第39卷第S2期 班危糾乡5总忒 Vol.39 No.S2

2016 年 12 月 Environmental Science & Technology Dec. 2016

吴龙，岳昌盛，彭犇，等.汞污染土壤修复技术探讨[J].环境科学与技术,2016,39 （S2 ：308-312. W u Long, Yue Changsheng, Peng Ben,etal. D iscussof mercury po l lution soi l remediation technology[J]. EnvironmentalScience&Technology，2016，39（S2） ：308-312.

汞污染土壤修复技术探讨

吴龙， 岳昌盛， 彭犇， 郝以党， 刘诗诚

（1. 中冶建筑研究总院有限公司，北京 100088； 2. 中冶节能环保有限责任公司，北京 100088）

摘 要：中国是工业大国，有色金属冶炼、燃煤电厂等生产存在大量的汞排放，每年汞排放总量估计在2 000 t 以上。中国 1.61%的土 壤汞含量超标，国内汞、有色金属矿区、冶炼厂等工业用地土壤汞含量严重超标，往往为背景土壤的20 倍以上；燃煤电厂、垃圾焚烧厂用 地汞含量普遍超标。因此，需要严格控制相关企业汞污染物排放，加快开展汞污染土壤修复。汞污染土壤的修复方法需要根据土壤的性质 和土壤修复后用途选择，实际修复往往需采用多种方法结合，以便达到土壤的低成本、高效化修复。

关键词：汞； 污染； 土壤； 修复

中图分类号：X53 文献标志码:A doi: 10.3969/j.issn.1003—6504.2016.S2・060 文章编号：1003—6504（2016）S2—0308—05

Discuss of Mercury Pollution Soil Remediation Technology  
WU Long, YUE Changsheng, PENG Ben, HAO Yidang, LIU Shicheng  
1.Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group, Co, Ltd, Beijing 100088, China;

2.Energy Saving and Environmental Protection, MCC Group, Co, Ltd, Beijing 100088, China)

**Abstract**：China is an industrial country，there is large amount mercury emissions existing because of non —ferrous metal smelting, coal—fired power plants and other production activities ，and the annual total amount of mercury is more than 2 000 tons. 1.61% soil mercury content of China exceed standard，and the mercury content of domestic mining area for mercury， non—ferrous metals，and other industrial lands exceed seriously, 20 times more than the mercury content of background soil ； Mercury contents of coal—fired power plant and garbage incineration plant are generally out standard too. Therefore, it is nec － essary to strictly control the relevant corporate mercury emissions, and accelerate the development of mercury contaminated soil remediation. Remediation of mercury contaminated soil needs to be based on the nature of the soil and the use of soil af － ter remediation, the actual remediation often need to use a variety of methods in order to achieve the low cost and high effi － ciency target.

**Key words**：mercury; pollution; soil; remediation

《环境科学与技术》编辑部：（网址）http://fjks.chinajournal.net.cn （电话）027—87643502 （电子信箱）[hjkxyjs@vip.126.com](mailto:hjkxyjs@vip.126.com) 收稿日期：2016—04—19；修回 2016—06—01

作者简介:吴龙（1985 -，男,高级工程师，工学博士，主要从事固废处理利用、土壤修复技术研究，（电子信箱）jieke8857@126.com（

汞是常温下唯一的液态金属，是非生命所需且对 生物体具有强毒害作用的元素。汞对人体器官、神经 系统及遗传变异等具有十分严重的危害作用。20 世纪 60 年代日本发生的水俣病事件是汞污染的典型事件， 恶性事件的发生也引起研究人员的重视。

生产生活中产生的汞排放进入大气或者水体，通 过沉降或扩散进入土壤中，土壤中汞被植物吸收通过 食物链进入人体，长期生活在土壤汞污染地区将对人 体健康产生危害。论文对汞的排放及我国土壤汞污染 现况进行了阐述，系统分析土壤汞污染修复技术，通 过各技术的对比分析对汞污染土壤的修复进行探讨。

1. 我国汞的排放和土壤汞污染现状
   1. 汞的排放 关于汞的排放还没有确切的数据，普遍认为每年 约有 1 000~4 000 t 汞排放到大气中。工业革命以来， 陆续约 20 万 t 汞排放大气中，目前仍约有 3 500 t 汞 在大气中，大气中汞浓度相比工业革命前已经增加 3 倍[1—2]。

