

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

曹玉贤, 田霄鸿*, 杨习文, 陆欣春, 陈辉林, 南雄雄, 李秀丽

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为揭示潜在性缺锌土壤上不同施锌方式对小麦子粒锌含量及其生物有效性的影响, 选用 5 个冬小麦品种进行了土施和喷施锌肥的田间裂区试验。结果表明, 供试土壤条件下, 不同施锌方式对小麦产量均无明显影响, 但是在一定施锌方式下小麦子粒锌含量大幅度提高。与对照相比, 土施、喷施及土施 + 喷施锌肥提高小麦子粒锌含量幅度分别为 -6.1%、64% 和 83%, 提高小麦子粒锌携出量幅度分别为 -3.6%、69% 和 83%。3 个施锌处理降低子粒中植酸含量的幅度分别为 -2.4%、7.2% 和 1.5%, 降低植酸与锌摩尔比的幅度分别为 -25%、41% 和 44%, 且不同品种之间也存在一定差异; 虽然植酸与锌的摩尔比有所下降, 但仍高于 20。此外, 单独土施锌肥虽可大幅度提高耕层土壤有效锌含量, 但对子粒锌含量及生物有效性的影响很小。总之, 在小麦生长后期喷施锌肥是提高潜在性缺锌土壤上小麦子粒锌含量和生物有效性较为经济的方式, 对改善小麦锌营养品质有较好作用。

关键词: 锌肥; 土施; 喷施; 锌含量; 生物有效性; 植酸

中图分类号: S512.1*1.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)06-1394-08

Effects of soil and foliar applications of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability

CAO Yu-xian, TIAN Xiao-hong*, YANG Xi-wen, LU Xin-chun, CHEN Hui-lin, NAN Xiong-xiong, LI Xiu-li

(College of Resource and Environment, Northwest A & F University/Key Lab for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field experiment with a split plot design was conducted to investigate the effects of different Zn application methods (soil application or foliar spray) on grain Zn concentration and Zn bioavailability of 5 winter wheat cultivars in potentially zinc (Zn)-deficient calcareous soil. The results show that there are little effects of applying Zn fertilizer on grain yield of wheat, while the grain Zn concentration is significantly increased under certain methods of Zn application. Compared with the control treatment (no Zn application), the grain Zn concentrations are increased by -6.1%, 63.9% and 82.6% under the methods of soil application, foliar spray and soil + foliar application of Zn fertilizers, and the grain Zn uptakes are increased by -3.6%, 69% and 83%, respectively. The phytic acid concentrations are decreased by -2.4%, 7.2% and 1.5% and the phytic acids to Zn molar ratios are decreased by -25%, 41% and 44% of the three treatments, respectively, and there are differences of the phytic acid concentration and the ratio among wheat cultivars. Although the molar ratios of phytic acid to Zn are decreased by the Zn applications, the ratios are still higher than 20. The soil application of Zn can increase the content of soil DTPA-Zn significantly, while the effects of the soil application of Zn on grain Zn concentration and bioavailability are not significant. In conclusion, comparing with the 3 Zn application methods, the foliar application of Zn fertilizer to wheat at the late growth stage (for example, the milk and dough stage) is an economical and effective method to attain high Zn concentration and bioavailability, and to improve the Zn quality of wheat grain in potentially Zn-

收稿日期: 2010-01-11 接受日期: 2010-03-30

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0866); 国家自然科学基金项目(40971179)资助。

作者简介: 曹玉贤(1982-), 女, 山东济宁人, 硕士, 主要从事植物营养调控研究。E-mail: caoyx2007@yahoo.cn

* 通讯作者 Tel: 029-87082785, E-mail: txhong@hotmail.com

deficiency calcareous soil.

Key words: zinc; soil application; foliar application; Zn concentration; Zn bioavailability; phytic acid

微量元素营养缺乏尤其是锌缺乏在全球范围内越来越受到人们关注。据 WHO 调查表明,全球近三分之一的人口面临着缺锌引起的健康问题^[1-3],缺锌已成为影响人类健康的主要因素之一^[4-5]。在我国,约 50% 的儿童表现出轻微的缺锌症状,而在以谷类作物为主食的北方尤其是偏远地区,这种情况更为严重^[6]。研究表明,导致人体出现锌缺乏的主要原因包括谷类作物子粒本身锌含量不高(20 ~ 30 mg/kg)和子粒中含有多种限制人体锌吸收的抗营养因子两个方面^[4, 6-7]。

全球大约 50% 的谷类种植地区土壤有效锌含量较低,导致谷类作物子粒锌含量低^[8-10]。在我国,以北方黄土区的石灰性土壤上缺锌现象严重^[10],而小麦集中种植区主要分布在这些土壤上,导致我国小麦子粒锌含量不高,在 19.9 ~ 43.9 mg/kg 之间,平均仅为 29.3 mg/kg^[11]。因此,探讨提高石灰性土壤中锌利用率以及小麦子粒锌含量的有效措施,对缓解人体出现锌缺乏的危害具有重要意义。

