·森林资源建设与保护 Construction and Protection of Forest Resources·

兼顾碳汇与木材生产的樟子松人工林经营优化

方洁，蒋博，金星姬*
（东北林业大学 林学院，哈尔滨 150040）

摘　要：为量化樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）人工林碳储量与木材产量之间的权衡关系，通过模拟与优化方法探索协同提升碳储量和木材产量的最佳经营策略，推动樟子松人工林的可持续经营。基于樟子松林分生长模型模拟不同立地条件下现实样地的木材产量及活立木碳库、木产品碳库和死有机质碳库的动态，利用多属性效用函数构建兼顾木材产量和碳储量的多目标方程及相应的单目标方程，并组合差分进化算法求解满足不同经营目标下的最优采伐方案。结果显示，在多目标经营中随着立地质量的提高（从14~18 m增加到21~26 m），主伐及间伐时间整体推后，年均木材产量和平均总碳储量及净现值分别平均增长46.2%、48.7%、54.7%，将木产品碳库和死有机质碳库纳入碳储量核算，平均总碳储量比仅考虑活立木碳库时增加36.2%~44.2%；相较于仅考虑木材产量的单目标经营，多目标经营的轮伐期延长7~10 a，年均木材产量降低1.6%~2.1%，平均总碳储量增长15.9%~29.5%。研究表明，采用多碳库碳储量核算方法能够更全面地反映人工林的真实固碳潜力，基于碳储量与木材产量的权衡分析，确定兼顾碳汇与木材生产的折中经营策略，在保证稳定木材产出的同时有效提升林分的固碳能力，也为樟子松人工林多目标经营提供科学依据。

关键词：樟子松；人工林；木材产量；碳储量；死有机质碳库；木产品碳库；多目标经营；权衡分析
中图分类号：S757　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.009

Management Optimization of Mongolian Pine Plantations Considering Carbon Sequestration and Wood Production

FANG Jie, JIANG Bo, JIN Xingji*
(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To quantify the trade-off between carbon stock and wood production in Mongolian pine plantations and to integrate simulation and optimization approaches to explore optimal management strategies that simultaneously increase carbon stock and wood production, thereby enhancing the sustainable management of Mongolian pine plantations. Based on the Mongolian pine stand growth simulator, this study investigated the dynamics of wood production and carbon stocks in the live tree carbon pool, product carbon pool, and dead organic matter carbon pool under different site indices using existing field plots. A multi-objective function incorporating wood production and carbon stock was developed using a multi-attribute utility function, together with the corresponding single-objective functions. The differential evolution algorithm was applied to derive the optimal cutting schedules under different management objectives. Results indicated that in multi-objective management, as site indices improved (site indices increasing from 14-18 m to 21-26 m), the timing of final cutting and thinning were generally postponed. Meanwhile, the mean annual wood production, average total carbon stock, and net present value increased on average by 46.2%, 48.7%, and 54.7%, respectively. When product and dead organic matter carbon pools were incorporated into the carbon accounting framework, the average total carbon stock was 36.2%-44.2% higher than that estimated by considering only the live tree carbon pool. Compared with the single-objective management regime considering only wood production, the rotation length under multi-objective management was

收稿日期：2026-03-26
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2201002)。
第一作者简介：方洁，硕士研究生。研究方向为森林经营优化。E-mail：2035828061@qq.com
***通信作者：**金星姬，博士，正高级实验师。研究方向为森林生长模拟与经营决策。E-mail：xingji_jin@163.com
引文格式：方洁，蒋博，金星姬. 兼顾碳汇与木材生产的樟子松人工林经营优化[J]. 森林工程，2026，42(5)：974-985.
Fang Jie，Jiang Bo，Jin Xingji. Management optimization of mongolian pine plantations considering carbon sequestration and wood production[J]. Forest Engineering，2026，42(5)：974-985.

extended by 7-10 years, while the mean annual wood production decreased by 1. 6%-2. 1% and the average total carbon stock increased by 15. 9%-29. 5%. The study showed that the multi-carbon-pool based carbon stock accounting approach provides a more comprehensive representation of the actual carbon sequestration potential of plantation forests. Based on the trade-off analysis between carbon stock and wood production, a compromise management strategy balancing carbon sequestration and wood production is identified, as it ensures stable wood production while effectively enhancing the carbon sequestration capacity of stands, thus providing a scientific basis for multi-objective management of Mongolian pine plantations.

Keywords: Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*); plantation forestry; wood production; carbon stock; dead organic matter carbon pool; product carbon pool; multi-objective management; trade-off analysis

0　引言

我国人工林面积居世界首位,在提升区域森林覆盖率、保障木材供给及增强陆地生态系统碳汇功能等方面发挥着重要作用[1-2]。然而长期以来,人工林经营主要以木材产量或经济效益最大化为核心目标,对林分碳汇功能的协同提升关注不足[3-5]。这种以生产导向为主的经营模式在一定程度上制约了人工林生态服务功能的综合发挥,随着社会对森林功能需求的多样化,传统以木材生产为核心的经营模式难以满足现实需求,森林经营正逐步向包含木材生产、碳储量在内的多目标经营转变[6-7]。因此,提升人工林生态系统碳汇功能并保障木材供给,已成为我国森林经营的重要科学问题,也是支撑"双碳"战略目标的重要途径。

在森林经营中,木材生产与碳汇功能这 2 个经营目标是相互冲突的,为协调二者之间的关系,有研究学者采用约束优化、线性规划、目标规划等方法将碳汇效益纳入森林管理规划模型,如 Keles 等[8]、Baskent 等[9]运用线性规划方法构建了兼顾碳汇与木材生产的森林管理规划模型,系统分析了二者之间的权衡关系,并比较了传统木材经营与多目标经营模式在经济效益、森林结构等方面的差异;Quintero-Méndez 等[10]研究发现兼顾木材与碳汇收益的多目标经营下的净现值显著高于仅考虑木材收益的单目标经营;Yousefpour 等[11]采用模拟-优化相结合的方法在挪威云杉人工林中实现了木材生产、碳汇与生物多样性三大目标的综合优化。其中,模拟-优化方法是当前森林经营研究中广泛采用的技术手段,其核心在于通过构建林分生长模型模拟不同经营措施对林分生长及碳储量动态变化的影响,并在此基础上开展经营方案的优化决策。进一步结合多属性效用函数构建包含木材产量及其经济收益、碳储量等的多目标方程,量化不同经营目标之间的权衡或协同关系,从而探索更具综合效益的多目标经营模式,已有研究表明科学合理的森林经营策略能够在保障稳定木材产出的同时,有效提升林分碳储量水平,促进森林经济效益与生态效益的协调统一[12-15]。

