

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230024

锥栗杂交 F_1 代果实表型性状变异分析及单株综合选择

方周^{1,2}, 江锡兵^{1*}, 龚榜初¹, 赖俊声³, 吴剑³, 李煜²

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002;

3. 庆元县自然资源和规划局, 浙江 庆元 323800)

摘要: [目的] 为明确锥栗杂交子代果实性状变异规律, 并进行综合评价和优良单株选择。[方法] 以锥栗杂交 F_1 代 143 个单株为材料, 对其果实表型 7 个外形特征性状和 12 个数量性状分别进行遗传多样性与变异分析, 并采用主成分分析与灰色关联度分析方法对所有单株进行综合评价。[结果] 杂交 F_1 代坚果形状等 6 个外形特征性状多样性指数大于 0.8, 具有丰富的遗传多样性; 12 个数量性状中, 变异幅度较大的为栗苞总质量、坚果总质量与单果质量, 变异幅度最小为出仁率, 单株间果实表型各性状差异极显著 ($P < 0.01$), 具有较大的选择潜力; 12 个果实数量性状间共存在 42 组极显著相关 ($P < 0.01$) 与 6 组显著相关 ($P < 0.05$) 关系, 可开展联合选择; 主成分分析与灰色关联度分析中单株综合得分最高均为 G-98, 2 种方法综合评选出 G-98 等 10 个优良单株。[结论] 锥栗杂交 F_1 代果实表型性状存在丰富的变异与相关性, 综合选优结果重合度较高, 研究结果为锥栗新种质创制和优良新品种选育奠定了基础。

关键词: 锥栗; 杂交育种; 果实性状; 主成分分析; 灰色关联度分析

中图分类号: S476

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)05-0021-11

锥栗 (*Castanea henryi* (Skan) Rehder & E. H. Wilson) 属壳斗科 (Fagaceae) 栗属 (*Castanea*) 植物, 是我国特有的木本粮食树种和特色经济林树种。锥栗果实含有丰富的淀粉、糖、蛋白质、维生素以及人体必需的多种氨基酸和矿物质元素, 口感细腻香甜, 风味独特, 深受广大南方群众的喜爱^[1]。且其树干通直, 材质优良, 纹理微密, 是优秀的果材兼用树种。锥栗原产于我国中部, 自然分布于秦岭、淮河以南的 14 个省份, 尤以闽北和浙南种质资源最为丰富。通过对野生群体的人工选育, 在浙江庆元、福建建瓯等地选出了多个大果、高产的优良品种^[2], 并进行了大规模的人工栽培, 成为带动山区农民增收致富的重要途径, 具有良好的经济效益。目前全国锥栗栽培面积约

8 万 hm^2 , 而年产量仅为 8 万吨^[3]。大果、丰产的高品质锥栗品种稀少, 已经逐步成为制约锥栗产业发展壮大的重要因素。

锥栗新品种选育目前主要为传统的选择育种。自上世纪 90 年代起, 育种工作者对野生锥栗资源进行了长期的人工选育, 继续选择潜力已经不大; 同时随着城市化进程推进, 有限的锥栗野生居群遭到不断的破坏, 其面积逐渐缩小, 从中进一步选育出锥栗优良品种的难度越来越大, 杂交育种逐渐成为锥栗新品种选育的新方向。杂交育种可以使不同遗传基础的亲本基因在子代进行重组, 产生不同的遗传多样性, 通过筛选有可能寻找出兼具或者超过双亲优良性状的新个体, 从而为新品种选育提供材料^[4]。近年来, 杂交育种在油茶 (*Camellia*

收稿日期: 2023-01-15 修回日期: 2023-05-28

基金项目: 浙江省农业新品种选育重大科技专项 (2021C02070-4); 林业和草原科技成果国家级推广项目 (2023133102)

* 通讯作者: 江锡兵, 副研究员, 研究方向: 经济林育种与栽培, E-mail: jxb912@126.com

oleifera Abel.)^[5]、枣 (*Ziziphus jujuba* Mill.)^[6]、猕猴桃 (*Actinidia chinensis* Planch.)^[7] 等经济树种上运用广泛, 成为创育新品种的有效途径。我国自上世纪 60 年代起, 通过对板栗 (*Castanea mollissima* Blume.)、丹东栗 (*Castanea crenata* Sieb. et Zucc.)、日本栗 (*Castanea crenata* Sieb. et Zucc.) 等栗属植物的杂交, 成功选育出一批具有高产、早熟、适应性强等优良特性的栗新品种^[8-10], 然而国内锥栗杂交育种相关研究尚在起步阶段, 关于锥栗杂交子代的经济性状相关研究鲜有报道。

本研究以锥栗杂交 F_1 代为材料, 通过变异分析、方差分析、主成分分析以及灰色关联度分析对其果实表型性状进行研究, 并综合选择优良杂交子代单株, 为后续进一步开展锥栗优良新品种选育奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于浙江省丽水市庆元县关门岙林区, 属亚热带季风性气候。以中国林业科学研究院亚热带林业研究所选育的‘YLZ 1 号’等 13 个锥栗优良新品种或无性系为杂交亲本, 2011 年通过人工控制授粉获得锥栗杂交果实, 2012 年播种育苗, 2013 年春季建立杂交子代测定林, 采用完全随机区组设计, 株行距 4 m × 4 m。于 2021 年 8 月对锥栗杂交 F_1 代结果情况进行调查统计, 共选取 143 株生长发育良好、结果性能较强的杂交子代单株。杂交组合概况以及单株数量见表 1。

