

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2023.02.017

我国砷霜厂场地污染现状及其治理研究进展

马宝军 李晓彤 杨明学 刘旭升 农娜 唐勉 杨佳莹

(南丹县南方有色金属有限责任公司, 广西 南丹 547204)

摘 要: 砷霜厂是我国一类典型的重金属复合污染场地。介绍了国内砷霜厂遗留场地的形成背景和污染现状, 对物理阻隔、固化/稳定化、生态修复三类主要治理技术的基本原理和特点进行了综述, 并重点阐述了固化/稳定化材料的种类及其应用现状, 总结了砷霜厂污染场地治理的典型工程案例, 分析与展望了砷霜厂污染场地治理技术的发展方向, 旨在为砷霜厂污染场地的修复和管理提供参考。

关键词: 砷霜厂场地; 重金属复合污染; 物理阻隔; 固化/稳定化; 生态修复

中图分类号: X52; X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2023)02-0125-07

The pollution status and research progress of remediation for arsenic factory sites in China

MA Bao-jun LI Xiao-tong YANG Ming-xue LIU Xu-sheng NONG Na TANG Mian YANG Jia-ying

(Nandan Nanfang Nonferrous Metals Co. Ltd., Nandan 547204, Guangxi, China)

Abstract: Arsenic factory is a typical heavy metal combined contamination site in China. In this paper, the formation background and pollution status of the sites left behind by the arsenic factory in China was introduced, the basic principles and characteristics of the three main treatment technologies of physical barrier, solidification/stabilization and ecological restoration were reviewed, and the types of solidification/stabilization materials and their applications were emphasized. Besides, some typical engineering cases were also expounded and the development direction of treatment technology was further analyzed and prospected to provide reference for the remediation and management of arsenic factory contaminated sites.

Key words: arsenic factory sites; heavy metals combined contamination; physical barrier; solidification/stabilization; ecological remediation

我国砷矿资源储量约占世界总量的 70%, 且分布集中, 湖南、云南、广西三省的砷矿储量约占全国总量的 $2/3$ ^[1,2]。而且, 我国拥有世界上独特的单体雄黄矿床, 其中, 湖南石门雄黄矿拥有 1 500 余年的开采历史, 主要生产砷霜、硫酸和雄

黄粉^[3]。20 世纪 50 年代以来, 随着一批国有砷霜厂的成立, 我国砷矿开采冶炼进入大规模工业化时代, 其中云南文山砷霜厂产量多年居全国首位。20 世纪 80 年代初, 随着国际市场对砷霜和金属砷需求量的增加, 砷霜和砷冶炼生产经济效益升高, 我国砷冶炼产业再次迅速发展, 大批砷霜厂兴建。早期砷冶炼过程多采用粗放型的“土法炼砷”工艺, 该法以毒砂、雄黄矿等为原料, 通过土窑焙烧使原料中的砷以 As_2O_3 气体形式挥发, 挥发的 As_2O_3 气体经进一步冷凝结晶得到砷霜固体成品。“土法炼砷”工艺生产效率低且缺乏配套环保措施, 生产过

收稿日期: 2023-02-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3900805)

第一作者: 马宝军, 学士, 高级工程师, 研究方向为湿法冶金。E-mail: makelujian@163.com

通信作者: 李晓彤, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为湿法冶金。E-mail: 819054568@qq.com

程中产生大量的“三废”，导致砒霜厂区均存在不同程度的污染，对周边生态环境和人类健康构成严重威胁。20世纪90年代，砒及其化合物产品市场逐步被其他产品替代，伴随着国家清理“十五小企业”政策出台并实施，砒霜厂被依法逐步关停，形成大量遗留污染场地^[4]。

根据环境保护部《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》（环发〔2012〕140号）和《关于加强工业企业关停、搬迁及原址场地再开发利用过程中污染防治工作的通知》（环发〔2014〕66号）等有关规定，为避免场地内污染物持续污染周边区域水土、确保当地生态环境和社会经济的健康发展，对砒霜厂遗留污染场地的治理刻不容缓。本文分析了国内重金属污染现状，并对砒霜厂污染场地修复技术进行归纳，旨在为砒霜厂污染场地的修复和管理提供相应依据和参考。

