

我国微量元素肥料研究及应用的历程与展望

刘桂东¹, 姜存仓^{2*}, 石磊², 袁亮³

(¹ 赣南师范大学生命科学学院, 江西赣州 341000; ² 华中农业大学资源与环境学院 / 微量元素研究中心, 湖北武汉 430070; ³ 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 我国土壤中微量元素普遍缺乏, 加之持续大量的氮、磷等化肥投入, 加剧了土壤中微量元素的不足。微量元素缺乏已成为影响农作物生产的主要障碍之一, 一些地方甚至成为人类微量元素缺乏的重要原因。施用微量元素肥料(以下简称微肥)是缓解植物微量元素缺乏的有效措施之一。我国较大规模、系统的微肥研究与应用始于 20 世纪 70 年代, 微肥剂型经历了由传统无机盐类到螯合类、缓控释、纳米类等各种新型微肥的发展, 微肥施用方式伴随微肥产品的创新而不断优化, 微肥施用范围逐渐扩大到几乎所有作物类型。截至 2024 年 4 月中旬, 大陆地区 31 个省级行政区除西藏外均有微量元素水溶肥料备案, 山东和河南两省的备案数量最多, 分别占全国的 29.7% 和 26.2%。每年申请的微肥及制备方法相关专利数量在 2011 年后快速增加, 到 2016 年达到年最高数量 67 项。然而, 在农业农村部登记和备案的(含)微量元素肥料大多为复合型的水剂和粉剂, 其他剂型产品很少。在实际生产中, 基层科技人员和农民对微肥的认知依然不够, 施用微肥后不能马上观察到显而易见的效果就怀疑微肥的功效, 市场上微量元素肥料剂型单一, 针对性不强, 影响着微肥的研究应用与推广。从我国农业实际出发, 今后需要加强以下几方面的工作: 首先要协调微量元素与大量元素之间的均衡配比, 建立适应“区域-土壤-作物”体系的微量元素养分综合管理体系; 要持续研发环境友好且高效的微肥产品及配套技术, 研究与轻减化施肥技术相适应的微肥剂型及其施用技术体系; 此外, 做好微肥质量监管, 在基层中普及微肥的相关知识, 提高对微肥重要性的认识, 做到“产-学-研-管-用”一体化推进, 促进我国微肥产业健康发展。

关键词: 微量元素肥料; 肥料剂型; 生产现状; 增效载体; 肥料监管

Development and prospect on research and application of micronutrient fertilizers in China

LIU Gui-dong¹, JIANG Cun-cang^{2*}, SHI Lei², YUAN Liang³

(¹ College of Life Sciences, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; ² College of Resources and Environment / Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; ³ Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Lack of micronutrients in soil is very common in China. Continuous application of chemical fertilizers in large quantity leads to accumulation of nitrogen and phosphorous in soils exaggerates the unbalance and deficiency of micronutrients, in some areas, micronutrient deficiency even causes the mal-micronutrition of human beings. Applying micronutrient fertilizers is an effective measure to alleviate micronutrient deficiencies of crops. The large-scale and systematic research and application of micronutrient fertilizers in China began in the 1970s. Up to now, the micronutrient fertilizer products in China have gone through the development from merely traditional inorganic salts to various types including chelating, slow/control-release, and nanoparticle micronutrient fertilizers. And the application methods are continuously optimized with the innovation of micro-fertilizer products. Micro-fertilizer has been promoted to almost all crop types. As of mid-April 2024, the 31 provincial-level administrative regions in the mainland of China, except Xizang, have all recorded micronutrient water-

收稿日期: 2024-04-27 接受日期: 2024-06-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2023YFD1900904); 国家自然科学基金项目(32160746)。

联系方式: 刘桂东 E-mail: liuguidong@gnnu.edu.cn; * 通信作者 姜存仓 E-mail: jcc2000@mail.hzau.edu.cn

soluble fertilizer products, Shandong and Henan provinces have the largest number of records, accounting for 29.7% and 26.2% of the records in whole country, respectively. The annual number of applied patents relating to micronutrient fertilizers and preparation methods has rapidly increased since 2011, reaching a maximum of 67 pieces in 2016. However, the micronutrient fertilizers, including those containing micronutrients, that registered and recorded in the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China are dominated by water-soluble complex fertilizers in liquored and powdered dosages. In the actual production, quite a lot of local agricultural technicians and users do not have enough and academic knowledge about the function and effect of micronutrients, they distrust micronutrient fertilizers if without immediate and visible effect. The micronutrient fertilizer products in the market are not selectable in dosages, and lack of specificity, impacting on the application and promotion of micronutrient fertilizers. From the actual quo of China, more works should be done in very recent future, firstly is to coordinate the comprehensive balance between micronutrients and macronutrients that is suitable for “region-soil-crop” system; continuously innovate the product dosages and supporting application technologies required by the trendy simple and less fertilization technology that is promoting across China; strengthen the popularization of micronutrient knowledge and the necessities of using micronutrients in the intensive crop production systems at grassroots levels. In addition, more attention on the market supervision and product standard system of micro-fertilizers still need paid. In one word, an integrated action on micronutrient fertilizer should be promoted regrading to “production-academic research-marketing supervision-application”, for the healthy development of China’s micronutrient fertilizer industry.

Key words: micronutrient fertilizer; fertilizer dosage; characteristics of product; efficiency enhancing carrier; fertilizer supervision

在地球化学领域,“微量元素”是指在岩石和土壤中以较低含量(通常 $<1000\text{ mg/kg}$)存在的元素,而在生物学领域,“微量元素”指的是在植物体干物质中浓度通常 $<100\text{ mg/kg}$ 的元素^[1]。尽管微量元素在植物体内含量较低,但其生理功能与氮、磷、钾等大量元素同等重要。不同植物或基因型对微量元素的需求存在较大差异,目前通常被认为是所有高等植物必需的微量元素有:硼(B)、氯(Cl)、铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)、钼(Mo)和镍(Ni)^[2]。其中,硼在植物中主要起结构组成作用,维持细胞壁和细胞膜结构完整^[3],氯以阴离子的形式参与渗透调节并维持植物体内电性平衡^[4],其余6种微量元素均为金属元素,作为酶的辅因子参与酶活性调节,稳定蛋白结构,参与电子传递和氧化还原反应等^[5]。土壤中微量元素不能满足植物生长需求时,可以通过施用微量元素肥料的方式进行补充。根据《中国大百科全书》中的定义,微量元素肥料是指含有一种或几种植物生长发育必需的微量营养元素并标明其含量的肥料,简称微肥。

肥料施用在我国具有悠久的历史,早期主要以农家肥为主,新中国成立以来特别是80年代以后随着高产品种推广以及农业集约化发展,我国氮、磷、

钾化肥施用量逐年增加,到2015年达到历史最高的6022.6万t^[6]。过量施用化肥导致了土壤退化、大气和水体污染以及生物多样性降低等问题^[7-8]。为此,“十三五”期间国家开展了化肥减量增效行动计划,取得了积极成效,2016—2022年连续7年实现了大量元素化肥消费总量负增长^[9]。高强度农作物生产每年会从土壤中带走大量养分,氮、磷、钾元素通过化肥施用得到有效甚至过量补充,微肥施用不足的现象普遍,在有机肥施用比例偏低的地方,微量元素缺乏尤为突出^[10]。越来越多的研究表明,微量元素缺乏已成为世界范围内农作物生产的主要障碍^[11]。据调查,世界上超过50%的土壤缺乏微量元素,直接导致农作物品质下降,间接引发人类饮食中某些必需微量元素(如铁、锌等)缺乏,导致贫血症、心脏病或神经系统损伤等身体和精神疾病的发生,从而带来影响人类健康的“隐性饥饿”问题^[12-13]。适当减少大量元素肥料投入,增施微肥已被证实可以提高作物产量和品质^[14]。因此,微量元素营养调控正逐渐成为现代高效集约化农业必不可少的技术措施之一^[15-16]。本文就我国微肥研究及应用历程、产业发展现状进行概述,并对其未来发展方向进行探讨,以期为今后我国微肥研究、应用及产业健康发展提供借鉴。

1 微肥研究与应用的发展回顾

我国微量元素研究始于 20 世纪 40 年代, 开始系统研究微量元素 (如锰和锌) 对植物生长和碳水化合物代谢的影响^[17]。50 年代开始研究土壤微量元素含量及其形态, 随着农业生产的恢复发展, 此时人们也开始重视微量元素在具体作物上的应用^[18]。首先引起重视的是钼肥, 1954—1958 年中国科学院林业土壤研究所曾连续 5 年在东北三省几种主要土壤上进行了一系列钼肥对大豆生长影响的试验^[19]。随后继续开展了不同微量元素对番茄^[20]、大豆^[21-22]、小麦^[23]、水稻^[24]、玉米^[23]、棉花^[23]、甘薯^[23]等多种作物产量和品质影响的研究, 揭开了我国微肥应用的序幕。进入 60 年代后, 大量严格的微肥肥效试验广泛开展, 1962 年 12 月 10—15 日中国科学院生物学部在南京召开了“中国科学院微量元素研究工作会议”, 总结了这一阶段的研究工作^[19]。60 年代中期, 中国农业科学院油料作物研究所在湖北浠水、蕲春、广济等县发现甘蓝型油菜“萎缩不实病”(即现在的“花而不实”现象), 试验证实是由缺硼引起的, 施用硼肥取得了明显的防治效果, 推动了硼肥的研究与应用^[25-26]。

进入 70 年代后, 中国农业科学院土壤肥料研究所张乃凤等^[27]在山东首先开展了田间锌肥试验示范和技术推广, 取得了增产效果。而后随着水稻缺锌“坐蔸”和玉米“花白苗”的大面积发生, 锌肥首先在水稻和玉米生产中进行了推广应用, 并逐步扩展到花生、大豆、甘蔗、果树和蔬菜等作物^[28-29]。1975 年, 华中农学院王运华等^[30-31]在湖北新洲发现缺硼导致棉花“蕾而不花”症状, 施硼防治效果极为显著, 随后开展了系统性的棉花施硼技术研究。此后, 科研人员通过大量田间试验进一步验证了硼肥在油菜、棉花、甜菜、果树等作物上的增产效果^[28]。1977 年 11 月中国科学院召开了第二次微量元素学术交流会, 全面总结了微量元素的生理及生物化学、微量元素施肥与地区土壤类型的关系、微量元素的土壤化学和几种主要微量元素在我国农业上的应用效果等方面的阶段性成果, 并于 1980 年由科学出版社出版了《中国科学院微量元素学术交流会汇刊》^[19, 32]。

1981 年, 在当时的农业部农业局和化工部化肥司领导下联合多家科研单位组建了“全国微肥科研协作组”, 于 1982—1986 年期间在全国范围内进行了系统地微肥施用技术研究和试验示范工作^[33]。在此工作基础上, 协作组 1986 年出版了《微量元素肥料研

究与应用》一书, 并首次制定了水稻和玉米锌肥以及棉花和油菜硼肥施用技术规范, 在微肥的研究与应用方面取得了大量突破性成就, 开创了我国微肥研究与应用新局面^[34]。掌握了油菜、棉花、麦类缺硼以及玉米、水稻缺锌的大田典型症状, 初步表征了大豆、小麦缺钼, 芝麻、向日葵缺硼以及其他作物缺乏微量元素典型症状, 首次出版了《主要作物营养失调症状图谱》^[35-36]。设置了作物微量元素的长期定位试验点, 进行土壤微量元素残留及土壤-作物-大气生态系统中微量元素的循环及施用微肥的去向等研究^[12, 37]。

