

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.005.006

37份文冠果优新种质资源表型性状遗传变异分析

王娅丽*, 顾志杰, 贾巧霞

(宁夏林业研究院, 种苗生物工程国家重点实验室, 宁夏 银川 750004)

摘要: [目的]明确文冠果优新种质资源表型性状的变异特点和多样性,为遗传改良提供依据。[方法]2019—2020年连续2年对37份种质资源的35个表型性状进行了方差分析、主成分分析、聚类分析等。[结果]37份种质资源的35个表型性状的平均变异系数为25.49%,变异范围为12.80%~63.25%,各部位变异系数大小排序为枝条性状(45.51%)>花序性状(31.01%)>果实性状(24.67%)>花性状(24.35%)>种子性状(21.82%)>叶性状(21.45%)。平均表型分化系数为80.525%,表明种质资源间的变异是表型变异的主要来源。主成分分析结果表明,前9个主成分的累积方差贡献率达到80.333%,可以综合反映35个性状的信息。聚类分析将37份文冠果种质资源根据其特点分为2个主要类群,6个亚类群,并初步明确了各亚类群性状特征和育种价值。[结论]文冠果种质资源表型性状遗传变异丰富,其中,花序、果实和花等性状变异范围大于叶片和种子,为文冠果种质资源的遗传改良、保存和评价提供了有益的信息。

关键词:文冠果;种质资源;表型性状;遗传变异

中图分类号:S722

文献标志码:A

文章编号:1001-1498(2022)05-0052-11

文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)为无患子科(Sapindaceae)文冠果属(*Xanthoceras*)落叶灌木或小乔木,主要分布在我国北方干旱和半干旱地区^[1],是集木本油料、生态造林、园林观赏等为一体的多功能树种。文冠果种仁含油量高达67%,其中,85%~93%为不饱和脂肪酸,包括37.1%~46.2%的亚油酸以及28.6%~37.1%油酸等人体必需的脂肪酸^[2-3],还含有3.04%左右的神经酸(组成大脑神经细胞的核心天然成分)^[4]。此外,文冠果还含有多种生物活性化合物,是益寿宁等中药的组成成分^[5]。如从文冠果壳中提取的文冠果皂苷具有抗肿瘤等作用,并且有可能成为治疗阿尔茨海默症的有效成分^[6-7]。近年来,由于文冠果重要的经济价值,其发展非常迅速,到2020年种植面积已达 $5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[1]。由于其广泛

的分布、丰富的生长环境以及长期的异花授粉,文冠果具有丰富的表型变异和多样性。因此,开展文冠果种质资源表型变异及多样性的研究,不仅可挖掘出有重要经济价值的育种资源,同时对于文冠果种质资源的鉴定、评价等有重要意义。

表型多样性的研究为通过表型性状分析遗传多样性提供了最传统和最方便的方法^[8]。相关性分析、主成分分析和聚类分析是表型多样性研究中最普遍和有效的分析方法,目前在李(*Prunus salicina* Lindl)、宽皮柑橘(*Citrus reticulata* Blanco)、杜仲(*Eucommia ulmoides* Oliver)、杏(*Armeniaca sibirica* Lam)等多种作物中均有应用^[9-12]。关于文冠果种质资源表型多样性的研究,王艺林等^[13]、张毅等^[14]、白鑫磊等^[15]及柴春山等^[16]对不同种源或群体文冠果的果实和种子的表型性状进行了变异研

收稿日期:2021-11-24 修回日期:2022-05-11

基金项目:宁夏自然科学基金(2022AAC03754)

*通讯作者:王娅丽,博士,副研究员。主要研究方向:植物优新品种选育及开发利用。电话:13709506182。Email:wangyali523@126.com

究和分析,证实文冠果果实和种子表型多样性丰富,且单株结果个数和种子产量变异最大;芦娟等^[17]对文冠果花的表型多样性研究结果得出,顶花序不孕花数及顶花序孕花数、侧花序长度等性状变异系数较大;郭军战等^[18]对文冠果12个数量性状进行了主成分分析和聚类分析,将12个生物学性状分为树形因子、叶形因子、果形因子、花序因子和综合因子等5类,并将12个数量性状聚为6大类。

以上研究多数是针对野生群体、不同种源等文冠果果实、种子、花等某一部位的性状进行的表型多样性及变异研究,而针对文冠果种质资源枝、叶、花、果实、种子等多部位表型性状的综合研究还未见报道。本研究以银川植物园收集保存的文冠果优新种质资源为研究对象,全面系统的对枝、叶、花、果实、种子等表型性状进行调查分析,旨在揭示文冠果种质资源表型变异多样性,为文冠果种质资源评价及遗传改良等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2019、2020年在银川植物园文冠果种质资源圃内开展。共37份种质,来自10个种源地,包括宁夏银川10份,宁夏吴忠3份,甘肃民勤5份,甘肃定西2份,内蒙赤峰8份,陕西靖边2份,陕西富县1份,山西太原3份,山东辉县1份,辽宁彰武2份。从种质分类上包括品种17份,无性系20份(表1)。2014年春季从各地引进各种质2~3年生的嫁接苗,或从拟引进种质上采集1年生枝条做接穗,采用芽接方式以银川植物园种植的3年生文冠果实生苗为砧木进行嫁接。采用完全随机区组设计,10株小区,3次重复,定植株行距2 m×3 m,密度1 650株·hm⁻²,所有种质均采用统一田间管理措施,采用滴灌进行灌溉和施肥,病虫害和杂草统一防治,每年春季由同一名经验丰富的工作人员对所有种质进行修剪。

