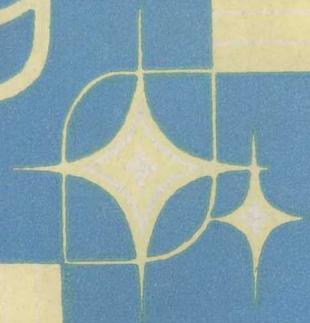




全国高等农业院校教材



# 微量元素营养 与微肥施用

● 刘武定 主编

● 土壤植物营养专业用

中国农业出版社

全国高等农业院校教材

# 微量元素营养与微肥施用

刘武定 主编

土壤植物营养专业用

中国农业大学出版社

## 前 言

本教材是在农业部教育宣传司领导下,由华中农业大学微量元素研究室负责编写的。1991年4月在福州召开的高等农业院校教材指导委员会土化、植保学科组第二次(扩大)会议上,教材编写大纲经土化小组审定通过,1992年3月基本完成初稿和初审,于1993年6月定稿。

教材共分十二章,第一章绪论介绍了土壤、植物微量营养元素的研究和应用概况以及近年来的进展;第二章至第八章均从植物、土壤和微肥应用三个方面,分别对七种植物必需的微量营养元素进行了较为详尽的阐述;第九章介绍了国内外较公认的有益微量元素;第十章至第十二章从不同角度介绍了微量营养元素间的相互关系、微量元素的遗传特性以及含微量元素复混肥料的生产和应用等问题。第一章绪论由刘武定、皮美美合写;第二章硼、第八章氯、第九章有益微量营养元素及第十一章微量营养元素的基因型差异由皮美美编写;第三章锌由王运华编写;第四章铝、第五章锰、第十章微量元素间的相互关系及第十二章含微量元素的复混肥料由刘武定编写;第六章铁及第七章铜由吴礼树编写。

本教材系教学参考书。按教材编写学科组要求,教学参考书应加深和拓宽学生知识面。因此,本教材编写起点高于大学本科教材《植物营养学》的微量元素营养及微肥部分,且各章后均附有大量的参考文献。其目的在于充实微量元素营养功能的内容,加深理论基础,并引导学生拓宽微肥应用的知识范围,以弥补大学本科教材因篇幅有限可能引起的不足。本教材适合硕士研究生阅读,可作为学位课的学习材料,而且对于农业科研工作者以及从事微肥生产和技术推广的人员均有重要参考价值。

在教材制定编写大纲和完成初稿的过程中,曾得到广西农业大学陆申年教授、河南农业大学吴建国教授、西南农业大学周则芳教授、浙江农业大学秦遂初教授以及湖南农学院欧阳铎声副教授等许多同行的关心、帮助和指导。初稿完成后,多方征求意见,经编写者多次修改、主编加工后,并约请北京农业大学陆景陵教授和南京农业大学胡霭堂教授进行评审。而后,编写者又再次修改,并由主编进行全面统稿和定稿。在教材即将出版之际,对关心、帮助和指导过教材编写的各位表示衷心地感谢。

在教材编写的后期,华中农业大学徐湘秀工程师和博士生朱端卫曾协助进行了教材誉写及参考文献的整理工作。陆景陵教授还协助完成了全书的制图工作。在此也一并表示感谢。

由于近年来微量元素研究和应用的进展很快,已出版的微量元素专著、期刊和学术论文甚多,限于教材的字数、编写时间及编写者的水平,难免有错漏和不妥之处,热忱盼望阅读本教材的同学、教师以及同行们提出宝贵意见。

刘武定

1993.7

# 目 录

## 前言

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 绪论——微量营养元素的研究与应用概况 ..... | 1   |
| 第一节 国外微量元素研究和应用概况 .....      | 1   |
| 第二节 我国微量元素研究和应用概况 .....      | 5   |
| 第二章 硼 .....                  | 8   |
| 第一节 植物中的硼 .....              | 8   |
| 第二节 土壤中的硼 .....              | 17  |
| 第三节 硼肥及其有效施用 .....           | 26  |
| 第三章 锌 .....                  | 36  |
| 第一节 植物中的锌 .....              | 36  |
| 第二节 土壤中的锌 .....              | 41  |
| 第三节 锌肥及其有效施用 .....           | 49  |
| 第四章 钼 .....                  | 53  |
| 第一节 植物中的钼 .....              | 53  |
| 第二节 土壤中的钼 .....              | 57  |
| 第三节 钼肥及其有效施用 .....           | 61  |
| 第五章 锰 .....                  | 65  |
| 第一节 植物中的锰 .....              | 65  |
| 第二节 土壤中的锰 .....              | 70  |
| 第三节 锰肥及其有效施用 .....           | 75  |
| 第六章 铁 .....                  | 79  |
| 第一节 植物中的铁 .....              | 79  |
| 第二节 土壤中的铁 .....              | 84  |
| 第三节 铁肥及其有效施用 .....           | 86  |
| 第七章 铜 .....                  | 89  |
| 第一节 植物中的铜 .....              | 89  |
| 第二节 土壤中的铜 .....              | 93  |
| 第三节 铜肥及其有效施用 .....           | 95  |
| 第八章 氯 .....                  | 98  |
| 第一节 植物中的氯 .....              | 98  |
| 第二节 土壤中的氯 .....              | 102 |
| 第三节 含氯化肥的施用 .....            | 103 |
| 第九章 有益微量元素 .....             | 106 |
| 第一节 钴 .....                  | 106 |
| 第二节 硒 .....                  | 109 |

|      |                                 |     |
|------|---------------------------------|-----|
| 第三节  | 钼 .....                         | 112 |
| 第十章  | 微量营养元素的相互作用 .....               | 117 |
| 第一节  | 微量营养元素相互作用的概念及其影响因素 .....       | 117 |
| 第二节  | 微量营养元素与大量营养元素间的相互作用 .....       | 118 |
| 第三节  | 微量营养元素间的相互作用 .....              | 124 |
| 第十一章 | 植物微量元素营养基因型差异 .....             | 127 |
| 第一节  | 植物营养基因型差异研究的范畴 .....            | 127 |
| 第二节  | 微量元素营养的基因型差异 .....              | 129 |
| 第十二章 | 含微量元素的复混肥料 .....                | 137 |
| 第一节  | 含微量元素复混肥的类型 .....               | 137 |
| 第二节  | 含微量元素复混肥的配制 .....               | 138 |
| 第三节  | 微量元素在肥料载体中的化学反应及影响农业效果的因素 ..... | 141 |

