肖斌,黄辉,丁业新,等.赤皮青冈优良高碳汇家系早期选择[J].江西农业大学学报,2026,48(2):492-505.
XIAO B,HUANG H,DING Y X,et al.Early selection of excellent high carbon sink families of *Cyclobalanopsis gilva*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(2):492-505.

赤皮青冈优良高碳汇家系早期选择

肖　斌[1,2],黄　辉[1,2],丁业新[1,2],蔡宗明[1,2],丁　颖[1,2],
万　晨[1,2],谢崟峰[1,2],邓秋敏[1,2],姚甲宝[1,2*]

(1.中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心 江西 新余 336600;2.生物多样性保护与资源利用江西省重点实验室 江西 新余 336600)

摘要:【目的】筛选优良赤皮青冈高碳汇家系,为提高林分的碳储量提供优良材料。【方法】选择不同林龄、径级4~14 cm的赤皮青冈标准木,采用单株伐倒法和全挖法分别采集地上、地下部分样品,测定其生物量及有机碳含量并构建拟合模型。利用模型计算3年生赤皮青冈42个家系测定林的生物量和碳储量,分析各家系生长和形质性状的遗传变异特征,解析各家系生物量和碳储量的遗传变异规律,估算遗传增益,筛选高生物量和高碳汇增益的赤皮青冈优良家系。【结果】(1)3年生赤皮青冈不同家系生长和形质性状存在极显著的家系×区组效应(P<0.01),树高、地径、冠幅、最长侧枝长度家系遗传力较高(0.470~0.518),单株遗传力相对较低。(2)赤皮青冈生物量和有机碳最优拟合模型均为$\ln Y=k_0+k_1\ln D+k_2\ln H+k_3\ln CW$,各部位以地上部分模型拟合精度优于地下部分,干材生物量与有机碳模型拟合效果最好。(3)3年生赤皮青冈不同家系生物量和碳储量存在显著或极显著的家系×区组效应,家系遗传力高于单株遗传力,活枝生物量和碳储量遗传增益最高,分别为43.93%、47.60%。(4)综合比较家系生物量、碳储量、综合选择指数和BLUP育种值,以排名前10%作为优良高碳汇家系入选标准,筛选出福建JO1、湖南CB8、湖南YS3共3个优良高碳汇家系,其生物量、碳储量的遗传增益均值分别为21.27%、13.60%,现实增益均值分别为38.96%、49.98%。【结论】3年生赤皮青冈家系性状遗传力普遍较高,受较强的家系遗传控制,筛选出的3个赤皮青冈优良高碳汇家系可作为碳汇造林的优良材料选择。

关键词:赤皮青冈;遗传变异;遗传增益;生物量;碳储量;高碳汇家系
中图分类号:S722　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2026)02-0492-14
CSTR:32399.14.aauj.2026041

Early selection of excellent high carbon sink families of *Cyclobalanopsis gilva*

XIAO Bin[1,2],HUANG Hui[1,2],DING Yexin[1,2],CAI Zongming[1,2],DING Ying[1,2],
WAN Chen[1,2],XIE Yinfeng[1,2],DENG Qiumin[1,2],YAO Jiabao[1,2*]

收稿日期:2025-09-29　　**修回日期:**2025-12-16　　**接受日期:**2026-01-07
基金项目:江西省重点研发计划项目(20252BCF320032)和江西省2023年度中央财政林业科技推广示范项目(JXTG[2023]05号)
Project supported by Jiangxi Provincial Key R&D Program(20252BCF320032)and Jiangxi Province 2023 Central Financial Forestry Science and Technology Promotion Demonstration Project (JXTG[2023]05)

作者简介:肖斌,工程师,硕士,orcid.org/0009-0001-5474-5986,1165333825@qq.com;*通信作者:姚甲宝,高级工程师,博士,主要从事珍贵树种育种与高效培育技术研究,orcid.org/0009-0000-1056-4449,ylzx101@163.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1.Subtropical Forestry Experimental Center, Chinese Academy of Forestry, Xinyu, Jiangxi 336600, China; 2.Jiangxi Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Resource Utilization, Xinyu, Jiangxi 336600, China)

Abstract: [**Objective**] The aim is to provide excellent materials for improving the carbon storage of forest stands by screening high carbon sink families of *Cyclobalanopsis gilva*. [**Method**] The standard trees of *Cyclobalanopsis gilva* of different forest ages and diameter classes of 4-14 cm were selected. The aboveground and underground samples were collected by individual felling method and full digging method, respectively. The biomass and organic carbon content were measured, and the biomass and organic carbon models were constructed. The model was used to calculate the biomass and carbon storage of 42 families of 3-year-old *Cyclobalanopsis gilva*, analyze the genetic variation characteristics of growth and form traits of each family, analyze the genetic variation of biomass and carbon storage of each family, estimate the genetic gain, and screen out the excellent families of *Cyclobalanopsis gilva* with large biomass and carbon storage gain. [**Result**] (1) There was a significant family×block effect (P<0.01) in the growth and form quality traits of different families of 3-year-old *Cyclobalanopsis gilva*. The heritability of tree height, ground diameter, crown width and longest lateral branch length was high (0.470-0.518), and the heritability of single plant was relatively low. (2) The optimal fitting model of biomass and organic carbon of *Cyclobalanopsis gilva* was $\ln Y=k_0+k_1\ln D+k_2\ln H+k_3\ln CW$. The fitting accuracy of aboveground part model was better than that of underground part, and the fitting effect of dry biomass and organic carbon model was the best. (3) There were significant or extremely significant family × block effects on biomass and carbon storage of different families of 3-year-old *Cyclobalanopsis gilva*. The heritability of family was higher than that of single plant. The genetic gains of biomass and carbon storage of living branches were the highest, which were 43.93% and 47.60%, respectively. (4) Based on the comprehensive comparison of family biomass, carbon storage, comprehensive selection index and BLUP breeding value, the top 10% were selected as the selection standard of excellent high-carbon sink families. Fujian JO1, Hunan CB8 and Hunan YS3 were selected as excellent high-carbon sink families. The genetic gains of biomass and carbon storage were 21.27% and 13.60%, respectively, and the realistic gains were 38.96% and 49.98%, respectively. [**Conclusion**] The heritability of 3-year-old *Cyclobalanopsis gilva* families is generally high, which is controlled by strong family genetic control. The selected 3 excellent high-carbon sink families of *Cyclobalanopsis gilva* can be used as excellent material selection for carbon sink afforestation.

