

# 红壤中丛枝菌根真菌对污泥态铜生物有效性的影响\*

廖继佩 林先贵<sup>†</sup> 曹志洪  
(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘 要** 以玉米为宿主植物, 研究了不同污泥量(0、1%、4%)施入红壤后接种丛枝菌根真菌 *Acaulospora laevis*、*Glomus caledonium* 和 *Glomus manihotis* 对菌根侵染率、孢子密度、玉米生长和铜生物有效性的影响。结果表明, 施用 1% 的污泥可增加接种 *A. laevis* 的菌根侵染率和孢子密度, 其玉米地上部和地下部生物量也有显著增加, 而不接种(含土著菌根真菌)、接种 *G. caledonium* 和 *G. manihotis* 的菌根侵染率、孢子密度、玉米地上部和地下部生物量却有显著下降( $p < 0.05$ )。施用 1% 的污泥时接种 *A. laevis* 降低了玉米地上部铜浓度, 而接种 *G. caledonium* 和 *G. manihotis* 却增加了玉米地上部铜浓度, 另外, 接种处理增加玉米根部对铜的吸收总量。不同的菌根真菌对重金属的耐受力是不同的, 只有施入一定的污泥量即在一定污染程度下才能发挥菌根真菌 *A. laevis* 对污染土壤的修复作用。

**关键词** 丛枝菌根真菌, 污泥, 红壤, 铜, 生物有效性  
中图分类号 S154.3

污泥是污水处理的产物, 是一种含水量高、易腐败、有恶臭、呈黑色或黑褐色的流体状或饼状物质, 既含大量有机质和氮、磷等植物营养元素, 同时又含有各种重金属、有机污染物和病原微生物。污泥农用已经为人们广泛采纳, 这不仅是一种廉价的处理方式, 而且可提高土壤的物理性质和营养状况<sup>[1]</sup>。红壤是我国亚热带地区的重要土壤资源。长期以来我国红壤区的低丘岗地由于不合理的开发利用, 导致水土流失, 土壤肥力下降, 以及生物多样性的衰减, 这为污泥农用于红壤提供了广阔的空间。由于重金属不能化学降解以及移动性差, 同时植物对它们吸收量较少, 所以污泥中所含的大量重金属将在土壤中长期存在。红壤的缓冲性能较弱, 再加之红壤是一种酸性土壤, 从而使得其中有毒物质的毒性较高。如江西铜矿和冶炼厂周围土壤和饲料中的 Cu、Zn、Mo 和 Cd 的含量均较高, 农田土壤含铜量最高达  $3755 \text{ mg kg}^{-1}$ , 饲料含铜量最高达  $1573 \text{ mg kg}^{-1}$ , 从而导致该地区的营养状况和繁殖力均较低, 而居民的癌症(特别是肝癌)发病率很高<sup>[2]</sup>。因此对该地区的红壤进行重金属生态环境效应的研究具有十分重要的意义。

丛枝菌根真菌可与许多农作物和花卉作物的根系共生形成菌根, 当土壤中 P、Zn 和 Cu 含量低时这种共生体可促进菌根植物对这些元素的吸收。Boyle 和 Paul<sup>[3]</sup>曾报道, 城市工业污泥处理的土壤中锌浓度与小麦菌根侵染率呈负相关。然而, Arnold 和 Kapustka<sup>[4]</sup>通过田间和盆栽试验发现, 施用含重金属的污泥对丛枝菌根的发育没有影响。Weissenhom 等<sup>[5]</sup>认为土著菌根真菌对高量重金属的耐受力比对高量磷要强, 从而可能是其它因素(如 P)而不是重金属影响着菌根侵染率。由此可见, 污泥施入土壤后重金属对菌根侵染率的影响并不是一致的。Dueck 等<sup>[6]</sup>发现, 泡囊丛枝菌根真菌(VAMF)侵染减轻锌对宿主的毒害, 从而促进植物的生长和减少重金属进入食物链。但是也有人报道 WAMF 可增加重金属对菌根植物的毒害<sup>[7]</sup>。这主要是因为不同研究者所用的宿主植物、污泥仔所含的重金属种类和数量、菌根真菌

\* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011806)和中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环联合开放实验室项目(2992803)资助

