

■ 新型肥料丛书

中微量元素营养元素肥料 研究与开发

ZHONG WEI LIANG YING YANG YUAN SU FEI LIAO YAN JIU YU KAI FA

史丹利化肥股份有限公司 编著

中国农业科学技术出版社

■ 新型肥料丛书

中微量元素营养元素肥料

研究与开发

史丹利化肥股份有限公司 编著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中微量营养元素肥料研究与开发 / 史丹利化肥股份有限公司

编著 .— 北京 : 中国农业科学技术出版社 ,2014.12

ISBN 978-7-5116-1868-9

I . ①中… II . ①史… III . ①微量元素肥料 - 研究

IV . ① TQ445

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 267616 号

责任编辑 徐 毅 张志花

责任校对 贾晓红

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号

邮编: 100081

电 话 (010) 82106636 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)

(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106631

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 889mm × 1 194mm 1/16

印 张 20.75

字 数 670 千字

版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价 68.00 元

— 版权所有 · 翻印必究 —

编委会

高级顾问 蔡德龙

主 编 高进华 于广武

副主编 窦兴霞 王 臣 江志阳 冯尚善 王丝平

编 委 闫忠彪 李晓冰 周 飞 王洪涛 王婷婷 杨晓云

孙 伟 卞会涛 何长兴 陈迪荣 甘 霖 李 勇

徐勤政 覃晓彦 李崇明 杨莹山 彭玉净 崔 然

张 贺 尹 微 邹继峰 齐云峰 林汉良 何建芳

周景斌 郑连举 何广欣 孙长城 李云宏 陈庆峰

张立超 张宗彩 岳玉苓 李文平 王洪富 魏云云

潘 芹 李 宁 史庆才 古荣鑫 王家伟 夏红丽

李俊峰

内容提要

肥料是植物的食粮，肥料占农业生产资料的 50% 以上，其重要性不言而喻；新型肥料是目前国内外肥料发展的总趋势，是低碳农业、生态农业的必然结果；中微量元素肥料是新型肥料的主要内涵，是平衡施肥、土壤修复的生力军。因此，重视研究、开发硼、锌、钼、镁、硫等中微量元素肥料极其必要，具有提高作物产量，改善产品品质，改良土壤，增加土壤养分，提高养分利用率及作物抗逆性的显著效果。

目前，中国南北方土壤，尤其是南方土壤锌、硼、锰、钼等微量元素极其缺乏，占耕地面积的 1/3 以上，急需补充，即约 5 亿亩 (1 亩 $\approx 667\text{m}^2$ ，全书同) 耕地需要补充中微量元素肥料。其市场潜力极大，生态效益、社会效益和经济效益极其可观。

本书以中微量元素肥料为主线，兼顾大量元素、有益元素、环境保护、植物营养、平衡施肥、腐植酸肥料、氨基酸肥料、生态肥料等新型肥料的推介。从植物营养和生态农业入手，系统地介绍植物的中微量元素营养，植物、土壤中微量元素的含量、分布、形态及我国土壤、作物对中微量元素的需求；针对日益恶化的生态环境，对土壤重金属、农药、化肥污染状况进行剖析并提出了科学可行的防治补救措施；对生物有机无机生态肥，腐植酸、氨基酸肥料，中微量元素肥料及有益元素肥料也做了比较详尽的介绍。

本书由中国科学院东北地理与农业生态研究所、中国科学院沈阳应用生态研究所及国内中微量元素肥料著名研究专家合作编著而成。

本书的显著特点是：针对性、实用性、权威性和可读性强；理论与实践、产学研结合紧密；符合低碳经济、生态农业、节能减排和循环经济的要求。

本书可供农业科技工作者，农业大专院校在校生、研究生、土肥工作者及肥料企业参考。

序

土壤是作物中微量营养的主要来源，农作物缺乏中微量营养是一个世界性的问题。土壤中微量元素和作物中微量营养是一个非常活跃的研究领域，也具有广阔的应用前景。微量营养元素的发现与应用，是近几十年来植物矿质营养研究领域内的重大发现和农业施肥的巨大进展。一方面是因为它的施用，不仅提高了农作物的产量，而且还改善了收获物的品质；另一方面是它还解决了病虫害理论不能解决的植物缺素症的病因，促进了农业生产的发展。

在植物所必需的 16 种营养元素中，中微量营养元素就占了 10 个席位，占 5/8；近几十年来，我国由于磷酸二铵、氮、磷、钾复混肥的大量施用，致使土壤中磷过剩，钾、镁、硫、硅、锌、硼和钼等营养元素不足，土壤营养失衡，土壤酸化，造成农产品产量下降，品质变劣；由于农作物高产良种、经济作物和果蔬作物的大面积种植，从土壤中带走了大量中微量营养元素得不到及时补充；中低产田面积剧增及土壤重金属、农药、水污染加剧，致使土壤生态环境恶化；加之人们对高产、优质、安全、环保农产品的青睐，促使中微量元素肥料需求量大增。我国施用中微量营养元素肥料前景广阔。

从目前资料看，已经发现我国东半部广大地区缺乏硼和钼，北半部广大地区又缺乏锰和锌，这些地区正是我国重点粮、棉、油产区和畜牧业基地，通过合理施用微肥，可望在 5 亿亩以上的耕地上获得增产 10% 以上的效果。这是一个周期短、数量大、效益高的“短、平、快”项目。

