

典型工业场地土壤复合重金属污染特征及稳定化修复材料优化配比研究

廖清平

(广东皓森生物科技有限公司)

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.004

摘要: 随着我国产业结构深度调整与城市化进程加速,大量工业退役场地遗留严重的土壤重金属复合污染问题。本文系统梳理了有色金属冶炼、电镀、钢铁焦化等典型工业场地土壤重金属的污染特征与来源,分析了阳离子型与阴离子型重金属同步稳定化的技术难点,综述了磷酸盐类、铁基材料、碱性材料及工业固废基复配材料在重金属稳定化修复中的应用现状。在此基础上,重点探讨了基于响应面法与正交试验的稳定化材料配比优化策略,总结了典型复配体系的优化配比与稳定化效果。研究表明,单一材料难以实现对多种重金属的同步高效稳定,基于材料间协同效应的复配优化是提升修复效果的关键路径。未来研究应着力于建立针对不同污染类型的材料配比数据库,并加强长期环境稳定性评估。

关键词: 工业场地; 重金属复合污染; 稳定化修复; 材料复配; 配比优化

Study on Composite Heavy Metal Pollution Characteristics and Optimized Proportion of Stabilization Remediation Materials for Typical Industrial Site Soils

Qingping Liao

Guangdong Haosen Biotechnology Co., Ltd.

Abstract: With the in-depth adjustment of industrial structure and accelerated urbanization in China, numerous decommissioned industrial sites suffer from severe composite heavy metal pollution in soil. This paper systematically summarizes the pollution characteristics and sources of heavy metals in typical industrial sites including non-ferrous metal smelting, electroplating, steel and coking industries. The technical difficulties in the simultaneous stabilization of cationic and anionic heavy metals are analyzed, and the application status of phosphate materials, iron-based materials, alkaline materials and industrial solid waste composite materials in heavy metal stabilization remediation is reviewed. On this basis, this paper focuses on the proportion optimization strategy of stabilization materials based on orthogonal tests and response surface methodology, and summarizes the optimal proportion and stabilization performance of typical composite remediation systems. The results show that a single material cannot realize efficient simultaneous stabilization of multiple heavy metals, and material compounding optimization based on synergistic effects is the key to improving remediation efficiency. Future research should focus on establishing targeted material proportion databases for different pollution types and strengthening the evaluation of long-term environmental stability.

Keywords: industrial site; composite heavy metal pollution; stabilization remediation; material compounding; proportion optimization

前言

过去几十年间,我国工业经济的飞速发展在创造巨大物质财富的同时,也留下了不容忽视的环境遗产。有色金属冶炼、电镀、化工、钢铁焦化等行业在生产过程中,由于废气排放、废水渗漏、固体废物堆存以及突发性泄漏事件,导致大量重金属污染物进入场地土壤,形成了数量可观的工业退役污染场地。如今,伴随着产业结构升级和城市功能更新,这些场地正逐步被收回并重新开发利用,其土壤中潜藏的重金属污染风险随之浮出水面,成为制约土地安全再利用的关键瓶颈。

据统计,我国土壤中镉和铅的超标率分别为 7.0% 和 1.5%。在各类污染场地中,工业场地土壤重金属污染极少以单一元素形态出现,更多表现为多种重金属元素共存的复合污染格局。铅、镉、砷、铜、锌、铬等往往以不同组合方式同时存在于同一场地土壤中,形成污染“套餐”。这种复合污染体系的修复难度远高于单一污染——不同重金属在土壤固-液界面的吸附、沉淀、络合等行为相互影响,化学形态和迁移转化规律更加复杂,任何一种单一的修复策略都难以全面应对^[1]。

