



稀土农林



研究与应用

熊炳昆 陈 蓬 等 编著



冶金工业出版社



稀土农林研究与应用

熊炳昆 陈 蓬 王 锋 编著
郭伯生 郑 伟

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2000

内 容 简 介

稀土农用是我国首创并居于国际领先水平的一项新技术新成果。本书系统地总结了我国稀土农用林用科研、生产所取得的成就,涉及稀土农用的理论基础、稀土农用生物化学、稀土农用环境化学、稀土土壤学、稀土植物生理学、稀土分析化学以及稀土在上百种农作物及林木、果树、牧草上的研究成果及应用;阐述了稀土在医药临床上的研究及延伸至畜牧水产养殖业上的应用研究等内容。本书可供从事稀土和稀土农用林用等相关领域的科技人员、大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

稀土农林研究与应用/熊炳昆等编著. —北京:冶金工业出版社, 2000. 5

ISBN 7-5024-2487-3

Ⅰ. 稀… Ⅱ. 熊… Ⅲ. ①稀土化合物-应用-农业
②稀土化合物-应用-林业 N. S13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 67454 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 谭学余 美术编辑 王耀忠 责任校对 秦雅慧 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店

2000 年 5 月第 1 版, 2000 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm, 1/32, 13.5 印张, 362 千字, 421 页, 1-1800 册

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

编著者的话

在国家发展计划委员会稀土办和全国绿化办的支持下,由北京有色金属研究总院、全国稀土农用中心承担,冶金工业出版社、中国林业出版社等单位编辑出版的稀土农用科技丛书,包括《稀土农林研究与应用》、《农业环境中的稀土》和《农用稀土生产工艺》三本专著以及一册《稀土农用文献汇集》,将于1999年和2000年陆续出版,奉献给广大读者。

众所周知,我国稀土资源十分丰富,储量居世界首位。近年来随着改革开放和国民经济的发展,我国的稀土生产及应用水平已跃居世界前列。稀土农用林用就是近20年来在我国发展起来的稀土资源综合利用的新领域,一门新的前沿科学。正如我们在1994年纪念全国稀土农用协作网成立15周年和稀土农用中心成立10周年大会上所作的报告中概括的那样:“稀土农用是我国首创并居于国际领先水平的一项重要成果,是开发利用我国丰富稀土资源事业中的一项具有中国特色的重要成就,是我国材料科学和稀土生物化学研究领域中的一项重要突破,是我国在组织边沿学科研究中,采取多学科跨地区跨部门联合攻关的一次成功范例。它凝结着我国众多领导、专家、学者和科研成果推广工作者几十年的心血和汗水,是我们从事稀土农用事业的成千上万名工作者艰苦奋斗、团结协作和科学智慧的结晶。我们为取得这样的成就而高兴自豪。”

稀土农用曾多次被列为国家重点科技攻关项目、国际合作项目和国家自然科学基金“九五”重大项目。有关地区和部门也组织了长期的卓有成效的基础研究和应用研究,直接投入的研究经费粗略估计近2000万元。通过国家、部级和省级鉴定和验收的项目(或课题)上百项,获国家级科技进步奖、攻关奖、成果推广奖10项,部级、省级科技进步成果奖近百项,专利47项。在国内外发表

的论文和研究报告近 1500 篇,还有不少相关的专著。因此,我们有责任将这些研究成果编纂成书,使之能够较系统较完整地反映那一段科学研究历史的足迹,把它留给国家、留给后人,也献给那些为稀土农用事业呕心沥血的、已经作古的、已经退役的朋友们和同事们。