1 我国砒霜厂场地污染现状

我国砒霜厂场地污染物主要来自于“土法炼砒”工艺过程中产生的废渣及烟尘，其特征污染物为As、Cu、Pb、Cd、Zn等多种重金属，其中以As污染最为严重，pH值一般为1.60~6.50^[5-8]。

胡毅鸿等^[3]研究表明石门雄黄矿区的矿渣和上层覆土中As总量分别高达1 020~389 300 mg/kg和3 800~27 300 mg/kg，酸雨可浸出As浓度分别为16.50~84.00 mg/L和0.10~0.60 mg/L，对周边场地造成了持久的As污染。刘崴等^[9]对石门雄黄矿区水样进行分析时发现，流经该矿区水样中的As浓度显著高于其他区域水样中的As浓度。蔡保松等^[10]对湖南郴州某废弃砒冶炼厂附近的土壤进行调查，结果表明厂附近的土壤总As浓度平均值达到63.90 mg/kg，高出全国土壤As浓度平均值的2~25倍。曾宪坤^[11]对某砒冶炼厂遗留污染场地进行了调查和风险评估，结果表明该场地土壤主要为重金属污染，其中As、Cd污染程度较大，As最高浓度达38 700 mg/kg，Cd最高浓度为585 mg/kg，局部污染深度达15 m，受污染土壤达40万m³。黄奎贤等^[5]通过分析某遗留砒霜厂场地的重金属污染特征发现，场地受到了As、Cu、Pb、Cd和Zn等重金属复合污染，其中，As污染最为严重，高出评价标准值的7 199倍。覃霞^[12]对广西河池某遗留砒霜厂进行了场地污染调查，结果

表明该场地土壤遭受了重金属复合污染，污染物为As、Zn、Pb、Cd、Cu，其含量分别为2 482.53~21 273.28、383.86~4 577.58、8.38~5 091.92、0.13~16.71、23.24~604.16 mg/kg，对周边的人体和环境造成了极高的健康风险。ZHANG等^[13]对广西贺州某废弃砒霜厂的渣土混合物进行了分析，结果表明该场地特征污染物为As、Zn、Cu、Cd四种重金属，其含量分别高达17 407、2 043、1 376、570 mg/kg，且渣土呈酸性。胡波等^[14]对广西某镇砒霜厂遗址进行了场地调查和风险评估，并确定场地的主要污染物为As，其他污染物有Cu、Pb、Cd、Zn，污染介质以土壤和废渣为主。李嘉艳^[15]对云南南华砒渣场地进行了调查，结果表明所检测五个渣堆均属于危险废物，矿坑涌水及影响区地表水As污染严重，对周边环境已造成了严重污染。

由于历史原因，场地内废弃物直接露天堆放，未采取安全防渗措施，在其长期堆放过程中，重金属通过雨水淋溶、冲刷、下渗等方式迁移，造成周边场地的水土污染，危害动植物和人体健康，破坏场地的理化性质和生物多样性，并对附近地区的生产生活安全构成严重威胁。砒霜厂场地污染为典型的重金属复合污染，具有综合性、隐蔽性、不可逆性、严重危害性和难治理性。

2 砒霜厂污染场地治理技术

2.1 物理阻隔技术

目前采用的物理阻隔技术主要包括表面覆盖、垂直阻隔、水平阻隔和阻隔填埋。该技术的原理是采用封存或阻隔手段，切断污染物的暴露途径，从而限制污染物的迁移扩散，降低污染风险，保护受体安全，具有场地适应性强、成本低、工程建设周期短、风险控制效果好、施工技术成熟等优点，在砒霜厂场地污染风险控制中得到广泛的应用。但是，物理阻隔技术不能降低污染介质中污染物本身的毒性和体积，且对场地后续开发活动有较大限制^[16]。

2.1.1 表面覆盖

表面覆盖技术通过在污染区域上方铺设覆盖层，防止污染物及其介质与周围环境接触，需要适当提高地面坡度，以促进地表水径流，减少地表水下渗所造成的污染物迁移扩散。典型的表面覆盖系

