

植物修复重金属污染及内生细菌效应

丁建¹ 陈贝¹ 袁建军^{2*}

(1. 厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室 福建 厦门 361005)

(2. 泉州师范学院 福建 泉州 362000)

摘要: 土壤和水体的重金属污染已严重危害人类生存环境与健康。由于受重金属污染的环境分布广泛, 迫切需要开发经济的清除环境重金属的技术。植物修复是通过绿色植物降解或移除环境污染物, 有望成为重金属污染环境原位修复技术。植物内生菌是指定殖于健康植物的各种组织和器官内部的细菌, 被感染的宿主植物不表现出外在病症, 耐重金属的内生菌在多种超富集植物中存在。在植物修复过程中, 野生型内生菌或基因工程内生菌的抗性系统能降低重金属植物毒性, 促进其迁移金属。耐重金属内生菌还可以通过固氮、溶解矿物元素及产生类植物激素、铁载体和 ACC 脱氨酶等产物促进植物的生长。主要综述目前植物-内生菌相互作用及其潜在的促进植物修复重金属污染的研究进展。

关键词: 植物修复, 内生菌, 重金属

Phytoremediation of heavy metals and its endophytic bacteria effects

DING Jian¹ CHEN Bei¹ YUAN Jian-Jun^{2*}

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

(2. Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract: Pollution of soils and water with heavy metals is becoming one of the most severe environmental and human health hazards. Innovative ways are pressed for cleaning widespread heavy metals contamination. Phytoremediation is a remediation technology that requires the use of green plants to remove pollutants from the environment. Endophytic bacteria colonize within plant hosts without causing symptoms of infection or negative effects. The metal resistant endophytes are present in various hyperaccumulator plants. During phytoremediation of metals, the wild-type or engineered endophytes can lower metal phytotoxicity and enhance heavy metal translocation to plant through its metal-resistance system. Moreover, the metal resistant endophytes can indirectly benefit plant growth by various mecha-

nisms such as nitrogen fixation, solubilization of minerals production of phytohormines, siderophors, 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase. This review describes the potential for exploiting plant-endophyte partnerships to improve phytoremediation of heavy metals.

Keywords: Phytoremediation, Endophytic bacteria, Heavy metal

工业化进程带来了极大的环境问题, 在很多工业区的土壤和水体环境中, 存在高浓度重金属污染, 从而导致了严重的生态危险^[1]。重金属随着食物链累积, 对高等动物机体产生危害^[2]。

由于土壤等环境中重金属污染是一个不可逆的过程, 具有非降解性并难以用物理化学方法完全清除。传统方法修复土壤、水体重金属污染的工艺复杂, 投资昂贵, 难以对大面积污染环境进行净化处理。开发简单有效的原位生物处理技术是治理重金属污染的一条重要途径, 通常是利用绿色植物及其微生物与环境之间的相互作用, 对环境污染进行吸附、降解或富集, 使污染环境得到恢复, 包括利用植物原位修复污水、污泥、土壤、沼泽地等^[3-4]。植物修复技术作为绿色的环境污染治理技术, 已成为世界环境修复技术与工程科学研究的前沿领域之一。

1 植物修复技术

植物修复(Phytoremediation)是一种基于自然生长植物或者遗传工程培育植物修复污染土壤或水体等技术总称。它通过植物系统及其植物内生菌、根际微生物群落相互作用来去除、降解或稳定环境污染物^[3-4]。植物修复重金属污染主要分为以下类型:

(1) 植物提取(Phytoextraction), 是利用重金属超富集植物将土壤或水体中的重金属转运到植物的地上部分, 再通过收获植物将重金属移走, 以降低土壤或水体中的重金属含量。利用超富集植物吸收土壤或水体中的重金属的持续植物提取技术和利用螯合剂(EDTA、HEDTA、DTPA、EGTA 和 NTA)促进植物吸收重金属的诱导植物提取技术^[13,17,25]。

