

黑龙江省胡桃楸生长及种实变异与选择

方玉凤^{1,2}, 徐连峰^{1*}, 张强^{1,3}, 李勇^{1,2}, 初国庆⁴, 任悦¹, 赵影⁵

(1. 黑龙江省林业科学院齐齐哈尔分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 2. 黑龙江七台河森林生态系统国家定位观测研究站, 黑龙江 七台河 154600; 3. 黑龙江省松嫩平原农田防护林生态系统国家定位观测研究站, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 4. 黑龙江省宾县万人欢林场, 哈尔滨 150000; 5. 中国科学院沈阳应用生态研究所 森林生态与保育重点实验室, 沈阳 110016)

摘要: 对东北地区胡桃楸 (*Juglans mandshurica*) 人工林进行的研究多为生长性状研究, 种实变异的研究较少。因此, 联合生长及种实性状的胡桃楸早期选择, 可推进胡桃楸遗传改良工作。以10年生家系试验林为研究对象, 测定其表型性状、生长性状、种实性状, 采用方差分析、主成分分析、布雷津多性状综合评定法, 分析胡桃楸不同家系之间各测定指标变异规律。结果表明, 表型性状变异系数的变化范围为16.15%~57.70%, 脊宽度和脊突出程度的变异系数(分别为57.70%、56.98%)最大, 顶尖突出程度的变异系数(16.15%)最小, 表型性状相对稳定。除分枝角外, 其余数量性状在家系间差异极显著 ($P<0.01$)。生长性状中材积的变异系数(58.06%)最大, 其余相关指标的变异系数变化范围为17.03%~22.51%; 果实性状中单鲜果重的变异系数(17.12%)最大, 其余相关指标的变异系数变化范围为5.13%~8.19%; 果核性状中单核质量的变异系数(18.76%)最大, 其余相关指标的变异系数变化范围为6.74%~9.25%。相关性分析显示生长性状的株高、冠幅、地径、胸径、材积五者间存在极显著正相关 ($P<0.01$), 果实三径、果核三径、单鲜果质量、单核质量相关8个性状间均存在极显著正相关性 ($P<0.01$)。根据一般配合力, 每个性状筛选出3个优良亲本。主成分分析法提取到4个主成分, 累积贡献率达到84.32%。利用多性状综合评定法, 从材用、果用及果材兼用角度分别筛选出5个优良家系, 初选的优良家系可为该地区胡桃楸良种选育提供理论支撑。

关键词: 胡桃楸; 家系; 生长性状; 表型性状; 筛选; 变异

中图分类号: S718.4; S792.13

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.010

Variation and Selection in Growth and Seed Traits of *Juglans mandshurica* in Heilongjiang Province

FANG Yufeng^{1,2}, XU Lianfeng^{1*}, ZHANG Qiang^{1,3}, LI Yong^{1,2}, CHU Guoqing⁴, REN Yue¹, ZHAO Ying⁵

(1. Qiqihar Branch Heilongjiang Academy of Forestry Sciences, Qiqihar 161005, China; 2. Heilongjiang Qitaihe Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Qitaihe 154600, China; 3. Heilongjiang Songnen Plain Farmland Shelterbelt Ecosystem National Observation and Research Station, Qiqihar 161005, China; 4. Wanrenhuan Forest of Binxian County, Harbin 150411, China; 5. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Silviculture, Shengyang 110016, China)

Abstract: Studies on plantations of *Juglans mandshurica* in northeast China have primarily focused on growth traits, while relatively limited research on seed and fruit variation. Therefore, early selection of *Juglans mandshurica* based on integrated growth and seed traits can accelerate its genetic improvement programs. Taking 10 years old *Juglans mandshurica* experimental forest as the research object, this study measured the descriptive phenotypic traits, growth traits, and seed traits. Variance analysis, principal component analysis and Breitzin comprehensive evaluation were used to analyze the variation of traits among different families of *Juglans mandshurica*. The results showed that the variation coefficient of

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2024Q002); 中央财政林业科技推广示范项目(黑[2025]TG17); 国家重点研发计划项目(2024YFD1500200); 林业公益性行业科研专项项目(201304704)。

第一作者简介: 方玉凤, 硕士, 高级工程师。研究方向为经济林研究。E-mail: qqhrfyf@163.com。

***通信作者:** 徐连峰, 硕士, 研究员级高级工程师。研究方向为森林培育研究。E-mail: xxllff2000@126.com。

引文格式: 方玉凤, 徐连峰, 张强, 等. 黑龙江省胡桃楸生长及种实变异与选择[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1193-1205.

FANG Y F, XU L F, ZHANG Q, et al. Variation and selection in growth and seed traits of *Juglans mandshurica* in Heilongjiang Province[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1193-1205.

descriptive phenotypic traits ranged from 16.15% to 57.70%, the variation coefficient of ridge width (57.70%) and ridge protrusion (56.98%) were the largest, and the variation coefficient of top prominence (16.15%) was the smallest, the phenotypic traits were relatively stable. Except for the branch angle, the other quantitative traits were significantly different among families ($P < 0.01$). Among the growth traits, the variation coefficient of volume (58.06%) was the largest, and other related indicators ranged from 17.03% to 22.51%. Among the fruit traits, the variation coefficient of single fruit mass (17.12%) was the largest, and other related indexes ranged from 5.13% to 8.19%. The variation coefficient of single nut mass (18.76%) was the largest, and other related indexes ranged from 6.74% to 9.25%. Correlation analysis showed that there were significant positive correlations among plant height, crown diameter, basal diameter, DBH and volume ($P < 0.01$), there were significant positive correlations among fruit tridiameter, nut tridiameter, single fruit mass and single nut mass ($P < 0.01$). General combining ability analysis showed that three excellent parents were selected for each trait. Four principal components were extracted by principal component analysis, and the cumulative contribution rate reached 84.32%. By using the comprehensive evaluation method of multiple traits, five excellent families were selected from the perspectives of wood use, fruit use, and both fruit and wood use. The excellent families preliminarily selected could provide theoretical support for the selection and application of *Juglans mandshurica* in this area.

Keywords: *Juglans mandshurica*; family; growth traits; phenotypic traits; select; variation

0 引言

胡桃楸(*Juglans mandshurica*)又名核桃楸^[1],是珍贵的果材兼用树种,与水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、黄菠萝(*Phellodendron amurense* Rupr.)并称为我国东北地区的“三大硬阔”^[2-3],天然林20 a左右开始结实,人工纯林下的胡桃楸可提早结实^[4-5]。从分布范围和数量情况看,长白山地区和小兴安岭被认为是胡桃楸的最适生长区域^[6-7]。胡桃楸作为一种珍贵的木本粮油树种,发展前景广阔^[8],但实际造林生产中仍存在选育良种少等问题。

关于胡桃楸家系试验的研究,如张秦徽^[9]对东三省胡桃楸天然林家系基于种实性状进行的种质资源评价,从生长角度和种实角度分别筛选出优良家系;周彦超^[10]对辽东地区6个种源的胡桃楸以果核表型变异多样性为指标进行了变异分析;芦贤博等^[11]对黑龙江省胡桃楸6年生人工林以生长性状筛选出3个优良家系;刘劲宏等^[12]对黑龙江省5~7年生胡桃楸133个半同胞家系以生长性状为指标筛选出27个优良家系;代伟昭^[13]对7年生核桃楸子代测定林以生长性状为指标筛选出4个优良家系。这些研究表明,天然胡桃楸种源间生长性状和果核性状均具有较大变异,对子代测定林进行的研究集中在幼苗,测定的指标也主要从生长方面进行。因此,开展胡桃楸不同家系综合评价,对筛选出的优良种质资源进行利用,是目前胡桃楸研究领域的重要工作,也是完善三北六期工程树种选育的重点任务。

