

粘盖牛肝菌不同菌株对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附及其对油松 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的耐受性

白淑兰^{1,2}, 赵春杰³, 房耀维³, 白玉娥¹, 刘 勇²

(1. 内蒙古农业大学林学院, 内蒙古, 呼和浩特 010019; 2. 北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083;
3. 内蒙古农业大学职业技术学院, 内蒙古, 呼和浩特 010018)

摘要: 为了探讨同一菌根真菌不同菌株对重金属的耐受性, 选用采集于内蒙古阴山山脉不同地区的粘盖牛肝菌(*Suillus bovinus*)的不同菌株进行研究。首先, 在不同浓度 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 液体培养基中培养菌丝体, 以了解各菌株菌丝体对重金属的耐受性及吸附能力, 采用烘干法和原子吸收法分别测定菌丝体的生物量和菌丝体、培养液中 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 含量, 结果表明: 劈柴沟粘盖牛肝菌在 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫条件下, 生物量、吸附能力约为其余各菌株的 1.5~2 倍。其次, 为了探明油松(*Pinus tabulaeformis*)形成菌根后对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫的耐受性及其耐受机理, 采用一次性定量浇灌不同浓度 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 溶液的方法, 测定了菌根化油松苗地上、地下生物量及 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 含量的分配, 结果表明: 菌根形成后能显著促进油松的生长及对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫的耐受性, 并且菌根能够帮助油松吸收基质中大量的 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} , 根中重金属的含量是茎叶中的 2~3 倍以上, 非菌根苗在重金属浓度稍高(Zn^{2+} : 400mg/kg; Cd^{2+} : 40mg/kg) 时就会死亡。经方差分析及多重比较证实, 劈柴沟粘盖牛肝菌对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的耐受性及对油松的促生效果与其它各菌株存在显著的差异, 这可能是它通过把吸收的 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 最大限度地输送到根中的同时, 也输送到了茎叶中, 使重金属在体内得到一定程度的稀释, 使自身免受毒害。

关键词: 粘盖牛肝菌; 菌株; 油松; 重金属; 菌根化

The absorption of Zn^{2+} and Cd^{2+} by different strains of *Suillus bovinus* and its effect on the tolerance of *Pinus tabulaeformis* seedlings to Zn^{2+} and Cd^{2+}

BAI Shu-Lan^{1,2}, ZHAO Chun-Jie³, FANG Yao-Wei³, BAI Yu-E¹, LIU Yong² (1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. College of Resources and Environments, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. College of Occupation Technology, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018 China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 220~224.

Abstract: This paper investigated the heavy metal tolerance of different strains of *Suillus bovinus* collected in Inner Mongolia. There were two separate experiments. The first experiment involved the liquid culture of different strains of *Suillus bovinus* in different concentrations of Zn^{2+} and Cd^{2+} . This experiment showed that the biomass accumulation and Zn^{2+} and Cd^{2+} absorption of a native strain of *Suillus bovinus* collected in Pi Cai Gou was 1.5~2 times higher than those of other native strains. The second experiment was carried out on the mycorrhizaed seedlings of *Pinus tabulaeformis*. It showed that the formation of mycorrhizae enhanced the growth and Zn^{2+} and Cd^{2+} tolerance of these seedlings. Mycorrhizae facilitated the absorption of Zn^{2+} and Cd^{2+} from the growth matrix, leading to 2~3 times higher concentration of Zn^{2+} and Cd^{2+} in roots than in shoots. In contrast, non-mycorrhizaed seedlings failed to survive in high concentrations of Zn^{2+} and Cd^{2+} (i. e., Zn^{2+} 400

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30260086); 内蒙古自然科学基金资助项目(20010905-09)

收稿日期: 2004-05-31; **修订日期:** 2004-12-10

作者简介: 白淑兰(1960~), 女, 蒙古族, 内蒙古通辽人, 博士, 副教授, 主要从事菌根基础与应用研究。E-mail: Baishulan2004@163.com

