

DOI: 10.20103/j.stxb.202503100513

石秀平, 聂兆君, 王钰乔, 许嘉阳, 刘亥扬, 张玉鹏, 范蔚, 杨紫媛, 姚晨, 赵鹏, 刘红恩. 施硒对中国水稻、小麦、玉米增产提质效应的 Meta 分析. 生态学报, 2026, 46(6): - .

Shi X P, Nie Z J, Wang Y Q, Xu J Y, Liu H Y, Zhang Y P, Fan W, Yang Z Y, Yao C, Zhao P, Liu H G. Meta-analysis of the effects of selenium application on the yield and quality improvement of rice, wheat and maize in China. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(6): - .

施硒对中国水稻、小麦、玉米增产提质效应的 Meta 分析

石秀平¹, 聂兆君^{1,2,3}, 王钰乔⁴, 许嘉阳^{1,2}, 刘亥扬^{1,2}, 张玉鹏^{1,2}, 范蔚⁵, 杨紫媛¹, 姚晨¹, 赵鹏^{1,2,3}, 刘红恩^{1,2,3,*}

1 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046

2 河南农业大学河南省土壤污染防治与修复重点实验室, 郑州 450046

3 河南农业大学农业农村部黄淮海平原耕地质量保育重点实验室, 郑州 450046

4 河南农业大学农学院, 郑州 450046

5 信阳市农业科学院, 郑州 464000

摘要: 硒作为人体必需微量元素, 在抗氧化、心血管保护、免疫增强及癌症预防等生理功能中具有关键作用。针对我国 72% 土壤缺硒的现状, 通过作物施硒转化为有机硒是安全经济的补硒途径。本研究系统评估施硒对水稻、小麦、玉米的增产提质效应, 为科学施硒提供理论依据。研究收集 2013—2024 年中国知网、维普、万方、Web of Science 及 PubMed 数据库中 134 篇田间试验文献, 以“硒”“小麦 / 玉米 / 水稻”“产量”为关键词, 采用响应比自然对数(lnR)作为效应值进行 Meta 分析, 借助 Microsoft Office、Get Data Graph Digitizer、MetaWin 2.1 等软件处理数据。施硒总体使水稻、小麦、玉米增产 5.41% (95% CI: 4.74%—6.08%, $P_0 < 0.01$), 其中小麦和水稻增产显著, 分别提升 8.72% (95% CI: 7.69%—9.75%) 和 6.35% (95% CI: 6.34%—7.71%), 玉米增产不明显, 效应值仅为 0.46% (95% CI: -0.71%—1.63%) 且 lnR 的 95% 置信区间下限小于 0; 施硒显著提升籽粒硒含量 (164.09%, 95% CI: 156.15%—169.21%, $P_0 < 0.01$), 玉米提升效果最佳, 效应值为 172.97% (95% CI: 164.55%—181.39%, $P_0 < 0.01$); 籽粒淀粉含量提质效应为 2.39% (置信区间 1.71%—3.06%, $P_0 < 0.05$), 仅玉米达到显著水平, 效应值为 3.87% (95% CI: 2.86%—4.88%); 籽粒蛋白质含量提质有正效应且效应值为 4.99% (95% CI: 3.78%—6.2%, $P_0 > 0.05$), 其中玉米最显著, 效应值为 8.90% (95% CI: 4.45%—9.17%)。不同作物在施硒方式、地区和土壤硒含量等因素影响下表现各异。施硒对三种作物产量、硒含量、淀粉和蛋白质含量均有较大影响, 是提升作物品质和产量的有效手段, 但需依作物种类、地区和土壤条件优化施硒策略, 保障人体硒营养摄入和农业优质高产。

关键词: 施硒; 小麦; 玉米; 水稻; 产量; 硒含量; 品质; Meta 分析

Meta-analysis of the effects of selenium application on the yield and quality improvement of rice, wheat and maize in China

SHI Xiuping¹, NIE Zhaojun^{1,2,3}, WANG Yuqiao⁴, XU Jiayang^{1,2}, LIU Haiyang^{1,2}, ZHANG Yupeng^{1,2}, FAN Wei⁵, YANG Ziyuan¹, YAO Chen¹, ZHAO Peng^{1,2,3}, LIU Hongen^{1,2,3,*}

1 College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China

2 Key Laboratory of Soil Pollution Prevention, Control and Remediation of Henan Province, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China

3 Key Laboratory of Cultivated Land Quality Conservation in Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Henan Agricultural

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD2301200); 河南省耕地保育产业技术体系 (HARS-22-19-S)

收稿日期: 2025-03-10; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuhongen7178@126.com

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

University, Zhengzhou 450046, China

4 College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China

5 Xinyang Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 464000, China

Abstract: Selenium, an essential micronutrient for humans, plays a pivotal role in maintaining normal physiological functions, including antioxidation, cardiovascular protection, immune enhancement, and cancer prevention. Given the widespread selenium deficiency in 72% of China's soil, converting inorganic selenium to organic selenium through crop application represents a safe and cost-effective supplementation approach. This study systematically evaluated the effects of selenium application on yield and quality improvement in rice, wheat, and maize to provide a theoretical basis for scientific selenium fertilization. A total of 134 field trial studies (2013–2024) from CNKI, VIP, Wanfang, Web of Science, and PubMed databases were included, using keywords like “selenium”, “wheat/maize/rice”, and “yield”. The natural logarithm of the response ratio ($\ln R$) was employed as the effect size for Meta-analysis, with data processed using Microsoft Office, Get Data Graph Digitizer, and MetaWin 2.1. Overall, selenium application increased the yield of rice, wheat, and maize by 5.41% (95% CI: 4.74%–6.08%, $P_Q < 0.01$). Notably, wheat and rice yields increased significantly by 8.72% (95% CI: 7.69%–9.75%) and 6.35% (95% CI: 6.34%–7.71%), respectively, while maize yield showed a negligible increase of 0.46%. Selenium application remarkably elevated grain selenium content by 164.09% (95% CI: 156.15%–169.21%, $P_Q < 0.01$), with maize demonstrating the most pronounced effect (172.97%, 95% CI: 164.55%–181.39%). The quality improvement of grain starch content was 2.39% (95% CI: 1.71%–3.06%, $P_Q < 0.05$), significant only in maize (3.87%, 95% CI: 2.86%–4.88%). A positive but non-significant effect was observed on grain protein content (4.99%, 95% CI: 3.78%–6.20%), with maize showing the highest enhancement (8.90%, 95% CI: 4.45%–9.17%). Effects varied significantly by crop type, application method (foliar spraying outperforming soil application), region (East China showing the strongest response), and soil selenium content (rice/wheat optimal in moderate selenium soils, maize in low selenium soils). Selenium application proves effective for yield and quality improvement, but strategies must be optimized based on crop, regional, and soil conditions to ensure human selenium nutrition and agricultural productivity.

Key Words: selenium application; wheat; maize; rice; yield; selenium content; quality; Meta-analysis

硒(Selenium)是土壤微生物、动物和人类生存所必需的微量营养元素,对人体生理机能的正常运转起着至关重要的作用^[1–3]。人体缺硒会引发一系列严重疾病,如大骨节病、克山病、Kashin-Beck病、心血管疾病及癌症等^[4–5]。中国约72%的土壤处于不同程度的缺硒状态^[6],据2020年《中国居民营养与慢性病状况报告》显示,成人每日硒摄入量虽提高到41.6 μg ,但仍有约7亿人口低于WHO推荐的55 $\mu\text{g}/\text{d}$ 标准^[7–8],因此人体需补充外源硒。由于人体难以利用无机硒且其具有毒害作用,而向作物施硒转化为有机硒后再摄入人体是一种安全经济的补硒方式^[9]。水稻、小麦和玉米作为人类主要的粮食作物,在中国农业生产中占据着极其重要的地位。研究表明,适量施硒对这三种作物增产提质效果显著,同时还能增强植物的抗氧化性和抗逆性。通过生产种植富硒粮食作物,将无机态硒转化为有机态硒,从而提高居民硒摄入量,是一种健康、经济、可持续且易于实现的方式^[10–11]。鉴于硒肥的施用效果受作物种类、土壤硒含量、种植地区、施用方式等多种因素影响,深入探究这些因素对施硒效果的影响,不仅可为合理利用硒肥促进作物增产提质提供科学依据,对保障国家粮食安全和改善国民健康膳食结构也具有极为重要的意义。

在施硒对水稻、小麦、玉米影响的研究领域,前人已取得了丰硕的成果。在水稻方面,已有研究表明硒能够显著促进水稻生长发育,增强其抗氧化能力,有效减少氧化损伤,进而对水稻产量产生积极影响^[12]。在品质方面,部分研究指出硒有助于改善水稻籽粒品质^[13–14],研究显示施硒可在一定程度上调节水稻籽粒蛋白质和淀粉的代谢过程,但具体影响因硒的施用量和水稻品种而异。对于小麦,研究表明施硒可显著提高小麦产量,在适宜硒浓度下,小麦的光合作用、养分吸收等生理过程得到显著增强,从而促进其生长和增产^[15]。在品

质方面,硒能够优化小麦籽粒的蛋白质组成和含量,有效提升小麦营养品质^[16],但不同地区的土壤条件和小麦品种会导致施硒效果存在差异^[17-18]。在玉米方面,一些研究关注到硒对玉米抗逆性的增强作用,研究表明硒可显著增强玉米的抗氧化防御系统,提高其对逆境胁迫的耐受性^[19],不过在产量和品质方面的研究结果相对较为复杂,仍需进一步深入探究。这些研究为进一步开展施硒对水稻、小麦、玉米增产提质的 Meta 分析奠定了重要基础,提供了宝贵的参考方向,有助于更全面深入地理解施硒在农业生产中的作用机制和效果差异。目前,关于施硒对水稻、小麦、玉米产量、品质和硒含量的研究,大多局限于单一角度和特定试验地点,其结果仅能反映特定环境下施硒对单一作物的影响,缺乏对不同品种施硒的综合性、区域性评价,且全国范围内施硒对这三种作物增产提质的定量分析综述极为罕见。为了全面定量分析全国范围内施硒对水稻、小麦、玉米的影响效应,有必要系统整合全国符合要求的施硒试验数据,并运用 Meta 分析方法进行深入研究。

本研究运用 Meta 分析方法,全面搜集整理 2013—2024 年中国水稻、小麦、玉米施硒大田试验数据,深入剖析不同作物种类、施肥方式、地区和土壤硒含量等因素对施硒效果的差异,详细阐明施硒对作物产量、品质和硒含量的影响,旨在为合理利用硒肥、促进作物增产提质以及保障人体硒营养摄入提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源和收集方法

