

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份谷子核心种质资源的苗高、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16份材料属于硒高效品种, 45份材料属于硒较高品种, 60份属于硒中等效率品种, 66份属于硒较低品种, 18份属于硒低效品种; 施加0.5 mmol/L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 16 high Se-efficient responsiveness accessions, 45, 60 and 66 with medium Se-efficient responsiveness accessions and 18 deficient accessions. Under 0.5 mmol/L Se treatment, the activities of SOD and POD were increased, whereas the activity

收稿日期: 2022-08-18 修回日期: 2022-09-18 网络出版日期: 2022-10-21

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220818002>

第一作者研究方向为杂粮种质资源鉴定评价, E-mail: sxaxugf@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: 山西省基础研究计划面上项目(20210302123364); 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(202204010910001-06); 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项目(杂粮)(2022-03)

Foundation projects: The Applied Basic Research Project of Shanxi Province (20210302123364); National Laboratory of Minor Crops Germplasm Innovation and Molecular Breeding (in preparation) (202204010910001-06); Shanxi Scholarship Council of China (2021-071); The Shanxi Agricultural Research System (Minor Crop) (2022-03)

of CAT was decreased. Collectively, the comprehensive index is more objective to evaluate the selenium efficient utilization of foxtail millet at 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^[1-6]。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部分硒通过硫代谢途径,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,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,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。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

205份谷子核心种质资源,由中国农业科学院作物科学研究所刁现民研究员提供,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 $\mu\text{mol/L}$ (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 $^{\circ}\text{C}$, 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:以茎上节根的着生点为起点,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:叶长×叶宽×0.785;茎粗:用游标卡尺测谷子主茎基部的读数;根长:位于植株根系中间部位的根长度;地上鲜重: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:根系总重量;根冠比:地下鲜重/地上鲜重。

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;根尖数即根毛的数量。

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10 5℃杀青30 min,85℃烘干箱中烘烤36 h(至恒重),按照国家标准《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^[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^[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。

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,并参考苑义川等^[29]评价方法对硒响应相关指标进行综合分析。

硒响应能力系数=11个性状处理组测量值/对照组(蒸馏水)测量值 (1)

硒响应能力系数比值大小代表硒响应能力的强弱。

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:

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

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

硒响应能力综合评价值:

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

D 代表各品种经过亚硒酸钠处理后对硒响应能力的综合评价值。

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亚硒酸钠处理下,除了根系总体积和根尖数下降外,其余性状均较对照有不同程度的升高;在0.5 mmol/L亚硒酸钠处理下,除了组织硒含量升高外,其余9个苗期性状的平均值较对照都呈现不同程度的下降趋势。对照组所测定性状的变异系数介于20.07%~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。 T_1 与 T_2 处理组所测定性状的硒响应能力系数的变异系数分别介于14.44%~77.07%与15.68%~77.51%之间(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。

2.2 谷子苗期硒响应指标的相关性分析

为了深入解析亚硒酸钠处理后谷子苗期各性状间的相关性,筛选极端硒响应能力的材料,对0.5 mmol/L亚硒酸钠处理下的11个硒响应能力系数进行相关性分析。分析发现,苗高与叶面积的硒响应能力系数呈极显著正相关,相关系数高达0.803;根长和根尖数的硒响应能力系数呈极显著正相关,相关系数达0.504;茎粗与叶面积的硒响应能力系数呈极显著正相关,其相关系数为0.508;地下鲜重与根冠比的硒响应能力系数呈极显著正相关,相关系数达0.713;此外,地上部硒含量与根长的硒响应能力系数呈极显著负相关,地下部硒含量与地上部硒含量的硒响应能力系数呈显著负相关(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。

2.3 谷子苗期硒响应指标的主成分分析

为将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。剔除特征根小于1的主成分,结果将11个单项指标简化为4个主成分,其中主成分1贡献率最大为28.19%,主要特征向量包含苗高、茎粗、叶面积、地上鲜重和地下鲜重,反映了大部分地上部因子的信息;第2主成分贡献率为15.778%,载荷较高的有根系总体积、根尖数等2个主要性状,反映了地下部因子;第3主成分贡献率为14.011%,主要载荷因子是根冠比;第4主成分载荷较高的是地上部硒含量和地下部硒含量,反映了谷子硒吸收能力,综合这4个主成分的累积贡献率达到67.634%,能代表原有性状指标的绝大部分信息(表3)。因此,本研究将通过这4个主成分对谷子苗期硒响应能力进行综合评价。

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

性状 Trait	对照组 Control					处理组 T ₁ Treatment T ₁					T ₁ 组硒响应能力系数 The ratio of selenium responsiveness under T ₁ treatment					处理组 T ₂ Treatment T ₂					T ₂ 组硒响应能力系数 The ratio of selenium responsiveness under T ₂ treatment				
	平均值	标准差	变异系数(%)	CV		平均值	标准差	变异系数(%)	CV		平均值	标准差	变异系数(%)	CV		平均值	标准差	变异系数(%)	CV		平均值	标准差	变异系数(%)	CV	
	Mean	SD				Mean	SD				Mean	SD				Mean	SD				Mean	SD			
苗高(cm) SH	12.527	3.486	27.83			13.968	3.962	25.98			1.132	0.166	14.66			11.519	3.328	28.89			0.934	0.196			20.99
根长(cm) RL	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(mm) DMS	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(cm ²) LA	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(g) AFW	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(g) UFW	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 RSR	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(cm ³) RV	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 T	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(mg/Kg) SS	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(mg/Kg) SR	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