Keywords: *Cyclobalanopsis gilva*; genetic variation; genetic gain; biomass; carbon storage; high carbon sink family

【研究意义】在第七十五届联合国大会上,我国明确提出“双碳”目标,并将其纳入生态文明建设整体布局,标志着我国生态文明建设进入以降碳为重点战略方向的新阶段[1]。森林作为陆地生态系统中最大的碳库,在调节全球碳循环、减缓温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用[2-3]。我国是世界上人工林面积最大的国家,自20世纪70年代以来,森林碳储量的增加主要源于人工林营造[4-6],随着时间推移,我国人工幼龄林和中龄林将发挥越来越大的固碳能力,森林碳汇功能将进一步增强[7]。因此,早期选育高效碳汇树种、实施精准森林经营,是提升我国森林整体固碳能力、实现“双碳”目标的关键路径,对应对全球气候变化具有重要意义[8-9]。【前人研究进展】碳汇造林是以增加森林碳汇为主要目的,对造林和林木生长全过程实施碳汇计量和监测的造林活动[8,10]。相关研究表明,一些固碳效益较为突出的造林优势树种在森林碳汇中扮演重要角色[11],树种和造林模式的选择是增加森林生态系统碳汇的重要管理决策[12],造林时合理选择高碳汇树种可大幅提升其固碳潜力,相比原生森林类型可使碳固存量增加25%[13]。因此,筛选优良的碳汇造林树种,是提高森林碳增汇量、兼顾生产和生态效益的前提。赤皮青冈(*Cyclobalanopsis gilva*)为壳斗科青冈属常绿阔叶大乔木,是我国特有珍贵用材树种,素以材质优良而闻名,其木材坚硬、耐久性强,具有遇火难燃,耐湿不腐等特点,为江南四大名木之一。赤皮青冈根系发达、固碳能力强、适应性好、种苗有保障且造林技术成熟,被专家评选为浙江省碳汇造林十大主推树种之一[14],该树种

在我国江西、浙江、福建、湖南、广东、贵州等省份均有自然分布，是重要的生态修复树种和极具发展前景的珍贵乡土树种[15]。在碳汇林营建过程中，选择高碳汇且是国家重点栽培的多功能产业树种，可产生更高的经济效益。当前，许多学者开展了不同地区高碳汇树种的筛选研究[16-18]，除选择固碳能力强的树种外，选育高碳汇林木良种家系也是提高林分碳储量的基础。高碳汇家系选育基于林木种内丰富的遗传变异，通过筛选生物量和碳储量等指标具有优势的基因型家系，可以实现森林碳汇能力的遗传增益。

【本研究切入点】当前，筛选珍贵树种研究主要集中在用材育种及高效培育技术方面，国内外关于森林碳汇的研究多以树种、林分和器官为研究对象，而从固碳能力角度筛选优良碳汇家系的相关报道较少[2,19]。【拟解决的关键问题】本研究以3年生赤皮青冈42个家系为研究对象，根据碳汇造林需要，结合生物量指标筛选出高碳汇家系，实现珍贵用材培育与碳汇造林的有机统一，为提高林分的碳储量提供优良材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究试验材料分为两部分：第一部分选择中国林科院亚热带林业实验中心树木园（27°46′N，114°44′E）不同林龄、径级4~14 cm的赤皮青冈作为试验材料，试验区赤皮青冈造林密度为1 125 株/hm^2，株行距3 m×3 m，保存率96%，用于赤皮青冈生物量和碳储量模型的构建。第二部分于2019年3月采用培育的1年生赤皮青冈容器苗，在中国林科院亚热带林业实验中心长埠实验林场（27°33′N，114°36′E）营建优树家系测定林，家系测定林参试家系共42个，分别来自福建建瓯（20个，JO1~JO20）、贵州天柱（1个，TZ1）、湖南城步（8个，CB1~CB8）、湖南会同（6个，HT2~HT7）、湖南桑植（1个，SZ1）、湖南永顺（3个，YS1~YS3）、江西上饶（2个，SR3和SR5）和浙江庆元（1个，AN1），用于优良高碳汇家系的筛选。两部分试验材料所在试验地均地处江西省新余市分宜县境内，属亚热带湿润季风气候，年平均气温18 ℃，其中7月平均最高气温28.8 ℃，1月平均最低气温5.3 ℃，年平均降水量1 600 mm，年无霜期265 d，海拔90.8 m，土质以黄红壤为主，土层深厚，土壤肥沃。

1.2 试验设计与调查

第一部分试验材料在立地条件保持一致的情况下，按不同径级选取赤皮青冈标准木，每个径级选择10株标准木，共选取标准木60株。标准木应为没有断梢、分叉的生长正常的树木，且其冠幅、冠长具有代表性，不选择林缘木和孤立木。对选择的标准木，依次测量其地径、树高、枝下高和冠幅，相关测量指标见表1。

表1 不同径级赤皮青冈标准木生长情况

Tab.1 Growth of standard *Cyclobalanopsis gilva* trees with different diameter grades

标准木径级/cm Standard wood diameter class	平均胸径/cm Mean breast diameter	平均地径/cm Average ground diameter	平均树高/m Mean tree height	平均枝下高/m Average branch height	平均冠幅/m Mean crown breadth
4	4.1	6.2	4.9	1.13	2.21
6	6.4	9.4	6.2	1.09	3.44
8	8.2	11.2	6.0	1.15	4.07
10	10.0	14.3	7.6	1.32	4.22
12	11.7	16.5	7.8	1.28	4.84
14	13.3	17.7	8.3	1.17	5.04

第二部分赤皮青冈优树家系测定林采用完全随机区组设计，设5次重复，8株单列小区，株行距2.5 m×2.5 m，共计1 680株，于2021年11月测定其地径、树高、冠幅、树干通直度、分叉干数、一级侧枝数量、最长侧枝长度和最粗侧枝基径。

1.3 样品收集与测定

第一部分试验材料采用单株伐倒法收集地上部分样品[样木叶、活枝、树干（去皮）、树皮]，采取全挖

法收集地下部分树根样品[样木根茎、粗根(直径≥10 mm)、细根(2 mm≤直径<10 mm)]。样品收集方法参照中华人民共和国林业行业标准《立木生物量建模样本采集技术规程》(LY/T 2259—2014)执行,收集到的样品在采集地立即称重并记录其鲜重,按不同植物器官分别装袋带回实验室用于生物量及有机碳的含量测定。

生物量、有机碳测定分为地上和地下两部分,单株总生物量=地上部分生物量+地下部分生物量,单株总有机碳储量=地上部分有机碳+地下部分有机碳,生物量采用80 ℃恒温烘干法测定,有机碳采用重铬酸钾容量法进行测定。

1.4　数据处理与分析

试验数据采用Excel 2016整理计算,依据拉依达准则去除异常数据,采用SPSS17.0进行数据统计分析,Origin2024进行图形绘制。利用SPSS 17.0计算各性状均值与变异系数,利用SAS 9.4中的GLM、VARCOMP和REG等程序进行性状方差分析,估算方差分量与遗传力,采用R软件Ime4包估算家系BLUP值。

性状方差分析的统计模型的公式为:

$$X_{jki} = \mu + F_i + B_j + F_iB_j + e_{ijk} \tag{1}$$

式(1)中:X_{jki}为试验区第i区组第j家系第k单株的观测值,μ为群体平均效应,B_j为第j区组效应,F_i为第i家系效应,e_{ijk}为随机误差。

单株遗传力(h_i^2)计算公式为:

$$h_i^2 = 4\sigma^2_f/\sigma^2_f + \sigma^2_{fb} + \sigma^2_e \tag{2}$$

式(2)中:σ^2_f表示家系的方差分量,σ^2_{fb}表示家系与区组的交互作用方差分量,σ^2_e表示环境方差分量。

家系遗传力(h_f^2)计算公式为:

$$h_f^2 = \sigma^2_f/(\sigma^2_f + \sigma^2_{fb}/b + \sigma^2_e/r_h b) \tag{3}$$

式(3)中:σ^2_f表示家系的方差分量,σ^2_{fb}表示家系与区组的交互作用方差分量,σ^2_e表示环境方差分量,b为区组数,r_h为平均株数。

遗传增益:$\triangle G=i\times\delta_p\times h_f^2/X$ (4)

现实增益:$\triangle G'=i\times\delta_p/X$ (5)

式(4)、式(5)中:δ_p为标准差;X为性状平均值;i为选择强度。

综合指数选择法计算公式为:

$$I=w_1h_1^2(x_1-\bar{x})/\sigma_1+w_2h_2^2(x_2-\bar{x})/\sigma_2+\cdots+w_ih_i^2(x_i-\bar{x})/\sigma_i \tag{6}$$

