

砂培条件下不同缺 Zn 敏感型玉米对施锌的反应

孙 刚^{1,2}, 杨习文¹, 田霄鸿¹, 李生秀¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 江西省农业科学院 土壤肥料研究所, 江西 南昌 330200)

【摘 要】 【目的】研究不同缺 Zn 敏感型玉米(*Zea mays* L.)对缺 Zn 的敏感程度和耐性。【方法】以缺 Zn 敏感型玉米品种陕单 902、陕单 911、农大 60、中单 2 号、户单 2000 和非敏感型玉米品种新陕资 1 号、郑单 958、陕单 8813、高农 1 号、户单 4 号为供试材料,在温室中进行不同供 Zn 水平(设无 Zn、低 Zn、适量供 Zn 和足量供 Zn 4 个处理,分别施 0, 0.5, 1.5, 3.0 mg/kg ZnSO₄ · 7H₂O)下玉米幼苗的砂培试验,研究供 Zn 量对玉米生长、生物量以及各部位 Zn 含量和吸收量的影响。【结果】不同缺 Zn 敏感型玉米对施 Zn 的反应有较大差异,缺 Zn 敏感型玉米对低 Zn 的敏感性明显高于非敏感型玉米。敏感型玉米品种幼苗较非敏感型的根冠比大;供 Zn 会降低玉米幼苗的根冠比,而促进地上部生长。缺 Zn 非敏感型玉米在低 Zn 条件下会受到较为严重的伤害,这种伤害比无 Zn 所造成的伤害更为严重。施 Zn 量为 0.5 mg/kg 时,玉米幼苗吸收的 Zn 绝大部分被累积在根中;施 Zn 量增加至 1.5 mg/kg 时,玉米幼苗 Zn 含量较无 Zn 处理普遍提高,缺 Zn 敏感型玉米根、茎、叶的 Zn 含量分别提高了 20.5%, 53.6% 和 18.5%,而非敏感型玉米分别提高了 5.5%, 83.4% 和 60.7%。【结论】缺 Zn 非敏感型玉米根系吸收的 Zn 更多地被转移至地上部,使地上部含 Zn 量的增幅显著大于敏感型玉米。不同缺 Zn 敏感型玉米在缺 Zn 条件下不仅生长和 Zn 营养的分布情况截然不同,而且在供 Zn 后对 Zn 的吸收也存在差异。

【关键词】 玉米基因型;施 Zn;缺 Zn 敏感型;根冠比

【中图分类号】 S143.7⁺2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)02-0101-08

Response of different maize of variou susceptibility to zinc application under sand culture conditions

SUN Gang^{1,2}, YANG Xi-wen¹, TIAN Xiao-hong¹, LI Sheng-xiu¹

(1 College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Soil and Fertilizer Research Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang, Jiangxi 330200, China)

Abstract: 【Objective】 The experiment was conducted to study the responses of different maize (*Zea mays* L.) to zinc-susceptibility and endurance at four zinc supplying rates (0, 0.5, 1.5, 3.0 mg/kg sand). 【Method】 A sand experiment of maize seedling growth was conducted using maize of susceptibility (Shaandan 902, Shaandan 911, Nongda 60, Zhongdan 2 and Hudan 2000) and non-susceptibility (Xinshanzi 1, Zhengdan 958, Shaandan 8813, Gaonong 1 and Hudan 1) to Zn deficiency in a greenhouse. 【Result】 The tentative results indicated that, when low rate of Zn (0.5 mg/kg) was supplied, the maize plants of zinc-susceptibility type to zinc deficiency were more sensitive than non-susceptibility maize plants. The susceptible genotypes to zinc deficiency had higher root to shoot ratios than non-susceptibility maize plants, because the root of zinc susceptibility genotypes grew better and could take up more nutrients. The decrease of root to shoot ratios promoted correspondingly the growth of the shoot. The maize plants for non-susceptibility genotypes under low zinc rate were damaged more seriously than those under zinc deficiency. Zinc

* [收稿日期] 2009-06-16

[基金项目] 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0866);西北农林科技大学青年学术骨干支持计划(2006);西北农林科技大学科研专项(06ZR045)

[作者简介] 孙 刚(1977—),男,陕西凤翔人,助理研究员,硕士,主要从事土壤植物体系养分调控研究。

[通信作者] 田霄鸿(1967—),男,甘肃天水人,教授,博士,主要从事旱地养分管理研究。E-mail: txhong@hotmail.com

taken up by maize seedlings was mainly accumulated in roots when the zinc supplying rate was 0.5 mg/kg. Zinc concentration in maize plants for zinc susceptibility types was increased obviously when zinc application rate was increased to 1.5 mg/kg, zinc concentrations increased by 20.5%, 53.6% and 18.5% in root, stem and leaf, respectively while that of the non-zinc susceptibility types increased by 5.5%, 83.4% and 60.7%, respectively. 【Conclusion】 The Zn taken up by susceptibility genotypes was readily translocated to shoots, and increased the zinc concentration in shoot and the range of zinc concentration increased was higher than that of the non-susceptibility genotypes. The growth and Zn distribution of different zinc-susceptibility maize types were entirely different under zinc deficiency condition, moreover, there also existed difference for zinc uptake at zinc supply.

