

随机价格下杉木人工林的碳汇收益及最优轮伐期确定

余智涵^{1,2}, 宁卓^{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: 发展林业碳汇是应对全球气候变化及实现中国2060年碳中和的重要举措。基于改进的Faustmann-Hartman模型, 以中国南方浙江、福建和江西三个省份杉木人工林为研究对象, 使用时间序列模型拟合并预测中国碳排放权交易市场的碳汇价格, 通过蒙特卡洛模拟确定最优轮伐期及碳汇收益。研究结果表明: (1) 依次纳入木材收益、地上生物量碳汇收益和死亡有机质碳汇收益时, 杉木人工林的最优轮伐期分别为21.85年、22.98年和22.88年; (2) 上述三种情景下, 林地期望价值的净现值分别为20408.20元/hm²、24587.29元/hm²和28101.11元/hm²; (3) 全面考虑包含死亡有机质碳库在内的林业碳汇效益, 能够稳定提高林地所有者收益约7.02%~21.61%。此外, 应进一步考虑多轮伐期下税收政策及自然风险等因素对碳汇营林的影响, 这是确定最优轮伐期和碳汇收益后续研究值得重视的问题。

关键词: 杉木; 碳汇收益; 最优轮伐期; Faustmann-Hartman模型; 随机价格; 时间序列分析; 蒙特卡洛模拟

2020年9月22日, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会上提出: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”。为了实现这一减排承诺, 除了工业减排外, 加强森林的可持续经营管理、充分发挥林业碳汇的碳减排作用也是应对全球气候变化的有效措施^[1-3]。中国森林资源总量丰富, 年均增长速度也较快, 发展潜力巨大^[4,5]。结合1949—2018年间的森林资源清查数据, 中国森林碳储量为8.362 Pg C (1 Pg=10¹⁵g), 其中2014—2018年间的年均碳累积量达到0.201 Pg C^[6]。然而, 中国林业碳汇项目在自愿碳交易市场中的份额并不大。除了项目本身的长周期和高成本等因素外, 中国碳排放权交易市场碳配额分配不合理、平均碳汇价格偏低、市场活跃程度不高, 也在一定程度上影响了林业碳汇充分发挥其作用与潜力^[7,8]。

《建立市场化、多元化生态保护补偿机制行动计划》提出, “林业温室气体自愿减排项目优先纳入全国碳排放权交易市场”, 可以预期将来林地所有者也有机会获得与林业碳汇相关联的额外收入^[9,10]。林地所有者的目标是利润最大化, 通常可以根据Faustmann^[11]构建的仅考虑木材收益的模型求解其最优管理决策。作为林业碳汇项目的直接参与者, 林

收稿日期: 2021-02-08; 修订日期: 2021-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72073064, 71703069)

作者简介: 余智涵 (1998-), 男, 江苏丹阳人, 博士研究生, 研究方向为林产品碳循环。

E-mail: yuzhihan@njfu.edu.cn

通讯作者: 杨红强 (1971-), 男, 陕西渭南人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为气候变化与林业碳科学。

E-mail: yhqnfu@aliyun.com

地所有者会意识到林业碳汇具有一定的生态服务价值,考虑林业碳汇收益将直接导致产出的增加,结合碳汇价格的波动,其经营管理决策可能会发生改变。Hartman^[12]通过扩展 Faustmann 模型,将各类生态系统服务和林地设施服务价值纳入到评价系统,同时考虑了木材经济效益和生态经济效益。作为重要的人工林树种,杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的面积和蓄积量占比较高,在中国林业发展中占有极其重要的地位,确定其最优轮伐期及林地期望价值的净现值具有重要的研究意义和实践价值^[13]。本文基于改进的 Faustmann-Hartman 模型,充分考虑包含随机碳汇价格、地上生物量和死亡有机质碳汇收益对杉木人工林最优轮伐期的影响,以期为中国将林业碳汇项目全面纳入碳排放权交易市场提供科学依据。

1 文献综述

林业经济学中的一个经典问题是,如何确定一个林分的采伐年龄,即最优轮伐期,使林地期望价值的净现值最大化。目前,包含木材价值和生态服务价值在内的 Faustmann-Hartman 模型是求解最优轮伐期的基本模型^[11,12]。进一步地,Plantinga 等^[14]、Van Kooten 等^[15]、Englin 等^[16]、Olschewski 等^[17]、Price 等^[18]、Shrestha 等^[19]及 Ekholm^[20]聚焦于林地的碳汇效益,从气候变化缓解、环境外部性、生物质燃料供应等方面研究了碳汇收益对最优轮伐期的影响,发现考虑碳汇收益的 Faustmann-Hartman 模型具有更长的最优轮伐期,碳汇价格的变化可能是影响最优轮伐期及林地价值的重要因素。此外,也有部分学者从税收政策(如 Chang^[21,22])和自然风险(如 Reed^[23]、Ning 等^[24]、Ekholm^[20])的角度就森林财产税、自然扰动和森林火灾等问题进一步扩展了 Faustmann-Hartman 模型,解决了如何使用税收工具调节林业生产力及自然风险下森林经营管理方案确定的问题。

在现实中,经济行为受到各种不确定性的影响,林业生产的长期性意味着林地所有者在做出经营决策时可能永远无法知道未来参数的精确值^[25]。Samuelson^[26]指出,当前市场环境无法满足未来价格完全确定的基本假设,林地所有者会因为采伐时的高价或低价面临收益上的不确定性,应该在决策过程中引入概率和期望值作为一种近似。最初,部分学者研究了随机木材价格假设下最优轮伐期的确定,如 Clarke 等^[27]与 Thomson^[28],发现最优轮伐期对木材价格不敏感。在近几年的研究中,随机价格假设也有由木材价格扩展至碳汇价格,包括 Chladna^[29]、Petrasek 等^[30]、Ning 等^[31]在内的学者使用实物期权法对包含碳汇收益在内的林地价值进行了测算,由于实物期权法可以在未来每个决策时间点分析立即采伐与延迟采伐的收益情况、允许林地所有者通过把握投资机会而在未来获得更高的收益,因此随机价格假设可能会通过碳汇价格的波动而带来更高的林地价值,且波动越大,林地期望价值越高,另外最优轮伐期也会因为价格过程的不同而存在一定差异。

但是,上述研究大多只考虑了地上生物量的碳汇,而忽略了林业中的另一重要碳库——死亡有机质。国家林业碳汇项目方法学文件《碳汇造林项目方法学》和《森林经营碳汇项目方法学》均指出,如果“根据方法学的适用条件,项目活动的实施会增加这个碳库”,即死亡有机质碳库产生了净碳汇增量,那么应该将该碳库包含在内。Gutrich 等^[32]首次在最优轮伐期的确定中纳入了死亡有机质碳库;Asante 等^[33,34]分别在多个和单个轮伐期假设下评估了死亡有机质碳库对最优轮伐期的影响,发现与仅考虑地上生物量碳汇相比,最优轮伐期更短,且当碳汇价格较低时,死亡有机质碳库的初始碳储量对最优轮伐期的影响较小。然而,这些研究以静态碳汇价格为基础,忽略了价格波动对林地所