## 第一章 绪论——微量营养元素的研究与应用概况

微量元素的研究及其在农业中的应用已有 60 多年的历史,而微肥的大面积施用,则始于本世纪 60 至 70 年代。近 20 年来,由于氮、磷、钾化肥的大量施用,作物高产品种的选育推广,单位面积产量的不断提高,以及有机肥料施用量的明显减少,使得土壤中大量营养元素与微量营养元素的不平衡日益突出。由于缺乏某种或几种微量元素,从而严重影响作物的产量和品质。在某些低产土壤上,微量元素的缺乏已成为获得产量的障碍因素,在某些高产田块,也可能阻碍产量继续上升。Stout (1972) 曾将微量元素 Mo 对提高豆科作物产量所提供的能量,与 $^{235}\text{U}$  裂变所产生的能量进行比较后指出,仅在澳大利亚的维多利亚洲大约  $2 \times 10^6 \text{ ha}$  牧场,由于施用钼肥,每年所产生的能量,就相当于 1400 个 $^{235}\text{U}$  原子弹的能量单位。因此有人认为,土壤、植物中微量营养元素的研究和应用,是近代农业和生物学研究史上的卓越成就之一 (Kabata-Pendias, 1985)。不少国家已将微肥的施用作为作物高产优质的一项不可缺少的技术措施。

微量元素与人类和动物的健康密切相关,人和动物均直接或间接以植物为食物,植物中某些微量元素的缺乏或过量往往引起人和动物发生疾病,严重威胁着人畜的健康。因此植物微量元素营养与微肥的应用,对调节生物圈中食物链的元素平衡具有重要作用。近年来,国内外在医学、营养学、环境科学、生态学等各个领域中的微量元素研究均在迅速发展。

我国幅员广大,土壤类型和作物种类繁多,尤其有辽阔的草原可发展畜牧业,因此,土壤—植物—动物系统中微量元素的研究和应用,无论在土壤、植物营养领域或者其它领域,都将有着广阔的前景。

### 第一节 国外微量元素研究和应用概况

自 E. 格瑞斯证实铁是第一个植物必需微量元素以后, J. S. 麦克哈佑等人又相继发现其它 6 个必需微量元素 (表 1—1), 使微量元素在农业中的研究和应用, 很快引起了世界各国的重视。30 年代欧洲一些国家普遍发生甜菜腐心病, 田间试验研究结果认为是土壤缺硼引起的症状 (E. Brandenburg, 1931); 40 年代澳大利亚证实钼是三叶草生长的限制因素, 施用钼肥后, 使几百万公顷放牧地的三叶草产量及载畜量成倍增加 (Anderson, 1942); 60 年代印度发现低湿水稻田缺锌减产, 施用锌肥即可矫正 (Nene, 1966)。因此甜菜施硼、豆科作物施钼以及水稻施锌最先在农业生产上广泛应用, 并取得了很好的增产效果。

微量元素的研究工作随着服务于生产和应用而发展, 据 CAB 农业文摘统计, 从 1939 到 1984 年, 公开发表的有关农业微量元素研究和应用的论文总数超过 1.6 万篇, 仅 1984 年一年中就达到 800 余篇。从文献统计数字可看出其发展之快, 也反映了它在生产中的地位和

重要性。近年来，已出版了农业中的微量营养元素，土壤、植物以及环境中的微量元素等多种专著和期刊。各国从开展微量元素普查到缺素诊断，并应用微肥提高作物产量和品质，以及微量元素生理功能的研究，均取得了很好的效果和成就。随着高新技术的发展，微量元素的研究工作也将逐步深入。以下主要从土壤植物营养的角度，对当前国际上微量元素的研究和应用作一简要概括。

表 1—1 植物必需微量元素的发现年代

| 发现者和发现年代               | 发现者和发现年代             |
|------------------------|----------------------|
| 铁 1844 Gris, E.        | 铜 1931 Lipman, C. B. |
| 锰 1922 McHargue, J. S. | McKinney, G.         |
| 硼 1923 Warington, K.   | 钼 1939 Arnon, D. I.  |
| 锌 1926 Sommer, A. L.   | Stout, P. R.         |
| Lipman, C. B.          | 氯 1954 Broyer, T. C. |

### 一、微量营养元素的土壤化学

1. 微量元素的地球化学。根据地球化学有关的背景材料，研究地壳与土壤中微量元素含量和分布的关系。主要从宏观上研究微量元素的大循环。
2. 土壤中微量元素的化学形态、转化，不同提取剂提取的微量元素的生物有效性及其影响因素等。
3. 土壤中微量元素吸附、解吸机制和生物有效性；土壤中微量元素的无机相平衡和金属螯合物平衡以及土壤中有机质—微量元素反应等的研究。以上内容在《农业中的微量营养元素》(1991) 均有专题论述 (W. Chesworth; R. D. Harter; W. L. Lindsay; L. M. Shuman; F. J. Stevenson; W. A. Norvell)，与该书第一版 (1972) 比较，还可看出近十年来在上述各个方面的某些新进展。

### 二、微量营养元素的地理分布

微量营养元素的缺乏和中毒，常与形成该地区的地理条件有关。因此微量营养元素的地理分布是每个国家一项资源开发性的研究。例如，美国已进行 4 次全国性的土壤中微量元素状况的普查，发现全国有 30 个州缺锰，面积约  $5.26 \times 10^6 \text{ha}$ ；43 个州缺锌，面积达  $2.63 \times 10^6 \text{ha}$ ；44 个州缺硼，面积  $4.85 \times 10^6 \text{ha}$ ，缺钼和缺铜分别为 27 及 14 个州，面积为  $61$  及  $2.4 \times 10^5 \text{ha}$ 。此外，还分别对美国豆科作物缺铜和缺钼绘制了地理分布图 (Kubota, 1976, 1983)。苏格兰绘制了 25 个元素的含量分布图。前东德已完成第三次耕地微量元素的普查，根据第一次普查结果，全国耕地土壤钼、硼、铜、锌、锰含量低于临界值的面积占全国耕地面积的比例分别为 23%、38%、21%、5% 和 4%。澳大利亚南部的“90 英里沙漠”是世界著名的铜、钼、锌缺乏区，总面积达 3 亿英亩。《土壤中的微量元素》(H. Aubert, 1977) 一书中，比较系统地概括了世界各国土壤中硼、钼、锰、锌、铜、钴、镍、铬、钒、钛、铅、硒、碘……等 23 种微量元素及有益元素的含量、分布、形态，以及缺乏和过量的有关资料。对于各国微肥生产和有针对性地推广微肥，曾起了重要作用。



