植物营养与肥料学报 2014,20(4):998 -1004
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0423

锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响

王孝忠,田 娣,邹春琴*
(农业部土壤与作物相互作用实验室,中国农业大学资源环境与粮食安全中心,中国农业大学,北京 100193)

摘要:【目的】施用锌肥是改善作物缺锌、提高产量和籽粒锌含量的重要措施。锌肥的施用效果受多种因素的影响,通过总结自70年代以来锌肥施用对我国主要粮食作物小麦、玉米、水稻产量的影响,分析不同年代、锌肥施用方式、锌肥用量对这三大作物产量影响的进程,探讨锌肥的适宜用量和施用方式。**【方法】**利用万方数据库、中国知网,查阅了1970至2013年间,我国主要粮食作物水稻、小麦和玉米锌肥施用相关的田间试验文献333篇,剔除文献中没有产量数据、没有具体施肥相关信息如施肥量、施肥方式等文献,有效样本数总计为1656个。采用相关分析、方差分析等统计分析方法,Microsoft Excel 2010软件分析。**【结果】**锌肥增产效果受锌肥施用方式、施用量、年代的影响,具体结果如下,1)锌肥施用方式 土壤施用、叶面喷施和种子处理在小麦上的平均增产率分别为11.3%、10.0%和11.1%;在玉米上的平均增产率分别为13.7%、12.7%和12.1%;水稻上的平均增产率分别为15.0%、9.8%和9.7%。与叶面喷施和种子处理相比,无论是小麦、玉米还是水稻,土施锌肥的增产效果最好。2)锌肥施用量 小麦、玉米和水稻的增产率随土施锌肥量增加而增加,当施锌量达到一定量后,随施肥用量的进一步增大,增产率有所降低。小麦、玉米和水稻土施锌肥的合适用量分别为15~45 kg/hm^2、20~30 kg/hm^2、20~30 kg/hm^2。小麦增产率与喷施锌肥的浓度关系不明显,叶面喷施浓度在0.4%~0.5% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$时增产效果最佳;而玉米、水稻增产率和叶面喷施锌肥的浓度变化趋势与土施锌肥变化趋势一致。过去40年玉米和水稻适宜喷施锌肥浓度分别是0.1%~0.3%、0.2%~0.4% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$。3)施肥年代 随着年代的变化,不同作物施用锌肥的增产幅度不同。随着年代的推进,同一锌肥施用方式在小麦上增产率呈逐渐增高的趋势;锌肥土施和叶面喷施在玉米上的增产率呈下降趋势;锌肥土施在水稻上的增产率呈下降趋势,而叶面喷施在水稻的增产率呈先降低后增加的趋势;种子处理方式在水稻和玉米上的增产率随年代的变化不明显。**【结论】**施用锌肥能有效提高小麦、玉米和水稻的产量,但是其增产效果受锌肥施用方式、施用量、年代的影响。因此,今后在锌肥施用方面,农户应根据作物、土壤、环境等条件,选择恰当的施肥方式及锌肥用量,来提高锌肥的增产效果。

关键词:锌肥施用方式;锌肥用量;增产效果;粮食作物
中图分类号:S143.7+2 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2014)04-0998-07

Yield responses of the main cereal crops to the application approaches and rates of zinc fertilizer in China

WANG Xiao-zhong, TIAN Di, ZOU Chun-qin*
(*Key Laboratory of Plant-Soil Interaction, MOE/Center for Resources, Environment and Food Security, CAU/ China Agricultural University, Beijing 100193, China*)

Abstract:【Objectives】The application of zinc (Zn) fertilizer is an effective measure to solve Zn deficiency and to improve both yield and grain Zn content in cereal crops. The effects of Zn application are affected by many factors. The effects of Zn application approaches and rates on the yield of wheat, maize, rice since the 1970s in China were summarized to explore an optimized approach and rate of Zn fertilizer in production systems of cereal crops.

