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

天然云冷杉林树木生长与树木大小、竞争和树种多样性的关系

张岚棋 杨华 张晓红

Relationship between tree growth and tree size, competition as well as species diversity in spruce-fir natural forests

Zhang Lanqi, Yang Hua, Zhang Xiaohong

引用本文:
张岚棋, 杨华, 张晓红. 天然云冷杉林树木生长与树木大小、竞争和树种多样性的关系[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):64–72. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220409
Zhang Lanqi, Yang Hua, Zhang Xiaohong. Relationship between tree growth and tree size, competition as well as species diversity in spruce–fir natural forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5):64–72. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220409

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220409

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地形和竞争对典型阔叶红松林不同生长阶段树木胸径生长的影响

Influences of topography and competition on DBH growth in different growth stages in a typical mixed broadleaved–Korean pine forest, northeastern China

北京林业大学学报, 2017, 39(1): 9–19. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160218

基于随机森林算法的落叶松云冷杉混交林单木胸径生长预测

Individual tree DBH growth prediction of larch–spruce–fir mixed forests based on random forest algorithm

北京林业大学学报, 2019, 41(9): 9–19. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180266

原始云冷杉、红松林树木生长对氮沉降的响应

Response of tree growth to nitrogen deposition in spruce–fir–Korean pine virgin forest in Lesser Khingan Mountains in northeastern China

北京林业大学学报, 2017, 39(4): 21–28. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160106

基于邻近木的林分结构多样性研究

Study on forest structure diversity based on the neighbourhood trees

北京林业大学学报, 2020, 42(6): 52–58. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190120

甘肃大野口青海云杉距离加权大小比竞争指数研究

Distance–weighted size ratio competition index in the forest of Picea crassifolia in Dayekou, Gansu Province of northwestern China

北京林业大学学报, 2017, 39(2): 40–48. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160210

城市森林主要树种树冠尺度及生长空间需求

Crown scale and growth space demands of main tree species in urban forest

北京林业大学学报, 2018, 40(3): 42–54. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170331

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220409

天然云冷杉林树木生长与树木大小、竞争和树种多样性的关系

张岚棋[1] 杨 华[1] 张晓红[2]
（1. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；2. 国家林业和草原局国际合作交流中心，北京 100714）

摘要:【目的】林分内林木大小、竞争和树种多样性等多方面因素影响着林木的生长，而胸高断面积生长量通常被用来描述树木生长状态。本文利用长白山云冷杉针阔混交林主要树种的单木胸高断面积生长量建立随机森林模型，研究和量化影响树木生长的环境因素，旨在为该地区的云冷杉针阔混交林生长预估提供理论依据。**【方法】**连续 24 年（1987—2010 年）对总样木数为 6 903 株的固定样地进行数据调查，应用随机森林算法，选取单木、竞争因子、多样性和气候方面共 11 个调查因子，对混交林中 6 个主要树种建立胸高断面积生长量模型，并使用 10 折交叉验证法来优化超参数 mtry 和评估模型结果。**【结果】**（1）臭冷杉、云杉、红松、椴树、枫桦、白桦 6 个主要树种胸高断面积生长量模型的决定系数分别为 0.663、0.683、0.695、0.459、0.384 和 0.568。（2）单木胸高断面积是最重要的因子，对树木生长有着很强的正向影响；竞争因子和树木大小多样性是影响树木生长的主要因素，单木胸高断面积生长量随着竞争因子、树木大小多样性增加而下降。（3）树种多样性对树木生长的影响比较有限，树种多样性指数和混交度的增加会一定程度加快云杉、臭冷杉和红松的生长速度；而气候因子对树木生长的影响则相对较小。**【结论】**树木生长在很大程度上依赖于其自身的生长潜力，在外界环境中主要受到来自林木间竞争和树木大小多样性的抑制，而树种多样性的增加也能在一定程度促进林内优势树种的生长；随机森林模型能够很好地量化和显出各变量与单木胸高断面积生长量之间复杂的关系，可以作为森林管理评价工具，为森林生长收获预估提供新的方法。

关键词：树木生长；树木大小；竞争；树种多样性；随机森林模型
中图分类号：S791.14 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)05−0064−09
引文格式：张岚棋，杨华，张晓红. 天然云冷杉林树木生长与树木大小、竞争和树种多样性的关系［J］. 北京林业大学学报，2024，46(5)：64−72. Zhang Lanqi, Yang Hua, Zhang Xiaohong. Relationship between tree growth and tree size, competition as well as species diversity in spruce-fir natural forests［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 64−72.

Relationship between tree growth and tree size, competition as well as species diversity in spruce-fir natural forests

Zhang Lanqi[1] Yang Hua[1] Zhang Xiaohong[2]
(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Center for International Cooperation and Exchange, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract:［**Objective**］Tree size, competition, tree species diversity and other factors in the forest stand affect the growth of forest trees, while the individual basal area increment (BAI) is often used to describe tree growth. A random forest model was established to study the individual tree BAI of main tree species in the mixed forest of Changbai Mountain of northeastern China, study and quantify the environmental mechanisms affecting tree growth, aiming to provide a theoretical basis for growth projections.［**Method**］Data were investigated for 24 consecutive years (1987−2010) in a fixed sample plot with a total