- 通讯作者

收稿日期: 2002-03-14; 收到修改稿日期: 2003-07-07

以及土壤类型等试验条件差异所致。为了将菌根真菌应用于植物修复,本试验以玉米为供试植物,通过施不同的污泥量于红壤中来研究三种丛枝菌根真菌的效应,以选出优良的丛枝菌根真菌进行重金属污染土壤的植物修复。

## 1 材料与方 法

所用土壤(红壤表土)采自江西鹰潭中国科学院红壤生态实验站,并经风干,过 2 mm 筛。按 0.087 g kg<sup>-1</sup>和 0.33 g kg<sup>-1</sup>的量分别施入尿素和过磷酸钙。供试土壤的理化性状见表 1。

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Some physical and chemical properties of the soil tested

有机质	碱解氮	有效磷	速效钾	Zn	Cu
O. M.	Alk hydro. N	Olsen-P	NH <sub>4</sub> OAc extractable K	HF-HClO <sub>4</sub> digestion	
(g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	
9.3	50.9	0.7	43.4	0.35	0.44

所用污泥采自苏州污泥厂,黑色,呈流状。先将此污泥风干,初步粉碎后用粉碎机磨碎,过 20 目,混匀备用。所含的重金属主要为铜,其含量为 10 420.6 mg kg<sup>-1</sup>,镉、锌、铅和铬的含量分别为 1.75、1425.3、973.3 和 205.7 mg kg<sup>-1</sup>。有机质含量为 379.7 g kg<sup>-1</sup>,全 N、全磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和全钾(K<sub>2</sub>O)分别为 33.9、30.6、14.0 g kg<sup>-1</sup>,pH 为 6.4。所用丛枝菌根真菌为 *A. laevis* (34)、*G. caledonium* (90036)、*G. manihotis* (38)。以花生为宿主在红壤中进行扩大培养 80d 后的土壤和侵染的根段混合物为接种剂,另以相同重量在烘箱中经 170℃ 灭菌 2 h 的菌剂土壤为对照(NM)。供试植物为玉米(*Zea mays* L.),由南京绿领种苗有限公司提供。经 75% 的酒精浸泡 5 min 后用 3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 灭菌 10 min,再用灭菌水冲洗 4 次,放在灭过菌的石英砂中催芽。挑选大小一致、健壮的幼苗移入钵中,每一钵栽 3 株。试验钵为棕色塑料盆,每一钵装土 1 kg,然后按每盆 0、10、40 g 污泥的量(即 0、1% 和 4%)加入污泥,并充分混匀,平衡 3 周。将接种剂以每盆 40 g 的量加入钵 2/3 处(撒匀,弄平),另以相同重量在烘箱中经 170℃ 灭菌 2 h 的上述接种剂作为对照,即不接种(NM)。

本试验采用完全随机化设计,每个处理 3 次重复,共 3(污泥量:0、1% 和 4%) × 4(接种处理:不接种、接种 34、90036 和 38 号菌) × 3(重复) = 36 盆。平时浇灌自来水,使土壤的含水量为田间持水量的 60%。玉米在温室中自然生长 90 d 后收获。鲜根经 Phillips 法染色后以方格交叉法测菌根侵染率<sup>[8]</sup>,并测定根际土壤的孢子密度。将玉米地上部和地下部用自来水冲洗干净,然后用蒸馏水洗 2 次,经 70℃ 烘 48 h 后称重。土壤有效态铜含量用 0.1 mol L<sup>-1</sup> 的盐酸(土壤:溶液 = 1:10, W/V)浸提,地上部和地下部经不锈钢粉碎机粉碎后用硝酸-高氯酸混酸(5:1, V/V, 均为优质纯)消化,原子吸收法测定铜。试验结果应用 SPSS 10.0 统计软件进行 Duncan 法多重比较。

