

谷子苗期硒高效品种筛选及评价

邢国芳^{1,2}, 侯颖^{1,2}, 王浩^{1,2}, 任超^{1,2}, 马俊伟^{1,2}, 卢成达²

(¹ 杂粮种质资源创新与分子育种国家实验室(筹)/山西农业大学, 太原 030031; ² 山西农业大学农学院, 太谷 030801)

摘要: 谷子是抗逆性强且营养价值丰富的粮饲兼用作物。硒是人体和动物必需的微量元素, 适量的硒能促进作物生长发育和品质提升。本研究旨在探讨不同基因型的谷子苗期硒响应能力, 建立筛选与评价体系。对具有代表性的 205 份谷子核心资源的苗高、叶面积、茎粗、地上鲜重、地下鲜重、根冠比、主根长、根系总体积、根尖数、地上部硒含量和地下部硒含量等 11 个指标的硒响应系数进行相关性分析, 并采用隶属函数法综合评价不同品种的苗期硒响应能力, 筛选硒高效与硒低效品种, 在生理水平上分析其植株体内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的活性。结果表明, 205 份谷子种质资源可划分为 5 类, 其中 30 份材料属于硒高效品种, 49 份材料属于硒较高品种, 40 份属于硒中等效率品种, 32 属于硒较低品种, 54 份属于硒低效品种; 施加 0.5 mmol.L⁻¹ 的亚硒酸钠使谷子植株 SOD 和 POD 酶活性增强, CAT 酶活性降低。总之, 以综合指标评价谷子苗期硒高效品种的方法更为客观, 保护酶系统在谷子苗期硒响应中具有重要作用。

关键词: 谷子; 硒响应能力; 种质资源; 综合评价; 保护酶

Screening and Evaluation of Efficient Utilization of Selenium in Foxtail Millet at the Seedling Stage

XING Guo-fang^{1,2}, HOU Ying^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, REN Chao^{1,2}, MA Jun-wei^{1,2}, LU Cheng-da²

(¹National Laboratory of Minor Crops Germplasm Innovation and Molecular Breeding (in preparation)/ Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031;

²College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801)

Abstract: Foxtail millet (*Setaria italica*. L) is a vital crop that plants as food and fodder crop, with strong stress resistance and bundle of nutritional elements. Selenium (Se) is a component essential for human and animal cells, beneficial for plants growth and quality improvement. This study attempts to explore the ability of Se-responsive in foxtail millet and establish a corresponding evaluation system. We conducted the correlation analysis and principle component analysis based on 11 phenotypic indicators, including seedling height, leaf area, stem thickness, fresh weight of shoot, fresh weight of root, root length, total root length, root volume, apical number, shoot and root selenium content in 205 foxtail millet germplasm accessions. The membership function method was used to comprehensively evaluate the selenium responsiveness, and identify the genotypes showing Se efficient and Se deficient at the seedling stage. Furthermore, the enzymatic activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in shoot were analyzed between Se efficient and deficient varieties. 205 foxtail millet varieties were grouped into five categories. There were 30 high Se-efficient responsiveness accessions, 49, 40 and 32 with medium Se-efficient responsiveness accessions and 54 deficient accessions. Under 0.5 mmol.L⁻¹ Se treatment, the activities of SOD and POD were increased, whereas the activity of CAT was decreased. Collectively, the comprehensive index is more objective to evaluate the selenium efficient utilization of foxtail millet at

收稿日期: 2022-08-18

修回日期: 2022-09-18

网络出版日期:

URL:

第一作者主要研究方向为杂粮种质资源鉴定评价, E-mail: sxauxgf@126.com

通信作者: 卢成达, 研究方向为谷子高产高效栽培, E-mail: luchengdadeyouxiang@126.com

基金项目: 杂粮种质资源创新与分子育种国家实验室(筹)自主研发项目(编号 202204010910001-06); 山西省基础研究计划面上项目(20210302123364); 山西省回国留学人员科研资助项目(2021-071); 山西省现代农业产业技术体系建设(杂粮)(2022-03)

Foundation projects: Research Program Sponsored by National Laboratory of Minor Crops Germplasm Innovation and Molecular Breeding (in preparation) (No. 202204010910001-06), the Applied Basic Research Project of Shanxi Province (20210302123364), Shanxi Scholarship Council of China (2021-071), the Shanxi Agricultural Research System (Minor Crop) (2022-03)

the seedling stage, and the antioxidant enzymes activities of the plant are important for the responsiveness of foxtail millet to the Se treatment.

Key words: foxtail millet; the ability of responsiveness to selenium; germplasm resources; comprehensive evaluation; protective enzymes

谷子 (*Setaria italica* (L.) Beauv.)，是禾本科狗尾草属植物，又称粟，脱壳后称小米，其基因组小，约 430 Mb、二倍体，因其高效的光能利用，被称为 C4 光合作用的模式作物^[1]。谷子在中国农业生产史上发挥着举足轻重的作用，被誉为“中华民族的哺育作物”^[7-8]。另外，谷子具有抗旱、耐贫瘠、水分利用率高、适应性广，营养丰富均衡，饲草蛋白含量高等突出特点^[9-10]，被认为是未来应对水资源短缺的战略储备作物，建设可持续农业的生态作物以及改善人们膳食结构营养平衡的特色作物^[11-13]。

硒是对人类和动物健康非常重要的一种微量元素，具有强大的抗氧化特性，硒含量不足会导致机体免疫力下降，并引发多种疾病^[14]，据报道我国目前还有 51% 以上的地区土壤缺硒（总硒含量少于 0.5 mg/kg）^[15]，其中包括山西、陕西、河北、内蒙古等在内的严重缺硒地区占到 1/3^[16]。同时，人体自身不能合成硒，只有通过粮食及肉蛋等食物摄取一定量的硒^[17]。然而，由于硒和硫之间化学性质的相似性使得自然界中的硒被硫元素置换，形成了含硒的氨基酸、蛋白质、碳水化合物和其他生物活性化合物^[18,19]，从而导致粮食等天然食物中的硒含量较低。因此，必须通过外源生物富硒的方式提高作物硒含量，来维持我国人口膳食营养平衡迫在眉睫^[20]。

据报道，低浓度的硒可以促进作物的生产发育，而高浓度的硒则对作物造成毒害^[21,22]。关于作物硒高效品种的筛选和相关研究已有报道，但有关谷子硒高效资源的筛选鉴定研究较少，且大部分集中在不同的外源硒施加对谷子生理生化特性、产量品质等方面的影响^[23-26]。我国谷子资源丰富，位居世界第一^[27]。对谷子资源的鉴定评价是谷子优异基因的资源发掘和品种选育工作的首要基础^[28]。苑义川等^[29]采用隶属函数法对谷子苗期耐低磷种质进行了筛选与鉴定，樊瑀等^[30]采用隶属函数法对 35 份谷子资源萌发期抗旱性进行了综合评价，张笛等^[31]对 100 份谷子品种资源的萌发期耐盐性进行了评价分别筛选到了极端敏感与耐受的典型材料，为谷子育种提供了材料和基础。因此，本研究采用苗期水培方式，以 205 份谷子核心种质资源为材料，对亚硒酸钠处理下不同品种谷子的苗期性状（包括苗高、根长、叶面积等 11 个性状）所反应的硒响应能力进行了综合评价，以期筛选出谷子硒高效利用材料，为谷子硒高效品种的选育和机理研究提供依据，并为富硒谷子饲料生产提供材料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

由山西农业大学杂粮分子育种团队提供的 205 份谷子品种，在山西农业大学表型平台人工气候室进行种植。

1.2 试验设计

采用单因素设计，分别利用 0 (CK)、0.3 $\mu\text{mol/L}$ (T_1) 和 0.5 $\mu\text{mol/L}$ (T_2) 的硒营养液（溶质为亚硒酸钠）对不同遗传背景的 205 份谷子资源材料进行水培种植，设置 3 次生物学重复。具体方法为：挑选大小均匀一致、籽粒饱满、无霉变、无病虫害种子，随后将种子放置于垫有育苗棉的培养框（50 cm×35 cm）

中，覆膜，进行暗处理（1-2 d）。以种子露白作为发芽指标，发芽后去掉保鲜膜，每天用 Hoagland 溶液喷洒 1 次（1500 mL），进行光照培养（25/28℃，16 h 光照/8 h 黑暗）。长至一叶一心期（5 d）时，向水培盒（8 cm×12 cm）中移苗。移苗后，采用不同浓度硒营养液继续培育，待其长势出现差异（14 d）后测定相关性状并取材。