本研究以黑龙江省胡桃楸不同种源内77个半同胞家系试验林为研究对象,从生长性状、种实性状角度进行综合评价,初步筛选优良家系,为黑龙江省胡桃楸

良种选育提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地点位于黑龙江省宾县万人欢林场,地处黑龙江省南部,地处松花江南岸,张广才岭西麓,地理位置128°04'29"—128°19'13"E,45°44'20"—45°57'18"N,海拔340 m,属中温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季温湿多雨,年均温2.4℃,年降水量600~800 mm,无霜期130 d左右,年日照时数2 560 h。土壤类型主要为暗棕壤,植被属长白山植物区。

1.2 试验材料

试验种子来自黑龙江省东部山区及周边地区胡桃楸天然林分,包括东方红(DFH-1)、虎林(HL-10)、宝清(BQ-2)、七台河(QTH-5)、牡丹江(MDJ-8)、东京城(DJC-7)、铁力(TL-3)、亚布力(YBL-6)、大泉子(DQ-8)、万人欢(WRH-3)、五常(WC-9)、清原(QY-5)、三岔(SC-10)13个种源(大写字母表示种源地编号,后面数字表示家系数)的共计77个胡桃楸半同胞家系,2014年秋季播种育苗,2016年春季移栽造林,采用随机完全区组设计,10株小区,3次重复,栽植密度3 m×4 m,各区组周边设保护行,区组间设6 m隔离带,人工抚育连续3 a至幼林郁闭。

1.3 试验方法

2024年9月份对胡桃楸不同家系的株高、冠幅、地径、胸径和分枝角等性状进行每木测量。利用塔尺(精度0.1 m)测量株高;利用米尺(精度0.1 cm)测量冠幅(取东西、南北2个方向均值);利用游标卡尺(精度0.01 cm)测量地径和胸径,确定植株最低活枝分叉点;利用量角器(精度0.01°)测量分枝角^[14-15],并计算单

株材积。采集果实,将完整、无病虫害的果实全部采收、低温保鲜,利用游标卡尺测量果实纵径、横径、侧径。果实经风干、脱皮、自然干燥后,利用游标卡尺测量果核纵径、横径、侧径;利用电子天平(精度0.01 g)测果实(30颗)单果质量、果核单核质量,计算鲜果含

水率。参照《核桃种质资源描述规范和数据标准》^[16]和《植物新品种特异性、一致性、稳定性测试指南 核桃属》(GB/T 26909—2011)^[17],从中选取描述性表型性状7个,对其进行数量化赋值后频率分析,即各性状类型所占比例,见表1。

表1 胡桃楸果核描述性表型性状及记载标准

Tab. 1 Descriptive phenotypic traits and recording standard of nut of *Juglans mandshurica*

| 表型性状 Phenotypic traits | 测定方法和各级频率/% Determination methods and frequencies |
|---|---|
| 垂直于缝合线切面形状 Section shape of perpendicular to the suture line | 1.圆形(6.93%);2.扁圆形(6.93%);3.卵圆形(34.63%);4.长椭圆形(33.77%);5.阔卵圆形(17.75%);6.心形(0%) |
| 基部形状 Bottom shape | 1.圆形(19.48%);2.扁圆形(24.68%);3.楔形(51.95%);4.方形(3.90%) |
| 顶尖突出程度 Top prominence | 1.凹(0%);3.平(0.43%);5.凸(39.39%);7.尖(60.17%) |
| 脊宽度 Ridge width | 1.细(42.86%);3.窄(48.92%);5.中(6.49%);7.宽(1.73%) |
| 脊分布 Ridge distribution | 1.上1/2(20.78%);3.上2/3(32.90%);5.贯通(46.32%) |
| 脊突出程度 Ridge protrusion | 1.凹(46.32%);3.平(45.02%);5.凸(8.66%) |
| 核壳颜色 Nut colour | 3.黄(25.11%);5.棕(51.95%);7.褐(22.94%) |

注:括号内数据表示在总样品中所占比例。

Note: The data in brackets indicate the proportion in the total sample.

1.4 数据统计分析

本研究所有数据基础分析采用Excel 2020软件,方差分析、相关性分析和主成分分析采用SPSS 22.0软件。

果形指数(fruit shape index, FSI)=果实纵径/果实横径。

核形指数(nut shape index, NSI)=果核纵径/果核横径。

材积(V)^[18]计算公式为

$$V = 0.000\ 042D^{1.772\ 558}H^{1.174\ 785} \quad (1)$$

式中: D 为胸径,cm; H 为树高,m。

表型变异系数(CV,式中为 C_V)^[19]计算公式为

$$C_V = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: σ^2 为性状的表型方差分量; \bar{X} 为性状的平均值。

遗传力(h_p^2)^[20]公式为

$$h_p^2 = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_p^2 + \sigma_{PB}^2/B + \sigma_e^2/NB} \quad (3)$$

式中: σ_p^2 为家系均方; σ_{PB}^2 为家系与区组互作的均方; σ_e^2 为误差均方; B 为区组数; N 为重复数。

遗传增益(G)^[21]公式为

$$\Delta G = h_p^2 W/\bar{X} \times 100\% \quad (4)$$

式中, W 为选择差。

现实增益(ΔG_r)^[21]公式为

$$\Delta G_r = W/\bar{X} \times 100\% \quad (5)$$

亲本一般配合力(g)计算公式^[22]为

$$g = \chi - \mu \quad (6)$$

式中: χ 为亲本的某个交配组合在某一性状的子代平均值; μ 为这一性状所有组合的子代总平均值。

采用布雷津多性状综合评定法^[23]对不同家系进行综合评定,综合评定值 Q_i 计算公式为

$$a_i = X_{ij}/X_{j\max} \quad (7)$$

$$Q_i = \left(\sum_{j=1}^n a_i \right)^{1/2} \quad (8)$$

式中: X_{ij} 为某一性状的平均值; $X_{j\max}$ 为某一性状的最优值; n 为评价指标的个数。

2 结果和分析

2.1 描述性表型性状的变异

对胡桃楸果核描述性表型性状特征赋值后计算见

表2,垂直于缝合线切面形状的“心形”、顶尖突出程度的“凹”未出现。顶尖突出程度的变异系数最低,为16.15%,性状“尖”占比60.17%;核壳颜色的变异系数为28.02%,性状“棕”占比51.95%。其余性状的变异系数均在30%以上,变异系数最大的性状为脊宽度(57.70%)和脊突出程度(56.98%)。由各性状不同类型所占比例,可将黑龙江省东部山区及周边地区胡桃

楸果核主要描述性表型性状特征总结如下:垂直于缝合线切面形状主要为卵圆形(34.63%)、长椭圆形(33.77%);基部形状主要为楔形(51.95%);顶尖突出程度主要表现为尖(60.17%);脊宽度以细(42.86%)、窄(48.92%)为主;脊分布主要为贯通(46.32%);脊突出程度以凹(46.32%)、平(45.02%)为主;核壳颜色主要为棕(51.95%)。

