

叶面喷硒对燕麦品种硒积累的影响及品种综合性状评价

李越¹ 宁丹¹ 吕玉峰¹ 张斌¹ 薛志强² 贾举庆¹
冯美臣¹ 宋晓彦¹ 张美俊¹ 杨武德¹

(¹杂粮种质资源创新与分子育种国家实验室(筹)/山西农业大学农学院, 030801,
山西晋中; ²山西农业大学生态农牧研究所, 037200, 山西朔州)

摘要 为揭示喷硒对燕麦硒积累的影响, 并评价筛选喷硒后燕麦产量和品质综合性状优良燕麦品种, 以 24 份燕麦品种为材料, 设置 3 个喷施浓度(亚硒酸钠用量为 0、80、160g/hm²), 抽穗期进行叶面喷硒。结果表明, 燕麦成熟期叶片硒含量随喷硒浓度提高增幅最大, 其次为籽粒。喷硒降低 24 份燕麦籽粒硒含量变异水平。喷硒下, 籽粒硒含量差异最大, 根硒含量差异最小。叶面喷施 80g/hm² 的亚硒酸钠时, 籽粒硒含量最高的品种可达 0.30mg/kg; 喷施 160g/hm² 亚硒酸钠时, 24 份燕麦品种籽粒硒含量均超多数文献提到的食物或可食材料硒限量标准(0.300mg/kg)。喷硒也会影响籽粒蛋白质、脂肪和β-葡聚糖含量的变异程度。在叶面喷施 80g/hm² 亚硒酸钠时, 燕麦产量与未喷硒均无显著差异; 燕麦籽粒硒含量与脂肪、β-葡聚糖含量存在显著正相关, 相关系数分别为 0.63 和 0.42; GYT 双标图基于产量, 兼顾硒、蛋白质、脂肪和β-葡聚糖含量, 24 份燕麦品种综合值排名前 5 位的依次为品燕 1 号、Banner、OA1576-4、白燕 10 号和品燕 2 号。

关键词 燕麦; 叶面喷硒; 硒积累; 综合性状评价

燕麦(*Avena L.*)是禾本科燕麦属一年生草本植物, 可被用作粮食、饲料及饲草^[1]。裸燕麦(*Avena sativa L. subsp. nuda*)和皮燕麦(*Avena sativa L.*)在我国均有种植, 因富含β-葡聚糖和亚油酸等多种功能成分备受大众喜爱。硒是人体必需的微量元素, 我国大约 72% 的地区存在不同程度的缺硒或低硒^[2], 硒缺乏会导致克山病和大骨节病等^[3]。Lyons 等^[4]研究表明, 常见禾谷类作物硒吸收能力排序为小麦>水稻>玉米>大麦>燕麦, 可见燕麦对硒的积累能力在禾谷类作物中较弱。因此, 生产富硒燕麦在未来品质支撑农作物产业中使燕麦产业有更广阔的发展前景^[5-6]。

土壤施硒可显著提高作物籽粒硒含量^[7-9]。等量施硒条件下, 土壤施硒较叶面施硒能更有效提高水稻籽粒硒含量, 土壤施硒水稻籽粒硒含量为叶面喷硒处理的 5.3 倍^[10], 但有研究^[11]表明, 硒酸盐和亚硒酸盐施入土壤后易被土壤吸附固定, 降低植物的利用程度。因此, 目前硒富集研究多聚焦于叶面喷硒。有研究^[12]表明, 喷硒后, 水稻叶、茎、精米硒含量均显著提高, 表现为叶>茎>精米。叶面喷施 150g/hm² 纯硒, 小麦籽粒硒含

量可达 3101μg/kg^[13]; 叶面喷施 116g/hm² 亚硒酸钠, 小麦籽粒硒含量可达 647.8μg/kg^[14], 以上 2 个研究均显示叶面喷硒对小麦籽粒产量无显著影响。叶面喷硒可提高小麦各部位硒含量, 提高小麦产量、穗数、穗粒数及千粒重, 但对籽粒粗蛋白、粗纤维、面筋和脂肪含量的影响各有不同^[15]。在黑小麦孕穗期对叶面喷施浓度 10~20mg/L 的亚硒酸钠, 可显著提高黑小麦籽粒硒含量, 对黑小麦产量无显著影响^[16]。叶面喷施 67.84g/hm² 亚硒酸钠不仅可提高谷子籽粒硒含量, 还可改善谷子粗蛋白、脂肪、赖氨酸和叶酸等营养品质^[17]。谷子叶面喷施 4 种不同硒肥均可提高谷子籽粒硒含量和产量^[18]。可见, 叶面喷施适量硒, 在不降低作物产量和品质情况下, 应是提高作物籽粒硒含量的一个快速安全的有效渠道。

同一作物不同品种吸收、转运和积累硒的能力有差异^[19-21], 且硒处理后产量和品质对硒的响应也不同^[17,21]。目前喷硒对不同燕麦品种硒积累、产量和品质影响的研究较少。因此本研究采用在晋北地区推广种植的 24 份燕麦品种, 于抽穗期喷硒, 揭示喷硒对燕麦成熟期硒积累的影响, 并采用 GYT

作者简介: 李越, 主要从事燕麦栽培生理研究, E-mail: l635642675@163.com

张美俊为通信作者, 研究方向为杂粮种质创新, E-mail: meijunz@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(202204010910001-26); 山西农业大学生物育种工程项目(YZGC107)

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-04-06; 网络出版日期: 2023-04-06

双标图评价产量和品质综合性状优良的燕麦品种，为筛选和开发富硒功能性燕麦提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年在山西省朔州市平鲁区试验基地（111°52′~112°41′E，39°21′~39°58′N）进行。平均海拔约 1800m，多年平均气温 5.5℃，无霜期 105d，年均降水量 420mm，雨季集中在 6-10 月，属北温带大陆性气候。耕作层土壤（0~20cm）含有机质 9.17g/kg、碱解氮 40.98mg/kg、速效磷 6.12mg/kg、速效钾 162.97mg/kg，pH 7.68，硒含量 0.17mg/kg。