1.3 指标测定

苗高（Seedling Height, cm）：以茎上节根的着生点为起点至最长叶在谷子茎上的生长位置为终点，用直尺进行测定；叶面积（Leaf Area, cm²）：叶长×叶宽×0.785 来计算；茎粗（Diameter of Main Stem, mm）：用游标卡尺测得谷子主茎基部的读数；根长（Root Length, cm）：位于植株根系中间部位的根长度；地上鲜重（Aboveground fresh weight, g）：用天平称量茎基部与根系的节点以上的植株部分；地下鲜重（Underground fresh weight, g）：根系总重量；根冠比（Root-shoot ratio）：地下部鲜重/地上部鲜重。

选取 3 株长势均匀一致的材料，用蒸馏水将材料根系部分清洗干净，并保留完整的根系，通过 WinRhizo 软件对植株根系进行扫描分析，测定根系总体积（RootVolume）；根尖数（Tips）即根毛的数量。

以茎基部与根系的节点为分界，将植株划分成地上部和地下部，于 105℃ 杀青 30 min，85℃ 烘干箱中烘烤 36 h（至恒重），利用国家标准《食品中硒含量的测定（GB/T 5009-2003）》，采用原子荧光法测定谷子苗期地上部以及地下部的硒含量，具体方法参考唐玉霞等（2009）^[32]。超氧化物歧化酶（SOD）过氧化物酶（POD）和过氧化氢酶（CAT）含量的测定参考苑义川等（2019）^[29]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 和 GraphPad Prism 8 对所测数据进行图表分析，通过 SPSS 22.0 进行相关性分析、主成分分析、方差分析，显著性分析，使用 TBtools 进行聚类分析。

硒响应能力的综合评价

采用模糊隶属函数法对 205 份供试材料进行硒响应能力的综合评价，并参考苑义川^[24]的评价方法对硒响应相关指标进行综合分析。

硒响应系数=处理组的测量值/对照组的测量值 (1)

隶属函数计算：

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2)$$

$\mu(X_i)$ 代表第 i 个综合指标的隶属函数值， X_i 为第 i 个综合指标值； X_{max} 为第 i 个综合指标的最大值， X_{min} 为第 i 个综合指标的最小值。

综合指标的权重：

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^m P_i \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (3)$$

W_j 代表第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度及权重； P_j 为各品种第 j 个综合指标的贡献率。

硒响应能力综合评价值：

$$D = \sum_{i=1}^m [\mu(X_i) \times (W_i)] \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (4)$$

D 代表各品种经过亚硒酸钠处理后对硒响应的综合评价值。

2 结果与分析

2.1 不同品种单项指标硒响应能力系数的分析

通过对亚硒酸钠处理与对照下的苗期谷子表型测定发现，不同浓度的亚硒酸钠对谷子苗期表型性状的效应存在明显差异，在 0.3 mmol.L^{-1} 亚硒酸钠处理下，除了根系总体积和根尖数下降意外，其余性状均较对照有不同程度的提升；在 0.5 mmol.L^{-1} 亚硒酸钠处理下，除了组织硒含量升高外，9 个苗期性状指标的平均值较对照都呈现不同程度的下降趋势。所测定性状的变异系数介于 $20.07\% \sim 100.74\%$ ，且均大于 10% ，表明所选用谷子材料具有丰富的遗传变异。所测定性状的硒响应能力系数介于 $14.44\% \sim 77.51\%$ （表 1），表明谷子苗期不同表型性状对亚硒酸钠的响应能力不同。因此，采用单一或几个性状用于评价不同谷子品种的苗期硒响应能力并不准确，需进一步对多个性状进行综合评价及筛选。

表 1 不同品种谷子硒响应能力分析

Table 1 Selenium response ability analysis of different varieties of foxtail millet

指标	对照组			处理组 T ₁			硒响应能力系数 T ₁ /CK			处理组 T ₂			硒响应能力系数 T ₂ /CK		
	Control group			Handle group			Selenium Responsiveness Factor			Handle group			Selenium Responsiveness Factor		
Index	平均值	标准差	CV	平均值	标准差	CV	平均值	标准差	CV	平均值	标准差	CV	平均值	标准差	CV
	Mean	SD	(%)	Mean	SD	(%)	Mean	SD	(%)	Mean	SD	(%)	Mean	SD	(%)
苗高	12.527	3.486	27.83	13.968	3.629	25.98	1.132	0.166	14.66	11.519	3.328	28.89	0.934	0.196	20.99
根长	7.931	2.961	37.33	8.683	2.879	33.16	1.134	0.245	21.60	7.125	2.724	38.23	0.929	0.245	26.37
茎粗	1.186	0.238	20.07	1.273	0.245	19.25	1.087	0.157	14.44	1.106	0.232	20.98	0.944	0.148	15.68
叶面积	2.682	1.211	45.15	3.188	1.300	40.78	1.278	0.459	35.92	2.284	1.075	47.07	0.905	0.355	39.23
地上鲜重	0.110	0.057	51.82	0.121	0.062	51.24	1.185	0.497	41.94	0.093	0.054	58.06	0.923	0.511	55.36
地下鲜重	0.034	0.027	79.41	0.041	0.023	56.10	1.377	0.946	68.70	0.028	0.018	64.29	0.913	0.434	47.54
根冠比	0.348	0.219	62.93	0.375	0.254	67.73	1.230	0.948	77.07	0.332	0.190	57.23	1.031	0.424	41.13
根系总体积	0.271	0.273	100.74	0.194	0.217	111.86	0.965	0.512	53.06	0.121	0.192	158.68	0.716	0.555	77.51
根尖数	558.842	397.363	71.10	538.319	326.131	60.58	1.140	0.467	40.96	402.180	314.522	78.20	0.837	0.426	50.90
地上部硒含量	0.113	0.047	41.59	1.097	0.283	25.80	10.360	2.399	23.16	2.047	0.409	19.98	19.625	4.764	24.28
地下部硒含量	0.298	0.117	39.26	2.039	0.335	16.43	8.012	3.634	45.36	2.965	0.324	10.93	11.660	5.074	43.52

注：T₁ 为 0.3 mmol·L⁻¹ 处理条件，T₂ 为 0.5 mmol·L⁻¹ 处理条件

Note: T₁ means the content of sodium selenite is 0.3 mmol·L⁻¹, while T₂ means 0.5 mmol·L⁻¹.

2.2 谷子苗期硒响应指标的相关性分析

为了深入解析在 0.5 mmol.L⁻¹ 亚硒酸钠处理后谷子苗期各性状间的相关性，对所选的 11 个硒响应能力指标进行相关性分析。分析发现，株高与叶面积积极显著正相关，相关系数高达 0.802；根长和根尖数呈极显著正相关，相关系数达 0.503；茎粗与叶面积呈正极显著相关，其相关系数为 0.508；地下鲜重与根冠比呈正相关，相关系数达 0.712；此外，地上部硒含量与根长呈负相关，地下部硒含量与地上部硒含量呈正相关（表 2）。由于各单项指标之间的相关性较为明显，不同指标间存在一定的信息重叠，所以无法直接通过这些指标对谷子苗期表现复杂的硒响应能力进行综合评价，需要进一步将各项指标转化为少量互不相关的指标，以便更有效地筛选苗期硒响应能力强的谷子种质资源。

表 2 谷子苗期各性状(T₂/CK)硒响应指标的相关性显著分析

Table 2 Significant correlation analysis of Se response index of each character (T₂/CK) in foxtail millet at seedling stage

	SH	RL	DMS	LA	AFW	UFW	RSR	RootVolume	Tips	Se-Shoot	Se-Root
SH	1	0.345**	0.403**	0.802**	0.366**	0.392**	-0.019	0.091	0.117*	0.005	0.087
RL		1	0.210**	0.365**	0.203**	0.313**	0.097	0.369**	0.503**	-0.08	-0.108
DMS			1	0.508**	0.196**	0.296**	0.004	-0.045	0.035	0.019	0.025
LA				1	0.317**	0.376**	-0.032	0.124*	0.064	-0.021	0.005
AFW					1	0.380**	-0.135*	0.082	0.108	-0.02	-0.078
UFW						1	0.712**	0.033	0.101	-0.033	-0.056
RSR							1	-0.028	0.023	-0.01	0.013
Root Volume								1	0.537	-0.034	-0.087
Tips									1	-0.003	-0.043
Se-Shoot										1	0.378
Se-Root											1

注:图中颜色深浅代表相关性强弱，其中，红色表示正相关，蓝色代表负相关性。SH:苗高;RL:根长度;DMS:茎粗;LA:叶面积;AFW:地上鲜重;UFW:地下鲜重;RSR:根表面积。*和**分别表示在 P<0.05 和 P<0.01 水平差异显著。

Note: The color in the figure represents the strength of correlation, where red indicates positive correlation and blue represents negative correlation. SH: seedling height; RL: root length; DMS: diameter of main stem; LA: leaf area; AFW: aboveground fresh weight; UFW: underground fresh weight; RSR: root surface area. * and ** indicate significant differences at P < 0.05 and P < 0.01 levels, respectively.