基于上述背景，为在全国大力宣传、推广、应用中微量营养元素肥料，促进科技含量高新型中微量营养元素的研究和开发，由史丹利化肥股份有限公司会同中国科学院东北地理与农业生态研究所、中国科学院沈阳生态应用研究所、国家化肥产品质量监督检验中心（山东）及国内中微量元素研究著名专家等，合作编著了《中微量营养元素肥料研究与开发》一书。

该书由十八章组成，以中微量营养元素为主线，兼顾植物营养、有益元素、环境保护、平衡施肥、腐植酸肥料、氨基酸肥料、生态肥料等新型肥料的推介。本书作者以多年来从事作物高产栽培与中微量元素肥料方面的研究与应用为基础，在编著过程中参阅了大量国内外有关肥料，特别是中微量元素肥料著述及相关文献，结合作者研究、推广领域中的科技成果，采取理论与实践相结合、产学研相结合，以低碳经济、生态农业、新型肥料为主导思想得以完成。

该书的显著特点是：针对性、实用性、权威性和可读性强；理论与实践、产学研结合紧密；符合低碳经济、生态农业、节能减排和循环经济的要求。全书层次清晰，结构合理，详略得当，具有系统性和实用性。

本书对于从事肥料与作物等专业的科研人员、大学生、研究生进行相关研究具有一定的参考价值，对于从事肥料行业研发的科研人员、企业以及农业生产一线的各类专业技术人员具有现实的指导意义。

硅肥之父

蔡德龙

2014 年 9 月 10 日

目 录

CONTENTS

绪言	1	二、结果与分析	28
第一章 作物营养与中微量元素	7	三、结论与建议	30
第一节 作物营养概述	7	第二章 作物对中微量元素吸收的基本原理	31
一、植物营养学的早期研究	7	第一节 养分归还学说	31
二、李比希对植物营养学的贡献	7	一、养分归还学说的基本内容	31
三、植物营养学科近年来的发展趋势	8	二、养分归还学说的发展	32
第二节 植物营养学的范畴及主要研究方法	10	第二节 最小养分律	32
主要的研究范畴	10	一、最小养分律的基本内容	32
第三节 植物生长发育的必需营养元素	12	二、最小养分律的发展	34
一、植物组成及必需营养元素的概念	12	第三节 报酬递减律与米采列希学说	35
二、植物必需营养元素的生理作用	15	一、报酬递减律的含义	35
三、作物营养与施肥	16	二、米采列希学说的含义	35
四、必需营养元素的作用	20	三、米采列希学说的意义	35
五、营养元素的同等重要律和不可代替律	20	第四节 因子综合作用律	36
第四节 作物对养分的吸收	21	第三章 中国土壤中微量元素现状及地理分布	38
一、植物根部营养	21	第一节 概述	38
二、根外营养	23	第二节 土壤锌的含量分布	40
三、作物各生育期的营养特性	24	一、锌的含量分布	40
第五节 中微量元素及中微量元素肥料	25	二、锌发现研究历史	41
一、中微量元素	25	三、土壤有效锌、全锌的含量	41
二、中微量元素肥料	26	四、影响土壤有效锌的因素	42
三、常用微肥种类	26	第三节 土壤硼的含量分布	42
四、微肥的有效施用与哪些因素有关	27	一、土壤中硼的几种形态	43
第六节 第四元素产品添加微量元素锌、硼肥效研究	28	二、全硼	43
一、材料与方法	28	三、有效态硼	43

四、影响土壤有效硼含量的因素	44	三、锰	76
五、硼的供给状况	45	四、铜	78
第四节 土壤钼的含量分布	45	五、钼	80
一、土壤中钼的形态	45	六、铁	82
二、土壤中全钼、有效态钼含量	45	七、氯	85
三、钼的供给状况	46		
四、影响土壤有效钼的因素	46	第六章 植物摄取中微量营养元素的机理.....	87
第五节 土壤锰、铜、铁的含量分布.....	47	第一节 概述.....	87
一、锰的含量及分布	47	第二节 土壤中离子交换.....	87
二、铜的含量及分布	48	一、阳离子交换	88
三、铁的含量及分布	49	二、阴离子交换	90
四、影响土壤有效铁的因素	50	第三节 接触交换和根系阴离子交换.....	90
第四章 植物中的微量营养元素.....	51	一、接触交换	90
第一节 概述.....	51	二、根系阳离子交换量	90
一、微量营养元素的研究历史	51	三、离子由土壤向根系的移动	90
二、微量元素肥料的发展历史	53	四、植物对离子的吸收	92
三、微量元素肥料的前景	55	第四节 植物对养分的吸收.....	94
第二节 植物中的微量营养元素.....	55	一、植物吸收养分的器官和途径	94
一、植物界种间微量元素含量分布	57	二、根系对养分的吸收	94
二、植株不同年龄和部位微量元素含量分布	59	三、根际养分的概念及理化、生物学特点	97
三、植物微量元素过剩危害	59	四、根分泌物	100
四、植物中锌的含量	60	五、根际微生物	102
五、植物中硼的含量	61	六、根吸收养分的部位	103
六、植物中锰的含量	61	七、根可吸收的养分形态	103
七、植物中铁的含量	61	八、土壤养分向根部迁移的方式	103
八、植物中铜的含量	61	九、根部对无机养分的吸收	104
九、植物中钼的含量	61	十、根部对有机养分的吸收	104
第五章 植物对中微量营养元素的需求.....	62	第五节 根外器官对养分的吸收.....	104
第一节 植物对中量元素的需求.....	62	一、根外营养的机理	104
一、硫	62	二、根外营养的特点	105
二、钙	64	三、影响根外营养效果的因素	105
三、镁	67	四、养分在植物体内的运转和利用	105
第二节 植物对微量元素的需求.....	69	五、影响植物吸收养分的条件	106
一、硼肥	69	六、环境因素对植物吸收养分的影响	107
二、锌	74	第六节 主要农作物吸收养分的数量 and 比例.....	109

