

我国中微量元素肥料行业发展现状、挑战与未来前瞻

王 军, 顾典润, 李 霞

(中国无机盐工业协会中微肥及新特肥分会, 北京 100010)

[摘要] 中微量元素肥料作为植物生长必需的营养元素供给源, 在保障作物产量、提升农产品品质及促进农业可持续发展中具有不可替代的作用。系统回顾我国中微量元素肥料行业的发展历程, 梳理产能扩张、产品结构、技术研发及登记备案等方面的最新进展, 分析当前行业面临的产品同质化、科技投入不足、污染治理及国际竞争等问题, 并从原料提纯、配方精准化、工艺创新及产品多样化等角度, 对未来发展趋势进行展望, 以期为行业政策制定、科研布局与产业升级提供参考。

[关键词] 中微肥; 中微量元素; 发展历程; 产业现状; 展望

[中图分类号] S143.7 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 10-0012-06

Development status, challenges, and future prospects of medium and trace elements fertilizer industry in China

WANG Jun, GU Dianrun, LI Xia

(Medium and Trace Elements Fertilizer and New Special Fertilizer Branch, China Inorganic Salts Industry Association, Beijing 100010, China)

Abstract: Medium and trace elements fertilizer, as an essential source of nutrients for plant growth, plays an irreplaceable role in ensuring crop yields, improving the quality of agricultural products, and promoting sustainable agricultural development. The development history of China's medium and trace elements fertilizer industry is systematically reviewed, the latest advancements in capacity expansion, product structure optimization, technological research and development, and registration and record-keeping processes are summarized. The current challenges faced by the industry are analyzed, including product homogenization, inadequate investment in technology, pollution control issues, and international competition. Furthermore, the insights into future development trends from perspectives such as raw material purification, precise formulation, process innovation, and product diversification are offered, with the aim of providing references for policy formulation, scientific research planning, and industrial upgrading.

Key words: medium and trace elements fertilizer; medium and trace elements; development history; current industry status; prospects

0 引言

中量元素是指植物生长所必需的、需求量介于大量元素(氮、磷、钾)和微量元素之间的营养元素, 包括钙、镁、硫。钙是细胞壁组成成分, 作用是稳定细胞膜, 调节生理活动; 镁是叶绿素的核心成分, 是多种酶的活化剂; 硫是蛋白质和氨基酸(如胱氨酸、蛋氨酸)的组成成分。微量元素是指铁、硼、锰、铜、锌、钼和氯。中微量元素是植物生长发育的必需营养元素, 在植物的生命活动中起着不可替代的作用。尽管植物对这些元素的需求量远低于对氮、磷、钾的需求, 但其在植物酶系统激

活、光合作用、抗逆性提升等方面发挥着不可替代的生理功能^[1-3]。

近年来, 随着全球农业绿色转型的深入推进, 中微量元素肥料(中微肥)在提高作物产量、改善农产品品质、促进土壤健康及减少环境污染等方面展现出显著优势。一方面, 传统化肥的过度使用导致土壤养分失衡、环境污染加剧, 而中微肥通过精准养分供给、生物激活技术及智能控释机制, 显著

[收稿日期] 2025-09-30

[作者简介] 王 军(1964-), 男, 山西柳林人, 工程师, 高级政工师, 中国无机盐工业协会中微肥及新特肥分会秘书长。

提升了肥料利用率,还能大幅度改善作物品质,减少农业面源污染^[4-5]。另一方面,政策引导与市场需求共同推动行业变革。农业农村部在《化肥使用量零增长行动方案》明确提出,要提高新型肥料占比,并实施“一减三提”(到2025年,农用化肥施用量稳中有降;提高有机肥施用面积、测土配方施肥覆盖率,将化肥利用率提高到43%)举措。事实上,到2024年,我国水稻、玉米、小麦三大粮食作物化肥利用率为42.6%,比2022年提高1.3个百分点,它标志着我国在推进化肥减量增效、提高效率方面取得了稳步进展。同时,经济作物种植面积的扩大催生了定制化肥料需求,促使企业加快技术研发与产品创新,特别是近十年来,中微量元素越来越得到重视,镁、钙和硫等元素又逐渐成为作物增产的限制因子。中微肥正成为现代农业可持续发展的重要驱动力。在“双碳”目标与化肥减量增效行动的背景下,我国中微肥行业迎来快速发展期,技术创新与产业升级不断加速。