1.2 试验方法与数据处理

2021 年 9 月至 11 月, 根据调查结果于每株子代上采集 30 ~ 50 个健康饱满无病害的成熟栗苞带回实验室, 使用游标卡尺、百分位天平测定栗苞总质量 (X_1)、栗苞横径 (X_2)、栗苞纵径 (X_3)、坚果总质量 (X_4)、单果质量 (X_5)、坚果横径 (X_6)、坚果纵径 (X_7)、果形指数 (X_8) 与苞刺长度 (X_9) 等 9 个数量性状, 并计算其出籽率 (X_{10}), 之后每个单株选取 15 ~ 30 个健康坚果, 剥去种皮, 称量栗仁总质量, 计算其出仁率 (X_{11}), 再将栗仁与种皮放置于烘箱内, 105 °C 杀青 15 min, 65 °C 烘干 72 h 后取出, 称量栗仁和种皮的总干质量, 并计算坚果含水

表 1 锥栗杂交组合概况

Table 1 Cross combination of chestnut

组合编号 Combination No.	杂交组合 Combination	子代数量 Number of hybrids
C	YLZ 26 × YLZ 15	15
D	YLZ 21 × YLZ 15	3
D1	YLZ 21 × YLZ 7	1
E	YLZ 26 × YLZ 14	5
F	YLZ 25 × YLZ 14	9
G	YLZ 24 × YLZ 15	5
H	YLZ 24 × YLZ 1	15
J	YLZ 14 × YLZ 1	23
J1	YLZ 14 × YLZ 25	3
L	YLZ 1 × YLZ 24	33
N	YLZ 1 × YLZ 2	6
Q1	YLZ 15 × YLZ 3	1
Q2	YLZ 15 × YLZ 21	4
S1	YLZ 23 × YLZ 25	2
T1	YLZ 24 × YLZ 7	6
U	YLZ 25 × YLZ 15	5
V1	YLZ 26 × YLZ 2	2
V2	YLZ 26 × YLZ 21	1
V3	YLZ 26 × YLZ 24	1
V4	YLZ 26 × YLZ 30	1
W	YLZ 30 × YLZ 21	2

率 (X_{10})。出籽率与出仁率的计算公式如下:

$$Sr = (m_1/M_1) \times 100\%$$

$$Kr = (m_2/M_2) \times 100\%$$

式中: Sr 为出籽率, m_1 为测定的坚果总质量, M_1 为测定的栗苞总质量, Kr 为出仁率, m_2 为剥取出的栗仁总质量, M_2 为剥取的坚果总质量。

参考 LY/T 1851—2009《植物新品种特异性、一致性、稳定性测试指南 板栗》^[11] 和 NY/T 2328—2013《农作物种质资源鉴定评价技术规范 板栗》^[12], 结合锥栗坚果实际表型, 对栗苞形状、苞刺密度、坚果形状、坚果颜色、果面茸毛、果面光泽与底座大小等 7 个锥栗果实外形特征性状进行人工评定。外形特征性状的等级评定按照表 2 进行赋值, 计算其出现频率与 Shannon 多样性指数, 其中栗苞内结果不止一个的取正常边果或饱满果进行测定。Shannon 多样性指数多样性指数计算公式为:

表2 性状特征描述及代码

Table 2 Characteristic traits description and code

性状 Traits	性状特征描述及代码 Characteristic traits description and code
栗苞形状 Fruit bract shape	1.球形, 2.椭球形, 3.圆锥形
苞刺密度 Density of bract thorn	1.稀, 2.中, 3.密
坚果形状 Nuts shape	1.长圆锥形, 2.圆锥形, 3.球形, 4.扁球形, 5.椭圆形
坚果颜色 Nuts color	1.黄褐, 2.红褐, 3.紫褐, 4.黑褐
果面茸毛 Density of downy hair	1.少, 2.较少, 3.较多, 4.多
果面光泽 Nuts surface luster	1.油亮, 2.明亮, 3.半毛, 4.毛
底座大小 Size of nuts base	1.小, 2.中, 3.大

$$h = - \sum \ln(pi) \times pi$$

其中 pi 为性状在群体中出现的频率。

采用 EXCEL 2007、R 语言软件包与 ORIGIN 2021b 等进行数据处理。包括方差分析、变异分析、主成分分析以及灰色关联度分析。

2 结果与分析

2.1 杂交子代果实外形特征性状遗传多样性

锥栗杂交子代 7 个果实外形特征性状的多样性分析见表 3, 从中可见, F₁ 代栗苞形状与苞刺密度分别以球形、密为主, 频率分别达到了 63.89% 与 56.94%; 坚果形状以球形为主, 频率为 50.00%; 颜色以红褐色为主, 频率达到了 65.97%。7 个外形特征性状的多样性指数除底座大小仅为 0.168 2 以外, 其余性状均大于 0.8, 其中多样性指数大于 1 的是果面绒毛、果面光泽与坚果形状, 由此可见, 锥栗杂交 F₁ 代 7 个果实外形特征性状除底座大小比较稳定外, 其余 6 个性状表现出丰富的多样性。

表3 杂交子代果实外形特征性状的频率分布及 Shannon 多样性指数

Table 3 Frequency distribution and Shannon's Diversity Index of hybrids

性状 Trait	频率分布与分级 Frequency distribution and classification/%					Shannon多样性指数 Shannon's Diversity Index
	1	2	3	4	5	
栗苞形状 Fruit bract shape	63.89	9.72	26.39	-	-	0.864 4
苞刺密度 Density of bract thorn	9.72	33.33	56.94	-	-	0.913 5
坚果形状 Nuts shape	4.86	38.89	50.00	2.78	3.47	1.077 1
坚果颜色 Nuts color	25.69	65.97	8.33	0.00	-	0.830 6
果面茸毛 Density of downy hair	34.03	40.97	22.92	2.08	-	1.150 7
果面光泽 Nuts surface luster	19.44	59.03	19.44	2.08	-	1.028 7
底座大小 Size of nuts base	2.78	96.53	0.69	-	-	0.168 2