2.3 谷子苗期硒响应指标的主成分分析

为将上面谷子苗期表现硒响应能力的性状指标数据缩减为少数有代表性的数据，从而减少分析过程并使误差降低，将上述 11 个硒响应相关性状转化为少量的有效指标，将 205 份供试种质各单项指标的硒响应能力系数作为基础数据进行主成分分析。结果将 11 个单项指标简化为 6 个主成分，其中主成分 1 包含了苗高系数等 9 个主要作用因子，主成分 2 包含根长系数等 3 个主要作用因子，主成分 3 包含地下鲜重系数等 4 个主要作用因子，主成分 4、5 和 6 分别包含 9、7 和 5 个主要作用因子，综合这 6 个主成分的累积贡献率达到 83.545%，能代表原有性状指标的大多数信息（表 3 和表 4）。因此，本研究将通过这 6 个主成分对谷子苗期硒响应能力进行综合评价。

表 3 各综合指标特征值及贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution rate of each comprehensive index

主成分	特征根	贡献率	累积贡献率
Principal componen	Characteristic root	Contributive ratio (%)	Cumulative contributive ratio (%)
1	3.098	28.166	28.166
2	1.736	15.783	43.949
3	1.542	14.017	57.966
4	1.062	9.655	67.621
5	0.976	8.874	76.495
6	0.776	7.050	83.545

表 4 各因子载荷矩阵

Table 4 Loading matrix of each factor

指标	因子载荷/Factor loading					
	1	2	3	4	5	6
苗高 SH	0.249	-0.162	-0.189	0.097	0.013	0.216
根长 RL	0.214	0.241	0.022	0.097	0.193	-0.066
茎粗 DMS	0.183	-0.192	-0.109	-0.214	0.297	0.163
叶面积 LA	0.255	-0.165	-0.197	-0.016	0.116	0.270
地上鲜重 AFW	0.168	-0.075	-0.143	0.056	-0.537	-0.778
地下鲜重 UFW	0.217	-0.151	0.399	0.092	-0.177	-0.110
根冠比 RSR	0.070	-0.078	0.603	0.105	0.014	0.167
根系总体积 RootVolume	0.108	0.423	-0.041	0.138	-0.079	0.192
根尖数 Tips	0.130	0.426	0.012	0.181	0.048	-0.024
地上部硒含量 Se-Shoot	-0.072	-0.128	-0.123	0.647	-0.436	0.497
地下部硒含量 Se-Root	-0.049	-0.126	-0.030	0.619	0.605	-0.457

注:SH:株高;RL:根长度;DMS:主杆直径;LA:叶面积;AFW:地上鲜重;UFW:地下鲜重;RSR:根表面积;

Note: SH: seedling height; RL: root length; DMS: diameter of main stem; LA: leaf area; AFW: aboveground fresh weight; UFW: underground fresh weight; RSR: root surface area;

2.4 谷子苗期硒响应能力的综合评价

2.4.1 隶属函数鉴定品种硒响应能力 依据上述主成分分析的结果，采用 1.4 中的公式（2）分别计算各综合指标的隶属函数值 $\mu(X_j)$ 。由表 5 可知，在苗期亚硒酸钠处理下，综合指标 1 中 B004 品种 $\mu(X_1)$ 最小，为 0，说明其在综合指标 1 中硒响应能力最弱；B175 品种 $\mu(X_1)$ 最大，为 1，说明其在综合指标 1 中硒响应能力最强；综合指标 2~6 中 $\mu(X)$ 最小的品种分别是 B163、B163、B239、B110 和 B110， $\mu(X)$ 最大的品种分别是 B032、B254、B322、B332 和 B094。通过以上结果，我们发现通过 6 个综合指标分别对谷子苗期硒响应能力的鉴定结果有所不同。因此，为了对谷子苗期硒响应能力进行更全面充分的评价，我们通过 1.4 中的公式（3），基于各综合指标的贡献率，计算综合指标的权重 W_j 分别为 0.337、0.189、0.168、0.116、0.106 和 0.084，并根据公式（4）计算谷子苗期硒响应能力各综合指标的综合评价 D 值。其中，D 值越小，表明谷子苗期硒响应能力越弱；D 值越大，表明谷子苗期硒响应能力越强。

表 5 各品种的综合性状指标值、 $\mu(X)$ 及综合评价值(D)

Table 5 Values of each comprehensive weight, $\mu(X)$, and comprehensive evaluation value(D)

品种	品种名称	来源	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	$\mu(X_5)$	$\mu(X_6)$	综合评价	排名
Variety	Name	Source	D 值							
B175	广 37	广西北海市	1.000	0.619	0.210	0.401	0.809	0.836	0.692	1
B328	红钙谷	北京中品开元	0.886	0.461	0.578	0.605	0.696	0.655	0.682	2
B007	红粘谷	黑龙江德都县	0.635	0.814	0.478	0.680	0.848	0.718	0.677	3
B083	晋谷 57	山西农科院谷子所	0.942	0.363	0.350	0.532	0.820	0.898	0.669	4
B005	鸭子嘴	黑龙江克山县	0.688	0.519	0.658	0.589	0.791	0.796	0.660	5
B084	Ise-455	美国爱俄华州	0.718	0.893	0.299	0.388	0.795	0.814	0.659	6
B254	糯粟	江苏省上饶市	0.578	0.637	1.000	0.300	0.676	0.752	0.653	7
B208	338A	内蒙古赤峰	0.814	0.581	0.562	0.178	0.853	0.697	0.649	8
B070	石榴子	河北安国县	0.806	0.643	0.217	0.462	0.670	0.812	0.623	9
B043	压塌车	山西定襄	0.452	0.852	0.436	0.685	0.872	0.712	0.618	10
B174	骡子尾	山东省菏泽县	0.825	0.544	0.185	0.419	0.802	0.850	0.617	11
B048	毛毛亮	河北承德	0.694	0.652	0.387	0.469	0.661	0.817	0.615	12
B138	铁 8396	辽宁铁岭市	0.504	0.707	0.436	0.734	0.840	0.693	0.609	13
B141	小紧穗	黑龙江省海伦市	0.501	0.886	0.460	0.471	0.716	0.772	0.609	13
B187	周里围	陕西省长安县	0.438	0.715	0.372	0.898	0.986	0.633	0.607	15
B341	公谷 65 号	吉林省农科院作物所	0.500	0.796	0.546	0.457	0.646	0.787	0.598	16
B332	陇谷 11 号	甘肃农科院作物所	0.636	0.702	0.163	0.289	1.000	0.908	0.591	17
B148	野谷子	吉林省长春县	0.412	0.887	0.328	0.688	0.733	0.805	0.587	18
B085	Kraftborn	荷兰	0.697	0.438	0.324	0.534	0.661	0.884	0.579	19
B109	白毛粱谷	山西省天镇县	0.572	0.864	0.349	0.139	0.853	0.676	0.578	20
B135	78-0625	黑龙江省农科院	0.493	0.744	0.390	0.517	0.740	0.775	0.576	21
B182	禾谷子	山西省万荣县	0.463	0.820	0.422	0.501	0.672	0.771	0.576	21
B198	晋谷 42	山西农科院谷子所	0.782	0.382	0.322	0.421	0.808	0.614	0.576	21
B383	白谷 6 号	吉林省白城市农科院	0.535	0.772	0.355	0.381	0.749	0.788	0.576	21
B032	碱谷	内蒙古包头	0.408	1.000	0.403	0.440	0.589	0.775	0.573	25
B298	03-992	河北承德市农科所	0.512	0.699	0.584	0.260	0.697	0.760	0.571	26
B274	冀谷 18	河北农科院谷子所	0.715	0.393	0.265	0.395	0.864	0.850	0.569	27
B099	苞米混子	黑龙江省呼兰县	0.370	0.908	0.365	0.645	0.607	0.843	0.568	28
B168	酒谷	河北省赵县	0.484	0.776	0.399	0.366	0.801	0.742	0.567	29
B071	紫根红	河北临城县	0.423	0.827	0.407	0.368	0.782	0.808	0.561	30
B074	阴天旱	山东济阳县	0.506	0.615	0.489	0.353	0.689	0.843	0.554	31
B256	毛粟	江西省波阳县	0.444	0.801	0.335	0.452	0.725	0.798	0.554	31
B239	晋谷 35	山西农科院谷子所	0.617	0.720	0.356	0.000	0.827	0.732	0.553	33
B001	孢子沿谷子-1	黑龙江省爱辉	0.427	0.884	0.236	0.380	0.841	0.805	0.552	34
B191	刀把齐	陕西省丹凤县	0.807	0.097	0.476	0.489	0.665	0.651	0.552	34
B342	公谷 68 号	吉林省农科院作物所	0.408	0.568	0.643	0.540	0.666	0.759	0.550	36
B130	八百年	河北省平泉县	0.465	0.668	0.318	0.486	0.937	0.646	0.547	37
B317	济 07610	山东农科院作物所	0.527	0.590	0.286	0.579	0.828	0.657	0.547	37
B349	谷丰 1 号	河北农科院谷子所	0.399	0.657	0.335	0.662	0.969	0.631	0.547	37
B252	粘子糯	四川省巫山县	0.373	0.687	0.458	0.437	0.827	0.855	0.543	40
B105	红粘谷	内蒙古林西县	0.528	0.534	0.313	0.583	0.752	0.757	0.542	41
B022	大毛毛谷	辽宁赤峰县	0.421	0.574	0.517	0.611	0.626	0.795	0.541	42
B166	茶清谷	天津市宁河县	0.573	0.338	0.251	0.897	0.608	0.876	0.541	42
B275	冀谷 19	河北农科院谷子所	0.407	0.668	0.321	0.562	0.903	0.741	0.541	42
B075	金屏谷子	山东蓬莱县	0.466	0.250	0.826	0.341	0.705	0.956	0.538	45
B359	沧 555	河北沧州农科院	0.573	0.375	0.275	0.582	0.912	0.732	0.536	46
B064	60 天黄烫	山东临清	0.393	0.664	0.376	0.602	0.837	0.663	0.535	47
B181	优质 18 号	山西省汾阳县	0.329	0.782	0.320	0.703	0.727	0.746	0.534	48
B323	鲁谷 10 号	山东农科院作物所	0.334	0.746	0.455	0.594	0.751	0.636	0.532	49

