

基于生长与材性性状的灰楸优良无性系初选

于晓池^{1,2}, 张鹏¹, 王军辉², 易飞², 麻文俊^{2*}

(1.东北林业大学, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 林木遗传育种全国重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京, 100091;)

摘要: 【目的】为筛选速生, 材质优良的灰楸无性系。【方法】本研究测定了来自不同生态区(4个省份)的200个灰楸无性系1年, 9年, 11年和13年生的生长性状(树高和胸径), 13年生的材性性状(Pilodyn值和弹性模量), 并进行了遗传变异分析和重复力估算, 分析了性状间, 及性状与地理气候因子的相关性; 利用综合评价法结合育种值选择优良无性系。【结果】灰楸各性状在无性系间差异极显著, 变异系数介于12.12%-26.17%, 重复力介于0.79-0.97。9年生, 11年生和13年生间的生长性状显著相关; 11年生和13年生生长和材性性状呈极显著负相关; 9年生, 11年生和13年生的生长性状和13年生的Pilodyn值与海拔呈正相关, 与经度呈负相关。【结论】早期选择生长和材性优良无性系的的适宜树龄为11年生, 选择出9个生长优良无性系, 6个优质木材无性系, 3个生长与材性性状均较优的无性系, 为灰楸无性系进一步优选奠定基础。此外, 西部高海拔地区的灰楸生长快, 而东部低海拔地区的灰楸材性较好, 可为不同生态区灰楸无性系的选择提供参考。**关键词:** 灰楸, 遗传变异, 综合评价法, 优良无性系选育

Primary Selection of Excellent *Catalpa fargesii* Clones Based on Growth and Wood Properties

Abstract: 【Objective】 To select excellent clones characterized by fast growth and high-quality wood of *Catalpa fargesii* Bur. 【Method】 Growth traits, including height and diameter at breast height (DBH) at 1, 9, 11 and 13 years old, were collected and wood properties, including the Pilodyn value and elastic modulus at age 13 of 200 clones of *C. fargesii* from different ecological areas (four provinces), were measured. 【Result】 Genetic variation analysis and repeatability estimation were carried out. The correlation between the characteristics and the correlation between the characteristics and the geographical and climatic factors were analyzed. Excellent clones were selected by a comprehensive evaluation method combined with breeding values. The traits of *C. fargesii* were significantly different among the clones. The coefficient of variation (CV) ranged from 12.12% to 26.17%, and the repeatability (R) ranged from 0.79 to 0.97. The growth traits among ages of 9, 11 and 13 were significantly correlated, and the growth traits at ages of 9, 11 and 13 and Pilodyn values at the age of 13 were positively correlated with altitude and negatively correlated with longitude. Tree growth at ages of 11 and 13 showed a high negative correlation with wood properties. 【Conclusion】 The suitable tree age for the early selection of clones with excellent growth and wood properties is 11 years old. Nine clones with excellent growth, six clones with high-quality wood and three clones with great growth and wood properties were selected, which laid a foundation for further optimization of *C. fargesii* clones. Additionally, *C. fargesii* clones in the western and high-altitude areas featured fast growth, while those in the eastern and low-altitude areas had better wood properties. This study serves as a reference for the selection of *C. fargesii* clones in different ecological areas.

Key words: *Catalpa fargesii*; genetic variation; comprehensive evaluation method; breeding value; excellent clone breeding.

树木具有丰富的遗传多样性, 这是由遗传和环境因素引起的 (Neale *et al.*, 2011)。利用这些遗传变异可进行选择性育种, 对树木进行遗传改良。由于林木各种性状存在较强的早晚遗传相关性, 可依据幼龄期性状对其成熟期性状作出预测。这使得早期选择成为一种有效的育种策略, 能够极大地缩短育种周期 (潘惠新等, 1997)。朱 (2022) 等人利用一年生美洲黑杨 (*Populus deltoides*) 无性系生长参数, 筛选出77个可用于区域化试验的优良无性系; 舒 (2018) 等人测定170个亚美马褂木 (*Liriodendron sino-americanum*) 无性系1-8年生的胸径、树高和材积, 确定3龄幼树可用于早期选择, 由此选择出8个速生无性系。环境差异会造成林木生长和材性的差异, 因此, 分析目标性状与种源地地理气候因子相关性, 可以为种质的选择提供依据, 提高选择效率。如张等 (2016) 对17个种源地闽楠 (*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang) 进行生长差异分析, 筛选出浙江丽水等闽楠生长较好的产地。张等 (2018) 通过3个种源映山红 (*Rhododendron simsii*) 的光合参数差异计算, 及其与环境因子的相关性分析, 确定安徽种源为优良生长适应性资源。

灰楸 (*Catalpa fargesii* Bur.) 为紫葳科 (Bignoniaceae) 梓属 (*Catalpa*) 乔木, 其材质优良, 根系发达, 具有很强的固土抗风、耐旱耐寒能力。灰楸主要分布于甘肃省、陕西省、山西省、河北省和河南省等地 (赵秋玲, 2018), 广泛的生态分布幅度使之具有丰富的遗传变异 (Hamrick *et al.*, 1992), 优良无性系选育潜力巨大。赵秋玲等根据 2 年生灰楸的生长和叶部性状对 137 份种质资源进行多样性分析, 揭示了灰楸无性系表型性状的差异主要由遗传因素造成 (赵秋玲, 2018); 凌娟娟 (2019) 等对 33 个 5 年生灰楸无性系进行遗传变异分析, 初步筛选出 6 个速生丰产良种和 4 个优质用材无性系用于定向培育。出于对优质木材的需求不断增加, 选择出速生且材性优良的灰楸无性系, 用于后续人工林营建显得十分迫切和必要。

本研究以来自 4 个不同省份的 200 份灰楸种质无性系为对象, i 通过对其 1 年生、9 年生、11 年生和 13 年生的生长性状与 13 年生的材性性状进行测定分析, 揭示灰楸的变异水平; ii 分析不同树龄各指标间相关性, 以及各指标与种源地地理气候因子的相关性, 以确定灰楸无性系选择的适宜树龄和种源地; iii 基于生长、材性, 以及育种值初选出优良的灰楸无性系, 为开展分生态区生产力和稳定性评价提供材料。

1 材料与方法

1.1 材料来源

2007 年, 在甘肃省、陕西省、山西省和河南省开展灰楸种质资源全面调查收集, 收集材料为 1 年生小枝, 共收集种质 267 株。2008 年, 在甘肃省天水市秦州区嫁接扩繁 (无性系化), 每株嫁接扩繁 36 株, 并于当年进行苗期生长指标和表型指标测定, 共测定无性系 200 个。2009 年, 在甘肃省小陇山林业实验局林业科学研究所沙坝实验基地营建种质资源对比试验林, 采用随机完全区组设计, 4 次重复, 参试无性系 200 个。参试无性系具体来源信息见图 1 和表 1。

表 1 参试无性系来源
Table 1. Source of tested clones.

