浙 江 农 林 大 学 学 报, 2026, **43**(5): 1084−1093 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20250579

引用格式: 邹炜文, 彭道黎, 陈铭捷. 基于 3-PGmix 模型模拟间伐对塞罕坝人工林生物量和生产力的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(5): 1084−1093. ZOU Weiwen, PENG Daoli, CHEN Mingjie. Effects of simulated thinning on biomass and productivity of the Saihanba plantation based on 3-PGmix model[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(5): 1084−1093.

基于 3-PGmix 模型模拟间伐对塞罕坝人工林生物量和生产力的影响

邹炜文，彭道黎，陈铭捷

（北京林业大学 林学院，北京 100083）

摘要：【目的】旨在对塞罕坝地区华北落叶松 *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* 和樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 3-PGmix 模型参数化，探究间伐对塞罕坝人工林生物量和生产力的影响规律。**【方法】**基于 3-PGmix 模型，以塞罕坝机械林场华北落叶松人工林、樟子松人工林为研究对象，结合样地实测数据，对塞罕坝地区华北落叶松和樟子松 3-PGmix 模型参数化。设定不同间伐强度 (对照 0%、轻度 20%、中度 35% 和重度 50%) 与不同间隔时间 (5 a 短间隔和 10 a 长间隔)，模拟不同间伐措施下林分生物量和净初级生产力随林龄的变化。**【结果】**构建的塞罕坝地区华北落叶松与樟子松人工林 3-PGmix 模型参数体系，经样地实测数据校验并开展简单线性回归分析显示：各因子的决定系数 (R^2) 为 0.84~0.99，表明模型具备较高的模拟精度与可靠性。林分生物量对间伐干扰的响应特征在 2 个树种中表现一致：未实施间伐的林分生物量均为最高，而重度间伐且采伐间隔期较长的林分生物量在干扰初期降至最低；但经长期恢复演替后，不同间伐处理林分的生物量差距逐步缩小并趋于接近。在林分净初级生产力层面，2 个树种均呈现出一致的响应规律，即重度间伐长间隔措施的林分净初级生产力最大，未间伐林分的净初级生产力则为各处理中最低。**【结论】**华北落叶松与樟子松人工林的林分生物量与间伐强度呈反比关系，间伐会导致林分生物量在短期内急剧下降；但经长期恢复期后，受干扰林分的生物量可逐步恢复至接近未间伐林分的水平。林分净初级生产力与间伐强度成正比关系，其中重度间伐长间隔措施对促进林分净初级生产力的提升具有最优效应。图 2 表 5 参 29

关键词：3-PGmix 模型；间伐；塞罕坝；人工林；华北落叶松；樟子松；生物量；生产力

中图分类号：S757 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-0756(2026)05-1084-10

Effects of simulated thinning on biomass and productivity of the Saihanba plantation based on 3-PGmix model

ZOU Weiwen，PENG Daoli，CHEN Mingjie

（College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China）

Abstract: ［**Objective**］ This study aims to parameterize the 3-PGmix model for *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Saihanba area, and explore the effects of thinning on the biomass and productivity of plantations in this region. ［**Method**］ Based on the 3-PGmix model, taking the *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations in Saihanba Mechanized Forest Farm as research objects, the parameterization of the 3-PGmix model for 2 tree species was conducted by combining measured data of sample plots. Different thinning intensities (control, 0%; light, 20%; moderate, 35%; and heavy, 50%) and different interval periods (short interval of 5 years and long interval of 10

收稿日期：2025-11-13；修回日期：2026-06-14

基金项目：国家重点研发计划项目 (2023YFD2200403)

作者简介：邹炜文 (ORCID: 0009-0009-7938-4548)，从事森林经营理论与技术研究。E-mail: Owen_zou@bjfu.edu.cn。通信作者：彭道黎 (ORCID: 0009-0009-7938-4548)，教授，博士，从事森林资源监测与评价研究。E-mail: dlpeng@bjfu.edu.cn

years) were set to simulate the changes of stand biomass and net primary productivity with stand age under different thinning measures. [**Result**] The parameter system of the 3-PGmix model for *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Saihanba area was verified by field-measured data, and a simple linear regression analysis was conducted. The results showed that the coefficient of determination (R^2) of each factor ranged from 0.84 to 0.99, indicating that the model had high simulation accuracy and reliability. The response characteristics of stand biomass to thinning disturbance were consistent between the two tree species: the stand biomass without thinning was the highest, while that of stands with heavy thinning and long cutting intervals decreased to the lowest level in the initial stage of disturbance; however, after a long-term restoration succession, the biomass gap among stands under different thinning treatments gradually narrowed and tended to be close. Regarding stand net primary productivity (NPP), both tree species exhibited a consistent response pattern: the stand NPP under heavy thinning with long intervals was the highest, whereas that of unthinned stands was the lowest among all treatments. [**Conclusion**] The stand biomass of *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations was inversely proportional to thinning intensity. Thinning would cause a sharp decline in stand biomass in the short term; however, after a long recovery period, the biomass of disturbed stands could gradually recover to a level close to that of unthinned stands. Stand NPP was positively correlated with thinning intensity, and heavy thinning with long intervals was most effective in increasing stand NPP. [Ch, 2 fig. 5 tab. 29 ref.]

