doi**:** 10. 11838 /sfsc． 20160502

根瘤菌在污染土壤修复中的地位和作用

黄兴如1，2，张彩文1，张晓霞1\*

**(** 1． 中国农业微生物菌种保藏管理中心/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所**，**北京 100081**;**2． 首都师范大学资源环境与旅游学院**，**北京 100048**)**

摘 要: 根瘤菌是一种在环境中广泛存在，常与豆科植物共生结瘤固氮的细菌类群， 在农、 林、牧业的可持续发 展中具有重要作用。近年来研究发现，除了人们熟知的固氮功能，根瘤菌还参与环境中重金属、有机物等污染土 壤的修复，在生态环境修复、维持土地生产力以及节能减排方面发挥了重要的作用，尤其是根瘤菌与豆科植物联 合修复污染环境效果更为显著。本文综合介绍了根瘤菌在重金属、有机物等污染土壤及滨海盐渍土壤修复中的地 位、作用及潜在价值，以期为改善生态环境提供一些可参考的方法和依据。

关键词: 根瘤菌; 促生作用; 生物修复

中图分类号: S154. 38 + 1 文献标识码: A 文章编号: 1673 －6257 ( 2016) 05 －0005 －06

根瘤菌 **(** rhizobia**)** 是一类广泛分布于土壤中的 革兰氏阴性杆状细菌**，**既可与豆科植物共生**，**也可 以在土壤中以腐生菌的状态长期生存**，**或作为内生 菌寄存于非豆科植物体内**［**1－2**］**。目前**，**根瘤菌的分 类已由1984年的2属4种发展到现在的14属70 多 种回**,**其中最具代表性的根瘤菌属有1889年Frank 最早建立的根瘤菌属*(Rhizobium* **) *；*** Jordan "于 1982年从根瘤菌属中分化出来的慢生根瘤菌属 *(Bradyrhizobium****) ；*** Jarvis 等 5 在 1985 年发现的中慢 生根 瘤 菌 属 **(** *Mesorhizobium* **) ;** 1988 年 姚竹 云 等 6 和陈文新等**［**1**］**确立的中华根瘤菌属 **(** *Sinorhizobi- um***) ;** 1988 年**，** Dreyfus 等 7 发现的固氮根瘤菌属 **(** *Azorhizobium***) ;** 1942 年由 Conn 8 建立的土壤杆菌 属 **(** *Agrobacterium***) ，** 以 及 1984 年 由 Knosel 9 发 现 的叶瘤菌属 **(** *Phyllobacterium***)** 。

因其能与豆科植物共生结瘤固氮而具有深远的 科研及农业价值**;** 同时考虑到豆科植物对人类和动 物的重要性**，** 致使根瘤菌对污染土壤的修复作用及 耐受能力逐渐受到广泛关注。在农业生产中**，** 根瘤 菌与豆科作物进行轮作、间作可提高土壤肥力**，** 对 增加作物产量起着至关重要的作用**［**10**］**。此外**，** 由

收稿日期: 2015 －07 －08; 最后修订日期: 2015 －12 －20 基金项目: 国家高技术研究发展计划( 863计划)项目 ( 2012AA101403) ; 农业部“引进国际先进农业科学技术”重点项目 (2011－G25) 。

作者简介: 黄兴如 ( 1988 － ) ，男，安徽阜阳人，硕士研究生，主 要研究方向为环境微生物学 。 E － mail : huangxingru@ 126. com 。 通讯作者 : 张晓霞， E － mail : xxzhang@ caas． ac． cn 。 于根瘤菌可以在作物根部大量生长繁殖**，** 因此减小 了病原微生物的繁殖机会**;** 同时根瘤菌还可诱导植 物产生系统抗性**，** 减轻作物发病的几率**，** 提高其抗 病性**［**11**］**。大豆接种根瘤菌后**，** 可减少氮肥的使用 量**，** 有效缓解和改善大豆重迎茬及根腐病**［**12**］，** 显 著提高作物的品质与产量**;** 并且减轻了因大量施用 化肥、生产化肥而造成的环境污染。根瘤菌还可以 加强作物的抗旱能力**［**13**］**。除此之外**，** 近年来诸多 研究表明**，** 根瘤菌在重金属、有机物等污染土壤修 复中同样发挥重要作用。在此**，** 本文对根瘤菌及其 共生体系修复重金属、有机物等污染土壤的研究现 状和发展趋势进行综述。

