

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.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.06.005

增效载体在新型微量元素肥料中的应用现状及前景展望

姜存仓,肖思赞

华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心,武汉 430070

摘要 微量元素是植物生长发育必需的营养元素,微量元素肥料在作物增产提质、逆境抗性和农田健康等方面有重要作用。相对于传统的微量元素肥料,通过增效载体与微量元素有机结合制成的新型微量元素增效载体肥料具有水溶性好、移动性快、稳定性强、难以被土壤固定且易于被植物吸收利用等特点。筛选或创制增效载体是新型微量元素肥料研发的核心环节,本文概述了新型微量元素肥料增效载体及其类型、主要作用机制,综述了新型微量元素肥料增效载体的研发现状及其在农业生产中的应用效果,指明了新型微量元素增效载体肥料在实际应用中存在的问题,提出了针对性建议,并对其下一步发展趋势进行了展望。

关键词 增效载体;新型肥料;养分增效;微量元素肥料;肥料增效载体

中图分类号 TM3;TQ4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)06-0026-09

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到了不可替代的作用。植物对微量元素的需求量虽小,但一旦缺乏,则会影响作物的生长发育,导致作物产量、品质下降,甚至植株枯萎死亡^[1]。施肥是提高作物产量和品质的有效途径。我国早期施用的微量元素肥料多为无机盐,如硫酸亚铁、硫酸铜、硼砂等。无机微肥制备简单且生产成本较低,但无机盐中的金属离子施入土壤后易被土壤中的 CO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 等固定,生成难溶性的盐,难以被作物吸收利用,从而降低肥料利用率^[2]。且无机盐在土壤中的酸碱度适宜范围较小,一旦土壤的酸碱性超过无机离子的适应范围,微量元素的有效性降低,且微量元素易被土壤胶体吸附^[3]。肥料增效载体是能够对肥料中营养元素进行改性增效的功能物质,通常具有调肥、调根、调土、调代谢、信息靶向等功能。目前有关微量元素肥料的研究多采用有机螯合剂作为增效载体与微量元素在一定条件下进行螯合反应,形成具有稳定性质的螯合物,如EDTA-Fe、黄腐酸-铁、赖氨酸-锌、山梨醇-硼等。相较于传统无机微量元素肥料,增效载体型微肥具有水溶性好、稳定性强、不易被土壤固定且利于作物吸收等优点,可以有效提高肥料利用率,减少养分损

失,实现对传统微量元素肥料的改进。

在保证粮食安全前提下,如何减少肥料用量,提高其利用率,降低肥料对环境的影响,选择合适的增效载体是实现肥料功能提升的关键环节。微量元素与增效载体形成的化合物的稳定性越好,对养分的运载能力越强,但是对于植物吸收利用而言,土壤中养分的稳定性过高或过低都不理想,稳定性过高不利于根系吸收和有效地释放微量元素养分;稳定性过低易在土壤中被分解固定,无法安全到达植物根系。因而对微量元素增效载体的开发显得尤为重要。

本文介绍了目前微量元素肥料中增效载体的主要类型,概述了近年来新型微量元素肥料增效载体的研发状况、应用效果以及作用机制,并对新型微量元素肥料增效载体发展趋势进行了展望,以期为新肥料开发提供参考。

1 增效载体及其类型

随着肥料行业的迅速发展,微量元素载体的种类由人工化学合成类的EDTA发展到腐殖酸类、氨基酸类等大分子有机物类,再到海藻提取物类、生物炭类、功能菌类等绿色新型增效载体,形成了种类繁多的新型微量元素肥料体系。根据载体的来源及作

收稿日期:2023-09-29

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2023YFD1700204)

姜存仓,E-mail:jcc2000@mail.hzau.edu.cn

用机制的不同,可以划分为以下几个主要类型:化学合成类、腐殖酸类、氨基酸类、糖醇类、小分子有机酸类、纳米材料、海藻提取物类、生物炭(炭基材料)类、功能菌及其发酵液或代谢物类等(图1)。

目前,对新型增效载体的开发和应用仍在探索中。Ueno等^[4]利用L-脯氨酸合成PDMA(脯氨酸-2'-脱氧麦根酸),相较于DMA(脱氧麦根酸),成本更加低廉,分子更加稳定。研究表明,PDMA-Fe能够活化土壤中的难溶铁,有效改善水稻、黄瓜的铁营

养,且效果明显优越于传统铁肥。微生物及其分泌物同样可作为土壤中微量元素的载体。左元梅等^[5]发现,芽孢杆菌1603IPR-02的分泌物含有异羟肟酸型铁载体,对土壤难溶性铁具有很好的螯合能力,在石灰型土壤上能够显著改善花生对铁的吸收利用并提高光合作用效率。此外,天然高分子金属螯合剂HSAL是一种基于硫酸木质素的改性材料,研究表明,HSAL可以有效螯合钙、铁、锌等微量元素以提高养分的有效性,从而促进水稻和拟南芥的生长^[6]。

