

胡杨根际细菌提高木本植物对重金属胁迫的耐受性*

陈雯¹ 欧阳立明^{1*} 孔沛筠¹ 杨泽宇¹ 吴蔚¹ 朱冬林¹ 张利莉²

(¹华东理工大学生物工程学院, 上海 200237; ²塔里木大学生命科学学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘要 胡杨是我国西北荒漠地区特有的、对多种非生物逆境具有高抗逆性的树种,但其相关微生物的生态和生理功能研究还比较缺乏.本文从新疆沙雅地区原始胡杨林根际土壤中分离出重金属抗性细菌共72株.其中具有单一重金属(Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 或 Zn^{2+})抗性的细菌菌株50株,有三重以上重金属抗性的菌株9株.将其中5株多重重金属抗性细菌接种至生根的竹柳插条,进行重金属胁迫下的盆栽培养.结果表明:在铜或锌胁迫下,5株多重重金属抗性细菌对竹柳的生长抑制有不同程度的缓解,其中假单胞菌Z30和贪铜菌N8菌对铜和锌两种胁迫下竹柳生物量的增长与不接菌对照相比均达到显著差异水平.说明在非重金属污染区生长的胡杨根际存在多样性的重金属抗性细菌,其中一些多重重金属抗性菌对改善重金属胁迫下植物的生长有显著作用,具有应用于木本植物-微生物联合修复环境重金属污染的价值.

关键词 重金属; 胡杨; 根际细菌; 竹柳; 植物促生菌

文章编号 1001-9332(2015)09-2811-06 **中图分类号** Q89 **文献标识码** A

Rhizospheria bacteria of *Populus euphratica* improve resistance of wood plants to heavy metals. CHEN Wen¹, OUYANG Li-ming¹, KONG Pei-jun¹, YANG Ze-yu¹, WU Wei¹, ZHU Dong-lin¹, ZHANG Li-li² (¹*School of Biotechnology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China*; ²*School of Bioscience, Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(9): 2811–2816.

Abstract: *Populus euphratica* is a special kind of woody plant, which lives in desert area of north-western China and is strongly resistant to multiple abiotic stresses. However, the knowledge about the ecology and physiological roles of microbes associated with *P. euphratica* is still not enough. In this paper, we isolated 72 strains resistant to heavy metals from rhizospheric soil of wild *P. euphratica* forest in Shaya County of Xinjiang. There were 50 strains conveying resistance to one of four heavy metals (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} or Zn^{2+}), and 9 strains were resistant to at least three kinds of these heavy metals. Five of the multi-heavy metal resistant bacteria were inoculated to bamboo willow and the growth inhibition of plant under stresses of Cu^{2+} or Zn^{2+} was found to be alleviated to different extent. Among the 5 strains, *Pseudomonas* sp. Z30 and *Cupriavidus* sp. N8 significantly improved the growth of plant under stresses of both zinc and copper when compared to the uninoculated controls. The results showed the diversity of heavy metal resistant bacteria associated with *P. euphratica* which lived in a non-heavy metal polluted area and some of the multi-heavy metal resistant bacteria may greatly improve the growth of host plant under heavy metal stress. The PGPB associated with *P. euphratica* has potential application in the xylophyte-microbe remediation of environmental heavy metal pollution.

Key words: heavy metal; *Populus euphratica*; rhizosphere bacteria; *Salix maizhokung garensis*; plant growth-promoting bacteria (PGPB).

* 华东理工大学上海市级大学生创新活动项目(S13079)、新疆生产建设兵团塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室开放课题(BRZD1203)资助.

* * 通讯作者. E-mail: ouyanglm@ecust.edu.cn

2014-11-03 收稿, 2015-06-09 接受.

土壤重金属污染对植物多样性、食品安全和土壤微生物生态造成了极大威胁^[1],因此,开发有效的土壤修复技术十分重要.利用重金属富集性植物修复土壤重金属污染具有经济、环境友好、操作方便的优点,受到了人们的广泛关注.但植物尤其是草本植物修复存在生物量小、生长速度慢、土壤营养条件不良等逆境下重金属耐受性差等问题.植物与微生物联合修复利用能定殖到植物体内或根际的有益微生物,增强植物宿主对环境污染物和其他逆境的耐受性,即提高植物-微生物共生体系在逆境胁迫下的生存能力和生长表现,从而有效地增强共生体系对环境的修复能力.它结合了微生物和植物两种修复技术的优点,因而成为当前最具前景的低成本且环保、有效的环境修复处理方法^[2-4].