Key words: 3-PGmix model; thinning; Saihanba; plantation; *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; biomass; productivity

华北落叶松 *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* 和樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 是中国用材林和碳汇林树种，同时也是河北省塞罕坝机械林场的主要造林树种，其种植面积占该地区人工林总面积的近 70%[1]，在区域森林生态系统中占据核心地位。塞罕坝地区兼具海拔高、降水量少、年温差大、无霜期短的特殊气候特征[2]，这种严酷的生境条件使得当地人工林不仅成为京津冀区域防风固沙的生态屏障，更肩负着维持区域生态系统稳定、涵养水源及提升林地生产力的关键使命。林地生产力的核心量化表征指标是植被净初级生产力 (NPP)，该指标既能直接反映植被生长状况，更是评判生态系统稳定性的核心依据。尤为重要的是，NPP 的细微波动不仅会直接影响森林生态系统的稳定状态，还可能间接驱动区域气候的变化[3]。因此，精准解析 NPP 的调控机制、筛选最优经营措施以提升林地生产力，对塞罕坝人工林生态价值与生产功能的协同实现具有重要现实意义。

作为人工林经营中调控林分结构与生产力的关键营林措施，间伐通过选择性伐除林分中部分个体，可有效降低林内竞争压力、改善空气流通与光照条件，进而促进保留木生长，优化林分结构并推动植被更新[4–5]。然而，现有研究关于间伐对林分生物量与生产力的影响结论存在显著分歧：商添雄等[4] 发现间伐虽会减少华北落叶松林分乔木层生物量，但能显著提高乔木层生产力；黄鑫春[5] 研究发现间伐后落叶松单位面积蓄积量明显低于未间伐对照，另有研究指出间伐与林分生物量、生产力的相关性不显著，甚至可能导致生产力下降[6]。这种分歧的核心原因在于受间伐干扰林分经过不同间伐强度和不同时间长短的恢复期后，能否恢复至接近未间伐林分的水平。现有研究多集中于其他树种或常规生境，但关于塞罕坝特殊气候条件下华北落叶松和樟子松的针对性研究不足，导致无法为当地人工林经营提供科学的间伐方案，亟需开展系统性探究。

林木生长模型是量化林分生长规律、解析经营措施效应的核心工具，主要包括经验模型、过程模型与混合模型等[7]。其中，过程模型因具有机制明确、特征清晰的优势，已成为当前估算林分 NPP 的主流方法。3-PG 模型作为过程模型的典型代表，目前已在不同树种研究中得到成功应用[8–15]。3-PGmix 模型由 FORRESTER 等[12] 在 3-PG 模型基础上改进而来，重点优化了对落叶树种与混交林的生长模拟适配性，恰好契合本研究中华北落叶松 (落叶树种) 与樟子松的研究对象特性，为精准模拟提供了方法支撑。

国内已有学者基于 3-PG 系列模型开展相关研究：王成雨等[10] 利用 3-PGmix 模型模拟杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林轮伐期与间伐措施对蓄积量的影响，证实不同立地条件下间伐效应存在显著差异；解雅麟等[9] 通过该模型明确不同间伐方案对兴安落叶松 *L. gmelinii* 林分蓄积量、生物量及 NPP 的调控作用；白羽等[11] 借助解析木数据完成长白落叶松 *L. olgensis* 3-PG 模型参数化。对于本研究，3-PGmix 模型可以对林分设置不同间伐措施同时开展长期模拟，揭示不同间伐措施对林分长期生长的影响规律。

为探究塞罕坝地区独特生境下不同间伐措施对人工林长期生长的影响规律，本研究以塞罕坝机械林场 33 块华北落叶松样地和 20 块樟子松样地的实测数据为基础，借助 3-PGmix 模型开展系统性研究，旨在明确不同间伐措施对 2 种针叶人工林生物量和 NPP 的长期变化规律，最终筛选出有利于林分生产力提升的最优间伐措施，为塞罕坝华北落叶松和樟子松人工林的科学经营提供坚实的理论依据与技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

样地位于河北省承德市围场满族蒙古族自治县塞罕坝机械林场 (42°02′~42°36′N、116°51′~117°39′E)。该区域地处冀北山地与内蒙古高原的过渡带，同时兼具森林—草原、森林—沙漠的交错带属性。气候类型为寒温性大陆季风气候，年均气温为−1.2 ℃，年极端最高气温达 33.4 ℃、极端最低气温低至−43.3 ℃；季节特征上，冬季严寒且持续时间长，夏季清凉而周期短促，年均降水量约 460.0 mm。研究区内主要树种有华北落叶松、樟子松、白桦 *Betula platyphylla*、云杉 *Picea asperata* 等。

1.2 数据收集与处理

1.2.1 *样地调查数据* 样地信息见表 1。本研究样地实测数据采集于 2024 年 9 月，调查因子包括林木胸径、树高、冠幅、活枝下高，样地经纬度、海拔、坡度、坡向和土壤类型。样地包括初植密度为 3 300 株·hm^{-2} 的华北落叶松固定样地 33 块，樟子松固定样地 20 块，样地大小为 20 m×30 m，林龄为 15~50 a。其中，华北落叶松样地未间伐 3 块，轻度间伐 (15%~30%) 10 块，中度间伐 (＞30%~45%) 10 块，重度间伐 (＞45%) 10 块；樟子松样地未间伐 2 块，轻度间伐 (15%~30%) 6 块，中度间伐 (＞30%~45%) 6 块，重度间伐 (＞45%) 6 块。

选取样地内总株数 10% 的树木作为标准木，要求胸径、树高与林分平均胸径、平均树高的差值绝对值≤5%，使用生长锥进行年轮条采样，由于样地最后一次间伐开展于 2017 年，故利用每木检尺的胸径数据结合年轮条数据重建 2018 年样地平均胸径，得到 2 期数据开展后续实验。

表 1 样地林分因子统计量

Table 1 Statistics of stand variables for sample plots

树种	项目	平均胸径/cm	平均树高/m	株数密度/(株·hm^{-2})
华北落叶松	平均值	18.0	14.8	1 385
	最小值	12.7	10.9	350
	最大值	25.5	19.8	2 600
	标准差	4.2	2.7	629
樟子松	平均值	20.2	15.1	1 124
	最小值	15.0	9.0	700
	最大值	26.0	19.5	2 467
	标准差	3.3	3.5	606

