

上海某工业地块重金属砷污染土壤淋洗修复工程实例

邓冬冬

上海申环环境工程有限公司，上海

收稿日期：2023年3月5日；录用日期：2023年4月6日；发布日期：2023年4月13日

摘要

介绍了上海某工业地块砷污染土壤异位化学淋洗修复工程。通过前期调查资料确定场地污染现状、修复目标、修复范围及修复工程量。通过修复技术比选确定适合本项目的修复工艺及技术路线。通过中试试验确定修复药剂种类及添加比例。修复施工阶段主要步骤为污染土壤清挖、转运、筛分预处理、淋洗修复、养护验收。对修复后的养护堆、基坑、废水进行采样，所有土壤混合样品、废水样品检测结果均满足相应修复目标值。确保了本工业地块的安全开发再利用，也能够为其他类似污染场地修复提供案例支撑。

关键词

土壤，砷，淋洗，修复

Project Case of Leaching and Remediation of Heavy Metal Arsenic Contaminated Soil in an Industrial Plot in Shanghai

Dongdong Deng

Shanghai Shenhuan Environmental Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 5th, 2023; accepted: Apr. 6th, 2023; published: Apr. 13th, 2023

Abstract

This paper introduces the remediation project of arsenic contaminated soil in an industrial plot in Shanghai. Determine the site pollution status, remediation objectives, remediation scope and re-

mediation quantities based on the preliminary survey data. Determine the repair process and technical route suitable for the project through comparison and selection of repair technologies. The type and adding proportion of remediation agent are determined through pilot test. The main steps in the remediation construction stage are the removal and transfer of contaminated soil, screening pretreatment, leaching and repair, and maintenance and acceptance. The repaired soil pile, foundation pit and waste water shall be tested, and the test results of all soil mixed samples and waste water samples shall meet the corresponding remediation target value. It ensures the safe development and reuse of this industrial plot and can also provide case support for the remediation of other similar contaminated sites.

Keywords

Soil, Arsenic, Leaching, Remediation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国工业化发展，工业企业退场后的土壤中重金属污染超标问题日益严重。重金属污染土壤具有隐蔽性、长期性和不可逆性[1]。土壤中污染重金属主要是镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌和镍 8 种重金属[2]。为保障城市工业用地的安全开发再利用，促进土壤修复技术的发展，需要对工业企业退场后的重金属污染土壤进行修复处理。本地块经前期调查、风险评估工作确认地块土壤中的重金属砷超过了人体健康风险，根据土壤法需要对地块进行修复施工后才能完成地块的出让再开发。

化学淋洗修复技术作为常用于重金属污染土壤的修复技术之一，具有高效快速、操作简单、可以削减污染土壤中重金属总量。作用机制是利用淋洗剂或化学助剂将土壤中的重金属污染物溶解、解吸、整合、固定等化学作用，使得重金属污染物从固相中转移到液相中实现重金属污染物从土壤中分离从而修复土壤的目的[3] [4]。

2. 工程概况

2.1. 地块污染现状

Table 1. Target value of soil remediation

表 1. 土壤修复目标值

污染物	基坑清理值(mg/kg)	修复目标值(mg/kg)
砷	20	20

地块位于上海某城区，地块周边主要为居民区、河流、商业用地等，历史上存在多家工业企业，主要为照明灯具、仪器的生产等。地块后续规划居住用地、教育用地等作为第一类用地开发建设。

地块土层结构自上而下：0 m~1.5 m 左右约为杂填土、杂填土下至原状地面以下 3.0 m 左右为粉质粘土、粉质粘土下到地面以下 6.0 m 为淤泥质粉质粘土，该层未穿透。场地内浅层地下水水位在场地西南部稍高，在场地的东北稍低，大致流向为由西南向东北，补给地块外地表水。

本地块土壤污染因子为重金属砷，地块内污染超标点位的最大浓度为 155 mg/kg，污染最大深度到 3 m，修复方量约为 5316.6 m³。确定后的土壤修复目标值见表 1。

