文章编号:1674-2869(2025)04-0376-09

螯合态中微量元素肥料的制备及应用研究进展

余荣光[1],裴志杰[1],李浩勋[1],张艺超[1],熊 芸[1],丁一刚[1],刘生鹏[1],盖晓宏[*2]
1.武汉工程大学化工与制药学院,湖北 武汉 430205;
2.国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司,新疆 哈密 839000

摘 要:在实际生产中,植物正常所必需的中微量元素,如铁、锌、锰、铜、硼、钙、镁硅等,通常以无机盐形式被直接施入土壤中而容易被固定,导致其难以被植物吸收利用;而螯合态中微量元素肥料通过螯合剂与中微量元素形成稳定络合物,可增强元素在土壤中的活性与可吸收性,能显著提高利用率,对推动农业"高产、优质、绿色"发展及实现可持续农业具有重要意义。系统阐述了三类主流螯合剂制备螯合态肥料的研究现状:(1)天然大分子类,虽螯合性较弱,但富含活性物质且环境友好,可改善土壤理化性质并促进作物生长;(2)有机酸类,螯合稳定性适中且易降解,能提升作物抗逆性与果实品质,其中氨基酸螯合肥还可协同补充氮源;(3)化学合成类,螯合能力强,IDHA因生物降解性优异成为EDTA的绿色替代者,但EDTA存在环境残留风险。在实际应用中,天然大分子螯合率低,有机酸类受土壤pH影响显著,化学合成类部分产品成本高且环境风险突出,同时多元素协同螯合技术不成熟、施用条件苛刻。建议聚焦新型高效螯合剂研发,优化多元素协同螯合工艺;通过跨领域合作构建智能施肥系统,实现精准施用,以降低成本并减少环境影响。

关键词:中微量元素;螯合肥料;螯合剂;研究进展
中图分类号:S143.7+.2 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ. 202501017

Research progress in preparation and application of chelated medium and trace elements fertilizers

YU Rongguang[1], *PEI Zhijie*[1], *LI Haoxun*[1], *ZHANG Yichao*[1], *XIONG Yun*[1], *DING Yigang*[1], *LIU Shengpeng*[1], *GAI Xiaohong*[*2]
1. School of Chemical Engineering & Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. State Development Investment Corporation Xinjiang Luobupo Potash Co., Ltd, Hami 839000, China

Abstract: Essential medium and trace elements (MTEs) - including Fe, Zn, Mn, Cu, B, Ca, Mg, and Si - often become immobilized when applied to soils as inorganic salts, severely limiting plant uptake. In contrast, chelated MTE fertilizers form stable complexes through coordinated binding with chelating agents, thereby enhancing their mobility in soil and bioavailability while significantly improving utilization rates. This technology plays a pivotal role in advancing "high-yield, premium-quality, and eco-friendly" agricultural practices. This review systematically evaluates three mainstream chelator categories: (1) Natural macromolecules, which offer modest chelation capacity but improve soil properties through fully biodegradable bioactive components; (2) Organic acids (e.g., citrates), which provide pH-dependent chelation stability, and enhance crop resilience, with amino acid variants concurrently supplying nitrogen; (3) Synthetic chelators, which deliver the strongest chelation strength, where IDHA emerges as an eco-

收稿日期:2025-01-27
基金项目:武汉工程大学第十五届研究生教育创新基金(CX2023020)
作者简介:余荣光,硕士研究生。Email:m15347225360@163.com
***通信作者**:盖晓宏,高级工程师。Email:1491642451@qq.com
引文格式:余荣光, 裴志杰, 李浩勋, 等. 螯合态中微量元素肥料的制备及应用研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2025,47(4):376-384.

friendly EDTA alternative given EDTA's persistence concerns. Current applications face several critical challenges: natural macromolecules suffer from low chelation efficiency; organic acids significantly depend on soil pH; synthetic alternatives often involve high costs and potential environmental hazards; and multi-nutrient co-chelating technologies remain immature, coupled with demanding application conditions. To address these issues, focused efforts on developing novel, high-efficiency chelators and optimizing multi-element co-chelating processes are recommended. Furthermore, interdisciplinary collaboration is essential to establishing intelligent fertilization systems for precise application, thereby reducing costs and minimizing environmental impacts.

Keywords: medium and trace elements; chelated fertilizers; chelating agents; research progress

中微量元素是植物生长和发育所必需的元素，对于植物的正常生理功能至关重要[1]。中量元素、微量元素及有益元素在植物营养体系中具有明确界定：中量元素（钙、镁、硫）是植物需求量仅次于氮磷钾的营养成分，微量元素（铁、锰、锌、铜、硼、钼）则是必需但需求量极低的矿质元素[2]，而硅等有益元素虽非植物必需却能显著改善特定作物的生理功能。这些元素参与了植物体内许多关键酶的活性中心作用、调节植物代谢过程以及维持细胞结构和功能的稳定性作用[3]。实验表明，樱桃番茄施用中微量元素肥料后可增产17.23%~29.43%，同时樱桃番茄的糖度也提高0.90%~1.98%[4]；甘蔗施用中微量元素肥料提升了甘蔗的产量[5]。由此可见，中微量元素肥料在促进作物产量和提升品质方面具有强大的效果。

传统中微肥在土壤中的有效性受双重限制：铁、锌、铜等金属元素在碱性土壤中易与OH^-、CO_3^{2-}形成难溶化合物，而钙、镁等碱土金属则易被黏土矿物固定；硼、钼等非金属元素在沙质土壤中因吸附位点不足易发生淋溶损失[6]。这种有效性困境不仅源于元素自身化学特性，还与土壤氧化还原状态、离子拮抗作用等复合因素密切相关[7-8]。