T₁为0.3 mmol/L处理条件, T₂为0.5 mmol/L处理条件; 下同T₁ means the content of sodium selenite is 0.3 mmol/L, while T₂ means 0.5 mmol/L, while T₂ means 0.5 mmol/L; SH: Seedling height; RL: Root length; DMS: Diameter of main stem; LA: Leaf area; AFW: Aboveground fresh weight; UFW: Underground fresh weight; RSR: Root-shoot ratio; RV: Root volume; T: Tips; SS: Se-Shoot; SR: Se-Root; The same as below

表2 谷子苗期各性状(T_2/CK)硒响应能力系数的相关性分析
Table 2 Correlation analysis of Se response index of each character (T_2/CK) in foxtail millet at seedling stage

性状 Trait	苗高 SH	根长 RL	茎粗 DMS	叶面积 LA	地上鲜重 AFW	地下鲜重 UFW	根冠比 RSR	根系总体积 RV	根尖数 T	地上部硒含量 SS	地下部硒含量 SR
苗高 SH	1	0.346**	0.404**	0.803**	0.365**	0.393**	-0.016	0.091	0.118*	-0.005	-0.023
根长 RL		1	0.210**	0.366**	0.204**	0.314**	0.098	0.369**	0.504**	-0.205**	-0.059
茎粗 DMS			1	0.508**	0.197**	0.295**	0.004	-0.045	0.033	-0.131*	-0.028
叶面积 LA				1	0.318**	0.376**	-0.031	0.124*	0.065	-0.085	-0.045
地上鲜重 AFW					1	0.380**	-0.135	0.083	0.109	0	-0.092
地下鲜重 UFW						1	0.713**	0.034	0.102	-0.102	-0.074
根冠比 RSR							1	-0.028	0.023	-0.085	-0.053
根系总体积 RV								1	0.536	-0.089	-0.142*
根尖数 T									1	-0.121*	-0.087
地上部硒含量 SS										1	-0.135*
地下部硒含量 SR											1

*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著,下同
* and ** indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.The same as below

表3 各综合指标特征值、贡献率及各因子载荷矩阵
Table 3 Eigenvalues, contribution rate of each comprehensive index and loading matrix of each factor

指标 Index	因子载荷 Factor loading			
	1	2	3	4
苗高 SH	0.774	-0.282	-0.290	0.103
根长 RL	0.664	0.418	0.033	0.103
茎粗 DMS	0.565	-0.336	-0.171	-0.224
叶面积 LA	0.789	-0.287	-0.302	-0.016
地上鲜重 AFW	0.520	-0.128	-0.221	0.057
地下鲜重 UFW	0.674	-0.260	0.616	0.096
根冠比 RSR	0.219	-0.133	0.930	0.109
根系总体积 RV	0.335	0.735	-0.065	0.146
根尖数 T	0.403	0.739	0.017	0.193
地上部硒含量 SS	-0.222	-0.221	-0.188	0.687
地下部硒含量 SR	-0.152	-0.221	-0.045	0.660
特征根 Characteristic root	3.101	1.736	1.541	1.062
贡献率(%)Contributive ratio	28.190	15.778	14.011	9.655
累计贡献率(%) Cumulative contributive ratio	28.190	43.968	57.979	67.634

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4个主成分综合指标的隶属函数值 $\mu(X_j)$ 。由表4可知,在苗期亚硒酸钠处理下,隶属函数值 $\mu(X_i)$ 最小(0)的品种是B004,说明其在综合指标1中硒响应能力最弱; $\mu(X_i)$ 最大(1.000)的品种为B175,说明其在

综合指标1中硒响应能力最强; $\mu(X_2)\sim\mu(X_4)$ 中最小(0)的品种分别是B163、B163和B239,最大(1.000)的品种分别是B032、B254和B322。通过以上结果,发现4个综合指标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,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0.4167、0.2333、0.2072和0.1428,并根据公式(4)计算谷子苗期硒响应能力综合评价 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。

2.4.2 各品种硒响应能力的聚类分析 为了使本研究分类结果更为客观,采用TBtools软件,选择最大距离法对谷子苗期硒响应能力综合评价指标(D)值进行聚类分析(表4,图1),结果发现本研究所选用的205份谷子种质资源可以划分为5类。其中,第I类为硒响应能力最强的品种, D 值范围在0.568~0.683,包括来自北京的红钙谷(B328)、广西的广37(B175)和山西当地品种晋谷57(B083)等在内的16份材料;第II类为硒响应能力较强材料, D 值范围在0.471~0.555,包含45份材料;第III类 D 值范围在0.411~0.468,包含60份材料;第IV类硒响应能力较弱, D 值范围在0.330~0.409,包含66份材料;第V类为硒响应能力最弱的品种, D 值范围在0.224~0.319,共有18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)等。

表4 各品种的综合性状指标值、 $\mu(X)$ 及综合评价值(D)Table 4 Values of each comprehensive weight, $\mu(X)$, and comprehensive evaluation value(D)

