

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.24144

CSTR: 32231.14.PSJ.2095-0837.24144

王雅洁, 王嘉琳, 周灿, 焦义能, 王柏, 源春彦, 王文玉, 丁广大, 赵竹青, 石磊. 施用钼肥对我国主要粮食作物和豆科作物增产提质的 Meta 分析 [J]. 植物科学学报, 2025, 43 (3): 361-370

Wang YJ, Wang JL, Zhou C, Jiao YN, Wang B, Yuan CY, Wang WY, Ding GD, Zhao ZQ, Shi L. Meta-analysis of the effects of molybdenum fertilizer application on yield increase and quality improvement of major grain crops and leguminous crops in China [J]. *Plant Science Journal*, 2025, 43 (3): 361-370

施用钼肥对我国主要粮食作物和豆科作物 增产提质的 Meta 分析

王雅洁¹, 王嘉琳¹, 周 灿², 焦义能², 王 柏², 源春彦³, 王文玉³,
丁广大¹, 赵竹青¹, 石 磊^{1*}

(1. 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室/华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070; 2. 湖北茂盛生物有限公司, 湖北随州 441300; 3. 河南省息县农业科学研究所, 河南信阳 464399)

摘 要: 钼是植物生长发育所必需的微量营养元素。本研究利用关键词“钼肥+小麦/玉米/花生/大豆+产量/品质”在中国知网 (CNKI)、万方、维普、Web of Science 等数据库中检索, 收集并整理了 2000-2021 年发表的相关文献, 采用 Meta 整合分析方法, 探讨施用钼肥对粮食作物 (小麦 (*Triticum aestivum* L.)、玉米 (*Zea mays* L.) 和豆科作物 (花生 (*Arachis hypogaea* L.)、大豆 (*Glycine max* (L.) Merr.)) 的影响。结果显示: 玉米、花生和大豆施用钼肥后平均增产 12.72%, 大豆增产效果最好, 小麦无显著增产效果。3 种作物的纯钼推荐用量分别为 0~1、0.6~0.8 和 0.4~0.6 kg/hm²。钼肥对不同地区的花生均有显著增产效果, 且华南地区的增产率最高; 而在西部地区, 钼肥对大豆的增产效果最好。2000 年以来, 钼肥对大豆的增产率逐年下降, 而对花生的增产率则逐年上升。施用钼肥显著提高玉米、花生和大豆的蛋白质含量, 以及花生和大豆的脂肪含量。综上, 钼肥的增产提质效果受作物种类、施用量、施用时期、种植地区等因素的影响, 在生产中应综合考虑相关因素, 制定科学的施肥方案, 为我国农作物的增产提质提供保障。

关键词: 钼肥; 增产率; 蛋白质含量; 脂肪含量; Meta 分析

中图分类号: S143.7

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837 (2025) 03-0361-10

Meta-analysis of the effects of molybdenum fertilizer application on yield increase and quality improvement of major grain crops and leguminous crops in China

Wang Yajie¹, Wang Jialin¹, Zhou Can², Jiao Yineng², Wang Bai², Yuan Chunyan³,
Wang Wenyu³, Ding Guangda¹, Zhao Zhuqing¹, Shi Lei^{1*}

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Microelement Research Centre, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Maosheng Biotechnology Co., Ltd., Suizhou, Hubei 441300, China; 3. Xixian

Agricultural Science Research Institute, Xinyang, Henan 464399, China)

Abstract: Molybdenum (Mo) is an essential micronutrient for plant growth and development. This study conducted a comprehensive meta-analysis of literature published between 2000 and 2021, retrieved from

收稿日期: 2024-06-20, 接受日期: 2024-08-12。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1700204)。

作者简介: 王雅洁 (1998-), 女, 博士研究生, 研究方向为增值中微量元素肥料的创制及其增值机制 (E-mail: yjwang1998@webmail.hzau.edu.cn)。

* 通信作者 (Author for correspondence. E-mail: leish@mail.hzau.edu.cn)。

databases including CNKI, Wanfang, China Science and Technology Journal Database, and Web of Science using the keywords "Molybdenum fertilizer+wheat/maize/peanuts/soybean+yield/quality". The analysis examined the impact of Mo fertilization on the yield and quality of major grain crops (*Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L.) and leguminous crops (*Arachis hypogaea* L. and *Glycine max* (L.) Merr.) in China. Results showed that Mo fertilizer application increased the average yield of maize, soybeans, and peanuts by 12.72%, with a significantly greater effect observed in soybeans compared to peanuts and maize. However, Mo fertilization did not result in a significant yield increase in wheat. The recommended application rates were 0–1 kg/hm² for maize, 0.6–0.8 kg/hm² for peanuts, and 0.4–0.6 kg/hm² for soybeans. Regional variations were evident, with the highest peanut yield observed in South China and the most pronounced soybean yield response in western China. Since 2000, the yield-enhancing effect of Mo fertilization has declined in soybeans while increasing in peanuts. Mo application also significantly improved protein content in maize, peanuts, and soybeans, as well as the fat content of peanuts and soybeans. Overall, the yield and quality benefits of Mo fertilization depend on crop species, application rate, timing, and regional conditions. Optimizing Mo fertilization strategies based on these factors is essential for sustaining yield improvements and enhancing agricultural product quality in China.

