

青霉菌对桃树铅胁迫的缓解效应

李奕松¹,杜立栋²,梁 为²,王有年^{2*}

(1.北京农学院生物技术系,北京 102206;2.北京农学院植物科学技术系,北京 102206)

摘要 为了解青霉菌对植物吸收重金属元素铅的影响,把从土壤里分离到的具有铅富集能力的青霉菌(*Penicillium Inordinate Arenicola* sp.)接种到铅污染不同程度的土壤里,采用盆栽的方法观察这个菌株对毛桃(*Prunus persica* L. Batsch)和大久保桃(*Prunus persica* L. Batsch cv. *Okubao*)铅胁迫的缓解效应。结果表明(1)在接种青霉菌的土壤里生长的毛桃和大久保桃的根、茎、叶中铅累积量均比未接种青霉菌的低,茎叶中铅的分配率比未接种青霉菌的低;(2)接种青霉菌相对增加桃苗株高、叶绿素含量、硝酸还原酶及超氧化物歧化酶活性,降低叶片的细胞膜透性,随着土壤中铅胁迫强度的增加,接种青霉菌对增加桃树株高及改善叶片生理特性的效应递减;(3)两个桃树品种的上述生理性状受铅胁迫的影响及青霉菌的缓解效应存在品种间差异。

关键词 青霉菌,铅,桃

中图分类号 X172 文献标志码 A 文章编号:1672-2043(2011)01-0037-05

The Effect of a Strain of *Penicillium* on Lead(Pb) Toxicity of *Prunus persica* L.

LI Yi-song¹, DU Li-dong², LIANG Wei², WANG You-nian^{2*}

(1. Department of Biotechnology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2. Department of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract A strain of *Penicillium* (*Penicillium Inordinate Arenicola* sp.) with the function of concentrating lead(Pb) from soil was employed to explore the possibility that by using it to decrease the effect of Pb toxicity on the two peach trees(*Prunus persica* L. Batsch and *Prunus persica* L. Batsch cv. *Okubao*) grew on soil with different lead contents. The results indicated that the amount of Pb accumulated whatever in the shoots, roots and leaves of both the peach trees grew on soil inoculated with the *Penicillium* fungi was lower than the control which did not inoculate the *Penicillium* fungi, the distribution rates of Pb in the shoots and leaves was also lower than control, and plant height, the contents of chlorophyll, the activity of superoxide dismutase(SOD) and nitrate reductase(NR) of plants grew on the soil treated with *Penicillium* fungi was higher than that grew on the control soil, the membrane permeability of the cell was lower in treated plants than in control, but with the increasing Pb concentration in the soil, alleviation effect of *Penicillium* fungi on Pb toxicity was decreased progressively. The impact of Pb stress on the two peaches and alleviation effect of *Penicillium* fungi on Pb toxicity were different between *Prunus persica* L. Batsch and *Prunus persica* L. Batsch cv. *Okubao*.

Keywords *Penicillium*; lead; peach

重金属铅(Pb)是一种毒害性强的环境污染物,土壤中的铅可通过食物链对人类产生危害^[1-3]。随着土壤环境重金属污染的日益严重,种植果蔬的农田土壤中重金属的积累量也有上升趋势,这对果品的安全生产提出严峻考验^[4-5]。如何利用微生物对重金属的抗性和解毒作用来吸收和转化重金属已引起国内外学者的

关注^[6-9]。已有研究发现了一些微生物如细菌和真菌对重金属离子都有很强的耐受性及吸附能力^[10-11]。利用这类微生物来减少植物对重金属的吸收是一种有效的方法,人们在番茄^[12]、玉米^[13]、油松^[14]、牧草^[15]、苎麻^[16]等植物上做了相关研究,在果树方面的研究未见报道。探索在发生重金属污染的情况下,通过微生物的作用缓解重金属对果树的危害、维护果树正常生长发育、使果品中重金属含量减少到国家卫生许可标准范围内的研究具有现实的意义,为充分利用土地资源,生产安全的果品提供了一个新的途径。本研究利用从矿区土壤中筛选得到的对铅具有富集能力的青霉菌,以毛桃和大久保桃幼苗为试材,研究了青霉菌对桃树