尽管已有研究在森林多目标经营方面取得了重要进展,但仍存在不足。首先,当前国内外相关研究在核算森林碳储量时仅考虑了活立木碳库,忽略了其他碳库的影响。事实上,森林从大气中吸收的碳首先固定并储存在活立木中,之后随着林木生长、死亡和采伐等过程在不同库之间发生转移,其中部分碳以凋落物、枯死木和采伐残留物等形式进入死有机质(dead organic matter, DOM)碳库,还有部分碳以采伐并加工利用的木产品形式进入木产品碳库,因此在评估森林碳汇功能时未将这些碳库纳入考量,可能会低估森林生态系统的真实固碳潜力[16]。为突破这一局限,先后有研究学者将 DOM 碳库、木产品碳库加入动态规划模型,以探究多碳库背景下的最优森林经营决策,相关研究表明,DOM 碳库的引入会导致林分最优轮伐期的延长,而考虑木产品碳库则会缩短采伐年龄[17-19];也有研究进一步整合活立木碳库、木产品碳库及 DOM 碳库进行综合分析,认为多碳库核算能够更全面反映森林碳汇价值,并显著提高土地期望值,但对轮伐期的影响相对有限[20-21]。其次,现有研究多侧重于林分主伐年龄或最优轮伐期的确定,对间伐等经营措施在森林经营过程中的影响关注不足[17-21]。合理的间伐有助于促进林木生长,并提升林分碳储量的累积水平,同时还会改变碳在不同碳库之间的分配格局[22],因此仅以轮伐期为核心开展的经营优化难以充分反映森林经营过程中的动态特征。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)因其抗逆性强和速生等优良特性,成为我国东北地区主要针叶造林树种之一,在人工林建设中占据重要地位[23]。近年来,随着国家大规模造林工程的推进,樟子松人工林面积持续扩大,如何通过科学经营协调其木材生产与碳汇功能成为亟待解决的关键问题。本研究以黑龙江省樟子松人工林为研究对象,基于多属性效用函数构建包括木材产量和碳储量的多目标方程,综合考虑活立木碳库、木产品碳库和 DOM 碳库,利用模拟-优化系统探究樟子松人工林碳储量与木材生产之间的权衡关系,并将间伐措施纳入经营决策变量,进一步优化经营

决策，探索樟子松人工林兼顾碳储量与木材生产的最优采伐方案，为樟子松人工林多目标经营提供更加全面的理论依据与决策支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源及研究区概况

研究区位于黑龙江省张广才岭西坡的苇河林场（128°10′~128°47′E，44°01′~44°52′N）、帽儿山林场（128°18′~128°41E，45°02′~45°18′N）和完达山西麓余脉的孟家岗林场（130°32′~130°52′E，46°20′~46°30′N）。研究区海拔170~750 m，气候属温带大陆性季风气候，年平均气温2.5 ℃，无霜期120~125 d，年降水量550~800 mm；土壤以暗棕壤为主，还有少量的草甸土和沼泽土。本研究的初始林分数据源自上述地区的20块樟子松人工林固定标准样地，林分具体统计信息见表1。

表1 樟子松人工林林分因子统计信息

Tab. 1 Statistical information of stand factors of Mongolian pine plantations

参数 parameter	地位指数/m site index	林分年龄/a stand age	林分优势高/m stand dominant height	林分密度/(株·hm^{-2}) stand density	林分平均胸径/cm mean DBH	林分断面积/(m^2·hm^{-2}) stand basal area
最小值 minimum	14.7	13	11.4	767	9.6	8
均值 mean	17.7	22	13.8	1 453	14.6	23
最大值 maximum	25.2	27	17.5	3 175	19.3	35
标准差 standard deviation	2.2	4	2.0	656	2.7	7

1.2 研究方法

本研究以左壮等[24]、何培等[25]、倪添等[26]构建的樟子松人工林地位指数模型、树高曲线、单木直径生长模型、单木枯损模型、最大密度线、削度方程、生物量模型为基础，模拟不同经营措施下的樟子松林分木材产量变化及碳动态，且模型在参数校准与独立样本验证过程中表现出较高精度，系统模拟值与实测值相对误差均控制在5%以内，表明模型具有较高的拟合精度与稳定性[24]。

1.2.1 碳储量核算

1）活立木碳库

活立木的根、枝、叶的生物量根据生物量模型进行估计，其中细根的生物量假定等于叶的生物量[27]，树干的生物量可通过材积与木材密度（0.45 t/m^3）的乘积得到[28]，各器官生物量乘以碳系数（本研究取值0.5[29]）得到碳储量。

2）DOM碳库

本研究DOM碳库中包括凋落物、枯死木及采伐残留物，凋落物的产量采用活立木各器官碳储量及周转率[30-31]（枝、叶、根、细根分别为0.012 5、0.330 0、0.012 5、0.900 0）进行估计，枯死木株数使用枯损模型进行估计。凋落物、枯死木及采伐残留物自然分解过程使用Olson模型[32]进行模拟，公式为

$$B_t = B_0 \exp(-kt)。 \quad (1)$$

$$k = \exp(-3.231 - 0.312\ln(d))。 \quad (2)$$

式中：B_t为t年后剩余碳储量；B_0为初始碳储量；k为分解率，枝、叶、根的分解率来自文献报道[31]（枝、叶、根、细根分别为0.06、0.35、0.06、0.98）；d为胸径，cm。树干的分解率取决于林木胸径[33]，本研究使用Yasso模型[34]对不同胸径的樟子松树干进行分解模拟，并根据模拟结果拟合得到k的预测模型（式（2），模型R^2=0.993）。

3）木产品碳库

活立木被采伐后，使用削度方程基于表2中的小头直径计算采伐木的各材种材积，再通过木材密度转换为生物量，木产品的分解以政府间气候变化专门委员会（intergovernmental panel on climate change，IPCC）[35]提供的不同产品半衰期（锯木、板材、纸浆木、生物燃料分别为35、30、3、3 a）、动态一阶衰减模型为基础进行分解模拟，公式为

$$C_t = C_0 \exp(-qt)。 \quad (3)$$

$$q = \ln(2)/t_{1/2}。 \quad (4)$$

式中：C_t为t年后剩余碳储量；C_0为初始碳储量；q为废弃率；$t_{1/2}$为半衰期。

1.2.2 多目标经营优化

1）目标方程

为兼顾樟子松的木材生产与碳汇功能，本研究分别构建木材产量与碳储量的单目标方程（single-objective function，OF，式中记为O_{F1}、O_{F2}）作为对比，同时利用多属性效用函数构建包括木材产量和碳储量的多目

表2　木材种类和由不同种类制备的木材产品的比例

Tab. 2　Timber assortments and the proportions of wood products prepared from different assortments

木产品类型 product type	产品比例 products proportion				
	大径材 large log	中径材 medium log	小径材 small log	纸浆材 pulpwood	薪材 fuelwood
锯木 sawn wood	0.4	0.4	0.4	0	0
板材 particle board	0.3	0.3	0.3	0.1	0
纸浆木 pulp and paper	0.1	0.1	0.1	0.7	0
生物燃料 biofuel	0.2	0.2	0.2	0.2	1
小头直径/cm top diameter	26	20	6	4	2
最短长度/m shortest length	4	4	4	2	2

