

## 绿洲盐化潮土施锌对玉米生长和锌形态转化的影响

马前瑞<sup>1, 2</sup>, 霍琳<sup>2</sup>, 杨思存<sup>1, 2\*</sup>, 蔡立群<sup>1</sup>, 王成宝<sup>2</sup>, 温美娟<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为了揭示施锌对绿洲盐化潮土区玉米生长和锌形态变化的影响, 通过盆栽模拟的方法, 探讨了不同盐分浓度条件下(轻度、中度、重度)外源锌施入对玉米株高、干重、含锌量、吸锌量和各形态锌含量的影响。结果表明: 相同盐分浓度条件下, 施锌 10 mg/kg 使得玉米株高、干重、含锌量、吸锌量和土壤有效锌含量分别增加了 8.5% ~ 21.6%、21.7% ~ 333.3%、107.3% ~ 154.7%、166.7% ~ 965.9% 和 451.3% ~ 547.2%, 碳酸盐结合态、松结有机态、氧化锰结合态、无定形氧化铁结合态、晶型氧化铁结合态、残留矿物态锌含量分别增加了 147.4% ~ 173.3%、122.4% ~ 152.1%、11.6% ~ 12.6%、32.6% ~ 33.4%、17.6% ~ 18.0%、3.1% ~ 3.2%; 相同施锌条件下, 随着土壤盐分浓度的增加, 玉米株高、干重、含锌量、吸锌量和土壤有效锌含量分别降低了 6.5% ~ 36.4%、12.8% ~ 89.9%、5.5% ~ 22.0%、17.4% ~ 92.2% 和 4.8% ~ 18.1%, 碳酸盐结合态、松结有机态、氧化锰结合态锌含量分别降低了 4.7% ~ 15.0%、3.6% ~ 13.7%、10.4% ~ 25.6%, 无定形氧化铁结合态、晶型氧化铁结合态、残留矿物态锌含量分别升高了 1.9% ~ 5.8%、0.4% ~ 3.5%、0.6% ~ 2.2%。综合分析认为, 在盐渍化环境中, 施锌能够改善玉米生长状况的主要原因是大幅度提高了碳酸盐结合态、松结有机态 2 种有效态锌含量, 在短期内改善了土壤-作物系统锌营养水平, 提高了玉米的耐盐性。

**关键词:** 绿洲盐化潮土; 锌形态; 玉米生长; 施锌; 盐分浓度

锌是植物必需的营养元素<sup>[1]</sup>, 植物所需的锌主要来自土壤。全世界范围内有大量缺锌土壤, 我国约有 40% 的土壤缺锌, 主要分布在北方石灰性土壤上。关于石灰性土壤锌有效性的问题, 国内外学者开展了大量研究, 目前普遍把土壤有效锌(DTPA-Zn) < 0.50 mg/kg 和植株含锌浓度 < 20 mg/kg 作为土壤和作物的缺锌临界值<sup>[2-3]</sup>。土壤中的锌有多种形态, 不同形态锌对植物的有效性不同, 不同形态锌的相互转化也必然会影响到对作物的有效性和锌肥的肥效<sup>[4-5]</sup>。不同研究者的结果表明, 虽然在不同地区、不同土壤、不同耕作栽培条件下, 土壤中锌的形态分布差异较大, 但交换态、松结有机态、碳酸盐结合态仍然是有效锌的主要来源, 只是在不同条件下各形态锌发生了转化, 从而导致了土壤有效锌含量的增加或减少<sup>[6-7]</sup>。同时, 施锌能够

提高土壤锌的有效性, 增加植株和籽粒锌含量, 这已被广泛认可。但在盐渍化环境中, 锌肥施入土壤后如何发生形态转化, 国内外的相关研究报道却并不多<sup>[8-9]</sup>。

绿洲盐化潮土是典型缺锌土壤之一<sup>[5]</sup>, 我们在该地区的调查研究结果表明, 土壤有效锌平均含量只有 0.34 mg/kg, 玉米缺锌症状非常普遍, 而且不同类型、不同程度盐渍化土壤中有效锌含量和植株缺锌率的差异也较大<sup>[9]</sup>。在中度氯化物-硫酸盐盐渍土上, 土壤有效锌含量达到 0.57 mg/kg, 高于土壤缺锌临界值, 但仍然有 18.3% 的玉米植株表现出缺锌症状; 而在重度镁质盐渍土上, 土壤有效锌含量只有 0.22 mg/kg, 玉米植株缺锌率达到了 37.4%<sup>[10]</sup>, 即便是施入 150 kg/hm<sup>2</sup> 硫酸锌, 仍不能完全解决苗期生长缓慢、全生育期花叶病普遍发生、后期果穗发育不良和产量低的问题<sup>[5, 11-12]</sup>。由此我们认为, 是盐渍化环境加重了作物缺锌, 有可能是土壤中的一种或几种离子参与了不同形态锌的转化, 从而导致土壤中活性锌含量显著减少和外源锌被迅速转化为不被作物吸收的形态。另一方面, 也有可能是土壤盐分浓度或盐分离子抑制了锌