2.2. 修复工艺的确定

针对重金属污染，结合修复效果、时间、经济、二次污染等方面提出以下修复技术进行比选：异位稳定化修复技术、异位化学淋洗修复技术、异位植物修复技术(表 2)。

Table 2. Comparison of remediation technologies for heavy metal contaminated soil
表 2. 重金属污染土壤修复技术比较

修复技术	稳定化修复技术	淋洗修复技术	植物修复技术
修复时间	一般	短	长
修复成本	中	中	低
二次污染风险	高	中	中
修复效率	低	高	低
技术成熟度	高	高	中

通过上述技术的特点和局限性，异位稳定化处理技术不能彻底清除土壤中的总量，只能改变形态，对土壤的去向有所限制，若是修复后现场回填则该技术不能达到修复目标；植物修复时间较长，考虑到项目周期紧张，不考虑植物修复。因此，针对本地块重金属污染，采用原地异位化学淋洗技术。

3. 现场中试

3.1. 实验目的

工程项目实施过程中会与实验室小试情况可能存在较大差异，因此在工程项目实施过程中，利用现场淋洗设备和预处理设备进一步确定设备运行时的药剂添加配比。

3.2. 实验方案

清挖得到基坑 I2 污染土壤，中试取样方量为 5 m² (约 7.5 t) 污染土。首先，用传送带以 10 t/h 的速度送入污染土壤，在通过滚筒筛、洗砂机、振动筛对不同污染粒径土壤进行筛分后，将洗砂机洗出的砂土与泥浆置入增效洗脱池中。

其次，增效洗脱池中分别配置 3 g/L, 4 g/L, 5 g/L 无水磷酸二氢钾，控制设备水土比在 1:5 工况下，增效洗脱时间控制在 2 h，分别检测不同浓度无水磷酸二氢钾在相同水土比情况下重金属污染物的浓度。每次更换不同浓度的无水磷酸二氢钾时，都对增效洗脱设备进行排空清理。相应比例淋洗药剂添加质量见表 3。

Table 3. Design of pilot test for heavy metal leaching (reagent ratio)

表 3. 重金属淋洗中试实验设计(药剂配比)

处理土样	样品量/t	加水量/t (1:5)	无水磷酸二氢钾(g/L)	药剂量/t	淋洗后取样编号
基坑 I2	7.5	0	0	0	bk-3
	7.5	37.5	3	0.1125	Lxzs-1
	7.5	37.5	4	0.15	Lxzs-2
	7.5	37.5	5	0.1875	Lxzs-3

3.3. 实验结果

Table 4. Test results of different leaching agent concentrations
表 4. 不同淋洗药剂浓度试验结果

试验编号	加水量/t (1:5)	无水磷酸二氢钾(g/L)	药剂量/t	砷浓度(mg/kg)
bk-3	0	0	0	94.7
Lxzs-1	37.5	3	0.1125	34.3
Lxzs-2	37.5	4	0.15	13.6
Lxzs-3	37.5	5	0.1875	11.5

根据表 4 结果, 养护后土壤砷浓度随着淋洗药剂无水磷酸二氢钾的投加量的升高逐渐降低, 其中 3 g/L 的无水磷酸二氢钾投加量砷浓度超出修复目标值, 4 g/L 的无水磷酸二氢钾投加量已能使得砷浓度低于修复目标, 因此本项目淋洗施工无水磷酸二氢钾投加量选择 4 g/L。

4. 工程实施

4.1. 总体工艺路线

修复施工分为施工准备阶段、修复施工阶段、效果评估阶段。针对重金属砷污染土壤的总体修复技术路线见图 1。施工准备阶段首先完成场地交接后进行测量放线, 确认地块污染范围; 修复施工阶段的主要施工技术方案有污染土壤的清挖转运、破碎筛分预处理、土壤淋洗修复施工、淋洗废水施工等; 效果评估阶段即对清挖、修复后的基坑、土堆、废水进行验收, 合格后回填或纳管排放。

