籍翠莹,孙鹤嘉,周颖,等.冀北山区樟子松生物量分配特征及模型研建[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(2):90-101.
Ji C Y, Sun H J, Zhou Y, et al.Biomass allocation characteristics and model development of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in northern Hebei mountainous area[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(2):90-101.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202404029

冀北山区樟子松生物量分配特征及模型研建

籍翠莹[1],孙鹤嘉[1],周颖[1],钱甲龙[1],付立华[2],刘强[1*]

(1.河北农业大学 林学院,河北 保定 071000;2.河北省塞罕坝机械林场,河北 承德 068466)

摘　要:[目的]樟子松以其耐旱、耐贫瘠的生物学特性,成为"三北"防护林建设的主力军,在冀北沙地得到广泛应用,本研究旨在探索河北省塞罕坝地区樟子松不同器官生物量分配规律,构建最优生物量预测模型。[方法]以河北省塞罕坝机械林场12年至46年生樟子松为研究对象,基于34棵标准木不同器官生物量数据,分析其生物量的分配规律,构建以胸径、树高及其高径比为自变量的樟子松各器官生物量模型,通过调整后确定系数(R_a^2)和均方根误差(RMSE)评价模型拟合效果,以平均误差(ME)和平均误差绝对值(MAE)评价模型检验效果。[结果](1)樟子松各器官中树干生物量占比最高(48.86%~65.61%),树叶和树根占比较低,分别为10.58%和14.65%。(2)树干生物量占比随年龄、胸径、树高的增加而增加,其中随胸径而变化最明显,从30%增加至76%;树枝和树叶生物量占比随年龄、胸径和树高的增加而降低;根生物量分配比例较为稳定(变化幅度不超过15%)。(3)树枝生物量最优模型是以D^2H为变量的指数方程形式,R_a^2达到0.87,而干、叶和根均是以D^aH^b为变量的指数方程形式,R_a^2均达到0.79以上,其中树干的R_a^2高达0.99。相容性生物量模型R_a^2可达到0.95。[结论]冀北坝上地区不同林龄樟子松干、枝和叶生物量分配有显著差异,以D^aH^b为变量的指数模型对单独估计樟子松整体和各器官生物量效果较优,但相容性模型可在保证良好拟合效果的基础上兼顾整体与器官的关系。本研究完善了冀北山区樟子松生物量模型体系,可为樟子松人工林可持续经营奠定理论基础。

关键词:樟子松; 器官生物量; 分配比例; 异速生长模型; 相容性生物量模型
中图分类号:S791.253　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)02-0090-12

Biomass allocation characteristics and model development of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in northern Hebei mountainous area

Ji Cuiying[1], Sun Hejia[1], Zhou Ying[1], Qian Jialong[1], Fu Lihua[2], Liu Qiang[1*]

(*1.College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2.Saihanba Mechanized Forest Farm of Hebei Porovince, Chengde 068466, China*)

Abstract: [Objective] *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, known for its drought resistance to poor soil conditions, has become a key species in the construction of the 'Three North' Shelterbelt Program and is widely used in the sandy areas of northern Hebei. The purpose of this study was to explore the biomass distribution patterns of different organs of *P. sylvestris* in the Saihanba area of Hebei Province and to construct an optimal biomass prediction model. [Methods] The study focused on the pine trees aged 12 to 46 years from the Saihanba Mechanized Forest Farm in Hebei Province. Based on biomass data from 34 sample trees, the allocation patterns of biomass in different organs was analyzed. Biomass models for various organs were constructed using DBH, tree height, and height-to-diameter ratio as independent variables. The fitting performance of the models was evaluated using the adjusted coefficient (Ra^2) and root mean square error (RMSE), and the predictive performance was assessed

收稿日期:2024-04-11　　**修回日期**:2024-09-06
基金项目:河北省重点研发计划项目-乡村振兴技术创新专项(22326807D);河北农业大学引进人才科研专项(YJ201942)
作者简介:籍翠莹(ORCID:0009-0003-3211-773X),硕士研究生,研究方向:森林可持续经营
*通信作者:刘强(ORCID:0000-0002-0256-2424),副教授, E-mail: qiangliu2015@126.com

using mean error (ME) and mean absolute error (MAE). [Results] (1) Among the organs of pine trees, the trunk had the highest biomass proportion (48.86%～65.61%), while the leaves and roots had lower proportions at 10.58 % and 14.65 %, respectively. (2) The proportion of trunk biomass increased with age , DBH, and tree height, with the most significant change observed with DBH, increasing from 30% to 76%. The proportions of branch and leaf biomass decreased with the increase of age, DBH and tree height. The root biomass allocation remained relatively stable, with a variation of less than 15%. (3) The optimal model for branch biomass was an exponential equation with D^2H as the variable, achieving an Ra^2 of 0.87. For the stems, leaves, and roots, the optimal models were exponential equations with D^aH^b as the variable, with Ra^2 values exceeding 0.79. The stem model achieved an Ra^2 of 0.99. The compatible biomass model achieved an Ra^2 of 0.95. [Conclusion] The biomass allocation of stem, branches, and leaves of *P. sylvestris* in the northern Hebei region varied significantly with tree age. Exponential models with D^aH^b as the variable were effective for estimating the total and organ－specific biomass of *P. sylvestris*. However, the compatible model provided a good fit while maintaining the relationship between the whole tree and its organs. This study enhanced the biomass model system of *P. sylvestris* in the mountainous areas of northern Hebei Province and laid a theoretical foundation for the sustainable management of *P. sylvestris*.

Keywords: *Pinus. sylvestris*, Organ biomass, Allocation ratio, Allometric growth model, Compatible biomass model

生物量是衡量森林生态系统健康状况的关键指标之一,它反映了植物体内物质和能量的积累情况[1]。生物量分配是植物在生殖与生存之间寻求平衡的结果[2],这种分配策略的变化可以揭示植物如何根据环境条件调整其生长策略,以最大化其生存和繁殖的成功率。各器官生物量分配比例的变化不仅表征了植物对资源获取的调控能力,也反映了植物对环境压力的适应性[3-4]。模型估计法作为生物量监测估算最常用的方法,国内外相关研究很多[5-6]。因此,构建生长模型,已成为估算林木及林分生物量简便而有效的方法[7]。目前基于林木形态因子所构建的生物量模型主要有生物量异速生长模型、相容性生物量模型等[8],但大多数只采用单一建模方法进行模型的建立与验证[9],本研究将采用这2种建模方法,并且对其进行比较。在以往的建模方法中通常以树高和胸径作为重要指标[10],本研究则拟将高径比(Ratio of tree height to diameter, RHD)引入到生物量模型构建中,高径比作为林木生长状态的一个统计指标,提供了树高和胸径之间关系的直观反映[11],作为评估森林生态系统结构和功能的一个重要参数[12-13]。