省 Province	市 City	无性系数 Number of clones	海拔/m Altitude	经度 E Longitude	纬度 N Latitude	年均气温/℃ Annual mean temperature	平均降雨量/mm Annual precipitation
	天水 Tianshui	97	1509.48	105.72	34.57	10.93	592.98
甘肃 Gansu	陇南 Longnan	22	1295.68	105.61	33.80	11.22	716.33
	庆阳 Qingyang	36	1417.50	106.84	35.19	9.56	542.58
	平凉 Pingliang	8	1318.19	107.39	35.42	9.65	556.61
陕西 Shaanxi	咸阳 Xianyang	3	1084.00	107.51	35.12	9.10	584.00
	宝鸡 Baoji	1	910.00	107.06	34.36	9.10	584.00
山西 Shanxi	临汾 Linfen	17	790.35	111.16	35.86	10.47	556.71
	运城 Yuncheng	5	447.20	110.42	34.97	14.10	530.00
河南 Henan	洛阳 Luoyang	11	395.00	112.45	34.62	14.34	565.27



图 1 参试无性系来源。于甘肃（■）、陕西（■）、山西（■）和河南（■）的 9 个种源地（星号）中，共取样了 200 个无性系。

Figure 1. Distribution map of tested clones. A total of 200 clones were sampled across the 9 Provenance (asterisk) from Gansu (■), Shaanxi (■), Shanxi (■) and Henan Province(■).

1.2 试验地概况

试验地位于甘肃省天水市麦积区（105°53'24.468" E，34°34'14.484" N），隶属于甘肃省小陇山林业实验局林业科学研究所。该地地处秦岭西段，土壤为黄绵土，年平均气温 10.7℃，≥10℃ 积温 3359℃，极端高温 39℃，极端低温-19.2℃，无霜期约 190 d，年降水量 600 mm 以上。

1.3 指标测定

分别于 2008 年、2016 年和 2018 年测定 1 年生、9 年生和 11 年生灰楸无性系的生长性状，于 2020 年测定 13 年生灰楸的生长性状和材性性状。具体测定方法为，每个无性系随机选取生长正常的 3 株，生长指标树高和胸径的测定精确度分别为 0.01 m 和 0.01 cm；材性指标的测定方法为，使用 Pilodyn 木材检测仪（6J, PROCEQ, Switzerland）3 次测定胸径处南北向的 Pilodyn 值（Cown *et al.*, 1978; Yamashita, *et al.*, 2007）取南北向的平均值作为单株 Pilodyn 值（0.01 mm）；使用 Director ST300 活立木力学性质测定仪（新西兰 Fibre-gen 公司）3 次测定胸径处的弹性模量，取平均值作单株弹性模量（0.01 GPa）（Fukatsu *et al.*, 2014; Pâques *et al.*, 2010）。

1.4 数据分析

用 Excel 2013 整理和分析数据，用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析和相关性分析，利用 Gilmour（2009）的方法通过 ASReml 进行育种值的计算，用 RStudio 进行遗传多样性指数（ H' ）的计算， $H' = -\sum P_i \ln P_i$ ， P_i 为某性状第 i 个代码出现的概率（刘长友等，2006）。用 Graphpad 和 TBtool 作图。

变异系数：

$$CV = SD / \bar{X}$$

式中：CV 为变异系数；SD 为标准差； \bar{X} 为无性系平均值。

无性系重复力采用续九如（Xu *et al.*, 2006）的方法进行估算：

$$R = 1 - 1/F$$

式中：R 为重复力；F 值为方差分析中的 F 值。

采用布雷金多性状综合评定法对无性系进行综合评定（解孝满等，2008），计算公式为：

$$Qi = \sqrt{\sum_{j=1}^n a_i}, \quad a_i = X_{ij}/X_{jmax}$$

式中： Qi 为综和评价值； X_{ij} 为第 i 个无性系某一性状的值； X_{jmax} 为某一性状的最优值， n 为评价指标的个数）。由于本研究中，需要挑选 Pilodyn 值较小的无性系，因此在计算 Pilodyn 值的 a_i 值时对公式进行改进， $a_i = -X_{ij}/X_{jmax}$ 。

遗传增益估算的计算公式为（朱之悌等，1989）：

$$\Delta G = RW / \bar{X}$$

式中： W 为选择差； R 为性状的重复力； \bar{X} 为某一性状的平均值。

2 结果与分析

2.1 灰楸无性系生长和材性性状总体变异分析

参试的灰楸 200 个无性系在 1 年生、9 年生、11 年生和 13 年生的各性状方差分析结果显示（表 2），树高、胸径、Pilodyn 值和弹性模量在无性系间均存在极显著差异（ $p < 0.01$ ）。1 年生灰楸无性系树高和胸径的均值分别为 1.65 m 和 16.70 mm，变异幅度分别为 1.07-2.32 m 和 7.60-21.94 mm，到 13 年生均值分别为 6.31 m 和 92.91 mm，变异幅度则分别为 3.60-8.00 m 和 43.00-152.00 mm 之间。1、9、11 和 13 年生灰楸无性系树高和胸径的变异系数均介于 13.71%-26.17%（表 2），Pilodyn 值和弹性模量的变异系数分别为 12.12% 和 15.59%。1 年生、9 年生、11 年生和 13 年生的树高遗传多样性指数 H' 分别为 2.083 、

