

# 施硒对小麦硒吸收影响的 Meta 分析<sup>①</sup>

行文静<sup>1,3</sup>, 李 娇<sup>2</sup>, 岳盈盈<sup>4</sup>, 王烨熔<sup>1,3</sup>, 杨郑州<sup>1,3\*</sup>

(1 百色学院农业与食品工程学院, 广西百色 533000; 2 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150000; 3 广西芒果生物学重点实验室, 广西百色 533000; 4 卧龙区农业农村发展服务中心, 河南南阳 473000)

**摘 要:** 为探究施硒对小麦籽粒中总硒、无机硒及有机硒含量的影响, 以不施硒为对照, 通过 Meta 分析法, 整合分析硒源、施硒时期、施硒次数、施硒量及施硒方式等因素对小麦硒吸收的影响。结果表明: 施硒可以提高小麦籽粒中总硒含量, 硒酸盐的提升效应最大(2.53), 但不同硒源之间并无显著差异。不同时期施硒对小麦硒吸收的响应不同, 生育后期(孕穗期–灌浆期)施硒效果更佳, 尤其是开花期(2.16)和灌浆期(2.17)。施硒量为 60–100 g/hm<sup>2</sup> 时对小麦籽粒中无机硒、有机硒含量的影响效应最大(>2.00)。土施(达 3.95)对小麦籽粒中总硒含量的促进效应显著高于叶面喷施, 但叶面喷施更有利于籽粒无机硒的积累。施硒次数 ≤2 次对小麦籽粒硒含量具有显著促进效应, 次数增加则促进效果下降。因此, 在实际生产中, 建议综合考虑各方因素, 优选硒酸盐在生育后期施用, 并且施硒次数 ≤2 次, 施硒量宜 ≤100 g/hm<sup>2</sup>, 以最大限度促进小麦硒富集。

**关键词:** 硒富集; 小麦; 硒源; 施用方式; 施用时期; 施用量

**中图分类号:** S512.1 **文献标志码:** A

## Meta-Analysis of Effect of Selenium Application on Selenium Absorption in Wheat

XING Wenjing<sup>1,3</sup>, LI Jiao<sup>2</sup>, YUE Yingying<sup>4</sup>, WANG Yerong<sup>1,3</sup>, YANG Zhengzhou<sup>1,3\*</sup>

(1 College of Agriculture and Food Engineering, Baise University, Baise, Guangxi 533000, China; 2 College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China; 3 Guangxi Key Laboratory of Biology for Mango, Baise, Guangxi 533000, China; 4 Wolong District Agricultural and Rural Development Service Center, Nanyang, Henan 473000, China)

**Abstract:** To explore the effects of selenium (Se) application on total, inorganic and organic Se contents in wheat grains, with no Se application as the control group, a meta-analysis was used to comprehensively analyze the effects of factors such as Se source, application season, frequency, amount, and method of Se fertilizers on wheat Se absorption. The results showed that Se application can increase total Se content in wheat grains, with the highest effect of selenate (2.53), but there was no significant difference between different Se sources. The response of Se uptake in wheat varies at different seasons, with better effects observed during the late-growth stage (booting stage filling stage), especially during the flowering stage (2.16) and grouting stage (2.17). The maximum effect (>2.00) on inorganic and organic Se contents in wheat grains was observed when Se application rate was 60–100 g/hm<sup>2</sup>. The promotion effect of soil application (up to 3.95) on total Se content in wheat grains is significantly higher than that of foliar spraying, but foliar spraying is more conducive to the accumulation of inorganic Se in grains. Applying Se less than or equal to 2 times has a significant promoting effect on Se content in wheat grains, but the promoting effect decreases as the frequency increases. In practical production, various factors should be comprehensively considered to select selenate, apply Se in the later stage of growth, reduce the frequency of Se application (≤2 times), and adjust the amount of Se application appropriately (≤100 g/hm<sup>2</sup>) to maximize the enrichment of Se in wheat.

**Key words:** Selenium (Se) enrichment; Wheat; Se source; Application method; Application season; Application rate

硒(Se), 人体必需的微量元素, 参与人体代谢和正常生理过程, 能有效预防肿瘤、心血管疾病、骨关节炎、克山病、新型冠状病毒肺炎等疾病<sup>[1-2]</sup>。但硒与人体健康呈“U”形关系, 过量摄入会造成中毒,

①基金项目: 广西科技基地和人才专项(桂科 AD22035015, 桂科 AC22080006)和广西新农科项目(XNK2023014)资助。

\* 通信作者(21775285@qq.com)

作者简介: 行文静(1994—), 女, 河南洛阳人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为土壤中硒的利用。E-mail: 1521647294@qq.com

出现脱发、指甲变形等症状<sup>[3]</sup>。饮食补硒可以大大降低中毒风险，是目前最安全、高效的补硒方式。小麦是我国主要粮食作物之一，占全国粮食总量的 20%，且属于硒敏感作物，常被用作硒生物富集的优势材料。我国是缺硒大国，约 50% 的土壤缺硒 ( $<0.125 \text{ mg/kg}$ )，土壤硒含量低及分布不均导致我国小麦籽粒中硒含量普遍较低 ( $64.2 \text{ } \mu\text{g/kg}$ )，难以满足人体健康的需求<sup>[4-5]</sup>。因此，需要通过其他手段促进小麦对硒的吸收，以达到小麦富硒的水平。