大量研究表明,合理的农艺措施是提高子粒锌含量最有效的途径之一。目前,农艺措施主要包括培育子粒富锌品种和施用锌肥,前者通过育种手段提高子粒锌含量,但周期长且需要持续投入大量时间和资源;而施用锌肥或含锌的氮磷钾肥料则能快速提高小麦子粒锌含量,且已在土耳其、印度等国取得了显著成效^[4, 7]。另外,子粒中含有的多种抗营养因子,如多酚、纤维素、植酸等,其中植酸是降低锌生物有效性的最主要因子,因为它是磷的主要储存形式,能与锌紧密结合,从而显著降低人体对锌的吸收^[4, 7]。目前,关于潜在性缺锌土壤(DTPA-Zn 含量在 0.5 ~ 1.0 mg/kg 之间)上不同施锌方式对小麦产量尤其是子粒锌营养品质的影响研究较少;在田间关于施锌肥对影响小麦子粒锌生物有效性的重要因子——植酸含量变化的研究报道更少^[12]。为此,本研究通过田间试验分析了不同施锌方式(土施和喷施)下子粒锌含量和生物有效性的变化,旨在结合我国土壤实际供锌能力,探讨提高小麦子粒锌含量和生物有效性的最有效方法,为提高我国小麦子粒锌营养品质提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验在西北农林科技大学农作一站内进行。该区海拔 525 m,年平均气温 13℃左右,年均降水量约为 600 mm,土壤类型为土垫旱耕人为土,属于黄土母质,褐土类塿土亚类红油土属。播前土壤 pH 值为 7.98,有机质含量 13.79 g/kg, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 2.41 mg/kg, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 5.43 mg/kg,土壤 DTPA-Zn 0.65 mg/kg。

试验采用田间裂区设计,主处理为施锌方式,设对照(不施锌肥)、土施锌肥(Zn 15 kg/hm²)、喷施锌肥(Zn 1.5 kg/hm²)、土施(Zn 15 kg/hm²) + 喷施(Zn 1.5 kg/hm²) 锌肥 4 个处理,锌肥以 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的形式施用;副处理为小麦(*Triticum Aestivum* L.) 品种,共 5 个:渭丰 151(WF 151)、陕 715(S 715)、西农 889(XN 889)、远丰 175(YF 175)、小偃 216(XY 216),3 次重复。为了方便田间作业,主处理和副处理均采用条状设计,主区面积 3 m × 10 m,副区面积 2 m × 3 m,每个副区内种植小麦 9 行,行距 0.2 m,株距 0.02 m。播前一次性施基肥 N 100 kg/hm², P_2O_5 120 kg/hm²,肥料为尿素和过磷酸钙,不施钾肥。土施锌肥与土壤混匀后撒施,人工翻入土中;喷施锌肥在小麦扬花期、灌浆前期(2009 年 4 月 15 日至 5 月 9 日),每次喷施浓度为 0.3% ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 的 Zn 0.3 kg/hm²,每隔 1 周喷施 1 次,连续喷施 5 次。2008 年 10 月 12 日按照设计的行株距进行人工点播。在小麦返青期(2009 年 2 月 21 日)灌溉 1 次,灌水量为 40 mm。

1.2 采样及测定

在小麦成熟期调查每小区单位面积(1 m²)内有效穗数,同时取 30 株小麦样进行千粒重和穗粒数的考种。于 2009 年 6 月 3 日对各小区小麦进行收获计产;第 2 天在每小区采集土样,经过风干处理进行土壤 DTPA-Zn 含量测定。

植物样品中 Zn 含量:称取 0.5 g 左右粉碎样品于 550℃ 的马福炉中灰化 6 h,用 5 mL 1:1 (v/v) HNO_3 溶解灰分,再用 AA320 CRT 型原子吸收分光光度计测定 Zn 含量^[13]。

土壤 DTPA-Zn 含量:用 DTPA 溶液浸提,然后用 AA320 CRT 型原子吸收分光光度计测定^[13]。

植酸含量的测定:利用阴离子交换树脂将植酸

和植酸盐吸附,使之与无机磷及其盐类等杂质分离,通过与显色剂作用产生褪色反应,根据植酸含量与褪色程度成正比,用分光光度计在波长 500 nm 处测定吸光度,从而计算试样中植酸的含量^[14]。

试验数据均用 Microsoft Excel 和 DPS (Data Processing System) 7.05 统计软件进行方差分析和多重比较(LSD法)。