统包括表层、保护层、排水层、阻隔层、气体收集层和基础层，常用的功能性覆盖材料包括黏土、膨润土、土工膜等。

2.1.2 垂直阻隔

垂直阻隔技术通过在污染区域四周建设垂直隔离墙，利用地下阻隔墙体封存污染物或改变地下水流向，抑制污染物的横向迁移扩散。根据建筑材料和施工方式，垂直阻隔措施包括泥浆墙、灌浆墙、板桩墙、搅拌桩墙、土工膜墙，为了达到阻止污染物随地下水迁移的目的，要求垂直阻隔墙有非常低的渗透性，同时，阻隔墙需要有足够的强度和持久性。

此外，1982年，美国环保局提出了可渗透反应墙技术，该技术通过在地下安装活性材料墙体，将地下污染物拦截并在墙体填充介质中通过吸附、化学沉淀、降解等作用实现污染物的去除。可渗透反应墙是垂直阻隔技术的一种，但该技术要求墙体渗透系数大于含水层的渗透系数，以降低对地下水流场的影响，同时反应介质需要具有较好的稳定性、抗腐蚀性以及持久的活性，常用的填充反应介质包括零价铁、活性炭、无机矿物（如沸石、磷灰石、石灰石）、黏土、固体废弃物、碳源、营养物质、微生物载体及其组合材料等^[17]。

2.1.3 水平阻隔

水平阻隔技术通过在污染场地底部水平敷设阻隔层，阻断污染物的迁移扩散，主要包括混凝土水平阻隔、黏土水平阻隔、土工膜水平阻隔等技术，通常与垂直阻隔技术联用以实现污染物的有效控制。

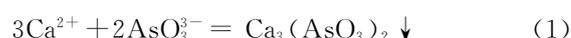
2.1.4 阻隔填埋

阻隔填埋技术是指将污染物置于柔性或刚性填埋场中，阻断污染物迁移扩散的途径，使污染物与周围环境隔离，可分为柔性阻隔填埋和刚性阻隔填埋。柔性填埋场采用天然材料（如天然黏土）、人工合成材料（如高密度聚乙烯）等作为防渗层，适用于低含水率的重金属污染土壤填埋，也常常被选为固化/稳定化的后续安全处置方法^[14]。刚性填埋场则采用钢筋混凝土结构构筑基础与外壳，适用于高浸出风险污染物的处置。

2.2 固化/稳定化技术

固化/稳定化技术通过使用固化/稳定化材料以吸附、沉淀、络合等作用将污染物转化为溶解度

低、迁移性和毒性较小的形式，进而实现其无害化并降低其对生态系统的危害性，技术的成熟性、稳定性和可行性较好，是砷霜厂遗留场地中固体废物和土壤治理的一项典型技术。固化/稳定化材料的研发和应用是该技术效果和成本的关键。目前，砷霜厂污染场地治理中常用的固化剂包括水泥、石灰等，稳定化材料包括化学药剂、天然矿物、工农业固废和合成材料（纳米材料、类水滑石等），其中As的稳定化材料以钙基和铁基材料为主，主要通过生成Ca-As和Fe-As沉淀实现As的稳定化：



