

引用格式: 王嘉栋, 张璇, 杨改儿, 等. 不同品种宁夏枸杞种实表型性状变异分析及综合评价[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 43(X): 1-12. WANG Jiadong, ZHANG Xuan, YANG Gaier, *et al.* Analysis and comprehensive evaluation of phenotypic variations in seed and fruit traits of different cultivars of *Lycium barbarum*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 43(X): 1-12.

不同品种宁夏枸杞种实表型性状变异分析及综合评价

王嘉栋^{1,2}, 张璇^{1,2}, 杨改儿^{1,2}, 段淋渊³, 戴国礼³, 张波³, 李翔^{1,2}

(1. 宁夏大学 林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 林木资源高效生产全国重点实验室, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏农林科学院 枸杞科学研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要: 【目的】对不同品种宁夏枸杞 *Lycium barbarum* 种实性状进行测定分析, 探究种实性状的变异规律, 为枸杞良种选育以及品种开发利用提供理论基础。【方法】以枸杞种质资源收集圃的 14 个品种宁夏枸杞 (10 种红果、4 种黄果) 为研究对象, 测定其种实性状, 并进行相关性分析、变异系数分析、聚类分析、主成分分析和综合评价。【结果】①枸杞果实与种子大小、果柄长度呈显著正相关 ($P < 0.05$)。②不同品种宁夏枸杞种实性状的变异系数为 0.17%~59.08%, 平均变异系数为 19.16%, 变异较为丰富, 表型多样化程度高, 且种内与种间均呈显著差异 ($P < 0.05$); 果实性状的变异系数 (19.69%) 高于种子 (17.17%), 与种子相比, 果实性状变异较大。③‘宁农杞 20 号’ ‘Ningnongqi 20’ 在不同维度聚类下均与红果枸杞聚为一类, 其种实性状变异规律与红果枸杞较为相似。‘宁农杞 4 号’ ‘Ningnongqi 4’ 在 4 种聚类方式下均单独为 I 类, 其种实性状存在独特的变异。④主成分分析显示: 前 4 个主成分的累计贡献率为 74.478%, 保留了原始性状中的大部分遗传信息, 其中黏着性、胶着性、咀嚼性、果长、果宽、果形指数、种子长、种子宽、种子千粒重是主成分影响较大的几个性状。⑤对 14 个品种宁夏枸杞进行综合评分发现: ‘宁农杞 4 号’ 排名第 1 位, ‘宁杞 3 号’ ‘Ningqi 3’、‘宁农杞 20 号’ 与 ‘宁杞 9 号’ ‘Ningqi 9’ 分别排名为 2、3、4 位。【结论】14 个品种宁夏枸杞的种实表型性状变异幅度大, ‘宁农杞 4 号’ 的综合得分最高, 具有较优的质构特性, 其高硬度可能适合机械化采收, 而其低弹性提示加工时需调整工艺参数。图 3 表 7 参 40

关键词: 宁夏枸杞; 种实; 质构特性; 变异系数; 品种筛选

中图分类号: S722.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)00-0001-12

Analysis and comprehensive evaluation of phenotypic variations in seed and fruit traits of different cultivars of *Lycium barbarum*

WANG Jiadong^{1,2}, ZHANG Xuan^{1,2}, YANG Gaier^{1,2}, DUAN Linyuan³, DAI Guoli³, ZHANG Bo³, LI Xiang^{1,2}

(1. College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. National Key Laboratory of Efficient Production of Forest Tree Resources, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Research Institute of Lycium Science, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to determine and analyze the traits and study the variation pattern of seed and fruit traits of different cultivars of *Lycium barbarum* so as to provide theoretical basis for cultivating good varieties and utilizing germplasm resources. [Method] 14 *L. barbarum* cultivars (10 red fruits, 4 yellow fruits) collected from a germplasm repository were selected as research materials. Their seed and fruit traits were measured, followed by correlation analysis, coefficient of variation (CV) analysis, cluster

收稿日期: 2025-03-25; 修回日期: 2025-10-30

基金项目: 宁夏农林科学院科技创新引导项目 (NKYG-24-09)

作者简介: 王嘉栋 (ORCID: 0009-0008-6390-5022), 从事林木遗传育种研究。E-mail: 15247701179@163.com。通信作者: 李翔 (ORCID: 0000-0001-5330-3396), 讲师, 博士, 从事林木遗传育种研究。E-mail: lixiangphd@nxu.edu.cn

analysis, principal component analysis (PCA), and comprehensive evaluation. [Result] (1) Significant positive correlation between seed and fruit size and length of fruit stalk of *L. barbarum* ($P < 0.05$). (2) The CVs of phenotypic traits among cultivars ranged from 0.17% to 59.08%, with an average CV of 19.16%, indicating high phenotypic diversity. Significant differences were observed both within and between varieties ($P < 0.05$). Fruit traits exhibited greater variability (CV=9.69%) compared to seed traits (CV=17.17%). (3) ‘Ningnongqi 20’ was clustered into one class with red fruit *L. barbarum* under different dimensional clustering, and its variation pattern of seed and fruit traits was more similar to that of red fruit *L. barbarum*. ‘Ningnongqi 4’ formed an independent cluster (Group I) in all analyses, demonstrating unique trait variations. (4) PCA identified 4 principal components with a cumulative contribution rate of 74.478%, capturing most genetic information. Key traits influencing component loadings included adhesiveness, gumminess, chewiness, fruit length/width, fruit shape index, seed length/width, and thousand-seed weight. (5) Comprehensive evaluation ranked ‘Ningnongqi 4’ first, followed by ‘Ningqi 3’, ‘Ningnongqi 20’, and ‘Ningqi 9’. [Conclusion] The 14 *L. barbarum* cultivars exhibited substantial phenotypic diversity in seed and fruit traits, providing valuable breeding materials. ‘Ningnongqi 4’ with the highest comprehensive score, showed superior textural properties, its high hardness may facilitate mechanical harvesting, while low elasticity necessitates adjusted processing parameters. [Ch, 3 fig. 7 tab. 40 ref.]

Key words: *Lycium barbarum*; seed and fruit; textural properties; coefficient of variation; variety screening

枸杞为茄科 Solanaceae 枸杞属 *Lycium* 多年生木本植物^[1]。迄今为止,枸杞属植物在全球约 80 余种,中国有 7 种 3 变种,包括宁夏枸杞 *Lycium barbarum* 及其变种黄果枸杞 *L. barbarum* var. *auranticarpum* 等,主要分布于华北及西北地区^[2]。作为宁夏“六特”产业的核心品类,枸杞产业已成为区域经济发展的支柱,宁夏培育的枸杞良种已覆盖全国所有枸杞产区,占全国枸杞主栽品种的 95% 以上,枸杞鲜果精深加工转换率达 35%,枸杞规模以上企业达 30 家,全产业链综合产值达 290 亿元^[3-5]。近年来,枸杞活性成分(如多糖、类胡萝卜素、甜菜碱)的功能研究已较为深入,证实其具有抗氧化^[6]、调节肠道菌群^[7]、降血糖^[8]等功效,而枸杞籽油在食品与化妆品中的应用也备受关注^[9-10]。随着消费升级,枸杞深加工产品(如原浆、锁鲜果等)需求激增,市场对生长快、大果型、抗逆性强的新品种需求迫切^[11]。

种实性状(果长、果质量、千粒重、果形指数等)和质构特性(硬度、咀嚼性等)直接影响采收效率与储存加工特性^[12]。果形指数(纵径/横径)影响果实采收效率。有研究发现:宁夏枸杞品种‘宁农杞 4 号’‘Ningnongqi 4’(果形指数为 1.18)在机械采收中破损率仅为 3.2%,显著低于低果形指数的传统品种^[13]。甜樱桃 *Prunus avium* 品种中,心形果(果形指数为 0.738)因受力均匀,采收时果柄脱落力较宽心形果低 15%~20%,可降低机械损伤风险^[14]。果实质构特性是评价果实耐储性的关键参数。研究发现:不同品种水晶梨 *Pyrus pyrifolia* 品质特性差异较大,‘翠冠梨’‘Cuiguan’适用于储运及深加工,而‘新世纪梨’‘Nijisseiki’适用于健康食品开发^[15]。对枣 *Ziziphus jujuba* 种质资源果实质地的研究根据质地参数特征将这些资源划分为不同利用类型的类群^[16]。综上,种实性状与质地研究是连接农业生产、加工技术、市场消费的核心纽带,对开展经济林木定向育种和林产品深加工具有重要意义。