本研究系统收集了 2013—2024 年发表于中国知网、维普、万方数据库以及 Web of Science、PubMed 数据库的中国大陆地区有关施硒对水稻、小麦、玉米产量、硒含量和品质影响的田间试验论文,并构建了专门的数据库,同时检索了农业专业数据库 CAB Abstracts,以增强文献覆盖的全面性。搜索关键词涵盖“硒”、“小麦(Wheat)/玉米(Maize)/水稻(Rice)”、“产量(Yield)”、“淀粉(Starch)”、“蛋白质(Protein)”及其组合。选择蛋白质和淀粉作为品质指标,主要原因如下:其一,淀粉作为谷物的主要成分,是人体重要的能量来源,而蛋白质是人体必需的营养成分,对维持身体正常的生理功能、生长发育和组织修复起着关键作用;其二,施硒主要通过影响谷物的氨基酸组分作用于蛋白质,进而对谷物品质产生影响,蛋白质与其他品质指标具有较高的相关性,在反映作物品质方面具有较强的代表性;其三,在综述性研究中,数据的丰富详实是确保结论准确可靠的关键,淀粉和蛋白质在相关文献中出现频率较高,而其他小麦品质指标的数据量相对较少。

为筛选出符合标准的高质量文献,获取准确的数据,制定了严格的筛选标准:(1)试验地点必须为中国室外大田,并在文中详细注明试验地点或经纬度;(2)试验必须同时包含施硒和不施硒两种处理,且除施硒与否外,其他管理措施(如灌溉、施肥、病虫害防治等)、取样与测定时间及方法等均需保持一致;(3)文中必须明确硒肥的用量及施用方式;(4)试验测得的相关数据应具备标准差(或标准误)及样本数,或重复数至少为 3 次且可直接获取或通过计算得到;(5)取得的数据至少包括水稻/小麦/玉米产量、籽粒硒含量、蛋白质含量或淀粉含量中的一项。经严格筛选,最终纳入分析范围的文献共 134 篇(图 1),其中中文文献 102 篇,英文文献 32 篇,收集的田间试验地点分布如图 2 所示。

1.2 数据分析

将整合后的数据建立数据库,运用 Meta 分析方法进行研究^[20]。基于本研究目的,采用响应比(response ratio, RR)的自然对数($\ln R$)作为效应值来量化施硒对水稻、小麦、玉米不同反应变量(产量、籽粒硒含量、淀粉含量和籽粒蛋白质含量)的影响,计算公式为:

$$RR = \ln R = \ln X_i - \ln X_c$$

式中: X_i 为施硒的实验组处理指标的均值, X_c 为不施硒肥的对照处理指标的均值。

因同一研究施硒会对水稻、小麦、玉米的产量、硒含量及品质产生一定差异,同时不同研究间的地区因素、田间管理措施、土壤肥力等因素的差异,研究结果之间存在很大的变异,因此选择随机效应模型计算综合效应值。利用 95%置信区间来判断产量效应的差异显著性,若 $\ln R$ 的 95%置信区间下限大于 0,则说明施硒有正效应;若 $\ln R$ 的 95%置信区间上限小于 0,则说明施硒有负效应;若 $\ln R$ 的 95%置信区间与 0 重合,则说明施

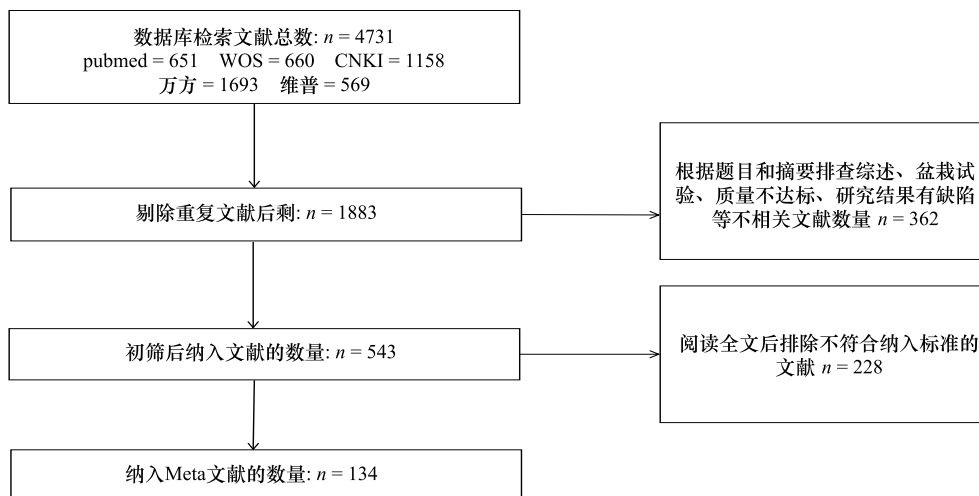


图1 文献纳入流程图

Fig.1 Flowchart of literature inclusion process

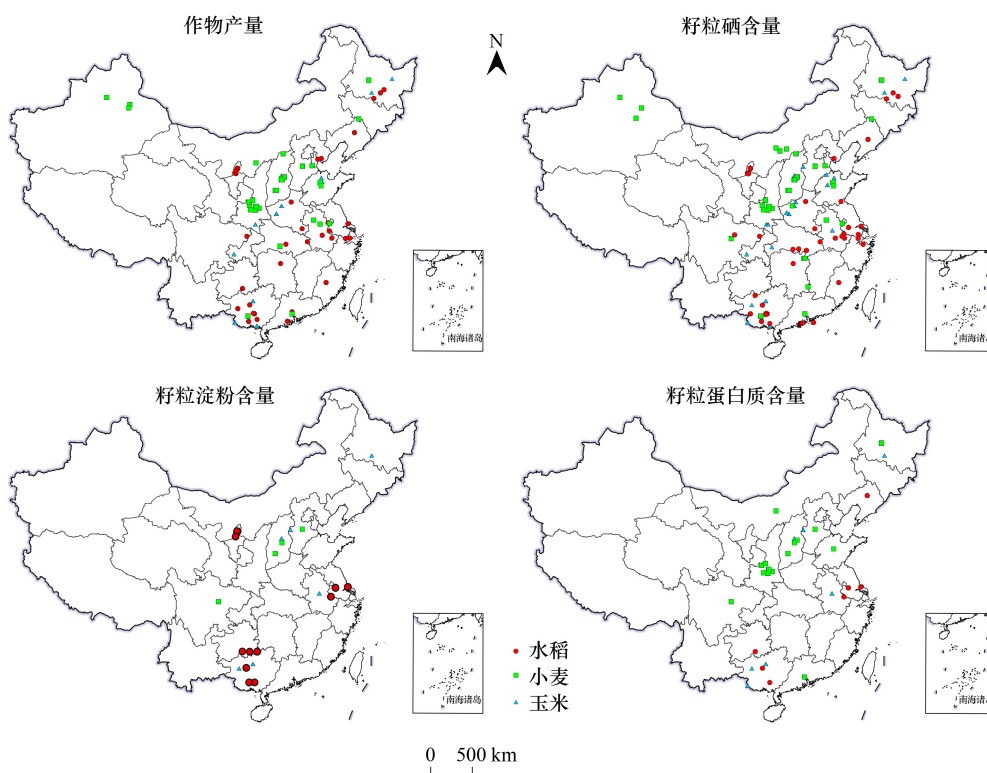


图2 本文收集的施硒条件下水稻、小麦、玉米的总产量、硒含量、淀粉含量与蛋白质含量的田间试验点位置

Fig.2 The location of field trial sites collected in this analysis with Rice, Wheat, Maize Total yield, Se content, starch protein content and protein content with Se application

硒无明显作用。为更好地解释叶面施硒对不同反应变量的影响, 将 $\ln R_{++}$ 转换为相对变化率 (E), 计算公式如下:

$$E = [\exp(\ln R_{++}) - 1] \times 100\%$$

数据异质性包括总体异质性 (total heterogeneity)、组间异质性 (heterogeneity between-group) 和组内异质性

(heterogeneity within-group),数值越大代表数据异质性越大。本研究通过组间异质性,检验同一指标的效应量在不同亚组之间的差异,分析各分组的组间异质性。如果 $P_Q<0.05$,则认为组间异质性显著,反之则不显著^[15]。

1.3 数据分类

将文献中采集的数据进行统计和分类,参考各项数据分级标准,及数据库中的数据分布情况对变量的分组入表 1 所示。

1.4 数据处理

本研究借助 NoteExpress 和 EndNote 软件高效管理中英文文献;利用 Microsoft Office 2019 进行数据收集、数据库建立和基础计算;针对以图片形式呈现的数据,运用 Get Data Graph Digitizer 软件进行转化提取;采用 MetaWin2.1 软件开展 Meta-数据分析和异质性检验,并进行发表偏倚检验;利用 GraphPad Prism 软件绘制专业图表。

表 1 施硒对小麦/玉米/产量、籽粒硒含量、淀粉含量和蛋白质含量的数据库解释变量分类分组

Table 1 Classification and grouping of explanatory variables for effects of foliar Se application on Wheat/Maize/Rice grain yield, Se content, Starch content and Protein content databas

影响因素 Influence factor	分组亚类 Classification of sub-group
作物品种 Crop variety	小麦、玉米、水稻 Wheat、Maize、Rice
施肥方式 Selenium application method	喷施、土施、喷施和土施 Foliar application、Soil application、Soil and Foliar application
试验区域 Experiment region	华东、华北、华南、华中、东北、西南、西北 Eastern China、North China、South China、Central China、Northeast China、Southwest China、Northwestern China
土壤全硒 Soil total Se (mg/kg)	≤0.125、0.125—0.175、0.175—0.450、≥0.450—3.00

2 结果分析

2.1 施硒对我国水稻、小麦、玉米产量、籽粒硒含量、淀粉含量与蛋白质含量的综合效应

对施硒小麦、玉米和水稻的产量、籽粒硒含量、淀粉含量与蛋白质含量分别计算其异质性和发表偏倚检验(表 2)。其中,与不施硒肥相比,施硒对水稻、小麦、玉米产量有正效应,总体为 5.41%(置信区间 4.74%—6.08%)且增产效应均显著($P_Q<0.01$);对籽粒硒含量的提升影响显著为 164.09%(置信区间 156.15%—169.21%, $P_Q<0.01$);对籽粒淀粉含量提质效应影响显著,效应值为 2.39%(置信区间 1.71%—3.06%, $P_Q<0.05$);对籽粒蛋白质含量提质有正效应,效应值为 4.99%(置信区间 3.78%—6.2%),但蛋白质提质效应不显著($P_Q>0.05$)。

