

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240071

气候和立地等级对落叶松林分生物量估计的影响

刘子洋^{1,2} 强波^{1,2} 张浩^{1,2} 符利勇² 郭晋平¹

(1. 山西农业大学林学院, 山西 太谷 030801; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要:【目的】构建包含立地等级与气候因子的落叶松生物量模型, 分析环境与气候共同作用对生物量估算的影响, 为森林经营和决策提供理论依据。【方法】基于吉林省 2004、2009 及 2014 年落叶松人工林固定样地数据, 结合 World Clim 提供的 1950—2000 年平均气候因子, 选用 Richards 模型作为基础模型。通过地形因子合并立地单元划分立地等级, 并将立地等级作为哑变量, 建立含立地等级和气候因子的落叶松林分生物量模型, 分析气候和立地等级对林分生物量的影响。【结果】(1)建立的含立地等级和气候因子的模型的拟合精度可达 0.961, 与训练集得出的各项评价指标差异均小于 5%, 表现出较好的泛化能力。(2)林分因子对林分生物量的独立解释率为 93.7%, 立地等级为 2.4%, 而气候因子仅为 0.3%。(3)温度和降水共同影响林分生物量, 最干旱季温度升高会降低林分生物量最大值, 而最冷季降水增加则可促进林分生物量的增长。【结论】立地等级对落叶松林分生物量估算的影响大于气候因子。建立的含立地等级和气候因子的落叶松生长收获预估模型, 揭示了气候和立地等级对落叶松生物量生长的综合作用, 为林分适宜性经营和森林精准增汇提供科学依据。

关键词: 落叶松人工林; 气候变化; 林分生物量; 哑变量模型

中图分类号: S757 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)01-0022-07

引文格式: 刘子洋, 强波, 张浩, 等. 气候和立地等级对落叶松林分生物量估计的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 22-28. Liu Ziyang, Qiang Bo, Zhang Hao, et al. Influence of climate and site grade on biomass estimation of *Larix gmelinii* stand [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 22-28.

Influence of climate and site grade on biomass estimation of *Larix gmelinii* stand

Liu Ziyang^{1,2} Qiang Bo^{1,2} Zhang Hao^{1,2} Fu Liyong² Guo Jinping¹

(1. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China;

2. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] This paper constructs a larch biomass model that includes site class and climate factors, and analyzes the combined effects of environment and climate on biomass model within the same forest stand, so as to provide a theoretical basis for forest management and decision-making. [Method] Based on the data from fixed sample plots of larch plantations in Jilin Province of northeastern China in 2004, 2009, and 2014, and average climate factors from 1950–2000 obtained through World Clim, the Richards model was selected as the base model. Topographic factors significantly correlated with biomass were classified and integrated into the site class, which was used as a dummy variable to establish a larch stand biomass model including both site quality and climate factors. The impacts of climate and site quality on stand biomass were also analyzed. [Result] (1) The model incorporating site quality and climatic factors achieved a fitting accuracy of 0.961, with differences in evaluation metrics obtained from the training set being less than 5%, demonstrating good generalization ability. (2) Stand factors independently explained 93.7% of the variance in stand biomass, while site class accounted for 2.4%, and climate factors only 0.3%.

收稿日期: 2024-03-13 修回日期: 2024-04-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31270679)。

第一作者: 刘子洋。主要研究方向: 森林经营管理。Email: 2589898382@qq.com 地址: 030801 山西省晋中市太谷区铭贤路 1 号。

责任作者: 郭晋平, 教授。主要研究方向: 森林生态学、森林资源培育与经营研究。Email: jinpguo@126.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

(3) Temperature and precipitation jointly affected stand biomass. Higher temperatures in the driest season can reduce the maximum biomass of stand, while increased precipitation in the coldest season can accelerate the growth rate of stand biomass. [Conclusion] Site quality has a greater impact on estimation of larch stand biomass than climate does. The established *Larix gmelinii* growth and yield prediction model, which incorporates both site class and climate factors, reveals the effects of these factors on larch biomass growth. This can provide scientific guidance for suitable forest stand management and precise carbon sequestration in forestry.