第七节 微量营养元素的吸收·····	110	第四节 几种主要作物的缺素症状和 防治方法·····	149
一、锰·····	110	一、水稻缺锌坐莖·····	149
二、铁·····	110	二、玉米缺锌花叶·····	151
三、锌和铜·····	110	三、油菜缺硼症·····	151
四、硼和钼·····	111	四、棉花缺硼症·····	152
第七章 中微量营养元素的作用效果··	112	五、小麦缺锰花叶症·····	152
第一节 概述·····	112	六、小麦和豆科作物缺钼症·····	153
第二节 矿质营养与植物生长，产量 和品质的关系·····	113	七、柑橘和苹果缺硼症·····	153
一、矿质营养与植物生长·····	113	八、柑橘缺锌、缺铁症·····	154
二、矿质养分与产量的关系·····	114	第九章 营养元素相互作用及 化学反应·····	155
三、矿质营养与品质的关系·····	114	第一节 营养元素的相互作用·····	155
第三节 中微量营养元素的作用效果·····	116	一、概述·····	155
一、中量营养元素的作用效果·····	116	二、相互作用的类型·····	155
二、微量营养元素的作用效果·····	122	三、相互作用的机制·····	155
第八章 土壤、作物缺乏及过剩中微量营养 元素诊断·····	131	四、已经观察到的植物中微量营养元素 的相互作用·····	155
第一节 作物缺乏微量元素的营养 诊断方法·····	131	五、微量营养元素之间的相互作用·····	157
一、作物缺乏微量元素的营养诊断意义··	131	第二节 相互作用的形态·····	158
二、作物缺素诊断方法·····	131	第三节 营养元素间的有效性效应·····	159
三、开展缺素调查·····	131	一、介质中的养分关系 （协助作用，颀颀作用）·····	159
四、目视诊断法·····	132	二、温度、水分、光照的影响·····	159
五、土壤化学分析诊断·····	132	三、土壤理化性状的影响·····	160
第二节 中量元素营养诊断·····	134	四、根系的代谢及代谢产物的影响·····	160
一、钙·····	134	五、苗龄和生育阶段的影响·····	160
二、硫·····	136	第十章 中微量营养元素与平衡施肥··	161
三、镁·····	137	第一节 测土配方、平衡施肥·····	161
第三节 微量元素营养诊断·····	140	一、平衡施肥定义·····	161
一、硼·····	140	二、平衡施肥的简介及背景·····	161
二、钼·····	141	第二节 测土配方、平衡施肥的方法步骤··	163
三、铜·····	143	一、测土配方施肥的目的·····	163
四、锰·····	144	二、测土配方施肥的基本原则·····	163
五、锌·····	147	三、测土配方施肥的核心环节和重要步骤··	164
六、铁·····	148		

四、测土配方、平衡施肥的步骤	164	三、农药污染的防治	186
五、测土配方施肥技术的主要方法	165	第十二章 腐植酸、氨基酸与中微量	
六、测土配方施肥技术的主要程序	166	营养元素..... 189	
七、土样养分的分析	168	第一节 概述..... 189	
八、配方的制定	168	一、腐植酸的概念	189
第十一章 土壤环境污染及修复..... 170		二、腐植酸的分类	189
第一节 土壤污染现状..... 170		第二节 腐植酸的组分..... 189	
第二节 土壤污染修复..... 171		一、泥炭	189
一、概述	171	二、褐煤	190
二、土壤修复背景	172	三、风化煤	190
三、土壤修复现状	172	第三节 腐植酸的功能..... 190	
四、土壤修复的必要性	172	一、腐植酸在农业上的应用	191
五、土壤修复技术运用现状	172	二、腐植酸新型肥料功能	192
六、土壤修复技术发展趋势	173	三、腐植酸肥施用方法	193
七、土壤修复技术	173	第四节 腐植酸研究新进展..... 193	
八、土壤修复展望	175	一、腐植酸改性及提取工艺的进展	194
第三节 生态环境污染..... 175		二、主要研究成果及发展方向	194
一、大气污染	175	第五节 氨基酸与中微量元素..... 210	
二、水体污染	176	一、氨基酸的分类	211
三、重金属污染	176	二、氨基酸的功能	212
四、有机物污染	177	三、氨基酸的应用	214
五、土地沙化	177	第十三章 中微量营养元素肥料	
六、水土流失	177	及施用技术..... 217	
七、旱灾水灾等自然灾害	177	第一节 中微量元素肥料的种类和性质... 217	
八、生物破坏	177	一、中微量元素肥料的种类	217
第四节 环境污染防治..... 177		二、中微量元素肥料的性质	218
一、制定必要的法律法规	177	第二节 常用中微量元素肥料的施用方法... 218	
二、生物净化	178	一、一般施肥方法	218
第五节 重金属对土壤的污染..... 178		二、几种常用微肥的施用方法	219
一、污染现状	178	三、施用中微量元素肥料应注意的问题 ...	221
二、污染源	178	第三节 中量元素的施用技术..... 222	
三、污染危害	180	一、硫肥	222
四、我国土壤污染防治对策	181	二、钙肥	226
第六节 农药对土壤的污染..... 183		三、镁肥	227
一、农药对土壤的污染	183	第四节 微量元素的施用技术..... 228	
二、污染危害	185		

