

我国油菜、大豆和烤烟硼肥增产提质的整合分析

王嘉琳¹, 张世柏², 王涛², 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, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北茂盛生物有限公司, 湖北 随州 441300)

摘要: 硼是作物必需的微量营养元素, 但近 20 年来我国油菜、大豆和烤烟等作物施用硼肥的增产及品质提高效果并不清楚。通过收集 172 篇文献, 基于 Meta 分析研究了上述作物硼肥施用的增产及品质提高效果。结果表明: 油菜、大豆和烤烟施用硼肥平均增产 14.26%, 其中油菜施肥增产效果显著高于烤烟和大豆。大豆、烤烟和油菜硼砂推荐用量分别为 10 ~ 15、20 ~ 30 和 0 ~ 10 kg/hm², 硼肥的增产效果为华东地区油菜好于烤烟和大豆, 华中地区油菜好于烤烟。大豆、烤烟和油菜硼肥增产幅度随着年代发生变化, 2000 年以来大豆和烤烟施用硼肥增产率呈逐渐降低的趋势, 油菜施用硼肥增产率呈逐渐增高的趋势。施用硼肥显著提高了油菜含油量并降低了蛋白质含量, 但对大豆蛋白质和脂肪含量无显著影响; 增加了烤烟烟碱和还原糖含量, 但对钾氯比无显著影响。华南地区油菜籽含油量, 华中地区大豆蛋白质和脂肪含量显著增加, 华中地区烤烟还原糖含量和华南地区钾氯比增加效果最好。此外, 2000 年之后油菜含油量呈增高趋势, 其他作物品质因子呈下降趋势。综上, 施用硼肥能显著提高我国作物的产量和部分品质因子, 但其增产和品质提高效果受作物种类、施用量、施用时期、施用地区等因素的影响。因此, 在农业生产中应考虑种植地区、作物种类、土壤类型及有效硼含量等因素制定相应的硼肥施用方案, 为我国作物增产和品质提高提供保障。

关键词: 油菜; 大豆; 烤烟; 硼肥; 施用量; 增产率; 品质; Meta 分析

在现代农业生产中, 施肥仍是提高作物产量和改善品质的主要途径。在种植过程中, 不仅要重视大量元素肥料的施用, 更应关注微量元素在作物增产和品质提升中的功能。硼是植物必需的微量营养元素, 是细胞壁的组分并对细胞壁结构的稳定起到重要作用; 参与作物体内糖的合成与运输, 促进细胞生长分裂及生殖器官的发育, 进而对作物的生长代谢起着重要作用, 对于作物产量的提高和品质的改善有重要作用。硼营养丰缺显著影响植物对硼的吸收、运输和分配, 缺硼抑制作物营养生长, 尤其是生长点——根尖和茎尖的生长^[1-2]。研究表明, 我国土壤硼含量自北向南、自西向东逐渐降低。成土母质、土壤类型和气候条件等因素影响土壤硼含量, 沉积岩发育的土壤比火山岩含硼量高, 干旱地区比湿润地区高, 沿海比内陆高, 盐土比非盐土

高^[1]。除石灰岩土外, 南方土壤硼含量低于平均硼含量, 北方土壤高于或接近平均硼含量^[3]。硼肥的施用效果不仅与土壤中该元素的有效含量有关, 也受作物种类、种植地区、施用量、施用年代等因素的影响。由于不同年代土壤肥力、气候、产量水平、作物品种、农艺措施差异较大, 硼肥施用的增产效果不同^[4]。因此, 探究不同年代、不同地区硼肥不同施肥量对我国作物产量和品质指标的影响具有重要的意义。

研究表明, 施用硼肥油菜株高、分枝部位、主花序长度、有效角果数、角果长度、角果粒数、千粒重和单株产量均明显高于对照^[5-6]。油菜缺硼抑制地上部生长点生长, 严重缺硼会使顶芽死亡, 出现花而不实的症状^[1]。硼还能显著增加大豆产量和油脂含量^[7], 烤烟适量增施硼肥能明显改善烟株的生长发育, 平衡烟叶化学成分^[8-9]。因此, 开展硼肥对我国作物产量和品质提高潜力的研究, 有利于在提高硼肥利用效率的同时, 明确其对品质因子的影响, 为我国农业可持续生产提供理论依据。

整合 (Meta) 分析方法通过对同类试验数据进行收集、分析、归纳, 从而形成新的结论, 能够

收稿日期: 2024-02-19; 录用日期: 2024-05-19

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2023YFD1901004, 2023YFD1700204)。

作者简介: 王嘉琳 (2001-), 硕士研究生, 主要从事微量元素养分管理研究。E-mail: wangjialin@webmail.hzau.edu.cn。

通讯作者: 石磊, E-mail: leish@mail.hzau.edu.cn。

更加全面地反映各研究之间的共性和普及性^[10-12]。Meta 分析作为适宜在大时间和空间范围的统计工具,在我国农学领域中广泛应用,是评价因素变化的有效方法^[2, 13-14]。石如岳等^[11]运用 Meta 分析方法探究中微量元素对番茄产量和品质影响,结果显示施用中微量元素能够显著提高番茄果实单果质量和产量,且微量元素效果优于中量元素。目前,Meta 分析逐渐应用于农学专业领域,韩天富等^[15]基于 Meta 分析方法探究中国水稻产量对施肥的响应特征,结果表明与不施肥相比,施肥显著提高水稻产量。但是目前国内外没有关于硼肥对作物产量增产和品质提高效应方面的 Meta 分析报道。因此,本文利用 Meta 分析方法,研究了 2000 年至 2021 年发表的文献中硼肥施用对我国大豆、烤烟和油菜产量和品质的影响,明确了不同作物种类、施用量、年代和地区硼肥施用效果的差异,旨在为我国作物生产和品质提升提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集