有者决策和收益带来的影响。

作为碳中和目标实现过程中的关键一环,林业碳汇可以通过市场化交易体现其经济价值。目前,国内学者大多基于比较静态分析,并以欧盟碳排放权交易市场为参考,在不同的碳汇价格水平下,评估最优轮伐期的变动情况^[13,35,36]。然而,欧盟碳汇价格水平较高,2020年6月以来,多次突破30欧元/t(约合240元/t);但中国8个碳排放权交易市场的碳汇价格始终保持在0~100元左右,且受到交易制度、环境、政策等因素的综合影响,具有一定的随机波动性^[37]。随着中国碳排放权交易市场的不断完善,纳入林业碳汇效益不但能增加林地所有者的收入,亦能提高森林的生态效益,符合碳中和愿景实现过程中政府、企业、个人共同参与的社会路径^[38-40]。因此,有必要以中国碳排放权交易市场的碳汇价格为基础,在碳汇价格随机波动的情况下,研究包含木材收益、地上生物量碳汇收益和死亡有机质碳汇收益在内的完整林业碳汇效益,以帮助林地所有者确定碳汇营林的最优轮伐期,同时了解未来收益的波动情况。

本文在Asante等^[34]的基础上就随机价格问题进一步扩展Faustmann-Hartman模型,从随机价格视角出发,拟合并预测未来中国碳排放权交易市场的碳汇价格走势,进而分析纳入完整的林业碳汇效益后林地所有者的收益变化及最优轮伐期确定。

2 研究方法 with 数据来源

作为中国南方杉木人工林较多的省份,浙江、福建和江西三个省份已经审定或备案了多个包含杉木经营在内的林业碳汇项目,选取其作为案例点具有重要的研究价值^[35]。因此,本文以中国南方浙江、福建和江西三个省份的杉木人工林为研究对象,通过时间序列分析对碳汇价格建模,模拟未来碳汇价格的变化,并使用蒙特卡洛模拟分别确定考虑i木材收益、ii木材收益+地上生物量碳汇收益、iii木材收益+地上生物量碳汇收益+死亡有机质碳汇收益三种情景下的最优轮伐期及林地期望价值的净现值。时间序列模型结合蒙特卡洛模拟,本质上也是一种看涨期权的定价方法,能够帮助林地所有者做出是否投资的决策,同时分析未来收益的不确定性,避免在每个决策点依次判断。

本节首先归纳了包含死亡有机质碳库和随机价格在内的Faustmann-Hartman模型的重要假设;接着分别从木材收益、地上生物量碳汇收益和死亡有机质碳汇收益三个角度构建模型,并使用时间序列模型对碳汇价格建模;最后总结所使用的各个参数。

2.1 模型假设

充分包含林业碳汇收益、随机价格、死亡有机质碳库等因素,本文就Faustmann-Hartman模型的随机价格拓展问题,设定如下假设条件。

假设一:林地所有者希望确定最优轮伐期 T ,使得木材收益和碳汇收益的净现值最大,其中,木材收益指砍伐年份出售杉木的可销售木材部分所获得的收入,碳汇收益指每年林地碳汇增量所对应的价值总和(即林地所有者每年会因碳汇的增加而获得收入,因碳汇的减少而发生支出)。假设林地是在单一的建立、生长和收获周期下管理的;假设裸地造林,忽略造林前林地已有的碳汇,忽略采伐后碳释放所造成的碳汇收益损失。

假设二:木材价格、经营成本及与森林生长相关的参数已知,且不随时间变化。碳汇价格会随时间波动,但林地所有者可以利用已有价格数据预测未来的价格走势。

假设三:本文的碳汇收益除了地上生物量碳汇收益外,还包括死亡有机质碳汇收益。其中,死亡有机质碳库将以恒定的速率 α 衰减,同时,地上生物量碳库也将以一个

固定的比例 β 通过凋落物的形式转移到死亡有机质碳库中^[33]；采伐后，地上生物量中除了被采伐的部分，全部转移到死亡有机质碳库中。

2.2 模型构建

2.2.1 木材收益

首先构建仅考虑木材收益时的 Faustmann 模型。在单次轮作中，木材收益，即林地期望价值的净现值 $NPV_t(t)$ 可以表示为：

$$NPV_t(t) = [(P_w - C_v) \times \delta \times V(t)] e^{-rt} - C_e \quad (1)$$

式中： P_w 为木材价格（元/m³）； C_v 为木材采运成本（元/m³）； δ 为出材率； $V(t)$ 为树木蓄积量（m³/hm²）； r 为连续复利下的折现率； C_e 为经营成本（元/hm²）。

本文使用陈则生^[41]构建的 Chapman-Richards 方程作为杉木的生长方程：

$$V(t) = 4.535 \times SI^{1.609} \times [1 - e^{-0.096t}]^{3.720} \quad (2)$$

式中： SI 为立地指数。

对林地所有者利润最大化的一阶条件 $NPV'_t(t) = 0$ 求解，可以得到：

$$r = \frac{\delta(P_w - C_v)V'(t)}{\delta(P_w - C_v)V(t)} = \frac{V'(t)}{V(t)} \quad (3)$$

式（3）表明，仅考虑木材收益时的最优轮伐期应该满足木材收益的瞬时增长率 $\frac{V'(t)}{V(t)} = r$ （即林地所有者将资本投资到其他行业的最高收益率）。

2.2.2 地上生物量碳汇收益

依据假设一，在单次轮作中，地上生物量碳汇收益的净现值 $NPV_b(t)$ 可以表示为：

$$NPV_b(t) = \int_0^t e^{-rt} P_c \times \frac{44}{12} \times B'(t) dt - e^{-rt} P_c \times \frac{44}{12} \times B(t) \quad (4)$$

式中： P_c 表示碳汇价格（元/t）； $B(t)$ 表示地上生物量的碳质量方程（t/hm²）； $\frac{44}{12}$ 表示将碳质量转化为二氧化碳质量； $\int_0^t e^{-rt} P_c \times \frac{44}{12} \times B'(t) dt$ 表示每年地上生物量碳汇增量在其生命周期内的现值之和， $e^{-rt} P_c \times \frac{44}{12} \times B(t)$ 表示采伐时由于地上生物量的碳汇损失而必须支付款项的现值。

参考 Fang 等^[42]和苏伟^[43]的研究，杉木人工林的地上生物量的碳质量可以由树干生物量与生物量扩展因子相乘得到：

$$B(t) = [a \times V(t) + b] \times BEF \quad (5)$$

式中： a ， b 为与杉木有关的特定参数； BEF 为杉木的生物量扩展因子。

由于木材收获和地上生物量碳汇所获得收入，即林地期望价值的净现值可以表示为：

$$NPV_{tb}(t) = NPV_t(t) + NPV_b(t) \quad (6)$$

对林地所有者利润最大化的一阶条件 $NPV'_{tb}(t) = 0$ 求解，可以得到：

$$r = \frac{\delta(P_w - C_v)V'(t)}{\delta(P_w - C_v)V(t) - \frac{44}{12}P_c B(t)} \quad (7)$$

与式（3）相比，式（7）分母多减了一项 $\frac{44}{12}P_c B(t)$ 。由于 $B(t)$ 被假设为时间 t 的增

函数 [式 (2) 和式 (5)], 在碳汇价格 $P_c > 0$ 的条件下, 式 (7) 右边总是小于式 (3) 右边。因此, 对于给定的折现率 r , 同时考虑木材收益和地上生物量碳汇收益的最优轮伐期将大于仅考虑木材收益时的最优轮伐期, 以降低采伐时由于地上生物量的碳汇损失而必须支付款项的现值 [式 (4)]。另外, 碳汇价格越高, 最优轮伐期的延长效应也越明显。

