

网络出版时间:2017-03-07 11:17

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.04.021

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170307.1117.042.html>

锌肥种类和施用方式对土壤锌形态及有效性的影响

刘娟花, 国春慧, 陈艳龙, 贾 舟, 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】 【目的】探索谷类作物适宜的锌肥种类及施用方式, 为高效土施锌肥提供参考。**【方法】**设置连续两季小麦田间定位试验, 以不施锌肥为对照, 选取 ZnEDTA (4 kg/hm^2) 和 ZnSO_4 (20 kg/hm^2) 2 种锌源, 采用均施和条施 2 种施锌方式, 比较不同锌肥以不同方式施入土壤后, 在连续两季小麦种植过程中土壤 Zn 形态的转化规律及有效性的差异。**【结果】**与均施锌肥相比, 条施 ZnEDTA 和 ZnSO_4 2 种锌肥后, 在第 1 季土壤有效锌、交换态锌、松结有机态锌的增加率分别为 20.87% 和 374.03%, 3 497.36% 和 1 077.39%, 41.14% 和 256.38%, 第 2 季增加效果有所降低; 与 4 kg/hm^2 ZnEDTA 处理相比, 20 kg/hm^2 ZnSO_4 处理采用均施和条施 2 种方式均可以增加土壤有效锌及松结有机态锌、碳酸盐结合态锌含量, 且两季的增加效果均较好, 但与第 1 季相比, 第 2 季的效果极大降低; ZnEDTA 处理均施和条施均可在第 1 季保持较高的交换态锌含量(平均为 0.26 mg/kg), 而在第 2 季该形态锌大部分被固定(平均含量为 0.02 mg/kg)。**【结论】**条施较低量的 ZnEDTA 可有效增加当季作物土壤中的有效锌含量, 但对后季作物生长过程中土壤有效锌含量的提升效果较小。

【关键词】 石灰性土壤; 小麦; 锌源; 施锌方式; 锌有效性; 锌形态

【中图分类号】 S143.7⁺2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2017)04-0149-08

Effect of Zn source and application method on Zn form and availability in soil

LIU Juanhua, GUO Chunhui, CHEN Yanlong, JIA Zhou, TIAN Xiaohong

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrient and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study obtained suitable Zn sources and application methods to provide basis for efficient application of Zn fertilizer. **【Method】** A field trial was carried out over two consecutive cropping seasons, with no Zn application as control and four treatments of two Zn sources (ZnEDTA with 4 kg/hm^2 and ZnSO_4 with 20 kg/hm^2) and two application methods (broadcast and band). The soil zinc fractions and Zn availability during the two consecutive wheat cropping seasons were compared. **【Result】** Compared to broadcast application, band application of ZnEDTA and ZnSO_4 increased soil DTPA-Zn, exchangeable Zn (Ex-Zn), and weakly bond to organic matter Zn (Wbo-Zn) by 20.87% and 374.03%, 3 497.36% and 1 077.39%, and 41.14% and 256.38% in the first season, and these fractions reduced slightly in the subsequent season. Compared to 4 kg/hm^2 EDTA-Zn application, 20 kg/hm^2 ZnSO_4 application increased the contents of soil DTPA-Zn, Wbo-Zn, and carbonate bond Zn (Carb-Zn) in both seasons, although the effect in the subsequent season was lower. EDTA-Zn application could maintain high content of Ex-Zn in the first season (with an average of 0.26 mg/kg), and most of the Ex-Zn was fixed in the sub-

【收稿日期】 2016-02-26

【基金项目】 国家自然科学基金项目(41371288); 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11)

【作者简介】 刘娟花(1990—), 女, 陕西安康人, 硕士, 主要从事旱地养分调控研究。E-mail: 1095683200@qq.com

【通信作者】 田霄鸿(1967—), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士, 主要从事旱地养分调控研究。E-mail: txhong@hotmail.com

sequent season(with an average of 0.02 mg/kg).【Conclusion】In conclusion,band application of low level of EDTA-Zn could effectively increase soil DTPA-Zn content in the first cropping season,while the efficiency was lower in the subsequent cropping season.

Key words: calcareous soil; wheat; Zn sources; Zn fertilizer application methods; Zn availability; Zn fractions

锌作为人体的必需微量元素,在生理调节、骨骼发育、营养代谢及免疫力提升等方面具有重要功能。据估计,目前全世界约有 27 亿人口正面临锌缺乏问题^[1-2]。小麦作为主要的粮食作物,其籽粒锌含量低是导致以其为主食人群缺锌的主要原因^[3]。研究表明,中国北方地区小麦籽粒锌含量约为 32.3 mg/kg,距离人体营养所需的理想含量(40~60 mg/kg)尚有较大差距^[4-5]。因此,着力提高小麦籽粒锌含量对于改善人体健康水平具有重要意义。

施用锌肥等农艺措施对于提高小麦籽粒锌含量见效快,其中土施锌肥相对便捷。然而,土施锌肥虽能提高土壤有效锌含量,但我国北方小麦主产区土壤类型多为潜在缺锌的石灰性土壤(土壤有效锌(DTPA-Zn)含量为 0.5~1.0 mg/kg),这类土壤的特殊性质,使得土施锌肥对提高小麦籽粒锌含量的效果不佳,导致锌肥利用率极低^[6]。