以“硼肥”+“油菜”/“大豆”/“烤烟”+“产量”/“品质”及其英文为关键词,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 日至 2022 年 1 月 1 日期间发表的中国不同地区施用硼肥对不同作物产量和品质影响的田间试验论文,并进行对比。

本研究建立了一个数据库,设置以下筛选条件对检索到的文献进行筛选以获得 Meta 分析要求的数据:(1) 试验地点在中国进行;(2) 各试验应有试验组和对照组,以不施肥或常规施肥(施用氮、磷和钾)做对照处理;(3) 所涉及文献中的试验必须为大田试验,盆栽及营养液培养等试验结果应去除;(4) 试验中的施硼量必须明确记录;(5) 各试验成熟期籽粒产量、品质指标必须明确记录;(6) 各试验重复次数不应低于 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 126 篇硼肥对作物产量影响的符合要求的文献,整理得到数据 410 组;46 篇硼肥对作物品质影响的符合要求的文献,整理数据 168 组。

1.2 数据分析

在 Excel 2019 中建立关于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 (lnR) 作为效应值:

$$R = X_i / X_c;$$

$$\ln R = \ln (X_i / X_c) = \ln X_i - \ln X_c;$$

式中, X_i 是试验组的农作物产量和品质指标的均值, X_c 是对照组农作物产量和品质指标的均值^[16]。因为二次筛选后的研究大多没有试验数据的标准误差或标准差,故本文采用无权分析,利用重复抽样技术计算效应值^[11]。采用 SPSS 26.0 进行 bootstrap 计算,抽样频率为 5000 次,得到平均效应值和上下限,利用 Origin 2018 制作森林图^[17-19]。如果在 95% 的置信区间内不包括 0,则效应值是显著的;如果分类变量之间 95% 的置信区间不重叠,则分类变量之间的差异是显著的^[10]。

为更直观地观察硼对作物增产率及品质提高效率的影响效果,文中各指标的提高幅度 (Z) 计算公式为^[20]:

$$Z = (R - 1) \times 100\%;$$

若所收集文献中提供的作物产量和品质数据是以图的形式进行展示,则通过 Origin 2018 中的 digitizer 功能进行图形数值化。

1.3 数据分类

采用 Excel 2019 对符合标准的文献建立相关数据库,为探究不同因素对施用硼肥后我国作物的增产及品质提高效应的影响情况,根据从文献中所提取的数据,按照作物种类、地区、施用量以及施用年份来进行分类,分类结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 作物产量影响因素分类概况

影响因素	分类
作物种类	油菜、大豆、烤烟
施用量 (B, kg/hm ²)	油菜: ≤ 1、1 ~ 2、2 ~ 3、>3 大豆: ≤ 0.5、1 ~ 1.5、1.5 ~ 2、>2 烤烟: ≤ 0.5、0.5 ~ 1、1 ~ 1.5、1.5 ~ 2、2 ~ 3、3 ~ 4、>4
试验地区	东北、华北、华东、华南、华中、西北、西南
试验年份	2000-01-01 至 2011-01-01、2011-01-01 至 2022-01-01

表 2 作物品质影响因素分类概况

影响因素	分类
作物种类	油菜、大豆、烤烟
品质指标	油菜: 含油量、蛋白质 大豆: 蛋白质、脂肪 烤烟: 烟碱、还原糖、钾氯比
试验地区	东北、华北、华东、华南、华中、西北、西南
试验年份	2000-01-01 至 2011-01-01、2011-01-01 至 2022-01-01

数据收录了东北、华北、华东、华南、华中、西北、西南 7 个区域内的试验数据,按照中国地理区域划分,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、台湾地区,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,东北地区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省,西南地区包括四川省、重庆市、云南省、贵州省、西藏自治区,西北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^[20]。

2 结果与分析

2.1 施用硼肥对不同作物增产效果的影响

2.1.1 施用硼肥对大豆、烤烟和油菜产量的影响

施硼肥对大豆、烤烟和油菜 3 种作物的增产影响呈显著正效应,提高幅度分别为 9.92%、7.67% 和 25.18% (图 1)。油菜施肥增产效果显著高于烤烟和大豆。

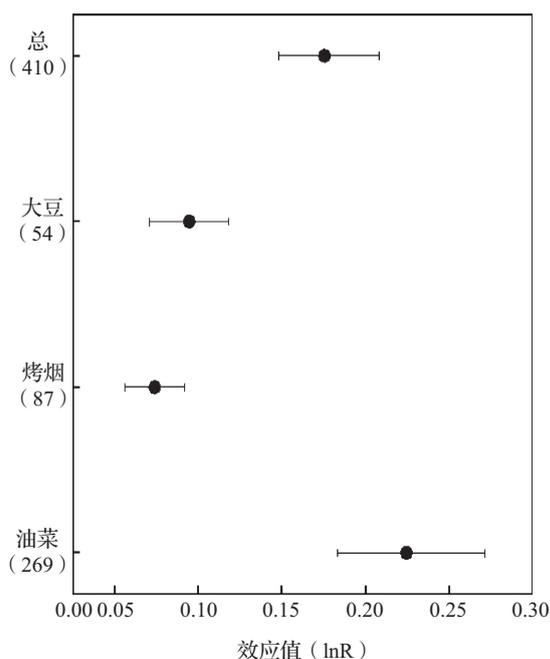


图 1 硼肥施用对大豆、烤烟和油菜增产效果的影响

注:“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。

2.1.2 不同地区施用硼肥对大豆、烤烟和油菜产量的影响

大豆施用硼肥在华中地区增产率最高,为 22.88%;其次是华北和华东地区,增产率分别

为 11.05% 和 9.14%;各地区间增产率差异不显著 (图 2)。烤烟施用硼肥,不同地区增产效果不同,其中华东地区的增产效果显著且增产率最高,为 16.47%;其次为西南、华中和华南地区,增产率分别为 8.39%、4.55% 和 4.16%;华中和华南地区的增产效果较差;东北地区硼肥无显著效果。此外,华东地区硼肥的增产效果显著高于华南地区 (图 2)。油菜施用硼肥不同地区增产效果不同,其中华南地区增产率最高,为 64.63%;西北地区的增产效果最差,增产率为 13.88%;华北地区无显著增产效果。华北地区增产率显著低于除西北地区以外的其他地区 (图 2)。总体上,华东地区施用硼肥烤烟增产率高于大豆,油菜显著高于烤烟 (135.69%) 和大豆 (324.71%);华中地区施用硼肥增产效果,油菜显著高于烤烟 (371.34%) (图 2)。