一、锌肥	228	一、我国土壤养分状况	259
二、锰肥	231	二、我国主要作物的养分需求量及适宜的养分比例	262
三、硼肥	232	三、肥料施用对生态环境的影响	265
四、钼肥	234	四、施肥原则是测土配方、平衡施肥 ...	266
五、铁肥	234	五、为作物生长发育营造良好的生态环境	266
六、铜肥	235		
第十四章 大豆重迎茬与中微量元素...	236	第二节 生产生物有机肥的原料.....	268
第一节 作物重迎茬种植.....	236	一、无机营养元素	268
一、作物对重迎茬种植敏感程度	236	二、有机营养元素	268
二、重迎茬大豆减产规律	236	三、生物有机肥料的技术要求	273
三、重迎茬大豆减产原因	236	第三节 生物有机无机生态肥.....	273
第二节 微量元素对重迎茬大豆产量的影响	238	一、修复被重金属和农药污染的土壤 ...	273
一、锌	238	二、改良土壤，增强作物的抗逆性	274
二、锰	239	三、保水抗旱，提高作物的抗旱性能 ...	274
三、钼	239	四、提高肥料利用率，补充化肥的不足	274
四、硼	240	五、黄腐酸具有提高植物体内多种酶活性和叶绿素含量的作用	274
第三节 影响重迎茬大豆减产的综合因素	240	六、提高作物产量，改善产品品质	275
一、土壤生物活性变化	240	第四节 生物有机无机生态肥的配方设计方法.....	275
二、土壤物理、化学性状变劣，根系分泌有毒物质增加	240	一、配方设计方法	275
三、植株生育及病害发生	246	二、常用配方	276
第四节 提高重迎茬大豆单产技术措施...	247	三、自行设计配方	278
大豆重迎茬保产剂、黄萎叶喷剂等产品的推广应用	247	第五节 部分作物生物有机无机生态肥配方.....	280
第十五章 硼泥生物有机无机生态肥...	252	第六节 雷竹有机无机专用肥料及施用技术.....	289
第一节 我国硼泥的生产情况.....	252	一、雷竹的需肥特点及规律	289
第二节 硼泥生态肥生产工艺.....	252	二、雷竹必需的营养元素及作用	289
第三节 硼泥有机无机生态肥施用效果...	252	三、雷竹的平衡施肥原则	290
一、试验结果	253	四、雷竹无公害施肥技术	290
二、示范结果	257	第七节 山核桃有机无机专用肥料及施用技术.....	291
第十六章 生物有机无机生态肥配方研究.....	259	一、山核桃的需肥特点及规律	292
第一节 配方设计的依据.....	259	二、山核桃必需的营养元素及作用	292
		三、山核桃的施肥原则	293

四、山核桃需肥特性及方法	293	二、我国土壤中硅的含量及分布	302
第十七章 中微量营养元素肥料的		三、硅肥农业生产中的作用	303
发展趋势.....	295	四、硅肥种类与施用	307
第一节 中微量元素肥料的研究方向		五、硅肥展望	308
及发展趋势.....	296	第三节 有益营养元素硒.....	308
一、研制开发生物有机无机生态肥	296	一、国内外硒肥研究与应用	308
二、生物有机无机生态肥特点	296	二、硒在土壤中的含量及分布	309
第二节 研制开发黄腐酸、氨基酸中		三、硒对植物的作用及影响	309
微量元素螯合肥.....	296	四、硒肥种类与施用	312
一、黄腐酸、氨基酸中微量元素		五、硒肥的发展前景	312
螯合肥成分	296	第四节 有益营养元素镍.....	313
二、黄腐酸、氨基酸中微量元素		一、国内外镍肥研究与应用	313
螯合肥特点	297	二、镍在土壤中的含量与分布	313
第三节 发展趋势.....	298	三、镍在农业中的作用	313
一、研制开发 BB 肥、长效肥多元或全元		四、镍肥种类与施用	314
复混肥料	298	五、镍肥展望	314
二、调整化肥结构, 加强有机无机生态		第五节 有益营养元素钛.....	315
专用肥的研究开发	298	一、国内外钛肥研究与应用	315
三、重视中微量元素的颉颃等问题的研究	298	二、钛在土壤中的含量及分布	315
四、加强硼泥等废弃物的开发利用	299	三、有益营养元素钛肥的作用	315
第十八章 有益营养元素肥料		四、钛肥种类与施用	316
施用技术.....	300	五、钛肥的展望	316
第一节 有益营养元素肥料的种类.....	300	第六节 有益营养元素钴.....	316
有益营养元素肥料的种类	300	一、国内外钴肥研究与应用	316
第二节 有益营养元素硅.....	300	二、钴在土壤中的含量及分布	317
一、国内外硅肥研究与应用	300	三、有益营养元素钴肥的作用	318
		四、钴肥种类与施用	318
		五、钴肥展望	318
		主要参考文献.....	319

