江西农业大学学报　2024,46(1)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　https://doi.org/10.3724/aauj.2024011

吴云燕,张露,刘远生,等.不同种源/家系毛红椿连年生长性状变异及早期选择[J].江西农业大学学报,2024,46(1):106-117.
WU Y Y,ZHANG L,LIU Y S,et al.Variation of annual growth traits and early selection of different provenances/families of *Toona ciliata* var. *pubescens*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(1):106-117.

不同种源/家系毛红椿连年生长性状变异及早期选择

吴云燕[1],张　露[1*],刘远生[2],程强强[1],苏仁峰[1],
潘俊彬[1],刘　军[3],刘　玮[1],马际凯[1]

(1.江西农业大学 林学院/江西省森林培育重点实验室/江西特色林木资源培育与利用2011协同创新中心,江西 南昌 330045;2.江西省安福县明月山林场,江西 吉安 343200;3.中国林业科学研究院 亚热带林业研究所,浙江 杭州 311400)

摘要:【目的】对毛红椿种源家系幼林生长性状差异进行研究,筛选早期生长性状优良的毛红椿种源/家系,揭示其地理变异规律,以推进毛红椿遗传改良工作。【方法】以毛红椿5个种源11个家系为研究对象,调查树高、胸径等生长性状,对不同种源/家系生长性状进行遗传变异分析及相关性分析,并利用遗传增益进行优良种源/家系选择。【结果】毛红椿早期生长性状在种源、家系间均存在极显著差异(P<0.01);14号家系(江西宜丰)在树高、胸径、材积等方面表现最好且生长最快,1号家系(安徽泾县)和4号家系(安徽泾县)生长相对较慢,且2号、13号、14号、15号的连年生长量靠前;树高、胸径和材积的变异系数分别为25.39%~32.74%、31.94%~36.55%、80.81%~91.21%,5年生毛红椿测定林的变异系数为材积>胸径>树高,其遗传力分别为0.586~0.894、0.749~0.852、0.643~0.780;相关性分析结果表明,除生长性状与无霜期,5年生枝下高与经度、年均降水量的相关性未达显著外,各生长性状之间相关性达极显著水平(P<0.01),各生长性状与经纬度呈现极显著负相关(P<0.01),与年均气温、年均降水量呈现极显著正相关(P<0.01)。根据主成分分析结果进行综合评价,初步选出3个优良家系(12号、13号、14号),其中14号家系树高、胸径、材积的遗传增益分别为14.94%、16.59%、38.20%。【结论】毛红椿的生长性状在种源和家系间都存在着丰富的遗传变异,在地理上呈现明显的"双向渐变型"。初步筛选的14号(江西宜丰)家系不仅生长优良,且有着较高的遗传增益,可作为推广使用的首选家系,可以为毛红椿选育工作提供基础。

关键词:毛红椿;生长性状;遗传变异;种源/家系选择
中图分类号:S791.246　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2024)01-0106-12

Variation of annual growth traits and early selection of different provenances/families of *Toona ciliata* var. *pubescens*

WU Yunyan[1],ZHANG Lu[1*],LIU Yuansheng[2],CHENG Qiangqiang[1],
SU Renfeng[1],PAN Junbin[1],LIU Jun[3],LIU Wei[1],MA Jikai[1]

收稿日期:2023-09-14　　**修回日期:**2023-12-07
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD060060605)
Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFD060060605)
作者简介:吴云燕,硕士生,orcid.org/0009-0000-5639-7324,wyy1428601556@163.com;*通信作者:张露,教授,博士,博士生导师,主要从事林木遗传育种和森林培育研究,orcid.org/0000-0003-2168-0546,zhlu856@163.com。

(1. College of Forestry, Jiangxi Provincial Key Laboratory of Silviculture, 2011 Collaboration Innovation Center of Jiangxi Typical Trees Cultivation and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Anfu Mingyueshan Forestry Centre of Jiangxi Province, Ji'an, Jiangxi 343200, China; 3. Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to explore the differences in growth traits of young forests of *Toona ciliata* var. *pubescens* provenances and families. The provenances/families with excellent early growth traits were screened, and their geographical variation rules were revealed, so as to promote the genetic improvement of *Toona ciliata* var. *pubescens*. [**Method**] Taking 11 families of 5 provenances of *T. ciliata* var. *pubescens* as the research objects, the growth traits including tree height and diameter at breast height were investigated. The genetic variation and correlation analysis of growth traits of different provenances/families were analyzed, and the genetic gain was used to select excellent provenances/families. [**Result**] There were significant differences in early growth traits among provenances and families (P<0.01). No. 14 (Yifeng, Jiangxi) had the best performance and fastest growth in tree height, diameter at breast height and volume, while No. 1 (Jingxian, Anhui) and No.4 (Jingxian, Anhui) grew relatively slowly. The annual growth of No.2, No.13, No.14 and No.15 was higher. The variation coefficients of tree height, diameter at breast height and volume were 25.39%-32.74%, 31.94%-36.55% and 80.81%-91.21%, respectively, the variation coefficients of 5-year-old *T. ciliata* var. *pubescens* forest were ranking as follows: volume > diameter at breast height > tree height, and their heritability were 0.586-0.894, 0.749-0.852 and 0.643-0.780, respectively. The results of correlation analysis showed that except for the correlation between growth traits and frost-free period, the correlation between 5-year old branch height and longitude and annual average precipitation was not significant, the correlation between each growth trait reached extremely significant level (P<0.01). Each growth trait showed extremely significant negative correlation with longitude and latitude (P<0.01), and extremely significant positive correlation with annual average temperature and annual average precipitation (P<0.01). Comprehensive evaluation was conducted according to the results of principal component analysis. Three excellent families (No.12, No.13 and No.14) were preliminarily selected. The genetic gains of tree height, diameter at breast height and volume of No.14 family were 14.94 %, 16.59 % and 38.20 %, respectively. [**Conclusion**] The growth traits of *T. ciliata* var. *pubescens* has rich genetic variation among provenances and families, and shows obvious 'two-way gradient' in geography. The preliminary screening of No.14 (uanshan) family not only grows well, but also has a high genetic gain. It could be used as the preferred family for popularization and application, and could provide the basis for the breeding of *Toona ciliata* var. *pubescens*.