在众多土壤重金属污染修复技术中,固化/稳定化技术

因其处理成本相对较低、操作简便、修复周期短且效果可靠，被广泛应用于工业场地污染土壤的治理。然而，复合污染体系对稳定化材料提出了更为苛刻的要求——材料不仅要能稳定某一种重金属，还需对共存的多种重金属均具备良好的稳定化效果。依靠单一类型材料难以兼顾不同重金属的稳定化需求，而通过多种材料的科学复配，利用各组分之间的功能互补与协同增强效应，则有望实现多种重金属的同步高效稳定。

一、典型工业场地土壤复合重金属污染特征

（一）行业类型与污染组合的关联性

不同门类的工业生产活动所排放的重金属种类各有侧重，这使得污染场地土壤中重金属的组合类型呈现出明显的行业烙印。理解这一关联性，是开展污染调查、风险评估以及针对性修复方案设计的基本前提。

在有色金属冶炼行业，由于矿石原料中常伴生多种重金属元素，且冶炼过程中的高温熔炼、焙烧等工序会使不同金属同步释放进入环境，因此这类场地的污染组合最为复杂。典型的污染元素包括铅、锌、铜、镉、砷等，其中铅和镉的超标情况尤为突出，往往形成以铅-锌-镉-砷为核心组合的复合污染格局^[2]。

电镀行业是另一类具有代表性的重金属污染源。电镀工艺大量使用铬酸、硫酸铜、氯化镍、氰化物等化学品，因此电镀场地土壤中的特征污染物通常包括铜、镍、铬（尤其是六价铬）、锌等。其中，六价铬因其高溶解性和强致癌性而受到特别关注，其与铜、镍共同形成的复合污染组合是该类场地的典型标志。

钢铁冶炼和焦化行业同样不容忽视。烧结、炼铁、炼钢等工序中会伴随铅、锌、镉等重金属的释放，焦化生产则因煤中微量元素的富集造成土壤中砷、汞、铅等污染。这类场地的污染往往呈现多环芳烃与重金属复合的特点，进一步增加了修复的复杂度。

（二）空间分布规律与形态特征

重金属在工业场地土壤中的空间分布并非均匀，而是受污染源位置、污染物迁移途径、土壤理化性质等多重因素控制，呈现出显著的异质性。从水平方向上看，污染浓度通常以生产车间、废水排放口、原料堆场、烟囱周边等污染源位置为中心向外围逐渐递减，但实际场地中往往存在多处污染源叠加，导致多个高值斑块交错分布。从垂向分布来看，铅、镉等元素多富集于表层0至30厘米范围内，但随着酸性溶液的淋溶作用，部分重金属也可向下迁移至更深层土壤^[3]。

重金属的化学形态是决定其环境行为与生态风险的核心因素。根据 Tessier 五步连续提取法，重金属在土壤中通常以可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态等形式存在，其中可交换态和碳酸盐结合态的生物有效性较高，生态风险大。复合污染体系中，不同重金属的形态分布差异显著：镉的可交换态比例通常较高，迁移性强；铅和铜多分布于铁锰氧化物结合态和有机

结合态；砷在酸性土壤中多以阴离子形态存在，受氧化还原条件和铁氧化物含量影响显著。这种形态分布的差异性，决定了稳定化材料需要具备多样化的作用机制。

二、稳定化修复材料及其在复合污染中的适用性

（一）主流材料类型与作用机制

磷酸盐类材料是稳定化修复领域应用最广泛的材料之一，典型代表包括磷酸氢二钾、过磷酸钙、羟基磷灰石等。其核心机制在于磷酸根与铅、镉、锌等阳离子重金属反应生成溶解度极低的金属磷酸盐沉淀，其中对铅的固定效果尤为突出。此外，部分磷酸盐材料还能通过表面吸附和离子交换作用辅助固定其他重金属。

铁基材料主要包括零价铁、硫酸亚铁、铁氧化物及氢氧化物等。零价铁可通过还原作用将六价铬转化为三价铬，显著降低其毒性和迁移性；铁（氢）氧化物表面含有大量羟基，能与砷酸根形成内层络合物，通过配位吸附和共沉淀将砷固定。铁基材料对砷和六价铬的稳定化效果显著，稳定化率可达90%以上^[4]。

