线以更快的速度发生周期性变化。在首次基准采伐之前, 碳基线与林分碳储量保持相同的走势, 之后随着基准采伐而发生周期性变化。依次纳入生物量、DOM 和 HWP 碳库后, 碳基线将逐渐升高并变得更加平滑。值得注意的是, 由于本研究的对象为单一林分, 碳基线仍存在一定的波动性, 但考虑由许多这样林分组成的森林将会得到一条更加平滑的碳基线^[12]。

图 3 显示了未来 100 a HWP 碳库的碳基线和碳储量变化。在首次基准采伐之后, 商品材将进入 HWP 碳库分解, Faustmann 原则和 MSY 原则下的 HWP 碳库碳储量也将以 $H(t)$ 的形式经历指数衰减。而 HWP 碳基线在每经历一次基准采伐之后, 都将由于新的商品材流入 HWP 碳库而升高, 但随着 HWP 碳储量的增加, 其每年的碳损失量也将增加。如图 2 所示, 在首次基准采伐之前, 碳基线与 HWP 碳储量保持相同的走势, 之后随着基准采伐而发

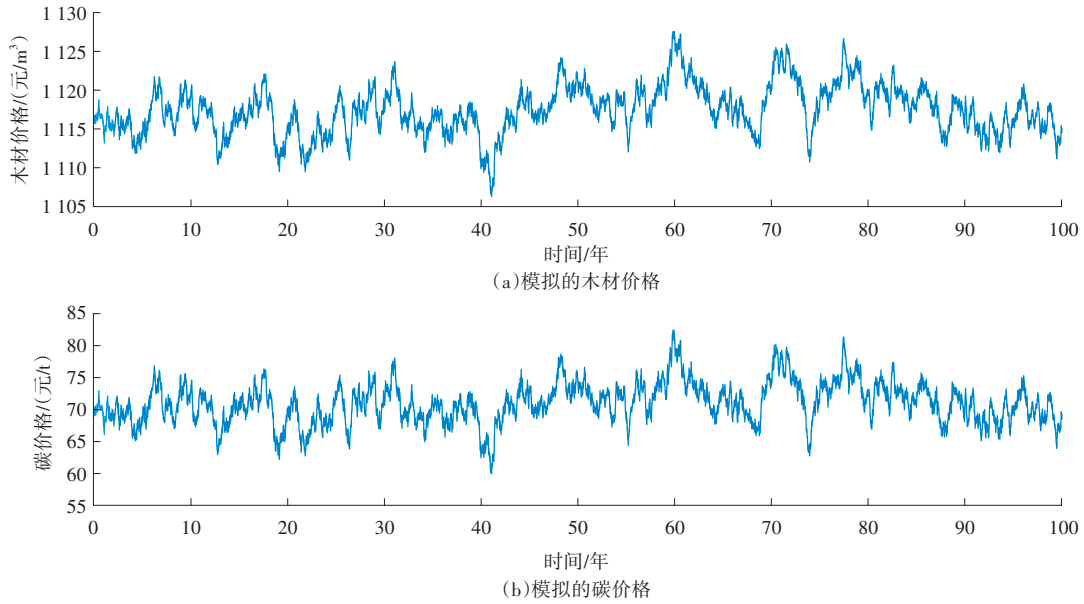


图1 模拟的木材和碳价格路径

表1 模型参数

参数	参数含义	参数值或方程	数据来源
$Q(t)$	杉木生长方程/(m^3/hm^2)	$4.535 \times 15^{1.609} \times [1 - e^{-0.096t}]^{3.720}$	陈则生 ^[50]
$B(t)$	生物量方程/(t/hm^2)	$[0.40 \times Q(t) + 22.54] \times 1.63 \times 0.52$	Fang等 ^[51] 国家发展改革委应对气候变化司 ^[52]
$D(t)$	DOM碳储量方程/(t/hm^2)	$e^{-0.28t} \left(D(0) + \int_0^t e^{0.28s} 0.06B(s) ds \right)$	Yu等 ^[26]
$H(t)$	HWP碳储量方程/(t/hm^2)	$e^{-0.0277(t-T)} \gamma \lambda Q(T)$	Asante等 ^[15] IPCC ^[53]
C_v	采运成本/(元/t)	288.77	沈月琴等 ^[9] 余智涵等 ^[36]
C_r	重置成本/(元/ hm^2)	26 121.59	沈月琴等 ^[9] 余智涵等 ^[36]
L_2	未来土地价值/(元/ hm^2)	15 000	土流网
λ	出材率	0.7	沈月琴等 ^[9]
r	折现率/%	5	作者假设
δ	CO_2 转化系数/(t/t)	3.67	国家发展改革委应对气候变化司 ^[52]
γ	碳转换因子/(t C/ m^3)	0.16	国家发展改革委应对气候变化司 ^[52]
v_w	木材价格回复速率	0.91	MR模型计算
μ_w	长期均衡木材价格/(元/ m^3)	1 116.95	MR模型计算
σ_w	木材价格波动率	0.19	MR模型计算
v_c	碳价格回复速率	1.35	MR模型计算
μ_c	长期均衡碳价格/(元/t)	70.52	MR模型计算
σ_c	碳价格波动率	0.36	MR模型计算