致谢: 中国科学院微生物所卯晓岚研究员对菌种给予鉴定, 在此谨表谢忱

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30260086) and Natural Science Foundation of Inner Mongolia (No. 20010905-09)

Received date: 2004-05-31; **Accepted date:** 2004-12-10

Biography: BAI Shu-Lan, Ph. D., mainly engaged in biochemical and physiological theory of mycorrhizae and its application. E-mail: Baishulan2004@163.com

mg/kg; Cd^{2+} 40mg/kg). Statistical analysis showed that the Zn^{2+} and Cd^{2+} tolerance of the strain from Pi Cai Gou was significantly different from that of other strains. This strain also significantly enhanced the growth of the seedlings. The mechanism involved is likely to be the optimized distribution of the absorbed Zn^{2+} and Cd^{2+} between the roots and the shoots, therefore diluting the poisonous effect of Zn^{2+} and Cd^{2+} .

Key words: *Suillus bovinus*; strain; *Pinus tabulaeformis*; heavy metal; mycorrhizaed

文章编号:1000-0933(2005)02-0220-05 中图分类号:Q142,Q948,S791.254 文献标识码:A

自 1981 年著名科学家 Bradley 等首次报道了石楠菌根能够降低植物对过量重金属铜和锌的吸收及菌根能够增强植物对重金属的耐性以来^[1],各国学者对菌根对重金属修复的研究产生了浓厚的兴趣,尤其是传统的耐受性优良菌株的筛选与分子生物学重组技术的研究已成为菌根重金属修复的热点^[2]。研究结果表明,菌根真菌一方面可以通过分泌特殊物质等形式改变植物根际环境,改变重金属的存在状态,降低重金属毒性,另一方面菌根还能影响宿主植物对重金属的积累和分配,使宿主植物体内重金属积累量增加,有毒重金属被贮存在细胞的不同部位或被结合到胞外基质中,通过代谢这些离子可被沉淀或螯合,从而降低其毒性,提高植物提取的效果^[3,4]。

然而,更多学者都立足于不同菌根真菌对重金属的耐性研究。据 Thompson 研究表明,在同一菌种不同菌株之间,对重金属的耐受性也有一定差异^[5]。

本研究选用不同采集地点的粘盖牛肝菌(*Suillus bovinus*)的 5 个菌株,在纯培养条件下研究它们对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫的耐受性及吸附特性;同时将这些菌株接种于油松,研究不同菌株油松菌根苗对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的耐受性及在油松植株体内的分配,旨在筛选到耐 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫能力强和对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 污染土壤修复效果好的菌株,为西部区 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 污染土壤的菌根植物修复以及耐重金属优良基因型的筛选提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试菌种 粘盖牛肝菌(*Suillus bovinus*)隶属于伞菌目(*Agaricales*)牛肝菌科(*Boletaceae*)粘盖牛肝菌属(*Suillus*)。它是松属(*Pinus*)、云杉属(*Picea*)、落叶松属(*Larix*)重要的菌根真菌^[6]。供试 5 个菌株均分离于阴山山脉人工油松或落叶松林下粘盖牛肝菌子实体,即:黑牛沟油松粘盖牛肝菌(简称 HS. b),蛮汉山落叶松粘盖牛肝菌(简称 MS. b),乌素图油松粘盖牛肝菌(简称 WS. b),古路板油松粘盖牛肝菌(简称 GS. b),劈柴沟油松粘盖牛肝菌(简称 PS. b)。

1.1.2 供试树种 油松(*Pinus tabulaeformis*)是华北地区典型菌根型树种,根系发达,保持水土能力强,涵养水源作用大,喜光、耐寒、耐干旱、耐瘠薄,是内蒙西部地区主栽造林树种之一。

1.2 试验方法

1.2.1 液体纯培养条件下不同菌株菌丝体对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 耐受性及其吸附特性