表 2 中发表偏倚性检验结果显示,4 个指标的安全系数(Nfs)均大于最低阈值,不存在发表偏倚,即收集的数据可靠。

2.2 施硒对水稻、小麦、玉米产量效应的影响

从图 3 可以看出,施硒对水稻、小麦、玉米的总增产效应为 5.41%(95% CI:4.74%—6.08%, $P_Q<0.01$),且 95%置信区间下限均大于 0,表明整体具显著增产效应。但种间差异显著。其中,小麦对硒肥响应最敏感,增产效应值达 8.72%(95% CI:7.69%—9.75%, $P_Q<0.01$),置信区间不跨零,统计与实际效应均显著。水稻的增产影响呈显著正效应,效应值为 6.34%(95% CI:4.98%—7.71%)。施硒对玉米的增产效应值为 0.46%(95% CI:-0.71%—1.63%, $P_Q<0.01$),虽置信区间含零值(提示样本异质性高),但 $P_Q<0.01$ 的统计显著性结合后续分层分析,支持“施硒对玉米存在条件性增产效应”。

从施硒方式看,不同施用方式对增产效应的影响呈现复杂特征:小麦、水稻增产效应值分别为,效应值分别为 8.77%(95% CI:6.31%—11.23%, $P_Q=0.867>0.05$)和 6.79%(95% CI:5.6%—7.98%, $P_Q=0.0397>0.05$)但因施硒浓度、生育期等异质性, P_Q 均 >0.05 ,未达显著;玉米喷施效应值 0.79%(95% CI:-0.32%—1.9%),无显

著作用。土施中,水稻和小麦成正效应,效应值分别为 6.15% (95% CI: 1.18%—11.12%, $P_Q > 0.05$) 和 8.39% (95% CI: 0.37%—16.42%, $P_Q > 0.05$), 但同样因 $P_Q > 0.05$, 仅体现潜在增产趋势; 玉米土施效应值 -1.19% (95% CI: -3.85%—42.38%, $P_Q > 0.05$) 因置信区间跨零、 $P_Q > 0.05$, 无显著减产证据, 土施+喷施对水稻和小麦的增产效应分别为 1.31% (95% CI: -7.72%—10.35%, $P_Q > 0.05$) 和 14.86% (95% CI: -12.66%—16.42%, $P_Q > 0.05$), 95% 置信区间下限小于 0, 所以增产效果无显著变化。由此可以看出, 土施硒肥和叶面施硒对水稻和小麦产量有显著正效应, 且喷施效果均显著高于土施肥, 土施硒对玉米产量呈现负效应, 喷施对玉米的产量影响则不显著。

表 2 施硒对水稻、小麦、玉米籽粒硒生物强化的综合效应量

Table 2 Comprehensive effect size of Se application on yield and quality of Rice, Wheat, Maize

指标 Index		样本量 Sampling number	提高率 Increase rate/%	异质性检验 Heterogeneity test		发表偏倚检验 Publication test	
				Q	PQ	5n+10	失安全数 Fail-safe number
产量 Yield	总计	790	5.41	110.64	<0.01	3960	73054.2
	水稻	199	6.34				
	小麦	349	8.72				
	玉米	242	0.46				
籽粒 Se 含量 Grain Se content	总计	1081	164.09	49.12	<0.01	5415	1573627.7
	水稻	237	137.04				
	小麦	407	158.45				
	玉米	437	184.11				
籽粒淀粉含量 Grain starch content	总计	179	2.39	16.19	<0.05	905	3503.5
	水稻	63	9.5				
	小麦	40	1.78				
	玉米	76	3.87				
籽粒蛋白质含量 Grain protein content	总计	299	4.99	4.07	>0.05	1505	6581.3
	水稻	59	3.17				
	小麦	154	4.67				
	玉米	86	9.17				

从地区来看(图 3), 施硒对水稻、小麦、玉米产量的影响因地域生态差异(土壤硒本底、气候等)呈现显著分化。水稻施用硒肥在东北地区呈显著正效应, 效应值为 12.06% (95% CI: 10.17%—13.95%, $P_Q < 0.01$); 其次是西南地区、华东地区、华南地区和西北地区, 效益值分别为 10.16% (95% CI: 3.36%—16.95%)、6.45% (95% CI: 3.89%—9.01%)、5.09% (95% CI: 3.17%—7.01%) 和 4.77% (95% CI: 1.83%—7.77%), 华北和华中地区效应值分别为 2.32% (95% CI: -0.225%—6.89%) 和 2.48% (95% CI: -0.086%—5.83%) 虽效应值为正, 但因置信区间跨零影响则不显著, 整体而言, 水稻施硒增产呈现“东北、西南主导”特征。小麦施用硒肥, 不同地区产量影响有显著差异, 其中华北地区的产量呈显著正效应, 效应值为 17.27% (95% CI: 13.56%—20.97%, $P_Q < 0.01$), 其次为西北地区, 效应值为 4.6% (95% CI: 3.20%—8.88%, $P_Q < 0.01$), 其余地区因置信区间跨零, 无显著增产作用。玉米施用硒肥对华北地区产量呈显著正效应, 效应值为 2.05% (95% CI: 2.30%—3.73%, $P_Q < 0.05$), 华东地区效应值为 11.25% (95% CI: 4.41%—17.94%) 虽效应值高但样本量少 (number = 8) 异质性干扰风险大, 其他地区因效应值为负或置信区间跨零施硒肥对产量的影响不显著。总体上看, 不同地区施硒对水稻、小麦、玉米产量的影响呈现鲜明地域分异特征: 华北地区施硒后, 小麦 17.27% 的显著增产效应, 显著高于水稻 (2.32%) 与玉米 (2.05%), 成为小麦施硒响应最突出的核心区; 华东地区玉米施硒呈现 11.25% 的效应值 (虽受样本量掣肘存在异质性风险), 显著优于水稻 (6.45%) 和小麦 (2.42%), 展现出玉米在该区域的施硒响应优势。而东北地区施硒后, 玉米 (3.16%)、小麦 (2.9%) 均未呈现显著增产效果, 反映出该区域生态因子 (如

低温气候、土壤硒-其他元素互作)可能对施硒效应存在抑制作用。

从不同土壤总硒含量来看,水稻和小麦在土壤硒含 0.175—0.450 mg/kg 时施硒对产量有显著的正效应,效应值分别为 7.28% (95% CI: 5.84%—8.72%) 和 15.47% (95% CI: 11.75%—19.19%), 其次是 ≥ 0.450 —0.300 mg/kg 和 ≤ 0.125 mg/kg 时,其中 ≥ 0.450 —0.300 mg/kg 时,水稻和小麦的效应值分别为 5.85% (95% CI: 3.73%—7.96%) 和 8.01% (95% CI: 2.95%—13.07%); ≤ 0.125 mg/kg 时,水稻和小麦的效应值分别为 4.37% (95% CI: 0.32%—8.14%) 和 4.68% (95% CI: -0.30%—9.65%)。在土壤硒含量为 0.125—0.175 mg/kg 时,施硒对小麦产量因置信区间跨零且效应值趋近于 0,判定为无显著增产作用,效应值为 0.99% (95% CI: -4.37%—6.34%)。玉米在土壤硒含量 ≤ 0.125 mg/kg 时,施硒对产量有正效应,效应值为 2.09% (95% CI: 0.25%—3.93%, $P_Q < 0.01$),其它土壤硒含量范围条件下,施硒对玉米产量效应值呈负或置信区间跨零,故无明显响应。

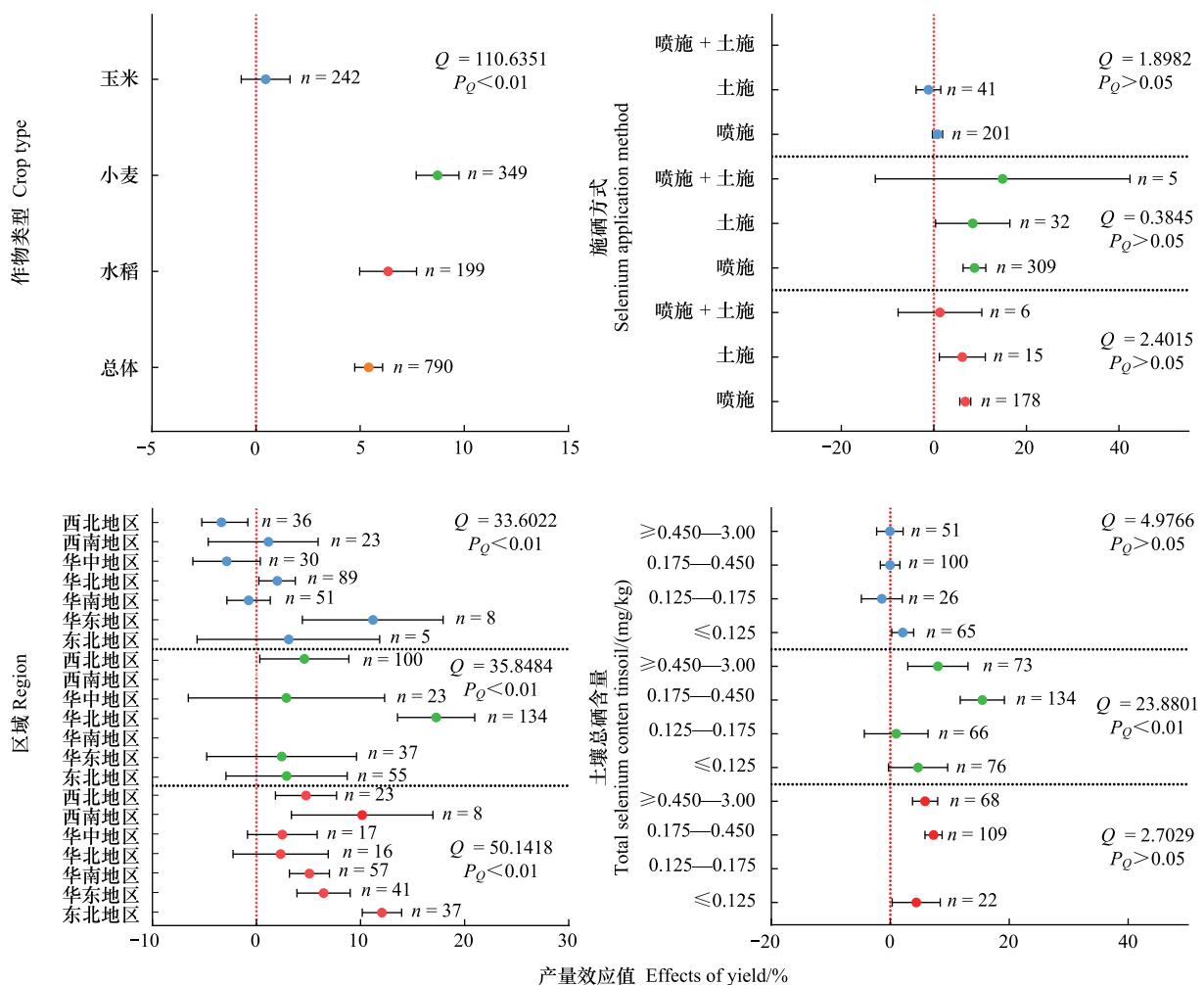


图 3 不同种类、不对施硒方式、不同地区和土壤总硒含量施硒对作物的产量效应值的影响

Fig.3 Effects of species, Se application measure and area and total Se content in soil on the response of plant yield to Se application