标方程(multi-objective function,MOF,式中记为M_{OF})

$$O_{F1} = W_P。\tag{5}$$

$$O_{F2} = C_S。\tag{6}$$

$$M_{OF} = w_1(W_P/W_{Pmax}) + w_2(C_S/C_{Smax})。\tag{7}$$

式中:W_P为轮伐期内的年均木材产量,$m^3/(hm^2\cdot a)$;C_S为平均总碳储量,t/hm^2;W_{Pmax}、C_{Smax}为仅考虑W_P、C_S时的最大值;w_1、w_2分别为多目标方程中W_P与C_S的权重值,且w_1与w_2和为1。由于各变量的量纲不同,本研究将各变量除以对应的最大值,以消除量纲的影响。

2)约束条件

本研究依据森林采伐作业规程[36],在系统内部组合惩罚函数设置经营约束条件,间伐时株数强度小于40%,同时采伐间隔期要大于一个龄级期。

3)决策变量

决策变量由一系列采伐参数构成,主要包括间伐次数、间伐时间、间伐方式和强度,本研究所设间伐次数为2次,间伐处理中的林木采伐均依据以下间伐强度模型[37]进行。

$$t(d) = \frac{1}{\left[1 + a_3\exp\left(-a_1\left(d - a_2\right)\right)\right]^{1/a_3}}。\tag{8}$$

式中:$t(d)$为胸径d的间伐强度,cm;a_1、a_2、a_3是待优化的参数,其中a_1为间伐方式,$a_1<0$为下层伐,a_1=0为均匀伐,$a_1>0$为上层伐。

4)优化方法

本研究利用差分进化算法(differential evolution,DE)对多目标方程进行优化求解,即搜索出一组决策变量以满足目标方程最大化及相关约束。DE算法基本原理是通过种群内个体向量的差分扰动来产生变异体,再通过概率交叉将其与原个体参数相结合,最终借助贪婪竞争策略决定新种群的构成,从而逐步逼近问题的最优解[38]。本研究设定的算法参数为群体大小(90),迭代次数为20,交叉概率为0.5,变异因子为0.5。

1.2.3　经济参数

净现值(net present value,NPV,式中为N_{PV})是森林多目标经营决策的主要经济指标,其核心是将森林在经营周期内所有的成本与收益根据基准贴现率折算成现值的总和,用来比较不同经营方案、确定最优轮伐期、评估碳汇等复合效益。本研究计算木材净现值所需经济参数包括贴现率、木材价格和经营成本[39]。贴现率为4%;木材价格中大径材900元/m^3,中径材770元/m^3,小径材600元/m^3;经营成本包括:整地费用500元/hm^2,造林费用5 000元/hm^2,抚育费用为500元/hm^2。

$$N_{PV} = \sum_{t=1}^{n}\frac{R_t - C_t}{(1+p)^t}。\tag{9}$$

式中:N_{PV}为净现值;t为林龄;R_t为t年时的收入;C_t为t年时的费用支出;p为贴现率。

2　结果与分析

2.1　目标方程的权衡分析

通过模拟不同权重组合下的樟子松人工林轮伐期内年均木材产量和平均总碳储量,从上、中、下等立地条件中分别选取具有代表性的林分,以地位指标(S_I)为15.7、18.6、21.9 m为例,绘制两者间的妥协关系曲线,见图1。结果表明,年均木材产量与平均总碳储量之间存在显著冲突,整体上,随着平均总碳储量的增加,年均木材产量下降,二者之间的权衡关系在不同权重组合下存在显著差异。基于边际分析原理,可通过

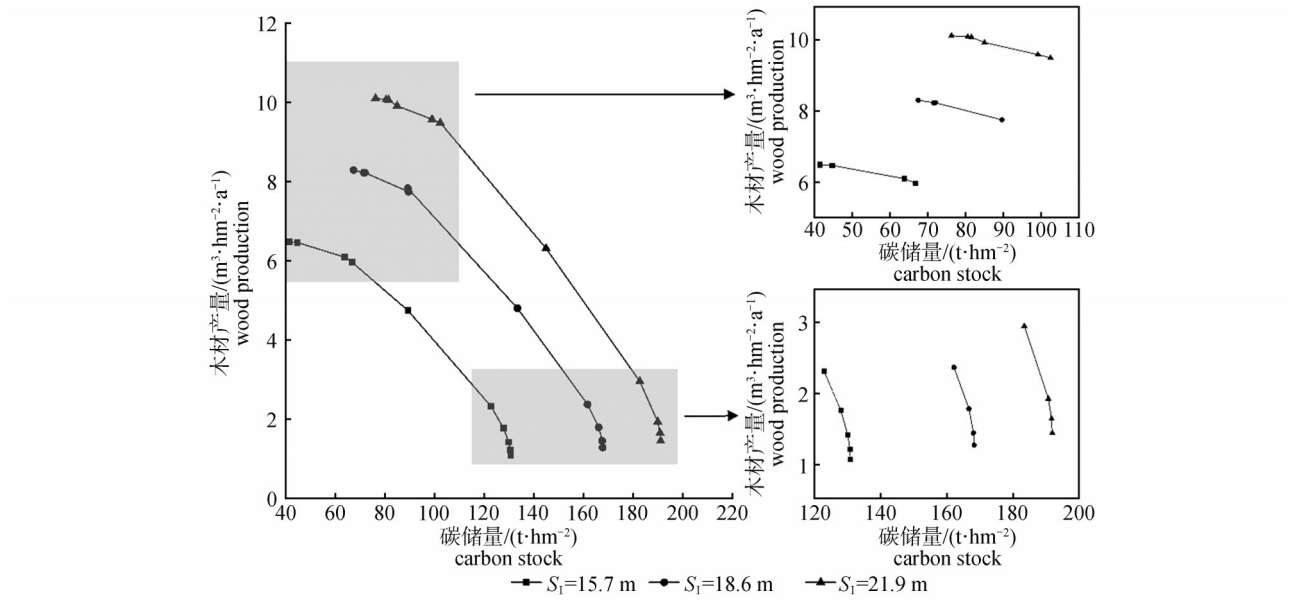


图1 年均木材产量和平均总碳储量的妥协关系曲线

Fig. 1 The trade-off curves between mean annual wood production and average total carbon stock

