

丛枝菌根真菌在植物修复砷污染土壤中的作用^①

肖艳平^{1,2}, 尹睿^{2*}, 沈生元³, 陈玉成¹, 邢曠¹, 陈雪民³

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验(中国科学院南京土壤研究所), 中国科学院南京土壤研究所-香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008; 3 江苏省吴江市农林局, 江苏吴江 215200)

摘要: 丛枝菌根真菌能增强植物对矿质元素的吸收、提高植物的抗逆性、增强抗病性、改善植物根际微环境, 减轻重金属对植物的毒害, 影响植物对重金属的吸收和转运, 在重金属污染土壤的植物修复中显示出极大的应用潜力。近年来, As 污染已成为全球非常突出且急需解决的环境问题之一, 对 As 污染土壤的生物修复也因而成为研究热点。本文主要从丛枝菌根真菌改变土壤 pH 和酶活性、增强植物对 As 的耐性和影响植物对 As 的吸收方面综述了丛枝菌根在 As 污染土壤修复中的应用研究进展, 揭示出菌根应用在 As 污染土壤中的作用潜力和研究方向。

关键词: 丛枝菌根真菌; 砷; 土壤; 植物修复

中图分类号: Q938; X53; X17

砷(As)是一种在自然界中分布极为广泛、毒性很强的类金属, 同时也是最常见、危害人类健康最严重的致癌污染物之一。各种 As 污染物可不同程度地引起急性、亚急性和慢性 As 中毒, 还可诱发皮肤癌、肺癌和膀胱癌^[1]。据世界卫生组织公布, 目前全球至少有 5 000 多万人口正面临着地方性 As 中毒的威胁, 其中大多数为亚洲国家。中国也是受 As 毒危害最为严重的国家之一, 台湾、新疆、内蒙古、山西等省则因高 As 地下水的灌溉导致了相当面积的农田 As 污染区^[2]。从外界进入土壤的 As, 易累积在耕作层^[3]。土壤中累积过量的 As 不仅影响农作物生长^[4], 还可能通过作物吸收积累和迁移进入水体而对人体健康和生态安全造成极大威胁^[5]。因此, 其治理技术已成为环境科学领域关注的焦点之一^[6-9]。由于土壤 As 污染存在量大面广的特点^[3], 应用传统的污染土壤修复技术治理, 存在技术难度较大、成本较高等问题。植物修复在重金属污染土壤的修复中显示出良好的应用前景, 但由于自身的局限, 这一技术仍然需要不断地发展和完善。

丛枝菌根真菌是一类重要的土壤真菌, 能够与陆地上 80% 以上的植物根系建立共生关系^[10], 形成丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)。AM 真菌能显著增加植物对土壤中水分和其他矿质元素的吸收^[11-12],

提高植物的抗逆性^[13-14]。自从 Bradley 等^[15]发现石楠菌根降低植物对过量重金属 Cu 和 Zn 的吸收以后, 对菌根在植物吸收重金属作用方面的研究也就日渐成为热点^[16]。多数研究表明, 菌根化的植物可以提高对土壤中重金属元素的吸收和积累^[7,9,16]。近年来的研究也显示, 生长于 As 污染土壤中的植物也趋于形成菌根, 且 AM 真菌可提高它们的抗 As 能力^[7,17-18], 因而 AM 真菌在 As 污染土壤的修复中受到广泛的关注。

1 丛枝菌根真菌提高植物修复重金属污染土壤的机理

AM 真菌之所以有助于重金属污染土壤的植物修复, 其主要机理是通过直接作用和间接作用两种方式增强了植物对重金属毒害的耐性^[19], 促进了植物的生长和对重金属的吸收及转运。

1.1 直接作用

AM 真菌可能是通过螯合作用和过滤机制而得以使植物在重金属胁迫条件下生存。①螯合作用: AM 真菌的菌丝内有可提供结合重金属的位点, 具有较强的络合重金属元素的能力使重金属积聚于真菌菌丝中。在重金属污染土壤中, 菌根真菌能够通过调节宿主植物根际土壤中重金属形态来影响重金属元素的生物有效性, 从而达到阻止过量金属进入植物, 减轻重金属