稀土农用还是一门年轻的学科,开展工作的时间还不长,研究的深度特别是涉及稀土生物化学、稀土环境化学的基础研究还有待深入,但稀土作为有益元素其生物效应经过大量的具有一定深度和广度的研究已经得以证明。正如 1994 年第十一届全国稀土农用工作会议在西安召开时我们曾引用过鲁迅的名言:“其实世上本没有路,走的人多了,也就成了路。”科学研究就是探索未知,就是开拓新路,就是发现客观事物的规律,使之成为人类进步造福。就如最初我们不知锌、锰、钼、铜等为必需的微量元素一样,我们对稀土的生物效应的认识现在也只是一个起步阶段,只要我们深入探索不断总结,稀土生物功能的理论研究及实践必将取得新的发展。因此,尽管本书还有许多肤浅和不足之处,也就可以理解。愿这几本书对此有所贡献。

《稀土农林研究与应用》参阅了郭伯生、熊炳昆等编著的《农业中的稀土》(中国农业科技出版社,1988 年)一书,总结了从“七五”以来稀土农用、林用和稀土在畜牧养殖业上的应用研究和机理研究、环境评价研究、抗逆性能研究、稀土碳铵复混肥的应用研究等内容,较全面、较系统地总结了这一时期稀土农用和林用所取得的成就,由于资料极为丰富,本书不可能全部概括。

本书由国家发展计划委员会稀土办公室王彩凤副处长和刘为彬高级工程师审阅,谨此致谢。

目 录

1 稀土在农林业上应用的理论基础	1
1.1 概述	1
1.2 稀土元素在植物中的生物特性	7
1.3 土壤中稀土元素的可给性.....	11
1.3.1 土壤本底中的稀土元素	11
1.3.2 土壤本底中稀土元素的赋存形态	19
1.3.3 外源稀土在土壤中的赋存状态	26
1.3.4 土壤中稀土的可给性	30
1.3.5 影响土壤中可溶态稀土含量的因素	43
1.3.6 土壤中稀土的生物有效性.....	45
1.3.7 土壤对外源稀土的吸附、解吸和固定	49
1.4 稀土对植物生物效应的本质.....	67
1.4.1 稀土元素在植物体内的运移和分布	67
1.4.2 稀土元素在植物体内的定位和存在状态	75
1.4.3 稀土元素与钙的相关性	81
1.4.4 稀土元素对种子萌发、根系生长和植物生长素的 影响	98
1.4.5 稀土对植物光合作用和叶绿素形成的影响	121
1.5 稀土元素对植物抗逆性的影响	131
1.5.1 稀土元素对植物细胞膜和抗逆性的影响	131
1.5.2 稀土元素对酸雨和臭氧损伤植物的影响	145
1.5.3 稀土元素降解作物中有害重金属元素和其他有害残 留物及对病毒影响的研究	146
1.6 稀土元素对植物群体结构和经济性状的影响	151
2 稀土在农业上的应用研究	153
2.1 稀土在粮食作物上的应用研究	153

2.1.1	小麦	153
2.1.2	荞麦	167
2.1.3	水稻	169
2.1.4	玉米	177
2.2	稀土在油料作物上的应用研究	187
2.2.1	油菜	187
2.2.2	花生	190
2.2.3	大豆	193
2.3	稀土在棉、麻和芦苇上的应用研究	200
2.3.1	棉花	200
2.3.2	亚麻	210
2.3.3	苧麻	214
2.3.4	芦苇	215
2.4	稀土在糖料作物上的应用研究	219
2.4.1	甘蔗	219
2.4.2	甜菜	231
2.5	稀土在橡胶树、烟草和茶树上的应用研究	239
2.5.1	橡胶树	239
2.5.2	烟草	244
2.5.3	茶树	250
2.6	稀土在蔬菜类作物上的应用研究	251
2.6.1	马铃薯	251
2.6.2	食用菌	253
2.6.3	大白菜	256
2.6.4	黄瓜	258
2.7	稀土在瓜果类和药材、花卉上的应用研究	259
2.7.1	草莓	259
2.7.2	葡萄	261
2.7.3	西瓜	266
2.7.4	人参	268