1. 根瘤菌对污染土壤修复的重要性

根瘤菌不仅拥有降解有机污染物和抗重金属的 能力**，** 还可刺激其他降解菌的生存和行动能力**，** 从 而降低污染物的浓度**［**14**］;** 其与豆科植物共生结瘤 固氮作用**，** 可以促进植物生长**，** 增强植物抗病、抗 逆性**［**11**，**13**］;** 可修复盐渍**［**15**］**、重金属**［**16**］**、多氯联 苯**［**2**］**、多环芳烃**［**2**］**等重金属矿区和工业废弃地的污 染土壤**，** 对生态环境的修复起着重要作用。根瘤菌 －豆科植物共生体在地面覆盖、防风固沙、改良土 壤及作为经济作物、药用作物和生物肥料等方面也 起着重要作用**［**17**］**。

土壤是诸多污染物最主要的循环归宿**，** 因此控 制土壤中特别是耕作层土壤中的污染物是消减其进 入食物链的重要途径**，** 也是控制整个环境有毒有害 —5—

污染物的重要环节。植物与微生物联合修复污染土 壤被认为是最具潜力的生物修复技术之一**，**它是一 项利用植物与其根际或内生微生物的协同作用来清 除环境介质中有毒有害污染物的绿色修复技术**，**因 其高效、安全、环境友好、低成本等优点而获得广 泛认可**［**14**，**18**］**。根瘤菌对污染土壤的修复也主要得益 于其与豆科植物形成的共生体系**:** 一方面**，**植物为 微生物提供了生存场所**，**根分泌物、脱落物和酶等 营养物质**，**促进菌群的生长繁殖**，**增强微生物的联 合降解作用**［**19**］;** 另一方面**，**微生物能够降解污染 物或改变污染物的存在形态**，**减轻污染物对植物的 毒害**，**提高植物的耐受性**，**促进植物对污染物的吸 收转化**［**10**］**。微生物 － 植物联合修复通过发挥微生 物和植物各自的优点**，**最大限度弥补了它们各自修 复土壤中污染物的不足**，**提高了微生物的修复 效率。

1. 根瘤菌在重金属污染土壤修复中的地位和作用

2. 1 根瘤菌对重金属的抗性及修复作用

重金属污染区域中存有大量重金属抗性根瘤 菌**，**其可与豆科植物形成共生体系参与重金属污染 土壤修复**，**具有潜在的环境修复价值。国内外对根 瘤菌修复重金属污染土壤开展了大量研究**，**筛选出 多种重金属抗性和修复性根瘤菌。 Nonnoi 等［20］从 Hg污染土壤生长的草本豆科植物中分离出59株根 瘤菌**，**它们均对 Hg 表现出抗性**，**且对其他多种重 金属具有抗性。Wani等昵21从印度马图拉重金属 污染地生长的 Pea 和 Greengram 的根瘤中分别分离 出根瘤菌 *Rhizobium* sp. RP5 和 *Bradyrhizobium* sp. (vigna**)** RM8**,**且发现他们均对Ni和Zn表现出很 好的抗性。Vidal等因从法国南部Zn尾矿筛选一株 *Mesorhizobium metallidurans* STM 2683**，** 在酵母浸出 物－甘露醇 **(**YEM**)** 液体培养基中可耐受32 mmol/L 的Zn和0. 5 mmol/L的Cd。陈雯莉等23研究发现**，** 在Cu、Zn、Cd污染的红壤和褐土中接种根瘤菌**，** 根瘤菌及其代谢活动在一定程度上能改变Cu、Zn、 Cd在不同土壤中的分布及释放量。根瘤菌与土壤 胶体组分相互作用后形成复合体**，** 可固定重金属离 子**［**24 。 可见**，** 根瘤菌本身同样对重金属具有降解 和解毒作用 。