绪 言

到目前为止,国内外公认的高等植物所必需的营养元素有 16 种。它们是碳、氢、氧、氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、硼、锰、铜、锌、钼和氯。在必需营养元素中,碳和氧来自空气中的二氧化碳;氢和氧来自水,而其他的必需营养元素几乎全部都是来自土壤。

大量营养元素含量一般占干物质重量的 0.1% 以上,它们是碳、氢、氧、氮、磷、钾、钙、镁和硫 9 种;微量营养元素的含量一般在 0.1% 以下。有的只含 0.1mg/kg,它们是铁、硼、锰、铜、锌、钼和氯 7 种。中微量元素,尤其是微量元素在植物体内虽然含量低,但却是植物生长发育不可缺少的营养元素,是制约植物生长发育的重要元素。

微量元素研究已有 90 年以上的历史。一般说来大概始于 20 世纪 20 年代。尽管格里斯 (Gris) 1844 年就发现了铁是植物正常生活不可缺少的微量元素,但植物必需的微量元素,其绝大多数是 1922 年以后发现的。自 1922 年麦克哈古 (McHargue) 发现锰是植物必需的微量元素之后,又相继先后发现了硼、锌、铜、钼、氯、钠、钴、钒等是植物必需的微量元素。

微量元素的研究,现已远远超出了它们的生理作用和农业化学效益或肥效的范畴,而渗透到了其他分支学科中。它的重要性,不仅引起了生理学家、土壤学家、农业化学(肥料)家和农学家们的重视,而且生物化学家和生态学家以及医学、卫生学与环境科学方面的专家们也给予了极大的关注。这些科学家和学者们,根据各自的学科目的和方向,从不同的角度对微量元素进行了广泛深入的研究。例如,随着环境污染问题的出现,人与环境恶化的矛盾日益尖锐突出,微量元素与人体健康、人类疾病、衰老和长寿的关系,微量元素在环境生态平衡,土壤修复和生态系统中的作用等都十分引人注目。另外,微量元素与植物起源、演化和分类的关系,与植物地理学和生态学的关系,与形态学、胚胎学、细胞学、遗传学和分子生物学的关系,以及微量元素与动植物资源、引种驯化和绿化建设的关系等,都引起了有关学者的极大兴趣。显然,微量元素研究的领域是极其广阔的。

微量营养元素的发现与应用,是近几十年来植物矿质营养研究领域内的重大发现和农业施肥的巨大进展。这一方面是因为它的施用,不仅提高了农作物的产量,而且还改善了收获物的品质;另一方面是它还解决了病虫害理论不能解决的植物缺素症(一种生理病害)的病因,促进了农业生产的发展。

我国的微量元素研究工作,起步较国外略晚一些,大致始于 20 世纪 40 年代初。最早是由我国著名的植物生理学家罗宗洛教授等人于 1940 年从理论上探讨微量元素的生理作用开始的。在此初期阶段,他们主要研究了微量元素对种子萌发、幼苗和花器官的生长,淀粉水解和碳水化合物代谢的影响作用。例如,汤玉璋和姚瑗 1942 年将含锰琼胶小块置于燕麦胚芽去尖芽鞘一侧进行实验,结果发现引起了胚芽鞘的弯曲生长;罗宗洛等在 1943—1945 年研究了微量元素对水稻、小麦、玉米种子萌发、初期生长和淀粉水解的影响,发现有促进作用;罗宗洛和汤玉璋 1945 年的试验证明锰能促进玉米种子萌发和初期生长;罗宗洛和黄宗甄于 1945 年、1947 年、1948 年研究了微量元素对花粉萌发和花粉管生长的影响;崔微 1941—1942 年证明了微量元素对小麦种子萌发和初期生长有不同程度的促进作用;罗宗洛等 1945—1948 年研究了微量元素对碳水化合物代谢的影响,发现

锰等微量元素能促进菜豆中淀粉的水解。总之，前人在这方面做了许多有益的工作，为我国微量元素生理作用的研究奠定了初步基础。罗宗洛 1947 年在“学艺”上曾以“微量元素、生长素与植物之生长”为题写过一篇综述，对于我国微量元素研究早期，即 40 年代的工作做了总结。

