

诃子果实性状变异及优树选择

董章宏^{1,2}, 蒋 华^{1,2}, 杨丽英³, 张 炜^{1,2}, 段胜智³, 杨涛铭^{1,2},
赵江萍^{1,2}, 李归林^{1,2}, 张满常³

(¹保山市林业和草原技术推广站, 云南保山 678000; ²保山市林业和草原科学研究所, 云南保山 678000;

³保山市药品检验检测研究院, 云南保山 678000)

摘要: 为深入挖掘诃子种质资源, 以怒江流域的240株候选单株为研究对象, 测定其果实的19个性状并进行变异和相关性分析, 利用主成分分析法、模糊隶属函数法和多维坐标综合法筛选优良单株。结果表明, 诃子果实性状变异丰富, 变异系数在0.03~0.78之间, 均值0.21; 变异幅度以没食子酸最大, 果肉重量、总酚、果实重量和果核重量次之, 果形指数、水浸出物、可食率、水分较小。相关性分析表明, 可食率与可溶性固形物、总酸均呈极显著正相关, 与水浸出物、总酚和没食子酸均呈显著正相关, 可食率可作为诃子优树选择的重要性状指标; 总糖、总酸、总酚和可溶性固形物两两之间均呈极显著正相关。19个性状提取到5个主成分, 累积方差贡献率74.444%, 决选优株9株, 编号分别为BB01、BB13、JZS22、MC18、MC20、MCC12、MK08、MK12、SJK08。研究结果为诃子良种选育及创制提供了科学依据, 具有重要的应用价值。

关键词: 诃子; 果实; 性状变异; 优树选择

Variation of Fruit Traits and Plus Tree Selection in *Terminalia chebula* Retz.

DONG Zhanghong^{1,2}, JIANG Hua^{1,2}, YANG Liying³, ZHANG Wei^{1,2}, DUAN Shengzhi³, YANG Taoming^{1,2},
ZHAO Jiangping^{1,2}, LI Guilin^{1,2}, ZHANG Manchang³

(¹Forestry and Grassland Technique Extension Station of Baoshan City, Baoshan 678000, Yunnan;

²Forestry and Grassland Scientific Research Institute of Baoshan City, Baoshan 678000, Yunnan;

³Institute for Drug Inspection and Testing of Baoshan, Baoshan 678000, Yunnan)

Abstract: To comprehensively explore the germplasm resources of *Terminalia chebula* Retz., this study selected 240 candidate individual plants from the Nujiang River Basin for analysis. Nineteen fruit traits were assessed, and variation and correlation analyses were performed. Superior individual plants were identified through principal component analysis (PCA), the affiliation function method, and a multidimensional coordinate synthesis method. The results demonstrated substantial variation in the fruit traits of *T. chebula*, with coefficients of variation ranging from 0.03 to 0.78 and an average of 0.21. Gallic acid content exhibited the highest variability, followed by pulp weight, total phenols, fruit weight, and kernel weight. In contrast, traits such as the fruit shape index, water extract, edible rate, and moisture content showed relative limited variation. The edible rate displayed an extremely significant positive correlation with soluble solids and total acid, as well as significant positive correlations with water extract, total phenols, and gallic acid content. These findings highlight the edible rate as a critical indicator for the selection of superior *T. chebula* individuals. Moreover, extremely significant positive correlation were observed among total sugar, total acid, total phenols, and soluble

收稿日期: 2024-08-07 网络出版日期: 2025-01-03

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240807001>

第一作者研究方向为植物遗传改良与繁育, E-mail: dongzhanghong@swfu.edu.cn

通信作者: 张满常, 研究方向为食品药品的检验检测, E-mail: 195906453@qq.com

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202302AE090023); 保山市科技计划项目(2024bskj22)

Foundation projects: Yunnan Provincial Major Sciences and Technology Special Projects Program (202302AE090023); The Science and Technology Plan Project of Baoshan City(2024bskj22)

solids. PCA of the 19 traits yielded five principal components, collectively accounting for 74.444% of the cumulative variance. Nine exceptional elite plants were identified, with the following serial numbers: BB01, BB13, JZS22, MC18, MC20, MCC12, MK08, MK12, and SJK08. These results offer a scientific foundation for the selection and development of improved varieties of *T. chebula*, holding significant practical value for future cultivation and resource utilization.

Key words: *Terminalia chebula* Retz.; fruit; trait variation; plus tree selection

诃子(*Terminalia chebula* Retz.),又名诃黎勒、诃得果,为使君子科(Combretaceae)揽仁树属(*Terminalia* L.)落叶乔木,分布于南亚和东南亚国家,在中国天然分布集中于怒江流域海拔1100 m以下的河谷地区^[1-4]。诃子果实成熟期为11-12月,以果实干品入药;幼果青色,为中药西青果(又名藏青果);成熟果实黄褐色,为中药诃子,是我国药典收录的传统药物^[5-6]。诃子富含多酚、黄酮类、萜类等多种化学活性物质,具有抗氧化、抗菌、抗肿瘤等多种药理活性^[7-8],常用于治疗肠道、心血管、肿瘤等疾病^[8-10],为重要的配伍药材,在蒙药、藏药中视为“药中之王”^[9]。诃子药源主要依赖国外进口;国内云南、广东和广西虽有少量人工栽培,但以采集野生资源为主,导致果实品质参差不齐、采集成本高、安全隐患大、种质资源破坏严重。近年来,学者们对国内诃子的资源分布^[2-4]、种子萌发^[11-12]、苗木培育^[13-14]、荒山造林^[14-15]、分子标记^[16-17]和DNA条形码技术^[18]等进行了研究,但未见果实性状变异研究及优树选择的相关报道。

开展果实性状变异研究和优树选择工作,有助

于种质资源的收集、保存、鉴定评价、利用以及栽培良种培育,对推动诃子的开发利用与可持续发展至关重要。经济林优树选择普遍采用主成分分析法、模糊隶属函数法和多维坐标综合法权衡筛选,即将相关性状表型值划分为不同等级并根据其重要性给予分值,累加评分、综合评定决选优树^[19-21]。本研究在国内诃子主要分布区开展种质资源调查的基础上,科学布局,采集9个样点240株诃子果实并对其19个性状进行测定分析,采用综合评分法决选优良单株,为诃子品比试验林建立、良种培育提供关键材料,对推动产业基地建设和可持续发展、解决药源依赖进口带来的潜在“掐脖子”问题具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 采样地点 9个采样地点兼顾诃子天然分布区的北部、南部和怒江东岸、西岸流域,每个采样点分布面积不低于10 hm²,种群间的直线距离大于20 km,采样地点基本概况见表1。