“0 线”表示无效线,误差线表示 95% 置信区间,括号中的数字代表纳入的数据组数量和效应值

2.3 施硒对水稻、小麦、玉米提高籽粒硒含量效应的影响

从图 4 可以看出,95% 置信区间的效应值下限均大于 0,籽粒硒含量提升总效应为 156.58% (95% CI: 151.26%—161.90%, $P_Q < 0.01$),说明施硒对我国水稻、小麦、玉米籽粒硒含量提高均有正效应。其中,玉米对硒富集响应最突出,籽粒硒含量提升效应值达 172.97% (95% CI: 164.55%—181.39%),其次是小麦和水稻,效

应值分别为 155.03% (95% CI: 146.36%—163.71%) 和 129.53% (95% CI: 118.17%—140.90%), 上述结果表明, 施硒对禾谷类作物籽粒硒含量的提升效应存在显著种间差异, 玉米对施硒的硒富集响应最为敏感。

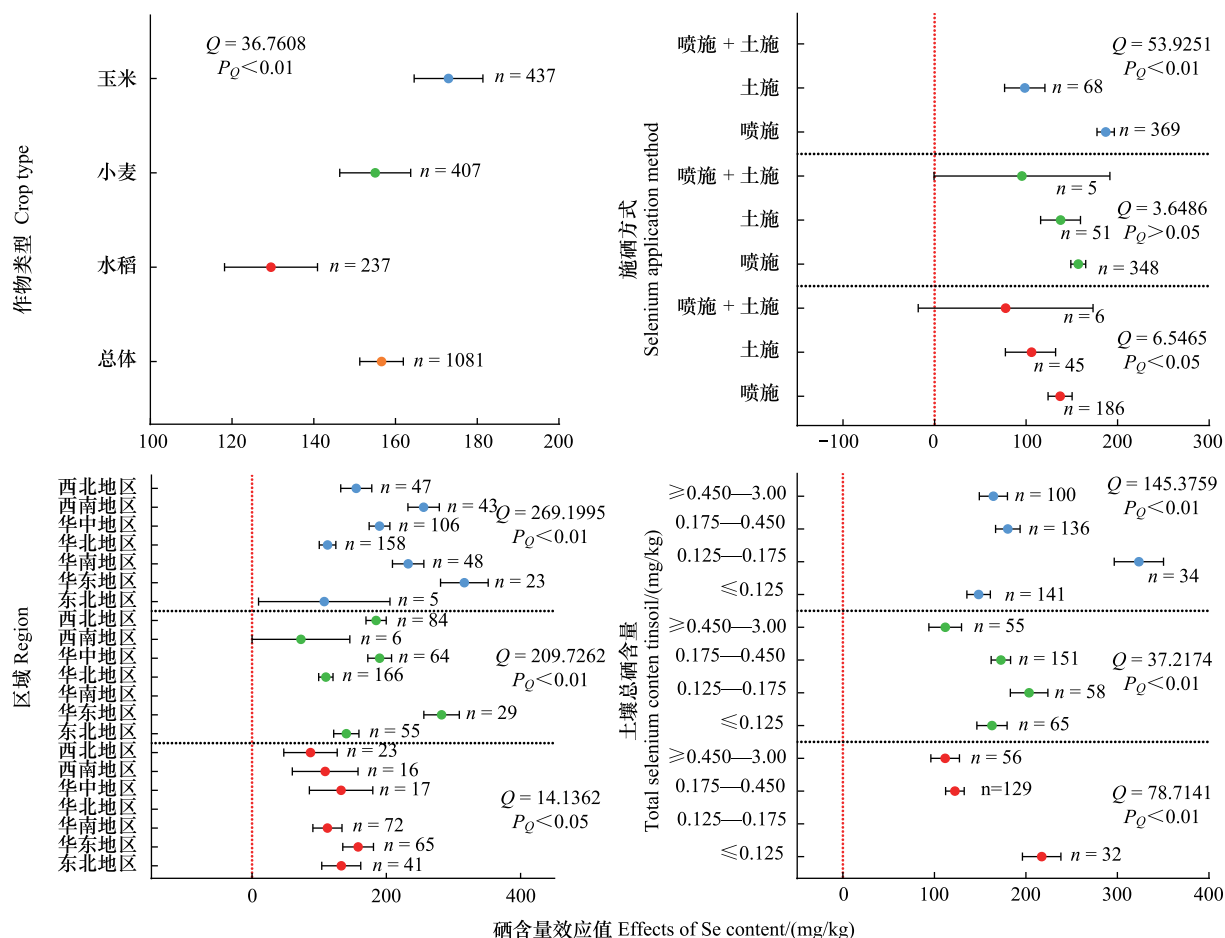


图 4 不同种类、不同施硒方式、不同地区和土壤总硒含量施硒对籽粒硒含量效应值的影响

Fig.4 Effects of species, Se application measure and area and total Se content in soil on the response of grain Se content to Se application

从施硒方式看(图 4), 喷施对水稻、小麦、玉米籽粒提升的效果均显著高于土施, 其中喷施条件下施硒肥对玉米籽粒硒含量提升的效应显著高于小麦和水稻, 效应值分别为 186.98% (95% CI: 177.56%—196.40%)、157.04% (95% CI: 148.86%—165.23%)、137.18% (95% CI: 123.98%—150.37%); 土施对提升籽粒硒含量的效应中小麦的效果更为显著, 其次是水稻和玉米, 效应值分别为 137.72% (95% CI: 115.95%—159.49%)、108.45% (95% CI: 77.43%—132.27%)、98.61% (95% CI: 76.58%—120.65%)。土施+喷施对小麦和水稻籽粒硒含量的提升效应分别为 95.48% 和 77.65%, 由此可以看出, 小麦提升效果较为显著, 但低于喷施和土施。水稻在 95% 置信区间下限 (95% CI: -17.90%—173.19%) < 0, 所以土施+喷施情况下对水稻籽粒硒含量提升效果影响并不显著。

从地区来看(图 4), 不同地区施硒对籽粒硒含量的提升效应呈现“华东地区全面主导”特征, 水稻籽粒硒含量提升在华东地区最为显著, 效应值为 157.96% (95% CI: 135.17%—180.75%); 其次是东北地区、华中地区、华南地区、西南地区和西北地区, 效应值分别为 132.85% (103.82%—161.87%)、132.53% (85.23%—179.82%)、112.21% (90.58%—133.84%)、108.85% (59.85%—157.86%) 和 86.94% (47.17%—126.72%)。小麦籽粒硒含量提升在华东地区呈显著正效应, 效应值为 282.32% (255.92%—308.7%); 其次是华中地区 (189.99%)、西北地区 (184.74%)、东北地区 (140.31%)、华北地区 (109.81%) 和西南地区 (72.72%)。玉米籽

粒硒含量提升在华东地区效应最为显著,效应值为 316.21% (95%CI:280.71%—351.72%),其次是西南地区、华南地区、华中地区、西北地区、华北地区和东北地区,效应值分别为 255.5%、232.43%、189.75%、155.11%、112.45%和 107.46%。由此看出华东地区对玉米、小麦、水稻籽粒硒含量的提升效应最为显著,玉米的提升效果要显著高于小麦、水稻。

从土壤总硒含量来看(图 4),水稻在土壤硒含量为 ≤ 0.125 mg/kg 时,籽粒硒含量提升效果最为显著 217.25% (95%CI:183.02%—224.00%),其次是 0.175—0.450 mg/kg 和 ≥ 0.450 —3.00 mg/kg,效应值分别为 122.46% (95%CI:112.32%—132.61%) 和 111.72% (95%CI:96.13%—127.31%)。小麦在土壤硒含量为 0.125—0.175 mg/kg 时,施硒对籽粒硒含量提升效果呈显著正效应,效应值为 203.51% (95%CI:183.02%—224.00%),其次是 0.175—0.450 mg/kg、 ≤ 0.125 mg/kg、 ≥ 0.450 —3.00 mg/kg,效应值分别为 172.66% (95%CI:162.02%—183.29%)、162.94% (95%CI:146.44%—179.44%)、111.8% (95%CI:93.93%—129.72%)。在土壤硒含量为 0.125—0.175mg/kg 时,施硒对玉米籽粒硒含量提升效果最为显著,效应值为 323.49% (95%CI:296.61%—350.38%),其次为 0.175—0.450 mg/kg、 ≥ 0.450 —3.00 mg/kg、 ≤ 0.125 mg/kg,效应值分别为 180.26% (95%CI:166.90%—193.62%)、164.41% (95%CI:149.03%—179.78%)、148.31% (95%CI:135.48%—161.14%)。其中,在 0.125—0.175 mg/kg 和 0.175—0.450 mg/kg 情况下施硒对小麦和玉米籽粒硒提升的效果最为显著,且玉米籽粒硒含量提升的效果要显著高于小麦。