比较不同经营目标之间的边际替代率来确定最优平衡点[40]。当偏向选择以木材产量为目标时，目标方程中平均总碳储量权重从0增至0.3时，平均总碳储量增加10.7%~53.7%，年均木材产量减少1.2%~6.2%，边际替代率显著降低，以较小的木材产量损失换取较大的碳储量提升，既保证了木材稳定产出又提高了林分整体碳储量。而当继续增加平均总碳储量权重时，年均木材产量将大幅减少，边际替代率升高。因此，年均木材产量和平均总碳储量的权重比7∶3为偏向木材产量的最佳平衡点。当偏向选择以碳储量为目标时，目标方程中年均木材产量权重从0增至0.2时，平均总碳储量减少0.6%~0.9%，年均木材产量增加31.5%~39.8%，边际替代率降低，以较少的碳储量损失换取木材产量大幅提升，因此年均木材产量和平均总碳储量的权重比2∶8为偏向碳储量的最佳平衡点。通过综合考虑樟子松人工林的生物学特性、现实对木材的需求及基础模型的应用范围，最终确定两者的权重比7∶3为最优权重组合、确定了多目标方程(MOF)为权衡各目标效益的折中经营策略。其公式为

$$M_{OF} = 0.7(W_P/W_{Pmax}) + 0.3(C_S/C_{Smax})。 \quad (10)$$

式中：W_P为轮伐期内的年均木材产量，$m^3/(hm^2 \cdot a)$；C_S为平均总碳储量，t/hm^2；W_{Pmax}、C_{Smax}为仅考虑W_P、C_S时的最大值。

2.2 优化结果分析

2.2.1 不同立地和经营目标对优化结果的影响

分别对不同立地条件的单目标(OF_1、OF_2)和多目标(MOF)优化结果进行对比分析，结果见表3。从整体上看，在相同经营目标下，随着立地质量的提高，年均木材产量及大径材产量、净现值、平均总碳储量及各库碳储量均有不同程度的增长。以MOF为例，当地位指数从14~18 m增加到21~26 m时，轮伐期平均延长13 a，净现值平均增长54.7%，年均木材产量提升46.2%，平均总碳储量增加48.7%，其中活立木碳储量、DOM碳储量、木产品碳储量分别增加40.5%、52.6%、98.2%，平均总碳储量比活立木碳储量高出36.2%~44.2%。因此，樟子松人工林在较好立地条件下木材产量与碳储量显著高于较差的立地条件，并且木产品碳储量对立地质量最为敏感，其次是DOM碳储量，活立木碳储量最不敏感。

当经营目标不同时，优化结果存在明显差异。以碳储量为目标(OF_2)时，在模型预测数据范围内未发生间伐且轮伐期过长，虽可实现林分碳储量的最大化积累，但导致了木材产量维持在较低水平。相较于仅考虑木材产量的单目标经营(OF_1)，兼顾木材产量和碳储量的多目标经营(MOF)的轮伐期延长了7~10 a，年均木材产量降低1.6%~2.1%，净现值增长4.72~6.80万元/hm^2，平均总碳储量增加了15.9%~29.5%，其中活立木碳储量、DOM碳储量、木产品碳储量分别增加7.50~9.87、2.35~4.25、0.30~2.35 t/hm^2。整体上，不同立地条件的林分在不同经营目标下年均木材产量及碳储量之间均呈现出明显差异，MOF在保证稳定木材产出提高净现值的同时，调控碳在活立木碳库、DOM碳库及木产品碳库间的分配格局，提升林分的固碳能力。

表 3　不同立地和经营目标的优化结果

Tab. 3　The optimization results of different site indexes and objectives

地位指数/m site index	经营目标 management objective	轮伐期/a rotation length	年均木材产量/($m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) annual wood production	平均总碳储量/($t \cdot hm^{-2}$) average total carbon stock	活立木碳储量/($t \cdot hm^{-2}$) live tree carbon stock	DOM 碳储量/($t \cdot hm^{-2}$) DOM carbon stock	木产品碳储量/($t \cdot hm^{-2}$) product carbon stock	净现值/(万元$\cdot hm^{-2}$) net present value
	OF_1	30~54(36)	6.49~8.91(7.78)	37.87~57.30(47.38)	30.599~44.00(37.53)	3.56~8.52(5.28)	2.60~6.74(4.57)	2.98~5.02(4.23)
14~18	MOF	39~66(46)	6.38~8.69(7.62)	50.61~72.96(61.35)	39.07~53.50(45.03)	7.69~14.79(9.53)	3.80~9.77(6.78)	7.03~9.99(8.95)
	OF_2	193~222(206)	1.07~1.34(1.22)	130.65~163.02(150.32)	87.25~108.15(99.79)	43.40~57.53(50.53)	0	−0.60~−0.59(−0.59)
	OF_1	33~50(44)	7.15~9.09(8.17)	50.60~64.98(56.63)	38.36~47.73(42.60)	5.63~9.79(8.06)	2.47~8.26(5.98)	3.73~5.21(4.49)
18~21	MOF	48~65(54)	7.08~8.88(8.03)	60.19~81.48(71.40)	47.60~55.90(51.12)	8.18~16.27(11.96)	4.41~11.17(8.33)	9.14~9.99(9.48)
	OF_2	202~220(213)	1.15~1.39(1.26)	145.38~173.72(162.77)	98.81~112.92(108.14)	46.57~61.16(54.63)	0	−0.60~−0.59(−0.60)
	OF_1	51~54(52)	10.10~12.42(11.32)	76.19~83.61(78.72)	51.93~55.52(53.40)	11.18~12.92(12.19)	11.8~15.17(13.14)	5.95~8.29(7.05)
21~26	MOF	56~63(59)	9.91~12.20(11.14)	84.92~95.95(91.25)	61.07~65.05(63.27)	13.97~15.12(14.54)	9.88~15.78(13.44)	11.72~15.98(13.85)
	OF_2	215~219(218)	1.45~1.62(1.55)	191.04~211.97(203.86)	125.34~137.31(132.66)	65.70~74.66(71.20)	0	−0.60~−0.59(−0.59)

注:括号内为对应因子的平均值。

Note: The average value of the corresponding factors is in brackets.

2.2.2　不同经营目标下的林分碳储量与蓄积量动态变化

以现实林分中选取地位指数 21.9、18.6、15.7 m 的林分为例,绘制不同经营目标最优经营方案下林分蓄积量与碳储量的变化曲线,见图 2—图 5,用于反映各经营策略下林分蓄积生长过程及各碳库碳储量的动态变化特征。以地位指数 21.9 m 的林分为例,当以最大化碳储量为唯一经营目标时(OF_2),在樟子松林分生长模拟器的有效预测期内[21],林分尚未达到碳成熟状态,林分将继续生长积累碳储量,经营周期内未设置间伐措施,当活立木碳储量和 DOM 碳储量与轮伐期内平均碳储量平衡时才会进行主伐,主伐时的木材产量为 318.00 m^3/hm^2。通过优化满足经营目标 OF_1 与 MOF 最大化下的经营决策,结果表明,经营目标 OF_1 的两次间伐时间分别为 35、46 a,间伐间隔期为 11 a,间伐收获的木材产量为 324.00 m^3/hm^2,主伐年龄为 54 a,主伐时的木材产量为 221.50 m^3/hm^2,总收获量为 545.50 m^3/hm^2,间伐收获占总收获量的 59.4%;间伐导致活立木碳储量损失 103.00 t/hm^2,DOM 碳储量增加 30.50 t/hm^2,其中根与枝的碳储量所占比例较高分别为 41.1%、29.2%,木产品碳储量增加 72.50 t/hm^2,其中锯木和板材碳储量分别占木产品碳储量的 40.0%、