施硒可有效提高小麦产量和品质，促进籽粒中硒的累积和转化。目前常用的硒肥主要有有机硒、无机硒 (硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿粉) 和新型硒肥 (纳米硒)，其进入土壤后形态及有效性发生变化<sup>[6]</sup>，影响小麦对硒的吸收与利用<sup>[7]</sup>。有研究表明，土施硒酸盐和亚硒酸盐，小麦中硒含量显著高于有机硒处理，且亚硒酸盐可促进硒向籽粒中转移<sup>[7-8]</sup>。黄婷苗等<sup>[9]</sup>认为小麦对硒的吸收受制于硒源和施硒方式，叶面喷施硒酸盐当季效果最佳，而土施亚硒酸盐后效最强，第二季种植的小麦仍可达到富硒水平。而杨浩等<sup>[10]</sup>研究表明，土施硒酸钠小麦籽粒中硒含量显著高于叶面喷施。卢鹏飞等<sup>[11]</sup>以硒强化指数作为指标，发现花期喷施有机硒效果最好，优于硒酸钠和纳米硒。可见，对于硒源和施硒方式的选择，并无统一观点。不同生育期小麦对养分的吸收能力不同，因此，大部分学者将施硒时期作为重要的研究对象。唐玉霞等<sup>[12]</sup>研究发现，生殖生长阶段小麦对硒的吸收速率和吸收量剧增，且抽穗至灌浆初期施硒最适宜。而陈泊宁<sup>[13]</sup>研究表明，扬花期最宜施硒。拔节期是小麦产量形成的关键期，也有学者认为拔节期施硒最佳<sup>[14]</sup>。施硒次数的研究多集中于叶面喷施硒肥，研究表明喷施硒次数影响硒在植株各部位的积累，尤其是籽粒<sup>[15]</sup>。Radawiec 等<sup>[16]</sup>认为，施硒次数产生的效果与施硒时期有关，多次施

硒可能促进籽粒硒积累，也可能导致硒含量下降。一定浓度范围内，小麦籽粒中硒含量随施硒量的增加而增加，但籽粒硒含量过高则存在摄入过量风险<sup>[14,17]</sup>。目前施硒量随硒源和施硒方式的差异波动范围较大 ( $0\sim 700 \text{ g/hm}^2$ )<sup>[9]</sup>，无法得出最佳施硒量。

硒农艺强化是培育富硒小麦的重要措施，硒源、施硒量、施硒时期等因素都直接或间接影响小麦对硒的吸收与利用。现有的独立研究难以将各因素汇集于一体进行综合分析，得出精准、科学施硒策略。因此，本研究立足于该点，采用定量统计方法 (Meta 分析)，对同质性的研究进行整合分析，详细阐述硒源、施硒量、施硒方式、施硒时期、施硒次数及小麦类型等对小麦籽粒硒含量的影响，以为小麦硒生物强化及富硒小麦的生产提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究基于 Web of Science 数据库和中国知网中 2004—2024 年间发表的文章数据进行研究。检索关键词包括“硒”“硒酸钠”“亚硒酸钠”“纳米硒”“小麦”“籽粒硒”“selenium”“wheat”及其组合等，中英文论文共检索到 743 篇并全文下载。为实现研究目的，满足 Meta 分析的数据要求，筛选的文章需满足以下要求：①种植作物为小麦；②试验处理必须包含硒处理与对照处理 (不施硒)；③文中需标明硒的种类和用量；④取得的数据至少包括小麦籽粒中硒含量，且仅用小麦中硒含量相关数据；⑤每组处理重复次数  $\geq 3$  次。最终，获得符合要求的文献共 46 篇。

### 1.2 数据分类

为进一步分析各因素对小麦籽粒中无机硒、有机硒及总硒含量的影响，参照表 1 对文献中采集的数据进行亚组分类。

表 1 施硒对小麦籽粒中无机硒、有机硒及总硒含量解释变量分组

Table 1 Grouping of explanatory variables for inorganic selenium (Se), organic Se, and total Se contents in wheat grains under Se application

影响因素	数据样本量	亚组分类
小麦类型	420	冬小麦、春小麦
硒种类	476	硒矿粉、亚硒酸盐、硒酸盐
施硒时期	392	播种前、分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期、成熟期、返青期+拔节期、拔节期+孕穗期、拔节期+开花期、孕穗期+灌浆期、分蘖期+拔节期、分蘖期+拔节期+开花期、分蘖期+拔节期+开花期+成熟期
施硒量 ( $\text{g/hm}^2$ )	482	$<10$ 、 $10\sim 60$ 、 $60\sim 100$ 、 $\geq 100$
施硒方式	478	土施、叶面喷施、种子处理、叶面喷施+土施
施硒次数	322	1、2、3、4

### 1.3 数据处理与分析

收集的数据中,包括大田试验研究结果和盆栽试验研究结果。本研究首先将试验中土壤施硒量进行单位统一,均采用  $\text{g}/\text{hm}^2$ 。并根据文献中试验硒的用量统一折算为 0~20 cm 土壤质量百分比(%) (若无土壤容重信息,则默认为  $1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ )。