能促进植物生长和提高植物抗逆性的细菌被称为植物促生细菌(plant growth promoting bacteria, PGPB).PGPB 作用的机制包括分泌某些植物激素(如吲哚-3-乙酸、脱落酸、赤霉素、细胞分裂素等)或植物激素代谢酶类(如 1-氨基环丙烷-1-羧酸脱氨酶),促进植物吸收营养(固氮和溶解无机磷),促进植物对病原微生物的抗性(如分泌铁载体、抗生素)等^[5-6].一些 PGPB 参与加速金属离子的流动或固定、酸化、螯合以及还原而影响植物对重金属的吸收^[7].

胡杨(*Populus euphratica*),又称“异叶杨”,是杨柳科杨属植物中最原始、最古老的树种,具有抗旱、抗热、抗寒、抗风沙、抗盐碱和抗瘠薄的特性,是我国西部干旱高盐的荒漠地区唯一的乔木树种.我国天然胡杨林面积的 91.1% 分布在新疆地区,而新疆 95% 以上的胡杨林分布在塔里木河流域.因此这里是迄今为止地球上分布最集中、保存最完整、最具代表性的原始胡杨林.胡杨作为中国西北荒漠生态系统的重要成员,对于遏制沙漠扩展、改善生态环境、保护生物多样性、保障工农业生产具有不可替代的地位,也是我国宝贵的生物学研究资源^[8].

目前人们对胡杨干旱和高盐适应性的解释主要是基于植物生理方面.如胡杨可通过增加气孔阻力来降低胡杨叶片的蒸腾作用,选择性吸收无机离子以及降低 ATP 消耗来适应干旱环境的胁迫^[9].近年来发现,植物激素信号机制在木本植物应对长期非生物逆境的过程中有重要作用^[10-11].然而,与多年生木本植物紧密相关的微生物是否对其非生物逆境抗性有贡献,其相互作用机制如何,人们的认识还非常有限.

笔者前期研究发现,胡杨根际存在丰富的 PGPB,有助于提高宿主植物的抗旱和抗盐生长^[12-13].Helen 等^[14]报道,盐生植物对一些非生物逆境胁迫包括重金属也有较强抗性.这提示我们从胡杨根际细菌群落中寻找重金属抗性菌.它们有可能在微生物-木本植物联合修复重金属污染中具有应用价值.

木本植物生育期长,有较大的生物量和较高的经济价值,且其不会进入食物链,这使得它成为一个理想的植物修复载体.竹柳(*Salix maizhokung garensis*)为杨柳科柳属落叶乔木^[15],生长快速、适应性强,用途广泛,是营造工业原料林、速生丰产林、农田防护林和城乡绿化的优良生态树种^[16].用竹柳作为模式植物筛选 PGPB 进行联合修复可以应用到污染程度高、生态恶劣的地区,在改善生态的同时还能获得林木原料和经济效益,具有良好的实际应用价值.

为了了解胡杨根际细菌中是否存在重金属抗性菌及其多样性,以及能否改善接种后的竹柳在重金属胁迫下的生长,本文首先从胡杨根际土壤中筛选出多重重金属抗性细菌,研究菌株对不同重金属的抗性及其分布,对同时具有 3 种以上抗性的菌株进行 16S rDNA 测序,鉴定其菌种类型;再将筛选出的菌株接种于竹柳,在重金属胁迫下进行盆栽培养,比较和评价细菌对竹柳的促生抗逆效果.

1 材料与方法

1.1 试验材料

胡杨林根际土壤来自新疆阿克苏地区沙雅县原始胡杨林内.竹柳为市售插条,长 15 cm 左右.

细菌培养基和植物营养液配方(以下均为 1 L 体系).固体营养琼脂(NA):酵母提取物 3 g、胰蛋白胨 5 g、NaCl 5 g、琼脂 15 g;869:酵母提取物 5 g、胰蛋白胨 10 g、NaCl 5 g、葡萄糖 1 g、无水氯化钙 0.261 g、琼脂 15 g;改良的 Hoagland 营养液^[17]:四水硝酸钙 945 mg、硝酸钾 506 mg、硫酸铵 66 mg、磷酸二氢钾 66 mg、硝酸镁 74 mg、硫酸镁 433 mg、铁盐溶液 2.5 mL、微量元素液 5 μ L.