2. 2 根瘤菌对重金属的抗性和解毒机制 在自然进化过程中**，** 根瘤菌对有毒有害物质和 环境改变逐渐形成了一定的适应性**，** 表现为根瘤菌 —6—

的抗性。 目前**，** 有研究者从根瘤菌核酸及蛋白质水 平初步分析研究了其耐受重金属毒性的机理。 Carrasco 等**［**25 从黄铁矿溢出污染区分离得到41 株 可耐高浓度As、Cu和Pb的根瘤菌**，**其中菌株S. *meliloti* Alf12可产生大量的多糖**，**且富集的As主要 集中在细胞壁上**，**表明富集的As可能主要和这些 多糖结合以降低其毒性**；**通过PCR扩增出As抗性 基因 *arsB* 和 Cu 抗性基因 *copA***，** 表明还有其他抗性 机制参与重金属 As、 Cu 的抗性。 S. *meliloti* 因存在 *ars*基因**，**被指出通过水-甘油跨膜运输蛋白通道 来实现对重金属As的解毒及抗性。Maynaud等阴 研究发现**，**在Zn和Cd存在的条件下**，**几种编码金 属流出及隔离系统基因的表达明显上调**，** 因此**，** 这 些基因被认为可能与根瘤菌耐受重金属原理密切相 关。 Figueira 等 27 研究 R. *legumin osarum* bv. *viciae* 对 Cd具有不同抗性水平的菌株在镉处理前后还原型 谷胱甘肽 **(**GSH**)** 的变化**，** 结果表明**，** Cd 抗性根 瘤菌株在处理前后 GSH 值变化极显著**，** GSH 对 Cd 起到一定的 解 毒 作用。 Pereira 等 28 对 R. *legumino- sarum* bv*． viciae* 的抗Cd机制进行深入研究**，**表明在 中等浓度 Cd 胁迫下**，** 细胞分泌脂多糖 **(**LPS**)** 含 量增加**，**使Cd积聚于细胞壁**；**当Cd浓度较高时**，** 细胞壁积聚的Cd饱和**，**Cd进入细胞内部**，**此时能 量输出系统发挥作用。 综合诸多研究发现**，** 根瘤菌 对重金属的抗性、 解毒机制主要归咎以下几方面**: (** 1**)** 根瘤菌可以降低细胞外层屏障对重金属离子的 通透性**，** 从而有效阻止大量重金属进入菌体内**［**29 。 **(** 2**)** 细胞外层屏障不仅包括细胞膜和细胞壁**，** 还包 括胞外多糖、 脂多糖、 荚膜多糖、 糖蛋白等附属结 构**，** 这些附属结构负责将重金属吸附形成复合物以 降低重金属对细胞的毒害**［**29 。 **(**3**)** 当重金属进入 细胞后**，** 细胞可以利用细胞溶质的螯合作用**，** 细胞 液泡的分隔作用**，** 胞蛋白与重金属结合作用来降低 重金属毒性**［**30 。 **(** 4**)** 根瘤菌还可利用外排作用**，** 将部分重金属排出胞外**，** 避免重金属在胞内过度 积累**［**24 。

2. 3 根瘤菌 － 豆科植物共生体系修复土壤重金属 污染

在重金属污染区域**，** 重金属毒性和养分不足是 重金属污染地植被恢复的主要限制因子**，** 而氮素的 极端不足又是养分不足的核心问题**，** 提高重金属污 染地氮素含量水平成为重金属污染地生态修复的首 要工作**［**31 。 根瘤菌 － 豆科植物共生体系是已知固

氮能力最强、固氮量大、抗逆能力强的生物固氮体 系之一**，** 它们之间是一种紧密互利关系**，** 是其适应 胁迫环境 **(** 如营养物质匮乏、干旱、重金属污染 等**)** 的有效策略之一。

Piha 等**［**32**］**指出**，** 豆科植物与根瘤菌共生**，** 可 以克服废弃地土壤贫瘠所带来的危害。Smith等閔 和Obbard等网均在研究中发现**，**只要在豆科植物 可以长期生长的土壤中**，** 无论这个地区土壤中重金 属的浓度是多少**，** 都会有根瘤菌出现。 缪福俊 等**［**35**］**发现**，** 兰坪铅尾矿区的根瘤菌对酸、低温、 铅、锌的耐性都很高**，** 而且每种豆科植物上都有与 之共生的强耐性根瘤菌**，** 保证了其在重度污染环境 中正常生长。 此外**，** 一些研究结果也表明了根瘤 菌 － 豆科植物共生体系能够改良酸性土壤**，** 降低土 壤中交换性铝、交换性酸的含量**［**36－38**］，** 以及重金 属污染物**［**39**］**。 由以上研究结果可知**，** 根瘤菌与豆 科植物共生体系可对不同重金属污染区域进行有效 的生态修复 。

1. 根瘤菌在有机污染土壤修复中的地位和作用

近年来**，** 关于根瘤菌对碳氢化合物污染物抗性 的研究较多。 研究表明**，** 根瘤菌对诸多有机污染物 具有抗性**，** 如抗生素**［**40**］;** 同时能够降解苯酚**［**41**］**、 多氯联苯**［**2**］**、三硝基甲苯**［**42**］**、多环芳烃**［**2**］**、二苯 并噻吩**［**43**］**、2**，** 4 － 二硝基甲苯**［**44**］**、三苯代甲烷染 料甲基紫**［**45**］**等有机污染物。