注:DOM碳储量方程中的 $D(0)$ 在首个轮伐期被假设为0,在后续轮伐期应等于上个轮伐期采伐时刻的DOM碳储量;HWP碳储量方程中的 T 表示采伐时间。

生周期性变化。

3.2 不同碳基线情景下的最优轮伐期和土地期望值

表2显示了不同碳基线下的最优轮伐期和LEV。就

固定碳基线而言,考虑碳汇收益将延长最优轮伐期并提高LEV,且随着碳库数量的增加,LEV的提高幅度也逐渐增大,这一结果与现有中国南方杉木人工林的研究保持

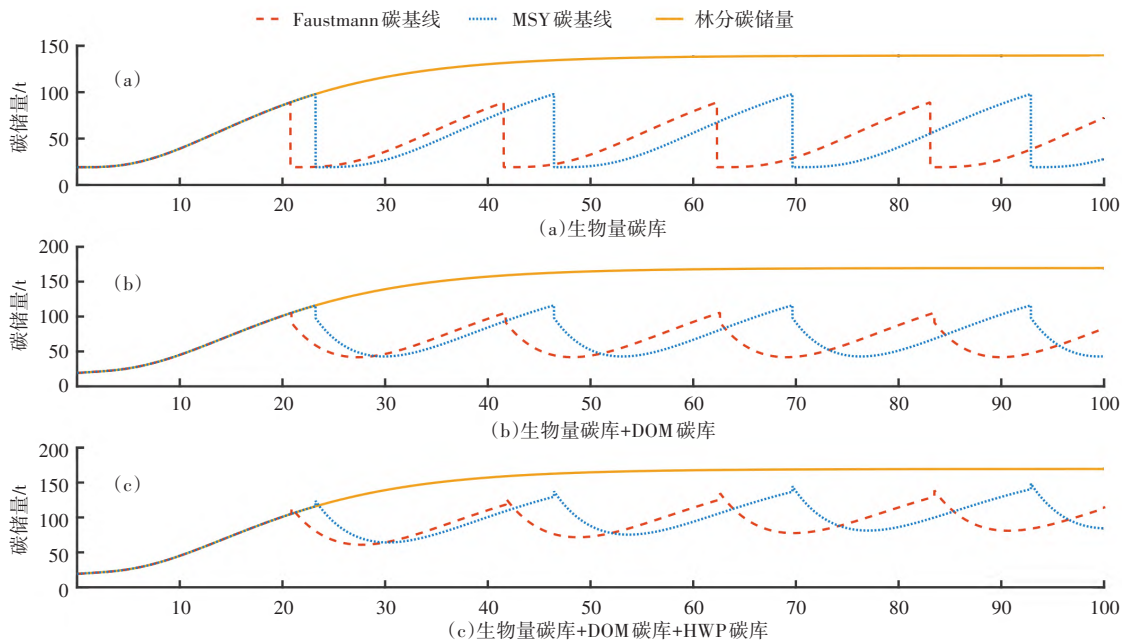


图2 考虑不同碳库时的碳基线和林分碳储量变化

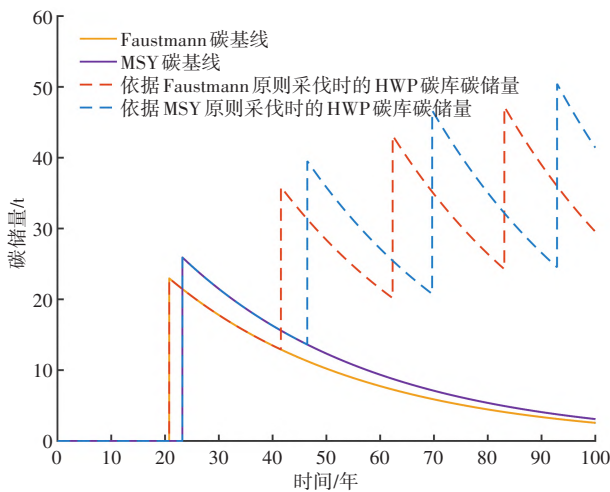


图3 HWP碳基线和碳储量变化

一致^[8-9,31]。而纳入多个碳库对最优轮伐期的提升并不明显,这可能是因为当前的长期均衡碳价格与长期均衡木

材价格相差太大,只有当两者较为接近时,才能对最优轮伐期产生明显影响^[31,36]。但从另一方面来说,纳入多个碳库可以帮助林农在不对其原有经营决策作出过多调整的情况下提高收益,这可能是激励林农参与碳汇林经营较为有利的碳基线政策。

就 Faustmann 碳基线和 MSY 碳基线而言,考虑碳汇收益将延长最优轮伐期,且最优轮伐期均保持在中国南方杉木人工林较为合理的 20~30 a 左右。而对 LEV 的影响取决于纳入碳库的数量,特别是对于 MSY 碳基线,无论纳入何种碳库,LEV 均低于仅考虑木材收益的情景。这主要是因为额外性原则下,只有超出碳基线的净碳汇量才允许被计算收益。而根据图 2,碳基线与林分碳储量在首次基准采伐之前保持相同,这意味着林农只能从首次基准采伐之后的碳汇量中获益,从而导致 LEV 下降。但 Faustmann 碳基线和 MSY 碳基线均遵循了《温室气体自愿减排交易管理办法(试行)》中所强调的额外性原则,且提