Key words: maize genotype; zinc application; susceptibility genotype to zinc deficiency; ratio of root to shoot

Zn 是自然界分布较广的金属元素,但作物缺 Zn 问题在世界范围内广泛存在。作物缺 Zn 最终会通过食物链引起人体缺 Zn, Zn 缺乏已被列为导致人类死亡的主要风险因素^[1]。Hotz 等^[2]曾报道,粮食作物 Zn 缺乏影响到世界 1/3 的人口。Zn 缺乏被认为是影响人体生长发育、免疫和认知能力的重要因素。Zn 缺乏还大大增加了人体 DNA 损伤和癌症发生的风险^[3-4]。作物缺 Zn 最根本的原因是土壤缺 Zn,在我国,缺 Zn 土壤面积超过国土总面积的 40%^[5],这类土壤主要集中在北方干旱和半干旱地区,该区土壤全 Zn 含量平均仅为 78 mg/kg,低于全国土壤和酸性土壤的平均含量(分别为 100 和 163 mg/kg),有效 Zn 含量则常低于缺 Zn 临界含量(0.5 mg/kg)^[5]。玉米(*Zea mays* L.)种植也主要集中在这些区域。

Zn 作为植物必需的营养元素,对超过 300 种酶的结构和功能都具有重要作用^[6],缺 Zn 显著影响植物生长。玉米和水稻被认为是对缺 Zn 最敏感的作物,前人已对水稻耐 Zn 敏感型做了大量研究工作^[7-9],例如 Gao 等^[10-11]研究了缺 Zn 土壤上,不同水分条件下水稻对 Zn 的吸收情况。人们很早就发现玉米会因缺 Zn 而出现“白苗病”,导致产量降低;严重缺 Zn 时,会造成极显著减产。玉米和高粱对 Zn 缺乏的耐受性较差,Clark 对缺 Zn 敏感性差异较大的 2 个玉米品种的研究发现,抗性品种干物质产量较高,冠/根比较大,Zn 吸收量和含量、单位 Zn 所产生的干物质及从根部向地上部的转运量也较高^[12]。近年来的研究表明,不同玉米基因型对 Zn 的吸收和缺 Zn 的敏感程度存在差异^[13],但目前关于不同供 Zn 水平对不同缺 Zn 敏感型玉米生长影响的研究尚十分有限。

解决作物缺 Zn 通常是采用施 Zn 肥和菌肥的

方式来改善植物的 Zn 营养状态^[14]。但研究发现,不同植物或同一植物的不同基因型,对同一微量元素缺乏或毒害的敏感程度和适应能力有很大差异^[5],玉米和水稻都对缺 Zn 较敏感,其中不同基因型玉米对缺 Zn 的敏感性有很大差异^[15]。我国拥有丰富的玉米种质资源,筛选 Zn 营养高效型玉米品种,对我国粮食安全和资源保护具有重要的现实意义。本试验采取不同供 Zn 水平,研究不同缺 Zn 敏感型玉米对 Zn 用量的反应,以期对玉米生产中 Zn 营养问题的解决提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试玉米品种 通过对陕西省播种面积较大的 35 个玉米品种进行缺 Zn 敏感性的筛选和对比研究,将其划分为缺 Zn 敏感型、中间型和非敏感型 3 种类型^[16]。本试验从筛选出的缺 Zn 敏感基因型和非敏感基因型中各挑选 5 个品种用于试验,其中敏感型品种分别为陕单 902、陕单 911、农大 60、中单 2 号和户单 2000;非敏感型品种为新陕资 1 号、郑单 958、陕单 8813、高农 1 号和户单 4 号。供试玉米品种均由西北农林科技大学农学院提供。

1.1.2 供试营养液 试验所用营养液配方为:Hoagland 提供大量元素:Ca (NO₃)₂ · 4H₂O 0.95 g/L, KNO₃ 0.61 g/L, MgSO₄ · 7H₂O 0.49 g/L, NH₄H₂PO₄ 0.12 g/L, 柠檬酸铁 0.005 g/L(原配方为酒石酸铁, Fe 的浓度未变);Arnon 配方(无 Zn)提供微量元素:H₃BO₃ 2.86 mg/L, MnCl₂ · 4H₂O 1.81 mg/L, CuSO₄ · 5H₂O 0.08 mg/L, H₂MoO₄ · 4H₂O 0.09 mg/L^[16]。

1.2 试验方法

采用新鲜、粒径为 0.5~2.0 mm 的河砂作为培

养基质,先用自来水洗去其中的泥土和其他杂质,然后用蒸馏水淘洗3次后晾干。培养容器为13 cm×13 cm(直径×高)的黑色营养钵,装干砂1.3 kg。试验设无Zn(Zn0)、低Zn(Zn1)、适量供Zn(Zn2)和足量供Zn(Zn3)4个供Zn水平处理,分别施0、0.5、1.5和3.0 mg/kg ZnSO₄·7H₂O(施用量以Zn计)。每处理重复4次,每重复10盆,共160盆。发芽阶段及前期培养在培养室内进行:挑选饱满的玉米种子,用体积分数3% H₂O₂浸泡消毒30 min,再用蒸馏水洗净后浸种24 h。2004-07-23装盆并播种,每盆播种3粒,浇足量蒸馏水保证出苗。5 d后移入玻璃网室(顶部为玻璃,四周为铁丝网),10 d后间苗,每盆留苗1株并以溶液的形式一次性施入ZnSO₄·7H₂O。每隔6 d浇无Zn营养液100 mL/盆。培养53 d后收获,期间及时观察并记录幼苗的外观表现。

1.3 样品采集

收获时将整株玉米(包括根系)从砂子中冲洗取出,先用自来水冲洗,再用蒸馏水洗净,最后用吸水纸擦干,测定每株玉米幼苗的株高、叶片数和叶面积(采用系数法^[17])。随后分成根系、茎秆和叶片3部分,先在80℃下烘15 min,然后在60℃烘48 h,称量干质量后,粉碎待用。