品种 Variety	品种名称 Name	来源 Source	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	综合评价值(D) Comprehensive assessment value(D)	排名 Order
B328	红钙谷	中国北京中品开元	0.886	0.463	0.578	0.604	0.683	1
B175	广37	中国广西北海市	1.000	0.619	0.209	0.401	0.662	2
B007	红粘谷	中国黑龙江德都县	0.635	0.814	0.477	0.679	0.650	3
B254	糯粟	中国江苏省上饶市	0.580	0.640	1.000	0.298	0.641	4
B005	鸭子嘴	中国黑龙江克山县	0.688	0.522	0.658	0.589	0.629	5
B083	晋谷57	中国山西农科院谷子所	0.942	0.366	0.351	0.533	0.627	6
B084	Isc-455	美国爱俄华州	0.719	0.892	0.299	0.389	0.625	7
B208	338A	中国内蒙古赤峰	0.814	0.583	0.561	0.178	0.617	8
B070	石榴子	中国河北安国县	0.807	0.643	0.216	0.460	0.597	9
B048	毛毛亮	中国河北承德	0.694	0.655	0.387	0.468	0.589	10
B110	野生谷	中国山西省天镇县	0.731	0.638	0.263	0.497	0.579	11
B141	小紧穗	中国黑龙江省海伦市	0.501	0.886	0.458	0.471	0.578	12
B043	压塌车	中国山西定襄	0.453	0.852	0.436	0.687	0.576	13
B341	公谷65号	中国吉林省农科院作物所	0.501	0.797	0.546	0.454	0.572	14
B138	铁8396	中国辽宁铁岭市	0.504	0.707	0.436	0.735	0.570	15
B174	骡子尾	中国山东省菏泽县	0.825	0.542	0.183	0.419	0.568	16
B187	周里围	中国陕西省长安县	0.438	0.713	0.373	0.899	0.555	17
B032	碱谷	中国内蒙古包头	0.408	1.000	0.403	0.439	0.550	18
B148	野谷子	中国吉林省长春县	0.412	0.886	0.327	0.688	0.545	19
B182	禾谷子	中国山西省万荣县	0.464	0.819	0.420	0.501	0.543	20
B198	晋谷42	中国山西农科院谷子所	0.782	0.384	0.322	0.421	0.542	21
B085	Kraftborn	荷兰	0.698	0.441	0.324	0.534	0.537	22
B298	03-992	中国河北承德市农科所	0.513	0.701	0.584	0.259	0.535	23
B135	78-0625	中国黑龙江省农科院	0.493	0.745	0.390	0.517	0.534	24
B099	苞米混子	中国黑龙江省呼兰县	0.371	0.905	0.365	0.644	0.533	25
B109	白毛粱谷	中国山西省天镇县	0.571	0.862	0.348	0.140	0.531	26
B383	白谷6号	中国吉林省白城市农科院	0.536	0.771	0.354	0.380	0.531	27
B191	刀把齐	中国陕西省丹凤县	0.807	0.102	0.478	0.488	0.529	28
B168	酒谷	中国河北省赵县	0.486	0.777	0.398	0.367	0.519	29
B342	公谷68号	中国吉林省农科院作物所	0.409	0.572	0.645	0.539	0.514	30
B074	阴天旱	中国山东济阳县	0.507	0.616	0.487	0.352	0.506	31
B256	毛粟	中国江西省波阳县	0.444	0.800	0.334	0.452	0.506	32
B071	紫根红	中国河北临城县	0.424	0.825	0.406	0.368	0.506	33
B022	大毛毛谷	中国辽宁赤峰县	0.423	0.575	0.516	0.610	0.504	34
B332	陇谷11号	中国甘肃农科院作物所	0.635	0.701	0.163	0.289	0.503	35
B274	冀谷18	中国河北农科院谷子所	0.713	0.396	0.265	0.398	0.501	36
B166	茶清谷	中国天津市宁河县	0.575	0.341	0.252	0.896	0.499	37
B239	晋谷35	中国山西农科院谷子所	0.617	0.721	0.354	0.000	0.499	38
B317	济07610	中国山东农科院作物所	0.526	0.590	0.285	0.578	0.498	39
B323	鲁谷10号	中国山东农科院作物所	0.335	0.746	0.455	0.594	0.493	40
B105	红粘谷	中国内蒙古林西县	0.528	0.535	0.314	0.583	0.493	41
B001	泡子沿谷子-1	中国黑龙江省爱辉	0.427	0.883	0.235	0.384	0.488	42
B181	优质18号	中国山西省汾阳县	0.328	0.783	0.320	0.704	0.486	43
B130	八百年	中国河北省平泉县	0.465	0.666	0.318	0.486	0.485	44
B064	60天黄烫	中国山东临清	0.395	0.666	0.375	0.603	0.484	45
B349	谷丰1号	中国河北农科院谷子所	0.399	0.658	0.333	0.664	0.484	46

表4 (续)

