

许陶瑜, 李建, 史根生, 等. 山西引种核桃的表型多样性分析及综合评价[J]. 山西农业科学, 2026, 54(2):44-53.

XU T Y, LI J, SHI G S, et al. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of walnut introduction in Shanxi[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(2):44-53.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.02.06

山西引种核桃的表型多样性分析及综合评价

许陶瑜, 李建, 史根生, 郝华正, 冀中锐, 陈霖, 王晶, 张强

(山西农业大学 经济作物研究所, 山西 太原 030031)

摘要:以国家级林木良种基地汾阳市核桃良种繁殖试验园引种的87份核桃资源为研究对象,测定坚果表型的质量性状和数量性状,对其中的6个质量性状和14个数量性状进行了多样性分析、主成分分析、相关性分析和聚类分析、综合评价。结果表明,山西引种的87份核桃坚果6个质量性状的多样性指数为0.494~2.019,其中,坚果形状和核仁皮色是遗传多样性最丰富的表型标记,可作为种质鉴定的核心指标。14个数量性状的变异系数为8.88%~29.33%,其中,青果单质量、坚果湿质量及出仁率的高变异系数为高产、高附加值品种选育提供了直接选择依据。主成分分析提取了4个主成分,累计贡献率达到86.934%,能较好地反映主要性状的变异信息,其中,坚果大小(PC1)与果形指数(PC2)是表型分化的主导因子。相关性分析表明,14个数量性状存在不同程度的关联性,壳厚度与出仁率的负相关规律为“薄壳高仁”育种策略提供了理论支撑。聚类分析在欧氏距离为1.2时,将87份核桃品种资源分为四大类群。综合评价表明,巨丰、晋龙1号等综合表现优异的种质可直接用于品种改良;紫仁等特异材料则需通过功能基因组学挖掘其特殊代谢途径,拓展核桃的多元化利用场景。

关键词:核桃;表型多样性;相关性分析;聚类分析;综合评价

中图分类号:S664.1 文献标识码:A 文章编号:1002-2481(2026)02-0044-10

Phenotypic Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of Walnut Introduction in Shanxi

XU Taoyu, LI Jian, SHI Gensheng, HAO Huazheng, JI Zhongrui,

CHEN Lin, WANG Jing, ZHANG Qiang

(Institute of Industrial Crop, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: In this study, 87 walnut resources introduced in Fenyang Walnut Seed Breeding Experimental Garden of the National Forestry Seed Base were used as research objects. The quality and quantitative traits of nut phenotypes were determined, and diversity analysis, principal component analysis, correlation analysis, cluster analysis, and comprehensive evaluation were performed on 6 quality traits and 14 quantitative traits. The results showed that the diversity index of 6 quality traits of 87 walnut nuts introduced in Shanxi ranged from 0.494 to 2.019, among them, nut shape and nucleolar skin color were the phenotypic markers with the most abundant genetic diverse and could be used as a core index for germplasm identification. The coefficient of variation of 14 quantitative traits ranged from 8.88% to 29.33%, among them, the high coefficient of variation in green fruit unit weight, nut wet weight, and walnut kernel rate provided a direct selection basis for the breeding for high-yield and high value-added varieties. Four principal components were extracted by principal component analysis, and the cumulative contribution rate reached 86.934%, which could better reflect the variation information of the main traits, and among them, nut size(PC1) and fruit shape index(PC2) were the dominant factors in phenotypic differentiation. Correlation analysis showed that 14 quantitative traits were associated to varying degrees, the negative correlation between shell thickness and walnut kernel rate provided a theoretical support for the breeding strategy of thin shell high kernel. Cluster analysis divided

收稿日期:2025-05-07

基金项目:吕梁市校地合作重点专项(2024XDHZ09);山西省科技创新项目(2022L087);山西省青年基金项目(202203021222163);山西省农业科学院生物育种工程(YZGC054);山西农业大学优秀博士启动项目(2024BQ07);山西省博士毕业生来晋工作奖励项目(SXBYKY2024063);山西农业大学科技创新提升工程(CXGC2023068)

作者简介:许陶瑜,助理研究员,主要从事经济林作物遗传育种研究,E-mail:496979327@qq.com

通信作者:李建,副研究员,主要从事经济林、作物栽培育种研究,E-mail:nkslijian@126.com

87 walnut variety resources into four major groups when the Euclidean distance was 1.2. The result of the comprehensive evaluation indicated that the germplasm with excellent comprehensive performance such as Jufeng and Jinlong 1 could be directly applied to variety improvement, and the special materials such as Ziren required exploration of the unique metabolic pathways by functional genomics to expand the multiutilization scenarios of walnuts.

Keywords: walnut; phenotypic diversity; correlation analysis; cluster analysis; comprehensive evaluation

山西省农业GDP占比超5%,其中种植业占总产值的55%以上。核桃作为干果经济林的核心品类,是林业产值的重要组成部分。山西核桃优势产区面积超过26.6万hm²,覆盖汾州核桃产区,包括汾阳、交口、孝义等;南部核桃产区,包括古县、蒲县等;太行山核桃产区,包括潞城、黎城、左权等。尽管山西省核桃产量未进入全国前三,但作为传统优势产业,其核桃以“个大、壳薄、肉厚”著称,且“汾州核桃”被列入中国地理标志产品,具有品牌溢价能力^[1]。

山西核桃的主栽品种包括礼品2号、清香、晋绵、汾核1号、孝核1号等^[2-3]。山西核桃生产存在主栽品种老化的突出问题,吕梁核心产区以汾州绵核桃为主,运城、临汾等地也多种植当地筛选的绵核桃品种。该类品种在20世纪八九十年代是重要的出口创汇产品,而随着市场需求升级,鲜食核桃成为消费新宠,山西核桃产业发展却受限于品种更新滞后:除汾阳推广礼品2号鲜食品种外,多数产区仍沿用老旧绵核桃品种,普遍存在结果晚、壳壁厚、产量偏低的弊端,严重制约产业提质增效。对引种核桃开展表型分析,有助于快速筛选适配山西立地条件的优良品种,为产区大面积改接换种与推广应用提供科学支撑^[4-6]。