2.2 杂交子代果实数量性状变异分析

2.2.1 F₁ 代果实表型的变异分析 锥栗杂交 F₁ 代果实数量性状的变异分析结果见表 4, 12 个数量性状除含水率与出仁率, 其余性状变异系数均大于 10%, 具有丰富的变异, 其中变异系数较大的 3 个性状分别是栗苞总质量、坚果总质量与单果质量, 变异系数分别达到了 41.10%、42.25%、33.58%, 而最低的为出仁率, 仅为 6.28%。杂交子代果实表型差异较大, 可开展单株选择。

2.2.2 F₁ 代果实表型的方差分析 对栗苞总质量等 9 个数量性状进行单因素方差分析, 结果见表 5。可见 9 个性状在 143 个个体间均存在极显著

差异 ($P < 0.01$)。所有性状中 F 值最大的为果形指数, F 值为 118.99, 最小的为单果质量, F 值为 59.28。以上结果表明各杂交子代果实数量性状个体内差异小于个体间, 个体间差异为变异的主要来源。

对栗苞总质量、坚果总质量、单果质量等 3 个重要经济性状, 在极显著水平下 ($P < 0.01$) 进行 LSD 多重比较并取前 20 名, 如表 6。

2.2.3 F₁ 代果实表型的相关性分析 杂交 F₁ 代 12 个数量性状的相关性系数见表 7。可见各性状之间呈现出一定的相关性, 共存在 42 组极显著相关 ($P < 0.01$) 与 6 组显著相关 ($P < 0.05$) 关系,

表4 杂交子代果实12个数量性状的变异分析

Table 4 Variation analysis of 12 quantitative characters in hybrid fruits

	栗苞总质量/g Fruit bract mass	栗苞横径/mm Transverse diameter of fruit bract	栗苞纵径/mm Longitudinal diameter of fruit bract	坚果总质量/g Total nuts mass
M ± SD	17.37 ± 7.14	49.87 ± 7.53	48.21 ± 6.47	6.23 ± 2.63
CV	41.10%	15.11%	13.42%	42.25%
变幅 Range	6.80 ~ 46.22	35.10 ~ 73.71	35.40 ~ 68.41	2.14 ~ 18.22
	单果质量/g Single nut mass	坚果横径/mm Transverse diameter of nuts	坚果纵径/mm Longitudinal diameter of nuts	果形指数 Nut shape index
M ± SD	5.82 ± 1.95	21.34 ± 2.83	23.45 ± 2.78	1.11 ± 0.14
CV	33.58%	13.24%	11.87%	12.69%
变幅 Range	2.14 ~ 12.45	14.59 ~ 29.13	17.16 ~ 31.31	0.88 ~ 1.83
	苞刺长度/mm Long of bract thorn	含水率/% Rate of water content	出仁率/% Kernel rate	出籽率/% Seed rate
M ± SD	10.49 ± 2.08	45.37 ± 2.86	72.83 ± 4.57	36.28 ± 5.79
CV	19.81%	6.31%	6.28%	15.96%
变幅 Range	6.16 ~ 16.49	32.11 ~ 51.14	52.45 ~ 84.41	22.97 ~ 51.85

表5 杂交子代果实9个数量性状的单因素方差分析

Table 5 One-way ANOVA of 12 quantitative characters in hybrid fruits

	栗苞总质量 Fruit bract mass		栗苞横径 Transverse diameter of fruit bract		栗苞纵径 Longitudinal diameter of fruit bract	
	MS	F	MS	F	MS	F
个体间	1198.91	78.91**	1342.17	93.90**	936.19	70.42**
个体内	15.19		14.29		13.29	
	坚果总质量 Total nuts mass		单果质量 Single nut mass		坚果横径 Transverse diameter of nuts	
	MS	F	MS	F	MS	F
个体间	165.48	63.52**	85.78	59.28**	185.51	67.90**
个体内	2.61		1.45		2.73	
	坚果纵径 Longitudinal diameter of nuts		苞刺长度 Length of bract thorn		果形指数 Nut shape index	
	MS	F	MS	F	MS	F
个体间	190.37	77.66**	116.86	93.21**	0.47	118.99**
个体内	2.45		1.25		0.00	

注：*，** 分别表示在0.05与0.01水平差异显著

Notes: *, ** Symbols indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively

其中，栗苞总质量、栗苞横径、栗苞纵径、坚果总质量、单果质量、坚果横径、坚果纵径与苞刺长度等性状间均存在极显著相关 ($P < 0.01$)，其中相关性最大为单果质量与坚果横径2个性状，相关系数为0.937；出仁率与坚果总质量、单果质量、坚果横径、坚果纵径之间均存在极显著正相关 ($P < 0.01$)，表明出仁率与坚果的表型关联度较高；出仁率与出籽率之间存在极显著正相关

($P < 0.01$)，可见两个性状之间存在较为紧密的关系。生产实践中可根据以上相关性，开展联合选择。

2.3 锥栗杂交 F₁ 代单株综合选择

2.3.1 杂交子代数量性状的主成分分析 根据赖俊声等^[13]的方法，对栗苞总质量 (X_1)、栗苞横径 (X_2)、栗苞纵径 (X_3)、坚果总质量 (X_4)、单果质量 (X_5)、坚果横径 (X_6)、坚果纵径 (X_7)、苞刺长度 (X_8)、果形指数 (X_9) 9个数量性状进行主成分分析。