Key words: *Larix gmelinii* plantation; climatic change; stand biomass; dummy variable model

林分生物量与碳储量是评价森林质量的重要指标,也是森林经营决策的重要依据^[1]。面对全球气温上升带来的挑战,森林已成为气候变化研究的热点。通过森林增林扩绿、提质增效等措施,可有效降低大气碳浓度、维持气候稳定^[2]。在气候变化背景下,分析森林生长与收获规律对林业精准增汇和森林适地经营具有重要意义。

近年来,受气候变化影响,森林生物量及碳储量的变化受到广泛关注。模型模拟法已成为探究林分生长与环境因素关系的重要手段。然而,传统林分生物量模型主要通过林分密度、林分断面积、经营措施和立地因子等变量来解释生物量变化,未能充分考虑气候因子的作用。已有研究表明,林龄和土壤质地可解释 65.6% 的森林生态系统碳储量变化^[3];退化森林的林分生物量变异受林分因子、海拔和干扰方式的共同影响^[4];碳储量还会因地形地势而发生变化^[5]。尽管上述研究解决了相应问题,但均假设气候条件不变,无法系统分析气候因子对林分生长的影响。

气候与林分生长的响应关系错综复杂^[6]。Bennett 等^[7]发现气候变量可解释林分地上生物量变异的 47%; Rudgers 等^[8]指出加入气候因子会影响生物量估算结果; Khan 等^[9]发现降水和温度显著影响林分生物量;李芸等^[10]发现落叶松净初级生产力与温度呈显著正相关,但与降水无显著关系;Aguirre 等^[11]发现气候对落叶松(*Larix gmelinii*)生物量的影响既有正向作用又有负向作用,气候和立地因子均对林分生长有显著影响。此外,何潇等^[12]基于年湿热指数构建的哑变量模型指出,不同落叶松林分中气候因子的作用方向和强度因树种而异;贡晓清等^[13]发现在相同区域不同树种对气候变化的响应既有共性又有差异性;台秉洋^[14]研究不同海拔条件下落叶松生长与气候的关系,发现气候对林分的影响方向和程度随海拔显著变化;杜志等^[15]则发现竞争、立地质量和气候相关的因子均与林分生长显著相关。综上,立地和气候因子对林分生长的影响具有一定不确定性,具体响应可能因区域、树种及环境条件而异。

随着气候变暖的不断加剧,部分亚热带区域逐渐向北热带和中热带转变^[16],这一变化为落叶松林的适地经营和精准固碳经营带来了新的挑战。张清华等^[17]研究发现,温度升高将导致落叶松的南部分布边界持续北移,甚至可能被阔叶林完全取代。李峰等^[18]预测,在当前气候变化趋势下,到 2050 年大兴安岭地区的落叶松分布面积可能减少 99.7%。因此,落叶松林分生物量随立地和气候变化的关系亟需进一步研究。尤其是林分、气候和立地条件的协同作用对落叶松生物量的影响尚不明确。在区域尺度下采用适当的方法评估各因子对林分生物量的影响,将为气候变化背景下的森林可持续经营提供科学依据。

基于此,本文以吉林省落叶松人工林为研究对象,利用 3 期固定样地清查数据及 1 km × 1 km 尺度的气候数据,构建含立地等级、林分指标以及气候因子的林分生物量模型,旨在为气候变化背景下落叶松人工林宜林经营和精准固碳提供依据。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

吉林省(122°24' ~ 131°52'E, 40°56' ~ 46°19'N)位于我国东北地区,属温带大陆性季风气候。省内各区域气候差距较大,月极端低温达到-20℃,月极端高温为 23℃,年总降水量为 400 ~ 1 000 mm,夏季降水量可达到全年的 80%。地形分布以大黑山为界限,中、东部集中为山区和森林,西部为平原和洼地,全省森林覆盖率为 35.9%,其中落叶松占林地面积和蓄积的 8.5% 和 5.5%。

1.2 样地调查数据和数据处理

数据来源于吉林省 2004、2009、2014 年固定样地清查数据,样地位置与分布见图 1。样地面积为 0.06 hm²,主要调查因子有树种、胸径、树高、立木类型、坡向等。其他林分因子可根据样地单木数据计算,包括林分平均胸径、平均树高、林分胸高断面积、林分株数密度和林分密度指数等。