3. 1 根瘤菌对多氯联苯污染土壤的修复 根瘤菌是与植物共生的典型土壤微生物**，** 其不 仅能够提供植物所必需的营养**，** 而且能够降解多氯 联苯等不能被细菌单独转化的有机物**［**46 － 47**］** 。 李秀 芬等**［**48**］**选用紫云英 **(** *Astragalus sinicus* L． **)** 作为宿 主植物**，** 通过盆栽试验研究了接种紫云英根瘤菌 **(** *Rhizobium huakuii***)** 对多氯联苯污染土壤的修复效 应**，** 结果表明**，** 单接种根瘤菌、种植紫云英以及紫 云英接种根瘤菌处理土壤中多氯联苯的去除率分别 为 20.5%、23.0%、53.1%**，** 均显著高于对照处 理**;** 而且发现接种根瘤菌显著增加了紫云英根际土 壤的微生物生物量碳、氮**，** 明显增强了土壤微生物 群落的碳源利用能力**，** 从而改善了微生物群落功能 多样性。 可见**，** 紫云英 －根瘤菌共生体对多氯联苯 污染土壤表现出较好的修复潜力。 滕应等**［**49**］**与崔 力拓等**［**50**］**同样将根瘤菌、菌根真菌接种于紫花苜 蓿上**，** 通过盆栽试验对多氯联苯污染土壤的修复进 行了研究**，** 结果都表明**，** 紫花苜蓿－菌根真菌 －根 瘤菌的共生体系**，** 对土壤中多氯联苯的降解起到明 显作用**，** 对多氯联苯污染土壤显示了较好的修复潜 力。 Xu 等**［**51**］**通过田间试验研究了不同处理对根际 土壤多氯联苯的修复情况**，** 结果表明**，** 苜蓿接种根 瘤菌处理的土壤中多氯联苯的去除率 **(** 43%**)** 明显 高于不种植苜蓿 **(** 5.4%**)** 和只种植苜蓿 **(** 36%**)** 的处理**;** 接种根瘤菌的苜蓿根须中多氯联苯含量从 3. 30 jig/kg增加到26.72 jig/kg**,**而不接种根瘤菌 的苜蓿根须中多氯联苯含量从115. 07 **i**g/kg增加到 142. 23 **i**g/kg**;** 且发现接种根瘤菌苜蓿根际土壤细 菌群落结构明显不同于只种植苜蓿的处理**，** 细菌群 落的丰富度明显增加**，** 在接种根瘤菌的苜蓿根际土 壤中均能观察到多氯联苯降解菌及真菌。 由此得出 根际土壤中多氯联苯的移除并非与植物根系吸收相 关**，** 而是明显受到根际微生物群落的影响。

3. 2 根瘤菌对多环芳烃污染土壤的修复

多环芳烃 **(** PAHs**)** 是一类在环境中普遍存在 的有机化合物**，** 因其具有高毒性、易迁移且不易降 解等特点而备受人们关注。 目前**，** 国内外很多研究 结果表明根瘤菌对污染土壤中 PAHs 也有较好的修 复作用**［**52－53**］，** 尤其是根瘤菌与豆科植物联合修复 更为显著**［**14**］**。 Poonthrigpun 等**［**54**］**从石油污染土壤中 分离出一株 *Rhizobium* sp． strain CU － A1 **，** 该菌可在 3 d内对600 mg/L苊烯实施完全降解**；**Keum等阴 从多环芳烃污染土壤中分离出一株以多环芳烃 **(** 菲**)** 为唯一碳源和能源的 *Sinorhizobium* sp． C4。 Teng 等**［**14 和沈源源**［**56 均在其研究中发现**，** 在 PAHs污染土壤中种植植物可以促进土壤中PAHs 的降解**，**植物修复后土壤中PAHs含量明显低于不 种植物的土壤处理**；** 且对于植物接种根瘤菌后的处 理**，** 土壤中 PAHs 含量显著低于只种植物的处理**，** PAHs 降解率提高了20%左右**，** 这说明接种根瘤菌 对土壤中 PAHs 降解有较好的促进作用。 Johnson 等**［**57 研究了由黑麦草、白三叶草和根瘤菌组成的 共生体对 PAHs 的修复作用**，** 同样发现在接种根瘤 菌后**，** 植物对污染土壤有更好的降解修复效果。 近 年来 **，** 实验 室 筛 选 出 *Rhizobium petrolearium* 等 多 株 对三环和四环的 PAHs 降解率达到了78%以上的多 环芳烃高效降解菌株**［**58 。 与此同时**，** 选用豆科植 物苜蓿作为宿主植物**，** 通过盆栽试验研究了接种根 瘤菌 **(** *Rhizobium petrolearium* SL － 1 **)** 的苜蓿对多环 芳烃污染土壤的修复效应。 结果表明**，** 单接种根瘤