品种 Variety	品种名称 Name	来源 Source	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	综合评价价值(D) Comprehensive assessment value(D)	排名 Order
B107	金香玉	中国内蒙古赤峰市	0.367	0.923	0.365	0.272	0.483	47
B345	朝谷13号	中国辽宁省农科院水保所	0.398	0.672	0.370	0.582	0.482	48
B094	黑谷2号	中国黑龙江黑河	0.532	0.480	0.248	0.678	0.482	49
B255	黄粟	中国江西省广丰县	0.477	0.652	0.352	0.393	0.480	50
B339	陇谷9号	中国甘肃农科院作物所	0.429	0.724	0.321	0.451	0.478	51
B264	蒙金谷1号	中国内蒙古市农牧科学院	0.815	0.024	0.418	0.325	0.478	52
B344	朝谷12号	中国辽宁省农科院水保所	0.419	0.668	0.372	0.496	0.478	53
B326	济谷13	中国山东农科院作物所	0.434	0.821	0.320	0.263	0.476	54
B252	粘子糯	中国四川省巫山县	0.375	0.688	0.457	0.437	0.474	55
B075	金屏谷子	中国山东蓬莱县	0.466	0.254	0.827	0.340	0.473	56
B123	白毛谷	中国青海省民和县	0.616	0.329	0.443	0.329	0.472	57
B364	公谷5号	中国吉林省农科院作物所	0.368	0.699	0.485	0.388	0.472	58
B275	冀谷19	中国河北农科院谷子所	0.408	0.665	0.319	0.562	0.471	59
B171	河北乌	中国河北广宗县	0.565	0.513	0.307	0.369	0.471	60
B314	豫谷14	中国河南安阳市农科院	0.424	0.681	0.321	0.482	0.471	61
B363	承谷12	中国河北承德市农科所	0.381	0.045	0.882	0.813	0.468	62
B359	沧555	中国河北沧州农科院	0.574	0.375	0.275	0.583	0.467	63
B360	冀谷12号	中国河北沧州农科院	0.390	0.746	0.317	0.443	0.465	64
B053	小金俊	中国河北东光	0.434	0.684	0.341	0.369	0.464	65
B019	小苗金	中国吉林白城	0.437	0.634	0.362	0.407	0.463	66
B129	谷子	中国新疆疏附县	0.410	0.584	0.339	0.600	0.463	67
B376	公谷71号	中国吉林省农科院作物所	0.449	0.613	0.355	0.403	0.461	68
B079	沙湾谷子	中国新疆	0.348	0.589	0.462	0.583	0.461	69
B046	猫蹄谷	中国山西壶关	0.361	0.639	0.381	0.576	0.461	70
B170	毛毛谷	中国河北宁晋县	0.437	0.623	0.311	0.471	0.459	71
B228	白沙榴	中国江苏省铜山县	0.462	0.567	0.344	0.431	0.458	72
B060	青谷	中国河南鹿邑	0.432	0.584	0.352	0.477	0.457	73
B184	黄九根齐	中国陕西省榆林市	0.378	0.635	0.351	0.550	0.457	74
B263	吃喝谷	中国湖北省襄阳县	0.333	0.778	0.346	0.452	0.457	75
B258	二白谷	中国新疆沙湾县	0.509	0.378	0.474	0.381	0.453	76
B152	红谷	中国宁夏西吉县	0.370	0.495	0.358	0.762	0.452	77
B056	秋毛羽	中国河南安阳	0.465	0.615	0.331	0.325	0.452	78
B179	黄单子谷	中国山西省大同市	0.490	0.494	0.193	0.648	0.452	79
B361	沧156	中国河北沧州农科院	0.594	0.266	0.407	0.401	0.451	80
B049	钱串紧谷	中国北京良乡	0.446	0.563	0.403	0.337	0.449	81
B316	济07607	中国山东农科院作物所	0.722	0.082	0.272	0.503	0.448	82
B215	郑448	中国河南省农科院	0.360	0.564	0.362	0.639	0.448	83
B203	小粒白不育系	中国河北张家口	0.353	0.728	0.396	0.327	0.446	84
B126	谷子	中国新疆吐鲁番市	0.380	0.726	0.187	0.553	0.445	85
B062	黄粘谷	中国山东荣城	0.400	0.601	0.377	0.413	0.444	86
B134	谷子×高粱	中国黑龙江	0.322	0.775	0.286	0.486	0.444	87
B172	八杈谷	中国河南台前县	0.404	0.683	0.308	0.352	0.442	88
B305	安07·海4065	中国河南安阳市农科院	0.353	0.657	0.401	0.407	0.441	89
B076	170.000	中国山东省农科院	0.459	0.506	0.334	0.438	0.441	90
B224	狗尾粟(小粟)	中国海南省儋县	0.452	0.602	0.444	0.126	0.439	91
B268	赤谷8号	中国内蒙古市农牧科学院	0.438	0.568	0.355	0.346	0.438	92
B014	日本谷	中国黑龙江海林	0.376	0.602	0.367	0.448	0.437	93

表 4 (续)

