

# 锌污染土壤接种丛枝菌根真菌对玉米苗期生长的影响

申 鸿, 陈保东, 冯 固, 刘 于, 李晓林

(中国农业大学植物营养学开放实验室, 北京 100094)

**摘 要:**通过三个土壤锌水平上的盆栽玉米试验,研究了丛枝菌根真菌在锌污染时对玉米苗期生长的影响。研究表明,即使在土壤锌施入量达  $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,菌根真菌对玉米仍有近 50% 的侵染率,说明菌根真菌对重金属锌具有相当的抗性。锌污染土壤中菌根共生体的建立,明显地改善了植株对磷素的吸收和运输,有助于植株在重金属污染逆境中的生长。更为重要的是,菌根植物在未增加体内锌浓度的前提下,较对照显著提高了叶和根中的锌吸收量,表明菌根植物在重金属锌污染的土壤上具有一定的生物修复作用。

**关键词:**污染修复; 锌; 丛枝菌根真菌; 玉米

**中图分类号:**X172   **文献标识码:**A   **文章编号:**1000 - 0267(2002)05 - 0399 - 04

## Influence of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Maize Growth in a Zinc Polluted Soil

SHEN Hong, CHEN Bao-dong, FENG Gu, LIU Yu, LI Xiao-lin

(Department of Plant Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Pot - test studies were done to show the responses of inoculation of maize with *Glomus caledonium* at different soil Zn levels. It was shown that arbuscular mycorrhizal fungus was highly Zn - tolerant. The infection rate was nearly 50%, even when soil was supplied at a dosage of  $600 \text{ mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The improved growth of mycorrhizal plants on contaminated soils was ascribed to enhanced P uptake. Zn content in leaves and roots of mycorrhizal maize increased significantly while Zn concentration was little different between mycorrhizal and non - mycorrhizal plants. It was suggested that arbuscular mycorrhizal fungi play an important role in heavy metal bioremediation.

**Keywords:** bioremediation; Zn; arbuscular mycorrhizal fungi; maize

重金属污染是造成土壤环境质量下降的重要原因之一。和其它类型污染物相比,重金属的特殊性在于它不能被土壤微生物降解而从环境中彻底消除<sup>[1]</sup>,当其在土壤中积累到一定程度时就会对土壤 - 植物系统产生毒害和破坏作用。而且,重金属还可能通过生物的富集作用,经食物链传递危及人类健康<sup>[3]</sup>。正是由于土壤重金属污染问题的严重性和普遍性,对重金属污染土壤修复问题的研究已成为当今农业、生态和环境科学领域研究的重要内容。

作为自然界中分布极其广泛的一类土壤真菌

——菌根真菌,具有独特的生物学特性,对其生理、生态等方面的研究已有许多成果,并在造林、园艺、果树、农作物等生产实践中显示出良好的应用前景。在重金属污染的生物修复中,菌根的潜在作用已日益为人们所重视。丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是菌根真菌的重要组成部分之一,它能与绝大多数的高等植物(主要是草本植物及少部分木本植物)形成共生体系<sup>[14]</sup>。它的根外菌丝能向土壤中广泛伸展,形成根外菌丝网,有利于吸收土壤中的矿质养分,并在根际生态系统中起着多种重要作用。许多研究表明,在逆境条件下,丛枝菌根能通过扩大根系吸收范围、活化土壤养分、增强植物抗性等多种机制,显著促进寄主植物生长<sup>[9-12]</sup>。

自 Mosses 1957 年在苹果幼苗上发现丛枝菌根真菌能提高植物对微量元素的吸收以来,相关的研究已受到植物营养学工作者的广泛重视,但前期工作主要

收稿日期: 2002 - 01 - 07

基金项目: 国家自然科学基金(40071050); 国家重点基础研究规划项目(G1999011807)

作者简介: 申 鸿(1964—),男,西南农业大学资源环境学院讲师,植物营养学在职博士。

通讯联系人: 李晓林(lxl@mx.cei.gov.cn)