Key words: Molybdenum fertilizer; Increasing rate of yield; Protein content; Fat content; Meta-analysis

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 和玉米 (*Zea mays* L.) 分别是我国第 2 和第 3 大粮食作物, 提高其生产力对确保我国粮食安全具有重要意义。大豆 (*Glycine max* (L.) Merr.) 和花生 (*Arachis hypogaea* L.) 作为豆科作物, 是我国食用植物油和蛋白质的重要来源。其中, 大豆在黑龙江、安徽和内蒙古等地大面积种植, 全国种植总面积高达 1 047 万 hm²^[1], 花生的种植面积仅次于油菜 (*Brassica napus* L.)。钼是固氮酶、硝酸还原酶和黄嘌呤氧化酶的催化和组成部分, 主要以含钼酶的形式影响植物氮、磷代谢、维生素 C 合成、光合作用以及开花结实等过程^[2]。土壤中钼的含量因土壤类型而异, 低钼和缺钼土壤主要分布于我国东部, 高钼土壤主要分布在东北、西北和华南地区^[3]。豆科和十字花科作物需钼量较多, 对缺钼敏感, 是喜钼植物; 而禾本科作物需钼量较少^[2]。施用钼肥在促进大豆生长、提高产量的同时, 也能提升大豆品质, 增加大豆籽粒中蛋白质的含量^[4]。叶面喷施钼肥不仅能提高花生产量, 还能提高其对氮的吸收及地上部和种子中钼的含量^[2]。小麦施钼可促进出苗整齐、健壮, 增强抗寒性, 通过提早分蘖, 增加分蘖数, 从而提高产量^[5]。适量施用钼肥可促进玉米对氮、磷和钾的吸收, 提高全糖、可溶性糖和纤维素的含量, 从而增加产量和改善品质, 但过量施钼则会显著抑制玉米对氮、磷、钾养分的吸收利用, 甚至导致减产^[6]。因此, 系统研究不同地区、不同年代和钼肥不同施肥量对我

国小麦、玉米、大豆和花生产量及品质指标的影响, 对指导农户科学合理施用钼肥具有重要意义。

Meta 分析 (Meta-analysis) 是一种有效的整合统计方法, 能够对同类试验数据进行系统归纳和综合分析, 揭示各研究之间的共性和普遍性^[7, 8], 从而得出新的结论。该方法适用于大时间和空间范围的数据统计, 在我国农学领域中得到了广泛应用, 成为评价因素变化的重要手段^[9, 10]。譬如, 朱盼盼和石磊^[11]基于 Meta 分析研究了我国主要粮食作物施用锌肥的增产效果, 提出了影响锌肥增产的 4 大因素。杨效家等^[12]运用 Meta 分析探究了中微量元素对烤烟 (*Nicotiana tabacum* L.) 产量与品质的影响, 发现施用中微量元素肥料能够显著提高烤烟产量, 改善烤烟农艺性状。夏思瑶等^[13]基于 Meta 分析研究了施用有机肥对生菜 (*Lactuca sativa* L.) 产量和品质的影响。然而, 目前国内外尚无关于钼肥增产提质效果的分析报道。

本文基于 Meta 分析方法, 整理了 2000–2021 年发表的相关文献数据, 研究钼肥施用对我国主要农产品产量和品质的影响, 探讨不同作物种类、施用量、年代和地区钼肥施用效果的差异, 研究结果旨在为我国农产品生产和品质提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

以“钼肥+小麦/玉米/花生/大豆+产量/品质”为

关键词, 在中国知网、万方数据库、维普和 Web of Science 数据库中, 检索 2000 年 1 月 1 日-2021 年 12 月 31 日期间发表的中国大陆不同地区施用钼肥对上述作物产量和品质影响的田间试验论文。建立数据库, 设置以下条件对检索到的文献进行筛选, 以获得整合 (Meta) 分析要求的数据: (1) 试验地点在中国大陆进行; (2) 试验包含试验组和对照组, 以不施肥或常规施肥 (施用氮、磷和钾) 为对照处理; (3) 所涉及文献中的试验必须为大田试验; (4) 试验中的施钼量必须明确记录; (5) 试验成熟期的籽粒产量、品质指标须有明确记录; (6) 试验重复次数不低于 3 次; (7) 去除试验数据重复的文献; (8) 忽略多处理的综合效应。基于以上条件, 共筛选出 96 篇符合要求的产量相关的文献, 整理获得数据 232 组; 21 篇符合要求的品质相关的文献, 整理获得数据 60 组。

1.2 数据处理与分析

采用 Excel 2019 软件进行数据处理, 对文献中以图形表示的产量和品质数据, 通过 Origin 2018 软件中的 digitizer 功能进行图形数值化。建立农作物产量及品质的数据库, 并根据研究目的进行分类和计算, 使用反应比 R 的自然对数 ($\ln R$) 作为效应值, 计算公式如下:

$$R = X_t / X_c \quad (1)$$

$$\ln R = \ln(X_t / X_c) = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中, X_t 为试验组农作物产量和品质指标的均值, X_c 为对照组的均值^[14]。

由于筛选后的文献部分缺乏试验数据的标准误或标准差, 故本文采用无权重分析方法, 利用重复抽样技术计算效应值^[8]。采用 SPSS 26.0 软件进行 Bootstrap 计算, 抽样频率为 5 000 次, 得到平均效应值和上下限, 利用 Origin 2018 软件制作森林图^[15, 16]。若在 95% 的置信区间内不包括 0, 则认为效应值显著; 若分类变量之间 95% 的置信区间不重叠, 则认为分类变量之间的差异显著^[7]。

为了更直观地显示钼对农产品增产及品质提高的影响效果, 文中各指标的提高幅度 (Z) 计算公式为 $Z = (R - 1) \times 100\%$ ^[11]。

1.3 数据分类

采用 Excel 2019 软件对符合标准的文献建立相关数据库, 根据从文献中提取的数据, 按照农作物种类、地区、钼施用量以及施用年份进行分类, 分类结果见表 1。由于不同作物对钼的需求量存在显著差异, 本研究对不同作物钼肥的施用量进行了整理, 根据施用量范围区间进行了划分。

2 结果与分析

2.1 施用钼肥对不同作物产量的影响

2.1.1 施用钼肥对不同作物的增产效果

施用钼肥对玉米、花生和大豆的增产呈显著

表 1 农作物产量及品质影响因素的分类概况
Table 1 Classification of factors influencing crop yields

影响因素 Effects	分类 Classification
农作物种类	小麦、玉米、花生、大豆 小麦: <0.3、0.3~0.6、>0.6 玉米>1、<1 花生: <0.2、0.2~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1、>1~1.5、>1.5~2、>2 大豆: <0.2、0.2~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1.5、>1.5
钼施用量/ kg/hm ²	蛋白质含量、脂肪含量
品质指标	华中、华东、华南、华北、西部
试验地区	2000 年 1 月 1 日-2010 年 12 月 31 日、2011 年 1 月 1 日-2021 年 12 月 31 日
试验年份	