种实性状变异是植物适应生境的关键指标,也是开展遗传育种与种质创新的基础。樊光辉等^[17]通过田间观测筛选出青海枸杞优良株系;卢文晋等^[18]揭示了黑果枸杞 *Lycium ruthenicum* 形态变异的生态适应性;王继业等^[19]筛选出了刚竹属 *Phyllostachys* 竹种中变异程度较高,具有较大选育空间的群体。不同枸杞种质资源成分及功效差异主要由遗传多样性决定,而表型多样性是遗传多样性研究的重要内容^[20]。通过测量形态、生理等指标,来判断枸杞种实的变异规律,可为选育优良品种提供依据。但现有枸杞相关研究仍存在表型指标单一,缺乏果实和种子性状的关联分析;评价方法碎片化,未整合形态、质构等多维度数据;品种覆盖有限,尤其缺乏对黄果枸杞的系统研究,导致育种实践中表型选择标准模糊,严重制约了高产、耐储运、加工专用型品种的选育进程。

鉴于此，本研究以宁夏主栽的 14 个品种宁夏枸杞 (10 种红果、4 种黄果) 为对象，通过测定 16 项种实性状，结合变异分析、聚类分析和主成分分析等方法，研究不同品种枸杞种实性状的变异规律及相关性，找出影响枸杞综合品质的关键表型指标，为枸杞种质资源表型数据库的建立及品种筛选标准的优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为宁夏农林科学院枸杞科学研究所种质资源圃保存的 14 个品种果用宁夏枸杞 (表 1)，其中 N1~N10 为红果宁夏枸杞 (简称红果)，NQ4、NQ5、NQ19、NQ20 为黄果宁夏枸杞 (均由红果宁夏枸杞变异而来，简称黄果)。宁夏枸杞通过人工杂交选育获得，树龄均为 5 年生，成熟果实采自树冠中上部，每种枸杞随机选取 30 个无病虫害果实，放置于-20 ℃ 冰箱冷冻保存。本研究聚焦宁夏主栽红果及黄果枸杞，因黑果枸杞在本地栽培规模较小且品种有限，故未纳入。所选 14 个品种覆盖当地主流商业化品系，可为区域良种选育提供直接参考。

表 1 14 个品种宁夏枸杞基本信息

Table 1 14 basic information of *L. barbarum* cultivars

品种	颜色	种质资源	品种	颜色	种质资源
N1	红色	‘宁杞1号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 1’	N8	红色	‘宁杞8号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 8’
N2	红色	‘宁杞2号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 2’	N9	红色	‘宁杞9号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 1’
N3	红色	‘宁杞3号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 3’	N10	红色	‘宁杞10号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 10’
N4	红色	‘宁杞4号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 4’	NQ4	黄色	‘宁农杞4号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningnongqi 4’
N5	红色	‘宁杞5号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 5’	NQ5	黄色	‘宁农杞5号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningnongqi 5’
N6	红色	‘宁杞6号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 6’	NQ19	黄色	‘宁农杞19号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningnongqi 19’
N7	红色	‘宁杞7号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningqi 7’	NQ20	黄色	‘宁农杞20号’ <i>L. barbarum</i> ‘Ningnongqi 20’

1.2 研究方法

1.2.1 果实表型测量 每个枸杞品种随机采摘 30 个成熟果实，确保果实无病虫害且成熟度一致。使用电子天平 (精度为 0.001 g) 测量单果质量 (g)，游标卡尺 (精度为 0.01 mm) 测量果长 (果实纵径，mm) 和果宽 (果实横径，mm)。果柄长度和果柄粗度分别使用游标卡尺测量，果柄长度从果实基部至果柄末端，果柄粗度为果柄中部的直径。果形指数=果实纵径/果实横径。变异系数 (C_v) 为： $C_v=(\sigma/\mu)\times 100\%$ ，其中 σ 为标准差， μ 为平均值^[21]。采用 SC-10 色差仪 (深圳市三恩时科技有限公司) 测定果实色度。每种枸杞随机选取 30 个果实，测定其亮度 (L^*)、红绿值 (a^*)、黄蓝值 (b^*) 和总色差 (ΔE^*)。 L^* 取值 0~100，值越大表示亮度越高； a^* 为红绿轴，正值表示红色倾向，负值表示绿色倾向； b^* 为黄蓝轴，正值表示黄色倾向，负值表示蓝色倾向； ΔE^* 为总色差，反映果实颜色与标准色的差异。每个果实测定 3 次，取平均值作为最终结果。

1.2.2 果实质构测定 质地剖面分析是利用力学方法来模仿人体口腔咀嚼食物的过程，测定内容包括硬度、弹性、咀嚼性、黏性、凝聚性、回复性等质构指标^[22-23]。使用 TA.XT Plus 质构仪测定果实质构特性，包括硬度 (N)、弹性 (形变恢复比率)、黏聚性、胶着性 (N·m) 和咀嚼性 (J) 的测定。每种枸杞随机选取 30 粒果实，测定前将果实置于室温 (25±1)℃ 平衡 2 h。测定参数设置如下：探头类型为 P/5 圆柱形探头，测试速度为 1.0 mm·s⁻¹，压缩比为 50%，触发力为 5 g。具体指标定义及计算公式参考文献^[24]。

1.2.3 种子表型测量 每种枸杞品种随机挑选 30 粒种子，使用显微镜连接 imageView 软件测量种子长度 (mm) 和宽度 (mm)。种子千粒重测定方法为：随机选取 1 000 粒种子，使用电子天平 (精度为 0.001 g) 称量，重复 3 次取平均值。单果种子数通过解剖 30 个果实，统计每个果实中的种子数量，计算平均值。

1.3 数据分析

数据处理与统计分析借助 Excel 2021 完成，并结合 SPSS 27.0 进行差异显著性检验 (ANOVA)、Pearson 相关性分析、主成分分析 (PCA)。使用 R 语言进行系统聚类分析^[25]。

2 结果与分析

2.1 不同品种宁夏枸杞果实表型性状差异

由表 2 可知：14 个品种宁夏枸杞各表型性状之间均存在差异。红果枸杞中，‘宁杞 8 号’ ‘Ningqi 8’ 的果长、单果质量均最大。由图 1 发现：‘宁杞 8 号’ 果实较其他品种更大。而在黄果枸杞中，‘宁农杞 20 号’ ‘Ningnongqi 20’ 的各性状明显优于其他 3 种黄果。14 个品种宁夏枸杞根据果形指数又可分为圆形与椭圆形，果形指数大于 1.5 的为椭圆形，小于 1.5 的为圆形。‘宁杞 1 号’ ‘Ningqi 1’、‘宁杞 2 号’ ‘Ningqi 2’、‘宁杞 3 号’ ‘Ningqi 3’、‘宁杞 4 号’ ‘Ningqi 4’、‘宁杞 5 号’ ‘Ningqi 5’、‘宁杞 6 号’ ‘Ningqi 6’、‘宁杞 8 号’ ‘宁杞 9 号’ ‘Ningqi 9’、‘宁农杞 19 号’ ‘Ningnongqi 19’、‘宁农杞 20 号’ 为椭圆形，‘宁杞 7 号’ ‘Ningqi 7’、‘宁杞 10 号’ ‘Ningqi 10’、‘宁农杞 4 号’ ‘Ningnongqi 4’、‘宁农杞 5 号’ ‘Ningnongqi 5’ 为圆形。14 个品种宁夏枸杞中椭圆形的比例明显高于圆形，说明大部分枸杞在自然生长的状况下趋近于椭圆形。观察不同品种枸杞的色度值发现：黄果枸杞亮度值 ($L^*=43.45\sim46.70$) 高于红果枸杞 ($L^*=34.64\sim39.97$)，其中‘宁农杞 20 号’ 呈橙黄色 ($a^*=18.4$)，‘宁农杞 19 号’ 为亮黄色 ($a^*=7.36$)。

