

3种微量元素对小麦生长发育及产量和品质的影响研究进展*

鲁璐 吴瑜**

(中国科学院成都生物研究所 成都 610041)

摘要 综述了锌、铁、硒3种微量元素对小麦生长发育、产量及品质影响的研究进展,对造成小麦中微量元素含量差异的原因进行了深入分析.土壤中微量元素的植物有效性、元素间的相互影响、小麦品种的基因型差异、栽培管理措施等因素都会导致小麦籽粒中微量元素含量变化.研究基因型差异并筛选富含微量元素的功能性营养小麦品种成为今后小麦遗传育种的一项重要工作.图1 参58

关键词 小麦;微量元素;锌;铁;硒;元素有效性;基因型

CLC S512.103.3

Advance in Study of Effects of Three Trace Elements on Wheat*

LU Lu & WU Yu**

(Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract Trace elements have an important function to both human health and plant life activity. The recent studies on the biological functions of zinc, iron and selenium, and their important roles in plant growth and development are reviewed in this paper. Certain concentration of zinc, iron or selenium can increase yield, promote growth and improve quality of wheat. Due to the influences of environment and plant itself, zinc, iron and selenium contents vary in different wheat varieties. Detail analyses of the variation indicate that the effectiveness of trace elements in plants, interaction among elements, genotypes of wheat and cultural management might make the elements varied in plants. Investigation of genotypic difference and selection of microelement-rich plants are important for wheat breeding in the near future. Fig 1, Ref 58

Keywords wheat; trace element; zinc; iron; selenium; element effectiveness; genotype

CLC S512.103.3

随着经济的日益发展和生活水平的不断提高,人们的膳食营养需求也较从前大为提升.过去,营养学研究的焦点放在能量和蛋白,却忽略了矿物质的营养需求.随着对微量矿物质认识的深入,微量矿物质对于人类膳食健康的重要性日益凸显.美国全国科学研究委员会和中国营养学会均推荐了人体必需微量元素的每日膳食供给量,如铁元素成人一般需求量为每日10~15 mg,锌的日推荐量为15 mg,硒的日推荐量为50 µg.上世纪80年代开启了有机微量元素时代,但是目前在有机微量元素领域里所作的研究及取得的成果并不是很多.仅仅是添加较高量的微量元素,并不能保证膳食营养获得改善,怎样提高人类食物中能被人体合理有效利用的有机微量元素含量是现今畜牧和作物育种研究中的一个热点和难题.近年来,有关营养领域中微量元素的研究和应用在食用动物上取得了较大进展,但对粮食作物的研究还相对落后.小麦是重要的粮食作物,世界上有三分之一以上的人口将其作为主要食粮,研究小麦中微量元素的含量、功能、存在形式、作用机理等具有重要意义.如何借助农艺措施改进或进行作物遗传改良,生产出营养富集、益于健康的粮食来满足

足人类营养与健康的需要,已成为当今国际作物科学研究的一个新领域^[1].在参考大量国内外文献的基础上,本文综述了3种微量元素对小麦影响的研究进展,并分析了造成小麦微量元素含量差异的原因.

1 微量元素在植物中的生物学功能

微量元素包括铁、锌、铜、锰、铬、硒、钼、钴、氟等,相对于大量元素而言在生物体内含量极少,但与动植物的生存和健康息息相关,具有至关重要的作用.通过与蛋白质和其它有机基团结合,形成了酶、激素、维生素等生物大分子,发挥着重要的生理生化功能.微量元素构成了体内重要的载体与电子传递系统,参与激素与维生素的合成,还对遗传信息的携带者核酸的物理、化学性质均可产生影响.多种RNA聚合酶中含有锌,而核酸还原酶的作用则依赖于铁^[2].

