植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources
ISSN 1672-1810,CN 11-4996/S

《植物遗传资源学报》网络首发论文

题目：442 份谷子育成品种（系）在山西的表型多样性分析
作者：任莹，王宏勇，王拴锁，常利芳，侯雅静，郝雅萍，赵凯
DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20251025001
收稿日期：2025-10-25
网络首发日期：2025-12-29
引用格式：任莹，王宏勇，王拴锁，常利芳，侯雅静，郝雅萍，赵凯．442 份谷子育成品种（系）在山西的表型多样性分析[J/OL]．植物遗传资源学报.
https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20251025001

植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources　DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.20251025001

442 份谷子育成品种（系）在山西的表型多样性分析

任莹[1]，王宏勇[1]，王拴锁[1,2]，常利芳[1]，侯雅静[1]，郝雅萍[1]，赵凯[1]

（[1]山西农业大学农学院，太原 030031；[2]山西省后稷实验室，太原 030031）

摘要：为解析 442 份谷子育成品种（系）在山西的表型变异规律和多样性特征，本研究开展了系统的表型遗传多样性分析及综合评价。表型变异结果表明，8 个质量性状的遗传多样性指数为 0.1900 ～1.0246，除粒色外均小于 1.0000；15 个数量性状遗传多样性指数介于 1.9613 ～ 2.0865 之间，除穗长、倒二叶长外均大于 2.0000；变异系数范围为 8.09%～23.18%，码粒数、单穗重、单穗粒重变异丰富，倒二叶宽、千粒重、抽穗期、生育期变异较小；表明供试材料差异大、类型丰富。相关性分析显示，15 个数量性状间存在复杂的相关性，其中单穗重与单穗粒重呈极显著正相关（$r=0.9676$，$P<0.01$）。主成分分析提取了 5 个主成分，累积贡献率达 78.46%，基于主成分计算表型性状综合评价 F 值范围为 0.2099～0.8549，其中 2017 K 测 1 得分最高，太选谷 29 矮得分最低。通过聚类分析，442 份育成品种（系）被划分为 3 个类群，类群I（中间型）、类群II（高秆晚熟型）和类群III（早熟型），各类群间性状差异显著。结果表明，442 份谷子育成品种（系）遗传多样性丰富，可为后续遗传机制解析、种质创新及育种实践提供重要的材料与理论依据。

关键词：谷子；育成品种（系）；表型性状；多样性分析；综合评价

Phenotypic Diversity Analysis of 442 Foxtail Millet Varieties (Lines) in Shanxi Province

REN Ying[1], WANG Hongyong[1], WANG Shuansuo[1, 2], CHANG Lifang[1], HOU Yajing[1], HAO Yaping[1], ZHAO Kai[1]

([1]*College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031;* [2]*Shanxi Hou Ji Laboratory, Taiyuan 030031*)

Abstract: Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation were conducted on 442 foxtail millet varieties (lines) in Shanxi Province to delineate their phenotypic variation and diversity. Analysis of the 8 qualitative traits revealed that the genetic diversity index ranged from 0.1900 to 1.0246, with only grain color (GC) greater than 1.0000. For the 15 quantitative traits, the index ranged from 1.9613 to 2.0865, all greater than 2.0000 except for panicle length (PL) and the length of the penultimate leaf (LPL). The coefficients of variation for quantitative traits ranged from 8.09% to 23.18%. Higher variation was observed in grain number per spikelet (GNS), single panicle weight (SPW), and grain weight per panicle (GWP), while lower variation was noted for the width of the penultimate leaf (WPL), thousand-grain weight (TGW), heading date (HD), and growth duration (GD). These results indicate substantial phenotypic diversity

收稿日期：2025-10-25

第一作者研究方向为谷子遗传育种，E-mail: renying2013@126.com

通信作者：赵凯，研究方向为谷子遗传育种，E-mail: zhaokai017@126.com

基金项目：山西农业大学科技创新提升工程（CXGC2025046）；财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系（CARS-06-14.5-B8）

Foundation projects：Science and Technology Innovation Program of Shanxi Agricultural University（CXGC2025046）；China Agriculture Research System of MOF and MARA（CARS-06-14.5-B8）

among the accessions. Correlation analysis revealed complex relationships among the quantitative traits, including a highly significant positive correlation (r = 0.9676, P < 0.01) between single panicle weight (SPW) and grain weight per panicle (GWP). Principal component analysis extracted five principal components, accounting for 78.46% of the total variance. Using these components, comprehensive evaluation scores (F-values) were derived, ranging from 0.2099 to 0.8549, with 2017 K Ce 1 scoring the highest, and Taixuangu 29 ai the lowest. Cluster analysis classified the 442 varieties (lines) into three groups: Group I (intermediate type), Group II (tall late-maturing type), and Group III (early-maturing type), with significant differences observed among the groups. In conclusion, the 442 foxtail millet varieties (lines) exhibited rich genetic diversity, providing valuable germplasm resources and theoretical basis for future genetic research, germplasm innovation, and breeding practice.

Key words: foxtail millet; varieties (lines); phenotypic traits; diversity analysis; comprehensive evaluation

谷子（*Setaria italica*（L.）P. Beauv.）为禾本科狗尾草属作物，籽粒脱壳后为小米，起源于我国黄河流域，栽培利用历史可追溯至 11500 年前的南庄头遗址[1]，是中华农耕文明发展的重要载体作物[2]。因其抗旱耐瘠薄、适应性广，在我国干旱半干旱地区农业生产中占有重要地位[3]。目前，我国谷子种质资源保有量 28915 份[4]，居世界首位，这些种质资源特色鲜明，为种质创新与品种选育奠定了坚实基础[5]。

种质资源是农业科技创新与现代育种的物质基础[5-6]，育种目标的实现依赖于其丰富的遗传多样性。表型性状作为基因型与环境互作后的综合体现[7-11]，是资源评价和育种实践的选择依据。杨朋娟等[12]通过多环境鉴定 160 份谷子资源，提出株高、叶片数、穗粗可以作为广适、高产稳产品种选育的目标性状。袁迪等[13]的分析表明，2011-2022 年间登记的 200 个谷子品种仍保持着丰富的遗传多样性。薛亚鹏等[14]对 179 份谷子四大名米品种群进行农艺及品质性状分析，发现品种群间遗传变异丰富、农艺性状差异显著、品质差异较小，为谷子品质育种提供依据。孟帅等[15]对 181 份谷子种质资源进行多样性分析，为饲用谷子种质利用提供材料基础。黄蕊等[16]对 603 份山西地方谷子在 5 个生态环境下进行表型多样性分析，充分证明了山西谷子种质资源变异丰富。这些工作为谷子种质资源评价及品种选育提供了重要参考。

