

韩芳,韩向东,苏乐平,等.叶面喷施纳米硒对不同基因型谷子农艺性状、硒含量及产量和品质的影响[J].江苏农业科学,2024,52(12):89-95.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.12.012

叶面喷施纳米硒对不同基因型谷子农艺性状、硒含量及产量和品质的影响

韩芳¹,韩向东²,苏乐平¹,周雪¹,李星星¹,郭玮¹,牛宏伟¹,袁宏安¹

(1.延安市农业科学研究院,陕西延安 716000;2.陕西省延安市土壤肥料工作站,陕西延安 716000)

摘要:探究不同基因型谷子对纳米硒的响应,为延安谷子种质资源硒富集高效利用和遗传改良提供参考依据。以 9 份来自不同生态区的延安市谷子主栽品种为试验材料,于灌浆中期和后期叶面喷施 375 g/hm² 的纳米富硒营养剂,设置清水对照,分析和比较不同谷子品种在纳米硒处理后农艺性状、产量、籽粒米色、品质及硒含量的变化。结果表明,延安市谷子主栽品种分为 2 类群,一类是硒敏感型材料:晋汾 107、李渠黑谷和延谷 14,经纳米硒处理后,各项农艺性状、产量下降明显,除晋汾 107 外,李渠黑谷和延谷 14 的大部分籽粒米色、品质均提升;另一类是耐硒型材料:晋谷 40、衡谷 36、长生 13、晋谷 21、陕豫谷 3 号、长生 07,经纳米硒处理后,各项农艺性状、产量上升明显,除长生 07、陕豫谷 3 号、长生 13 外,晋谷 40、晋谷 21、衡谷 36 的大部分籽粒米色、品质均上升。可见,叶面喷施 375 g/hm² 的纳米硒可以显著($P < 0.05$)增加谷子的硒含量、产量、穗重、穗粒重、千粒重、穗长、株高、茎粗、穗粗、粗蛋白和粗纤维含量;对谷子籽粒米色没有影响。不同类型的谷子品种对高浓度硒的响应不同。

关键词:谷子;纳米硒;硒敏感性;产量;农艺性状;品质指标

中图分类号:S515.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)12-0089-07

谷子属于黍亚科狗尾草属,又称粟,是我国古代先民的主要口粮之一,也是我国的重要杂粮之一^[1-2]。谷子不仅与中国革命紧密相连,曾为延安革命根据地提供了重要的粮食支持,而且具有丰富的营养价值和突出的医药保健作用,还能耐旱、耐瘠薄、抗逆性强、适应性^[3-5]。谷子的品质提升是育种家和栽培家共同关注的焦点^[6],硒是一种重要的微量元素,对人体健康有着重要作用,但我国多数地区土壤硒含量较低,导致硒缺乏症的发生。近年来,外源硒也被发现可以影响植物的生长发育和品质^[7]。因此,通过叶面喷施外源纳米硒来提升谷子的硒含量和品质是一种新颖而有效的方法,对于促进谷子产业发展和改善人们营养状况具有重要

意义。

目前,多个研究报道叶面喷施无机硒肥对水稻、小麦、玉米、大豆、马铃薯等作物的效果^[8-12]。其中彭涛等研究报道叶面喷施硒肥能明显提高小麦产量和籽粒的硒含量,产量增幅达 0.9% ~ 5.5%^[13]。段门俊等叶面喷施 Na₂SeO₃ 能增加再生稻产量,提升再生稻米品质和精米率,降低垩白率^[14]。候青光等研究表明,在玉米拔节期和大喇叭口期喷施硒肥可显著或极显著提高产量^[10]。潘丽萍等研究表明,膨大期喷施硒肥对马铃薯产量、矿质元素及品质均有促进作用^[12]。但作物研究中常喷施的硒以亚硒酸盐和硒酸盐等无机硒为主,此类物质有毒性大、难吸收、利用率低、污染强等缺点,相比之下,纳米硒具有毒性低、结构稳定、生物活性高、污染小等优点,受到人们广泛关注^[15]。已有研究发现,马铃薯、绿豆中喷施纳米硒可以提高作物的产量、品质、矿质元素^[16-17]。然而,目前谷子纳米硒研究大部分集中在单一品种或单一生态区谷子生理特性、产量品质等方面的影响,尤其缺乏不同谷子种质资源纳米硒高效资源筛选鉴定^[18-20]。本研究以 9 份不同生态区延安市谷子主栽品种为试验材料,于灌浆中期和后期喷施 375 g/hm² 纳米富硒

收稿日期:2023-11-14

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-06-14.5-B28);陕西省重点研发计划(编号:2023-YBNY-017);延安市科技计划(编号:2023-CYL-172)。

作者简介:韩芳(1971—),女,陕西宜川人,高级农艺师,从事谷子栽培与遗传育种研究。E-mail:206490534@qq.com。

通信作者:苏乐平,硕士,农艺师,从事谷子栽培与遗传育种研究, E-mail:sltp2015@163.com;袁宏安,研究员,从事谷子栽培与遗传育种研究, E-mail:nksyha@sina.com。