2 结果与分析

2.1 不同施锌方式对小麦产量构成因素及产量的影响

不同施锌处理对小麦千粒重有一定影响,但对单位面积穗数和穗粒数影响差异不显著(表1)。

与对照相比,土施+喷施锌肥处理下小麦产量最低,仅增产0.40%,而土施锌肥处理下小麦产量最高,其次为喷施锌肥处理,分别增产3.16%和2.71%,但

均未达到显著水平。不同小麦品种间产量差异显著,其中,西农889的产量最高为4360 kg/hm²,而陕715的产量仅为3917 kg/hm²,前者比后者高出11.3%(表2)。表2还看出,不同小麦品种在不同施锌处理下存在显著差异,其中渭丰151、远丰175在喷施+土施锌肥处理下产量最高,分别为4243和4341 kg/hm²,陕715和小偃216在喷施锌肥和土施锌肥处理时产量最高,分别为4595和4773 kg/hm²。不同施锌处理对同一品种小麦产量的影响也存在差异,小偃216子粒产量由高到低的处理分别为:土施锌肥>土施+喷施锌肥>喷施锌肥>对照。但从5个品种的平均产量看,各处理间无显著差异,可见,无论哪种施锌方式,施锌均未表现出明显增产效果。这与Ranjbar等^[15]研究的在严重缺锌土壤上施锌肥能够显著增加小麦子粒产量的结果不同,可能与本试验供试土壤为潜在性缺锌土壤有关。

表1 不同施锌处理和不同品种对小麦产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different Zn application treatments and genotypes on wheat yield components

项目 Item	千粒重(g) 1000-seed wt.	穗数(No./m ²) Panicles	每穗粒数(No./spike) Grains
对照 Control	37.1 a	431 a	36 a
土施 Soil application of Zn	36.1 ab	391 a	37 a
喷施 Foliar application of Zn	37.3 a	458 a	32 a
土施+喷施 Soil and foliar application of Zn	34.5 b	436 a	38 a
渭丰 151 WF 151	37.2 a	403 b	35 a
陕 715 S 715	36.0 a	405 b	36 a
远丰 175 YF 175	35.8 a	438 ab	34 a
西农 889 XN 889	36.7 a	438 ab	37 a
小偃 216 XY 216	35.5 a	462 a	38 a

注(Note): 多重比较分别在同一列中不同主处理和副处理(品种)间进行 The multiple comparisons are carried out in different main treatments and sub-treatments (cultivars), respectively. 同列中不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters in same column mean significant among treatments at 5% level.

表2 不同施锌处理对不同品种小麦产量的影响

Table 2 Effects of different Zn application treatments on wheat yields of different cultivars

处理 Treatment	子粒产量 Grain yield (kg/hm ²)					均值 Average	增产率 Increase (%)
	渭丰 151 WF 151	陕 715 S 715	远丰 175 YF 175	西农 889 XN 889	小偃 216 XY 216		
对照 Control	3804 bc	4025 abc	4052 abc	4771 a	3647 bc	4060 a	
土施 Soil application of Zn	3996 abc	3660 bc	4022 abc	4488 ab	4773 a	4188 a	3.16
喷施 Foliar application of Zn	3985 abc	4595 ab	3894 abc	4222 abc	4153 abc	4170 a	2.71
土施+喷施 Soil and foliar applications of Zn	4243 abc	3390 c	4341 abc	3960 abc	4445 ab	4076 a	0.40
均值 Average	4007 ab	3917 b	4077 ab	4360 a	4254 ab		

注(Note): 均值间多重比较分别在主处理和副处理间进行,其他在不同处理间进行 The multiple comparisons of average are carried out in different main treatments and sub-treatments (cultivars), respectively, and others are carried out in different treatments. 不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters mean significant among treatments at 5% level.

2.2 不同施锌方式对不同小麦品种子粒锌含量及携出量的影响

由图 1 可知,不施锌肥处理下不同小麦品种子粒锌含量在 22.82 ~ 49.42 mg/kg 之间,平均为 25.93 mg/kg。其中,土施+喷施锌肥处理对提高子粒锌含量效果最显著,子粒锌含量在 43.49 ~ 49.42 mg/kg 之间,提高幅度平均为 83%,且以陕 715 子粒锌含量最高,达到 49.42 mg/kg,西农 889 提高幅度最大,达 105%。喷施锌肥处理也显著增加了子粒锌含量,含量在 38.5 ~ 46.0 mg/kg 之间,平均提高幅度为 64%,其中以小偃 216 子粒锌含量最高为

