

低锌旱地土施锌肥对小麦产量和锌利用的影响

李孟华^{1,2}, 王朝辉^{1,2*}, 李强^{1,2}, 戴健^{1,2}, 高雅洁^{1,2}, 靳静静^{1,2}, 曹寒冰^{1,2}, 王森^{1,2}

(1.旱区作物逆境生物学国家重点实验室 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:土壤有效锌含量低是制约西北旱地冬小麦籽粒锌营养品质的关键问题。采用连续两年的田间定位试验, 设 0、10、25、50、100、150 kg·hm⁻² 6 个锌肥(ZnSO₄·7H₂O)水平, 研究了施锌对小麦产量、籽粒锌含量和土壤有效锌含量的影响, 分析了西北旱地冬小麦土施锌肥的可行性。结果表明, 随锌肥用量增加, 土壤有效锌含量显著提高, 但小麦产量无明显变化, 小麦籽粒锌含量两季最高值分别为 19.8、32.1 mg·kg⁻¹, 比不施锌提高 32%和 44%, 却依然低于 40~60 mg·kg⁻¹ 的推荐含量, 总锌利用率不到 1%。因此, 在西北旱地, 不建议通过土施锌肥来提高小麦籽粒锌含量。

关键词:旱地; 冬小麦; 锌肥; 产量; 锌含量; 锌利用效率

中图分类号: S143.7 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)11-2168-07 doi:10.11654/jaes.2013.11.010

Effects of Soil Zn Application on Grain Yield and Zn Utilization of Wheat in Zn-deficient Dryland Soils

LI Meng-hua^{1,2}, WANG Zhao-hui^{1,2*}, LI Qiang^{1,2}, DAI Jian^{1,2}, GAO Ya-jie^{1,2}, JIN Jing-jing^{1,2}, CAO Han-bing^{1,2}, WANG Sen^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil Zn deficiency is one of the factors seriously limiting the Zn contents of winter wheat grain in dryland area of Northwestern China. In a two-year field experiment with six Zn application rates of 0, 10, 25, 50, 100, 150 kg ZnSO₄·7H₂O·hm⁻², effects of Zn applied to soil on winter wheat grain yield, grain Zn concentrations and soil DTPA-Zn were investigated. Soil DTPA-Zn increased significantly with Zn application rates. Soil application of Zn did not show effects on wheat grain yields, but increased grain Zn concentration by 32% and 44% in the first and second season, respectively, with maximum grain Zn concentrations of 19.8 mg·kg⁻¹ and 32.1 mg·kg⁻¹, lower than the recommended Zn level of 40~60 mg·kg⁻¹. Total Zn utilization efficiency by wheat was less than 1%. These findings suggest that applying Zn directly to soil is not an option to improve Zn nutrition of wheat in the dryland area of northwestern China.

Keywords: dryland; winter wheat; zinc fertilizer; grain yield; zinc concentration; zinc utilization efficiency

锌参与人体及动植物的众多生理生化过程, 是生物体生长发育的必需微量元素^[1-3], 世界上有超过 1/3 的人口锌营养不足, 已成为影响人体健康的第五大因素^[4]。在中国, 也有近 1 亿的人口锌营养缺乏, 尤其是在欠发达的农村地区^[5]。人体锌元素主要来源于日常

饮食, 小麦是中国北方大部分地区居民的主要粮食作物, 提高小麦籽粒中锌元素的含量对解决这一地区居民由于锌缺乏造成的健康问题具有一定意义。

研究表明, 我国小麦锌含量普遍较低, 一般在 20~35 mg·kg⁻¹ 之间^[6-10], 与推荐含量 40~60 mg·kg⁻¹^[11] 相差较远, 不能满足以小麦为主食的人群锌营养需要。土壤有效锌含量不足是导致小麦锌营养缺乏的主要原因。我国小麦种植区多为石灰性土壤, 如黄土高原地区土壤碳酸钙含量高以及较高的 pH, 使 20.79% 的土壤有效锌在临界值(0.5 mg·kg⁻¹)之下, 37.9% 为潜在缺锌(0.5~1.0 mg·kg⁻¹)水平^[12-13]。许多研究认为,

收稿日期: 2013-03-26

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金; 西北农林科技大学“创新团队建设计划”; 高等学校学科创新引智计划(B12007); 国际锌协会项目(Zinc Nutrient Initiative MD-86)