收稿日期:2013-11-16 **接受日期:**2013-12-26
基金项目:973项目"主要粮食作物高产栽培与资源高效利用的基础研究"(2009CB118606)资助。
作者简介:王孝忠(1989—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事作物微量元素锌营养研究。E-mail:08.wangpeng@163.com
* 通信作者 E-mail:zcq0206@cau.edu.cn

【**Methods**】The data was collected from WanFangDATA and CNKI, including 333 literatures about the effects of Zn application on the production of wheat, maize and rice from 1970 to 2013 in China under field conditions. 1656 test samples were selected by excluding the literatures without yield data and specific fertilizer information such as a concrete application approach and rate of Zn fertilizer. Data was analyzed by correlation analysis and analysis of variance using Microsoft Excel 2010 softwares. 【**Results**】The positive effects of Zn applications on the crop yields were affected by application approaches and rates of Zn and different years. The main results were as follows, 1) Effects of Zn application methods　The average yield increase induced by application methods such as soil, foliar and seed-treating applications of Zn fertilizer were 11.3%, 10.0%, 11.1%, respectively for wheat, 13.7%, 12.7%, 12.1% for maize and 15.0%, 9.8%, 9.7% for rice. Compared with foliar and seed-treated applications, soil application of Zn consistently achieved the highest yield increase regardless of crops. 2) Effects of Zn application rates　With increases of soil Zn-applied rates, the average yield increase of wheat, maize and rice tended to increase continuously. When the soil applied Zn reached a certain amount, the yield increase showed a slight decrease. The optimized soil Zn-applied rates for higher increases in yield of wheat, maize and rice were 15 -45 kg /hm^2, 20 - 30 kg/hm^2, and 20 - 30 kg/hm^2, respectively. The foliar applications of Zn showed an irregular effect on the yield increase of wheat, with foliar application of $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ at a 0.4% - 0.5% rate achieving the highest yield increase. The effects of foliar applications of Zn on yield increase of maize and rice are the same as soil applications of Zn. In the past 40 years, the optimized foliar Zn-applied rates in form of $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ for maize and rice were 0.1% - 0.3% and 0.2% - 0.4%, respectively. 3) Effects of different years　The yields in response to different crops were different with years. Advanced in years, the yield increase of wheat tended to increase continuously with each Zn application method. For rice, the yield increase induced by soil applications showed a slight decrease while it decreased slightly at first and then increased with foliar applications. In contrast to soil and foliar applications, seed-treating applications showed an irregular effect on the yield increase of maize, wheat and rice. 【**Conclusions**】Zn fertilizer application could effectively improve yields of wheat, maize and rice, but the yield increase was affected by application approaches and rates of Zn fertilizer and different years. Therefore, in the future, farmers should choose an appropriate method and rate of Zn fertilizer to improve yields of cereal crops based on the crops, soil and environmental conditions.

Key words: application approach; zinc fertilizer rate; yield increase; cereal crops

锌是植物必需微量元素,对于作物产量的提高和品质的改善有重要作用。然而近年来由于产量的进一步提高和新品种的推广,锌缺乏的现象越来越普遍和严重。据统计,全世界50%的作物种植区土壤都存在缺锌或潜在缺锌[1]。目前我国土壤缺锌现状日趋严重,缺锌土壤面积达4866.7万公顷[2],大约占耕地面积的40%[3]。全世界作物因缺锌而造成减产的面积最为广泛[4-5],施用锌肥是改善作物缺锌、提高产量和籽粒锌含量的重要措施[4-7]。

自80年代以来,农业部组织的全国微肥协作网的大量研究表明,在缺锌土壤上施用锌肥效果显著[8-9],同时随着年代变化,锌肥施用方法和技术也在不断提高。同时研究表明,锌肥的施用效果受多种因素的影响,土壤pH高、有效锌含量低是造成作物缺锌的主要原因,因此在土壤pH较高、土壤DTPA-Zn含量越低的土壤上施用锌肥效果越明显[8-9]。锌肥的施用效果不仅与土壤状况有关,而且受作物种类、施用方式、施用量、施用时期等因素的影响[9]。由于不同年代土壤肥力、气候、产量水平、作物品种、农艺措施差异较大,锌肥施用的增产效果变化很大。在过去几十年,虽然在一些缺锌土壤上,锌肥的施用得到了一定程度推广,但哪种方法效果更好,没有一致的结论。周伟[10]研究表明,施用锌肥可以提高两季作物产量,不同施锌方法作物的增产效果不同,其中土施增产率明显高于叶面喷施和拌种处理,是最好的施锌方法。Yilmaz等[11]在小麦上比较了锌肥浸种、土施和叶面喷施三种措施,发现土施对提高小麦产量的效果显著,而

