

文章编号:1672-9250(2007)04-0367-08

微生物与重金属的相互作用机理研究进展

孙嘉龙^{1,2,3}, 肖唐付¹, 周连碧⁴, 何立斌^{1,2}, 宁增平^{1,2}, 李航⁵, 彭景权^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 贵州省环境科学研究设计院, 贵州 贵阳 550002; 4. 北京矿冶研究总院, 北京 100044; 5. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042)

摘要:微生物在自然界内种类繁多,并在重金属元素的生物地球化学循环中扮演着重要的角色。近年来,细菌与真菌对重金属的富集、转化作用成为此领域内的研究焦点。研究表明,细菌对重金属的富集、转化作用主要是通过胞壁吸附、氧化还原、细菌淋滤及与其它生物协同作用而进行的;真菌则主要是通过表面吸附与重金属硫蛋白的络合作用来富集环境中的重金属。文章对这些研究进展进行了综述,同时还介绍了菌根真菌在重金属的植物修复中所起的重要作用。

关键词:微生物;重金属;富集;转化

中图分类号:X142;X172

文献标识码:A

自上世纪以来,矿产资源的开发利用对工业与社会的发展起到巨大的推动作用,但同时也给当地水体和土壤等带来了很大的环境污染(主要是有毒有害重金属元素的污染,如日本的水俣病等),进而影响到人类健康^[1,2],引起一系列的重金属超标、中毒事件^[3,4]。因此,重金属污染也越来越受到公众和政府的关注,尤其是在矿产资源开发力度较大的地区(如贵州、云南、山西等)。处理重金属污染的传统方法多为物理化学法,如化学沉淀法、离子交换法、反渗透法萃取法、活性炭吸附法等^[5],它们各有优点,但不同程度地存在着投资大、能耗高、操作困难、易产生二次污染等缺点。

自从20世纪80年代以来,生物修复技术因其具有处理费用低,对环境影响小、效率高等优点,越来越受到广泛关注^[6]。其中,利用微生物进行重金属污染修复是一个研究热点^[5]。微生物(microbe)是所有微小生物的总称,它涵括原核生物中的全部

真细菌和古细菌、真核生物中的部分真菌及单细胞藻类等,种类繁多,数量极大,分布广泛,而且具有繁殖迅速,个体微小,比表面积大,对环境适应能力强等特点,因而成为人类最宝贵、最具开发潜力的资源库之一。

在当前受重金属污染的生态环境中,微生物种群结构、生理代谢会产生各种变化以响应重金属的胁迫,这些信息可用于重金属生物有效性的评价^[7];反之,微生物对重金属的吸附富集、氧化还原、淋滤、协同植物吸收等作用又可用于探索重金属污染环境的修复技术。

1 细菌对重金属的富集、转化作用

1.1 吸附作用

细胞壁是细菌个体与重金属接触最早的部分,富含羧基阴离子和磷酸阴离子,使得细菌表面具有阴离子的性质,很容易与金属发生反应,因而金属很容易结合到细菌的表面。

许多研究表明细菌及其代谢产物对溶解态的金属离子有很强的络合能力,这主要归因于其表面的独特化学组成^[8-10]。细胞壁带有负电荷而使整个细菌表面呈现阴离子特性,通过细菌细胞中均聚物或杂聚物上的羧基或磷酸基等阴离子作用可以增加

收稿日期:2006-12-25;修回日期:2007-07-05

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAC09B04);中国科学院“西部之光”项目

第一作者简介:孙嘉龙(1978—),男,博士生,主要从事环境微生物学方面的研究。

金属离子的吸附^[10]。此外,细胞壁中的分子结构也具有活性,可以将金属螯合在细胞表面^[8]。细菌可以通过细胞表面的络合作用而阻止某些重金属进入细胞内部敏感区域,而对于那些细胞化学反应需要的金属则可以通过细胞壁运输到原生质中特定位点^[10]。