其次,利用各研究中施硒处理和未施硒处理小麦籽粒硒含量均值(总硒、有机硒和无机硒含量均值)及其对应的重复数、标准差,采用对数响应比  $\ln R$  作为效应值来描述施硒对小麦硒吸收的影响。公式如下:

$$\ln R = \ln \left( \frac{X_t}{X_c} \right) \quad (1)$$

式中:  $X_t$  为施硒处理小麦籽粒硒含量均值;  $X_c$  为未施硒对照小麦籽粒硒含量均值。

使用 Metawin 2.0 进行数据的统计分析。由于本研究纳入的文献在试验条件、小麦品种和环境因素等方面存在异质性,故采用随机效应模型计算综合效应值。若某指标的平均效应值的 95% 置信区间(95%CI)与 0 重叠,则认为该指标对小麦硒吸收无显著影响;反之,则认为该指标对小麦硒吸收具有显著影响。若  $95\%CI > 0$ , 表示该指标显著促进小麦硒吸收,若  $95\%CI < 0$ , 表示该指标显著抑制小麦硒吸收。

此外,利用 Excel 2016 软件建立数据库,通过

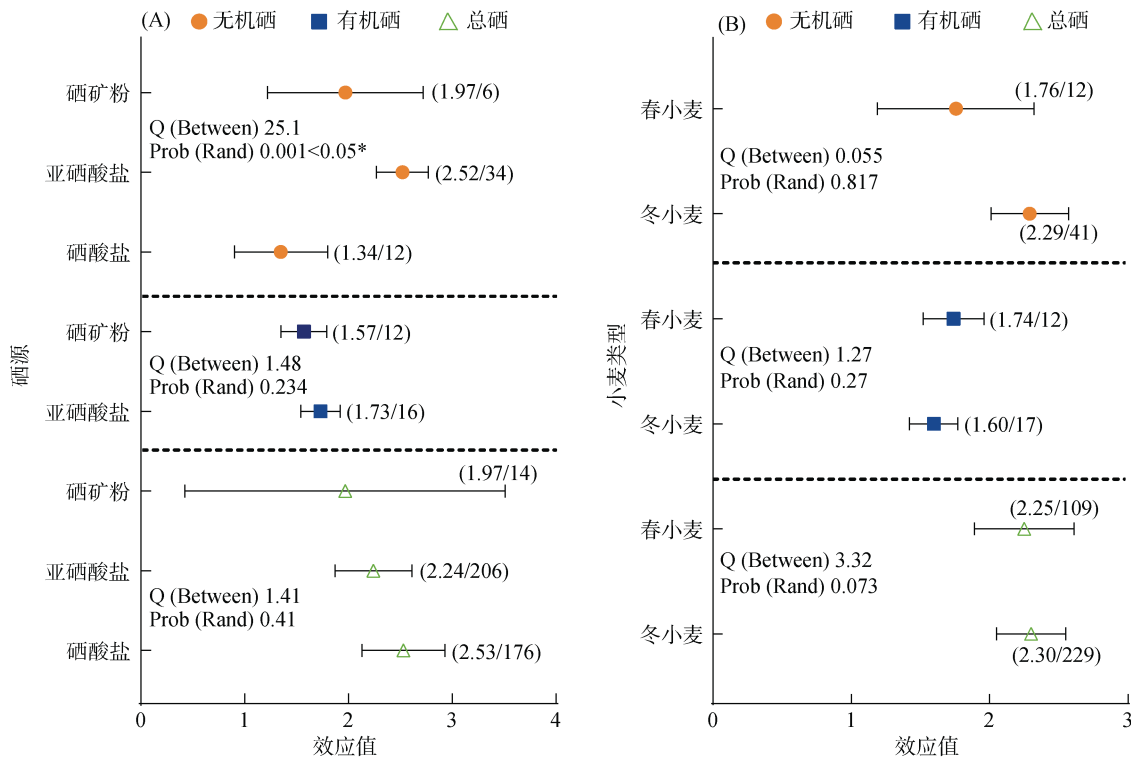
GetData Graph Digitizer 提取论文中图片信息,完成数据收集。通过 MetaWin 进行 Meta 分析,利用 GraphPad Prism 8.0 绘制森林图使数据可视化。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同硒源与小麦类型对小麦硒吸收的影响效应

外源添加不同种类的硒对小麦无机硒、有机硒及总硒含量均具有显著正效应(图 1A)。不同硒源对小麦籽粒中无机硒的影响效应为:亚硒酸盐>硒矿粉>硒酸盐。其中,亚硒酸盐对小麦中无机硒的提升效应可达  $2.52(95\%CI 2.27\sim 2.77)$ ,显著高于硒酸盐( $95\%CI 0.89\sim 1.79, P < 0.05$ )。对小麦籽粒中有机硒含量分析可得,施加硒矿粉和亚硒酸盐的提升效应分别为  $1.57(95\%CI 1.35\sim 1.78)$ 和  $1.73(95\%CI 1.54\sim 1.91)$ ,但两者之间无显著性差异。不同硒源对小麦籽粒中总硒含量的提升效应为硒酸盐最高( $2.53$ ),亚硒酸盐次之( $2.24$ ),硒矿粉最低( $1.97$ ),三者间无显著性差异。

不同小麦类型对其籽粒中无机硒、有机硒、总硒含量均具有显著正效应(图 1B)。其中春小麦对籽粒中有机硒的影响效应达到  $1.74(95\%CI 1.52\sim 1.96)$ ,高于冬小麦( $1.60$ )。而籽粒中无机硒和总硒含量则呈现相反的现象,即冬小麦的影响效应值高于春小麦,分



