

DOI:10.12171/j.1000-1522.20220399

杉木人工林碳汇木材多功能经营的最优轮伐期

臧颢¹ 黄锦程² 刘洪生² 欧阳勋志¹ 姜俊³ 宁金魁¹

(1. 江西农业大学林学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省崇义县林业局, 江西 赣州 341300; 3. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要:【目的】探讨不同条件下杉木人工林碳汇木材多功能经营的最优轮伐期及收益的变化, 为杉木人工林多功能经营和决策提供科学依据。【方法】以江西省崇义县杉木人工林为研究对象, 基于 31 块固定样地的多期调查数据, 以 Faustmann-Hartman 模型为基础, 设计了 3 种模拟情景, 情景 1 只考虑木材收益, 情景 2 和 3 分别在情景 1 的基础上依次纳入地上生物量碳汇收益和死亡有机质碳汇收益, 不同情景分析了不同碳价格、利率和立地质量对杉木人工林的最优轮伐期和林地期望值的影响。【结果】基准条件下(地位指数 15 m、利率 5% 和碳价格 77 元/t), 林地期望值随着林分年龄的增加表现为先增加后减小, 情景 1 和情景 2 的最优轮伐期均为 21 年, 情景 3 为 20 年, 最优轮伐期下情景 2 和 3 的林地期望值对比情景 1 分别增加了 23% 和 35%。随着碳价格的增加, 最优轮伐期和林地期望值分别呈现缩短和增加的趋势; 同一碳价格下, 3 种情景的最优轮伐期最多相差达 4 年, 且随着碳价格的增加, 最优轮伐期的差异也在逐渐增大。随着利率的增加, 最优轮伐期和林地期望值均呈现减小趋势; 当利率增至 7% 时, 林地期望值大幅降至 10% 以下, 情景 1 甚至出现了负数。随着地位指数的增加, 3 种情景下林地期望值均显著增加, 最优轮伐期则逐渐缩短。【结论】当前杉木经营的环境下, 碳汇收益的增加对最优轮伐期的影响不明显, 但能显著增加林地期望值, 因此有利于增强经营者从事人工林多功能经营的积极性。碳价格、利率和立地质量可显著影响最优轮伐期和林地期望值。

关键词: 杉木人工林; 最优轮伐期; 多功能经营; Faustmann-Hartman 模型; 碳库

中图分类号: S750 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2022)10-0120-09

引文格式: 臧颢, 黄锦程, 刘洪生, 等. 杉木人工林碳汇木材多功能经营的最优轮伐期 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 120-128. Zang Hao, Huang Jincheng, Liu Hongsheng, et al. Optimal rotation period of carbon sequestration wood multifunctional management in Chinese fir plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 120-128.

Optimal rotation period of carbon sequestration wood multifunctional management in Chinese fir plantation

Zang Hao¹ Huang Jincheng² Liu Hongsheng² Ouyang Xunzhi¹ Jiang Jun³ Ning Jinkui¹

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;

2. Forestry Bureau of Chongyi County, Ganzhou 341300, Jiangxi, China;

3. School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The paper aims to analyze the change of optimal rotation and benefits under different conditions in consideration of carbon sequestration and timber for Chinese fir plantation, and provide a scientific basis for multi-functional management and decision. [Method] This study focused on Chinese fir plantation in Chongyi County and conducted in remeasurement data of 31 permanent plots, Jiangxi Province of eastern China. Based on Faustmann-Hartman model, three different scenarios were designed in this study. Scenario 1 only considered timber benefits. Scenario 2 added additional aboveground biomass pool, and Scenario 3 further considered the impact of dead organic matter pool. For each scenario,

收稿日期: 2022-09-30 修回日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901306、31960313、31700563)。

第一作者: 臧颢, 讲师。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: b12345abba@163.com 地址: 330054 江西省南昌市昌北区志敏大道 1101 号江西农业大学林学院。

责任作者: 宁金魁, 讲师。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: ning.jinkui@gmail.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

the effects of different carbon prices, rates and site index on the optimal rotation and land expected value were analyzed. [Result] Under the baseline condition (carbon price: 77 CNY/t; rate: 5%; site index: 15 m), the land expected value showed a trend of first increasing and then decreasing with the increasing age. The optimal rotation for scenario 1 and 2 was 21 years, and for scenario was 20 years. Compared with scenario 1, a 23% increase of the land expected value was found for scenario 2 and a 35% increase for scenario 3. With the carbon price increasing, the optimal rotation decreased and the land expected value increased. For the same carbon price, the difference of optimal rotation among three scenarios was up to 4 years, and the difference increased with carbon price increased. With the rate increasing, the optimal rotation and land expected value showed a decreasing trend. When rate was 7%, the land expected value turned to be down to less than 10% for all three scenarios and negative land expected value was found for scenario 1. With the site index increased, the optimal rotation decreased and the land expected value increased. [Conclusion] Under the present Chinese fir management environment, benefits of carbon sequestration do not have a significant effect on optimal rotation. However, an impact on land expected value exists. It is beneficial to enhance the enthusiasm of multi-functional management for Chinese fir plantation. Carbon price, rate and site quality can significantly affect the optimal rotation and land expected value.