表1 文冠果37份优新种质资源

Table 1 The 37 germplasm resources of *X.sorbifolium*

序号 Code	种质名称 Accession name	种质来源 Origin	类型 Germplasm type	序号 Code	种质名称 Accession name	种质来源 Origin	类型 Germplasm type	序号 Code	种质名称 Accession name	种质来源 Origin	类型 Germplasm type
1	开口笑	山东辉县	品种	14	森森金紫冠	甘肃定西	品种	27	5-B2-1	宁夏银川	无性系
2	蒙冠3号	内蒙赤峰	品种	15	森森桃红冠	甘肃定西	品种	28	Fhg	宁夏银川	无性系
3	蒙冠2号	内蒙赤峰	品种	16	森森重瓣冠	陕西富县	品种	29	森森红粉冠	宁夏银川	品种
4	蒙冠1号	内蒙赤峰	品种	17	中石四号	辽宁彰武	品种	30	Jhwm	陕西靖边	无性系
5	N916	甘肃民勤	无性系	18	中石九号	辽宁彰武	品种	31	金公主4号	内蒙赤峰	品种
6	N917	甘肃民勤	无性系	19	森森金粉冠	宁夏银川	品种	32	金公主8号	内蒙赤峰	品种
7	N920	甘肃民勤	无性系	20	Cfg	宁夏银川	无性系	33	金帝3号	内蒙赤峰	品种
8	N923	甘肃民勤	无性系	21	Bxg	宁夏银川	无性系	34	金王1号	内蒙赤峰	品种
9	森森文冠果	甘肃民勤	品种	22	5-C3-2	宁夏银川	无性系	35	Nsjt21	宁夏吴忠	无性系
10	冠硕	山西太原	品种	23	森森橙红冠	宁夏银川	品种	36	Nsjt 29	宁夏吴忠	无性系
11	冠林	山西太原	品种	24	5-C1-1	宁夏银川	无性系	37	Nsjt 32	宁夏吴忠	无性系
12	Yx02	山西太原	无性系	25	Jhz	陕西靖边	无性系				
13	Jhg	内蒙赤峰	无性系	26	Hrhb	宁夏银川	无性系				

1.2 表型性状调查与测定方法

1.2.1 表型性状采样方法 每种质选取3株生长正常、无明显缺陷、未发现病虫害、生长基本一致的结果树作为试验对象。2019—2020年每年4月下旬开花盛期在每株树冠中上部选取花序10个,盛开的小花30朵进行花序和花性状调查;8月上

旬果实成熟期采集成熟果实10个,成熟种子15个进行果实及种子性状调查(其中,百粒质量为每单株随机取100粒种子,重复3次,取平均值);9月中旬在树冠中上部采集当年生枝条5个,成熟复叶15个,成熟小叶15片进行枝、叶性状的调查。所有采样均按照单株进行,枝、叶、花等性

状调查鲜样,果实及种子性状自然阴干后调查测定。

1.2.2 表型性状调查与测定 利用电子天平和游标卡尺等对 37 份种质资源的 35 个表型性状进行调查统计,包括 2 个枝性状:当年生枝条长 (ABL/cm)、当年生枝条粗 (ABD/mm); 7 个叶性状:复叶数量 (CLN/个)、叶轴长 (RL/cm)、叶轴宽 (RW/cm)、小叶数量 (LN/个)、小叶长 (LL/mm)、小叶宽 (LW/mm)、叶型指数 (LSI); 5 个花序性状:花序长 (IL/mm)、花序宽 (IW/mm)、花序径 (ID/mm)、花序花数量 (FN/个)、花序指数 (ISI); 7 个花性状:花朵长 (FL/mm)、花冠径 (CD/mm)、花梗长 (PL/mm)、花梗径 (PD/mm)、花瓣长 (PL1/mm)、花瓣宽 (PW/mm)、花瓣指数 (PSI); 7 个果实性状:果实质量 (FW/g)、单果种子数 (SFSN/个)、单果种子质量 (SFSW/g)、果实横径 (FTD/mm)、果实纵径 (FLD/mm)、果型指数 (FSI)、出种率 (SP/%) ; 7 个种子性状:种子横径 (STD/mm)、种子纵径 (SLD/mm)、种型指数 (SSI)、种子质量 (SW/g)、种仁质量 (KW/g)、出仁率 (KP/%)、百粒质量 (SHGW/g)。其中,叶形指数 = 叶长/叶宽,花序指数 = 花序长/花序宽、花瓣指数 = 花瓣长/花瓣宽,果形指数 = 果纵径/果横径,种形指数 = 种子纵径/种子横径;出种率 = 种子质量/果实质量 $\times 100\%$;出仁率 = 种仁质量/种子质量 $\times 100\%$ 。数据取 2019 及 2020 年 2 年调查测量的平均值。

1.3 数据处理

用表型分化系数 (V_{ST}) 来反映种质间表型分化的值,即种质间变异占遗传总变异的百分比, $V_{ST} = (\sigma^2_{I/s}) / (\sigma^2_{I/s} + \sigma^2_s)$, $\sigma^2_{I/s}$ 为种质间的方差分量百分比, σ^2_s 为种质内的方差分量百分比^[19]。用变异系数 (CV) 表示表型性状的离散程度, $CV = S/\bar{X}$ ^[20]。根据各性状的平均观测值 (\bar{X}) 与标准差 (S) 进行性状等级的划分,按照 $\bar{X} \pm kS (k=0, 0.5, 1, 1.5, 2)$ 将各个性状的观测值划分为 1~10 级,在计算每级的分布频率后计算各性状的 Shannon-Wiener 指数 (H) 和 Simpson 遗传多样性指数 (D)^[10-11]。

采用 SPSS 软件的描述性统计,统计了各数量性状的平均值、标准差、最小值、最大值等;采用 z-score 标准化后的数据对 35 个表型性状进行主成分分析^[21-22];利用平方欧式遗传距离 (Squared Euclidean distance) 采用离差平方和法 (Ward's method) 进行聚类分析^[9,12]。其他统计

运算按照常规方法并利用 EXCEL2003、SPSS20.0 软件包提供的有关程序进行。

2 结果与分析

2.1 文冠果 37 份种质资源 35 个表型性状的多样性

表 2 表明:文冠果种质具有丰富的遗传多样性。Shannon-Wiener 指数 (H) 和 Simpson 遗传多样性指数 (D) 变化范围分别为 0.20~1.96 和 0.42~0.84,其中,FTD、SHGW、FL、PL1、FLD、SFSW 等几个性状的信息指数和遗传多样性指数较大,说明这些性状在每一级中的分布比较均匀;SFSN、SSI、KP、ABD、LN 这几个性状的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 遗传多样性指数较小,说明这几个性状表现型较少,且在每个表现型上分布不均匀。枝、叶、花序、花、果和种子性状的 Shannon-Wiener 指数的大小顺序为花性状 (1.774) > 花序性状 (1.724) > 叶性状 (1.620) > 枝性状 (1.615) > 果实性状 (1.581) > 种子性状 (1.559); Simpson 遗传多样性指数的排序与 Shannon-Wiener 指数排序基本一致。花序、花、果实等性状的表型遗传变异较丰富。