(误差线表示 95% 置信区间; Q(Between)表示组间异质性; Prob(Rand)表示组间异质性检验的显著程度; 括号内数值表示效应值/样本容量; 下同)

图 1 硒源(A)及小麦类型(B)对小麦籽粒中硒含量的影响效应  
Fig. 1 Effects of Se types (A) and wheat types (B) on Se contents in wheat grains

别为 2.29(95%CI 2.01~2.57)、2.30(95%CI 2.05~2.55) 和 1.76(95%CI 1.19~2.32)、2.25(95%CI 1.89~2.61)。然而,冬小麦与春小麦之间对籽粒中无机硒、有机硒、总硒含量的影响效应无显著差异。

**2.2 施硒时期及次数对小麦硒吸收的影响效应**

不同生育期施加硒对小麦籽粒中无机硒、有机硒及总硒含量的影响差异显著。图 2A 显示,播种前、孕穗期、开花期、灌浆期、孕穗期+灌浆期外源施加硒,对小麦中无机硒含量均呈现显著正效应。其中,孕穗期+灌浆期施加硒,对无机硒含量的影响效应值最大,为 3.25(95%CI 2.50~4.01),显著高于播种前施硒(1.59 95%CI 1.19~1.98,  $P<0.05$ )。灌浆期施硒对小麦中无机硒的影响效应值低于孕穗期+灌浆期施硒,为 2.40(95%CI 2.04~2.76),但显著高于播种前施硒( $P<0.05$ )。施硒时期对小麦籽粒中有机硒含量的影响效应值为:灌浆期(1.74)>开花期(1.67)>播种前(1.57),但三者之间无显著性差异。

单一时期施硒和复合时期施硒对小麦籽粒中总

硒含量的影响均呈现正效应(图 2B)。单一时期施硒处理中,播种前施硒对小麦籽粒中总硒含量的影响效应值最大,为 3.48(95%CI 3.11~3.84),显著高于分蘖期、拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期施硒( $P<0.05$ ),成熟期施硒效应值最低,为 0.32(95%CI -4.15~4.79)。单一时期施硒处理中,除分蘖期和成熟期施硒外,其他时期施硒对小麦籽粒中硒含量的影响效应均达显著水平。复合时期施硒处理中,除了孕穗期+灌浆期施硒对小麦籽粒中硒含量的影响达显著正效应水平,为 3.11(95%CI 1.94~4.28),其他施硒处理的影响均未达显著水平。

通过对施硒次数进行分析可知(图 2C),施硒次数为 1~2 次时,对小麦籽粒中硒含量具有显著正效应;施硒次数为 3~4 次时,对小麦籽粒中硒含量的影响效应不显著,且随着施硒次数的增加其效应值呈下降趋势,其中单次施硒影响效应最大,为 2.54(95%CI 2.31~2.76),施硒次数为 4 次时效应值最小,为 0.64(95%CI -2.48~3.75)。

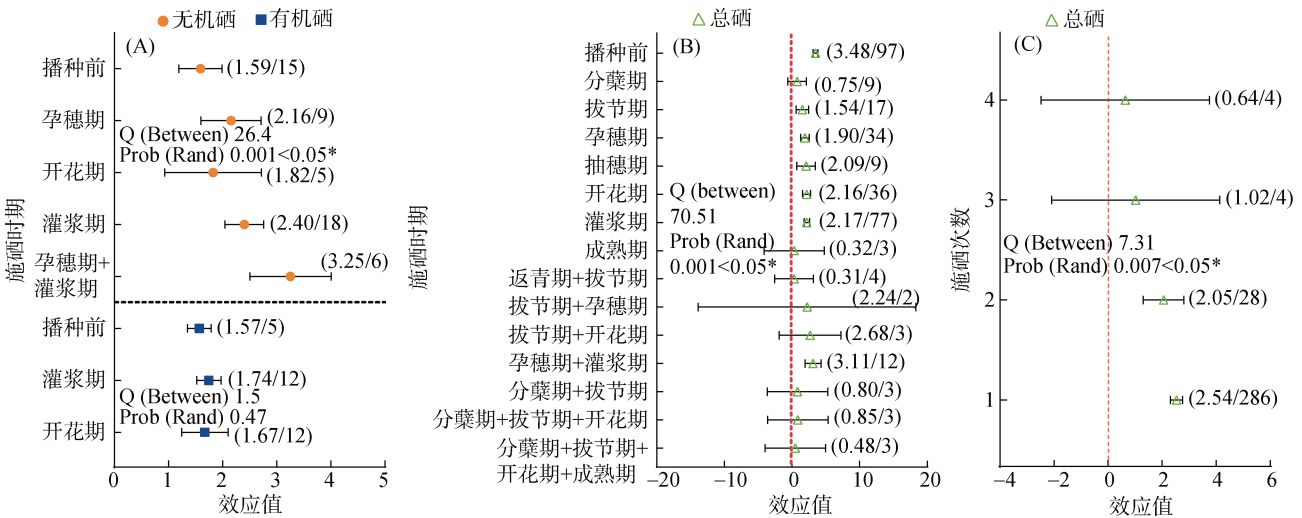


图 2 施硒时期(A、B)及施硒次数(C)对小麦籽粒硒含量的影响效应  
Fig. 2 Effects of Se application seasons (A, B) and times (C) on Se contents in wheat grains