收稿日期: 2022−10−10 **修回日期:** 2023−01−21
基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目的子课题（2021YFD220040401）。
第一作者: 张岚棋。主要研究方向：森林结构与生长模型模拟。Email: 15680832191@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学。
责任作者: 杨华，博士，教授。主要研究方向：森林结构与生长模型模拟和森林资源监测技术。Email: huayang8747@163.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

sample size of 6 903 trees. Random forest algorithm was used to build individual tree BAI model with 11 independent variables as individual tree, competition factor, diversity, and climate for 6 main tree species in mixed forest. And 10-fold cross-validation was used to optimize hyper parameter mtry and evaluate these models. [**Result**] (1) The coefficients of determination for the model of BAI for the six major species of *Abies nephrolepis*, *Picea koraiensis*, *Pinus koraiensis*, *Tilia amurensis*, *Betula costata*, and *Betula platyphylla* were 0.663, 0.683, 0.695, 0.459, 0.384, and 0.568, respectively. (2) The basal area (BA) of individual tree was the most important independent variable, and had a strong positive effect on the growth of trees. Competitive factors and tree size diversity were the main factors affecting tree growth, and individual BAI decreased with increasing competitive factors and tree size diversity. (3) The effects of species diversity on tree growth were relatively limited, with increases in species diversity index and mingling degrees accelerating the growth of *Abies nephrolepis*, *Picea koraiensis* and *Pinus koraiensis* to some extent; whereas the effects of climatic factors on tree growth were relatively small. [**Conclusion**] Tree growth is largely depends on its own growth potential, which is mainly inhibited by competition and tree size heterogeneity in the external environment, while increased species diversity also promotes the growth of dominant species within the forest to some extent. The random forest model can well quantify and express the complex relationship between the variables and BAI of individual tree. It can be used as a tool for forest management practice and providing a new method for forest growth and yield prediction.

Key words: tree growth; tree size; competition; tree species diversity; random forest model

了解森林生长对于森林管理规划和森林生产力评估至关重要[1]。单木断面积作为与胸径直接相关的因子，具有较高的稳定性和预估性[2]，而胸高断面积生长量（basal area increment，BAI）通常被用来描述树木的生长变化，也是评价林分生产力高低的指标之一。一般认为，混交林比纯林具有更高的生产力、时间稳定性，更低的生物和非生物干扰风险以及更多样化的生态系统，但是森林群落的复杂性也导致了其生长预测的困难性[3]。树木生长受到树木自身特征和外界环境等生物或非生物因素的显著影响[4]，例如：树种、树木大小（胸径）、林分直径结构、林木竞争、生物多样性等。竞争是控制林木生长一个基本因素，竞争反映了树木之间相互争夺资源而产生的压力。而生物多样性对生态系统功能的影响一定程度上依赖于物种本身所具有的功能特征[5]，不同森林生态系统中生物多样性与生产力之间的关系尚不确定，特别是在空间结构复杂、优势种存活时间较长的森林群落中[6]，两者关系更为复杂。因此，研究天然林中林木大小、竞争、生物多样性等林分结构因子对于树木生长的影响可以为森林经营、林分改造指明方向。

研究树木生长与各方面影响因素之间的关系可借助于森林生长模型，目前研究者基于线性、非线性回归模型和混合效应模型等方法[7−9]，已经开发了各种胸高断面积生长量模型。然而，这些参数模型在应用过程中所用的数据需要满足正态分布、等方差、独立性等假设[10]，而森林数据的复杂性和层次性很难满足这些假设。作为一种机器学习算法，随机森林模型可以很好地解决这些问题。大量的研究都证明了随机森林模型具有很高的预测准确率，对异常值具有很好的容忍度[11]。目前，随机森林模型已经在林木适宜性生长分析[12]、森林类型划分[13−14]和立木材积预测[15]等研究中成功得到应用。但是，利用随机森林模型分析林木大小、生物多样性、竞争等因素对树木生长影响的研究报道较少。本研究以我国长白山地区长期监测数据作为材料，采用随机森林算法对 6 种主要树种建立胸高断面积生长量模型，分析树木生长的影响因子，旨在为森林生长收获预估提供一种新方法。

1　研究区概况

研究区位于吉林省延边朝鲜族自治州汪清林业局金沟岭林场（43°17′～48°25′N，130°05′～130°20′E）。林场海拔为 550～1 100 m，地貌以低山丘陵为主，坡度在 5°～25°之间。研究区森林覆盖率达 98%，为天然针阔叶混交林，植被属于长白山区系。

2　数据与研究方法

2.1　数据来源

采用 1987 年在长白山地区金沟岭林场设定的 5 块面积介于 0.16～0.36 hm^2 的天然混交林固定样地，并连续监测，记录样地内所有胸径≥5 cm 的树木的胸径和相对坐标值，其中每隔 2～3 年复测一次样地，本研究选取 1987—2010 年的样地数据。样地概况如表 1 所示，其中主要树种为臭冷杉（*Abies nephrolepis*）、红皮云杉（*Picea koraiensis*）、红松

表 1 样地信息统计表（1987）

Tab. 1 Statistical table of sample plot information (1987)

样地号 Sample plot No.	面积/hm² Area/ha	平均胸径 Mean DBH/cm	海拔 Altitude/m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree/(°)	树种组成 Tree species composition
1	0.160	18.8	780	东北 Northeast	13	5云3冷1红1枫 5P3A1PK1B
2	0.250	22.0	650	西南 Southwest	28	4冷2红2椴1枫1白 4A2PK2T1B1BP
3	0.360	15.9	750	东北 Northeast	7	4冷3云1红1椴1枫 4A3P1PK1T1B
4	0.312	16.3	780	东北 Northeast	10	5冷3云1红1枫 5A3P1PK1B
5	0.200	20.4	634	东北 Northeast	26	3云3红2椴1冷1白 3P3PK2T1A1BP

注：P. 红皮云杉 *Picea koraiensis*; A. 臭冷杉 *Abies nephrolepis*; PK. 红松 *Pinus koraiensis*; B. 枫桦 *Betula costata*; T. 椴树 *Tilia amurensis*; BP. 白桦 *Betula platyphylla.*

（*Pinus koraiensis*）、椴树（*Tilia amurensis*）、枫桦（*Betula costata*）、白桦（*Betula platyphylla*），优势树种为臭冷杉、红皮云杉和红松。

2.2 随机森林模型变量选取

采用单木胸高断面积（BA）、林木竞争、多样性与气候相关指标，建立胸高断面积生长量（BAI）随机森林模型，对模型进行变量重要性分析，并构建各因子对 BAI 的偏依赖图，分析各因子对 BAI 的影响。

