

锌肥与三唑酮配合喷施对冬小麦锌营养品质的影响

刘珂, 赵吉红, 王少霞, 李萌, 陈艳龙, 田霄鸿

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 于 2013—2014 年小麦生长期, 在陕西关中地区进行田间喷施试验, 设置 CK、喷 Zn、喷三唑酮、喷 Zn + 三唑酮 4 个处理, 以揭示锌与三唑酮配合喷施对小麦锌营养品质的影响。结果表明: 不同喷施方式对小麦籽粒千粒重及产量均无明显影响; 喷三唑酮、喷 Zn + 三唑酮及喷 Zn 使籽粒 Zn 含量由 CK 的 25.9 mg·kg⁻¹ 分别提高到 32.2、52.4 mg·kg⁻¹ 和 52.7 mg·kg⁻¹, 增加幅度分别为 24%、102% 和 103%; 喷三唑酮和喷 Zn + 三唑酮处理降低了小麦籽粒植酸含量, 相比对照分别降低 23.8%、15.9%, 使植酸/Zn 摩尔比明显降低, 从而显著提高了籽粒锌生物有效性。Zn 与三唑酮配合喷施下提高籽粒锌含量及其生物有效性的效果十分明显, 同时还能兼顾防治小麦白粉病、条锈病等。

关键词: 叶面喷锌; 三唑酮; 锌含量; 锌生物有效性; 冬小麦; 锌营养品质

中图分类号: S143.7+2 **文献标志码:** A

Effects of combined foliar Zn application with triadimefon on Zn nutritional quality of winter wheat

LIU Ke, ZHAO Ji-hong, WANG Shao-xia, Li Meng, CHEN Yan-long, TIAN Xiao-hong

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/

Key Lab of Plant nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To provide theoretical basis for an agronomic method for improving grain Zn nutritional quality while controlling wheat diseases and pests, this study was conducted to investigate the effect of foliar Zn combined with triadimefon on Zn content and bioavailability of winter wheat. A field experiment was conducted in Guanzhong Plain with four spray treatments (control, foliar Zn, foliar triadimefon, foliar Zn + triadimefon) during 2013—2014 winter wheat (Xiaoyan 22) growing seasons. Results showed foliar application treatments had no significant effects on thousand kernel weights, grain yield of wheat. Compared with the CK treatment, foliar triadimefon, foliar Zn and foliar Zn + triadimefon significantly increased grain Zn concentration from 25.9 mg·kg⁻¹ to 32.2, 52.4 mg·kg⁻¹ and 52.7 mg·kg⁻¹, with an average increasing range of 24%, 102%, and 103%, respectively. Foliar triadimefon, foliar Zn + triadimefon reduced grain phytic acid concentration by an average of 23.8% and 15.9%, respectively, P/Zn molar ratio was also significantly reduced under these two treatments. Combined foliar Zn application with triadimefon obviously improved grain Zn concentration and bioavailability, while it can also prevent and control winter wheat powdery mildew, stripe rust, etc. This research provides a scientific basis for effective combination of foliar Zn, pesticides and fungicides in production practice.

Keywords: foliar Zn; triadimefon; Zn concentration; Zn bioavailability; winter wheat; Zn nutritional quality

锌是人体必需微量营养元素, 人体缺锌会引起诸多严重的健康问题。全世界范围内, 约 1/3 以上人口遭受缺锌问题的困扰, 5 岁以下儿童每年因缺锌而导致死亡的人数多达 11.6 万人^[1-2]。来自饮食的锌摄入量不足被认为是人体缺锌的主要原因。

小麦是世界三大主要粮食作物之一, 其籽粒 Zn 含量高低直接影响到以其为主食人群的锌营养水平。我国小麦主产区处于北方潜在缺锌石灰性土壤地区, 小麦籽粒平均 Zn 含量(29.3 mg·kg⁻¹) 低于满足人体健康需求的 Zn 含量合理水平(40 ~ 60

收稿日期: 2016-05-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371288)