冀北坝上地区位于河北省和内蒙古自治区交界处,属森林-草原-荒漠交错带,降雨量少、气候恶劣、土壤贫瘠、无霜期短,是典型的北方半干旱生态脆弱区[14]。该地区是京津冀地区的重要生态屏障,对于维护区域生态平衡和生物多样性具有关键作用[15]。造林是该区域有效的植被恢复和保护措施,尤其是对于降低风速、减少风沙灾害具有显著效果[16],但受极端气候和贫瘠土壤的限制,适宜该地区造林的乡土树种寥寥无几。樟子松因其出色的抗寒抗旱和耐瘠薄特性[17-18],成为类似极端生境主要的攻坚造林树种[19],不仅能够在相对贫瘠的土壤中生存[20],还能够通过其根系固定土壤和沙尘,有效改善土壤的理化性质,减轻土壤荒漠化现象[21]。在“三北”防护林建设中的发挥了重要作用,成为干旱风沙地区困难立地造林的首选,在冀北坝上地区也得到广泛应用[22-24],但关于其生物量分配特征及预测的研究主要集中于东北地区[25],而在河北地区仍十分欠缺。此外,樟子松人工林已在多处出现了退化现象[26-27],明晰其生物量分配对干旱条件的响应机制及其生长发育规律十分必要。

本研究以河北省塞罕坝机械林场樟子松人工林为研究对象,分析不同林龄各器官生物量分配规律,并基于胸径、树高、高径比等指标,构建和筛选最优的樟子松单株生物量预测模型,旨在完善冀北山区樟子松生物量模型体系,为樟子松人工林可持续经营奠定基础。

1　研究区与研究方法

1.1　研究地区概况

研究区位于河北省围场满族蒙古族自治县最北部,42°02’～42°36’N,116°51’～117°39’E,海拔在1000 m以上,该地处于内蒙古高原向华北平原的过渡地带,地势南低北高,地形以丘陵和平原为主。属于半干旱半湿润寒温带大陆性季风气候,年均气温-1.3 ℃,全年昼夜温差大,四季分明,无

霜期平均80 d,年平均日照2 457.2 h,日照率56%,平均降水量460.3 mm[14]。塞罕坝全场总经营面积93 333.3 hm^2,有林地面积76 666.7 hm^2,森林覆盖率达到82%,林木总蓄积量1036万 m^3。土壤以灰色森林土、山地棕壤和风沙土为主。研究区域为樟子松保护区。该地区的主要乔木树种有华北落叶松(*Larix principis*—*rupprechtii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设及样木选取

本研究以河北省塞罕坝机械林场樟子松人工林为研究对象,于2020年针对<30 a、30~40 a、40~50 a不同林龄开展固定样地布设,每个林龄布设3块大小为30 m×30 m的固定样地,共计样地9块,基本信息见表1。对样地内胸径大于5 cm的林木挂牌标记并进行每木检尺。具体测量因子包括树高(Tree height, H)和胸径(Diameter at breast height, DBH),并记录样地内的所有林木的相对坐标(X,Y)。基于样地内每木检尺数据,计算出每个林龄径阶范围,并在样地外以4 cm径阶为标准,每个径阶筛选2~4株生长状态良好的林木作为解析样木,测量对应的树高和胸径,样地和样木基本信息分别见表1和表2。

表1 样地基本信息统计

Table 1 Statistics of basic informations of sample plots

林龄/a Age	海拔/m Altitude	坡度/° Slope	林分密度/(株/hm^2) Stand density	胸径/cm Diameter at breast height	树高/m Tree height	高径比 Ratio of tree height to diameter
<30	1600	<5	2706	5.0~13.9	1.2~12.6	20.3~90.7
30~40	1600	<5	1702	10.4~25.1	7.5~17.0	72.1~106.1
40~50	1600	<5	1463	10.5~29.5	7.5~20.9	71.4~110.2

1.2.2 解析样木生物量测定

采用整株全挖收获法与烘干法测量不同器官生物量。将解析样木伐倒(伐根不超过5 cm)后,按1 m等距锯成若干段,并裁掉各轮层枝条。称量每段树干的鲜重(Fresh weight of stem, Ws),在每一轮层中按平均鲜重选取1个枝条作为标准枝,进行枝叶分离,分别称量标准枝鲜重(Fresh weight of branch, Wb)和叶的鲜重(Fresh weight of leaf, Wl)。采用"全挖法"将树根全部挖出,将树根分成粗根(>5 cm)、中根(2~5 cm)和细根(<2 cm),将3个部分的树根进行称重(Fresh weight of root, Wr)。在每段树干基部伐下5 cm左右厚度的圆盘作为样品,大圆盘可进一步切割成楔形,保证重量为500 g左右即可,靠近树梢部分按重量适当多取。树枝和树叶样品主要来源于标准枝,样品重量也为500 g左右,针对位于上层树冠的小枝条可从其它非标准枝上采样补充。将不同器官样品带回实验室进行含水率测定,具体方法为将样品置于烘箱中105 ℃杀青30 min后85 ℃烘干48 h至恒重,称量树干干重并计算树干生物量(Stem biomass, SB)、称量树枝干重并计算树枝生物量(Branch biomass, BB)、称量树叶干重并计算树叶生物量(Leaf biomass, LB)、称量树根干重并计算树根生物量(Root biomass, RB)。计算总生物量(Total biomass, TB)=BB+LB+DB+RB。记录以上生物量参数后计算生物量分配指标,包括干生物量分配=(SB/TB)×100%、枝生物量分配=(BB/TB)×100%、叶生物量分配=(LB/TB)×100%、根生物量分配=(RB/TB)×100%。