46.02 mg/kg,西农 889 提高幅度最大,为 79%。土施锌肥处理提高小麦子粒锌含量的效果不显著,平均提高幅度为-6.1%,显著低于土施+喷施和喷施锌肥处理;品种间差异也不显著,表明在潜在性缺锌土壤上土施锌肥对子粒锌含量的提升效果不佳。不同品种子粒锌含量的差异也达显著水平,其中小偃 216 子粒平均锌含量最高,为 37.42 mg/kg,而远丰 175 子粒锌含量最低为 33.00 mg/kg,前者比后者高出 13%。另外,不同施锌处理对同一小麦品种子粒锌含量也有明显影响,其顺序为:土施+喷施锌肥 > 喷施锌肥 > 土施锌肥 ≥ 对照。

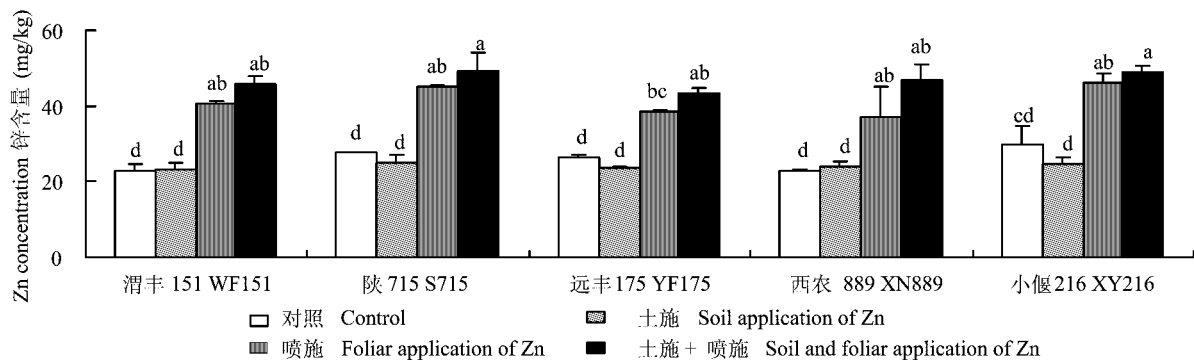


图 1 不同施锌处理对小麦子粒锌含量的影响

Fig. 1 Effects of different Zn application treatments on Zn concentration in wheat grain

注(Note): 图上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant difference among treatments at 5% level.]

不同施锌方式对子粒锌携出量的影响不同。表 3 看出,与对照相比,土施+喷施锌肥处理下小麦子粒锌携出量增长率最高,达到 83%;其次为喷施锌肥处理,为 69%;而土施锌肥则比对照低 3.6%。这与不同施锌方式对子粒锌含量影响的趋势大致相同。不同品种之间子粒锌携出量也存在差异,其中小偃 216 子粒锌携出量最高,达到 159.0 g/hm²,而渭丰

151 子粒锌携出量仅为 134.1 g/hm²,前者比后者高出 19%。不同施锌方式下,不同品种子粒锌携出量也存在显著差异。其中,小偃 216 在土施+喷施锌肥处理下子粒锌携出量最高,达到 218.1 g/hm²,而陕 715 在土施锌肥处理下子粒锌携出量最低为 91.9 g/hm²,前者是后者的 1.37 倍。可见,喷施锌肥和土施+喷施锌肥处理对提高小麦子粒锌的携出量效果较显著。

表 3 不同施锌处理对小麦子粒锌携出量的影响

Table 3 Effects of different Zn application treatments on Zn uptakes by wheat grain

处理 Treatment	子粒锌携出量 Zn uptakes by wheat grain(g/hm ²)					均值 Average	增长率 Increase (%)
	渭丰 151 WF 151	陕 715 S 715	远丰 175 YF 175	西农 889 XN 889	小偃 216 XY 216		
对照 Control	86.8 f	111.2 ef	106.9 ef	108.9 ef	109.3 ef	104.6 b	
土施 Soil application of Zn	93.5 f	91.9 f	95.1 f	107.3 ef	117.4 def	101.0 b	-3.6
喷施 Foliar application of Zn	161.7 bcd	207.8 ab	149.9 cde	172.3 abc	191.1 abc	176.5 a	69.0
土施+喷施 Soil and foliar applications of Zn	194.3 abc	167.5 abc	188.8 abc	185.2 ab	218.1 a	190.8 a	83.0
均值 Average	134.1 b	144.6 ab	135.2 b	143.4 ab	159.0 a		

注(Note): 均值间多重比较分别在主处理和副处理间进行,其他在不同处理间进行 The multiple comparisons of average are carried out in different main treatments and sub-treatments (cultivars), respectively, and others are carried out in different treatments. 不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters mean significant among treatments at 5% level.