作者简介: 刘珂(1991—), 男, 陕西西乡人, 硕士, 主要从事植物营养与调控研究。E-mail: keliuterry@gmail.com。

通信作者: 田霄鸿(1967—), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事植物营养与调控及循环农业研究。E-mail: txhong@hotmail.com。

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[3-4]。此外,小麦籽粒中众多抗营养因子如植酸,其可以与 Zn^{2+} 结合形成不溶性复合物,最终使籽粒的锌生物有效性更低^[3]。已有研究表明,土施和喷施锌肥均是提高缺锌土壤上小麦籽粒 Zn 含量的有效农艺措施^[5-6],但潜在缺锌石灰性土壤上,土施锌肥对籽粒富锌效果却十分有限,而叶面喷锌能使籽粒 Zn 含量提高幅度达 1.41 ~ 2.08 倍;同时,喷施锌肥也能有效降低籽粒植酸含量,使植酸/Zn 摩尔比减小,从而提高籽粒 Zn 的生物有效性^[7-9]。虽然喷施锌肥的小麦籽粒富锌效果良好,但好的富锌效果需要适当增加喷施次数,因而费时费工,难以在实际生产中应用。因此,找到提高我国北方地区小麦籽粒 Zn 含量的高效农艺措施,对于改善我国民众锌营养水平意义重大。

目前,“一喷三防”组合式技术,即将杀虫剂、杀菌剂、叶面肥等混合后配成溶液进行喷雾作业,在防治病虫害、抗干热风、促大穗、增粒重等方面的效果已在我国北方麦区得到广泛认同,研究发现在小麦抽穗期至灌浆期根据田间病情,结合气象条件及小麦长势喷施三唑酮 (Triadimefon) 是一种防治小麦白粉病、条锈病等的有效措施^[10-11]。虽有研究表明使用磺酰脲类除草剂会明显阻碍缺铜敏感型小麦对铜元素的吸收与利用^[12],然而,三唑酮作为“一喷三防”组合式技术中的杀菌剂其喷施对小麦微量元素含量影响的研究还很少,而将农药与微肥配合喷施对籽粒微量元素含量及其生物有效性的影响鲜见报道。

鉴于此,本研究在小麦灌浆前期将叶面锌肥与防治小麦流行病的农药三唑酮混合喷施,以期查明三唑酮单独喷施和三唑酮-锌混合叶面喷施对潜在缺锌石灰性土壤上冬小麦籽粒营养品质如 N、P、K、Zn、Fe、Mn、Ca 及植酸的影响。从而明确叶面锌肥与三唑酮共同喷施对冬小麦籽粒富锌及其他营养元素的影响程度,为优化两者配合条件提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于 2013 年 10 月至 2014 年 6 月在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站进行 (34°17'38" N, 108°04'02" E)。试验区海拔 525 m,年平均气温 13℃,年平均蒸发量约为 900 mm。供试土壤为旱耕人为土垫土,耕层土壤基本理化性状为:有机质 12.54 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 13.53 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 2.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 11.51 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 149 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CaCO_3 65.8 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, DTPA - Zn 0.61

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 7.9。

试验供试小麦品种为小偃 22,播种量为 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,采用随机区组设计,设置对照 (CK, 蒸馏水)、喷 Zn (0.3% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、喷三唑酮 (0.12% 三唑酮可湿性粉剂)、喷 Zn + 三唑酮 (0.3% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 0.12% 三唑酮可湿性粉剂) 4 个处理,重复 6 次,每个小区面积为 2 m^2 。播前一次性施基肥 N 120 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,肥料分别为尿素 (46% N) 和过磷酸钙 (18% P_2O_5)。在小麦越冬期进行 1 次灌溉,灌水量为 40 mm。喷施时期为小麦灌浆前期 (4 月下旬到 5 月上旬),每隔 7 d 喷施 1 次,连续喷施 3 次,每次每个小区喷 200 ml,三次累计喷施纯 Zn 2.71 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。具体时间为:4 月 28 日、5 月 5 日、5 月 12 日。喷施在 16:00—19:00 间进行,以避免在高温及强光下喷肥对叶片造成伤害,保证喷施效果。其它管理措施与当地大田相同。