汞的排放有人为因素和自然因素，人为主要有化 石燃料燃烧、城市垃圾焚烧、有色金属冶炼、氯碱电 极、化工行业汞催化剂、汞矿区三废排放、汞电器设 备、农药等生产生活排放。估计人为汞排放量约为

2 100 t/a ，是环境汞浓度增高的直接原因 。此外，火山 、 地热、土壤和水体表面挥发等也会产生一定的汞排 放。

文献［3-4］显示，世界范围内人为汞排放以亚洲地 区排放量为主约1 000 t,其中我国汞排放为500~700 t,主要因为我国能源结构以煤炭为主，且有色金属等 涉及汞排放的行业生产规模也是世界上最大的。目前 关于我国汞排放量还缺乏具体的统计,但我国土壤汞 释放通量要高于国外同类地区。我国部分城市空气中 汞含量为5.4~18.4 ng/m3,偏远地区为2.7~7.5 ng/m3, 气态汞含量均远高于欧美同类地区的汞浓度,目前北 半球大气平均汞含量为1.3~1.7 ng/m3,不到我国气态

汞含量的 50%。

文献［5］基于官方数据对1999 年我国汞排放进行 系统分析,结果表明1999 年我国汞人为排放总量为 536 t，其中45%来自有色金属熔炼,38%来自煤燃烧， 17%来自电池、荧光灯和水泥等生产活动。2005 年我 国向大气排放汞量为825.2 t,占全球排放总量的42% 以上。上述数据均为 10余年前数据,2015年我国有色 金属产量为 1999年的 12.6倍,煤燃烧量为 1999年的 2.68倍，根据此推算汞排放量约为4 000 t,依此估计 我国实际汞排放量估计不低于2 000 t,工业快速发展 带来了汞排放的急剧增加。

* 1. 我国土壤汞污染现状

土壤中汞包括自然来源和人为来源两种。自然来 源主要指土壤母体中自身含有的汞,不同的土壤类型 存在着巨大的差异,我国土壤汞的背景含量为 0.038 mg/kg,高于世界平均0.03 mg/kg的均值。但人为的生 产排放增加了环境内的汞含量,表1 为我国典型生产 生活区域土壤汞含量。

表 1 典型生产区域土壤汞含量 ［6-16］

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 贵州万山汞矿区  地域 周边8 km | 湖南官寨铅锌 | 某锌冶炼厂 | 某氯碱厂 | 台州电子 | 某垃圾焚烧厂 | 内蒙某电厂 |
| 矿区周边 5 km | 周边 30 km | 盐泥堆场附近 | 废物回收区 | 周围 2 km | 周围 1 km |
| 汞含量 /mg-kg-1 12~53 | 1.15 | 0.2~3.6 | 3.42~22.54 | 3.1 | 0.088 | 0.4~1.7 |
| 背景含量/mg-kg-1 0.5 | 0.55 | 0.11 | 0.3 | 0.1 | 0.06 | 0.2~0.3 |

由表1 数据可发现汞矿区、铅锌矿区、铅锌冶炼 厂、氯碱生产厂、电子垃圾拆分区域周边土壤汞含量 往往超出当地背景土壤汞含量 20倍以上。垃圾焚烧 厂及发电厂周边区域土壤汞含量也明显高于背景土 壤汞含量 50%以上。可见汞生产、有色金属生产或电 子垃圾拆分区的汞排放对土壤的影响十分显著,急需 妥善的处理,若三废排放控制不当可对周边土壤环境 带来毁灭性的打击。垃圾焚烧及燃煤发电也会产生汞 排放,对于单一的生产单位可能产生量相对较低,但 考虑我国垃圾焚烧处理量近6 000万t,燃煤总量在 30亿t以上，可适当提高汞排放标准有助于汞排放总 量的控制。

2014年国家环保部和国土资源部联合发布《全国 土壤污染状况调查公报》指出我国土壤点位超标率为 16.1%,汞元素污染点位超标率为 1.61%,其中工业废 弃地点位超标率为 34.9%,涉及化工、矿冶等多行业, 土壤污染治理十分迫切。

1. 汞污染土壤修复技术

汞污染土壤修复技术有热脱附法,淋洗法、化学 法、植物法、微生物法、固化等修复方法以及后续的固 化封存技术。此外常用的还有挖掘法,但基本为换土, 挖掘出的污染土壤还需要采用其他技术进行修复。