表 2 不同品种宁夏枸杞果实表型

Table 2 Fruit phenotypes of different varieties of *L. barbarum*

品种	果长/mm	果宽/mm	单果质量/g	果形指数	果柄粗/mm	果柄长/mm	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
N1	18.12±1.89 def	10.14±1.10 g	0.99±0.17 g	1.81±0.28 c	19.60±3.11 cd	1.81±0.28 c	38.66±0.92 de	28.48±1.65 a	23.03±2.08 ef	3.93±1.50 gh
N2	22.12±1.62 b	10.22±0.92 g	1.14±0.05 ef	2.18±0.22 a	24.60±3.07 bc	2.18±0.22 a	36.69±1.33 fg	26.55±1.83 b	22.28±3.07 fg	4.16±1.85 gh
N3	20.12±1.43 c	12.25±0.72 a	1.60±0.20 ab	1.65±0.12 d	26.48±2.52 a	1.65±0.12 d	36.44±0.76 g	22.43±1.44 e	19.54±1.65 h	2.22±1.27 h
N4	17.32±1.41 f	10.18±1.05 g	1.25±0.20 de	1.72±0.20 cd	20.03±2.43 def	1.72±0.20 cd	34.64±1.22 f	22.85±2.30 de	20.13±2.45 h	4.35±2.57 gh
N5	18.78±1.65 d	10.84±1.07 cdef	1.28±0.21 cd	1.74±0.20 cd	19.43±2.38 ef	1.74±0.20 cd	39.06±2.37 cde	27.90±3.51 a	27.39±4.90 d	11.50±6.01 d
N6	19.82±1.76 c	11.27±0.89 cd	1.59±0.20 ab	1.77±0.19 cd	21.21±3.22 de	1.77±0.19 cd	38.76±1.12 de	22.76±1.08 de	20.67±2.09 gh	3.19±1.33 h
N7	17.57±1.63 ef	11.89±1.14 ab	1.38±0.18 c	1.49±0.20 e	21.20±2.29 de	1.49±0.20 e	38.59±0.52 de	27.19±1.19 ab	22.31±1.31 fg	7.03±1.40 ef
N8	24.50±2.00 a	11.41±1.41 bc	1.71±0.37 a	2.17±0.22 a	18.36±2.79 fg	2.17±0.22 a	39.97±1.30 cd	27.19±1.60 ab	24.58±2.34 e	8.22±2.53 e
N9	22.41±2.25 b	11.10±0.98 cde	1.68±0.27 a	2.03±0.18 b	21.36±3.11 d	2.03±0.18 b	36.95±0.88 fg	23.85±1.42 cd	19.45±1.48 h	4.17±0.88 gh
N10	15.46±2.69 g	10.72±1.24 defg	1.00±0.22 g	1.46±0.29 ef	17.13±3.13 g	1.46±0.29 ef	37.93±1.57 ef	25.06±2.55 c	21.09±2.88 fgh	5.71±2.24 fg
NQ4	14.10±1.29 h	10.45±0.66 fg	1.12±0.22 de	1.35±0.14 f	25.64±3.95 ab	1.35±0.14 f	43.45±5.77 b	12.84±3.10 g	30.37±6.72 c	40.91±8.20 c
NQ5	10.54±1.24 i	10.40±0.89 fg	0.75±0.13 h	1.02±0.16 g	18.62±2.11 fg	1.02±0.16 g	40.3±3.81 c	11.42±3.66 h	29.25±5.03 c	39.27±6.23 c
NQ19	18.40±1.81 de	10.62±1.35 efg	1.35±0.35 cd	1.76±0.31 cd	23.52±2.79 c	1.76±0.31 cd	46.06±3.59 a	7.36±2.81 i	32.57±5.41 b	44.26±5.93 b
NQ20	22.11±2.54 b	11.12±0.90 cde	1.51±0.25 b	2.00±0.25 b	24.45±6.71 bc	2.00±0.25 b	46.70±3.20 a	18.40±3.16 f	37.52±4.06 a	51.38±5.27 a

说明：数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同品种宁夏枸杞果实的质构分析

由表 3 可见：各种枸杞间的质构性状存在差异，黄果品种‘宁农杞 4 号’硬度最高 (30.07 N)，但其弹性 (0.71) 显著低于红果品种 (0.79~0.89) ($P<0.05$)。

2.3 不同品种宁夏枸杞种子性状与数量差异

从表 4 可见：14 个品种宁夏枸杞的种子中，黄果枸杞的种子更大且千粒重明显高于红果枸杞。而在红果枸杞中，‘宁杞 3 号’的种子千粒重明显高于其他品种。‘宁杞 8 号’ ‘宁杞 9 号’ 的种子最大。且黄果枸杞的种子数量明显少于红果枸杞，它们单果产出的种子更少。而在红果枸杞中，‘宁杞 1 号’ 与 ‘宁杞 2 号’ 的种子数量较少，种子产量与 4 种黄果枸杞相当。

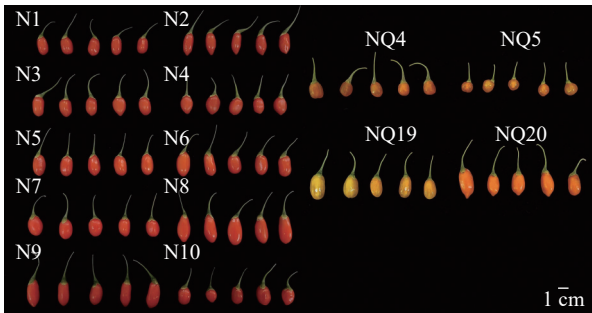


图 1 14 个品种枸杞果实图片

Figure 1 Pictures of fruits of 14 cultivars of *L. barbarum*

表 3 不同品种宁夏枸杞质构分析

Table 3 Textural profile analysis of different cultivars of <i>L. barbarum</i>					
品种	硬度/N	弹性	黏聚性	胶着性/(N·m)	咀嚼性/J
N1	28.34±3.36 def	0.83±0.08 c	0.24±0.05 ab	6.64±1.29 b	5.49±1.12 ab
N2	27.41±2.97 ef	0.85±0.07 abc	0.24±0.08 ab	6.68±2.21 b	5.71±2.03 a
N3	30.84±2.65 b	0.86±0.06 abc	0.19±0.05 bcd	5.95±1.49 bcd	5.11±1.32 ab
N4	28.91±2.86 bcde	0.87±0.06 abc	0.19±0.09 bcd	5.41±2.43 bcde	4.67±2.08 abc
N5	28.68±5.52 cdef	0.79±0.06 d	0.18±0.07 cd	4.83±1.83 cdefg	3.76±1.34 cde
N6	28.21±2.38 def	0.88±0.04 ab	0.23±0.08 bc	6.39±2.33 bc	5.61±2.12 ab
N7	28.57±3.17 cdef	0.84±0.07 bc	0.15±0.06 def	4.20±1.57 efg	3.56±1.45 cde
N8	30.51±3.54 bc	0.86±0.04 abc	0.11±0.06 f	3.43±1.91 fg	2.94±1.66 de
N9	37.08±3.24 a	0.87±0.03 abc	0.14±0.12 def	4.14±2.17 efg	3.81±2.13 cde
N10	26.54±3.79 f	0.83±0.02 bc	0.12±0.07 ef	3.29±2.03 g	2.74±1.70 e
NQ4	30.07±6.10 bcd	0.71±0.20 e	0.28±0.18 a	8.94±7.47 a	5.34±2.89 ab
NQ5	21.27±1.44 g	0.88±0.05 ab	0.22±0.10 bc	4.68±2.03 defg	3.96±1.83 cd
NQ19	20.71±1.02 g	0.89±0.04 a	0.28±0.11 a	5.86±2.15 bcd	5.19±1.92 ab
NQ20	30.64±5.89 bc	0.89±0.04 a	0.16±0.09 de	5.01±3.08 cdef	4.47±2.80 bc