表 2 灰楸无性系生长和木材性状方差分析和重复性估算

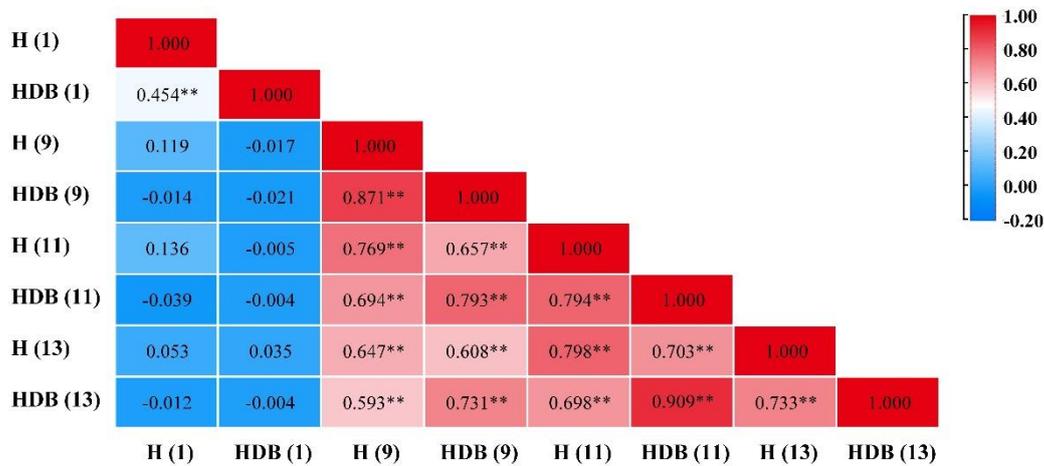
Table 2. Variance analysis and repeatability estimation of the growth and wood characteristics of the *C. fargesii* clones.

树龄 Age	1 年 1 a		9 年 9 a		11 年 11 a		13 年 13 a			
性状 Characters	苗高/m Height	地径/mm Diameter	树高/m Height	胸径/mm Diameter	树高/m Height	胸径/mm Diameter	树高/m Height	胸径/mm Diameter	Pilodyn 值/mm Pilodyn value	弹性模量/GPa MOE
均值±标准差 Mean±SD	1.65±0.23	16.70±2.60	5.15±0.92	60.22±13.15	6.28±0.98	76.85±14.45	6.31±0.86	92.91±23.59	14.01±1.70	9.22±1.44
变幅 Amplitude	1.07-2.32	7.60-21.94	2.45-7.18	23.09-94.77	3.20-9.20	29.84-133.08	3.60-8.00	43.00-152.00	8.92-25.00	4.76-15.45
变异系数/% CV	13.73	15.59	17.81	21.84	15.60	18.80	13.71	26.17	12.12	15.59
F 值 F Value	29.12**	6.35**	7.58**	6.13**	8.62**	4.77**	10.12**	5.08**	8.27**	3.92**
重复力 Repeatability	0.97	0.84	0.87	0.84	0.88	0.79	0.90	0.80	0.88	0.75
遗传多样性指数 H'	2.083	2.040	2.043	1.830	1.939	1.983	1.898	2.042	1.825	1.854

2.043、1.939 和 1.898，随树龄增加而逐渐减小。4 个树龄的胸径 H' 均介于 1.830-2.042 之间。Pilodyn 值和弹性模量的 H' 分别为 1.825 和 1.854。因此，灰楸种质的生长和材性性状均存在丰富的遗传变异。1 年生灰楸树高和胸径的重复力最高，分别为 0.97 和 0.84；9 年生、11 年生和 13 年生的树高和胸径的重复力均略低于 1 年生，但树高依旧介于 0.87-0.90，胸径介于 0.79-0.84。13 年生无性系的 Pilodyn 值和弹性模量的重复力分别为 0.88 和 0.75。

2.2 灰楸无性系生长性状、材性性状和地理气候因子的相关性分析

灰楸无性系生长的相关性：对 1、9、11 和 13 年生前树高、胸径进行相关分析（图 2），1 年生灰楸无性系的树高和胸径与 9、11 和 13 年生的树高、胸径的相关性均不显著 ($p>0.05$)，9、11 和 13 年生灰楸无性系间的生长性状均极显著正相关 ($p<0.01$)；各树龄内灰楸无性系的树高和胸径均极显著正相关。因此，灰楸无性系在 1 年生时的树高和胸径不能完全反应中龄林的生长水平，9 年后生长方趋于稳定。



注：H，树高（苗高）；HDB，胸径（地径）。括号中的数字表示这棵树的树龄。*表示相关性在 0.05 水平上显著，**表示相关性在 0.01 水平上显著。

图 2 灰楸无性系 1 年、9 年、11 年和 13 年生生长特性相关性分析

Figure 2. Correlation analysis of the growth characteristics of *C. fargesii* clones at 1, 9, 11 and 13 years.

灰楸无性系生长性状与材性的相关性：1、9、11、和 13 年生的生长性状与 13 年生的材性性状的相关性分析表明（图 3），1 年生时的生长性状与材性性状相关性不显著。9 年生后，胸径与弹性模量呈显著或极显著负相关，且相关性随树龄增大而增强，但树高与弹性模量的相关性均未达到显著水平。Pilodyn 值与树高呈正相关关系，只在 11 年生时达到极显著；而 11 年生和 13 年生的胸径与 Pilodyn 值则为极显著正相关。由此可知，灰楸无性系在 11 年生后的生长性状才与材性性状显示出较高的相关性，其中胸径与材性性状的相关性随生长时间不断增强；总体表现为生长越好，Pilodyn 值越大，弹性模量越小。

灰楸无性系生长和材性与地理气候因子的相关性：对 13 年生灰楸的生长和材性性状与种源地的主要地理气候因子进行相关性分析（图 4）。树高和胸径都与海拔呈显著正相关，与经度和年均温呈负相关；Pilodyn 值与海拔和年均降雨量呈显著正相关，与经度呈极显著负相关；弹性模量只与年均降雨量呈极显著负相关。因此，种源地海拔越高、地理位置越偏西，年均温越低的无性系，生长更优；东部低海拔种源地的无性系 Pilodyn 值较小；年降雨量越小，Pilodyn 值越小，弹性模量越高。

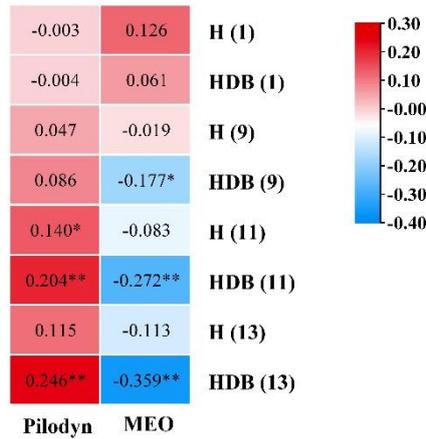
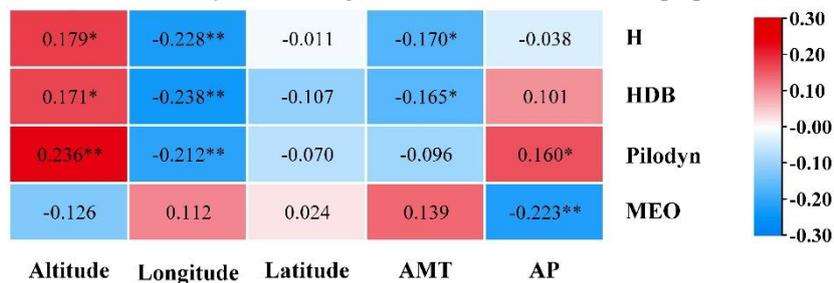


图3 灰楸无性系生长与木材性状相关性分析

Figure 3. Correlation analysis between growth characteristics and wood properties of *C. fargesii* clones.