表2 不同碳基线下的最优轮伐期和土地期望值

情景	固定碳基线		Faustmann 碳基线		MSY 碳基线	
	最优轮伐期 /a	LEV /(元/hm ²)	最优轮伐期 /a	LEV /(元/hm ²)	最优轮伐期 /a	LEV /(元/hm ²)
T	20.79	21 366.73	20.79	21 366.73	20.79	21 366.73
T+B	22.48	23 289.24	22.38	19 952.30	23.23	19 130.42
T+B+D	22.48	30 841.27	24.53	23 149.10	26.00	21 030.59
T+B+D+H	22.46	32 198.97	24.64	23 939.16	26.07	21 584.91

注:T表示木材收益,T+B表示木材收益+生物量碳汇收益,T+B+D表示木材收益+生物量+DOM碳汇收益,T+B+D+H表示木材收益+生物量+DOM+HWP碳汇收益。

供了一种对最优轮伐期和LEV更加准确的估计方法。

3.3 不同碳基线情景下的生态补偿水平

根据式(13),可以测度不同碳基线下激励林农由用材林经营转向碳汇林经营的生态补偿水平,见表3。当考虑固定碳基线时,无论纳入何种碳库,只需要碳交易市场相对建设完备、林农能够在碳交易市场中自由交易,那么政府无须提供生态补偿,林农自然会依据利润最大化原则由用材林转向碳汇林经营。而在Faustmann碳基线下是否需要政府提供生态补偿则取决于纳入的碳库数量。当仅纳入生物量碳库时,政府需要一次性补偿1 414.42元/hm²、或每年补偿105.02元/hm²以激励林农转向碳汇林经营;当进一步纳入DOM和HWP碳库后,政府则无须提供生态补偿激励。就MSY碳基线而言,当

