



张馨方, 郭燕, 张树航, 李颖, 刘金雨, 范丽颖, 王广鹏. 210份板栗种质资源坚果表型性状多样性分析[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(01):90-103.
ZHANG Xinfang, GUO Yan, ZHANG Shuhang, LI Ying, LIU Jinyu, FAN Liying, WANG Guangpeng. Diversity analysis of nut phenotypic traits of 210 Chinese chestnut germplasm resources[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(01):90-103.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.08

210份板栗种质资源坚果表型性状多样性分析

张馨方 郭燕 张树航 李颖 刘金雨 范丽颖 王广鹏*

(河北省农林科学院 昌黎果树研究所, 河北 昌黎 066600)

摘要 为解析中国板栗种质资源坚果表型性状多样性,对11个省市210份中国板栗资源的19个表型性状(2个假性质量性状、5个质量性状和12个数量性状)进行测定,利用Shannon-Wiener's多样性指数评价表型性状的遗传多样性,并综合运用相关性、主成分和聚类分析等方法对坚果表型进行多样性分析。结果表明:210份资源的19个坚果表型性状具有较高的多样性水平,变异系数介于4.38%~47.98%,遗传多样性指数介于0.45~1.96,其中数量性状的遗传多样性指数普遍高于质量性状;坚果表型性状群体间变异约占总变异的1/4,群体内约占3/4,群体内变异是坚果表型变异的主要来源;出仁率与单粒质量、种仁质量呈极显著正相关,果形指数只与坚果长呈极显著正相关,与其他性状呈极显著负相关($P<0.01$);主成分分析将12个数量性状转换为3个独立的综合指标,累计贡献率达87.334%,最能反应坚果表型特征的3个性状是坚果长、种仁质量和单粒质量;基于遗传距离聚类,供试资源划分为4大类群,各类群间表型性状差异明显,第III-1亚类资源普遍单粒质量较大、出仁率相对较高,可作为大粒加工型良种培育优良亲本。本研究从多角度系统分析了210份板栗资源坚果表型性状的多样性,可为优异种质的挖掘及创新利用提供参考。

关键词 板栗;坚果表型;多样性;综合评价

中图分类号 S664.2

文章编号 1007-4333(2025)01-0090-14

文献标志码 A

Diversity analysis of nut phenotypic traits of 210 Chinese chestnut germplasm resources

ZHANG Xinfang, GUO Yan, ZHANG Shuhang, LI Ying, LIU Jinyu, FAN Liying,
WANG Guangpeng*

(Changli Institute of Pomology, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Changli 066600, China)

Abstract To analysis the nut phenotypic traits diversity of Chinese chestnut, a total of 19 phenotypic traits (two false qualitative traits, 5 qualitative traits and 12 quantitative traits) of 210 Chinese chestnut resources from 11 provinces were determined. Then genetic diversity of nut phenotypic traits was calculated based on the Shannon-Wiener information diversity index. The chestnut germplasms were comprehensively evaluated by using the correlation analysis, principal component and cluster analysis. The results showed that: The 19 nut phenotypic traits of 210 chestnut resources displayed a high level of phenotypic diversity, with variation coefficients ranged from 4.38% to 47.98%, and the genetic diversity index ranged from 0.45 to 1.96. The diversity index of quantitative traits was generally higher than that of qualitative traits. The nut phenotypic variation among populations accounted for about 1/4 of the total variation, and about 3/4 within

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1600401);现代种业创新专项(21326304D);河北省农林科学院科技创新专项(2022KJCXZK-RW-5);国家园艺种质资源库项目(NHGRC)

第一作者: 张馨方(ORCID:0009-0006-9854-8702),副研究员,主要从事板栗种质资源和遗传育种研究,E-mail:971470601@qq.com

通讯作者: 王广鹏(ORCID:0000-0003-0953-4175),研究员,主要从事板栗遗传育种与栽培生理研究,E-mail:wangguangpeng430@163.com

populations. Correlation analysis showed that kernel rate was significantly positively correlated with nut size and kernel weight. Nut shape index was only significantly positively correlated with nut length, and was significantly negatively correlated with other traits ($P<0.01$). Principal component analysis showed that the 12 quantitative traits were integrated into three principal components, and their additive contributing rate reached 87.334%. The three traits that could best reflect the phenotypic characteristics of nuts were the nut length, kernel weight and nut size. The 210 germplasm resources were systematically clustered into four groups based on the genetic distance, and there were significant differences among the groups. The germplasms in group III-1 could be used as excellent parents for material innovation and hybrid breeding because of their large nut size and high kernel rate. The diversity of nut phenotypic traits of Chinese chestnut was systemically analyzed from multiple perspectives in this study, which could provide a scientific basis for the discovery and innovative utilization of excellent chestnut germplasm.

Keywords Chinese chestnut; nut phenotypes; diversity; comprehensive evaluation

板栗(*Castanea mollissima* Bl.)抗逆、耐瘠薄性强,是重要的木本粮食树种,我国拥有遗传多样性非常丰富的种质资源^[1]。对现有资源进行精准鉴定和评价,是高效保护、改良和创新利用资源的基础,其中表型性状鉴定被认为是一种认识并利用优异资源的有效手段^[2]。目前,关于中国板栗表型性状多样性研究已取得显著进展^[3-6],但尚未完全掌握资源的遗传多样性水平和品种特性。表型性状中,果实性状的变异是遗传变异的主要特征之一,也是研究植物种群的重要组成部分^[7]。坚果是板栗重要的生殖和食用器官,其性状优异与否直接关系到板栗的产量与品质。因此,对坚果表型性状进行遗传多样性和变异程度研究,有利于高产优质资源的筛选和开发利用。已有板栗坚果表型多样性研究中,兰彦平等^[8]提出采用巢式设计方差分析研究板栗表型性状在群体间和群体内的差异显著性;江锡兵等^[9]认为坚果表型性状遗传稳定性高于叶片表型及坚果品质性状,且群体内变异高于群体间变异;刘亚斌等^[7]比较了不同群体的刺苞及坚果形态差异,并进行了聚类分析;李彤彤等^[10]通过对 80 个板栗品种的表型差异进行分析,筛选出 8 个表型指标用于生

产上品种鉴别。然而,以往对板栗坚果表型研究多集中于坚果长、宽和单粒重等几个数量性状,对坚果质量性状及种仁性状的多样性鲜有涉及,且普遍选用样本数量较少,资源类型也不够丰富,限制了优异资源的深度挖掘利用。因此,本研究以来源于我国 11 个板栗主产省市的包含 5 个板栗品种群的 210 份资源为材料,对 19 个坚果表型性状进行遗传多样性分析,旨在进一步丰富我国板栗的遗传多样性信息,并发掘利用其中优异资源直接服务于板栗高产优质新品种选育工作,促进产业发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以来源于我国 11 个板栗主产省市(群体)的 210 份资源为试验材料(表 1)。所有资源均是 2004 年嫁接于 3 年生‘燕山早丰’实生砧木上,每份 5 株,株行距 4 m×4 m,统一采用常规栽培模式管理。试材位于河北省农林科学院昌黎果树研究所板栗种质资源圃(119°15'E, 39°72'N),该地属暖温带半湿润大陆性气候,年均气温 12.2℃,年均降水量 643 mm,无霜期 186 d,年均日照时数为 2 663.7 h,沙壤土。