Key words: Chinese fir plantation; optimal rotation period; multifunctional management; Faustmann-Hartman model; carbon pool

全球气候变化已经成为当前的热点问题。森林是陆地生态系统的主体,充分发挥森林的碳汇作用是应对全球变暖的有效措施^[1-2]。长期以来,中国的人工林面积居全球首位。据第九次全国森林资源连续清查结果^[3],全国人工林面积为 7 594.28 万 hm^2 ,固碳潜力巨大。因此,加强中国人工林的可持续经营管理,将碳减排列入人工林经营的主要目标中,有助于推进碳中和背景下中国人工林多功能经营的发展^[4-6]。

人工林经营中的一个关键问题是,如何确定林分的最优轮伐期,进而使得林地收益最大化^[7]。使用 Faustmann-Hartman 模型是目前多数学者处理这一问题的常见做法,并以此确定具有林地最大化木材收益和碳汇收益的最优轮伐期^[8-9]。林卓等^[6]、薛蓓蓓等^[10]在对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林进行分析时发现:在仅考虑木材收益的基础上,引入碳汇收益,不能改变林分的最优轮伐期。也有一些学者^[11-12]认为:相较于单一的考虑木材收益,在经营目标中加入碳汇收益后能显著的延长林分的最优轮伐期。多功能林分旨在兼顾木材收益和碳汇收益,国内外研究在对其最优轮伐期的研究已经有了一定积累,尽管国内外在兼顾木材收益和碳汇收益的多功能森林最优轮伐期的确定上已经有了一些积累^[13-14],但目前尚未获得一致的结论。同时这些结论也因研究采用的碳价格、利率等的不同而变化。针对这一问题,很多学者采用敏感性分析探究了碳价格、营林成本、利率、树种等因素对最优轮伐期的影响。如:Thomson^[15]在随机木材价格假设下探究了最优轮伐

期的确定方法,发现最优轮伐期对木材价格不敏感;沈月琴等^[16]发现碳价格对杉木人工林最优轮伐期存在一定的影响。

上述研究大多聚焦于树木生物量的碳汇作用,而忽略了死亡有机质碳库。Astante 等^[13,17]发现:死亡有机质碳库会缩短最优轮伐期,而这一影响在碳价格较低时不明显。余智涵等^[7]基于净现值计算了木材收益、地上生物量碳库和死亡有机质碳库下杉木人工林的最优轮伐期,发现了相似的结果,但基于净现值计算的最优轮伐期是以单个轮伐期的多功能最大化为目标,而无限轮伐期下死亡有机质碳库对最优轮伐期的影响研究较少。

杉木是我国重要的人工造林树种,面积和蓄积分别为 990.20 万 hm^2 和 75 545.01 万 m^3 ,占全国人工林面积的 17% 和人工林蓄积的 22%^[3]。杉木人工林在中国林业发展中具有非常重要的地位,综合考虑木材和碳汇收益,并以此确定杉木人工林的最优轮伐期,具有极其重要的研究意义和实践价值。鉴于此,本研究以江西省赣州市崇义县杉木人工林为研究对象,基于实地调查数据,在综合考虑地上生物量和死亡有机质碳库的基础上,分析了碳价格、利率和立地质量对杉木人工林最优轮伐期和林地期望值的影响,以期对杉木人工林的多功能经营和决策提供科学依据。

1 研究区概况

崇义县位于江西省赣州市西部,属于南岭的北端,地理坐标为 25°24' ~ 25°55' N, 113°55' ~

114°38'E。崇义县地处中低纬度,属中亚热带季风湿润区,年平均气温 20.5 °C,极端最高温 39.9 °C,最低温-8 °C,年均降水量 1 638.9 mm,无霜期 307 d。全县总面积 2 206.27 km²,主要地貌为低山、丘陵,土壤类型有黄壤、红壤等。崇义县属常绿阔叶林生物气候带,主要树种有杉木、马尾松(*Pinus massoniana*)、丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)、苦楝(*Melia azedarach*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、木荷(*Schima superba*)等。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

固定样地数据来自崇义县境内 42 块杉木人工

林样地,面积为 600 和 667 m²。样地布设时间为 2011—2020 年,每块样地进行过 1~3 次复测,调查间隔期 1 年。主要调查样地的地理坐标、地形、坡度、海拔、土壤类型、种植时间,并对胸径 5 cm 以上的树木进行每木检尺,记录树种,测量胸径、树高等因子。基于后续研究的需要,从 42 个样地中选取了初植密度相同(2 535 株/hm²)的 31 块样地用于后续的模式构建。样地布设时的基本概况及复测信息见表 1。