为了提高中微量元素在土壤中的活性和可吸收性，制备螯合中微量元素肥料成为一种重要的研究方向。螯合剂利用其内部多个配位原子与微量金属元素配位生成环状络合物，从而增加其在土壤中的溶解度和稳定性，并提高其可被植物吸收的能力[9-10]。针对易固定元素采用强螯合剂形成稳定络合物，阻止羟基沉淀；对易淋失元素则选用缓释型配体构建空间位阻效应，延长土壤持留时间[11]。

近年来，螯合中微量元素肥料的制备研究得到了广泛关注和研究。研究者们通过使用不同类型的螯合剂，如天然大分子类、有机酸类和化学合成类等，以及不同的制备方法，努力寻找制备高效螯合中微量元素肥料的途径。然而，尽管螯合中微量元素肥料的制备研究取得了一些进展，但仍面临一些挑战和问题。首先，螯合剂的选择和优化仍然是一个关键问题。不同的螯合剂对中微量元素的螯合效果有差异，因此需要找到适合不同中微量元素的螯合剂。其次，螯合中微量元素肥料的制备方法需要进一步完善和优化，以提高制备效率和产品的稳定性。此外，螯合中微量元素肥料的实际应用还需要考虑土壤环境和作物类型等因素的影响。

因此，本文介绍了螯合中微量元素肥料制备的研究进展，包括常见的螯合剂类型、制备方法及应用研究现状。通过深入了解螯合中微量元素肥料的制备过程和应用前景，可以为发展更高效、环保的农业肥料提供参考和指导，为实现可持续农业发展做出贡献。

1　天然大分子类螯合剂

天然大分子螯合剂是利用天然动植物的有效提取成分作为螯合剂，如海藻酸、甲壳素、腐殖酸和木质素磺酸钠等。虽然这类螯合剂的螯合性一般较差，但其自身营养含量较为全面。除了含有螯合剂和中微量元素外，它们还富含其他活性物质，因此更容易被植物吸收，并对植物生长产生积极影响。此外，由于动植物提取类螯合剂采用天然动植物提取成分，不含人工合成成分，因此对环境和植物更加友好。

1.1　腐殖酸

腐殖酸是一种高分子有机弱酸，由芳香族和多种官能团组成，广泛存在于泥炭、褐煤、风化煤中。腐殖酸具有吸附、络合和交换等性能，同时具有良好的生理活性，腐殖酸作为一种自然的土壤改良剂，在改善土壤理化性质、提高保肥能力、增加持水能力等方面发挥着重要作用，且有助于提

升农作物品质。

王志勇等[12]在保持传统尿素生产工艺不变的前提下，利用提纯浓缩的腐殖酸螯合微量元素增效剂与熔融尿液按一定比例混合，并通过高塔喷淋造粒制备出含有腐殖酸改性的尿素颗粒。图1为制备含有腐殖酸改性尿素的流程。经过试验证明，与普通尿素相比，含有腐殖酸改性的尿素氨挥发累积量降低超过45.00%，氮肥表观利用率提高了7.20%，玉米产量增加了9.57%。

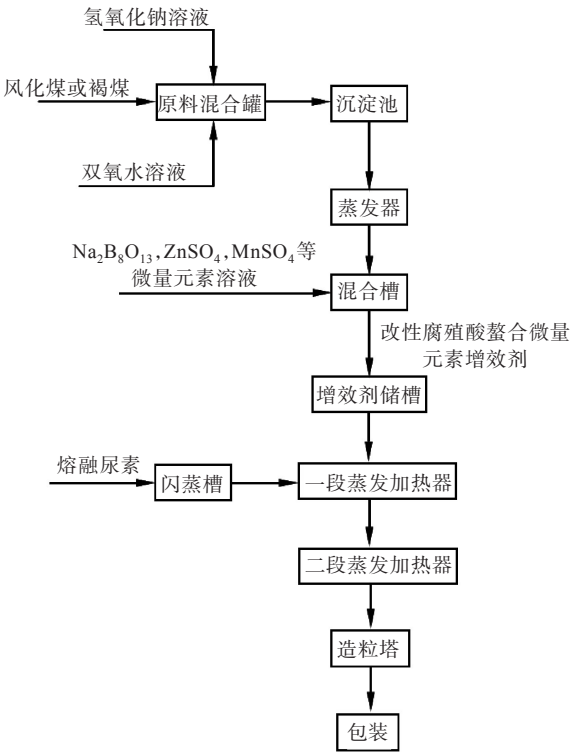

图1 制备含有腐殖酸改性尿素的流程

Fig. 1 Process for the preparation of humic acid containing modified urea

1977年，华北农业大学唐山分校在国内率先利用生产腐殖酸的副产品制备腐殖酸螯合铁肥[13]。研究结果表明，施用腐殖酸螯合肥可以增加果实的横径、纵径和单果质量，同时提高可溶性固形物含量[14]。任春梅等[15]的研究结果显示，在水稻田中施用腐殖酸螯合肥可以提高作物的抗寒、抗旱和抗病能力，从而促进水稻产量的增加。

崔金洲等[14]研究了腐殖酸螯合肥与普通肥料对苹果产量的影响，由表1可以看出，通过随机区组设计，3个处理各3次重复，每株在3月下旬施肥2.25 kg。结果显示该肥料使坐果期和收获期分别提前2和5 d，单果重等多项生长性状指标增加，产量显著提高，平均产量达47 700 kg/hm^2，增产率14.88%，增收明显且节肥增收。任春梅等[15]对水稻施用腐殖酸螯合肥与普通肥料进行对比研究，设3个处理2次重复，每667 m^{2}插前底肥施25 kg，后续还有返青肥和蘖肥的施用。该肥料使水稻插后缓苗快，分蘖期提前2 d，株高、穗长等综合性状表现好，比对照有增产，增产率最高达8.3%。