进入 90 年代后, 我国微量元素的研究更加深入和广泛, 已基本完成了各省、市、自治区级微量元素含量分布研究^[38], 主要开展了微量元素营养生理、微量元素与其他元素的关系、不同作物微量元素的敏感性和适宜用量、土壤微量元素的丰缺指标等方面研究, 提出了主要农作物微量元素含量缺乏与中毒的临界值, 促进了植物微量元素营养诊断技术在农业生产上的应用^[38-39]。各种作物的微肥施用取得显著成效, 据不完全统计, 到 1990 年全国微肥施用面积已达 1000 万 hm^2 左右, 微肥用量达 3.4 万 t, 取得了良好社会和经济效益^[28]。此阶段 (80—90 年代) 出版了大量关于微肥的专著或论文集 (表 1), 达到了微肥研究工作的一次高峰。

进入 21 世纪后, 随着学科交叉融合以及对环境问题的不断重视, 研究人员开始重点关注微量元素营养遗传^[40]、微肥影响农产品品质^[41]及缓解重金属毒害的生理机制^[42-43]、微量元素与大量元素配施^[44]以及新型微肥的研制和推广应用等方面研究^[45-46]。不同微肥在各种作物类型中的施用范围进一步扩大, 研究与应用几乎涵盖了所有类型作物, 包括谷类作物^[47]、薯类作物^[48]、豆类作物^[49]、纤维作物^[50]、油料作物^[26]、糖料作物^[51]、饮料作物^[52]、嗜好作物^[53]、药用植物^[54]、饲草作物^[55]、园艺作物^[56]等。微肥施用在提高作物产量、改善产品品质以及提高作物抗逆性等方面的报道也越来越多。对我国主要粮食作物施用锌肥增产效果进行整合分析, 发现施用锌肥能有效提高小麦、玉米和水稻的产量 (增产范围在 9.7%~15.0%), 但是其增产效果受锌肥施用方式、施用量、年代的影响^[57-58]。不同种类微肥在部分作物中的施肥方式与推荐用量见表 2。随着研究的不断深入, 目前我国微肥发展现状呈现出微肥种类及外延产品日益增多、微肥施用技术不断发展以及微肥施用范围逐渐扩大等特点。

表 1 我国 20 世纪 80—90 年代出版的关于微量元素肥料的部分专著

Table 1 Some monographs on micronutrient fertilizers published in China in the 1980s and 1990s

出版年份 Publication year	专著名称 / ISBN Title of monograph / ISBN	出版社 Press	作者 Author
1984	微量元素肥料的应用 / 16298·45 Application of micronutrient fertilizers / 16298·45	四川科学技术出版社 Sichuan Science and Technology Press	四川省农牧厅土肥处 Soil and Fertilizer Department of Sichuan Provincial Department of Agriculture and Animal Husbandry
1986	微量元素肥料研究与应用 / 16304·114 Research and application of micronutrient fertilizers / 16304·114	湖北科学技术出版社 Hubei Science and Technology Press	农牧渔业部农业局 Agriculture Bureau of the Ministry of Agriculture, Animal Husbandry and Fisheries
1986	植物微量元素营养与施肥 / 16288·114 Plant microelement nutrition and fertilization / 16288·114	辽宁科学技术出版社 Liaoning Science and Technology Press	张治钧 Zhang Zhijun
1987	微量元素肥料使用技术 / 7-80538-013-9 Application technology for micronutrient fertilizers / 7-80538-013-9	中原农民出版社 Zhongyuan Nongmin Press	蔡德龙, 等 Cai Delong, <i>et al.</i>
1988	微量元素肥料 / 7-5025-0183-5 Micronutrient fertilizer / 7-5025-0183-5	化学工业出版社 Chemical Industry Press	刘铮 Liu Zheng
1989	微量元素与微肥施用 / 7-109-01168-2 Microelements and micronutrient fertilizer application / 7-109-01168-2	农业出版社 Agriculture Press	邹邦基 Zou Bangji
1991	微量元素的农业化学 / 7-109-01379-0 Agricultural chemistry of microelements / 7-109-01379-0	农业出版社 Agriculture Press	刘铮, 等 Liu Zheng, <i>et al.</i>
1992	微肥施用技术 / 7-80572-524-1 Application technology for micronutrient fertilizers / 7-80572-524-1	济南出版社 Jinan Publishing House	邹明富, 徐从东 Zou Mingfu, Xu Congdong
1992	作物的微量营养与微肥施用 / 7-5349-1100-1 Micronutrients of crops and application of micronutrient fertilizers / 7-5349-1100-1	河南科学技术出版社 Henan Science and Technology Press	吴建国, 等 Wu Jianguo, <i>et al.</i>
1993	微量元素肥料的作用与应用 / 7-5364-2562-7 Function and application of micronutrient fertilizers / 7-5364-2562-7	四川科学技术出版社 Sichuan Science and Technology Press	褚天铎, 等 Chu Tianduo, <i>et al.</i>
1995	微量元素营养与微肥施用 / 7-109-03720-7 Microelement nutrition and application of micronutrient fertilizers / 7-109-03720-7	中国农业出版社 China Agriculture Press	刘武定 Liu Wuding
1999	微量元素肥料施用技术 / 7-80584-919-6 Application technology for micronutrient fertilizers / 7-80584-919-6	贵州科技出版社 Guizhou Science and Technology Press	蒋志毅, 黄晓玲 Jiang Zhiyi, Huang Xiaoling

2 微肥种类及外延产品日益增多

20 世纪 70—80 年代期间, 我国微肥产业刚刚兴起, 研发力量较为薄弱, 国内生产的微肥产品以固体无机成分为主, 定型产品极少^[93]。此时农业应用以土壤施用方法为主, 根外施用方法为辅。无机盐微量元素肥料是把植物所需微量元素以无机盐形式复混而成, 但由于微量元素以金属离子形式存在, 易被土壤所固定, 使微量元素的肥效得不到正常发挥^[94]。当时, 在国家科技部和农业部设立的“六五”科研计

划资助下, 国内科研单位和高校进行了大量攻关研究, 为微肥的生产和施用提供了科学依据^[93]。

20 世纪 90 年代以后, 微肥产业开始迅速发展, 生产企业和总产量逐年增加, 产品类型以液态叶面肥为主, 具有多元素与复合型的特点, 但企业的生产规模小, 工艺技术不精, 养分形态仍以无机盐为主, 微肥生产成本低^[93]。在微量元素肥料产品的研制方面, 水溶性金属螯合物开始作为微量元素肥料被利用, 取得了明显增产效果。此时的螯合剂以化学合成为主, 主要是亚胺多羧型螯合剂, 包括乙二胺

表 2 主要微量元素肥料及其施用技术

Table 2 Fertilization methods and recommended dosage of micronutrient fertilizers in various crops

微量元素 Micronutrient	微肥名称 Product name	土壤 Soil	作物 Crop	施肥方式 Application method	推荐用量/浓度 Recommended dosage /concentration	参考文献 Reference
硼 Boron	缓释硼砂	缺硼土壤	油菜	土壤施用	4.5~9.0 kg/hm ²	[59]
	Slow-release borax	Boron deficient soil	Rape	Soil application		
	缓释硼砂	缺硼红壤	油菜	种肥同播	9.0 kg/hm ²	[60]
	Slow-release borax	Boron deficient red soil	Rape	Seed fertilizer		
	硼砂	缺硼黄壤	烤烟	土施+喷施	12.2 kg/hm ² +0.26%	[61]
	Borax	Boron deficient yellow soil	Flue-cured tobacco	Soil and foliar application		
	硼砂	缺硼红壤	脐橙	土壤施用	15 g/plant	[62]
	Borax	Boron deficient red soil	Navel orange	Soil application		
	速乐硼	不缺硼	棉花	叶面喷施	≤ 0.3%	[63]
	SOLUBOR	Adequate boron	Cotton	Foliar application		
硼酸 Boric acid	硼酸		苹果	叶面喷施	0.15%	[64]
	Boric acid		Apple	Foliar application		
锌 Zinc	ZnSO ₄	低锌旱地	小麦	推荐喷施	0.4% (4.8 kg/hm ²)	[65]
		Low zinc dry land	Wheat	Foliar application		
	Zn-EDTA	石灰性土壤	小麦	盆栽土施	Zn 4 mg/kg, soil	[66]
		Calcareous soil	Wheat	Potted soil application		
	ZnSO ₄	辽东南地区	玉米	推荐土施	15 kg/hm ²	[67]
		Southeast Liaoning area	Maize	Soil application		
	ZnSO ₄	砂姜黑土	小麦	土壤施用	15~30 kg/hm ²	[68]
	Shajiang black soil	Wheat	Soil application			
纳米锌 Nano-Zn	纳米锌	设施土壤	番茄	叶面喷施	200 mg/L	[69]
	Nano-Zn	Greenhouse soil	Tomato	Foliar application		
铁 Iron	FeSO ₄	围垦涂土	黄花梨	主干注射	0.3%	[70]
		Reclamation soil	<i>Pyrus pyrifoliavar</i>	Trunk injection		
	FeSO ₄	石灰性土壤	灰枣	树干注射	2.0 g/L	[71]
		Calcareous soil	<i>Ziziphus jujube</i>	Trunk injection		
	Fe-EDTA	紫色土	柑橘	树干输液	0.36%, 500 mL	[72]
		Purplish soil	Citrus	Trunk injection		
	Fe-EDDHA	石灰性土壤	大豆	土壤施用	0~9 kg/hm ²	[73]
		Calcareous soil	Soybean	Soil application		
纳米铁肥 Nano-Fe	纳米铁肥	栗钙土	当归	叶面喷施	90 μmol/L	[74]
	Nano-Fe	Chestnut soil	Chinese angelica	Foliar application		
钼 Molybdenum	(NH ₄) ₂ MoO ₄	低钼土壤	大豆	拌种	1~2 g/kg	[75]
		Low Mo soil	Soybean	Seed dressing		
	(NH ₄) ₂ MoO ₄	低钼黄潮土	花生	浸种+喷施	0.1%+0.1%	[76]
		Low Mo yellow tidal soil	Peanut	Seed soaking + spraying		
	(NH ₄) ₂ MoO ₄	低钼黏壤土	春大豆	拌种+喷施	0.8 g/kg + 900 g/hm ²	[77]
		Low Mo clay loam	Spring soybean	Seed dressing + spraying		
	(NH ₄) ₂ MoO ₄	山地红壤	花生	拌种或喷施	2 g/kg或0.1%	[78]
		Mountain red soil	Peanut	Seed dressing or spraying	2 g/kg or 0.1%	
	(NH ₄) ₂ MoO ₄	紫色土	烤烟	叶面喷施	0.1%	[79]
		Purplish soil	Flue-cured tobacco	Foliar application		
(NH ₄) ₂ MoO ₄	(NH ₄) ₂ MoO ₄	旱薄地	花生	拌种	1~1.5 g/kg	[80]
		Poor dry land	Peanut	Seed dressing		
纳米钼肥 Nano-Mo	盆栽	油菜	叶面喷施	550 mg/L	[81]	
	Potting	Rape	Foliar application			

续表 2 Table 2 continued

微量元素 Micronutrient	微肥名称 Product name	土壤 Soil	作物 Crop	施肥方式 Application method	推荐用量/浓度 Recommended dosage /concentration	参考文献 Reference
锰 Manganese	MnSO ₄		灰枣 <i>Ziziphus jujube</i>	树干注射 Trunk injection	2 g/plant	[82]
	MnSO ₄	盆栽 Potting	春小麦 Spring wheat	叶面配施 Foliar application	0.2%	[83]
	MnSO ₄	沙壤土 Sandy loam soil	水稻 Rice	土壤施用 Soil application	45 kg/hm ²	[84]
	MnSO ₄	褐土 Cinnamon soil	春玉米 Spring maize	土壤施用 Soil application	15 kg/hm ²	[85]
	MnSO ₄	瘠土 Lou soil	冬小麦 Winter wheat	土壤施用 Soil application	45 kg/hm ²	[86]
	MnSO ₄	盆栽 Potting	马铃薯 Potato	叶面配施 Foliar application	0.1%~0.6%	[87]
	铜 Copper	CuSO ₄	水稻土 Paddy soil	水稻 Rice	蘸秧根 Dip in seedling roots	0.1%
CuSO ₄		水稻土 Paddy soil	水稻 Rice	土壤施用 Soil application	7.5~15 kg/hm ²	[89]
CuSO ₄		石砂土 Stone sand soil	小麦 Wheat	土壤施用 Soil application	30 kg/hm ²	[90]
CuSO ₄		轻质壤土 Light loam	玉米 Maize	土壤施用 Soil application	15~22.5 kg/hm ²	[91]
CuSO ₄		轻质壤土 Light loam	玉米 Maize	拌种 Seed dressing	2~3 g/kg	[91]
CuSO ₄		丘陵红壤 Hilly red soil	花生 Peanut	浸种 Seed soaking	0.1%	[92]