叶面喷施在提高小麦籽粒锌含量方面更有优势。同一种施锌方式,其施用量对锌肥的增产效果也有一定影响[12],不同施锌量的增产效果不同,但是对锌肥的适宜用量并不清楚。

因此,本文通过总结自70年代起锌肥施用对我国主要粮食作物小麦、玉米、水稻产量的影响,分析年代、锌肥施用方式、锌肥用量对这三大作物产量影响的进程,探讨其合适的施肥量和施肥方式,为粮食作物生产中锌肥的合理施用提供一些参考。

1 材料与方法

文献来源:万方数据库、中国知网。

本文查阅了1970至2013年间,我国主要粮食作物水稻、小麦和玉米锌肥施用相关的文献333篇,分为1970～1979年,1980～1989年,1990～1999年,2000～2013年四个阶段进行总结。剔除文献中没有产量数据、没有具体施肥相关信息如施肥量、施肥方式等文献,试验有效样本数总计为1656个,其中小麦试验样本数为451个,来自102篇文献,玉米试验样本数为734个,来自120篇文献,水稻试验样本数为471个,来自111篇文献。本研究采用的统计分析方法包括相关分析及方差分析,采用Microsoft Excel 2010版处理软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同年代锌肥施用方式对小麦、玉米和水稻增产效果的影响

施用锌肥是改善作物锌营养、提高产量和品质的重要措施,特别是在缺锌或潜在缺锌的地区,锌肥的施用尤其重要。锌肥的施用方式主要有土施、叶面喷施、种子处理(浸种、包衣和拌种等),但是不同措施在改善作物锌营养和提高产量方面作用有所不同。

2.1.1 不同年代锌肥施用方式对小麦增产效果的影响　由表1可以看出,虽然锌肥施用都能在一定程度上提高小麦产量,但是锌肥的施用方式不同,年代不同,其增产效果也有所不同。四个不同年代,小麦施锌的增产效果都表现为:土施>种子处理>喷施。同时,自80年代以来无论是土施、喷施还是种子处理,随着年代的递进,同一锌肥施用方式小麦增产率均有所提高,特别是土施锌肥的增产效果提高幅度较大,而叶面喷施基本没有变化,增产效果维持在10%左右。2000年以后种子处理的增产率较高(表1)。

表1 不同年代锌肥施用方式对小麦增产率的影响

Table 1 Yield response of wheat to different application approaches of zinc fertilizer with years in China

年代 Year	施肥方式 Fertilization approach	样本数 Sample size	增产率(%) Yield increase	
			平均值 Mean	*CV*
1980～1989	土施 Soil application	98	10.7	102
	喷施 Foliar application	72	9.2	62
	种子处理 Seed treating	36	9.3	105
1990～1999	土施 Soil application	98	13.0	96
	喷施 Foliar application	20	10.9	60
	种子处理 Seed treating	9	11.9	59
2000～2009	土施 Soil application	42	26.0	107
	喷施 Foliar application	40	11.4	56
	种子处理 Seed treating	8	17.7	37
2010～2013	土施 Soil application	18	11.8	141
	喷施 Foliar application	6	11.5	83
	种子处理 Seed treating	—	—	—

注(Note):没有查到1970～1979年关于小麦施锌的文献 No reference was searched related to zinc fertilizer on the wheat from 1970 to 1979 in China;没有查到2010～2013年关于小麦施锌种子处理的文献 No reference was searched related to seed treating on wheat from 2010 to 2013 in China.

