

丛枝菌根真菌 (*Glomus intraradices*) 对铜污染土壤上玉米生长的影响

杨秀梅^{1,3}, 陈保冬², 朱永官², 王冬梅^{1,*}, 王幼珊⁴

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 沃德兰特(北京)生态环境技术研究院, 北京 100080; 4. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100089)

摘要:盆栽试验研究了不同土壤施 Cu 水平(0、50、200 mg/kg)下,接种不同来源的两个丛枝菌根真菌 *Glomus intraradices* 菌株对玉米生长、Cu、P 以及微量元素 Fe、Mn、Zn 吸收的影响。结果表明:接种菌根真菌显著提高了玉米的生物量,增加了玉米植株 P 浓度和吸收量;随着施 Cu 水平提高,各处理根系 Cu 浓度显著增加。各施 Cu 水平下玉米根系 Cu 浓度远远高于地上部分 Cu 浓度,同一施 Cu 水平下接种处理根系 Cu 浓度要显著高于对照;尤其在 200 mg/kg 施 Cu 水平下,接种处理根系 Cu 浓度大约是地上部分的 45~58 倍,对照根系 Cu 浓度大约是地上部分的 12 倍。总体上,试验条件下两个菌株对玉米的接种效应没有明显差异。试验表明丛枝菌根对重金属 Cu 有较强的固持作用,这可能是菌根减轻宿主植物 Cu 毒害的一个重要机制。

关键词:丛枝菌根真菌(*Glomus intraradices*);玉米;铜

文章编号:1000-0933(2008)03-1052-07 中图分类号:Q142,X171 文献标识码:A

Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus intraradices*) on growth and mineral nutrition of maize plants in copper contaminated soils

YANG Xiu-Mei^{1,3}, CHEN Bao-Dong², ZHU Yong-Guan², WANG Dong-Mei^{1,*}, WANG You-Shan⁴

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil & Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Water and Land Eco Environment Technology Institute, Beijing 100080, China

4 Institute of Plant Nutrition & Resources, Beijing Academy of Agriculture & Forestry Sciences, Beijing 100089, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1052 ~ 1058.

Abstract: In a pot experiment effects of inoculation with two strains of AM fungus *Glomus intraradices* on growth, Cu and P uptake and mineral nutrition of maize plants under different Cu addition levels were investigated. The results indicated that mycorrhizal inoculation significantly increased dry weights and P uptake of maize plants. Root Cu concentrations markedly increased with increasing Cu addition levels. For all treatments, root Cu concentrations were significantly higher than shoot Cu concentrations, while under each Cu addition level root Cu concentrations of inoculated plants were significantly higher than those of uninoculated controls. Under Cu addition level of 200 mg/kg, root to shoot ratio of Cu concentration in

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40401031);国家林业科技支撑计划专题资助项目(2006BAD03A0301)

收稿日期:2007-04-28; **修订日期:**2008-01-10

作者简介:杨秀梅(1981~),女,山西繁峙人,硕士生,主要从事工程绿化研究. E-mail: xmy0929@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dmwang@bjfu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40401031), and Program topics of Forestry Science & Technology, China "new materials, new products and application technology of engineering afforestation in Difficulties Site" (No. 2006BAD03A0301)

Received date: 2007-04-28; **Accepted date:** 2008-01-10

Biography: YANG Xiu-Mei, Master candidate, mainly engaged in revegetation engineering. E-mail: xmy0929@126.com

inoculated plants was 44—48, in contrast to 12 for uninoculated plants. In general, no obvious differences were found in the inoculation effects between the two fungal strains. The experiments demonstrated that arbuscular mycorrhiza could effectively retain Cu in plant roots, which may be one of the key mechanisms for the alleviation of Cu phytotoxicity by mycorrhizal associations.