然而,产品过剩、行业内卷、技术创新动能不足、成果转化率、产品同质化严重、农民认知仍是中微肥行业高质量发展面临的挑战。未来,随着生物技术、纳米材料及智能施肥系统的深度融合,中微肥有望在精准农业、循环农业及全球粮食安全领域发挥更大作用。本文旨在系统梳理中微肥行业最新进展,分析关键技术突破与应用成效,并探讨未来发展趋势,为政策制定、科研攻关及产业升级提供参考。

1 我国中微肥行业发展历程

1.1 中量元素肥料发展历程

我国中量元素肥料研究的发展历程可以划分为3个阶段:即认知忽视阶段(20世纪80年代前)、问题显现与研究起步阶段(20世纪80—90年代)、深入发展与推广应用阶段(21世纪以来)。具体情况如下。

一是认知忽视阶段(20世纪80年代前)。农业生产主要追求产量,施肥以氮、磷、钾为主。土壤中的中量元素主要通过有机肥和过磷酸钙(含硫、钙)、钙镁磷肥等传统肥料附带补充,并未被作为独立的营养问题来研究。

二是问题显现与研究起步阶段(20世纪80—90年代)。随着高浓度肥料(如尿素、磷酸二铵、氯化钾)的普及,不含中量元素的肥料大量使用,导致土壤中钙、镁、硫等元素被持续消耗而得不到补充。一些经济作物(如果树、蔬菜、油菜)开始出

现典型的缺素症状,如苹果苦痘病(缺钙)、番茄脐腐病(缺钙)、老叶失绿(缺镁)等,引起了科研人员的关注。此阶段,研究主要集中在缺乏症的诊断、土壤中量元素含量的背景调查等方面。

三是深入发展与推广应用阶段(21世纪以来)。基于全国第二次土壤普查数据,科研人员绘制了更精细的土壤中量元素分布图,明确了我国存在大面积的潜在性中量元素缺乏区域^[6]。例如,南方酸性红壤普遍缺钙、镁,华北、西北部分地区土壤缺硫。

首先,在生理机制研究方面,深入到中量元素在植物体内的生理功能、吸收转运机制(如钙的运输、镁的再分配)和与其他元素的协作关系等。

其次,作物品质研究方面,相关研究证实中量元素对提高农产品品质具有关键作用。钙既能显著提高果实的硬度,还让农产品耐储存;镁能提升叶片光合效率,增加碳水化合物积累;硫对油料作物的油含量、葱蒜的风味物质形成有决定性作用。

再次,新型肥料研发方面,催生了一大批中量元素肥料,如硝酸钙、硝酸铵钙、糖醇钙、螯合镁、硫酸钾镁肥、各种含硫肥料等。水溶肥、叶面肥成为补充中量元素的高效方式。中量元素肥料已在农业生产中开展广泛示范与推广应用。

1.2 微量元素肥料发展历程

我国的微量元素研究始于20世纪40年代,主要研究微量元素对植物生长和碳水化合物代谢的影响。20世纪50年代开始研究土壤微量元素含量及其形态,1956年前后,中国科学院有关研究所开展了土壤化学和农业化学方面微量元素的研究。特别是微量元素对代谢过程的作用与呼吸的关系、对酶的影响的研究都有一些进展。期间,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^[7]。随后继续开展了不同微量元素对番茄、大豆、小麦、水稻、玉米、棉花、甘薯等多种作物产量和品质影响的研究,揭开了我国微量元素肥料应用的序幕。20世纪80年代至90年代后,我国微量元素的研究与应用得到了长足发展。据不完全统计,到1990年全国微量元素肥料施用面积已达1 000万hm²左右,用量达3.4万t,取得了良好社会效益和经济效益。