2.3 不同施锌方式对小麦子粒中植酸含量的影响

对照处理中植酸含量在 10.94 ~ 11.84 mg/g 之间, 平均为 11.39 mg/g。与之相比, 喷施锌肥显著降低了子粒植酸含量, 平均降低幅度为 7.2%; 其次为土施 + 喷施锌肥处理, 平均降低幅度为 1.5%; 而土施锌肥处理则比其增加了 2.4% (图 2)。不同品种间子粒中植酸含量也存在差异, 其中陕 715 子

粒中植酸含量为 11.53 mg/g, 而小偃 216 子粒中植酸含量为 10.67 mg/g, 前者比后者高出 8%。另外, 不同品种在不同施锌处理下也存在差异, 其中陕 715 在土施锌肥处理下子粒植酸含量最高为 12.73 mg/g, 而喷施锌肥处理下小偃 216 子粒植酸含量 9.40 mg/g 为最小, 前者是后者的 1.35 倍。

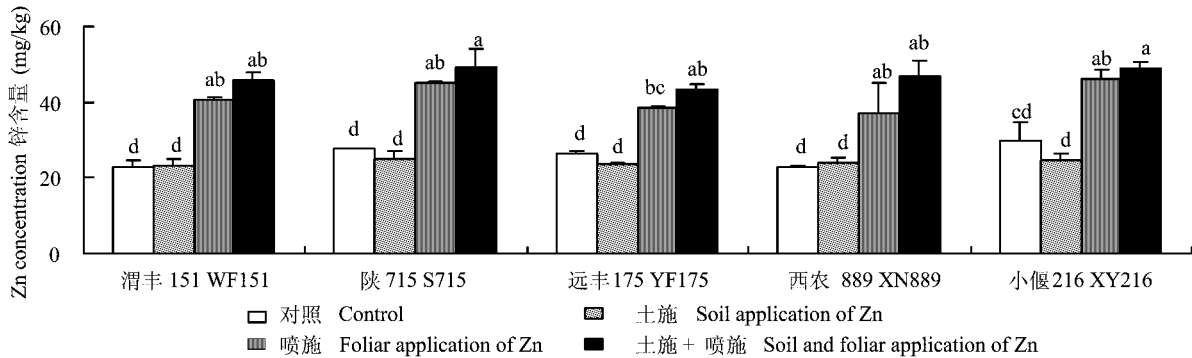


图 2 不同施肥处理对子粒中植酸含量的影响

Fig. 2 Effects of different Zn application treatments on the concentrations of phytic acid (PA) in wheat grain

[注 (Note): 图柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant difference at 5% level.]

2.4 不同施锌方式对小麦子粒中植酸与锌摩尔比的影响

图 3 表明, 对照处理不同小麦品种子粒中植酸与锌的摩尔比值在 36.3 ~ 50.3 之间, 平均为 43.2。土施 + 喷施锌肥处理平均比对照降低 44%, 其比值在 21.8 ~ 25.4 之间, 平均为 23.8, 且品种间差异不显著。喷施锌肥处理也显著降低植酸与锌的摩尔比, 平均为 25.2, 降幅达 41%, 其中, 小偃 216 子粒中植酸与锌的摩尔比值最低, 为 20.2, 而渭丰 151

降低幅度最大, 为 52%; 与土施 + 喷施锌肥处理相比, 总体差异不显著。土施锌肥处理植酸与锌的摩尔比降幅相对较小, 而且陕 715、远丰 175 和小偃 216 的摩尔比还略微升高。有研究表明, 植酸与锌的摩尔比值低于 10 时, 植酸几乎不抑制锌的吸收利用, 高于 20 时则严重抑制其吸收利用^[16-18]。本试验在施锌肥后, 植酸与锌的摩尔比虽有所降低, 在 20.2 ~ 50.7 之间, 但均高于 20, 因此, 还需进一步降低。

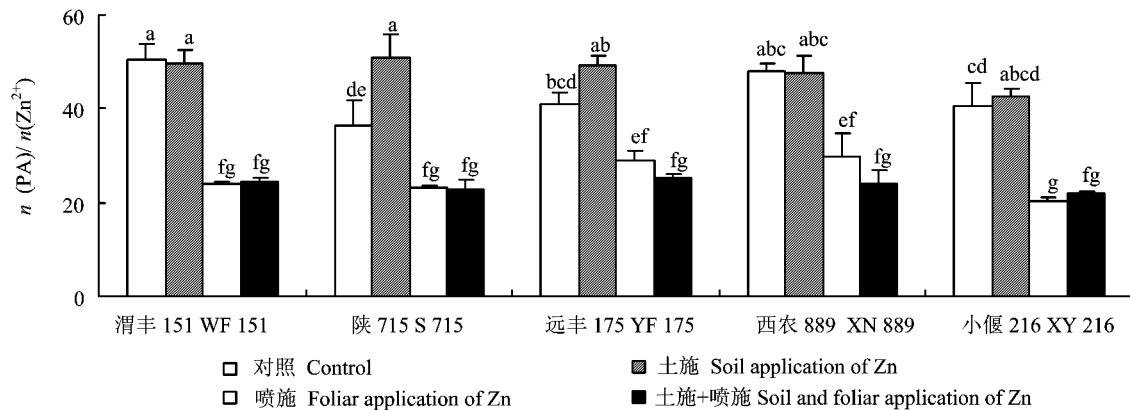


图 3 不同施肥处理对子粒中植酸与锌的摩尔比值的影响

Fig. 3 Effects of different Zn application treatments on the molar ratios of PA to Zn in wheat grain

[注 (Note): 图柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant difference at 5% level.]