收稿日期: 2022-03-12; 录用日期: 2022-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41967016); 甘肃省农业科学院重点研发计划(2020GAAS19)。

作者简介: 马前瑞(1996-), 硕士研究生, 主要从事土壤养分资源管理研究。E-mail: 1491858804@qq.com。

通讯作者: 杨思存, E-mail: yangsicun@sina.com。

的吸收,造成虽然土壤中有效锌含量较高,却仍然不能被作物吸收利用。基于此,本研究采用盆栽模拟的方法,通过向非盐化土壤中加入盐结皮形成不同盐分浓度的方式来模拟盐化潮土不同盐渍化程度,研究外源锌施入对玉米生长和锌形态转化的影响,旨在为该地区盐化潮土合理施用锌肥提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试土壤和土壤盐结皮取自甘肃省张掖市临泽县蓼泉镇湾子村(39° 19' N, 100° 05' E)玉米茬地耕层土壤(0 ~ 20 cm),经冬灌洗盐,含有机质 12.3 g/kg、全氮 1.0 g/kg、全磷 0.9 g/kg、碱解氮 70.8 mg/kg、有效磷 13.2 mg/kg、速效钾 245 mg/kg、有效锌 0.9 mg/kg、全盐 1.0 g/kg、pH 值 8.4,土壤中可交换态锌(Ex-Zn)和紧结有机态锌(SBO-Zn)含量为痕量。供试盐结皮取自相邻的撂荒地,属氯化物-硫酸盐盐结皮,含盐量 200.6 g/kg,其中  $\text{HCO}_3^-$  8.3 g/kg、 $\text{Cl}^-$  25.8 g/kg、 $\text{SO}_4^{2-}$  112.8 g/kg、 $\text{Ca}^{2+}$  4.6 g/kg、 $\text{Mg}^{2+}$  28.4 g/kg、 $\text{K}^+$  0.4 g/kg、 $\text{Na}^+$  20.3 g/kg。供试土壤和盐结皮均经风干、破碎、过筛(2 mm)后备用。锌肥为  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,氮肥为尿素(N 46%),磷肥和钾肥为  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,均为化学试剂。供试玉米品种为先玉 335,为河西绿洲灌区广泛种植且对缺锌比较敏感的品种<sup>[13]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验于 2021 年 4 月至 6 月在甘肃省农业科学

院温室大棚中进行,为盆栽试验,采用双因素裂区设计,主处理为是否施用锌肥,设不施锌(Zn0)和施锌 10 mg/kg(Zn10) 2 个水平,副处理为盐分浓度,设非盐化土(S0)、盐分浓度 2 g/kg(S2)、盐分浓度 5 g/kg(S5)、盐分浓度 10 g/kg(S10) 4 个水平。试验采用 20 cm × 20 cm 米氏盆,每盆装土 3.5 kg,每处理施 N 100 mg/kg、P 50 mg/kg 和 K 63 mg/kg,各处理均重复 4 次,所施化肥和锌肥以溶液的形式施入并按比例浇灌去离子水,平衡 1 d 后播种。玉米经催芽后于 4 月 19 日播种,每盆 6 颗,7 d 后定苗,定苗 5 株。生长期间浇灌去离子水,玉米六叶期即试验结束。根系和地上部分单独采集后,先在 105℃ 下杀青 30 min,再在 80℃ 下烘干至恒重,分别称重后磨细备用,测定锌含量。同时采集土样样品,自然风干、磨碎后过 2 mm 筛备用,用于测定有效锌和各形态锌含量。

### 1.3 测定项目及方法

土壤基本理化性状采用常规分析方法测定<sup>[14]</sup>。有机质用重铬酸钾外加热容量法;全氮用半微量凯氏定氮法;全磷用钼锑抗比色法;碱解氮用碱解扩散法;有效磷用 Olsen 法;速效钾用火焰光度法;pH 值用酸度计测定(2.5:1 水土比);全盐量用 5:1 水土比浸提-烘干残渣称量法;土壤有效锌(DTPA-Zn)以水土质量比为 2:1 浸提(pH 7.3),用原子吸收分光光度计测定;锌的形态分级方法采用韩凤祥等<sup>[15]</sup>提出的改进后的连续浸提方法(表 1);采用干灰化法制备植株样待测液,用原子吸收分光光度计测定其锌含量。