四乙酸 (EDTA)、乙二醇二乙醚二胺四乙酸 (EGTA)、二乙三胺五乙酸 (DTPA) 和羟乙基乙二胺三乙酸 (HEDTA) 等, 但由于价格较高, 其大面积推广受到一定的限制^[95]。除此之外, 微肥的一些外延产品如钛微肥和光合微肥在此阶段研制成功并在试验过程中取得了明显增产效果^[98]。钛微肥是以活性钛为主要成分的多元微量元素肥, 可以提高作物对养分的吸收运转能力, 促进光合作用和碳水化合物合成^[96]。光合微肥除含有作物生长发育所必需的铁、锰、硼、锌、钼和铜等微量元素外, 还添加了光呼吸抑制剂, 具有多元微肥和光合肥的双重功能^[97]。

21 世纪以来, 我国微肥发展进入快速阶段, 各种新型微肥不断推出。新型螯合微肥进一步发展, 开始由化学合成螯合剂转向植物生理活性物质等天然螯合剂的开发与应用。目前常见的天然螯合 (络合) 剂包括氨基酸类、小分子有机酸类、腐植酸类、糖醇类、海藻提取物、木质素磺酸盐等, 也被称为微肥助剂或增效载体^[98]。上述天然有机物质来源广泛且螯合能力适中, 适宜作为微量元素螯合剂^[99-100]。

利用动物有机废弃物 (蹄甲、毛发等) 经水解制得氨基酸后制备氨基酸螯合微肥, 实现了废弃物的再利用, 大大降低了氨基酸螯合肥料的生产成本^[101]。以城市污水处理厂污泥为原料, 提取其中的菌体蛋白, 采用多种化学方法制备氨基酸螯合微量元素肥料, 技术更加环保可行^[102]。利用植物材料获得木质素进行改性处理后, 制备改性木质素等天然高分子螯合微肥研究与应用也获得了成功^[103]。林辉东等^[104]以废碱锰电池和木质素为原料, 采用“焙烧—酸解—螯合”工艺制成 (Mn+Zn)-LS 螯合微肥, 盆栽试验证实其效果良好。此外, 新型生物源螯合剂的开发与应用也在持续探索中, 如利用微生物分泌物开发微生物铁载体等微量元素螯合剂, 显著提高了植物对铁的吸收利用能力^[105]。

将微量高效生物活性增效载体与化学肥料科学配伍, 通过综合调控“肥料—作物—土壤”系统改善微量元素肥效的增值肥料的研发和推广应用愈发受到重视^[106]。而针对速效肥料利用率低且易导致环境污染等问题, 近年来以缓控释微肥为代表的环境友好

型微肥也开始受到关注^[107]。根据制造工艺和性质差异,缓控释微肥一般包括低溶解度微肥、外涂层/包膜微肥和生物基吸附微肥等,均表现出微量元素释放可控的特性^[108]。由山西省高分子复合材料工程技术研究中心研发的不同溶解度高分子缓释微肥,能够较好的控制微量元素在土壤中的释放^[109],应用较多的天然高分子材料包括纤维素、淀粉和壳聚糖等^[110]。湖南省农业环境生态所研发了一款多元长效微肥,其由硼砂、硫酸锌和钼酸钠加上养分稳定剂和控失剂以及其他一些辅助成分,经过配方、混合、造粒而成,在水稻上施用效果显著^[111]。以丙烯酸单体接枝无定形高分子碱木质素制备了具有保水、缓释功能的聚丙烯酸接枝碱木质素基铁肥,为高效施用铁肥和碱木质素在农业可降解缓/控释载体领域的应用提供了参考^[112]。生物基吸附微肥以炭基缓释微肥为代表,因其在土壤质量提升与养分供应方面表现出明显优势而受到广泛关注^[113]。

随着纳米技术的发展,在肥料领域纳米微肥也开始研发并在生产上应用,主要包括纳米结构肥料、纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料、纳米碳增效肥料、纳米生物复合肥料等^[114]。尽管纳米微肥对作物产量和品质提升的报道较多^[115-116],但纳米颗粒的植物毒性效应尚需持续关注^[117]。其他微肥外延产品如稀土微肥、含硒微肥等也有大量报道^[118]。研发了提质增效型、土壤改良型和重金属污染土壤修复型稀土微量元素螯合有机肥,证实其对水稻增产提质、

节本增效具有明显效果^[119]。探讨了不同配方含硒微肥在水稻、玉米等多种作物上的施用效果,结果表明含硒微肥不仅能提高产量,也能生产出富硒农产品^[120]。随着水肥一体化灌溉施肥技术在我国大面积推广应用,(含)微量元素水溶肥也逐渐成为市场上的主要微肥品种,近些年发展迅猛^[121]。除此之外,含有微量元素的种衣剂也表现出了较好效果,陆艳等^[122]以 0.2% 黄腐酸、0.02% 胺鲜酯和 0.15% 微肥包衣处理,提高了苜蓿种子发芽势和出苗率,并促进了苜蓿分枝。根据微量元素形态及制作工艺的不同,总结了微肥发展过程中主要的种类或形态(图 1)。综上所述,我国微肥产品体系的不断完善经历了由单一的无机盐类到多元化的新型微肥、由单质微肥到微肥复合化等发展过程。

3 微肥施用技术不断发展

微肥对植物的生长发育起着重要作用,但微肥的肥效易受作物种类、土壤性质、施用量、施用时期以及施用方式等多方面因素的影响^[123]。微肥施用方式伴随微肥产品的创新而不断发展,土壤施肥、叶面施肥、种子处理、灌溉施肥和树干输液是最常用的微量元素施用技术。

土壤施肥是将微肥作为基肥施入土壤中,一般是在播种前翻土均匀施入,也可与氮、磷、钾等大量元素肥料混合一起均匀施入土中^[124]。这种施用方式不需要额外增加设备或劳动力,因此比较实用和

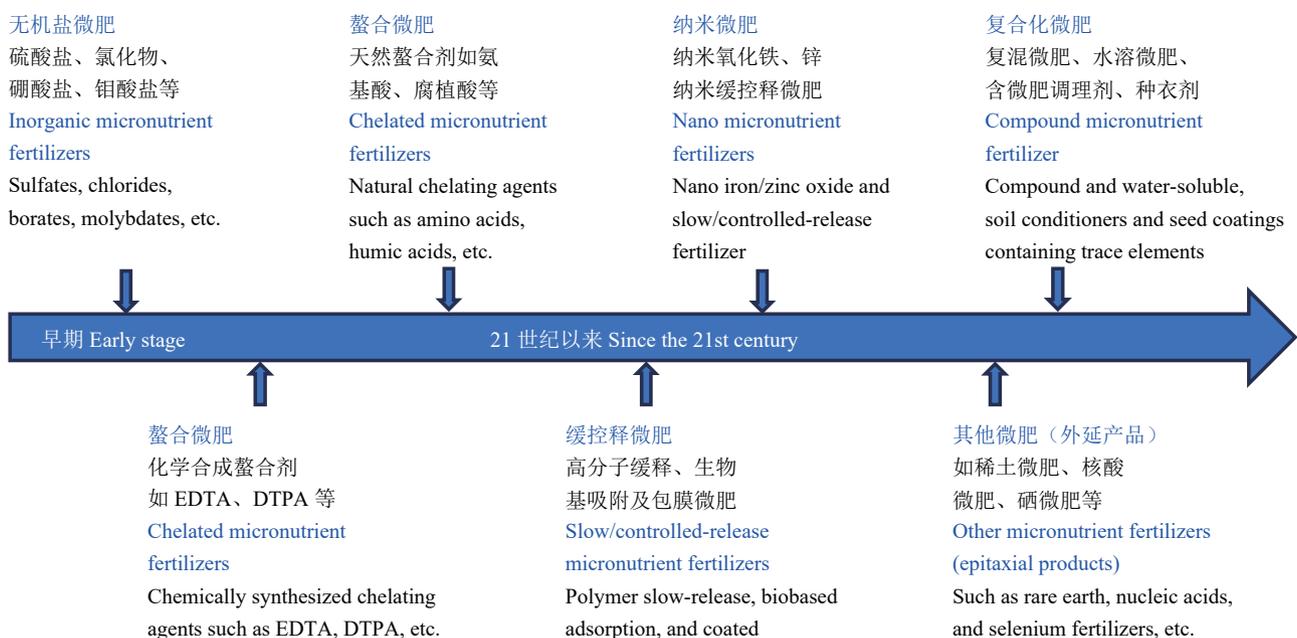


图 1 微量元素肥料剂型发展历程

Fig. 1 Development processes of micronutrient fertilizer forms

经济, 也是最古老和传统的一种施肥方法, 适用于大部分作物。向土壤直接施用微量元素是向植物提供充足营养的有效方式, 优点是可以解决土壤长期缺乏微量元素的问题, 其缺点是养分的生物有效性受土壤特性(如酸碱性、有机质含量、阳离子交换量等)和根系吸收能力的影响较大^[125]。在微量元素严重缺乏的土壤上或对某种微量元素需求较多的作物上, 常采用土壤施肥的方式。我国南方柑橘产区土壤普遍缺硼严重, 采用土壤施硼的方式明显改善了脐橙的生长发育和硼营养状况, 和不施硼的对照相比产量提高 20% 以上, 经济效益良好^[62]。油菜等双子叶植物对硼的需求量较高, 采用土壤施肥的方式能显著增加直播油菜产量并提高油菜籽的含油率、油酸和亚油酸含量^[126]。无机盐类微肥和缓控释微肥是土壤施肥常选用的微肥种类, 金属螯合微肥由于可以避免离子在土壤中的固定, 在石灰性土壤上施用则是较优的选择^[59, 73]。

叶面施肥是根外追肥最常用的方式, 通常指将微肥悬液或微肥配成一定浓度的水溶液, 在合适的时期对作物叶片进行喷施, 通过气孔和表皮细胞的渗透作用直接进入叶肉细胞。相较于土壤施肥, 叶面施肥具有更高和更快的吸收效率, 避免养分在土壤中的固定和淋失^[127]。由于植物对微量元素的需求量较少, 叶面施用能够满足植物需求, 因此叶面喷施矫正微量元素缺乏的效果优于氮、磷等大量营养元素^[12]。在小麦生长后期喷施锌肥是提高潜在性缺锌土壤上小麦籽粒锌含量和生物有效性较为经济的方式, 对改善小麦锌营养品质有较好作用^[128]。在旱地低锌区, 与土施锌相比, 叶面喷施是更加经济有效、环境友好的锌肥施用方式, 是提高小麦锌营养品质切实可行的措施^[65]。而在辽东南地区种植的玉米锌肥施用效果表现为土施优于叶面喷施^[67]。因此, 叶面喷施的效果与作物种类及作物生长过程中喷施时期有关。另外, 无机盐类微肥、螯合微肥、水溶性微肥和纳米类微肥常被用作叶面施肥, 对微量元素潜在性缺乏土壤上种植的作物进行叶面喷施是比较经济有效的方式。