Key Words: arbuscular mycorrhizal fungi; maize; copper

20 世纪 80 年代 Bradly 等人^[1]在重金属矿区植物调查中发现,矿区中菌根植物的生长情况明显好于非菌根植物。随后许多研究者通过试验研究发现,在重金属(Zn、Cd、Cu)污染情况下,丛枝菌根真菌侵染植物可以降低宿主植物地上部分的重金属浓度,从而提高重金属元素对植物毒害的抗性^[2~5]。而且国外研究人员已从重金属污染土壤中筛选出了耐重金属 Zn 及 Cd 的丛枝菌根真菌菌株^[6,7],指出分离自污染土壤中的菌株与普通土壤中的菌株相比,表现出了更强的耐重金属性,同时有效地阻止了重金属向植株地上部的转移。

基于以上研究,本试验模拟了由低到高 3 个土壤施 Cu 水平,研究了接种分离自铜尾矿和无污染土壤中的丛枝菌根真菌 *Glomus intraradices* 对玉米生长、P、以及重金属 Cu 的吸收影响,探讨分离自铜尾矿的丛枝菌根真菌 *Glomus intraradices* 与分离自普通土壤上的丛枝菌根真菌 *Glomus intraradices* 相比,是否具有更强的耐 Cu 性,是否能够更有效的阻止重金属 Cu 向植株地上部分的运输。同时试验也分析了菌根玉米对微量重金属矿物质(Fe、Zn、Mn)的吸收影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

培养基质 供试土壤取自于中国科学院遗传与发育研究所长期定位试验站,其基本理化性状为,pH 8.26(水:土=2.5:1),速效磷为 2.88 mg/kg,速效钾 62 mg/kg,全 Cu 27.97 mg/kg,DTPA 可提取的 Fe 8.07 mg/kg;Mn 5.91 mg/kg;Cu 1.35 mg/kg;Zn 0.86 mg/kg(ICP-OES,Optima2000DC,Perkin-Elmer Co U. S. A 测定)。供试土壤风干后,过 2 mm 筛,电离辐射灭菌(25 KGy,北京大学第三医院)。

供试作物 供试作物为玉米(农大 108),播种前用 10% H₂O₂ 对种子进行表面消毒大约 10min,然后用去离子水清洗,在 25℃ 恒温培养箱催芽,种子露白大约 1cm 左右播种。

供试菌种 供试的丛枝菌根真菌为分离自无污染土壤中的 *Glomus intraradices* 及分离自安徽铜陵铜尾矿的 *Glomus intraradices*,两个菌株文中分别用 M1 和 M2 表示。菌剂由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供,菌剂为含有真菌孢子、菌丝以及被侵染的宿主植物根段的根际砂土。

土壤中添加的重金属 Cu 为化学试剂 CuSO₄·5H₂O(分析纯)溶液。

1.2 试验设计

试验设 3 个施 Cu(CuSO₄·5H₂O)水平,分别为 0、50、200 mg/kg(以 Cu0、Cu50、Cu200 表示)。每个施 Cu 水平下设不接种 - M,接种菌剂 M1(+M1),接种菌剂 M2(+M2),3 个处理,每个处理重复 4 次,共 36 盆。

试验所用容器为 1.5L 的塑料盆,为了避免其它污染,在装土前内衬塑料袋。每盆装土 1.5 kg,以溶液形式向土壤中加入基础肥料:N(NH₄NO₃)90 mg/kg、K(K₂SO₄)150 mg/kg、P(KH₂PO₄)20 mg/kg,以及适量的微量元素,加入肥料后混合均匀,平衡一周。接种处理每盆加菌剂 60g,对照加入等量的灭菌菌剂,与土壤充分混和后装盆,浇水使土壤含水量达到 15%。选出芽在 1cm 左右颗粒饱满的种子,每盆播种 4 粒。出苗 4d 后间苗,每盆留长势相近的 2 棵。

试验在中国科学院生态环境研究中心控温温室进行,温度控制在 25℃ 左右,自然采光。为了保证植物生长期间不受缺 N、K 营养的胁迫,在植物生长期追施 N、K 肥各两次,第 1 次 N、K 各 50 mg/kg,第 2 次 N 50 mg/kg、K 30 mg/kg。试验期间采用称重浇水的方法维持土壤的含水量在 15%。