表2 描述性表型性状基本数据
Tab. 2 Basic data of descriptive phenotypic traits

| 描述性表型性状 Descriptive phenotypic traits | 极小值 Minimum | 极大值 Maximum | 极差 Range | 标准差 Standard deviation | 变异系数(CV) / % Coefficient of variation |
|---|----------------|----------------|-------------|---------------------------|--|
| 垂直于缝合线切面形状 Section shape of perpendicular to the suture line | 1 | 5 | 4 | 1.08 | 30.96 |
| 基部形状 Bottom shape | 1 | 4 | 3 | 0.84 | 35.10 |
| 顶尖突出程度 Top prominence | 3 | 7 | 4 | 1.00 | 16.15 |
| 脊宽度 Ridge width | 1 | 7 | 6 | 1.35 | 57.70 |
| 脊分布 Ridge distribution | 1 | 5 | 4 | 1.56 | 44.43 |
| 脊突出程度 Ridge protrusion | 1 | 5 | 4 | 1.28 | 56.98 |
| 核壳颜色 Nut colour | 3 | 7 | 4 | 1.39 | 28.02 |

2.2 数量性状的方差分析

对不同家系各数量性状方差分析见表3,除分枝角外,其余11个性状在家系间差异极显著($P < 0.01$)。从家系遗传力看,除分枝角外,其余各性状的家系遗传力均较高见表4,地径、果核纵径在区组间差异不显著,各性状在其他变异来源间的差异均达极显著($P < 0.01$)。胡桃楸的生长、种实性状在不同家系间具有较大遗传差异,具备选择和改良的基因基础,在选择生长量高、果形大的优良种源中具有较大改良潜力。

2.3 数量性状的变异参数

胡桃楸不同家系17个数量性状的特征情况见表4。由表4可知,生长指标方面,单株材积的变异系数(58.06%)最大,变化范围为0.001 1~0.044 7 m³,均值为0.011 4 m³;冠幅和地径的变异系数(19.89%、17.03%)最小,变化范围分别为2.00~5.88 m、5.01~15.03 cm,均值分别为4.00 m、10.90 cm。果实方面,单鲜果质量的变异系数最高,为17.12%,变化范围为23.00~66.67 g,均值为40.56 g;鲜果含水率的变异系数最小,

为5.13%;果实三径变异系数为6.16%~7.84%。果核方面,单核质量的变异系数最高,为18.76%,变化范围为4.05~14.29 g,均值为8.75 g;果核三径变异系数为6.74%~9.03%。果形指数和核形指数均值分别为1.41和1.58,结合描述性表型性状,说明黑龙江省东部山区及周边地区的胡桃楸种实基本为长椭圆形。

2.4 各数量性状相关性分析

对数量性状进行相关性分析,如图1所示。由图1可知,生长性状方面,株高、冠幅、地径、胸径、材积五者间存在极显著正相关($P < 0.01$);分枝角与冠幅极显著正相关(0.19);果实三径、果核三径、单鲜果质量、单核质量相关8个性状间均存在极显著正相关性($P < 0.01$);鲜果含水率与果大小、单鲜果质量相关性达显著及以上水平($P < 0.05$),与单核质量极显著负相关(-0.37);果形指数与核形指数极显著正相关(0.84),二者与生长性状间存在负相关性,与果、核纵径极显著正相关($P < 0.01$),与果、核宽径、侧径极显著负相关($P < 0.01$)。

表 3 家系各性状方差分析表
Tab. 3 Variance analysis of different traits among families

| 性状 Trait | 变异来源 Variance sources | 自由度(df) Degree of freedom | 均方(MS) Mean square | F | 性状 Trait | 变异来源 Variance sources | 自由度(df) Degree of freedom | 均方(MS) Mean square | F |
|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|----------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|----------|
| 株高 Plant height | 家系 Family | 76 | 9.877 | 15.351** | 果纵径 Fruit vertical diameter | 家系 Family | 76 | 205.098 | 17.706** |
| | 区组 Block | 2 | 3.225 | 5.012** | | 区组 Block | 2 | 7.609 | 0.657 |
| | 区组 × 家系 B × F | 152 | 4.816 | 7.485** | | 区组 × 家系 B × F | 152 | 109.139 | 9.422** |
| 冠幅 Crown diameter | 家系 Family | 76 | 3.265 | 5.018** | 果横径 Fruit horizontal diameter | 家系 Family | 76 | 69.218 | 17.756** |
| | 区组 Block | 2 | 9.701 | 14.910** | | 区组 Block | 2 | 180.943 | 46.415** |
| | 区组 × 家系 B × F | 152 | 3.072 | 4.721** | | 区组 × 家系 B × F | 152 | 25.332 | 6.498** |
| 地径 Basal diameter | 家系 Family | 76 | 23.823 | 5.017** | 果侧径 Fruit lateral diameter | 家系 Family | 76 | 89.678 | 22.270** |
| | 区组 Block | 2 | 3.685 | 0.776 | | 区组 Block | 2 | 136.625 | 33.928** |
| | 区组 × 家系 B × F | 152 | 11.811 | 2.487** | | 区组 × 家系 B × F | 152 | 30.242 | 7.510** |
| 胸径 DBH | 家系 Family | 76 | 17.697 | 8.604** | 核纵径 Nut vertical diameter | 家系 Family | 76 | 196.807 | 20.614** |
| | 区组 Block | 2 | 31.194 | 15.165** | | 区组 Block | 2 | 3.039 | 0.318 |
| | 区组 × 家系 B × F | 152 | 7.220 | 3.510** | | 区组 × 家系 B × F | 152 | 88.837 | 9.305** |
| 分枝角 Branch angle | 家系 Family | 76 | 237.739 | 1.300 | 核横径 Nut horizontal diameter | 家系 Family | 76 | 50.923 | 22.681** |
| | 区组 Block | 2 | 911.108 | 4.983** | | 区组 Block | 2 | 40.920 | 18.226** |
| | 区组 × 家系 B × F | 152 | 302.350 | 1.654** | | 区组 × 家系 B × F | 152 | 16.245 | 7.235** |
| 材积 Volume | 家系 Family | 76 | 0.000 | 12.913** | 核侧径 Nut lateral diameter | 家系 Family | 76 | 53.861 | 22.609** |
| | 区组 Block | 2 | 0.000 | 15.927** | | 区组 Block | 2 | 134.489 | 56.456** |
| | 区组 × 家系 B × F | 152 | 0.000 | 4.955** | | 区组 × 家系 B × F | 152 | 18.233 | 7.654** |

注: *为 $P < 0.05$; **为 $P < 0.01$ 。

Note: * means $P < 0.05$; ** means $P < 0.01$.