菌、 种植苜蓿以及苜蓿接种根瘤菌3种处理土壤中 多环芳烃的去除率均显著高于对照处理。 而且发现 接种根瘤菌的苜蓿对多环芳烃的去除率要高于直接 施加菌剂和只种植植物的处理**［**59 。

1. 根瘤菌在滨海盐渍土壤修复中的地位和作用

董晓霞等**［**15 利用田间长期定位试验对豆科植 物修复滨海盐渍土壤进行了研究**，** 结果显示长期种 植紫花苜蓿和林生山黧豆的土壤**，** 盐分含量、 pH 值明显降低**，** 有机质、 氮含量明显升高。 这是由于 豆科植物有生物脱盐作用**，** 吸收土壤中的可溶性盐 离子**，** 并积累于植物体内**，** 随植物的转移而被带 走**，** 从而降低了土壤盐分。 而根瘤菌 － 豆科植物有 较强固氮作用**，** 可提高土壤的生物量**；** 并且随着植 物生长**，** 不断有细根、 根瘤和落叶死亡脱落**，** 这些 有机物质腐败分解后**，** 提高了土壤有机质含量。 根 瘤菌 －豆科植物共生是生物改良滨海盐渍土的有效 方法。

1. 结语

根瘤菌不仅可以有效地提高豆科植物的产量**，** 改良土壤肥力**，** 还可修复重金属、 有机物等污染土 壤**，** 对农业生产及环境修复具有积极的意义**，** 引起 了人们的极大兴趣和广泛关注。 自然界普遍存在一 些对污染环境具有耐受性和修复性的根瘤菌**，** 而根 瘤菌 －豆科植物共生体系是修复污染环境的一种有 效的途径**；** 但是根瘤菌和豆科植物在污染环境中的 生存、 生长、 繁殖、 共生能力及固氮效率都会受到 污染物毒性、 土壤营养成分、 气候条件等诸多环境 因素的影响。 因此**，** 根瘤菌 － 豆科植物共生体系修 复技术在实践中尚不能得到很好的应用**，** 目前研究 多集中于根瘤菌、 豆科植物及其共生体系筛选、 污 染物毒性、 抗性机理等实验室研究阶段**，** 还有许多 问题尚不明确**，** 需要进一步的研究。**(** 1**)** 进一步筛 选高效降解污染物并促进植物生长的根瘤菌**，** 实现 根瘤菌与豆科植物的最佳组合**，** 构建具有高修复效 率和高稳定性的根瘤菌 －豆科植物共生体系的修复 模式。**(** 2**)** 将根瘤菌 －豆科植物共生系统与其他修 复措施相结合**，** 形成新工艺**，** 提高其修复效率**，** 应 用于实践。**(** 3**)** 研究根瘤菌对宿主植物根际污染物 形态变化的影响**，** 提高其生物利用率。**(** 4**)** 研究根 瘤菌与宿主植物的共生关系**，** 分析阐明根瘤菌强化 植物修复的机制**，** 提高其修复效率。**(** 5**)** 从分子水 —8—

平上深入研究根瘤菌的抗性修复机制**，** 并从功能上 阐明根瘤菌 － 豆科植物共生修复过程的分子机理**，** 为改造、 利用环境工程菌奠定基础。

参考文献:

[1 陈文新，汪恩涛，陈文峰. 根瘤菌 － 豆科植物共生多样性

与地理环境的关系 [J . 中国农业科学，2004，37 ( 1 ) : 81 － 86.

[2 Ahmad D， Mehmannavaz R， Damaj M. Isolation and charac­

terization of symbiotic N2 － fixing *Rhizobium meliloti* from soils contaminated with aromatic and chloroaromatic hydrocarbons: PAHs and PCBs [J . International Biodeterioration and Bio- degradation，1997 ，39 : 33 － 43 .

[3 张晓霞，马晓彤，姜瑞波. 根瘤菌分类研究进展及存在的

争议 [J . 微生物学通报，2010，37 ( 4) : 601 － 606.

[4 Jordan D C. Notes: Transfer of *Rhizobium japonicum* buchanan

1980 to *Bradyrhizobium* gen. nov. ， a genus of slow － growing ， root nodule bacteria from leguminous plants [J . International Journal of Systematic Bacteriology， 1982， 32 ( 1 ) : 136 － 139.

[5 Jarvis B D W，Van Berkum P，Chen W X， et al. Transfer of

*Rhizobium leti*， *Rhizobium huzkuii*， *Rhizobiurn ciceri*， *Rhizobi- um mediterraneum* and *Rhizobium tianshanense* to *Mesorhizobium* gene nov [J . International Journal of Systematic Bacteriology ， 1997，47: 895 － 898.