**2.3 施硒量及施硒方式对小麦硒吸收的影响效应**

施硒量对小麦籽粒中无机硒、有机硒含量具有显著正效应(图 3A)。当施硒量为 60~100 g/hm<sup>2</sup>时,对小麦籽粒中无机硒、有机硒含量的影响效应最大,分别为 2.94(95%CI 2.31~3.57)、2.18(95%CI 1.38~2.98);当施硒量为 10~60 g/hm<sup>2</sup>时,对小麦籽粒中无机硒、有机硒含量的影响效应最小,分别为 1.97(95%CI 1.55~2.39)、1.60(95%CI 1.38~1.81),且不同施硒量之间差异显著( $P<0.05$ )。小麦籽粒中总硒含量结果显示,低施硒量(<10 g/hm<sup>2</sup>)对籽粒中总硒含量的影响不显著,随着施硒量的增加,影响效应逐渐增加,且达

到显著水平。当施硒量  $\geq 100$  g/hm<sup>2</sup>时,小麦籽粒中总硒含量的影响效应达到最大,为 3.52(95%CI 3.10~3.92),是低施硒处理(<10 g/hm<sup>2</sup>)的 4.8 倍。

目前的施硒方式主要包括土施、叶面喷施、种子处理(硒溶液浸种或硒拌种)和多种方式复合施硒。施硒方式对小麦籽粒硒吸收的影响不同(图 3B),叶面喷施与土施对小麦籽粒中无机硒含量均具有显著正效应,且叶面喷施的影响效应显著大于土施( $P<0.05$ ),达到 2.40(95%CI 2.15~2.65),是土施的 1.5 倍。两种施硒方式对小麦籽粒中有机硒含量的影响也呈现显著正效应,且叶面喷施的影响效应大于土施,分

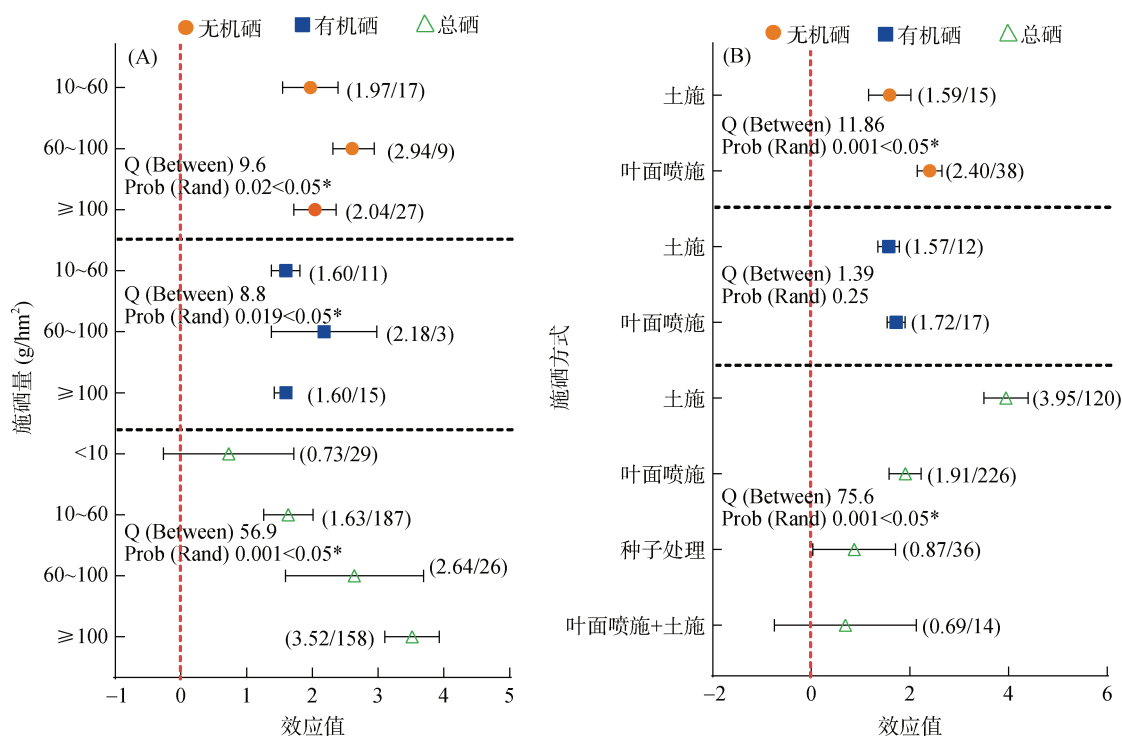


图 3 施硒量(A)和施硒方式(B)对小麦籽粒硒含量的影响效应  
Fig. 3 Effects of Se application amounts (A) and methods (B) on Se contents in wheat grains

别为 1.72(95%CI 1.54~1.90)、1.57(95%CI 1.35~1.79), 然而两种施硒方式之间并无显著差异。土施、叶面喷施、种子处理对小麦籽粒中总硒含量具有显著正效应, 且土施时影响效应最大, 为 3.95(95%CI 3.50~4.40), 显著高于叶面喷施, 是叶面喷施处理的 2.1 倍。叶面喷施+土施混合施硒对小麦籽粒中总硒含量的影响效应为 0.69(95%CI -0.75~2.13), 且并未达显著水平, 表明混合施硒对小麦籽粒中总硒含量的影响效果不及单一施硒方式。