1.2 试验方法

1.2.1 胡杨根际土壤中重金属抗性细菌的分离 称取 2 g 土壤,加入 20 mL 0.85% NaCl 溶液和适量无菌的玻璃珠,置于摇床中,160 r \cdot min⁻¹ 振荡 30 min,使土壤颗粒充分散开形成均匀的土壤悬液.梯度稀释土壤悬液,将稀释度为 10⁵ ~ 10⁸ 的土壤悬液涂布到含重金属(Cu²⁺、Zn²⁺、Ni²⁺ 或 Pb²⁺)终浓度为 2 mmol \cdot L⁻¹ 的 NA 平板上.每个稀释度重复 3 次.之后

将平板倒置放于恒温培养箱中,30 ℃培养 3~5 d.选取合适稀释度(细菌菌落数落在 20~200 的范围内)的平板进行菌落计数,进而确定每克土壤中的细菌数以及每克土壤中 4 种重金属抗性菌的数量.

每克土样中的细菌数=特定稀释度平板上的菌落数×稀释度

将重金属平板上形态特征不同的菌在含重金属的培养基中重新培养和划线分离,得到纯培养菌株.

1.2.2 多重抗性菌株筛选 将从胡杨根际土壤分离得到的 155 个菌株,接种于含 2 mmol · L⁻¹ 重金属离子(分别为 Cu²⁺、Zn²⁺、Ni²⁺、Pb²⁺)浓度的 1/5 869 培养基平板,在 30 ℃培养箱培养 2 d,筛选出具有重金属离子抗性的菌株(其中同时具有 3 种以上重金属抗性的作为后续试验菌株).

1.2.3 菌株鉴定 菌株鉴定采用核糖体 16S rDNA 序列分析方法,具体步骤如下:1) 细菌基因组 DNA 提取:冷冻保存的菌株用 NA 培养基活化培养后,用溶酶体酶消化菌体,然后用 CTAB-氯仿抽提和异丙醇沉淀得到基因组 DNA^[18].2) PCR 扩增细菌 16S rDNA:所用 PCR 引物为(细菌 16S 通用引物):27f-(5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'); 1492r-(5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3')^[19],反应条件:预变性 94 ℃ 4 min;变性 94 ℃ 30 s;退火 55 ℃ 40 s;延伸 72 ℃ 90 s,30 个循环.扩增产物纯化回收后交铂尚生物技术公司测序.质量好的序列在 Ribosomal Database Project (RDP) 数据库通过 Classifier 工具^[20]在线比对后,鉴定得到菌属结果.

1.2.4 植物盆栽试验 植物用口径为 16 cm 的塑料花盆培养,培养基质用市售河沙.试验设置 1 个空白组、1 个对照组和试验组(空白组不做接菌处理,并用自来水浇灌;对照组不做接菌处理,并用重金属溶液浇灌;试验组进行接菌处理,并浇灌重金属溶液),每个试验组对应接种 1 种抗性菌株,每组 3 盆,每盆种植 4 根竹柳.

选用长度约 15 cm 的竹柳枝条,在萘乙酸钠生根粉溶液(50 mg · L⁻¹)中浸泡 2 h 后,用自来水培养约 1 周至生根,期间每隔 1 d 换一次水;同时用液体 NA 培养基培养试验菌株 1 d,离心去上清后,用 10 mmol · L⁻¹ 硫酸镁溶液将菌体悬浮并稀释到 OD600 值为 0.5;将生根的竹柳 12 棵为一组浸泡于所配制的 50 mL 不同菌悬液中 2 h(对照组与空白组用等量 10 mmol · L⁻¹ 硫酸镁溶液处理),即完成接种处理.

处理后的竹柳于口径 16 cm 的花盆中用干净的

细黄沙培养,每个花盆中装等体积沙子,加自来水至饱和.所有的盆栽竹柳置于人工气候培养箱中培养(培养温度:25 ℃/20 ℃,光照周期:16 h/8 h,湿度控制在 50%~60%).移栽 1 d 后每盆用改良的 Hoagland 营养液浇灌 60 mL 以恢复植株移栽后的生长,5 d 后开始重金属胁迫培养 2 周^[21].

