植物营养与肥料学报 2013,19(6):1346-1355
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0608

低锌旱地施锌方式对小麦产量和锌利用的影响

李孟华[1,2], 王朝辉[1,2*], 王建伟[1,2], 毛 晖[1,2], 戴 健[1,2], 李 强[1,2], 邹春琴[3]
(1 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100;
2 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100; 3 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

摘要: 西北地区是我国典型的旱地低锌区。本文选择黄土高原中部两个典型地点,通过田间试验,在两个施氮水平下,研究了不施锌、土施锌、叶喷锌和土施+叶喷锌4种方式对冬小麦产量、锌的吸收和累积以及锌肥利用效率的影响。结果表明,不同施锌方式对小麦产量均无显著影响,但均提高了小麦子粒锌含量,提高幅度因施锌方式而异。与不施锌相比,叶喷和土施+叶喷锌肥可使小麦子粒锌含量提高40%左右,平均达到40 mg/kg;单独土施锌肥虽使土壤有效锌提高3倍左右,但子粒锌含量无显著变化。叶喷锌肥的锌利用效率远高于土施和土施+叶喷处理,每公顷喷施1 kg锌可使小麦子粒锌含量提高6.70～13.04 mg/kg;子粒锌利用率为6.02%～9.40%,达到土施锌肥的80倍左右;总锌利用率为19.78%～30.91%,是土施锌肥的132～221倍。施氮水平对小麦产量及锌肥利用效率均无显著影响。可见,在旱地低锌区,与土施锌相比,叶喷是更加经济有效、环境友好的锌肥施用方式,是提高小麦锌营养品质切实可行的措施。

关键词: 小麦; 施锌方式; 产量; 锌含量; 利用效率
中图分类号: S512.01;S143.7+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)06-1346-10

Effect of Zn application methods on wheat grain yield and Zn utilization in Zn-deficient soils of dryland

LI Meng-hua[1,2], WANG Zhao-hui[1,2*], WANG Jian-wei[1,2], MAO Hui[1,2],
DAI Jian[1,2], LI Qiang[1,2], ZOU Chun-qin[3]
(*1 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Resources and Environmental Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China*)

Abstract: Soil Zn deficiency and drought are serious stress factors limiting the Zn nutrition of crops in northwest China. Field experiments were conducted to study the effects of soil application, foliar application and soil + foliar application of Zn on yield, Zn contents and accumulation in grain, and Zn use efficiency of winter wheat grown under two N rates at two locations in the middle part of Loess Plateau. Results show that Zn application does not increase the grain yield of winter wheat, but can increase the grain Zn contents. The increases are varied with the Zn application methods, the grain Zn contents are increased by about 40%, up to 40 mg/kg for foliar application and soil + foliar application, not significant with soil application, although the soil DTPA - Zn is triply increased. Zinc use efficiency of the foliar applied Zn is higher than those of the soil and soil + foliar applied Zn. Each one kg/ha foliar applied Zn is observed to be able to increase the grain Zn content by 6.70-13.04 mg/kg. The grain Zn utilization and total Zn utilization efficiency are respectively 6.02%-9.40% and 19.78%-30.91% for the foliar applied Zn, which are correspondingly 80 and 132-221 times more than those for the soil applied Zn. Nitrogen

收稿日期: 2013-01-22 **接受日期:** 2013-04-15
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金;农业公益性行业科研专项经费项目(201303104, 201103003);西北农林科技大学"创新团队建设计划";国际锌协会项目(Zinc Nutrient Initiative MD-86)资助。
作者简介: 李孟华(1985—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事旱地冬小麦锌营养的施肥研究。E-mail: lmhll@126.com
* 通信作者 Tel: 029-87082234, E-mail: w-zhaohui@263.net

rates have no effect on the yield and Zn utilization. Therefore, the foliar application of Zn is more cost-effective and environmental friendly than the soil application, and is one of the important practices to improve grain Zn concentration on Zn-deficient soils in dryland areas of northwestern China.

Key words: wheat; Zn fertilization method; grain yield; Zn content; use efficiency

锌是人及动植物生长发育必需的微量元素之一,参与生物体众多生理生化过程[1-2],人体锌摄入量不足会导致免疫功能障碍、性腺发育不良、认知功能障碍以及腹泻、肺炎等疾病[3]。据统计,全世界超过20亿人锌摄入量不足[4],中国大约有一亿人遭受锌缺乏困扰,尤其是农村地区更加严重[5]。膳食中的锌是人体锌的主要来源,小麦是我国主要粮食作物和矿质元素主要供给来源,20%以上锌营养由小麦及其制品提供,这一比例在北方及农村地区更高[5]。因此,小麦锌含量高低直接影响我国居民锌营养状况。

我国小麦锌含量普遍不高。张明艳等[6]研究了112个长江中下游主推和部分引进品种,发现小麦子粒锌含量平均为32.07 mg/kg;傅兆麟等[7]分析了黄海麦区255份种质材料,发现子粒平均锌含量为24.01 mg/kg;张勇等[8-9]先后两次研究了我国北方共505个小麦样品,发现平均锌含量分别为29.3和32.3 mg/kg;在山西地区的研究结果也显示,小麦平均锌含量仅为29.3 mg/kg[10]。这些结果说明,与推荐含量40～60 mg/kg[11]相比,我国小麦锌含量普遍较低。另外,因为锌在成熟小麦子粒中一般在糊粉层和胚中的含量相对较高,精加工过程常会使这些部分被去除,因而导致人们食用的面粉锌含量降低[12]。据统计,2009年中国部分省区成年居民人均每天锌摄入量为11.2 mg,比1989年下降了1.1 mg[13],这主要是由于作为膳食锌来源的谷类食物锌含量下降而引起的[14]。