2 行业现状与产能分析

2.1 主要产品类型与结构

中量元素肥料:如硝酸钙、硝酸铵钙、糖醇钙、流体钙镁等,主要用于预防果蔬的生理病害

(如脐腐病、苦痘病),提高果实硬度。

微量元素肥料:包括含锌、硼、铁、锰、铜、钼的叶面肥、水溶肥等,常用于纠正作物的缺素症状。

螯合技术产品:如乙二胺四乙酸(EDTA)、糖醇、氨基酸螯合的微量元素肥料,这些产品稳定性好、易被作物吸收,利用效率远高于传统无机盐,是高端市场的主流方向^[8]。

功能性肥料:将中微量元素与大量元素肥料一体化造粒,形成“全营养肥料”,是未来肥料工业发展的重要趋势。

2.2 市场规模与增长趋势

过去5年,在化肥“零增长”或“负增长”的政策背景下,农业投入正在从“量”向“质”转变,中微量营养元素市场正成为一个高速增长的新赛道。资料显示:2023年农业中微量营养元素市场总规模攀升至120亿元,年复合增长率稳定在10%以上。

以螯合态铁肥为例,其产能从2021年的85.2万t激增至2025年的124.8万t,产能利用率高达88.3%,体现了市场对高效、稳定形态微量元素产品的强劲需求。钙肥产业则呈现出显著的集群效应,山西交城凭借其资源与产业配套优势,占据了全国硝基钙肥80%以上的市场份额,形成了以硝酸钙、硝酸铵钙、硝酸镁等为主导的30多个产品系列,产品远销全球60多个国家,成为我国新型肥料“走出去”的典范。硝酸铵钙的产量从2021年的237万t增长至2024年的279万t,增速显著。

从产品结构看,锌、铁是市场份额最高的两种微量元素,合计占比超过60%,反映了其在纠正土壤缺素、保障粮食安全中的核心地位。

基础微量元素盐类,如氯化锌、硫酸亚铁等,产量保持稳定增长,为肥料复合化提供了充足的原料保障。与此同时,硼肥产业呈现出“稳中有进”的特点,2023年产量约为75万t。更为重要的是,以缓释硼肥、氨基酸螯合硼为代表的高效新型产品市场渗透率从2020年的10.2%上升至2023年的19.4%,这标志着中微肥行业正从提供基础养分向提供高效、智能的营养解决方案转变。

3 技术创新与研发进展

3.1 关键技术与工艺突破

中微肥行业创新已从单一的工艺改进,迈向原料、工艺、产品与施用技术的系统化创新。行业龙头企业与科研机构在关键技术上持续取得突破。例

如,拜耳集团推出新一代中微量元素水溶肥产品,该产品运用先进的络合和螯合技术,将肥料中的钙离子转化为更稳定、更易吸收的螯合及络合态,大幅度提升了肥料的低温稳定性、溶解度和流动性。中国科学院合肥物质科学研究院在硼分离领域取得突破,该技术可使硼利用率提升至75%以上,较传统工艺提高30%。2023年水肥一体化系统中硼肥配套使用率达63%,较露天种植模式高38个百分点,这清晰地表明“产品+技术”的集成解决方案正成为主流。

内蒙古兰晶生态科技有限公司于2023年建厂,生产的矿物肥富含多种中微量元素和有益元素,截至2025年,建成35万t/a转鼓造粒生产线以及25万t/a超液压挤压造粒生产线,年产能突破60万t。山东丰源集团股份有限公司推出的含大豆多糖中微肥具有低碳环保、吸收快等特点,契合国家减肥增效政策,应用成本低且经济效益显著。