①基金项目: 江苏省社会发展基金项目(BS2006025)和中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目(CXTD-Z2005-4)资助。

* 通讯作者(ryin@issas.ac.cn)

作者介绍: 肖艳平(1983—), 女, 重庆奉节人, 硕士研究生, 主要从事污染土壤微生物修复方面的研究。E-mail: xiaoyanping585@163.com

对植物的毒害作用^[20], 维持植物的正常生长, 进而维持植物对重金属的吸收和转运。②过滤机制: 重金属可与真菌细胞壁分泌的粘液和真菌组织中聚磷酸、有机酸结合, 可暂以多聚磷酸盐的形式沉积在真菌中, 或以果胶酸类物质的形式沉积在真菌的寄主植物根系的界面上, 从而减少重金属向地上部的运输量^[19, 21]。

1.2 间接作用

干扰植物对营养元素的吸收是重金属植物毒性的机制之一。共生的菌根形成后可以不同方式和途径影响植物代谢过程, 对植物的生长发育、矿质营养、水分吸收、产量、品质及抗逆性(抗病性、耐盐性)都有重要作用^[7, 11-15, 17]。AM 真菌对重金属的间接作用主要是通过强化宿主植物来实现的, 即在加强宿主养分吸收的同时提高宿主的抗逆性。

1.2.1 AM 真菌促进宿主植物对土壤养分的吸收

接种 AM 真菌有效改善土壤肥力及结构状况, 从而促进宿主植物对土壤养分的吸收^[22]。AM 真菌主要由根中的菌丝、菌根、液泡及土中的菌丝、孢子等部分组成, 它通过与植物根系结合增加了根系的吸收表面积, 在很大程度上提高了根系的吸收能力^[23]。菌丝桥不仅可以在不同植株之间传递矿质养分^[24], 还能传递碳水化合物^[25], 调节植物激素的合成与分配^[26], 全面改善植物的生长状况。许多研究表明, AM 真菌可以促进植物根系对 P、Cu、Zn 等矿质元素的吸收, 显著改善植物营养状况, 菌丝分泌的螯合物还有利于植物难利用形态的养分特别是 P 的有效化, 增加植物的利用^[27-28], 尤其是重金属污染下对于提高植物对重金属的耐性也起到重要作用^[18]。很多菌根植物通过增加 P 素营养促进植物的生长^[17], 菌根植物具有较好的 P 营养状况可能是菌根植物具有较高重金属耐性的原因之一^[17, 29]。

1.2.2 AM 真菌提高植物的抗病性 国内外不少研究人员发现 AM 真菌能减轻植物受到病虫害的侵害。接种 AM 真菌可提高植物对线虫的耐受性, 减轻线虫引起的病害^[30]。刘润进等^[31]研究发现接种 AM 真菌可降低棉花黄萎病的病情指数, 防治效果在 50% 以上, 并提出 AM 真菌诱导植物抗病性理论: AM 真菌主要是通过直接作用即诱导生化拮抗物质来提高植株的抗病性和间接作用即改善营养、生长等状况来提高植株的耐病性。

1.2.3 AM 真菌提高植物的抗盐性 AM 真菌能促进盐渍土中植物的生长, 增加叶片面积和叶绿素含

量并提高地上部及地下部干物质产量, 减轻植物因盐害造成的产量损失^[32]。AM 真菌能提高植物的耐盐性已被许多研究者证实, 但植物的耐盐是一个复杂的过程, 对于 AM 真菌提高植物抗盐的机理, 大多数研究认为 AM 真菌提高植物的耐盐性是改善了寄主植物的营养状况或改变了寄主植物的某些生理过程, 如: 加强植物渗透调节^[33]、改变植物抗氧化酶活性及相关基因的表达^[34]。关于 AM 真菌提高植物耐盐性的调控机制还不是很清楚, 有待进一步研究。