表 1 土壤中各形态锌的连续提取法

步骤	提取形态	提取剂	土液比	条件
I	交换态锌(Ex-Zn)	1 mol $\text{MgCl}_2$ (pH 7.0)	1:4	恒温振荡 2 h
II	碳酸盐结合态锌(CAB-Zn)	1 mol $\text{NaOAc-HOAc}$ (pH 5.0)	1:15	恒温振荡 6 h
III	松结有机态锌(WBO-Zn)	0.1 mol $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ +1 mol $\text{Na}_2\text{SO}_4$ (pH 9.5)	1:20	恒温振荡 2 h
IV	氧化锰结合态锌(OxMn-Zn)	0.1 mol $\text{NH}_2\text{OH-HCl}$ (pH 2.0)	1:20	恒温振荡 0.5 h
V	紧结有机态锌(SBO-Zn)	30% $\text{H}_2\text{O}_2$ (经 $\text{HNO}_3$ 酸化, pH 2.0) 与 1 mol $\text{MgCl}_2$ (pH 7.0)	1:2.5 与 1:4	(85 ± 5)℃ 水浴加热近干 (2 次) 与恒温振荡 2 h
VI	无定形氧化铁结合态锌(AOFe-Zn)	0.14 mol $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -0.175 mol $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ (pH 3.25)	1:20	恒温振荡 4 h
VII	晶形氧化铁结合态锌(COFe-Zn)	0.04 mol $\text{NH}_2\text{OH-HCl}$ (25% HOAc)	1:20	96 ~ 100℃ 水浴加热,操作 2 次(总土液比不变)
VIII	残留矿物态锌(RES-Zn)	$\text{HClO}_4$ -HF-HCl	—	高温消煮

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 26.0 对数据进行统计分析, 采用双因素方差分析进行差异显著性检验, 用 LSD 法进行多重比较, 用 Excel 2010 作图。

2 结果与分析

2.1 施锌对不同盐分浓度土壤中玉米幼苗生长的影响

从表 2 可以看出, 施锌和盐分浓度对玉米株高、干重都有极显著影响 ( $P<0.01$ ); 锌盐交互对玉米株高的影响不显著, 但对玉米干重的影响达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。从玉米生长期间的表现来看, 在 Zn0 条件下, 当土壤含盐量为 2 g/kg 时, 玉米植株矮小, 玉米生长已受到胁迫; 土壤含盐量达到 5 g/kg 时, 胁迫作用进一步加强, 个别植株叶片出现白色条纹, 表现出典型缺锌症状; 当土壤含盐量达到 10 g/kg 时, 玉米生长已完全受到抑制, 出苗 12 d 便枯死, 即便是施入 10 mg/kg 的锌肥也无济于事, 只是推迟了玉米幼苗死亡的时间 (23 d)。从玉米收获时测得的株高来看, 在 Zn0 条件下, S2、S5 处理比 S0 处理分别降低了 2.9%、28.7%, S2 与 S0 处理间差异不显著; 在 Zn10 条件下, S2、S5 处理比 S0 处理分别降低了 6.5%、36.4%, S2 与 S0 处理间差异也不显著。随着土壤含盐量的增加, 不管是施锌还是不

表 2 施锌在不同盐分浓度下的玉米株高和干重

施锌水平	盐分浓度	株高 (cm)	干重 (g/盆)
Zn0	S0	54.7 ± 3.8a	18.5 ± 0.2a
	S2	53.1 ± 5.6a	18.4 ± 0.2a
	S5	39.0 ± 6.4b	9.3 ± 0.1b
	S10	—	0.6 ± 0.1c
Zn10	S0	66.5 ± 5.2a	25.7 ± 0.5a
	S2	62.2 ± 4.6a	22.4 ± 0.1b
	S5	42.3 ± 4.3b	13.0 ± 0.2c
	S10	—	2.6 ± 0.1d
显著性			
	Zn	**	**
	S	**	**
	Zn × S	ns	**

注: 同列不同小写字母表示相同施锌水平不同盐分浓度处理间差异达显著水平 ( $P<0.05$ ); 一代表枯死, ns 表示处理间差异不显著, \* 表示  $P<0.05$ , \*\* 表示  $P<0.01$ 。下同。

施锌, 玉米株高都有明显降低的趋势, 但在相同盐分浓度下, Zn10 处理却显著高于 Zn0 处理, 在 S0、S2、S5 处理下分别增加了 21.6%、17.1%、8.5%, 但在 S5 处理下, Zn0 与 Zn10 处理间差异不显著。玉米干重的降低趋势与株高基本一致, Zn0 处理下, S2、S5、S10 处理分别降低了 0.5%、50.0%、96.8%, S0 与 S2 处理间差异不显著; Zn10 处理下分别降低了 12.7%、49.3%、90.1%, 各处理间均达到了差异显著水平。相同盐分浓度下, S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理的玉米干重分别增加了 38.7%、21.7%、39.8%、333.3%, 各处理间均达到差异极显著水平 ( $P<0.01$ )。