[6 姚竹云，陈文斯. 根瘤菌的现代分类及其系统发育 [J .

微生物学杂志，1998，18 ( 1) : 38 － 43.

[7 Dreyfus B ，Garcia J L，Gillis M. Characterization of *Azorhizobi-*

*um caulinodans* gen nov，sp nov，a stem － nodulating nitrogen － fixing bacterium isolated from sesbania rostrata [J . Internation­al Journal of Systematic Bacteriology，1988 ，38 ( 1 ) : 89 － 98.

[8 Conn H J. Validity of the genus *Alcaligenes* [J . Journal of

Bacteriology，1942 ，44 ( 3) : 353.

[9 Knosel D H，Genus I V. *Phyllobacterium* nom. rev [J . Bergey's

Manual of Systematic Bacteriology，1984，1: 254 － 256.

[10 王瑾，王喆之，董忠民. 土壤氢氧化细菌促进作物生长机

理研究进展 [J . 应用 与环境生物学报，2012，18 ( 5) : 853 － 861.

[11 田丰，陈立杰，王媛媛，等. 根瘤菌 Sneb183 对大豆胞囊线

虫二龄幼虫 的 作用方 式 研 究 [J . 中国生物防治学报， 2014，( 4) : 540 － 545.

[12 周金玲. 大豆根瘤菌剂作用功效 [J . 科 技 致富向 导，

2012，( 8) : 327 － 337.

[13 曾小红，伍建榕，马焕成. 接种根瘤菌的台湾相思对干旱

胁迫的生化响应 [J . 浙江林学院学报，2008，25 ( 2 ) : 181 － 185.

[14 Teng Y，Shen Y Y ， Luo Y ， et al. Influence of *Rhizobium me-*

*liloti* on phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons by alfalfa in an aged contaminated soil [J . Journal of Hazardous Materials，2011，186 ( 2) : 1271 － 1276.

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

董晓霞，刘兆辉，李志禄，等． 豆科牧草对滨海盐渍土壤 盐分特性和肥力影响的研究 [J ． 安徽农业 科学，2008， 36 ( 14) : 6060 － 6062．

Wani P A，Khan M S ， Zaidi A． Effect of metal － tolerant plant growth 一 promoting *Rhizobium* on the performance of pea grown in metal － amended soil [J ． Archives of Environmental Contami­nation and Toxicology，2008，55 ( 1) : 33 一 42． 陈华癸，李阜棣，陈文新，等． 土壤微 生物 学 [M ． 上 海: 上海科学技术出版社，1979.225 一228．

沈源源． 多环芳烃污染土壤的植物 一 微生物联合修复效应 [D ． 南京: 南京农业大学，2010．

施积炎，陈英旭，林琦，等． 根分泌物与微生物对污染土壤 重金属活性的影响 [J ． 中 国 环 境 科 学，2004，24 ( 3 ) : 316 一 319．

Nonnoi F，Chinnaswamy A，de la Torre V S G，et al． Metal tol­erance of rhizobial strains isolated from nodules of herbaceous legumes ( *Medicago* spp． and *Trifolium* spp． ) growing in mercu­ry 一 contaminated soils [J ． Applied Soil Ecology，2012，61: 49 一 59．

Wani P A，Khan M S，Zaidi A． Effect of metal tolerant plant growth promoting *Bradyrhizobium* sp． ( vigna) on growth，sym- biosis，seed yield and metal uptake by greengram plants [J ． Chemosphere，2007，70 ( 1) : 36 一 45．

Vidal C，Chantreuil C，Berge O，et al． *Mesorhizobium metalli- durans* sp． nov． ，a metal 一 resistant symbiont of Anthyllis vul- neraria growing on metallicolous soil in Languedoc，France [J ． International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiolo- gy，2009 ，59 ( 4 ) : 850 一 855．

陈雯莉，黄巧云，郭学军． 根瘤菌对土壤铜、锌和镉形态分配 的影响 [J ． 应 用 生 态 学 报，2003，14 (8) : 1278 一 1282． 赵叶舟，王浩铭，汪自强． 豆科植物和根瘤菌在生态环境 中的地位和作用 [J ． 农业环境 与发展，2013，30 ( 4 ) : 7 一 12．

Carrasco J A，Armario P，Pajuelo E，et al． Isolation and char­acterisation of symbiotically effective Rhizobium resistant to arse­nic and heavy metals after the toxic spill at the Aznalcollar pyrite mine [J ． Soil Biology and Biochemistry，2005，37 ( 6 ) : 1131 一 1140．

Maynaud C J，Bush A I，Masters C L，et al． Metals and amy­loid 一 p in Alzheimer's disease J] . International Journal of Experimental Pathology，2005，86 ( 3) : 147 一 159．