我国曾鼓励使用腐殖酸作为螯合剂，但腐殖酸的螯合能力较差，并且容易与重金属离子形成螯合物，使植物有吸收重金属的风险[16-17]。

综合现有研究可见，腐殖酸类螯合肥料的研究呈现多维度发展特征：在作用机制层面，其核心优势体现在三重协同效应——通过官能团（羧基、酚羟基）络合中微量元素提升化学稳定性，通过胶体吸附特性减少土壤固定，通过刺激根系分泌有机酸增强跨膜运输；在应用效果层面，无论是天然腐殖酸还是人工腐殖酸，均展现出显著的增产提质效应，且对寒/旱/病等逆境胁迫具有正向调节作用。

然而，腐殖酸存在明显的缺点，其环境适配性差异显著，腐殖酸螯合物在土壤中的配体交换效应、不同pH条件下的稳定性差异，尚未形成区域性配方调节模型。其次，腐殖酸重金属风险防控机制缺失，尽管腐殖酸与重金属的螯合作用可能促进植物吸收，但对Cd、Pb等有害元素的竞争性络合效应，仍需开展长期田间生态毒性评估。

表1 不同处理的苹果和水稻产量

Table 1 Apple and rice yields in different treatments

研究因素	腐殖酸螯合肥在苹果上的应用	腐殖酸螯合肥在水稻上的应用
试验地点	甘肃省天水市	辽宁省盘锦县
供试作物	苹果	水稻
供试肥料	北京澳佳腐殖酸螯合肥（16-14-20）	雪黎佳牌腐殖酸螯合复合肥（16-16-8）
对生育期的影响	坐果期和收获期分别提前2 d与5 d	插后缓苗快，比对照早1~2 d，分蘖期提前2 d
对生长性状的影响	单果重、果实横径、果实纵径及可溶性固形物都明显增加	株高、穗长、穗数、粒数、成粒数、结实率、千粒重等综合性状表现较好
对产量的影响	产量最高，平均产量达47 700 kg/hm^2，增产6 180 kg/hm^2，增产率14.88%	比处理2增产21.6 kg每667 m^2，增产率为3.2%；比处理3增产54.1 kg每667 m^2，增产率为8.3%

注：处理1为腐殖酸螯合肥；处理2为氮磷钾比例为15∶15∶15的复合肥；处理3为磷酸二铵，氮磷钾比例为18∶46∶0。

1.2　木质素磺酸盐

木质素是一种芳香性高分子物质，主要存在于高等维管束植物中，其分子结构含有氧代苯丙醇或其衍生物结构单元，与纤维素和半纤维素一起构成植物体的支持组织。木质素在植物体内扮演着重要的角色，它不仅作为纤维素的黏合剂，增强了植物体的机械强度，还有助于水分的运输和提高对外界环境不良侵袭的抵抗能力。木质素是一种聚酚类高聚物，由苯基丙烷结构单元通过碳碳键（C—C）和醚键（—O—）相互连接和无规则耦合形成三维网状结构。根据苯基上连接的功能基团不同，木质素的结构单元可以分为愈创木基丙烷单元（松伯醇）、紫丁香基丙烷单元（介子醇）和对羟苯基丙烷单元（对香豆醇）3类。图2为木质素结构片段。木质素拥有多种活性基团，如羟基、羧基、醛基等，因此在适当条件下易于与其他物质发生反应。同时，木质素在土壤中也能够被微生物降解，这使得它能够作为肥料改善土壤并促进植物生长。其中，木质素与微量元素如Fe、Cu、Zn络合反应，生成有机微量元素木质素螯合肥料[18]。

Guo等[19]使用木质素磺酸盐制备的阳离子交换剂，成功实现了微量元素Fe、Cu、Zn的螯合肥制备。马立群[20]在特定条件下利用木质素磺酸盐与Fe^{2+}形成络合物，研制出含有铁元素的微肥，可以满足植物对铁的需求，从而预防植物缺铁病的发生。马涛等[21]利用碱木质素作为起始原料，成功合成了一种高效的木质素螯合锌肥料。马强[22]利用水体系法以木质素磺酸钠制备螯合铜和螯合亚铁肥。结果显示，螯合铜和螯合亚铁的制备所需的摩尔比和反应温度相同，分别为2∶1和80 ℃。然而，反应时间分别为50和30 min，反应pH值则分别为6和3。螯合铜的螯合率高达94.28%，而螯合亚铁为80%。通过对木质素进行螯合改性引入金属阳离子，对木质素螯合肥的制备具有重要意义。

基于以上研究表明，木质素基螯合肥料的开发呈现鲜明的学科交叉特征，其核心优势源于木质素独特的三维网状结构与丰富官能团（其中羟基、羧基占比达15%~20%）的协同作用。木质素磺酸盐通过酚羟基邻位配位和羧基离子键合，使金属元素的土壤固定率降低30%~50%，同时增强跨膜运输效率。但是碱法提取木质素的螯合反应条件导致能耗较高，导致其难以规模化生产。

2　有机酸类螯合剂

有机酸类螯合剂是利用含有羧基的有机酸作为配位原子，从而与金属离子形成螯合物，常见的有机酸包括柠檬酸、氨基酸和有机磷酸等。此类螯合剂的螯合性能较一般，稳定性适中，但易于降