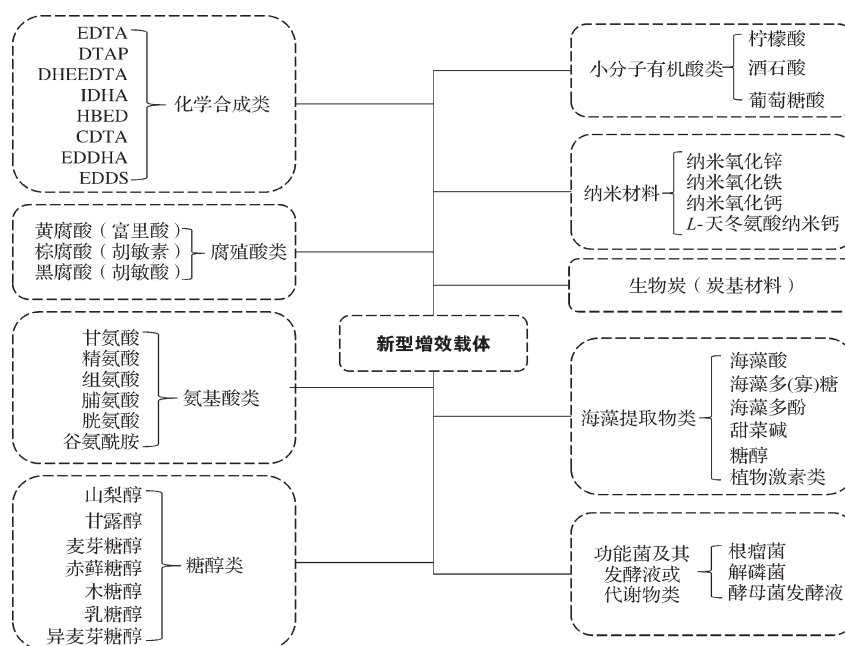


图1 新型微量元素肥料增效载体类型

Fig.1 Efficiency enhancing carrier types of new micronutrient fertilizers

2 增效载体的主要作用机制

2.1 化学合成类

自1935年EDTA首次人工合成以来,化学合成类螯合剂开始被广泛应用于微量元素肥料中。目前主要有EDTA、NTA(氨基三乙酸)、DTAP(二亚乙基三胺五乙酸)、IDHA(亚氨基二琥珀酸)、EDDHA(乙二胺-N,N'-2-羟基苯乙酸)、HBED[N,N'-二(2-羟基苯基)亚乙基二胺-N,N'-二乙酸盐]等。其中,生产和使用最为广泛的是EDTA,能够有效结合金属离子,与锌、锰、铜、铁等微量元素均可合成稳定的螯合物^[7]。但在自然条件下EDTA生物降解的第一个产物为ED3A(乙二胺三酸酯),不易被普通微生物降解,可以自发环化为更顽固的3KP(3-酮哌嗪-N,N'-二乙酸盐),持续污染环境且具有一定的生物毒性^[8]。因此,目前EDTA、NTA、DTAP等均被欧洲

国家禁用。

2.2 腐殖酸类

腐殖酸是由动植物残体(主要是植物残体)经微生物的分解作用以及生物化学过程而形成的一种具有复杂结构的大分子有机物质。根据腐殖酸在溶剂中的不同颜色与溶解性差异可划分为黄腐酸(富里酸)、棕腐酸(胡敏素)、黑腐酸(胡敏酸)。腐殖酸含有C、H、O、N等元素以及羟基、羧基、羰基、酰基、酚羟基、醇羟基、甲氧基等含氧官能团。这些含氧官能团使得腐殖酸拥有弱酸性、离子交换性、络合性、氧化还原性以及生理活性等基本性质^[9]。腐殖酸与金属离子不仅可以按照一般方式生成盐,还可以通过其侧链上的含氧官能团与Fe、Zn、Mg、B、Mo等金属的离子形成络合物或螯合物,通过络合(螯合)作用,使得土壤中难溶性或不溶性的微量元素转化为可溶

性螯合微肥,提高土壤中微量元素的有效性^[10]。

2.3 氨基酸类

某些氨基酸具有生长调节剂的功能,可以促进植物的光合作用和呼吸作用。同时,由于氨基酸中含有的羧基和氨基等官能团,因而具有一定的螯合能力。氨基酸的羧基与微量元素通过1个或多个配位键共价结合,形成稳定性的络合物。氨基酸种类繁多且不同氨基酸生理功能不同,目前市场上氨基酸肥料多以皮毛等含蛋白质分解后的各种氨基酸混合物为主。作物生产上施用微量元素多采用叶面喷施,某些微量元素因其相对分子质量较大,难以通过叶表扩散至植物体内^[11]。氨基酸-微量元素络合物以氨基酸为载体,参与机体内蛋白质的合成,可被植物直接吸收利用。与无机来源相比,增加了微量元素的有效性,提高植物对微量元素的吸收和转运速率,对作物的增产效果更为明显^[12]。

2.4 糖醇类

糖醇是含有2个及以上羟基的多元醇,是植物光合作用的初产物之一。目前开发的有山梨糖醇、甘露糖醇、麦芽糖醇、赤藓糖醇、木糖醇、乳糖醇、异麦芽糖醇等^[13]。糖醇上的羟基作为配位体提供孤对电子,使其能够与微量元素形成具有环状稳定结构的络合物^[14]。而以液态形式稳定存在的糖醇螯合物则具有更高的溶解度,可以在植物体内进行长距离移动,提高了营养元素的移动性及利用效率^[15]。另外,糖醇相对分子质量较小,叶面喷施糖醇肥,其叶面渗透能力更强,提高了作物对养分的吸收效率。

2.5 小分子有机酸类

小分子有机酸类主要指既含有羟基也含有羧基的有机酸,包括酒石酸、柠檬酸和葡萄糖酸等。有机酸以羟基和羧基上的氧与金属离子形成配位键,生成环状螯合物。在酸性条件下,其基团上的氢难以解离,与金属离子的螯合能力较差;在碱性条件下则螯合物结构不稳定,易发生反应,一般仅在偏碱性或中性条件下螯合性能较好^[16]。但也有学者认为,柠檬酸在pH为4~8条件下具有较强的螯合能力,其反应生成物在酸性条件下更加稳定^[17]。这可能是小分子有机酸及其螯合的微量元素不同所产生的反应条件差异。小分子有机酸具有水溶性强、易被生物降解等特点,更易被植物吸收利用,且对环境 and 作物的影响较小。