2.2.3 死亡有机质碳汇收益

依据假设三, 死亡有机质碳库中碳储量的变化 $D'(t)$ 可以用微分方程来描述:

$$D'(t) = \beta B(t) - \alpha D(t) \quad (8)$$

通过给定死亡有机质碳库的初始碳储量 $D(0)$, 可以得到 $D(t)$ 的解析解:

$$D(t) = e^{-\alpha t} \left(D(0) + \int_0^t e^{k\alpha} \beta B(k) dk \right) \quad (9)$$

同地上生物量碳汇收益一样, 死亡有机质碳汇收益的净现值 $NPV_d(t)$ 可以表示为:

$$NPV_d(t) = \int_0^t P_c \times \frac{44}{12} \times D'(T) e^{-rT} dT + P_c \times \frac{44}{12} \times [B(t) - \gamma V(t)] e^{-rt} \quad (10)$$

式中: γ 为树木的碳转换因子 (t/t)。

由于木材收获、地上生物量碳汇和死亡有机质碳汇所获得收入, 即林地期望价值的净现值 $NPV_{td}(t)$ 可以表示为:

$$NPV_{td}(t) = NPV_l(t) + NPV_b(t) + NPV_d(t) \quad (11)$$

对林地所有者利润最大化的一阶条件 $NPV'_{td}(t) = 0$ 求解, 可以得到:

$$r = \frac{\delta(P_w - C_v)V'(t) + \frac{44}{12}P_c[D'(t) + B'(t) - \gamma V'(t)]}{\delta(P_w - C_v)V(t) - \frac{44}{12}P_c\gamma V(t)} \quad (12)$$

其中, $D'(t)$ 可以表示为:

$$D'(t) = \beta B(t) - e^{-\alpha t} [D(0) + \int_0^t e^{k\alpha} \beta B(k) dk] \quad (13)$$

与式 (3) 相比, 式 (12) 分母部分多减去的 $\frac{44}{12}P_c\gamma V(t)$ 具有延长最优轮伐期的作用。对于分子部分, $B'(t) - \gamma V'(t)$ 通常大于 0, 因为可销售木材部分的增长率一般来说小于树木生物量的增长率; 如式 (13) 所示, $D'(t)$ 会因为参数设置 $[D(0)$ 、 α 和 $\beta]$ 的不同而具有不同的正负性, 在本文的参数假设下, $D'(t)$ 始终大于 0。因此, 对于给定的折现率 r , 同时考虑木材收益、地上生物量碳汇收益和死亡有机质碳汇收益的最优轮伐期将大于仅考虑木材收益时的最优轮伐期。

式 (12) 也可以表示为如下形式:

$$r = \frac{\delta(P_w - C_v)V'(t) + \frac{44}{12}P_c[D'(t) + B'(t) - \gamma V'(t)]}{\delta(P_w - C_v)V(t) - \frac{44}{12}P_cB(t) + \frac{44}{12}P_c[B(t) - \gamma V(t)]} \quad (14)$$

式 (14) 的分子和分母部分均大于式 (7), 这将导致在木材收益和地上生物量碳汇收益的基础上进一步考虑死亡有机质碳汇收益后, 最优轮伐期的变动方向将不确定。

2.3 随机价格预测

在时间序列分析中, 以差分移动平均自回归模型 (ARIMA) 为基础的模型是较为常用的模型^[44]。本文以广州碳排放权交易所 2015 年 12 月 25 日至 2020 年 12 月 24 日的日度碳排放权配额 (GDEA) 收盘价时间序列数据为基础, 构建了 AR(3) [即 ARIMA(3, 0, 0)] 模

型,用于预测未来碳汇的价格走势,具体建模过程见3.1节:

$$P_c(t) = C + \varnothing_1 P_c(t-1) + \varnothing_2 P_c(t-2) + \varnothing_3 P_c(t-3) + \varepsilon(t) \quad (15)$$

式中: C 、 \varnothing_1 、 \varnothing_2 、 \varnothing_3 为待估参数; $\varepsilon(t)$ 为白噪声序列,且 $\varepsilon(t) \sim N(0, \sigma^2)$ 。

由于 $\varepsilon(t)$ 的存在,未来的碳汇价格走势是随机的,存在不确定性。蒙特卡洛模拟是一种处理不确定性问题的有效方法,其基本思想是:根据柯尔莫哥洛夫强大数律,若 X_n 为对随机变量 X 进行 N 次重复抽样而得到的独立同分布的随机变量序列,且该序列的期望 $E(X_N)$ 存在,则这 N 个独立同分布的随机变量 X_1, X_2, \dots, X_N 的平均值随着抽样次数 N 的增大趋于实际期望 $E(X_N)$ 的概率为 1^[45],即:

$$P\left(\lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n = E(X_N)\right) = 1 \quad (16)$$

本文使用蒙特卡洛模拟法进行 5000 次迭代,以确定在未来碳汇价格走势随机波动的情况下,最优轮伐期和林地期望价值净现值的平均值。

2.4 数据来源

除了碳汇价格外,杉木人工林的经营成本、木材价格和与杉木生长相关的参数也是 Faustmann-Hartman 模型中的重要参数。

2.4.1 经营成本

杉木人工林的经营成本主要包括三个部分:(1)造林成本,包括初始的清山、整地、种植、施肥成本以及接下来三年的补植和抚育成本;(2)管护成本,在采伐之前,每年都会发生;(3)采运成本,即采伐时的采伐成本和运输成本。在实际计算过程中,应将上述不同时间点的各类成本全部贴现至第 1 年年初。

不同区域杉木人工林的经营成本可能会由于地理位置、气候条件、立地指数等差异而有所不同。本文以中国南方的浙江、福建和江西三个省份的优等林地为例,取其杉木人工林经营成本的平均值作为经营成本,如表 1 所示。

表 1 杉木人工林的经营成本投入

Table 1 Silvicultural costs input of *Cunninghamia lanceolata*

造林成本/(元/hm ²)				管护成本/ (元/hm ²)	采运成本/ (元/m ³)
第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年		
16104.37	5242.17	4072.47	1563.59	90.48	288.77

注:数据来源于朱臻等^[46]、沈月琴等^[47]。所有价格数据均已使用国家统计局“林业产品生产价格指数”转换为真实价格。

2.4.2 木材价格

杉木价格因其胸径而异^[48,49]: < 6 cm 为 300 元/m³, 6~8 cm 为 600 元/m³, 8~12 cm 为 800 元/m³, 12~16 cm 为 900 元/m³, 16~20 cm 为 1000 元/m³, > 20 cm 为 1200 元/m³。

根据杉木平均胸径模型 $\bar{D}(t) = 1.779 \times 15^{1.388} \times [1 - e^{-0.012t}]^{0.801}$, 其胸径达到 6 cm 需要 3.66 年,达到 8 cm 需要 5.30 年,达到 12 cm 需要 8.97 年,达到 16 cm 需要 13.16 年,达到 20 cm 需要 17.85 年^[41]。在实际计算过程中,木材价格是一个关于时间 t 的函数 $P_w(t)$ 。

2.4.3 模型参数

表 2 汇总了 Faustmann-Hartman 模型涉及的各项参数取值及数据来源,主要包含与经济活动和与林木生长相关的参数。

3 结果分析

表2 模型参数设置

Table 2 Model parameters setting

参数名称	值	数据来源
δ	0.7	沈月琴等 ^[47]
r	5%	王周绪等 ^[50]
SI	15	朱臻等 ^[46]
a	0.3999	Fang 等 ^[42]
b	22.541	Fang 等 ^[42]
BEF	1.634	苏伟 ^[43]
α	0.28	徐传洪 ^[51]
β	0.0601	周涛等 ^[52] , 蔡兆炜 ^[53]
$D(0)$	0	作者假设
γ	0.15964	苏伟 ^[43]

