



## 微量元素在维持农作物营养方面的重要性

B. DELL

澳大利亚，默多克大学

### 摘要：

微量营养素在支撑农作物生产方面的重要性，通常集中表现在提高产量和在现有耕地上增加作物密度来为不断增多的世界人口提供粮食方面。可是，从耕作系统中排出的微量营养素往往被人们所忽视，为了提高产量人们施用的肥料绝大部分是氮磷钾肥，特别是在发展中国家更是如此。如有机质减少、土壤酸化这样的土地退化，已经在另一层面增加了在耕作系统中使用微量元素的复杂性。微量营养素肥料的使用策略应包含农业系统和土地使用方面的变化，包括退耕和节水水稻生产引起的变化。除土壤有机质和土壤酸化的影响外，微量营养素在作物根系的作用将更多地受到未来不稳定降水模式和干旱共同导致的气候变化的影响。应对这些挑战的解决方案，在于良好规划的农业措施，比如通过施加肥料和农作物残余处置进行有规律的定期的微量元素补充。现有高产农作物品种中的微量营养素效能（包括提高和利用）的培育特性可能是一个长期的研究对象，不只是能够减少农作物减产，也能提高农作物的品质，比如增加微量营养素在谷类/种子中的密度，而这是以食用植物性食物为主的人们的主要粮食。

### 绪论

近十年来，当人们关注于提高主要粮食作物中微量营养素的含量时，农作物在这方面不足的消息经常被报道，大量采取秸秆还田的措施以确保微量元素供给不至于影响农作物的产量。最近，根据Rashid 等人2004年的研究显示，在印度西北部Punjab地区的石灰性土壤中缺乏硼元素就抑制了水稻产量和谷物质量。根据Stewart等人2005年的研究成果，至少30-50%的农作物产量是因为施加了商业肥料（氮、磷、钾）的缘故。没有微量营养素预算信息，比如2004年Yamada在巴西关于土壤、农作物和肥料的讨论中指出，目前不可能评估全部农作物产量对微量营养素的依赖程度。然而，在世界范围内缺乏微量营养素的土壤，特别是缺乏锌（Alloway, 2004年）、铁和硼（Shorrocks, 1987年），使人们认识到，除非微量营养素被有目的地用于农作物生产，否则某些地区的生产能力将会持续降低。Alloway 在2004年断定，“很可能有数百万公顷的水稻受益于含有锌的肥料”。

以1998年稻米产量低于世界平均水平的70个国家为例(Sauerborn, 2002年)，他们未来可能会因为贫瘠土壤中缺乏微量营养素的缘故，而使通过施用经济的常量营养素肥料提高的产量减少。正如White和Zasoski(1999年)指出的那样，我们需要更多地了解土壤中微量元素存在状态的详细情况，以加强对微量元素应用的管理。当人们对世界上一些农作物生长区的农作物微量营养素需求的研究成果减少时，农作物生长所需的微量营养素却在持续升高。

要素满足了以下需求，包括在农作物收获时增加去除物、施用常量营养元素肥料特别是氮肥而增加农作物产量，以及农业习惯和土地扩展的变化。本文探讨的在是支撑农作物生产的微量营养素管理方面面临的一些挑战。这个课题最新的研究是由 Fageria 等人在 2002 年进行的。由于世界上大多数人口以谷类作物为主要粮食，所以例子侧重于谷类方面，也包括工业纤维性作物。Hartemink 2004 年指出了一些热带地区耕地土壤肥力下降的问题。我们更多关注的是有切实体验的澳大利亚和亚洲地区。然而，需要引起注意的是，在未来二十年里，非洲和南美洲谷类作物产量的增加可能会比亚洲地区的多，若不考虑非洲土壤贫瘠的因素非洲地区肥料使用残留低（Holmén, 2005 年）。

## 土壤退化

土壤肥力流失主要与世界上许多地区每年流失 0.1-35mm 的表层土有关。这与用 DPTA 提取液分析的微量营养素（铜、锰、锌）和土壤中的有机碳含量通常是密切相关的（Sharma 等人，2004 年）。此外，土壤中微量营养素循环与有机物利用率和农作物残留管理密切相关，而这对维持土壤中微量营养素的平衡是非常重要的（Mythili 等人，2003 年）。保护耕地和退耕的采用不仅减少侵蚀还隔绝了碳（Lal, 2002 年），并且通过生物反应增加了营养物循环。在 2003/4 年，大约有 9 千万公顷的土地得到退耕，其中大多在北美、巴西、阿根廷和澳大利亚（Derpsch 和 Benites, 2004 年）。退耕在印度恒河平原（IGP）也迅速得到采用。退耕仅仅 4 年后，2004 年 Malik 等人在印度恒河平原的六个地点测量出土壤中的碳含量增加（平均增加了 44%，范围 0-104%）。在仅有的标明日期的关于有机物和微量营养素的垂直分布与退耕和耕作关系的研究中，Teixeria (2003 年) 指出，退耕造成的同种微量营养素减少，很可能是因为有机物大量集中在地表附近区域。微肥余效是否因退耕而改变还需论证。