2.6 纳米材料

纳米材料指在纳米尺度范围内或具有纳米级结

构的物质,已被广泛应用于化工、电子、能源、医药、生命科学和农业等领域^[18]。纳米材料具有较强的吸附性、反应性、物理化学动态性以及溶液体系中的团聚能力^[19],使之可以通过多种机制进入植物细胞组织^[20]。纳米肥料是指将营养物质加工成纳米尺度,或以纳米粒子为载体,通过吸附、螯合、包膜等方式制备成含有纳米结构的新型肥料。纳米锌、纳米钙、纳米钼等具有纳米特性的材料,活性更高,养分更容易被作物吸收。另外,利用纳米材料包膜可以有效减缓肥料的溶解速率,从而达到缓释控释的目的,最大程度地提高肥料养分效率^[21-22]。

2.7 海藻提取物类

海藻是生活在沿海的大型多细胞简单植物,含有丰富的N、P、K等元素^[23],也是植物正常生长发育所需的微量元素的优质来源。用作肥料的海藻一般是大型经济藻类,如巨藻、泡叶藻、海囊藻等,海藻提取物作为海藻肥的主要功能物质,其活性成分主要包括海藻多(寡)糖、海藻酸、甜菜碱、海藻多酚和甘露醇等糖醇以及生长素、细胞分裂素、赤霉素、脱落酸等激素类物质^[24-25]。因此,海藻提取物不仅可以提高肥料的利用效率,且具有一定的促进植物生长发育、提高植物抗逆性的作用^[26]。

2.8 生物炭(炭基材料)类

生物炭在农业生产中多用作土壤改良剂、重金属污染吸附剂。生物炭的吸附性主要是由于其表面积大、孔隙率高或存在允许离子结合的官能团,可以用来吸附植物生长发育必需的微量营养素离子,提供了将生物炭与提供必需微量元素营养肥料相结合的可能性^[27]。目前生物炭被用作植物必需大量元素(炭基复合肥)的增效载体较多,而用作微量元素载体的研究仍较少。

2.9 功能菌及其发酵液或代谢物类

目前,功能菌类在肥料行业中的应用主要分为两类:一是微生物菌肥,在土壤中通过直接添加菌株(如根瘤菌、解磷菌等)达到增产增效目的;其二是微生物次生产物,如发酵液和代谢产物等。研究表明,功能菌及其代谢物作为载体与微量元素肥料配合施用有利于作物对微量元素的吸收^[28],但其具体作用机制尚不完全明确,国际上的研究方兴未艾。

3 微量元素肥料增效载体的研发现状

面对资源、能源、环境和粮食安全等方面的严峻

挑战,国家对化肥的使用提出了更高的要求。对此,加强科技创新、研发高效新型肥料是我国肥料产业以质改量的必然选择。近年来对于微量元素肥料增效载体的研发越来越受到国内外学者的关注。对于新产品的开发和研制,陆艳等^[29]以微肥、黄腐酸以及胺鲜酯作为主要活性成分研制苜蓿种衣剂,通过不同浓度与组合,确定了以0.15%微肥、0.2%黄腐酸和0.02%胺鲜酯对苜蓿种子包衣处理,能够有效提高种子萌发率并促进幼苗生长。曹胜磊^[30]通过对木质素、纤维素和鸡毛进行化学改性,成功制备了缓释铁肥PL-CF-Fe(酚化鸡毛碱解铁)、复合缓释锌肥Cell-CF-Zn(纤维素-鸡毛碱解锌),成本更为低廉且具有较大的应用潜力。同时,针对新型微量元素肥料的表征分析,牛红艳等^[31]研制了一种新型淀粉基缓释铜肥,采用红外、元素分析及扫描电镜等手段对其组成和形貌进行表征,并通过水溶出率及土壤培养法表明该肥料具有较好的缓释效果。在工艺优化方面,王铁军等^[32]的研究对微贮腐熟工艺生产有机肥的效果特性参数与肥源物料配比、微生物菌剂施用量、物料含水率、腐熟时间等关键工艺参数进行指标检测并建立回归模型,分析确定了最优工艺参数。葛淑华^[33]脱除了废革屑多肽中的重金属,并将

其与Ca²⁺、Zn²⁺、Fe²⁺进行螯合反应,制备成为新型肥料。研究表明,该多肽螯合肥可以有效提高苏州青油菜的叶绿素含量,可以促进其植株的生长,达到增产目的。前期一些学者已开展了较多的工作。从近些年我国新型微量元素肥料相关的研究生毕业论文设计(表1),以及有关微量元素肥料增效载体研发论文发表年度分布(图2)等,可以看出,目前的工作重点主要集中在新型微量元素肥料的开发和研制、肥料表征和机制研究,以及对现有工艺优化和应用效果的分析等方面。

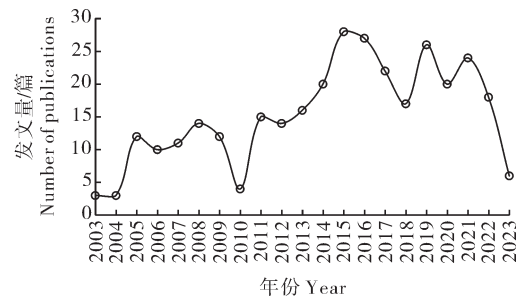


图2 增效载体微量元素肥料相关研发论文发表年度分布图

Fig.2 Annual distribution map of research and development papers related to efficiency enhancing carrier micronutrient fertilizers

表1 近些年我国新型微量元素肥料相关的研究生毕业论文设计统计

Table 1 China's new micronutrient fertilizer related graduate thesis statistics in recent years