滋育源(山东)生态科技有限公司是一家专业从事纳米悬浮钙及其衍生产品的研发、生产和销售的新型肥料企业,目前形成年产碳酸钙26万t和纳米钙10万t的生产规模,针对作物不同的需求,研发出具有防日灼剂、防裂果剂、大棚降温剂、棉花降糖剂、苹果免套袋剂、药肥双效的含钙产品,农用效果显著。

3.2 机制研究与基础科学支撑

基础科学研究的纵深发展为中微肥的科学应用提供了坚实的理论支撑,推动行业从“经验施肥”走向机制指导下的“精准施肥”。植物根系吸收和地上分配转运的研究取得突破性进展。

如华中农业大学分离克隆油菜硼高效转运子基因NIP5;1和BOR1,缺硼时植物可以主动吸收硼,并且硼转运子呈极性分布^[9]。随后,植物铁、锰、铜、锌、钼和氯等吸收和分配转运子先后被分离克隆。这些研究为中微量元素肥料在农业上的应用提供了坚实的理论支撑。另外,华中农业大学通过与国内外企业合作开发了油菜、柑橘和蔬菜瓜果专用肥以及硼和钼等新型微肥,产生了显著的经济效益。

中国农业大学通过对钙的刺激功能研究发现,钙不仅能稳定细胞膜结构,保持细胞的完整性,而且钙对生物膜的稳定作用在植物对离子的选择性吸收、生长、衰老、信息传递以及植物的抗逆性等方面有重要作用^[10]。还在玉米花生间作解决花生缺铁的生理和分子机制方面取得重要进展。

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研究揭示了玉米施锌与光合作用的关系，研发了锌腐酸尿素、海藻酸尿素和禾谷素尿素，以及锌腐酸/海藻酸磷铵、锌腐酸/海藻酸复合肥等系列增值肥料新产品，在我国锌肥研究与推广中做出重要贡献^[11]。

青岛大学通过对高端流体螯合中微量元素肥料的开发应用，揭示了中微肥在提升作物产品品质、抗逆性的机制，以及对农田生态系统质量的影响，并涉及土壤中微量重金属/农药及抗生素等污染物风险评价及其防治等^[12]。最近，四川农业大学研究明确了水溶性聚磷酸铵对植物必需中微量营养元素钙、镁、锌、铁、铜、锰的螯合情况及溶解规律，开发了保留中微量元素的磷肥新工艺，节约了能源，减少了碳的排放^[12]。北京中农瑞利源高科技发展有限公司研发的全水溶聚碳钙中微肥，实现了果蔬果实密度增加与糖度提高，为聚碳钙肥在经济作物上的大面积推广开辟了新路径。

4 市场与政策环境

4.1 政策、科学认知和市场需求

中微量营养素市场的蓬勃发展，并非单一因素所致，而是政策、科学认知和市场需求共同驱动的结果。

政策驱动：农业农村部的“化肥减量增效”和“测土配方施肥”行动是核心驱动力。这些政策引导农民从单纯使用氮、磷、钾等大量元素肥料，转向科学补充土壤中缺乏的钙、镁、硫、锌、硼、铁等中微量元素，实现“缺什么补什么”的精准施肥。

科学认知提升：随着农业技术的普及，农业种植者越来越认识到中微量元素对提高作物品质（如果实甜度、色泽、耐储运性）、抗逆性（抗病虫害、抗旱、抗寒）以及最终产量至关重要。这从“吃饱”到“吃好”的观念转变，创造了巨大的市场需求。

产业价值升级：消费者对农产品品质的要求越来越高，推动了上游种植端对中微量元素的投入。例如，种植高端水果、品牌蔬菜的基地，会更主动地使用这类产品来提升产品价值。

在粮食安全与农业可持续发展的双重目标下，我国农业正在经历从“重量”到“重质”的深刻转型。中微量营养元素作为提升土壤健康、作物产量和品质的关键投入品，已经从过去的“可选辅助品”变成了今天的“必需营养品”，市场潜力巨大，并将继续保持强劲的增长势头。

