

富含微量元素的谷粒对农作物和人类健康的益处



I. Cakmak
Sabanci University, Turkey

摘要:

缺乏微量元素是农作物和土壤常见的问题，它能够引起农作物产量的下降和谷物营养品质的降低。在发展中国家，谷物是卡路里摄取的最要来源，但是谷物中固有的微量元素的浓度是非常低的，特别是生长在缺乏微量元素的土壤中的那些谷物。除了固有的微量元素含量低以外，谷物本身还有许多可以在人类消化道中抑制微量元素吸收利用的物质，如植酸。因此长期食用以小麦为主要原料的食物将可能引起锌、铁和硒的缺乏，并可能导致健康问题，如生长发育或免疫系统受损等。据估计，世界上有一半的人口缺乏微量元素，特别是缺乏锌和铁这两种元素。在当今讨论的解决人类微量元素缺乏问题的几种策略中，作物育种策略是改善谷物中微量元素缺乏的一种现实的、经济有效的策略。然而，土壤中还存在一些不利的化学因素（如异常的PH值、有机物和湿度低等）将限制这些新研制的作物对微量元素的吸收。因此，施用含有微量元素的肥料被认为是解决目前正在进行的作物育种计划中存在的微量元素缺乏问题的最快速的办法和最重要的补充方式，这个育种计划的目的是研究开发高微量元素含量的新谷物基因。本文研究了锌元素对作物的影响，文中列举了大量例子说明了施用锌肥和富含锌的NPK复合肥对谷类作物产生的影响。这些肥料的使用，不仅使产量增加，而且还提高了谷物中锌的含量。文中列举了在芬兰使用硒的例子，富含硒元素的NPK复合肥不仅有效的提高了作物中硒的含量，而且还改善了人们对硒的摄取量，增加了芬兰人血浆中硒的含量。富含微量元素（特别是锌）的谷物除了能够有益于人体健康外，还能够给生长在不利环境中的作物带来一些农事方面的益处，如增加种子的活力和对病原体土壤的忍受程度。本文评估了微肥对增加谷物中微量元素的潜力，并描述了富含微量元素的谷物在作物生产过程中和人类营养方面所扮演的角色。重点讲述了锌的影响，也涉及到了硒的影响，这主要是因为其他对人类营养也非常重要的微量元素（如铁）不能够通过播撒和叶面喷施的方法施肥以达到提高谷物中铁含量的目的。

介绍

锌缺乏：人类健康的全球危险因素

增加作物中微量元素的含量是全球范围内的具有挑战性的问题，他有利于提高作物产量和改善人体健康。在微量元素中，锌元素的缺乏被视为影响作物生长和人类健康的最危急的微量元素缺乏因素(WHO, 2002; Alloway, 2004; Hotz and Brown, 2004)。当今，锌元素缺乏是影响全球人类健康

以及致死的重要的危险因素之一。据世界卫生组织报告，引起人类疾病的危险因素中，在全球范围内锌缺乏位居20个最重要的因素中的第11位，在发展中国家中锌缺乏位居10个最重要的因素中的第5位(WHO, 2002)。表1显示，缺铁在缺锌之后，位居第6位（表1）。

表1 低收入国家中引起疾病的十种主要原因(WHO, 2002)

危险因素	比例
	(%)
体重过轻	14.9
不安全的性行为	10.2
不安全的水源	5.5
室内烟尘	3.7
锌缺乏	3.2
铁缺乏	3.1
维生素A缺乏	3.0
血压	2.5
吸烟	2.0
胆固醇	1.9

通过全面的调查研究，Hotz and Brown (2004)报告中显示，锌缺乏影响着全球将近三分之一的人口，不同的国家影响范围从4-73%。锌缺乏是影响人类健康的主要原因之一，他可能损害人类的生长发育和免疫系统以及学习能力，进而增加受到感染、DNA损坏以及患上癌症的机会(Hotz and Brown, 2004; Ho, 2004; Cunningham-Rundles, 2005)。

硒缺乏是另一个人类健康的全球影响因素。据估计，全球至少有近10亿人受到由于硒摄入量不足而带来的健康问题(Lyons et al, 2003)。硒被认为是最重要的抗癌因素，可以预防心血管疾病的发生，改善人类免疫系统以及维持甲状腺水平促进新陈代谢等 (Combs and Gray, 1998; Kohrle, 2005; Rayman, 2005)。

谷类：贫乏的微量元素源

当今人类普遍缺乏锌元素的主要原因是因为长期大量的实用以谷类为基础的食物。在发展中国家，谷类（如：小麦、大米和玉米）是人类最重要的卡路里摄取的来源。在这些谷类作物中，小麦对满足每日卡路里的摄取扮演了重要的角色，是重要的矿物质和蛋白质的来源。以谷类为基础的食物也是人类摄取硒元素的重要来源。