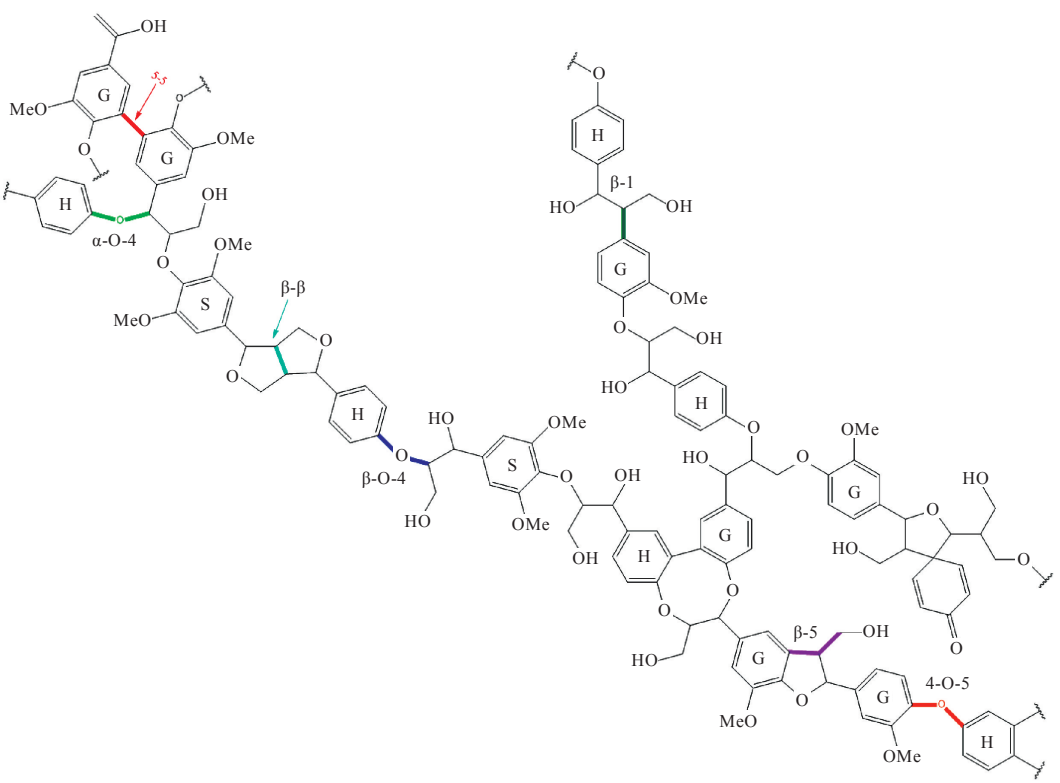

图2　木质素片段结构

Fig. 2　Structure of lignin fragments

解,且在水中溶解性良好,同时其形成的螯合物也容易被植物吸收,因此利用率较高。有机酸类螯合剂受pH的影响较大,通常在微酸或中性条件下稳定性更佳,而在碱性环境下容易发生反应并破坏其结构[9]。

2.1 柠檬酸

柠檬酸又称为枸橼酸,由碳、氢、氧元素组成,分子式为$C_6H_8O_7$,其为无色晶体,在水中具有良好的溶解性,是一种用途广泛的天然有机酸。作为一种天然有机酸,柠檬酸在自然界中广泛分布,它存在于植物如柠檬、柑橘、菠萝等果实以及动物的骨骼、肌肉和血液中,因其无毒的特性导致柠檬酸非常适合用于制备螯合肥。柠檬酸分子中包含3个羧基,当羧基失去质子后形成的羧酸根离子可以与二价和三价的微量金属元素形成螯合物[23]。

王海[24]以柠檬酸与硝酸锌、硝酸铜和硝酸锰分别制备了3种柠檬酸螯合肥,并且锌、铜、锰的螯合率分别达到96%、94%、98%。随后对小麦种子使用硝酸盐和柠檬酸螯合肥分别进行处理,结果显示柠檬酸螯合肥对小麦种子的发芽势、发芽率、根长和芽长的提升均显著高于硝酸盐处理组,表明柠檬酸螯合肥在小麦浸种方面具有更大的优势。张庆等[25]研究了叶面喷施不同形态的锌化合物对水稻糙米中锌含量的影响,使用EDTA二钠锌、葡萄糖酸锌、柠檬酸锌和硫酸锌处理后,糙米中锌的质量分数分别增加了约27%、27%、29%和32%。

柠檬酸作为天然多羧基螯合剂,其核心优势源于独特的配位化学特性。3个相邻羧基可形成六元环螯合结构,使微量元素在土壤中的化学稳定性提升40%~60%,且螯合产物的跨膜运输效率较无机盐形态提高25%~35%。柠檬酸螯合态微量元素不仅通过改善膜透性促进种子萌发,还能通过调控抗氧化酶系统增强作物抗逆性,形成“养分供给—生理调节”的双重功效。田间试验进一步显示,其在水稻糙米锌富集和小麦幼苗生长中的效果优于传统EDTA螯合形态,凸显了天然有机酸在食品强化领域的应用潜力。然而目前现有的研究表明,目前研究集中于单一元素螯合,对多元素协同螯合体系的开发及抗逆信号通路的调控机制缺乏深入探索;柠檬酸降解产物对根际微生物群落的影响,以及高浓度柠檬酸对土壤阳离子交换平衡的干扰效应尚未明确。

2.2 氨基酸

氨基酸微量元素螯合物具有抗干扰、稳定性高、吸收率优越以及生物效价高等优点,可同时补充微量元素和氨基酸,被广泛应用[26]。在农业领域中,氨基酸螯合肥对提升作物产量、改善品质以及减少农药残留等方面发挥着重要作用[27]。

研究结果表明,施用氨基酸能够在不同程度上促进蔬菜的生长,提高产量并改善蔬菜的品质[28]。闫广轩等[29]的研究结果显示,施用氨基酸螯合肥可以显著提高果实的单果质量,改善果实的品质,并增加果实中维生素C的含量,同时降低果实中可滴定酸的含量。许丽娟等[30]将废弃动物蛋白(毛发、蹄角和皮革等)进行水解生成复合氨基酸,并与Zn、Cu和Mn等微量金属元素无机盐进行螯合反应,得到复合氨基酸螯合肥,且螯合率可达95%,稳定性好。并且田间实验结果显示,与无机盐肥料相比,复合氨基酸螯合肥在作物增产方面的效果明显更好。穆军[31]对传统酸法水解动物蛋白制备复合氨基酸的工艺进行改良,采用微波辅助水解动物蛋白制备复合氨基酸,此法水解时间短、能耗小、酸浓度低、脱酸耗碱量小,而且成本适中。