注: 华中地区包括河南省、湖北省、湖南省; 华东地区包括山东省、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、上海市、台湾省; 华南地区包括广西壮族自治区、广东省、海南省、香港特别行政区、澳门特别行政区; 华北地区包括北京市、天津市、山西省、河北省、内蒙古自治区、黑龙江省、吉林省、辽宁省; 西部地区包括新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、陕西省、西藏自治区、四川省、重庆市、云南省、贵州省。下同。

Notes: Central China includes Henan, Hubei, and Hunan provinces; East China includes Shandong, Jiangsu, Zhejiang, Anhui, Fujian, Jiangxi, Shanghai, and Taiwan provinces; South China includes Guangxi, Guangdong, Hainan, Hong Kong Special Administrative Region, and Macao Special Administrative Region; North China includes Beijing, Tianjin, Shanxi, Hebei, Inner Mongolia Autonomous Region, Heilongjiang, Jilin, and Liaoning provinces; and the Western region includes Xinjiang, Qinghai, Gansu, Ningxia, Shaanxi, Xizang, Sichuan, Chongqing, Yunnan, and Guizhou provinces. Same below.

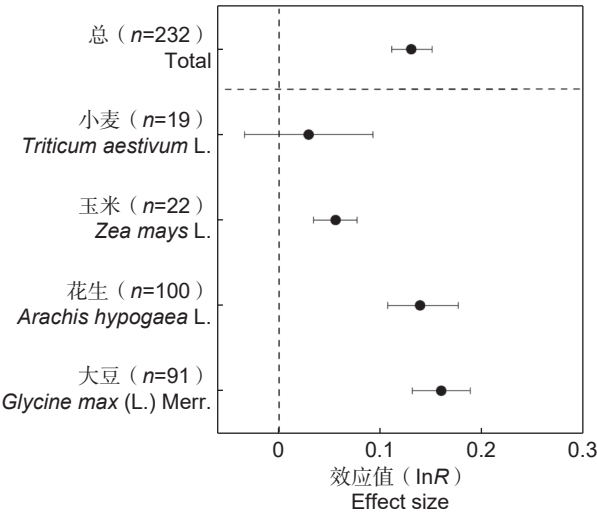
正效应，其中玉米增产率为 5.80%，花生增产率为 14.97%，大豆增产率高达 17.39%，但小麦施用钼肥的增产效果不显著（图 1）。

2.1.2 不同地区施用钼肥对不同作物的增产效果

不同地区施用钼肥对 4 种作物的增产效果具有显著差异（图 2）。施用钼肥后，华中地区小麦的增产率最高，为 7.48%；其次为华东地区，增产率 5.96%；而西部地区无显著增产效果。不同地区的玉米施用钼肥增产效果显著，其中华北地区的增产率最高，为 8.11%；西部地区的增产率最低，为 3.27%。华南地区的花生施用钼肥增产效果最为显著，增产率高达 103.66%，而华东地区的增产效果相对较低，仅为 6.89%。西部地区大豆施用钼肥的增产效果最佳，增产率为 26.47%，而华北地区仅增产 12.57%。

总体来看，华北地区花生施用钼肥的增产效果最为显著，其次是大豆，玉米的增产效果相对较低。在华东地区，施钼对大豆的增产效果明显高于小麦。而在西部地区，对大豆和花生的增产效果均显著优于玉米。华中地区则以大豆的增产

效果最为显著，其次是花生，小麦的增产效果最差（图 2）。



“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。下同。

“0 line” represents the invalid line, and error bars indicate 95% confidence intervals. Numbers in parentheses represent number of datasets included. Same below.

图 1 钼肥对不同作物的增产效果
Fig. 1 Effects of molybdenum fertilizer on yield increase in different crops

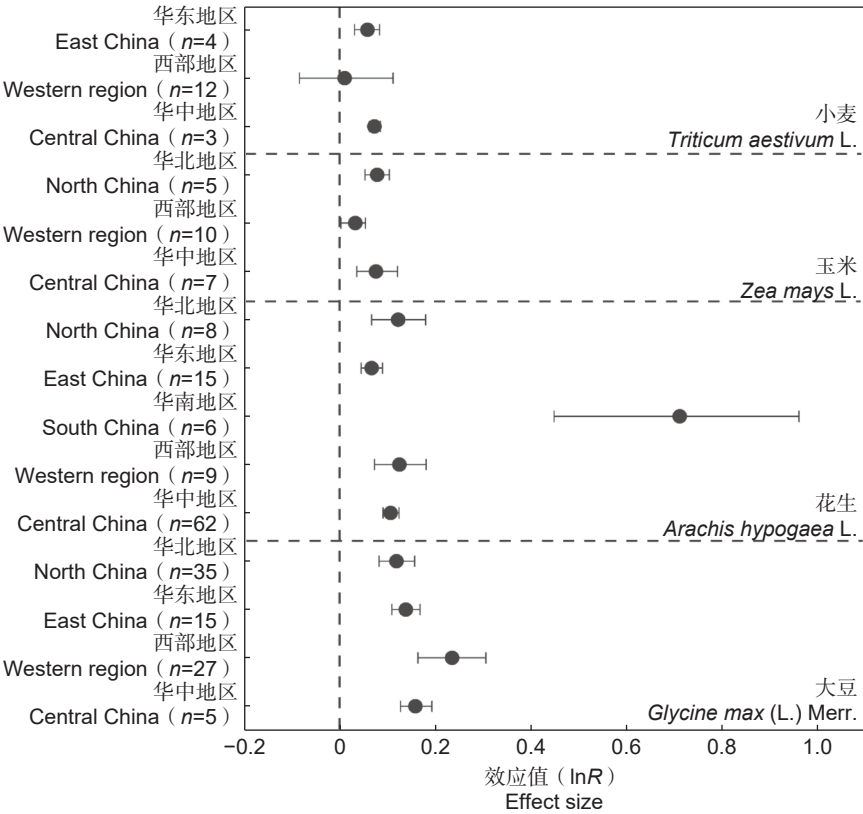


图 2 施用钼肥对不同地区不同作物的增产效果
Fig. 2 Effects of molybdenum fertilizer on yield increase in different crops in different regions

