北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

不同碳政策情景下油松人工林最优轮伐期

安梓源 龚直文 张寒

Optimal rotation period for *Pinus tabuliformis* plantations under different carbon policy scenarios

An Ziyuan, Gong Zhiwen, Zhang Han

引用本文:
安梓源, 龚直文, 张寒. 不同碳政策情景下油松人工林最优轮伐期[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):67–75. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250267
An Ziyuan, Gong Zhiwen, Zhang Han. Optimal rotation period for *Pinus tabuliformis* plantations under different carbon policy scenarios[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):67–75. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250267

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250267

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

杉木人工林碳汇木材多功能经营的最优轮伐期
Optimal rotation period of carbon sequestration wood multifunctional management in Chinese fir plantation
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 120–128. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220399

降雨减少对油松人工林凋落叶分解的影响
Effects of rainfall reduction on litter leaf decomposition of *Pinus tabuliformis* plantation
北京林业大学学报, 2020, 42(7): 68–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190211

晋西黄土区油松林土壤碳氮磷计量特征对林龄和密度的响应
Response of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of *Pinus tabuliformis* forests to stand age and density in the Loess Plateau region of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2024, 46(12): 30–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240188

气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响
Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 82–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230072

晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响
Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabuliformis* plantations in loess area of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2024, 46(10): 22–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230282

碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究
Forest carbon sequestration potential in China under the background of carbon emission peak and carbon neutralization
北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38–47. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210143

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250267

不同碳政策情景下油松人工林最优轮伐期

安梓源 龚直文 张 寒
（西北农林科技大学经济管理学院，陕西 杨凌 712100）

摘要:【目的】森林具有外部性，存在“市场失灵”问题，通过引入碳政策，施行适宜的管理决策，以实现多目标效益最大化，充分发展森林的碳汇功能，助力“双碳”目标的实现。**【方法】**以中国陕西省油松人工林为研究对象，利用解析木数据，基于 Richards 方程构建林分生长模型；利用换算因子连续函数法构建碳储量生长模型；以 Faustmann-Hartman 模型为基础，模拟计算不同碳政策情景下的林地期望值及最优轮伐期；并且在碳税收和碳补贴政策下对不同碳价格的林分碳储量进行核算；通过敏感性分析，定量研究不同经济参数对林地期望值和最优轮伐期的影响。**【结果】**(1)在利率为 4%、碳价格为 50 元/t、木材价格为 980 元/m^3 时，仅考虑木材收益时最优轮伐期为 56.2 年，每公顷林地期望值为 11 203 元。碳补贴政策的加入会导致最优轮伐期延长 0.4 年，每公顷林地期望值增加至 11 935 元。在碳补贴基础上进一步引入碳税收，未改变最优轮伐期，但由于碳损失的“惩罚”作用，每公顷林地期望值下降至 11 499 元。(2)激励性碳政策会增加林分碳储量，碳价格每提高 1 个单位，每公顷碳储量提高 3%。(3)当利率由 1% 增加到 5% 时，最优轮伐期不断缩短；当木材价格由 700 元/m^3 增加到 1 200 元/m^3 时，最优轮伐期几乎没有改变。**【结论】**混合型碳政策可以有效延长轮伐期，提升林分碳储量，有利于森林的可持续发展。适度降低利率可延长最优轮伐期，增强森林碳汇等生态服务功能。

关键词：油松人工林；Faustmann-Hartman 模型；最优轮伐期；碳政策；林业碳汇；“双碳”；人工林经营
中图分类号：S752；S791.254 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0067−09
引文格式：安梓源，龚直文，张寒. 不同碳政策情景下油松人工林最优轮伐期 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(12)：67−75.
An Ziyuan, Gong Zhiwen, Zhang Han. Optimal rotation period for *Pinus tabuliformis* plantations under different carbon policy scenarios[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 67−75.

Optimal rotation period for *Pinus tabuliformis* plantations under different carbon policy scenarios

An Ziyuan Gong Zhiwen Zhang Han
(College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: [**Objective**] Forests exhibit externalities and face market failures. By introducing carbon policies and implementing appropriate management strategies, it is possible to maximize multi-objective benefits, fully harness the carbon sequestration potential of forests, and contribute to achieving the “Dual Carbon” goals. [**Method**] This paper examines *Pinus tabuliformis* plantations in Shaanxi Province, China. Stand growth models were constructed using analytical timber data based on the Richards equation; carbon stock growth models were built using the conversion factor continuous function method. Based on the Faustmann-Hartman model, the land expectation value (LEV) and optimal rotation period were simulated under different carbon policy scenarios. Carbon storage of forest stands was calculated at various carbon prices under both carbon tax and subsidy policies. Sensitivity analysis was employed to quantitatively assess the

收稿日期: 2025−07−10 **修回日期:** 2025−10−21
基金项目: 国家自然科学基金项目(32572053)，陕西省重点研发计划(2024SF-ZDCYL-05-07、2024SF-YBXM-547)，国家社科基金重大项目(24&ZD108)。
第一作者: 安梓源。主要研究方向：资源经济与环境管理。Email：anziyuan@nwafu.edu.cn 地址：712100 陕西省咸阳市杨凌示范区邰城路 3 号西北农林科技大学经济管理学院。
责任作者: 龚直文，副教授。主要研究方向：林业碳汇经营管理。Email：gongzhiwen@nwafu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

impacts of different economic parameters on LEV and optimal rotation period. [**Result**] (1) At a discount rate of 4%, carbon price of 50 CNY/t, and timber price of 980 CNY/m^3, the optimal rotation period was 56.2 years with timber revenue only, yielding a LEV of 11 203 CNY/ha. Introducing a carbon subsidy policy extended the optimal rotation period by 0.4 years and increased LEV to 11 935 CNY/ha. The addition of a carbon tax policy did not change the rotation period but reduced LEV to 11 499 CNY/ha due to carbon loss. (2) Incentive-based carbon policies enhanced forest carbon storage: a 1-unit increase in carbon price raises carbon storage per hectare by 3%. (3) As the discount rate increases from 1% to 5%, the optimal rotation period shortened progressively. When the timber price increased from 700 CNY/m^3 to 1 200 CNY/m^3, the optimal rotation period remained almost unchanged. [**Conclusion**] Hybrid carbon policies can effectively extend the rotation period and increase stand carbon storage, thereby promoting the sustainable development of forests. Moderately reducing the discount rate can extend the optimal rotation period, enhancing forest carbon sequestration and other ecosystem services.