## 2 试验结果

### 2.1 不同污泥量对菌根真菌的影响

**2.1.1 菌根侵染率** 不施污泥和施用 1% 的污泥时接种 34 号菌的菌根侵染率均最高(图 1)。与不施污泥相比,施用 1% 的污泥显著降低不接种、接种 90036 和 38 号菌的菌根侵染率( $p < 0.05$ ),而接种 34 号菌的菌根侵染率却有所增加,可见,不同的菌根真菌对 1% 的污泥呈现出不同的效应,其中 34 号菌对 1% 污泥有较强的耐受力,这必将影响玉米生长和对铜的吸收。另外,当污泥用量为 4% 时,无论是不接种还是接种丛枝菌根真菌的玉米生长均受到明显的抑制,根部均发黑,没有须根,因此无法测定菌根侵染率,也没有测定根际土壤中菌根真菌的孢子密度。

**2.1.2 孢子密度** 不同污泥量对不同菌根真菌产孢力的影响也是不同的(图 2)。与不施污泥相比,施用 1% 的污泥显著减少不接种、接种 90036 和 38 号菌的孢子密度( $p < 0.05$ ),此时每 10 g 土中的孢子数均只有 1 个左右,而接种 34 号菌的孢子密度却明显增加。可见,1% 的污泥提高了 34 号菌的活性,减弱了土著菌根真菌、90036 和 38 号菌的活性。由图 2 还可知,不施污泥时这四种处理间的孢子密度差异

不显著, 施用 1% 的污泥时接种 34 号菌的孢子密度极显著高于其它三种处理的孢子密度( $p < 0.01$ )。这与菌根侵染率的规律相一致。

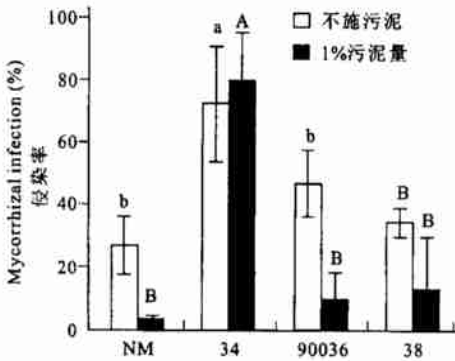


图 1 不同污泥量对菌根真菌侵染率的影响

Fig. 1 Effect of different sewage sludge levels on mycorrhizal infections

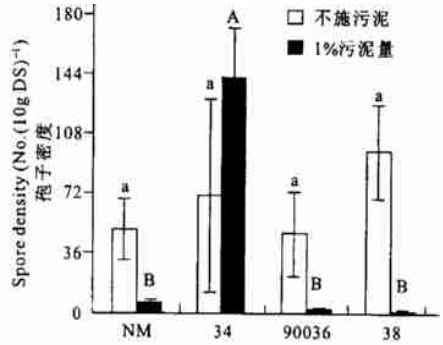


图 2 不同污泥量对菌根真菌孢子密度的影响

Fig. 2 Effect of different sewage sludge levels on spore densities

注: DS: 干土; NM: 不接种; 34: 接种 *A. laevis*; 90036 接种 *G. caledonium*; 38 接种 *G. manihotis*; 柱上不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ ); 柱上不同大写字母表示差异极显著( $p < 0.01$ ); 下同

### 2.2 污泥施入红壤后接种丛枝菌根真菌对玉米生物量(干重)的影响

2.2.1 地上部生物量 不施污泥时接种34和90036号菌的玉米地上部生物量极显著高于不接种和接种38号菌( $p < 0.01$ ), 此时, 接种34和90036号菌的玉米地上部生物量分别是不接种处理的1.38和1.30倍, 而接种38号菌的玉米地上部生物量极显著低于不接种处理( $p < 0.01$ )。可见, 接种菌根真菌并不一定增加玉米的地上部生物量。施用1%的污泥时接种34号菌的玉米地上部生物量极显著高于不接种、接种90036和38号菌的玉米地上部生物量( $p < 0.01$ ), 且接种90036号菌的玉米地上部生物量显著高于不接种和接种38号菌( $p < 0.05$ )。与不施污泥时相比, 施用1%的污泥极显著地增加了接种34号菌的玉米地上部生物量( $p < 0.01$ ), 增幅达102.4%, 而显著地降低了不接种、接种90036和38号菌的玉米地上部生物量( $p < 0.05$ ), 降幅分别达45.8%、37.0%和31.4%。施用4%的污泥时, 大部分玉米已