35 个性状的平均变异系数为 25.49%,变异范围为 12.80%~63.25%。变异系数较大的几个性状是 ABL (63.25%)、PD (53.06%) 和 ID (42.57%)。枝、叶、花序、花、果和种子性状的平均变异系数依次为:枝性状 (45.51%) > 花序性状 (31.01%) > 果实性状 (24.67%) > 花性状 (24.35%) > 种子性状 (21.82%) > 叶性状 (21.45%)。

2.2 文冠果表型变异研究

表 3 表明:文冠果表型性状在种质间和种质内存在广泛变异,种质间 F 值为 4.750~385.547 ($p < 0.01$),种质内 F 值为 1.307~19.667 ($p < 0.01$)。除 LN、PD 和 SSI 外,其他表型性状在种质间和种质内都有极显著差异。

2.3 文冠果表型分化系数

表 4 表明:文冠果表型分化系数 (V_{ST}) 范围为 28.994%~97.836%; V_{ST} 较小的性状有 ID (28.994%)、FTD (45.664%) 和 PD (46.223%) 3 个性状;其余 32 个性状的 V_{ST} 值均高于 50%,说明种质间的变异对表型多样性的

表 2 文冠果 37 个种质表型性状多样性分析

Table 2 Analysis of diversity of 35 phenotypic traits among 37 *X. sorbifolium* germplasms

表型性状 Phenotypic traits		平均 Mean	方差 SD	最小值 Min	最大值 Max	Shannon-Wiener 指数 <i>H</i>	Simpson遗传 多样性指数 <i>D</i>	变异系数 CV /%	
								百分比 Percentage	平均 Means
枝性状 Branch traits	ABL/cm	17.94	11.35	1.90	66.50	1.71	0.79	63.25	45.51
	ABD/mm	3.17	0.88	1.41	9.65	1.52	0.76	27.78	
叶性状 Leaf traits	CLN/个	10.55	3.43	4.00	25.00	1.68	0.80	32.53	21.45
	RL/cm	16.70	3.12	4.50	27.80	1.59	0.77	18.69	
	RW/cm	8.48	2.33	1.20	21.50	1.54	0.78	27.45	
	LN/个	15.08	2.24	7.00	23.00	1.54	0.74	14.88	
	LL/mm	43.65	7.62	21.89	70.11	1.77	0.81	17.45	
	LW/mm	14.72	3.10	8.10	32.05	1.67	0.79	21.04	
	LSI	2.97	0.55	1.44	5.78	1.55	0.75	18.14	
花序性状 Inflorescence traits	IL/mm	99.51	33.35	25.77	231.02	1.70	0.80	33.51	31.01
	IW/mm	50.72	10.79	17.00	93.09	1.79	0.82	21.27	
	ID/mm	2.97	1.26	0.99	10.20	1.74	0.80	42.57	
	ISI	1.96	0.62	0.46	5.90	1.74	0.80	31.17	
	FN/个	18.96	5.03	8.00	42.00	1.65	0.77	26.52	
花性状 Flowertraits	FL/mm	25.49	6.42	10.00	48.72	1.92	0.83	25.18	24.35
	CD/mm	7.75	1.30	1.06	14.11	1.68	0.78	16.73	
	PL/mm	13.44	3.34	0.90	31.33	1.83	0.81	24.84	
	PD/mm	0.38	0.20	0.10	1.20	1.59	0.78	53.06	
	PL1/mm	16.88	2.76	7.73	28.14	1.92	0.84	16.36	
	PW/mm	8.59	1.51	4.26	20.82	1.80	0.82	17.64	
	PSI	1.97	0.33	0.13	4.40	1.68	0.80	16.66	
果实性状 Fruit traits	FW/g	42.33	15.60	10.96	94.50	1.80	0.82	36.85	24.67
	SFSN/个	15.65	4.19	2.00	31.00	0.20	0.79	26.78	
	SFSW/g	19.51	7.94	5.02	63.46	1.83	0.82	40.67	
	FTD/mm	53.90	8.76	28.46	93.24	1.96	0.84	16.25	
	FLD/mm	53.31	11.71	21.06	89.05	1.87	0.82	21.97	
	FSI	0.99	0.16	0.38	1.86	1.74	0.78	16.36	
	SP/%	46.12	6.38	11.98	69.85	1.67	0.77	13.83	
种子性状 Seed traits	STD/mm	12.47	1.83	7.67	19.95	1.82	0.82	14.64	21.82
	SLD/mm	13.42	1.82	7.99	19.59	1.75	0.82	13.54	
	SSI	1.08	0.14	0.62	1.60	0.68	0.42	12.80	
	SW/g	1.04	0.33	0.26	2.16	1.62	0.79	31.82	
	KW/g	0.49	0.18	0.14	1.19	1.79	0.80	35.93	
	KP/%	47.45	8.84	15.84	89.58	1.31	0.63	18.62	
	SHGW/g	103.32	26.25	53.12	188.53	1.94	0.84	25.41	

贡献高于种质内变异, 且种质间变异具有相对优势。枝、叶、花序、花、果实和种子的 V_{ST} 值分别

为 67.868%、84.535%、76.419%、83.355%、78.876% 和 80.863%。35 个表型性状的平均 V_{ST}

表 3 文冠果 37 份种质资源 35 个表型性状的方差分析

Table 3 Variation analysis of 35 phenotypic traits among 37 *X.sorbifolium* germplasms