1.2.3 数据分析

(1)模型构建

基础模型构建:对于樟子松异速生长模型构建,采取对数、指数、幂函数等形式的方程,对胸径、树高、径高比与各器官生物量建立相关关系,共筛选出8个方程(表3)。

相容性生物量模型构建:本文生物量的估计采用能使各分量之和等于总量的相容性模型的方法,公式如下:

$$W_S = a_1 D^{b1} H^{c1} \quad (1)$$

$$W_B = a_2 D^{b2} H^{c2} \quad (2)$$

$$W_L = a_3 D^{b3} H^{c3} \quad (3)$$

$$W_R = a_4 D^{b4} H^{c4} \quad (4)$$

表2　样木基本信息统计

Table 2　Statistics of basic information of sample wood

林龄/a Age	样木编号 The sample wood number	径级 Diameter class	胸径/cm Diameter at breast height	树高/m Tree height	高径比 Height to diameter ratio
<30	I−1	6	5.2	3.2	61.5
	I−2		5.9	2.8	47.5
	I−3		6.0	2.7	45.0
	I−4		6.4	4.7	73.4
	I−5	10	8.1	5.0	71.4
	I−6		8.1	3.1	44.3
	I−7		8.9	7.2	80.9
	I−8		9.4	5.8	61.7
	I−9	12	10.5	10.0	94.8
	I−10		11.5	10.2	88.7
	I−11		13.0	9.9	76.4
	I−12		13.5	11.3	83.9
30～40	II−1	12	11.8	11.3	88.0
	II−2		13.2	11.6	95.8
	II−3		13.4	11.5	87.9
	II−4	16	14.4	12.8	85.8
	II−5		15.1	13.3	89.0
	II−6		15.3	13.4	87.7
	II−7		15.5	12.2	78.7
	II−8	20	19.9	15.6	78.2
	II−9		21.7	16.1	74.3
	II−10	24	24.7	16.8	68.0
40～50	III−1	16	14.1	12.6	83.1
	III−2		14.2	13.4	116.7
	III−3		14.6	15.0	96.4
	III−4		17.7	14.7	102.7
	III−5	20	18.9	14.3	75.8
	III−6		21.5	16.1	74.9
	III−7	24	23.1	16.5	71.3
	III−8		23.7	16.6	70.0
	III−9		24.5	17.6	71.8
	III−10	28	26.7	17.1	64.1
	III−11		26.9	17.2	63.7
	III−12		27.0	17.0	63.0

$$W_T = a_1 D^{b1} H^{c1} + a_2 D^{b2} H^{c2} + a_3 D^{b3} H^{c3} + a_4 D^{b4} H^{c4} \quad (5)$$

式中:W_S、W_B、W_L、W_R和W_T分别表示树干、树枝、树叶、树根和总生物量(kg);D为胸径(cm);H为树高(m);a_1、a_2、a_3、a_4、b_1、b_2、b_3、b_4、c_1、c_2、c_3、c_4是其模型的参数。

(2)模型检验

模型拟合时随机选取75%的数据用于模型拟合,25%的数据用于模型的独立性检验。选择调整后确定系数(R_a^2)和均方根误差(RMSE)作为评价模型拟合效果的指标,选择平均误差(ME)和平均误差绝对值(MAE)作为独立性检验的指标,各个指标计算公式如下:

$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2)\left(\frac{n-1}{n-p}\right),$$

表3 基础生物量方程形式

Table 3 The basal biomass equation form

方程编号 Equation number	方程类型 Equation type	方程形式 Equation form	参数 Parameter	文献来源 Reference sources
Model 1	幂函数	$W=a_0D^{a1}H^{a2}$	a_0, a_1, a_2	刘坤等[28](2017)
Model 2	幂函数	$W=b_0D^{b1}$	b_0, b_1	李晓莎等[15](2016)
Model 3	幂函数	$W=c_0RHD^{c1}$	c_0, c_1	新建(2024)
Model 4	幂函数	$W=d_0(D^2H)^{d1}$	d_0, d_1	董利虎等[29](2013)
Model 5	对数	$\ln W=e_0+e_1\ln D$	e_0, e_1	刘红梅等[30](2013)
Model 6	对数	$\ln W=f_0+f_1\ln H$	f_0, f_1	周昊等[31](2023)
Model 7	对数	$\ln W=g_0+g_1\ln RHD$	g_0, g_1	新建(2024)
Model 8	对数	$\ln W=h_0+h_1\ln(D^2H)$	h_0, h_1	贾炜玮等[25](2008)

注:W表示生物量(kg),D为胸径(cm),H为树高(m),RHD为高径比;a、b、c为生物量模型参数。

Note: W represents the biomass (kg), D is Ddiameter (cm), H is tree height (m), HDR is high diameter ratio; a, b, c are biomass model parameters.

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\widehat{y_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{y_i}-\widehat{y_i}\right)^2} \quad (6)$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\widehat{y_i}\right)^2}{n-p}} \quad (7)$$

$$\mathrm{ME}=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{y_i-\widehat{y_i}}{n}\right) \quad (8)$$

$$\mathrm{MAE}=\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i-\widehat{y_i}}{n}\right| \quad (9)$$

式中:y_i为观测值;$\overline{y_i}$为观测值的平均值;$\widehat{y_i}$为预测值;n为样本个数;p为参数个数。

本研究主要使用Excal 2010、SPSS 24、R4.3.2等软件对数据进行统计分析和制图。本研究的数据整理及图表绘制使用Excel 2010,描述性统计分析使用SPSS 24,模型拟合用R4.3.2中nls包完成。

2 结果与分析

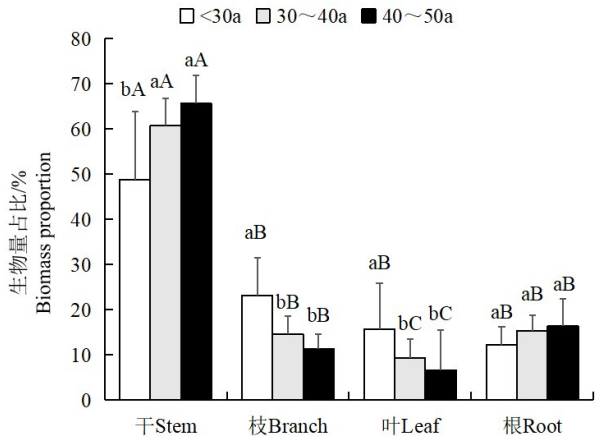
2.1 樟子松生物量分配

塞罕坝地区樟子松不同林龄各器官生物量分配如图1所示。其中<30 a林龄樟子松的干生物量在总生物量中所占比例显著低于30~40 a、40~50 a,随着林龄的增加,干生物量占比增加了16.75%。不同林龄之间树根生物量占比没有显著差异,但是呈现出一个缓慢上升趋势,从<30 a至40~50 a增加了4.18%。<30 a的樟子松的枝、叶生物量占比均显著高于其它林龄,各林龄枝生物量占比从23.18%(<30 a)降至11.34%(40~50 a),叶生物量占比从15.76%(<30 a)下降至6.67%(40~50 a)。

同一林龄不同器官之间生物量占比差异显著(图1)。3个林龄的干生物量占比均显著高于其它器官,分别为48.86%、60.97%、65.51%。30~40、40~50 a这2个林龄的叶生物量占比均显著低于干、枝、根,2个林龄的叶生物量占比分别为9.30%和6.67%。在<30 a林龄阶段,生物量的分配比例依次为干>枝>叶>根,然而,随着樟子松林年龄的增长,这一比例逐渐转变为干>根>枝>叶。

