

盐渍条件下施锌量对玉米幼苗生长和锌形态转化的影响

霍琳^{1,2}, 马前瑞³, 杨思存^{1,2}, 温美娟^{1,2}, 王成宝^{1,2}

(1. 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; 2. 国家农业科学白银观测实验站, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃亚盛实业(集团)股份有限公司条山农工商开发分公司, 甘肃 景泰 730400)

摘要: 为揭示外源锌在绿洲盐化潮土中的转化特征, 通过盆栽模拟试验, 探究了盐渍条件下不同施锌量对玉米幼苗生长和锌形态转化的影响。结果表明, 无论非盐渍条件还是盐渍条件下, 随着施锌量的增加玉米的株高和干重均呈先增加后减小的趋势, 施锌量为 5~10 mg/kg 时达到最大。玉米含锌量随施锌量的增加而增大, 吸锌量随施锌量的增加先增大后减小, 施锌量为 10 mg/kg 时达到最大。施锌 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0 mg/kg 处理的株高与不施锌比较, 在非盐渍条件下分别增加 13.60%、13.89%、15.58%、20.84%、21.57%、19.58%, 在盐渍条件下分别增加 3.31%、8.00%、9.74%、11.51%、8.41%、6.87%。由此认为, 绿洲盐化潮土的适宜施锌量为 5~10 mg/kg, 有害或过量施锌量为 ≥ 20 mg/kg。随施锌量的升高, 盐渍条件下的土壤有效锌(DTPA-Zn)、碳酸盐结合态锌(CAB-Zn)、松结有机结合态锌(WBO-Zn)、氧化锰结合态锌(OxMn-Zn)、无定形氧化铁结合态锌(AOFe-Zn)、晶形氧化铁结合态锌(COFe-Zn)和残留矿物态锌(RES-Zn)均呈上升趋势, 分别增加了 15.63%~767.19%、7.69%~296.92%、5.68%~270.45%、0.72%~19.42%、1.82%~65.25%、1.01%~37.61%、0.18%~6.92%。与非盐渍条件下相比, 盐渍条件下的玉米株高、干重、含锌量、吸锌量、土壤有效锌(DTPA-Zn)、植物可利用态锌(碳酸盐结合态锌、松结有机结合态锌、氧化锰结合态锌)均降低, 其他态锌(无定形氧化铁结合态锌、晶形氧化铁结合态锌和残留矿物态锌)均升高。综合分析认为, 施用适量锌肥能显著提高玉米的耐盐性, 缓解长期盐分胁迫带来的毒害, 在短期内能有效改善土壤-作物系统的锌营养水平。

关键词: 盐渍条件; 施锌量; 玉米幼苗生长; 锌形态

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2022)02-0154-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2022.02.012

Effects of Different Zinc Application Amount on Maize Seedling Growth and Zinc Speciation Transformation under Saline Conditions

HUO Lin^{1,2}, MA Qianrui³, YANG Sicun^{1,2}, WEN Meijuan^{1,2}, WANG Chengbao^{1,2}

(1. Institute of Soil Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. National Scientific Observing and Experimental Station of Agriculture (Baiyin), Lanzhou Gansu 730070, China; 3. Tiaoshan Agricultural Industrial and Commercial Development Branch, Gansu Yasheng Industry (Group) Co., Ltd. Jingtai Gansu 730400, China)

Abstract: To reveal the transformation characteristics of exogenous zinc in saline fluvo-aquic soils in Hexi Oasis Areas, pot experiments were conducted to explore the effects of different zinc application amount on the maize seedlings growth and the zinc transformation forms under saline conditions. The results showed that the plant height and dry weight of maize increased at first and then decreased with the increase of zinc application amount under both S0 non-saline and S5 saline conditions and reached the maximum when the zinc application amount was 5 to 10 mg/kg. The maize zinc contents increased with the increase of zinc application, while the zinc uptake amount increased first and then decreased with the increase of zinc application and reached the maximum when the zinc application amount was 10 mg/kg. The plant heights of zinc application under 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 and 20.0 g/kg treatments were 13.60%, 13.89%, 15.58%, 20.84%, 21.57% and 19.58% higher than CK, no zinc application, respectively under the S0 non-saline condition, and heights were 3.31%, 8.00%, 9.74%, 11.51%, 8.41% and 6.87% higher than CK, respectively under the S5 saline condition. It was concluded that the appropriate zinc application amount in the saline soils were 5 to 10 mg/kg, and the harmful or excessive zinc application amount was ≥ 20 mg/kg. With the increasing of zinc application, the contents of soil available zinc (DTPA-Zn), carbonate bound zinc (CAB-Zn), loose organic bound zinc (WBO-Zn), manganese oxide bound zinc (OxMn-