1.4 测定项目及方法

测定幼苗中的Zn含量及供试玉米种子的千粒质量和P、Zn含量。种子P含量采用H₂SO₄-H₂O₂消解,钼锑抗比色法^[18]测定;种子和幼苗含Zn量采用干灰化法处理植物样品,原子吸收分光光度计法^[19]测定。

1.5 数据处理

试验数据采用SAS 8.2统计软件进行方差分析和多重比较(SSR法,α=5%)。

2 结果与分析

2.1 供Zn量对玉米幼苗生长的影响

从图1~3可以看出,对于缺Zn敏感型玉米,Zn1处理的株高、叶片数和叶面积较Zn0处理均有所增加;当供Zn量增加到1.5 mg/kg(Zn2处理)时,上述3个指标均有不同程度增加;当供Zn量继续增加到3.0 mg/kg(Zn3处理)时,除了株高在各品种间的表现不完全一致(陕单902和陕单911的株高明显下降,而农大60、中单2号和户单2000均有不同程度增加)外,叶片数和叶面积则均有所降低。表明缺Zn敏感型玉米对少量供Zn比较敏感,而对足量供Zn时反应不一,这可能与Zn的大量存在影响了对其他养分的吸收有关。在不同施Zn条件下,缺Zn非敏感型玉米的叶片数、株高和叶面积的变化规律与缺Zn敏感型玉米不同,与Zn0处理相比,Zn1处理各品种株高、叶面积均降低,而叶片数增加;Zn2处理各品种株高、叶片数和叶面积均明显增加,并达到最大值;Zn3处理各品种上述3个农艺性状均有不同程度降低,其中叶片数降低幅度较小,株高和叶面积降低幅度较大。由此可见,低Zn供应会对缺Zn非敏感型玉米的生长产生严重抑制,这种抑制比缺Zn的影响更为严重;Zn3处理对该型玉米的生长也产生了明显的抑制作用。

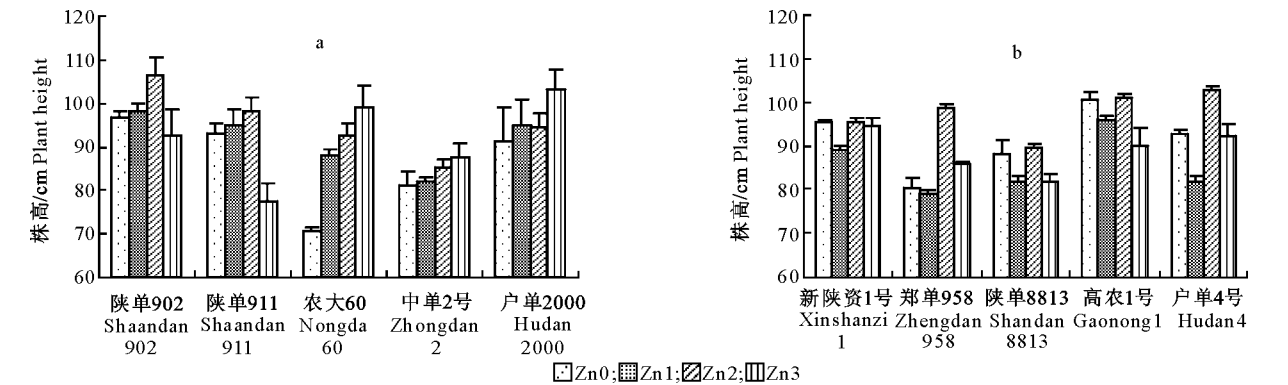


图1 不同供Zn量对缺Zn敏感型(a)和非敏感型(b)玉米幼苗株高的影响
Fig.1 Effects of zinc rates on plant height of maize genotypes of susceptibility (a) and non-susceptibility (b) to Zn deficiency

2.2 供Zn量对玉米幼苗生物量的影响

表1表明,缺Zn敏感型玉米Zn0处理根的生物量总体上高于非敏感型玉米;敏感型和非敏感型

玉米在Zn1处理下根和冠部的生物量均较低,表明少量供Zn比缺Zn对玉米生长的危害更大;Zn2处理下2类玉米幼苗各部分的生物量均最大,说明

Zn² 处理对玉米幼苗的生长有促进作用;与 Zn² 处理相比,Zn³ 处理下玉米幼苗各器官生物量均有不同程度的降低,这可能是由于 Zn 的大量吸收和积累,对幼苗生长产生了不良影响。玉米各部分生物

量大小次序为:叶>根>茎,而且三者存在较好的相关性(根与茎、根与叶及茎与叶的相关系数 *r* 分别为 0.748 9,0.856 9 和 0.815 2,均达显著水平)。

