

土壤微量元素译文集

刘 铮 朱其清 等译



MODERN ZINC

江苏科学技术出版社

土壤微量元素译文集

刘 铮 朱其清等译

江苏科学技术出版社

土壤微量元素译文集

刘 铮 朱其清等译

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：常州人民印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 13.25 字数 318,000
1981 年 1 月第 1 版 1981 年 1 月第 1 次印刷
印数 1—1,500 册

书号：16196·031 定价：1.10 元

责任编辑 陆宝珠

前 言

微量元素是指土壤中含量很低的化学元素，这些元素的含量范围一般为 $n \times 10^{-4} - n \times 10^{-3} \%$ ，即百万分之几到十万分之几。在土壤学研究的领域中所指的微量元素有双重意义，除了泛指所有的含量很低的元素以外，还可以专指具有生物学意义的微量元素。具有生物学意义的微量元素是植物和动物正常生长和生活所必需的和不可缺少的，对于农业生产和土壤肥力来说都有重要的意义。土壤中这些元素的含量过多或者过少，直接影响到植物吸收量也会过多或者过少，因而影响到农作物的产量和质量。如果家畜食用了这种微量元素含量不正常的牧草和饲料，也会影响家畜的健康和畜产品的产量和质量。这种情况已为农业生产实践所证实。近几十年来，农业生产中的微量元素问题已经引起普遍的重视，在生产实践中应用日趋广泛，有关的研究工作也迅速增多。农作物的高产稳产以及家畜与人的健康都与微量元素有着紧密的联系。可以认为，在植物、动物与土壤之间的微量元素交换中存在着密切的关系。就科学研究而论，它开辟了新的研究领域，所涉及的学科也很广，例如农学、土壤学、地质学、植物生理学、生物化学等等。

就土壤学的角度而论，土壤是植物所需要的微量元素的主要来源，土壤中或多或少的都含有这些元素，但是不一定能够满足植物的需要。土壤中微量元素的供给情况由土壤类型和土壤条件决定。微量元素供给不足或者过多，只有在一定的土壤和土壤条件下才会出现，微量元素肥料的效果也只有在一一定的土壤和土壤条件下才会表现出来，而不是在所有的土壤上对各种农作物都要施用微量元素。也就是说，微量元素肥料的施用是有选择性的，应当根据土壤中微量元素的供给情况和农作物的需肥特点分区进行。土壤中微量元素的供给情况由它们的含量、形态和分布情况来决定，这是施用微量元素肥料的依据。

近年来我国在微量元素的研究和应用方面都取得许多的进展。在一定的情况下，土壤缺乏微量元素已成为提高农作物产量的限制因子，但是在如何正确施用微量元素肥料来提高农作物产量和质量的工作中，不论在实践和理论方面仍然存在着许多问题有待解决，有待深入地和系统地试验和研究。

目前，在我国广泛使用的微量元素肥料是钼肥，对豆科植物（包括豆科绿肥）的作用是不可忽视的。其次是硼锌锰肥，在一定类型的土壤上对一定种类的农作物也有良好的增产作用。根据土壤学的角度而论，钼和硼在我国南北方许多类型的土壤上会有一定的增产作用，而锌和锰则主要施用在北方的石灰性土壤上，对于农业生产潜力的进一步发挥，将会起着重要的作用。现在在各地进行着大量的肥效试验，在肯定肥效的基础上，进一步的工作有待展开。例如微量元素肥料的有效施用条件和施用技术，需要作进一步的试验、研究和总结，农作物的微量元素营养的评价指标和土壤的微量元素供给情况的指标需要进一步的确定，适合我国资源情况和耕作制度的微量元素肥料的研制工作也急待展开。在进行这些工作时，对于土壤、植物和肥料中微量元素的测定方法的建立也应当展开相应的工作。

1977年中国科学院召开了微量元素学术交流会议，对近十多年的微量元素试验和研究工

作进行了交流,对微量元素的进一步研究提出了建议。但是对这一方面研究的系统资料仍较缺乏。针对这种情况,我们选译了近年国外已发表的带有总结性的文章编译成这本译文集。本书首先介绍的是关于微量元素的概括性的论著,译自联合国粮农组织出版的土壤资源丛书。其次介绍了关于主要微量元素锌、铜、硼、锰的论著,包括土壤中的含量、形态、可给性、在植物生理方面的作用等。近年来锌的研究工作进展较大,所以选译了两篇关于锌的综述,一篇是概括性的论述,另一篇则是淹水土壤中的锌的专论。目前我国锌肥的效果已逐渐肯定,这两篇著作有一定的参考价值。另外,选择了微量元素肥料的品种、生产、施用技术、施用条件的几篇著作,内容也是较为全面的。有关分析方法只介绍土壤和植物分析方法的优缺点和评价指标等,而不涉及具体的分析操作。最后则介绍国外应用微量元素的现状和发展趋势。希望这些译文对我国的微量元素研究和应用能够起一些参考作用。但是由于水平有限,误译和不妥之处在所难免,尚希广大读者提出宝贵意见,并给予批评指正。

该译文集中各篇参考文献均从略。

刘 铮

1980年3月

目 录

土壤与农业中的微量元素	M.Sillanpää (1)
土壤和植物营养中的锌	W. L. Lindsay (35)
锌肥的施用和锌在淹水土壤中的性状	D.S.Mikkelsen; Shiou Kuo (54)
土壤中锰的可给性	B.T.Cheng; G.J.Ouellette (71)
植物体内锰的功能	W. Bergmann; P. Neubert (77)
植物营养中的钼	B.T.Cheng; G.J.Ouellette (80)
论土壤与植物中的钼	W. H. Allaway (87)
影响土壤中钼供给的因子	N. J. Barrow (94)
耕作土壤和灌溉水中的硼	F. T. Bingham (99)
植物体内硼的功能	W.M.Dugger (104)
促成植物体内微量养分缺乏的气候条件和土壤条件	R.E.Lucas; B. D. Knezek (114)
通过施肥矫正微量养分的不足	L.S.Murphy; L.M.Walsh (124)
微量元素肥料的制造、销售和使用	J.J.Mortvedt; H.G.Cunningham (146)
用土壤和植物分析法诊断微量养分的缺乏	J.Benton Jones, Jr. (164)
土壤中微量养分的测试	F.R.Cox; E.J.Kamprath (168)
植物组织的微量养分分析	J.Benton Jones, Jr. (184)
应用微量元素的趋势	H. G. Cunningham (199)