表 1 210 份板栗资源名称、来源地及资源类型
Table 1 The names, sources and types of 210 Chinese chestnut materials

编号 No.	名称 Name	来源地 Source	类型 Type	编号 No.	名称 Name	来源地 Source	类型 Type
1	邢厂王汉沟	河北青龙	C	106	华光	山东泰安	D
2	邢厂四亩地	河北青龙	C	107	华丰	山东泰安	D
3	挂兰峪 1 号	河北兴隆	C	108	杂 35 号	山东泰安	A
4	青龙小山	河北青龙	C	109	野杂	山东泰安	A
5	白露香	河北兴隆	A	110	山东黄棚	山东池上	A
6	八卦岭东区	河北兴隆	C	111	金丰	山东招远	A

表1（续）

编号 No.	名称 Name	来源地 Source	类型 Type	编号 No.	名称 Name	来源地 Source	类型 Type
7	青龙小山白露	河北青龙	C	112	红光	山东莱西	A
8	温杖子1号	河北青龙	C	113	新选1号	山东泰安	A
9	南天门2号	河北兴隆	C	114	石丰	山东海阳	A
10	大碌洞2号	河北兴隆	C	115	郟城3号	山东郟城	A
11	大杖子1号	河北青龙	C	116	侯庄2号	河北迁西	B
12	迁西315	河北迁西	B	117	贾庄1号	河北迁西	B
13	燕宝	河北青龙	A	118	干2-2	河北迁西	B
14	双台大红袍	山东泰安	A	119	岔3	河北宽城	C
15	湖南黔丽	湖南新田	A	120	沙坡峪3号	河北兴隆	C
16	大红袍	安徽广德	A	121	关堂64	河北遵化	C
17	九家种	江苏苏州	A	122	龙湾5号	河北兴隆	B
18	沐河大袍	山东临沭	A	123	石场子2-2	河北迁西	C
19	桂花香	湖北罗田	A	124	杨家峪13	河北迁西	C
20	镇巴双洁	陕西镇巴	A	125	邢台丰收1号	河北邢台	A
21	鄂栗1号	湖北麻城	A	126	塔54	河北遵化	B
22	毛板红	浙江诸暨	A	127	X12	河北昌黎	A
23	迟栗子	安徽广德	A	128	上庄52	河北青龙	C
24	燕秋	河北青龙	A	129	下庄4号	河北青龙	C
25	燕紫	河北青龙	A	130	大碌洞	河北兴隆	C
26	燕丽	河北青龙	A	131	凤2	河北青龙	C
27	金杖子2号	河北青龙	C	132	牛1	河北迁西	C
28	屈家早	河北宽城	B	133	杨家峪1号	河北迁西	C
29	晚早5	河北兴隆	A	134	何家坟5	河北昌黎	C
30	西沟1号	河北遵化	A	135	山东早实丰	山东泰安	A
31	白露(母)	河北青龙	C	136	大粒	山东郟城	A
32	大青裂	河北青龙	A	137	沙坡峪1号	河北兴隆	C
33	怀丰	北京怀柔	A	138	塔14	河北遵化	C
34	燕平	北京昌平	A	139	桑6	河北迁安	C
35	浙早1号	浙江诸暨	A	140	长南庄2号	河北迁西	C
36	罗田乌壳栗	湖北罗田	A	141	杨家峪1-6	河北迁西	C
37	桐优-33	湖南攸县	A	142	园门实生	河北昌黎	B
38	宜兴古-1	江苏宜兴	C	143	后南峪丰收1号	河北邢台	B
39	魁栗	浙江上虞	A	144	周家峪6号	河北迁西	C
40	金平	山东费县	A	145	H7-5	河北昌黎	D
41	上光栗	浙江仙居	A	146	乳山短枝	山东乳山	A
42	包丰	山东费县	A	147	王1(母)	河北宽城	A
43	黄前	山东泰安	A	148	迁西紫晶	河北迁西	B
44	DL-1	湖北罗田	C	149	北2实生	河北遵化	C
45	DL-2	湖北罗田	C	150	小薄皮	河北迁西	C
46	DL-4	湖北罗田	C	151	三日忙	河北宽城	C
47	DL-3	湖北罗田	C	152	东冰窖3号	河北宽城	C
48	广西14-1	广西东兰	C	153	燕明	河北抚宁	A

表 1 (续)

编号 No.	名称 Name	来源地 Source	类型 Type	编号 No.	名称 Name	来源地 Source	类型 Type
49	融水优株	广西融水	C	154	王厂沟 2 号	河北宽城	C
50	苏州古-1	江苏苏州	C	155	兴隆早栗子	河北兴隆	C
51	安优 1 号	湖南新田	B	156	迁西暑红	河北迁西	A
52	城步优株	湖南城步	C	157	X 13-98	河北昌黎	D
53	黄花优株	湖南长沙	C	158	刘早 1 号	河北迁西	B
54	石门优株	湖南石门	C	159	南天门乡	河北兴隆	C
55	新田优株	湖南新田	C	160	徐玉明 1	河北兴隆	C
56	黑 8	北京怀柔	A	161	陆南优	河北兴隆	C
57	XL-002	河北兴隆	C	162	牛圈子	河北兴隆	C
58	迁西壮栗	河北迁西	A	163	大 3113	河北迁西	A
59	崔 1	河北宽城	C	164	鲁栗 3 号	山东泰安	A
60	艾峪口	河北宽城	C	165	去暑红-1	河北青龙	A
61	熊 84	河北宽城	A	166	迁西早红	河北迁西	A
62	塌山 1 号	河北宽城	C	167	去暑红-2	河北青龙	A
63	烟清	山东烟台	A	168	燕山早丰	河北迁西	A
64	烟泉	山东烟台	A	169	京暑红	北京怀柔	A
65	黑烟清	山东烟台	A	170	大板红	河北宽城	A
66	长安明拣栗	陕西西安	A	171	邢台短枝	河北邢台	A
67	短花	北京怀柔	A	172	白露	河北青龙	A
68	贵州野毛栗	贵州玉屏	C	173	早 1	河北昌黎	A
69	去暑红	河北青龙	A	174	迁早 1	河北迁安	A
70	白底	河北青龙	A	175	早 2	河北昌黎	A
71	青实	河北青龙	A	176	燕光	河北迁西	A
72	处暑红	江苏宜兴	A	177	燕奎	河北迁西	A
73	燕兴	河北兴隆	A	178	燕山短枝	河北迁西	A
74	东岳早丰	山东泰安	B	179	燕金	河北宽城	A
75	岱岳早丰	山东泰安	B	180	宽城大屯	河北宽城	C
76	替码珍珠	河北迁西	A	181	宽城下六	河北宽城	C
77	X 12-55	河北昌黎	D	182	邢台垂枝	河北邢台	A
78	无花栗	山东泰安	A	183	邢台大粒	河北邢台	A
79	石场子 1-1	河北迁西	C	184	H 7-1	河北昌黎	D
80	金真晚栗	陕西镇安	A	185	M 替码实生	河北昌黎	C
81	金真栗	陕西镇安	A	186	平泉(葛)	河北平泉	C
82	早 3	河北昌黎	A	187	燕山硕丰	河北昌黎	D
83	邢台早熟	河北邢台	A	188	X 19-94	河北昌黎	D
84	燕栗 2 号	河北迁西	B	189	燕栗 4 号	河北昌黎	A
85	西寨 1 号	河北迁西	B	190	迁早 2	河北迁安	A
86	后南峪垂枝	河北邢台	A	191	D 3-21	河北昌黎	D
87	替码燕明	河北抚宁	A	192	H 3-18	河北昌黎	D
88	变异燕明	河北抚宁	A	193	X 34-105	河北昌黎	D
89	抚宁薄皮	河北抚宁	A	194	遵玉	河北遵化	A
90	遵化短刺	河北遵化	A	195	东冰窖 1 号	河北宽城	C