我国中微肥产业实现了从分散到集中、从量变到质变的跨越式发展，市场规模持续扩大。

4.2 产品登记与备案情况

我国中微量元素肥料于21世纪初开始登记产品，2001—2011年10年间，根据国家化肥质量监督检验中心（北京）肥料登记信息，我国以产品通用名称为中量元素水溶肥获得农业农村部肥料登记证并在有效期内的肥料产品累计51个。其中，中量元素肥料从2009年开始登记，到2011年共4个，中量元素肥料呈缓慢增长趋势。微量元素肥料于2005年开始登记产品，2005年微量元素水溶肥登记产品402个，微量元素肥料登记产品16个，到2011年，微量元素水溶肥登记产品1 242个，微量元素肥料登记产品42个。共有969家企业生产中微量元素肥料，产地主要在山东等地。产品类型以微量元素水溶肥为主，占中微量元素肥料产品总数的92%，并且呈现快速发展趋势。微量元素水溶肥产品98%是复合型，以锌、锰、硼等组合为主。全国中微量元素肥料涉及的作物已经达到59种之多，基本覆盖了我国主要作物种类。

到2025年9月底，以产品通用名称为中量元素肥料获得农业农村部肥料登记证并在有效期内的肥料产品共198个，其中产品形态为颗粒的104个，形态为水剂的47个，形态为粉剂的47个；非水溶中量元素肥128个，其中形态为颗粒87个，水剂9个，粉剂32个；中量元素水溶肥22个，水剂16个，粉剂6个；微量元素肥料12个，其中水剂3个，粉剂9个；微量元素水溶肥39个，水剂20个，粉剂19个（见表1）。农业用硝酸铵钙33个，农业用硝酸钙1个。

表1 截至2025年9月底我国中微量元素肥料各形态产品登记数量

Table 1 The registered quantities of various form of medium and trace element fertilizers in China as of the end of September 2025

项目	中量元素肥料	非水溶中量元素肥	中量元素水溶肥	微量元素肥料	微量元素水溶肥
水剂	47	9	16	3	20
粉剂	47	32	6	9	19
颗粒	104	87	0	0	0
总计	198	128	22	12	39

自2020年12月农业农村部肥料备案系统上线以来，中微量水溶肥市场持续增长。截至2025年9月底，中量元素水溶肥国内产品备案达到92 619个，境外产品备案37 620个，微量元素水溶肥料国

内产品备案1 63 285个,境外产品备案16 144个。这一方面极大丰富了市场产品供给,满足了多样化需求;另一方面也对事中事后监管、产品质量保障提出了更高要求。表2数据显示,2021年是备案数量爆发的一年,随后几年保持在高位震荡,表明市场已进入一个活跃且稳定的发展平台期。

表2 2020—2025年我国中微量元素水溶肥产品备案数量
Table 2 Filing quantity of water-soluble medium and trace element fertilizer products in China from 2020 to 2025

年份	中量元素水溶肥	微量元素水溶肥
2020	6 500	8 751
2021	22 917	36 737
2022	14 005	23 992
2023	18 489	35 659
2024	17 321	33 704
2025	13 387	25 018

注:2025年数据截至9月底。

5 行业发展面临的挑战与展望

5.1 产量规模稳步增长但结构性不足

我国中微肥产量呈现品类分化特征。硼酸产量从2019年的16万t增至2021年的23万t,硼砂产量同期从11.6万t降至7.0万t。钙肥产业形成集群效应,山西交城占全国硝基钙肥80%份额,硝酸铵钙等产品出口60余国。硫酸锰2020年产量为47.9万t,广西占比31.7%。但整体仍存缺口:锰矿进口依赖度高达80%~90%,2024年进口量2 928万t;硼酸2021年进口31万t,表观消费量超过国产产量1.3倍。