### 三、微量元素的营养生理学

近年来,对微量元素在植物呼吸作用、光合作用、固氮作用以及蛋白质代谢和核酸代谢中的生理功能均有较深入的研究。微量元素的作用特点主要是作为金属蛋白辅酶的组分,并作为酶反应的活化剂,有的元素(Fe、Mn、Cu)作为辅酶的组分,通过电子传递,催化植物体一系列的氧化还原反应;有的元素(Fe和Zn)可偶联酶和基质形成酶—基质化合物,或者通过影响酶或基质的分子构型而促进酶的反应(如锌);有的元素(如硼)虽不是任何酶的组分,也不存在于其它基本的有机化合物中,但它的生理作用很大,它参与生长素和酚类化合物及其它代谢过程;还揭示了各种微量元素在各个过程中的可能作用位置,如锰主要在光合系统II中催化水的光解反应,铁主要在叶绿体中参与植物的光合作用;铁蛋白和钼—铁蛋白是当前铁生理作用研究的重点,它推动了生物固氮的进展。微量元素还参与氨基酸的活化和肽链的形成与分解。此外,微量元素对核酸代谢以及对酚类物质、激素、维生素等影响,植物体中微量元素吸收和运输的机理都取得了某些新的成就。

除了研究植物必需的微量元素外,近年来还重视对钒、钴、硒、钛、碘、氟、锂、硅、铬等有益微量元素进行了农学和生理学上的研究。Colin. J. Asher (1991)在“有益元素、功能营养元素与可能的新的必需元素”一文中作了较全面的综述。

根际营养为80年代植物营养学、土壤学、微生物学以及植物生理学等学科研究的前沿,而微量元素的根际营养为其中的重要内容之一。包括根际微生态系统中,微量元素在根—土界面上的交换和动态变化;根际固氮微生物和菌根菌与锌、钼、钴和钒等微量元素的关系,以及根系分泌物中某些有机酸与铁、锌等微量元素形成的螯合物,对难溶性磷、钾释放影响的研究等。

从已有的研究资料看,一个微量元素的生理作用或它在环境中被吸收利用的机理问题,都不能脱离元素间的相互关系来解释。但目前许多研究仍停留在元素间的拮抗、促进以及吸收利用等一些表现现象和形态症状,尚缺乏从理论上探讨元素间相互作用机理的研究。因此,植物微量营养元素交互作用的研究,除从植物、土壤营养方面进行外,还扩展到维持环境的生态平衡以及人类健康等方面,使研究内容有了新的含义(见第十章)。

近年来,微量元素与植物体内激素平衡的关系引起了研究者们的关注,例如硼、锰、铁与植物体内IAA的形成、运转和降解的关系。加强这方面的研究,对微量元素与植物生长和产量形成之间相互作用原因将有更深入的认识。

### 四、微量元素肥料的应用和增产效应

各国都进行了不同土壤气候带、不同作物对不同微量元素的反应,也包括微量元素的诊断以及土壤、作物微量元素缺乏与中毒临界值的确定。例如前东德1979年施硼增产7%—16%的作物有甜菜、油菜、马铃薯、紫花苜蓿等;施钼增产7%—36%的作物有苜蓿、花椰菜和甘蓝等;施铜增产5%—19%的作物有大麦、小麦和玉米等;施锌增产1%—5%的作物有甜菜、马铃薯等。根据美国微肥肥效试验结果,施钼增产显著的作物有豆科及十字花科;施硼增产显著的作物有甜菜、豆科、棉花、十字花科和苹果;其它增产显著的作物有玉米、水稻、大豆、甜菜和甘薯施锰;玉米、水稻、大豆和柑桔施锌;玉米和小粒谷



物施铜。前苏联研究结果证明,微肥除提高产量外,还可改善品质,如缺硼土壤施用硼肥,甜菜增产 4.5t/ha,提高块根含糖量 0.3—2.1 个百分点;乌克兰施锰肥,甜菜增产 1.0—1.5t/ha,糖分提高 0.2—0.6 个百分点;棉花施锌和铜可增产籽棉 240—380kg/ha,提高棉籽含油量 2.0—4.5 个百分点。1966 年印度首先证实了水稻缺锌症状,以后逐步在日本、菲律宾、东南亚各国以及美、意、西、葡、匈等国均发现水稻缺锌现象。对水稻的锌素营养和锌肥施用以及缺锌的土壤条件等均作了大量深入的研究。近年来,某些有益元素如钒、钴、硒对作物产量和品质的影响也引起了研究者的重视。

此外,微量元素的缺素和中毒诊断对指导微肥的合理施用有重要作用,尤其是利用微量元素与酶的关系进行营养诊断是解决农业生产问题的一个新途径。它与化学诊断比较,具有准确、及时等特点,如测定碳酸酐酶及硝酸还原酶活性,可分别判断是否缺锌和缺铜。

### 五、微量元素的某些跨学科研究

学科间的相互渗透是科学发展的必然趋势。植物微量元素营养问题,虽然最先是植物生理学家和农学家提出的,但目前的研究早已超出这些学科的范围,并向遗传育种、生态环境、动物营养等学科渗透,进而出现多种学科的相互渗透,并形成新的学科领域或分支。