核桃表型多样性分析和评价是引种核桃适应性鉴定和推广种植的重要依据,表型是核桃可测量的特征和性状,是自身基因表达、环境相互作用的结果,也是决定农作物产量、品质和抗逆性等性状的重要因素,其本质是植物基因图谱的时序三

维表达及其地域分异特征和代际演进规律^[7-10]。

本研究以国家级林木良种基地汾阳市核桃良种繁殖试验园保存的87份核桃品种为样本,从青果、干果、种仁的描述性状及数量性状多角度出发,对20个指标进行测定分析,探究87个引种核桃的表型性状多样性,以期对核桃种质资源进行挖掘,为核桃品种选育及种质资源的系统评价和综合利用提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验在汾阳核桃良种繁殖试验园(37°14'42"N, 111°47'24"E)进行。地处吕梁山脉黄土丘陵区,年平均气温10.1℃,属温带大陆性气候,无霜期177 d,适合核桃生长(无霜期在150 d以上)。年平均降雨量438.4 mm,集中于7—8月。海拔860 m,地形为缓坡台垣梯田,以粗骨褐土和黄绵土为主,地表覆盖深厚黄土,土层疏松,排水性较好。年日照时数2 598.6 h,满足核桃喜光需求(需2 000 h以上)。试验园凭借黄土丘陵的疏松土壤、充足光照及精准的水肥管理,成为我国北方最大的核桃良种繁殖基地。

1.2 试验材料

供试材料为汾阳市核桃良种繁殖试验园保存的87份核桃品种。所有材料均为嫁接成年树,树龄5~6 a,株距4 m,行距5 m,树体健壮,试验地管理一致。具体信息见表1。

表1 87份核桃引种资源的情况

Tab.1 87 walnut introduction resources

编号 Code	品种 Variety	引种地 Introduction site	编号 Code	品种 Variety	引种地 Introduction site
1	晋龙1号	山西汾阳	9	岱辉	山东
2	辽宁6号	辽宁	10	鲁果4号	山东
3	元丰	山东	11	鲁果12号	山东
4	硕丰	山东	12	浮山大果	山西浮山
5	鲁光	山东	13	鲁果8号	山东
6	鲁果5号	山东	14	岱丰	山东
7	西林3号	陕西	15	鲁果9号	山东
8	襄汾大果	山西襄汾	16	鲁香	山东

续表 1 87 份核桃引种资源的情况
 Tab.1(Continued) 87 walnut introduction resources

编号 Code	品种 Variety	引种地 Introduction site	编号 Code	品种 Variety	引种地 Introduction site
17	元林	山东	53	阿7	新疆
18	鲁果10号	山东	54	朝鲜	辽宁
19	鲁核1号	山东	55	鲁康11号	山东
20	龙珠	河北卢龙	56	京861	北京
21	绿香	山东	57	扎343	新疆
22	辽宁7号	辽宁	58	塞比塞尔	罗马尼亚
23	晋绵1号	山西	59	垂玲6号	美国
24	丰辉	山东	60	汾核1号	山西汾阳
25	辽宁5号	辽农	61	清丰	河南
26	NM1-8	内蒙古	62	香玲	山东
27	鲁康5号	山东	63	礼品3号	辽宁
28	409404	山西汾阳	64	孝核1号	山西孝义
29	3945	山西汾阳	65	美国红仁	美国
30	鲁果7号	山东	66	美国钻石	美国
31	NM1-6	内蒙古	67	泰勒	美国
32	晋绵2号	山西	68	农核1号	山西太谷
33	鲁果3号	山东	69	上宋6号	山东
34	薄壳香	北京	70	强特勒	美国
35	8510	山西汾阳	71	西扶2号	陕西
36	礼品2号	辽宁	72	温185	新疆
37	中核短枝	河南	73	汾核3号	山西汾阳
38	中林6号	北京	74	清香	日本
39	岱香	山东	75	巨丰	新疆
40	鲁康1号	山东	76	晋龙2号	山西汾阳
41	鲁果2号	山东	77	汾核2号	山西汾阳
42	阿9	新疆	78	金薄香1号	山西
43	3244	山西汾阳	79	汾核4号	山西汾阳
44	清水	陕西渭南	80	汾核5号	山西汾阳
45	鲁康4号	山东	81	汾核6号	山西汾阳
46	8506	山西汾阳	82	汾核7号	山西汾阳
47	新翠丰	新疆	83	西扶1号	陕西
48	中林3号	北京	84	薄丰	河南
49	秋香	山东	85	晋丰	山西
50	8511	山西汾阳	86	美国红仁·王贵	美国
51	鲁果1号	山东	87	紫仁	陕西安康
52	寒丰	辽宁			

1.3 表型测定方法

根据《核桃种质资源描述规范与评价》,对核桃进行种质资源的描述和分级^[11-12]。2024年9月10日于果实完熟期,每个品种选择3株树体健壮且生长基本一致的样树,每株随机采10个大小基本一致的果实,使用千分之一电子天平称量青果质量(GFUW),使用游标卡尺(精度0.01 mm)分别

测量青果果实的纵径(GFVD)、横径(GFTD)和侧径(GFLD),每个果实重复测量3次。去皮后,使用电子天平称量坚果湿质量(NWW),使用游标卡尺测定青皮厚度(GST)、坚果纵径(DFVD)、横径(DFTD)、侧径(DFLD),观察和记录坚果形状、缝合线特征、缝合线紧密度、核壳刻窝等质量性状。自然晾干20 d后去壳,测定坚果干质量(IDW)、核