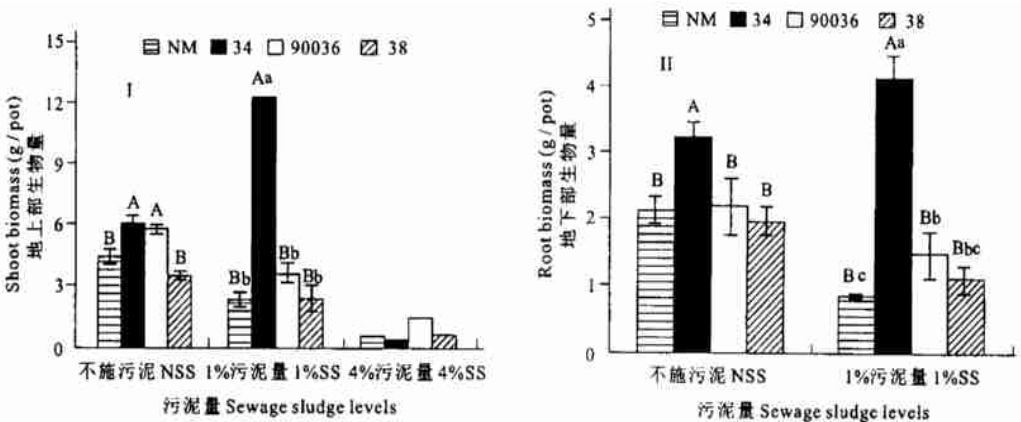


图 3 接种不同菌根真菌时不同污泥量对玉米生物量的影响

Fig. 3 Influence of different sewage sludge levels on the dry biomass of the maize inoculated with different mycorrhizal fungi

注: NSS 为 no sewage sludge; 1% SS 为 1% sewage sludge; 4% SS 为 4% sewage sludge

经死亡,其中,在这4种处理中接种34号菌的玉米地上部生物量最低,这与不施污泥和施用1%的污泥时的情形相反(图3 I)。上述结果表明,接种菌根真菌对玉米地上部生物量的影响因土壤条件而异,不施污泥和施用1%的污泥时接种34号菌的玉米地上部生物量均最高。

**2.2.2 地下部生物量** 接种丛枝菌根真菌常增加玉米地下部生物量,且这一效应与污泥量有关(图3 II)。不施污泥时接种34号菌的玉米地下部生物量极显著高于不接种、接种90036和38号菌( $p < 0.01$ ),接种34号菌的玉米地下部生物量是不接种处理的1.53倍,而不接种、接种90036和38号菌之间的生物量差异不显著。施用1%的污泥时接种34号菌的玉米地下部生物量极显著高于不接种、接种90036和38号菌( $p < 0.01$ ),且接种90036号菌的玉米地下部生物量显著高于不接种处理( $p < 0.05$ )。与不施污泥相比,施用1%的污泥显著地增加接种34号菌的玉米地下部生物量( $p < 0.05$ ),增幅达28.8%,却极显著地降低不接种和接种38号菌的玉米地下部生物量( $p < 0.01$ ),接种90036号菌的玉米地下部生物量也有明显降低,此时,不接种、接种90036和38号菌的玉米地下部生物量降幅分别为59.8%、32.1%和43.3%。上述结果表明,施用1%的污泥增加了接种*A. laevis*(34号菌)的玉米地下部生物量,降低了其它3种处理的玉米地下部生物量,与玉米地上部生物量有相同的规律。

### 2.3 不同污泥量施入红壤后接种丛枝菌根真菌对玉米吸收铜的影响

**2.3.1 对根际土壤有效态铜含量的影响** 从表2可知,不施污泥时接种和不接种之间根际土壤有效态铜含量有如下规律:接种34号菌>不接种>接种90036号菌>接种38号菌,且它们之间差异达极显著水平( $p < 0.01$ )。此时,与不接种处理相比,接种34号菌增加了土壤有效态铜的含量,而接种90036和38号菌却减少了土壤有效态铜的含量。施用1%的污泥时,有效态铜含量有如下规律:接种34号菌>接种38号菌>不接种>接种90036号菌,但它们之间差异不显著。因此,接种丛枝菌根真菌并不一定提高土壤有效态铜的含量。