1.2.2 *气候数据* 气象数据来源于 ClimateAP 3.10，提取样地地区 (42°23′~42°27′N，117°09′~117°21′E) 1991—2024 年气象数据，包括月均最高气温、月均最低气温、月降水量、月降水日数、霜冻日数等；太阳辐射数据来源于 NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)，从卫星传感器获取的地球科学数据以及从全球大气模型得出的数据。

1.2.3 *生物量和净初级生产力估算* 生物量计算以国家林草局 2024 年最新发布的 GB/T 43648—2024《主要树种立木生物量模型与碳计量参数》为参考，选取河北地区落叶松 (总体编号Ⅱ) 和樟子松生物量模型，采用落叶松和樟子松单木地上和地下生物量模型，选用一元模型结合样地实测数据计算相应指标。计算公式如下：

$$M_{\mathrm{A}} = a_0 D^{a_1};$$

$$M_{\mathrm{B}} = b_0 D^{b_1};$$

$$P_{\mathrm{NPP}} = M_i - M_{i-1}。$$

其中，M_A为地上生物量估计值 (kg)；a_0、a_1、b_0、b_1为模型参数，华北落叶松的参数值分别为 0.062 3、2.016、2.403 和−0.049 8，樟子松的参数值分别为 0.054 6、2.234、2.572 和−0.039 8；D为林木胸径 (cm)；M_B为地下生物量估计值 (kg)；P_{NPP}指净初级生产力 (t·hm^{-2})；M_i为第i年生物量 (t·hm^{-2})。

1.2.4　样地间伐措施设置　依照 LY/T 1897—2022《中华人民共和国林业行业标准》中“华北落叶松人工林经营技术规程”及塞罕坝机械林场实际造林规划设计，设定初植密度为 3 300 株·hm^{-2}。本研究在 3-PGmix 模型中设定标准化间伐情景 (与 1.2.1 节样地调查所采用的实际间伐强度分级不同，此处为模型模拟的参数设定)，设置 4 种不同的间伐强度：未间伐对照组、轻度间伐、中度间伐、重度间伐，分别对应间伐强度为 0%、20%、35% 和 50%，分别用字母 NT、LT、MT 和 HT 表示。间伐次数设定为 2 次，第 1 次间伐设定在初植后第 10 年进行，第 2 次间伐分为距离第 1 次间伐 5 和 10 a 2 种情况。6 种处理组合分别为 LT5、MT5、HT5、LT10、MT10、HT10 (字母表示间伐强度，数字表示第 2 次间伐距离第 1 次间伐的年数)。

1.3　3-PGmix 模型

3-PGmix 模型是由 3-PG 模型进一步改进得到的，基于月时间尺度和林分空间尺度的生长过程模型。模型主要由碳固定模块、生物量分配模块和水量平衡模块构成，输入变量包括林分因子、立地因子、气候、营林措施等数据，即可有效模拟林分生理生长过程。模型输出变量包括随林龄变化的林分和林冠因子、蓄积量、各组分生物量等数据[12]。

1.3.1　模型参数　模型参数见表 2，主要通过以下 3 种方法获得：通过实测样地数据拟合计算求得；利用过往研究中相同或相似树种的参数，再通过迭代的方法得到拟合效果最佳的参数；模型参数默认值。土壤肥力等级 (FR) 作为 3-PGmix 模型的关键变量，采用 SUBEDI 等[16] 的方法，利用优势木平均高和基准年龄推算的立地指数 (SI)，建立样地 SI 与林分蓄积量之间的函数关系，最后建立 FR 与 SI 的函数方程。

1.3.2　模型评价　采用 5 折交叉验证法，将样地实测数据随机划分为 5 组，以其中 4 组作为模型校正样本，余下 1 组作为验证样本，分别对样地实测平均胸径、平均树高、生物量和净初级生产力与模型模拟值进行对比检验。将模型预测值与样地实测值进行简单回归分析，计算决定系数 (R^2)、平均绝对误差 (MAE)、平均相对误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE) 和相对均方根误差 (RRMSE)，以此评估模型精度[10]。

2　结果与分析

2.1　模型精度检验

由表 3 可知：3-PGmix 模型对华北落叶松和樟子松各林分因子的模拟精度均较高。华北落叶松各因子的 R^2 为 0.91~0.99，MRE 不超过 19.9%，RRMSE 不超过 12.1%；樟子松各因子的 R^2 为 0.84~0.99，MRE 不超过 7.0%，RRMSE 不超过 14.2%。其中，2 个树种平均胸径的模拟精度最高，校准与验证 R^2 均达 0.99，RRMSE 均不超过 1.5%；平均树高的 R^2 为 0.91~0.98，RRMSE 不超过 13.2%；生物量的 R^2 为 0.96~0.99，RRMSE 不超过 14.2%；净初级生产力的 R^2 为 0.84~0.93，MRE 不超过 19.9%。校准精度与验证精度总体接近，表明本研究构建的 3-PGmix 模型参数体系具备良好的泛化能力，可用于塞罕坝地区华北落叶松和樟子松人工林生长过程的精确模拟。

2.2　间伐对塞罕坝华北落叶松和樟子松人工林生物量的影响

由表 4 可知：2 个树种生物量在不同间伐处理间均存在差异，且均以未间伐处理的生物量最大值最高，重度间伐 10 a 间隔处理最低。与未间伐处理相比，各间伐处理的华北落叶松生物量最大值降低 1.44%~6.89%，樟子松降低 0.32%~9.64%。