仅纳入生物量或DOM碳库时,由于碳汇林经营的LEV低于用材林经营(表2),政府需要一次性向经营碳汇林的林农提供336.14~2 236.30元/hm²或每年提供23.10~162.76元/hm²不等的生态补偿,且补偿标准随着纳入碳库数量的增加而降低,而在纳入HWP碳库后无须提供生态补偿激励。

根据《森林经营碳汇项目方法学》,林业碳汇经营的固定期限通常为20 a、30 a、40 a、50 a或60 a。因此可以测度不同碳基线下激励林农参与具有固定期限林业碳汇经营的生态补偿水平,见表4。总的来说,当仅纳入生物量碳库时,固定碳基线下的生态补偿水平最低,对公共财政支出也最为有利。而进一步纳入DOM和HWP碳库后,不论固定期限如何,MSY碳基线总是能够提供最低的生态补偿水平。同时,虽然Faustmann碳基线下的生态补偿水平不是最低的,但当纳入完整碳库或固定期限较长时,它也低于固定碳基线。若进一步考虑中国南方杉木人工林实际的20 a或30 a左右的轮伐期,MSY碳基线会对公共财政支出显得更加有利。

表3 不同碳基线下激励林农由用材林转向碳汇林经营的生态补偿水平

项目	生态补偿水平的净现值/(元/hm ²)		
	固定碳基线	Faustmann碳基线	MSY碳基线
情景			
T+B	无须生态补偿	1 414.42	2 236.30
T+B+D	无须生态补偿	无须生态补偿	336.14
T+B+D+H	无须生态补偿	无须生态补偿	无须生态补偿
项目	以年金形式计算的生态补偿水平/(元/hm ² ·a)		
	固定碳基线	Faustmann碳基线	MSY碳基线
情景			
T+B	无须生态补偿	105.02	162.76
T+B+D	无须生态补偿	无须生态补偿	23.10
T+B+D+H	无须生态补偿	无须生态补偿	无须生态补偿

注:T+B表示木材收益+生物量碳汇收益,T+B+D表示木材收益+生物量+DOM碳汇收益,T+B+D+H表示木材收益+生物量+DOM+HWP碳汇收益。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究以中国南方杉木人工林为例,在纳入生物量、DOM和HWP碳库的情况下,构建了广义Faustmann模型并求解林农利润最大化的一阶条件,使用蒙特卡罗模拟评估了木材及碳价格波动时、林业碳汇额外性视角下林农的收益变化及最优轮伐期确定,测度了不同碳基线下的生态补偿水平。主要结论如下。

表4 不同碳基线下激励林农参与具有固定期限林业碳汇经营的生态补偿水平

项目	生态补偿水平的净现值/(元/hm ²)								
	固定碳基线			Faustmann碳基线			MSY碳基线		
	T+B	T+B+D	T+B+D+H	T+B	T+B+D	T+B+D+H	T+B	T+B+D	T+B+D+H
20 a	748.83	8 300.86	9 658.56	6 842.63	10 039.42	10 829.49	6 020.75	7 920.91	8 475.23
30 a	4 042.58	11 594.61	12 952.31	5 132.39	8 329.18	9 119.24	4 485.21	6 385.37	6 939.69
40 a	13 879.17	21 431.20	22 788.90	17 096.14	20 292.93	21 082.99	16 324.44	18 224.60	18 778.92
50 a	22 133.63	29 685.66	31 043.36	23 625.57	26 822.36	27 612.42	23 398.86	25 299.02	25 853.34
60 a	27 714.74	35 266.77	36 624.47	29 982.32	33 179.11	33 969.17	29 548.46	31 448.62	32 002.94
项目	以年金形式计算的生态补偿水平/(元/hm ² ·a)								
	固定碳基线			Faustmann碳基线			MSY碳基线		
	T+B	T+B+D	T+B+D+H	T+B	T+B+D	T+B+D+H	T+B	T+B+D	T+B+D+H
20 a	59.23	656.59	763.98	541.24	794.11	856.60	476.23	626.54	670.38
30 a	260.18	746.24	833.62	330.32	536.07	586.92	288.67	410.97	446.64
40 a	802.58	1 239.28	1 317.79	988.60	1 173.46	1 219.14	943.97	1 053.85	1 085.91
50 a	1 205.65	1 617.02	1 690.97	1 286.91	1 461.05	1 504.08	1 274.57	1 378.07	1 408.26
60 a	1 458.34	1 855.73	1 927.17	1 577.66	1 745.88	1 787.45	1 554.83	1 654.82	1 683.99