表2 收获玉米时各处理根际土壤有效态铜的含量

Table 2 Available Cu content in the soil of the rhizosphere after harvest of maize ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	不接种 Noninoculation	34 <i>A. laevis</i>	90036 <i>G. caledonium</i>	38 <i>G. manihotis</i>
不施污泥	0.28±0.02 bB	0.35±0.01 aA	0.23±0.02 cC	0.07±0.01 dD
1% 污泥	98.78±0.49 a	101.18±4.42 a	97.39±1.11 a	100.37±1.15 a
4% 污泥	353.57±12.56			

注:同一行不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ ),同一行不同大写字母表示差异极显著( $p < 0.01$ ),下同

**2.3.2 玉米地上部铜浓度和铜量** 不施污泥时不接种处理的玉米地上部铜浓度最高,且显著高于接种处理的玉米地上部铜浓度( $p < 0.05$ ),而接种38号菌的玉米地上部铜浓度显著低于其它3种处理( $p < 0.05$ )。施用1%的污泥时接种38号菌的玉米地上部铜浓度最高,且显著高于不接种和接种34号菌( $p < 0.05$ ),其中接种34号菌的玉米地上部铜浓度最低。与不施污泥相比,施用1%的污泥均极显著增加所有处理的玉米地上部铜浓度( $p < 0.01$ ),不接种、接种34、90036和38号菌的玉米地上部铜浓度分别增加了0.89、1.53、3.74和11.50倍(表3)。可见,污泥施入红壤后接种菌根真菌并不一定增加玉米地上部铜浓度。

不施污泥时不接种处理的玉米地上部铜量最高,其次为接种34号菌,而接种38号菌的玉米地上部铜量最低,且极显著低于其它3种处理( $p < 0.01$ )。施用1%的污泥时接种34号菌的玉米地上部铜量极显著高于其它3种处理( $p < 0.01$ ),而不接种处理的玉米地上部铜量最低,并有如下的规律:接种34号菌>接种90036号菌>接种38号菌>不接种,且它们之间差异达显著水平( $p < 0.05$ )。此时接种34、90036和38号菌的玉米地上部铜量分别是不接种处理的4.37、2.09、1.54倍。与不施污泥相比,施用1%的污泥时接种34、90036和38号菌的玉米地上部铜量分别增加了410%、270%和700%,而不接种的玉米地上部铜量几乎没有增加(表4)。上述结果表明,一定污染条件下接种菌根真菌能增加玉米对铜的吸收量,这一现象是接种菌根真菌促进玉米生长和增加玉米地上部铜浓度(34号菌除外)的协同效应所致。

表 3 玉米地上部铜的浓度

Table 3 Cu concentration in the shoot of the maize ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	不接种 Noninoculation	34 <i>A. laevis</i>	90036 <i>G. caledonium</i>	38 <i>G. maritima</i>
不施污泥	14.28±1.57 a	9.12±2.26 b	7.32±0.30 b	3.58±0.24 c
1% 污泥	27.03±1.83 b	23.08±0.54 b	37.42±2.74 ab	44.76±15.62 a
4% 污泥	213.64	375.49	104.12	278.85

表 4 玉米地上部铜量

Table 4 Total Cu content in the shoot of the maize ( $\mu\text{g pot}^{-1}$ )

处理 Treatment	不接种 Noninoculation	34 <i>A. laevis</i>	90036 <i>G. caledonium</i>	38 <i>G. maritima</i>
不施污泥	63.07±5.48 A	55.64±13.77 A	42.30±2.45 A	12.52±1.04 B
1% 污泥	65.33±15.45 Cd	285.21±7.13 Aa	136.47±21.31 Bb	100.29±5.03 BCc
4% 污泥	406.78	440.07	437.50	527.30

2.3.3 玉米地下部铜浓度和铜量 不施污泥时接种34号菌的玉米地下部铜浓度极显著高于其它3种处理( $p < 0.01$ ), 不接种和接种90036号菌的玉米地下部铜浓度相差不大, 接种38号菌的玉米地下部铜浓度极显著低于前三者( $p < 0.01$ )。施用1%的污泥时不接种、接种34和38号菌的玉米地下部铜浓度相差不大, 接种90036号菌的玉米地下部铜浓度最低, 且它们之间差异不显著。与不施污泥相比, 施用1%的污泥时不接种、接种34、90036和38号菌的玉米地下部铜浓度均极显著增加( $p < 0.01$ ), 分别增加了29.95、10.45、28.70和10.71倍(表5)。从而, 低量铜时接种菌根真菌影响玉米地下部铜浓度, 而高量铜时接种菌根真菌并不显著影响玉米地下部铜浓度。