收稿日期 2010-06-25

基金项目 北京市自然科学基金重点资助项目(6071001) 北京市教委
科技发展计划项目(M200510020007)

作者简介 李奕松,博士,副教授,主要研究方向为植物生理生态。
E-mail: liyisong8@sina.com

* 通讯作者 王有年 E-mail: wynbua1@126.com

铅胁迫的缓解效应。

1 材料与方法

1.1 材料

供试苗木:毛桃(*Prunus persica* L. Batsch)、大久保桃(*Prunus persica* L. Batsch cv. *Okubao*)。

青霉菌:从矿区土壤中筛选得到的对铅具有富集能力的菌株,经鉴定为青霉属青霉亚属沙栖系 *Penicillium Inordinate Arenicola* sp.^[17]。

1.2 方法

1.2.1 试验处理

土壤的有机质含量为 $11.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH 为 7.51、铅含量为 $24.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土样风干后,过 2 mm 筛,3 月上旬将 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 配成水溶液,按比例喷施到基质土壤中,配制成铅含量(以 Pb^{2+} 计)为 200、400、800、1 600 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理土壤,同时设置对照(CK),分别表示为 CK、Pb200、Pb400、Pb800、Pb1 600。各处理土壤风干后,过筛,充分混匀,然后装入塑料盆(上口直径 30 cm、下口直径 23 cm、高 25 cm),每盆风干土重 10 kg。4 月上旬移栽桃苗,每盆栽植 1 株桃苗,每处理栽植 6 盆。用接种针挑取在固体培养皿中培养的青霉菌菌落于盛有 100 mL 液体培养基的 250 mL 三角瓶中,在恒温振荡培养箱中(28°C 、 $110 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)培养 24 h。桃苗移栽后第 7 d,向需要接种处理的每盆桃苗土壤中添加 100 mL 培养液。7 月上旬对各项指标进行测定。

1.2.2 叶片生理指标及桃苗株高测定

选取每处理桃苗完全展开叶片(枝条顶端第 5~8 片叶)进行各项指标测定。细胞膜透性、超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参照邹琦的方法^[18],叶绿素的含量、硝酸还原酶活性测定参照张志良的方法^[19]。桃苗移栽前及其后 90 d 分别测定每株桃苗的株高,每处理取 6 株平均值。

1.2.3 铅含量的测定

选取 Pb800 处理桃苗,分别测定根、茎、叶中铅含量。取样后用自来水冲洗干净,再用去离子水冲洗,杀

青、烘干,样品粉碎、研磨后,用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消化,Z-5000 原子吸收光谱仪测定铅含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。

试验数据采用 SPSS15 处理分析,多重比较采用 Duncan's 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 铅在桃苗根、茎、叶中的分配

表 1 显示,接种青霉菌的毛桃和大久保桃根、茎、叶中铅的累积量均比未接种青霉菌的低,毛桃根、茎、叶中铅含量分别降低 4.0%、28.7%、34.9%,大久保桃根、茎、叶中铅含量分别降低 7.6%、15.2%、22.3%;接种青霉菌的两个桃苗品种根部铅的分配率高于未接种的,茎和叶中铅的分配率低于未接种的。说明接种青霉菌减少了桃苗中铅的积累总量,并且减少了茎叶中的分配率。此外,毛桃的吸铅量高于大久保桃,运输到地上部铅多于大久保桃。

