植物营养与肥料学报 2015,21(2): 354 - 361 doi: 10.11674/zwyf.2015.0209
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

绿洲盐化潮土施镁对玉米幼苗生长、活性氧自由基代谢和锌营养的影响

杨思存, 霍 琳, 王成宝, 姜万礼
(甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 农业部甘肃耕地保育与农业环境科学观测实验站, 兰州 730070)

摘要:【目的】甘肃河西走廊绿洲盐化潮土地玉米缺锌现象非常普遍,土壤镁含量高通常被认为是造成土壤和作物缺锌的重要因素之一,本文探讨了绿洲盐化潮土锌、镁之间的关系。**【方法】**采用盆栽模拟试验方法,以硫酸镁为原料,设加入 Mg^{2+} 0、74、147、221、515 mg/kg,形成交换性 Mg 含量分别为 287.3、349.2、411.6、487.9、755.2 mg/kg 的混合土壤,来模拟绿洲盐化潮土含镁量低、较低、中等、较高、极高 5 种类型。在玉米生长期间浇灌去离子水,用重量法控制水分的供应。玉米生长 45 d 收获,测定株高后,采集心叶下第二个叶片鲜样用于测定叶绿素含量,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)含量。植株分地上部和根系,烘干粉碎后用于测定锌的含量。**【结果】**1)较高和极高的土壤交换性镁抑制玉米幼苗的生长。镁加入量为 221 mg/kg,土壤交换性镁含量达到 487.9 mg/kg 时,玉米植株矮小,生长已受到胁迫, 加入量为 515 mg/kg,土壤交换性镁含量达到 755.2 mg/kg 时,玉米株高显著降低了 14.5%,植株叶缘焦枯,个别植株叶片出现白色条纹,表现出明显的镁中毒症状和典型缺锌症状。2)随施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高,玉米地上部和地下部的干重分别降低了 11.9%～38.3% 和 4.6%～23.0%,茎叶干重的降低幅度明显高于根系。3)随施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高,玉米叶片叶绿素含量降低了 9.4%～45.9%,用量达到 515 mg/kg 时几乎降低了一半,导致地上部叶片出现枯黄。叶片 SOD、POD、CAT 活性都是先升高再迅速降低,峰值分别出现在 147 mg/kg、74 mg/kg 和 147 mg/kg,用量达到 515 mg/kg 时分别降低了 49.75%、48.06% 和 32.21%;MDA 含量始终呈增加趋势,增幅在 20.39%～183.58%。4)施镁显著降低了玉米幼苗的锌含量和吸收量,但对茎叶和根系的抑制程度不同。与不施镁处理相比,茎叶锌含量降低了 4.05%～57.09%,吸收量降低了 15.41%～73.55%;根系锌含量降低了 7.55%～18.99%,吸收量降低了 11.62%～37.40%,不管是锌含量还是吸收量,根系的降低幅度都明显低于茎叶。这也导致锌从根系向地上部的转运显著降低,施镁 147 mg/kg 时锌的转运率还有 46.60%,施镁 515 mg/kg 时只有 34.55%,仅达到不施镁水平的 62%。5)随着施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高,土壤有效锌含量也显著降低,降幅在 11.4%～46.6%,特别是施镁 515 mg/kg,土壤交换性镁含量达到 755.2 mg/kg 时,土壤有效锌含量已降至 0.47 mg/kg,超过了土壤缺锌临界值(DTPA-Zn < 0.5 mg/kg)。**【结论】**绿洲盐化潮土上的玉米缺锌问题与土壤含镁量水平密切相关,随着施镁量的增加,玉米幼苗的生长受到抑制,株高、干重、叶片中的叶绿素含量和 SOD、POD、CAT 活性都显著降低,MDA 含量显著增加。施镁抑制了玉米幼苗对锌的吸收,对茎叶的抑制程度明显高于根系,导致锌从根系向地上部的转运率显著降低。施镁降低了土壤有效锌含量,用量达到 515 mg/kg 时,土壤有效锌含量已低于缺锌临界值。

关键词: 盐化潮土; 土壤交换镁; 锌营养; 活性氧自由基代谢; 玉米幼苗
中图分类号: S153.6+21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0354-08

Inhibition of high Mg concentration on seedling growth, free radical metabolism of reactive oxygen and zinc nutrition of maize in saline fluvo-aquic soils

YANG Si-cun, HUO Lin, WANG Cheng-bao, JIANG Wan-li
(*Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences/Gansu Scientific Observing and Experiment Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture, Lanzhou 730070, China*)

Abstract:【Objectives】 Zinc deficiency is very often happened in maize in saline fluvo-aquic soils in Hexi Oasis Area of Gansu Province, the high soil magnesium levels have been regarded as a major contributor to this