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研究。E-mail: lmh11@126.com

* 通信作者: 王朝辉 E-mail: w-zhaohui@263.net

农作物土施 $15\sim 45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硫酸锌即可^[14-19],也有研究表明,在我国西北旱地土施锌肥不能达到增产和提高小麦籽粒锌含量的目的^[20-22]。这是否由于施锌量不足,增加锌肥用量能否提高小麦产量和籽粒锌含量?目前国内报道的较高施锌 ($\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 量有 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[23]、 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[24]和 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (20 年合计用量)^[25],由于试验条件的差异,其试验结果也不尽一致。如在土壤有效锌 (DTPA-Zn) 为 $0.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土施锌肥 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可使小麦籽粒锌含量提高 32.3%,达 $41.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[23],而产量却因年份及品种而异、增减不一;在土壤有效锌为 $0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,施锌 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可使第一季小麦增产 6%~10%,籽粒锌含量提高 79.4%,达 $56.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而第二季锌含量仅 $26.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[24];土壤有效锌为 $0.84\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,每年施锌 $15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,连续使用 20 年后,小麦增产 $610.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增产率 38.4%,籽粒锌含量由 $21.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高到 $38.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。国外也有类似的研究,土壤有效锌为 $0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,施 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,使小麦产量提高 260%,籽粒锌含量由 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高到 $18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[26]。

在西北旱地典型缺锌区 (DTPA-Zn $<0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 短期内土施大量的锌肥能否增加小麦产量,能否使小麦籽粒锌达到推荐含量?针对这些问题,我们设计了不同锌肥用量的定位试验,连续两年对西北旱地典型缺锌区土施锌肥的效果进行研究,以期为指导合理施用锌肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究为两年定位试验,于 2010 年 9 月 25 日—2011 年 6 月 19 日、2011 年 9 月 26 日—2012 年 6 月 20 日在陕西省永寿县的养马庄村 ($39^\circ 49' 1.6''\text{ N}$, $108^\circ 10'$

$41.6''\text{ E}$) 进行。试验区海拔 1187 m,为一年一熟的冬小麦连作区,年平均气温 10.2°C ,无霜期 210 d,年均降雨量 610 mm,试验年份降雨量见图 1。土壤类型为黄绵土,试验前耕层土壤有机质 $11.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮 $18.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮 $4.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 (Olsen-P) $11.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 ($\text{NH}_4\text{OAc-K}$) $99.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效锌 (DTPA-Zn) $0.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效铁 (DTPA-Fe) $7.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH8.1 (水土比 2.5:1)。

1.2 试验设计

第一季 (2010—2011 年) 在氮磷钾肥的基础上,设置 0、10、25、50、100、150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 6 个施锌量 (以 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 计,下同),播前将锌肥拌土均匀撒在地表后翻入土壤。磷、钾肥用量分别为 $75\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $75\text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$,以磷酸二铵和硫酸钾为肥源,播前作为底肥一次施入。氮肥用量 $180\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中 1/3 作为基肥播前施入 (以磷酸二铵和尿素为肥源),2/3 在返青期追施 (以尿素为肥源)。田间小区排列采用完全随机区组设计,重复 4 次,小区面积 $4.5\times 7=31.5\text{ m}^2$,行距 18 cm。小麦品种选用晋麦 47,播量 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。第二季 (2011—2012 年) 于 2011 年 9 月 26 日在原地块相同位置进行,施肥情况与第一季相同。小麦生长期的田间管理均与当地农户相同。

1.3 样品采集与测定

小麦成熟后,每个小区割取两个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方,晒干后脱粒计产。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去,留地上部混合作为一个分析样品,分为茎叶、颖壳、籽粒 3 部分,计算产量构成要素等。取部分分析样品用去离子水清洗后在 105°C 下杀青 30 min, 65°C 烘干至恒重,用碳化钨球磨仪 (莱驰 MM 400,德国) 磨细,密封保存,备用。

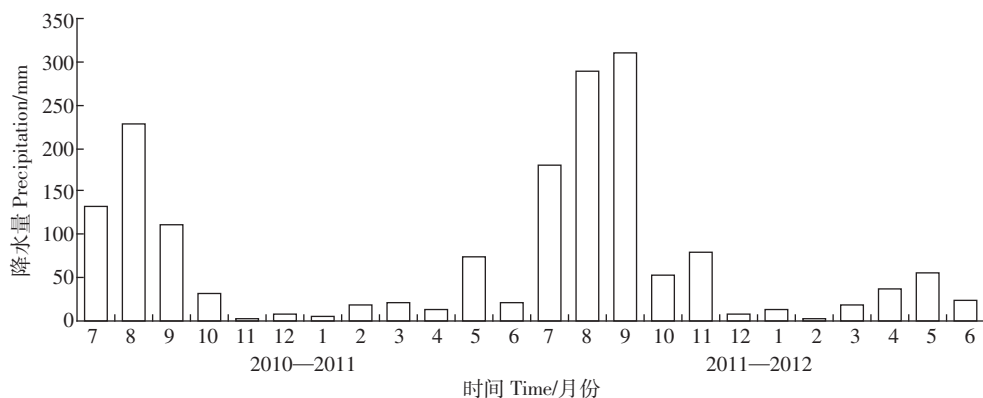


图1 试验区 2010 年 7 月至 2012 年 6 月各月降水量

Figure 1 Monthly precipitation distribution from July 2010 to June 2012 at the experiment site