2.7.5	当归	272
2.7.6	水仙花	272
2.7.7	唐菖蒲	275
2.7.8	郁金香	275
2.7.9	稀土在其他花卉上的应用	276
3	稀土在草业和绿肥上的研究与应用	278
3.1	概况	278
3.1.1	稀土在豆科牧草上的应用效果	279
3.1.2	稀土对豆科牧草生长和生理功能的影响	280
3.1.3	稀土浓度对豆科牧草产量效应的相关性	282
3.1.4	稀土在禾本科牧草上的应用效果	282
3.2	内蒙地区草原和牧草应用稀土的研究	284
3.2.1	施用方法和效果	284
3.2.2	稀土对牧草生长的影响	286
3.2.3	稀土对牧草品质的影响	288
3.2.4	燕麦、野大麦和秣食豆应用稀土的效果	289
3.3	新疆地区草业生产中应用稀土的研究	290
3.3.1	施用方法和效果	290
3.3.2	稀土对牧草生长的影响	291
3.4	稀土在其他地区牧草上的研究和应用	293
3.4.1	种子丸衣试验和大面积飞播示范	293
3.4.2	甘肃高寒地带牧草应用稀土的研究	395
3.5	紫云英应用稀土的研究	296
3.5.1	稀土对紫云英生长发育的影响	296
3.5.2	稀土对紫云英的增产效果	296
4	稀土在林业上的应用研究	297
4.1	概述	297
4.1.1	稀土元素对木本植物的生理活动的影响	298
4.1.2	稀土元素对林木生长发育的影响	299
4.1.3	苗木施用稀土的效果	300

4.2 稀土在育苗中的应用研究	303
4.2.1 稀土在松杨等林木育苗中的应用研究	303
4.2.2 稀土在红松、云杉育苗中的应用研究	303
4.2.3 稀土在兴安落叶松育苗中的应用研究	307
4.2.4 稀土在用材林育苗上的应用研究	307
4.2.5 稀土对灌木种苗生长的研究	308
4.2.6 稀土提高杉木、木荷、板栗、南洋楹和刺槐苗木质量的 应用研究	310
4.2.7 稀土在容器育苗中的研究和应用	312
4.2.8 稀土在无(有)性繁殖的应用研究	313
4.3 稀土在果树上的研究和应用	315
4.3.1 苹果树应用稀土的研究	315
4.3.2 枣树应用稀土的研究	321
4.3.3 猕猴桃树应用稀土的研究	326
4.3.4 山楂树应用稀土的研究	328
4.3.5 核桃树应用稀土的研究	328
4.3.6 板栗树应用稀土的研究	329
4.3.7 柑桔应用稀土的研究	330
4.3.8 稀土在荔枝、龙眼树上的研究和应用	334
4.3.9 稀土在香蕉、菠萝上的研究和应用	337
4.4 稀土在一些经济林木上的应用研究	340
4.4.1 柞树	340
4.4.2 桑树	342

5 稀土在医药临床上的试验研究及在畜禽饲养中的

应用研究	343
5.1 概况	343
5.2 稀土在医学领域中的应用研究	343
5.2.1 稀土用于抗凝血及其机制的研究	344
5.2.2 预防动脉硬化的应用研究	344
5.2.3 稀土的消炎和镇痛作用研究	345