铁、锌、硒3种微量元素在植物体内具有重要的生物学功能,含量过多或过少,都将导致植物产生生理疾病^[3~5].锌是植物体内多种酶的组成成分和活化剂.小麦缺锌表现为麦苗叶片失绿,心叶白化,中后期植株矮小,叶小而脆,根系变黑,空秕粒多,千粒重低^[6].铁是人们发现的第一个植物必需微量元素^[7],铁在植物呼吸、光合和氮代谢等的氧化还原过程中都起着重要作用^[8],植株缺铁叶子会变黄,得黄叶病^[9].硒对高等植物具有抗氧化作用,可提高植株的抗逆性和抗衰老能力,促进植株的正常生长,推测硒可能是高等植物的必需微量元素^[10].此外,微量元素还有重金属拮抗和环境胁迫

收稿日期: 2009-09-17 接受日期: 2010-04-20

*中国科学院知识创新项目(No. KSCX2-YW-N-43-02)和四川省农作物育种攻关项目(No. 2006YZGG-3)资助 Supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KSCX2-YW-N-43-02) and the Crop Breeding Research Project of Sichuan, China (No.2006YZGG-3)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wuyu@cib.ac.cn)

抵制,影响植物气味等功能^[11]。

在植物中微量元素只有在其最适浓度范围内才能发挥其生物学功能,例如硒一般低于 0.1×10^{-6} 才促进植物的生长发育,超过一定的浓度范围,会抑制植物的生长发育,对植物产生毒害,浓度越高抑制越强,产生的毒害作用越大。一般非硒积累植物含硒量 $>50 \text{ mg/kg}$ 时,就会使植物中毒,表现出生长缓慢、植株矮小、叶子失绿等中毒症状^[12]。

2 3种微量元素对小麦生长发育、产量及品质的影响

2.1 3种微量元素对小麦产量的影响

对于缺锌条件下锌对小麦产量的影响,研究结果表明,缺锌是制约小麦高产的主要因素之一。缺锌条件下小麦当季补锌可增产3.57%~12.32%。锌对小麦的增产作用主要归因于:锌提高了小麦根系和茎蘖的发育质量,延长了叶片的有效功能期,促进了干物质积累,增加了成穗数和粒重^[6]。

用锌肥拌种效果优于用铁肥拌种,铁肥与锌肥配合施用效果更好,用锌铁肥拌种,小麦单株穗数、穗粒数、千粒重及产量均较对照有所增加^[13]。

在农业生产中,常常观察到施少量硒对农作物的产量有促进作用的例子。如程伯容等在东北病区进行了玉米、小麦、大豆等作物的喷硒试验,以亚硒酸钠喷洒叶面,均得到增产效果^[14]。

由以上研究结果可见,目前关于微量元素对小麦产量影响的研究多集中于利用肥料拌种、农药喷洒等外施方法,而不同小麦品种对微量元素吸收能力的差异却尚未见报道。

2.2 3种微量元素对小麦生长发育的影响

适量的锌可以加速小麦植株的生长、分蘖和春化作用^[15],但如果超过一定浓度,如 Zn^{2+} 浓度高于 10^{-4} mol/L 时,种子萌发、种子中 α -淀粉酶活性和幼苗生长均显著受抑;随着 Zn^{2+} 浓度的增加和培养时间的延长,细胞膜透性增加,根系活力下降和硝酸还原酶活性降低,根冠比下降^[16]。

小麦不同生长发育时期所含微量元素会有所变化。霍晓婷等测定了田间高产试验条件下冬小麦不同生育时期植株地上部各器官的铁含量,结果表明,麦株含铁量随生育时期呈单峰曲线变化,其峰顶位于返青期;铁吸收量随生育时期呈双峰曲线变化,其峰顶分别位于拔节期和乳熟期,而峰谷出现在开花期。各生育阶段麦株体内铁始终以叶片分配比例最高^[17],这一趋势与锌的分配大体一致^[18]。

依据植物对硒吸收量的水平差异可以将植物划分为聚硒植物、非聚硒植物(大多为农作物和草本植物)和富硫并高硒植物。小麦属于非聚硒植物^[19]。有研究证明,喷洒硒肥能提高小麦叶片中SOD的活性,起到促进生长的作用。在小麦灌浆初、中期喷施硒肥后,叶片中丙二醛(MDA)含量都有不同程度的降低。MDA是细胞膜脂过氧化产物,降低叶片中MDA含量后,能延缓作物的衰老^[20]。硒在一定浓度范围内对小麦的生长发育及籽粒性状具有较为明显的促进作用^[21]。硒对植物生长的作用符合一般必需营养元素对生物体反应的Bertrand生物剂量规律,因而也有可能是植物生长所必需的营养元素^[11]。