品种 Variety	品种名称 Name	来源 Source	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	综合评价值(D) Comprehensive assessment value(D)	排名 Order
B204	DA3 不育系	中国河北张家口	0.470	0.783	0.150	0.186	0.436	94
B050	黄苗谷子	中国北京	0.369	0.657	0.276	0.491	0.434	95
B120	金棒子	中国甘肃古浪县	0.477	0.447	0.238	0.569	0.434	96
B272	黄金苗(香谷)	中国内蒙古市农牧科学院	0.465	0.444	0.319	0.481	0.432	97
B177	济叶冲 1	中国山东省农科院	0.330	0.544	0.330	0.692	0.432	98
B302	安 04-4705	中国河南安阳市农科院	0.388	0.718	0.446	0.062	0.431	99
B139	野谷子-1	中国甘肃会宁县	0.304	0.569	0.405	0.607	0.430	100
B319	鲁谷 6 号	中国山东农科院作物所	0.261	0.774	0.332	0.501	0.430	101
B320	鲁谷 7 号	中国山东农科院作物所	0.363	0.477	0.374	0.623	0.429	102
B091	齐头黄	中国江苏铜山县	0.489	0.576	0.176	0.355	0.425	103
B047	黄大粒	中国河北逐鹿	0.441	0.467	0.458	0.259	0.425	104
B180	大同黄	中国山西省寿阳县	0.361	0.545	0.290	0.597	0.423	105
B218	铁 9037	中国辽宁省铁岭市	0.345	0.550	0.389	0.485	0.422	106
B378	公谷 73 号	中国吉林省农科院作物所	0.509	0.441	0.371	0.207	0.422	107
B012	红粘谷	中国黑龙江汤原	0.347	0.602	0.373	0.406	0.420	108
B122	小红谷	中国青海省化隆县	0.274	0.698	0.412	0.407	0.420	109
B318	鲁谷 5 号	中国山东农科院作物所	0.284	0.722	0.262	0.545	0.419	110
B375	公谷 70 号	中国吉林省农科院作物所	0.291	0.662	0.410	0.394	0.417	111
B299	黑谷子	中国河北承德市农科所	0.369	0.468	0.359	0.558	0.417	112
B210	粘小米	中国广西省天峨县	0.300	0.573	0.479	0.409	0.417	113
B080	晋谷 54	中国山西农科院谷子所	0.397	0.594	0.352	0.270	0.415	114
B350	谷丰 2 号	中国河北农科院谷子所	0.377	0.488	0.381	0.449	0.414	115
B102	红粘谷	中国吉林省辉南县	0.403	0.538	0.314	0.391	0.414	116
B095	龙爪粘	中国黑龙江省肇源县	0.413	0.576	0.208	0.448	0.413	117
B145	小黄谷子	中国吉林省大安市	0.311	0.510	0.553	0.352	0.413	118
B313	安 93-15	中国河南安阳市农科院	0.383	0.528	0.218	0.588	0.412	119
B325	济谷 12	中国山东农科院作物所	0.419	0.602	0.405	0.089	0.411	120
B237	大白条	中国宁夏惠农县	0.377	0.483	0.332	0.509	0.411	121
B346	冀乡 1 号	中国河北农科院谷子所	0.507	0.341	0.232	0.490	0.409	122
B096	金香玉	中国黑龙江省肇源县	0.409	0.506	0.374	0.295	0.408	123
B042	青软谷	中国山西山阴	0.377	0.352	0.415	0.578	0.408	124
B381	公矮 3 号	中国吉林省农科院作物所	0.312	0.683	0.323	0.357	0.407	125
B430	长农 35	中国山西省长治市	0.433	0.471	0.354	0.300	0.406	126
B031	白油沙	中国内蒙古凉城	0.363	0.554	0.379	0.329	0.406	127
B386	朝谷 14 号	中国辽宁省农科院水保所	0.373	0.484	0.365	0.434	0.406	128
B253	籼粟	中国江苏省上饶市	0.282	0.630	0.380	0.439	0.406	129
B029	碱谷	中国内蒙古兴和县	0.372	0.532	0.373	0.338	0.405	130
B092	珠沙糯	中国湖北保康县	0.602	0.187	0.183	0.503	0.404	131
B082	昭和糯	日本	0.414	0.536	0.362	0.212	0.403	132
B067	晋谷 21	中国山西农科院谷子所	0.444	0.522	0.273	0.274	0.402	133
B310	豫谷 2 号	中国河南安阳市农科院	0.298	0.758	0.196	0.418	0.401	134
B322	鲁谷 9 号	中国山东农科院作物所	0.194	0.305	0.506	1.000	0.400	135
B068	佛手	中国天津市蓟县	0.547	0.412	0.166	0.290	0.400	136
B195	大红毛谷	中国甘肃省临洮县	0.270	0.736	0.290	0.382	0.399	137
B183	白酒谷	中国陕西省神木县	0.303	0.409	0.327	0.749	0.397	138
B199	猫屎谷	中国青海省化隆县	0.274	0.663	0.326	0.421	0.396	139
B038	大青苗鱼刺	中国甘肃会宁	0.251	0.685	0.360	0.400	0.396	140

表 4 (续)