1.2.4 AM 真菌提高植物的抗旱性 AM 真菌能改善植物的水分状况, 提高植物的抗旱能力。林先贵等^[35]指出菌根的早期形成对提高植株整个生育期的抗逆性有重要作用, 菌根明显增加了植物的抗旱能力。关于 AM 真菌改善植物水分状况提高抗旱性的作用机制问题, 与 AM 真菌可以提高与抗旱性相关的酶活性有关^[19]。此外, AM 真菌分泌的球囊霉素糖蛋白能够促进水分稳定的土壤团聚体的形成^[36], 这可能也是宿主植物抗旱性增强的原因之一。由于 AM 真菌对植物的生理生化影响是多方面的, 如养分吸收、气孔调节、酶和激素含量与活性等的变化都会直接或间接地影响水分代谢, 因此, 刘润进等^[37]认为菌丝的直接吸收作用和菌根真菌间接调节植物渗透势是提高植物的抗旱性的双重机制, AM 真菌能改善植物水分状况是多种因素共同作用的结果。

2 丛枝菌根真菌应用于砷污染土壤植物修复的研究进展

AM 真菌除了能够促进植物对营养元素和水分的吸收、提高植物的抗旱性、抗病性等作用之外^[11-14], 还可以提高植物对重金属污染的耐受能力^[15], 因而在重金属污染土壤的修复中受到越来越多的关注。As 和 P 是同族元素, 砷酸盐离子和磷酸盐离子的物理化学性质非常相似, 而以至植物吸收砷酸盐时, 常常是靠着磷酸盐的运输系统进入植物体内^[38], 而 AM 真菌在促进植物 P 素吸收方面有突出的作用, 因而菌根在 As 污染土壤植物修复中有重要作用。

2.1 丛枝菌根真菌改变土壤 pH 值, 进而影响砷的吸附与解吸附

土壤的酸碱度对土壤中 As 的浓度、形态和毒性都有非常明显的影响。吸附态 As 向溶解态 As 的转化也与土壤 pH 有关。一般来说, 在 pH < 7 的范围内, 随着 pH 的升高, As (III) 的吸附量逐渐增加, As (V) 的吸附量逐渐降低^[40-41]。已有的试验表明植物根系接种 AM

真菌，根际土壤pH升高^[39]。因而接种AM真菌可以促进土壤中As(V)的解吸附，减少As(III)的解吸附，有利于土壤中As以绝对比例为As(V)，而这种形态的As是植物吸收的主要形态^[42]。

2.2 丛枝菌根真菌影响土壤磷酸酶活性，促进了植物对磷和砷的吸收

磷酸酶活性与菌根真菌具有较密切的关系^[43]，接种AM真菌能影响土壤的有机成分，提高植物根际土壤磷酸酶活性^[44]。土壤中磷酸酶是催化土壤中磷酸单酯和磷酸二酯水解的酶，它能将有机磷酸酯水解为无机态的磷酸，从而增加植物对土壤中P元素的吸收。AM真菌的存在，使植物吸收了大量的P，从而“稀释”了植物体内的含As比例，增强了植物对As的耐性^[17]。

2.3 丛枝菌根真菌改变土壤砷的生物有效性，从而影响植物吸收砷

As在土壤中的存在形态决定着As对生物的有效性和毒性^[45-46]。土壤中As形态可分为3类：①水溶性As；②交互性As；③难溶性As。水溶性As代表着土壤中最能被生物利用、最具环境风险的As形态，且也代表着土壤溶液中含有的As，一般来说在土壤溶液中该形态的As含量通常较低^[47]。夏运生^[48]认为接种AM真菌主要是通过降低土壤水溶性As及地上部As含量，并增加P的吸收而提高植株P、As比而改善植物生长状况。

2.4 丛枝菌根真菌增加植物对其他养分元素的吸收，进而影响对砷的耐性

AM真菌促进宿主植物对土壤养分的吸收、改变植物根形态和根际的氧化还原作用等，促进植物的生长，形成“稀释效应”，使植物中富集As的浓度降低，或将As固定在菌丝、根表面和根际土中^[49-50]，从而增加植物对As的耐性。