由图 1 可知：2 个树种生物量随林龄的变化趋势基本一致，均随林龄增大而持续增加，在幼龄林和中龄林阶段增速较快，进入近熟林阶段后增速趋缓。间伐使林分生物量在短期内显著下降，且间伐强度越大、间隔时间越长，生物量降幅越大。然而，经长期恢复后，不同间伐处理间的生物量差异逐渐缩小，60 a 末各处理间的生物量最大值差距趋于减小。

2.3　间伐对塞罕坝华北落叶松和樟子松人工林净初级生产力的影响

由表 5 可知：2 个树种 NPP 在不同间伐处理间均存在差异，在 60 a 模拟期内，各处理中以重度间

表 2 华北落叶松和樟子松人工林 3-PGmix 模型参数

Table 2 Parameters of 3-PGmix model of *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations

项目	参数	符号	单位	华北落叶松	樟子松	来源
异速生长关系及分配	当胸径为2 cm时的叶干质量比	p_2	–	0.683	0.7	[17]；F
	当胸径为20 cm时的叶干质量比	p_{20}	–	0.146	0.198	F；F
	干质量与胸径的关系常数	a_s	–	0.063	0.0604	F；F
	干质量与胸径的幂指数	n_s	–	2.507	2.469	F；F
	NPP分配到根的最大比例	η_{Rx}	–	0.6	0.6	F；F
	NPP分配到根的最小比例	η_{Rn}	–	0.25	0.25	F；F
凋落物及根周转	最大叶凋落速率	γ_{FX}	月$^{-1}$	0.065	0.0295	F；F
	林龄为0时叶凋落速率	γ_{F0}	月$^{-1}$	0.001	0.001	D；D
	叶凋落速率达1/2时林龄	$t_{\gamma F}$	月	24	48	[17]；[15]
	月均根周转率	γ_R	月$^{-1}$	0.015	0.015	D；D
	叶子长出月	t_{LP}	月	5	0	[17]；[15]
	叶子脱落月	t_{LL}	月	10	0	[17]；[15]
温度调节	生长最低温度	T_{min}	℃	−5	−5	[17]；[15]
	生长最适温度	T_{opt}	℃	16	15	[17]；[15]
	生长最高温度	T_{max}	℃	38	35	[17]；[15]
林龄调节	最大林龄	t_x	a	160	160	[17]；[15]
比叶面积	初期比叶面积(SLA_0)	σ_0	$m^2 \cdot kg^{-1}$	7.986	4.29	[17]；[15]
	成熟林比叶面积(SLA_1)	σ_1	$m^2 \cdot kg^{-1}$	5	4.29	[17]；[15]
	比叶面积达(SLA_0+SLA_1)/2时林龄	t_σ	a	5	5	D；D
生产及呼吸	冠层量子效率	α_{Cx}	$mol \cdot mol^{-1}$	0.056	0.04	F；F
树高	茎高关系常数	α_H	–	2.869 5	0.333 8	F；F
	胸径在茎高关系中的幂指数	n_{HB}	–	0.569 8	1.253 3	F；F
	竞争在茎高关系中的幂指数	n_{HC}	–	0	0	F；F
材积	材积关系常数	a_V	–	7.27×10^{-5}	7.57×10^{-5}	F；F
	胸径在材积关系中的幂指数	n_{VB}	–	1.800 4	1.872 2	F；F
	树高在材积关系中的幂指数	n_{VH}	–	0.992 5	0.882 9	F；F

说明：来源列中分号前后分别表示华北落叶松和樟子松的参数来源；F 为拟合与实测参数，D 为模型默认参数。–表示无单位。

表 3 模型评估结果

Table 3 Results of model evaluation

树种	统计指标	校准精度				验证精度			
		平均胸径/cm	平均树高/m	生物量/($t \cdot hm^{-2}$)	净初级生产力/($t \cdot hm^{-2}$)	平均胸径/cm	平均树高/m	生物量/($t \cdot hm^{-2}$)	净初级生产力/($t \cdot hm^{-2}$)
华北落叶松	MAE	0.21	0.55	7.99	0.40	0.22	0.56	3.83	0.70
	RMSE	0.27	0.66	9.22	0.54	0.23	0.65	4.68	0.73
	MRE/%	1.20	3.70	5.50	11.00	1.20	3.60	2.60	19.90
	RRMSE/%	1.50	6.00	5.60	11.10	1.50	4.70	3.70	12.10
	R^2	0.99	0.91	0.96	0.92	0.99	0.91	0.98	0.93
樟子松	MAE	0.24	0.63	4.10	0.22	0.12	0.60	2.05	0.32
	RMSE	0.31	0.71	5.29	0.26	0.13	0.80	2.25	0.33
	MRE/%	1.20	4.50	2.90	4.10	0.60	4.40	1.50	7.00
	RRMSE/%	1.50	13.20	14.20	4.70	1.50	4.90	3.50	5.60
	R^2	0.99	0.96	0.98	0.84	0.99	0.98	0.99	0.86

伐 10 a 间隔处理的 NPP 平均值最高，未间伐处理最低。总体规律表现为：NPP 随间伐强度增大而升高，且相同间伐强度下长间隔处理的 NPP 高于短间隔处理。与未间伐处理相比，各间伐处理使华北落叶松 NPP 平均值提高了 5.81%~17.19%，樟子松 NPP 平均值提高了 2.35%~7.51%。

由图 2 可知：华北落叶松人工林 NPP 在幼龄林阶段随林龄增大迅速升高，约 11 a 时达到峰值，此后随林龄增大而缓慢下降；间伐强度越大、间隔时间越长，NPP 趋于稳定下降的时间越晚。在 11~60 a 模拟期内，未间伐处理的 NPP 几乎始终低于各间伐处理；各间伐处理在间伐后 NPP 均有短暂回升，但间伐强度越大，回升幅度越小。樟子松人工林 NPP 在幼龄林阶段同样呈快速升高趋势，随后经历一段先降后升的波动阶段，最终转入缓慢持续下降。各处理均在经历一定林龄后趋于稳定下降，且间伐强度越大，趋于稳定下降的时间越晚，与华北落叶松人工林 NPP 随间伐强度的响应特征一致。