壳厚度(DFST)、核仁质量(SWKW),观察和记录核仁饱满度、核仁颜色。

通过坚果三径和干质量指标,计算果形指数和出仁率。

$$\text{果形指数(FSI)} = 2 \times \text{DFVD} / (\text{DFTD} + \text{DFLD}) \quad (1)$$

$$\text{出仁率(WKR)} = \text{SWKW} / \text{NWW} \times 100\% \quad (2)$$

1.4 数据处理

利用Excel 2020软件进行数据统计并计算各引种资源质量性状和数量性状的变异系数,利用SPSS 26.0统计分析软件对原始数据进行Z标准化处理,消除不同量纲对分析产生的影响。利用处理后的数据进行相关性分析、主成分分析和聚

类分析,利用Origin 2022软件制作聚类图。

2 结果与分析

2.1 基于质量性状的果实特征变异及遗传特征

对87份核桃的6个果实质量性状进行分析(表2),具体来说^[12],坚果形状有10种类型,分为圆形、近圆形、短椭圆形、椭圆形、长椭圆形、卵形、倒卵形、圆筒形、方圆形、三角形。缝合线紧密度有4种类型,分为松、较松、较紧、紧密。缝合线特征有3种类型,分为凹、平、凸。核壳刻窝有3种类型,分为浅、中、深。核仁饱满度有3种类型,分为干瘪、较饱满、饱满。核仁皮色有5种类型,分为淡黄、黄褐、褐、深褐、紫红。

表2 6个质量性状的频率分布及多样性指数

Tab.2 Frequency distribution and diversity index of six quality traits

描述型性状 Descriptive trait	频率 Frequency										Shannon 指数 Shannon in- dex
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
坚果形状 Nut shape	0.21	0.13	0.21	0.11	0.09	0.02	0.08	0.02	0.13	0	2.019
缝合线紧密度 Suture tightness	0.43	0.14	0.11	0.32							1.250
缝合线特征 Suture characteristics	0.00	0.20	0.80								0.494
核壳刻窝 Nucleolus shell pits	0.44	0.30	0.26								1.074
核仁饱满度 Nucleolus plumpness	0.08	0.29	0.63								0.851
核仁皮色 Nucleolus skin color	0.43	0.48	0.05	0.01	0.03						1.024

从表2可以看出,6个质量性状的遗传表现具有不同的集中度,同一性状的遗传多样性也存在差异。多样性指数的范围为0.494~2.019,平均值为1.119。其中坚果形状的多样性指数最高(2.019),缝合线特征的多样性指数最低(0.494)。其他性状的多样性指数由大到小依次为缝合线紧密度(1.250)、核壳刻窝(1.074)、核仁皮色(1.024)、核仁饱满度(0.851)。

2.2 核桃坚果表型数量性状的遗传多样性分析

近年来,消费者越来越追求口感,崇尚营养、保健、养生,鲜食核桃因其果仁晶莹剔透、口感爽脆、营养丰富、矿物质及维生素含量齐全,深受广大消费者的喜爱,消费量逐年增加。本研究加入了核桃青果三径、青皮厚度等指标,顺应了市场需求,为筛选鲜食核桃提供借鉴。在引种的87份核桃中,青果直径(青果横径和青果侧径的较大值) ≥ 50 mm的一级鲜果有33份,占比37.93%。 50 mm $>$ 青果直径 ≥ 45 mm的二级鲜果有39份,

占比44.83%, 45 mm $>$ 青果直径 ≥ 40 mm的三级鲜果有15份,占比17.24%^[13]。

从表3可以看出,14个表型数量性状存在差异,变异系数为8.88%~29.33%,均值为16.16%,说明核桃种质资源差异明显。其中坚果湿质量的变异系数最高(29.33%),其次为青果单质量(25.74%)和干果壳厚度(22.97%);青果横径的变异系数最小(8.88%),其后为青果侧径(9.41%)和干果侧径(9.91%)。青果单质量的变异范围最大,达到86.11 g(27.34~113.45 g),出仁率的变异范围为31.65%~87.61%,青果纵径的变异范围为36.74~75.93 mm,坚果湿质量的变异范围为9.43~46.63 g,干果纵径的变异范围为28.50~60.17 mm,坚果干质量的变异范围为6.85~22.87 g,单果核仁质量的变异范围为3.92~11.50 g,青皮厚度的变异范围为3.55~8.27 mm,干果壳厚度的变异范围为0.72~2.12 mm,果形指数的变异范围为0.91~1.45。

表 3 87 份核桃种质资源坚果表型数量性状的统计分析

Tab.3 Statistical analysis of quantitative traits of nut phenotype in 87 walnut germplasm resources

表型性状 Phenotypic trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	中位数 Median	均值 Mean	标准差 SD	变异系数/% CV
GFVD/mm	75.93	36.74	39.19	50.70	51.66	5.6	10.83
GFTD/mm	62.79	36.99	25.80	47.52	47.97	4.26	8.88
GFLD/mm	57.95	33.59	24.36	45.35	45.85	4.31	9.41
GST/mm	8.27	3.55	4.72	5.97	6.00	0.90	16.50
GFUW/g	113.45	27.34	86.11	57.10	59.75	15.38	25.74
NWW/g	46.63	9.43	37.20	19.29	20.41	5.99	29.33
DFVD/mm	60.17	28.50	31.67	38.62	39.62	4.72	11.92
DFTD/mm	49.13	28.75	20.38	35.13	35.54	3.61	10.17
DFLD/mm	46.78	25.35	21.43	34.49	34.74	3.44	9.91
DFST/mm	2.12	0.72	1.40	1.29	1.33	0.30	22.97
NWW/g	22.87	6.85	16.02	12.77	13.14	2.97	22.60
SWKW/g	11.50	3.92	7.58	7.12	7.11	1.56	21.90
FSI	1.45	0.91	0.54	1.12	1.13	0.12	10.68
WKR/%	87.61	31.65	55.95	53.77	54.81	8.43	15.39