(一) 微量元素营养的基因型差异 在农业生产中,解决植物、土壤缺素及毒害的传统方法,通常均采用施肥或改良土壤来满足植物生长发育的需要。近年来,遗传育种学家与植物营养学家合作,通过选育新品种的低投入途径来解决缺素、毒害等植物营养问题。植物矿质营养基因差异的研究,已引起世界各国的广泛重视。从 1982—1991 已召开 4 次国际性学术讨论会,分别出版了《植物矿质营养基因差异学术讨论会论文集》,各次讨论会均涉及有关微量元素营养的内容。1994 年将在美国召开第五次国际学术讨论会,在各国育种学家和植物营养学家们共同努力下,微量元素营养基因差异的研究,定将获得可喜的成果(见第十一章)。

(二) 微量元素与植物抗病性及其它抗逆性 许多微量元素能抑制某些病原菌,使抗病性增强,如锰能提高马铃薯晚疫病和疮痂病的抗病性;硼能提高甜菜立枯病的抗病性等。近 10 年来微量元素的抗病机理也有较多报道。最近 R. D. Graham 等(1991)已较全面地总结了各国有关硼、锰、锌、铁、铜、钼、氯、镍、硅等微量元素与抗病的关系及其抗病机理。微量元素还能促进植物对不良环境的抵抗力和忍耐能力。如通过微量元素对植物细胞结构和植物代谢的影响,增加抗低温和冻害的能力;由于某些微量元素可降低原生质对  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的透性,增加胶体稳定性,提高亲水胶体和糖的含量,从而提高植物的抗盐能力。

(三) 微量元素与生态环境 随着微量元素肥料的普遍应用,当长期连续施用后,可能带来土壤和环境的污染。因而研究微肥最佳投入量及施用频率,也是土壤学家、植物营养学家及农业环保学家共同的研究内容。澳大利亚曾经把“90 英里沙漠”铜缺乏区的施铜标准定为 7kg/ha 硫酸铜,现在认为一次施用后可维持 5—7 年。

(四) 微量元素与食物链 土壤中微量元素的缺乏与过量,除影响作物产量、品质外,还通过食物链严重地影响人类和牲畜的健康。60 年代初期,伊朗曾出现一种青春期营养性侏儒综合症,患者体躯矮小、贫血、性发育不良,与小白鼠缺锌症状一致,服锌后明显好转,原因是患者以谷物为主食,而谷物中含有大量植酸盐和纤维素,从而影响锌的吸收利

用。又如植物体内含钼量高达 200mg/kg 时,植物才表现中毒症状,但当牧草中钼超过 10mg/kg 时,牲畜(特别是牛)食用后发生中毒症(红皮白毛症)。因此,土壤—植物—动物体系中微量元素的平衡问题、愈来愈引起各个学科的普遍重视。E. R. Miller (1991) 及 D. R. Van Campen (1991) 分别对动物营养中的微量元素及人类营养中的微量元素作了较全面的综述。

## 第二节 我国微量元素研究和应用概况

我国微量元素的研究起于本世纪 40 年代,50 年代进行了土壤微量元素及钼对大豆增产效果的研究,1956 年全国科学发展 12 年远景规划中,列有“土壤中微量元素及稀土元素的含量、形态和转化规律性以及和植物生产的关系”的研究课题;继 1962 年及 1977 年中国科学院分别召开了微量元素学术会议后,又多次召开了全国性的微量元素会议。农业部还组织了全国微肥科研协作组,将微量元素肥料的研究和应用列为重点项目之一。1986 年出版的《微量元素肥料研究与应用》一书,总结了我国微量元素肥料的科技成果和推广经验。总之,近年来,我国在微量元素的生理功能,微肥对多种作物的施用效果和施用条件以及诊断指标等均取得了显著的进展。

### 一、在微量元素研究和推广工作中取得的成就

(一) 微量元素肥料的增产效果 在 50 年代首先肯定了钼在大豆上的增产作用,随后又相继肯定了硼对油菜、棉花、甜菜、果树以及锌对水稻、玉米的增产效果。近年来全国各地又进行了大量的试验研究,在更广泛的范围内,证实了微量元素在多种土壤上对多种作物的良好效果,增产幅度一般为 10%—20%,在严重缺乏微量元素的地区,某些作物的增产率可高达 30%—40%。据不完全统计,全国微肥施用面积 1983 年为 4000 多万亩,1984 年已超过 7500 多万亩。据化工部 1991 年 4 月在安徽省微肥应用座谈会统计资料表明,我国微肥的生产厂家已达 150 个,总产量  $1.2 \times 10^6$  t 以上,单一和多元微肥的品种超过 20 个,应用推广面积已超过 1 亿亩,这两年有了更大的发展。随着农业生产的发展,农产品商品率的提高,氮、磷、钾化肥施用量的日益增多和有机肥用量的不断减少,微量元素的效果将会更加明显,微肥的施用定将进一步发展。

(二) 微量元素的缺乏症状及微肥施用 目前已掌握了油菜、棉花、麦类缺硼以及玉米、水稻缺锌的大田典型症状。对大豆缺钼、缺锰,芝麻、向日葵缺硼,小麦缺钼以及其它作物缺乏微量元素症状也已初步掌握,并首次出版了《主要作物营养失调症状图谱》;各地还制作了不同作物缺乏微量元素的幻灯片,这对鉴别微量元素缺乏症,尤其在广大农民中如何根据作物外观来判断缺乏微量元素,推测施用微肥的必要性,进而推广普及微肥起了重要作用。

各地试验结果表明,微肥的增产效果与土壤中微量元素含量和其它理化性状以及作物品种有关。如在水稻、玉米施锌,油菜、棉花施硼的有效施用条件与方法方面均取得了很好的成果。全国微肥科研协作组分别制订了相应的技术规程,并通过农业部下达各地试用执行,为微肥施用规范化提供了依据,同时,各地对其它农作物、蔬菜和果树等的微肥有

效施用条件也作了大量工作。

**(三) 微量元素的地理分布** 中国科学院南京土壤研究所已完成全国千万分之一的硼、锰、钼、锌、铜等微量元素的地理分布图。在此基础上,根据土壤中微量元素的缺乏情况,农作物对缺乏微量元素的敏感程度,以及各地微肥试验效果,结合当地作物布局,将我国微量元素肥料的应用分为微量元素显效区、有效区和可能有效区三级,并分别绘制了上述各元素的应用分区图。此外,目前有半数以上的省市也完成了土壤中主要微量元素的概测工作,对有计划地生产、分配和合理施用微肥有一定的参考意义。