集中在作为微量元素的重金属缺乏等方面的研究,而关于丛枝菌根真菌对土壤中过量重金属如  $Mn^{[13]}$  的吸收,特别是对作为污染物的重金属如  $Cd^{[5, 7, 15-17]}$ 、 $Zn^{[5-7, 17]}$ 、 $Cu^{[17]}$ 、 $Pb^{[7, 17]}$  等的生物修复则是近年的研究重点。但就丛枝菌根对宿主植物吸收重金属元素的影响而言,相关的研究结果分歧较大,对其作用机理尚不十分明确<sup>[2, 8]</sup>。

本文旨在通过接种丛枝菌根真菌后,对宿主植物(玉米)在锌污染土壤中生长及营养状况(磷素营养)等的研究,考察丛枝菌根真菌-宿主植物共生体系在土壤重金属污染条件下进行生物修复的可能性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 供试菌种

真菌菌种 *Glomus Caledonium*, 由中国科学院南京土壤研究所提供。以玉米为宿主盆栽扩繁,将含有寄主植物根段、菌根真菌孢子及根外菌丝的根际土为接种剂。

#### 1.1.2 供试作物

玉米 (*Zea mays*, 农大 108)。播种前用 10%  $H_2O_2$  对种子进行表面消毒 10 min, 去离子水漂洗数次,于室温下催芽。

#### 1.1.3 供试金属元素

重金属元素锌 ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ), 采用分析纯化学试剂。

#### 1.1.4 培养基质

低养分含量的砂土和粘土按 3:1(体积比)比例混合使用,使用前过 1 mm 筛。基本理化性状见表 1。

表 1 试验土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soils studied

土壤质地	土壤来源	pH	速效磷(01sen-P) /mg · kg <sup>-1</sup>	土壤有效锌 /mg · kg <sup>-1</sup>
沙土	北京卢沟桥	8.67	2.37	0.24
粘土	河北唐山	7.6	9.74	1.36
混合土壤		8.18	3.96	0.44

土壤及细砂(过 1 mm 筛)、粗河砂(粒径 1—3 mm)等培养基质在装盒前均经高温高压蒸汽灭菌(121 °C, 2 h),晾干。

#### 1.1.5 培养容器及实施

可容 2.5 kg 土的塑料盆。播种前向土壤中施入  $NH_4NO_3$ 、 $K_2SO_4$  和  $KH_2PO_4$  做底肥, N、P、K 肥施量分别为 N: 300 mg · kg<sup>-1</sup>、K: 150 mg · kg<sup>-1</sup>、P: 20 mg ·

kg<sup>-1</sup>。按 10% (m/m) 菌种量接种。

### 1.2 试验设计

重金属 Zn 设 3 个浓度水平: 分别为 0、300、600 mg · kg<sup>-1</sup>。以不接种对照处理, 每处理设重复 3 次, 总计 6 个处理。

### 1.3 装盆、播种、管理、收获和测定

先将 300 g 粗河砂垫盆底, 均匀混肥后土壤 1.5 kg 覆于其上并平整, 两者间用 30 μm 尼龙网分开。200 g 菌根接种剂与沙土混匀装盆, 再覆盖余下 0.5 kg 土。按 15% 量浇水, 待水分渗透均匀后播种。每盆播种 5 粒, 出苗后间留 3 株。

试验于 2001 年 3 月底在中国农业大学资源环境学院植物营养系网室进行。试验周期为 8 周。每天用称重法浇水两次(保证土壤中有 15% 持水量)。

收获时, 各处理的根及茎、叶经清水漂洗, 60 °C—70 °C 烘干, 称重。

植株中微量元素采用干灰化-ICP(等离子电感耦合发射光谱)测定。土壤速效磷采用钼锑抗比色法测定。宿主植物菌根浸染率用酸性品红染色-方格交叉法测定。

### 1.4 数据分析

试验数据结果以 SAS 统计软件进行方差分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同土壤施锌水平下, 接种菌根真菌对玉米生长的影响

不同处理的植株根、茎、叶生物量及菌根浸染率结果见表 2。从生物量可反映出, 土壤锌施入水平的不同(重金属污染程度的不同), 能较为明显地影响玉米植株的生长: 叶、茎、根均在重度土壤锌污染 ( $Zn$  600 mg · kg<sup>-1</sup>) 时表现出生物量最低。