Beveridge 和 Murray 等^[11]研究发现从芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)上分离下来的细胞壁可以从溶液中螯合大量的 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ , 中量的 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Au^{3+} 和 Ni^{2+} 以及少量的 Hg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ , 而 Li^+ 、 Ba^{2+} 、 Co^{2+} 、 Al^{3+} 则不被吸收, 当将细胞壁放入含氯化金的水溶液中时, 可在细胞壁上通过聚核作用形成微小晶体。Beveridge 等^[10]通过对 *B. subtilis* 细胞壁上的肽聚糖层进行研究, 证明其可以从水溶液中结合大量金属离子, 特别是大多数过渡金属, 第一副族金属的富集能力大于 1 nmol/mg(相对于肽聚糖层干重)。

另外, 当溶液中存在其他金属离子时, 这些共存离子与主要离子竞争细胞上有限的带负电荷的基团, 一般都会抑制主要金属离子的吸收, 从而导致主要金属离子的吸附量的减少。周东琴等^[12]研究了用 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Hg^{2+} 3 种离子对沟戈登氏菌(*Gordona amarae*)诱导培养的结果表明, 在培养基中加入 5.72 mg/L 的 Cu^{2+} 连续培养时, 沟戈登氏菌对 Hg^{2+} 的吸附率由 39% 上升至 98%, 对 Cu^{2+} 的吸附率由 51% 下降至 35%, 如图 1 所示。这种差别表明微生物对重金属元素的吸附具有选择性。因此, 在利用微生物吸附工业废水中的重金属离子时, 选择性诱导培养是提高微生物吸附能力的有效方法。

1.2 氧化还原作用

细菌很早就被发现可以在细胞外部沉积铁和锰的氧化物和氢氧化物, 并可以调节 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 和其它金属的氧化还原反应^[13,14], 如 *Thiobacillus* 属革兰氏阴性细菌, 可以氧化铁和硫, 这种铁氧化系统一般存在于细菌的细胞壁包括 C-和 α -型细胞色素, 以及蓝色铜蛋白和锈花青素($C_{27}H_{30}O_{16}$) 中^[15]。

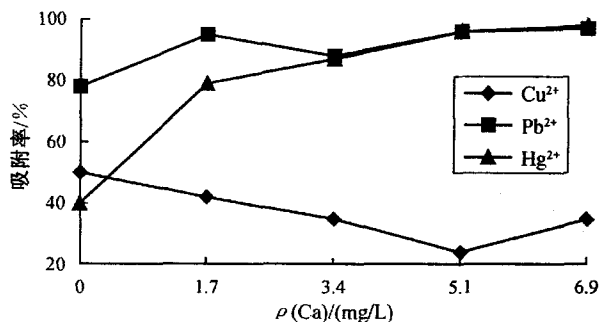


图 1 Cu^{2+} 的诱导培养对沟戈登氏菌(*Gordona amarae*) 吸附率的影响

Fig. 1. Effect of inducible culture of Cu^{2+} on the biosorption rate of *Gordona amarae*.

在外界环境中, 变价金属 As、Cr、Co 和 Au 等可以不同的价态形式存在, 而细菌的代谢活动可以通过其氧化还原作用改变它们的价态。Chang 等^[16]在污水处理厂发现一种嗜硫酸盐细菌(Sulfate-reducing bacteria, SRB)可以还原 Cr^{6+} 为低毒的溶解度较小的 Cr^{3+} , 从而降低水体中的重金属毒性。

一些常见细菌对重金属离子的氧化还原作用见表 1 所示。

因此, 如果能从环境中筛选细菌种群, 合理地利用细菌的氧化还原作用, 就可以控制重金属离子的某些化学行为, 降低其在自然环境中的毒性或活性。

表 1 部分细菌对重金属离子的氧化还原作用

Table 1. Oxido-reduction of heavy metals by some bacteria

| 菌株 | 氧化还原作用 | 参考文献 |
|--|---|------|
| 别样单胞菌(<i>Alteromonas putrefaciens</i>) | $U(VI) \rightarrow UO_2$ | [17] |
| 大肠杆菌(<i>E. coli</i>)、金属还原菌(<i>Shewanella putrefaciens</i>) | $Np(V) \rightarrow Np(IV)$ | [18] |
| 硫还原菌(<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>) | $Pd(II) \rightarrow Pd(0)$ | [19] |
| 火杆菌(<i>Pyrobaculum islandicum</i>) | $U(VI) \rightarrow U(IV)$ $Tc(VII) \rightarrow (VI) \rightarrow Tc(V)$ | [20] |
| 奇异球菌(<i>Deinococcus radiodurans</i>) | 还原 $Tc(VII)$ 、 $Cr(VI)$ 、 $U(VI)$ 等 | [21] |
| 罗尔斯通氏菌(<i>Ralstonia metallidurans</i>) | $Se(IV) \rightarrow Se(0)$ | [22] |
| 假单胞菌(<i>Pseudomonas sp.</i>) | $Cr(VI) \rightarrow Cr(III)$ | [23] |