2.3 核桃表型性状的相关性分析

基于 Pearson 相关性系数分析,87 份核桃引种资源的 14 个数量性状存在不同程度的相关性(表 4)。其中,青果纵径(GFVD)、青果横径(GFTD)、青果侧径(GFLD)间呈极显著正相关;干果纵径(DFVD)、干果横径(DFTD)、干果侧径(DFLD)间呈极显著正相关;青皮厚度(GST)与青果三径、青果单质量(GFUW)呈极显著正相关;干果

壳厚度(DFST)与青皮三径、干果三径、青皮厚度(GST)、坚果干质量(NWW)、单果核仁质量(SWKW)均呈极显著正相关,而与出仁率(WKR)呈极显著负相关;坚果干质量(IDW)与坚果湿质量(NWW)呈极显著正相关;出仁率(WKR)与干果壳厚度(DFST)、坚果干质量(IDW)均呈极显著负相关,而与单果核仁质量(SWKW)呈极显著正相关。

表 4 87 份核桃种质资源坚果表型性状的相关性分析

Tab.4 Correlation analysis of nut phenotypic traits of 87 walnut germplasm resources

性状 Trait	GFVD	GFTD	GFLD	GST	GFUW	NWW	DFVD	DFTD	DFLD	DFST	IDW	SWKW	FSI	WKR
GFVD	1													
GFTD	0.575**	1												
GFLD	0.572**	0.899**	1											
GST	0.366**	0.535**	0.508**	1										
GFUW	0.762**	0.875**	0.881**	0.607**	1									
NWW	0.672**	0.771**	0.812**	0.244*	0.851**	1								
DFVD	0.864**	0.429**	0.441**	0.171	0.616**	0.636**	1							
DFTD	0.405**	0.682**	0.668**	0.088	0.621**	0.698**	0.482**	1						
DFLD	0.406**	0.785**	0.842**	0.214*	0.708**	0.784**	0.454**	0.830**	1					
DFST	0.265*	0.315**	0.302**	0.247*	0.394**	0.436**	0.256*	0.299**	0.306**	1				
IDW	0.566**	0.655**	0.730**	0.350**	0.717**	0.732**	0.643**	0.633**	0.738**	0.466**	1			
SWKW	0.580**	0.686**	0.747**	0.317**	0.749**	0.782**	0.510**	0.567**	0.694**	0.275**	0.755**	1		
FSI	0.569**	-0.192	-0.201	0.050	0.064	0.021	0.663**	-0.296**	-0.320**	0.031	0.072	-0.024	1	
WKR	0	0.020	-0.005	-0.073	0.015	0.043	-0.200	-0.094	-0.059	-0.301**	-0.364**	0.318**	-0.150	1

注:*表示在 0.05 水平下显著相关;**表示在 0.01 水平下极显著相关。

Note: * indicated significant correlation at 0.05 level; ** indicated extremely significant correlation at 0.01 level.

2.4 基于表型性状的聚类分析

将坚果的 14 个表型性状标准化后,对 87 个核

桃资源进行聚类分析(图 1),在欧氏距离为 1.2 时,可以分为四大类群。

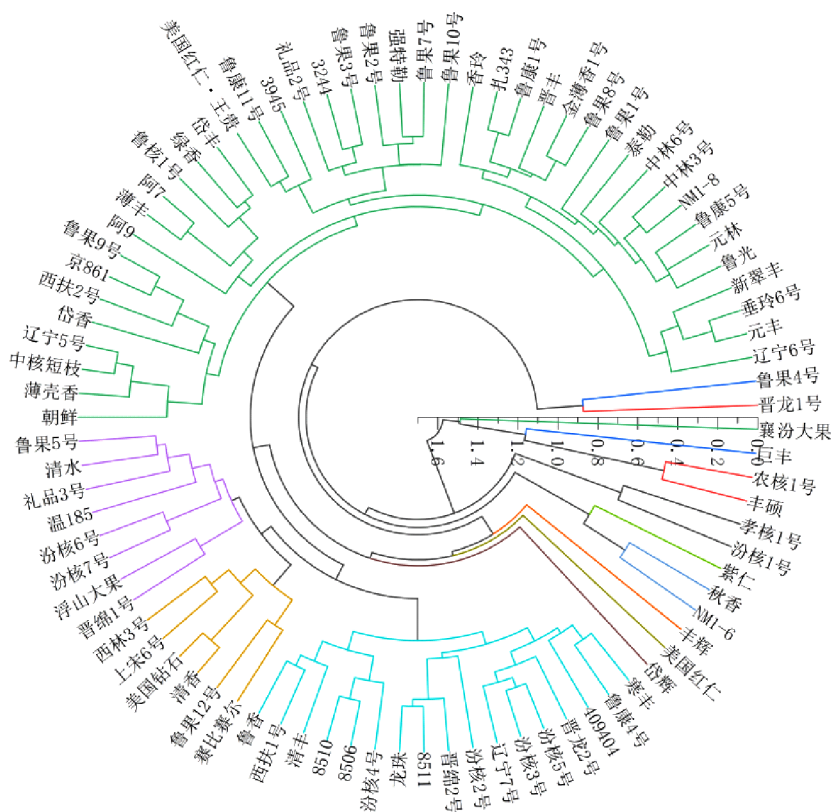


图 1 基于表型性状的 87 份核桃资源聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of 87 walnut resources based on phenotypic traits