收稿日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41967016); 甘肃省现代农业科技支撑体系区域创新中心重点科技项目(2021GAAS53)。

作者简介: 霍琳(1972—), 女, 甘肃甘谷人, 副研究员, 主要从事土壤养分资源管理研究工作。Email: gshuolin@163.com。

Zn), amorphous iron oxide bound zinc (AOFe-Zn), crystalline iron oxide bound zinc (COFe-Zn) and residual mineral zinc (RES-Zn) under S5 saline condition showed an upward trend, increasing by 15.63% to 767.19%, 7.69% to 296.92%, 5.68% to 270.45%, 0.72% to 19.42%, 1.82% to 65.25%, 1.01% to 37.61% and 0.18% to 6.92%, respectively. Compared with the S0 non-saline condition, under the S5 saline condition the plant height, dry weight, zinc content, zinc uptake, soil DTPA-Zn, valid zinc (CAB-Zn, WBO-Zn and OxMn-Zn) were decreased, while contents of other zinc (AOFe-Zn, COFe-Zn and RES-Zn) were increased. Comprehensive analysis showed that the application of appropriate zinc fertilizer could significantly improve the salt tolerance of maize, alleviate the toxicity caused by long-term salt stress, and effectively improve the zinc nutrition level of soil-crop system in the short term.

Key words: Saline condition; Zinc application amount; Maize seedling growth; Zinc form

绿洲盐化潮土是土壤在逐渐形成过程中, 由于地下水下降, 水质矿化度增加后导致盐分过高而形成的一种氯化物—硫酸盐盐渍土^[1], 盐渍条件是限制甘肃河西走廊地区玉米稳定高产的主要影响因素。土壤盐分过高会使玉米植株吸收养分受到影响以及土壤溶液渗透压上升而引起生理性亏水, 从而导致后茬作物产量较低^[2]。土壤中过多的盐离子渗透胁迫、营养失衡等因素使得玉米产生盐害, 造成了减产^[3]。近年来在该地区的调查表明, 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的有效锌(DTPA-Zn)含量和植株缺锌率差异也较大^[4], 在中度盐渍土壤(氯化物—硫酸盐)中, 土壤 DTPA-Zn 含量仅为 0.57 mg/kg, 略高于土壤缺锌阈值(0.5 mg/kg), 但仍有 18.0%左右的玉米植株处于缺锌范畴, 表现出典型的缺锌症状。国内外关于土壤盐分和施锌肥对玉米影响的研究报道, 大多数针对的是单因素对玉米生长的影响, 而将土壤盐分和施锌结合起来的并不多, 尤其是不同施锌量对玉米生长及土壤锌形态影响的研究未见有报道。

锌(Zn)是植物所需要的重要营养元素^[5], 植物缺锌时会导致植株丛生矮化, 使其叶绿素水平、光合作用速率降低, 易出现白化苗, 在后续生长中会有籽粒不饱满的现象^[6-7]。植株所需要的锌大多数来自土壤, 土壤中的锌缺乏在全世界范围内普遍存在, 中国大约有 40%的土壤面临锌短缺问题, 北方石灰性土壤缺锌更为严重^[8-9], 绿洲盐化潮土是典型缺锌土壤之一^[10]。目前普遍把土壤中 DTPA-Zn 低于 0.5 mg/kg、植株含锌浓度低于 20 mg/kg 作为土壤和植株的缺锌阈值^[11], 土壤中的 DTPA-Zn 含量不足是导致玉米锌营养缺乏的主要原因, 而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。在含