土壤有效锌含量不足是导致小麦锌营养缺乏的主要原因。黄土高原20.69%的土壤有效锌(DTPA-Zn)在临界值(0.5 mg/kg)以下,37.93%为低水平(0.5～1.0 mg/kg)[15]。由于该地区气候干旱,土壤有机质含量低,碳酸钙含量高以及较高的pH等,使土壤有效锌含量偏低[15-19],导致这一地区种植的小麦子粒锌含量较低,难以满足人体锌营养需求。因此,通过经济有效的措施提高小麦子粒锌含量,对缓解这一地区锌营养不足具有一定的现实意义。

小麦育种及施用锌肥是提高小麦子粒锌含量的两个重要途径[20-21],通过育种获得锌高效型品种是获得富锌小麦子粒的有效途径,但这需要一个较长的过程,即使获得这种锌高效型的品种,也难以在有效锌含量缺乏的土壤上发挥作用。因此,通过施用锌肥等农艺措施在短时间内实现小麦子粒富锌是一种有效可行的途径[11]。目前,土施和叶面喷施是施用锌肥的两种主要方式。当土壤有效锌较低时,土施和叶喷硫酸锌可使小麦子粒锌含量提高3～4倍,增产2～3倍[22],Cakmak等[23]也发现土施或叶喷均可提高子粒锌含量,且在小麦生长后期喷施锌肥效果更好,但只有土施锌肥才能取得明显的增产效果。而在陕西关中地区的试验结果却表明,土施或叶喷锌肥均不会显著影响小麦产量,但可以不同程度地提高小麦子粒锌含量[24-25],渭北旱塬17年的长期定位试验也发现施锌增产效果较小[26]。也有研究认为,施用锌肥的效果可能和施氮量有关,锌供应充足时,增施氮肥可以提高小麦产量或子粒锌含量[23,27-28]。

我国西北地区居民主要以面食为主,因此该地区小麦子粒的锌含量与该区居民的锌营养状况有密切关系,但有关这一地区小麦施锌方式方面的研究还较少,且多局限于一个地点[29-30]。本研究选取陕西关中平原西部的凤翔县及渭北旱塬的永寿县两个试验点,研究施锌方式对小麦产量、子粒锌含量及锌肥有效性的影响,旨在探讨黄土旱地低锌区不同种植条件下更加经济有效、环境友好的锌肥施用方式,为优化我国旱地低锌区小麦锌肥管理提供切实可行的措施和理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于2010～2011年在陕西省永寿县养马庄村及凤翔县横水村进行。永寿县养马庄村试验点位于海拔1105 m的典型旱地雨养农业区,一年一熟,冬小麦连作,土壤类型为黄绵土,年平均气温10.2℃,无霜期210天,常年降雨量610 mm,65%的降水集中在6～9月,小麦生长期为9月下旬到次年6月底。凤翔县横水村试验点位于关中平原西

部,海拔600 m,一年两熟,冬小麦-夏玉米轮作,土壤类型为土垫旱耕人为土,年平均气温11.5℃,无霜期207天,常年降雨量625 mm,农田具备灌溉条件。供试土壤主要理化性状见表1。

表1 试验点土壤基本性状

Table 1 The properties of soils at two experiment sites

地点 Location	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	有效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	矿质氮 Mineral N		DTPA-Zn (mg/kg)	pH
					NO_3^--N (mg/kg)	NH_4^+-N (mg/kg)		
永寿县 Yongshou county	11.3	0.78	6.5	134.0	10.4	5.7	0.45	8.2
凤翔县 Fengxiang county	14.6	0.87	8.1	120.1	13.1	3.9	0.74	7.9

1.2 试验设计

本研究设两个施氮水平(N 180、300 kg/hm^2)和4种施锌方式:1)不施锌(对照C);2)土施锌(S,施$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 50 kg/hm^2,播前拌土撒在地表后人工翻入土壤);3)叶喷锌[F,施$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 4.8 kg/hm^2,以0.4%(w/v)的$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$溶液在傍晚喷施于小麦冠层,用0.01%(v/v)的吐温20做表面活性剂,在小麦抽穗前一周和花后一周各喷施1次,用量分别为50%];4)土施+叶喷锌[S+F,锌肥施用量和施锌方法及时间与土施锌(S)和叶喷锌(F)相同]。各处理磷、钾肥用量相同,分别为$P_2O_5$75 kg/hm^{2}和K_2O 75 kg/hm^2,均在播前作为底肥一次施入,磷肥用磷酸二铵,钾肥用硫酸钾。氮肥用磷酸二铵(计入随磷肥施入的氮量)和尿素,1/3作基肥播前施入,2/3在返青期追施。小区面积31.5 m^2(4.5 m×7 m),行距18 cm,每处理重复4次,完全随机区组排列。小麦选用当地品种,永寿选用晋麦47,凤翔选用西农979,播量为150 kg/hm^2。凤翔试验点在返青期灌水一次,小麦生长期间的田间管理均与当地农户相同。

1.3 采样与测定方法

在小麦成熟期,每个小区收获两个1 m^{2}样方,晒干后脱粒计算小麦子粒产量。在每个小区随机选取约100株小麦,将小麦植株连根拔起后沿根茎结合处将根剪断,地上部为一个分析样品,风干后脱粒,分为茎叶、颖壳、子粒三部分,用于测定产量构成因素,并结合子粒产量计算小麦地上部总生物量。定量取各部分样品用去离子水清洗后105℃杀青30 min,65℃烘干至恒重,用碳化钨球磨仪(莱驰MM400,德国)磨细,密封保存,备用。

小麦收获后在各小区选取3个点,采集0—20 cm、20—40 cm土壤样品,样品混匀自然风干后磨细,过1 mm尼龙网筛,备用。

植物样品用$HNO_3-H_2O_2$微波消解仪(屹尧WX-8000,中国)消解,原子吸收分光光度计(日立Z-2000,日本)测定锌含量;土壤有效锌用DTPA溶液(DTPA 0.005 mol/L, $CaCl_2$ 0.01 mol/L, TEA 0.1 mol/L,pH=7.3)浸提,液土比为2:1,原子吸收分光光度计测定。