* 1. 热脱附法

热脱附法采用高温手段将汞及汞化合物等有害 重金属元素挥发成为气相和土壤分离。一般包括土壤 的预处理、高温脱附、气相冷凝及烟气净化。

土壤预处理需要采用自然晾干或烘干等措施控 制土壤中含水率,一般控制在 20%以下；采用破碎、筛 分措施控制土壤粒度,去除大块沙石,一般控制土壤 颗粒粒径在2 cm以下。预处理完的土壤采用高温设 备进行加热土壤，一般温度控制在200~800 常采用 回转窑、电热炉等高温设备［17］。高温作用下汞等重金 属元素及化合物挥发进入气相和土壤分离,分离后的 气体冷却出液相汞沉降,烟气采用活性碳吸附等净化 措施处理后再排入大气。

热脱附处理温度较高,往往使用添加剂降低处理 温度,节约成本,提高效率。采用氯化物作为添加剂可 有效降低热脱附处理温度,并提供一定的负压真空条 件,促进汞等重金属化合物的挥发,处理温度可降低到 500它以内，甚至更低冋。挥发的汞蒸汽冷却一般多采 用冷空气或水介质进行冷却,也有采用金属和高温汞 蒸汽进行反应生成汞齐对汞进行捕捉。

* 1. 淋洗法 淋洗法多采用水作为介质对土壤进行选矿处理, 利用汞和土壤密度的显著差异,以及不同颗粒大小土 壤中汞分布状态的不同进行分离。大颗粒砂石砾（一 般10目以上）直接采用水淋洗后回填,较细颗粒需要 进行多次的选矿处理,液固比往往高达10甚至 20,选 矿处理过程有研究人员添加过剩的 Na2S 或 CaCl2、 Na?EDTA,草酸及KI等试剂促进土壤中汞元素的浸 出［19］。分离所得的含汞溶液采用硫化物进行沉淀分离 含汞物质。此外,还有相关研究采用氨水作为介质进 行选矿处理,氨水可在一定条件下挥发,可形成闭环 处理。
  2. 化学法

化学法注重通过添加化学物质和含汞污染物反 应促进含汞污染物的浸出或稳定化。化学法种类较 多,有研究采用可溶性的次氯酸盐、碘盐、硝酸盐、硫 代硫酸盐形成可溶性的汞化合物,也有采用次氯酸、 硫酸等强酸进行酸浸出汞离子,浸出的可溶性汞化物 采用硫化物生成硫化汞沉淀分离。此外还有添加双氧 水、高锰酸钾提供强氧化性条件,采用柠檬酸、果石 酸、碳酸、草酸等形成可溶性的络合物［20］,进而采用离 子交换分离。

* 1. 植物法

植物法利用植物本体对土壤中汞等有害元素的 吸收能力,汞在植物中富集,降低土壤中汞含量。相关 研究发现油菜、大蒜、葱、山嵛菜、洋麻等植物对汞元 素具有较强的吸收能力［21］,可用于汞污染土壤修复。

* 1. 微生物法

微生物法主要是利用细菌对土壤中汞存在形式 的转化作用,将汞化合物中的二价汞氧化转化成单质 汞,再通过汞单质的气相挥发收集去除。可用于汞土 壤修复的微生物有铁氧化细菌,菌丝体真菌,芽孢杆 菌,恶臭假单胞菌等［22］,且工作环境往往在较强的酸 性条件下进行。

* 1. 固化法

固化法是汞污染土壤修复的最终方法,该方法通 过添加胶凝材料等方法将污染土壤封存包裹,使其中 汞等重金属元素浸出液浓度低于标准排放要求。

固化法多采用水泥、矿渣、钢渣、石灰、石膏等具 有水硬胶凝性物质作用固化胶结剂［23］。此外通过添加 硫化物、磷酸盐、钨酸盐等药剂促进稳定的不溶性汞 化物的形成,降低可溶性汞元素含量。一般胶凝材料 添加量约为固化土壤量的 15%~20%,添加剂含量一般 略高于需用量 。

1. 土壤汞修复技术的对比分析
   1. 土壤汞修复技术对比

我国土壤汞污染严重,尤其有色冶炼、氯碱等工 业生产企业及矿区周边土壤汞污染严重超标,迫切需 要修复治理,表2 为常规土壤汞修复方法的对比情 况。

由表2可知,采用热脱附法、固化法处理具有广 泛的适用性,处理效率高,周期短,但成本较高,破坏 土壤组织。淋洗法处理效率高,周期短,但处理成本

表 2 常规土壤汞修复方法的对比

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 修复技术 | 优点 | 缺点 |
| 热脱附法 | 效率高,周期短,无二次污 染,实用性广 | 成本高,破坏土壤 |
| 淋洗法 | 效率高,周期短 | 成本高,易产生污染废水,粘 土处理效果差 |
| 化学法 | 效率高,周期短 | 成本高,易产生药剂污染 |
| 植物法 | 成本低,无二次污染,不破坏 土壤 | 周期长,污染程度不能过高 |
| 微生物法 | 成本低,无二次污染,不破坏 土壤 | 条件苛刻,周期较长 |
| 固化法 | 效率高,周期短 | 成本高,破坏土壤 |