1.3 淋滤作用

细菌淋滤法(Bioleaching)是指利用自然界中一些细菌的直接作用或其代谢产物的间接作用,产生氧化、还原、络合、吸附或溶解作用,将固相中某些不溶性成分(如重金属、硫及其它金属)分离浸提出来的一种技术,又称微生物湿法冶金(bio-hydrometallurgy)^[24]。

在自然界中,氧化硫杆菌、氧化亚铁杆菌等可以通过提高氧化还原电位、降低酸度等作用,滤除污泥、土壤和沉积物中的重金属。不同种类的细菌对重金属的淋溶效果也不同,一般来讲,嗜酸细菌(Acidophilic) > 嗜中性细菌(Neutrophilic),氧化亚铁杆菌 + 氧化硫杆菌 > 氧化亚铁杆菌 > 土著微生物^[25]。

在国内,有学者通过接种嗜酸性硫杆菌复合菌株(氧化亚铁硫杆菌与氧化硫杆菌)的生物淋滤作用而去除城市生活垃圾焚烧飞灰中的重金属,结果表明,5 g/L 的硫粉投加比例对重金属的去除与底物利用最为有利。在此条件下淋滤处理飞灰 15 d, Cd、Zn、Cu、Pb 的去除率分别可达到 89.7%、81.8%、72.6%、29.3%,硫粉的利用率达到 65.2%^[26]。

在国外,Löser 等曾借助土著微生物的淋滤作用开发了一种固体床生物淋滤技术(solid-bed bioleaching)来修复德国萨克森地区 Weisse Elster 河流沉积物的重金属污染,指出处理过程中基质 S (substrate)的最适投加量为 2%,最适温度在 30~40 °C 之间,去除率最高可达 98%^[27]。

1.4 协同效应

环境条件的改变、细菌的死亡分解等会导致细菌固定的重金属部分活化而重新释放到环境中,成为潜在危害。以植物和根际微生物为研究对象的植物-微生物联合修复技术则可以将重金属富集到超富集植物体内,彻底从环境中清除出去^[28]。

一方面植物可以提供土壤微生物生长所需的碳源和能源,同时又可提供微生物所需的氧气,根际环境中细菌的数量显著超过非根际环境^[7]。另一方面,与非根际环境相比,由于根际附近大量生长的细菌可以富集更多的金属离子,从而分担了植物的压力,使植物生长得更好。Vivas 等^[29]在一个锌矿区的植物根际分离到一株短芽孢杆菌(*Brevibacillus* sp.),能富集环境中 5.6% 的锌离子。

2 真菌对重金属的富集、转化作用

2.1 吸附作用

真菌对重金属的吸附作用主要是指细胞成分对金属的消极吸附,其吸附的方式主要有两种:一是细胞壁上的活性基团(如巯基、羧基、羟基等)与重金属离子发生定量化合反应(如离子交换、配位结合或络合等)而达到吸收的目的;二是物理性吸附或形成无机沉淀而将重金属污染物沉积在自身细胞壁上^[30,31]。

细胞壁是重金属进入细胞内的第一道屏障,大多数金属离子都螯合在细胞壁上。细胞壁的化学组成和结构决定着金属离子与它们的相互作用特性。细胞通过螯合作用吸附重金属已被证明和真菌细胞壁结构有关,如细胞壁的多孔结构使其活性化学配位体在细胞表面合理排列并易于和金属离子结合^[32,33]。此外,胞壁多糖可提供氨基、羧基、羟基、醛基、以及硫酸根等官能团,它们对金属离子有着较强的络合能力^[34]。