表1 诃子单株采样地基本概况

Table 1 Information of *Terminalia chebula* sampling sites

编号 Code	采样地点 Sampling location	采样株数 Number of samples	单株编号 Individual number	海拔(m) Altitude
1	保山市龙陵镇安镇	25	BB01~25	937~1190
2	保山市隆阳区潞江镇	30	CG01~30	741~1263
3	保山市龙陵县勐糯镇	31	JZS01~31	1143~1241
4	保山市龙陵县木城乡	31	MC01~31	1014~1241
5	保山市龙陵县木城乡	31	MCC01~31	902~1263
6	保山市隆阳区芒宽乡	12	MK01~12	762~1023
7	保山市龙陵县龙新乡	29	SJK01~29	883~1457
8	保山市施甸县太平镇	31	TP01~31	968~1319
9	临沧市镇康县勐棒镇	20	ZK01~20	784~1246

1.1.2 样株 每个采样地点选择生长正常、成年龄(树龄15年以上)、盛果期、丰产(树冠垂直投影鲜果产量不低于1 kg/m²)的植株作为样株。为减

少近亲繁殖效应,样株间距大于40 m。各样点样株数量根据居群大小而不同,抽样率在0.5%左右,原则上采样地点样株数量不少于20株,但

芒宽乡为分布北缘,植株结实率低,采样植株仅为12株,最终在9个样点内共采集样株240株。

1.1.3 果实样本 于2023年11-12月诃子果实成熟

期,在各采样点内分样株采集果实样本。每样株从树体不同方向方位采集不低于50个成熟果实,按样株装袋,做好标记,供室内分析(图1)。



图1 诃子植株和果实

Fig. 1 *Terminalia chebula* Retz. and its fruits

1.2 试验方法

1.2.1 果实表型性状测定 果实采集后24 h内完成性状的测定。将样株果实带回实验室内,剔除样品果实中畸形、病虫危害、机械损伤等不正常果实后充分混合均匀,随机选取不低于30个果实,果实清洗干净、沥干果面水分,用游标卡尺测量果实横径、果实纵径、果核横径、果核纵径(精度0.01 mm),用电子天平测量果实重量、果肉重量、果核重量(精度0.1 g);收集、保存果肉用于成分测定。可食率(%)=(果实重量-果核重量)/果实重量×100%;果形指数=果实纵径/果实横径。

1.2.2 果实成分性状测定 分单株将果肉用多功能粉碎机磨碎混匀,装入自封袋、编号后置于2~4℃冷藏保存,用于成分测定。水分、灰分、水浸出物、粗纤维、可溶性固形物、总糖、总酸、总酚、没食子酸含量分别按照GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[22]、GB5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》^[23]、GB/T 8305-2013《茶 水浸出物测定》^[24]、GBT5009.10-2003《食品安全国家标准 植物类食品中粗纤维的测定》^[25]、NY/T 2637-2014《水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法》^[26]、GB/T 10782-2021《蜜饯质量通则》^[27]、GB 12456-2021《食品中总酸的测定》^[28]、LY/T 2866-2017

《余甘子粉》^[29]、LY/T1644-2005《没食子酸分析试验方法》^[30]测定。

1.3 数据分析

用Microsoft Excel 2021软件对诃子果实性状和内含物的数据进行整理。用SPSS 26.0软件对果实性状和内含物平均值、标准差、变异系数进行计算及相关性分析、主成分分析、隶属函数法分析和多维坐标综合法分析^[31],对候选单株进行分级打分,综合3种分析方法决选优良单株。

2 结果与分析

2.1 果实性状变异

19个果实性状在全部单株间的变异丰富,变异系数0.03~0.78,均值为0.21。果肉重量、果实重量和果核重量变异系数在0.30~0.34之间;果核纵径/果核横径、果核横径、果核纵径、果实纵径、果实横径、果形指数、可食率变异较低,变异系数均低于0.15。内含物变异系数以没食子酸最高,为0.78,总酚、总糖、灰分和可溶性固形物变异系数在0.23~0.33之间。总酸、粗纤维、水浸出物、水分变异系数均低于0.15。果形指数、水浸出物、可食率和水分变异较小,一致性较高(表2)。

表2 果实性状统计分析

Table 2 Statistical analysis of fruit characteristics

果实性状 Fruit traits	缩写 Abbreviation	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV
果实重量(g)Fruit weight	FW	6.64	35.86	16.12	4.99	0.31
果实横径(mm)Transverse diameter of fruit	FTD	20.74	38.10	27.53	3.11	0.11
果实纵径(mm)Longitudinal diameter of fruit	FLD	25.80	45.77	34.63	4.16	0.12
果肉重量(g)Pulp weight	PW	5.12	33.67	13.55	4.64	0.34
果核重量(g)Kernel weight	KW	0.86	4.05	2.19	0.65	0.30
果核横径(mm)Transverse diameter of kernel	KTD	7.10	18.66	12.83	1.59	0.12
果核纵径(mm)Longitudinal diameter of kernel	KLD	15.01	27.75	20.24	2.49	0.12
可食率(%)Edible rate	ER	76.00	94.55	85.46	3.70	0.04
果形指数 Fruit shape index	FSI	1.02	1.64	1.26	0.11	0.09
果核纵径/果核横径 Longitudinal diameter of kernel/ transverse diameter of kernel	KLD/ KTD	1.12	2.29	1.60	0.22	0.14
水分(%)Moisture content	MC	69.21	84.54	78.09	2.73	0.03
灰分(%)Ash content	AC	0.46	1.52	0.90	0.22	0.25
水浸出物(%)Water extract	WE	54.08	95.90	91.83	4.46	0.05
粗纤维(%)Crude fiber	CF	1.52	3.28	2.27	0.30	0.13
可溶性固形物(%)Soluble solids	SS	4.82	28.62	14.55	3.28	0.23
总糖(g/100g)Total sugar	TS	2.08	7.76	4.33	1.19	0.27
总酸(g/kg)Total acid	TA	21.11	44.96	31.14	4.24	0.14
总酚(mg/g)Total phenol	TP	5.78	50.65	26.99	8.97	0.33
没食子酸(mg/kg)Gallic acid	GA	32.34	2377.62	351.25	273.89	0.78