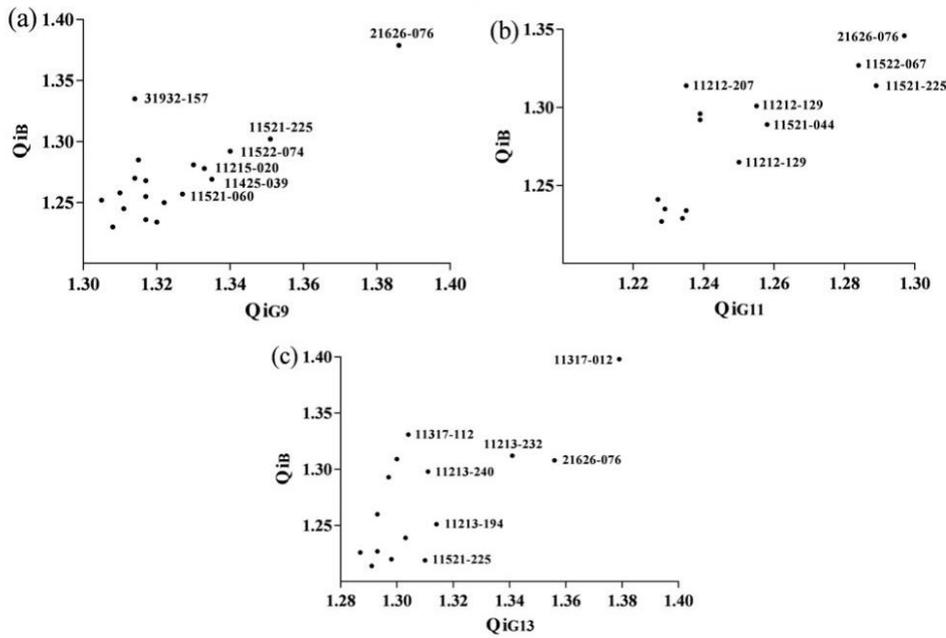
注: AMT, 年均温; AP, 年降水量。

图4 13年生灰楸无性系生长和木材性状与地理和气候因子的相关性分析。

Figure 4. Correlation analysis between growth and wood properties with geographical and climatic characteristics of the 13-year-old *C. fargesii* clones.

2.3 灰楸无性系综合评价

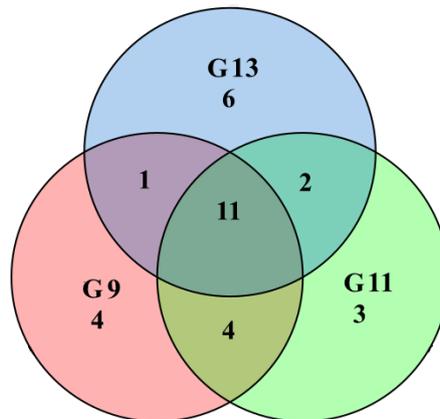
利用生长性状评价无性系: 分别利用 9、11 和 13 年生的树高和胸径对灰楸无性系的生长情况进行综合评价, 以 10% 的入选率对无性系进行选择 (图 5a-c), 3 个树龄的入选结果见图 5。9 年生入选的 20 个无性系树高和胸径的平均值分别为 6.48 m 和 80.93 mm, 较总体平均值高 20.52% 和 25.59%, 遗传增益分别为 22.51% 和 28.89%。11 年生入选的 20 个无性系树高和胸径的平均值分别为 7.67 m 和 99.62 mm, 较总体平均值高 18.12% 和 22.86%, 遗传增益分别为 19.44% 和 23.41%。13 年生入选的 20 个无性系树高和胸径的平均值分别为 7.44 m 和 122.89 mm, 较总体平均值高 15.19% 和 24.40%, 遗传增益分别为 16.17% 和 25.82%。结果表明, 选择的优良无性系树高和胸径的均值高于总体均值 15%-25%, 树高的遗传增益介于 19.44%-22.51% 之间, 胸径的遗传增益介于 22.86%-28.89% 之间。3 个树龄都入选的无性系有 11 个 (图 6), 分别为: 21626-076、11213-232、11212-129、11522-074、11216-206、11213-194、11213-240、11521-225、11212-130、11522-067 和 11215-020, 它们的生长性状稳定, 一直处于较优水平; 9 年生时未入选, 11 和 13 年生时都入选的无性系有 2 个, 分别为 11317-012 和 11521-044, 尤其是 11317-012 的排名均为第一, 说明其具有较大的生长潜力。计算 200 个无性系树高和胸径的育种值, 并对其进行综合评价。生长较优的这 13 个无性系中, 11212-129 (1.287)、11215-020 (1.240)、11213-194 (1.237)、11521-225 (1.277)、11522-067 (1.260)、21626-076 (1.377)、11213-240 (1.290)、11213-232 (1.263) 和 11521-044 (1.258) 等 9 个无性系生长性状育种值的综合评价结果均大于 200 个无性系生长性状育种值的综合评价的平均值 (0.994)。



注：QiB (a-c)，树高与胸径育种值的综合评价指数。QiG9、QiG11 和 QiG13 分别代表 9 年生、11 年生和 13 年生灰楸树高和胸径的综合评价指数。

图 5 基于生长性状的 200 个灰楸无性系的综合评价

Figure 5. Qi values of 200 *C. fargesii* clones based on growth traits by comprehensive evaluation methods.