2.2 樟子松不同器官生物量分配及其驱动因素分析

樟子松的干、枝、叶和根各部分生物量在总生物量中所占的比例与树木的年龄、胸径和树高之间存在着显著的相关性(图2)。总的来说,干生物量在总生物量中的比例随着树木年龄的增长、胸径的扩大和树高的上升呈上升趋势,在这些因素中,年龄与干生物量比例的相关性最为紧密,相关系数达到了0.79(图2A);相反,枝生物量在总生物量中的比例随着树木年龄的增长、胸径和树高的增加而呈现下降趋势,与胸径的相关性最低,相关系数为0.44(图2F);叶生物量在总生物量中的比例也随着树木的年龄、胸径和树高的增长而减



小写字母代表同一器官不同林龄之间生物量占比差异显著($P<0.05$);大写字母代表同一林龄不同器官之间生物量占比差异显著($P<0.05$)

The lowercase letter represents significant difference in the proportion of biomass between different forest ages of the same organ($P<0.05$). The capital letter represents significant difference in the proportion of biomass among different organs of the same forest age ($P<0.05$)

图1　不同林龄樟子松各器官生物量分配

Fig.1　Distribution of biomass of each organ in different age of *P. sylvestris* var. *mongolica*

少,但与树高的相关性最为突出,相关系数为0.72(图2K)。而根系生物量在总生物量中的分配比例变化并不显著,所有相关系数都低于0.50,与树木的年龄、胸径和树高之间的关联性较弱。干、枝、叶生物量占比的变化幅度分别达到46.38%、28.57%、31.49%,而根生物量占比的变化幅度在15%以内,相对稳定。

2.3　生物量模型拟合与检验

本研究在8个基础生物量模型中(表3),筛选了R_a^2较高的前4种模型及器官总和生物量模型、相容生物量模型(表4)。结果表明各器官生物量模型的R_a^2介于0.52至0.99之间,拟合优度分化严重。其中,根生物量模型R_a^2最高,平均达到0.80以上,其中根生物量模型的Model 1_R拟合优度最高,达到了0.98,Model 4_R的拟合优度最低,只达到0.67;而叶物量模型R_a^2最低,平均值不足0.70,其中Model 1_L的拟合优度为0.79,而Model 3_L的拟合优度不足0.50。干、根生物量模型的拟合优度均较高,除Model 3_S、Model 3_R外,其它模型的拟合优度均达到0.75以上;枝生物量的Model 4_B拟合优度最高,为0.87。此外,不同模型形式对同一器官生物量拟合效果也存在明显差异,Model 1和Model 4对各器官生物量的拟合表现最好,干、枝、叶、根相较于Model 3平均提高了47.2%、27.3%、35.6%、30.6%。Model 9是基于各器官最优模型计算而来的总生物量数值,该结果与实测值之间的R_a^2可达到0.95,明显优于直接建立总生物量模型的Model 2_T和Model 3_T,但略低于Model 1_T和Model 4_T,相容性生物量模型(Model 10)兼顾了各器官之和等于总量的条件限制,R_a^2仍可达到0.95,且MAE最低。

表4　樟子松各器官和单株生物量模型

Table 4　Biomass model of each organ and single plant of *P. sylvestris* var. *mongolica*

组分/kg Components	编号 Number	方程形式 Equation form	拟合效果 The fitting effect		检验效果 The test effect	
			R_a^2	RMSE	ME	MAE
干生物量 Stem biomass	Model 1_S	$W_S=0.009D^{1.777}H^{1.322}$	0.996	4.145	8.05	12.15
	Model 2_S	$W_S=0.053D^{2.404}$	0.765	5.477	5.78	12.55
	Model 3_S	$W_S=77.289HDR^{-0.119}$	0.524	45.483	8.05	279.00
	Model 4_S	$W_S=0.015(D^2H)^{0.970}$	0.996	4.239	9.75	46.97
枝生物量 Branch biomass	Model 1_B	$W_B=0.012D^{0.066}H^{1.322}$	0.765	4.145	9.39	9.39
	Model 2_B	$W_B=0.015D^{2.319}$	0.684	5.392	-1.01	2.22
	Model 3_B	$W_B=27.949HDR^{-0.233}$	0.575	10.776	-3.34	50.00
	Model 4_B	$W_B=0.004(D^2H)^{0.948}$	0.871	5.335	-4.82	19.22
叶生物量 Leaf biomass	Model 1_L	$W_L=0.014D^{3.071}H^{0.993}$	0.796	4.402	-15.38	15.38
	Model 2_L	$W_L=0.004D^{2.583}$	0.654	4.426	-0.88	1.31
	Model 3_L	$W_L=29.681HDR^{-0.355}$	0.439	7.299	-5.91	37.14
	Model 4_L	$W_L=0.001(D^2H)^{1.058}$	0.789	4.473	-4.77	10.86
根生物量 Root biomass	Model 1_R	$W_R=0.020D^{0.484}H^{1.789}$	0.983	1.180	0.78	1.12
	Model 2_R	$W_R=0.112D^{1.528}$	0.892	1.613	0.27	1.18

续表

组分/kg Components	编号 Number	方程形式 Equation form	拟合效果 The fitting effect		检验效果 The test effect	
			R_a^2	RMSE	ME	MAE
	Model 3_R	$W_R=1.318HDR^{0.404}$	0.675	5.269	5.27	38.27
	Model 4_R	$W_R=0.069(D^2H)^{0.583}$	0.978	1.367	3.28	8.62
器官总和生物量 Total organ biomass	Model 9	$W_T=W_S+W_B+W_L+W_R$	0.950	5.337	-14.42	14.42
整株生物量 Whole-plant biomass	Model 1_T	$W_T=0.025D^{1.761}H^{1.131}$	0.988	10.921	7.28	13.42
	Model 2_T	$W_T=0.107D^{2.305}$	0.567	11.899	4.20	13.58
	Model 3_T	$W_T=14.378HDR^{-0.108}$	0.540	66.393	-22.27	540.45
	Model 4_T	$W_T=0.033(D^2H)^{0.928}$	0.987	10.950	13.91	65.03
相容性生物量 Compatibility biomass	Model 10	$W_T=0.006D^{-0.845}H^{-0.812}+3.837e^{-6}D^{1.116}H^{4.639}+0.154D^{-3.839}H^{-0.575}+0.209D^{1.501}H^{0.464}$	0.950	5.299	-6.70	21.41