5.2 原料结构资源丰富但利用受限

我国关键资源储量全球领先:钼矿占全球总储量的30.8%(370万t),锌矿储量为全球总储量的20%,硼矿储量7 503万t(世界第五)。但开发瓶颈突出,主要体现在品位低,80%磷矿为中低品位,锌、锰矿平均品位低于国际水平;分布不均,锰矿43%集中在广西,硼矿97%分布于青海、辽宁、西藏;锰矿选冶难度大,导致进口依赖,硼矿近10年查明储量下降4.3%。

5.3 产品同质化与市场秩序问题

中微肥行业市场准入门槛较低,尚未形成具有明显带动作用的龙头企业,大量中小企业的涌入导致产品同质化问题日益突出。部分企业依赖“炒作概念”夸大产品功效,缺乏核心技术支持,甚至出现假冒伪劣现象,严重损害行业整体信誉。此外,部分产品作用机制不明确,缺乏科学施用指导,农

户认知有限,推广过程中高度依赖高成本的试验示范。同时,中量元素和微量元素肥料领域仍缺乏统一的行业标准,产品质量参差不齐,市场监管缺乏有效依据,进一步制约了市场的规范发展。

5.4 科技研发与成果转化投入不足

多数企业研发投入占比低于行业平均水平(2.5%),依赖传统工艺,高端产品如纳米微肥、生物微肥占比仅15%~34%,核心技术(如螯合技术)仍依赖进口。2025年行业设备升级需投入18亿~22亿元,但中小企业因资金短缺难以承担。尽管头部企业拥有专利技术,但行业整体产学研合作薄弱,创新成果转化率低。

5.5 环境污染治理压力持续增大

传统微肥生产过程中废水、废气排放超标,磷石膏等固体废弃物综合利用率不足30%。2024年行业治污成本占生产成本的12%~15%,较2020年提升5个百分点,部分企业为降低成本违规排放。

5.6 新形势下的国际竞争与产业升级压力

随着精细化农业的不断推进,市场对定制化产品的需求激增,水溶肥、缓控释肥渗透率提升,但高端产品如纳米微肥、生物微肥仅占市场的15%~34%;核心技术依赖进口,自主创新能力有待提升;全球肥料巨头加速布局特种肥料市场,国内企业面临更大竞争压力。

6 发展趋势与展望

未来,中微肥行业将围绕“精准化、绿色化、智能化”三大方向,推动从“补充角色”升级为“农业绿色核心支撑”。优化产品结构,高端产品占比提升至50%以上,纳米微肥、生物微肥等新型产品市场渗透率显著提高,突破关键核心技术,实现自主可控,肥料利用率提高15~20个百分点。

6.1 工艺技术方向

传统无机盐肥料(如硫酸锌)易被土壤固定,新型工艺聚焦提升有效性:(1)螯合技术,Fe-EDTA(乙二胺四乙酸铁)、锌腐酸等有机螯合微肥吸收率提高30%~50%;(2)载体创新,聚磷酸铵螯合钙镁锌铁等元素,实现养分缓释与减碳双效;(3)工艺融合,水溶性聚碳钙肥提升草莓糖度,海藻酸尿素增强抗逆性;(4)诊断精准化,基于土壤-作物系统的实时营养诊断技术逐步推广。

6.2 产品创新方向

中微肥产业产品体系升级主要体现在以下3个方面:一是浓度提升,水溶肥占比从10%增至2024年的35%,颗粒型备案产品占比达21.3%;二是功

能复合,形成速效型(硝基复合肥)、抗逆型(腐植酸铁肥)、智能型(按需释放养分)全系列;三是专用定制,723种登记水溶肥中,83种含6种微量元素(Cu+Fe+Mn+Zn+B+Mo),2024年定制化微肥备案超11万种。

水溶肥与叶面肥升级,高溶解度、无沉淀的水溶性微肥(如全水溶硼酸钾满足滴灌和叶面喷施需求)抢占高端市场。传统粉剂、颗粒剂与液体悬浮肥并存,适应不同施用场景。中微肥与生物刺激素(如海藻酸、氨基酸等)结合,开发功能性复合产品,提升作物抗逆促生效果;发展具有土壤改良功能的肥料产品,如调理酸性土壤的硅钙肥、改善盐碱地的腐植酸肥等;研发抗逆型特种肥料,帮助作物抵御干旱、低温、盐碱等逆境。