高,处理过程废液量大,易产生二次污染水,淋洗法处 理粘土效果差,更适用于砂土类型土壤。化学法和淋 洗法具有类似的优缺点,但相对易产生药剂污染。微 生物法和植物法处理普遍存在成本低、无二次污染、 不破坏土壤的优点,但普遍存在处理周期相对较长, 且微生物处理条件苛刻,植物法不能处理污染程度过 高的土壤。

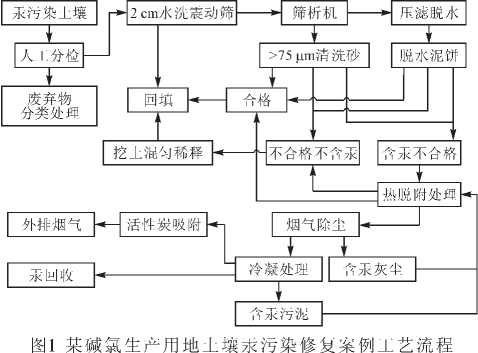
* 1. 土壤汞修复工艺的选择分析

土壤汞修复工艺的选择要根据污染土壤的性质 和修复后土地的用途 2 个方面进行选择。不同的土壤 类型和修复后土地用途对土壤修复时间周期、是否破 坏土壤及二次污染等提出了不同的要求。

土壤的类型很多,但简单的来讲可以分为砂质 土、黏质土和壤土三类。砂质土含沙量多,颗粒粗糙、 渗水速度快,保水性能差,通气性能好,反之黏性土性 质和砂质土性质相反,而壤土性质介于两者之间。淋 洗及化学法更适合处理渗水快、保水性能差的砂质土 处理,黏质土处理效率较低。

修复后土地的用途很多,但简单的来讲可以分为 工业生产,商业居住,农业种植以及园林绿化等休闲 观光4类。工业生产、商业居住用地修复后不必用于 种植,可不考虑修复引起的土壤的组织结构破坏,且 需要处理效率高、周期短,适合选择处理热脱附、淋 洗、化学及固化方法。农业种植和园林绿化还需要利 用土地种植,需要保持土壤的组织结构不破坏,处理 周期要求相对宽松,适合选择植物和微生物法。

实际土壤修复往往会涉及到不同的土壤类别,因 此会多种修复技术组合使用。图 1 为某氯碱生产用地 汞污染土壤修复案例工艺流程,该修复过程涉及挖 土、淋洗、热脱附3 种处理方式。修复过程首先对土壤 进行预处理,采用破碎、筛分等装置进行处理,对土壤 进行颗粒分级。对于颗粒粒径在 2 cm 以上的砂砾直 接采用水淋洗,淋洗完成后直接回填。采用筛析机进 行处理，分成75 pm以上的清洗砂和75 pm以下的 细粒度泥浆,泥浆压滤获得脱水泥饼。脱水泥饼和清



洗砂若有害元素合格直接回填，若有害元素不合格但 不包含汞元素需进行挖新土混匀稀释至合格，汞元素 不合格则进行热脱附处理。挥发的含汞烟气进行除尘 和冷凝处理，冷凝可回收汞，冷凝后的烟气经碳吸附 后达标外排，过程产生的汞超标灰尘和污泥返回热脱 附处理。

1. 小结

我国工业发展迅速，每年汞排放量估计在 2 000 t 以上，有色金属、汞矿区及冶炼厂以及电子垃圾拆分 区土壤汞往往为背景土壤的 20 倍以上，污染超标严 重；国内燃煤电厂及垃圾焚烧厂周边土壤污染往往为 背景土壤的 1~2 倍，存在较为广泛的土壤污染问题。 因此，需要严格控制上述企业汞排放，已经污染地区 应尽快修复。

汞污染土壤修复可采用热脱附、淋洗、植物等方 法处理，处理方法的选择一方面要根据土壤的性质， 同时也要结合修复后土壤的用途，从而从修复的时间 周期、成本、土壤组织破坏等因素选择修复方法。实际 修复案例中一种方法往往不能满足修复要求，需要多 种方法结合，达到更为经济、高效的修复处理。

[参考文献]

1. 戴前进, 冯新斌, 唐桂萍. 土壤汞的地球化学行为及其污染的 防治对策[J].地质地球化学,2002, 30(4): 75-79.