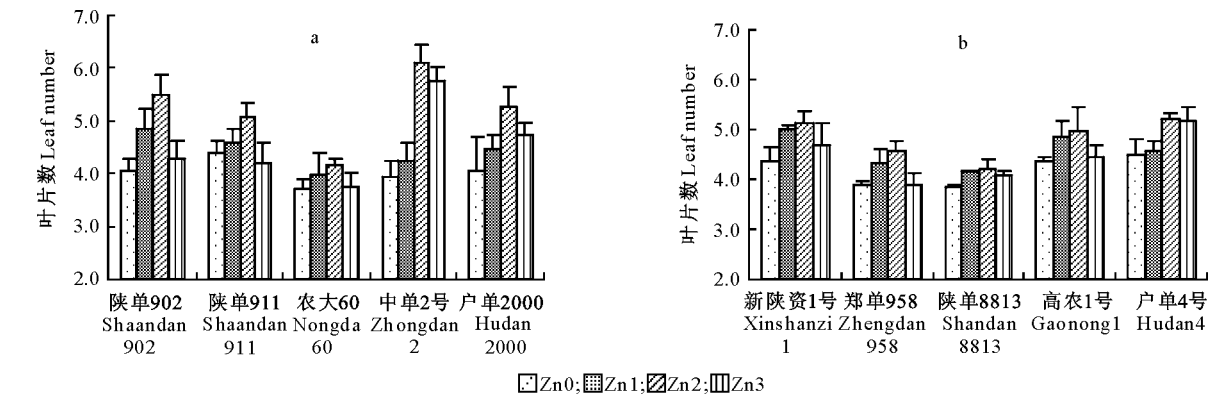


图 2 不同供 Zn 量对缺 Zn 敏感型(a)和非敏感型(b)玉米幼苗叶片数的影响
Fig. 2 Effect of zinc rates on leaf number of maize genotypes of susceptibility (a) and non-susceptibility (b) to Zn deficiency

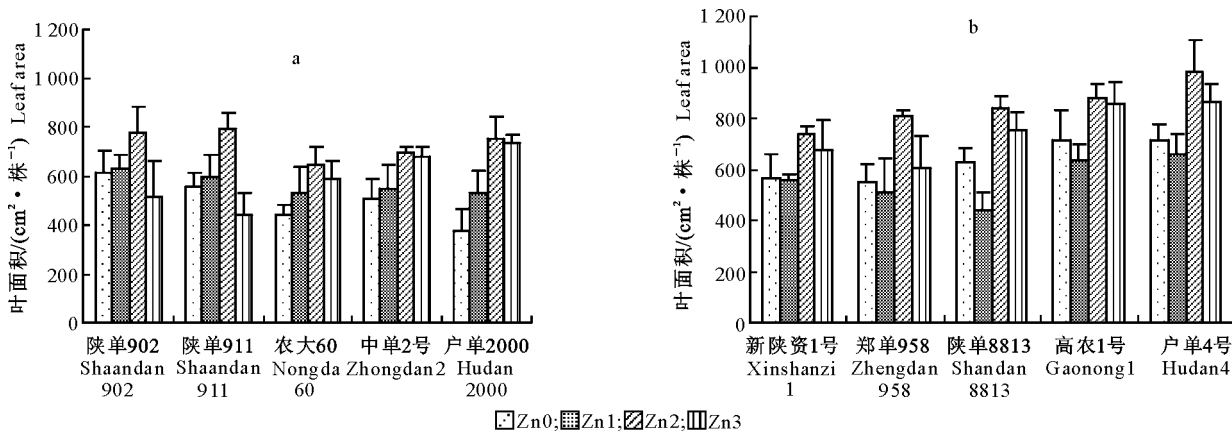


图 3 不同供 Zn 量对缺 Zn 敏感型(a)和非敏感型(b)玉米幼苗叶面积的影响
Fig. 3 Effect of zinc rates on the leaves area of maize genotypes of susceptibility (a) and non-susceptibility (b) to Zn deficiency

表 1 还表明,供 Zn 量对缺 Zn 敏感型不同的 2 类玉米的影响有所差异。根冠比可作为表征玉米对缺 Zn 反应较为敏感的指标之一,其能反映植株生长的协调一致性和对环境变化的适应能力。Zn⁰ 处理缺下,Zn 敏感型玉米幼苗可能由于对缺 Zn 比较敏感,因此根系大量生长以吸收更多 Zn 来满足植株对 Zn 的需求,其根冠比普遍大于非敏感型玉米。Zn¹ 处理下,缺 Zn 敏感型玉米根冠比变化不尽相同

(陕单 911 和农大 60 根冠比微增,其他 3 种降低),而缺 Zn 非敏感型玉米的根冠比均降低;Zn³ 处理下,敏感型和非敏感型玉米的根冠比均降低,但降低幅度有一定差异。结果表明,缺 Zn 条件下,敏感型玉米幼苗根系会大量生长,以便吸收更多的养分,导致玉米幼苗根冠比增大,而供应适量 Zn 会明显降低根冠比,促进地上部的生长。

表 1 不同供 Zn 量对不同缺 Zn 敏感型玉米幼苗生物量的影响

缺 Zn 敏感型 Zinc-susceptibility	品种 Cultivar	处理 Treatment	生物量/(g·株 ⁻¹) Biomass				根冠比 Root to shoot ratio
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	冠部 Shoot	
敏感型 Susceptibility	陕单 902 Shaandan 902	Zn ⁰	1.88 b	1.23 b	2.02 bc	3.25 c	0.58 a
		Zn ¹	1.20 c	1.05 c	1.82 c	2.87 d	0.42 b

