现代化工

*Modern Chemical Industry*

ISSN 0253-4320,CN 11-2172/TQ



题目：

作者： 收稿日期： 网络首发日期： 引用格式：

现代化工》网络首发论文

汞污染土壤修复技术的研究进展 高晓霞，刘玉香，袁进，孔鑫，白衡，李瑞云 2020-08-22

2021-06-25

高晓霞，刘玉香，袁进，孔鑫，白衡，李瑞云．汞污染土壤修复技术的研究 进展．现代化工**.**

<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2172.TQ.20210625.1109.006.html>



Gna啊新洌

VCx [www.cnki.net](http://www.cnki.net)

**网络首发**：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶 段。录用定稿指内容己经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期 刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出 版年、卷、期、页码均己确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出 版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编 辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、 出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。 为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认**：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国 学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

网络首发时间：2021-06-25 11:21:23

网络首发地址：<https://kns.cnki.net/kcms/detail/112172.TQ.20210625.1109.006.html>

汞污染土壤修复技术的研究进展

高晓霞 1,2，刘玉香 1\*，袁 进 1,2，孔 鑫 1,2，白 衡 3，李瑞云 3 （1.太原理工大学环境科学与工程学院，山西 晋中 030600； 2.太原理工大学环保产业创新研究院，山西 晋中 030600； 3.山西丽浦创新科技有限公司，山西 晋中 030600） **摘要**：综述了不同汞污染土壤修复技术，包括物理修复技术、化学修复技术和生物修复技术等；对各种技术的优缺点进 行了比较分析；进一步提出了修复中需关注的问题，以期为相关研究提供参考。

**关键词**：汞污染；土壤；物理修复；化学修复；生物修复

**中图分类号**：X756

Research progress of mercury contaminated soil remediation technology

GAO Xiao-xia1,2, LIU Yu-xiang1\*, YUAN Jin1,2, KONG Xin1,2, BAI Heng3, LI Rui-yun3

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

2. Innovation Institute of Environmental Industry, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

3. Shanxi Lipu Innovation Technology Co., Ltd., Jinzhong 030600, China)

**Abstract**：In this paper, different remediation technologies of mercury-contaminated soil were summarized, including physical remediation technology, chemical remediation technology and bioremediation technology, etc., and the advantages and disadvantages of each technology were compared and analyzed. On this basis, the problems to be studied in the repair process are further proposed, so as to provide reference for related research.

**Key words**： mercury contamination; soil; physical remediation;chemical remediation; bioremediation

汞（Hg）是一种有毒重金属，土壤是汞的一个重要受体。汞极易在植物和生物体内积累并通过食物链 向人类转移［1-2］。汞会对人体产生不同的毒性作用，主要影响神经系统，导致严重的健康问题［3］。因此，对 汞污染土壤的修复迫在眉睫。汞污染土壤修复技术包括物理修复技术、化学修复技术和生物修复技术，这 些修复技术可进一步细分为土壤洗选、热解析、固化稳定化、电动修复、植物修复和微生物修复 6 大类［4］。

1. 物理技术

**1.1** 土壤洗选

土壤洗选是利用重力、磁力、清洗剂等来降低汞污染浓度的一个物理过程，包括重力冲洗、磁分离、 泡沫浮选和淋洗剂洗涤等方式［5-7］。 Boente 等［5］用土壤洗选去除黄铁矿灰污染土壤中的汞等有毒元素，清洗 方法如表 1。

表 1 土壤洗选去除汞及特点

|  |  |
| --- | --- |
| 方法 | 特点 |
| 高强度磁分离  干法  湿法 重力冲洗技术  浮沉分离  水力旋流 | 弱磁性污染物，可以精确分离，需预先干燥受污染土壤，洗土高成本，粒径  500 ~1000 pm  粒度较小的颗粒，回收率和浓缩比高，粒径1000〜2000 pm、63〜125 pm  密度比液体低的粒子漂浮，密度高的粒子下沉，粒径125 ~1000 pm  分离重颗粒和轻颗粒，颗粒根据其粒度和密度分离，适合淤泥质黏土组分，粒  径＜63 pm |
| Boente等回用纳米级零价铁（nZVI）辅助土壤洗涤汞，将土壤划分为不同的粒度，进行湿式高强度磁 选和水力旋流，nZVI的加入提高了土壤洗选效率，尤其是对于较大粒级（125〜2 000）。当汞与土壤组分 的颗粒密度或表面性质差异比较显著、汞与土壤之间没有强烈吸附作用、不存在高浓度腐殖质和黏土矿物 | |

