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

引入林分结构与土壤养分提高大兴安岭火烧迹地白桦幼树树高胸径模型精度

朱世萍 梅雪松 刘兆刚 董灵波

Incorporating stand structure and soil nutrients to improve the accuracy of height-diameter model of naturally regenerated *Betula platyphylla* saplings under forest fire disturbance in the Greater Khingan Range

Zhu Shiping, Mei Xuesong, Liu Zhaogang, Dong Lingbo

引用本文:
朱世萍, 梅雪松, 刘兆刚, 董灵波. 引入林分结构与土壤养分提高大兴安岭火烧迹地白桦幼树树高胸径模型精度[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):86–97. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260014
Zhu Shiping, Mei Xuesong, Liu Zhaogang, Dong Lingbo. Incorporating stand structure and soil nutrients to improve the accuracy of height–diameter model of naturally regenerated *Betula platyphylla* saplings under forest fire disturbance in the Greater Khingan Range[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):86–97. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260014

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260014

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于林木分级的大兴安岭天然兴安落叶松树高曲线研究

Height curve of natural *Larix gmelinii* in the Daxing’anling Mountains of northeastern China based on forest classification

北京林业大学学报, 2023, 45(5): 88–96. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210513

林火干扰对林分结构及植被更新影响研究进展

Research progress on effects of fire disturbance on stand structure and vegetation regeneration

北京林业大学学报, 2025, 47(1): 156–162. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240029

基于长时序影像的大兴安岭山脉林火扰动识别与时空分布格局

Identification of forest fire disturbances and spatiotemporal distribution patterns in the Greater Khingan Mountains based on long–term remote sensing imagery

北京林业大学学报, 2026, 48(4): 80–91. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250157

内蒙古大兴安岭林区白桦天然林单木胸径生长模型构建

Construction of individual tree DBH growth models for natural *Betula platyphylla* forests in Daxing’an Mountains, Inner Mongolia of northern China

北京林业大学学报, 2024, 46(8): 101–110. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230086

基于混合效应和分位数回归的温带针阔混交林树高与胸径关系研究

Research on the relationship between tree height and DBH of temperate coniferous and broadleaved mixed forests based on mixed effects and quantile regression

北京林业大学学报, 2024, 46(2): 28–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220428

气候敏感的杉木树高胸径非线性混合效应模型研建

Development of climate–sensitive nonlinear mixed–effects tree height–DBH model for *Cunninghamia lanceolata*

北京林业大学学报, 2023, 45(9): 52–61. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230052

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260014

引入林分结构与土壤养分提高大兴安岭火烧迹地白桦幼树树高−胸径模型精度

朱世萍　梅雪松　刘兆刚　董灵波
（东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】为揭示林火干扰对大兴安岭地区天然更新白桦幼树树高−胸径关系的影响，通过模型构建并引入林分结构和土壤养分特征提高其多因素模拟精度，为该地区火后森林经营管理提供理论支撑。**【方法】**以大兴安岭塔河林业局盘古林场为研究区，在 1996、2010、2019 年重度火干扰迹地及非火干扰区设置固定样地 24 块，调查白桦幼树（胸径 < 5 cm）1 465 株。采用调整决定系数（R_a^2）、平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）筛选最优基础模型；以火干扰状态为哑变量，通过再参数化将林分及土壤因子引入基础模型，构建广义非线性模型；进一步纳入样地水平随机效应，构建非线性混合效应模型。针对火干扰区与非火干扰区样本量不均衡问题，采用分层抽样策略进行 3 折交叉验证，确保各折中两类样地比例与总体一致，以评估模型泛化能力。**【结果】**（1）Gompertz 模型为白桦幼树树高−胸径的最优基础模型，其 R_a^2、RMSE 和 MAE 分别为 0.683 9、1.03 m 和 0.78 m；（2）引入火干扰、树种香农多样性指数和土壤全磷的广义非线性模型显著提升了预测精度，R_a^2 提升约 4.1%，RMSE 和 MAE 分别降低约 4.9% 和 6.4%；（3）进一步考虑样地异质性后，混合效应模型的 R_a^2 提升至 0.730 6，RMSE 和 MAE 分别降为 0.95 m 和 0.71 m；（4）树种香农多样性指数和土壤全磷均与幼树高生长呈负相关，但火干扰显著削弱了二者的抑制效应；当胸径为 5 cm 时，火干扰区预测树高（6.44 m）较非火干扰区（6.15 m）高 4.7%。**【结论】**研究表明火干扰通过缓解林分竞争和土壤磷养分约束限制，间接促进了白桦幼树生长。本研究构建的混合效应模型有效捕获了样地水平的异质性，为火干扰后天然林更新预测提供了可靠工具。

关键词：林火干扰；白桦幼树；哑变量；混合效应；树高；胸径；土壤养分
中图分类号：S792.15　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)10−0086−12
引文格式：朱世萍，梅雪松，刘兆刚，等. 引入林分结构与土壤养分提高大兴安岭火烧迹地白桦幼树树高−胸径模型精度[J]. 北京林业大学学报，2026，48(10)：86−97. Zhu Shiping, Mei Xuesong, Liu Zhaogang, et al. Incorporating stand structure and soil nutrients to improve the accuracy of height-diameter model of naturally regenerated *Betula platyphylla* saplings under forest fire disturbance in the Greater Khingan Range[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 86−97.

Incorporating stand structure and soil nutrients to improve the accuracy of height-diameter model of naturally regenerated *Betula platyphylla* saplings under forest fire disturbance in the Greater Khingan Range

Zhu Shiping　Mei Xuesong　Liu Zhaogang　Dong Lingbo
(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [**Objective**] To reveal the effects of forest fire disturbance on the height-diameter relationship of naturally regenerated *Betula platyphylla* saplings in the Greater Khingan Mountains region, this study improved the accuracy of multi-factor simulation by constructing models and incorporating stand structure and soil nutrient characteristics, so as to provide theoretical support for post-fire forest management in this

收稿日期: 2026−01−13　**修回日期:** 2026−03−05
基金项目: 国家重点研发计划（2023YFF1304002）。
第一作者: 朱世萍。主要研究方向：森林可持续经营。Email: 2498579063@qq.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学林学院。
责任作者: 董灵波，博士生导师，教授。主要研究方向：森林可持续经营。Email: farrell0503@126.com　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

area. [**Method**] A total of 1 465 *Betula platyphylla* saplings were surveyed across 24 permanent plots in Panggu Forest Farm, Tahe Forestry Bureau, Greater Khingan Mountains, covering areas burned in 1996, 2010, and 2019 as well as unburned controls. The adjusted coefficient of determination (R_a^2), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE) were used to select the optimal height-diameter basic model. A dummy variable representing fire disturbance status was then incorporated, and stand and soil factors were introduced into the base model via reparameterization to construct a generalized nonlinear model. To address the imbalance in sample sizes between burned and unburned plots, a stratified sampling strategy was adopted for 3-fold cross-validation to ensure consistent proportions of plot types across folds, thereby evaluating model generalization. [**Result**] (1) The Gompertz model was identified as the optimal base model with R_a^2, RMSE, and MAE of 0.683 9, 1.03 m, and 0.78 m, respectively. (2) The generalized nonlinear model incorporating fire disturbance, Shannon diversity index of tree species, and soil total phosphorus significantly improved prediction accuracy, increasing R_a^2 by approximately 4.1%, and reducing RMSE and MAE by approximately 4.9% and 6.4%, respectively. (3) The nonlinear mixed-effects model further improved R_a^2 to 0.730 6, with RMSE and MAE decreasing to 0.95 m and 0.71 m, respectively. (4) Both the Shannon diversity index and soil total phosphorus were negatively correlated with sapling height growth. However, fire disturbance significantly attenuated their inhibitory effects. For saplings with a DBH of 5 cm, predicted height in burned areas (6.44 m) was 4.7% higher than that in unburned areas (6.15 m). [**Conclusion**] Our findings indicate that fire disturbance promotes *Betula platyphylla* sapling height growth by alleviating stand competition and soil phosphorus limitation. The mixed-effects model developed in this study effectively captured plot-level heterogeneity, providing a reliable tool for predicting natural regeneration following fire disturbance.