锌肥施入土体后会发生老化现象,使得水溶态锌转化为更加稳定的形态^[7],并且其在土壤中的有效性持续时间与土壤性质、肥料类型和肥料施用量有关^[8]。研究表明,在土耳其一种极缺锌石灰性土壤(DTPA-Zn 含量约为 0.29 mg/kg)中,施 28 kg/hm² ZnSO₄ 防治小麦锌缺乏,肥效持续时间可长达 4~7 年^[9]。而相对于无机锌肥,螯合态锌肥由于稳定性较强、在土壤中不易被固定,故老化过程更为缓慢,EDTA 作为一种很强的螯合剂,与锌接触会与之形成比自然有机配体更稳定的形态^[10]。所以,ZnEDTA 在石灰性及中性土壤中肥效较好^[11]。此外,老化现象还与锌在土壤中的扩散过程有关^[12]。相对于均匀施锌,在小麦根际条施锌肥可以增加作物根际土壤有效锌含量,从而提高锌的生物有效性^[13]。

锌的生物有效性常采用土壤有效锌(DTPA-Zn)来表征,其大小不仅与土壤全锌含量有关,更与其各化学组分密切相关^[14]。锌在土壤中以多种形态存在,这些形态相互转化保持一种动态平衡,而转化速率决定了有效锌库的大小^[15-16]。一般地,土壤中交换态锌(Ex-Zn)和碳酸盐结合态锌(Carb-Zn)含量与锌肥生物有效性的关系最为密切^[17]。目前,

我国在北方潜在缺锌石灰性土壤上施用无机锌肥的研究方面做了大量工作,施用方法以均匀撒施为主^[18-20],而对其他螯合态锌及其他施锌方法的研究甚少。为此,本研究选用 ZnEDTA 和 ZnSO₄ 2 种锌肥,同时采用均施和条施 2 种施锌方式,旨在比较不同锌肥以不同方式施入土壤后,在连续两季小麦种植过程中土壤 Zn 形态的转化规律及有效性的差异,进而为合理高效施用 Zn 肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站进行,该地区属于半湿润易旱区,海拔 525 m,年平均气温 13 ℃,多年平均降水量 600 mm。供试土壤类型属于土垫旱耕人为土,于播种前采集了 0~20 cm 耕层土壤,风干,磨细过 2 mm 筛。供试土壤理化性质为 pH 8.2,矿质态氮 10.6 mg/kg,速效磷 10.9 mg/kg,速效钾 150 mg/kg,CaCO₃ 75 g/kg,有机质 13.81 g/kg,CEC 24.2 cmol/kg,DTPA-Zn 0.77 mg/kg,全 Zn 72.9 mg/kg。

1.2 试验设计与方法

试验于 2012-10—2014-06 进行,采用 2 年定位模式,所有施锌肥处理均在第 1 年小麦种植前完成,第 2 年除不进行土施锌肥外,其他田间作业均与第 1 年相同。锌肥处理采用条带设计,共设置 2 个研究因素,即锌肥形态及施用方式。其中锌源有 2 种,分别为 ZnSO₄·7H₂O 和 ZnEDTA;施锌方式亦为 2 种,分别为均匀施锌(锌肥与土壤混合,均匀撒施翻入土中后开沟播种)和集中施锌(条施,即先开沟,将锌肥与土壤混合后,均匀撒入沟中再播种,施锌宽度约为 10 cm)。试验共设 5 个处理,即不施锌肥(CK)、均施 ZnSO₄(M-ZnSO₄)、均施 ZnEDTA(M-ZnEDTA)、条施 ZnSO₄(B-ZnSO₄)、条施 ZnEDTA(B-ZnEDTA)。采用随机区组设计,重复 4 次,共 20 个小区,小区面积 2 m×3 m=6 m²。小区之间垄宽 0.2 m,区组之间留宽 0.5 m 过道。基于当 ZnEDTA 和 ZnSO₄·7H₂O 施用量相同时,前者肥效是后者的 3~5 倍^[21-23],故本试验设置施 Zn 量分别为

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 20 kg/hm², ZnEDTA 4 kg/hm²。基施尿素(N 用量为 125 kg/hm²)和过磷酸钙(P₂O₅ 用量为 100 kg/hm²)。供试小麦品种为小偃 22 号,采用点播法,每穴 1 粒种子,株距 2 cm,行距 20 cm,每小区种植 10 行。小麦生长期间无灌溉,其他管理方式同当地农户,且试验过程中所有田间操作均由人工完成。

1.3 土壤样品采集及指标测定

1.3.1 土壤样品采集 对于所有处理,均分别于第 1 季小麦幼苗期(2012-12-25)、分蘖期(2013-01-20)、返青期(2013-03-10)、拔节期(2013-04-10)、灌浆期(2013-05-10)、收获后(2013-06-10)及第 2 季小麦幼苗期(2013-11-20)、分蘖期(2013-12-25)、返青期(2014-03-05)、拔节期(2014-04-05)、灌浆期(2014-05-05)、收获后(2014-06-07),即锌肥施入土壤后的 55,81,130,161,191,222,385,431,492,523,553 和