2.1.2 不同年代锌肥施用方式对玉米和水稻增产效果的影响　由表2可以看出,不同年代,不同锌肥施用方式对玉米增产效果表现为土施>种子处理>喷施,其中土施增产效果明显,喷施及种子处理增产效果较小,且二者之间没有显著差异。70年代锌肥施用方式在玉米上增产效果有所不同,表现为土施>喷施>种子处理。对于土施和喷施两种方式而言,随着年代的递进,同一锌肥施用方式在玉米上增产

率表现为降低趋势,尤其是土施方式,自 80 年代以后其增产率就维持在 10% 左右。

水稻与玉米有相似的趋势,从上世纪 70 年代到 2010 年以前,土施锌肥的增产效果最好,而 2010 年后叶面喷施锌肥的效果好于土施,而且随着年代的递进,土施锌肥在水稻上增产率明显降低,叶面喷施在水稻上增产率有先降低后增加的趋势,种子处理方式的增产率较低,年代间变化不明显(表 2)。

表 2　不同年代锌肥施用方式对玉米和水稻增产率的影响

Table 2　Yield response of maize and rice to different application approaches of zinc fertilizer with years in China

年代 Year	施肥方式 Fertilization approach	玉米 Maize			水稻 Rice		
		样本数 Sample size	增产率 Yield increase(%)		样本数 Sample size	增产率 Yield increase(%)	
			平均值 Mean	*CV*		平均值 Mean	*CV*
1970～1979	土施 Soil application	29	33.9	124	46	29.7	132
	喷施 Foliar spray	40	28.3	110	8	30.1	65
	种子处理 Seed treating	43	13.1	84	6	7.3	20
1980～1989	土施 Soil application	99	15.6	113	97	15.0	153
	喷施 Foliar application	69	14.1	78	71	12.1	134
	种子处理 Seed treating	58	15.0	83	18	13.3	49
1990～1999	土施 Soil application	138	10.6	123	94	12.8	291
	喷施 Foliar spray	36	8.1	75	25	4.4	83
	种子处理 Seed treating	51	8.5	76	17	7.3	52
2000～2009	土施 Soil application	112	12.1	102	38	11.8	112
	喷施 Foliar application	33	7.8	64	15	6.9	62
	种子处理 Seed treating	7	9.2	44			
2010～2013	土施 Soil application	15	8.6	23	31	6.0	66
	喷施 Foliarapplication	4	6.7	16	7	9.4	26
	种子处理 Seed treating						

注(Note):没有查到 2000～2009 年、2010～2013 年水稻种子处理文献, 2010～2013 年玉米种子处理文献 No reference was searched related to seed treating with zinc fertilizer on rice from 2000 to 2009 and from 2010 to 2013, on maize from 2010 to 2013 in China.

2.2　锌肥施用量对小麦、玉米和水稻增产率的影响

2.2.1 土壤施用　土壤施用锌肥可促进作物根系的生长,提高作物对土壤中养分的吸收,促进作物茎蘖发育从而使成穗数增加,促进花后干物质的积累,延长灌浆时间从而使粒重增加,最终使作物产量增加[13-18]。

对小麦而言,土壤施用七水硫酸锌的平均增产率为 11.3%,当土壤施用量为 15～30 kg/hm^2 时,小麦的增产效果最好,增产率可以达到 12.8%,用量大于 75 kg/hm^2 时,增产效果次之(表 3)。

对玉米而言,土壤施用七水硫酸锌的平均增产率是 13.7%,随着施用量的增加玉米增产率也随之增加,当土壤施用量在 20～30 kg/hm^2 时,增产率达到最大,为 17.1%,此后随着土壤施用量的增加,增产率呈下降趋势。

对水稻而言,土壤施用七水硫酸锌的平均增产率是 15.0%,随着土壤施用量增加,水稻增产率也有所增加,当土壤施用量在 20～30 kg/hm^2 范围时,增产率达到最大,为 16.1%,此后随着土壤施用量增加,水稻增产率呈下降趋势。

2.2.2 叶面喷施　叶面喷施七水硫酸锌虽然没有土壤施用增产效果好,但是适时叶面喷施可以预防或弥补早期的锌缺乏对作物生长和产量造成的影响[4],并且促进更多锌向籽粒转移,提高小麦籽粒和面粉中锌的含量[19]。

表3 土施锌肥用量对小麦、玉米和水稻增产率的影响

Table 3 Yield response of wheat, maize and rice to the rates of zinc fertilizer with soil application