土壤与农业中的微量元素

M. Sillanpää

一、前言

为了满足世界人口迅速增长的需要,要求每公顷耕地生产越来越多的粮食和纤维。近数十年来,以先进的耕作技术、培育良种、较好地控制植物病害和杂草、增施矿质肥料、增加灌溉面积等措施来获得作物正常的增产(表1)。

表1. 世界上九种作物的平均产量和三种主要肥料养分的用量

年 份	1948~52	1952~56	1963~67
作 物	公斤/每公顷		
小 麦	990	1080	1280
水 稻	1630	1820	2070
玉 米	1590	1700	2280
粟、高粱	510	560	740
大 麦	1180	1250	1560
燕 麦	1140	1190	1530
大 豆	1000	980	1180
棉 花	440	500	630
马铃薯	10900	11100	12600
养 分	公斤/每公顷耕地		
N	8	4	12
P ₂ O ₅	4	5	10
K ₂ O	8	4	8

尽管肥料的用量有较快的发展,但每年从土壤中失去的主要养分要比施入的矿质肥料多二至六倍。某些失去的养分虽然可以从秸秆、农家肥料中得到补充,但就养分平衡而言,仍然是负值。

微量元素没有在施用普通肥料时经常地施入土壤。近几百年来,土壤中失去的微量元素也没有得到任何系统的补给。第一篇缺乏微量元素的报告,是在十九世纪末发表的。如今已发现大面积土壤不能供应植物以足够的微量元素。原因是:单独施用主要养分来促使产量提高;微量元素通过风化和淋溶而损失;农家肥料和其他天然肥料的比例比化学肥料减少;化肥的纯度增加以及某些其他因素,都加速土壤中可给态微量元素的耗竭。

新鲜植物的含水量在十分之九左右。大部分植物的干物质中,大约有95%是由碳、氢、氧、氮四种元素组成的。钾、磷、钙、镁、硅、铝、硫、氯和钠约占干重的4%。余下的1%或更少些是另外一些元素,包括所有必需的微量营养元素。

根据植物的需要量及其功能,可把这些元素分为不同的类别。近年来,有些作者把它们分成两组。即:大量养分(N、P、K、Mg、Ca、S)和微量养分(其他养分),而大部分研

究工作者是分成下列三类:

主要养分 指氮、磷、钾。植物的需要量较大(常以干物质的百分数来表示),要经常施用矿质肥料向土壤补充。

中量元素或养分 是指硅、钙、镁、硫。它们以较大的量存在于土壤和植物之中。也常作为肥料里的辅助元素施入土壤,或分别作为土壤改良剂施用,如石灰和石膏。而硅不一定是所有植物都必需的。

微量元素(微量养分) 在一般土壤和植物中仅有少量的存在,以ppm表示。有时“养分”这个词,仅仅指那些已经被证实对植物生长和动物营养所必需的元素,并以此与另一些非必需的元素相区别。这样的区分,不是始终实用的。因为某些元素对植物是必需的,而动物并不需要,反之亦然。此外,随着时间的推移,更多的元素将被证明是必需的。而且目前列出的元素,也不是所有的植物都全部需要。

目前已经知道有六种以上的微量元素对植物生长是必需的,或者估计是必需的。这些元素包括硼、氯、铜、铁、锰、钼、钠、锌,可能还有钴。其中氯、钴、铜、铁、锰、钼、钠、锌也是动物必需的营养。动物还需要铬、碘、硒,可能还有氟。现已发现,在某些条件下,钡和锶的缺乏会影响生长或出现其他异常现象。但这两种元素是否必需还是个疑问。

除上述以外,还有若干元素在大部分土壤和植物中存在着。这些元素显然并非植物和动物所必需。其中如钒,它仅对某些微生物功能起重要作用,从而间接影响植物生长。又如铝,在土壤中起着重要的化学作用,特别是对磷的有效性有很大影响。在土壤和植物中发现的许多元素,其重要性与其说是对生长的刺激作用,还不如说是毒害作用。一般说来,所有微量元素在土壤中的浓度若明显超过正常范围或平均值,对动植物都有毒害作用。在某些情况下,硼、铜、氟、钼、锰和硒等元素,即使浓度较低,也会表现出毒害作用。由于这些原因,再加上微量元素种类多,在生物过程中的作用复杂,并且在一般情况下微量元素的缺乏症状或毒害症状难以区别,所以要准确地解决微量元素问题,一般是艰苦和费时的。有时施多了有造成毒害的危险,要准确阐明这一问题的实质,通常要进行田间试验。然而,当某些微量元素稍有缺乏时,其全部后果可能只是导致作物和动物的产量降低,而没有任何可见的外部症状。

显然,微量元素潜在缺乏的范围,远远超出人们的一般预料。目前人们所考虑的只是局部地区微量元素的问题,若不进行适当的研究和及时预报,在不久的将来,就会产生严重的后果,微量元素的缺乏将扩展到更大的范围,从而更广泛更复杂地限制生产的发展。尽管微量元素的许多性质已为人们所知,但应用这些知识并不容易。为了防止在应用过程中发生严重差错,需要进行更多的研究,特别是广泛的进行试验。