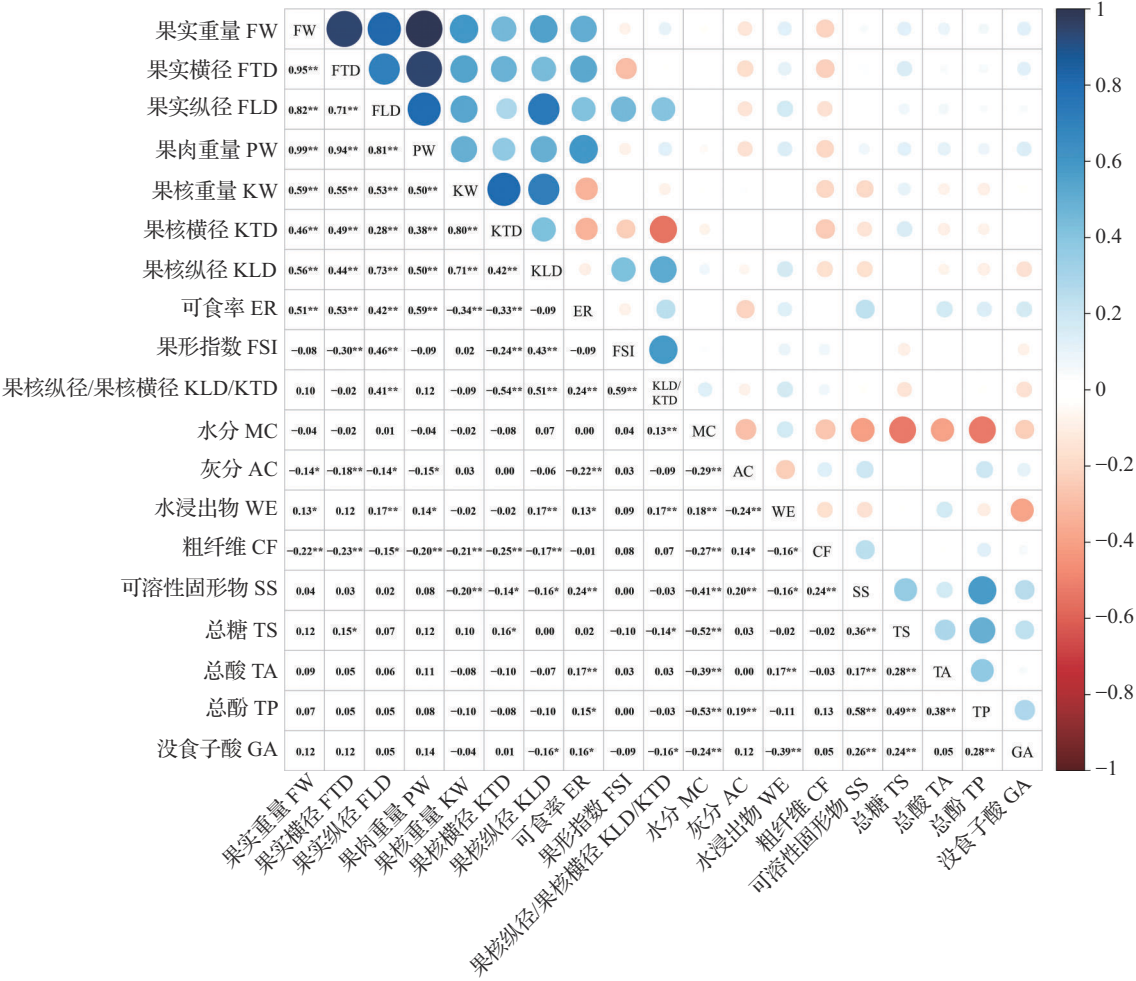
2.2 果实性状相关性

相关性分析结果表明,诃子各性状之间存在较为复杂的关系,果实重量、果核重量、果肉重量及果实横径、果实纵径两两之间均呈极显著正相关。在果实表型性状与内含物方面,果实横径、果核横径与总糖含量呈显著正相关;可食率与可溶性固形物、总酸均呈极显著正相关,与水浸出物、总酚、没食子酸均呈显著正相关,与灰分呈极显著负相关。粗纤维与果实重量、果实横径、果肉重量、果核重量、果核横径、果核纵径呈极显著负相关,与果实纵径呈显著负相关,表明粗纤维受果实表型影响较大。在果实内含物方面,总糖、总酸、总酚和可溶性固形物两两之间均呈极显著正相关,均与水分呈极显著负相关;没食子酸与可溶性固形物、总糖、总酚呈极显著正相关,与水分、水浸出物呈极显著负相关(图2)。

2.3 果实性状主成分分析

以果实表型性状和内含物的数据为基础,计算主成分的特征值、贡献率及累计贡献率。主成分分析显示有5个主成分特征值大于1.0,符合主成分分

析的要求,累计方差贡献率74.444%,能反应19个性状指标的综合信息(表3)。第1主成分特征值5.087,方差贡献率为26.774%,其中正向因子载荷系数较高的是果实重量、果肉重量、果实横径、果实纵径、果核纵径、果核重量、果核横径,主要反映的是果实大小及形态相关信息(图3)。第2主成分特征值3.157,方差贡献率为16.618%,其中正向因子载荷系数较高的是总酚、可溶性固形物、总糖、没食子酸,负向因子载荷系数较大的为水分,主要反映的是果实药用成分相关信息(图3)。第3主成分特征值2.524,方差贡献率为13.284%,其中正向因子载荷系数较高的是果核纵径/果核横径、果形指数、可食率,负向因子载荷系数较大的为果核横径,主要反映的是果实形态相关信息。第4主成分特征值1.974,方差贡献率为10.388%,其中正向因子载荷系数较高的是果形指数,负向因子载荷系数较高的是可食率,主要反映的是果实食用性相关信息。第5主成分中负向因子载荷系数较高的是水浸出物和总酸,特征值1.402,方差贡献率为7.380%,主要反映的是果实药用成分相关信息。



*表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关; **表示在 $P < 0.01$ 水平上极显著相关
* indicates that the correlation at $P < 0.05$ is significant; ** indicates that the correlation at $P < 0.01$ is extremely significant

图2 果实性状相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of fruit characteristics

表3 前5个主成分的特征向量、特征值、贡献率及累计贡献率
Table 3 The eigenvector, eigenvalue, contribution rate, and cumulative contribution rate of the former five principal components