1.2 供试材料

试验燕麦品种共 24 份，其中 22 份来源于中国农业科学院国家农作物种质资源保存中心，2 份来源于加拿大农业部（品种名为 Banner 和 OA1576-4）。24 份品种中有 19 份裸燕麦和 5 份皮燕麦。信息如表 1 所示。试验所用硒源为亚硒酸钠（Na₂SeO₃）。

表 1 供试燕麦品种信息
Table 1 Test oat varieties information

编号 Code	品种名称 Variety name	裸（皮） Naked (hulled)	编号 Code	品种名称 Variety name	裸（皮） Naked (hulled)
1	白燕 1 号	裸	13	坝蓂 1 号	裸
2	白燕 2 号	裸	14	坝蓂 8 号	裸
3	白燕 3 号	裸	15	坝蓂 18 号	裸
4	白燕 4 号	裸	16	晋燕 8 号	裸
5	白燕 5 号	裸	17	晋燕 12 号	裸
6	白燕 6 号	皮	18	晋燕 13 号	裸
7	白燕 7 号	皮	19	晋燕 17 号	裸
8	白燕 8 号	裸	20	晋燕 18 号	裸
9	白燕 10 号	裸	21	燕科 1 号	裸
10	品燕 1 号	裸	22	陇燕 2 号	皮
11	品燕 2 号	裸	23	Banner	皮
12	品燕 5 号	裸	24	OA1576-4	皮

1.3 试验设计

试验采用裂区设计，喷硒浓度为主区，品种为副区。5 月 21 日播种，小区面积 2m²（2m×1m），每小区种植 5 行燕麦，行距 25cm，每米播种 100 粒，小区间隔 1m。在燕麦抽穗期进行叶面喷硒，根据前期多年在山西省朔州市平鲁区的试验结果，设 3 个亚硒酸钠用量水平，分别是 0（Se0）、

80（Se1）、160g/hm²（Se2），折合纯硒用量为 0（Se0）、35.896（Se1）、71.792g/hm²（Se2），将各处理按亚硒酸钠用量溶于水，用水量均为 1250L/hm²。喷施时，用塑料挡板围拢所喷小区。重复 3 次，共 216 个小区。其他田间管理按常规进行。

成熟期按小区收获籽粒，风干后计产（皮燕麦产量按脱内外稃后籽粒计产），然后用于其他指标测定。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 硒含量 参照 GB 5009.93-2017 的氢化物原子荧光光谱法^[22]测定硒含量，先称取 0.5g 样品倒入消煮管中，加入 10mL 酸性溶液（硝酸:高氯酸=9:1）和玻璃珠，盖上弯颈玻璃漏斗消化过夜。次日置于消煮炉上进行消煮，待溶液体积为 2mL 时，加入 5mL 盐酸溶液（6mol/L）继续消煮至无色，冷却后加入铁氰化钾溶液（100g/L），定容至 10mL 离心管中。应用原子荧光光谱仪进行样品质量浓度的测定，通过下面公式计算样品中硒含量。

$$X=[(\rho-\rho_0)\times V]/(m\times 1000)$$

式中，X（mg/kg）为样品中硒的含量；ρ（μg/L）为样品溶液中硒的质量浓度；ρ₀（μg/L）为空白溶液中硒的质量浓度；V（mL）为样品消化液总体积；m（g）为样品称样量；1000 为换算系数。

1.4.2 品质性状 参照 GB/T 5511-2008 凯氏定氮法^[23]测定蛋白质含量；参照 GB 5009.6-2016 索氏提取法^[24]测定脂肪含量；采用酶试剂盒（AOAC 995.16, Megazyme）测定β-葡聚糖含量。

1.5 数据处理

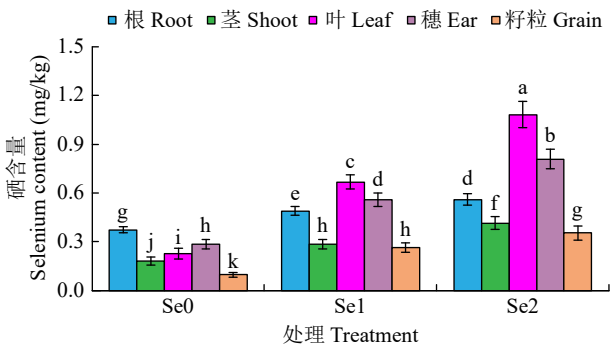
运用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理；采用 SPSS 22.0 进行 ANOVA 方差分析和相关性分析；采用 Duncan 法进行多重比较，差异显著性为 P<0.05；用 Origin 9.0 绘图；用 GGEBiplot 8.1 进行双标图分析。

2 结果与分析

2.1 喷硒对燕麦各器官硒含量的影响

叶面喷施不同浓度硒下 24 份燕麦品种各器官硒含量如图 1 所示。由图 1 可以看出，Se0 处理下根硒含量显著高于其他器官，分别比茎、叶、穗和籽粒硒高 36.53%、133.92%、19.68%和 153.41%。穗硒含量也显著高于茎、叶和籽粒，籽粒硒含量

最少，分别比茎、叶和穗硒含量显著低 88.66%、135.05%和 194.85%。Se1 处理下，根、叶和穗硒含量显著高于茎和籽粒，叶硒含量又显著高于根和穗，叶硒含量分别比根、茎和穗硒含量高 36.53%、133.92%和 19.68%。籽粒硒含量比根、叶和穗硒含量分别显著低 85.60%、153.41%和 111.74%；Se2 处理下，各器官硒含量均呈现显著差异，表现为叶>穗>根>茎>籽粒，叶硒含量比根、茎、穗硒含量分别高 92.87%、161.35%和 33.58%，籽粒硒分别比根、茎、叶和穗的硒含量低 58.92%、17.28%、206.52%和 129.46%。表明未喷硒处理下，燕麦根中积累的硒含量最多，叶面



不同小写字母表示 0.05 水平差异显著
The different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level

图 1 喷硒后 24 份燕麦品种各器官硒含量
Fig.1 Selenium contents in different organs of 24 oats varieties after spraying selenium