5.2.4	稀土在降低血糖方面的研究	345
5.2.5	稀土在烧伤方面的应用研究	345
5.2.6	稀土抑瘤作用的研究及对肿瘤的诊断	346
5.2.7	稀土在糖尿病和艾滋病方面的应用研究	347
5.3	稀土对动物体免疫功能影响的研究	348
5.4	稀土对动物消化吸收影响的研究	350
5.4.1	稀土对大白鼠胃液分泌的影响	350
5.4.2	稀土对家兔消化率的影响	351
5.5	稀土在育猪上的应用研究	352
5.5.1	不同稀土化合物对猪生长的影响	352
5.5.2	镧、铈化合物对猪生长发育影响的研究	353
5.5.3	饲喂稀土对猪肉品质和某些血液指标的影响	354
5.5.4	稀土在基础饲料及猪肉、脏器组织中的 分布与蓄积	357
5.6	稀土对肉鸡生长影响的研究	358
5.6.1	稀土对肉鸡饲养生产的影响	358
5.6.2	稀土对蛋鸡产蛋性能的影响研究	358
5.6.3	稀土对鸡的肉用性能及肌肉营养成分的影响	360
5.6.4	稀土在鸡肉和鸡脏器中的分布和残留	360
5.7	稀土在水产养殖业上的应用研究	361
5.7.1	稀土在淡水渔业上的应用研究	361
5.7.2	稀土对鱼肉品质的影响研究	364
5.7.3	稀土在鲜鱼中的残留量研究	365
5.8	稀土在蚕业上的应用研究	366
5.8.1	家蚕	366
5.8.2	柞蚕	368
6	稀土农用产品的生产工艺	371
6.1	硝酸稀土	371
6.1.1	概述	371
6.1.2	用包头轻稀土原料制备农用硝酸稀土的工艺流程 ...	371

6.1.3	富镧农用硝酸稀土的生产工艺	380
6.2	稀土碳铵复混肥	382
6.2.1	概况	382
6.2.2	稀土碳铵复混肥生产工艺	384
6.3	稀土饲料添加剂的研制	390
7	稀土农用安全性毒理学评价研究	392
7.1	硝酸稀土的安全性毒理学评价研究	393
7.1.1	实验材料	393
7.1.2	实验方法	394
7.1.3	实验结果	395
7.1.4	实验研究的结论	397
7.2	抗坏血酸稀土的毒性研究	398
7.2.1	实验材料和方法	398
7.2.2	实验研究结果	399
7.3	碳酸稀土的毒性研究	403
7.3.1	实验方法	403
7.3.2	研究结果	404
7.4	土壤中农用外源稀土的积累和迁移	405
7.4.1	土壤中农用外源稀土的积累	405
7.4.2	土壤中农用外源稀土的迁移	408
7.4.3	外源农用稀土对土壤的贡献值	410
	参考文献	411

第 1 章 稀土在农林业上应用的理论基础

1.1 概述

稀土农用是近 30 年来取得重大发展的一门新兴学科^[1],最早把稀土元素用于植物栽培的研究工作是在 1917 年。中国学者钱崇澍与美国人 W. J. Ostenhout 共同发表的论文就是研究钡、铈、铈对水绵的特殊生理作用^[2]。

在 30 年代初,苏联学者开展了研究稀土对植物生长影响的试验工作。1933 年,托木斯克大学的 П. В. Савостин 和 И. М. Тернер 为了弄清磷灰石中所含的微量稀土是否具有生理活性而进行了盆栽试验。他们用少量的碳酸镧(50g 干土中加入 1~3mg)和草酸铈(3~6mg)做了两种小麦的营养生长试验。作者认为镧具有较大的生长刺激作用,而铈对整个小麦生长产生了抑制作用^[3]。

А. А. Дробков 从 1935 年开始对稀土的肥效进行了比较系统的研究。他用从磷灰石中提取出的水溶性稀土化合物,试验其对农作物的生长、发育和对产量的影响,供试的作物有豌豆、萝卜、黄瓜、亚麻和橡胶草等。试验结果表明,加入稀土后所有试验植株的鲜重和产量都增加了。最高的产量是在容器内(含 6L 混合营养液)加入 0.01g 混合稀土或单一的铈、镧和钆时得到的。在这个浓度下,混合稀土使豌豆鲜重增加了 65.23%,豆荚增加了 45.66%;铈使豌豆鲜重增加了 40.07%,豆荚增加了 26.01%;镧使豌豆、豆荚鲜重分别增加了 25.48%和 30.17%;钆使豌豆、豆荚鲜重分别增加了 35%和 39.64%。作者认为,无论是单一稀土或混合稀土,都表现出相当有效的类似微量元素肥料的作用。