Keywords: *Toona ciliata* var. *pubescens*; growth traits; genetic variation; provenance/family selection

【研究意义】毛红椿(*Toona ciliate* var. *pubescens*)为楝科(Memiacaae)香椿属(*Toona*)落叶大乔木,现归并为红椿(*Toona ciliate*),是我国第一批二级保护濒危树种[1]。在中国江西、云南、四川、安徽、湖南、广西、广东、贵州等省有分布,垂直分布在海拔高度300~950 m[2]。毛红椿树干通直圆满,生长快,心材呈红色,花纹美观,结构细致,剖面光滑,耐腐蚀性好,是良好工艺用材树种,有"中国桃花心木"之称[3],从其提取的部分化合物对肿瘤表现不同程度的抑制作用,具有经济价值和良好的开发前景[4]。但由于生境破坏等原因,毛红椿生存和发展面临挑战,其总分布面积下降,现存林分资源衰退短缺。

【前人研究进展】林木种源试验是在同一环境条件下对比分析不同地理种源的树种生长情况,根据不同种源在生长性状,表型性状等差异开展种源试验,选择优良种源和家系是林木改良计划的基础。目前我国已对许多树种开展种源及家系早期选择工作,如胡桃楸(*Juglans mandshurica*)[5]、福建柏(*Fokienia hodginsii*)[6]、赤皮青冈(*Cyclobalanopsis gilva*)[7]、越南黄花梨(*Dalbergia tonkinensis*)[8]、湿地松(*Pinus elliottii*)[9]、黑荆树(*Acacia mearnsii*)[10]等树种均取得显著成效。研究表明最早关注毛红椿是1977年在安徽泾县开展毛红椿人工造林试验研究,而后相继在遗传多样性[11-12]、种实和苗期生长[13-14]及苗期施肥[15-16]等方面有报道。学者也对不同种源或家系毛红椿早期选择进行了初步研究,如刘军等[17]利用浙江、安徽和江

西等地种源在安徽进行造林试验，结合3年调查结果综合选育出8个优良家系；黄红兰等[18]用江西的14个家系在赣州造林，综合评价选出4个优良家系。但林业生产上造林用种还停留在随采随育进行造林，未见有毛红椿良种，为此选育毛红椿良种迫在眉睫[19-20]。【本研究切入点及拟解决的关键问题】研究以分布在江西、安徽、浙江、湖北4个省份的毛红椿5个种源11个家系为材料，通过连续5年的生长性状分析，初步筛选生长优良且适应性好的种源/家系，旨在为江西省珍贵用材产业发展提供优质种质资源。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省吉安市安福县明月山林场山庄分场（27°39′N，114°52′E），年均降水量1 553 mm，年均温17.7 ℃，年平均降雨日166 d，年日照时数1 649 h，年无霜期279 d，属中亚热带季风湿润气候。具有日照充足，雨量充沛，气候温和，四季分明，无霜期较长等特点。土壤为红壤，全氮含量1.20 g/kg，全磷含量0.25 g/kg，全钾含量15.80 g/kg，pH值5.08，水解性氮含量55.17 mg/kg，有机质含量14.93 g/kg，速效钾含量67.40 mg/kg，有效磷含量0.59 mg/kg。造林前为杉木采伐迹地，坡度18°，东南坡，全垦整地。

1.2 试验材料和方法

材料来自安徽泾县、浙江富阳、赣州龙南、湖北宜昌和江西宜丰的5个种源11个家系，种源地经纬度通过GPS测量获得，气候因子信息从中国气象数据网（http://data.cma.cn）和世界气候数据库（https://www.worldclim.org/data/index.html）查询，不同种源地理气候如表1。2018年春采用1年生播种苗营建种源/家系试验林，采用完全随机区组设计，每5株1个小区，5次重复，株行距为2 m×3 m，试验林边缘设置2~3行木荷保护行。造林后前3年每年除草抚育2次，以后每年1次。自2018年起连续5年每年在毛红椿落叶停止生长时每木调查树高（H）、胸径（DBH），且2022年除调查树高（H）和胸径（DBH）外，增加调查枝下高（m）、东西冠幅（m）、南北冠幅（m）等指标。单株材积计算公式为（V）：$V=0.000\ 052\ 76\mathrm{DBH}^{1.882\ 161}H^{1.009\ 317}$。

表1 不同种源地理气候因子

Tab.1 The geographical and climatic factors of different provenances

种源 Provenance	家系编号 Family No.	家系 Family	纬度 North latitude	经度 East longitude	年降水量/mm Annual precipitation	年均温/℃ Annual mean temperature	无霜期/d Frost-free period
安徽泾县 Jing xian, Anhui	1号	泾县3	30°48′	118°24′	1 500	15.7	260
	4号	泾县1					
	2号	官山1	28°30′	114°29′	1 900	17.2	260
江西宜丰 Yifeng, Jiangxi	5号	官山5					
	6号	官山3					
	13号	官山2					
	14号	官山4					
湖北宜昌 Yichang, Hubei	12号	宜昌1	30°45′	111°10′	1 215.6	16.9	250
浙江富阳 Fuyang, Zhejiang	7号	富阳2	30°03′	119°57′	1 464	16.2	237
	8号	富阳1					
赣州龙南 Longnan, Ganzhou	15号	九连山1	25°49′	113°54′	2 155	18.9	286

1.3 数据处理

用Excel、SPSS 26.0进行数据整理统计分析，采用Origin绘图。

方差分析模型为：$y_{ijk}=\mu+B_i+P/F_j+(\mathrm{BP})_{ij}+\varepsilon_{ijk}$ （1）

式（1）中，y_{ijk}为观测值；μ为总体平均值；B_i为第i个区组的效应；P/F_j为第j个种源/家系的效应；$(\mathrm{BP})_{ij}$为第i个区组和第j个种源/家系的交互效应；ε_{ijk}为随机误差。

家系遗传力估算：$h^2=\dfrac{M_F-M_{FB}}{M_F}$ （2）

式（2）中：h_2为家系遗传力，M_F为家系均方，M_{FB}家系×区组交互均方。

现实增益估算:$\Delta R=\frac{S}{x_p}\times 100\%$　　(3)

遗传增益估算:$\Delta G=\frac{R}{x_p}\times 100\%$,其中$R=h^2S$,$S=x_i-x_p$　　(4)