这篇论文的目的,是向读者介绍各种微量元素在农业生产中的重要性,以及不同土壤中微量元素的来源、存在和性状方面的一般性资料。同时还介绍植物对各种微量元素的需求和主要生物作用,及其校正缺乏的资料。此外,还希望能帮助农业工作者清晰地认识微量元素在农业中的作用。参考文献是为了供读者查阅本文没有提到的更为详细的资料。

二、微量元素资源

(一) 岩石和矿物中的微量元素

土壤中的微量元素,主要来自岩石。土壤通过地球化学的和土壤化学的风化过程,由岩

石中获得了微量元素。动植物的腐解产物，天然水，大气中的物质，肥料，杀虫剂和杀菌剂是土壤微量元素的次要来源。

地壳几乎有99%是由氧(46.6%)、硅(27.7%)、铝(8.1%)、铁(5.0%)、钙(3.6%)、钠(2.8%)、钾(2.6%)和镁(2.1%)组成的。一些较不常见的成分列于表2。

表 2. 地壳中二十种微量元素的平均含量(ppm)

Mn	1000	Cr	200	Cu	70	As	5
F	800	Sr	150	Sn	40	Cs	3.2
S	520	V	150	Co	40	Mo	2.3
Cl	480	Ni	100	Pb	16	I	0.3
Ba	430	Zn	80	B	10	Se	0.09

地球外壳绝大部分是由火成岩和变质岩构成的，其次是沉积岩。沉积岩中大约80%是页岩和板岩，15%是砂岩，5%是石灰岩。微量元素的分布随岩石和矿物的种类而有很大变化(表3，表4)。

表 3. 沉积岩中大量和微量元素的组成

主要岩石类型	大量元素组成	微量元素组成
砂岩	Si	Zr, Ti, Sn, 稀土元素, Th, Au, Pt等
页岩和沥青页岩	Al, Si, K	V, U, As, Sb, Mo, Cu, Ni, Co, Cd, Ag, Au, Pt, B, Se
铁矿	Fe	V, P, As, Sb, Se
锰矿	Mn	Li, K, Ba, B, Ti, W, Co, Ni, Cu, Zn, Pb
石灰岩和白云岩	Ca, Mg, Fe	Ba, Sr, Pb, Mn
盐沉积物	K, Na, Ca, Mg	B, I

表 4. 火成岩常见矿物中大量元素和微量元素的组成及其相对稳定性

稳定性	矿物	大量元素组成	微量元素组成
易风化	橄榄石	Mg, Fe, Si	Ni, Co, Mn, Li, Zn, Cu, Mo
	角闪石	Mg, Fe, Ca, Al, Si	Ni, Co, Mn, Sc, Li, V, Zn, Cu, Ga
	辉石	Ca, Mg, Al, Si	Ni, Co, Mn, Sc, Li, V, Zn, Pb, Cu, Ga
	黑云母	K, Mn, Fe, Al, Si	Rb, Ba, Ni, Co, Sc, Li, Mn, V, Zn, Cu, Ga
	磷灰石	Ca, P, F	稀土元素, Pb, Sr
	钙长石	Ca, Al, Si	Sr, Cu, Ga, Mn
	中长石	Ca, Na, Al, Si	Sr, Cu, Ga, Mn
	奥长石	Na, Ca, Al, Si	Cu, Ga
中等稳定	钠长石	Na, Al, Si	Cu, Ga
	石榴石	Ca, Mg, Fe, Al, Si	Mn, Cr, Ga
	正长石	K, Al, Si	Rb, Ba, Sr, Cu, Ga
	白云母	K, Al, Si	F, Rb, Ba, Sr, Ga, V
	榍石	Ca, Ti, Si	稀土元素, V, Sn
	钛铁矿	Fe, Ti	Co, Ni, Cr, V
	磁铁矿	Fe	Zn, Co, Ni, Cr, V
	电气石	Ca, Mg, Fe, B, Al, Si	Li, F, Ga
	榍石	Zn, Si	Hf
很稳定	石英	Si	

(二) 土壤中的微量元素

1. 全量 正如某些作者所指出的, 尽管岩石和矿物的微量元素组成随风化和成土过程而变化, 但土壤中微量元素的总量通常还非常明显地反映那些成土母质的矿物组成。土壤中的微量元素含量和它的母质并不是永久紧密相关的, 并不能都以土壤母质来定量估算土壤中微量元素的数量, 尤其是冰川迁移和土壤母质混杂的地区, 更难以直接比较。

不同土壤中微量元素全量的相对变化范围, 要比大量营养元素更大些。Mitchell用图式标出了矿质土壤中若干种微量元素含量的范围(图1)。

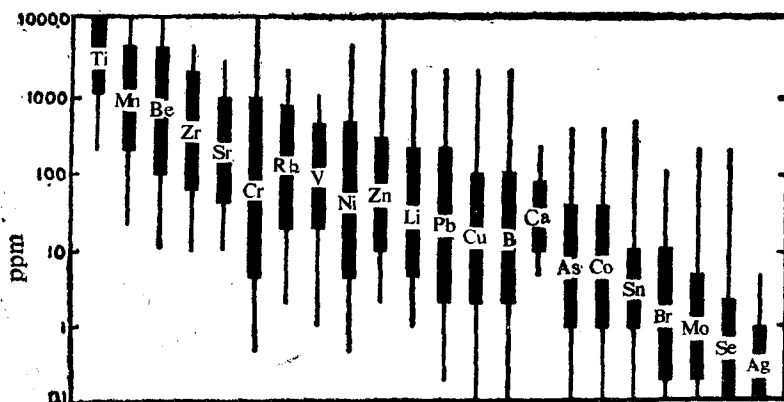


图1 常见矿质土壤中微量元素全量

图中细线表示不常见值, 极端值则未列入

土壤中微量元素的总量, 除与其母质的矿物组成有关外, 还取决于风化的类型和强度, 以及在成土过程中占优势的气候条件及其他因素。

不同岩石和矿物对风化作用的相对的抗性, 显然对土壤质地和微量元素含量都有很大影响。细质土壤或其它土壤中细粒的部分, 很可能来自易风化的矿物, 这也是微量元素的重要来源。粗质土壤和土壤中粗质部分, 则来自抗风化的矿物, 例如石英, 它们的微量元素含量亦低(表4)。许多作者的报告指出, 微量元素含量低的是粗质土壤, 而不是细质土壤。160个芬兰矿质土壤标本中, 五种元素与质地的相互关系见图2。所示回归曲线相关性极显著。而分析的第六种元素铅, 其相关性不明显。这可能是由于它不规则地存在于易风化的矿物中。

