

网络出版时间:2026-06-24

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260624.1521.002

叶面喷施纳米硒对小麦硒吸收、转运及分布的影响

刘家君¹, 王德福¹, 秦娜娜², 刘靖涛¹, 刘小容¹

(1. 四川文理学院/特色植物开发研究四川省高校重点实验室/大巴山农业资源开发与生态保护达州市重点实验室, 四川达州 635000;

2. 达州市农业科学研究院, 四川达州 635000)

摘要:富硒小麦是缺硒地区人群膳食补硒的有效途径。为探究硒在小麦各部位的吸收、转运和分布规律,以小麦品系川文 2401 为供试材料,叶面喷施清水(CK)和 $7.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C_1)、 $15.0 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C_2)、 $30.0 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C_3) 纳米硒,分析不同处理对小麦硒吸收、转运、籽粒硒形态、营养元素、生态风险、膳食硒摄入和产量及其构成因素的影响。结果表明,与 CK 相比,叶面喷施纳米硒后小麦各组织的硒含量显著提高,籽粒硒含量增加 25.5~126.8 倍;硒转运系数(TF)发生显著变化,其中旗叶与第 1 茎节、第 2 叶与第 2 茎节、第 3 叶与第 3 茎节及第 4 叶与第 4 茎节的 TF 分别降低 85.5%~91.3%、64.7%~82.4%、75.0%~75.0% 和 50.0%~83.3%,穗轴与颖壳、穗轴与籽粒的 TF 分别增加 209.4%~718.8% 和 111.4%~640.0%。CK 的籽粒仅检测出硒代胱氨酸(SeCys)和硒代蛋氨酸(SeMet),SeCys 占比较高; C_1 、 C_2 和 C_3 处理籽粒中新增 1 种硒形态,为甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys),SeMet 占比最高。与 CK 相比, C_1 、 C_2 和 C_3 处理籽粒的锰、锌、铜和蛋白质含量显著下降,降幅分别为 12.7%~15.6%、4.1%~18.2%、6.8%~16.1% 和 6.9%~22.7%;铁含量显著增加,增幅 46.4%~111.1%。 C_1 处理的生态风险指数(Er)为 51.6,最接近 Er 安全阈值(40.0),成人每日膳食硒摄入量(EDI)为 $297.2 \mu\text{g}$,处于推荐范围($60 \sim 400 \mu\text{g}$);CK 的 Er 在安全阈值内,但 EDI 远低于推荐范围的最低值; C_2 、 C_3 处理的 Er 和 EDI 均高于安全/推荐范围。与 CK 相比, C_1 、 C_2 、 C_3 处理的产量和千粒重显著提高,增幅分别为 3.5%~8.5% 和 2.8%~4.4%;有效穗数和穗粒数无显著变化。综上,叶面喷施纳米硒可显著增加小麦籽粒硒含量和产量,并通过改善硒形态、占比及其他营养元素含量提高其品质,其中 C_1 处理($7.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$)为纳米硒最优喷施浓度。

关键词:小麦;纳米硒;硒转运;营养元素;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)07-0943-10

Effects of Foliar Nano-Selenium Spraying on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Wheat

LIU Jiajun¹, WANG Defu¹, QIN Nana², LIU Jingtao¹, LIU Xiaorong¹

(1. Sichuan University of Arts and Science/Key Laboratory of Exploitation and Study of Distinctive Plants in Education Department of Sichuan Province/Dazhou Key Laboratory of Agricultural Resources Development and Ecological Conservation in Daba Mountain, Dazhou, Sichuan 635000, China; 2. Dazhou Academy of Agricultural Sciences, Dazhou, Sichuan 635000, China)

Abstract: Selenium-enriched wheat is a viable strategy to address dietary selenium deficiencies in selenium-deficient regions. To explore the selenium uptake, translocation, and distribution patterns in various wheat tissues, a wheat line Chuanwen 2401 was used as the material. Four foliar spraying treatments were set up: three nano-selenium application rates of $7.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C_1), $15.0 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C_2) and $30.0 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C_3), with clean water as the control(CK), to analyze the effects on selenium absorption and translocation, selenium speciation in grains forms, nutrient element contents, ecologi-

收稿日期:2025-12-19

修回日期:2026-03-26

基金项目:四川省高校重点实验室开放基金项目(TSZW2023ZB-10);四川革命老区发展研究中心 2025 年度项目(SLQ2025SB-36);大巴山农业资源开发与生态保护达州市重点实验室 2025 年度项目(ARDEC202508);达州市科技计划项目(2024SSZXZYT04)

第一作者 E-mail:liujiajun@sasu.edu.cn(刘家君)

通讯作者 E-mail:2249183768@qq.com(秦娜娜)

cal risks, dietary selenium intake, yield and yield components. The results showed that, foliar nano-selenium spraying significantly increased selenium content in various wheat tissues, and selenium content in wheat grain significantly increased by 25.5—126.8 fold. Compared with CK, selenium translocation coefficients showed significant changes, for example, TF of flag leaf and the 1st stem node, the 2nd leaf and 2nd stem node, the 3rd leaf and 3rd stem node, and the 4th leaf and 4th stem node were significantly reduced by 85.5%—91.3%, 64.7%—82.4%, 75.0%—75.0%, and 50.0%—83.3%, respectively. TF of rachis and glume, rachis and grain were significantly increased by 209.4%—718.8% and 111.4%—640.0%, respectively. Only selenocysteine(SeCys) and selenomethionine(SeMet) were detected in CK grains, with SeCys accounting for the higher proportion. An additional selenium speciation, methylselenocysteine(MeSeCys), was identified in grains under C_1 , C_2 , and C_3 treatments, with SeMet being the dominant selenium form. Compared with CK, contents of Mn, Zn, Cu, and grain protein significantly decreased by 12.7%—15.6%, 4.1%—18.2%, 6.8%—16.1%, and 6.9%—22.7%, respectively. Fe content significantly increased by 46.4%—111.1%. The ecological risk index(Er) of the C_1 treatment was 51.6, which was closest to the safety threshold(40.0), and the estimation of daily selenium intake(EDI) was 297.2 μg , falling within the recommended range(60—400 μg). The Er value of CK was within the safety threshold, but its EDI was far below the lower limit of the recommended range. Both Er and EDI values of C_2 and C_3 treatments exceeded the safety/recommended ranges. Compared with CK, yield thous and grain weight of C_1 , C_2 , and C_3 treatments significantly increased by 3.5%—8.5% and 2.8%—4.4%, respectively. Effective spikes and grains per spike showed no significant changes. In conclusion, foliar nano-selenium spraying significantly increased the selenium content and yield of wheat grains, and improved the wheat grains quality by regulating the selenium speciation, proportion, and nutrient element content. Among them, C_1 treatment($7.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$) was the optimal foliar nano-selenium spraying concentration.