续表 1 Continued table 1

缺 Zn 敏感型 Zinc-susceptibility	品种 Cultivar	处理 Treatment	生物量/(g·株 ⁻¹) Biomass				根冠比 Root to shoot ratio
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	冠部 Shoot	
敏感型 Susceptibility	陕单 902 Shaandan 902	Zn2	2.38 a	1.59 a	3.32 a	4.91 a	0.48 ab
		Zn3	1.73 b	1.44 ab	2.34 b	3.78 b	0.46 b
	陕单 911 Shaandan 911	Zn0	1.68 a	1.12 a	2.51 a	3.63 a	0.46 b
		Zn1	1.68 a	1.06 ab	2.19 a	3.25 b	0.52 a
		Zn2	1.98 a	1.26 a	2.57 a	3.83 a	0.52 a
		Zn3	1.00 b	0.89 b	1.45 b	2.34 c	0.43 b
		Zn0	1.17 a	0.88 a	1.49 a	2.37 a	0.49 b
	农大 60 Nongda 60	Zn1	1.03 a	0.68 b	1.35 a	2.03 c	0.51 a
		Zn2	1.33 a	0.92 a	1.58 a	2.50 c	0.53 a
		Zn3	1.09 a	0.83 a	1.47 a	2.30 d	0.47 a
	中单 2 号 Zhongdan 2	Zn0	1.18 b	0.88 b	1.46 ab	2.34 bc	0.50 b
		Zn1	0.99 c	1.03 ab	1.31 b	2.34 b	0.42 b
		Zn2	1.89 a	1.25 a	2.42 a	3.67 a	0.52 a
		Zn3	1.32 b	0.84 b	1.88 ab	2.72 c	0.48 a
	户单 2000 Hudan 2000	Zn0	1.55 ab	0.98 b	2.21 b	3.16 b	0.49 a
		Zn1	1.34 b	0.93 b	1.94 b	2.87 b	0.47 a
		Zn2	1.70 a	1.56 a	2.93 a	4.29 a	0.42 b
		Zn3	1.69 a	1.29 a	2.81 a	4.10 a	0.41 b
非敏感型 Non-suscepti- bility	新陕资 1 号 Xinshanzi 1	Zn0	1.33 ab	1.29 a	2.32 ab	3.61 a	0.37 a
		Zn1	1.12 b	1.00 b	2.08 b	3.08 d	0.36 a
		Zn2	2.00 a	1.37 a	2.70 a	4.07 a	0.49 a
		Zn3	1.47 ab	1.19 ab	2.22 b	3.41 c	0.43 a
	郑单 958 Zhengdan 958	Zn0	1.50 a	0.98 b	2.13 b	3.11 bc	0.48 a
		Zn1	1.04 b	0.80 b	1.66 c	2.46 c	0.42 c
		Zn2	1.69 a	1.43 a	2.92 a	4.35 a	0.39 c
		Zn3	1.46 a	1.21 a	1.99 b	3.20 b	0.46 b
	陕单 8813 Shaandan 8813	Zn0	1.03 c	0.80 b	1.48 bc	2.28 c	0.45 b
		Zn1	0.81 c	0.68 b	1.22 c	1.90 d	0.43 b
		Zn2	2.13 a	1.18 a	2.72 a	3.90 a	0.55 a
		Zn3	1.46 b	1.01 a	1.94 b	2.95 b	0.49 b
	高农 1 号 Gaonong 1	Zn0	1.49 b	1.18 b	2.73 b	3.91 b	0.38 a
		Zn1	1.38 b	1.09 b	2.63 b	3.72 b	0.37 a
		Zn2	2.07 a	1.60 a	3.52 a	5.12 a	0.40 a
		Zn3	1.35 b	1.12 b	2.14 b	3.26 c	0.41 a
	户单 4 号 Hudan 4	Zn0	1.54 ab	0.95 b	2.23 ab	2.23 d	0.49 ab
		Zn1	1.32 b	0.93 b	2.10 b	3.07 c	0.43 b
		Zn2	1.87 a	1.54 a	2.69 a	4.23 a	0.44 b
		Zn3	1.81 a	1.02 b	2.58 a	3.60 b	0.50 a

注:同一品种同列数据后标不同小写字母者表示在 5%水平上差异显著。

Note:Means followed by the different letters in the same column for the same cultivar show significant difference at 5% significant level.

2.3 供 Zn 量对玉米幼苗 Zn 分布的影响

2.3.1 对 Zn 含量的影响 表 2 表明,施 Zn 对玉米幼苗不同部位 Zn 含量产生了明显影响。Zn0 处理下,缺 Zn 敏感型玉米幼苗根系 Zn 含量总体上低于非敏感型,但茎、叶片中 Zn 含量则总体上高于非敏感型,其均值分别较非敏感型玉米提高了 28.9%和 33.3%。Zn1 处理下,缺 Zn 敏感型玉米的根系和茎中 Zn 含量较 Zn0 处理提高,其均值分别提高了 9.96%和 10.33%,而叶片 Zn 含量下降,其均值降低了 30.8%;非敏感型玉米茎和叶中 Zn 含量平

均值较 Zn0 处理分别提高了 20.42%和 27.03%,根系中则降低了 6.34%。Zn2 处理下,缺 Zn 敏感型玉米的根、茎中 Zn 含量平均值较非敏感型玉米分别提高了 15.2%和 21.1%,叶中 Zn 含量平均值降低了 18.5%。Zn3 处理下,2 类玉米各部位 Zn 含量均较 Zn2 处理有较大幅度的增加。说明在 Zn3 处理条件下,玉米幼苗各部位的 Zn 含量会普遍提高,与 Zn0 处理相比,缺 Zn 敏感型玉米根、茎、叶中 Zn 含量平均值分别提高了 20.5%,53.6%和 18.5%,而缺 Zn 非敏感型玉米分别提高了 5.5%,83.4%和