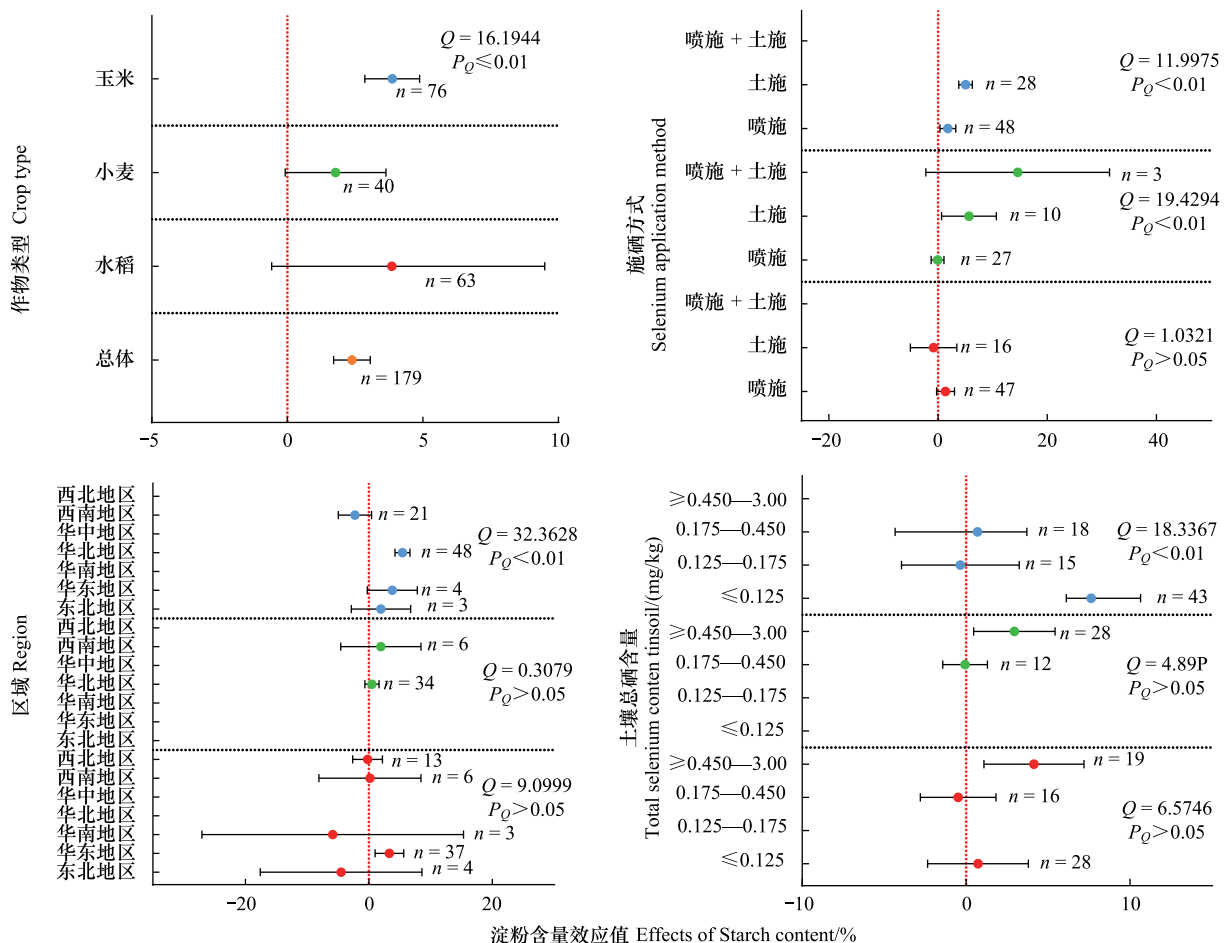


图 5 不同种类、不对施硒方式、不同地区和土壤总硒含量施硒对籽粒淀粉含量效应值的影响

Fig.5 Effects of species, Se application measure and area and total Se content in soil on the response of grain Starch content to Se application

2.4 施硒对水稻、小麦、玉米提高籽粒淀粉含量效应的影响

从(图5)可以看出,施硒作物籽粒淀粉含量在95%置信区间的效应值下限大于0,呈正效应,效应值2.39%(95%CI:1.71%—3.06%, $P_Q < 0.05$),其中,施硒对玉米籽粒淀粉含量的影响呈显著正效应,效应值为3.87%(95%CI:2.86%—4.88%);施硒对水稻和小麦籽粒淀粉含量的影响不显著,提高幅度分别为2.64%(95%CI:-0.58%—9.50%)和1.78%(95%CI:-0.08%—3.64%)因置信区间下限小于0(含零值),无法判定显著增益,反映水稻、小麦淀粉合成对施硒的响应弱于玉米(图5)。

从施硒方式来看(图5),喷施硒对水稻和小麦籽粒淀粉含量的影响不显著,效应值分别1.37%(95%CI:-0.27%—3.01%)和-0.08%(95%CI:-1.27%—1.1%);喷施硒对玉米籽粒淀粉含量的提升则呈显著正效应,效应值为1.80%(95%CI:0.35%—3.24%)。土施硒对水稻籽粒淀粉含量的影响呈负效应,因置信区间跨零不显著,效应值为-0.82%(95%CI:-5.07%—3.43%, $P_Q > 0.05$);土施硒对小麦和玉米籽粒淀粉含量的提升呈显著正效应,效应值分别为5.66%(95%CI:0.65%—10.67%)和5.04%(95%CI:3.81%—6.28%),施硒对籽粒淀粉含量提升的影响,小麦要高于水稻。土施+喷施条件下,仅小麦有少量样本($n=3$),效应值为14.59%(95%CI:-2.23%—31.41%),因样本量极少、置信区间跨零,无显著增益作用(图5)。

从地区来看(图5),水稻籽粒淀粉含量响应呈现“华东地区显著、华南/西北负向趋势”特征,在华东地区有显著正效应,效应值为3.32%(95%CI:0.10%—5.64%),在华南地区和西北地区水稻淀粉含量的提升呈负效应,效应值分别为-5.85%和-4.49%,其他地区则无显著影响且95%置信区间的效应值下限小于0(图5)。小麦在华北地区和西南地区施硒对籽粒淀粉的提升无显著影响,效应值分别为0.5%(95%CI:-0.65%—1.65%)和1.93%(95%CI:-4.56%—8.43%)。玉米在华北地区施硒对玉米籽粒淀粉含量的提升呈显著正效应,效应值为5.44%(95%CI:4.24%—6.65%);在华东地区和东北地区对玉米籽粒淀粉含量的提升影响因置信区间跨零则不显著,效应值分别为3.79%(-0.27%—7.84%)和1.91%(-2.85%—6.77%);在西南地区施硒对玉米籽粒淀粉含量的提升呈负效应,效应值为-2.26%(95%CI:-4.95%—0.44%)。

从土壤总硒含量来看(图5),水稻在土壤硒含量 ≥ 0.450 — 3.00 mg/kg时施硒对籽粒淀粉含量提升的影响呈显著正效应,效应值为4.14%(95%CI:1.09%—7.19%);在土壤硒含量为 0.175 — 0.450 mg/kg时施硒对水稻籽粒淀粉含量的影响置信区间跨零不显著,效应值为0.73%(-2.35%—3.80%);在土壤硒含量 ≤ 0.125 mg/kg时施硒对水稻籽粒淀粉含量的影响不显著,效应值为-0.48%(-2.79%—1.82%),且95%置信区间效应值下限小于0。小麦在土壤硒含量 ≥ 0.450 — 3.00 mg/kg时施硒对籽粒淀粉含量提升的影响呈正效应,效应值为2.95%(0.46%—5.43%);在土壤硒含量 0.175 — 0.450 mg/kg时施硒对小麦籽粒淀粉含量提升的影响不显著,效应值为-0.06%(-1.42%—1.30%)。玉米在土壤硒含量 ≤ 0.125 mg/kg时施硒对籽粒淀粉含量的影响呈显著正效应,效应值为6.11%(0.63%—10.64%);在 0.125 — 0.175 mg/kg和 0.175 — 0.450 mg/kg时施硒对玉米籽粒淀粉含量的影响不显著,效应值分别为-0.35%(-3.94%—3.24%)和2.71%(-4.33%—3.71%),且95%置信区间 < 0 。由此可见,水稻和小麦在土壤硒含量 ≥ 0.450 — 3.00 mg/kg时,淀粉含量提升效果最好,且施硒对水稻产生的效果更好,玉米在土壤硒含量 ≤ 0.125 mg/kg时施硒对淀粉含量提升的效果最好。

2.5 施硒对水稻、小麦、玉米提高籽粒蛋白质含量效应的影响

从(图6)可以看出,施硒对作物籽粒蛋白质含量的影响均有正效应,且95%置信区间的效应值下限大于0,总效应为4.99%(95%CI:1.09%—7.19%, $P_Q = 0.153 > 0.05$),虽异质性检验无显著差异,但整体呈显著正效应。其中施硒对玉米籽粒蛋白质含量的正效应最为显著,效应值为9.17%(95%CI:4.45%—13.89%),其次时小麦和水稻,效应值分别为4.67%(95%CI:2.96%—6.39%)和3.17%(95%CI:0.35%—5.98%)。

从施硒方式来看(图6),喷施硒对水稻和小麦籽粒蛋白质含量均有显著正效应,效应值分别为6.16%(95%CI:3.99%—7.19%, $P_Q < 0.01$)和4.62%(95%CI:3.07%—6.17%);喷施硒对玉米籽粒蛋白质含量无显著影响,效应值为0.56%(95%CI:-2.36%—3.48%),95%置信区间跨零且效应值趋近于0,无显著影响(图6)。土施硒对小麦和玉米籽粒蛋白质含量有显著正效应,效应值分别为7.85%(95%CI:0.69%—15.01%)和

21.24% (95% CI: 2.58%—25.83%), 且玉米籽粒蛋白质含量提升显著高于小麦籽粒蛋白质含量; 土施硒对水稻籽粒蛋白质含量则呈现负效应, 效应值为 -1.98% (95% CI: -6.42% — 2.47%)。