从全国土壤微量元素概测结果来判断,土壤中微量元素含量存在着明显的地区差别,东部特别是东南部主要缺硼;北方石灰性土壤(包括水稻土)及南方水稻土(包括石灰性、中性水稻土及沼泽土、盐土等)多缺锌;北方黄土母质和黄河冲积物发育的石灰性土壤,尤其质地轻的冲积土多缺锰;南方红壤区的大多数酸性土壤多缺钼;北方干旱、半干旱地区的石灰性土壤易缺铁;南方长期渍水的水稻土和北方的沼泽土、泥炭土易缺铜。据80年代北京、河北、湖北、湖南和陕西等省市的调查结果,总的情况为缺锌面积约占30%以上,缺硼面积约占40%以上,缺锰、缺铁及缺铜分别为20%、10%和5%。

**(四) 微量元素的营养生理学** 近10余年来,我国还对主要微量元素的生理功能进行了研究。研究结果在阐明锌对植物体内游离氨基酸代谢和植物生殖器官的影响;锰对植物氮代谢和钼、锌、硼对光合作用强度的影响;硼对植物受精生理过程和各器官解剖结构的影响,以及主要微量元素对作物养分吸收,酶活性的影响等各方面均取得了显著的成就。微量元素营养的基因型差异,如油菜、棉花抗低硼品种的筛选及其营养差异,铁、锌对单、双子叶植物根分泌物的影响,尤其禾本科植物耐缺铁胁迫的研究均有较大进展。

80年代初开始,微量元素与其它元素间的相互作用引起了研究者的重视,棉花、油菜硼与氮、磷、钾和锰相互作用对产量和品质、养分吸收、膜透性以及解剖结构的影响;水稻磷、锌相互作用的机理,以及小麦氮磷锌交互作用均进行了较深入的研究。

## 二、今后需要研究和解决的主要问题

1. 全面完成不同土壤气候带土壤有效微量元素的含量和分布规律,进一步充实全国微量元素分布图、区划图和缺素图,为微肥的合理分配和施用进一步提供重要依据。继续进行微量元素诊断技术的研究,特别对名、优、特产作物如珍贵药材、名贵花卉等各种微量元素诊断的研究和应用。此外,还要重视虽无外部症状,但却能导致产量及品质降低的潜在性缺乏微量元素诊断技术的研究。

2. 深入开展土壤中微量元素的化学行为及其生物有效性的研究。研究不同土壤中微量元素形态、转化和吸附、解吸特性;研究土壤中不同形态微量元素与产量、品质的关系;研究土壤中微量元素不同形态的化学提取方法及其生物有效性;研究因土合理施用微肥的技术。

3. 深入开展微量元素在植物营养生理方面的研究。微量元素在改善农产品品质,特别是对经济作物、特产作物品质的研究;微量元素在调节植物体激素平衡和各种酶系统中的作用;微量元素与根系分泌物的关系及其在根际营养中作用的研究等。此外,在作物营养过程与物质代谢过程,以及土壤元素循环转化过程中,微量元素与其它元素的关系;施用

微肥对作物吸收利用土壤和肥料中主要养分的数量和效率的影响；微量元素与其它元素配合施用的技术；含微量元素复混肥料及专用肥的配制和生产、化学反应和农用效果的研究。

#### 4. 其它需要研究的问题。

(1) 在不同土壤气候带的长期轮作试验中，大量、中量元素与微量元素平衡问题的研究；施用大量化肥和有机肥以及其它化学药剂对土壤微量元素含量和有效性影响的研究；以及微肥施用的后效和防止过量微量元素的积累和环境污染的研究。

(2) 作物的微量元素营养基因型差异的研究，筛选抗缺乏和耐毒害的植物新品种的研究。

(3) 食物链中微量元素的作用及食品和饲料中强化微量元素添加剂配制的研究。

(4) 微量元素与抗病性及其它抗逆性如抗低温冻害、抗高温干旱等提高植物本身保护能力的研究等。

### 参 考 文 献

- [1] 刘芷宇等，主要作物营养失调症状图谱，农业出版社，1980。
- [2] 刘 铮等，中国科学院微量元素学术交流会汇刊，科学出版社，1980。
- [3] 华中农业大学土化系，微量元素营养与微肥施用（教材），1984。
- [4] 农牧渔业部农业局，微量元素肥料研究与应用，湖北科学技术出版社，1986。
- [5] 刘 铮等，微量元素的农业化学，农业出版社，1991。
- [6] J. J. Mortvedt 等著，中国农业科学院编译，农业中的微量营养元素，农业出版社，1984。
- [7] H. Marschner 著，曹一平、陆景陵等译，高等植物的矿质营养，北京农业大学出版社，1991。
- [8] K. Mengel 著，张宜春、刘同仇等译，植物营养原理，农业出版社，1987。
- [9] H. Aubert 等著，刘 铮等译，土壤中的微量元素，科学出版社，1982。
- [10] Б. А. Ягодин 著，李保安译，苏联农业中的微量元素肥料问题，土壤学进展，1985，(3) 17—20。
- [11] Н. Н. Смирнова 等著，李保安译，国外应用微肥的现状与展望，土壤学进展，1987 (4) 17—20。
- [12] B. E. Davies, Applied-Soil Trace Elements, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- [13] M. Y. Shkolnik, Trace Elements in Plants, Amsterdam-Oxford, 1984.
- [14] D. C. Adriano, Trace Element in the Terrestrial Environments, Springer-Verlag, 1986.
- [15] A. Kabata-Pendias, Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Inc. 1984.
- [16] D. J. D. Nicholas et al., Trace Elements in Soil-Plant-Animal Systems, Academic Press, New York, 1975.
- [17] J. J. Mortvedt et al., Micronutrients in Agriculture (2nd ed.), SSSA, Madison, 1991.
- [18] 沈 康等，植物生理生化，中国农业百科全书（生物学），农业出版社，1990。