表型性状 Phenotypic traits		均方 Mean square			F值 F value	
		种质间 Among germplasm	种质内 Within germplasm	机误 Random errors	种质间 Among germplasm	种质内 Within germplasm
枝性状 Branch traits	ABL	1 026.075	179.192	48.428	21.188 ^{**}	3.700 ^{**}
	ABD	5.021	0.968	0.415	12.092 ^{**}	2.331 ^{**}
叶性状 Leaf traits	CLN	69.905	16.566	6.262	11.164 ^{**}	2.646 ^{**}
	RL	227.383	8.654	4.773	47.644 ^{**}	1.813 ^{**}
	RW	163.255	6.138	1.732	94.239 ^{**}	3.543 ^{**}
	LN	73.976	4.547	3.480	21.259 ^{**}	1.307
	LL	1 521.998	104.052	21.983	69.235 ^{**}	4.733 ^{**}
	LW	260.462	12.868	3.746	69.531 ^{**}	3.435 ^{**}
	LSI	3.870	0.563	0.201	18.535 ^{**}	2.697 ^{**}
花序性状 Inflorescence traits	IL	25 493.292	784.606	229.150	111.252 ^{**}	3.424 ^{**}
	IW	2 322.182	102.434	37.871	61.318 ^{**}	2.705 ^{**}
	ID	39.303	18.501	8.274	4.750 ^{**}	2.236 ^{**}
	ISI	6.814	0.350	0.147	46.311 ^{**}	2.378 ^{**}
	FN	350.747	58.507	10.807	32.455 ^{**}	5.414 ^{**}
花性状 Flower traits	FL	2 941.864	43.779	9.373	313.860 ^{**}	4.671 ^{**}
	CD	86.317	3.403	0.696	124.092 ^{**}	4.892 ^{**}
	PL	757.578	8.379	2.876	263.392 ^{**}	2.913 ^{**}
	PD	1.518	0.523	0.224	6.784 ^{**}	2.335
	PL1	491.808	10.847	2.199	223.659 ^{**}	4.933 ^{**}
	PW	117.320	7.835	0.876	133.952 ^{**}	8.945 ^{**}
	PSI	4.351	0.209	0.061	71.365 ^{**}	3.426 ^{**}
果实性状 Fruit traits	FW	4 747.954	590.713	55.752	85.162 ^{**}	10.595 ^{**}
	SFSN	339.787	12.177	6.199	54.811 ^{**}	1.964 ^{**}
	SFSW	1 294.414	133.075	13.221	97.096 ^{**}	10.065 ^{**}
	FTD	2 384.366	864.984	434.786	5.484 ^{**}	1.989 ^{**}
	FLD	3 283.294	85.408	31.645	103.752 ^{**}	2.699 ^{**}
	FSI	0.483	0.028	0.011	42.441 ^{**}	2.452 ^{**}
	SP	740.309	76.504	19.710	37.560 ^{**}	3.881 ^{**}
种子性状 Seed traits	STD	83.859	6.611	1.307	64.179 ^{**}	5.059 ^{**}
	SLD	88.091	5.629	1.326	66.423 ^{**}	4.245 ^{**}
	SSI	0.330	0.033	0.013	26.276 ^{**}	2.649
	SW	3.480	0.357	0.035	100.551 ^{**}	10.302 ^{**}
	KW	0.915	0.124	0.006	145.670 ^{**}	19.667 ^{**}
	KP	1 214.376	226.485	122.226	9.935 ^{**}	1.853 ^{**}
	SHGW	6 028.942	98.111	15.637	385.547 ^{**}	6.274 ^{**}

注: **表示差异极显著 ($p < 0.01$)Note: **Extremely significant difference ($p < 0.01$)

为 80.525%，表明种质间的变异是表型变异的主要来源。

2.4 文冠果表型性状主成分分析

表 5 显示：有 9 个主成分特征值大于 1，累积

贡献率达到 80.333%，包含了表型性状的大部分信息，可以替代原来 35 个性状的信息。PC1-PC9 贡献率分别为 25.075%，16.345%，9.997%，7.221%，6.122%，4.800%，4.143%，3.633% 和

表 4 文冠果表型性状方差分量和表型分化系数

Table 4 Variance component and phenotypic differentiation coefficients of 35 phenotypic traits

表型性状 Phenotypic traits		方差分量 Variance component			方差分量百分比 Percentage of variance component / %			表型分化系数 V_{ST} / %	
		种质间 Among germplasm	种质内 Within germplasm	机误 Random errors	种质间 Among germplasm ($\sigma^2_{t/s}$)	种质内 Within germplasm (σ^2_s)	机误 Random errors	百分比 Percentage	平均 Means
枝性状 Branch traits	ABL	53.230	26.153	48.428	41.648	20.462	37.890	67.055	67.868
	ABD	0.243	0.111	0.415	31.574	14.399	54.027	68.680	
叶性状 Leaftraits	CLN	3.138	2.061	6.262	27.383	17.981	54.636	60.364	84.535
	RL	4.755	0.259	4.773	48.584	2.644	48.772	94.839	
	RW	3.453	0.294	1.732	63.026	5.361	31.613	92.160	
	LN	1.466	0.071	3.480	29.213	1.418	69.369	95.371	
	LL	31.021	5.471	21.983	53.050	9.356	37.593	85.007	
	LW	5.419	0.608	3.746	55.447	6.223	38.330	89.910	
	LSI	0.069	0.024	0.201	23.465	8.204	68.331	74.094	
花序性状 Inflorescence traits	IL	815.985	55.546	229.150	74.135	5.046	20.819	93.627	76.419
	IW	72.729	6.456	37.871	62.132	5.516	32.353	91.847	
	ID	0.418	1.023	8.274	4.299	10.528	85.173	28.994	
	ISI	0.211	0.020	0.147	55.725	5.372	38.903	91.207	
	FN	9.381	4.770	10.807	37.587	19.112	43.301	66.292	
花性状 Flowertraits	FL	32.097	1.147	9.373	75.315	2.691	21.994	96.550	83.355
	CD	0.914	0.090	0.696	53.745	5.309	40.947	91.011	
	PL	8.292	0.183	2.876	73.049	1.616	25.335	97.836	
	PD	0.009	0.010	0.224	3.532	4.109	92.358	46.223	
	PL1	5.320	0.288	2.199	68.140	3.692	28.168	94.860	
	PW	1.207	0.232	0.876	52.134	10.021	37.845	83.877	
	PSI	0.045	0.005	0.061	40.749	4.433	54.818	90.188	
果实性状 Fruit traits	FW	136.716	53.496	55.752	55.584	21.750	22.670	71.876	78.876
	SFSN	10.714	0.598	6.199	61.184	3.414	35.402	94.715	
	SFSW	38.271	11.985	13.221	60.290	18.881	20.828	76.151	
	FTD	36.153	43.020	43.478	29.476	35.075	35.449	45.664	
	FLD	105.541	5.376	31.645	74.032	3.771	22.197	95.153	
	FSI	0.015	0.002	0.011	53.818	6.182	40.000	89.697	
	SP	21.470	5.679	19.710	45.818	12.120	42.062	79.081	
种子性状 Seed traits	STD	1.688	0.354	1.307	50.403	10.561	39.036	82.677	80.863
	SLD	1.803	0.287	1.326	52.783	8.398	38.819	86.274	
	SSI	0.006	0.001	0.013	30.571	6.459	62.971	82.558	
	SW	0.069	0.021	0.035	54.859	17.161	27.980	76.172	
	KW	0.017	0.008	0.006	55.713	25.124	19.163	68.920	
	KP	19.237	6.951	12.222	50.083	18.097	31.820	73.458	
	SHGW	131.449	5.498	15.637	86.148	3.603	10.248	95.985	
平均 Means				49.563	10.117	40.321	80.525		