2.2 研究方法

本研究采用 Faustmann-Hartman 模型^[7,18-19]探究杉木人工林最优轮伐期,并以林地期望值最大时的年龄作为最优轮伐期。

表 1 样地概况

Tab. 1 General situation of sample plots

样地 Sample plot	年龄/a Age/year	林分平均胸径 Stand mean DBH/cm	林分平均高 Stand mean height/m	密度/(株·hm ⁻²) Density/(tree·ha ⁻¹)	地位指数 Site index/m	面积 Area/m ²	布设年份 Layout year	复测次数 Remeasurement time
P1	12	13.5	10.9	1 155	16.4	667	2014	3
P2	10	10.7	10.6	1 545	16.6	667	2014	3
P3	10	9.4	10.5	1 515	17.0	667	2014	3
P4	8	8.5	10.2	2 115	11.6	667	2011	3
P5	8	7.9	9.3	2 325	11.9	667	2011	3
P6	14	15.4	14.9	1 305	15.8	667	2011	3
P7	8	10.2	8.8	1 980	12.6	667	2011	3
P8	21	15.5	11.2	1 380	10.1	667	2011	3
P9	8	10.1	9.8	2 055	15.8	667	2011	3
P10	31	28.5	16.4	990	14.2	667	2016	3
P11	31	31.1	16.2	1 065	14.3	667	2016	3
P12	29	27.7	17.2	1 035	15.5	667	2016	3
P13	6	5.7	8.8	2 490	20.1	667	2014	3
P14	10	11.7	10.7	1 620	17.3	667	2015	2
P15	10	10.2	7.9	1 980	13.7	667	2015	2
P16	10	12.4	10.1	1 590	18.4	667	2015	2
P17	10	10.9	9.2	1 800	18.0	667	2015	2
P18	10	10.3	8.9	1 770	19.9	667	2015	2
P19	9	7.7	9.7	1 935	18.9	667	2016	3
P20	10	8.2	10.2	1 800	18.6	667	2016	3
P21	13	10.7	10.5	1 275	16.7	667	2016	3
P22	10	9.4	10.0	1 785	19.4	667	2016	3
P23	10	9.4	10.0	1 665	18.5	667	2016	3
P24	32	21.0	20.8	1 005	17.2	667	2020	1
P25	36	18.1	12.8	945	14.4	667	2020	1
P26	44	15.3	11.1	870	8.8	667	2020	1
P27	13	11.5	10.5	1 320	15.4	600	2015	2
P28	11	11.4	10.7	1 440	15.2	600	2015	2
P29	15	13.3	8.5	1 155	20.0	600	2015	2
P30	15	14.4	10.4	1 200	17.6	600	2015	2
P31	15	13.0	10.1	1 125	19.0	600	2015	2

注:地位指数采用基于Richards方程的差分方程法计算,基准年龄为20年。Notes: site index is calculated using the algebraic difference model based on Richards equation, and the base age is 20 years.

2.2.1 林分蓄积和地上生物量

本研究采用江西省的二元材积式^[20]计算样地中每木的蓄积, 采用适用于江西省的二元生物量方程^[21]计算样地中每木的地上生物量, 将样地中所有单木的蓄积和地上生物量累加后换算成单位面积的林分蓄积和地上生物量。

采用 Richards 方程, 构建林分蓄积和地上生物量的生长模型, 并采用再参数化的方法关联蓄积和生物量生长模型的参数与地位指数, 建立含地位指数的林分蓄积和地上生物量生长模型, 并采用 5 折交叉验证和决定系数(R^2)、平均绝对偏差(MAE)和均方根误差(RMSE)等 3 个评价指标描述模型的精度。Richards 方程的形式如下:

$$y = \beta_0(1 - e^{-\beta_1 t})^{\beta_2} \quad (1)$$

式中: y 为因变量, t 为年龄, $\beta_i(i=0,1,2)$ 为待估参数, 再对待估参数进行再参数化, 其形式如下:

$$\beta_i = \beta_{i0} + \beta_{i1} SI \quad (2)$$

式中: β_{i0} 和 β_{i1} 为待估参数, SI 为地位指数。

2.2.2 多功能经营的最优轮伐期

本研究采用 Faustmann-Hartman 模型, 从情景 1(木材收益)、情景 2(木材收益 + 地上生物量碳汇收益)和情景 3(木材收益 + 地上生物量碳汇收益 + 死亡有机质碳汇收益)3 个情景计算杉木人工林多功能经营下的林地期望值, 以林地期望值最大作为确定最优轮伐期的依据。3 种情景的期望值计算形式

如下:

$$LEV_1 = LEV_t - LEV_m \quad (3)$$

$$LEV_2 = LEV_t - LEV_m + LEV_b \quad (4)$$

$$LEV_3 = LEV_t - LEV_m + LEV_b + LEV_d \quad (5)$$

式中: LEV_1 、 LEV_2 、 LEV_3 分别表示 3 种情景计算的林地期望值(元/hm²), LEV_t 为木材收入(元/hm²), LEV_m 为经营成本(元/hm²), LEV_b 为地上生物量碳汇收益(元/hm²), LEV_d 为死亡有机质碳汇收益(元/hm²)。

木材收入(LEV_t)的计算公式如下:

$$LEV_t = \frac{\rho P_t V(T) e^{-rT}}{1 - e^{-rT}} \quad (6)$$

式中: ρ 为出材率; P_t 为木材价格(元/m³); 出材率和木材价格根据崇义县近 5 年的出材情况和杉木销售情况, 分别取 70% 和 1 200 元/m³; T 为轮伐期, $V(T)$ 为根据构建的林分蓄积生长模型计算得到 T 年时的林分蓄积量(m³/hm²), r 为连续时间利率。

