doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.05.013

电镀厂址土壤重金属污染分布特征及修复路径探讨

李基强，尹 翀*，于晓静

(济南市生态环境监控中心，山东 济南，250399)

摘要：调查并分析典型电镀厂址土壤重金属污染的分布特征、进行风险评估及管控修复，是该类场地安全再利用的必要工作。在调查某电镀场地土壤重金属污染现状的基础上，定量分析了不同深度土壤的重金属空间分布特征和污染区域。场区内重金属污染与电镀厂生产功能分区相对应，说明重金属主要来源于电镀液泄漏。由于该场区填土层以下为渗透性较差的粉质黏土和中等风化岩，不利于重金属污染物向土壤深层迁移，因而重金属污染物主要集中在表层土壤。风险评估六价铬污染物的土壤致癌风险为 1.45×10^{-4}，大于 10^{-6}；三价铬的土壤非致癌危害商为 2.12，大于 1，均超过了人体健康风险可接受水平。在评估地块应修复区域时，通过空间上不超标点连线的方法估算，采用 Ordinary Kriging(普通克里金插值法)进行修整，优化了修复区域边界轮廓线，并探讨了可行的管控修复方案。

关键词：电镀；土壤；重金属；风险评估；管控修复

中图分类号：x53 **文献标识码：**B

Investigation on the distribution characteristics and restoration pathways of heavy metals in soil at an electroplating plant

Li Jiqiang, Yin Chong*, Yu Xiaojing

(Jinan Ecological Environment Monitoring Center, Jinan 250399, China)

Abstract: Investigating and analyzing the distribution characteristics of heavy metal pollution in typical electroplating site soil, conducting risk assessment and management and restoration, is a necessary task for the safe reuse of such sites. Based on the current status of heavy metal pollution in electroplating site soil, the quantitative analysis was conducted to investigate the spatial distribution features and pollution areas of heavy metals at different soil depths. The heavy metal pollution in the site is corresponding to the production function division of the electroplating plant, indicating that the heavy metals mainly come from the leakage of electroplating solution. Due to the poor permeability of the fill soil layer below the site, which is composed of poorly consolidated clay and medium weathered rock, it is difficult for heavy metal pollutants to migrate to deeper soil layers. Therefore, the heavy metal pollutants are mainly concentrated in the surface soil. The soil carcinogenic risk of hexavalent chromium pollutant is 1.45×10^{-4}, which is greater than 10^{-6}; the non-carcinogenic risk of trivalent chromium pollutant is 2.12, which is

收稿日期：2024-08-01 **修回日期：**2024-09-28

作者简介：李基强(1973—)，男，高级工程师，研究方向为环境工程治理工作，email：983267276@qq.com

通信作者：尹翀, email：pyhbyc99@126.com

引用信息：李基强，尹翀，于晓静.电镀厂址土壤重金属污染分布特征及修复路径探讨[J]. 电镀与精饰，2025，47(5)：86-94，114.

Li Jiqiang，Yin Chong，Yu Xiaojing. Investigation on the distribution characteristics and restoration pathways of heavy metals in soil at an electroplating plant[J]. Plating and Finishing，2025，47(5)：86-94，114.

greater than 1, both of which exceed the acceptable level of human health risk. When estimating the restoration area of the assessment site, the method of connecting non-exceeding points in space was used, and the Ordinary Kriging (ordinary Kriging interpolation method) was used for refinement to optimize the boundary contour of the restoration area and explore feasible management and restoration schemes.
Keywords: electroplating; soil; heavy metals; risk assessment; controlled restoration

近几年，环保督察对“十五土小”、“散乱污”等进行了根本整治，有效控制了金属冶炼、石油、化工、煤炭焦化、电解电镀、皮革制染等行业三废排放对环境的污染，减少了危险废物贮存、利用、处置场所等“6+1”行业对土壤的污染。“关闭搬迁”后，往往造成化工场地土壤严重污染，成为土地再利用时的安全隐患和顽疾。

电镀工业镀液及废水的滴渗，会导致重金属元素进入土壤，污染毒化土壤及地下水源，直接或者间接影响居民的身体健康[1]。目前，对这类污染土壤的调查及污染空间分布特征研究的较少，缺少污染风险评估和管控修复的综合研判。