1.2 样品采集及测定

于小麦成熟期 (2014 年 6 月 4 日) 对各小区小麦进行收获测产。随机选取小区长势一致且有代表性的小麦 20 株。人工脱粒,75℃ 烘干至恒重,随后将籽粒样品磨碎,用于测定籽粒中大量元素 (N、P、K)、微量元素 (Zn、Fe、Mn、Ca) 及植酸含量。

小麦籽粒 N、P、K 含量的测定:用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 法消煮,分别用凯氏定氮法测定全氮,钼蓝比色法测定全磷,原子吸收法测定全钾。

小麦籽粒 Zn、Fe、Mn、Ca 含量的测定:称取约 0.5 g 粉碎样品于马福炉中 550℃ 灰化 6 h,灰化处理后用 1:1 (v/v) HNO_3 溶解,各元素含量分别用原子吸收分光光度计法 (Z-2000) 测定。

植酸的测定:植酸含量根据 Liang 等^[13]的方法进行测定。

1.3 数据处理

所得数据均使用 Microsoft Excel 2013 进行统计并作图,试验数据采用 SAS 8.1 统计软件进行方差分析及多重比较 (LSD 法,差异显著性水平为 5%)。

2 结果与分析

2.1 不同喷施处理对小麦千粒重、籽粒产量及大量元素含量的影响

由表 1 可知,与喷水 (CK) 相比,喷 Zn、喷三唑酮、喷 Zn + 三唑酮均使小麦千粒重有一定增加,但处理间未达到差异显著水平。单独喷施三唑酮处理下的小麦籽粒产量最高,其次为喷 Zn + 三唑酮处理。喷 Zn、喷三唑酮及喷 Zn + 三唑酮使籽粒中 N 含量相比对照有所增加,P 含量有所降低,但均未达到

差异显著水平。综上,单独喷锌、喷三唑酮或锌与三唑酮配合喷施对千粒重、籽粒产量及氮、磷含量均无明显影响。但 Zn + 三唑酮处理能明显降低籽粒中

的钾元素,降幅为 25.6%,表明锌与三唑酮混合喷施适时适量补施钾肥,效果可能会更佳。

表 1 不同喷施处理对小麦千粒重、籽粒产量及大量元素的影响

Table 1 Effect of different application treatments on wheat thousand kernel weight, grain yield and concentration of N, P and K						
处理 Treatment	千粒重 TKW/g	籽粒产量/(kg·hm ⁻²) Grain yield	N 含量/(g·kg ⁻¹) N concentration	P 含量/(g·kg ⁻¹) P concentration	K 含量/(g·kg ⁻¹) K concentration	
喷水 CK	41.7a	3575a	21.2a	2.9a	3.9a	
喷锌 Foliar Zn	42.8a	3500a	21.8a	2.8a	3.8ab	
喷三唑酮 Foliar triadimefon	42.3a	3779a	23.5a	2.5a	3.6ab	
喷 Zn + 三唑酮 Foliar Zn + triadimefon	42.4a	3767a	22.5a	2.3a	2.9b	

注:小写字母代表同列不同喷施处理之间的多重比较(5%显著水平),下表同。
Note: lowercase letter within the same column represents significance at $P < 0.05$, the same below.

2.2 不同喷施处理对小麦籽粒 Zn、Fe、Mn、Ca 含量的影响

各喷施处理对小麦籽粒锌含量影响显著,其中喷 Zn + 三唑酮和喷 Zn 处理效果最为明显,相比于对照分别提高了 1.02、1.03 倍(表 2),同时,单独喷施三唑酮也能增加籽粒中的 Zn 含量,增幅达 24.3%,但未达到差异显著水平;而单独喷 Zn 与喷 Zn + 三唑酮相比,籽粒中 Zn 含量无明显差异,表明三唑酮与锌配合喷施与单独施 Zn 的籽粒富锌效果相当,此外,相比于对照,喷 Zn + 三唑酮能提高籽粒中 Fe、Mn、Ca 的含量,可见,Zn 与三唑酮混合喷施对籽粒中锌、铁等矿质元素的累积有一定的促进作用,但其机理尚不明确,有待进一步研究。