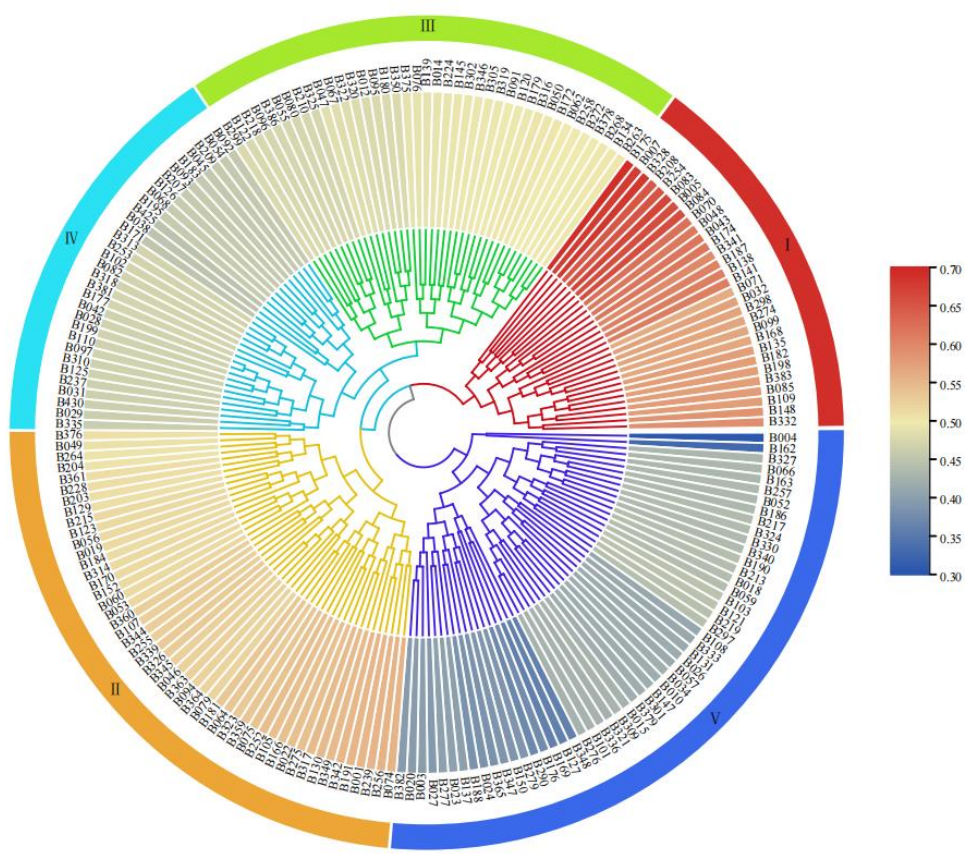
B339	陇谷 9 号	甘肃农科院作物所	0.428	0.724	0.321	0.451	0.676	0.837	0.530	50
B326	济谷 13	山东农科院作物所	0.433	0.823	0.321	0.264	0.761	0.733	0.529	51
B255	黄粟	江西省广丰县	0.477	0.651	0.353	0.392	0.648	0.826	0.527	52
B344	朝谷 12 号	辽宁省农科院水保所	0.419	0.669	0.373	0.497	0.740	0.718	0.527	52
B360	冀谷 12 号	河北沧州农科院	0.391	0.746	0.318	0.443	0.825	0.728	0.526	54
B107	金香玉	内蒙古赤峰市	0.367	0.924	0.366	0.272	0.739	0.656	0.525	55
B046	猫蹄谷	山西壶关	0.360	0.642	0.381	0.576	0.833	0.739	0.524	56
B345	朝谷 13 号	辽宁省农科院水保所	0.397	0.672	0.371	0.582	0.570	0.864	0.524	56
B363	承谷 12	河北承德市农科所	0.380	0.038	0.880	0.814	0.856	0.658	0.524	56
B094	黑谷 2 号	黑龙江黑河	0.533	0.477	0.248	0.678	0.461	1.000	0.523	59
B079	沙湾谷子	新疆	0.347	0.589	0.460	0.584	0.837	0.695	0.521	60
B364	公谷 5 号	吉林省农科院作物所	0.368	0.698	0.485	0.389	0.656	0.822	0.521	60
B053	小金俊	河北东光	0.434	0.683	0.342	0.369	0.798	0.679	0.517	62
B060	青谷	河南鹿邑	0.433	0.584	0.352	0.477	0.768	0.753	0.516	63
B152	红谷	宁夏西吉县	0.368	0.495	0.358	0.761	0.852	0.713	0.516	63
B170	毛毛谷	河北宁晋县	0.439	0.619	0.310	0.469	0.775	0.744	0.516	63
B314	豫谷 14	河南安阳市农科院	0.424	0.680	0.322	0.482	0.609	0.831	0.516	63
B019	小苗金	吉林白城	0.435	0.633	0.362	0.407	0.705	0.781	0.515	67
B056	秋毛羽	河南安阳	0.465	0.616	0.332	0.325	0.800	0.755	0.515	67
B123	白毛谷	青海省民和县	0.616	0.324	0.444	0.330	0.638	0.779	0.515	67
B215	郑 448	河南省农科院	0.361	0.565	0.362	0.639	0.902	0.669	0.515	67
B184	黄九根齐	陕西省榆林市	0.377	0.635	0.350	0.550	0.807	0.684	0.513	71
B228	白沙榴	江苏省铜山县	0.461	0.564	0.343	0.429	0.677	0.823	0.511	72
B361	沧 156	河北沧州农科院	0.592	0.263	0.406	0.401	0.756	0.791	0.511	72
B129	谷子	新疆疏附县	0.410	0.582	0.339	0.601	0.579	0.884	0.510	74
B203	小粒白不育系	河北张家口	0.353	0.729	0.395	0.327	0.798	0.757	0.510	74
B376	公谷 71 号	吉林省农科院作物所	0.450	0.614	0.355	0.405	0.650	0.788	0.509	76
B049	钱串紫谷	北京良乡	0.446	0.564	0.404	0.337	0.710	0.819	0.508	77
B204	DA3 不育系	河北张家口	0.470	0.785	0.151	0.185	0.903	0.675	0.506	78
B264	蒙金谷 1 号	内蒙古市农牧科学院	0.813	0.019	0.418	0.327	0.573	0.710	0.506	78
B316	济 07607	山东农科院作物所	0.722	0.078	0.273	0.502	0.808	0.667	0.504	80
B050	黄苗谷子	北京	0.370	0.656	0.276	0.490	0.895	0.665	0.503	81
B172	八杈谷	河南台前县	0.403	0.682	0.310	0.351	0.742	0.794	0.503	81
B134	谷子×高粱	黑龙江	0.323	0.775	0.287	0.484	0.673	0.845	0.502	83
B263	吃喝谷	湖北省襄阳县	0.330	0.780	0.346	0.453	0.665	0.733	0.502	83
B268	赤谷 8 号	内蒙古市农牧科学院	0.438	0.569	0.356	0.346	0.842	0.670	0.501	85
B062	黄粘谷	山东荣城	0.399	0.599	0.377	0.414	0.745	0.722	0.499	86
B258	二白谷	新疆沙湾县	0.509	0.375	0.474	0.382	0.629	0.781	0.499	86
B272	黄金苗(香谷)	内蒙古市农牧科学院	0.466	0.443	0.319	0.480	0.727	0.857	0.499	86
B378	公谷 73 号	吉林省农科院作物所	0.508	0.439	0.372	0.205	0.922	0.714	0.499	86
B091	齐头黄	江苏铜山县	0.488	0.576	0.177	0.355	0.850	0.749	0.498	90
B120	金棒子	甘肃古浪县	0.478	0.443	0.237	0.568	0.742	0.800	0.497	91
B179	黄单子谷	山西省大同市	0.489	0.492	0.194	0.650	0.548	0.871	0.497	91
B305	安 07-海 4065	河南安阳市农科院	0.352	0.659	0.401	0.408	0.650	0.823	0.496	93
B319	鲁谷 6 号	山东农科院作物所	0.261	0.776	0.333	0.502	0.755	0.792	0.496	93
B346	冀乡 1 号	河北农科院谷子所	0.505	0.340	0.234	0.487	0.956	0.762	0.496	93
B302	安 04-4705	河南安阳市农科院	0.388	0.716	0.446	0.060	0.837	0.688	0.495	96
B145	小黄谷子	吉林省大安市	0.309	0.511	0.553	0.352	0.866	0.799	0.494	97
B224	狗尾粟(小粟)	海南省儋县	0.452	0.602	0.445	0.126	0.744	0.698	0.493	98
B014	日本谷	黑龙江海林	0.377	0.599	0.368	0.448	0.715	0.747	0.492	99
B375	公谷 70 号	吉林省农科院作物所	0.292	0.661	0.410	0.394	0.757	0.868	0.491	100
B076	170	山东省农科院	0.459	0.503	0.333	0.439	0.572	0.855	0.490	101
B139	野谷子-1	甘肃会宁县	0.304	0.566	0.404	0.606	0.807	0.676	0.490	101
B047	黄大粒	河北逐鹿	0.440	0.466	0.458	0.261	0.704	0.801	0.486	103