载体及微肥类型 Type of micronutrient fertilizer	研发方向 Research direction	时间 Time	文献来源 Literature resources
腐殖酸液肥 Humic acid liquid fertilizer	工艺优化 Process optimization	2022	[34]
柠檬酸螯合肥 Citric acid chelating fertilizer	制备方法与表征 Preparation method and characterization	2021	[16]
多肽螯合肥 Peptide chelate fertilizer	工艺优化/应用效果分析 Process optimization/application effect analysis	2019	[33]
氨基酸-铜,氨基酸-铁 Amino acid-copper, amino acid-ferrous	制备方法 Preparation method	2018	[14]
磷酸二氢铵-硼 Ammonium dihydrogen phosphate-boron	制备方法 Preparation method	2017	[35]
甘氨酸-锌,甘氨酸-铜 Glycine-zinc, glycine-copper	新型研制 New development	2017	[36]
腐殖酸钾 Potassium humate	工艺优化/应用效果分析 Process optimization/application effect analysis	2016	[37]
聚磷酸铵-镁/铜/铁 Ammonium polyphosphate-magnesium/copper/iron	新型研制 New development	2016	[38]
水溶硼/锌/铜 Water soluble boron/zinc/copper	新型研制 New development	2016	[39]
缓释铁/锰/铜/锌 Slow-release iron/manganese/copper/zinc	新型研制 New development	2015	[40]
甘氨酸-钙 Glycine-calcium	新型研制/应用效果分析 New development/application effect analysis	2015	[41]
甘氨酸/赖氨酸/甲硫氨酸-铜 Glycine/lysine/methionine-copper	新型研制 New development	2014	[42]
硫肥+锌/钙 Sulphur fertilizer+zinc/calcium	工艺优化/应用效果分析 Process optimization/application effect analysis	2013	[43]
三乙醇胺 Triethanolamine	新型研制 New development	2012	[44]
甘氨酸+钙/铁/铜 Glycine+calcium/iron/copper	制备方法与表征 Preparation method and characterization	2012	[45]
氨基酸螯合肥 Amino acids trace-element fertilizers	新型研制 New development	2011	[46]
腐殖酸 Humic acid	新型研制/应用效果分析 New development/application effect analysis	2010	[47]
多糖、抑菌剂 Polysaccharides and bacteriostatic agents	新型研制/应用机理 New development/application mechanism	2009	[48]
EDTA、有机酸 EDTA and organic acid	表征与机理 Characterization and mechanism	2008	[49]

4 增效载体在微量元素肥料的应用

目前有关增效载体在微量元素肥料中的应用效果已有大量研究(表2)。研究表明,腐殖酸螯合微肥不仅可以提高作物产量,还可以提高植物的抗寒、抗旱及抗病能力^[65]。周丽平等^[66]的研究发现,腐殖酸对作物根系的生长发育有一定的调控作用。以纳米材料作为微肥载体,可以实现将微量营养元素靶向传输到植物体内的目标位置,提高养分的利用效率^[67]。邓秀丽^[59]研究了含海藻酸钠寡糖肥料对黄瓜、芥菜、苦麦菜、苋菜、空心菜以及辣椒等6种作物生长及产量的影响,结果显示其对各作物的影响效果均不相同。海藻酸钠寡糖能够显著提高西瓜的发芽率,对盆栽黄瓜的促根效果最为显著,而对空心菜的增产效果最好。林怡^[68]的研究表明,当施用140、

175 mg/L的糖醇-钙时,蓝莓的产量及果实品质得到较大提高,而当施用质量浓度为70 mg/L时,增产或品质改善效果不佳。Li等^[62]通过叶面喷施的方式探究山梨醇-钙对马铃薯品质的影响,发现相较于无机钙肥,喷施山梨醇-钙的马铃薯可溶性糖提高了8.8%,硝态氮含量降低了11.89%,且有效提高了马铃薯的产量。因此,增效载体在微肥中的应用效果与载体的类型、植物种类、施用量及施用方法等有关。

5 问题与展望

当前,我国农业对“优质、高产、绿色”的要求不断提高,微量元素肥料的发展也越来越重要。增效载体型微肥的大力开发与推广应用已成为必然需

表2 目前已报道的增效载体微量元素肥料应用情况

Table 2 Application of currently reported efficiency enhancing carrier micronutrient fertilizer