式(3)、(4)中:R为选择响应,S为选择差,ΔG为遗传增益,x_i为入选家系性状i的均值,x_p为所有种源的总体均值。

2　结果与分析

2.1　不同种源/家系毛红椿连年生长性状方差分析

为了解毛红椿幼林各种源家系间遗传差异,对毛红椿各年生长性状进行方差分析(表2)。树高方差分析结果表明,除种源×区组无显著差异($P>0.05$)外,其余各年度树高在不同种源间、不同家系间、不同区组间均呈极显著差异($P<0.01$);胸径方差分析结果表明,种源×区组、2019年区组×家系无显著差异($P>0.05$),2 a毛红椿种源间、5 a区组×家系差异显著($P<0.05$),其余呈极显著差异($P<0.01$);材积方差分析结果表明,种源×区组、2 a区组×家系、种源间无显著差异($P>0.05$)。其余各年度材积在不同种源间、不同家系间、不同区组间存在极显著差异($P<0.01$)。这种来自遗传的差异说明不同种源/家系在生长性状方面具有统计意义,毛红椿种源具有选择潜力。

表2　不同种源/家系生长性状方差分析

Tab.2　Variance analysis of growth traits of different provenances/families

林龄 Forest age	性状 Trait	树高 Tree height		胸径 Diameter at breast height		材积 Volume	
	变异来源 Variation source	均方 Mean	*F*	均方 Mean	*F*	均方 Mean	*F*
1 a	区组 Block	0.388	6.428**				
	家系 Family	0.261	4.324**				
	区组×家系 B×F	0.108	1.795**				
	种源 Provenance	0.446	6.636**				
	区组×种源 B×P	0.071	1.054**				
2 a	区组 Block	9.473	21.857**	7.302	13.132**	0.000 005 766	12.745**
	家系 Family	4.477	10.329**	2.758	4.961**	0.000 002 056	4.544**
	区组×家系 B×F	0.77	1.777**	0.691	1.243	0.000 000 609	1.346
	种源 Provenance	2.97	8.634**	2.067	3.236*	0.000 002	3.032
	区组×种源 B×P	0.555	1.615*	0.59	0.923	0.000 000 536	1.045
3 a	区组 Block	27.723	59.151**	28.055	28.647**	0.000 118	26.669**
	家系 Family	9.25	19.737**	10.098	10.311**	0.000 034 37	7.781**
	区组×家系 B×F	1.088	2.322**	2.38	2.43**	0.000 012 28	2.781**
	种源 Provenance	7.638	15.55**	17.873	13.888**	0.000 061 36	10.768**
	区组×种源 B×P	0.59	1.202	1.47	1.142	0.000 009 677	1.698
4 a	区组 Block	27.723	59.151**	71.113	32.932**	0.000 94	37.795**
	家系 Family	9.25	19.737**	27.503	12.736**	0.000 243	9.764**
	区组×家系 B×F	1.088	2.322**	4.057	1.879**	0.000 010 22	2.37**
	种源 Provenance	15.368	25.396**	39.462	14.767**	0.000 298	9.347**
	区组×种源 B×P	0.912	1.507	2.405	0.9	0.000 04	1.271
5 a	区组 Block	68.01	50.307**	142.451	38.208**	0.005 343	45.269**
	家系 Family	18.055	13.356**	36.682	9.839**	0.001 048	8.88**
	区组×家系 B×F	1.916	1.417*	6.36	1.706*	0.000 231	1.959**
	种源 Provenance	32.365	21.996**	49.977	11.325**	0.001 289	8.887**
	区组×种源 B×P	2.299	1.562*	4.69	1.063	0.000 164	1.127

**表示$P<0.01$,*表示$P<0.05$。

** indicates $P<0.01$, * indicates $P<0.05$.

2.2 不同种源/家系毛红椿连年生长情况

对连续 5 年的生长指标进行方差分析及多重比较(图 1)表明,不同家系间生长指标达显著差异(P<0.05)。造林当年家系间树高变异幅度为 0.67~1.00 m,1 号家系生长量最小,为安徽泾县种源,2 号家系生长量最高,为江西官山种源。2 年生时 13 号家系高生长最大(2.81 m),14 号家系的胸径和材积生长最大(3.12 cm、1.45×10^{-3} m^3)。第 3 年及以后 14 号家系(江西宜丰种源)各性状均表现最优,5 年生时平均树高 6.94 m,平均胸径 9.45 cm,平均材积 2.9×10^{-2} m^3,年均高和径生长量分别为 1.19 m 和 1.59 cm。江西官山种源 14 号和 2 号及湖北宜昌种源 13 号的平均树高、胸径和材积均大于总体均值。