1.4 数据处理

试验数据采用SAS 8.1(Statistical Analysis System)软件进行统计分析,采用LSD(Least Significant Difference)法进行多重比较,差异显著性水平为5%。

相关参数及其计算公式:

锌收获指数(%)=子粒锌累积量(g/hm^2)/地上部锌累积量(g/hm^2)×100[31]。

子粒锌提高指数[(mg/kg)/(kg/hm^2)]=(施锌子粒锌含量(mg/kg)-不施锌子粒锌含量(mg/kg)]/施锌量(kg/hm^2)。

子粒锌利用率(%)=[施锌处理子粒锌累积量(g/hm^2)-不施锌处理子粒锌累积量(g/hm^2)]/施锌量(g/hm^2)×100[32]。

总锌利用率(%)=[施锌处理地上部锌累积量(g/hm^2)-不施锌处理地上部锌累积量(g/hm^2)]/施锌量(g/hm^2)×100[33]。

2 结果与分析

2.1 施锌方式对小麦产量及收获指数的影响

两地试验结果(表2)表明,施氮量和施锌方式

对小麦子粒产量、地上部生物量及收获指数均无显著影响。施氮为 N 180 和 300 kg/hm² 时,永寿试验点平均子粒产量分别为 5536 kg/hm² 和 5916 kg/hm²,凤翔试验点分别为 6956 kg/hm² 和 6973 kg/hm²;两地小麦地上部生物量平均分别为 11275 kg/hm² 和 11941 kg/hm²、14603 kg/hm² 和 14744 kg/hm²;收获指数平均为 49% 和 49%、48% 和 47%。说明在两个试验地点施氮 N 180 kg/hm² 即可满足小麦对氮素的需求,增施氮肥不能提高小麦产量;土壤虽然缺锌,但施用锌肥也并不能显著提高小麦产量。

表 2　不同施锌方式对小麦产量及收获指数的影响

Table 2　Effects of different Zn application methods on yield and harvest index of winter wheat

施氮量 N rate (kg/hm²)	施锌方式 Zn application method	永寿县 Yongshou County			凤翔县 Fengxiang County		
		产量 Grain yield (kg/hm²)	生物量 Biomass (kg/hm²)	收获指数 Harvest index (%)	产量 Grain yield (kg/hm²)	生物量 Biomass (kg/hm²)	收获指数 Harvest index (%)
180	对照 C	5356 a	11073 a	48 a	6874 ab	14626 ab	47 a
	土施 S	5455 a	10982 a	50 a	6633 b	13761 b	48 a
	叶喷 F	5901 a	12029 a	49 a	7385 a	15377 a	48 a
	土施 + 叶喷 S + F	5430 a	11016 a	49 a	6932 ab	14647 ab	48 a
	平均 Mean	5536A	11275A	49 A	6956 A	14603 A	48 A
300	对照 C	5764 a	11759 a	49 a	6986 ab	14134 ab	49 a
	土施 S	5941 a	12131 a	49 a	7093 ab	15266 a	46 a
	叶喷 F	6272 a	12440 a	49 a	7294 a	15435 a	47 a
	土施 + 叶喷 S + F	5687 a	11432 a	50 a	6652 b	14074 ab	47 a
	平均 Mean	5916 A	11941A	49 A	6973A	14744 A	47 A

注(Note): C—Control; S—Soil applacation; F—Foliar application; S + F—Soil + Foliar application. 同列数据后不同小写字母表示不同施锌方式 LSD 检验在 0.05 水平上差异显著,不同大写字母表示不同氮水平 LSD 检验在 0.05 水平上差异显著 Different small letters following values in the same column show significant differences at the 0.05 level among different Zn application methods, and different capital letters show significant differences among N rates at the 0.05 level (LSD test).

2.2　施锌方式对小麦锌含量的影响

与对照相比,叶喷及土施 + 叶喷锌肥可显著提高了小麦子粒锌含量(表 3)。在施氮 N 180 和 300 kg/hm² 时,永寿试验点叶喷锌处理的子粒锌含量分别为 41.5 和 43.4 mg/kg,较对照分别提高了 49% 和 52%;凤翔试验点的子粒锌含量分别为 35.3 和 36.5 mg/kg,较对照提高了 24% 和 27%。永寿试验点土施 + 叶喷处理的子粒锌含量与叶喷处理无显著差异,在施氮 N 180 和 300 kg/hm² 下分别较对照提高了 45% 和 50%;而凤翔点土施 + 叶喷处理的子粒锌含量显著高于叶喷处理,分别提高了 33% 和 38%。两试验点土施锌的效果均不显著,子粒锌含量仅比对照提高 4.3% ~ 6.3%。尽管同一锌肥处理在施氮 N 300 kg/hm² 时的子粒锌含量要高于 N 180 kg/hm²,但均未达显著水平,说明在 N 180 kg/hm²的基础上再增施氮肥不能提高小麦子粒锌含量。

从表 3 还可以看出,茎叶和颖壳对施锌方式的反应与子粒基本一致。土施锌处理没有显著提高茎叶及颖壳锌含量。叶喷锌时,N 180 和 300 kg/hm² 两个氮水平下永寿试验点小麦茎叶锌含量分别为 37.4 和 43.8 mg/kg,较对照分别提高 642% 和 774%,颖壳锌含量分别为 52.3 和 52.9 mg/kg,较对照提高 689% 和 590%;凤翔试验点茎叶锌含量分别为 25.6 和 28.2 mg/kg,较对照提高 211% 和 228%,颖壳锌含量分别为 25.5 和 27.7 mg/kg,较对照分别提高 189% 和 211%。土施 + 叶喷锌时,永寿试验点的茎叶及颖壳锌含量与叶喷锌差异不显著,但凤翔试验点则高于叶喷锌;两个氮水平下,茎叶锌含量较对照分别提高 320% 和 361%,颖壳锌含量提高 245% 和 299%。可见,叶喷及土施 + 叶喷锌时一部分被小麦吸收并分配到子粒中,提高了子粒锌含量,