等^[14]研究的给小麦施 Zn 使籽粒中植酸含量降低的结果不同,目前,Zn 与植酸的关系尚不明确,需进一步探索二者相互作用的机理。

由图 1B 可知,对照处理中籽粒植酸/锌摩尔比值平均为 40.4,喷 Zn、喷三唑酮及喷 Zn + 三唑酮均显著降低了籽粒中植酸/锌摩尔比,相比于对照,降幅分别为 41.6%、31.3%、55.5%,其中,Zn + 三唑酮处理下该比值最低,为 16.8,说明将锌肥与三唑酮混合喷施对籽粒锌生物有效性的提高效果最佳。不同喷施处理相比于对照能在一定程度上降低籽粒中植酸/Fe 摩尔比,其中,单独喷施三唑酮的效果最好,降幅达 21%,其次是 Zn + 三唑酮处理和单独喷锌处理,降幅分别为 17.1%和 15.5%(图 1C)。总的来说,在本试验条件下,将三唑酮与锌肥配合喷施既有利于显著增加籽粒中 Zn、Fe 等矿质元素的含量又能明显提高锌生物有效性,因而是喷施的最佳选择。

表 2 不同喷施处理对小麦籽粒中微量元素含量的影响/(mg·kg⁻¹)

Table 2 Effect of different application treatments on Zn, Fe, Mn and Ca concentration of winter wheat grain					
处理 Treatment	Zn	Fe	Mn	Ca	
喷水 CK	25.9b	55.9a	35.7a	216.5a	
喷锌 Foliar Zn	52.7a	72.6a	37.4a	244.5a	
喷三唑酮 Foliar triadimefon	32.2b	53.2a	37.4a	280.8a	
喷 Zn + 三唑酮 Foliar Zn + triadimefon	52.4a	63.9a	37.5a	324.4a	

2.3 不同处理对小麦籽粒植酸含量及矿质元素生物有效性的影响

如图 1A 所示,对照处理中籽粒的平均植酸含量为 10.6 mg·g⁻¹,与之相比,单独喷三唑酮显著降低了籽粒中的植酸含量,降幅达 23.7%,其次是喷 Zn + 三唑酮,降幅 15.9%,而喷三唑酮与喷 Zn + 三唑酮相比,差异不显著,可见,锌与三唑酮配合喷施并没有影响三唑酮对植酸的降低作用。本研究发现单独喷施 Zn 肥增加了籽粒中植酸含量,这与 Erdal

3 讨论

小麦病害是影响小麦高产的主要因素之一,用杀菌剂防治是小麦生产中的重要技术措施。三唑酮是一种高效、低毒、低残留、持效期长、内吸性强的广谱性杀菌剂,其被植物吸收后,能在植物体内传导,在实际农业生产中应用广泛。季书勤等^[15]研究表明在小麦抽穗期、扬花期、灌浆期喷洒 3 次三唑酮菌剂,使小麦千粒重提高明显,籽粒产量有一定的增加。本试验研究发现,单独喷施三唑酮处理下的小麦籽粒产量最高,原因可能是在小麦抽穗至灌浆前期喷施三唑酮药剂,能在小麦白粉病等病害盛发前期达到有效防治的目的,从而保证灌浆顺利进行,最终使籽粒产量提高;同时,研究表明三唑酮也是一种生长调节剂,能延缓作物生长、提高叶绿素含量、增强作物抗逆性^[16-17]。因此,在小麦灌浆前期叶面