林分密度指数(S)^[19]计算公式为

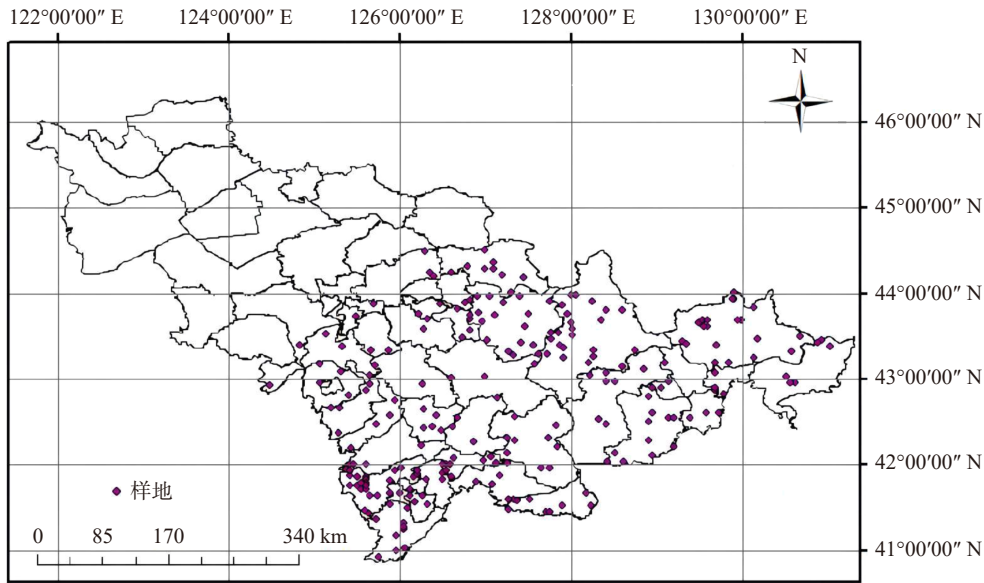


图1 落叶松样地分布

Fig. 1 Distribution of *Larix gmelinii* sample plots

$$S = N \left(\frac{D}{D_0} \right)^\gamma \quad (1)$$

式中： N 为林分株数密度(株/hm²)， D 为样地树木平均胸径(cm)， D_0 为标准平均胸径(取20 cm)， γ 为自然稀疏率(取值1.605)。

林分每公顷生物量由样地单木总生物量(包括树干、树枝和树叶等)求和并除以样地面积获得，单木模型参照标准LY/T 2654—2016《立木生物量模型及碳计量参数—落叶松》。

删除存在错测、漏测以及输入错误等问题的部

分样地，选择林分平均胸径大于5 cm的样地，筛选后得到有效样地286个。为提高模型的精准性，并判断新模型的合理性，本研究取出数据的30%用来检验模型，最终获得建模数据200组和验证数据86组。林分因子统计量见表1。

立地等级的划分由立地因子的组合反映。筛选一类调查数据中与林分平均高生长相关的地形因子，将筛选出来的地形因子分级后(分级标准见表2)，将各元素组合为立地单元，按照立地单元将样地划分为不同立地等级。

表1 数据变量的统计量

Tab. 1 Statistics in data variables

变量	建模数据				检验数据			
	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差
林分平均年龄/a	27	68	8	13	25	55	8	12
林分密度/(株·hm ⁻²)	1 129	2 593	375	483	1 160	3 238	375	627
林分密度指数/(株·hm ⁻²)	499	1 000	61	200	496	1 064	75	200
林分胸高断面积/(m ² ·hm ⁻²)	12.82	30.12	1.15	6.57	14.11	25.40	5.06	5.09
林分生物量/(t·hm ⁻²)	76.47	208.61	4.73	45.00	75.23	194.29	6.03	42.00

表2 立地因子等级划分标准

Tab. 2 Classification criteria for site factor grades

序号	因子	划分条件
1	海拔	每200 m一个等级
2	坡度	每15°一个等级
3	坡向	(1)北坡；(2)东北坡；(3)东坡；(4)东南坡；(5)南坡；(6)西南坡；(7)西坡；(8)西北坡；(9)无坡向
4	坡位	(1)脊部；(2)上坡；(3)中坡；(4)下坡；(5)山谷；(6)平地
5	土层厚度	每20 cm一个等级
6	腐殖层厚度	(1)薄：< 2 cm；(2)中：2~5 cm；(3)厚：> 5 cm