经营成本(LEV_m)的计算公式如下:

$$LEV_m = \frac{C_a + \sum C_t e^{-rk} + \sum C_p e^{-rl} + C_h e^{-rT}}{1 - e^{-rT}} \quad (7)$$

式中: C_a 为造林成本(元/hm²), C_t 为抚育补植成本(元/hm²), C_p 为管护成本(元/hm²), C_h 为采伐运输成本(元/m³), k 和 l 分别为抚育和管护的时间。所有成本的信息均通过在崇义县的实际调研得到(表 2)。

表 2 单位面积经营成本

Tab. 2 Operating cost per unit area

造林整地/(元·hm ⁻²) Afforestation and land preparation/(CNY·ha ⁻¹)	抚育/(元·hm ⁻²) Silviculture/(CNY·ha ⁻¹)			管护/(元·hm ⁻²) Management/(CNY·ha ⁻¹)	采运成本/(元·m ⁻³) Mining and transportation cost/(CNY·m ⁻³)
	第1年	第2年	第3年		
	First year	Second year	Third year		
11 940	3 900	4 200	3 000	300	374

考虑到最优轮伐期末采伐时的林木一部分会长期储存在木制品中, 因此地上生物量碳汇收益(LEV_b)的计算公式采用如下:

$$LEV_b = \frac{\theta P_c \int_0^T B'(t) e^{-rt} dt - \theta P_c (1 - \alpha_1) B(T) e^{-rT}}{1 - e^{-rT}} \quad (8)$$

式中: θ 为含碳系数, 取 0.500 3^[21], P_c 为碳价格(元/t), $B'(t)$ 是 $B(t)$ 的导数, $B(t)$ 为根据构建的林分地上生物量生长模型计算得到的 t 时的林分地上生物量(t/hm²), $B(T)$ 是 $t=T$ 时 $B(t)$ 的值。 α_1 为长期储存在木制品中的碳比例, 本研究采用的黄宰胜等^[22]的计算方法, 对应的公式为:

$$\alpha_1 = 1 - \frac{v_1 \beta_1}{r + v_1} - \frac{v_2 (1 - \beta_1)}{r + v_2} \quad (9)$$

式中: v_1 为长期耐用木制品腐烂速度, 取 0.007 9^[22], v_2 为短期木制品的腐烂速度, 取 0.010 3^[22], β_1 为木制品中长期耐用木制品的比例, 本研究取 0.5^[10]。

根据 Asante^[17]给出的死亡有机质碳库的碳储量变化规律, 死亡有机质碳汇收益(LEV_d)的计算公式可以写成:

$$LEV_d = \frac{\theta P_c \int_0^T D'(t) e^{-rt} dt - P_c (\theta B(T) - \gamma V(T)) e^{-rT}}{1 - e^{-rT}} \quad (10)$$

式中: $\theta B(T) - \gamma V(T)$ 表示采伐后转移至死亡有机质碳

库的值, γ 取 0.159 64^[7], $D'(t)$ 是死亡有机质碳库储量在 t 年时的变化, 其计算公式如下^[7]:

$$D'(t) = \beta_2 B(t) - e^{-\alpha_2 t} \int_0^t \beta_2 B(m) e^{\alpha_2 m} dm \quad (11)$$

式中: m 为积分变量, α_2 为死亡有机质碳库衰减的速率, 取 0.28^[23], β_2 为地上生物量碳库以凋落物形式每年转移至死亡有机质碳库的比例, 取 0.060 1^[24-25]。

2.2.3 敏感性分析

为了定量探索不同碳价格、利率和立地条件对杉木人工林最优轮伐期的影响, 分别模拟 5 种碳价格(25、50、77、300、500 元/t)、5 种利率(3%、4%、5%、6%、7%)和 5 种地位指数(11、13、15、17、19 m)对最优轮伐期和林地期望价的影响。其中, 地位指数 15 m、利率 5% 和碳价格 77 元/t(为广州碳排放权交易所 2022 年的日度碳排放权配额收盘价的平均值)为本研究的基准条件。

3 结果与分析

3.1 林分蓄积量和地上生物量生长模型

基于 Richards 方程, 构建的林分蓄积量生长模型和地上生物量生长模型如下:

$$V = 5.136 4SI^{1.655 4} (1 - e^{-0.067 949t})^{2.754 3} \quad (12)$$

$$B = 2.760 2SI^{1.325 7} (1 - e^{-0.149 01t})^{2.330 5} \quad (13)$$

式中: V 为林分蓄积量(m^3/hm^2), B 为地上生物量(t/hm^2)。

五折交叉验证的结果表现: 蓄积生长模型的 R^2 为 0.796, MAE 为 27.7 m^3/hm^2 , RMSE 为 33.9 m^3/hm^2 ; 地上生物量生长模型的 R^2 为 0.789, MAE 为 11.3 t/hm^2 , RMSE 为 14.1 t/hm^2 , 说明构建的模型精度较好, 可以应用于后续的林地期望值的计算。