品种 Variety	品种名称 Name	来源 Source	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	综合评价价值(D) Comprehensive assessment value(D)	排名 Order
B209	西 1-2-4	中国陕西农科院	0.434	0.347	0.309	0.468	0.393	141
B045	向阳谷	中国山西中阳	0.243	0.434	0.586	0.481	0.393	142
B028	气死糜子	中国辽宁海城	0.330	0.454	0.501	0.319	0.392	143
B055	绳头黄谷	中国河南浚县	0.409	0.509	0.191	0.443	0.392	144
B093	晋谷 29	中国山西农科院谷子所	0.308	0.597	0.216	0.548	0.391	145
B335	陇谷 5 号	中国甘肃农科院作物所	0.395	0.337	0.377	0.458	0.387	146
B097	勾根	中国黑龙江省庆安县	0.357	0.548	0.273	0.375	0.387	147
B121	小苗谷	中国宁夏固原县	0.470	0.462	0.218	0.254	0.385	148
B213	Ise1474	国际半干旱研究所	0.299	0.429	0.456	0.442	0.382	149
B054	小紫根	中国河北吴桥	0.396	0.421	0.322	0.361	0.382	150
B125	谷子	中国青海省民和县	0.403	0.364	0.385	0.324	0.379	151
B425	大白谷(广灵)	中国山西省广灵县	0.385	0.406	0.386	0.302	0.378	152
B219	2651662.000	中国农科院品资所	0.283	0.409	0.436	0.510	0.376	153
B207	选三 4n	中国陕西省农科院	0.441	0.137	0.405	0.536	0.376	154
B297	宽九	中国河北承德市农科所	0.381	0.422	0.434	0.183	0.374	155
B330	金穗谷 1 号	中国甘肃省平凉农科所	0.379	0.309	0.398	0.399	0.369	156
B103	鸭子嘴	中国吉林省辉南县	0.366	0.400	0.469	0.180	0.369	157
B018	备荒四号	莫斯科	0.299	0.456	0.405	0.376	0.368	158
B186	然谷	中国陕西省华阴县	0.279	0.585	0.292	0.376	0.367	159
B340	陇粟 2 号	中国甘肃农科院作物所	0.348	0.478	0.292	0.348	0.367	160
B217	郑 737(9)	中国河南省农科院	0.391	0.430	0.288	0.301	0.366	161
B059	新农谷②	中国河南新乡	0.365	0.377	0.418	0.270	0.365	162
B190	红酒谷	中国陕西省麟游县	0.230	0.660	0.201	0.513	0.365	163
B034	饿死牛谷	中国内蒙古丰镇	0.289	0.546	0.354	0.293	0.363	164
B321	鲁谷 8 号	中国山东农科院作物所	0.284	0.407	0.414	0.445	0.362	165
B015	刀把齐	中国黑龙江阿城县	0.317	0.443	0.347	0.384	0.362	166
B324	济谷 11	中国山东农科院作物所	0.323	0.531	0.289	0.280	0.358	167
B163	黄谷	中国西藏墨脱县	0.704	0	0	0.445	0.357	168
B066	早谷	中国山东胶南	0.258	0.339	0.345	0.689	0.356	169
B057	枪鞭穗	中国河南孟县	0.241	0.494	0.397	0.401	0.355	170
B257	芝麻粟	中国江西省波阳县	0.345	0.322	0.361	0.427	0.355	171
B052	露米青谷	中国河北涉县	0.395	0.369	0.262	0.343	0.354	172
B309	豫谷 1 号	中国河南安阳市农科院	0.292	0.538	0.316	0.277	0.352	173
B276	冀谷 20	中国河北农科院谷子所	0.260	0.543	0.344	0.319	0.352	174
B336	陇谷 6 号	中国甘肃农科院作物所	0.182	0.446	0.362	0.675	0.351	175
B301	保谷 18	中国河北保定市农科所	0.319	0.410	0.479	0.152	0.349	176
B147	鸭子嘴	中国吉林省长岭县	0.274	0.466	0.365	0.355	0.349	177
B101	假金苗	中国内蒙古呼盟扎旗	0.276	0.435	0.335	0.437	0.348	178
B026	锦谷 5 号	中国辽宁锦州市农科所	0.320	0.404	0.375	0.290	0.347	179
B010	黄沙突出谷	中国黑龙江安达	0.386	0.184	0.441	0.320	0.341	180
B327	济谷 14	中国山东农科院作物所	0.412	0.258	0.204	0.465	0.341	181
B333	陇谷 3 号	中国甘肃农科院作物所	0.333	0.305	0.406	0.320	0.340	182
B379	公谷 74 号	中国吉林省农科院作物所	0.278	0.617	0.322	0.085	0.339	183
B108	藕粒红	中国内蒙古宁城县	0.372	0.412	0.382	0.054	0.338	184
B131	小乌谷子	中国河北承德	0.395	0.213	0.245	0.477	0.333	185
B277	冀谷 21	中国河北农科院谷子所	0.337	0.367	0.328	0.254	0.330	186
B023	大罕蛋粘谷	中国辽宁宁城县	0.288	0.431	0.328	0.292	0.330	187

表 4 (续)								
品种	品种名称	来源	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	综合评价值(D)	排名
Variety	Name	Source					Comprehensive assessment value(D)	Order
B027	龙谷	中国辽宁台安	0.255	0.438	0.348	0.271	0.319	188
B020	黄粘谷	中国吉林通化	0.324	0.344	0.280	0.320	0.319	189
B176	济矮秆 6	中国山东省农科院	0.329	0.324	0.339	0.244	0.318	190
B024	紧刀把齐	中国辽宁阜新	0.279	0.300	0.367	0.384	0.317	191
B382	公矮 4 号	中国吉林省农科院作物所	0.288	0.486	0.314	0.115	0.315	192
B137	2450473.000	中国吉林长春	0.217	0.336	0.286	0.599	0.314	193
B347	冀谷 25	中国河北农科院谷子所	0.279	0.452	0.251	0.263	0.311	194
B003	大糟皮	中国黑龙江嫩江县	0.401	0.213	0.350	0.149	0.310	195
B365	公谷 5-1	中国吉林省农科院作物所	0.255	0.383	0.348	0.278	0.307	196
B188	白料姜	中国陕西省三原县	0.111	0.445	0.400	0.512	0.306	197
B279	冀谷 24	中国河北农科院谷子所	0.256	0.236	0.341	0.483	0.301	198
B150	红苗牛头沟	中国内蒙古赤峰市	0.298	0.180	0.252	0.566	0.299	199
B290	沧 409	中国河北沧州农科院	0.225	0.393	0.257	0.293	0.281	200
B127	谷子	中国新疆米泉市	0.139	0.432	0.344	0.344	0.279	201
B348	白米 1 号	中国河北农科院谷子所	0.257	0.195	0.270	0.436	0.271	202
B169	齐头白	中国河北衡水市	0.227	0.214	0.238	0.508	0.266	203
B162	乐山白糯	中国四川乐山市	0.069	0.349	0.263	0.522	0.239	204
B004	糟皮-刀把齐	中国黑龙江嫩江县	0	0.447	0.322	0.370	0.224	205