2.998%。从特征向量的绝对值看, PC1 主要反映了果实和种子的性状; PC2 主要反映花的性状; PC3 主要反映叶片性状。

2.5 文冠果种质资源聚类分析

聚类结果(图 1)表明: 39 个种质分为 2 个大类群, 每一类群表型性状均值见表 6。第一类群

表 5 文冠果 37 份种质资源 35 个表型性状主成分分析

Table 5 The PCA of 35 phenotypic traits among 37 *X. sorbifolium* germplasms

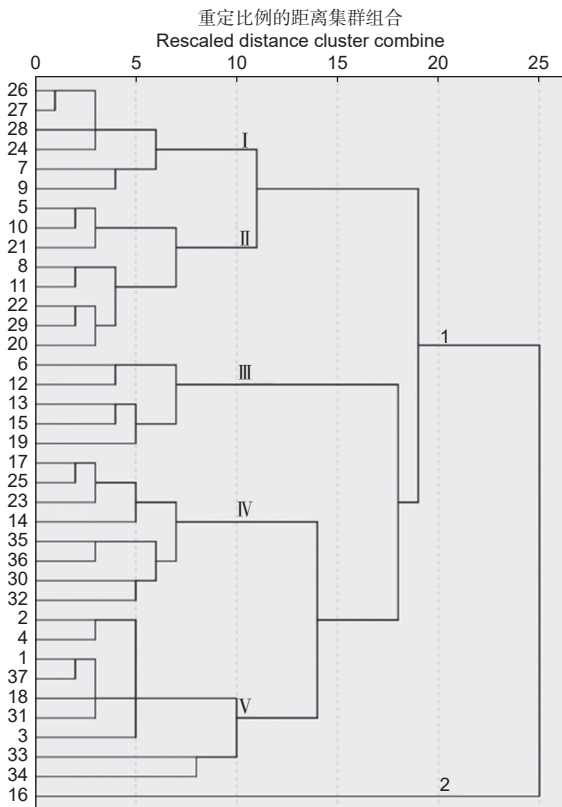
表型性状 Phenotypic traits	主成分 Principle component								
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
STD	0.853	-0.164	0.176	0.110	0.007	0.050	-0.232	0.106	-0.006
FLD	0.845	0.102	0.282	-0.173	-0.016	0.052	-0.005	-0.076	0.003
SLD	0.835	-0.107	0.246	0.134	-0.180	-0.037	-0.248	-0.016	-0.060
SHGW	0.810	-0.272	-0.063	-0.135	0.353	0.175	-0.003	0.172	0.065
FW	0.786	-0.088	-0.059	-0.257	0.216	-0.043	0.114	-0.199	0.369
SW	0.776	-0.338	-0.137	-0.091	0.361	0.190	-0.026	0.148	0.070
SFSW	0.752	-0.148	-0.211	-0.230	0.152	-0.075	0.210	-0.198	0.371
KP	0.743	-0.184	-0.080	0.235	-0.238	0.044	-0.078	0.119	-0.314
KW	0.737	-0.358	-0.248	-0.099	0.319	0.242	-0.042	0.150	-0.042
FSI	0.723	0.004	0.392	0.093	-0.148	0.059	-0.050	-0.206	-0.061
FTD	0.723	0.011	0.064	0.061	0.042	-0.068	0.160	0.265	-0.018
SP	0.706	-0.226	-0.083	0.283	-0.302	-0.165	0.160	0.062	-0.056
SSI	0.684	-0.058	0.246	0.323	-0.427	-0.195	-0.056	-0.057	-0.153
SFSN	0.599	-0.128	-0.124	0.039	-0.452	-0.116	0.383	-0.250	0.080
ABL	0.266	0.822	-0.378	0.104	0.110	0.034	0.113	-0.129	-0.140
PL1	0.213	0.806	-0.281	0.108	-0.052	0.177	-0.006	-0.214	0.027
ID	0.229	0.729	0.256	-0.068	-0.276	-0.020	0.059	-0.075	0.131
FL	0.323	0.718	-0.265	0.234	-0.036	0.194	-0.175	0.038	-0.012
IL	0.200	0.713	0.119	-0.319	-0.022	-0.145	-0.302	0.357	0.119
CD	0.267	0.702	-0.030	0.003	0.284	-0.222	0.063	-0.021	-0.055
IW	0.191	0.661	-0.320	0.295	-0.003	-0.049	-0.259	0.150	0.260
PW	0.171	0.586	-0.399	0.099	0.255	-0.486	0.085	-0.095	-0.047
PL	0.209	0.561	-0.422	0.110	0.107	0.162	0.181	-0.044	-0.296
RL	-0.038	0.386	0.714	-0.228	0.002	-0.107	0.207	-0.119	-0.026
LL	-0.060	0.268	0.682	0.377	0.167	0.213	0.276	0.187	0.059
LW	-0.012	0.025	0.660	0.523	0.398	-0.042	0.010	-0.179	0.062
ABD	0.024	0.298	0.607	-0.058	0.126	0.009	-0.187	-0.148	-0.181
FN	-0.231	0.131	0.171	0.604	0.056	0.050	-0.284	0.176	0.425
ISI	0.103	0.376	0.320	-0.598	-0.028	-0.148	-0.154	0.338	-0.087
PD	0.176	0.259	0.369	-0.408	-0.149	-0.246	0.212	0.070	0.163
CLN	0.176	0.166	0.196	-0.371	0.459	0.299	-0.123	-0.245	-0.308
LSI	-0.102	0.291	-0.077	-0.285	-0.426	0.360	0.348	0.425	0.004
PSI	0.094	0.266	0.106	-0.005	-0.361	0.744	-0.079	-0.144	0.109
LN	-0.292	0.146	0.039	-0.133	0.014	0.347	0.118	-0.231	0.210
RW	-0.029	0.116	0.180	0.412	0.353	0.095	0.597	0.327	-0.081
特征值 Eigen value	8.776	5.721	3.499	2.527	2.143	1.680	1.450	1.272	1.049
贡献率 Contribution rate/%	25.075	16.345	9.997	7.221	6.122	4.800	4.143	3.633	2.998
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	25.075	41.420	51.417	58.638	64.759	69.560	73.703	77.336	80.333