时，土壤洗选才能发挥理想的效果。

为了提高清洗效率常利用化学提取来处理汞污染土壤。贾俊峰等⑺分别用KI、NazSzOs、乙二胺四乙 酸、柠檬酸、酒石酸对贵州矿区原土进行淋洗修复，结果表明，NazSzOs去除效果最好为11.17%, NazSzOs 浓度为0.01 mol/L时淋洗率达到稳定数值12.85%,淋洗之后有效态汞降至原来的61.54%,淋洗后用0.6 g/L NazS 溶液对淋洗液处理即可排放。

**1.2** 热解析

热解析是传统的汞污染土壤修复方法，但是加热温度通常超过600r，需要大量的能量输入，并且处 理过的土壤不适合农业再利用［8］。已有研究发现，在土壤中添加氯盐、柠檬酸、活性炭等物质可以明显降 低热解温度，减少能量输入［9-11］（表2）,同时降低汞污染土壤中的汞含量和浸岀浓度，满足汞含量的标 准限值和浸出标准。

表 2 添加剂下汞污染土壤热解析

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 添加剂 | 实验条件 | 实验结果 |
| 柠檬酸［8］ | 400°C, 60 min,添加剂与汞的 | 汞浓度从134 mg/kg降至1.1 mg/kg, |
|  | 摩尔比为 15 | 减少 35%的能量输入 |
| MgCl2[9] | 200C，60 min | 汞的去除率在 65%以上，提高69.08% |
| SnCl2[10] | 250C 〜300C，20 min | 汞的回收率为 93.50% |
| 颗粒活性炭［11］ | 微波诱导热处理， 400 W （约 | 总汞去除率可达 86.9%，土壤有机质损 |
|  | 350C)40 min | 失 29.2%，可降低约 70.3%的能耗 |

温度与时间是影响热解析的主要因素，加入添加剂可在低温短时间内去除汞，节约大量资源。同时土 壤和气体中汞的热力学形态分析和确定各种汞物种蒸发的温度是重要的。Park等［12］对低温下各种汞物种的 高分辨率动力学速率常数进行了评估，对于现场污染土壤和添加HgCb、HgO、HgS的土壤，汞蒸发相对 应的 A*H*0值分别为 19.80±6.36、8.83±0.71、23.40±1.05、20.39±1.93 kJ/mol,测得的 A*H*0仅占理论估算值的 30%，表明与纯化学状态下的汞相比，去除污染土壤中的汞需要更高的温度，同时发现汞从土壤中的蒸发 可能是扩散控制的。

1. 化学技术

**2.1** 固化稳定化

近年来研究了多种稳定剂来转化汞在土壤中的形态从而达到汞污染土壤的修复，例如生物炭、黏土矿 物、地质聚合物和层状双氢氧化物等。Zhao等［13］合成了稻壳生物炭（RHB）和硫改性稻壳生物炭（SRHB）, 并将其应用于贵州省汞污染的农业土壤。S2-和Hg2+形成高度稳定的化合物HgS, RHB和SRHB处理能有 效地固定土壤中的汞至少50年和75年。因此SRHB可以用于大面积汞污染土地的处理，但是要先在缺氧 条件下进行试验。Wang等［14］将腐植酸改性蒙脱石（HA-Mont）应用于汞污染土壤，5% HA-Mont可将污 染土壤中汞的浓度降低93.0%，并进行浸岀毒性分析，发现渗滤液中汞浓度降低65.9%，经过120年的老 化，汞的可靠性仍能保持在0.95以上。Wang等［15］使用富含碳酸钙的黏土矿物和磷酸二铵修复汞污染土壤, 对汞的最大去除率为37 mg/g,能显著降低土壤生物有效态汞含量。余高等［16］发现生物炭-聚丙烯酰胺更能 有效吸附、固定土壤中的汞，改善土壤的理化状况。Ma等［17］发现对于30x10-6 Hg2+,层状双氢氧化物插层 M0S42-可以在5 min内去除97.3%,在30 min内去除99.7%。

