



施用钼肥对大豆生长性状、产量和品质影响的 Meta 分析

张立强¹, 张景勇², 孙 宇¹, 贺斌斌¹, 张 伟², 陈 迪¹, 朴仁哲¹, 赵洪颜¹

(1. 延边大学 农学院, 吉林 延吉 133002; 2. 吉林省农业科学院 大豆研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要:为在已有研究进展的基础上整体分析施用钼肥对大豆生长性状、产量和品质的影响, 系统量化分析种植地区、气候特征、土壤特性、品种和施肥播种措施等影响因子对大豆产量和品质的影响程度, 从而为构建合理钼肥施用策略提供理论依据, 本研究收集并整理 1971—2021 年发表的钼肥施用种植大豆相关文献, 以 Meta 分析方法定量统计, 整体分析施用钼肥对大豆生长性状、产量因子和品质性状的影响, 系统分析不同区域、自然条件和田间管理措施下施用钼肥对大豆产量和品质的影响。结果表明: 本研究共收集到 98 篇文献, 6 612 组数据。与不施钼肥相比, 施用钼肥可显著增加大豆地上部干重 (17.9%)、叶面积指数 (15.52%)、茎粗 (13.77%)、叶绿素含量 (12.06%)、分枝数 (8.95%)、主茎节数 (1.35%)、根瘤数 (26.05%)、根干重 (23.37%)、根系活力 (19.54%)、侧根数 (9.22%)、单株荚数 (16.72%)、单株粒数 (13.21%)、百粒重 (3.83%)、产量 (16.99%) 和蛋白质含量 (7.25%)。华中、华北和西北地区施用钼肥对增加产量、蛋白质和脂肪含量效果最好, 分别增加 23.62%、10.37% 和 3.665%。钼肥拌种施用更有益于大豆产量的增加; 拌种和叶面喷施同时进行有助于大豆蛋白质和脂肪的积累; 施用钼肥配合穴播播种对大豆产量和蛋白质含量增加效果更好。大豆早熟品种配合砂质土, 降水量 800 ~ 1 500 mm、年平均温度 > 15 ℃、年日照时数 1 100 ~ 2 200 h 条件下更适合大豆增产。大豆晚熟品种配合黏质土土壤施用钼肥后高温、多雨和少日照条件下更有利于提高大豆蛋白质含量。低雨、低温、多日照更有助于大豆脂肪的积累。在我国大豆种植区施用钼肥, 尤其是在温度高、日照时数较少和降水量为 600 ~ 1 500 mm 的地区, 对于改善大豆的生长性状, 提高其产量和品质具有重要意义。

关键词:大豆; 钼肥; 性状; Meta 分析; 影响因子; 自然条件; 管理措施

Meta Analysis of Effects of Molybdenum Fertilizer on Soybean Growth Traits, Yield and Quality

ZHANG Li-qiang¹, ZHANG Jing-yong², SUN Yu¹, HE Bin-bin¹, ZHANG Wei², CHEN Di¹, PIAO Ren-zhe¹, ZHAO Hong-yan¹

(1. College of Agriculture, Yanbian University, Yanji 133002, China; 2. Soybean Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to clarify the effects of applying molybdenum fertilizer on soybean agronomic traits, yield factors and yield quality, construct a reasonable molybdenum fertilizer application strategy, and provide a theoretical basis for improving soybean yield and quality, we collected and sorted out papers published from 1971 to 2021 to quantitatively analyzed the differences in soybean agronomic traits and yield quality under different management measures, and quantified the climate characteristics by Meta-analysis method. We systematically analyzed the effects of molybdenum fertilizer application on factors such as yield and quality of soybean under different regions, natural conditions and field management measures. The results showed that a total of 98 articles and 6 612 groups of data were collected. Compared with no molybdenum fertilizer, the application of molybdenum fertilizer can significantly increase soybean shoot dry weight (17.9%), leaf area index (15.52%), stem diameter (13.77%), and chlorophyll content (12.06%), branches number (8.95%), main stem nodes number (1.35%), nodules number (26.05%), root dry weight (23.37%), root vitality (19.54%), lateral roots number (9.22%), pods number per plant (16.72%), seeds number per plant (13.21%), 100-seed weight (3.83%), yield (16.99%) and protein content (7.25%). Application of molybdenum fertilizer in Central China, North China and Northwest China had the best effects on yield, protein and fat content, respectively, which were 23.62%, 10.37% and 3.665% increment. The application of molybdenum fertilizer for seed dressing was more conducive to the increase of soybean yield, and the simultaneous application of seed dressing and foliar spraying can help the accumulation of soybean protein and fat content. Application of molybdenum fertilizer combined with hole sowing had a better effect on increasing soybean yield and protein content. Soybean early-maturing varieties combined with sandy soil, precipitation 800 ~ 1 500 mm, annual average temperature > 15 ℃, and annual sunshine hours 1 100 ~ 2 200 hours were more suitable for increasing soybean production. Late-maturing soybean varieties combined with clay soils after applying molybdenum fertilizer were more conducive to increasing the protein content of soybeans under the conditions of high temperature, more rain and less sunshine. Low rain,

收稿日期: 2021-10-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD1000905, 2016YFD0101502); 吉林省科技厅重点研发项目 (20200402040NC); 吉林省农业科学院创新基金 (KYJF2021JQ007)。

第一作者: 张立强 (1997—), 硕士研究生, 主要从事大豆栽培生理研究。E-mail: 2020010597@ybu.edu.cn。

通讯作者: 赵洪颜 (1980—), 博士, 副教授, 主要从事大豆栽培耕作与微生物分子生态研究。E-mail: zhy@ybu.edu.cn。

low temperature and more sunshine were more conducive to the accumulation of soybean fat content. The application of molybdenum fertilizer in soybean planting areas, especially in areas with high temperature, low sunshine hours and precipitation of 600–1 500 mm in China, is of great significance for improving the agronomic characteristics of soybeans and increasing its yield and quality.

Keywords: soybean; molybdenum fertilizer; traits; Meta-analysis; influential factor; natural conditions; management measures

在现代农业生产中,施肥仍然是作物增产的主要措施,但在大豆种植过程中,常出现仅重视氮、磷、钾肥的施用,却忽略了微量元素重要性的情况。钼是植物必需的营养元素,特别是大豆对钼的需求量是其他作物的 100 多倍^[1-2]。当土壤中有效钼含量为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下时,大豆便处于缺钼状态^[3]。施用钼肥能否改善大豆农艺性状,增加产量和品质,与田间管理和大豆生长环境有关^[4]。因此,研究合理施用钼肥对大豆生长发育的影响,及对产量和品质的提升作用,都具有重要科学意义。前人研究表明施用钼肥可以显著提高大豆产量和籽粒品质等。大豆在低钼条件下,植株矮小,叶片呈淡绿色,大豆根系体积大幅减小,根的干重、根长降低;总荚数、主茎节数减少,百粒重、单株粒数和粒重下降,严重时植株枯死^[5-11]。在缺钼土壤上施钼肥可以显著提高大豆产量^[12-14]。钼肥对大豆籽粒脂肪和蛋白质的积累也有一定的影响^[15-16]。通常施钼可提高大豆籽粒种蛋白氮和非蛋白氮的比值,但对于籽粒中的脂肪含量影响的研究结果不一致。这些研究为深入认识钼肥在促进大豆生长发育过程中的作用提供了有力支撑。但这些试验方法各不相同,相关结果一定程度上取决于特定的区域环境和土壤因子,而对于特定区域乃至全国范围的研究甚少。因此,尚缺少在区域尺度上施用钼肥对大豆产量和品质影响的系统报道。为整体认识施用钼肥对大豆产量和品质的影响程度,可基于这些相对独立的研究,收集关于施用钼肥条件对我国大豆生长性状、产量和品质的影响及其影响因素的文献,综合所有有关信息进行全面系统的分析。

Meta 分析(Meta-analysis)是一种对同类研究的多个研究结果进行整合分析,并获取一致性结论的统计方法^[17-18]。近年来,Meta 分析在我国农学领域的应用不断延伸,作为适合更大时间和空间范围的统计工具,正不断地发挥着独特而重要的作用,已经成为分析关键因素的潜在影响,及评价因素变化的有效方法^[19]。本研究基于 Meta 方法,分析 1971—2021 年已发表的相关文献数据,整体分析施用钼肥对大豆生长性状、产量因子和品质性状的影响;讨论在中国不同地区,不同温度、降水量和年日照时数等自然条件下,及不同品种、土壤类型、播种方式和钼肥施肥方式等管理措施下,施用钼肥对大豆产量和品质的作用效果。本研究旨在系统分析