对世界上许多种植谷类作物地区的农民来说，土壤酸性的增加是一个大问题。世界上大约有 30% 的表层土壤是酸性的，这其中有 75% 的下层土壤也有局限性（Sumner 和 Noble, 2003 年）。例如在澳大利亚西部地区，在部分谷物作物带，土壤的 PH 值持续降低是由于以前的农业种植活动（小麦-豆类与牧草草场轮耕与耕地复种相结合）和使用了铵-氮肥料。为改善土壤的酸性添加石灰导致了小麦中锌含量的降低和沙地土壤的产量下降（Brennan 等人，2005 年）。这发生在以前添加锌肥料的土壤里。这 1800 万公顷收割完春小麦的土地中大约 45% 的土壤中缺乏锌（Gartrell 和 Glencross 1968 年），并建议每 10-15 年再施加一次锌肥。（Brennan, 2001 年）。

Brennan 等人 2005 年进行的试验显示添加石灰缩短了锌肥的有效期。他们建议测试土壤和植物中微量营养素的含量，并且警告在土壤中添加石灰时，日常要施用含锌、锰、铜的肥料。在澳大利亚西南部降雨充沛地区的牧场也遇到了相同的问题。（Bolland 等人，2004）。

## 精耕细作和高产

农作物对微量营养素的需求量随着农作物产量的增加而增长。同时当前农作物产量增加的速度与绿色革命期间并不一样大，中等程度的增加很显然既归因于农艺学的调整又归因于新栽培品种的引入。例如在越南，湄公河三角洲和全国的每单位面积稻

米产量分别提高了28%和57% (Bo等人, 2003年)。根据美国农业部-国家科学院的数据, 美国的谷物产量在过去的二十年间提高了大约15%。为了支撑农业, 必须考虑弃耕后土壤中去掉微量营养素对土地肥力的影响。(表1)

表1. 收割稻子和小麦后铜、锌的缺失评估

作物种类	谷物中微量营养素浓度微量营养素缺失评估 (g. ha <sup>-1</sup> ) (mg. kg <sup>-1</sup> dwt)*			
	铜	锌	铜	锌
小麦 产量 3 - 5 吨/公顷 @	1.2 - 8.6	8.0 - 46	4 - 43	24 - 230
糙米 (去壳) 产量 7 - 9 吨/公顷 #	1 - 13	6 - 28	7 - 117	42 - 252

\* 上述数据来源于Rengel等人. (1999年); @ 数据来自中国产区, 中国农业研究会赵冰前博士; # 稻子产区被Peng 等人引用 (2004年).

见上表, 由于高产的原因, 在精耕细作的稻子-小麦耕作系统停止耕作后移除的微量营养素会很高。众所周知, 灌溉会减少洼地土壤中可用的锌和铜含量, 增加铁和锰的含量 (Kirk, 2004年)。锌缺乏在许多稻子种植区引发了一个严重的问题, 特别是在推广使用硫酸锌肥料的印度 (Mythili等人 2003)。不管农业生产方式向节水型或旱耕稻方面的转变, 是否会使微量营养素对产量的影响程度减少, 还需要进一步证实。最近Lu等人 (2004年) 的研究突出表明了营养供应的复杂性和中国稻-麦轮耕的持续有效性。尽管对水稻来说有足够的锰元素, 但在接下来的小麦种植时则会面临锰缺乏。这些学者撰文指出小麦缺乏锰是因为高PH值质地土壤和以前在粘土质、酸性土壤中耕种稻子引发的锰含量升高。Lu和他的同事推断适当的处理根部生长的下层土可以减轻稻麦轮耕情况下的麦子中锰含量的缺乏。

在干旱地区和地中海气候的地区, 农作物根部穿透到下层土壤对吸收水份是至关重要的, 特别是在生长期的后期。例如, 在澳大利亚西部地区, 直到开花期麦子所需要的水都主要依靠降雨补充, 然而开花期后需要的水主要依靠下层土壤中储存的水 (Gregory 等人, 1992)。令人惊讶的是我们对当根部渗透到贫瘠土壤范围时根部是如何获得微量营养素以维持生长的, 知道的并不多。

众所周知, 停止对植物根系外部的硼补给, 则不能向韧皮部输送硼, 这样就会在几个小时之内导致根部功能削弱。(Dell 和 Huang 1997)。我们对其它微量营养素的情况知道的更少。使用一个分根系统, 麦苗在完全营养液 (ALL) 中生长, 然后将这个分根系统一半转移到全铜营养液中, 片刻后再在全锰营养液中做试验 (如图1)。