前人研究证明,锌、铁、硒均在一定浓度范围内能够促

进小麦的生长发育。因此,研究微量元素在植物中有效作用的浓度范围,对促进作物生长、增加产量以及提高人类膳食营养都具有指导意义。

2.3 3种微量元素对小麦品质的影响

由于喷施锌提高了小麦旗叶的硝酸还原酶(NR)活性、谷丙转氨酶(GPT)活性和叶绿素(Chl)含量,从而可以提高小麦籽粒的沉淀值、湿面筋、出粉率、吸水量和稳定时间,但对蛋白质、形成时间没有影响^[22]。还有研究成果表明,在缺锌土壤上施锌肥使小麦籽粒的含氮量和17种氨基酸的含量都有所提高,从而提高了小麦的品质^[23]。此外,有报道指出,高浓度铁可降低小麦叶锈病、黑粉病、全蚀病的危害程度^[24]。

加硒化肥使得麦粒的氨基酸结构发生了相应的变化,苯丙氨酸减少了12.7%;作为小麦的第一限制性氨基酸赖氨酸增加了15.6%,从而弥补了小麦赖氨酸含量的不足,提高了小麦的营养价值^[25]。

以上研究结果说明,适当外施锌、铁、硒肥可以提高小麦营养价值并减少病害,是提高小麦品质的一种重要措施。但目前国内外对小麦营养品质的研究多数集中在蛋白质、面筋、沉降值、稳定时间等方面,在微量元素含量方面研究很少,富含微量元素的功能性小麦选育尚未见报道。本课题组连续两年对不同地点种植的几十个不同小麦品种(系)进行了微量元素锌、铁、硒的含量测定和统计分析,已筛选出了对微量元素吸收能力强的品种,为培育富含微量元素的功能性小麦品种积累了材料;将其作为亲本进行的后续杂交试验和分子遗传机理研究正在深入进行中。

3 小麦微量元素含量差异的原因分析

小麦中不同种类的微量元素含量差异很大,同种微量元素在不同品种、不同植株中含量也不同,即使在同一植株中也会因环境气候、栽培条件等因素的不同而有所差异。

3.1 土壤中微量元素的植物有效性

微量元素在生物体内存在多种形式,以什么形式存在将影响微量元素在生物体内的分布和吸收。对动物体的研究发现,锌通过形成RNA、DNA聚合酶可直接影响核酸及蛋白质的合成,在元素锌的多种存在形式中,氨基酸锌(Zn-Met)的效价比乙酸锌和葡萄糖锌的要高,而乙酸锌和葡萄糖锌的利用率和沉积率都高于硫酸锌。但对于锌在植物中的存在形式和形态分级的研究和报道却很少。

铁是许多重要氧化还原酶的重要组成部分^[8]。植物体内总铁90%以上存在于光合细胞器——叶绿体中^[26]。由于叶绿素的组成中没有铁,故一般多认为铁很可能是叶绿素合成过程中的催化剂^[27-28]。但铁在土壤中有效性低,在植物体内移动性差,施用铁肥往往效果甚微^[29]。

土壤pH值会影响植物的含硒量,如当土壤pH为7.0时,土壤溶液或植物中的含硒量比土壤pH 4.5时的多得多。此外,土壤中各种状态的硒对植物含硒量的有效性不同,其顺序为硒酸盐 $>$ 亚硒酸盐 $>$ 元素硒(最难吸收)^[30]。

土壤硒的有效性一般用植物对硒的吸收量进行检验^[31]。在土壤里硒的不同存在形态中,小麦植株含硒量只与土壤 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Se}$ 呈极显著相关,所以有人把 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Se}$ 视为土壤中的有效硒^[32]。在非聚硒植物中,有机态硒主要以蛋白质的形态