3.2 最优轮伐期

根据构建的生长模型及经济指标, 按前述公式分别计算 3 种情景下的出材量、地上部分固碳量和林地期望值(表 3)。总的来看: 出材量和地上部分固碳量表现为随着年龄的增加而增大, 但增幅逐渐减小, 3 种情景下林地期望值均表现为随着年龄的增加而先增大后减小的趋势。当仅考虑木材收益时, 杉木人工林最优轮伐期为 21 年, 对应的林地期望值为 1.37 万元/ hm^2 。同时考虑了木材和地上生物量的碳汇收益后, 最优轮伐期仍为 21 年, 对应的林地期望值则增加到了 1.69 万元/ hm^2 。进一步考虑了死亡有机质的碳汇收益后, 杉木人工林的最优轮伐期则降至 20 年, 林地期望值则增加至 1.86 万元/ hm^2 。

综合来看: 在基准条件下, 仅考虑地上生物量的碳汇收益对杉木人工林的最优轮伐期无明显影响, 但能显著增加林地期望值; 而进一步考虑了死亡有机质的碳汇收益后, 能在一定程度上缩短最优轮伐期, 并增加林地期望值, 其中最优化期下情景 2

表 3 各情景下杉木人工林的林地期望值

Tab. 3 Land expected values of Chinese fir plantation under different scenarios

年龄/a Age/year	出材量/ $(m^3 \cdot hm^{-2})$ Timber yield/ $(m^3 \cdot ha^{-1})$	林分地上部分固碳量/ $(t \cdot hm^{-2})$ Stand aboveground carbon sequestration/ $(t \cdot ha^{-1})$	林地期望值/ $(万元 \cdot hm^{-2})$ Land expected value/ $(10^4 CNY \cdot ha^{-1})$		
			情景1 Scenario 1	情景2 Scenario 2	情景3 Scenario 3
12	63.6	32.7	-0.32	0.03	0.31
13	73.1	34.8	0.12	0.47	0.74
14	82.8	36.7	0.48	0.82	1.08
15	92.6	38.4	0.76	1.10	1.34
16	102.4	39.9	0.98	1.31	1.54
17	112.1	41.3	1.14	1.47	1.68
18	121.7	42.4	1.25	1.58	1.78
19	131.1	43.4	1.33	1.65	1.83
20	140.3	44.3	1.36	1.68	1.86
21	149.3	45.1	1.37	1.69	1.85
22	157.9	45.8	1.36	1.67	1.82
23	166.4	46.3	1.32	1.63	1.77
24	174.5	46.8	1.27	1.57	1.70
25	182.3	47.3	1.20	1.49	1.63

和 3 的林地期望值分别比情景 1 增加了 23% 和 35%。

3.3 敏感性分析

3.3.1 碳价格的影响

随着碳价格从 77 元/t 增加到 500 元/t 时, 考虑了碳汇收益的情景 2 和情景 3 的最优轮伐期会缩短 1~3 年, 林地期望值增至 2.03 和 2.51 倍; 当碳价格从 77 元/t 降到 25 元/t 时, 对应的最优轮伐期最多延长 1 年, 林地期望值降至 88% 和 82%。总体而言, 随着碳价格的增加, 最优轮伐期和林地期望值分别呈现缩短和增加的趋势(图 1)。同一碳价格下, 3 种情景的最优轮伐期最多相差为 4 年, 且随着碳价格的增加, 最优轮伐期的差异也在逐渐增大。

3.3.2 利率的影响

当利率从 5% 降至 3% 时, 3 种情景的最优轮伐期会延长 2 或 3 年, 林地期望值则分别增至 4.12、3.63 和 3.44 倍; 当利率从 5% 增至 7% 时, 3 种情景的最优轮伐期均缩短 2 年, 而林地期望值则大幅降至 10% 以下, 情景 1 甚至出现了负数。总体而言, 随着利率的增加, 最优轮伐期和林地期望值均呈现减小趋势(表 4)。同一利率下, 不同情景的最优轮伐期最

多相差 1 年, 其差异并未随着利率的增加表现出明显的变化。

3.3.3 地位指数的影响

当地位指数从 15 m 增至 19 m 时, 3 种情景的最优轮伐期缩短了 1 或 2 年, 林地期望值则分别增至 2.89、2.61 和 2.48 倍; 而当地位指数从 15 m 降至 11 m 时, 3 种情景的最优轮伐期延长了 2 或 3 年, 林地期望值则在地位指数降至 13 m 分别降至 18%、30% 和 36%; 当地位指数降至 11 m 时, 林地期望值则为负值。总体而言, 随着地位指数的增加, 3 种情景的林地期望值均显著增加, 最优轮伐期则逐渐缩短(表 5)。同一地位指数下, 不同情景的最优轮伐期最多相差 1 年, 其差异并未随着地位指数的增加表现出明显的变化。