(1)不同浓度 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 液体培养基的制备 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 分别选用 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 作材料。配制 MMN 液体培养基^[7],使 pH 值为 6.0,分装在三角瓶内,50ml/瓶。高温高压灭菌 30min,冷却后在超净工作台内,用 0.22 μm 微孔滤膜加入不同浓度的 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 母液,1ml/瓶, Zn^{2+} 浓度为 0、50、100 mg/L 和 200mg/L; Cd^{2+} 浓度为 0、2、4、8 mg/L,每个处理 5 个重复。

(2)接种与培养 在超净工作台内将食品粉碎机用 75%酒精灭菌后,将生长旺盛的液体菌剂粉碎混匀后,在上述 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 培养基中分别加入粉碎的液体菌剂 1ml/瓶,然后置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 暗培养室静置培养,15d 测菌丝生物量及对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附量。

(3)测定方法 把 15d 的培养物分别过滤,置于 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘至恒重,测其生物量。同时用原子吸收分光光度计测各培养液中的 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 含量,换算出各菌株对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附量。

1.2.2 不同菌株对油松 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 耐受性

(1)油松种子处理 选择无病虫、饱满、颗粒均匀的油松种子用清水洗净浸泡 24h 后,再用 30% H_2O_2 消毒 30min,药液冲净后置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 发芽箱内催芽。

(2)育苗基质处理 育苗基质选用蛭石和苗圃土(蛭石、苗圃土质量比为 1:2),把准备好的基质混匀过 5mm 筛后装入塑料袋内进行高温高压灭菌 1.5h,冷却后晾晒于干净的地方 7d 后使用。

(3)固体菌剂培养与芽苗接种 固体基质为蛭石,用 MMN 液体培养基混拌,使重量含水量为 70%,拌匀装入罐头瓶内,高温高压灭菌 1.5h,冷却后将生长健壮的平板菌落切成均匀的小块接入 15 块,同时设一个不接种的空白培养基用于对照处理,置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 暗培养室中培养 20~25d 备用。

取规格为 120mm×100mm 的育苗杯,将准备好的育苗基质装入育苗杯 3/4 后,分别称取各处理菌剂(包括空白)5g 撒于其上,再将油松芽苗播入其中,覆基质厚约为 1.5cm,使每杯共重 250g。置于照度为 $1.9\times 10^4\text{lx}$ 的金属卤化物灯培养室培养,昼/夜温度 $27\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。光期为 14h/d,除正常管理外,每 2 周浇 1 次稀释 10 倍的 Hoagland 营养液,每次 30ml/杯,以提供必要的营养。

(4) Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫处理及植株收获 幼苗 3 个月后用体视显微镜定期检查菌根感染率,待感染率达 50% 以上时,随机抽取一定量的苗杯,用 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 母液(Zn^{2+} 浓度为 0、100、200、400mg/kg; Cd^{2+} 浓度为 0、10、20、40 mg/kg)一次性浇入杯中,每个处理 5 个重复。管理同上。

胁迫 12 周后对茎叶和根系分别进行收获。洗净后置于 80℃ 烘箱中烘至恒重,分别获得根系和茎叶的生物量。再将其分别磨碎用原子吸收分光光度计测定 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 含量。

2 结果与分析

2.1 不同菌株在液体纯培养条件下对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫的反应

2.1.1 不同菌株菌丝体生长对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫的反应 菌丝体生物量反映了各菌株受 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫的程度。研究结果表明,重金属浓度越高对菌丝抑制作用越大,生物量越低。通过对各菌株进行统计分析证实,无 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 时各菌株菌丝体生物量之间无显著差异,但随着 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度的增加劈柴沟菌株与其余菌株产生了明显的差异,尤其,当 Zn^{2+} 浓度为 200 mg/L、 Cd^{2+} 浓度为 8 mg/L 时劈柴沟菌株菌丝体的生物量约为其余菌株的 1.5~2 倍(表 1)。