本文在调查某电镀场地土壤重金属污染现状的基础上，定量分析了土壤不同深度重金属空间分布的特征和污染区域。在评估地块修复范围时，采用不超标点连线的方法估算，用Ordinary Kriging（普通克里金插值法）对污染区域轮廓线进行修整，优化了修复范围，并探讨了可行的管控修复方案。

1　材料与方法

1.1　电镀场地概况

电镀场地位于济南市东南部，总占地面积为3 628 m^2。1995~2018年，全厂有一条镀锌生产线，2018~2020年，进行厂房翻新改造，并在原有生产线基础上，新增一条镀铬生产线和一条滚镀锌生产线。2020年初，根据用地规划，该企业全面停产。2021年5月，对厂区遗留的生产设备和环保设备进行了拆除。目前，厂区内仅保留废水收集池、临时镀锌池和厂房，地下水池已排空，池中无遗留危险废物堆存。当地政府拟征收该地块用作道路建设，依据《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137—2011)中规定，用地类型为第二类。

根据水文地质勘察报告，在勘察深度范围内，地块地层自上而下由第四系全新统人工堆积层(Qml)、第四系全新统冲洪积层(Q4 al+pl)组成，下伏新太古代中期花岗岩(Ar3γ)。调查区自上而下可划分为第四系松散岩类孔隙含水岩组、基岩裂隙水含水岩组，其中松散岩类孔隙含水岩组主要接受大气降水，沿地表径流排出地块。关注的污染物可通过地面漫流和垂直下渗造成地块及周边区域土壤污染。此外，根据地块水文地质报告，各个钻孔已穿透粉质黏土层和强风化岩层并揭露部分中等风化岩，均未见地下水。结合周边居民访谈以及收集周边水文地质资料，分析后认为：调查区域地下水埋深在30～40 m左右，无潜水；中等风化岩层具有较强污染阻隔作用；调查地块对深层地下水的污染风险较小。因此，不再对地块内地下水进行采样分析[2]。

1.2　场地污染调查方法

1.2.1　调查采样分析概况

调查采用系统网格布点法和判断加密布点法。初步调查完成 12 个土壤采样点(包括1个清洁对照点)的采样工作，共采集土样 73份(包括5份现场平行样)。根据土壤颜色、异味、变层和样品快速检测结果分析，最终送检土样34份，现场平行样5份。

在初步调查基础上进行了详细调查。在地块内布设 22个土壤检测点位，地块外布设4个对照点。检测因子为地块初步调查超标因子六价铬和特征污染物(总铬、锌、氰化物、氟化物)，共送检样品152 件(包括15个平行样品)。

针对采集的土壤样品，依据《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》(GB36600－2018)中所列的45项基本项目进行检测，并增加试样的pH值、石油烃(C10～C40)、重金属(锌和总铬)、无机物(氰化物和氟化物)进行检测。

土壤筛选值采用《土壤环境质量建设用地土壤风险管控标准(试行)》(GB36600－2018)中第二类用地的土壤风险筛选值。标准中不包含的指标(总铬、锌、氟化物)参考《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811－2011)中工业/商服用地的筛选值。