土壤改良是通过添加改良剂与汞发生反应，发生氧化还原、吸附或沉淀等反应，降低土壤中汞的迁移 性和生物有效性。 Beckers 等［18］研究了动态氧化还原条件下生物炭对污染土壤中总汞、汞甲基化和汞乙基 化的影响，生物炭在200r和500r热解，氧化还原范围在-150〜300 mV,与未加改良剂相比，2种改良剂 总汞浓度为原来的一半，随着氧化还原的增加，乙基汞有下降的趋势-Xing等［19］使用稻壳衍生生物炭改良 剂，汞通过结合巯基（如半胱氨酸）被固定在改良剂上，可以有效去除汞。

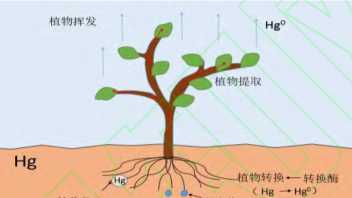
**2.2** 电动修复

电动修复是一种将电能转化为动能的过程，电动修复汞污染土壤可以通过电泳、电渗和电迁移3种方 式实现［20-21］。而电动修复去除率较低，需要加入促进剂提高去除率。Falciglia等［21 ］对严重汞污染沉积物进 行电动去污处理，以甲基甘氨酸二乙酸（MGDA）为阳极溶液，可获得39%的氧化率，同时使用MGDA 和表面活性剂可显著提高汞的去除率（70.93%）。Robles等［22］用乙二胺四乙酸（EDTA）作为促进剂来电动 处理汞污染土壤，［Hg-EDTA］2-复合物呈负电荷，可以在阳极侧回收汞，EDTA促进汞污染土壤的电动处理 与铁渗透反应屏障（PRB）耦合进一步去除溶液中的汞。结果表明，72 h后土壤中汞的回收率为76.30%， 阴极附近回收率为2.8%，剩余溶液通过带有PRB-Fe反应器进行处理，84.47%汞可以被回收。黄涛等［23］ 发明了利用电动修复耦合植物萃取技术去除底层污染土壤中汞的方法，能促进植物根系生长，缩短汞的迁 移距离，最高去除土壤底层 90%的汞。电动修复的处理效果较好，但会破坏土壤理化性质，不适宜大规模 使用。

1. 生物技术

**3.1** 植物修复

植物修复被认为是修复污染土壤的一种经济、环保的方法，汞污染土壤的植物修复主要包括植物提取、 植物稳定化、植物挥发、植物转换和根际培养等［2, 24］（图 1）。植物稳定化是利用植物根系降低土壤中汞的 流动性和生物有效性，但是并没有从土壤中去除汞；植物挥发是指植物吸收土壤中的污染物，将其转化为 挥发性物质，然后释放到大气中［24］，但增加了大气中的汞含量，所以使用受到了限制；植物转换是在转化 酶的作用下将汞转换为元素汞；根际培养是利用微生物提高汞的去除效果。



物稳心 根际培养微主物

图 1 汞污染土壤植物修复

目前使用最多的是植物提取，将汞转移到植物的地上部分进行移除。 Marrugo-Negrete 等［2］在哥伦比亚 金矿区对 24 种本地植物进行了植物修复能力的鉴定，结果表明，对于所有物种，根部积累的汞最多，其 次是叶和茎。麻疯树、辣椒、马蹄莲、黄花菜、莎草对汞的生物累积效率显著提高。植物提取效率取决于 2 个关键因素：金属积累能力和生物量生产，草本和亚灌木物种地上部积累量最高，适合通过移除植物的 地上部分进行修复；树木的生物量较高，也可以成为非常有效的植物修复剂。同一物种不同品种的修复能 力也有所差异，Lv等［25］对菊芋品种L1 （地上生物量高）、L2 （营养生长期长）和L3 （块茎产量高）进行 汞积累实验， 10 mg/kg 汞处理时死亡率分别为 21.43%、 25.93%、 85.19%， L1 和 L2 对汞的耐受性较强， L2 产生更多的生物量， L1 表现出更大的汞生物累积能力，所以在低汞污染下， L2 是很好的候选品种，在 高汞污染条件下 L1 是更好的候选品种。

硫是植物生长所必需和关键的营养素，研究表明，硫的加入可以提高植物修复效果。 Wang 等［26］在土 壤中添加硫改性有机黏土，最大限度地提高植物提取物产量，使植物汞含量显著增加了 11 倍。 Li 等［27］发 现在土壤中添加元素硫能促进甲基汞和总汞在水稻体内积累。