影响土壤微量元素全量的另一个因素, 是土壤有机质。一些作者指出, 土壤中的有机质增加, 微量元素含量也相应增高。但有时也得到相反的结果。另一方面, 大部分有机质土在耕种的时候, 经常出现缺乏一种或几种微量元素。在某些情况下, 测出泥炭土中微量元素含量(ppm)很高, 但当再分析在泥炭土上生长的植物时, 其微量元素含量则低于在其他土壤上生长的植物。人们常认为其原因在于有机质土中的微量元素有效性低, 或者固定率高, 但实际上还是全量过低。要弄懂这些矛盾的结果, 必须认识到用来表示微量元素含量的容积和单位, 这是很重要的, 不可忽视的。例如有两种土壤, 矿质土壤的容重为1.5, 泥炭土的容重为0.1。二者的某种微量元素含量若以重量为基础计算均为100ppm, 如以体积为基础来表示, 则结果大不相同, 计算如下:

土 壤	容 重	微量元素含量表示法		
		以重量表示	以体积表示	
		ppm	mg/升土	kg/公顷*
矿质土	1.5	100	150	300
泥炭土	0.1	100	10	20

* 1公顷20厘米深的耕层土壤 = 2百万升

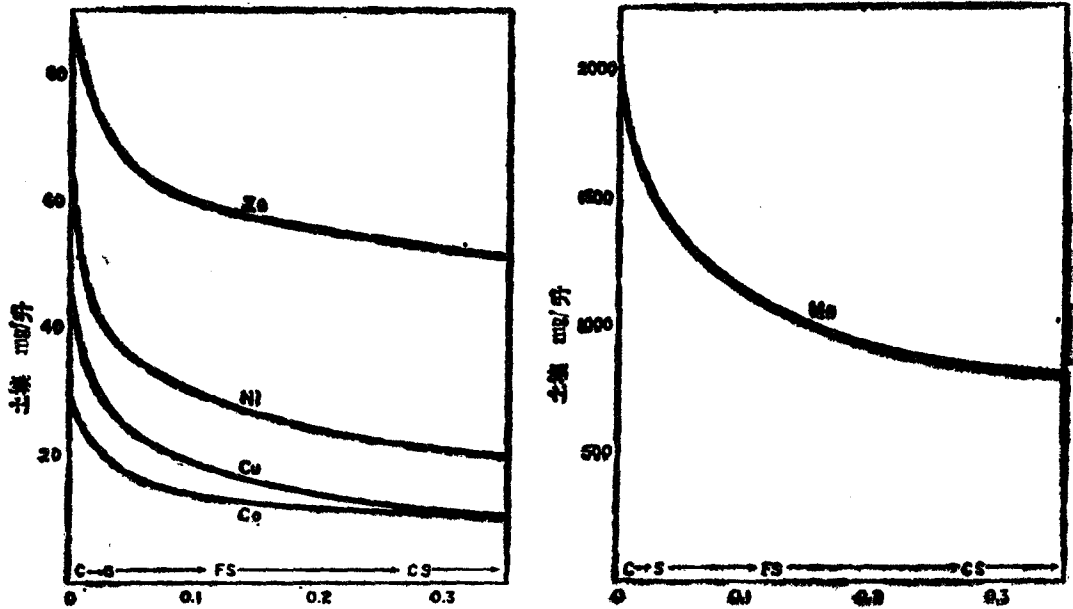


图2 五种微量元素的全量与土壤质地的关系(土壤质地以颗粒平均重量直径表示)

图中C=粘土, S=粉砂土, FS=细砂土, CS=粗砂土。(假如土壤容重=1.0, 1mg/升=1ppm)

在这一极端的例子中, 泥炭土中的100ppm只相当矿质土壤中的1/15。当然, 不存在泥炭土的地方, 土壤容重的变化是不大的, 那么强调用这两种方法表示结果之间的差异也就没有什么意义了。

土壤有机质和五种微量元素含量之间的关系示于图3。这个结果是选用了2637个有机质

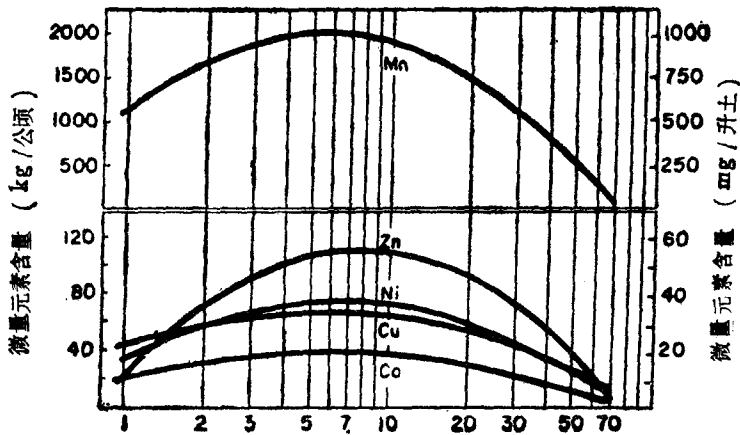


图3 芬兰土壤中五种微量元素全量与有机质含量的关系
(回归曲线的相关性极显著)