Key words: *Pinus tabuliformis* plantation; Faustmann-Hartman model; optimal rotation age; carbon policy; forest carbon sequestration; "Dual Carbon"; plantation management

营林能够产生显著的正外部性，其价值体现为一系列无法通过传统市场交易体现的生态调节服务，包括碳汇、水土保持与生物多样性保护等，即市场机制无法为这些效益定价，存在市场失灵的问题。森林的实际社会价值会因此被低估，森林的所有者常忽略森林的长期价值而追求短期利益，倾向于提前砍伐森林，造成森林难以实现社会价值最大化。此外，森林资源具有典型的公共物品属性，兼具非竞争性与非排他性特征，易产生"搭便车"问题。即部分个体或群体在未承担保护成本的情况下，无偿享受生态红利，进一步削弱所有者保护森林的动机。所有者可能放弃森林管理，转而将土地用于农业、建设等更具私人收益的领域，这将导致生态系统退化，威胁森林的长期可持续性。因此，政策合理干预成为纠正市场失灵、实现社会价值最优的必要手段。通过碳补贴、造林奖励、碳税或惩罚性机制等，将外部生态价值内部化为所有者的私人收益，可有效延长轮伐期，提升碳汇能力。因此，研究的关键在于碳政策如何影响最优轮伐期，如何给予激励补贴或税收才能促使森林所有者推迟砍伐周期，实现社会效益最优。

森林的最优轮伐期的确立是政府制定碳政策的基础依据。传统的 Faustmann 模型同时考虑了林地的机会成本、资本的机会成本和林木价格等因素，得到了考虑木材效益下的最优轮伐期[1]。后续研究引入了非木材效益，进一步拓宽了决策模型的应用范围，Hartman 模型[2]考虑了林地服务，VanKooten 模型[3]考虑了林地的碳汇功能，二者相较于 Faustmann 模型轮伐周期更长[4]。利率是影响最优轮伐期的重要经济参数，最优轮伐期随利率增加呈显著减小趋势[5]。木材效益是森林经济效益的主要来源，对林地期望值产生重要影响，木材价格与最优轮伐期呈现负相关关系，与森林效益呈现正相关关系[6]。立地水平[7]、造林密度[8]、林分管理[9]、风险与不确定性[10−12]也是最优轮伐期的影响因素。随着碳交易市场的兴起完善，开展人工林的碳汇经营有利于林地投资，碳政策的施行对轮伐期和净现值的影响愈发重要[13]。关于碳政策对人工林最优轮伐期的研究[14]表明，随着碳价格的上升，林农会得到激励，从而延长轮伐周期，增加碳封存收益，但是碳限额的频繁调整会缩短轮伐周期并降低净现值[15]。合理的碳价格是激励林农延长轮伐期、提升森林碳汇功能并实现森林经营综合效益最大化的重要政策工具。

林分蓄积量与碳储量作为模型的主要输入参数，直接决定了最优轮伐期估算的可靠性。当前林业碳汇计量面临的主要挑战在于缺乏能够反映区域特征的森林生长过程模型，尤其适合县域森林生长过程的模型较少。林分生长模型通过一个或一组数学函数刻画林分变量与生长量之间的关系，用于预测和模拟林分生长[16]。将林分生长模型按照模型模拟对象划分，可以分为全林分模型、径阶模型和单木模型[17]。径阶模型的基础是林木径级，是一种介于全林分生长模型和单木模型中间的过渡模型，包括直径分布模型、理论生长方程和径阶转移模型[18]。Richards 方程是一种理论生长方程，被广泛使用，在人工林的胸径、树高和材积生长量与林龄进行方程拟合方面具有较高的可靠性[19]。因此，本研究考虑使用 Richards 方程构建县域尺度的生长模型，为轮伐期决策提供可靠依据。

黄龙山林区位于陕北黄土高原东南部黄龙县境内，被誉为陕北黄土高原上的"绿色明珠"。油松（*Pinus tabuliformis*）是该林区的主要造林树种之一，

具备生长快、耐干旱、耐瘠薄且适应性强的特性，拥有良好的生态效益与经济效益[20–21]。基于此，本文以该区域油松为研究对象，构建油松人工林生长过程模型，将碳政策纳入分析框架，研究其与最优轮伐期之间的作用机制，并核算碳税收与碳补贴政策下的林分碳储量，定量分析不同碳价格、木材价格和利率对最优轮伐期和林地期望值的影响，为油松人工林经营决策提供参考。

1　研究区概况

黄龙山林区地处黄土高原的东南部，属于渭北干旱高原与陕北黄土高原的交叉地带，是中国生态环境建设规划优先实施的重点地区，也是关中平原、洛河下游流域的绿色屏障，具有重要的生态区位。研究区位于陕西省黄龙山天然林保护区内，地理坐标为 35°24′09″ ~ 36°02′01″N、109°38′49″ ~ 110°16′49″E，海拔为 800 ~ 2 500 m。该区域属大陆性暖温带半湿润气候区，具有大陆性季风气候特征，四季分明，干湿分明，光热充足，降水适中。年平均气温 8.6 ℃，极端最高气温 36.7 ℃，极端最低气温−23.7 ℃，降水集中于 7—9 月，年平均降水量为 640 mm，年无霜期为 126 ~ 186 d。黄龙山林区属于黄土高原丘陵沟壑区，花岗岩和片麻岩构成其陡峭的丘陵地貌，地形复杂多变，平均坡度为 35°。土壤类型以褐土和黄土为主，土壤比较肥沃，潜在生产力大，有机质含量高，土壤平均厚度为 50 cm。黄龙山林区植物区系属华北植物区，包含 22 科 29 属 46 种木本乔木树种，植物种类超过 580 种。林区植被以天然次生林和人工林为主，主要树种包括油松、栎类（*Quercus* spp.）、侧柏（*Platycladus orientalis*）和核桃（*Juglans regia*）等。