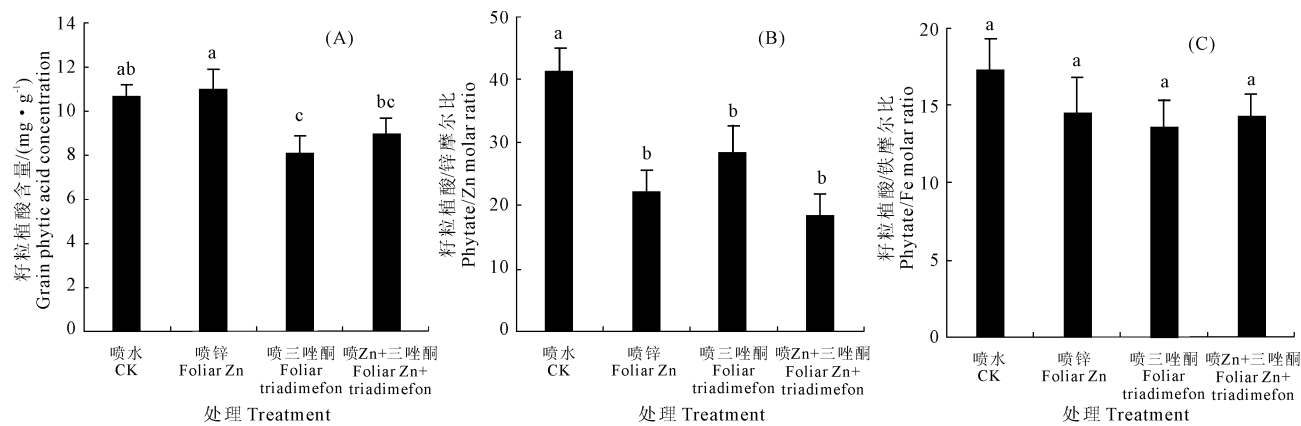


图 1 不同处理对冬小麦籽粒植酸含量、植酸/锌摩尔比及植酸/铁摩尔比的影响

Fig. 1 Effect of different treatments on grain phytic acid concentration and molar ratio of phytic acid to Zn, Fe in winter wheat grain

喷施三唑酮,其经叶面内吸至植物体内,既抑制了病原菌在叶表的附着和侵染又对小麦灌浆起到调节作用,最终使小麦得以稳产、抗病。此外,将锌肥与三唑酮菌剂混合喷施也提高了小麦千粒重以及籽粒产量,说明锌与三唑酮配合喷施并没有减弱三唑酮的稳产抗病效果。前人关于此类的研究内容多是单因素试验,或是大量元素与杀菌剂结合喷施^[18-19],而将微肥与农药结合起来喷施少见报道,本研究发现了微肥与三唑酮等杀菌剂配合喷施对千粒重以及产量的效果,但其表现出提高的机理仍待进一步研究。

多数研究表明,由于锌在小麦韧皮部的移动性很强,喷施锌肥通过增加小麦花后叶片、茎秆等主要营养器官中的 Zn 贮量,促进 Zn 从营养器官向籽粒转运,从而提高籽粒中的锌含量^[20-21]。本研究在上述工作基础上,将锌肥、三唑酮菌剂叶面分别单施及混合喷施,结果发现单独喷施三唑酮使小麦籽粒 Zn 含量增加 24%,其原因可能是由于三唑酮促进了营养器官中的锌向籽粒中的转运。张培志等^[22]研究发现三唑酮结构中三唑环上的 N 原子,能与 Zn^{2+} 通过单齿配位作用形成 Zn-三唑酮复合物。所以,单独喷施三唑酮使小麦籽粒锌含量提高的原因很大程度上是由于作物吸收三唑酮后与营养器官中的锌形成了 Zn-三唑酮复合物,更利于营养器官中的 Zn 向籽粒中的转运。而 Zn 与三唑酮配合使小麦籽粒 Zn 含量比 CK(喷水)提高了 1.02 倍,与单独喷施 Zn 肥对籽粒锌含量的增加效果相当,说明喷施锌肥的富锌的效果并没有因三唑酮的加入而受到影响,其原因可能是由于三唑酮菌剂多为酸性或中性,而本试验中所使用的叶面锌肥($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)的水溶液呈酸性(pH 4.5),二者混合不会因发生化学反应形成沉淀或悬浊物而影响彼此的功效,且随着 Zn-三唑酮复合物在溶液中的溶解及喷施,使其同时具有