注:T+B表示木材收益+生物量碳汇收益,T+B+D表示木材收益+生物量+DOM碳汇收益,T+B+D+H表示木材收益+生物量+DOM+HWP碳汇收益。

(1)当纳入生物量、DOM和HWP碳库时,固定碳基线、Faustmann碳基线和MSY碳基线下的最优轮伐期分别为22.45 a、24.64 a和26.07 a,LEV分别为32 198.97元/hm²、23 939.16元/hm²和21 584.91元/hm²。在固定碳基线下,纳入多个碳库可以帮助林农在不对其原有经营决策作出过多调整的情况下提高收益,这将有利于激励林农参与碳汇林经营。而就Faustmann碳基线和MSY碳基线而言,林农只能从首次基准采伐之后的碳汇量中获益,从而导致LEV相较于仅考虑木材收益时有所下降。

(2)当碳交易市场相对完备、林农能够在碳交易市场中自由交易时,在固定碳基线下,政府无须提供生态补偿,林农自然会依据利润最大化的原则由用材林经营转向碳汇林经营。而在Faustmann碳基线和MSY碳基线下,政府则需根据纳入碳库的不同,一次性提供至多2 236.30元/hm²或每年提供至多162.76元/hm²的生态补偿以激励林农参与碳汇林经营,且补偿水平随着纳入碳库数量的增加而降低。

(3)为了激励林农参与具有20~60 a固定期限的林业碳汇经营,政府需要一次性提供748.83~36 624.47元/hm²或每年提供59.23~1 927.17元/hm²不等的生态补偿。当仅纳入生物量碳库时,固定碳基线所要求的生态补偿水平最低。进一步纳入DOM和HWP碳库时,MSY碳基线提供了最低的生态补偿水平。特别是考虑到中国南方杉木人工林实际的20 a或30 a左右的轮伐期,MSY碳基线会对公共财政支出更加有利。

4.2 讨论

本研究基于林业碳汇额外性原则,以中国南方杉木人工林为例,评估了不同碳基线对LEV和最优轮伐期的影响,并对生态补偿水平进行了测度,能够为政府开展准确的林业碳核算、制定合理的林业碳基线方法学、激励林农参与林业碳汇经营提供科学依据。同时,以下几个问题在有关林业碳汇额外性及生态补偿的研究过程中也值得探讨和重视。

(1)完善碳核算方法学,全面纳入森林多碳库。当前,生物量碳库已成为林业碳核算的主要对象,但DOM和HWP碳库在碳循环中同样扮演着重要角色。纳入DOM和HWP碳库,可以更全面地反映森林生态系统的碳汇功能,有助于提升林农的收益,增强其参与碳汇经营的积极性。然而,多碳库的纳入也增加了碳核算的复杂性和不确定性。因此,需要进一步完善碳核算方法学,提升监测和核查技术,确保碳汇量核算的准确性和可靠性,包括引入遥感监测、物联网传感器和大数据分析等技术,可以实现对森林生长、碳储量和环境变化的实时监测和精细化管理。同时,开发标准化的数据采集和分析工具,建