表 6 杂交子代果实 3 个重要经济性状的 LSD 排序结果

Table 6 LSD sequencing results of three important economic traits in hybrid fruits

子代编号 No.	栗苞总质量/g Fruit bract mass	子代编号 No.	坚果总质量/g Fruit bract mass	子代编号 No.	单果质量/g Fruit bract mass
C-68	46.22 A	C-68	18.22 A	D1-4	12.45 A
G-98	42.70 B	G-98	17.51 A	G-98	10.64 B
C-55	41.20 B	L-39	14.80 B	E-32	10.49 B
D1-4	37.86 C	D1-4	12.45 C	W-6	10.46 B
L-39	35.50 D	F-17	10.96 D	E-30-2	10.39 BC
E-32	34.56 D	F-7	10.95 D	L-27	10.16 BCD
E-30-2	29.23 EF	C-20	10.56 DE	L-22	9.75 BCD
G-111	28.50 EFG	E-32	10.49 DEF	U-14	9.74 CD
J-14	26.99 FGH	W-6	10.31 DEFG	D-1	9.62 CD
D-1	26.96 FGH	E-30-2	9.98 DEFGH	U-5	9.47 D
L-22	26.85 FGH	C-84	9.89 EFGH	C-55	9.39 D
J-31-1	26.50 GH	L-27	9.74 EFGHI	T1-4	9.33 D
C-20	26.04 GH	U-14	9.74 EFGHI	G-111	9.04 DE
U-14	25.81 GHI	D-1	9.62 FGHI	F-16-2	8.39 EF
F-17	25.65 GHI	U-5	9.47 HI	D-2	8.38 EFG
F-7	25.65 GHI	C-55	9.47 HI	L-84	8.33 EFGHI
L-84	25.29 GHIJ	L-22	9.46 HI	L-2-1	8.32 EFGH
L-27	25.19 GHIJ	F-6	9.34 HIJ	J-31-1	8.04 EFGHIJ
L-122	25.18 GHIJ	S1-3	9.20 HIJK	L-106	8.01 EFGHIJK
C-65	25.15 GHIJK	G-111	9.06 HIJKLM	L-47	7.83 EFGHIJKL

注: 同一列中不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)

Note: The different capital letters in the same column indicates significant differences ($P < 0.01$)

果纵径 (X_7)、果形指数 (X_8)、苞刺长度 (X_9)、坚果含水率 (X_{10})、出仁率 (X_{11}) 和出籽率 (X_{12}) 等 12 个数量性状值进行 Z-score 标准化, 导入 ORIGIN 2021b 软件中进行主成分分析。如表 8, 得到各主成分的特征值、贡献率与累计贡献率。可见前 4 个主成分的累积贡献率已达到 84.59%, 表明前 4 个主成分已经可以代表 143 个单株 12 个数量性状的 84.59% 的信息, 因而提取前 4 个主成分进行分析。

提取前 4 个主成分的因子载荷矩阵如表 9, 其中对第一主成分贡献较大的性状为栗苞总质量、栗苞横径、栗苞纵径、坚果总质量、单果质量、坚果横径、坚果纵径与苞刺长度, 即表征杂交 F₁ 代果实的表型, 它们反应了 48.85% 的原始信息; 对第二主成分贡献较大的为出仁率与出籽率两个性状, 反应了 15.59% 的原始信息; 对第三主成分贡献较大的是果形指数, 即表征坚果的外形特性; 对第四主成分贡献较大的是坚果含水率。

通过前 4 个主成分的特征值与相关性矩阵, 建立主成分方程:

$$Y_2 = -0.035 0X_1 - 0.080 0X_2 - 0.155 4X_3 + 0.076 5X_4 + 0.072 3X_5 + 0.092 6X_6 - 0.010 6X_7 - 0.122 8X_8 - 0.184 9X_9 - 0.118 8X_{10} + 0.254 8X_{11} + 0.325 5X_{12}$$

$$Y_1 = 0.065 3X_1 + 0.063 1X_2 + 0.060 7X_3 + 0.062 6X_4 + 0.064 2X_5 + 0.064 5X_6 + 0.043 9X_7 - 0.026 8X_8 + 0.040 7X_9 - 0.009 6X_{10} + 0.024 1X_{11} - 0.003 7X_{12}$$

$$Y_3 = -0.064 9X_1 - 0.115 5X_2 + 0.086 4X_3 - 0.046 4X_4 + 0.054 4X_5 - 0.055 7X_6 + 0.389 8X_7 + 0.446 9X_8 + 0.006 7X_9 - 0.217 4X_{10} + 0.083 7X_{11} + 0.060 7X_{12}$$