钼肥对大豆的生长发育、产量以及籽粒品质的影响,揭示施用钼肥对大豆生长发育的影响机制,为大豆生产中合理施用钼肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 数据收集 在线检索中国知网(<https://www.cnki.net>)、万方(<https://www.wanfangdata.com.cn>)、维普(<http://qikan.cqvip.com>)和 Web of Science(<https://www.webofscience.com>)数据库,中文检索词包括微量元素、钼肥、大豆、黄豆、农艺性状、产量和品质等,英文检索词包括 trace elements、molybdenum fertilizer、soybean、agronomic characters、yield 和 quality 等,收集 1971—2021 年中国不同地区及不同条件下施用钼肥对大豆生长性状、产量和品质影响的相关论文。

1.1.2 数据纳入标准 为确保研究的准确性,本研究建立了一个数据库,并按以下标准筛选论文:(1)在中国进行田间试验;(2)以不施肥或常规施肥(氮磷钾施肥)做对照处理;(3)每一项试验数据具有均值或方差,至少 3 次重复,或有两年以上的数据;(4)确定种植地点、年份、施肥方式(拌种或叶面施肥);(5)剔除试验数据重复的文献;(6)忽略多处理的联合效应。

1.2 试验设计

根据文献确定对比观测的大豆性状,包括:地上部农艺性状(株高、茎粗、分枝数、主茎节数、地上部干重、叶面积指数和叶绿素含量);地下部农艺性状(主根长、根瘤数、根干重、侧根数和根系活力);产量相关性状(单株荚数、单株粒数、百粒重);产量;品质性状(蛋白质和脂肪含量)。

亚组分析:由于中国不同农业生产区的气候条件、耕作措施以及播种方式差异较大,且不同施肥方式、土壤类型等诸多因素均对大豆生长发育有一定影响。因此,本研究以多种方式对已有的数据进行分组,利用分亚组 Meta 分析方法检验某一特定因素对大豆生长性状、产量和品质的影响。具体分为:(1)东北、华北、华中、华东、西南和西北 6 个种植区域;(2)低(900~1 100 h)、中(1 100~2 200 h)、高(2 200~2 500 h)和极高(2 500~3 300 h)4 类年日照时数;(3)3 种年平均温度区间:<10℃、10~15℃和>15℃;(4)极低(400~600 mm)、低(600~

800 mm)、中(800 ~ 1 500 mm)和高(> 1 500 mm) 4类年平均降水量;(5)早熟(≤121 d)、中熟(121 ~ 131 d)和晚熟(≥131 d)3类熟期大豆品种;(6)根据美国农业部 1996 年国际土壤分类体系(International System of Soil Classification),将耕层土壤类型为砂壤土、黏质土和壤土;(7)穴播、条播和

点播3种播种方式;(8)钼肥拌种(MoB)、叶面喷施(MoY)、拌种和叶面同施(MoBY)与常规施肥等不同施肥方式;(9)大豆苗期、花期、结荚期和鼓粒期4个钼肥叶面喷施时期。本研究所有大豆种植区域的气候信息如表 1 所示,大田试验点分布如图 1 所示。

表 1 中国大豆种植区的气候资料
Table 1 The general climate data of soybean planting areas in China

地区 Region	平均气温 Average air temperature/℃	10℃以上有效积温 Effective accumulated temperature above 10℃/℃	年日照 Annual sunshine/h	年平均雨量 Average annual rainfall/mm
中国东北地区 Northeast China	-4 ~ 12	1600 ~ 3800	2200 ~ 2900	400 ~ 1000
中国华北地区 North China	6 ~ 15	3000 ~ 5000	2000 ~ 2800	400 ~ 1000
中国华东地区 East China	10 ~ 18	2000 ~ 8000	900 ~ 2500	500 ~ 1500
中国华中地区 Central China	18 ~ 24	6500 ~ 9500	1200 ~ 2500	1000 ~ 2500
中国西南地区 Southwest China	-4 ~ 20	4500 ~ 6000	1100 ~ 2500	800 ~ 1750
中国西北地区 Northwest China	-4 ~ 14	2500 ~ 5000	2000 ~ 3300	50 ~ 800

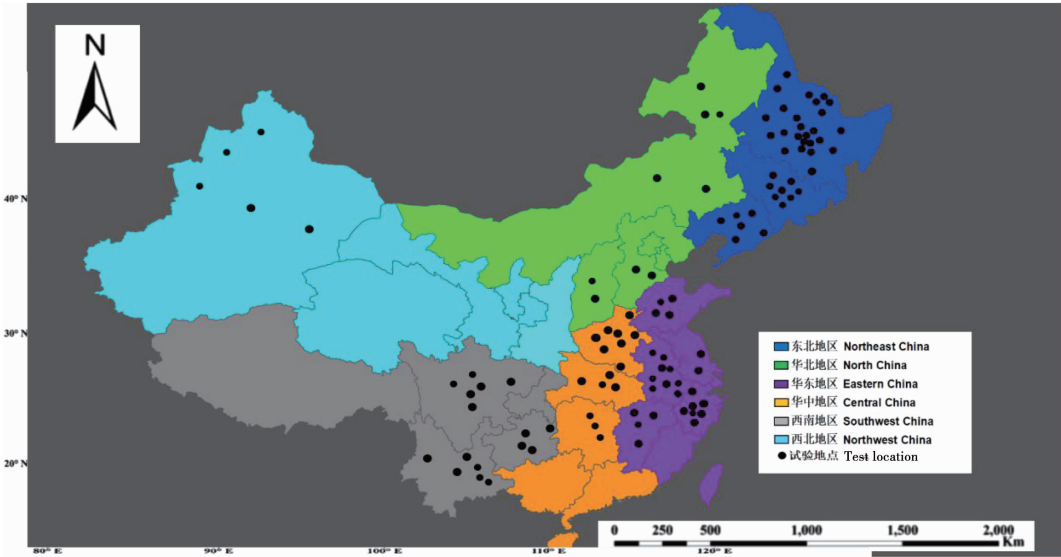


图 1 中国大豆种植的地理区域以及文献中田间试验的地点分布
Fig. 1 The geographical areas of soybean cultivation in China and the sites distribution of field trials included in the literature

1.3 方法

采用 MetaWin 2.1 软件进行 Meta 分析^[20],以响应比(R)的自然对数为效应值(lnR),通过公式 $R = \frac{X_t}{X_c}$ 和 $\ln R = \ln\left(\frac{X_t}{X_c}\right) = \ln X_t - \ln X_c$ 计算每一对数据的效应值^[21],式中, X_t 代表钼肥处理下大豆性状,以 Y 计; X_c 代表不施肥或常规施肥处理下的大豆性状。通过公式 $\omega = (n_t \times n_c)/(n_t + n_c)$ 计算各效应值对应权重,式中, ω 代表权重; n_t 代表钼肥处理下的试验重复次数; n_c 代表不施肥或常规施肥处理下

的试验重复次数。利用重抽样法计算效应值的 95% 置信区间,如果其不与 0 重合,那么则认为效应值显著^[22],即若置信区间全部>0,则说明施用钼肥显著促进大豆性状;若置信区间全部<0,则说明施用钼肥能够显著抑制大豆性状($P < 0.05$)^[23]。若置信区间包含 0,则说明施用钼肥对大豆性状无显著影响。为了便于描述,通过式 $E(\%) = [\exp(\ln R) - 1] \times 100\%$ 计算得到大豆性状的变化率,式中,E 代表施用钼肥条件相对于不施肥或常规施肥条件大豆相关效应值的变化率。