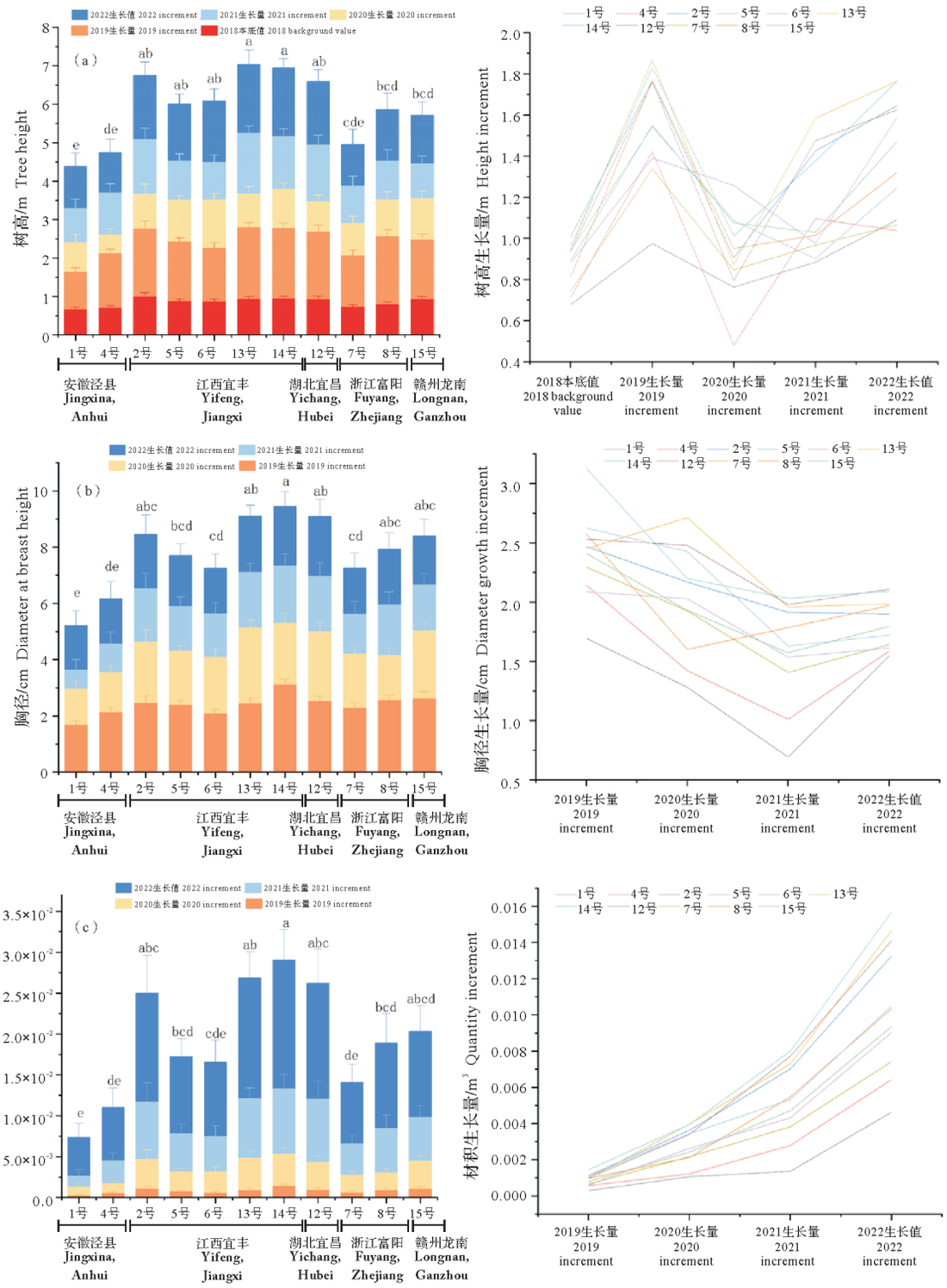


图 1 不同家系生长性状多重比较

Fig.1 Multiple comparison of growth traits of different families

从生长趋势来看,2019—2022年树高总体生长表现从高到低到高的“V”形变化趋势,2020年高生长量最低,2号、12号、13号、14号的高生长量较大;2020年的胸径生长量最大,表现出2020年>2022年>2021年,2号、12号、13号、14号胸径生长量较大;而材积的生长量从2019年起呈增长趋势,14号家系表现最佳。

2.3　不同种源/家系连年生长遗传变异

11个不同家系连年生长性状的遗传变异如表3。5年生树高平均值为5.95 m,变幅在1.5~13.4 m;胸径平均值7.87 cm,变幅在2.1~15.3 cm;材积的平均值为0.019 5 m^3,变幅在0.005~0.078 5 m^3。树高、胸径和材积的变异系数在年份间变化范围分别为25.39%~32.74%,31.94%~36.55%,80.80%~91.21%。同一年龄下,树高的变异系数略低于胸径的变异系数,远低于材积的平均变异系数,说明材积具有很高的遗传改良潜力。树高,胸径,材积遗传力在不同年份间的变化范围分别为0.586~0.894,0.749~0.852,0.643~0.780,属于中高等遗传力水平,说明毛红椿的各生长性状主要受遗传控制,在种源家系间进行优良性状的选择具有现实意义。不同生长性状表现出较大的变异,较大的遗传分化为选择优良家系创造了条件。