1.3 试验收获及样品制备与分析

植物生长 6 周后收获,先将玉米地上部分自茎基部剪下,洗净,烘干,称重。根系用去离子水洗净,剪成 1

cm 左右的根段,随机取 0.7 g 左右测菌根侵染率,其余的烘干,称重。植物样品烘干称重后粉碎,称取 0.3 g 左右的样品用 5 ml 的 HNO_3 和 HClO_4 混合酸 ($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4 = 4:1$) 160°C 消煮,制备待测溶液。

菌根侵染率采用曲利苯蓝染色-直线截获法测定^[8]。利用等离子体电感耦合发射光谱仪 (ICP-OES, Optima2000DC, PerkinElmer Co U. S. A) 测定植物样品中的 P、Fe、Mn、Cu、Zn 元素的浓度。

应用 SPSS11.5 统计软件对试验数据进行统计分析,5% 水平下 LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 菌根侵染率和植株生长情况

由表 1 可知,在对照中,未发现有菌根真菌侵染。同一施 Cu 水平 (Cu0、Cu200) 下,接种 M1 和 M2 处理之间无显著差异。同时随着土壤施 Cu 水平的提高,接种 M1 和 M2 各自处理之间玉米根系的菌根侵染率都无显著变化,表明施 Cu 并没有影响菌根菌 M1 和 M2 对玉米根系的侵染。

表 1 不同处理下玉米的生物量、根冠比和菌根侵染率

Table 1 Dry weight, root to shoot ratio, and percentage root colonized of maize plants under different treatments

施 Cu 水平 Cu level (mg/kg)	接种处理 Treatment	生物量 Biomass (干重 Dry weight)		根冠比 Root/shoot	侵染率 (%) Percentage root colonized
		地下部分 Root (g/ pot)	地上部分 Shoot (g/ pot)		
0	- M	0.71e	1.61e	0.45bc	0
	+ M1	2.55b	5.75b	0.44c	37a
	+ M2	2.43bc	5.76b	0.42c	29ab
50	- M	0.79e	1.44e	0.55a	0
	+ M1	2.97a	6.75a	0.44c	34a
	+ M2	2.28bcd	5.31bc	0.43c	24b
200	- M	0.79e	1.33e	0.59d	0
	+ M1	1.95d	4.46d	0.47bc	32ab
	+ M2	2.18cd	4.69cd	0.48bc	27ab

表中数据为 4 次重复的平均值;同一列中数值标注不同字母表示在 5% 显著水平差异显著,下同 Different letters following means in one column indicate significant difference by LSD test ($p < 0.05$); the same below

植物生长方面,对于同一施 Cu 水平而言:接种处理植株生物量要显著高于对照;2 个接种处理之间,除了在 Cu50 水平下接种 M1 处理根系、地上生物量显著高于接种 M2 处理外,其余两个施 Cu 水平下差异不显著。而对于不同施 Cu 水平,各处理玉米生物量的变化为:对照之间玉米根系、地上部分生物量都无显著变化;接种 M1 处理 Cu50 水平下玉米根系、地上部分生物量显著高于 Cu0 和 Cu200 水平,Cu200 水平下玉米根系、地上部分生物量显著低于 Cu0;接种 M2 处理根系部分生物量差异不显著,地上部分生物量在相邻施 Cu 水平下差异不显著,但施 Cu200 水平要显著低于施 Cu0 水平。说明尽管接种菌根真菌 M1 和 M2 可以促进植物的生长,但是土壤中高浓度的 Cu 会抑制菌根玉米的生长,而且对接种 M1 处理玉米生长的不利影响较为显著。

从根系、地上部分生物量来看,土壤施 Cu 浓度的增加对玉米生长并没有显著影响,但是从根冠比看,随着土壤 Cu 浓度的增加,对照根冠比显著增加,说明高浓度的 Cu 对非菌根玉米地上部分生长产生了抑制作用。

2.2 不同处理对玉米吸收 Cu 的影响

由表 2 可以看出,随着施 Cu 水平的提高,无论是对照还是接种处理,玉米根系中的 Cu 浓度和吸收量都呈显著上升趋势;但同一施 Cu 水平下 (Cu50、Cu200),接种处理植株根系 Cu 浓度和吸收量要显著高于对照,接种处理根系 Cu 浓度大约是对照的 2 倍左右,而根系 Cu 吸收量大约是对照的 6~7 倍。说明菌根可以显著提高玉米根系对重金属 Cu 的吸收能力,尤其在土壤 Cu 浓度相对较高情况下。