营养剂,分析和比较它们产量、农艺性状、籽粒米色、品质和硒含量的变化,并结合聚类分析,筛选出较强的富硒谷子主栽品种,为后期谷子纳米硒高效品种改良和机理研究提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为延安市谷子主栽品种长生 07、晋汾 107、衡谷 36、陕豫谷 3 号、长生 13、延谷 14、晋谷 21、晋谷 40、李渠黑谷均由延安市农业科学研究院谷子课题组提供,这些品种经过了前期引种试验筛选,具有较大的遗传背景差异大,来源于不同的生态区,其中,山西 5 份,陕西 3 份,河北 1 份。试验硒肥是为纳米富硒营养剂(氨基酸型),由中农硒科富硒农业技术研究院提供。

1.2 试验设计

田间试验于 2021 年在陕西省延安市安塞区延安市农业科学研究所沙渠湾基地(109°20′51.4″E, 36°47′58.3″N)进行。试验地土壤类型为沙壤土,为 2018 年新造耕地,前茬种植大豆,土层土壤 pH 值为 8.45,有机质含量为 6.31 g/kg,全氮含量为 0.49 g/kg,有效磷含量为 3.44 mg/kg,速效钾含量为 122.2 mg/kg,总硒含量为 0.24 mg/kg。

采用裂区设计^[21],小区长 3 m,宽 5 m,面积为 15 m²,重复 3 次。于灌浆中期(播种后 16 周)和后期(播种后 17 周)分别对 9 个延安市谷子主栽品种喷施纳米富硒营养剂,硒肥处理浓度按照纳米硒肥产品使用方法为 375 g/hm²,设置清水对照,兑水 450 L/hm²。2021 年 5 月 8 日播种,5 月 26 日间苗,6 月 21 日定苗,定苗密度为 45 万株/hm²,10 月 25 日收获。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 农艺性状调查与小区产量测定 谷子成熟后,从每个小区连续选取长势均匀的 5 株植株,参照文献[22]测量株高、茎粗、穗长、穗粗、穗重、穗粒重、千粒重。收取各个小区的全部谷子,进行测产。

1.3.2 米色测定 各个小区的谷子脱粒后,利用 JLGJ-B-45 型检验砻谷机进行脱壳、分筛、去杂后,用色差仪(ColorReader CR7)测定各个小区的米色亮度(L^*)、红绿值(a^*)、黄蓝值(b^*),并计算橘色颜色指数^[2]:

$$CCI = 1\,000 \times a^* / (L^* \times b^*)。$$

1.3.3 品质测定 蛋白质含量测定按照 GB

5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法进行;脂肪含量测定按照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》酸水解法进行;粗纤维含量测定按照 GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》进行;赖氨酸测定按照染料结合赖氨酸法-DBL 法进行^[23]。每个材料测定 3 个平行样。

1.3.4 硒含量测定 按照 GB 5009.93—2017《食品安全国家标准 食品中硒的测定》用氢化物原子荧光光谱法测定谷子籽粒硒含量。

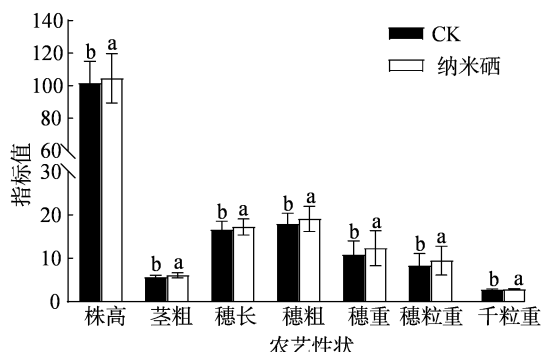
1.4 数据分析

试验数据采用 Graphpad Prism 9.5 绘制图表、SAS 进行方差分析和多重比较分析,利用 SPSS 25 进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 喷施纳米硒对谷子主要农艺性状及产量的影响

由图 1 可知,纳米硒处理显著提高了谷子的株高、穗重、穗粒重、穗长、茎粗、穗粗和千粒重,分别增加了 2.88 cm、1.09 g、0.95 g、0.63 cm、0.42 mm、0.37 mm、0.05 g。纳米硒处理还显著提高了谷子的折合产量,平均增加了 236.79 kg/hm²,为 3 806.67 kg/hm²,而对照的折合产量为 3 569.88 kg/hm²。结果表明,叶面喷施纳米硒肥能够促进谷子的生长发育,提高产量,增加其农艺性状。



柱上不同小写字母表示喷施纳米硒处理与对照之间在 0.05 水平上差异显著,下同

图1 喷施纳米硒对谷子农艺性状的影响

2.2 喷施纳米硒对谷子籽粒米色、品质及硒含量的影响

由表 1 可知,经纳米硒处理后,所有谷子籽粒的 L^* 、 a^* 、 b^* 值均为正值,但与对照相比,没有显著变化,对谷子籽粒的橘色颜色指数(CCI)也没有显著

影响。纳米硒处理对谷子籽粒的粗纤维、粗脂肪、粗蛋白、赖氨酸、硒含量均有影响,其中粗纤维含量显著增加了 10.77%,粗蛋白含量显著增加了 9.26%,赖氨酸含量显著降低了 9.38%,粗脂肪含量降低了 0.42%。此外,灌浆中后期叶面喷施纳米硒可显著提高谷子籽粒中的硒含量,纳米硒处理前

谷子籽粒硒平均含量为 0.001 mg/kg;硒处理后,谷子籽粒硒平均含量为 1.102 mg/kg。结果表明,叶面喷施纳米硒能够改善谷子籽粒的品质,增加其粗纤维和粗蛋白含量,降低其赖氨酸和粗脂肪含量,但不影响其米色。