含量变幅很大的土壤标本（从一般的矿质土壤到含有很少矿物质的泥炭土）。

矿质土壤中微量营养元素的含量似乎是随有机质的增加而增大，其最大值是有机质含量 5~15% 的土壤。若再继续增加有机质含量，微量元素的含量则开始下降，纯泥炭土中微量元素含量最少。虽然这个趋势对于五种元素来说都是一致的，但它的基本原因并不是因为它们的化学性质近似，而可能是属于土壤学的性质：即所有这些微量元素都来自土壤的矿物质。生长和腐解在矿质土壤上的植物，从底层土壤中得到微量元素，并将它们集聚于表层，还要加上矿质土壤已经含有的微量元素，这就是矿质土壤中微量元素随有机质含量的增加而成比例增高的原因。如果再增加有机质含量，那么由矿质本身的微量元素构成的土壤微量元素全量的比例开始下降。这是由于土壤容重同时降低所致。到后来，上部的泥炭层和下部的矿质土壤之间的联系就越来越少。表层深厚的泥炭土中仅有的微量元素也是植物从底土矿物中逐渐运积而来的。水藓泥炭高位沼泽就是这种极端的情况，它的所有养分含量都很低。这一趋势，在北方泥炭中也很明显。由于气候条件，植物残体腐解非常缓慢，因而导致了泥炭的迅速积累。当然，某些局部因素，如底土矿物的类型、从四周来的排水、淋洗和地下水位的变化等，都对这一趋势有不同的影响。还应指出，假设将图 3 所示的相关性，以重量为基础（即以 ppm 为单位）表示，则回归曲线将近于直线（Mn 和 Zn），甚至呈向上弯曲的曲线（Ni, Cu, Co）。这样，就得出了在有机质的整个变化范围内，微量元素的含量随有机质增加而增高的印象。

2. 可溶部分含量与可给性 通常每年随作物收获而携走的微量元素量（Mn500, Zn250, Cu50, Mo10, Co1 克/公顷）*是很少的，一般不到土壤中各种元素含量的 1%。因此，即使在微量元素最缺乏的情况下，其总量仍然大大超过作物对它的需要量。微量元素的_{可给性}主要决定于它的可溶性，而可溶性又取决于各种土壤因素。使用一般提取液提取，其可溶态微量元素的含量通常也超过植物的需要量，并有很大余量。因此，在阐述化学提取效果时，必须考虑这一情况。

土壤中微量元素的全量，对于可溶的或对植物有效部分的含量都有重要影响。但其他一些因素如 pH、质地、有机质、粘土矿物、水分含量、氧化还原电位和各微量元素间的相互关系等，也对微量元素的_{可溶性}、_{可给性}有影响。所以用微量元素全量来估算可给部分含量状况是不可靠的指标。尽管如此，至今用全量来估算微量元素状况仍很普遍。其主要原因显然是测定可溶的和可给部分的含量有困难。

微量元素以不同形式结合于土壤中。不同形态间的区分在于扩散。Lakanen 指出，微量元素可以下列各种形态存在于土壤之中：（1）土壤溶液中的微量元素。（2）土壤颗粒的电荷所吸附的交换性离子。这些离子态的微量元素是对植物有效的部分。它和交换性钾、钙、镁相似。但是，微量元素结合得比较牢固，可给性较低。（3）微量元素与有机质形成复合态。大多数微量元素是典型的重金属，它们可以和土壤有机质或生物残体中的配合基结合而形成复合体。这种状态的微量元素对植物的可给性各有不同。（4）微量元素沉淀。铁锰浓度高，足以形成沉淀。这一部分在某种程度上对植物是有效的。（5）包蔽态微量元素。它们是在新的固相物质形成时，被包蔽在其中的。微量元素并非是其_{中的主要成分}。这是一个长时间的平衡反应，对此了解得还很少。（6）土壤矿物的组成部分。这种状态的微量元素在风化过程中才能释放出来。进入粘土矿物晶格的离子态微量元素也属于这一类，其可给性是很低的。

* 搜集不同来源的近似数据。

微量元素对植物的可给性，以及影响可给性的因素，对于不同的微量元素和介质来说，是有很大的差异的。据 Cottenie 等人报道，除七种元素外，砂培的植物对微量元素肥料中 Fe 和 Cu 的吸收，比其他微量元素的吸收变化小。对 B 和 Mo 的吸收与其在介质中的含量有关。对 Mn 和 Zn 的吸收则受其他条件的影响。关于影响可给性的因素和应用鉴别试剂提取的效果，Hodgson 和 Mitchell 已做了很好的介绍。

影响微量元素可给性的某些土壤因素，已成为许多研究者的研究课题，一些重要的资料已有介绍。其中最受重视的、公认的因素是土壤 pH。有机质已被认为具有较高的吸附性能，但它对非可给态微量元素的吸附能力，还需进一步研究。现已发现，土壤质地对许多微量元素全量有影响。然而质地对微量元素可溶性的影响资料却很少。

土壤 pH 土壤 pH 值对微量元素的给性有显著影响，从而也影响了植物对微量元素的吸收。如酸度减弱，Al, Co, Cu, Fe, Ni, Sn, Zn, 特别是 Mn 的可溶性降低，植物的吸收量也随之减少，而 Mo 和 S 则相应增加。有的报告指出，植物利用微量元素的能力，随着酸度的减弱 (pH 值升高) 而下降。其最低值在 pH 5.2~6.5。当 pH 值较高时，植物利用能力则保持不变，甚至增强。土壤 pH 值对一些元素可给性的影响，如 Truog 提供的图 4 所示。植物对四种微量元素吸收的情况列于表 5。