2.1.3 钼肥不同施用量对不同作物的增产效果

不同施用量的钼肥对玉米的增产效果均显著，纯钼施用量为 $0\sim 1\text{ kg/hm}^2$ 时的增产率最高（6.48%）。相比之下，钼肥对小麦无显著增产效果（图3）。钼肥不同施用量对花生的增产效果均显著，施用量为 $0.6\sim 0.8\text{ kg/hm}^2$ 时的增产率最高（30.66%），超过该用量后增产率下降。不同施用量钼肥对大豆的增产效果不同， $0\sim 1.5\text{ kg/hm}^2$ 时增产效果显著， $0.4\sim 0.6\text{ kg/hm}^2$ 时增产率达到峰值（25.58%）；大于 1.5 kg/hm^2 时增产效果不显著。在钼施用量同为 $0\sim 0.6\text{ kg/hm}^2$ 时，大豆的增产效果显著高于花生（图3）。

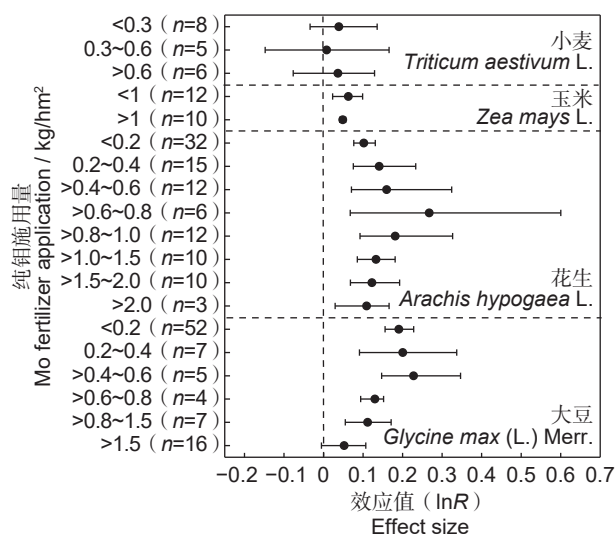


图3 钼肥用量对不同作物的增产效果

Fig. 3 Effects of different application rates of molybdenum fertilizer on yield increase in different crops

2.1.4 不同年代施用钼肥对不同作物的增产效果

不同年代施用钼肥对4种作物的增产效果差异显著（图4）。其中，玉米在2011-2021年施用钼肥的增产效果较好，增产率为7.28%。而施用钼肥对小麦的增产效果在2000-2010年间较好，增产率为7.59%。花生施用钼肥，在2011-2021年间的平均增产率为17.55%，是2000-2010年平均增产率的2.32倍。2000-2010年，大豆施用钼肥后的平均增产率为21.81%，显著高于2011-2021年（高72.55%）。总体来看，2000-2010年间，钼肥对大豆的增产效果最为显著，2011-2021年间，则对花生的增产效果最为突出。

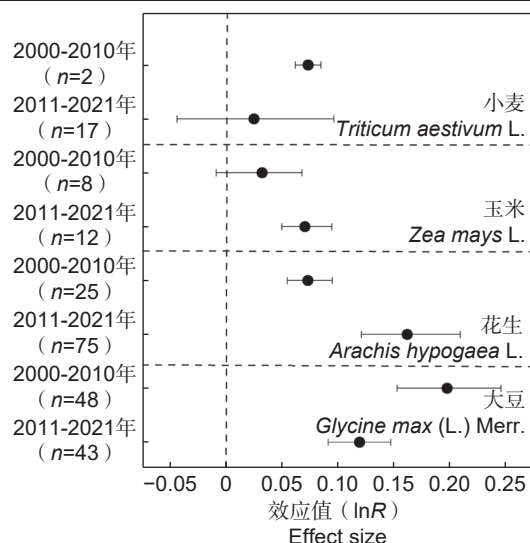


图4 不同年代施用钼肥对不同作物的增产效果

Fig. 4 Effects of molybdenum fertilizer on yield increase of different crops in different years

2.2 施用钼肥对玉米、花生和大豆品质的影响

2.2.1 施用钼肥对3种作物品质的影响

施用钼肥对玉米、花生和大豆品质指标的影响不同（图5）。施用钼肥后，玉米的蛋白质含量显著增加（6.1%），脂肪含量降低；花生的蛋白质含量显著提高（6.52%），脂肪含量也有提高（1.53%）。施用钼肥后，大豆的蛋白质和脂肪含量均显著上升，分别提高了6.18%和2.45%。总体上，钼肥对花生蛋白质含量的提升效果最为显著，其次是大豆；对大豆脂肪含量的提升效果最

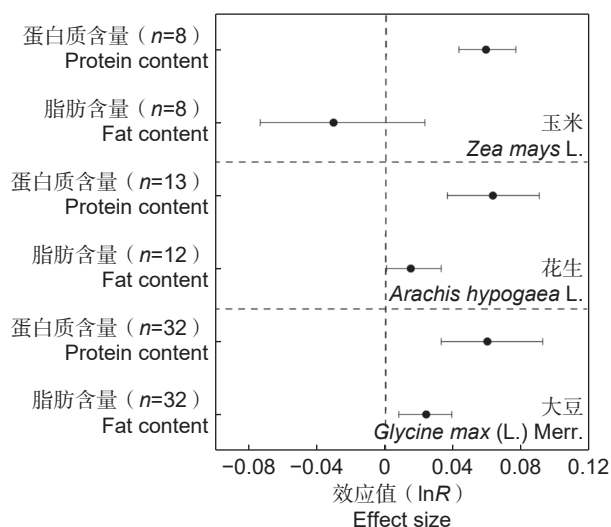


图5 施用钼肥对3种作物品质的影响

Fig. 5 Effects of molybdenum fertilizer on quality of three crops

佳, 其次是花生。

2.2.2 不同地区施用钼肥对玉米、花生和大豆品质的影响

施用钼肥对不同地区玉米的蛋白质含量均能显著提升, 其中对华中地区的提升最多, 提高了 7.77%, 对华北地区的提升最少, 为 4.46% (图 6: A)。施用钼肥显著降低西部地区花生的蛋白质含量, 降幅为 0.31%; 但提高了华中地区花生的蛋白质含量 (9.02%) (图 6: A)。施用钼肥后, 华北地区的大豆蛋白质含量增加最多, 为 6.84%, 而华中地区的增加幅度最少, 仅为 2.48% (图 6: A)。

