

Research Progress of Lead Pollution and Bioremediation Technology

Tairan Zhang, Wei Wang

Qinghai University, Xining
Email: 344490297@qq.com, 526442190@qq.com

Received: Feb. 20th, 2014; revised: Mar. 20th, 2014; accepted: Mar. 27th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In modern society, lead pollution is an increasingly serious environmental problem and there exist many maladies for treating the lead pollution by chemical and physical solutions. Therefore, bioremediation of lead contamination has become a hot research field in recent years. This paper reviews the lead pollution and the harm of lead, and then summarizes the research progress of lead pollution in microbial remediation technology mainly from the perspective of lead resistant microorganisms on lead adsorption conditions and mechanism. Finally, this paper puts forward some suggestions on the development of its application according to the development status of domestic lead pollution and bioremediation technology.

Keywords

Lead Pollution, Microbial Remediation, Suggestions

铅污染及其微生物修复技术的研究进展

张泰然, 王 维

青海大学, 西宁
Email: 344490297@qq.com, 526442190@qq.com

收稿日期: 2014年2月20日; 修回日期: 2014年3月20日; 录用日期: 2014年3月27日

摘要

铅污染是现代人类社会的一个日趋严重的环境问题，而传统上对于铅污染治理的物理化学方法存在着不少的弊端。所以对于铅污染的生物修复技术成为近几年来研究的热点。本文首先综述了铅的污染及其危害，然后主要从耐铅微生物对铅的吸附条件和机理上，总结了近几年来对于铅污染微生物修复技术的研究进展。最后根据国内铅污染微生物修复技术的发展状况，提出了几点基于其应用的发展建议。

关键词

铅污染，微生物修复，建议

1. 引言

1.1. 综述

铅是亲硫元素，多产于硫化矿氧化带，它是地球中藏量较多的元素之一，铅又是亲气元素，有大气污染和参与全球循环的特点，因而它也是环境中最丰富的有毒污染物之一[1]。而铅更是被有些学者认为是出现在人类文明中最严重的环境污染物之一，这一观点是被生物圈中铅高出自然水平几个数量级的浓度增加而证实的[2]。

铅污染程度的日趋加剧又是由其广泛的用途而决定的：主要用于制造铅蓄电池；在颜料和油漆中，铅白是一种普遍使用的白色染料；玻璃中加上铅制成铅玻璃，有很好的光学性能，可以制造各种光学仪器；铅还用来制造放射性辐射、X射线的防护设备等[3]。铅的这些性质和用途决定了铅污染将在很长一段时间内成为人类必须要认真面对的环境问题。

实验表明，铅是具有“粒子活性”的，这种污染会在许多铅排放和环境循环过程中通过粒子产生有效的铅清除[4]。但是由于欧洲和美国工业革命的开始，导致铅排放量大幅度增加，在同一时期生产的近50%的铅作为污染物释放到了环境之中[5]。这种排放远远地打破了自然界中原有的吸附-解吸附平衡，更是导致铅在环境中局部过度富集。

而铅本身更是钙的一种生物地球化学的类似物，它很容易结合到营养代谢中去[4]。这导致铅元素在环境中的生物富集和生物放大现象尤为明显。而铅对生物的影响又集中体现在大气、土壤、水体三个方面。

1.2. 土壤的铅污染

土壤是一个不均匀体系，不同类型的土壤对土壤的环境容量的影响是不同的，即使是采自同一母质发育的不同地区的同一类型的土壤，其Pb的化学行为和生物效应也有显著差异[6]。

而铅污染在我国经过全国土壤背景值基本统计量的结果表明，我国土壤含铅量最高可达1143 $\mu\text{g/g}$ ，最低为0.68 $\mu\text{g/g}$ ，平均可达到26 $\mu\text{g/g}$ [7]。而铅在土壤中的存在形态受土壤物理化学性质的控制，常以可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物硫化物结合态和残渣态等5种形态存在[8]。