用自来水配制重金属溶液(Cu²⁺ 100 μmol · L⁻¹;Zn²⁺ 200 μmol · L⁻¹),处理各试验组植物.每天浇灌 60 mL,空白组浇灌自来水 60 mL.

培养两周后,将植物小心从沙土中取出,用自来水反复冲洗去除泥沙,然后去离子水淋洗,再用滤纸吸干多余水分.分别将每盆竹柳的新生茎叶以及根部剪下,于 60 ℃恒温烘箱内烘干至恒量,称量并记录植株新生茎叶和根部干质量.记录每盆竹柳新生部分的干质量.

1.3 数据处理

将所得的植物各部分干质量数据,用 SPSS 软件处理,采用单因素多重变量分析不同处理的植物干质量,各组数据与经重金属胁迫处理但不接种细菌的对照组数据两两比较差异,差异显著性水平以 α=0.05 为检验标准.

2 结果与分析

2.1 胡杨根际重金属抗性细菌的抗性分布

从胡杨植物根系土壤中分离筛选得到 72 株重金属抗性细菌,不同抗性菌株的抗性种类和数量分布如图 1.其中单一抗性的菌株数量有 50 株,占全部菌株数量的 69.4%.单一抗性菌中 Zn 抗性菌数>Cu 抗性菌数>Ni 抗性菌数>Pb 抗性菌数.具有两重抗性的菌株有 13 株,具有三重抗性的菌株有 6 株,具有四重抗性的菌株有 3 株.可见,随着抗性种类的增加,菌株数量呈递减趋势.

2.2 菌株鉴定结果

将同时具有3种以上重金属抗性的9个菌株,

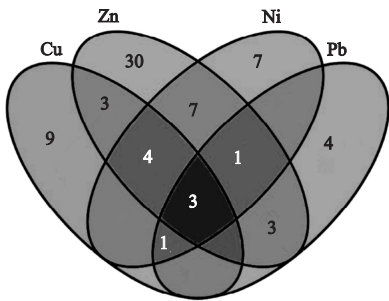


图 1 72 株细菌的重金属抗性文氏图
Fig.1 Venn's diagram outlining the heavy metal resistance of 72 strains.

表 1 多重抗性菌种的鉴定结果及其抗性种类
Table 1 Bacteria with multiple heavy metal resistance and their species identifications

细菌编号 Bacteria No.	属名 Genus (一致性 Confidence threshold>80%)	抗重金属种类 Resistance to heavy metal species
C90	链霉菌 <i>Streptomyces</i>	Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+}
N8	食铜菌 <i>Cupriavidas</i>	Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+}
N22	链霉菌 <i>Streptomyces</i>	Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+}
C23	芽孢杆菌 <i>Bacillus</i>	Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+}
Z30	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+}
C10	葡萄球菌 <i>Staphylococcus</i>	Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+}
C17 *	肠杆菌科 <i>Enterobacteriaceae</i>	Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+}
C32	马赛菌 <i>Massilia</i>	Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+}
C45	新鞘氨醇杆菌 <i>Novosphingobium</i>	Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+}

* 仅鉴定到科 Only assigned to family level.

扩增 16S rDNA 序列并测定,在 Ribosomal Database Project (RDP) 数据库通过 Classifier 工具在线比对后,鉴定得到菌属结果如表 1.9 株细菌分属于 8 个不同属,说明胡杨根际重金属抗性细菌的多样性比较高.

2.3 竹柳接种胁迫培养结果

笔者前期通过菌株接种拟南芥 (*Arabidopsis thaliana*) 在重金属胁迫下培养的预试验结果 (数据未发表),从以上 9 株细菌中选出与植物共生抗逆效果较好的 C90、N8、N22、C23 及 Z30 号 5 株菌株接种竹柳的扦插枝条,在一定的重金属离子浓度下进行培养,通过植物生长情况的比较来评估体系抗重金属的性能.

接种不同菌株的竹柳分别用 100 μmol · L⁻¹ Cu²⁺、200 μmol · L⁻¹ Zn²⁺ 的水溶液浇灌培养两周后,剪下竹柳新生根及叶于烘箱烘干后,于分析天平称取接种不同菌株的植物新生部分的干质量,得到图 2.各组数据与对照相比差异显著的在图中用“*”号示出.