喷硒后，叶中积累的硒含量最多，其次是穗和根，各处理中籽粒硒含量均最少。

由图 1 还可以发现，Se1 和 Se2 处理下各器官硒含量均比 Se0 处理各器官硒含量显著增加，Se1、Se2 处理根硒含量比 Se0 处理显著增加 31.02%和 50.00%；茎硒含量显著增加 56.28%和 126.23%；叶硒含量显著增加 193.42%和 374.56%；穗硒含量显著增加 95.45%和 183.22%；籽粒硒含量显著增加 172.17%和 263.92%。Se2 处理根、茎、叶、穗和籽粒硒含量比 Se1 处理也显著增加，增加幅度分别为 14.49%、44.76%、61.73%、44.90%和 33.71%。以上分析表明，叶面喷硒可以不同程度地提高燕麦各器官硒含量，在一定喷硒浓度范围内，增幅随喷硒浓度增加而增加，其中喷硒对成熟期叶片硒含量提高幅度最大，其次是籽粒。

不同硒浓度处理下燕麦各器官硒含量变异情况如表 2 所示，Se0 处理下，24 份燕麦品种各器官硒含量的变异系数在 5.39%~14.63%，茎、叶和籽粒硒含量的变异系数显著大于穗和根，根硒含量变异系数又显著低于穗。在 Se1 和 Se2 处理下，各器官变异系数范围分别为 5.58%~11.55%和 6.35%~12.10%，24 份燕麦品种均是籽粒硒含量的变异系数显著大于其他器官，在 Se1 处理下，10 号品种籽粒硒含量达 0.30mg/kg；Se2 处理下，8 号品种籽粒硒含量达 0.44mg/kg。Se1 和 Se2 处理下也均是根

表 2 喷硒后 24 份燕麦品种各器官硒含量变异情况
Table 2 Variation of selenium contents in different organs of 24 oats varieties after spraying selenium

处理 Treatment	部位 Position	含量范围 Content range (mg/kg)	标准差 SD	变异系数 CV (%)	最低含量的品种编号 Variety code with minimum content	最高含量的品种编号 Variety code with maximum content
Se0	根	0.32~0.41	0.02	5.39f	1	15
	茎	0.15~0.23	0.03	13.52a	20	10
	叶	0.15~0.28	0.03	14.63a	11	10
	穗	0.23~0.34	0.03	10.10bc	8	18
	籽粒	0.07~0.13	0.01	13.69a	1	18
Se1	根	0.44~0.54	0.03	5.58f	20	10
	茎	0.23~0.34	0.03	9.99c	20	2
	叶	0.60~0.74	0.04	6.27e	6	23
	穗	0.49~0.63	0.04	7.14d	15	2
	籽粒	0.20~0.30	0.03	11.55b	16	10
Se2	根	0.50~0.62	0.04	6.35e	6	2
	茎	0.36~0.51	0.04	9.59c	16	2
	叶	0.98~1.35	0.08	7.40d	16	8
	穗	0.74~0.91	0.06	7.26d	22	8
	籽粒	0.30~0.44	0.04	12.10b	16	8

不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著，下同
Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, the same below

硒含量变异系数显著小于其他器官。且 Se2 和 Se1 处理籽粒硒变异系数显著低于 Se0 处理。结果表明 24 份燕麦品种在籽粒中硒含量稳定性差, 差异较大, 且喷硒会降低籽粒硒的变异水平, 根中硒含量较稳定, 差异较小。

进一步分析 24 份燕麦品种籽粒硒含量差异, 由表 3 可以看出, Se1 和 Se2 处理下, 24 份燕麦品种籽粒硒含量均显著高于 Se0 处理, 除 13 号品种外, 其他品种 Se2 处理籽粒硒含量也均显著高于 Se1 处理, 表明喷硒对 24 份燕麦品种籽粒硒含

表 3 喷硒后 24 份燕麦品种籽粒硒含量
Table 3 Grain selenium contents of 24 oats varieties after spraying selenium mg/kg

编号 Code	籽粒硒含量 Grain selenium content			编号 Code	籽粒硒含量 Grain selenium content			编号 Code	籽粒硒含量 Grain selenium content		
	Se0	Se1	Se2		Se0	Se1	Se2		Se0	Se1	Se2
1	0.07c	0.36b	0.34a	9	0.09c	0.29b	0.39a	17	0.10c	0.22b	0.32a
2	0.10c	0.29b	0.42a	10	0.12c	0.30b	0.40a	18	0.13c	0.28b	0.36a
3	0.09c	0.29b	0.42a	11	0.09c	0.26b	0.30a	19	0.08c	0.26b	0.33a
4	0.09c	0.24b	0.30a	12	0.09c	0.29b	0.40a	20	0.11c	0.20b	0.31a
5	0.10c	0.28b	0.35a	13	0.10b	0.28a	0.34a	21	0.08c	0.25b	0.33a
6	0.09c	0.23b	0.31a	14	0.12c	0.23b	0.35a	22	0.11c	0.26b	0.32a
7	0.09c	0.30b	0.40a	15	0.11c	0.24b	0.33a	23	0.09c	0.30b	0.40a
8	0.08c	0.30b	0.44a	16	0.10c	0.20b	0.30a	24	0.10c	0.27b	0.34a

量均有提高作用。

2.2 喷硒对燕麦籽粒品质性状的影响

不同硒浓度处理下, 24 份燕麦品种籽粒品质性状变异情况如表 4 所示。可以看出, 24 份燕麦品种籽粒蛋白质含量的变异系数表现为 Se2>Se1

>Se0, 且 Se2 和 Se1 处理均与 Se0 处理差异显著。在 Se1 和 Se2 处理下, 燕麦品种蛋白质含量最高的是 9 号和 18 号品种, 含量分别为 18.66% 和 19.24%。结果表明喷硒显著增加 24 份燕麦品种籽粒蛋白质的变异水平。

表 4 喷硒后 24 份燕麦品种籽粒品质性状变异情况
Table 4 Variation of grain quality traits in 24 oats varieties after spraying selenium