2.5 施锌对小麦收获后土壤有效锌含量的影响

表 4 看出,土施锌肥和土施 + 喷施锌肥处理能够显著增加耕层土壤(0—20 cm)有效锌(DTPA-Zn)含量,分别比对照提高 167% 和 204%,达到 2.47 和 2.81 mg/kg,均显著高于土壤缺锌临界值 0.50 mg/kg,使土壤有效锌含量处于较高水平^[10],显著改善了土壤对植物的锌营养供应条件;且两处理之间差异不显著。喷施锌肥对耕层土壤有效锌含量影响不大,其增长率仅为 12.3%。种植不同品种对土壤

有效锌含量也存在一定差异,其中陕 715 的土壤有效锌含量最高,为 2.03 mg/kg,而远丰 175 的土壤有效锌含量最低,为 1.45 mg/kg,前者比后者高出 40%,差异显著。说明施用锌肥后不同品种对土壤有效锌含量具有一定的影响。在同一品种不同施肥方式对提高土壤有效锌含量的变化规律基本一致,即表现为:土施 + 喷施锌肥处理 > 土施锌肥 > 喷施锌肥 > 对照。

表 4 不同施锌处理对耕层土壤(0—20 cm)DTPA-Zn 含量的影响

Table 4 Effects of different Zn application treatments on the DTPA-Zn contents in 0—20cm soil layer

处理 Treatment	土壤有效 Zn 含量 DTPA-Zn contents(mg/kg)						增长率 Increase (%)
	渭丰 151 WF151	陕 715 S 715	远丰 175 YF175	西农 889 XN889	小偃 216 XY216	均值 Average	
对照 Control	0.87 d	0.88 d	1.03 d	0.93 d	0.89 d	0.93 b	
土施 Soil application of Zn	2.56 ab	2.73 ab	2.20 bc	1.34 cd	3.51 a	2.47 a	167.0
喷施 Foliar application of Zn	0.82 d	1.02 d	1.05 d	1.33 cd	0.98 d	1.04 b	12.3
土施 + 喷施 Soil and foliar applications of Zn	3.19 ab	3.52 a	1.50 cd	3.55 a	2.32 bc	2.81 a	204.0
均值 Average	1.86 ab	2.03 a	1.45 b	1.79 ab	1.93 ab		

注(Note): 均值间多重比较分别在主处理和副处理间进行,其他在不同处理间进行 The multiple comparisons of average are carried out in different main treatments and sub-treatments (cultivars), respectively, and others are carried out in different treatments. 不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters mean significant among treatments at 5% level.

3 讨论

本试验表明,土施锌肥和土施 + 喷施锌肥处理虽然均能大幅度提高土壤有效锌含量,使土壤有效锌含量处于较高水平^[10]。但是,单纯土施锌肥并不能显著提高小麦子粒锌含量。这与国外的研究结果有较大差异。Yilmaz 等^[19]认为,在严重缺锌土壤上土施锌肥的增产增质效果均很好,能够使小麦子粒锌含量增加 2 倍左右。本试验的潜在性缺锌土壤条件下,土施锌肥既未表现出明显增产作用,也无提高子粒锌含量的效果;而喷施锌肥和土施 + 喷施锌肥两种施锌方式不仅显著提高了小麦子粒锌含量,而且显著降低了子粒中植酸含量,也显著降低了植酸与锌的摩尔比。因此,从成本角度考虑,喷施锌肥对提高小麦子粒锌含量和生物有效性的效果最佳,也较经济。

喷锌时期是影响作物子粒锌含量的一个重要因子。Cakmak^[7]指出,在作物生长晚期喷施锌肥能较大幅度增加子粒锌含量;Ozturk 等^[20]研究看出,小麦子粒高锌累积出现在子粒形成的早期如灌浆前

期,且在等量条件下喷 10 次比喷 3 次效果好。本试验在小麦的扬花期至灌浆前期(2009 年 4 月 15 日~5 月 9 日)喷施锌肥,共喷施 5 次,使不同小麦品种子粒锌含量达 37.2~49.4 mg/kg 之间,较对照处理提高均在 45.9% 以上。因此,建议最佳喷锌时期在小麦生长后期,如灌浆期。另外,Cakmak^[7]认为,小麦子粒锌含量达到 60 mg/kg 时才能满足人体对锌的需要。但本试验中,子粒锌含量最高为 49.4 mg/kg,这可能与喷锌总量较低有关。因此,通过增加喷锌量能否进一步提高子粒锌含量仍需继续深入研究。而且,为方便田间作业,喷锌次数和浓度也应进一步研究。