## 第二章 硼

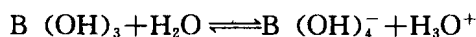
早在1914年,法国P. Maza根据硼对玉米生长的影响首先提出硼在植物营养中的重要性。1923年英国K. Warington用蚕豆进行试验,发现缺硼植株外表出现典型症状,不能完成其生育周期,为肯定硼对植物的必要性得到了可靠的证据。随后,A. L. Sommer和C. B. Lipman在1926年又进一步证实硼为多种高等植物生长所必需。从此,硼被公认为植物生长发育所必需的微量元素之一。半个多世纪以来,科学试验和生产实践证明,在植物必需的7种微量元素中,植物缺硼最为普遍。在本世纪20—30年代,西欧甜菜广泛发生“腐心病”,减产严重,经研究是缺硼引起的,施用少量硼肥可防止发病,使甜菜大幅度增产。从此硼肥的应用引起各国农业化学家和生产者的普遍重视。美国50个州中有43个州,各有一种或多种作物缺硼。缺硼作物有甜菜、豆科植物、十字花科植物、棉花、果树和多种蔬菜等;在加拿大,紫云英缺硼相当普遍;在非洲、尼日利亚和赞比亚,棉花出现明显的缺硼症状,施用硼肥后显著增产。此外,东欧、前苏联、日本亦广泛存在着缺硼土壤。

我国硼肥的研究和应用,从50年代开始起步,60年代中期,中国农业科学院油料作物研究所在湖北省浠水县和祁春县发现甘蓝型油菜“花而不实”症,经研究证明系缺硼所致,施硼可有效地防治并且有明显增产效果,是我国硼肥研究和应用中的重大突破。70年代中期以来,相继发现湖北省新州县棉花“蕾而不花”症,黑龙江省甘南等地小麦“不稔”症,以及一些地方的苹果和柑桔的“不实”症,油橄榄的“多头”症等,均属缺硼症。根据1983年不完全统计,全国硼肥用量约3000多吨,施硼面积已达1400万亩。从此,硼肥的研究和应用进入了新的发展阶段。

### 第一节 植物中的硼

#### 一、植物对硼的吸收和运输

水溶液中的硼主要以硼酸态 $[H_3BO_3$ 或 $B(OH)_3]$ 存在。硼酸是一种很弱的酸,可以接受 $OH^-$ ,而不提供 $H^+$ :



在土壤或营养液的生理酸性( $pH < 8$ )条件下,硼主要呈分子态存在,未离解的 $H_3BO_3$ 分子,是植物根系吸收硼的主要形态。

关于植物根系吸收硼的机理是属于主动吸收还是被动吸收,至今还有争论,但多数研究者认为硼是随质流通过根部而进行的被动吸收为主。Tanaka(1967)认为,被向日葵根系所积累的一部分硼,被动地吸附在自由空间中与多糖形成硼酸盐络合物。这种推想主要是根据根系吸收硼和释放 $H^+$ 之间存在的化学计量关系。Bowen等(1976)在研究大麦离体根吸收硼时,曾鉴定细胞内自由空间硼组分的特性,全硼中很大部分存在于水分自由空间

或以硼酸盐多醣络合物可逆地被束缚于细胞壁中。研究者们认为在植物体内还存在一种受代谢控制所吸收的硼，但只有在将自由空间中积累的硼移去之后，才能在实验中被检测出来，说明主动吸收的硼所占的比例相对地少。

硼在植物体内相对地说是不移动的，进入植物体内的硼被牢固地结合在细胞壁结构中。蒸腾速率对硼的向上运输有决定性的影响，根部吸收的硼，随木质部的质流向地上部运输，在叶尖和叶缘常积累较多的硼。当植株由于过量硼中毒时，中毒症状往往从叶面积较大的中下部叶片的尖端和边缘首先出现。某些植物种为适应高硼条件，可用吐水的方式将硼分泌出来。相反，当缺硼时植物却首先在生长点和上部嫩叶上出现缺硼症状。硼从根通过木质部的迁移存在明显的基因型差异，例如不同番茄品种之间，根中硼的累积水平相似，而硼向上部的运转率却相差 5 倍。

## 二、硼在植物体内的含量和分布

植物体内的含硼量因其种类而异，变幅在 2—100mg/kg 范围内。双子叶植物含硼量明显地高于单子叶植物，具有乳液系统的双子叶植物如蒲公英和罂粟含硼量特别高（表 2—1）。植物体内的含硼量基本上可反映作物对硼的需要量，如含硼量较高的甜菜和油菜需硼量也较高，曾分别是西欧和我国施硼的突破口。含硼量低的禾本科作物需硼量也低，缺硼的可能性较小。含硼量高的罂粟等需硼量特别高，除种植在含硼量特别丰富的土壤上外，通常都需要施用硼肥。

表 2—1 一些作物的含硼量（干物质，mg/kg）

| 植物种类 | 含硼量  | 植物种类 | 含硼量  | 植物种类 | 含硼量  |
|------|------|------|------|------|------|
| 大 麦  | 2.3  | 番 茄  | 15.6 | 大 豆  | 37.2 |
| 水 稻  | 2.7  | 棉 花  | 19.6 | 菜 豆  | 43.0 |
| 小 麦  | 3.3  | 豌 豆  | 21.7 | 萝 卜  | 64.5 |
| 玉 米  | 5.0  | 油 菜  | 24.9 | 甜 菜  | 75.6 |
| 芹 菜  | 11.9 | 烟 草  | 25.0 | 蒲公英  | 80.0 |
| 蚕 豆  | 15.4 | 紫云英  | 25.0 | 罂 粟  | 94.0 |

Berger (1949) 曾将各种作物按照需硼量分为 3 组：

(1) 需硼较多的有：苜蓿、甜菜、红三叶草、萝卜、卷心菜、花椰菜、向日葵、油菜、苹果。

(2) 需硼中等的有：棉花、烟草、番茄、甘薯、花生、胡萝卜、莴苣、桃、梨。

(3) 需硼较少的有：水稻、大麦、小麦、燕麦、荞麦、玉米、大豆、豌豆、马铃薯、亚麻、柑桔。

同一类作物的不同基因型和品种对硼的需要也不相同，例如甘蓝型油菜比白菜型油菜需硼多。在甘蓝型油菜出现“花而不实”的土壤上，白菜型油菜却生长正常，即使在甘蓝型油菜中，品种间亦有差异。又如陆地棉比中棉对硼反应敏感，在陆地棉中又以鄂光棉、鄂岱棉、华棉 4 号和荃棉 5 号对硼最敏感。