在对橡胶草进行砂培试验时发现,稀土对提高橡胶草的产量方面并不突出,但能较大幅度地提高橡胶草的含胶量,使其含胶量从 2.7%提高到 4.9%,增长率达 78%^[4]。

А. А. Дробков 在“二战”前的工作主要是通过水培和砂培试

验,肯定了稀土对作物的增产效果,并指出了稀土起作用的阶段性特点。战后他和其他学者把注意力集中到微量稀土元素及其同位素对农作物的影响研究方面。他们研究了钐和钆等在加速番茄成熟和提高其含糖量方面的作用。所用的溶液含有 $10^{-5}\%$ 的钐,在温室内用这样的溶液对秧苗进行根外追肥,结果是上述元素分别提高收获量 29.4% 和 22.4%。施用钐对提高果实中的含糖量最显著,为对照样品的 123%。

从 60 年代开始,罗马尼亚的 C. T. Horovitz 和保加利亚的 И. А. Иванова 对稀土农用进行了多方面的研究。C. T. Horovitz 在布加勒斯特中心农业研究所进行了硫酸铈对向日葵、甜菜、豌豆、杂交玉米和小麦种子的萌发试验。最佳浓度的硫酸铈可以使玉米的萌发根干重增加 37%,使地上部分鲜重增加 78%。铈可使小麦种子出苗率从 37% 提高到 54%,经稀土处理过的小麦干物重比对照增加 13%。И. А. Иванова 研究了氯化稀土对小麦、玉米、甜菜、大豆、西红柿、黄瓜的生长和对产量的影响。试验表明,小剂量的氯化铈对植物的生长和产量都有促进作用,而大剂量地施用铈,对作物生长产生抑制作用。作者认为最有应用前景的氯化铈溶液浓度是每升 50~100mg,即相当于十万分之五到万分之一的浓度。

CeCl_3 的浓度从每升 10mg 增加到 100mg 时,小麦和玉米的鲜重达到最高值,比对照样品分别增加 19.5% 和 26.7%。在浓度为每升 50mg 时,大豆的鲜重比对照样品增加了 18.2%。

И. А. Иванова 对水稻进行的浸种试验表明,当 CeCl_3 浓度为每升 50~100mg 时,浸种时间以 16h 为好。浓度为每升 2000mg 时,浸种时间只需 5h。对玉米、小麦、甜菜进行的田间试验表明,最有希望应用稀土的作物是甜菜,用每升含 50mg 的 CeCl_3 溶液喷施甜菜 3 次,增产达 24%,生物统计达到了显著水平。甜菜含糖量增加了 0.4%。

这位学者还从植物生理学角度上研究了氯化铈对大豆光合强度和对各种生物化学酶活性的影响。结果表明,50mg 浓度的 CeCl_3 对促进大豆光合作用最为明显,在这个浓度下植株地上部分的生

长也快于对照物。

60年代末,70年代初,苏联研究人员对含有微量稀土元素的天然矿石发生了兴趣。文献[5]指出,哈萨克斯坦东南所产的含稀土矿石可起到天然无机肥料的作用。

日本在这方面也进行过一些研究。在1980年发表的专利中指出^[6],褐钇铈矿是植物的活化剂,这种矿肥可以预防白菜的软腐病,提高胡萝卜的株重7.2%。

前苏联学者 Ю. П. Чирков 把各种微量元素分成14个处理,对青贮玉米进行了田间试验。试验方法是取50kg玉米加水2L,并加入相应的微量元素。试验结果表明,镧与铈均可提高青贮玉米的产量20%~25%,并能提高饲料的营养价值^[7]。

此外,菲律宾、美国、英国也有过稀土农用研究的一些报道^[8,9]。

到目前为止,尚未见过国外有将稀土用于农业生产实践的报道。在继续研究稀土元素对植物生长有无作用的问题时,前苏联学者 А. А. Дробков 当时认为尚有以下难题有待解决:(1)缺少先进的仪器及测试方法,不能准确地测定植物体内和土壤中的微量稀土含量及有效态稀土的含量;(2)对不同土壤类型和不同的作物品种尚无规范的稀土使用技术;(3)稀土在植物食品中的积累以及动物或人体食用后所产生的生理影响还不清楚。И. П. Скрипка 和 А. А. Дробков 在1972年发表文章^[10]认为:稀土盐类比较贵,这也是妨碍使用的原因之一。