没有支根

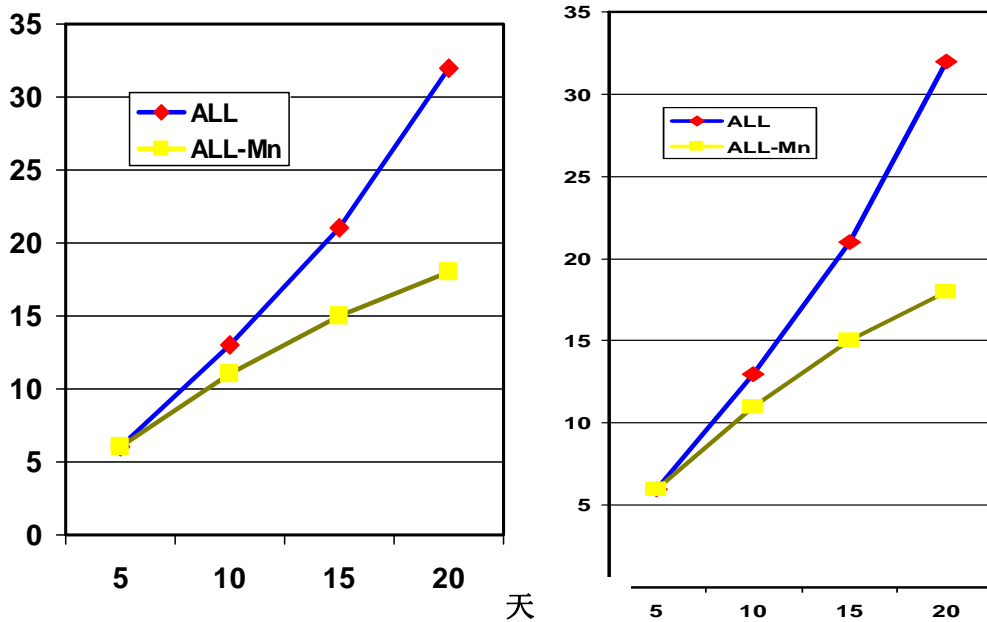


图1. 去除锰 (A) 或者铜 (B) 后, 由完全营溶液培养的一半小麦根部系统的支根所显现的结果。麦苗在完全营养溶液中生长直到被转移 (第0天)。A. J. Webb 和 B. Dell 没有出版的数据。

15天 (全锰) 和25天 (全铜) 以后, 支根开始明显地减少。这显示植物内部向根部重新分配锰和铜的效率难以充分地维持根部的生长。这种重新分配究竟是产生于微量营养素较多的表层土壤中的根系, 还是在更深的支根仍然需要进行进一步研究。我们也不知道在微量营养素成为限制作物生长和繁殖的情况, 它向根部再移动可能被削弱的程度。略微缺乏铜元素的小麦在老叶子中保留的铜比在有足够铜供给的作物中要长 (Hill 等人, 1979), 并且这将限制铜输出到根尖。在小麦秧苗叶子中含有的锌向根部再移动的情况下没有发现这样的限制。(Haslett 等人, 2001)。关于微量营养素的供给和在贫瘠土壤中根部生长的更多知识, 有助于确定在土壤中补给微量营养素的最佳策略。

## 改变土地用途

施用微肥成功地减轻了无序的耕作状态, 可能需要再考虑改变土地的用途。这在印度恒河平原特别明显, 将单一栽培的低产、周期长的本土品种稻子或麦子, 换成短期高产品种的稻麦轮换的精耕作系统, 加重了土壤中微量营养素的缺乏。(Nayyar 等人, 2001年, Gupta 2005年)。另一个例子是在澳大利亚的西南部地区, 大约2百万公顷农业土地最近改成一年生的草场和速生桉树种植业耕地 (蓝橡胶)。尽管土壤中铜的剩余数量足够超过三十年的施用需求, 但铜缺乏导致树干坏死和树木生长迟缓已成为一个严重的问题。(Dell 等人, 2003年)。由Dell等人2001年定义的标准浓度范围建立的叶状检测程序, 成功地确定了铜缺乏的机制, 乃至扩展到锌和硼方面等 (图2)。

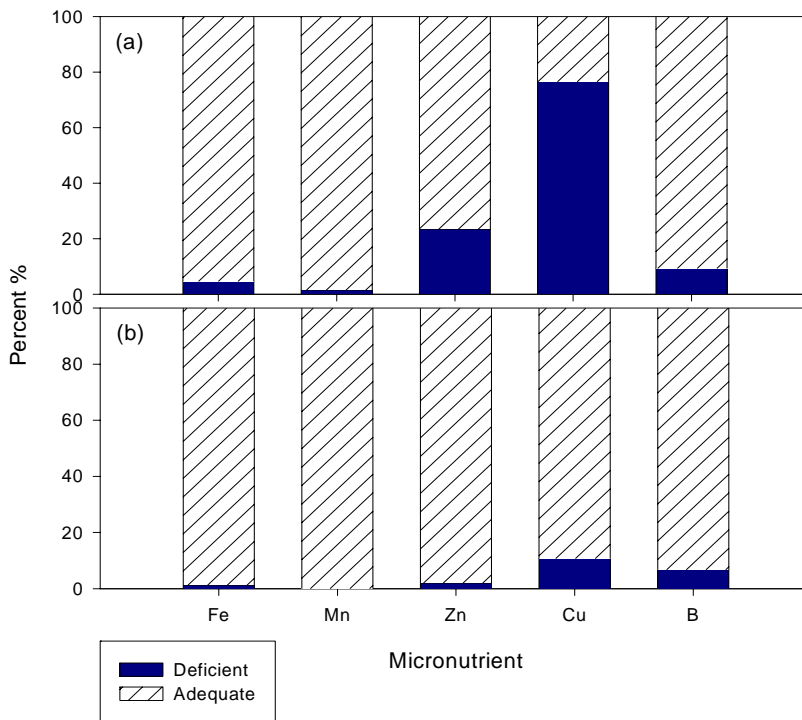


图2。由于改变了铜的施用量(1-4 公斤铜/公顷)，(a) 澳大利亚西南部蓝橡胶种植园中微量营养素缺乏的影响范围(占有耕地样本的百分数)，在建立微量营养素叶状营养监控程序2年后减少(b)。(B. Dell 等人, 未出版的数据)