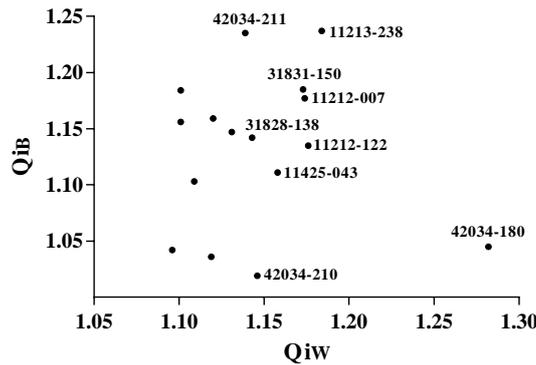


注：G7、G9 和 G11 分别代表 7 年生、9 年生和 11 年生时根据生长性状综合评价选出的 20 个优良无性系。

图 6 7 年生、9 年生和 11 年生生长优良灰楸无性系韦恩图

Figure 6. Wayne diagram of excellent growth clones selected at the ages of 9, 11 and 13. G9, G11 and G13 represent 20 excellent clones selected according to the comprehensive evaluation of growth traits at the ages of 9, 11 and 13, respectively.

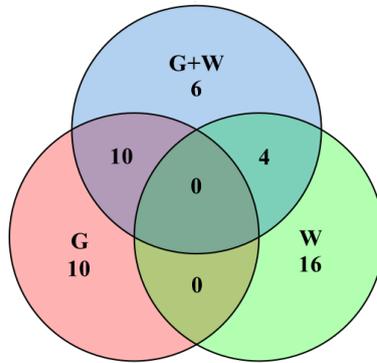
材性性状评价无性系：利用 13 年生的 *Pilodyn* 值和弹性模量为评价指标对灰楸无性系的材性进行综合评价，以 10% 的入选率对无性系进行选择，入选的 20 个无性系见图 7。*Pilodyn* 值和弹性模量的平均值分别为 11.83 mm 和 12.00 GPa，*Pilodyn* 值较总体平均值低 18.43%，弹性模量较总体平均值高 23.17%，遗传增益分别为 13.70% 和 22.62%。根据材性性状入选的 20 个无性系与根据生长性状入选的无性系间无重合（图 8）。对这 20 个无性系的 *Pilodyn* 值和弹性模量的育种值进行计算，并进行综合评价。发现 11213-238 (1.237)、42034-211 (1.235)、42034-175 (1.262)、11213-236 (1.159)、11213-089 (1.184) 和 11213-081 (1.156) 等 6 个无性系材性性状育种值的综合评价结果均大于 200 个灰楸无性系的平均值 (1.019)，可用于灰楸材性优良无性系的选育。



注：QiB，Pilodyn 值和弹性模量育种值的综合评价指数；QiW，Pilodyn 值和弹性模量的综合评价指数。

图 7 基于木材性状的 200 个灰楸无性系的综合评价

Figure 7. Qi values of 200 *C. fargesii* clones based on wood traits by comprehensive evaluation methods. QiB, Comprehensive evaluation of the breeding values of the Pilodyn value and MOE; QiW, comprehensive evaluation of the Pilodyn value and MOE.

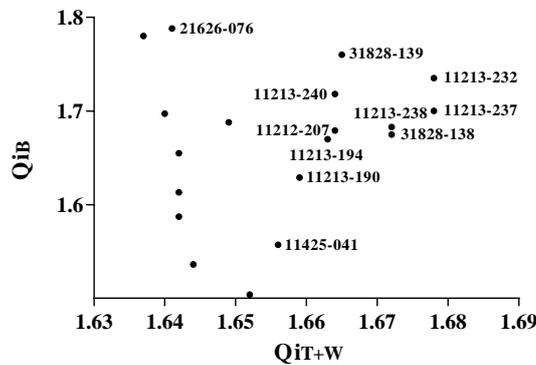


注：G，根据生长性状综合评价筛选出的 20 个生长优良无性系；W，根据材性性状综合评价筛选出的 20 个材性优良无性系；G+W，根据生长和材性性状的综合评价，筛选出 20 个生长和材性优良无性系。

图 8 根据生长，材性，生长和材性性状筛选的优良灰楸无性系韦恩图

Figure 8. Wayne diagram of excellent clones selected for growth, wood and growth and wood properties.

生长与材性性状联合评价无性系：利用 13 年生的树高、胸径、Pilodyn 值和弹性模量为评价指标对灰楸无性系进行综合评价，以 10% 的入选率对无性系进行选择，入选的 20 个无性系见图 9。入选无性系的树高、胸径、Pilodyn 值和弹性模量的平均值分别为 7.24 m、109.62 mm、11.83 mm 和 12.00 GPa；树高、胸径和弹性模量比总平均值分别高 12.85%、15.24% 和 8.62%，Pilodyn 值较总体平均值低 12.94%；4 个性状的遗传增益分别为 13.20%、14.39%、4.29% 和 7.05%。相较于用生长性状或材性性状评选出的无性系，生长与材性性状联合选择的 20 个无性系的树高、胸径、Pilodyn 值和弹性模量的平均值较总平均值的增加量和遗传增益都略有减小。



注：QiB，生长和材性性状育种值的综合评价指数；QiT+W，生长和材性性状综合评价指数。

图 9 基于生长和材性性状的 200 个灰楸无性系的综合评价

Figure 9. Qi values of the 200 *C. fargesii* clones based on growth and wood traits by comprehensive evaluation.

入选的 20 个无性系中, 11216-206、11213-232、11213-237、11213-240、11213-194、11213-006、11212-130、31829-145、21626-076 和 11318-164 与利用生长性状选择出的无性系重合(图 8), 说明这 10 个无性系的入选是由于其生长情况良好; 31828-138、11213-238、11425-041 和 42034-180 与利用材性性状选择出的无性系重合, 它们的入选是由于其材性较优; 而 31828-139、11212-207、11213-190、11214-102、11215-031 和 11213-242 等 6 个无性系树高介于 7.00 m-7.67 m 之间, 胸径介于 97.67 mm-107.33 mm 之间, Pilodyn 值介于 9.17 mm-10.92 mm 之间, 弹性模量介于 9.16 GPa-10.92 GPa 之间, 它们的入选是由于生长性状和材性性状较为均衡, 都处于中上水平。这 6 个无性系的生长或材性虽不是最优的, 却是能兼顾速生和优质的无性系。对这 20 个无性系的生长和材性性状育种值进行综合评价, 11213-232(1.700)、11213-240(1.718)、11212-207(1.679)、11213-194(1.670)、11213-190(1.629)、11212-130(1.688) 和 11213-242(1.697) 等 7 个无性系生长和材性性状育种值的综合评价结果均大于 200 个灰楸无性系的平均值(1.624), 可用于生长材质均优良的无性系的选育。