表 2 不同土壤锌水平对植株生物量及菌根浸染率的影响

Table 2 Effects of biomass in different parts of maize and mycorrhizal colonization under various concentrations of zinc added

锌水平 /mg · kg <sup>-1</sup>	接种 处理	叶干重 /g · pot <sup>-1</sup>	茎干重 /g · pot <sup>-1</sup>	根干重 /g · pot <sup>-1</sup>	根冠比 /g · g <sup>-1</sup>	浸染率 /%
0	- M	20.12ab	11.19ab	19.82a	0.63b	0c
	+ M	20.34ab	12.69ab	17.72b	0.54b	76.9a
300	- M	21.94a	13.18a	17.31b	0.49b	0c
	+ M	22.36a	13.19a	17.44b	0.49b	49.6b
600	- M	17.19c	10.23b	12.13d	0.44b	0c
	+ M	18.12bc	9.52b	14.09c	0.51b	46.4b
LSD <sub>0.05</sub>		2.26	1.37	2.19	0.10	9.57

注: -M 代表不接种, +M 代表接种。同一列中标记不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平, 下表同。

无论接种与否,植株的茎、叶均随土壤施锌水平表现出较为一致的变化趋势:从土壤缺锌( $Zn\ 0$ )到中等锌污染( $Zn\ 300\ mg \cdot kg^{-1}$ )程度,干重呈增加趋势;当土壤超过中等锌污染,其生物量呈减少趋势。并且,在相同锌水平上,接种处理间未有显著性差异。

不同土壤施锌水平下,接种菌根真菌对根生物量有明显的影响,这特别表现在不施锌和重度锌污染这两个极端条件下:不施锌土壤中的对照根干重显著高于接种处理;但重度锌污染土壤的情形则正相反,接种处理的根干重显著高于对照。

过去的研究表明<sup>[21]</sup>,当低磷土壤缺锌时,接种菌根真菌有利于宿主植物对营养元素的吸收,并减少光合同化产物向地下部的运输;对照植株为增加根系的生长、扩大根系的吸收面积、维持植株的正常生长,必须向地下部供应更多的同化产物。因此,本试验中对照植株的根干重大于接种处理。

本试验中,当土壤呈重度锌污染时,接种处理的根干重显著大于对照。说明接种菌根真菌后,缓解了重金属对植物的毒害,促进了宿主植物根系的生长,从而保证了植株能在重金属污染胁迫下根的生长和营养元素的吸收;对照则由于缺乏这种“保护”机制,根系因土壤重金属的毒害而使其生长受到更大抑制。

本试验结果表明,在锌施入量为  $300\ mg \cdot kg^{-1}$  时,对菌根浸染率产生了显著抑制作用,但浸染率仍维持在 50% 左右;当继续增加锌施入量到  $600\ mg \cdot kg^{-1}$  水平时,菌根浸染率基本维持不变。说明丛枝菌根真菌对重金属锌污染具有相当的抗性。

## 2.2 不同土壤锌浓度水平对玉米吸收、分配重金属锌的影响

通过对植株锌浓度和锌吸收量的试验结果分析可知(表 3),植株的叶、茎和根的锌浓度在各自接种和未接种处理内,均表现为随土壤施锌水平的提高而相应地显著性提高。此外,在各个土壤施锌水平上,植株锌浓度在接种间也均未达到差异显著水平。

植株体内锌吸收量同样随土壤施锌水平的提高而相应呈现显著提高。在锌  $600\ mg \cdot kg^{-1}$  水平土壤中,玉米叶和根中的锌吸收量均表现出接种处理显著大于对照。

综合研究植株锌浓度和锌吸收量,可发现在重度锌污染土壤中,虽然接种与否间的植株锌浓度没达到显著性差异,但接种处理的玉米叶和根中的锌吸收量显著高于对照。

表 3 不同土壤锌水平接种菌根真菌对玉米植株中锌浓度( $mg \cdot kg^{-1}$ )和锌吸收量( $mg$ )的影响

Table 3 Effects of Zn concentration and uptake of maize under various concentrations of zinc added