存在^[28]。有研究表明, 硒主要存在于球蛋白中^[33]。施加硒化肥小麦中的硒被植物吸收, 并将亚硒酸钠中的硒转化为自然的有机硒, 且小麦中的全部硒都是生物学上可利用的^[34]。对硒中毒区小麦籽粒酸水解物进行离子色谱分析的结果证实, 植物硒蛋白中的硒主要以Se-Met的形式存在^[35]。硒的存在形态是决定硒生物有效性的首要因素, 其它影响因素尚有硒和别的生命元素及有机物之间的相互作用等等。正常条件下, 植物中硒的组成成分以有机态为主, 占90%, 主要以硒代氨基酸、硒代蛋白质存在; 此外, 还有硒多糖、含硒多肽、含硒RNA、各种甲基硒化物等形式存在^[36-37]。正是这部分有机硒, 尤其是大分子含硒化合物被视为低毒且具有生物有效活性的部分, 它们具有更高的生物利用度。

在人和动物体中硒酶的活性中心是含硒半胱氨酸(Sec), 硒是唯一受基因调控的微量元素^[38]。植物蛋白的硒主要以Se-Met存在, 也有Sec, 但缺乏转移水平的调控^[21]。

3.2 元素间的相互影响

生物体内所有的元素都存在直接或间接的联系, 彼此相互影响, 处于平衡状态。颜世铭等曾系统阐述过人体内各种微量元素的相互影响, 其中锌、铁、硒之间的关系见图1^[39], 各元素间存在单向抑制或相互影响。

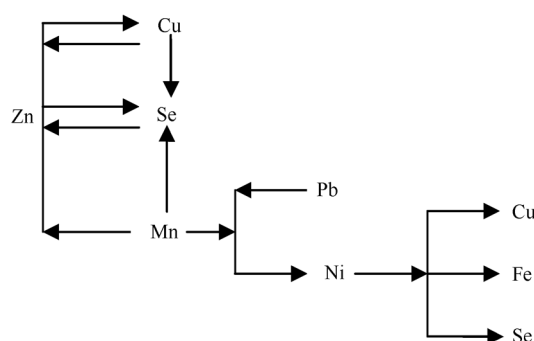


图1 微量元素间的相互关系^[39]
Fig. 1 Interaction of trace elements^[39]

同样, 植物体对各种微量元素的吸收也存在复杂的相互抑制或促进作用, 土壤中其它离子的含量也影响小麦对微量元素的吸收。

对于锌与氮在植物营养生理上的相互关系, 研究认为高氮营养条件下容易造成缺锌^[40]。氮锌关系复杂, 国内有关这方面的研究不多^[41-42], 但有人进行了氮锌配施对小麦生长影响的研究, 实验证明适当的氮锌配施对小麦生长发育具有明显的促进作用^[43]。

镉对小麦吸收锌有拮抗效应, 因此, 有机肥对小麦籽粒锌含量的影响与外源镉、锌的浓度组合有关^[44]。

锌能使汞毒害引起的生理生化变化得以不同程度的恢复, 但随汞浓度的升高, 锌的这种缓解效应逐渐减弱^[45]。

钙与锌也有拮抗作用, 钙不仅影响锌的吸收, 而且还影响锌在生物体内的分配。其它元素(如铜、铬和镉等)与锌也存在着拮抗关系。锌与这些元素的竞争会降低其生物利用率。

由于铁、锌与磷之间都存在有拮抗作用, 而铁在作物体内的代谢功能与锌的供应有关, 所以铁锌肥混合施用更利于

肥效的发挥^[12]。

硒的吸收受重金属(汞、镉、砷等)影响, 它们之间存在拮抗作用, 因结合成难溶复合物, 从而不能被吸收。一方面硒的吸收降低了, 但另一方面减轻环境污染对植物造成的危害^[46]。此外, 植物对硒与磷、钾、钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌和钼的吸收也会相互影响^[41]。