同时还有很大一部分存在于小麦茎叶与颖壳中,或者残留于茎叶及颖壳表面,使茎叶和颖壳锌含量大幅度提高,是子粒锌提高幅度的十几倍。除凤翔试验点小麦颖壳外,增施氮肥对小麦营养器官锌含量没有显著影响。

表3 不同施锌方式对小麦各部分锌含量的影响(mg/kg)

Table 3 Effects of different Zn application methods on zinc contents in different parts of wheat

施氮量 N rate (kg/hm^2)	施锌方式 Zn application method	永寿县 Yongshou County			凤翔县 Fengxiang County		
		茎叶 Straw	颖壳 Glume	子粒 Grain	茎叶 Straw	颖壳 Glume	子粒 Grain
180	对照 C	5.0 b	6.6 c	27.9 b	8.2 d	8.8 d	28.6 d
	土施 S	5.5 b	6.8 c	29.6 b	9.4 d	9.6 d	29.8 d
	叶喷 F	37.4 a	52.3 b	41.5 a	25.6 c	25.5 c	35.3 c
	土施+叶喷 S+F	39.9 a	50.9 b	40.5 a	34.6 ab	30.5 b	37.9 ab
	平均 Mean	22.0 A	29.2 A	34.9 A	19.5 A	18.6 B	32.9 A
300	对照 C	5.0 b	7.7 c	28.6 b	8.6 d	8.9 d	28.7 d
	土施 S	5.7 b	6.7 c	30.3 b	9.9 d	10.0 d	30.3 d
	叶喷 F	43.8 a	52.9 ab	43.4 a	28.2 bc	27.7 bc	36.5 bc
	土施+叶喷 S+F	45.1 a	60.4 a	42.9 a	39.6 a	35.6 a	39.6 a
	平均 Mean	24.9 A	31.7 A	36.3 A	21.6 A	20.6 A	33.8 A

注(Note): C—Control; S—Soil applacation; F—Foliar application; S+F—Soil+Foliar application. 同列数据后不同小写字母表示不同施锌方式LSD检验在0.05水平上差异显著,不同大写字母表示不同氮水平LSD检验在0.05水平上差异显著 Values followed by different small letters mean significant different at the 0.05 level among different Zn application methods, and capital letters mean significant among N rates at the 0.05 level (LSD test).

2.3 施锌方式对小麦地上部锌累积量与分配的影响

施锌方式对小麦地上部锌累积量的影响与对锌含量的影响一致(表4)。施氮180和300 kg/hm^2时,永寿试验点土施锌处理小麦总锌累积量分别为192.6和215.3 g/hm^2,凤翔试验点分别为264.8和294.2 g/hm^2,较对照均无显著差异。叶喷和土施+叶喷处理均显著提高了小麦的锌总累积量,且两者没有显著差异。叶喷锌时,永寿试验点在两个施氮水平下小麦锌总累积量分别为493.7和556.4 g/hm^2,较对照提高176%和183%,凤翔试验点为465.8和492.0 g/hm^2,较对照提高78%和86%。土施+叶喷锌时,永寿试验点在N 180和300 kg/hm^2两个施氮水平下的锌总累积量较对照提高155%和162%,凤翔试验点提高102%和111%。可见,叶喷及土施+叶喷锌肥使小麦地上部累积量显著增加,土施则没有效果,而且增施氮肥也不能显著提高小麦锌总累积量。

土施锌,两试验点锌收获指数分别为84%和83%、75%和73%,与对照都没有显著差异。叶喷及土施+叶喷锌肥显著降低了小麦锌收获指数,且两者没有显著差异,永寿试验点叶喷及土施+叶喷处理使锌收获指数较对照降低了41%~42%,而凤翔试验点降低25%~38%。可见,叶喷及土施+叶喷虽然明显提高了地上部的锌累积量,但却使锌在子粒中的分配比例降低。

2.4 施锌方式对小麦锌肥利用效率的影响

子粒锌的提高指数、子粒锌利用率、总锌利用率均为评价锌肥利用效率的重要参数,对指导合理施用锌肥有重要意义。对土施和叶喷两种施锌方式的分析(表5)表明,三个参数因地点有一定变异,在土壤有效锌含量偏低的永寿(DTPA-Zn=0.45 mg/kg)三者数值均偏高,而在土壤有效锌含量较高的凤翔(DTPA-Zn=0.74 mg/kg)数值则偏低,但两个试验点的两个氮水平间无显著差异。从N 180和300 kg/hm^2两个施氮水平的平均值来看,永寿和凤翔试验点土施锌处理的子粒锌提高指数分别为0.15和0.13(mg/kg)/(kg/hm^2),叶喷锌处理分别

为 13.04 和 6.70(mg/kg)/(kg/hm²)；两试验点土施处理的子粒锌利用率分别为 0.12% 和 0.07%、叶喷处理分别为 9.40% 和 6.02%，土施处理的总锌利用率分别为 0.14% 和 0.15%、叶喷处理分别为 30.91 和 19.78%。可见，土施锌肥时，子粒锌提高指数、子粒锌利用率、总锌利用率都是极低的。

表 4　不同施锌方式对小麦地上部锌累积量和锌收获指数的影响

Table 4　Effects of different Zn application methods on Zn accumulation in shoot and Zn harvest index

施氮量 N rate (kg/hm²)	施锌方式 Zn application method	永寿县 Yongshou County		凤翔县 Fengxiang County	
		锌总累积量(g/hm²) Total Zn uptake	锌收获指数(%) Zn harvest index	锌总累积量(g/hm²) Total Zn uptake	锌收获指数(%) Zn harvest index
180	对照 C	178.6 c	83 a	261.2 c	75 a
	土施 S	192.6 c	84 a	264.8 c	75 a
	叶喷 F	493.7 ab	49 b	465.8 b	56 b
	土施 + 叶喷 S + F	455.1 b	48 b	526.5 ab	51 bc
300	对照 C	196.7 c	84 a	264.8 c	76 a
	土施 S	215.3 c	83 a	294.2 c	73 a
	叶喷 F	556.4 a	49 b	492.0 ab	55 b
	土施 + 叶喷 S + F	525.4 ab	47 b	557.7 a	47 c

注(Note)：C—Control；S—Soil applacation；F—Foliar application；S + F—Soil + Foliar application. 同列数据后不同小写字母表示不同施锌方式 LSD 检验在 0.05 水平上差异显著 Different small letters following values in the same column show significant differences at the 0.05 level among different Zn application methods (LSD test).