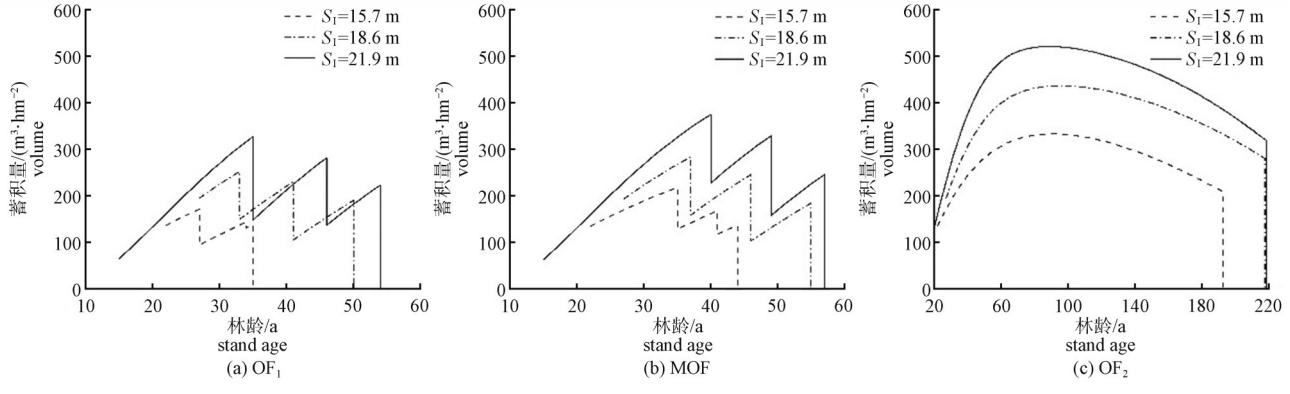


图 2　不同经营目标最优经营方案下林分蓄积生长变化

Fig. 2　Growth and change of stand volume under the optimal management scheme with different management objectives

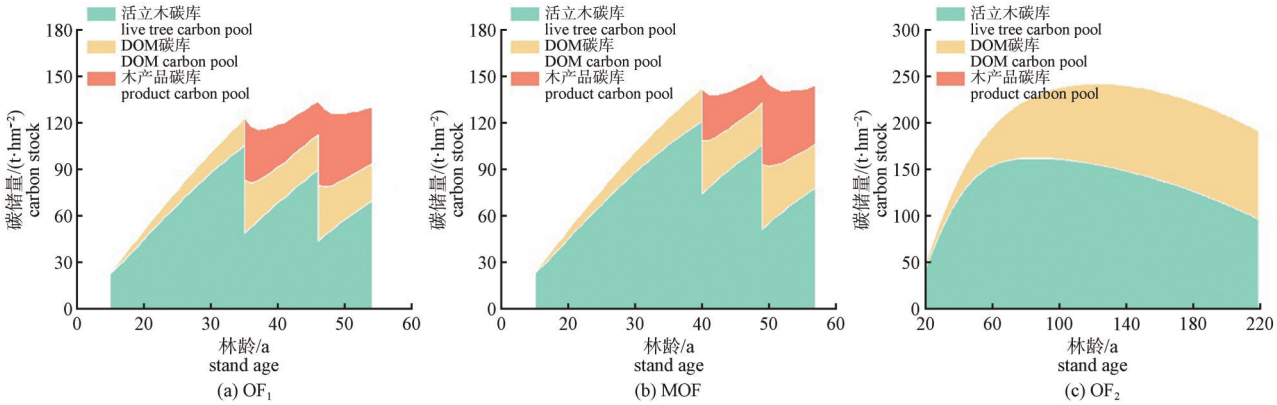


图 3 地位指数为 21.9 m 时不同经营目标最优经营方案下的碳动态

Fig. 3 Carbon dynamics under the optimal management scheme with different management objectives for a site index of 21.9 m

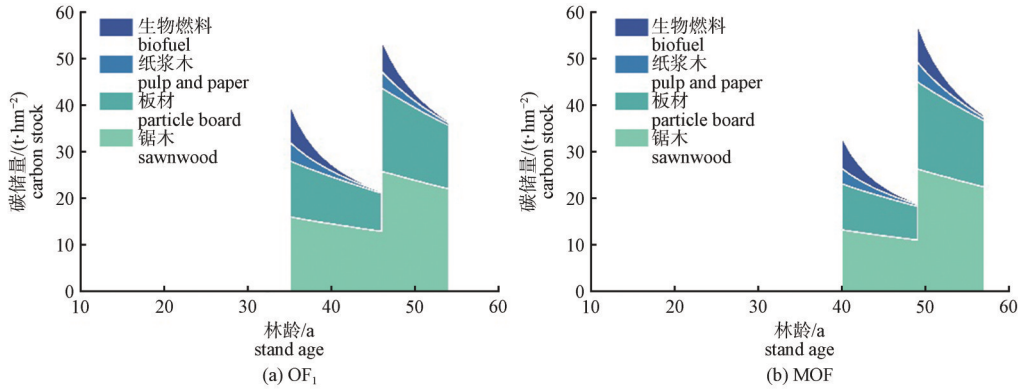


图 4 地位指数为 21.9 m 时不同经营目标最优经营方案下木产品碳库的碳动态

Fig. 4 Carbon dynamics of product carbon pool under the optimal management scheme with different management objectives for a site index of 21.9 m

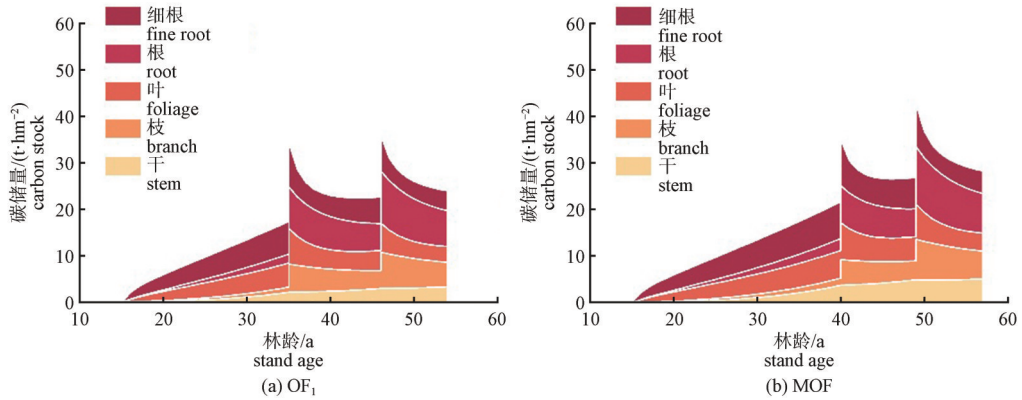


图 5 地位指数为 21.9 m 时不同经营目标最优经营方案下 DOM 碳库的碳动态

Fig. 5 Carbon dynamics of DOM carbon pool under the optimal management scheme with different management objectives for a site index of 21.9 m