本课题组通过研究也发现小麦中的锌与铁含量呈正相关, 即小麦对两种元素的吸收会互相促进。而小麦对锌、铁元素的吸收与对硒元素的吸收会互相拮抗。

3.3 小麦基因型差异

有人用田间试验方法研究了栽培模式、播种密度和施氮量与小麦籽粒中锌、铁、锰、铜含量与携出量的关系。这些元素的含量分布主要受作物自身遗传性状的控制, 而人为的栽培措施的影响是有限的, 不同处理组合对籽粒中铁、锰和铜的含量均有显著性影响, 而对锌含量未表现出明显影响^[47]。所以研究基因型差异并筛选微量元素的高效敏感型成为遗传选育的一项重要工作。

缺铁是石灰性土壤常见的植物营养问题之一。禾本科植物铁载体分泌能力与耐缺铁有关, 提高植物铁载体分泌能力是改良缺铁的土壤上植物铁营养的关键措施之一。于福同等在水培条件下分析了冬小麦3个杂交种及其4个亲本在缺铁营养液中植物铁载体的分泌及杂种的效应。通过分析杂交种和亲本的关系, 认为可以通过对亲本分泌植物铁载体能力和配合力的选择, 利用杂种优势来提高小麦铁的利用效率^[48]。不同磷效率小麦对低铁胁迫有基因型差异, 磷效率越高, 对低铁的反应越敏感^[49]。用DDRT-PCR技术比较正常供铁和缺铁胁迫下铁高效型小麦(京-411)和铁低效型小麦(三属麦-3)的基因表达差异模式, 证明了基因表达受缺铁胁迫的抑制^[50]。

不同基因型小麦对硒的吸收量不同, 说明筛选富硒基因型是可能的^[51]。比如强筋小麦对硒的吸收能力明显高于普通小麦, 表明高蛋白质含量的品种吸收硒的能力较强^[52]。

在分子水平的富硒机理研究方面, Sabine等研究发现大肠杆菌突变体中硒结合蛋白质需要经过半胱氨酸合成途径的大部分需酶步骤, 当半胱氨酸合成受阻时结合到蛋白质的硒含量增加了^[53]。Kromayer等报道了作为含硒蛋白的硒代半胱氨酸的合成需要一种mRNA的二级结构组件-SECIS的成分和转录因子SelB的相互作用^[54]。最近, 有研究证实, S-腺苷-L-蛋氨酸: L-蛋氨酸S-甲基转移酶(MMT)负责催化硒蛋氨酸的甲基化, 形成硒-甲基硒蛋氨酸(SeMM)。应用T-DNA插入证实, MMT失活会导致植物硒挥发的完全丧失, 但应用化学的方法补偿MMT催化的产物SeMM, 则可以恢复MMT突变体产生挥发硒的能力, 提示通过T-DNA插入的方法可以筛选得到与植物硒代谢有关的突变体^[55]。因此, 有必要加强植物富硒突变体的研究, 应用分子遗传学的方法分离富硒基因, 并通过转基因技术研究植物聚硒机理, 为提高农作物的富硒水平奠定理论基础^[56]。

3.5 栽培管理措施不同

叶面喷施优于拌种, 锌铁混合施用优于单用。由于铁、锌与磷之间都存在有拮抗作用, 而铁在作物体内的代谢功能与

锌的供应有关,所以铁锌肥混合施用更利于肥效的发挥,并且由于铁锌在植物内不易移动,所以,拌种与叶面喷施结合施用效果更好^[14]。

在小麦不同的生育时期进行叶面喷肥,对籽粒中硒的含量增长具有不同的效果^[20]。硒肥试验表明,小麦生长后期喷洒硒肥对成产要素和产量没有明显影响,籽粒中硒含量显著提高;灌浆期喷洒比孕穗期喷洒富硒效果显著,这可能与小麦籽粒蛋白质合成过程中容易与硒螯合有关^[52]。