由于施用了微量营养素(通过土地和空气)更好地改良了树木的机能和活力。在多数情况下,施用氮磷钾肥是没有反应或反应不大的,而铜是主要的营养限制措施。初步的研究认为蓝橡胶利用的铜比一年生农作物/草场物种少,原因是蓝橡胶的主要生长萌芽期在夏季,那时根部在0-15厘米土壤中由于干旱而降低了根的活力。

此外,蓝橡胶比它替换的农作物单位面积产生的生物量多。不只是因为这里需要更多的土壤中的铜元素,还因为与小麦相比在树木中输出的铜元素(25-30克铜/公顷)比谷物中的多(3.5-7.0克/每公顷)。这个例子突出显示了需要在许多工业化种植园中对微量营养元素的施用进行更多的研究。在发展中国家新近增加的收获面积预计到2030年将达到总计1亿2000万公顷新耕地(Alexandratos, 2005年)。这些土地的大多数在非洲次撒哈拉和拉丁美洲地区(Alexandratos, 1995年)。我们对许多亚洲地区山地原始森林和次生林引发的微量营养素严重缺乏情况比较熟悉,毫无疑问由于土壤贫瘠和土壤肥力流失在其它地方也会遇到相同的问题。例如,在苏门答腊岛、棉兰老岛、海南省和云南省开垦后的土地缺乏硼,苏门答腊岛西部和泰国中部缺乏铁,中国南方缺乏锌,印度尼西亚缺乏铜。上个世纪九十年代中期,中国昆明西部的楚雄地区清除灌木丛准备耕种蓝橡胶,但由于硼的严重缺乏,使橡胶树长得和地面差不多一样高(图3)。毫无疑问,将来要使这一地区达到和维持一定的产量还需要不断的努力。农民也需要鉴别微量营养素和包含经济利益的施肥方法等方面的帮助。在图3显示的斜坡下面,农民正在他们种植的烟草中使用含有硼的肥料,但是在这个地区的小麦由于缺乏硼而颗粒小的现象一直出现。

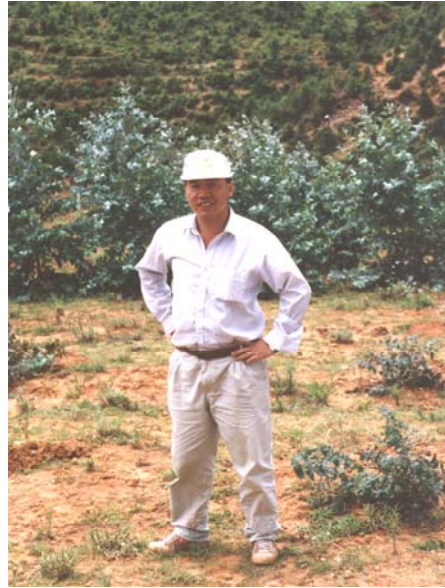


图3。中国云南省楚雄地区，砍掉次生松和橡树林（背景）种植了蓝橡胶后严重的硼缺乏导致了植株矮小（前景），然而在种植时每株补给0.6克硼的树木生长正常（中景）。

由于在云南省硼是制约农作物生长的主要微量营养素，它的功能主要是在在整个农作物生长周期维持土壤中养分供应。此外，从蓝橡胶的例子上看，可能是由于单独耕种的原因，对很多农民来说施加硼元素是很难的。我们的研究发现，图3 中的健康树木在一年后变为缺乏硼元素。高浓度的硼元素（大约5 千克 硼 /公顷）对防止硼元素在4年后缺乏应该是足够的，但会在第一年引起幼苗中毒。每年施用一次小剂量的硼肥会满足农作物生长的内部需求，但这对树林是不切实际的。作为可供选择的解决办法就是，如果有可能的话施用缓释的硼肥料、种植硼元素高效的树木和提高土壤中硼元素的保持力。

### 从气候影响看营养紊乱

对云南省雨水灌溉的稻麦轮耕地区来说，小麦的产量降低也可能是因为非营养的影响因素，比如在开花期遇到低温，低光照和高湿度的气候。雄性植株不育可能是因现代小麦品种达到了更高的水平而恶化，或者受到随着气候变化而增长的极端天气条件的影响。在邻近开花阶段，这些受气候影响导致的症状，与由于土壤中硼元素含量低或者硼元素供给中断引发的不结果是无法区分的。例如地表土壤干旱也可能出现这样的状况。当穗保留在叶鞘中的时候，小麦授粉临界期的发展可能短得只有3天。因此短暂对根部中断硼元素的供应，例如短时的土壤干旱就会影响谷物的产量。如以前提到的那样，现代小麦线性趋向硼元素效率低。