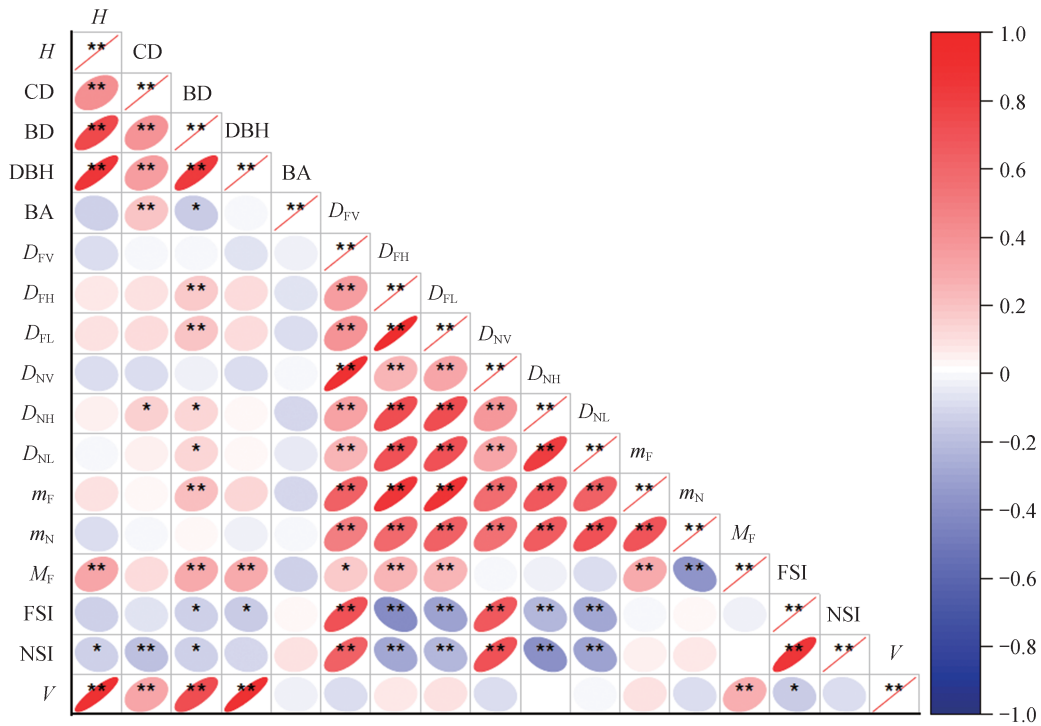
2.5 各数量性状一般配合力分析

不同家系生长性状的一般配合力见表 5。由表 5 可知,株高的一般配合力变化范围为-1.75~2.42,较高的家系为 QY7、QY9、DJC20;冠幅的一般配合力变化范围为-1.28~1.08,较高的家系为 SC1、QY7、DQ21;地径的一般配合力变化范围为-35.92~27.44,较高的家

系为 DJC20、QY2、WC4;胸径的一般配合力变化范围为-26.56~28.96,较高的家系为 QY7、DJC20、WRH16;分枝角的一般配合力变化范围为-10.05~10.31,较高的家系为 QY7、DJC8、DQ19;材积的一般配合力变化范围为-0.50~1.13,较高的家系为 QY7、QY10、DJC20。

表4 数量性状基本数据
Tab. 4 Basic data of quantitative traits

| | 数量性状 Quantitative trait | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|--|--|---|---|---------------------------------------|---|--|--|---|--|-------------------------------------|
| | 生长性状 Growth trait | | | | | | | 果实性状 Fruit trait | | | | | | | 果核性状 Nut trait | | |
| | 株高 (H)/m Plant height | 冠幅 (CD)/m Crown diameter | 地径 (BD)/cm Basal diameter | 胸径 (DBH)/cm Diameter at breast height | 分枝角 (BA)/(°) Branch angle | 材积 (V)/m ³ Volume | 果纵径 (D _{EV})/mm Fruit vertical diameter | 果横径 (D _{EH})/mm Fruit horizontal diameter | 果侧径 (D _{EL})/mm Fruit lateral diameter | 单鲜果质量 (M _F)/g Mass of single fruit | 果实指数 (FSI) Fruit shape index | 鲜果含水率 (M _F)/% Moiture content of fresh fruit | 核纵径 (D _{NV})/mm Nut vertical diameter | 核横径 (D _{NH})/mm Nut horizontal diameter | 核侧径 (D _{NL})/mm Nut lateral diameter | 单核质量 (M _N)/g Mass of single nut | 核形指数 (NSI) Nut shape index |
| 平均值 Mean | 5.37 | 4.00 | 10.90 | 7.29 | 31.61 | 0.011 4 | 54.07 | 38.43 | 39.39 | 40.56 | 1.41 | 72.16 | 44.10 | 27.98 | 27.32 | 8.75 | 1.58 |
| 极小值 Minimum | 2.70 | 2.00 | 5.01 | 3.29 | 15.08 | 0.001 1 | 40.70 | 32.27 | 32.00 | 23.00 | 1.17 | 63.06 | 32.68 | 22.68 | 22.01 | 4.05 | 1.21 |
| 极大值 Maximum | 9.20 | 5.88 | 15.03 | 11.72 | 48.26 | 0.044 7 | 68.41 | 45.52 | 48.15 | 66.67 | 1.82 | 93.05 | 55.84 | 33.26 | 33.85 | 14.29 | 2.06 |
| 极差 Range | 6.50 | 3.88 | 10.02 | 8.43 | 33.18 | 0.043 5 | 27.71 | 13.25 | 16.15 | 43.67 | 0.66 | 30.00 | 23.16 | 10.58 | 11.84 | 10.24 | 0.85 |
| 标准差 Standard deviation | 1.18 | 0.80 | 1.86 | 1.54 | 7.11 | 0.006 6 | 4.24 | 2.37 | 2.64 | 6.94 | 0.12 | 3.71 | 3.98 | 1.89 | 2.02 | 1.64 | 0.15 |
| 变异系数(CV)/% Coefficient of Variation | 21.94 | 19.89 | 17.03 | 21.12 | 22.51 | 58.06 | 7.84 | 6.16 | 6.71 | 17.12 | 8.19 | 5.13 | 9.03 | 6.74 | 7.39 | 18.76 | 9.25 |
| 遗传力 Heritability | 0.935 | 0.801 | 0.801 | 0.884 | 0.231 | 0.923 | 0.944 | 0.944 | 0.955 | — | — | — | 0.951 | 0.956 | 0.956 | — | — |



H: 株高; CD: 冠幅; BD: 地径; DBH: 胸径; BA: 分枝角; D_{FV} : 果纵径; D_{FH} : 果横径; D_{FL} : 果侧径; D_{NV} : 核纵径; D_{NH} : 核横径; D_{NL} : 核侧径; m_F : 鲜果质量; m_N : 单核质量; M_F : 鲜果含水率; FSI: 果形指数; NSI: 核形指数; V: 材积; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

H: plant height; CD: crown diameter; BD: basal diameter; DBH: diameter at breast height; BA: branch angle; D_{FV} : fruit vertical diameter; D_{FH} : fruit horizontal diameter; D_{FL} : fruit lateral diameter; D_{NV} : nut vertical diameter; D_{NH} : nut horizontal diameter; D_{NL} : nut lateral diameter; m_F : mass of single fruit; m_N : mass of single nut; M_F : moisture content of fresh fruit; FSI: fruit shape index; NSI: nut shape index; V: volume; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