2.2 施锌对不同盐分浓度土壤中玉米植株含锌量和吸锌量的影响

从表 3 可以看出, 施锌和盐分浓度对玉米植株含锌量和吸锌量都有极显著影响 ( $P<0.01$ ); 锌盐交互对玉米植株含锌量的影响不显著, 但对吸锌量的影响达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。在 Zn0 处理下, S2、S5、S10 处理的玉米植株含锌量分别比 S0 处理降低了 10.5%、19.6%、36.6%, S0 与 S2、S2 与 S5 处理间差异不显著, 且都低于玉米缺锌临界值 ( $<20$  mg/kg); Zn10 处理下, S2、S5、S10 处理的玉米植株较 S0 处理含锌量虽然也分别降低了 5.5%、10.4%、22.0%, 但总体上都高于玉米缺锌临界值, S0 与 S2、S2 与 S5 处理间差异也不显著。相同盐分浓度下, S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理的玉米植株含锌量分别增加了 107.3%、118.9%、131.3%、154.7%, 各处理间均达到差异极显著水平 ( $P<0.01$ )。与含锌量相似, 随着土壤盐分浓度的增加, 不管是施锌还是不施锌, 玉米植株吸锌量都显著降低, Zn0 处理下, S2、S5、S10 较 S0 处理的吸锌量分别降低了 11.1%、59.8%、97.9%, Zn10 处理下分别降低了 17.4%、54.6%、92.2%, 各处理间均达到差异极显著水平 ( $P<0.01$ )。相同盐分浓度下, S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理的玉米植株吸锌量分别增加了 187.0%、166.7%、224.6%、965.9%, 且各处理间均达到差异极显著水平 ( $P<0.01$ )。

2.3 施锌对不同盐分浓度土壤中有效锌 (DTPA-Zn) 含量的影响

从表 3 可以看出, 施锌和盐分浓度及其交互对土壤 DTPA-Zn 都有极显著影响 ( $P<0.01$ ), 相同施锌处理下随着盐分浓度的增加, 土壤 DTPA-Zn 含量逐渐降低。在 Zn0 处理下, S2、S5、S10 比 S0

处理分别降低了 6.6%、15.8%、30.3%，S0 与 S2、S2 与 S5、S5 与 S10 处理间差异不显著；在 Zn10 处理下，S2、S5、S10 比 S0 处理分别降低了 4.8%、10.9%、18.1%，S0 与 S2 处理间差异不显著，其他各处理均达到差异显著水平。施锌显著提高了土壤中的 DTPA-Zn 含量，相同盐分浓度下，S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理的 DTPA-Zn 含量分别增加了 451.3%、461.9%、482.8%、547.2%，且各处理间均达到差异极显著水平 ( $P<0.01$ )。

表 3 施锌在不同盐分浓度下的玉米植株含锌量、吸锌量和土壤有效锌含量

施锌水平	盐分浓度	含锌量 ( $\mu\text{g/g}$ )	吸锌量 ( $\mu\text{g/盆}$ )	土壤有效锌 ( $\text{mg/kg}$ )
Zn0	S0	21.9 ± 0.8a	405.6 ± 9.2a	0.76 ± 0.17a
	S2	19.6 ± 0.6ab	360.6 ± 8.1b	0.71 ± 0.06ab
	S5	17.6 ± 0.4b	163.0 ± 4.2c	0.64 ± 0.10bc
	S10	13.9 ± 0.2c	8.5 ± 0.2d	0.53 ± 0.08c
Zn10	S0	45.4 ± 1.2a	1164.1 ± 10.4a	4.19 ± 0.12a
	S2	42.9 ± 1.6ab	961.8 ± 9.8b	3.99 ± 0.16a
	S5	40.7 ± 0.9b	529.1 ± 9.6c	3.73 ± 0.10b
	S10	35.4 ± 1.4c	90.6 ± 5.4d	3.43 ± 0.07c
显著性				
Zn		**	**	**
S		**	**	**
Zn × S		ns	**	**

## 2.4 施锌对不同盐分浓度土壤中各形态锌含量的影响

### 2.4.1 对碳酸盐结合态锌 (CAB-Zn) 含量的影响

从表 4 可以看出，土壤 CAB-Zn 含量在 0.60 ~

1.93 mg/kg 之间，占到了全锌含量的 0.6% ~ 1.8%，施锌和盐分浓度对 CAB-Zn 含量的影响达到极显著水平 ( $P<0.01$ )，锌盐交互对 CAB-Zn 含量的影响不显著。相同施锌水平下随着盐分浓度的增加，CAB-Zn 含量呈逐渐降低的趋势。Zn0 处理下，S2、S5、S10 比 S0 处理分别降低了 7.4%、17.8%、23.8%，Zn10 处理下，S2、S5、S10 比 S0 处理分别降低了 4.7%、9.9%、15.0%，2 个施锌水平下 S0 与 S2、S2 与 S5、S5 与 S10 处理间均差异不显著。施锌显著提高了 CAB-Zn 的含量，相同盐分浓度下，S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理分别增加了 146.2%、153.9%、166.2%、176.1%，各处理间均达到差异极显著水平 ( $P<0.01$ )。