正如报告所述，在一些国家谷类中硒的浓度很低，不能够满足人体每日对硒的需求(Adams et al., 2002; Lyons et al., 2003).中亚和西亚的许多国家，每日卡路里摄取量的45%左右都是由小麦提供的，在农村这个比重可能增加到75%以上（图1）。如前所述，小麦本身所含的微量元素浓度很低，特别是生长在缺乏微量元素的土壤中的小麦。在土耳其，生长在富含锌的土壤中的小麦的锌浓度为20-30 mg/kg,而生长在却锌土壤中的小麦的锌浓度为8-15 mg/kg (Cakmak et al., 1999; Erdal et al., 2002). 一些报告和调查研究表明，各个国家的小麦含锌浓度为20-35 mg/kg (Rengel et al., 1999; Cakmak et al., 2004). 正如生物强化挑战纲要“HarvestPlus” (www.harvestplus.org)所描述的那样，为了改善人类锌营养素的水平，小麦中锌的目标浓度应该达到50-60 mg/kg. HarvestPlus是由CGIAR中心领导的全球机构，主要目的是应用作物育种进程，改善主食作物中锌、铁和维生素A的浓度和生物利用率。

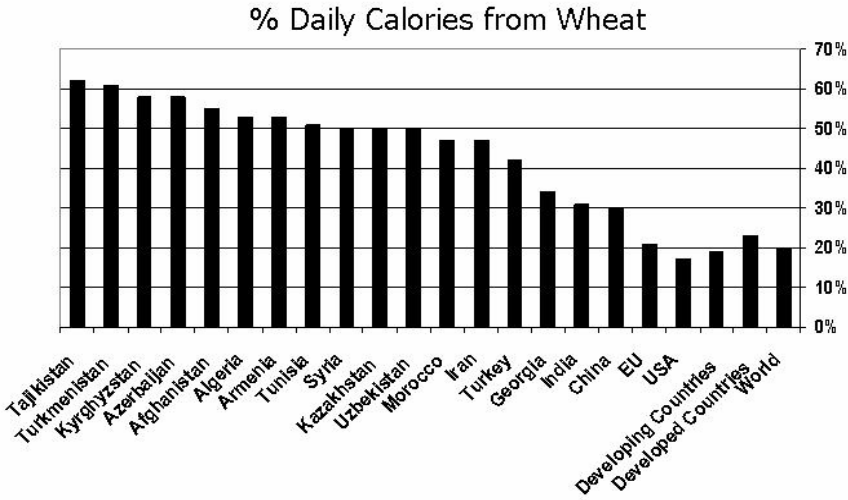


图1：不同国家和地区从小麦中每日摄取卡路里的数量
(来源: FAO Database 2003; H.J. Braun, CIMMYT-Turkey 编译).

除了本身锌含量低以外，谷类作物中还含有大量的阻止人类消化系统吸收利用锌元素的物质，如植酸和多酚等。在谷物中，植酸主要存在于含磷混合物中，遇到锌以后植酸降低了食物中锌的溶解度，并限制了肠道对锌元素的利用和保持能力。通过降低谷类食品中植酸的浓度可以改善人体对锌的吸收和利用(Lonnerdal, 2002; Egli et al., 2004)。由于低浓度的锌和大量的复合物降低了锌的利用率，因此长期大量的食用谷类食品使得人类出现了缺锌问题。因此，一些问题的解决变得迫在眉睫，如至少在缺锌的地区改善食品作物中的微营养状态，保证谷物中有大量的锌元素以及减少由于缺锌带来的健康问题等。

解决办法

在文献所研究的方法中，农业方法（如育种、施肥）似乎是最经济可行的解决微量元素缺乏问题的办法(Cakmak et al., 2002; Welch and Graham, 2004; White and Broadley, 2005)。食品强化和补充也是一些国家为减少由于缺乏微量元素而出现身体健康问题的解决办法。然而，这些办法太昂贵了，不容易被生活在农村的人所接受。例如，为了通过食品强化方式消除5000万人口的微量元素缺乏问题，每年需要投入2500万美元(Bouis et al., 2002; Bouis, 2003)。另外，植物育种方式也是一种经济且现实的解决方法。通过对主食作物实施基因突变的办法来提高作物中的微量元素的含量。这种基因突变方式主要是在作物育种过程中开发高微量元素含量的新的作物基因(Cakmak et al., 2002; Bouis, 2003; Welch and Graham, 2004)。然而，作物育种方式也有它的局限性：它是一个长期的过程，并且需要多种方式和大量的资源。另外，这种需要常时间努力的方法是否会奏效还存在一定的不确定性。这种方法至少包括(i)分辨最佳种源，(ii)长期的正交和反交试验，(iii)不同土壤和气候环境中目标示踪的稳定性，最后(iv)新开发的生物强化基因对普通作物和土壤的适应性这四个应用在目标范围的管理办法。如下所述，还有一些土壤和作物的因素能够阻止新开发的育种植物从土壤中吸收足够的锌。为了减少作物育种方式的限制条件，施用含有微量元素的肥料是一种有效解决这个问题的方法。施用微肥可以被看作是一种改善食品作物中缺乏微量元素问题的短期补充办法。