第一季播前(2010年9月24日)、灌浆期(2011年5月7日)和成熟收获后(2011年6月20日),第二季播前(2011年9月25日)、灌浆期(2012年5月11日)和成熟期收获后(2012年6月21日)在各小区选取3点,采集0~20 cm土壤样品,混匀自然风干后磨细,过1 mm尼龙筛备用。

植物样品用 $\text{HNO}_3\text{--H}_2\text{O}_2$ 微波消解仪(屹尧WX-8000,中国)消解,以原子吸收分光光度计(日立Z-2000,日本)测定消解液中的锌。土壤有效锌用DTPA溶液(DTPA $0.005\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 CaCl_2 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TEA $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH7.3)浸提,液土比为2:1,用原子吸收分光光度计测定浸提液中的锌。

1.4 数据计算与分析

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

相关参数及其计算公式如下:

收获指数(%)=小麦产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)/地上部生物量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times 100\%$

锌收获指数(%)=籽粒锌累积量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)/地上部锌累积量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times 100\%$

总锌利用率(%)=[施锌处理地上部锌累积量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)-不施锌处理地上部锌累积量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)]/施锌量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times 100\%$

2 结果与分析

2.1 施锌对冬小麦产量、收获指数的影响

两季的试验结果(表1)均表明,不同施锌量对冬小麦产量、地上部生物量和收获指数均无显著影响。两季的小麦产量、生物量平均值分别是6768、7043 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和14 311、14 524 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,收获指数分别是

48%和49%,第二季的产量、生物量均高于第一季。这可能由于两季的降水量不同,第二季(1076 mm)显著高于第一季(670 mm)造成的。可见,虽然土壤有效锌的测定值较低($0.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但本试验中土施锌肥并没有明显增加小麦产量。

2.2 施锌对成熟期小麦各部位锌含量的影响

两季试验小麦对不同土施锌肥用量的反应不完全一致(图2)。第一季小麦成熟期籽粒、颖壳、茎叶各部位中锌含量随施锌量增加而增加,呈极显著正相关关系($P<0.001$);第二季植株各部位锌含量随施锌量增加呈先增加、后降低趋势,两者表现为显著抛物线关系($P<0.001$)。两季小麦不同部位的锌含量均表现为籽粒>颖壳>茎叶,第一季三者分别由对照处理的15.0、4.2、3.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高到150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理的19.8、5.4、4.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别提高32%、30%和24%。第二季分别由对照处理的22.3、4.0、3.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高到100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理的32.1、6.1、5.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别提高44%、54%和56%,再增施锌,各部位锌含量不再提高。土施一定量的锌肥,虽然可以提高小麦各部分锌含量,但小麦籽粒锌含量均未达到40~60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

比较两季小麦各部位锌含量可以看出,第二季小麦籽粒、颖壳和茎叶锌含量平均值比第一季分别提高70%、7%和17%,且达到显著水平(籽粒 $P<0.0001$ 、颖壳 $P=0.0422$ 、茎叶 $P<0.0001$),对照处理籽粒锌含量由第一季的15.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高至第二季的22.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比第一季的最高施锌量处理高出12%,这可能也是第二季小麦生育期水分条件比较好造成的。

2.3 施锌对小麦锌累积、分配及锌肥利用效率的影响

施锌对小麦地上部锌累积量的影响与锌含量情况一致(表2),随施锌量增加,地上部锌累积量呈增加趋势。第一季施锌量从10 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