综合上述文献可以认为,国际上对稀土农用研究进行了不少工作,但这些工作是分散的、间断的、单学科的实验室研究或小型试验。总的情况是,多数研究肯定了稀土元素对植物生长有一定的刺激作用,加入微量稀土能提高作物产量、加速作物成熟和具有改善某些作物品质的效果。但由于深入研究不够,重复少,材料不统一,特别是缺乏多学科的配合,因而未得出明确的结论,使稀土元素能否在农作物上应用的问题没有解决,工作难于深入和继续。

我国是世界上稀土资源最丰富的国家,这为我国可以在农作

物上使用稀土提供了可靠的物质基础。稀土农用研究工作在我国是从 70 年代初开始的,北京有色金属研究总院和北京农科院等科研单位合作开展了研究和试用工作。在研制的稀土农用产品取得一定试用效果后,迅速扩展到河北、云南、广东、湖南、黑龙江、内蒙古、江西等省,示范面积很快达到了几万亩。但到了 1978 年前后大部分研究和示范工作中断了,原因主要有二:一是农用研究试验做得不深、不够细致,严格的小区试验和重复少,对不同农作物的施用技术还缺乏针对性,所以一些地区施用稀土后的增产效果不稳定;另一个原因是,施用稀土后可能有放射性污染、有残毒,使得一些人对稀土农用不放心,连有些施用稀土有很好效果的地区也不敢用。事实说明,简单的试验和单学科的研究是很难解决稀土农用这样复杂的技术难题的。正是因为有了国外几十年、国内多年开展稀土农用研究和试验的经验,才使我国的一些科学工作者提出了组织一个多学科、跨行业的稀土农用协作组织的主张。在 1979 年组成了全国稀土农用协作网,参加的单位逐步发展到近 100 个。根据研究工作的需要,在协作网内成立了六个研究组,即稀土农用技术、稀土土壤学、稀土植物生理学、稀土毒理卫生学、稀土农用分析检测和农用稀土化合物制备工艺。各专业组在协作网的统一组织与协调下,制定计划,落实专题,横向交叉,相互配合。参加协作攻关的科技人员在国家有关部门的支持下,经过了近 20 年的系统研究,终于在稀土农用技术和稀土农用的应用基础理论研究中取得了一系列的重要突破。

(1)通过连续多年的盆栽、小区、田间对比试验,证明了稀土对粮食、油料、水果、蔬菜等几十种农作物确有一定的增产作用,小麦、水稻等粮食作物的增产幅度为 8% 左右,花生、甜菜、烟草等为 8%~12%,蔬菜、水果为 10%~15%。同时证明,稀土“常乐”不但可使农作物增产,而且可以改善部分农产品的品质。西瓜、甜菜、甘蔗施用“常乐”后,绝对含糖量提高 0.4%~1.0%;苹果、荔枝、龙眼、葡萄中的维生素 C 含量增加,甜酸比得到改善,稀土能稳定地提高烤烟的上等烟产率和提高大白菜的实心率^[11~14]。

(2)证明稀土元素(单一或混合轻稀土)在一定条件下可促进作物生根、发芽,增加作物的叶绿素含量和增强光合速率,提高作物对氮、磷等元素的吸收和运输。试验还表明,稀土可以增强作物的抗逆性和影响一些生物酶的活性。植物学家们认为,稀土元素是对作物生长起一定促进作用的有益元素^[15~19]。

(3)经大量土壤测定发现,土壤中可溶态稀土一般只占其全量的10%以下,而且随成土母质、地区、土壤类型和土壤的酸碱度等因素变化而不同。并经田间实验证明,可溶态稀土含量低的地区往往是施用稀土效果较好的地区^[20]。