2　数据与方法

2.1　数据来源

固定样地数据来源于陕西省黄龙山林区 7 块 20 m × 30 m 的油松人工林样地，涵盖幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林。样地布设时间为 2015 年 8 月—2016 年 8 月，利用 GPS 定位获取地理坐标及海拔信息，利用罗盘仪测定坡度、坡向，并记录调查坡位、土壤类型、气象因素以及造林密度、间伐次数与强度等。选取的样地具有相近的初植密度和较低的经营干扰强度，林龄范围为 18 ~ 47 年，郁闭度 0.9 左右。在每块样地内，对 DBH > 3 cm 的活立木进行每木检尺，记录坐标、胸径、树高及冠幅等生长指标。以平均标准木法选取 7 株解析木，均进行伐倒解析，测量其干形、材积及生物量，并取样测定木材基本密度。

对当地主要木材交易市场进行调查，结合林业部门发布的木材价格指导信息，最终确定油松的原木市场均价为 980 元/m^3。该价格水平符合近年来陕西省木材市场价格波动区间，能够较好地反映研究区域木材的实际经济价值。

碳价格主要参考全国碳排放权交易市场的历史交易数据。2021 年 7 月 16 日 —2024 年 12 月 31 日，全国碳市场收盘价的均值为 67.93 元/t（以 CO_2 计，下同），中位数为 58.80 元/t，最高价和最低价分别为 105.65 和 41.46元/t[22]。在地方层面，陕西省首单 CCER 林业碳汇项目实际成交碳价为 42 元/t。宝塔区薛张小流域、绥德辛店沟和米脂高西沟等项目通过“地方试点碳市场”交易，碳汇均价为 55.33 元/t。综合全国碳市场价格走势，考虑陕西省经济发展水平及林业碳汇项目的实际收益能力，本研究选取 50 元/t 作为基准碳价。

2.2　研究方法

首先构建油松林分生长模型和碳储量生长模型，其次，分 3 种不同的碳政策情景计算轮伐期和林地期望值。情景 1 为不考虑碳政策，即仅考虑木材的经济效益，包括木材销售收入与经营成本，不考虑森林所产生的碳汇效益。情景 2 为碳补贴政策，即在情景 1 的基础上进一步考虑森林所带来的碳汇效益。情景 3 为混合碳政策，即在情景 2 的基础上将释放的碳汇部分也纳入考虑范围。其后核算碳税收与碳补贴政策下的碳汇效益。最后通过敏感性分析定量研究不同碳政策情景下，经济参数对最优轮伐期和林地期望值的影响，利率变动区间选取为 1% ~ 5%，木材价格变动区间为原木材价格的 20%。

2.2.1　油松林分生长模型和碳储量生长模型

选用 Richards 方程作为材积生长模型，计算单木蓄积量。基于计算得到的单木蓄积量与单木地上生物量，通过造林密度转换为单位面积的林分蓄积量与林分地上生物量[23–24]。

$$V_t = a\left(1-\mathrm{e}^{-ct}\right)^b D_\mathrm{p} \tag{1}$$

式中：t 为林龄（a）；V_t 为林龄为 t 时林分的蓄积量（m^3/hm^2）；a、b 和 c 为参数；D_p 为造林密度（株/hm^2）。

乔木层碳储量采用换算因子连续函数法估算，未计入林下灌木、草本、枯落物、死木及土壤碳库。

$$\alpha_t = (AV_t + B)F \tag{2}$$

式中：α_t 为林龄为 t 时乔木层的碳储量（Mg/hm^2）；A 和 B 为油松对应的参数，取值分别为 0.755 4 和 5.092 8[25]；F 为含碳系数，取值为 0.5[26]。

2.2.2　碳补贴与碳税收的确定

森林可以产生碳汇，减缓气候变化，具有显著的

正外部性。然而滥伐和不合理经营会加剧碳排放，产生负外部性。市场机制难以自动对这些外部行为进行补偿或惩罚，导致森林管理者缺乏保护森林、增汇减排的动力。为实现生态保护与经济发展的双赢，有必要通过补贴和税收的手段对森林管理者进行激励和惩罚，而如何确定补贴与税收的标准，是政策设计需解决的核心问题。

森林通过光合作用吸收并固定大气中的 CO_2，形成碳汇，这部分固碳量对缓解气候变化有正向贡献，因此政府应考虑给予与固碳量相等的补贴，以激励森林所有者对森林进行保护。碳补贴参考式(3)[14]计算。

$$C_s = P_c \frac{\int_0^T e^{-rt}\alpha_t' dt}{1-e^{-rT}} \tag{3}$$

式中：C_s 表示碳补贴(CNY/hm^2)；P_c 表示碳价格(元/Mg)；T 表示轮伐期(a)；r 为利率，取值 4%[27]；α_t' 为 α_t 的一阶导数(Mg/(hm^2·a))。

然而，在森林采伐后，木材产品储存的碳会缓慢分解，导致碳释放形成损失。这部分损失会抵消碳汇的增长，因此应按释放量征收碳税收[14]。

$$C_t = P_c \alpha_T (1-\beta)\frac{1}{e^{rT}-1} \tag{4}$$

式中：C_t 表示碳税收(元/hm^2)；α_T 表示一个轮伐期末林分的碳储量(Mg/hm^2)；β 为采伐后长期留存于林产品中的碳比例，取值为 5%[28]。

总体来说，碳价格升高会直接提高森林固碳的补贴收益，使生态保护更具经济吸引力，尽管碳损失所带来的税收绝对值也随之增加，但补贴收益的增幅远大于税收成本的增幅，从而显著提高了经营者的净收益，进一步增强了其进行可持续经营的动力。因此，碳价格提高是激励型碳政策。反之，碳价格降低则属于惩罚型碳政策。