共有 35 份种质，分为 I、II、III、IV、V 共 5 个亚类群，亚类群 I 包括 6 个种质（Hrhb、5-B2-1、Fhg、5-C1-1、N920 和森森文冠果），这 6 个种质枝、叶、花序、花、果、种子等性状的平

均值都较小；亚类群 II 包括 8 个种质（N916、冠硕、Bxg、N923、冠林、5-C3-2、森森红粉冠、Cfg）特征是其花序和花性状的平均值较大，而枝、叶、果和种子性状的平均值较小或中等；亚类群 III 包

括 5 个种质 (N917、Yx02、Jhg、森森桃红冠和森森金粉冠) 特征为其花序、花、枝、叶、果实和种子的性状均值较大, 其中, 花序和花性状值为几个亚类群中最大; 亚类群 IV 由 8 个种质组成 (中石四号、Jhz、森森橙红冠、森森金紫冠、Nsjt21、Nsjt29、Jhwm 和金公主 8 号) 特征为枝、叶性状的平均值较大、花序和花性状的平均值较小, 而果实和种子性状的平均值为中等水平; 亚类群 V 包括 9 个种质 (蒙冠 3 号、蒙冠 1 号、开口笑、Nsjt32、中石九号、金公主 4 号、蒙冠 2 号、金帝 3 号和金王 1 号) 主要特征是果实和种子性状的平均值较大。第二类群只有 1 个种质森森重瓣冠, 其特征为重瓣花, 不结果, 花小, 枝叶性状平均值为中等水平。

表 7 表明: 37 份种质资源共 10 个地理来源, 部分相同来源的种质分布在同一组中, 如来自宁夏银川和和甘肃民勤的种质主要分布在亚组 I 中, 来自内蒙赤峰的种质主要分布在亚组 V 中; 其他来源



注: 样品编号对应表 1

Note: The code number correspond to germplasms displayed in Table 1

图 1 文冠果 37 份种质资源表型性状聚类分析

Fig. 1 Dendrogram of cluster analysis among 37 germplasms of *X. sorbifolium* by Ward method

的种质则分散在各个亚组中。说明相同地理来源的种质既有相对聚合的现象, 也有分布混杂的现象, 并未完全归为一类。

3 讨论

表型性状的变异是基于植物基因型和环境之间的变异和相互作用^[23]。系统的形态学性状描述和鉴定是种质资源研究的最基本的方法和最便捷的途径^[24]。本研究首次将枝、叶、花序、花、果实、种子等多部位表型性状进行全面系统的综合研究, 对 37 份种质资源的 35 个表型性状的遗传变异进行了分析。文冠果种质资源表型变异丰富, 表型多样性高, 其中, 花序、果实和花等性状变异范围大于叶片和种子。

变异系数 (CV) 反映性状的离散程度, 变异系数越大, 观测值的离散度越高, 表型多样性越丰富^[25]。本研究中, 文冠果枝、叶、花序、花、果实和种子性状的变异系数均处于中等水平。叶性状的平均变异系数为 21.45%, 高于戚建莉等^[7] 16.18%、白鑫磊等^[15] 19.21% 的报道; 花序平均变异系数为 31.01%, 花平均变异系数为 24.35%, 花序和花平均为 27.13%, 小于卢娟等^[17] 报道的 32.64%; 果实性状的平均变异系数为 24.67%, 小于马新等^[26] 和柴春山等^[16] 报道的 43.6% 和 28.72%, 但大于王艺林等^[13] 报道的 6.14%; 种子性状平均变异系数为 21.82%, 小于白鑫磊等^[15] 报道的 29.19%, 大于王艺林等^[13] 和柴春山等^[16] 报道的 10.02% 和 13.57%。与其他植物相比, 文冠果种质资源间的表型分化 ($V_{ST}=80.525\%$) 处于较高水平, 如硬叶兜兰^[27] (*Paphiopedilum micranthum* T. Tang, $V_{ST}=64\%$)、水青树^[28] (*Tetracentron sinense* Oliv, $V_{ST}=56.34\%$) 和闽楠^[25] (*Phoebe bournei* Yang, $V_{ST}=53.77\%$)。

主成分分析 (PCA) 是降低多元数据集维度的有力工具, 它可以将大量的指标整合压缩成少量的反映较多信息的综合指标^[29], 该方法非常适合用来进行多性状的选择, 以此来确定导致所选材料变异的最主要的性状^[30]。本文主成分分析结果表明, 前 9 个主成分的累积方差贡献率达到 80.333%, 可以综合反映 35 个性状的信息; 该数值略高于白鑫磊报道的 74.693%^[15] 和郭军战报道的 70.260%^[18] 的结果, 与马新等^[26] 的 86.053% 的结果相似。

表 6 文冠果种质资源各类群表型性状特征

Table 6 The mean value of phenotypic traits in different groups of *X. sorbifolium* germplasms