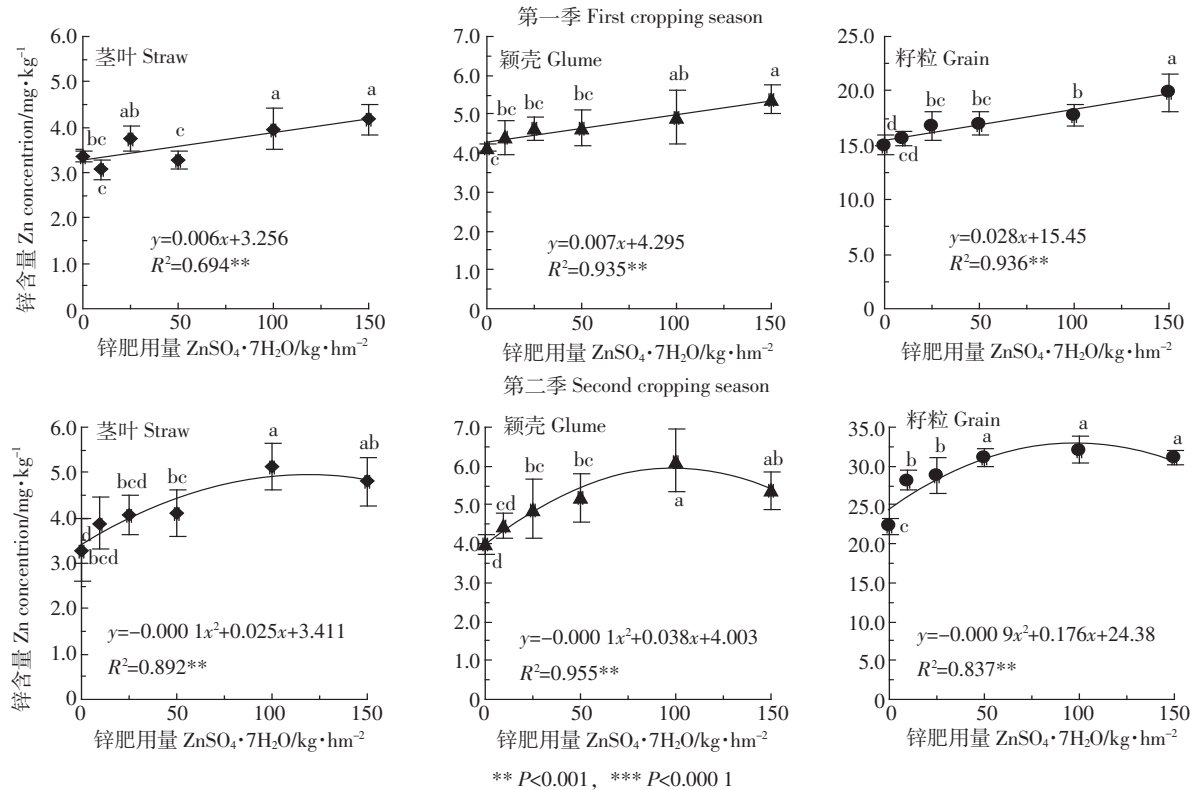
表1 锌肥用量对小麦产量、生物量及收获指数的影响

Table 1 Effects of Zn fertilization on grain yield, biomass and harvest index in the 2010—2011 and 2011—2012 cropping seasons

施锌量 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ rates/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	第一季 First cropping season			第二季 Second cropping season		
	产量 Grain yield/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	生物量 Biomass/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	收获指数 Harvest index/%	产量 Grain yield/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	生物量 Biomass/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	收获指数 Harvest index/%
0	6643±885a	14 022±2112a	47±1.2a	7029±299a	14 212±577a	49±2.2a
10	6912±775a	14 802±1488a	48±2.0a	6721±495a	14 079±910a	48±0.5a
25	6386±991a	13 368±2224a	48±1.3a	7038±331a	14 187±559a	50±0.4a
50	7121±796a	15 115±1852a	47±0.8a	6987±600a	14 259±1319a	49±0.8a
100	6607±1218a	13 975±2667a	47±0.5a	7190±270a	14 981±727a	48±1.3a
150	6939±771a	14 583±1808a	48±1.2a	7292±229a	15 115±338a	48±2.2a

注:同列数据后不同小写字母表示不同锌肥用量LSD检验在0.05水平上差异显著,下同。

Note: Different small letters following numbers in the same column show significant difference at 0.05 level among different $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ rates. It is the same in the following tables.



图中的误差线为均数标准差, $n=4$,下同。The error bars are standard deviation of the mean, and $n=4$. It is the same in the following figures

图 2 锌肥用量与小麦各部位锌含量的关系

Figure 2 The relationship between ZnSO₄·7H₂O rates and zinc concentration in different parts of wheat

表 2 锌肥用量对小麦锌累积、分配及利用效率的影响

Table 2 Effects of Zn fertilization rates on Zn accumulation, distribution and Zn utilization efficiency