2.2.3 改进的 Faustmann-Hartman 模型

以 Faustamnn-Hartman 模型[1−2]为基础，借鉴 van Kooten 等[3]对 Faustmann 模型做出的改进，进一步纳入木材收益、碳收益、碳损失和成本，建立油松人工林多目标经营林地期望值模型，计算公式如(5)所示。

$$V_{le} = V_R + V_C - V_E \tag{5}$$

式中：V_{le} 为林地期望值(元/hm^2)，V_R 为木材收益(元/hm^2)；V_C 为碳汇的净收益(元/hm^2)，V_E 为生产经营过程中产生的总成本(元/hm^2)。将 V_{le} 对 T 求一阶导数并令其为 0，得到最优砍伐时间。

木材出材量与木材价格相乘即为木材的经济收益，计算公式如(6)所示。

$$V_R = P_t V_T \theta \frac{1}{e^{rT}-1} \tag{6}$$

式中：P_t 表示木材价格，取值为 980 元/m^3，θ 为出材率，取值 70%。

考虑碳汇损失部分，碳汇的净收益公式如(7)所示。

$$V_C = P_c \frac{\int_0^T e^{-rt}\alpha_t' dt}{1-e^{-rT}} - P_c \alpha_T (1-\beta)\frac{1}{e^{rT}-1} \tag{7}$$

森林生长和经营过程中产生的成本包括种植成本(C_{plant})、管理成本(C_{manage})、主伐成本($C_{cutting}$)和运输成本($C_{transport}$)4 个部分。

$$V_E = C_{plant} + C_{manage} + C_{cutting} + C_{transport} \tag{8}$$

$$C_{plant} = C_{pla} + \frac{C_{pla}}{e^{rT}-1} \tag{9}$$

$$C_{manage} = C_{man}\frac{e^r - e^{-rT}}{(e^r-1)(1-e^{-rT})} \tag{10}$$

$$C_{cutting} = C_{cut} V_T \theta \frac{1}{e^{rT}-1} \tag{11}$$

$$C_{transport} = C_{tra} V_T \theta \frac{1}{e^{rT}-1} \tag{12}$$

式中：C_{pla} 代表与轮伐期造林成本相关的常数，取值 500 元/hm^2；C_{man} 为每年管理成本相关的常数，取值 80 元/hm^2；C_{cut} 为每个轮伐期末主伐成本相关的常数，取值 120 元/m^3；C_{tra} 为每个轮伐期末运输成本相关的常数，取值 20 元/m^3。

3 结果与分析

3.1 蓄积量与碳储量生长曲线

油松人工林蓄积与年龄拟合模型的决定系数为 0.930 4，表明模型具有较高的拟合优度，能够较好地描述油松材积随林龄变化的规律(图 1)。随着林木年龄的增长，油松蓄积整体呈上升趋势，在不同的生长阶段，生长速度存在差异，曲线呈现“S”形，符合树木生长规律。油松人工林的材积生长过程具有明显的阶段性特征。在前 20 年，油松处于幼龄期，材积增长较为缓慢，林木的根系和冠层处于发育和构建阶段，只有较少的生物量积累。在 20 年以后，树木进入速生期，这一阶段是油松人工林生产力最高的时期，也是森林碳汇最大的阶段，此时材积增长速度逐渐加快，在林龄大约 50 年时达到生长拐点，之后的生长速度逐渐减缓。在 90 年左右，林木的生长进入成熟期，生长速率受凋谢和环境的影响而减慢，材积增长逐渐于稳定。加强对幼龄期的抚育经营，可以促进林分尽早进入速生期，对于成熟期的森林可以考虑间伐或择伐以维持林分活力，提高碳汇

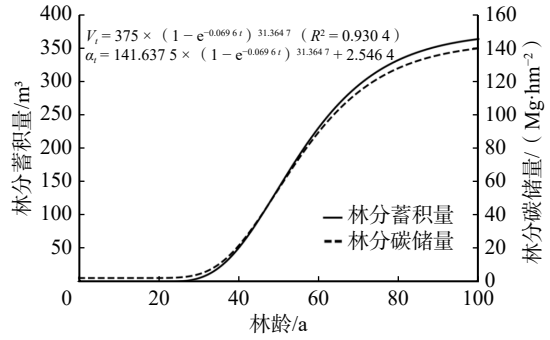


图 1　蓄积量与碳储量生长曲线

Fig. 1　Growth curves of stock volume and carbon storage

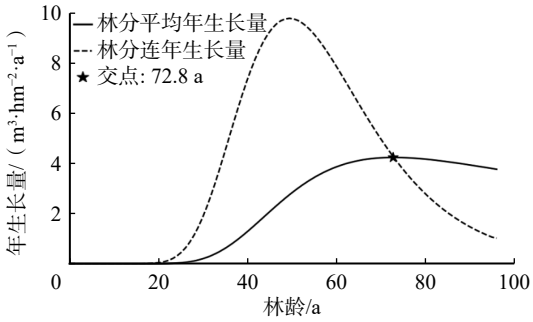


图 2　林分的平均年生长量与连年生长量

Fig. 2　Mean annual increment and current annual increment of the stand

功能。

基于单位面积蓄积量生长曲线，通过模型换算得到林分碳储量生长曲线(图 1)。从整个生长周期来看，油松人工林的碳汇能力呈现出明显的阶段性特征，碳储量积累过程的增长形式呈现为“S”形，与森林生态系统碳储量自然生长规律相符合，反映了森林生态系统的自然演替规律。在前 20 年，油松人工林处于幼龄林阶段，碳储量积累较为缓慢，碳储量仅从 2.54 Mg/hm^2 微增至 2.56 Mg/hm^2，这一阶段的碳汇功能相对较弱；20 ~ 50 年油松林树冠充分发育，光合作用效率显著提升，碳储量的积累进入快速增长期，在第 50 年时可以达到 56 Mg/hm^2，年均生长量高达 1.77 Mg/hm^2；当林龄大于 50 年时，随着林木进入成熟期，生长速度逐渐趋缓，碳储量增速逐渐减缓，年均生长量降至 0.81 Mg/hm^2。当油松林达到数量成熟龄时，其碳储量累积量趋于稳定，最终维持在 116 Mg/hm^2 左右。油松林分碳储量生长过程曲线的确定为推算油松人工林最佳轮伐期和制定合理的碳汇经营管理决策提供了重要的理论依据。