化学药剂稳定化技术操作简单、增容率小，具有规模化应用前景，也是我国砷霜厂场地中固体废物和污染土壤稳定化治理过程常用的技术手段。张荷等^[18]通过加入20% FeSO₄对云南南华县龙潭雄黄矿区尾矿渣进行稳定化，小试处理后的雄黄尾矿渣中As的浸出浓度降低至2.50 mg/L以下。WANG等^[19]进一步通过添加FeSO₄对雄黄尾矿渣进行了中试稳定化处理，结果表明FeSO₄的加入促进了Ca-As和S-As向更稳定的Fe-As化合物转化。经FeSO₄处理后，雄黄尾矿渣中As的浸出浓度可成功降低到GB 18598—2001填埋标准限值以下。覃霞^[12]通过向广西河池遗留砷霜厂污染土壤中添加质量比为5%的螯合铁+Ca(OH)₂(3:1)或螯合铁+CaO(3:1)均实现了As的稳定，稳定化处理土壤水浸提As浓度分别降低了96.68%、96.64%，硫酸-硝酸浸提As浓度分别降低了96.67%、96.27%，土壤pH值和土壤水浸提液pH值都维持在7~8。王统等^[20]使用自主研发的新型药剂TY-Z对砷霜厂冶炼废渣及其周边土壤进行了固化/稳定化，处理后土壤中的As、Cd、Pb浸出量远低于危险废物填埋污染控制标准(GB 18598—2001)限值。胡波等^[14]选用21.87%水泥和3%硫酸亚铁对广西某砷霜厂污染物进行固化/稳定化处理，使其中As、Cu、Pb、Cd、Zn浸出浓度均低于最高允许排放浓度。李嘉艳^[15]以水泥和石灰对云南南华砷霜厂砷渣进行固化处理时发现，两种材料对砷渣都有一定的固化效果，以硫酸亚铁、硫酸铝和氯化铁对砷渣进行稳定化处理，结果表明

硫酸亚铁和硫酸铝的处理效果较好,综合考虑环保、经济等因素,选取水泥和硫酸亚铁对砷渣进行固化/稳定化,使砷渣浸出液中 As 浓度低于《危险废物浸出毒性鉴别标准》(GB 5084.3—2007)的限值。

此外,ZHANG 等^[13]用脱硫石膏、红土、石灰石和电厂灰分别对广西贺州某砷霜厂酸性砷渣进行稳定化处理时发现,四种材料的稳定化效果为电厂灰>石灰石>脱硫石膏>红土,其中石灰石和电厂灰可有效提高砷渣 pH 值,促进砷渣中 Zn、Cu、Cd 以碳酸盐/氢氧化物沉淀形式稳定,同时促进不稳定 As 向 Ca-As 化合物的沉淀转变,当稳定化时间为 60 天、电厂灰和石灰石用量为 3% 时,As、Zn、Cu、Cd 稳定化率分别达到 62.03%, 97.86%, 99.81%, 90.39% 和 38.49%, 99.96%, 99.99%, 99.62%。杨慧芬等^[21]公开了一种酸性砷渣中多种重金属原位稳定化材料及其应用方法,该稳定化材料为落地油泥热脱附处理后所得固体残渣-热脱附渣,可通过化学沉淀和离子交换作用实现酸性砷渣中 As、Zn、Cu、Cd 的同步稳定化。FAN 等^[22]在中性条件下,使用硫酸盐还原菌的纯培养物将石门雄黄尾矿沉积物释放的 As(V)还原为 As(III),然后,通过将其吸附到纳米 Fe 硫化物(例如 FeS、FeS₂)上或与 S²⁻共沉淀生成纳米硫化砷(As₃S₂)而稳定。另外,研究表明零价铁-氧化亚铁硫杆菌联用也可显著抑制雄黄尾矿中 As 的释放^[23]。黎亮^[24]利用纳米零价铁对师门雄黄矿区中度 As 污染土壤进行原位稳定化修复,结果表明在纳米零价铁用量为 0.2% 时,土壤 As 在中性环境下的溶出浓度降低了 44.2%。任思为^[25]发现使用镁铝类水滑石对广西某砷霜厂遗留污染场地土壤进行稳定化,可显著提高土壤 pH 值,当材料用量为 5% 时,Zn、Cu、Cd 稳定化率均可超过 99%,As 稳定化率在 90% 左右。虽然上述材料的固化/稳定化效果较好,但在使用过程中存在材料用量大、增容比高、经济性差等问题,尚缺乏实际应用案例。

2.3 生态修复

生态修复技术是以生物修复为基础,结合各种物理修复、化学修复以及工程控制措施等实现污染治理和生态恢复。历史遗留场地的生态修复治理模式主要在结合其污染特征及现有工程的基础上,融