施锌量 ZnSO ₄ ·7H ₂ O rates/kg·hm ⁻²	第一季 First cropping season			第二季 Second cropping season		
	总锌累积量 Total Zn uptake/g·hm ⁻²	锌收获指数 Zn harvest index/%	总锌利用率 Total Zn utilization efficiency/%	总锌累积量 Total Zn uptake/g·hm ⁻²	锌收获指数 Zn harvest index/%	总锌利用率 *Total Zn utilization efficiency/%
0	131.7±12.4c	80.4±2.2a	—	180.8±7.8c	86.5±1.1abc	—
10	129.9±12.1c	81.0±2.0a	0.18a	218.8±20.0b	86.6±1.8ab	0.79a
25	146.0±13.6bc	81.2±2.7a	0.25a	232.8±24.0b	87.0±0.6ab	0.58ab
50	147.2±12.7bc	80.7±2.4a	0.14a	248.4±30.4ab	87.4±1.2a	0.37ab
100	158.5±15.4b	81.0±1.0a	0.12a	272.2±23.2a	84.8±1.3c	0.26ab
150	178.6±14.0a	81.0±3.1a	0.14a	264.6±12.1a	85.5±1.7bc	0.19b

注: * 2010—2012 年两季小麦锌的累积利用率。It is the accumulative Zn utilization efficiency for winter wheat over the two growing seasons from 2010—2012.

hm⁻²时,与对照差异不显著,锌肥用量增加到 100、150 kg·hm⁻²时,锌累积量显著增加。第二季施锌处理的锌累积量均高于对照,施锌量为 10~50 kg·hm⁻²时,植株锌累积量差异不显著,但增加到 100 kg·hm⁻²时,锌累积量明显增加,再增加施锌量,锌累积量不再增加。

锌收获指数反映锌在小麦营养器官和籽粒的分配情况。试验结果(表 2)表明,土施锌肥没有对小麦锌收获指数造成显著影响,两季的锌平均收获指数分别是 81%和 86%,第二季比第一季高 6.7%。

总锌利用率指作物地上部吸收的肥料锌占施锌量的百分比,反映了锌肥的利用效率。第一季总锌利用率介于 0.12%~0.25%(表 2),不同施锌量间没有显著差异;两季总锌利用率在 0.19%~0.79%之间。可见,土施锌肥的肥料利用率极低,达不到 1%。

2.4 施锌对耕层土壤有效锌含量的影响

土施锌肥提高了小麦各生育期的土壤有效锌含量,且随施锌量增加不断提高(图 3)。施 150 kg·hm⁻²处理的土壤有效锌从第一季播种前的 0.37 mg·kg⁻¹

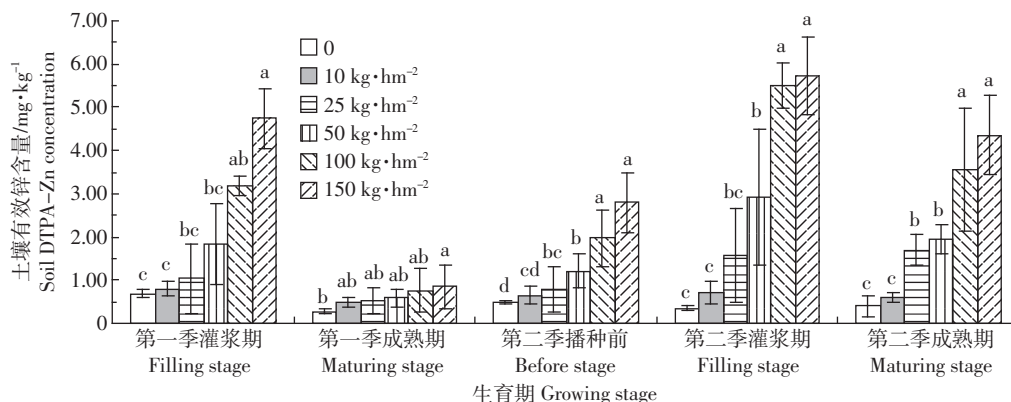


图3 小麦不同生育期土壤(0~20 cm)有效锌含量变化

Figure 3 Dynamics of soil DTPA-Zn at different growth stages of winter wheat

提高至第一季灌浆期的 $4.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加 9 倍以上, 但到第一季成熟期又降至 $0.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 经过 2011 年 7、8 月夏闲期后, 又提高至第二季播前 $2.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。第二季播种前施入锌肥后, 灌浆期有效锌含量比第一季灌浆期进一步提高, 施 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理提高至 $5.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 到第二季成熟期又有所降低, 但仍高于第一季成熟期, 为 $4.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是第一季播前的 11.8 倍, 第二季播前的 1.6 倍。其他施锌量处理的土壤有效锌变化规律与此基本一致。可见, 土施锌肥可显著提高土壤有效锌水平。