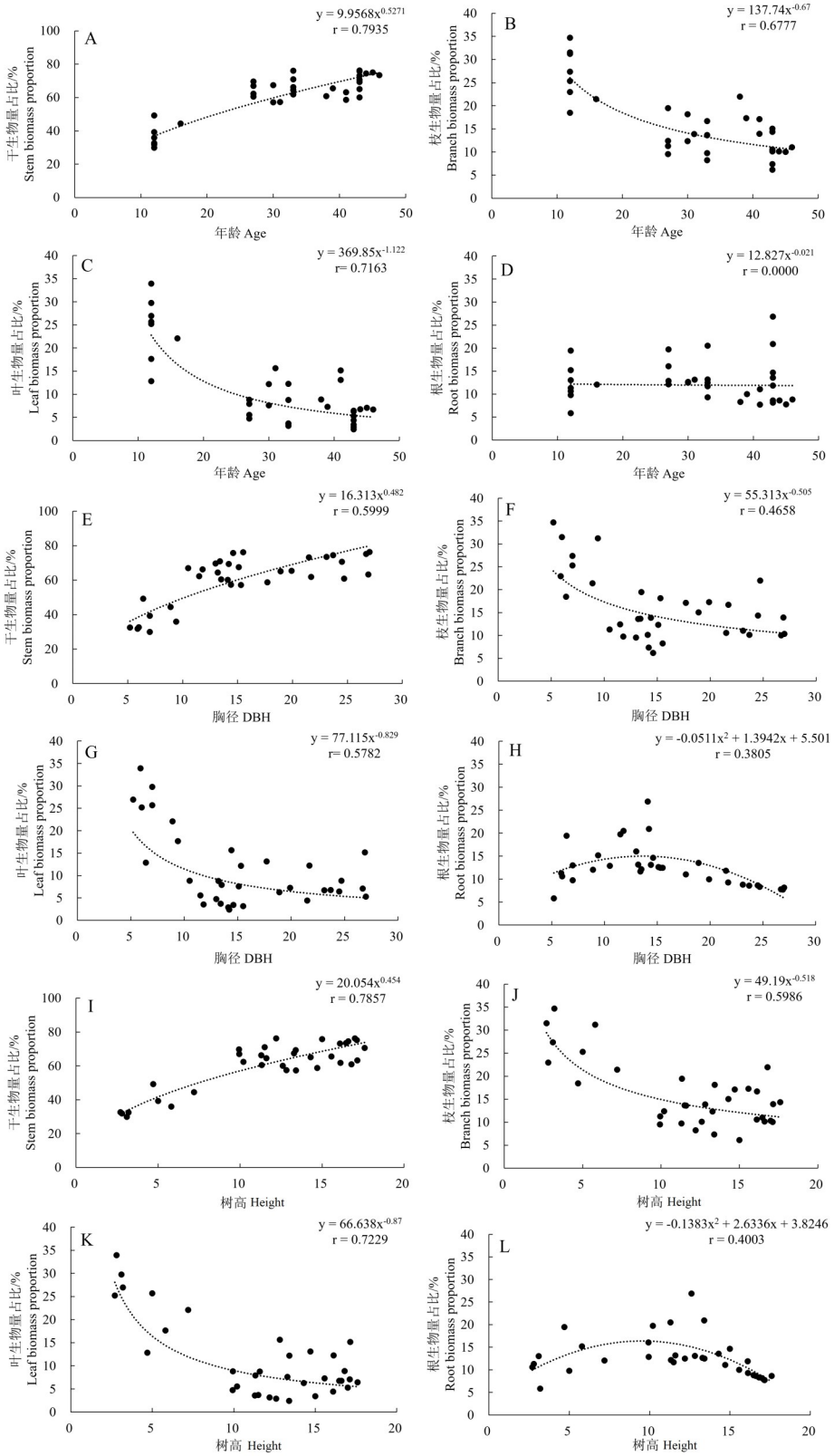
3 讨论

3.1 不同器官生物量分配特征及环境适应策略

植物生物量在不同器官中的积累与分配规律,不仅反映了其生长代谢的特性[32],而且随着林木年龄的增长,分配比例也会发生显著变化[33]。在本研究中,樟子松的树干、枝、叶和根的生物量比例在不同林龄间表现出显著差异(图1),这与付德刚等[34]研究结果一致。具体来说,树干生物量占比始终处于主导地位(48%~65%),但随着年龄的增长,树干生物量占比逐渐升高,枝、叶、根的生物量比例相对较小(11.34%、6.67%、16.38%),这种分配模式与刘娜等[35]研究赤皮青冈(*Cyclobalanopsis gilva*)时得出的结论相似,即树干生物量的比例最大,其次是根,然后是枝和叶,这种分配模式是植物对环境适应的一种策略,树干作为植物体的主要支撑结构,其生物量的增加有助于植物体的稳定和向上生长[36]。本研究中,根生物量占比平均在14.65%,这一比例低于内蒙古毛乌素沙地樟子松的根生物量占比[37],这是因为植物在面对水分胁迫时,会调整其生长策略,通过增加根系的生长来提高对水分和养分的吸收能力[38],更好地利用有限的资源[39]。然而,在更严重的干旱条件下,植物的根生物量可能会受到抑制,且随着极端干旱的持续,根生物量减少的趋势更加明显[39]。本研究结果表明叶生物量占比较低(平均在10.58%),与以往研究结果一致,这是由于在半干旱条件下[40]叶片细胞含水量下降,通过气孔关闭以减少水分蒸腾散失,造成叶片胞间CO_2浓度降低[41],随着干旱加剧,叶片细胞原生质脱水,产生大量的活性氧,导致细胞膜氧化受损,光合色素降解,PSII活性降低,电子传递链破坏,最终造成植物细胞发生机械损伤,使叶片的生长受到影响[42],这些变化不仅降低了叶片生物量占比,也进一步佐证了植物面对干旱条件下对资源的优化分配机制,以适应不利的生长环境[43]。综上所述,植物生物量的分配是一个复杂的机制,尤其受干旱和水分胁迫最为严重。

3.2 不同器官生物量分配差异的驱动因素

本研究发现,影响樟子松不同器官生物量分配的主要个体因素包括年龄、胸径和树高(图2)。随着林木年龄、胸径和树高的增长,地上生物量的分配模式呈现出树干生物量比例上升(图2A、图2E、图2I)而树枝和树叶生物量比例下降的趋势(图2B、图2C、图2F、图2G、图2J、图2K),这一发现与刘红梅等[30]、黄超等[44]的研究结果相一致,而孟盛旺等[45]发现,树枝生物量比例随树木生长而呈上升趋势,与本研究结果不同,这是因为火炬松木质生物量的积累通常以叶生物量为代价向树干和树枝分配更多的资源,从而在与邻近树木的竞争中获得更多的光照[46],而樟子松为强喜光树种[47],随着林木的增长,林分郁闭程度逐渐增加,下层枝长期处于弱光环境下,致使其营养供应不足而逐渐枯萎和脱落[48],进而导致活枝生物量占比下降。此外,本研究还发现,根系生物量在树木年龄、胸径和树高的变化过程中分配比例保持相