作物种类 Category of crops	载体微肥 Carrier micronutrient fertilizer	植物 Plant	施用量/浓度 Application amount/ concentration	施肥方法 Application method	应用效果 Fertilization effect	参考文献 References
粮食作物 Food crops	柠檬酸锌 Zinc citrate	小麦 Wheat	0.2 mg/mL	浸种 Seed soaking	提高小麦种子的发芽率以及小麦幼苗内过氧化物酶活性	[16]
	根瘤菌+微肥 Rhizobium + micronutrient fertilizer	大豆 Soybean	20 mL/hm ² 80 kg/hm ²	土壤施用 Soil application	提高大豆叶片叶绿素含量,增加大豆可溶性糖及可溶性蛋白含量,提高大豆产量	[50]
	纳米氧化锌 ZnO NPs	水稻 Rice	5 g/L	叶面喷施 Foliar spraying	改善植株生长、产量及产量性状、土壤微生物数量和脱氢酶活性	[51]
油料作物 Oil-bearing crops	山梨醇/甘露醇/丙三醇-硼 Sorbitol/mannitol/ glycerol-boron	油菜 Rape	25 μmol/L	营养液 Nutrient solution	能促进植株的生长,显著提高油菜叶片色素含量、根系活力以及地上部硼含量	[52]
	纳米氧化钙 CaO-NPs	花生 Peanut	500 mg/L	叶面喷施 Foliar spraying	提高了花生的萌发率和生长速度	[53]
	L-天冬氨酸钠钙 Ca(L-asp)-NPs	油菜 Rape	100 mg/L	营养液 Nutrient solution	促进油菜根系生长,增加叶绿素含量,提高叶片光合速率,提高可溶性蛋白含量	[54]
蔬菜作物 Vegetable crops	黄腐酸铁 FA-Fe	菠菜 Spinach	10 mmol/1.5 L 20 mmol/1.5 L	叶面喷施 Foliar spraying	植株叶片叶绿素含量、铁含量显著增加,提高了菠菜的产量	[55]
	赖氨酸/苏氨酸/蛋氨酸-锌 Lysine/threonine/methionine-zinc	洋葱 Onion	0.5% (w/v) 1 000 L/hm ²	叶面喷施 Foliar spraying	鳞茎中锌含量显著增加,增强了锌在植物体内的运输效率,提高洋葱产量与品质	[56]
	氨基酸-钙 Amino acid-Ca	结球生菜 Cabbage lettuce	30 g/L 0.5%	叶面喷施 Foliar spraying	提高结球生菜产量和品质,促进对钙、磷、钾等养分的吸收,增加经济效益	[57]
	甘露醇/木糖醇-钙 Mannitol/xylitol-Ca	小白菜 Pakchoi	150 mg/L	叶面喷施 Foliar spraying	促进了小白菜生长和养分吸收,并改善了其品质	[58]
	海藻酸钠寡糖 Sodium alginate oligosaccharides	黄瓜 Cucumber 辣椒 Capsicum 空心菜 Water spinach	30 mg/mL	土壤施用 Soil application	提高作物株高,增加茎粗、叶片数量,提高作物产量,增加根际土壤的有机质含量	[59]
	亚氨基二琥珀酸螯合铁 IDHA-Fe	生菜 Lettuce	6 mg/L	叶面喷施 Foliar spraying	增加生菜的可溶性蛋白含量及可溶性糖含量,提高产量和质量	[60]
其他作物 Other crops	生物炭+微肥 Biochar + micronutrient fertilizer	蚕豆 Broad bean	1 mL/L	土壤施用+叶面喷施 Soil application and foliar spraying	促进蚕豆的生长发育及蚕豆的碳水化合物、蛋白质、脂肪和微量元素的含量,提高根际的酶活性	[61]
	山梨醇-钙 Sorbitol-Ca	马铃薯 Potato	4 500 g/hm ²	叶面喷施 Foliar spraying	显著提高马铃薯产量,有效促进土壤中主要养分的吸收利用,提高马铃薯品质	[62]
	乙二胺-N'N'-2-羟基苯乙酸螯合铁 EDDHA-Fe	梨 Pear	6% 稀释3 000倍	叶面喷施 Foliar spraying	有效防治梨缺铁性黄化病,提高植株抗性	[63]
	腐殖酸-锌 Humic acid-Zn	酸浆 Physalis alkekengi L.	2 g/L	叶面喷施 Foliar spraying	显著提高酸浆叶片的叶绿素含量,促进植株的发育	[64]

求。化学合成类载体虽然稳定性强,但不利于植物的吸收利用,且部分载体存在难以被生物降解、对环境和作物造成污染和危害的问题。而氨基酸、腐殖酸等天然有机载体则更容易被作物吸收,但与微量元素的结合率较低,稳定性也较差,难以实现工业化、高纯度、高稳定性生产。因此,对新型载体微量元素肥料而言,一是要对现有不同类型增效载体进行有针对性的筛选;二是加强对人工合成、动植物或微生物等增效载体新型材料的源头创新、原创探索开发;三要对新型载体肥料工艺进行优化升级;四要注重对与增效载体适配的新型肥料原料的选择。此外,目前市面所售的“肥料增效剂”存在成分不明、机制不清、效果不稳、使用不当等问题,但基于增效载体生产及检测行业标准目前仍未推出,建议在政策层面加强对增效载体微量元素肥料的管控与支持,促进其健康、规范、有序的发展。