施用微肥也可以被看作是一种改善谷类作物中缺乏微量元素问题的经济有效办法，它有利于作物育种方式的成功实现。施肥方法可以更快速的将微量元素提供给长期食用谷类食品的人们。在安纳托利亚中部的耕地调查显示，给谷物施用锌肥不仅增加了产量而且还提高了作物中锌的含量。取决于不同的土壤情况和施肥方式，锌肥能够将谷物中锌的含量增加3倍左右(表2)。最有效的提升种子和种芽中锌含量的方式是土壤+叶面的施肥方法，这种方法可以将谷物中锌的浓度增加3.5倍，将种芽中的锌浓度增加7倍。同样，芬兰一项长期施肥项目显示，全国范围内施用富硒的氮磷钾复合肥不但成功的提高了食品作物中硒的含量、改善了日常硒的摄取量而且还将芬兰人民血浆中的硒的浓度提升到目标水平（图 2）。如图2 显示加到复合肥中的硒的含量为16 mg/kg。

表二：不同施用方法对谷物地上枝芽和谷物中锌含量的影响以及施用锌肥后种芽生物量和谷物产量的增长率。枝芽的取样点在茎干延伸的初始阶段。这些数据代表着安纳托利亚中部缺锌土壤中一种硬质小麦和三种育种小麦的平均数据。锌应用方式的详细办法参见Yilmaz et al., 1997

Zn application Methods	Zn concentration		Increases in yield by Zn application	
	Whole shoot	Grain	Whole biomass	Grain
	(mg kg ⁻¹)		(%)	
Control	10	10	-	-
Soil	19	18	109	265
Seed	12	10	79	204
Leaf	60	27	40	124
Soil+Leaf	69	35	92	250
Seed+Leaf	73	29	83	268

随后，为了避免摄取过量的不必要的硒，加入到肥料中硒的数量从16mg/kg减少到6mg/kg。这种做法使得食品作物中和每日摄取的硒的含量显著下降。因此，目前加入肥料中的硒的含量保持在10mg/kg(图2; Aspila, 2005)。芬兰近20年的施用硒肥策略是改善谷物中微量元素含量的一个很好的例子。一项相似的计划10年前在土耳其启动，他们施用富锌复合肥。在二十世纪九十年代，当施用锌肥可以促进作物的生长和显著增加谷物的产量这一不争的事实显现出来以后，土耳其开始大规模的生产和使用富锌复合肥。今天，当缺锌问题成为安纳托利亚小麦缺乏微量元素的至关重要问题被诊断出来后的10年，土耳其含锌复合肥的施用量已经从零提高到30万吨(Cakmak, 2004)。不幸的是，至今为止仍然没有研究显示施用含锌复合肥后对人类日常锌的摄取量的影响，特别是对生活在安纳托利亚中部的农村居民的影响。

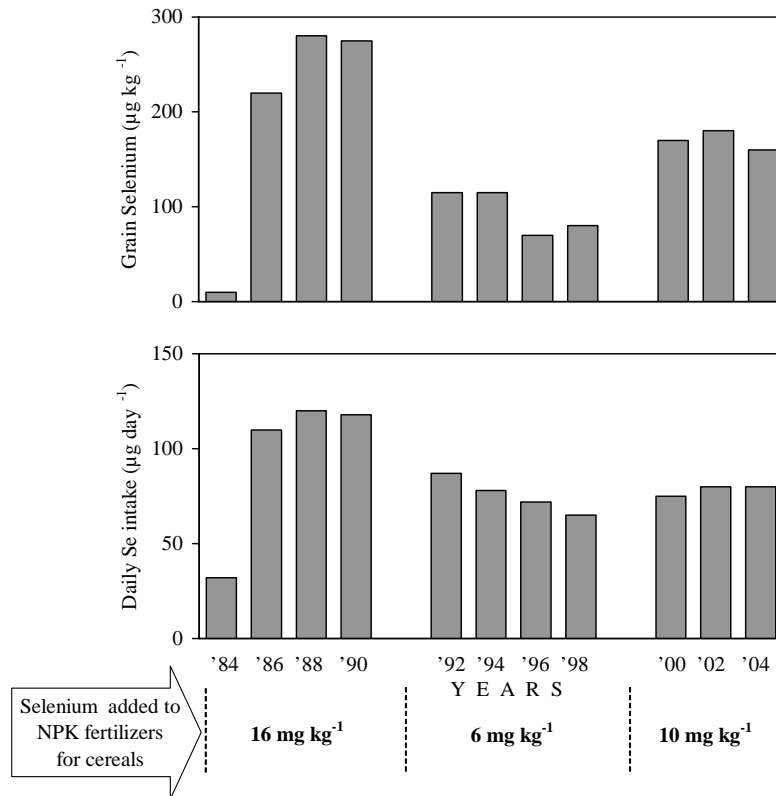


图2：1984-2004年期间芬兰施用富硒复合肥后谷物中和每日摄取的硒的浓度的变化(re-drawn from the presentation of Dr. Combs at “Farming for Health”, Oslo, Oct.-2005; see also Ekholm et al., 2005).