硼在植物体内的分布规律是：在营养器官中叶片含硼量高于茎枝和根；繁殖器官含硼量往往高于营养器官，而且较集中地分布在花器官中（表 2—2）。可见，硼对植物繁殖器官的形成有重要作用。

### 三、硼的生理功能

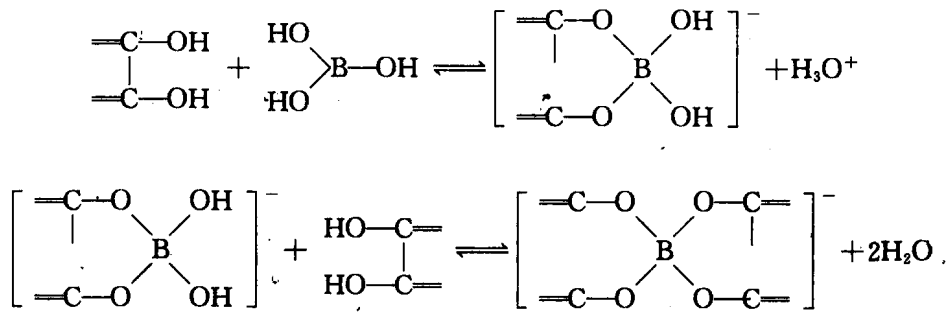
关于硼在植物体内的生理功能至今尚不十分清楚。硼和其它微量元素不同，它既不像 Mn、Zn、Cu 是酶的组成成分，可通过酶和基质的螯合作用而起反应；又不像 Fe、Mn、Cu 或 Mo 可通过化合价的变化在植物体内起电子传递作用。因此，对硼的生理功能的研究，通常只能间接地从缺硼植株的生理试验中推论，先提出假说，然后用试验加以证实。

表 2—2 棉花、油菜不同器官的含硼量（干物质，mg/kg）

| 作物 | 营养器官 | 含硼量       | 繁殖器官 | 含硼量       |
|----|------|-----------|------|-----------|
| 棉花 | 根    | 8.6       | 蕾    | 27.8      |
|    | 茎枝   | 9.1       | 花    | 49.5      |
|    | 叶片   | 28.9      | 幼铃   | 31.4      |
|    | 叶柄   | 11.0      | 种子   | 14.4      |
| 油菜 | 根    | 16.0—13.1 | 花    | 27.1—32.3 |
|    | 茎枝   | 7.2—9.8   | 果壳   | 18.1—20.5 |
|    | 叶片   | 17.1—35.0 | 种子   | 8.0—14.2  |

硼对植物的营养生长和生殖生长均有明显的影响。综合国内外报道，大体可将硼的生理作用概括为以下几方面：

（一）硼与组织结构的形成 硼酸与顺式二元醇络合形成稳定的硼酸酯，其反应式如下：



这类络合物的形成需要有一个相邻的顺式二元醇构型的多羟基化合物。植物体内许多糖及其衍生物如糖醇和糖醛酸，特别是可作为细胞壁半纤维素组分的甘露醇、甘露聚糖和多聚甘露糖醛酸均具有这种构型。而葡萄糖、果糖、半乳糖和它们的衍生物如蔗糖不具有顺式二元醇的构型，因而不能形成稳定的硼酸络合物。有些邻二酚如咖啡酸和羟基阿魏酸，它们是双子叶植物木质素合成的重要前体物质（McClure, 1976），亦可形成稳定的硼酸络合物。

早在 1934 年 Suhnucker 就提出，硼与细胞壁组分形成多羟基化合物，因而能提高细胞



壁的稳定性的。高等植物的全硼含量中的大部分都在细胞壁中被络合为顺式硼酸酯 (Thelher 等, 1977)。双子叶植物需硼量比单子叶植物高, 可能与其细胞壁中半纤维素和木质素的前体物质中含有较多的具有顺式二元醇构型的化合物有关。据 Tanaka (1976) 研究, 在单子叶植物 (如小麦) 根细胞中, 被稳固地结合的硼量为 3—5mg/kg 干重, 而在某些双子叶植物 (向日葵) 中则高达 30mg/kg 干重。这种质外体硼可能类似于钙, 具有调节某些细胞壁成分 (包括质膜) 的合成和保持其稳定性的作用。

Dugger (1983) 综合了近代关于硼在植物生长发育中的作用的大量研究结果, 提出硼在植物体内作用的假定顺序 (图 2—1)。他认为硼的许多作用均与一个基本的作用有关, 硼在植物体内之所以能调节多种酶促反应, 从而影响各种代谢活动, 是由于它能够与具有顺式二元醇结构的多羟基化合物形成络合物。当硼与植物体内酶促反应的反应物或产物络合时, 便可促进或抑制某些专一的代谢途径, 代谢途径的转变又导致代谢库大小的变化或阻止某种特定代谢途径的进程。

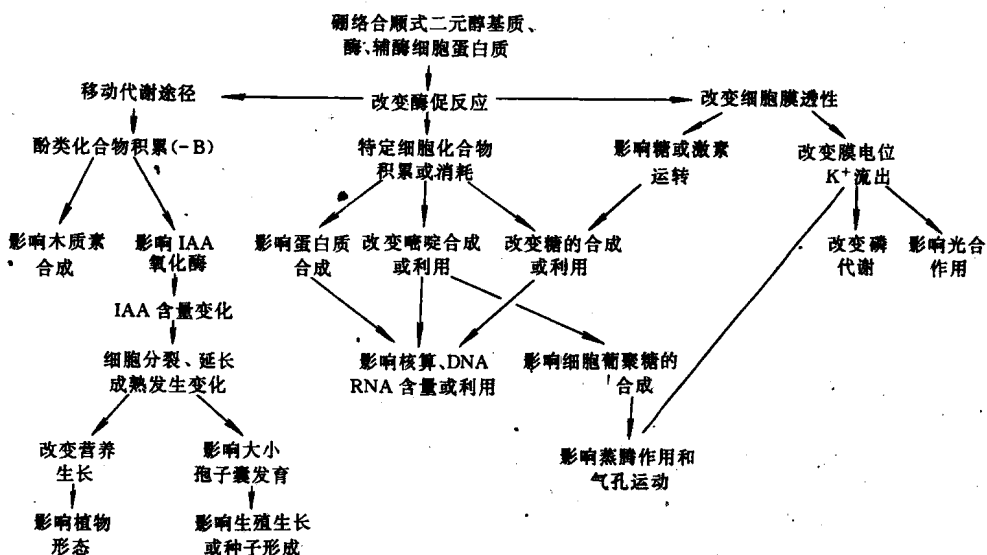


图 2—1 硼在植物体内的作用或影响代谢活动的假定顺序  
(Dugger, 1983)