2.2.1 竞争指标

选择大于对象木的林木断面积之和（BAL）、Reineke 的林分密度指数（SDI）[16]、死亡率和基于 4 株邻近木的 Hegyi 竞争指数[17]（CI）。其中死亡率为 2 次调查期间枯死木和少量被伐木占林分内总树木的比例，BAL、SDI、死亡率均可以在不同程度体现林分内的竞争状况，而 CI 则表达了更小尺度的竞争压力。

$$\mathrm{SDI} = N\left(\frac{D}{D_0}\right)^b \tag{1}$$

$$\mathrm{CI}_i = \sum_{j=1}^{4} \frac{d_j}{d_i D_{ij}} \tag{2}$$

式中：N 为林分内树木总数量，D 为林分平均胸径，D_0 为林分标准胸径 20 cm，b 为自然稀疏系数 1.605；CI_i 是对象木的竞争指数，d_i 为对象木 i 的胸径，d_j 是竞争木 j 的胸径，D_{ij} 为对象木 i 与竞争木 j 之间的距离。

2.2.2 多样性指标

在林分尺度上计算林分树种多样性（DIV_SP）和树木大小多样性（DIV_Size）。而空间结构参数描述了树木在空间结构单元尺度上受到的影响，具有一定的研究意义，因此选择了代表树种空间隔离程度的混交度（M）[18]、林木个体大小分化情况的大小比数（U）[19]分别代表空间结构单元层面上的树种多样性和树木大小多样性。

$$\mathrm{DIV_Size} = -\sum \frac{N_i}{N}\left(\ln\frac{N_i}{N}\right) \tag{3}$$

$$\mathrm{DIV_SP} = -\sum \frac{N_j}{N}\left(\ln\frac{N_j}{N}\right) \tag{4}$$

式中：N 为林分内树木总数量，N_i 是林分内第 i 个径阶的树木数量，N_j 是林分内第 j 种树种的数量。

2.2.3 气候指标

气候指标选择了年平均温度和年平均降雨量，将观测间隔期内样地的年平均气候指标作为自变量参与模型构建。气象资料来源于中国气象科学数据共享网（http://www.cma.gov.cn/home.do），选取 1958—2018 年距离采样点最近的汪清气象站（43°18′N，129°47′E，海拔 244.8 m）的数据。气象要素包含每个月的最低气温、最高气温、平均气温和总降水量。模型变量详细情况见表 2。

2.3 BAI 随机森林模型建立

主要建模工具是随机森林，这是一种基于决策树的集成学习方法[20]。它是利用 bootstrap 重抽样方法从原始样本中抽取多个样本，对每个样本进行决策树建模，然后组合多棵决策树的预测，通过投票得出最终预测结果。随机森林算法的卓越预测能力来自于对每个单独样本的随机决策树构造；在每个树节点上，只考虑所有可用自变量的一个子集进行分割，此子集用 mtry 参数设置。本研究针对云冷杉针阔混交林，mtry 参数选取范围为 1 ~ 11，对于每个 mtry 值进行 10 折交叉验证[21]。

模型评估指标选择决定系数（R^2）和均方根误差（RMSE）[22]作为模型评估指标，决定系数用于直观表达回归模型对观测值的拟合程度，均在 10 折交叉验证中取平均值。对于每个树种，选择能输出最高 R^2 的模型为最终模型。对模型进行因子重要性分析，并构建各因子对 BAI 的偏依赖图，分析各因子对 BAI 的影响。

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \bar{O}\right)^2 \tag{5}$$

表 2　模型因子属性统计表

Tab. 2　Statistics table of model factor attributes

类别 Category		因子 Factor	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean
单木因子 Individual tree factor		BA/(10^{-4} m^2)	9.62	2 341.40	295.64
竞争因子 Competitive factor		BAL/($m^2 \cdot ha^{-1}$)	0	11.10	6.08
		CI	0.23	26.28	2.73
		SDI	99.03	284.49	214.33
		死亡率 Mortality rate/%	0	22	5.1
多样性 Diversity	树木大小多样性 Tree size diversity	DIV_Size	2.44	2.87	2.67
		U	0	1	0.50
	树种多样性 Tree species diversity	DIV_SP	1.54	2.05	1.74
		M	0	1	0.67
气候 Climate		年平均温度 Average annual temperature/℃	1.89	6.25	5.02
		年平均降雨量 Average annual rainfall/mm	393.90	735.38	588.15

注：BA. 单木胸高断面积；BAL. 大于对象木的林木断面积之和；CI. 对象木的竞争指数；SDI. Reineke的林分密度指数；DIV_Size. 树木大小多样性；*U*. 大小比数；DIV_SP. 林分树种多样性；*M*. 混交度。Notes: BA, basal area of individual tree; BAL, sum of basal area of forest tree that is greater than the object trees; CI, competition index of object tree; SDI, stand density index of Reineke; DIV_Size, tree size diversity; *U*, dominance degree; DIV_SP, tree species diversity of stand; *M*, mingling degree.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2} \qquad (6)$$

式中：O_i、P_i 分别为第 i 个观测值和模型预测值，$\bar{O}$表示观测值的平均值，n 表示样本数。

2.4　数据处理

通过 ArcGIS10.6 统计样地内林木的相对位置，通过 R 4.0.2 软件进行数据分析工作，其中利用 R 包 randomForest 进行随机森林模型的回归建模，caret 包进行 10 折交叉验证，R 包 ggplot 进行制图。

3　结果与分析

3.1　林木结构特征

总样木数为 6 903 株。从表 3 可以看出：主要树种臭冷杉、云杉、红松、椴树、枫桦和白桦的胸高断面积平均值范围为 109.8 ~ 346.1 cm^2，胸高断面积生长量平均值范围为 2.8 ~ 9.6 cm^2/a。其中枫桦的胸高断面积平均值最小，红松中存在所测胸高断面积的最大值，但其小径级树占比较多。云杉的大径级树比例较高，而白桦的断面积中等大小的树占比较多，因此二者也有着最大的胸高断面积平均值。不同树种的胸高断面积年平均生长量存在一定的差异，具体表现为云杉 > 白桦 > 红松 > 臭冷杉 > 椴树 > 枫桦。