按照表 2 标准组合划分后共得到 10 个立地等级, 但由于部分立地等级的样本量太少, 无法形成有效曲线, 因此我们将样本量过少的立地等级与平均树高相差最少的立地等级合并为一个, 最终共有 5 个立地等级。第 I 立地等级林分生长最好, 第 V 立地等级林分生长最差, 第 I 到第 V 立地等级分别有 37、68、58、73、50 个样地, 分级后结果见图 2。

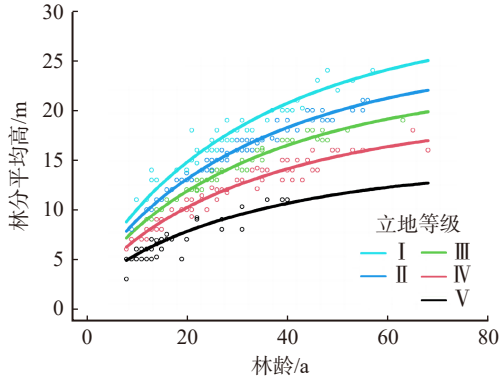


图 2 落叶松人工林林分平均高的 5 个立地等级分布

Fig. 2 Distribution of 5 site grades with stand average height of *Larix gmelinii* plantation

1.3 气候数据

中长期气候平均值能够反映当地的气候条件。气候与林木生长的响应关系可能表现为全年、单月或者某一季度气候的影响。本研究气候数据通过世界气候数据集下载获得, 空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。采用 ArcGIS 的 Spatial Analyst 功能提取样地对应气候数据。将 1950—2000 年的 19 个生物气候因子与 3 个落叶松生长季气候因子(6—10 月)的平均气候因子作为分析对象。当前气候因子含义见表 3。

2 研究方法

2.1 气候变量筛选

温度和降水显著影响林分生长^[20], 但太多的变量会导致模型变得复杂, 或出现参数无法计算等问题, 因此选择与生物量最显著相关的温度和降水因子各一个。通过对气候因子多元逐步回归, 保留与生物量显著相关且共线性较弱的气候因子。最终选择最干旱季平均气温(CV9)和最冷季降水量(CV19)作为气候因子。标准化回归系数是在对自变量和因变量同时进行标准化处理后得到的回归系数, 可以比较不同自变量对因变量的相对作用大小。因此, 对筛选后的变量进行标准化处理, CV9 和 CV19 的标准化系数分别为-0.016 6 和 0.001 7。

2.2 基础模型构建

理论生长模型可以反映并预测生物量随林龄的生长趋势。以林分为研究对象时, 林分密度指数描述描述林分竞争程度和林地立地现状。将林分密度

表 3 气候变量含义说明

Tab. 3 Explanation of climate variable meaning

气候变量编号	含义说明
CV1	年平均气温(°C)
CV2	月平均气温差(°C)
CV3	等温性(CV2/CV7)(×100)
CV4	温度季节性变化(标准差×100)
CV5	最热月最高温(°C)
CV6	最冷月最低温(°C)
CV7	年平均气温差(°C)
CV8	最湿季平均气温(°C)
CV9	最干旱季平均气温(°C)
CV10	最热季平均气温(°C)
CV11	最冷季平均气温(°C)
CV12	年总降水量(mm)
CV13	最湿月降水量(mm)
CV14	最干月降水量(mm)
CV15	降水量季节性(变异系数)
CV16	最湿季降水量(mm)
CV17	最干旱季降水量(mm)
CV18	最热季降水量(mm)
CV19	最冷季降水量(mm)
CV20	生长季平均最高温(°C)
CV21	生长季平均最低温(°C)
CV22	生长季降水量(mm)

指数和林龄作为自变量, 不仅具有生物学意义也能较好地表征林分因子。因此, 本研究选用 Richards 模型作为基础生物量模型, 模型形式为

$$B = a \left(1 - \exp \left(-b \left(\frac{S}{1000} \right)^c A \right) \right)^d \quad (2)$$