Keywords: Wheat; Nano-selenium; Selenium uptake; Nutrient elements; Yield

硒是人类与动物必需的微量元素,是谷胱甘肽过氧化物酶等重要抗氧化酶的核心组成成分^[1-2]。硒缺乏可导致人体生长发育迟缓、甲状腺功能紊乱、生殖功能障碍等多种疾病^[3-5]。《中国居民膳食营养素参考摄入量(WS/T 578.3)》中,成人每日硒推荐摄入量为 60~400 μg ,目前中国有超过 7 000 万人口生活在低硒或缺硒地区,面临硒摄入不足的健康风险^[6-7]。小麦是易于富集硒的谷类作物,中国小麦籽粒硒含量在 0.0~672.7 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,多数产区的小麦硒含量达不到推荐标准,难以满足人体通过膳食摄入硒的需求^[8]。开展小麦硒营养强化相关研究与应用对改善居民健康状况具有重要意义。

研究发现,叶面喷施亚硒酸盐、硒酸盐及复配硒肥等传统外源硒均可显著提升作物可食用部位硒含量,例如,叶面喷施硅硒配比为 1:1 的硅硒肥显著提高蔗笋和甘蔗的硒含量^[9];叶面喷施亚硒酸钠后,黑豆籽粒硒含量增加 65.21 倍^[10];施亚硒酸钠可促进茶树中硒从根向茎的转运,显著提

升根、茎、叶等器官的硒含量^[11]。纳米硒具有稳定的理化性质和较高的生物安全性,多种作物对其表现出较好的富硒效果。叶面喷施 0.095 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米硒后,紫色马铃薯块茎的硒含量增加至 0.174 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,符合富硒农产品标准^[12]。叶面喷施 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的纳米硒能提升旱地优质水稻的产量和籽粒硒含量,增幅分别为 29.6%和 45.5%;喷施浓度增加至 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,还可显著降低稻瘟病、稻曲病等病害发生^[13]。茶园喷施 13.5 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-1}$ 的纳米硒能显著提高茶树叶片叶绿素含量和鲜叶产量^[14]。但硒在不同作物体内的吸收、转运及积累规律存在显著差异。例如,叶面喷施硒肥后,硒元素大多积累在水稻叶片或茎部,不易向下转移,但易由茎部向籽粒转移^[15];叶面喷施硒酸钠和亚硒酸钠能显著抑制硒从小麦叶片向相邻节的转运,促进硒从小麦穗轴向颖壳、穗轴向籽粒的转运^[16];叶面喷施纳米硒能显著增加小麦各部位的硒含量,增加千粒重和产量,但不影响有效穗数和穗粒数^[17];开花期喷

施纳米硒可提高小麦成熟期干物质积累量、籽粒硒含量和产量^[18]。

目前,纳米硒在小麦中的研究多聚焦于产量、硒含量等表观效应,关于硒在小麦植株各部位的吸收、转运及分布机制尚未见系统解析,适宜喷施浓度亦未明确优化,且其对籽粒硒富集效率、产量形成及潜在环境风险的协同评估仍较为缺乏。为此,本研究设置 4 个梯度浓度的纳米硒处理,系统分析硒在小麦不同部位中的积累动态与转运规律,评估其对籽粒产量、硒生物强化效率及环境安全性的影响,以确定最优喷施浓度,为纳米硒在小麦安全生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2024—2025 年在达州市农业科学研究院试验基地(107°28′ N,31°14′ E;海拔 692.2 m)开展。试验地土壤 pH 值为 8.02;土壤养分含量分别为有机质 27.67 g·kg⁻¹,总氮 1.50 g·kg⁻¹,总磷酸盐 0.81 g·kg⁻¹,总钾 17.46 g·kg⁻¹,总硒 0.13 mg·kg⁻¹。前茬作物为大豆。

1.2 试验设计

供试材料为新育成的高代小麦品系川文 2401。供试药剂为富硒营养粉剂(纳米硒含量 5.0%),购于中农硒科富硒农业技术研究院。采用单因素随机区组设计,设置 4 个纳米硒叶面喷施浓度:0 g·hm⁻²(CK)、7.5 g·hm⁻²(C₁)、15.0 g·hm⁻²(C₂)和 30.0 g·hm⁻²(C₃),小区面积为 10 m²(2 m×5 m),3 个重复。采用条播方式播种,播种时间为 2024 年 10 月下旬,播种量为 187.5 kg·hm⁻²。在小麦分蘖期、孕穗期和灌浆期时,选择晴天上午 10 点使用德力西小型喷雾器(最大容量为 5 L)进行叶面喷施,CK、C₁、C₂ 和 C₃ 处理喷施液的硒浓度分别为 0 mg·L⁻¹、3.75 mg·L⁻¹、7.50 mg·L⁻¹ 和 15.00 mg·L⁻¹,每小区喷施量为 2 L。其他管理同当地大田。

1.3 样品采集与处理

小麦成熟期,每小区采集具代表性小麦植株样品 5 株,并将其分为根和地上部位,地上部位分为旗叶、第 2 叶~第 4 叶(图 1 及下文简称叶 1~叶 4)、穗轴、颖壳、籽粒、第 1 茎节~第 4 茎节(图 1 及下文简称节 1~节 4)、第 1 节间~第 5 节间(图 1 及下文简称节间 1~节间 5),共 17 个部位(图 1)。将样品用蒸馏水洗净,在 65℃的烘箱中烘干至恒