表 2 不同处理下玉米植株 Cu 浓度和吸收量

Table 2 Cu concentration and uptake of maize shoots and roots under different treatments

施 Cu 水平 Cu level	接种处理 Treatment	Cu 浓度 (mg/kg) Cu concentration (mg/kg)		Cu 吸收量 (μg/pot) Cu uptake (μg/pot)	
		地下部分 Root	地上部分 Shoot	地下部分 Root	地上部分 Shoot
0	- M	19.46d	7.36c	12.98e	11.74f
	+ M1	36.22d	6.01cd	91.86de	34.59cd
	+ M2	36.98d	4.80d	90.17de	28.67d
50	- M	87.15c	10.88b	69.47de	15.58ef
	+ M1	145.79b	6.39cd	438.26c	43.08a
	+ M2	158.57b	6.38cd	364.48c	33.81cd
200	- M	178.40b	15.28a	139.42d	21.40e
	+ M1	420.03a	9.34bc	805.41b	41.53ab
	+ M2	452.28a	7.74c	991.04a	36.11bc

随着施 Cu 量的增加,对照地上部分 Cu 浓度和 Cu 吸收量显著增加,大约提高了 1 倍,而接种处理 Cu 浓度和吸收量变化幅度小于对照。在同一施 Cu 水平下 (Cu50、Cu200),接种处理地上部分 Cu 浓度显著低于相应的对照,而接种 M1 和 M2 处理之间差异不显著,接种处理的地上部分 Cu 吸收量显著高于对照,主要是由于菌根植株地上生物量较大。

进一步分析接种处理与对照玉米体内 Cu 浓度和吸收量的变化可以发现:随着土壤施 Cu 量的增加,各处理玉米根系与地上部分 Cu 浓度的比值也在逐渐增加,对照由 3 上升到了 12,接种 M1 处理由 6 上升到了 45,接种 M2 处理由 8 上升到了 58;根系与地上部分 Cu 吸收量的比值变化,对照由 1 上升到了 7,接种 M1 处理由 3 上升到 19,接种 M2 处理由 3 上升到 27。

由上述可以看出,接种菌根真菌极大地提高了玉米根系中 Cu 浓度和吸收量,而相应的地上部分 Cu 浓度和吸收量变化不显著,这表明丛枝菌根有助于 Cu 在根系中的吸持,而消减了由根系向地上部分的运输,从而将大量的 Cu 素滞留在了菌根共生体中^[9]。

2.3 不同处理对玉米吸收 P 的影响

由表 3 可以看出,随着土壤施 Cu 水平的提高,对照之间玉米根系、地上部分 P 的浓度和吸收量都没有显著差异,而与对照相比接种 M1 和 M2 处理显著提高了玉米植株 P 的浓度和吸收量。在不同施 Cu 水平下,接种 M1 处理和 M2 处理玉米 P 浓度的变化为:随着施 Cu 量的增加,接种 M1 处理玉米无论是根系还是地上部分 Cu 浓度都无显著变化;接种 M2 处理根系、地上 P 浓度呈上升趋势。在同一施 Cu 水平下,除了 Cu0 水平下接种 M1 处理根系、地上部分 P 浓度显著高于接种 M2 处理外,其余两个水平接种处理之间差异不显著。

表 3 不同处理玉米植株 P 浓度和吸收量

Table 3 P concentration and uptake of maize shoots and roots under different treatments