表 1 喷施纳米硒对谷子米色、品质及硒含量的影响

处理	米色				品质				硒含量 (mg/kg)
	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	CCI	粗纤维含量 (%)	粗脂肪含量 (%)	粗蛋白含量 (%)	赖氨酸含量 (%)	
CK	56.97±1.25a	8.37±0.38a	38.21±1.57a	3.72±0.19a	1.95±0.10b	4.80±0.13a	11.99±0.41b	0.32±0.02a	0.001b
纳米硒	56.97±1.14a	8.36±0.41a	38.17±1.59a	3.72±0.18a	2.16±0.14a	4.78±0.10a	13.10±0.41a	0.29±0.01b	1.102±0.02a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表 2 同。

2.3 喷施纳米硒对不同谷子品种之间主要农艺性状和产量的影响

灌浆中期和后期喷施 375 g/hm² 的纳米硒后,不同谷子品种的农艺性状(株高、茎粗、穗长、穗粗、穗重、穗粒重、千粒重)变化存在差异(图 2)。李渠黑谷、延谷 14、晋汾 107 的株高降低,降幅分别为 5.03、4.71、3.76 cm,6 个谷子品种的株高较对照上升,晋谷 21 的增幅最大,为 15.61 cm;9 个谷子品种中,晋汾 107 的茎粗明显降低,降幅为 0.44 mm,8 个谷子品种的茎粗增加,陕豫谷 3 号的增幅最大,为 1.21 mm;5 个品种的穗长较对照有所增加,其中陕豫谷 3 号、长生 13、衡谷 36、晋谷 21 经纳米硒处理后穗长增幅分别为 3.55、2.03、1.89、1.10 cm,延谷 14 经纳米硒处理后穗长降低,降幅为 1.99 cm;纳米硒处理后 7 个谷子的穗粗较对照增加,晋谷 21、长生 13、衡谷 36 的增幅均在 2.00 mm 以上,其中晋谷 21 的增幅最大,为 3.39 mm,李渠黑谷、延谷 14 经纳米硒处理以后穗粗下降,李渠黑谷的降幅最大,为 1.75 mm;纳米硒仅降低了晋谷 21、李渠黑谷、延谷 14 的穗重,增加了其他品种的穗重,增幅最大的品种是陕豫谷 3 号,为 5.21 g;7 个谷子品种的穗粒重增加,其中陕豫谷 3 号、衡谷 36、长生 13 的增幅均在 2.00 g 以上,陕豫谷 3 号的增幅最大,为 3.64 g,李渠黑谷、延谷 14 经纳米硒处理以后穗粗重明显下降,李渠黑谷的降幅最大,为 2.86 g;纳米硒对不同谷子品种的千粒重的影响差异较大,4 个品种的千粒重减小,5 个品种的千粒重增加,其中陕豫谷 3 号的增幅最大,为 0.39 g。灌浆中后期喷施 375 g/hm² 的纳米硒对不同谷子品种产量具有较大

的影响,晋谷 40、衡谷 36、长生 07、陕豫谷 3 号、晋谷 21、长生 13 产量在纳米硒处理下增产,其中晋谷 40 的增幅最大,为 751.11 kg/hm²,晋汾 107、延谷 14、李渠黑谷产量在纳米硒处理下减产,其中晋汾 107 的降幅最大,为 428.89 kg/hm²(图 3)。结果表明,叶面喷施纳米硒对于不同谷子品种的农艺性状和产量改变存在差异。

2.4 喷施纳米硒对不同谷子品种之间米色及品质的影响

经纳米硒处理后,不同谷子品种的 *L*^{*}、*a*^{*}、*b*^{*} 值均为正值,并存在变化(表 2)。晋谷 40、延谷 14、衡谷 36、李渠黑谷的 *L*^{*} 值均上升,*L*^{*} 值越大米色越亮,晋谷 40 的增幅最大,为 4.21;延谷 14、晋谷 40、衡谷 36、晋谷 21、李渠黑谷的 *a*^{*} 值均增大,*a*^{*} 值越大米色越红,延谷 14 的增幅最大,为 0.82;延谷 14、晋谷 40、衡谷 36、李渠黑谷、晋谷 21 的 *b*^{*} 值均增大,*b*^{*} 值越大米色越黄,延谷 14 的增幅最大,为 2.60;衡谷 36、长生 07、长生 13、晋谷 21、延谷 14 的米色综合指标(CCI 值)均得到提升。

不同谷子品种之间的品质性状包括粗纤维、粗脂肪、粗蛋白、赖氨酸经纳米硒处理后,均有不同程度的响应(表 2)。其中,衡谷 36、延谷 14、晋汾 107、晋谷 40、长生 07、晋谷 21、李渠黑谷的粗纤维含量增加,衡谷 36 的增幅最大,增加了 0.74 百分点;李渠黑谷、衡谷 36、晋谷 21 的粗脂肪含量均上升,李渠黑谷的增幅最大,增加了 0.30 百分点,延谷 14、长生 13 的粗脂肪含量在纳米硒处理后变化不大;长生 13、陕豫谷 3 号、晋汾 107、延谷 14、衡谷 36、李渠黑谷、晋谷 40 的粗蛋白含量均上升,长生 13 的增幅最