由图 2 可以看出,试验浓度的重金属溶液处理对竹柳生长有明显的毒害作用,在 100 μmol · L⁻¹ Cu²⁺ 或 200 μmol · L⁻¹ Zn²⁺ 胁迫下,对照组植物新生组织总干质量分别为空白组的 56.2% 和 56.5%.从植物形态发育上可观察到,重金属胁迫下对照组的植物叶面积小且稀疏,根数量少而且根长度短.

候选细菌中的大部分对缓解重金属对宿主植物生长的抑制起到了明显作用,其中 Z30 和 N8

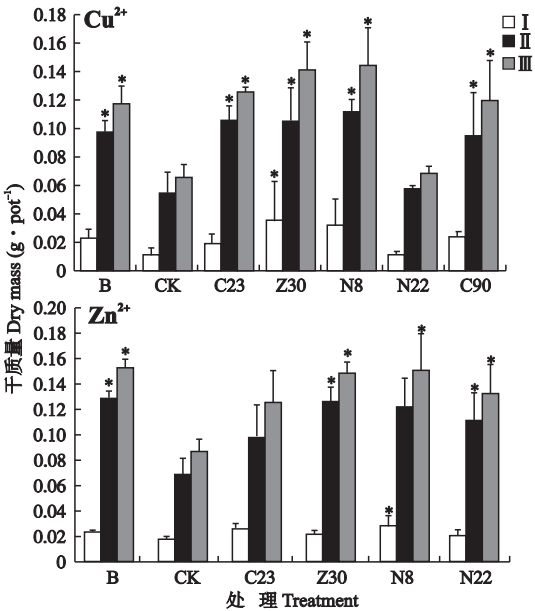


图 2 Cu²⁺和 Zn²⁺胁迫下不同类型接菌处理的植株质量
Fig.2 Dry mass of plants inoculated with different stains under the stress of Cu²⁺, Zn²⁺.
B: 空白组 Blank; CK: 对照 Control. I: 根 Root; II: 叶 Leaf; III: 总计 Total. * P<0.05.

菌株在 Cu 和 Zn 两种胁迫下对植物生长的促进都达到显著水平 (图 2).在 Cu²⁺胁迫下,与无接种对照组相比,接种 N8 组植株新生组织总干质量增加到 2.20 倍、接种 Z30 号的为 2.14 倍、C23 为 1.92 倍、C90 为 1.82 倍,均接近或超过非胁迫空白组的生长.在 Zn²⁺胁迫下,接种 Z30、N8、N22 号菌株的植株新生组织干质量分别为对照组的 1.72、1.74 和 1.53 倍,均显著高于对照组.这些促进植物在重金属胁迫

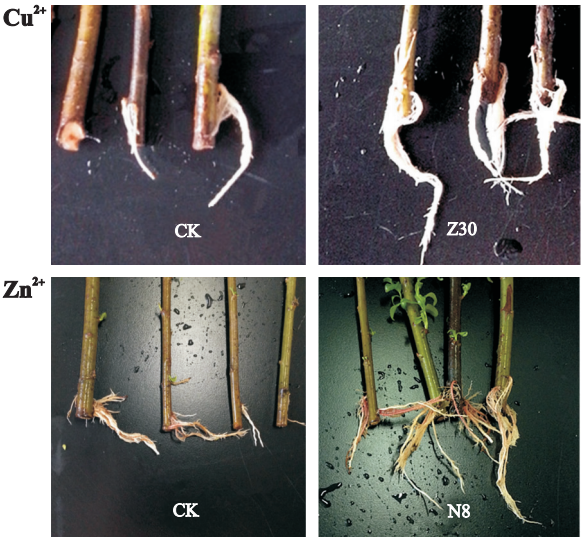


图 3 Cu²⁺和 Zn²⁺胁迫下植株地下部分的生长状况
Fig.3 Growth conditions of underground part of the plants under the stress of Cu²⁺, Zn²⁺.