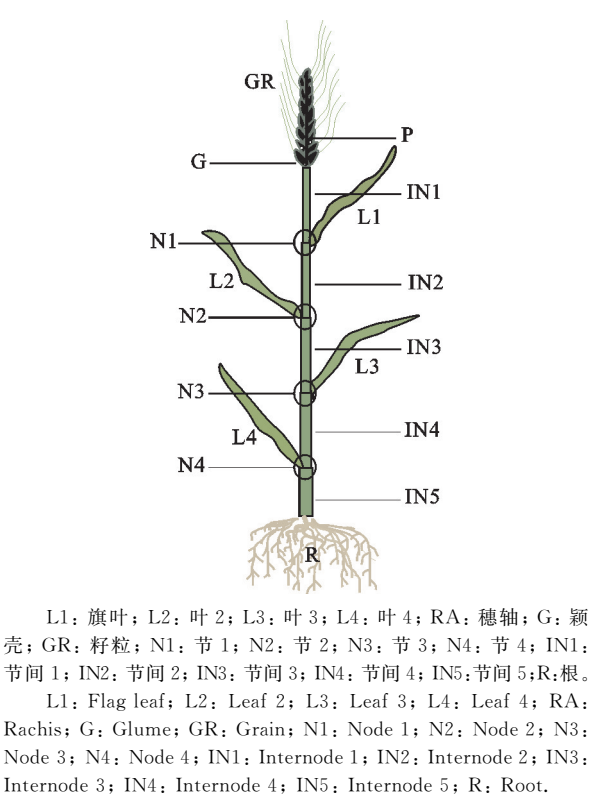


图 1 小麦各组织的分解图

Fig. 1 Decomposition diagram of each tissue of wheat

重,用于后续分析。

1.4 测定指标及方法

将烘干至恒重的小麦各组织样品研磨成粉,分别称取 0.5 g 于锥形瓶中,加入 10 mL 浓硝酸在消解仪上进行消解,用蒸馏水将消解溶液定容至 50 mL,用电感耦合等离子体发射光谱仪(Varian 720ES ICP-OES,检出限为 1 μg·L⁻¹)测定硒含量以及籽粒的锰、铁、锌和铜含量。小麦籽粒的蛋白含量采用国标 GB5009.5 中的凯氏定氮法进行测定。将各处理的小麦籽粒送至南京研科检测技术有限公司(中国,南京)进行硒形态分析,包括硒代胱氨酸(SeCys)、甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys)、硒代蛋氨酸(SeMet)、硒酸盐(Selenate)和亚硒酸盐(Selenite)。

小麦成熟期,在每个小区选取 1 m² 的样方测定有效穗数,重复 3 次,平均值作为该小区的有效穗数;每个小区中收获 5 个麦穗,分别测定穗粒数,平均值作为该小区的穗粒数。按小区收获,测定产量、千粒重。计算硒在小麦各部位的转运系数(TF)^[19],估算小麦植株及根系还田后硒的潜在生态风险指数(Er)^[20]。基于 Nargis 等^[21]的分级标准,将 Er 分为轻微生态风险(slight, Er<40)、中等生态风险(medium, 40<Er<80)、强烈

生态风险(strong, $80 < Er < 160$)、较强生态风险(very strong, $160 < Er < 320$)和极强生态风险(extremely strong, $Er > 320$)5 个等级。利用公式 $EDI = C_{\text{Grain}} \times W_{\text{Grain intake}}$ 估算每人每日硒摄入量(EDI)^[22-23], EDI 推荐值为 $60 \sim 400 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, C_{Grain} 为小麦籽粒硒含量, $W_{\text{Grain intake}}$ 为日均小麦摄入量, 为 0.1402 kg 。

1.5 数据与统计分析

利用 Excel 2021 和 Origin 2021 进行数据整理与作图, 利用 SPSS Statistics 27 进行方差分析和差异显著性检测。

2 结果

2.1 不同处理对小麦各部位硒含量的影响

由表 1 可知, 叶面喷施纳米硒可显著增加小麦各部位硒含量(除 C_1 处理的 $N3$ 外)。相较于 CK, C_1 、 C_2 和 C_3 处理小麦植株的总硒含量分别增加了 5.0 倍、16.2 倍和 35.9 倍; 穗、叶、节、节间和根的硒含量分别增加了 10.2~91.2 倍、6.7~43.9 倍、1.2~8.8 倍、0.9~9.1 倍和 0.9~6.5 倍, 其中穗和叶的增幅最大。小麦各部位的硒含量均随硒喷施浓度增加而显著增加, 与 CK 相比, 喷硒处理籽粒、颖壳和穗轴的硒含量分别提升 25.5~126.8 倍、19.7~170.9 倍和 2.3~54.6

倍, 3 个喷硒处理中, 籽粒和颖壳增幅均大于穗轴; 旗叶、叶 2、叶 3 和叶 4 的硒含量分别提升 29.9~150.2 倍、7.9~46.2 倍、3.6~27.3 倍和 2.9~31.3 倍, 旗叶的增幅最大; 节 1、节 2、节 3 和节 4 的硒含量分别提升 3.4~13.5 倍、0.7~15.0 倍、0.1~6.3 倍和 0.9~5.0 倍; 节间 1、节间 2、节间 3、节间 4 和节间 5 的硒含量分别提升 8.7~97.0 倍、2.6~14.2 倍、0.3~7.5 倍、0.3~5.1 倍和 0.2~2.0 倍; 根的硒含量提升 0.9~6.5 倍。综上, 小麦植株及各部位的硒含量均在 C_3 处理下最大, C_1 处理最小。

2.2 不同处理小麦各组织硒的转运系数分析

分析喷硒后硒在小麦不同部位之间的转运系数(TF)发现, 与 CK 相比, C_1 处理中, $TF_{\text{RA-G}}$ 、 $TF_{\text{RA-GR}}$ 、 $TF_{\text{N1-IN1}}$ 、 $TF_{\text{N2-IN2}}$ 和 $TF_{\text{IN5-R}}$ 显著增加, 增幅依次为 531.3%、640.0%、154.5%、117.9% 和 53.4%; $TF_{\text{IN1-RA}}$ 、 $TF_{\text{L1-N1}}$ 、 $TF_{\text{L2-N2}}$ 、 $TF_{\text{L3-N3}}$ 、 $TF_{\text{L4-N4}}$ 和 $TF_{\text{N4-IN5}}$ 显著降低, 降幅依次为 72.4%、85.5%、82.4%、75.0%、50.0% 和 36.2%。 C_2 处理中, $TF_{\text{RA-G}}$ 、 $TF_{\text{RA-GR}}$ 、 $TF_{\text{N1-IN1}}$ 、 $TF_{\text{N2-IN2}}$ 和 $TF_{\text{IN5-R}}$ 显著增加, 增幅依次为 718.8%、537.1%、490.9%、94.6% 和 253.4%; $TF_{\text{IN1-RA}}$ 、 $TF_{\text{L1-N1}}$ 、 $TF_{\text{L2-N2}}$ 、 $TF_{\text{N2-IN3}}$ 、 $TF_{\text{L3-N3}}$ 、 $TF_{\text{L4-N4}}$ 和 $TF_{\text{N4-IN5}}$ 显著降低, 降幅为 84.3%、89.9%、76.4%、50.9%、75.0%、83.3% 和 37.5%。 C_3 处理中, $TF_{\text{RA-G}}$ 、 $TF_{\text{RA-GR}}$ 、 $TF_{\text{N1-IN1}}$ 和 $TF_{\text{IN5-R}}$ 显著