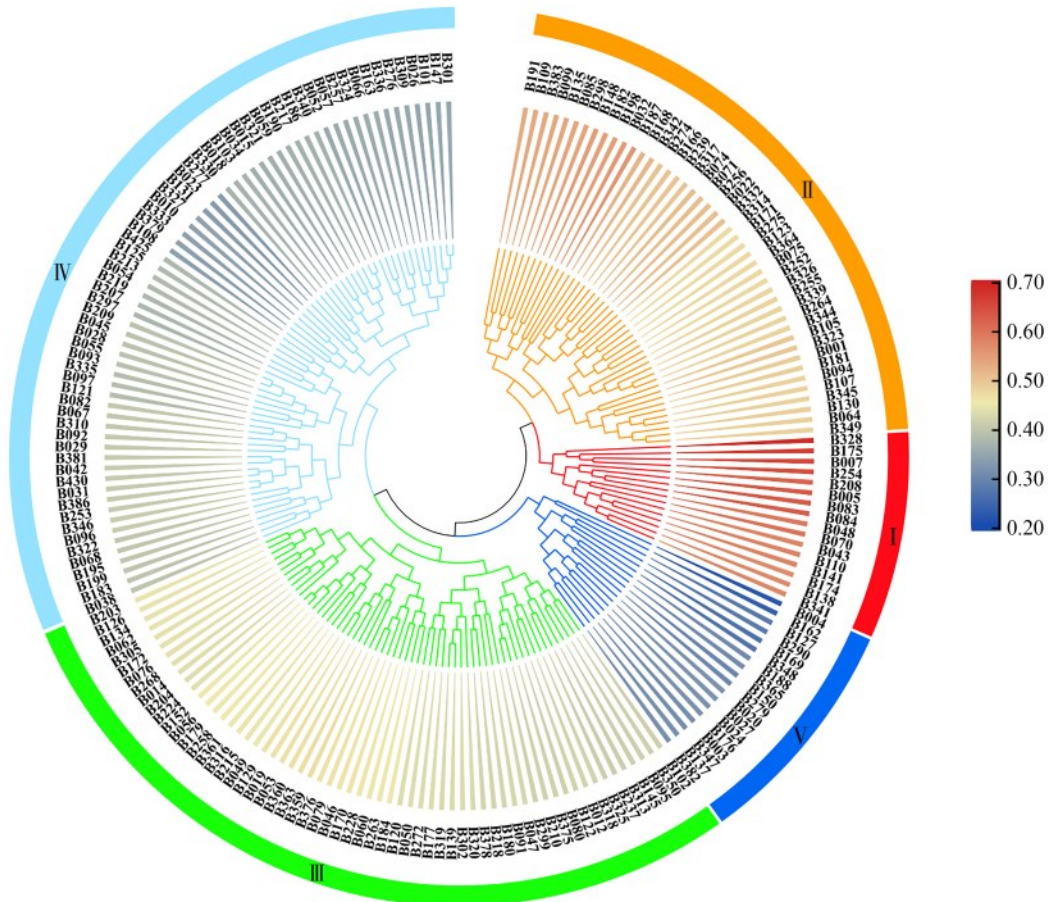


图 1 205 份谷子品种的硒响应能力聚类图

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。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 T_2 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。

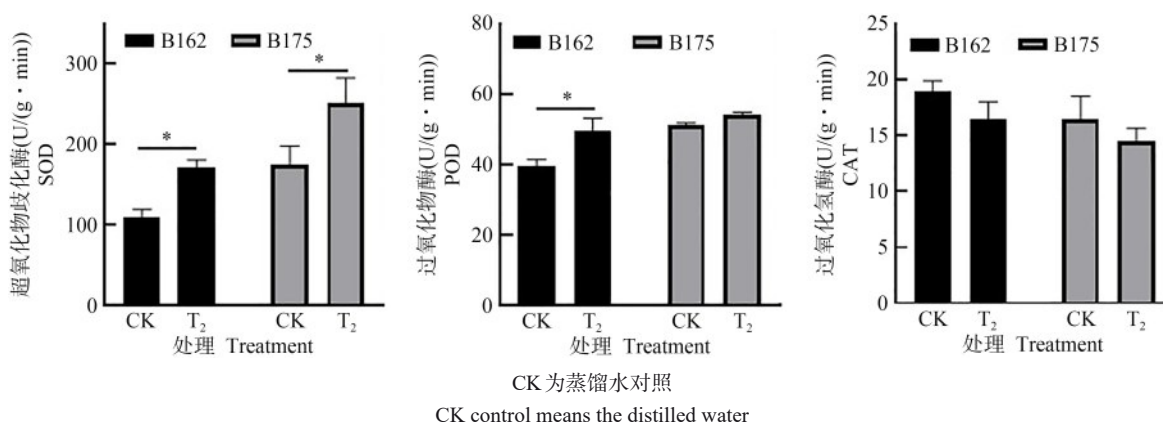


图2 不同亚硒酸钠处理下谷子叶片酶活性的比较

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。本研究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,为富硒谷子育种和生产提供材料和数据支持。本研究根据前期试验结果(未发表)设置了两个硒浓度,其中 T_1 处理下,谷子的苗期性状除了根系总体积和根尖数下降外,其余性状均较对照有不同程度的升高;而在 T_2 处理下,除了组织硒含量升高外,其余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。这可能是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],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0.3 mmol/L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^[23]的研究结果相似,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,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]。通过将各品种来源地等信息比较发现,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,也值得进一步的研究。