图 1 各数量性状相关性分析
Fig. 1 Correlation analysis of quantitative traits

表 5 生长性状的一般配合力
Tab. 5 General combining ability of growth traits

| 家系 Family | 株高(H) Plant height | 家系 Family | 冠幅(CD) Crown diameter | 家系 Family | 地径(BD) Basal diameter | 家系 Family | 胸径(DBH) Diameter at breast height | 家系 Family | 分枝角(BA) Branch angle | 家系 Family | 材积(V) Volume |
|--------------|-----------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-----------------|
| QY7 | 2.42 | SC1 | 1.08 | DJC20 | 27.44 | QY7 | 28.96 | QY7 | 10.31 | QY7 | 1.13 |
| QY9 | 2.05 | QY7 | 1.07 | QY2 | 23.67 | DJC20 | 24.38 | DJC8 | 8.31 | QY10 | 0.79 |
| DJC20 | 1.88 | DQ21 | 0.94 | WC4 | 21.42 | WRH16 | 23.12 | DQ19 | 7.41 | DJC20 | 0.76 |
| QY2 | 1.54 | WC9 | 0.85 | QY7 | 21.20 | QY2 | 21.35 | DJC24 | 7.39 | QY9 | 0.66 |
| WC7 | 1.18 | BQ6 | 0.84 | QTH9 | 19.72 | DQ7 | 20.31 | WC9 | 7.03 | QY2 | 0.62 |
| WRH16 | 1.16 | WC1 | 0.68 | WC9 | 19.34 | QY9 | 17.99 | SC20 | 7.01 | WRH16 | 0.56 |
| HL7 | 1.16 | QTH5 | 0.66 | QY10 | 17.97 | HL1 | 16.50 | HL1 | 6.05 | DQ7 | 0.51 |
| DQ7 | 1.10 | WC7 | 0.64 | WRH16 | 17.56 | YBL25 | 15.81 | WC29 | 5.49 | HL7 | 0.40 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| DJC8 | -1.73 | TL5 | -1.16 | DJC12 | -34.62 | SC23 | -24.42 | HL22 | -8.31 | SC23 | -0.50 |
| SC23 | -1.75 | HL4 | -1.28 | HL4 | -35.92 | DJC12 | -26.56 | DQ23 | -10.05 | DJC12 | -0.50 |

不同家系种实性状的一般配合力见表6。由表6可知,果纵径的一般配合力变化范围为-5.70~7.31,较高的家系为WRH3、DQ15、WRH1;果横径的一般配合力变化范围为-4.37~3.94,较高的家系为WC29、WRH1、BQ6;核纵径的一般配合力变化范围为-6.18~8.28,较高的家系为WRH3、DQ15、WRH1;核横径的一

般配合力变化范围为-3.46~3.77,较高的家系为WRH1、WC9、WC29;单鲜果重的一般配合力变化范围为-11.13~13.53,较高的家系为WRH1、WC9、WC29;单核重的一般配合力变化范围为-2.40~2.96,较高的家系为WRH1、MDJ11、WC19。

表6 种实性状的一般配合力
Tab. 6 General combining ability of seed traits

| 家系 Family | 果纵径(D_{FV}) Fruit vertical diameter | 家系 Family | 果横径(D_{FH}) Fruit horizontal diameter | 家系 Family | 核纵径(D_{NV}) Nut vertical diameter | 家系 Family | 核横径(D_{NH}) Nut horizontal diameter | 家系 Family | 单鲜果质量(m_F) Mass of single fruit | 家系 Family | 单核质量(m_N) Mass of single nut |
|--------------|--|--------------|--|--------------|--|--------------|--|--------------|--|--------------|-------------------------------------|
| WRH3 | 7.31 | WC29 | 3.94 | WRH3 | 8.28 | WRH1 | 3.77 | WRH1 | 13.53 | WRH1 | 2.96 |
| DQ15 | 6.50 | WRH1 | 3.90 | DQ15 | 6.63 | WC9 | 2.53 | WC9 | 11.66 | MDJ11 | 2.51 |
| WRH1 | 5.92 | BQ6 | 3.33 | WRH1 | 5.81 | WC29 | 2.46 | WC29 | 11.44 | WC19 | 2.31 |
| WC29 | 5.39 | WC9 | 3.07 | MDJ5 | 5.72 | WC19 | 2.37 | WC7 | 9.96 | WC4 | 2.30 |
| WC14 | 4.93 | WC7 | 2.62 | WC14 | 5.30 | HL6 | 2.35 | WRH3 | 8.84 | HL22 | 2.22 |
| WC1 | 4.87 | HL12 | 2.59 | DJC24 | 4.42 | BQ6 | 2.25 | BQ6 | 8.29 | MDJ5 | 2.05 |
| MDJ5 | 4.60 | HL6 | 2.38 | WC9 | 3.99 | WC7 | 2.12 | DQ19 | 8.07 | WRH3 | 2.02 |
| DJC24 | 4.25 | DQ11 | 2.29 | WC1 | 3.87 | WRH3 | 1.85 | HL22 | 6.26 | WC9 | 1.86 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| HL1 | -4.96 | QY2 | -3.53 | SC11 | -5.03 | QY2 | -2.74 | YBL9 | -10.95 | YBL9 | -2.12 |
| SC11 | -5.70 | YBL13 | -4.37 | DJC6 | -6.18 | DQ14 | -3.46 | YBL13 | -11.13 | HL7 | -2.40 |

2.6 各数量性状综合评价

应用主成分分析法对各数量性状提取主成分,见表7。按照特征值大于1的原则提取到4个主成分,累积贡献率达到84.322%,可以综合反映17个数量性状的大部分信息。第I主成分主要包含果、核三径、单鲜果质量及单核质量8个性状,表征的是种实性状;第II主成分主要包含株高、冠幅、地径、胸径、材积5个性状,表征的是生长性状;第III主成分主要包含果形指数、核形指数2个性状,表征的是种实性状;第IV主成分主要为鲜果含水率性状。

以这17个数量性状采用布雷津多性状综合评定法进行综合评价,见表8。以6%的入选率进行选择,根据株高、冠幅、地径、胸径、分枝角及材积作为木材产量的指标,入选的5个家系(QY7、DJC20、QY9、QY2、WC9)的株高、冠幅、地径、胸径、分枝角及材积的平均值分别为7.10 m、4.63 m、12.98 cm、9.35 cm、34.92°、0.0230 m³,通过计算,遗传增益分别为30.10%、12.59%、15.29%、24.92%、2.42%、93.60%,现实增益分别为32.20%、15.72%、19.08%、28.18%、10.47%、101.40%;根据果实三径、果核三径、单鲜果质量和单

核质量作为种实产量的指标,入选的5个家系(WRH1、WC29、WC9、WRH3、WC7)的果核三径平均值分别为59.07、41.28、42.68、48.96、30.53、29.23 mm,通过计算,遗传增益分别为8.73%、7.01%、7.98%、10.47%、8.70%、6.70%,现实增益分别为9.24%、7.43%、8.35%、11.01%、9.10%、7.01%。综合材用与果用布雷津多性状综合评定法得分,入选5个家系(WRH1、WC9、WC7、DJC20、WRH3),与主成分分析入选的5个家系相同,各家系各项指标平均值见表9。

3 讨论与结论

表型多样性是基因和环境共同作用的结果^[24],利用表型性状进行分析是探究遗传多样性变化的重要基础^[25-26],相关研究认为胡桃楸种群果核性状的变异是稳定遗传的,是胡桃楸适应不同生境条件的方式之一^[27]。胡桃楸不同种源果核描述性表型性状中,顶尖突出程度及核壳颜色的变异系数低于30%,其余5项性状的变异系数为30.96%~57.70%,变异系数的大小可反映性状的变异程度,是适应环境变化和生存竞争的关键,可有效评估种群遗传多样性和育种选择潜