B067	晋谷 21	山西农科院谷子所	0.443	0.521	0.275	0.273	0.826	0.838	0.484	104
B322	鲁谷 9 号	山东农科院作物所	0.194	0.302	0.504	1.000	0.860	0.826	0.484	104
B320	鲁谷 7 号	山东农科院作物所	0.362	0.472	0.374	0.623	0.583	0.862	0.481	106
B012	红粘谷	黑龙江汤原	0.347	0.601	0.375	0.406	0.693	0.767	0.479	107
B095	龙爪粘	黑龙江省肇源县	0.412	0.577	0.208	0.448	0.732	0.790	0.479	107
B180	大同黄	山西省寿阳县	0.360	0.545	0.291	0.597	0.588	0.879	0.479	107
B350	谷丰 2 号	河北农科院谷子所	0.376	0.487	0.380	0.450	0.767	0.746	0.479	107
B299	黑谷子	河北承德市农科所	0.368	0.465	0.357	0.556	0.759	0.724	0.478	111
B122	小红谷	青海省化隆县	0.275	0.697	0.412	0.408	0.660	0.788	0.477	112
B218	铁 9037	辽宁省铁岭市	0.345	0.548	0.389	0.486	0.726	0.701	0.477	112
B096	金香玉	黑龙江省肇源县	0.408	0.504	0.375	0.294	0.760	0.765	0.475	114
B386	朝谷 14 号	辽宁省农科院水保所	0.374	0.482	0.365	0.433	0.807	0.723	0.475	114
B055	绳头黄谷	河南浚县	0.409	0.508	0.193	0.442	0.826	0.817	0.474	116
B080	晋谷 54	山西农科院谷子所	0.396	0.591	0.354	0.269	0.638	0.832	0.474	116
B210	粘小米	广西省天峨县	0.300	0.572	0.480	0.411	0.684	0.759	0.474	116
B325	济谷 12	山东农科院作物所	0.419	0.600	0.404	0.089	0.775	0.694	0.474	116
B177	济叶冲 1	山东省农科院	0.328	0.543	0.330	0.692	0.447	0.903	0.472	120
B381	公矮 3 号	吉林省农科院作物所	0.311	0.680	0.323	0.355	0.726	0.788	0.472	120
B082	昭和糯	日本	0.415	0.534	0.363	0.212	0.773	0.743	0.471	122
B102	红粘谷	吉林省辉南县	0.403	0.535	0.314	0.389	0.598	0.863	0.471	122
B253	粳粟	江苏省上饶市	0.282	0.629	0.381	0.440	0.662	0.849	0.471	122
B313	安 93-15	河南安阳市农科院	0.382	0.527	0.218	0.588	0.621	0.846	0.471	122
B318	鲁谷 5 号	山东农科院作物所	0.283	0.721	0.261	0.544	0.569	0.839	0.470	126
B028	气死糜子	辽宁海城	0.329	0.452	0.501	0.320	0.716	0.891	0.469	127
B042	青软谷	山西山阴	0.378	0.348	0.415	0.578	0.818	0.619	0.469	127
B097	勾根	黑龙江省庆安县	0.356	0.549	0.273	0.374	0.919	0.698	0.469	127
B110	野生谷	山西省天镇县	0.730	0.635	0.264	0.503	0.000	0.000	0.469	127
B199	猫屎谷	青海省化隆县	0.274	0.664	0.327	0.421	0.779	0.764	0.469	127
B125	谷子	青海省民和县	0.400	0.363	0.385	0.323	0.821	0.889	0.468	132
B310	豫谷 2 号	河南安阳市农科院	0.298	0.759	0.198	0.418	0.752	0.747	0.468	132
B031	白油沙	内蒙古凉城	0.363	0.554	0.380	0.329	0.695	0.762	0.467	134
B237	大白条	宁夏惠农县	0.376	0.481	0.332	0.508	0.579	0.867	0.467	134
B430	长农 35	山西省长治市	0.433	0.470	0.355	0.301	0.680	0.758	0.465	136
B029	碱谷	内蒙古兴和县	0.372	0.530	0.374	0.340	0.652	0.791	0.464	137
B335	陇谷 5 号	甘肃农科院作物所	0.394	0.335	0.377	0.458	0.757	0.818	0.462	138
B068	佛手	天津市蓟县	0.547	0.409	0.166	0.290	0.657	0.776	0.459	139
B126	谷子	新疆吐鲁番市	0.380	0.724	0.187	0.553	0.534	0.494	0.459	139
B195	大红毛谷	甘肃省临洮县	0.269	0.737	0.291	0.381	0.746	0.672	0.459	139
B093	晋谷 29	山西农科院谷子所	0.307	0.594	0.215	0.547	0.757	0.745	0.458	142
B183	白酒谷	陕西省神木县	0.302	0.408	0.327	0.750	0.683	0.774	0.458	142
B207	选三 4n	陕西省农科院	0.438	0.133	0.405	0.536	0.841	0.787	0.458	142
B054	小紫根	河北吴桥	0.398	0.419	0.323	0.361	0.779	0.767	0.457	145
B092	珠沙糯	湖北保康县	0.600	0.183	0.183	0.503	0.740	0.622	0.457	145
B209	西 1-2-4	陕西农科院	0.432	0.345	0.309	0.467	0.700	0.778	0.457	145
B045	向阳谷	山西中阳	0.242	0.432	0.586	0.481	0.798	0.628	0.455	148
B171	河北乌	河北广宗县	0.564	0.510	0.309	0.371	0.314	0.440	0.452	149
B038	大青苗鱼刺	甘肃会宁	0.251	0.684	0.361	0.401	0.543	0.846	0.450	150
B425	大白谷（广灵）	山西省广灵县	0.383	0.406	0.387	0.302	0.720	0.797	0.449	151
B103	鸭子嘴	吉林省辉南县	0.368	0.398	0.468	0.179	0.744	0.828	0.447	152
B121	小苗谷	宁夏固原县	0.469	0.459	0.219	0.252	0.685	0.756	0.447	152
B219	2651662	中国农科院品资所	0.281	0.406	0.437	0.509	0.716	0.764	0.444	154
B297	宽九	河北承德市农科所	0.381	0.419	0.434	0.183	0.715	0.777	0.443	155
B190	红酒谷	陕西省麟游县	0.230	0.661	0.203	0.512	0.829	0.690	0.442	156
B213	Ise1474	国际半干旱研究所	0.300	0.426	0.455	0.441	0.719	0.678	0.442	156