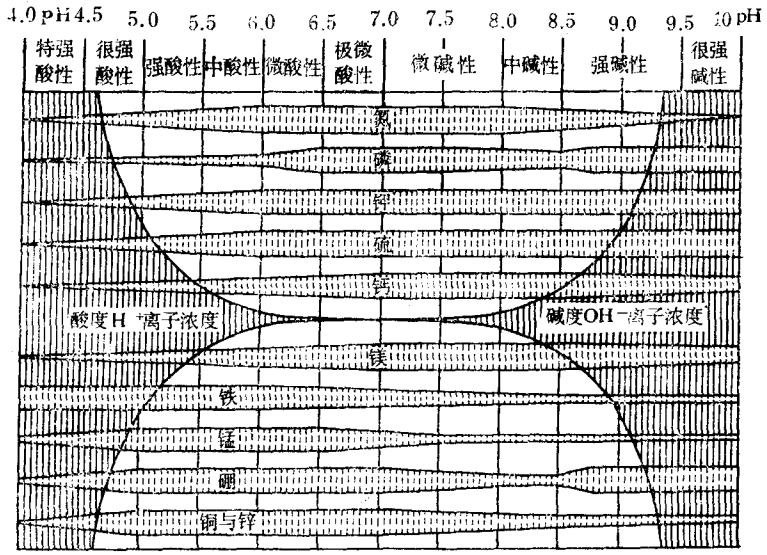


图 4 植物养分的可给性与土壤 pH 的关系

表 5. 施用石灰对土壤 pH 和植物体中微量元素含量的影响

处 理 CaCO ₃ 吨/公顷	土 壤 pH	元 素 含 量 (ppm, 干物质)							
		混 合 牧 草				红 三 叶 草			
		Co	Ni	Mo	Mn	Co	Ni	Mo	Mn
未 施 石 灰	5.4	0.28	1.83	0.42	125	0.22	1.98	0.28	58
14.4	6.1	0.19	1.34	1.54	112	0.18	1.40	1.48	41
27.1	6.4	0.15	1.08	2.14	72	0.12	1.10	1.53	40

pH 对不同微量元素可溶性和对植物可给性的影响，通常比图 4 所示的情况更为复杂。pH 对 Mn 的影响一般要大于对其它微量元素。有人报道，施用石灰后，代换性 Mn 的含量要

下降1/50~1/20，而对Cu的吸收影响很小，或根本没有影响。同时还发现，pH对许多微量元素在化学溶剂中的浸提量影响较大，而对植物从土壤中吸收微量元素的量，则影响较小。这大概是由于pH值增高时，植物对微量元素的吸收能力增强所致。但也曾有过相反的结果。显然，pH对植物吸收土壤中原有的微量元素和施入的微量元素的影响是不一样的，一般对后者的影响较大。在现有这些微量元素中，唯有Mo的可给性是随pH值增高而增加的。

关于每种微量元素的^{可给性}与土壤pH值的关系，将在第三章中分别讨论。

土壤质地 土壤质地是影响土壤矿物中微量元素有效部分含量的因素之一。虽然这方面的资料还很少，但有些分析结果表明，在比较大的土壤颗粒中，微量元素全量较低，砂土中也出现许多缺乏微量元素的情况。如联合国粮农组织的报告“欧洲微量元素与土壤单元的关系”中，列出了明显缺乏B,Mn,Co,Cu,Mo,I,Fe,Zn等微量元素的16个国家，所列举的矿质土壤绝大多数是砂质或粗质的（对其质地有明确的叙述）。

芬兰两种不同质地土壤的六种微量元素含量列于表6。

表6. 两种不同质地的土壤中六种微量元素全量的平均值及其在酸性(pH4.65)的醋酸铵溶液中的可溶性(毫克/升土壤)

微 量 元 素	土 壤 种 类		土 壤 种 类	
	细 矿 质 土 壤		粗 矿 质 土 壤	
标 本 号	60		49	
颗粒直径平均值 (毫米)	0.017		0.223	
	全 量	可溶部分含量	全 量	可溶部分含量
Co (毫克/升)	32	0.17	13	0.08
Cu	33	0.61	16	0.29
Mn	1489	31.7	709	8.0
Ni	50	0.73	24	0.20
Pb	22	0.32	24	0.25
Zn	69	0.31	48	0.41

对这些数据进行统计分析的结果表明：两种土壤间这些元素的相对溶解度（可溶性部分含量/全量）没有显著差异。而回归曲线的结果表明，土壤质地增粗与可溶部分含量下降的相关性对四种元素(Co,Cu,Mn,和Ni)来说是极显著的。但对pb和Zn不显著。由此可知，质地增粗，微量元素可溶部分含量下降。这一趋势与土壤质地和微量元素全量间的关系相似(图2)。这从表6中也可看出。在以后发表的大量土壤资料中，也有类似的结论。

土壤有机质 关于土壤有机物质对微量元素^{可给性}的影响，已进行了广泛的研究。但结果很不一致。特别在早期的文献中，认为在某种情况下，有机质对微量元素的吸附，是导致微量元素缺乏的原因。近期的研究结果与上述观点并不一致，但有机化合物对土壤无机成分的影响也并不十分清楚。由于对增加有机质致使土壤容重下降所造成的后果没有足够的认识，所以在应用这些分析结果来解释有机质的作用时，就出现了许多不一致的说法。而且不同的微量元素对不同的有机化合物的反应也是有很大差别的。

腐殖质对二价和三价金属离子吸持的稳定性要大于对碱金属离子的吸持。很早以前，已经了解到Cu与有机化合物可结合为相当稳定的络合物，大概比Mn被腐殖质固定更为稳定。然而，Svanbert等人指出，植物明显具有吸收有机化合物中Cu的能力。当矿质土壤中加入

有机质后,对植物有效的交换性Mn含量增加。关于Mn和其他微量元素与此相反的结果也有报道。Irving和Williams指出,二价金属螯合物的稳定常数是按Ca, Mn, Co, Ni, Cu的次序递增,而Zn一般稍低于Cu。图5为六种微量元素相对可溶性(可溶部分含量占全量的百分数)与土壤有机质含量之间的函数关系。这个结果与上述论点一致。