氨基酸螯合肥中的微量金属元素和氨基酸被作物吸收后,会产生互补增效的效果[32],因此氨基酸螯合肥相比无机盐肥料在肥效和有效性上表现明显更优[33]。有研究结果显示,利用氨基酸和黄腐酸作为螯合剂、腐殖酸作为掩蔽剂,其成本仅为EDTA螯合剂的8%~10%,而且这种添加剂可以提高肥料的利用率10%~20%,同时增强植物的抗旱、抗寒、早熟和抗病能力,改善农产品品质[34]。

表2[35-36]为施用氨基酸螯合肥对辣椒和结球生菜的生物学性状的影响。在辣椒植株内,中微

表2 氨基酸螯合肥对辣椒和结球生菜的影响

Table 2 Effect of amino acid chelate fertilizer on pepper and nodular lettuce

应用条件	辣椒(中微量元素螯合肥)	结球生菜(氨基酸螯合钙)
产量增加	0.5 g/L浓度下增产30.05%	质量分数0.5%条件下增产16.27%
品质改善	提高维生素C含量,提高钙镁含量	提高维生素C含量,降低硝酸盐含量
养分吸收	促进氮、磷、钾吸收,增强光合作用	提高全钙含量,促进磷、钾吸收
最佳浓度	0.5 g/L	质量分数为0.3%~0.5%
应用方式	每隔10 d叶面喷施1次,共4次	叶面喷施,莲座期和结球初期各1次

量元素氨基酸螯合肥不仅显著提高了30.05%的产量，还增加了维生素C以及钙、镁含量，同时促进了氮、磷、钾的吸收，增强了光合作用，从而提升了辣椒的整体品质和抗逆性。而在结球生菜上，氨基酸螯合钙的应用同样提高了16.27%的产量，并在质量分数0.3%~0.5%的条件下有效提升了维生素C含量，降低了硝酸盐含量，显著提高了全钙含量以及磷、钾的吸收量，这些效果共同促进了结球生菜品质的改善和经济效益的增加。两种肥料的最佳应用条件分别是辣椒以0.5 g/L和结球生菜以质量分数0.3%~0.5%施用，且都通过叶面喷施的方式进行。氨基酸提供氨态氮可被作物直接吸收，螯合肥中金属元素可促进植株对氮、磷、钾吸收，增强光合作用及代谢功能，提升产量和质量。叶面喷施中微量元素氨基酸螯合肥可提高维生素C含量，促进植株和果实生长发育，该肥料的效果显著，是土壤施肥的有效辅助补充方式。

氨基酸通过氨基（—NH_2）与羧基（—COOH）的协同配位作用，形成五元/六元环状螯合结构，使金属元素在碱性土壤中的化学稳定性较无机盐提升质量分数30%~50%，且避免与土壤中的磷酸根、氢氧根发生沉淀反应。氨基酸作为植物可直接吸收的氮源，质量分数占比15%~20%，与螯合态金属元素形成运输和代谢的协同效应。高浓度氨基酸对土壤脲酶活性的抑制效应以及复合氨基酸中游离氨基酸与螯合态元素的竞争性吸收机制尚且未知。

3　化学合成类螯合剂

目前，化学合成类螯合剂主要包括乙二胺四乙酸（ethylene diamine tetraacetic acid，EDTA）、二乙烯三胺五乙酸（iminodisuccinic acid，DTPA）和亚氨基二琥珀酸（iminodisuccinic acid，IDHA）等[37]。这些螯合剂通常含有氨基或羟基羧酸等功能基团，并且其具备良好的螯合性能和稳定性。

3.1　EDTA

在19世纪50年代，首次人工合成了EDTA，20世纪70年代被广泛应用于Zn、Mn、Cu、Fe等螯合态微肥，其中美国是世界上产量最多的国家，日本次之[13]。EDTA表现出在较宽酸度范围内有效地结合金属阳离子的能力，从而通过螯合反应形成新物质，具有良好的螯合性能[38]。此外，EDTA螯合微量元素的生产工艺相对简单，设备共用性强，同时不会产生“三废”污染（在土壤中降解缓慢，而非生产过程污染），适合且易于实现工业化生产[39-40]。

SHAHREKIZAD等[41]采用$FeCl_2$、$FeCl_3$（摩尔比为1∶2）与EDTA为原料，在反应温度为50 ℃的条件下反应1 h，最后洗涤干燥得到纳米Fe-EDTA，产品为黑色固体。张西兴等[39]用碱式碳酸锌和六水合硝酸锌为原料，将其与EDTA进行螯合，得到乙二胺四乙酸锌钠，实验步骤与Fe-EDTA的合成相似。

研究结果表明，通过向叶片喷施EDTA螯合铁肥可以显著提高叶片中氨基酸的含量，其效果明显优于喷施硫酸亚铁[42]。国春慧等[43]的研究表明，Zn-EDTA螯合肥可以显著增加土壤中潜在有效的锌含量，并且当螯合态锌肥被施入土壤，有效锌的含量可以在小麦被收获后继续保持，确保土壤具有长期供应锌的能力。韩冬芳等[44]研究表明，使用Mg-EDTA可以显著增加大白菜的产量，当施加镁7 mg/kg时，大白菜的增产率可达46.6%。但在自然条件下，EDTA会首先转化为乙二胺三乙酸酯，然后转化为3-酮哌嗪-*N*，*N*-二乙酸酯，这种物质是一种持久性的有机污染物，其在土壤中积累导致对作物和环境造成不利影响[45]。DTPA和EDTA相似，都是一种非生物降解型螯合剂，所以EDTA与DTPA在欧盟开始被限制使用[46]。