基于大规模的土壤普查数据和作物营养基因组学研究成果,未来将发展更加精细化的专用配方。例如,针对南方酸性土壤的“钙镁调理型微肥”;针对北方石灰性土壤的“铁锌活化型微肥”;针对高经济价值作物的“果树专用硼肥”“蔬菜专用钙肥”等,实现“一地一策”和“一作物一方案”的精准养分管理。

6.3 绿色发展和资源循环

绿色转型聚焦3个维度:源头上,聚磷酸铵工艺减少碳排放,锌腐酸尿素降低氮损失20%;使用端,水溶肥利用率达60%(传统肥利用率仅30%),减少土壤固定与淋溶损失;废弃物利用层面,钢铁渣、磷石膏转化为钙镁硅肥,实现工业副产物资源化。

未来将广泛采用食品级硫酸锌、试剂级硼酸等高纯度原料,从源头上降低重金属等有害杂质含量,提升肥料的安全性与有效性。同时,开发城市污泥、工业副产物等的新型资源化利用途径,将是实现循环经济和降低生产成本的重要方向。

7 结语

中微肥正从“辅助养分”转向“品质引擎”。通过螯合技术突破资源限制,水溶工艺降低环境风险,定制化产品满足品质农业需求。未来需在降解材料研发、精准施用系统、循环技术3个维度突破,实现“土壤健康-作物优质-人体营养”全链条提升。

【参考文献】

[1] 陆景陵.植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社,2003.

[2] 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 & Compound Fertilizer, 2019, 34(1):34-35, 45.

[3] 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.

[4] 牛彦超,朱盼盼,马彦平.整合态中微量元素肥料现状分析及前景展望[J].肥料与健康,2022,49(5):6-10.
NIU Y C, ZHU P P, MA Y P. Analysis of Current Situation and Prospect of Chelated Medium and Trace Element Fertilizers [J]. Fertilizer & Health, 2022, 49(5):6-10.

[5] 刘桂东,姜存仓,石磊,等.我国微量元素肥料研究及应用的历程与展望[J].植物营养与肥料学报,2024,30(9):1794-1811.
LIU G D, JIANG C C, SHI L, et al. Development and prospect on research and application of micronutrient fertilizers in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(9):1794-1811.

[6] 刘铮,唐丽华,朱其清,等.我国主要土壤中微量元素的含量与分布初步总结[J].土壤学报,1978,15(2):138-150.
LIU Z, TANG L H, ZHU Q Q, et al. Content and Distribution of Trace Elements in Soils of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 1978, 15(2):138-150.

[7] 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.

[8] 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.

[9] ZHANG C, HE M L, WANG S L, et al. Boron deficiency-induced root growth inhibition is mediated by brassinosteroid signalling regulation in Arabidopsis [J]. The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology, 2021, 107(2):564-578.

[10] PENG Y, MING Y H, JIANG B C, et al. Differential phosphorylation of Ca²⁺-permeable channel CYCLIC NUCLEOTIDE-GATED CHANNEL20 modulates calcium-mediated freezing tolerance in Arabidopsis [J]. The Plant Cell, 2024, 36:4356-4371.

[11] 赵丽芳,袁亮,张水勤,等.锌与尿素结合对锌有效性及尿素转化的影响[J].中国农业科学,2021,54(16):3461-3472.
ZHAO L F, YUAN L, ZHANG S Q, et al. Effects of Zinc Combined with Urea on Zinc Availability and Urea Conversion [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(16):3461-3472.

[12] 王辛龙,杨升东,许德华,等.含整合态中微量元素的水溶性聚磷酸铵及其制备方法:CN109503236A[P].2019-03-22.