3.2　随机森林模型评估

表 4 分别展示了 6 个树种 10 折交叉验证下的最优结果。其中红松拥有最高的拟合优度(R^2 = 0.695，mtry = 4)，而枫桦的拟合优度最低(R^2 = 0.384，mtry = 2)。云杉(R^2 = 0.683，mtry = 4)和臭冷杉(R^2 = 0.663，mtry = 4)相对于椴树(R^2 = 0.459，mtry = 4)和白桦(R^2 = 0.568，mtry = 5)拟合精度也更高。总体而言，云杉模型的 RMSE 最大，而枫桦最

表 3　主要树种信息统计表

Tab. 3　Statistical table of main tree species information

树种 Tree species	株数 Number of plant	胸高断面积 BA/cm^2						胸高断面积生长量/($cm^2 \cdot a^{-1}$) BAI/($cm^2 \cdot year^{-1}$)					
		最小值 Min.	q25	q50	q75	最大值 Max.	平均值 Mean	最小值 Min.	q25	q50	q75	最大值 Max.	平均值 Mean
臭冷杉 *Abies nephrolepis*	2 375	19.6	91.6	243.3	447.7	1 562.3	311.2	0	2.7	6.5	11.7	40.6	8.0
云杉 *Picea koraiensis*	1 650	20.4	95.0	240.5	526.9	1 870.4	346.1	0	2.0	6.5	14.8	48.7	9.6
红松 *Pinus koraiensis*	898	9.6	59.4	124.3	411.9	2 341.4	293.8	0	1.5	4.2	11.6	47.6	8.1
椴树 *Tilia amurensis*	661	12.8	124.7	264.5	481.1	1 676.4	337.3	0	1.1	3.2	7.4	36.5	5.0
枫桦 *Betula costata*	899	23.8	50.3	78.5	118.3	1 809.6	109.8	0	0.3	1.8	3.9	21.6	2.8
白桦 *Betula platyphylla*	420	28.3	172.0	268.8	401.2	1 764.6	346.1	0	4.2	7.8	13.4	37.7	9.2

注：q25、q50、q75分别为下四分位数、中位数和上四分位数。Notes: q25, q50, and q75 are the lower quartiles, median, and the upper quartiles, respectively.

表 4 10 折交叉验证结果

Tab. 4 10-fold blocked cross-validation results

树种 Tree species	mtry	R^2 ± SD	RMSE ± SD
臭冷杉 *Abies nephrolepis*	4	0.663 ± 0.052	3.897 ± 0.263
云杉 *Picea koraiensis*	4	0.683 ± 0.058	5.272 ± 0.445
红松 *Pinus koraiensis*	4	0.695 ± 0.064	5.067 ± 0.737
椴树 *Tilia amurensis*	4	0.459 ± 0.069	3.969 ± 0.294
枫桦 *Betula costata*	2	0.384 ± 0.075	2.523 ± 0.262
白桦 *Betula platyphylla*	5	0.568 ± 0.101	4.540 ± 0.719

小，其原因可能是自身胸高断面积生长量更高的树种往往具有更大的 RMSE。

3.3 模型因子重要性分析

表 5 表示了各因子在每个树种的 BAI 模型中的相对重要性及其排序，可以看出：11 个指标中，单木 BA 在臭冷杉、云杉、红松、椴树、枫桦和白桦的 BAI 模型中都是最重要的自变量，其对各树种模型 R^2 的影响范围为 13.1%～22.6%。竞争因子 4 个指标（BAL、CI、死亡率、SDI）在各模型中总体的相对重要性范围在 34.7%～45.5%，其中 BAL 和 CI 在除了椴树模型的其余模型中均比较稳定地排名在第 2～4 位，且在云杉、臭冷杉和红松模型中 CI 相对重要性高于 BAL，在其他模型中则相反；SDI 在白桦和椴树的模型中相对重要性较强，而在其他树种模型中处于中等水平；死亡率在红松模型中的相对重要性较低，排在最后一名，仅为 4.8%，在其他树种模型中同样处于中等水平。多样性指标（DIV_Size、*U*、DIV_SP、*M*）总体的相对重要性范围在各模型中为 29.3%～35.4%；除了枫桦模型，其他模型中的 DIV_Size 相对重要性均大于 DIV_SP，而除了白桦模型，*U* 的相对重要性均大于 *M*；其中 DIV_Size 在臭冷杉、云杉和椴树中的相对重要性相比于 *U* 较高，而 *U* 则在红松和枫桦的模型中具有更高的相对重要性。在气候因素中，年平均温度的因子相对重要性更高，对不同模型 R^2 的影响范围在 5.4%～9.2%，其最大值出现在臭冷杉 BAI 模型中；而年平均降水在各树种模型中的相对重要性均较低，范围在 2.0%～6.0%。

表 5 模型因子相对重要性

Tab. 5 Relative importance of model factors %

类别 Category		因子 Factor	臭冷杉 *Abies nephrolepis*	云杉 *Picea koraiensis*	红松 *Pinus koraiensis*	椴树 *Tilia amurensis*	枫桦 *Betula costata*	白桦 *Betula platyphylla*
单木因子 Individual tree factor		BA	13.3	13.1	19.2	19.8	22.6	17.5
竞争因子 Competitive factor		BAL	10.6	9.6	10.0	14.6	13.8	11.6
		CI	12.6	10.1	11.4	5.8	8.0	10.2
		SDI	8.3	9.3	8.5	10.6	7.0	14.0
		死亡率 Mortality rate	8.9	8.2	4.8	10.6	6.7	9.7
多样性 Diversity	树木大小多样性 Tree size diversity	DIV_Size	10.1	12.8	8.0	14.0	6.6	9.7
		U	6.8	9.0	11.4	7.4	10.8	5.1
	树种多样性 Tree species diversity	DIV_SP	8.5	7.8	6.0	5.5	7.1	7.4
		M	6.6	5.8	7.3	2.7	4.9	7.1
气候 Climate		年平均降雨量 Average annual rainfall	5.1	6.0	5.8	2.0	5.0	2.3
		年平均温度 Average annual temperature	9.2	8.2	7.6	6.9	7.4	5.4