解放以后，我国微量元素生理作用的研究有了很大发展。不仅研究了微量元素对生长发育、增加产量、改良品质的效果，而且开辟了一些新的研究领域，深入到微量元素对代谢过程的作用、与呼吸作用的关系、对酶活性的影响等方面。在这些方面，数以百计的科学工作者付出了辛勤的劳动，做了大量深入的研究，在理论和生产实践上都取得了很多成果，它们对阐明植物生命活动的内在基本规律起了重要作用。对于这方面的成就，崔徵 1962 年曾以“植物中的微量元素”为题写过一篇综述，发表在《中国科学院微量元素研究工作会议汇刊》（1962 年 12 月 10~15 日）中，1964 年科学出版社，对此做了系统的总结。

我国微量元素的土壤化学和农业化学的研究，基本上是解放以后开始的，在这方面解放前几乎完全是一个空白领域。50 年代初，中国科学院的土壤研究所和林业土壤研究所，从分析测试技术系统方面，为这一研究工作的开展做了有益的准备，先后确立了不同土壤中各种微量元素的测试方法，使光谱、极谱及比色分析方法成功地应用于我国土壤的微量元素测定中。例如，刘铮 1964 年同时发表了土壤和植物中微量元素的比色测定、极谱测定。方肇伦 1964 年发表了土壤微量元素的光谱定量测定法；唐丽华等 1964 年发表了土壤中微量元素的光谱半定量分析法等。与此同时，一些科学工作者对部分地区及部分土壤微量元素的含量分布、形态，以及与作物生长的关系等，进行了研究。例如，朱兆良 1957 年发表了“中国土壤中的氟及氯”，1964 年刘铮等同时发表了“酸性水稻土中微量元素的含量和形态及与水稻生长的关系”和“微量元素对柑橘的作用及各元素间的关系”；方肇伦等发表了“东北及内蒙古（内蒙古自治区，简称内蒙古，全书同）东部的土壤微量元素”；何电源等同时发表了“华南某些主要土壤中微量元素的含量和分布的初步研究”以及“华南某些砖红壤中钼的含量及钼肥对豆科作物的效应”；杨玉爱等发表了“辽宁省土壤中的微量元素”等。至于微量元素肥料的肥效试验结果的文献数量就更多了，主要是由各地农业科研机构来进行和完成的。

我国微量元素的土壤化学和肥效试验研究工作，从 60 年代初开始有了显著发展，到 70 年代中后期进入高潮，不仅研究的内容广，深度也提高了一大步，而且在生产上推广应用微肥出现了大好形势。例如，刘铮等 1981 年在完成我国土壤微量元素含量和分布调查的基础上，提出了我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布，为我国土壤微量元素的丰缺状况勾画出了一个基本的轮廓；张乃凤等 1981 年对山东全省土壤锌的含量分布进行了普查；中国科学院成都地理所微量元素组 1971—1979 年对四川盆地土壤微量元素含量分布进行了调查。我国微量元素肥料在农业上的试验示范和推广应用，到 1981 年已普及 22 个省、市、区，占全国 30 个省、市、区（包括台湾省）的 73%，面积达 2000 多万亩。对于这方面，60 年代初及以前的工作，我国著名的土壤学家和农业化学家李庆逵教授 1964 年曾以“我国微量元素研究工作在土壤农化方面的进展”为题，做了系统总结。另外，刘铮 1977 年又以专论形式发表了一篇“微量元素在农业中的应用和展望”，发表在《中国科学院微量元素学术交流汇刊》（1980 年科学出版社）一书中，文中根据已有的试验研究成果，相当明确而且比较具体地提出了几种主要微量元素在我国应用的前景。

科学研究和生产实践证实微量元素为有机体正常生命活动所必需，在有机体的生活中起着重要的作用。微量元素不仅在农业生产中有重要意义，不仅是土壤学中的一个新的生长点，而且已经成为许多科学领域中的重要内容，植物生理学、生物化学、地球化学、环境化学、生态学、畜牧学、医学等无不与微量元素有关，引起

了不同科学领域中的工作者的重视。在农业生产中则广泛地引用了微量元素肥料，成为提高单位面积产量和产品质量的有效而且简便节省费用的措施。在土壤中微量元素供给不足的时候，则会成为限制产量进一步提高的障碍因素，微量元素肥料的应用便是克服这些障碍的必要措施。这一点已在国内外的许多工作中得到证实。

近几十年来，由于磷酸二铵，氮、磷、钾复混肥的大量施用；农作物高产良种的大面积推广种植；经济作物和果蔬作物大面积种植；中低产田面积剧增；作物营养，尤其是土壤中微量元素缺乏失衡；加之人们对高产、优质、安全、环保农产品的青睐，促使占 16 种必需营养元素中的 3/5 左右的中微量元素需求量大增。

从目前资料看，已经发现我国东半部广大地区缺乏硼和钼，北半部广大地区又缺乏锰和锌，这些地区正是我国重点粮、棉、油产区和畜牧业基地，说明我国施用微肥前景广阔，是一个周期短、数量大、效益高的“短、平、快”项目。据资料显示，我国东部与北部地区，通过合理施用微肥，可望在 5 亿亩以上的耕地上获得增产 10% 以上的效果。

基于上述背景，为在全国大力宣传、推广、应用中微量营养元素肥料，促进中微量营养元素的研究和开发，由史丹利化肥股份有限公司会同中国科学院东北地理与农业生态研究所、中国科学院沈阳生态应用研究所、国家化肥产品质量监督检验中心（山东）、史丹利化肥股份有限公司及国内中微量元素肥料著名研究专家，合作编著了《中微量营养元素肥料研究与开发》一书。