### 3 讨论

#### 3.1 硒源及小麦类型对小麦硒吸收的影响

外源加硒能显著促进小麦对硒的吸收( $P < 0.05$ ), 但不同硒源其生物有效性存在差异。本研究表明, 外源添加硒酸盐、亚硒酸盐及硒矿粉, 对小麦籽粒中总硒含量的促进作用依次增加, 但无显著差异(图 1A)。这种差异可能是因为土壤环境复杂, 硒源进入土壤后受土壤矿物、微生物等因素影响, 发生吸附-解吸、络合、沉淀-溶解、氧化-还原等反应<sup>[18]</sup>, 导致有效硒含量发生变化, 进而减小或增大了各硒源间的差异。土壤有效硒(水溶态硒、交换态硒和部分有机态硒)水平是决定小麦硒含量的关键因素<sup>[19]</sup>。亚硒酸盐、硒酸盐及硒矿粉加入土壤后, 其有效硒水平均先降低后趋于稳定<sup>[8]</sup>, 然而亚硒酸盐较硒酸盐更容

易被土壤中氧化物(铁铝氧化物等)、有机质等吸附固持<sup>[20-21]</sup>。硒矿粉中的硒则主要以有机结合态或残渣态形式存在<sup>[22]</sup>, 供硒能力较弱, 但在酸性条件下硒矿粉中的硒可溶解于土壤溶液中供植物吸收利用。因此, 小麦对不同硒源的吸收总体呈现出效应为: 硒酸盐>亚硒酸盐>硒矿粉。小麦籽粒中的硒主要分为有机硒和无机硒, 其中有机硒约占总硒含量的 80%, 无机硒多以  $\text{Se}^{6+}$  形式存在, 占 11%~21%<sup>[23]</sup>。无机硒具有毒害作用, 小麦硒生物强化作用可将无机硒最大限度地转化为有机硒, 提高小麦的食用和保健价值。然而不同硒源下小麦硒转化能力不同, 卢鹏飞等<sup>[11]</sup>研究发现, 施加纳米硒、有机硒、无机硒后小麦籽粒中有机硒与无机硒占比存在明显差异。本研究也表明, 不同硒源对小麦籽粒中有机硒和无机硒含量的提升效应各异(图 1A)。这可能是由于不同硒源在植物体内的转化机制不同。基于小麦的种植季节将小麦划分为春小麦和冬小麦, 其中春小麦的种植有利于小麦籽粒中无机硒积累, 而冬小麦则更有利于有机硒的积累, 但两者之间并无显著性差异。小麦籽粒中有机硒主要以硒代蛋氨酸 (SeMet) 和硒代胱氨酸(SeCys) 的形态存在<sup>[24]</sup>。硒代蛋氨酸是合成蛋白质的重要组成部分, 也是人体必需的氨基酸之一。冬小麦中蛋氨酸和胱氨酸含量略高于春小麦<sup>[5]</sup>, 故冬小麦籽粒中有机硒含量会略高。

### 3.2 施硒时期和次数对小麦硒吸收的影响

小麦硒生物强化的能力随生育期的变化而改变<sup>[16]</sup>, 因此, 调控施硒时期可以显著增加小麦籽粒中硒含量。本研究表明, 任何生育期施硒均可提高小麦籽粒中硒含量, 且生育后期(孕穗期-灌浆期)施硒效果更佳, 尤其是开花期和灌浆期(图 2B)。成熟期施硒效果较差, 因成熟期小麦籽粒含水量下降, 干物质停止积累, 对硒吸收能力减弱。陈泊宁<sup>[13]</sup>认为, 小麦生长后期(扬花期-灌浆期)施硒, 其籽粒中硒含量增幅要大于生长早期施硒, 最适合施硒的时期是扬花期。贾亚琴等<sup>[25]</sup>研究发现, 灌浆期施硒籽粒中硒含量显著高于拔节期和孕穗期, 但会导致减产, 孕穗期施硒可以最大限度保证小麦产量和籽粒硒含量。可见, 小麦最适施硒时期并不统一, 但生育后期(孕穗期-灌浆期)施硒效果要优于生育前期。外界环境复杂, 施硒效果会随着时间延长而下降, 单次施硒可能无法达到富硒效果。Radawiec 等<sup>[16]</sup>研究表明, 当施硒总量一定, 施硒次数 > 2 次, 小麦籽粒中硒含量随施硒次数的增加而呈下降趋势; 当施硒次数 ≤ 2 次时, 则小麦籽粒中硒含量与施硒时期密切相关。刘庆等<sup>[23]</sup>研究发现, 孕穗期单施亚硒酸盐, 小麦籽粒中硒含量高于孕穗期+灌浆前期的两次施硒。本研究结果与上述结果一致, 呈现低施硒次数(≤ 2 次)促进、高施硒次数(> 2 次)低的规律。小麦耐硒能力较强, 同一浓度多次施硒, 可以增加籽粒中硒含量, 但是增加量并不显著<sup>[13]</sup>, 故实际生产中可以选择适当的时期一次性施硒。