式中: B 、 S 、 A 分别代表林分生物量、林分密度指数和林龄, a 、 b 、 c 、 d 均为模型参数。

通过再参数化将气候因子加入模型, 模型有 4 个变量, 两个气候因子共有 16 种设置情况, 最终将最干旱季平均气温(T_m)和最冷季降水量(P_m)分别设置在参数 a 和 c 上。

$$B = (a + eT_m) \left(1 - \exp \left(-b \left(\frac{S}{1000} \right)^{(c+fP_m)} A \right) \right)^d \quad (3)$$

式中: T_m 和 P_m 分别代表最干旱季平均温度和最热季降水量, a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 均为模型参数。

2.3 哑变量模型构建

通常不同立地等级的林分生长水平差异较显著, 但立地等级难以直接作为变量反映对生物量变化的影响, 因此本研究将立地等级作为哑变量, 得到含哑变量的生物量生长模型。添加气候因子后模型

有6个参数。为避免模型参数过多难以拟合,将哑变量仅设置在一个参数上,最终将哑变量设置在参数 a 上,模型形式为

$$B = \left(\sum_{i=1}^{n=5} a_i x_i \right) \left(1 - \exp \left(-b \left(\frac{S}{1000} \right)^c A \right) \right)^d \quad (4)$$

$$B = \left(\sum_{i=1}^{n=5} a_i x_i + e T_m \right) \left(1 - \exp \left(-b \left(\frac{S}{1000} \right)^{(c+fP_m)} A \right) \right)^d \quad (5)$$

式中: x_i 为区分立地等级的哑变量(用 0/1 标识), a_i 为模型参数($i = 1, 2, 3, 4, 5$)分别表示第 I 到第 V 立地等级,其余变量解释与式(2)相同。

2.4 模型评价

通过赤池信息准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC)和决定系数(R^2)对模型进行判断,若改进后的模型 R^2 越接近 1, AIC 与 BIC 值最小,则认为模型最优,反之模型较差。

模型检验采用独立检验,随机将 70% 的数据作为建模数据,30% 的数据用作检验,检验结果由均方根误差(RMSE)和总相对误差(TRE)判断, RMSE 和 TRE 越小,表示模型拟合能力越好。

3 结果与分析

添加气候因子和立地等级均可提升模型拟合程度,由表 4 可知,添加变量后模型的 AIC 和 BIC 与原模型相比均有不同程度的减小,排除因变量过多导致的过拟合问题。基础模型拟合精度 R^2 达到 0.937, RMSE 为 11.22 t/hm²;添加气候因子后, R^2 提高 0.003, RMSE 降低了 0.28 t/hm²。对比原模型,采用哑变量建模后,拟合效果提高, R^2 提高了 0.023, RMSE 降低了 2.37 t/hm²;同时添加气候和立地等级哑变量时模型拟合精度会进一步提升,但提升有限。

表 4 林分生物量模型评价指标

Tab. 4 Evaluation indicators for stand biomass model

模型	R^2	TRE	RMSE/(t·hm ⁻²)	AIC	BIC
基础模型(式2)	0.937	1.61	11.22	2 204	2 222
含气候因子模型(式3)	0.940	1.50	10.94	2 193	2 219
含立地等级模型(式4)	0.960	1.01	8.85	2 076	2 109
含气候因子和立地等级模型(式5)	0.961	0.99	8.78	2 077	2 117

若将 R^2 作为影响因子对林分生物量的总解释率,可以发现只有林分因子(林分密度指数)时,解释率可达到 93.7%;考虑立地等级时,可以多解释生物量 2.4% 的变异,而添加的气候因子解释率仅为 0.3%;当共同考虑气候和立地等级时,模型解释率的提升小于分别将气候和立地等级添加到模型的提升之

和,这表明立地等级和气候因子对林分生物量存在交互影响。

含立地等级与气候因子的最佳生物量模型拟合结果为

$$B = (a_i - 1.093 T_m) \left(1 - \exp \left(-0.002 339 \left(\frac{S}{1000} \right)^{(1.438 - 0.004 193 P_m)} A \right) \right)^{23.39} \quad (6)$$

式中: $a_1 \sim a_5$ 分别表示第 I 到第 V 立地等级的参数 ($a_1 = 187.6, a_2 = 167.6, a_3 = 157.3, a_4 = 137.3, a_5 = 116.4$)。