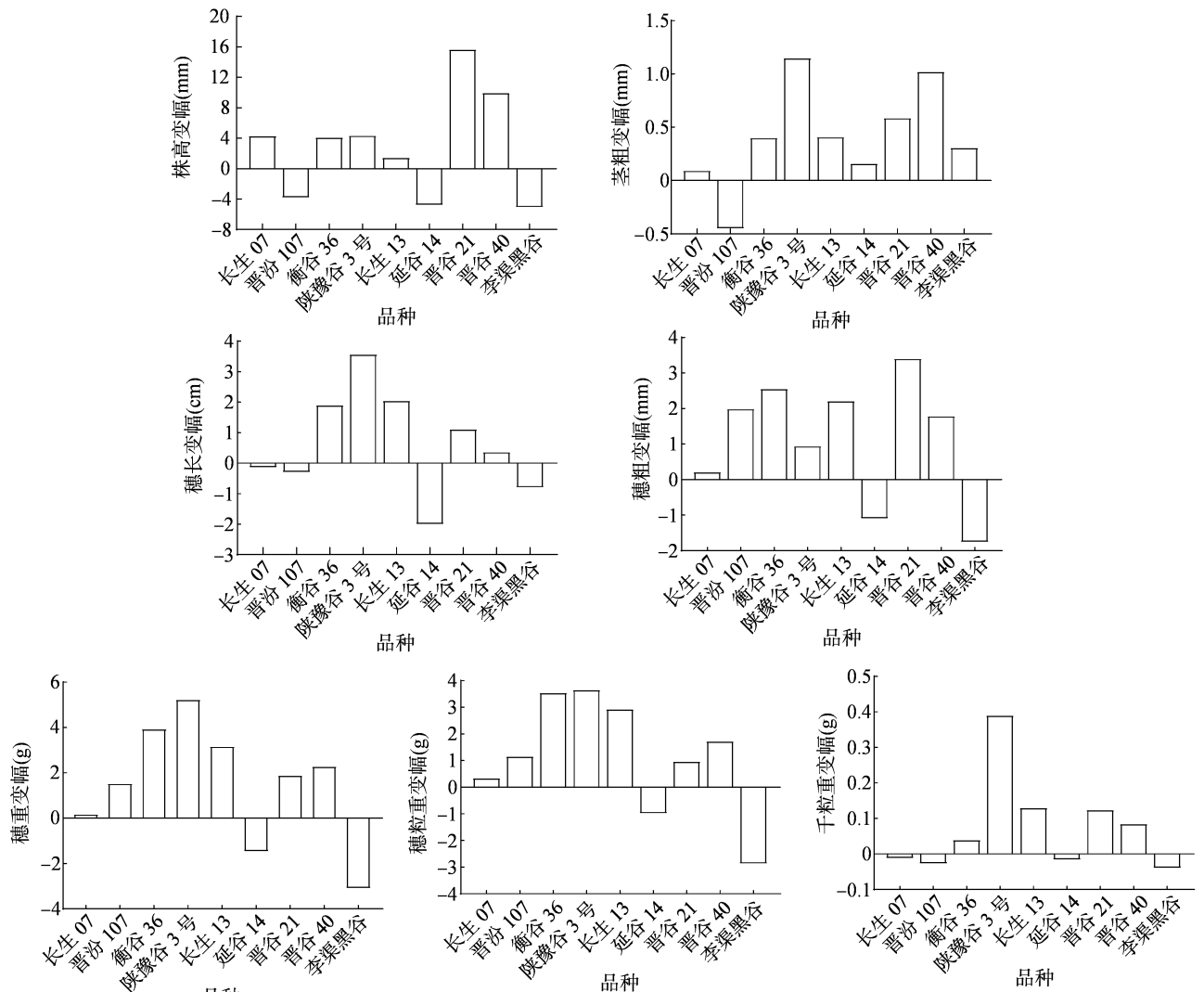


图2 喷施纳米硒对不同品种谷子农艺性状的变化

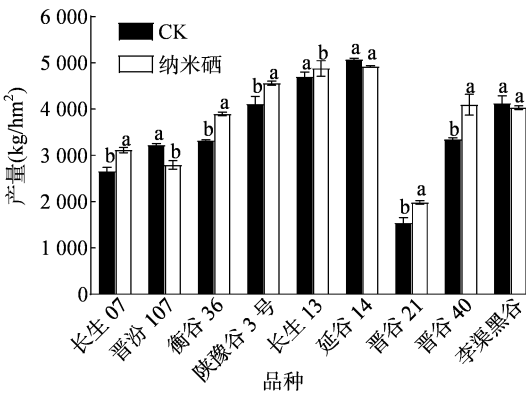


图3 喷施纳米硒对不同品种谷子产量的影响

大,增加了 3.94 百分点;所有谷子品种的赖氨酸含量对纳米硒处理的响应较小,仅有晋谷 40、长生 13 的赖氨酸含量得到提升,长生 07 处理前后赖氨酸含量无明显变化,其他品种的赖氨酸含量降低。

2.5 喷施纳米硒对不同谷子品种籽粒硒含量的影响

灌浆中期和后期喷施 375 g/hm^2 的纳米硒明显提高了不同谷子品种籽粒硒含量(图 4)。9 个延安市主栽品种中,长生 07、李渠黑谷、晋谷 40、晋汾 107 的硒含量增值均在 0.95 mg/kg 以上,长生 07 的增值最大,为 2.93 mg/kg ;晋谷 21、长生 13、衡谷 36、延谷 14、陕豫谷 3 号的硒含量增值均在 0.34 mg/kg 以下,陕豫谷 3 号的增值最小,为 0.21 mg/kg 。