表1（续）

编号 No.	名称 Name	来源地 Source	类型 Type	编号 No.	名称 Name	来源地 Source	类型 Type
91	前3	河北邢台	A	196	H 8-1	河北昌黎	D
92	广西油栗	广西隆安	A	197	燕晶	河北遵化	A
93	广西玉林11号	广西玉林	A	198	D 2-2	河北昌黎	D
94	青毛软刺	江苏宜兴	A	199	大桑园1号	河北宽城	C
95	重阳蒲	江苏宜兴	A	200	X 12-25	河北昌黎	D
96	浙江奎栗	浙江绍兴	A	201	东陵明珠	河北遵化	A
97	罗田1号	湖北罗田	A	202	X 30-70	河北昌黎	D
98	燕丰	北京怀柔	A	203	焦扎	江苏宜兴	A
99	燕红	北京怀柔	A	204	早3113	河北迁西	B
100	小官10	河北遵化	A	205	D 5-50	河北昌黎	D
101	大官10	河北遵化	A	206	X 13-98	河北昌黎	D
102	紫珀	河北遵化	A	207	X 34-105	河北昌黎	D
103	达1-3	河北遵化	A	208	H 西7-1	河北昌黎	D
104	达1-2	河北遵化	A	209	南垂5号	河北昌黎	A
105	山东红栗	山东泰安	A	210	BJHW	北京怀柔	B

注:A,实生良种;B,地方品种;C,古树资源;D,杂交优系(种)。
Note: A, seedling cultivars; B, local varieties; C, ancient trees resources; D, hybrids varieties.

1.2 测定项目及方法

2021和2022年,连续2年于各资源坚果成熟期采集刺苞,每份资源选取长势良好且一致的植株3株,自每株树冠中部外围四周采摘30个刺苞为一个样本,脱苞后带回实验室,冷藏保存用于坚果表型性状测定。

1.2.1 质量性状与假性质量性状测定

坚果形状、坚果颜色和接线形状的测定按照

《植物新品种特异性、一致性、稳定性测试指南 板栗》^[11],坚果光泽、果顶果肩、茸毛分布及茸毛颜色的测定按照《板栗种质资源描述规范和数据标准》^[12]。根据《植物新品种特异性、一致性、稳定性测试指南 板栗》^[11],将坚果形状和坚果颜色归于假性质量性状范畴,其它性状为质量性状。将每份资源7个性状分别进行赋值,赋值标准见表2。

表2 板栗坚果质量性状与假性质量性状特征描述及赋值

Table 2 The description and assignment of nut quality traits and false quality traits of Chinese chestnut

类别 Type	性状 Trait	特征描述 Description and assignment of traits				
		1	2	3	4	5
假性质量性状 False quality trait	坚果形状	椭球形	球形	卵形		
	坚果颜色	红褐色	黄褐色	褐色	紫褐色	黑褐色
质量性状 Quality trait	接线形状	平直	波状	如意状		
	坚果光泽	油亮	明亮	半明	半毛	毛
	果顶果肩	喙突	平	浑圆	微凹	
	茸毛分布	近果顶	果肩以下	周身		
	茸毛颜色	棕黄	灰白			

1.2.2 数量性状测定

坚果长(Nut length, NL)、坚果宽(Nut width, NW)、坚果厚(Nut thickness, NT)及种壳厚(Shell

thickness, ST)使用游标卡尺(精度为0.01 mm)测量,底座宽(Base width, BW)和果面弧长(Surface arc length, SAL)使用卷尺(精度为0.1 cm)测量,每

样本随机选取 10 个边果进行以上性状的测量,取其平均值,精确到 0.01。使用电子天平(精度为 0.01 g)进行单粒质量(Nut size, NS)和种壳质量(Shell weight, SW)的测定,每样本随机选取 10 个坚果进行测定,取其平均值,精确到 0.01。果形指数(Nut shape index, NSI)、底座大小(Base size, BS)、种仁质量(Kernel weight, KW)和出仁率(Kernel rate, KR)通过公式计算得出:果形指数为坚果长与坚果宽的比值,底座大小为底座宽与果面弧长的比值,种仁质量为单粒质量与种壳质量的差值,出仁率为种仁质量与单粒质量的比值。

1.3 数据分析

使用 Excel 2010 软件对数据进行整理和计算,利用 SPSS 20.0 进行表型性状的表述性统计、方差分析、相关性分析、主成分分析以及遗传距离的计算,使用 Mega 软件绘制聚类图。

1.3.1 表型性状变异系数(CV)和遗传多样性指数计算

采用变异系数表示性状的离散程度^[13],计算公式如下:

$$CV=\frac{s}{u}\times 100\%$$
 (1)

式中:s 为标准差;u 为性状平均值,mm/g。

Shannon-Wiener's 多样性指数(H')计算公式为^[11]:

$$H'=-\sum P_i\times \ln P_i$$
 (2)

式中: P_i 为某一性状第*i*级别的材料份数占总份数的百分比,%。

1.3.2 方差分析

采用巢式设计方差分析进行检验^[5],群体间变异占遗传总变异的百分比用表型分化系数(V_{ST})表示^[13]。计算公式如下:

$$V_{ST}=[\delta_{2t/s}/(\delta_{2t/s}+\delta_{2s})]\times 100\%$$
 (3)

式中: $\delta_{2t/s}$ 为群体间方差分量; δ_{2s} 为群体内方差分量。

2 结果与分析

2.1 中国板栗坚果表型性状多样性分析

2.1.1 质量性状与假性质量性状

供试板栗资源 7 个性状的 Shannon-Wiener's 多样性指数变化范围为 0.45~1.30(表 3),平均为 0.84,其中坚果颜色的多样性指数最大,坚果形状的多样性指数最小。接线形状的变异系数最大(47.98%),茸毛颜色变异系数最小(26.76%)。7 个性状的平均变异系数为 37.54%,说明这些性状的变异较丰富,但分布相对集中。

表 3 板栗坚果质量性状与假性质量性状的分布特征及变异系数、多样性指数

Table 3 Distribution characteristics and coefficient of variation, diversity index of nut qualitative traits and false quality traits of Chinese chestnut

类别 Type	性状 Trait	频率/% Frequency					变异系数/% CV	多样性指数 H'
假性质量性状 False quality traits	坚果形状	88.08	5.18	6.74			45.11	0.45
	坚果颜色	15.54	0.52	38.34	34.20	11.40	35.85	1.30
质量性状 Quality trait	接线形状	76.17	14.51	9.33			47.98	0.71
	坚果光泽	18.13	63.21	13.99	4.15	0.52	35.41	1.03
	果顶果肩	2.07	61.66	20.21	16.06		31.28	1.00
	茸毛分布	66.84	29.53	3.63			40.38	0.75
	茸毛颜色	29.53	70.47				26.76	0.61
平均 Average							37.54	0.84

注:频率指与表 2 中特征描述相对应的各性状的频率。
Note: Frequency refers to the frequency of each trait corresponding to the description characteristics in Table 2.