Figueira E M A P， Gusmko L A I， Pereira S I A． Cadmium tolerance plasticity in *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*: glu­tathione as a detoxifying agent [J ． Canadian Journal of Micro- biology，2005 ，51 ( 1 ) : 7 一 14．

Pereira S I A，Lima A I G， Figueira E M A P． Heavy metal toxicity in *Rhizobium leguminosarum biovar viciae* isolated from soils subjected to different sources of heavy 一 metal contamina­tion: Effects on protein expression [J ． Applied Soil Ecology， 2006 ，33 ( 3 ) : 286 一 293．

Pereira S I A，Lima A I G，Figueira E M A P． Screening pos­sible mechanisms mediating cadmium resistance in *Rhizobium le- guminosarum* bv. viciae isolated from contaminated Portuguese soils [J ． Microbial Ecology，2006 ，52 ( 2 ) : 176 一 186 ．

1. 金婷婷． 大豆根系分泌物缓解铝毒的机理研究 [D ． 金 华: 浙江师范大学，2008．
2. 张志权，束文圣． 豆科植物与矿业废弃地植被恢复 [J ． 生态学杂志，2002，21 ( 2) : 47 一52．
3. Piha M I，Vallack H W，Reeler B M，et al． A low input ap­proach to vegetation establishment on mine and coal ash wastes in semi 一 arid regions． I． tin mine tailings in zimbabwe [J ． Journal of Applied Ecology，1995，32: 382 一 390．
4. Smith S R，Giller K E． Effective *Rhizobium legum inosarum* bio­var trifolii present in five soils contaminated with heavy metals from long 一 term applications of sewage sludge or metal mine spoil [J ． Soil Biology and Biochemistry，1992，24 ( 8 ) : 781 一 788．
5. Obbard J P，Jones K C． The effect of heavy metals on dinitro­gen fixation by *Rhizobium* while clover in range of long 一 term sewage sludge amended and metal 一 contaminated soils [J ． Environmental Pollution，1993，79 ( 2) : 105 一 112．
6. 缪福俊，熊智，孙浩，等． 兰坪铅锌尾矿区豆科植物根瘤 菌耐受性研究 [J ． 安徽农业科学，2010，38 ( 21) : 11365 一 11367．
7. 李艳，张如莲，刘国道，等． 施用豆科绿肥后砖红土壤酸 度随时间的动态变化 J ■热带作物学报，2011, 32 ( 3 ) : 427 一 431．
8. 李艳， 张如莲， 刘国道， 等． 施用热带豆科绿肥对砖红壤 pH值的动态影响及其机制研究 J] ■ 土壤，2012, 44 (1) : 101 一106．
9. 孔繁翔， 桑伟莲， 蒋新， 等． 铝对植物毒害及植物抗铝作 用机理 [J ． 生态学报， 2000， 20 (5) : 855 一 862．
10. 梁建强， 段晓丹， 崔广玲， 等． 西北地区金属尾矿地根瘤 菌的重金属抗性及其系统发育研究 [J ． 农业环境科学学 报， 2009， 28 ( 6) : 1120 一1126．
11. Naamala J， Jaiswal S K， Dakora F D． Antibiotics resistance in Rhizobium: type， process， mechanism and benefit for agricul­ture [J ． Current Microbiology， 2016， 72 ( 6) : 804 一816．
12. Wang Z， Yang Y， Sun W， et al． Biodegradation of nonylphe­nol by two alphaproteobacterial strains in liquid culture and sedi­ment microcosm [J ． International Biodeterioration and Biodeg- radation， 2014， 92: 1 一5．
13. Labidi M， Ahmad D， Halasz A， et al． Biotransformation and partial mineralization of the explosive 2， 4， 6 一 trinitrotoluene ( TNT) by rhizobia [J ． Canadian Journal of Microbiology， 2001，47(6): 559 - 566.
14. Frassinetti S， Setti L， Corti A， et al． Biodegradation of dibenzo­thiophene by a nodulating isolate of *Rhizobium meliloti* [J . Cana­dian Journal of Microbiology， 1998， 44 ( 3) : 289 一297.
15. Dutta S K， Hollowell G P， Hashem F M， et al. Enhanced bioremediation of soil containing 2， 4 一 dinitrotoluene by a ge­netically modified *Sinorhizobium meliloti* [J . Soil Biology and

Biochemistry，2003 ，35 ( 5 ) : 667 － 675 .