1.4 数据分析

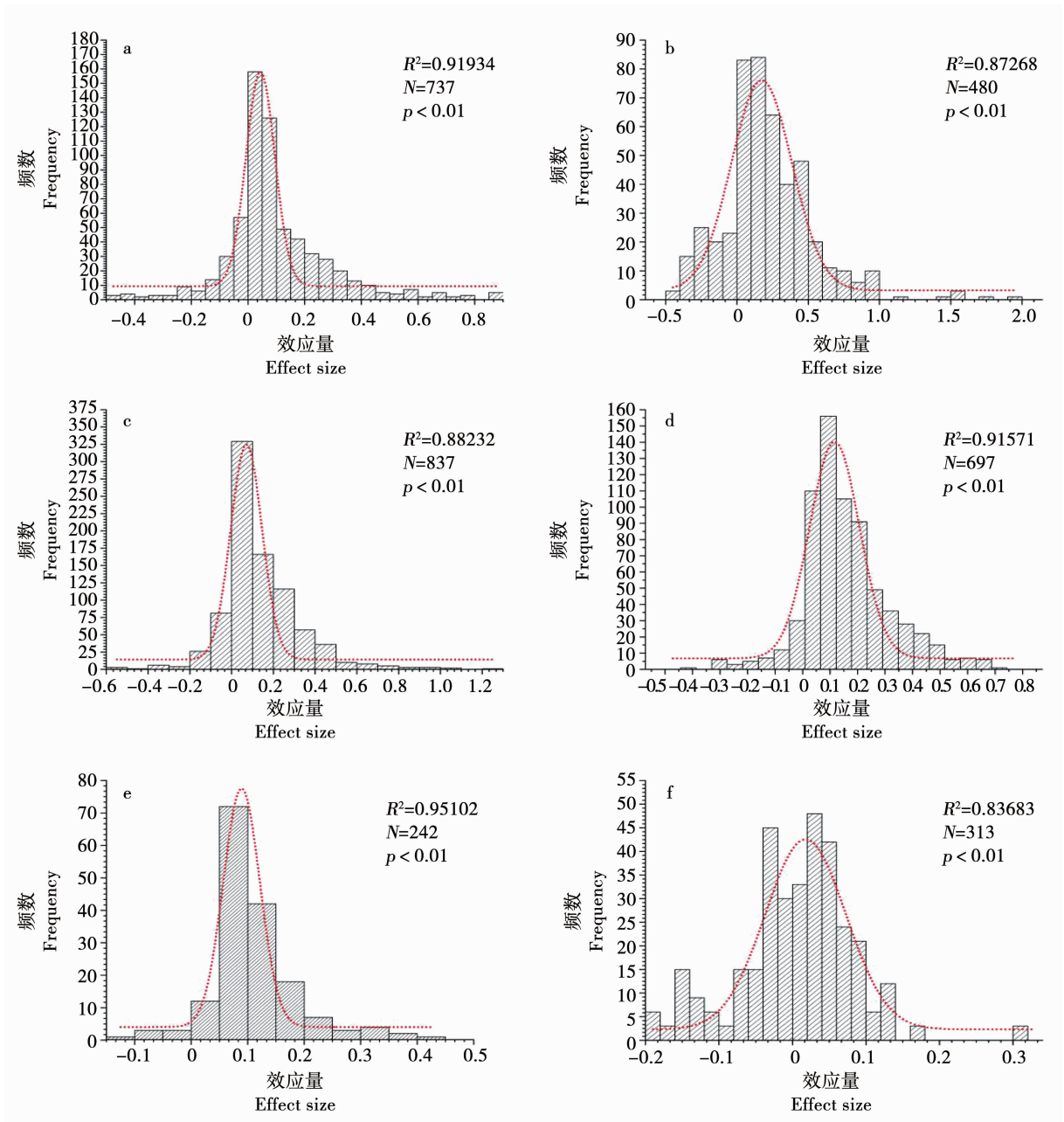
采用 GraphPad Prism 9.0 软件作图,利用 Origin v8.0 软件将 R 的频率拟合到高斯分布函数中,以检验观测数据的均匀性。

2 结果与分析

2.1 数据分组

共选取获得 98 篇基于钼施肥对大豆应用效果的研究论文,共 6 612 组数据。施用钼肥处理下的

农艺性状对比观测数据为 1 217 组,其中地上部农艺性状对比观测数据为 737 组,地下部农艺性状对比观测数据为 480 组;施用钼肥处理下的产量相关性状对比观测数据为 837 组,其中单株荚数对比观测数据为 272 组、单株粒数为 281 组、百粒重为 284 组;施用钼肥处理下的大豆产量和品质对比观测数据为 1 252 组,其中产量对比观测数据为 697 组、蛋白质含量为 242 组、脂肪含量为 313 组。所有对比观测数据的效应量的频率分布均呈正态分布(图 2)。

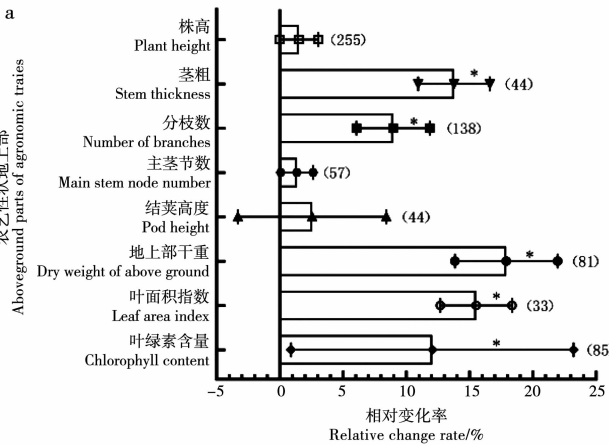


注:a. 地上部农艺性状;b. 地下部农艺性状;c. 产量相关性状;d. 产量;e. 蛋白质含量;f. 脂肪含量。
Note: a. Aboveground agronomic traits; b. Underground agronomic traits; c. Yield-related traits; d. Yield; e. Protein content; f. Fat content.

图 2 施用钼肥条件对大豆性状影响的效应量 R 的频率分布
Fig.2 The frequency distribution of effect quantity R on soybean traits under the condition of applying molybdenum fertilizer

2.2 施用钼肥对大豆性状的影响

2.2.1 对大豆农艺性状的影响 如图 3a 所示,与不施肥或常规施肥对比,施用钼肥显著增加大豆茎粗、分枝数、主茎节数、地上部干重、叶面积指数和叶绿素含量,但对大豆株高和结荚高度无显著影响。其中,对大豆地上部干重促进效应最显著,增加 17.9% ($P<0.05$,下同);叶面积指数、茎粗和叶绿素含量分别显著增加 15.52%、13.77% 和 12.06%;对分枝数和主茎节数促进效应较低,分枝数显著增加 8.95%,主茎节数仅增加 1.35%。



注:a. 地上部;b. 地下部。“0 线”表示无效线,误差线表示 95% 置信区间,“()”中的数字代表纳入的文献数目。误差线与无效线相交时无显著差异,“*”表示在($P<0.05$)水平上显著差异。下同。
Note:a. Above ground; b. Underground. The ‘0 line’ represents an invalid line, the error bar represents the 95% confidence interval, the numbers in ‘()’ represent the number of included papers. There is no significant difference when the error bar and the invalid line intersec, ‘*’ indicates a significant difference at the ($P<0.05$) level. The same below.

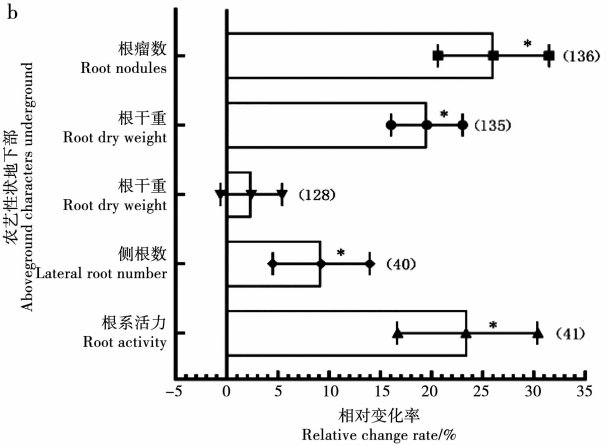
图 3 施用钼肥对大豆农艺性状的影响

Fig. 3 The effects of molybdenum fertilizer on agronomic characters of soybean

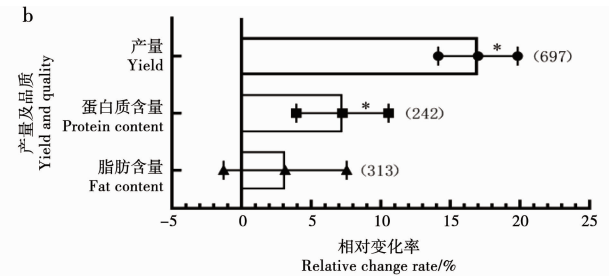
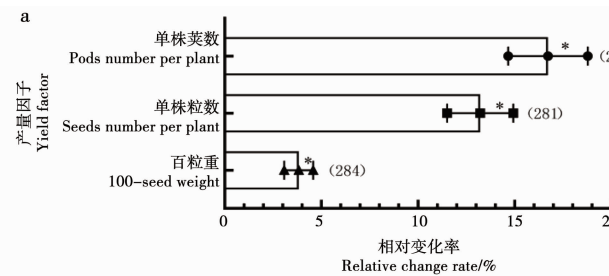
2.2.2 对大豆产量及其相关性状和品质的影响 如图 4 所示,与不施肥或常规施肥对比,施用钼肥可显著提高大豆单株荚数、单株粒数、百粒重、产量和蛋白质含量,但对大豆脂肪含量无显著影响。其中,对大豆产量促进效应最显著,增加 16.99%;单

如图 3b 所示,施用钼肥显著提高了大豆根瘤数、根干重、侧根数和根系活力,对大豆主根长的影响不明显。其中,对大豆根瘤数增加效应最显著,增加 26.05%;根干重和根系活力分别显著增加 23.37% 和 19.54%;在所有地下部指标中,对侧根数增加效应较低,侧根数仅增加 9.22%。

由此可见,施用钼肥可改善大豆农艺性状,对叶面积指数、茎粗、根系活力和根瘤数均有较好的增加效应,故施用钼肥能提高大豆光合作用、抗倒伏和固氮能力。



株荚数和单株粒数分别显著增加 16.72% 和 13.21%;对蛋白质含量和百粒重促进效应较小,蛋白质含量显著增加 7.25%,百粒重仅显著增加 3.83%,在所有产量因子和产量品质指标中增加效应最低。



注:a. 产量相关性状;b. 产量和品质。
Note:a. Yield-related traits; b. Yield and quality.