平均年生长量(mean annual increment，MAI)是指在树木整个生长过程中生长量的平均值，连年生长量(current annual increment，CAI)是指树木生长量逐年增加值。从油松人工林林分平均年生长量与连年生长量随林龄变化的动态关系(图 2)可以看出，MAI 曲线呈先上升后缓慢下降的趋势，CAI 曲线呈先快速增长后逐渐下降的特点，二者在第 72.8 年时相交，此时对应的油松的年生长量为 4.23 m^3/(hm^2·a)，这一点即为油松人工林的数量成熟龄。在达到数量成熟龄之前，CAI 始终高于 MAI，表明林分的生产力处于上升阶段；当 CAI 降至 MAI 以下时，表明林分的生长效率不断下降。以林分最大可持续产量为目标，数量成熟龄是最佳主伐年龄。与中国北方其他地区的油松林[29]相比，本研究的油松人工林数量成熟龄约延后 5 ~ 6 年，可能原因是黄龙山林区的立地条件更为优越，从而导致数量成熟龄的延迟。

3.2　不同碳政策情景下的最优轮伐期

轮伐期与林地期望值之间的关系呈倒“U”形曲线(图 3)。情景 1 的最优轮伐期为 56.2 年，林地期望值为 11 203 元/hm^2。情景 2 引入碳补贴政策后，由于增加了碳汇收益，最优轮伐期延长至 56.6 年，林地期望值提升至 11 935 元/hm^2，相较于不考虑碳收益，轮伐期延长了 0.4 年，林地期望值约提升 6.13%。情景 3 进一步考虑了碳损失部分，最优轮伐期没有发生改变，仍为 56.6 年，林地期望值下降至 11 499 元/hm^2。总体来看，在 3 种不同的碳政策情景下，最优轮伐期和林地期望值存在差异。碳补贴政策可以延长轮伐期，提高林地收益。混合政策通过加入碳税收，平衡了激励与约束。合理的碳定价政策可以为森林经营决策提供有效的指导作用，是实现生态效益和经济效益双赢的重要依据。

基于中国(0 ~ 60 元/t)与欧洲(0 ~ 100 欧元/t)市场碳价格的差异，本文对 0 ~ 1 000 元/t 的碳价格进行了数值模拟。随着碳价格的变动，不同政策情景下的最优轮伐期和林地期望值均呈现出明显的动态变化(图 4)。碳价格从 0 提升至 50 元/t 时，最优轮伐期延长 0.43 年，林地期望值提升 296 元/hm^2。当碳价格增至 1 000 元/t 时，混合碳政策与纯碳补贴政

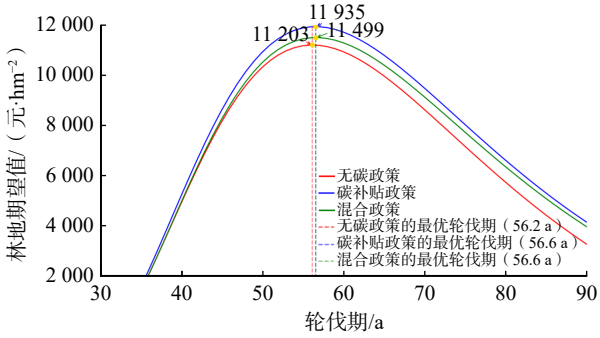


图 3　不同政策情境下油松人工林的林地期望值和最优轮伐期

Fig. 3　Land expectation value and optimal rotation age of *Pinus tabuliformis* plantation under different policy scenarios

策下的最优轮伐期和林地期望值均随碳价提高而延长。在同一碳价水平下，混合碳政策因需缴纳碳税，其林地期望值低于纯碳补贴政策，且最优轮伐期比后者推迟，差异随着碳价格的上升逐步增大。

3.3 碳税收与碳补贴政策下碳汇效益核算

建立合理的碳价格形成机制是激活森林碳汇潜力的关键经济杠杆。随着碳价逐级攀升，林分主要通过延长轮伐期使林木获得额外生长时间，碳密度呈加速累积趋势(图 5)。当碳价格从 0 提升至 50 元/t 时，林分碳密度从 77.58 Mg/hm^2 增加至 78.95 Mg/hm^2，增幅达 1.76%；当碳价格进一步上涨至 150 元/t 时，碳密度达到 81.76 Mg/hm^2，较基准水平提升 5.39%；500 元/t 时碳密度达 92.22 Mg/hm^2，增幅 16%；1 000 元/t 时碳密度进一步提升至 109 Mg/hm^2，较基准水平高出 38%。可见，持续走高的碳价能够显著改变经营决策，为森林碳汇功能提升提供强劲经济激励。

3.4 敏感性分析

3.4.1 利率变动

利率对最优轮伐期和林地期望值具有显著负向驱动(图 6)。利率由 1% 升至 5%，最优轮伐期从 67.31 年缩短至 53.67 年(利率每增加 1%，最优轮伐期缩短约 3 年)，林地期望值从 162 497.74 元/hm^2 急剧下降至 5 398.1 元/hm^2。引入碳收益后，高利率下的“缩短”效应得到部分修正：5% 利率时，纯碳补贴与混合碳政策分别将轮伐期延长至 54.08 年与 54.11 年，林地期望值提高至 5 827.62 与 5 587.75 元/hm^2。