山西地处黄河中游，是我国谷子的传统优势产区，常年种植面积约 20 万 hm^2，孕育了晋谷 21 号等名优品种，形成了“沁州黄”、“汾都香”、“东方亮”等品牌，产业基础坚实。在谷子产业化发展的当下，该地区种质资源虽丰富，但品种结构分散，缺乏综合性状突出的主导品种；以晋谷 21 号为代表的主栽品种普遍存在植株高大、抗倒伏性弱、机械化程度低等问题；同时，该品种作为骨干亲本被高频使用，导致遗传背景狭窄，这些都在一定程度上限制了品种的突破性改良。因此，系统分析谷子种质资源在山西的表型多样性，对推动当地育种创新至关重要。育成品种（系）作为种质资源的重要组成部分，对其进行全面的评价是实现进一步遗传改良的关键。当前研究多集中在山西地方种质[16-19]，针对育成品种（系）在山西特定生态条

件下的表型多样性研究尚显不足[20]。因此，本研究以 442 份国内谷子育成品种（系）为材料，通过系统的表型多样性、相关性、主成分及聚类分析，并计算综合得分进行评价，旨在拓宽当地谷子育种遗传基础，并为这批育成品种（系）在山西的高效利用及遗传改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料包括 442 份谷子育成品种（系），由山西农业大学农学院保存并提供（详见 https：//doi.org/10.13430/j. cnki. jpgr. 20251025001，附表 1）。材料主要来源于全国及山西省谷子联合鉴定试验，涵盖了国内多个省份的育成品种（系），具有良好的代表性。其中，山西省 225 份，河北省 48 份，内蒙古自治区 47 份，北京市 22 份，河南省 21 份，吉林省 19 份，黑龙江省 18 份，辽宁省 16 份，陕西省 11 份，山东省 9 份，甘肃省 5 份，新疆自治区 1 份。

1.2 试验方法

试验分别于 2023 年、2024 年在山西农业大学东阳试验示范基地进行。试验地为水浇地，土壤类型为壤土，前茬作物为杂豆。每年 5 月中下旬播种，10 月上旬收获（早熟材料适时早收）。秋施羊粪 60 m^3/hm^2 作基肥，播前随旋耕施磷酸二铵 300 kg/hm^2 作种肥。试验材料按顺序播种，每份材料种植 2 行，行长 3 m，行距 33 cm，株距 6 cm，常规田间管理。

田间性状调查依据《中华人民共和国植物新品种特异性、一致性和稳定性的测试指南 谷子》[21]在不同生育阶段进行，每份材料选 5 株进行测定，取平均值。调查性状包括 8 个质量性状与 15 个数量性状。质量性状为幼苗叶鞘色、花药颜色、刚毛颜色、刚毛长度、穗颈姿态、穗型、粒色、米色，并进行赋值（表 1）。数量性状为株高、穗长、穗粗、茎粗、穗颈长、节数、倒二叶长、倒二叶宽、穗码数、码粒数、单穗重、单穗粒重、千粒重、抽穗期、生育期。

表 1 质量性状描述标准

Table 1 Descriptive standards for qualitative traits

质量性状 Qualitative traits	描述标准 Descriptive standards						
	1	2	3	4	5	6	7
叶鞘色 LSC	绿色	浅紫色	中等紫色	—	—	—	—
穗型 PT	—	纺锤	圆筒	棍棒	—	猫爪	—
穗颈姿态 PNP	直	中弯	强弯	勾型	—	—	—
花药颜色 AC	白色	黄色	黄色	—	—	—	—
刚毛颜色 BC	绿色	—	紫色	—	—	—	—
刚毛长度 BL	—	—	短	—	中	—	长

粒色 GC	白色	黄色	红色	褐色	灰色	黑色	—
米色 EC	白色	灰绿色	浅黄色	中等黄色	—	—	—

LSC: Leaf sheath colour; PT: Panicle type; PNP: Panicle neck posture; AC: Anther colour; BC: Bristle colour; BL: Bristle length ; GC: Grain colour; EC: Endosperm colour; The same as below

1.3 数据分析

利用 Excel 对原始数据进行整理，并计算最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数和 Shannon-Weaver 多样性指数（H'，Shannon-Weaver diversity index）。对于质量性状，根据各表型类别的观测频率（P_i）计算 H'；对于数量性状，通过平均值（X）和标准差（S）将数据划分为 10 级，每级相差 0.5S，从第 1 级（$X_i < X - 2S$）到第 10 级（$X_i \geqslant X + 2S$），各级相对频率（P_i）用于计算 H'。

$$H' = -\sum_{i=1}^{n} P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$$

式中，P_i 表示某个性状第 i 个级别频率。

利用 SPSS 25.0 进行主成分分析，计算主成分得分，对提取的主成分得分进行 Min-Max 标准化，计算各主成分贡献率权重，通过加权求和计算各种质资源综合评价 F 值[9, 22]。利用 R 4.4.3 进行频次分布分析、相关性分析、方差分析及 Ward 聚类分析[23]。

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{i\,min}) / (X_{i\,max} - X_{i\,min}) \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$$

式中，$\mu(X_i)$为第 i 个性状的隶属函数值，X_i 为第 i 个性状值；$X_{i\,max}$、$X_{i\,min}$ 分别为第 i 个性状的最大值和最小值。

$$W_i = R_i / \sum_{i=1}^{n} R_i \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$$

式中，W_i 是第 i 个主成分的归一化权重，R_i 是第 i 个主成分的方差贡献率。

$$F = \sum_{i=1}^{n} \mu(X_i) \cdot W_i \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$$

2 结果与分析

2.1 表型遗传多样性分析

2.1.1 质量性状多样性 442 份谷子育成品种（系）的 8 个质量性状的遗传多样性指数变化范围为 0.1900 ~ 1.0246（表 2），其中粒色多样性指数最高，米色多样性指数最低。从分布频率来看，参试材料表型以幼苗叶鞘绿色（75.11%）、穗呈纺锤型（60.18%）、穗颈姿态强弯（80.77%）、花药黄色（62.67%）、刚毛绿色（81.67%）、刚毛长度中等（50.00%）、粒色黄色（57.01%）、米色中等黄色（96.38%）为主，具有一定的多样性。