施 Cu 水平 Cu level	接种处理 Treatment	P 浓度 (%) P concentration (%)		P 吸收量 (mg/pot) P uptake (mg/pot)	
		地下部分 Root	地上部分 Shoot	地下部分 Root	地上部分 Shoot
0	- M	0.07d	0.06d	1.12c	0.41c
	+ M1	0.14ab	0.13a	8.21a	3.27a
	+ M2	0.11c	0.11c	6.24b	2.64b
50	- M	0.07d	0.06d	0.96c	0.51c
	+ M1	0.12bc	0.12bc	8.41a	3.49a
	+ M2	0.12ab	0.12bc	6.37b	2.83b
200	- M	0.07d	0.07d	0.99c	0.48c
	+ M1	0.14a	0.13ab	6.02b	2.55b
	+ M2	0.13ab	0.13ab	6.31b	2.77b

其次从 P 吸收量变化来看:在 Cu0、Cu50 水平下,接种 M1 处理玉米根系、地上部分显著高于接种 M2 处理;土壤施 Cu200 水平时,接种 M1 处理和接种 M2 处理之间无差异。试验数据显示,随着土壤施 Cu 浓度的增加,接种 M1 处理植株 P 含量呈下降趋势,而接种 M2 处理之间无明显变化。

通过以上分析可以看出在低浓度 Cu 水平下(Cu0, Cu50),与接种 M2 处理相比接种 M1 处理对于玉米 P 的吸收有一定的优势,但随着 Cu 浓度增加,这种优势在减弱。

2.4 不同处理对玉米吸收微量元素 Fe、Zn 和 Mn 的影响

由表 4 可以看出,同一施 Cu 水平下,接种菌根植株根系中 Fe 浓度显著高于对照,对应的接种处理之间差异不显著;而地上部分 Fe 浓度正好相反,表现为对照高于接种处理。

表 4 不同处理玉米植株中 Fe、Zn、Mn 的浓度

Table 4 Fe, Zn and Mn Concentration of maize shoots and roots under different treatments

施 Cu 水平 Cu level	接种处理 Treatment	Fe 浓度 Fe concentration (g/kg)		Zn 浓度 Zn concentration (mg/kg)		Mn 浓度 Mn concentration (mg/kg)	
		地下部分 Root	地上部分 Shoot	地下部分 Root	地上部分 Shoot	地下部分 Root	地上部分 Shoot
0	- M	6.57d	0.28b	33.30d	19.01cb	78.58bd	119.63bd
	+ M1	26.60ab	0.19cd	178.81ab	13.71d	102.43abd	102.87d
	+ M2	26.43ab	0.18d	228.44a	30.75a	110.40abd	106.41d
50	- M	9.89d	0.28b	46.93d	15.15cd	93.53bd	113.78bd
	+ M1	29.36a	0.18d	208.62a	10.64de	112.81abd	117.65bd
	+ M2	27.18a	0.18d	214.41a	25.33ab	140.63a	115.97bd
200	- M	7.12d	0.39a	31.03d	18.13cb	75.35d	146.46a
	+ M1	19.70bc	0.20cd	140.60b	7.27e	136.01a	129.15ab
	+ M2	19.40c	0.16d	161.72ab	24.06b	119.32ab	127.88b

随着施 Cu 水平的提高,接种处理根系 Fe 浓度呈先上升后下降的趋势,而地上部分差异不显著;对照之间根系 Fe 浓度在施 Cu0、Cu50 水平之间无差异,但在施 Cu200 水平时达到了最大值 0.39 mg/kg,显著高于其他处理。

结合图 1 看,不同施 Cu 水平下,接种处理根系与地上部分 Fe 浓度比在 100 ~ 160 之间,而对照在 40 以下,与对照相比接种菌根抑制了 Fe 素向植株地上运输,说明丛枝菌根在增加植株 Fe 吸收的同时,使大量的 Fe 素主要集中在了宿主植物的根系。