作物 Crop	锌肥用量 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (kg/hm²)	样本数 Sample size	增产率(%) Yield increase 平均值 Mean	CV
小麦 Wheat	<15	108	9.7	89
	15～30	97	12.8	90
	30～45	12	11.4	33
	60～75	18	10.3	109
	>75	18	12.5	129
	汇总 Total	253	11.3	94
玉米 Maize	<10	35	10.6	136
	10～20	135	12.1	95
	20～30	115	17.1	156
	30～50	40	13.4	62
	>50	29	12.2	124
	汇总 Total	354	13.7	133
水稻 Rice	<10	23	12.3	120
	10～20	120	15.0	234
	20～30	120	16.1	197
	30～50	21	14.3	99
	>50	9	8.5	140
	汇总 Total	293	15.0	205

对小麦而言,喷施锌肥的平均增产率为10.0%,喷施浓度在0.4%～0.5%时小麦增产率明显高于喷施其它浓度处理,而喷施其它各浓度小麦增产率变化不明显(表4)。

对玉米而言,叶面喷施锌肥平均增产率为12.7%,由于玉米喷施锌肥浓度大都集中在0.1%～0.4% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 之间,随着喷锌浓度的增加,玉米增产率逐渐增加,当喷施浓度达到0.1%～0.3% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 时,玉米增产率达到最高,为13.2%～14.0%,此后随着喷施浓度的提高,玉米的增产率有所下降(表4)。

对水稻而言,喷施锌肥平均增产率为9.8%,喷施浓度在0.2%～0.3% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 时,水稻增产率明显高于其它浓度处理,此时增产率为12.3%,此后随着喷施浓度提高,水稻增产率有所下降(表4)。

表4 喷施不同浓度锌肥对小麦、玉米和水稻增产率的影响

Table 4 Yield response of wheat, maize and rice to the rates of foliar $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ application

作物 Crop	喷施浓度 Spray concentration (%)	样本数 Sample size	增产率(%) Yield increase 平均 Mean	CV
小麦 Wheat	<0.1	10	8.8	74
	0.1～0.2	36	9.9	60
	0.2～0.3	48	8.8	50
	0.3～0.4	29	9.6	67
	0.4～0.5	12	16.7	49
	汇总 Total	135	10.0	61
玉米 Maize	<0.1	12	5.2	60
	0.1～0.2	106	14.0	74
	0.2～0.3	26	13.2	91
	>0.3	11	8.0	60
	汇总 Total	155	12.7	81
水稻 Rice	<0.1	9	11.7	95
	0.1～0.2	49	10.2	108
	0.2～0.3	9	12.3	95
	≥0.4	20	7.3	64
	汇总 Total	87	9.8	100

3 讨论与结论

施用锌肥能有效提高小麦、玉米和水稻的产量,但是其增产效果受锌肥施用方式、施用量的影响。就锌肥施用方式而言,各种作物的增产效果表现如下,小麦为土施>种子处理>喷施;玉米和水稻为土施增产效果最好,喷施和种子处理增产效果差异不明显。产生这种差异的原因可能有:1)叶面喷施锌肥的吸收率低、养分在叶片的附着时间短、喷施锌肥用量少、受温度、水分等环境条件的影响很大,叶面喷施的锌不能有效地进入到根部,缓解根部锌缺乏,叶面喷施只能是其它措施的补充形式[20];2)种子处理锌肥用量有限,通常只是在种子萌发和早期生长阶段缓解作物缺锌的问题[10];3)土壤施锌,锌肥用量大,植株可以通过根系从周围的土壤里不断地吸收锌供其所需[10],故土施增产效果较好[21]。由于不同年代间气候、作物品种等差异

很大,故年代间作物施锌增产率不同。就不同年代而言,在小麦上自 80 年代以来无论是土施、喷施还是种子处理,随着年代的递进,同一锌肥施用方式小麦增产率都有所提高,特别是土壤施锌的增产率变化幅度较大,而叶面喷施基本没有变化,增产率维持在 10% 左右。锌肥土施和叶面喷施在玉米上的增产率呈下降趋势,锌肥土施在水稻上的增产率也呈下降趋势,而叶面喷施在水稻上的增产率呈先降低后增加的趋势,种子处理方式在水稻和玉米上的增产率随年代的变化不明显。