收稿日期: 2014-01-06 **接受日期:** 2014-12-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(41261072);农业部公益性行业(农业)科研专项(200903001)资助。
作者简介: 杨思存(1971—),男,甘肃靖远人,副研究员,主要从事土壤养分管理与盐碱地改良利用研究。E-mail: yangsicun@sina.com

deficiency. The inhibition effect of magnesium to zinc in saline fluvo-aquic soils in Hexi Oasis Area were discussed in this paper. 【**Methods**】 A pot experiment was conducted with maize as materials. Exchangeable magnesium contents of 287.3, 349.2, 411.6, 487.9 and 755.2 mg/kg were obtained by irrigating different amount of $MgSO_4$ solution. The maize plants were harvested at 46 days, the biomass of above and under ground parts were dried and weighed, the Zn contents were measured. The second leaf under the interior leaf was used for the determination of active oxygen and some enzyme activities. 【**Results**】 1) More high and extremely high exchangeable Mg level in soil inhibits the growth of maize seedlings. When magnesia applied levels is 221 mg/kg, i.e. the exchangeable Mg content in soil is over 487.9 mg/kg, the growth of maize is stressed, when the Mg^{2+} applied level is 515 mg/kg, i.e. the exchangeable Mg content in soil is over 755.2 mg/kg, the plant height is markedly decreased by 14.5%, showing symptoms of magnesia poison and zinc deficiency, such as withered leaf margins and partial white stripes on the leaves ($P < 0.01$). 2) With the increase of or exchangeable Mg levels, the dry weight in the of Mg^{2+} addition maize are reduced by 11.9%–38.3% and 4.6%–11.9% respectively. The reduction in stem weight is significantly higher than in roots. 3) Maize leaf chlorophyll contents are reduced by 9.4%–45.9% with the increase of the Mg^{2+} addition . The Mg level of 515 mg/kg would lead to withered and yellow leaves. The blade superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities are increased at first and then reduced quickly, the peak value appears at the exchangeable Mg levels of 147, 74 and 147 mg/kg respectively. When the dose reaches 515 mg/kg, the values are reduced by 49.75%, 48.06% and 32.21% respectively. The malondialdehyde (MDA) contents are increased consistently in the range of 20.39%–183.58%. 4) The exchangeable Mg levels significantly inhibit the uptake of Zn. Compared with the CK, the zinc contents in above ground parts are reduced by 4.05%–57.09%, the uptake reduced by 15.41%–73.55%; the root zinc contents are reduced by 7.55%–18.99%, and the uptake reduced by 11.62%–37.40%. The zinc content and absorption in stems/leaves are reduced more than in roots. High exchangeable Mg level would also lead to lower upward transfer of zinc. 5) Soil available zinc contents are significantly reduced with the increase of exchangeable Mg levels. When the Mg level reaches 515 mg/kg, i.e. the exchangeable Mg content in soil is over 755.2 mg/kg, the available zinc content falls to 0.47 mg/kg, which is below the critical value of zinc deficiency (DTPA–Zn < 0.5 mg/kg). 【**Conclusions**】 Zinc deficiency of maize in saline fluvo-aquic soil in Hexi Oasis Area is closely related to soil magnesium content. The high levels of exchangeable Mg contents show significant restraining effects on the maize seedling growth and biomass, the leaf chlorophyll content and the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT). Over high exchangeable Mg levels decrease the zinc absorption by maize seedlings, and the inhibition in stem/leaf is significantly higher than in root system, which inhibites the upward transfer of Zn from root to shoot. The available zinc content in soil will also be reduced, when the Mg level reaches 515 mg/kg, the available zinc content is below the critical value of zinc deficiency.

Key words: saline fluvo-aquic soil; soil exchangeable Mg level; zinc nutrition; free radical metabolism; maize seedling

甘肃河西走廊的绿洲盐化潮土是潮土发育过程中,由于地下水中 $Mg(HCO_3)_2$ 含量过高而盐化形成的一种镁质盐渍土,其特点是耕层土壤含有大量可溶性镁、交换性镁和碳酸镁,盐分组成中 Mg^{2+} 明显高于 Ca^{2+},CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 占阴离子总量的 40%～70%[1-3]。近年在该地区的调查发现,施用了钙镁磷肥、磷酸镁铵、硫酸镁等含镁肥料的土壤上,玉米的“花白苗”现象越严重,干枯死亡率在 10%～20%,表现出典型缺锌症状。分析表明,该类土壤的耕层交换性镁含量普遍在 300 mg/kg 左右,最高可达 2347 mg/kg,土壤有效锌平均含量仅为 0.34 mg/kg,而在交换性镁含量≥600 mg/kg 的重度镁质盐渍土上,有效锌含量只有 0.22 mg/kg,玉米植株缺锌率达到了 37.4%,即便是施入 150 kg/hm^2 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[4-5]。由此我们推测,绿洲盐化潮土上高镁、高 pH 的土壤条件可能是诱发玉米缺锌的重要因素。

锌是植物的必需营养元素[6],植物所需的锌主要来自土壤。全世界有大范围的缺锌土壤,亚洲有 200 万公顷缺锌稻田,我国也有 40% 的缺锌土壤[7],主要分布在北方石灰性土壤上,绿洲盐化潮土也是