大量文献调查研究了锌肥在农业中的影响。然而锌的作用不仅仅是促进了作物的生长和增加作物的产量，最重要的是增加了食物作物中可食用部分的锌元素的含量。因此，需要对锌肥在增加谷物锌浓度中所扮演的角色以及如何改善人类的营养健康方面做进一步详细的研究。

育种方法潜在的局限性

正如下面所讨论的那样，一些土壤因素潜在的限制了新开发的（生物强化）育种作物从土壤中吸收足够的锌元素的能力。为了使新研发的谷物中积累大量的锌，必须通过施用锌肥或富锌复合肥来保证土壤中有足够多的锌供作物吸收。

经过锌强化后的谷物和其他作物能否成为育种计划的一个成功结果主要取决于土壤中作物可得到的锌池的尺寸。为了增加谷物中锌的积累量（如从15-25 mg Zn kg⁻¹ 到 50-60 mg Zn kg⁻¹），土壤中必须有足够量锌供作物吸收。然而，在一些谷物种植区的土壤中含有化学和物理因素，他们削弱了作物和根系对锌的吸收能力（图3）。

在大多数情况下，土壤中缺少作物可以吸收锌的原因是由于土壤中的不利的化学和物理的缘故，如PH值高、CaCO₃含量高、有机物含量低和土壤湿度低等。这些土壤因素促进了土壤对锌元素的吸收和沉淀，从而削减了锌元素输送到作物根系的能力。

从这样的不利土壤中吸收足够的锌并把他们积累在谷粒中的遗传能力不能够被视为育种方法的完全延伸。另外，从吸收土壤中的锌的遗传和生理机理的表述过程（如根系释放有机酸离子、其他的有机化合物和生物合成物；传输蛋白质和增加根系表面积）中我们可以看到这个过程需要消耗大量的能量，因此可能造成已被吸收的碳流向锌摄取的地方。这样有可能降低新研发的基因品种的产量的下降。

由于新的高产品种的出现带来了谷物产量的持续增加，消耗了土壤中的锌源，因而更加加重了土壤中缺锌的程度。因此，在优化生物强化的谷物过程中添加锌到土壤或叶面喷施锌元素是至关重要的，并且可以确保增加谷物中锌含量的育种方式成功实现。

锌：控制磷的吸收 降低谷物中的植酸

锌可以控制作物根系对磷的吸收。一些报告显示，低锌环境有助于各种作物根茎对磷的吸收并可以加速磷从根茎到枝叶的输送过程。一般来说，缺锌经常伴随着枝芽中高磷的积累，有时甚至可能导致枝叶中的磷中毒状况的发生。缺锌对作物吸收磷的影响是显而易见的，但是当作物缺铁、铜或锰时，这种相互影响不会出现(Loneragan et al., 1982; Cakmak and Marschner, 1986)。大量缺锌作物中磷的积累构成了作物根系环境中相互削弱的反馈机制，锌可以控制根系对磷的吸收和磷从根茎到枝芽的传输过程(Marschner and Cakmak, 1986)。最近一些数据表明，缺锌可以增强根茎细胞中磷传输基因的显现(Huang et al., 2000)。正如所预料的那样，由于磷在作物的韧皮部位具有高度的流动性，因此增加磷在根系的吸收和在枝芽处的积累将会相应的增加谷粒中的磷。当被传送到谷粒中以后，65-85%无机磷被合成为植酸，这些植酸可以与锌形成复合物，因此阻碍了人类消化系统对锌的吸收(Guttieri et al., 2004)。因此，植酸锌的摩尔比率将被作为食物中锌的利用率的评判标准(Morris and Ellis, 1989)。如果这个值低于20，那么人体对锌的利用将保持在一个合适的水平。正如安纳托利亚中部的试验结果所示，通过添加足够的锌到缺锌土壤中来降低作物对磷的吸收可以降低磷的浓度，进而降低植酸锌的摩尔比率(Erdal et al., 2002)。这些试验数据证明，施用锌肥有利于增加谷物中锌的生物利用率。

高浓度锌元素的种子有利于作物生长

当种子中锌的浓度低时，作物在早期生长阶段的抗风险能力比较弱。尽管他们的外观很正常，但是含锌浓度低的种子有时不能够存活。这意味着如果种子中锌的含量比较低的话，他可能存在一些潜在的细胞缺陷和损伤。因此在种子发芽期和秧苗早期生长期保证土壤中有足够量的锌是非常重要的。