早期提出的是在发芽时，效率高的硼元素小麦品种与效率低的硼元素品种需要的硼元素数量相同，但它们在临界开花阶段向花朵输送硼元素的效率更高。(Nachiangmai, 2004年, 图4)。很显然, 在这个领域区分硼不足与气候的暂时制约是至关重要的, 所以应该给农民以适当的建议。Katagi等人 (2001年)取得的结论是, 在印度恒河平原硼元素缺乏可能与铁元素和锰元素缺乏一样重要, 提醒我们在这个地区将要做的工作是十分重要的。

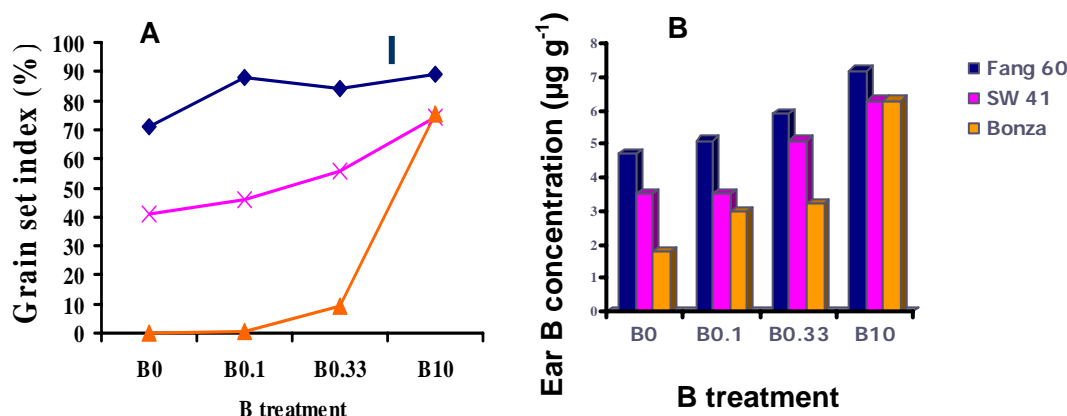


图4. 小麦中硼的效能。A, 在外界硼浓度低供应 (0-0.1 $\mu$ M硼) 时, 硼效率高小麦 FANG 60 (上面的图形) 在谷物中的维护能力好于适度的低效率硼SW41 (中间的图形), 或者低效硼的Bonza (下面的图形)。谷物结穗指数被定义为谷物结实期小花中 10 个主要小穗花序中的 2 个基本复花花序的小花的百分比。Fang 60在硼浓度低的情况下输送硼元素的能力可能好于SW41或者Bonza。数据来源于Nachiangmai (2004年)。

## 气候变化

大气中CO<sub>2</sub>含量的增加、全球变暖、降水区域和强度的改变, 以及极端气候状况发生的频率和强度, 都是影响未来农作物生产的因素。例如, 在澳大利亚气候的变化对特定的谷类生产地区意味着正面或者负面的影响 (Howden 和 Jones, 2005年)。气候变化可能已经影响产量的典型事例是, 在最近十年间墨西哥西北部地区的小麦产量提高达到 25% 以上, 这就是因为在生长期的夜晚温度下降。(Lobel 等人, 2005年)。

相反, 林等人 (2005年) 推测, 中国未来 20-80 年间的谷类作物 (稻子、玉米和小麦) 的产量将会仅因为温度升高而下降。夜晚温度的升高可能已经抑制了稻子的生产 (Peng等人, 2004年)。世界上许多地方的农业, 包括地中海型气候和潮湿的热带地区, 似乎更易受到快速气候变化和可变气候的影响 (Kokic 等人, 2005年; Zhao等人, 2005年)。

如稻子这样的农作物能否从大气中CO<sub>2</sub>含量的提高中受益, 将依赖于光合作用时的空气温度是否超过最佳水平, 以及土地能否提供维持作物生长的足够的水和养分。到目前为止, 关于未来气候状况下营养重点的讨论很少。黄等人 (2005年) 提出, 较低的根区温度可能增加生长在热带/亚热带地区的植物中硼元素的需求。Lynch 和

St. Clair (2004年)首次提出了“如果我们要了解全球实际土壤变化对植物的影响，需要综合机械论数量遗传学和植物对矿物应力反应的概念模型”。因此广泛地推测气候变化是否改变农作物微量营养素的需求，或土壤向根部供应微量营养素的能力的条件是不成熟的。确切的说，更好地处理文中提出的现有微量营养素问题，以及在主要食品中添加一定浓度的微量营养元素，由此产生对其营养需求变化的预测，都是我们将要努力的方向。