图 4 施用钼肥对大豆产量相关性状、产量和品质的影响

Fig. 4 The effects of molybdenum fertilizer on soybean yield-related traits, yield and quality

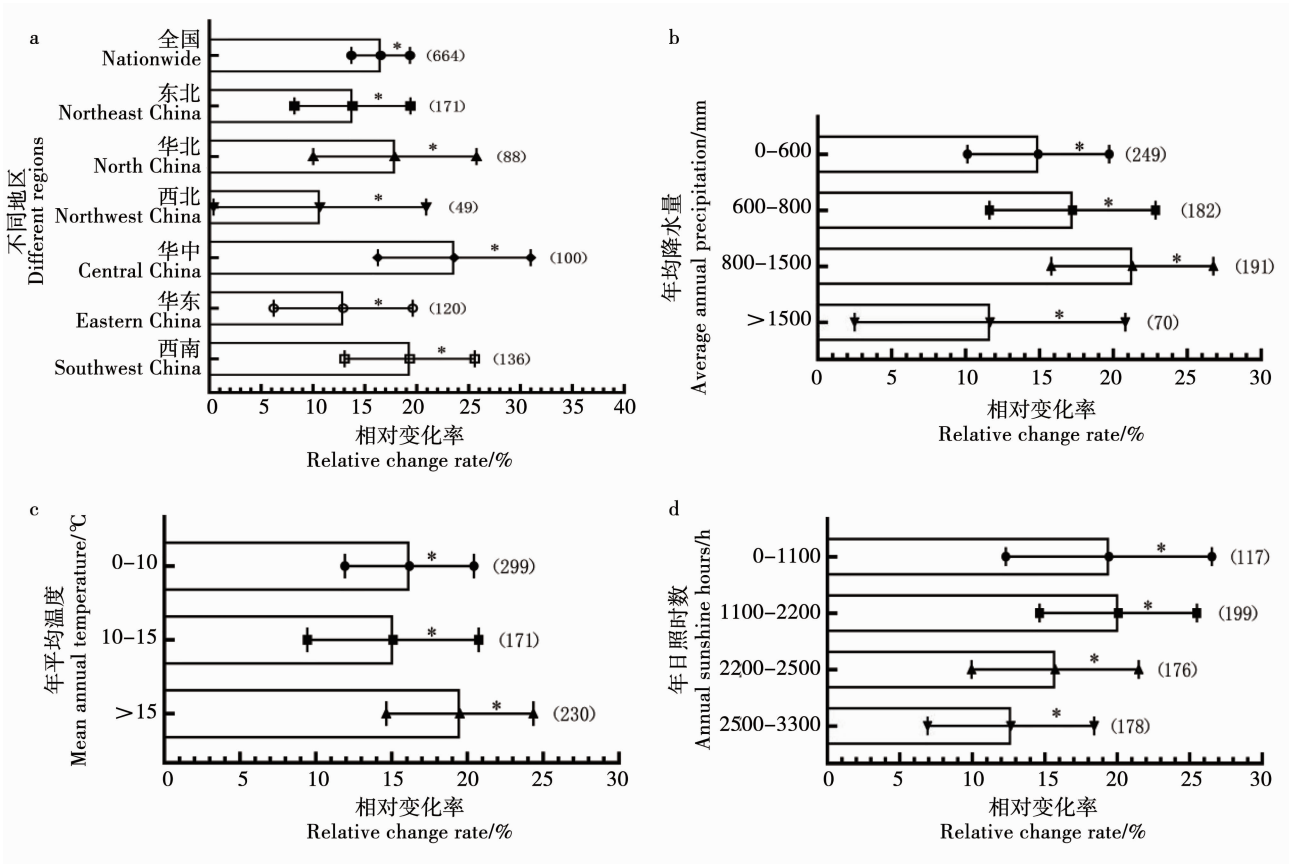
2.3 施用钼肥对不同种植区域和自然条件下大豆产量和品质的影响

2.3.1 对大豆产量的影响 如图 5a 所示,全国范围内,施用钼肥能使大豆产量显著增加 16.53%,不同地区施用钼肥都可促进大豆产量,但影响程度各不相同。在华中地区,施用钼肥对大豆产量的促进效应最显著,增加 23.62%;在西南和华北地区,分别显著增加 19.32% 和 17.89%,均高于全国平均水平;在东北、西北和华东 3 个地区,促进效应均低于全国平均水平,其中东北和华东地区分别显著增加 13.8% 和 12.91%;在西北地区,显著增加 10.66%,在所有地区中的促进效应最小。

随着年均降水量的增加,施用钼肥对大豆产量的影响效应总体呈先增大(降水量 < 1 500 mm)后减小(降水量 > 1 500 mm)趋势。在高降水量(>1 500 mm)条件下,大豆的产量提高 11.65%;在低降水量(< 600 mm)条件下,大豆的产量提高 11.65% ~ 14.92%。其中,800 ~ 1 500 mm 降水条件对大豆产量的促进效应最大,显著增加 21.29%,而

600 ~ 800 mm 降水条件下显著增加 17.24% (图 5b)。随着年平均温度的增加,施用钼肥对大豆产量的影响效应总体呈先减小(年平均温度 < 15 ℃)后增大(年平均温度 > 15 ℃)的趋势。在年平均温度 > 15 ℃ 条件下,其对大豆产量的促进效应最显著,提高 19.5%;年平均温度 > 0 ~ 10 ℃,显著提高 16.18%;年平均温度 10 ~ 15 ℃,显著提高 15.09%,增产效应最小(图 5c)。随着年日照时数的增加,施用钼肥对大豆产量的影响效应总体上呈先增大(年日照时数 < 2 200 h)后减小(年日照时数 > 2 200 h)趋势。在年日照时数 1 100 ~ 2 200 h 条件下,大豆产量提升最显著,提高 20.07%;年日照时数 0 ~ 1 100 h 和 2 200 ~ 2 500 h 条件下,大豆产量分别显著增加 19.42% 和 15.72%;年日照时数 2 500 ~ 3 300 h 条件下,大豆产量显著增加 12.66%,增加效应最小(图 5d)。

总体来看,在高温、适宜的降水量和日照时数条件下施用钼肥更有助于大豆增产。



注:a. 地区;b. 年均降水量;c. 年平均温度;d. 年日照时数。
Note: a. Region; b. Annual average precipitation; c. Annual average temperature; d. Annual sunshine hours.