传统的治理铅污染土壤的主要方法有改土法、隔离包埋法、电动修复法、冲洗络合法等，但因为治理费用高或存在二次环境风险难以大面积推广使用，磷改良剂、诱导植物提取属于新型的土壤污染修复技术，具有廉价、易操作等优点，在国际上已有成功范例[8]。

1.3. 铅污染对植物的危害

铅不是植物发育的必需元素，当被动进入植物根、茎或叶后，就会在其中不断积累，影响植物的生长发育和生理生化过程[9]。而已有的研究表明， Pb^{2+} 可以导致植物氧化胁迫 O_2^{2-} 、 H_2O_2 、 $-OH$ 等活性氧的大量产生，严重地影响植物膜系统的功能[10]，导致膜体的过氧化[11]。而 Cd^{2+} 的膜富集更是可直接或者间接地改变 K^+ 通道的结构和功能[12]。

基于此，近年来许多学者都关于铅对植物的毒害进行了相关研究，其部分研究表明，高浓度的铅会影响植物种子的发芽率和发芽指数[13]，还会影响种子幼根的生长[14]。除了对植物种子的影响外，更会使生长中的作物成熟期推迟，产量大幅度下降，这一点在陈怀满对土壤-植物系统中的重金属污染的研究[7]得到证明。而对于成体植物，高的铅浓度会影响其总叶绿素[15]，正常水分代谢[16]，硝酸还原酶、过氧化氢酶[17]、DNA 和 RNA 的活性及其细胞的有丝分裂[18]，抗氧化酶活性[19]以及体内 SOD 活性[20]等。

同时，研究还表明一定浓度锌，镧，有机酸和硒等物质都可以对铅污染有一定的修复作用，其具体机理大多是提高了 SOD、CAT 或 POD 的活性[21]-[24]。

而事实上，铅污染真正对人类的危害不仅体现在其高浓度对植物的破坏，还体现在其低浓度时的生物放大现象，及通过生物链从自然环境(土壤、水体、大气)进入农作物再进一步进入人体。据统计，我国受重金属污染的耕地面积近 2000 万 hm^2 ，约占总耕地面积的 20%，全国粮食含铅量大于 1.0 mg/kg 的产地有十多个[25]。

1.4. 铅污染对人体的危害

铅是一种分布广泛且毒性没有阈值的重金属，在环境中可长期蓄积，主要通过空气、土壤、食物、饮水进入人体[26]。长期暴露在铅污染物环境中，往往会造成体内血铅浓度升高，引起贫血、认知缺损、听力减弱和维生素 D 代谢紊乱、腹部疼痛等问题，而儿童和婴幼儿是铅污染的敏感人群[27]。

研究表明，铅对机体的损伤呈多系统性、多器官性，能对神经、造血、消化、泌尿、生殖、心血管、内分泌、免疫等系统及生长发育造成不利影响[28]。通过对小白鼠的研究发现，其脑部对铅的反应最为敏感，会对记忆力和学习能力产生影响[28]。而这种影响在一定程度上可以被锌拮抗：锌可能通过某种途径直接或间接阻断了铅与抗氧化酶系的相互作用，减轻了铅引起的神经化损伤[28]。

而对于人体来说，铅通过肠道和呼吸进入人体，再经过主动运输和被动扩散两种形式由小肠和肺泡吸收进入血液，一部分储存于骨骼(通常所说的储存池)，另一部分随血液分布到全身各器官组织(通常所说的交换池)，从而产生毒性作用。其动态平衡如图 1[29]所示。而铅还可以通过血液进入脑组织，造成