Dai Qianjin, Feng Xinbin, Tang Guiping. The geochemical behavior of mercury in soil and its pollution control[J]. Geol－ ogy Geochemistry, 2002, 30(4): 75-79. (in Chinese)

1. 王之峰, 汤丽玲, 马生明, 等. 城市汞污染土壤中 Hg 的形态 特征[J].物探与化探,2014, 38(2): 345-348.

Wang Zhifeng, Tang Liling, Ma Shengming, et al. Modes of occurrence of Hg in Hg pollution of soil of cities[J]. Geophys－ ical & Geochemical Exploration, 2014,38(2):345-348. (in Chi－ nese)

1. 冯新斌，仇广乐,付学吾，等.环境汞污染[J].化学进展,2009,

21(2/3): 436-457.

Feng Xinbin, Qiu guangle, Fu Xuewu, et al. Mercury pollution in the environment [J]. Process in Chmistry, 2009, 21 (2/3): 436-457. (in Chinese)

1. 王定勇, 石孝洪, 杨学春. 大气汞在土壤中转化与土壤汞富集 的相关性[J].重庆环境科学,1998,20(5): 436-457.

Wang Dingyong, Shi Xiaohong, Yang Xuechun. Transforma－ tion of atmospheric mercury in soil and its influence on the ac－ cumulation of mercury in soil [J]. Chongqing Environmental Science, 1998, 20(5): 436-457. (in Chinese)

1. 胡月红.国内外汞污染分布状况研究综述[J].环境保护科学, 2008, 34(1): 38-41.

Hu Yuehong. Review of mercury pollution distribution status research at home and abroad [J]. Environmental Protection Science, 2008, 34(1): 38-41. (in Chinese)

1. 包正铎, 王建旭, 冯新斌, 等. 贵州万山汞矿区污染土壤中汞 的形态分布特征[J].生态学杂志,2011, 30(5): 907-913.

Bao Zhengduo, Wang Jianxu, Feng Xinbin, et al. Distribution of mercury speciation in polluted soils of Wanshan mercury mining area in Guizhou [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5): 907-913. (in Chinese)

1. 戴智慧, 冯新斌, 李平, 等. 贵州万山汞矿区自然土壤汞污染 特点[J].生态学杂志,2011, 30(5): 902-906.

Dai Zhihui, Feng Xinbin, Li Ping, et al. Mercury pollution in natural soil collected from Wanshan mercury mining area in Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30 (5): 902-906. (in Chinese)

1. 莫招育, 陈志明, 谢鸿, 等. 典型铜冶炼生产工艺中汞污染源 流程及监控方案研究[J].大众科技,2013,15(164): 72-75.

Mo Zhaoyu, Chen Zhiming, Xie Hong, et al. A study on the analysis of mercury pollution source' fate and monitoring sys－ tem by typical copper smelting process [J]. Popular Science & Technology, 2013, 15(164): 72-75. (in Chinese)

1. 刘芳, 王书肖, 吴清茹. 大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染 评价及来源分析[J].环境科学,2013, 34(2): 712-717.

Liu Fang, Wang Shuxiao, Wu Qingru. Evaluation and source analysis of the mercury pollution in soils and vegetables around a large -scale zinc smelting plant [J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 712-717. (in Chinese)

1. 彭庆庆, 罗岳平, 邢宏霖, 等. 湖南省涉汞行业汞污染现状及 防治监管对策[J].中国环境监测,2014, 30(2): 67-79.

Peng Qingqing, Luo Yueping, Xing Honglin, et al. Mercury pollution status of mercury involved industry in Hunan province and its prevention,treatment and regulation strategies [J]. Environmental Monitoring in China, 2014,30(2):67-79. (in Chinese)

1. 张少庆, 王起超, 赵明宪, 等. 葫芦岛市不同污染源河流汞污 染特征研究[J].地球与环境,2008, 36(3): 225-230.

Zhang Shaoqing, Wang Qichao, Zhao Mingxian, et al. Study on the characteristics of mercury pollution in rivers of Huludao city contaminated by different sources [J]. Earth and Environ－ ment, 2008, 36(3): 225-230. (in Chinese)

1. 赵连娣,彦惠芬. 葫芦岛市五里河沿岸土壤汞污染状况及评

价[J]. 土壤通报,1997, 28(2): 68-70.