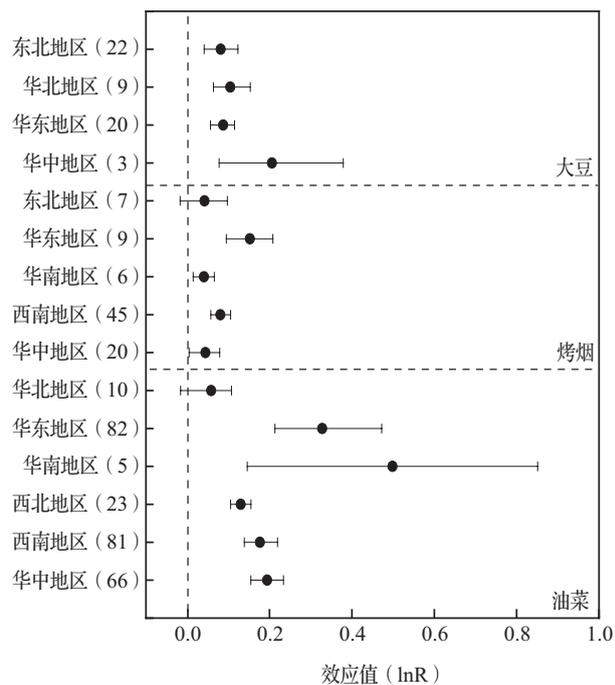


图 2 不同地区施用硼肥对不同作物增产效果的影响

2.1.3 硼肥不同施用量对大豆、烤烟和油菜产量的影响

大豆不同硼肥施用量增产效果不同,纯硼用量 1 ~ 1.5 kg/hm² 时增产率最高 (17.72%), 超过 1.5 kg/hm² 时增产率随施肥量增加而下降, 0.5 ~ 1 kg/hm² 和 >2 kg/hm² 时施肥效果不显著 (图 3)。烤烟不同硼肥施用量增产效果也不同,纯硼用量 0 ~ 0.5 kg/hm² 时无显著增产效果, 0.5 ~ 3 kg/hm² 时增产率随施肥量增加而增加, 2 ~ 3 kg/hm² 增产效果最佳

(17.22%)，超过 3 kg/hm² 增产率降低 (图 3)。油菜不同硼肥施用量均有显著增产效果，其中施用量 0 ~ 1 kg/hm² 时增产率最高 (26.11%)，>3 kg/hm² 时增产率最低 (20.84%) (图 3)。总体上，纯硼施用量 0 ~ 0.5 kg/hm² 时大豆增产效果显著高于烤烟，0.5 ~ 1 kg/hm² 时烤烟增产效果显著高于大豆。

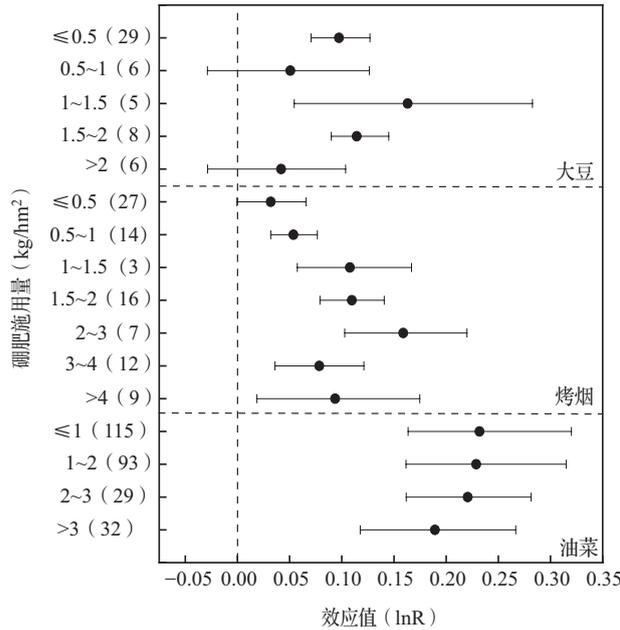


图 3 硼肥用量对不同作物增产效果的影响

2.1.4 不同年代施用硼肥对大豆、烤烟和油菜产量的影响

不同年代施用硼肥增产效果不同。施用硼肥，大豆 2000—2011 年增产率为 12.24%，2011—2022 年为 7.81%，增产率下降；烤烟 2000—2011 年增产率 7.73%，2011—2022 年增产率为 7.57%，增产率无显著变化；油菜 2000—2011 年增产率为 15.49%，2011—2022 年增产率为 31.01%，增产率升高 (图 4)。2000—2011 年期间 3 类作物的增产效果表现为油菜施硼增产效果显著高于烤烟。2011—2022 年期间 3 类作物的增产效果表现为油菜施硼增产效果显著高于大豆和烤烟 (图 4)。

2.2 施用硼肥对不同作物品质提高的影响

2.2.1 施用硼肥对大豆、烤烟和油菜品质的影响

施用硼肥对不同作物品质指标的影响不同 (图 5)。油菜施用硼肥后，含油量显著增加 7.51%，蛋白质显著降低 2.76%；大豆施用硼肥后蛋白质和脂肪含量无显著变化；烤烟施用硼肥后，烟碱和还