说明：数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$)。

表 4 不同品种宁夏枸杞种子表型

Table 4 Seed phenotypes of different cultivars of <i>L. barbarum</i>					
品种	种子长/mm	种子宽/mm	种子千粒重/g	种形指数	单果种子数
N1	1.35±0.24 fg	0.78±0.18 def	0.682±0.002 n	1.81±0.45 cd	9.00±0.45 h
N2	1.36±0.17 fg	0.63±0.21 g	0.850±0.001 l	2.39±0.81 a	12.83±0.79 g
N3	1.58±0.21 de	0.85±0.22 cde	1.819±0.004 b	2.00±0.67 abc	33.07±1.51 b
N4	1.48±0.22 ef	0.75±0.24 efg	1.012±0.002 h	2.14±0.66 abc	30.13±2.93 d
N5	1.39±0.22 fg	0.65±0.19 g	0.861±0.001 k	2.39±1.18 a	38.34±2.34 a
N6	1.43±0.18 f	0.73±0.19 efg	0.959±0.001 i	2.11±0.75 abc	31.30±2.56 c
N7	1.47±0.20 ef	0.73±0.15 efg	0.882±0.001 j	2.20±1.20 ab	32.30±1.53 b
N8	1.64±0.19 cd	0.83±0.19 cde	1.251±0.001 g	2.08±0.48 abc	31.23±2.60 c
N9	1.62±0.22 cd	0.95±0.24 c	1.301±0.001 f	1.81±0.51 bcd	26.00±2.10 f
N10	1.28±0.17 g	0.67±0.14 fg	0.801±0.001 m	2.00±0.56 abc	28.03±2.48 e
NQ4	2.41±0.38 a	1.63±0.31 a	1.603±0.006 d	1.50±0.19 d	8.03±0.98 i
NQ5	1.87±0.47 ab	1.20±0.36 b	1.351±0.001 e	1.58±0.19 d	12.70±0.84 g
NQ19	1.92±0.33 b	1.28±0.29 b	1.696±0.001 c	1.55±0.26 d	12.87±0.82 g
NQ20	1.75±0.17 bc	0.87±0.17 cd	2.468±0.002 a	2.04±0.42 abc	12.90±0.80 g

说明：数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$)。

2.4 不同品种宁夏枸杞种实表型性状相关性分析

对 14 个品种宁夏枸杞种实的 16 项表型性状进行相关性分析(图 2)发现：果长与果宽、单果质量、果形指数、果柄长、硬度、弹性、种形指数之间呈显著正相关($P<0.05$)；果宽与单果质量、果柄长、硬度之间呈显著正相关($P<0.05$)；单果质量与果形指数、果柄长、硬度、弹性、种形指数之间呈显著正相关($P<0.05$)；果形指数与硬度、弹性、种形指数之间呈显著正相关($P<0.05$)；果柄长与果长、果宽、单果质量之间呈显著正相关($P<0.05$)；硬度与果长、果宽、单果质量之间呈显著正相关($P<0.05$)；黏聚性与胶着性、咀嚼性、种子长、种子宽之间呈显著正相关($P<0.05$)；胶着性与咀嚼性、种子长、种子宽之间呈显著正相关($P<0.05$)。

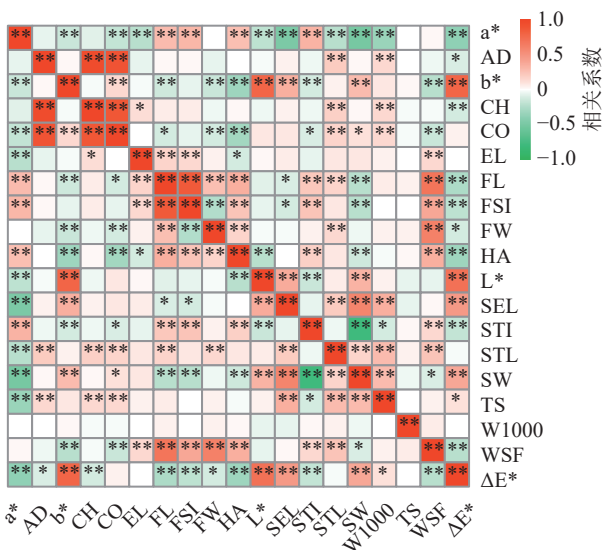
2.5 不同品种宁夏枸杞种实性状变异系数分析

从表 5 可见：14 个品种宁夏枸杞 16 项种实表型性状的平均变异系数为 19.16%，变异幅度为

0.17%~59.08%。果实 16 项性状平均变异系数为 19.69%，大于种子性状的 17.17%。果实色度变异幅度为 1.35%~59.08%，变异丰富。平均变异系数较大的性状为黏聚性、胶着性和咀嚼性，均值都大于 40%，平均变异系数最小的是种子千粒重，均值仅为 0.17%。同一性状在不同品种枸杞之间的变异系数也不同，弹性在‘宁农杞 4 号’的变异系数达 28.09%，在其他品种均为个位数。而变化范围较大的有黏聚性、胶着性、咀嚼性、种形指数。其他性状的变化范围较小，均未超过 20%；同一品种枸杞各性状的变异程度也存在较大差距，且各品种中变异系数最小的均为种子千粒重。而观察不同品种枸杞之间的变异系数发现：‘宁杞 4 号’‘宁杞 5 号’‘宁杞 9 号’‘宁杞 10 号’‘宁农杞 4 号’‘宁农杞 20 号’的变异系数平均值都超过了 20%，说明这 6 种枸杞变异丰富，多样化程度较高。

2.6 不同品种宁夏枸杞聚类分析

在果实表型特征维度考察中，发现色度与品质关联较弱，因此未将其纳入聚类分析体系。对 14 个品种分别从果实表型(除色度外)、果实质构特征及种子表型特征 3 个维度进行系统分析，并基于所有性状指标开展综合评价(图 3)。基于果实性状聚类分析结果(图 3A)显示：‘宁农杞 4 号’与‘宁农杞 5 号’聚为第 I 类群，两者果实显著小于其他品种。‘宁杞 3 号’因果柄特征突出单独成类(II 类群)，其余 11 个品种构成 III 类群。基于果实质构性状聚类分析结果(图 3B)显示：‘宁农杞 4 号’因独特机械特性独立成类(I 类群)，其硬度最高，但弹性最低，黏着性与胶着性高于其他品种，建议采用低温干燥工艺保留色泽。‘宁杞 5 号’‘宁杞 7 号’等 5 个低黏着性品种聚为 II 类群。余下 8 个高咀嚼性品种构



*表示相关显著($P<0.05$)；**表示相关极显著($P<0.01$)。HA. 硬度；FL. 果长；FSI. 果形指数；FW. 果宽；WSF. 单果质量；EL. 弹性；STI. 种形指数；CH. 咀嚼性；AD. 胶着性；CO. 黏聚性；SEL. 种子长；SW. 种子宽；TS. 果柄粗；STL. 果柄长；W1000. 种子千粒重；L*. 亮度；a*. 红绿值；b*. 黄蓝值；ΔE*. 总色差。

图 2 不同品种宁夏枸杞种实性状相关性分析
Figure 2 Correlation analysis of fruiting traits of different cultivars of *L. barbarum*

表 5 不同品种宁夏枸杞种实性状变异系数分析

Table 5 Analysis of coefficient of variation of phenotype traits of different cultivars of *L. barbarum* seeds