表 7 各性状主成分分析
Tab. 7 Principal component analysis of each trait

| 主要成分因子 Principal component factor | 主成分 I Component I | 主成分 II Component II | 主成分 III Component III | 主成分 IV Component IV |
|---|----------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| 株高 H Plant height | 0.101 | 0.881 | 0.325 | -0.117 |
| 冠幅 CD Crown diameter | 0.227 | 0.567 | 0.149 | -0.263 |
| 地径 BD Basal diameter | 0.26 | 0.841 | 0.241 | -0.142 |
| 胸径 DBH Diameter at breast height | 0.12 | 0.874 | 0.369 | -0.075 |
| 分枝角 BA Branch angle | -0.09 | 0.052 | 0.2 | 0.119 |
| 材积 V Volume | 0.076 | 0.88 | 0.331 | -0.108 |
| 果纵径 D_{FV} Fruit vertical diameter | 0.555 | -0.429 | 0.678 | 0.081 |
| 果横径 D_{FH} Fruit horizontal diameter | 0.894 | 0.068 | -0.264 | 0.279 |
| 果侧径 D_{FL} Fruit lateral diameter | 0.919 | 0.056 | -0.182 | 0.235 |
| 单鲜果质量 m_F Mass of single fruit | 0.948 | -0.055 | 0.156 | 0.186 |
| 果形指数 FSI Fruit shape index | -0.168 | -0.452 | 0.84 | -0.136 |
| 鲜果含水率 M_F Moiture content of fresh fruit | 0.102 | 0.424 | 0.318 | 0.793 |
| 核纵径 D_{NV} Nut vertical diameter | 0.534 | -0.465 | 0.675 | -0.105 |
| 核横径 D_{NH} Nut horizontal diameter | 0.863 | -0.089 | -0.265 | -0.177 |
| 核侧径 D_{NL} Nut lateral diameter | 0.868 | -0.071 | -0.289 | -0.215 |
| 单核质量 m_N Mass of single nut | 0.862 | -0.245 | 0.06 | -0.294 |
| 核形指数 NSI Nut shape index | -0.144 | -0.389 | 0.874 | 0.028 |
| 特征值 Eigenvalue | 5.595 | 4.365 | 3.242 | 1.133 |
| 贡献率 /% Contribution | 32.915 | 25.676 | 19.068 | 6.663 |
| 累积贡献率 /% Cumulative contribution | 32.915 | 58.591 | 77.658 | 84.322 |

表8 各家系综合得分
Tab. 8 Comprehensive score of each family

| 生长性状 Growth trait | | 种实性状 Seed traits | | 综合得分 Comprehensive score | | 主成分值 Principal component value | |
|----------------------|-------|---------------------|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------------|------------|
| 家系 Family | Q_i | 家系 Family | Q_i | 家系 Family | Q_i | 家系 Family | 主成分值 PC |
| QY7 | 2.43 | WRH1 | 2.39 | WRH1 | 3.06 | WRH1 | 3.52 |
| DJC20 | 2.16 | WC29 | 2.25 | WC9 | 3.01 | WC7 | 3.31 |
| QY9 | 2.12 | WC9 | 2.18 | WC7 | 2.92 | WC9 | 3.27 |
| QY2 | 2.11 | WRH3 | 2.18 | DJC20 | 2.84 | DJC20 | 3.14 |
| WC9 | 2.08 | WC7 | 2.14 | WRH3 | 2.83 | WRH3 | 3.04 |

表9 入选家系各性状平均值
Tab. 9 Average values of different traits in selected families

| 家系 Family | 株高(H)/m Plant height | 冠幅(CD)/m Crown diameter | 地径(BD)/cm Basal diameter | 胸径(DBH)/cm Diameter at breast height | 分枝角(BA)/(°) Branch angle | 材积(V)/m ³ Volume | 单鲜果质量(m_c)/g Mass of single fruit | 单核质量(m_N)/g Mass of single nut |
|--------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|--------------------------------|--|---------------------------------------|
| WRH1 | 6.13 ± 0.37 | 4.38 ± 0.53 | 11.87 ± 1.14 | 8.40 ± 0.43 | 32.25 ± 8.61 | 0.0156 ± 0.0026 | 54.09 ± 1.72 | 11.71 ± 0.89 |
| WC9 | 6.13 ± 0.27 | 4.85 ± 0.52 | 12.83 ± 1.02 | 8.30 ± 0.45 | 38.64 ± 2.86 | 0.0151 ± 0.0019 | 52.22 ± 7.43 | 10.61 ± 0.50 |
| WC7 | 6.55 ± 0.37 | 4.64 ± 0.54 | 12.44 ± 0.14 | 8.74 ± 0.41 | 27.87 ± 1.79 | 0.0181 ± 0.0027 | 50.52 ± 0.58 | 9.70 ± 0.64 |
| DJC20 | 7.25 ± 0.13 | 4.62 ± 0.08 | 13.64 ± 0.25 | 9.73 ± 0.31 | 27.63 ± 1.86 | 0.0244 ± 0.0019 | 45.67 ± 3.18 | 7.57 ± 0.32 |
| WRH3 | 5.49 ± 0.23 | 4.42 ± 0.39 | 11.31 ± 1.06 | 7.84 ± 0.15 | 32.75 ± 4.85 | 0.0119 ± 0.0008 | 49.40 ± 7.05 | 10.78 ± 0.59 |

| 家系 Family | 果纵径(D_{FV})/mm Fruit vertical diameter | 果横径(D_{FH})/mm Fruit horizontal diameter | 果侧径(D_{FL})/mm Fruit lateral diameter | 果形指数(FSI) Fruit shape index | 核纵径(D_{NV})/mm Nut vertical diameter | 核横径(D_{NH})/mm Nut horizontal diameter | 核侧径(D_{NL})/mm Nut lateral diameter | 核形指数(NSI) Nut shape index |
|--------------|---|---|--|--------------------------------|---|---|--|------------------------------|
| WRH1 | 59.98 ± 1.63 | 42.33 ± 0.89 | 43.20 ± 0.57 | 1.42 ± 0.06 | 49.91 ± 1.17 | 31.75 ± 0.93 | 30.93 ± 1.71 | 1.57 ± 0.04 |
| WC9 | 57.66 ± 0.58 | 41.49 ± 2.04 | 42.77 ± 2.22 | 1.40 ± 0.06 | 48.09 ± 1.08 | 30.51 ± 0.87 | 28.57 ± 1.29 | 1.58 ± 0.07 |
| WC7 | 56.84 ± 1.77 | 41.05 ± 1.05 | 43.03 ± 0.73 | 1.39 ± 0.08 | 47.23 ± 2.09 | 30.10 ± 0.67 | 29.00 ± 0.52 | 1.57 ± 0.09 |
| DJC20 | 57.08 ± 2.23 | 40.32 ± 0.71 | 40.63 ± 0.93 | 1.41 ± 0.03 | 44.94 ± 1.33 | 28.15 ± 0.10 | 25.95 ± 0.72 | 1.60 ± 0.05 |
| WRH3 | 61.38 ± 1.22 | 39.18 ± 1.70 | 41.05 ± 1.97 | 1.57 ± 0.05 | 52.38 ± 0.33 | 29.83 ± 1.09 | 28.42 ± 1.31 | 1.76 ± 0.08 |