2.6 延安市谷子主栽品种的聚类分析

根据不同谷子品种经纳米硒处理后农艺性状、产量、籽粒米色、品质及硒含量的变化值做聚类分析。在欧式距离 10 处,可将 9 个延安市谷子主栽品种分成 2 类(图 5)。一类是晋汾 107、李渠黑谷和延

表 2 喷施纳米硒对谷子米色及品质的影响

品种	处理	米色				品质			
		<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	CCI	粗纤维含量 (%)	粗脂肪含量 (%)	粗蛋白含量 (%)	赖氨酸含量 (%)
长生 07	CK	59.45 ± 1.05a	9.87 ± 0.43a	43.19 ± 1.25a	3.85 ± 0.14a	1.77 ± 0.15a	4.67 ± 0.15a	14.33 ± 0.90a	0.33 ± 0.03a
长生 07	纳米硒	56.97 ± 0.76b	9.15 ± 0.51b	40.58 ± 1.97b	3.96 ± 0.13a	1.97 ± 0.21a	4.63 ± 0.15a	13.77 ± 0.40b	0.33 ± 0.01a
晋汾 107	CK	59.01 ± 1.05a	8.95 ± 0.31a	42.45 ± 1.50a	3.58 ± 0.16a	1.93 ± 0.15b	4.67 ± 0.06a	14.97 ± 0.59b	0.29 ± 0.02a
晋汾 107	纳米硒	57.19 ± 1.26b	7.97 ± 0.45b	40.29 ± 1.81b	3.46 ± 0.14a	2.47 ± 0.15a	4.47 ± 0.06b	16.07 ± 0.51a	0.29 ± 0.02a
衡谷 36	CK	59.85 ± 0.94a	8.89 ± 0.16b	40.07 ± 1.20a	3.71 ± 0.15b	2.13 ± 0.06b	4.47 ± 0.06a	6.83 ± 0.06b	0.33 ± 0.04a
衡谷 36	纳米硒	60.12 ± 0.83a	9.61 ± 0.45a	41.01 ± 1.26a	3.90 ± 0.15a	2.87 ± 0.06a	4.63 ± 0.06a	7.63 ± 0.25a	0.27 ± 0.02b
陕豫谷 3 号	CK	60.74 ± 1.20a	9.73 ± 0.51a	41.80 ± 1.91a	3.84 ± 0.20a	2.33 ± 0.06a	4.67 ± 0.12a	7.27 ± 0.06b	0.34 ± 0.02a
陕豫谷 3 号	纳米硒	59.61 ± 1.01b	8.91 ± 0.26b	40.77 ± 1.51a	3.67 ± 0.14b	1.73 ± 0.15b	4.27 ± 0.06b	10.63 ± 0.74a	0.28 ± 0.01b
长生 13	CK	58.32 ± 1.38a	9.10 ± 0.42a	40.84 ± 2.28a	3.83 ± 0.14a	2.33 ± 0.15a	4.63 ± 0.15a	12.43 ± 0.71b	0.28 ± 0.01b
长生 13	纳米硒	57.93 ± 0.64a	9.01 ± 0.35a	40.10 ± 1.46a	3.88 ± 0.10a	2.23 ± 0.15a	4.63 ± 0.06a	16.37 ± 0.45a	0.33 ± 0.02a
延谷 14	CK	57.65 ± 0.96b	8.03 ± 0.39b	36.63 ± 1.31b	3.81 ± 0.17a	1.77 ± 0.12b	4.53 ± 0.12a	16.23 ± 0.50a	0.45 ± 0.01a
延谷 14	纳米硒	59.13 ± 0.99a	8.85 ± 0.30a	39.23 ± 1.10a	3.82 ± 0.18a	2.37 ± 0.15a	4.53 ± 0.06a	17.17 ± 0.15b	0.33 ± 0.02b
晋谷 21	CK	59.14 ± 1.23a	8.95 ± 0.41a	41.53 ± 1.05a	3.64 ± 0.15a	1.83 ± 0.06a	5.37 ± 0.06a	11.27 ± 0.15a	0.33 ± 0.01a
晋谷 21	纳米硒	58.77 ± 1.14a	9.08 ± 0.35a	42.06 ± 1.55a	3.67 ± 0.15a	1.93 ± 0.15a	5.43 ± 0.06a	10.77 ± 0.15a	0.22 ± 0.02b
晋谷 40	CK	55.33 ± 1.70b	9.79 ± 0.43b	41.27 ± 1.79b	4.29 ± 0.13a	1.87 ± 0.06b	4.63 ± 0.12a	11.73 ± 0.50a	0.26 ± 0.01b
晋谷 40	纳米硒	59.54 ± 2.27a	10.56 ± 0.72a	42.72 ± 2.68a	4.16 ± 0.31a	2.17 ± 0.12a	4.53 ± 0.06a	12.17 ± 0.25a	0.33 ± 0.02a
李渠黑谷	CK	43.24 ± 1.68a	2.04 ± 0.40a	16.12 ± 1.86a	2.93 ± 0.47a	1.57 ± 0.06a	5.57 ± 0.38b	12.87 ± 0.21a	0.27 ± 0.01a
李渠黑谷	纳米硒	43.45 ± 1.37a	2.09 ± 0.26a	16.75 ± 1.00a	2.88 ± 0.35a	1.67 ± 0.12a	5.87 ± 0.31a	13.37 ± 0.76a	0.26 ± 0.01a