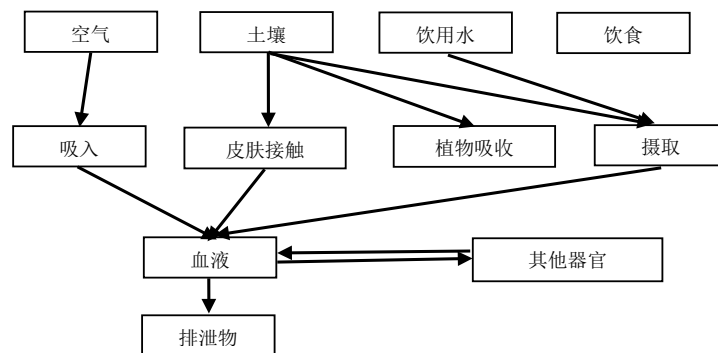


Figure 1. Biological structure of the IEUBK model for lead in children
图 1. 儿童血铅模型 IEUBK 的生物学结构图

脑损伤，血铅的理想水平应该为 0[30]。

而事实上，不仅高浓度的铅环境会对人体产生损伤，低浓度的铅环境一样会对人体产生不利影响：长期接触低水平铅不仅能使生物学指标发生改变，同时会对周围神经系统产生不同程度的损伤，使下肢感觉神经、上肢运动神经潜伏期较先受累[31]。

从严格意义上讲，正常人血铅含量不应大于 400 mg/kg[32]。而目前，人类对铅的吸收值已接近或超出人体的最大允许量，铅的过度摄入已经成为危害人体健康不容忽视的一个方面[33]。无论是世界还是国内，人体血铅超标的事件更是层出不穷。

2. 铅污染的微生物修复

2.1. 其他修复方法概述

传统的含铅废水处理技术有化学沉淀法、电解法、吸附法、离子交换法、膜分离法等[34]。化学沉淀法对化学试剂的消耗较大，且存在二次污染的可能性；电解法耗电量大，处理废水量少；膜分离法处理成本较高；吸附法是一种比较有效的处理重金属污染的方法，活性炭、离子交换树脂、离子交换纤维材料固然有良好的处理效果，但其经济运行成本高，难以大规模应用。因此寻找高效，低成本的吸附材料是当前吸附法处理重金属污染的一个研究热点[35]。

而其生物吸附铅的主要机理一般被认为与胞外聚合物(胞外多糖和胞外蛋白)有关，其中研究表明胞外蛋白对铅吸附的贡献大于胞内蛋白。而在吸附过程中，胞外聚合物在吸附铅时并未被破坏其本身的结构，说明是它们其中的基团与铅离子发生了作用。其具体机理经过研究表明可能是氨基中的 N 和酰胺中的 N 起了主要作用[36]。

而生物吸附法又可分为植物修复法和微生物处理技术[3]。在植物修复中，能利用的植物有草本、藻类、木本植物等。已有文献涉及到玉米、向日葵、燕麦、大麦、豌豆和莴苣等植物对重金属的修复作用研究[37] [38]。而国内文献则有对超铅富集植物接骨草和鲁白，芥菜以及杨梅的研究[39]-[41]。

而微生物处理技术国内还普遍处于实验室阶段。但近年来已经有不少学者展开了对铅吸附性微生物的研究。

2.2. 微生物修复

关于铅污染的微生物修复，近几年来国内外学者对耐铅微生物做了各方面的研究[42]-[54]。其研究方向大多集中在吸附条件、吸附机理上。少有学者对他们所分离出的耐铅微生物进行了 DNA 层面上的遗传学分析[48]，但由于数据有限，无法得出可靠结论，故不在此详细阐述。

2.2.1. 吸附条件的研究进展

几乎所有研究耐铅性微生物的学者都研究了其吸附条件，包括温度、PH、离心转速、铅浓度对微生物吸附铅能力的影响等。其基本思想大多是控制一种吸附条件，测定其对铅离子的去除率或 600 nm 处的 OD 值。大量的实验表明，耐铅性微生物对铅的去除率和其在 600 nm 下的 OD 值(可以反映微生物生长情况)变化趋势基本一致。所以我们可以认为在 600 nm 下的 OD 值可以在一定程度上反映耐铅性微生物对铅吸附能力的大小，更可以进一步推论出：耐铅性微生物对铅的吸附是一个以活细胞吸附为主的过程。