品种	性状变异系数/%																		
	果长	果宽	单果质量	果形指数	果柄长	果柄粗	硬度	弹性	黏聚性	胶着性	咀嚼性	种子长	种子宽	种形指数	种子千粒重	L*	a*	b*	ΔE*
N1	10.40	10.88	17.47	15.33	15.88	17.63	11.85	9.28	19.64	19.48	20.43	17.70	23.32	24.59	0.28	2.38	5.79	9.03	38.17
N2	7.32	9.04	13.39	9.97	12.48	12.91	10.83	7.69	31.50	33.01	35.52	12.73	33.75	34.04	0.11	3.62	6.89	13.78	44.47
N3	7.09	5.85	12.68	7.11	9.51	18.44	8.61	7.03	24.01	24.91	25.84	12.96	26.00	33.50	0.19	2.09	6.42	8.44	57.21
N4	8.15	10.27	15.97	11.55	12.13	16.54	9.89	7.22	48.79	44.93	44.54	14.68	31.30	30.81	0.19	3.52	10.07	12.17	59.08
N5	8.77	9.83	16.60	11.20	12.26	13.88	19.26	7.94	41.15	37.80	35.48	15.87	29.55	49.44	0.07	6.07	12.58	17.89	52.26
N6	8.90	7.91	12.53	10.53	15.19	16.35	8.45	4.40	34.16	36.48	37.90	12.66	25.34	35.30	0.08	2.89	4.75	10.11	41.69
N7	9.26	9.62	13.10	13.68	10.79	15.49	11.10	8.87	38.06	37.29	40.79	13.40	20.41	54.56	0.06	1.35	4.38	5.87	19.91
N8	8.15	12.33	21.65	10.26	15.18	16.77	11.61	4.42	54.17	55.73	56.31	11.68	23.02	22.94	0.19	3.25	5.88	9.52	30.78
N9	10.05	8.81	16.31	9.05	14.54	15.50	8.73	3.63	83.11	52.45	55.80	13.71	25.36	28.14	0.05	2.38	5.95	7.61	21.10
N10	17.41	11.56	21.60	19.78	18.28	22.21	14.27	2.60	58.28	61.79	62.11	13.33	21.21	28.02	0.45	4.14	10.18	13.66	39.23
NQ4	9.12	6.33	19.31	10.18	15.40	16.45	20.28	28.09	63.42	83.55	54.20	15.92	18.99	12.70	0.36	13.28	24.14	22.13	20.04
NQ5	11.76	8.57	18.11	15.22	11.32	21.42	6.76	5.94	43.96	13.36	46.20	25.04	29.64	11.85	0.08	9.45	32.05	17.20	15.86
NQ19	9.86	12.72	26.30	17.39	11.87	14.68	4.94	4.56	37.09	36.62	36.92	17.03	22.34	16.55	0.14	7.79	38.18	16.61	13.40
NQ20	11.49	8.11	16.74	12.30	27.45	20.45	19.22	4.33	55.26	61.58	62.64	9.85	19.19	20.55	0.07	6.85	17.17	10.82	10.26
均值	9.84	9.42	17.27	12.40	14.45	17.05	11.84	7.57	45.19	42.78	43.91	14.75	24.96	28.79	0.17	4.93	13.17	12.49	33.10

成Ⅲ类群。基于种子性状聚类分析结果(图 3C)显示：‘宁农杞 4 号’ ‘宁农杞 5 号’ ‘宁农杞 19 号’ 因近圆形种子形成Ⅰ类群；‘宁杞 1 号’ 等 8 个小粒品种为Ⅱ类群；‘宁农杞 20 号’ ‘宁杞 3 号’ 等大粒品种构成Ⅲ类群。整合三维度性状的综合聚类分析结果(图 3D)显示：‘宁农杞 4 号’ 独立为Ⅰ类群；‘宁农杞 5 号’ 与 ‘宁农杞 19 号’ 聚为Ⅱ类群；其余 11 个品种构成Ⅲ类群。

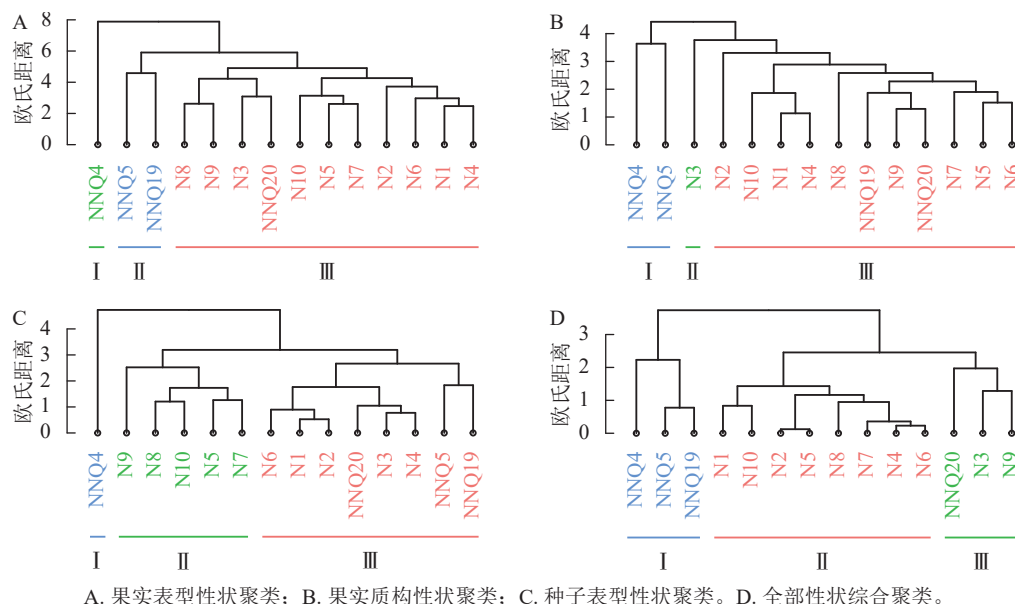


图 3 不同品种宁夏枸杞聚类分析

Figure 3 Cluster analysis of different cultivars of *L. barbarum*

2.7 不同品种宁夏枸杞表型性状主成分分析

鉴于果实色度不作为品质评价指标，本研究以枸杞种实为研究对象，系统性聚焦除色度外的 15 个关键性状，开展主成分分析。以特征值 1.0 为标准提取了 4 个主成分，其方差累计贡献率达 74.478%，保留了原始性状中的大部分遗传信息，分析结果见表 6。主成分 1 的方差贡献率和特征值均为最大，其中黏聚性、胶着性、咀嚼性、种子长、种子宽的正向载荷度达 0.6 以上，果长、果宽、单果质量、果形指数均为负向指标，说明主成分 1 主要反映果实与种子大小。主成分 2 载荷较大的有果长、果宽、单果质量，为正向指标，说明主成分 2 主要反映果实的大小。主成分 3 载荷较大的正向指标为种子千粒重，负向指标较大的有胶着性和咀嚼性。主成分 4 载荷较大的是果形指数，为正向指标。

设提取的 4 个主成分依次为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ，可列出 4 个主成分得分函数表达式，分别为：

$$F_1 = -0.231X_1 - 0.073X_2 - 0.132X_3 - 0.216X_4 + 0.164X_5 + 0.161X_6 + 0.142X_7 - 0.321X_8 + 0.400X_9 + 0.401X_{10} + 0.326X_{11} + 0.284X_{12} + 0.371X_{13} - 0.189X_{14} + 0.144X_{15};$$

$$F_2 = 0.414X_1 + 0.395X_2 + 0.458X_3 + 0.229X_4 + 0.231X_5 + 0.155X_6 + 0.325X_7 - 0.022X_8 + 0.073X_9 + 0.124X_{10} + 0.173X_{11} + 0.141X_{12} - 0.108X_{13} + 0.282X_{14} + 0.256X_{15};$$

$$F_3 = -0.134X_1 - 0.201X_2 + 0.116X_3 - 0.269X_4 + 0.272X_5 + 0.301X_6 - 0.341X_7 + 0.186X_8 - 0.207X_9 - 0.285X_{10} - 0.295X_{11} + 0.283X_{12} + 0.231X_{13} - 0.116X_{14} + 0.427X_{15};$$

$$F_4 = 0.311X_1 - 0.347X_2 - 0.090X_3 + 0.552X_4 - 0.054X_5 + 0.378X_6 + 0.071X_7 - 0.266X_8 - 0.141X_9 - 0.083X_{10} - 0.200X_{11} - 0.011X_{12} + 0.228X_{13} - 0.345X_{14} + 0.102X_{15}。$$

其中，15 个指标中， X_1 为果长， X_2 为果宽， X_3 为单果质量， X_4 为果形指数， X_5 为果柄长， X_6 为果柄粗， X_7 为硬度， X_8 为弹性， X_9 为黏聚性， X_{10} 为胶着性， X_{11} 为咀嚼性， X_{12} 为种子长， X_{13} 为种子宽， X_{14} 为种形指数， X_{15} 为种子千粒重。

设综合得分为 F ，以主成分的方差贡献率为权重，构建综合评价公式： $F = 31.327\%F_1 + 21.419\%F_2 + 13.770\%F_3 + 7.961\%F_4$ 。