表 5　不同施锌方式对小麦锌肥利用效率的影响

Table 5　Effects of different Zn application methods on Zn use efficiency

施氮量 N rate (kg/hm²)	施锌方式 Zn application method	永寿县 Yongshou County			凤翔县 Fengxiang County		
		子粒锌提高指数 ZnIIg (mg/kg)/(kg/hm²)	子粒锌利用率 ZnUEg (%)	总锌利用率 ZnUEt (%)	子粒锌提高指数 ZnIIg (mg/kg)/(kg/hm²)	子粒锌利用率 ZnUEg (%)	总锌利用率 ZnUEt (%)
180	对照 Control						
	土施 Soil applacation	0.15 b	0.11 b	0.12 b	0.11 b	0.01 b	0.03 b
	叶喷 Foliar applacation	12.48 a	8.74 a	28.87 a	6.21 a	5.95 a	18.74 a
300	对照 Control						
	土施 Soil applacation	0.16 b	0.13 b	0.16 b	0.14 b	0.13 b	0.26 b
	叶喷 Foliar applacation	13.61 a	10.05 a	32.95 a	7.18 a	6.09 a	20.82 a

注(Note)：ZnIIg—Zn increase index；ZnUEg—Grain Zn utilization efficiency；ZnUEt—Total Zn utilization efficiency. 同列数据后不同小写字母表示不同施锌方式 LSD 检验在 0.05 水平上差异显著 Different small letters following values in the same column show significant differences at the 0.05 level among different Zn application methods (LSD test).

2.5　施锌方式对小麦收获后土壤有效锌(DTPA - Zn)的影响

表 6 显示，叶喷锌(F)处理多数情况下土壤有效锌有增加趋势，且在两个地点的情况一致。从两

个氮水平的平均值来看，永寿和凤翔试验点F处理的0—20 cm土层有效锌含量分别为0.50和0.78 mg/kg，较对照提高21%和17%，20—40 cm土层有效锌含量无明显变化。土施锌处理使土壤有效锌显著增加，两地情况一致。从两个氮水平的平均值来看，永寿和凤翔试验点土施锌处理的0—20 cm土层有效锌含量分别为1.11和1.62 mg/kg，较对照提高169%和143%；20—40 cm土层有效锌含量分别为0.34和0.39 mg/kg，较对照提高15%和25%。土施+叶喷处理的情况和土施锌处理一致。可见，土施锌肥能显著提高土壤有效锌含量，且表层更加明显。

表6 不同施锌方式对收获期不同土层土壤有效锌含量的影响(mg/kg)

Table 6 Effects of different Zn application methods on the DTPA-Zn in different soil layers at the harvest

施氮量 N rate (kg/hm^2)	施锌方式 Zn application method	永寿县 Yongshou County		凤翔县 Fengxiang County	
		0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
180	对照 C	0.47 bc	0.25 bc	0.65 c	0.32 bc
	土施 S	1.26 a	0.31 abc	1.78 a	0.41 a
	叶喷 F	0.51 bc	0.23 c	0.80 c	0.33 bc
	土施+叶喷 S+F	1.19 a	0.32 abc	1.33 ab	0.34 bc
300	对照 C	0.36 c	0.34 ab	0.68 c	0.29 bc
	土施 S	0.97 ab	0.37 a	1.45 ab	0.37 ab
	叶喷 F	0.49 c	0.26 bc	0.76 c	0.26 c
	土施+叶喷 S+F	1.03 ab	0.33 abc	1.04 bc	0.36 ab

注(Note)：C—Control；S—Soil applacation；F—Foliar application；S+F—Soil+Foliar application. 同列数据后不同小写字母表示不同施锌方式LSD检验在0.05水平上差异显著 Different small letters following values in the same column show significant differences at the 0.05 level among different Zn application methods (LSD test).

3 讨论

3.1 不同施锌方式对小麦产量的影响

根据刘铮[18]的研究，当土壤潜在性缺锌(有效锌含量在0.5～1.0 mg/kg之间)或严重缺锌(有效锌含量低于0.5 mg/kg)时，施用锌肥可以改善农作物缺锌症状。本试验土壤有效锌含量均低于1.0 mg/kg，但无论土施还是叶喷锌肥，都没有显著提高小麦产量，尽管叶喷有提高小麦产量的趋势，且显著提高小麦子粒锌含量。关于锌肥对小麦产量的影响，前人的研究结果也不尽一致。土耳其的研究结果表明，在Konya(土壤DTPA-Zn为0.18 mg/kg)土施Zn $SO_4 \cdot 7H_2O$ 50 kg/hm^2时，可使小麦增产21%～23%，而喷施0.5%的$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$则无效果；在Adana(土壤DTPA-Zn为0.49 mg/kg)和Samsun(DTPA-Zn为1.59 mg/kg)的喷施锌肥试验也无效果[23]；在河南省新乡(土壤DTPA-Zn为0.12 mg/kg)的试验结果发现，施锌30～240 kg/hm^2，可使小麦增产4.6～10%[34]；江苏省连云港(土壤DTPA-Zn为0.58 mg/kg)的研究表明，锌肥用量在30～45 kg/hm^2时，能有效提高小麦产量，再提高锌肥用量其增产效果反而下降[35]。然而，Zou等对包括中国在内的多个国家4年的23个试验研究表明，只有在Pakistan(土壤DTPA-Zn为0.30～0.71 mg/kg)的土施锌肥($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 50 kg/hm^2)试验表现出显著的增产效果，而叶喷锌肥($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5%)表现出增产趋势，但差异不显著[36]。在陕西关中地区(土壤DTPA-Zn为0.65～0.67 mg/kg)的研究也表明，土施或叶喷锌肥均对产量无明显影响[30, 37-38]。本试验在同一地区(土壤DTPA-Zn为0.48～0.78 mg/kg)的研究结果也表明，土施$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 50 kg/hm^2或叶喷4.0 kg/hm^2(0.5%)均对产量无明显影响[32]。由此可以看出，因气候、土壤等条件的差异，锌肥对产量的影响并不确定，在我国黄土高原旱作区，水分缺乏是限制小麦产量的主要因素，单纯施用锌肥很难提高小麦产量。