表 2 质量性状多样性分析

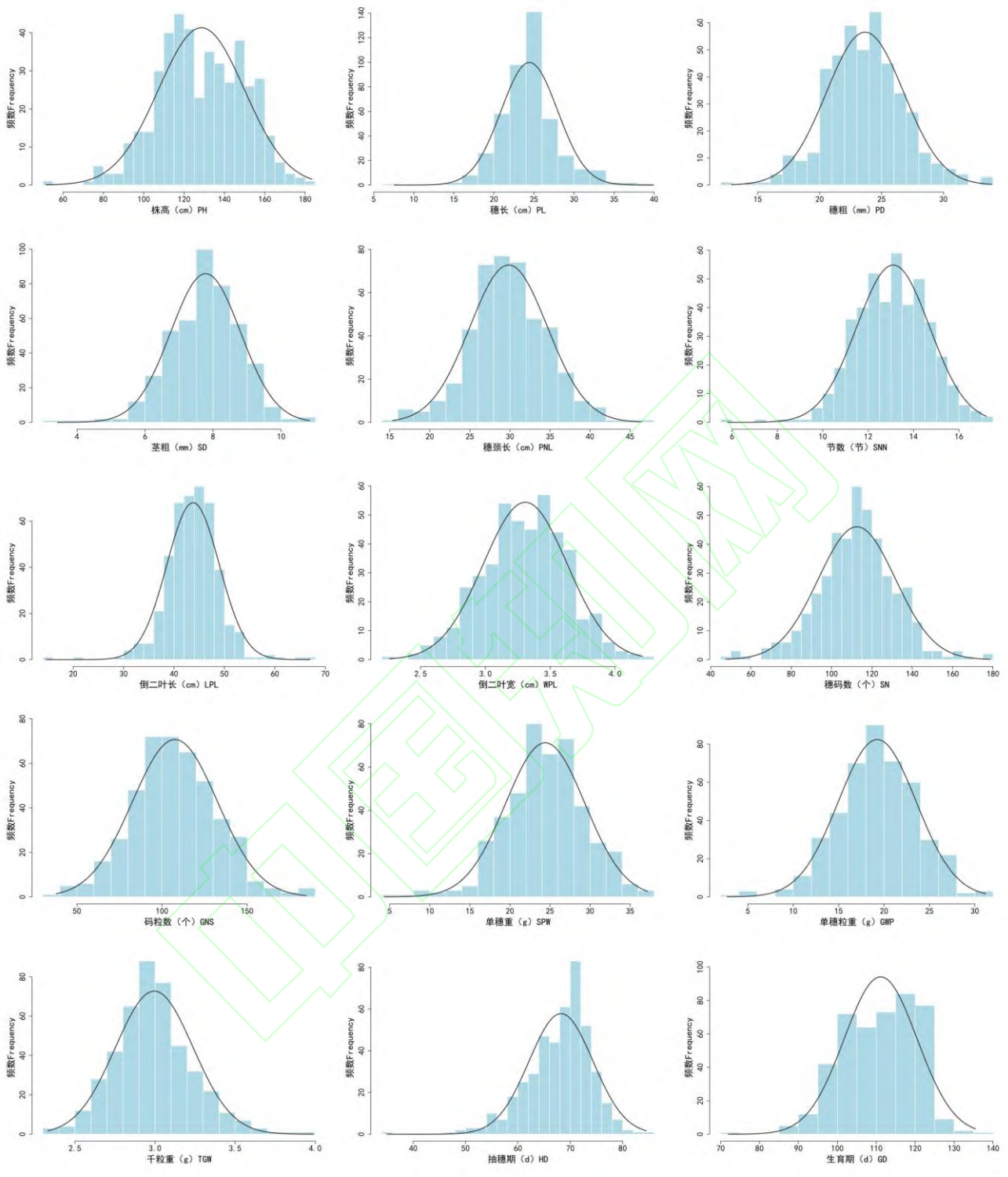
Table 2 Diversity analysis of qualitative traits

质量性状	频率（%） Frequency							遗传多样性指数
Qualitative traits	1	2	3	4	5	6	7	*H'*
叶鞘色 LSC	75.11	9.05	15.84	—	—	—	—	0.7242
穗型 PT	—	60.18	30.09	9.50	—	0.23	—	0.9044
穗颈姿态 PNP	1.36	7.01	80.77	10.86	—	—	—	0.6583
花药颜色 AC	36.88	62.67	0.45	—	—	—	—	0.6852
刚毛颜色 BC	81.67	—	18.33	—	—	—	—	0.4763
刚毛长度 BL	—	—	35.52	—	50.00	—	14.48	0.9940
粒色 GC	33.71	57.01	2.26	4.30	1.36	1.36	—	1.0246
米色 EC	0.45	2.04	1.13	96.38	—	—	—	0.1900

2.1.2 **数量性状多样性** 442 份谷子育成品种（系）的 15 个数量性状频率分布结果表明（图 1），所有性状均呈连续分布。各性状变幅较大，种质类型丰富（表 3），主要表现为株高平均值为 128.57 cm，变幅为 51.54 cm（太选谷 29 矮）至 183.34 cm（长分 3 号）；穗长平均值为 24.43 cm，变幅为 7.57 cm（太选谷 29 矮）至 39.90 cm（太选谷 29-2）；单穗粒重平均值为 19.25 g，变幅为 2.72 g（太选谷 29 矮）至 31.20 g（金谷 4 号）；千粒重平均值为 2.99 g，变幅为 2.33 g（龙辐 60533）至 3.99 g（大同 39）；生育期平均值为 111.12 d，变幅为 72.00 d（太选谷 29 矮）至 135.50 d（2022-1）。

遗传多样性分析进一步表明，数量性状遗传多样性指数变化范围为 1.9613～2.0865，其中倒二叶宽最高，穗长最低。除穗长、倒二叶长外，其余 13 个性状遗传多样性指数均大于 2.0000。各性状变异系数范围为 8.09%～23.18%，其中码粒数变异系数最高，千粒重变异系数最低；码粒数、单穗重、单穗粒重变异系数高于 20%，表明其遗传改良潜力较大；倒二叶宽、千粒重、抽穗期、生育期变异系数小于 10%，表明其遗传稳定。

以上结果表明，442 份谷子育成品种（系）在数量性状上存在明显差异，多样性丰富，为后续育种改良提供宝贵的材料基础。



PH: Plant height; PL: Panicle length; PD: Panicle diameter; SD: Stem diameter; PNL: Panicle neck length; SNN: Stem node number; LPL: Length of penultimate leaf; WPL: Width of penultimate leaf; SN: Spikelet number; GNS: Grain number per spikelet; SPW: Single panicle weight; GWP: Grain weight per panicle; TGW: Thousand-grain weight; HD: Heading date; GD: Growth duration; The same as below