灌溉施肥则是利用灌溉系统提供微量元素, 将养分直接输送到根区^[129]。灌溉施肥技术的发展与水溶肥的大力推广密切相关。灌溉施肥可以实现相对精准施肥, 并且可以有效维持根际土壤适宜的水分含量和养分浓度, 减小养分向下迁移的速率, 提高水分和养分的利用效率^[130]。但是需要注意施肥管道的维护和管理, 同时也需要注意微量元素与大量元

素之间的相互作用。灌溉施肥方式特别适用于干旱区和果树等经济作物。例如, 宁夏引黄灌区春小麦在滴灌条件下增施锌肥和锰肥均提高了春小麦籽粒中锌、锰含量, 显著提高了千粒重和产量^[47]。在葡萄转色期, 滴施 7.5 kg/hm² Fe-EDTA 并配合叶面喷施 0.075% 的 Fe-EDTA 可以显著提升叶片叶绿素含量和光合速率并改善葡萄品质^[131]。

种子处理包括两类不同的方式, 一种是播种前用微肥进行浸种或拌种, 另一种则是用微量元素对种子进行包衣, 种子处理可以节省用肥量, 因此它是一种经济实用方法^[132]。浸种也称种子引发, 是一项控制种子缓慢吸水和逐步回干的种子处理技术, 可以提高萌发时间的稳定率和萌发整齐率, 为植物早期发育提供必需的微量元素, 但是浸种时间和浓度需要精确控制; 拌种则需要保证微量元素与种子混合均匀^[133-134]。种子包衣需要一定的技术和设备支撑, 微量元素种子包衣的成功和有效性取决于选用的养分种类、包衣材料、土壤类型、水分和肥力状况以及养分与种子的比例^[135]。用微量元素进行浸种、拌种或种子包衣, 特别适用于播种的粮食作物。例如, 锰肥、铁肥和钼肥处理种子后的大田小麦增产幅度可达 8.5%~21.1%, 高于拔节期喷施的增产幅度 4.3%~12.0%^[136]。锰肥和锌肥对花生种子进行包衣增加了花生籽粒干重并降低了籽粒镉含量^[137]。因此, 微肥种子处理技术是提高大田作物籽粒微量元素含量和产量的重要措施之一。

树干输液是木本植物常用的一种微量元素补充方式, 在果树生产中较早采用了该方法, 具体操作方式是在树干基部进行钻孔, 将肥料通过输液管从钻孔注入树体内, 使树体快速补充营养, 并极大提高肥料利用效率^[138]。目前树干注射主要有两种方式, 一种是利用压力泵进行强力高压注射, 另一种则是利用虹吸原理进行虹吸输液或自流式滴输^[139]。果树采用树干输液方式补充肥料不污染土壤、水源、空气和树体表面, 不存在土壤吸附、固定和抛洒浪费的问题, 是生产绿色食品理想的环保型高科技施肥方法, 也被认为是一种极有应用前景的果树施肥方式^[140]。树干输液方式是生产上解决果树缺铁黄化经常采用的一种补铁技术, 已在苹果^[141]、黄花梨^[70]、新疆灰枣^[71]和柑橘^[72]等果树上应用并取得了良好效果。

4 当前我国微量元素肥料产品市场状况

在实施化肥减量增效的大背景下, 人们开始更

加关注微量元素对作物产量和品质的重要作用,以达到“以微促大”的效果,这给微肥产业提供了一个良好的发展空间。许多企业开始规模化生产以水溶肥为主的微肥,同时也在大量元素化肥中添加多种微量元素,生产含有微量元素的复混肥等。通过文献调研并对农业农村部发布的(含)微量元素肥料产品登记或备案信息进行检索,分析了截至2024年4月中旬含微量元素肥料产品种类、剂型、生产区域分布等情况,初步了解我国微量元素肥料产业发展现状。由于国家规定经农田长期使用、有国家或行业标准的单一微量元素肥料无需登记,以及市场关于微量元素肥料推广情况资料的限制等情况,从肥料登记与备案分析只是反映了微量元素肥料在我国市场的主流销售类型,尚不能判断其推广应用情况^[142]。本文统计的含微量元素肥料仅指在农业农村部登记和备案的微量元素肥料以及含微量元素的其他肥料。

4.1 含微量元素肥料产品登记概况

以产品通用名称为微量元素肥料获得农业农村部肥料登记证并且在有效期内的微量元素肥料产品共有14个,其中产品形态为水剂的5个,形态为粉剂的9个,多为外国企业登记产品。微量元素水溶肥料共登记有723个产品,其中产品形态为水剂341个、粉剂378个、颗粒4个,表明登记的微量元素水溶肥以水剂和粉剂为主,颗粒形态产品所占比例极低。截至2024年4月中旬登记的723个产品中,单一微量元素水溶肥料共有45种,其中单质硼肥有29种,单质锌肥有13种,其他元素单质肥各1种。大部分微量元素水溶肥是含有多种微量元素的复合型产品,其中标注含有Cu+Fe+Mn+Zn+B+Mo 6元素的复合型产品83个。

除了直接以微量元素肥料登记的产品以外,其

他含有微量元素的产品还包括以下几类,含腐植酸水溶肥料产品登记有3414个,其中添加微量元素的共有120个产品。登记含氨基酸水溶肥料产品3236个,其中添加微量元素的产品有1590个。有机水溶肥料产品登记有949个,标注含有微量元素的产品161个。以大量元素水溶肥料作为通用名称登记的产品有984个,其中标注含有微量元素的产品达到937个,说明目前大量元素肥料生产中绝大部分均会添加微量元素,以提升肥料效果。其中,大量元素水溶肥中添加最多的微量元素组合为Zn+B,基本符合我国土壤与作物微量元素锌和硼较缺乏的现状。

4.2 微量元素水溶肥料备案现状

自2020年9月起,包括微量元素水溶肥料在内的一部分肥料产品由登记改为备案制,备案系统于2020年12月15日上线运行。自备案制实施以来,微量元素水溶肥料呈爆发式增长,截至2024年4月中旬,微量元素水溶肥料国内产品共备案114500个,境外产品共备案11582个(表3)。从产品形态来看,微量元素水溶肥料仍然以水剂和粉剂为主,水剂所占比例稍高于粉剂。与前期实行登记制时产品相比,近年来备案的微量元素水溶肥料(包括国内和境外)中颗粒形态产品所占比例明显增高,约占全部备案产品的21.3%。与2001—2011年调查粉剂所占比例最高的结果不同,近年来水剂和颗粒形态产品比例有所增加,可能与粉剂存在容易潮解、结块等问题有关^[142]。

从国内微量元素水溶肥料备案区域分布情况来看,大陆地区31个省级行政区除了西藏外均有微量元素水溶肥料生产,我国微量元素肥料产品生产地区仍然主要集中在山东和河南等老牌肥料主产省份,备案数量分别为33956和30021个,分别占全国的29.7%和26.2%,两省微量元素水溶肥料备案数

表3 2020年以来不同剂型微量元素水溶肥料产品每年新增情况

Table 3 Numbers of newly registered water-soluble micronutrient fertilizers with different dosage forms since 2020

年份 Year	国内产品 Domestic products				境外产品 Overseas products			
	水剂 Liquor	粉剂 Powder	颗粒 Granule	全部 Total	水剂 Liquor	粉剂 Powder	颗粒 Granule	全部 Total
2020	3646	3402	1703	8751	140	83	46	269
2021	15986	13490	7261	36737	1129	970	603	2702
2022	10751	8517	4724	23992	1199	939	635	2773
2023	14710	12175	8774	35659	1870	1463	1033	4366
2024	4182	3456	1723	9361	605	512	355	1472

注:肥料产品备案系统于2020年12月开通,2024年数据截至4月中旬。

Note: The online application system of fertilizer product is opened in December 2020, and the data for 2024 is as of mid-April.

量占全国的 55% 以上。贵州、青海、宁夏、甘肃和重庆等省份微量元素水溶肥料备案数量较少, 一共仅占全国的 1.1%。

4.3 新型微肥研发情况

知识产权的申请情况可以在一定程度上反映微肥的研发情况, 通过中国知网平台, 以专利名称“微量元素肥料”或“微肥”为关键词进行检索(未进行单质微肥检索), 然后筛选微肥及制备方法相关专利, 截至 2024 年 5 月, 包括公开和授权专利共筛选到 462 个。以专利公开日期能查询到微肥相关专利的最早时间为 1990 年, 一直到 2010 年 20 多年的时间仅公布了微肥相关专利 82 个。从 2011 年开始, 新型微肥每年的研发数量快速增加, 2016 年达到最高数量 67 项, 此后逐渐有所下降(图 2)。从各省的微肥专利公布数量来看, 排名前十位的省份依次是山东、江苏、安徽、辽宁、广东、广西、湖北、河南、四川和北京, 占据了总量的 71.4%。

5 微量元素与微肥研究展望

化肥被称为粮食的“粮食”, 在保障我国粮食安全和人类营养健康等方面发挥了重要作用。然而, 持续大量施用氮、磷等化肥导致土壤养分严重失衡, 目前我国大多数土壤中的氮和磷养分处于盈余状态, 而中微量元素缺乏现象愈发严重^[143-144]。因此, 协调微量元素与大量元素之间的均衡配比, 并与植物生长需求相匹配, 是实现新阶段化肥减量增效战略的基本要求。然而, 在实际生产中, 基层科技人员和农民对微肥的认知依然不够, 施用微肥后不能马上观察到肉眼可见的效果就怀疑微肥的功效,

市场上微肥剂型单一, 针对性不强, 影响着微肥的研究应用与推广。从我国农业实际出发, 未来微肥研究重点应包括以下几个方面。

5.1 基于养分平衡原则建立适应“区域-土壤-作物”的微肥综合管理体系

鉴于目前生产上微量元素单一缺乏向复合缺乏及养分失衡方向发展, 亟需建立田间作物养分实时诊断及调控新技术及指标体系, 以实现农田养分的精准管理; 探索微量元素与其他营养元素的相互作用对作物养分吸收和利用的影响, 明确不同微量元素之间及微量元素与大量元素配合施用技术; 开展长期定位研究, 跟踪观察微量元素肥料对土壤肥力和作物生产力的长期影响, 为制定科学的施肥策略提供依据; 基于“区域+土壤类型+作物种类”体系差异以及生产实际需求, 需要系统化研究不同区域需要的基础肥料种类、大中微量元素肥料科学配伍方案以及作物整个生育期全程管理服务套餐等, 为完善以需求为导向的肥料生产和供应体系提供支撑。同时, 系统探索如何实现微量元素在“土壤-植物-食品-人体”全链条协同强化的技术途径, 助力健康中国, 消除“隐性饥饿”。

5.2 持续创新发展环境友好且高效的微肥产品及配套技术

传统的无机盐类微肥容易被土壤固定或发生淋洗等损失, 导致肥效短且利用率较低。而化学合成螯合剂类螯合微肥尽管提高了微量元素有效性, 但由于价格高, 加上螯合剂本身不易降解, 对土壤存在潜在不良影响。因此, 持续创新发展环境友好且高效的微肥产品, 符合我国绿色肥料或绿色智能肥

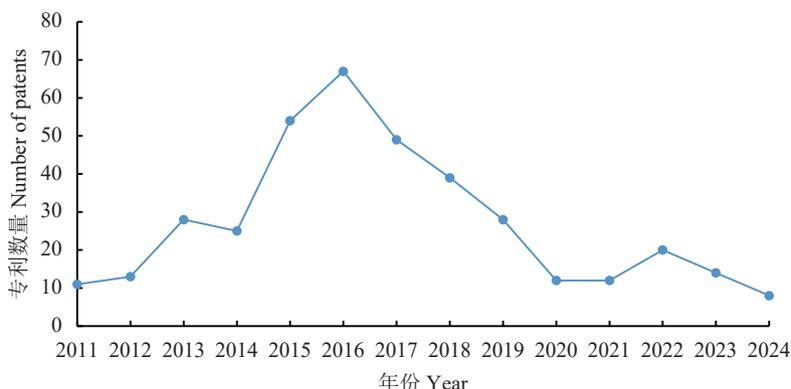


图 2 每年申请微肥相关专利的总体趋势

Fig. 2 Number of annual applications for patents related to micronutrient fertilizers

注: 2024 年数据截至 5 月底。

Note: The data for 2024 is as of the end of May.