表 1 不同处理小麦不同部位的硒含量

Table 1 Selenium content of different parts in wheat under different treatments

mg · kg⁻¹

组织 Tissue	CK	C ₁	C ₂	C ₃
GR	0.08±0.01d	2.12±0.11c	4.77±0.01b	10.22±0.72a
G	0.08±0.01d	1.66±0.09c	5.62±0.09b	13.75±0.55a
RA	0.25±0.03d	0.82±0.02c	2.14±0.02b	13.90±0.72a
L1	0.18±0.05d	5.57±0.21c	15.75±0.45b	27.22±0.28a
L2	0.53±0.07d	4.72±0.17c	14.48±0.42b	25.02±2.86a
L3	0.73±0.04d	3.38±0.09c	10.14±1.51b	20.65±1.15a
L4	0.66±0.06d	2.60±0.06c	8.06±0.62b	21.34±0.33a
N1	0.12±0.01d	0.53±0.02c	1.05±0.10b	1.74±0.09a
N2	0.09±0.00d	0.15±0.01c	0.64±0.06b	1.44±0.06a
N3	0.15±0.04c	0.17±0.01c	0.52±0.05b	1.09±0.05a
N4	0.20±0.01c	0.39±0.07b	0.40±0.01b	1.20±0.35a
IN1	0.03±0.00d	0.29±0.01c	1.35±0.03b	2.94±0.05a
IN2	0.05±0.02c	0.18±0.01b	0.68±0.12a	0.76±0.09a
IN3	0.09±0.02d	0.12±0.01c	0.33±0.04b	0.77±0.04a
IN4	0.15±0.00d	0.19±0.01c	0.38±0.08b	0.92±0.09a
IN5	0.30±0.03b	0.37±0.04b	0.38±0.05b	0.90±0.18a
R	0.26±0.08d	0.50±0.02c	1.19±0.20b	1.96±0.16a

同行数据后不同小写字母表示不同处理间差异在 0.05 水平显著。下同。

Different lowercase letters following data in same lines indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same in tables 2 and 3.

表 2 小麦不同部位间硒的转运系数

Table 2 Selenium transport coefficients between different parts of wheat

转运系数(TF) Translocation coefficient(TF)	CK	C ₁	C ₂	C ₃
TF _{RA-G}	0.32±0.04d	2.02±0.13b	2.62±0.02a	0.99±0.03c
TF _{RA-GR}	0.35±0.08d	2.59±0.16a	2.23±0.01b	0.74±0.09c
TF _{IN1-P}	10.15±1.88a	2.80±0.16bc	1.59±0.04c	4.73±0.32b
TF _{L1-N1}	0.69±0.18a	0.10±0.01b	0.07±0.01b	0.06±0.00b
TF _{N1-IN1}	0.22±0.04d	0.56±0.04c	1.30±0.13b	1.70±0.11a
TF _{N1-IN2}	0.41±0.21a	0.34±0.02a	0.66±0.17a	0.44±0.07a
TF _{L2-N2}	0.17±0.03a	0.03±0.00b	0.04±0.01b	0.06±0.00b
TF _{N2-IN2}	0.56±0.29c	1.22±0.07a	1.09±0.28b	0.53±0.05c
TF _{N2-IN3}	1.06±0.28a	0.81±0.04ab	0.52±0.10b	0.53±0.01b
TF _{L3-N3}	0.20±0.04a	0.05±0.00b	0.05±0.01b	0.05±0.00b
TF _{N3-IN3}	0.70 ±0.27a	0.70±0.04a	0.64±0.13a	0.71±0.07a
TF _{N3-IN4}	1.06±0.24a	1.08±0.12a	0.75±0.21a	0.85±0.12a
TF _{L4-N4}	0.30±0.01a	0.15±0.03b	0.05±0.01c	0.06±0.02c
TF _{N4-IN4}	0.75±0.06ab	0.49±0.05b	0.97±0.22a	0.81±0.14a
TF _{N4-IN5}	1.52±0.12a	0.97±0.09b	0.95±0.11b	0.78±0.18b
TF _{IN5-R}	0.88±0.32d	1.35±0.13c	3.11±0.19a	2.25±0.35b

增加,增幅为 209.4%、111.4%、672.7%和 155.7%; TF_{IN1-P}、TF_{L1-N1}、TF_{L2-N2}、TF_{N2-IN3}、TF_{L3-N3}、TF_{L4-N4} 和 TF_{N4-IN5} 显著降低,降幅为 53.4%、91.3%、64.7%、50.0%、75.0%、80.0%和 48.7%。其余处理中的转运系数无显著性变化(表 2)。综上,叶面喷施纳米硒能显著提高硒从穗轴向籽粒、穗轴向颖壳、节间 5 向根的转运系数,C₃ 处理较 C₁、C₂ 处理的效果减弱;也能显著降低硒从叶片向相邻节点的转运系数。

2.3 不同处理小麦各组织硒的分布规律分析

从小麦各组织的硒分布(图 2A)看,CK 条件下,小麦各组织的硒含量占比表现为叶(54.1%)>节间(15.1%)>节(12.1%)>穗(11.5%)>根(7.2%);叶面喷施纳米硒后各组织硒含量占比均表现为叶>穗>节>节间>根。在 C₁、C₂ 和 C₃ 处理中,叶的硒含量占比分别为 62.2%、66.6%和 59.2%,穗的硒含量占比分别为 26.7%、25.6%和 33.5%,节的硒含量占比分别为 4.2%、3.2%和 3.3%,节间的硒含量占比分别为 4.0%、2.4%和 2.3%,根的硒含量占比分别为 2.9%、2.2%和 1.7%。以上结果表明,叶面喷施纳米硒后,穗的硒含量占比提升至第二位,且 C₁、C₂、C₃ 处理间增幅无明显差异。

在小麦穗中,C₁、C₂ 和 C₃ 处理穗轴的硒含量占比分别从 CK 的 60.5%降低至 17.8%、17.1%和 36.7%;颖壳的硒含量占比分别从 CK 的 19.0%增加至 36.1%、44.8%和 36.3%;籽粒的硒含量

占比分别从 CK 的 20.5%增加至 46.1%、38.1%和 27.0%(图 2B)。在小麦叶片中,C₁、C₂、C₃ 处理旗叶的硒含量占比分别从 CK 的 8.7%增加至 34.2%、32.5%和 28.9%;叶 2 的硒含量占比分别从 CK 的 25.3%增加至 29.0%、29.9%和 26.5%;叶 3 的硒含量占比分别从 CK 的 34.6%降低至 20.8%、20.9%和 21.9%;叶 4 的硒含量占比分别从 CK 的 31.4%降低至 16.0%、16.6%和 22.6%(图 2C)。在茎节中,CK 中节 1、节 2、节 3 和节 4 的硒含量占比分别为 21.4%、16.1%、26.7%和 35.8%,C₁ 处理节 1 的硒含量占比增加至 42.5%,节 2、节 3 和节 4 的硒含量占比分别降低至 12.0%、14.0%和 31.5%;C₂ 处理节 1 和节 2 的硒含量占比分别增加至 40.1%和 24.5%,节 3 和节 4 的硒含量占比分别降低至 20.1%和 15.3%;C₃ 处理节 1 和节 2 的硒含量占比分别增加至 31.7%和 26.3%,节 3 和节 4 的硒含量占比分别降低至 20.0%和 22.0%(图 2D)。在节间中,C₁、C₂、C₃ 处理节间 1 的硒含量占比分别从 CK 的 4.1%增加至 25.4%、43.3%和 46.8%;节间 2 的硒含量占比分别从 CK 的 7.8%增加至 15.7%、21.8%和 12.1%;节间 3 的硒含量占比分别从 CK 的 15.1%降低至 10.5%、10.5%和 12.2%;节间 4 的硒含量占比分别从 CK 的 24.1%降低至 16.1%、12.3%和 14.6%;节间 5 的硒含量占比分别从 CK 的 48.9%降低至 32.2%、12.2%和 14.3%(图 2E)。