二

《中微量营养元素肥料研究与开发》一书由十八章组成：第一章 作物营养与中微量营养元素；第二章 作物对中微量元素吸收的基本原理；第三章 中国土壤中微量营养元素现状及地理分布；第四章 植物中的微量营养元素；第五章 植物对中微量营养元素的需求；第六章 植物摄取中微量营养元素的机理；第七章 中微量营养元素的作用效果；第八章 土壤、作物缺乏及过剩中微量营养元素诊断；第九章 营养元素相互作用及化学反应；第十章 中微量营养元素与平衡施肥；第十一章 土壤环境污染及修复；第十二章 腐植酸、氨基酸与中微量营养元素；第十三章 中微量营养元素肥料及施用技术；第十四章 大豆重迎茬与中微量元素；第十五章 硼泥生物有机无机生态肥；第十六章 生物有机无机生态肥配方研究；第十七章 中微量营养元素肥料发展趋势；第十八章 有益营养元素肥料施用技术。其中，除十八章、十五章分别由蔡德龙和江志阳完成外，其余各章均由于广武和高进华等人完成。最后由于广武和李晓冰审阅定稿。

全书以中微量元素肥料为主线，兼顾大量元素、有益元素、环境保护、植物营养、平衡施肥、腐植酸肥料、氨基酸肥料、生态肥料等新型肥料的推介。

在本书编著过程中参阅了大量国内外有关肥料，特别是中微量元素肥料著述及相关文献，多次向相关领域专家请教，结合作者研究、推广领域中的科技成果，采取理论与实践相结合、产学研相结合，利用低碳经济、生态农业、新型肥料为主导思想得以完成。

本书最大的亮点有两个，一是中国最大的复合肥企业——史丹利与中国最权威的科技部门——中国科学院强强联合；二是中微量元素与环境保护、平衡施肥、土壤修复、节能减排关系密切，是我国今后肥料发展的活力素和生力军。

本书的显著特点是：针对性、实用性、权威性和可读性强；理论与实践、产学研结合紧密；符合低碳经济、生态农业、节能减排和循环经济的要求。

本书对于从事肥料与作物等专业的科研人员、大学生、研究生进行相关研究具有一定的参考价值，对于从事肥料行业研发的科研人员以及农业生产一线的各类专业技术人员具有现实的指导意义。

三

在新型肥料研究开发中，中微量元素的研制与推广日益引起人们的关注和重视。在我国随着农药和氮、磷、钾肥料的大量施用，生态环境恶化，土壤农药及重金属污染严重，以及农业集约化，设施栽培农业的发展，经济作物和果蔬作物种植面积的增加，农业生产障碍日益增多，尤其是作物营养失调现象的增加，限制了农作物产量和品质的进一步提高。一方面由于种植结构调整，经济作物种植面积增加，从而对作物品质和产量要求都有所提高。另一方面，氮、磷、钾类大化肥浓度越来越高，由于生产工艺的原因，导致高浓度大化肥中中微量元素含量降低，再加上有机肥施用量的减少，土壤中可利用的中微量元素更少。因此，给土壤补充中微量元素显得尤为迫切。

自 1978 年以来，中国科学院南京土壤所对全国土壤微量元素锌、硼、锰、钼、铜、铁的含量做了调查。调查结果表明，我国大部分地区都存在不同程度的微量元素缺乏。土壤中微量元素处于“中度缺乏”的状态，当作物的正常生长代谢已受到了缺乏微量元素影响时，施用微肥能改变作物微量营养状况并可促进生长，提高产量。根据全国第二次土壤普查数据，结果显示南方酸性土壤，硼、镁、钙、钼的含量都非常缺乏，北方碱性土壤也缺铁、锌、锰、钙等中微量元素。我国缺少微量元素铁、铜、钼、硼、锰、锌的耕地分别占 5%、6.9%、21.1%、46.8%、34.5% 和 51.5%。微量元素中，硼缺乏最严重。全国耕种土壤缺硼面积多达 5 亿~10 亿亩，主要分布于中国东南部地区（长江中下游）和黄土高原、华北平原、淮北平原。

中微量元素肥料的研究方向及发展趋势有以下几点。

1. 研制开发 BB 肥、长效肥多元或全元复混肥料

发达国家复混肥的比例占化肥总量的 85% 以上，而我国不到 17%。由于单一化肥所含元素单一，需施用多次，加之中微量元素用量很少，用量很难掌握，将中微量元素与氮、磷、钾常量元素复合，既减少了施肥的麻烦，又可将常量元素作为中微量元素的载体或稀释剂，减少了施用的麻烦。因此，将来多元、全元复混肥料研制开发将成为中微量元素肥料研究的重点。