料发展的要求^[145]。包膜缓控释肥可以减少施肥次数、提高肥料利用率,但存在产品的养分供给与作物需求的匹配度不够等问题,未来应设计和开发具有超疏水性的新型可生物降解和可再生包膜材料,以使养分释放与作物对养分的需求同步。对具有缓释性能的材料,如天然高分子聚合物淀粉、纤维素和壳聚糖等,以及最近国内外研究较多的生物炭和层状双氢氧化物(LDHs)等进行筛选和改性,不断提升缓释微肥性能。关注纳米技术在微肥产品研发中的应用,如生物炭基纳米肥料、纳米微量元素长效叶面肥等,评估其对作物生长影响的同时也需要关注纳米颗粒的实际环境行为和生态毒性。水肥一体化是灌溉与施肥结合的最佳方式,也意味着研制能够应用于滴喷灌系统的全水溶微肥或兼容大量元素的微肥是未来农业发展的需要。除此之外,成本低、可生物降解、对环境友好的微肥增效载体也是未来的重点。新型微肥的效果取决于外界环境条件与施用方式,因此还需要针对每一种新产品开展配套施用技术研究,同时研发与轻减化施肥技术相适应的微量元素肥料剂型及其施用技术体系,不断推动农业生产“绿色增产增效提质”目标的实现。总之,绿色新型微肥产品研发应该向着施用简便化、肥料高效化、环境无害化方向发展,突出核心技术原创性。

5.3 建立和完善微肥市场监管和产品标准体系

新型肥料产品标准体系不够完善。面对市场上不断推出的新产品,由于产品标准体系存在滞后性,导致有的新产品无标准可依^[146]。水肥一体化技术在全国的大力推广促进了水溶肥料市场的繁荣,我国水溶肥料产量从2010年的60万t增长到2020年的560万t,占化肥年产量的比例由0.95%升至10.19%,呈逐年上升趋势^[147]。据农业农村部办公厅关于全国肥料质量监督抽查情况的通报数据,2018和2019年抽查的大量元素水溶肥料合格率分别为75%和79.2%,而不合格的主要原因是微量元素含量与标识值不符和砷元素含量超标。另据江苏省农产品质量检验检测中心对52个批次水溶肥检测结果显示,产品的整体合格率只有40.4%,而检测的6个批次微量元素水溶肥中仅有1个批次合格,说明微肥质量需要进一步完善监管^[147]。因此,建议对微肥生产企业和销售商进行严格的市场准入管理,对微肥产品进行定期或不定期的抽检和检测,建立微肥市场信息公示和追溯系统,向消费者公开产品信息、

质量检测报告等。同时,通过追溯系统迅速定位问题产品的来源,保证流入市场的微肥质量。需要进一步在农业生产中普及微量元素的作用及微肥施用相关知识,分区域分作物做好微肥肥效试验示范,引导农民重视并合理施用微肥,做到“产-学-研-管-用”各环节同频共振,促进我国微肥产业健康发展。

参 考 文 献:

- [1] Alloway B J. Micronutrients and crop production: An introduction [A]. Alloway B J. Micronutrient deficiencies in global crop production [C]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.
- [2] Hänsch R, Mendel R R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl)[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, 12(3): 259–266.
- [3] Voxeur A, Fry S C. Glycosylinositol phosphorylceramides from *Rosa* cell cultures are boron-bridged in the plasma membrane and form complexes with rhamnolacturonan II[J]. *The Plant Journal*, 2014, 79(1): 139–149.
- [4] Marschner P. Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd edition)[M]. London: Academic Press, 2012.
- [5] Waldron K J, Rutherford J C, Ford D, *et al.* Metalloproteins and metal sensing[J]. *Nature*, 2009, 460: 823–830.
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [7] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 等. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊): 81–84.
Wang Y Q, Peng Z P, Xue S C, *et al.* Effect of excessive fertilization on soil ecological environment in the facility farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(S): 81–84.
- [8] 张晓楠, 邱国玉. 化肥对我国水环境安全的影响及过量施用的成因分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 104–114.
Zhang X N, Qiu G Y. Causes of excessive use of chemical fertilizer and its impacts on China's water environment security[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(4): 104–114.
- [9] 周卫, 丁文成. 新阶段化肥减量增效战略研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(1): 1–7.
Zhou W, Ding W C. Strategic researches of reducing fertilizer use and increasing use efficiency in China in the new era[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(1): 1–7.
- [10] 周建斌. 作物营养从有机肥到化肥的变化与反思[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1686–1693.
Zhou J B. Reconsideration of the changes of plant nutrition from organic fertilizers to chemical fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1686–1693.
- [11] Li P, Du Y M, Huang L B, *et al.* Nanotechnology promotes the R&D of new-generation micronutrient foliar fertilizers[J]. *RSC Advances*, 2016, 6: 69465–69478.
- [12] Wang S Z, Xu L, Hao M D. Impacts of long-term micronutrient fertilizer application on soil properties and micronutrient availability

- [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(23): 16358.
- [13] Schaetzel T, Sankar R. Effects of micronutrient deficiencies on human health: Its status in South Asia[J]. *Journal of Crop Production*, 2002, 6(1/2): 55–98.
- [14] Liu X D, Hu C X, Riaz M, *et al.* Reducing macronutrients and increasing micronutrient fertilizers are key to improving the quality of pomelo *Citrus grandis* (L.) Osbeck Cv. “Guanxi” [J]. *Agriculture*, 2022, 12(10): 1711.
- [15] 张素素, 齐英杰, 沈彦辉, 等. 我国中微量元素肥料应用现状与前景分析[J]. *磷肥与复肥*, 2019, 34(1): 34–35, 45.
Zhang S S, Qi Y J, Shen Y H, *et al.* Application status and prospect analysis of medium and trace element fertilizer in China[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2019, 34(1): 34–35, 45.
- [16] 马斌, 丁焯毅, 展宗瑞, 等. 浅析中微量元素水溶肥料的特点及发展前景[J]. *安徽化工*, 2023, 49(3): 5–7.
Ma B, Ding X Y, Zhan Z R, *et al.* Characteristics and development prospect of water-soluble fertilizer in micronutrient[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2023, 49(3): 5–7.
- [17] 陆定志, 罗宗洛. 微量元素生长素和数种化学物质对小麦子叶鞘伸长的影响[J]. *中国科学*, 1950, (21): 379–393.
Lu D Z, Luo Z L. Effects of micro-elements auxin and several chemical substances on the elongation of wheat cotyledon sheaths [J]. *Scientia Sinica*, 1950, (21): 379–393.
- [18] 蒋志毅, 黄晓玲. 微量元素肥料施用技术[M]. 贵州贵阳: 贵州科技出版社, 1999.
Jiang Z Y, Huang X L. Application technology of micronutrient fertilizers[M]. Guiyang, Guizhou: Guizhou Science and Technology Press, 1999.
- [19] 褚天铎. 我国微量元素肥料的研究与应用回顾[J]. *土壤肥料*, 1989, (5): 30–34.
Chu T D. Review of research and application of micronutrient fertilizers in China[J]. *Soil and Fertilizer*, 1989, (5): 30–34.
- [20] 李家慎, 陈振文, 黄正福. 喷射微量元素对番茄产量及品质的影响[J]. *植物学报*, 1955, 4(1): 77–83.
Li J S, Chen Z W, Huang Z F. The effect of some microelements on the yield and quality of tomato through spraying[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1955, 4(1): 77–83.
- [21] 朱淇. 微量元素对大豆产量和品质的影响初步试验[J]. *植物学报*, 1956, 5(4): 439–444.
Zhu Q. Preliminary experiment on the effect of trace elements on soybean yield and quality[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1956, 5(4): 439–444.
- [22] 朱淇, 梁之婉, 陈恩凤. 不同土类上施用微量元素与大豆生长、发育、产量及品质的关系[J]. *土壤学报*, 1963, 11(4): 417–425.
Zhu Q, Liang Z W, Chen E F. Effect of micro elements on the growth and yield of soybean in some important soil types of northeastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 11(4): 417–425.
- [23] 王象坤, 张祖庆, 刘武林, 等. 微量元素对我国几个主要农作物产量影响的研究预报[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1956, (1): 123–131.
Wang X K, Zhang Z Q, Liu W L, *et al.* Research and prediction of the impact of trace elements on the yield of several important crops in China[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 1956, (1): 123–131.
- [24] 赵素娥, 崔激. 微量元素对水稻幼苗生长和呼吸作用的影响及其相互关系[J]. *植物学报*, 1963, 11(1): 67–75.
Zhao S E, Cui C. The effects of microelements on the growth and respiration of rice with special reference to the respiratory inhibitors [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1963, 11(1): 67–75.
- [25] 任沪生, 陈仲西, 肖昌珍. 油菜萎蔫不实防治研究[A]. 中国科学院微量元素学术交流会汇刊编辑小组. 中国科学院微量元素学术交流会汇刊[C]. 北京: 科学出版社, 1980.
Ren H S, Chen Z X, Xiao C Z. Study on controlling rape atrophy and sterility[A]. Editing Group of Academic Exchange Conference on Microelements in CAS. Proceedings of Academic Exchange Conference on Microelements in CAS[C]. Beijing: Science Press, 1980.
- [26] 徐芳森, 王运华. 我国作物硼营养与硼肥施用的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1556–1564.
Xu F S, Wang Y H. Advances in studies on crop boron nutrition and application of boron fertilizers in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1556–1564.
- [27] 张乃凤, 王淑惠, 张大弟. 山东省土壤速效锌普查和锌肥肥效试验[J]. *土壤肥料*, 1980, (3): 44–47.
Zhang N F, Wang S H, Zhang D D. Survey of soil available zinc in Shandong Province and experimental study on zinc fertilizer application[J]. *Soil and Fertilizer*, 1980, (3): 44–47.
- [28] 褚天铎, 杨清, 刘新保, 等. 微量元素肥料的作用与应用[M]. 四川成都: 四川科学技术出版社, 1993.
Chu T D, Yang Q, Liu X B, *et al.* The role and application of micronutrient fertilizers[M]. Chengdu, Sichuan: Sichuan Science and Technology Press, 1993.
- [29] 陈丰民, 付建和, 吕世光, 等. 锌肥施用技术[M]. 黑龙江哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1987.
Chen F M, Fu J H, Lü S G, *et al.* Zinc fertilizer application technology [M]. Haerbin, Heilongjiang: Heilongjiang Science and Technology Press, 1987.
- [30] 湖北省新洲县农业局土肥站, 华中农学院黄冈分院土肥组. 棉花叶片萎蔫蕾而不花问题初探[J]. *中国棉花*, 1976, (1): 35–36.
Soil & Fertilizer Station of Agricultural Bureau in Xinzhou Hubei, Soil & Fertilizer Group of Huanggang Division in Huazhong Agricultural College. Primary study on the problem of budding without flowering and leaf atrophy in cotton[J]. *China Cotton*, 1976, (1): 35–36.
- [31] 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.
Wang Y H, Xu F S, Lu J W. Boron of agriculture in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [32] 中国科学院微量元素学术交流会汇刊编辑小组. 中国科学院微量元素学术交流会汇刊[C]. 北京: 科学出版社, 1980.
Editing Group of Academic Exchange Conference on Microelements in CAS. Proceedings of Academic Exchange Conference on Microelements in CAS[C]. Beijing: Science Press, 1980.
- [33] 全国微肥科研协作组. 几种主要农作物锌硼肥施用技术规范的研究