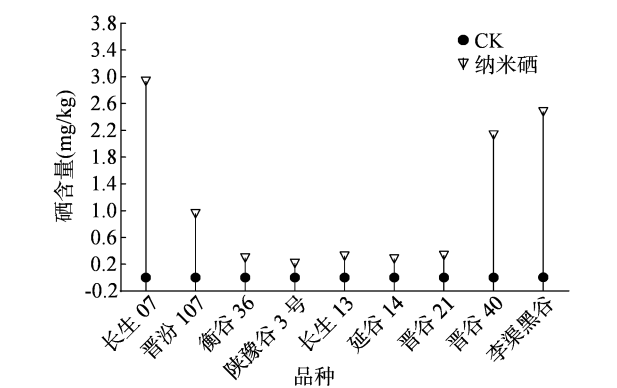


图 4 对照及纳米硒处理后不同谷子品种籽粒硒含量的变化

谷 14,这些品种受纳米硒处理的影响,其农艺性状、产量均有不同程度的下降,其中晋汾 107 对纳米硒的响应最为明显,各项农艺性状、产量和大部分籽粒米色、品质均下降,与之不同的是李渠黑谷和延谷 14 除各项农艺性状、产量下降明显外,大部分籽粒米色、品质得到了提升,可见,灌浆中后期喷施 375 g/hm² 的纳米硒对晋汾 107、李渠黑谷和延谷 14 的生长表现出抑制作用;另一类是晋谷 40、衡谷 36、长生 13、晋谷 21、陕豫谷 3 号、长生 07,表现为株高、茎粗、穗长、穗粗、单穗重、穗粒重、千粒重均有不同程度的上升,其中晋谷 40、晋谷 21、衡谷 36 各项农

艺性状、产量、大部分籽粒米色、品质均上升,与之不同的是长生 07、陕豫谷 3 号、长生 13 除各项农艺性状、产量上升明显外,大部分籽粒米色、品质得到了降低,晋谷 40 对纳米硒的响应最为明显,可见,灌浆中后期喷施 375 g/hm² 的纳米硒对晋谷 40、衡谷 36、长生 13、晋谷 21、陕豫谷 3 号、长生 07 的生长表现为促进作用。

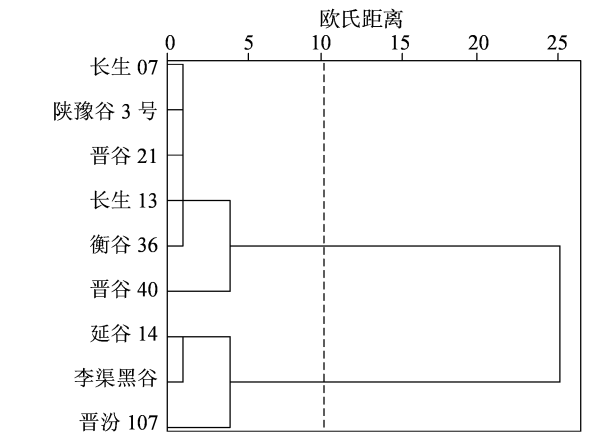


图 5 延安市谷子主栽品种聚类结果

3 讨论与结论

硒是人体和动物新陈代谢的重要必需微量元素

素之一^[24],具有抗癌、抗菌、抗氧化等功能^[25-26]。硒缺乏会使得动物机体的免疫功能下降,增加了糖尿病、心脑血管疾病、克山病、大骨节病、癌症等疾病的发生风险^[27]。人体无法合成硒元素,植物富硒是人体获取硒的最经济有效的途径之一^[28]。本研究对来自不同生态区的 9 个延安市谷子主栽品种在灌浆中期和后期喷施 375 g/hm² 纳米富硒营养剂后,不同谷子品种农艺性状、产量、籽粒米色、品质及硒含量均存在较大差异。灌浆中期和后期叶面喷施 375 g/hm² 的纳米硒后,谷子的产量、穗重、穗粒重、千粒重、穗长、株高、茎粗和穗粗增加。这说明外源硒能够通过影响谷子的产量形成因子(穗重、穗粒重、千粒重),加快灌浆速率,促进籽粒中营养物质的形成,从而增加谷子的产量^[5]。这与穆婷婷等的研究结果^[29-34]一致。