2.2 青霉菌对铅胁迫下桃苗株高的影响

铅胁迫对桃苗株高增长量的影响显著,随着铅处理浓度的增加,毛桃和大久保桃的株高增长量大幅度减少(表 2)。接种青霉菌后,各处理桃苗株高增长量相对增加。毛桃在 Pb200~Pb1 600 处理梯度下,其增长量分别是对照的 57.0%、37.8%、14.5% 和 5.9%;接种青霉菌后的增长量分别增加到对照的 87.9%、75.8%、60.6% 和 8.3%。大久保桃在 Pb200~Pb1 600 处理梯度下,其增长量分别是对照的 45.8%、40.7%、37.0% 和 0.0%;接种青霉菌后的增长量分别增加到对照的 74.3%、70.8%、55.3% 和 44.2%。可见,在铅胁迫下接种青霉菌对毛桃和大久保桃苗的生长均有促进作用。

2.3 青霉菌对铅胁迫下桃苗叶片细胞膜透性的影响

图 1 显示,各处理的桃苗叶片细胞膜相对透性(RMP)随铅浓度的增加而增大。在 Pb200~Pb1 600 处理梯度中,接种与未接种青霉菌的毛桃叶片相对膜透性分别为 13.00%、13.54%、16.94%、19.26% 和 18.64%、20.94%、21.56%、23.81%;接种青霉菌的毛桃叶片相

表 1 Pb 在桃苗根、茎、叶中的富集和分配
Table 1 Distribution and enrichment of Pb in different organs of peaches

项目	毛桃		毛桃+青霉菌		大久保桃		大久保桃+青霉菌	
	Pb 含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	分配率/%						
根	0.758±0.043	83.48	0.728±0.031	87.61	0.715±0.014	92.25	0.661±0.021	93.10
茎	0.087±0.002	9.58	0.062±0.001	7.46	0.033±0.011	4.26	0.028±0.004	3.94
叶	0.063±0.001	6.94	0.041±0.002	4.93	0.027±0.001	3.49	0.021±0.002	2.96

注:表中数据为 Pb800 处理桃苗 Pb 含量,分配率为各器官 Pb 含量占总含量的百分比。

表2 青霉菌对铅胁迫下株高的影响
Table 2 Effects of *Penicillium* on the plant height under Pb stress

处理	毛桃		毛桃+青霉菌		大久保桃		大久保桃+青霉菌	
	株高增长量/cm (Pb 处理/对照)/%							
CK	51.17a	100.0	25.76a	100.0	47.10a	100.0	43.80a	100.0
Pb200	29.17b	57.0	22.63a	87.9	21.55b	45.8	32.55b	74.3
Pb400	19.33b	37.8	19.53ab	75.8	19.15b	40.7	31.00b	70.8
Pb800	7.43c	14.5	15.60b	60.6	16.95b	37.0	24.20c	55.3
Pb1 600	3.00c	5.9	2.13c	8.3	0.00c	0.0	19.35c	44.2

注 株高增长量为 Pb 处理后桃苗株高减去处理前桃苗株高, 角标表示不同处理间差异, 带相同字母的平均值间无显著差异($P>0.05$)。下同。

对膜透性比未接种青霉菌的毛桃叶片相对膜透性分别降低了 30.3%、35.3%、21.4%、19.1%。接种与未接种青霉菌的大久保桃叶片相对膜透性分别为 16.64%、17.94%、20.56%、24.11% 和 20.35%、21.42%、23.91%、27.37%。接种青霉菌的大久保桃叶片相对膜透性比未接种青霉菌的大久保桃叶片相对膜透性分别降低了 18.2%、16.2%、14.0%、11.9%。接种青霉菌能有效地缓解铅对桃苗细胞膜的危害, 降低了叶片的相对膜透性, 接种青霉菌对毛桃的缓解效应优于大久保桃, 低铅浓度下的青霉菌缓解效应优于高铅浓度下的缓解效应。