30.0%。活立木碳储量受到间伐的影响使得碳从活立木碳库向 DOM 和木产品碳库转移，导致活立木碳储量显著下降，之后随着林分生长活立木碳储量快速恢复，而木产品碳库与 DOM 碳库分解过程碳储量逐渐减少，但总碳储量整体上随林分生长呈逐渐增加的趋势，在轮伐期末总碳储量为 130.50 t/hm^2。与经营目标 OF_1 的经营策略相比，经营目标 MOF 的间伐时间推后 3~5 a，间伐间隔期缩短 2 a，轮伐期延长 3 a，间伐收获的木材

产量为318. 00 m^3/hm^2,主伐时的木材产量为246. 00 m^3/hm^2,总收获量为564. 00 m^3/hm^2,在轮伐期末总碳储量为144. 50 t/hm^2,收获的总木材产量增长3. 5%,轮伐期末总碳储量增长10. 7%。综合来看,兼顾碳储量与木材产量的多目标经营能适当延长轮伐期并提升森林整体蓄积量与碳储量。

主伐后的DOM碳储量和木产品碳储量将成为下一轮伐期初始碳储量。在经营目标OF_1、MOF、OF_2下DOM碳储量分别为45. 00、51. 50、120. 00 t/hm^2,木产品碳储量分别为86. 00、93. 00、71. 50 t/hm^2。木产品碳库主要由经加工利用的锯木和板材构成,能够在较长时间以稳定形式储存碳,且木产品碳库各组分碳储量在不同经营目标下差异较小,锯木和板材碳储量所占比例较高,分别为40. 0%~48. 6%、30. 0%~33. 0%。DOM碳库各组分碳储量存在明显差异,在经营目标OF_1与MOF下,碳储量主要储存在树枝和根系中,所占比例分别为24. 7%~25. 4%、16. 2%~16. 6%,在经营目标OF_2下,大部分碳储存在分解速率较慢的树干中,所占比例为63. 9%,见图6。因此,不同的经营目标不仅显著影响DOM和木产品碳储量,还会改变碳库不同组分间的分配格局,其中DOM碳库对经营目标最为敏感,木产品碳储量相对稳定。

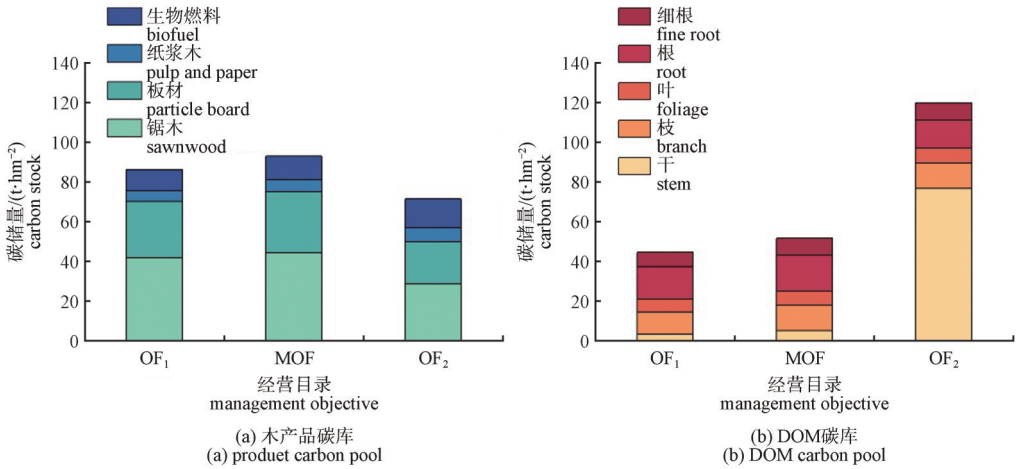


图6　地位指数为21. 9 m时主伐时不同经营目标下木产品碳库与DOM碳库碳储量

Fig. 6　Carbon stock of product carbon pool and DOM carbon pool under different management objectives at final cutting for a site index of 21. 9 m

3　讨论

3. 1　轮伐期延长对碳汇效益的影响及经营可行性

人工林在减缓全球气候变暖、增加陆地生态系统碳汇和保障木材供给等方面发挥着重要作用,科学合理的人工林经营是提升其碳汇功能和综合效益的重要途径。本研究基于模拟-优化系统,分析不同经营目标及立地条件对樟子松人工林木材产量与碳储量的影响,研究结果表明,多目标经营能够在维持较高木材产量的同时显著提升林分整体碳储量,相较单目标经营具有更优的综合效益,这与已有研究关于森林多目标经营的结论基本一致[12-15]。研究进一步发现,对于碳储量与木材产量这2个相互冲突的经营目标,多目标经营通过设置合理的间伐强度、间伐时间和轮伐期,在木材产量损失较小的情况下保持较高的固碳能力,从而在一定程度上实现森林经济效益与生态效益的协同发展。

根据森林采伐作业规程樟子松用材林主伐年龄一般在41~50 a[36],本研究多目标经营下的主伐年龄推迟至46~59 a,适当推迟主伐年龄有利于增加林分生物量积累时间,从而提高林分长期固碳能力。当以碳储量为经营目标时,在不考虑经营约束及风险成本等因素下,模型通过延迟采伐以持续积累碳储量,得到的最优轮伐期为206~218 a,明显长于常规经营下的主伐年龄。目前我国现存樟子松人工林最大林龄已超过60 a[41],而天然樟子松林最大林龄可达377 a[42],表明樟子松具有长期生长的生物学潜力。因此,从树种生物学特性看,该结果具有一定理论合理性;但从我国人工林经营实际出发,其现实可行性较低,一方面,过长的轮伐期会增加经营成本及风险,另一方面,本研究采用的樟子松林分生长模型主要基于13~66 a林分样地数据构建,其有效预测期为60~80 a,虽然模型可以进行长期模拟,但当预测期超出其有效适用范围时,模拟结果的不确定性会增加,可靠性也会降低[24]。因此,该结果仅设定为最大化碳储量经营目标下的理论结

果，其主要意义在于揭示单一碳储量经营目标下，模型通过延迟采伐以持续积累碳储量，而在实际森林经营中，应综合考虑木材生产需求、经营周期等，以确定更合理的轮伐期[43]。