图 1 数量性状频次分布

Fig. 1 Frequency distribution of quantitative traits

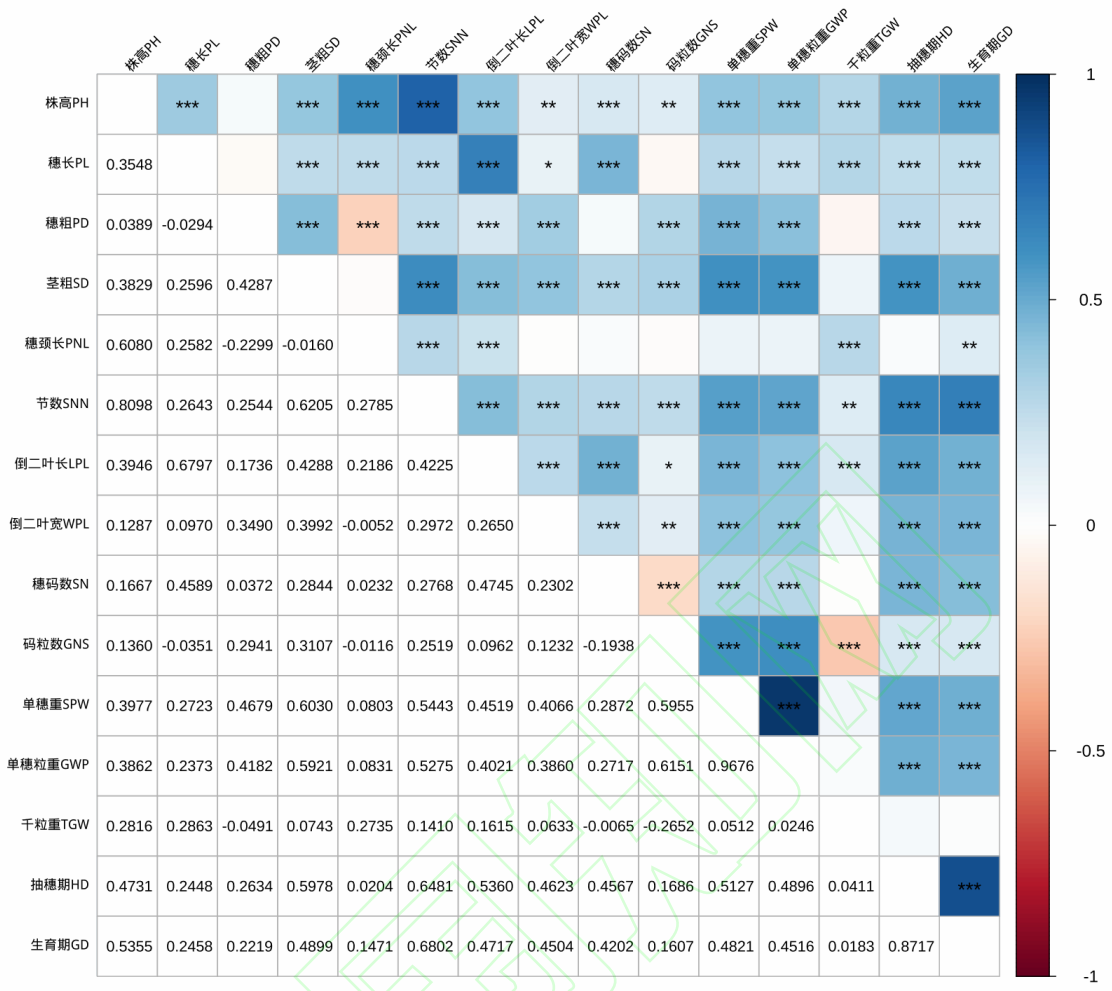
表 3 数量性状多样性分析

Table 3 Diversity analysis of quantitative traits

数量性状 Quantitative traits	平均值 Mean	标准差 *SD*	变幅 Range	变异系数（%） *CV*	遗传多样性指数 *H'*
株高（cm）PH	128.57	21.32	51.54~183.34	16.58	2.0617
穗长（cm）PL	24.43	3.53	7.57~39.90	14.46	1.9613
穗粗（mm）PD	23.66	3.12	12.90~33.90	13.18	2.0517
茎粗（mm）SD	7.78	1.03	3.43~10.83	13.19	2.0403
穗颈长（cm）PNL	29.84	4.84	15.36~46.36	16.23	2.0707
节数 SNN	13.10	1.61	5.80~17.20	12.26	2.0405
倒二叶长（cm）	43.78	5.18	14.61~66.96	11.84	1.9846
倒二叶宽（cm）	3.31	0.32	2.26~4.21	9.81	2.0865
穗码数 SN	112.54	19.15	47.63~178.63	17.01	2.0405
码粒数 GNS	107.58	24.94	37.87~184.50	23.18	2.0739
单穗重（g）SPW	24.41	4.95	4.33~37.17	20.28	2.0456
单穗粒重（g）	19.25	4.28	2.72~31.20	22.24	2.0626
千粒重（g）TGW	2.99	0.24	2.33~3.99	8.09	2.0284
抽穗期（d）HD	68.22	6.10	35.00~84.50	8.94	2.0246
生育期（d）GD	111.12	9.36	72.00~135.50	8.43	2.0493

2.2 相关性分析

对 15 个数量性状进行相关性分析分析变量间关系发现，有 81 对呈极显著正相关，3 对呈极显著负相关，各数量性状之间存在不同程度的相关性（图 2）。其中，单穗重与单穗粒重相关系数最大（$r=0.9676$），抽穗期与生育期（$r=0.8717$）、株高与节数（$r=0.8098$）次之。相关系数大于 0.50 的极显著正相关性状对包括株高与穗颈长、节数、生育期；穗长与倒二叶长；茎粗与节数、单穗重、单穗粒重、抽穗期；节数与单穗重、单穗粒重、抽穗期、生育期；倒二叶长与抽穗期；码粒数与单穗重、单穗粒重；单穗重与单穗粒重、抽穗期；抽穗期与生育期。同时，千粒重与多数性状相关性较弱，表明其变异相对独立；码粒数与千粒重（-0.2652）、穗粗与穗颈长（-0.2299）、穗码数与码粒数（-0.1938）呈极显著负相关。



*，**，***分别表示在 P<0.05，P<0.01，P<0.001 水平上显著相关

*，**，***indicate significant correlation at the P<0.05, P<0.01, and P<0.001 levels, respectively

图 2 数量性状相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of quantitative traits

2.3 主成分分析及综合评价

对 15 个数量性状进行 KMO 和 Bartlett 球形检验（KMO = 0.762，$P < 0.001$），确认数据适合进行主成分分析，提取特征值大于 1 的主成分，前 5 个主成分累积贡献率达 78.46%（表 4）。主成分 1 特征值 5.83，贡献率 38.87%，其中单穗重、节数、抽穗期、单穗粒重、生育期、茎粗载荷较高；主成分 2 特征值 2.24，贡献率 14.96%，其中穗颈长、穗长、千粒重正向载荷较高，码粒数、穗粗负向载荷较高。主成分 3 特征值 1.52，贡献率 10.12%，以穗颈长、码粒数正向载荷，穗码数负向载荷为主。主成分 4 特征值 1.17，贡献率 7.77%，以穗长正向载荷，生育期负向载荷为主；主成分 5 特征值 1.01，贡献率 6.74%，千粒重载荷较高。