2.4 入选无性系种源地环境因子分析

分析不同树龄入选优良无性系的种源地发现(表 3), 生长性状综合评价无性系入选率最高的种源地为天水(45%-60%), 其次为平凉(20%-25%); 根据材性综合评价入选率高低依次为天水(55%)、洛阳(25%)和临汾(10%); 生长与材性联合选择入选率最高的城市为天水(65%), 第二是临汾(15%), 而洛阳、陇南、庆阳和咸阳的入选率均为 5%。甘肃省天水市收集无性系 97 个, 占总种质的 48.5%, 而根据 9 年生和 11 年生的生长性状选择出的无性系有 12 个来自天水, 入选率为 60%, 根据 13 年生材性性状入选和生长和材性联合评价入选的无性系中, 来自天水的入选率分别为 55%和 65%, 均大于天水市种源的总种质占比; 甘肃省平凉市采集种质 8 份, 占总种质的 4%, 根据 9、11 和 13 年生的生长性状综合评价入选率分别为 20%、25%和 25%, 远大于平凉市种源的总种质资源占比; 山西省临汾市收集种质资源 17 份, 占总种质的 8.5%, 根据材性性状和生长材性联合评价的入选率为 10%和 15%; 河南省洛阳市采集种质 11 份, 占总种质的 5.5%, 根据材性性状入选了 5 份种质, 入选率为 25%, 大于总种质资源占比。

将各市的无性系入选率结合地理气候因子(表 1)进行分析, 天水市种源地平均海拔 1 509.48 m, 位列 9 个地区第 1 名, 平均经度 E105.07°, 在 9 个城市中经度最小; 平凉市种源地平均海拔 1 318.19 m, 位列第 2 名, 平均经度 E107.39°, 小于其他种源地的经度; 临汾市和洛阳市种源地平均海拔为 790.35 m 和 395.00 m, 位列第 7 和第 9 名, 经度分别为 E111.16°和 E112.45°, 排名第 2 和第 1。结果表明, 甘肃省天水市和平凉市海拔较高, 地理位置偏西, 其种质生长性状较好, 根据生长入选的无性系占比较高; 临汾市和洛阳市海拔较低, 地理位置偏东, 其种质材性性状较好, 根据材性入选的无性系占比较高。

表 3 各省市灰楸优良无性系入选率

Table 3 Selection rate of excellent clones of *C. fargesii* clones in various provinces and cities

省 Province	市 City	总无性系数/ 率%		入选个数/率% (2016 生长性 状)		入选个数/率% (2018 生长性状)		入选个数/率% (2020 生长性 状)		入选个数/率% (2020 材性性状)		入选个数/率% (2020 生长性状和 材性性状)	
		Number / rate of clones	Number / rate of clones	Number / rate of candidates (2016 Growth traits)	Number / rate of candidates (2018 Growth traits)	Number / rate of candidates (2020 Growth traits)	Number / rate of candidates (2020 Wood properties)	Number / rate of candidates (2020 Growth&Wood properties)					
甘肃 Gansu	天水 Tianshui	97	48.50	12	60.00	12	60.00	9	45.00	11	55.00	13	65.00
	陇南 Longnan	22	11.00	1	5.00	1	5.00	4	20.00	0	0.00	1	5.00
	庆阳 Qingyang	36	18.00	1	5.00	1	5.00	0	0.00%	2	10.00	1	5.00
	平凉 Pingliang	8	4.00	4	20.00	5	25.00	5	25.00	0	0.00	0	0.00
陕西 Shaanxi	咸阳 Xianyang	3	1.50	1	5.00	1	5.00	1	5.00	0	0.00	1	5.00

	宝鸡 Baoji	1	0.50	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
山西 Shanxi	临汾 Linfen	17	8.50	0	0.00	0	0.00	1	5.00	2	10.00	3	15.00
	运城 Yuncheng	5	2.50	1	5.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00%	0	0.00
河南 Henan	洛阳 Luoyang	11	5.50	0	0.00	0	0.00	0	0.00	5	25.00	1	5.00

3 讨论

3.1 灰楸种内变异丰富，优良无性系选育潜力较大

树木具有丰富的遗传变异，选择性育种可依据育种目标，从丰富的育种资源中选择优良的生产材料进行推广应用，实现对树木的遗传改良 (Mwase *et al.*, 2008)。林木无性系的遗传变异水平很高，例如，楸树 (*Catalpa bungei*) (肖遥等, 2017)、滇楸 (*Catalpa fargesii* f. *duclouxii*) (肖遥等, 2019)、White Poplar (*Populus alba* L.) (Zhao *et al.*, 2013) 和青海云杉 (*Picea crassifolia* Kom.) (李青粉等, 2015) 的生长或材性等指标在无性系间均存在极显著差异，变异系数介于 7.21%-29.18%，具有很大的遗传改良潜力。在本研究中，灰楸 1、9、11 和 13 年生的生长性状和 13 年生的材性性状在 200 个无性系间均存在极显著差异；各性状的变异系数均介于 12.12%-26.17%，遗传多样性均介于 1.825-2.083。表明灰楸生长与材性性状在不同无性系间差异较大，多样性丰富，可进行选择育种。此外，遗传多样性受环境因素的影响程度可以通过重复力反映，重复力越高意味着性状越稳定，受外界环境作用影响越小，选择的效果越好 (吴裕等, 2012)。在本研究中，灰楸生长和材性性状的重复力均介于 0.75-0.97 之间。这与滇楸 (肖遥等, 2019) 无性系、楸树 (马建伟等, 2014) 无性系和青海云杉 (*Picea crassifolia* Kom.) (李青粉等, 2015) 无性系的树高、胸径和木材密度具有高重复力 (0.745-0.983) 结果类似。表明树木的生长性状和材性性状具有高度遗传控制的特性，这为生长和材性改良提供了良好的遗传基础。另外，灰楸各性状较大的重复力还可能是由于种质收集后，在甘肃省天水市麦积区建立同质园，生长环境相同，故遗传效应在变异成因中占主导地位。上述结果意味着以改良生长和材性性状为目的的灰楸无性系选育具有极大的潜力和可行性，能为后续的人工选育提供依据。