施用钼肥后, 华北地区的玉米脂肪含量显著降低 5.18%, 而华中地区的含量无显著变化 (图 6: B)。施用钼肥后, 西部和华中地区的花生脂肪含量显著上升, 分别增加了 0.37% 和 2.48%, 但华东地区显著降低了 0.16%, 华北地区则无显著变化 (图 6: B)。钼肥显著提高华北和华东地区的大豆脂肪含量, 分别提高 3.33% 和 4.22%, 但对华中地区的大豆脂肪含量无显著影响 (图 6: B)。总体上, 华北地区施用钼肥可显著提高大豆的蛋白质含量, 其次为玉米和花生。华中地区施用钼肥后, 玉米 (213.31%) 和花生 (263.71%) 的蛋白质含量显著高于大豆。华北地区施用钼肥对大

豆脂肪含量的提高效果最好, 其次为花生和玉米。华中地区施用钼肥对花生脂肪含量的增加最多, 其次为玉米 (图 6)。

2.2.3 钼肥施用量对玉米、花生和大豆品质的影响

不同施用量的钼肥对 3 种植物的蛋白质含量均呈显著的正效应。钼肥施用量为 0~0.2 和 >0.2 kg/hm² 时, 玉米的蛋白质含量分别显著提高 6.09% 和 6.13%。施用量为 0~0.5 kg/hm² 时, 花生的蛋白质含量增加最为显著, 为 7.80%。施用量超过 1 kg/hm² 时, 大豆的蛋白质含量增加最多, 达 9.74% (图 7: A)。

不同施用量的钼肥对 3 种作物的脂肪含量影响不同。当施用量为 0~0.2 kg/hm² 时, 玉米的脂肪含量降低 5.82%, 而施钼量超过 0.2 kg/hm² 时变化不明显 (图 7: B)。钼肥施用量不同对花生的脂肪含量无显著影响 (图 7: B)。施钼量在 0~0.5 kg/hm² 时对大豆的脂肪含量无显著影响, 0.5~1 kg/hm² 及以上时, 则显著提高其脂肪含量, 其中, >1 kg/hm² 时的效果最好, 可提高 9.74% (图 7: B)。

2.2.4 不同年代施用钼肥对花生、大豆、小麦和玉米品质的影响

不同年代施用钼肥对 3 种作物蛋白质和脂肪含量的影响不同 (图 8)。2000-2010 年, 施用钼

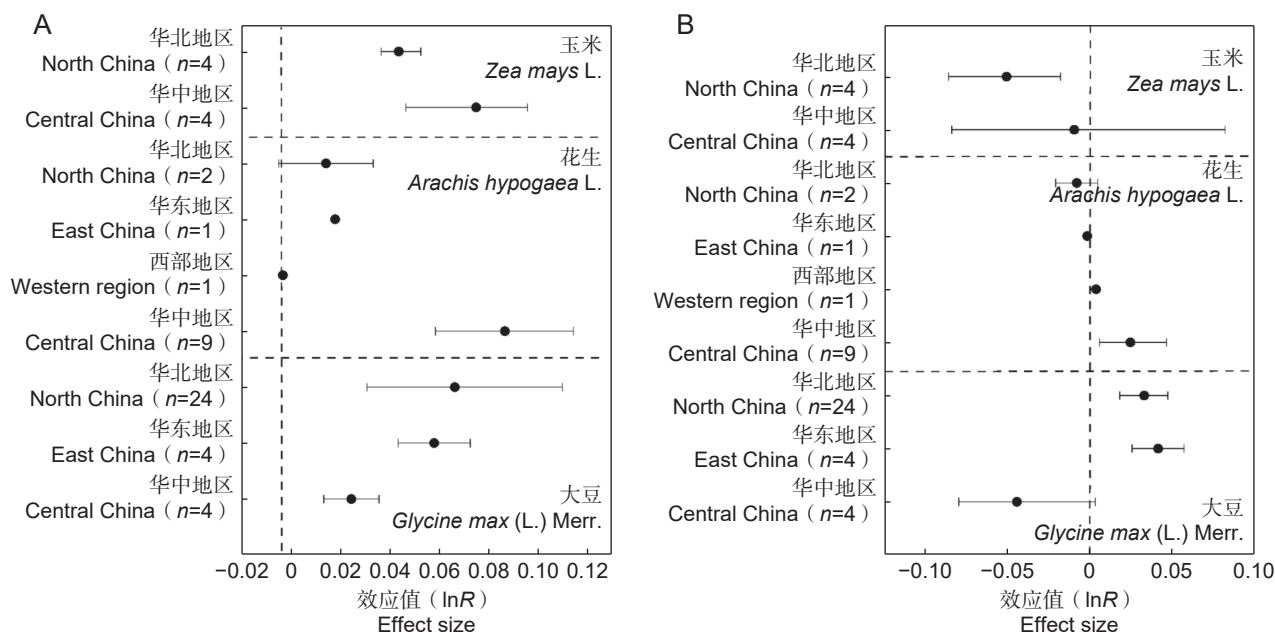


图 6 不同地区钼肥对 3 种作物蛋白质 (A) 和脂肪 (B) 含量的影响

Fig. 6 Effects of molybdenum fertilizer on the protein content (A) and fat content (B) in three crops in different regions