3.1 时间序列建模

在建模之前首先使用 ADF 检验法对数据平稳性进行检验，依据 BIC 信息准则确定滞后阶数为 4 阶^[54]。实际检验过程中发现，对于同时包含漂移项和趋势项的 ADF 检验模型， P 值为 0.0187，表明在 5% 的显著性水平上拒绝原始价格数据不平稳的零假设，即原始价格数据平稳^[55]。

如图 1 所示，原始价格数据的自相关函数拖尾，偏自相关函数在 4 阶截尾，表明应该建立 AR 模型^[44]。对于滞后阶数的选择，同样以 BIC 信息准则为准，对滞后 1~4 阶进行检验：滞后 1 阶 2108.43，滞后 2 阶 2100.24，滞后 3 阶 2099.03，滞后 4 阶 2100.26。BIC 值在滞后 3 阶时最小，故应对原始价格数据建立 AR(3) 模型。模型的具体参数如表 3 所示。由表 3 可知， $|\varphi_1|+|\varphi_2|+|\varphi_3|=0.9973<1$ ，满足 AR 模型平稳的充分条件，故该 AR(3) 模型是平稳的^[44]。

此外，由于参数估计过程中假设随机误差项为白噪声序列，因此还需检验该 AR(3) 模型的残差是否为白噪声。Ljung-Box Q 检验是一种定量的检验方法，评估了残差序列对指

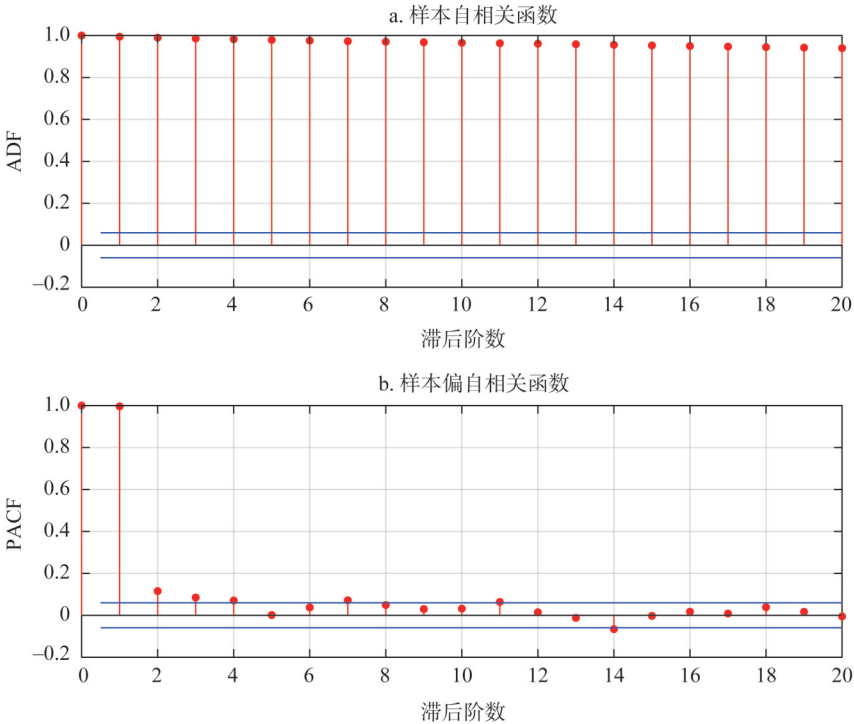


图1 原始价格数据的自相关函数和偏自相关函数

Fig. 1 Autocorrelation function and partial autocorrelation function of original price data

定的最大滞后阶数 m ，前 m 个自相关函数值一致为 0，即残差序列不存在自相关、为白噪声序列的零假设^[56]。检验结果显示 P 值为 0.0615，表明在 5% 的显著性水平上接受模型残差序列是白噪声的零假设。图 2 给出了 1 条未来 50 年碳汇的模拟价格路径。

表 3 AR(3) 模型参数
Table 3 Model parameters of AR(3)

参数	值	标准差	t 统计量	P 值
C	0.0642	0.0610	1.0519	0.29
\varnothing_1	0.8715	0.0225	38.7033	0.00
\varnothing_2	0.0409	0.0327	1.2504	0.21
\varnothing_3	0.0849	0.0233	3.6436	0.00
σ^2	0.3679	0.0137	26.9318	0.00

3.2 杉木人工林碳汇收益及最优轮伐期分析

3.2.1 木材收益

当仅考虑木材生产收益时，杉木人工林的最优轮伐期为 21.85 年，林地期望价值的净现值为 20408.20 元/hm²（图 3a）。与已有研究结果相比，本文计算所得的最优轮伐期较长而林地期望价值的净现值较低^[36,46,57]。主要原因是本文仅考虑了单一的轮作周期，将任何时间点因未收获而损失的投资收益视为机会成本，并且不包含由于未来地租损失而产生的机会成本，这将导致其最优轮伐期高于考虑无限个轮作周期时的最优轮伐期，而净现值计算结果偏低^[25]。

3.2.2 木材收益和地上生物量碳汇收益

同时考虑木材收益和地上生物量碳汇收益时，杉木人工林的最优轮伐期由 21.85 年小幅提升至平均 22.98 年，增加了 5.17%；林地期望价值的净现值由 20408.20 元/hm²提升至平均 24587.29 元/hm²，增加了 20.48%（图 3b、表 4）。同仅考虑木材生产的收益时类似，相较于已有研究，本文计算所得的平均最优轮伐期较长而林地期望价值的净现值均值较

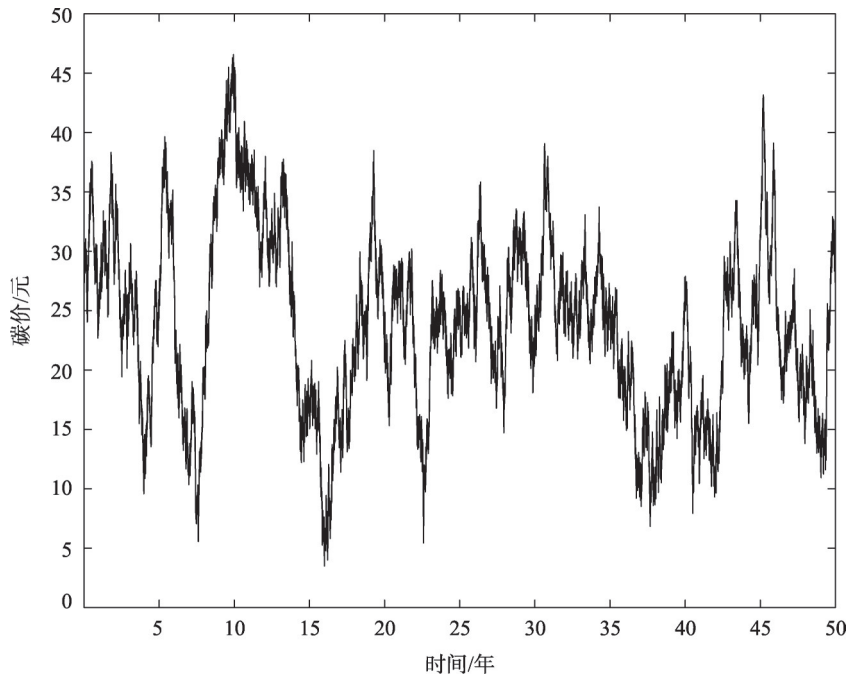
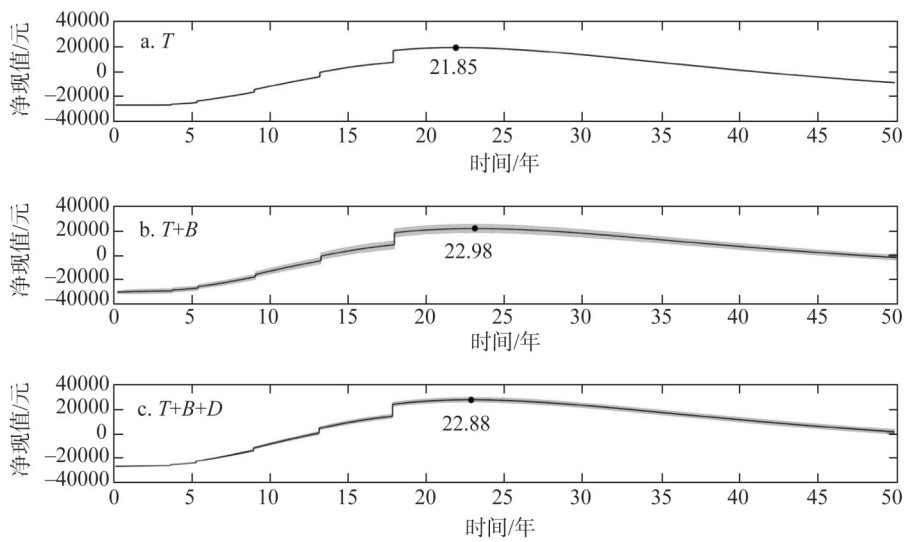