2.4 青霉菌对铅胁迫下桃苗叶绿素含量的影响

不同浓度铅处理后毛桃、大久保桃叶绿素含量结果如图 2 所示。毛桃和大久保桃在 Pb200 处理时, 叶绿素含量在铅的刺激下分别高于对照 7.1%、3.8%, 在 Pb400~Pb1 600 处理梯度时, 叶绿素含量随铅浓度的增加而显著降低, Pb1 600 处理时毛桃的叶绿素含量是对照的 45.8%, 大久保桃的叶绿素含量是对照的 38.1%, 大久保桃降低的幅度大于毛桃。接种青霉菌以后, 各种铅浓度处理的毛桃和大久保桃的叶绿素含量均比未接种的含量高, 并且延缓了叶绿素含量下降的

幅度, 接种后 Pb1 600 处理时毛桃的叶绿素含量是对照的 51.3%, 大久保桃的叶绿素含量是对照的 44.6%, 接种青霉菌缓解了铅对叶绿素的伤害。

2.5 青霉菌对铅胁迫下桃苗叶片硝酸还原酶活性的影响

从图 3 可以看出, 毛桃叶片硝酸还原酶(NR)活性在未接种与接种青霉菌处理中均随铅胁迫浓度的增加呈现下降的趋势; 在 Pb200~Pb1 600 处理梯度下, 接种青霉菌处理的毛桃叶片的硝酸还原酶活性比未接种青霉菌的高。大久保桃硝酸还原酶活性则呈现先升高后降低的趋势, 接种青霉菌处理后的大久保桃叶片硝酸还原酶活性比未接种青霉菌的大久保桃硝酸还原酶活性依次高出 13.2%、42.4%、32.3%、19.1%。表明接种青霉菌能有效地提高铅胁迫下植物体内硝酸还原酶的活性, 同时铅胁迫导致植物体内硝酸还原酶活性高低的效应在不同植物间存在差异。

2.6 青霉菌对铅胁迫下桃苗叶片超氧化物歧化酶活性的影响

图 4 反映了铅胁迫下毛桃和大久保桃叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化以及接种青霉菌后对 SOD 活性变化的影响。结果表明, 两种桃树叶片的

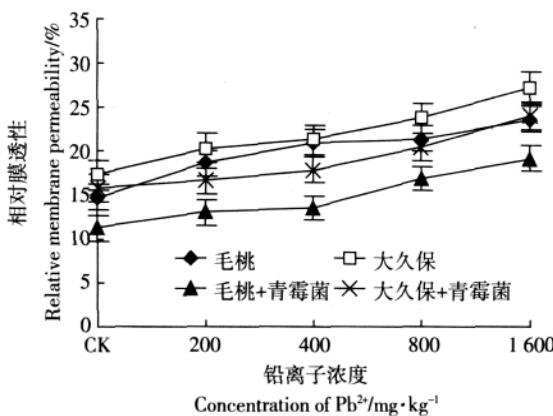


图1 青霉菌对铅胁迫下桃苗叶片细胞膜透性的影响

Figure 1 Effects of *Penicillium* on the RMP of peaches under Pb stress

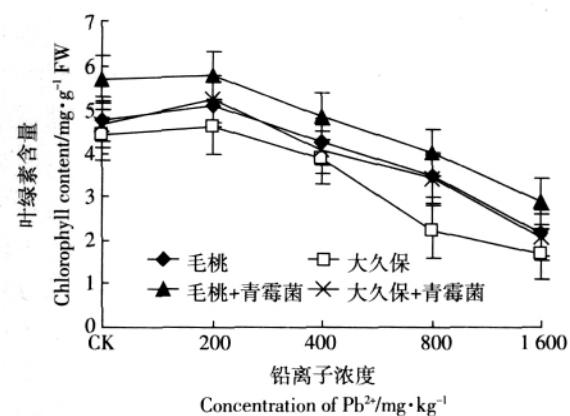


图2 青霉菌对铅胁迫下桃苗叶绿素含量的影响

Figure 2 Effects of *Penicillium* on the chlorophyll content in peaches under Pb stress