3.2 考虑碳储量及自然干扰等因素下的森林经营

本研究将活立木碳库、木产品碳库、DOM碳库纳入统一碳核算框架，平均总碳储量较仅考虑活立木碳库时增加了36.2%~44.2%。这一结果表明，仅关注活立木碳库会低估林分在轮伐期内的整体固碳潜力，而多碳库能够更加全面反映林分的全生命周期碳储量动态变化，为森林多目标经营提供了更系统的科学依据。然而，需要指出的是本研究中木产品碳库与DOM碳库在模拟初期的初始碳储量为0，且对于木产品与DOM碳储量的计算并不是从造林当年开始，而是在造林后某一既定林龄开始进行的，可能导致在模拟经营初期会低估木产品与DOM碳储量[16]。因此在后续研究中可将对不同林龄下木产品与DOM碳储量的初始化预测模型加入模拟-优化系统中，可以更真实地反映林分不同阶段的碳储量动态。

从经济角度来看，本研究采用净现值评价不同经营方案的经济效益，结果表明多目标经营不仅能够提升林分碳储量，也能获得较高的净现值，说明其在经济效益上同样具有一定优势。然而，本研究仅考虑了木材净现值，未将碳汇价值纳入经济核算，事实上随着全球碳市场机制的日益成熟和中国国家碳交易市场的正式运行，森林碳汇已从生态资产转变为可量化、可交易的经济资产[44]。已有研究表明，碳价的变动会显著影响森林经营决策[20,45]，因此将碳汇收益纳入经营优化体系，可更全面地反映人工林在“双碳”背景下的经济贡献，有助于经营策略从单一追求木材产出转向兼顾碳储量增长等多目标，从而提升经营策略的现实可行性，从而实现生态效益与经济效益的协调统一。

已有研究表明，在经营决策中忽略自然干扰可能导致经济收益高估达25%[46]。自然干扰会在一定范围内造成林木死亡从而改变林分结构，还在长期尺度上影响植被恢复过程，进而对木材产量和碳储量产生持续性影响[47]。本研究是基于确定性模型开展优化模拟，未考虑风、雪、火、病虫害等多种自然干扰因素的影响。因此，未来森林经营模型的构建有必要由确定性优化向随机优化拓展，将自然干扰相关风险参数整合到优化模型中，使目标方程能够基于干扰的概率分布评估经营方案的期望表现，同时优化目标也不应仅局限于寻求理想条件下的最优解，而是关注在不确定环境下表现更稳定、适应性更强的经营策略。

综上所述，本研究采用了多碳库碳储量核算方法，并构建了包括碳储量与木材产量的多目标方程，并引入木材收益进行经济优化，为樟子松人工林的多目标经营提供了重要决策支持，但对于林分初始碳储量的考量及森林多目标经营中经济价值与自然干扰的考量仍有待进一步研究。

4 结论

本研究通过模拟-优化系统探究碳储量与木材生产之间的权衡关系，确定了兼顾二者的折中经营策略，并分析经营目标及立地条件对樟子松人工林木材产量与碳储量的具体影响，主要研究结论如下。

1)在多目标经营(MOF)下，随着地位指数的增加，年均木材产量提升46.2%，平均总碳储量增加48.7%，且将木产品碳库和DOM碳库纳入碳储量核算后，年均总碳储量比仅考虑活立木碳库时增加36.2%~44.2%，能够更全面地反映人工林的真实固碳潜力，且立地生产力越高，林分越能在经营周期内实现更高的木材产量和碳储量。

2)与仅考虑木材产量的单目标经营相比，多目标经营的轮伐期延长7~10 a，平均总碳储量增加15.9%~29.5%，年均木材产量减少1.6%~2.1%，以较小的木材产量损失换取较大的碳储量提升，且多目标经营在不同立地条件下均表现出明显优势，通过优化间伐措施，在兼顾木材生产的同时增强林分整体固碳能力。

3)活立木碳储量受到间伐的影响使得碳从活立木碳库向木产品碳库和DOM碳库转移，导致活立木碳储量显著下降，之后随着林分生长活立木碳储量快速恢复，而木产品碳库与DOM碳库分解过程碳储量逐渐减少，但轮伐期内平均总碳储量整体上随林分生长呈逐渐增加的趋势。

参 考 文 献

[1] 陈瑶，李云红，邵英男. 森林碳汇研究现状分析[J]. 民营科技，2017(7)：204.
Chen Yao, Li Yunhong, Shao Yingnan. Analysis of research status of forest carbon sinks[J]. Private Science and Technology, 2017(7): 204.

[2] 梅梦媛，雷一东. 我国人工林新时代发展形势分析[J]. 世界林业研究，2019，32(3)：73-77.
Mei Mengyuan, Lei Yidong. Analysis on development trend of China's plantation in new era[J]. World Forestry Research, 2019, 32(3): 73-77.

[3] 朱磊，王庆成，陈国富. 人工用材林木材产量经营模拟研究[J]. 华东森林经理，2006(4)：53-58.

Zhu Lei, Wang Qingcheng, Chen Guofu. Study of simulating management of timber output of timber plantation[J]. East China Forest Management, 2006(4): 53-58.

[4] 陈俊松,赵尘,石迪. 闽西北人工林经济效益动态分析[J]. 森林工程,2010,26(5):83-86.
Chen Junsong, Zhao Chen, Shi Di. Dynamic analysis on economic benefit of plantation in the Northwest of Fujian Province[J]. Forest Engineering, 2010, 26(5): 83-86.

[5] 李储山,张青宇,轩志龙,等. 长白落叶松人工林生长过程及其经济效益的研究[J]. 吉林林业科技,2014,43(5):31-32,46.
Li Chushan, Zhang Qingyu, Xuan Zhilong, et al. Study on growth process and economic benefit of Larix olgensis Henry man-made forest[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2014, 43(5): 31-32, 46.

[6] 刘世荣,杨予静,王晖. 中国人工林经营发展战略与对策:从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报,2018,38(1):1-10.
Liu Shirong, Yang Yujing, Wang Hui. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 1-10.

[7] Deng W W, Xiang W, Ouyang S, et al. Spatially explicit optimization of the forest management tradeoff between timber production and carbon sequestration[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109193.

[8] Keles S, Başkent E Z. Modelling and analyzing timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: A case study[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2007, 16(3), 473-479.

[9] Baskent E Z, Sedat K, Yolasigmaz H A. Comparing multipurpose forest management with timber management, incorporating timber, carbon and oxygen values: a case study[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2008, 23(2): 105-120.

[10] Quintero-Méndez M A, Jerez-Rico M. Heuristic forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations[J]. Iforest-Biogeosciences and Forestry, 2017, 10(2): 430-439.

[11] Yousefpour R, Hanewinkel M. Modelling of forest conversion planning with an adaptive simulation-optimization approach and simultaneous consideration of the values of timber, carbon and biodiversity[J]. Ecologica Economics, 2009, 68(6): 1711-1722.

[12] Jin X J, Pukkala T, Li F R, et al. Optimal management of Korean pine plantations in multifunctional forestry[J]. Journal of Forestry Research, 2017, 28(5): 1027-1037.