3.4.2 木材价格变动

最优轮伐期对木材价格的变动不敏感(图 7)。木材价格 700 ~ 1 200 元/m^3 变动时，不考虑碳政策的加入，最优轮伐期始终维持在 56.2 年。由于油松人工林的数量成熟龄相对固定，在无外部政策干预时，市场价格变动难以改变基于生物学特性的最优采伐时点。然而，引入碳补贴或混合政策后，轮伐期分别仅缩短 0.32 和 0.36 年，降幅不足 0.5%，经济意义有限。林地期望值则随木材价格线性递增，价格每提高 1 元/m^3，期望值增加约 16 元/hm^2。

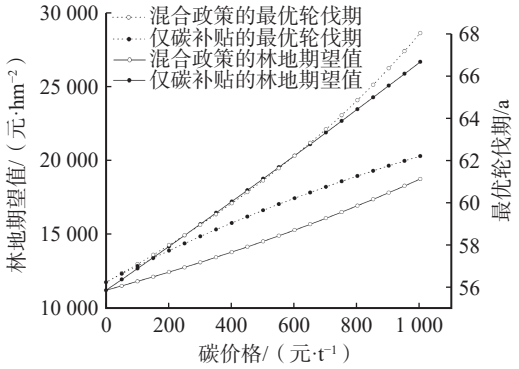


图 4 不同政策情境下碳价格变动对林地期望值和最优轮伐期的影响

Fig. 4 Impact of carbon price changes on land expectation value and optimal rotation age under different policy scenarios

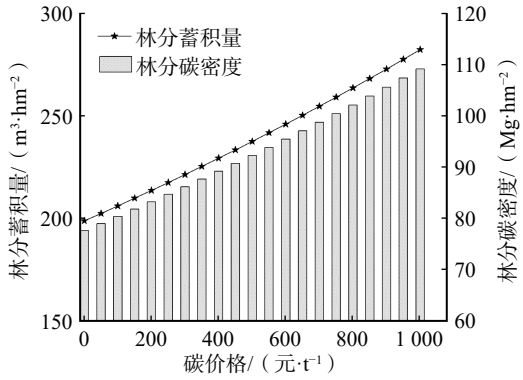


图 5 碳补贴和碳税收政策对林分蓄积量与林分碳密度的影响

Fig. 5 Effects of carbon subsidy and carbon tax policies on stand volume and stand carbon density

4 讨 论

4.1 碳政策对森林经营决策的影响

本研究发现，在现有的价格水平下，碳政策的加入导致最优轮伐期延长，但是幅度较小，这与朱臻等[30]对浙江省杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的研究结果相似。一方面原因可能是因为本文只计算了乔木层生物量碳库，未能完全反映森林的碳汇能力，这导致模型中碳汇收益偏低。但更主要的原因在于，当前市场上的木材价格远高于碳价格，经营决策仍由木材销售主导，碳汇收益难以对轮伐期调整产生足够的经济激励。

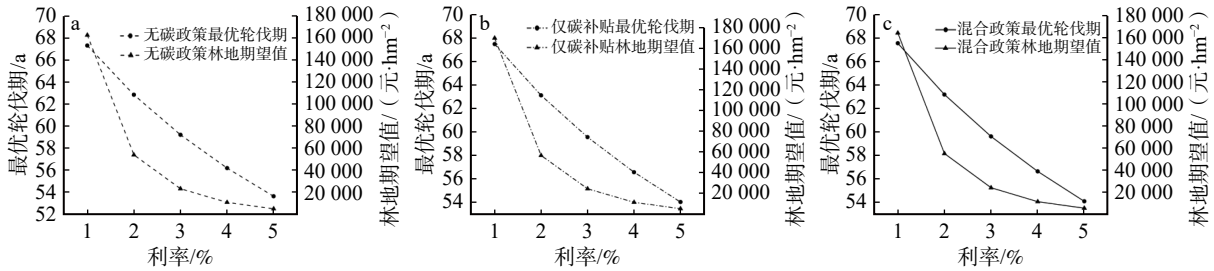


图 6 利率变动对最优轮伐期与林地期望值的影响

Fig. 6 Impact of discount rate fluctuations on optimal rotation age and land expectation value

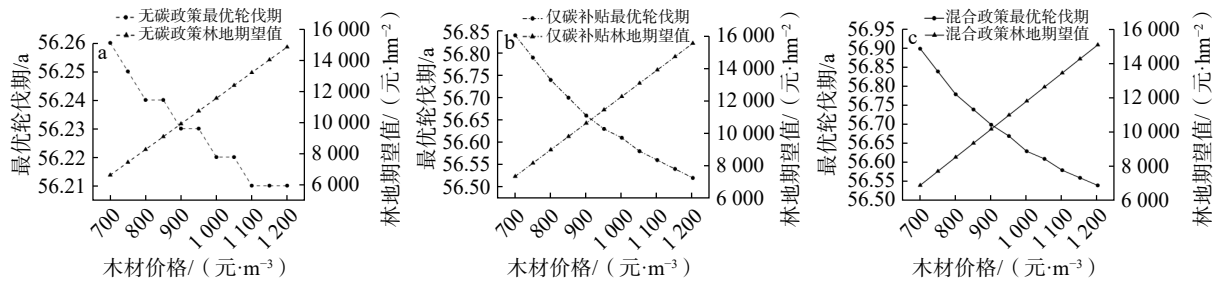


图 7　木材价格变动对最优轮伐期与林地期望值的影响

Fig. 7　Impact of timber price fluctuations on optimal rotation age and land expectation value

碳政策变化对油松人工林经营具有显著影响，本研究发现激励性碳政策会延长轮伐期、增加林分碳储量。这一结果与 van Kooten[31]通过最优轮伐期模型所得出的结论一致，即提高碳价会促使轮伐期延长，甚至可能永不采伐，实现碳储量的最大化。