入生态自然净化理念,采取一系列综合方法进行生态修复,常用的治理措施包括地质环境整治、次生灾害防治、水土流失防治、土地复垦复绿、植被种植等,同时需要遵循可持续发展原则,实现当地社会经济发展与生态环境相平衡。例如,湖南石门雄黄矿区治理修复过程中采取了污染农田修复工程及配套辅助工程,采用蜈蚣草-活化剂强化修复以及蜈蚣草-柑橘间作修复中度至中度污染农田区 1000 多亩,采用水稻(玉米)-钝化剂阻隔修复轻度至中度污染农田安全利用区 1000 多亩,从根本上解决了土壤污染问题,同时也促进了当地社会经济的发展^[26]。

近年来,为了促进生态修复工作的高质量发展,我国出台了众多政策规划,建立生态保护红线制度,提出“绿水青山就是金山银山”的理念,并将生态保护与修复上升为国家战略。2021 年,“联合国生态系统恢复十年”行动计划启动,进一步推动了全球生态保护和修复。砷霜厂遗留污染场地往往存在生物多样性降低、大面积植被群落消失等问题,生态平衡被严重破坏,开展砷霜厂污染场地生态修复工作是落实新时期生态文明建设理念的必然趋势。

3 工程案例

目前,砷霜厂污染场地多采用分级分区治理原则,在确定场地污染特征的基础上,以风险管控为导向,综合考虑技术适应性、治理成本、后期监管难易程度及场地开发需求,基于“源-径-汇”风险三要素构建修复管控措施。根据砷霜厂复杂的场地特征及污染情况,实际工程案例往往采用联合修复技术。如肖友程等^[27]对河池市某砷霜厂进行场地调查和风险评估,根据废渣、建筑垃圾和污染土壤的污染物浓度和性质,将处理对象分为 3 类:危险废物、第 I 类一般工业固体废物和第 II 类一般工业固体废物。危险废物清挖后进行转运和填埋处置,第 I 类一般工业固体废物清挖后直接送至填埋场进行填埋,第 II 类一般工业固体废物先采用固化/稳定化技术修复,达到第 I 类一般工业固体废物的要求后进行填埋。胡波等^[14]综合考虑成本效益和修复周期,对广西某镇砷霜厂的污染治理选用固化/稳定化与阻隔填埋联用的典型组合工艺。曾宪坤^[11]根据某砷冶炼厂遗留场地污染范围

广、污染深度不一、污染程度各异特征,采用“固化/稳定化+安全隔离+生态封场”联合修复技术对污染场地进行原位修复,稳定化后土壤浸出液中重金属浓度均达到预期修复目标,且不新征用地,造价合理,修复后场地作为生态公园使用。黄璇等^[28]根据广西某典型历史遗留砷霜厂污染物及污染土壤的不同污染等级,采取修复和风险管控相结合的方式对其进行治理,其中,高风险污染物采用集中刚性填埋处置技术,中风险污染物和高浸出风险污染土壤采用稳定化修复-原址阻隔填埋处置技术,低风险污染物和低浸出风险污染土壤采用原址封场阻隔处置技术。刘登峰等^[8]在对某砷霜厂遗留场地风险因子进行分类分级的基础上,对高风险污染物原地建设刚性填埋场进行处置,中风险污染物和高浸出风险污染土壤实施固化/稳定化处理后原位阻隔填埋,低风险污染物和低浸出风险污染土壤采用原位阻隔、工程管控措施后在场地表层进行生态恢复,同时通过在场地周边修建截洪沟等措施进一步降低污染风险,并建立长期监测体系和污染风险预警方案,以控制治理后场地的污染风险。

4 结论与展望

我国砷霜厂场地呈重金属复合污染,对周边环境产生了严重危害并具有难治理性。目前,历史遗留砷霜厂地的治理技术主要包括物理阻隔技术(表面覆盖、垂直阻隔、水平阻隔、阻隔填埋)、固化/稳定化技术和生态修复技术。综合考虑技术的适应性、治理成本、后期监管难易程度及场地开发需求,砷霜厂污染场地工程治理适宜采用物理阻隔+固化/稳定化+生态修复联合技术进行分级分区治理,该技术也符合新时期生态文明建设的要求。其中化学药剂稳定化技术操作简单、增容率小,是砷霜厂遗留场地中固体废物和污染土壤治理的一项典型技术,但目前针对重金属复合污染的化学药剂种类较少且类型单一,因此,新型高效化学稳定化药剂的开发仍是未来研究的重点。