3 讨论

本研究表明, 土施锌肥对小麦产量及生物量均无显著影响, 国内外也有类似报道。但在土耳其 Konya (土壤 DTPA-Zn 为 $0.12 \sim 0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 土施 $50 \sim 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 可使小麦增产 $21\% \sim 260\%$ ^[26-27]; 在澳大利亚, 土壤 DTPA-Zn 在 $0.27 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间时, 土施锌肥 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 使小麦增产 $5\% \sim 15\%$ ^[28]; 7 个国家 23 个试验点研究结果表明, 在土壤有效锌 $0.3 \sim 6.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围内, 只有 Pakistan (DTPA-Zn $0.30 \sim 1.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 施锌 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 提高了小麦产量^[21]。河南新乡 (DTPA-Zn 为 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 施锌 $30 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 使小麦增产 $4.6\% \sim 10\%$ ^[24]; 淮北平原砂姜黑土区 (DTPA-Zn 为 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 施锌 $15 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 使小麦增产 $10\% \sim 17\%$ ^[29]。然而, 陕西关中 (DTPA-Zn 为 $0.65 \sim 0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[22-23, 30]、渭北旱塬 (DTPA-Zn $0.48 \sim 0.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20]等地, 土施锌肥 $15 \sim 50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 均对产量无明显影响。本试验在西北旱地典型缺锌区, 土壤有效锌含量仅为 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 即使两季的施锌量之和高达 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 小麦产量及生物量亦无显著变化, 试验

期间小麦也未表现出明显的锌中毒症状。可见, 由于气候、土壤条件和小麦品种的差异, 土施锌肥对小麦产量的影响并不确定。特别是在西北旱地雨养农业区, 在土壤有效锌含量不至于很低 (DTPA-Zn $< 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的情况下, 水分是限制作物产量的主要因素, 而不是锌。

土施一定量锌肥大幅度提高了耕层土壤有效锌含量, 各锌肥处理有效锌 (DTPA-Zn) 含量均高于对照, 且随施锌量增加而增加, 但随生育期后移, 土壤有效锌含量又有下降。除作物吸收利用外, 施入石灰性土壤的锌还会与土壤反应, 转化为碳酸盐和氧化物结合态, 以及更复杂的残渣态^[23, 30-31], 部分有效锌也会向深层土壤迁移^[32], 因此收获期耕层土壤有效锌含量低于灌浆期。经过两个月的夏闲期, 由于翻耕、土壤中秸秆腐解及微生物活动^[33-34]、降水增加引起的土壤水分条件改善, 在下季小麦播种前土壤 DTPA-Zn 又有所提高。关于旱地土壤有效锌的季节变化与影响因素还有待于深入研究。

随施锌后土壤有效锌含量的提高, 土施锌肥不同程度地提高了小麦植株地上各部位锌含量。第一季小麦各部位锌含量与施锌量呈直线 ($y=ax+b$) 关系, 但单位施锌量引起的作物锌含量增加值 a 较小, 作物锌含量随施锌量增加不明显, 籽粒锌含量只从对照的 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高至最高施锌量时的 $19.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不足推荐含量^[11]的一半; 第二季继续施入锌肥后, 小麦锌含量与施锌量呈二次曲线 ($y=ax^2+bx+c$) 关系, 曲线最高点的施锌量为 $97.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 籽粒锌含量为 $32.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仍达不到推荐含量^[11]。将目前常用的推荐施锌量 $15 \sim 45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 代入以上两个回归方程, 两季籽粒锌含量只能分别达到 $15.8 \sim 16.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $26.8 \sim$

30.5 mg·kg⁻¹。可见,尽管土施锌肥使土壤有效锌含量成倍增加,小麦籽粒锌含量的提高却很有限,远不能满足人体对锌元素的需求。由于石灰性土壤高CaCO₃含量、高pH值、土壤过粘、有机质含量低以及土壤水分等因素限制根从土壤中吸收锌^[13,35],总锌利用率最高不到1%,绝大部分的锌残留于土壤,这些是否会对生态环境造成污染还不明确。

比较两季小麦籽粒锌含量发现,第二季对照处理是第一季的1.5倍,分析其原因应该与两季降雨量有关。有研究表明,干旱胁迫对土壤中锌的有效性、作物对锌的吸收运输及锌营养状况有直接影响。土壤中有有效锌多以胶体吸附的代换态存在,自由锌离子数量很少,土壤中锌主要以扩散方式向植物根系移动^[36],水分不足时必然影响有效锌的移动,从而限制植物根际土壤有效锌的补充,影响植物吸收;另外,干旱影响小麦根系的形态构型和根系质外体的吸收及跨膜运输^[37],植物蒸腾作用降低,也可减少锌从根系向地上部的长距离运输^[39]。第二季是该地区一个罕见的丰水年,降水量达1076 mm,生育期(10月到次年6月)降水350 mm,比第一季(670 mm和250 mm)分别高61%、40%,较多的水分更利于土壤有效锌在土壤中的移动、根系吸收以及植物体内运输,使第二季小麦籽粒锌含量显著高于第一季,也使小麦地上部锌收获指数提高了6.7%。