立全国统一的碳汇数据库,将为林业碳汇的科学管理和政策制定提供坚实基础。

(2)合理设定碳基线,优化林业碳汇政策。碳基线的设定直接影响林农的碳汇收益和经营决策。固定碳基线虽然简单易行,但没有考虑如果项目未实施也会发生的碳储量变化,从而无法确定该项目是否导致碳汇水平发生变化。另外,Faustmann碳基线和MSY碳基线还依赖于未来多年、甚至是几十年对碳储量的反事实模型预测,这可能出现信息不对称的情况。因为除了项目负责人外,没有人知道在忽略碳市场的情况下该项目会如何发展,从而造成项目负责人和政策制定者之间的博弈,无法充分体现林农的额外减排贡献。同时,不同碳基线下的LEV和最优轮伐期存在差异,政策制定者需要权衡林农收益、生态效益和财政支出,制定兼顾效率和公平的碳汇政策。特别应考虑地区差异和树种特性,制定适应性的碳基线方案,提升政策的针对性和有效性。例如,在生态脆弱地区或碳汇潜力大的地区,可采取更为激励性的碳基线和补偿政策,以最大化减排效果。

(3)加强碳市场建设,完善生态补偿机制。碳市场的发展程度直接影响林农参与碳汇经营的积极性。在碳交易市场相对完备的情况下,林农可以通过出售碳汇获得额外收益,政府的财政压力也可相应减轻。然而,目前碳市场仍存在价格波动大、交易机制不完善等问题,限制了林农的参与度。因此,政府应加快推进碳市场体系建设,稳定碳价预期,提供技术和信息支持。同时,针对碳市场无法完全弥补林农收益损失的情况,建立合理的生态补偿机制,动态调整补偿标准,确保林农的利益,促进碳汇林经营的可持续发展。

参考文献

- [1] 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[J].农业经济问题,2022,43(9):11-23.
- [2] 岳婷,李梦婷,陈红,等.碳中和研究热点与演进趋势:基于科学知识图谱[J].资源科学,2022,44(4):701-715.
- [3] 袁佳双,张永香.气候变化科学与碳中和[J].中国人口·资源与环境,2022,32(9):47-52.
- [4] 刘燕华,李宇航,王文涛.中国实现“双碳”目标的挑战、机遇与行动[J].中国人口·资源与环境,2021,31(9):1-5.
- [5] 汪宗顺,张海鹏,岳超,等.造林增汇是实现碳中和的成本有效途径吗:以西北地区为例[J].自然资源学报,2024,39(3):731-748.
- [6] TAHVONEN O, RAUTIAINEN A. Economics of forest carbon storage and the additionality principle [J]. Resource and energy economics, 2017, 50: 124-134.
- [7] 曹先磊,任云鹤,许赛赛,等.“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[J].中国农业大学学报,2023,28(12):177-193.