参考文献

- [1] 刘广龙. 含砷废料资源化利用与无害化处置现状[J]. 中国矿山工程, 2012, 41(6): 50-54.
LIU G L. Arsenic waste recycling and harmless treatment [J]. China Mine Engineering, 2012, 41(6): 50-54.
- [2] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 201-212.
XIAO X Y, CHEN T B, LIAO X Y, et al. Regional distribution of arsenic contained minerals and arsenic pollution in China [J]. Geographical Research, 2008, 27(1): 201-212.
- [3] 胡毅鸿, 周蕾, 李欣, 等. 石门雄黄矿区 As 污染研究 I—As 空间分布、化学形态与酸雨溶出特性[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1515-1521.
HU H Y, ZHOU L, LI X, et al. Arsenic contamination in Shimen Realgar mine I: As spatial distribution, chemical fractionations and leaching[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(8): 1515-1521.
- [4] 蒋宏国, 罗琳, 朱凌峰. 三氧化二砷冶炼废渣的危害及处理[J]. 环境工程, 2009, 27(2): 88-90.
JIANG H G, LUO L, ZHU L F. The hazard and treatment of the waste slag from smelting arsenic trioxide[J]. Environmental Engineering, 2009, 27(2): 88-90.
- [5] 黄奎贤, 覃柳妹, 黎承波, 等. 典型砷霜厂污染场地重金属污染特征及环境风险评价[J]. 环境保护科学, 2016, 42(6): 110-114.
HUANG K X, QIN L M, LI C B, et al. Pollution characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in a typical contaminated site of one arsenic plant[J]. Environmental Protection Science, 2016, 42(6): 110-114.
- [6] RAN H Z, DENG X G, GUO Z H, et al. Pollution characteristics and environmental availability of toxic elements in soil from an abandoned arsenic-containing mine[J]. Chemosphere, 2022, 303: 135189. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135189.
- [7] RAN H Z, GUO Z H, YI L W, et al. Pollution characteristics and source identification of soil metal(loid)s at an abandoned arsenic-containing mine, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 413: 125382. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125382.
- [8] 刘登峰, 刘金龙, 温焕君, 等. 砷霜厂搬迁遗留场地的典型污染物及岩土工程管控措施[J]. 水利水电技术, 2019, 50(增刊1): 54-59.
LIU D F, LIU J L, WEN H J, et al. The typical pollutants and geotechnical engineering management measures in relocation legacy site of arsenic factory[J]. Water Resources and Hydropower