式(6)中:$\bar{x}$为性状的平均值,h^2为性状遗传力,σ表示性状的标准差,w表示性状的相对经济权重,其中$w_{1+}w_{2+}\cdots w_i=1$。

利用线性回归方程对赤皮青冈生物量及有机碳含量进行模型拟合。

采用异速生长方程构建模型,由于模型存在异方差,将幂函数($Y=aX^b$)进行对数转换为线性形式($\ln Y=a+b\ln X$),以此消除异方差现象。在多元回归模型中,自变量间可能高度相关,导致回归系数估计不稳定,可通过对数模型线性回归后的方差膨胀系数(variance inflation factor,VIF)衡量多重共线性严重程度,从而筛选自变量。本研究选用以下3个方程:

$$\ln Y = k_0 + k_1 \ln D \tag{7}$$

$$\ln Y = k_0 + k_1 \ln D + k_2 \ln H \tag{8}$$

$$\ln Y = k_0 + k_1 \ln D + k_2 \ln H + k_3 \ln \mathrm{CW} \tag{9}$$

$$\ln Y = k_0 + k_1 \ln D^2H \tag{10}$$

$$\ln Y = k_0 + k_1 \ln D^2H + k_2 \ln \mathrm{CW} \tag{11}$$

式(7)~(11)中:Y为各器官或单株总生物量或有机碳含量;k_0、k_1、k_2、k_3为拟合系数;D为地径;H为树高,CW为平均冠幅。式(2)可通过VIF衡量多重共线性程度;采用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)进行模型效果评价和选优。

2 结果与分析

2.1 赤皮青冈家系生长和形质性状方差分析和遗传力估算

3年生赤皮青冈不同家系存在极显著的家系×区组互作效应(P<0.01),遗传变异丰富(表2)。从变异系数结果看,不同家系生长指标变异相对较小,变异系数为9%~10%,而形质指标变异相对较大,变异系数为4.83%~16.91%,其中一级侧枝数变幅最大,变异系数最高。家系遗传力分析表明,树高、地径、冠幅生长性状家系遗传力较高(≥0.423),受较强的遗传控制,而形质性状中仅最长侧枝长度遗传力较高外,其他性状遗传力均表现较低。当其他条件相同时,应优先考虑树高、地径等生长性状,以获得更佳的家系选择效果。不同家系生长性状的单株遗传力高于形质性状,但均表现较低,这表明表型度量值不能有效预测其内在的基因型值,应加强家系与家系内个体的联合选择。

表2 赤皮青冈不同家系生长和形质性状的方差分析和遗传力估计

Tab.2 Variance analysis and heritability estimation of growth and form quality traits in different families of *Cyclobalanopsis gilva*

性状 Traits		地径/cm Ground diameter	树高/m Tree height	冠幅/m Crown width	树干通直度 Trunk straightness	分叉干数 Number of forked trunks	一级侧枝数 Branch number	最长侧枝长度/m Longest branch length	最粗侧枝基径/cm Widest branch diameter
均值 Mean		2.44	1.61	0.78	3.6	1.83	20.26	0.59	0.73
变幅 Range		2.09~3.10	1.22~1.88	0.58~0.92	3.25~4.33	1.26~2.24	14.07~27.37	0.42~0.74	0.26~0.90
变异系数/% CV		9.25	9.36	9.78	4.83	12.70	16.91	10.48	11.24
F值	家系 σ^2_f	1.96**	1.91**	1.75**	1.03	0.86	1.19	1.83**	1.05
	区组 b	15.40**	9.72**	15.20**	15.14**	5.63**	17.17	12.87**	11.57**
	家系×区组 σ^2_{fb}	1.58**	1.81**	1.93**	1.89**	1.70**	3.75**	1.64**	2.50**
机误 Error		0.519	0.214	0.052	0.499	1.108	74.994	0.042	0.067
h_f^2		0.518	0.500	0.470	0.033	0.034	0.191	0.476	0.111
h_i^2		0.164	0.169	0.161	0.006	0.006	0.072	0.142	0.029

*为0.05显著水平,**为0.01极显著水平。

* indicates significant difference at 0.05 level, ** indicates highly significant difference at 0.01 level.

2.2 赤皮青冈生物量与有机碳模型构建

选择变异系数稳定、遗传力较高的生长性状(地径、树高、冠幅)构建生物量和有机碳模型,由赤皮青冈各器官生物量与生长性状之间的异速生长方程可知(表3),地上部分方程(8)、(9)、(11)的VIF值分别为4.599、5.839、4.737,决定系数R^2为0.869~0.989,RMSE为0.096~0.369,地下部分模型相较于地上部分的VIF值更高、R^2更低、RMSE更高,说明地上部分模型拟合精度优于地下部分。各器官生物量模型拟合精度由高到低依次为TB、BB、LBB、LB、CRB、RB和FRB,综合比较VIF、R^2以及RMSE表现,筛选方程(9)$\ln Y=k_0+k_1\ln D+k_2\ln H+k_3\ln CW$为赤皮青冈生物量最优拟合模型。

由赤皮青冈各器官有机碳与生长性状之间的异速生长方程分析结果可知(表4),地上部分方程(8)、(9)、(11)VIF值分别为4.599、5.839、4.737,决定系数R^2为0.296~0.874,RMSE为0.382~0.826,与生物量异速生长方程一致,地上部分模型拟合精度优于地下部分,各器官有机碳模型拟合精度由高到低依次为SOCC、LBOC、BOCC、LOCC、ROCC、CROC和FROC,综合比较VIF、R^2以及RMSE表现,筛选方程(9)$\ln Y=k_0+k_1\ln D+k_2\ln H+k_3\ln CW$为赤皮青冈有机碳最优拟合模型。

2.3 赤皮青冈家系生物量和碳储量方差分析和遗传参数估算

基于最优拟合模型计算的3年生赤皮青冈不同家系生物量和碳储量遗传变异显示(表5),赤皮青冈家系各器官生物量变异系数为17.38%~27.81%,碳储量变异系数为25.48%~32.85%,与生物量相比,碳储