参考文献 References

- [1] 关春彦. 中微量元素与作物[J]. 吉林农业, 2007(8): 28-29. GUAN C Y. Medium and trace elements and crops[J]. Agriculture of Jilin, 2007(8): 28-29 (in Chinese).
- [2] 林海波, 夏忠敏, 陈海燕. 有机、无机肥料配施研究进展与展望[J]. 耕作与栽培, 2017(4): 67-69. LIN H B, XIA Z M, CHEN H Y. Advances and prospects of rational application of organic and chemical fertilizers [J]. Tillage and cultivation, 2017(4): 67-69 (in Chinese with English abstract).
- [3] 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 (in Chinese with English abstract).
- [4] UENO D, ITO Y, OHNISHI M, et al. A synthetic phytosiderophore analog, proline-2'-deoxymugineic acid, is efficiently utilized by dicots[J]. Plant and soil, 2021, 469(1): 123-134.
- [5] 左元梅, 王天琪, 王男麒, 等. 一种来自于芽胞杆菌的微量元素螯合剂及其应用: CN113717885B[P]. 2023-06-27. ZUO Y M, WANG T Q, WANG N L, et al. Trace element chelating agent from bacillus and application of trace element chelating agent: CN113717885B[P]. 2023-06-27 (in Chinese).
- [6] LIU Q, KAWAI T, INUKAI Y, et al. A lignin-derived material improves plant nutrient bioavailability and growth through its metal chelating capacity [J/OL]. Nature communications, 2023, 14: 4866 [2023-09-29]. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40497-2>.
- [7] KNEPPER T P. Synthetic chelating agents and compounds exhibiting complexing properties in the aquatic environment [J]. TrAC trends in analytical chemistry, 2003, 22(10): 708-724.
- [8] YUAN Z W, VANBRIESEN J M. The formation of intermediates in EDTA and NTA biodegradation [J]. Environmental engineering science, 2006, 23(3): 533-544.
- [9] ZAVYALOVA N E, VASBIEVA M T. Elemental composition and structure of humic acids in virgin and arable soddy-podzolic soils of the cis-urals [J]. Eurasian soil science, 2021, 54(10): 1575-1580.
- [10] 王强. 腐殖酸与铁锰铝及其氧化物的相互作用机理研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005. WANG Q. Interactions of humic acids with Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{2+} ions and their oxidizes and the mechanisms [D]. Chongqing: Southwest Agriculture University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [11] GOOS R J, JOHNSON B E, THIOLLET M. A comparison of the availability of three zinc sources to maize (*Zea mays* L.) under greenhouse conditions [J]. Biology and fertility of soils, 2000, 31(3): 343-347.
- [12] 邵建华, 陆腾甲. 氨基酸微肥的生产和应用进展[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(4): 48-51. SHAO J H, LU T J. Review of production of amino acid based microelement fertilizer & its application [J]. Phosphate & compound fertilizer, 2000, 15(4): 48-51 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李腾升, 魏倩倩, 黄明丽, 等. 糖醇螯合肥在农业上的应用研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1393-1403. LI T S, WEI Q Q, HUANG M L, et al. Research progresses on the application of sugar alcohol chelated fertilizers in agriculture [J]. Acta pedologica sinica, 2021, 58(6): 1393-1403 (in Chinese with English abstract).
- [14] 马强. 微量金属元素螯合肥制备方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018. MA Q. Study on the preparation method of trace metallic chelate fertilizer [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [15] 何键, 聂兆广, 李玲玉, 等. 螯合肥料在农业上的应用效果研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 507-512. HE J, NIE Z G, LI L Y, et al. The application effects of chelate fertilizers in agriculture [J]. Chinese journal of soil science, 2017, 48(2): 507-512 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王海. 柠檬酸螯合锌、铜、锰化合物的制备与表征[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. WANG H. Preparation and characterization of citric acid chelated zinc, copper and manganese compounds [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [17] 牛彦超, 朱盼盼, 马彦平. 螯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 (in Chinese with English abstract).
- [18] GOSWAMI L, KIM K H, DEEP A, et al. Engineered nano particles: nature, behavior, and effect on the environment [J]. Journal of environmental management, 2017, 196: 297-315.
- [19] MAUTER M S, ZUCKER I, PERREAULT F, et al. The role of nanotechnology in tackling global water challenges [J]. Nature sustainability, 2018, 1(4): 166-175.

- [20] YANG J E, CAO W D, RUI Y K. Interactions between nanoparticles and plants: phytotoxicity and defense mechanisms[J]. *Journal of plant interactions*, 2017, 12(1): 158-161.
- [21] 殷宪国. 纳米肥料制备技术及其应用前景[J]. 磷肥与复肥, 2012, 27(3): 48-51. YIN X G. The preparation technology of nanometer fertilizer and its application prospect[J]. *Phosphate & compound fertilizer*, 2012, 27(3): 48-51 (in Chinese with English abstract).
- [22] GHORMADE V, DESHPANDE M V, PAKNIKAR K M. Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants [J]. *Biotechnology advances*, 2011, 29(6): 792-803.
- [23] ZHANG N, CHU R, ZHANG N N, YAN J K. Seaweed fertilizer improved drought tolerance of tomato seedlings in sandy soil[J]. *Plant nutrition*, 2023, 46(16): 3869-3880.
- [24] 李长宁, SRIVASTAVA M K, 农倩, 等. 水分胁迫下外源 ABA 提高甘蔗抗旱性的作用机制[J]. *作物学报*, 2010, 36(5): 863-870. LI C N, SRIVASTAVA M, NONG Q, et al. Mechanism of tolerance to drought in sugarcane plant enhanced by foliage dressing of abscisic acid under water stress [J]. *Acta agronomica sinica*, 2010, 36(5): 863-870 (in Chinese with English abstract).
- [25] KHOMPATARA K, PETTONGKHAO S, KUYYOGSUY A, et al. Enhanced resistance to leaf fall disease caused by *Phytophthora palmivora* in rubber tree seedling by *Sargassum polycystum* extract [J/OL]. *Plants*, 2019, 8(6): 168 [2023-09-29]. <https://doi.org/10.3390/plants8060168>.
- [26] 叶燕萍, 姜予强, 罗香英, 等. 壳聚糖处理对苗期甘蔗抗旱性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 94-98. YE Y P, LOU Y Q, LUO X Y, et al. Effect of oligochitosan on drought resistance of sugarcane seedlings [J]. *Agricultural research in the arid areas*, 2010, 28(2): 94-98 (in Chinese with English abstract).
- [27] SKRZYPCZAK D, SZOPA D, MIKULA K, et al. Tannery waste-derived biochar as a carrier of micronutrients essential to plants [J/OL]. *Chemosphere*, 2022, 294: 133720 [2023-09-29]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133720>.
- [28] 苗秀妍. 丛枝菌根真菌和微肥施用对大豆生长及锌、硒积累的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2019. MIAO X Y. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and trace element fertilization on growth and accumulation of zinc and selenium in soybean [D]. Nanning: Guangxi University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [29] 陆艳, 吉高, 王显国, 等. 以胺鲜酯、黄腐酸、微肥为主要成分的首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 micro-element fertilizer [J]. *Pratacultural science*, 2019, 36(8): 2168-2175 (in Chinese with English abstract).
- [30] 曹胜磊. 三种生物质新型肥料的研制与性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. CAO S L. Research on development and properties of three new biomass-based fertilizers [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [31] 牛红艳, 蒲陆梅, 李静, 等. 一种环境友好的淀粉缓释铜肥的制备及性能测试[J]. *化学研究与应用*, 2016, 28(5): 604-609. NIU H Y, PU L M, LI J, et al. Preparation and properties of a novel environmentally friendly starch-based copper fertilizer with slow-release properties [J]. *Chemical research and application*, 2016, 28(5): 604-609 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王铁军, 王瑞丽, 孙军德, 等. 秸秆-粪便属地化微贮制肥工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(2): 251-257. WANG T J, WANG R L, SUN J D, et al. Parameter optimization of the small-scale compost technology with localization maize stover and livestock manure [J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(2): 251-257 (in Chinese with English abstract).
- [33] 葛淑华. 利用废革屑制备多肽螯合肥工艺及应用研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2019. GE S H. Study on preparation and application of polypeptide chelating fertilizer based on leather wastes [D]. Yantai: Yantai University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [34] 杨婧. 腐殖酸液肥生产控制系统研究与设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2022. YANG J. Research and design of humic acid liquid fertilizer production control system [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [35] 黄家祥. 液体高硼微量元素水溶肥料制备[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017. HUANG J X. The preparation of liquid trace element water-soluble fertilizer with high boron content [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [36] 刘志雪. 含锌、铜微量元素水溶肥料的研制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017. LIU Z X. The development of the water-soluble fertilizers containing trace elements of zinc and copper [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [37] 高翔. 腐植酸液体滴灌肥生产工艺优化及其在棉花上的应用效果[D]. 石河子: 石河子大学, 2016. GAO X. Optimization of the humic acid based fluid fertilizer production process and its effects on cotton growth in drip irrigated field [D]. Shihezi: Shihezi University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [38] 兰国志. 水溶性聚磷酸铵与金属离子螯合制取螯合物实验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016. LAN G Z. Experimental study on preparation of chelate by chelating water-soluble ammonium polyphosphate with metal ions [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [39] 刘鹏. 液体高硼微量元素水溶肥料制备[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017. LIU P. The preparation of liquid trace element water-soluble fertilizer with high boron content [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017 (in Chinese with English abstract).