指标 Index	处理 Treatment	含量范围 Content range (%)	标准差 SD	变异系数 CV (%)	最低含量品种编号 Variety code with minimum content	最高含量品种编号 Variety code with maximum content
蛋白质 Protein	Se0	10.04~16.22	1.86	14.86b	15	11
	Se1	10.76~18.66	2.36	16.65a	13	9
	Se2	10.37~19.24	2.37	17.24a	16	18
脂肪 Fat	Se0	3.33~10.67	1.73	23.77a	20	22
	Se1	3.46~10.79	1.69	22.85a	21	7
	Se2	3.87~10.53	1.74	23.74a	21	1
β-葡聚糖 β-glucan	Se0	0.52~2.68	0.58	38.04a	19	24
	Se1	1.62~4.56	0.87	27.89b	1	3
	Se2	1.49~4.03	0.66	24.80c	4	9

24 份燕麦品种在 3 个处理下籽粒脂肪含量的变异系数无显著差异, 表明喷硒对 24 份燕麦品种籽粒脂肪含量变异水平没影响。

24 份燕麦品种籽粒β-葡聚糖含量的变异系数表现为 Se0>Se1>Se2, 且处理间存在显著差异, 表明喷硒降低 24 份燕麦品种籽粒β-葡聚糖含量的变异水平, 在一定范围内, 变异水平随喷硒浓度增加而降低。在 Se1 和 Se2 处理下, 3 号和 9 号籽粒β-葡聚糖含量最高, 分别为 4.56% 和 4.03%。

2.3 喷硒对燕麦籽粒产量的影响

叶面不同喷硒浓度下, 24 份燕麦品种籽粒产量如表 5 所示, Se1 处理下, 24 份燕麦品种在产量与 Se0 均无显著差异, Se2 处理下, 11 号、12 号、17 号、23 号、24 号品种产量显著低于 Se0 和 Se1 处理。Se2 处理下, 11 号、12 号、17 号、23 号、24 号品种产量分别比 Se0 降低 33.99%、13.00%、17.83%、4.28% 和 8.85%, 比 Se1 处理降低 35.52%、14.12%、21.70%、6.25% 和 14.87%。

表 5 喷硒后 24 份燕麦品种籽粒产量

Table 5 Grain yields of 24 oats varieties after spraying selenium

kg/hm²

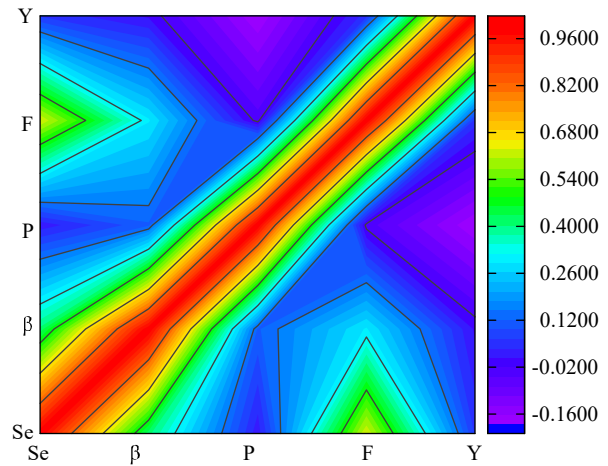
编号 Code	产量 Yield			编号 Code	产量 Yield			编号 Code	产量 Yield			编号 Code	产量 Yield		
	Se0	Se1	Se2		Se0	Se1	Se2		Se0	Se1	Se2		Se0	Se1	Se2
1	3494.7a	3502.4a	3307.8a	7	3773.8a	3848.7a	3578.6a	13	4211.3a	4298.5a	3747.1a	19	3438.9a	3560.1a	3543.1a
2	3134.5a	3151.5a	3005.6a	8	3653.4a	3733.6a	3364.3a	14	3821.8a	3952.3a	3852.3a	20	2958.1a	3053.6a	3055.5a
3	3172.9a	3214.2a	3180.4a	9	3074.6a	3321.8a	3053.8a	15	4184.9a	4520.0a	4007.4a	21	3183.0a	3259.9a	3414.9a
4	3872.1a	3951.2a	3611.6a	10	3960.0a	4057.6a	3854.6a	16	3280.2a	3478.9a	3284.2a	22	3382.1a	3490.4a	3154.3a
5	3411.0a	3497.8a	3253.3a	11	4062.9a	4109.2a	3032.2b	17	3594.8a	3712.8a	3050.8b	23	3988.2a	4063.7a	3824.6b
6	3975.5a	4052.8a	3911.4a	12	3601.0a	3636.8a	3186.8b	18	3064.9a	3208.2a	3359.6a	24	3926.8a	4144.2a	3607.6b

结果表明，叶面喷施适量硒不会影响燕麦产量，喷硒浓度增大 1 倍时，会降低部分燕麦品种产量。

2.4 24 份燕麦品种籽粒硒含量、品质性状及产量的综合评价

根据食物或可食材料硒限量标准^[14]，由表 2 可以看出，Se2 处理下，24 份燕麦品种籽粒硒含量均已超过多数文献食物或可食材料硒含量限量 0.300mg/kg。因此在对 24 份燕麦品种进行籽粒硒含量、品质性状及产量综合评价时，仅分析 Se1 处理的籽粒硒含量、品质和产量数据。

24 份燕麦品种籽粒硒含量与品质性状及产量的相关性分析结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，硒含量与脂肪、β-葡聚糖含量存在显著正相关性，相关系数分别为 0.63 和 0.42。即籽粒硒含量高的燕麦，其脂肪和β-葡聚糖含量也高。硒含量与蛋白质含量和产量均不存在显著相关性。这表明通过喷硒提高燕麦籽粒硒含量，有助于提高燕麦脂肪和β-葡聚糖的积累。



Y: 产量, P: 蛋白质, β: β-葡聚糖, Se: 硒, F: 脂肪, 下同
Y: yield, P: protein, β: β-glucan, Se: selenium, F: fat, the same below

图 2 24 份燕麦品种籽粒硒含量、品质性状及产量的相关性分析热图 (n=72)

Fig.2 Thermograms of correlation among grain selenium contents, quality traits and yields of 24 oat varieties (n=72)