(2) 植物滤除法(Rhizofiltration), 植物利用根系吸收污水中重金属元素, 而达到净化水体的作用。

(3) 植物的固定(Phytostabilization), 是植物利用吸收沉淀和相关微生物相互作用来固定土壤中重金属的方式, 可以降低重金属的生物有效性和防止其进入水体和食物链, 从而降低其对环境的污染风险。

植物修复技术的前提条件是找到合适的超富集植物。超富集植物是指能超量吸收重金属元素, 将其转移到地上组织而不表现出任何毒性特征的植物。一般认为, 超富集植物能富集 Co、Cr、Cu、Pb 和 Ni 的量在 1.0 mg/kg (DW) 以上, 积累 Mn、Zn 含量在 10 mg/kg (DW)^[10]。Baker 等进一步指出超富集植物的转运系数(植物地上组织与根部重金属含量的比值)应该大于 1, 表明超富集植物具有将重金属从地下组织向地上组织转移和富集的能力^[18]。国内外已经确定近 400 种超富集重金属植物(表 1), 也有农作物作为实验植株的报道。相比一般性超富集植物, 农作物具有可产生高生物量的优势, 如果能促进其植物提取效能, 在重金属污染土壤修复中也有一定的应用潜力。如 Huang 等报道在实验条件下, Pb (2 500 mg/kg)污染土壤经 HEDTA 处理后, 玉米幼芽 Pb 富集量达到 10 600 mg/kg^[13]; Sheng 等报道了在耐 Cd 细菌的作用下促进油菜对 Cd 的富集作用^[16]。此外, Windham 等报道了 2 种主要盐沼地植物互花米草和芦苇对重金属的吸收和转移, 结果显示 2 种植物吸收的重金属主要分布在根部, 达到 70%–100%, 冠根比小于 0.42。两种植物的地上组织都能在不同程度上检测到 Hg、Cu、Zn、Cr 和 Pb 5 种重金属元素, 并且互花米草叶片 Hg (0.05–0.08 mg/kg)和 Cr (1.25–4.07 mg/kg)含量显著高于芦苇, 而在 10 月份, 芦苇的叶片能富集更多的微量元素 Cu (3.72–10.70 mg/kg)和 Zn (11.52–79.03 mg/kg)^[19]。互花米草和芦苇的抗逆性强, 生物量较大, 这为利用植物修复受重金属污染湿地提供了参考。

表 1 部分超富集植物及其相应重金属
Table 1 Overview of partial hyperaccumulator plants and their associated heavy metal(s)

超富集植物 Hyperaccumulator plants	重金属 Heavy metals	参考文献 References
遏蓝菜属植物 <i>Thlaspi goesingense</i>	Ni,Zn	[5-6]
天蓝遏蓝菜 <i>Thlaspi caerulescens</i>	Zn,Cd	[7]
贝托庭芥 <i>Alyssum bertolonii</i>	Ni	[8]
蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i>	As	[9]
<i>Aeollanthus biformifolius</i>	Cu	[11]
圆叶遏蓝菜 <i>Thlaspi rotundifolium</i>	Pb	[12]
东南景天 <i>Sedum alfredii</i> Hance	Zn	[14]
商陆 <i>Phytolacca acinosa</i> Roxb.	Mn	[15]

2 内生菌促进植物修复作用

2.1 植物修复相关细菌

植物修复的成功在于通过充足的植物产量和有效的从根部向地上组织转移作用,将重金属从污染环境移除。已报道的遏蓝菜属、庭芥和商陆等生长在受重金属污染土壤上的现场植物,能在正常的生长发育下富集高浓度的重金属^[5,8,15]。但是超富集植物存在以下不足:(1)大部分超累积植物植株矮小,生物量低,生长周期长,因而修复效率低,应用植物修复技术时,可能要花费几年的时间才能有效地降低重金属的含量^[17];(2)特定重金属富集植物通常可能只耐受或吸收一种或两种重金属元素,环境中其他重金属或有机污染物可能对其产生植物毒性,从而限制了植物修复技术在复合污染环境治理中的应用。这就要求深入研究植物修复策略,包括非生物和生物性策略。植物相关根际微生物和内生菌引起了极大关注,迄今在植物-细菌-重金属三者相互作用方面有大量的应用性研究^[21]。