植酸是降低锌生物有效性的主要抗营养因子之一,它对人体锌吸收限制作用较强。子粒中 65%~85% 的磷以植酸形式存在,离子状态的锌与植酸结合后几乎不能被人体吸收^[4,7]。施用锌肥能有效降低作物对磷的吸收和累积,从而降低植酸含量,提高人体对锌的吸收和利用^[12]。但植酸与锌含量的高低并不能作为影响锌生物有效性的指标,这是因为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。因此多数情况下,植酸与锌的摩尔比常用来作为预测小麦等禾谷类作物子粒中锌的生物有效性指标之一。本试验中喷施锌肥和土施+喷施锌肥处理能显著降低植酸与锌的摩尔比值,降幅高达44%和40%,这与Erdal等^[12]的研究结果一致;但土施锌肥处理降低摩尔比效果不明显,这可能与单独土施锌肥增加子粒锌含量以及降低植酸含量的幅度较小有关,表明喷施锌肥能有效提高锌的生物有效性。引起锌吸收利用被抑制的 $[\text{植酸}]/[\text{Zn}^{2+}]$ 临界摩尔比值为10~20,低于10植酸几乎不抑制锌的吸收利用,高于20则严重抑制其吸收利用^[21-23]。但本试验中植酸与锌的摩尔比在20.2~50.7之间,均高于20,这对人体锌的吸收起着限制作用,因此还需进一步降低。另外,有研究表明植酸在人体中能起到一定的抗癌作用,且种子中的植酸对种子萌发和幼苗活性也起着非常重要的作用^[23-24],因此植酸与锌含量的关系还需要进一步探讨。

筛选锌高效基因型小麦与施锌肥一样也是提高小麦子粒锌含量的有效方法之一^[19-20]。陈自惠等^[25]通过整合缓冲营养液培养表明,渭丰151和陕715为锌高效基因型小麦品种;而子粒锌含量与锌效率之间不存在显著相关性。本试验看出,锌高效基因型小麦品种陕715的子粒锌含量在土施+喷施锌肥处理下最高为49.4 mg/kg,而锌低效基因型小麦品种小偃216子粒锌含量在该处理下为49.1 mg/kg,两者差异不显著;同时锌低效基因型小麦品种西农889子粒锌含量在土施+喷施锌肥和喷施锌肥处理下提高幅度均最高,分别为105%和78.8%。表明锌高效基因型小麦与子粒富锌小麦并不等同,这可能与控制小麦锌效率和增加子粒锌含量性状的编码基因不同有关^[26-27]。Cakmak等^[28]通过大田和盆栽试验看出,禾谷类作物在锌效率上表现出的不同可能与其根系从土壤中吸收锌的能力不同有关。Jonathan等^[29]结果表明,面包型小麦品种中锌向地上部分的运输效率高,也反映了根系的吸收效率高,说明根系对锌的吸收可能对锌效率贡献更大。关于施肥对小麦子粒锌富集和小麦锌效率高低之间的关系尚待进一步研究。

另外,不同小麦品种在不同施锌处理下对土壤DTPA-Zn含量的影响存在差异,这可能与作物根系分泌物等有关,因不同基因型释放根系分泌物的能力不同;也可能是不同基因型小麦对锌的携出量不同。相关分析表明,土壤DTPA-Zn含量与小麦子

粒携出量之间并未达到显著相关。因此,不同小麦品种对土壤DTPA-Zn含量的影响还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Hotz C, Brown K H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control [J]. *Food Nutr. Bull.*, 2005, 25: 94-203.
- [2] Gibson R S. Zinc: The missing link in combating micronutrient malnutrition in developing countries [J]. *Proc. Nutr. Soc.*, 2006, 65: 51-60.
- [3] Prasad A S. Zinc: mechanisms of host defense [J]. *Nutr.*, 2007, 137: 1345-1349.
- [4] Cakmak I. Enrichment of fertilizers with zinc: An excellent investment for humanity and crop production in India [J]. *J. Trace Elem. Medic. Biol.*, 2009, 23: 281-289.
- [5] Graham R D, Welch R M, Bouis H E. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps [J]. *Adv. Agron.*, 2001, 70: 77-142.
- [6] Yang X E, Chen W R, Feng Y. Improving human micronutrient nutrition through biofortification in the soil-plant system: China as a case study [J]. *Environ. Geochem. Health*, 2007, 29: 413-428.
- [7] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. *Plant Soil*, 2008, 302: 1-17.
- [8] Graham R D, Welch R M. Breeding for staple-food crops with high micronutrient density: Working papers on agricultural strategies for micronutrients No. 3 [R]. Washington DC: International Food Policy Institute, 1996.
- [9] Cakmak I. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways [J]. *Plant Soil*, 2002, 247: 3-24.
- [10] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律 [J]. *中国农业科学*, 1994, 27(1): 30-37.
Liu Z. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 1994, 27(1): 30-37.
- [11] 张勇, 王德森, 张艳, 等. 北方冬麦区小麦种子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.
Zhang Y, Wang D S, Zhang Y *et al.* Variation of major mineral elements concentration and their relationships in grain of Chinese wheat [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2007, 40(9): 1871-1876.
- [12] Erdal I, Yilmaz A, Taban S. Phytic acid and phosphorus concentrations in seeds of wheat cultivars grown with and without zinc fertilization [J]. *J. Plant Nutr.*, 2002, 25(1): 113-127.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析第3版 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002. 263-285.
Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis (3rd.)* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999. 263-285.
- [14] GB/T 5009.153-2003, 植物性食品中植酸的测定 [S].