以上 7 个性状中,分化最大的是坚果颜色和坚果光泽;分化最小的是茸毛颜色,仅有棕黄和灰白 2 种分化类型。在坚果形状这一性状中,椭球形占

88.08%,球形和卵形较少;褐色和紫褐色的坚果颜色较为普遍,红褐色和黑褐色次之,黄褐色极少;接线形状中平直形较为普遍(76.17%),波状和如意

状较少;坚果光泽中明亮占比最多(63.21%),油亮和半明次之,半毛和毛较少;喙突型的果顶果肩极少(2.07%),浑圆和微凹较多,平的最多(61.66%);坚果茸毛大多分布在近果顶(66.84%),其次在果肩以下(29.53%),分布在周身的极少(3.63%)。

2.1.2 数量性状

由板栗坚果12个数量性状的多样性指数及遗传变异分析结果(表4和5)可见,这些性状的变异系数介于4.38%~33.73%。其中,底座宽、种壳厚、

种壳质量、单粒质量和种仁质量的变异系数均达20%以上,表明这些性状的离散程度较大,变异度丰富。而坚果长、果形指数和出仁率的变异系数均<10%,说明这些性状遗传较稳定。

12个性状的Shannon-Wiener's多样性指数(H')介于1.70~1.96,平均为1.84。整体来看,数量性状的遗传多样性指数高于质量性状的多样性指数,表明板栗坚果的数量性状具有较高的遗传多样性和分布平衡性;而质量性状则分布相对集中,均匀度较差。

表4 板栗坚果12个数量性状的遗传多样性指数
Table 4 Genetic diversity index of 12 nut quantitative traits of Chinese chestnut

数量性状 Quantitative trait	均值±标准差 Mean±SD	中位数 Median	极小值 Min	极大值 Max	极差 Range	多样性指数 H'
坚果长/mm NL	25.41±2.39	25.23	15.12	34.89	19.77	1.90
坚果宽/mm NW	30.59±3.33	30.37	19.21	46.33	27.12	1.89
坚果厚/mm NT	19.11±2.28	18.85	10.14	30.75	20.61	1.87
果形指数 NSI	0.83±0.05	0.83	0.59	1.08	0.48	1.75
底座宽/mm BW	14.29±2.94	13.97	8.00	25.00	17.00	1.85
果面弧长/mm SAL	47.77±4.99	47.27	32.00	70.00	38.00	1.86
底座大小 BS	0.30±0.04	0.30	0.19	0.47	0.27	1.84
种壳厚/mm ST	0.59±0.16	0.57	0.20	1.55	1.35	1.77
种壳质量/g SW	1.57±0.53	1.47	0.51	4.77	4.26	1.77
单粒质量/g NS	9.60±2.65	9.04	4.71	19.67	14.96	1.96
种仁质量/g KW	8.03±2.28	7.56	3.38	16.85	13.47	1.95
出仁率 KR	0.84±0.04	0.84	0.63	0.96	0.32	1.70

2.2 中国板栗群体间和群体内的坚果表型变异分析

将来源于同一省市的资源作为一个群体,计算其中12个数量性状在群体间和群体内的方差分量及表型分化系数(表6)。可知,群体间和群体内方差分量百分比分别为2.13%~32.85%和42.06%~66.44%;各性状的表型分化系数介于4.34%~33.14%,平均为24.93%,即群体间的平均表型变异约占总变异的1/4,群体内约占3/4,说明群体内变异是板栗坚果表型变异的主要来源。各性状除果形指数在群体间的差异不显著,其他性状在群体间和群体内均存在极显著差异($P<0.01$),说明板栗坚果表型性状在群体间和群体内的变异程度均较丰富。

2.3 中国板栗坚果表型性状综合评价

2.3.1 相关性分析

坚果12个数量性状相关性分析结果表明(表7),大多数性状之间具有极显著相关性。出仁率与单粒质量、种仁质量呈极显著正相关($P<0.01$),与种壳厚、种壳质量呈极显著负相关($P<0.01$),与底座大小呈显著负相关($P<0.05$);种壳厚和种壳质量与果形指数呈极显著负相关,与其他性状均呈极显著正相关($P<0.01$);单粒质量与种仁质量呈极显著正相关($P<0.01$),且相关系数最高(0.988)。坚果长、宽、厚、底座宽、果面弧长、底座大小两两之间呈极显著正相关($P<0.01$);果形指数只与坚果长呈极显著正相关($P<0.01$),与其他性状(坚果宽、厚、底座宽、果面弧长、底座大小、种壳厚、种壳

表 5 板栗坚果数量性状变异程度

Table 5 Variation of nut quantitative traits of Chinese chestnut

数量性状 Quantitative trait	变异系数 CV
坚果长 NL	9.42
坚果宽 NW	10.87
坚果厚 NT	11.95
果形指数 NSI	6.08
底座宽 BW	20.61
果面弧长 SAL	10.45
底座大小 BS	13.75
种壳厚 ST	26.78
种壳质量 SW	33.73
单粒质量 NS	27.58
种仁质量 KW	28.34
出仁率 KR	4.38

质量、单粒质量和种仁质量)呈极显著负相关($P<0.01$)。

2.3.2 主成分分析

基于 12 个数量性状进行主成分分析(表 8),根据特征值 >1 及累计贡献率 $>85\%$ 的原则,共提取 3 个主成分,其主成分特征值分别为 7.787、1.551 和 1.142,贡献率分别为 64.893%、12.922% 和 9.519%。前 3 个主成分的累积贡献率达 87.334%,可反映板栗坚果表型性状的绝大部分信息。

第 1 主成分中坚果宽、厚、果面弧长和单粒质量的特征向量较大,可作为坚果大小相关的综合指标;第 2 主成分中出仁率和种壳厚(绝对值)的特征向量较大,反映了坚果的经济性状,是坚果的外观品质特征;第 3 主成分中果形指数和底座大小(绝对值)的特征向量较大,反映了坚果的形状因子。

表 6 板栗坚果 12 个数量性状的方差分量和群体间表型分化系数

Table 6 Variance components and phenotype differentiation coefficients of 12 nut quantitative traits of Chinese chestnut