尽管本试验设置了N 180和300 kg/hm^2两个氮水平，但不同氮水平下的小麦产量和生物量均无

显著差异,与前人的氮锌协同[23,37]结论不一致。这可能是 N 180 kg/hm^2 的氮肥用量已经足够满足小麦对氮素的营养需求,再增施氮肥并不能表现出对小麦生长的促进作用。

3.2 不同施锌方式对小麦子粒锌含量、锌累积与分配的影响

喷施锌肥使小麦子粒锌含量大幅度提高,这说明通过叶面喷施的锌可以较容易地运输到子粒,Haslett[38]和 Erenoglu[39]等人的同位素标记试验也证明了这一点。然而,在旱稻和拟南芥的研究却发现,在子粒形成时期,根系吸收及转运是子粒中锌的主要来源[40-41],这很可能是在人为控制的室内培养及盆栽试验中,锌、水分供应充足,根系吸收及转运成为子粒中锌来源的主要途径[27,40-42]。本试验条件下,土壤中较高的碳酸钙含量及 pH,使施入土壤中的锌很快转化为非有效态即钝化形态,从而导致锌肥有效性降低。另外,锌主要以扩散的方式向植物根系移动,该地区小麦生育期内降水不足,影响小麦根毛产生和伸长,从而影响锌向小麦根际的扩散和吸收;干旱还会减弱蒸腾作用,使锌由根系向地上部的运输动力下降[43]。因此,单纯土施锌肥,小麦地上部营养器官及子粒的锌含量都不能明显提高,而喷施的效果较好,叶喷和土施 + 叶喷使子粒锌含量较对照平均提高 40%,从 28 mg/kg 提高到 40 mg/kg 左右,达到推荐含量[11]。

叶喷锌肥显著提高了小麦地上部的锌累积量,但却显著降低锌收获指数。Cakmak 等[23]认为,大田条件下,土壤供锌受限,生殖生长阶段增加营养器官的锌储量是提高子粒锌含量的关键。Dang 等[44]的研究也发现,子粒由再分配获得的锌占子粒总锌量的比率为 58.2% ~ 60.3%,可见,子粒锌的吸收和积累在较大程度上取决于营养器官对锌的再分配。然而,叶喷锌肥并没有使子粒锌累积量像茎叶颖壳中的累积量一样大幅度提高,导致叶喷锌收获指数降低。有研究者认为这可能是营养器官与生殖器官之间存在着转运障碍[45],或者是子粒"库"容量有限,从而限制了锌的积累;也可能是叶面喷施的锌没能全部进入植物组织,而是部分残留在茎叶表面,致使收获指数降低,具体原因还有待深入研究。

3.3 不同施锌方式对小麦锌肥利用效率的影响

国内外表征肥料利用效率的参数很多,目前肥料利用率,即肥料养分回收率常用于表征大量元素肥料的利用情况[46]。本文选用子粒锌提高指数、子粒锌利用率、总锌利用率作为衡量锌肥利用效率及施肥的参数,且选用子粒锌提高指数这一指标来计算使小麦子粒锌含量提高到某一水平时的锌肥施用量。试验发现,叶喷和土施锌肥时,子粒锌提高指数分别是 6.70 ~ 13.04(mg/kg)/(kg/hm^2)和 0.13 ~ 0.14(mg/kg)/(kg/hm^2),子粒锌利用率分别是 6.02% ~ 9.40% 和 0.07% ~ 0.12%,总锌利用率分别是 19.78% ~ 30.91% 和 0.14% ~ 0.15%。从分析结果(表 5)可以看出,在土壤有效锌含量低时,锌肥利用效率要高于土壤有效锌含量相对高的地点,而且土施锌肥的锌肥利用效率是极低的。施入土壤的锌肥数量是叶喷的 10 倍还多,假设本试验中土施锌肥使小麦子粒锌含量达到叶喷的水平,那么土施锌也是极不经济的,而且长年施锌会使大量锌残留在土壤,对生态环境是否存在潜在危害,也有待进一步研究。因此,在干旱的石灰性土壤上,叶喷锌肥是提高小麦子粒锌含量更经济有效、环境友好的施肥措施。

3.4 不同施锌方式对土壤有效锌的影响

虽然是叶面施肥,但喷施的锌肥不可能完全附着于植株上,因此,叶喷锌肥也有提高土壤有效锌的趋势,而土施锌肥使土壤耕层有效锌显著增加,较对照提高 3 倍左右。郝明德等 18 年的定位试验也发现,连续施锌后耕层有效锌含量明显增加,但对 60 cm 以下的深层土壤有效锌含量影响不显著[47]。尽管土施锌后土壤有效锌含量大幅度提高,但却没有明显提高小麦子粒的锌含量,与 Yilmaz[22] 和 Cakmak[23]等在严重缺锌(土壤 DTPA-Zn 为 0.12 ~ 0.18 mg/kg)的土壤上施锌肥使小麦子粒锌含量增加 2 倍多相差甚远,这可能是本试验的土壤没有达到极严重缺锌的程度,而且土壤水分不足,制约了锌在土壤中的移动、小麦根系发育以及锌由根系向地上部的转运,从而出现土壤有效锌增高,而小麦地上部器官锌含量不增加的结果。