表 3　赤皮青冈各器官生物量回归模型

Tab.3　Biomass regression model of each organ of *Cyclobalanopsis gilva*

部位 Position	方程 Equation	系数 Coefficient				拟合优度 Goodness of fit		
		K_0	K_1	K_2	K_3	VIF	R^2	RMSE
LB	(7)	−4.393	2.243				0.891	0.302
	(8)	−3.94	2.55	−0.637		4.599	0.895	0.300
	(9)	−3.432	1.833	−0.715	1.052	5.839	0.921	0.263
	(10)	−4.926	0.888				0.869	0.331
	(11)	−4.192	0.549	1.183		4.737	0.902	0.289
LBB	(7)	−5.512	2.976				0.918	0.342
	(8)	−5.329	3.10	−0.258		4.599	0.918	0.346
	(9)	−4.917	2.519	−0.321	0.853	5.839	0.928	0.329
	(10)	−6.261	1.185				0.904	0.369
	(11)	−5.653	0.904	0.980		4.737	0.918	0.347
BB	(7)	−4.512	2.035				0.948	0.183
	(8)	−4.902	1.771	0.548		4.599	0.953	0.177
	(9)	−4.540	1.261	0.493	0.748	5.839	0.970	0.144
	(10)	−5.075	0.817				0.951	0.177
	(11)	−4.604	0.600	0.759		4.737	0.970	0.142
TB	(7)	−3.522	2.336				0.976	0.140
	(8)	−4.159	1.904	0.898		4.599	0.985	0.111
	(9)	−3.973	1.642	0.869	0.385	5.839	0.989	0.098
	(10)	−4.187	0.941				0.985	0.109
	(11)	−3.951	0.832	0.381		4.737	0.989	0.096
RB	(7)	−0.6111	2.495				0.689	0.640
	(8)	−8.523	1.162	3.02		4.622	0.744	0.601
	(9)	−7.285	0.23	2.538	1.480	6.862	0.768	0.592
	(10)	−7.05	1.04				0.720	0.608
	(11)	−5.813	0.568	1.489		7.082	0.745	0.600
CRB	(7)	−5.788	2.492				0.693	0.634
	(8)	−7.114	1.759	1.661		4.622	0.710	0.637
	(9)	−5.025	0.187	0.848	2.498	6.862	0.779	0.575
	(10)	−6.642	1.027				0.707	0.619
	(11)	−4.566	0.234	2.501		7.082	0.777	0.559
FRB	(7)	−5.308	1.848				0.666	0.501
	(8)	−4.573	2.254	−0.920		4.622	0.675	0.510
	(9)	−4.880	2.485	−0.800	−0.367	6.862	0.677	0.526
	(10)	−5.810	0.742				0.646	0.516
	(11)	−6.121	0.861	−0.375		7.082	0.648	0.530

LB:树叶生物量;LBB:活枝生物量;BB:树皮生物量;TB:树干(去皮)生物量;RB:根茎生物量;CRB:粗根生物量;FRB:细根生物量;VIF:方差膨胀系数;R^2:决定系数;REME:均方根误差。

LB: leaf biomass; LBB: living branches biomass; BB: bark biomass; TB: trunk biomass; RB: rhizome biomass; CRB: coarse root biomass; FRB: fine root biomass; VIF: variance inflation factor; R^2: coefficient of determination; RMSE: root mean square error.

表 4 赤皮青冈各器官有机碳含量回归模型

Tab.4 Regression model of organic carbon content in different organs of *Cyclobalanopsis gilva*

部位 Position	方程 Equation	系数 Coefficient				拟合优度 Goodness of fit		
		K_0	K_1	K_2	K_3	VIF	R^2	RMSE
LOCC	(7)	−4.54	2.084				0.730	0.487
	(8)	−4.924	1.824	0.540		4.599	0.733	0.491
	(9)	−4.180	0.776	0.426	1.539	5.839	0.786	0.446
	(10)	−5.115	0.837				0.732	0.485
	(11)	−4.162	0.396	1.536		4.737	0.786	0.439
LBOC	(7)	−7.275	3.320				0.838	0.560
	(8)	−7.225	3.353	−0.070		4.599	0.838	0.568
	(9)	−7.026	3.072	−0.100	0.412	5.839	0.840	0.574
	(10)	−8.126	1.324				0.829	0.576
	(11)	−7.788	1.168	0.544		4.737	0.832	0.579
BOCC	(7)	−7.094	2.87				0.752	0.633
	(8)	−7.15	2.832	0.078		4.599	0.752	0.642
	(9)	−6.205	1.500	−0.067	1.956	5.839	0.798	0.588
	(10)	−7.84	1.146				0.745	0.641
	(11)	−6.585	0.566	2.021		4.737	0.796	0.582
SOCC	(7)	−4.229	2.491				0.839	0.419
	(8)	−5.431	1.676	1.694		4.599	0.864	0.391
	(9)	−5.072	1.170	1.639	0.743	5.839	0.874	0.382
	(10)	−4.99	1.011				0.860	0.390
	(11)	−4.582	0.822	0.658		4.737	0.868	0.385
ROCC	(7)	−7.458	2.814				0.673	0.751
	(8)	−9.518	1.676	2.578		4.622	0.703	0.738
	(9)	−7.335	0.034	1.729	2.608	6.862	0.761	0.686
	(10)	−8.466	1.165				0.694	0.726
	(11)	−6.295	0.337	2.615		7.082	0.752	0.675
CROC	(7)	−6.866	2.537				0.587	0.814
	(8)	−8.236	1.779	1.716		4.622	0.601	0.826
	(9)	−6.475	0.454	1.031	2.105	6.862	0.641	0.811
	(10)	−7.737	1.045				0.599	0.802
	(11)	−5.987	0.377	2.108		7.082	0.639	0.786
FROC	(7)	−4.916	1.415				0.332	0.767
	(8)	−2.235	2.898	−3.356		4.622	0.433	0.730
	(9)	−1.215	2.131	−3.753	1.218	6.862	0.457	0.740
	(10)	−5.138	0.544				0.296	0.788
	(11)	−5.163	0.550	0.278		7.082	0.319	0.800

LOCC：树叶有机碳含量；LBOC：活枝有机碳含量；SOCC：树干（去皮）有机碳含量；BOCC：树皮有机碳含量；ROCC：根茎有机碳含量；CROC：粗根有机碳含量；FROC：细根有机碳含量；VIF：方差膨胀系数；R^2：决定系数；REME：均方根误差。

LOCC: leaf organic carbon content; LBOC: organic carbon content of living branches; SOCC: stem organic carbon content; BOCC: bark organic carbon content; ROCC: rhizome organic carbon content; CROC: organic carbon content of coarse roots; FROC: fine root organic carbon content; VIF: variance inflation factor; R^2: coefficient of determination; RMSE: root mean square error.

量变异幅度更大,变异系数更高。3年生赤皮青冈各部位生物量和碳储量均存在显著或极显著的家系×区组互作效应。遗传力分析表明,家系遗传力大于单株遗传力,其中树叶、活枝、树皮、干材、树根的生物量及活枝、树皮、干材的碳储量家系遗传力较高(≥0.423),受较强的家系遗传控制。按照20%入选率估算生物量和碳储量的遗传增益,活枝生物量和碳储量遗传增益表现最高,分别为43.93%、47.60%。

表5　赤皮青冈不同家系生物量和碳储量方差分析和遗传参数估算

Tab.5　Variance analysis of biomass and carbon storage and estimation of genetic parameters in different families of *Cyclobalanopsis gilva*

指标 Index	部位 Position	均值±标准差/g Mean±SD	变幅 Range	变异系数/% CV	F值 F value		h_f^2	h_i^2	遗传增益/% △G
					σ_f^2	σ_{fb}^2			
生物量 Biomass	树叶	101.11±21.26^{c}	66.64~156.06	21.03	1.05	1.61**	0.577	0.228	34.42
	活枝	61.39±17.07^{e}	34.13~102.01	27.81	1.14	1.56**	0.559	0.208	43.93
	树皮	38.53±8.70^{d}	21.78~56.19	22.57	0.98	1.79**	0.506	0.188	31.41
	干材	133.67±34.81^{b}	70.38~203.86	26.04	1.07	1.68**	0.519	0.188	36.66
	树根	96.18±11.69^{c}	50.65~96.18	17.38	0.95	1.55*	0.577	0.222	27.47
碳储量 Carbon storage	树叶	29.83±7.60^{c}	14.49~44.87	25.48	1.08	62.68**	0.029	0.022	2.05
	活枝	16.34±5.00^{d}	8.49~27.64	30.60	1.19	1.47**	0.555	0.196	47.60
	树皮	6.18±1.95^{e}	2.66~10.47	31.56	1.08	1.79**	0.512	0.193	45.95
	干材	43.99±14.45^{b}	17.30~76.70	32.85	1.06	1.72**	0.481	0.167	42.46
	树根	49.76±13.80^{b}	25.20~79.49	27.73	1.31	1.23*	0.249	0.047	19.13

表中数据不同字母表示各部位同一指标之间存在差异显著性(P<0.05)。

Different letters in the table indicate significant differences among the same index in different organs (P<0.05).