3.2　IDHA

IDHA是经过改进后开发的新型螯合剂，其能够螯合二价和三价离子，生成的螯合物具有稳定性和良好的水溶性等优点，可以被植物完全吸收且易于降解。因此，IDHA是当前化学合成类螯合剂的发展方向之一。IDHA具有以氨基为中心的对称结构，含有4个羧基，其可以与二价和三价金属离子螯合形成包裹的八面体立体构型的络合物，并且具有较大且稳定的螯合强度[9]。由于螯合剂本身可以被植物吸收并转化为氨基酸和其他物质，因此认为IDHA螯合肥可以完全被作物吸收，并转化为可利用的营养物质[52]。IDHA与EDTA相比，在大多数金属离子的螯合性能上具有相似或更好的表现，但IDHA具有良好的生物降解性，因此在农业生产中具有更广阔的应用前景。IDHA的结构式如图3所示。

Klem-Marciniakl等[48]通过改变溶液的pH值，在水溶液和模拟的肥料环境中来确定IDHA的螯合度。在所有环境中，Zn^{2+}和Mn^{2+}在pH为7时螯合度最高；Cu^{2+}在pH为5时螯合度最高；Fe^{3+}在pH为6.5时螯合度最高。

表3列出了IDHA和EDTA对几种金属离子的螯合值，从表中可知，IDHA对大多数金属的螯

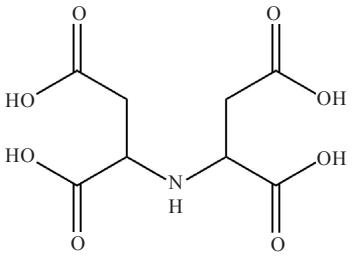

图3 IDHA结构式

Fig. 3 Structural formula of IDHA

表3 IDHA和EDTA对不同金属的螯合值

Table 3 Chelation values of IDHA and EDTA for different metals

物质	螯合值	
	IDHA螯合	EDTA螯合
$Ca(CH_3COO)_2$	214.33	284.67
$CeCl_3$	487.60	1,383.07
$La(NO_3)_3$	387.77	2,460.99
$Ba(NO_3)_2$	190.43	547.66
$ZnCl_2$	328.13	338.58
$Fe(NO_3)_3$	99.28	5.84
$Cu(NO_3)_2$	371.32	306.28
$Mn(NO_3)_2$	245.33	294.02

合能力基本达到了EDTA的水平，有些甚至超过EDTA的螯合能力[49]。

Beltyukova等[50]将IDHA与EDTA的对比，系统评估了其生物降解性、植物生长促进作用及生态毒性。实验结果表明，IDHA在28 d内的生物降解率达到28.1%，为EDTA的4.5倍。当IDHA与金属离子形成络合物后，其降解速率提高了1.8倍。大部分IDHA化合物在7 d内即可快速降解，而EDTA在实验条件下几乎没有生物降解作用，这表明IDHA在环境中具有更好的降解性。在生态毒性方面，使用萝卜作为受试植物进行种子发芽指数(GI)测试时，100 g/L的IDHA溶液对其抑制作用明显低于EDTA，抑制程度为EDTA的2.4~2.6倍。并且，在推荐使用浓度下，IDHA及其复合物对植物的毒性也明显低于EDTA。此外，对水生生物如小球藻和大型溞的毒性测试结果显示，IDHA的毒性同样低于EDTA。IDHA作为一种新型螯合微肥，具备较强的生物降解性和较低的生态毒性，展现出良好的应用潜力。

唐量等[51]则研究了IDHA螯合锌对小麦的生长影响。IDHA螯合锌在小麦试验中，通过多种施肥组合处理，发现其能显著提高小麦产量，主要体现在增加有效穗数、穗均粒数和穗均净重等方面，对籽粒锌含量提升明显，是良好的补锌剂；而杨睿等[52]对生菜施加IDHA螯合铁的试验里，设置不同浓度处理，结果表明6.00 mg/L时生菜多项指标较优，对生菜生长和品质有一定影响，可作为替代传统铁源的选择。表4为两者施用效果对比表，其均为改善作物营养提供了有价值的研究成果，有助于推动农业生产中微量元素肥料的合理应用，以提升作物产量和品质，进而对人体健康产生积极影响。

在EDTA被大多数国家列入禁止使用名单的大趋势下，IDHA等新型绿色螯合剂符合健康生态和绿色农业发展的要求，具有更开阔的发展前景。

IDHA作为新一代绿色螯合剂，在配位化学机制上，对称四羧基结构可与金属离子形成八面体螯合构型，在pH 5~8范围内的螯合效率较EDTA提升10%~15%，且避免了EDTA在碱性土壤中的金属离子解离问题。28 d生物降解率达28.1%，是EDTA的4.5倍，且络合态降解速率进一步提高1.8倍，显著降低土壤残留风险，表明其生态毒性和水生生物安全性优势突出。同时，IDHA螯合锌/铁在小麦/生菜上的增产效应及品质提升，印证了其在农业领域的突出表现。