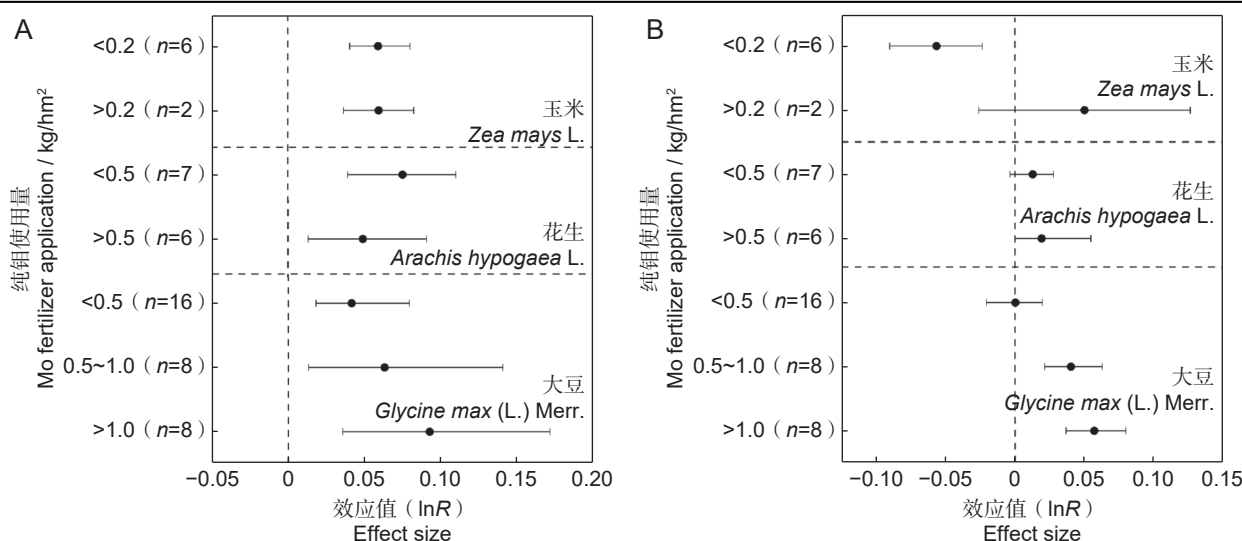


图7 不同钼肥施用量对3种作物蛋白质(A)和脂肪(B)含量的影响

Fig. 7 Effects of different application rates of molybdenum fertilizer on protein (A) and fat (B) content in three crops

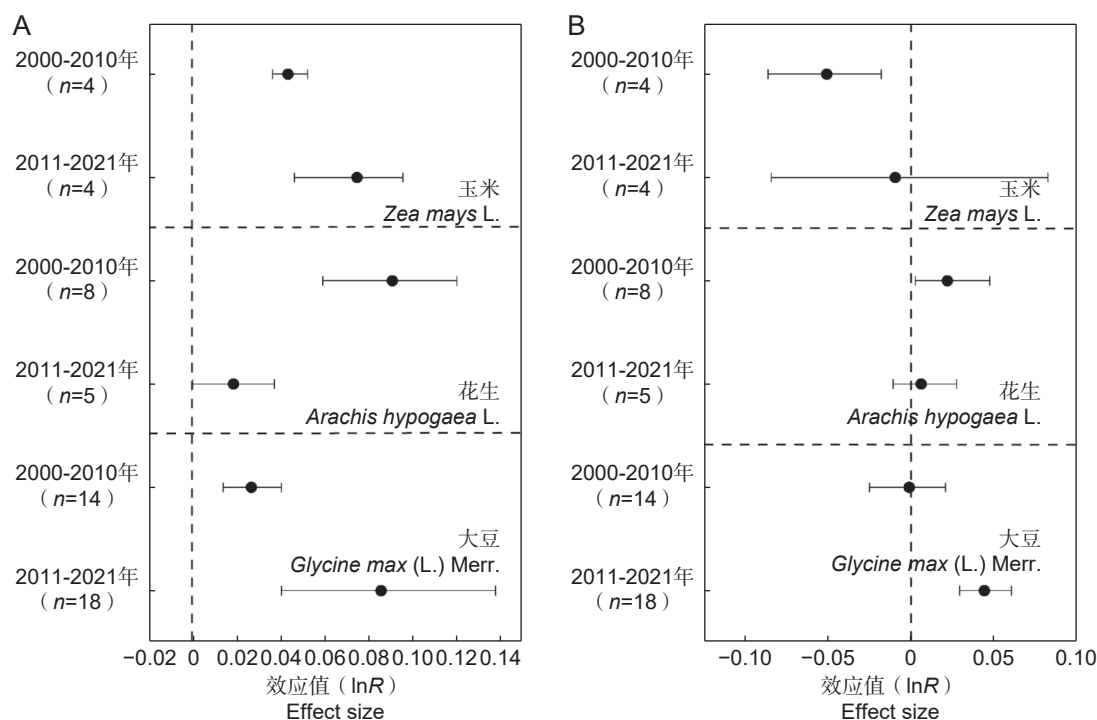


图8 不同年代施用钼肥对3种作物蛋白质(A)和脂肪(B)含量的影响

Fig. 8 Effects of molybdenum fertilizer on protein (A) and fat (B) content in three crops in different years

肥的花生蛋白质含量增加了 9.50%；而 2011-2021 年，钼肥对玉米和大豆蛋白质含量的提升高于花生，分别提高了 7.77% 和 8.95%。2000-2010 年，施用钼肥后，玉米和花生的脂肪含量分别降低 5.18% 和提高 2.19%，但 2011-2021 年间，钼肥不影响两种作物的脂肪含量。2000-2010 年，

钼肥对大豆脂肪含量无显著影响，但 2011-2021 年提高了其脂肪含量 (4.49%)。

总体上，2000-2010 年期间，钼肥对花生蛋白质含量的提高效果明显高于玉米和大豆；而 2011-2021 年钼肥对大豆和玉米蛋白质含量的提高效果显著高于花生。2000-2010 年，施用钼肥