2.4.1 AM真菌对As污染土壤中超富集As植物——蜈蚣草吸收As的影响

超富集As植物——蜈蚣草的发现^[51]，掀起了超富集植物修复As污染土壤的研究热潮^[52]，但此项技术仍然有许多不足之处，蜈蚣草需要在特定的环境中生长，且前期生长慢，限制了其在生产上的大面积推广应用。因此有必要寻求一些可加速植物修复效率或提高植物重金属抗性的途径。利用AM真菌与植物之间形成菌根共生体的特性来修复污染土壤是一种土壤修复的新途径。

AM真菌能促进蜈蚣草生长，加速对As污染土壤的修复。Liu等^[53]研究表明接种AM真菌提高了蜈

蚣草地上部生物量，显著提高蜈蚣草对As的富集效果，使As从地下部分向地上部分转运量较非菌根植物提高43%。Leung等^[54]对蜈蚣草接种菌根真菌后也观察到类似结果，认为接种AM真菌增加蜈蚣草吸收和富集As。Trotta等^[55]研究发现接种AM真菌降低蜈蚣草根部的As浓度，但可以促进As从蜈蚣草根部分向地上部转运。白建峰^[56]的研究结果表明，在近185 mg/kg中As污染土壤中，接种AM真菌促进蜈蚣草地上部As浓度显著增加。在近400 mg/kg的高As污染土壤中，接种AM真菌增加了蜈蚣草的生物量，地上部As吸收量提高了1.12倍，菌根对As吸收的贡献率达28%。菌根真菌的侵染促进了As从根系向地上部的转运，菌根对As的转运效率达到71%^[57]。大多研究表明，AM真菌同时提高蜈蚣草地上部的生物量和As浓度，从而显著增加了As的提取量^[53-57]，缩短了修复时间。

2.4.2 AM真菌对As污染土壤中其它植物的影响

对于非超累积植物而言，菌根真菌主要是通过降低重金属污染土壤对植物的毒性或改变植物对重金属的吸收、积累而促进植物的生长，加速重金属污染土壤的植物生态恢复^[58]。在As污染土壤中，接种AM真菌促进黑麦草和三叶草P元素的吸收，提高植物P/As比，促进植物生长，形成稀释效应，从而增加植物对As的耐性^[17]。接种AM真菌抑制砷酸盐从地下部向地上部转移，增加紫花苜蓿和玉米对As的耐性^[39,58]。Jankong等^[59]认为AM真菌对不同植物有不同的影响，对根系发达的植物生长几乎没有影响，且降低了植物中As的浓度；相反对根系不发达（根毛和分支少）的植物不仅能提高其生物量，而且促进As的富集，这与植物的根系代谢活动有关。

3 存在的问题与展望

虽然大多数研究都表明AM真菌能够促进植物吸收积累重金属，但是也有很不一致的报道，接种AM真菌可以增加^[60]，或降低^[17]，或没有影响^[61]植物体内的重金属含量。AM真菌对重金属从根向地上部转运的影响也不一致，有的报道认为AM真菌促进了植物向地上部的转移^[53,55,61]，有的则是抑制转移^[39,58]。另外，在重金属复合污染的情况下，菌根真菌对植物生长的保护性机制随土壤中重金属元素含量不同而异。在低污染水平下，菌根真菌可以促进植物对重金属元素的吸收，而高污染条件下降低植物对重金属元素的吸收^[62-63]。这主要是由于AM真菌对重金属的作用受到诸

多因素的影响,如宿主植物的种类、宿主植物的基因型、土壤肥力、土壤 pH 等。另外不同真菌在侵染能力、菌丝的生长及 P 运输效率方面都存在差异。因此,AM 真菌影响植物吸收重金属和 As 的作用机理还需要展开更深入的研究。

有关 AM 真菌对植物吸收积累 As 的作用的研究还比较少,尚存在如下不足:① As 污染土壤中 AM 真菌侵染植物根系的根际效应还不清楚;②对超积累植物蜈蚣草根际 As 的微观化学行为、生物有效性的主要环境影响因子以及环境因子间的综合效应等方面的研究尚是空白;③土壤质量对 AM 真菌对植物吸收 As 的影响的研究还比较薄弱。