使用独立检验分析模型稳定性,从独立检验结果(表 5)来看,参数标准差变化不大,模型稳定性良好。建模数据与检验数据评价指标相似,表明模型对吉林省落叶松人工林具有很好的适用性。

表 5 最优模型检验

Tab. 5 Optimal model verification

参数	式(5)		训练集		验证集	
	估计值	标准差	TRE	RMSE/(t·hm ⁻²)	TRE	RMSE/(t·hm ⁻²)
a_1	187.6	17.81				
a_2	167.6	17.64				
a_3	157.3	17.12				
a_4	137.3	16.81				
a_5	116.4	17.12				
b	0.002 064	0.159				
c	1.442	0.15				
d	25.36	0.039				
e	-1.459	1.074				
f	-0.005 133	0.002 899				
模型评价			0.991	8.78	0.986	8.61

4 讨论

本研究采用哑变量和再参数方法,构建了考虑气候和立地综合影响的生物量模型。增加变量可以显著提升模型拟合能力和适用性^[21]。新建立的模型能够准确模拟气候变化背景下,不同立地等级落叶松林分生物量的生长变化趋势。Richards 模型在生物量估算中表现良好,模型拟合精度可达 90%。将立地等级作为哑变量加入林分生物量模型,减少了建模复杂度,使林分整体有统一的模型形式,并提升生物量模型拟合精度至 0.961。颜伟等^[22]以 Richards 方程为基础模型,将立地等级和树种作为哑变量,拟合了河南省栎类(*Quercus spp.*)和杨树(*Populus spp.*)林分的断面积和蓄积模型,拟合精度进一步提高, R^2 由 0.925 提升到 0.937,与本文研究结果类似。进

一步表明本研究结果具有统计可靠性。

气候因子对林分生长状况和立地条件的影响较为复杂。选用气候因子差异较大, 地形因子多样的数据可以放大非生物因子对生物量的影响, 但研究区域过大, 林分生物量的变异可能受到其他因素的影响。本研究以温度差异大、立地条件丰富的吉林省作为研究区域, 选取落叶松人工林为研究对象, 结合与样地对应的 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的精准气候数据, 分析气候因子和立地等级对落叶松生物量的影响。通过多元逐步回归, 筛选出的气候因子为最干旱季节气温(12月至次年2月)和最冷季降水(12月至次年2月)。这与于黎等^[23]采用主成分分析筛选出的气候因子(最干季平均气温、最湿月降水量)具有共同点, 均表现为最干季平均气温对林分生长的影响要大于降水。立地等级可以独立解释 2.4% 的生物量变异, 而气候因子对生物量的解释率仅为 0.3%。立地等级和林分因子对生物量的影响显著大于气候因子。何潇等^[24]通过构建含林分和气候因子的林分生物量模型分析了气候对落叶松的影响, 结果表明林分因子对落叶松林分生物量的影响占比超过 80%, 而气候对林分生物量的解释度不足 1%, 与本研究结果一致。此外, 本研究发现, 在综合考虑气候和立地等级时发现模型解释率并不等于气候和立地等级的独立解释率的简单相加。这表明, 林分因子、立地等级和气候因子对林分生物量存在交互作用和共同影响。

Richards 方程是经典的理论生长模型, 其参数具有重要生物学含义。其中, 参数 a 可以影响林分生物量的最大值。经过参数位置设置对比发现, 只有当温度和立地等级位于参数 a 时, 模型拟合能力会提高。这表明, 温度和立地等级决定了林分生物量的最大值, 而降水则主要影响落叶松林分的生长速率。对两个气候因子做标准化处理, 标准化系数分别为 -0.016 6、0.001 7。这表明温度升高会降低落叶松的生物量最大值, 而降雨量升高则会促进林分生长, 这与 Khan 等^[9]的研究结果一致。然而, 李芸等^[10]研究认为吉林省落叶松净初级生产力与温度呈显著正相关, 而与降雨关系不明显。这一结论与本文研究结果相反, 可能与气候数据来源差异有关。下一步将考虑通过其他建模方法, 对比分析非生物因子、建模方法对落叶松林分生物量的影响, 深入研究落叶松林分生物量变化的多元驱动机制。