基于 5 个主成分贡献率，计算各主成分权重 W_i 分别为：0.50、0.19、0.13、0.10、0.09。对各主成分得分进行 Min-Max 标准化$\mu(X_i)$，计算综合评价 F 值。$F = \mu(X_1) \times 0.50 + \mu(X_2) \times 0.19 + \mu(X_3) \times 0.13 +$

$\mu(X_4)$ ×0.10+ $\mu(X_5)$ ×0.09。442 份谷子育成品种（系）表型性状综合评价 *F* 值范围为 0.2099～0.8549，平均 *F* 值为 0.6138。综合评价 *F* 值前 20 的种质依次是 2017 K 测 1、金谷 4 号、2014 延安引、晋谷 34 号/K7013、2020 测 18、06-213、沁黄 3 号、368、太选谷 29-2、06-162、南 1042、晋谷 59 号、晋谷 34 号、白谷 9 号、晋谷 36 号早、南 1070、海鉴 8、沁黄 2 号、长农 41、晋品谷 7 号。对综合评价 *F* 值与 15 个数量性状进行相关性分析，发现其与所有性状均呈极显著正相关。其中，与株高（$r=0.7927$）、节数（$r=0.7025$）、倒二叶长（$r=0.6641$）、穗长（$r=0.6413$）、单穗重（$r=0.6388$）、单穗粒重（$r=0.6103$）的相关性较高，表明这些性状是影响综合评价结果的关键指标。

表 4 数量性状的主成分载荷矩阵

Table 4 Principal component loading matrix of quantitative traits

性状	主成分 Principal component				
Tiaits	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
株高 PH	0.6649	0.4369	0.4554	-0.2290	-0.0493
穗长 PL	0.4669	0.5183	-0.1838	0.5526	-0.0660
穗粗 PD	0.4182	-0.5428	-0.0939	0.0595	0.3984
茎粗 SD	0.7569	-0.1920	-0.0597	-0.0213	0.1472
穗颈长 PNL	0.2273	0.5962	0.5577	-0.0131	-0.0732
节数 SNN	0.8113	0.1318	0.2238	-0.3137	-0.0298
倒二叶长 LPL	0.6809	0.3124	-0.2380	0.3515	-0.0953
倒二叶宽 WPL	0.5246	-0.2003	-0.2709	-0.1825	0.3692
穗码数 SN	0.4772	0.2793	-0.6009	0.1273	-0.2456
码粒数 GNS	0.3878	-0.5959	0.4647	0.2259	-0.2633
单穗重 SPW	0.8200	-0.3390	0.1689	0.2818	0.0075
单穗粒重 GWP	0.7930	-0.3564	0.2007	0.2743	-0.0290
千粒重 TGW	0.1407	0.5107	0.1631	0.1503	0.7195
抽穗期 HD	0.8100	0.0152	-0.2680	-0.3518	-0.0777
生育期 GD	0.7870	0.0813	-0.1697	-0.4241	-0.1327
特征值 Eigenvalue	5.83	2.24	1.52	1.17	1.01
方差贡献率（%）Contribution rate	38.87	14.96	10.12	7.77	6.74
累积贡献率（%）Cumulative contribution rate	38.87	53.84	63.95	71.72	78.46

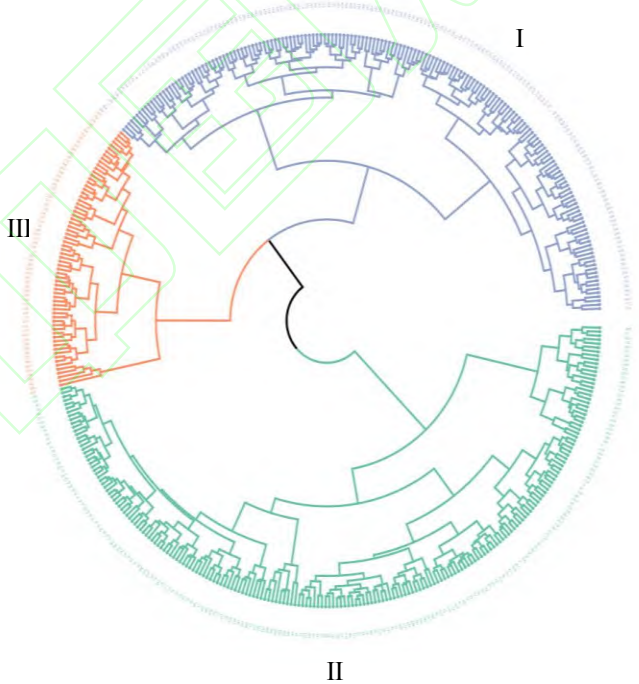
2.4 聚类分析

采用 Ward 法对 442 份育成品种（系）的 15 个数量性状进行系统聚类，共划分为 3 个类群（图 3）。进一步方差分析表明，不同类群数量性状差异显著（表 5）。

类群I包含豫谷 1 号、朝谷 35、赤谷 16、大同 45、中谷 19 等 169 份种质。该类群穗粗（24.88 mm）、码粒数（109.74 个）平均值最高，株高（114.10 cm）、穗颈长（26.40 cm）平均值最低，其余性状平均值居于中等；各性状变异系数中等。综合来看，该类种质整体性状适中，属中间型。

类群II包含 2017 K 测 1、金谷 4 号、2014 延安引、晋谷 34 号/K7013、2020 测 18 等 205 份种质。该类群除穗粗（23.39 mm）、码粒数（109.31 个）外，其余性状平均值最高，其中株高、穗长、穗颈长、节数、倒二叶长、倒二叶宽、穗码数、单穗重、单穗粒重、千粒重、抽穗期、生育期平均值显著高于其他两个类群；各性状变异系数中等。综合来看，该类种质整体株高较高、生育期较长，属高秆晚熟型。

类群III包含九谷 19、公谷 60、公谷 70、嫩选 16、龙 11-7004 等 68 份种质。该类群除株高（116.10 cm）、穗颈长（30.10 cm）平均值为中等外，其余性状平均值均最低，其中穗粗、茎粗、节数、倒二叶长、倒二叶宽、穗码数、码粒数、单穗重、单穗粒重、抽穗期、生育期平均值显著低于其他两个类群；大部分性状变异系数较高。综合来看，该类种质整体生育期较短，属早熟型。



数字编号同附表 1

The numerical codes are as in Supplementary Table S1

图 3 442 份谷子育成品种（系）聚类图

Fig. 3 Cluster dendrogram of 442 foxtail millet varieties (lines)

表 5 不同类群数量性状平均值及变异系数

Table 5 Mean values and coefficients of variation of quantitative traits of different groups