为了更好地利用 AM 真菌提高植物修复 As 污染土壤效率,则需要了解 AM 真菌对植物根际效应的影响,了解 AM 真菌对根际 As 的化学行为和生物有效性的影响,也需要明确 AM 真菌对植物修复 As 污染效率与土壤环境质量的关系,因此,我们认为今后要加强如下几个方面的研究:

(1) As 污染土壤中 AM 菌根的根际效应。超积累植物吸收和积累 As 的效率是影响植物提取修复效率高的重要因素,而植物吸收、转运和积累 As 的能力又受植物生长状况、根际环境和土壤中 As 的生物可利用性的影响。AM 真菌侵染植物根系后会引植物根系生长和生理的变化,如根系的发育、根系分泌物的组分和数量等,这些变化又会引起根际环境 pH、Eh、含水量、有机组分、微生物群落结构和活性以及 As 形态和价态的变化。如今,根际微生态效应已经成为一个新的研究热点,根际领域的研究是植物修复技术发展的关键之一,了解 AM 真菌对超积累植物和作物吸收 As 的根际微生态效应不仅有利于揭示超积累植物吸收和积累 As 的机理本质,发展提高修复效率的技术,还有利于 As 低污染土壤以及修复后土壤的有效、安全利用。

(2) 超积累植物蜈蚣草根际 As 的微观化学行为和生物有效性。As 在根际中的化学行为直接影响它在土壤植物系统中的转化和迁移,而超积累植物修复效率的高低在很大程度上也依赖于 As 在土壤中的生物有效性。植物对 As 污染土壤的修复不仅仅局限于植物对 As 的吸收,也包括由于植物生长而引起的 As 的迁移,如溶解性 As 随径流水和渗漏水的迁移。了解植物根际 As 化学行为和生物可利用性的变化以及土壤环境因素对它们的影响,对制定提高植物修复效率的措施非常必要。

(3) 影响 AM 真菌对 As 作用的生态因素。AM 真菌对 As 的作用受到诸多因素的影响,如宿主植物的种类、宿主植物的基因型、土壤肥力、土壤 pH 等。对不同的植物(耐 As 和超富集 As)还需要做大量的工作筛选适合该植物的菌株,从而将 AM 真菌有效地运用到 As 污染土壤的生态恢复和植被重建中。

土壤健康与粮食的安全息息相关,通过生物技术修复 As 污染土壤将有较好的应用前景。AM 真菌在植物修复 As 污染土壤中的研究值得更多的关注,土壤动物-菌根真菌-植物联合原位修复 As 污染农田土壤是我们课题正在开展的工作,以期 As 污染农田土壤的修复奠定基础。

参考文献:

- [1] Badal KM, Kazuo TS. Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 2002, 58: 201-235
- [2] 蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇, 谢华, 肖细元, 雷梅, 张国平. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响. *生态学报*, 2004, 24(4): 711-717
- [3] 廖晓勇, 陈同斌, 肖细元, 黄泽春, 安志装, 莫良玉, 李文学, 陈焯, 郑袁明. 污染水稻田中土壤含砷量的空间变异特征. *地理研究*, 2003, 22(5): 635-643
- [4] 张广莉, 宋光煜, 赵红霞. 磷影响下根际无机砷的形态分布及其对水稻生长的影响. *土壤学报*, 2002, 39(1): 23-28
- [5] 华建峰, 林先贵, 尹睿, 蒋倩. 矿区砷污染对土壤线虫群落结构特征的影响. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(1): 79-84
- [6] Liao XY, Chen TB, Xie H, Liu YR. Soil As contamination and its risk assessment in industrial districts of Chenzhou, Southern China. *Environment International*, 2005, 31(6): 791-798
- [7] Bai JF, Lin XG, Yin R, Zhang HY, Wang JH, Chen XM, Luo YM. The influence of arbuscular mycorrhizal fungi on As and P uptake by maize (*Zea mays* L.) from As-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38: 137-145
- [8] Al Rmallia SW, Harisa PI, Harrington CF, Ayub M. A survey of arsenic in foodstuffs on sale in the United Kingdom and imported from Bangladesh. *The Science of the Total Environment*, 2005, 337: 23-30
- [9] 白建峰, 林先贵, 尹睿, 张华勇. 砷污染土壤的生物修复研究进展. *土壤*, 2007, 39(5): 692-700
- [10] Schwarzott D, Walker C, Schussler A. Glomus, the largest genus of the arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales), is nonmonophyletic. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2001, 21: 190-197