数量性状 Quantitative trait	方差分量 Variance component			方差分量百分比/% Percentage of variance portion		表型分化系数/% Phenotype differentiation coefficient	F 值 F value	
	群体间	群体内	随机误差	群体间	群体内		群体间	群体内
坚果长 NL	2 510.16	5 687.82	2 915.63	22.59	51.18	30.62	8.76**	16.96**
坚果宽 NW	4 472.44	11 441.54	5 525.09	20.86	53.37	28.10	7.76**	18.01**
坚果厚 NT	2 041.49	4 761.27	3 303.59	20.20	47.11	30.01	8.52**	12.53**
果形指数 NSI	0.11	2.34	2.54	2.13	46.89	4.34	0.90	8.00**
底座宽 BW	3 795.62	8 033.97	4 977.58	22.58	47.80	32.09	9.38**	14.03**
果面弧长 SAL	8 681.77	25 802.69	13 840.20	17.97	53.39	25.18	6.68**	16.21**
底座大小 BS	0.49	1.39	1.36	15.18	42.78	26.18	7.05**	8.85**
种壳厚 ST	2.86	20.30	25.11	5.91	42.06	12.33	2.79**	7.03**
种壳质量 SW	134.64	290.20	116.39	24.88	53.62	31.69	9.21**	21.68**
单粒质量 NS	4 462.85	9 004.08	120.12	32.85	66.27	33.14	9.84**	651.66**
种仁质量 KW	3 152.03	6 672.79	218.45	31.38	66.44	32.08	9.38**	265.55**
出仁率 KR	0.19	1.22	1.186	7.31	47.04	13.46	3.10**	8.96**
平均 Mean	2 437.89	5 976.63	2 587.27	22.16	54.32	24.93	/	/

注:**表示差异极显著($P<0.01$)。下同。
Note: ** indicates extremely significant difference at 0.01 level. The same below.

根据各指标在 3 个主成分中的得分系数及该主成分的特征根,计算出各指标的权重即表达式中各指标的系数,坚果表型综合得分表达式 $Y=0.128X_1+0.099X_2+0.099X_3+0.029X_4+0.058X_5+0.107X_6+0.004X_7+0.006X_8+0.069X_9+0.122X_{10}+0.128X_{11}+0.088X_{12}$ 。在该式

表7 板栗坚果12个数量性状之间的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between 12 phenotypic traits of Chinese chestnut

数量性状 Quantitative trait	坚果长 NL	坚果宽 NW	坚果厚 NT	果形指 数 NSI	底座宽 BW	果面 弧长 SAL	底座大 小 BS	种壳厚 ST	种壳质 量 SW	单粒 质量 NS	种仁 质量 KW	出仁 率 KR
坚果长 NL	1.000											
坚果宽 NW	0.828**	1.000										
坚果厚 NT	0.731**	0.821**	1.000									
果形指数 NSI	0.080**	-0.487**	-0.321**	1.000								
底座宽 BW	0.605**	0.692**	0.719**	-0.289**	1.000							
果面弧长 SAL	0.811**	0.828**	0.823**	-0.216**	0.788**	1.000						
底座大小 BS	0.272**	0.386**	0.431**	-0.265**	0.874**	0.397**	1.000					
种壳厚 ST	0.262**	0.274**	0.271**	-0.079**	0.267**	0.295**	0.163**	1.000				
种壳质量 SW	0.628**	0.662**	0.609**	-0.198**	0.587**	0.650**	0.357**	0.494**	1.000			
单粒质量 NS	0.744**	0.790**	0.733**	-0.244**	0.666**	0.763**	0.391**	0.346**	0.753**	1.000		
种仁质量 KW	0.720**	0.765**	0.711**	-0.238**	0.638**	0.737**	0.372**	0.288**	0.644**	0.988**	1.000	
出仁率 KR	-0.023	-0.010	-0.005	-0.019	-0.035	0.001	-0.047*	-0.309**	-0.513**	0.144**	0.286**	1.000

注:*表示差异显著($P<0.05$)。
Note: * indicates significant correlation at 0.05 level.

表8 12个表型性状前3个主成分的特征向量、特征值、贡献率及累计贡献率

Table 8 Eigen vectors, eigen values, contribution rate and cumulative contribution rate of first three principal components based on 12 phenotypic traits

数量性状 Quantitative trait	主成分 Principle factor		
	第1主成分	第2主成分	第3主成分
坚果长 NL	0.884	0.067	0.395
坚果宽 NW	0.959	0.077	-0.001
坚果厚 NT	0.948	0.057	0.032
果形指数 NSI	-0.401	-0.046	0.747
底座宽 BW	0.896	-0.030	-0.255
果面弧长 SAL	0.948	0.023	0.150
底座大小 BS	0.641	-0.055	-0.541
种壳厚 ST	0.561	-0.618	0.123
种壳质量 SW	0.924	-0.292	0.088
单粒质量 NS	0.948	0.218	0.110
种仁质量 KW	0.917	0.317	0.110
出仁率 KR	-0.049	0.957	0.009
特征值 Eigen values	7.787	1.551	1.142
贡献率/% Contribution ratio	64.893	12.922	9.519
累计贡献率/% Cumulative contribution ratio	64.893	77.815	87.334

表9 板栗资源不同类群12个表型性状的均值

Table 9 Mean values of 12 phenotypic traits in different groups of Chinese chestnut germplasm resources

数量性状 Quantitative trait	I	II	III		IV		
			1	2	1	2	3
数量/份 Number	15	7	61	1	38	1	87
坚果长/mm NL	29.78	21.66	26.85	28.04	23.40	27.06	24.85
坚果宽/mm NW	37.00	24.81	32.52	33.01	27.78	32.46	29.84
坚果厚/mm NT	23.07	15.63	20.45	21.95	17.31	20.56	18.58
果形指数 NSI	0.81	0.87	0.83	0.85	0.84	0.84	0.83
底座宽/mm BW	19.11	11.25	15.94	19.22	11.96	14.46	13.60
果面弧长/mm SAL	56.84	39.66	50.83	55.44	43.46	45.06	46.70
底座大小 BS	0.34	0.28	0.31	0.35	0.27	0.32	0.29
种壳厚/mm ST	0.73	0.58	0.63	0.88	0.53	0.61	0.56
种壳质量/g SW	2.72	1.05	1.80	2.45	1.16	1.96	1.41
单粒质量/g NS	16.00	5.77	11.41	7.98	7.21	8.37	8.63
种仁质量/g KW	13.28	4.72	9.60	5.53	6.05	6.41	7.22
出仁率 KR	0.83	0.82	0.85	0.69	0.84	0.75	0.84

注:I、II、III和IV表示依据聚类分析划分的第I类群、第II类群、第III类群和第IV类群,对应III类群下的1、2表示第III-1和第III-2亚类,对应IV类群下的1、2、3表示第IV-1、第IV-2和第IV-3亚类。

Note: I, II, III and IV represent group I, group II, group III and group IV based on cluster analysis. Corresponding to group III 1 and 2 represent subgroup III-1 and subgroup III-2. Corresponding to group IV 1, 2 and 3 represent subgroup IV-1, subgroup IV-2 and subgroup IV-3.