A、B、C、D是年龄与各器官生物量占比之间的关系,E、F、G、H是胸径与各器官生物量占比之间的关系,I、J、K、L是树高与各器官生物量占比之间的关系

A, B, C, D are the relationship between age and the proportion of biomass in each organ. E, F, G, H are the relationship between DBH and the proportion of biomass of each organ. I, J, K, L are the relationship between tree height and the proportion of biomass of each organ

图2　各器官生物量占比与年龄、胸径、树高的相关性

Fig.2　Correlation between the biomass proportion of each organ and age, DBH and tree height

对稳定(图2D、图2H、图2L),这与赵厚本等[49]的研究结果相吻合,这表明,在资源稀缺时,生物量会优先分配给更需要的器官,当该器官获得收益时,其它器官发育将被延缓[31]。

3.3 最优生物量预测模型

本研究以塞罕坝34棵樟子松解析木生物量数据为基础,基于不同基础模型形式构建了生物量异速生长模型、相容性生物量模型(表4),通过对模型拟合效果、预测结果分析发现,在模型构建中,立木形态因子中对生物量的估计贡献最大的是胸径,Zhou等[50]、黄光灿等[51]的研究结果均证明了胸径对生物量估计的重要性;其余依次为树高、高径比。同时,本研究中,以"D*H"的复合因子建立的生物量模型拟合度更高,这与白志强等[52]对西伯利亚落叶松林(*Larix sibir—ica*)等的研究结果一致,这是因为在生物量模型中加入树高能提高立木生物量模型的精度[52-53]。本研究中各器官生物量模型中,干、枝、根的R_a^2较高,但叶生物量模型R_a^2较低,这与郑雪婷等[53]研究一致,这是因为采用收获法调查林木的生物量,叶生物量的变化较大,其生物量模型的拟合效果一般都相对较低[25]。本研究以D^bH^c为基础形式的模型对不同器官生物量都有较高的估计效果,虽然枝生物量模型的最优形式是D^2H,但以D^bH^c为基础形式的模型R_a^2也达到0.9,均为最优模型(表3),均高于以D为基础形式的模型形式,此研究与兰洁等[7]研究结果一致,这说明随着自变量的增加,各器官生物量的拟合效果和预估精度有明显改进[52]。本研究增加了各器官生物量之和等于总生物量的条件限制,发现树木整株模型、各器官生物量之和模型和相容性模型都表现出相似的趋势,总体上R_a^2相差不大,但相容性生物量模型的MAE最低(表4),与郑雪婷等[53]对青藏高原典型人工林幼树的研究成果一致,这是因为相容性模型通常有较小的置信区间[54],提高了模型的拟合效果和预测精度。

4 结论

干旱贫瘠地区樟子松表现出根部优先的生物量分配策略。随年龄的增加,树干生物量占比明显增加,在成熟林中可达到65%,而树枝、树叶生物量占比明显减少,分别降低15%以上,树根生物量占比相对稳定。本研究筛选了树干最优生物量模型$W_S=0.009D^{1.777}H^{1.322}$、树枝最优生物量模型$W_B=0.004(D^2H)^{0.948}$、树叶最优生物量模型$W_L=0.014D^{3.071}H^{0.993}$、树根最优生物量模型$W_R=0.020D^{0.484}H^{1.789}$和整株最优生物量模型$W_T=0.025D^{1.761}H^{1.131}$,相容性生物量模型在保障较高拟合和预测精度的前提下,可以兼顾器官与总体的相容关系,在同时预测总体和各器官生物量时具有一定优势。

参考文献

[1]邱东,周桂玲,刘同业. 3种棒果芥属植物生物量分配及异速生长分析[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(6):215-220.
Qiu D, Zhou G L, Liu T Y. Analysis of biomass allocation and allometric growth of three *Sterigmostemum* species in Junggar Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6):215-220.

[2]郝虎东,田青松,石凤翎,等. 无芒雀麦地上生物量及各构件生物量分配动态[J]. 中国草地学报,2009,31(4):85-90.
Hao H D, Tian Q S, Shi F L, et al. Allocated dynamics of aboveground biomass and structural biomass in *Bromus inermis* Leyss[J]. Chinese Journal of Grassland, 2009, 31(4):85-90.

[3]李宗英,罗庆辉,许仲林. 西天山雪岭云杉林分密度对森林生物量分配格局和异速生长的影响[J]. 干旱区研究,2021,38(2):545-552.
Li Z Y, Luo Q H, Xu Z L. Effects of stand density on the biomass allocation and tree height-diameter allometric growth of *Picea schrenkiana* forest on the northern slope of the western Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 545-552.

[4]Nogueira F C B, Dobe E K, Silva Filho J B, et al. Allometric equations to estimate aboveground biomass of *Dalbergia cearensis* species in the Brazilian seasonally dry tropical forest [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 484:118920.

[5]Jenkins J C, Chojnacky D C, Heath L S, et al. National-scale biomass estimators for United States tree species[J]. Forest Science, 2003, 49(1):12-35.

[6]Lambert M C, Ung C H, Raulier F. Canadian national tree aboveground biomass equations[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(8):1996-2018.

[7]兰洁,肖中琪,李吉玫,等. 天山雪岭云杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 浙江农林大学学报,2020,37(3):416-423.
Lan J, Xiao Z Q, Li J M, et al. Biomass allocation and allometric growth of *Picea schrenkiana* in Tianshan Mountains [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2020, 37(3): 416-423.

[8]陈宗铸,陈毅青,杨琦,等. 海南岛桉树相容性生物量模型的研究[J]. 热带作物学报,2018,39(9):1868-1875.
Chen Z Z, Chen Y Q, Yang Q, et al. Compatibility biomass model of eucalyptus in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(9):1868-1875.

[9]李福明,冯泳翰,赵怡,等. 蔡家川流域人工刺槐生物量模型的构建与比较[J]. 森林与环境学报,2024,44(1):62-70.
Li F M,Feng Y H,Zhao Y,et al. Construction and comparison of artificial *Robinia pseudoacacia* biomass model in Caijiachuan Watershed[J]. Journal of Forest and Environment,2024,44(1):62-70.

[10]欧光龙,胥辉. 森林生物量模型研究综述[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2020,40(1):1-11.
Ou G L,Xu H. A review on forest biomass models[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences),2020,40(1):1-11.

[11]Opio C,Jacob N,Coopersmith D. Height to diameter ratio as a competition index for young conifer plantations in northern British Columbia, Canada [J]. Forest Ecology and Management,2000,137(1-3):245-252.

[12]Hess A F,Minatti M,Costa E A,et al. Height-to-diameter ratios with temporal and dendro/morphometric variables for Brazilian pine in south Brazil [J]. Journal of Forestry Research,2021,32(1):191-202.