表 1 不同菌株在 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫下菌丝体生物量

菌株 Strains Treatment of Zn^{2+} and Cd^{2+} (mg/L)	Table 1 The biomass accumulation of different strains under the stress of Zn^{2+} and Cd^{2+}						
	对照 Controls		生物量 Biomass(mg/50ml)				生物量 Biomass(mg/50ml)
	0	50	100	200	2	4	8
HS. b	0.1375a	0.0914c	0.0807b	0.0641b	0.0636c	0.0522b	0.0290b
MS. b	0.1418a	0.0634d	0.0590c	0.0433c	0.0424d	0.0421b	0.0239b
WS. b	0.1428a	0.0678d	0.0555c	0.0413c	0.0823b	0.0518b	0.0349b
GS. b	0.1378a	0.1132b	0.0555c	0.0649b	0.0648c	0.0547b	0.0399b
PS. b	0.1506a	0.1503a	0.1074a	0.0859a	0.1324a	0.0828a	0.0614a

* 同一列中字母不同,表示多重比较差异显著(LSD 检验, $P=0.05$) Different letters indicate significant difference (LSD test, $P=0.05$); 下同 the same below

2.1.2 不同菌株菌丝体对 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 吸附量的影响 由表 2 可以看出,随着培养液中 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度的增加,各菌株对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附量不断增加,并且经多重比较证实,各菌株之间存在显著的差异。同时应指出,在高浓度重金属胁迫时,劈柴沟菌株吸附量与其余菌株存在极显著的差异。

表 2 不同菌株菌丝体对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 吸附量的影响

菌株 Strains Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 处理 Treatment of Zn^{2+} and Cd^{2+} (mg/L)	Table 2 The Zn^{2+} and Cd^{2+} absorption of different strains							
	Zn^{2+} 吸附量 Absorption of Zn^{2+} ($\mu\text{g/g}$ Dry mycelium)				Cd^{2+} 吸附量 Absorption of Cd^{2+} ($\mu\text{g/g}$ Dry mycelium)			
	0	50	100	200	0	2	4	8
HS. b	0.33a	5.72b	8.32b	13.92b	0.06a	0.27c	0.54b	0.64b
MS. b	0.32a	5.62b	8.26b	13.31b	0.05a	0.35b	0.54b	0.75b
WS. b	0.35a	7.82a	9.53a	15.90a	0.05a	0.26c	0.61b	0.62b
GS. b	0.33a	5.67b	8.34b	13.33b	0.05a	0.27c	0.56b	0.62b
PS. b	0.32a	7.83a	8.45b	16.16a	0.06a	0.45a	0.87a	1.15a

2.2 不同菌株在 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫下对油松耐受性的影响

2.2.1 不同菌株在 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫下对油松生物量的影响 试验证实,所有菌株均能显著促进油松在 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫环境中的生长,随着 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫的加剧,不同菌株油松苗之间存在着显著的差异,其中,劈柴沟粘盖牛肝菌油松苗生物量在 Zn^{2+} 浓度为 400mg/kg、 Cd^{2+} 浓度为 40mg/kg 时分别为其它各菌株平均生物量的近 2 倍。非菌根苗在此浓度下全部死亡。

2.2.2 不同菌株在 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫下对油松茎叶、根中 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 含量的影响 在 Zn^{2+} 胁迫下,菌根苗根及茎叶中 Zn^{2+} 含量

显著高于非菌根苗,而且劈柴沟菌株根及茎叶中 Zn²⁺ 含量与其它菌株有显著差异。在 Zn²⁺ 浓度为 400mg/kg 时,非菌根苗全部死亡,但这时从根与茎叶中 Zn²⁺ 含量的比例看,劈柴沟菌株与其余菌株无显著差异,这可能是该菌株虽然对 Zn²⁺ 吸收量大,但在根和茎叶内分配模式与其余菌株无差异(表 3)。