根际微生物可能是内生菌的主要来源,两者都在植物-土壤环境两者关系中起到重要的作用,其中植物根际促生菌(Plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)在植物修复研究中受到很多学者青睐^[25]。耐重金属根际促生菌通过固氮、促进磷钾溶解、产生植物激素(如吲哚乙酸, IAA)和铁载体等方式促

进植物生长^[21], Sheng 等报道了产 IAA 假单胞菌和芽孢杆菌能在 Cd 毒性浓度条件下促进油菜生长发育、根系延长和对 Cd 的吸收^[16]。植物因重受金属等环境因子胁迫后合成“应激”乙烯, 次生代谢途径开始运转, 影响植物正常生理过程, PGPR 可以合成 1-氨基环丙烷-1-羧基(1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)脱氨酶, 降解乙烯前体物质, 提高植物对环境胁迫的耐受性^[29]。很多植物内生菌也具有促植物生长的特征。Idris 等从 *Thlaspi goesingense* 分离出的内生菌均为产生铁载体的 Ni 抗性细菌, 其中 36%能产生 ACC 脱氨酶活性^[6]。

2.2 内生菌和耐重金属内生菌

植物内生菌是指定殖于健康植物的各种组织和器官内部的细菌, 被感染的宿主植物不表现出外在病症^[20]。Kieran 等将携带绿色荧光蛋白基因(*gfp*)的质粒转化从杨树木质部汁液中分离的 3 株内生菌, 研究表明重组菌都能有效定殖于根际区, 并且能重新进入宿主植物根部木质部或树干, 证实内生菌可以通过根围环境进入植物体内^[22]。内生菌还可以通过种子垂直传递^[23]。一旦进入植物体内, 就会在适合其生存的特定组织如根毛、叶片细胞间隙、细胞质等中定殖。内生菌可以很容易地穿过植物皮层进入木质部导管中, 随着植物的生长可以将内生菌运送到植物上部营养器官或繁殖器官中。Compant 等发现内生伯克霍尔德菌(野生株 PsJN)在葡萄苗木的地上组织中是通过蒸腾系统进行系统性传播^[24]。

PGPR 能促进植物生长和重金属元素的相变和吸收, 但是 PGPR 的有效生存和定殖取决于自身固有的生理特征及植物根围生物和非生物性的土壤环境等^[27]。相比之下, 内生菌定殖于植物体内, 超富集植物在体内积累了大量重金属后, 为内生菌提供了一个高重金属浓度的生存环境, 驯化后的内生菌具有很强的重金属抗性。Idris 等利用 T-RFLP 和 16S rDNA 测序方法鉴定了 *Thlaspi goesingense* 根际菌主要是甲基杆菌属、红球菌属和 *Okibacterium* 属, 大部分内生菌 16S rDNA 与嗜中温甲基杆菌属和鞘氨醇单胞菌属。内生菌比根际细菌有更高的 Ni 耐受性, 能分泌 ACC 脱氨(基)酶的比例为 36%, 明显高

于根际细菌的 20%^[6]。Lodewyckx 等从超富集 Zn 植物 *T. Calaminaria* 中分离出根际细菌和根、顶芽内生菌, 研究表明, 顶芽内生菌对重金属 Zn 和 Cd 的耐受性高于分离自根际和根部相同种属的细菌^[7]。超富集植物内生菌具有分泌 ACC 脱氨酶、铁载体、植物激素等特征, 促进重金属的浸提和吸收^[26]。这些特性提示耐重金属内生菌具有很好的应用前景。