性状 Traits	类群I Group I		类群II Group II		类群III Group III	
	平均值 Mean	变异系数（%） *CV*	平均值 Mean	变异系数（%） *CV*	平均值 Mean	变异系数（%） *CV*
株高（cm）PH	114.10^{b}	14.08	144.64^{a}	9.71	116.10^{b}	14.10
穗长（cm）PL	23.38^{b}	11.57	25.90^{a}	13.50	22.58^{b}	16.32
穗粗（mm）PD	24.88^{a}	12.74	23.39^{b}	10.88	21.48^{c}	15.00
茎粗（mm）SD	7.91^{a}	11.26	8.09^{a}	10.31	6.52^{b}	14.43
穗颈长（cm）PNL	26.40^{c}	14.48	32.59^{a}	12.29	30.10^{b}	13.15
节数 SNN	12.53^{b}	9.04	14.14^{a}	8.71	11.38^{c}	12.52
倒二叶长（cm）LPL	42.74^{b}	9.40	46.33^{a}	9.44	38.68^{c}	13.94
倒二叶宽（cm）WPL	3.33^{b}	7.56	3.41^{a}	9.15	2.93^{c}	8.19
穗码数 SN	112.29^{b}	13.77	119.06^{a}	14.45	93.51^{c}	21.79
码粒数 GNS	109.74^{a}	23.25	108.31^{a}	21.17	100.00^{b}	28.10
单穗重（g）SPW	24.50^{b}	19.09	26.18^{a}	15.00	18.85^{c}	22.86
单穗粒重（g）GWP	19.42^{b}	20.96	20.62^{a}	17.11	14.70^{c}	25.78
千粒重（g）TGW	2.94^{b}	6.90	3.06^{a}	8.52	2.94^{b}	7.81
抽穗期（d）HD	68.07^{b}	5.33	71.53^{a}	6.17	58.63^{c}	8.63
生育期（d）GD	109.23^{b}	5.61	117.14^{a}	5.82	97.68^{c}	6.35

不同字母表示不同类群差异显著（$P < 0.05$）

Different letters indicate significant differences among groups ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 谷子育成品种（系）在山西的遗传多样性

通过表型性状多样性评价筛选种质资源是种质创新、遗传改良的基础[24-26]。育成品种（系）作为现代育种成果的集中体现，其变异丰富度是后续育种突破的前提。本研究对 442 份谷子育成品种（系）的遗传变异水平进行了系统分析，发现其在山西具有较高的表型多样性。其中，米色遗传多样性指数最低（$H'=0.1900$），反映了育成品种（系）在该性状上的高度一致性。13 个数量性状的遗传多样性指数大于 2.0000，显示出广

泛的遗传变异。这一结果与黄蕊等[16]对 603 份山西地方种质和吕建珍等[20]对 264 份育成品种（系）的研究结果相似，且多数数量性状的多样性指数高于刘思辰等[17]、翟海翔等[19]对山西地方种质的研究结果。这表明育成品种（系）同样具有丰富的遗传多样性，且数量性状具有更丰富的选择潜力，因此被确定为后续分析的重点[27]。这些育成品种（系）为在山西开展优异资源发掘和拓宽遗传基础提供材料支撑。

3.2 谷子育成品种（系）综合评价

性状间的相互关系是进行协同选择的关键。相关性分析共检测到 81 对极显著正相关，3 对极显著负相关，揭示了 15 个数量性状间存在复杂的遗传关联。其中，单穗重与单穗粒重表现出最强的正向协同变异（$r = 0.9676$），与袁迪等[13]、黄蕊等[16]和吕建珍等[20]结果一致。研究发现，株高与除穗粗外的其他性状均呈极显著正相关，与赵雅杰等[28]发现的株高与穗粗、茎粗、千粒重呈显著负相关结果不同，推测是由本研究特定的材料及生态环境不同所致。

主成分分析结合隶属函数分析是进行种质资源综合评价的重要方法[25-26, 29]。对 15 个数量性状进行主成分分析，提取了 5 个主成分（累计贡献率 78.46%），涵盖了原始性状的大部分信息。基于此构建的综合评价 F 值显示，供试材料的平均得分为 0.6138，高于 264 份国内主要谷子育成品种（系）在山西的平均得分（0.529）[20]和山西地方谷子种质的平均得分（0.516、0.41）[16, 19]。其中，221 份材料（50.00%）综合评价 F 值超过平均值，表明半数育成品种（系）的综合表现优良。值得注意的是，综合排名前 20 的种质中有 15 份为山西省育成品种（系），这可能与谷子的本地适应性密切相关，可作为核心亲本用于后续遗传改良。此外，群体中还存在一些综合得分不占优势但有特色的材料，如株高最矮、生育期最短的太选谷 29 矮，多种特殊粒色米色材料，如峰红谷（红谷黄米）、汾特 6 号（黑谷黄米）、太选谷 26（灰谷灰绿米）等和穗型（2022-1（猫爪型）材料，这些种质为特色育种和基础研究提供了宝贵的遗传资源。

3.3 谷子育成品种（系）类群划分及利用

聚类分析将 442 份育成品种（系）划分为 3 个性状差异显著的类群。地理分布显示，95.45%的北京材料集中分布在类群I，75.11%的山西材料主要分布在类群II，呈现一定的地理聚类特征，与前人基于分子标记得出的结论相似[30-31]。其余地区来源材料在各类群分布较为分散，与地理来源无明显关联。

在农艺性状方面，类群I、类群II整体性状表现优于类群III。类群I表现为性状均衡的中间型，种质来源广泛，包含了供试的 12 个省市自治区的部分材料，可作为稳产、广适品种选育的亲本材料。类群II表现为高秆、大穗、晚熟，是选育高产、饲草品种的优良亲本。其中，山西材料在该类群中占比 82.44%，表明高秆晚熟是山西育成品种（系）的主要特征。尽管中矮秆化是谷子产业发展的必然趋势[2]，但该类群种质的高生物量是保障山西丘陵旱地产量的关键，在株高改良时应因地制宜。类群III以中矮秆、早熟种质为主，性状变异系数较高，遗传改良潜力大。来自内蒙古、山西和黑龙江的种质占比较高（79.41%），其矮秆与早熟特性为山西谷子株高、熟期与生态适应性改良提供关键材料。

综上所述，本研究通过对 442 份谷子育成品种（系）的表型遗传多样性分析，为山西谷子拓宽遗传基础、培育突破性品种提供了理论依据。然而，表型性状易受环境因素影响，难以全面反映遗传变异，且个别育成品种（系）存在同种异名等问题，后续研究应结合分子标记技术，从基因组层面进行更精准的鉴定与评价。

参考文献

[1] Yang X Y, Wan Z W, Perry L, Lu H Y, Wang Q, Zhao C H, Li J, Xie F, Yu J C, Cui T X, Wang T, Li M Q, Ge Q S. Early millet use in northern China . Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(10): 3726-3730

[2] 刁现民, 王立伟, 智慧, 张俊, 李顺国, 程汝宏. 谷子中矮秆资源创制、遗传解析和育种利用. 作物学报, 2024, 50(2): 265-279

Diao X M, Wang L W, Zhi H, Zhang J, Li S G, Cheng R H. Development, genetic deciphering, and breeding utilization of dwarf lines in foxtail mille. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(2): 265-279