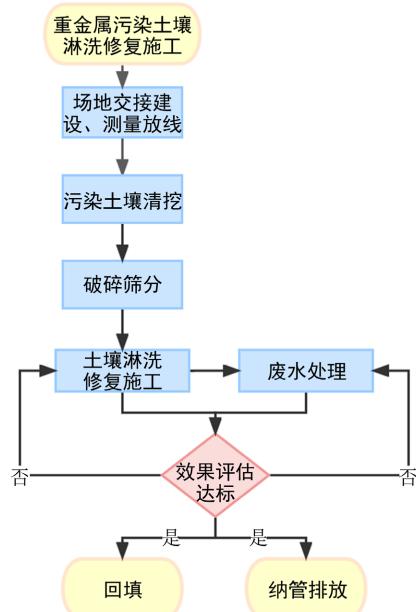


Figure 1. Overall construction process route
图 1. 总体施工工艺路线

4.2. 污染土壤清挖

本项目设计总污染方量约 5316.6 m^3 , 总污染面积约 2011.6 m^2 , 分为 I1 (开挖深度: 0 m~1.5 m)、I2 (开

挖深度：0 m~3.0 m)。根据前期地块土壤污染状况调查与风险评估报告，在开挖的表层~3.0 m 范围内，土质多为杂填土与粉质粘土。I1 基坑度为 1.5 m，采取直挖的清挖方式。I2 基坑度为 3.0 m，采取二级放坡的清挖方式确保基坑支护安全。现场根据基坑实际开挖情况，对开挖后基坑范围进行复核。

4.3. 污染土壤预处理

清挖基坑土壤中也掺杂着大石块、砖块等建筑垃圾，土壤清挖后首先短驳至清挖土壤暂存区，再采用 ALLU 土壤破碎筛分斗对土壤进行破碎筛分，将污染土壤与筛分出的建筑垃圾(粒径 > 40 mm)在土壤预处理区域内分区堆放。现场筛分出的建筑垃圾均进行了后续的清洗处理，清洗后集中堆放。待基坑验收合格时，压实回填原基坑。

4.4. 污染土壤淋洗修复施工

本项目土壤异位淋洗系统由五个子系统组成，分别是定量进料 + 泥石分离造浆系统、粒径分级化学增效淋洗系统、泥水分离系统、水处理系统和电控系统。

① 定量进料 + 泥石分离造浆系统：主要由进料斗、输送机和滚筒洗石机组成。预处理后土壤经输送机进入滚筒洗石机内，利用高压水枪加清水清洗，。筛分粒径小于 2 mm 泥土并进行造浆，粒径大于 2 mm 的砂石经洗石机末端排出。② 粒径分级化学增效淋洗系统：由高频振动筛、淋洗池仓、加药系统等组成。滚筒洗石机产生的泥石浆经高频振动筛筛分后，粒径大于 0.3 mm 的砂石经输送机排出，其余粒径小于 0.3 mm 的土壤颗粒随泥浆进入淋洗池仓内，再通过加入依照中试实验得到等比例淋洗药剂进行增效淋洗处理。③ 泥水分离系统：由搅拌桶、板框压滤机组成。该系统主要将增效淋洗后泥浆输送至板框压滤机内进行泥水分离，压滤产生废水进入水处理系统，固相泥饼掉堆放至待检区域。④ 水处理系统：由加药系统、一体式水处理机和活性炭罐组成。压滤产生废水进入一体式处理机进行混凝沉淀，再由活性炭罐过滤后进入支架水池内。处理合格后的废水可循环使用。

土壤预处理后进入淋洗系统，形成泥石浆，再经粒径分级及增效淋洗系统和泥水分离系统，最后分出 3 个不同粒径的堆体，分别是粒径 2 mm~40 mm 的砂石、0.3 mm~2 mm 的细砂、粒径小于 0.3 mm 的泥饼，并进行分区堆放。淋洗设备等均与中试过程中的工程设备一致，无水磷酸二氢钾药剂比例依据中试结果实际添加。