586 d 采集 0~20 cm 土层小麦株间土样,每小区 4 个样点构成一个混合样品,自然条件下风干、研磨后过孔径 1 mm 筛,用于测定土壤有效锌及不同形态锌含量。

1.3.2 土壤有效 Zn(DTPA-Zn)含量的测定 首先用 DTPA 溶液对各土样进行浸提,液土体积质量比为 2 : 1,浸提液用 AA320CRT 型原子吸收分光光度计测定。

1.3.3 土壤各形态 Zn 含量的测定 参考 Lu 等^[3]和魏孝荣等^[24]的连续浸提分级方法,对土样中各形态 Zn 含量进行测定。测定时液土体积质量比为 10 : 1,将土壤锌分为 5 种组分,即交换态 Zn(Ex-Zn)、松结有机态 Zn(Wbo-Zn)、碳酸盐结合态 Zn(Carb-Zn)、氧化锰结合态 Zn(OxMn-Zn)、紧结有机态 Zn(Sbo-Zn),浸提液和操作条件见表 1。

表 1 土壤锌形态分级测定方法
Table 1 Grading method of soil zinc fractions

锌形态 Zn fraction	浸提液 Extraction	操作条件 Operation condition
交换态 Zn Ex-Zn	1 mol/L Mg(NO ₃) ₂ , pH 7.0	振荡 2 h Shake 2 h
松结有机态 Zn Wbo-Zn	0.1 mol/L Na ₄ P ₂ O ₇ , pH 9.5	振荡 2 h Shake 2 h
碳酸盐结合态 Zn Carb-Zn	1 mol/L NaAc-HAc, pH 5.0	振荡 5 h Shake 5 h
氧化锰结合态 Zn OxMn-Zn	0.1 mol/L NH ₂ OHHCl, pH 7.0	振荡 0.5 h Shake 0.5 h
紧结有机态 Zn Sbo-Zn	A. 质量分数 30% H ₂ O ₂ , pH 2.0; B. 1 mol/L Mg(NO ₃) ₂ , pH 7.0 A. Mass fraction 30% H ₂ O ₂ , pH 2.0; B. 1 mol/L Mg(NO ₃) ₂ , pH 7.0	A 溶液 85 ℃ 水浴近干,重复 1 次, B 溶液 25 ℃ 浸提 2 h Extracted with A at 85 ℃ twice, then extracted with B at 25 ℃ for 2 hours

1.4 数据处理

对试验所获得的数据用 SAS v8 软件进行方差分析和相关分析,选用单因素方差分析方法,平均数间多重比较选用 LSD 法,差异显著性标准为 $P=5\%$ 。图、表均采用 Microsoft Excel 2007 统计软件进行制作。

2 结果与分析

2.1 不同施锌处理对土壤 DTPA-Zn 的影响

由图 1 可以看出,施锌在两季小麦生长过程中对土壤 DTPA-Zn 含量均有增加效果。在第 1 季小麦生长期,土壤 DTPA-Zn 含量的增加程度表现为施 20 kg/hm² ZnSO₄ · 7H₂O 高于施 4 kg/hm² ZnEDTA,条施锌肥高于均施锌肥。在第 2 季小麦生长期,施锌对 DTPA-Zn 含量的增加程度低于第 1 季,相对于 CK,施用 ZnEDTA 对 DTPA-Zn 含量的增加效果影响很小,而施用 ZnSO₄ 处理土壤中的 DTPA-Zn 含量仍保持在较高水平,但 2 种施锌方式间 DTPA-Zn 含量无显著差异。可见施 20

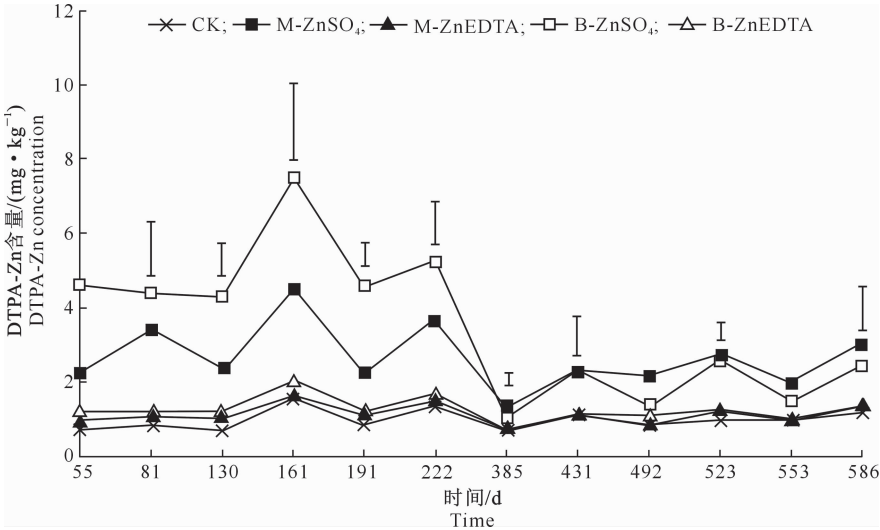
kg/hm² ZnSO₄ 的锌肥肥效在两季中均高于施 4 kg/hm² ZnEDTA,而条施锌肥对于提高土壤 DT-PA-Zn 含量仅在第 1 季优于均施锌肥,在第 2 季与均施锌肥相比并无显著差异,且条施锌肥处理土壤的 DTPA-Zn 含量在第 2 季的减少程度远大于均施锌肥处理。