3.4 模型因子偏依赖分析

从图 1 可以看出：单木 BA 对各树种 BAI 都有较强的正向影响，其中云杉的 BAI 增加最多。当单木 BA 达到阈值时，BAI 停止增加，趋近一个常数；对于臭冷杉、云杉、红松、椴树、白桦，大约在胸高断面积为 1 000 cm^2 时 BAI 达到阈值，而枫桦则在 200 cm^2 时 BAI 就达到了阈值。在竞争因子中，BAL 的增加对所有树种的 BAI 都有强烈的负面影响，当 BAL 达到 8 m^2/hm^2 时，BAI 停止减小，成为一个常数；竞争指数 CI 同样对 BAI 有明显的抑制作用，并且在臭冷杉、云杉、红松和白桦中表现的更加突出，当 CI 在 1～4 时，BAI 会明显下降；SDI 对于白桦和椴树 BAI 有明显的促进效果；而死亡率在达到 5% 前，与各树种 BAI 呈负相关，在死亡率超过 5% 后无明显变化。各树种的 BAI 都随着树木大小多样性 DIV_Size 的增加而减小，并且在 DIV_Size 的值处于 2.5～2.6 时都有一个急剧降低的过程。大小比数 *U* 同样对林木生长有一定程度的负面影响，红松、云杉、臭冷杉、枫桦的 BAI 随着 *U* 的增大而不断减小，白桦和椴树则随着 *U* 增加先增大后减小。树种多样性指数 DIV_SP 的提高会少量促进云杉与臭冷杉的 BAI 增长，混交度 *M* 对臭冷杉、红松的 BAI 有着一定的正向作用。在气候因素中，当年平均温度超过 3 ℃ 时，各树种 BAI 会有所下降，随后趋于平缓；当

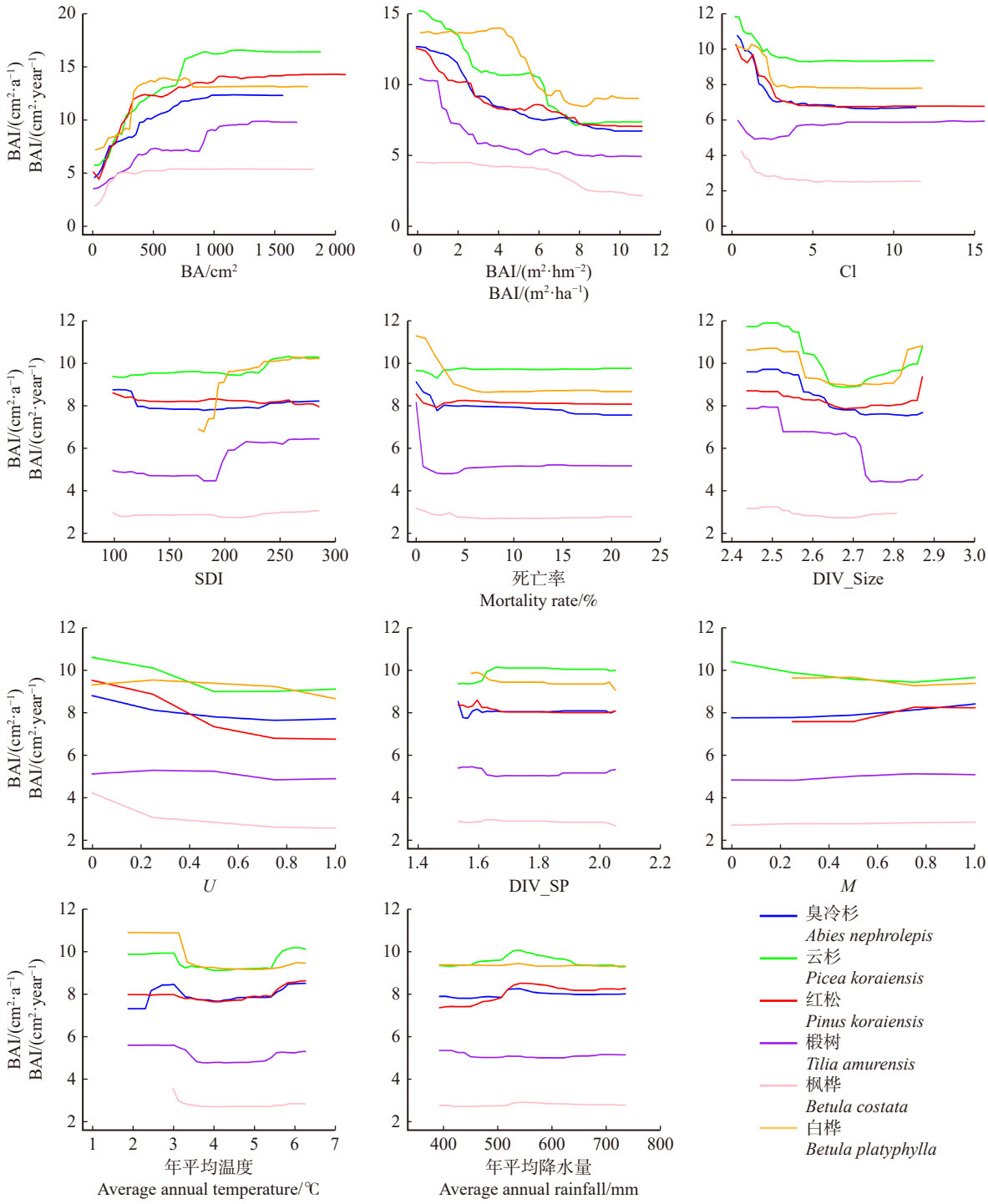


图 1　各因子对不同树种 BAI 生长的偏依赖关系

Fig. 1　Partial dependence of various factors on BAI growth of different tree species