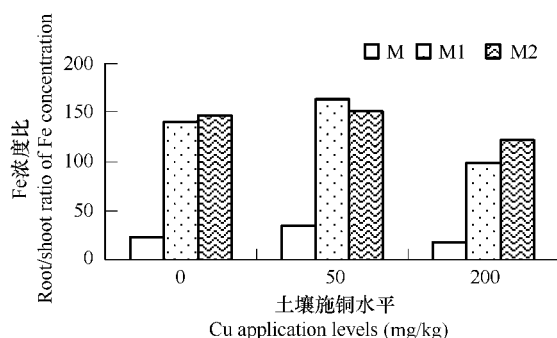


图 1 不同处理玉米地下与地上部分 Fe 浓度比

Fig. 1 Root to shoot ratio of Fe concentrations in maize plants

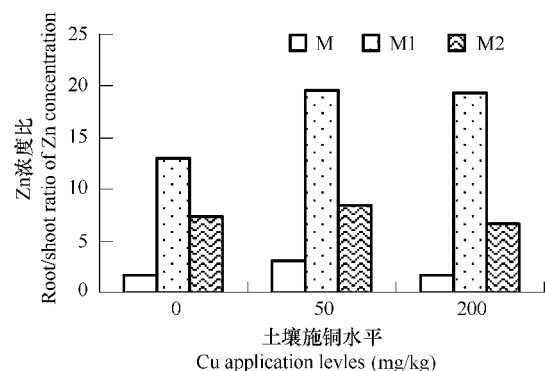


图 2 不同处理玉米地下与地上部分 Zn 浓度比

Fig. 2 Root to shoot ratio of Zn concentrations in maize plants

表 4 表明,同一施 Cu 水平下,接种处理玉米根系 Zn 浓度显著高于对照,大约是对照的 4 ~ 7 倍,接种处理间差异不显著;而且不施 Cu 水平之间,对照之间无差异,接种处理之间差异也不显著。地上部分 Zn 浓度在

接种之间表现却截然不同,同一施 Cu 水平下,接种 M2 植株地上部分 Zn 浓度显著高于接种 M1 处理和对照,而接种 M1 处理显著又低于对照。

结合图 2 看:接种 M1 处理,根系 Zn 浓度约为地上部分的 13 ~ 17 倍;接种 M2 处理,根系 Zn 浓度约为地上部分的 7 ~ 8 倍;对照根系 Zn 浓度约为地上的 2 ~ 3 倍。

总体上看接种处理植株根系 Mn 浓度高于对照,接种处理之间差异不显著,对照之间也不显著(表 4);在施 Cu0 和 Cu50 水平下,各处理之间地上部分 Mn 浓度无显著差异;在施 Cu200 水平,无论是接种处理还是对照地上部分 Mn 浓度都高于其他两个水平,尤其是对照达到了所有处理的最大值 146.46mg/kg。

比较植株根系与地上的 Mn 浓度比(图 3)发现:对照中根系与地上部分 Mn 浓度比在 0.5 ~ 0.8;接种 M1 处理和 M2 处理根系与地上部分 Mn 浓度比为 0.9 ~ 1.2。

3 结论

试验结果显示:在不同的土壤施 Cu 浓度下,接种丛枝菌根真菌(*Glomus intraradices*)显著提高了玉米的生物量和对 P 的吸收能力。但是土壤中高浓度的 Cu 会抑制菌根玉米的生长,同时也抑制了非菌根玉米根系的生长。

从 Cu 的吸收来看,在高浓度施 Cu 水平下,接种菌根真菌 *Glomus intraradices* 显著增加了玉米根系中的 Cu 浓度,但相应的却降低了植物地上部分的 Cu 浓度,说明丛枝菌根真菌(*Glomus intraradices*)侵染的植物根系对重金属 Cu 有较强的固持效果,这与 Carvalho^[10]的试验结果相同,这也可能是菌根减轻宿主植物 Cu 毒害的一个重要机制。同时菌根的这种固持效应也同样表现在了对于土壤中微量重金属元素 Fe、Zn 的吸收上,接种丛枝菌根真菌在显著促进了玉米微量重金属 Fe、Zn 的吸收的同时,也显著“抑制”了 Fe、Zn 向地上部分的运输,从而把大量的 Fe、Zn 滞留在了根系中。