土壤样品选择检测数据见表1。数据表明，地块内氰化物、氟化物在各点位的土壤样品均能满足相应标准要求，六价铬、总铬和锌在部分点位出现不同程度的超标。

表 1 超标点位汇总一览表

Tab.1 Summary list of the over-standard points

超标点位	超标深度/m	超标因子	检出值/(mg·kg^{-1})	土壤类型	第二类用地筛选值/(mg·kg^{-1})	超标倍数	第二类用地管制值/(mg·kg^{-1})	超标倍数
S12	0.1～0.5	六价铬	283.0	杂填土	5.7	48.65	78	2.63
S13	0.1～0.5	六价铬	51.2	杂填土	5.7	7.98	78	0.00
		总铬	5 580.0		2 500.0	1.23	2 500	1.23
		锌	12 200.0		10 000.0	0.22	10 000	0.22
S15	0.1～0.5	六价铬	489.0	杂填土	5.7	84.79	78	5.27
	0.6～1.1		20.0	粉土	5.7	2.51	78	0.00
S16	0.1～0.5	六价铬	312.0	杂填土	5.7	53.74	78	3.00
	0.6～1.1		6.5	粉土	5.7	0.14	78	0.00
S17	0.1～0.5	六价铬	410.0	杂填土	5.7	70.93	78	4.26
	2.1～2.5		102.0	粉土	5.7	16.89	78	0.31
S22	0.1～0.5	六价铬	8.2	素填土	5.7	0.44	78	0.00
		锌	15 400.0	素填土	10 000.0	0.54	10 000	0.54
S26	0.1～0.5	六价铬	8.4	杂填土	5.7	0.47	78	0.00
		总铬	5 020.0		2 500.0	1.01	2 500	1.01
		锌	24 200.0		10 000.0	1.42	10 000	1.42

1.2.2 调查结论

根据初步调查、详细调查和补充调查，调查地块共计布设采样点位48个，送检土壤样品226个。根据检测结果，地块内六价铬、总铬和锌存在不同程度超标。超标点位为 S3、S7、S12、S13、S14、S15、S16、S17、S18、S19、S21、S22、S24、S25、 S26、S27、S31、BC1和BC2，共计19个。超标样品共计48个，超标面积共计2 671.57 m^2。

表 2 超标情况统计表

Tab.2 Statistical table of the over-standard conditions

序号	指标	超标点位	超标深度/m	超标面积/m^2
1	六价铬	S3、S7、S12、S13、S14、S15、S16、S17、S18、S19、S21、S22、S24、S25、S26、S27、S31、BC1、BC2	0.1～5.9	2 671.57
2	总铬	S13、S26、BC2	0.1～1.0	524.15
3	锌	S13、S22、S26、BC2	0.1～5.0	695.28

1.2.3　污染分布特征及原因分析

(1) 六价铬

六价铬超标点位为 S3、S7、S12、S13、S14、S15、S16、S17、S18、S19、S21、S22、S24、S25、S26、S27、S31、BC1和BC2，共计19个，超标样品46个，检出范围为ND～489 mg/kg，超标深度范围为0.1～5.9 m。其中超标较为严重的点位为S15、S16、S17、S12，分别位于镀铬车间及危废间。最大超标浓度为489.0 mg/kg，为S15点位表层样品，位于镀铬车间内，紧邻含铬废水收集池。最大超标深度为5.9 m(强风化)，为BC1点位，位于危废间内，检出浓度为25.9 mg/kg，该点位已钻探至风化岩。5.9 m以下为灰岩(中风化)，对污染物迁移具有阻隔作用，可作为终孔依据[3]。

六价铬超筛选值连片区域主要分布于镀铬车间、镀锌车间、危废间、废水收集池、临时镀锌槽、碱性喷淋塔、污水处理站以及厂房翻新时土壤扰动影响区域。分布特征是表层土壤超标严重，深层土壤超标浓度较低，孤点未连片。研究表明，土壤对六价铬的吸附受到pH值影响。pH值在2～6.5时，吸附量随pH值增加而增加，随后随着pH值的增加而减少[4-5]。本电镀场地表层土壤呈碱性，pH值随深度增加呈现不断减小的趋势；同时场地粉质黏土、中风化岩层具有较强的污染阻隔作用，因此超标污染基本处于土壤表层[6-7]。

(2) 总铬

总铬超标点位为S13、S26、BC2，共计3个，超标样品3个。检出范围为26～5 580 mg/kg，超标土壤的深度范围为0.1～1.0 m。其中超标较为严重的点位为S13，位于废水收集池区域，最大超标浓度为5 580 mg/kg，超标深度为土壤表层。总铬超筛选值连片区域主要分布于废水收集池以及厂房翻新时土壤扰动的影响区域。

(3) 锌

根据检测结果，锌超标点位为 S13、S22、S26、BC2，共计4个，超标样品5个。检出范围为21～24 200 mg/kg，超标深度范围为 0.1～5.0 m。其中超标较为严重的点位为S26，位于厂房翻新时土壤扰动影响区域，超标浓度为24 200 mg/kg，为表层样品；最大超标土壤深度为5.0 m，为BC2点位，位于废水收集池区域，检出浓度为10 100 mg/kg。锌超筛选值的连片区域主要分布于废水收集池、临时镀锌槽以及厂房翻新时的土壤扰动影响区域。