表型性状 Phenotypic traits	类群1 Group 1					类群2 Group 2	平均 Means
	亚组 I Subgroup I	亚组 II Subgroup II	亚组 III Subgroup III	亚组 IV Subgroup IV	亚组 V Subgroup V		
ABL/cm	9.02	16.84	29.27	19.47	17.68	13.59	17.64
ABD/mm	2.97	3.40	3.66	3.41	2.63	2.99	3.18
CLN/个	8.36	9.51	12.96	11.13	10.90	11.60	10.74
RL/cm	15.32	14.95	15.28	14.94	14.70	17.98	15.53
RW/cm	15.96	16.79	18.55	17.70	15.16	17.19	16.89
LN/个	8.01	8.08	9.13	9.02	8.26	8.07	8.43
LL/mm	42.48	42.96	49.46	48.02	38.52	38.50	43.32
LW/mm	14.24	14.31	16.22	16.67	13.01	11.88	14.39
LSI	3.06	3.08	3.09	2.96	2.99	3.31	3.08
IL/mm	84.81	111.71	141.55	77.14	96.13	89.28	100.10
IW/mm	47.95	58.78	56.60	42.23	50.45	43.79	49.97
ID/mm	2.66	3.53	4.37	2.51	2.41	2.00	2.91
ISI	1.79	1.92	2.57	1.87	1.96	2.06	2.03
FN/个	20.15	22.48	18.53	17.66	16.68	15.97	18.58
FL/mm	22.81	30.55	31.28	20.32	25.06	18.12	24.69
CD/mm	7.02	7.93	9.16	7.14	7.88	7.28	7.73
PL/mm	11.23	15.45	15.93	11.58	13.50	12.74	13.40
PD/mm	0.34	0.40	0.50	0.43	0.34	0.30	0.38
PL1/mm	15.66	18.38	20.11	14.22	16.96	16.58	16.98
PW/mm	7.98	9.30	9.26	7.53	8.94	8.54	8.59
PSI	1.99	2.00	2.22	1.92	1.95	1.94	2.00
FW/g	26.65	37.21	47.51	41.87	54.87	--	41.62
SFSN/个	14.78	16.71	13.33	14.99	17.33	--	15.43
SFSW/g	12.14	17.29	20.31	18.29	27.15	--	19.03
FTD/mm	50.41	52.19	58.90	51.55	60.70	--	54.75
FLD/mm	42.63	52.18	61.13	53.30	57.08	--	53.27
FSI	0.84	1.00	1.04	1.05	0.95	--	0.98
SP/%	46.30	46.30	42.77	44.89	49.54	--	45.96
STD/mm	11.15	12.11	12.99	13.21	12.72	--	12.44
SLD/mm	13.12	13.07	14.12	13.72	13.25	--	13.46
SSI	1.18	1.08	1.09	1.04	1.04	--	1.09
SW/g	0.74	0.83	1.08	1.09	1.35	--	1.02
KW/g	0.34	0.39	0.51	0.50	0.67	--	0.48
KP/%	47.11	48.08	46.74	45.85	50.33	--	47.62
SHGW/g	74.63	82.71	113.28	109.55	129.69	--	101.97

注: --为缺失值

Note: -- means missing data

聚类分析将 37 份文冠果种质资源划分为 2 个大类群和 6 个亚类, 初步明确了每个亚类群的特征, 可为其合理开发利用提供帮助, 其中, 亚类

IV 叶性状值较大, 可用于选育以叶用为主的品种, 如开发文冠果叶茶等; 亚类 II 和 III 具有较高的花序和花性状值, 可用于选育观花等为主的观赏类品

表 7 不同地理来源的种质在聚类分析中的分布

Table 7 Distribution of the different original *X. sorbifolium* germplasms in clustered groups

地理来源 Original	类群1 Group 1					类群2 Group 2	合计 Total
	亚组I Subgroup I	亚组II Subgroup II	亚组III Subgroup III	亚组IV Subgroup IV	亚组V Subgroup V		
宁夏银川	4	4	1	1	0	0	10
甘肃民勤	2	2	1	0	0	0	5
山西太原	0	2	1	0	0	0	3
内蒙赤峰	0	0	1	1	6	0	8
甘肃定西	0	0	1	0	0	0	1
辽宁彰武	0	0	0	1	1	0	2
陕西靖边	0	0	0	2	0	0	2
甘肃会宁	0	0	0	1	0	0	1
宁夏吴忠	0	0	0	2	1	0	3
山东辉县	0	0	0	0	1	0	1
陕西富县	0	0	0	0	0	1	1
合计	6	8	5	8	9	1	37

种; 亚类 V 的果实性状和种子性状都较大, 具有较高的 FW、SFSN、SFSW、FTD、KP、SW、KW 和 SHGW 值, 这些性状与果实和种子等产量成显著正相关^[15,26], 因此, 亚类 V 的种质可用于选育果用型品种。

聚类分析结果与种质地理来源分布并不完全一致, 同一地理区域的种质资源既相互聚合, 又与来自其他类群的种质资源相互关联。这主要是因为本试验所用的种质均是从当地苗木中筛选获得的优良品种(品系); 在长期选择的过程中, 不同省份的种质也进行了资源交换, 这种种质交换导致聚类结果与地理来源之间并不完全一致。

4 结论

37 份文冠果优新种质资源表型性状遗传变异丰富, 按部位划分, 花序、果实和花等性状变异范围大于叶片和种子; 主成分分析可以简化种质资源筛选评价指标; 聚类分析初步明确了各亚类群特征和育种价值。这些结果很好的揭示了文冠果优新种质资源的表型遗传变异, 为种质资源的遗传改良、保存和评价提供了有益的信息。

参考文献:

[1] Yu H Y, Fan S Q, Bi Q X, et al. Seed morphology, oil content and fatty acid composition variability assessment in yellow horn (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) germplasm for optimum biodiesel production[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 97: 425-430.

[2] Venegas-Calcrón M, Ruíz-Méndez M V, Martínez-Force E. Characterization of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge seeds: lipids, proteins and saponins content[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 109: 192-198.

[3] 王娅丽, 赵卫英, 刘思洋, 等. 文冠果籽油的超临界萃取及其脂肪酸组成[J]. 经济林研究, 2014, 32(1): 135-139.

[4] Bi Q X, Zhao Y, Du W, et al. Pseudomolecule-level assembly of the Chinese oil tree yellowhorn (*Xanthoceras sorbifolium*) genome[J]. GigaScience, 2019, 8(6): 1-11.

[5] Rong W, Sun Z, Li Q, et al. Characterization and simultaneous quantification of seven triterpenoid saponins in different parts of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge by HPLC-ESI-TOF[J]. Anal Methods, 2016, 8: 2176-2184.

[6] 张雅欣, 路肖, 肖碧灵, 等. 文冠果抗阿尔茨海默症的研究进展及应用前景[J]. 药物评价研究, 2018, 41(5): 912-917.