通过分析接种处理发现在高浓度施 Cu(200)水平下,分离自铜尾矿上的丛枝菌根真菌 *Glomus intraradices* 与无污染土壤 *Glomus intraradices* 相比,并没有表现出显著的耐 Cu 性,也没有显著阻止重金属 Cu 向玉米地上部分的运输。但是试验结果显示,随着施 Cu 水平的提高,接种分离自无污染土壤的 *Glomus intraradices* 处理玉米生物量、植株体内 P 吸收量都显著降低,而接种分离自铜尾矿上的 *Glomus intraradices* 处理玉米生物量、植株体内 P 吸收量都没有显著变化。表明随着土壤 Cu 浓度的升高,对于分离自无污染土壤 *Glomus intraradices* 的“菌根效应”不利影响要大于铜尾矿上的 *Glomus intraradices*。但是当施 Cu 浓度继续升高(大于 200)时,接种分离自铜尾矿的 *Glomus intraradices* 和接种分离自无污染土壤 *Glomus intraradices* 相比,是否会显著缓解菌根玉米对于 Cu 污染的毒害作用,需要进一步的试验研究。

References:

- [1] Wang F Y, Lin X G, Zhou J M. Arbuscular Mycorrhizal and soil remediation. Soil, 2004, 36(3): 251—257.
- [2] Chen B D, Li X L, Tao H Q, et al. The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in alcalcareous soil spiked with various quantities of zinc. Chemosphere, 2003, 50: 839—846.
- [3] Tao H Q, Song Y C, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal infection on growth of red clover at different levels of Zn Pollution. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(3): 81—85.
- [4] Liu Y, Ma Y S, Du C H, et al. Effects of *Glomus intraradices* inoculation on the growth of red fescue and its cadmium accumulation under cadmium contamination. HuBer Agricultural Sciences, 2004, 5: 58—61.

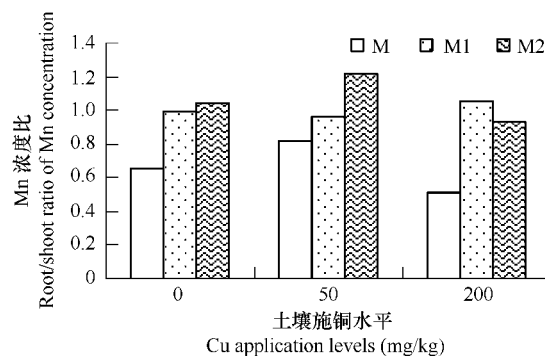


图 3 不同处理玉米地下与地上 Mn 浓度比

Fig. 3 Root to shoot ratio of Mn concentrations in maize plants

- [5] Carvalho L M, Ca ador I, Matins-Loução M A. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance root cadmium and copper accumulation in the roots of the salt marsh plant *Aster tripolium* L. *Plant Soil*, 2006, 285: 161 — 169.
- [6] Hiderbrandt U, Kaldorf M, Bothe H. The zinc violet and its colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Physiol*, 1999, 154: 709 — 717
- [7] Weissenhorn I, Leyval C, Berthelin J. Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy metal polluted soils. *Plant Soil*, 1993, 157: 247 — 25.
- [8] Giovanetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infections in roots. *New Phytologist*, 1980, 84: 489 — 500.
- [9] Shen H, Liu Y, Li X L, *et al.* Influence of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus caledonium*) on maize seedling grown in copper contaminated soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11 (2): 199 — 204.
- [10] Carvalho L M, Cacador I, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi enhance root cadmium and copper accumulation in the roots of the salt marsh plant *Aster tripolium* L. . *Plant Soil*, 2006, 285: 161 — 169.

参考文献:

- [1] 王发园, 林先贵, 周健明. 丛枝菌根与土壤修复. *土壤*, 2004, 36 (3): 251 ~ 257.
- [3] 陶红群, 宋勇春, 等. 不同锌污染水平下丛枝菌根对三叶草生长的影响. *中国农业大学学报*, 1999, 4 (3): 81 ~ 85.
- [4] 刘茵, 马原松, 杜长海, 等. 镉污染环境中丛枝菌根真菌对紫羊茅生长及镉积累的影响. *湖北农业科学报*, 2004, 5: 58 ~ 61.
- [9] 申鸿, 刘于, 李晓林, 等. 丛枝菌根真菌 (*Glomus caledonium*) 对 Cu 污染土壤生物修复机理初探. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (2): 199 ~ 204.