对花生脂肪含量的提高显著高于玉米, 而 2011-2021 年对大豆脂肪含量的提高显著高于花生 (图 8)。

3 讨论

施用钼肥对不同作物产量和品质的影响具有显著差异, 尤其在提升花生、大豆等豆科作物的产量和品质方面效果显著。本研究的 Meta 分析结果表明, 钼肥可显著增加花生和大豆等豆科作物的产量, 并对玉米产量有促进作用。前人研究发现, 钼肥能够促进花生根瘤菌的形成及其固氮作用, 增强光合能力, 从而为花生增产奠定基础^[17]。适量施用钼肥有利于大豆株高、根长、根瘤数量及叶片面积的增加, 增强植株代谢和抗性, 进而提高单株荚数、粒数和百粒重, 显著提升产量^[18, 19]。此外, 钼肥还可促进玉米对氮、磷、钾等养分的吸收, 提高其利用率, 增加单产并改善籽粒品质^[4]。前期研究显示, 钼肥能增强小麦根系活力, 提高叶片叶绿素含量, 促进干物质积累和转运, 从而提高小麦产量^[20]。然而, 本研究的 Meta 分析结果显示, 施用钼肥对小麦的增产效果不显著, 这可能与我国小麦钼肥试验多集中在土壤 pH 值较高、有效钼含量丰富的西部地区有关, 且小麦对钼的需求量较低。相比之下, 施用钼肥对花生和大豆的增产效果显著高于玉米和小麦, 这可能与豆科作物需钼量大、对钼敏感性高有关^[2]。此外, 钼肥对不同作物品质的影响也存在差异: 花生的蛋白质含量增加最多, 其次为大豆, 玉米相对较差; 大豆的脂肪含量增加最多, 其次为花生, 玉米效果最差, 这可能与作物的种性有关^[21, 22]。

肥料的施用效果与土壤中相关元素的含量密切相关^[23]。不同地区施用钼肥对作物产量的影响存在显著差异。酸性土壤中钼的有效性较低, 而碱性土壤中则较高^[2]。华南地区施用钼肥时, 花生的增产率最高, 这可能与该地区土壤有效钼含量较低 (平均值为 0.13 mg/kg) 有关。由于华南地区降水量大, 土壤中的有效钼容易流失, 因此花生施用钼肥的增产效果较好。西部地区大豆施用钼肥的增产效果最佳, 这也与该地区土壤有效钼含量低 (平均值为 0.12 mg/kg) 有关。此外, 华中地区小麦施用钼肥的增产率最高 (7.48%), 而华

北地区玉米施用钼肥的增产率最高。王运华等^[24]提出, 冬小麦施用钼肥增产需要一定条件, 包括土壤有效钼含量低、土壤 pH 值低、氮肥施用量高以及越冬期低温。不同地区施用钼肥对农产品品质指标的影响也有所不同。譬如, 大豆施用钼肥时, 在华北地区蛋白质含量增加最多, 而在华东地区脂肪含量提高最为明显; 花生施用钼肥时, 在华中地区蛋白质和脂肪含量均有所增加, 分别提高了 9.02% 和 2.48%; 玉米施用钼肥时, 在华中地区的蛋白质含量增加最多, 而在华北地区的增加较少, 且脂肪含量显著降低。这可能是由于作物体内的蛋白质和脂肪含量与其体内氮和碳水化合物化合物的分配密切相关, 不同种类和品种的作物之间存在差异^[25, 26]。

本研究的 Meta 分析结果表明, 自 2000 年以来, 大豆和小麦施用钼肥的增产效果逐年下降, 而玉米和花生施用钼肥的增产趋势则呈上升态势。前者可能是因为大豆和小麦产区长期推广钼肥施用, 导致土壤有效钼含量增加, 施钼效应降低。玉米和大豆施用钼肥对其蛋白质和脂肪含量的提升随年份推移呈上升趋势, 而花生施用钼肥对其蛋白质和脂肪含量的增加率则呈下降趋势, 这可能既与土壤的有效钼含量有关, 也与作物的种性有关。

钼肥的施用量对农产品的增产及品质提升效果具有显著影响。研究表明, 大豆施用钼肥后增产效果明显, 当施用量达到一定水平时, 增产效果逐渐减弱, 其最佳施用量约为 0.71 kg/hm²^[27]; 而花生和玉米的推荐施用量分别为 1.5~2.25 和 0.58 kg/hm²^[28, 29]。本研究分析发现, 大豆、花生和玉米的增产率与钼肥施用量之间呈先增后减的趋势, 即随着施用量的增加, 增产率先升后降。因此, 大豆、花生和玉米的适宜纯钼施用量范围分别为 0.4~0.6、0.6~0.8 和 0~1 kg/hm², 相当于钼酸铵施用量分别为 0.75~1.1、1.1~1.5 和 0~1.85 kg/hm², 与前人研究结果基本一致。