4 结论

在该试验地区,施锌不会对旱地小麦产量产生显著影响,但叶喷锌肥有增产的趋势。叶喷和土施 + 叶喷锌肥可使小麦子粒锌含量显著提高 40% 左右,平均达到 40 mg/kg;单独土施锌肥虽使土壤有效锌提高 3 倍左右,但子粒锌含量无显著变化。叶喷锌肥的锌利用效率远高于土施和土施 + 叶喷,每公顷喷施 1 kg 锌可使小麦子粒锌含量提高 6.70 ~ 13.04 mg/kg,子粒锌利用率为 6.02% ~ 9.40%,是

土施锌肥的80倍左右,总锌利用率平均为19.78%～30.91%,是土施锌肥的132～221倍。由此可见,在旱地叶面喷施锌肥是经济有效、环境友好的施用方式。

参考文献:

[1] Prasad A S. Discovery of human zinc deficiency and studies in an experimental human model[J]. Am. J. Clin. Nutr., 1991, 53(2): 403-412.

[2] Shankar A H, Prasad A S. Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection[J]. Am. J. Clin. Nutr., 1998, 68(suppl): 447-463.

[3] Nriagu J, Zinc deficiency in human health[A]. Encyclopedia of environmental health[M]. Burlington: Elsevier, 2011. 789-800.

[4] Muller O, Krawinkel M. Malnutrition and health in developing countries[J]. CMAJ, 2005, 173(3): 279-286.

[5] Ma G, Jin Y, Li Y *et al*. Iron and zinc deficiencies in China: what is a feasible and cost-effective strategy?[J]. Public Health Nutr., 2008, 11(6): 632-638.

[6] 张明艳, 郁一凡, 封超年, 等. 不同基因型小麦子粒、面粉和麸皮中Ca和Zn含量的差异[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(2): 240-245.
Zhang M Y, Yu Y F, Feng C N *et al*. Differences of calcium and zinc contents among flour, grain and bran of different wheat varieties[J]. J. Tritic. Crops, 2011, 31(2): 240-245.

[7] 傅兆麟, 李明艳, 郭孙黎, 等. 黄淮麦区主要小麦种质资源锌含量测定报告[J]. 北京农业, 2007, (27): 1-4.
Fu Z L, Li M Y, Guo S L *et al*. The determing report of Zn content in seed for the main wheat idioplasm resources in Huang Huai Wheat Area[J]. Beijing Agric., 2007, (27): 1-4.

[8] Zhang Y, Song Q, Yan J *et al*. Ortiz-Monasterio I. Mineral element concentrations in grains of Chinese wheat cultivars[J]. Euphytica, 2010, 174: 303-313.

[9] 张勇, 王德森, 张艳, 何中虎. 北方冬麦区小麦品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, He Z H. Variation of major mineral elements concentration and their relationships in grain of Chinese wheat[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(9): 1871-1876.

[10] 郭明慧, 裴自友, 温辉芹, 等. 普通小麦品种子粒矿质元素含量分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(18): 41-44.
Guo M H, Pei Z Y, Wen H Q *et al*. Mineral elements concentration analysis on major wheat cultivars[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2011, 27(18): 41-44.

[11] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. Plant Soil, 2008, 302: 1-17.

[12] 王云霞, 杨连新. 用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱研究小麦子粒元素的共分布[J]. 作物学报, 2012, 38(3): 514-521.
Wang Y X, Yang L X. Element colocalization in wheat seed revealed by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry(LA-ICP-MS)[J]. Acta Agron. Sin., 2012, 38(3): 514-521.

[13] 张继国, 张兵, 王惠君, 等. 1989-2009年中国九省区居民膳食营养素摄入状况及变化趋势(七)18-49岁成年居民膳食锌的摄入状况及变化趋势[J]. 营养学报, 2012, 34(2): 234-236.
Zhang J G, Zhang B, Wang H J *et al*. Nutrients intake trend of Chinese population in nine provinces from 1989 to 2009(Ⅶ) zinc intake trend of Chinese adults aged 18-49 years[J]. Acta Nutr. Sin., 2012, 34(2): 234-236.

[14] Zhai F, Wang H, Du S *et al*. Popkin B M. Prospective study on nutrition transition in China[J]. Nutr. Rev., 2009, 67(Sup. 1): 56-61.

[15] 刘合满, 张兴昌, 苏少华. 黄土高原主要土壤锌有效性及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 898-902.
Liu H M, Zhang X C, Su S H. Available zinc content and related properties of main soil in the Loess Plateau[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2008, 27(3): 898-902.

[16] Wang J J, Harrell D L. Effect of ammonium, potassium, and sodium cations and phosphate, nitrate, and chloride anions on zinc sorption and lability in selected acid and calcareous soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69: 1036-1046.

[17] 余存祖, 彭琳, 刘耀宏, 等. 黄土区土壤微量元素含量分布与微肥效应[J]. 土壤学报, 1991, 28(3): 317-326.
Yu C Z, Peng L, Liu Y H *et al*. Content and distribution of trace elements and fertilizer efficiency in soils of loessal region[J]. Acta Pedol. Sin., 1991, 28(3): 317-326.

[18] 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.

[19] Cakmak I, Torun B, Erenoĝlu B *et al*. Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency[J]. Euphytica, 1998, 100(1): 349-357.

[20] Cakmak I, Pfeiffer W H, McClafferty B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron[J]. Cereal Chem., 2010, 87(1): 10-20.

[21] Pfeiffer W H, McClafferty B. HarvestPlus: Breeding crops for better nutrition[J]. Crop Sci., 2007, 47(Sup. 3): 88-105.