Table 3 Different Zn ²⁺ distributions in <i>Pinus tabulaeformis</i> watered with solutions of Zn ²⁺									
菌株 Strains 浓度 Content of Zn ²⁺ (mg/kg)	地上部 Zn ²⁺ 含量 Content in needles and stem of Zn ²⁺ (μg/pot)				地下部 Zn ²⁺ 含量 Content in roots of Zn ²⁺ (μg/pot)				根茎 Zn ²⁺ 含量比 Roots Needles and stem of Zn ²⁺
	0	100	200	400	0	100	200	400	400
HS. b	16. 95a	30. 12b	35. 95b	37. 61b	16. 98a	99. 68bc	111. 01c	120. 08c	3. 2a
MS. b	16. 84a	31. 19b	37. 05a	38. 01b	17. 42a	103. 25b	114. 02bc	121. 23c	3. 2a
WS. b	17. 66a	33. 24a	36. 09b	38. 99b	18. 01a	105. 21b	120. 96a	127. 02b	3. 3a
GS. b	16. 95a	32. 98a	37. 32a	38. 12b	17. 52a	102. 20b	116. 52b	116. 52d	3. 1a
PS. b	17. 32a	35. 02a	38. 03a	40. 72a	18. 11a	110. 32a	123. 54a	130. 02a	3. 2a
CK	16. 02a	18. 56c	24. 65c	—	17. 98a	88. 29d	110. 21c	—	—

— 苗木已经死亡 Means died;下同 the same below

菌根苗对 Cd²⁺ 的吸收与对 Zn²⁺ 的吸收呈相似的变化趋势。尤其在 Cd²⁺ 浓度为 40mg/kg 时,非菌根苗全部死亡,劈柴沟菌株地上、地下对 Cd²⁺ 的吸收与其它菌株均有显著的差异。但从根与茎叶中 Cd²⁺ 含量比值看,这时所有的菌根苗之间无显著的差异,这与 Zn²⁺ 在体内的分配具有相似的结果(表 4)。

Table 4 Different Cd ²⁺ distributions in <i>Pinus tabulaeformis</i> watered with solutions of Cd ²⁺									
菌株 Strains 浓度 Content of Cd ²⁺ (mg/kg)	地上部 Cd ²⁺ 含量 Content in needles and stem of Cd ²⁺ (μg/pot)				地下部 Cd ²⁺ 含量 Content in roots of Cd ²⁺ (μg/pot)				根茎 Cd ²⁺ 含量比 Roots Needles and stem of Cd ²⁺
	0	10	20	40	0	10	20	40	40
HS. b	1. 25a	4. 15b	6. 19b	6. 29b	2. 51a	8. 46a	11. 05b	15. 32b	2. 4a
MS. b	1. 26a	4. 03b	6. 15b	6. 81b	2. 34a	8. 32a	10. 46b	13. 01c	2. 0a
WS. b	1. 18a	4. 06b	6. 25b	6. 80b	2. 48a	8. 12a	10. 65b	13. 68c	2. 0a
GS. b	1. 09a	4. 00b	6. 30b	6. 08b	2. 35a	8. 52a	10. 88b	14. 50b	2. 3a
PS. b	1. 08a	4. 95a	7. 41a	8. 51a	2. 52a	8. 69a	12. 20a	17. 02a	2. 0a
CK	1. 23a	3. 20c	3. 49c	—	2. 09a	3. 06b	4. 73c	—	—

菌根苗无论在吸收 Zn²⁺, 还是 Cd²⁺, 主要分配部位是植株的根系, 并且各菌株之间有显著的差异。另外, 茎叶中 Zn²⁺、Cd²⁺ 含量增加比根系中缓慢, 这同黄艺研究结果相一致^[8]。