**3.2** 微生物修复

微生物修复包括吸收、挥发和固定等过程。依靠微生物减轻重金属在土壤中的迁移性与生物有效性， 达到去除土壤重金属的目的。植物根系和根际微生物的相互作用可以减少汞进入水体以及食物链中。 Chamba等［28］对人手工小规模金矿污染土壤上植物与丛枝菌根真菌（AMF）共生下的汞积累能力进行了评 估，结果发现所有植物的根中都有 AMF 定殖，毛茛具有最高的汞积累能力和 AMF 定殖率，毛茛根和叶中 汞含量最高为3.56、1.48 mg/kg，适应土壤污染条件的天然AMF可以有效地增加植物组织中的汞含量以及 植物根系的生物量。

由于土壤中的Hg2+可以转化为毒性最大的甲基汞，因此将Hg2+还原为Hg0被认为是解毒作用。Yao等 ［29］从污染土壤中新分离到1株乌松假单胞菌CY-1，可以对Hg2+进行还原，当初始浓度为5 mg/L时，Hg2+ 的还原率最高为82.8%。CY-1的初级和次级代谢产物也具有一定的Hg2+还原能力。土壤真菌是地球上最 丰富和最多样的分类学类群，在生态系统中发挥着重要作用。Chang等［30］分离到1株Hg2+挥发真菌青霉属

(DC-F11),具有降低Hg2+植物毒性、总汞和交换性汞的生物修复潜力，在细胞外真菌细胞可通过吸附和 沉淀的方式将Hg2+通过胞外隔离作用解毒，在细胞内mer基因可以将细菌中的Hg2+还原为挥发性Hg0。接 种DC-F11能显著提高土壤总汞去除率25.89%，总去除率为85.02%，但真菌生长被60 mg Hg2+完全抑制。 Mello 等［31］选择了 8 株内生细菌接种于玉米植株，大部分内生细菌使根系生物量积累明显增加，可以降低 土壤汞含量至少46.32%，接种之后植物中的汞含量是未接种的 7倍以上，除了汞积累外还通过促进汞的挥 发降低土壤汞含量，使汞含量降低到对蠕虫无毒的水平。

为了监测生物修复的效果， Yang 等［32］将二氧化硅纳米材料应用在薄膜扩散梯度技术中，它的作用是 在土壤系统中引入一个可控的扰动，复制植物根系所引起的过程，可以测定土壤中汞的生物有效性，预测 植物吸收汞和微生物吸收汞的有效性。

**3.3** 修复方法的优缺点

随着工业的发展，人类活动进一步加剧了土壤中汞的污染，汞污染土壤修复工作刻不容缓，为了更好 地理解和探索更有效的汞污染土壤处理方法，表3总结了各种汞污染土壤修复方法的优缺点，应根据其优 缺点和土壤类型选择合适的修复方法。

表 3 修复方法的优缺点

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 修复方法 | 优点 | 缺点 \Y</ |
| 物理修复 |  | |
| 土壤洗选 | 永久去除，处理系统易于模块 | 简单洗选效果一般，洗脱液造成 |
|  | 化，修复便利 | 二次污染、成本高 |
| 热解析 | 快速去除，可以回收汞 | 成本太高，影响土壤性质，汞蒸  气易溢出 |
| 化学修复 |  | |
| 固化稳定化 | 周期短、效率高 | 汞不能从受污染的介质中去除 |
| 电动修复 | 无二次污染、费用低 | 时间长、受土壤性质影响 |
| 生物修复 |  | |
| 植物修复 | 对环境影响小、成本低、可大规 | 生长周期长、深度不够、清理工 |
|  | 模修复 | 作繁杂 |
| 微生物修复 | \对环境影响小、成本低 | 缺乏大规模应用 |