保持足够量的锌在土壤中可以确保作物根系良好生长并且有助于防止其受到土壤中病原体的侵袭。图5 显示了不同浓度的锌溶液中对改善大麦种子发芽和秧苗生长过程的影响，在这个试验中，种子都被装填到5 mM的锌溶液中(Ajourri et al., 2004)。当装填溶液锌浓度升高时，锌对作物生长的

影响反而减弱。安纳托利亚中部的野外试验显示，在缺锌土壤环境中，由含锌浓度低的种子长成的作物秧苗的活力和野外移植能力比较差。在多雨的环境中，由含 $1.5\mu\text{g}$ 的锌种子长成的秧苗比含 $0.4\mu\text{g}$ 的锌的种子长成的秧苗的移植能力强，而且前者的产量是后者的2倍(Yilmaz et al., 1998)。

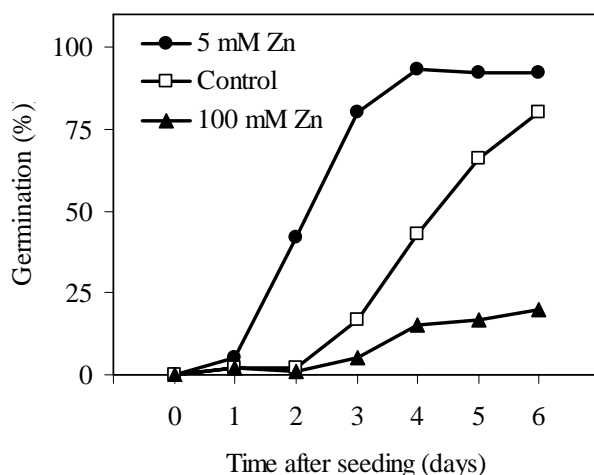


图5：皮氏培养器中装填溶液的锌浓度对大麦种子生长的影响 (re-drawn from Ajouri et al., 2004)

有趣的是，尽管可以促进枝芽生长和提高产量，种子中锌的增加并没有影响谷物中锌的浓度。如表2所示，包锌种子显著的增加了谷物的产量。使用包锌种子与土壤施用锌肥对产量的增长情况相差无几，但这两种方法对产量的增加要好于页面喷施锌肥的方法（表2）。然而，由包锌种子长成的作物的枝芽和谷粒中锌的浓度要远远低于由土壤施用和页面喷施锌肥的方法生长的谷物中锌的浓度，前者与没有采用额外供锌的方法生长的作物中的锌浓度相差不多。这些结果可以说明，高浓度的包锌种子在种子发芽和秧苗早期生长阶段起着非常重要的作用。最近，我们发现在种子发芽阶段，新长出的幼根和胚芽鞘中锌元素的浓度很高（ 200 mg kg^{-1} ）。这个现象可以说明，在种子早期发育阶段，锌是非常重要的(L. Ozturk et al., 未出版)。在种子发芽阶段保持锌的浓度处于较高的水平，可以防止种子和秧苗免受土壤中病原体的侵袭。

作物组织感染病原体的最明显的表现就是叶面流出分泌物和根系的非原质体从细胞中释放。流出物如碳水化合物和氨基酸是阻止病原体快速的入侵到根系和叶面组织的重要的化合物。

流出物的释放比例受到细胞膜的结构完整性影响。细胞膜完整结构的任何变化都会增加流出物的释放比例，给病原体提供了一个良好的输送媒介(Marschner, 1995)。锌对保护和维持细胞膜的结构完整性起到了重要的作用(Welch et al., 1982; Cakmak, 2000)。在缺锌条件下，细胞膜变成多孔状并且释放出大量的可以防止病原体侵袭的化合物(Cakmak and Marschner, 1988)。有证据显示，

锌可以抑制根腐病病原体和根线虫(Brennan, 1992; Streeter et al., 2001; Siddique et al., 2002)并且可以通过减少有机物的释放而消灭所有的传染源。

增加种子中锌的含量对播种比率也有非常重要的影响。在安纳托利亚中部小麦种植区的播种比率是非常高的(例如: 200-300 千克/ 公顷), 而当地的缺锌问题是非常严重的。由于秧苗的弱移植性和高“冬季死亡”率, 当地的播种比率非常高。预计, 随着种子中锌浓度的增加, 播种率将显著下降, 至少在安纳托利亚中部每年可以节省50万吨的种子, 因此每年可为该地区带来1亿美元的收益(Braun, 1999)。

类似锌, 富硒的种子也可以提高不利环境中秧苗的移植能力。增加种子中硒的浓度可以通过诱导作物中抗氧化蛋白质的生成来阻止秧苗受到不适宜的温度的侵害(Chen and Sung, 2001)。在稻谷中, 采用叶面喷施的方法每公顷施用0-60克的硒, 使种子中硒的浓度从0.03 mg kg⁻¹ 增加到 1.28 mg kg⁻¹, 并且增强了种子的自由基解毒能力和降低脂质的过氧化反应能力(图6)。结果表明, 富硒的种子可以更好的避免受到有毒自由基的攻击。硒被认为是可以使谷胱甘肽过氧化酶更好的发挥生物作用的必要的物质, 这种酶可以将哺乳动物细胞中的许多有毒过氧化物分解(Combs and Gray, 1998)。