2.3 内生菌促进植物修复重金属污染

内生菌-超富集植物是一种互惠共生关系。超富集植物为内生菌提供必要的营养物质和定殖环境, 为内生菌提供高浓度重金属的生存环境。反过来, 内生菌能直接或间接地促进超富集植物的生长发育和健康^[30]。

铁元素几乎是所有生命机体的必需元素。石灰性土壤中铁元素主要以 Fe^{3+} 高价态和不溶性氧化态存在, 不能直接被细菌利用。为了摄取充足的铁元素, 细菌必须具有浸提金属的机制, 其中包括分泌铁载体(Siderophores)。铁载体是一种可以高效率结合铁并且供给微生物细胞的低分子量物质^[31], 3 价铁以铁-铁载体复合物形式定位于细胞膜后, 被还原成 2 价铁, 并释放到细菌内。已有 500 多种铁载体得以确认^[32]。铁载体作为整合剂溶解矿物或有机化合物之外, 还可以与 Al、Cd、Cu、Ga、In、Pb 和 Zn, 甚至和放射性核元素 U 和 Np 形成稳定复合物, 提高这些物质的溶解度^[26]。分离自不同超富集植物的多种内生菌也可以产铁载体^[6-8], 并且能通过促进植物生长和对重金属的吸收加强植物修复。Barzanti 等报道 83% (67 株) 分离自 *Alyssum bertolonii* 的内生菌在 Ni 胁迫下能分泌铁载体和促进植物生长^[8]。Sheng 等分离出荧光假单胞菌 G10 和分歧杆菌 G16 两株 Pb 抗性根内生菌, 其中 G16 菌株能产铁载体, 并显著提高在铅污染土壤上的油菜生物量和吸收 Pb 的总量^[28]。值得注意的是, 虽然 Dimkpa 等报道了铁载体能促进植物的生长, 提高植物对重金属毒性的耐受力, 并从根际区吸收有毒重金属的总量(如 Cd 和 U)^[33-34]; 相反的是, Lodewyckx 等研究表明从超富集植物 *T. caerulea* 茎和根组织中分离的内生菌在铁缺陷条件下不产生铁载体^[35]。

有待直接的证据说明产铁载体内生菌能提高宿主植物的有毒重金属耐受性。

内生菌能平衡植物因胁迫诱导产生的乙烯。乙烯是一种植物内源成熟激素, 生物性或非生物性环境胁迫因素会上调乙烯的表达, 广泛地影响植物正常发育, 如抑制根系的延长、侧根的生长和根毛的形成、种子的萌发、顶芽发育和叶片脱落等^[29,36]。内生菌通过分泌植物激素如 ACC 脱氨酶, 将 ACC 作为 N 源, 降低植物细胞乙烯合成量, 从而间接促进根系的延长和植物发育。Idris 等研究表明相对于根际菌(20%), 内生菌有更高比例(36%)能利用 ACC 作为 N 源, 这可能与内生菌-植物天然的共生关系相关^[6]。Sheng 等分离的分歧杆菌 G16, 是能分泌 ACC 脱氨酶的 Pb 耐受型根内生菌, 该菌能显著提高受试植物的生物量和 Pb 的吸收总量^[28]。

内生菌合成促生化合物。在重金属污染的环境中, 植物相关细菌通过产生生长素、细胞分裂素和赤霉素等植物激素促进植物发育和生长而发挥重要作用^[39]。大量的研究报道了由内生菌所产植物激素吲哚乙酸(IAA)的促生作用^[26]。甘薯产 IAA 内生菌能有效促进宿主植物生长, 接种异种植物白杨后, 也可以增加白杨植株的高度, 并促进其根系的分枝和叶子的形成^[37]。在 Pb 胁迫下, 产 IAA 的根内生分歧杆菌 G16, 接种油菜后, 能促进油菜根系发育, 提高其生物量和吸收 Pb 总量^[28]。但是 Kamnev 等研究发现在培养基中添加 0.2 mmol/L 的 Cu^{2+} 或 Cd^{2+} 后, 能显著降低内生巴西固氮螺菌 *Azospirillum brasilense* Sp245 的 IAA 产量, 直接影响重金属污染土壤环境中植物-内生菌共生互惠的效能^[38]。重金属是否抑制 IAA 合成, 这可能与产生 IAA 菌株对重金属的抗性特征相关。