- Engineering, 2019, 50(Sup. 1): 54-59.
- [9] 刘威, 胡俊栋, 路国慧. 石门雄黄矿区砷污染水平及风险评价[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(4): 96-102.
LIU W, HU J D, LU G H. Assessment of arsenic contamination and risk in Shimen realgar mine[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2020, 35(4): 96-102.
- [10] 蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 711-717.
CAI B S, CHEN T B, LIAO X Y, et al. Arsenic concentrations in soils and vegetables and their risk assessments in highly contaminated area in Hu'nan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 711-717.
- [11] 曾宪坤. 联合修复技术在工业遗留污染场地治理中的应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(12): 92-95.
ZENG X K. Application of joint restoration technology in treatment of industrial remaining polluted sites [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(12): 92-95.
- [12] 覃霞. 广西河池某遗留砷霜厂污染场地土壤质量状况及修复研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
QIN X. Soil quality status and repair study of contamination site in a legacy arsenic plant in Hechi, Nanning[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [13] ZHANG G, YANG H F, JIANG M L, et al. Effects of four cost-effective amendments on the synchronous stabilization of As, Zn, Cu and Cd in contaminated mixture of residue and soil from an arsenic smelting site[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10 (3): 107845. DOI: 10. 1016/j. jece. 2022. 107845.
- [14] 胡波, 殷承启, 曹亚丽, 等. 废弃砷霜厂砷污染治理典型工艺的应用与分析[J]. 资源节约与环保, 2016(6): 289-290.
HU B, YIN C Q, CAO Y L, et al. Application and analysis of typical technology of arsenic pollution control in abandoned arsenic plant [J]. Resources Economization & Environment Protection, 2016(6): 289-290.
- [15] 李嘉艳. 云南南华砷污染调查及污染治理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
LI J Y. The survey and scheme research of arsenic pollution control in Nanhua arsenic mining in Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [16] 谢云峰, 曹云者, 张大定, 等. 污染场地环境风险的工程控制技术及其应用[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(1): 51-59.
XIE Y F, CAO Y Z, ZHANG D D, et al. Engineering control technologies and its application in the risk management for contaminated sites [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(1): 51-59.
- [17] 杨茸茸, 周军, 吴雷, 等. 可渗透反应墙技术中反应介质的研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4579-4587.
YANG R R, ZHOU J, WU L, et al. Research progress of reaction mediums in permeable reaction barrier technology[J]. China Environmental Science, 2021, 41(10): 4579-4587.
- [18] 张荷, 徐诗琦, 王鑫, 等. 雄黄尾矿渣稳定化处理技术试验[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 168-172.
ZHANG H, XU S Q, WANG X, et al. Bench and plot scale test on slag stabilization process of realgar mine tailings[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8): 168-172.
- [19] WANG X, ZHANG H, WANG L L, et al. Transformation of arsenic during realgar tailings stabilization using ferrous sulfate in a pilot-scale treatment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 32-39.
- [20] 王统, 吴文卫, 毕廷涛, 等. 新型固化/稳定化药剂TY-Z安全处置砷渣及砷污染土壤试验[J]. 环境工程, 2020, 38(增刊1): 558-561.
WANG T, WU W W, BI Y T, et al. Experimental study on safe disposal of arsenic slag and arsenic contaminated soil by new solidification/stabilization(S/S) agent TY-Z[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(Sup. 1): 558-561.
- [21] 杨慧芬, 张鸽, 孙启伟, 等. 一种酸性砷渣中多种重金属原位稳定化材料及其应用方法: ZL 20221 0298557. 2 [P]. 2022-12-06.
YANG H F, ZHANG G, SUN Q W, et al. An in-situ stabilization material for multiple heavy metals in acidic arsenic slag and its application method: ZL 202210298557.2 [P]. 2022-12-06.
- [22] FAN L J, ZHAO F H, LIU J, et al. The As behavior of natural arsenical-containing colloidal ferric oxyhydroxide reacted with sulfate reducing bacteria[J].

- Chemical Engineering Journal, 2018, 332: 183-191.
- [23] FAN L J, ZHAO F H, LIU J, et al. Dissolution of realgar by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in the presence and absence of zerovalent iron: implications for remediation of iron-deficient realgar tailings[J]. Chemosphere, 2018, 209: 381-391.
- [24] 黎亮. NZVI对石门雄黄矿区重度As污染土壤的钝化修复效果研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020.
- LI L. Effect of nanoscale zero-valent iron on immobilization of arsenic in severely contaminated soil from Shimen realgar mine[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020.
- [25] 任思为. 砷霜厂遗址污染场地治理修复技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- REN S W. Study on remediation technology of contaminated site of arsenic plant site[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [26] 马志强. 石门砷污染农田修复项目经验介绍[J]. 中国环保产业, 2020(6): 18-21.
- MA Z Q. Experience of arsenic contaminated farmland remediation project in shimen[J]. China Environmental Protection Industry, 2020 (6): 18-21.
- [27] 肖友程, 许超, 王扬, 等. 河池市某砷霜厂污染土壤固化/稳定化修复工程实例[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 176-179.
- XIAO Y C, XU C, WANG Y, et al. Project case of solidification/stabilization of heavy metal contaminated soils in an arsenic factory of Hechi city [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 176-179.
- [28] 黄旋, 郭宝蔓. 某典型历史遗留砷霜厂修复治理实施探讨[J]. 污染防治技术, 2021(2): 20-24.
- HUANG X, GUO B M. Discussion and analysis on the implementation of a typical historical arsenic plant site remediation[J]. Pollution Control Technology, 2021(2): 20-24.

(编辑: 王爱平)