- [11] Dodd JC, Dougall TA, Clapp JP. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant community establishment at Samphire Hoe, Kent, UK-the reclamation platform created during the building of the Channel tunnel between France and the UK. *Biodiversity and Conservation*, 2002, 11: 39-58
- [12] Augé RM. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 2001, 11: 36-42
- [13] Ruiz-Lozano JM, Collados C, Barea JM, Azcon R. Arbuscular mycorrhizal symbiosis can alleviate drought induced nodule senescence in soybean plants. *New Phytol*, 2001, 151: 493-502
- [14] Vivas A, Voros I, Biro B, Campos E, Barea JM, Azcon R. Symbiotic efficiency of autochthonous arbuscular mycorrhizal fungus (*G. mosseae*) and *Brevibacillus* sp. isolated from cadmium polluted soil under increasing cadmium levels. *Environmental Pollution*, 2003, 126: 179-189
- [15] Bradley R, Burt AJ, Read DJ. Mycorrhizal infection and resistance to heavy metal toxicity in *Calluna vulgaris*. *Nature*, 1981, 292: 335-337
- [16] 王发园, 林先贵, 周健民. 丛枝菌根与土壤修复. *土壤*, 2004, 36(3): 251-257
- [17] Dong Y, Zhu YG, Smith FA. Arbuscular mycorrhiza enhanced arsenic resistance of both white clover (*Trifolium repens* Linn.) and ryegrass (*Lolium perenne* L.) plants in an arsenic-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 2008, 155: 174-181
- [18] Gonzalez-Chavez C, Harris PJ, Dodd J, Meharg AA. Arbuscular mycorrhizal fungi confer enhanced arsenate resistance on *Holcus lanatus*. *New Phytol.*, 2002, 155: 163-171
- [19] 李晓林, 冯固. AM 生态生理. 北京: 华文出版社, 2001: 194-195
- [20] 黄艺, 陈有监, 陶澍. 污染条件下 VAM 玉米元素积累和分布与根际重金属形态变化的关系. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 859-862
- [21] Gonzalez Chavez MC, Carrillo-Gonzalez R, Wright SF, Nichols KA. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 2004, 130: 317-323
- [22] Feng G, Song YC, Li XL, Christie P. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to utilization of organic sources of phosphorus by red clover in a calcareous soil. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22: 139-148
- [23] Johansen A, Jakobsen I, Jensen ES. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. III. Hyphal transport of ³²P and ¹⁵N. *New Phytol.*, 1993, 124: 61-68
- [24] 艾为党, 张俊伶, 李隆, 李晓林, 冯固. 三叶草体内磷通过菌丝桥向黑麦草的传递研究. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 615-618
- [25] Grime JP, Mackey JM, Hillier SH, Read DJ. Floristic diversity in a model system using experimental microcosms. *Nature*, 1987, 328: 420-422
- [26] Barker SJ, Tagu D. The roles of auxins and cytokinins in mycorrhizal symbioses. *Journal of plant Growth Regulation*, 2000, 19: 144-154
- [27] Sirvastava AK, Singh S, Marathe RA. Organic Citrus: soil fertility and plant nutrition. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2002, 19(3): 5-29
- [28] Clark R B, Zeto S K. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(7): 867-902
- [29] Liao JP, Lin XG, Cao ZH, Wong MH. Interactions between arbuscular mycorrhizae and heavy metals under sand culture experiment. *Chemosphere*, 2003, 50: 847-853
- [30] Castillo P, Nico AI, Azcon-Aguilar C, Del Rio Rincon C, Calvet C, Jiménez-Díaz RM. Protection of olive planting stocks against parasitism of root-knot nematodes by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Pathology*, 2006, 55: 705-713
- [31] 刘润进, 沈崇尧, 裘维蕃. VAMF真菌与黄萎病菌存在侵染中的竞争作用. *土壤学报*, 1994, 31(增刊): 224-229
- [32] Kaya C, Higgs D, Kirnak H, Tas I. Mycorrhizal colonization improves fruit yield and water use efficiency in watermelon (*Citrus luslanatus* Thunb.) grown under well-watered and water-stressed conditions. *Plant and Soil*, 2003, 253(2): 287-292
- [33] Melchor J, Rosa M, Luis R. Evaluation of some nutritional and biochemical indicators in selecting salt resistant tomato cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 54: 193-201
- [34] Ghorbanl IM, Ebrahimzadeh H. Effects of NaCl and mycorrhizal fungi on antioxidative enzymes in soybean. *Biologia Plantarum*, 2004, 48(4): 575-581
- [35] 林先贵, 郝文英, 施亚琴. VA菌根对植物耐旱涝能力的影响. *土壤*, 1992, 24(3): 142-145
- [36] Rillig MC, Wright SF, Eviner VT. The role of Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species. *Plant and Soil*, 2002, 238: 325-333
- [37] 刘润进, 郝文英. VA菌根真菌对植物水分代谢的影响. *土壤学报*, 1994, 31(增刊): 46-53
- [38] Cao X, Ma LQ, Shiralipour A. Effects of compost and phosphate amendments on arsenic mobility in soils and arsenic uptake by the

- hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Environmental Pollution*, 2003, 126: 157-167
- [39] Xia YS, Chen BD, Christie Peter, Smith FA, Wang YS, Li XL. Arsenic uptake by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in an arsenic-contaminated soil with added phosphorus. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19: 1 245-1 251
- [40] 王永, 徐仁扣. As(III)在可变电荷土壤中的吸附与氧化的初步研究. *土壤学报*, 2005, 42(4): 609-613
- [41] 陈静, 王学军, 朱立军. pH对砷在贵州红壤中的吸附的影响. *土壤*, 2004, 36(2): 211-214
- [42] Mogan JE, Morgan AJ. The distribution and intracellular compartmentation of metals in the endogeic earthworm *Aporrectodea caliginosa* sampled from an unpolluted and a metal-contaminated site. *Environmental Pollution*, 1998, 99(2): 167-175
- [43] 高辉, 顾泳洁, 蔡培乾, 张欣. 岛屿生境下苦楮AM(丛枝菌根)与根际土壤磷酸酶活性的相关性研究. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(1): 24-27
- [44] Goicoechea N, Antolín MC, Strnad M, Sanchezdiaz M. Root cytokinins, acid phosphatase and nodule activity in drought-stressed mycorrhizal or nitrogen fixing alfalfa plants. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47: 683-686
- [45] Garcia I, Diez M, Martin F, Simon M, Dorronsoro C. Mobility of arsenic and heavy metals in a sandy-loam textured and carbonated soil. *Pedosphere*, 2009, 19(2): 166-175
- [46] 罗磊, 张淑贞, 马义兵. 土壤中砷吸附机理及其影响因素研究进展. *土壤*, 2008, 40(3): 351-359
- [47] Wenzel WW, Brandstetter A, Wutte H, Lombi E, Prohaska T, Stingeder G. Arsenic in field-collected soil solutions and extracts of contaminated soils and its implication to soil standards. *Journal of Nutrition Soil Science*, 2002, 165(2): 221-228
- [48] 夏运生, 陈保冬, 朱永官, 吴亚洵, 王幼珊, 李晓林. 外加不同铁源和丛枝菌根对砷污染土壤上玉米生长及磷、砷吸收的影响. *环境科学学报*, 2008, 28(3): 516-524
- [49] Sharple JM, Meharg AA, Chambers SM. Evolution: Symbiotic solution to arsenic contamination. *Nature*, 2000, 404: 951-952
- [50] Chen BD, Xiao XY, Zhu YG, Smith FA, Xie ZM, Smith SE. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* gives contradictory effects on phosphorus and arsenic acquisition by *Medicago sativa* Linn. *Science of the Total Environment*. 2007, 379: 226-234
- [51] Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang W, Cai Y, Kennelley ED. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 2001, 409: 579
- [52] 韦朝阳, 郑欢, 孙歆, 王成. 不同来源蜈蚣草吸收富集砷的特征及植物修复效率的探讨. *土壤*, 2008, 40(3): 474-478
- [53] Liu Y, Zhu YG, Chen BD, Christie P, Li XL. Influence of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on uptake of arsenate by the As hyperaccumulator fern *Pteris vittata* L. *Mycorrhiza*, 2005, 15(3): 187-192
- [54] Leung HM, Ye ZH, Wong MH. Interactions of mycorrhizal fungi with *Pteris vittata* (As hyperaccumulator) in As-contaminated soils. *Environmental Pollution*, 2006, 139(1): 1-8