Key words: forest fire disturbance; *Betula platyphylla* saplings; dummy variable; mixed effect; tree height; diameter; soil nutrients

林火是驱动森林生态系统结构与功能变化的关键干扰因子。在全球气候变化背景下，森林火灾的发生频次、燃烧强度与过火面积整体呈上升态势[1]，过火地区的森林经营管理日益受到重视。天然更新是天然林维持与繁衍的核心途径，其进程与效果受不同程度火干扰的影响。阐明林火干扰后林分结构的重塑机制，揭示火后幼树更新生长规律，可为制定科学的火后森林经营措施提供理论依据，对促进林分结构稳定、推动群落向顶级方向演替、保障森林生态系统服务功能的持续发挥具有重要意义[2–3]。

土壤是森林生态系统的重要组成部分，为植物、动物与微生物提供养分基质与生存环境[4–5]。土壤养分的储量、形态及空间异质性直接调控林木个体生长过程，进而影响森林群落的更新动态与演替方向[6]。受气候变化与人类活动的影响，森林土壤养分的含量与分布格局处于持续动态变化中，其中养分有效性的改变是驱动林木生长响应的核心环节。因此，明确土壤养分对林木生长的调控机制，是实现林地养分精准管理、挖掘森林生产潜力与生态功能、制定差异化森林经营方案的重要理论基础。

树高与胸径是林分调查中最易获取且最核心的测树因子，是表征林木生长状态、反映林分结构及预测林木生长潜力的关键参数[7]。树高曲线长期以来是林业研究的重点，其中非线性模型因更符合树木生长规律，在林业研究中得到广泛应用。传统基于普通最小二乘法构建的固定效应模型仅能反映群体平均预测结果，预估误差较大[8]，且要求样本满足独立正态分布条件；而森林立地条件的复杂性导致林木生长存在较强的空间关联性，若按不同立地分别建模会大幅增加调查与计算成本。因此，利用哑变量、混合效应等方法扩展的模型逐渐成为提升树高–胸径模型精度与适用性的主流方向。

哑变量模型可将多分类因子转化为二分变量纳入模型，在简化模型结构的同时实现分组拟合，常与混合效应模型联合使用以进一步提升模型性能。目前二者在树高–胸径模型构建中已形成较为成熟的应用体系。朱光玉等[9]在湖南栎类天然混交林树高–胸径模型中引入林分与立地类型哑变量，证实其可有效提升模型的预估精度与适用范围；沈子奕等[10]发现，纳入地形因子的线性混合效应模型预估精度优于哑变量模型与基础模型，可为立地生产力评估提供更可靠的方法支持。此外，多项研究表明，将海拔、林分密度、土壤养分等环境因子纳入混合效应模型，可有效解释立地异质性带来的生长差异，显

著提升模型的稳定性与生物学解释力[11−13]。

现有树高−胸径生长模型研究多以胸径≥5 cm的成林为对象[14−15]，针对幼树阶段的相关研究相对较少[16]；且多数研究未将火干扰、林分结构与土壤养分因子同时纳入，难以系统揭示火后幼树的生长驱动机制。在全球林火态势加剧的背景下，火干扰区的森林恢复与精准经营对幼树生长模型提出了更高要求。为此，本研究以大兴安岭火干扰区与未火干扰区的白桦幼树为研究对象，在基础模型上，引入火干扰哑变量、林分因子与土壤养分因子，同时纳入样地随机效应，构建非线性混合效应模型，旨在阐明火干扰下环境因子对白桦幼树树高−胸径关系的调控规律，提升火后幼树生长的预估精度，为大兴安岭火烧迹地的森林恢复与经营规划提供理论支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于大兴安岭地区塔河林业局盘古林场（52°41′57″N，123°51′57″E）。该区属寒温带大陆性季风气候，海拔高度介于 420～850 m 之间，年均气温为−4.5 ℃～−3.0 ℃，林内年积雪期为 5 个月，深度达 40 cm。地貌多为山地丘陵。据塔河林业局 2022 年森林资源二类调查数据，该林场总经营面积 18.2 万 hm^2，其中林业用地面积 17.8 万 hm^2，森林覆盖率达 92.3%；主要乔木树种包括兴安落叶松（*Larix gmelinii*，蓄积占比 58%；下同）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*，占比 15%）、白桦（*Betula platyphylla*，占比 12%）、山杨（*Populus davidiana*，占比 8%），以及少量的红皮云杉（*Picea koraiensis*）、冷杉（*Abies nephrolepis*）；林下灌木以杜鹃（*Rhododendron dauricum*）、杜香（*Ledum palustre*）、蓝莓（*Vaccinium uliginosum*）、忍冬（*Lonicera caerulea*）等为主，草本植物以小叶章（*Deyeuxia angustifolia*）、苔草（*Carex* spp.）、蕨类（*Pteridium aquilinum*）等为主。

1.2 数据获取

在全面踏查基础上，于 2024 年选择典型林分设立固定样地 24 块。各样地依据林分特征和试验目的综合确定，其中 1996 年、2010 年和 2019 年重度火干扰各 4 块，未干扰样地各 4 块。设置不同火灾年份样地的主要目的是利用时间代替空间的方法，丰富样本数据，避免同一地区特定年份恢复后样地特征过于相似，从而使构建的模型更具有代表性。

样地面积均为 30 m × 30 m，记录各样地海拔、坡向、坡位、坡度、坐标（GPS）以及郁闭度等林分因子；同时对样地内胸径 ≥ 5 cm 的乔木进行每木调查，记录其树种、胸径、树高、冠幅（东、西、南、北 4 个方向）、状态和相对位置。参照 Chrimes 等[17]和 Saksa 等[18]的研究，本研究中幼树指树高 > 1.3 m 且胸径 < 5 cm 的乔木，测量样地中所有幼树的树种、状态、地径、胸径、树高、相对位置，并根据芽鳞痕用钢尺测量其每年的树高生长量。24 块样地共调查到白桦幼树 1 465 株，其中林火干扰区 1 174 株、非火干扰区 291 株。

考虑到两组样本量差异较大，为验证其可比性，本研究对核心林分因子及土壤环境指标进行了组间对比。Wilcoxon 秩和检验结果显示，两组数据中物种丰富度（$p = 0.078$，$r = 0.046$）、土壤有机质（$p = 0.146$，$r = 0.038$）、全氮（$p = 0.292$，$r = 0.028$）在干扰区和非火干扰区无显著差异，而其他指标如树高（$p < 0.05$，$r = 0.284$）、胸径（$p < 0.05$，$r = 0.245$）和香农多样性指数（$p < 0.05$，$r = 0.416$）、pH（$p < 0.05$，$r = 0.475$）等统计显著，反映了林火干扰后幼树生长及环境条件改变的直接生态效应。