图 2 模拟的碳汇价格路径
Fig. 2 A simulated price path of carbon sink



注：T=木材收益，T+B=木材收益+地上生物量碳汇收益，T+B+D=木材收益+地上生物量碳汇收益+死亡有机质碳汇收益，下同，b和c两小图中的阴影部分表示95%置信区间。

图3 不同情景下林地期望价值的净现值随时间的演进

Fig. 3 Evolution of net present value of land expectation value over time under different scenarios

表4 蒙特卡洛模拟结果分布的特征数

Table 4 Characteristic numbers of Monte Carlo simulation results distribution

情景		95%置信区间	均值	标准差	变异系数	偏度	峰度
T+B	最优轮伐期	(19.25, 26.87)	22.98	1.99	0.0865	0.1220	2.6109
	净现值	(22301.11, 26945.21)	24587.29	1201.34	0.0489	0.0596	2.6619
T+B+D	最优轮伐期	(21.24, 24.64)	22.88	0.89	0.0391	0.1148	2.6757
	净现值	(26313.95, 29900.10)	28101.11	915.95	0.0326	0.0027	2.9028

低^[36,46,47,57]。除了仅考虑单次轮作周期的原因外，对碳汇价格的设定也是造成结果差异的重要原因之一。已有研究多采用以欧盟碳排放权交易市场为参考的较高碳汇价格，而本文通过拟合广州碳排放权交易所的碳汇价格数据并预测，发现未来的碳汇价格将大致保持在5~45元/t之间波动，低于欧盟碳排放权交易市场的平均碳汇价格（图2）。

与Van Kooten等^[15]和Asante等^[34]通过理论分析所得出的结论一致，考虑地上生物量的碳汇收益能够延长最优轮伐期，并提高林地期望价值的净现值。然而，与仅考虑木材收益时相比，最优轮伐期差异并不是很大，仅仅提高了1年左右，主要原因是未来的碳汇价格与杉木价格1200元/m³相比差异很大，几乎可以忽略不计。周伟等^[36]和朱臻等^[46]在中国南方杉木人工林的案例研究中也发现，在现有的木材价格水平下，只有当碳汇价格达到800~1000元/t时，最优轮伐期才会发生明显改变。此外，地上生物量的含碳量一般来说也低于杉木的蓄积量（图4a、图4b）。

3.2.3 木材收益、地上生物量碳汇收益和死亡有机质碳汇收益

进一步考虑死亡有机质的碳汇收益，杉木人工林的最优轮伐期由22.98年小幅缩短至平均22.88年，减少了0.44%；林地期望价值的净现值由24587.29元/hm²提升至平均28101.11元/hm²，增加了14.29%（图3c、表4）。这与Asante等^[34]得出的结论一致：考虑

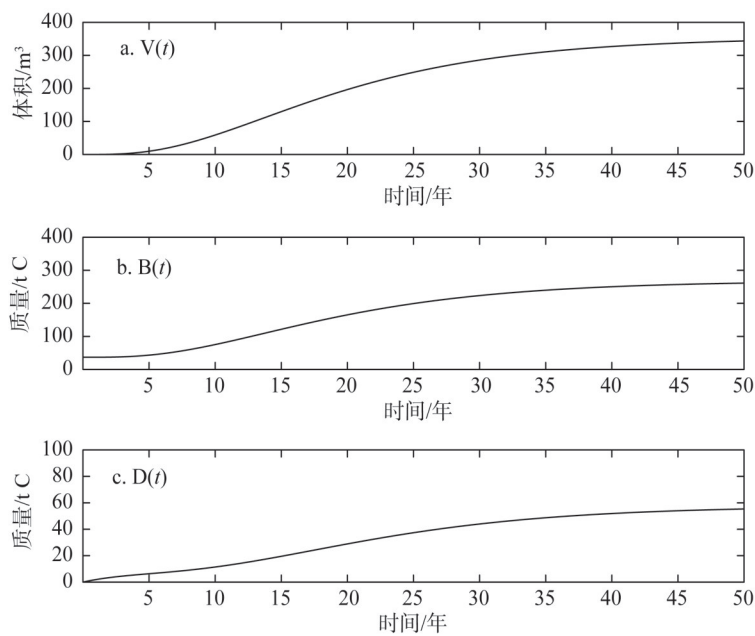


图4 杉木蓄积量，地上生物量和死亡有机质碳储量

Fig. 4 *Cunninghamia lanceolata* volume, aboveground biomass and dead organic matters carbon stock

死亡有机质的碳汇收益会略微缩短最优轮伐期，但可以提高林地期望价值的净现值。虽然死亡有机质碳库的碳储量价值相较于地上生物量碳库而言小得多（图4b、图4c），但考虑死亡有机质的碳汇收益仍可以在不影响林地所有者决策的情况下增加其收入，这可能会推动林业经营者从事碳汇林经营。

3.2.4 蒙特卡洛模拟结果的分布

与静态价格相比，基于随机价格的蒙特卡洛模拟结果能够有效地从统计学的角度评估碳汇价格波动给林业所有者决策带来的不确定性。如表4所示：对于情景ii木材收益+地上生物量碳汇收益，最优轮伐期的95%置信区间为 (19.25, 26.87) [即最优轮伐期有95%的可能性落在区间 (19.25, 26.87) 内]，对应林地期望价值净现值的95%置信区间为 (22301.11, 26945.21)，相较于情景i，提升了约9.28%~32.03%；对于情景iii木材收益+地上生物量碳汇收益+死亡有机质碳汇收益，最优轮伐期的95%置信区间为 (21.24, 24.64)，对应林地期望价值净现值的95%置信区间为 (26313.95, 29900.10)，相较于情景ii，提升了约7.02%~21.61%。结合图5a和图5c，考虑杉木人工林的碳汇收益时，林地期望价值净现值的蒙特卡洛模拟结果分布明显向x轴右侧移动。且不论碳汇价格如何波动，几乎所有模拟结果的净现值均大于仅考虑木材收益时的净现值（20408.20元/ hm^2 ），表明纳入碳汇收益能够提高林地所有者的收益。