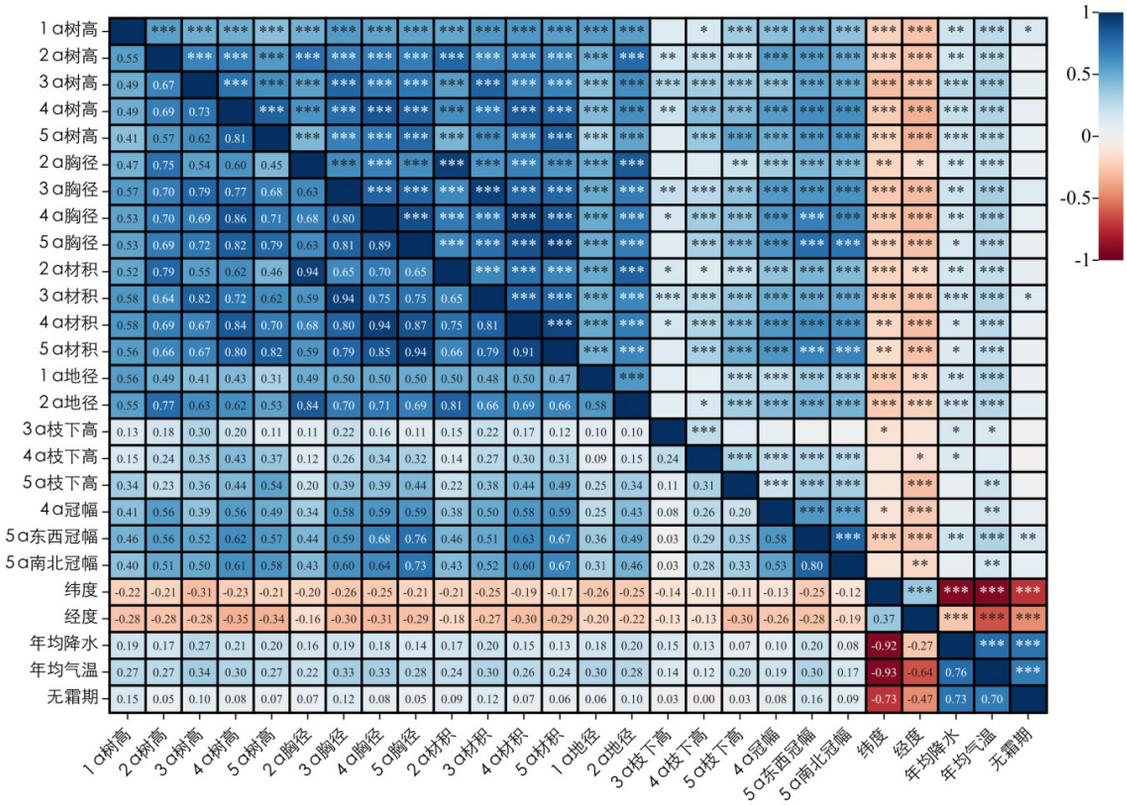
表3　不同林龄生长性状的遗传变异分析

Tab.3　Genetic variation analysis of growth traits in different forest ages

性状 Trait	林龄 Forest age	均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Standard error	变异系数/% Coefficient of variation	遗传力 Heritability
树高 *H*	1 a	0.87±0.02	0.2	1.9	0.28	32.74	0.586
	2 a	2.44±0.04	0.9	4.2	0.69	28.47	0.828
	3 a	3.36±0.06	1.2	5.8	0.89	26.48	0.882
	4 a	4.52±0.07	1.3	7.3	1.15	25.39	0.882
	5 a	5.95±0.11	1.5	13.4	1.78	29.92	0.894
胸径 DBH	2 a	2.42±0.06	0.9	5.8	0.88	36.55	0.749
	3 a	4.46±0.09	1.2	8.8	1.42	31.94	0.764
	4 a	6.06±0.13	1.3	12.1	2.12	35.03	0.852
	5 a	7.87±0.17	2.1	15.3	2.76	35.06	0.827
材积 *V*	2 a	$0.88\times10^{-3}\pm0.5\times10^{-4}$	5.6×10^{-5}	4.9×10^{-3}	9.6×10^{-4}	91.21	0.704
	3 a	$3.7\times10^{-3}\pm1.8\times10^{-4}$	1.3×10^{-4}	1.8×10^{-2}	3.1×10^{-3}	80.81	0.643
	4 a	$8.9\times10^{-3}\pm4.6\times10^{-3}$	1.0×10^{-3}	3.3×10^{-2}	7.5×10^{-3}	81.95	0.757
	5 a	$1.95\times10^{-2}\pm1.0\times10^{-2}$	5.0×10^{-3}	7.8×10^{-2}	1.65×10^{-2}	82.26	0.780
地径 GD	1 a	1.76±0.03	0.4	4.7	0.49	27.28	0.738
	2 a	3.92±0.07	1.1	8.4	1.33	32.17	0.704

2.4　种源性状及其与地理因子相关性分析

毛红椿不同种源家系连年生长性状及其与地理因子的相关性分析结果如图2所示。结果表明同一年树高,胸径之间存在极显著的正相关关系,且相关性较强,相关性系数均大于0.7;枝下高、冠幅与树高、胸径间也存在极显著正相关,且略小于树高胸径之间的相关性系数。树高连年的相关系数在0.419~0.809,胸径连年的相关系数在0.627~0.808,材积连年的相关性系数在0.653~0.913。同一生长性状连续两年的之间的相关系数随着年龄增加而变大,说明可以用前一年生长来预测第二年的生长。毛红椿生长性状与种源地经纬度的相关性分析结果表明,各年份树高、胸径、地径、材积和冠幅都与种源地经度、纬度呈显著负相关,与年平均降水量、年均气温呈显著正相关,且受年均气温影响略大于年均降水量,与无霜期相关不显著。5 a枝下高与经度显著负相关,与年均气温显著正相关,与经度、年均降水量相关性不显著。



***表示P<0.001，**表示P<0.01，*表示P<0.05。

*** indicates P<0.001, ** indicates P<0.01, * indicates P<0.05.

图2 生长性状与地理气候因子相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between growth traits and geographical and climatic factors

2.5 不同种源/家系主成分分析

对毛红椿的各生长性状进行主成分分析，分析结果如表4。将树高、胸径等生长数据经过降维处理后，通过KMO和Bartlett的球形度检验，得出KMO值为0.826，表明这些变量可以进行因子分析；且Bartlrt球形检验，显著性P<0.001，表明变量高度相关。提取1个主成分，其特征值为5.802，累计贡献率为72.528%，代表了毛红椿生长性状的72.528%信息。用x_1、x_2、x_3、x_4、x_5、x_6、x_7、x_8分别表示标准化后的树高、胸径、材积、枝下高，东西冠幅、南北冠幅、树高年增长量、胸径年增长量；用Y表示主成分得分，根据成分矩阵，得出主成分方程：

$$Y=\frac{0.895x_1+0.951x_2+0.938x_3+0.591x_4+0.796x_5+0.793x_6+0.860x_7+0.931x_8}{\sqrt{5.802}}$$

表 4 各性状主成分分析

Tab.4 Principal component analysis of different traits

主要成分因子 Principal component factors	主成分 Component	主要成分因子 Principal component factors	主成分 Component
特征值 Eigenvalue	5.802	东西冠幅 Crown diameter	0.591
贡献率/% Contribution	72.528	南北冠幅 Crown diameter	0.796
树高 Tree height	0.895	材积 Volume	0.793
胸径 Diameter at breast height	0.951	树高年增长量 Annual height increase	0.860
枝下高 Branch height	0.938	胸径年增长量 Annual DBH increase	0.931

根据主成分分析的结果，计算种源及家系综合得分并排序，不同种源家系毛红椿综合得分如表5所示。就2022年底生长性状而言，家系排名为14号>13号>12号>2号>15号>6号>5号>8号>7号>1号>4号。

其中2号、12号、13号、14号家系长势较好,而2号,13号,14号均属江西宜丰种源,12号为湖北宜昌种源,正好为种源综合得分前两位。从种源综合得分来看,湖北宜昌种源>江西宜丰种源>赣州龙南种源>浙江富阳种源>安徽泾县种源。

表5　不同种源/家系综合得分和排名

Tab.5　Comprehensive score and ranking of different provenance/families

家系编号 Family No.	综合得分 Comprehensive scores	排名 Rankings	种源 Provenance	综合得分 Comprehensive scores	排名 Rankings
1号/No.1	−2.033 6	10	安徽泾县 Jing xian, Anhui	−1.836 9	5
2号/No.2	0.920 5	4	江西宜丰 Yifeng, Jiangxi	0.621 8	2
4号/No.4	−1.610 2	11	湖北宜昌 Yichang, Hubei	1.080 2	1
5号/No.5	−0.283 1	7	浙江富阳 Fuyang, Zhejiang	−0.655 6	4
6号/No.6	−0.390 9	6	赣州龙南 Longnan, Ganzhou	0.299 1	3
7号/No.7	−0.807 7	9			
8号/No.8	−0.505 7	8			
12号/No.12	1.080 2	3			
13号/No.13	1.281 7	2			
14号/No.14	1.653 3	1			
15号/No.15	0.299 1	5			