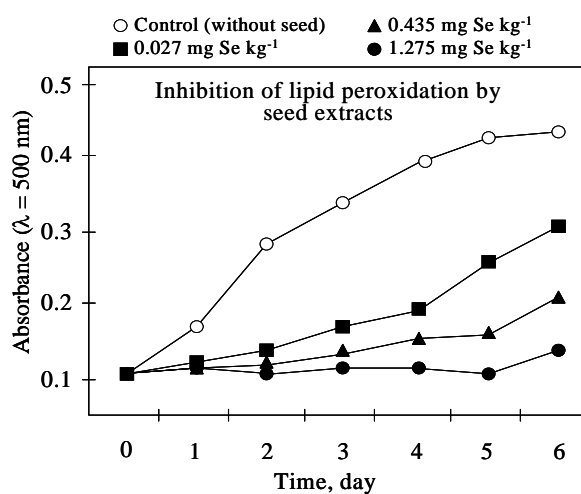


图 6: 含有不同浓度硒的稻米种子中水提物的抗氧化活动。基于抑制亚油酸氧化的化验(re-drawn from Xu and Hu, 2004)。

环境因素

在施用锌肥或者富锌复合肥过程中有可能引起土壤锌中毒的这个环境问题必须被考虑。但是正如我们所了解的那样, 尽管施用锌肥已经很多年了, 但是锌中毒问题并没有出现在实际的农业活动中。当将锌肥施用到缺锌土壤中之后, 锌很快就被土壤固定。对安纳托利亚中部的缺锌土壤进行

分析之后，可以发现被加到土壤中的锌（3.9 mg/kg的土壤相当于每公顷中含有1吨的锌）几乎完全被吸收了(Erenoglu, 1995)。利用氯化钙萃取的方法研究锌吸收过程的实验表明，预先加入520 μ g的土壤中每千克氯化钙只能吸收5 μ g的锌，这意味着土壤对锌的吸收能力很强，而作物根系可得到的锌确很少。很显然，只有经过长时间大量的使用锌以后，锌中毒问题才会出现。不过，在施用锌肥的种植区内，为了降低锌中毒发生的可能性需要对作物和土壤中的锌浓度进行定期的监测。锌肥对缺锌土壤的改善程度通常在使用后的2-3年间达到最佳效果(Martens and Westermann, 1991)，因此锌肥不需要被连年施用。这样在施用当年以及随后的2-3年间追踪谷物中的锌浓度就变得非常重要了。

结论

微量元素缺乏问题已经成为全球瞩目的问题，他影响着世界上半的人口，特别是发展中国家那些依赖像小麦、稻谷和玉米这些食品作物的人们。现在，全球将近50%的谷物种植地区的土壤中都缺乏微量元素，特别是缺锌。培育新型的高微量元素含量的谷类作物被认为是解决这个问题的行之有效的办法。但是这种使用养分干涉的方式去解决缺乏微量元素的问题的方法是一个长期的过程，并且需要尝试多种培育方式和大量的资源。而且这种方式是否可以奏效还是一个不确定的事情。另外，还有一些土壤和作物的因素可以潜在的影响新开发（生物强化）育种作物从土壤中吸收足够量的微量元素。因此除了培育含有高微量元素的粮谷外，一些短期的农事活动被人们采用，如给大宗作物施用微肥等，正如文中讲述的那样，芬兰施用硒肥而土耳其施用锌肥。富锌的谷粒对作物的生长也是非常重要的，他可以促进种子发芽、秧苗生长、提高秧苗活力。越来越多的证据表明，含高浓度锌的种子可以改善作物的农事行为。富锌肥料在目标国家全国范围内得到广泛的应用，并且很快的取得了成效，促进了作物对锌的吸收，使得食品作物中锌的含量得到了大幅度的提升。这种方法对优化锌强化谷物和确保增加谷物中微量元素含量的育种计划的成功都是至关重要的。

References

- Adams, M.L., Lombi, E., Zhao, F.J. and McGrath, S.P. 2002: Evidence of low selenium concentrations in UK bread-making wheat grain. *J. Sci. Food. Agric.* 82: 1160-1165.
- Ajouri, A., Asgedom., H. and Becker, M. 2004: Seed priming enhances germination and seedling growth of barley under conditions of P and Zn deficiency. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 630-636.