表 4　不同间伐措施华北落叶松和樟子松生物量模拟统计量

Table 4　Statistics of simulated biomass in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning regimes

处理	华北落叶松		樟子松	
	生物量最大值/(t·hm^{-2})	相对增量/%	生物量最大值/(t·hm^{-2})	相对增量/%
NT	252.04	0	259.67	0
LT5	248.42	−1.44	258.83	−0.32
MT5	246.00	−2.40	252.71	−2.68
HT5	242.28	−3.87	235.16	−9.44
LT10	245.26	−2.69	254.47	−2.00
MT10	240.50	−4.58	245.09	−5.61
HT10	234.68	−6.89	234.63	−9.64

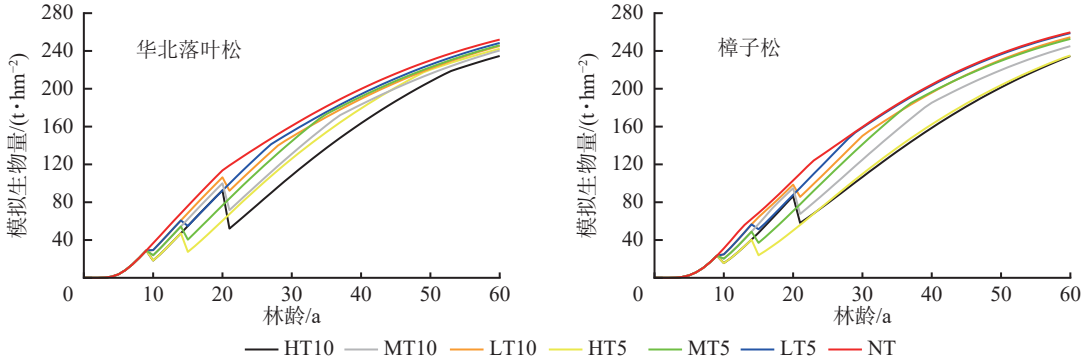

图 1　不同间伐措施华北落叶松和樟子松生物量模拟

Figure 1　Simulated biomass in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning regimes

3　讨论

3.1　3-PGmix 模型性能评价

森林生物量和 NPP 形成是一个极其复杂的过程，既受树种自身生长特性与生理生态过程的影响，也受降水、温度、土壤等环境因子的影响。目前的森林生物量与 NPP 估算与模拟方法有多种，其中，直接收获法和解析木法破坏性大，无法重复观测，气候相关模型和植被指数模型等受季节气候变化限制，不同地区误差大。作为过程模型的一种，3-PG 模型包含碳平衡、生物量分配和光辐射等树种自身的生理参数，也囊括了气候、土壤肥力等众多环境因素。该模型以系列方程为核心工具，涵盖碳量平衡、水量平衡及生物量分配，对外界环境因子调控下的植被生理过程进行模拟，最终实现对林分生长过程的定量预测[18]。

本研究基于 33 块华北落叶松和 20 块樟子松人工纯林样地实测数据，对 3-PGmix 模型进行参数

表 5　不同间伐措施华北落叶松净初级生产力模拟值

Table 5　Statistics of simulated NPP in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning regimes

统计值	华北落叶松		樟子松	
	NPP平均值/(t·hm^{-2})	相对增量/%	NPP平均值/(t·hm^{-2})	相对增量/%
NT	4.13	0	4.26	0
LT5	4.37	5.81	4.36	2.35
MT5	4.51	9.20	4.45	4.46
HT5	4.59	11.14	4.55	6.81
LT10	4.46	7.99	4.42	3.76
MT10	4.68	12.83	4.49	5.40
HT10	4.84	17.19	4.58	7.51

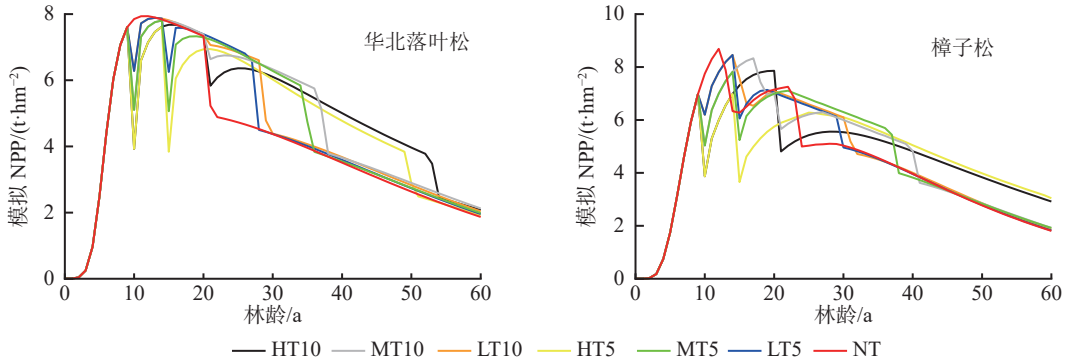

图 2 不同间伐措施华北落叶松和樟子松净初级生产力模拟

Figure 2 Simulated NPP in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning regimes