[13]Sharma R P,Vacek Z,Vacek S,et al. A nonlinear mixed-effects height-to-diameter ratio model for several tree species based on Czech national forest inventory data[J]. Forests,2019,10(1):70.

[14]邓婷,籍翠莹,钱甲龙,等. 塞罕坝不同坡度、坡位土壤特征及其对樟子松幼树的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(4):75-85.
Deng T,Ji C Y,Qian J L,et al. Effects of microtopography on soil characteristics and growth of young *Pinus sylvestris* var. mongolica trees in Saihanba region[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition),2023,43(4):75-85.

[15]李晓莎,楚聪颖,许中旗,等. 河北省塞罕坝地区樟子松人工林的生物量[J]. 河北林果研究,2016,31(3):230-234.
Li X S,Chu C Y,Xu Z Q,et al. The biomass of Scotch pine plantations in Saihanba area of Hebei Province[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research,2016,31(3):230-234.

[16]牛庆花,彭博,陆贵巧,等. 河北省坝上地区牧场防护林的防风效能研究[J]. 水土保持通报,2018,38(4):114-117,124.
Niu Q H,Peng B,Lu G Q,et al. Windbreak efficiency of pasture shelterbelt in Bashang area of Hebei Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(4):114-117,124.

[17]吴雪铭,余新晓,陈丽华,等. 间伐强度对坝上樟子松林下持水能力的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(7):2347-2354.
Wu X M,Yu X X,Chen L H,et al. Effects of thinning intensity on the understory water-holding capacity of *Pinus sylvestris* var. mongolica plantation in the Bashang area of North China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(7):2347-2354.

[18]王东丽,张日升,方祥,等. 固沙樟子松种子萌发与幼苗生长对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 浙江农林大学学报,2020,37(1):60-68.
Wang D L,Zhang R S,Fang X,et al. Seed germination and seedling growth response to drought stress and resistance evaluation for introduced *Pinus sylvestris* var. mongolica sandy-fixation plantation[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2020,37(1):60-68.

[19]Zhu J J,Kang H Z,Tan H,et al. Natural regeneration characteristics of *Pinus sylvestris* var. mongolica forests on sandy land in Honghuaerji,China[J]. Journal of Forestry Research,2005,16(4):253-259.

[20]徐健楠,李治安,慕晓炜,等. 樟子松瘤锈病瘤部增生模型[J]. 东北林业大学学报,2022,50(9):140-145.
Xu J N,Li Z A,Mu X W,et al. Hyperplasia model of *Pinus sylvestris* gall rust [J]. Journal of Northeast Forestry University,2022,50(9):140-145.

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

[22]刘亚玲,信忠保,李宗善,等. 河北坝上樟子松人工林径向生长及其对气候因素的响应[J]. 生态学报,2022,42(5):1830-1840.
Liu Y L,Xin Z B,Li Z S,et al. Response of radial growth of *Pinus sylvestris* var. mongolica to climate factors in Bashang area of Hebei Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(5):1830-1840.

[23]河北省塞罕坝机械林场(河北塞罕坝国家级自然保护区管理中心). 一种高寒半干旱风蚀沙化土地育苗造林方法:中国,CN202210816395.7[P]. 2022-09-06.
Saihanba Mechanized Forest of Hebei. A method of seedling afforestation in alpine semi-arid wind eroded sandy land:China,CN202210816395.7[P]. 2022-09-06.

[24]任悦,高广磊,丁国栋,等. 不同生长期樟子松外生菌根真菌群落物种组成及其驱动因素[J]. 植物生态学报,2023,47(9):1298-1309.
Ren Y,Gao G L,Ding G D,et al. Species composition and driving factors of the ectomycorrhizal fungal community associated with *Pinus sylvestris* var. mongolica at different growth periods[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2023,47(9):1298-1309.

[25]贾炜玮,于爱民. 樟子松人工林单木生物量模型研究[J]. 林业科技情报,2008,40(2):1-2.
Jia W W,Yu A M. Study on single biomass model for mongolian scots pine in plantation[J]. Forestry Science and Technology Information,2008,40(2):1-2.

[26]路伟伟,吴波,白建华,等. 樟子松人工林退化原因及研究展望[J]. 科学通报,2023,68(11):1286-1297.
Lu W W,Wu B,Bai J H,et al. Causes and research prospects of the decline of *Pinus sylvestris* var. mongolica plantation[J]. Chinese Science Bulletin,2023,68(11):1286-1297.

[27]宋立宁,朱教君,郑晓. 基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案[J]. 生态学杂志,2017,36(11):3249-3256.
Song L N,Zhu J J,Zheng X. Forestation and management

scheme of *Pinus sylvestris* var. mongolica plantations in sandy lands based on their decline mechanisms[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(11):3249-3256.

[28]刘坤,曹林,汪贵斌,等. 银杏生物量分配格局及异速生长模型[J]. 北京林业大学学报,2017,39(4):12-20.
Liu K,Cao L,Wang G B,et al. Biomass allocation patterns and allometric models of *Ginkgo biloba*[J]. Journal of Beijing Forestry University,2017,39(4):12-20.

[29]董利虎,李凤日,贾炜玮. 东北林区天然白桦相容性生物量模型[J]. 林业科学,2013,49(7):75-85.
Dong L H,Li F R,Jia W W. Compatible tree biomass Models for natural white birch (*Betula platyphylla*) in Northeast China Forest Area[J]. Scientia Silvae Sinicae,2013,49(7):75-85.

[30]刘红梅,吕世杰,刘清泉,等. 多伦县樟子松人工林生物量及碳储量研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2013,34(3):49-53.
Liu H M,Lü S J,Liu Q Q,et al. Biomass and carbon storage of the *Pious sylvestris* var. mongolica Litv. plantation in the Duolun county [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2013,34(3):49-53.

[31]周昊,叶尔江·拜克吐尔汉,何怀江,等. 东北地区主要造林树种幼苗期生物量分配特征与异速生长模型[J]. 林业科学,2023,59(11):23-32.
Zhou H, Yeerjiang B K T E H, He H J, et al. Biomass distribution characteristics and species-specific allometric equations for afforestation species in Northeast China [J]. Scientia Silvae Sinicae,2023,59(11):23-32.

[32]Enquist B J,Niklas K J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants[J]. Science, 2002, 295 (5559):1517-1520.

[33]Poorter H,Jagodzinski A M,Ruiz-Peinado R,et al. How does biomass distribution change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents[J]. New Phytologist,2015,208(3):736-749.