图 5 不同地区和自然条件下施用钼肥对大豆产量的影响

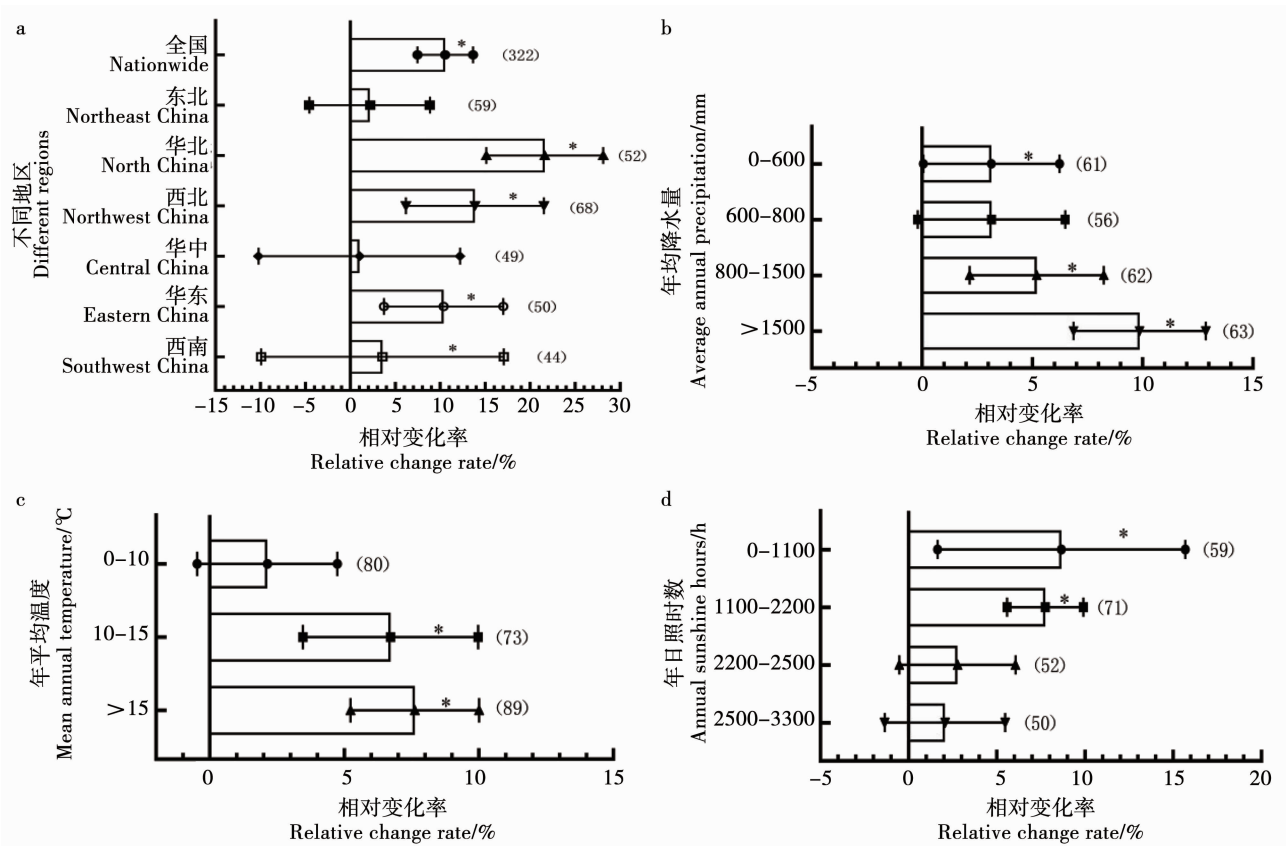
Fig. 5 The effects of molybdenum fertilizer application on soybean yield in different regions and natural conditions

2.3.2 对大豆蛋白质含量的影响 如图 6a 所示, 全国范围,施用钼肥能使大豆的蛋白质含量显著增加 10.55%;华北、西北和华中地区,施用钼肥能促进大豆蛋白质含量的增加;而东北、华中、西南地区,施用钼肥对大豆蛋白质含量无显著影响。在华北地区,施用钼肥对大豆蛋白质含量的促进效应最显著,增加 21.61%;在西北地区,显著增加 13.85%,高于全国平均水平;在华东地区,促进效应低于全国平均水平,使其显著增加 10.37%。

随着年均降水量的增加,施用钼肥对大豆蛋白质含量的促进效应呈现增大趋势,但在降水量为 600~800 mm 条件下无显著促进效应。在降水量为 0~600、800~1 500 和 >1 500 mm 条件下,施用钼

肥使大豆蛋白质含量分别提高 3.14%、5.2% 和 9.86% (图 6b)。随着年平均温度的增加,施用钼肥对大豆蛋白质含量的促进效应呈增大趋势,但在年平均温度为 0~10℃ 条件下无显著促进效应。在年平均温度为 10~15℃ 和 >15℃ 条件下,施用钼肥处理使大豆蛋白质含量分别提高 6.72% 和 7.62% (图 6c)。随着年日照时数的增加,施用钼肥对大豆蛋白质含量的促进效应呈减小趋势,但在年日照时数为 >2 200 h 条件下无显著促进效应,在年日照时数为 0~1 100 h 和 1 100~2 200 h 条件下,施用钼肥使大豆蛋白质含量分别提高 8.66% 和 7.75% (图 6d)。

总体来看,在高温、多雨、少日照的地区,施用钼肥更有益于大豆蛋白质含量的积累。



注:a. 地区;b. 年均降水量;c. 年平均温度;d. 年日照时数。
Note: a. Region; b. Annual average precipitation; c. Annual average temperature; d. Annual sunshine hours.

图 6 不同地区和自然条件下施用钼肥对大豆蛋白质含量的影响

Fig. 6 The effects of molybdenum fertilizer application on soybean protein content in different regions and natural conditions

2.3.3 对大豆脂肪含量的影响 如图 7a 所示, 全国范围,施用钼肥能使大豆脂肪含量显著降低 1.79%。在华东地区,施用钼肥对大豆脂肪含量的抑制效应最为显著,降低 5.29%;在华中地区,显著降低 3.195%;但在东北和西北地区,施用钼肥能促

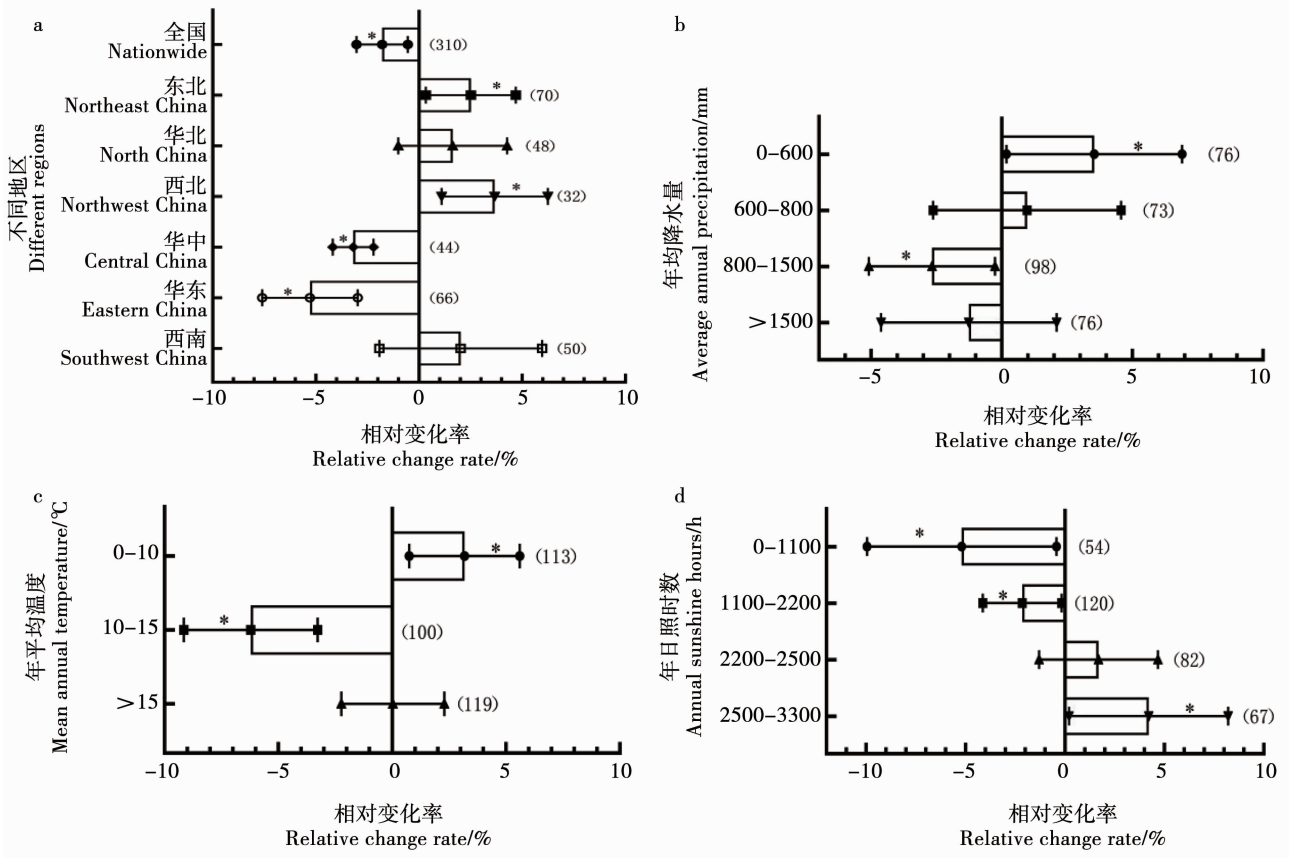
进大豆脂肪含量的增加,在西北地区的增加效应最为显著,增加 3.665%,在东北地区,显著增加 2.51%;而在华北和西南地区施用钼肥对大豆脂肪含量均无显著影响。