- [8] 朱臻,沈月琴,吴伟光,等. 碳汇目标下农户森林经营最优决策及碳汇供给能力:基于浙江和江西两省调查[J]. 生态学报, 2013,33(8):2577-2585.
- [9] 沈月琴,王枫,张耀启,等. 中国南方杉木森林碳汇供给的经济分析[J]. 林业科学,2013,49(9):140-147.
- [10] GREN I M, AKLILU A Z. Policy design for forest carbon sequestration: a review of the literature [J]. *Forest policy and economics*, 2016, 70: 128-136.
- [11] RANDAZZO N A, GORDON D R, HAMBURG S P. Improved assessment of baseline and additionality for forest carbon crediting [J]. *Ecological applications*, 2023, 33(3):2817.
- [12] ASANTE P, ARMSTRONG G. Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision under alternative baseline policies [J]. *Canadian journal of forest research*, 2016, 46(5):656-665.
- [13] MASON C F, PLANTINGA A J. The additionality problem with offsets: optimal contracts for carbon sequestration in forests [J]. *Journal of environmental economics and management*, 2013, 66(1):1-14.
- [14] SEDJO R, SOHNGEN B. Carbon sequestration in forests and soils [J]. *Annual review of resource economics*, 2012, 4: 127-144.
- [15] ASANTE P, ARMSTRONG G W. Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: a comparative statics analysis [J]. *Journal of forest economics*, 2012, 18(2):145-156.
- [16] BENTO A, HO B, RAMIREZ-BASORA M. Optimal monitoring and offset prices in voluntary emissions markets [J]. *Resource and energy economics*, 2015, 41: 202-223.
- [17] COFFIELD S R, VO C D, WANG J A, et al. Using remote sensing to quantify the additional climate benefits of California forest carbon offset projects [J]. *Global change biology*, 2022, 28(22):6789-6806.
- [18] STAPP J, NOLTE C, POTTS M, et al. Little evidence of management change in California's forest offset program [J]. *Communications earth & environment*, 2023, 4: 331.
- [19] HOLTSMARK B, HOEL M, HOLTSMARK K. Optimal harvest age considering multiple carbon pools: a comment [J]. *Journal of forest economics*, 2013, 19(1):87-95.
- [20] 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 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(4): 219-228.
- [21] 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 [J]. *资源科学*, 2020, 42(5):825-839.
- [22] 贯君,曹玉昆,朱震锋,等. 基于B-S期权定价理论的落叶松碳汇造林项目经济价值评估与敏感性分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(1):63-70.
- [23] 曹先磊,张颖. 落叶松碳汇造林项目 CCER 开发成本动态核算研究 [J]. *统计与信息论坛*, 2019, 34(3):43-49.
- [24] 曹先磊,张颖. 云南思茅松碳汇造林项目减排量、经济价值及其敏感性分析 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(2):234-242.
- [25] AMACHER G S, OLLIKAINEN M. Prices versus quantities in forest regulation [J]. *Forest policy and economics*, 2024, 160: 103032.
- [26] YU Z H, NING Z, CHANG W Y, et al. Optimal harvest decisions for the management of carbon sequestration forests under price uncertainty and risk preferences [J]. *Forest policy and economics*, 2023, 151: 102957.
- [27] CHANG W Y, LI Z L, LU K F, et al. Optimal eco-compensation for forest-based carbon sequestration programs: a case study of larch carbon sink plantations in Gansu, northwest China [J]. *Forests*, 2022, 13(2):268.
- [28] DENG H B, ZHENG P, LIU T X, et al. Forest ecosystem services and eco-compensation mechanisms in China [J]. *Environmental management*, 2011, 48(6):1079-1085.
- [29] ENGEL S, PAGIOLA S, WUNDER S. Designing payments for environmental services in theory and practice: an overview of the issues [J]. *Ecological economics*, 2008, 65(4):663-674.
- [30] SARTORI P J, SCHONS S Z, AMACHER G S, et al. Deferred rotation carbon programs for even-aged forests: aligning landowner and societal objectives [J]. *Forest policy and economics*, 2024, 168: 103295.
- [31] 周伟,高岚. 森林碳汇收益的实证分析:以广东省杉木林为例 [J]. *科技管理研究*, 2015, 35(2):219-223.
- [32] NIINIMÄKI S, TAHVONEN O, MÄKELÄ A, et al. On the economics of Norway spruce stands and carbon storage [J]. *Canadian journal of forest research*, 2013, 43(7):637-648.
- [33] PIHLAINEN S, TAHVONEN O, NIINIMÄKI S. The economics of timber and bioenergy production and carbon storage in Scots pine stands [J]. *Canadian journal of forest research*, 2014, 44(9):1091-1102.
- [34] ABRI IAL, GROGAN K, DAIGNEAULT A. Optimal forest management in the presence of endogenous fire risk and fuel control [J]. *European journal of forest research*, 2023, 142(2):395-413.
- [35] NING Z, SUN C Y. Forest management with wildfire risk, prescribed burning and diverse carbon policies [J]. *Forest policy and economics*, 2017, 75:95-102.
- [36] 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 [J]. *自然资源学报*, 2022, 37(3):753-768.
- [37] ZHANG D W. Faustmann in an uncertain policy environment [J]. *Forest policy and economics*, 2001, 2(2):203-210.
- [38] 孙思宇,宁卓. 采伐政策风险对人工林最优轮伐期的影响 [J]. *林业经济*, 2023, 45(3):66-78.
- [39] 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 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(10):211-220.
- [40] ZHANG N, NING Z, ZHANG H, et al. Optimal rotation period of populus plantations considering multiple carbon pools and carbon cap policies in Jiangsu, east China [J]. *Forestry: an international journal of forest research*, 2023, 96(2):249-263.
- [41] FAUSTMANN M. Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry [J]. *Journal of forest economics*, 1995, 88(3):533-537.
- [42] HARTMAN R. The harvesting decision when a standing forest has value [J]. *Economic inquiry*, 1976, 14(1):52-58.
- [43] 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 [J]. *American journal of agricultural economics*, 1995, 77(2):365-374.
- [44] CHANG S J. Twenty one years after the publication of the generalized Faustmann formula [J]. *Forest policy and economics*, 2020, 118: 102238.