表4 IDHA螯合锌和螯合铁对小麦和生菜的影响

Table 4 Effect of IDHA chelated zinc and chelated iron on wheat and lettuce

研究因素	IDHA螯合铁对生菜的影响	IDHA螯合锌对小麦的影响
研究对象	生菜	小麦
螯合剂类型	IDHA-Fe	IDHA-Zn
目的	解决EDTA/Fe^{2+}造成的生态环境污染问题，提高生菜生长及品质	提高小麦的锌含量，改善人体锌营养健康
施用方法	基质盆栽，不同IDHA-Fe浓度处理	底施复合肥和追施尿素，添加IDHA-Zn和EDTA-Zn
效果	适当质量浓度的IDHA-Fe可达到与EDTA-Fe相同的增产效果，同时改善生菜品质	添加IDHA-Zn能显著提高小麦产量和籽粒锌含量
环境影响	IDHA-Fe具有良好的生物降解性	IDHA-Zn被视为EDTA的升级替代品
结论	IDHA-铁质量浓度不宜超过6.00 mg/L	IDHA-Zn作为补锌剂能显著提高小麦产量和籽粒锌含量

然而，IDHA产业化仍面临技术梗阻。石灰性土壤中碳酸氢根离子与IDHA-Fe竞争结合使复合物半衰期缩短至45 d（正常土壤＞90 d）；DETPMP/IDHA复配体系虽提升作物产量，但膦酸基团修饰使生产成本较纯IDHA提高2.7倍。表6中生菜IDHA-Fe施用量限值（6.00 mg/L）正是上述矛盾的综合体现——既要满足根际铁有效性，又需规避降解产物的碳代谢干扰。

5　总结和展望

在螯合态中微量元素肥料的制备与应用研究中，螯合剂的选择与研发无疑是其核心环节；得到总结与未来趋势的展望如下：

（1）螯合剂筛选的关键性。螯合剂的螯合强度、容量、安全性与肥效是评估其性能的关键标准。稳固的螯合强度确保中微量元素在土壤和肥料中具有良好的水溶性，增强肥料的效果和利用率。高容量的螯合剂有助于降低肥料成本，提升经济效益。安全性是从生产到施用全过程的基本要求，确保肥料对环境和作物无害。而肥效的优劣则直接决定了肥料的实际应用价值。

（2）螯合态肥料在农业中的重要性。随着我国农业走向“高产、优质、绿色”的发展方向，螯合态中微量元素肥料的地位愈发突出。研究表明，螯合肥料在提高元素利用率、促进作物增产提质方面具有显著效果。尽管双螯合与多重螯合技术的应用为肥料性能的提升提供了新的思路，但目前肥料的成本高、性价比不高，以及施用条件苛刻，仍是制约其广泛应用的主要瓶颈。

（3）技术革新的前景。微胶囊化与缓释技术的结合为螯合肥料的研究带来了新的突破。这些技术可以精准控制养分的释放速率，更好地契合作物生长的各个阶段。通过这些创新技术的融合，未来的螯合态肥料将更加高效、环保，满足作物在不同生长周期中的营养需求。

（4）跨领域合作与智能化施肥。跨领域的合作将成为推动螯合态中微量元素肥料发展的关键。通过整合材料科学、生物技术、农业信息技术等领域的优势，结合大数据与人工智能技术，构建智能施肥决策系统，可以根据作物品种、土壤状态、气候变化等因素，定制个性化和精准化的施肥方案。这将极大提升肥料的综合效益，并为农业养分管理体系的重塑提供新思路。

螯合态中微量元素肥料的研发与应用仍面临挑战，但创新驱动、跨学科合作与技术革新将为其突破瓶颈提供有力支持。未来的研究将进一步优化螯合剂的选择与制备技术，提升肥料的性能与经济效益，推动农业向更加绿色、高效、可持续的方向发展。

参考文献

[1] 郭娟. 肥料种类及其在草莓生长发育过程中的作用研究[J]. 果农之友，2023(8)：75-79.

[2] 张海艳，刘金梅，范继锋，等. 新型肥料微量元素螯合肥的研究与应用进展[J]. 蔬菜，2024(4)：13-22.

[3] ARECHE F O，AGUILAR S V，MORE LÓPEZ J M，et al. Recent and historical developments in chelated fertilizers as plant nutritional sources，their usage efficiency，and application methods [J]. Brazilian Journal of Biology，2023，83：e271055.

[4] 李少杰，姬宇翔，温学萍，等. 双杆整枝及增施中微量元素肥料对露地樱桃番茄品质及产量的影响[J]. 园艺与种苗，2023，43(4)：1-2.

[5] 黄恒掌，韦广厚，罗广盘. 中微量元素肥对甘蔗产量和品质的影响试验初报[J]. 南方农业，2016，10(16)：34-35.

[6] 刘旺，陈志良，彭晓春，等. 强化重金属污染土壤的螯合剂诱导植物提取研究[J]. 安徽农业科学，2012，40(8)：4832-4838.

[7] 郑宇琦，许春雪，安子怡，等. 土壤和沉积物重金属形态分析研究进展[J/OL]. 中国无机分析化学，2024：1-12.（2024-02-02）. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=WJFX20240131004 &dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[8] 宋哲楷，张小凯，何锋，等. 纳米颗粒污染土壤的健康评价研究进展[J]. 环境科学研究，2024，37(5)：1080-1091.

[9] 牛彦超，朱盼盼，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.

[10] 姜存仓，肖思赟. 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.

[11] KHARE S，SINGHAL A，RALLAPALLI S，et al. Bio-chelation for sustainable heavy metal remediation in municipal solid waste compost：a critical review of chelation technologies [J]. Environmental Science and Pollution Research，2025：https://doi. org/10.1007/s11356-025-36368-6.

[12] 王志勇，孟广银，吴文慧，等. 含腐殖酸改性尿素的研究与开发[J]. 化肥工业，2017，44(4)：55-57，66.

[13] 宁望理. 对发展螯合微肥的粗浅认识[J]. 陕西化工，1979，8(3)：21-23.

[14] 崔金洲，雒家其，王香玉，等. 腐殖酸螯合肥在苹果上的应用效果[J]. 农业科技与信息，2018(24)：89-91.