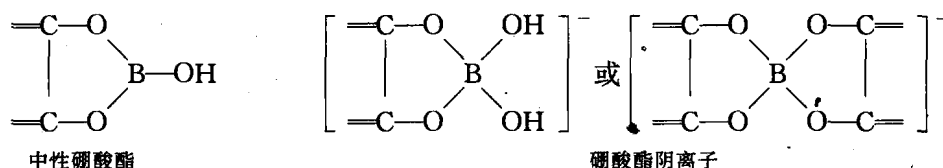
**(二) 硼与分生生长和核酸代谢** 植物缺硼的症状最先是分生组织的生长受阻, 根尖和茎尖首先受害。Albert 等 (1961) 将番茄幼苗转移到缺硼培养液中, 6h 后根尖的伸长即停止。Kouchi 等 (1976) 发现, 将向日葵植株移入缺硼培养液 3h, 根伸长受到抑制, 72h 后, 根尖即遭破坏、变褐, 侧根加密和不正常地膨大。近年的试验证明, 硼不仅为细胞伸长所必需, 也是细胞分裂所不可缺少的。

由于缺硼症状首先出现在分生生长上, 由此推想硼与核酸代谢有关。试验证明, 缺硼的向日葵不仅根与茎中 RNA 含量比供硼充足的植株低, 而且在缺硼的溶液中加入 RNA 后, 植株的缺硼症状即可消失 (Shkolnik, 1962)。缺硼的蚕豆不仅根部吸收  $^{32}\text{P}$  明显降低, 结合到核酸中的  $^{32}\text{P}$  比例亦减少, 若在加入  $^{32}\text{P}$  前 1h 供给硼, 以上两种影响均未出现。可见

硼对 RNA 合成有重要影响。关于硼在 RNA 代谢中的作用机理并不十分清楚，有人认为缺硼阻碍了 RNA 的前体物质——嘧啶碱和嘌呤碱的合成，因而使 RNA 含量降低。也有人认为缺硼使植株体内核糖核酸酶活性加强，加快核酸的降解。例如，在缺硼菜豆中，该酶的活性比正常硼处理高 6 倍，因此认为缺硼对 RNA 分解的影响，可能超过对其合成的影响。缺硼还减少 DNA 的合成，但不像对 RNA 影响那样显著和迅速，因 RNA 具有比 DNA 更高的转换率。

(三) 硼与碳水化合物运输和代谢 早期的研究作业已证明，碳水化合物运输受阻是植物缺硼最明显的特征之一。将含硼的  $^{14}\text{C}$ —蔗糖加到植物叶片上，植物体吸收的糖比未加硼处理的多；当硼供应充足时，用  $^{14}\text{CO}_2$  饲喂的植株叶片中所合成的  $^{14}\text{C}$ —光合产物，能大量地由标记叶片向其它部位转运；而缺硼植株叶片中形成的光合产物却很少向外运输，致使分生组织如根尖和茎尖生长点中缺乏糖，而叶片中同化产物则明显累积。这一影响往往发生在植物外部形态出现缺硼症状之前。

关于硼促进碳水化合物运输的机理，1954 年 Gauch 和 Dugger 最先提出硼糖络合物假说。他们根据硼酸能和多羟基化合物形成络合物的原理，推论硼能和糖络合形成中性硼酸酯和硼酸酯阴离子：



硼糖络合物比高极性的糖分子较易通过细胞膜，因此硼对植物体内光合产物的运输起着促进作用。Lee 等成功地在植物体外证明了硼可与 6-磷酸葡萄糖形成络合物，给予这一假说以有力支持。但近年来有些研究者发现，硼酸同高等植物体内糖运输的主要形态——蔗糖反应微弱，而在植物体内糖运输的主要通道——韧皮部中硼的浓度极低，因此认为硼糖络合物促进糖运输的观点说服力不强。有人认为硼促进糖的吸收和运输可能是某种间接作用，或由于缺硼植株的筛板中形成的愈伤组织（胼胝质）阻碍了糖的运输；或由于严重缺硼植物的根尖和茎尖库的活性减弱的结果。总之，尽管硼促进糖运输已为许多试验结果所证实，但对其机理至今尚无一致的看法。

硼除促进碳水化合物的运转外，还对碳水化合物（特别是细胞壁）的合成有重要的影响，用离体棉花胚珠试验证明，缺硼不利于棉纤维素细胞壁的合成。在缺硼的细胞壁中有较多的果胶物质。缺硼细胞的初生细胞壁不平滑，上面有与细胞壁物质混合的泡状聚集物的不规则沉积（Hirsch 和 Torrey, 1980），说明硼不仅与细胞壁的组分牢固地络合，而且是维持细胞结构完整性所必需。缺硼棉花胚珠中的葡萄糖大量结合到  $\beta$ -1, 3 葡聚糖中，而含硼适量的胚珠中的葡萄糖则分散结合在  $\beta$ -1, 3 葡聚糖和  $\beta$ -1, 4 葡聚糖中。 $\beta$ -1, 3 葡聚糖是胼胝质的主要成分，所以，在缺硼植物的筛管中常有胼胝质的积累。

(四) 硼与酚类化合物、木质素和生长素代谢 由于硼与呼吸基质 6-磷酸葡萄糖可形成络合物，因而控制着呼吸作用的途径，使流向磷酸戊糖途径的基质减少，限制了酚类化合物的积累，从而有利于糖酵解和构成细胞壁的半纤维素和果胶质的合成；而在缺硼的植株中，流向磷酸戊糖途径的基质增多，6-磷酸葡萄糖脱氢酶活性增强，导致酚类化合物的积