因幼树生长吸收营养物质的细根主要分布在 0～30 cm 土层，且土壤有机质、酶活性等关键指标在 0～30 cm 土层最高，因此在各样地中心和 4 角避开乔木根系和林窗的条件下分别挖取 0～30 cm 土层土壤样品并混合均匀，采集的土壤带回实验室后风干，去除植物根系和石砾，过 2 mm 和 0.149 mm 筛，用于土壤有机碳、全氮和全磷等的测定[19−20]，其中土壤有机碳含量使用重铬酸钾外加热法进行测定，全氮和全磷等使用 AA3 连续流动分析仪测定（表 1）。

本研究所有统计分析与模型拟合均在 R4.4.1 软件中完成。

1.3 基础模型

参照前人已有研究[21−23]，根据天然更新白桦幼树树高−胸径散点图（图 1），选择 5 个具有代表性且具有生物学意义的非线性模型作为白桦幼树树高−胸径的基础模型（表 2）。采用调整决定系数（R_a^2）、平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）筛选模型，其中 R_a^2 越大而 MAE 和 RMSE 越小，则模型拟合效果越好。

1.3.1 哑变量模型

哑变量又称虚拟变量，其取值通常为 0 或 1，用于将定性因子转化为定量因子。本研究将该样地是否为火干扰样地设置为哑变量，引入树高−胸径最优基础模型中，公式为

$$H = 1.3 + (a_0 + a_1 S)\mathrm{e}^{-(b_0+b_1 S)\mathrm{e}^{-(c_0+c_1 S)D}} \quad (1)$$

式中：D 为胸径；H 为树高；a_0、a_1、b_0、b_1、c_0、c_1 为参数；S 为哑变量，当发生火干扰时 S 为 0，当未遭受火干扰时 S 为 1。

表 1　样地基本信息

Tab. 1　Basic information of the sample plot

样地类型	变量	最大值	最小值	平均值	标准差
火干扰区	林分平均胸径/cm	12.71	5.67	6.94	1.96
	每公顷株数/(株·hm^{-2})	2 622.22	655.56	1 035.28	255.26
	林分密度指数/(株·hm^{-2})	598.66	82.56	145.13	112.61
	大于对象木断面积/(m^2·hm^{-2})	0.82	0.00	0.43	0.23
	物种丰富度/种	16	6	8	2
	树种香农多样性指数	2.05	1.15	1.39	0.26
	酸碱度	5.22	4.09	4.30	0.32
	有机碳含量/(g·kg^{-1})	102.00	8.30	27.87	19.05
	全氮/(g·kg^{-1})	4.58	0.68	1.48	0.80
	全磷/(g·kg^{-1})	1.00	0.29	0.48	0.25
	全钾/(g·kg^{-1})	28.60	18.40	25.09	1.66
	氮磷比	5.52	1.45	3.33	1.44
	碳氮比	35.76	11.39	18.15	3.69
	碳磷比	197.30	18.63	64.10	30.15
	灌木盖度/%	100.00	2.00	60.00	37.24
	灌木平均高度/cm	58.00	19.50	37.71	12.04
	草本盖度/%	59.00	11.00	32.75	14.21
	草本平均高度/cm	45.00	10.50	29.80	9.98
非火干扰区	林分平均胸径/cm	15.23	8.16	11.93	2.54
	每公顷株数/(株·hm^{-2})	2 200.00	222.22	936.68	480.08
	林分密度指数/(株·hm^{-2})	558.68	59.67	282.10	126.02
	大于对象木断面积/(m^2·hm^{-2})	1.29	0.00	0.22	0.12
	物种丰富度/种	14	2	8	3
	树种香农多样性指数	2.11	0.50	1.66	0.30
	酸碱度	5.09	4.11	4.70	0.32
	有机碳含量/(g·kg^{-1})	138.00	6.91	41.98	44.23
	全氮/(g·kg^{-1})	5.82	0.61	1.94	1.72
	全磷/(g·kg^{-1})	0.90	0.26	0.53	0.24
	全钾/(g·kg^{-1})	33.10	19.10	26.70	3.71
	氮磷比	6.47	1.74	3.26	1.45
	碳氮比	114.40	27.63	18.31	6.04
	碳磷比	153.33	26.78	63.45	42.25
	灌木盖度/%	180.00	0.00	82.91	45.65
	灌木平均高度/cm	120.00	0.00	57.21	44.14
	草本盖度/%	60.00	0.00	24.50	22.18
	草本平均高度/cm	37.00	0.00	21.75	14.59

当分类变量有 n 个水平时，为避免完全共线性，哑变量个数应为($n-1$)个。本研究在基础模型不同参数及其组合上引入哑变量进行模型的拟合，利用 t 检验判断在不同参数上的显著性，若 $p>0.05$，则该参数不引入哑变量。

1.3.2　广义非线性模型

除胸径外，树高生长还受其他环境因子的影响，为量化这些环境因子对树高生长的作用，本研究在已有研究[24]基础上，结合现有数据选择了 14 个候选指标。筛选出与树高生长相关性较高且具有生物学

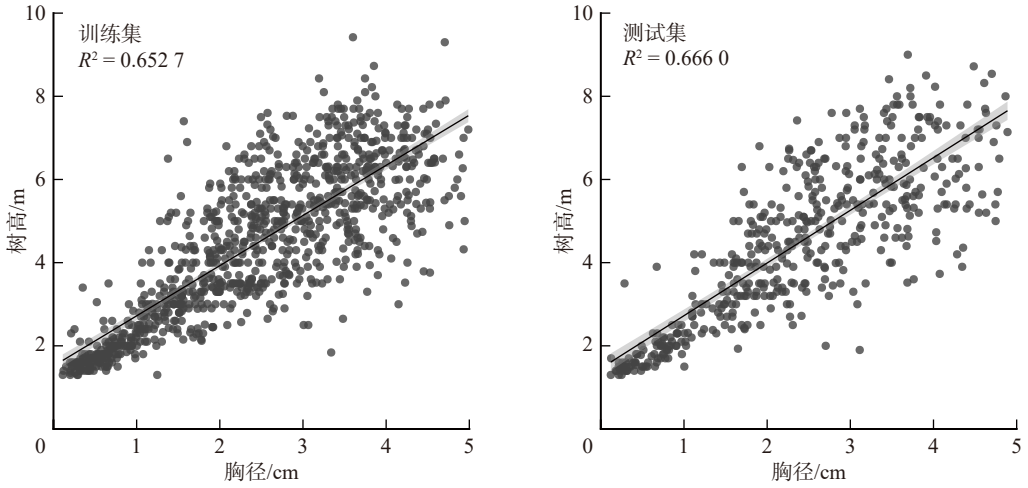


图 1 训练集和测试集散点分布

Fig. 1 Distribution of training set and test set points

表 2 候选基础模型

Tab. 2 Candidate base models

模型编号	模型表达式	模型名称	来源文献
1	$H = 1.3 + aD^b$	Stoffels	[22]
2	$H = 1.3 + \frac{aD}{(1+D)^b}$	Curtis	[22]
3	$H = 1.3 + e^{a-\frac{b}{1+D}}$	Wykoff	[23]
4	$H = 1.3 + \frac{a}{1+be^{-cD}}$	Logistic	[21]
5	$H = 1.3 + ae^{-be^{-cD}}$	Gompertz	[21]

注：*H*. 树高；*D*. 胸径；*a*、*b*、*c*为参数。

意义的指标，对基础模型进行再参数化，并依据方差膨胀因子（VIF）剔除存在严重共线性的变量（VIF > 5 判定为存在严重多重共线性）。模型再参数化的公式以 Gompertz 为例，如

$$H = 1.3 + (a_0 + a_1X_1 + \cdots + a_nX_n) \\ e^{-(b_0+b_1X_1+\cdots+b_nX_n)e^{-(c_0+c_1X_1+\cdots+c_nX_n)D}} \quad (2)$$