- 究 I [J]. 土壤肥料, 1989, (3): 6-9.
- National Micro-fertilizer Research Cooperative Group. Study on technical specification of application of zinc and boron fertilizer in several main crops I [J]. Soil and Fertilizer, 1989, (3): 6-9.
- [34] 农牧渔业部农业局. 微量元素肥料研究与应用[M]. 湖北武汉: 湖北科学技术出版社, 1986.
- Agriculture Bureau of the Ministry of Agriculture, Animal Husbandry and Fisheries. Research and application of micronutrient fertilizers [M]. Wuhan, Hubei: Hubei Science and Technology Press, 1986.
- [35] 刘芷宇, 唐永良, 罗质超. 主要作物营养失调症状图谱[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- Liu Z Y, Tang Y L, Luo Z C. Symptom map of major crop nutritional disorders[M]. Beijing: Agriculture Press, 1982.
- [36] 刘武定. 微量元素营养与微肥施用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- Liu W D. Micronutrient nutrition and application of micro-fertilizers [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [37] 张艳, 胡亚鲜, 郭胜利. 长期施用微肥条件下微量元素和有机官能团在团聚体中的积累特征[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1420-1431.
- Zhang Y, Hu Y X, Guo S L. Accumulation of trace element and organic functional groups in different size fractions of a loess topsoil after long-term micronutrient fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5): 1420-1431.
- [38] 王丽明, 李立群, 王爱萍, 等. 微量元素肥料的研究应用及发展趋势[J]. 山东科学, 1996, 9(3): 62-64.
- Wang L M, Li L Q, Wang A P, *et al.* Research and application on microelement fertilizer with trenc of development[J]. Shandong Science, 1996, 9(3): 62-64.
- [39] 梁华东. 微量元素肥料研究和应用的回顾与21世纪展望[J]. 华中农业大学学报, 1999, (增刊28): 95-99.
- Liang H D. The review and 21st century prediction for research and use of trace element fertilizer[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1999, (S28): 95-99.
- [40] 施卫明, 李光杰, 艾超, 周卫. 中国植物营养生物学研究重要进展和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(12): 2310-2323.
- Shi W M, Li G J, Ai C, Zhou W. Important progress and prospects of plant nutritional biology in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(12): 2310-2323.
- [41] 李林, 寿惠霞. 作物铁生物强化[J]. 生命科学, 2015, 27(8): 1037-1046.
- Li L, Shou H X. Iron biofortification of crop plants[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2015, 27(8): 1037-1046.
- [42] Li X W, Li Y L, Mai J W, *et al.* Boron alleviates aluminum toxicity by promoting root alkalization in transition zone via polar auxin transport[J]. *Plant Physiology*, 2018, 177(3): 1254-1266.
- [43] 胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 等. 施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1635-1643.
- Hu Y M, Lü J S, Sun W B, *et al.* Effects of manganese application on the growth, cadmium uptake and cadmium distribution of maize in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1635-1643.
- [44] 管庆林. 大中微量元素配施对雪茄烟叶生理特性及产质量的影响 [D]. 河南郑州: 河南农业大学硕士学位论文, 2023.
- Guan Q L. Effects of combined application of large, medium and trace elements on physiological characteristics, yield and quality of cigar leaves[D]. Zhengzhou, Henan: MS Thesis of Henan Agricultural University, 2023.
- [45] 崔全石, 孙嘉茂, 时瑀繁, 等. 叶面喷施稀土微肥对南红梨果实采后品质的影响[J]. 果树学报, 2024, 41(1): 52-64.
- Cui Q S, Sun J M, Shi Y F, *et al.* Effect of foliar spraying of rare earth micronutrient fertilizer on fruit quality of Nanhong pear[J]. *Journal of Fruit Science*, 2024, 41(1): 52-64.
- [46] 尚超. 包膜锌肥制备与性能评估及其在玉米上的应用[D]. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2023.
- Shang C. Preparation and performance evaluation of coated zinc fertilizer and its application to maize[D]. Tai'an, Shandong: MS Thesis of Shandong Agricultural University, 2023.
- [47] 杨春霞, 张艳, 夏学智. 叶面喷施和滴灌条件下增施微肥对春小麦微量元素含量和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(2): 38-46.
- Yang C X, Zhang Y, Xia X Z. Effects of micro-fertilizer on trace element content and yield of spring wheat under foliar spraying and drip irrigation[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(2): 38-46.
- [48] 韦云东, 郑华, 刘翠娟, 等. 增施中微量元素肥料对木薯生长及产量的影响[J]. 热带农业科学, 2020, 40(1): 7-14.
- Wei Y D, Zheng H, Liu C J, *et al.* Effect of meso and micro element fertilizers on the growth and yield of cassava[J], *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2020, 40(1): 7-14.
- [49] 赵春会, 王建林. 2008—2018年大豆受微量元素调控效应研究文献分析[J]. 农技服务, 2019, 36(10): 25-27.
- Zhao C H, Wang J L. Literature analysis on the regulatory effects of micronutrients on soybeans from 2008 to 2018[J]. *Agricultural Technology Service*, 2019, 36(10): 25-27.
- [50] 马强, 张民, 李子双, 等. 铜基营养叶面肥提高棉花光合特性、产量及其防病效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 969-980.
- Ma Q, Zhang M, Li Z S, *et al.* Effects of copper-based nutritional foliar fertilizers on photosynthetic characteristics, yield and disease control efficiency of cotton[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 969-980.
- [51] 杨洪泽, 张强, 董心久, 等. 锌硼锰肥配合施用对甜菜产量、含糖率和产糖量的影响[J]. 北方农业学报, 2020, 48(4): 71-74.
- Yang H Z, Zhang Q, Dong X J, *et al.* Effects of application of Zn, B, Mn fertilizers on yield, sugar content and sugar yield in sugar beet[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2020, 48(4): 71-74.
- [52] 赵梓筌. 微量元素肥料对茶叶产量、品质和元素积累的影响[D]. 湖北武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2022.
- Zhao Z Q. Effect of micronutrient fertilizer on yield, quality and element accumulation of tea[D]. Wuhan, Hubei: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2022.
- [53] 杨效家, 姚彬, 黄成东, 等. 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 X J, Yao B, Huang C D, *et al.* 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.
- [54] 张衡锋, 张焕朝, 韦庆翠, 李成忠. 4种微肥对番红花生长、品质及产量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 169-173.
Zhang H F, Zhang H C, Wei Q C, Li C Z. Effects of four microelement fertilizer on growth, quality, and yield in *Crocus sativus* L.[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(1): 169-173.
- [55] 张坤. 微肥对赖草、紫花苜蓿微量元素富集和品质的影响[D]. 山西太原: 山西农业大学硕士学位论文, 2022.
Zhang K. Effects of microfertilizer on the enrichment of trace elements and quality in *Leymus secalinus* and alfalfa[D]. Taiyuan, Shanxi: MS Thesis of Shanxi Agricultural University, 2022.
- [56] 郭凯. 微量元素对恋思萝卜产量和品质的影响[D]. 安徽合肥: 安徽农业大学硕士学位论文, 2023.
Guo K. Effects of trace elements on yield and quality of AISI radish [D]. Hefei, Anhui: MS Thesis of Anhui Agricultural University, 2023.
- [57] 王孝忠, 田娣, 邹春琴. 锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 998-1004.
Wang X Z, Tian D, Zou C Q. Yield responses of the main cereal crops to the application approaches and rates of zinc fertilizer in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4): 998-1004.
- [58] 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 P P, 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.
- [59] 耿国涛, 陆志峰, 张洋洋, 等. 硼肥用量对双低油菜籽产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(5): 924-934.
Geng G T, Lu Z F, Zhang Y Y, et al. Effects of boron application rate on double-low rapeseed yield and quality[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(5): 924-934.
- [60] 韩德鹏, 吕伟生, 陈明, 等. 缓释硼肥种肥用量对红壤油菜生长发育和产量的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(10): 2394-2403.
Han D P, Lü W S, Chen M, et al. Effects of the application rate of slow-release boric fertilizer on the growth and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) in red soil cultivated land under the simultaneous sowing of fertilizer and seeds[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(10): 2394-2403.
- [61] 陈相君, 张永辉, 郭仕平, 等. 基于响应曲面模型优化施硼方式提升烤烟上部叶质量[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 366-374.
Chen X J, Zhang Y H, Guo S P, et al. Optimization of boron fertilizer application method using response surface design model for high-quality upper leaves of flue-cured tobacco[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 366-374.
- [62] 姜存仓, 王运华, 刘桂东, 等. 赣南脐橙叶片黄化及施硼效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 656-661.
Jiang C C, Wang Y H, Liu G D, et al. Effect of boron on the leaves etiolation and fruit fallen of Newhall navel orange[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009, 15(3): 656-661.
- [63] 张君, 刘小芳, 危常州, 等. 叶面施硼对棉花氮磷钾吸收量及产量的影响[J]. 中国棉花, 2015, 42(1): 34-37.
Zhang J, Liu X F, Wei C Z, et al. Effects of foliar spraying boron on the nutrient absorption and output of cotton[J]. China Cotton, 2015, 42(1): 34-37.
- [64] 唐岩, 宋来庆, 孙燕霞, 等. 叶面喷施硼肥对富士苹果品质和香气成分的影响[J]. 山东农业科学, 2014, 46(1): 70-72.
Tang Y, Song L Q, Sun Y X, et al. Effects of foliage application of boric acid on quality and aroma components of Fuji apple fruits[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014, 46(1): 70-72.
- [65] 李孟华, 王朝辉, 王建伟, 等. 低锌旱地施锌方式对小麦产量和锌利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1346-1355.
Li M H, Wang Z H, Wang J W, et al. Effect of Zn application methods on wheat grain yield and Zn utilization in Zn-deficient soils of dryland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(6): 1346-1355.
- [66] 国春慧, 赵爱青, 田霄鸿, 等. 锌源和施锌方法对石灰性土壤锌组分及锌肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1225-1233.
Guo C H, Zhao A Q, Tian X H, et al. Effects of Zn sources and application methods on the contents of various Zn fractions and Zn fertilizer utilization efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(5): 1225-1233.
- [67] 张丽丽, 付俊, 杨海龙, 等. 施锌方式对辽东南地区玉米干物质生产及产量形成的影响[J]. 辽宁农业科学, 2018, (2): 14-18.
Zhang L L, Fu J, Yang H L, et al. The effect of zinc on maize dry matter production and grain yield in the southeast region of Liaoning Province[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2018, (2): 14-18.
- [68] 汪明云, 李录久, 吴萍萍, 等. 淮北砂姜黑土小麦高效锌肥施用效应[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(2): 138-140.
Wang M Y, Li L J, Wu P P, et al. High efficiency zinc fertilizer application benefit of wheat in Huaibei lime concretion soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(2): 138-140.
- [69] 王宝春, 窦宗信, 庞勇, 等. 高效纳米锌叶面肥对设施番茄产量和果实品质的影响[J]. 南方农机, 2024, 55(9): 7-8, 30.
Wang B C, Dou Z X, Pang Y, et al. Effect of foliar application of high-efficiency nano zinc fertilizer on the yield and fruit quality of greenhouse tomatoes[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 7-8, 30.
- [70] 张吉祥. 不同施肥方式对海涂地黄花梨黄化叶片影响的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (4): 50-53.
Zhang J X. Studies on leaf yellowing disease for Huanghua pear plants on saline-alkaline soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, (4): 50-53.
- [71] 宋锋惠, 张萍, 史彦江. 树干注射铁肥对新疆灰枣产量和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(6): 102-107.
Song F H, Zhang P, Shi Y J. Effects of trunk injection of Fe on the yield and quality of *Ziziphys jujuba* cv. Huizao from Xinjiang[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(6): 102-107.
- [72] 马晓丽, 刘雪峰, 袁项成, 等. 树干输液和叶面喷施铁肥对缺铁黄