锌水平 / $mg \cdot kg^{-1}$	接种 处理	植株锌浓度			植株锌吸收量		
		叶	茎	根	叶	茎	根
0	-M	15.14c	11.11ac	29.71c	0.30c	0.11d	0.60d
	+M	47.66c	11.65c	22.83c	0.95c	0.15d	0.41d
300	-M	233.03b	447.65b	750.66b	5.12a	5.92c	12.95c
	+M	217.25b	492.07b	770.00b	4.86c	6.47bc	13.37c
600	-M	468.60a	808.60a	1474.99a	8.06b	8.27a	17.83b
	+M	497.80a	794.93a	1447.38a	9.02a	7.62ab	20.40a
LSD <sub>0.05</sub>		54.25	100.6	108.47	1.27	1.55	2.05

经分析比较,还发现本试验在三个施锌水平的植株地上部的叶和地下部根中的锌浓度和锌吸收量的变化趋势较为特殊。

当土壤缺锌时,无论是锌浓度还是锌吸收量,植株根中均表现为接种处理低于对照,而叶中则正相反,接种低于对照。说明当土壤缺锌时,接种菌根真菌有利于锌作为矿质营养由根向叶的运输。

在土壤中度锌污染时,情况正好与缺锌相反:锌浓度和锌吸收量均是植株根中接种处理高于对照,而叶中则是接种低于对照。说明当土壤出现锌污染后,菌根真菌通过“生物稀释作用”<sup>[81]</sup>减少了作为重金属污染物的锌由根向叶运输,从而对地上部尤其是叶的正常生长起保护作用。

在土壤重度锌污染时,玉米植株叶中锌浓度和锌吸收量仍然是接种高于对照,但与缺锌土壤不同,其根中的锌吸收量是接种高于对照,而锌浓度却是接种低于对照。说明在重金属锌重度污染时,菌根真菌一方面增强了植株体内锌向叶中的运输和积累,另一方面通过促进植株根(菌根)的生长,在增加了锌在根中的累积(锌吸收量增加)的同时,较未受菌根真菌浸染的植株降低了锌在根中的浓度,因此保证了植株根系在重金属胁迫条件下的相对正常生长。菌根的这种在重度重金属污染土壤上所表现出的明显的“解毒”作用<sup>[17]</sup>,体现了丛枝菌根真菌的浸染对宿主植物在重度重金属污染土壤上生长的保护作用。

## 2.3 不同土壤锌水平下,接种菌根真菌对玉米吸收磷的影响

接种菌根真菌对植株磷素营养的影响结果见表 4。在三个土壤施锌水平上,植株体内磷浓度一致地反映出接种处理显著高于对照。并且,在土壤重度锌污染时,接种处理的植株根、茎、叶的磷浓度在各自处理中均为最高,而该土壤施锌水平对照处理的植株磷浓

表4 不同土壤锌水平接种菌根真菌对植株磷浓度和磷吸收量的影响

Table 4 Effects of P concentration (%) and uptake (g) of maize under various concentrations of zinc added

锌水平 /mg · kg <sup>-1</sup>	接种 处理	磷浓度/%			磷吸收量/g			磷吸收总量 /g
		叶	茎	根	叶	茎	根	
0	- M	0.1c	0.09d	0.08d	1.94cd	0.95d	1.54c	4.43d
	+ M	0.13b	0.11b	0.11b	2.60b	1.42b	1.98ab	6.00b
300	- M	0.10c	0.10cd	0.09c	2.19c	1.30bc	1.52c	5.02c
	+ M	0.13b	0.12b	0.12b	2.98a	1.54ab	2.02a	6.53a
600	- M	0.10c	0.10bc	0.08c	1.78d	1.05cd	1.03d	3.86e
	+ M	0.15a	0.18a	0.13a	2.67b	1.72a	1.84b	6.22ab
LSD <sub>0.05</sub>		0.01	0.01	0.01	0.26	0.3	0.16	0.38

度与其它两个土壤施锌水平对照处理相比却无较大变化。

植株磷吸收量也显示出, 在三个土壤施锌水平上, 叶、茎和根的植株磷吸收量也是体现了接种处理显著高于对照的现象。

从植株磷吸收总量看, 凡是接种菌根真菌的处理, 植株体内磷吸收总量均达到或超过 6 g, 且在三个土壤施锌水平上差异不十分显著; 而对照组中, 一则磷吸收总量显著低于接种处理, 二则体现在三个土壤施锌水平上彼此间也存在着显著差异。