1. Parshetti G ， Saratale G ， Telke A， et al. Biodegradation of hazardous triphenylmethane dye methyl violet by Rhizobium ra- diobacter ( MTCC 8161) [J . Journal of Basic Microbiology ， 2009，49: 36 － 42.
2. Mackova M， Vrchotova B， Francova K， etal. Biotransforma­tion of PCBs by plants and bacteria － consequences of plant － mi­crobe interactions [J . European Journal of Soil Biology， 2007， 43 ( 4) : 233 － 241.
3. Leigh M B， Prouzova P， Mackova M， et a1. Polychlorinated

biphenyl ( PCB) － degrading bacteria associated with trees in a

PCB － contaminated site [J . Applied and Environmental Mi- crobiology， 2006， 72 ( 4) : 2331 － 2342.

1. 李秀 芬， 滕 应， 骆 永 明， 等. 多氯联苯污染土壤的紫云 英-根瘤菌联合修复效应 J - 土壤，2013，45 (1): 105 － 110.
2. 滕应， 骆永明， 高军， 等. 多氯联苯污染土壤菌根真菌 － 紫花苜蓿 － 根瘤菌联合修复效应 [J . 环境科学， 2008， 29 (10) : 2925 －2930.
3. 崔力拓， 李志伟. 紫花苜蓿 － 菌根真菌 － 根瘤菌对多氯联 苯污染土壤的修复作用 J .农业环境科学学报，2008, 27 (1) : 226 － 229.
4. Xu L， Teng Y， Li Z G， et al. Enhanced removal of polychlo­rinated biphenyls from alfalfa rhizosphere soil in a field study: the impact of a rhizobial inoculum [J . Science of the Total Environment， 2010， 408 (5) : 1007 －1013.
5. Muratova A， Pozdnyakova N， Makarov O， et al. Degradation of phenanthrene by the *rhizobacterium Ensifer meliloti* [J . Bio- degradation， 2014， 25 (6): 787－795.
6. Yessica G P， Alejandro A， Ronald F C， et al. Tolerance growth and degradation of phenanthrene and benzo[a pyrene by *Rhizobium tropici* CIAT 899 in liquid culture medium [J . Ap­plied Soil Ecology， 2013， 63: 105 －111.
7. Poonthrigpun S， Pattaragulwanit K， Paengthai S， et al. Novel intermediates of acenaphthylene degradation by *Rhizobium* sp. strain CU － A1 : evidence for naphthalene － 1 ， 8 － dicarboxylic acid metabolism [J . Applied and Environmental Microbiolo- gy， 2006， 72 (9) : 6034 － 6039.
8. Keum Y S， Seo J S， Hu Y， et al. Degradation pathways of phenanthrene by *Sinorhizobium* sp. C4 [J . Applied Microbi­ology and Biotechnology， 2005， 71 (6) : 935 － 941 .
9. 沈源源， 滕应， 骆永明， 等. 几种豆科植物、禾本科植物 对多环芳烃复合污染土壤的修复 [J . 土壤， 2011， 43 (2) : 253 － 257.
10. Johnson D L， Anderson D R， McGrath S P. Soil microbial re­sponse during the phytoremediation of a PAHs eontaminated soil [J . Soil Biology ＆ Biochemistry， 2005， 37 (12): 2334 －2336.
11. 黄兴如， 张彩文， 张瑞杰， 等. 多环芳烃降解菌的筛选、 鉴定及降解特性 [J . 微生物学通报， 2016， 43 (5): 965 － 973.
12. 张爽. 多环芳烃降解菌的筛选、降解特性及其与植物联合 修复研究 [D . 哈尔滨: 东北农业大学， 2015.

The role of *Rhizobium* in remediation of contaminated soils

HUANG Xing-ru1 2 ，ZHANG Cai-wen1 ，ZHANG Xiao-xia1\* ( 1 . Agricultural Culture Collection of China， Institute of Agri­cultural Resources and Regional Planning，Chinese Academy of Agricultural Sciences， Beijing 100081； 2. College of Re­sources Environment and Tourism ，Capital Normal University ， Beijing 100048 )

**Abstract**: *Rhizobia* have traditionally been considered as legume endosymbionts and have generally been isolated from nodules on leguminous plants. More recently，*Rhizobia* have been found in different environments. In addition to well-known nitrogen­fixing capability，*Rhizobia* also play a very important role in environmental modification ， maintaining land productivity， energy conservation and emission reduction ，especially the superiority of the *Rhizobium*-legume symbiosis in remediation of contamina­ted soils. This article reviewed recent developments of *Rhizobia* for promoting plant-growth and improving remediaton of contam­inated soils by heavy metals ， organic wastes and salinization， expecting to offer some available ways to improve the environ­ment.

**Key words**: *Rhizobium*； plant-growth promotion； bioremediation