2.2 不同施锌处理对土壤各形态 Zn 的影响

由图 2 可见,在第 1 季小麦种植初期(55 d),施锌均增加了土壤的松结有机态和碳酸盐结合态锌含量,二者总量的增加效果表现为条施 ZnSO₄ > 均施 ZnSO₄ > 条施 ZnEDTA > 均施 ZnEDTA。到第 2 季小麦收获后(586 d),与不施锌相比,施用 20 kg/hm² 的 ZnSO₄ · 7H₂O 可以增加松结有机态及碳酸盐结合态锌含量,而施 4 kg/hm² ZnEDTA 对各形态锌含量无显著增加作用;另外,均施与条施锌肥在第 2 季对各形态锌含量的影响无显著差异。与施锌 55 d 相比,586 d 后土壤松结有机态锌含量均会降低,降低程度表现为条施 ZnSO₄ > 均施 ZnSO₄ > 条施 ZnEDTA > 均施 ZnEDTA。由以上

分析可知,无论何种锌肥施入土壤,均可以增加土壤中各形态 Zn 含量,其中松结有机态和碳酸盐结合态 Zn 含量的增加较为明显,然后逐渐向其他形态

Zn 转化;条施锌肥在施肥初期对交换态锌含量增加效果最好,而 586 d 时会大大降低,最终与均施锌肥达到相近水平。



图中误差线为各处理间在 $P=5\%$ 水平的 LSD 值。图 3 同
Bar represents LSD(5%) between all treatments. The same for Fig. 3

图 1 不同施锌处理下两季小麦各生育期内土壤 DTPA-Zn 含量的动态变化

Fig. 1 Soil DTPA-Zn concentrations of different treatments in two cropping seasons

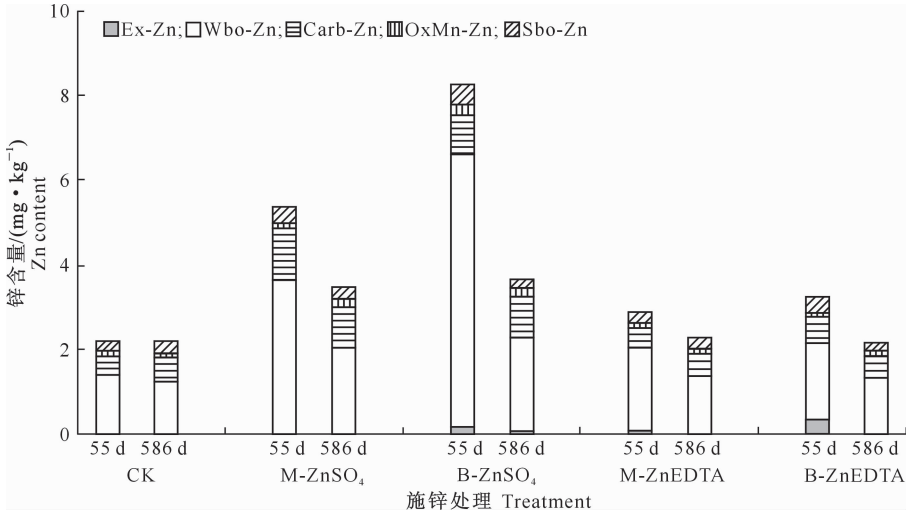


图 2 不同施锌处理第 1 季种植初期和第 2 季收获后土壤不同形态锌含量的差异

Fig. 2 Differences in Zn fractions in the initial stage of first cropping season and harvest stage of second cropping season in soils under different treatments

由图 3 可知,不同施锌处理下,土壤中交换态、松结有机态锌含量随时间推移均呈现降低趋势,而紧结有机态锌含量表现出一定的波动性,但总体变化较小,说明土壤中交换态、松结有机态锌稳定性较低,易被固定,紧结有机态锌则具有较强的稳定性。从图 3 亦可看出,碳酸盐结合态锌含量在第 2 季虽然也有降低趋势,但幅度较小,故而仍有较高残余量。此外,就各个施锌处理间的差异而言,在第 1 季

交换态锌含量表现为施 4 kg/hm^2 ZnEDTA 高于施 20 kg/hm^2 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,其他形态锌则表现为施 20 kg/hm^2 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 高于施 4 kg/hm^2 ZnEDTA;在施肥方式上,对于任意一种锌肥,各形态锌含量均表现为条施高于均施。在第 2 季所有形态锌含量均表现为施 20 kg/hm^2 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 高于施 4 kg/hm^2 ZnEDTA,而施用方式间无显著差异。