当年均降水量 <800 mm 时,施用钼肥对大豆脂

肪含量呈促进效应,当年均降水量 > 800 mm 时,施用钼肥对大豆脂肪含量呈抑制效应。年均降水量 0 ~ 600 mm 条件下,施用钼肥使大豆脂肪含量显著提高 3.54%;而在年均降水量 800 ~ 1 500 mm 条件下,施用钼肥使大豆脂肪含量显著降低 2.67%(图 7b)。随着年平均温度的增加,施用钼肥对大豆脂肪含量的作用从促进转为抑制,> 15 ℃ 时无显著影响。相对低温(0 ~ 10 ℃)条件下,施用钼肥使大豆脂肪显著含量提高 3.18%;而在相对高温 10 ~ 15 ℃ 条件下,使大豆脂肪含量显著降低 6.21%(图 7c)。

随着年日照时数的增加,施用钼肥对大豆脂肪含量的影响效应总体呈逐渐促进作用。年日照时数 2 500 ~ 3 300 h 条件下,施用钼肥使大豆脂肪含量显著增加 4.21%;而年日照时数 0 ~ 1 100 h 和 1 100 ~ 2 200 h 条件下,分别显著降低 5.195% 和 2.15%(图 7d)。

由此可以看出,自然条件下施用钼肥对大豆脂肪含量的影响与蛋白质含量的影响相反,低温、少雨、多日照地区施用钼肥可增加大豆脂肪含量,高温、多雨、少日照则会降低其含量。



注:a. 地区;b. 年均降水量;c. 年平均温度;d. 年日照时数。
Note:a. Region; b. Annual average precipitation; c. Annual average temperature; d. Annual sunshine hours.

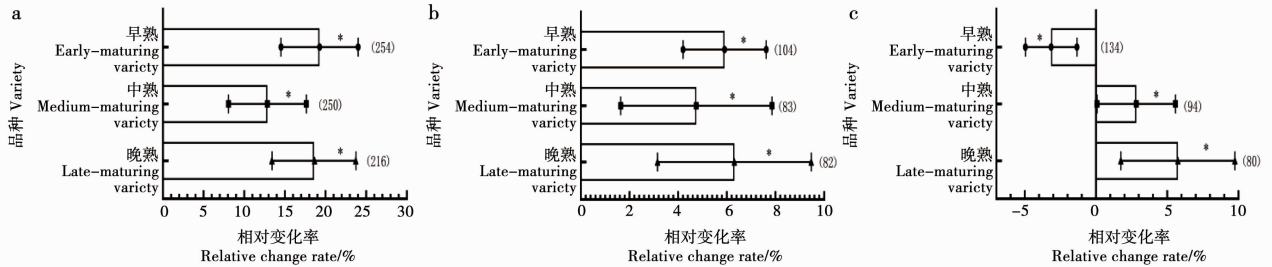
图 7 不同地区和自然条件下施用钼肥对大豆脂肪含量的影响

Fig. 7 The effects of molybdenum fertilizer application on soybean fat content in different regions and natural conditions

2.4 不同农田管理措施下施用钼肥对大豆产量和品质的影响

2.4.1 不同熟期品种 种植早熟大豆品种时,施用钼肥能使产量显著增加 19.27%,使蛋白质含量显著增加 5.91%,但会使脂肪含量显著降低 3.15%。种

植中熟大豆品种时,施用钼肥对产量、蛋白质含量和脂肪含量均有显著促进效应,分别增加 12.85%、4.75% 和 2.83%。种植晚熟大豆品种时,施用钼肥对产量、蛋白质含量和脂肪含量的促进效应最好,分别显著增加 18.65%、6.31% 和 5.75%(图 8)。

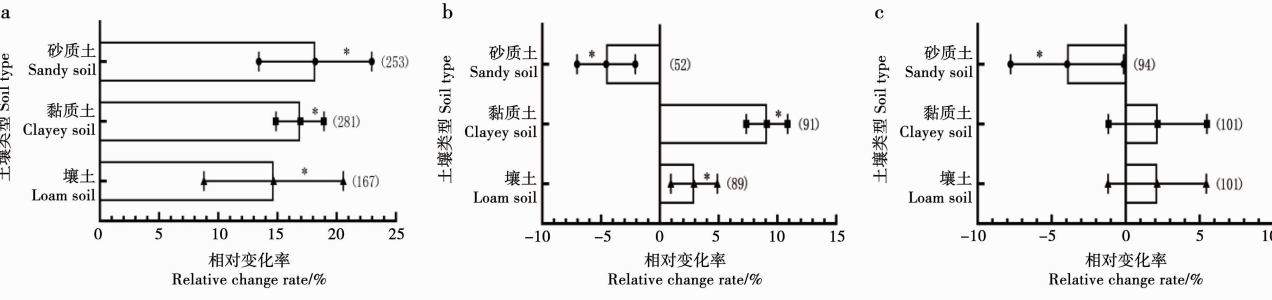


注:a. 产量;b. 蛋白质含量;c. 脂肪含量。
Note:a. Yield; b. Protein content; c. Fat content.

图8 种植不同熟期大豆品种时施用钼肥对产量、蛋白质含量和脂肪含量的影响
Fig.8 The effects of molybdenum fertilizer on yield, protein content and fat content of soybean varieties of different maturity

2.4.2 不同土壤类型 如图9所示,砂质土施用钼肥对大豆的增产作用最强,显著增加18.19%,壤土和黏质土施用钼肥分别使大豆显著增产14.67%和16.94%。砂质土施用钼肥使大豆蛋白质含量和脂

肪含量分别显著降低4.57%和3.95%,黏质土和壤土施用钼肥对大豆脂肪含量的影响不显著。黏质土和壤土施用钼肥分别使大豆蛋白质含量显著增加9.11%和2.91%。

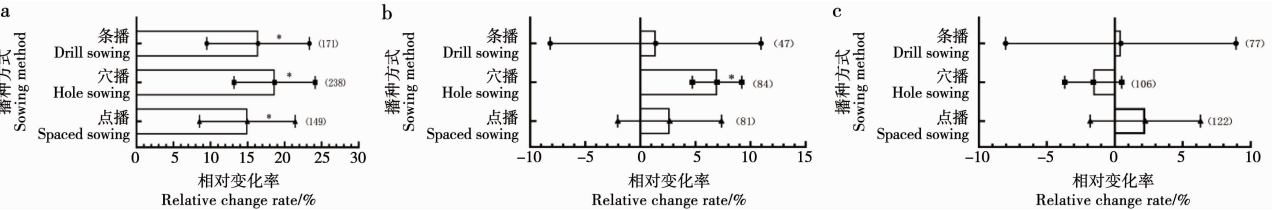


注:a. 产量;b. 蛋白质含量;c. 脂肪含量。
Note:a. Yield; b. Protein content; c. Fat content.

图9 不同土壤类型条件下施用钼肥对大豆产量、蛋白质含量和脂肪含量的影响
Fig.9 The effects of molybdenum fertilizer on soybean yield,protein content and fat content under the condition of different soil types

2.4.3 不同播种方式 如图10所示,穴播条件下施用钼肥对大豆产量和蛋白质含量的促进效果明显优于条播和点播,穴播能使大豆蛋白质含量显著增加6.96%。3种播种方式下施用钼肥对大豆

脂肪含量的影响效应均不显著。穴播条件下施用钼肥对大豆的增产效应最大,显著增产18.65%;条播次之,显著增产16.42%;点播最小,显著增产14.97%。



注:a. 产量;b. 蛋白质含量;c. 脂肪含量。
Note:a. Yield; b. Protein content; c. Fat content.