2.6　优良家系遗传增益分析

以20%的入选率初步筛选出12号(湖北宜昌)、13号(江西宜丰)和14号(江西宜丰)为优良家系。入选家系遗传增益如表6所示,入选家系5 a时的树高、胸径及材积的平均值分别为6.86 m、9.22 cm和2.7×10^{-2} m^3,现实增益分别为15.22%、17.11%、40.33%,遗传增益分别为13.60%、14.15%和31.45%。

表6　入选家系生长性状遗传增益分析

Tab.6　Genetic gain analysis of growth traits of selected family

类别 Type	家系编号 Family No.	树高 Tree height		胸径 Diameter at breast height		材积 Volume	
		现实增益/% Realistic gain	遗传增益/% Genetic gain	现实增益/% Realistic gain	遗传增益/% Genetic gain	现实增益/% Realistic gain	遗传增益/% Genetic gain
家系选择 Family selection	12号	10.76	9.62	15.59	12.89	34.31	26.76
	13号	18.18	16.26	15.69	12.98	37.69	29.40
	14号	16.71	14.94	20.06	16.59	48.98	38.20
入选家系平均值 Mean		15.22	13.60	17.11	14.15	40.33	31.45

3　结论与讨论

遗传和变异是育种工作的主要研究内容,也是良种选择工作的基础[21]。因种源地环境不同,长期的自然选择会让同一树种形成不同变异,林木种源变异是选择育种的前提[22]。许多树种的选择育种表明种源家系选择可以取得改良效果。树高、胸径和材积是森林树木生长的重要特征,它们决定着森林树木的经济价值,对林木育种者有着重要研究意义。本研究测定不同种源毛红椿连续5年的树高、胸径等生长性状,探究其生长及变异情况。结果表明毛红椿树高、胸径、材积在参试种源间、家系间均存在极显著差异($P<0.01$),即在种源家系间存在明显遗传变异,说明本研究材料具有较高的遗传潜力,可以对毛红椿群体这些性状进行遗传改良,具有实践价值。毛红椿生长性状在不同区组间的差异则说明环境对其

生长也有影响。前人研究发现香椿、红椿等家系间的树高、胸径均差异显著，说明椿属生长性状差异普遍较大[23-24]。表型变异系数反映不同种源家系间各性状间的变异程度，表型变异系数越大，选择潜力越大，越有利于优良家系的选择。本研究中毛红椿的变异系数均在25.39%以上，属高变异系数，略高于杉木等[25]。不同种源/家系连年生长性状及变异情况差别大，根据连续5年的观测结果，14号家系（江西宜丰种源）各生长性状始终最优，1号家系各生长性状始终最小。14号家系，属江西宜丰种源，其5 a树高达6.94 m，胸径达9.45 cm。因本试验种源家系较少，且未能结合木材材性等进行联合分析，结果有一定局限性，但可为早期生长选择作参考[26]。

遗传力反映基因对生长性状的控制程度，遗传力越大，越能稳定遗传给后代。根据遗传力大小大致划分遗传控制程度：大于0.5为高遗传力，0.2~0.5为中等遗传力；小于0.2为低遗传力。本研究中，毛红椿种源不同林龄树高，胸径和材积的遗传力为0.586~0.894，属高遗传力，而且随着林龄的增加，各性状遗传力呈上升且趋于稳定的趋势，说明遗传因素是影响种源和家系生长的主要因素，也进一步说明毛红椿种源早期选择的可行性。这些遗传力值高于刘军等[27]研究中0.63、0.52，但低于肖兴翠等[24]研究中苗高的遗传力0.976。在红锥种源试验中，其生长性状遗传力也在0.866~0.888[28]。同一群体的各性状遗传力存在一定规律，与家系数量、试验设计及环境等都有关系，甚至是试验林林龄，林龄不同会对选择造成影响。在刘劲宏等[29]对胡桃楸的研究中表明遗传力随林龄增加而增大，不同性状的遗传力随着年龄变化也发生在柳杉、落叶松等树种[30-31]。

相关性分析可以反应各性状之间存在的联系，对了解不同性状之间的关系具有重要作用[32]。本研究中，同一年份各生长性状之间，连年树高、连年胸径之间均表现出极显著正相关，说明生长发育过程中各生长性状协调发展，可以同时进行遗传改良。不同年份生长性状之间的相关关系，说明早期选择具有一定的可靠性，在毛红椿中进行早晚性状相关具有潜力，也可为林木遗传改良提供早期选择的参考[33-34]。从毛红椿生长性状与地理气候因子的相关性来看，不同树龄的树高、胸径、冠幅与降水量、年均温表现出显著正相关；与经度、纬度表现出显著负相关。刘军等[35]在研究毛红椿种实和苗期生长性状地理种源变异中发现地径生长和产地纬度呈现极显著的负相关，这与本研究结果相同。在本研究中，不同种源毛红椿树高胸径的变异模式为双向渐变型，即西部种源生长优于东部种源，南部种源优于北部种源。这种明显的经纬度地理变异模式也存在于苦楝[36]、乳源木莲[37]等中，因此在进行种源选择时可以把种源地的经纬度考虑在内。

遗传增益是评价育种效果的关键参数，可以表明育成群体超出现有群体的多少，体现育种成效。杨孟晴等[38]通过对3 a赤皮青冈生长和性质性状的研究计算育种值，基于主成分筛选出优势家系。本研究通过主成分综合评分，筛选出优良家系14号的树高、胸径、材积的遗传增益分别为13.21%、12.14%、29.07%，高于舒应东等[23]对香椿的研究和晏姝等[39]对南洋楹的研究。

本研究基于连续5年的生长性状，开展了对不同种源/家系毛红椿幼林的综合评价，结果表明，2号、13号、14号家系生长状况良好，均属江西宜丰种源，1号、4号家系生长较为缓慢，均属安徽泾县种源。在连年生长性状与地理气候因子相关性分析中，毛红椿各生长性状除枝下高外，表现出与经纬度显著负相关，与年均温、年降水量显著正相关，可以在人工林培育时综合考虑环境因素。

致谢：江西省林业科技创新专项（201903）同时对本研究给予了资助，谨致谢意！

参考文献 References：

[1] 徐佳文，石福习，张朝晖，等.中亚热带濒危植物毛红椿和南方红豆杉种内与种间竞争差异[J].应用生态学报，2020，31(1)：1-8.

XU J W，SHI F X，ZHANG Z H，et al.Difference in intra- and inter-specific competition of two endangered plant species (*Toona ciliata* var. *pubescens* and *Taxus chinensis* var. *mairei*) in the middle subtropical zone of China[J].Chinese journal of applied ecology，2020，31(1)：1-8.