[3] 刁现民. 禾谷类杂粮作物耐逆和栽培技术研究新进展. 中国农业科学, 2019, 52(22): 3943-3949

Diao X M. Progresses in stress tolerance and field cultivation studies of orphan cereals in china. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22): 3943-3949

[4] 刁现民. 育种创新造就谷子种业新发展.中国种业, 2022(4): 4-7

Diao X M. Breeding innovation creates new development of millet seed industry. China Seed Industry, 2022(4): 4-7

[5] 梁红凯, 赵苏蒙, 陆琼, 周鹏, 智慧, 刁现民, 贺强. 谷子微核心种质的构建. 作物学报, 2025, 51(6): 1435-1444

Liang H K , Zhao S M, Lu Q, Zhou P, Zhi H, Diao X M, He Q. A mini core collection of foxtail millet. Acta Agronomic Sinica. 2025, 51(6): 1435-1444

[6] 贾俊婷, 戴彰言, 吉浴芳, 吴志媛, 高家东, 张文虎, 吴柔贤, 刘军. 广东大蒜种质资源系统收集与鉴定评价. 植物遗传资源学报, 2025, 26(10): 1902-1915

Jia J T, Dai Z Y, Ji Y F, Wu Z Y, Gao J D, Zhang W H, Wu R X, Liu J. Systematic field collection and identification of garlic (*Allium sativum* L.) in Guangdong. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(10): 1902-1915

[7] 王红梅, 杨天育, 董孔军, 何继红, 张磊, 陈玉梁, 刘新星, 李忠旺, 任瑞玉. 96 份谷子种质资源淀粉多样性及优异资源鉴选利用. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 13-21

Wang H M, Yang T Y, Dong K J, He J H., Zhang L, Chen Y L, Liu X X, Li Z W, Ren R Y. Diversity of starch and excellent resource selection and utilization in 96 foxtail millet germplasm resources. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 13-21

[8] 姚祝芳, 张雄坚, 杨义伶, 黄立飞, 陈新亮, 姚肖健, 罗忠霞, 陈景益, 王章英, 房伯平. 177 份甘薯地方资源表型性状的遗传多样性分析. 作物学报, 2022, 48(9): 2228-2241

Yao Z F, Zhang X J, Yang Y L, Huang L F, Chen X L, Yao X J, Luo Z X, Chen J Y, Wang Z Y, Fang B P. Genetic diversity of phenotypic traits in 177 sweetpotato landraces. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(9): 2228-2241

[9] 常利芳, 李欣, 郭慧娟, 乔麟轶, 张树伟, 陈芳, 畅志坚, 张晓军. 小偃麦衍生系表型遗传多样性分析及综合评价. 草业学报, 2022, 31(11): 61-74

Chang L F, Li X, Guo H J, Qiao L Y, Zhang S W, Chen F, Chang Z J, Zhang X J. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of octoploid

Tritipyrum-derived wheat breeding lines based on agronomic traits. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(11): 61-74

[10] 李玉姗, 肖菁, 马越, 田超, 赵连佳, 王帆, 宋羽, 蒋程瑶. 169 份番茄种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价. 中国农业科学, 2024, 57(18): 3671-3683

Li Y S, Xiao J, Ma Y, Tian C, Zhao L J, Wang F, Song Y, Jiang C Y. Identification and evaluation of phenotypic characters and genetic diversity analysis of 169 tomato germplasm resources. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(18): 3671-3683

[11] 周珊, 黄玉新, 段维兴, 高轶静, 杨翠芳, 周忠凤, 陆衫羽, 张革民, 张保青. 国内甘蔗种质资源表型性状的遗传多样性分析. 热带作物学报, 2023, 44(6): 1123-1134

Zhou S, Huang Y X, Duan W X, Gao Y J, Yang C F, Zhou Z F, Lu S Y, Zhang G M, Zhang B Q. Genetic diversity assessment of sugarcane native of domestic with phenotypic traits. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(6): 1123-1134

[12] 杨朋娟, 张世文, 王振山, 闫留延, 张小梅, 桑璐曼, 王慧洁, 祖超凡, 何占祥, 贾小平, 白俊艳. 多环境评估谷子资源主要农艺性状遗传参数. 植物遗传资源学报, 2022, 23(4): 1046-1054

Yang P J, Zhang S W, Wang Z S, Yan L Y, Zhang X M, Sang L M, Wang H J, Zu C F, He Z X, Jia X P, Bai J Y. Genetic parameters estimation of main agronomical Traits of foxtail millet germplasm resources under multiple environments. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(4): 1046-1054

[13] 袁迪, 智慧, 王海岗, 张慧, 姚琦, 梁红凯, 王君杰, 陈凌, 刁现民, 贾冠清. 我国谷子登记品种遗传多样性分析及综合评价. 作物杂志, 2024(4): 14-23

Yuan D, Zhi H, Wang H G, Zhang H, Yao Q, Liang H K, Wang J J, Chen L, Diao X M, Jia G Q. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of registered varieties of foxtail millet in China. Crops, 2024(4): 14-23

[14] 薛亚鹏, 王蓉, 柴小娇, 王若楠, 王倩, 刘少雄, 王瑞云, 刘敏轩. 谷子四大名米品种群农艺及品质性状评价与亲缘关系分析. 植物遗传资源学报, 2024, 25(4): 544-561

Xue Y P, Wang R, Chai X J, Wang R N, Wang Q, Liu S X, Wang R Y, Liu M X. Evaluation of agronomic and quality traits in four famous landraces groups of foxtail millet and relationship analysis. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(4): 544-561

[15] 孟帅, 范光宇, 赵治海, 段海峰, 刘贵河, 刘东霞. 181 份谷子资源农艺性状分析. 草地学报, 2024, 32(9): 2943-2951

Meng S, Fan G Y, Zhao Z H, Duan H F, Liu G H, Liu D X. Agronomic trait analysis of 181 foxtail millet resources. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9): 2943-2951

[16] 黄蕊, 阳世杰, 王杨, 冯链, 潘怡敏, 王海岗. 山西谷子种质资源表型性状鉴定及综合评价. 核农学报, 2024, 38(10): 1887-1896

Huang R, Yang S J, Wang Y, Feng L, Pan Y M, Wang H G. Identification and comprehensive evaluation of phenotypic traits of Shanxi foxtail millet germplasm resources. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(10): 1887-1896

[17] 刘思辰, 曹晓宁, 温琪汾, 王海岗, 田翔, 王君杰, 陈凌, 秦慧彬, 王纶, 乔治军. 山西谷子地方品种农艺性状和品质性状的综合评价. 中国农业科学, 2020, 53(11): 2137-2148