- 化柑橘的矫正效果[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(10): 115–117.
- Ma X L, Liu X F, Yuan X C, *et al.* Correction effect of iron fertilizer application by spraying on the leaf and trunk-injection on iron deficiency chlorosis in citrus trees[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(10): 115–117.
- [73] 韩喜国, 杨波, 于德彬, 等. 石灰性缺铁土壤不同铁效率大豆品种产量及相关性状对Fe-EDDHA肥的响应[J]. *中国油料作物学报*, 2022, 44(6): 1329–1336.
- Han X G, Yang B, Yu D B, *et al.* Response of yield and related traits of soybean varieties with different iron efficiency to Fe-EDDHA fertilizer in calcareous iron-deficient soils[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(6): 1329–1336.
- [74] 孟令煜, 杨涛, 王引权, 等. 叶面喷施纳米铁对当归生理生化特性及药材产量、品质的影响[J]. *时珍国医国药*, 2022, 33(10): 2497–2501.
- Meng L Y, Yang T, Wang Y Q, *et al.* Effect of foliar spraying of nano iron on the physiological and biochemical characteristics, the yield and quality of *Angelica sinensis*[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2022, 33(10): 2497–2501.
- [75] 陈忠群, 闫艳红, 杨文钰, 等. 净套作条件下钼肥拌种对大豆光合特性及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2015, 34(6): 982–986, 992.
- Chen Z Q, Yan Y H, Yang W Y, *et al.* Influence of seed treatment with molybdenum on soybean photosynthesis and yield under mono-cropping and relay strip intercropping system[J]. *Soybean Science*, 2015, 34(6): 982–986, 992.
- [76] 姚健, 戴爱梅, 杨稚娟, 等. 钼肥施用模式对花生农艺性状、产量及蛋白质的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(27): 82–87.
- Yao J, Dai A M, Yang Z J, *et al.* Effects of molybdenum fertilizer applying patterns on agronomic traits, yield and protein of peanut[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(27): 82–87.
- [77] 朱旺冲, 李成业, 吴晓峰, 等. 钼肥施用方式对春大豆“五月黄”农艺性状及产量形成的影响[J]. *湖南农业科学*, 2019, (8): 46–49.
- Zhu W C, Li C Y, Wu X F, *et al.* Effects of different molybdenum fertilizer application ways on agronomic characters and yield of spring soybean “Wuyuehuang” [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2019, (8): 46–49.
- [78] 张莉, 杜红统. 山地红壤钼肥不同用法用量对花生经济性状及产量的影响[J]. *云南农业*, 2019, (2): 80–82.
- Zhang L, Du H T. The effect of different usage and dosage of molybdenum fertilizer on the economic characteristics and yield of peanuts in mountainous red soil[J]. *Yunnan Agriculture*, 2019, (2): 80–82.
- [79] 周芳芳, 蔡宪杰, 杨策, 等. 不同生育时期叶面喷施钼肥对烤烟品质及经济性状的影响[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(S1): 207–210, 215.
- Zhou F F, Cai X J, Yang C, *et al.* Effect of spraying molybdate fertilization on the tobacco leaves in different stage on tobacco quality and economic characters[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(S1): 207–210, 215.
- [80] 张俊, 郝西, 刘娟, 等. 钼肥拌种量对旱薄地花生发育及氮素积累的影响[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(3): 59–66.
- Zhang J, Hao X, Liu J, *et al.* Effect of seed dressing with ammonium molybdate on development and nitrogen accumulation of peanut in poor dry land[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(3): 59–66.
- [81] 肖晓璐, 段博, 蒋展, 等. 叶面喷施纳米钼酸钾对油菜幼苗光合特性及氮代谢的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(5): 980–987.
- Xiao X L, Duan B, Jiang Z, *et al.* Effects of foliar spraying of nanopotassium molybdate on photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of rapeseed seedlings[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2023, 45(5): 980–987.
- [82] 张萍, 宋锋惠, 史彦江. 树干注射钼肥对新疆灰枣生长和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 1018–1024.
- Zhang P, Song F H, Shi Y J. Effects of trunk injection of Mn on yield and quality of *Ziziphus Jujuba* cv. Huizao in Xinjiang[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(4): 1018–1024.
- [83] 曾建国, 李廷亮, 文涛, 等. 叶面喷施钼对春小麦生长及锰吸收转移的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(9): 25–29.
- Zeng J G, Li T L, Wen T, *et al.* Impact of spraying manganese fertilizer on leaf of growth, absorption and transfer of manganese in spring wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(9): 25–29.
- [84] 张丽, 耿荣, 任杨. 宁夏引黄灌区水稻锌锰微肥应用效果分析[J]. *北方农业学报*, 2019, 47(6): 47–52.
- Zhang L, Geng R, Ren Y. Application effects of zinc and manganese fertilizers in rice in Ningxia Irrigation Area of Yellow River diversion [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(6): 47–52.
- [85] 车丽, 韩彦青, 杨丽. 锌锰肥对春玉米产量及品质的影响[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(11): 1980–1983.
- Che L, Han Y Q, Yang L. Effects of zinc and manganese fertilizer on yield and quality of spring maize[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(11): 1980–1983.
- [86] 王燕萍, 刘娟, 郑筱敏, 等. 硫酸锰肥在冬小麦上的应用效果研究[J]. *基层农技推广*, 2020, 8(1): 39–41.
- Wang Y P, Liu J, Zheng X M, *et al.* Study on the application effect of manganese sulfate fertilizer on winter wheat[J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2020, 8(1): 39–41.
- [87] 焦淑娟, 董强, 卢婷婷, 等. 叶面喷施MnSO₄对马铃薯植株叶片生理特性和块茎品质的影响[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(4): 1304–1311.
- Jiao S J, Dong Q, Lu T T, *et al.* Effect of spraying MnSO₄ on potato leaves and tubers physiological characteristics of quality[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(4): 1304–1311.
- [88] 徐俊祥, 董文瑞. 永久性及长期渍水的水稻土中铜的供给情况和铜肥的效果[J]. *土壤学报*, 1989, 26(2): 149–158.
- Xu J X, Dong W R. Copper status of permanently waterlogging and long-termed waterlogging paddy soils and response of rice to copper fertilizer[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(2): 149–158.
- [89] 胡启灿, 叶永秦. 水稻施用铜肥的效果及其施用技术研究[J]. *土壤通报*, 1992, 23(6): 269–271.
- Hu Q C, Ye Y Q. Study on the effect and application technology of copper fertilizer on rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1992, 23(6): 269–271.
- [90] 吴政. 小麦缺铜症的诊断及铜肥施用技术的研究[J]. *土壤肥料*, 1992, (4): 33–34.
- Wu Z. Study on the diagnosis of copper deficiency and copper

- fertilizer application techniques in wheat[J]. *Soil and Fertilizer*, 1992, (4): 33–34.
- [91] 佟屏亚, 凌碧莹, 高富兰, 等. 铜肥对玉米生长发育和产量构成影响的研究[J]. *北京农业科学*, 1995, 13(2): 36–39.
- Tong P Y, Ling B Y, Gao F L, *et al.* Effects of copper fertilizer on the growth, development, and yield composition of corn[J]. *Beijing Agricultural Sciences*, 1995, 13(2): 36–39.
- [92] 张满堂, 古汉虎. 丘陵红壤花生铜肥效果及施用技术[J]. *土壤肥料*, 1996, (5): 32.
- Zhang M T, Gu H H. Effect and application technology of copper fertilizer on peanut in hilly red soil[J]. *Soil and Fertilizer*, 1996, (5): 32.
- [93] 曹一平, 肖艳. 中微量元素肥料特征与产业发展趋势[A]. 邹春琴, 张福锁. 中国土壤—作物中微量元素研究现状和展望[C]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- Cao Y P, Xiao Y. Characteristics and industrial development trends of medium and trace element fertilizers[A]. Zou C Q, Zhang F S. Current status and prospects of research on medium and trace elements in soil-crops in China[C]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [94] Knepper T P. Synthetic chelating agents and compounds exhibiting complexing properties in the aquatic environment[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2003, 22(10): 708–724.
- [95] 万蕾, 邢玉芬, 李长荣. 螯合微肥的稳定性及其生物学效应初探[J]. *中国农业大学学报*, 1994, 20(1): 79–82.
- Wan L, Xing Y F, Li C R. The first investigation in the stability and biological effect of chelate micro-fertilizers[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1994, 20(1): 79–82.
- [96] 石宗江, 许明义. 钛微肥在农业生产上的应用与前景[J]. *广西热作科技*, 1995, 7(1): 40–42.
- Shi Z J, Xu M Y. The application and prospects of titanium microfertilizer in agricultural production[J]. *Guangxi Tropical Agriculture*, 1995, 7(1): 40–42.
- [97] 山东省科学院生物研究所. 光合多元微肥简介[J]. *山东科学*, 1989, 2(4): 2.
- Institute of Biology, Shandong Academy of Sciences. Introduction to photosynthetic multielement microfertilizer[J]. *Shandong Science*, 1989, 2(4): 2.
- [98] 姜存仓, 肖思赞. 增效载体在新型微量元素肥料中的应用现状及前景展望[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(6): 26–34.
- Jiang C C, Xiao S Y. Status and prospects of applying efficiency enhancing carrier in new trace element fertilizers[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(6): 26–34.
- [99] 何敏, 李倩, 刘珂, 等. 中微量元素螯合型肥料研究进展[J]. *安徽化工*, 2022, 48(5): 6–10.
- He M, Li Q, Liu K, *et al.* Research progress of chelating fertilizer with medium and trace elements[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2022, 48(5): 6–10.
- [100] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 334–343.
- Zhou L P, Yuan L, Zhao B Q, *et al.* Advances in humic acid structures and their regulatory role in maize roots[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(2): 334–343.
- [101] 穆军, 呼世斌, 王永科. 猪蹄甲制备氨基酸螯合微肥及其对小白菜生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 185–187.
- Mu J, Hu S B, Wang Y K. Preparing fertilizers of amino acid chelate micro element from pig hoof nail and its effect on growth of pakchoi[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 185–187.
- [102] Liu Y S, Kong S F, Li Y Q, Zeng H. Novel technology for sewage sludge utilization: Preparation of amino acids chelated trace elements (AACTE) fertilizer[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1/3): 1159–1167.
- [103] 周涛. 玉米秸秆酶解残渣的氧化及制备螯合微肥的研究[D]. 江苏南京: 南京林业大学硕士学位论文, 2012.
- Zhou T. Study on oxidation of enzymatic hydrolysis residues of corn stalk and preparation of chelated micro-fertilizers from the oxidation product[D]. Nanjing, Jiangsu: MS Thesis of Nanjing Forestry University, 2012.
- [104] 林辉东, 唐燕, 温中东, 王德汉. (Mn+Zn)-LS 螯合微肥的研制及肥效实验[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(1): 107–112.
- Lin H D, Tang Y, Wen Z D, Wang D H. Developing (Mn+Zn)-LS chelated micronutrient fertilizer and its effect on corn growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1): 107–112.
- [105] 崔黎明, 单晨, 史利桦, 等. 生物源新型铁螯合剂研究进展及其应用[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(6): 59–72.
- Cui D M, Shan C, Shi L H, *et al.* Progress and application of novel iron biochelates[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(6): 59–72.
- [106] 赵秉强, 袁亮. 我国绿色高效化肥产品创新与产业发展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11): 2143–2149.
- Zhao B Q, Yuan L. Innovation and industrial development of green efficiency fertilizers in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11): 2143–2149.
- [107] 岳焕芳, 王克武, 孟范玉, 等. 新型缓控释增效肥研究进展和发展前景[J]. *蔬菜*, 2020, (1): 38–42.
- Yue H F, Wang K W, Meng F Y, *et al.* Researching progress and developing prospect for new slow/controlled releasing fertilizer[J]. *Vegetables*, 2020, (1): 38–42.
- [108] Mikula K, Izydorczyk G, Skrzypczak D, *et al.* Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136365.
- [109] 白甜, 程冬冬, 毋登辉, 刘亚青. 新型高分子缓释微肥的养分释放特征研究[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(10): 2348–2357.
- Bai T, Cheng D D, Wu D H, Liu Y Q. Nutrient release characteristics of a new polymeric slow-release micronutrient fertilizer[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(10): 2348–2357.
- [110] 陈姣. 淀粉基缓控释肥料的制备及其性能研究[D]. 甘肃兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2018.
- Chen J. Preparation and properties of starch-based slow- and controlled-release fertilizer[D]. Lanzhou, Gansu: MS Thesis of Lanzhou University, 2018.
- [111] 谢映泉, 万强, 周艳. 不同配方多元长效微肥在水稻上施用效果的研究[J]. *湖南农业科学*, 2019, (7): 58–60.
- Xie Y Q, Wan Q, Zhou Y. Study on the application effect different formulas of multi-element long-acting micro-fertilizer on rice[J].