另外,如果对真菌吸附剂进行一些物理、化学的预处理(如用酸、碱浸泡或加热等方法),可以不同程度改变其吸附能力。Murugesan 等^[35]将一种从茶树上分离得到的真菌(Tea fungus)用 FeCl₃ (15 mg/L)浸泡 30 min,然后用于对砷的生物吸附实验。结果表明,溶液中砷的去除率接近 100%,较对照组高出 40%。李清彪等^[36]人研究也发现,用 0.2 mol/L 的 NaOH 溶液处理白腐真菌(*Phanerochaete chrysosporium*)的菌丝球后,发现它对 25 mg/L 的铅溶液的吸附率达到了 95%以上,明显大于未经碱处理的白腐真菌的吸附量(66.64%)。这些试验说明外界条件对真菌吸附效果的影响较大,在真菌吸附剂的应用上有一定的实践意义。

2.2 络合作用

在真菌细胞壁与金属离子结合的被动吸附过程中,细胞壁上的多糖等物质可以为结合重金属离子提供大量的离子交换点,当这些结合点达到饱和时,真菌对重金属离子的富集就得通过另外一种机制——络合作用。有研究报道,姬松茸(*Agaicus blazei* Murrill)在土壤和原料的镉含量小于 0.2 mg/kg 的条件下,检测到其子实体镉含量高达 5~17 mg/kg,分析其原因主要归功于特异性的 Ca 结合多肽^[37]。

真菌细胞内普遍存在一种对金属离子具有亲和

能力的蛋白质(肽),称为金属硫蛋白(Metallothionein, MT),它们的作用是结合进入细胞内的重金属离子,使其以不具有生物活性的无毒的螯合物形式存在,降低金属离子的活性从而起到减轻或解除毒害的作用^[38,39]。在真菌中的金属硫蛋白通常由3种氨基酸组成:半胱氨酸、谷氨酸和甘氨酸^[40]。

多数的金属硫蛋白都是由金属离子诱导产生的,如 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Ag^{2+} 、 Sb^{3+} 等都具有较强的诱导能力^[41]。一些真菌体内产生的诱导金属硫蛋白如表2所示。

表2 部分真菌体内产生的诱导金属硫蛋白
Table 2. Some metallothioneins induced by fungi

| 菌株 | 诱导产生的MT | 参考文献 |
|--|---------|------|
| 粗糙脉孢菌(<i>Neurospora sp.</i>) | Cu-MT | [42] |
| 柱状田头菇(<i>Agrocybe cylindracea</i>) | Cd-MT | [43] |
| 双孢蘑菇(<i>Agaricus bisporus</i>) | Cu-MT | [40] |
| <i>Heliscus lugdunensis</i> | Cu-MT | [44] |
| <i>Fontanospora fusiramosa</i> , <i>Flagellospora curta</i> | Cd-MT | [45] |
| 根瘤菌(<i>Rhizobia</i>) | Ca-MT | [46] |

不同的金属硫蛋白其氨基酸组成也不一样。双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)中有与粗糙脉孢菌(*Neurospora crasser*)相似的Cu-MT,每分子金属硫蛋白含6摩尔铜及25个氨基酸残基(其中7个半胱氨酸残基),分子量为2600^[40,42]。江枝和等^[47]对姬松茸子实体中17种氨基酸含量进行了分析,认为半胱氨酸含量与重金属镉含量两者关联系数最大,而脯氨酸含量与重金属镉含量两者关联系数次之。

另外,许多研究表明在酵母菌中也发现存在类似的蛋白^[48]。

3 菌根与重金属的相互作用

菌根是土壤中的真菌菌丝与高等植物营养根系形成的一种联合体,具有很强的酸溶和酶解能力,菌根根际分泌物及菌际提供的微生态环境使菌根根际维持较高的微生物种群密度和生理活性,从而促进植物生长。同时,菌根真菌的活动可改善根际微生态环境,增强植物抗病能力,极大地提高植物在逆境(如干旱、有毒物质污染等)条件下的生存能力^[49]。

Bradley等^[50]在调查英国铜(锌)矿区植物时发现,植物非常稀疏,少量生存的植物中多为石楠菌根植物,且与非菌根植物相比较生长好。自此以后,许

多国家的研究人员对菌根在重金属修复的作用展开了广泛的研究。

菌根真菌对于重金属植物修复的作用主要有以下几个方面:

(1)菌根真菌通过分泌特殊的分泌物等形式改变植物根际环境,改变重金属的存在状态,降低重金属毒性。Heggo等^[51]发现菌根真菌能通过改变土壤pH值和分泌物成分来减弱重金属的生物有效性。Liao等^[52]在研究莴苣对铅的吸附中发现,用GC(气相色谱法)对含有不同重金属浓度的菌根真菌培养物进行分析,发现草酸、柠檬酸、苹果酸、琥珀酸等有机酸随着重金属浓度的增加而增加,这可能是真菌利用这些有机酸降低pH值,与重金属结合进而富集重金属的结果。所有这些研究成果表明了菌根能促进菌根植物对重金属的富集。

(2)菌根真菌能影响菌根植物对重金属的积累和分配,使菌根植物体内重金属积累量增加,提高植物的富集效果。国外学者研究发现,在锌、镉和镍污染的土壤或尾矿库上接种菌根真菌后,苜蓿(*Medicago sativa*)、黑麦草(*Lolium perenne*)和白车轴草(*Trifolium repens*)等植物对重金属的耐受性增强,能获取更多的营养成分,这就可以很好地应用于植物修复^[53,54,55]。

(3)在菌根植物对重金属的吸收或运输、迁移或积累等过程中,AM(*Arhusclar mycorrhiza*)真菌很可能参与调控这些相关功能基因的表达。在重金属胁迫条件下,AM真菌侵染的豌豆(*Pisum sativum*)、西红柿(*Lycopersicon esculentum*)与对照植物在某些抗性基因的表达上表现出差异^[56]。Repetto等^[57]通过二维凝胶电泳-液相色谱技术证实菌根调节合成了Cd诱导蛋白,认为这是菌根共生体对Cd的解毒机制之一。

(4)菌根真菌向宿主植物传递营养,使植物幼苗成活率提高,宿主植物抗逆性增强、生长加快,间接地促进植物对重金属的修复作用^[58]。近年来,采用同位素标记及尼龙网、PVC板隔开等方法对菌根真菌菌丝向宿主植物传递N和P进行了定量的分析测定,结果表明,菌根菌丝对植物体N和P的运输量较大,促进植物的生长^[59,60]。

(5)菌根的形成也同时影响植物根际微生物的种类和数量。有研究表明,树木每克外生菌根(鲜质量)能支持 10^6 个好氧细菌和 10^2 个酵母菌,菌根根际微生物的数量比周围土壤高出近千倍^[61]。

植物根区的菌根菌有独特的酶系统和代谢途径,能降解不能被细菌单独降解的污染物,将菌根修复与植物修复综合运用,是植物生态修复新的研究方向。一般认为,重金属污染土壤中的土著菌根真菌耐受重金属能力较强,植物与菌根真菌生物修复的关键在于筛选有较强降解能力的菌根真菌和适宜的共生植物^[62],从而相互匹配形成有效的菌根。

4 结 论

重金属污染已经成为一个日益突出的环境问题,微生物富集技术的应用为重金属污染的修复提供了新的途径。

微生物富集重金属的机理是一个综合系统的过程,多方面协同作用的结果,仅从以上所列举的几个方面来了解富集机理是不够的。目前,在微生物对重金属的富集机理方面仍有许多问题有待于解

决:(1)细胞壁中哪些特有的成分或基因可吸附或结合重金属;(2)细胞质膜上的有哪些重金属转运蛋白(酶)或载体起转运金属离子作用;(3)金属硫蛋白在菌体细胞内的定位及对重金属解毒的作用程度;(4)与菌体耐重金属有关的基因是如何表达与调控的,等等。

另外,国内外学者针对微生物富集重金属的机理,已从亚细胞角度、生理生化角度、分子生物学角度开展了广泛的研究;而针对微生物富集技术的应用于重金属污染的修复方面的研究较少,而且研究结果还存在一定的不确定性。因此,一方面仍然需要做大量的野外试验以获得准确的试验参数来验证室内试验的结果,以期微生物修复技术的推广;另一方面,将微生物修复技术与其它环境修复技术进行有效的集成,可为重金属环境污染的修复提供更为有效的技术支持。