从地区来看 (图 6), 施硒对水稻、小麦、玉米籽粒蛋白质含量的影响呈现显著地域分化, 水稻在东北地区籽粒蛋白质含量呈显著正效应, 效应值为 11.53% (95% CI: 6.75% — 16.32% , $P_Q < 0.01$), 其次是华东地区 3.88% (1.50% — 6.26%); 水稻在华南地区和西南地区施硒对籽粒蛋白质含量的影响呈负效应, 效应值为 -7.32% (-29.61% — 14.96%) 和 -3.84% (-12.61% — 4.92%)。小麦在华东地区施硒对籽粒蛋白质含量呈正效应且最显著, 效应值为 11.83% (95% CI: 7.51% — 16.14% , $P_Q < 0.01$), 其次是西南地区、华北地区, 效应值分别为 9.73% (0.08% — 19.38%) 和 5.52% (2.85% — 8.18%); 小麦在西北地区和东北地区施硒对籽粒蛋白质含量因置信区间跨零无显著影响, 效应值分别为 2.29% (-0.1% — 4.68%) 和 2.12% (-2.01% — 6.25%)。玉米在华东地区施硒对籽粒蛋白质含量影响呈显著正效应, 效应值为 39.46% (95% CI: 2.82% — 50.72% , $P_Q < 0.05$), 其次是华北地区, 效应值分别为 17.33% (14.19% — 20.46%); 玉米在东北地区施硒对籽粒蛋白质含量影响因置信区间跨零, 无显著增益证据, 效应值为 5.6% (-10.37% — 21.58%); 玉米在西南地区和华南地区施硒对籽粒蛋白质含量影响呈显著负效应, 效应值分别为 -4.01% (-6.06% — 1.11%) 和 -2.97% (-7.99% — 0.03%)。

从土壤总硒含量来看 (图 6), 水稻籽粒蛋白质响应呈现“中硒土壤 ($0.175\text{—}0.450\text{ mg/kg}$) 显著增益、高低硒土壤负向”特征, 水稻在土壤硒含量为 $0.175\text{—}0.450\text{ mg/kg}$ 时施硒对水稻籽粒蛋白质含量的影响呈显著正效应, 效应值为 12.63% (95% CI: 8.40% — 16.87% , $P_Q < 0.05$); 在在土壤硒含量 $\geq 0.450\text{—}3.00\text{ mg/kg}$ 和

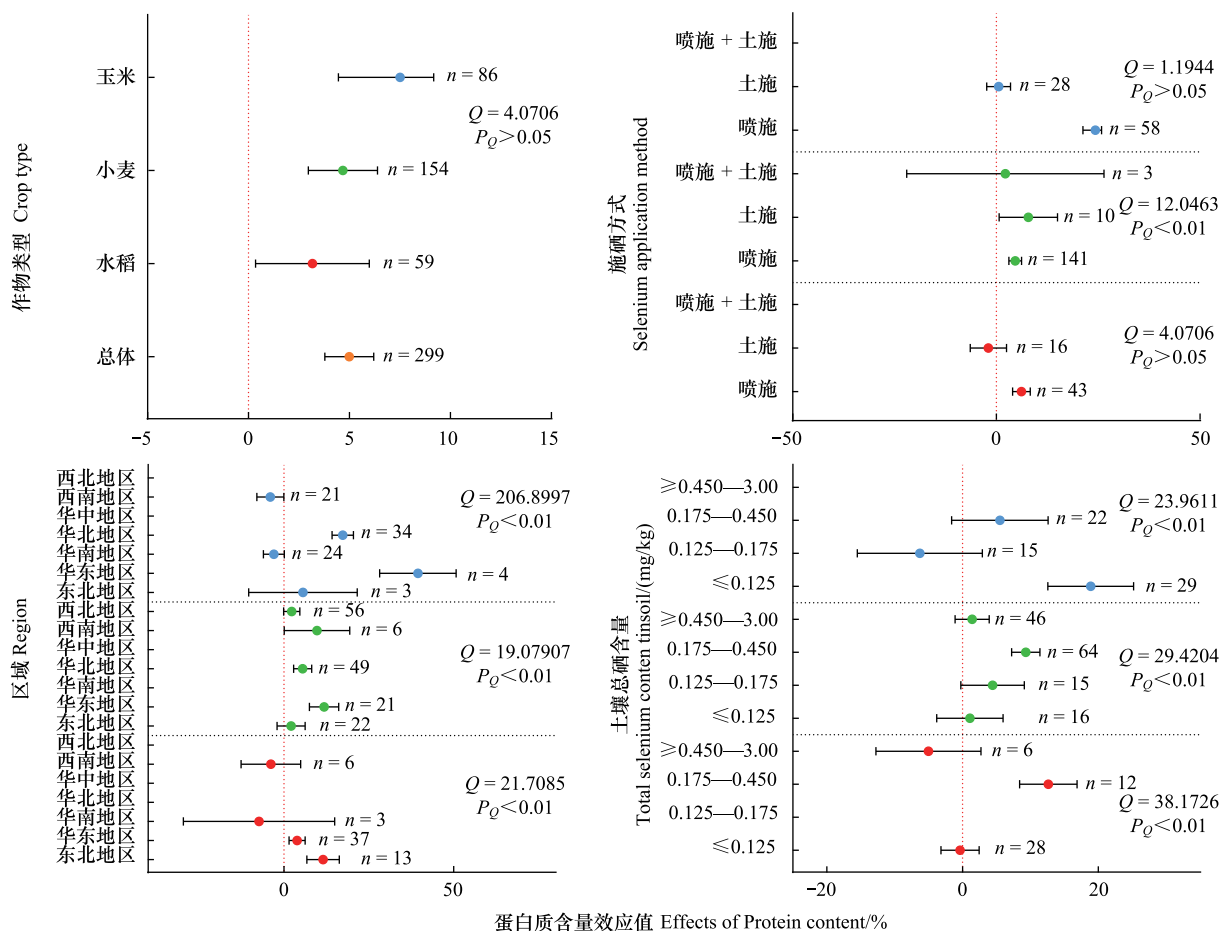


图 6 不同种类、不对施硒方式、不同地区和土壤总硒含量施硒对籽粒蛋白质含量效应值的影响

Fig.6 Effects of species, Se application measure and area and total Se content in soil on the response of grain Protein content to Se application

≤ 0.125 mg/kg 时施硒对水稻籽粒蛋白质含量的影响呈负效应,效应值为 -5.03% ($-12.77\%—2.71\%$) 和 -0.36% ($-3.18\%—2.45\%$)。小麦在土壤硒含量为 $0.175—0.450$ mg/kg 时施硒对小麦籽粒蛋白质含量提升的效应最显著,效应值为 9.32% (95% CI: $7.23\%—11.40\%$, $P_Q < 0.01$), 在土壤硒含量 ≤ 0.125 mg/kg、 $0.125—0.175$ mg/kg 和 $\geq 0.450—3.00$ mg/kg 时施硒对小麦籽粒蛋白质含量的影响因置信区间跨零、 $P_Q > 0.05$, 无显著影响, 效应值分别为 1.09% ($-3.80\%—5.97\%$)、 4.42% ($-0.25\%—9.09\%$) 和 1.41% ($-1.10\%—3.93\%$)。由此可见水稻在土壤硒含量为 $0.175—0.450$ mg/kg 时施硒对籽粒蛋白质含量提升要优于小麦。在玉米在土壤硒含量 ≤ 0.125 mg/kg 时施硒对籽粒蛋白质含量影响呈显著正效应,效应值为 18.89% (95% CI: $12.57\%—25.21\%$, $P_Q < 0.01$); 在土壤硒含量为 $0.125—0.175$ mg/kg 施硒对玉米籽粒蛋白质含量呈显著负效应,效应值为 -6.29% (95% CI: $-15.50\%—2.92\%$); 在土壤硒含量为 $0.175—0.450$ mg/kg 时施硒对玉米籽粒蛋白质含量影响不效应值为 5.50% (95% CI: $-1.60\%—12.61\%$), 因置信区间跨零, 无显著增益证据, 玉米在低硒土壤 (≤ 0.125 mg/kg) 中蛋白质含量提升 18.89% , 但在 $0.125—0.175$ mg/kg 土壤中转为 -6.29% , 可能与中硒土壤中硒-铁/铝氧化物结合导致有效性下降有关, 同时 $0.125—0.175$ mg/kg 区间样本量较少 ($n = 15$), 异质性较高。

3 讨论

3.1 施硒对水稻、小麦、玉米增产效应及因素分析

总体上,施硒对我国水稻、小麦、玉米均呈现总体正向增产效应(总效应 5.41% , $P_Q < 0.01$), 但种间差异显著^[21]。小麦增产效应值达 8.72% (95% CI: $7.69\%—9.75\%$), 显著高于水稻 (6.34%) 与玉米 (0.46%)。这种差异与作物生理特性密切相关: 小麦施硒增产效果最为显著, 可能是因为硒增强了小麦的光合作用、养分吸收及抗逆能力, 促进了其生长发育^[22]。有研究指出, 硒能增加小麦叶片中叶绿素的含量, 提高光反应效率, 从而为光合作用提供更多能量和还原力^[23], 同时, 硒还能促进小麦根系对氮、磷、钾等养分的吸收, 为植株生长提供充足的营养^[24], 而玉米增产不明显, 或许与玉米自身的生理特性和对硒的吸收利用机制有关, 其在硒的作用下, 代谢过程和生长调节未产生明显的增产效果^[25], 可能是玉米对硒的吸收存在阈值, 当施硒量超过一定范围后, 多余的硒无法被有效利用, 甚至可能对玉米的生理过程产生负面影响^[26]。

从施硒方式看, 喷施效应值(小麦 8.77% 、水稻 6.79%) 高于土施(小麦 8.39% 、水稻 6.15%), 这可能是由于喷施能使硒更直接、快速地被叶片吸收利用, 及时参与作物的生理代谢过程^[27—29], 叶片表面具有丰富的气孔和角质层, 喷施的硒肥可以通过气孔或角质层扩散进入叶片细胞, 迅速发挥作用^[30]; 而土施硒可能在土壤中发生固定或转化, 影响了作物对硒的吸收效率, 例如, 土壤中的铁、铝氧化物等可能与硒发生吸附或共沉淀反应, 降低硒的有效性^[31]。但对于玉米, 土施和喷施均未产生显著增产效果, 需进一步探究更适宜玉米的施硒技术, 如采用分次施硒或与其他肥料配合施用的方式, 以提高玉米对硒的吸收和利用效率^[32—33]。

不同地区的增产效应差异显著。东北地区水稻施硒增产效应突出(效应值为 12.06%), 可能得益于当地的气候、土壤条件与硒的协同作用, 促进了水稻生长, 东北地区夏季长日照(日均日照 ≥ 10 h) 与低温(日均温 $20—25^\circ\text{C}$) 延长光合产物积累期, 有利于水稻光合作用产物的积累, 适量的硒通过增强抗氧化酶活性(如 SOD) 减轻高温强光胁迫, 形成协同增益, 可能进一步增强了水稻的光合作用和抗逆性^[23]; 华北地区小麦施硒增产效应显著 (17.27%), 或许与当地的农业管理措施和土壤环境适配性高有关^[28]; 而东北地区玉米呈负效应 (-4.03%), 可能是由于该地区土壤或气候因素使得硒对玉米生长产生了负面干扰, 具体原因有待深入研究, 例如, 东北地区土壤的酸碱度、微生物群落等可能影响了硒的形态和有效性, 进而影响玉米对硒的吸收和利用^[34]。