富锌和防病的效果成为可能,因而在实际生产中有较好的可行性和推广价值。

植酸是影响作物锌生物有效性的主要抗营养因子之一,小麦籽粒中 65%~85% 的磷以植酸形式存在,离子态锌与植酸结合后几乎不能被人体吸收^[3]。前人的研究多是通过育种措施来降低籽粒植酸的含量,因小麦含有丰富的植酸酶变异,育种工作者通过培育高植酸酶小麦品种来提高锌元素的生物有效性,但目前能利用的种质材料农艺性状较差,且改良难度较大^[23];而本研究发现在小麦灌浆前期喷施三唑酮对降低籽粒植酸含量效果显著。相关研究发现,植酸酶是一类特殊的酸性磷酸酶,能够水解植酸最终释放出无机磷,而经过三唑酮种衣剂包衣处理的小麦幼苗中酸性磷酸酶在叶片细胞的细胞质、液泡膜内侧及相邻细胞间隙内含物中活性高、分布普遍^[24-25]。因此,喷施三唑酮对小麦籽粒植酸降低的机理可能是叶面吸收三唑酮后增强了叶片细胞中酸性磷酸酶的活性和分布,使其更易于有效地降解植株营养器官中的植酸,从而使得籽粒中植酸含量明显降低。仍需作进一步研究明确三唑酮对降低小麦籽粒中抗营养因子的作用。与此同时,本试验结果还发现 Zn 与三唑酮混合喷施同样能起到降低植酸的作用,降幅达 15.9%,虽没有单独喷三唑酮对植酸的降低效果明显,但其能保证更好的籽粒营养品质,更具有实用性。

然而研究表明籽粒中 Zn 或植酸含量的高低还不能作为判断籽粒 Zn 生物有效性的指标,因为若籽粒中植酸与锌的绝对量不同,但摩尔比相同时,可能不会影响锌的生物有效性,因此,多数研究用植酸与锌的摩尔比来判断小麦等禾谷类作物籽粒 Zn 生物有效性。本试验表明叶面喷 Zn 后籽粒中植酸/Zn 摩尔比相比于对照显著降低,这与曹玉贤等^[26]的研

究结果一致,同时发现喷三唑酮与喷 Zn + 三唑酮也同样显著降低了该摩尔比,其中,锌与三唑酮混合喷施效果最好,可能二者配合喷施既能使三唑酮发挥其对植酸显著的减弱作用又能兼顾施锌肥提高籽粒 Zn 含量效果,从而使植酸/锌摩尔比显著降低,明显提高锌生物有效性。本试验结果还发现喷施三唑酮虽降低了籽粒 Fe 含量,但使其生物有效性提高,说明三唑酮对植酸减弱程度要大于对铁的降低;杨习文等^[27]研究发现喷施锌肥使小麦籽粒中的铁含量增加幅度很大,本试验中 Zn + 三唑酮处理同样能使籽粒中铁含量增加,说明二者配合喷施不会影响单独施锌对籽粒 Fe 含量的增加效果。综上,锌肥与三唑酮混合喷施能改善单独喷施锌肥对籽粒矿质元素生物有效性的提高效果,因而具有广阔的应用前景。

4 结 论

本研究表明,在小麦生长后期可把喷施锌肥与喷施农药进行有机结合,不仅能显著增加小麦籽粒锌含量,亦能降低植酸含量,从而提高锌铁等矿质元素的生物有效性。因此,有望成为潜在缺锌土壤同时满足籽粒富锌和病虫害防治需求的高效农艺措施。

参 考 文 献:

[1] Cakmak I. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways[J]. Plant and Soil, 2002,247:3-24.

[2] Black R E, Victora C G, Walker S P, et al. Maternal and child under nutrition and overweight in low - income and middle-income countries [J]. Lancet, 2013,382(9890):427-451.