3 讨 论

3.1 中国板栗资源表型遗传多样性

目前,利用大样本量资源进行板栗坚果表型精准鉴定及综合评价的研究较少,因此,本研究可为板栗种质资源的保护、利用及育种应用提供较为准确的参考依据。板栗资源的价值主要体现在育种利用上,而表型性状鉴定可为优异资源的挖掘和利用提供科学有效的信息^[14]。板栗坚果表型是农艺性状中较为稳定的遗传特征,通过深入分析其特征可揭示群体的遗传规律、变异大小^[9]。变异系数和遗传多样性指数是评价种质资源表型遗传多样性的重要指标,二者数值越大表明变异幅度越大,遗传多样性越丰富,更可能含有极端变异类型,品种改良选择潜力也就越大^[15-17]。一般认为果实纵径、横径等形态性状的变异系数<15%,是相对稳定的植物学性状,可作为果实表型性状变异程度的界限^[18]。本研究发现,板栗坚果表型性状存在较高的遗传变异,19个表型性状的变异系数为4.38%~47.98%,表明各性状间存在明显差异。其中,坚果

长、宽、厚、果面弧长4个形态指标性状及果形指数、底座大小、出仁率3个比值指标性状的变异系数均在15%以下,说明这几个性状遗传特性较稳定;种壳厚度、种壳质量、种仁质量和单粒质量这4个表型性状的变异系数均在20%以上,说明这些性状具有更高的变异程度,在优异资源的选择方面潜力更大,研究和利用价值较高。

赖俊声等^[19]发现板栗坚果形状和颜色、果面光泽、果面茸毛和接线形状这些性状的遗传多样性指数为0.685~1.428,陈旭等^[20]发现质量性状坚果光泽和假性质量性状坚果颜色、边框形状和种仁颜色的多样性指数变化范围为0.459~1.567。本研究中7个性状的多样性指数变化范围为0.45~1.30,说明这几个性状相较已报道的坚果形状、颜色、坚果光泽和茸毛分布等性状,其变异较为集中,均匀度较差。此外,本研究发现比值型性状(果形指数和出仁率)的变异系数都较小,与在核桃和杉木等树种上的研究结果一致^[21-22],说明这些比值性状普遍具有变异性小、稳定性高的特点。因此可以在资源分类、品种鉴定时放心使用这些表型性状,比如

在板栗品种鉴别上通过考查坚果长、宽指标,计算获得果形指数指标来快速实现品种区分。

3.2 中国板栗资源表型性状的变异规律

群体内的变异反映了个体基因型间的表型变异,研究个体基因型间的性状变异是提高育种效率的根本^[4,23]。而群体间变异是不同环境长期选择的结果,是群体分化的源泉^[24-25]。本研究中板栗坚果12个数量性状在群体间的平均表型分化系数(V_{ST})值为24.93%,即群体间的平均变异与群体内的平均变异比约为1:3,表明各性状群体内的变异高于群体间变异,群体内变异是板栗坚果12个表型性状呈多样性的主要来源。此项结果与郭燕等^[26]对板栗叶片表型性状多样性研究和刘亚斌等^[7]对板栗刺苞表型多样性分析的结果一致。江锡兵等^[9]认为,板栗坚果性状在遗传上较为稳定,主要由自身遗传因素控制,不易受环境影响,这可能是坚果表型性状由群体内变异占主导地位的重要原因。另一方面,群体间变异反映的是存在地理和生殖隔离的群体间表型的差异,不同地区长期相互引种使得群体间基因交流频繁^[27],减少了地理隔离的影响,从而削弱了群体间的遗传分化程度。此外,一般认为环境与栽培管理措施对表型性状有较大影响,本研究所有材料取自同一试验地点,可以更直观地比较相同环境及栽培管理条件下不同资源由基因型差异导致的坚果表型差异,更真实地反映了坚果性状遗传变异规律;但由于本试验地环境条件与原产地存在差异,对坚果表型性状的具体呈现会造成一定影响,未能全面反映出板栗资源群体间的表型分化。

3.3 板栗资源坚果表型性状的综合评价

目前,基于主成分分析结合隶属函数法的综合评价方法在作物、园艺植物的表型遗传多样性研究中得到广泛应用^[28-33],这种方法不仅能筛选出权重、代表性强的典型评价指标,还可以评价每份资源的综合表现。本研究中12个数量性状之间存在显著或极显著相关性,其中底座大小、种壳质量和厚度、种仁质量和单粒质量对出仁率的影响显著,在一定条件下,底座越小、种壳越轻或越薄、种仁和单粒质量越大,出仁率也就越高。因此在板栗生产加工中,要满足高出仁率坚果的特异要求,可综合考虑上述性状进行定向育种,那么获得突破的可能性更大。由于12个表型性状之间大多存在极显著相关性,提供的信息相互重叠,通过降维的方法将之前多个相

关的单个指标转换成少数几个新的独立的综合指标,筛选出关键性状进行重点考察,能减轻数据采集的工作量和数据分析的难度。本研究结果显示,12项指标反映坚果表型性状的顺序为:坚果长>种仁质量>单粒质量>果面弧长>坚果厚>坚果宽>出仁率>种壳质量>底座宽>果形指数>种壳厚>底座大小,因此,在对坚果表型性状进行评价及定向育种实践中应重点关注排序靠前的性状。

3.4 聚类分析

本研究借助12个数量性状,基于欧氏距离对210份中国板栗资源进行了聚类分析,其中第Ⅲ-1类板栗资源种仁质量较大,出仁率相对较高,可从中选取资源作为大粒加工型品种培育优良育种亲本。不同类群的板栗坚果表型特征有明显差别,如第Ⅰ类群主要是南方品种资源,表现为坚果长、宽、厚、果面弧长较大,单粒质量和种仁质量也较大,同时也包括了‘山东大粒’等北方资源;第Ⅱ类群的资源坚果长、宽、厚、果面弧长较小,单粒质量和种仁质量也较小,主要来自广西、河北等地。归属同一品种群的资源也可能划分为不同类群,如第Ⅲ-1类和第Ⅳ类群大多属于华北品种群。聚类结果是将具有相同或相似性状的材料聚到一起,与资源整体的地理来源存在一定偏差。分析原因包括以下几点:一是由于各地选种目标的多样性,同一地区不同地点的材料在长期后代选择中表型特征差异越来越明显,导致地理来源相同的材料可能被归入不同类群;二是不同来源但具有相同特征的材料聚为一起,表明这些材料的遗传基础比较接近,与系谱来源并不完全吻合,可能是基因交流导致的趋同性;此外,从资源评价的角度出发,仅通过十几个表型性状还不足以完全揭示资源的遗传变异,导致结果存在一定的误差。为了更精准的鉴定不同资源,还需利用表型性状结合分子标记的方法,这样对资源的分析评价会更加全面、准确。

4 结 论

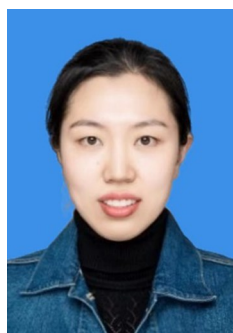
210份板栗资源19个坚果表型性状具有较高的多样性水平,群体内变异是坚果表型变异的主要来源;最能反应坚果表型特征的3个性状是坚果长、种仁质量和单粒质量;供试资源被划分为4大类群,各类群间表型性状差异明显,第Ⅲ-1亚类单粒质量大,出仁率高,可作为大粒加工型良种培育优良亲本。