- [40] 白甜. 含微量元素高分子缓释肥的制备及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2015. BAI T. The preparation and properties of polymeric slow-release fertilizer containing trace elements[D]. Taiyuan: North University of China, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [41] 王亮亮. 中量元素水溶肥料研制及应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015. WANG L L. The development and application of the water-soluble mid-elements fertilizers[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [42] 于倩. 脉冲电场辅助制备氨基酸螯合铜的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. YU Q. Study on the pulsed electric field assisted preparation of amino-acid-Cu and its properties [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [43] 丁俊山. 不同工艺复合肥农艺效果及其配方优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. DING J S. Study on the agronomic effects of compound fertilizers with different processes and the formulation optimization [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [44] 吴云. 新型硼系有机水溶肥料的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. WU Y. Research of new organic type boron-based water-soluble fertilizer[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [45] 叶云霞. 有机酸螯合钙、铁、铜微量元素化合物的制备和表征 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. YE Y X. Preparation and characterization of organic acid chelated calcium, iron, copper trace elements compounds [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [46] 邢颖. 氨基酸金属离子螯合物合成条件及测定方法的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. XING Y. Study of mensuration and preparation method of chelate of amino acid with trace elements [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [47] 张刚. 螯合态腐殖酸型叶面肥的开发及生产应用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2010. ZHANG G. A study on development and utilization of chelating foliar fertilization [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [48] 张琳. 环保型大豆种衣剂的研制及增产机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009. ZHANG L. Study on preparation and yield-increasing mechanism of an environmentally friendly soybean seed-coating agent [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [49] 姜素荣. 高效复合叶面肥制备与性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008. JIANG S R. Study on preparation and properties of high-efficiency compound foliar fertilizer [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [50] 孟庆英, 韩旭东, 张春峰, 等. 根瘤菌与微肥对大豆生理及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2017(2): 51-54. MENG Q Y, HAN X D, ZHANG C F, et al. Effect of rhizobia and trace fertilizer on physiological and yield of soybean [J]. Heilongjiang agricultural sciences, 2017(2): 51-54 (in Chinese with English abstract).
- [51] BALA R, KALIA A N, DHALIWAL S S. Evaluation of efficacy of ZnO nanoparticles as remedial zinc nanofertilizer for rice [J]. Journal of soil science and plant nutrition, 2019, 19(2): 379-389.
- [52] 闫磊, 姜存仓, 董肖昌, 等. 多元醇络合硼对油菜苗期生长及生理特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(2): 38-44. YAN L, JIANG C C, DONG X C, et al. Effects of polyol-chelated boron fertilizers on physiological characteristics of rape-seed seedlings [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(2): 38-44 (in Chinese with English abstract).
- [53] DEEPA M, SUDHAKAR P, NAGAMADHURI K V, et al. First evidence on phloem transport of nanoscale calcium oxide in groundnut using solution culture technique [J]. Applied nanoscience, 2015, 5(5): 545-551.
- [54] 侯佳玉, 闫磊, 程锦, 等. L-天冬氨酸纳米钙促进油菜生长的机理机制[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1408-1416. HOU J Y, YAN L, CHENG J, et al. Mechanistic mechanism of calcium L-aspartate nanoparticles to promote the growth of rape [J]. Journal of agro-environment science, 2022, 41(7): 1408-1416 (in Chinese with English abstract).
- [55] TURAN M, EKINCI M, KUL R, et al. Foliar applications of humic substances together with Fe/nano Fe to increase the iron content and growth parameters of spinach (*Spinacia oleracea* L.) [J/OL]. Agronomy, 2022, 12(9): 2044 [2023-09-29]. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092044>.
- [56] RAFIE M R, KHOSHGOFTARMANESH A H, SHARIATMADARI H, et al. Apoplastic and symplastic zinc concentration of intact leaves of field onion (*Allium cepa*) as affected by foliar application of ZnSO₄ and Zn-amino chelates [J]. Journal of plant nutrition, 2023, 46(5): 731-742.
- [57] 刘瑜, 郭宁, 赵凯丽, 等. 喷施氨基酸螯合钙对结球生菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 123-126. LIU Y, GUO N, ZHAO K L, et al. Effects of spraying amino acid chelated calcium fertilizer on yield, quality and nutrient absorption of lettuce [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2022(9): 123-126 (in Chinese with English abstract).
- [58] 丁双双, 李燕婷, 袁亮, 等. 糖醇和氨基酸对小白菜钙营养及生长、品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 744-751. DING S S, LI Y T, YUAN L, et al. Effects of sugar alcohols and amino acids on growth, quality and calcium nutrition of Chinese cabbage [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2016, 22(3): 744-751 (in Chinese with English abstract).
- [59] 邓秀丽. 含海藻酸钠寡糖肥料的应用效果研究[D]. 海口: 海南大学, 2020. DENG X L. Study on the application effect of the liquid fertilizer containing sodium alginate oligosaccharide [D]. Haikou: Hainan University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [60] 杨睿, 王子凡, 李灵芝, 等. IDHA螯合铁对基质培生菜生长及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(6): 816-822.