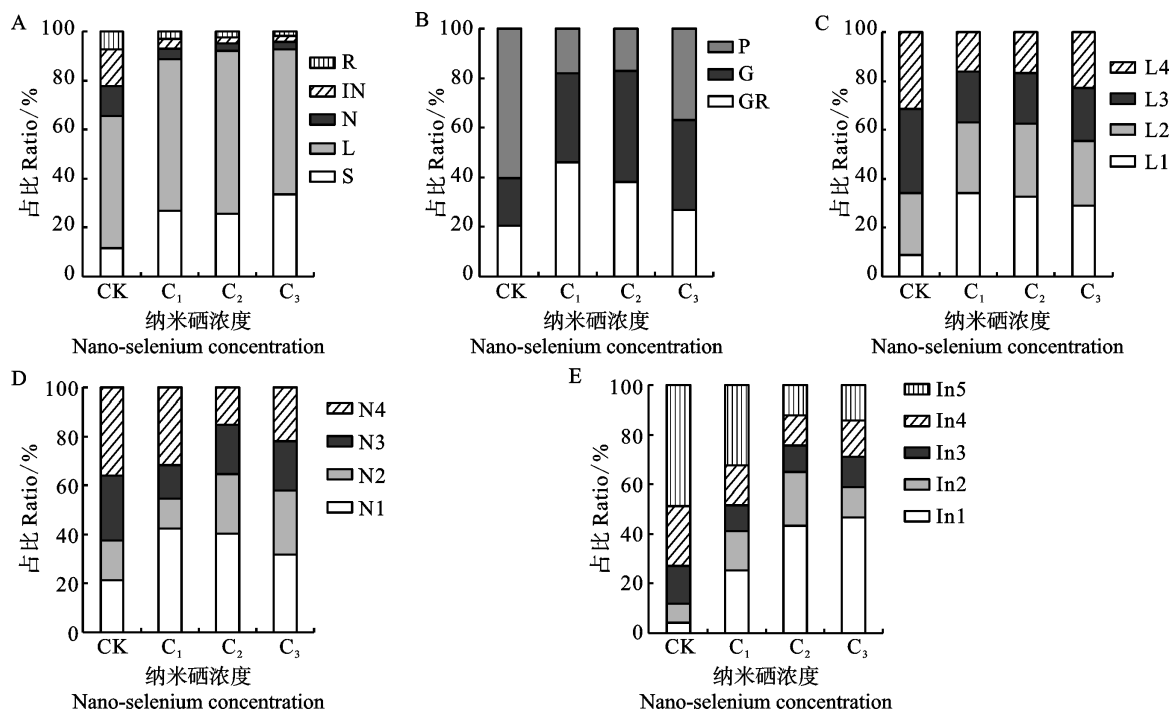


图 2 小麦不同部位硒的分布

Fig. 2 Selenium proportion in different parts of wheat

2.4 不同处理小麦籽粒硒形态及含量分析

叶面喷施纳米硒后,小麦籽粒中硒形态和含量均发生变化(图 3)。CK 条件下,小麦籽粒中仅检测到 SeCys 和 SeMet;C₁、C₂ 和 C₃ 处理的小麦籽粒中检测到 3 种硒形态,分别为 SeCys、SeMet 和 MeSeCys(图 3A),表明叶面喷施纳米硒能增加小麦籽粒硒形态的种类。与 CK 相比,C₁ 处理籽粒中的 SeCys 含量增加 0.3 倍,C₂ 和 C₃ 处理显著增加,分别增加 1.3 倍和 1.8 倍;C₁、C₂ 和 C₃ 处理籽粒中的 SeMet 含量均显著增加,依次增加 47.0 倍、83.8 倍和 194.4 倍。与 C₁ 处理相比,C₂

和 C₃ 处理籽粒中的 MeSeCys 含量分别增加 0.5 倍和 1.2 倍(图 3A)。CK 小麦籽粒的 SeCys 和 SeMet 含量占比分别为 79.1%和 20.1%;C₁、C₂ 和 C₃ 处理籽粒中的 SeCys 含量占比分别为 8.7%、8.8%和 4.9%,MeSeCys 含量占比分别为 5.8%、4.9%和 3.3%,SeMet 含量占比分别为 85.5%、86.3%和 91.8%(图 3B)。与 CK 相比,C₁、C₂ 和 C₃ 处理籽粒中的 SeCys 含量占比均显著降低,SeMet 含量占比均显著增加,表明叶面喷施纳米硒能促进小麦籽粒中 SeCys 向 SeMet 的转化。