B059	新农谷②	河南新乡	0.366	0.375	0.419	0.270	0.824	0.681	0.441	158
B018	备荒四号	莫斯科	0.299	0.454	0.404	0.375	0.758	0.725	0.440	159
B217	郑 737(9)	河南省农科院	0.391	0.428	0.289	0.300	0.702	0.784	0.437	160
B324	济谷 11	山东农科院作物所	0.323	0.530	0.289	0.280	0.816	0.715	0.437	160
B330	金穗谷 1 号	甘肃省平凉农科所	0.378	0.305	0.398	0.399	0.815	0.611	0.436	162
B340	陇粟 2 号	甘肃农科院作物所	0.347	0.475	0.291	0.349	0.662	0.821	0.436	162
B257	芝麻粟	江西省波阳县	0.344	0.320	0.362	0.426	0.819	0.729	0.435	164
B052	露米青谷	河北涉县	0.395	0.364	0.262	0.341	0.803	0.745	0.434	165
B186	然谷	陕西省华阴县	0.278	0.582	0.293	0.375	0.709	0.732	0.434	165
B066	早谷	山东胶南	0.256	0.338	0.345	0.687	0.877	0.616	0.433	167
B163	黄谷	西藏墨脱县	0.704	0.000	0.000	0.446	0.701	0.831	0.433	167
B327	济谷 14	山东农科院作物所	0.412	0.257	0.204	0.466	0.815	0.817	0.431	169
B309	豫谷 1 号	河南安阳市农科院	0.293	0.535	0.315	0.276	0.741	0.783	0.429	170
B015	刀把齐	黑龙江阿城县	0.316	0.440	0.347	0.384	0.703	0.719	0.428	171
B101	假金苗	内蒙古呼盟扎旗	0.275	0.433	0.335	0.436	0.795	0.731	0.427	172
B276	冀谷 20	河北农科院谷子所	0.258	0.542	0.344	0.318	0.720	0.789	0.427	172
B336	陇谷 6 号	甘肃农科院作物所	0.181	0.444	0.361	0.674	0.704	0.813	0.427	172
B321	鲁谷 8 号	山东农科院作物所	0.283	0.405	0.414	0.446	0.563	0.855	0.425	175
B034	饿死牛谷	内蒙古丰镇	0.290	0.546	0.355	0.294	0.588	0.776	0.422	176
B301	保谷 18	河北保定市农科所	0.320	0.408	0.478	0.152	0.725	0.715	0.420	177
B379	公谷 74 号	吉林省农科院作物所	0.278	0.618	0.323	0.087	0.754	0.769	0.420	177
B010	黄沙突出谷	黑龙江安达	0.385	0.180	0.442	0.321	0.736	0.782	0.419	179
B147	鸭子嘴	吉林省长岭县	0.275	0.464	0.365	0.356	0.656	0.786	0.419	179
B026	锦谷 5 号	辽宁锦州市农科所	0.320	0.403	0.375	0.290	0.685	0.768	0.418	181
B057	枪鞭穗	河南孟县	0.240	0.492	0.397	0.402	0.716	0.644	0.417	182
B131	小乌谷子	河北承德	0.396	0.209	0.244	0.475	0.672	0.899	0.416	183
B333	陇谷 3 号	甘肃农科院作物所	0.333	0.303	0.406	0.321	0.720	0.752	0.414	184
B108	藕粒红	内蒙古宁城县	0.372	0.410	0.381	0.053	0.775	0.673	0.412	185
B023	大罕蛋粘谷	辽宁宁城县	0.287	0.430	0.328	0.292	0.677	0.761	0.403	186
B277	冀谷 21	河北农科院谷子所	0.337	0.367	0.327	0.253	0.685	0.750	0.403	186
B137	2450473	吉林长春	0.215	0.335	0.287	0.597	0.882	0.661	0.402	188
B003	大糟皮	黑龙江嫩江县	0.398	0.210	0.353	0.148	0.771	0.789	0.399	189
B020	黄粘谷	吉林通化	0.326	0.340	0.281	0.320	0.706	0.756	0.397	190
B382	公矮 4 号	吉林省农科院作物所	0.286	0.485	0.315	0.114	0.789	0.699	0.397	190
B027	龙谷	辽宁台安	0.256	0.434	0.349	0.270	0.671	0.761	0.394	192
B150	红苗牛头沟	内蒙古赤峰市	0.298	0.177	0.253	0.565	0.796	0.745	0.389	193
B347	冀谷 25	河北农科院谷子所	0.279	0.452	0.252	0.264	0.694	0.742	0.389	193
B279	冀谷 24	河北农科院谷子所	0.256	0.233	0.340	0.481	0.763	0.752	0.388	195
B024	紧刀把齐	辽宁阜新	0.280	0.296	0.367	0.383	0.534	0.856	0.385	196
B188	白料姜	陕西省三原县	0.112	0.443	0.399	0.511	0.783	0.647	0.385	196
B365	公谷 5-1	吉林省农科院作物所	0.253	0.382	0.349	0.279	0.723	0.701	0.384	198
B176	济矮秆 6	山东省农科院	0.328	0.320	0.340	0.243	0.602	0.674	0.377	199
B290	沧 409	河北沧州农科院	0.224	0.394	0.258	0.292	0.779	0.731	0.371	200
B127	谷子	新疆米泉市	0.138	0.429	0.344	0.344	0.625	0.824	0.361	201
B169	齐头白	河北衡水市	0.227	0.211	0.239	0.506	0.801	0.718	0.361	201
B348	白米 1 号	河北农科院谷子所	0.256	0.192	0.269	0.435	0.803	0.679	0.361	201
B162	乐山白糯	四川乐山市	0.068	0.347	0.263	0.521	0.840	0.557	0.329	204
B004	糟皮一刀把齐	黑龙江嫩江县	0.000	0.446	0.322	0.371	0.548	0.785	0.306	205

2.4.2 各品种晒响应能力的聚类分析 为了使本试验分类结果更为客观，我们采用 TBtools 软件，选择最大距离法对上述 6 个谷子苗期晒响应能力综合指标的 D 值进行聚类分析（表 5，图 1），结果发现本试验所选用的 205 份谷子种质资源可以划分为 5 类。其中，第 I 类为晒响应能力最强的品种，D 值范围在 0.692~0.561，

包括来自广西的广 37 (B175)、北京的红钙谷 (B328) 和山西当地品种晋谷 57 (B083) 等在内的 30 份材料, 第 II 类为硒响应能力较强材料, D 值范围在 0.554~0.506, 包含 49 份材料, 第 III 类 D 值范围在 0.504~0.474, 包含 40 份材料, 第 IV 类硒响应能力较弱, D 值范围在 0.472~0.449, 包含 32 份材料; 第 V 类为硒响应能力最弱的品种, D 值范围在 0.447~0.306, 共有 54 份材料, 其中包含来自黑龙江的糟皮-刀把齐 (B004)、四川乐山的乐山白糯 (B162) 和河北省农科院的白米 1 号 (B348)。



图中不同颜色分支代表不同类型硒响应能力
Different colored branches in the figure represent different types of selenium response capacity

图 1 205 份谷子品种的硒响应能力聚类图
Fig. 1 Cluster diagram of selenium response ability of 205 foxtail millet varieties

2.5 不同品种在亚硒酸钠处理下叶片保护酶活性差异

在逆境胁迫下, 植物体内会产生破坏细胞膜结构的超氧自由基。SOD、POD 和 CAT 这 3 种酶被认为是植物胁迫评估的重要生理指标。我们根据苗期筛选结果选择具有代表性的硒低效品种 (B162) 与硒高效品种 (B175)。在水培条件下, 测定其在亚硒酸钠处理与对照下的苗期叶片 SOD、POD 与 CAT 酶活性。结果表明, 这 2 个品种在 T₂ 处理后体内 SOD、POD 活性与对照相比均呈现显著的上升趋势。但是由于其响应能力不同, B162 变化更为明显。此外, 2 个品种的 CAT 酶活性与对照相比均下降, 这说明一定浓度的亚硒酸钠处理有助于提升谷子叶片 SOD 和 POD 酶活性, 同时 CAT 酶的活性会受到一定的抑制作用。

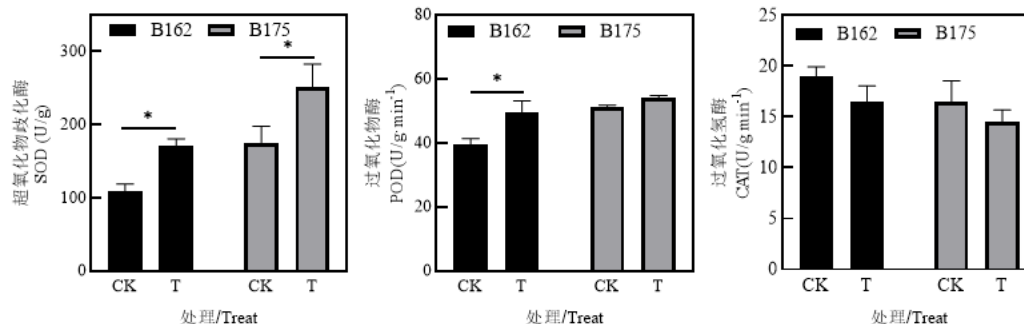


图 2 不同亚硒酸钠处理下谷子叶片酶活性的比较

Fig. 2 Comparison of enzyme activities in foxtail millet leaves under different sodium selenite treatments