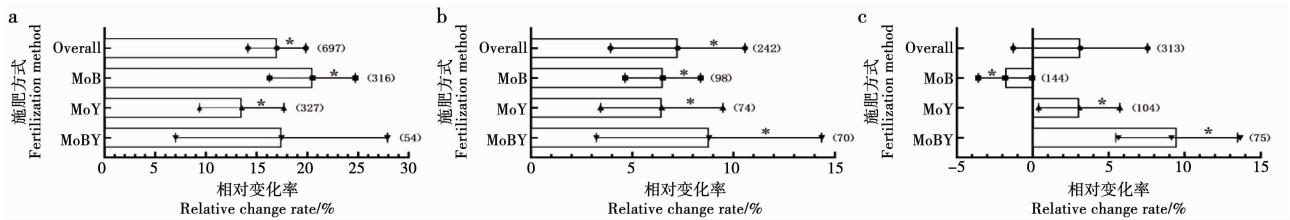
图10 不同播种方式下施用钼肥对大豆产量、蛋白质含量和脂肪含量的影响
Fig.10 The effects of molybdenum fertilizer on soybean yield, protein content and fat content under the condition of different sowing methods

2.4.4 不同钼肥施用方式 如图11所示,拌种(MoB)施肥方式下施用钼肥对大豆产量的促进效应最大,产量显著增加20.5%;叶面同施(MoBY)次

之,增加17.45%;叶面喷施(MoY)增产效应最小,显著增加13.53%。MoBY方式下施用钼肥对大豆蛋白质含量的促进效应最显著,增加8.79%,MoB

和 MoY 方式下的促进效应相近,分别显著增加 6.51% 和 6.46%。MoBY 方式下对大豆脂肪含量的增加效应最显著,增加 9.14%;MoY 方式下对大豆脂肪含量的促进效应次之,显著增加 3.06%。但 MoB 方式下对大豆脂肪含量具有抑制效应,显著减

少 1.82%。其中,MoY 方式下,不同生育期喷施增产效果由大到小的顺序为苗期 > 鼓粒期 > 结荚期 > 开花期,分别显著增产 16.43%、15.55%、12.77% 和 10.58% (图 12)。



注:a. 产量;b. 蛋白质含量;c. 脂肪含量。
Note: a. Yield; b. Protein content; c. Fat content.

图 11 不同施肥方式下施用钼肥对大豆产量、蛋白质含量和脂肪含量的影响
Fig. 11 The effects of molybdenum fertilizer on soybean yield, protein content and fat content under the condition of different fertilization methods

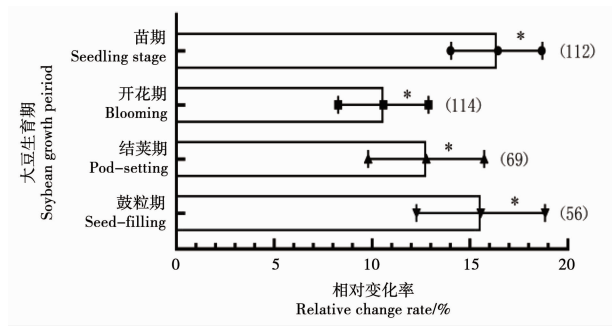


图 12 不同生育期叶面喷施钼肥对大豆产量的影响
Fig. 12 The effects of spraying molybdenum fertilizer in different growth periods on soybean yield

3 讨论

3.1 施用钼肥对大豆农艺性状和产量相关性状的影响

Chen 等^[24] 研究结果表明,钼肥能显著改善大豆地上部的农艺性状和产量因子。本研究结果进一步说明,施用钼肥比不施用或常规施肥大豆植株的茎粗、有效分枝数、叶面积指数、叶绿素含量、地上部干重、主茎节数、单株荚数、单株粒数和百粒重分别增加 13.77%、8.95%、15.52%、12.06%、17.9%、1.35%、16.72%、13.21% 和 3.83%。本研究分析结果进一步表明,施用钼肥后大豆根系活力、侧根数、根干重和根瘤数均显著增加,与对照相比分别提高 23.37%、26.05%、19.54% 和 9.22%。这主要是因为钼在植物体内具有重要的生理功能,施用钼肥可提升大豆叶片的叶绿素含量和光合作用强度^[25]。

3.2 不同自然环境下施用钼肥对大豆产量和品质的影响

本研究结果表明,年均降水量为 800 ~ 1 500 mm 时,施用钼肥对大豆的增产效应最显著;而年均降水量 > 1 500 mm 情况下施用钼肥的增产效应低于较干旱(降水量为 0 ~ 600 mm 时)的情况。施用钼肥对蛋白质含量的促进效应随年均降水量的增加而增大,脂肪含量的响应则相反,表现为随年均降水量的增加而降低,甚至年均降水量 > 800 mm 时,脂肪含量降低 2.67%。该结果进一步说明大豆生育期间高降水量对脂肪积累不利,但有助于蛋白质的积累。

在整个大豆生长期,大豆生长最适日平均气温为 20 ~ 25 ℃^[25]。本研究结果表明,施用钼肥后,年平均温度对大豆产量和品质的影响与年均降水量的影响规律相似。施用钼肥对大豆产量和蛋白质含量的促进效应与年平均温度呈正相关,均在 > 15 ℃ 时促进效应最显著,分别增加 19.5% 和 7.62%。这是由于在一定的温度范围内,温度越高,越有利于大豆生长和发育^[26]。施用钼肥对大豆脂肪含量的促进效应随温度的升高而减小,甚至在 10 ~ 15 ℃ 时显著降低 6.21%。这是因为高温易引起蛋白质的提高,而较低的温度和较大的温差有利于脂肪的形成^[27]。

光照直接影响大豆的产量和品质,光照时长可表示光量对作物光合作用的影响程度^[28]。本研究结果表明,施用钼肥后,大豆产量和蛋白质含量的增加情况与年日照时数呈负相关,均在 2 500 ~ 3 300 h 时增加效应最低。原因在于大豆为短日照作物,较长光照条件可导致其营养和生殖的不协调生长,直接影响籽粒品质。大豆脂肪含量的增加效

应随日照时数的升高而升高。这是由于脂肪的形成对光照强度较为敏感,在长日照条件下会延长大豆花期后各生长阶段,提高脂肪与亚油酸的比例^[29]。

3.3 不同播种和施肥方式下施用钼肥对大豆产量和品质的影响

适宜的播种方法对于争时抢种、争墒保苗具有十分现实的意义。本研究结果表明,穴播播种对大豆产量和蛋白质含量的促进效果最好,是由于穴播大豆出苗后株距适宜,植株分布均匀,通风透光条件良好,植株个体可充分利用地力和空间,获得相同的营养面积,提高土壤水分利用率,有利植株的生长发育。

钼肥拌种和不同时期喷施对大豆产量和品质田间试验研究结果表明,各施钼肥处理产量和蛋白质含量均高于对照处理,且增加效应显著,但籽粒脂肪含量增加不明显,因此,就籽粒品质而言,施用钼肥对蛋白质含量的影响程度大于对脂肪含量的影响^[30]。本研究结果中钼肥不同施用方法和播种方式使籽粒蛋白质含量有一定程度的增加,但钼肥不同施肥方式对大豆脂肪含量的影响不同,钼肥叶面喷施可提高籽粒中脂肪含量,而钼肥拌种施用则会降低,这正是我国关于钼对大豆籽粒中脂肪形成影响的研究中存在一定分歧的原因所在。

3.4 不同熟期大豆品种和土壤类型施下用钼肥对大豆产量和品质的影响

相对大豆中熟和晚熟品种,早熟品种施用钼肥后的增产更大,产量平均增加 19.27%,这可能与大豆早熟品种的单株生长量小,但是其经济系数大,单株生物产量积累快、单株荚重增长快、单荚重增长也快有关^[31-32]。但早熟品种脂肪含量显著降低 3.15%,可能是由于脂肪在合成积累过程中存在剧增时期,早熟品种各指标增长都比较迅速,以此推测剧增时期更加剧烈,因此施用钼肥对其脂肪含量的积累影响更大^[33]。使用钼肥后晚熟品种蛋白质和脂肪含量分别显著增加 6.31% 和 5.75%。所有品种中,中晚熟品种脂肪形成高峰最早,为花期后 33~36 d,以后多数品种稍有下降,少数品种下降后稍有回升^[34]。由此推测脂肪含量随生育期的延长而增加,晚熟品种脂肪含量增加效应更大。

当土壤类型为砂质土时,施用钼肥会使大豆籽粒中蛋白质和脂肪的含量降低,分别降低了 4.57% 和 3.95%,这可能是因为灌溉水和雨水易使砂质土中的养分流失,其热容量比黏质土小,白天增温快,夜间降温也快,所以昼夜温差较大,进而大豆中籽粒蛋白质和脂肪含量降低。大豆生长对土壤条件

的要求并不严格,但相对黏质土和壤土,砂质土对大豆的促产效果更加显著,使大豆产量平均增加 18.19%,虽然砂质土的保肥保水能力较弱,但其透气性和 pH 更适合大豆生长发育。

4 结论

施用钼肥对大豆农艺性状、产量因子、产量和品质均有显著促进效应。但其影响因素很多,总体来说,施用钼肥配合适宜的降水量(600~1 500 mm)、年平均温度(>15℃)和年日照时数(1 100~2 200 h),适当的大豆品种(晚熟品种)和土壤类型(黏质土),适合的播种方式(穴播)和施肥方式(MoBY)等条件,更有助于大豆产量和品质的增加,在大豆生产中可参考这些因素更加合理地施用钼肥,以提高其产量和品质。

参考文献

[1] 姜佰文. 不同水分条件下硼、钼对大豆作用机制的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006. (JIANG B W. Study on the mechanism of boron and molybdenum on soybean under different moisture conditions [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006.)