钠较高的碱性土壤中, 当土壤 pH 升高后, Zn²⁺ 的吸附量随之增加, 土壤存在的游离 Zn²⁺ 含量受到了影响, 进而使得有效性随之下降^[12], NaCl 与 Zn 对于作物生长和产量的影响不是简单的叠加效应, 而是存在明显的相互拮抗作用关系^[13]。同时, 施锌能够提高土壤 Zn 的有效性, 增加植株和籽粒 Zn 含量, 这已被社会广泛认可^[14]。但在盐渍条件下施锌后能否减缓对玉米的毒害作用及土壤中锌形态转化关系机制尚不明确。我们通过盆栽试验, 研究盐分与锌对玉米生长的相互作用, 探讨盐渍条件下不同施锌量对玉米幼苗生长及土壤锌形态转化的影响, 旨在探明施锌在盐渍条件下的作用, 为该地区合理施用锌肥提供科学支撑。

1 材料与方法

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、速效磷 13.2 mg/kg、速效钾 245 mg/kg、有效锌 0.9 mg/kg、全盐 1.0 g/kg、pH 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。供试盐结皮取自邻近撂荒地, 属氯化物—硫酸盐盐结皮, 含盐量 200.6 g/kg, 其中 HCO₃⁻ 8.3 g/kg、Cl⁻ 25.8 g/kg、SO₄²⁻ 112.8 g/kg、Ca²⁺ 4.6 g/kg、Mg²⁺ 28.4 g/kg、K⁺ 0.4 g/kg、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。供试锌肥为 ZnSO₄·7H₂O, 氮肥为尿素(含N 46%), 磷肥和钾肥为 KH₂PO₄, 均为化学试剂。指示玉米品种为先玉 335, 为河西绿洲灌区广泛种植且对缺锌比较敏感的品种^[15]。

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进行。盆栽试验, 采用双因素完全交

互设计, 主处理为 2 个盐分浓度, 分别记为非盐化土(S0)和盐分浓度 5 g/kg(S5); 副处理分别为不施锌肥(Zn0)、施锌肥 0.5 mg/kg(Zn0.5)、1.0 mg/kg(Zn1)、2.0 mg/kg(Zn2)、5.0 mg/kg(Zn5)、10.0 mg/kg(Zn10)、20.0 mg/kg(Zn20)7 种施锌方式。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、P₂O₅ 50 mg/kg 和 K₂O 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 粒, 7 d 后定苗, 定苗 5 株。生长期间浇灌去离子水, 玉米 6 叶期即试验结束, 用直尺测量株高, 根系和地上部分, 每盆单独采集后, 先在 105 °C 下杀青 30 min, 再在 80 °C 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的含量。

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^[16]。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, 速效磷用 Olsen 法, 速效钾用火焰光度法。pH 用酸度计测定(水土质量比 2.5 : 1), 全盐量用水土质量比 5 : 1 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(AA320CRT)测定。Zn 的形态分级采用韩凤祥等^[17]改进后的连续浸提法进行(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(AA320CRT)测定锌含量。

1.4 数据处理

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

2 结果与分析

2.1 盐渍条件下施锌对玉米幼苗生长的影响

从表 2 可以看出, 无论 S0 非盐渍条件还是 S5 盐渍条件下, 随着施锌量增加, 玉米的株高和地上部干重均呈先增加后减小的趋势, 施锌量为

表 2 盐渍条件下不同施锌量的玉米幼苗株高和干重^①

主处理	副处理	株高 /cm	地上部干重 /g/盆
S0	Zn0	54.70±3.8 e	18.50±0.20 e
	Zn0.5	62.14±4.6 d	21.35±0.25 d
	Zn1	62.30±4.9 d	22.55±0.21 c
	Zn2	63.22±4.2 c	23.95±0.11 b
	Zn5	66.10±3.9 a	25.40±0.24 a
	Zn10	66.50±5.2 a	25.65±0.45 a
	Zn20	65.41±4.4 b	22.40±0.24 c
S5	Zn0	39.02±6.4 c	9.25±0.10 d
	Zn0.5	40.31±3.0 c	10.40±0.11 c
	Zn1	42.14±3.5 b	11.00±0.16 bc
	Zn2	42.82±2.8 ab	11.84±0.22 b
	Zn5	43.51±3.7 a	13.06±0.13 a
	Zn10	42.30±4.3 b	13.00±0.10 a
	Zn20	41.70±3.0 b	11.43±0.11 bc
	Zn	**	**
	S	**	**
	Zn×S	ns	**

①表中不同小写字母表示相同盐分水平不同施锌量处理间差异达显著水平(P<0.05); ns 表示处理间差异不显著, * 表示处理间差异显著, ** 表示处理间差异极显著, 下同。