典型区域之一[8]。石灰性土壤上一般以 DTPA－Zn <0.5 mg/kg、植株含锌浓度 <20 mg/kg 作为土壤和作物的缺锌临界值[9]。土壤 pH 值、有机质、粘粒含量、碳酸钙、磷酸盐以及养分元素、共存的金属离子等都会对土壤—作物系统锌营养产生影响[10-11]。在 pH 5.5～7.0 范围内，土壤 pH 值每增加一个单位，石灰性土壤溶液中的锌离子浓度降低 30～45 倍[12]。然而在含钠较高的碱性土壤上，随着 pH 值的升高，可能形成溶解性较好的锌酸钠，从而增加土壤锌的有效性[13]。镁与锌之间存在着拮抗作用，但施镁作物缺锌主要是发生在作物上，而不是土壤中[14]。在镁质碱化盐渍土上，土壤盐分与有效锌呈正相关，与作物含锌浓度呈负相关，且镁与锌在土壤中有置换作用，在作物体内有拮抗作用[5]。为进一步探讨锌、镁之间的关系，我们进行了盆栽试验，通过加入不同用量硫酸镁来模拟绿洲盐化潮土不同含镁量水平的方式，研究了施镁对玉米幼苗生长、活性氧自由基代谢和锌营养的影响，旨在为绿洲盐化潮土的改良利用和含镁肥料的合理使用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2012 年 4 月至 6 月在甘肃省农业科学院玻璃温室内进行。供试土壤为轻壤质灰潮土，取自甘肃省临泽县小屯乡白寨村麦茬地耕层（0—20 cm），多地块取土混合后经风干、破碎、过筛（3 mm）备用。土壤基本性质为有机质 18.6 g/kg、全氮 1.63 g/kg、全磷 0.67 g/kg、碱解氮 102 mg/kg、速效磷 4.4 mg/kg、速效钾 240 mg/kg、pH 8.54、全盐量 2.97 g/kg、水溶性钙 0.39 g/kg、K^+ 和 Na^+ 0.13 g/kg、水溶性 HCO_3^- 0.2 g/kg、Cl^- 0.29 g/kg、SO_4^{2-} 1.59 g/kg、有效锌 0.89 mg/kg、交换性镁 287.5 mg/kg。供试镁肥为 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$，氮肥为 NH_4NO_3，磷和钾肥为 KH_2PO_4，以上肥料均用化学纯试剂。供试玉米品种选用武科 2 号，为河西绿洲灌区广泛种植且对缺锌比较敏感的品种。

1.2 试验设计

试验采用盆栽方法，供试盆钵为塑料盆，高 30 cm、直径 20 cm，将土壤和肥料均匀混合后装盆，每盆装风干土 5 kg。以硫酸镁为镁源，设加入镁（Mg）0、74、147、221、515 mg/kg 5 个水平，混合后，土壤交换性 Mg 含量分别为 287.3、349.2、411.6、487.9 和 755.2 mg/kg，依次代表绿洲盐化潮土含镁量低、较低、中等、较高、极高 5 种类型。除试验设计镁用量外，每个处理施 N 100 mg/kg、P 50 mg/kg 和 K 63 mg/kg。所施肥料均以溶液形式施入，充分与土壤混匀后灌水至饱和，平衡 1 天后播种。玉米经催芽于 4 月 20 日播种，每盆 8 粒，7 d 后定苗，每盆 5 株。玉米生长期间浇灌去离子水，用重量法控制水分供应。各处理均重复 6 次。玉米生长到 6 叶期时（45 d）收获，测定株高后，其中 3 次重复采集心叶下第二个叶片鲜样用于测定叶绿素含量，超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）活性和丙二醛（MDA）含量。另外 3 次重复分为地上部茎叶和地下部根系两部分收获，洗净后先在 90℃下杀青 30 min，再在 60℃下烘干至恒重，分别称重后用不锈钢粉碎机粉碎，过 0.25 mm 筛备用。同时采集土壤样品，自然风干、磨碎后过 1 mm 筛备用。

1.3 测定项目与方法

土壤基本理化性状采用常规分析方法测定[15]。土壤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 值用酸度计测定；全盐量用 5∶1 水土比浸提—烘干残渣称量法；水溶性钙、镁用 EDTA 络合滴定法，钾、钠用火焰光度法；HCO_3^- 用双指示剂滴定法；Cl^- 用硝酸银滴定法；SO_4^{2-} 用 EDTA 间接络合滴定法。DTPA－Zn 以水土比为 2∶1 浸提（pH 7.3），植株样品 Zn 湿灰化法（浓 HNO_3∶$HClO_4$ = 3∶1）消解，用原子吸收分光光度计（AA320CRT）测定[15]。

叶片叶绿素含量测定采用丙酮浸提分光光度法，超氧化物歧化酶（SOD）活性测定采用氮蓝四唑（NBT）法，过氧化物酶（POD）活性测定采用愈创木酚法，过氧化氢酶（CAT）活性测定采用高锰酸钾滴定法，丙二醛（MDA）含量测定采用硫代巴比妥酸法，具体方法参照文献[16]。

1.4 统计分析

采用 Excel 2003 和 SAS 9.0 软件对数据进行统计分析，LSD 法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 施镁对玉米幼苗生长的影响

绿洲盐化潮土施镁对玉米生长有不良影响，当施镁 221 mg/kg，土壤交换性镁含量达到 487.9 mg/kg时，玉米植株矮小、根长变短、根数减少，显示玉米的生长已受到胁迫；施镁 515 mg/kg，土壤交换