土壤硒含量对增产效应的调控呈现“钟形曲线”特征。水稻和小麦在 $0.175—0.450$ mg/kg 时增产效应最佳(水稻 7.28% 、小麦 15.47%), 因该区间土壤有效硒(水溶态+交换态) 占比达 $30\%—40\%$, 既能满足作物需求, 又避免硒毒性(如高硒诱导活性氧积累), 说明适量的土壤硒背景有利于施硒发挥增产作用, 过高或过低的土壤硒可能影响作物对硒的吸收及生理响应, 进而影响产量^[28,34,35]。玉米在低硒土壤中施硒有一定增产

效果,但在其他含量范围呈负效应,需精准调控施硒量以适应不同土壤硒环境^[29],例如,在高硒土壤中,可以通过添加改良剂来降低硒的有效性,减少硒对玉米的负面影响^[35]。

3.2 施硒对水稻、小麦、玉米籽粒硒含量效应及因素分析

施硒显著提高了三种作物籽粒硒含量,玉米提升效果最佳(总效应 172.97%),显著高于小麦(155.03%)和水稻(129.53%)。这种差异源于作物硒吸收转运机制的分化:玉米对硒的吸收转运能力较强,能更高效地将土壤或喷施的硒积累在籽粒中,玉米根系具有特殊的转运蛋白,能够优先将硒吸收并转运到地上部分,再分配到籽粒中^[36-37];而水稻和小麦相对较弱,但仍有明显提升,表明施硒可有效实现作物硒生物强化。

不同施硒方式对籽粒硒含量的影响呈现“喷施主导、土施分化、组合待优化”特征,喷施对三种作物籽粒硒含量提升效果优于土施,原因是喷施能避免土壤固定,使硒更直接地进入植物体内参与代谢积累^[28];土施在提升小麦籽粒硒含量上效果相对较好,可能与小麦根系对土壤硒的吸收特性有关^[38],但总体仍低于喷施,小麦根系发达,根际环境中的微生物群落可能与小麦根系协同作用,促进了对土壤硒的吸收。土施+喷施对小麦有一定提升作用,但对水稻不显著,需优化组合施硒方式以提高水稻籽粒硒富集效果,例如,可以调整土施和喷施的比例和时间,以达到最佳的硒富集效果^[39]。

在地区方面,华东地区对三种作物籽粒硒含量提升最为显著,可能是该地区的农业生态环境、土壤性质及气候条件有利于硒的吸收转化,促进了作物对硒的积累。华东地区土壤质地疏松,透气性好,有利于作物根系的生长和对硒的吸收。同时,该地区的气候温和湿润,也为硒的吸收和转化提供了适宜的环境^[40];不同地区土壤和气候的差异会影响硒的有效性及作物吸收,导致提升效果不同,在施硒实践中应因地制宜。

土壤硒含量不同,各作物籽粒硒含量提升效果不同。水稻在低硒土壤中提升显著,说明低硒土壤背景下施硒更易被水稻吸收积累,可能是在低硒土壤中,水稻根系会通过调节自身的生理代谢,增强对硒的吸收能力^[41];小麦和玉米在特定中等硒含量区间提升效果突出,反映了其对硒含量的适应性和吸收规律^[42],为精准施硒提供了依据,为精准施硒提供了依据。例如,在中等硒含量土壤中,小麦和玉米的根系可能会分泌一些物质,促进硒的溶解和吸^[43]。

3.3 施硒对水稻、小麦、玉米籽粒淀粉含量效应及因素分析

施硒对玉米籽粒淀粉含量有显著正效应,对水稻和小麦不显著。玉米可能在硒的作用下,淀粉合成相关酶活性或代谢途径发生了积极改变,研究发现,施硒能提高玉米中腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(*AGPase*)等关键酶的活性,促进淀粉的合成^[44];而水稻和小麦的淀粉合成过程受硒影响较小,可能是其自身的淀粉合成调控机制相对稳定,不易受硒干扰。

喷施对玉米淀粉含量提升有显著正效应,对水稻和小麦不显著甚至有负效应,表明不同作物对喷施硒的响应不同,喷施的硒可能通过影响玉米叶片的光合作用和同化物的转运,间接影响淀粉的合成。而对于水稻和小麦,喷施的硒可能干扰了其正常的生理代谢过程,对淀粉合成产生不利影响。土施对小麦和玉米淀粉含量提升显著,对水稻呈负效应,可能与不同作物根系对土壤硒的吸收及转运至淀粉合成部位的效率有关,小麦和玉米根系对土壤硒的吸收和转运能力较强,能够将硒有效地运输到籽粒中,参与淀粉的合成过程^[46]。而水稻根系可能在吸收和转运硒的过程中存在障碍,导致硒无法有效促进淀粉合成,甚至可能产生负面影响,需针对不同作物优化施硒策略,如根据作物的生长阶段和需求,调整施硒方式和施硒量。

在地区方面,水稻在华东地区淀粉含量提升显著,在华南和西北地区呈负效应,可能与地区间温度、光照、水分等环境因素和硒的交互作用有关,华东地区的温度、光照和水分条件适宜,与硒协同作用,促进了水稻淀粉的合成。而在华南和西北地区,可能由于高温、干旱或其他环境因素,影响了硒的作用效果,导致淀粉含量下降;小麦和玉米在不同地区的淀粉含量变化也受环境和土壤因素影响,说明环境因素在施硒对淀粉含量影响中起关键作用^[46-47]。例如,在光照充足的地区,小麦和玉米的光合作用较强,为淀粉合成提供了更多的底物,施硒可能进一步促进了淀粉的合成;而在干旱地区,水分胁迫可能抑制了作物的生长和淀粉合成,施硒的效果也会受到影响^[48]。

土壤硒含量方面,水稻和小麦在高硒土壤中施硒对淀粉含量提升效果较好,玉米在低硒土壤中提升显著,这与作物对不同土壤硒环境的适应性及硒对淀粉代谢的作用机制有关^[50],应根据土壤硒状况调整施硒措施^[50],在高硒土壤中,水稻和小麦可能通过自身的调节机制,有效地利用硒来促进淀粉合成。而玉米在低硒土壤中,施硒能够激活其淀粉合成相关的生理过程,提高淀粉含量^[29]。

3.4 施硒对水稻、小麦、玉米籽粒蛋白质含量效应及因素分析

施硒对三种作物籽粒蛋白质含量均有正效应,玉米最为显著。硒可能参与了作物蛋白质合成过程,如影响氨基酸代谢、蛋白质翻译等环节^[27,39],在玉米中,硒可能促进了氮的吸收和转化,为蛋白质合成提供了更多的氮源,同时调节了蛋白质合成相关基因的表达,提高了蛋白质的合成效率^[32]。玉米在这一过程中对硒的响应更为敏感,使得蛋白质含量提升幅度更大。

喷施对水稻和小麦蛋白质含量有显著正效应,对玉米不显著;土施对小麦和玉米有显著正效应,对水稻呈负效应。这表明不同施硒方式对作物蛋白质合成的影响因作物而异^[27],可能与作物叶片和根系对硒的吸收及转运至蛋白质合成部位的效率和机制不同有关^[50-51]。喷施的硒可能通过叶片的吸收和转运,直接参与水稻和小麦叶片中的蛋白质合成过程。而土施的硒在小麦和玉米根系吸收后,能够有效地运输到籽粒中,促进蛋白质合成^[23]。对于水稻,土施的硒可能在根系中发生了转化或积累,无法有效地运输到籽粒中参与蛋白质合成,甚至可能对根系的生理功能产生负面影响^[51]。

在地区方面,水稻在东北地区蛋白质含量提升显著,在华南和西南地区呈负效应;小麦在华东地区提升最显著,在西北和东北地区不显著;玉米在华东地区提升显著,在西南和华南地区呈负效应。地区间环境因素与硒相互作用,影响了作物蛋白质合成代谢,在施硒时需考虑地区差异,东北地区的低温环境可能延缓了水稻的生长发育,使水稻有更多的时间积累蛋白质,而施硒进一步促进了这一过程。在华南和西南地区,高温高湿的环境可能加速了水稻的生长,导致蛋白质合成相对不足,施硒的效果也受到影响。对于小麦和玉米,华东地区的土壤肥力、光照和水分等条件适宜,与硒协同作用,促进了蛋白质的合成;而在其他地区,环境因素可能限制了硒的作用效果^[17]。

土壤硒含量方面,水稻和小麦在中硒土壤(0.175—0.450 mg/kg)含量区间施硒对蛋白质含量影响显著,玉米在低硒土壤(≤ 0.125 mg/kg)中施硒提升显著。这反映了不同作物蛋白质合成对土壤硒含量的要求不同,应依据土壤硒检测结果合理施硒,在适宜的土壤硒含量下,水稻和小麦能够有效地利用硒来调节蛋白质合成相关的生理过程。而玉米在低硒土壤中,施硒能够激活其蛋白质合成的关键酶和基因表达,从而提高蛋白质含量^[35]。

4 结论

本研究通过 Meta 分析,探究了施硒对我国水稻、小麦和玉米的影响。施硒对这三种作物的产量、籽粒硒含量、淀粉含量和蛋白质含量均产生作用。

施硒总体增产 5.41%,小麦和水稻增产显著,玉米不明显。施硒效果受方式、地区和土壤硒含量影响,如喷施对水稻和小麦增产优于土施,东北水稻、华北小麦施硒增产突出,东北玉米施硒减产,水稻和小麦在 0.175—0.450 mg/kg 土壤中,玉米在 ≤ 0.125 mg/kg 土壤中施硒增产效果较好;施硒显著提升籽粒硒含量,玉米提升效果最佳。喷施效果优于土施,华东地区提升效果最显著,不同作物在不同土壤硒含量区间提升效果不同;施硒仅对玉米淀粉含量有显著正效应,对三种作物蛋白质含量均有正效应且玉米最显著。二者受施硒方式、地区和土壤硒含量影响情况各异。

综上,施硒是提升作物品质和产量的有效手段,但不同作物响应存在一定差异。在农业生产中,需根据作物种类、地区环境和土壤条件优化施硒策略,如小麦和水稻优先喷施并按需调整用量,玉米探索新施硒技术,从而实现硒的高效利用,保障作物优质高产,为人体硒营养摄入提供保障。