### 3.3 施硒量和施硒方式对小麦硒吸收的影响

硒对植物的生长具有双重作用<sup>[26-27]</sup>, 呈现“低促高抑”现象, 因此施硒量的把控至关重要。本研究表明, 施硒量 ≥ 100 g/hm<sup>2</sup> 时, 小麦籽粒中硒含量促进效应最大(图 3A)。然而在实际生产中, 过量的硒会使小麦籽粒中硒含量超过安全限值(0.3 mg/kg)<sup>[28]</sup>, 引发食品安全问题。此外, 过量的硒还会诱使活性氧自由基在植物体内大量积累, 造成膜结构的损伤和功能的丧失, 抑制作物生长, 导致小麦减产<sup>[18,29]</sup>。张凤洁<sup>[30]</sup>设置低(20 g/hm<sup>2</sup>)、中(40 g/hm<sup>2</sup>)、高(80 g/hm<sup>2</sup>)三个硒浓度进行小麦叶面喷施, 发现低浓度喷施小麦籽粒硒积累不足, 高浓度喷施则超出安全限值, 中浓度 40 g/hm<sup>2</sup> 喷施时最为合适。王敏<sup>[24]</sup>研究发现, 高浓度硒(100 g/hm<sup>2</sup>)会抑制小麦籽粒中有机硒的积累, 降低硒浓度更适合实际生产。施硒量的设置与施硒时期、硒种类、小麦品种及当地的气候条件等密切相关<sup>[8,30-31]</sup>, 目前尚无统一标准。本研究表明, 施硒量在 10~

100 g/hm<sup>2</sup> 范围内, 均可以有效促进小麦籽粒中有机硒、无机硒及总硒含量的积累, 故可以根据生产实际情况, 在该施硒范围内进行施硒量的调整。

施硒方式是影响小麦籽粒硒积累的关键因素之一。本研究表明, 两种施硒方式均可促进小麦对硒的吸收, 其中土施硒小麦籽粒总硒含量最高, 叶面施硒更有利于硒的转化(图 3B)。杨浩等<sup>[10]</sup>研究也表明, 土施硒肥效果优于叶面喷施。叶面施硒效果较低可能与区域环境有关, 种植区域的气温、降水等因素会显著影响叶面施硒的效果<sup>[32]</sup>, 且叶面喷施的硒维持时间较短<sup>[33]</sup>。有机硒的合成需要酶的作用, 叶片中有多种酶, 可将进入叶片的硒及时转化为有机硒化物, 并转移至籽粒<sup>[10]</sup>。而根系吸收的硒迁移转化能力较弱, 易被固定在根系细胞中<sup>[34]</sup>, 故叶面喷施有利于有机硒的积累。硒浸种可以提高作物的出苗率及植物根际土壤酶活性。研究表明, 植株籽粒中硒含量与浸泡液硒浓度呈显著正相关, 但浸种硒浓度超出适宜范围, 会抑制种子萌发<sup>[35-36]</sup>。此外, 张久明等<sup>[36]</sup>和李文栓等<sup>[37]</sup>研究发现, 浸种难以使小麦籽粒达到富硒标准, 需要后期追施硒肥。目前, 复合施硒方式较单一施硒方式对植物果实中硒积累的影响研究较少, 且结果各不相同。高虎等<sup>[38]</sup>以硒代蛋氨酸作为硒源, 发现叶面喷施较土施和两者复合施硒更有利于南瓜果实中硒积累。廖青等<sup>[39]</sup>发现, 施加有机硒肥, 甘薯中硒积累效果为: 土施+喷施>喷施>土施。本研究结果显示, 两种施硒方式结合(叶面喷施+土施)对小麦籽粒硒的促进效果不及采用单一施硒方式(图 3B), 而税杨等<sup>[40]</sup>的研究则表明, 土施+叶面喷施硒肥处理小麦籽粒中硒含量显著高于单一土施硒肥处理。这些研究结果的差异或与硒源种类、作物种类等密切相关。

## 4 结论

小麦对硒的吸收受硒源、施硒时期、施硒次数、施硒量和施硒方式等因素的综合影响。硒源会影响小麦硒的转化(籽粒中有机硒及无机硒的占比差异显著), 但对小麦籽粒中总硒含量的影响并不显著; 调控施硒时期可以显著增加小麦籽粒中硒含量, 且生育后期(孕穗期-灌浆期)施硒效果优于生育前期; 施硒次数对小麦籽粒硒吸收的影响整体呈现低施硒次数(≤ 2 次)促进、高施硒次数(> 2 次)降低, 因此实际生产中可选择适当的时期一次性施硒; 施硒量在 10~100 g/hm<sup>2</sup> 范围内, 可有效促进小麦籽粒中有机硒、无机硒及总硒含量的积累, 但施硒量需根据具体情况调整。土施硒肥对小麦籽粒硒的促进效果显著高