产量是最重要的性状指标，以产量为主要目标性状，兼顾籽粒硒、β-葡聚糖、蛋白质和脂肪含量，制作双标图对 24 份燕麦品种进行综合评价，图 3 中的小圆圈代表“平均综合指标”，穿过圆圈带单箭头的直线横轴是平均综合指标轴，越靠近箭头方向的品种，其综合指标排名越靠前。因此，由综合指标在横轴上的投射位置可以看出，基于产量为主要目标性状，兼顾籽粒硒、β-葡聚糖、蛋白质和脂肪含量，24 份燕麦品种综合性状排名靠前的 5 个品种编号依次为 10、23、24、11、9；综合性状排名靠后的 5 个品种编号依次为 19、22、16、21、20。

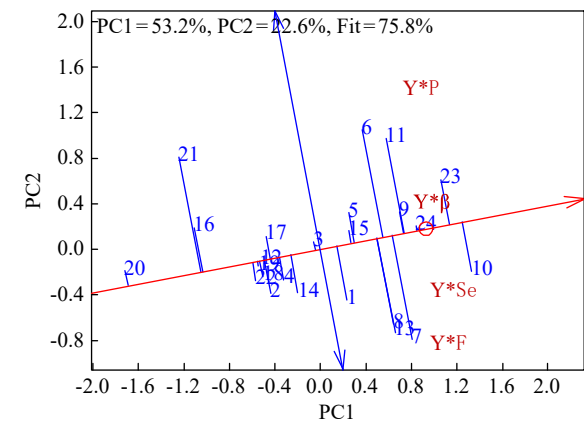


图 3 24 份燕麦品种产量×品质性状双标图

Fig.3 Yield×quality traits biplot about 24 oat varieties

图 3 中与横轴垂直并通过原点带有双箭头的直线为 Y 轴，代表各品种与各性状间相互作用的倾向性。品种到横轴的垂线长度代表其各性状的稳定性，越靠近横轴各性状越稳定，即垂线越短表示品种各性状稳定性越好。结合图 3 和表 6 可以看出，性状稳定性靠前的 5 个品种依次为 12、3、24、1、19，性状稳定性排名靠后的 5 个品种依次为 8、7、11、6、21，其他品种介于两者之间。

综合值是将综合性状与稳定性状进一步综合

表 6 24 份燕麦品种产量×品质性状综合值
Table 6 Comprehensive values of yield×quality traits about 24 oats varieties

编号 Code	综合性状值 Synthetic trait value	稳定性值 Stability trait value	综合值 Comprehensive value	编号 Code	综合性状值 Synthetic trait value	稳定性值 Stability trait value	综合值 Comprehensive value
1	21 015.1	-208.6	20 849.0	13	25 503.6	-4155.3	23 645.9
2	20 671.3	-1852.0	21 474.6	14	23 433.1	-2898.7	22 117.7
3	22 897.5	29.4	22 911.9	15	24 268.9	844.6	23 957.2
4	21 342.6	-1156.1	21 825.2	16	18 235.9	1626.4	18 672.4
5	24 705.2	1342.1	24 099.1	17	20 924.3	1266.7	21 237.4
6	25 707.7	4581.0	23 582.5	18	20 612.1	-509.3	20 620.8
7	26 251.7	-4473.6	24 135.5	19	20 347.4	-315.2	20 370.4
8	25 598.8	-4275.4	23 677.2	20	15 014.1	739.0	14 685.1
9	26 648.8	899.3	26 325.6	21	17 810.9	5364.4	20 241.7
10	29 472.4	-2573.9	28 668.5	22	20 233.5	-709.8	20 368.1
11	26 698.8	4559.3	24 617.0	23	28 438.6	1936.5	27 985.2
12	20 492.0	8.8	20 535.7	24	27 378.6	-69.7	27 687.2

数据源于 GGE 软件分析。稳定性指性状在 AEC-Y 轴上的投影。综合值指综合考量各性状综合排名与其综合稳定性的值
The analytical data in this table were from GGE software. Stability refers to the projection of traits to AEC-Y axis. The comprehensive value is based on the rank of synthetic traits and stability of synthetic traits

评价，综合值高的品种说明其综合性状优异且各性状稳定性均较好。由表 6 可以看出，综合值排名前 5 的品种依次为 10、23、24、9、11，综合值排名后 5 位的品种依次为 19、22、16、21、20。

3 讨论

3.1 叶面喷硒后燕麦各器官硒积累规律

植物通过叶片吸收利用无机形态硒，并转移至植物体的其他部位^[25]。本研究表明，未喷硒燕麦仅从土壤中获得硒，在成熟期积累在根中的硒含量最多；叶面喷硒后，叶片是燕麦成熟期硒含量富集的器官。无论喷硒与否，籽粒中硒含量均最少。陈丽娜^[26]通过对燕麦叶面喷硒后发现，成熟期燕麦硒含量表现为叶>穗>根>茎>籽粒，并得出无论是否喷硒，燕麦非食用部位的硒含量都明显高于食用部位的结论。杨建军等^[27]研究发现，水稻叶面喷硒后，成熟期水稻各器官硒含量表现为叶>茎>根>籽粒。本研究 24 份燕麦品种喷硒后各器官硒含量均值的结果与这类研究结果相似。本研究结果表明，通过叶面喷硒，可以不同程度提高燕麦成熟期各器官硒含量，在本试验设置的喷硒浓度范围内，提高幅度随喷硒浓度的增加而增加。其中叶硒含量提高幅度最大，籽粒次之。陈雪等^[28]研究也表明，2 个水稻品种喷硒后，与未喷硒相比，硒在叶和籽粒中所占比例显著提高，根和茎中提高的较少。

本研究表明，24 份燕麦品种成熟期在籽

粒中硒含量稳定性差，差异较大，根中硒含量较稳定，差异较小，且喷硒会降低籽粒中硒的变异水平，目前关于喷硒后作物各器官硒含量变异水平比较的研究较少，李韬等^[21]研究发现，硒肥可以提高 110 份小麦籽粒中的硒含量，但增幅因品种而异。