从赤皮青冈各部位生物量均值来看,除活枝与树根差异不显著外,其他部位之间均存在显著差异性(P<0.05),由高到低依次为干材、树叶、树根、活枝和树皮,碳储量除干材和树根差异不显著外,其他部位之间均存在显著差异性(P<0.05),由高到低依次为树根、干材、树叶、活枝和树皮。各部位中,干材生物量变化幅度最大,干材和树根有机碳变化幅度最大(表5、图1)。

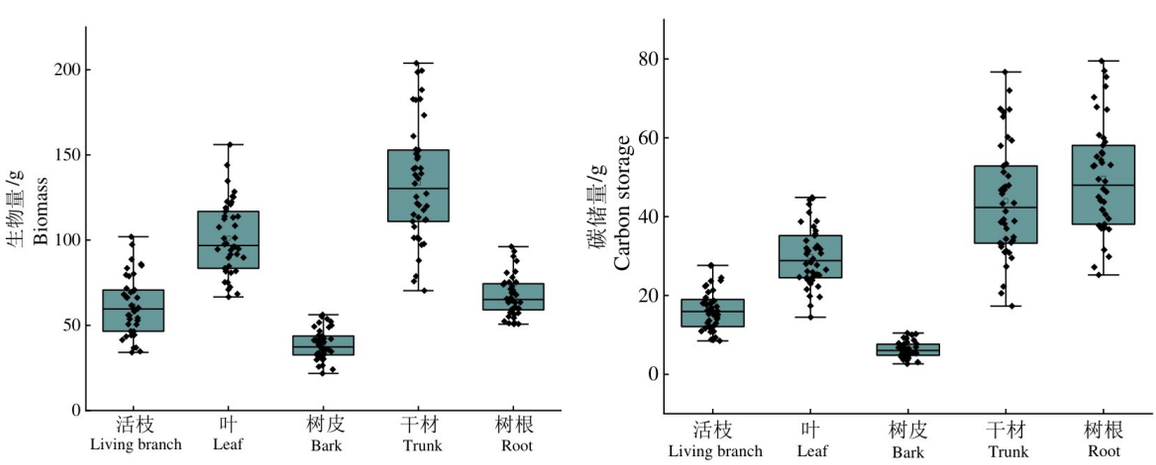


图1　赤皮青冈各家系不同器官生物量和碳储量分布

Fig.1　Distribution of biomass and carbon storage in different organs of *Cyclobalanopsis gilva* families

2.4　赤皮青冈高碳汇家系筛选

采用多重比较法对单株生物量和碳储量进行分析(表6)。结果表明,福建JO1、湖南CB8、湖南YS3、湖南CB7、福建JO13、湖南CB1的单株生物量均显著高于江西SR5、SR3(P<0.05);湖南CB7、福建JO1、湖南CB8、湖南YS3、湖南HT5、福建JO13的单株碳储量均显著高于江西SR5、SR3(P<0.05)。江西SR5、SR3

的单株生物量和碳储量均低于其他各家系，筛选出单株生物量、碳储量排名前10%的共有家系分别为福建JO1、湖南CB8、湖南YS3和湖南CB7，其单株生物量较家系平均值分别高出51.74%、47.78%、34.34%、33%，单株碳储量较家系平均值分别高出66.17%、58.71%、44.62%、39.94%。根据育种目标，为获得生物量和碳储量增益均较大的优良家系，将生物量和碳储量权重均设置为0.5，计算综合选择指数，同时利用BLUP法估算各家系的育种值作为家系评定的参考指标。依据综合指数结果筛选排名前10%的家系分别为湖南CB8、福建JO1、湖南YS3、福建JO13和湖南CB1。其综合指数分别为0.280、0.266、0.122、0.111、0.098。采用独立淘汰法对各家系生物量和碳储量BLUP值进行排序，选取排名前10%的家系（图2），分别为福建JO1、湖南CB8、湖南YS3、福建JO8和湖南HT6。综合比较单株生物量、碳储量、综合选择指数和BLUP育种值，以排名前10%作为优良高碳汇家系入选标准，最终筛选出福建JO1、湖南CB8、湖南YS3 3个优良家系。3个入选家系生物量的遗传和现实增益均值分别为21.27%、38.96%，碳储量遗传和现实增益均值分别为13.60%、49.98%（表7）。

表6 单株生物量、碳储量多重比较及综合选择指数

Tab.6 Multiple comparison of biomass and carbon storage per plant and comprehensive selection index

家系 Family	生物量平均数±标准差/g Biomass mean ±SD	碳储量平均数±标准差/g Average carbon storage±SD	综合指数 Composite index	家系 Family	生物量平均数±标准差/g Biomass mean ±SD	碳储量平均数±标准差/g Average carbon storage±SD	综合指数 Composite index
JO1	609.93±173.31^{a}	229.60±77.05^{a}	0.266	JO16	384.84±158.18^{abcd}	124.16±60.11^{abcde}	−0.015
CB8	593.99±171.81^{ab}	221.25±77.74^{a}	0.280	JO19	383.83±92.86^{abcd}	132.30±44.71^{abcde}	−0.013
YS3	539.99±144.27^{abc}	216.55±84.86^{ab}	0.122	CB5	378.25±295.38^{abcd}	143.73±134.27^{abcde}	0.063
CB7	534.58±398.33^{abc}	230.64±195.09^{a}	0.074	CB6	377.31±217.93^{abcd}	144.92±92.20^{abcde}	−0.071
JO13	530.65±183.41^{abc}	199.51±100.52^{abc}	0.111	YS2	372.76±173.19^{abcd}	130.61±74.51^{abcde}	−0.041
CB1	530.26±114.69^{abc}	196.10±46.89^{abcde}	0.098	JO12	368.70±145.31^{abcd}	126.31±70.64^{abcde}	−0.013
JO11	515.02±198.76^{abcd}	197.27±101.20^{abcd}	0.060	JO9	360±229.39^{abcd}	120.29±94.12^{abcde}	−0.024
HT5	511.59±288.86^{abcd}	211.41±143.85^{abc}	0.089	CB4	359.27±59.51^{abcd}	127.58±21.64^{abcde}	−0.074
HT6	472.64±187.86^{abcd}	172.44±78.26^{abcde}	0.095	JO7	350±120.25^{abcd}	116.64±46.66^{abcde}	−0.036
HT4	450.13±131.17^{abcd}	180.46±68.14^{abcde}	0.042	JO20	330.17±86.64^{abcd}	114.64±34.14^{abcde}	−0.092
CB2	448.29±129.26^{abcd}	160.96±68.14^{abcde}	0.059	JO18	327.88±207.24^{bcd}	107.20±79.07^{abcde}	−0.063
JO4	448.16±166.19^{abcd}	170.47±77.97^{abcde}	0.017	JO14	318.14±135.36^{bcd}	111.10±63.22^{abcde}	−0.093
JO15	440.49±116.37^{abcd}	150.49±56.97^{abcde}	0.048	HT3	317.27±15.27^{bcd}	107.31±14.43^{abcde}	−0.006
CB3	435.72±279.10^{abcd}	163.26±119.61^{abcde}	−0.077	HT7	316.40±56.58^{bcd}	107.12±34.60^{abcde}	−0.104
JO8	434.58±180.86^{abcd}	151.16±81.97^{abcde}	0.090	JO6	313.92±57.69^{bcd}	108.27±24.01^{abcde}	−0.043
JO2	427.80±135.29^{abcd}	157.87±53.71^{abcde}	−0.031	YS1	312.72±121.16^{bcd}	115.23±51.67^{abcde}	−0.123
HT2	424.22±185.82^{abcd}	165.50±85.15^{abcde}	0.005	JO3	304.26±205.12^{cd}	108.69±89.55^{abcde}	−0.096
SZ1	419.21±123.81^{abcd}	162.37±68.02^{abcde}	−0.026	JO17	270.47±103.85^{cd}	91.48±44.34^{bcde}	−0.115
TZ1	405.10±223.14^{abcd}	158.56±111.75^{abcde}	−0.020	JO10	267.30±74.53^{cd}	84.30±31.04^{cde}	−0.113
AN1	400.83±265.73^{abcd}	122.42±87.71^{abcde}	0.088	SR5	248.06±87.64^{d}	68.47±27.48^{e}	−0.158
JO5	388.07±162.46^{abcd}	147.66±77.94^{abcde}	−0.051	SR3	237.28±54.60^{d}	70.31±19.75^{de}	−0.105
家系生物量均值 Family average biomass				401.55±182.17^{abcd}			
家系碳储量均值 Family average carbon storage				145.90±83.23^{abcde}			