钼肥的常用施用方法包括拌种、浸种和喷施。由于不同作物的种子大小不一致, 钼肥的施用方法也不完全相同。本研究的 Meta 分析未区分钼肥种类及不同施用方式对作物产量和品质的影响, 未来有待进一步分析和比较。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报 [N]. 人民日报, 2024-03-01 (10).
- [2] 张俊伶. 植物营养学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2021: 162-166.
- [3] 刘铮, 朱其清, 徐俊祥, 严楚良. 中国土壤中钼的含量与分布规律 [J]. 环境科学学报, 1990, 10 (2): 132-137.
Liu Z, Zhu QQ, Xu JX, Yan CL. Contents and distribution of Mo in soils of China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, 10 (2): 132-137.
- [4] 张立强, 张景勇, 孙宇, 贺斌斌, 张伟, 等. 施用钼肥对大豆生长性状、产量和品质影响的 Meta 分析 [J]. *大豆科学*, 2022, 41 (3): 288-299.
Zhang LQ, Zhang JY, Sun Y, He BB, Zhang W, et al. Meta analysis of effects of molybdenum fertilizer on soybean growth traits, yield and quality [J]. *Soybean Science*, 2022, 41 (3): 288-299.
- [5] 王运华, 徐芳森, 鲁剑巍. 中国农业中的硼 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 21-64.
- [6] 杨利华, 郭丽敏, 傅万鑫, 姚华. 钼对玉米吸收氮磷钾、子粒产量和品质及苗期生化指标的影响 [J]. *玉米科学*, 2002, 10 (2): 87-89.
Yang LH, Guo LM, Fu WX, Yao H. Effect of molybdenum on absorption of nitrogen, phosphorus and potassium, grain yield and quality, biochemical components of seedling stage in maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10 (2): 87-89.
- [7] Curtis PS, Wang XZ. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology [J]. *Oecologia*, 1998, 113 (3): 299-313.
- [8] 石如岳, 王冲, 杨俊雪, 于点, 高萌萌. 中微量元素对番茄产量和品质影响的整合分析 [J]. *中国瓜菜*, 2021, 34 (3): 66-71.
Shi RY, Wang C, Yang JX, Yu D, Gao MM. Meta analysis of the influence of middle and trace elements on tomato yield and quality [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34 (3): 66-71.
- [9] Gurevitch J, Hedges LV. Statistical issues in ecological meta-analyses [J]. *Ecology*, 1999, 80 (4): 1142-1149.
- [10] Van Kessel C, Venterea R, Six J, Adviento-Borbe MA, Linquist B, van Groenigen KJ. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis [J]. *Glob Chang Biol*, 2013, 19 (1): 33-44.
- [11] 朱盼盼, 石磊. 我国主要粮食作物施用锌肥增产效果的整合分析 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (6): 213-218.
Zhu PP, Shi L. Effects of application of zinc on the yield increase of main grain crops in China by Meta-analysis [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023 (6): 213-218.
- [12] 杨效家, 姚彬, 黄成东, 徐照丽, 邓小鹏, 马二登. 施用中微量元素肥料对烤烟产量与品质影响的整合分析 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51 (14): 116-123.
Yang XJ, Yao B, Huang CD, Xu ZL, Deng XP, Ma ED. Effect of medium and trace element fertilizer on yield and quality of flue-cured tobacco: a meta-analysis [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51 (14): 116-123.
- [13] 夏思瑶, 王冲, 王新宇. 施用有机肥对生菜产量和品质影响的 Meta 分析 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (6): 312-318.
Xia SY, Wang C, Wang XY. Meta analysis of organic fertilizer application on yield and quality of lettuce [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021 (6): 312-318.
- [14] Hedges LV, Gurevitch J, Curtis PS. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, 80 (4): 1150-1156.
- [15] Adams DC, Gurevitch J, Rosenberg MS. Resampling tests for meta-analysis of ecological data [J]. *Ecology*, 1997, 78 (4): 1277-1283.
- [16] Rosenberg MS, Adams DC, Gurevitch J. MetaWin: Statistical Software for Meta-Analysis, Version 2.0 [M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc., 2000: 48.
- [17] 石乔龙, 龙冬仙, 李华荣, 陈永辉, 张宏源. 2020 年花生增施中微量元素化肥效果研究 [J]. *现代农业科技*, 2021 (4): 5-6.
- [18] 张雷. 大豆施用镁、钼、锰肥的增产效果 [J]. *土壤肥料*, 2005 (6): 50-51.
Zhang L. Effect of application Mg, Mo and Mn on yield of soybean [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2005 (6): 50-51.
- [19] 刘鹏. 钼、硼对大豆产量、品质影响的营养生理机制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2000: 28-100.
- [20] 李春霞. 锰、铁和钼肥处理种子与叶面喷施对小麦生长与吸收的影响及其机制 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019: 21-83.
- [21] Carlim EL, Meert L, Reis B, Ercoli L. Fertilization with nickel and molybdenum in soybean: effect on agronomic characteristics and grain quality [J]. *Terra Latinoam*, 2019, 37 (3): 217-222.
- [22] 刘娜, 曲胜男, 王晓光, 谢畅, 高世杰, 等. 钙钼硼肥对花生光合特性及产量品质的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51 (1): 27-34.
Liu N, Qu SN, Wang XG, Xie C, Gao SJ, et al. Effect of Ca,

- Mo and B fertilizer combined application on photosynthetic characteristics, yield and kernel quality of peanut[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2020, 51 (1): 27-34.
- [23] 王书转. 长期施肥条件下土壤微量元素化学特性及有效性研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016: 18-119.
- [24] 王运华, 魏文学, 谭启玲, 杜应琼, 许松林. 湖北省黄棕壤冬小麦缺钼和施钼研究 [J]. 土壤肥料, 1995 (3): 24-28.
- [25] 张庆江, 张立言, 毕恒武. 普通小麦碳氮物质积累分配特征及与籽粒蛋白质的关系 [J]. 华北农学报, 1996, 11 (3): 57-62.
- Zhang QJ, Zhang LY, Bi HW. Accumulation and distribution of carbohydrate and nitrogen and their relationships to grain protein content in wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1996, 11 (3): 57-62.
- [26] 唐湘如, 官春云. 作物产量和品质的碳氮及脂肪代谢调控的研究进展 [J]. 湖南农业大学学报, 1997, 23 (1): 96-106.
- Tang XR, Guan CY. Current research status on the regulation of carbohydrate and protein and oil metabolism associated with the yield and quality of crops[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1997, 23 (1): 96-106.
- [27] 孔素娟, 卢乃涛. 钼酸铵在花生上的肥效试验总结 [J]. 河南农业, 2015 (13): 16.
- [28] 柳美玲. 硼钼微量元素对大豆品质和产量的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2009 (2): 65-66.
- Liu ML. Effect of B-Mo trace elements on soybean quality and yield[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009 (2): 65-66.
- [29] 赵玉梅. 玉米钼元素田间试验 [J]. 农业工程技术, 2022, 42 (5): 13.

(责任编辑: 李惠英)