人体和动物摄入的硒含量是否满足需求，主要取决于作物中硒含量。燕麦产量在全球禾谷类作物中排名第 6 位，提高燕麦的硒含量对通过食物膳食补硒有着重要的作用。但是对作物施用外源硒时，硒从有益到有害之间的阈值很小^[29-31]，中低浓度外源硒对作物有益，过量施用外源硒则会使作物中硒含量超标^[32-33]。史丽娟等^[34]对高粱喷施 120mg/kg 以及马凤霞等^[35]对小麦喷施 120g/hm² 亚硒酸钠时，高粱和小麦籽粒中的硒含量均已超出多数文献中的食物或可食材料硒限量标准（以硒计）0.300mg/kg^[14]。本研究结果表明，不喷施硒的 24 份燕麦品种籽粒硒含量范围在 0.07~0.13mg/kg，均未达到或刚达食物或可食材料硒限量标准^[14]。叶面喷施 80g/hm² 的亚硒酸钠时，籽粒硒含量范围在 0.20~0.30mg/kg，在食物或可食材料硒限量标准之内；叶面喷施 160g/hm² 亚硒酸钠时，籽粒硒含量范围在 0.30~0.44mg/kg，已超过食物或可食材料硒限量标准^[14]，可能会对人体造成硒中毒现象，不建议食用。因此适宜的喷硒浓度既能使燕麦籽粒硒含量更大程度地接近富硒谷物的上限又不会产生毒害作用，因此提高燕麦籽粒硒含量，确定适宜的喷硒浓度，是研究富硒燕麦生产的核心。

3.2 叶面喷硒对燕麦品质性状的影响

本研究结果显示, 喷硒对 24 份燕麦品种籽粒蛋白质、脂肪和 β -葡聚糖含量变异水平影响不一致。喷硒能改变 24 份燕麦品种籽粒蛋白质含量的变异水平, 在一定范围内, 变异水平随喷硒浓度增加而增大, 在本研究叶面喷施亚硒酸钠用量为 $160\text{g}/\text{hm}^2$ 情况下, 24 份燕麦品种籽粒蛋白质含量的变异水平最丰富。尚庆茂等^[36]研究认为, 硒可以作为核糖核酸链的成分来转运氨基酸, 用于蛋白质的合成。施用硒肥可提高燕麦籽粒中必需氨基酸含量和氨基酸总含量^[37], 促进籽粒对蛋白质的合成和积累, 提高籽粒蛋白质含量^[38-39], 本研究 24 份燕麦品种籽粒蛋白质含量变异水平随喷硒浓度增加而增大, 也可能是喷硒提高了燕麦籽粒蛋白质的原因。

燕麦籽粒脂肪含量在谷类作物中位居前列, 其中 80% 是不饱和脂肪酸, 对人体起着非常重要的作用。本研究显示, 喷硒对 24 份燕麦品种籽粒脂肪含量变异水平无影响, 这可能是由于喷硒对 24 份燕麦籽粒脂肪含量影响较小所致。冯学金等^[40]研究显示, 叶面喷硒对胡麻籽粒脂肪含量的影响也较小。史丽娟等^[34]的研究表明, 喷施不同剂量的硒对高粱脂肪含量的影响未达到显著差异。张新军等^[38]研究也表明, 叶面喷硒对燕麦籽粒的脂肪含量影响不显著, 可能作物脂肪含量受硒元素影响较小。

燕麦籽粒 β -葡聚糖有独特的生理功能, 目前被认为是燕麦最具开发潜力的品质之一。本研究显示, 喷硒使燕麦品种籽粒 β -葡聚糖含量差异缩小, 且随喷硒浓度增加, 差异缩小越大。这可能是硒元素影响了 24 份燕麦品种籽粒 β -葡聚糖的合成。宋妍等^[41]利用亚硒酸钠溶液浸泡青稞籽粒发现, 被硒溶液浸泡的籽粒其 β -葡聚糖含量显著高于对照组, 最高可达 1.08 倍。目前, 喷硒对禾谷类作物籽粒 β -葡聚糖含量影响的研究还较少, 硒与 β -葡聚糖含量的关系仍需进一步研究探讨。

3.3 叶面喷硒对燕麦产量的影响

张妮等^[42]研究发现, 在生育期喷施 2 次 $20\text{mg}/\text{L}$ 亚硒酸钠时, 小麦产量显著提高 19%。Nawaz 等^[43]的研究表明, 叶面喷施 $40\text{mg}/\text{L}$ 硒酸钠时, 小麦产量显著提高 14%。郝玉波等^[44]研究发现, 土壤施低含量 ($\leq 10\text{mg}/\text{kg}$) 的亚硒酸钠时, 玉米籽粒产量显著提高, 施入高含量硒 ($\geq 25\text{mg}/\text{kg}$) 时, 玉米籽粒产量会下降。本试验结果表明, 24 份燕麦品种

喷施亚硒酸钠用量为 $80\text{g}/\text{hm}^2$ 的产量与 Se0 均无显著差异, 仅在 $160\text{g}/\text{hm}^2$ 下有 5 个品种的产量显著低于 Se0 和 $80\text{g}/\text{hm}^2$ 下的产量。表明适宜浓度的喷硒不会对燕麦产量造成影响, 高浓度的硒会导致部分燕麦品种产量降低, 这与人^[44]的研究结果一致, 表明影响作物产量的硒施用量有一个阈值, 在一定阈值范围内, 施用硒不会影响作物产量或对作物产量有促进作用, 超过阈值范围会对作物产量产生抑制效应, 且不同作物^[45]甚至同一作物不同品种^[35]产量对硒施用量的响应也不同。因此, 研究确定既能使不同作物及其不同品种籽粒硒含量保持在安全范围内, 又能使不同作物及其不同品种产量达到增产或不减产的最适硒施用量, 对富硒农作物产品的安全、高效生产非常关键。

3.4 叶面喷硒后燕麦籽粒综合性状评价

鉴定某一品种是否优异, 不能以单一凸显指标来评价, 要平衡好各项指标, 只有通过将各项指标进行综合分析, 选出综合性最优的品种才是适合生产中推广和利用的品种。本研究利用叶面喷施 $80\text{g}/\text{hm}^2$ 亚硒酸钠处理下的 24 份燕麦品种籽粒硒含量、产量和品质数据结合相关性分析, 利用 GGE 双标图进行评价和筛选叶面喷硒后产量和品质综合性状优良的燕麦品种。