迫下生长的细菌下文统称为植物促生抗逆菌。

大多数促生抗逆菌对宿主植物地上部生长量的促进作用明显。由于根系水分含量较高,而且总体生物量较低,所以促生抗逆菌的作用体现在植物根系干质量的增长量上大多不显著。其中 Z30 号菌对竹柳在 Cu 胁迫下的根系生长发育有显著促进,而 N8 菌对竹柳在 Zn 胁迫下的根系生长发育有显著促进(图 3)。

N8 和 Z30 菌株对植物在 Cu 和 Zn 胁迫下都有显著的促生抗逆表现,但 N22 菌仅提高了植物对 Zn 的耐受性,对植物在 Cu 胁迫下的生长抑制没有缓解表现。

3 讨 论

本研究发现,生长在非重金属污染地区的胡杨根际存在重金属抗性细菌,并且多样性较高。分离得到的多重重金属抗性细菌菌株可在 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫下显著提高木本植物竹柳的耐受生长,尤其是 N8 和 Z30 菌表现优良。经过 16S rDNA 序列鉴定,Z30 是假单胞菌属,N8 是贪铜菌属。假单胞菌属细菌有丰富的重金属抗性基因和化合物代谢途径,常被用于生物修复和植物促生^[22]。而贪铜菌属细菌对铜有高度耐受性,且此菌属有芳香族化合物污染修复的能力^[23],但尚无其促进植物的重金属耐受性的相关报道。本文的结果证明它们有应用到木本植物-微生物联合修复环境的潜力。

PGPB 对植物吸收重金属的影响分为 3 种情况:一些微生物增加了植物对重金属的吸收和富集,并通过解毒机制提高植物对体内外高浓度重金属的耐受性;一些微生物通过减少植物对重金属的吸收来提高植物对环境重金属的耐受性;还有一些微生物可以明显改变重金属在植物体内的分配和转运,使一些重金属从敏感的组织转运到有耐受性的组织,从而提高植物对环境重金属的耐受性。第一种情况可以直接提高共生体系清除土壤重金属污染物的效率;第二种情况有助于植物在尾矿等环境恶劣地区生存和生长,有利于生态恢复;第三种情况下,微生物虽然并未直接提高植物对重金属的吸收能力,但植物在重金属胁迫下的生长改善后,可以间接提高植物修复能力。N8 和 Z30 对植物吸收重金属的影响和应用还有待于进一步研究。

植物相关微生物的联合应用,提高了植物修复技术的效果。近年来相关研究不断深入,Wang 等^[24]发现,芽孢杆菌可提高小麦对铜的累积,减轻由铜导

致的氧化损伤,并分泌吲哚-3-乙酸(IAA)促进植物生长。Babu 等^[25]发现,来自欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)根系的苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*) GDB-1 具有从尾矿去除重金属的能力,机制涉及产生 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氨酶、吲哚乙酸(IAA)和铁载体,以及溶解土壤磷等促进植物生长的特性。本文发现的促生抗逆菌提高植物对重金属的耐受机制还有待深入研究。随着微生物-植物促生抗逆相关作用机制研究的不断深入,以及优良菌株的不断发现,微生物-植物联合作用作为一种很有潜力的重金属修复技术,会逐步完善而走上实际应用的道路。

参考文献

- [1] Zhang Y (张 彦), Zhang H-W (张惠文), Su Z-C (苏振成), *et al.* Effects of long-term heavy metals stress on farmland soil microbial population, biomass and activity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(7): 1491-1497 (in Chinese)
- [2] Chen J-M (陈景明). Reviews on heavy metals resistance of plants. *Acta Agriculture Jiangxi* (江西农业学报), 2005, **17**(4): 117-121 (in Chinese)
- [3] Jiang H-Y (江行玉), Zhao K-F (赵可夫). Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2001, **7**(1): 92-99 (in Chinese)
- [4] Ma Y (马 莹), Luo Y-M (骆永明), Teng Y (滕 应). Effects of endophytic bacteria enhancing phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2013, **50**(1): 195-202 (in Chinese)
- [5] Rajkumar M, Sandhya S, Prasad MNV, *et al.* Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 2012, **30**: 1562-1574
- [6] Wang Y-L (王英丽), Lin Q-Q (林庆祺), Li Y (李 宇), *et al.* Application potential of siderophore-producing rhizobacteria in phytoremediation of heavy metals-contaminated soils. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(7): 2081-2088 (in Chinese)
- [7] Hazrat A, Ezzat K, Muhammad AS. Phytoremediation of heavy metals: Concepts and applications. *Hemosphere*, 2013, **91**: 869-881
- [8] Qiao H-L (乔海莉), Tian C-M (田呈明), Luo Y-Q (骆有庆), *et al.* Diversity of soil microorganism in the natural *Populus euphratica* forests in Xinjiang. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2007, **29**(5): 127-131 (in Chinese)
- [9] Yang Y-Q (杨永青), Wang W-Q (王文棋), Erio AO, *et al.* Research of *Populus*' physiological adaptation mechanisms under drought stress. *Journal of Beijing*