- Alloway, B.J. 2004: Zinc in soils and Crop Nutrition. International Zinc Association Communications. IZA Publications, Brussel.
- Aspila, P. 2005: History of selenium supplemented fertilization in Finland. In: Proceedings Twenty Years of Selenium Fertilization. Ed.: M. Eurola. Agrifood Research Reports 69.
- Bouis H.E. 2003: Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost? Proceedings of the Nutrition Society 62: 403-411.
- Bouis, E.H., Graham R.D. and Welch, R.M. 2002: The Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) Micronutrients Project: Justifications and objectives. Food Nutr. Bull. 21: 374-381.
- Braun H.J. 1999: Prospects of Turkey's wheat industry, breeding and biotechnology. In: Hububat Sempozyum. Ed.: H. Ekiz, International Winter Cereal Research Center-Konya. ISBN: 975-487-071-3.
- Brennan, R.F. 1992: The effect of zinc fertilizer on take-all and the grain yield of wheat grown on zinc-deficient soils of the Esperance region, Western Australia. Fert. Res. 31: 215-219.
- Cakmak, I. 2000: Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. New Phytol. 146: 185-205.
- Cakmak, I. 2004: Identification and correction of widespread zinc deficiency in Turkey, A success story. The Proceedings No. 552, International Fertiliser Society, York. UK.
- Cakmak, I. and Marschner, H. 1986: Mechanism of phosphorus induced zinc deficiency in cotton. I. Zinc deficiency-enhanced uptake rate of phosphorus. Physiol. Plant. 68: 483-490
- Cakmak, I. and Marschner, H. 1988: Increase in membrane permeability and exudation in roots of zinc deficient plants. J. Plant Physiol. 132: 356-361.
- Cakmak, I.; Torun, B.; Erenoglu, B.; Oztürk, L.; Marschner, H.; Kalayci, M.; Ekiz H.; Yılmaz, A. 1998: Morphological and physiological differences in cereals in response to zinc deficiency. Euphytica, 100: 349-357.
- Cakmak, I. Kalayci, M. Ekiz, H. Braun, H.J. and Yılmaz, A. 1999: Zinc deficiency as an actual problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO-Science for Stability Project. Field Crops Res. 60: 175-188.
- Cakmak, I., Graham, R. and Welch R.M. 2002: Agricultural and Molecular Genetic Approaches To Improving Nutrition and Preventing Micronutrient Malnutrition Globally. In: Encyclopedia of Life Support Systems. Section Eds: I. Cakmak and R. M. Welch. UNESCO-EOLSS Publishers Co Ltd. UK, ISBN: 0 9542989-0-X, 3490 pp.

- Cakmak, I., Torun, A., Millet, E., Feldman, M., Fahima, T., Korol, A., Nevo, E., Braun, H.J. and Ozkan, H. 2004: *Triticum dicoccoides*: An Important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat. *Plant Nutr. Soil Sci.* 50: 1047-1054.
- Catlett, K.M., Heil, D.M., Lindsay, W.L. and Ebinger M.H. 2002: Soil chemical properties controlling zinc (2+) activity in 18 Colorado soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1182-1189.
- Chen, C.C. and Sung, J.M. 2001: Priming bitter gourd seeds with selenium solution enhances germinability and antioxidative responses under sub-optimal temperature *Physiol. Plant.* 111: 9-16.
- Combs, Jr G.F. and Gray, W.P. 1998: Chemopreventive agents: selenium. *Pharmacol. Ther.* 79: 179-192.
- Cunningham-Rundles, S., McNeeley, D.F, Moon, A. 2005: Mechanisms of nutrient modulation of the immune response. *J. Allergy Clin. Immun.* 115: 1119-1128.
- Egli, I., Davidsson, L., Zeder, C., Walczyk, T., Hurrell, R. 2004. Dephytinization of a complementary food based on wheat and soy increases zinc, but not copper, apparent absorption in adults. *J. Nutr.* 134: 1077-1080.
- Erdal, I., Yilmaz, A., Taban, S., Eker, S. and Cakmak, I. 2002: Phytic acid and phosphorus concentrations in seeds of wheat cultivars grown with and without zinc fertilization. *J. Plant Nutr.* 25: 113-127.
- Erenoglu, B. 1995: Zinc Adsorption and Desorption Characteristics in Selected Soils from Central Anatolia, GAP and Cukurova Regions (in Turkish). MSc Thesis, Cukurova University, Adana.
- Ekholm, P., Eurola, M. and Venalainen, E-R. 2005: Selenium content of foods and diets in Finland. In: *Proceedings Twenty Years of Selenium Fertilization*. Ed.: M. Eurola. *Agrifood Research Reports* 69.
- Graham, R.D.; Ascher, J.S.; Hynes, S.C. 1992: Selection of zinc-efficient cereal genotypes for soils of low zinc status. *Plant Soil*, 146: 241-250.
- Guttieri, M., Bowen, D., Dorsch, J.A., Raboy, V. and Souza, E. 2004. Identification and characterization of a low phytic acid wheat. *Crop Sci.* 44: 418-424.
- Ho, E. 2004: Zinc deficiency, DNA damage and cancer risk. *J. Nutr. Biochem.* 15: 572-578.
- Hotz, C. and Brown, K.H. 2004: Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food Nutr Bull* 25: 94-204.
- Huang, C., Barker, S.J., Langridge, P., Smith, F.W. and Graham, R.D. 2000: Zinc deficiency up-regulates expression of high-affinity phosphate transporter genes in both phosphate-sufficient and -deficient barley roots. *Plant Physiol.* 124: 415-422.
- Kohrle, J. 2005: Selenium and the control of thyroid hormone metabolism. *Thyroid* 15: 841-853.
- Loneragan, J.F., Grunes, D.L. Welch, R.M., Aduayi, E.A., Tengah, A., Lazar, V.A., Cary, E.E. 1982: Phosphorus accumulation and toxicity in leaves in relation to zinc supply. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 46: 345-351.
- Lonnerdal, B. 2002: Phytic acid-trace element (Zn, Cu, Mn) interactions. *Inter. J. Food Sci. Techn.* 37: 749-758.