性镁含量达到 755.2 mg/kg时,胁迫作用进一步加强,玉米叶缘焦枯、植株枯黄,表现出明显的镁中毒症状,个别植株叶片出现白色条纹,表现出典型缺锌症状。从收获时的玉米株高来看(表 1),随着施镁量的增大或土壤交换性镁含量的提高,玉米株高有明显降低的趋势。施镁 74 ～ 147 mg/kg,土壤交换性镁含量为 349.2 ～411.6 mg/kg,相当于中等偏低土壤含镁量水平时,玉米株高只比不施镁处理降低了 1.6 ～ 4.6 个百分点,差异不显著;施镁 221 mg/kg,土壤交换性镁含量达到 487.9 mg/kg,相当于较高土壤含镁量水平时,玉米株高显著降低了 8.9 个百分点;施镁量达到 515 mg/kg,土壤交换性镁含量达到 755.2 mg/kg,相当于极高土壤含镁量水平时,玉米株高降低了 14.5 个百分点,差异达到极显著水平。玉米地上部干重的降低趋势与株高基本一致,在施镁量为 74 mg/kg时显著降低 11.9%,施镁量为 221 mg/kg 时显著降低 25.9%,但土壤含镁量较低、中等、较高三个水平之间的差异不显著;施镁量达到 515 mg/kg 时,降低的幅度进一步增加,高达 38.3%。玉米地下部干重也随施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高而降低,但降低的幅度较小,只有 4.6%～23.0%。根冠比是植物自身调节地上部与地下部干物质分配的一种能力,以保证某一部分优先生长,为后期的生长发育打基础。从不同施镁处理的的根冠比来看,随施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高,玉米的根冠比呈增加趋势,之所以出现这种地上、地下增加不同步的情况,一方面可能是玉米地上部和地下部对镁胁迫的耐受程度不同,另一方面可能是高镁抑制了营养元素从地下部向地上部的转移。

表 1　不同施镁水平玉米株高和干物质产量

Table 1　Plant height and dry biomass of maize under different Mg treatments

施镁量 (mg/kg) Mg input	株高 Plant height		干重 (g/plant) Dry weight		根冠比 Ratio of root/shoot
	(cm)	(%)	地上部 Shoot	地下部 Root	
0	50.5 a	100.0	4.36 a	1.22 a	0.280 c
74	49.7 a	98.4	3.84 b	1.16 ab	0.303 bc
147	48.2 a	95.4	3.58 b	1.10 bc	0.307 bc
221	46.0 b	91.1	3.23 b	1.04 c	0.321 ab
515	43.2 c	85.5	2.69 c	0.94 d	0.351 a

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly among treatments at the 5% level.

2.2　施镁对玉米叶片叶绿素含量和活性氧自由基代谢的影响

2.2.1 叶绿素含量　随着施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高,玉米叶片叶绿素含量显著下降(图 1)。与不施镁处理相比,施镁 74、147、221、515 mg/kg处理的叶绿素含量分别降低了 9.4%、21.6%、25.4% 和 45.9%,特别是在土壤施镁量达到 515 mg/kg 时,叶绿素含量几乎降低了一半,导致玉米叶片枯黄,出现明显的镁中毒现象和典型缺锌症状。

2.2.2 活性氧自由基代谢　随着施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高,玉米幼苗叶片中 SOD、POD、CAT 活性的变化趋势基本一致,三者都是先升高再迅速降低(表 2)。SOD 和 CAT 活性的峰值均出现在施镁量 147 mg/kg,施镁 74、147 mg/kg 处理分别

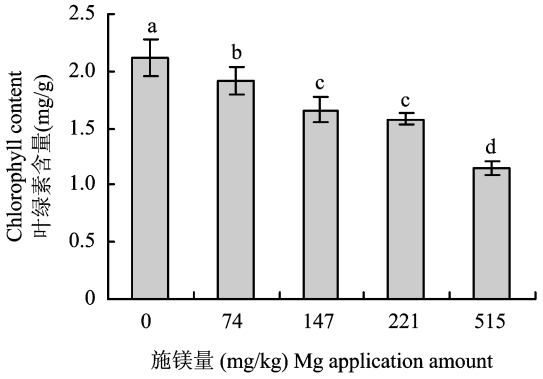

图 1　不同施镁量玉米幼苗叶绿素含量

Fig. 1　Chlorophyyll contents of maize seendling under different Mg application amount

[注(Note): 方柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% level.]