式中：a_0、a_1、a_n、b_0、b_1、b_n、c_0、c_1、c_n 为模型待估参数，X_1、X_2、⋯、X_n 为筛选后的环境因子，包括林分密度、竞争、立地质量、林分结构等。

1.3.3 混合效应模型

在广义非线性模型基础上，考虑样地水平的随机效应对天然更新白桦幼树树高–胸径关系的影响，构建样地水平的混合效应模型。该模型一方面可以提高模型预测精度，另一方面可有效处理样地间异方差问题，表达式如下。

$$\boldsymbol{Y}_{ij} = f\left(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{X}_{ij}\right) + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\mu}_i \sim N(0, D) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, R_i) \quad (5)$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{ij}$为第 i 块样地内第 j 株幼树的树高观测值，$\boldsymbol{X}_{ij}$为对应观测的自变量向量；$\boldsymbol{\beta}$为固定效应参数估计值向量；$\boldsymbol{\mu}_i$为基于区域水平的随机效应参数向量；f为向量$\boldsymbol{\beta}$、$\boldsymbol{\mu}_i$、$\boldsymbol{X}_{ij}$的非线性函数；ε_{ij}为对应观测的随机残差项；$\boldsymbol{D}$为基于区域水平的随机效应参数的方差–协方差矩阵；$\boldsymbol{R}_i$为误差协方差结构矩阵。

考虑到模型在构建过程中可能存在异方差，引入R_i描述误差协方差结构。

$$R_i = \sigma^2 \boldsymbol{G}_i^{0.5} \Gamma_i \boldsymbol{G}_i^{0.5} \quad (6)$$

式中：σ^2为模型误差方差值；$\boldsymbol{G}_i$为区域内异方差结构的对角矩阵；Γ_i为区域内误差自相关结构。若模型存在异方差，则采用幂函数构建异方差结构。

$$\sigma^2(v) = |v|^{2\theta} \quad (7)$$

式中：v是方差协变量；θ是幂次系数；$\sigma^2(v)$表示残差的方差，其大小随拟合值v的幂次变化，从而实现异方差的消除。

根据许崇华等[11]研究方法，在构建混合效应模型需依次确定随机效应参数、方差协方差结构与异方差校正函数 3 类参数。各模型拟合优度采用赤池信息准则（AIC）、贝叶斯准则（BIC）和对数似然值（LogLik）进行评价，AIC 和 BIC 值越小越好，LogLik

值越大越好。对于参数个数不同的模型，进一步采用似然比检验（LRT）来确定最终模型。

1.3.4　模型检验与评价

采用 3 折交叉检验的方法，对模型的预测水平和能力进行检验，利用调整决定系数、平均绝对误差、均方根误差、赤池信息准则对模型的拟合精度进行检验和评价。

$$R_{\mathrm{a}}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \overline{Y}_i\right)^2} \times \frac{n-1}{n-k-1} \tag{8}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{n-p}} \tag{9}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|Y_i - \hat{Y}_i\right|}{n} \tag{10}$$

$$\mathrm{AIC} = -2\ln L + 2d \tag{11}$$

式中：Y_i为第 i 个观测值；$\hat{Y}_i$为第 i 个预测值；$\overline{Y}$为观测值的平均值；k为模型自变量个数；p 为参数个数；L 为模型的似然函数值；d 为模型中估计参数个数；n 为样本数。

2　结果与分析

2.1　基础模型选择

对天然更新白桦幼树数据进行基础模型构建，各模型调整决定系数（R_{a}^2）均大于 0.66，RMSE 为 1.03 ~ 1.06 m，MAE 为 0.78 ~ 0.83 m，且各模型参数均达到极显著（$p < 0.001$）。综合比较统计结果，确定模型 5 作为白桦幼树最优基础模型（表 3）。

2.2　广义非线性模型构建

在基础模型上，将火干扰状态（$S = 1$ 为未火干扰，$S = 0$ 为火干扰）作为哑变量引入白桦最优基础模型，得到模型参数估计值以及评价指标，分别在参数 a、b、c 及其组合上构建的模型中，根据评价指标 AIC、BIC 选择最优模型，在参数 c 上引入哑变量，模型拟合最优，此时R_{a}^2、RMSE、MAE 分别为 0.689 0、1.02 m、0.77 m。

$$H_i = 1.3 + a\mathrm{e}^{-b\mathrm{e}^{-(c_0 + c_1 S_i)D}} \tag{12}$$

式中：H_i 为树高；S_i 为哑变量；a、b、c_0、c_1 为待估参数。

为量化环境因子对天然更新白桦幼树树高–胸径模型影响，基于哑变量模型引入林分及土壤变量。通过 Pearson 相关性分析筛选与树高相关性较高的变量（$|r| > 0.3$），再结合 VIF 检验排除共线性（图 2）。最终筛选出土壤全磷、林分平均胸径、林分密度指数和树种香农多样性指数 4 个变量，其 VIF 值分别为 1.09、3.25、3.27 和 1.76，均小于 5，不存在严重共线性。pH 在各模型中均不显著，故予以剔除。

将筛选后的变量代入模型，检验参数显著性并结合评价指标进行筛选。综合考虑模型拟合精度与生物学意义：参数 a 代表潜在最大树高，香农多样性指数反映林分多样性，与幼树生长的空间竞争密切相关，进而影响树高生长上限；参数 c 影响树高曲线趋于渐近线的速率，土壤全磷对树木生长具有调节作用，当全磷达到一定水平时可能促进树木由高速高生长转向径向生长，使树高曲线趋于平缓。因此，将香农多样性指数引入参数 a，土壤全磷引入参数 c，模型如下。

$$H_i = 1.3 + (a_0 + a_1 S_{\mathrm{sn}})\mathrm{e}^{-b\mathrm{e}^{-(c_0 + c_1 S_i + c_2 P_{\mathrm{TP}})D}} \tag{13}$$

式中：a_0、a_1、b、c_0、c_1、c_2 为待估参数；S_{sn}为树种香农多样性指数；P_{TP}为土壤全磷含量。

与基础模型相比，引入林分及土壤变量后，白桦幼树树高–胸径模型的R_{a}^2由 0.683 9 上升到 0.712 0，增长 4.1%，RMSE 由 1.03 m 降至 0.98 m，下降 4.9%，MAE 由 0.78 m 降至 0.73 m，下降 6.4%，模型拟合精度显著提升。