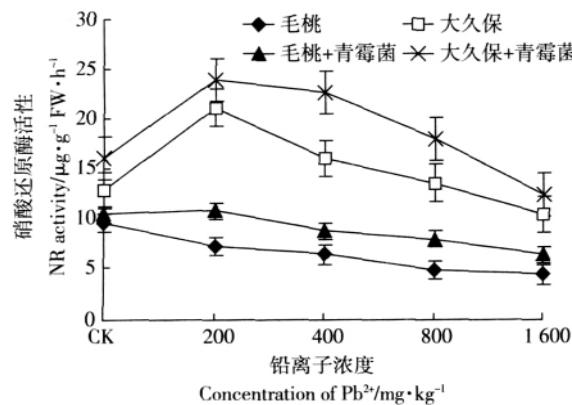


图3 青霉菌对铅胁迫下桃苗叶片硝酸还原酶活性的影响
Figure 3 Effects of *Penicillium* on the NR activity of peaches under Pb stress

SOD活性随铅处理浓度的增加先升后降。毛桃和大久保桃在Pb400处理时SOD的活性都达到最高值,分别比对照增加了102.6%、69.5%,然后随胁迫浓度继续增加而开始下降。Pb1600时,大久保桃的SOD略低于对照4.9%,而毛桃仍维持较高的水平。在Pb1600处理时,接种青霉菌后的毛桃和大久保桃植株叶片SOD活性较未接种青霉菌的植株叶片SOD活性分别高9.9%、24.9%。说明在高浓度铅胁迫下,接种青霉菌维持了桃树叶片内较高的SOD活性。

3 讨论

对重金属具有抗性的微生物通过吸附土壤和水体中重金属或通过微生物的活动降低重金属活性,发挥减轻或解除重金属毒害的作用^[10 20-23]。邵继海等^[16]研究抗镉细菌对苎麻生长和吸收镉能力的结果表明,在镉污染的土壤中接种cdr6、cdr7两种细菌能显著增加苎麻生物量和叶片叶绿素含量,降低植株地下部分丙二醛(MDA)含量,但对植株镉含量没有影响。接种外生菌根真菌可显著降低根际重金属的生物有效性,缓解重金属对油松幼苗的毒害作用^[14]。本试验的研究结果说明,接种青霉菌增加了毛桃和大久保桃株高,提高了叶片叶绿素含量、硝酸还原酶的活性、超氧化物歧化酶活性,降低了叶片细胞膜相对透性,减少了桃树体内铅的累积总量,减少了铅在桃树地上部的分配率。这表明在铅胁迫下接种青霉菌,不但改善了桃树的生理机能,减少了桃树对铅的吸收量,而且减少了铅向地上部的运输^[15]。至于接种微生物后阻止重金属向植物地上部输送的作用机理则需要进一步研究,因为有研究资料显示,某些微生物能促进植物对重金属

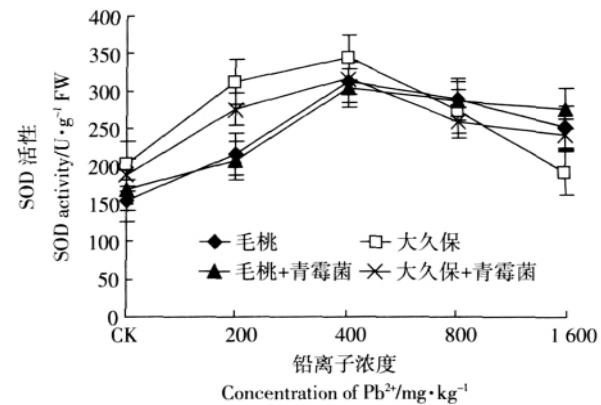


图4 青霉菌对铅胁迫下桃苗 SOD 活性的影响
Figure 4 Effects of *Penicillium* on the SOD activity of peaches under Pb stress