基因工程内生菌在植物修复中的应用。很多策略用来提高植物修复效率, 其中包括利用特定重金属抗性基因, 对植物内生菌进行基因改造, 研究其对植物修复的作用。Lodewyckx 等将 *Ralstonia metallidurans* 31A 的 Ni 抗性基因 *ncc-nre* 通过转座子整合到洋葱伯克霍尔德菌 *Burkholderia cepacia* L.S.2.4 和织片草螺菌 *Herbaspirillum seropedicae* 的

染色体, 重组伯克霍尔德菌接种黄羽扇豆 *Lupinus luteus* L 后, 和对照组相比, 根部 Ni 的摄入量有所提高(30%), 顶芽 Ni 浓度相当, 而重组组织片草螺菌接种后的效果和野生型菌株相同。研究表明, 基因重组赋予内生菌的 Ni 抗性特征并没有增加植物对 Ni 的迁移作用^[40]。Weyens 等进一步将降解三氯乙烯 (TCE) 基因和 *ncc-nre* Ni 抗性基因转化洋葱伯克霍尔德菌 VM1468, 黄花羽扇豆接种重组菌后, 可以降低 TCE 和 Ni 的植物毒性, 减少 TCE 的蒸散, 显著增加 Ni 的摄入量^[41]。基因改造内生菌策略已广泛应用于植物修复有机污染物研究^[42], 在进行修复重金属污染时值得借鉴。如 Taghavi 等报道将含甲苯降解基因的质粒 pTOM-Bu61 转化洋葱伯克霍尔德菌 VM1468 后接种白杨, 能促进受试植株生长, 减少甲苯的蒸散。同时 pTOM-Bu61 在白杨内生菌群中发生水平基因转移(Horizontal gene transfer, HGT), 这种基因转移可能改变内生菌菌群结构而提高修复环境损害效率^[43]。

3 展望

开发适合修复重金属污染的植物。综合超富集植物的特征, 选取生物量大、生长性能好的植株, 特殊现场环境下, 可考虑选用盐沼植物或可重复种植的农作物。对于特定的有毒重金属污染, 如砷、汞和硒等, 可以利用转基因植物进行有效的修复^[42]。

植物内生菌通过促进对矿物元素等营养物质的吸收、诱导系统抗性、生物固氮、产生植物激素等方式与宿主植物互惠共生, 促进植物生长发育和对重金属吸收, 加强植物修复重金属污染环境的效能。由于实际应用的需要, 植物修复和植物-内生菌相互关系还值得人们进一步研究。