表 1 土壤中各形态锌的连续提取法

步骤	提取形态	提取剂	土液质量比	条件
I	交换态锌(Ex-Zn)	1N MgCl ₂ (pH 7.0)	1:4	恒温振荡 2 h
II	碳酸盐结合态锌(CAB-Zn)	1N NaOAc-HOAc (pH 5.0)	1:15	恒温振荡 6 h
III	松结有机态锌(WBO-Zn)	0.1M Na ₄ P ₂ O ₇ +1N Na ₂ SO ₄ (pH 9.5)	1:20	恒温振荡 2 h
IV	氧化锰结合态锌(OxMn-Zn)	0.1M NH ₂ OH-HCl (pH 2.0)	1:20	恒温振荡 0.5 h
V	紧结有机态锌(SBO-Zn)	30% H ₂ O ₂ 氧化(pH 2.0)与 1 N MgCl ₂ (pH 7.0)	1:2.5 与 1:4.0	(85 ± 5)°C 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)	H ₂ C ₂ O ₄ -(NH ₄) ₂ C ₂ 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)	0.04M NH ₂ OH-HCl(25% HOAc)	1:20	96~100°C 水浴加热, 操作 2 次(总土液比不变)
VIII	残留矿物态锌(RES-Zn)	HClO ₄ -HF-HCl		高温消煮

5.0 ~ 10.0 mg/kg 时达到最大。施锌 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0 mg/kg 处理的株高与 Zn0(不施锌)比较, 在 S0 非盐渍条件下分别增加 13.60%、13.89%、15.58%、20.84%、21.57%、19.58%, 在 S5 盐渍条件下分别增加 3.31%、8.00%、9.74%、11.51%、8.41%、6.87%。由此认为, 绿洲盐化潮土的适宜施锌量为 5 ~ 10 mg/kg, 有害或过量施锌量为 ≥ 20 mg/kg。

从表 2 还可以看出, 施锌和盐分浓度对玉米地上部干重有极显著交互作用($P < 0.01$), 对玉米株高无显著交互作用, 但施锌与盐分浓度单独对玉米株高和干重均有极显著影响($P < 0.01$)。与 S0 相比, S5 抑制了玉米幼苗生长, 降低了玉米株高和地上部干重, 但 Zn0.5 ~ Zn20 处理能够缓解盐渍条件对玉米生长的抑制。不施锌处理 S5 水平下较 S0 水平下的株高降低了 28.67%, 地上部干重降低了 50.00%, 各施锌处理 S5 水平下株高降低了 32.42% ~ 36.39%, 地上部干重降低了 48.54% ~ 51.29%。

2.2 盐渍条件下不同施锌量对玉米植株含锌量和吸锌量的影响

从表 3 可以看出, 玉米含锌量随施锌量的增加而增大; 吸锌量随着施锌量的增加先增大后减小, 施锌量为 10.0 mg/kg 时达到最大。各施锌处理的玉米含锌量分别较 Zn0 处理在 S0 非盐渍条件下分别增加 17.35%、39.73%、56.16%、82.19%、107.31%、131.05% ($P < 0.05$), 在 S5 盐渍条件下分别增加 22.16%、34.66%、43.75%、63.07%、131.25%、147.16% ($P < 0.05$); 吸锌量较 Zn0 处理, 在 S0 非盐渍条件下分别增加了 35.28%、70.21%、102.03%、149.66%、187.00%、179.45% ($P < 0.05$), 在 S5 盐渍条件下分别增加 37.19%、59.96%、83.80%、129.98%、224.64%、205.07% ($P < 0.05$)。

从表 3 还可以看出, 盐分和施锌水平对玉米含锌量无显著交互作用, 但对吸锌量交互作用显著 ($P < 0.01$), 盐分和施锌水平单独效应均显著 ($P < 0.01$)。玉米的含锌量和吸锌量在 S0 与 S5 水平下各施锌处理均差异显著。S5 水平下不施锌处理玉米含锌量为 17.60 mg/kg, 低于玉米植株缺锌临界值(20.0 mg/kg); 与 S0 水平下相比, S5 水平下的玉米含锌量在相同施锌处理下降了