4.5. 检测与验收

针对本地块清挖后的基坑 I1 及修复后养护土堆 TD1、基坑 I2 及修复后养护土堆 TD2 分批次检测采样检测目标污染物砷是否达到清挖目标值和修复目标值。基坑 I1 采集坑底 3 个混合样品、坑壁 5 个混合样品、1 个平行样品，基坑 I2 采集坑底 5 个混合样品、坑壁 14 个混合样品、3 个平行样品。土堆按照每 500 m³ 取 1 个混合样进行检测。修复后养护土堆 TD1 共计 755.7 m³，采集 2 个混合样、1 个平行样品进行检测。修复后养护土堆 TD2 共计 4657 m³，采集 10 个混合样、1 个平行样品进行检测。淋洗废水采集 10 个样品，检测废水中砷及可能产生的二次污染产物(pH、SS、COD、BOD5)。所有土壤混合样品、废水样品检测结果均满足相应修复目标值。

5. 结论与建议

5.1. 结论

本项目选择异位淋洗修复技术针对地块重金属砷污染土壤进行修复处置，总计修复土壤方量 5316.6 m³。采取现场中试的试验手段，确定适宜的修复药剂及药剂添加比例。以保证修复工程效果及施工经济

性。本工程采取在前端加入高压冲洗等装置使得滚筒的粘性土解泥效果更好，从而增大制浆效率。压滤过程中加入适量生石灰或增加压滤时间以保证压滤脱水效果。对修复后的养护土堆、基坑、废水进行检测，所有土壤混合样品、废水样品检测结果均满足相应修复目标值。

通过本项目的实施，根据场地特征，对上海地区浅层重金属类污染土壤采用异位淋洗修复模式，对其实用性及修复效果进行了验证，能够为其他类似污染场地修复提供案例支撑。作为上海工业地块修复工程案例，也保障城市工业用地的安全开发再利用。

5.2. 问题与建议

根据《中国土壤元素背景值》资料，在全国表层土壤(0 cm~20 cm)中，砷元素含量算术平均值为 11.2 mg/kg [5]。而一类用地的筛选值为 20 mg/kg，砷在地块内土壤中的背景值相对较高。土壤中砷的形态与修复密切相关[6]，加强土壤中砷的形态研究、影响其形态的主要因素以及选择合适的淋洗药剂是确保修复效果的重要保证。

由于上海地区浅层土性多为杂填土层、粉质粘土层、淤泥质粉质粘土层、而淋洗的滚筒对于粘性土的解泥效果较差，大体积泥块难制成泥浆进入后续环节，且所制得的泥浆含水率大，压滤所需时间长，压得的出料泥饼含水率高，不易成形。导致淋洗处理的效率变低。施工过程中，采取在前端加入高压冲洗等装置或将粘土提前加水搅拌会使制浆效果变好。但对于上海较深的淤泥质粉质粘土的淋洗施工效率会受到影响，产生的泥饼含水率高不易于现场的堆放、验收。对现场场地的环境保护、二次污染防治也是一大考验。

参考文献

- [1] 宋云, 尉黎, 王海见. 我国重金属污染土壤修复技术的发展现状及选择策略[J]. 环境保护, 2014, 42(9): 32-36.
- [2] 陆伟. 重金属污染土壤修复技术的发展现状和趋势[C]//《环境工程》2018 年全国学术年会. 《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(下册). 北京: 《工业建筑》杂志社, 2018: 815-818.
- [3] Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G. and Richer-Lafleche, M. (2008) Soil Washing for Metal Removal: A Review of Physical/Chemical Technologies and Field Applications. *Journal of Hazardous Materials*, **152**, 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.043>
- [4] Abumaizar, R.J. and Smith, E.H. (1999) Heavy Metal Contaminants Removal by Soil Washing. *Journal of Hazardous Materials*, **70**, 71-86. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00149-1)
- [5] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 13-19.
- [6] 李圣发, 王宏镇. 土壤砷污染及其修复技术的研究进展[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 248-253.