Forestry University (北京林业大学学报), 2006, **28** (S2): 6–11 (in Chinese)

[10] Junghans U, Polle A, DÜchting P, *et al.* Adaptation to high salinity in poplar involves changes in xylem anatomy and auxin physiology. *Plant, Cell and Environment*, 2006, **29**: 1519–1531

[11] Osakabe Y, Kawaoka A, Nishikubo N, *et al.* Responses to environmental stresses in woody plants: Key to survive and longevity. *Journal of Plant Research*, 2012, **125**: 1–10

[12] Wang SS, Ouyang LM, Ju XY, *et al.* Survey of plant drought-resistance promoting bacteria associated with *Populus euphratica* tree from arid soil. *Indian Journal of Microbiology*, 2014, **54**: 419–426

[13] Ju XY, Ouyang LM, Zhang LL. Endophytic bacteria community of *Populus euphratica* Oliv. and the strains improving the salt tolerance of plant. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2014, **8**: 43–52

[14] Helen D, Evdokia S, Eleni M. Mitigation measures for chromium-VI contaminated groundwater: The role of endophytic bacteria in rhizofiltration. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **281**: 114–120

[15] Mao X-X (毛晓霞). Effects of three hormones on cuttage rooting of bamboo-willow. *Hubei Agricultural Sciences* (湖北农业科学), 2013, **52**(5): 1086–1089 (in Chinese)

[16] Zhu J-J (朱继军), Chen B-S (陈必胜), Wang Y-Q (王玉勤), *et al.* Preliminary study on introduction of the energy willow varieties of *Salix jiangsuensis* and bamboo willow. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2012, **40**(29): 14290–14291 (in Chinese)

[17] Barac T, Taghavi S, Borremans B, *et al.* Engineered endophytic bacteria improve phytoremediation of water-soluble, volatile, organic pollutants. *Nature Biotechnology*, 2004, **22**: 583–588

[18] Vesa M, Seppo N, Seppo K, *et al.* MPN-PCR-quantification method for staphylococcal enterotoxin c1 gene from fresh cheese. *International Journal of Food Microbiology*, 1997, **36**: 135–143

[19] Jiang H, Dong H, Zhang G, *et al.* Microbial diversity in water and sediment of Lake Chaka, an Athalassohaline Lake in northwestern China. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**: 3832–3845

[20] Wang Q, Garrity GM, Tiedje JM, *et al.* Classifier for rapid assignment of rRNA sequences into the new bacterial taxonomy. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**: 5261–5267

[21] Morgan PW, Drew MC. Ethylene and plant responses to stress, *Physiologia Plantarum*, 1997, **100**: 620–630

[22] Tan G-E (谭贵娥), He C-Q (何池全), Lu X-Y (陆晓怡). Effect of lead-tolerant bacteria on lead uptake and accumulation by *Ricinus communis* L. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2008, **27**(1): 82–85 (in Chinese)

[23] Berezina N, Yada B, Lefevbre R. From organic pollutants to bioplastics: Insights into the bioremediation of aromatic compounds by *Cupriavidus necator*. *New Biotechnology*, 2015, **32**: 47–53

[24] Wang HO, Xu R, You LM, *et al.* Characterization of Cu-tolerant bacteria and definition of their role in promotion of growth, Cu accumulation and reduction of Cu toxicity in *Triticum aestivum* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **94**: 1–7

[25] Babu AG, Kim JD, Oh BT. Enhancement of heavy metal phytoremediation by *Alnus firma* with endophytic *Bacillus thuringiensis* GDB-1. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **250**: 477–483

作者简介 陈 雯,女,1993 年生,本科生. E-mail: ivine163@163.com

责任编辑 肖 红