化，利用 3-PGmix 模型模拟间伐对塞罕坝华北落叶松和樟子松的林分生物量和生产力的影响，生物量和 NPP 的模拟值和观测值具有较好的一致性，证明了 3-PGmix 在本研究中的可行性。本研究中使用的 3-PGmix 模型参数中，p_2、p_{20}、η_{R_x}、η_{R_n}、γ_{F_X}、α_{C_x}等参数取值均通过迭代的方法选取。华北落叶松部分参数直接采用已有研究中华北落叶松实测或拟合得到的参数[9]；有关樟子松研究内容较少，无法获取准确的参数值，但樟子松为欧洲赤松 *Pinus sylvestris* 的变种，国外对于欧洲赤松的研究较多，本研究采用的部分樟子松参数来源于已建立的欧洲赤松 3-PGmix 模型参数[13, 15]。欧洲赤松生境与塞罕坝地区独特生境存在差异，这可能会导致模型模拟樟子松生长的准确性下降。

本研究中实测的样地无法完整覆盖 60 a 模拟时间，部分实测成熟林样地间伐强度和时间存在不明确的情况，且樟子松样地数量仅有 20 块，相较于华北落叶松样本数量不足，可能会影响 3-PGmix 模型参数的精确度，从而影响模拟的准确性。另外，本研究的模拟是在理想的立地条件、林分空间和无气候变化、极端气候和病虫害等外部干扰因子的条件下进行，但实际情况可能存在多种环境因素导致林分生长状况发生改变。在后续研究中，应进一步扩大样地数量，并纳入覆盖更广泛的立地条件 (包括不同海拔、坡度、土壤类型等) 及不同气候情景下的华北落叶松和樟子松样地数据，以提高模拟的精确度。

3.2 间伐对林分生物量与净初级生产力的影响

本研究模拟不同间伐时间间隔和不同间伐强度对华北落叶松和樟子松人工林生物量和 NPP 的影响，并分析了 60 a 间林分生物量与 NPP 的动态变化特征。结果表明：在生物量积累方面，较短的间伐时间间隔 (5 a) 能够使林分生物量更快恢复，而从 NPP 方面来看，长间隔 (10 a) 相较于短间隔 (5 a) 更有利于 NPP 的增加。从间伐强度来看，未间伐处理下 2 个树种生物量最大值最高，但经长期恢复演替后，不同间伐处理林分的生物量差距逐步缩小并趋于接近，重度间伐则最有利于提升 NPP，与塞罕坝地区其他研究结果相一致[2, 19]，与贾忠奎等[20] 对于塞罕坝华北落叶松人工林的研究结果部分一致。

间伐直接移除部分林木，导致林分密度下降，冠层截获光合有效辐射减少，短期内生物量和 NPP 积累可能呈下降趋势[21−23]。间伐初期间伐后剩余树木受到的竞争减弱，虽然促进单株树木生长，但难以抵消间伐导致的生物量损失，表现为间伐林分总生物量低于未间伐林分生物量。本研究中间伐措施减少了林分的生物量，但也促进了林分 NPP 的增加，虽然短期内生物量损失严重，但经过较长时间后能恢复到接近未间伐组的林分生物量。

从 3-PGmix 模型碳平衡模块角度看，林分 NPP 表现为碳固定与自养呼吸的差值。间伐前，林分因高密度导致光照、水分、养分竞争激烈，碳固定受限制；间伐疏减林分密度，林分空间格局得到优化，保留木生长条件提高，整体碳固定得以提升[24]。自养呼吸与各器官生物量直接相关，总体而言间伐后自养呼吸的下降幅度通常大于碳固定的变化幅度，表现为 NPP 的提升。另外间伐会增加林分的凋落物层，提高土壤养分含量，从而实现 NPP 的提升。对于间伐后的恢复期，较长的间伐间隔期能提供给生态系统更多的时间从人类干扰中恢复，有利于生产力的积累[17]。LI 等[25] 研究表明：未经间伐的高初始种植密度会导致高死亡率以及缓慢的生长速度，重度间伐可在短期内使落叶松的 NPP 翻倍。OGAYA 等[26] 研究发现间伐可以提高地中海冬青栎 *Quercus ilex* 天然林森林生产力。由于间伐降低了林分密度，林木种内竞争性降低，单木生长空间增大，光合作用面积增加，更有利于干物质的积累，因而能提高林分生

产力[4]。虽然间伐强度的增加能有效提高森林生产力，但强度不宜过高，强度过高间伐会显著降低林分密度，导致土壤蒸发增加，产生水分胁迫，可能引发 NPP 长期下降[27]。因此，通过模拟林分间伐对林分净初级生产力的影响，以获取最佳的间伐方案，可以作为有效提高人工林生物量和生产力的依据。

3.3　净初级生产力随林龄变化规律

在本研究中，2 种林分 NPP 随林龄变化整体均呈现“先快速上升，达到峰值后逐渐下降”的单峰曲线规律。幼龄林时期，林分冠层逐渐郁闭，叶面积指数快速上升，叶片的光合效率处于最佳阶段，且林分内部资源 (光照、养分、水分) 分配相对均衡，个体生长与群体光合的协同性最强，NPP 快速攀升并达到整个生长周期的峰值，是人工林生产力的鼎盛时期。10 a 以后，植株个体间的资源竞争加剧，同时部分叶片进入衰老阶段，叶面积指数逐渐下降，光合作用能力减弱；且林分生物量分配向木质部 (树干、粗根) 倾斜，用于呼吸消耗的非光合器官占比升高，NPP 从峰值开始缓慢下降。若此时不采取间伐措施，经过一段时间后，林分生长达到空间最大值，优势木冠层完全郁闭，冠层下部的弱势个体死亡，会导致林分 NPP 在短时间内大幅下降。

目前，较多研究者认为森林在老龄阶段碳固定的降低幅度比自养呼吸的上升幅度更显著是导致 NPP 下降的主要原因[28]。另外，林分长期生长或土壤保肥能力差导致土壤养分缺失进而限制森林生长并抑制 NPP，也被认为是导致 NPP 下降的重要原因之一[29]。