60.7%。在足量供 Zn 情况下,非敏感型玉米根系吸收的上部 Zn 含量的增幅远大于敏感型。收的 Zn 被大量转移到地上部以提高 Zn 含量,使地

表 2 不同供 Zn 量对不同缺 Zn 敏感型玉米幼苗 Zn 含量的影响

Table 2 Effect of zinc application rates on concentration of maize seedling with different zinc-susceptibility		mg/kg											
缺 Zn 敏感型 Zinc-susceptibility	品种 Cultivar	Zn0			Zn1			Zn2			Zn3		
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
敏感型 Susceptibility	陕单 902 Shaandan 902	20.09 ab	8.15 c	10.27 ab	21.38 c	8.37 d	6.88 bc	20.67 a	8.90 c	9.98 b	24.03 ab	17.81 b	13.61 b
	陕单 911 Shaandan 911	20.50 ab	12.72 bc	13.01 a	24.18 a	15.17 b	9.17 b	22.32 a	17.47 a	12.48 a	24.23 ab	20.37 ab	15.05 b
	农大 60 Nongda 60	22.33 a	15.96 ab	14.13 a	23.50 b	19.21 a	13.28 a	24.18 a	19.31 a	13.59 a	26.80 a	20.96 a	19.09 a
	中单 2 号 Zhongdan 2	20.29 ab	16.28 a	10.19 b	23.85 a	16.70 b	5.38 c	24.62 a	18.71 a	9.45 b	24.84 ab	19.44 ab	10.31 c
	户单 2000 Hudan 2000	19.18 b	11.31 bc	10.61 ab	19.71 c	11.61 c	5.55 c	22.90 a	13.37 b	7.86 b	23.50 b	20.31 ab	10.87 c
	均值 Mean	20.48	12.88	11.64	22.52	14.21	8.05	22.94	15.55	10.67	24.68	19.78	13.79
非敏感型 Non-susceptibility	新陕资 1 号 Xinshanzi 1	20.39 b	7.55 b	5.58 b	19.15 b	9.13 b	8.54 b	18.19 b	8.39 b	9.67 bc	19.48 de	15.72 c	12.81 b
	郑单 958 Zhengdan 958	25.44 ab	9.92 ab	8.71 a	23.99 a	12.46 a	9.18 b	20.16 ab	12.63 a	12.34 b	28.66 a	19.42 b	14.08 b
	陕单 8813 Shaandan 8813	25.61 a	12.86 ab	9.15 a	22.64 a	14.65 a	11.26 ab	21.38 a	15.85 a	11.91 bc	28.51 a	24.50 a	12.64 b
	高农 1 号 Gaonong 1	22.58 b	10.29 ab	10.30 a	21.99 a	12.02 a	13.20 a	20.03 ab	12.35 a	14.54 a	23.61 bc	13.87 c	16.89 a
	户单 4 号 Hudan 4	22.78 b	9.31 b	9.92 a	21.63 a	11.90 a	13.28 a	19.85 ab	14.98 a	13.59 ab	22.97 cd	18.09 bc	13.71 b
	均值 Mean	23.36	9.99	8.73	21.88	12.03	11.09	19.92	12.84	13.10	24.65	18.32	14.03

注:同一敏感型同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表 3 同。

Note: Means followed by the different letters in the same column for the cultivars of the same zinc-susceptibility show significant difference at 5% level. The same as table 3.

2.3.2 对 Zn 吸收量的影响 表 3 表明,不同供 Zn 量对玉米幼苗不同部位 Zn 吸收量有一定的影响。缺 Zn 敏感型玉米中,与 Zn0 处理相比,Zn1 处理基本上使根系中的 Zn 吸收量增加,叶中的 Zn 吸收量减少,表明低 Zn 处理使玉米幼苗吸收的 Zn 更多地积累在根系中,减少了叶片中的 Zn 含量,更容易表现出缺 Zn 症状;Zn2 和 Zn3 处理下,玉米幼苗根、茎和叶中的 Zn 吸收量大多有不同程度增加,明显提高了玉米幼苗各部位的 Zn 累积量,从而可有效地

防止缺 Zn 黄化现象的出现。从玉米幼苗对 Zn 的吸收量可以看出,缺 Zn 敏感型玉米根系中积累了大量的 Zn,低 Zn 施用量下叶片中 Zn 的吸收量最小,而在缺 Zn、适量和足量供 Zn 条件下,其 Zn 吸收量才有所增加。缺 Zn 非敏感型玉米中,Zn3 处理明显增加了根、茎、叶对 Zn 的吸收量,而 Zn0 处理则明显增加了根中 Zn 吸收量占整株 Zn 吸收总量的比例。

表 3 不同供 Zn 量对不同敏感型玉米幼苗 Zn 吸收量的影响

Table 3 Effect of zinc application rates on content of maize seedling with different zinc-susceptibility

缺 Zn 敏感型 Zinc-susceptibility	品种 Cultivar	处理 Treatment	Zn 吸收量/(mg·株 ⁻¹)Zinc uptake			(根/总量)/% Root/total uptake
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
敏感型 Susceptibility	陕单 902 Shaandan 902	Zn0	0.19 b	0.06 b	0.07 b	60.5
		Zn1	0.20 b	0.05 b	0.04 c	68.7
		Zn2	0.20 b	0.06 b	0.07 b	60.8
		Zn3	0.33 a	0.20 a	0.13 a	50.0
	陕单 911 Shaandan 911	Zn0	0.24 c	0.12 c	0.11 b	50.9
		Zn1	0.29 b	0.14 c	0.07 c	58.5
		Zn2	0.29 b	0.19 b	0.11 b	49.2
		Zn3	0.36 a	0.26 a	0.16 a	46.5
	农大 60 Nongda 60	Zn0	0.39 bc	0.17 c	0.13 b	48.8
		Zn1	0.33 c	0.22 b	0.12 b	48.3