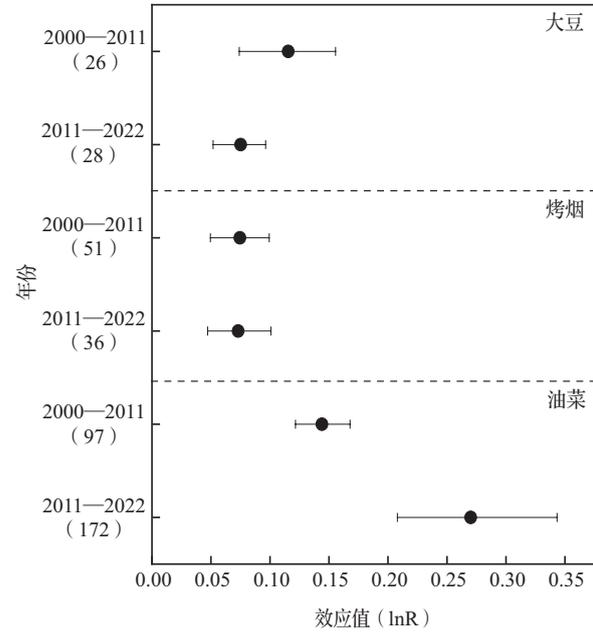


图 4 不同年代施用硼肥对不同作物增产效果的影响

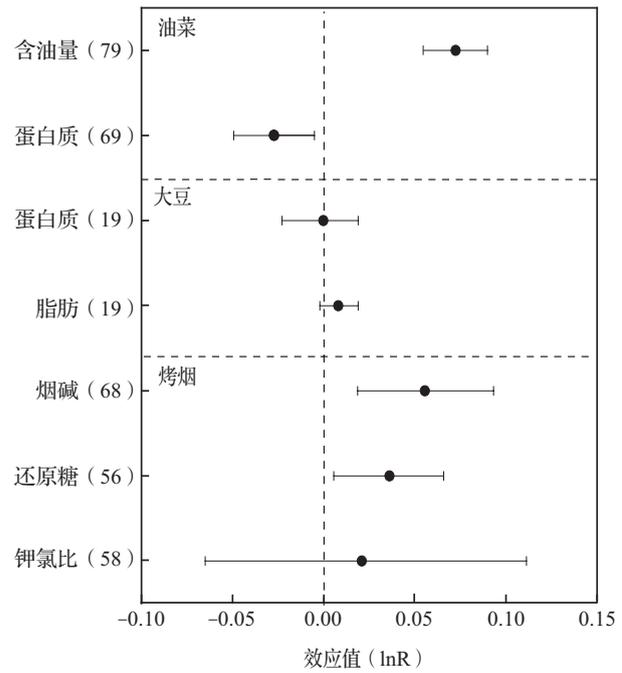


图 5 施用硼肥对大豆、烤烟和油菜品质的影响

原糖含量显著增加，分别提高 5.71% 和 3.68%，但钾氯比无显著变化。

2.2.2 不同地区施用硼肥对大豆、烤烟和油菜品质的影响

不同地区施用硼肥对油菜品质指标的影响不同 (图 6)。油菜施用硼肥后，华南地区油菜籽含油量增加最多，提高 19.79%；华东地区油菜籽含油量的增加最少，为 2.6%。油菜施用硼肥后，华北

地区油菜籽蛋白质含量增加 5.22%，华南地区油菜籽蛋白质含量降低 13.33%，西南地区油菜籽蛋白质含量无显著变化（图 6）。大豆施用硼肥后，华中地区蛋白质和脂肪含量显著增加，分别提高 3.31% 和 3.16%；东北地区蛋白质和脂肪含量无显著变化（图 7）。烤烟施用硼肥后，东北地区烟碱显著降低（降低 4.08%），西南地区烟碱含量增加 8.58%，但华南地区烟碱含量无显著变化；东北、华东和华中地区烤烟还原糖含量显著增加，其中华中地区增加最多（提高 13.38%）；华南和西南地区烤烟还原糖无显著变化（图 8）。施用硼肥后，东北和华东地区钾氯比显著降低，其中华东地区钾氯比降低 2.37%；华南地区钾氯比提高 106.74%；西南和华中地区无显著变化（图 8）。

2.2.3 硼肥不同施用量对大豆、烤烟和油菜品质的影响

硼肥不同施用量对作物品质指标的影响不同（图 9）。油菜施用硼肥含油量显著提高，其中施肥量 0 ~ 1 kg/hm² 时增加最高，为 10.03%；2 ~ 3 kg/hm² 增加效果最差，为 3.47%（图 9）。油菜施用硼肥后，施肥量 0 ~ 1 kg/hm² 时籽粒蛋白质含量显著降低，降低幅度为 3.47%；其他施肥量籽粒蛋白质含量无显著变化（图 9）。大豆施用硼肥后，施肥量 0 ~ 0.5