谷子籽粒的米色是谷子外观品质的重要指标,也是衡量谷子商品性的关键标准。有研究报道,灌浆期叶面喷施硒肥可使谷子籽粒中的黄色素含量增加,从而影响谷子籽粒米色^[35]。然而,也有研究报道,叶面喷施硒肥对谷子籽粒中的叶黄素含量和米色无显著性影响^[31]。本研究发现,灌浆中和后期叶面喷施 375 g/hm² 的纳米硒后,谷子籽粒的 L^* 、 a^* 、 b^* 、CCI 均无显著变化,表明外源硒对谷子籽粒米色无显著影响,与后者的研究结果^[31]相符。然而,不同品种谷子籽粒米色对纳米硒的响应不一样,其中延谷 14、衡谷 36、李渠黑谷、晋谷 40 的米色有所改变。这可能由于前人选择了单一品种或单一生态区的谷子种质资源作为研究对象有关。本研究发现,纳米处理后可提高谷子籽粒的粗蛋白、粗纤维含量,并且粗蛋白对茎粗和穗重有一定相关性。这与穆婷婷等的研究结果^[28-29,36-37]一致。本研究发现,来自山西的长生 07、晋谷 40、晋汾 107、晋谷 21、长生 13 谷子籽粒含量均在 0.320 mg/kg 以上,富硒能力较强。这与岳琳祺等的研究结果^[34,38]一致。可见,不同生态区的谷子对纳米硒的响应不同,山西地区的谷子具有较强的富硒潜力,在富硒谷子品种的育种工作中,可以着重关注山西的谷子。

聚类分析是作物种质资源鉴定、筛选和评价的重要方法之一,广泛应用于各种作物^[39-40]。李洁将 150 份青稞种质资源利用系统聚类,分为 4 大类,分别为耐旱性较差、有一定的耐旱性、耐旱性最佳和耐旱性最弱^[41]。陈凌等根据耐低氮综合评价 D 值,通过聚类分析将 100 份糜子品种划分为耐低氮型、

中间型和不耐低氮型 3 种类型^[42]。岳琳祺等对硒处理后不同品种谷子农艺性状的变化值做聚类分析,将 31 份谷子种质资源分为 4 个类群,其中第 1 类群为硒敏感型材料,第 2 类群为耐硒性材料,其他材料分别聚为第 3 类和第 4 类^[34]。邢国芳等将 205 份谷子种质资源分为 5 类,分别为硒高效品种、硒较高效品种、硒中等效率品种、硒较低效品种、硒低效品种^[43]。本研究根据不同谷子品种经纳米硒处理后农艺性状、产量、米色、品质和硒含量的变化值,将 9 份延安市谷子主栽品种分为 2 类,一类是硒敏感型材料:晋汾 107、李渠黑谷和延谷 14,经纳米硒处理后,各项农艺性状、产量下降明显,除晋汾 107 外,李渠黑谷和延谷 14 的大部分籽粒米色、品质均提升;另一类是耐硒型材料:晋谷 40、衡谷 36、长生 13、晋谷 21、陕豫谷 3 号、长生 07,经纳米硒处理后,各项农艺性状、产量上升明显,除长生 07、陕豫谷 3 号、长生 13 外,晋谷 40、晋谷 21、衡谷 36 的大部分籽粒米色、品质均上升。表明高浓度纳米硒对不同类型的谷子品种影响不同,硒敏感品种的生长发育会受到抑制,而耐硒型品种的生长发育会受到促进。而不同谷子品种籽粒米色和品质对高浓度纳米硒的响应没有规律。

本研究对 9 份来自不同生态区延安市谷子主栽品种经纳米硒处理后农艺性状、产量、籽粒米色、品质及硒含量的变化进行了分析和比较。将 9 份延安市谷子主栽品种分为 2 类。灌浆中期和后期叶面喷施 375 g/hm² 的纳米硒后,谷子的产量、穗重、穗粒重、千粒重、穗长、株高、茎粗和穗粗增加。375 g/hm² 的纳米硒提高了谷子籽粒的硒含量、粗蛋白、粗纤维含量,对谷子籽粒米色没有影响,不同类型的谷子品种对高浓度硒的响应不同。

参考文献:

- [1] 吕厚远,李玉梅,张健平,等. 青海喇家遗址出土 4 000 年前面条的成分分析与复制[J]. 科学通报,2015,60(8):744-760.
- [2] 赵利蓉,马珂,张丽光,等. 不同生态区谷子品种农艺性状和品质分析[J]. 作物杂志,2022(2):44-53.
- [3] 袁宏安,王飞,妙佳源,等. 延安小米品牌建设思路与对策[J]. 农业科技管理,2015,34(3):83-86.
- [4] Ingle K P, Suprasanna P, Narkhede G W, et al. Biofortified foxtail millet: towards a more nourishing future [J]. Plant Growth Regulation, 2023, 99(1):25-34.
- [5] 吴季蓉. 硒肥对谷子农艺性状、光合特征及产量的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2018.
- [6] 程汝宏,张婷,王根平,等. 新中国成立以来谷子育种的主要研