4 小结

在西北旱地典型缺锌区,施用硫酸锌可显著提高土壤有效锌含量,但未能提高小麦产量,籽粒锌含量提高也有限,两季籽粒锌含量最高时分别为19.8 mg·kg⁻¹和32.1 mg·kg⁻¹,比对照提高32%和44%,均未达到推荐含量。因此,不建议在该地区通过土施锌肥来提高小麦籽粒锌含量。

参考文献:

- [1] 葛可佑.中国营养科学全书(上册)[M].北京:人民卫生出版社,2004:139-146.
- [2] GE Ke-you. An overview of nutrition sciences(Vol. 1)[M]. Beijing:People's Medical Publishing House, 2004:139-146.
- [3] Prasad A S, Halsted J A, Nadimi M. Syndrome of iron deficiency anemia, hepatosplenomegaly, hypogonadism, dwarfism and geophagia[J]. *The American Journal of Medicine*, 1961, 31(4):532-546.
- [4] Sommer A L, Lipman C B. Evidence on the indispensable nature of zinc and boron for higher green plants[J]. *Plant Physiol*, 1926, 1(3):231-249.
- [5] Anthony R, Patrick V, Thomson P, et al. The world health report 2002: Reducing risks, promoting healthy life[M]. Geneva:World Health Organization, 2002:162-163.
- [6] 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 Nutrition*, 2008, 11(6):632-638.
- [7] Zhang Yong, Song Qi-chao, Yan Jun, et al. Mineral element concentrations in grains of Chinese wheat cultivars[J]. *Euphytica*, 2009, 174(3):303-313.
- [8] 郭明慧,裴自友,温辉芹,等.普通小麦品种籽粒矿质元素含量分析[J].中国农学通报,2011,27(18):41-44.
- [9] GUO Ming-hui, PEI Zi-you, WEN Hui-qin, et al. Mineral elements concentration analysis on major wheat cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(18):41-44.
- [10] 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.
- [11] FU Zhao-lin, LI Ming-yan, GUO Sun-li, et al. The determining report of Zn content in seed for the main wheat idioplasm resources in Huang Huai Wheat Area[J]. *Beijing Agriculture*, 2007, 27:1-4.
- [12] 张明艳,郁一凡,封超年,等.不同基因型小麦籽粒、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.
- [13] ZHANG Ming-yan, YU Yi-fan, FENG Chao-nian, et al. Differences of calcium and zinc contents among flour, grain and bran of different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(2):240-245.
- [14] 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.
- [15] ZHANG Yong, WANG De-sen, ZHANG Yan, et al. Variation of major mineral elements concentration and their relationships in grain of Chinese wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9):1871-1876.
- [16] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J] *Plant and Soil*, 2008, 302(1):1-17.
- [17] 买文选,田霄鸿,李生秀.石灰性土壤小麦缺锌矫正及锌营养品质改善的途径[J].广东微量元素科学,2007,14(11):1-10.
- [18] MAI Wen-xuan, TIAN Xiao-hong, LI Sheng-xiu. The pathways of rectification of Zn deficiency and improvement of zinc nutritional quality of wheat in calcareous soils[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, 14(11):1-10.
- [19] 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.
- [20] LIU He-man, ZHANG Xing-chang, SU Shao-hua. Available zinc content and related properties of main soil in the Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):898-902.
- [21] 农业部测土配方施肥技术专家组.2012年春季主要作物科学施肥技术指导意见[N].农民日报,2012年3月19日(05).
- [22] Soil Testing and Formulated Fertilization Expert Group of the Ministry of Agriculture of China. Technical guide for scientific fertilization of main crops in spring of 2012[N]. Farmers'Daily, On March 19, 2012(05).
- [23] 李芳贤,王金林,李玉兰,等.锌对夏玉米生长发育及产量影响的研究[J].玉米科学,1999(1):73-77.
- [24] LI Fang-xian, WANG Jin-lin, LI Yu-lan, et al. Studies on influence of zinc to the summer corn growth, development and yield[J]. *Journal of*