### 2.4.2 对松结有机态锌 (WBO-Zn) 含量的影响

从表 4 可以看出，土壤 WBO-Zn 含量在 1.63 ~ 4.76 mg/kg 之间，占到了全锌含量的 1.6% ~ 4.5%，施锌和盐分浓度对 WBO-Zn 含量的影响达到极显著水平 ( $P<0.01$ )，锌盐交互对 WBO-Zn 含量的影响不显著。相同施锌水平下随着盐分浓度的增加，WBO-Zn 含量呈逐渐降低的趋势。Zn0 处理下，S2、S5、S10 比 S0 处理分别降低了 7.4%、17.8%、23.8%，Zn10 处理下，S2、S5、S10 比 S0 处理分别降低了 3.6%、9.7%、13.7%，2 个施锌水平下各处理间均达到差异显著水平。施锌显著提高了 WBO-Zn 的含量，相同盐分浓度下，S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理分别增加了 122.4%、131.8%、144.3%、152.1%，且各处理间均达到差异极显著水平 ( $P<0.01$ )。

表 4 施锌在不同盐分浓度下的土壤各形态锌含量

施锌水平	盐分浓度	碳酸盐结合态锌	松结有机态锌	氧化锰结合态锌	无定形氧化铁结合态锌	晶形氧化铁结合态锌	残留矿物态锌
Zn0	S0	0.78 ± 0.08 a	2.14 ± 0.18a	1.72 ± 0.07a	4.81 ± 0.14c	10.72 ± 0.30c	77.37 ± 3.18b
	S2	0.72 ± 0.06ab	1.98 ± 0.06b	1.54 ± 0.06ab	4.89 ± 0.24c	10.76 ± 0.46c	77.87 ± 3.32b
	S5	0.65 ± 0.04bc	1.76 ± 0.15c	1.39 ± 0.10bc	4.95 ± 0.17ab	10.90 ± 0.48ab	78.48 ± 4.13ab
	S10	0.60 ± 0.11c	1.63 ± 0.07d	1.27 ± 0.08c	5.06 ± 0.12a	11.06 ± 0.36a	79.03 ± 6.30a
Zn10	S0	1.93 ± 0.05a	4.76 ± 0.20a	1.92 ± 0.12a	6.38 ± 0.15c	12.61 ± 0.42b	79.78 ± 4.25b
	S2	1.84 ± 0.11ab	4.59 ± 0.14b	1.72 ± 0.16b	6.50 ± 0.22bc	12.66 ± 0.51b	80.29 ± 4.31b
	S5	1.74 ± 0.04bc	4.30 ± 0.11c	1.56 ± 0.10bc	6.57 ± 0.13b	12.85 ± 0.54a	80.97 ± 4.29ab
	S10	1.64 ± 0.06c	4.11 ± 0.10d	1.43 ± 0.07c	6.75 ± 0.21a	13.05 ± 0.64a	81.54 ± 4.86a
显著性							
Zn		**	**	**	**	**	**
S		**	**	**	**	**	*
Zn × S		ns	ns	ns	ns	ns	ns

#### 2.4.3 对氧化锰结合态锌 (OxMn-Zn) 含量的影响

从表 4 可以看出, 土壤 OxMn-Zn 含量在 1.27 ~ 1.92 mg/kg 之间, 占到了全锌含量的 1.3% ~ 1.8%, 施锌和盐分浓度对 OxMn-Zn 含量的影响达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 锌盐交互对 OxMn-Zn 含量的影响不显著。相同施锌水平下随着盐分浓度的增加, OxMn-Zn 含量呈逐渐降低的趋势。Zn0 处理下, S2、S5、S10 比 S0 处理分别降低了 10.4%、19.2%、26.1%, S0 与 S2、S2 与 S5、S5 与 S10 处理间均差异不显著; Zn10 处理下, S2、S5、S10 比 S0 处理降低了 10.4%、18.7%、25.6%, S0 与 S2 处理间差异显著, S2 与 S5、S5 与 S10 处理间差异不显著。施锌提高了 OxMn-Zn 含量, 相同盐分浓度下, S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理分别增加了 11.6%、11.7%、12.2%、12.6%, 且各处理间均达到差异极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

#### 2.4.4 对无定形氧化铁结合态锌 (AOFe-Zn) 含量的影响

从表 4 可以看出, 土壤 AOFe-Zn 含量在 4.81 ~ 6.75 mg/kg 之间, 占到了全锌含量的 4.9% ~ 6.2%, 施锌和盐分浓度对 AOFe-Zn 含量的影响达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 锌盐交互对 AOFe-Zn 含量的影响不显著。相同施锌水平下随着盐分浓度的增加, AOFe-Zn 含量呈逐渐增加的趋势。Zn0 处理下, S2、S5、S10 比 S0 处理分别增加了 1.7%、2.9%、5.2%, S0 与 S2、S5 与 S10 处理间差异不显著; Zn10 处理下, S2、S5、S10 比 S0 处理分别增加了 1.8%、3.0%、5.7%, S0 与 S2、S2 与 S5 处理间差异不显著。施锌提高了 AOFe-Zn 含量, 相同盐分浓度下, S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理分别增加了 32.6%、32.8%、32.7%、33.3%, 且各处理间均达到差异极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