**4** 展望

虽然汞污染土壤修复技术已经取得了很多研究进展，但仍有进一步提高与优化的地方。

1. 土壤洗选淋洗液需要进行处理，寻找性质温和的淋洗液是一个重要方向；稳定化固化中要对汞 的稳定性进行长期监测，防止造成二次污染。
2. 热解析、电动修复会破坏土壤中的有机质，改变土壤结构，需要降低对土壤理化性质的影响， 所以要发展低温热解析技术，提高热解效率的同时减少对土壤的危害，同时注意汞蒸气的溢出。
3. 植物修复是一种很有前途的方法，可以用来修复大面积、浅层污染物浓度相对较低的土壤，但 汞超富集植物仍值得探索；微生物修复面临菌种的选择与大规模试验挑战。同时生物修复的机理需要深入 探讨。
4. 可以将不同修复技术结合，同时将基因工程技术应用于修复，使修复方法更加经济、环保、易 于操作。
5. 建议采用生命周期方法评价含汞物质的开采、使用、排放和处置，可以准确有效地预测汞污染 状况。

参考文献

1. O'Connor D, Hou D Y, Ok Y S, *et al*. Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: A critical review [J]. Environ Int, 2019, 126: 747-761.
2. Marrugo-Negrete J, Marrugo-Madrid S, Pinedo-Hernandez J, *et al*. Screening of native plant species for phytoremediation potential at a Hg-contaminated mining site [J]. Sci Total Environ, 2016, 542: 809-816.
3. Zhang Y H, Hou D Y, O'Connor D, *et al.* Lead contamination in Chinese surface soils: Source identification, spatial-temporal distribution and associated health risks [J]. Crit Rev Environ Sci Technol, 2019, 49(15): 1386-1423.
4. Teng D Y, Mao K, Ali W, *et al*. Describing the toxicity and sources and the remediation technologies for mercury-contaminated soil [J]. RSC Adv, 2020, 10(39): 23221-23232.
5. Boente C, Sierra C, Rodriguez-Valdes E, *et al*. Soil washing optimization by means of attributive analysis: Case study for the removal of potentially toxic elements from soil contaminated with pyrite ash [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 2693-2699.
6. Boente C, Sierra C, Martinez-Blanco D, *et al*. Nanoscale zero-valent iron-assisted soil washing for the removal of potentially toxic elements [J]. J Hazard Mater, 2018, 350: 55-65.
7. 贾俊峰, 黄阳, 刘方, 等. 汞矿区汞污染土壤的淋洗修复 [J]. 化工环保, 2018, 38(2): 231-235.
8. Ma F J, Peng C S, Hou D Y, *et al*. Citric acid facilitated thermal treatment: An innovative method for the remediation of mercury contaminated soil [J]. J Hazard Mater, 2015, 300: 546-552.
9. Zhao T, Wang X R, Yang X J, *et al*. Thermogravimetric and XRD study of the effects of chloride salts on the thermal decomposition of mercury compounds [J]. J Mater Cycles Waste Manag, 2017, 19(2): 712-717.
10. Lee E S, Cho S J, Back S K, *et al*. Effect of substitution reaction with tin chloride in thermal treatment of mercury contaminated tailings [J]. Environmental Pollution, 2020, 264: 114761.
11. Cao H L, Cai F Y, Jiao W B, *et al.* Microwave-induced decontamination of mercury polluted soils at low temperature assisted with granular activated carbon [J]. Chem Eng J, 2018, 351: 1067-1075.
12. Park M O, Kim M H, Hong Y. The kinetics of mercury vaporization in soil during low-temperature thermal treatment [J]. Geoderma, 2020, 363: 114150.
13. Zhao B, O'Connor D, Shen Z T, *et al.* Sulfur-modified biochar as a soil amendment to stabilize mercury pollution: An accelerated simulation of long-term aging effects [J]. Environmental Pollution, 2020, 264: 114687.
14. Wang L W, Li X R, Tsang D C W； *et al.* Green remediation of Cd and Hg contaminated soil using humic acid modified montmorillonite: Immobilization performance under accelerated ageing conditions [J]. J Hazard Mater, 2020, 387: 122005.
15. Wang J X, Xing Y, Xie Y Y, *et al*. The use of calcium carbonate-enriched clay minerals and diammonium phosphate as novel immobilization agents for mercury remediation: Spectral investigations and field applications [J]. Sci Total Environ, 2019, 646: 1615-1623.
16. 余高, 陈芬, 赵成刚, 等. 高分子聚合物与钝化剂复配对汞污染土壤钝化修复研究 [J]. 环境工程, 2020: 1-11.