参考文献 References

- [1] 张宇和, 柳菱, 梁维坚, 张育明. 中国果树志-板栗榛子卷[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005
Zhang Y H, Liu L, Liang W J, Zhang Y M. *China Fruit Chronicles-Chestnut and Hazelnut Roll* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005 (in Chinese)
- [2] 王晓鸣, 邱丽娟, 景蕊莲, 任贵兴, 李英慧, 李春辉, 秦培友, 谷勇哲, 李龙. 作物种质资源表型性状鉴定评价: 现状与趋势[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(1): 12-20
Wang X M, Qiu L J, Jing R L, Ren G X, Li Y H, Li C H, Qin P Y, Gu Y Z, Li L. Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm: Status and development[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(1): 12-20 (in Chinese)
- [3] 李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 王广鹏. 211份板栗种质资源花序表型多样性和聚类分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(22): 4667-4682
Li Y, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Wang G P. Catkin phenotypic diversity and cluster analysis of 211 Chinese chestnut germplasms [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(22): 4667-4682 (in Chinese)
- [4] 郭燕, 张树航, 李颖, 张馨方, 王广鹏. 中国板栗36个叶片表型性状的多态性[J]. 中国农业科学, 2022, 55(5): 991-1009
Guo Y, Zhang S H, Li Y, Zhang X F, Wang G P. Diversity analysis of 36 leaf phenotypic traits of Chinese chestnut [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 991-1009 (in Chinese)
- [5] 李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 闫希光, 王广鹏. 中国板栗9个结果母枝相关表型性状遗传多样性研究[J]. 园艺学报, 2019, 46(3): 453-463
Li Y, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Yan X G, Wang G P. Genetic diversity analysis of several phenotypic traits related to biennial bearing branch in Chinese chestnut [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2019, 46(3): 453-463 (in Chinese)
- [6] 杨振立, 王广鹏, 张树航, 郭燕, 张馨方, 李颖. 燕山板栗15个花序相关表型性状遗传多样性研究[J]. 华北农学报, 2020, 35(S1): 93-101
Yang Z L, Wang G P, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Li Y. Genetic diversity analysis of 15 phenotypic traits related to catkin in Yanshan chestnut [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(S1): 93-101 (in Chinese)
- [7] 刘亚斌, 郭素娟, 孙传昊. 基于巢式分组设计的板栗刺苞与坚果形态多样性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(10): 51-60
Liu Y B, Guo S J, Sun C H. Morphological diversity analysis of chestnut thorns bract and nuts based on nested grouping design [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(10): 51-60 (in Chinese)
- [8] 兰彦平, 周连第, 姚砚武, 曹庆昌, 兰卫宗. 中国板栗坚果性状表型多样性研究[C]//首届中国林业学术大会论文集. 北京: 当代中国出版社, 2005
Lan Y P, Zhou L D, Yao Y W, Cao Q C, Lan W Z. Study on phenotypic diversity of nut traits of Chinese chestnut [C]. In: *Proceedings of the First China Forestry Science Conference*. Beijing: Contemporary China Publishing House, 2005 (in Chinese)
- [9] 江锡兵, 龚榜初, 刘庆忠, 陈新, 吴开云, 邓全恩, 汤丹. 中国板栗地方品种重要农艺性状的表型多样性[J]. 园艺学报, 2014, 41(4): 641-652
Jiang X B, Gong B C, Liu Q Z, Chen X, Wu K Y, Deng Q E, Tang D. Phenotypic diversity of important agronomic traits of local cultivars of Chinese chestnut [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(4): 641-652 (in Chinese)
- [10] 李彤彤, 郭素娟, 江锡兵. 不同板栗品种坚果表型差异分析及稳定性指标筛选[J]. 林业科学研究, 2023, 36(4): 99-108
Li T T, Guo S J, Jiang X B. Phenotypic difference analysis and screening stability indexes of different Chinese chestnut varieties nuts [J]. *Forest Research*, 2023, 36(4): 99-108 (in Chinese)
- [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]. 北京: 中国标准出版社, 2009
LY/T 1851-2009 Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability of Chestnut (*Castanea mollissima* Bl) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese)
- [12] 刘庆忠. 板栗种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
Liu Q Z. *Descriptors and Data Standard for Chestnut (Castanea mollissima blume)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)
- [13] 李洪果, 陈达镇, 许靖诗, 刘光金, 庞晓东, 叶金辉. 濒危植物格木天然种群的表型多样性及变异[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 69-83
Li H G, Chen D Z, Xu J S, Liu G J, Pang X D, Ye J H. Phenotypic diversity and variation in natural populations of *Erythrophloeum fordii*, an endangered plant species [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(4): 69-83 (in Chinese)
- [14] Campbell D R. Using phenotypic manipulations to study multivariate selection of floral trait associations[J]. *Annals of Botany*, 2009, 103(9): 1557-1566
- [15] 胡标林, 万勇, 李霞, 雷建国, 罗向东, 严文贵, 谢建坤. 水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 829-839
Hu B L, Wan Y, Li X, Lei J G, Luo X D, Yan W G, Xie J K. Analysis on genetic diversity of phenotypic traits in rice (*Oryza sativa*) core collection and its comprehensive assessment [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(5): 829-839 (in Chinese)
- [16] 梁森苗, 张淑文, 郑锡良, 任海英, 朱婷婷, 戚行江. 杨梅生长指标与果实品质间的相关性分析[J]. 核农学报, 2019, 33(4): 751-758
Liang S M, Zhang S W, Zheng X L, Ren H Y, Zhu T T, Qi X J. Correlation between growth indexes and fruit quality traits of Chinese bayberry (*Myrica rubra* sieb et zuce) [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(4): 751-758 (in Chinese)
- [17] 谢向誉, 尚小红, 严华兵, 曹升, 王颖, 肖亮, 陆柳英, 曾文丹. 广西地方食用木薯种质资源遗传多样性分析[J]. 核农学报, 2020, 34(11): 2397-2406
Xie X Y, Shang X H, Yan H B, Cao S, Wang Y, Xiao L, Lu L Y, Zeng W D. Genetic diversity analysis of edible cassava landraces in Guangxi [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(11): 2397-2406 (in Chinese)
- [18] 刘国彬, 兰彦平, 兰卫宗, 曹均. 板栗农家品种资源坚果表型性状分析[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(5): 977-981, 987
Liu G B, Lan Y P, Lan W Z, Cao J. An analysis of phenotypic traits of native chestnut varieties [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2013, 35(5): 977-981, 987 (in Chinese)
- [19] 赖俊声, 江锡兵, 龚榜初, 杨龙, 汤丹. 板栗地方品种质量性状多样性分析[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(8): 1196-1200
Lai J S, Jiang X B, Gong B C, Yang L, Tang D. Diversity analysis of quality traits of local chestnut varieties [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(8): 1196-1200 (in Chinese)
- [20] 陈旭, 郝雅琼, 聂兴华, 杨海莹, 刘松, 王雪峰, 曹庆芹, 秦岭, 邢宇. 板栗总苞和坚果主要性状与SSR标记的关联分析[J]. 中国农业科学, 2022, 55(13): 2613-2628
Chen X, Hao Y Q, Nie X H, Yang H Y, Liu S, Wang X F, Cao Q Q, Qin L, Xing Y. Association analysis of main characteristics of bur and nut with SSR markers in Chinese chestnut [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(13): 2613-2628 (in Chinese)
- [21] 李亚兰, 潘存德, 陈虹. 坚果表型性状在核桃种质鉴定中的应用[J]. 西南农业学报, 2020, 33(6): 1113-1120
Li Y L, Pan C D, Chen H. Classification of common walnut (*Juglans regia* L.) germplasm resources [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(6): 1113-1120 (in Chinese)
- [22] Martín-Gómez J J, Rewicz A, Rodríguez-Lorenzo J L, Janoušek B,