表 7 显示：14 个品种宁夏枸杞中，‘宁农杞 4 号’ ‘宁杞 3 号’ ‘宁农杞 20 号’ 的综合得分排名前 3 位，其共同特征为高硬度、适中果形指数及优异色泽，适合开发高品质干果与即食产品。综合得分

表 6 不同品种宁夏枸杞表型性状主成分分析

Table 6 Principal component analysis of phenotypic traits of different cultivars of *L. barbarum*

性状	主成分载荷矩阵				特征向量			
	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
果长	−0.501	0.742	−0.192	0.340	−0.231	0.414	−0.134	0.311
果宽	−0.158	0.708	0.289	−0.379	−0.073	0.395	0.201	−0.347
单果质量	−0.287	0.820	0.167	−0.098	−0.132	0.458	0.116	−0.090
果形指数	−0.469	0.411	−0.387	0.603	−0.216	0.229	−0.269	0.552
果柄长	0.356	0.414	0.391	−0.059	0.164	0.231	0.272	−0.054
果柄粗	0.349	0.278	0.432	0.413	0.161	0.155	0.301	0.378
硬度	0.307	0.583	−0.490	0.078	0.142	0.325	−0.341	0.071
弹性	−0.695	−0.040	0.268	−0.291	−0.321	−0.022	0.186	−0.266
黏聚性	0.868	0.130	−0.297	−0.154	0.400	0.073	−0.207	−0.141
胶着性	0.869	0.223	−0.410	−0.091	0.401	0.124	−0.285	−0.083
咀嚼性	0.706	0.310	−0.424	−0.219	0.326	0.173	−0.295	−0.200
种子长	0.615	0.252	0.406	−0.012	0.284	0.141	0.283	−0.011
种子宽	0.804	−0.194	0.332	0.249	0.371	−0.108	0.231	0.228
种形指数	−0.409	0.505	−0.166	−0.377	−0.189	0.282	−0.116	−0.345
种子千粒重	0.312	0.459	0.614	0.112	0.144	0.256	0.427	0.102
特征值	4.699	3.213	2.066	1.194	4.699	3.213	2.066	1.194
贡献率/%	31.327	21.419	13.770	7.961	31.327	21.419	13.770	7.961
累积贡献率/%	31.327	52.746	66.517	74.478	31.327	52.746	66.517	74.478

表 7 不同品种宁夏枸杞综合得分排名

Table 7 Comprehensive score ranking table of different cultivars of *L. barbarum*

品种	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	综合得分	排名
NQ4	3.318	6.336	−0.824	0.041	8.871	1
N3	2.278	7.138	−0.744	0.146	8.817	2
NQ20	1.873	7.101	−0.790	0.266	8.450	3
N9	1.749	7.306	−1.223	0.338	8.168	4
N2	1.962	6.804	−0.908	0.230	8.088	5
N6	1.947	6.568	−0.959	0.145	7.700	6
NQ19	1.939	5.942	−0.380	0.122	7.623	8
N8	1.042	7.032	−0.852	0.393	7.614	7
N1	2.070	6.160	−1.056	0.156	7.331	9
N4	1.931	6.158	−0.934	0.147	7.303	10
N7	1.646	6.280	−0.741	0.110	7.295	11
N5	1.556	6.251	−0.926	0.172	7.053	12
N10	1.420	5.652	−0.615	0.137	6.594	13
NQ5	2.049	4.833	−0.361	−0.048	6.474	14

在 8 分以上的品种中，‘宁杞 3 号’ ‘宁农杞 20 号’ ‘宁杞 9 号’ 均来自种子聚类中的第 3 类群。

3 讨论

3.1 枸杞种实性状与品种选育

枸杞是传统的药食同源植物，具有重要的经济价值。研究发现：长期食用枸杞果实有助于促进肠道免疫^[26]。枸杞中的枸杞多糖具有改善肝损伤^[27]、降血糖抗肾炎的作用^[28]。随着枸杞中的功效被不断发掘，人们对枸杞的品质、产量有了更高的要求，急需创制高产、抗逆和优质等综合性状优异的枸杞新种

质资源。本研究发现：在 14 个品种宁夏枸杞中，大部分枸杞的果实在自然生长中趋近于椭圆形，而黄果枸杞的果实亮度明显高于红果枸杞。在黄果枸杞中，‘宁农杞 20 号’的 a^* 较高，偏橙黄色，‘宁农杞 19 号’为亮黄色 ($a^*=7.36$)，可作为天然色素提取原料。本研究对枸杞果实的质构性状研究发现：高硬度品种(‘宁杞 3 号’‘宁杞 8 号’‘宁农杞 20 号’)更耐机械挤压，适合干制加工；低硬度品种(‘宁农杞 5 号’‘宁农杞 19 号’)果肉柔软，适合鲜食或制浆。对不同品种枸杞种子的性状与单果种子数量进行分析发现：黄果枸杞的种子明显比红果枸杞大，而单果产出的种子数量相较于红果枸杞更少。4 种黄果枸杞的种形也略有差异，‘宁农杞 4 号’‘宁农杞 5 号’‘宁农杞 19 号’的种形相较于其他枸杞更加圆润，而‘宁农杞 20 号’的种形与红果枸杞较为相似。对 14 个品种枸杞的种实性状进行相关性分析发现：枸杞果柄长与果柄粗和种子大小呈正相关趋势，果柄越长、越粗，种子越大；果实硬度和果柄长与果实大小、果实质量呈正相关，果实越硬、果柄越长，其长势越好。而枸杞种实性状之间联系紧密，其中一个性状指标的变化可能会引起其他性状指标的变化^[29]。

3.2 枸杞种实性状变异与多样性

种实性状丰富的变异有助于优良种质的筛选^[30]。一般认为，变异系数大于 10%，表明样本群体的性状差异较大，就越能适应更广泛的环境条件^[31]。14 个品种宁夏枸杞的种实性状平均变异系数达 19.16%，说明其具有较高的环境适应性。其中，果实性状的变异系数为 19.69%，高于种子性状 17.17%，证明与种子表型变异相比，果实性状变异更加丰富，这与李永梅等^[32]对旱区野生铁线莲 *Clematis florida* 种实表型分析的研究结果一致。而不同品种枸杞种子的长、宽以及种形指数变异系数较高，说明种子外在形状稳定性较低。而在植物的遗传变异过程中，表型性状可直观地体现植物遗传多样性，而表型性状变异也是物种遗传变异的表现形式^[33-34]。通过研究植物表型多样性能够认识植物群体的遗传变异规律及对环境的响应与适应机制^[35]。本研究发现：11 个种实表型性状平均变异系数为 0.17%~59.08%，变异幅度大、变异丰富。

3.3 枸杞种质多维度聚类分化与优异种质资源挖掘

分维度进行聚类揭示了特异性状组合。果实质构指标显示：‘宁农杞 4 号’的高硬度可能适合机械化采收，而低弹性提示加工时需调整工艺参数。多维表型分析能有效反映种质间亲缘关系，而分维度聚类可为定向育种提供性状选择依据^[36]。不同品种枸杞相互之间可能具有独立的遗传背景，涵盖比较丰富的遗传变异，可为后期品种选育提供更为丰富的遗传材料^[37]。‘宁农杞 20 号’在 4 种聚类方式下均与黄果枸杞聚为 1 类，这可能与其遗传背景相关，因它是由红果枸杞变异而来，从而也解释了‘宁农杞 20 号’种实性状为何与红果枸杞相似。‘宁农杞 4 号’在 4 种聚类方式下均为第 I 类，值得注意的是‘宁农杞 4 号’在果实表型聚类中与‘宁农杞 5 号’同组，但在种子聚类中‘宁农杞 5 号’与其分离，表明其果实形态与种子特征可能受不同的遗传机制调控^[38]，同时，‘宁农杞 4 号’在所有分维度聚类中均独立成类，且在综合聚类中与红果枸杞完全分离，暗示其具有独特的遗传背景。同时，其在综合聚类与果实表型聚类时单独聚为 1 类，说明其种实性状较为独特。主成分分析可以反映各指标对主成分载荷作用的能力与方向^[39]。结合主成分综合得分发现：‘宁农杞 4 号’排名第 1 位，后期可重点培育这一品种并加以利用。种实性状是决定产量的重要因素，种子千粒重更大的群体更容易产出综合得分较高的优良个体，利用种子质量较高的类群筛选优良品种更为高效^[40]。‘宁杞 3 号’‘宁农杞 20 号’‘宁杞 9 号’的综合排名分别为第 2、3、4 位，种子性状较优，在今后的研究中可着重关注这 3 个品种枸杞，开展种子品质相关研究。