参 考 文 献

- [1] Hsu M J, Selvaraj K, Agoramoorthy G. Taiwan's industrial heavy metal pollution threatens terrestrial biota[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(2): 327-334
- [2] Nelson B W, Pattee O H, Sileo L, et al. Metal contamination in wildlife living near two zinc smelters[J]. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*. 1985, 38(1): 63-86
- [3] Cocchi L, Vescovi L, Petrini L E, et al. Heavy metals in edible mushrooms in Italy[J]. *Food Chemistry*, 2006, 98(2): 277-284
- [4] 刘乃瑜,马小凡,谢忠雷,等.长春市城市土壤中重金属元素的积累及其微生物特性研究[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2004, (B10): 134-138
- [5] Wu H Y, Ting Y P. Metal extraction from municipal solid waste (MSW) incinerator fly ash—Chemical leaching and fungal bioleaching[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, 38(6): 839-847
- [6] Maria L. Accumulation of metals by microorganisms — processes and importance for soil systems[J]. *Earth-Science Reviews*. 2000, 51(1-4): 1-31
- [7] Zhang C B, Huang L N, Shu W S, et al. Structural and functional diversity of a culturable bacterial community during the early stages of revegetation near a Pb/Zn smelter in Guangdong, PR China[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(1): 16-26
- [8] Beveridge T J. Mechanisms of the binding of metalions to bacterial walls and the possible impact on microbecology[M]. Washington: American Society for Microbiolgy, 1984
- [9] Beveridge T J. Role of cellular design in bacterial metal accumulation and mineralization[J]. *Annu. Rev. Microbiol.*, 1989, 43: 147-171
- [10] Beveridge T J, Schultze-Lam S. Detection of anionic sites on bacterial walls, their ability to bind toxic heavy metals and form sedimentable flocs and their contribution to mineralization in natural freshwater environments[A]. In: Allen H E, Huang C P, Bailey G W. Metal speciation and contamination of soil[M]. BocaRaton: CRG Press/Lewis Publisher, 1995
- [11] Beveridge T J. The response of cell walls of *Bacillus subtilis* to metals and electron microscopic strains[J]. *Can. J. Microbial.*, 1978, 24: 89-104
- [12] 周东琴,朱一民,魏德洲.沟戈登氏菌吸附 Cu^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} 的重金属抗性研究[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2005,