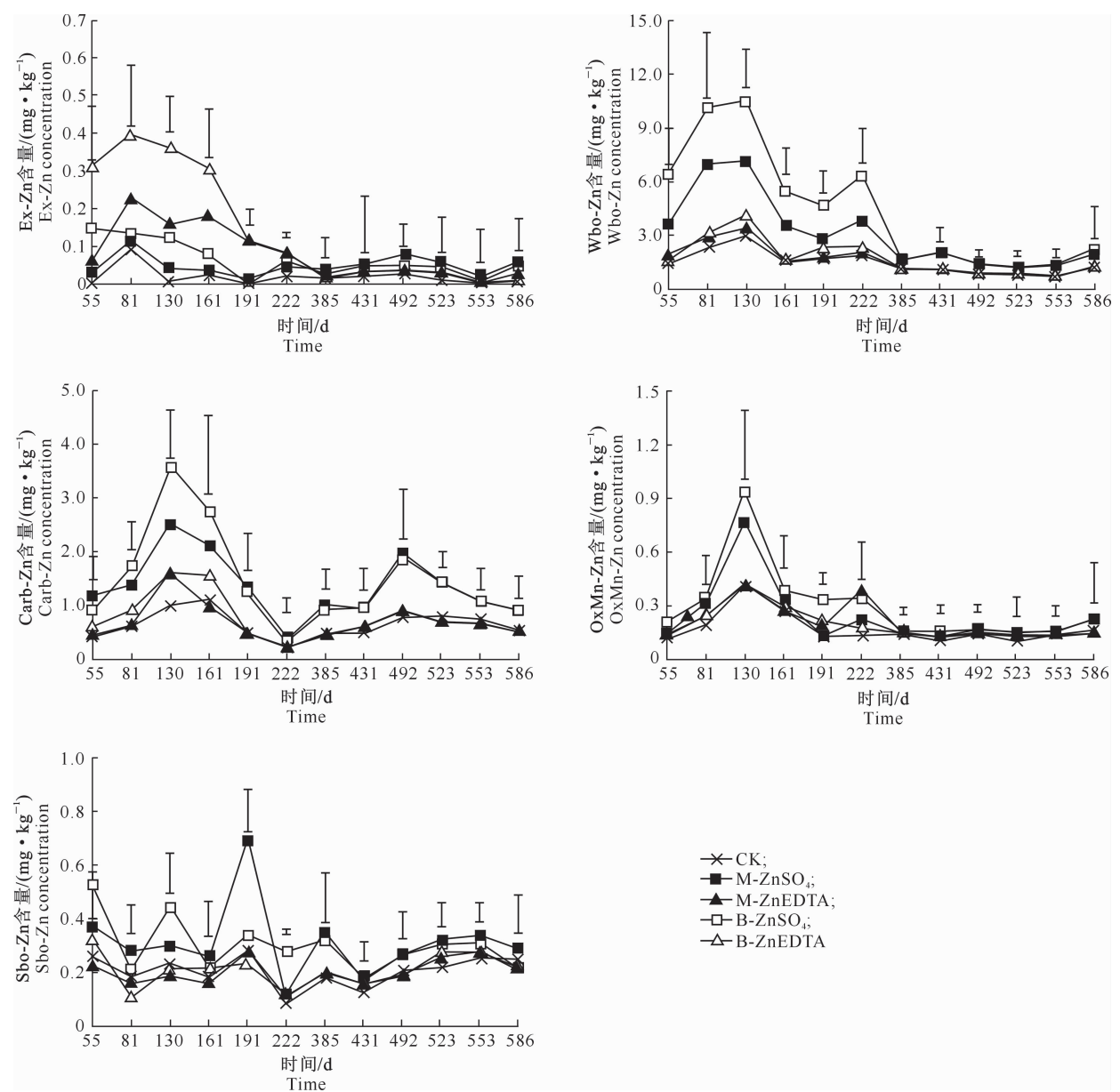


图 3 不同施锌处理下土壤各形态锌含量的动态变化
Fig. 3 Changes of Zn fractions in different treatments

2.3 不同施锌处理下土壤各形态锌与 DTPA-Zn 的相关关系

2 种不同施锌方式下,土壤 DTPA-Zn 与各形态锌的相关性分析结果见表 2。由表 2 可以看出,均施 ZnSO₄ 条件下,DTPA-Zn 与 Ex-Zn、Wbo-Zn、Carb-Zn、OxMn-Zn 呈正相关关系,与 Sbo-Zn 呈负相关关系,但相关性均不显著。均施 ZnEDTA 条件下,DTPA-Zn 与 Ex-Zn、Wbo-Zn、OxMn-Zn 呈正相关关系,与 Carb-Zn、Sbo-Zn 呈负相关关系,但相关性均不显著;在各形态锌中,Ex-Zn 与 Wbo-Zn 呈极显著正相关关系,与 OxMn-Zn 呈显著正相关关系。条施 ZnSO₄ 条件下,DTPA-Zn 与 Wbo-Zn 呈显著