关于温度，大量学者的实验都表明，耐铅性微生物对铅的吸附率的峰值都是在 30℃ 附近。而当耐铅性微生物的生长温度条件高于或低于这个温度时，其吸附率大多都会出现明显下降，其具体原因还未成定论。在温度这个方向上，30℃ 远远高于我国大部分地区的常温。所以如果要想让铅污染的微生物修复技术走出实验室，其最佳吸附温度将会是一个需要最先被解决的问题。

关于 PH, 许多学者也做了相关方面的研究。研究表明, 大多数的耐铅菌都不属于极端嗜碱菌或极端嗜酸菌。其对于 PH 的耐受性在 2 左右, 普遍集中在 5~8。原因可能是由于其生长环境不同而导致的。

关于培养转速, 只有少部分学者做了此方面的研究。其研究结果也十分一致, 即将含铅废水和菌种进行充分混合会提高耐铅菌对于铅的吸附效率。但研究表明, 一般只有在混合速率超过每秒 10 转, 才有可能使吸附效率达到最大。这在实际中耗能将会成为一个很大的问题, 所以其实际意义远远低于温度和 PH 对铅吸附能力的影响。

关于铅浓度, 这是对于耐铅性微生物吸附铅的一个至关重要的问题。从自然环境中分离的菌种对铅浓度吸附的峰值一般集中在 300~600 mg/L。部分学者对分离出的菌种进行了驯化, 使其耐铅能力有了明显的提高。研究表明: 真菌的耐铅能力一般大于细菌的耐铅能力; 但对铅的吸附能力, 其规律还尚不明显。

还有部分学者对铅的吸附时间进行研究, 证明了其吸附是一个以快速吸附为主的过程[44]。

还有部分学者做了相关方面的研究, 对湿菌和干菌关于铅吸附的能力进行了测定[49], 其结果是湿菌的吸附能力远大于干菌。但数据较少, 尚且无法定论。

2.2.2. 吸附机理的研究进展

吸附机理同样是一个研究的热点。研究发现, 如果只考虑生物膜对铅的吸附, Langmuir 和 Freundlich 模型都能很好地描述生物膜对铅吸附的热力学过程, 而 Elovich 和双常数速率方程能够较好地拟合吸附的动力学过程[47]。而其它的研究表明, 对于耐铅性微生物对铅的吸附数据大多都符合 Langmuir 等温吸附模型。

还有部分学者对耐铅微生物进行了红外光谱分析, 金羽等人则对耐铅微生物进行了电镜扫描。无论是数学模型还是红外光谱分析, 都证实了耐铅微生物对铅的吸附机理是一个以表面吸附为主的过程。对耐铅微生物的电镜扫描发现, 耐铅微生物对铅的吸附过程中存在着胞内富集现象。

2.3. 应用发展的建议

2.3.1. 应用技术

国内已经有了许多对耐铅微生物吸附铅能力的研究, 但至今仍缺少可以和理论相结合的应用技术, 这是我国铅污染的生物修复技术一直都没能走出实验室的一个重要原因。所以对于铅污染的微生物修复, 应注重其应用技术的研究:

对于含铅废水, 微生物修复有着吸附效率高、速度快、选择性去除铅等优点, 但是由于微生物体积小, 使微生物细胞不易与废水相分离, 容易产生二次污染。这大大限制了微生物修复技术在处理含铅废水中的应用和发展。因此对于含铅废水的微生物修复来说, 选取合适的微生物并根据其性质用恰当的固定方法来吸附铅, 是一个非常广阔的研究前景。

对于受到铅污染的土壤, 由于重金属的不可降解性和富集性, 微生物修复存在着无法彻底清除的缺陷, 所以微生物对于土壤重金属的修复作用主要是与植物结合: 利用微生物促进重金属离子活性, 促进植物对重金属的吸收[55]。所以对于土壤的微生物修复来说, 应根据当地的具体环境, 来确定修复所用的耐铅植物与微生物, 综合考虑二者之间的联系。