- Maize Sciences*, 1999(1):73-77.
- [16] 李 强. 锌对小麦生长及产量的影响[J]. 土壤肥料, 2004(1):16-18.
LI Qiang. Effect of zinc fertilizer on the growth and yield of wheat[J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(1):16-18.
- [17] 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 Ming-de, WEI Xiao-rong, DANG Ting-hui. Effect of long-term applying zinc fertilizer on wheat yield and zinc absorption by wheat in dryland[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1):46-48.
- [18] 彭 琳, 彭祥林, 余存祖, 等. 黄土地区土壤中锌的含量分布、锌肥肥效及其有效施用条件[J]. 土壤学报, 1983, 20(4):361-372.
PENG Lin, PENG Xiang-lin, YU Cun-zu, et al. Zinc content in soils of loessal region, effect of zinc fertilizer and effective conditions for its application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1983, 20(4):361-372.
- [19] 张建军, 樊廷录. 小麦锌营养研究进展[J]. 作物杂志, 2008(4):19-23.
ZHANG Jian-jun, FAN Ting-lu. Research progress of zinc nutrition in wheat[J]. *Crops*, 2008(4):19-23.
- [20] 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 Crops Research*, 2012, 135:89-96.
- [21] 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(1-2):119-130.
- [22] 曹玉贤, 田霄鸿, 杨习文, 等. 土施和喷施锌肥对冬小麦籽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 Yu-xian, TIAN Xiao-hong, YANG Xi-wen, et al. Effects of soil and foliar applications of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1394-1401.
- [23] Lu X C, Cui J, Tian X H, et al. Effects of zinc fertilization on zinc dynamics in potentially zinc-deficient calcareous soil[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(4):963-969.
- [24] 汪 洪, 刘新保, 褚天铎, 等. 锌肥对作物产量、籽粒锌及土壤有效锌含量的后效[J]. 土壤肥料, 2003(1):3-6.
WANG Hong, LIU Xin-bao, CHU Tian-duo, et al. Residual effect of zinc application on crop yield, zinc concentration in crop grain and soil available zinc[J]. *Soils and Fertilizers*, 2003(1):3-6.
- [25] 柳燕兰, 郝明德, 张少民. 黄土区旱地长期施用微肥对冬小麦农艺性状及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3):72-75.
LIU Yan-lan, HAO Ming-de, ZHANG Shao-min. Effect of long-term applying micronutrients fertilization on the yield of winter wheat and the structure of wheat in dryland of loess region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(3):72-75.
- [26] 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.
- [27] Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(16):9092-9102.
- [28] Peck A W, McDonald G K, Graham R D. Zinc nutrition influences the protein composition of flour in bread wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 47(2):266-274.
- [29] 黄文川, 李录久, 李文高. 小麦氮锌配施效应及增产机理研究[J]. 核农学报, 2000, 14(4):225-229.
HUANG Wen-chuan, LI Lu-jiu, LI Wen-gao. Effect of applying nitrogen combined with zinc on wheat yield[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2000, 14(4):225-229.
- [30] 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 Xin-chun, TIAN Xiao-hong, YANG Xi-wen, et al. Effects of combined application of nitrogen and zinc on zinc fractions and fertilizer efficiency in calcareous soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6):1202-1213.
- [31] 莫 争, 王春霞, 陈 琴, 等. 重金属 Cu Pb Zn Cr Cd 在土壤中的形态分布和转化[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1):9-12.
MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN Qin, et al. Form distribution and transformation of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in soils[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(1):9-12.
- [32] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞. 黄土高原地区连续施锌条件下土壤锌的形态及有效性[J]. 中国农业科学, 2005, 38(7):1386-1393.
WEI Xiao-rong, HAO Ming-de, ZHANG Chun-xia. Zinc fractions and availability in the soil of the Loess Plateau after long-term continuous application of zinc fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(7):1386-1393.
- [33] Cayuela M L, Sinicco T, Mondini C. Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(1):118-127.
- [34] 杨 芳, 田霄鸿, 陆欣春, 等. 小麦秸秆腐解对自身锌释放及土壤供锌能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5):1188-1196.
YANG Fang, TIAN Xiao-hong, LU Xin-chun, et al. Effects of application of wheat straw on straw Zn release and soil Zn supply capacity during the decomposition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5):1188-1196.
- [35] Alloway B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans[J]. *Environ Geochem Health*, 2009, 31(5):537-548.
- [36] Warncke D D, Barber S A. Diffusion of zinc in soil; I. The influence of soil moisture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36(1):39-42.
- [37] 王晨阳, 马元喜. 不同土壤水分条件下小麦根系生态生理效应的研究[J]. 华北农学报, 1992, 7(4):1-8.
WANG Chen-yang, MA Yuan-xi. Ecological and physiological effects on root systems of wheat under different soil water conditions[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1992, 7(4):1-8.
- [38] 汪 洪, 金继运, 周 卫. 不同水分状况下施锌对玉米生长和锌吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1):91-97.
WANG Hong, JIN Ji-yun, ZHOU Wei. Effects of zinc application on growth and zinc uptake of maize under soil moisture stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1):91-97.