17. Ma L J, Wang Q, Islam S M, *et al*. Highly selective and efficient removal of heavy metals by layered double hydroxide intercalated with the MoS42- Ion [J]. J Am Chem Soc, 2016, 138(8): 2858-2866.
18. Beckers F, Awad Y M, Beiyuan J Z, *et al*. Impact of biochar on mobilization, methylation, and ethylation of mercury under dynamic redox conditions in a contaminated floodplain soil [J]. Environ Int, 2019, 127: 276-290.
19. Xing Y, Wang J X, Shaheen S M, *et al*. Mitigation of mercury accumulation in rice using rice hull-derived biochar as soil amendment: A field investigation [J]. J Hazard Mater, 2020, 388: 121747.
20. Iannelli R, Masi M, Ceccarini A, *et al*. Electrokinetic remediation of metal-polluted marine sediments: experimental investigation for plant design [J]. Electrochim Acta, 2015, 181: 146-159.
21. Falciglia P P, Malarbi D, Greco V, *et al*. Surfactant and MGDA enhanced - Electrokinetic treatment for the simultaneous removal of mercury and PAHs from marine sediments [J]. Sep Purif Technol, 2017, 175: 330-339.
22. Robles I, Lozano M J, Solis S, *et al*. Electrokinetic treatment of mercury-polluted soil facilitated by ethylenediaminetetraacetic acid coupled with a reactor with a permeable reactive barrier of iron to recover mercury (II) from water [J]. Electrochim Acta, 2015, 181: 68-72.
23. 黄涛, 宋东平, 刘万辉, 等. 利用电动修复耦合植物萃取技术去除底层汞污染土壤中汞的方法: CN, 110695079A [P/OL]. [2019-10-23]. <http://g.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=patent&id=CN201911009503.4>.
24. Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications [J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 869-881.
25. Lv S Q, Yang B, Kou Y X, *et al*. Assessing the difference of tolerance and phytoremediation potential in mercury contaminated soil of a non-food energy crop, helianthus tuberosus L. (Jerusalem artichoke) [J]. PeerJ, 2018, 6: e4325.
26. Wang J X, Shaheen S M, Swertz A C, *et al.* Sulfur-modified organoclay promotes plant uptake and affects geochemical fractionation of mercury in a polluted floodplain soil [J]. J Hazard Mater, 2019, 371: 687-693.
27. Li Y Y, Wang Y J, Zhang Q J, *et al*. Elemental sulfur amendment enhance methylmercury accumulation in rice (Oryza sativa L.) grown in Hg mining polluted soil [J]. J Hazard Mater, 2019, 379: 120701.
28. Chamba I, Rosado D, Kalinhoff C, *et al*. Erato polymnioides - A novel Hg hyperaccumulator plant in ecuadorian rainforest acid soils with potential of microbe-associated phytoremediation [J]. Chemosphere, 2017, 188: 633-641.
29. Yao *Y* Hu L, Li S Z, *et al.* Exploration on the bioreduction mechanisms of Cr(W)and Hg( II) by a newly isolated bacterial strain Pseudomonas umsongensis CY-1 [J]. Ecotox Environ Safe, 2020, 201: 110850.
30. Chang J J, Shi Y, Si G Z, *et al*. The bioremediation potentials and mercury(I )-resistant mechanisms of a novel fungus Penicillium spp. DC-F11 isolated from contaminated soil [J]. J Hazard Mater, 2020, 396: 122638.
31. Mello I S, Targanski S, Pietro-Souza W, *et al.* Endophytic bacteria stimulate mercury phytoiemediation by modulating its bioaccumulation and volatilization [J]. Ecotox Environ Safe, 2020, 202: 110818.
32. Yang J W, Fang W, Williams P N, *et al*. Functionalized mesoporous silicon nanomaterials in inorganic soil pollution research: Opportunities for soil protection and advanced chemical imaging [J]. Curr Pollut Rep, 2020, 6(3): 264-280.

收稿日期：2020-08-22；修回日期：2021-06-07

基金项目：工业窑炉协同处置固体废物技术创新平台(YDZX20191400002883)；水泥窑协同处置土法选 金废渣工艺与预处理脱汞技术研究(201903D321076)

作者简介： 高晓霞(1996-)，女，硕士生；刘玉香(1969-)，女，博士，教授，研究方向为污染物资源化利 用与新型生物处理技术的研发，通讯联系人， yuxiangliu2002@126.com。