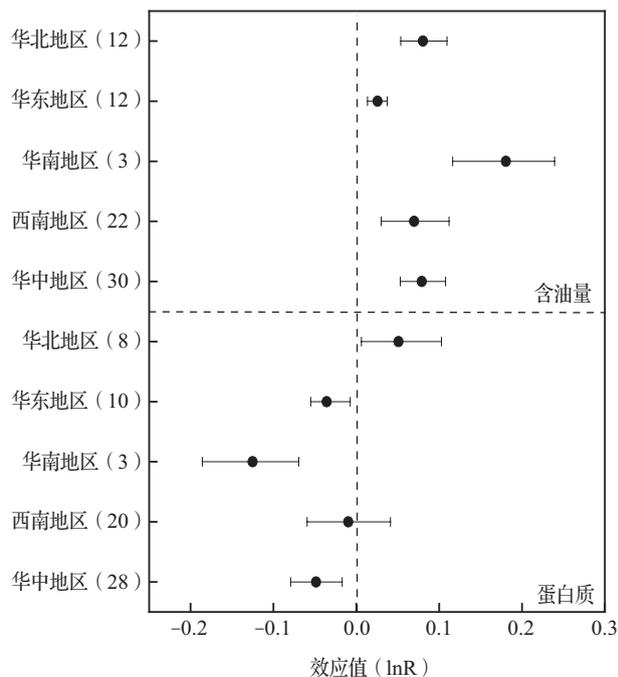


图 6 不同地区施用硼肥对油菜品质的影响

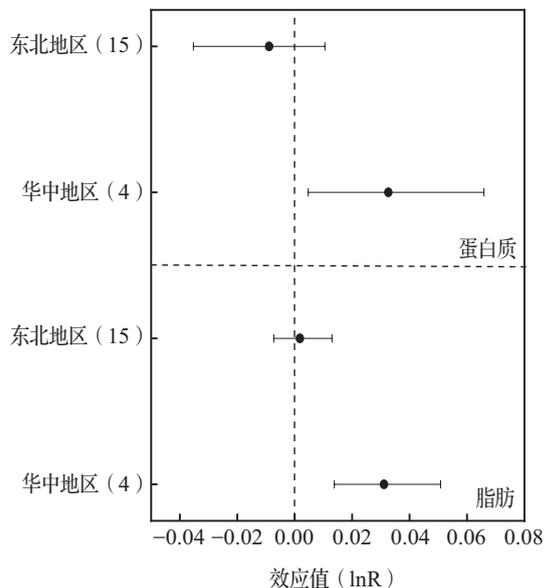


图 7 不同地区施用硼肥对大豆品质的影响

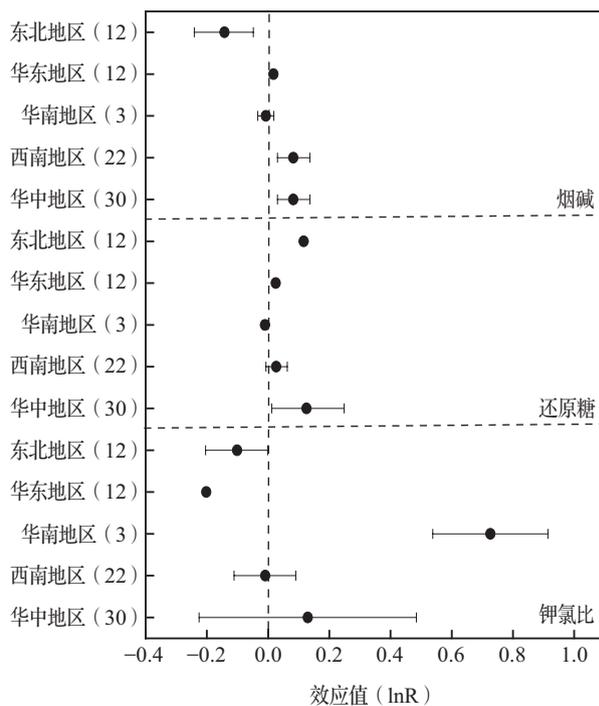


图 8 不同地区施用硼肥对烤烟品质的影响

kg/hm² 时籽粒蛋白质含量显著增加，增加幅度为 1.73%；施肥量 >0.5 kg/hm² 大豆蛋白质含量无显著变化（图 10）。施用硼肥对于大豆脂肪含量无显著影响（图 10）。烤烟施用硼肥后，施肥量 0.5 ~ 1 kg/hm² 和 1 ~ 2 kg/hm² 时烟碱含量显著增加，其中 0.5 ~ 1 kg/hm² 时增加 10.8%；施肥量 >3 kg/hm² 时，烤烟