- Hunan Agricultural Sciences, 2019, (7): 58–60.
- [112] 马艳丽, 王儒儒, 方桂珍, 李大奇. 聚丙烯酸接枝木质素磺基铁肥的制备及其缓释性能[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 208–214.
Ma Y L, Wang R R, Fang G Z, Li D Q. Preparation and release performance of polyacrylic acid grafted alkali lignin-based iron fertilizer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 208–214.
- [113] 赵牧秋, 史云峰. 一种炭基缓释微肥及其制备方法: CN103193551A [P]. 2013-07-10.
Zhao M Q, Shi Y F. A carbon based slow-release micro fertilizer and its preparation method: CN103193551A [P]. 2013-07-10.
- [114] 刘秀伟, 袁琳, 罗迎娣, 等. 纳米肥料制备研究进展[J]. *河南化工*, 2017, 34(10): 7–11.
Liu X W, Yuan L, Luo Y D, *et al.* Research progress in preparation of nano fertilizer[J]. *Henan Chemical Industry*, 2017, 34(10): 7–11.
- [115] 罗伟君, 唐琳, 周佳丽, 杨肖娥. 纳米锌肥对番茄果实锌含量与品质的强化[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(1): 184–188.
Luo W J, Tang L, Zhou J L, Yang X E. Improvement of zinc concentration and quality of tomato fruit by nano zinc fertilizer[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 32(1): 184–188.
- [116] 陈士勇, 王锐, 陈志青, 等. 纳米锌和离子锌对水稻产量形成及籽粒锌含量的影响[J]. *作物杂志*, 2022, (4): 107–114.
Chen S Y, Wang R, Chen Z Q, *et al.* Effects of nano-zinc and ion-zinc on rice yield formation and grain zinc content[J]. *Crops*, 2022, (4): 107–114.
- [117] 杨新萍, 赵方杰. 植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应[J]. *环境科学*, 2013, 34(11): 4495–4502.
Yang X P, Zhao F J. A review of uptake, translocation and phytotoxicity of engineered nanoparticles in plants[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(11): 4495–4502.
- [118] 侯思远, 林睿华, 燕子红, 等. 稀土微肥在农业上的应用[J]. *化肥设计*, 2023, 61(3): 1–4.
Hou S Y, Lin R H, Yan Z H, *et al.* Application of rare earth micro-element fertilizer in agriculture[J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2023, 61(3): 1–4.
- [119] 龙素霞, 湛毅强, 王连林, 等. 不同功能稀土微量元素螯合有机肥的研制及其对水稻发育、产量、品质的影响[J]. *肥料与健康*, 2024, 51(1): 42–51.
Long S X, Zhan Y Q, Wang L L, *et al.* Development of different functions of organic fertilizers with chelated rare earth and trace elements and their effects on rice development, yield and quality[J]. *Fertilizer & Health*, 2024, 51(1): 42–51.
- [120] 钟积东, 万强, 罗连光, 等. 含硒微肥的研究和应用效果初报[J]. *湖南农业科学*, 2009, (8): 45–47.
Zhong J D, Wan Q, Luo L G, *et al.* Preliminary report on the research and application effects of selenium containing micro-fertilizers[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009, (8): 45–47.
- [121] 沈欣, 辛景树, 李燕婷, 等. 水溶肥料产品登记现状[J]. *中国土壤与肥料*, 2021, (2): 296–301.
Shen X, Xin J S, Li Y T, *et al.* Registration status of water-soluble fertilizer products[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021, (2): 296–301.
- [122] 陆艳, 吉高, 王显国, 等. 以胺鲜酯、黄腐酸、微肥为主要成分的苜蓿种衣剂配方的研究[J]. *草业科学*, 2019, 36(8): 2168–2175.
Lu Y, Ji G, Wang X G, *et al.* Alfalfa seed coating formula with diethyl aminoethyl hexanoate, fulvic acid, and microelement fertilizer[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(8): 2168–2175.
- [123] Nunes A P P, Takayama T, Sarkis L F, Guelfi D. Micronutrients in coated phosphate fertilizer improve precision distribution and nutrient use efficiency of soybean[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2023, 87(6): 1398–1416.
- [124] 马琦琦, 李丽君, 王斌, 等. 微肥对植物生长作用及施用技术的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(13): 4–6.
Ma Q Q, Li L J, Wang B, *et al.* Research progress on the effects of micro-fertilizers on plant growth and application techniques[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(13): 4–6.
- [125] Thapa S, Bhandari A, Ghimire R *et al.* Managing micronutrients for improving soil fertility, health, and soybean yield[J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 11766.
- [126] 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.
Geng G T, Lu Z F, Lu Y, *et al.* Effect of boron application on seed yield and quality of direct sown winter rapeseed (*Brassica napus* L.) in red soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 928–936.
- [127] Ma J Z, Zhang M, Liu Z G, *et al.* Effects of foliar application of the mixture of copper and chelated iron on the yield, quality, photosynthesis, and microelement concentration of table grape (*Vitis vinifera* L.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 254: 106–115.
- [128] 曹玉贤, 田霄鸿, 杨习文, 等. 土施和喷施锌肥对冬小麦籽粒锌含量及生物有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1394–1401.
Cao Y X, Tian X H, Yang X W, *et al.* Effects of soil and foliar applications of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(6): 1394–1401.
- [129] Ahmed N, Zhang B, Chachar Z, *et al.* Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 323: 112512.
- [130] 周江涛, 赵德英, 程存刚. 花前滴灌施肥对华红苹果生长和矿质元素的影响[J]. *经济林研究*, 2020, 38(4): 109–116.
Zhou J T, Zhao D Y, Cheng C G. Effects of fertigation before flowering on growth and mineral element contents of Huahong apple[J]. *Non-wood Forest Research*, 2020, 38(4): 109–116.
- [131] 古超峰. 施铁对酿酒葡萄矿质营养及浆果组分的影响[D]. 宁夏银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2021.
Gu C F. Effect of iron application on mineral nutrition and berry composition of wine grape[D]. Yinchuan, Ningxia: MS Thesis of Ningxia University, 2021.
- [132] Chen F B, Feng Y C, Huo S P. Seed coating with micronutrients improves germination, growth, yield and microelement nutrients of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Biotechnic & Histochemistry*, 2023, 98(4): 230–242.
- [133] 刘阳, 袁会珠, 闫晓静, 杨代斌. 种子引发与引发种子药剂处理研究进展[J]. *种子*, 2024, 43(1): 76–83.
Liu Y, Yuan H Z, Yan X J, Yang D B. Advances in seed priming

- and the primed seeds' treatment with pesticides[J]. *Seed*, 2024, 43(1): 76–83.
- [134] Farooq M, Wahid A, Siddique K H M. Micronutrient application through seed treatments: A review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12(1): 125–142.
- [135] Halmer P. Seed technology and seed enhancement[J]. *Acta Horticulturae*, 2008, 771: 17–26.
- [136] 李春霞. 锰、铁和铜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]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2019.
- Li C X. Effects and mechanism of seed soaking and foliar spraying of manganese, iron and molybdenum on growth and absorb of wheat[D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2019.
- [137] 李丽荣, 贾梦凡, 王兴祥, 等. 锰肥和锌肥种子包衣对花生的降镉效果[J]. *中国油料作物学报*, 2024, 46(2): 394–402.
- Li L R, Jia M F, Wang X X, *et al.* Effects of manganese fertilizer and zinc fertilizer seed coating on cadmium reduction in peanut[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2024, 46(2): 394–402.
- [138] 吴国良, 刘群龙, 刘和, 等. 树体自动滴输微肥对果树生理和果实品质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(2): 154–157.
- Wu G L, Liu Q L, Liu H, *et al.* Effects of dripping injection of microelements on fruit tree physiology and fruit quality[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(2): 154–157.
- [139] 高一宁. 铁肥虹吸输液矫正苹果缺铁失绿症及机理研究[D]. 广西南宁: 广西大学硕士学位论文, 2013.
- Gao Y N. Study on the mechanism of iron fertilizer siphon transfusion of remedying iron deficiency chlorosis in apple trees[D]. Nanning, Guangxi: MS Thesis of Guangxi University, 2013.
- [140] 黄梅. 微量元素树干输液对薄壳山核桃生长及品质的影响[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2023.
- Huang M. Effect of micronutrient trunk infusion on growth and quality of pecan[D]. Chongqing: MS Thesis of Southwest University, 2023.
- [141] 薛进军, 王秀茹, 台社珍, 等. 铁肥品种和施肥方式矫治苹果缺铁症的试验[J]. *中国果树*, 2000, (1): 12–14.
- Xue J J, Wang X R, Tai S Z, *et al.* An experiment on correcting iron deficiency in apples using iron fertilizer varieties and fertilization methods[J]. *China Fruits*, 2000, (1): 12–14.
- [142] 张丹, 张卫峰, 季玥秀, 等. 我国中微量元素肥料产业发展现状[J]. *现代化工*, 2012, 32(5): 1–5.
- Zhang D, Zhang W F, Ji Y X, *et al.* Development of medium and trace element fertilizer industry in China[J]. *Modern Chemical Industry*, 2012, 32(5): 1–5.
- [143] Li H, Huang G, Meng Q, *et al.* Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1): 157–167.
- [144] 杜瑞敏, 朱基琛, 籍婷婷, 等. 中微量元素肥料的研究现状及展望[J]. *河南化工*, 2018, 35(4): 3–6.
- Du R M, Zhu J C, Ji T T, *et al.* Research status and prospect of medium and trace element fertilizer[J]. *Henan Chemical Industry*, 2018, 35(4): 3–6.
- [145] 张福锁, 黄成东, 申建波, 等. 绿色智能肥料: 矿产资源养分全量利用的创新思路与产业化途径[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1203–1212.
- Zhang F S, Huang C D, Shen J B, *et al.* Green intelligent fertilizer: New insight into making full use of mineral nutrient resources and industrial approach[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1203–1212.
- [146] 冯尚善, 崔荣政, 王臣. 我国新型肥料产业发展现状及展望[J]. *磷肥与复肥*, 2020, 35(10): 1–3.
- Feng S, Cui R Z, Wang C. Development status and prospect of new-type fertilizer industry in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2020, 35(10): 1–3.
- [147] 王红慧, 宋凯强. 水溶肥料产品质量现状分析与对策[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(3): 430–432.
- Wang H H, Song K Q. Quality analysis and countermeasures of water-soluble fertilizer[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(3): 430–432.