续表 3 Continued table 3						
缺 Zn 敏感型 Zinc-susceptibility	品 种 Cultivar	处 理 Treatment	Zn 吸收量/(mg·株 ⁻¹)Zinc uptake			(根/总量)/% Root/total uptake
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
敏感型 Susceptibility	农大 60 Nongda 60	Zn2	0.35 bc	0.23 b	0.14 b	48.8
		Zn3	0.45 a	0.30 a	0.24 a	45.5
		Zn0	0.24 b	0.16 b	0.08 a	50.2
	中单 2 号 Zhongdan 2	Zn1	0.27 b	0.14 b	0.03 b	61.1
		Zn2	0.32 a	0.19 ab	0.08 a	54.5
		Zn3	0.34 ba	0.20 a	0.09 a	53.0
	户单 2000 Hudan 2000	Zn0	0.20 c	0.09 b	0.08 a	54.0
		Zn1	0.18 c	0.08 b	0.03 b	63.1
		Zn2	0.25 b	0.11 b	0.05 ab	61.1
		Zn3	0.32 a	0.23 a	0.10 a	49.7
	新陕资 1 号 Xinshanzi 1	Zn0	0.17 b	0.04 b	0.03 b	71.7
		Zn1	0.18 b	0.06 b	0.05 b	60.8
		Zn2	0.16 b	0.06 b	0.06 b	58.2
		Zn3	0.23 a	0.16 a	0.11 a	46.3
	郑单 958 Zhengdan 958	Zn0	0.28 b	0.07 b	0.06 d	67.9
		Zn1	0.27 bc	0.10 b	0.07 d	61.8
		Zn2	0.23 c	0.11 b	0.10 c	51.4
		Zn3	0.45 a	0.24 a	0.15 a	53.6
非敏感型 Non-susceptibility	陕单 8813 Shaandan 8813	Zn0	0.30 b	0.11 b	0.07 c	63.3
		Zn1	0.27 b	0.14 b	0.09 bc	54.2
		Zn2	0.26 b	0.16 b	0.10 b	50.2
		Zn3	0.47 a	0.33 a	0.13 a	50.3
	高农 1 号 Gaonong1	Zn0	0.24 b	0.08 b	0.07 b	61.1
		Zn1	0.26 b	0.11 ab	0.11 ab	53.6
		Zn2	0.23 b	0.12 ab	0.13 ab	48.5
		Zn3	0.32 a	0.15 a	0.18 a	49.4
	户单 4 号 Hudan 4	Zn0	0.24 b	0.07 c	0.07 b	63.4
		Zn1	0.25 b	0.11 b	0.11 a	53.1
		Zn2	0.24 b	0.15 b	0.12 a	46.7
		Zn3	0.31 a	0.21 a	0.13 a	48.2

本试验发现,缺 Zn 敏感型玉米幼苗 Zn1 处理比 Zn0 处理更早出现缺 Zn 症状,叶片较早出现黄褐色液滴,接着从叶尖开始逐渐枯萎,新生幼叶叶脉间出现浅黄色。值得注意的是,在缺 Zn 条件下,缺 Zn 非敏感型玉米叶片中的 Zn 含量虽普遍低于敏感型玉米叶片,但未首先表现出缺 Zn 症状。这说明对于不同缺 Zn 敏感型玉米而言,在玉米生长过程中决定是否表现出缺 Zn 症状不仅与叶片中的 Zn 含量有关,也与不同基因型表现缺 Zn 的体内最低 Zn 含量有关,这种特性可能主要受其遗传特性决定。另外,缺 Zn 敏感型玉米叶片的 Zn 吸收量也明显小于非敏感型玉米,而缺 Zn 非敏感型玉米幼苗不同部位的 Zn 含量和 Zn 吸收量均随着供 Zn 量的增加而逐渐增大。低 Zn 条件下,缺 Zn 敏感型玉米(农大 60 例外)根系累积的 Zn 量所占比例最大,而缺 Zn 非敏感型玉米在无 Zn 条件下达到最大。显然,缺 Zn 敏感型玉米在低 Zn 条件下会使根系积累大量的 Zn,而缺 Zn 非敏感型玉米会把根系吸收的 Zn 向地上部分转运。

3 讨 论

筛选抗缺 Zn 能力强的玉米品种,是解决北方缺 Zn 造成玉米减产问题比较直接而有效的方法。国际水稻研究所曾对 2 474 种水稻基因型进行了耐缺 Zn 能力的田间鉴定和筛选^[6],本试验所使用的玉米品种是从 35 个玉米品种中筛选出来的,其数量虽然十分有限,但在国内也是较多的。本试验发现,低 Zn 对缺 Zn 敏感型玉米幼苗的株高、叶片数、叶面积等农艺性状有一定促进作用,而对非敏感型玉米幼苗产生的危害比缺 Zn 更严重,这种危害的程度因品种不同而略有差异。低 Zn 对玉米幼苗的危害主要发生在非敏感型品种上,这与玉米本身的基因型有关,因此进一步明确不同缺 Zn 敏感型玉米品种的基因差异具有重要意义。无论是缺 Zn 敏感型还是非敏感型玉米,少量供 Zn 均会使根系生物量降低;适量供 Zn 则会使玉米幼苗的生物量均明显增加。Wang 等^[20]发现,与不施 Zn 相比,足量供 Zn 会显著提高玉米地上部的生物量,而对根系的影响