对比图3b和图3c，考虑死亡有机质碳汇收益时的95%置信区间宽度明显小于仅考虑地上生物量碳汇收益的情景，且在前10年，考虑死亡有机质碳汇收益时的95%置信区间宽度几乎为0。主要原因是仅考虑地上生物量碳汇收益时，林地所有者需要为砍伐而造成的碳损失支付罚款，因此其收益会因为碳汇价格的波动而产生不确定性。进一步考虑死亡有机质碳汇收益后，砍伐后的生物量一部分流入木材市场销售，剩余部分全部转移

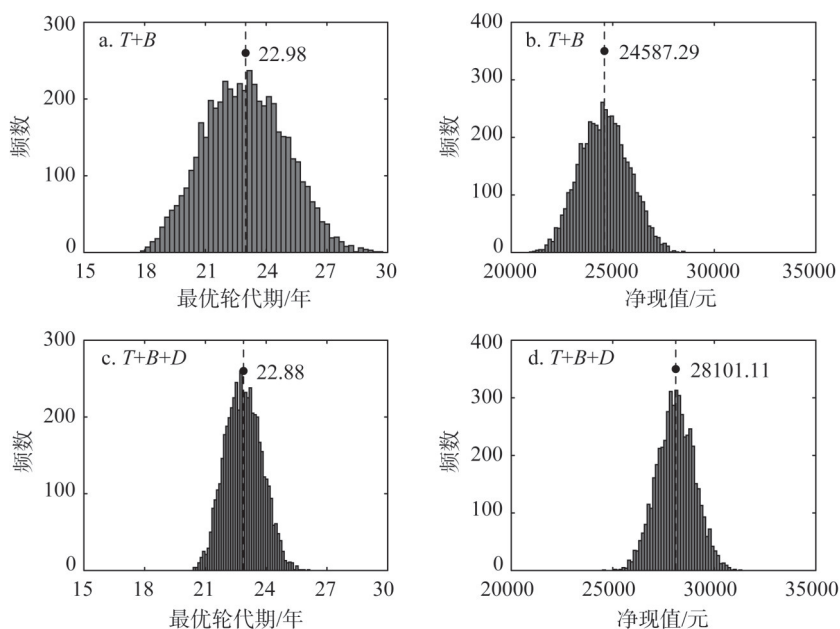


图5 蒙特卡洛模拟结果的频数直方图

Fig. 5 Frequency histogram of Monte Carlo simulation results

至死亡有机质碳库中, 没有造成任何碳损失。随着死亡有机质碳库碳储量的增加, 其衰减量也在逐年增加, 由于价格波动而导致林地所有者支付罚款的不确定性才会逐渐显现出来, 但无论在何时砍伐, 其不确定性始终小于仅考虑地上生物量碳汇收益时的不确定性。从标准差和变异系数来看 (表4), 考虑死亡有机质碳汇收益时的最优轮伐期和林地期望价值净现值的模拟离散程度也更小。这一现象表明, 考虑包含死亡有机质碳库在内的完整林业碳汇效益, 不但能增加林地所有者的收入, 亦能减少由于碳汇价格波动而对其收入带来的不确定性。就偏度和峰度而言 (表4), 所有分布的偏度系数均大于0, 略呈右偏态; 所有分布的峰度系数均小于3, 相较于正态分布略微平坦。

4 结论与讨论

4.1 结论

发展林业碳汇经济已经成为应对全球气候变化的重要趋势。随着中国碳排放权交易市场的不断完善, 除了木材生产的收益外, 林地所有者还有机会得到地上生物量碳库以及死亡有机质碳库的碳汇收益; 另外, 森林的生态效益也能够提高, 有利于碳中和愿景的实现。在现实中, 碳汇的市场价格会随着时间的推移而波动, 有必要在未来价格随机的情况下对碳汇营林的经济收益及最优轮伐期进行评价。本文以中国南方浙江、福建和江西三个省份的杉木人工林为研究对象, 使用AR(3)模型拟合并预测中国碳排放权交易市场的碳汇价格, 通过蒙特卡洛模拟确定了考虑地上生物量和死亡有机质碳汇时的最优轮伐期和林地期望价值的净现值。主要结论为:

(1) 依次纳入木材收益、地上生物量碳汇收益和死亡有机质碳汇收益时杉木人工林的最优轮伐期分别为21.85年、22.98年和22.88年。考虑地上生物量的碳汇收益将会延长

最优轮伐期,进一步考虑死亡有机质的碳汇收益会略微缩短最优轮伐期,但由于当前碳汇价格相较于杉木价格低很多,最优轮伐期的改变效果并不是特别明显。

(2) 三种情景下林地期望价值的净现值分别为 20408.20 元/hm²、24587.29 元/hm²、28101.11 元/hm²。尽管当前中国碳排放权交易市场的碳汇价格较低,但依次纳入地上生物量碳汇收益、死亡有机质碳汇收益也能分别提高林地期望价值的净现值 20.48% 和 14.29%,表明全面考虑营林过程中的碳汇效益能够大幅提高林地所有者的经济收益。

(3) 与仅考虑地上生物量碳汇收益相比,全面考虑包含死亡有机质碳库在内的林业碳汇效益能够稳定提高林地所有者收益约 7.02%~21.61%。因此,林业碳汇纳入中国碳排放权交易市场可以在不影响林地所有者决策的情况下增加其收入,这可能会刺激碳汇营林项目的增加,进而提高森林的生态效益,有利于碳中和愿景的实现。

4.2 讨论

有关林地碳汇收益及最优轮伐期确定的 Faustmann-Hartman 模型前期研究主要涉及气候变化缓解、环境外部性、生物质燃料供应等方面,包括不同碳汇价格水平下的比较静态分析和以随机价格假设为基础的动态分析,但多局限于地上生物量部分;少数考虑包含死亡有机质在内的完整林业碳汇效益的研究,也以静态碳汇价格为基础,忽略了价格波动对林地所有者决策带来的影响。本文从随机价格视角出发,使用蒙特卡洛模拟分析纳入完整的林业碳汇效益后林地所有者的收益变化及最优轮伐期确定,结合随机价格假设,既能给出不同情境下最优轮伐期和林地期望价值净现值的均值,也能给出蒙特卡洛模拟结果分布的特征数,用于分析价格波动给林地所有者决策和收益所带来的不确定性,以帮助考虑碳汇收益的林地所有者做出更合理的管理决定。同时,以下几个问题在 Faustmann-Hartman 模型的研究过程中也值得重视。

(1) 将林业碳汇全面纳入中国碳排放权交易市场并完善林业碳汇调查监测体系。由于中国碳排放权交易市场的碳汇价格与已有研究所参考的欧盟碳汇价格相比偏低,本文计算所得的平均最优轮伐期较长而林地期望价值的净现值均值较低^[36,46,47,57]。与静态价格相比,基于随机价格的蒙特卡洛模拟结果显示,纳入死有机质碳汇收益、考虑完整的林业碳汇效益能够稳定提高林地所有者收益约 7.02%~21.61%。因此,首先应当完善林业碳汇调查监测体系,提升各个林业碳库的碳汇监测技术,同时针对完整林业碳汇效益进一步加强方法学的开发,提高完整林业碳汇效益的计量精度,为林业碳汇全面纳入中国碳排放权交易市场提供技术支持。可以预期,林业碳汇纳入中国碳排放权交易市场将刺激碳汇营林项目的增加,进而提高森林的生态效益,充分发挥林业在碳中和愿景实现过程中的作用。