碳补贴政策显著提高了林地期望价值，并有效延长了最优轮伐期，提升了森林碳汇能力。随着全国碳市场制度体系的持续完善与稳步推进，碳定价机制逐步形成，交易价格呈现稳中有升的态势，森林经营者倾向于延长轮伐周期以获得更高的碳汇收益，这种经济激励机制直接促进了森林蓄积量的持续增长和生物量的不断累积，从而提升森林的碳汇功能。Sartori 等[32]的研究也表明补贴提高了林地的预期收益，使得森林经营者倾向于推迟采伐。相比之下，碳税收政策会导致林地期望价值下降。在同时包含碳补贴与碳税收的混合政策情境下，最优轮伐期进一步延长，森林碳储量也相应提升。这是由于采伐行为会产生碳排放，导致被征税，相当于提高了采伐的边际成本；而放弃采伐、继续保持林木生长则能够增加碳汇并获得相应补贴。因此，混合碳政策实质上是“采伐成本”与“保留收益”之间的经济权衡。

碳补贴提高了保留林木的收益，而碳税收增加了采伐的隐含成本，二者共同改变了传统以木材收益为核心的经营目标。在较高碳价格下，经营者倾向于推迟采伐，不仅直接增加了林分生物量和碳储量，而且也影响了林分结构及生态系统稳定性。从长期看，这有助于推动油松人工林从木材生产为主的短周期经营方式，转向长周期、高碳汇、多功能协同的经营模式，更好地契合森林可持续经营与“双碳”目标的需要。

4.2　经济因素对森林经营决策的影响

利率是影响最优轮伐期的关键经济参数，二者之间呈反向变动的关系，这与 Ning 等[33]的研究结果一致。利率反映了资金的时间价值和经营者的机会成本。较高的利率会降低未来收益的现值，经营者为了更快获得回报会倾向于提前采伐；较低的利率会提升长期经营收益的现值，使得轮伐期延长所带来的木材效益、碳汇效益得以充分体现，从而激励森林经营者采取可持续的经营策略。当利率上升时，最优轮伐期提前，林地期望值下降。这是因为通过连续复利的方式计算利率，会导致其影响随着时间的推移不断累积放大，随着轮伐期的延长，未来收益的现值呈现指数级衰减的形式。因此，微小的利率变动由于这种指数级的放大效应，最终会显著影响最优轮伐期。

木材价格的变动对最优轮伐期和林地期望值的作用相对有限，虽然木材价格上涨带来的经济激励会提高经营收益，但并未显著改变经营者对最优轮伐期的选择，这与王晓雯等[34]的研究结果一致。可能的原因是随着油松人工林的生长，木材蓄积量的边际生长量已逐渐下降，木材价格上涨能够提高的单位收益有限，利率的存在会导致未来收益随时间以指数级折现，在这两个因素的共同作用下，木材价格变动难以实现最优轮伐期决策的大幅度调整。

提高森林经营管理水平，并维持目前的森林资源增加态势，是我国实现“双碳”目标的关键[35]。为充分发挥森林的经济价值与生态价值，应建立合理的碳定价机制，适当提高碳价水平，实施补贴与税收相结合的混合型碳政策，有效引导经营者延长轮伐期，提升林地期望值，通过推迟采伐促进林木生长与碳储量累积，减少林业用地转换为其他用地的可能性。同时应探索基于利率的政策调节工具，如通过提供贴息贷款、降低融资成本等方式，激励长期经营行为，实现政策效应、经济效益与生态效益的统一。

4.3　研究局限与未来展望

本研究主要聚焦于乔木层碳储量，未能全面反映森林生态系统的整体碳汇能力；同时，所选取的具体经济指标数值存在一定不确定性，可能导致模型估计结果与实际经营状况之间产生偏差。为更系统评估油松人工林的综合碳汇潜力，未来研究可进一步将灌木层、枯落物及土壤等多碳库纳入核算体系，并综合模拟碳市场价格波动、气候变化以及自然风险等不确定因素对经营决策的影响。

5 结　　论

通过政策的干预将森林的外部性内部化是实现森林可持续经营的重要手段，本文采用 Faustmann-Hartman 模型构建油松人工林在 3 种不同碳政策目标情景下的林地期望值计算模型，并定量分析不同利率、碳价格和木材价格对油松人工林最优轮伐期和林地期望值的影响，得到如下主要结论。

（1）碳政策的经济激励效果依赖于碳价格水平。碳价格从 0 增加到 50 元/t 时，仅延长最优轮伐期 0.4 年，林地期望值增加不足 300 元/hm^2，影响较为有限；而当碳价格提高至 300 元/t 时，最优轮伐期可显著延长约 3 年。

（2）油松人工林的最优轮伐期对碳价格、利率较为敏感，木材价格的变动对最优轮伐期几乎不产生影响。碳价每升高 1 元/t，碳储量增加 3%；利率每升高 1%，轮伐期缩短约 3 年；木材价格 700 ~ 1 200 元/m^3 对轮伐期几乎无影响。

（3）混合碳政策能更有效地实现经济效益与生态效益的平衡协调。相比纯补贴型政策，引入碳税收虽会略微降低林地期望值，但可通过延长轮伐期显著提升林分碳储量。这表明补贴与税收相结合的混合型碳政策能够在兼顾经营者经济效益的同时，更有效地促进碳汇功能的提升。

参 考 文 献

[1] Faustmann M. Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry[M]// Roger A S. Economics of Forestry. London: Routledge, 2018: 1−40.

[2] Hartman R. The harvesting decision when a standing forest has value[M]// Roger A S. Economics of Forestry. London: Routledge, 2018: 295−302.

[3] 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[M]// Roger A S. Economics of Forestry. London: Routledge, 2018: 363−372.

[4] 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 [J]. 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 forest land expectation value[J]. Forestry Economics, 2020, 42(10): 3−15.

[5] 董灵波, 蔺雪莹, 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.

[6] 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.