很小。Marschner 等^[21]认为,施 Zn 使玉米茎和叶片生长量提高,而根系生长量减小,缺 Zn 条件下植株根冠比、根叶比和根茎比增大,这是植物适应缺 Zn 的一种生理表现。

本试验发现,不同敏感型玉米幼苗的根冠比变化并不完全相同,缺 Zn 敏感型玉米幼苗在无 Zn 和低 Zn 条件下,根冠比变化幅度很小,而在充分供 Zn 时,可能由于供 Zn 解除了缺 Zn 对根系的胁迫,对地上部起到了明显的促进作用,根冠比明显下降;非敏感型玉米在供 Zn 条件下根冠比没有明显的变化,而一旦充分供 Zn,根冠比则会显著上升。虽然在不同的供 Zn 水平下,根冠比会发生变化,但无 Zn 和低 Zn 条件下,敏感型玉米幼苗的根冠比高于非敏感型。这表明在判断玉米的缺 Zn 敏感型时,用根冠比作为判断指标具有重要意义。

一般认为,筛选不同基因型要经过盆栽试验和大田试验 2 个阶段,以大田试验作为对盆栽试验的验证。Hossain 等^[15]通过 3 年的大田试验成功筛选出了 Zn 高效和 Zn 低效的玉米品种(玉米 Zn 效率为 72%~95%),并认为 Zn 效率高于 90%的为高效型,而低于 80%为低效型。这个划分标准为玉米 Zn 效率的认定提供了一个依据。本试验所使用的品种是经过 2 次砂培试验筛选出来的^[10],从试验结果可以看出,筛选试验的结果得到了再次重现。对盆栽筛选试验的多次重复验证,不仅避免了大田试验所带来的工作量大的问题,而且也可以得到满意的结果,适用于对大量品种的筛选比较。在不同供 Zn 水平下,玉米的生长和养分吸收规律截然不同。通过多次重复试验来验证不同品种对缺 Zn 敏感性的差异是完全可行的。另外,远红杰等^[22]采用营养液培养法研究了 5 种基因型玉米自交系对 Zn 敏感性的差异,取得了一些可贵的经验,为今后筛选和研究玉米 Zn 敏感性提供了一条新途径。现在,很多研究都将缺 Zn 敏感性和 Zn 高效性区分得很清楚,但是国际水稻研究所称,Zn 高效水稻品种同时也对 Zn 缺乏有很强的耐性^[23],陈光财等^[24]和王人民等^[24]的试验证实了耐低 Zn 品种同时也是 Zn 高效品种,具有高效品种的共性,耐低 Zn 品种与 Zn 高效品种间存在必然联系^[23,25]。玉米耐低 Zn 品种与 Zn 高效品种之间的关系是否也与水稻一样,还需要进一步研究。

[参考文献]

[1] Ismail C. Enrichment of cereal grains with zinc; Agronomic or

genetic biofortification? [J]. Plant Soil, 2008, 302: 1-17.

[2] Hotz C, Brown K H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control [J]. Food Nutr Bull, 2004, 25: 94-204.

[3] Gibson R S. Zinc; the missing link in combating micronutrient malnutrition in developing countries [J]. Proc Nutr Soc, 2006, 65: 51-60.

[4] Prasad A S. Zinc: Mechanisms of host defense [J]. J Nutr, 2007, 137: 1345-1349.

[5] 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. (in Chinese)

[6] Christie P, Li X L, Chen B D. Arbuscular mycorrhiza can depress translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc [J]. Plant Soil, 2004, 261: 209-217.

[7] 王人民, 杨肖娥. 不同锌离子活度对水稻养分吸收的影响及其基因型差异 [J]. 作物学报, 2001, 27(5): 566-574.

Wang R M, Yang X E. Effect of different Zn²⁺ activities on nutrient absorption of rice (*oryza sativa* L.) and their genotypes difference in zn nutrient [J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(5): 566-574. (in Chinese)

[8] 徐晓燕, 杨肖娥, 杨玉爱. 水稻品种对石灰性土壤缺 Zn 耐性机理的研究 [J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 396-401.

Xiu X Y, Yang X E, Yang Y A. Study on mechanisms of rice cultivars adaptation to zinc deficiency in calcareous soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(3): 396-401. (in Chinese)

[9] 王人民, 陈光财, 张永鑫, 等. 锌离子活度对水稻膜透性的影响及基因型差异 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1114-1118.

Wang R M, Chen G C, Zhang Y X. et al. Genotypic difference in membrane permeability in rice at different Zn²⁺ activities [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(8): 1114-1118. (in Chinese)

[10] Gao X P, Zou C Q, Zhang F S, et al. Tolerance to zinc deficiency in rice correlates with zinc uptake and translocation [J]. Plant and Soil, 2005, 278: 253-261.

[11] Gao X P, Zou C Q, Fan X Y. From flooded to aerobic conditions in rice cultivation: Consequences for zinc uptake [J]. Plant and Soil, 2006, 280: 41-47.

[12] 张福锁. 植物营养生态生理学和遗传学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.

Zhang F S. Genetics and ecophysiology of plant nutrition [M]. Beijin: China Science Tech Publishing House, 1993. (in Chinese)

[13] Ângela M, Pedro R, Anderson R, et al. Efficiency of maize cultivars for zinc uptake and use [J]. Sci Agric, Piracicaba Braz, 2005, 62(3): 264-273.

[14] Subramanian K S, Asokkumar Jegan C B. Response of maize to mycorrhizal colonization at varying levels of zinc and phosphorus [J]. Biol Fertil Soils, 2008, 45: 133-144.