- 究进展[J]. 粮油食品科技,2022,30(4):68-75,10.
- [7]郑 聪,许自成,毕庆文. 硒营养在作物科学中的研究进展[J]. 江西农业学报,2009,21(9):110-112,115.
- [8]曾 睿. 富硒水稻的生理生化特性及其硒蛋白抗氧化活性研究[D]. 雅安:四川农业大学,2019:73-74.
- [9]郭 函. 喷硒对彩麦营养品质及花青素生物合成酶基因表达的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2019:26-28.
- [10]侯青光,韦林汕,卢亚妮,等. 硒肥不同喷施时期和种类对玉米产量、品质及硒和重金属含量的影响[J]. 西南农业学报,2021,34(9):1900-1906.
- [11]张艳玲,潘根兴,胡秋辉,等. 叶面喷施硒肥对低硒土壤中大豆不同蛋白组成及其硒分布的影响[J]. 南京农业大学学报,2003,26(1):37-40.
- [12]潘丽萍,邢 颖,陈锦平,等. 不同硒肥施用模式对冬种马铃薯硒含量、产量及品质的影响[J]. 南方农业学报,2021,52(5):1215-1221.
- [13]彭 涛,于金林,成东梅,等. 不同喷施硒时期和次数对小麦产量及硒含量的影响[J]. 安徽农业科学,2015,43(17):104-105,108.
- [14]段门俊,田玉聪,吴芸紫,等. 叶面喷施亚硒酸钠对再生稻产量及品质的影响[J]. 中国水稻科学,2018,32(1):96-102.
- [15]王碧莹,王亮亮. 硒的生理功能及纳米硒在动物营养中的应用研究进展[J/OL]. 中国畜牧杂志,2023[2024-01-18]. <https://doi.org/10.19556/j.0258-7033.20230905-04>.
- [16]胡万行,石 玉,程玉琦,等. 纳米硒对紫色马铃薯生长及其矿物质元素含量和品质特性的影响[J]. 西北植物学报,2020,40(2):296-303.
- [17]王佑成,赵天瑶,裴淑敏,等. 纳米硒喷施对绿豆芽生长特性、营养品质、酚类含量和抗氧化性的影响[J]. 中国农业大学学报,2019,24(5):39-46.
- [18]刘雨杉,许佳昕,尹美强,等. 喷施纳米硒对谷子幼苗生理特性及农艺性状的影响[J]. 山西农业科学,2021,49(5):599-602.
- [19]兰 敏,尹美强,温银元,等. 纳米硒对谷子生物量和微量元素含量的影响[J]. 山西农业科学,2020,48(4):515-519,555.
- [20]孔清华. 谷子施用生物纳米硒的生理生化效应及对产量的影响[D]. 济南:山东师范大学,2020:25-28.
- [21]宁海龙. 田间试验与统计方法[M]. 北京:科学出版社,2012:21-22.
- [22]陆 平. 谷子种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2006:43-47.
- [23]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:295-297.
- [24]Qiu W Y, Wang Y Y, Wang M, et al. Construction, stability, and enhanced antioxidant activity of pectin-decorated selenium nanoparticles[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2018, 170:692-700.
- [25]王 霞,谢晓方,张卓忆,等. 纳米硒的合成技术、生物学功能及其在畜禽生产中的应用研究进展[J]. 饲料研究,2023,46(13):180-184.
- [26]李星星,韩 芳,周 雪,等. 富硒谷子研究进展[J]. 中国农学通报,2022,38(7):1-6.
- [27]苏华华,王艳华. 纳米硒的制备及生物医学应用研究进展[J]. 生物技术通讯,2020,31(5):621-626.
- [28]穆婷婷,张福耀,李志华,等. 不同时期施硒对谷子硒含量、有机硒转化率及谷子品质的影响[J]. 华北农学报,2018,33(6):193-198.
- [29]穆婷婷,杜慧玲,张福耀,等. 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.
- [30]张宇杰,郭平毅,郭美俊,等. 外源硒矿粉对谷子保护酶活性、产量和籽粒中硒含量的影响[J]. 中国农业科技导报,2021,23(5):153-159.
- [31]李 冉,刘宇航,梁 杉,等. 硒肥对谷子产量因子及其籽粒富硒效果的影响[J]. 中国农业科技导报,2021,23(6):140-146.
- [32]吴季蓉,王宏富. 不同生育时期喷施硒肥对谷子农艺性状及产量的影响[J]. 山西农业科学,2018,46(4):595-598,619.
- [33]张兰兰,孙冬雪,庞立欣,等. 外源硒对谷子植株体内谷胱甘肽过氧化物酶及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(19):59-62.
- [34]岳琳祺,郭佳晖,白雄辉,等. 叶面喷施硒肥对不同基因型谷子农艺性状及籽粒硒含量的影响[J]. 中国农业科技导报,2021,23(4):154-163.
- [35]宁 娜. 硒、除草剂及不同生态因子对谷子品质的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2016:97-99.
- [36]彭晓伟,蒋沛含,张爱军,等. 叶面喷施硒肥对谷子农艺性状及品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2022,42(1):1-9.
- [37]高贞攀,郭平毅,原向阳,等. 叶面喷施亚硒酸钠对谷子籽粒含硒量及品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2015,35(2):157-161.
- [38]Liu M X, Zhang Z W, Ren G X, et al. Evaluation of selenium and carotenoid concentrations of 200 foxtail millet accessions from China and their correlations with agronomic performance[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(7):1449-1457.
- [39]陈鲁鹏,姚晓华,姚有华,等. 青藏高原青稞品质评价体系构建及生态区划分析[J]. 西北植物学报,2023,43(4):667-678.
- [40]李 龙,宋 慧,张 扬,等. 不同生态区谷子品种在华北地区农艺性状及适应性评价[J]. 江苏农业科学,2023,51(14):90-94.
- [41]李 洁. 150 份青稞种质资源成株期耐旱性鉴定[J]. 西北农业学报,2022,31(2):164-174.
- [42]陈 凌,王君杰,王海岗,等. 耐低氮糜子品种的筛选及农艺性状的综合评价[J]. 中国农业科学,2020,53(16):3214-3225.
- [43]邢国芳,侯 颖,王 浩,等. 谷子苗期硒高效品种筛选及评价[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(1):158-171.