#### 2.4.5 对晶形氧化铁结合态锌 (COFe-Zn) 含量的影响

从表 4 可以看出, 土壤 COFe-Zn 含量在 10.72 ~ 13.05 mg/kg 之间, 占到了全锌含量的 11.0% ~ 12.0%, 施锌和盐分浓度对 COFe-Zn 含量的影响达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 锌盐交互对 COFe-Zn 含量的影响不显著。相同施锌水平下随着盐分浓度的增加, COFe-Zn 含量呈逐渐增加的趋势。Zn0 处理下, S2、S5、S10 比 S0 处理分别增加了 0.4%、1.7%、3.2%, Zn10 处理下, S2、S5、S10 处理比 S0 分别增加了 0.4%、1.9%、3.5%, 2 个施锌水平

下 S0 与 S2、S5 与 S10 处理间均差异不显著, 但 S0、S2 与 S5、S10 处理间均达到了差异显著水平。施锌显著提高了 COFe-Zn 含量, 相同盐分浓度下, S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理分别增加了 17.6%、17.7%、17.8%、17.9%, 且各处理间均达到差异极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

#### 2.4.6 对残留矿物态锌 (RES-Zn) 含量的影响

从表 4 可以看出, 土壤 RES-Zn 含量在 77.37 ~ 81.54 mg/kg 之间, 占到了全锌含量的 74.3% ~ 80.1%, 施锌对 RES-Zn 含量的影响达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 盐分浓度对 RES-Zn 含量的影响达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 锌盐交互对 RES-Zn 含量的影响不显著。相同施锌水平下随着盐分浓度的增加, RES-Zn 含量呈逐渐增加的趋势。Zn0 处理下, S2、S5、S10 比 S0 处理分别增加了 0.7%、1.4%、2.2%, Zn10 处理下, S2、S5、S10 比 S0 处理分别增加了 0.6%、1.5%、2.2%, 2 个施锌水平下 S0 和 S2 与 S5、S5 与 S10 处理间均差异不显著, 但 S0、S2 与 S10 处理间均达到了差异显著水平。施锌提高了 RES-Zn 的含量, 在相同盐分浓度下, S0、S2、S5、S10 处理下的 Zn10 比 Zn0 处理分别增加了 3.1%、3.1%、3.2%、3.2%, 且各处理间均达不到差异显著水平。

### 3 讨论

锌作为植物叶绿体的组成成分之一, 参与了作物生长素的代谢, 决定并影响着数十种酶的活性, 对作物生长发育和产量具有重要的影响<sup>[16]</sup>。刘春晓等<sup>[17]</sup>研究表明, 当盐分浓度较高时, 盐分会胁迫干扰胞内的离子稳定, 导致细胞膜功能异常, 酶代谢活动减弱, 玉米生长受抑, 最终整株植物受到严重影响、减产直至死亡。本研究结果表明, 随着盐分浓度的增加, 玉米幼苗生长受到胁迫直至死亡, 施锌显著增加了玉米株高、干重、含锌量和吸锌量, 甚至在 10 g/kg 的盐分浓度下使玉米幼苗的死亡时间推迟了 11 d, 可见施锌能缓解盐胁迫对玉米幼苗生长的伤害, 这与宫庆友等<sup>[18]</sup>的研究结果是一致的, 可能是在盐胁迫下, 玉米地上部和根部  $\text{Na}^+$  含量增加, 造成了土壤导水性能的降低, 补充锌后使得玉米植株保持较低的渗透势, 有利于盐胁迫条件下植物细胞的吸水, 从而缓解渗透胁迫所造成的伤害<sup>[19-20]</sup>。此外, 人们普遍认为在缺锌条件下植株内的锌浓度会显著下降, 施锌能显著提高作

物体内的锌含量<sup>[21]</sup>。尽管这些结论大多是在正常土壤环境中得出的,但本研究在盐渍化条件下也得出了相同的结论,即:在不施锌条件下,随着土壤盐分浓度的增加,玉米植株含锌量显著降低,远远低于玉米缺锌临界值(<20 mg/kg);施锌处理的玉米植株含锌量虽然也在降低,但都高于玉米缺锌临界值,这与芦满济等<sup>[22]</sup>的研究结果是一致的,可能是施锌在提高盐渍环境中玉米锌营养水平的同时,也增强了耐盐性,促进了玉米的生长。