- GB/T 5009.153-2003, Determination of phytic acid in vegetable foods[S].
- [15] Ranjbar G A, Bahmaniar M A. Effects of soil and foliar application of Zn fertilizer on yield and growth characteristics of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars [J]. *Asian J. Plant Sci.*, 2007, 6(6): 1000-1005.
- [16] 金瑛,马冠生. 植酸与矿物质的生物利用率[J]. *国外医学(卫生学分册)*, 2005, 32(3): 141-144.
Jin Y, Ma G S. The bioavailability of phytic acid and mineral elements[J]. *Foreign Medic. Sci. (Sect. Hyg.)*, 2005, 32(3): 141-144.
- [17] Karunaratne A M, Amerasinghe P H, Ramanujam V M S *et al.* Zinc, iron and phytic acid levels of some popular foods consumed by rural children in Sri Lanka[J]. *J. Food Comp. Ana.*, 2008, 21: 481-488.
- [18] Harland B F, Smith S A, Howard M P *et al.* Nutritional status and phytate: Zinc and phytate \times calcium: Zinc diet. molar ratios of lacto-ovo vegetarian Trappist monks; 10 years later[J]. *Am. Diet.*, 1988, 88: 1562-1566.
- [19] Yilmaz A, Ekiz H, Torun B *et al.* 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.*, 1997, 20: 461-471.
- [20] Ozturk L, Yazici MA, Yucel C *et al.* Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat [J]. *Physiol. Plant*, 2006, 128: 144-152.
- [21] Ma G, Li Y, Jin Y *et al.* Phytate intake and molar ratios of phytate to zinc, iron and calcium in the diets of people in China [J]. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 2007, 61: 368-374.
- [22] Kwun I S, Kwon C S. Dietary molar ratios of phytate: Zinc and millimolar ratios of phytate \times calcium: Zinc in South Koreans [J]. *Biol. Trac. Elem. Res.*, 2000, 75: 29-41.
- [23] Somasundar P, Riggs D, Jackson B *et al.* Inositol hexaphosphate (IP6): A novel treatment for pancreatic cancer [J]. *Surg. Res.*, 2005, 126(2): 199-203.
- [24] Vucenik I, Shamsuddin A M. Cancer inhibition by inositol hexaphosphate (IP6) and inositol: from laboratory to clinic [J]. *J. Nutr.*, 2003, 133: 3778-3784.
- [25] 陈自惠,田霄鸿,王晓峰,曹玉贤. 螯合-缓冲营养液培养条件下不同小麦品种的锌效率比较[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(6): 65-72.
Chen Z H, Tian X H, Wang X F, Cao Y X. Study on zinc efficiency of different wheat cultivars under the chelator-buffered nutrient solution culture conditions [J]. *J. Northwest A & F Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2009, 37(6): 65-72.
- [26] Cakmak I, Torun A, Millet E *et al.* *Triticum dicoccoides*: An important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat [J]. *Soil Sci., Plant Nutr.*, 2004, 50(7): 1047-1054.
- [27] Gene Y, Mcdonald G K. Domesticated emmer wheat (*T. turgidum* L. subsp. *dicoccon* (Schrank) Thell.) as a source for improvement of zinc efficiency in durum wheat [J]. *Plant Soil*, 2008, 310(1-2): 67-75.
- [28] Cakmak I, Ekiz H, Yilmaz A *et al.* Differential responses of rye, triticale, bread and durum wheats to zinc deficiency in calcareous soils [J]. *Plant Soil*, 1997, 188(1): 1-10.
- [29] Hart J J, Norvell W A, Welch R M *et al.* Characterization of zinc uptake, binding and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars [J]. *Plant Physiol.*, 1998, 118: 219-226.