- (3):304-306
- [13] Vanbroekhoven K, Van Roy S, Gielen C, et al. Microbial processes as key drivers for metal (im)mobilization along a redox gradient in the saturated zone[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148(3): 759-769
- [14] Wu S C, Luo Y M, Cheung K C, et al. Influence of bacteria on Pb and Zn speciation, mobility and bioavailability in soil: A laboratory study[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 765-773
- [15] Carmalin Sophia A, Swaminathan K, Sandhya S. Microbially-influenced degradation of solidified/stabilized metal waste [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(13): 2562-2567
- [16] Chang I S, Kim B H. Effect of sulfate reduction activity on biological treatment of hexavalent chromium [Cr(VI)]contaminated electroplating wastewater under sulfate-rich condition[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(2): 218-226
- [17] Lovely D R, Phillips E J P, Gorby Y A. Microbial reduction of uranium[J]. *Nature*, 1991, 350: 413-416
- [18] Lloyd J R, Cole J A, Macaskie L E. Reduction and removal of heptavalent technetium from solution by *Escherichia coli* [J]. *J Bacteriol.*, 1997, 179: 2014-2021
- [19] Lloyd J R, Yong P, Macaskie L E. Enzymatic recovery of elemental Palladium by using sulfate-reducing bacteria[J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1998, 64: 4607-4609
- [20] Kashefi K, Lovley D R. Reduction of Fe(III), Mn(IV), and toxic metals at 100°C by *Pyrobaculum islandicum* [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2000, 66: 1050-1056
- [21] Fredrickson J K, Kostandarites H M, Li S W, et al. Reduction of Fe(III), Cr(VI), U(VI), and Tc(VII) by *Deinococcus radiodurans* R1 [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2000, 66: 2006-2011
- [22] Roux M, Sarret G, Pignot-Paintrand I, et al. Mobilization of Selenite by *Ralstonia metallidurans* CH34 [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2001, 67: 769-773
- [23] McLean J, Beveridge T J. Chromate reduction by a Pseudomonad isolated from a site contaminated with chromated Copper Arsenate [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2001, 67: 1076-1084
- [24] Bajpai P. Biological bleaching of chemical pulps [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2004, 24(1): 1-58
- [25] Mo C H, Cai Q Y, Wu Q T, et al. Research advances of microbiological method for heavy metal removal from municipal sludge [J]. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 2001, 7(5): 511-515
- [26] 周顺桂, 胡佩, 常明, 等. 生物淋滤法脱除城市生活垃圾焚烧飞灰中的重金属: 底物浓度的影响 [J]. 2005, 13(2): 129-135
- [27] Löser C, Zehndorf A, Hoffmann P, et al. Remediation of heavy metal polluted sediment by suspension and solid-bed leaching: Estimate of metal removal efficiency [J]. *Chemosphere*, 2007, 66(9): 1699-1705
- [28] Zhuang X, Chen J, Shim H, et al. New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation [J]. *Environment International*, 2007, 33(3): 406-413
- [29] Vivas A, Biro B, Ruiz-Lozano J M, et al. Two bacterial strains isolated from a Zn-polluted soil enhance plant growth and mycorrhizal efficiency under Zn-toxicity [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(9): 1523-1533
- [30] Tyler G. Metal accumulation by wood-decaying fungi [J]. *Chemosphere*, 1982, 11(11): 1141-1146
- [31] 沈薇, 杨树林, 李校堃, 等. 木霉 (*Trichoderma* sp.) HR-1 活细胞吸附 Pb(II) 的机理 [J]. *中国环境科学*, 2006, (1): 101-105
- [32] Fogarty R V, Tobin J M. Fungal melanins and their interactions with metals [J]. *Enzyme and Microbial Technology*. 1996, 19(4): 311-317
- [33] Wang F Y, Lin X G, Yin R. Role of microbial inoculation and chitosan in phytoextraction of Cu, Zn, Pb and Cd by *Elsholtzia splendens* - a field case [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(1): 248-255
- [34] Mullen M D, Wolf D C, Beveridge T J, et al. Sorption of heavy metals by the soil fungi *Aspergillus niger* and *Mucor rouxii* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(2): 129-135
- [35] Murugesan G S, Sathishkumar M, Swaminathan K. Arsenic removal from groundwater by pretreated waste tea fungal biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(3): 483-487
- [36] 李清彪, 吴涓, 杨宏泉, 等. 白腐真菌菌丝球形成的物化条件及其对铅的吸附 [J]. *环境科学*, 1999, 20(1): 33-38
- [37] 江启沛. 药食两用真菌姬松茸富镉特性及其拮抗抑制研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2003
- [38] Narender R G, Prasad M N V. Heavy metal-binding proteins/peptides: Occurrence, structure, synthesis and functions: A review [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1990, 30(3): 251-264
- [39] Stillman M J. Metallothioneins [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 1995, 144: 461-511