图5中回归曲线都达高显著相关水平,并显示出各种微量元素间的明显差异。随着有机质的增加,可溶性Mn的含量增加尤为显著,而Cu的回归线和相关系数在六种元素中是最低的。微量元素的化学特性,特别是它们与腐殖质形成螯合物的亲和力,可用来解释各元素间的差别。例如螯合态Mn,在这些土壤中似乎没有什么

重要作用,特别是在pH3.6~5.8(较砂质土壤低1个pH单位)的有机质土中,这是因为形成螯合物的亲和力在酸性条件下是很弱的。同样,在有机质土中,即使这种作用较弱,对其他元素来说也是这样,随有机质含量的增加而降低的pH,可使其溶解度也略有增加。

植物能够吸收许多种与有机质结合的微量元素。所以泥炭土中出现的缺乏微量元素的现象,并不是因为其有效部分含量低,而是因为微量元素全量不足。对于微量元素与有机质的关系,Wallace, Mortenson等人已作过评论。

其他因素 显著影响微量元素对植物可给性的其他因素有:土壤微生物活动性、土壤排水、氧化还原状况、气候条件和季节变化。这些因素是相互影响的。各单一因素的作用程度还难以确定。

微生物活性在很大程度上取决于上述诸因素以及受土壤的化学组成、pH、土壤有机质的数量和质量等因素制约。有些证据表明,当土壤微生物与植物争夺土壤中少量有效Zn的时候,可直接导致Zn的缺乏。微生物对微量元素可给性影响的间接途径是:在有机质分解过程中释放一些微量元素离子,一些离子结合在微生物组织中而被固定,微量元素被氧化为可给性较低的形态,被氧化的形态再被还原以及微生物对pH、氧化电位的改变更间接地影响微量元素的可供性。

显然,Mn和Fe的可给性受氧化还原电位的影响要比其它元素大。由于水分含量过高或淹水而造成的还原条件,可使S,Cu,Mo,Ni,Zn,Pb,V和Co的可给性增高。有时Mn,Fe,Mo,S可达毒害程度。然而,在某些情况下,Co,Mo,Mn与上述相反的结果也有报道。在氧化条件下,Mn和Fe的可给性低。一般认为是由于三价化合物比二价化合物溶解度低的缘故。氧化还原过程经常伴随着土壤pH值的改变。这种改变使情况复杂化,就象Fe,Mn和其他元素的相互作用那样。

许多微量元素的可供性是随季节的变化而变化的。但要确定这一变化的趋势,还是很困难,因为涉及的因素比较复杂。土壤温度增高,经常使微量元素的吸收增高,但同时也使土

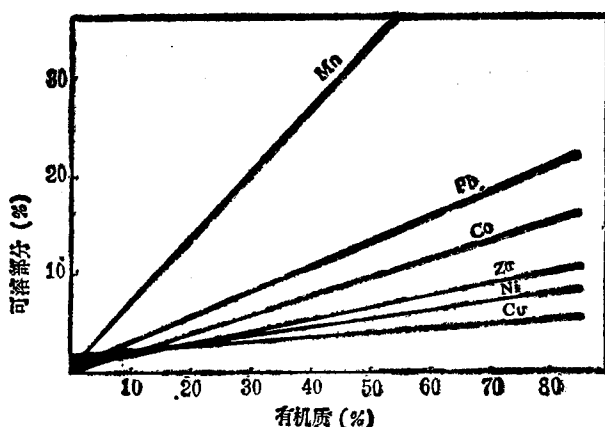


图5 六种微量元素的相对可溶部分占全量的百分数(酸性醋酸铵溶液)与土壤有机质含量之间的关系

壤变干。土壤变干又会导致微量元素的可供性下降。微生物活性明显受温度的制约。同时根据氧化还原状况、微生物种类、有机质含量等情况，对微量元素可供性也有不同影响。过多施用磷肥，可使Cu和Zn的可供性下降，使Mn的可供性增高，而对B和Mo的吸收则产生种种不同的影响。对磷诱发的缺Cu和缺Zn，有几种解释：在植物体中的Zn和Cu可能被过量的磷固定，或在嫩枝的导管中被磷沉淀，或在根内磷与锌可能有拮抗作用，或在良好的生理活性的根系界面外发生反应，以致降低Cu和Zn的利用。

关于上述因素对微量元素可供性的影响，Alexander, Ouastal, Hodgson 和 Grable 都有报道。至于每一种微量元素在这方面的情况将在第Ⅲ部分进一步讨论。

植物是动物的微量元素来源 植物吸收微量元素的能力，因土壤资源和各种因素对微量元素可供性的影响而有明显不同。此外，不同的植物种类对营养的需求也有很大差异。这在下一部分各单一微量元素的介绍中将讨论到。植物正常生长所需要的微量元素数量与产生毒害症状时微量元素含量之间的差距，对不同的植物种类和不同的微量元素来说，是不一样的。

由于不同的植物种类对微量元素的需要不同，植物体内微量元素的容许含量也不一样，这就有可能选用一些植物作为指示作物来鉴定某地区是否缺乏某种微量元素或是否存在毒害。有些植物对某种微量元素的需求明显比其它植物高，并具有明显的生长特征，这种植物若生长在缺乏该种微量元素的土壤上，其缺乏症状就很容易识别。Wallace 提到，甜菜、饲料甜菜、苹果、甜樱桃和复盆子，都是土壤缺Mn的指示作物。花菜可作为缺Mo的指示作物，桔子、苹果可作为缺Zn的指示植物，苹果是缺B的指示植物，花菜、花茎甘兰、羽衣甘兰、包心菜、苹果、梨、李子和复盆子是缺Fe的指示植物。另外，那些对土壤中某些高浓度的微量元素有特殊耐性的植物，可作为生物地球化学勘探中，寻找Cu, Fe, Zn, Mn, Pb等矿床的指示植物。