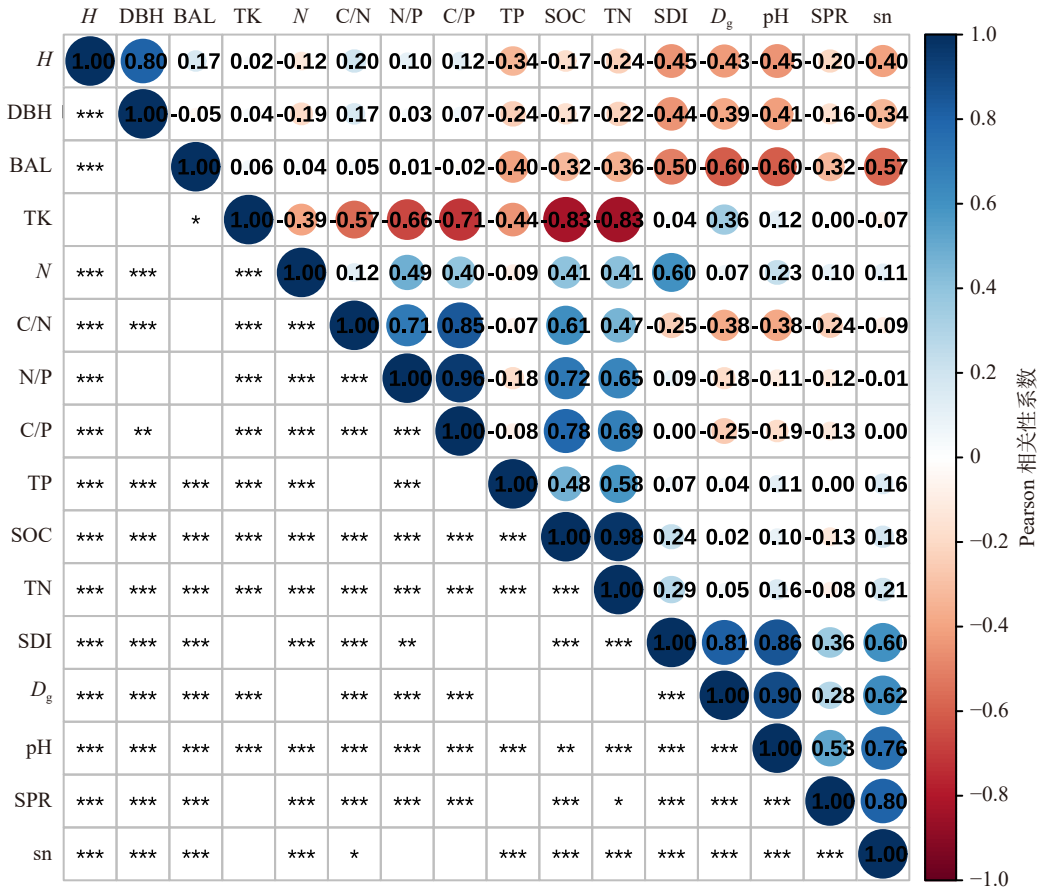
2.3　树高–胸径混合效应模型

在将随机效应引入不同参数及组合时，考虑到模型收敛性、参数显著性及拟合效果，最终将随机效应引入参数 c。混合效应模型的 AIC、BIC 和 LogLik 值分别为 4 039.95、4 082.22、−2 011.97（表 4）。与广义非线性模型相比，R_{a}^2增加 2.6%、RMSE、MAE 分

表 3　基础模型参数估计与拟合统计量

Tab. 3　Basic model parameter estimation and fitting statistics

模型编号	参数			评价指标					
	a	b	c	R_{a}^2	RMSE/m	MAE/m	AIC	BIC	LogLik
1	1.522 0	0.858 9		0.663 4	1.06	0.83	4 399.20	4 415.07	−2 196.60
2	1.804 5	0.231 4		0.666 1	1.06	0.83	4 386.31	4 402.18	−2 190.15
3	2.461 6	4.291 5		0.676 4	1.04	0.80	4 340.47	4 356.34	−2 167.24
4	5.052 4	13.969 6	1.468 0	0.680 8	1.03	0.79	4 314.63	4 335.79	−2 153.32
5	5.325 9	3.857 5	0.922 6	0.683 9	1.03	0.78	4 302.36	4 308.30	−2 147.18



H.树高；DBH.胸径；BAL.大于对象木断面积；*N*.每公顷株数；D_g.林分平均胸径；SDI.林分密度指数；SPR物种丰富度；sn.树种香农多样性指数；pH.酸碱度；SOC.土壤有机质含量；TN.全氮；TP.全磷；TK.全钾；N/P.碳磷比；C/N.碳氮比；C/P.碳磷比。***表示$p < 0.001$，**表示$p < 0.01$，*表示$p < 0.05$。下同。

图 2 树高与环境因子相关性热图

Fig. 2 Heat map of the correlation between tree height and environmental factors

别减小 3.1%、2.7%。混合效应模型参数均极显著（$p < 0.001$），有明确的生物学意义，但残差图存在异方差，因此，本研究在非线性混合效应模型中引入幂函数，进行异方差校正（图 3）。

$$H_{ij} = 1.3 + (a_0 + a_1 S_{sn})\mathrm{e}^{-b\mathrm{e}^{-(c_0+c_1 S_i+(\mu+c_2)P_{tp})D}} \quad (14)$$

式中：μ 为样地的随机效应参数。

2.4 模型检验与评价

本研究采用 3 折交叉验证评估模型预测性能。为避免火干扰区与非火干扰区样本量差异对模型评估造成偏倚，采用以火干扰状态为分层变量的抽样策略，分别对每组进行 3 折划分，保证每一折训练集和测试集中火干扰区与非火干扰区的样本比例与总体一致（火干扰区约占 80%，非火干扰区约占 20%），最后，将两组对应折合并，形成最终的训练集和测试集。所有分析均设置随机种子，保证结果可重复。

3 折交叉检验（表 5）表明，各模型具有较好的预测精度，其中混合效应模型和广义非线性模型优于基础模型。与基础模型相比，广义非线性模型的R_a^2、RMSE、MAE 分别优化了 1.5%、4.9%、5.1%，与广义非线性模型相比，混合效应模型的R_a^2优化了 1.4%，RMSE、MAE 变化较小。因此，引入哑变量以及林分变量构造混合效应模型，能够有效考虑样地随机效应并提高模型预测精度。

图 4a、b 表明，广义非线性模型与混合效应模型中土壤全磷固定为均值（0.49 g/kg）时，火干扰区幼树树高总体高于非火干扰区，且香农多样性指数为均值（1.44）时的树高高于其取最大值（2.11）和最小值（0.50）时。图 4c、d 表明，香农多样性指数为均值（1.44）时，火干扰区幼树树高同样高于非火干扰区，且土壤全磷在均值（0.49 g/kg）时的树高高于其取最大值（1.004 g/kg）和最小值（0.258 g/kg）时。

3 讨 论

3.1 树高–胸径生长模型的精度比较与混合效应模型的生物学优势

在林业生产和实践中，需对影响树高–胸径关系的林分因子进行统计分析，并建立准确、有效且具有生物学意义的预测模型，以深入理解林分生长规律和种间竞争关系，其中非线性模型通常能更精准地

表 4　白桦幼树树高−胸径各模型的参数及拟合统计量

Tab. 4　Parameters and fitting statistics of tree height-diameter models for *Betula platyphylla* saplings

项目	参数	基础模型	哑变量模型	广义非线性模型	混合效应模型
参数	a_0	5.325 9	5.334 4	6.962 7	6.688 5
	a_1			−1.072 4	−0.816 4
	b	3.857 5	3.770 4	3.366 1	3.167 8
	c_0	0.922 6	0.931 2	0.980 1	0.927 5
	c_1		−0.127 6	−0.301 5	−0.337 1
	c_2			−0.063 7	−0.120 4
	σ^2	1.100 4	1.084 0	0.964 7	0.907 0
	σ_u^2				0.043 3
评价指标	R_a^2	0.683 9	0.689 0	0.712 0	0.730 6
	RMSE/m	1.03	1.02	0.98	0.95
	MAE/m	0.78	0.77	0.73	0.71
	AIC	4 302.36	4 281.85	4 090.37	4 039.95
	BIC	4 323.52	4 308.30	4 127.36	4 082.22
	LogLik	−2 147.18	−2 135.93	−2 038.19	−2 011.97