## 食物的品质

微量营养素的缺乏影响了世界上数以亿计的人们(Welch 和Graham 1999, Kennedy 等人 2002)，富含微量营养素的农作物降低了公众健康问题出现的可能性。最近，建立起的一个国际项目(HarvestPlus - [www.harvestplus.org](http://www.harvestplus.org))是用传统的作物育种方式在主要粮食作物中提高微量营养素的含量。这个方法包括选择大大提高从土壤中获得微量营养素能力，以及在谷物颗粒充实期向种子增加微量营养素能力的的显形特性。(Graham 等人, 1999)。在某些情况下有可能在生殖期通过多叶喷施的方法增加谷物中锌的含量。除了能提高与人类健康密切相关的营养质量外，微量营养素富集的种子还可以使播种在微量营养素贫乏土壤中的农作物的产量增加(Welch和Graham, 2004年)。2005年，White和Broadley评价了用转基因方式在植物中增加铁和锌的生物利用率。很显然，加强农作物的微量营养素需求在将来是一个重要的研究领域。

## 营养效率

在微量营养素低的土壤上从事农作物生产的一个方法是在繁殖过程中选择营养效率高的基因。根据Huang和Graham (2001年)的观点，“我们现在之所以缺乏引人注目的培植微量营养素效率特点的争论，是因为到目前为止取得的适合在缺乏微量营养素土壤中种植植物的努力的成就很少”。尽管如此，最近人们在选择高效锌元素小麦基因和其在田地中的栽培取得了相当大的进展(见 I. Cakmak, 这些会议记录)。基因型的营养效能是指在抑制标准基因型营养物的土壤中能够引发高产的能力(Huang 和 Graham, 2001年)。此外，来源于硬粒小麦(*Triticum aestivum durum*)与二倍体小麦(*T. tauschii*)之间杂交的人工培育的六倍体小麦，已经表现出比现在的锌元素基因型小麦具有高得多的锌营养效率，这表明它们可以用来提高现代基因型小麦的锌的营养效率(Genc和 McDonald, 2004年)。

锌营养效率机制或许还要阐明和包括的是，在易受影响的贫瘠土地上增加产量，增强吸收、传送和利用锌元素。重要的是，锌元素高效基因型小麦不能取代土壤中长期施用锌元素肥料，到目前为止，高效的锌元素和低效锌元素基因型小麦在他们得到最适宜的种植时具有相同的锌元素浓度。某些高效的锌元素基因，可能通过施加锌肥料以确保在锌元素的输出时谷物中能具有更高含量的锌。

与锌元素相对照，对硼元素研究的引出来自国际玉米小麦改良中心的国际种质，大多数发展中国家依靠它来进行新的小麦品种，在很大程度上硼元素的效率低(Rerkasem等人, 2004)。这些工作也说明在硼元素低的土壤中的小麦生产，很大程度上得益于国际间重要种质中越来越高的硼元素效能。(Rerkasem 和 Jamjod, 2004年)。因为在先进的培育路线中，一些硼的效率已经被证实，并且硼元素的功效是受基因的控制，因此提高硼元素的功效是切实可行的。(Rerkasem 和 Jamjod, 2004年)。

相同的工作在中国的双低油菜品种（canola）中进行。在当前主要农作物中营养效能高的种植特性，将对减少由微量营养素制约导致产量/质量的降低提供长期有效的选择。

## 结束语

1、农作物对微量元素的需求相对很少，但定性的看，微量营养素缺乏非常限制常量营养素的效力。

2、扭转土壤退化的土地管理和改进不利的土壤PH值，必需供给适合农作物生长的微量营养素。这种应用不仅适用于粮食作物，对工业树木种植也适用。

3、由于产量更高，每单位土地的输出总量高，停止耕作时大量的输出和引入微量营养素密集的品种，都会使农作物需要的微量元素增加。

4、目前缺乏有关新的农作物特别是木本农作物的微量营养元素需求的研究文章，还需要进行维持微量营养元素项目的研究工作。

5、由于微量营养素的因素在世界上许多地方继续限制产量，需要通过持续不断的努力扩充人员以使农民关注微量营养素。需要在很多耕作系统中加强的当地微量营养素的知识。

6、微量营养素功效的培植策略需要在高产选择计划中一体化。在发展中国家的偏僻地区，微量营养素效率的培育胜于高产，它可能是稳定和持续生产最有效的解决方案，因为对许多肥料产品和技术来说是难以达到的。