不施污泥时接种34号菌的玉米地下部铜量极显著高于其它3种处理( $p < 0.01$ ), 不接种和接种90036号菌的玉米地下部铜量之间相差不大, 接种38号菌的玉米地下部铜量最低, 且极显著低于接种34号菌和不接种处理( $p < 0.01$ )。施用1%的污泥时接种34号菌的玉米地下部铜量极显著高于其它3种处理( $p < 0.01$ ), 不接种处理的玉米地下部铜量最低。此时, 接种34、90036和38号菌的玉米地下部铜量分别是不接种处理的4.25、1.49、1.35倍(表6)。可见, 施用1%的污泥时接种菌根真菌能增加玉米地下部铜量, 这与玉米地上部铜量有相似的规律。

表 5 玉米地下部铜的浓度

Table 5 Cu concentration in the root of the maize ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	不接种 Noninoculation	34 <i>A. laevis</i>	90036 <i>G. caledonium</i>	38 <i>G. maritima</i>
不施污泥	20.30±1.32 B	54.33±2.58 A	18.03±0.97 B	6.11±1.61 C
1% 污泥	628.37±41.01 a	621.83±92.86 a	535.55±73.54 a	660.75±77.62 a

表 6 玉米地下部铜量  
Table 6 Total Cu content in the root of the maize ( $\mu\text{g pot}^{-1}$ )

处理 Treatment	不接种 Noninoculation	34 <i>A. laevis</i>	90036 <i>G. caledonium</i>	38 <i>G. manihotis</i>
不施污泥	42.95 ± 6.74 B	175.49 ± 18.03 A	39.04 ± 6.28 BC	11.71 ± 0.90 C
1% 污泥	534.21 ± 60.13 B	2270.74 ± 100.48 A	795.94 ± 223.62 B	721.75 ± 131.07 B

### 3 讨论

丛枝菌根真菌的多样性是维持自然生态系统植物多样性的一个主要因子<sup>[9]</sup>。生长在重金属污染地的植物有菌根侵染现象,这表明这些真菌具有重金属耐受性。为了探明重金属、丛枝菌根真菌和植物的相互作用,研究和对比重金属污染和无污染土壤中丛枝菌根真菌对宿主植物生长和吸收重金属的影响是十分必要的。夏增禄<sup>[10]</sup>指出,红壤铜污染的临界值为  $53 \text{ mg kg}^{-1}$ 。由于本试验所用的污泥含铜量为  $10420.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ,红壤中铜的背景值很低,若按 1% 和 4% 的量施该污泥于红壤,则土壤的铜含量分别高达 100 和  $400 \text{ mg kg}^{-1}$ ,此时红壤中铜的含量是铜污染临界值的 2~8 倍,远高于红壤铜污染的临界值。因此,本试验是检验低量铜(不施污泥)和铜胁迫下三种丛枝菌根真菌的应答。

本试验中,施用 1% 的污泥增加了接种 *A. laevis* 的菌根侵染率和孢子密度,而不接种(含土著菌根真菌)、接种 *G. caledonium* 和 *G. manihotis* 的菌根侵染率和孢子密度却有显著下降。这说明施入污泥后不同的菌根真菌对重金属的耐受力是不同的<sup>[11]</sup>,从而对宿主植物的生长产生不同的影响。不施污泥和施用 1% 的污泥时接种 34 号菌对玉米生长的促进作用明显高于土著菌根真菌、接种 90036 和 38 号菌,这一现象在施用 1% 的污泥时更为明显。由于接种 38 号菌时的玉米生物量低于不接种,所以接种菌根真菌并不一定促进玉米的生长。从玉米体内磷的浓度(结果未列出)来看,不施污泥时接种 38 号菌的玉米体内磷浓度高于其它处理,所以接种 38 号菌的玉米生物量最低并不是 38 号菌没有促进对磷的吸收所致。究竟是什么原因造成上述现象的,还有待于继续研究。施用 4% 的污泥时所有处理的玉米大部分已经死亡,其中,接种 34 号菌的玉米地上部生物量在这四种处理中最低,而接种 90036 号菌的地上部生物量最高,这与不施污泥和施用 1% 的污泥时的情形不同。由此可知,施用不同量的污泥时不同的丛枝菌根真菌对玉米的生长产生不同的影响,这是一个很有趣的现象,值得做进一步研究,以便选出适合不同生境的菌根真菌生态型对重金属污染土壤进行修复。