比不施镁处理增加 9.93%、13.54% 和 13.06%、23.31%，施镁 221、515 mg/kg 处理分别比不施镁处理降低 19.24%、49.75% 和 0.51%、32.21%；POD 活性的峰值出现在施镁量 74 mg/kg，但与不施镁处理差异不显著；施镁 221、515 mg/kg 处理分别比不施镁处理降低了 20.93% 和 48.06%。这说明在适量施镁范围内，3 种保护酶能起到协同作用，提高保护酶活性，减轻活性氧自由基对膜脂的毒害，从而起到保护植物的作用；但当施镁量或土壤含镁量超出正常范围后，就会对保护酶活性造成伤害。

丙二醛（MDA）是自由基对细胞膜脂进行过氧化伤害的最终产物之一，其含量变化可代表细胞的脂质过氧化水平和生物膜损伤程度的大小，是判断膜脂过氧化作用的一个重要指标[17]。由表 2 可以看出，随着施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高，玉米幼苗叶片中 MDA 含量始终呈增加趋势。与不施镁处理相比，施镁 74、147、221、515 mg/kg 处理分别增加了 20.39%、66.74%、102.71% 和 183.58%。说明高镁胁迫能增强脂质过氧化作用，造成 MDA 在玉米叶片中大量积累。

表 2 不同施镁量玉米幼苗 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量

Table 2 SOD, POD and CAT activities and MDA content in maize under different Mg treatments

施镁量 (mg/kg) Mg input	SOD [U/(g·min), FW]	POD [$\triangle OD_{470}$/(mg·min)]	CAT [mg/(g·min)]	MDA (nmol/g, FW)
0	32.12 b	1.29 a	21.58 c	14.37 e
74	35.31 a	1.34 a	24.83 b	17.30 d
147	36.47 a	1.29 a	26.61 a	23.96 c
221	25.94 c	1.02 b	21.47 c	29.13 b
515	16.14 d	0.67 c	14.63 d	40.75 a

注（Note）：同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly among treatments at the 5% level.

2.3 施镁对玉米锌含量的影响

2.3.1 土壤及玉米的锌含量 施镁显著降低了玉米幼苗的 Zn 含量（表 3），与不施镁相比，茎叶的 Zn 含量分别降低了 4.05%、34.80%、44.59% 和 57.09%，根系的 Zn 含量分别降低了 7.55%、14.90%、16.82% 和 18.99%。可以看出，根系 Zn 含量的降低幅度明显低于茎叶，之所以出现这种差异，一方面与茎叶和根系对锌吸收能力的不同有关；另一方面也可能与锌的转运受阻有关。

从表 3 还可以看出，在不施镁的情况下，土壤有效 Zn 含量也只有 0.88 mg/kg，处于潜在缺锌范围（DTPA-Zn 在 0.5～1.0 mg/kg）；随着施镁量的增加或土壤含镁量水平的提高，土壤有效 Zn 含量显著降低。施镁 147 mg/kg，土壤交换性镁含量达到 411.6 mg/kg 时，土壤有效 Zn 含量降至 0.72 mg/kg，比不施镁对照降低 17.9%；施镁 221 mg/kg，土壤交换性镁含量达到 487.9 mg/kg 时，土壤有效 Zn 含量降至 0.64 mg/kg，比不施镁对照降低 27.0%；施镁 515 mg/kg，土壤交换性镁含量达到 755.2 mg/kg时，土壤有效 Zn 含量降至 0.47 mg/kg，比不施镁对照降低 46.6%，而且超过了土壤缺锌临界值（DTPA-Zn <0.5 mg/kg）。

表 3 不同施镁量下玉米幼苗及土壤有效锌含量

Table 3 Zn concentrations of maize and soil available Zn contents under different treatments

施镁量 Mg input (mg/kg)	植株 Plant (μg/g) 茎叶 Shoot	植株 Plant (μg/g) 根系 Root	土壤有效锌 Soil avail.-Zn (mg/kg)
0	29.6 a	84.4 a	0.88 a
74	28.4 b	78.4 b	0.78 b
147	19.3 c	72.2 c	0.72 c
221	16.4 d	70.5 cd	0.64 d
515	12.7 e	68.7 d	0.47 e

注（Note）：同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly among treatments at the 5% level.

2.3.2 玉米的锌吸收量 与 Zn 含量相似，施镁也显著降低了玉米幼苗的 Zn 吸收量（表 4），与不施镁相比，茎叶的 Zn 吸收量分别降低了 15.41%、46.45%、58.89% 和 73.55%，根系的 Zn 吸收量分别降低了 11.62%、23.35%、29.16% 和 37.40%，植株总体 Zn 吸收量分别降低了 13.73%、36.18%、45.67% 和 57.48%。可以看出，根系吸收量的降低幅度明显低于茎叶，说明施镁虽然抑制了 Zn 的吸收量，但对茎叶和根系的抑制程度不同，仍有一部分 Zn

表 4　不同处理玉米幼苗锌的吸收量(μg/plant)

Table 4　Zn uptakes by maize plants contents under different treatments

施镁量(mg/kg) Mg input	茎叶 Shoot	根系 Root	总量 Total
0	128.93 a	103.21 a	232.14 a
74	109.06 b	91.22 b	200.28 b
147	69.04 c	79.11 c	148.15 c
221	53.00 d	73.12 cd	126.12 d
515	34.10 e	64.61 d	98.71 e

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly among treatments at the 5% level.