## REFERENCES

- Alexandratos, N. (ed.) (2005). World Agriculture. Towards 2015/30. Highlights. IFA-FAO Agricultural Conference "Global Food Security and the Role of Sustainable Fertilization", 26-28 March 2003, Rome, Italy. Check dates
- Alexandratos, N. (1995). World Agriculture. Towards 2010. FAO, Rome & Wiley, Chichester.
- Alloway, B.J. (2004). Zinc in Soils and Crop Nutrition. International Zinc Association, Brussels.
- Bo, N., V., Mutert, E. and Sat, C.D. (2003) Balcrop Balanced Fertilization for Better Crops in Vietnam. Potash and Phosphate Institute/ Potash & Phosphate Institute of Canada, Singapore.
- Bolland, M.D.A., Allen, D.G. and Rengel, Z. (2002). Response of annual pastures to applications of limestone in the high rainfall areas of south-western Australia. Aust. J. Exp. Agric. 42, 925-937.
- Brennan, R.F. (2001). Residual value of zinc fertilizer for production of wheat. Aust. J. Exp. Agric. 41, 541-547.
- Brennan, R.F., Bolland, M.D.A. and Bell, R.W. (2005). Increased risk of zinc deficiency in wheat on soils limed to correct soil acidity. Aust. J. Soil Res. 43, 647-657.
- Derpsch, R. and Benites, J.R. (2004). Agricultura conservacionista no munda. Paper presented at the Brazilian Soil Science Conference, July 2004, Santa Maria, Brazil.
- Dell, B. and Huang, L. (1997). Physiological response of plants to low boron. Plant Soil 193, 103-120.
- Dell, B., Malajczuk, N., Xu, D. and Grove, T.S. (2001). Nutrient Disorders in Plantation Eucalypts. Second Edition (Revised). Canberra, ACIAR Monograph No. 74
- Dell, B., Xu, D., Rogers, C. and Huang, L. (2003). Micronutrient disorders in eucalypt plantations: causes, symptoms, identification, impact and management. In: Eucalyptus Plantations - Research, Management and Development. Wei, R.P., and Xu, D. (eds). World Upland Soil Fertility in Southeast Asia. PPI, Singapore. 121-148.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. and Clark, R.B. (2002). Micronutrients in crop production. Advances in Agronomy 77, 185-268.
- Gartrell, J.W. and Glencross, R.N. (1968). Copper, zinc and molybdenum for new land crops and pastures - 1969. J. Agric. - Western Australia 9, 517-521.
- Genc, Y. and McDonald, G.K. (2004). The potential of synthetic hexaploid wheats to improve zinc efficiency in modern bread wheat. Plant Soil 262, 23-32.
- Graham, R.D., Senadhira, D., Beebe, S., Inglesias, C. and Monasterio, I. (1999). Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops : conventional approaches. Field Crops Res. 60, 57-80.

- Gregory, P.J., Tennant, D. and Belford, R.K. (1992). Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a Mediterranean-type environment. *Aust. J. Agric. Res.* 43, 555-573.
- Gupta, A.P. (2005). Micronutrient status and fertilizer use scenario in India. *J. Trace Elements in Medicine and Biology* 18, 325-331.
- Hartemink, A.E. (2004). Soil fertility decline on agricultural plantations in the tropics. IFA Regional Conference for Asia and the Pacific, 14-16 Dec. 2004, Auckland, New Zealand.
- Haslett, B.S., Reid, R.J. and Rengel, Z. (2001). Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Ann. Bot.* 87, 379-386.
- Hill, J., Robson, A.D. and Loneragan, J.F. (1979). The effects of copper supply on the senescence and the retranslocation of nutrients of the oldest leaf of wheat. *Ann. Bot.* 44, 279-287.
- Holmén, H. (2005). The state and agricultural intensification in sub-Saharan Africa. In: G. Djurfeldt, H. Holmén, M. Jirström & R. Larsson (eds), *The African Food Crisis*, CAB International, Wallingford, 87-112.
- Howden, M. and Jones, R. (2005). Costs and benefits of CO<sub>2</sub> increase and climate change on the Australian wheat industry. Australian Greenhouse Office. [www.greenhouse.gov.au](http://www.greenhouse.gov.au) (assessed 13 Feb. 2006).
- Huang, C.Y. and Graham, R.D. (2001). Improving nutritional quality and agronomic characteristics of crop plants through plant breeding. In: K. Singh, F. Mori, R.M. Welch (eds), *Perspectives on Micronutrient Nutrition of Crops*, Scientific Publishers, Jodhpur, India, Chapter 10 225-246.
- Huang, L., Ye, Z.Q., Bell, R.W. and Dell, B. (2005). Boron nutrition and chilling tolerance of warm climate crop species. *Ann. Bot.* 96, 755-767.
- Kataki, P.K., Srivastava, S.P., Saifuzzaman, M. and Upreti, H.K. (2001). Sterility in wheat and response of field crops to applied boron in the Indo-Gangetic Plains. *J. Crop Production* 4, 133-165.
- Kennedy, G., Nantel, G. and Shetty, P. (2002). The scourge of "hidden hunger" : global dimensions of micronutrient deficiencies. *Food, Nutrition and Agriculture* 32, 8-16.
- Kirk, G. (2004). *The Biogeochemistry of Submerged Soils*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- Kokic, P., Heaney, A., Pechey, L., Crimp, S. and Fisher, B.S. (2005). Climate change - predicting the impacts on agriculture : a case study. *Australian Commodities* 12, 161-170.
- Lal, R. (2002). Soil conservation and restoration to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. In : J.L. Rubio, R.P.C. Morgan, S. Asins & V. Andreu (eds.), *Man and Soil at the Third Millennium*. Geofoma Ediciones, Logroño, 37-51.