土施、叶面喷施锌肥能不同程度提高作物产量,其增产效果受施用方式、锌肥施用量、作物种类等条件的影响[22]。不同的供锌水平对作物的增产效果不同,适当的供锌水平可以显著提高作物的产量[23-24]。由表 3 可知,小麦、玉米和水稻的增产率随土施锌肥量的变化趋势为: 起初,随土施锌肥量增加增产率一直增加,当施锌量达到一定的范围后,随施肥用量的进一步增大,增产率降低。总结自 70 年代以来发表的文献,发现小麦、玉米和水稻土施锌肥的合适用量分别为 15 ～ 45 kg /hm^2、20 ～ 30 kg/hm^2、20 ～ 30 kg/hm^2。总体而言,土施锌肥的增产效果相对比较稳定,只是近年来产量水平提高后,锌肥用量需要重新考虑。由表 4 可知,对于叶面喷施,小麦增产率与喷施锌肥的浓度关系不明显,叶面喷施浓度在 0.4% ～ 0.5% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 时增产效果最佳; 而玉米、水稻增产率和叶面喷施锌肥的浓度变化趋势与土施锌肥变化趋势一致。其中,从发表的文献数据来看,过去 40 年玉米和水稻适宜喷施锌肥浓度分别是 0.1% ～ 0.3%、0.2% ～ 0.4% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$。由表 3、表 4 可知,无论是土施还是叶面喷施,锌肥的增产效果与作物种类有关。锌肥施用对玉米和水稻的增产效果优于小麦,可能与玉米和水稻对锌敏感, 而小麦对锌不敏感有关[21, 25],玉米和水稻生长过程中容易产生锌缺乏现象,在同一施锌量条件下,玉米和水稻的增产效果明显,而小麦的增产效果不明显。

综上所述,施用锌肥能提高农作物的产量,其增产效果受土壤条件、作物种类、施锌方式、锌施用量等因素的影响。因此,今后在锌肥施用方面,农户应根据作物、土壤、环境等条件,选择恰当的施肥方式及锌肥用量来提高锌肥的增产效果。如何提高作物特别是禾谷类作物籽粒中锌含量,已成为人们关注的焦点。因此,作者认为如何充分发挥锌肥在实现作物高产和高品质双赢中的作用是今后锌肥施用研究的重点。

参 考 文 献:

[1] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. Plant and Soil, 2008, 302(1-2): 1-17.

[2] 李庆逵,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 江西: 江西科学技术出版社,1998.
Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. The fertilizer problem in the Chinese agricultural sustainable development[M]. Jiangxi: Jiangxi Science and Technology Press, 1998.

[3] 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]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, 29(5): 413-428.

[4] Rengel Z, Batten G D, Crowley D E. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops [J]. Field Crops Research, 1999, 60(1-2): 27-40.

[5] Zhao F J, Shewry P R. Recent developments in modifying crops and agronomic practice to improve human health[J]. Food Policy, 2011, 361: S94-S101.

[6] Welch R M. Linkages between trace elements in food crops and human health [M]. Micronutrient deficiencies in global crop production, Springer, 2008, 287-309.

[7] 朱和明,卞秀兰,薛立民. 玉米施用锌肥的试验研究[J]. 石河子科技, 1991, (4): 10-12.
Zhu H M, Bian X L, Xue L M. Studies on effect of Zn fertilizer applications on maize [J]. Shihezi Agricultural Science and Technology, 1991, (4): 10-12.

[8] 全国微肥科研协作组. 几种主要农作物锌硼肥施用技术规范的研究[J]. 土壤肥料, 1989, (3): 6-9.
National micronutrient fertilizer research collaboration group. Approaches of zinc and boron fertilization in several major crops [J]. Soils and Fertilizers, 1989(3): 6-9.