此外,气候差异、天气原因以及土壤温度、湿度和质地等环境因素的影响也会使得小麦中微量元素含量有所差异。但这方面的研究报道较少。

4 展望

微量元素对植物和人畜生长发育具有的重要作用已为人们所共知, CIMMYT已在高铁锌种质材料的筛选和杂交利用上开展了初步的工作^[57];而印度和巴基斯坦等发展中国家也在国际研究机构的资助下启动了相关研究。关于今后更进一步的研究,应作好在微量元素偏低地带的调节补充工作,除了利用肥料补充人畜粮食作物中的微量元素,克服微量元素缺乏病外,还要对其在作物体内的生理作用机制、对作物生长发育进程的影响及有效施用方式进一步探讨与研究,并继续利用分子遗传学方法研究小麦等粮食作物微量元素营养存在的基因型差异,作好品种鉴定筛选工作;此外,筛选植物源微量元素的天然活性化合物,探讨天然大分子中微量元素的结合方式及生理功能等问题也是亟需研究的课题,这将为活性物质的深加工开发和进一步深入研究奠定基础。

由于过量的微量元素对人畜具有危害性,因此微量元素毒害区的控制和开发利用工作也需加强。首先,要做好测试评估工作,例如,有研究表明硒浓度与种子发芽各项指标抑制率呈显著正相关,应用小麦根伸长抑制率可作为化学物质生态风险评价的一项生物标志物^[58]。其次,可利用天然或转基因技术改良的微量元素富集植物调节植物体内微量元素的含量水平,通过植物富集,一方面可以治理环境污染,另一方面可以开发利用有机微量元素生产功能性营养食品。

References

- Welch RM, Graham RD. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *J Exp Biol*, 2004, **55**: 353~364
- 陈国树. 微量元素学科研究进展. 环境与开发, 1995, **4**: 1~3
- Yan SM (颜世铭), Li ZX (李增禧), Xiong LP (熊丽萍). Essentials of trace element medicine I. Physiological role and balance of trace elements in human body. *Trace Elements Sci* (广东微量元素科学), 2002, **9** (9): 17~18
- Combs GF. Selenium in Biology and Medicine. New York, USA: Van Nostrand Reinhold Co, 1987
- Whanger PD. A country with both selenium deficiency and toxicity: some thoughts and impressions. *J Nutr*, 1989, **119**: 1236~1239
- 李强. 锌对小麦生长发育及产量影响的研究. 耕作与栽培, 2003, **3**: 52~53
- Vose PB. Iron nutrition in plants: a world overview. *J Plant Nutri*, 1982, **5**: 233~249
- Smith BN. Iron in higher plants: storage and metabolic role. *J Plant Nutri*, 1984, **7**: 759~766
- Wang LP (汪李平). Review on iron nutrition and control of iron deficiency in plants. *J Anhui Agric Univ* (安徽农业大学学报), 1995, **22** (1): 17~22
- 李志玉, 郭庆元, 涂学文. 大豆施硒效应和硒素积累特性的初步研究. 中国油料, 1994, **16** (1): 41~44
- 陈铭, 刘更另. 高等植物的硒营养及在食物链中的作用(二). 土壤通报, 1996, **27** (4): 185~188
- Biacs PA, Daoood HG, Kodar L. Effect of Mo, Se, Zn and Cr treatments on the yield, element concentration, and carotenoid content of carrot. *Agric Food Chem*, 1995, **43**: 589~591
- 胡玉香, 翟长庚, 于聚然. 锌铁微肥对小麦良种的增产作用. 中国种业, 2003, **2**: 25
- Cheng BR (程伯容), Ju SJ (鞠山见), Yue SR (岳淑榕), He RZ (赫荣臻), Sheng SJ (盛士骏). Studies on the selenium in soils of northeastern china. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1980, **1**: 55~60
- 崔征. 中国科学院微量元素研究工作会议汇刊. 北京: 科学出版社, 1964
- Liu JX (刘建新). Effect of zinc on seedlings growth and some physiological characters in wheat. *J Gansu Sci* (甘肃科学学报), 2004, **16** (1): 49~51
- Huo XT (霍晓婷), Yang JT (杨建堂), Wang WL (王文亮), Han YL (韩燕来), Zhao YP (赵月平). Studies on properties of iron absorption of high yield winter wheat. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 2001, **32** (4): 170~172
- 杨建堂. 等高产冬小麦锌素吸收分配特点的研究. 土壤通报, 1997, **98** (3): 124
- Chen DQ (陈大清). Progress of plant selenium assimilation and screening of resistant selenium mutant. *Amino Acids & Biotic Resource* (氨基酸和生物资源), 2004, **26** (2): 65~70
- Song JY (宋家永), Li JG (李敬光), Wang YH (王永华), Guo RL (郭汝礼), Yin J (尹钧). Effect of applying selenium fertilizer on wheat physiological characteristics and the grain selenium content. *J Henan Agric Univ* (河南农业大学学报), 2005, **39** (2): 139~142
- Ding L (丁莉), Wu Y (武芸), Shang HX (尚红喜). Advances in fundamental research on Se-containing biomacromolecules in plants. *J Hubei Inst Nationalities* (湖北民族学院学报), 2004, **22** (2): 1~4
- Xu LX (徐立新), Mao FW (毛凤梧). Effects of microelement on the quality and yield of wheat. *China Seed Ind* (中国种业), 2006, **6**: 41
- 周伟. 不同施锌方法对小麦含锌量及产量影响的研究. 生态农业研究, 1995, **9**: 34~38
- 张福锁. 环境胁迫与植物营养. 北京: 北京农业大学出版社, 1993
- 孙崇延. 施加硒化肥对麦粒的化学元素及氨基酸含量的影响. 微量元素与健康研究, 1995, **3** (12): 39~45
- Price CA. Iron compounds and plant nutrition. *Plant Physiol*, 1968, **19**: 239~248
- Mengel K, Kirkby EA. Principles of Plant Nutrition. Bern: International Potash Institute, 1982
- Price CA. Micronutrients in Agriculture. Madison: Soil Science Society of America, Inc., 1972