正相关关系,与 Ex-Zn、Carb-Zn、OxMn-Zn 呈正相关关系,与 Sbo-Zn 相关性极低;在各形态锌中,Ex-Zn 与 Wbo-Zn 呈极显著正相关关系。条施 ZnEDTA 条件下,DTPA-Zn 与 Ex-Zn、Wbo-Zn、Carb-Zn、OxMn-Zn 呈正相关关系,与 Sbo-Zn 呈负相关关系,但相关性均不显著;在各形态锌中,Ex-Zn 与 Wbo-Zn、OxMn-Zn 呈极显著正相关关系,与 Carb-Zn 呈显著正相关关系。可见,Ex-Zn、Wbo-Zn 及 Carb-Zn 对土壤 DTPA-Zn 最为重要,其中 Wbo-Zn、Carb-Zn 分别直接和间接影响 Ex-Zn 含量而成为 DTPA-Zn 储存库。

表 2 不同施锌处理下土壤 DTPA-Zn 与各形态锌的相关性
Table 2 Correlation analysis between soil DTPA-Zn and Zn fractions

处理 Treatment	指标 Index	DTPA-Zn	Ex-Zn	Wbo-Zn	Carb-Zn	OxMn-Zn	Sbo-Zn
M-ZnSO ₄	DTPA-Zn	1	0.32	0.36	0.11	0.22	-0.40
	Ex-Zn		1	0.35	0.11	0.1	-0.44
	Wbo-Zn			1	0.38	0.77* *	-0.11
	Carb-Zn				1	0.66*	0.15
	OxMn-Zn					1	-0.18
	Sbo-Zn						1
B-ZnSO ₄	DTPA-Zn	1	0.46	0.66*	0.33	0.47	0.08
	Ex-Zn		1	0.76* *	0.37	0.43	0.37
	Wbo-Zn			1	0.48	0.77* *	0.3
	Carb-Zn				1	0.75* *	0.15
	OxMn-Zn					1	0.34
	Sbo-Zn						1
M-ZnEDTA	DTPA-Zn	1	0.27	0.05	-0.08	0.39	-0.41
	Ex-Zn		1	0.76* *	0.39	0.58*	-0.48
	Wbo-Zn			1	0.42	0.78* *	-0.44
	Carb-Zn				1	0.45	-0.06
	OxMn-Zn					1	-0.62*
	Sbo-Zn						1
B-ZnEDTA	DTPA-Zn	1	0.36	0.16	0.33	0.36	-0.17
	Ex-Zn		1	0.76* *	0.65*	0.75* *	-0.05
	Wbo-Zn			1	0.43	0.82* *	-0.31
	Carb-Zn				1	0.81* *	0.04
	OxMn-Zn					1	-0.15
	Sbo-Zn						1

注：* 表示相关性显著($P<0.05$), * * 表示相关性极显著($P<0.01$)。
Note: * means significant difference ($P<0.05$), * * means extremely significant difference ($P<0.01$).

3 讨 论

3.1 不同锌源及施锌方式下锌在土壤中的固定

本研究中,不同施锌处理在第 2 季的有效性均表现出一定的残留效应,但远低于第 1 季,这主要是因为石灰性土壤高 pH 和高 CaCO₃ 含量等特殊的理化性质,使得施入的锌肥更容易从不稳定的形态转化成稳定的形态^[25]。锌肥施入土壤后,大量的锌会被土壤微粒固定残留在土壤中^[26]。造成这一现象的原因主要是微孔扩散、沉淀及絮凝作用所引起的固相空隙阻塞等^[27]。而残留的有效锌则主要来源于土壤固体上的锌的解析、土壤有机质中锌的矿化、农业生产对土壤锌的再活化以及锌从土壤中的淋溶^[28]。

锌在石灰性土壤中主要通过扩散方式进行迁移,速度较慢,且极易被固定^[29]。本试验 2 种施锌方式中,与均施相比较,条施锌肥在第 1 季能够显著提高小麦株间土壤 DTPA-Zn 含量,而在第 2 季二者无显著差异,这可能归因于条施锌肥更能减小锌向根系运移的距离,从而减少土壤与锌肥的接触面积,进而降低对锌肥的固定^[30-31],故在第 1 季表现出

更好的增加根系周围土壤 DTPA-Zn 含量的效果;第 2 季由于耕种环节所进行的田间整理使得原来条施的锌肥也均匀化,因而 2 种施锌方式在第 2 季的扩散途径不再有差异,根系周围土壤有效锌含量亦无显著差异。对于 2 种来源的锌肥,本试验设计过程中参考 ZnEDTA 的肥效是 ZnSO₄ 的 3~5 倍^[21-23],选取 ZnSO₄ 施用量为 ZnEDTA 的 5 倍来试图使二者肥效达到相近水平。然而结果显示,施 4 kg/hm² ZnEDTA 对 DTPA-Zn 的贡献不及 20 kg/hm² ZnSO₄,但其较小的施入量在第 1 季仍表现出较好的效果,而第 2 季则效果不佳,这一结果可能也与 EDTA-Zn 过低的施入量有关。而交换态锌作为一种有效性最强的锌形态^[3],与对照及施 20 kg/hm² ZnSO₄ 相比,施 EDTA-Zn 后,其含量会显著提高,并能够在较长的时间内维持相对高的水平,可见,EDTA 作为一种很强的整合剂^[10],使得以之为载体的锌肥在迁移的过程中不易被土壤中其他胶体固定。