4 讨 论

本研究利用 Faustmann-Hartman 模型从 3 种情景分析了杉木人工林最优轮伐期及林地期望值的变化, 结果表明: 仅考虑木材收益(情景 1)时, 最优轮伐期最长; 而综合考虑了木材收益、地上生物量碳汇

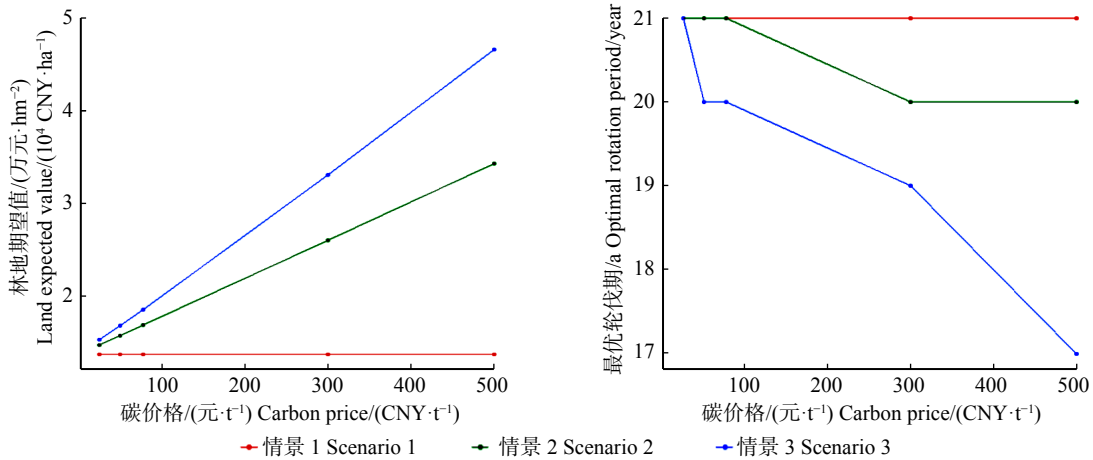


图 1 碳价格对杉木人工林林地期望值和最优轮伐期的影响

Fig. 1 Effects of carbon price on the land expected values and optimal rotation period of Chinese fir plantation

表 4 利率对杉木人工林林地期望值和最优轮伐期的影响

Tab. 4 Effects of interest rate on land expected values and optimal rotation period of Chinese fir plantation

利率 Rate/ %	情景1 Scenario 1		情景2 Scenario 2		情景3 Scenario 3	
	最优轮伐期/a Optimal rotation period/year	林地期望值/(万 元·hm ⁻²) Land expected value/(10 ⁴ CNY·ha ⁻¹)	最优轮伐期/a Optimal rotation period/year	林地期望值/(万 元·hm ⁻²) Land expected value/(10 ⁴ CNY·ha ⁻¹)	最优轮伐期/a Optimal rotation period/year	林地期望值/(万 元·hm ⁻²) Land expected value/(10 ⁴ CNY·ha ⁻¹)
3	24	5.66	23	6.12	23	6.38
4	22	2.92	22	3.29	21	3.49
5	21	1.38	21	1.69	20	1.86
6	20	0.42	20	0.69	19	0.83
7	19	-0.22	19	0.02	18	0.14

表5 地位指数对杉木人工林林地期望值和最优轮伐期的影响

Tab. 5 Effects of site index on the land expected values and optimal rotation of Chinese fir plantation

地位指数 Site index/m	情景1 Scenario 1		情景2 Scenario 2		情景3 Scenario 3	
	最优轮伐期/a Optimal rotation period/year	林地期望值/(万 元·hm ⁻²) Land expected value/(10 ⁴ CNY·ha ⁻¹)	最优轮伐期/a Optimal rotation period/year	林地期望值/(万 元·hm ⁻²) Land expected value/(10 ⁴ CNY·ha ⁻¹)	最优轮伐期/a Optimal rotation period/year	林地期望值/(万 元·hm ⁻²) Land expected value/(10 ⁴ CNY·ha ⁻¹)
11	23	-0.74	23	-0.54	23	-0.39
13	22	0.25	22	0.51	21	0.67
15	21	1.37	21	1.69	20	1.86
17	20	2.62	20	2.99	20	3.17
19	20	3.97	19	4.40	19	4.60

收益和死亡有机质碳库收益(情景3)时,最优轮伐期最短,即随着碳库收益种类的增加,杉木人工林最优轮伐期表现出一定程度的缩短,但总体变化不明显。而林地期望值则随着碳库种类的增加显著增加,这与林卓等^[6]、薛蓓蓓等^[10]对杉木林的研究结果基本一致。在木材收益的基础上,综合考虑树木生物量的碳汇收益,不会改变经营决策;而增加了死亡有机质碳库后,最优轮伐期会表现小幅度的缩短,这也与余智涵等^[7,17]的研究一致。一些学者^[4,26]认为,随着在经营目标中考虑的碳库增多,最优轮伐期也会逐渐变动,且随着碳价格的增加,最优轮伐期的变动也会更大。