- 29 刘武定. 微量元素营养与微肥施用. 北京: 中国农业出版社, 1995
- 30 施和平. 植物中的硒及其生理作用. 植物学通报, 1995, **12** (增刊): 31~36
- 31 Huang JG (黄建国), Yuan L (袁玲). Selenium status and availability in purple soil of Sichuan Basin. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1997, **34** (2): 152~159
- 32 Hamdy AA, Gissel-Nielsen G. Fractionation of soil Selenium. *Z Pflanzenernaehr Bodenkd*, 1976, **6**: 696~703.
- 33 中国矿物岩石地球化学会环境地质地球化学学会编. 环境地球化学与健康. 北京: 地震出版社, 1990
- 34 Ensminger AH. 营养素. 北京: 农业出版社, 1989
- 35 Belstein MA, Whanger PD. Deposition of dietary organic and inorganic selenium in rat erythrocyte proteins. *J Nutr*, 1986, **116**: 1701~1719
- 36 Guo BJ (郭宝江), Huang Z (黄峙), Liu XS (刘学诗). Advances in research on biological cycle of Se and active Se-containing substances. *J South China Norm Univ* (华南师范大学学报), 2001, **3**: 123~130
- 37 张继文, 王善英, 王其兵. 富硒植物与人体健康. 植物杂志, 1997, **2**: 10~11
- 38 Huang Z (黄峙), Zheng WJ (郑文杰), Guo BJ (郭宝江). Research progress on Se-containing biomacromolecules. *Nat Sci J Hainan Univ* (海南大学学报), 2001, **19** (2): 169~175
- 39 Yan SM (颜世铭), Li ZX (李增禧), Xiong LP (熊丽萍). Essentials of trace element medicine I. Physiological role and balance of trace elements in human body. *Trace Elements Sci* (广东微量元素科学), 2002, **9** (9): 17~18
- 40 Chapman HD, Vanselow AF. Relation between nitrogen and zinc in crop nutrition. *J Agric Res*, 1937, **55**: 365~379
- 41 慕晓茹, 劳家怪, 祁明楣. 大豆氮锌营养研究. 土壤通报, 1990, **21** (1): 30~32
- 42 左余宝, 李书田, 谢晓红. 夏玉米施用钾肥的增产效果及氮磷钾配合施用技术. 土壤肥料, 1995, **2**: 31~35
- 43 Huang WC (黄文川), Li LJ (李录久), Li WG (李文高). Effect of applying nitrogen combined with zinc on wheat yield. *Acta Agric Nucl Sin* (核农学报), 2000, **14** (4): 225~229
- 44 Chen SB (陈世宝), Hua L (华珞), Bai LY (白铃玉), Wei DP (韦东普). Antagonistic effects of cadmium on zinc in wheat grain and amelioration effect of organic manure. *Ecol & Environ* (生态环境), 2003, **12** (1): 15~18
- 45 Chen GC (陈刚才), Gan L (甘露), Wan GJ (万国江). Alleviative effect of zinc cation on mercury toxicity of wheat seedlings. *Agro Environ Prot* (农业环境保护), 2000, **19** (5): 257~259
- 46 Zhang C (张驰), Wu YY (吴永尧), Peng ZK (彭振坤). Progress in the research of selenium in plants. *J Hubei Inst Nationalities* (湖北民族学院学报), 2002, **20** (3): 58~62
- 47 Li F (李峰), Tian XH (田霄鸿), Chen L (陈玲), Li SX (李生秀). Effect of planting model, N fertilization and planting density on concentration and uptake of Zn, Fe, Mn and Cu in grains of winter wheat. *Soil & Fertil* (土壤肥料), 2006, **2**: 42~46