影响土壤有效锌的因素很多<sup>[23-24]</sup>,土壤pH值、有机质、碳酸钙、盐分含量和元素的交互作用也是重要原因。甘肃河西走廊的绿洲盐化潮土是典型的石灰性土壤,土壤pH值大多在8.5以上,有时甚至高达10.0,土壤有效锌含量较低也是必然。本试验条件下,供试土壤在不加入盐结皮的情况下,有效锌含量也只有0.89 mg/kg,处于潜在缺锌范围,随着盐分浓度的增加,土壤有效锌含量显著降低,这与团队以往的研究<sup>[8-9]</sup>结论是一致的。值得关注的是在施锌10 mg/kg后,虽然土壤有效锌含量还是随着盐分浓度的增加而显著降低,但土壤中的DTPA-Zn含量总体上却增加了5倍左右,这种增加显然极大地改善了绿洲盐化潮土锌营养水平,但对于已经受到盐胁迫的玉米生长而言,其作用是非常有限的。另一方面,跟土壤有机质、粘粒、碳酸钙、盐离子对外源锌的强烈固定相比,这种5倍左右的增加也是暂时的,随着时间的推移,这些锌终将被固定,只是有些被固定成了有效态,有些被固定成了无效态。因此,施锌有效的前提条件还是中、轻度的盐渍化环境。

土壤中锌的形态分级是人们在研究土壤对锌的吸附固定和有效性过程中逐渐建立起来的。我们以往的研究表明,交换态、松结有机态、碳酸盐结合态是土壤有效锌的主要来源,土壤中的 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Na^+$ 对土壤有效锌含量变化起着关键作用<sup>[9]</sup>。Han等<sup>[25]</sup>对我国多个硫酸锌试验土壤进行分析发现,外源锌施入土壤后,最先进入交换态和松结有机态组分,之后随着时间的推移逐渐被土壤矿物吸附固定转化为无效态锌。魏孝荣等<sup>[26]</sup>研究表明,石灰性土壤中,土壤的主要化学组分对原有锌的固定量大小为:粘土矿物>氧化铁>有机质>氧化锰>碳酸盐;而对外源锌的固定量大小则为:氧化铁>有机质>粘土矿物>碳酸盐>氧化锰。本研究表明,施锌10 mg/kg使得土壤中各种形态的锌

含量都有了增加,增幅以碳酸盐结合态和松结有机态最大,无定形氧化铁结合态和晶型氧化铁结合态次之,氧化锰结合态和残留矿物态最小,这种增加与土壤盐分浓度密切相关,在轻度盐渍化土壤上转化为有效态的比重较大,在重度盐渍化土壤上大部分转化成了无效态,这与Han等<sup>[25]</sup>、魏孝荣等<sup>[26]</sup>的研究结果是一致的,只是更突出了盐渍化土壤的特点。

#### 4 结论

通过外源锌施入绿洲盐化潮土对玉米生长、土壤有效锌含量和锌形态转化的盆栽试验研究表明,随着土壤盐分浓度的增加,玉米幼苗生长受到胁迫直至死亡,施锌能缓解这种胁迫,提高玉米幼苗的耐盐性;施锌大幅度提高了碳酸盐结合态、松结有机态锌含量,在短期内改善土壤锌营养水平,进而提高了玉米吸收锌的能力;施入的锌肥在轻度盐渍化土壤上转化为有效态的比重较大,在重度盐渍化土壤上大部分转化成了无效态。因此,该区施锌有效的前提条件是中、轻度的盐渍化环境。

#### 参考文献:

- [1] 陆景陵. 植物营养学(上册)(第2版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 69-73.
- [2] 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 (1): 11-18.
- [3] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 北方常见农作物根际土壤中铅、锌的形态转化及其植物有效性[J]. *生态环境*, 2006 (4): 743-746.
- [4] 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.
- [5] 杨思存, 霍琳, 芦满济. 灰钙土上玉米的锌肥效应研究[J]. *西北农业学报*, 2002, 11 (4): 55-58.
- [6] 陈艳龙, 熊仕娟, 董金碁, 等. 有机物料与锌肥配施对石灰性土壤锌有效性及形态转化的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (8): 2737-2745.
- [7] 刘侯俊, 王俊梅, 张承昕, 等. 长期不同施肥对土壤和玉米锌含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017 (6): 37-43.
- [8] 王成宝, 霍琳, 杨思存, 等. 绿洲盐化潮土区典型缺锌玉米根际和非根际土壤锌形态差异[J]. *甘肃农业科技*, 2020 (6): 22-28.
- [9] 杨思存, 霍琳, 王成宝, 等. 绿洲盐化潮土有效锌含量与盐分离子的相关性及通径分析[J]. *土壤*, 2017, 49 (3): 550-557.