第 I 类群包括了 4 个品种资源,分别是襄汾大果、巨丰、农核 1 号、丰硕,该类群坚果大小显著大于其他类群,果形以长形为主。如巨丰的青果单质量达 112.9 g,坚果干质量为 22.87 g,均为较高水平;农核 1 号的果长达 49.2 mm,果形指数为 1.425,明显呈长形。第 II 类群包括 2 个品种资源,分别是孝核 1 号、汾核 1 号,该类群坚果大小仅次于第 I 类群,果形趋近于圆形。孝核 1 号的青果单质量为 55.26 g,汾核 1 号青果单质量为 73.46 g,且二者果形指数都是 0.928,接近圆形。第 III 类群包括 2 个品种资源,分别是鲁果 4 号、晋龙 1 号,该类群的特点是坚果大小适中,果形近圆形。晋龙 1 号的坚果干质量为 13.76 g,鲁果 4 号的坚果干质量为 10.25 g,果形指数分别是 1.008 和 1.036,均接近 1,呈近圆形。第 IV 类群包括 79 个核桃资源,分为 8 个亚群:第 I 亚群包括 3 个品种资源,分别是紫仁、秋香、NM1-6,该亚群特点是坚果体型偏小,果形为圆形。如 NM1-6 的青果单质量为 31.43 g,坚

果干质量为 7.09 g,果形指数 1.078,接近圆形;秋香果形为圆形,紫仁果形也为圆形;第 II 亚群包括 1 个资源,为丰辉,该亚群特点是坚果较小,果形为长椭圆。丰辉的青果单质量为 43.52 g,坚果干质量为 10.48 g,果形指数为 1.106,呈长椭圆形;第 III 亚群包括 1 个资源,为美国红仁,特点是坚果大小中等,果形为短椭圆,仁色紫红。美国红仁的青果单质量为 50.5 g,坚果干质量为 12.11 g,果形指数为 1.147,仁色为紫红;第 IV 亚群包括 1 个资源,为岱辉,特点是坚果中等大小,果形为圆筒形。岱辉的青果质量为 55.25 g,坚果干质量为 19.18 g,果形为圆筒形;第 V 亚群包括了 17 个品种资源,分别是寒丰、鲁康 4 号、409404、晋龙 2 号、汾核 5 号、汾核 3 号、辽宁 7 号、汾核 2 号、晋绵 2 号、8511、龙珠、汾核 4 号、8506、8510、清丰、西扶 1 号、鲁香;该亚群的特点为坚果大小中等,果形多为近圆或方圆形,如寒丰果形为方圆形,鲁康 4 号果形为方圆形,辽宁 7 号果形为近圆。坚果干质量集中于 10~15 g,

如寒丰 12.45 g, 鲁康 4 号 12.28 g; 第Ⅵ亚群包括了 6 个品种资源, 分别是塞比塞尔、鲁果 12 号、清香、美国钻石、上宋 6 号、西林 3 号; 特点是坚果大小中等, 果形多为长椭圆或倒卵形, 如塞比塞尔果形为长椭圆, 鲁果 12 号果形为倒卵形。青果单质量集中于 65~75 g, 如鲁果 12 号 67.3 g, 西林 3 号 74.85 g; 第Ⅶ亚群包括 8 个品种资源, 分别是晋绵 1 号、浮山大果、汾核 7 号、汾核 6 号、温 185、礼品 3 号、清水、鲁果 5 号, 特点是坚果大小中等, 果形多为近圆或椭圆, 如晋绵 1 号果形为近圆, 浮山大果果形为方形。坚果干质量在 13~18 g, 如浮山大果 18.73 g,

清水 17.6 g, 果壳光滑度多为粗糙, 出仁率集中于 0.43~0.5; 其余 42 个品种资源为第Ⅷ亚群, 该亚群的特点为坚果大小中等偏下, 果形多样, 包括圆形、短椭圆、卵形等, 果壳光滑度多为较光洁或光洁。如辽宁 6 号果形为圆形, 元丰果形为近圆, 鲁光果形为短椭圆。

2.5 核桃坚果表型性状的主成分分析

对 87 份核桃资源的 14 个坚果表型性状进行了主成分分析^[14], 结果见表 5。以特征值 1.0 为标准提取了 4 个主成分, 其累计贡献率达到了 86.934%, 其反映了坚果表型性状的大部分信息。

表 5 87 份核桃种质资源数量性状的主成分分析

Tab.5 Principal component analysis of quantitative traits of 87 walnut germplasm resources

表型性状 Phenotypic trait	PC1	PC2	PC3	PC4	表型性状 Phenotypic trait	PC1	PC2	PC3	PC4
GFVD	0.484	0.781	0.270	0.005	DFST	-0.303	-0.076	-0.228	0.593
GFTD	0.817	0.039	0.454	-0.039	IDW	0.742	0.278	0.163	-0.424
GFLD	0.855	0.044	0.414	-0.053	SWKW	0.813	0.240	0.218	0.219
GST	-0.151	-0.072	-0.943	0.113	FSI	0.304	-0.942	-0.021	0.069
GFUW	0.764	0.309	0.511	-0.051	WKR	0.093	-0.068	0.046	0.937
NWW	0.872	0.295	0.131	-0.051	特征值 Eigenvalue	7.588	1.580	0.890	0.809
DFVD	0.476	0.837	-0.022	-0.186	贡献率/% Contribution rate	53.734	15.060	10.015	8.125
DFTD	0.882	-0.025	-0.137	-0.182	累计贡献率/% Total rate	53.734	68.794	78.809	86.934
DFLD	0.940	-0.060	0.034	-0.141					

第 1 主成分特征值最大(7.588), 贡献率也最大, 为 53.734%, 特征向量中正向载荷较高的性状有干果侧径、干果横径、坚果单湿质量、青果侧径, 其特征向量值均大于 0.85, 这些性状反映了坚果的大小, 而负向载荷较高的为干果壳厚度, 特征向量值为 -0.303。第 2 主成分特征值为 1.58, 贡献率为 15.06%, 正向载荷较高的性状有干果纵径、青果纵径, 其特征向量值均高于 0.78, 负向载荷值较高的为果形指数, 特征向量值为 -0.942, 这类性状与核桃的形状有关。第 3 主成分特征值为 0.89, 贡献率为 10.015%, 正向载荷较高的有青果单质量, 特征向量值为 0.511, 负向载荷值较高的有青皮厚度, 其特征向量值为 -0.943, 属于核桃青果的性状特征。第 4 主成分特征值为 0.809, 贡献率为 8.125%, 正向载荷较高的性状有出仁率、干果壳厚度、单果仁质量, 其特征值分别是 0.937、0.593、0.219, 属于坚果的经济指标。