2.3.2. 吸附条件

虽然国内学者对耐铅微生物的吸附条件的研究资料很多, 但是大多都没有与实际环境相结合。其分离出的耐铅微生物大多都没有在实际环境中吸附铅, 因此实际参考价值并不高。

对于受到铅污染的土壤, 由于微生物修复是与植物相结合的, 所以应当研究两者之间的相互作用关

系。根据实际土壤环境、温度等外部条件，以及所选取的耐铅微生物、植物本身的性质共同确定其最适吸附条件。

对于含铅废水，应研究耐铅微生物在实际废水中对铅离子的吸附作用，并将实验结果与在培养基中的吸附结果进行对比。分析两种环境下不同因子对微生物吸附铅的影响。或是研究不同的固定化方式、菌种在水体中的存在方式，对菌种吸附铅能力的影响。

2.3.3. 联合吸附

如今国内对微生物吸附铅的研究大多集中在单菌种吸附上。所以，对铅的多菌种联合吸附很可能是以后的研究方向之一。即研究水体和土壤内的耐铅菌种与其他菌种的共生关系。研究是否存在两种耐铅性微生物能对铅进行联合吸附，或是存在某种不耐铅微生物能通过某种机理来增强耐铅微生物的铅吸附能力。

2.3.4. 菌种驯化

在前文已经提到，耐铅性微生物的最适吸附温度大约都集中在 30℃。可 30℃ 远超我国大部分地区的常温。而驯化嗜低温性耐铅性微生物就是其解决办法之一。除了温度以外，驯化耐受其他实际环境因素的耐铅微生物也是一个不错的研究方向。

参考文献 (References)

- [1] Chau, Y.K., et al. (1980) Lead in the marine environment. Pergamon Press, Oxford, 225.
- [2] 陈皓文 (1986) 铅污染与微生物. *环境科学*, **7**, 87-89.
- [3] 袁海平 (2010) 固定化微生物细胞吸附铅的研究. 硕士论文, 山西大学生命科学学院, 山西.
- [4] Smith, D.R., Flegal, A.R. and 段霞瑜 (1995) 生物圈中的铅: 最近的趋势. *AMBIO-人类环境杂志*, 北京.
- [5] Flegal, A.-R. and Smith, D.R. (1992) Current needs for increased accuracy and precision in measurements of low levels of lead in blood. *Environmental Research*, **58**, 125-133
- [6] 陈怀满, 郑春荣, 孙小华 (1994) 影响铅的土壤环境容量的因素. *土壤*, **4**, 189-195
- [7] 陈怀满 (1996) 土壤 - 植物系统中的重金属污染. 科学出版社, 北京.
- [8] 高文谦, 陈玉福 (2011) 铅污染土壤修复技术研究进展及发展趋势. *有色金属*, **1**, 131-136.
- [9] 李秀珍, 李彬 (2008) 重金属对植物生长发育及品质的影响. *安徽农业科学*, **14**, 5742-5746.
- [10] 任艳芳, 何俊瑜, 张冲, 等 (2010) 铅胁迫对莴苣种子萌发和部分生理代谢的影响. *江苏农业学报*, **4**, 740-744.
- [11] 任安芝, 高玉葆, 刘爽 (2002) 青菜幼苗体内几种保护酶活性对 Pb、Cd、Cr 胁迫的反应研究. *应用生态学报*, **13**, 510-512.
- [12] Wang, S., Xing, T.R., Tang, M.L., Yong, W., Li, C.C., Chen, L., Wang, H.L., Tang, J.L. and Ruan, D.Y. (2008) Effects of Cd²⁺ on transient outward and delayed rectifier potassium currents in acutely isolated rat hippocampal CA1 neurons. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, **377**, 245.
- [13] 陈振华, 张生, 胡晋 (2005) 铅污染对 3 个水稻品种种子活力的影响. *中国水稻科学*, **3**, 269-272.
- [14] 马文丽, 金小弟, 王转花 (2004) 铅胁迫对燕麦种子萌发及幼苗生长的影响. *山西大学学报(自然科学版)*, **2**, 202-204.
- [15] 龚双姣, 马陶武, 姜业芳, 等 (2009) 铅胁迫对 3 种藓类植物细胞伤害及光合色素含量的影响. *西北植物学报*, **8**, 1630-1636.
- [16] Parys, E., Romanowska, E., Siedlecka, M., et al. (1998) The effect of lead on photosynthesis and respiration in detached leaves and in mesophyll protoplasts of *Pisum sativum*. *Acta Physiologiae Plantarum*, **20**, 313-322.
- [17] 李荣春 (2000) Cd/Pb 及其符合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响. *植物生态学报*, **2**, 238-242.
- [18] 张义贤 (1997) 重金属对大麦(*Hordeum vulgare*)毒性的研究. *环境科学学报*, **2**, 199-205.
- [19] 蔡卓, 卢登峰, 梁信源, 等 (2012) 铅污染对芦荟抗氧化活性影响的研究. *广西大学学报(自然科学版)*, **3**, 515-520.
- [20] 唐咏 (2001) 铅污染对辣椒幼苗生长及 SOD 和 POD 活性的影响. *沈阳农业大学学报*, **1**, 26-28.