10.35% ~ 28.07%, 玉米吸锌量显著降低了 54.55% ~ 63.44%。

2.3 盐渍条件下不同施锌量对土壤 DTPA-Zn 的影响

图 1 显示, 不论是盐分、施锌水平, 还是盐锌交互作用, 均对土壤 DTPA-Zn 有极显著影响($P < 0.01$)。在 S0 水平下, 即在不施锌时土壤 DTPA-Zn 为 0.76 mg/kg, 属于潜在缺锌范畴(DTPA-Zn 在 0.5 ~ 1.0 mg/kg)。随着施锌量的增加, DTPA-Zn 含量显著增加, Zn0.5 较 Zn0 增加了 15.79%, 且较 Zn1 处理差异不显著; 在 Zn20 处理下 DTPA-Zn 含

表 3 盐渍条件下不同施锌量的玉米植株含锌量和吸锌量

主处理	副处理	含锌量 /($\mu\text{g/g}$)	吸锌量 /($\mu\text{g/盆}$)
S0	Zn0	21.90 \pm 0.80 g	405.59 \pm 9.24 g
	Zn0.5	25.70 \pm 0.84 f	548.70 \pm 9.14 f
	Zn1	30.60 \pm 0.78 e	690.34 \pm 9.29 e
	Zn2	34.20 \pm 0.68 d	819.43 \pm 9.24 d
	Zn5	39.90 \pm 0.73 c	1 012.61 \pm 9.24 c
	Zn10	45.40 \pm 0.86 b	1 164.06 \pm 10.41 a
	Zn20	50.60 \pm 0.85 a	1 133.44 \pm 10.24 b
S5	Zn0	17.60 \pm 0.43 f	162.98 \pm 4.22 g
	Zn0.5	21.50 \pm 0.45 e	223.60 \pm 3.20 f
	Zn1	23.70 \pm 0.62 d	260.70 \pm 4.26 e
	Zn2	25.30 \pm 0.60 d	299.55 \pm 9.24 d
	Zn5	28.70 \pm 0.44 c	374.82 \pm 8.35 c
	Zn10	40.70 \pm 0.50 b	529.10 \pm 7.82 a
	Zn20	43.50 \pm 0.56 a	497.21 \pm 7.64 b
	Zn	**	**
	S	**	**
	Zn \times S	ns	**

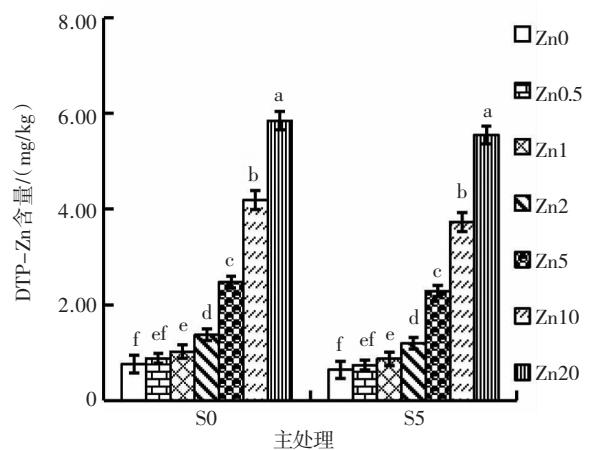


图 1 不同施锌量对盐渍条件下土壤 DTPA-Zn 的影响

量为最高, 较不施锌处理增加了 669.74%; 在 S5 水平下, 在不施锌时土壤 DTPA-Zn 含量为 0.64 mg/kg, 较 S0 水平下不施锌处理降低了 15.79%。与 S0 相比, 在相同施锌处理下, DTPA-Zn 含量降低 5.13% ~ 15.91%, 但施锌量增加后, DTPA-Zn 含量仍旧显著增加, Zn20 处理下较 Zn0 处理增加 767.19%, DTPA-Zn 含量增幅高于 S0 水平。

2.4 盐渍条件下不同施锌量对土壤各形态 Zn 的影响

从表 4 可知, 随施锌量的增加, 碳酸盐结合态锌(CAB-Zn)、松结有机结合态锌(WBO-Zn)、氧化锰结合态锌(OxMn-Zn)、无定形氧化铁结合态锌(AOFe-Zn)、晶形氧化铁结合态锌(COFe-Zn)和残留矿物态锌(RES-Zn)均呈上升的趋势。在 S0 与 S5 水平下, Zn20 处理的 CAB-Zn、WBO-Zn、OxMn-Zn、AOFe-Zn、COFe-Zn、RES-Zn 含量均最高, 较 Zn0 处理分别增加了 264.10%、232.24%、18.02%、65.28%、37.41%、6.85% 和 296.92%、270.45%、19.42%、65.25%、37.61%、6.92%, 其中以 CAB-Zn、WBO-Zn 含量增幅最大。