根据 4 个主成分的贡献率, 得到综合评价方程:

$$Y = 0.577 4Y_1 + 0.184 3Y_2 + 0.148 0Y_3 + 0.090 1Y_4$$

利用综合评价方程对 143 株杂交子代进行得

表 7 杂交子代果实性状的相关系数

Table 7 Correlation coefficient of crossing fruit traits

	栗苞总质量 Fruit bract mass	栗苞横径 Transverse diameter of fruit bract	栗苞纵径 Longitudinal diameter of fruit bract	坚果总质量 Total nuts mass	单果质量 Single nut mass	坚果横径 Transverse diameter of nuts	坚果纵径 Longitudinal diameter of nuts	果形指数 Nut shape index	苞刺长度 Length of bract thorn	含水率 Rate of water content	出仁率 Kernel rate	出籽率 Seed rate
栗苞总质量 Fruit bract mass												
栗苞横径 Transverse diameter of fruit bract	0.887**											
栗苞纵径 Longitudinal diameter of fruit bract	0.774**	0.811**										
坚果总质量 Total nuts mass	0.917**	0.820**	0.614**									
单果质量 Single nut mass	0.795**	0.678**	0.744**	0.792**								
坚果横径 Transverse diameter of nuts	0.804**	0.713**	0.673**	0.827**	0.937**							
坚果纵径 Longitudinal diameter of nuts	0.515**	0.370**	0.649**	0.523**	0.684**	0.567**						
果形指数 Nut shape index	-0.360**	-0.409**	-0.097	-0.379**	-0.353**	-0.545**	0.367**					
苞刺长度 Length of bract thorn	0.431**	0.670**	0.712**	0.337**	0.362**	0.364**	0.302**	-0.084				
含水率 Rate of water content	-0.041	-0.051	-0.063	-0.09	-0.126	-0.101	-0.185*	-0.052	-0.027			
出仁率 Kernel rate	0.192*	0.153	0.144	0.286**	0.425**	0.377**	0.220**	-0.211*	0.024	-0.242**		
出籽率 Seed rate	-0.191*	-0.205*	-0.381**	0.171*	0.069	0.113	0.046	-0.097	-0.252**	-0.126	0.384**	

注: *表示相关性显著, **表示相关性极显著

Notes: * indicates significant correlation, and ** indicates extremely significant correlation

表 8 数量性状主成分特征值以及累计贡献率

Table 8 Principal component eigenvalue and cumulative contribution rate of quantitative traits

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	5.861 54	48.85	48.85
2	1.870 62	15.59	64.43
3	1.502 58	12.52	76.96
4	0.915 66	7.63	84.59
5	0.684 11	5.70	90.29
6	0.588 16	4.90	95.19
7	0.388 27	3.24	98.42
8	0.080 62	0.67	99.10
9	0.051 69	0.43	99.53
10	0.037 76	0.31	99.84
11	0.012 92	0.11	99.95
12	0.006 10	0.05	100.00

分计算, 将综合得分前 20 的单株进行排序, 如表 10。

2.3.2 杂交子代数量性状的灰色关联度分析 根据苏欣欣等^[14]的方法, 将锥栗杂交 F₁ 代 12 个数量性状整体视作一个灰色系统, 以全部子代 12 个性状中每一性状的最大值组成参考品种, 即栗苞总质量 46.22 g、栗苞横径 73.71 mm、栗苞纵径 68.41 mm、坚果总质量 18.22 g、单果质量 12.45 g、坚果横径 29.13 mm、坚果纵径 31.31 mm、果形指数 1.83、刺长 16.49 mm、坚果含水率 51.14%、出仁率 84.41% 和出籽率 51.85%, 子代的 12 个性状值构成比较序列。由于各性状的量纲不一致, 因此将各子代性状值除以参考序列对应性状值去除量纲。计算各性状的灰色关联度、权重以及各单株的灰色评价价值。

如表 11, 可见在整个系统中, 权重占比最大为含水率 (X₁₀), 权重为 11.37%; 占比最小为坚

表 9 前 4 个主成分因子载荷矩阵

Table 9 Load matrix of the first four principal component factors

果实性状 Crossing fruit traits	第1主成分 Principal component 1	第2主成分 Principal component 2	第3主成分 Principal component 3	第4主成分 Principal component 4
X ₁	0.382 8	-0.065 5	-0.097 6	0.073 1
X ₂	0.369 7	-0.149 7	-0.173 5	-0.125 0
X ₃	0.355 6	-0.290 7	0.129 8	-0.058 7
X ₄	0.366 7	0.143 0	-0.069 7	0.140 0
X ₅	0.376 1	0.135 2	0.081 8	0.135 8
X ₆	0.378 1	0.173 3	-0.083 7	0.100 4
X ₇	0.257 5	-0.019 8	0.585 7	0.268 5
X ₈	-0.157 1	-0.229 7	0.671 6	0.174 6
X ₉	0.238 5	-0.345 9	0.010 0	-0.294 1
X ₁₀	-0.056 1	-0.222 1	-0.326 6	0.822 8
X ₁₁	0.141 4	0.476 6	0.125 8	-0.159 3
X ₁₂	-0.022 0	0.608 9	0.091 2	0.189 9

表 10 杂交子代主成分综合评价得分排名

Table 10 Ranking of principal component comprehensive evaluation scores of hybrids

子代编号 No.	综合得分 Integrated score	排名 Rank	子代编号 No.	综合得分 Integrated score	排名 Rank
G-98	4.530 9	1	D-1	2.326 7	11
D1-4	4.242 3	2	L-27	2.134 7	12
C-68	3.998 6	3	L-22	2.134 4	13
C-55	2.932 4	4	L-39	2.101 6	14
E-30-2	2.782 8	5	U-5	2.101 1	15
U-14	2.696 9	6	F-6	1.820 9	16
E-32	2.684 8	7	D-2	1.608 2	17
G-111	2.488 0	8	J-31-1	1.599 7	18
T1-4	2.450 5	9	L-80	1.535 2	19
W-6	2.339 2	10	L-47	1.507 0	20

表 11 杂交子代 12 个数量性状灰色关联系数及权重

Table 11 Grey correlation coefficient and weight of 12 quantitative characters in hybrids