(2) 健全中国碳排放权交易市场的定价及价格波动调控机制。与欧盟等发达国家/地区相比,中国碳排放权交易市场仍处于起步和发展阶段。政府及相关部门应该从政策制定和立法角度进一步健全定价及价格波动调控机制,降低可能存在的市场、技术和政策风险,为中国碳排放权交易市场的稳定运行和林业碳汇收益的实现提供良好的市场环境,从而充分体现林业在缓解气候变化和碳中和实现过程中的作用。另外,出于简化目的,本文仅考虑单次轮作下的杉木人工林碳汇收益及最优轮伐期的确定,在多个轮伐期假设下,由于不同轮伐期内的碳汇价格路径存在差异,仅使用时间序列模型可能难以对林地所有者提供准确的收益评估。因此,如何在随机价格假设下考虑多个轮伐期、提高分析价格随机波动的精确度仍有待研究。

(3) 研究税收政策、自然风险对最优轮伐期和林地所有者经济收益的影响。本文未能考虑税收政策^[21,22]、自然风险^[20,23,24]对于林地所有者改变林种结构、林分密度和营林投入的影响。一般来说,林业部门可以通过制定合理的税收政策以充分实现税收调节功能,促使林地所有者调整最优轮伐期来确保边际收益始终等于边际成本,进而促进林地木材经济效应和生态经济效益的共同发展;由于气候变化加剧而导致自然风险发生概率的提高也会在一定程度上影响林地所有者的经济收益,有必要结合不同林地所有者的风险偏好以评估自然风险对最优轮伐期和林地期望价值的影响,从而提高林地所有者经济收益的稳定性^[10]。上述问题都有待于在今后的研究中予以深化。

致谢: 感谢课题组杨爱军教授、张楠博士的有益建议。

参考文献(References):

- [1] PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333 (6045): 988-993.
- [2] 戴尔阜, 汪晓帆, 朱建佳, 等. 采伐与人工更新对红壤丘陵区森林面积和地上生物量的影响模拟: 以会同县磨哨林场为例. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 2995-3006. [DAI E F, WANG X F, ZHU J J, et al. Modeling the long-term impacts of harvest and artificial regeneration on forest area and aboveground biomass in Red Soil Hilly Region: A case study in Moshao forest farm of Huitong county. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(12): 2995-3006.]
- [3] HARRIS N L, GIBBS D A, BACCINI A, et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 2021, 11(3): 234-240.
- [4] 薛龙飞, 罗小锋, 李兆亮, 等. 中国森林碳汇的空间溢出效应与影响因素: 基于大陆31个省(市、区)森林资源清查数据的空间计量分析. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1744-1754. [XUE L F, LUO X F, LI Z L, et al. Spatial spillover effects and influencing factors of forest carbon sink in China: Spatial econometric analysis based on forest resources inventory in 31 provinces of the mainland of China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1744-1754.]
- [5] 徐伟义, 金晓斌, 杨绪红, 等. 中国森林植被生物量空间网格化估计. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1725-1741. [XU W Y, JIN X B, YANG X H, et al. The estimation of forest vegetation biomass in China in spatial grid. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(10): 1725-1741.]
- [6] 张煜星, 王雪军. 全国森林蓄积生物量模型建立和碳变化研究. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(2): 199-214. [ZHANG Y X, WANG X J. Study on forest volume-to-biomass modeling and carbon storage dynamics in China. *Scientia Sinica Vitae*, 2021, 51(2): 199-214.]
- [7] 张蓉, 孟兵站. 我国林业碳汇项目开发与参与碳市场交易途径分析. *林业建设*, 2020, (5): 49-53. [ZHANG R, MENG B Z. Analysis on the development of forestry carbon sequestration project and the way to participate in carbon market trade in China. *Forestry Construction*, 2020, (5): 49-53.]
- [8] 郭蕾, 赵方芳. 我国碳排放权交易市场活跃度研究: 基于碳价时间序列的测算. *价格理论与实践*, 2020, (7): 98-101, 179. [GUO L, ZHAO F F. Research on the active degree of carbon emission trading market in China: Calculation based on carbon price time series. *Price: Theory & Practice*, 2020, (7): 98-101, 179.]
- [9] 张轲, 武曙红. 林业行业纳入中国碳排放权交易制度的可行性研究. *中南林业科技大学学报: 社会科学版*, 2016, 10 (1): 42-47. [ZHANG K, WU S H. A feasibility study on carbon emission trading system included by the forestry sector in China. *Journal of Central South University of Forestry & Technology: Social Sciences*, 2016, 10(1): 42-47.]
- [10] 张楠, 宁卓, 杨红强. 弗斯曼模型及其广义改进: 基于林地期望值评估方法学演进. *林业经济*, 2020, 42(10): 3-15. [ZHANG N, NING Z, YANG H Q. Faustmann model and its generalization: Methodology evolution based on evaluation of forestland expectation value. *Forestry Economics*, 2020, 42(10): 3-15.]
- [11] FAUSTMANN M. Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. *Journal of Forest Economics*, 1995, 1: 7-44.
- [12] HARTMAN R. The harvesting decision when a standing forest has value. *Economic Inquiry*, 1976, 14(1): 52-58.

- [13] 巢林, 刘艳艳, 洪伟, 等. 碳汇木材复合经营对杉木人工林经济成熟龄及现值收益的影响. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2016, 45(4): 409-419. [CHAO L, LIU Y Y, HONG W, et al. Effect of combined carbon and timber management on net present value of economic maturity age in *Cunninghamia lanceolata* plantation. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2016, 45(4): 409-419.]
- [14] PLANTINGA A J, BIRDSEY R A. Optimal forest stand management when benefits are derived from carbon. Natural Resource Modeling, 1994, 8(4): 373-387.
- [15] 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.
- [16] ENGLIN J, CALLAWAY J M. Environmental impacts of sequestering carbon through forestation. Climatic Change, 1995, 31(1): 67-78.
- [17] OLSCHESKI R, BENITEZ P C. Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. Journal of Forest Economics, 2010, 16(1): 1-10.
- [18] PRICE C, WILLIS R. The multiple effects of carbon values on optimal rotation. Journal of Forest Economics, 2011, 17(3): 298-306.
- [19] SHRESTHA P, STAINBACK G A, DWIVEDI P, et al. Economic and life-cycle analysis of forest carbon sequestration and wood-based bioenergy offsets in the central hardwood forest region of united states. Journal of Sustainable Forestry, 2015, 34(3): 214-232.
- [20] EKHOLM T. Optimal forest rotation under carbon pricing and forest damage risk. Forest Policy and Economics, 2020, 115, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934119304356>.
- [21] CHANG S J. An economic analysis of forest taxation's impact on optimal rotation age. Land Economics, 1982, 58(3): 310-323.
- [22] CHANG S J. Forest property taxation under the generalized Faustmann formula. Forest Policy and Economics, 2018, 88: 38-45.
- [23] REED W J. The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. Journal of Environmental Economics and Management, 1984, 11(2): 180-190.
- [24] NING Z, SUN C Y. Forest management with wildfire risk, prescribed burning and diverse carbon policies. Forest Policy and Economics, 2017, 75: 95-102.
- [25] AMACHER G S, OLLIKAINEN M, KOSKELA E. Economics of Forest Resources. Cambridge: The MIT Press, 2009.
- [26] SAMUELSON P A. Economics of forestry in an evolving society. Economic Inquiry, 1976, 14(4): 466-492.
- [27] CLARKE H R, REED W J. The tree-cutting problem in a stochastic environment. Journal of Economic Dynamics and Control, 1989, 13(4): 569-595.
- [28] THOMSON T A. Optimal forest rotation when stumpage prices follow a diffusion process. Land Economics, 1992, 68(3): 329-342.
- [29] CHLADNA Z. Determination of optimal rotation period under stochastic wood and carbon prices. Forest Policy and Economics, 2007, 9(8): 1031-1045.
- [30] PETRASEK S, PEREZ-GARCIA J, BARE B B. Valuing forestlands with stochastic timber and carbon prices. Annals of Operations Research, 2013, 232: 217-234.
- [31] NING Z, SUN C. Carbon sequestration and biofuel production on forestland under three stochastic prices. Forest Policy and Economics, 2019, 109, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934119303879>.
- [32] GUTRICH J, HOWARTH R B. Carbon sequestration and the optimal management of new hampshire timber stands. Ecological Economics, 2007, 62(3-4): 441-450.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 沈月琴, 王小玲, 王枫, 等. 农户经营杉木林的碳汇供给及其影响因素. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(8): 42-47.