- Cervantes E. Seed morphology in *Silene* based on geometric models[J]. *Plants*, 2020, 9(12): 1787
- [23] 张云跃, 马常耕, 林睦就, 李柏海. 我国银杏遗传变异研究之一: 种核性状的群体间和群体内变异[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 35-40
- Zhang Y Y, Ma C G, Lin M J, Li B H. Study on one of genetic variations for *Ginkgo biloba* in China the variation of breeding fruit-stone characters among and within population [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 35-40 (in Chinese)
- [24] Fuchs E J, Hamrick J L. Genetic diversity in the endangered tropical tree, *Guaiaacum sanctum* (Zygophyllaceae)[J]. *The Journal of Heredity*, 2010, 101(3): 284-291
- [25] 白潇, 李毅, 苏世平, 赵小仙. 不同居群唐古特白刺叶片解剖特征对生境的响应研究[J]. 西北植物学报, 2013, 33(10): 1986-1993
- Bai X, Li Y, Su S P, Zhao X X. Response of leaf anatomical characteristics of *Nitraria tangutorum* Bobr from different populations to habitats [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(10): 1986-1993 (in Chinese)
- [26] 郭燕, 张树航, 李颖, 张馨方, 王英杰, 王广鹏. 燕山板栗种质资源叶片表型性状多样性研究[J]. 园艺学报, 2022, 49(8): 1673-1688
- Guo Y, Zhang S H, Li Y, Zhang X F, Wang Y J, Wang G P. Diversity analysis of leaves phenotypic traits of Yanshan chestnut [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, 49(8): 1673-1688 (in Chinese)
- [27] 张馨方, 张树航, 李颖, 郭燕, 王广鹏. 基于SSR标记的板栗种质资源遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2020, 18(15): 5164-5175
- Zhang X F, Zhang S H, Li Y, Guo Y, Wang G P. Genetic diversity analysis of *Castanea mollissima* germplasm resources based on SSR markers [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(15): 5164-5175 (in Chinese)
- [28] Cao Q J, Lu B R, Xia H, Rong J, Sala F, Spada A, Grassi F. Genetic diversity and origin of weedy rice (*Oryza sativa* f spontanea) populations found in North-eastern China revealed by simple sequence repeat (SSR) markers [J]. *Annals of Botany*, 2006, 98(6): 1241-1252
- [29] 李欢, 鄢小青, 杨占烈, 谭金玉, 黎小冰, 陈能刚, 吴荣菊, 陈惠查, 阮仁超. 贵州香禾糯地方稻种资源表型遗传多样性分析与综合评价[J]. 中国农业科学, 2023, 56(11): 2035-2046
- Li H, Yan X Q, Yang Z L, Tan J Y, Li X B, Chen N G, Wu R J, Chen H C, Ruan R C. Analysis and comprehensive evaluation of phenotype genetic diversity in Kam Sweet Rice germplasm resources in Guizhou [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(11): 2035-2046 (in Chinese)
- [30] 张一中, 张晓娟, 梁笃, 郭琦, 范昕琦, 聂萌恩, 王绘艳, 赵文博, 杜维俊, 柳青山. 基于表型性状的高粱育种材料遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2023, 56(15): 2837-2857
- Zhang Y Z, Zhang X J, Liang D, Guo Q, Fan X Q, Nie M E, Wang H Y, Zhao W B, Du W J, Liu Q S. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of sorghum breeding materials based on phenotypic traits [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(15): 2837-2857 (in Chinese)
- [31] 张斌斌, 蔡志翔, 沈志军, 严娟, 马瑞娟, 俞明亮. 观赏桃种质资源表型性状多样性评价[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2406-2418
- Zhang B B, Cai Z X, Shen Z J, Yan J, Ma R J, Yu M L. Diversity analysis of phenotypic characters in germplasm resources of ornamental peaches [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(11): 2406-2418 (in Chinese)
- [32] 周远航, 鲁伟丹, 马小龙, 高江龙, 樊晓琴, 郭建富, 陈友强, 林明, 石书兵. 籽瓜种质资源表型性状鉴定及遗传多样性分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(8): 119-132
- Zhou Y H, Lu W D, Ma X L, Gao J L, Fan X Q, Guo J F, Chen Y Q, Lin M, Shi S B. Phenotypic characters identification and genetic diversity analysis of seed melon germplasm resources [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 119-132 (in Chinese)
- [33] 贺乔乔, 周希希, 王业文, 李培江, 王胜宝, 张羽. 基于SNP和表型性状的柚稻种质资源遗传多样性研究[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(8): 80-93
- He Q Q, Zhou X X, Wang Y W, Li P J, Wang S B, Zhang Y. Genetic diversity of *Indica* rice germplasm resources based on SNP and phenotypic markers [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 80-93 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 张馨方, 河北省农林科学院昌黎果树研究所副研究员。主要从事板栗种质资源收集利用和良种培育工作。参与建立了表型-分子标记相耦合资源鉴别技术规程, 获河北省科学技术进步一等奖1项、河北省林学会林业科学技术一等奖1项。获得河北省科学技术成果5项, 其中4项获国际先进, 1项获国内领先。授权国家发明专利8项, 参与河北省经济林产业技术支撑体系项目和板栗现代种业科技创新项目, 发表论文30余篇。



通讯作者简介: 王广鹏, 博士, 河北省农林科学院昌黎果树研究所研究员。主要从事中国板栗良种培育和高效栽培技术研究推广工作。育成了中国栽培面积最大的板栗品种‘燕山早丰’; 建立了表型-分子标记相耦合资源鉴别技术规程, 编制了GB/T 22346—2008《板栗质量等级》; 创建了包含6项技术专利的板栗快速定向育种技术体系1套, 提高育种效率25%, 构建起全国最大的板栗杂交育种群体, 从中培育新品种(系)11个; 研发出中国北方板栗的第三代整形修剪技术——‘轮替更新整形修剪技术’, 列入行标LY/T1337—2017。主持省级以上项目20余项, 获得省部级科技成果一等奖1项、二等奖1项、三等奖2项, 发表论文93篇(SCI 5篇), 授权国家发明专利7项、新品种权9项、审定良种6项。