相关性分析表明, 硒含量与脂肪和 β -葡聚糖含量存在显著正相关性, 与蛋白质含量和产量均无显著相关性。前人^[46]研究表明, 谷子硒含量和蛋白质含量存在显著正相关; 小麦硒含量与产量不存在相关性^[14]; 水稻硒含量与产量呈负显著相关^[47]。可见目前硒含量与品质、产量相关性没有一致的结果, 可能与研究的作物种类或试验使用硒种类及浓度有关。

产量是农业生产最主要的目标性状, GGE 软件的研发人严威凯博士近期研发了 GYT (Genotype by Yield*Trait) 新功能, 此功能基于产量为最主要的目标性状, 可以兼顾多个农艺性状和品质性状, 对作物品种进行综合评价^[48-49]。本研究利用 GGE 软件的 GYT 双标图新功能, 基于产量为最主要的目标性状, 兼顾籽粒硒、 β -葡聚糖、蛋白质和脂肪含量, 对 24 份燕麦品种进行综合评价。结果表明, 综合性状排名前 5 的品种依次为品燕 1 号、Banner、OA1576-4、品燕 2 号、白燕 10 号。如再考虑各品种在产量与各品质性状结合的均衡稳定优越性, 24 份燕麦品种综合值排名前 5 的品种依次为品燕 1

号、Banner、OA1576-4、白燕 10 号、品燕 2 号。

4 结论

抽穗期叶面喷硒可提高燕麦各器官硒含量, 改变籽粒硒、蛋白质、脂肪和 β -葡聚糖含量变异水平。叶面喷施 $80\text{g}/\text{hm}^2$ 亚硒酸钠, 24 份燕麦品种籽粒硒含量在食物或可食材料硒限量标准 ($0.300\text{mg}/\text{kg}$) 之内。过量喷硒会使籽粒硒含量超出多数文献中食物或可食材料硒限量标准。基于产量为目标性状, 兼顾籽粒硒、蛋白质、脂肪和 β -葡聚糖含量, 筛选出综合性状优良的品燕 1 号、Banner、OA1576-4、白燕 10 号和品燕 2 号这 5 个燕麦品种。

参考文献

- [1] Obour A K, Holman J D, Schlegel A J. Seeding rate and nitrogen application effects on oat forage yield and nutritive value. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42(13): 1452-1460.
- [2] 中华人民共和国地方病与环境图集编纂委员会. 中华人民共和国地方病与环境图集. 北京: 科学出版社, 1989.
- [3] Schwarz K, Foltz C M. Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration. *Nutrition*, 1999, 15(3): 255-259.
- [4] Lyons G H, Judson G J, Ortiz-Monasterio I, et al. Selenium in Australia: Selenium status and biofortification of wheat for better health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 19(1): 75-82.
- [5] 张爱民, 李欣, 刘冬成, 等. 品质支撑农作物产业与未来发展. *中国农业科学*, 2016, 49(22): 4265-4266.
- [6] 汤超华, 赵青余, 张凯, 等. 富硒农产品研究开发助力我国营养型农业发展. *中国农业科学*, 2019, 52(18): 3122-3133.
- [7] 田秀英, 王正银. 硒对苦荞产量、营养与保健品质的影响. *作物学报*, 2008, 34(7): 1266-1272.
- [8] 铁梅, 韩杰, 李宝瑞, 等. 土壤施硒对燕麦硒含量及产量的影响. *中国农业大学学报*, 2015, 20(5): 74-80.
- [9] 李志玉, 郭庆元, 徐巧珍, 等. 不同大豆品种积累硒的特性及基因型差异. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(2): 207-213.
- [10] 张城铭, 周鑫斌. 不同施硒方式对水稻硒利用效率的影响. *土壤学报*, 2019, 56(1): 186-194.
- [11] Hawkesford M J, Zhao F J. Strategies for increasing the selenium content of wheat. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(3): 282-292.
- [12] 张鑫坪, 王炜鑫, 杨文祐, 等. 叶面施硒对不同小站稻品种吸收累积硒及微量元素的影响. *天津农林科技*, 2021(6): 6-8.
- [13] 刘庆, 田侠, 史衍玺. 施硒对小麦籽粒硒富集、转化及蛋白质与矿质元素含量的影响. *作物学报*, 2016, 42(2): 778-783.
- [14] 刘慧, 杨月娥, 王朝辉, 等. 中国不同麦区小麦籽粒硒的含量及调控. *中国农业科学*, 2016, 49(9): 1715-1728.
- [15] 王校辉, 闫红娜. 喷施富硒有机水溶肥料对冬小麦硒含量、累积量及籽粒产量质量的影响. *东北农业科学*, 2021, 46(5): 31-34, 55.
- [16] 贾亚, 琴董飞, 杨峰, 等. 喷施硒肥对黑小麦籽粒产量及硒含量的影响. *麦类作物学报*, 2021, 41(10): 1266-1271.
- [17] 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. *中国农业科学*, 2017, 50(1): 51-63.
- [18] 梁晶. 叶面喷施不同硒肥对谷子产量和籽粒硒含量的影响. *农业与技术*, 2019, 39(9): 19-21.
- [19] 周鑫斌, 赖凡, 张城铭, 等. 不同形态硒向水稻籽粒转运途径及品种差异. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1251-1258.
- [20] White C, Robson A, Fisher H. Variation in nitrogen, sulfur, selenium, cobalt, manganese, copper and zinc contents of grain from wheat and two lupin species grown in a range of Mediterranean environments. *Crop and Pasture Science*, 1981, 32(1): 47-59.
- [21] 李韬, 孙发宇, 龚盼, 等. 施纳米硒对小麦籽粒硒含量及其品质性状的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 427-433.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中硒的测定: GB 5009.93-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 谷物和豆类 氮含量测定和粗蛋白质含量计算凯氏法: GB/T 5511-2008. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中脂肪的测定: GB 5009.6-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [25] Vadim E, Larisa J. Characteristics of selenium migration in soil-plant system of East Meshchera and Transbaikalia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, 107(2): 200-205.
- [26] 陈丽娜. 外源硒对燕麦生长期光合特性及硒吸收影响的研究. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
- [27] 杨建军, 王海廷, 丁永峰, 等. 硒肥不同施用方法对水稻硒含量及产量的影响. *现代农业科技*, 2020(18): 6-7.
- [28] 陈雪, 沈方科, 梁欢婷, 等. 外源施硒措施对水稻产量品质及植株硒分布的影响. *南方农业学报*, 2017, 48(1): 46-50.
- [29] 夏方山, 王聪聪, 李红玉, 等. 硒引发对紫花苜蓿种子抗氧化性能的影响. *草地学报*, 2021, 29(3): 472-477.
- [30] White P J. Selenium metabolism in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 2018, 1862(11): 2333-2342.
- [31] Gissel-nielsen G, Gupta U C, Lamand M, et al. Selenium in soils and plants and its importance in livestock and human nutrition. *Advances in Agronomy*, 1984, 37: 397-460.
- [32] 徐辉碧. 生物微量元素一硒. 武汉: 华中工学院出版社, 1984.
- [33] 陈铭, 谭见安, 王五一. 环境硒与健康关系研究中的土壤化学与植物营养学. *土壤学进展*, 1994, 22(4): 1-10.
- [34] 史丽娟, 白文斌, 曹昌林, 等. 外源硒对高粱产量、籽粒硒含量及品质的影响. *作物杂志*, 2020(3): 191-196.
- [35] 马凤霞, 王沛, 张敏, 等. 叶面喷施硒肥对不同品种小麦产量及籽粒硒含量的影响. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 51(1): 25-30.
- [36] 尚庆茂, 李平兰. 硒在高等植物中的生理作用. *植物生理学通讯*, 1998(4): 284-288.
- [37] 李明, 介晓磊, 李建平, 等. 硒肥对苜蓿常规养分和氨基酸变化规律的影响. *草地学报*, 2012, 20(6): 110-116.
- [38] 张新军, 杨才, 曾昭海, 等. 叶面喷施硒肥对裸燕麦产量和品质的影响. *麦类作物学报*, 2015, 35(3): 408-412.
- [39] Li J H, Yang W P, Guo A N, et al. Combined foliar and soil selenium fertilizer increased the grain yield, quality, total se, and organic Se content in naked oats. *Journal of Cereal Science*, 2021, 2: 103265.
- [40] 冯学金, 郭秀娟, 杨建春, 等. 喷施硒肥对胡麻子粒硒含量、产量及品质的影响. *作物杂志*, 2019(3): 155-157.
- [41] 宋妍, 李粟晋, 陶阳, 等. 青稞籽粒富硒发芽条件优化及其抗

