

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^[3], 其中最具有代表性的根瘤菌属有 1889 年 Frank 最早建立的根瘤菌属 (*Rhizobium*); Jordan^[4] 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 (*Sinorhizobium*); 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

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

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。

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。

2 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其修复作用

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。Nomoi 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^[16,21]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^[22]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

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^[26]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. leguminosarum* 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. leguminosarum* 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^[33]和 Obbard 等^[34]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的正常生长。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。

3 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 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 增加到 26.72 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，而不接种根瘤菌的苜蓿根须中多氯联苯含量从 115.07 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 增加到 142.23 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；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]。Poonthrignun 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 萘烯实施完全降解；Keum 等^[55]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]。

4 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。

5 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

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, Mehmannaavaz R, Damaj M. Isolation and characterization of symbiotic N₂-fixing *Rhizobium meliloti* from soils contaminated with aromatic and chloroaromatic hydrocarbons: PAHs and PCBs [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 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*, *Rhizobium ciceri*, *Rhizobium 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 *Azorhizobium 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 meliloti* on phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons by alfalfa in an aged contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186 (2): 1271-1276.

- [15] 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.
- [16] Wani P A, Khan M S, Zaidi A. Effect of metal-tolerant plant growth-promoting *Rhizobium* on the performance of pea grown in metal-amended soil [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 55 (1): 33-42.
- [17] 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. 225-228.
- [18] 沈源源. 多环芳烃污染土壤的植物-微生物联合修复效应 [D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [19] 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): 316-319.
- [20] 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-contaminated soils [J]. Applied Soil Ecology, 2012, 61: 49-59.
- [21] Wani P A, Khan M S, Zaidi A. Effect of metal tolerant plant growth promoting *Bradyrhizobium* sp. (*vigna*) on growth, symbiosis, seed yield and metal uptake by greengram plants [J]. Chemosphere, 2007, 70 (1): 36-45.
- [22] Vidal C, Chantreuil C, Berge O, et al. *Mesorhizobium metallidurans* sp. nov., a metal-resistant symbiont of *Anthyllis vulneraria* growing on metalliferous soil in Languedoc, France [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2009, 59 (4): 850-855.
- [23] 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): 1278-1282.
- [24] 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): 7-12.
- [25] 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): 1131-1140.
- [26] Maynaud C J, Bush A I, Masters C L, et al. Metals and amyloid- β in Alzheimer's disease [J]. International Journal of Experimental Pathology, 2005, 86 (3): 147-159.
- [27] Figueira E M A P, Gasmão L A I, Pereira S I A. Cadmium tolerance plasticity in *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*: glutathione as a detoxifying agent [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2005, 51 (1): 7-14.
- [28] 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-metal contamination: Effects on protein expression [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 33 (3): 286-293.
- [29] Pereira S I A, Lima A I G, Figueira E M A P. Screening possible mechanisms mediating cadmium resistance in *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* isolated from contaminated Portuguese soils [J]. Microbial Ecology, 2006, 52 (2): 176-186.
- [30] 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.
- [31] 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): 47-52.
- [32] 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-arid regions. I. tin mine tailings in zimbabwe [J]. Journal of Applied Ecology, 1995, 32: 382-390.
- [33] Smith S R, Giller K E. Effective *Rhizobium leguminosarum* biovar *trifolii* present in five soils contaminated with heavy metals from long-term applications of sewage sludge or metal mine spoil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24 (8): 781-788.
- [34] Obbard J P, Jones K C. The effect of heavy metals on dinitrogen fixation by *Rhizobium* while clover in range of long-term sewage sludge amended and metal-contaminated soils [J]. Environmental Pollution, 1993, 79 (2): 105-112.
- [35] 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): 11365-11367.
- [36] 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): 427-431.
- [37] 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): 101-106.
- [38] 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): 855-862.
- [39] 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): 1120-1126.
- [40] 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): 804-816.
- [41] 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 Biodegradation, 2014, 92: 1-5.
- [42] Labidi M, Ahmad D, Halasz A, et al. Biotransformation and partial mineralization of the explosive 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) by rhizobia [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2001, 47 (6): 559-566.
- [43] 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): 289-297.
- [44] Dutta S K, Hollowell G P, Hashem F M, et al. Enhanced bioremediation of soil containing 2, 4-dinitrotoluene by a genetically modified *Sinorhizobium meliloti* [J]. Soil Biology and

- Biochemistry, 2003, 35 (5): 667–675.
- [45] Parshetti G, Saratale G, Telke A, et al. Biodegradation of hazardous triphenylmethane dye methyl violet by *Rhizobium radiobacter* (MTCC 8161) [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2009, 49: 36–42.
- [46] Macková M, Vrchotová B, Francová K, et al. Biotransformation of PCBs by plants and bacteria – consequences of plant – microbe interactions [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43 (4): 233–241.
- [47] Leigh M B, Prouzová P, Macková M, et al. Polychlorinated biphenyl (PCB) – degrading bacteria associated with trees in a PCB – contaminated site [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72 (4): 2331–2342.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] Muratova A, Pozdnyakova N, Makarov O, et al. Degradation of phenanthrene by the *rhizobacterium Ensifer meliloti* [J]. *Biodegradation*, 2014, 25 (6): 787–795.
- [53] 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.
- [54] Poonthirigpun 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 Microbiology*, 2006, 72 (9): 6034–6039.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] Johnson D L, Anderson D R, McGrath S P. Soil microbial response during the phytoremediation of a PAHs contaminated soil [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37 (12): 2334–2336.
- [58] 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.
- [59] 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-ru^{1,2}, ZHANG Cai-wen¹, ZHANG Xiao-xia^{1*} (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 nitrogen-fixing 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 remediation 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