2.6 核桃坚果表型性状评价结果

将 87 份核桃资源的坚果表型性状数据标准

化, 根据 4 个主成分的贡献率和聚类分析, 计算综合评价并排序。综合分值越高表明, 青果越大、青皮越薄、坚果越大、核壳越薄、单果仁越重、出仁率越高, 综合得分排序见表 6。

87 份核桃资源的坚果表型性状综合分值范围为 (-0.185~4.756), 综合分值的平均值为 1.984, 品种巨丰的坚果性状综合评价最佳, 而紫仁的综合分值最低。根据综合得分结合聚类分析的结果, 排序得到 3 大类群中综合评价表现最佳的种质资源: 第 I 类群中巨丰的综合分值最高(4.756), 巨丰坚果巨大, 青果单质量达 112.9 g, 属于顶尖水平, 果仁质量 11.5 g, 出仁率 0.502, 果形指数 1.431, 果壳光洁, 缝合线紧密。该品种丰产性好, 果实个头大, 商品性突出, 适合鲜食和加工。第 II 类群中汾核 1 号的综合分值最高(3.393), 果实呈圆形, 纵径 4.12 cm, 横径 4.31 cm, 侧径 4.23 cm。该品种树势中庸, 树姿开张, 树冠呈半圆形; 属于晚实核桃品种, 结果相对较晚, 但产量稳定; 适宜在山西晋中、吕梁等核桃适生区种植, 抗寒性和抗病性较强, 适合在

北方气候条件下生长。其果形美观、大小均匀,商品性好,适合商品化生产。第Ⅲ类群中晋龙1号的综合分值最高(3.303),坚果单干质量13.76 g,果仁质量9.886 g,出仁率0.718 g,果形指数1.008,近圆形,果壳较光洁,缝合线凸且紧密,壳厚0.956 mm,属于薄壳类型。晋龙1号适应性较强,抗逆性较好,在多种立地条件下均能生长结果。其出仁率高,果仁颜色为尖白,品质优良,适合炒食或榨油。

该品种树势健壮,丰产稳产,是较为常用的优良品种之一。第Ⅳ类群中汾核6号的综合分值最高(3.634)。该品种坚果较大,青果单质量可达90 g,单果干质量19.94 g,果仁质量为11.34 g,出仁率0.568,果形指数1.092,近圆形。树体生长势较强,树冠较大,具有一定的丰产潜力。其果实个头较大,出仁率中等,可作为鲜食或加工的品种选择。

表6 核桃坚果表型性状综合得分排序

Tab.6 Ranking of comprehensive scores of phenotypic traits of walnut nuts

品种 Variety	综合评 价值 Compre- hensive score	排名 Rank- ing	品种 Variety	综合评 价值 Compre- hensive score	排名 Rank- ing	品种 Variety	综合评 价值 Compre- hensive score	排名 Rank- ing
巨丰 Jufeng	4.756	1	西扶1号 Xifu 1	2.206	31	泰勒 Tulare	1.538	61
襄汾大果 Xiangfengdaguo	4.684	2	辽宁7号 Liaoning 7	2.204	32	香玲 Xiangling	1.526	62
汾核6号 Fenhe 6	3.634	3	岱辉 Daihui	2.190	33	中核短枝 Zhongheduanzhi	1.507	63
汾核1号 Fenhe 1	3.393	4	汾核5号 Fenhe 5	2.158	34	辽宁6号 Liaoning 6	1.498	64
晋龙1号 Jinlong 1	3.303	5	塞比塞尔 Sibisel	2.136	35	阿9 A 9	1.485	65
农核1号 Nonghe 1	3.290	6	晋丰 Jinfeng	2.135	36	薄丰 Bofeng	1.430	66
汾核7号 Fenhe 7	3.249	7	金薄香1号 Jinboxiang 1	2.010	37	美国红仁 RobertLivermore	1.424	67
浮山大果 Fushandaguo	3.138	8	8511	2.007	38	美国红仁·王贵	1.412	68
清水 Qingshui	2.973	9	8510	2.001	39	RobertLivermore by Wanggui		
丰硕 Fengshuo	2.873	10	新翠丰 Xincuiheng	1.959	40	NM1-8	1.401	69
礼品3号 Lipin 3	2.736	11	鲁果8号 Luguo 8	1.955	41	阿7 A 7	1.397	70
美国钻石 Hartley	2.716	12	鲁康1号 Lukang 1	1.927	42	朝鲜 Chaoxian	1.371	71
孝核1号 Xiaohel 1	2.716	13	鲁康4号 Lukang 4	1.915	43	丰辉 Fenghui	1.369	72
清香 Qingxiang	2.715	14	鲁果1号 Luguo 1	1.893	44	西扶2号 Xifu 2	1.316	73
上宋6号 Shangsong 6	2.691	15	薄壳香 Bokexiang	1.861	45	鲁核1号 Luhe 1	1.216	74
晋绵1号 Jinmian 1	2.640	16	扎343 Zha 343	1.836	46	鲁果3号 Luguo 3	1.214	75
鲁果4号 Luguo 4	2.638	17	寒丰 Hanfeng	1.809	47	鲁果7号 Luguo 7	1.179	76
鲁果5号 Luguo 5	2.615	18	岱丰 Daifeng	1.761	48	礼品2号 Lipin 2	1.172	77
清丰 Qingfeng	2.590	19	鲁康11 Lukang 11	1.697	49	3244	1.165	78
鲁果12 Luguo 12	2.516	20	垂玲6号 Chuiling 6	1.695	50	鲁果9号 Luguo 9	1.141	79
汾核4号 Fenhe 4	2.512	21	中林6号 Zhonglin 6	1.674	51	秋香 Qiuxiang	1.063	80
温185 Wen 185	2.497	22	中林3号 Zhonglin 3	1.666	52	强特勒 Chandler	1.015	81
鲁香 Luxiang	2.422	23	鲁康5号 Lukang 5	1.664	53	京861 Jin 861	1.013	82
汾核2号 Fenhe 2	2.412	24	元丰 Yuanfeng	1.657	54	鲁果10 Luguo 10	0.957	83
西林3号 Xilin 3	2.412	25	3945	1.656	55	鲁果2号 Luguo 2	0.914	84
8506	2.295	26	辽宁5号 Liaoning 5	1.629	56	岱香 Daixiang	0.474	85
汾核3号 Fenhe 3	2.291	27	元林 Yuanlin	1.618	57	NM1-6	0.460	86
晋绵2号 Jinmian 2	2.232	28	鲁光 Luguang	1.617	58	紫仁 Ziren	-0.185	87
晋龙2号 Jinlong 2	2.227	29	绿香 Lūxiang	1.597	59			
龙珠 Longzhu	2.210	30	409404	1.591	60			