累积到了根系而没有向地上部转运。

2.3.3 Zn 从根系向地上部的转运　Rengel 等[18]将养分的转运率定义为植株地上部养分的吸收量与整株吸收量的比值。在本研究中,我们对不同施镁条件下玉米幼苗的 Zn 转运情况进行了分析。从图 2 可以看出,随着施镁量的增加或土壤交换态镁含量的提高,Zn 从根系向地上部的转运显著降低,施镁 147 mg/kg,土壤交换性镁含量为 411.6 mg/kg 时,Zn 的转运率还有 46.60%,施镁 515 mg/kg,土壤交换性镁含量为 755.2 mg/kg 时只有 34.55%,仅达到不施镁水平的 62%,表明施镁或高土壤交换性镁对地上部茎叶的抑制作用较根系更为明显(表 1),导致根系累积了更多的锌的缘故;对 Zn 含量和 Zn 吸收量的分析也有相同的结论(表 3、表 4)。

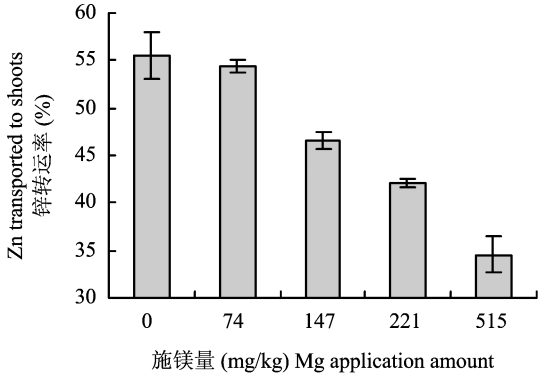

图 2　施镁对玉米幼苗锌转运的影响

Fig. 2　Effects of Mg applied in soil on Zn transported to shoots of maize plants

3　讨论

3.1　高镁土壤对作物生长发育的影响

镁是作物生长发育不可缺少的营养元素,它不仅是叶绿素的重要组分,还是许多酶的活化剂[19]。所以当环境缺镁或供镁不足时必然会影响植物的碳、氮代谢,影响植物的生长发育[20]。环境中镁浓度过高不仅会对植物产生单盐毒害,也会与 K^+、Ca^{2+}、Zn^{2+}、Mn^{2+}、Cu^{2+}、Fe^{2+}等离子产生拮抗作用,引起营养元素的匮乏[21-22]。本研究表明,随施镁量增加,玉米株高和干重显著降低,施镁量达到 515 mg/kg 时,玉米植株已表现出明显的镁中毒症状和缺锌症状,这与 Narwal 和 Chitralekha 等[21-22]的研究结果是一致的。镁对维持叶绿体结构有重要作用,但也需要合适的浓度,Portis[23]认为类囊体中合适的镁浓度约为 2 mmol/L,基质中合适的镁浓度约为 3～5 mmol/L,超过这个浓度都会使叶绿体结构受到破坏,基粒数下降、被膜损伤、类囊体数目降低。本研究中随着施镁量的增加,玉米叶片叶绿素含量显著下降,施镁量达到 515 mg/kg 时降低了 45.9%,导致玉米叶片枯黄,这也是镁浓度过高导致叶绿体结构受到损伤的具体表现。对于作物的正常生理代谢而言,营养物质的缺乏和过剩都是逆境的表现,也都会引起细胞酶活性的变化[24]。汪洪和褚天锋[25]的研究表明,缺镁菜豆叶片中的 MDA 含量升高,真叶中的 SOD、POD、CAT 活性高于正常植株。本研究中随着施镁量的增加,玉米幼嫩叶片 MDA 含量始终呈增加趋势,SOD、POD、CAT 活性都是先升高再迅速降低。虽然一个是在缺镁条件下,一个是在镁过量条件下,但两个研究结果基本是一致的,这是因为对于作物的正常生理代谢来说都是逆境,其作用都是导致活性氧过多,诱导了清除系统活性的提高和发生膜脂过氧化作用。

3.2　高镁环境对土壤 Zn 有效性的影响

影响土壤有效锌含量的因素很多[10-11],如土壤 pH 值、碳酸钙含量、盐分含量和元素的交互作用等。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,土壤中的 Ca^{2+} 含量并不高,田间调查、取样分析化验、盆栽试验结果仍然显示随着施镁量的增加,土壤有效锌含量都显著降低,这说明 Mg^{2+} 至少有着与 Ca^{2+} 相同的作用,对水溶性锌有很强的亲和力,通过吸附降低了土壤锌的有效性[26]。芦满济等[5]的研究结果表明土壤盐分与土壤有效锌含量之间呈正相关,Shula 等[14]却认为施镁作物缺锌主要是发生在作物上而不是在土壤中。本研究中随着施镁量的增加,土壤盐分含量是增加的,土壤有效锌含量也是

降低的,但土壤盐度的形成毕竟是多种阳离子和阴离子共同作用的结果,单纯的盐分含量与有效锌含量之间是否有必然的关系,还有待更进一步地深入研究。关于土壤中锌与镁之间关系的研究报道并不多,刘铮等[27]认为在土壤晶格上,Mg^{2+}和OH^-间的结合力比较弱,晶格很容易被破坏而使Mg^{2+}露出,Zn^{2+}和Mg^{2+}的离子半径又非常接近,很容易与土壤晶格中的Mg^{2+}发生同晶置换作用,从而降低土壤有效Zn含量。也有学者[28]认为,石灰性土壤中存在着大量的游离态CO_3^{2-}和HCO_3^-,一部分Zn^{2+}会通过化学沉淀或吸附的方式与其结合,造成有效Zn含量的降低。但在本研究中,施入的是$MgSO_4 \cdot 7H_2O$,各处理土壤中的CO_3^{2-}和HCO_3^-含量是相同的,其他土壤条件也是相同的,因此有理由相信造成土壤有效Zn含量降低的主要原因还是高镁的土壤环境,而不是CO_3^{2-}和HCO_3^-。