碱性材料以生石灰、熟石灰等为代表，通过提高土壤pH值促使镉、铜、锌等阳离子生成氢氧化物或碳酸盐沉淀。但碱性条件对砷和铬等两性元素可能产生相反效果，反而增加其迁移性。黏土矿物与沸石凭借较大的比表面积和离子交换能力，可通过物理吸附和表面络合固定多种重金属阳离子，但稳定化容量相对有限。

近年来，利用钢渣、粉煤灰、赤泥等工业固废制备稳定化材料的研究增长迅速。这类材料含有丰富的硅、钙、铁、铝等活性组分，不仅可实现“以废治废”、降低修复成本，还具有显著的环保与经济效益。

（二）单一材料面对复合污染时的能力边界

尽管上述各类材料在单一重金属污染体系中往往表现优异，但当面对复合污染时，各自的短板便暴露无遗。磷酸盐材料对铅效果突出但对砷稳定化能力极其有限；铁基材料虽在砷和六价铬稳定化方面表现出色，但对铅和镉的固定能力相对逊色；碱性材料面临的核心矛盾最为典型——对镉、铜、锌等阳离子沉淀效果显著，但碱性环境反而可能促进砷的释放。这种选择性作用的天然属性，决定了单一材料难以胜任复合污染体系的全面稳定化任务，必须通过多种材料的合理复配来实现功能的交叉覆盖与协同增强。

三、稳定化修复材料的优化配比策略

（一）配比优化方法学路径

稳定化材料的复配需要针对具体的污染特征和修复目标，通过科学实验设计确定各组分最佳比例。目前较为成熟的优化方法主要包括正交试验设计和响应面法两大体系。

正交试验设计是一种高效的多因素多水平实验方法，其核心是从全部因素水平组合中挑选出具有代表性的部分组合进行实验，通过极差分析和方差分析识别各因素的主次影响顺序和最优水平组合。该方法可在有限实验工作量内初步筛选出关键材料类型及其适宜添加范围。

响应面法是在正交试验基础上更为精细的优化工具，

尤适用于寻求最优配比的精确值。其中 Box-Behnken 设计和中心复合设计最为常用。响应面法通过建立稳定化效果与各材料添加量之间的多元回归数学模型，能够连续反映因素变化对效果的影响趋势，优化精度更高。实际研究中常采取“先正交初筛、后响应面精调”的两步策略，兼顾实验效率与优化精度^[5]。

(二) 典型复配体系与配比方案

近年来，围绕不同类型复合污染体系的研究积累了一批代表性成果。针对铜、铬、铅复合污染土壤，研究者筛选钢渣、骨粉和磷矿粉三种绿色材料，通过响应面优化得到最优质量比 3 : 1 : 5，20% 添加量下铜、铬和铅的毒性浸出浓度分别降低 85%、82% 和 99% 以上。

针对冶炼场地铜、镍、铅、砷复合污染，提出的零价铁、

高炉矿渣和氧化钙三元体系按质量比 6 : 3 : 1 复配，10% 添加量下四种重金属稳定化率分别达 99.92%、96.16%、92.06% 和 99.58%。该体系经 150 次冻融循环后稳定化率仍维持在 60% 以上，证实了其长期耐久性。

针对铅冶炼渣堆场土壤中砷、镉、铜、铅、锌复合污染，以硫酸亚铁、粉煤灰和高岭土按 14% : 12% : 3% 制备的复配材料，使五种重金属的生物可利用态含量分别降低 71.55%、49.62%、91.35%、61.37% 和 41.45%。

对于电镀厂退役地块铜、镍、砷、六价铬、镉复合污染，1% 石灰、1% 磷酸氢二钾和 2% 铁基材料的组合使浸出浓度满足地下水标准要求。在砷镉复合污染体系中，铁盐、铝基材料和有机硫化物 TMT 复配的 C3 材料在 1.0% 添加量下使酸浸提态砷和镉降低率分别达 96.95% 和 99.37%。