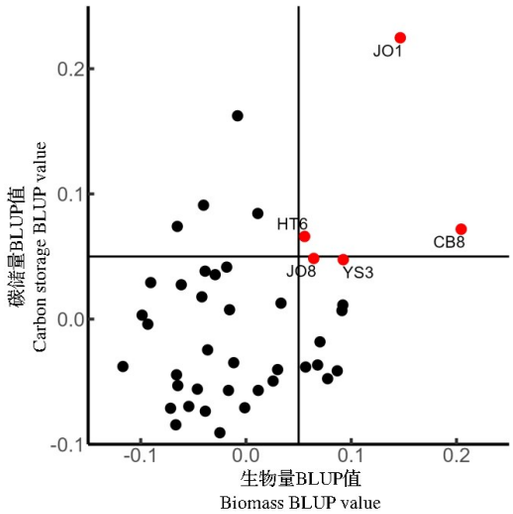


图2　基于生物量和碳储量BLUP值的赤皮青冈优良高碳汇家系选择

Fig.2　Selection of excellent high carbon sink families of *Cyclobalanopsis gilva* based on biomass and carbon storage BLUP values

表7　入选赤皮青冈家系生物量、碳储量的遗传和现实增益

Tab.7　Genetic and realistic gains of biomass and carbon storage in *Cyclobalanopsis gilva* families

家系 Family	平均生物量/g Average biomass	平均碳储量/g Average carbon storage	生物量增益 Biomass gain		碳储量增益 Carbon storage gain	
			遗传增益 Genetic gain	现实增益 Realized gain	遗传增益 Genetic gain	现实增益 Realized gain
福建JO1	609.93	229.60	21.57%	39.51%	12.69%	46.65%
湖南CB8	593.99	221.25	21.95%	40.20%	13.28%	48.82%
湖南YS3	539.99	216.55	20.30%	37.18%	14.82%	54.48%
平均Mean	581.30	222.47	21.27%	38.96%	13.60%	49.98%

3　讨　论

遗传和变异是林木良种选育研究的重要内容,明确变异来源是树种遗传改良的前提[20]。本研究发现3年生赤皮青冈42个家系生长和形质性状存在极显著的家系×区组互作效应,这与王芳等[20]、陈兴彬等[21]分别对杉木和水曲柳的研究结果一致,表明家系生长不仅受遗传因素控制,也受环境因素影响。变异系数作为遗传测定中的重要参数,其高低反映了样本的差异及这种差异遗传给下一代的能力[22],本研究生长性状变异系数相对稳定,形质性状变异系数差异大,遗传变异丰富,但变异系数均低于20%,相较于罗芊芊等[23]、徐肇友等[24]在江西抚州、浙江龙泉研究的3年生赤皮青冈生长和形质性状变异系数更低,这种差异可能与造林密度、立地环境、气候条件、人为管理环境因素等有关。遗传力反映了在群体中根据表型优劣选择基因型的可靠程度,通过估算家系和单株遗传力有助于确定育种选择方式和强度[25]。本研究显示,3年生赤皮青冈生长性状以及形质性状最长侧枝长度的家系遗传力较高,受较强的家系遗传控制,这表明赤皮青冈在一定的选择强度下,选用地径、树高、冠幅、最长侧枝长度作为主要的选择性状可能会取得更好的改良效果。此外,赤皮青冈各性状家系遗传力明显高于单株遗传力,其原因可能是幼龄期赤皮青冈受地区环境影响,单株性状基因型差异未完全表达,家系内单株变化较大[26-27],通过优良家系的选择可获得较大的遗传增益,若将家系选择和单株选择相结合,可能取得更好的改良效果。由于林木生长周期较长,且家系遗传易受环境因素影响,今后还需开展林木生长周期多阶段、多区域的试验,进一步评价赤皮青冈家系的适应性和稳定性。

胸径、树高作为植物最重要的生长指标,通常与生物量存在线性相关关系,相关研究表明赤皮青冈生长快慢对生物量及有机碳含量均具有显著影响[28]。本研究中3年生赤皮青冈处于幼龄期,侧枝发达,选用变异系数稳定、遗传力表现较大的地径、树高、冠幅来构建赤皮青冈生物量、有机碳异速生长方程,

用于估算赤皮青冈各家系生物量及碳储量，对早期筛选优良高碳汇家系具有重要意义。一直以来，异速生长方程被认为是一个较为理想的模型[29]，彭健健等[30]采用非线性联立方程组，构建了以地径、树高和冠幅为自变量的杨梅人工林单株生物量模型，模型拟合精度在85%以上，冷寒冰等[31]、王佳慧等[29]分别在香樟、椴树构建生物量模型中引入树高和冠幅作为第二变量和第三变量，模型精度有所提升但提高幅度有限。这与本研究在以地径、树高为变量的基础上增加冠幅变量后模型精度有所提高，但提高幅度有限相一致。本研究筛选的生物量和有机碳最优拟合模型均为$\ln Y=k_0+k_1\ln D+k_2\ln H+k_3\ln CW$，模型拟合精度范围分别为0.677~0.989，0.457~0.874。其中干材生物量与有机碳模型拟合效果最好，R^2分别为0.989、0.874。各部位以地上部分模型拟合精度优于地下部分，可能与地下植物根系生物量及有机碳含量更受根系直径，长度、比面积等自身性状调控有关[32]。

本研究利用最优拟合模型估算的3年生赤皮青冈家系生物量和碳储量均存在显著或极显著的家系×区组互作效应，碳储量变异系数较高，有利于赤皮青冈高碳汇家系的筛选。同样，生物量和碳储量性状表现出家系遗传力高于单株遗传力，且受较强的家系遗传控制。赤皮青冈各部位单株生物量遗传增益为27.47%~43.93%，单株碳储量（除树叶外）遗传增益为19.13%~47.60%，表明对赤皮青冈碳汇育种进行遗传改良具有一定的实际意义[33]。育种值是选择育种的重要参数，是性状表型值中遗传效应的加性效应部分，反映遗传效应的大小，对林木育种值的精确预测是提高选育效率的关键[34-36]。本研究利用BLUP方法估算育种值，结合育种目标选择综合选择指数作为评估指标，综合筛选出福建JO1、湖南CB8、湖南YS3共3个优良高碳汇家系。3个入选家系生物量、碳储量的遗传增益均值分别为21.27%、13.60%，现实增益均值分别为38.96%、49.98%，增益明显，可作为碳汇造林的早期优良材料。