Zhao Liandi, Yan Huifen. Status and evaluation of mercury pollution in the soil of Five Mile River in Huludao City [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(2): 68-70. (in Chi－ nese)

1. 郑剑铭,周劲松,何胜,等.燃煤电厂汞排放对周边环境的影

响[J].化工学报,2009, 60(12): 3104-3111.

Zheng Jianming, Zhou Jinsong, He Sheng, et al. Environmen－ tal impact of mercury emission from a coal-fired power plant

[J]. CIESC Journal, 2009, 60(12): 3104-3111. (in Chinese)

1. 王道涵,杨亚利,任鹏,等.内蒙古某电厂周围土壤汞分布特

征及其影响因素[J].环境工程学报,2015, 9(12): 6135-6140.

Wang Daohan, Yang Yali, Ren Peng, et al. Distribution char － acteristics and influencing factors of mercury in soil around some coal -fired power plant of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2015,9(12):6135-6140. (in Chinese)

1. 郑冬梅,王起超,郑娜.锌冶炼-氯碱复合污染区木本植物中 的汞[J].环境科学,2007, 28(1): 27-31.

Zheng Dongmei, Wang Qichao, Zheng Na. Mercury in woody plants in the area suffering combined pollution by zinc smelt－ ing and cholor -alkai production [J]. Environmental Science, 2007, 28(1): 27-31. (in Chinese)

1. 王蓉慧,王琪,朱雪梅,等.水银法烧碱工艺遗留盐泥废物的 汞污染问题研究[J].环境污染与防治,2013, 35(4): 22-26.

Wang Huirong, Wang Qi, Zhu Xuemei, et al. Study on the mercury pollution of a historical salt sludge stockpile generat－ ed from mercury cell chlor-alkali process [J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(4): 22-26. (in Chinese)

1. 杨勤,王兴润,孟昭福,等.热脱附处理技术对汞污染土壤的

影响[J].西北农业学报,2013, 22(6): 203-208.

Yang Qin, Wang Xingrun, Meng Zhaofu, et al. Effect of ther－ mal desorption treatment technology on mercury contaminated soils [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(6): 203-208. (in Chinese)

1. 杨乾坤,王兴润,高俊发,等.氯盐协同作用下含汞土壤热脱

附实验研究[J].环境工程,2014(11): 168-173.

Yang Qiankun, Wang Xingrun, Gao Junfa, et al. Experimental research on chlorine salt -assisted thermal desorption of mer－ cury contaminated soils [J]. Environmental Engineering, 2014 (11): 168-173. (in Chinese)

1. 董汉英,仇荣亮,赵芝灏,等.工业废弃地多金属污染土壤组 合淋洗修复技术研究[J]. 土壤学报,2010, 47(6): 1126-1133.

Dong Hanying, Qiu Rongliang, Zhao Zhihao, et al. Sequential elution technique remediation of multimetal contaminated brownfield soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (6): 1126-1133. (in Chinese)

1. 郭观林, 周启星, 李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复 研究进展[J].应用生态学报,2005,16(10): 1990-1996.

Guo Guanlin, Zhou Qixing, Li Xiuying. Advances in research on in situ chemo-immobilization of heavy metals in contami－ nated soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology , 2005, 16 (10): 1990-1996. (in Chinese)

1. 刘平, 仇广乐, 商立海. 汞污染土壤植物修复技术研究进展 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 933-937.

Liu Ping, Qiu Guangle, Shang Lihai. Phytoremediation of mercury contaminated soil:A review[J]. Chinese Journal of E－ cology, 2007, 26(6): 933-937. (in Chinese)

1. 李梦杰, 王翠玲, 李荣春, 等. 汞、铅、铬污染土壤的微生物修 复[J].环境工程学报,2013, 7(4): 1568-11572.

Li Mengjie, Wang Cuiling, Li Rongchun, et al. Microorganism remediation of Hg,Pb and Cr contaminated soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7 (4): 1568­11572. (in Chinese)

1. 吴学勇, 张涛. 汞污染土壤稳定化固化修复技术工程应用试 验研究[J].环境科学导刊,2014,33(1): 6-11.

Wu Xueyong, Zhang Tao. Application research in stabiliza－ tion/solidification for the remediation of mercury contaminat－ ed soil[J]. Environmental Science Survey, 2014, 33(1): 6-11. (in Chinese)