注：σ_u^2为混合效应模型随机效应μ的方差，σ^2为残差方差。

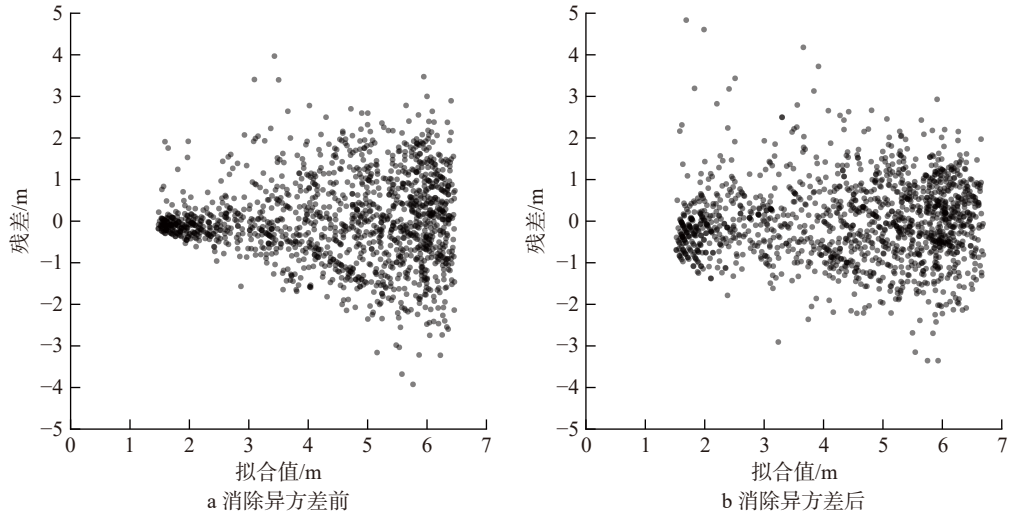


图 3　白桦幼树混合效应模型树高预测残差图

Fig. 3　Residual plots of height prediction for *Betula platyphylla* saplings based on mixed-effects model

表 5　不同树高−胸径模型 3 折交叉检验

Tab. 5　Three-fold cross-validation results of different tree height-diameter models

模型	R_a^2	RMSE/m	MAE/m
基础模型	0.681 8	1.03	0.78
广义非线性模型	0.691 7	0.98	0.74
混合效应模型	0.701 2	1.00	0.75

描述树高与胸径的关系[25]。本研究基于火干扰与未干扰样地的白桦幼树数据，采用 5 个非线性模型拟合树高−胸径关系，结果表明 Gompertz 模型效果最优。该研究结果与路文燕等[26]对大兴安岭天然林白桦基础模型的选择存在差异，表明地域、树种及林木生长状态等会影响树高−胸径模型的拟合结果。此外，海拔、坡度、坡向等立地条件与林木生长联系紧密[27−28]。

在此基础上引入样地随机效应，构建非线性混合效应模型，经异方差校正与 3 折交叉验证，模型无

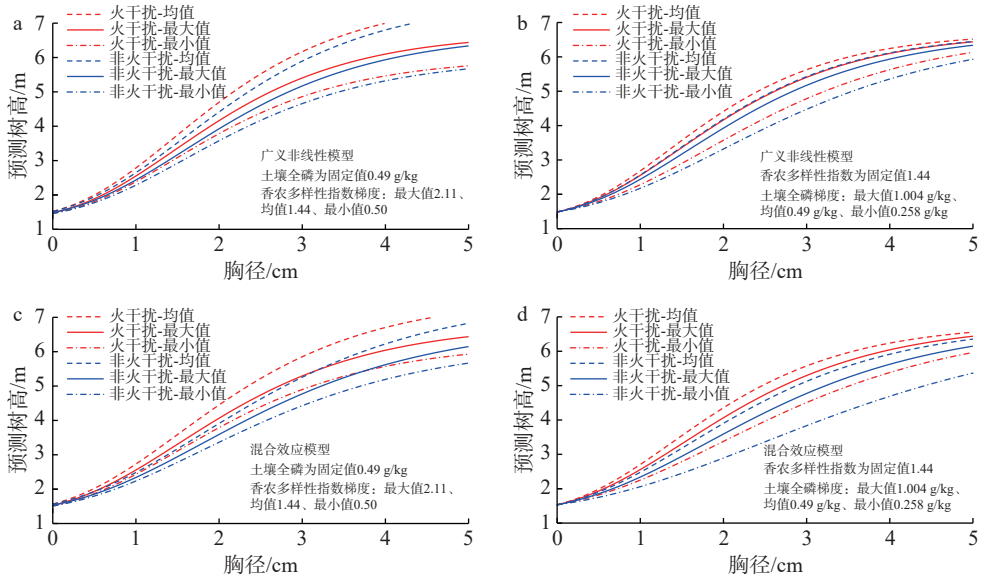


图 4 火干扰与未干扰条件下土壤全磷、香农多样性指数对树高预测的影响

Fig. 4 Effects of total phosphorus and Shannon index on tree height prediction under fire-disturbed and undisturbed conditions

过拟合现象，残差分布均匀且无明显异方差，整体精度与稳健性均优于广义非线性模型，这与李欣宇等[29]、Patrício 等[23]的研究结论一致。相较于传统非线性回归，混合效应模型可有效解释样地间的自然变异，纳入土壤与林分因子后能更全面地揭示幼树生长与环境因子的耦合关系，弥补了广义非线性模型难以反映样地水平随机差异的不足，更适用于火干扰背景下的区域白桦幼树生长模拟，可为该地区火后幼树树高曲线研究提供方法参考。

尽管广义非线性模型与混合效应模型的拟合精度差异较小，但混合效应模型在稳健性与生物学解释力方面仍具优势；后续可进一步优化模型结构，在保持精度的同时降低复杂度，以提升应用便捷性。

3.2 土壤全磷与物种多样性对幼树生长的抑制作用及驱动机制

土壤全磷含量与幼树树高呈显著负相关，这与梁昊等[30]、杜娜等[31]研究不同，表明不同树种和年龄阶段影响幼树生长的养分因子贡献可能存在差异；也与 Jia 等[32]关于高浓度磷促进树高生长的结论不一致。其原因可从两方面解释：一是外部有效磷供给受限，研究区域幼树层种间竞争较强，土壤全磷总量升高并不等同于有效磷供给同步增加，当惰性磷占比较高时，幼树根系难以吸收利用；二是内部养分计量平衡受制约，幼树生长受氮、磷等多元素比例的协同调控，单一磷素总量升高可能打破植物体内养分平衡，反而引发生长速率的改变。此外，已有研究表明施磷对生长的促进作用存在阈值，超过临界值后会产生抑制效应[33−34]。

本研究选取土壤全磷作为核心土壤养分因子纳入模型，主要依据该地区的养分限制特征：大兴安岭低温湿润的气候条件下，土壤腐殖质大量积累，磷素多以有机惰性形态存在，有效磷供给不足是限制林木生长的关键因素；同时火干扰对土壤磷素矿化、形态转化与有效性具有显著调控作用。研究中未深入探讨不同土层养分化学计量特征及样地数据间的内在关联对树高–胸径关系的影响，后续研究需补充多土层养分数据，完善生长驱动机制分析。

林分因子方面，树种香农多样性指数与幼树树高同样呈显著负相关，其本质反映了种间竞争对幼树生长的抑制作用。本研究选用香农多样性指数表征群落整体竞争压力，与黄宏超等[35]采用的单木邻体竞争指标存在差异，原因在于幼树阶段个体较小，群落物种多样性水平更能反映林下光照、养分的整体竞争强度；而成林阶段单木邻体竞争的调控作用更突出[36]，二者适用的生长阶段不同，需分别讨论。

总体而言，本研究仅纳入土壤全磷与树种香农多样性指数两类环境因子，未系统考虑其他土壤养分元素，也未涉及主林层郁闭度等对幼树光照、水分供给具有关键调控作用的林分因子，可能限制了模型的解释力与适用范围。