对于模拟樟子松 NPP 变化在总体下降过程中有小段 NPP 上升的情况，可能是因为模型参数比叶面积部分直接使用了欧洲赤松的参数[15]，而欧洲赤松在模型中被默认为叶面积指数并不会随林龄而改变，这可能导致本研究中樟子松在自疏过程中能够以优势木光合作用能力提高实现 NPP 的短暂上升。

4　结论

本研究实现了塞罕坝地区华北落叶松和樟子松人工林 3-PGmix 模型的本地化参数化，并系统模拟了 60 a 生长周期内不同间伐强度与间隔时间组合对林分生物量和 NPP 的长期影响。研究表明：基于样地实测数据校准的 3-PGmix 模型对 2 个树种主要林分因子的模拟精度较高 (R^2=0.84~0.99)，可有效应用于塞罕坝地区华北落叶松和樟子松人工林生长的定量预测。

2 个树种均呈现出生物量与间伐强度反向变动、NPP 与间伐强度正向变动的分异格局，且这一格局并非静态：林分经长期自然恢复后，不同间伐处理间的生物量差异趋于缩小，而 NPP 差异在间伐强度较高时依然维持。从 NPP 的林龄动态看，2 个树种均呈现幼龄林阶段快速攀升、近熟林阶段持续下降的单峰规律，间伐可延缓 NPP 峰值后的下降进程。

本研究条件下，重度间伐 (强度 50%) 配合 10 a 长间隔的组合方案在提升林分 NPP 方面效果最优。

本研究存在一定局限性：现有样地数量有限，且难以覆盖塞罕坝完整的立地条件梯度；樟子松部分参数参照欧洲赤松相关研究，与当地生境的适配性尚需进一步验证；此外，模拟过程未考虑气候变化、极端气候事件及病虫害等随机干扰因子的影响。后续研究应在扩充不同立地条件和气候情景下样地数量的基础上，结合长期定位监测数据对模型参数进行持续率定，并引入气候变化情景，以提升模型在复杂环境条件下的预测能力与适用范围。

5　参考文献

[1]　钱甲龙, 孙鹤嘉, 刘强, 等. 植被恢复对塞罕坝地区土壤养分质量的影响 (2002—2022 年)[J]. 东北林业大学学报, 2024, **52**(8): 126−133. QIAN Jialong, SUN Hejia, LIU Qiang, *et al*. Effects of vegetation restoration on soil nutrient quality in the Saihanba Region (2002−2022)[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, **52**(8): 126−133. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2024.08.018.

[2]　付立华, 孙赫, 孙一博, 等. 间伐干扰对人工林林木生长、幼苗更新及植被多样性的影响[J]. 林业与生态科学, 2022, **37**(2): 148−154. FU Lihua, SUN He, SUN Yibo, *et al*. Effects of thinning on tree growth, seedling regeneration and vegetation diversity of plantation[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2022, **37**(2): 148−154. DOI: 10.13320/j.cnki.hjfor.2022.0021.

[3]　李登秋, 张春华, 居为民, 等. 江西省森林净初级生产力动态变化特征及其驱动因子分析[J]. 植物生态学报, 2016,

40(7): 643−657. LI Dengqiu, ZHANG Chunhua, JU Weimin, *et al*. Forest net primary productivity dynamics and driving forces in Jiangxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, **40**(7): 643−657. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0348.

[4] 商添雄, 韩海荣, 程小琴, 等. 华北落叶松人工林生长对抚育间伐的响应及其与土壤因子的关系[J]. 林业科学研究, 2019, **32**(6): 40−47. SHANG Tianxiong, HAN Hairong, CHENG Xiaoqin, *et al*. Response of *Larix principis-rupprechtii* plantation growth to thinning and its relationship with soil factors[J]. *Forest Research*, 2019, **32**(6): 40−47. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2019.06.006.

[5] 黄鑫春. 不同抚育间伐强度对辽东落叶松林生长的影响[J]. 林业资源管理, 2016(1): 65−71. HUANG Xinchun. Effect of different thinning intensities on the growth of Larch forest in eastern Liaoning Province[J]. *Forest Resources Management*, 2016(1): 65−71. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2016.01.012.

[6] 魏安然, 张雨秋, 谭凌照, 等. 抚育采伐对针阔混交林林分结构及物种多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, **41**(5): 148−158. WEI Anran, ZHANG Yuqiu, TAN Lingzhao, *et al*. Effects of tending felling on stand structure and species diversity of mixed coniferous and broadleaved forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, **41**(5): 148−158. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20190018.

[7] 雷相东. 机器学习算法在森林生长收获预估中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2019, **41**(12): 23−36. LEI Xiangdong. Applications of machine learning algorithms in forest growth and yield prediction[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, **41**(12): 23−36. DOI: 10.12171/j.1000−1522.20190356.

[8] 曲凌昊, 赵秀海, 张春雨. 3-PG 模型在天然兴安落叶松林生长因子预测中的应用[J]. 林业科学研究, 2022, **35**(1): 158−165. QU Linghao, ZHAO Xiuhai, ZHANG Chunyu. Application of 3-PG model in the prediction of growth factors in natural *Larix gmelinii* forest[J]. *Forest Research*, 2022, **35**(1): 158−165. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.01.018.pdf.

[9] 解雅麟, 雷相东, 曾伟生. 基于 3-PGmix 过程模型的落叶松人工林生长过程表编制[J]. 林业科学, 2023, **59**(12): 87−104. XIE Yalin, LEI Xiangdong, ZENG Weisheng. Compilation of growth and yield table for larch plantations based on 3-PGmix model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, **59**(12): 87−104. DOI: 10.11707/j.1001-7488.LYKX20220837.

[10] 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 Chengyu, FU Xinran, LI Jiayi, *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. DOI: 10.20103/j.stxb.202407021537.