[9] 褚天铎,刘新保,王淑惠等. 小麦施锌肥效果及使用技术的研究[J]. 土壤肥料, 1987, (4): 24-26.
Chu T D, Liu X B, Wang S H *et al.*, The effect of zinc fertilizer on yield of wheat and its application approaches[J]. Soils and Fertilizers, 1987, (4): 24-26.

[10] 周伟. 不同施锌方法对小麦含锌量及产量影响的研究[J]. 生态农业研究, 1995, 3(1): 34-38.
Zhou W. Impacts of applying zinc with different methods on zinc content and yield of wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 1995, 3(1): 34-38.

[11] 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]. Journal of Plant Nutrition, 1997, 20(4-5): 461-471.

[12] Hussain S, Maqsood M A, Rengel Z, Aziz T. Biofortification and estimated human bioavailability of zinc in wheat grains as influenced by methods of zinc application[J]. Plant and Soil, 2012, 361(1-2): 279-290.

[13] 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(16): 9092-9102.

[14] Cakmak I, Pfeiffer W H, McClafferty B. Review: Biofortification of durum wheat with zinc and iron [J]. Cereal Chemistry, 2010a, 87: 10-20.

[15] 姜丽娜, 侯飞, 蒿宝珍, 等. Zn^{2+}对小麦幼苗干物质及Zn积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1005-1010.
Jiang L N, Hou F, Hao B Z *et al*. Effect of Zn^{2+} on dry matter and zinc accumulation in wheat seedling[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(6): 1005-1010.

[16] 陈铭, 尹崇仁. 冬小麦体内锌元素的积累与浓度分布模式和锰、锌肥效应[J]. 北京农业大学学报, 1993, 19(2): 17-23.
Chen M, Yin C R. A study on accumulation and distribution patterns of zinc in winter wheat crops and the effect of manganese and zinc fertilization [J]. Journal of Beijing Agriculture University, 1993, 19(2): 17-23.

[17] 吴建国, 朱宜静, 张泽芳. 冬小麦吸收锌营养的特点与锌肥施用技术的研究[J]. 河南农业大学学报, 1986, 20(2): 141-146.
Wu J G, Zhu Y J, Zhang Z F. Studies on characteristics of Zn nutrient absorption and Zn fertilization technique of winter wheat [J]. Journal of Henan Agriculture University, 1986, 20(2): 141-146.

[18] 杨建堂, 王文亮, 王岩, 等. 高产冬小麦锌素吸收分配特点的研究[J]. 土壤通报, 1997, 28(3): 124-126.
Yang J T, Wang W L, Wang Y *et al*. Studies on zinc uptake and distribution of high-yielding winter wheat[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(3): 124-126.

[19] Zhang Y Q, Shi R L, Rezaul K M *et al*. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2010, 58(23): 12268-12274.

[20] 庞丽丽, 邹春琴. 主要粮食作物生产体系中锌肥的合理利用[J]. 中国农学通报, 2011, 27(27): 12-17.
Pang L L, Zou C Q. Progress in zinc fertilization in the production system of main cereal crops[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(27): 12-17.

[21] Alloway B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31(5): 537-548.

[22] 李燕婷, 李秀英, 肖艳, 等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 162-172.
Li Y T, Li X Y, Xiao Y *et al*. Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application [J]. Scientia Agriculturea Sinica, 2009, 42(1): 162-172.

[23] 孙建华, 李志洪, 李辛, 等. 高量施锌肥对玉米Zn吸收和积累及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 212-215.
Sun J H, Li Z H, Li X *et al*. Influence of high application rate of zinc fertilizers on absorption and accumulation of Zn and yield of maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 212-215.

[24] 李芳贤, 王金林, 李玉兰, 刁希强. 锌对夏玉米生长发育及产量影响的研究[J]. 玉米科学, 1999, 7(1): 72-76.
Li F X, Wang J L, Li Y L, Diao X Q. Studies on influence of zinc to the summer corn growth, development and yield [J]. Journal of Maize Science, 1999, 7(1): 72-76.

[25] 高质, 林葆, 周卫. 锌素营养对春玉米内源激素与氧自由基代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 424-428.
Gao Z, Lin B, Zhou W. Effects of zinc nutrition on endogenous hormone and free radicals in spring maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(4): 424-428.