3.3 火干扰对白桦幼树更新生长的调控

火干扰是驱动大兴安岭白桦林更新与演替的关键生态过程。本研究发现火干扰区白桦幼树生长显著优于未火干扰区，这种差异并非单一因子作用的结果，而是火干扰通过影响多个因子形成的，这与平晓帆等[37]、秦川等[38]研究结果一致。

从更新格局来看，火干扰区与未火干扰区的更新驱动机制存在明显差异：林火可打破白桦种子休

眠，同时清除上层植被、提升林下光照，为种子萌发与幼苗定居创造适宜微生境，因此火干扰区呈现爆发更新特征，幼树更新密度更高、年龄结构更集中；而未火干扰区的天然更新主要依赖林下种子库与母树自然落种，更新速率平缓、年龄分布更分散[39]。

从生长过程来看，火干扰主要通过两条途径缓解生长抑制：一是直接清除上层林木与林下灌草，显著降低种间竞争强度，改善幼树的光照与养分供给条件[40]；二是加速土壤腐殖质分解，促进有机磷向有效态转化，改善土壤理化性质与根系生长环境，打破原有养分限制[41]。二者共同作用下，火干扰区白桦幼树的生长速率显著提升，符合该地区火干扰后白桦作为先锋物种快速定居的演替规律。

基于本研究结果，针对大兴安岭火后白桦幼林经营提出以下参考建议：一是火干扰区白桦天然更新潜力较强，可优先依托自然更新开展火后植被恢复，辅以适度人工调控保障幼林质量；二是幼林培育阶段需避免盲目施肥，适时清除竞争性灌草，缓解养分与光照竞争，促进白桦幼树生长。

4　结　　论

本研究通过基础模型选择和林分变量筛选，构建了包含哑变量的广义非线性模型，并进一步引入样地随机效应，构建混合效应模型。相较于基础模型、哑变量模型和广义非线性模型，混合效应模型的调整决定系数分别提高了 6.8%、6.0% 和 2.6%。当胸径为 5 cm 时，火干扰区白桦幼树预测树高为 6.44 m，非火干扰区为 6.15 m，前者较后者高 4.7%，表明火干扰对幼树树高生长具有促进作用。引入林分及土壤因子后，树种香农多样性指数和土壤全磷含量均与树高呈负相关，但其对火干扰区幼树的负效应弱于非火干扰区，表明火干扰缓解了竞争和养分限制对幼树生长的抑制作用。

基于上述结果，在非火干扰区，鉴于种间竞争和土壤磷养分对幼树高生长的抑制效应较强，可考虑通过抚育间伐降低林分密度、优化群落结构，以缓解竞争压力；在火干扰区，幼树生长受竞争和养分限制的抑制作用相对较弱，可优先依托天然更新进行植被恢复，辅以适度人工调控保障幼林高质量生长。

参　考　文　献

[1] 董灵波, 刘兆刚. 不同强度的林火干扰对天然落叶松林分物种多样性及碳储量的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(9): 45−50.
Dong L B, Liu Z G. Effects of different fire intensities on biodiversity and carbon stocks of natural *Larix gmelinii* forest in Daxing'an mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(9): 45−50.

[2] 贾炜玮, 解希涛, 姜生伟, 等. 大兴安岭新林林业局 3 种林分类型天然更新幼苗幼树的空间分布格局 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2813−2822.
Jia W W, Xie X T, Jiang S W, et al. Spatial distribution pattern of seedlings and saplings of three forest types by natural regeneration in Daxin'an Mountains Xinlin Forestry Bureau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 2813−2822.

[3] Eerikäinen K, Valkonen S, Saksa T. Ingrowth, survival and height growth of small trees in uneven-aged *Picea abies* stands in southern Finland [J]. Forest Ecosystems, 2014, 1(1): 5.

[4] 李浩南, 于颖, 杨曦光, 等. 黑龙江省土地利用监测及预测 [J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1116−1126.
Li H N, Yu Y, Yang X G, et al. Land use monitoring and forecasting in Heilongjiang Province [J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1116−1126.

[5] 郑姗姗, 吴鹏飞, 马祥庆. 森林土壤养分空间异质性研究进展 [J]. 世界林业研究, 2014, 27(4): 13−17.
Zheng S S, Wu P F, Ma X Q. Research progress in nutrient spatial heterogeneity in forest soil [J]. World Forestry Research, 2014, 27(4): 13−17.

[6] 王洪丹, 王金满, 曹银贵, 等. 黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5098−5108.
Wang H D, Wang J M, Cao Y G, et al. Effect of soil and topography on vegetation restoration in an opencast coal mine dump in a loess area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5098−5108.

[7] 崔译今, 贾炜玮, 王帆, 等. 基于 TLS 数据的落叶松−水曲柳混交林单木因子提取及树高模型构建研究 [J]. 西南林业大学学报, 2025, 45(3): 142−150.
Cui Y J, Jia W W, Wang F, et al. Extraction of individual tree factor and tree height model construction of *Larix olgensis-Fraxinus mandshurica* mixed forest based on TLS data [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(3): 142−150.

[8] 吕乐乐, 王文彬, 董灵波. 基于哑变量和分位数回归的兴安落叶松更新幼树的树高−胸径模型 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(9): 2355−2362.
Lyu L L, Wang W B, Dong L B. Height-diameter models of regenerated saplings of *Larix gmelinii* based on dummy variable and quantile regression [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(9): 2355−2362.

[9] 朱光玉, 罗小浪. 湖南栎类天然混交林优势木树高曲线哑变量模型研究 [J]. 林业资源管理, 2017(4): 22−29.
Zhu G Y, Luo X L. Dominant height-diameter models for mixed *Quercus* forest based on dummy variable [J]. Forest Resources Management, 2017(4): 22−29.

[10] 沈子奕, 林杰. 基于哑变量回归和混合效应的杉树树高−胸径模型 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2022, 36(1): 80−85.
Shen Z Y, Lin J. Height-diameter at breast height model for *Cunninghamia* lanceolate based on dummy variable regression and mixed effects [J]. Journal of University of Jinan (Science and

Technology), 2022, 36(1): 80−85.

[11] 许崇华, 崔珺, 黄兴召, 等. 基于线性混合效应模型的杉木树高−胸径模型 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2017, 45(6): 53−60.
Xu C H, Cui J, Huang X Z, et al. Height-diameter model for Chinese fir based on linear mixed model [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(6): 53−60.

[12] 周泽宇, 杨绕华, 张玉珍, 等. 华北落叶松人工林直径分布预测模型构建 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(2): 117−124.
Zhou Z Y, Yang R H, Zhang Y Z, et al. Prediction model construction of diameter distribution of *Larix principis*-rupprechtii plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(2): 117−124.

[13] Chen G Q, Zhu G Y, Fu L Y, et al. Using coupled soil nutrients as dummy variables can improve the predictive performance of stand basal area growth model for subtropical Chinese fir plantations [J]. Forestry, 2026, 99: cpaf030.

[14] Ercanli İ. Artificial intelligence with deep learning algorithms to model relationships between total tree height and diameter at breast height [J]. Forest Systems, 2020, 29(2): e013.

[15] 王金池, 胡觉, 贺鹏, 等. 基于再参数化方法的湖北省杉木树高−胸径模型 [J]. 中南林业调查规划, 2025, 44(4): 70−76.
Wang J C, Hu J, He P, et al. Reparameterized height-diameter models for *Cunninghamia lanceolata* in Hubei Province [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2025, 44(4): 70−76.