- 氧化能力分析. 食品工业科技, 2019, 40(14): 188-195, 202.
- [42] 张妮, 李琦, 张栋, 等. 外源硒对滴灌小麦籽粒硒含量及产量的影响. 麦类作物学报, 2015, 35(7): 995-1001.
- [43] Nawaz F, Ahmad R, Ashraf M Y, et al. Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 113: 191-200.
- [44] 郝玉波, 刘华琳, 慈晓科, 等. 施硒对两种类型玉米硒元素分配及产量、品质的影响. 应用生态学报, 2012, 23(2): 411-418.
- [45] 匡恩俊, 迟凤琴, 张久明, 等. 叶面喷硒对不同作物籽粒硒含量及产量的影响. 中国土壤与肥料, 2018, 276(4): 133-136.
- [46] 刘三才, 朱志华, 李为喜, 等. 谷子品种资源微量元素硒和蛋白含量的测定与评价. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3812-3818.
- [47] 余守武, 陈合云, 郑学强, 等. 水稻籽粒硒含量的基因型差异及其与产量性状的相关性分析. 核农学报, 2011, 25(5): 993-997.
- [48] Yan W K, Frégeau-Reid J, Mountain N, et al. Genotype and management evaluation based on genotype by yield*trait (GYT) analysis. *Crop Breeding, Genetics and Genomics*, 2019, 1(2): e190002.
- [49] Yan W K, Frégeau-Reid J. Genotype by yield*trait (GYT) biplot: a novel approach for genotype selection based on multiple traits. *Scientific Report*, 2018, 8(1): 1-10.

Effects of Foliar Spraying Selenium on Selenium Accumulation of Oat Varieties and Evaluation of Their Comprehensive Traits

Li Yue¹, Ning Dan¹, Lü Yufeng¹, Zhang Bin¹, Xue Zhiqiang², Jia Juqing¹,
Feng Meichen¹, Song Xiaoyan¹, Zhang Meijun¹, Yang Wude¹

(¹National Laboratory of Minor Crops Germplasm Innovation and Molecular Breeding (in Preparation)/College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, Shanxi, China; ²Ecological Agriculture and Animal Husbandry Research Institute, Shanxi Agricultural University, Shuozhou 037200, Shanxi, China)

Abstract In order to reveal the effects of spraying selenium on the selenium accumulation in oats, and evaluate and screen excellent comprehensive traits oats varieties based on yield and quality after spraying selenium, 24 oats varieties were used as research materials, three spraying concentrations were set (sodium selenite dosage was 0, 80, 160g/ha) to spray on leaves at heading stage. The results showed that selenium content in oats leaves had the highest increase with increasing spraying selenium concentration at mature stage, with selenium content in grains in turn. The spraying selenium decreased the variation degree of grain selenium content. Under the same selenium concentration, the differences of selenium contents in grains among 24 oats varieties were the greatest, however, and the least in roots. When 80g/ha sodium selenite was sprayed, the highest selenium content in grains was 0.30mg/kg, but when the spraying concentration was 160g/ha, the grain selenium contents of 24 oats varieties all exceeded the limitations for selenium content in foods or edible materials from most of different literatures (0.300mg/kg). The variation levels of grain protein, fat and β -glucan contents were also changed by spraying selenium. When spraying 80g/ha sodium selenite, the yields of oats had no significant difference compared with the treatment of spraying 0g/ha; correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between selenium content and contents of fat and β -glucan, with correlation coefficients 0.63 and 0.42, respectively. GYT biplot analysis based on yield and considering grain selenium, protein, fat and β -glucan contents showed that the top five oat varieties were Pinyan 1, Banner, OA1576-4, Baiyan 10 and Pinyan 2 in turn.

Key words Oat; Foliar spraying selenium; Selenium accumulation; Comprehensive trait evaluation