- 48 Yu FT (于福同), Zhang AM (张爱民), Zhang FS (张福锁). Hybrid effects on the release of phytosiderophores in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Acta Bot Sin* (植物学报), 2002, **44** (1): 63~66
- 49 Qiu HZ (邱慧珍), Zhang FS (张福锁). Genotypic difference in response to Fe deficiency of winter wheat with different phosphorus efficiency. *Plant Nutr & Fertil Sci* (植物营养与肥料学报), 2004, **10** (4): 361~366
- 50 Yin LP (印莉萍), Liu WZ (刘维仲), Liu XL (刘祥林), Huang QN (黄勤妮), Chai DF (柴东方), Qiu ZS (邱泽生), Wang LS (王凌诗). DDRT-PCR analysis under iron-deficient condition in wheat roots and difference of ABC gene expression. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2001, **34** (3): 301~303
- 51 Lü JY (吕金印), Huang YB (黄亚冰), Liu J (刘军). Selenium absorption, distribution and translocation in wheat seedling. *Acta Agric Nucl Sin* (核农学报), 1996, **10** (1): 54~56
- 52 Ma YX (马玉霞), Yang SL (杨胜利), Zhao SZ (赵淑章). Early report on the high selenium technique study of the strong gluten wheat. *J Henan Vocation-Technical Teachers Coll* (河南职业技术学院学报), 2004, **32** (3): 9~10
- 53 Sabine M, Johann H, August B. The path of unspecific incorporation of selenium in *Escherichia coli*. *Arch Microbiol*, 1997, **168**: 421~427
- 54 Kromayer M, Neuhierl B, Friebe A. Genetic probing of the interaction between the translation factor SelB and its mRNA binding element in *Escherichia coli*. *Mol Genet*, 1999, **262**: 800~806
- 55 Abderrahmane T, Antje B, Norman T. An essential role of S-adenosyl-L-methionine:L-methionine S-methyltransferase in selenium volatilization by plants methylation of selenomethionine to selenium-methyl-L-selenium-methionine, the precursor of volatile selenium. *Plant Physiol*, 2002, **130**: 847~856
- 56 Li YS (李应生), Li YN (李亚男), Chen DQ (陈大清). Biological functions of selenium and the mechanism of selenium enrichment in plant. *J Hubei Agric Coll* (湖北农学院学报), 2003, **23** (6): 476~480
- 57 CGIAR. Breeding crops for better nutrition. <http://www.harvestplus.org>, 2007
- 58 Shao ZH (邵志慧), Lin KF (林匡飞), Xu XQ (徐小清), Zheng L (郑利), Xiang YL (项雅玲). Comparison of ecotoxic effect of selenium on seed germination of wheat and paddy rice. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2005, **24** (12): 1440~1443