不施污泥时不接种处理的玉米地上部铜浓度和地上部铜量均最高,这与菌根植物可从金属缺乏或含量不高的土壤中吸收更多的微量元素(如 Cu、Zn、Co)<sup>[12,13]</sup>相矛盾。究竟是由于不接种处理有菌根侵染现象(含有土著菌根真菌)所造成的,还是另有原因,这有待于进一步的探讨。施用 1% 的污泥时,在这四种处理中接种 34 号菌的玉米地上部铜浓度最低,而地上部铜量最高,这主要是由于接种 34 号菌显著地促进了玉米的生长所致,即“稀释效应”。施用 1% 的污泥时接种 90036 和 38 号菌的玉米地上部铜浓度高于不接种处理的玉米地上部铜浓度,但这四种处理的地下部铜浓度却相差不大。因此在污染程度较高的情况下接种菌根真菌并不一定降低宿主地上部铜的浓度,不同的菌根真菌之间差异较大。由此可知,外界重金属浓度较高时接种菌根真菌并不一定通过在地下部积累或排斥铜来解除铜的毒害。1% 的污泥时接种处理的玉米地上部和地下部铜量均高于不接种处理,所以此时接种菌根真菌有利于增加玉米对铜的吸收和积累。其中接种 34 号菌的玉米地上部铜量约是不接种处理玉米地上部铜量的 4.4 倍,从生物修复的角度来看,这将大大提高对重金属污染土壤的修复速度。不同的菌根真菌对宿主植物吸收和转移重金属的能力也有差异,从而保护作用 and 修复能力的大小随不同的菌根真菌菌株而异。为了达到快速修复的目的,很有必要筛选出符合特定生境和特定重金属的优良菌根真菌。若能筛选到既能显著促进植物生长又有利于重金属从地下部向地上部迁移的菌根真菌,这对重金属污染土壤的修复

将是十分有用的。施用 4% 的污泥使土壤溶液中有效态铜浓度达到  $353.57 \text{ mg kg}^{-1}$ , 此时玉米大部分已经死亡, 玉米地下部铜浓度高达  $1229.44 \text{ mg kg}^{-1}$  (结果未列出)。因此只有适量污泥施入红壤后接种 34 号菌才促进玉米产生更大的生物量和吸收高量的污泥态重金属, 有利于达到植物修复的目的。

从本试验可知, 将污泥施入土壤中结合接种优良菌根真菌(如 34 号菌)措施能提高作物产量和增加对铜的吸收。由于菌根现象的普遍性, 如何发挥菌根真菌消除或减弱污泥施入土壤后的负面影响具有很大的潜力和美好前景。这是由于菌根修复技术花费小, 见效快, 且不会带来第二次污染。另外菌根效应的有效期较长, 即收获第一季作物后再种植其它适宜作物时一般不必再接种菌根真菌。