- Lin, E., Xiong, W., Ju, H., Xu, Y.L., Li, Y., Bin, L.P. and Xie, L.Y. (2005). Climate change impacts on crop yield and quality with CO<sub>2</sub> fertilization in China. *Phil. Trans. Roy. Soc. London series B, Biol. Sci.* 360, 2149–2154.
- Lobell, D.B., Ortiz - Monasterio, J.I., Asner, G.P., Matson, P.A., Naylor, R.L. and Falcon, W.P. (2005). Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research* 94, 250–256.
- Lu, S.H., Lin, X.J., Li, L., Zhang, F.S., Zeng, X.Z. and Tang, C.X. (2004). Effect of manganese spatial distribution in the soil profile on wheat growth in rice-wheat rotation. *Plant Soil* 261, 39–46.
- Lynch, J.P. and St. Clair, S.B. (2004). Mineral stress : the missing link in understanding how global climate change will affect plants in real world soil. *Fields Crop Research* 90, 101–115.
- Malik, R.K., Yadav, A., Gill, G.S., Sadana, P., Gupta, R.K. and Piggin, C. (2004). Evolution and acceleration of no-till farming in rice-wheat cropping system of the Indogangetic Plains. *Proceedings 4<sup>th</sup> Int. Crop Sci. Congress*, 26 Sept. - 10 Oct. 2004, Brisbane, Australia. [www.cropscience.org.au](http://www.cropscience.org.au) (accessed 13 Feb. 2006).
- Mythili, S., Natarajan, K. and Kalpana, R. (2003). Zinc nutrition in rice - a review. *Agricultural Reviews* 24, 136–141.
- Nachiangmai, D. (2004). The Mechanism Controlling Boron Efficiency in Wheat Genotypes. PhD Thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand.
- Nayyar, V.K., Arora, C.L. and Kataki, P.K. (2001). Management of soil micronutrient deficiencies in the rice-wheat cropping system. *J. Crop Production* 4, 87–131.
- Peng, S., Huang, J., Sheehy, J.E., Laza, R.C., Visperas, R.M., Zhong, X., Centeno, G.C. Khush, G.S. and Cassman, K.G. (2004). Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *PNAS* 101, 9971–9975.
- Rashid, A., Yasin, M., Ashraf, M. and Mann, R.A. (2004). Boron deficiency in calcareous soil reduces rice yield and impairs grain quality. *Int. Rice Res. Notes* 29, 58–60.
- Rengel Z, Batten D E and Crowley D E 1999 Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. *Field Crops Research* 60, 27–40.
- Rerkasem, B. and Jamjod, S. (2004). Boron efficiency in wheat : a review. *Field Crops Research* 89, 173–186.
- Rerkasem, B., Nirantrayagul, S. and Jamjod, S. (2004). Increasing boron efficiency in international bread wheat, durum wheat, triticale and barley germplasm will boost production on soils low in boron. *Field Crops Research* 86, 175–184.
- Sauerborn, J. (2002). Site productivity, the key to crop productivity. *J. Agron. Crop Sci.* 188, 363–367.

- Shackley, B.J. (2000). Crop management. In: W.K. Anderson & J. Garlinge (eds), The Wheat Book - Principles and Practice. Bulletin 4443, Agriculture Western Australia, Perth, 131-163.
- Sharma, B.D., Harsh, A., Raj, K. and Nayyar, V.K. (2004). Relationships between soil characteristics and total and DTPA-extractable micronutrients in Inceptisols of Punjab. *Comm. Soil Sci. Plant Analysis* 35, 799-818.
- Shorrocks, V.M. (1997). The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant Soil* 193, 121-148.
- Stewart, W.M., Dibb, D.W., Johnston, A.E. and Smyth, T.J. (2005). The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agron. J.* 97, 1-6.
- Sumner, M.E. and Noble, A.D. (2003). Soil acidification : the world story. In: Z. Rengel (ed.) *Handbook of Soil Acidity*, Marcel Dekker, New York 1-28.
- Teixeira, I.R., de Souza, C.M, Borém, A. and da Silva, G.F. (2003). Variation of pH values and contents of organic carbon, copper, manganese, zinc and iron in depth in an Ultisol (Argissolo Vermelho-Amarelo) as function of different tillage systems. *Bragantia*, 62, 119-126.
- Welch, R.M. and Graham, R.D. (1999). A new paradigm for world agriculture : meeting human needs. Productive, sustainable and nutritious. *Field Crops Res.* 60, 1-10.
- Welch, R.M. and Graham, R.D. (2004). Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *J. Exp. Bot.* 55, 353-364.
- White, J.G. and Zasoski, R.J. (1999). Mapping soil micronutrients. *Field Crops Research* 60, 11-26.
- White, P.J. and Broadley, M.R. (2005). Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science* 10, 586-593.
- Yamada, T. (2004). Micronutrient deficiencies, occurrence and detection: the successful Brazilian experience. IFA Int. Symposium on Micronutrients, 23-25 Feb. 2004, New Delhi. [www.fertilizer.org](http://www.fertilizer.org) (accessed 13 Feb. 2006).
- Zhao, Y., Wang, C., Wang, S. and Tibig, L.V. (2005). Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the humid and sub-humid tropic