盐渍条件对植物可利用态锌的形成有抑制作用。与 S0 非盐渍条件下相比, S5 盐渍条件下的植物可利用态锌(碳酸盐结合态锌、松结有机结合态锌、氧化锰结合态锌)均降低, 分别为 9.15% ~

16.67%、8.30% ~ 17.75%、18.23% ~ 19.19%; 其他态锌(无定形氧化铁结合态锌、晶形氧化铁结合态锌和残留矿物态锌)均升高。相对于 S0 非盐渍条件, S5 盐渍条件下 CAB-Zn、WBO-Zn、OxMn-Zn 在 Zn0 处理下降低幅度最大, 分别为 16.67%、17.75%、19.19%; 在 Zn20 处理下降低幅度最小, 分别为 9.15%、8.30%、18.23%。AOFe-Zn、COFe-Zn、RES-Zn 在盐渍条件下含量有增加的趋势, 在各施锌处理下分别增加 2.81% ~ 3.22%、1.68% ~ 1.90%、1.43% ~ 1.50%, 施锌前后含量变化不大。

双因素方差分析表明, 盐分、施锌水平对土壤各形态 Zn 均无显著交互作用, 对 CAB-Zn、WBO-Zn、OxMn-Zn、AOFe-Zn、COFe-Zn 的单独影响效应均达到极显著水平($P < 0.01$), 对 RES-Zn 的影响达到显著水平($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

盐渍条件造成土壤中微量元素 Zn 缺乏, 植株根系对 Zn 的吸收、运输等过程受到限制, 使得 Zn 的含量逐渐减少, 形成了养分胁迫^[3, 18]。本研究表明, 在盐渍条件下玉米的株高和干重均降低, 10 mg/kg 的高施锌量使玉米的株高和干重相对于不施锌分别增加了 8.46%、40.39%, 这说明锌能够通过提高干重增强玉米对盐渍条件的抗性。有研

表 4 盐渍条件下不同施锌量的土壤锌形态

主处理	副处理	CAB-Zn	WBO-Zn	OxMn-Zn	AOFe-Zn	COFe-Zn	RES-Zn
S0	Zn0	0.78±0.08 f	2.14±0.18 f	1.72±0.08 e	4.81±0.18 e	10.72±0.18 e	77.37±1.18 d
	Zn0.5	0.83±0.05 ef	2.25±0.10 ef	1.73±0.10 e	4.89±0.10 ef	10.83±0.18 e	77.50±1.18 d
	Zn1	0.89±0.04 e	2.37±0.14 e	1.74±0.10 e	4.98±0.14 e	10.93±0.14 de	77.63±1.14 d
	Zn2	1.00±0.10 d	2.62±0.12 d	1.76±0.05 d	5.14±0.12 d	11.12±0.32 d	77.88±2.32 cd
	Zn5	1.36±0.09 c	3.47±0.19 c	1.82±0.10 c	5.59±0.19 c	11.65±0.19 c	78.57±1.19 bc
	Zn10	1.93±0.05 b	4.79±0.20 b	1.92±0.15 b	6.38±0.25 b	12.61±0.25 b	79.78±2.25 b
	Zn20	2.84±0.08 a	7.11±0.18 a	2.03±0.12 a	7.95±0.28 a	14.73±0.31 a	82.67±1.31 a
S5	Zn0	0.65±0.05 f	1.76±0.14 f	1.39±0.04 c	4.95±0.14 f	10.90±0.14 e	78.48±3.14 d
	Zn0.5	0.70±0.15 ef	1.86±0.15 ef	1.40±0.11 c	5.04±0.15 ef	11.01±0.25 e	78.62±2.25 d
	Zn1	0.75±0.10 e	1.98±0.22 e	1.41±0.05 c	5.12±0.25 e	11.11±0.35 de	78.76±2.35 d
	Zn2	0.86±0.12 d	2.22±0.08 d	1.43±0.07 c	5.29±0.18 d	11.31±0.28 d	79.01±2.28 cd
	Zn5	1.20±0.08 c	3.03±0.18 c	1.48±0.08 c	5.77±0.18 c	11.85±0.38 c	79.74±1.38 bc
	Zn10	1.74±0.04 b	4.30±0.21 b	1.56±0.11 b	6.57±0.21 b	12.85±0.29 b	80.97±1.29 b
	Zn20	2.58±0.15 a	6.52±0.20 a	1.66±0.10 a	8.18±0.20 a	15.00±0.40 a	83.91±1.40 a
	Zn	**	**	**	**	**	**
	S	**	**	**	**	**	*
	Zn×S	ns	ns	ns	ns	ns	ns