- [10] 杨思存, 霍琳, 马忠明, 等. 绿洲盐化潮土施镁对土壤-玉米锌镁营养的影响 [C]//土壤资源持续利用和生态环境安全学术会议论文集. 南京: 中国土壤学会, 2009: 497-503.
- [11] 吕小凡, 赵海蓓, 白如霄, 等. 施用启动肥对土壤特性、玉米生长及产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (1): 240-246.
- [12] 芦满济, 祁国元, 杨思存. 土壤盐分对土壤植物锌营养和施锌效果的影响 [C]//李生秀. 土壤-植物营养研究文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999: 746-752.
- [13] 蔡鑫鑫, 杨克军, 王玉凤, 等. 玉米耐低锌品种的筛选及评价 [J]. 黑龙江农业科学, 2014 (2): 1-5.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [15] 韩凤祥, 胡霭堂, 秦怀英, 等. 土壤痕迹元素形态分级提取方法的研究——以土壤锌形态分级为例 [J]. 农业环境科学学报, 1989, 8 (5): 26-29, 23.
- [16] 刘新稳, 孙亮庆, 张丽娟, 等. 不同施锌量对马铃薯植株锌的吸收、积累及薯块产量的影响 [J]. 江西农业学报, 2018, 30 (6): 35-38.
- [17] 刘春晓, 董瑞, 刘强, 等. 盐胁迫对不同玉米种质资源种子萌发特性的影响 [J]. 山东农业科学, 2017, 49 (10): 27-30, 35.
- [18] 官庆友, 陈冰琳, 李云峰, 等. 盐胁迫对甜玉米幼苗生长的影响 [J]. 耕作与栽培, 2021, 41 (2): 16-18, 23.
- [19] 张永峰, 殷波. 玉米耐盐性研究进展 [J]. 玉米科学, 2008, 16 (6): 83-85.
- [20] 徐隆华. 锌对盐胁迫下小麦幼苗生长的影响及其生理分子机理研究 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2014.
- [21] 路博宇, 张泽宇, 宋鑫丽, 等. 锌氮互作对糯玉米籽粒营养品质及锌含量的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2021, 52 (8): 12-20.
- [22] 芦满济, 祁国元, 芦目标. 绿洲潮土上锌肥效益与土壤盐分的关系 [J]. 土壤, 1986, 18 (4): 199-202.
- [23] 孙桂芳, 杨光穗. 土壤-植物系统中锌的研究进展 [J]. 华南热带农业大学学报, 2002, 8 (2): 22-30.
- [24] Hajiboland R, Yang X E, Römheld V. Effects of bicarbonate and high pH on growth of Zn-efficient and Zn-inefficient genotypes of rice, wheat and rye [J]. Plant and Soil, 2003, 250 (2): 349-357.
- [25] Han F X, Hu A T, Qi H Y, et al. Transformation and distribution of forms of zinc in acid, neutral and calcareous soils of China [J]. Geoderma, 1995, 66 (1): 121-135.
- [26] 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.

#### Effects of zinc application on maize growth and zinc speciation transformation in saline fluvo-aquic soil of Hexi oasis area

MA Qian-ru<sup>1, 2</sup>, HUO Lin<sup>2</sup>, YANG Si-cun<sup>1, 2\*</sup>, CAI Li-qun<sup>1</sup>, WANG Cheng-bao<sup>2</sup>, WEN Mei-juan<sup>2</sup> (1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070; 2. Institute of Soil Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070)

**Abstract:** To reveal the effects of zinc application on the maize growth and zinc morphological changes in saline fluvo-aquic soils in Hexi oasis area, and the effects of exogenous zinc application on the plant height, dry weight, zinc content, zinc uptake of maize, and the contents of various form zinc in the soil under different salt concentrations (mild, moderate and severe) were simulated by pot experiment. The results showed that under the same salt concentration, zinc application of 10 mg/kg increased the plant height, dry weight, zinc content, zinc uptake of maize and the content of soil available zinc by 8.5%-21.6%, 21.7%-33.3%, 107.3%-154.7%, 166.7%-965.9% and 451.3%-547.2%, respectively; and the zinc contents of carbonate bound state, loose organic state, manganese oxide bound state, amorphous iron oxide bound state, crystalline iron oxide bound state and residual mineral state in the soil increased by 147.4%-173.3%, 122.4%-152.1%, 11.6%-12.6%, 32.6%-33.4%, 17.6%-18.0% and 3.1%-3.2%, respectively. Under the same zinc application condition, with the increasing of soil salt concentration, the plant height, dry weight, zinc content, zinc uptake of maize and the content of soil available zinc decreased by 6.5%-36.4%, 12.8%-89.9%, 5.5%-22.0%, 17.4%-92.2% and 4.8%-18.1%, respectively; and the contents of carbonate bound state, loose organic state and manganese oxide bound state in the soil decreased by 4.7%-15.0%, 3.6%-13.7% and 10.4%-25.6%, respectively; while the contents of amorphous iron oxide bound state, crystalline iron oxide bound state and residual mineral state in the soil increased by 1.9%-5.8%, 0.4%-3.5% and 0.6%-2.2%, respectively. All the results indicated that in the salined environment, the main reasons why zinc application could improve the growth status of maize were that it greatly increased the contents of two effective zinc forms, namely, CAB-Zn and WBO-Zn, improved the zinc nutrition level of the soil-crop system in the short term, and improved the salt tolerance of maize.

**Key words:** saline fluvo-aquic soil; zinc forms; maize growth; zinc applying; salt concentration