另外,有研究发现苗期鉴定的不同硒响应能力的品种如硒高效材料冀谷18、白谷6号和苞米混子以及硒低效材料大糟皮、紧刀把齐和齐头白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,本研究鉴定出的这些苗期表现出较高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 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 CAT 酶活性在 0.5 mmol/L 亚硒酸钠处理后下降, 类似的现象在穆婷婷等^[23]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, 本研究测得的苗高、叶面积、根冠比以及地上部硒含量和地下部硒含量等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. *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. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2014, 1(1): 16-20
- [3] Dwivedi S L, Upadhaya H D, Senthilvel S, Jr C T H, Fukunaga K, Diao X M, Santra D, Baltensperger D, Prasad M. Millets: Genetic and genomic resources. *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. *生命科学*, 2017, 29(3): 292-301
- [5] 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. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2017, 29(3): 292-301
- [6] Hu H, Mauro-Herrera M, Doust A N. Domestication and improvement in the model C4 grass *Setaria*. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 719
- [7] 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. *Nature Plants*, 2020, 6: 1167-1178
- [8] Lu H, Zhang J, Liu K B. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(18): 7367-7372
- [9] 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 domesticaiton, metabolite traits and anti-inflammatory effects. *Molecular Plant*, 2022, DOI: 10.1016/J.MOLP.2022.07.003
- [10] 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. *农业现代化研究*, 2014, 35(5): 531-535
- [11] Li S G, Liu F, Liu M, Zhao Y, Wang H J. The current industry situation, development trend, and suggestions for the future of foxtail millet in China. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(5): 531-535
- [12] 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. *作物学报*, 2012, 38(5): 800-807
- [13] 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.]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(5): 800-807
- [14] 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. *粮油食品科技*, 2022, 30(4): 60-67
- [15] Li S G, Liu F, Liu M, Zhao W Q, Zhao Y. Historical evolution and future development direction of foxtail millet planting in china. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(4): 60-67
- [16] Amadou I, Gounga M E, Le G W. Millets: Nutritional composition, some health benefits and processing. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2013, 25: 501-508
- [17] kumar A, Tomer V, Kaur A, Kumar V, Gupta K. Millets: A solution to agrarian agaand nutritional challenges. *Agriculture Food Security*, 2018, 7: 31
- [18] Rayman M P. Selenium and human health. *The Lancet*, 2012, 379: 1256-1268

- [15] Wang Z J, Gao Y X. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments. *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. *Enviroment International*, 2018, 112: 294-309
- [17] Ellis D R, Salt D E. Plants, selenium and human health. *Current Opinion Plant Biology*, 2003, 6(3): 273-279
- [18] Mora M L, Durán P, Acuña A J, Cartes P, Demanet R, Gianfreda L. Improving selenium status in plant nutrition and quality. *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. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(51): 15061-15073
- [20] Filho J A C, Sobrinho R R, Raschlati S F. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and its role in plant nutrition in sustainable agriculture. *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. *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. *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. *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. *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. *中国土壤与肥料*, 2015 (4): 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. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015 (4): 112-117
- [25] 李星星, 韩芳, 周雪, 苏乐平, 袁宏安. 富硒谷子研究进展. *中国农学通报*, 2022, 38(7): 1-6
Li X X, Han F, Zhou X, Su L P, Yuan H A. Research progress of selenium-enriched millet. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(7): 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. *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. *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. *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. *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. *中国种业*, 2022(4): 4-6
Diao X M. Breeding innovation brings about new development of foxtail millet seed industry. *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. *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. *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. *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. *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. *作物杂志*, 2019(6): 43-49
Zhang D, Miao X F, Wang Y T. Evaluation and screening of salt tolerance in 100 foxtail millet at germination stage. *Crops*, 2019(6): 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. *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. *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. *现代农业科技*, 2020(4): 4-5
Jia L L, Wang L, Chen J Q, Chen H K. Research progress on effects of selenium on crops. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(4): 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. *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). *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 I, Pais I P, Silva M M, Pessoa M F, Reboredo F H. Selenium biofortification of rice grains and implications on macronutrients quality. *Experimental Agriculture*, 2018, 81: 22-29
- [37] White P J. Selenium accumulation by plants. *Annals of Botany*, 2016, 117(2):217-235
- [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. *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. 太谷:山西农业大学, 2021
- Yu G H. Evaluation of se-enrichment effect on foxtail millet core germplasm resources and genome-wide association analysis of related traits. Taigu: Shanxi Agricultural University, 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. 太谷:山西农业大学, 2022
- Wang H. Identification of selenium-responsive candidate genes in foxtail millet based on GWAS and transcriptome sequencing. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022
- [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. *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. *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. *Plants (Basel)*, 2021, 10(4):719