降水量处于 500 ~ 600 mm 时，臭冷杉、云杉与红松的 BAI 会先增大后减小并趋于平稳，而降水对于椴树、枫桦和白桦的影响很小。

4　讨　　论

4.1　单木胸高断面积对树木生长的影响

研究结果表明，单木的胸高断面积在 6 个树种 BAI 模型中都是最重要的自变量，这说明树木生长在一定程度上依赖于其自身的生长潜力，树木生长速度与树木大小密切相关。随着树木胸高断面积增大，其胸高断面积生长量也逐渐增加，增加至一定程度后开始稳定生长，通常在树木的幼年阶段会有更快的 BAI 增长期（图 1）。这与以往大多数的研究结果一致，例如：董雪婷等[23]发现，树木大小对华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）生产力产生了积极的影响；吕沅杭[24]发现，大兴安岭天然落叶松（*Larix gmelinii*）单木直径生长量随着单木胸径的增加而增加。这是因为大树的冠、根部等器官能够吸收到更

多的生长所需的资源，因此具有更高的生长速度[25]。对于臭冷杉、云杉、红松、椴树、白桦，大约在断面积为 1 000 cm^2 时达到 BAI 阈值，这可能代表单木生长存在一个速增期，在这一生长阶段单木生长速度与单木自身大小有着较强的正相关关系，而当单木生长达到一定大小后，速增期结束，连年生长量开始保持恒定值，此时可以进行相应的抚育采伐措施以促进整体林分的生长。另外，还有部分研究表明，单木的径向生长随年龄的增长呈先增大后减小的关系[26]，由于本研究的样地为天然林，年龄结构复杂，并且林分内多数林木未达到 35.7 cm 的胸径阈值，因此没有表现出这一特征。

4.2 林分内竞争对树木生长的影响

竞争是影响树木生长的一个主要因素，其重要性仅次于树木本身大小，并且树木所处的竞争状态也与其自身大小息息相关。BAL 代表了单木在林分内的竞争地位，BAL 越小，其竞争地位越高，在竞争中越有优势，因此也能占据更多的生长资源，而大的 BAL 值则表示该树在林分竞争中受压迫多，取得的生长资源有限，其胸高断面积生长速度也更缓慢。竞争指数 CI 则反应了单木在结构单元中所受的竞争压力，单木 BAI 同样与竞争指数 CI 呈负效应关系，竞争越强，其生长速度越慢。并且竞争指数 CI 在臭冷杉、云杉和红松 3 个针叶树种的模型中重要性较高，这与任玫玫等[27]关于长白山云冷杉林优势树种的竞争研究结果一致，推测是因为这 3 个树种受到侧方挤压较多，并且由于林木个体较大、数量较多，3 个树种有着较大的种间竞争压力。

不同树种的 BAI 对林分密度指数（SDI）有着不同的响应，云杉、白桦、椴树的 BAI 在适中的林分密度下有着明显的增长，随后趋于稳定；而臭冷杉、红松和枫桦的 BAI 则对林分密度变化的响应相对不大，总体呈下降趋势。造成这一现象的原因可能是云杉、白桦、椴树在样地中常构成冠层，当林分密度达到某一适中程度时，林冠层附近的树木会开始体现其优势地位，夺取更多资源，树木的层次结构也进而形成了林分内光资源的空间异质性，同时造成树种的生长差异。由于研究区受采伐影响极小，因此死亡率多数代表着该时期林分的枯死率，并且多数时期死亡率维持在 5% 左右（表 2），对树种组成没有明显的改变。图 1 表现出当林分内出现枯死木时，各树种的胸高断面积生长速度往往会降低，这可能代表着个别树木枯死的背后是整个林分内生长资源的匮乏，因此在日常经营中我们可能需要定期对林分整体情况进行监测。

4.3 多样性和气候对树木生长的影响

林分内树木大小多样性对树木生长有着一定的抑制作用。BAI 与树木大小多样性 DIV_Size 之间存在负相关，与 Liu 等[28]对生物多样性与天然云杉针阔混交林的生长关系研究结果一致，这在本质上可能是由于在年龄结构不均匀的混交林中，最大的树木无法平衡较小的树木的生长，两级分化加剧从而导致总体生长受影响。空间结构指数中代表林木大小差异程度的大小比数 U 同样也能证明这一点，U 可以简单地描述为目标树与邻近树之间的大小差异程度，随着 U 值的增加，椴树和白桦的 BAI 先随之增长，当 U 达到 0.75 时有所下降；云杉、臭冷杉、红松则完全与 U 呈现负面关系。这意味着当目标树为针叶树时，它的邻近木越小，其 BAI 就会越大；对阔叶树而言则相反。陈梦飞[29]也在研究中证实了云杉胸高断面积年均生长量与胸径大小比数的显著负相关关系。

树种多样性对树木生长的影响非常有限，相比于树木大小和竞争因素，树种多样性的重要性较低。树种多样性指数 DIV_SP 会对不同的树种产生不同的影响，其对云杉和臭冷杉的生长有着促进作用，因为云杉、臭冷杉是研究区的主要树种，在林分中占比较大，树种多样性的增加会提高其对自然资源的充分利用。臭冷杉、红松等树种的 BAI 随着空间结构指数混交度（M）的增大呈递增趋势，与吕延杰等[30]的研究结果相同，表明混交度的增大能促进其生长。这可能也代表了基于空间结构尺度的方法在用于分析林分内优势树种时会更具有代表性。