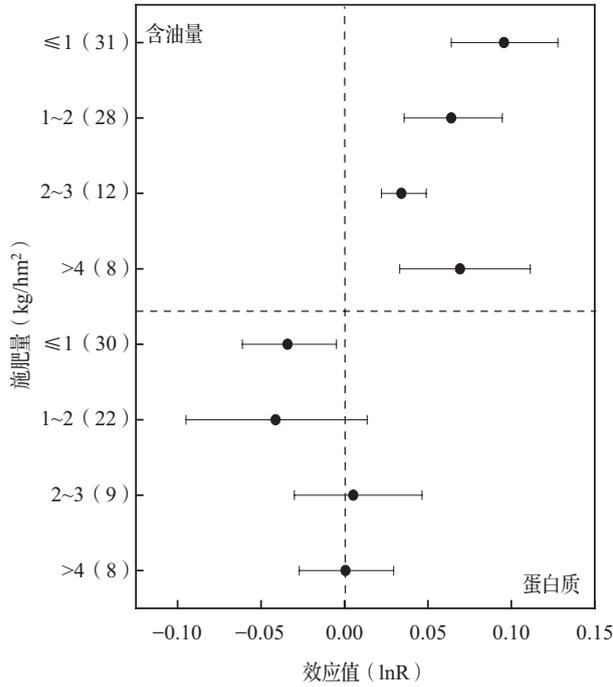


图9 硼肥用量对油菜品质的影响

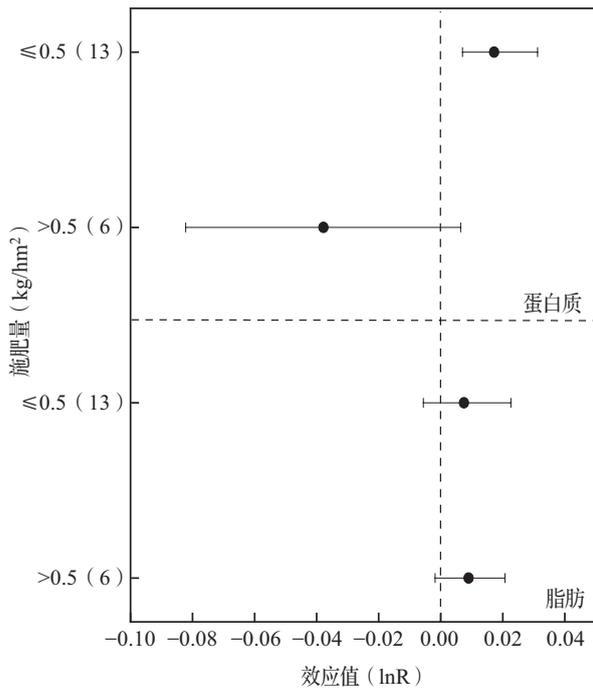


图10 硼肥用量对大豆品质的影响

还原糖含量增加 12.67% (图 11)。不同硼肥施用量对于烤烟钾氯比无显著影响 (图 11)。

2.2.4 不同年代施用硼肥对大豆、烤烟和油菜品质的影响

不同年代施用硼肥对作物的品质指标影响不同 (图 12)。油菜施用硼肥后, 2000—2011 年含油量提

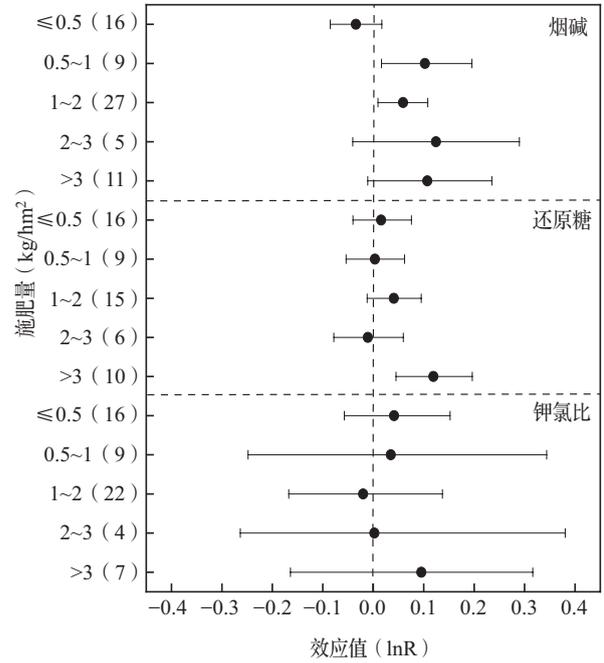


图11 硼肥用量对烤烟品质的影响

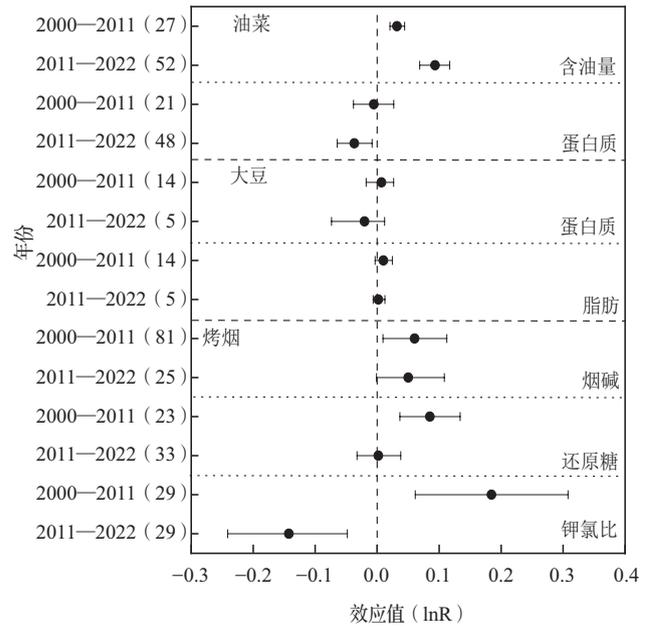


图12 不同年代施用硼肥对不同作物品质的影响

高了 9.79%, 2011—2022 年含油量提高了 37.71%; 2000—2011 年蛋白质含量无显著变化, 2011—2022 年显著降低 (降低 3.75%) (图 12)。大豆施用硼肥后, 2000—2011 和 2011—2022 年蛋白质和脂肪含量均无显著变化。烤烟施用硼肥后, 2000—2011 年烟碱、还原糖和钾氯比显著提高, 分别为 6.24%、8.88% 和 20.25%; 2011—2022 年烟碱、还原糖含量无显著变化, 钾氯比降低 15.32% (图 12)。

3 讨论

本研究施硼对作物产量影响的 Meta 分析结果与前人单个的研究结果基本相符。其中,施用硼肥油菜的增产效果显著高于烤烟和大豆,大豆增产效果好于烤烟,这可能与油菜需硼较多、烤烟需硼中等、大豆需硼较少有关^[21-22]。本研究 Meta 分析结果显示,不同作物施用硼肥对品质指标的影响不同(图 5)。油菜施用硼肥后,籽粒含油量显著增加,蛋白质含量显著降低,这与王运华等^[1]研究得到的缺硼导致油菜籽粒含油量降低结果一致。施用硼肥显著提高烤烟烟碱和还原糖含量,但对钾氯比无显著影响,对烤烟吸评质量起到积极作用,这与高家合等^[23]研究得到的烤烟的评吸质量与烟碱、钾氯比为正相关关系结果相符。本研究结果显示,大豆施用硼肥对蛋白质和脂肪含量无显著影响,这是因为生态因子变化对大豆品质的影响要大于施肥的影响^[24]。

作物的施肥效果与土壤中该元素含量息息相关^[25]。本研究 Meta 分析结果显示,大豆施用硼肥在华中地区的增产率最高,所收集文献华中地区的土壤有效硼含量平均值为 0.105 mg/kg,在所有地区中有效硼含量为最低。研究表明,中性或弱碱性、含盐量较高且阳离子较活跃的土壤环境有利于硼的富集^[26]。华中地区土壤偏酸性且淋溶较强,土壤硼有效性较低,故大豆需要的施硼量较高。烤烟施用硼肥在华东地区的增产率最高,所收集文献华东地区的土壤有效硼含量平均值为 0.32 mg/kg。油菜施用硼肥在华南地区的增产率最高,所收集文献华南地区的土壤有效硼含量平均值为 0.3 mg/kg,在所有地区中含量为最低,这表明土壤含硼量较低时施肥增产效果越好(图 2)。我国东南部土壤酸性,降水量多,土壤中硼元素极易发生淋洗,导致土壤有效硼不足^[27]。