4 结 论

本研究结果表明，3年生赤皮青冈42个家系之间生长性状、形质性状、生物量和碳储量均存在显著或极显著的家系×区组互作效应，家系遗传力高于单株遗传力。以地径、树高、冠幅为变量构建的赤皮青冈生物量和有机碳最优拟合模型均为$\ln Y=k_0+k_1\ln D+k_2\ln H+k_3\ln CW$。运用模型计算赤皮青冈各家系生物量和碳储量，综合比较单株生物量、碳储量、综合选择指数和BLUP育种值，以排名前10%作为优良高碳汇家系入选标准，筛选出福建JO1、湖南CB8、湖南YS3共3个优良高碳汇家系入选，入选家系遗传和现实增益明显，可作为碳汇造林的早期优良材料。

参考文献 References：

[1] 朱教君，高添，于立忠，等.森林生态系统碳汇：概念、时间效应与提升途径[J].应用生态学报，2024，35(9)：2313-2321.
ZHU J J，GAO T，YU L Z，et al.Carbon sink of forest ecosystems：concept，time effect and improvement approaches[J].Chinese journal of applied ecology，2024，35(9)：2313-2321.

[2] 纳晓莹，王秀伟，刘桂丰，等.依据白桦双列杂交子代林对优良碳汇亲本及家系选择[J].东北林业大学学报，2018，46(8)：8-12.
NA X Y，WANG X W，LIU G F，et al.Seed selection of good parents and families of high carbon sink ability with the diallel cross progeny woods of *Betula platyphylla* [J].Journal of northeast forestry university，2018，46 (8)：8-12.

[3] 薛春泉，徐期瑚，林丽平，等.广东主要乡土阔叶树种单木生物量生长模型[J].华南农业大学学报，2019，40(2)：65-75.
XUE C Q，XU Q H，LIN L P，et al.Biomass growth models for individual tree of main indigenous broadleaf tree species in Guangdong Province[J].Journal of south China agricultural university，2019，40(2)：65-75.

[4] 郎明翰，张日升，凡胜豪，等.科尔沁沙地南缘樟子松人工林碳汇及对气候因子的响应[J].水土保持学报，2024，38(4)：236-245.
LANG M H，ZHANG R S，FAN S H，et al.Carbon sequestration function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and its responses to climate factors on the southern edge of Horqin sandy land[J].Journal of soil and water conservation，2024，38(4)：236-245.

[5] ALVAREZ S, ORTIZ C, DÍAZ-PINÉS E, et al.Influence of tree species composition, thinningintensity and climate change on carbon sequestration in Mediterranean mountain forests: a case study using the CO_2Fix model[J].Mitigation and adaptation strategies for global change, 2016, 21: 1045-1058.

[6] 于海群.华北地区平原造林工程碳汇能力及碳汇价值研究:以北京市东郊森林公园为例[J].生态经济,2022,38(2):110-115.
YU H Q.Carbon accounting for afforestation project in the plain area of Beijing: a case study of eastern suburb forest park, Beijing[J].Ecological economy, 2022, 38(2): 110-115.

[7] 王大卫,沈文星.中国主要树种人工乔木林碳储量测算及固碳潜力分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(5):11-19.
WANG D W, SHEN W X.The carbon storage calculation and carbon sequestration potential analysis of the main artificial arboreal forest in China[J].Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2022, 46(5): 11-19.

[8] 王薇菡,虞依娜,谢嘉淇,等.中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征[J].生态学报,2023,43(5):1793-1803.
WANG W H, YU Y N, XIE J Q, et al.Characteristics of soil carbon, nitrogen accumulation and their ecological stoichiometry in Chinese subtropical forest under different afforestation patterns[J].Acta ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1793-1803.

[9] 尧俊,汪迎利,唐昌亮,等.广东木荷优良碳汇家系选育研究[J].林业与环境科学,2021,37(4):154-159.
YAO J, WANG Y L, TANG C L, et al.Study on selection and breeding of excellent carbon sequestration families of *Schima superba* in Guangdong[J].Forestry and environmental science, 2021, 37(4): 154-159.

[10] 徐英明,虞依娜,李鑫,等.南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳积累与碳汇功能[J].生态学报,2019,39(1):355-362.
XU Y M, YU Y N, LI X, et al.Soil carbon accumulation and carbon sinks under different afforestation patterns in Chinese subtropical forests[J].Acta ecologica Sinica, 2019, 39 (1): 355-362.

[11] 佳玮.森林碳汇与树种固碳能力研究进展[J].现代园艺,2023,46(1):26-29.
JIA W.Advances in forest carbon sink and carbon sequestration capacity of tree species[J].Contemporary horticulture, 2023, 46(1): 26-29.

[12] 王春梅,王汝南,蔺照兰.提高碳汇潜力:量化树种和造林模式对碳储量的影响[J].生态环境学报,2010,19(10):2501-2505.
WANG C M, WANG R N, LIN Z L.Carbon sequestration estimation by different tree species and reforestation types in forest ecosystem[J].Ecology and environmental sciences, 2010, 19(10): 2501-2505.

[13] HASEGAWA T, FUJIMORI S, ITO A, et al.Careful selection of forest types in afforestation can increase carbon sequestration by 25% without compromising sustainability[J].Communications earth & environment, 2024, 5: 171.

[14] 浙江省林业局发布"碳汇造林十大主推树种"[J].浙江林业,2023(4):48-49.
Zhejiang Forestry Bureau issued the 'Ten Major tree species for carbon sink afforestation'[J].Zhejiang forestry, 2023(4): 48-49.

[15] 欧阳泽怡,李志辉,欧阳硕龙,等.基于Maxent和ArcGIS的赤皮青冈在中国的潜在适生区预测[J].中南林业科技大学学报,2023,43(2):19-26.
OUYANG Z Y, Li Z H, OUYANG S L, et al.Prediction of the potential distribution of *Cyclobalanopsis gilva* in China based on the Maxent and ArcGIS model[J].Journal of central south university of forestry & technology, 2023, 43(2): 19-26.

[16] 林玮,白青松,陈雪梅,等.华南主要造林树种碳汇能力评价体系构建及优良碳汇树种筛选[J].西南林业大学学报(自然科学),2020,40(1):28-37.
LIN W, BAI Q S, CHEN X M, et al.Construction of the carbon sink capacity evaluation system of main afforestation tree species in south China and selection of the fine carbon sink species[J].Journal of southwest forestry university, 2020, 40(1): 28-37.

[17] 马俊青,李高阳,田丽.河南省主要造林树种含碳率比较研究[J].河南农业科学,2012,41(9):131-132.
MA J Q, LI G Y, TIAN L.Comparative study on carbon rate of main afforestation tree species in Henan Province[J].Journal of Henan agricultural sciences, 2012, 41(9): 131-132.

[18] 付志高,李芬好,肖以华,等.基于杉木退化人工林碳储量、生产力及其碳汇经济的阔叶树种选择研究[J].林业科学

研究,2024,37(6):93-103.
FU Z G,LI F H,XIAO Y H,et al.Selections of broad-leaved tree species planting in Chinese fir degraded plantation forests:based on carbon stock,productivity and carbon-sink economy[J].Forest research,2024,37(6):93-103.