3.2 外源锌肥在土壤中的有效性及形态转化

土壤 DTPA-Zn 与各形态锌含量的相关性分析结果表明,交换态 Zn 及松结有机态 Zn 对土壤有效

锌贡献最大,而碳酸盐结合态 Zn 及氧化锰结合态 Zn 亦会影响 DTPA-Zn,这与前人研究结果^[6,29]一致。碳酸盐结合态 Zn 和氧化锰结合态 Zn 主要是通过转化为交换态 Zn 及松结有机态 Zn 而间接供给有效锌,可见二者是有效锌的储存库,而紧结有机态 Zn 则与 DTPA-Zn 呈负相关关系,可见紧结有机态 Zn 的增加是锌肥无效化的表现形式之一。

土壤各形态锌含量变化显示,对于各个处理,锌肥施入土壤后不同形态锌含量差异较大。在第 1 季,对于 ZnSO₄ 处理,Ex-Zn、Wbo-Zn、Carb-Zn 含量显著增加,但对 OxMn-Zn、Sbo-Zn 含量无显著影响;对于 ZnEDTA 处理,Ex-Zn 含量显著增加且显著高于 ZnSO₄ 处理,Sbo-Zn 含量有所降低,而对 Wbo-Zn、Carb-Zn、OxMn-Zn 含量无显著影响。由此可知,在石灰性土壤上,ZnEDTA 一方面可以保持较高的 Ex-Zn 含量,另一方面可以通过将无效组分(Sbo-Zn)转化为有效性较高的组分而保持较高的活性^[32];在第 2 季,ZnSO₄ 处理各组分含量仍明显高于对照处理,而 ZnEDTA 处理 Ex-Zn 含量不再有显著提高,这可能是因为石灰性土壤中 Ex-Zn 稳定性较差,易转化为较为稳定的其他形态^[10]。

在小麦各生育期内,各处理土壤中 DTPA-Zn 及各形态锌均随时间存在波动性变化。两季中,随着小麦萌发-生长-收获的过程,DTPA-Zn 含量整体表现为先增加再降低的趋势,第 1 季小麦收获与第 2 季小麦萌发期间达到最低,但随着第 2 季小麦的生长,DTPA-Zn 再度被活化,而对 DTPA-Zn 贡献较大的 Ex-Zn 以及作为间接供给者的 Wbo-Zn 和 Carb-Zn 也表现出类似的动态变化规律,这可能是由于植物根系分泌的小分子量有机酸及氨基酸可以增加其根际土壤有效态 Zn 含量^[33]。

4 结 论

本研究中,条施锌肥土壤 DTPA-Zn 及 Ex-Zn、Wbo-Zn 含量在第 1 季均高于均施锌肥土壤,第 2 季大大降低,达到与均施锌肥相近的水平。施 20 kg/hm² ZnSO₄ 土壤 DTPA-Zn 及 Wbo-Zn、Carb-Zn 含量在第 1 季均高于施 4 kg/hm² ZnEDTA,第 2 季均大大降低;但与施 ZnSO₄ 处理相比,ZnEDTA 处理在第 1 季可以保持较高的 Ex-Zn 含量,而在第二季该形态锌大部分被固定。可见,条施较低量 ZnEDTA 可有效增加当季作物土壤中有效锌的含量,而对后季作物的肥效较小,因此于当季种植小麦时条施低量 EDTA-Zn,应是一种较为经济有效的提

高土壤有效锌的方式。

〔参考文献〕

- [1] Li M, Wang S X, Tian X H, et al. Zn distribution and bioavailability in whole grain and grain fractions of winter wheat as affected by applications of soil N and foliar Zn combined with N or P [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 61: 26-32.
- [2] Ma G S, Jin Y, Li Y P, et al. Iron and zinc deficiencies in China: what is a feasible and cost-effective strategy? [J]. Public Health Nutrition, 2008, 11: 632-638.
- [3] 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: 963-969.
- [4] Zhang Y, Song Q C, Yan J, et al. Mineral element concentrations in grains of Chinese wheat cultivar [J]. Euphytica, 2010, 174: 303-313.
- [5] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? [J]. Plant and Soil, 2008, 302: 1-17.
- [6] 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.
- [7] 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 Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1202-1213.
- [8] Ma Y B, Uren N C. Effect of aging on the availability of zinc added to a calcareous clay soil [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 76: 11-18.
- [9] Hossain M A, Jahiruddin M, Islam M R, et al. The requirement of zinc for improvement of crop yield and mineral nutrition in the maize-mungbean-rice system [J]. Plant and Soil, 2008, 306: 13-22.
- [10] 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.
- [11] Alvarez J M, Almendros P, Gonzalez D. Residual effects of natural Zn chelates on navy bean response, Zn leaching and soil Zn status [J]. Plant and Soil, 2009, 317: 277-291.
- [12] Diego M O, Lourdes H A, Agustin G. Efficiency of a zinc ligand-sulfonate as Zn source for wheat (*Triticum aestivum* L.) and corn (*Zea mays* L.) under hydroponic culture conditions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57: 226-231.
- [13] Ma Y B, Uren N C. The effects of temperature, time and cycles of drying and rewetting on the extractability of zinc added to a calcareous soil [J]. Geoderma, 1997, 75: 89-97.
- [14] Hamza S, Sadanandan A K. Effect of source and method of application of zinc on yield and quality of black pepper (*Piper nigrum* L.) [J]. Journal of Spices and Aromatic Crops, 2005, 14: 117-121.
- [15] 林亲铁, 朱伟浩, 陈志良, 等. 土壤重金属的形态分析及生物有效性研究进展 [J]. 广东工业大学学报, 2013, 30(2): 113-118.