- [45] 余智涵,杨红强. 基于广义 Faustmann 模型的营林管理决策方法学研究前沿及展望[J]. 林业科学,2024,60(9):170-182.
- [46] INSLEY M,ROLLINS K. On solving the multirotational timber harvesting problem with stochastic prices: a linear complementarity formulation[J]. American journal of agricultural economics, 2005, 87(3):735-755.
- [47] SCHWARTZ E S. The stochastic behavior of commodity prices: implications for valuation and hedging[J]. Journal of finance, 1997, 52(3):923-973.
- [48] PIAZZA A, PAGONCELLI B K. The optimal harvesting problem under price uncertainty[J]. Annals of operations research, 2014, 217(1):425-445.
- [49] 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[J]. 资源开发与市场,2024,40(4):503-510.
- [50] 陈则生. 杉木人工林经济成熟龄的研究[J]. 林业经济问题, 2010,30(1):22-26.
- [51] FANG J, CHEN A, PENG C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(5525):2320-2322.
- [52] 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[M]. 北京:中国经济出版社, 2013.
- [53] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.

Carbon baseline scenarios and ecological compensation levels based on forestry carbon sink additionality

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

(1. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu 210037, China;

2. Research Center for Economics and Trade in Forest Products, NFGA, Nanjing Jiangsu 210037, China;

3. Research Center for the Yangtze River Delta's Socioeconomic Development, Nanjing Jiangsu 210093, China)

Abstract Additionality is the foundation for conducting carbon credit accounting and validating the effectiveness of carbon offset projects. Under the principle of forestry carbon sink additionality, establishing a scientific carbon baseline and accurately calculating net carbon sequestration have become practical issues that urgently need to be solved in deepening the reform of tenure in collective forests. These efforts serve as a basis for determining a reasonable level of ecological compensation and encouraging forest farmers to participate in forestry carbon sequestration management. This study examined Chinese fir plantations in Zhejiang, Fujian, and Jiangxi provinces within the collective forest reform areas of southern China as a case study, utilizing a generalized Faustmann model incorporating multiple carbon pools such as biomass. From the perspective of forestry carbon sink additionality, the study employed Monte Carlo simulations to evaluate the ecological compensation levels provided through government incentives for forest farmers to participate in forestry carbon sink management under three carbon baseline scenarios. The research results indicated that: ① The optimal rotation periods for fixed carbon baseline, Faustmann carbon baseline, and maximum sustained yield (MSY) carbon baseline were 22.45 years, 24.64 years, and 26.07 years, respectively. ② Under the fixed carbon baseline, forest farmers would switch to carbon sink forest management based on the principle of maximizing profits. However, under the Faustmann and MSY carbon baselines, the government would need to provide ecological compensation of up to RMB 2 236.30/hm² on a one-time basis or RMB 162.76/hm² annually, depending on the inclusion of different carbon pools. ③ To encourage forest farmers to participate in forestry carbon sink management with a fixed duration, the government would need to provide ecological compensation ranging from RMB 748.83 to 36 624.47/hm² on a one-time basis, or RMB 59.23 to 1 927.17/hm² annually. The MSY carbon baseline would provide the lowest level of ecological compensation when included in multiple carbon pools. Based on these findings, this study suggests the following: establishing a sound carbon trading market system and ensuring accurate accounting of forestry carbon sinks, setting reasonable carbon baselines for different forest stands and tree species, and developing a reasonable ecological compensation policy that integrates timber and carbon sink revenues. These measures are critical to fully exerting the role of forestry in reducing emissions.

Key words carbon baseline; forestry carbon sink additionality; optimal rotation period; ecological compensation; Chinese fir plantation; forest management

(责任编辑:刘照胜)