果实性状 Fruit traits	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
果实重量FW(X_1)	0.963	0.119	0.015	-0.157	0.088
果实横径FTD(X_2)	0.911	0.143	-0.101	-0.310	0.072
果实纵径FLD(X_3)	0.885	-0.042	0.323	0.187	0.095
果肉重量PW(X_4)	0.938	0.153	0.084	-0.226	0.096
果核重量KW(X_5)	0.705	-0.181	-0.485	0.411	-0.005
果核横径KTD(X_6)	0.544	-0.060	-0.763	0.172	-0.096
果核纵径KLD(X_7)	0.719	-0.324	0.111	0.524	-0.005
可食率ER(X_8)	0.375	0.297	0.556	-0.609	0.141
果形指数FSI(X_9)	0.051	-0.236	0.575	0.635	0.041
果核纵径/果核横径KLD/ KTD(X_{10})	0.168	-0.247	0.815	0.296	0.084
水分MC(X_{11})	-0.005	-0.743	0.066	-0.337	0.154

表3 (续)

果实性状 Fruit traits	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
灰分AC(X_{12})	-0.184	0.272	-0.166	0.412	0.263
水浸出物WE(X_{13})	0.189	-0.277	0.271	-0.159	-0.669
粗纤维CF(X_{14})	-0.291	0.250	0.194	0.198	0.303
可溶性固形物SS(X_{15})	-0.031	0.714	0.193	0.083	0.109
总糖TS(X_{16})	0.149	0.635	-0.126	0.187	-0.339
总酸TA(X_{17})	0.072	0.451	0.213	0.026	-0.570
总酚TP(X_{18})	0.026	0.777	0.133	0.191	-0.154
没食子酸GA(X_{19})	0.056	0.515	-0.094	-0.059	0.474
特征值Eigenvalue	5.087	3.157	2.524	1.974	1.402
贡献率(%)Contribution rate	26.774	16.618	13.284	10.388	7.380
累计贡献率(%)Cumulative contribution rate	26.774	43.392	56.676	67.064	74.444

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_{19}$ 代表标准化后的性状指标变量
 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{19}$ represents the standardized trait indicator variable

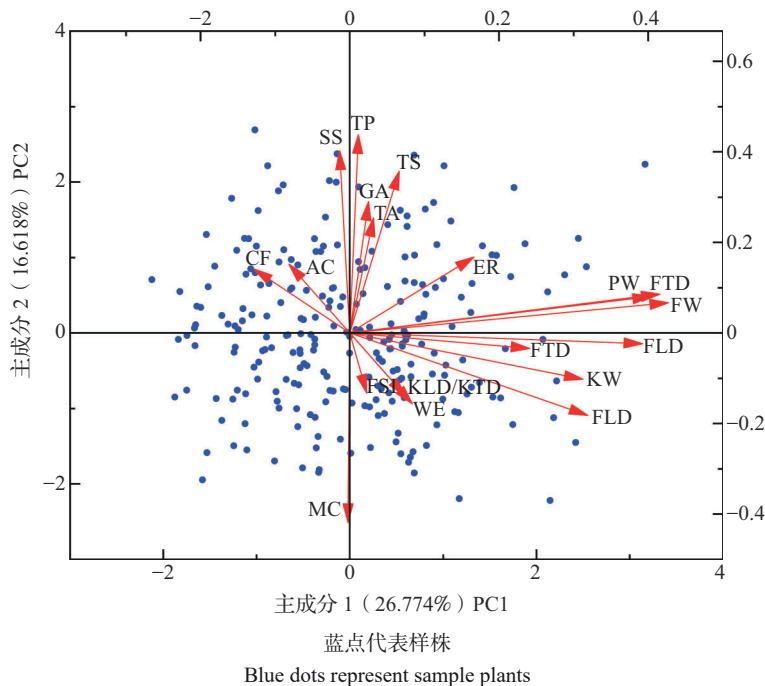


图3 诃子19个性状主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis based on 19 traits of *Terminalia chebula*

前5个主成分能够反映74.444%的综合信息,用 H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 分别表示5个主成分,用 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{19}$ 代表标准化后的性状指标变量,可得出如下线性方程,分别为:

$$H_1=0.427X_1+0.404X_2+0.392X_3+0.416X_4+0.313X_5+0.241X_6+0.319X_7+0.166X_8+0.023X_9+0.075X_{10}-0.002X_{11}-0.082X_{12}+0.084X_{13}-0.129X_{14}-0.014X_{15}+0.066X_{16}+0.032X_{17}+0.012X_{18}+0.025X_{19}$$

$$H_2=0.067X_1+0.081X_2-0.024X_3+0.086X_4-0.102X_5-0.034X_6-0.182X_7+0.167X_8-0.133X_9-0.139X_{10}-0.418X_{11}+0.153X_{12}-0.156X_{13}+0.141X_{14}+0.402X_{15}+0.357X_{16}+0.254X_{17}+0.437X_{18}+0.290X_{19}$$

$$H_3=0.009X_1-0.064X_2+0.203X_3+0.053X_4-0.305X_5-0.480X_6+0.070X_7+0.350X_8+0.362X_9+0.513X_{10}+0.042X_{11}-0.105X_{12}+0.171X_{13}+0.122X_{14}+0.122X_{15}-0.079X_{16}+0.134X_{17}+0.084X_{18}-0.059X_{19}$$

$$H_4 = -0.112X_1 - 0.221X_2 + 0.133X_3 - 0.161X_4 + 0.293X_5 + 0.122X_6 + 0.373X_7 - 0.434X_8 + 0.452X_9 + 0.211X_{10} - 0.240X_{11} + 0.293X_{12} - 0.113X_{13} - 0.141X_{14} + 0.059X_{15} + 0.133X_{16} + 0.019X_{17} + 0.136X_{18} - 0.042X_{19}$$

$$H_5 = 0.074X_1 + 0.061X_2 + 0.080X_3 + 0.081X_4 - 0.004X_5 - 0.081X_6 - 0.004X_7 + 0.119X_8 + 0.035X_9 + 0.071X_{10} + 0.130X_{11} + 0.222X_{12} - 0.565X_{13} + 0.256X_{14} + 0.092X_{15} - 0.286X_{16} - 0.481X_{17} - 0.130X_{18} + 0.400X_{19}$$

将前 5 个主成分的方差贡献率 a_1 (26.774%)、 a_2 (16.618%)、 a_3 (13.284%)、 a_4 (10.388%)、 a_5 (7.380%) 作为权数, 构建主成分分析综合评价模型: $H = a_1H_1 + a_2H_2 + a_3H_3 + a_4H_4 + a_5H_5$ 。