通过筛选野生株或基因改造植物内生菌, 充分利用内生菌促生和抗性性能, 提高宿主植物对重金属的迁移量, 加强植物对重金属、重金属-有机物复合污染环境的修复能力。

植物内生菌有一定的菌群结构, 不同的菌种生物功能上表现不一, 应用复合型功能性内生菌剂促进植物修复可能是一种可行的策略。

参考文献

- [1] Singh BR, Steinnes E. Soil and water contamination by heavy metals//Lal R, Stewart BA, eds. *Advances in Soil Science: Soil Processes and Water Quality*[M]. USA: Lewis Publishers, 1994: 233-271.
- [2] Peralta-Videa JR, Lopez ML, Narayan M, et al. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain[J]. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2009, 41(8/9): 1665-1677.
- [3] Cunningham SD, Berti WR, Huang JW. Phytoremediation of contaminated soils[J]. *Trends in Biotechnology*, 1995, 13(9): 393-397.
- [4] Khan AG. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 18(4): 355-364.
- [5] Reeves RD, Brooks RR. European species of *Thlaspi* L. (Cruciferae) as indicators of nickel and zinc[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1983, 18(3): 275-283.
- [6] Idris R, Trifonova R, Puschenreiter M, et al. Bacterial communities associated with flowering plants of the Ni hyperaccumulator *Thlaspi goesingense*[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2004, 70(5): 2667-2677.
- [7] Lodewyckx C, Mergeay M, Vangronsveld J, et al. Isolation, characterization, and identification of bacteria associated with the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* subsp. *calaminaria*[J]. *Int J Phytoremediation*, 2002, 4(2): 101-115.
- [8] Barzanti R, Ozino F, Bazzicalupo M, et al. Isolation and characterization of endophytic bacteria from the nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii*[J]. *Microb Ecol*, 2007, 53(2): 306-316.
- [9] Wang J, Zhao FJ, Meharg AA, et al. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*. Uptake kinetics, interactions with phosphate, and arsenic speciation[J]. *Plant Physiol*, 2002, 130(3): 1552-1561.
- [10] Baker AJM, Brooks RR. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: a review of their distribution, ecology, and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, 1989, 1: 81-126.
- [11] Malaisse F, Grégoire J, Brooks RR, et al. *Aeollanthus bifolius* De Wild: a hyperaccumulator of copper from Zaïre[J]. *Science*, 1978, 199(4331): 887-888.
- [12] Reeves RD, Brooks RR. Hyperaccumulation of lead and zinc by two metallophytes from mining areas of central Europe[J]. *Environmental Pollution Series A, Ecological*