果实性状 Crossing fruit traits	灰色关联系数 Grey correlation coefficient	权重/% Weight	关联序 Incidence order
X ₁	0.426 5	6.03	11
X ₂	0.588 9	8.33	7
X ₃	0.610 3	8.63	5
X ₄	0.411 7	5.82	12
X ₅	0.468 0	6.62	10
X ₆	0.635 3	8.98	4
X ₇	0.648 4	9.17	3
X ₈	0.535 5	7.57	9
X ₉	0.564 4	7.98	8
X ₁₀	0.803 9	11.37	1
X ₁₁	0.769 2	10.88	2
X ₁₂	0.610 0	8.63	6

表 12 杂交子代单株灰色关联度综合评价得分

Table 12 Comprehensive evaluation score of grey correlation degree for individual plant of hybrids

子代编号 No.	综合得分 Integrated score	排名 Rank	子代编号 No.	综合得分 Integrated score	排名 Rank
G-98	0.7867	1	G-111	0.6878	11
D1-4	0.7813	2	V1-6	0.6865	12
C-68	0.7593	3	D-1	0.6771	13
E-30-2	0.7352	4	U-5	0.6723	14
C-55	0.7292	5	L-39	0.6713	15
U-14	0.7181	6	L-22	0.6680	16
F-6	0.7057	7	C-35	0.6677	17
T1-4	0.7036	8	L-27	0.6665	18
E-32	0.7021	9	L-80	0.6634	19
W-6	0.6881	10	D-2	0.6546	20

果总质量 (X_4), 其权重为 5.82%, 其次是栗苞总质量 (X_1) 与单果质量 (X_5), 权重分别为 6.03% 与 6.62%。根据得到的灰色关联系数, 计算各单株的综合评价得分, 取得分前 20 名的单株以及得分, 如表 12。

结合 2.3.1 的主成分综合评定结果, 其中 G-

98 在 2 种综合排序方法中均为最佳单株。最终选出在 2 种综合评价方法均得分较高的 10 株单株, 分别是 G-98、D1-4、C-68、C-55、E-30-2、U-14、E-32、G-111、T1-4、W-6, 单株果实部分重要经济性状见表 13。可见除 C-68 外, 其余单果质量均在 9 ~ 13 g 之间, 属于大果单株。

表 13 综合选择单株的重要经济性状

Table 13 Important economic traits of single plant selected comprehensively

子代编号 No.	栗苞总质量/g Fruit bract mass	单果质量/g Single nut mass	出仁率/% Kernel rate	出籽率/% Seed rate
G-98	42.70	10.64	72.34	41.02
D1-4	37.86	12.45	77.53	32.88
C-68	46.22	7.77	77.73	39.43
C-55	41.20	9.39	75.31	22.97
E-30-2	29.23	10.39	75.72	34.15
U-14	25.81	9.74	74.01	37.74
E-32	34.56	10.49	75.36	30.35
G-111	28.50	9.04	80.25	31.79
T1-4	19.51	9.33	84.41	45.93
W-6	22.91	10.46	77.21	44.99
平均 Average	32.85	9.97	76.99	36.12

3 讨论

栗属植物均为 2 倍体且均含有 24 条染色体, 可进行相互杂交^[15]。杂交育种工作在栗属植物上开展较早, 20 世纪初国外学者开展了一系列以抗栗疫病特性为育种目标的种间杂交, 并选育出了欧洲

栗、美洲栗与中国板栗的杂交新品种^[16-17]。国内学者自上世纪 60 年代起, 以高产, 早熟, 抗病虫害为主要目标开展了日本栗与中国板栗的种间杂交, 时兴春等^[18]以江苏省板栗主栽品种处暑红作母本, 日本栗品种‘伊吹’和辽宁省自然杂种‘红石一号’的混合花粉作父本, 得到了抗虫、丰产、早实的板栗新

品种‘中日一号’;在板栗种内杂交育种研究中,明桂冬等^[19]从‘红栗’和‘泰安薄壳’的杂交后代中选育出板栗新品种‘红1号’;郭燕、李颖等^[20-21]以板栗品种‘燕明’为母本,‘燕山早丰’为父本进行杂交,从杂交后代中选育出优质、丰产的板栗新品种‘冀栗1号’与‘明丰2号’。近年来锥栗杂交育种研究逐步开展,李艳民等^[22]以湖南4个锥栗优系为亲本进行杂交,并对杂交子代幼苗的生长特性进行研究,以生长优势为育种目标,选择出最佳授粉组合‘ZFPL-2’×‘LYXJ-6’;章平生等^[23]以板栗、锥栗种内和种间9个杂交组合235个单株及其亲本为试材,对其叶表型及光合生理性状进行分析,结果表明各性状存在丰富的遗传多样性,不同杂交组合内变异是总变异的主要来源,并综合选出“魁栗×YLZ15号”和“魁栗×YLZ1号”两个优良杂交组合。锥栗杂交育种工作在非经济性性状研究上已取得一定成果,为锥栗杂交子代果实性状研究提供了有利基础。

本研究中,锥栗杂交F₁代果实7个外形特征性状除底座大小外,其余性状多样性指数均大于0.8,杂交子代在果实外观表征上存在丰富的多样性。12个数量性状中变异系数较大的为栗苞总质量、坚果总质量与单果质量,均超过30%,而除含水率与出仁率外,其余性状变异系数均大于10%,差异明显,存在较大的选择潜力。结合单因素方差分析,结果表明锥栗杂交F₁代单株在各数量性状上差异均达到极显著水平($P<0.01$),且个体间差异是变异的主要来源。相关性分析表明12个数量性状性状之间共存在42对极显著相关关系($P<0.01$),性状间关联性较强,此结论与龚榜初^[24]、李颖林^[25]等的一致,其中栗苞总质量、坚果总质量与单果质量等3个重要经济性性状与其他性状间分别存在8对、9对、9对极显著相关关系。后续育种工作中可根据单株经济性性状之间的显著差异以及关联性,在锥栗杂交F₁代中开展单株选择与性状间联合选择。