- [SHEN Y Q, WANG X L, WANG F, et al. Carbon sequestration supply and its influencing factors for farmers operating fir in Chinese southern collective forest zone. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(8): 42-47.]
- [36] 周伟, 高岚. 森林碳汇收益的实证分析: 以广东省杉木林为例. *科技管理研究*, 2015, 35(2): 219-223. [ZHOU W, GAO L. Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: Taking fir forest in Guangdong as an example. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(2): 219-223.]
- [37] 张晨, 杨仙子. 基于多频组合模型的中国区域碳市场价格预测. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3017-3025. [ZHANG C, YANG X Z. Forecasting of China's regional carbon market price based on multi-frequency combined model. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2016, 36(12): 3017-3025.]
- [38] 李怒云, 冯晓明, 陆霁. 中国林业应对气候变化碳管理之路. *世界林业研究*, 2013, 26(2): 1-7. [LI N Y, FENG X M, LU J. Carbon management path of China forestry sector in addressing the climate change. *World Forestry Research*, 2013, 26(2): 1-7.]
- [39] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 58-64. [WANG C, ZHANG Y X. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(6): 58-64.]
- [40] 谢聪, 徐晋涛. 森林社会经济效益问题探讨. *世界林业研究*, 2020, 33(3): 101-106. [XIE C, XU J T. A discussion on forest socioeconomic benefit. *World Forestry Research*, 2020, 33(3): 101-106.]
- [41] 陈则生. 杉木人工林经济成熟龄的研究. *林业经济问题*, 2010, 30(1): 22-26. [CHEN Z S. The research on age at economic maturity of Chinese fir plantations. *Issues of Forestry Economics*, 2010, 30(1): 22-26.]
- [42] FANG J, CHEN A, PENG C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [43] 苏伟. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报. 北京: 中国经济出版社, 2013. [SU W. The People's Republic of China Second National Communication on Climate Change. Beijing: China Economic Publishing House, 2013.]
- [44] BOX G E P, JENKINS G M, REINSEL G C. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 4th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons Publication Inc, 2008.
- [45] RAO B L S P. Conditional independence, conditional mixing and conditional association. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 2009, 61(2): 441-460.
- [46] 朱臻, 沈月琴, 张耀启, 等. 碳汇经营目标下的林地期望价值变化及碳供给: 基于杉木裸地造林假设研究. *林业科学*, 2012, 48(11): 112-116. [ZHU Z, SHEN Y Q, ZHANG Y Q, et al. Change of forestland expected value and carbon supply in the objective of carbon sequestration: Based on the Chinese fir plantation in bared land. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(11): 112-116.]
- [47] 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. *林业科学*, 2013, 49(9): 140-147. [SHEN Y Q, WANG F, ZHANG Y Q, et al. Economic analysis of Chinese fir forest carbon sequestration supply in South China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(9): 140-147.]
- [48] 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. *生态学报*, 2013, 33(8): 2577-2585. [ZHU Z, SHEN Y Q, WU W G, et al. Household optimal forest management decision and carbon supply: Case from Zhejiang and Jiangxi provinces. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2577-2585.]
- [49] 王枫, 沈月琴, 朱臻, 等. 杉木碳汇的经济学分析: 基于浙江省的调查. *浙江农林大学学报*, 2012, 29(5): 762-767. [WANG F, SHEN Y Q, ZHU Z, et al. Economic analysis of Chinese fir forest carbon sequestration: Based on Zhejiang's survey. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2012, 29(5): 762-767.]
- [50] 王周绪, 姜全飞. 中国林业行业基准贴现率研究. *林业经济*, 2006, (6): 39-44. [WANG Z X, JIANG Q F. China forestry basic rate of discount. *Forestry Economics*, 2006, (6): 39-44.]
- [51] 徐传洪. 不同林龄序列杉木人工林凋落物特征研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2020. [XU C H. Study on litter characteristics of Chinese fir plantation in different stand ages. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.]
- [52] 周涛, 史培军, 贾根锁, 等. 中国森林生态系统碳周转时间的空间格局. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(5): 632-644. [ZHOU T, SHI P J, JIA G S, et al. Spatial patterns of ecosystem carbon residence time in Chinese forests. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 40(5): 632-644.]

- [53] 蔡兆伟. 福建杉木人工林生物量模型研究. 北京: 北京林业大学, 2014. [CAI Z W. A Study on biomass models of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Fujian. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.]
- [54] NG S, PERRON P. Unit root tests in arma models with data-dependent methods for the selection of the truncation lag. *Journal of the American Statistical Association*, 1995, 90(429): 268-281.
- [55] 张世英, 许启发, 周红. 金融时间序列分析. 北京: 清华大学出版社, 2008. [ZHANG S Y, XU Q F, ZHOU H. Analysis of Financial Time Series. Beijing, Tsinghua University Press, 2008.]
- [56] LJUNG G M, BOX G E P. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, 1978, 65(2): 297-303.
- [57] 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.

Carbon sequestration benefit and optimal rotation period determination of *Cunninghamia lanceolata* plantation under stochastic price

YU Zhi-han^{1,2}, NING Zhuo^{1,2}, YANG Hong-qiang^{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, NFGA, Nanjing 210037, China; 3. Research Center for the Yangtze River Delta's Socioeconomic Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Developing forestry carbon sequestration economy is an important measure to cope with global climate change and realize carbon neutrality in China by 2060. Based on the improved Faustmann-Hartman model, taking *Cunninghamia lanceolata* plantation in Zhejiang, Fujian and Jiangxi provinces in Southern China as research objects, this paper used the time series model to fit and predict the carbon price of China's carbon emission trading market, and used Monte Carlo simulation to determine the optimal rotation period and the net present price of the land expectation value. The results showed that: (1) The optimal rotation periods of *Cunninghamia lanceolata* plantation were 21.85 years, 22.98 years and 22.88 years respectively when timber revenue, aboveground biomass carbon sequestration revenue and dead organic carbon sequestration revenue were included in turn. (2) Under the above three scenarios, the net present values of the land expectation value were 20408.20 CNY/hm², 24587.29 CNY/hm² and 28101.11 CNY/hm², respectively. (3) Comprehensive consideration of forest carbon sequestration benefits including dead organic matter carbon pool can stably raise the income of forest owners by 7.02%-21.61%. In addition, it is necessary to further consider the impact of tax policy and natural risks on carbon sequestration under multiple rotation in the follow-up study of determining the optimal rotation period and carbon sequestration benefits.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; carbon sequestration benefits; optimal rotation period; Faustmann-Hartman model; stochastic price; time series analysis; Monte Carlo simulation