力^[28], 本研究表明胡桃楸果核描述性表型性状存在丰富变异, 其中脊宽度、脊突出程度的变异系数最高, 分别为57.70%和56.98%, 表明从果核表型性状角度来讲, 以脊宽度和脊突出程度作为选育文玩核桃的潜力更大。

在林木育种研究中, 方差分析是评估变异幅度的重要方法^[29]。本研究中, 分枝角性状在家系间差异不显著, 其余11个性状在家系及家系×区组间均表现为差异极显著($P < 0.01$)。这与刘劲宏等^[12]连续3 a对5~7年生胡桃楸家系试验林进行的研究结果一致, 说明不同家系的差异性较强, 各性状在生长初期便能表现

出极显著差异, 具有丰富的遗传变异, 改良潜力较大。生长指标整体的变异系数高于果实性状和果核性状, 差异体现了环境对生长的影响^[30], 这可能是因为不同家系为适应当地的气候环境产生相应的遗传变异, 并遗传到结实^[31]。种实性状的单鲜果质量及单核质量的变异系数高于果核三径均值, 这与前人^[9, 32-33]的研究结果一致, 均表现出种实质量具有显著遗传多样性, 且苗木早期选择具有一定的可靠性^[34-35], 这就可以在胡桃楸结实初期进行优良家系选择, 缩减了日后工作量。遗传力是树木生长性状的主要遗传参数, 生长性状的株高和材积、种实性状的遗传力在0.9以上, 说明

胡桃楸的果用和材用性状受较高水平的遗传力控制,遗传改良空间较大。

相关性分析可反映各性状之间存在的联系,对了解不同性状间的关系具有重要作用。生长性状主要指标及种实性状主要指标均存在极显著正相关($P < 0.01$),说明胡桃楸生长及种实性状相关指标间相关性非常密切,体现了遗传与生理的共同影响,有研究表明胡桃楸早期生长主要受环境因素影响,随树龄增加,遗传因素的控制逐渐增强^[11],表明这些性状可能由相同遗传因素控制,计划下一步工作从分子测序角度进行基因分析。

一般配合力由加性基因控制,表示亲本可以稳定遗传给子代的能力,是选择理想亲本和发展优良杂交的先决条件^[36]。根据生长性状各指标,综合筛选出3个优良亲本QY7、DJC20、WRH16,株高、冠幅、地径、胸径和材积的平均值比总体平均值分别高33.92%、14.43%、20.24%、34.96%、122.51%;根据种实性状各指标,综合筛选出3个优良亲本WRH1、WC9、WC29,果核三径平均值比总体平均值分别高9.19%、9.46%、9.43%、9.73%、10.44%、8.28%。所选优良家系从不同利用方向出发,可作为今后不同育种目标的首选亲本,重点对这6个家系进行连年观测,从材用和果用2个方向筛选优良单株,进行分子标记,培育优良子代。

主成分分析法能将多项指标整合压缩成少量的反映较多信息的综合指标,简化选优指标和程序^[37-38]。本研究对17个数量性状进行的主成分分析中,提取到4个主成分,累积贡献率达到84.322%,第I主成分可代表种实相关信息,第II主成分可代表生长相关信息。胡桃楸主要作为果材兼用树种,对胡桃楸的评价应从多方面、多角度进行^[11],采用布雷津多性状综合评定法将不同属性的多个统计指标的信息转化为无量纲的相对评价价值^[39],可对多个性状同时进行评价,选育出的品系更稳定^[40]。结合主成分得分与布雷津多性状得分进行综合评定,结果显示,万人欢1号和3号,五常7号和9号与东京城20号是表现最佳的果材兼用型优良家系。由于研究对象为栽植第10年的胡桃楸试验林,属第1年或第2年结实,单株结实量无法代表胡桃楸盛果期结实水平,数据分析缺少产量因子,后续会对家系试验林继续观测,充实数据,使研究连贯。

参 考 文 献

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第21卷[M]. 北京:科学出版社,1979.
Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China: Volume 21 [M]. Beijing: Science

Press, 1979.

- [2] PALMA-SILVA C, FERRO M, BACCI M, et al. De novo assembly and characterization of leaf and floral transcriptomes of the hybridizing bromeliad species (*Pitcairnia* spp.) adapted to Neotropical Inselbergs [J]. Molecular Ecology Resources, 2016, 16(4):1012-1022.
- [3] 张晓林,刘超,刘剑,等. 核桃楸研究现状及育种策略[J]. 吉林林业科技, 2019, 48(1):14-17.
ZHANG X L, LIU C, LIU J, et al. Research status and breeding strategy of *Juglans mandshurica* [J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2019, 48(1):14-17.
- [4] 王玉娇. 胡桃楸与红松混交对土壤特性和细根性状的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2021.
WANG Y J. Effects of *Juglans mandshurica* and *Pinus Koraiensis* mixture on soil [J]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [5] 李佳娜,高瑞馨. 我国胡桃楸的遗传育种研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(17):4-7.
LI J N, GAO R X. Research progress on the genetic breeding of *Juglans mandshurica* in China [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(17):4-7.
- [6] 马万里,罗菊春,荆涛,等. 珍贵树种核桃楸的生态学问题及培育前景[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2005, 34(4):489-492.
MA W L, LUO J C, JING T, et al. Ecological studies and prospect of cultivation on *Juglans mandshurica* population [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition, 2005, 34(4):489-492.
- [7] 罗也,王君,杨雨春,等. 东北胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(6):10-19.
LUO Y, WANG J, YANG Y C, et al. Growth patterns of *Juglans mandshurica* secondary forest with stand age and stand density in Northeast China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6):10-19.
- [8] 李志新. 胡桃楸天然群体种实与营养性状变异分析和评价[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2022.
LI Z X. Analysis and evaluation on seeds and fruits, nutritional characters variation of *Juglans mandshurica* natural populations [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [9] 张秦徽. 东北地区胡桃楸种质资源评价及干旱响应表达和代谢机制研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2024.
ZHANG Q H. Evaluation of *Juglans mandshurica* germplasm resources and study on drought response expression and metabolic mechanism in northeast China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
- [10] 周彦超. 辽东地区胡桃楸优树选择与果核表型多样性