[7] 王成雨, 扶欣然, 李佳怡, 等. 基于 3-PGmix 模拟杉木人工林轮伐期和间伐措施对蓄积量的影响 [J]. 生态学报, 2025, 45(6): 2780−2797.
Wang C Y, Fu X R, Li J Y, et al. Effects of thinning measures on rotation period and stock volume of *Cunninghamia lanceolata* plantations based on 3-PGmix simulations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2780−2797.

[8] Dong L, Bettinger P, Qin H, et al. Optimizing rotation lengths for maximizing carbon balance of larch plantations in northeast China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 343: 131025.

[9] Knoke T, Paul C, Friedrich S, et al. The optimal rotation for a fully regulated forest is the same as, or shorter than, the rotation for a single even-aged forest stand: comments on Helmedag's (2018) paper[J]. European Journal of Forest Research, 2020, 139(1): 133−143.

[10] 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.
Sun S Y, Ning Z. The impact of harvesting policy risk on optimal rotation of plantations[J]. Forestry Economics, 2023, 45(3): 66−78.

[11] Labbé R, Niklitschek M, Contreras M. Effect of climate change on the land rent of radiata pine plantations in Chile: site productivity and forest fires[J]. Forest Policy and Economics, 2023, 156: 103068.

[12] McTaggart E, Megiddo I, Kleczkowski A. The effect of pests and pathogens on forest harvesting regimes: a bioeconomic model[J]. Ecological Economics, 2023, 209: 107800.

[13] 储安婷, 宁卓, 杨红强. 林业碳汇对人工林最优轮伐期的影响——以杉木和落叶松为例 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47(3): 225−233.
Chu A T, Ning Z, Yang H Q. Effects of forest carbon sequestration on optimal rotation of plantations: a case study of Chinese fir and larch[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2023, 47(3): 225−233.

[14] Long Y, Zhu Z, Hong Y, et al. The effect of carbon taxes and subsidies on forest carbon sequestration in China[J]. Forest Policy and Economics, 2024, 169: 103316.

[15] 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, 2023, 96(2): 249−263.

[16] 唐守正, 李希菲, 孟昭和. 林分生长模型研究的进展 [J]. 林业科学研究, 1993(6): 672−679.
Tang S Z, Li X F, Meng Z H. The development of studies on stand growth models[J]. Forest Research, 1993(6): 672−679.

[17] 杜纪山. 林木生长和收获预估模型的研究动态 [J]. 世界林业研究, 1999(4): 20−23.
Du J S. Research trends in trees growth and yield prediction

models[J]. World Forestry Research, 1999(4): 20−23.

[18] 马丰丰, 贾黎明. 林分生长和收获模型研究进展 [J]. 世界林业研究, 2008(3): 21−27.
Ma F F, Jia L M. Advances in the researches of stand growth and yield model[J]. World Forestry Research, 2008(3): 21−27.

[19] 王文俊, 李莲芳, 李小军, 等. 不同造林密度的 21a 生西南桦人工林生长规律研究 [J]. 林业资源管理, 2023(4): 53−61.
Wang W J, Li L F, Li X J, et al. Research on the growth model of a 21-year-old *Betula alnoides* plantation with different planting densities[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2023(4): 53−61.

[20] 樊军锋, 杨培华, 郭树杰, 等. 陕西油松遗传改良研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2006, 34(1): 45−50.
Fan J F, Yang P H, Guo S J, et al. Research progress of genetics and improvement on *Pinus tabulaeformis* Carriere of Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2006, 34(1): 45−50.

[21] 焦醒, 刘广全. 陕西黄土高原油松生长状况及其影响因子分析 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(5): 1026−1032.
Jiao X, Liu G Q. Growth and its influencing factors of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(5): 1026−1032.

[22] 姜楠, 朱险峰, 王延培, 等. 全国碳排放权交易市场价格趋势和波动研究 [J]. 价格理论与实践, 2025(5): 1−5.
Jiang N, Zhu X F, Wang Y P, et al. Research on price trends and fluctuations in the national carbon trading market[J]. Price: Theory & Practice, 2025(5): 1−5.

[23] 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 H, Huang J C, Liu H S, 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.

[24] 何潇, 罗光成, 高文强, 等. 山西中条山林局油松纯林碳汇潜力 [J]. 林业科学, 2025, 61(5): 74−84.
He X, Luo G C, Gao W Q, et al. Carbon sequestration potentiality of *Pinus tabuliformis* pure forest in Zhongtiaoshan Forestry Bureau of Shanxi Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(5): 74−84.

[25] 徐嵩龄, 方精云, 刘国华. 我国森林植被的生物量和净生产量 [J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497−508.
Xu S L, Fang J Y, Liu G H. Biomass and net production offorest vegetation in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(5): 497−508.

[26] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献 [J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733−740.
Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 733−740.

[27] Gong Z, O'Hara K L, Li W, et al. Optimal forest rotation periods: integrating timber production and carbon sequestration benefits in *Pinus tabulaeformis* plantations on the Loess Plateau, PR China[J]. Journal of Sustainable Forestry, 2019, 38(6): 591−613.

[28] 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.

[29] 殷鸣放, 杨琳, 殷炜达, 等. 油松、刺槐与杨树树干材积碳储量动态变化研究 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 65−68.
Yin M F, Yang L, Yin W D, et al. Dynamic changes of carbon storage in trunk volume of *Pinus tabulaeformis, Robinia pseudoacacia* and *Populus euramericana*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(5): 65−68.

[30] 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.

[31] van Kooten G C. Determining optimal forest rotation ages and carbon offset credits: accounting for post-harvest carbon storehouses[J]. Canadian Journal of Agricultural Economics, 2023, 71(2): 255−272.

[32] 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.

[33] Ning Z, Chen V, Sun C. Carbon sequestration and forest rotation age: a meta-regression [J]. Forest Science, 2025, 71: 841−863.

[34] 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 [J]. 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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2326−2336.

[35] 张颖, 孟娜, 姜逸菲. 中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 129−141.
Zhang Y, Meng N, Jiang Y F. Coupling and long-term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 129−141.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　张会儒）