- and Biological, 1983, 31(4): 277–285.
- [13] Huang JW, Cunningham SD. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation[J]. New Phytologist, 1996, 134(1): 75–84.
- [14] Yang XE, Long XX, Ni WZ. *Sedum alfredii* H: a new Zn hyperaccumulating plant first found in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(19): 1634–1637.
- [15] Xue SG, Chen YX, Reeves RD, et al. Manganese uptake and accumulation by the hyperaccumulator plant *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae)[J]. Environmental Pollution, 2004(131): 393–399.
- [16] Sheng XF, Xia JJ. Improvement of rape (*Brassica napus*) plant growth and cadmium uptake by cadmium-resistant bacteria[J]. Chemosphere, 2006, 64(6): 1036–1042.
- [17] Puschenreiter M, Stöger G, Lombi E, et al. Phytoextraction of heavy metal contaminated soils with *Thlaspi goesingense* and *Amaranthus hybridus*: rhizosphere manipulation using EDTA and ammonium sulphate[J]. J Plant Nutr Soil Sc, 2001, 164(6): 615–621.
- [18] Baker AJM, Whiting SN. In search of the Holy Grail: a further step in understanding metal hyperaccumulation?[J]. New Phytol, 2002, 155(1): 1–4.
- [19] Windham L, Weis JS, Weis P. Uptake and distribution of metals in two dominant salt marsh macrophytes, *Spartina alterniflora* (cordgrass) and *Phragmites australis* (common reed)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 56(1): 63–72.
- [20] Schulz B, Boyle C. What are Endophytes?[M]. Microbial Root Endophytes, 2006, 9(1): 1–13.
- [21] Rajkumar M, Ae N, Freitas H. Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction[J]. Chemosphere, 2009, 77(2): 153–160.
- [22] Germaine K, Keogh E, Garcia-Cabellos G, et al. Colonisation of poplar trees by *gfp* expressing bacterial endophytes[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 48(1): 109–118.
- [23] Mastretta C, Taghavi S, van der Lelie D, et al. Endophytic bacteria from seeds of *Nicotiana tabacum* can reduce cadmium phytotoxicity[J]. International Journal of Phytoremediation, 2009, 11(3): 251–267.
- [24] Compant S, Reiter B, Sessitsch A, et al. Endophytic colonization of *Vitis vinifera* L. by plant growth-promoting bacterium *Burkholderia* sp. strain PsJN[J]. Applied Environmental Microbiology, 2005, 71(4): 1685–1693.
- [25] Khan AG. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 18(4): 355–364.
- [26] Rajkumar M, Ae N, Prasad MNV, et al. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction[J]. Trends in Biotechnology, 2009, 28(3): 142–149.
- [27] Zhuang XL, Chen J, Shim H, et al. New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation[J]. Environment International, 2007, 33(3): 406–413.
- [28] Sheng XF, Xia JJ, Jiang CY, et al. Characterization of heavy metal-resistant endophytic bacteria from rape (*Brassica napus*) roots and their potential in promoting the growth and lead accumulation of rape[J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 1164–1170.
- [29] Mayak S, Tirosh T, Glick BR. Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress[J]. Plant Physiol Biochem, 2004, 42(6): 565–572.
- [30] Mastretta C, Barac T, Vangronsveld J, et al. Endophytic bacteria and their potential application to improve the phytoremediation of contaminated environments[J]. Biotech Gen Eng Rev, 2006, 23: 175–207.
- [31] Miethke M, Marahiel MA. Siderophore-based iron acquisition and pathogen control[J]. Microbiol Mol Biol Rev, 2007, 71(3): 413–451.
- [32] Boukhalfa H, Crumbliss AL. Chemical aspects of siderophore mediated iron transport[J]. Biometals, 2002, 15(4): 325–339.
- [33] Dimkpa CO, Merten D, Syatos A, et al. Siderophores mediate reduced and increased uptake of cadmium by *Streptomyces tendae* F4 and sunflower (*Helianthus annuus*), respectively[J]. J Appl Microbiol, 2009, 107(5): 1687–1696.
- [34] Dimkpa CO, Merten D, Svatoš A, et al. Metal-induced oxidative stress impacting plant growth in contaminated soil is alleviated by microbial siderophores[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(1): 154–162.
- [35] Cindy L, Jaco V, Fiona P, et al. Endophytic bacteria and their potential applications[J]. Crit Rev Plant Sci, 2002, 21: 583–606.
- [36] Woodward AW, Bartel B. Auxin: regulation, action, and interaction[J]. Ann Bot, 2005, 95(5): 707–735.
- [37] Khan Z, Doty SL. Characterization of bacterial endophytes of sweet potato plants[J]. Plant and Soil, 2009, 322(1/2): 197–207.
- [38] Kamnev AA, Tugarova AV, Antonyuk LP, et al. Effects of heavy metals on plant-associated rhizobacteria: comparison of endophytic and non-endophytic strains of *Azospirillum brasilense*[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 19(1): 91–95.
- [39] Sgroi V, Cassán F, Masciarelli O, et al. Isolation and characterization of endophytic plant growth-promoting (PGPB) or stress homeostasis-regulating (PSHB) bacteria

- associated to the halophyte *Prosopis strombulifera*[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2009, 85(2): 371-381.
- [40] Lodewyckx C, Taghavi S, Mergeay M, et al. The effect of recombinant heavy metal-resistant endophytic bacteria on heavy metal uptake by their host plant[J]. *International journal of phytoremediation*, 2001, 3(2): 173-187.
- [41] Weyens N, Croes S, Dupae J, et al. Endophytic bacteria improve phytoremediation of Ni and TCE co-contamina-
tion[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(7): 2422-2427.
- [42] Doty SL. Enhancing phytoremediation through the use of transgenics and endophytes[J]. *New Phytologist*, 2008, 179(2): 318-333.
- [43] Taghavi S, Barac T, Greenberg B, et al. Horizontal gene transfer to endogenous endophytic bacteria from poplar improves phytoremediation of toluene[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(12): 8500-8505.