- Lyons, G., Stangoulis, J. and Graham, R. 2003: High-selenium wheat: biofortification for better health. *Nutr. Res. Rev.* 16: 45-60.
- Marschner, H. and Cakmak, I. 1986: Mechanism of phosphorus induced zinc deficiency in cotton II. Evidence for impaired shoot control of phosphorus uptake and translocation under zinc deficiency. *Physiol. Plant.* 68: 491-496.
- Marschner, H. 1993: Zinc uptake from soils, In *Zinc in Soils and Plants*, Robson, A.D. Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 59-77.
- Marschner, H. 1995: *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd edition. London, UK: Academic Press.
- Martens, D.C. and Westermann, D.T. 1991: Fertilizer applications for correcting micronutrients in Agriculture. In *Micronutrients in Agriculture* (Mordvedt, J.J.; Cox, F.R.; Shuman, L.M.; Welch, R.M. Eds., 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, WI., 89-112.
- Morris, E.R., Ellis, R. 1989: Usefulness of the dietary phytic acid/zinc molar ratio as an index of zinc bioavailability to rats and humans. *Biol Trace Elem. Res.* 19:107-17.
- Obrador, A., Novillo, J. and Alvarez, J. M. 2003: Mobility and availability to plants of two zinc sources applied to a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 564-572.
- Rayman, M.P. 2005: Selenium in cancer prevention: a review of the evidence and mechanism of action. *Proc. Nutr. Soc.* 64 (4): 527-542.
- Rengel, Z., Batten, G.D., Crowley, D.E. 1999: Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. *Field Crops Res.* 60: 27-40.
- Rengel, Z. and Marschner, P. 2005: Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences *New Phytol.* 168:305-312.
- Sarkar, A.N. and Wyn Jones, R.G. 1982: Effect of rhizosphere pH on the availability and uptake of Fe, Mn and Zn. *Plant Soil* 66: 361–372.
- Siddiqui, I.A., Shaukat, S.S. and Hamid, M. 2002: Role of zinc in rhizobacteria-mediated suppression of root-infecting fungi and root-knot nematode. *J. Phytopathol.* 150: 569-575.
- Streeter, T.C., Rengel, Z., Neate, S.M., Graham, R.D. 2001: Zinc fertilisation increases tolerance to *Rhizoctonia solani* (AG 8) in *Medicago truncatula*. *Plant Soil* 228: 233-242.
- Takkar, P.N.; Chibba, I.M.; Mehta, S.K. 1989: *Twenty Years of Coordinated Research of Micronutrients in Soil and Plants (1967-1987)*. Indian Institute of Soil Science, Bhopal, IISS, Bull.
- Welch, R.M., Webb, M.J., Loneragan, J.F. 1982: Zinc in membrane function and its role in phosphorus toxicity. In: Scaife A, ed. *Proceedings of the Ninth Plant Nutrition Colloquium*. Warwick, UK. Wallingford, UK: CAB International, 710-715.
- 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 P.J. and Broadley MR. 2005: Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends Plant Sci.* 12: 586-593.
- White, J.G. and Zasoski, R.H. 1999: Mapping soil micronutrients. *Field Crops Res.* 60: 11-26.
- WHO. 2002: The World Health Report 2002: Reducing Risks, Promoting Healthy Life. World Health Organization 2002. ISBN 92 4 156207 2
- Xu, J. and Hu, Q. 2004: Effect of foliar application of selenium on the antioxidant activity of aqueous and ethanolic extracts of selenium-enriched rice. *J. Agric. Food Chem.* 52: 1759-1763.
- Yilmaz, A. Ekiz, H. Torun, B. Gültekin, I. Karanlik, S. Bagci, S.A. and Cakmak, I. 1997: Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat grown on zinc-deficient calcareous soils in Central Anatolia. *J. Plant Nutr.* 20: 461-471.
- Yilmaz, A. Ekiz, H. Gültekin, I. Torun, B. Barut, H. Karanlik, S. and Cakmak, I. 1998: Effect of seed zinc content on grain yield and zinc concentration of wheat grown in zinc-deficient calcareous soils. *J. Plant Nutr.* 21: 2257-2264.