- Lin Q T, Zhu W H, Chen Z L, et al. Progress in species and bioavailability of heavy metals in soil [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2013, 30(2): 113-118.
- [15] Mishra P, Singh R, Shrivastava P C, et al. Effect of continuous cropping and fertilization on Zinc fractions and their contribution to plant uptake under rice-wheat system [J]. Journal of Indian Society of Soil Science, 2009, 57: 167-171.
- [16] Tabassum S, Jeet S, Kumar R, et al. Effect of organic manure and zinc fertilization on zinc transformation and biofortification of crops in vertisols of central India [J]. Journal of Agricultural Science, 2014, 6: 221-231.
- [17] Alvarez J M, Gonzalez D. Zinc transformations in neutral soil and zinc efficiency in maize fertilization [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54: 9488-9495.
- [18] 刘 铮. 我国土壤中 Zn 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]. Scientia Agricultura Sinica, 1994, 27(1): 30-37.
- [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.
- Liu H M, Zhang X C, Su S H. Available zinc content and related properties of main soil in the Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 898-902.
- [20] Lu X C, Tian X H, Zhao A Q, et al. Effect of Zn supplementation on Zn concentration of wheat grain and Zn fractions in potentially Zn-deficient soil [J]. Cereal Research Communications, 2012, 40: 385-395.
- [21] Gupta G N, Deb D L. Effect of chelating agents on zinc diffusion in two soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 1984, 147: 533-539.
- [22] Chesnin L. Chelation in nutrition, chelates and the trace element nutrition of corn [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1963, 11: 118-122.
- [23] Boawn L C. Comparison of zinc sulfate and zinc EDTA as zinc fertilizer sources [J]. Soil Science Society of America, 1973, 37: 111-115.
- [24] 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 X R, Hao M D, Zhang C X. 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.
- [25] Han F X, Hu A T, Qi H Y. Transformation and distribution of forms of zinc in acid, neutral and calcareous soils of China [J]. Geoderma, 1995, 66: 121-135.
- [26] Almendros P, Gonzalez D, Alvarez J M. Residual effects of organic Zn fertilizers applied before the previous crop on Zn availability and Zn uptake by flax (*Linum usitatissimum*) [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176: 603-615.
- [27] Ma Y B, Uren N C. Effect of aging on the availability of zinc added to a calcareous clay soil [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 76: 11-18.
- [28] Brennan R F, Bolland M D A. Residual values of soil-applied zinc fertilizer for early vegetative growth of six crop species [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2006, 46: 1341-1347.
- [29] 魏孝荣, 郝明德, 田梅霞. 长期定位施 Zn 土壤-作物系统 Zn 分布特征研究 [J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 96-98.
- Wei X R, Hao M D, Tian M X. Distribution of zinc in soil-crop system after long-term located application of zinc fertilizer [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(2): 96-98.
- [30] 易建华, 孙在军, 贾志红. 烤烟根系构型及动态建成规律的研究 [J]. 作物学报, 2005, 31(7): 915-920.
- Yi J H, Sun Z J, Jia Z H. Configuration and dynamic formation of root system in flue-cured tobacco [J]. The Crop Journal, 2005, 31(7): 915-920.
- [31] 刘晓燕, 何 萍, 金继运. 我国小麦最佳养分管理研究进展 [J]. 高效施肥, 2010(1): 2-16.
- Liu X Y, He P, Jin J Y. Progress in optimal nutrient management of wheat in China [J]. Effective Fertilization, 2010(1): 2-16.
- [32] 国春慧, 赵爱青, 陈艳龙, 等. 锌肥种类和施用方式对小麦生育期内土壤不同形态 Zn 含量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 1-8.
- Guo C H, Zhao A Q, Chen Y L, et al. Effects of Zn source and application method on contents of different Zn forms during wheat growth [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Edi), 2015, 43(7): 1-8.
- [33] Xu W H, Liu H, Ma Q F, et al. Root exudates, rhizosphere Zn fractions, and Zn accumulation of ryegrass at different soil Zn levels [J]. Pedosphere, 2007, 17: 389-396.