究表明, 植株在缺锌情况下, 地上部的锌含量低于 20 mg/kg 后, 生物量下降明显, 并且植株在缺锌后根系表面积与体积变小^[19], 隔年施锌 10 mg/kg 后可以更好地获得高作物产量的锌吸收^[20], 玉米植株各器官中含锌量和锌吸收量显著提高, 促进锌素逐渐向地上部转移^[21]。在本研究发现, 随着施锌量的增大, 玉米的株高、干重、吸锌量呈现先增大后减小的趋势, 表明在土壤缺锌的状况下, 施入锌肥能够有效提高玉米植株中的含锌量, 促进玉米的生长, 但当施锌量达到 20 mg/kg 后, 玉米的株高、干重及吸锌量均呈现降低的趋势, 施锌处理的株高与不施锌比较, 在非盐渍条件下分别增加了 13.60%、13.89%、15.58%、20.84%、21.57%、19.58%, 在盐渍条件下分别增加了 3.31%、8.00%、9.74%、11.51%、8.41%、6.87%。适宜施锌量为 5~10 mg/kg, 有害或过量施锌量为 ≥ 20 mg/kg, 这与李广鑫等^[14, 22]的研究一致。另外, 本研究还表明, 在盐渍条件下经 10.0 mg/kg 高锌处理的玉米含锌量和锌吸收量均显著增加, 含锌量基本维持在非盐渍条件下 5.0 mg/kg 常规锌处理水平, 但锌吸收量却降低了 1 倍左右, 主要原因可能是施锌提高了玉米的盐分胁迫抗性, 减少了活性氧毒害, 盐渍条件抑制了锌的吸收, 改变了生长素的合成和分配, 影响了玉米作物的生长。适量的锌有利于维持正常的生长素代谢, 从而减轻盐分胁迫对玉米根系的毒害, 保持了玉米植株较强的养分吸收和转运的能力^[23]。

影响土壤 DTPA-Zn 含量变化的因子较多^[24-25], 土壤 pH、有机质含量、CaCO₃、盐分浓度和部分金属元素的交互作用也是重要原因。甘肃绿洲盐化潮土属于典型的石灰性土壤, 碱度较高, 土壤 pH 基本都在 8.5 以上, 锌在土壤固相上的吸附能力增大, 土壤 DTPA-Zn 含量较低是必然结果。本研究表明, 在不加入盐结皮的情况下, 供试土壤的 DTPA-Zn 含量为 0.76 mg/kg, 而在 5 g/kg 盐渍条件下 DTPA-Zn 含量降低至 0.64 mg/kg, 土壤 DTPA-Zn 含量降低幅度明显, 处于潜在缺锌范畴, 这与我们以往的研究结论^[4, 26]是一致的。此外, 评判土壤锌的有效性, 还应该考虑到锌在土壤中存在形态^[27-29], 本研究发现, 绿洲盐化潮土的土壤有效锌(DTPA-Zn)、松结有机结合态锌

(WBO-Zn)、氧化锰结合态锌(OxMn-Zn)、无定形氧化铁结合态锌(AOFe-Zn)、晶形氧化铁结合态锌(COFe-Zn)和残留矿物态锌(RES-Zn)均呈上升趋势, 分别增加了 15.63%~767.19%、7.69%~296.92%、5.68%~270.45%、0.72%~19.42%、1.82%~65.25%、1.01%~37.61%、0.18%~6.92%。与非盐渍条件下相比, 盐渍条件下的玉米株高、干重、含锌量、吸锌量、土壤有效锌、植物可利用态锌均降低, 其他态锌均升高。因此, 在盐含量较高的土壤中可适当增加锌肥用量, 以提高玉米盐分胁迫抗性和增加土壤锌的有效性^[30-31]。