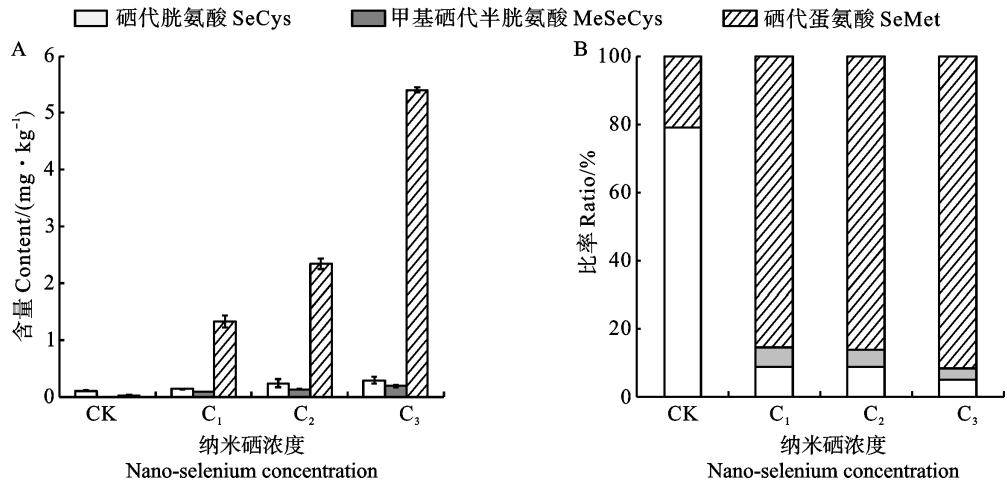


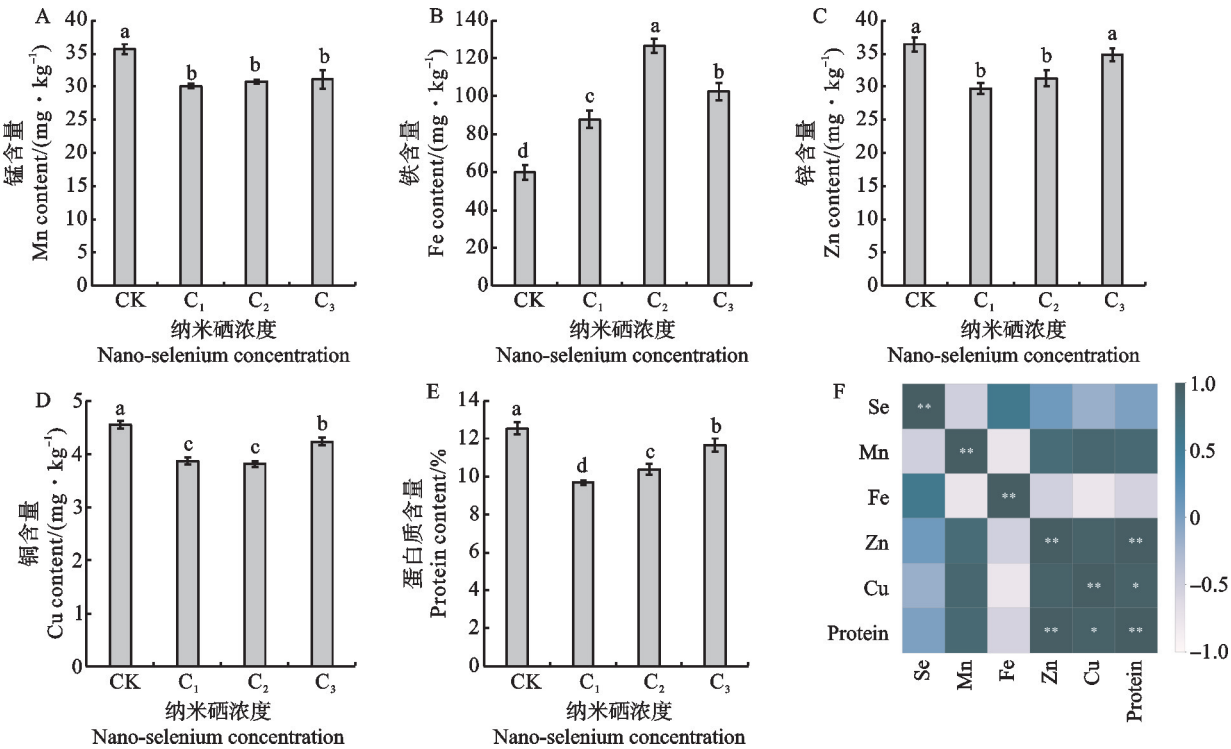
图 3 小麦籽粒中硒的形态及其含量

Fig. 3 Selenium speciation and their contents in wheat grains

2.5 不同处理小麦籽粒矿质元素及蛋白含量分析

叶面喷施纳米硒后,小麦籽粒中的矿质元素和蛋白质含量均发生显著变化(图 4)。与 CK 相比,C₁、C₂ 和 C₃ 处理的锰含量显著下降,降幅分别为 15.6%、13.8%和 12.7%,后 3 者间无显著性差异(图 4A);铁含量显著增加,增幅分别为 46.4%、111.1%和 70.9%,处理间存在显著性差

异,C₂ 处理增幅最大(图 4B);锌含量分别降低 18.2%、13.8%和 4.1%,C₁ 和 C₂ 处理下降显著(图 4C);铜含量均显著降低,降幅分别为 14.9%、16.1%和 6.8%(图 4D);蛋白质含量显著下降,降幅分别为 22.7%、17.2%和 6.9%,处理间存在显著差异(图 4E)。相关性分析发现,硒含量与锰、铁、锌、铜以及蛋白质含量之间均无显著相关性(图 4F)。



图柱上的不同字母表示不同硒浓度之间差异显著。
Different letters above the columns indicate significant difference among Se comcentrations at 0.05 level.

图 4 小麦籽粒中矿质元素及蛋白质含量

Fig. 4 Content of mineral elements and protein in wheat grains

2.6 不同处理硒的潜在生态风险评估

利用 Er 值评估各处理小麦植株及根系还田后硒的潜在生态风险。C₁ 处理的 Er 值为 51.64,略大于风险值(40),属于中等生态风险;C₂ 和 C₃ 处理的 Er 值分别为 148.75 和 289.75,远大于风险值,存在高等生态风险(图 5A)。这表明叶面喷施较高浓度纳米硒对小麦植株及根系还田后的农田可能产生较高的潜在生态风险。根据中国卫生行业标准(WS/T 578.3),成人每日膳食中推荐的硒摄入量为 60~400 μg。CK 条件下,成人每日硒摄入量为 11.82 μg,低于推荐最低标准;C₁ 处理的成人每日硒摄入量为 297.18 μg,处于硒推荐标准范围内,不会对人类健康产生危害;C₂ 和 C₃ 处理的成人每日硒摄入量为 669.36 μg 和 1

432.24 μg,远高于推荐最大值,将会对人类健康产生危害(图 5B)。因此,叶面喷施 C₁ 纳米硒浓度可使小麦籽粒达到推荐的成人每日硒摄入量,且对农田生态风险较小。

2.7 不同处理对小麦产量及其构成因素的影响

叶面喷施纳米硒可显著提高小麦产量和千粒重(表 3)。与 CK 相比,C₁、C₂ 和 C₃ 处理的产量增幅为 3.5%、6.8%和 8.5%,C₂ 和 C₃ 处理的产量显著高于 C₁ 处理,C₂ 和 C₃ 处理间无显著差异;C₁、C₂ 和 C₃ 处理的千粒重分别增加 2.8%、4.4%和 3.7%,三者间无显著差异。喷施硒处理的有效穗数和穗粒数与 CK 无显著差异,这说明提高叶面喷施纳米硒浓度后小麦产量增加的主要原因是千粒重的增加。