3 讨论

综上所述,粘盖牛肝菌不同菌株菌丝体均能大量吸收环境中 Zn²⁺、Cd²⁺。其中,劈柴沟粘盖牛肝菌对 Zn²⁺、Cd²⁺ 的耐受性和吸收能力显著高于其它菌株。该菌与油松形成菌根后,能显著促进油松在 Zn²⁺、Cd²⁺ 胁迫环境中的生长,并显著促进油松对 Zn²⁺、Cd²⁺ 的吸收,吸收的 Zn²⁺、Cd²⁺ 主要分配于根部,即,当 Cd²⁺ 浓度为 40mg/L 时,Zn²⁺ 浓度为 400mg/kg 时,根中 Cd²⁺ 与 Zn²⁺ 的含量分别为茎叶的 2~3 倍以上。从而初步认为,耐 Zn²⁺、Cd²⁺ 污染的最佳组合应为劈柴沟粘盖牛肝菌-油松。

Colplert 等研究发现,同一菌根真菌的不同菌株减轻重金属对宿主植物毒害的作用存在很大差异,从重金属污染地分离的菌株比未受重金属污染的土壤中分离的菌株更能促进宿主在重金属污染土壤中生长。同时还发现,菌根真菌对重金属抗性存在很大的遗传变异,耐重金属的菌株不但可以从污染地筛选,也可以从未受污染的土壤中分离^[9]。本试验选用的不同菌株分离于无 Zn²⁺、Cd²⁺ 污染的山地立地条件的真菌子实体。因此,可以认为,试验所用菌株所产生的耐性差异来自于真菌基因型的可能性较大,来自于遗传变异的可能性也许较小。另外,劈柴沟菌株对 Zn²⁺、Cd²⁺ 污染耐受性强,可能是它把吸收到的 Zn²⁺、Cd²⁺ 绝大多数输送到根中,同时输送到茎叶中的 Zn²⁺、Cd²⁺ 也显著高于其它菌株,这样可以使重金属在体内最大限度地得到稀释,从而免遭毒害,这也许是该菌株耐受性较强的重要机制。

References:

万方数据
[1] Bradley R, Burt A J, Read D J. Mycorrhiza infection and resistance to heavy metal toxicity in *Callaunan vulgarism*. *Nature*,1981,**292**:

336~337.

[2] Claudia G, Marb K. Identification of the copper region in saccharomyces cerevisiae by microarrays. *Biolchem*,2000,**275**(41):32310~32316.

[3] Huang Y, Chen Y J, Tao S .Effect of rhizospheric environment of VA-mycorrhizal plant on forms of Cu,Zn,Pb and Cd in polluted soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2000,**11**(3):431~434.

[4] Richen B, Hofner W. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal tolerance of alfalfa and oat on a sewage-sludge treated soil. *Pflanzenernahr Bodenk*,1996,**159**:189~194.

[5] Thompson G W, Medve R J. Effects of aluminium and manganese on the growth of ectomycorrhizal fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* , 1984,**48**:556~560.

[6] Mao X L. *Economic Fungi of China*. Beijing: Science Press,1998. 348.

[7] Hua X M. *Studies on Mycorrhiza of Forest Trees*. Beijing: Chinese Scientific & Technology Press,1995. 365~368.

[8] Huang Y, Tao S, Chen Y J, *et al.* Accumulation and Distribution of Cu and Zn in Mycorrhizal *Pinus sylvestris* and Its Associated Ectomycorrhizal Fungus *Suillus bovinus* Exposed to Elevated Cu and Zn Concentrations in Cultivating Substrate. *Environmental Science* , 2000,**21**(2):1~6.

[9] Colpert J V, Van Asshe J A. Heavy metal tolerance in some ectomycorrhizal fungi. *Funct. Ecol.* , 1987,**1**:415~421.

参考文献：

[3] 黄艺,陈有键,陶澍. 菌根植物根际环境对污染土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 形态的影响. *应用生态学报*,2000,**11**(3):431~434.

[6] 卯晓岚. *中国经济真菌*. 北京,科学出版社,1998. 348.

[7] 花晓梅. *林木菌根研究*. 北京:中国科学技术出版社,1995. 365~368.

[8] 黄艺,陶澍,陈有键,等. 外生菌根对欧洲赤松苗(*Pinus sylvestris*)Cu、Zn 积累和分配的影响. *环境科学*,2000,**21**(2): 1~6.