[7] 戚建莉, 柴春山, 芦娟, 等. 甘肃定西文冠果人工种群的枝叶表型多样性研究[J]. 林业资源管理, 2012, 8(4): 66-69.

[8] Schaal B A, Leverich W J, Rogstad S H. A comparison of methods for assessing genetic variation in plant conservation biology[M]// Falk D A, Holsinger K E. Genetics and conservation of rare plants. New York: Oxford University Press, 1991: 123-124.

[9] 林存学, 杨晓华, 刘海荣. 东北寒地 96 份李种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 园艺学报, 2020, 47(10): 1917-1929.

[10] 孙珍珠, 李秋月, 王小柯, 等. 宽皮柑橘种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4362-4372.

[11] 杜庆鑫, 庆军, 刘攀峰, 等. 杜仲种质资源果实性状变异及综合评价[J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 13-23.

[12] 尹明宇, 高福玲, 乌云塔娜. 内蒙古西伯利亚杏种质资源表型多样性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(2): 242-252.

[13] 王艺林, 吕东, 刘贤德, 等. 5 个种源文冠果果实和种子表型性状变异分析[J]. 经济林研究, 2018, 36(3): 38-47.

[14] 张毅, 敖妍, 刘觉非, 等. 文冠果种实性状变异规律及优良单株选择[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(9): 1-5.

- [15] 白鑫磊, 金 华, 邹吉祥, 等. 文冠果表型性状的相关性及主成分分析[J]. 经济林研究, 2019, 37 (1): 68-73.
- [16] 柴春山, 芦 娟, 蔡国军, 等. 文冠果人工种群的果实表型多样性及其变异[J]. 林业科学研究, 2013, 26 (2): 181-191.
- [17] 芦 娟, 柴春山, 蔡国军, 等. 甘肃定西文冠果花的表型多样性研究[J]. 林业资源管理, 2011, 10 (6): 49-53.
- [18] 郭军战, 张 敏, 费昭雪, 等. 文冠果数量性状的主成分分析及聚类分析研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27 (2): 67-79.
- [19] 葛 颂, 王明麻, 陈岳武. 用同工酶研究马尾松群体的遗传结构[J]. 林业科学, 1988, 24 (4): 400-409.
- [20] Divakara B N, Rameshwar D. Variability and divergence in *Pongamia pinnata* for further use in tree improvement[J]. Journal of Forestry Research, 2011, 22(2): 193-200.
- [21] Li H C, Gan X H, Zhang Z P, *et al.* Effects of altitudes and the DBH of seed trees on biological characteristics of *Tetracentron sinense* (Tetracentraceae) seeds[J]. Plant Divers Resour, 2015, 37(2): 177-183.
- [22] Yang X Y, Fu M Y, Xie J Z, *et al.* Geographic variation and provenance selection for bamboo wood properties in *Bambusa chungii*[J]. Journal of Forestry Research, 2009, 20(3): 261-267.
- [23] Santos R C, Pires J L, Correa R X. Morphological characterization of leaf, flower, fruit and seed traits among Brazilian *Theobroma L. species*[J]. Genet Resour Crop Evol, 2012, 59: 327-345.
- [24] He C, Poysa V, Yu K. Development and characterization of simple sequence repeat (SSR) markers and their use in determining relationships among *Lycopersicon esculentum* cultivars[J]. Theor Appl Genets, 2003, 106(2): 363-373.
- [25] Li Y G, Liu X H, Ma J W, *et al.* Phenotypic variation in *Phoebe bournei* populations preserved in the primary distribution area[J]. J For Res, 2018, 29(1): 35-44.
- [26] 马 新, 姜继元, 李 铭. 24 个种源文冠果在新疆的生长结实性状分析[J]. 经济林研究, 2019, 37 (1): 61-67.
- [27] 程 浩, 徐玉凤, 王文晓, 等. 中国硬叶兔兰主要分布区居群表型多样性分析[J]. 园艺学报, 2020, 47 (6): 1098-1110.
- [28] Li Y, Li S, Lu X H, *et al.* Leaf phenotypic variation of endangered plant *Tetracentron sinense* Oliv. and influence of geographical and climatic factors[J]. J For Res, 2021, 32: 623-636.
- [29] Ait-Sahalia Y, Xiu D C. Principal component analysis of high-frequency data[J]. J Am Stat Assoc, 2019, 114(525): 287-303.
- [30] Nardo M, Saisana M, Saltelli A, *et al.* Tools for composite indicators building[J]. Eur Comission Ispra, 2005, 15: 19-20.

Genetic Variation Analysis of Phenotypic Traits of 37 *Xanthoceras sorbifolium* Elite Germplasm

WANG Ya-li, GU Zhi-jie, JIA Qiao-xia

(State Key Laboratory of Seedling Bioengineering, Ningxia Forestry Institute, Yinchuan 750001, China)

Abstract: [Objective] To analyze the phenotypic variation of *X. sorbifolium*, and provide useful information for genetic improvement. [Method] Thirty-five phenotypic traits among 37 germplasms were analyzed by variance analysis, principal component analysis (PCA), and cluster analysis. [Result] Large variation and rich phenotypic diversity were found among and within germplasms of *X. sorbifolium*. The average coefficient of variation for 35 traits of 37 germplasm resources was 25.49%, and the variation range was 12.80% to 63.25%. The variation of branch traits was the largest (45.51%), followed by inflorescence traits (31.01%), fruit traits (24.67%), flower traits (24.35%), seed traits (21.82%), and leaf traits (21.45%). The mean phenotypic differentiation coefficient was 80.52%, indicating that the variation among germplasm resources was the main source of phenotypic variation. The cumulative contribution rate of the first nine main principal components reached 80.333%. The 37 germplasms were classified into two main groups and six subgroups according to their characteristics by Ward's method and reasonable utilization of each subgroup were suggested. [Conclusion] The genetic variation of phenotypic traits of *X. sorbifolium* is abundant, among which the variation range of inflorescence, fruit and flower traits is larger than that of leaf and seed. It provides useful information for the genetic improvement, preservation, and evaluation of *X. sorbifolium* germplasms.

Keywords: *Xanthoceras sorbifolium*; Germplasm resources; Phenotypic traits; Genetic variation.