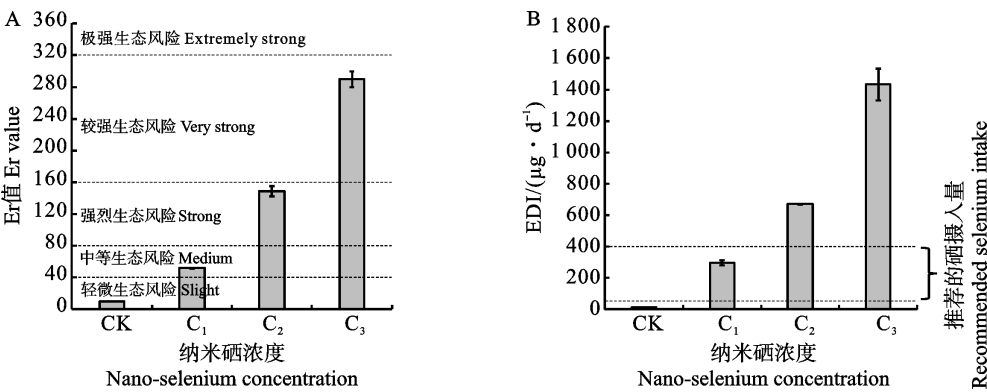


图 5 硒的生态风险评估分析
Fig. 5 Ecological risk assessment of selenium

表 3 小麦籽粒产量及其构成
Table 3 Grain yield and its components in wheat

性状 Traits	CK	C ₁	C ₂	C ₃
产量 Yield/(kg · hm ⁻²)	5 663.3 ± 46.4c	5 863.3 ± 74.1b	6 050.0 ± 57.2a	6 146.7 ± 60.2a
有效穗数 Effective spike	363.7 ± 6.1a	362.3 ± 4.2a	359.3 ± 4.2a	372.0 ± 7.4a
千粒重 Thousand kernel weight/g	45.9 ± 0.7b	47.2 ± 0.2a	47.9 ± 0.4a	47.6 ± 0.3a
穗粒数 Grains per spike	46.3 ± 1.3ab	45.7 ± 0.5b	48.0 ± 0.8a	45.3 ± 0.5b

3 讨论

叶面喷硒是小麦硒生物强化的有效手段,不同形态外源硒对小麦硒吸收效率、转运分配规律有显著影响,直接决定籽粒硒的强化效果。已有研究证实,叶面喷施 10~30 g · hm⁻² 的亚硒酸盐或硒酸盐可使小麦籽粒硒含量增加 1.5~50.0 倍^[16,24]。本研究结果显示,叶面喷施 7.5~30 g · hm⁻² 的纳米硒可使小麦籽粒硒含量较对照提升 25.5~126.8 倍。说明纳米硒的强化效率显著高于传统无机硒源。这可能因为相较于无机硒,纳米硒粒径小、比表面积大,易通过叶片气孔或角质层通道进入叶肉细胞,植物对其吸收效率高于无机硒离子。本研究中,纳米硒可显著影响硒在小麦体内的转运分配规律,喷施纳米硒后,硒从穗轴向籽粒的转运系数较对照提升 111.4%~640.0%,穗部硒累积量占比从对照的 11.5%提升至 25.6%~33.5%,减少了硒在茎秆等营养器官的累积量占比。

硒生物强化的核心目标是将外源硒转化为可被人体高效利用的有机硒形态,其中硒代蛋氨酸、硒代胱氨酸、甲基硒代半胱氨酸是谷物中最主要的活性硒组分。本研究中,CK 小麦籽粒中仅检测到硒代胱氨酸和硒代蛋氨酸两种硒形态,前者含量较高。叶面喷施纳米硒后,小麦籽粒硒形态组

成发生显著变化,不仅新增了甲基硒代半胱氨酸组分,还使硒代蛋氨酸含量占比从对照的 20.1%提升至 85.5%~91.8%,成为小麦籽粒的主导硒形态。这与人研究结论一致,但本研究有机硒占比高于已有报道的 80%^[25]。推测纳米硒对硒代氨基酸合成通路具有正效应。硒代蛋氨酸是可被人体直接吸收利用的优势硒形态,也是膳食硒的主要来源^[26]。本研究中纳米硒强化后的小麦籽粒未检测出硒酸盐、亚硒酸盐等无机硒残留,表明其不仅硒含量符合富硒标准,营养活性与食用安全性也显著优于传统无机硒强化效应。值得注意的是,叶面喷施纳米硒可协同提升小麦籽粒铁含量(46.4%~111.1%)。铁元素是人体必需的微量营养元素,这种硒、铁协同强化效应可同时缓解两类“隐性饥饿”问题^[27],突破了传统硒强化途径中仅关注硒元素积累的局限。本研究发现,喷施纳米硒后籽粒锰、锌含量、蛋白含量存在小幅下降,这可能是硒与其他矿质元素的吸收具有拮抗效应所致,后续可通过锌、硒配施、优化氮肥运筹等方式协调籽粒综合营养品质。

小麦产量主要构成因素包括有效穗数、穗粒数和千粒重。本研究中,叶面喷施不同浓度纳米硒显著增加了小麦千粒重和产量,对有效穗数和穗粒数无显著影响。这一结果与前人研究高度一

致^[17-18]。本研究分别于分蘖期、孕穗期、灌浆期喷施纳米硒,其中分蘖期、孕穗期是决定有效穗数、穗粒数的关键期。有效穗数和穗粒数未受纳米硒处理显著影响,表明纳米硒对产量构成因素的调控具有明确的靶向效应。千粒重的形成贯穿整个灌浆期,是外源营养物调控籽粒发育的核心因素,纳米硒可通过激活抗氧化酶系统延缓功能叶衰老,维持灌浆期叶片光合活性,为同化物合成提供持续动力;同时可显著提升同化物从叶片向籽粒的转运效率,加速碳水化合物向淀粉的转化与积累,最终表现为千粒重提升、产量增加^[28]。

4 结论

叶面喷施纳米硒显著提高小麦川文 2401 植株各部位的硒含量,其中籽粒硒含量提升 25.5~126.8 倍;显著抑制硒从叶片向相邻节点的转运,促进穗轴硒向颖壳和籽粒的转运;籽粒有机硒的占比增加,硒代蛋氨酸为主导硒形态;籽粒锰、锌、铜及蛋白质含量显著下降,但铁含量显著增加;显著提高千粒重(2.8%~4.4%)和籽粒产量(3.5%~8.5%);7.5 g·hm⁻² 纳米硒为最适叶面喷施浓度。

参考文献:

- [1] NEWMAN R, WATERLAND N, MOON Y, *et al.* Selenium biofortification of agricultural crops and effects on plant nutrients and bioactive compounds important for human health and disease prevention: A review [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2019, 74(4): 449.
- [2] WANG K, WANG Y Q, LI K, *et al.* Uptake, translocation and biotransformation of selenium nanoparticles in rice seedlings (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2020, 18(1): 103.
- [3] YIN H Q, QI Z Y, LI M Q, *et al.* Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa* L. [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 169: 911.
- [4] AVILA F W, YANG Y, FAQUIN V, *et al.* Impact of selenium supply on Se-methylselenocysteine and glucosinolate accumulation in selenium-biofortified *Brassica* sprouts [J]. *Food Chemistry*, 2014, 165: 578.
- [5] RAYMAN M P. The importance of selenium to human health [J]. *Lancet*, 2000, 356(9225): 233.
- [6] ZHOU F, DINH Q T, YANG W X, *et al.* Assessment of speciation and in vitro bioaccessibility of selenium in Se-enriched *Pleurotus ostreatus* and potential health risks [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 185: 109675.
- [7] GAO J, LIU Y, HUANG Y, *et al.* Daily selenium intake in a moderate selenium deficiency area of Suzhou, China [J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(3): 1088.
- [8] 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[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1720.
LIU H, YANG Y E, WANG Z H, *et al.* Selenium content of wheat grain and its regulation in different wheat production regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9): 1720.
- [9] 白娅男, 李慧敏, 谢菀萱, 等. 叶面喷施纳米硒硅肥对甘蔗富硒效果的影响[J]. 甘蔗糖业, 2019(4): 9.
BAI Y N, LI H M, XIE W X, *et al.* Effects of foliar application of nano-selenium and nano-silicon on selenium enrichment of sugarcane shoots [J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2019(4): 9.
- [10] 杜小平, 刘乔斐, 夏曾润, 等. 叶面施硒对黑豆硒吸收转运特征及籽粒硒形态的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2268.
DU X P, LIU Q F, XIA Z R, *et al.* Effects of selenium foliar spray on selenium uptake and translocation characteristics and seed selenium speciation in black beans [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(11): 2268.
- [11] 曹丹, 杨明忠, 刘艳丽, 等. 3 个茶树品种吸收和转运硒的差异研究[J]. 福建农业学报, 2025, 40(3): 294.
CAO D, YANG M Z, LIU Y L, *et al.* Differentiate selenium uptakes and translocations of three tea varieties [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 40(3): 294.
- [12] 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): 300.
HU W X, SHI Y, CHENG Y Q, *et al.* Effects of nano-selenium on the growth and its mineral element contents and quality characteristics of purple potatoes [J]. *Acta Botanica Borreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(2): 300.
- [13] 李子航. 纳米硒和纳米硅叶面喷施对旱地优质稻生长及抗性的效应研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2024: 27.
LI Z H. A study on the effects of nano-selenium and nano-silicon foliar spraying on the growth and resistance of high-quality dryland rice [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2024: 27.
- [14] 吴焕焕, 张虹, 任志红, 等. 叶面喷施对茶树叶片光合特性及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(6): 65.
WU H H, ZHANG H, REN Z H, *et al.* Effects of foliar application of nano-selenium on photosynthetic characteristics and yield of tea [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(6): 65.
- [15] 凌沥, 翟辉, 张云舒, 等. 外源硒对水稻硒吸收和转运的影响[J]. 新疆农业科学, 2025, 62(1): 105.
LING L, ZHAI H, ZHANG Y S, *et al.* Effects of exogenous selenium on its uptake and translocation in rice [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2025, 62(1): 105.
- [16] 狄雪荣. 硒对小麦镉吸收、转运与累积的调控效应与机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024: 88.
DI X R. Regulatory effects and mechanism of selenium on cadmium uptake, translocation and accumulation in wheat

- [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024:88.
- [17]卢鹏飞,高志强,孙敏,等.外源硒肥对小麦籽粒产量及植株硒元素积累的影响[J].河北农业大学学报,2020,43(3):19.
LU P F,GAO Z Q,SUN M,*et al.* Effects of exogenous selenium fertilizer on grain yield and selenium accumulation in wheat [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*,2020,43(3):19.
- [18]赵剑敏.外源硒肥对小麦产量、品质形成及硒元素积累的影响[D].太谷:山西农业大学,2020:12.
ZHAO J M. Effects of exogenous selenium fertilizer on yield,quality formation and selenium accumulation of wheat [D]. Taigu:Shanxi Agricultural University,2020:12.
- [19]刘畅,徐应明,黄青青,等.不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异[J].环境科学,2022,43(3):1597.
LIU C,XU Y M,HUANG Q Q,*et al.* Variations in cadmium accumulation and transport and ionic traits among different winter wheat varieties [J]. *Environmental Science*,2022,43(3):1597.
- [20]SHANGGUAN Y X,WEI Y,WANG L Q,*et al.* Sources and distribution of trace elements in soils near coal-related industries [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*,2016,70(3):449.
- [21]NARGIS A,SULTANA S,RAIHAN M J,*et al.* Multielement analysis in sediments of the river Buriganga (Bangladesh):Potential ecological risk assessment [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*,2019,16(3):1667.
- [22]DE LIMA LESSA J H,ARAUJO A M,FERREIRA L A,*et al.* Agronomic biofortification of rice(*Oryza sativa* L.) with selenium and its effect on element distributions in biofortified grains [J]. *Plant and Soil*,2019,444(1):333.
- [23]何建国,王新富,马荣,等.皖北煤矿区农田土壤-小麦中重金属分布特征及健康风险评价[J].中国煤炭,2021,47(4):83-84.
HE J G,WANG X F,MA R,*et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in farmland soil and wheat in coal mining area of Northern Anhui [J]. *China Coal*,2021,47(4):83-84.
- [24]WANG M,ALI F,QI M X,*et al.* Insights into uptake,accumulation, and subcellular distribution of selenium among eight wheat(*Triticum aestivum* L.) cultivars supplied with selenite and selenate [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*,2021,207:111544.
- [25]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[J].作物学报,2016,42(5):781.
LIU Q,TIAN X,SHI Y X. Effects of Se application on Se accumulation and transformation and content of gross protein and mineral elements in wheat grain [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2016,42(5):781.
- [26]秦冰,谷勋刚,王雅楠,等.外源硒肥对茶叶中硒代氨基酸形态及含量影响的研究[J].土壤通报,2013,44(4):956.
QIN B,GU X G,WANG Y N,*et al.* Effects of selenium application on selenoamino acids contents and morphology in the leaves of tea plant [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2013,44(4):956.
- [27]马前涛,杨世波,张满常,等.富硒营养液对小粒咖啡光合特性及矿质元素累积的影响[J].生态学杂志,2025,44(6):1991.
MA Q T,YANG S B,ZHANG M C,*et al.* Effects of the addition of selenium-rich nutrient solution on photosynthetic characteristics and mineral element accumulation in coffee (*Coffea arabica*) [J]. *Chinese Journal of Ecology*,2025,44(6):1991.
- [28]宋家永,王海红,朱喜霞,等.叶面喷硒对小麦抗氧化性能及籽粒硒含量的影响[J].麦类作物学报,2006,26(6):181.
SONG J Y,WANG H H,ZHU X X,*et al.* Effect of spraying selenium to the leaves on the performance of antioxidation of wheat and grain selenium content [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2006,26(6):181.