- [21] 李莉, 秦恩华, 熔, 等 (2006) 铅胁迫对绿豆苗期生理生化特性的影响及硒缓解作用. *湖北民族学院学报(自然科学版)*, **1**, 94-96.
- [22] 李雪梅, 张利红, 陶思源, 等 (2005) 不同有机酸对铅胁迫小麦幼苗的缓解作用. *生态学杂志*, **7**, 833-836.
- [23] 王立新, 郁建锋, 吕伟, 等 (2008) 锌对铅胁迫下豌豆幼苗生长发育的影响. *北方园艺*, **11**, 17-20.
- [24] 杜兰芳, 郁建锋, 屠云霞 (2007) 镧对铅胁迫下豌豆幼苗生长发育的影响. *北方园艺*, **12**, 14-18.
- [25] 王松良, 郑金贵, 等 (2007) 土壤重金属污染的植物修复与金属超富集植物及其遗传工程研究. *中国生态农业学报*, **1**, 190-194.
- [26] 吴季友, 王宗爽, 傅晓, 等 (2012) 美国铅环境空气质量、标准及控制战略. *中国人口·资源与环境*, **S2**, 245-248.
- [27] WHO (1987) *Air Quality Guidelines for Europe (2nd Edition)*, Copenhagen, 175.
- [28] 杨占军 (2008) 铅对小鼠神经行为的影响及锌的拮抗效应. *工业卫生与职业病*, **1**, 18-20.
- [29] 张一鹏 (2004) 城市儿童铅污染的现状、原因及防治措施. *职大学报(自然科学版)*, **4**, 8-9.
- [30] 张园, 耿春女, 蔡超 (2013) 铅暴露对人体健康风险评价的模型综述. *环境化学*, **6**, 943-951.
- [31] 朱玉华, 周敏杰, 曹钟兴 (2005) 低浓度铅环境作业工人周围神经传导速度与生物学指标的变化. *中国临床康复*, **9**, 227-229.
- [32] 张懋奎, 周晓明, 王蓓兰 (2007) 铅对人类的危害及铅中毒的预防. *社区卫生保健*, **6**, 359-360.
- [33] 韦友换, 黄秋婵 (2008) 铅对人体健康的危害效应及其防治途径. *微量元素与健康研究*, **4**, 62-64.
- [34] 沈黎, 孙勇, 熊大民 (2010) 含铅废水处理技术研究进展. *南方金属*, **1**, 9-12.
- [35] 薛红琴, 荆肇乾 (2011) 低成本生物材料去除废水中铅的研究探讨. *工业水处理*, **10**, 6-9.
- [36] 苏春彦, 康春莉, 郭平, 等 (2008) 天然水中优势菌胞外聚合物及其主要成分对铅的吸附. *应用化学*, **1**, 1-4.
- [37] Ebb, S.D. and Kochian, L.V. (1998) Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), barley (*Hordeum vulgare*) and India mustard (*Brassica juncea*). *Journal of Environmental Science & Technology*, **32**, 2802-806.