在现实的人工林经营过程中,影响最优轮伐期的因素很多。本研究分别分析了碳价格、利率和立地质量对最优轮伐期的影响。从结果看,不同碳库下碳价格对最优轮伐期的影响并不一致。情景2时的最优轮伐期会随着碳价格的增加而发生微小变动,而进一步考虑了死亡有机质碳库后,最优轮伐期的变动开始随着碳价格的增加而增加,特别是在碳价格大于300元/t后,呈现出碳价格每增加100元/t,最优轮伐期缩短1年的趋势。这与黄宰胜等^[27]、朱臻等^[28]的研究结果相似。

利率反映了机会成本,对经济效益有着较大的影响。本研究选用5种利率分析了利率对最优轮伐期的影响,发现随着利率的升高,最优轮伐期逐渐缩短,但不同情景下最优轮伐期的缩短程度差异不明显。此外,林地期望值也随着利率的升高而逐渐降低,在利率达到7%时,情景1中的林地期望值由正转负,而碳库的增加在一定程度上增加了林地期望值,但并没有改变随着利率的升高林地期望值降低的趋势。即碳库的增加并没有改变利率对最优轮伐期和林地期望值的影响程度。考虑到利率升高后森林经营的机会成本也会增加^[29-30],从而导致林业经营者的积极性也会降低,利率的升高对杉木人工林

的多功能经营是不利的。

立地质量是影响森林生长发育的关键因素,与林分蓄积量和碳储量之间有着密切的关系。本研究采用地位指数衡量立地质量的高低,发现随着地位指数的增加,最优轮伐期逐渐缩短。即立地质量对最优轮伐期存在显著影响。而本研究构建的林分蓄积量模型和地上生物量模型中,地位指数并不影响模型的拐点,即不会改变连年生长量达到最大时的林分年龄,这似乎与这一结果相悖。但事实上不同情景考虑的收益不同,而收益不仅取决于林分蓄积量或固碳量,由于本研究考虑了货币的时间价值,因此收益也与木材价格、碳价格及利率有关,并最终影响到林地期望值的变化,从而使得立地质量会影响最优轮伐期,这一结果与一些学者的发现^[6,31]相同。但不同碳库之间没有表现出明显差异,而林地期望值则随着地位指数的增加而增加,且随着碳库的增加,林地期望值增加的幅度逐渐变小,即碳库的增加不会改变最优轮伐期对地位指数的敏感性,但会缩小林地期望值对地位指数的敏感性。

在兼顾碳汇和木材的多功能经营下,杉木人工林的最优轮伐期对碳价格、利率和立地质量的变化反应较为敏感,而对碳库数量变化反应仅在碳价格超过300元/t时才表现出较为明显的变化。从投资的角度看,利率是人工林盈利能力的主要影响因素^[30,32],因此经营者在确定轮伐期时,应更多的关注于利率的变化。由于目前国内的碳价格较低(近5年间广州碳排放权交易所日度碳排放权配额收盘价最高为95.26元/t),因此在当前碳价格下经营者在确定轮伐期时不需要过多考虑碳库的影响。

5 结 论

兼顾木材收益和碳汇收益的多功能经营是人工林可持续发展的重要趋势。人工林有着巨大的固碳潜力,能使林业经营者获得木材收益的同时,还能获

得碳汇收益,在固碳减排上有着十分重要的表现。因此,当存在木材、碳汇等多个经营目标时,如何确定人工林的最优轮伐期十分重要。本研究基于实地调查数据,通过在经营目标中引入 2 种碳库的碳汇收益,分析探讨了碳库的增加对杉木人工林最优轮伐期的影响,同时比较了碳价格、利率和立地质量 3 个不确定因素对最优轮伐期和林地期望值的影响,得到的主要结论如下:

(1)在碳价格较低的情况下,引入碳汇目标并不会改变原来的经营决策,但总的收益会显著增加。对经营者而言,不用调整经营决策就可以获得更多的收益,有助于增加人工林多功能经营的积极性。

(2)最优轮伐期受碳价格、利率和立地质量的影响较为明显,其中利率和立地质量对最优轮伐期的影响不因碳库的增加而发生大的变动,但碳价格对最优轮伐期的影响随着碳库的增加而逐渐加强。

(3)林地期望值受碳价格、利率和立地质量的影响较为明显,其中利率对林地期望值的影响不因碳库的增加而发生大的变动,但碳价格和立地质量对林地期望值的影响随着碳库的增加而逐渐加强。随着碳库的增加,林地期望值随着碳价格的增加而增加的趋势更为明显,而随着立地质量的增加而增加的趋势逐渐减小。