## 参考文献

1. Sauerbeck D R. Plant, element and soil properties governing uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, 57: 58: 227~ 237
2. 郑春荣, 陈怀满. 红壤重金属复合污染与植物生长. 见: 张桃林, 何园球, 杨艳生主编. 红壤生态系统研究. 江西: 江西科学技术出版社, 1999. 164~ 172
3. Boyle M, Paul E A. Vesicular-arbuscular mycorrhizal associations with barley on sewage-amended plots. *Soil Biol. Biochem.*, 1988, 20: 945~ 948
4. Arnold P T, Kapustka L A. VA mycorrhizal colonization and spore populations in an abandoned agricultural field after five years of sludge applications. *Ohio J. Sci.*, 1987, 87: 112~ 114
5. Weissenhorn I, Mench M, Leyval C. Bioavailability of heavy metals and arbuscular mycorrhiza in a sewage sludge amended sandy soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, 27: 287~ 296
6. Dueck T A, Visser P, Ernest W H, *et al.* Vesicular-arbuscular mycorrhizae decrease zinc toxicity to grasses in zinc polluted soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1986, 18: 331~ 333
7. Killham K, Firestone M K. Vesicular arbuscular mycorrhizal mediation of grass response to acidic heavy metal depositions. *Plant Soil*, 1983, 72: 39~ 48
8. Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 1970, 55: 158~ 161
9. Heijden M G A Van der, Klironome J N, Ussic M, *et al.* Mycorrhizal fungi diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 1998, 396: 69~ 72
10. 夏增禄. 中国土壤环境容量. 北京: 地震出版社, 1992. 178~ 201
11. Hinklerbrandt U, Kardorf M, Bothe H. The zinc violet and its colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. *J. Plant Physiol.*, 1999, 154: 709~ 717
12. Faber B A, Zasoski R J, Bumau R G, *et al.* Zinc uptake by corn affected by vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Plant Soil*, 1990, 129: 121~ 130
13. Kothari S K, Marschner H, Romheld V. Contribution of the VA mycorrhizal hyphae in acquisition of phosphorus and zinc by maize grown in a calcareous soil. *Plant Soil*, 1991, 131: 177~ 185

## EFFECT OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON BIOAVAILABILITY OF COPPER IN SEWAGE-SLUDGE-AMENDED RED SOIL

Liao Ji-pei Lin Xian-gui Cao Zhi-hong

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

### Summary

The effect of different sewage sludge levels (0%, 1%, 4%) on mycorrhizal infections, spore densities, root and shoot biomass, Cu uptake by maize inoculated with three arbuscular mycorrhizal fungi (*A. laevis*, *G. caledonium* and *G. manihotis*) in the red soil was studied. Mycorrhizal infection, spore densities, root and shoot biomass were increased by 1% sewage sludge in comparison to no sewage sludge when the maize was inoculated with *A. laevis*, however, mycorrhizal infection, spore densities, and root and shoot biomass were greatly reduced in the three other treatments ( $p < 0.05$ ). When the red soil was amended with 1% sewage sludge the Cu concentrations in the shoot of the maize were NM (noninoculation)  $> G. manihotis > G. caledonium > A. laevis$ , and the total Cu content in the root of the maize infected with the three mycorrhizal fungi was higher than that under nonmycorrhizal treatment. The results showed that the tolerance of different arbuscular mycorrhizal fungi to heavy metals varied and *A. laevis* could remediate heavy metal contaminated soil when the heavy metal concentrations were not very high.

**Key words** Arbuscular mycorrhizal fungi, Sewage sludge, Red soil, Copper, Bioavailability

### 欢迎订阅 2004 年《中国农业科学》(中、英文版)

《中国农业科学》中、英文版是中国农业科学院主办的全国性、综合性、学术性期刊。主要刊登农牧业基础科学和应用科学研究论文。主要栏目有作物遗传育种·种质资源、植物保护、生理生态·耕作栽培、土壤肥料·节水灌溉、园林园艺、贮藏·保鲜·加工、畜牧·兽医、综述与专论、研究简报、快讯等。读者对象主要是国内外农业科学研究所、农业院校,以及综合性大学等有关农业科学研究与管理人员。

《中国农业科学》中、英文版 2004 年均为月刊,大 16 开,国内外公开发行。中文版国内统一刊号: CN 11-1328/S, 国际标准刊号: ISSN 0578-1752, 邮发代号: 2-138, 国外代号: BM43。每期 160 页,定价 29.00 元,全年定价 348.00 元。英文版国内统一刊号: CN 11-4720/S, 国际标准刊号: ISSN 1671-2927, 邮发代号: 2-851, 国外代号: 1591M。每期 80 页,国内定价 20.00 元,全年 240.00 元,国外定价 20.00 美元,全年定价 240.00 美元。广告经营许可证:京海工商广字第 0178 号。编辑部地址:北京中关村南大街 12 号。邮政编码: 100081; 电话: 010-68919808, 68975146, 68976244; 传真: 010-68976244; E-mail: zgnykx@mail.caas.net.cn; 网址: http://www.ChinaAgriSci.com