- 研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2019.
- ZHOU Y C. Study on selection of superior trees and kernel phenotypic diversity of *Juglans mandshurica* in eastern Liaoning [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [11] 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.
- [12] 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):9-17,64.
- LIU J H, LI Z X, ZHANG H G, et al. Analysis of variation in growth traits of different species and families of *Juglans mandshurica* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(8):9-17, 64.
- [13] 代伟昭. 核桃楸种源及家系变异分析与早期选择研究[J]. 林业勘查设计,2023,52(2):58-62.
- DAI W Z. Variation analysis and early selection of *Juglans mandshurica* provenance and family [J]. Forest Investigation Design, 2023, 52(2):58-62.
- [14] 张丹丹,李翔,王璧莹,等. 长白落叶松种子园亲本无性系生长性状变异研究[J]. 植物研究,2022,42(1):130-137.
- ZHANG D D, LI X, WANG B Y, et al. Variation analysis of growth traits of *Larix olgensis* parental clones in seed orchards [J]. Bulletin of Botanical Research, 2022, 42(1):130-137.
- [15] 魏嘉彤,陈思琪,芦贤博,等. 基于生长与木材性状的红松优良种源评价选择[J]. 北京林业大学学报,2022,44(3):12-23.
- WEI J T, CHEN S Q, LU X B, et al. Evaluation and selection of excellent provenances of *Pinus koraiensis* based on growth and wood properties [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3):12-23.
- [16] 刘庆忠. 核桃种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2007.
- LIU Q Z. Descriptors and data standard for Walnut(*Juglans regia* L.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 植物新品种特异性、一致性、稳定性测试指南核桃属:GB/T 26909—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability. *Juglans* (*Juglans* L.): GB/T 26909—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [18] 柏广新. 长白山西坡天然次生林水曲柳和胡桃楸材积表的编制[J]. 林业资源管理,2009(4):35-40,84.
- BAI G X. Volume table of *Fraxinus mandshurica* and *Juglans mandshurica* in second growth in western slope of Changbai Mountains, Jilin, China [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2009(4):35-40, 84.
- [19] METOUGUI M L, MOKHTARI M, MAUGHAN P J, et al. Morphological variability, heritability and correlation studies within an argan tree population (*Argania spinosa* (L.) Skeels) preserved *in situ* [J]. International Journal of Agriculture and Forestry, 2017, 7(2):42-51.
- [20] RAZAFIMAHATRATRA A R, RAMANANANTOANDRO T, RAZAFIMAHARO V, et al. Provenance and progeny performances and genotype×environment interactions of *Eucalyptus robusta* grown in Madagascar [J]. Tree Genetics & Genomes, 2016, 12(3):38.
- [21] 潘艳艳,梁德洋,郭婧,等. 日本落叶松不同种源及家系生长性状变异分析[J]. 北京林业大学学报,2018,40(11):19-27.
- PAN Y Y, LIANG D Y, GUO J, et al. Variance analyses on growth traits of *Larix kaempferi* in different seed sources [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(11):19-27.
- [22] 王虹,师尚礼,张旭业,等. 紫花苜蓿多元杂交后代产量和品质一般配合力分析及遗传参数的估算[J]. 草业学报,2016,25(3):126-134.
- WANG H, SHI S L, ZHANG X Y, et al. Determination of general combining ability and estimation of genetic parameters for yield and quality in alfalfa [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(3):126-134.
- [23] ZHAO X Y, PAN Y Y, PEI X N, et al. Forward, backward selection and variation analysis of growth traits in half-sib *Larix kaempferi* families [J]. Silvae Genetica, 2019, 68(1):1-8.
- [24] VIENNE D D. What is a phenotype? History and new developments of the concept [J]. Genetica, 2022, 150(3-4):153-158.
- [25] 任俊杰,庞新博,刘昭阳,等. 不同种源蒙古栎种子表型性状的多样性[J]. 浙江农林大学学报,2022,39(6):1221-1228.
- REN J J, PANG X B, LIU Z Y, et al. Diversity of phenotypic characters of *Quercus mongolica* seeds from different provenances [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(6):1221-1228.
- [26] 火艳,招雪晴,黄厚毅,等. 观赏石榴表型遗传多样性

- 分析[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(5): 939-949.
- HUO Y, ZHAO X Q, HUANG H Y, et al. Phenotypic genetic diversity of ornamental pomegranate cultivars [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(5): 939-949.
- [27] 高张莹, 张海峰, 陈国平, 等. 核桃楸种群果核形态及地理变异[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(4): 609-615.
- GAO Z Y, ZHANG H F, CHEN G P, et al. Fruit stone morphology and geographic variation in *Juglans mandshurica* populations [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, 23(4): 609-615.
- [28] HUFFORD M B, XU X, HEERWAARDEN J V, et al. Comparative population genomics of maize domestication and improvement [J]. Nature Genetics, 2012, 44(7): 808-811.
- [29] SAFAVI S A, POURDAD S S, TAEB M, et al. Assessment of genetic variation among safflower (*Carthamus tinctorius* L.) accessions using agro-morphological traits and molecular markers [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2010, 8(3/4): 616-625.
- [30] 吴云燕, 张露, 刘远生, 等. 不同种源/家系毛红椿连年生长期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.
- [31] 赵阳, 毕泉鑫, 句娇, 等. 文冠果种子及苗期生长性状地理种源变异[J]. 林业科学研究, 2019, 32(1): 160-168.
- ZHAO Y, BI Q X, JU J, et al. Geographic variation of seed and seedling growing traits in *Xanthoceras sorbifolium* [J]. Forest Research, 2019, 32(1): 160-168.
- [32] 付强. 基于种实表型和叶片性状的胡桃楸优良种源评价选择研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2024.
- FU Q. Study on the evaluation and selection of elite *Juglans mandshurica* provenance based on seed and fruit phenotype and leaf traits [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2024.
- [33] ZHANG Q H, YU S H, PEI X N. Within- and between-population variations in seed and seedling traits of *Juglans mandshurica* [J]. Journal of Forestry Research, 2002, 33(4): 1175-1186.
- [34] 余诚棋, 杨万霞, 方升佐, 等. 青钱柳种源间苗期性状变异分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 34-38.
- SHE C Q, YANG W X, FANG S Z, et al. Variation analysis of seedling characters among provenances of *Cyclocarya paliurus* [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2010, 34(1): 34-38.
- [35] 袁磊磊, 祁永会, 刘忠玲, 等. 核桃楸种源选择试验及其环境因子的影响[J]. 植物研究, 2013, 33(4): 468-476.
- YUAN X L, QI Y H, LIU Z L, et al. Provenance selection of *Juglans mandshurica* Maxim. and the effects of environmental factors [J]. Bulletin of Botanical Research, 2013, 33(4): 468-476.
- [36] CHEN X D, ZHAO B, JI C H, et al. Transcriptome profiling analysis of two contrasting barley genotypes in general combining ability for yield traits [J]. Brazilian Journal of Botany, 2021, 44(1): 117-123.
- [37] 董明亮, 高嘉玥, 孙文婷, 等. 北京市华北落叶松优树群体遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(4): 616-624.
- DONG M L, GAO J Y, SUN W T, et al. Genetic diversity and population structure of elite *Larix principis-rupprechtii* Mayr in Beijing [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(4): 616-624.
- [38] 贾春红, 张利, 魏晓, 等. 主成分分析法在毛叶木姜子优树选择中的应用[J]. 中药材, 2016, 39(5): 943-947.
- JIA C H, ZHANG L, WEI X, et al. Plus tree selection of *Litsea mollis* by principal component analysis [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2016, 39(5): 943-947.
- [39] 骆汝九, 胡治球, 宋雯, 等. 多性状综合评定的秩和差测验方法[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2008-2015.
- LUO R J, HU Z Q, SONG W, et al. A rank-sum-difference testing method for multi-trait comprehensive ranking [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(10): 2008-2015.
- [40] 梁德洋. 红松种子园亲本无性系及其子代变异选择研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- LIANG D Y. Study on genetic variation of parents and progenies in *Pinus koraiensis* seed orchard [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.