[15] 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.
[16] 冯华军, 胡立芳, 单丹, 等.水体腐殖质危害及去除的研究进展[J].科技通报,2008,24(4):553-558.
[17] ŠENKÝR J, ROČÁKOVÁ A, FETSCH D, et al. The acidobasic and complexation properties of Humic acids: III. Study of Humic acids complexation with cadmium(II) and lead(II) by pulse anodic stripping voltammetry [J]. Toxicological & Environmental Chemistry, 1999, 68(3/4): 377-391.
[18] LIU Q, KAWAI T, INUKAI Y, et al. A lignin-derived material improves plant nutrient bioavailability and growth through its metal chelating capacity [J]. Nature Communications,2023,14: 4866.
[19] GUO X Y, ZHANG S Z, SHAN X Q. Adsorption of metal ions on lignin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(1): 134-142.
[20] 马立群.碱法造纸黑液综合利用新进展[J].现代化工, 1998, 18(12): 15-18.
[21] 马涛, 詹怀宇, 王德汉, 等.木质素锌肥的研制及生物试验[J].广东造纸, 1999(3): 11-15.
[22] 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.
[23] 王美玲, 龚玉琼, 钟国清.柠檬酸锌螯合物的合成与应用[J].中国饲料, 2016(16): 14-17.
[24] 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.
[25] 张庆, 王娟, 景立权, 等.叶面施用不同形态锌化合物对稻米锌浓度及有效性的影响[J].中国水稻科学, 2015, 29(6): 610-618.
[26] 钟国清.第三代微量元素添加剂的研究进展[J].饲料工业, 1996, 17(2): 23-26.
[27] 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.
[28] 韩贝贝,王宝驹,佟静,等.氨基酸处理对水培韭菜产量、品质及风味的影响[J].中国蔬菜, 2022(5):74-80.
[29] 闫广轩, 曹小艳, 李百健, 等.氨基酸螯合中微量元素肥料对新高梨品质的影响[J].土壤, 2009, 41(1): 139-141.
[30] 许丽娟, 梁明龙, 何觉勤, 等.复合氨基酸微量元素螯合肥的制备及应用研究[J].广东化工, 2014, 41(2): 38-39, 47.
[31] 穆军.废弃动物蛋白制备天然有机螯合肥的新工艺研究[D].杨凌:西北农林科技大学, 2006.
[32] 刘音.氨基酸螯合微肥施用效果研究[J].安徽农业科学, 2009, 37(14): 6403-6405.
[33] 刘德辉, 田蕾, 邵建华, 等.氨基酸螯合微量元素肥料在小麦和后作水稻上的效果[J].土壤通报, 2005, 36(6): 917-920.
[34] 王连林,李翠芹,刘延波.双螯合多微添加剂的研发与工艺创制[J].化肥工业,2017,44(4):12-14, 19.
[35] 展宗瑞, 李倩, 田超超, 等.中微量元素氨基酸螯合肥在辣椒上的应用效果研究[J].现代农业科技, 2024(9): 63-65.
[36] 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.
[37] SUZUKI M, URABE A, SASAKI S, et al. Development of a mugineic acid family phytosiderophore analog as an iron fertilizer [J]. Nature Communications, 2021, 12: 1558.
[38] 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.
[39] 张西兴, 庞世花, 高琪.一种微量元素螯合铜盐的制备研究[J].广州化工, 2014, 42(17): 74-75.
[40] 张西兴, 高琪, 庞世花.乙二胺四乙酸螯合锌盐的制备研究[J].磷肥与复肥, 2013, 28(6): 14-15.
[41] SHAHREKIZAD M, GHOLAMALIZADEH A A, MIR N. EDTA-coated Fe_3O_4 nanoparticles: a novel biocompatible fertilizer for improving agronomic traits of sunflower (Helianthus Annuus) [J]. Journal of Nanostructures, 2015, 5(2): 117-127.
[42] HE W L, SHOHAG M J I, WEI Y Y, et al. Iron concentration, bioavailability, and nutritional quality of polished rice affected by different forms of foliar iron fertilizer [J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 4122-4126.
[43] 国春慧, 赵爱青, 陈艳龙, 等.锌肥种类和施用方式对小麦生育期内土壤不同形态Zn含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(7): 185-191, 200.
[44] 韩冬芳, 王德汉, 黄培钊, 等.不同形态镁对'早熟5号'大白菜产量及品质的影响[J].园艺学报, 2010, 37(10): 1655-1660.
[45] YUAN Z W, VANBRIESEN J M. The formation of intermediates in EDTA and NTA biodegradation [J]. Environmental Engineering Science, 2006, 23(3): 533-544.
[46] 申高明, 皇改革.可降解氨基羧酸型螯合剂在重金属污染土壤修复中的应用进展[J].河南科技, 2019, 38(1): 139-140.
[47] 尤洪星,朱孔杰.绿色螯合剂亚氨基二琥珀酸的合成与性能研究进展[J].广东化工,2015,42(20):15, 14.
[48] KLEM-MARCINIAK E, BIEGUN M, HOFFMANN K, et al. Degree of complexation of microelement ions by biodegradable IDHA chelator in water and simulated fertilization environment [J]. Polish Journal of Chemical Technology,2023,25(4):61-66.
[49] 吴长彧,王亚权,李静.绿色螯合剂亚氨基二琥珀酸的合成及螯合性能[J].化学工业与工程,2007,24(2): 121-124.
[50] BELTYUKOVA M,KURYNTSEVA P, GALITSKAYA P, et al. Biodegradation rate of EDTA and IDS and their metal complexes [J]. Horticulturae,2023,9(6): 623.
[51] 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.
[52] 唐量, 焦永康, 李文曦, 等.环保型螯合剂亚氨基二琥珀酸锌盐对小麦的施用效果[J].农业科技通讯, 2016(10): 105-108.

本文编辑:张 瑞