2.4 诃子优良单株选择

利用主成分分析法、隶属函数法、多维坐标综

合法分别计算候选优树的综合得分, 分值前 10% 的单株为优良单株, 在 240 株诃子候选优树中, 综合 3 种评价方法, 最终筛选得到 9 株优良单株, 编号分别为: BB01、BB13、JZS22、MC18、MC20、MCC12、MK08、MK12、SJK08 (表 4)。9 株优良单株中, 除水分和粗纤维外, 其余 17 个果实性状综合水平在全部参选单株平均水平之上, 表明利用 3 种方法筛选诃子优良单株具有一定的可行性和有效性。优良单株的果实重量、果实横径、果实纵径、果肉重量、果核重量、果核横径、果核纵径、可食率、果形指数、果核纵径/果核横径、灰分、水浸出物、可溶性固形物、总糖、总酸、总酚、没食子酸的平均值均分别大于其总体平均值, 如表 5 所示。选取的优良单株具有显著优异性, 可以作为优质的繁育材料加以利用。

表 4 3 种方法选择的复合型优株得分 (前 24 名)

Table 4 Scores of superior complex individuals selected by the three methods (top24)

排名 Ranking	主成分分析法 Principal component analysis		隶属函数法 Affiliation function method		多维坐标综合法 Multidimensional coordinate synthesis method	
	编号 No.	综合得分 F	编号 No.	Δi 值 Δi value	编号 No.	Pi 值 Pi value
1	BB01	2.4928	BB25	0.5380	BB01	1.2360
2	MK08	2.0289	BB01	0.5317	MC18	1.3045
3	JZS22	1.8443	MK08	0.5280	MK08	1.3330
4	MK12	1.8248	MK12	0.5230	JZS22	1.3388
5	BB13	1.7748	JZS22	0.5115	MCC12	1.3465
6	MCC12	1.7726	BB13	0.5113	MK12	1.3582
7	MC18	1.7022	MC20	0.5113	BB13	1.3927
8	MC20	1.6854	ZK09	0.5050	MCC11	1.4059
9	BB25	1.4541	MCC12	0.5000	CG07	1.4274
10	SJK08	1.2042	MCC19	0.4982	MC20	1.4577
11	MC07	1.1956	CG28	0.4720	CG05	1.4692
12	MC12	1.1887	JZS29	0.4712	ZK14	1.4700
13	MCC11	1.1529	BB08	0.4673	MC12	1.4735
14	CG28	1.1479	SJK11	0.4670	MC11	1.4880
15	CG07	1.0992	MCC09	0.4649	BB04	1.4919
16	ZK14	1.0125	MC18	0.4640	MCC07	1.4949
17	MCC19	1.0119	MCC22	0.4506	TP06	1.5105
18	MCC10	0.9771	MC07	0.4473	TP20	1.5147
19	MCC30	0.9673	BB07	0.4470	SJK08	1.5178
20	SJK09	0.9629	MCC08	0.4426	CG14	1.5280
21	MCC06	0.9615	MCC23	0.4414	MCC02	1.5337
22	MCC07	0.9468	MCC21	0.4383	MC31	1.5361
23	JZS29	0.9409	SJK08	0.4380	CG03	1.5382
24	MC11	0.9349	CG30	0.4369	MCC06	1.5418

表5 各优良单株的性状表现

Table 5 Performance of superior individuals at traits

单株编号 Individual number	果实重量 (g) FW	果实横径 (mm) FTD	果实纵径 (mm) FLD	果肉重量 (g) PW	果核重量 (g) KW	果核横径 (mm) KTD	果核纵径 (mm) KLD	可食率 (%) ER	果形指数 FSI	果核纵径/ 果核横径 KLD/KTD
BB01	35.86	38.10	44.88	33.67	2.19	13.51	21.32	93.86	1.18	1.58
BB13	29.64	34.60	44.26	27.22	2.42	14.19	23.41	91.74	1.28	1.65
JZS22	29.87	34.61	43.76	26.97	2.89	14.19	23.74	90.25	1.26	1.68
MC18	24.97	32.34	40.64	21.99	2.98	13.77	22.89	88.10	1.26	1.67
MC20	25.50	31.55	42.17	22.91	2.59	11.92	24.07	89.81	1.34	2.04
MCC12	26.58	33.28	39.81	23.66	2.93	13.14	25.34	88.96	1.20	1.93
MK08	30.07	33.75	45.39	26.66	3.41	15.25	23.84	88.42	1.34	1.57
MK12	20.77	27.97	45.77	17.32	3.45	13.90	25.02	83.03	1.64	1.82
SJK08	26.69	33.22	40.39	23.55	3.14	16.03	23.51	87.29	1.22	1.47
优良单株均值 Mean of superior individuals	27.77	33.27	43.01	24.88	2.89	13.99	23.68	89.05	1.30	1.71
总体均值 Mean of total	16.12	27.53	34.63	13.55	2.19	12.83	20.24	85.46	1.26	1.60

单株编号 Individual number	水分 (%) MC	灰分 (%) AC	水浸出物 (%) WE	粗纤维 (%) CF	可溶性 固形物 (%) SS	总糖 (g/100g) TS	总酸 (g/kg) TA	总酚 (mg/g) TP	没食子酸 (mg/kg) GA
BB01	78.52	0.60	94.21	1.69	17.40	6.45	29.05	36.20	2207.02
BB13	78.04	1.49	94.13	2.01	18.00	4.57	29.18	32.93	273.20
JZS22	77.14	1.02	94.26	1.80	18.92	6.69	24.40	30.66	538.11
MC18	74.33	0.91	93.17	2.14	22.81	6.16	38.13	42.43	382.14
MC20	74.45	0.79	93.20	2.38	19.14	4.76	36.03	22.35	486.40
MCC12	73.28	1.36	93.03	2.48	13.63	5.29	33.02	41.89	278.44
MK08	73.35	1.14	91.60	2.84	14.29	4.72	39.62	37.72	143.87
MK12	72.86	1.28	93.10	2.35	13.55	7.76	39.85	35.29	401.15
SJK08	74.87	0.81	95.90	2.16	14.34	6.23	34.24	24.67	186.27
优良单株均值 Mean of superior individuals	75.20	1.04	93.62	2.21	16.90	5.85	33.73	33.79	544.07
总体均值 Mean of total	78.09	0.90	91.83	2.27	14.55	4.33	31.14	26.99	351.25

3 讨论

3.1 果实性状变异

育种资源是生产优良繁殖材料的基础,林木遗传改良需保护物种丰富度,继而持续利用资源^[20,32]。确保育种资源的多样性,需从不同环境条件中选择育种材料^[33]。在本研究中,诃子采集样点兼顾分布