3 结论与讨论

植物表型特征的形成受遗传信息与生态因子

的协同调控,其多样性研究是解析物种遗传背景的重要途径^[15-18]。表型参数的变异幅度与种质资源的遗传异质性存在显著相关性,通过系统测定

核桃的形态学特征与产量相关性状,可有效揭示该物种的遗传分化规律^[19-24]。

本研究通过整合多维度表型分析,系统阐明了核桃种质资源的遗传多样性特征及其演化规律,主要结论如下:质量性状分化方面,坚果形状和核仁皮色是遗传多样性最丰富的表型标记,可作为种质鉴定的核心指标;缝合线紧密度等功能性状的保守性则反映了自然选择与人工驯化的双重作用。数量性状分析表明,青果单质量、坚果湿质量及出仁率的高变异系数为高产、高附加值品种选育提供了直接选择依据,而壳厚度与出仁率的负相关规律为“薄壳高仁”育种策略提供了理论支撑。主成分分析表明,坚果大小(PC1)与果形指数(PC2)是表型分化的主导因子,其协同调控机制解析将成为分子育种的重要研究方向。综合评价方面,巨丰、晋龙1号等综合表现优异的种质可直接应用于品种改良;紫仁等特异材料则需通过功能基因组学挖掘其特殊代谢途径,拓展核桃的多元化利用场景。

本研究构建的坚果表型性状多维评价体系,现阶段聚焦于种质单果形态特征(包括坚果三径值、壳厚系数、出仁率等)的量化权重分析,其综合评价模型尚未纳入产量潜力、生物胁迫抗性(如炭疽病抗性)及非生物胁迫抗性(如晚霜耐受性)等农艺性状指标。基于表型组学数据驱动的评价框架,未来拟通过整合生殖生长动态监测(坐果率、单位冠幅产量)、抗逆表型组测定(渗透调节能力、膜脂过氧化水平)以及代谢组特征谱(脂肪酸组成、多酚含量)等多维度数据,构建覆盖“形态—产量—抗性”三位一体的核桃种质资源全息评价模型,以提升品种选育的生态适应性与经济价值预测精度。

本研究构建的“表型—遗传”关联模型,不仅为核桃种质资源库的精准管理提供了数据支撑,更为突破性品种的分子设计育种奠定了表型组学基础。未来研究需进一步结合基因组重测序与代谢组分析,解析关键性状的分子调控网络,推动核桃遗传改良从表型选择向精准设计的跨越式发展。

参考文献:

- [1] 华晓琴. 汾州核桃地理标志产品保护现状的调查报告[D]. 太原:山西大学,2011.
HUA X Q. Geographical indication protection walnut Fenzhou survey report[D]. Taiyuan:Shanxi University,2011.
- [2] 史敏华,郭晓东,崔璐. 山西省核桃栽培现状及对策[J]. 山西林业科技,2013,42(1):61-62.
- [3] SHI M H, GUO X D, CUI L. Current situation and counter-measures of walnut cultivation in Shanxi province[J]. Shanxi Forestry Science and Technology,2013,42(1):61-62.
- [4] 裴东,鲁新政. 中国核桃种质资源[M]. 北京:中国林业出版社,2011.
PEI D, LU X Z. Walnut germplasm resources in China[M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2011.
- [5] 徐田,耿树香. 云南引种9个品种美国山核桃营养成分分析[J]. 中国油脂,2024,49(2):142-146.
XU T, GENG S X. Nutritional components analysis of 9 main varieties of *Carya illinoensis* introduced in Yunnan[J]. China Oils and Fats,2024,49(2):142-146.
- [6] 杨波,龚鹏,徐叶挺. 三个美国果用黑核桃品种在新疆喀什的引种研究[J]. 北方园艺,2010(23):42-44.
YANG B, GONG P, XU Y T. Introduction of three black walnut cultivars in Kashi[J]. Northern Horticulture,2010(23):42-44.
- [7] 吴宽敏,王敏珍,王晓珂,等. 商洛引种薄壳山核桃试验研究[J]. 陕西林业科技,2024,52(4):29-33.
WU K M, WANG M Z, WANG X K, et al. Experimental study on the introduction of *Carya illinoensis* in Shangluo[J]. Shaanxi Forest Science and Technology,2024,52(4):29-33.
- [8] 郭传友,黄坚钦,王正加,等. 大别山山核桃天然群体种实性状表型多样性[J]. 经济林研究,2007,25(3):15-18.
GUO C Y, HUANG J Q, WANG Z J, et al. Phenotypic diversity of fruit characters in *Carya dabieshanensis*[J]. Nonwood Forest Research,2007,25(3):15-18.
- [9] 吴涛,肖良俊,陈少瑜,等. 云南核桃种质资源的坚果表型和遗传多样性[C]//中国植物学会. 中国植物学会第十六次全国会员代表大会暨85周年学术年会论文集. 昆明:中国植物学会,2018:146-147.
WU T, XIAO L J, CHEN S Y, et al. Nut phenotypic and genetic diversity of walnut germplasm resources in Yunnan[C]// Botanical Society of China. Proceedings of the national congress of the botanical society of china & 85th anniversary academic annual meeting. Kunming: Botanical Society of China, 2018: 146-147.
- [10] 李亚兰,潘存德,范江涛,等. 基于坚果表型性状的新疆核桃种质资源多样性与分类[J]. 西南农业学报,2019,32(9):1986-1994.
LI Y L, PAN C D, FAN J T, et al. Diversity and classification of common walnut (*Juglans regia* L.) germplasm in Xinjiang based on nut phenotype traits[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2019,32(9):1986-1994.
- [11] 张赞齐,董宁光,郝艳宾,等. 109份丰产核桃单株坚果表型多样性分析及性状评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(3):87-96.
ZHANG Y Q, DONG N G, HAO Y B, et al. Nuts' phenotypic diversity analysis and character evaluation of 109 high-yield walnut individual trees[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2023,47(3):87-96.
- [12] 刘庆忠. 核桃种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2007.
LIU Q Z. Descriptors and data standard for walnut[M]. Beijing:China Agriculture Press,2007.
- [13] 赵振宇,高致明,李艳艳,等. 黄河流域核桃主栽品种表型综