[34]付德刚,乔显娟,王新媛,等. 林龄对黑松人工林植被层生物量分配的影响[J/OL]. 分子植物育种,2023:1-10.(2023-10-08)[2024-09-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231007.1317.006.html.
Fu D G,Qiao X J,Wang X Y,et al. Effect of forest age on biomass allocation of the vegetation layer of *Pinus thunbergii* Parlatore artificial forest [J/OL]. Molecular Plant Breeding, 2023:1-10.(2023-10-08)[2024-09-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231007.1317.006.html.

[35]刘娜,李志辉,王佩兰,等. 赤皮青冈人工林生长及生物量估算[J]. 中南林业科技大学学报,2022,42(5):143-149.
Liu N,Li Z H,Wang P L,et al. Biomass estimation of the growth law of *Cyclobalanopsis gilva* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2022, 42(5):143-149.

[36]Menezes A G S,Filgueiras B K C,Silva C S G,et al. Natural and human-related drivers affect belowground biomass and nutrients in a Caatinga dry forest [J]. Journal of Arid Environments,2024,223:105180.

[37]斯庆毕力格. 内蒙古毛乌素沙地樟子松人工林生物量及其动态变化[D]. 北京林业大学,2022.
Siqing B L G. Biomass and its dynamic change of Mongolian pine plantation in Mu Us Sandy land, Inner Mongolia [D]. Beijing Forestry University,2022.

[38]王晓辉,石兆勇,张梦歌,等. 不同菌根类型植物生物量分配对干旱的响应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2023,49(4):412-420.
Wang X H, Shi Z Y, Zhang M G, et al. Drought-induced biomass allocation responses in different types of mycorrhizal plants[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences),2023,49(4):412-420.

[39]陈明涛,赵忠. 干旱对4种苗木根系特征及各部分物质分配的影响[J]. 北京林业大学学报,2011,33(1):16-22.
Chen M T,Zhao Z. Effects of drought on root characteristics and mass allocation in each part of seedlings of four tree species [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33 (1): 16-22.

[40]孙昊慷,韩佳轩,贾建恒,等. 不同林龄及径级樟子松径向生长对干旱事件的响应[J]. 应用生态学报,2024,42(16):1-11.
Sun H K,Han J X,Jia J H,et al. Radial growth response of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* of different stand ages and diameter classes to drought events [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,42(16):1-11.

[41]万一峰,李辰晖,方升佐. 干旱胁迫对青钱柳苗木生理特性及渗透调节物质的影响[J]. 分子植物育种,2024:1-9.(2024-08-19)[2024-09-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240816.1505.002.html.
Wan Y F,Li C H,Fang S Z. Effects of drought stress on physiological characteristics and osmotic regulators of *Cyclocarya paliurus* seedlings[J]. Molecular Plant Breeding, 2024:1-9.(2024-08-19)[2024-09-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240816.1505.002.html.

[42]王利彬,祖伟,董守坤,等. 干旱程度及时期对复水后大豆生长和代谢补偿效应的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(11):150-156.
Wang L B,Zu W,Dong S K,et al. Effects of drought stresses and times on compensation effect after re-watering in soybean [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(11):150-156.

[43]李品,周慧敏,冯兆忠. 臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响[J]. 环境科学,2021,42(2):1004-1012.
Li P, Zhou H M, Feng Z Z. Ozone pollution, nitrogen addition, and drought stress interact to affect non-structural carbohydrates in the leaves and fine roots of poplar [J]. Environmental Science,2021,42(2):1004-1012.

[44]黄超,王黑子来,刘微,等. 樟子松人工林生物量模型的研究[J]. 防护林科技,2011(4):51-53.
Huang C,Wang H Z L,Liu W,et al. Biomass model for *Pinus sylvestris* var. mongolica plantations[J]. Protection Forest Science and Technology,2011(4):51-53.

[45]孟盛旺,谷振军,肖平江,等. 江西省吉安地区火炬松地上生

物量分配特征及模型研建[J]. 北京林业大学学报,2022,44(12):41-51.
Meng S W, Gu Z J, Xiao P J, et al. Characteristics of aboveground biomass allocation and model construction for loblolly pine in Ji'an Region, Jiangxi Province of Eastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(12): 41-51.

[46]Meng S W, Jia Q Q, Liu Q J, et al. Aboveground biomass allocation and additive allometric models for natural *Larix gmelinii* in the western Daxing'anling Mountains, northeastern China[J]. Forests, 2019, 10(2): 150.

[47]韩广,张桂芳,杨文斌. 影响沙地樟子松天然更新的主要生态气候因子的定量分析[J]. 林业科学,1999,35(5):22-27.
Han G, Zhang G F, Yang W B. Quantitative analysis on principle eco-climatic factors of limiting natural reforestation of pinus sylvestris var. mongolica on sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(5): 22-27.

[48]赵哈林,李瑾,周瑞莲,等. 樟子松幼苗生长及光合特性对强风沙流吹袭的响应[J]. 西北植物学报,2015,35(3):546-552.
Zhao H L, Li J, Zhou R L, et al. Response of the growth and photosynthetic properties of *Pinus sylvestris* var. mongolica saplings to strong wind-sand flow blowing[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(3): 546-552.

[49]赵厚本,周光益,李兆佳,等. 南亚热带常绿阔叶林4个常见树种的生物量分配特征与异速生长模型[J]. 林业科学,2022,58(2):23-31.
Zhao H B, Zhou G Y, Li Z J, et al. Biomass allocation and allometric growth models of four common tree species in southern subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(2): 23-31.

[50]Zhou X H, Brandle J R, Schoeneberger M M, et al. Developing above-ground woody biomass equations for open-grown, multiple-stemmed tree species: shelterbelt-grown Russian-olive [J]. Ecological Modelling, 2007, 202(3-4): 311-323.

[51]黄光灿,吴宏炜,赖建明,等. 福建木荷多元生物量模型及2种权函数的比较[J]. 西部林业科学,2020,49(2):137-146.
Huang G C, Wu H W, Lai J M, et al. Multi-biomass model of *Schima superba* and comparison of two weight functions[J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(2): 137-146.

[52]张绘芳,高亚琪,朱雅丽,等. 新疆雪岭杉生物量模型对比研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(6): 52-58.
Zhang H F, Gao Y Q, Zhu Y L, et al. A comparative study on biomass models for *Picea schrenkiana* in Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(6): 52-58.

[53]郑雪婷,仪律北,李强峰,等. 青藏高原典型人工林幼树生物量模型构建[J]. 应用生态学报,2022,33(11):2923-2935.
Zheng X T, Yi L B, Li Q F, et al. Developing biomass estimation models of young trees in typical plantation on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(11): 2923-2935.

[54]Pan L, Wang X W. Additive root biomass equations for *Betula platyphylla* suk. plantations in Northeast China[J]. Forests, 2022, 13(5): 661.

(编辑:郭玥微)