- [38] Kayser, K., Wenger, A., Keller, A., et al. (2000) Enhancement of phytoremediation of Zn, Cd and Cu from calcareous soils: The use of NTA and sulfur amendments. *Environmental Science and Technology*, **34**, 1778-1783.
- [39] 刘月莉, 伍钧, 唐亚 (2009) 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量. *生态学报*, **4**, 2020-2026.
- [40] 柯文山, 陈建军, 黄邦全, 等 (2004) 十字花科芸薹属5种植物对Pb的吸收和富集. *湖北大学学报(自然科学版)*, **3**, 236-238.
- [41] 何新华, 陈力耕, 何冰, 等 (2004) 铅对杨梅幼苗生长的影响. *果树学报*, **1**, 29-32.
- [42] 任广明, 曲娟娟 (2010) 铅抗性细菌的分离及吸附性能研究. *东北农业大学学报*, **2**, 55-59.
- [43] 朱一民, 周东琴, 魏德洲 (2003) *Norcardia amarae* 菌体对水相中Pb²⁺的吸附特性. *东北大学学报*, **10**, 978-981.
- [44] 李青彬, 韩永军, 刘雪平, 等 (2007) 土壤分离菌株去除水溶液中铅离子研究. *环境工程学报*, **1**, 70-74.
- [45] 周薇, 张小平, 康纪婷 (2009) 从矿区土壤中筛选微生物对Pb²⁺、Zn²⁺吸附的研究. *环境工程学报*, **3**, 1906-1911.
- [46] 赵玉清, 陈吉群, 张凤杰, 等 (2009) 非嗜铅菌对水中重金属Pb²⁺的吸附研究. *中国环境科学学会学术年会论文集*.
- [47] 赵玉清, 陈吉群, 边海涛 (2008) 生物膜的驯化及其对废水中铅离子的吸附. *大连海事大学学报*, **1**, 103-106.
- [48] 陈吉群 (2007) 耐铅优势菌的筛选及其应用研究. 硕士论文, 大连理工大学, 大连.
- [49] 陈若莉 (2010) Pb²⁺污染区耐铅细菌吸附特性的研究. *福建工程学院学报*, **8**, 262-303.
- [50] 李辉, 李登煜, 陈强, 等 (2005) 一株耐铅细菌B27的分离鉴定及其吸附能力研究. *环境科学学报*, **18**, 213-216.
- [51] 金羽, 曲娟娟, 李影, 等 (2013) 一株耐铅细菌的分离鉴定及其吸附特性研究. *环境科学学报*, **8**, 2248-2255.
- [52] 杨亮, 郝瑞霞, 吴津, 肖育雄 (2012) 耐受铅真菌的筛选及其对Pb²⁺吸附的初步研究. *环境科学学报*, **10**, 2266-2374.
- [53] 杨亮, 郝瑞霞, 等 (2012) 耐铅微生物筛选及其铅去除能力的初步研究. *北京大学学报(自然科学版)*, **6**, 965-970.
- [54] 曹铁华, 牟忠生, 王淑萍, 等 (2012) 抗铅微生物的筛选及EDDS螯合诱导黑麦草修复铅污染土壤的效应初探. *吉林农业科学*, **37**, 32-34.
- [55] 陈宝 (2011) 心耐铅细菌对铅污染土壤生物修复作用的研究. 硕士论文, 东北农业大学, 黑龙江.