- [40] Yasuhiro N, Sigeru N and Yoshio O. Amino acids and peptides XXVI. Synthesis of *Agaricus bisporus* metallothionein and related peptides and examination of their heavy metal-binding properties[J]. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin*, 1990, 38(8): 2112—2117
- [41] Vasak M. Advances in metallothionein structure and functions[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 19(1): 13—17
- [42] Lerch K, Beltramini M. Molecular structure and biological function of *Neurospora* copper metallothionein[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 1983, 79: 7—8
- [43] 刘安玲,朱必凤,刘主,等.柱状田头菇(茶薪菇)金属硫蛋白的分离纯化与特性研究[J]. *菌物系统*, 2002, 22(1): 112—117
- [44] Jaeckel P, Krauss G, Menge S, et al. Cadmium induces a novel metallothionein and phytochelatin 2 in an aquatic fungus [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2005, 333(1): 150—155
- [45] Guimaraes-Soares L, Felicia H, Joao Bebianno M, et al. Metal-binding proteins and peptides in the aquatic fungi *Fontanospora fusiramosa* and *Flagellospora curta* exposed to severe metal stress[J]. *Science of The Total Environment*, 2006, 372(1): 148—156
- [46] Ike A, Sriprang R, Ono H, et al. Bioremediation of cadmium contaminated soil using symbiosis between leguminous plant and recombinant rhizobia with the MTL4 and the PCS genes[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(9): 1670—1676
- [47] 江枝和,翁伯琦,王义祥,等.利用灰色系统分析姬松茸子实体中氨基酸含量与镉含量的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1259—1261
- [48] Zhou P, Szczyпка M S, Young R, et al. A system for gene cloning and manipulation in the yeast *Candida glabrata* [J]. *Gene*, 1994, 142(1): 135—140
- [49] Ma Y, Dickinson N M, Wong M H. Beneficial effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on establishment of leguminous trees on Pb/Zn mine tailings[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1403—1412
- [50] Bradley R, Burt A, Read D. Mycorrhizal infection and resistance to heavy metal toxicity in *Calluna vulgaris* [J]. *Nature*, 1981, 292: 335—337
- [51] Heggio A, Angle J S, Chaney R L. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal uptake by soybeans [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(6): 865—869
- [52] Liao Y C, Chang Chien S W, Wang M C, et al. Effect of transpiration on Pb uptake by lettuce and on water soluble low molecular weight organic acids in rhizosphere[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(2): 343—351
- [53] Chen B D, Zhu Y G, Duan J, et al. Effects of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on growth and metal uptake by four plant species in copper mine tailings[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2): 374—380
- [54] Tonin C, Vandenkoornhuyse P J, Straczek E J, et al. Assessment of arbuscular mycorrhizal fungi diversity in the rhizosphere of *Viola calaminaria* and effect of these fungi on heavy metal uptake by clover[J]. *Mycorrhiza*, 2001, 10(4): 161—168
- [55] Marques A P G C, Oliveira R S, Rangel A O S S, et al. Zinc accumulation in *Solanum nigrum* is enhanced by different arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(7): 1256—1263
- [56] Ouziad F, Hildebrandt U, Schmelzer E, et al. Differential gene expressions in arbuscular mycorrhizal-colonized tomato grown under heavy metal stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(6): 634—649
- [57] Repetto O, Bestel-Corre G, Dumas-Gaudot E, et al. Targeted proteomics to identify cadmium-induced protein modifications in *Glomus mosseae*-inoculated pea roots[J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 555—567
- [58] Muller T, Avolio M, Olivi M, et al. Nitrogen transport in the ectomycorrhiza association: The *Hebeloma cylindrosporum*-*Pinus pinaster* model[J]. *Phytochemistry*, 2007, 68(1): 41—51
- [59] Van der Heijden E W. Differential benefits of arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal infection of *Salix repens* [J]. *Mycorrhiza*, 2001, 10(4): 185—193
- [60] Dekkers T B M, Van der Werff P A. Mutualistic functioning of indigenous arbuscular mycorrhizae in spring barley and winter wheat after cessation of long-term phosphate fertilization[J]. *Mycorrhiza*, 2001, 10(4): 195—201
- [61] Leyval C K, Haselwandter T K. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects[J]. *Mycorrhiza*, 1997, (7): 139—153
- [62] 吴胜春,骆永明.重金属污染土壤的植物修复研究: II.金属富集植物 *Brassica Juncea* 根际土壤微生物数量的变化[J]. *土壤*, 2000, (2): 75—78, 98

STUDIES ON THE MECHANISMS OF INTERACTION BETWEEN MICROBOES AND HEAVY METALS

SUN Jia-long¹⁻³, XIAO Tang-fu¹, ZHOU Lian-bi⁴, HE Li-bin^{1,2},
NING Zeng-ping^{1,2}, Li Hang⁵, PENG Jing-quan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China; 3. Guizhou Environmental Institute of Sciences, Guiyang 550002, China; 4. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China; 5. Chongqing Institute of Geology & Mineral Resources, Chongqing, 400042, China)

Abstract

In the natural environment, there are various kinds of microboes, which play a key role in the bio-geochemical process of heavy metals. Recent studies have been focused on the absorption and transformation of heavy metals by bacteria and fungi. The results show that bacteria adsorbed the heavy metals mainly via biosorption, oxido-reduction, bioleaching and other synergisms, and fungi mainly via absorption and complexation with metallothionein. In addition, mycorrhiza fungi can also help the plants to biosorp heavy metals through metabolism.

Key words: microboe; heavy metal; absorption; transformation