与过去介绍的情况相反，看来植物对重金属的忍耐力，一般并非在于对不同离子的吸收机制。分析生长在世界不同地区有毒害土壤上的某些植物中的多种金属元素含量，其结果表明：在金属含量相同的条件下，耐性强的品种就没有出现像耐性弱的品种那样的毒害症状。某些试验表明，有忍耐力性和无忍耐力性的细羽剪股颖(*Agrostis tenuis*)群体对Zn和Cu的吸收都是一样的。因此，当评论到植物对重金属的忍耐力时，Turner认为一般的规律是：植物并不排出有毒化合物。也就是说，植物有真正的忍耐力。

Healy及其同事们最近还报道了食草动物直接食用土壤中微量元素这一有趣的问题。他们指出，羊一年多可吃进100磅(45公斤)土，而奶牛吃进量比绵羊高九倍。然而由于土壤类型、牧草的贮藏时间、管理措施、季节变化及动物个体差异，对吃进的土壤数量都有影响。即使吃进土壤的量较高，也不到吃进的鲜牧草量的2%，即不到干草量的10%。大多数元素在土壤中的浓度要比牧草中高，所以对食草动物来说，通过消化道的土壤就可能成为获取这些元素的直接来源。当在体内研究胃和十二指肠分泌物提取元素的能力时指出，这些分泌物可从土壤中提取出不少种具有营养价值的元素。与此同时，在某些情况下，溶液中元素的浓度在接触土壤后会下降。例如，胃液中Fe的浓度，在接触到土壤后可增至原水平的九倍。而Mn, Se, Zn则分别增至100, 10和1.65倍。在十二指肠分泌物中，Se和Zn的情况与在胃液中相似，而Mn仅稍有增加，Fe的含量则下降。一般来说，在土壤中微量元素含量最高的地方，其增加量也最大。例如在新西兰的Papakauri, Maikiwi和Timaru的土壤中Se

的含量分别为1.82, 0.75和0.44ppm, 在胃液中其含量分别增加10倍, 4倍和2.2倍。Healy还介绍了Mc Cabe、Wilson和Healy应用放射性同位素Co, Mn, Se和Zn作的动物试验未发表的结果, 他们估算了从土壤中吸收的各元素量分别为 ^{75}Se 34%, ^{65}Zn 14%, ^{60}Co 1%, ^{54}Mn 0.4%。

三、微量元素各论

(一) 硼(B) 硼对于所有的高等植物显然是不可缺少的, 虽然需要量随植物种类不同而有相当大的变化。1903年Bertrand第一个观测到硼对于植物生长的有益影响, 并推荐硼为商品肥料, 作为氮、磷、钾肥的补充。1910年Agulhon报道了较低浓度的硼对于小麦、燕麦和胡萝卜的增产效果以及毒性。稍后, 硼对于植物营养的重要作用得到了完全的证明。1931年发现糖甜菜的“心腐病”是由于缺硼的缘故, 从此以后发现其他的缺硼疾病影响到多种作物, 现在可以认为硼是农业上最重要的微量元素之一。

尽管六十多年来, 在植物的硼素营养上持续进行了大量的工作, 但硼在植物营养上的特殊功能还有很多是未知的。

硼对植物的作用, 关系到分生组织的活动, 生长素, 细胞壁, 蛋白质和果胶的新陈代谢, 维持植物体内恰当的水分关系、糖分转移、结实过程和酚酶的抑制等。据报告, 硼在原生组织和分生组织中的作用是在细胞成熟期, 在细胞发育以后是否需要还没有证明。一些植物次生的分生组织的产生对硼的需要是有差异的。

硼似乎与某些机能有紧密的关系, 例如钙在植物中的表现。如果由于缺硼, 钙-硼平衡被扰乱, 特有的缺硼症状就会显现; 如果这个平衡由于缺钙或硼过量而逆转, 可能出现硼中毒的症状。

对于木质素的聚合过程, 硼是必需的, 因为硼关联到黄酮类物质的含量和木质素的制造, 它紧密地参与黄酮类物质的合成。一个涉及硼的缺少对豆科植物的营养生长和产量影响的研究结果显示, 硼是维持顶部生长点的第一个需要的元素, 并直接参与细胞分裂的过程。除一个很窄的范围外, 产量不直接取决于硼的供应, 例如菜豆(*Phaseolus vulgaris*)的产量在0.05ppm时最高, 进一步增加硼含量一直到2.5ppm, 产量不受影响。

除此而外, 硼的缺乏与人和动物的许多变态反应有关, 但硼在动物体内的机能还远未得到揭示, 没有动物必需硼的证明。虽然自1912年以来, 已经知道硼在动物组织内是经常出现的。据报告, 肌肉组织和大部分器官不同于骨骼, 其干物质含硼仅0.5~1ppm或更少, 可是骨骼中硼的浓度要高数倍。一般成年人每天平均从普通饮食中摄入的硼约10~20毫克。食草动物随土壤类型和所消耗的植物种类而有很大的变化, 但以体重计, 每一单位体重的含硼量是很高的。从高硼的盐土和碱土上报道了羔羊肠胃和肺的异常, 那里水的含硼量(0.2~2.2毫克/升)也格外高。通常食物中的硼被迅速吸收并大部分随尿排出。

估计地壳的含硼量平均约10ppm(表2)。硼掺杂在许多岩石和矿物里, 但土壤中含硼最多的矿物是以电气石的形态存在(表3和表4), 这是一个高度难溶的硼硅酸盐, 含硼约3%。土壤硼的总含量通常约2ppm到100ppm以上, 平均约30~40ppm。土壤中植物可利用的硼的量相当于用沸水从土壤中提取的硼的量, 这个量从小于0.15ppm到50ppm以上, 大多数的土壤小于3ppm。热水溶的硼在温暖湿润区域的土壤估计常在0.2~1.5ppm, 而干旱和半