5 结 论

Richards 模型作为基础模型, 可以较好的拟合落叶松生物量。通过多元逐步回归筛选的气候因子为最干季平均气温和最冷季平均降水量。在此基础

上, 结合立地等级作为哑变量, 构建了含立地等级和气候的落叶松生物量模型, 模型拟合精度得到进一步提升。模型拟合精度由基础模型的 0.937 提升至 0.961, 体现出显著的统计可靠性和生物合理性。

气候因子中的温度和降水共同影响落叶松生物量的生长。通过再参数化的参数位置分析和标准化结果表明, 最干季平均气温升高和最冷季降雨增加均对落叶松生长产生负面影响。

进一步分析了立地等级、林分因子和气候因子对落叶松林分生物量的影响。结果显示, 林分因子对林分生物量的独立解释率为 93.7%, 立地等级为 2.4%, 而气候因子仅为 0.3%。在将气候和立地等级加入基础模型后, 发现总解释率低于各独立解释率之和, 这表明林分因子、立地等级和气候因子之间存在一定的交互作用。尽管气候因子对模型精度的提升较小, 但在气候变化背景下, 其影响不容忽视。

研究表明, 将立地等级作为哑变量建立生物量模型是可行的。此方法不仅能够显著提高模型精度, 减少建模工作量, 还能在气候变化背景下, 通过气候因子和立地等级的结合, 更精准判断生物量变化趋势, 并提升模型对生物量生长动态的预测能力。与原模型相比, 采用哑变量构建的生物量模型(包含立地等级和气候因子)在生物量拟合精度上表现更优, 符合实际应用需求。这一模型有助于指导不同气候情景下区域性落叶松林的合理经营。

参 考 文 献

- [1] Pan Y, Birdsey A R, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333: 988–993.
- [2] 张浩楠, 申融融, 张兴平, 等. 中国碳中和目标内涵与实现路径综述[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(2): 240–252.
Zhang H N, Shen R R, Zhang X P, et al. Implications and pathways of China's carbon neutrality: a review[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(2): 240–252.
- [3] 黄晓强, 信忠保, 赵云杰, 等. 林龄和立地条件对北京山区油松人工林碳储量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 184–190.
Huang X Q, Xin Z B, Zhao Y J, et al. Effects of stand ages and site conditions on carbon stock of *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing mountainous area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 184–190.
- [4] 何潇, 曹磊, 徐胜林, 等. 内蒙古大兴安岭林区不同恢复阶段森林生物量特征与影响因素[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(9): 50–58.
He X, Cao L, Xu S L, et al. Forest biomass characteristics and influencing factors in different restoration stages in the Daxing'anling forest region of Inner Mongolia, northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(9): 50–58.
- [5] 郑瞳, 牟长城, 张毅, 等. 立地类型对张广才岭天然白桦林生态系统碳储量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6284–6294.