3.2 灰楸优良无性系的早期选择适宜树龄

在选择性育种的过程中，所测指标间的相关系数可以反映出目标性状之间的关系，利于育种目标的选择 (Akihiro *et al.*, 2013)。在本研究中，各树龄的树高和胸径均极显著正相关，表明这两个生长性状可以同时用于选优。这与在 rubber tree (*Hevea* spp.) (Akihiro *et al.*, 2013) 和 white poplar (*Populus alba* L.) (Zhao *et al.*, 2013) 中的研究一致。此外，早晚期性状的相关分析可确定早期选择适宜年限。例如，12 年生云南松 (*Pinus yunnanensis*) 的树高年-年相关性达到极显著相关水平，因此，12 年生为其早期选择的终选年限 (徐冰等, 2018)。6 年生桤木 (*Alnus cremastogyne* Burk.) 的生长性状与 14 年生时的相关系数达到极显著程度，表明桤木的早期选择是可靠的 (王军辉等, 2000)。在本研究中，9 年生后，各树龄间生长性状才达到极显著正相关，这表明 1 年生时的树高和胸径还不能完全反映灰楸无性系成材后的生长水平，9 年生后灰楸的生长性状才趋于稳定，此时可以利用生长性状进行评价和选育。11 年生后的生长性状与材性性状建立起稳定的相关性，能进行无性系生长与材性的联合选育，且胸径与 Pilodyn 值和弹性模量相关性均极显著，相关系数随生长时间而增大，比树高更适于作为与材性进行综合评价的指标。灰楸的生长与材性呈负相关，树高和胸径越大，Pilodyn 值越大，弹性模量越小，这与前人的研究结果一致 (Fujimoto *et al.*, 2006; Kennedy *et al.*, 2013)。这可能是由于速生树木的细胞分裂速度快，导致木材密度降低，影响了其物理性质 (Fukatsu *et al.*, 2014; Mäkinen *et al.*, 2002)。因此，灰楸生长和材性性状优良无性系的选择树龄应最小为 11 年生。在选育优良种质时，要根据育种目标及目标性状趋于稳定的时间，来确定早期选择的适宜树龄，选择特定的无性系。最终达到既能通过幼龄性状预测成熟期性状，又能缩短育种周期的目的。

3.3 种源地地理气候因子对无性系选择的影响

通过分析目标性状与种源地地理气候因子相关性,可以确定适合的种源地。例如,云南松的生长性状与种源地的经度与海拔呈显著负相关,与年均温呈显著正相关,因此,永仁种源的云南松生长较优(李鑫等,2019)。枫香树(*Liquidambar formosana* Hance)的树高在地理空间上呈“西南-东北”递减的趋势,所以云南富宁、海南霸王岭和海南黎母山3个种源地的植株较高(何庆海等,2019)。在本研究中,灰楸无性系的生长与海拔和经度极显著相关。根据9、11和13年生灰楸无性系的生长性状综合分析选择的20个无性系中,3个树龄有9-12个无性系来自甘肃省天水市,4-5个无性系来自甘肃省平凉市,这两个种源地的优良无性系占比远大于其占总种质份数的比例。这可能是由于天水市和平凉市种源地平均海拔较高,并且偏西(平均经度为E105.07°和E107.39°)。天水市和平凉市生长性状优良种质占比大于原种质占比的另一个原因可能是,采集的种质有163份种质来自甘肃省,其中97份来自于天水市,且均栽植于甘肃省天水市麦积区,甘肃省的种质更能适应当地的气候环境,因此天水市和平凉市的种质生长更优。灰楸无性系的Pilodyn值与海拔和经度分别呈极显著正相关和负相关。根据材性性状综合评价选择的20个无性系中,有5份种质来自河南省洛阳市,2份种质来自山西省临汾市,这两个种源地的优良无性系占比远大于其占总种质份数的比例。可能是由于临汾市和洛阳市平均海拔790.35 m和395.00 m,位列9个城市中的倒数第3和倒数第1名,经度分别为E111.16°和E112.45°,为地理位置最靠东的2个城市,因此,其种质材性性状较好,根据材性入选的无性系占比较高。上述结果表明,在今后的研究中,若想选育生长性状优良的灰楸无性系,可重点从西部高海拔地区收集;若想选育材性性状优良的无性系,可着重关注东部平原地区的种质。且收集的种质应进行多点测定试验,这样得到的结果更具可靠性。在引种的过程中,应选择生境相似,种源地相近的优良种源进行推广应用。

3.4 灰楸优良无性系选择

育种目标决定育种方法。肖遥^[21]等人通过聚类分析和隶属函数法对无性系进行综合评价,将滇楸无性系分为高木材密度型,短纤维型,低木材密度型和长纤维型四种类型,可适用于不同的育种目的。凌娟娟^[9]等人利用主成分分析和隶属函数法,从33个灰楸无性系综合筛选出6个速生丰产良种和4个优质用材无性系用于定向培育。在本研究中,根据生长性状综合分析选择出20个灰楸无性系。其中,有11个无性系在3个树龄中均入选,它们的生长性状较为稳定。11317-012和11521-044在9年生时未入选,在11和13年生时入选,其中11317-012在11和13年生时的生长排名均为第一,说明11317-012具有较大的生长潜力。另外,育种值是选择育种中的重要参数,它能剔除环境的影响,准确的反应出遗传效应^[31-36]。对13个生长优良无性系的育种值进行计算,11212-129、11215-020、11213-194、11521-225、11522-067、21626-076、11213-240、11213-232和11521-044等9个无性系的育种值较大,可用于灰楸生长优良无性系的选育。根据材性性状综合分析选择出20个无性系。其中,11213-238、42034-211、42034-175、11213-236、11213-089和11213-081等6个无性系的育种值较大,可用于灰楸优良材性无性系的选育。对生长性状和材性性状进行联合评价入选了20个无性系,31828-139等6个无性系的生长性状和材性性状均处于中等偏上水平。这6个无性系中,11212-071、11213-190和11213-242的育种值较大,可作为灰楸生长和材性均较优的无性系进行选育。最终,本研究选择出9个稳定或生长潜力较大的生长优良无性系,6个优质木材无性系,3个生长与材性性状均较优的无性系,可按需求进行推广应用,最终对灰楸进行遗传改良。

4 结论

在林木育种过程中,几乎没有任何一个良种能集成所有的目标性状,因此可以根据育种目的选择出不同的候选群体。灰楸种内变异丰富,具有较大的优良无性系选育潜力。生长和材性优良无性系的早期选择适宜树龄为11年生后。本研究选择出9个稳定或生长潜力较大的生长优良无性系,6个优质木材无性系,3个生长与材性性状均较优的无性系,可按需求进行推广应用,最终对灰楸进行遗传改良。此外,西部高海拔地区的灰楸生长快,而东部低海拔地区的灰楸材性较好,这可为今后灰楸种质资源进一步的收集工作提供参考。