适宜的施锌量能够减缓盐渍条件对玉米的毒害作用, 提高玉米幼苗的耐盐性。绿洲盐化潮土适宜的施锌量为 5~10 mg/kg, 有害或过量施锌量为 ≥ 20 mg/kg。土壤盐渍条件降低了玉米株高、干重、含锌量、吸锌量、土壤有效锌(DTPA-Zn)和植物可利用态锌, 土壤盐分胁迫了玉米幼苗的生长, 阻碍了玉米养分的吸收与转运。

施锌使容易被玉米吸收利用的碳酸盐结合态、松结有机态锌含量大幅度增加, 在外源锌浓度较低水平下发生转化, 提高土壤中锌的活性, 短时间内提高了作物-土壤的锌营养水平, 促进了玉米的生长。

参考文献:

- [1] 马倩倩, 董博, 许旺旺, 等. 干旱区耕地质量等级评价及土壤养分与盐渍化的分析研究——以民勤绿洲为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 514-524.
- [2] U C SHUKLA, 常月帆. 受益分影响的土壤条件下锌对改善玉米生长的作用[J]. 国外农学-杂粮作物, 1987(2): 4-7.
- [3] 梁硕硕, 房琴, 闫宗正, 等. 水分调控降低盐分对夏玉米的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1388-1397.
- [4] 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.
- [5] 陆景陵. 植物营养学: 上册[M]. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [6] SALAMA ZA, EL-FOULY MM, LAZOVA G, et al. Carboxylating enzymes and carbonic anhydrase functions were suppressed by zinc deficiency in maize and chickpea plants[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2006, 28(5): 445-451.

- [7] 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.
- [8] HARARAH M A, AL-NASIR F, EL-HASAN T, et al. Zinc adsorption desorption isotherms: possible effects on the calcareous vertisol soils from Jordan[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(7): 2079-2085.
- [9] SHIVAY YS, KUMAR D, PRASAD R, et al. Relative yield and zinc uptake by rice from zinc sulphate and zinc oxide coatings onto urea[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 80(2): 181-188.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 徐温新, 叶正钱, 窦春英, 等. 西北典型林地和农田土壤锌的吸附-解吸特性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 191-194.
- [13] 陈文岭, 靳孟贵, 朱永惠, 等. NaCl 和 Zn 对棉花生长及营养元素吸收的影响[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(11): 1887-1895.
- [14] 李广鑫, 赵 鹏, 睢福庆, 等. 施锌对不同品种小麦锌吸收分配的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 216-225.
- [15] 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, 31(2): 1-5.
- [16] 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, 2000.
- [17] 韩凤祥, 胡霏堂, 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.
- [18] AFRIN S, AKHTAR N, KHANAM T, et al. Alleviative Effects of Zinc on Biomass Yield and Antioxidative Enzymes Activity in Leaves of Soybean (*Glycine max* L.) Under Salt Stress[J]. American Journal of Agriculture and Forestry, 2021, 9(3): 147-155.
- [19] 周 斌, 张金尧, 乙 引, 等. 缺锌对玉米根系发育、生长素含量及生长素转运基因表达的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1352-1358.
- [20] KUMAR S, VERMA G, DHALIWAL S S. et al. Influence of zinc fertilization levels and frequencies on crop productivity, zinc uptake and buildup of soil zinc in maize-wheat system[J]. Journal of Plant Nutrition, 2022: 1-22.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 刘智蕾, 苏锦铠, 孟静柔, 等. 低温胁迫下增施锌肥对水稻氮代谢与干物质积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(1): 15-22.
- [24] 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.
- [25] HAJIBOLAND R, YANG X E, ROMHELD V, et al. 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.
- [26] 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.
- [27] 陆欣春, 邹文秀, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1536-1542.
- [28] 王金鑫, 危常州, 王肖娟, 等. 新疆石灰性土壤锌有效性及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 297-300+304.
- [29] 梁佩玉, 王祖伟, 李伟克, 等. 土壤中无机钠盐对不同形态锌离子浓度的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(7): 4240-4242; 4282.
- [30] 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.
- [31] 陈艳龙, 熊仕娟, 董金璘, 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.