参考文献 (References):

- [1] Broome C S, McArdle F, Kyle J A, Andrews F, Lowe N M, Hart C A, Arthur J R, Jackson M J. An increase in selenium intake improves immune function and poliovirus handling in adults with marginal selenium status. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, 80(1): 154-162.
- [2] Hartikainen H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 18(4): 309-318.
- [3] Zeng H W, Combs G F. Selenium as an anticancer nutrient; roles in cell proliferation and tumor cell invasion. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2008, 19(1): 1-7.
- [4] 黄冰霞, 支添添, 赵志刚, 何宁, 韩成云. 硒元素与人类健康. *宜春学院学报*, 2019, 41(9): 95-101.
- [5] Fairweather-Tait S J, Bao Y, Broadley M R, Collings R, Ford D, Hesketh J E, Hurst R. Selenium in human health and disease. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2011, 14(7): 1337-1383.
- [6] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法. *岩矿测试*, 2020, 39(3): 319-336.
- [7] Hambidge K. Trace Elements in Human and Animal Nutrition. Academic press, 1986.
- [8] 汪敏, 庄海铃. 关于人体补硒标准的研究. *数理医药学杂志*, 2007(4): 549-550.
- [9] Zhu Y G, Pilon-Smits E A H, Zhao F J, et al. Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. *Trends in Plant Science*, 2009, 14(8): 436-442.
- [10] 李韬, 兰国防. 植物硒代谢机理及其以小麦为载体进行补硒的策略. *麦类作物学报*, 2012, 32(1): 173-177.
- [11] Pilon-Smits E A H, Winkel L H E, Lin Z Q. Mechanisms of Plant Selenium Hyperaccumulation. Springer International Publishing, 2017, 10.1007/978-3-319-56249-0(Chapter 4): 53-66.
- [12] Józwiak W, Politycka B. Effect of Selenium on Alleviating Oxidative Stress Caused by a Water Deficit in Cucumber Roots. *Plants*, 2019, 8(7): 217.
- [13] 魏丹, 杨谦, 迟凤琴, 申惠波. 叶面喷施硒肥对水稻含硒量及产量的影响. *土壤肥料*, 2005(1): 39-41.
- [14] 常云, 艾新帅, 袁乐斌, 卢波斯, 沈宏. 喷施海藻提取物螯合硒肥对水稻富硒及产量、品质的影响. *肥料与健康*, 2024, 51(5): 27-32.
- [15] 徐琴, 王孟, 谢义梅, 陈甜甜, 周灵, 谭亚华, 石垒, 邢丹英. 施硒对水稻外观品质及籽粒硒、镉和砷含量的影响. *中国农业科技导报*, 2019, 21(5): 135-140.
- [16] 聂浩亮, 黄少辉, 杨军芳, 杨云马, 张静, 杨慧敏, 杨文方, 邢素丽, 贾良良, 岳增良. 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. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(12): 1997-2010.
- [17] 马红艳, 聂兆君, 刘红恩, 李畅, 秦世玉, 赵鹏. 施氮量和施硒方式对冬小麦产量和籽粒矿质元素积累的影响. *河南农业科学*, 2022, 51(5): 10-22.
- [18] 刘慧, 杨月娥, 王朝辉, 李富翠, 李可懿, 杨宁, 王森, 王慧, 何刚, 戴健. 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.
- [19] 邢丹英, 金明珠, 阎忠武, 刘运谷, 吴代军, 雷昌云, 牟方勇, 邓端富. 富硒矿粉对不同小麦品种(系)富硒效应的初步研究. *安徽农业科学*, 2006(4): 726-727.
- [20] Djanaguiraman M, Prasad P V V, Seppanen M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2010, 48(12): 999-1007.
- [21] Schmidt D F L, Oh I S, Hayes T L. Fixed- versus random-effects models in meta-analysis: model properties and an empirical comparison of differences in results. *Br J Math Stat Psychol*, 2009, 62(1): 97-128.
- [22] 匡恩俊, 迟凤琴, 张久明, 宿庆瑞. 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(4): 133-136.
- [23] 黄思思, 余侃, 饶登峰, 龙小玲, 蔡端午, 刘金龙, 郑威, 程水源. 生物有机硒对小麦产量及硒含量的影响. *食品科技*, 2020, 45(10): 19-26.
- [24] 杨林林, 韩敏琦, 高嘉, 杨胜敏. 不同形态硒对盐胁迫下小麦苗期光合生理、抗氧化系统及离子稳态的影响. *山东农业科学*, 2023, 55(9): 46-56.
- [25] 陈思杨, 江荣风, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐/亚硒酸盐的吸收及转运机制. *环境科学*, 2011, 32(1): 284-289.
- [26] Farooq M U, Ishaq I, Barutcular C, Skalicky M, Maqbool R, Rastogi A, Hussain S, Allakhverdiev S, Zhu J. Mitigation effects of selenium on accumulation of cadmium and morpho-physiological properties in rice varieties. *PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY*, 2022, 170: 1-13.
- [27] 万丽. 不同浓度生物态硒处理对玉米营养成分的影响. *现代盐化工*, 2023, 50(5): 21-23.
- [28] 陈火云, 谢义梅, 周灵, 杜斌, 陈卉, 邢丹英. 施硒方式对油菜生长和籽粒硒、镉、铅含量的影响. *河南农业科学*, 2019, 48(3): 49-54.
- [29] 张琳, 梁晓芳, 申国明, 秦兴成, 孟贵星, 向必坤, 倪超, 时鹏, 郑林林. 土壤和叶面施硒对烤烟硒积累的影响. *中国烟草科学*, 2011, 32

(3): 57-60.

- [30] 吕臣浩, 邓小芳, 陈友恩, 陈家伟, 赵竹青, 刘新伟. 生姜硒营养特性研究. 中国土壤与肥料, 2019(1): 117-121.
- [31] 钟庆祥, 张豫, 陶贞, 贺一聪, 吴迪, 林培松. 土壤—植物系统硒的迁移转化机制研究进展. 地球科学进展, 2023, 38(1): 44-56.
- [32] 郝玉波, 刘华琳, 慈晓科, 安宏明, 董树亭, 张吉旺, 刘鹏, 赵斌. 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.
- [33] 侯青光, 韦林汕, 卢亚妮, 黄柄壬, 韦贵剑, 黄小英, 赵峰进, 李世奇. 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. 西南农业学报, 2021, 34(9): 1900-1906.
- [34] 马婧萱, 崔晓丹, 梁强, 胡文友, 黄标. 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. 土壤, 2024, 56(5): 1101-1110.
- [35] Wang D, Dinh Q T, Anh Thu T T, Zhou F, Yang W, Wang M, Song W, Liang D. Effect of selenium-enriched organic material amendment on selenium fraction transformation and bioavailability in soil. Chemosphere, 2018, 199: 417-426.
- [36] 黄梅燕, 余江敏, 杨苛, 农梦玲, 韦彩会. 外源硒对不同鲜食玉米品种籽粒硒含量和产量品质的影响. 农业研究与应用, 2022, 35(5): 50-55.
- [37] Sors T G, Ellis D R, Salt D E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. Photosynthesis Research, 2005, 86(3): 373-389.
- [38] Zhou X B, Zhang C M, Gao A X. Selenium speciation and distribution in the rhizosphere and selenium uptake of two rice (*Oryza sativa*) genotypes. International Journal of Agriculture and Biology, 2018, 20: 136-142.
- [39] 胡彩霞, 杨东霞, 刘红恩, 刘亥扬, 刘立杰, 张玉鹏, 许嘉阳, 秦世玉, 李畅, 睢福庆, 聂兆君. 磷硒配施对冬小麦硒吸收及根际土壤微生物群落的影响. 中国土壤与肥料, 2024(6): 157-167.
- [40] 王梦园, 杨良哲, 汪丹, 张阳阳, 段碧辉, 袁知洋, 闫加力. 叶面喷施硒肥对水稻吸收累积硒及其他矿质元素的影响. 安徽农业科学, 2024, 52(6): 150-154.
- [41] 谭卓贤, 杜建军, 孙星, 易琼, 徐培智, 张木. 石灰、磷酸盐及硅酸盐对土壤硒有效性及水稻累积硒的影响. 江苏农业学报, 2024, 40(3): 450-456.
- [42] 王兴周, 丁岚峰, 刘振喜, 王梦春. 硒对玉米产量及含硒量影响的研究. 黑龙江畜牧兽医, 1987(7): 7-9.
- [43] 罗定祥, 冶军, 侯振安, 安军妹, 白娇. 不同有机物料对土壤硒形态及小麦硒吸收的影响. 新疆农业科学, 2018, 55(2): 328-336.
- [44] 李美宁, 耿卫东. 叶面喷硒对玉米产量、品质及硒含量的影响. 耕作与栽培, 2024, 44(2): 31-33.
- [45] 楚文聪, 蔡万涛, 夏杜菲, 王储. 叶面喷施硒肥对玉米籽粒硒及其他矿质元素含量的影响. 现代农业科技, 2024(1): 1-7.
- [46] 史丽娟, 白文斌, 曹昌林, 高鹏. 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.
- [47] Nawaz F, Naeem M, Ashraf M Y, Tahir M N, Zulfikar B, Salahuddin M, Shabbir R N, Aslam M. Selenium Supplementation Affects Physiological and Biochemical Processes to Improve Fodder Yield and Quality of Maize (*Zea mays* L.) under Water Deficit Conditions. Frontiers in Plant Science, 2016, 7.
- [48] Li B, Liu X, Zhang C, Yu T, Wu T, Zhuo X, Li C, Wang L, Lin K, Ma X, Li X, Zhang H, Ji W, Yang Z. Spatially varying relationships of soil Se concentration and rice Se concentration in Guangxi, China: A geographically weighted regression approach. Chemosphere, 2023, 343: 140241.
- [49] 魏玮, 李平, 周志高, 王兴祥, 丁昌峰. 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. 环境科学, 2023, 44(2): 1003-1011.
- [50] 陈刚, 颜雪梅, 宋家鸿, 赵志刚, 邹杰, 陈云凤. 植物硒营养元素吸收和代谢分子生物学研究最新进展. 宜春学院学报, 2019, 41(12): 92-98.
- [51] Chao W, Rao S, Chen Q, Zhang W, Liao Y, Ye J, Cheng S, Yang X, Xu F. Advances in Research on the Involvement of Selenium in Regulating Plant Ecosystems. Plants, 2022, 11(20): 2712.