征订启事

2011年部分生物、农林类学术期刊联合征订表

刊物名称	邮发代号	刊 期	年价(元)	网 址	E-mail
癌变·畸·突变	80-285	双月刊	60	www.egh.net.cn	cemsctm@stu.edu.cn
动物学研究	64-20	双月刊	150	www.zoores.ac.cn	zoores@mail.kiz.ac.cn
动物学杂志	2-422	双月刊	360	http://dwxzz.ioz.ac.cn	journal@ioz.ac.cn
分子植物育种	84-23	双月刊	240	www.molplantbreed.org	mpb@hibio.org
国际遗传学杂志	14-55	双月刊	90	www.cma.org.cn	genetics@ems.hrbmu.edu.cn
激光生物学报	42-194	双月刊	150	www.jgswxb.net	jgswxb@hunnu.edu.cn
菌物学报	2-499	双月刊	480	http://journals.im.ac.cn/jwxtcn	jwxt@im.ac.cn
昆虫知识	2-151	双月刊	360	www.ent-bull.com.cn	entom@ioz.ac.cn
林业科学	82-6	月 刊	300	www.linyekexue.net	linykb@forestry.ac.cn
农业生物技术学报	2-367	双月刊	240	www.jabiotech.org.cn/	nsjxb@cau.edu.cn
人类学学报	2-384	季 刊	100	www.ivpp.ac.cn	acta@ivpp.ac.cn
生命科学	4-628	月 刊	480	www.lifescience.net.cn	cbbs@sibs.ac.cn
生命科学研究	42-172	双月刊	108	http://smky.chinajournal.net.cn	life@hunnu.edu.cn
生物工程学报	82-13	月 刊	780	http://journals.im.ac.cn/cjbcn	cjb@im.ac.cn
生物化学与 生物物理进展	2-816	月 刊	720	www.pibb.ac.cn	prog@sun5.ibp.ac.cn
生物技术通报	18-92	月 刊	300		biotech@mail.caas.net.cn
生物技术通讯	82-196	双月刊	150	http://swtx.chinajournal.net.cn	swtx@263.net
微生物学通报	2-817	月 刊	576	http://journals.im.ac.cn/wswxtbcn	tongbao@im.ac.cn
微生物学报	2-504	月 刊	660	http://journals.im.ac.cn/actamicrocn/	actamicro@im.ac.cn
武汉植物学研究	38-103	双月刊	180	http://whzwxxyj.cn	editor@rose.whiob.ac.cn
畜牧兽医学报	82-453	月 刊	360	www.xmsyxb.com	xmsyxb@263.net
遗传	2-810	月 刊	600	www.chinagene.cn	yczz@genetics.ac.cn
遗传学报	2-819	月 刊	600	www.jgenetgenomics.org	jgg@genetics.ac.cn
云南植物研究	64-11	双月刊	150	http://journal.kib.ac.cn	bianji@mail.kib.ac.cn
植物遗传资源学报	82-643	双月刊	120	www.zwyczy.cn	zwyczyxb2003@163.com
植物学报	2-967	双月刊	480	www.chinabullbotany.com	cbb@ibcas.ac.cn
中国实验动物学报	2-748	双月刊	120	www.calas.org.cn	A67761337@126.com
中国生态农业学报	82-973	双月刊	210	www.ecoagri.ac.cn	editor@sjziam.ac.cn
中国生物工程杂志	82-673	月 刊	960	www.biotech.ac.cn	biotech@mail.las.ac.cn
中国水产科学	18-250	双月刊	180	www.fishscichina.com	zgsckx@cafs.ac.cn
中国水稻科学	32-94	双月刊	120	www.ricesci.cn	cjrs@263.net
作物学报	82-336	月 刊	600	www.chinacrops.org/zwx	xbzw@chinajournal.net.cn