3.3 高镁环境对Zn吸收转运的影响

锌在植物体内以自由离子状态存在或与各种低分子化合物配合,其吸收和转运受多种因素制约,其中供锌水平和离子间的交互作用是植物营养学家研究较多的问题。大量研究结果表明,缺锌条件下作物体内锌浓度显著下降,施锌能大幅度提高作物体内锌含量和累积量[29-31]。本研究是在潜在缺锌的石灰性土壤上进行,有效锌含量(DTPA-Zn)只有0.89 mg/kg,土壤供锌水平很低,因此不同处理玉米体内锌含量和吸收量都很低。芦满济[5]等认为镁与锌之间存在拮抗作用,Zn的生物毒性试验也证明Mg^{2+}可以减少Zn的毒害作用[32],本研究中随着施镁量的增加,土壤和作物根际Mg^{2+}含量都大幅度增加,充足的Mg^{2+}充分满足了作物对镁素营养的需求,但对于玉米幼苗的锌营养来说,其作用是相反的,高浓度的Mg^{2+}有可能在质外体交换位点上与Zn^{2+}产生竞争[33],从而造成玉米茎叶和根系中的锌含量、锌吸收量都显著降低,这与上述研究者的结论是一致的。另外,本研究中施镁221 mg/kg时,玉米茎叶含锌量为16.4 μg/g,已表现出缺锌胁迫;施镁515 mg/kg时,茎叶含锌量只有12.7 μg/g,表现出缺锌症状,这与大多数研究者所认同的作物潜在性缺锌和缺锌临界值(茎叶含锌量<20 mg/kg和15 mg/kg)是一致的[13]。本研究中随着施镁量的增加,Zn从根系向地上部的转运显著降低,这一方面与施镁对茎叶和根系的抑制程度不同有关(表1),另一方面也可能与环境中大量存在的Mg^{2+}离子抢先占据了转运蛋白上的有利位置,导致根系吸收的锌不能向地上部运输有关[34]。

4 结论

1)绿洲盐化潮土上的玉米缺锌问题与土壤含镁量水平密切相关,随着施镁量的增加,玉米幼苗的生长受到抑制,达到515 mg/kg时表现出明显的镁中毒症状和典型缺锌症状,株高、干重、叶片中的叶绿素含量和SOD、POD、CAT活性都显著降低,MDA含量显著增加。

2)施镁抑制了玉米幼苗对锌的吸收,但对茎叶的抑制程度明显高于根系,导致玉米根系的锌含量和吸收量都普遍高于茎叶,锌从根系向地上部的转运率显著降低,施镁515 mg/kg时只有34.55%,仅达到不施镁水平的62%。

3)施镁降低了土壤有效锌含量,用量达到515 mg/kg时,土壤有效锌含量已降至0.47 mg/kg,超过了土壤缺锌临界值(DTPA-Zn<0.5 mg/kg)。

参考文献:

[1] 李加宏,俞仁培. 镁质盐渍土危害作物生长机理的初步研究[J]. 土壤通报,1997,28(6):246-247.
Li J H, Yu R P. The preliminary study on Mg-saline soil to against the growth mechanism of crops[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(6): 246-247.

[2] 田兆顺,董汉章. 河西走廊镁质碱化盐渍土的初步研究[J]. 土壤,1977,233-240.
Tian Z S, Dong H Z. The preliminary study on Mg-alkalization saline soil of Hexi Corridor[J]. Soils, 1977, 233-240.

[3] 刘向来. 镁质碱化土的改良[J]. 土壤通报,1985,16(2):62-63.
Liu X L. Reclamation for Mg-alkalization soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1985, 16(2): 62-63.

[4] 芦满济,祁国元,杨思存,等. 绿洲盐化潮土的锌肥效应及适宜用量[J]. 西北农业学报,1999,8(1):69-73.
Lu M J, Qi G Y, Yang S C *et al*. The effect of chemical zinc and it's optimum rate on maize in saline fluvo-aquic soil of Hexi oasis area[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1999. 8(1): 69-73.

[5] 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[A]. 李生秀. 土壤—植物营养研究文集[C]. 陕西科学技术出版社,1999. 746-52.
Lu M J, Qi G Y, Yang S C. Effects of soil salt and Zn application on Zn nutrition of soil and plant[A]. Li S X. Nutrition research of plant and soil [C]. Shaanxi Science and Technology Press, 1999. 746-752.

[6] 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.
Lu J L. Plant nutrition (Ⅰ) (2rd Ed)[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. 69-73.

[7] Hajiboland R, Yang X E, Romheld. 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: 349-357.

[8] 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.
Liu Z. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1994, 27(1): 30-37.

[9] 胡明芳, 文启凯, 田长彦. 作物锌素营养研究进展与展望[J]. 新疆农业科学, 1997, (5): 214-216.
Hu M F, Wen Q K, Tian C Y. The progress and prospects of zinc nutrition in crops[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1997, (5): 214-216.