[11] 白羽, 庞勇, 夏晓运, 等. 长白落叶松解析木数据参数化 3-PG 模型[J]. 林业科学, 2022, **58**(1): 98−110. BAI Yu, PANG Yong, XIA Xiaoyun, *et al*. 3-PG model parameterization using destructive sampling data of *Larix olgensis*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, **58**(1): 98−110. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20220111.

[12] FORRESTER D I, TANG Xiaolu. Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model[J]. *Ecological Modelling*, 2016, **319**: 233−254. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.07.010.

[13] FORRESTER D I, HOBI M L, MATHYS A S, *et al*. Calibration of the process-based model 3-PG for major Central European tree species[J]. *European Journal of Forest Research*, 2021, **140**(4): 847−868. DOI: 10.1007/s10342-021-01370-3.

[14] BAI Yu, PANG Yong, KONG Dan. Integrating remote sensing and 3-PG model to simulate the biomass and carbon stock of *Larix olgensis* plantation[J]. *Forest Ecosystems*, 2024, **11**: 100213. DOI: 10.1016/j.fecs.2024.100213.

[15] FORRESTER D I, AMMER C, ANNIGHÖFER P J, *et al*. Predicting the spatial and temporal dynamics of species interactions in *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* forests across Europe[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, **405**: 112−133. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.09.029.

[16] SUBEDI S, FOX T, WYNNE R. Determination of fertility rating (FR) in the 3-PG model for loblolly pine plantations in the southeastern United States based on site index[J]. *Forests*, 2015, **6**(9): 3002−3027. DOI: 10.3390/f6093002.

[17] XIE Yalin. 基于 3-PGmix 模型的气候变化和间伐对落叶松林生长收获的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2021. XIE Yalin. *Effects of Climate Change and Thinning on Growth and Yield of Larch Plantations Based on 3-PGmix Model*[D]. Beijing: Beijing Foretry University, 2021. DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2020.001436.

[18] 王馨慧, 邢艳秋, 黄佳鹏, 等. 基于 3-PG 模型的森林植被净初级生产力动态变化研究[J]. 森林工程, 2019, **35**(5): 50−56, 62. WANG Xinhui, XING Yanqiu, HUANG Jiapeng, *et al*. Dynamic research of net primary productivity of forest

vegetation based on 3-PG model[J]. *Forest Engineering*, 2019, **35**(5): 50−56, 62. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8023.2019.05.009.

[19] 张乃暄, 王韵頔, 许中旗, 等. 抚育间伐对塞罕坝地区云杉人工林碳储量及固碳速率的影响[J]. 河北农业大学学报, 2022, **45**(6): 81−87. ZHANG Naixuan, WANG yundi, XU Zhongqi, *et al*. The effects of thinning on vegetation carbon storage and carbon fixation rate of spruce plantations in Saihanba area[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2022, **45**(6): 81−87. DOI: 10.13320/j.cnki.jauh.2022.0097.

[20] 贾忠奎, 公宁宁, 姚凯, 等. 间伐强度对塞罕坝华北落叶松人工林生长进程和生物量的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012, **40**(3): 5−7, 31. JIA Zhongkui, GONG Ningning, YAO Kai, *et al*. Effects of thinning intensity on the growth and biomass of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Saihanba, Hebei Province[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, **40**(3): 5−7, 31. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2012.03.002.

[21] BOSELA M, ŠTEFANČÍK I, MARČIŠ P, *et al*. Thinning decreases above-ground biomass increment in Central European beech forests but does not change individual tree resistance to climate events[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, **306**: 108441. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108441.

[22] MAGRUDER M, CHHIN S, PALIK B, *et al*. Thinning increases climatic resilience of red pine[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, **43**(9): 878−889. DOI: 10.1139/cjfr-2013-0088.

[23] MARTINÍK A, MATOUŠKOVÁ M. Effect of thinning in birch stands: a review[J]. *Forest Ecology and Management*, 2025, **585**: 122675. DOI: 10.1016/j.foreco.2025.122675.

[24] 曹正, 苏宝玲, 张岩松, 等. 抚育间伐对辽东山区日本落叶松人工林碳储量及其组成的影响[J]. 应用生态学报, 2025, **36**(7): 1991−1999. CAO Zheng, SU Baoling, ZHANG Yansong, *et al*. Effects of thinning on carbon stocks and fractions of *Larix kaempferi* plantation in eastern area of Liaoning Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, **36**(7): 1991−1999. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202507.003.

[25] LI Zhaochen, XIAO Jun, LU Gang, *et al*. Productivity and profitability of *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus tabuliformis* plantation forests in Northeast China[J]. *Forest Policy and Economics*, 2020, **121**: 102314. DOI: 10.1016/j.forpol.2020.102314.

[26] OGAYA R, ESCOLÀ A, LIU Daijun, *et al*. Effects of thinning in a water-limited holm oak forest[J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 2020, **39**(4): 365−378. DOI: 10.1080/10549811.2019.1673179.

[27] SOUČEK J, ŠPULÁK O, LEUGNER J. Development of birch-aspen stand on a wind-thrown area[J]. *Reports of Forestry Research-Zpravy Lesnicheho Vyzkumu*, 2019, **64**(4): 191−197.

[28] 田雷. 结合林龄的亚热带森林 NPP 与碳汇估算及情景预测[D]. 南京: 南京林业大学, 2025. TIAN Lei. *Estimation and Scenario Projections of NPP and Carbon Sinks in Subtropical Forests Combined with Forest Age: A Case Study of Hunan Province*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2025. DOI: 10.27242/d.cnki.gnjlu.2025.000031.

[29] FISHER J B, BADGLEY G, BLYTH E. Global nutrient limitation in terrestrial vegetation[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**(3): 2011GB004252. DOI: 10.1029/2011gb004252.