分析植株磷浓度和磷吸收量, 可发现因接种菌根真菌显著改善了植株体内的磷素营养状况。这有助于宿主植物在低磷的重金属污染土壤上的生长, 从而增强了植株对重金属锌的抗性, 因此, 在磷有效性低的重金属污染土壤上, 菌根浸染通过改善植物的磷营养状况而强化生物修复的效率是至关重要的原因。

### 3 结论

本试验结果证明, 菌根真菌对土壤中重金属锌污染具有一定的抗性。同时, 菌根共生体的建立能在重金属污染土壤上明显改善植株磷素营养供应状况, 促进植株在重金属逆境胁迫下的生长, 从而提高了植物对土壤锌污染毒害的抗性。菌根共生体还能通过菌根的“生物稀释作用”, 缓解重金属元素对植物的毒害, 与对照相比, 在重度锌污染时, 接种处理在不增加植株体内锌浓度的同时, 显著提高了植物叶和根中的锌吸收量。所以, 接种菌根真菌有助于将重金属污染物锌从土壤中高效移出, 达到生物修复的目的。因此, 菌根真菌对重金属污染土壤的生物修复具有重要的生态学意义。

#### 参考文献:

[1] 樊邦棠. 环境化学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991. 1 711 - 1 719.

[2] 李晓林, 冯 固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001.

[3] 宋 静, 朱荫渭. 土壤重金属污染修复技术[J]. 农业环境保护, 1998, 17(6): 271 - 273.

[4] 陶红群, 李晓林, 张俊铃. 不同加 Cd 水平下丛枝菌根对三叶草生长和元素吸收的影响[J]. 应用环境与生态学报, 1997, 3(3): 263 - 267.

[5] 陶红群, 李晓林, 张俊铃. 丛枝菌根菌丝对重金属元素 Zn 和 Cd 吸收的研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 545 - 548.

[6] Denny HJ and Ridge I. Fungal slime and its role in the mycorrhizal amelioration of zinc toxicity to higher plants[J]. *New Phytol*, 1995, 130: 251 - 257.

[7] Diaz G, et al. Influence of arbuscular mycorrhizae on heavy (Zn and Cd) uptake and growth of *Lygeum spartum* and *Anthyllis cytisoides*[J]. *Plant and Soil*, 1996, 180: 241 - 249.

[8] Leyval C, et al. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects[J]. *Mycorrhiza*, 1997, 7: 139 - 153.

[9] Li X L, et al. Extension of the phosphorus depletion zinc in VAM white clover in a calcareous soil[J]. *Plant Soil*, 1991, 136: 41 - 48.

[10] Li X L, et al. Phosphorus depletion and pH decrease at the root - soil and hyphae - soil interfaces of VAM white clover fertilized with ammonium [J]. *New Phytol*, 1991, 119: 397 - 404.

[11] Li X L, et al. Acquisition of phosphorus and copper by VAM hyphae and root to shoot transport in white clover[J]. *Plant Soil*, 1991, (136): 49 - 57.

[12] Li X L, et al. Phosphorus acquisition of VA mycorrhizal hyphae from compacted soil in clover[J]. *Mycorrhiza*, 1997, 7: 139 - 157.

[13] Medeiros CAB, et al. Effects of excess manganese on mineral uptake in mycorrhizal sorghum[J]. *Plant Nutr*, 1994, 17(12): 2 203 - 2 219.

[14] Smith F A and Smith S E. Structural diversity in (vesicular) - arbuscular mycorrhizal symbioses[J]. *New Phytol*, 1997, 137: 373 - 388.

[15] Weissenhorn I, et al. Cd - tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy - metal polluted soils[J]. *Plant and Soil*, 1993, 157: 247 - 256.

[16] Weissenhorn I, et al. Root colonization of maize by a Cd - sensitive and a Cd - tolerant *Glomus mosseae* and cadmium uptake in sand culture[J]. *Plant and Soil*, 1995, 175: 233 - 238.

[17] Weissenhorn I, et al. Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy metal uptake by maize (*Zea mays* L.) in pot culture with contaminated soil[J]. *Mycorrhiza*, 1995, 5: 245 - 251.