有机或无机肥料的利用率以及它们对作物生长的影响,除了受土壤该元素含量和作物种类等因素影响外,还受到不同年份的影响^[28]。不同年份的气候条件如气温、光照、降水等要素不同,施肥效果不同^[29-30]。本研究 Meta 分析结果显示,2000 年以来,大豆和烤烟施用硼肥增产率呈随年代增加而降低的趋势,油菜施用硼肥增产率随年代增加呈增高的趋势(图 4);不同年代施用硼肥对作物的品质指标影响不同(图 12)。油菜施用硼肥对含油量和蛋白质影响效果呈随年份增加而降低趋势,大豆

施用硼肥对蛋白质和脂肪含量无显著影响,烤烟施用硼肥对烟碱、还原糖和钾氯比呈随年份增加而降低的趋势(图 12)。原因可能为硼砂基施的利用率低,前一年的硼肥施用量多导致土壤含硼量增加,影响下一年硼肥的施用效果。

硼肥对作物的增产和品质提高效果受硼肥施用量的影响。研究表明,油菜对硼较敏感,适宜的硼范围较小,硼肥施用量以 9 kg/hm² 为宜^[6]。大豆和烤烟硼肥用量分别为 7.5 和 30 kg/hm² 左右效果较好^[31-32]。本研究 Meta 分析结果显示,大豆、烤烟和油菜增产率随着硼肥施用量的增加而增加,当施用量达到一定程度时,增产率随硼肥施用量的增加而减少;大豆、烤烟和油菜纯硼的合适施用量分别为 1 ~ 1.5、2 ~ 3 和 0 ~ 1 kg/hm² (图 3),转换为 10% 硼砂的施用量分别为 10 ~ 15、20 ~ 30、0 ~ 10 kg/hm²,与前人研究结果基本相符。对于品质指标,本研究 Meta 分析结果显示,油菜含油量、大豆蛋白质和烤烟烟碱纯硼施用量分别为 0 ~ 1、0 ~ 0.5 和 0.5 ~ 1 kg/hm² 时效果最佳(图 9)。因此,在农业生产中要根据土壤和作物类型确定硼肥的合理用量。

4 结论

施用硼肥能显著提高我国油菜、大豆和烤烟的产量,其中油菜的增产效果优于烤烟和大豆。华东和华南地区的油菜、华中地区的大豆应多施硼肥,大豆、烤烟和油菜硼砂推荐用量分别为 10 ~ 15、20 ~ 30 和 0 ~ 10 kg/hm²。施用硼肥能显著提高油菜种子含油量,并降低蛋白质含量;提高烤烟烟碱和还原糖含量。在不同地区,需要根据土壤有效硼含量选择合适的硼肥施用量,结合生产要求关注品质指标,以提高肥料利用效率,为我国农业生产提供新的施肥依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Gurevitch J, Hedges L V. Statistical issues in ecological Meta-analyses [J]. Ecology, 1999, 80 (4): 1142-1149.
- [3] 刘铮,朱其清,唐丽华. 土壤中硼的含量和分布的规律性[J]. 土壤学报, 1989, 26 (4): 353-361.
- [4] 王子腾,耿元波. 国内外主要粮食作物对施用钾肥响应的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (3): 805-816.

- [5] 方彦, 孙万仓, 武军艳. 叶面喷施硼肥对西北旱寒区冬油菜保护酶、产量及经济性状的影响 [J]. 草业科学, 2012, 29 (9): 1446-1450.
- [6] 耿国涛, 陆志峰, 卢涌, 等. 红壤地区直播油菜施硼对籽粒产量和品质的影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 928-936.
- [7] 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.
- [8] 陈雨峰, 叶晓青, 周国荣, 等. 增施锰、硼微肥对烤烟农艺性状及产质量的影响 [J]. 广东农业科学, 2013, 40 (14): 75-77.
- [9] 陈相君. 硼肥对烤烟上部叶生长及品质的影响 [D]. 成都: 四川农业大学, 2022.
- [10] Curtis P S, Wang X Z. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology [J]. *Oecologia*, 1998, 113 (3): 299-313.
- [11] 石如岳, 王冲, 杨俊雪, 等. 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.
- [12] 金玉文, 芦远闯, 许华森, 等. Meta 分析养分管理措施对菜田土壤硝酸盐累积淋溶阻控效应 [J]. 农业工程学报, 2022, 38 (3): 103-111.
- [13] Kessel C V, 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*, 2012, 19 (1): 33-44.
- [14] 周燕, 孙洋洋, 胡志伟, 等. 氮肥对棉花产量和氮素吸收量影响的 Meta 分析 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (3): 317-325.
- [15] 韩天富, 马常宝, 黄晶, 等. 基于 Meta 分析中国水稻产量对施肥的响应特征 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (11): 1918-1929.
- [16] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, 80 (4): 1150-1156.
- [17] Adams D, Gurevitch J, Rosenberg M S. Resampling tests for meta-analysis of ecological data [J]. *Ecology*, 1997, 78 (4): 1277-1283.
- [18] Gurevitch J, Hedges L V. Statistical issues in ecological meta-analyses [J]. *Ecology*, 1999, 80 (4): 1142-1149.
- [19] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. *Metawin: statistical software for meta-analysis, version 2.0* [M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc, 1999.
- [20] 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.
- [21] 黄明玉. 夏大豆施硼的增产效果及施用技术 [J]. 江苏农业科学, 1987 (11): 20-21.
- [22] 陈相君. 硼肥对烤烟上部叶生长及品质的影响 [D]. 成都: 四川农业大学, 2022.
- [23] 高家合, 秦西云, 谭仲夏. 烟叶主要化学成分对评吸质量的影响 [J]. 山地农业生物学报, 2004, 23 (6): 497-501.
- [24] 辛秀君, 于凤瑶, 周顺启. 不同微肥拌种对高油大豆产量和品质的影响 [J]. 辽宁农业科学, 2003 (4): 15-16.
- [25] 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 (教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [26] 陈谦, 王昌, 马桂龙. 硼肥在作物生长中的作用及其施用技术 [J]. 新疆农垦科技, 2004 (3): 31-32.
- [27] 郑卓越, 梁逸铭, 陈晓东. 不同硼肥对华南地区番茄的产量和品质的影响 [C] // 中国园艺学会 2019 年学术年会暨成立 90 周年纪念大会论文摘要集. 北京: 中国园艺学会, 2019: 153.
- [28] 郭李萍, 王兴仁, 张福锁, 等. 不同年份施肥对作物增产效应及肥料利用率的影响 [J]. 中国农业气象, 1999 (4): 21-24.
- [29] Challinor A J, Watson J, Lobell D B. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4 (4): 287-291.
- [30] Cui D J, Yao Y X. Effect of fertilization on the impact of weather changes on crop yield [J]. *Pedosphere*, 1996, 6 (4): 379-382.
- [31] 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.
- [32] 梁兵, 黄坤, 李宏光, 等. 不同硼肥供给方式及水平对烤烟生长发育及产质量的影响 [J]. 西南农业学报, 2017, 30 (6): 1414-1420.