表 1 典型复合重金属污染土壤稳定化复配方案与效果

污染体系	复配材料组成	优化配比	添加量	关键效果
Cu、Cr、Pb 复合污染	钢渣 + 骨粉 + 磷矿粉	3 : 1 : 5 (质量比)	20%	Cu、Cr、Pb 毒性浸出浓度分别降低 85%、82%、99% 以上
Cu、Ni、Pb、As 复合污染 (冶炼场地)	零价铁 + 高炉矿渣 + CaO	6 : 3 : 1 (质量比)	10%	四种重金属稳定化率分别达 99.92%、96.16%、92.06%、99.58%；150 次冻融循环后仍维持 60% 以上
As、Cd、Cu、Pb、Zn 复合污染 (铅冶炼渣堆场)	硫酸亚铁 + 粉煤灰 + 高岭土	14% : 12% : 3%	-	五种重金属生物可利用态含量分别降低 71.55%、49.62%、91.35%、61.37%、41.45%
Cu、Ni、As、Cr(VI)、Cd 复合污染 (电镀厂)	石灰 + 磷酸氢二钾 + 铁基材料	1%+1%+2%	-	浸出浓度满足地下水标准要求
As、Cd 复合污染	铁盐 + 铝基材料 + TMT (C3 材料)	-	1.0%	酸浸提态 As、Cd 降低率分别达 96.95%、99.37%

(三) 配比优化中需统筹的因素

配比优化需综合考量多重因素。污染特征是决定配比方向的根本依据，精准的场地调查和形态分析是前置条件。材料间的协同与拮抗效应不可忽视，需警惕过高 pH 导致砷从铁氧化物表面解吸等问题。经济成本是工程应用的硬约束，利用工业固废作为原料是兼顾经济性的重要方向。长期稳定性是衡量方案成败的最终标尺，应通过老化实验验证复配方案的持久有效性。

结语：

典型工业场地土壤重金属复合污染具有来源多样、组合复杂、空间异质性强等特征，常用稳定化材料各有所长但也存在明显功能短板。通过多组分的科学复配与配比优化，利用功能互补与协同增强效应实现多种重金属同步稳定，已被大量研究证实为有效路径。正交试验设计和响应面法为配比优化提供了成熟的方法学支撑。

当前配比优化研究大多针对特定土壤和污染组合开展，最优配比的外部适用性有限，尚缺乏系统性的配比数据库和通用性配方设计准则。多数研究侧重短期效率评价，对复配材料长期服役性能关注不足。未来应将机器学习等方法引入配比优化研究以提升效率，同时加大对工业固废基

复配材料的研发力度，推动修复技术向绿色低碳方向持续演进。

参考文献：

[1] 巫奇恒,赵子宇,王威,等.生物炭负载氮磷复合材料的制备及其修复矿区重金属污染土壤的机理[J/OL].化工环保,1-9[2026-09-02].

[2] 陈朱婧,李政达,陈云慧,等.结构增强型磷石膏-微生物复合土壤调理剂的制备及修复效果研究初探[J/OL].矿物学报,1-13[2026-09-02].

[3] 庞泽麟,张戈.污水灌溉对土壤重金属影响研究综述[J].农村经济与科技,2026,37(13):40-43+73.

[4] 李松懋.基于生物-纳米复合技术的土壤重金属污染修复策略及环境咨询应用[J].科技与创新,2026,(12):193-195.

[5] 魏兴.某冶炼厂遗留重金属污染土壤稳定化修复技术研究与应用[J].湖南有色金属,2026,42(3):105-108.

作者简介：廖清平（1976 年—）、男、汉族、湖南洞口县人、本科、工程师（现有职称）、研究方向：环境工程与管理工作。