[2] BANERJEE P, DAS P, SINHAS. Importance of molybdenum for the production of pulse crops in India [J]. Journal of Plant Nutrition, 2021(1): 1-11.

[3] 魏向文, 温永煌, 翁善兰, 等. 江西土壤微量元素含量水平与微肥效应[J]. 土壤肥料, 1986(1): 23-27, 18. (WEI X W, WEN Y H, WENG S L, et al. Soil trace element content and micro fertilizer effect in Jiangxi [J]. Soil and Fertilizer, 1986(1): 23-27, 18.)

[4] MORGAN P B, AINSWORTH E A, LONGS P. How does elevated ozone impact soybean a meta-analysis of photosynthesis, growth and yield[J]. Plant Cell and Environment. 2003, 26(8): 1317-1328.

[5] MILANI G L, OLIVEIRA J A, DE MATOSP E, et al. Leaf application of molybdenum during soybean seed maturation [J]. Ciência e Agrotecnologia, 2010, 34(4): 810-816.

[6] GOLO A L, KAPPES C, CARVALHO M A C D, et al. Quality of soybean seeds produced with the application of different doses of molybdenum and cobalt [J]. Revista Brasileira de Sementes, 2009, 31(1): 40-49.

[7] MARCONDES J A P, CAIRES E F. Application of molybdenum and cobalt in seeds for soybean cultivation [J]. Bragantia, 2005, 64(4): 687-694.

[8] 刘鹏, 杨玉爱. 氮、磷、钾配施及其与钼、硼配施对大豆产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2003(2): 117-122. (LIU P, YANG Y A. The effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium and their combined application with molybdenum and boron on soybean yield [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2003(2): 117-122.)

[9] 范彦英, 赵继文, 刘素霞, 等. 硼、钼微肥配施对大豆产量及品质的影响[J]. 中国种业, 2003(10): 44. (FAN Y Y, ZHAO J

W, LIU S X, et al. Effects of combined application of boron and molybdenum micro-fertilizers on soybean yield and quality [J]. China Seed Industry, 2003(10): 44.)

[10] 刘鹏. 大豆钼、硼营养研究进展[J]. 中国农学通报, 2001(6): 41-44, 118. (LIU P. Research progress on soybean molybdenum and boron nutrition [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2001(6): 41-44, 118.)

[11] CARLIM E L, MEERT L, REISB, et al. Fertilization with nickel and molybdenum in soybean: Effect on agronomic characteristics and grain quality [J]. Terra Latinoamericana, 2019, 37 (3): 217-222.

[12] CARDOSO B M, LAZARINI E, MOREIRA A, et al. Effect of foliar molybdenum application on seed quality of soybean cultivars [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(6): 666-672.

[13] ERBIL E, UCAK A B, TAS T, et al. Effect of foliar application of iron (Fe) and molybdenum (Mo) on yield, protein and nodulation in soybean under agro climatic conditions of sanliurfa [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2020, 29 (4A): 3033-3039.

[14] LEMES E S, DEUNER C, BORGES CT, et al. Foliar application of nutrients and seed treatment: Effect on the yield and physiological quality of soybeans [J]. Revista de Ciências Agrárias, 2017, 40(1): 205-212.

[15] 杨光鹏. 钼、硼微量元素在大豆生产上应用效果[J]. 现代化农业, 2017(10): 25-26. (YANG G P. Application effect of molybdenum and boron trace elements in soybean production[J]. Modern Agriculture, 2017(10): 25-26.)

[16] GELAIN E, JUNIOR E J R, MERCANTE F M, et al. Biological nitrogen fixation and leaf nutrient concentration on soybean as a function of molybdenum and gypsum levels [J]. Ciência e Agrotecnologia, 2011, 35(2): 259-269.

[17] 刘鹏, 杨玉爱. 钼、硼对大豆品质的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(2): 184-189. (LIU P, YANG Y A. The effect of molybdenum and boron on soybean quality [J]. Chinese Agricultural Sciences, 2003, 36(2): 184-189.)

[18] VAN KESSEL C, VENTEREA R, SIX J, et al. Climate, duration and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2013, 19 (1): 33-44.

[19] GUREVITCH J, HEDGES L V. Statistical issues in ecological Meta-analyses[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1142-1149.

[20] PHILIBERT A, LOYCE C, MAKOWSKI D. Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 148: 72-78.

[21] ROSENBERG M S, ADAMS D C, GUREVITCH J. Meta Win; Statistical Softwure for Meta-Analysis[M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc. , 2000.

[22] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80 (4): 1150-1156.

[23] CURTIS P S, WANG X A. Meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form. and physiology [J]. Oecologia, 1998, 113(3): 299-313.

[24] CHEN L Z, YE J Q, WANGE R X, et al. Effect of combined application of boron and molybdenum microelement fertilizer on cowpea yield and quality[J]. Asian Agricultural Research, 2016, 8(10): 90–92.

[25] LI Y Z, TIAN D, FENG G, et al. Climate change and cover crop effects on water use efficiency of a corn-soybean rotation system[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255 (C). http://citesc.repec.org/rss/eeecagwatv_255_y_2021_i_c_s0378377421003073.xml. DOI: 10.1016/j. agwat.2021.107042.

[26] 李殿祥, 永傲强, 刘志军. 温度对大豆生育的影响[J]. 中国科技信息, 2006(22): 71, 44. (LI D X, YONG A Q, LIU Z J. The influence of temperature on soybean growth [J]. China Science and Technology Information, 2006(22): 71, 44.)

[27] 顾晓琴. 环境条件对大豆品质的影响[J]. 民营科技, 2012 (12): 108. (GU X Q. The influence of environmental conditions on soybean quantity [J]. Private Science and Technology, 2012 (12): 108.)

[28] 张贤发, 马宏斌. 光照对大豆产量的影响分析[J]. 农村实用科技信息, 2007(5): 7. (ZHANG X F, MA H B. Analysis of the influence of light on soybean yield [J]. Rural Practical Science and Technology Information, 2007(5): 7.)

[29] 胡国华, 宁海龙, 王寒冬, 等. 光照强度对大豆产量及品质的影响 I, 生育期光照强度变化对大豆脂肪和蛋白质含量的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2004, 26 (2): 86-88. (HU G H, NING H L, WANG H D, et al. The effect of light intensity on soybean yield and quality I, the effect of light intensity changes during growth period on soybean fat and protein content [J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2004, 26(2): 86-88.)

[30] OLIVEIRA C O E, LAZARINI E, TARSITANO M A A, et al. Cost and profitability of producing molybdenum-enriched soybean seeds[J]. Tropical Agricultural Research, 2015, 45(1): 82-88.

[31] 段素梅, 黄义德, 杨安中, 等. 钼酸铵拌种和喷施对大豆产量、品质和籽粒钼含量的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(2): 181-184, 189. (DUAN S M, HUANG Y D, YANG A Z, et al. Effects of ammonium molybdenum dressing and spraying on soybean yield, quality and grain molybdenum content [J]. Soybean Science, 2007, 26(2): 181-184, 189.)

[32] 刘鹏, 杨玉爱. 钼、硼对大豆光合效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 456-461. (LIU P, YANG Y A. Effects of molybdenum and boron on photosynthetic efficiency of soybean [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2003, 9(4): 456-461.)

[33] 付春旭. 早熟大豆品种产量与主要农艺性状的灰色关联度分析[J]. 黑龙江农业科学, 2013, 32(9): 1-4. (FU C X. Grey correlation analysis between the yield of early maturing soybean varieties and main agronomic traits [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2013, 32(9): 1-4.)

[34] 刘中奇, 李志刚, 谭巍巍. 不同大豆品种籽粒体积、含水量、脂肪和蛋白质积累动态分析[J]. 大豆科学, 2007, 26(2): 194-196. (LIU Z Q, LI Z G, TAN W W. Dynamic analysis of grain volume, water content, fat and protein accumulation of different soybean varieties [J]. Soybean Science, 2007, 26(2): 194-196.)