Effects of application of boron fertilizers on the yield increase and quality improvement of rapeseed, soybean and flue-cured tobacco in China by Meta-analysis

WANG Jia-lin¹, ZHANG Shi-bai², WANG Tao², ZHAO Zhu-qing¹, SHI Lei^{1*} [1. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Microelements Research Centre, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070; 2. Hubei Maosheng Biotechnology Co. Ltd., Suizhou Hubei 441300]

Abstract: Boron (B) is an essential micro-nutrient for crops, but the effects of B fertilizer application on the yield and quality of rapeseed, soybean and flue-cured tobacco in China are not clear in recent 20 years. In this study, 172 literatures were collected and the effects of B fertilizer on the yield and quality of above selected crops were studied by meta-analysis. The results showed that B fertilizer increased the yield of rapeseed, soybean and flue-cured tobacco by 14.26% in average, and the increasing rate of yield of B fertilizer on the rapeseed was significantly higher than that of flue-cured tobacco and soybean.

The recommended dosages of Borax in soybean, flue-cured tobacco and rapeseed were 10–15, 20–30 and 0–10 kg/hm², respectively. The increasing rate of yield of B fertilizer was higher in rapeseed than in flue-cured tobacco and soybean in East China, and higher in rapeseed than in flue-cured tobacco in Central China. The increasing rate of yield of B fertilizer on soybean, flue-cured tobacco and rapeseed changed with years. Since 2000, the increasing rate of yield of B fertilizer on soybean and flue-cured tobacco had gradually decreased, and that on rapeseed had gradually increased. B fertilizer increased the oil content and reduced the protein content of rapeseed greatly, but had no significant effect on soybean protein and fat content; it increased the nicotine content and the sugar content of flue-cured, while had no effect on the potassium-chloride ratio. The oil content of rapeseed in South China, the protein and fat content of soybean in Central China, and the reducing sugar content and potassium-chloride ratio of flue-cured tobacco in South China were higher than those on other growth regions. In addition, the oil content of rapeseed increased after 2000, while the quality parameters of other crops decreased. In summary, the application of B fertilizer can effectively improve the yield and some quality parameters of crops, however, the increasing rates are affected by other factors such as crop species, application rate, application period, and growth regions. Therefore, the B fertilizer application scheme should be formulated according to the grown regions, crops, soil types and the soil available B content in the agricultural production to guarantee the increase of crop yield and the improvement of grain (leaves) quality in China.

Key words: oilseed rape; soybean; flue-cured tobacco; boron fertilizer; application rate; increasing rate of yield; quality; Meta-analysis

[上接第 149 页]

(NPKM), 1.5 times amount of NPKM (1.5NPKM), organic fertilizer alone (M), NPK combined with straw (NPKS), straw alone (S) and abandoned field (CK₀). The above treatments were monitored in situ by LI-COR 8200S soil intelligent measurement chamber, LI-7180 trace gas analyzer and Stevens HydraProbe soil moisture and temperature sensor. The results showed that there were significant differences in soil respiration rate (NCER) among different fertilization treatments, and NPKM treatment reached the maximum value at 12:00 in the whole day, and its average NCER value was the highest, which was 13.48 μmol · m⁻² · s⁻¹. There were significant differences in the growth stages of spring wheat under different fertilization treatments, and the maximum NCER was in jointing stage. At maturity stage, the difference between NPK, CK₀ and NPKS treatments was significant compared with CK, and the NCER value decreased by 3.11–6.18 μmol · m⁻² · s⁻¹. Compared with CK treatment, the average NCER value of S treatment was lower, which decreased by 26.00%–38.00%. NCER increased with the increase of soil temperature and moisture, but not significantly positively related with soil organic carbon, total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium. Application of chemical fertilizer alone and addition of organic materials (organic fertilizer, straw) increased crop yield and biomass. In summary, NCER was affected by soil temperature and moisture, and NCER varied according to the growth period of spring wheat. Treatment of S reduced the NCER, and treatment with single application of chemical fertilizer and addition of organic materials (organic fertilizer, straw) increased crop yield and biomass.

Key words: long-term fertilization; grey desert soil; soil respiration rate; soil temperature; soil moisture; soil physicochemical properties; yield of spring wheat