[13] Peng W, Pukkala T, Jin X J, et al. Optimal management of larch (*Larix olgensis* A. Henry) plantations in Northeast China when timber production and carbon stock are considered[J]. Annals of Forest Science, 2018, 75: 63.

[14] 彭娓,李凤日,金星姬,等. 应用Hooke&Jeeves算法对长白落叶松人工林多目标经营的优化[J]. 东北林业大学学报,2018,46(7):1-6.
Peng Wei, Li Fengri, Jin Xingji, et al. Multi-objective management optimization of *Larix olgensis* plantations by hooke & jeeves algorithm[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(7): 1-6.

[15] 宋磊,金星姬,Pukkala Timo,等. 长白落叶松人工林多目标经营模式研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(2):150-158.
Song Lei, Jin Xingji, Pukkala Timo, et al. Research on multi-objective management schedules of *Larix olgensis* Plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(2): 150-158.

[16] Pukkala T. Calculating the additional carbon sequestration of finnish forestry[J]. Journal of Sustainable Forestry, 2020, 41(7): 624-641.

[17] 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.

[18] 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.

[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] 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 Lingbo, Lin Xueying, Zhang Yifan, et al. Optimal rotation of *Larix olgensis* plantation in considering carbon sequestration and timber production[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(5): 18-30.

[21] 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 Xiaowen, Yu Zhihan, Yang Hongqiang. 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.

[22] 许欣野,董灵波,陈冠谋. 间伐对长白落叶松人工林碳汇木材复合经济效益的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2024,44(9):201-210.
Xu Xinye, Dong Lingbo, Chen Guanmou. Effects of thinning on the compound economic benefits of carbon and wood for planted Larix olgensis forests[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(9):201-210.

[23] 丁丽,许晴,许中旗,等. 冀北坝上不同樟子松林的土壤养分及其与林木生长的关系[J]. 西北林学院学报,2018,33(1):49-55.
Ding Li, Xu Qing, Xu Zhongqi, et al. Soil nutrients of different pinus sylvestris var. mongolica plantations in Northern Bashang Area of Hebei Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1):49-55.

[24] 左壮,金星姬,Pukkala Timo,等. 抚育间伐强度对樟子松人工林成熟龄的影响[J]. 林业科学,2026,62(2):1-14.
Zuo Zhuang, Jin Xingji, Pukkala T, et al. Effects of thinning intensity on the maturity age of mongolian pine plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2026, 62(2):1-14.

[25] 何培,辛士冬,姜立春. 基于广义加性模型的樟子松树干削度方程研建[J]. 北京林业大学学报,2020,42(12):1-8.
He Pei, Xin Shidong, Jiang Lichun. Research on stem taper equation of Scots pine based on generalized additive model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(12):1-8.

[26] 倪添,谢龙飞,董利虎. 黑龙江省樟子松人工林含碳量估算方法的比较[J]. 生态学杂志,2023,42(7):1774-1782.
Ni Tian, Xie Longfei, Dong Lihu. Comparison of carbon estimation approaches for Pinus sylvestris var. mongolica plantation in Heilongjiang province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(7):1774-1782.

[27] Helmisaari H S, Derome J, Nöjd P, et al. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands[J]. Tree Physiol, 2007, 27(10):1493-1504.

[28] Peng Y X, Li F R, Liu F, et al. Prediction models of sapwood density, heartwood density, and bark density in *Larix olgensis* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4):1113-1120.

[29] Johnson W C. Sharpe D M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1983, 13(3):372-383.

[30] 邱俊,谷加存,姜红英,等. 樟子松人工林细根寿命估计及影响因子研究[J]. 植物生态学报,2010,34(9):1066-1074.
Qiu Jun, Gu Jiacun, Jiang Hongying, et al. Factors influencing fine root longevity of plantation-grown Pinus sylvestris var. mongolica[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(9):1066-1074.

[31] Pukkala T. Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration[J]. Forest Policy and Economics, 2014, 43:41-50.

[32] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. Ecology, 1963, 44(2):322-331.

[33] Pukkala T. Optimising the semi-continuous cover forestry of Finland[J]. Allgemaine Forst und Jagdzeitung, 2006, 1677, 141-149.

[34] Liski J, Palosuo T, Peltoniemi M, et al. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils[J]. Ecological Modelling, 2005, 189(1/2):168-182.

[35] IPCC. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry[M]. IPCC, Kanagawa, Japan, 2003.

[36] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 林木采伐技术规程:GB/T 45088—2024[S]. 北京:中国标准出版社,2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical regulations for forest harvesting: GB/T 45088—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

[37] Richards F. A flexible growth function for empirical use[J]. Journal of Experimental Botany, 1959, 10(29):290-300.

[38] 孙海丽. 差分进化算法改进及其应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
Sun Haili. Improvement of differential evolution algorithm and its application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[39] 赵文学. 樟子松林分成熟年龄的研究[J]. 林业勘查设计,2021,50(2):50-53.
Zhao Wenxue. Study on mature age of Pinus sylvestris var. mongolica Litv. Stand[J]. Forest Investigation De-

sign,2021,50(2):50-53.

[40] Miettinen K. Nonlinear multiobjective optimization[M]. Springer New York,NY,1998.

[41] 雷泽勇,韩艳刚,赵国军,等. 辽宁章古台樟子松生长过程分析[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(2):324-330.
Lei Zeyong, Han Yangang, Zhao Guojun, et al. Growth of mongolian pine in Zhanggutai of Liaoning Province[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(2): 324-330.

[42] 王晓春,宋来萍,张远东. 大兴安岭北部樟子松树木生长与气候因子的关系[J]. 植物生态学报,2011,35(3):294-302.
Wang Xiaochun, Song Laiping, Zhang Yuandong. Climate-tree growth relationships of Pinus sylvestris var. mongolica in the northern Daxing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(3): 294-302.

[43] Pukkala T. Which type of forest management provides most ecosystem services? [J]. Forest Ecosystems, 2016,3(1):9.

[44] 陈诺楠,朱养鹏. 中国碳交易机制关键要素研究[J]. 商展经济,2025(24):13-16.
Chen Nuonan, Zhu Yangpeng. Research on the key elements of China's carbon trading Mechanism[J]. Trade Fair Economy,2025(24),13-16.

[45] Gutrich J, Howarth R B. Carbon sequestration and the optimal management of New hampshire timber stands[J]. Environmental and Resource Economics, 2007, 37(4): 681-695.

[46] Díaz-Yáñez O C M, Mola-Yudego B, et al. Simulating the effects of wind and snow damage on the optimal management of Norwegian spruce forests[J]. Forestry: An International Journal of Forest Research, 2019, 92(4): 406-416.

[47] Mikoláš M, Svitok M, Bače R, et al. Natural disturbance impacts on trade-offs and co-benefits of forest biodiversity and carbon[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,2021,288(1961):20211631.