- [55] Trotta A, Falaschi P, Cornara L, Minganti V, Fusconi A, Drava G, Berta G. Arbuscular mycorrhizae increase the arsenic translocation factor in the As hyperaccumulating fern *Pteris vittata* L. *Chemosphere*, 2006, 65(1): 74-81
- [56] 白建峰. As污染农田土壤的微生物-蚯蚓-植物联合修复研究(博士学位论文). 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2007
- [57] 刘于. 丛枝菌根真菌对植物吸收富集砷的作用及机理(博士学位论文). 北京: 中国农业大学, 2007
- [58] Xu PL, Peter Christie, Liu Y, Zhang JL, Li XL. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* can enhance arsenic tolerance in *Medicago truncatula* by increasing plant phosphorus status and restricting arsenate uptake. *Environmental Pollution*, 2008, 156: 215-220
- [59] Jankong P, Visoottiviseth P. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on plants growing on arsenic contaminated soil. *Chemosphere*, 2008, 72: 1092-1097
- [60] Arriagada CA, Herrera MA, Ocampo JA. Beneficial effect of saprobe and arbuscular mycorrhizal fungi on growth of *Eucalyptus globules* co-cultured with *Glycine max* in soil contaminated with heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 2007, 84(1): 93-99
- [61] Citterio S, Prato N, Fumagalli P, Aina R, Massa N, Santagostino A, Sgorbati S, Berta G. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* induces growth and metal accumulation changes in *Cannabis sativa* L. *Chemosphere*, 2005, 59: 21-29
- [62] Symeonidis L. Tolerance of *Festuca rubra* L. to zinc in relation to mycorrhizal infection. *Biology of Metals*, 1990, 3: 204-207
- [63] 张旭红, 高艳玲, 林爱军, 黄益宗. 重金属污染土壤接种丛枝菌根真菌对蚕豆毒性的影响. *环境工程学报*, 2008, 2(2): 274-278

Roles of Arbuscular Mycorrhizal in Plant Remediation of Arsenic-Contaminated Soil

XIAO Yan-ping^{1,2}, YIN Rui², SHEN Sheng-yuan³, CHEN Yu-cheng¹, XING Ze¹, CHEN Xue-min³

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science,

Chinese Academy of Sciences and Hongkong Baptist University, Nanjing 210008, China;

3 Department of Agriculture and Forestry of Wujiang, Wujiang, Jiangsu 215200, China)

Abstract: Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi can enhance the uptake of nutrition of plants, promote the stress resistance of plants, improve the micro-ecological environment of plant rhizosphere, and reduce the poison of heavy metals to plants, influence the uptake and transport of heavy metals by plants, thus have great application potentials in the phytoremediation of metal-contaminated soil. In recent years, arsenic (As) pollution of soil has become into a major public concern in many countries and the bio-remediation of As-polluted soil has become a hot research topic. This paper reviews the research advances of AM in remediating As-polluted soil from the aspects of AM changing soil pH and enzyme activity, enhancing As resistance of plant and impacting As uptake, and also discloses the application potentials and research directions of AM in As-polluted soil.

Key words: Arbuscular mycorrhizae fungi, Arsenic, Soil, Phytoremediation