[16] 卢军, 张会儒, 雷相东, 等. 长白山云冷杉针阔混交林幼树树高−胸径模型 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(11): 10−25.
Lu J, Zhang H R, Lei X D, et al. Height-diameter models for saplings in a spruce-fir mixed forest in Changbai Mountains [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(11): 10−25.

[17] Chrimes D, Nilson K. Overstorey density influence on the height of *Picea abies* regeneration in northern Sweden [J]. Forestry: an International Journal of Forest Research, 2005, 78(4): 433−442.

[18] Saksa T, Valkonen S. Dynamics of seedling establishment and survival in uneven-aged boreal forests [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(8): 1409−1414.

[19] 马晓云, 李书兵, 陈美雄, 等. 依据最小数据集对白洋淀上游典型水源林的土壤质量综合评价 [J]. 东北林业大学学报, 2026, 54(1): 102−109,125.
Ma X Y, Li S B, Chen M X, et al. Comprehensive evaluation of soil quality in typical water conservation forests in the upper reaches of baiy-angdian lake based on a minimum data set [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2026, 54(1): 102−109,125.

[20] 杨光, 王欣宇, 马运佳, 等. 火烈度对落叶松林土壤微生物量和群落组成的影响 [J]. 林草资源研究, 2024(6): 35−44.
Yang G, Wang X Y, Ma Y J, et al. The impact of fire severity on soil microbial biomass and community composition in *Larix gmelinii* forests [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(6): 35−44.

[21] Zhang X F, Fu L Y, Sharma R P, et al. A nonlinear mixed-effects height-diameter model with interaction effects of stand density and site index for *Larix olgensis* in Northeast China [J]. Forests, 2021, 12(11): 1460.

[22] Adame P, del Río M, Cañellas I. A mixed nonlinear height–diameter model for Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(1−2): 88−98.

[23] Patrício M S, Dias C R G, Nunes L. Mixed-effects generalized height-diameter model: a tool for forestry management of young sweet chestnut stands [J]. Forest Ecology and Management, 2022, 514: 120209.

[24] 冯源, 李贵祥, 和丽萍, 等. 基于非线性混合效应模型的云南松林树高曲线 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(3): 49−60.
Feng Y, Li G X, He L P, et al. Tree height curves of Pinus yunnanensis forest based on nonlinear mixed effects model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 49−60.

[25] Zang H, Lei X D, Zeng W S. Height–diameter equations for larch plantations in northern and northeastern China: a comparison of the mixed-effects, quantile regression and generalized additive models [J]. Forestry, 2016, 89(4): 434−445.

[26] 路文燕, 董灵波, 田园, 等. 基于树种组成的大兴安岭天然林主要树种树高−胸径曲线研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47(4): 157−165.
Lu W Y, Dong L B, Tian Y, et al. Modelling height-diameter curves of main species for natural forests based on species composition in Greater Khingan Mountains, Northeast China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(4): 157−165.

[27] Wang Y F, Čufar K, Eckstein D, et al. Variation of maximum tree height and annual shoot growth of Smith fir at various elevations in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau [J]. PLoS One, 2012, 7(3): e31725.

[28] Keleş S Ö. The effect of altitude on the growth and development of Trojan fir (*Abies* nordmanniana subsp. equi-trojani [Asch. & Sint. ex boiss] coode & *Cullen*) saplings [J]. Cerne, 2020, 26(3): 381−392.

[29] 李欣宇, 叶尔江·拜克吐尔汉, 王娟, 等. 基于非线性混合效应模型的东北红松树高−胸径关系 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(3): 38−48.
Li X Y, Yeerjiang B, Wang J, et al. Relationship between tree height and DBH of *Pinus koraiensis* in northeastern China based on nonlinear mixed effects model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 38−48.

[30] 梁昊, 吴会峰, 温馨, 等. 七老图山华北落叶松人工林土壤化学计量特征及其与林木生长的关系 [J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(3): 383−393.
Liang H, Wu H F, Wen X, et al. Soil stoichiometric characteristics and their relationship with tree growth of *Larix principis*-rupprechtii in Qilaotu Mountain [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(3): 383−393.

[31] 杜娜, 王继军, 刘莉琳. 营林措施和环境因子对黄河中游刺槐生长的影响 [J]. 森林工程, 2025, 41(2): 243−252.

Du N, Wang J J, Liu L L. Impact of forest management practices and environmental factors on the growth of *Robinia pseudoacacia* in the middle reaches of the Yellow River [J]. Forest Engineering, 2025, 41(2): 243−252.

[32] Jia T, Fang X M, Yuan Y, et al. Phosphorus addition alter the pine resin flow rate by regulating tree growth and non-structural carbohydrates in a subtropical slash pine plantation [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 199: 116782.

[33] 刘鹏. 根际磷养分和解淀粉芽孢杆菌对春玉米生长及磷吸收的影响 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Liu P. Impact of *Bacillus amyloliquefaciens* and phosphorus in rhizosphere on the growth and P uptake of maize [D]. Changchun: Jilin University, 2013.

[34] 王鹏洋, 赵欣雨, 李博洋, 等. 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗生长及光合作用的影响 [J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1135−1144.
Wang P Y, Zhao X Y, Li B Y, et al. Effects of water and nitrogen-phosphorus additions on the growth and photosynthesis of *Fraxinus mandshurica* seedlings [J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1135−1144.

[35] 黄宏超, 庞丽峰, 符利勇, 等. 含竞争指标的广义可加混合效应树高−胸径模型 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(6): 70−78.
Huang H C, Pang L F, Fu L Y, et al. Generalized additive mixed-effect tree height-diameter models with a competition index [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(6): 70−78.

[36] 雷泽勇, 周晏平, 赵国军, 等. 竞争对辽宁西北部樟子松人工固沙林树高生长的影响 [J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 144−149.
Lei Z Y, Zhou Y P, Zhao G J, et al. Effects of competition on tree height growth of sand-fixation plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in northwest Liaoning Province [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 144−149.

[37] 平晓帆, 遇文婧, 黄颖. 火干扰对寒温带草原土壤微生态环境及碳循环的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4): 72−79.
Ping X F, Yu W J, Huang Y. Impact of fire disturbance on soil micro-ecological environment and carbon cycle in temperate grassland [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 72−79.

[38] 秦川, 丁波, 吕元亚, 等. 林火强度对喀斯特马尾松林下植被多样性和生物量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(6): 67−77.
Qin C, Ding B, Lyu Y Y, et al. Effects of forest fire intensity on understory vegetation diversity and biomass of P. massoniana in karst [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(6): 67−77.

[39] 岳永杰, 贾文杰, 张泽桃, 等. 林火干扰后植被恢复与更新及其物种多样性影响因子研究进展 [J]. 生态学杂志, 2025, 44(9): 3126−3134.
Yue Y J, Jia W J, Zhang Z T, et al. Research progress on vegetation restoration and regeneration after forest fire disturbance and the influencing factors of species diversity [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(9): 3126−3134.

[40] 武秀娟, 奥小平. 油松林火烧迹地恢复初期林下植被特征 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 155−161.
Wu X J, Ao X P. The Characteristics of Understory Vegetation in the Early Stage of Restoration of Burned Pinus tabuliformis Forests [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(5): 155−161.

[41] 谢兴龙, 魏亚娟, 侯红蕊. 林火干扰对云南松林土壤养分和生态化学计量特征的影响 [J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 67−75.
Xie X L, Wei Y J, Hou H R. Effects of fire disturbance on soil nutrients and ecological stoichiometric characteristics in Pinus yunnanensis forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 67−75.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　张会儒）