参 考 文 献

- [1] Neale, D.B.; Kremer, A. Forest tree genomics: Growing resources and applications. *Nat. Rev. Genet.* **2011**, *12*, 111–122.
- [2] 潘惠新, 黄敏仁, 阮锡根, 李火根, 王明麻. 材性改良研究 VI. 美洲黑杨×小叶杨无性系木材性状遗传相关分析[J]. 林业科学, 1997(01):84-93.
- [3] 朱瑞强, 陈莹, 韩友吉, 张传余, 苑正赛, 仲倚林, 李善文, 董玉峰. 美洲黑杨无性系苗期初步评价[J]. 山东林业科技, 2022, 52(04):53-57.
- [4] 舒伟林. 亚美马褂木速生无性系选择与生长规律研究[D]. 南京林业大学, 2018.
- [5] 张兰, 张怡, 段如雁, 韦小丽, 徐小琴. 不同产地闽楠苗期性状变异及初步选择[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(06):33-40.
- [6] 张中玮, 曹受金, 廖菊阳, 吴林世, 胥雯. 不同地理种源映山红生长适应性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(11):61-67. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.11.009.
- [7] 赵秋玲, 马建伟, 王军辉, 等. 灰楸不同流域种质变异与多样性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(05):803-809.
- [8] Hamrick, J.L. Factors influencing levels of genetic diversity in woody plant species. *New For.* **1992**, *95*, 124.
- [9] 凌娟娟, 肖遥, 杨桂娟, 马建伟, 赵秋玲, 负慧玲, 王军辉, 麻文俊. 灰楸无性系生长和形质性状变异与选择[J]. 林业科学研究, 2019, 32(05):149-156. DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2019.05.020.
- [10] Cown, D.J. Comparison of the Pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *NZ J. For. Sci.* **1978**, *8*, 384–391.
- [11] Yamashita, K.; Okada, N.; Fujiwara, T. Use of the Pilodyn for estimating basic density and its applicability to density-based classifying of *Cryptomeria japonica* green logs. *J. Wood Sci.* **2007**, *53*, 72–81.
- [12] Fukatsu, E.; Hiraoka, Y.; Matsunaga, K.; Tsubomura, M.; Nakada, R. Genetic relationship between wood properties and growth traits in *Larix kaempferi* obtained from a diallel mating test. *J. Wood Sci.* **2014**, *61*, 10–18.
- [13] Pâques, L.E.; Millier, F.; Rozenberg, P. Selection perspectives for genetic improvement of wood stiffness in hybrid larch (*Larix x eurolepis* Henry). *Tree Genet. Genomes* **2010**, *6*, 83–92.
- [14] Gilmour, A.; Gogel, B.; Cullis, B.; Thompson, R. *ASReml User Guide Release 3.0*; VSN International Ltd.: Harpenden, UK, 2009; pp. 87–96.
- [15] 刘长友, 程须珍, 王素华, 等. 中国绿豆种质资源遗传多样性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(4): 459-463
- [16] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006:31,55.
- [17] 解孝满, 李景涛, 赵合娥, 等. 柳树无性系苗期遗传测定与选择[J]. 江苏林业科技, 2008, 35(3): 6-9.
- [18] 朱之悌. 林木遗传学基础[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989:190-191.
- [19] 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. *New For.* **2008**, *36*, 225–238.
- [20] 肖遥, 麻文俊, 杨桂娟, 等. 6个灰楸无性系叶片表皮微形态特征比较[J]. 电子显微学报, 2017, 36(4):414-421.
- [21] 肖遥, 姚淑均, 杨桂娟, 等. 滇楸无性系早期木材性状变异与评价[J]. 林业科学研究, 2019(b), 32(4): 79-87.
- [22] Zhao, X.; Hou, W.; Zheng, H.; Zhang, Z. Analyses of genotypic variation in white poplar clones at four sites in china. *Silvae Gene* **2013**, *62*, 187–195.
- [23] 李青粉, 王军辉, 李登平, 等. 青海云杉无性系木材性状的遗传变异[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(12):12-16+35. DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2015.12.001.
- [24] 吴裕, 毛常丽. 树木育种学中遗传力、重复力和遗传增益的概念及思考[J]. 热带农业科技, 2012, 35(01):47-50.
- [25] 马建伟, 王军辉, 宋璐, 等. 楸树杂种无性系幼龄期材性遗传变异[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(10):11-15+19. DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.20140721.036.
- [26] Akihiro, S.; Tomiyasu, M.; Hitoshi, T. Relationships of tree height and diameter at breast height revisited: Analyses of stem growth using 20-year data of an even-aged *Chamaecyparis obtusa* stand. *Tree Physiol.* **2013**, *1*, 106–118.
- [27] Gonçalves, P.S.; Souza, P.D.; Bortoletto, N.; Cardinal, Á.B.; Átila, B.B. Age-age correlation for early selection of rubber tree genotypes in são paulo state, brazil. *Gene Mol. Biol.* **2005**, *28*, 758–764.
- [28] 徐冰, 袁德水, 王丽, 等. 油松生长性状早晚期相关性分析[J]. 河北林业科技, 2018(04):6-9.
- [29] 王军辉, 顾万春, 李斌, 郭文英, 夏良放. 桤木优良种源/家系的选择研究——生长的适应性和遗传稳定性分析[J]. 林业科学, 2000(03):59-66.
- [30] Fujimoto, T.; Akutsu, H.; Nei, M.; Kita, K.; Kuromaru, M.; Oda, K. Genetic variation in wood stiffness and strength properties of hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*). *J. Forest. Res-JPN.* **2006**, *11*, 343–349.
- [31] Kennedy, S.G.; Cameron, A.D.; Lee, S.J. Genetic relationships between wood quality traits and diameter growth of juvenile core wood in Sitka spruce. *Can. J. Forest. Res.* **2013**, *43*, 1–6.
- [32] Mäkinen, H.; Saranpää, P.; Linder, S. Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holzforchung* **2002**, *56*, 449–460.

- [31]李鑫,李昆,段安安,崔凯,高成杰.不同地理种源云南松幼苗生物量分配及其异速生长[J].北京林业大学学报,2019,41(04):41-50.DOI:10.13332/j.1000-1522.20180371.
- [32]何庆海,方茹,李文鑫,谢宇凯,张燕琴,石从广,杨少宗.不同种源枫香树幼苗生长性状的地理变异[J].植物资源与环境学报,2019,28(02):88-95.
- [33]孙晓梅,杨秀艳.林木育种预测方法的应用与分析[J].北京林业大学学报,2011,33(02):65-69.