参 考 文 献

- [1] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333: 988-993.
- [2] Harris N L, Gibbs D A, Baccini A, et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(3): 234-240.
- [3] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- State Forestry Administration. Chinese forest resources report (2014-2018)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.
- [4] 董灵波, 藺雪莹, 张一帆, 等. 兼顾碳汇和木材生产的长白落叶松人工林最优轮伐期[J]. *林业科学*, 2022, 58(5): 18-30.
- Dong L B, Lin X Y, Zhang Y F, et al. Optimal rotation of *Larix olgensis* plantation in considering carbon sequestration and timber production[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(5): 18-30.
- [5] 简盖元, 冯亮明, 刘伟平. 基于碳汇价值的森林最优轮伐期分析[J]. *林业经济问题*, 2011, 31(1): 70-75.
- Jian G Y, Feng L M, Liu W P. Analysis of forest optimal rotation which base on the value of carbon sequestration[J]. *Issues of Forestry Economics*, 2011, 31(1): 70-75.
- [6] 林卓, 吴承祯, 洪伟, 等. 杉木人工林碳汇木材复合经济收益分析及最优轮伐期确定: 基于时间序列预测模型[J]. *林业科学*, 2016, 52(10): 134-145.
- Lin Z, Wu C Z, Hong W, et al. Economic benefits analysis of carbon sequestration and timber and determination of optimal rotation period for a *Cunninghamia lanceolata* plantation based on time series model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(10): 134-145.
- [7] 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.
- Yu Z H, Ning Z, Yang H Q. Carbon sequestration benefit and optimal rotation period determination of *Cunninghamia lanceolata* plantation under stochastic price[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(3): 753-768.
- [8] Gong Z, O'Hara K L, Li W. Optimal forest rotation periods: integrating timber production and carbon sequestration benefits in *Pinus tabulaeformis* plantations on the Loess Plateau, P. R. China[J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 2019, 38(6): 591-613.
- [9] Guthrie G, Kumareswaran D. Carbon subsidies, taxes and optimal forest management[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2009, 43(2): 275-293.
- [10] 薛蓓蓓, 田国双. 基于碳汇木材复合经营目标的综合效益及影响因素分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(2): 205-212.
- Xue B B, Tian G S. Analysis of comprehensive benefits and influencing factors based on the combined economic value of carbon sequestration and timber benefits[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 45(2): 205-212.
- [11] Méndez M A, Rico M J. Heuristic forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations[J]. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2017, 10(1): 430-439.
- [12] 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.
- [13] 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[J]. *Journal of Forest Economics*, 2011, 17(1): 3-17.
- [14] Diaz-Balteiro L, Rodriguez L C E. Optimal rotations on *Eucalyptus* plantations including carbon sequestration: a comparison of results in Brazil and Spain[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229(1): 247-258.
- [15] Thomson T A. Optimal forest rotation when stumpage prices follow a diffusion process[J]. *Land Economics*, 1992, 68(3): 329-342.
- [16] 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.
- Shen Y Q, Wang F, Zhang Y Q, et al. Economic analysis of Chinese fir forest carbon sequestration supply in south China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(9): 140-147.
- [17] 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.

- [18] Faustmann M. Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry[J]. *Journal of Forest Economics*, 1849, 1: 7-44.
- [19] Hartman R. The harvesting decision when a standing forest has value[J]. *Economic Inquiry*, 1976, 14(1): 52-58.
- [20] 刘琪璟. 中国立木材积表 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.
Liu Q J. Tree volume tables of China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017.
- [21] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数——杉木: LY/T 2264—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Cunninghamia lanceolata*: LY/T 2264-2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [22] 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[J]. *资源科学*, 2016, 38(3): 485-492.
Huang Z S, Chen Q. Influencing factors analysis of forestry carbon sequestration cost-benefit based on afforestation cost methods[J]. *Resources Science*, 2016, 38(3): 485-492.
- [23] 徐传洪. 不同林龄序列杉木人工林凋落物特征研究 [D]. 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[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.
- [24] 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[J]. *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[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 40(5): 632-644.
- [25] 蔡兆炜. 福建杉木人工林生物量模型研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Cai Z W. A Study on biomass models of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Fujian[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [26] 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.
Zhou W, Gao L. Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools[J]. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(2): 219-223.
- [27] 黄宰胜, 陈钦. 不同情境下桉树碳汇林最佳轮伐期分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(增刊1): 25-31.
Huang Z S, Chen Q. Analysis of the optimal rotation of eucalypt carbon sequestration forests under various scenarios[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(Suppl.1): 25-31.
- [28] 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[J]. *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[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(11): 112-116.
- [29] 刘俊昌. 林业经济学 [M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2018.
Liu J C. Forest economics[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2018.
- [30] 王周绪, 姜全飞. 中国林业行业基准贴现率研究[J]. *林业经济*, 2006(6): 39-44.
Wang Z X, Jiang Q F. China forestry basic rate of discount[J]. *Forestry Economics*, 2006(6): 39-44.
- [31] Zhou W, Gao L. The impact of carbon trade on the management of short-rotation forest plantations[J]. *Forest Policy and Economics*, 2016, 62: 30-35.
- [32] 刘林, 张旭, 余素君, 等. 湿地松材脂兼用林最优轮伐期的经济分析: 以江西省景德镇市枫树山林场为例.[J]. *林业科学*, 2022, 58(4): 62-73.
Liu L, Zhang X, Yu S J, et al. Economic analysis on optimal rotation period of slash pine plantations used for timber and resin: a case study in a state-owned Fengshushan Forestry Farm of Jingdezhen, Jiangxi Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(4): 62-73.

(责任编辑 范娟 赵田芸
责任编辑 张会儒)