的吸收及迁移^[12-24],其原因可能是不同微生物对重金属吸收、固定或活化途径的差异,或者是植物吸收、转运重金属途径的差异。

微生物对重金属的吸附效果与重金属离子的初始浓度有关。研究发现,随着金属离子浓度的升高,菌体对重金属的去除率降低^[22]。这与本研究中青霉菌对铅胁迫的桃苗生理指标表现出的规律一致,随着铅胁迫强度的增加,青霉菌的缓解效应递减,可能存在的原因是高浓度重金属对微生物存在伤害作用,或是微生物的总量不足以达到缓解的效果。

本试验结果初步说明,在铅污染的土壤中接种具有铅富集能力的青霉菌能减少桃苗对铅的吸收和累积,改善桃苗的生理状况。为此,在土壤铅污染的某一背景值内,如何利用特定微生物对重金属的吸收、固定和转化作用来保障果树的生长发育,并且使果实中的铅含量在国标范围内的研究需要进一步探讨。

4 结论

铅污染土壤中接种青霉菌后,毛桃和大久保桃根、茎、叶中铅的累积量均比未接种青霉菌的低,毛桃根、茎、叶中铅含量分别降低4.0%、28.7%、34.9%,大久保桃根、茎、叶中铅含量分别降低7.6%、15.2%、22.3%;接种青霉菌后,相对增加了各种浓度铅处理桃苗株高增长量、叶片叶绿素含量、硝酸还原酶的活性、超氧化物歧化酶活性,降低了叶片细胞膜相对透性,青霉菌对桃苗铅胁迫的缓解效应与土壤铅浓度高低相关,低铅浓度下青霉菌缓解效应优于高铅浓度下的缓解效应,青霉菌对桃苗铅胁迫的缓解效应在两个桃树品种间存在差异,对毛桃的缓解效应优于大久保桃。