[19] 刘灵,张含国,张明远,等.樟子松含碳量家系变异与高碳汇家系选择[J].中南林业科技大学学报,2017,37(2):44-49.
LIU L,ZHANG H G,ZHANG M Y,et al.Study on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* genetic variation of carbon density and superior families selection of high carbon storage[J].Journal of central south university of forestry & technology,2017,37(2):44-49.

[20] 王芳,孙彬,杨雨春,等.水曲柳半同胞家系变异分析与选择[J].中南林业科技大学学报,2023,43(2):144-154.
WANG F,SUN B,YANG Y C,et al.Variation analysis and selection of *Fraxinus mandshurica* half-sib families[J].Journal of central south university of forestry & technology,2023,43(2):144-154.

[21] 陈兴彬,刘武阳,朱柯帆,等.信丰杉木第3代种子园自由授粉家系遗传变异及早期选择研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2025,45(3):1-6.
CHEN X B,LIU W Y,ZHU K F,et al.Genetic variation and early selection of growth traits in open-pollinated progeny of the third generation *Cunninghamia lanceolata* seed orchard in Xinfeng[J].Journal of southwest forestry university,2025,45(3):1-6.

[22] 陈晓阳,沈熙环.林木育种学[M].北京:高等教育出版社,2005.
CHEN X Y,SHEN X H.Tree breeding[M].Beijing:Higher Education Press,2005.

[23] 罗芊芊,肖德卿,范长根,等.幼龄期赤皮青冈家系变异分析及早期选择研究[J].南方林业科学,2025,53(3):24-29.
LUO Q Q,XIAO D Q,FAN C G,et al.Analysis of variation and early selection in young *Cyclobalanopsis gilva* families[J].South China forestry science,2025,53(3):24-29.

[24] 徐肇友,楚秀丽,肖纪军,等.3种青冈及其优树家系早期生长变异与选择[J].浙江林业科技,2017,37(4):6-11.
XU Z Y,CHU X L,XIAO J J,et al.Growth variation and early selection from different families of three species of *Cyclobalanopsis*[J].Journal of Zhejiang forestry science and technology,2017,37(4):6-11.

[25] 杨孟晴,邵慰忠,徐永宏,等.3年生赤皮青冈家系生长和形质性状变异与选择[J].林业科学研究,2023,36(4):31-40.
YANG M Q,SHAO W Z,XU Y H,et al.Variation and selection of growth and form-quality traits of 3-year-old *Cyclobalanopsis gilva*[J].Forest research,2023,36(4):31-40.

[26] 王佳兴,闫平玉,孙佰飞,等.长白落叶松自由授粉家系生长变异及优良家系早期选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(5):81-89.
WANG J X,YAN P Y,SUN B F,et al.Growth variation and superior families early selection of *Larix olgensis* free-pollinated families[J].Journal of Nanjing forestry university(natural sciences edition),2024,48(5):81-89.

[27] 陈留犇,张波,黎钉妮,等.卷荚相思半同胞子代遗传变异及早期选择[J].东北林业大学学报,2025,53(8):1-8.
CHEN L B,ZHANG B,LI D N,et al.Genetic variation and early selection of half-sib progeny in *Acacia cincinnata*[J].Journal of northeast forestry university,2025,53(8):1-8.

[28] 肖斌,姚甲宝,徐克芹,等.不同径级赤皮青冈生物量及有机碳分配特征与模型选择[J].中南林业科技大学学报,2025,45(10):124-133.
XIAO B,YAO J B,XU K Q,et al.Biomass and organic carbon allocation characteristics and model selection of *Cyclobalanopsis gilva* with different diameter classes[J].Journal of central south university of forestry & technology,2025,45(10):124-133.

[29] 王佳慧,李凤日,董利虎.基于不同预测变量的天然椴树可加性地上生物量模型构建[J].应用生态学报,2018,29(11):3685-3695.
WANG J H,LI F R,DONG L H.Additive aboveground biomass equations based on different predictors for natural *Tilia* Linn[J].Chinese journal of applied ecology,2018,29(11):3685-3695.

[30] 彭健健,王增,张勇,等.杨梅人工林相容性单株生物量模型构建[J].浙江农林大学学报,2022,39(2):272-279.
PENG J J,WANG Z,ZHANG Y,et al.Construction of compatible individual tree biomass model of *Myrica rubra* plantation[J].Journal of Zhejiang A & F university,2022,39(2):272-279.

[31] 冷寒冰,景军,奉树成.上海两种常绿阔叶树种生物量分配及异速生长模型[J].生态学杂志,2018,37(12):3590-

3596.

LENG H B, JING J, FENG S C. Biomass distribution and allometric model of two evergreen broad-leaved tree species in Shanghai[J]. Chinese journal of ecology, 2018, 37(12): 3590-3596.

[32] 庞榆,贺同鑫,孙建飞,等.北热带喀斯特森林优势树种细根生物量估算模型构建[J].植物生态学报,2024,48(10):1312-1325.

PANG Y, HE T X, SUN J F, et al. Construction of fine root biomass estimation models of dominant tree species in a north tropic karst forest[J]. Chinese journal of plant ecology, 2024, 48(10): 1312-1325.

[33] 刘灵,张含国,张明远,等.樟子松子代测定林高碳汇家系选择研究[J].西南林业大学学报,2016,36(1):57-62.

LIU L, ZHANG H G, ZHANG M Y, et al. Selection of high carbon storage families from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* progeny testing forest[J]. Journal of southwest forestry university, 2016, 36(1): 57-62.

[34] 纳晓莹.高固碳白桦优良家系选择[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.

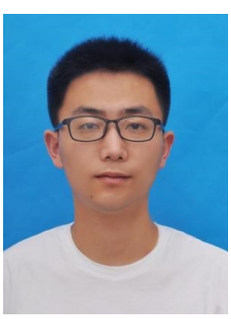
NA X Y. High carbon storage family selection of *Betula Platyphylla* Suk[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.

[35] YUAN C Z, ZHANG Z, JIN G Q, et al. Genetic parameters and genotype by environment interactions influencing growth and productivity in Masson pine in east and central China[J]. Forest ecology and management, 2021, 487: 118991.

[36] 谢金文,靳藏馥,张露,等.基于多点试验的湿地松半同胞家系早期选择研究[J].江西农业大学学报,2025,47(2):414-425.

XIE J W, JIN C F, ZHANG L, et al. Early selection of half sibling families of *Pinus elliottii* based on multi-point experiments[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2025, 47(2): 414-425.

(责任编辑:刘玉香)



第一作者简介:肖斌,工程师,硕士,2020年6月毕业于江西农业大学,目前主要从事赤皮青冈、木荷等珍贵阔叶树种种质资源收集及高效培育技术研究。工作期间主持中国林科院院基金子项目1项,参与江西省重点研发计划项目、江西省自然科学基金、中央财政林业科技推广项目、联合国开发计划署-全球环境基金(UNDP)等5项,共计发表学术论文10余篇,获软件著作权1部,参与授权专利4件。



通信作者简介:姚甲宝,高级工程师,博士,硕士生导师,主要从事亚热带珍贵阔叶树种育种与培育技术研究。主持江西重点研发计划项目、中央财政林业科技推广项目、江西省自然科学基金项目、联合国开发计划署-全球环境基金(UNDP-GEF)等6项,参与“十四五”国家重点研发计划、院基金青年协同创新项目子任务、省院合作项目等3项。在Industrial Crops and Products, BMC Genomics,生态学报等国内外核心期刊上发表论文20余篇,获软件著作权5部,授权专利3件,认定林木良种1项。现为中国林学会珍贵树种分会会员。长期从事林业科技成果转化与推广工作,形成“育种—培育—利用”一体化技术研究推广体系。