3 讨论

3.1 谷子苗期硒响应能力的筛选及评价

苗期是谷子生长发育的关键时期。本试验选用来自国内外的具有较大差异及代表性的 205 份谷子种质资源，其中包含有国内主要育成和推广品种，采用水培施加亚硒酸钠的方法对 205 份谷子苗期硒响应能力进行鉴定与筛选，可以为富硒谷子育种和生产提供材料和数据支持。另外，因为低浓度的硒可以促进作物的生长发育以及品质和籽粒硒含量提升，而高浓度的硒则对作物造成毒害作用^[33-35]，本试验根据前期试验结果（未发表）设置了两个硒浓度，其中 T₁ 处理下，谷子的苗期各项农艺性状均值均呈现增加的趋势，而 T₂ 处理下谷子的各项农艺性状指标较对照处理均下降，说明苗期谷子对外源亚硒酸钠的最适浓度介于 0.3~0.5 mmol.L⁻¹ 之间。由于外源施硒使谷子在生长发育中受到多方面的影响，不能以单一性状作为谷子苗期硒响应能力评价的主要筛选指标，而采用隶属函数法可以对谷子苗期硒响应能力进行整体评价，更为客观合理。另外，本研究不仅对谷子地下部硒含量进行了测定，也对地上部谷草的硒含量进行了测定，发现外源施用亚硒酸钠可以使谷草硒含量平均增加 10 倍左右，且在不同谷子材料间存在广泛的变异，这与穆婷婷等人的研究结果相似^[23]，也为提高饲草谷子品质改良提供了材料和理论依据。

3.2 不同谷子品种硒响应能力的差异与类型的划分

作物在苗期吸收多种元素以维持植株的生长发育，且不同植物对于硒元素的响应能力表现出一定差异，相同作物、不同品种的硒响应能力也不同^[17, 36,37]，另外，相同作物、同一品种在外源施硒浓度不同时也表现出一定的差异性^[38]。通过与各品种来源地等信息的比较发现，硒高效（第 I 类）种质来自北方地区的占多数。这可能与当地的土壤硒缺乏状况有关，也值得我们更深的关注。

另外，我们发现苗期鉴定的不同硒响应能力的品种如硒高效材料 B099、B274 和 B383 以及硒低效材料 B003、B024 和 B169 在成熟期叶面喷施亚硒酸钠后的硒响应能力均表现出同苗期鉴定结果一致的趋势^[39,40]，说明谷子硒响应能力具有重要的遗传机制，后续我们将进一步通过连锁分析以及全基因组关联分析（GWAS）定位控制谷子硒响应能力的候选基因位点，为谷子富硒机理研究提供依据。另外，本试验鉴定出的这些苗期以及成熟期均表现出较高的硒响应能力的重要材料，可以作为富硒谷子育种和生产的重要候选材料。

3.3 保护酶系统对外源硒处理的响应

据报道, SOD、POD 和 CAT 等氧化还原酶是植物抗逆胁迫的重要保护系统, 可以反映植物的逆境胁迫效应^[41]。苑义川等^[29]发现低磷胁迫诱导 SOD、POD 和 CAT 酶活性增加, 且在磷敏感与磷耐受品种间存在差异。穆婷婷等^[23]和王永会等^[24]发现采用一定浓度的外源硒叶面喷施, 导致不同生育期的 POD 和 SOD 等生理生化指标升高, 本研究发现, 0.5 mmol.L⁻¹ 的亚硒酸钠处理使得谷子叶片 SOD 和 POD 酶活升高, 这与 Khalofah 等^[42]在藜麦中的研究结果相似, 但是本试验中 CAT 酶活性在外源亚硒酸钠处理后下降, 类似的现象穆婷婷等之前的研究中也曾报道, 随着硒浓度的增加, CAT 等酶活呈现先升高后降低的趋势^[28], 表明谷子对外源亚硒酸钠的反应复杂, 后续需要更深入的研究。

4 结论

本研究对 205 份谷子核心种质的苗期硒响应能力进行了筛选与评价, 根据硒响应能力强弱可划分为 5 种不同类型。在施加亚硒酸钠的情况下, 本研究所测得的 11 个指标均可以作为鉴定谷子苗期硒响应能力强弱和品种选育的参考指标。其中硒高效品种和硒低效品种叶片保护酶系统对外源亚硒酸钠处理的响应能力不同, 可能是谷子外源硒处理引发的重要生理效应。

参考文献

- [1] Zhang G Y, liu X, Quan Z W, Cheng S F, Xu X, Pan S K, Xie M, Zeng P, Yue Z, Wang W L, Tao Y, Bian C, Han C L, Xia Q J, Peng X H, Cao R, Yang X H, Zhan D L, Hu J C, Zhang Y X, Li H N, Li H, Li N, Wang J Y, Wang C C, Wang R Y, Guo T, Cai Y J, Liu C Z, Xianag H T, Shi Q X, Huagn P, Chen Q C, Li Y R, Wang J, Zhao Z H, Wang J. Genome sequence of foxtail millet (*Setaria italica*) provides insights into grass evolution and biofuel potential[J]. Nature Biotechnology, 2012,30(6):549-554.
- [2] Diao X M, Schnable J, Bennetzen J L, Li J Y. Initiation of *Setaria* as a model plant[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2014, 1(1): 16-20.
- [3] Dwivedi S L, Upadhyaya H D, Senthilvel S, Jr C T H, Fukunaga K, Diao X M, Santra D, Baltensperger D, Prasad M. Millets: Genetic and Genomic Resources[J]. Plant Breeding Reviews, 2011, 35(1): 247-375.
- [4] 贾冠清, 刁现民. 谷子 (*Setaria italica* (L.)P. Beauv.) 作为功能基因组研究模式植物的发展现状及趋势[J]. 生命科学, 2017,29(3): 292-301.
Jia G Q, Diao X M. Current status and perspectives of researches on foxtail millet (*Setaria italica* (L.) P. Beauv.): A potential model of plant functional genomics studies[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2011, 35(1): 247-375.
- [5] Hu H, Mauro-Herrera M, Doust AN. Domestication and improvement in the model C4 grass *Setaria*[J]. Frontiers in Plant Science, 2018;9:719.
- [6] Yang Z, Zhang H G, Li X K, Shen H M, Gao J H, Hou S Y, Zhang B, Mayes S, Bennett M, Ma J X, Wu C Y, Sui Y, Han Y H, Wang X C. A mini foxtail millet with an Arabidopsis-like life cycle as a C4 model system.[J]. Nature Plants, 2020;6:1167-78.
- [7] Lu H, Zhang J, Liu K B. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(18):7367-7372.
- [8] Li X K, Gao J H, Song J Y, Guo K, Hou S Y, Wang X C, He Q, Zhang Y Y, Zhang Y K, Yang Y L, Tang J Y, Wang H L, Persson S, Huang M Q, Xu L S, Zhong L L, Li D Q, Liu Y M, Wu H, Diao X M, Chen P, Wang X W, Han Y H. Multi-omics analyses of 398 foxtail millet accessions reveal genomic regions associated with domestication, metabolite traits and anti-inflammatory effects[J]. Molecular Plant, 2022, DOI: 10.1016/J.MOLP.2022.07.003.
- [9] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 赵宇, 王慧君. 我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议[J]. 农业现代化研究, 2014,35(05):531-535.
Li S G, Liu F, Lie M, Zhao Y, Wang H J. The current industry situation, development trend, and suggestions for the future of foxtail millet in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014. 35(5): 531-535.
- [10] 智慧, 牛振刚, 贾冠清, 柴杨, 李伟, 王永芳, 李海权, 陆平, 白素兰, 刁现民. 谷子干草饲用品质性状变异及相关性分析[J]. 作物学报, 2012,38(5): 800-807.
Zhi H, Niu Z G, Jia G Q, Chai Y, Li W, Wang Y F, Li H Q, Lu P, Bai S L, Diao X M. Variation and correlation analysis of hay forage quality traits of foxtail millet [*setaria italica* (L.) beauv.][J]. Acta Agronomica Sinica, 2012,38(5): 800-807.
- [11] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 赵文庆, 赵宇. 中国谷子种植历史演变及未来发展方向[J]. 粮油食品科技, 2022,30(4):60-67.
Li S G, Liu F, Liu M, Zhao W Q, Zhao Y. Historical evolution and future development direction of foxtail millet planting in china[J]. Science and

Technology of Cereals, Oils and Foods., 2022,30(4):60-67.