参考文献：

- [1] Todd A C, Wetmur J G, Moline J M, et al. Unraveling the chronic toxicity of lead: An essential priority for environmental health[J]. *Environ Health Perspect*, 1996, 104(Suppl 1): 141–146.
- [2] Ikeda M, Zhang Z W, Shimbo S, et al. Urban population exposure to lead and cadmium in East and South-east Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 249: 373–384.
- [3] 陈怀满. 土壤-植物系统的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996. CHEN Huai-man. Heavy metal pollution in soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [4] 郑袁明, 罗金发, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征[J]. 地理研究, 2005, 24(4): 542–548. ZHENG Yuan-ming, LUO Jin-fa, CHEN Tong-bin, et al. Cadmium accumulation in soils for different land uses in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(4): 542–548.
- [5] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25: 117–122. CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25: 117–122.
- [6] 王亚雄, 郭瑾珑, 刘瑞霞. 生物吸附剂对重金属的吸附特性[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 72–75. WANG Ya-xiong, GUO Jin-long, LIU Rui-xia. Biosorption of heavy metals by bacterial isolated from activated sludge[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(6): 72–75.
- [7] 白红娟, 张肇铭, 杨官娥, 等. 球形红细菌转化去除重金属镉及其机理研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1809–1814. BAI Hong-juan, ZHANG Zhao-ming, YANG Guan-e, et al. Study on transformation and removal of the heavy metal cadmium by *Rhodobacter sphaeroides*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11): 1809–1814.
- [8] Ozdemir G, Ceyhan N, Ozturk T, et al. Biosorption of chromium(), cadmium() and copper() by *Pantoea* sp. TEM18[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, 102: 249–253.
- [9] Watanabe M, Kawahara K, Sasaki K, et al. Biosorption of cadmium ions using a photosynthetic bacterium, *Rhodobacter sphaeroides* S and amarine photosynthetic bacterium, *Rhodovulum* sp. and their biosorption kinetics[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2003, 95(4): 374–378.
- [10] Salinas E, Elorza de Orellano M, Rezza I, et al. Removal of cadmium and lead from dilute aqueous solutions by *Rhodotorula rubra*[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72: 107–112.
- [11] 曾景海, 齐鸿雁, 杨建州, 等. 重金属抗性菌 *Bacillus cereus* HQ-1 对银离子的生物吸附-微沉淀成晶作用[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 225–230. ZENG Jing-hai, QI Hong-yan, YANG Jian-zhou, et al. Biosorption of Ag⁺ by heavy metals hyperresistant *Bacillus cereus* Strain HQ-1[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 225–230.
- [12] 盛下放, 白玉, 夏娟娟, 等. 镉抗性菌株的筛选及对番茄吸收镉的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 467–469. SHENG Xia-fang, BAI Yu, XIA Juan-juan, et al. Screen out of cadmium-resistance strains and their effect on cadmium uptake by tomato[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 467–469.
- [13] 王红新, 郭绍义, 许信旺, 等. 接种丛枝菌根对复垦矿区玉米中重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1333–1337. WANG Hong-xin, GUO Shao-ji, XU Xin-wang, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal concentrations of maize in reclaimed soil of mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1333–1337.
- [14] 黄艺, 李婷, 费颖恒. 外生菌根真菌对油松幼苗根际土壤重金属赋存的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(3): 70–76. HUANG Yi, LI Ting, FEI Ying-heng. Effects of ectomycorrhizal fungi on heavy metal speciation in rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* seedling[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(3): 70–76.
- [15] Soares C R F S, Siqueira J O. Mycorrhiza and phosphate protection of tropical grass species against heavy metal toxicity in multi-contaminated soil[J]. *Biol Fertil Soils*, 2008, 44: 833–841.
- [16] 邵继海, 姚习文, 何绍江. 芒麻根际抗Cd细菌筛选及对芒麻生长和吸收Cd能力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 487–491. SHAO Ji-hai, YAO Xi-wen, HE Shao-jiang. Isolating Cd resistant bacteria from ramie rhizosphere and their effects on the growth and Cd absorptional characters of ramie[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 487–491.
- [17] 杜立栋, 王有年, 李奕松, 等. 微生物对土壤中铅富集作用的研究[J]. 北京农学院学报, 2008, 23(1): 38–41. DU Li-dong, WANG You-nian, LI Yi-song, et al. Study on accumulation of lead in soil by microbes[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2008, 23(1): 38–41.
- [18] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. ZOU Qi. Experiment in plant physiology[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.
- [19] 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2003. ZHANG Zhi-liang, ZHAI WEI-jing. A text-manual for plant physiology [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [20] Gavrilescu M. Removal of heavy metals from the environment by biosorption[J]. *Eng Life Sci*, 2004, 4(3): 219–232.
- [21] 刘红娟, 张慧, 党志. 一株耐镉细菌的分离及其富集Cd的机理[J]. 环境工程学报, 2009, 3(2): 367–371. LIU Hong-juan, ZHANG Hui, DANG Zhi. Isolation and bio-accumulation mechanisms of a Cd-resisting bacterium [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(2): 367–371.
- [22] 潘蓉, 曹理想, 张仁铎. 青霉菌和镰刀菌对重金属 Cd²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ 和 Pb²⁺ 的吸附特性[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 477–484. PAN Rong, CAO Li-xiang, ZHANG Ren-duo. Biosorption characteristics of heavy metals cadmium, copper, zinc, lead by *Penicillium* and *Fusarium* fungi[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(3): 477–484.
- [23] 刘爱民, 黄为一. 耐镉菌株的分离及其对Cd²⁺的吸附富集[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1): 91–95. LIU Ai-min, HUANG Wei-yi. Separation of tolerant cadmium bacterium strain and its accumulation adsorption of Cd²⁺[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(1): 91–95.
- [24] 杨卓, 李术娜, 李博文, 等. 接种微生物对土壤中Cd、Pb、Zn生物有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 671–675. YANG Zhuo, LI Shu-na, LI Bo-wen, et al. Effects of microbial inculcation on bio-availability of cadmium, lead and zinc in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 671–675.