于叶面喷施,且选用冬小麦更有利于籽粒中有机硒的积累。

### 参考文献:

- [1] Liu S W, Wei W F, Wang J L, et al. Theranostic applications of selenium nanomedicines against lung cancer[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2023, 21(1): 96.
- [2] Lima L W, Nardi S, Santoro V, et al. The relevance of plant-derived Se compounds to human health in the SARS-CoV-2 (COVID-19) pandemic era[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(7): 1031.
- [3] Combs G F Jr. Selenium in global food systems[J]. *The British Journal of Nutrition*, 2001, 85(5): 517–547.
- [4] López-Bellido F J, Sanchez V, Rivas I, et al. Wheat grain selenium content as affected by year and tillage system in a rainfed Mediterranean Vertisol-ScienceDirect [J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 41–48.
- [5] 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): 1715–1728.
- [6] 马婧萱, 崔晓丹, 梁强, 等. 东北典型黑土富硒区土壤与作物硒含量特征及影响因素——以海伦市为例[J]. *土壤*, 2024, 56(5): 1101–1110.
- [7] 刘飞飞, 李鹏燕, 吴迪, 等. 基于文献计量学的富硒小麦研究现状可视化分析[J]. *乡村科技*, 2024, 15(12): 60–66.
- [8] 魏玮, 李平, 周志高, 等. 不同外源硒在土壤中的有效性变化及其对小麦硒累积的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1003–1011.
- [9] 黄婷苗, 于荣, 王朝辉, 等. 不同硒形态和施硒方式对小麦硒吸收利用的影响及残效[J]. *作物学报*, 2022, 48(6): 1516–1525.
- [10] 杨浩, 刘东, 严俊, 等. 施硒方式对不同类型品种(系)小麦籽粒硒利用效率的影响[J]. *种子*, 2021, 40(4): 1–5, 10.
- [11] 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): 17–22.
- [12] 唐玉霞, 王慧敏, 吕英华, 等. 冬小麦硒素吸收积累特性及叶面喷施效应的研究[J]. *华北农学报*, 2010, 25(S1): 198–201.
- [13] 陈泊宁. 冬小麦施硒技术及施硒效果探究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [14] 董石峰, 孙敏, 林文, 等. 拔节期喷施亚硒酸钠对小麦籽粒硒积累特性和产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(4): 440–443.
- [15] 刘乔斐, 谢世学, 杜小平, 等. 叶面施硒浓度和喷施次数对春玉米产量和硒含量的影响[J]. *西北农业学报*, 2023, 32(9): 1336–1344.
- [16] Radawiec A, Szulc W, Rutkowska B. Selenium biofortification of wheat as a strategy to improve human nutrition[J]. *Agriculture*, 2021, 11(2): 144.
- [17] 李娇. 丛枝菌根真菌对冬小麦硒吸收转运和根际土壤硒形态的影响及机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [18] 杨忠兰, 翟凡, 温莉, 等. 土壤-植物系统中硒的生物有效性及其影响因素研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(2): 464–472.
- [19] 王丹. 秸秆还田对土壤硒生物有效性的影响及作用机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [20] Li Z, Man N, Wang S S, et al. Selenite adsorption and desorption in main Chinese soils with their characteristics and physicochemical properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(5): 1150–1158.
- [21] He Y Z, Xiang Y J, Zhou Y Y, et al. Selenium contamination, consequences and remediation techniques in water and soils: A review[J]. *Environmental Research*, 2018, 164: 288–301.
- [22] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(1): 75–81.
- [23] 刘庆, 田侠, 史衍玺. 施硒对小麦籽粒硒富集、转化及蛋白质与矿物质元素含量的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(5): 778–783.
- [24] 王敏. 施硒方式对小麦硒吸收、转运和形态分布的影响及机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [25] 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[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(10): 1266–1271.
- [26] Zhu L X, Wang P, Zhang W J, et al. Effects of selenium application on nutrient uptake and nutritional quality of *Codonopsis lanceolata*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225: 574–580.
- [27] 魏艳秋, 景艺卓, 郭笑恒, 等. 外源硒对植物抗盐性的影响研究进展[J]. *作物杂志*, 2021(2): 15–21.
- [28] Di X, Qin X, Zhao L, et al. Selenium distribution, translocation and speciation in wheat (*Triticum aestivum* L) after foliar spraying selenite and selenate[J]. *Food chemistry*, 2023, 400: 134077.
- [29] 高菲, 戴志华, 韩丹, 等. 硒影响植物抗氧化系统的作用与机制[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(5): 467–472.
- [30] 张凤洁. 外源硒对小麦籽粒营养品质及类黄酮积累的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.
- [31] 唐玉霞, 王慧敏, 杨军方, 等. 河北省冬小麦硒的含量及其富硒技术研究[J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(2): 347–351.
- [32] 聂浩亮, 黄少辉, 杨军芳, 等. 叶面施硒对冬小麦籽粒产量、蛋白质含量和硒富集影响的 Meta 分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(12): 1997–2010.
- [33] 张城铭, 周鑫斌. 不同施硒方式对水稻硒利用效率的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 186–194.
- [34] 雷红量, 丛文字, 蔡照磊, 等. 植物根系与叶片吸收硒的关键过程及影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1456–1467.
- [35] 胡丰琴. 亚硒酸钠溶液浸种和叶面喷施对水稻产量及硒含量的影响[D]. 荆州: 长江大学, 2022.
- [36] 张久明, 匡恩俊, 宿庆瑞, 等. 外源施硒对土壤酶活性、大豆籽粒硒及氨基酸含量的影响[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(5): 106–113.

- [37] 李文栓, 李晓军, 李培军, 等. 富硒营养液喷施量对春小麦产量和品质的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3643–3650.
- [38] 高虎, 穆晓国, 安磊, 等. 蛋氨酸硒不同增施方式对南瓜品质、产量及土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 51(11): 153–159.
- [39] 廖青, 邢颖, 梁潘霞, 等. 甘薯自然富硒能力测定及施硒方式对甘薯硒含量的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1838–1842.
- [40] 税杨, 杨文平, 夏清, 等. 施硒肥方式对强筋小麦产量、硒累积分配及籽粒营养品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(1): 112–120.

(责任编辑: 于 飞)