4 结论

本研究发现：枸杞种实表型变异性强，多样性丰富。而果实的变异系数相较于种子更高，变异更加丰富，稳定性较种子更差。枸杞果柄的长势影响着果实与种子的长势，果柄越长，果实越大，果柄越长、越粗，种子越大。同时，黄果枸杞单果产出的种子数明显少于红果枸杞，且种子相较于红果枸杞更圆(‘宁农杞 20 号’除外)，因其由红果变异而来，导致表型性状更接近红果枸杞。在 14 个品种枸杞中，‘宁农杞 4 号’的综合排名最好，后续应着重研究。

5 参考文献

- [1] GONG Guiping, LIU Qian, DENG Yangni, *et al.* Arabinogalactan derived from *Lycium barbarum* fruit inhibits cancer cell growth via cell cycle arrest and apoptosis[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, **149**: 639–650. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2020.01.251](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.251).
- [2] 钱丹, 纪瑞锋, 郭威, 等. 中国枸杞属种间亲缘关系和栽培枸杞起源研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2017, **42**(17): 3282–3285. QIAN Dan, JI Ruifeng, GUO Wei, *et al.* Advances in research on relationships among *Lycium* species and origin of cultivated *Lycium* in China[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2017, **42**(17): 3282–3285. DOI: [10.19540/j.cnki.cjcmm.20170814.006](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20170814.006).
- [3] 贺亚亚, 张雯雯. 宁夏回族自治区枸杞产业空间演化及驱动因子分析[J]. *北方园艺*, 2025(20): 142–148. HE Yaya, ZHANG Wenwen. Analysis on spatial evolution and driving factors of *Lycium chinensis* industry in Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Northern Horticulture*, 2025(20): 142–148. DOI: [10.11937/bfyy.20244977](https://doi.org/10.11937/bfyy.20244977).
- [4] 杨波. “宁夏模式”对甘肃酒泉枸杞产业发展的启示[J]. *中国果树*, 2025(6): 144–150. YANG Bo. The enlightenment of the “Ningxia model” on development of *Lycium barbarum* industry in Jiuquan, Gansu Province[J]. *China Fruits*, 2025(6): 144–150. DOI: [10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2025.06.023](https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2025.06.023).
- [5] 年新, 高艺玮, 连敏, 等. 宁夏枸杞产业发展现状及建议[J]. *农业科技通讯*, 2024(2): 4–6. NIAN Xin, GAO Yiwei, LIAN Min, *et al.* Present situation and suggestions of *Lycium barbarum* industry development in Ningxia[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2024(2): 4–6. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6400.2024.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6400.2024.02.001).
- [6] ZHANG Xiuxiu, ZHANG Wangwei, NI Zhijing, *et al.* Effects of different chemical modifications on physicochemical and antioxidation properties of *Lycium barbarum* seed dreg polysaccharides[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, **22**: 101271. DOI: [10.1016/j.fochx.2024.101271](https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101271).
- [7] YANG Yu, CHANG Yifan, WU Yi, *et al.* A homogeneous polysaccharide from *Lycium barbarum*: structural characterizations, anti-obesity effects and impacts on gut microbiota[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, **183**: 2074–2087. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2021.05.209](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.209).
- [8] LIANG Lisi, LIN Lianzhu, ZHAO Mouming. Exploration of green preparation strategy for *Lycium barbarum* polysaccharide targeting *Bacteroides* proliferative and immune-enhancing activities and its potential use in geriatric foods[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, **267**: 131316. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2024.131316](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131316).
- [9] ZHU Qing, ZHANG Wangwei, NI Zhijing, *et al.* Development and characterization of novel *Lycium barbarum* seed oil-based oleogels and their application in functional chocolate[J]. *Food Bioscience*, 2023, **56**: 103155. DOI: [10.1016/j.fbio.2023.103155](https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103155).
- [10] LIU Min, LIANG J, JING Chun, *et al.* Preparation and characterization of *Lycium barbarum* seed oil pickering emulsions and evaluation of antioxidant activity[J]. *Food Chemistry*, 2023, **405**: 134906. DOI: [10.1016/j.foodchem.2022.134906](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134906).
- [11] 杨改儿, 张璇, 王嘉栋, 等. ^{60}Co - γ 射线辐射宁夏枸杞的生物效应[J/OL]. *核农学报*, 2025-10-14 [2025-10-20]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HNXB20251013001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. YANG Gaier, ZHANG Xuan, WANG Jiadong, *et al.* Biological effects of ^{60}Co - γ rays irradiation on *Lycium barbarum* L. [J/OL]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025-10-14 [2025-10-20]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HNXB20251013001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [12] 张翔宇, 李喜宏, 王妍丹, 等. 基于果形和穿刺测试的葡萄浆果质构特性分析[J]. *食品工业科技*, 2017, **38**(1): 338–343. ZHANG Xiangyu, LI Xihong, WANG Yandan, *et al.* Analysis of the texture properties in grapes berries based on puncture test and berries shape[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, **38**(1): 338–343. DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2017.01.060](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.01.060).
- [13] 罗康宁. 枸杞振动采收动力学及果实跌落损伤研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023. LUO Kangning. *Research on the Dynamics of Vibration Harvesting and Falling Bruise of Fruit for Lycium barbarum*[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023. DOI: [10.27257/d.cnki.gnxhc.2023.000634](https://doi.org/10.27257/d.cnki.gnxhc.2023.000634).
- [14] 赵林, 杨峰, 樊继德, 等. 不同甜樱桃品种果实性状差异性比较[J]. *南方农业学报*, 2012, **43**(2): 209–212. ZHAO Lin, YANG Feng, FAN Jide, *et al.* Differentiation in the fruit characteristics in different sweet cherry cultivars[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2012, **43**(2): 209–212. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1191.2012.02.209](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2012.02.209).