[3] Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2010,58:9092-9102.

[4] 张 勇,王德森,张 艳,等.北方冬麦区小麦品种籽粒主要矿物质元素含量分布及其相关性分析[J]. 中国农业科学,2007,40(9):1871-1876.

[5] 刘 铮.中国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学,1994,27(1):30-37.

[6] Cakmak I, Kalayci M, Ekiz H, et al. Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO - science for stability project[J]. Field Crops Research, 1999,60:175-188.

[7] Zou C Q, Zhang Y Q, Rashid A, et al. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries[J]. Plant and Soil, 2012,361:119-130.

[8] Kutman U B, Yildiz B, Cakmak I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat[J]. Plant and Soil, 2011,342:149-164.

[9] Yang X W, Tian X H, Gale W J, et al. Effect of soil and foliar zinc application on zinc concentration and bioavailability in wheat grain grown on potentially zinc-deficient soil[J]. Cereal Research Communications, 2011b,39(4):535-543.

[10] 杨学举.小麦白粉病及抗白粉育种[J].北京农业科学,1991,9(6):24-25.

[11] 段双科,李随远,吴兴元,等.陕西关中小麦白粉病流行区域与关键防治对策[J].麦类作物学报,1998,18(6):62-66.

[12] Tang C, Robson A D. Cultivar variation in the effect of chlorsulfuron in depressing the uptake of copper in wheat[J]. Plant and Soil, 2000,225:11-2.

[13] Liang J F, Li Z G, Tsuji K, et al. Milling characteristics and distribution of phytic acid and zinc in long -, medium -, and short - grain rice[J]. Journal of Cereal Science, 2008,48:83-91.

[14] Erdal I, Yilmaz A, Taban S, et al. Phytic acid and phosphorus concentrations in seeds of wheat cultivars grown with and without zinc fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002,25(1):113-127.

[15] 季书勤,郭 瑞,赵淑章,等.氮磷钾、灌水、喷洒杀菌剂对强筋小麦产量和品质的影响[J].华北农学报,2006,21(4):82-86.

[16] 段辉国,卿东红,黄作喜,等.三唑酮对提高植物抗逆性的作用[J].中国农学通报,2005,21(9):249-251.

[17] Fletcher R A, Arnold V. Stimulation of cytokinins and chlorophyll synthesis cotyledons by triadimefon[J]. Physiological Plant, 1986,66:197-201.

[18] 王 静,冯国华,王来花,等.抽穗期喷肥和杀菌剂对强筋小麦徐麦 27 产量及品质的影响[J].中国农学通报,2008,24(10):161-163.

[19] 吕凤荣,李向东,季书勤,等.喷洒磷酸二氢钾和杀菌剂对强筋小麦郑麦 366 千粒重和品质的影响[J].河南农业科学,2011,40(9):11-13.

[20] Haslett B S, Reid R J, Rengel Z. Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots [J]. Annals of Botany, 2001,87:379-386.

[21] Kutman U B, Yildiz B, Cakmak I. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2011,53:118-125.

[22] 张培志,吴 军,龚钰秋,等.三唑酮氯化锌配合物的合成和晶体结构研究[J].无机化学学报,2003,19(7):753-756.

[23] 郝元峰,张 勇,何中虎.作物锌生物强化研究进展[J].生命科学,2015,27(8):1047-1054.

[24] 廖明星,顾振新.植酸酶基因工程及开发利用研究[J].食品科学,2003,24(1):155-159.

[25] 李健强,刘西莉,宋秀荣.三唑酮种衣剂包衣处理对小麦幼苗内酸性磷酸酶分布的影响[J].植物病理学报,1999 27(3):286-287.

[26] 曹玉贤,田霄鸿,杨习文,等.土施和喷施锌肥对冬小麦子粒锌含量及生物有效性的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1394-1401.

[27] 杨习文,田霄鸿,陆欣春,等.喷施锌肥对小麦籽粒锌铁铜锰营养的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):95-102.