- YANG R, WANG Z F, LI L Z, et al. Effects of IDHA chelated iron on growth and quality of substrate cultured lettuce [J]. *Journal of Shanxi agricultural sciences*, 2022, 50(6): 816-822 (in Chinese with English abstract).
- [61] MOHAMED I, EL-MEIHY R, ALI M H, et al. Interactive effects of biochar and micronutrients on faba bean growth, symbiotic performance, and soil properties [J/OL]. *Journal of plant nutrition and soil science*, 2018, 181(5): 802 [2023-09-29]. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700293>.
- [62] LI P C, GENG C Z, LI L Y, et al. Calcium-sorbitol chelating technology and application in potatoes [J]. *American journal of biochemistry and biotechnology*, 2020, 16(1): 96-102.
- [63] 朱守卫, 胡长效, 张浩. 不同铁制剂对梨缺铁性黄化病的防治效果 [J]. *落叶果树*, 2019, 51(6): 16-17. ZHU S W, HU C X, ZHANG H. Control effect of different iron fertilizer on iron deficiency chlorosis of pear [J]. *Deciduous fruits*, 2019, 51(6): 16-17 (in Chinese).
- [64] KAZEMI S, PIRMORADI M R, KARIMI H, et al. Effect of foliar application of humic acid and zinc sulfate on vegetative, physiological, and biochemical characteristics of *Physalis alkekengi* L. under soilless culture [J]. *Journal of soil science and plant nutrition*, 2023, 23(3): 3845-3856.
- [65] 任春梅, 胡续丽, 谢家义, 等. 腐殖酸螯合肥在水稻生产上的效应分析 [J]. *垦殖与稻作*, 2006, 36(3): 64-65. REN C M, HU X L, XIE J Y, et al. Effect analysis of humic acid chelated fertilizer on rice production [J]. *Reclaiming and rice cultivation*, 2006, 36(3): 64-65 (in Chinese).
- [66] 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 (in Chinese with English abstract).
- [67] COHEN Y, YASUOR H, TWOROWSKI D, et al. Stimuli-free transcuticular delivery of Zn microelement using biopolymeric nanovehicles: experimental, theoretical, and in planta studies [J]. *ACS nano*, 2021, 15(12): 19446-19456.
- [68] 林怡. 喷施不同钙肥对蓝莓产量、果实品质及贮藏性的影响 [J]. *中国南方果树*, 2019, 48(6): 103-105. LIN Y. Effects of spraying different calcium fertilizers on blueberry yield, fruit quality and storage [J]. *South China fruits*, 2019, 48(6): 103-105 (in Chinese).

Status and prospects of applying efficiency enhancing carrier in new trace element fertilizers

JIANG Cuncang, XIAO Siyun

*College of Resources and Environment/Microelement Research Center,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract Trace elements are essential nutrients for plant growth and development, and fertilizers made from them play an important role in improving the yield, quality, and stress resistance of crops, and farmland health. Compared to traditional trace element fertilizers, new trace element carrier fertilizers have the characteristics of good water solubility, strong stability, difficulty in soil fixation, and easy absorption and utilization by plants through the organic combination of efficient carriers and trace elements. Screening or manufacturing efficiency enhancing carrier is the core of developing new trace element fertilizers. This article overviewed efficiency enhancing carrier and their types, as well as the status of studying and developing new trace element carrier fertilizers in recent years. The effects of applying new trace element carrier fertilizers in agricultural production, as well as the main effect mechanisms of various high-efficiency carriers in trace element fertilizers were summarized and analyzed. The status of applying new trace element fertilizers was clarified. The problems existing in the practical application of the new type of trace element fertilizer were pointed out, and targeted suggestions were put forward, and the future direction of efforts was prospected.

Keywords efficiency enhancing carrier; new fertilizers; nutrient efficiency enhancement; trace element fertilizers; fertilizer efficiency enhancing carrier

(责任编辑:陆文昌)