[10] Barber S A. Soil nutrient bioavailability[M]. New York: Jones Wiley and Sons, Inc. 1984.

[11] Marschner H. Zinc uptake from soil[A]. Robson A D. Zinc in soils and plants[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. 59-77.

[12] Curtin D, Smillie G. Soil solution composition as affected by liming and incubation[J]. Soil Science Society of American Journal, 1983, 47(4): 701-707.

[13] 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.
Sun G F, Yang G S. The prospect of zinc in soil and plant system [J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2002, 8(2): 22-30.

[14] Shula L M, Rathan P K. Zinc magnesium interactions in soil and plants as measured by crop response[J]. International Journal of Trogical Agriculture, 1983,1: 309-316.

[15] 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.
Lu R K. Analytical methods of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.

[16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 182-185.
Li H S. Experimental principle and technique for plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 182-185.

[17] Tang T, Shi S, Li D *et al.* Physiological and biochemical responses of *Scytonema javanicum* (cyanobacterium) to salt stress [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 71(3): 312-320.

[18] Rengel Z, Graham R D. Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution Ⅱ. Nutrient uptake[J]. Plant and Soil, 1995, 176: 317-324.

[19] 汪洪, 褚天铎. 植物镁素营养的研究进展[J]. 植物学通报, 1999, 16(3): 245-250.
Wang H, Chu T D. The progress of study on mechanism nutrition in plants[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(3): 245-250.

[20] 王芳, 刘鹏, 徐根娣. 土壤中的镁及其有效性研究概述[J]. 河南农业科学, 2004, (1): 33-36.
Wang F, Liu P, Xu G D. The review for Magnesium and it's availability research in soil[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2004, (1): 33-36.

[21] Narwal R P, Kumar V, Singh J P. Potassium and magnesium relationship in cowpea[J]. Plant and Soil, 1985, 86: 129-134.

[22] Chitralekha C, Nirmala N. Influence of changes in manganese and magnesium supply on some aspects of wheat physiology[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1994, 40(2): 191-197.

[23] Portis A R Jr. Evidence of a low stromal Mg^{2+} concentration in intact chloroplasts in the dark[J]. Plant Physiol, 1981, 67(5): 985-989.

[24] Duguid J G, Bloomfied V A. Aggregation of melted DNA by divalent metal ion-mediated cross-linking [J]. Biophysical Journal, 1995, 69(6): 2642-2648.

[25] 汪洪, 褚天铎. 缺镁对菜豆幼苗膜脂过氧化及体内活性氧清除酶系统的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(4): 386-392.
Wang H, Chu T D. Effect of Mg deficiency on plasma membrane permeability, membrane lipid peroxidation and endogenous oxygen radicals scavenging enzymes systems in common bean[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(4): 386-392.

[26] 钱红, 谢振翅. 碳酸盐对土壤锌解吸影响的研究[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 105-108.
Qian H, Xie Z C. Effect of carbonate on desorption of soil zinc [J]. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 105-108.

[27] 刘铮, 朱其清. 微量元素的农业化学[M]. 北京: 农业出版社, 1991.
Liu Z, Zhu Q Q. Agrochemistry of microelements[M]. Beijing: Agriculture Press, 1991.

[28] 谢正苗. 土壤中锌的化学平衡[J]. 环境科学进展, 1996, 4(5): 13-30.
Xie Z M. Chemical equilibria if zinc in soils[J]. Advances in Environmental Science, 1996, 4(5): 13-30.

[29] 王景安, 张福锁. 供锌水平对玉米幼苗生长发育及锌含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2000, 22 (1): 69-72.
Wang J A, Zhang F S. The effect of supplying different levels of Zn on the growth and Zn concentration of maize seedling[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2000, 22 (1): 69-72.

[30] 汪洪, 周卫, 金继运. 分层供水和表层施锌对玉米植株生长和锌吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (4): 63-67.
Wang H, Zhou W, Jin J Y. Maize plant growth, root biomass distribution, and zinc uptake as affected by Zn application and different water conditions in soil layers[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007, (4): 63-67.

[31] 陆欣春, 陈玲, 田霄鸿, 等. 供锌条件下碳酸钙对小麦幼苗生长和锌吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1424-1428.
Lu X C, Chen L, Tian X H *et al.* Effects of $CaCO_3$ addition under Zn supply on wheat seedlings growth and Zn uptake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8): 1424-1428.

[32] Jansen S, Blust R, Van Leeuwen H P. Metal speciation dynamics and bioavailability: Zn (Ⅱ) and Cd (Ⅱ) uptake by mussel (*Mytilus edulis*) and carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Environment Science & Technology, 2002, 36 (10): 2164-2170.

[33] Campbell P G C. Interactions between trace metals and aquatic organisms: A critique of free ion activity model[A]. Tessier A, Tunner D R. Metal Speciation and bioavailability in aquatic systems[M]. New York, USA: John Wiley, 1995. 45-97.

[34] Hanikenne M, Kramer U, Demoulin V *et al.* A comparative inventory of metal transporters in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii* and the red alga *cyanidioschizon meralae*[J]. Plant Physiology, 2005, 137: 428-446.