(4)混合稀土硝酸盐的急性、亚急性和慢性毒理试验,吸收、分布、蓄积和致畸、致突变试验,以及天然放射性核素在土壤和农作物中的积累和卫生学评价研究等工作表明,适当地使用稀土,不会对环境和农产品质量产生不良影响,稀土“常乐”可以在农作物上推广使用^[21~23]。

(5)经对稀土农用分析方法进行系统研究,已有“土壤中稀土含量”、“大米、小麦中稀土氧化物含量”及稀土农用产品等分析方法定为国家标准分析方法公布,使我国稀土农用的研究成果建立在可靠而先进的分析检测方法基础之上^[24~26]。

(6)针对工业用硝酸稀土在天然水中易沉淀和叶面喷施时附着性能差等问题,研制出农业专用的稀土“常乐”系列产品,具有水溶性好、适应性强和肥效稳定等特点,为大面积推广提供了较为理想的实用商品。

从1979年开始,由于在稀土农用研究中开展了多学科的联合攻关,因而便利了不同学科和不同科研单位之间的分工协作,很快地攻克了国外学者认为难于解决的技术关键。到1985年底,已有16种农作物施用稀土“常乐”的技术通过了鉴定,得到了同行专家的确认。稀土农用安全性卫生学评价结论也通过了卫生部门的专家审定。与实用技术和基础研究密切相关的分析检测方法研究和产品定型工作均告完成。稀土土壤学和植物生理学方面的研究成果,从理论上探讨了稀土在一定条件下可使作物增产的原因。上述

研究和开拓工作的成就,为我国在农业生产上实际应用稀土元素作好了必要的技术准备。

在此之后,在国家支持下,开展了稀土在林业和牧草中的应用研究,内容主要包括将稀土用于育苗、幼林或成年林的喷施和促进牧草的生长及其品质的改善,林业上使用稀土的树种近 30 种,牧草 20 种,研究表明,在林木和牧草上使用适量稀土元素可以促进林木和牧草的生长发育^[27,28]。在对动物体进行毒理卫生学评价研究中发现,适量稀土元素可以提高小鼠细胞的免疫功能和机体的抗病能力^[29]。在此基础上开展了稀土元素在畜牧业和水产养殖业上的应用研究表明,混合稀土(主成分为轻稀土)可以促进畜禽生长,降低其发病率,减少饲料消耗,改善某些产品如羊毛、蚕丝的品质。相应的毒理卫生学评价表明,适量稀土元素以添加剂形式加入饲料饲喂动物是安全的,由于稀土畜用需要对其毒理卫生学进行较长期的多种内容的深入研究和观察,在开展稀土畜用的大群体示范的同时,这一研究还在深入进行。

稀土元素有促进作物对氮、磷、钾等元素吸收运转的功能,开展了稀土碳铵复混肥的工艺研究及其在农业上的试验研究,改善了化肥性能,增加了作物产量。一批用于畜牧业、水产养殖业的有机、无机稀土化合物及种子包衣用稀土产品也相继研究成功。至此,稀土在农业上的应用作物已有 100 个品种,林木 30 余种,牧草 20 余种,畜禽水产近 20 种。这些研究成果在获得大量科学的、肯定的结论后,先后被列为国家重大科技成果推广项目、国家星火计划项目、丰收计划项目,建立了一批稀土农用产品的定点生产企业,制定了 15 项产品的国家标准和行业标准,并根据不同地区的土壤、气候、不同作物的特点,因地制宜地开展了推广。截至 1998 年底,稀土农用推广面积累计达到 4 亿亩,在畜禽和水产上也进行了示范,取得了显著的经济效益和社会效益。在国家有关部门的支持下,为了深入研究与稀土农用有关的基础理论,国家自然科学基金委员会又将《稀土农用的环境化学生态效应毒理研究》列为重大项目,将促进我国稀土农用在理论和实践上的进一步发展。