Liu S C, Cao X N, Wen Q F, Wang H G, Tian X, Wang J J, Chen L, Qin H B, Wang L, Qiao Z J. Comprehensive evaluation of agronomic traits and quality

traits of foxtail millet landrace in Shanxi. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(11): 2137-2148

[18] 潘怡敏, 阳世杰, 黄蕊, 侯森, 王海岗. 山西谷子地方品种的品质分析与综合质量评估. 山西农业大学学报:自然科学版, 2025, 45(4): 16-26

Pan Y M, Yang S J, Huang R, Hou S, Wang H G. Quality analysis and comprehensive quality evaluation of foxtail millet landraces in Shanxi. Journal of Shanxi Agricultural University : Natural Science Edition, 2025, 45(4): 16-26

[19] 翟海翔, 黄蕊, 秦慧彬, 侯森, 穆志新, 王海岗. 山西省谷子种质资源收集与多样性分析. 植物遗传资源学报, 2025, 26(11): 2109-2117

Zhai H X, Huang R, Qin H B, Hou S, Mu Z X, Wang H G. Collection and diversity analysis of Shanxi foxtail millet germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(11): 2109-2117

[20] 吕建珍, 任莹, 王宏勇, 张庭军, 马建萍, 赵凯. 264 份谷子主要育成品种（系）表型多样性综合评价. 作物杂志, 2022(4): 22-31

Lyu J Z, Ren Y, Wang H Y, Zhang T J, Ma J P, Zhao K. Comprehensive phenotype evaluation of 264 major foxtail millet bred varieties (Lines). Crops, 2022(4): 22-31

[21] 刁现民, 李伟, 赵治海, 智慧, 张文英, 王永芳, 王鹏. NY/T 2425-2013 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 谷子. 北京：中华人民共和国农业部, 2013

Diao X M, Li W, Zhao Z H, Zhi H, Zhang W Y, Wang Y F, Wang P. NY/T 2425-2013 Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability—foxtail millet. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2013

[22] 曹雪莲, 陈影, 王迪, 唐杰, 谢丽源, 刘理旭. 毛木耳种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价. 核农学报, 2025, 39(2): 228-241

Cao X L, Chen Y, Wang D, Tang J, Xie L Y, Liu L X. Genetic diversity and comprehensive evaluation of the phenotypic characteristics of auricularia cornea germplasm resources. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(2): 228-241

[23] 钱景扬, 卢莉莉, 李芹, 汤寓涵, 陶俊, 赵大球. 中国芍药品种资源表型性状多样性分析. 园艺学报, 2025, 52 (2): 349-364

Qian J Y, Lu L L, Li Q, Tang Y H, Tao J, Zhao D Q. Diversity analysis of phenotypic traits for chinese herbaceous peony cultivar resources. Acta Horticulturae Sinica, 2025, 52(2): 349-364

[24] 金京花, 李淑芳, 赵亚东, 王迪, 张妤, 金国光, 李鹤南, 全成哲, 张强. 1775 份水稻种质资源重要农艺性状遗传多样性研究. 植物遗传资源学报, 2025, 26(3): 481-49

Jin J H, Li S F, Zhao Y D, Wang D, Zhang Y, Jin G G, Li H N, Quan C Z, Zhang Q. Study on important agronomic characters and genetic diversity of 1775 rice germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(3): 481-495

[25] 彭任文, 孙丽萍, 赵朝森, 厉苏宁, 王小翠, 徐将, 王勇军, 吴佳姗, 赵现伟, 郭兵福. 北美大豆种质资源农艺性状分析与优异种质筛选. 植物遗传资源学报, 2025, 26(10): 1928-1941

Peng R W, Sun L P, Zhao C S, Li S N, Wang X C, Xu J, Wang Y J, Wu J S, Zhao X W, Guo B F. Comprehensive analysis of agronomic traits and screening of elite soybean germplasm resources in North America. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(10): 1928-1941

[26] 余波, 江谧, 卢晶, 倪粤龙, 李强, 吴琪, 彭镰心, 任远航. 甘孜州青稞种质资源遗传多样性及综合品质分析. 麦类作物学报, 2025, 45(9): 1190-1203

Yu B, Jiang M, Lu J, Ni Y L, Li Q, Wu Q, Peng L X, Ren Y H. Genetic diversity and comprehensive quality analysis of highland barley germplasm resources in Ganzi prefecture. Journal of Triticeae Crops, 2025, 45(9): 1190-1203

[27] 张磊磊, 范阿棋, 洪梅, 马志华, 陈晋瑞, 赵双印, 郑凯, 吐尔逊•吐尔洪. 647 份海岛棉种质资源遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2023, 24(1): 307-316

Zhang L L, Fan A Q, Hong M, Ma Z H, Chen J R, Zhao S Y, Zheng K, Tu'er-xun T E H. Genetic diversity analysis of 647 sea island cotton germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(1): 307-316

[28] 赵雅杰, 温蕊, 贾祎明, 金晓蕾, 张永虎, 张利俊, 张彪, 张慧, 于立霞. 谷子种质资源表型性状遗传多样性分析. 作物杂志, 2025(2) : 61-69

Zhao Y J, Wen R, Jia Y M, Jin X L, Zhang Y H, Zhang L J, Zhang B, Zhang H, Yu L X. Analysis of genetic diversity of phenotypic traits of foxtail millet germplasm resources. Crops, 2025(2): 61-69

[29] 旺姆, 卓嘎, 扎桑, 西若曲宗, 达瓦顿珠, 郭刚刚, 张京, 卓嘎, 伦珠朗杰. 基于 6 个表型性状的青稞种质遗传多样性分析及综合评价. 作物学报, 2025, 51(6): 1526-1537

Wang M, Zhuo G, Zha S, Xiruo Q Z, Dawa D Z, Guo G G, Zhang J, Zhuo G, Lhundrup N. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of Qingke germplasm based on six phenotypic traits. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(6): 1526-1537

[30] 秦岭, 于淑婷, 杨延兵, 陈二影, 孔清华, 管延安. 1980s-2010s 华北夏谷区主栽谷子品种 SSR 遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2019, 20(01): 221-228

Qin L, Yu S T, Yang Y B, Chen E Y, Kong Q H, Guan Y A. Genetic diversity analysis of foxtail millet varieties (*Setaria italica* L.) released from 1980s to 2010s in summer sowing region of north china using SSR markers. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(01): 221-228

[31] 丁银灯, 胡相伟, 聂石辉, 王仙, 冯国郡, 耿洪伟, 郭丁. 谷子种质资源表型及 SSR 遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2018, 19(6): 1210-1221

Ding Y D, Hu X W, Nie S H, Wang X, Feng G J, Geng H W, GUO D. Analysis of phenotypic traits and SSR genetic diversity of foxtailmillet germplasms. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(6): 1210-1221