- [12] Amadou I, Gounga M E, Le G W. Millets: nutritional composition, some health benefits and processing[J]. Emirates Journal Of Food And Agriculture, 2013, 25:501-508.
- [13] kumar A, Tomer V, Kaur A, Kumar V, Gupta K. Millets: a solution to agrarian agaand nutritional challenges[J]. Agriculture Food Security, 2018,7:31.
- [14] Rayman M P. Selenium and human health[J]. The Lancet, 2012, 379: 1256-1268.
- [15] Wang Z J, Gao Y X. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16(11):1345-1351.
- [16] Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, TRan T A T, Wang D, Yang W X, Zhou F, Wang M K, Yu D S, Liang D L. Selenium distribution in the Chinese enviroment and its relationship with human health: a review[J]. Enviroment International, 2018, 112: 294-309.
- [17] Ellis D R, Salt D E. Plants, selenium and human health[J]. Current Opinion Plant Biology, 2003,6(3):273-279.
- [18] Mora M.L, Durón P, Acuña AJ, Cartes P, Demanet R, Gianfreda L. Improving selenium status in plant nutrition and quality[J]. Journal of soil science and plant nutrition, 2015, 15, 486-503.
- [19] Zhang X, He H, Xiang J Q, Yin H Q, Hou T. Selenium-containing proteins/peptides from plants: a review on the structures and functions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(51):15061-15073.
- [20] Filho J A C, Sobrinho R.R, Rascholati S F. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and its role in plant nutrition in sustainable agriculture[J]. Environmental Science, 2017, 12, 17-18.
- [21] Rios J J, Blasco B, Rosales M A, Sanchez- Rodriguez E, Leyva R, Cervilla L M, Romero L, Ruiz J M. Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium[J]. Journal of Science of Food and Agriculture. 2010, 90(11): 1914-1919.
- [22] Ramos S J, Rutzke M A, Haynes R J, Faquin V, Guilherme L R G, Li L. Selenium accumulation in lettuce germplasm[J], Planta, 2010, 233:649-660.
- [23] 穆婷婷, 杜慧玲, 张福耀, 景小兰, 郭琦, 李志华, 刘璋, 田岗. 外源硒对谷子生理特性、硒含量及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(1): 51-63.
- Mu T T, Du H L, Zhang F Y, Jing X L, Guo Q, Li Z H, Liu Z, Tian G. Effects of exogenous selenium on the physiological activity, grain selenium content, yield and quality of foxtail millet[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(1): 51-63.
- [24] 王永会, 周大迈, 张爱军, 王红, 张瑞芳. 外源硒对谷子抗氧化酶活性及其品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015,(04):112-117.
- Wang Y H, Zhou D M, Zhang A J, Wang H, Zhang R F. Effect of exogenous selenium on the activity of antioxidant enzymes and quality of millet[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2015,(04):112-117.
- [25] 李星星, 韩芳, 周雪, 苏乐平, 袁宏安. 富硒谷子研究进展[J]. 中国农学通报, 2022,38(07):1-6.
- Li X X, Hang F, Zhou X, Su L P, Yuan H A. Research progress of selenium-enriched millet[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022,38(07):1-6.
- [26] 刘猛, 赵宇, 刘斐, 李顺国, 夏雪岩, 南春梅. 中国富硒谷子产业现状及发展方向[J]. 河北科技大学学报, 2015,36(4): 419-424.
- Liu M, Zhao Y, Liu F, Li S G, Xia X Y, Nan C M. Status quo and development trend of selenium-rich foxtail millet industry in China[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015,36(4): 419-424.
- [27] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 程汝宏, 夏恩君, 刁现民. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021,54(3): 459-470.
- Li S G, Liu F, Liu M, Chen R H, Xia E J, Diao X M. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in china[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021,54(3): 459-470.
- [28] 刁现民. 育种创新造就谷子种业新发展[J]. 中国种业, 2022(4): 4-6.
- Diao X M. Breeding innovation brings about new development of foxtail millet seed industry[J]. Chinese Seed Industry, 2022(4): 4-6.
- [29] 苑义川, 陈小雨, 李明明, 李萍, 贾亚涛, 韩渊怀, 邢国芳. 谷子苗期耐低磷种质筛选及其根系保护酶系统对低磷胁迫的响应[J]. 作物学报, 2019,45(3): 442-453.
- Yuan Y C, Chen X Y, Li M M, Li P, Jia Y T, Han Y H, Xing G F. Screening of germplasm tolerant to low phosphorus of seedling stage and response of root protective enzymes to low phosphorus in foxtail millet[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019,45(3): 442-453.
- [30] 樊瑀, 董淑琦, 原向阳, 杨雪萍, 姚翔, 郭平毅, 杨雪芳. 谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选[J]. 中国农业大学学报, 2022,27(6): 42-54.
- Fan Y, Dong S Q, Yuan X Y, Yang X P, Yao X, Guo P Y, Yang X F. Comprehensive evaluation of drought resistance of foxtail millet germplasm resources during germination period and drought resistance index screening[J]. Journal of China Agricultural University, 2022,27(6): 42-54.
- [31] 张笛, 苗兴芬, 王雨婷. 100 份谷子品种资源萌发期耐盐性评价及耐盐品种筛选[J]. 作物杂志, 2019,(06):43-49.
- Zhang D, Miao X F, Wang Y T. Evaluation and screening of salt tolerance in 100 foxtail millet at germination stage[J]. Crops, 2019,(06):43-49.
- [32] 唐玉霞, 王慧敏, 刘巧玲, 吕英华, 王凌, 孙世友. 原子荧光法测定小麦中硒含量的研究[J]. 华北农学报, 2009(S1): 218-220.
- Tang Y X, Wang H M, Liu Q L, Lv Y H, Wang L, Sun S Y. Study on the determination of selenium in wheat by atomic fluorescence spectrometry[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009(S1): 218-220.
- [33] 贾莉莉, 王龙, 陈剑秋, 陈宏坤. 硒对作物影响的研究进展[J]. 现代农业科技, 2020, (04): 4-5.
- Jia L L, Wang L, Chen J Q, Chen H K. Research progress on effects of selenium on crops[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020, (04): 4-5.
- [34] Xie M H, Sun X Y, Li P, Shen X C, Fang Y. Selenium in cereals: insight into species of the element from total amount[J]. Comprehensive Reviews in Food

Science and Food Safety, 2021,20:2914-2940.

- [35] Li X J, Sun J J, Li W S, Gong Z Q, Jia C Y, Li P J. Effect of foliar application of the selenium-rich nutrient solution on the selenium accumulation in grains of foxtail millet (Zhangzagu 10)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29:5569–5576.
- [36] Lidon F C, Oliveira K, Ribeiro M M, Pelica J, Pataco I, Ramalho J C, Leitão A E, Almeida A S, Campos P S, Ribeiro-Barros L., Pais I P, Silva M M, Pessoa M F, Reboredo F H. Selenium biofortification of rice grains and implications on macronutrients quality[J]. Experimental Agriculture, 2018., 81, 22 – 29.
- [37] White P J. 2017. The genetics of selenium accumulation by plants. Selenium in plants, 2017, Volume 11978-3-319-56248-3.
- [38] Zhang M, Wilson L, Xing G F, Jiang L X, Tang S H. Optimizing root architecture and increasing transporter gene expression are strategies to promote selenium uptake by high-se accumulating rice cultivar[J]. Plant and Soil, 2020, 447:319-332.
- [39] 于港华. 谷子核心种质资源富硒效应评价及相关性状的全基因组关联分析[D]. 山西农业大学硕士学位论文, 山西太谷, 2021.
Yu GH. Evaluation of se-enrichment effect on foxtail millet core germplasm resources and genome-wide association analysis of related traits[D]. Thesis of ShanXi Agricultural University. Taigu, China, 2021.
- [40] 王浩. 基于 GWAS 和转录组测序鉴定谷子硒响应 相关候选基因[D]. 山西农业大学硕士学位论文, 山西太谷, 2022
Wang H. Identification of selenium-responsive candidate genes in foxtail millet based on GWAS and transcriptome sequencing[D]. Thesis of ShanXi Agricultural University. Taigu, China, 2021.
- [41] 朱娟娟, 喻春明, 陈继康, 陈平, 熊和平. 不同硒源和浓度对饲用苧麻幼苗生理生化特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022 (3):110-118.
Zhu J J, Yu C M, Chen J K, Chen P, Xiong H P. The influence of different selenium and concentration on physiological characteristics and antioxidant enzyme activities of forage ramie seedlings[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2022 (3):110-118.
- [42] Kholofah A, Migdadi H, Ei-Harty E. Antioxidant enzymatic activities and growth response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to exogenous selenium application[J]. Plants (Basel), 2021, 10(4):719.