- Zheng T, Mu C C, Zhang Y, et al. Effects of site condition on ecosystem carbon storage in a natural *Betula platyphylla* forest in the Zhangguangcai Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 6284–6294.
- [6] 刘世荣, 温远光, 蔡道雄, 等. 气候变化对森林的影响与多尺度适应性管理研究进展 [J]. *广西科学*, 2014, 21(5): 419–435.
- Liu S R, Wen Y G, Cai D X, et al. Impacts of climate change on forests and adaptive multi-scales management: a review[J]. *Guangxi Science*, 2014, 21(5): 419–435.
- [7] Bennett C A, Penman D T, Arndt K S, et al. Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale[J]. *Ecography*, 2020, 43(11): 1692–1705.
- [8] Rudgers A J, Hallmark A, Baker R S, et al. Sensitivity of dryland plant allometry to climate[J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(12): 2290–2303.
- [9] Khan D, Muneer M A, Nisa Z U, et al. Effect of climatic factors on stem biomass and carbon stock of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* in Daxing'anling Mountain of Inner Mongolia, China[J/OL]. *Advances in Meteorology*, 2019: 5692574 [2024–01–10]. <https://doi.org/10.1155/2019/5692574>.
- [10] 李芸, 王轶夫, 孙玉军, 等. 吉林省落叶松林净初级生产力时空特征及其对气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 947–959.
- Li Y, Wang Y F, Sun Y J, et al. Temporal-spatial characteristics of NPP and its response to climate change of *Larix* forests in Jilin Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 947–959.
- [11] Aquirre A, del Río M, Ruiz-Peinado R, et al. Stand-level biomass models for predicting C stock for the main Spanish pine species[J]. *Forest Ecosystems*, 2021, 8(1): 29.
- [12] 何潇, 雷相东, 段光爽, 等. 气候变化对落叶松人工林生物量生长的影响模拟 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2023, 47(3): 120–128.
- He X, Lei X D, Duan G S, et al. Modelling the effects of climate change on stand biomass growth of larch plantations[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(3): 120–128.
- [13] 贡晓清, 谢榕, 杨华. 长白山云冷杉针阔混交林 3 种常见树种径向生长对气候变化的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(4): 1–10.
- Gong X Q, Xie R, Yang H. Response of radial growth of three common tree species to climate change in a spruce-fir mixed stand in Changbai Mountain of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(4): 1–10.
- [14] 台秉洋. 大兴安岭北部高山兴安落叶松树木生长与气候变化的关系 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- Tai B Y. The relationship between the growth of *Larix gmelinii* in the north alpine of Great Khingan and the climate change[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [15] 杜志, 陈振雄, 李锐, 等. 气候敏感的杉木树高-胸径非线性混合效应模型研建 [J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(9): 52–61.
- Du Z, Chen Z X, Li R, et al. Development of climate-sensitive nonlinear mixed-effects tree height-DBH model for *Cunninghamia lanceolata*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(9): 52–61.
- [16] 曹福祥, 祁承经, 徐永福. 热带增宽及其对中国东部亚热带森林植被的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(3): 745–750.
- Cao F X, Qi C J, Xu Y F. Tropical widening and its impact on the subtropical forest vegetation in eastern China[J]. *Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(3): 745–750.
- [17] 张清华, 郭泉水, 徐德应, 等. 气候变化对我国珍稀濒危树种: 珙桐地理分布的影响研究 [J]. *林业科学*, 2000, 36(2): 47–52.
- Zhang Q H, Guo Q S, Xu D Y, et al. Influence of climate changes on geographical distribution of *Davidia involucrata*, the precious and endangered species native to China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(2): 47–52.
- [18] 李峰, 周广胜, 曹铭昌. 兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2255–2260.
- Li F, Zhou G S, Cao M C. Responses of *Larix gmelinii* geographical distribution to future climate change: a simulation study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2255–2260.
- [19] Reineke L H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests[J]. *Journal of Agricultural Research*, 1933, 46(7): 627–638.
- [20] 邓成, 梁志斌. 森林生长收获模型发展中存在的问题及相关建议 [J]. *世界林业研究*, 2015, 28(1): 92–96.
- Deng C, Liang Z B. Problems in forest growth and yield model and relevant suggestions[J]. *World Forestry Research*, 2015, 28(1): 92–96.
- [21] 洪奕丰, 陈东升, 申佳朋, 等. 长白落叶松人工林单木和林分水平的相容性生物量模型研究 [J]. *林业科学研究*, 2019, 32(4): 33–40.
- Hong Y F, Chen D S, Shen J P, et al. Study on compatible biomass models at individual tree and stand levels in man-made *Larix olgensis* forests[J]. *Forest Research*, 2019, 32(4): 33–40.
- [22] 颜伟, 段光爽, 王一涵, 等. 河南省栎类和杨树林分断面面积和蓄积生长模型构建 [J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(6): 55–61.
- Yan W, Duan G S, Wang Y H, et al. Construction of stand basal area and volume growth model for *Quercus* and *Populus* in Henan Province of central China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(6): 55–61.
- [23] 余黎. 气候敏感的长白落叶松人工林全林整体模型研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- Yu L. Climate-sensitive integrated stand growth model of Changbai larch (*Larix olgensis*) plantations[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [24] 何潇, 徐奇刚, 雷相东. 气候敏感的落叶松人工林林分生物量模型研究 [J]. *林业科学研究*, 2021, 34(6): 20–27.
- He X, Xu Q G, Lei X D. Climate-sensitive stand biomass model for *Larix* spp. plantation[J]. *Forestry Research*, 2021, 34(6): 20–27.

(责任编辑 范娟
责任编辑 张会儒)