2. 调整化肥结构，加强有机无机生态专用肥的研究开发

有机无机生物生态肥“高效、安全、环保”型肥料是国内外肥料研究与应用的主要趋势。针对这一趋势开发的生物有机无机生态肥，是以人畜粪便、作物秸秆、腐植酸、氨基酸和工业有机副产品，氮、磷、钾大量元素及 Mg、B 等中微量元素为主要原料，采用微生物菌群好氧固体动态自动发酵，测土配方增补作物需求氮、磷、钾、镁、钙、硫、硼、锌等，添加增强剂和缓释剂，以腐植酸和氨基酸为载体螯合、络合制作的复混肥。它把有机肥、无机肥、生物肥 3 种肥料结合起来，把有机肥的缓效、长效，无机肥的速效、高效，生物肥的增效、促效作用相互结合，急缓相济，优势互补，养分全面，均衡持久。同时它把生物肥的促生、供肥、抗病、减轻环境污染，有机肥的改良土壤结构、培肥地力、改善作物品质、提高化肥利用率与无机肥提供氮、磷、钾大量元素及中微量元素等作物必需的主要营养元素结合起来，既保证了作物生长不可缺少的营养成分，又改土修复土壤、促生、抗病、改善生态环境、对生产优质安全农产品、减轻环境污染有很大作用。

3. 重视中微量元素的颉颃等问题的研究

必需元素的有效性，是优质配方肥料质量的重要指标，国内肥料企业虽然也加入了中微量元素，但忽视中

微量元素的有效性,忽视中微量元素在肥料加工以及在施入土壤后可能发生的副反应而失效的问题。为了防止各元素间不良副反应和颉颃作用,在BB肥里中微量元素以独立的颗粒掺混,既避免了与磷肥的副反应,又可以保持中微量元素的有效性。

植物只能吸收能溶于水的离子态或螯合态的元素,铁(Fe)是以 Fe^{2+} 或金属螯合物形态,锰(Mn)是以 Mn^{2+} 或金属螯合物形态,锌(Zn)是以 Zn^{2+} 或金属螯合物形态,铜(Cu)是以 Cu^{2+} 或金属螯合物形态,硼(B)是以 H_2BO_3^- 形态,钼(Mo)是以 MoO_4^{2-} 形态,氯(Cl)是以 Cl^- 形态,钠(Na)是以 Na^+ 形态被吸收的。

土壤中许多微量元素并不缺乏,可是一般均以稳定的化合物存在,不能被植物吸收,土壤中微量元素的可给性受许多因子影响。

酸碱度:土壤中微量元素的可给性一般是在酸性条件下升高,在碱性条件下下降。一般来说,将pH值调至6.5是比较合适的,有利于土壤可给性微量元素的增加。

氧化还原电位:氧化还原电位对多种化合价的元素影响较为明显,如植物吸收的是 Mn^{2+} ,土壤处于还原状态时,有较多的 Mn^{2+} 供植物吸收,水稻田和排水不良的土壤便是这样;而在质地很轻的呈碱性反应的旱地土壤锰处于高价状态,不能被植物吸收利用。

有机质:有机质含量高的土壤含有较多的微量元素,有机质的分解产物,如腐植酸对微量元素具有一定螯合能力,而直接影响其可给性。

农作物所需的营养元素处于土壤的复杂体系中,各元素之间既有相互促进的作用,又有颉颃作用。例如,土壤中富含磷或大量施用磷肥,往往会导致或加重农作物缺锌现象,而磷与钼之间又存在相互促进作用。两种元素同时施用的效果大于分别施用的效果,在磷肥未满足需要时,钼肥的效果往往表现不出来。

中微量元素颉颃问题是关系到多元复合肥肥效的关键问题。现行的中微量元素肥料一般都加入可溶性无机盐,由于各元素的颉颃作用会大大降低肥效,影响了植物的吸收利用。美国等发达国家采用EDTA、柠檬酸等螯合剂,有效防止了颉颃作用,但EDTA成本高,不适合我国的国情。研究开发适合我国国情且又价廉的螯合剂腐植酸是中微量元素肥料研究的一个发展方向。今后应大力加强腐植酸对中微量元素螯合、络合的研究和应用。

4. 加强硼泥等废弃物的开发利用

以硼泥为原料的含硼复混肥项目的发展,使含硼废弃物得以合理利用,达到了化害为利、变废为宝的目的。不仅为企业创造了经济效益,而且有力地支援了农业发展,产生了良好的社会效益。据调查在辽宁省每年约有500万吨硼泥废弃物排放,宽甸地区硼泥排放量100万吨上下。科学合理利用这些硼泥废弃物生产开发有机无机复混肥具有极大优势,既可提供作物营养,又可改良土壤等生态环境,同时提高了产量、增加了收入。

我国中低产田地占总耕地的70%以上,其中,大部分存在中微量元素缺乏的问题,有针对性地施用中微肥,可作为提高中低产田产量的有效技术措施,还可有效增强作物对病虫害、低温、高温和干旱的抗逆性。

合理施用中微肥不仅可提高产量,而且对提高农产品的品质非常明显。农产品已摆脱过去计划经济时代片面求产量不求质量的影响。在市场经济的竞争中,提高产量和质量已成为不可分割的两个重要方面,优良品种和平衡施肥又是提高农产品产量和质量的两项重要措施。中国加入WTO后,这种竞争更为激烈,传统的农业生产方式和观念将受到严重挑战,将迫使人们转变观念,在重视产量的同时,更注重农产品的质量,这就给中微量元素开辟了广阔的市场前景。