- [15] 孟千杰, 徐玉娟, 吴继军, 等. 不同品种水晶梨果实品质特性综合分析[J]. *现代食品科技*, 2025, **41**(6): 216–225. MENG Qianjie, XU Yujuan, WU Jijun, *et al.* Comprehensive analysis of fruit quality characteristics of different varieties of crystal pear[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2025, **41**(6): 216–225. DOI: [10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0427](https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0427).
- [16] 薛晓芳, 焦文丽, 苏万龙, 等. 枣种质资源果实质地品质特性分析[J]. *西北农业学报*, 2024, **33**(7): 1318–1328. XUE Xiaofang, JIAO Wenli, SU Wanlong, *et al.* Characteristic analysis of fruit texture quality in jujube germplasm resources[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, **33**(7): 1318–1328. DOI: [10.7606/j.issn.1004-1389.2024.07.014](https://doi.org/10.7606/j.issn.1004-1389.2024.07.014).
- [17] 樊光辉, 王占林, 郑淑霞, 等. 青海枸杞自然变异优选育种试验[J]. *林业科技*, 2012, **37**(4): 7–11. FAN Guanghui, WANG Zhanlin, ZHENG Shuxia, *et al.* *Lycium barbarum* breeding test of natural mutation in Qinghai[J]. *Forestry Science & Technology*, 2012, **37**(4): 7–11. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9499.2012.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9499.2012.04.004).
- [18] 卢文晋, 王占林, 樊光辉. 黑果枸杞在人工栽培条件下的形态变异[J]. *经济林研究*, 2014, **32**(1): 171–174. LU Wenjin, WANG Zhanlin, FAN Guanghui. Morphological variation of *Lycium ruthenicum* under artificial cultivation conditions[J]. *Nonwood Forest Research*, 2014, **32**(1): 171–174. DOI: [10.14067/j.cnki.1003-8981.2014.01.011](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1003-8981.2014.01.011).
- [19] 王继业, 袁金玲, 赵丹丹, 等. 刚竹属竹种表型及纤维特征变异规律[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, **42**(6): 1165–1173. WANG Jiye, YUAN Jinling, ZHAO Dandan, *et al.* Variation patterns of phenotype and fiber characteristics of bamboo species in *Phyllostachys*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(6): 1165–1173. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20240606](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20240606).
- [20] 杨磊, 贾平平, 靳娟, 等. 118 个枣品种表型性状多样性分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2023, **32**(1): 50–60. YANG Lei, JIA Pingping, JIN Juan, *et al.* Analysis on phenotypic trait diversity of 118 *Ziziphus jujuba* cultivars[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2023, **32**(1): 50–60. DOI: [10.3969/j.issn.1674-7895.2023.01.06](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7895.2023.01.06).
- [21] 赵曦阳, 马开峰, 张明, 等. 3 年生毛白杨无性系光合特性的比较研究[J]. *林业科学研究*, 2011, **24**(3): 370–378. ZHAO Xiyang, MA Kaifeng, ZHANG Ming, *et al.* Comparative analysis of the photosynthetic characteristics of three-year-old *Populus tomentosa* clones[J]. *Forest Research*, 2011, **24**(3): 370–378. DOI: [10.13275/j.cnki.lykxyj.2011.03.020](https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2011.03.020).
- [22] 孙彩玲, 田纪春, 张永祥. TPA 质构分析模式在食品研究中的应用[J]. *实验科学与技术*, 2007, **5**(2): 1–4. SUN Cailing, TIAN Jichun, ZHANG Yongxiang. Application of TPA test mode in the study of food[J]. *Experiment Science and Technology*, 2007, **5**(2): 1–4. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4550.2007.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4550.2007.02.001).
- [23] LEE S Y, LUNA-GUZMÁN I, CHANG S, *et al.* Relating descriptive analysis and instrumental texture data of processed diced tomatoes[J]. *Food Quality and Preference*, 1999, **10**(6): 447–455. DOI: [10.1016/S0950-3293\(99\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(99)00035-X).
- [24] 李敏, 谢学刚, 江登珍, 等. 不同盐脱水加工工艺对榨菜质构的影响[J]. *中国调味品*, 2019, **44**(5): 97–100. LI Min, XIE Xuegang, JIANG Dengzhen, *et al.* Effects of different salt dehydration process on the texture of tuber mustard[J]. *China Condiment*, 2019, **44**(5): 97–100. DOI: [10.3969/j.issn.1000-9973.2019.05.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-9973.2019.05.023).
- [25] 杨艳, 汤玉喜, 唐洁, 等. 南方型黑杨种质资源表型及生长性状遗传多样性分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, **39**(7): 31–36. YANG Yan, TANG Yuxi, TANG Jie, *et al.* Genetic diversity of phenotypic and growth characters of southern type of *Populus deltoides*[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, **39**(7): 31–36. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.07.004](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.07.004).
- [26] DING Yu, CHEN Dan, YAN Yamei, *et al.* Effects of long-term consumption of polysaccharides from the fruit of *Lycium barbarum* on host's health[J]. *Food Research International*, 2021, **139**: 109913. DOI: [10.1016/j.foodres.2020.109913](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109913).
- [27] XIAO Jia, WANG Fei, LIONG E C, *et al.* *Lycium barbarum* polysaccharides improve hepatic injury through NFkappa-B and NLRP3/6 pathways in a methionine choline deficient diet steatohepatitis mouse model[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, **120**: 1480–1489. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2018.09.151](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.151).
- [28] DU Mingzhao, HU Xinyu, KOU Ling, *et al.* *Lycium barbarum* polysaccharide mediated the antidiabetic and antinephritic effects in diet-streptozotocin-induced diabetic sprague dawley rats via regulation of NF-kB[J]. *BioMed Research International*, 2016, **2016**(1): 3140290. DOI: [10.1155/2016/3140290](https://doi.org/10.1155/2016/3140290).
- [29] 吉德娟, 张得芳, 于倩. 柴达木盆地唐古特白刺的表型多样性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, **41**(10): 57–66. JI Dejuan, ZHANG Defang, YU Qian. Phenotypic diversity of *Nitraria tangutorum* Bobr. in Qaidam basin[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, **41**(10): 57–66. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.10.007](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.10.007).
- [30] 张毅, 敖妍, 刘觉非, 等. 不同群体文冠果种实性状变异特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(5): 1037–1043. ZHANG Yi, AO Yan, LIU Juefei, *et al.* Variable fruit and seed characteristics of *Xanthoceras sorbifolium* in different populations[J].

- Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(5): 1037–1043. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2019.05.025](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2019.05.025).
- [31] 韩旻昊, 任飞, 燕丽萍, 等. 山东元宝枫天然种群种实的表型多样性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, **43**(11): 173–184, 192. HAN Minhao, REN Fei, YAN Liping, *et al.* Fruit and seed phenotypic diversity of natural populations of *Acer truncatum* in Shandong[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, **43**(11): 173–184, 192. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.11.018](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.11.018).
- [32] 李永梅, 朱珠, 宋占邦. 旱区野生铁线莲种实表型分析[J]. *国土与自然资源研究*, 2024(3): 72–78. LI Yongmei, ZHU Zhu, SONG Zhanbang. Analysis of fruit and Seed Phenotypic traits of wild clematis in arid areas in China[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2024(3): 72–78. DOI: [10.16202/j.cnki.tnrs.2024.03.015](https://doi.org/10.16202/j.cnki.tnrs.2024.03.015).
- [33] 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. LIN Cunxue, YANG Xiaohua, LIU Hairong. Genetic diversity analysis of 96 plum germplasm resources by phenotypic traits in northeast cold area[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, **47**(10): 1917–1929. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2019-0982](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2019-0982).
- [34] 童跃伟, 唐杨, 陈红, 等. 红松种子园种群表型多样性研究[J]. *生态学报*, 2019, **39**(17): 6341–6348. TONG Yuewei, TANG Yang, CHEN Hong, *et al.* Phenotypic diversity of *Pinus koraiensis* populations in a seed orchard[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(17): 6341–6348. DOI: [10.5846/stxb201805161087](https://doi.org/10.5846/stxb201805161087).
- [35] 贺漫媚, 代色平, 陈秀萍, 等. 17 种石斛属植物表型性状多样性分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2024, **33**(2): 71–79, 90. HE Manmei, DAI Seping, CHEN Xiuping, *et al.* Analysis on phenotypic trait diversity of 17 *Dendrobium* species[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2024, **33**(2): 71–79, 90. DOI: [10.3969/j.issn.1674-7895.2024.02.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7895.2024.02.08).
- [36] FERGUSON S H, HIGDON J W, SCHMIDT C, *et al.* Investigating the relationship between body shape and life history traits in toothed whales: can body shape predict fast-slow life histories?[J]. *Evolutionary Biology*, 2023, **50**(3): 300–317. DOI: [10.1007/s11692-023-09605-4](https://doi.org/10.1007/s11692-023-09605-4).
- [37] 李慧, 魏天军. 基于主成分和灰色关联度分析的鲜食枣果实品质评价[J]. *经济林研究*, 2021, **39**(1): 60–67. LI Hui, WEI Tianjun. Evaluation of fruit quality of fresh-eating jujube based on principal component and gray correlation analysis[J]. *Non-wood Forest Research*, 2021, **39**(1): 60–67. DOI: [10.14067/j.cnki.1003-8981.2021.01.008](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1003-8981.2021.01.008).
- [38] MURREN C J. The integrated phenotype[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2012, **52**(1): 64–76. DOI: [10.1093/icb/ics043](https://doi.org/10.1093/icb/ics043).
- [39] 房凡, 贾黎明, 蒋晓辉, 等. 基于 24 个表型性状的中国黄连木优良单株选择[J]. *北京林业大学学报*, 2024, **46**(2): 40–50. FANG Fan, JIA Liming, JIANG Xiaohui, *et al.* Selection of superior individual *Pistacia chinensis* based on 24 phenotypic traits[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, **46**(2): 40–50. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20220447](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220447).
- [40] 高风, 文仕知, 韦铄星, 等. 不同种源香合欢种子和叶表型性状变异分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, **43**(2): 57–66. GAO Feng, WEN Shizhi, WEI Shuoxing, *et al.* Variation analysis of seed and leaf phenotypic traits of *Albizia odoratissima* from different provenances[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, **43**(2): 57–66. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.02.007](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.02.007).