区北缘、南缘和怒江东岸、西岸,能为优树选择和良种选育提供丰富种质材料。遗传和变异是林木遗传改良的基础^[34]。在基因和环境的共同作用下,植物性状变异丰富,为植物遗传改良提供多种选择^[35-36]。诃子部分性状变异丰富,可能受到环境、遗传等多重因素的共同影响,是诃子在不同环境中适应性的表现。表型变异系数能反映表型性状的变

异程度及种质差异的范围,变异系数越大,性状变异程度越高,表型多样性越丰富,选择潜力越大^[37-38]。诃子没食子酸的变异系数高达0.78,居于首位,果核重量、果实重量、总酚和果肉重量性状变异程度次之,介于0.30~0.34之间,表明诃子在药用性状和产量性状上有较大选择潜力,是选优工作中着重考虑的基础条件。相比之下,水分、可食率、水浸出物和果形指数变异程度较低,表现出较高的稳定性和一致性,受环境影响较小。本研究中,诃子果肉重量、果实重量和果核重量变异较大,与江明军等^[39]在文冠果(*Xanthoceras sorbifolia* Bunge)中的研究一致,而种实大小形态性状相对稳定,与文冠果^[39]、黄连木(*Pistacia chinensis* Bunge)^[40]、浙江红山茶(*Camellia chekiangoleosa* Hu)^[41]等优良单株选择研究一致。

植物性状存在一定的关联,相关性分析可以展示各性状之间错综复杂的关系^[42]。诃子果实重量、果核重量、果肉重量以及果实横径、果实纵径之间均呈现极显著正相关,表明诃子果实形态在生长发育过程中具有一定的协同性。可食率与可溶性固形物、总酸均呈极显著正相关,与水浸出物、总酚、没食子酸均呈显著正相关,说明诃子果实可食率越高,越有利于次生代谢物的积累,因此,将来对诃子开展大面积选优工作时,可以通过可食率指标对单株进行初步筛选,降低选优工作量。可溶性固形物、总糖、总酸、总酚含量两两之间呈极显著正相关,推测果实内部次生代谢物的合成和积累可能存在共同调控机制,对深入了解诃子果实的生理代谢过程以及优化栽培条件以提高果实次生代谢物积累具有重要的意义。

3.2 优良单株综合筛选

相对于独立标准法和连续选择法,综合评价法综合考虑植物性状,降低优选指标偏差,在选优工作中备受青睐。主成分分析法是将多个性状指标通过降维的方式用综合指标来量化,每个性状系数用简化的综合系数来代替^[19,43],已运用在千年桐(*Vernicia montana* Lour.)^[44]、‘海螺’望春花(*Yulania denudata* ‘Hailuo’)^[45]、文冠果^[46]等植物的优良单株筛选工作中。在主成分分析法基础上增加隶属函数分析法和多维坐标综合法,可以有效地降低评价误差,使选优结果更加科学、全面和可靠。综合3种评价方法进行优良单株选择,目前已广泛运用于山桐子(*Idesia polycarpa* Maxim.)^[36]、文冠果^[37]、浙江红花油茶^[41]等植物中。因评价权重不同,多维坐标

综合法与主成分分析法和隶属函数分析法的评价结果差异较大,在刘英等^[36]、江明军等^[39]、李佳妮等^[41]的研究中也是如此,但3种方法筛选结果排序总体趋于一致,表明选优结果较为科学可靠。综合3种评价结果,从240株诃子候选单株中筛选排名前10%作为优株,最终有9株候选单株同时入选,优株的果实性状具有显著的优异性,对主要经济性状的稳定性进一步研究后,可在诃子的生产中推广应用。

本研究收集不同种源果实,对果实19个性状进行测定和分析,为诃子的良种选育奠定了一定基础。但植物的生长发育和次生代谢物的形成,受基因和环境共同影响^[47]。本研究并未开展相同环境条件下诃子果实表型性状和次生代谢物的相关研究,存在一定的局限性,为了选优结果更加准确,选择出育种所需稳定的性状,开展优株及其家系种源试验并进行长期观测是下一步研究方向,以便挑选出性状稳定、品质更优的单株在生产中推广运用。同时做好其他种质资源的收集保存工作,以便及时挖掘利用优良性状。

参考文献

- [1] 吴征镒. 云南种子植物名录:上册. 昆明:云南人民出版社, 1984:391
Wu Z Y. Species list of seed plants in Yunnan: Volume 1. Kunming: The Peoples Press of Yunnan, 1984:391
- [2] 尼章光, 罗心平, 张林辉, 文定良, 解德宏. 云南野生诃子资源及开发利用. 中国野生植物资源, 2004, 23(4): 34, 45
Ni Z G, Luo X P, Zhang L H, Wen D L, Xie D H. Development and utilization of wild resources of *Terminalia chebuaia* in Yunnan. Wild Plant Resources in China, 2004, 23(4): 34, 45
- [3] 奎学华, 罗斌. 永德县诃子资源现状及分布特点研究. 林业调查规划, 2010, 35(5): 80-83
Kui X H, Luo B. The resources status and the distribution characteristic of *Terminalia chebuaia* Yongde county. Forest Inventory and Planning, 2010, 35(5): 80-83
- [4] Dong Z H, Jiang H, Zhang W, Wu J H, Yang Y P, Yang T M, Zhao J P, Luo C Z, Yang X X, Li G L. Potential distribution prediction of *Terminalia chebula* Retz. in China under current and future climate scenarios. Ecology and Evolution, 2025, 15(2): e70908
- [5] 刘玉梅, 宋宝安, 杨松, 胡德禹, 金林红, 薛伟. 诃子化学成分与生物活性的研究进展. 贵州大学学报:自然科学版, 2007, 24(2): 2008-2012
Liu Y M, Song B A, Yang S, Hu D Y, Jin L H, Xue W. Research advances in chemical components and bioactivities of *Terminalia chebuaia* Retz. Journal of Guizhou University:

- Natural Sciences Edition, 2007, 24(2): 2008-2012
- [6] 唐荣平. 临沧热区南药诃子资源现状及产业发展建议. 现代农业科技, 2020(2): 81-82
Tang R P. Status of *Terminalia chebuaia* Retz. resources in Lincang hot area and industrial development suggestions. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(2): 81-82
- [7] 赵鹿, 廖翠萍, 杨秀娟, 董世奇, 樊慧蓉, 刘昌孝. 诃子的研究进展及质量标志物的预测. 中草药, 2020, 51(10): 2732-2744
Zhao L, Liao C P, Yang X J, Dong S Q, Fan H R, Liu C X. Research progress in *Terminalia chebula* and its predictive analysis on Q-marker. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(10): 2732-2744
- [8] Tiwari M, Barooah M S. A comprehensive review on the ethnomedicinal and pharmacological properties of *Terminalia chebula* fruit. Phytochemistry Reviews, 2024, 23: 125-145
- [9] 张秀娟, 何丽娟, 芦清, 李东悦. 民族药诃子药理活性研究进展. 中国中药杂志, 2016, 41(4): 619-623
Zhang X J, He L J, Lu Q, Li D Y. Pharmacological activity of *Terminalia chebula*. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(4): 619-623
- [10] Na Takuathung M, Wongnoppavich A, Jaijoy K, Soonthorncharenon N, Sireeratawong S. Antioxidant and antitumorigenic activities of the standardized water extract from fruit of *Terminalia chebula* Retz. var. *chebula*. Natural Product Communications, 2023, 18(6): 1-12
- [11] 唐斌, 李世平. 中药诃子的发芽试验. 特产研究, 2003(2): 31-32
Tang B, Li S P. Germination experiment of Chinese medicine, *Terminalia chebula* Retz.. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 2003(2): 31-32
- [12] 唐荣平, 苏汉林, 王先宏, 黄飞燕. 诃子种子萌发特性初步研究. 种子, 2014, 33(8): 92-94
Tang R P, Su H L, Wang X H, Huang F Y. Preliminary study on seed germination characteristics of *Terminalia chebula* Retz.. Seed, 2014, 33(8): 92-94
- [13] 李会海. 诃子育苗技术. 热带农业科学, 2013, 33(1): 28-30, 57
Li H H. Quality bag seedlings cultivation technique for *Terminalia chebula*. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2013, 33(1): 28-30, 57
- [14] 奎学华, 张志涵, 奎文天, 杨雪兰. 诃子苗木培育及模拟荒山造林试验研究. 林业科技, 2023, 48(1): 11-14, 62
Kui X H, Zhang Z H, Kui W T, Yang X L. Research on the cultivation of *Terminalia chebula* seedlings and simulated afforestation experiments on barren hills. Forestry Science & Technology, 2023, 48(1): 11-14, 62
- [15] 奎学华, 寸德富, 杨永兰. 怒江下游低热河谷地区诃子造林成效调查分析. 绿色科技, 2023, 25(1): 139-143, 147
Kui X H, Cun D F, Yang Y L. Investigation and analysis on the effect of afforestation of *Terminalia chebulain* the low heat valley area of the lower reaches of the Nuiang River. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(1): 139-143, 147
- [16] 黄丰, 王培训, 周联, 曹柳英, 梁瑞燕, 徐鸿华, 刘军民. 诃子及其混淆品 RAPD 分析. 中草药, 2000, 31(9): 697-700
Huang F, Wang P X, Zhou L, Cao L Y, Liang R Y, Xu H H, Liu J M. Identification of the fruit of *Terminalia chebula* from its comfusable varieties by RAPD analysis. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2000, 31(9): 697-700
- [17] 吴文如, 李薇, 赖小平, 吴业剑, 梁倩影. 药用植物诃子 ISSR-PCR 反应体系的建立与优化. 广东药学院学报, 2011, 27(2): 140-143
Wu W R, Li W, Lai X P, Wu Y J, Liang Q Y. Establishment and optimization of ISSR-PCR reaction system for *Terminalia chebula* Retz.. Journal of Guangdong Pharmaceutical College, 2011, 27(2): 140-143
- [18] Stalin N, Madasamy P. Evaluation of chloroplast and nuclear DNA barcodes for species identification in *Terminalia* L.. Biochemical Systematics and Ecology, 2016, 68: 223-229
- [19] 起国海, 吴疆翀, 郑益兴, 彭兴民, 张太奎, 张孟伟, 余侃, 张燕平. 基于综合评分法的辣木优树选择. 分子植物育种, 2018, 16(7): 2282-2290
Qi G H, Wu J C, Zheng Y X, Peng X M, Zhang T K, Zhang M W, Yu K, Zhang Y P. Plus tree selection of *Moringa oleifera* based on comprehensive scoring method. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(7): 2282-2290
- [20] Lee K, Kim I S, Choi W Y. Enhancing breeding potential and genetic conservation: A comprehensive approach to plus-tree selection for *Tilia amurensis* improvement. Forests, 2023, 14: 1972
- [21] 徐鑒, 刘宇, 杨林, 田金红, 李婧婷, 马海涛, 李恩良, 王大玮. 鲜食型云南柃[木衣]优树选择. 植物遗传资源学报, 2023, 24(3): 903-910
Xu L, Liu Y, Yang L, Tian J H, Li J T, Ma H T, Li E L, Wang D W. Plus tree selection of fresh *Docynia delavayi* (Franch.) Schneid.. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(3): 903-910
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定. 北京: 中国标准出版社, 2016
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National standard for food safety determination of moisture in foods. Beijing: National Standard Press, 2016
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.4-2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定. 北京: 中国标准出版社, 2016
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.4-2016 National standard for food safety determination of ash in foods. Beijing: National Standard Press, 2016
- [24] 周卫龙, 徐建峰, 陆小磊, 王瑾, 沙海涛. GB/T 8305-2013 茶水浸出物的测定. 北京: 中国标准出版社, 2013
Zhou W L, Xu J F, Lu X L, Wang J, Sha H T. GB/T 8305-2013 Tea-Determination of water extracts content. Beijing:

- National Standard Press, 2013
- [25] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.88-2014 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定. 北京: 中国标准出版社, 2014
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009. 88-2014 National standard for food safety determination of dietary fibre in foods. Beijing: National Standard Press, 2014
- [26] 聂继云, 李静, 徐国锋, 李海飞, 毋永龙, 李志霞, 闫震, 匡立学. NY/T 2637-2014 水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法. 北京: 中国标准出版社, 2014
- Nie J Y, Li J, Xu G F, Li H F, Wu Y L, Li Z X, Yan Z, Kuang L X. NY/T 2637-2014 Refractometric method for determination of total soluble solids in fruits and vegetables. Beijing: National Standard Press, 2014
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 10782-2021 蜜饯质量通则. 北京: 中国标准出版社, 2021
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 10782-2021 General rule for the quality of preserved fruits. Beijing: National Standard Press, 2021
- [28] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 12456-2021 食品中总酸的测定. 北京: 中国标准出版社, 2021
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 12456-2021 National standard for food safety determination of total acids in foods. Beijing: National Standard Press, 2021
- [29] 甘瑾, 冯颖, 张弘, 张雯雯, 李娟, 侯彬. LT/T 2866-2017 余甘子粉. 北京: 中国标准出版社, 2017
- Gan J, Feng Y, Zhang H, Zhang W W, Li X, Hou B. LT/T 2866-2017 *Phyllanthus emblica* powder. Beijing: National Standard Press, 2017
- [30] 陈箭鸿, 汪咏梅, 吴冬梅, 吴在嵩. LY/T1644-2005 没食子酸分析试验方法. 北京: 中国标准出版社, 2005
- Chen J H, Wang Y M, Wu D M, Wu Z S. LY/T1644-2005 Test method for analysis of gallic acid. Beijing: National Standard Press, 2005
- [31] 熊彪, 齐季, 董树斌, 张莉梅, 张志翔, 哈登龙, 琚煜熙. 基于种实性状的山胡椒优良单株选择. 东北林业大学学报, 2016, 44(5): 10-14
- Xiong B, Qi J, Dong S B, Zhang L M, Zhang Z X, Ha D L, Ju Y X. Superior individual selection of *Lindera glauca* based on fruit and seed traits. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(5): 10-14
- [32] Clark J, Wilson T. The importance of plus-tree selection in the improvement of hardwoods. Quarterly Journal of Forestry, 2005, 99(1): 45-50
- [33] Sanna O, Benjamin D, Véronique J, Delphine D, Anna M F, Jose C, Paraskevid A, Patricia F R, Sara P, Pascal M, Simone S, Francesca B, Ivan S, Giovanni G V, Santiago C G M, Bruno F, Filippas A, Catherine B, Ricardo A. Diversity and enrichment of breeding material for resilience in European forests. Forest Ecology and Management, 2023, 530: 120748
- [34] 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 Forests, 2008, 36(3): 225-488
- [35] 杨旭, 杨志玲, 程小燕, 谭美. 不同种源三叶崖爬藤表型多样性分析. 植物资源与环境学报, 2019, 28(3): 78-83
- Yang X, Yang Z L, Cheng X Y, Tan M. Analysis on phenotypic diversity of *Tetrastigma hemsleyanum* from different provenances. Journal of Plant Resources and Environment, 2019, 28(3): 78-83
- [36] 刘英, 王帅, 王慧敏, 刘震. 山桐子果实性状变异规律及优良单株选择. 森林与环境学报, 2022, 42(5): 536-543
- Liu Y, Wang S, Wang H M, Liu Z. Variation pattern of fruit traits and superior individual selection in *Idesia polycarpa*. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(5): 536-543
- [37] 王艺林, 吕东, 刘贤德, 李小燕, 赵国生, 刘建海. 5个种源文冠果果实和种子表型性状变异分析. 经济林研究, 2018, 36(3): 38-47
- Wang Y L, Lyu D, Liu X D, Li X Y, Zhao G S, Liu J H. Analysis on variation of phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolia* fruit and seed of five crown fruits provenances. Non-wood Forest Research, 2018, 36(3): 38-47
- [38] Pan Y Y, Li S C, Wang C L, Ma W J, Xu G Y, Shao L L, Li K L, Zhao X Y, Jiang T B. Early evaluation of growth traits of *Larix kaempferi* clones. Journal of Forestry Research, 2018, 29(4): 1031-1039
- [39] 江明军, 国靖, 赵祥树, 汪贵斌. 不同种源文冠果种实性状差异及优良单株筛选. 森林与环境学报, 2023, 43(3): 265-271
- Jiang M J, Guo J, Zhao X S, Wang G B. Differences of *Xanthoceras sorbifolia* traits from different provenances and selection of superior individual plants. Journal of Forest and Environment, 2023, 43(3): 265-271
- [40] 房凡, 贾黎明, 蒋晓辉, 白倩, 苏淑钗. 基于24个表型性状的中国黄连木优良单株选择. 北京林业大学学报, 2024, 46(2): 40-50
- Fang F, Jia L M, Jiang X H, Bai Q, Su S C. Selection of superior individual *Pistacia chinensis* based on 24 phenotypic traits. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 40-50
- [41] 李佳妮, 吴美珍, 李煜, 叶玲, 陈世品, 陈辉. 浙江红花油茶实生群体性状变异及综合评价. 森林与环境学报, 2024, 44(3): 274-282
- Li J N, Wu M Z, Li Y, Ye L, Chen S P, Chen H. Comprehensive analysis of the phenotypic variation among seedling populations of *Camellia chekiangoleosa*. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(3): 274-282
- [42] 江锡兵, 滕国新, 范金根, 罗修宝, 盛建洪, 龚榜初. 长江中下游区板栗主栽品种果实表型和品质综合评价. 林业科学研究, 2022, 35(1): 70-81
- Jiang X B, Teng G X, Fan J G, Luo X B, Sheng J H, Gong B

- C. Comprehensive evaluation of fruit phenotype and quality of main Chinese chestnut cultivars in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Forest Research*, 2022, 35(1): 70-81
- [43] 戚嘉敏, 张鹏, 奚如春, 高乐, 陆晨. 高州油茶果实性状的遗传变异特征. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(4): 108-113
- Qi J M, Zhang P, Xi R C, Gao L, Lu C. Genetic variation and correlation analysis of fruit characters of *Camellia gauchowensis*. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, 38(4): 108-113
- [44] 刘俊涛, 王瑞辉, 沈燕, 魏家鸿, 刘凯利, 董凯丽, 吴毅, 黄木易. 千年桐盛果期优良单株综合评价选择. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(6): 53-62
- Liu J T, Wang R H, Shen Y, Wei J H, Liu K L, Dong K L, Wu Y, Huang M Y. Comprehensive evaluation and selection of excellent individual plants in flourishing fruit period of *Vernicia montana*. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(6): 53-62
- [45] 程明伟, 韩文妍, 骆绪美. ‘海螺’望春花优良单株选择及经济性状综合评价. *农学学报*, 2024, 14(5): 54-59
- Cheng M W, Han W Y, Luo X M. Selection of excellent single plant and comprehensive evaluation of economic traits of *Yulania denudate* ‘Hailuo’. *Journal of Agriculture*, 2024, 14(5): 54-59
- [46] 连琛, 敖妍, 谷飞云, 赵艳玲, 芦特. 文冠果古树优良单株筛选与健康评价. *东北林业大学学报*, 2024, 52(1): 6-13
- Lian C, Ao Y, Gu F Y, Zhao Y L, Lu T. Screening and health evaluation of excellent individual characteristics of *Xanthoceras sorbifolium* ancient trees. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, 52(1): 6-13
- [47] Li Y Q, Kong D X, Fu Y, Sussman M, Wu H. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 148: 80-89