[22] Yilmaz A, Ekiz H, Torun B *et al*. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on zinc-deficient calcareous soils[J]. J. Plant Nutr., 1997, 20(4-5): 461-471.

[23] Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y *et al*. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. J. Agric. Food Chem., 2010, 58(16): 9092-9102.

[24] 李秀丽, 曹玉贤, 田霄鸿, 等. 施锌方法对小麦子粒不同脱皮组分中锌与植酸及蛋白质分布的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 81-89.
Li X L, Cao Y X, Tian X H *et al*. Effect of Zn application methods on distribution of Zn, phytate and protein in wheat pearling fractions[J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For.

(Nat. Sci. Ed.), 2011, 39(8): 81-89.

[25] 杨习文, 田霄鸿, 陆欣春, 曹玉贤. 喷施锌肥对小麦子粒锌铁铜锰营养的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 95-102.
Yang X W, Tian X H, Lu X C, Cao Y X. Effect of foliar zinc application on the micronutrients of wheat grain[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2010, 28(6): 95-102.

[26] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地长期施用锌肥对小麦吸锌及产量的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 46-48.
Hao M D, Wei X R, Dang T H. Residual effect of zinc application on crop yield, zinc concentration in crop grain and soil available zinc[J]. Ecol. Environ., 2003, 12(1): 46-48.

[27] Kutman U B, Yildiz B, Ozturk L, Cakmak I. Biofortification of durum wheat with zinc through soil and foliar applications of nitrogen[J]. Cereal Chem., 2010, 87(1): 1-9.

[28] 陆欣春, 田霄鸿, 杨习文, 等. 氮锌配施对不同冬小麦品种产量及锌营养的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 923-928.
Lu X C, Tian X H, Yang X W *et al*. Effect of combination use of Zn and N fertilizers on yield and Zn content in winter wheat[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2010, 18(5): 923-928.

[29] 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 Res. Comm., 2011, 39(4): 535-543.

[30] 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.
Cao Y X, Tian X H, Yang X W *et al*. Effects of soil and foliar applications of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(6): 1394-1401.

[31] 樊堂群. 锌在不同基因型旱稻体内吸收运转差异的研究[D]. 青岛: 青岛农业大学硕士学位论文, 2005.
Fan T Q. Studies on zinc uptake and translocation in different gentupic aerobic rice cultivars[D]. Qingdao: Ms thesis of Qingdao Agricultural University, 2005.

[32] Wang J, Mao H, Zhao H *et al*. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China[J]. Field Crop Res., 2012, 135: 89-96.

[33] Gonzalez D, Obrador A, Lopez-Valdivia L, Alvarez J M. Effect of zinc source applied to soils on its availability to Navy Bean[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2008, 72(3): 641-649.

[34] 汪洪, 刘新保, 褚天铎, 等. 锌肥对作物产量、子粒锌及土壤有效锌含量的后效[J]. 土壤肥料, 2003, (1): 3-6.
Wang H, Liu X B, Chu T D *et al*. Residual effect of zinc application on crop yield, zinc concentration in crop grain and soil available zinc[J]. Soils Fert., 2003, (1): 3-6.

[35] 李强. 锌对小麦生长及产量的影响[J]. 土壤肥料, 2004, (1): 16-18.
Li Q. Effect of zinc fertilizer on the growth and yield of wheat[J]. Soils Fert., 2004, (1): 16-18.

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

[37] 陆欣春, 田霄鸿, 杨习文, 等. 氮锌配施对石灰性土壤锌形态及肥效的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1202-1213.
Lu X C, Tian X H, Yang X W *et al*. Effects of combined application of nitrogen and zinc on zinc fractions and fertilizer efficiency in calcareous soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2010, 47(6): 1202-1213.

[38] Haslett B S, Reid R J, Rengel Z. Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots[J]. Ann. Bot., 2001, 87(3): 379-386.

[39] Erenoglu B, Nikolic M, Römheld V, Cakmak I. Uptake and transport of foliar applied zinc(^{65}Zn) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency[J]. Plant Soil, 2002, 241(2): 251-257.

[40] Jiang W, Struik P C, Lingna J *et al*. Uptake and distribution of root-applied or foliar-applied^{65}Zn after flowering in aerobic rice[J]. Ann. Appl. Biol., 2007, 150(3): 383-391.

[41] Waters B M, Grusak M A. Whole-plant mineral partitioning throughout the life cycle in Arabidopsis thaliana ecotypes Columbia, Landsberg erecta, Cape Verde Islands, and the mutant line *ysl1ysl3*[J]. New Phytol., 2008, 177(2): 389-405.

[42] Waters B M, Uauy C, Dubcovsky J, Grusak M A. Wheat (*Triticum aestivum*) NAM proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen compounds from vegetative tissues to grain[J]. J. Exp. Bot., 2009, 60(15): 4263-4274.

[43] 汪洪, 汪立刚, 周卫, 金继运. 干旱条件下土壤中锌的有效性及与植物水分利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6).1178-1184.
Wan H, Wan L G, Zhou W, Jin J Y. Soil zinc availability under water stress condition and its relationship with plant water utilization: A review[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(6): 1178-1184.

[44] Dang H K, Li R Q, Sun Y H *et al*. Absorption, accumulation and distribution of zinc in highly-yielding winter wheat[J]. Agric. Sci. China, 2010, 9(7): 965-973.

[45] Palmgren M G, Clemens S, Williams L E *et al*. Zinc biofortification of cereals: problems and solutions[J]. Trends Plant Sci., 2008, 13(9): 464-473.

[46] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 450-459.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al*. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in china and measures for improvement[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 450-459.

[47] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地小麦长期施用锌肥的增产作用及土壤效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 377-380.
Hao M D, Wei X R, Dang T H. Effect of long-term applying zinc fertilizer on wheat yield and content of zinc in dryland[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(3): 377-380.