在气候因子中，年平均温度对树木生长造成的影响相比于年平均降水更大，可能是因为研究区的降水较为稳定，样地监测期间没有发生过干旱年，林分并未受到干旱胁迫，日常的水资源需求量已经得到满足，在这种情况下树木生长对于温度的响应也相对更强。总体来说，气候因子对树木生长的影响相对较小，这与余黎等[31]和欧强新等[32]关于气候与林木胸径生长量的影响关系的结果相似。但本研究未详细研究生长季温度、生长季降水以及太阳辐射时长等更深入具体的气候因子，并且本研究所采用的气候数据是基于林场范围，空间差异并不明显，这可能也是本文气候因子对树木生长造成影响相对较小的原因。

4.4 随机森林模型评价

本研究采用随机森林算法构建了胸高断面积生长量（BAI）模型，在此前，覃鑫浩[33]建立了兴安落叶松单木断面积混合效应模型，杜志等[34]也构建了马尾松（*Pinus massoniana*）混合效应模型，发现兴安落

叶松和马尾松胸高断面积生长量模型的决定系数 R^2 分别为 0.488 6 和 0.604 6。与本研究相比，随机森林模型构建的优势树种云杉、臭冷杉和红松模型决定系数 R^2 在 0.663～0.695，模型表现略优于混合效应模型，这也符合 Kindermann[35]之前的研究结果，他比较了 BAI 建模的不同回归技术，发现随着模型复杂性的增加，即自变量的数量增加，随机森林模型的优势越来越强。欧强新等[32]曾经使用随机森林算法对落叶松−云冷杉混交林单木胸径生长进行预测，模型的决定系数为 0.54，本研究构建的随机森林模型的决定系数与之相似，且针叶树种兼优势树种（红松、云杉、臭冷杉）比阔叶树种（白桦、椴树、枫桦）的模型拟合效果更好，这可能是因为不同树种的生物学特性不同，进而导致其对林分空间结构和气候等环境因素[36]的响应也不同。在实际应用中，可以划分适当的树种组进行林分生长模拟，简化建模过程。Ni 等[37]也曾提出区分树种对于分析混交林非常重要。

随机森林模型的一个缺点是不能直接得到明确的公式和相应的参数，但是在随机森林模型中，可以考查某一单独变量对目标变量的生态效应。在研究中，BAI 模型预测还受树干损害、昆虫爆发、胸径测量误差等因素影响，如：当用皮尺测量树木的胸高断面积时，误差在 4%～18% 之间[38−39]。在未来还应考虑这些因素，以提高 BAI 模型的可预测性。

5　结　　论

研究选择了长白山地区 5 块长期监测数据（1987—2010 年）的样地作为材料，基于随机森林算法对其中的主要树种臭冷杉、云杉、红松、椴树、枫桦、白桦，从单木因子、竞争、多样性和气候 4 个方面共 11 个自变量构建单木胸高断面积生长量（BAI）模型。结果表明：单木断面积是影响单木生长最重要的因子，呈正相关关系；其次树木大小多样性、代表林分内竞争地位的 BAL 和基于结构单元得到的竞争指数 CI 均对 BAI 有极大的负面影响，且与 BAL 相比，CI 更侧重于对林内优势树种云杉、臭冷杉、红松的描述；部分优势树种如云杉、红松的 BAI 还与大小比数 U 呈负相关，与混交度 M 呈正相关；气候因子对树木生长的影响相对较小。因此，树木生长在很大程度上依赖于其自身的生长潜力，在外界环境中主要受到来自竞争和树木大小多样性的抑制，而树种多样性的增加也能在一定程度促进林内优势树种的生长。总体而言，随机森林算法具有一定的统计可靠性，它能够很好地量化与表现出各变量与树木生长间的复杂关系，且模型建立过程中无需提前预设模型形式，具有较强的实用性，可以作为森林管理实践的新工具。

参　考　文　献

[1] Schlamadinger B, Bird N, Johns T, et al. A synopsis of land use, land-use change and forestry (lulucf) under the kyoto protocol and marrakech accords[J]. Environmental Science & Policy, 2007, 10(4): 271−282.

[2] 胡松. 湖南栎类天然林断面积生长模型研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
Hu S. Research on basal area growth model for oak natural forest in Hunan Province [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019.

[3] Jevsenak J, Skudnik M. A random forest model for basal area increment predictions from national forest inventory data[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 479: 118601.

[4] Jiang X, Huang J, Cheng J, et al. Interspecific variation in growth responses to tree size, competition and climate of western canadian boreal mixed forests[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631−632: 1070−1078.

[5] 江小雷, 岳静, 张卫国, 等. 生物多样性, 生态系统功能与时空尺度 [J]. 草业学报, 2010, 19(1): 219−225.
Jiang X L, Yue J, Zhang W G, et al. Biodiversity, ecosystem functioning and spatio-temporal scales[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(1): 219−225.

[6] Lei X, Wang W, Peng C. Relationships between stand growth and structural diversity in fpruce-dominated forests in new Brunswick, Canada[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(10): 1835−1847.

[7] Subedi N, Sharma M. Climate-diameter growth relationships of black spruce and jack pine trees in Boreal Ontario, Canada[J]. Global Change Biology, 2013, 19(2): 505−516.

[8] Chen L, Huang J, Stadt K, et al. Drought explains variation in the radial growth of white spruce in western Canada[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 133−142.

[9] Cortini F, Filipescu C, Groot A, et al. Regional models of diameter as a function of individual tree attributes, climate and site characteristics for six major tree species in Alberta, Canada[J]. Forests, 2011, 2(4): 814−831.

[10] Ashraf M, Zhao Z, Bourque C, et al. Integrating biophysical controls in forest growth and yield predictions with artificial intelligence technology[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2013, 43(12): 1162−1171.

[11] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述 [J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(3): 32−38.
Fang K N, Wu J B, Zhu J P, et al. A review of technologies on random forests[J]. Journal of Statistics and Information, 2011, 26(3): 32−38.

[12] 高若楠, 苏喜友, 谢阳生, 等. 基于随机森林的杉木适生性预测研究 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 36−43.
Gao R N, Su X Y, Xie Y S, et al. Prediction of adaptability of *Cunninghamia lanceolata* based on random forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(12): 36−43.