为选择优良锥栗单株,在本研究中测定了12个不同的数量性状。由于数量性状数目较多,单独从某一数量性状上进行比较非常片面,难以进行选择。主成分分析可以将多个因子降维为几个相对独立的主成分因子,这些因子含有原始数据的大部分信息量,从而简化数据结构,降低选择难

度^[26];而灰色关联度分析将含有多个因素的数据整体视作一个封闭的系统,分析系统内不同因素之间的关联程度大小,通过计算得出参试品种与理想品种之间的差距,从整体上进行综合评价^[27]。两种方法同时使用,将单一角度进行对比转变为对全局综合考虑,能够降低优良品种筛选的难度,在林业生产实践上已经得到广泛的使用。崔博文等^[28]对来自7个不同种源的马尾松进行磷胁迫试验,使用主成分分析与灰色关联度分析胁迫条件下15个生理生化指标,最终将马尾松的7个种源根据耐低磷能力分为4大类;杨璐等^[29]利用主成分分析与灰色关联度分析对13个桑葚品种的果实化学指标进行分析,选出了总黄酮、总酸、总多糖等5项能代表果实营养品质的代表性化学指标;江锡兵等^[30]使用主成分分析与灰色关联度分析对来自长江中下游的25个板栗主栽品种与5个北方板栗代表性主栽品种的果实与营养品质进行综合评价,选出了6个综合评分均在前列的板栗主栽品种。在本研究中,分别使用灰色关联度分析与主成分分析对143株锥栗杂交子代单株进行排序,均选择出20株排名靠前的优良单株,并将排序结果进行比较。2种排序结果之间的重合度达到了90%,具有良好的综合选择效果,此结论与江锡兵等^[30]得出两种综合排序结果具有较强相关度的结论相似。且主成分分析、灰色关联度分析与栗苞总质量、坚果总质量、单果质量等3个重要经济性性状值排序前20名的单株重合度分别达到了65%、75%、75%与60%、60%、65%,3者中与以单果质量排序结果的重合度较高。结合变异分析以及相关性分析,可知此3个重要经济性性状具有选择潜力较大、与其余性状关联性较强的特点,说明在锥栗育种工作中根据以上3个重要经济性性状,尤其是以单果质量为主要育种目标选取大果单株具有较高的可行性。同时在综合得分前20名的单株中,组合L的单株个数在2种方法中均占到20%以上,其次是组合C、组合G、组合E,均占到了10%,但无法直接说明以上4个组合是较好的杂交组合,还需对亲本配合力、遗传距离、杂种优势等方面进行深入研究。此外,由于两种排序方法的统计学原理并不相同,出现了V1-6、C-35、L-47与J-31-1等在2种分析结果中并不重复的单株,生产实践上可以综合考虑单株的特有性状与实际育种目标,

对以上单株进行选择。

4 结 论

本研究以锥栗杂交 F_1 代的 143 株单株为材料, 对其 7 个果实外形特征性状与 12 个果实数量性状进行测定与分析, 并使用主成分分析法和灰色关联度分析法对 12 个数量性状进行综合分析, 通过综合评价模型评选出优良单株。试验结果表明锥栗杂交 F_1 代果实性状变异较为丰富, 性状间存在一定关联性, 具有较好的选择潜力; 两种综合选优方法排序结果与以单果质量等 3 个重要经济性状值排序结果重合度较高, 相互验证。研究结果为锥栗新种质创制和优良新品种选育奠定了基础。

参 考 文 献:

- [1] 宋爱云, 陈 钦, 雷日平, 等. 锥栗栽培品种果实营养成分差异的分析[J]. 经济林研究, 2001, 19 (4): 5-7.
- [2] 吴连海, 龚榜初, 赖俊声, 等. 浙南闽北锥栗品种资源调查研究[J]. 浙江林业科技, 2007, 29 (1): 33-37.
- [3] 马海泉, 江锡兵, 龚榜初, 等. 我国锥栗研究进展及发展对策[J]. 浙江林业科技, 2013, 33 (1): 62-67.
- [4] 陈学森, 王 楠, 张宗营, 等. 关于果树种质资源与遗传育种若干问题的理解与思考[J]. 中国农业科学, 2022, 55 (17): 3395-3410.
- [5] 林 萍, 王开良, 姚小华, 等. 普通油茶杂交子代幼林经济性状的遗传分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37 (12): 31-38.
- [6] 谢 欢, 王中堂, 李明玥, 等. 枣杂交后代果实性状遗传分析[J]. 经济林研究, 2022, 40 (2): 125-134.
- [7] 韩 飞, 赵婷婷, 刘小莉, 等. 山梨猕猴桃与中华猕猴桃种间杂交后代果实性状的遗传倾向分析[J]. 植物科学学报, 2022, 40 (4): 505-512.
- [8] 郑瑞杰. 中日杂交栗“高见甘”选育研究[J]. 辽宁林业科技, 2016 (2): 12-14.
- [9] 王德永, 李喜运, 曲 晖, 等. 辽栗10号、辽栗15号、辽栗23号选育研究[J]. 辽宁林业科技, 2003 (2): 6-7 + 16.
- [10] 张树航, 李 颖, 王广鹏, 等. 板栗杂交新品种“南垂5号”的选育及栽培技术[J]. 河北农业科学, 2016, 20 (4): 55-56.
- [11] LY/T 1851-2009, 植物新品种特异性、一致性、稳定性测试指南板栗[S].
- [12] NY/T 2328-2013, 农作物种质资源鉴定评价技术规范 板栗[S].
- [13] 赖俊声, 吴连海, 周仙根, 等. 锥栗果实经济性状分析[J]. 经济林研究, 2006, 24 (4): 46-49.
- [14] 苏欣欣, 肖 洋, 胡晓航, 等. 基于灰色关联度分析和主成分分析法评估糖用甜菜品种的适应性[J]. 中国农学通报, 2021, 37 (30): 39-46.
- [15] 黄宏文. 从世界栗属植物研究的现状看中国栗属资源保护的重要性[J]. 武汉植物学研究, 1998, 16 (2): 171-176.
- [16] WESTBROOK J W, JAMES J B, SISCO P H, *et al.* Resistance to *Phytophthora cinnamomi* in American chestnut (*Castanea dentata*) backcross populations that descended from two Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) sources of resistance[J]. Plant disease, 2019, 103(7): 1631-1641.
- [17] CRADDOCK J H, PERKINS M T. Chestnut (*Castanea spp. Miller*) Breeding[M]//Advances in Plant Breeding Strategies: Nut and Beverage Crops. Springer, Cham, 2019: 105-156.
- [18] 时兴春, 童本群, 王德永, 等. 抗虫、丰产、早实板栗新品种——中日一号[J]. 落叶果树, 1996, 28 (4): 24-25.
- [19] 明桂冬, 柳美忠, 沈广宁, 等. 山东省果树研究所选育推广的板栗良种与栽培技术要点[C]. 干果研究进展(3). 2003: 105-109.
- [20] 郭 燕, 张树航, 李 颖, 等. 早实高产板栗新品种‘冀栗1号’的选育[J]. 果树学报, 2017, 34 (8): 1065-1068.
- [21] 李 颖, 王广鹏, 张树航, 等. 板栗新品种‘明丰2号’[J]. 林业科学, 2015, 51 (11): 145.
- [22] 李艳民, 袁德义, 肖诗鑫, 等. 不同锥栗优系亲本特性及杂交子代生长效应[J]. 经济林研究, 2019, 37 (2): 156-162.
- [23] 章平生, 江锡兵, 龚榜初, 等. 板栗与锥栗杂交 F_1 代叶片表型变异及杂种优势研究[J]. 植物研究, 2021, 41 (2): 281-293.
- [24] 龚榜初, 谢碧霞, 吴连海, 等. 锥栗种内表型性状变异的研究[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28 (5): 706-712.
- [25] 李颖林, 董蒙蒙, 陈 辉, 等. 锥栗主栽农家品种表型性状变异及选择研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38 (3): 36-43.
- [26] 武晓红, 陈雪峰, 景晨娟, 等. 杏杂交后代果实经济性状的主成分分析与聚类分析研究[J]. 江西农业学报, 2019, 31 (10): 45-51.
- [27] 邓聚龙. 农业系统灰色理论与方法[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1988: 39-74.
- [28] 崔博文, 乔 光, 范付华, 等. 不同种源马尾松种质耐低磷的主成分与灰色关联度分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39 (8): 49-56.
- [29] 杨 璐, 卢晓丽, 程 平, 等. 基于灰色关联度和主成分分析法的桑葚品质综合评价体系构建[J]. 新疆农业科学, 2017, 54 (5): 862-870.
- [30] 江锡兵, 滕国新, 范金根, 等. 长江中下游区板栗主栽品种果实表型和品质综合评价[J]. 林业科学研究, 2022, 35 (1): 70-81.

Variation Analysis of Fruit Phenotypic Traits and Comprehensive Selection of Individual Plant in F₁ Generation of *Castanea henryi*

FANG Zhou^{1,2}, JIANG Xi-bing¹, GONG Bang-chu¹, LAI Jun-sheng³, WU Jian³, LI Yu²

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 2. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Qingyuan Bureau of Natural Resources and Planning, Qingyuan 323800, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To clarify the variation patterns of fruit traits in hybrid offspring of *Castanea henryi*, and to conduct comprehensive evaluation and selection of excellent individual plants. [Method] The genetic diversity and variation of 7 shape feature traits and 12 quantitative traits of the fruit phenotype of 143 individual plants of F₁ generation of *Castanea henryi* were analyzed, and all individual plants were comprehensively evaluated by principal component analysis and grey correlation analysis. [Result] The results showed that the diversity index of 6 shape feature traits such as nut shape in F₁ hybrid generation was greater than 0.8, which showed high genetic diversity. Among the 12 quantitative characters, fruit bract mass, total nut weight and single nut weight had a large variation range, and the smallest variation range was the percentage of kernels. The differences of fruit phenotypic characters among single plants were very significant ($P < 0.01$), which had great selection potential. There were 42 groups of extremely significant correlation ($P < 0.01$) and 6 groups of significant correlation ($P < 0.05$) among the 12 fruit quantitative traits, and joint selection could be carried out. The highest comprehensive score of single plant was G-98 through principal component analysis and grey correlation analysis, and 10 excellent single plants including G-98 were selected by these two methods. [Conclusion] There are rich variations and correlations among various phenotypic traits in the F₁ hybrid of *Castanea henryi*, and the overlap of comprehensive selection results is high. The results lay a foundation for the creation of new germplasm and the breeding of fine new varieties of *Castanea henryi*.

Keywords: *C. henryi*; Cross breeding; Fruit traits; Principal component analysis; Grey correlation analysis

(责任编辑: 张 研)