[2] 黄红兰，钟沃谷，衣德萍，等.未来气候变化对我国毛红椿适生区分布格局的影响预测[J].南京林业大学学报（自然

科学版),2020,44(3):163-170.

HUANG H L, ZHONG W G, YI D P, et al.Predicting the impact of future climate change on the distribution patterns of *Toona ciliata* var. *pubescens* in China[J].Journal of Nanjing forestry university(natural sciences edition), 2020, 44(3): 163-170.

[3] 刀丽平,李恒,张春花,等.攀枝花干热河谷水肥控制对毛红椿(*Toona ciliata* var. *pubescens*)苗期的影响[J].四川林业科技,2018,39(3):44-46.

DAO L P, LI H, ZHANG C H, et al.Impact of water and fertilizer control on *Toona ciliata* var. *pubescens* seedlings in Panzhihua dry-hot valley[J].Journal of Sichuan forestry science and technology, 2018, 39(3): 44-46.

[4] 杜丽波,李金玉,张晓,等.毛红椿皮的化学成分及生物活性研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2022,40(4):162-172.

DU L B, LI J Y, ZHANG X, et al.Chemical constituents and biological activity from the bark of *Toona ciliata* var. *pubescens*[J].Journal of Guangxi normal university(natural science edition), 2022, 40(4): 162-172.

[5] 芦贤博,徐连峰,庞忠义,等.胡桃楸种源家系幼龄期生长变异及选择研究[J].林业科学研究,2022,35(1):20-30.

LU X B, XU L F, PANG Z Y, et al.Variation and selection of seedling growth traits among *Juglans mandshurica* provenances and families[J].Forest research, 2022, 35(1): 20-30.

[6] 刘凯,韩永振,王希贤,等.不同种源福建柏生长性状的差异与评价[J].中南林业科技大学学报,2023,43(3):62-72.

LIU K, HAN Y Z, WANG X X, et al.Difference and evaluation of grow traits of *Fokienia hodginsii* caused by different provenances[J].Journal of central south university of forestry & technology, 2023, 43(3): 62-72.

[7] 谢健.不同种源赤皮青冈幼林生长性状变异及种源选择[J].福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(5):636-640.

XIE J.Variations in growth traits and provenance selection of *Cyclobalanopsis gilv*[J].Journal of Fujian agriculture and forestry university(natural science edition), 2021, 50(5): 636-640.

[8] 洪舟,杨曾奖,张宁南,等.越南黄花梨种源家系生长遗传变异及早期选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(1):25-30.

HONG Z, YANG Z J, ZHANG N N, et al.Genetic variation and juvenile selection of growth traits of *Dalbergia tonkinensis* Prain[J].Journal of Nanjing forestry university(natural sciences edition), 2020, 44(1): 25-30.

[9] 熊启慧,靳藏馥,张露,等.两种源湿地松苗木生长特性和生理生态性状[J].江西农业大学学报,2023,45(2):252-262.

XIONG Q H, JIN C F, ZHANG L, et al.Growth characteristics and ecophysiological traits of *Pinus elliottii* seedlings from two provenances[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(2): 252-262.

[10] 任华东,姚小华,康文玲,等.黑荆树种源和家系的遗传变异与早期选择[J].林业科学,2010,46(3):153-160.

REN H D, YAO X H, KANG W L, et al.Genetic variation and early selection of provenances and families of *Acacia mearnsii*[J].Scientia silvae Sinicae, 2010, 46(3): 153-160.

[11] 潘蓉蓉,钟秋蔚,张露,等.毛红椿AFLP体系优化及引物筛选[J].南方林业科学,2022,50(4):6-10.

PAN R R, ZHONG Q W, ZHANG L, et al.Optimization verification and primer selection of AFLP reaction system of *Toona ciliata* var. *pubescens*[J].South China forestry science, 2022, 50(4): 6-10.

[12] 潘蓉蓉,袁生贵,张露,等.基于CiteSpace的珍稀濒危树种毛红椿研究热点分析[J].生物灾害科学,2021,44(1):77-83.

PAN R R, YUAN S G, ZHANG L, et al.Research hotspots of rare and endangered tree species *Toona ciliata* var.*pubescens* based on CiteSpace[J].Biological disaster science, 2021, 44(1): 77-83.

[13] 郭晓燕,王乔峰,张露,等.凋落叶分解过程对毛红椿种子发芽和幼苗生长的影响[J].江西农业大学学报,2019,41(4):715-722.

GUO X Y, WANG Q F, ZHANG L, et al.Effects of decomposing leaf litter on the seed germination and seedling growth of *Toona ciliata* var. *pubescens*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(4): 715-722.

[14] 陈娟,彭建,肖兴翠,等.红椿与毛红椿半同胞家系早期选择研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(8):17-24.
CHEN J,PENG J,XIAO X C,et al.Early selection study of half sib families of *Toona ciliata* var. *ciliata* & *Toona ciliata* var. *pubescens*[J].Journal of central south university of forestry & technology,2020,40(8):17-24

[15] 潘俊彬,刘远生,张露,等.施肥对毛红椿幼林生长及叶片生理特征的影响[J/OL].广西植物,2023,1-14[2023-12-07] http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20230619.1335.006.html.
PAN J B,LIU Y S,ZHANG L,et al.Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of *Toona ciliata* var. *pubescens*[J/OL].Guihaia,2023,1-14[2023-12-07]http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20230619.1335.006.html.

[16] 刘文剑,金建儿,李彦杰,等.水分和氮磷配比施肥对毛红椿幼苗生长、养分分配及叶绿素荧光特性的影响[J].西部林业科学,2021,50(6):83-90.
LIU W J,JIN J E,LI Y J,et al.Effects of waters fertilization with different nitrogen and phosphorus ratios on the growth,nutrient distribution and chlorophyll fluorescence characteristics of *Toona ciliata* var. *pubescens* seedlings[J].Journal of west China forestry science,2021,50(6):83-90.

[17] 刘军,陈益泰,姜景民,等.毛红椿优树自由授粉子代幼林生长表现[J].浙江林学院学报,2010,27(6):956-960.
LIU J,CHEN Y T,JIANG J M,et al.Growth performance of *Toona ciliata* var. *pubescens* family progeny by open pollination [J].Journal of Zhejiang A & F university,2010,27(6):956-960.