[13] 董灵波, 梁凯富, 张一帆, 等. 基于 Landsat 8 时间序列数据的翠岗林场森林类型划分 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2339−2346.
Dong L B, Liang K F, Zhang Y F, et al. Classification of forest types in Cuigang Forest Farm based on time series data of Landsat 8[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2339−2346.

[14] 徐丽, 欧阳勋志, 潘萍, 等. 基于 GF-1 WFV 与 MODIS 时空融

合的南方森林植被类型识别 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1948−1956.
Xu L, Ouyang X Z, Pan P, et al. Identification of forest vegetation types in southern China based on spatio- temporal fusion of GF-1 WFV and MODlS data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1948−1956.

[15] 孙铭辰, 姜立春. 基于机器学习算法的樟子松立木材积预测 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47(1): 31−37.
Sun M C, Jiang L C. Standing volume prediction of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* based on machine learning algorithm[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 31−37.

[16] Lh R. Perfecting a stand-density tndex for even-aged forests [J]. Journal of Agricultural Research, 1933, 46: 627−638.

[17] Hegyi F. A simulation model for managing Jack-pine stands simulation[J]. Royalcoll. For, Res. Notes, 1974, 30: 74−90.

[18] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究 [J]. 林业科学研究, 2001, 14(1): 23−27.
Hui G Y, Hu Y B. Measuring species spatial lsolation in mixed forests[J]. Forest Research, 2001, 14(1): 23−27.

[19] 惠刚盈. 一个新的林分空间结构参数: 大小比数 [J]. 林业科学研究, 1999, 12(1): 4−9.
Hui G Y. A new parameter for stand spatial structure: neighbourhood comparison[J]. Forest Research, 1999, 12(1): 4−9.

[20] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5−32.

[21] Arlot S, Celisse A. A survey of cross-validation procedures for model selection[J]. Statistics Surveys, 2010, 4: 40−79.

[22] Willmott C J, Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (mae) over the root mean square error (rmse) in assessing average model performance[J]. Climate Research, 2005, 30(1): 79−82.

[23] 董雪婷, 张静, 张志东, 等. 树种相互作用、林分密度和树木大小对华北落叶松生产力的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2722−2728.
Dong X T, Zhang J, Zhang Z D, et al. Effects of tree species interaction, stand density, and tree size on the productivity of *Larix principis-rupprechtii*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2722−2728.

[24] 吕沅杭, 伊利启, 王儒林, 等. 基于空间结构参数的大兴安岭天然落叶松单木直径生长模型 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(2): 81−91.
Lü Y H, Yi L Q, Wang R L, et al. Diameter growth model using spatial structure parameters of natural *Larix gmelinii* stand in Daxing'anling Mountains, northeast China[J]. Forest Research, 2021, 34(2): 81−91.

[25] Lin S, Li Y, Li Y H, et al. Influence of tree size, local forest structure, topography, and soil resource availability on plantation growth in Qinghai Province, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106957.

[26] Adame P, Hynynen J, Canellas I, et al. Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(3): 1011−1022.

[27] 任玫玫, 杨华. 长白山云冷杉林优势树种的竞争 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3089−3097.
Ren M M, Yang H. Competition among dominant tree species in a natural spruce-fir forest in Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3089−3097.

[28] Liu D, Zhou C, He X, et al. The effect of stand density, biodiversity, and spatial structure on stand basal area increment in natural spruce-fir-broadleaf mixed forests[J]. Forests, 2022, 13(2): 162.

[29] 陈梦飞. 青海东部黄土区青海云杉人工林空间结构对径向生长的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Chen M F. Effects of spatial structure of *Picea crassifolia* plantationon radial growth in the loess area of eastern Qinghai[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[30] 吕延杰, 杨华, 张青, 等. 云冷杉天然林林分空间结构对胸径生长量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 41−47.
Lü Y J, Yang H, Zhang Q, et al. Effects of spatial structure on DBH increment of natural spruce-fir forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(9): 41−47.

[31] 余黎, 雷相东, 王雅志, 等. 基于广义可加模型的气候对单木胸径生长的影响研究 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 22−32.
Yu L, Lei X D, Wang Y Z, et al. Impact of climate on individual tree radial growth based on generalized additive model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 22−32.

[32] 欧强新, 雷相东, 沈琛琛, 等. 基于随机森林算法的落叶松–云冷杉混交林单木胸径生长预测 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(9): 9−19.
Ou Q X, Lei X D, Shen C C, et al. Individual tree DBH growth prediction of larch-spruce-fir mixed forests based on random forest algorithm[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(9): 9−19.

[33] 覃鑫浩. 基于混合效应的兴安落叶松单木断面积生长模型研究 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4): 223−230.
Qin X H. Growth model of individual-tree basal area for *Larix gmelinii* based on mixed effect approach[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4): 223−230.

[34] 杜志, 陈振雄, 孟京辉, 等. 基于混合效应的马尾松单木断面积预估模型 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(9): 33−40.
Du Z, Chen Z X, Meng J H, et al. Prediction model of individual-tree basal area for *Pinus massoniana* based on mixed effect[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(9): 33−40.

[35] Kindermann G E. The development of a simple basal area increment, model[J]. Nature Precedings, 2011, 6: 1−25.

[36] Forrester D. Linking forest growth with stand structure: tree size inequality, tree growth or resource partitioning and the asymmetry of competition[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 447: 139−157.

[37] Ni R, Baiketuerhan Y, Zhang C, et al. Analysing structural diversity in two temperate forests in northeastern China[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 316: 139−147.

[38] Mcroberts R E, Hahn J T, Hefty G J, et al. Variation in forest inventory field measurements[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1994, 24(9): 1766−1770.

[39] Andreassen K, Tomter S. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, scots pine, birch and other broadleaves in Norway[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1): 11−24.

（责任编辑 范 娟 赵田芸
责任编委 孟 平）