- 合评价及优良种质筛选[J]. 河南农业科学, 2025, 54(4): 138-146.
- ZHAO Z Y, GAO Z M, LI Y Y, et al. Comprehensive phenotypic evaluation of main walnut cultivars and screening of excellent germplasm in the Yellow River Basin[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(4): 138-146.
- [13] 左力翔, 牛艳, 安晓宁, 等. 核桃青皮主要功能成分变化规律[J]. 山西农业科学, 2021, 49(7): 839-843.
- ZUO L X, NIU Y, AN X N, et al. Analysis on the change law of main functional components in walnut green husk[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(7): 839-843.
- [14] 赵瑞芬, 程滨, 滑小赞, 等. 基于主成分分析的山西省核桃主产区土壤肥力评价[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 61-68.
- ZHAO R F, CHENG B, HUA X Z, et al. Evaluation of soil fertility status in main walnut production areas in Shanxi based on principal component analysis[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2020, 40(6): 61-68.
- [15] 张计育, 王刚, 王涛, 等. 96份薄壳山核桃种质资源青果表型性状遗传多样性分析[J]. 中国南方果树, 2023, 52(1): 125-128.
- ZHANG J Y, WANG G, WANG T, et al. Genetic diversity analysis of green fruit phenotypic traits of 96 pecan germplasm resources[J]. South China Fruits, 2023, 52(1): 125-128.
- [16] 李建挥, 李柏海, 吴思政, 等. 湘西地区核桃坚果表型特征及多样性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 171-179.
- LI J H, LI B H, WU S Z, et al. Research on the nutphenotypic traits and diversities of walnut in western Hunan[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 171-179.
- [17] 郝苑汝, 申建国, 王相媛, 等. 陕西主要核桃品种(优系)坚果品质综合分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(5): 162-171.
- HAO Y R, SHEN J G, WANG X Y, et al. Comprehensive analysis on nut quality of main walnut varieties(superior lines) in Shaanxi province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(5): 162-171.
- [18] 雒宏佳, 李建红, 赵生春, 等. 甘肃省核桃坚果表型特征及多样性研究[J]. 中国果树, 2019(5): 87-92.
- LUO H J, LI J H, ZHAO S C, et al. Phenotypic characteristics and diversity of walnut nuts in Gansu province[J]. China Fruits, 2019(5): 87-92.
- [19] 李洋, 张贇齐, 温玥, 等. 早实核桃坚果表型和内在品质的关联分析及模型构建[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(1): 119-127.
- LI Y, ZHANG Y Q, WEN Y, et al. Correlation analysis and model construction of nut phenotype and kernel quality of early-fruited walnuts(*Juglans regia*)[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2025, 49(1): 119-127.
- [20] 陈鹏鹏. 经济树种核桃果实性状全基因组关联分析[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- CHEN P P. Fruit characters of economic tree walnut genome-wide association study[D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- [21] 李亚兰. 新疆栽培核桃种质资源多样性及表型性状的基因组关联分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2019.
- LI Y L. Genome association analysis of diversity and phenotypic traits of cultivated walnut germplasm resources in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2019.
- [22] 张雪梅, 李建涛, 王鹏涛, 等. 华北地区引种核桃种质资源表型多样性及筛选评价[J]. 河南农业科学, 2024, 53(5): 132-140.
- ZHANG X M, LI J T, WANG P T, et al. Phenotypic diversity and screening evaluation of introduced walnut germplasm resources in North China[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(5): 132-140.
- [23] 胡杨, 白苇, 张宝英, 等. 食葵种质资源遗传多样性分析[J]. 山西农业科学, 2024, 52(4): 25-33.
- HU Y, BAI W, ZHANG B Y, et al. Genetic diversity analysis of edible sunflower germplasm resources[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(4): 25-33.
- [24] 王艳玲, 周俊国, 吴建涛, 等. 薄壳核桃引种筛选及表型性状相关性分析[J]. 河南农业科学, 2025, 54(2): 145-152.
- WANG Y L, ZHOU J G, WU J T, et al. Introduction and screening of thin-shell walnut and correlation analysis of phenotypic traits[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(2): 145-152.