[18] 黄红兰,张露,刘郁林,等.江西毛红椿种源的半同胞家系子代早期测定及其评价[J].安徽农业大学学报,2012,39(3):371-376.
HUANG H L,ZHANG L,LIU Y L,et al.Early selection and evaluation of half-sib progenies of *Toona ciliata* var. *pubescens* from Jiangxi provenances[J].Journal of Anhui agricultural university,2012,39(3):371-376.

[19] WANG Q,PAN J,KE Y,et al.Impact of aspect on arbuscular mycorrhizal fungal diversity and community composition in a natural *Toona ciliata* var. *pubescens* forest in subtropical China[J].Forests,2022,13(12):2100.

[20] 贾婷,杜宣瑾,张露,等.毛红椿种子性状的种源差异及综合评价[J].森林与环境学报,2023,43(5):548-554.
JIA T,DU X J,ZHANG L,et al.Comprehensive evaluation of seed trait and provenance-associated trait differences in *Toona ciliata* var. *pubescens*[J].Journal of forest environment,2023,43(5):548-554.

[21] MWASE W F,SAVILL P S,HEMERY G.Genetic parameter estimates for growth and form traits in common ash(*Fraxinus excelsior* L.)in a breeding seedling orchard at Little Wittenham in England[J].New forests,2008,36(3):225-238.

[22] ZHANG Z,JIN G,FENG Z,et al.Joint influence of genetic origin and climate on the growth of *Masson pine* (*Pinus massoniana* Lamb.)in China[J].Scientific reports,2020,10(1):46-53.

[23] 舒应东,蒙兰杨,吴远媚,等.广西香椿半同胞家系子代测定及早期选择[J].热带农业科学,2023,43(4):16-21.
SHU Y D,MENG L Y,WU Y M,et al.Progeny determination and early selection of half sib families of *Toona sinensis* in Guangxi [J].Chinese journal of tropical agriculture,2023,43(4):16-21.

[24] 肖兴翠,龚详,张春花,等.红椿与毛红椿半同胞家系苗期生长变异与家系选择[J].湖南林业科技,2020,47(3):1-8.
XIAO X C,GONG X,ZHANG C H,et al.Seedling growth variation and selection of half-sib families of *Toona ciliata* var. *ciliata* and *Toona ciliata* var. *pubescens*[J].Hunan forestry science & technology,2020,47(3):1-8.

[26] QUE Q,LI C,LI B,et al.Multi-level genetic variation and selection strategy of *Neolamarckia cadamba* in successive years [J].Forests,2021,12(11):1455.

[27] 刘军,陈益泰,姜景民,等.毛红椿优树自由授粉子代生长性状的早期测定[J].林业科技开发,2010,24(4):36-38.
LIU J,CHEN Y T,JIANG J M,et al.Early evaluation on growing traits for open pollination progeny testing from *Toona ciliata* var. *pubescens* plus trees[J].Journal of forestry engineering,2010,24(4):36-38.

[28] 方碧江.红锥种源/家系生长性状遗传变异分析及选择[J].亚热带农业研究,2021,17(1):22-29.
FANG B J.Analysis and selection of genetic variation on growth traits among provenances / families of *Castanopsis hystrix* [J].Subtropical agriculture research,2021,17(1):22-29.

[29] 刘劲宏,李志新,张含国,等.胡桃楸不同种源及家系间生长性状的遗传变异[J].东北林业大学学报,2023,51(8):

9-17.

LIU J H, LI Z X, ZHANG H G, et al. Analysis of variation in growth traits of different species and families of *Juglaus maudshurica*[J].Journal of northeast forestry university, 2023, 51(8): 9-17.

[30] DONG M, FAN Y, WU Z, et al. Age - age correlations and early selection for growth traits in 40 half-sib families of *Larix principis-rupprechtii*[J].Journal of forestry research, 2019, 30(6): 2111-2117.

[31] HIRAOKA Y, MIURA M, FUKATSU E, et al. Time trends of genetic parameters and genetic gains and optimum selection age for growth traits in sugi (*Cryptomeria japonica*) based on progeny tests conducted throughout Japan[J].Journal of forest research, 2019, 24(5): 303-312.

[32] FUKATSU E, HIRAOKA Y, MATSUNAGA K, et al. Genetic relationship between wood properties and growth traits in *Larix kaempferi* obtained from a diallel mating test[J].Journal of wood science, 2014, 61(1): 10-18.

[33] KUMAR S, LEE J. Age-age correlations and early selection for end-of-rotation wood density in radiata pine[J].Forest genetics, 2002, 9(4): 323-330.

[34] 王云鹏, 张蕊, 周志春, 等. 木荷优树自由授粉家系早期生长性状遗传变异动态规律[J]. 林业科学, 2020, 56(9): 77-86.

WANG Y P, ZHANG R, ZHOU Z C, et al. Dynamic patterns of genetic variation in early growth traits of the open-pollinated families of *Schima superba* plus tree[J].Scientia silvae Sinicae, 2020, 56(9): 77-86.

[35] 刘军, 张海燕, 姜景民, 等. 毛红椿种实和苗期生长性状地理种源变异[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 55-59.

LIU J, ZHANG H Y, JIANG J M, et al. Geographic variation of seed/fruit and seedling growing traits in *Toona ciliata* var. *pubescens*[J].Journal of Nanjing forestry university(natural sciences edition), 2011, 35(3): 55-59.

[36] 何霞, 邓成, 杨嘉麒, 等. 苦楝种源间生长性状的早期地理变异分析[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(7): 45-54.

HE X, DENG C, YANG J Q, et al. Geographic variation of growth traits in early stage for *Melia azedarach* among different provenances[J].Journal of Beijing forestry university, 2018, 40(7): 45-54.

[37] 李因刚, 周志春, 金国庆, 等. 乳源木莲苗生长和形态的地理种源分化[J]. 林业科学研究, 2007, 20(1): 35-39.

LI Y G, ZHOU Z Z, JIN G Q, et al. Geographical differentiation for seedling growth and morphology of *Manglietia yuyuanensis* provenances[J].Forest research, 2007, 20(1): 35-39.

[38] 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.

[39] 晏姝, 韦如萍, 王润辉, 等. 南洋楹半同胞家系苗期变异及选择[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(6): 1-8.

YAN S, WEI R P, WANG R H, et al. Variation and selection of half-sib families of *Falcataria falcata* during seedling stage [J/OL].Journal of Zhejiang A&F university, 2023, 40(6): 1-8.