对初步调查、详细调查及补充调查的检测结果进行统计分析，发现土壤样品中重金属六价铬、总铬和锌等3项污染因子超标，污染土壤垂向超标深度为0～5.9 m，高于GB36600－2018第二类用地土壤风险筛选值，对人体健康可能存在风险。根据超筛选值土壤的空间分布情况分析，超标总面积2 671.57 m^2，其中六价铬各层位总超标面积为2 671.57 m^2、总铬各层位超标面积为 524.15 m^2，锌各层位超标面积为 695.28 m^2。土壤污染物超标原因可能有以下三点：(1)建厂初期使用含铬钝化剂，且生产车间、危废暂存库等生产区域未满足重点防渗要求，造成土壤污染；(2)电镀生产过程中废水、废液的跑冒滴漏；(3)2018年企业对厂房进行翻新改造，原生产车间的开挖土方用于厂区多处路面回填平整，导致被扰动区域表层土壤中的六价铬超标。

根据《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ 25.1－2019)、《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ 25.2－2019)，调查地块为污染地块，需要开展后续的风险评估工作，计算各污染物的致癌风险和危害商，判断风险是否可以接受。

1.3 土壤污染风险评估

1.3.1 污染源

本地块主要存在3项重金属超出筛选值的情况。其中六价铬超出《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》（GB36600－2018）第二类用地筛选值及第二类管制值；总铬和锌超出《北京市地方标准场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T811－2011)工业/商服用地筛选值。

表 3　土壤关注污染物情况汇总表

Tab.3　Summary of the contaminants of concern in soil

污染物	CAS 编号	最大浓度/(mg·kg^{-1})	筛选值/(mg·kg^{-1})	管制值/(mg·kg^{-1})	最大超标倍数
六价铬	18540-29-9	489	5.7	78	84.79
总铬	16065-83-1	5 580	2 500.0	—	1.23
锌	7440-66-6	24 200	10 000.0	—	1.42

1.3.2 暴露受体和途径

在工业用地利用方式下，成人可能会因长时间暴露于地块污染物而产生健康危害。暴露途径有经口摄入土壤、皮肤接触土壤和吸入土壤颗粒物[8-10]。

1.3.3 风险表征结果

对三价铬、六价铬和锌等超标污染物浓度进行土壤污染暴露风险计算。致癌风险：六价铬污染物土壤致癌风险为1.45×10^{-4}，大于10^{-6}，超过了人体健康风险可接受水平；三价铬和锌不具备致癌性，因此未评估其致癌风险。非致癌危害商：三价铬的土壤非致癌危害商为2.12，大于1，超过了人体健康风险可接受水平；六价铬和锌的非致癌危害商小于1。

综合评价可知，三价铬和六价铬风险不可接受。而锌无致癌风险，且其非致癌危害商未超过人体健康风险可接受水平，因此锌风险可接受。

表 4 各超标污染物致癌风险及非致癌危害商

Tab.4 Carcinogenic risk and non-carcinogenic hazard quotient of pollutants exceeding the standard

污染物	CAS 编号	致癌			合计	非致癌			合计
		口摄入土壤颗粒物	皮肤接触土壤颗粒物	吸入土壤颗粒物		口摄入土壤颗粒物	皮肤接触土壤颗粒物	吸入土壤颗粒物	
		CR_{ois}	CR_{dcs}	CR_{pis}	CR_{n}	HQ_{ois}	HQ_{dcs}	Hqpis	HIn
三价铬	16065-83-1	—	—	—	—	7.520×10^{-3}	—	2.110	2.120
六价铬	18540-29-9	8.91×10^{-5}	—	5.61×10^{-5}	1.45×10^{-4}	0.361	—	0.284	0.645
锌	7440-66-6	—	—	—	—	4.120×10^{-2}	—	—	4.120×10^{-2}

1.3.4 土壤修复目标值

修复目标值确定原则：对比相应规划用地方式下的风险控制值、筛选值和管控值，若风险控制值大于筛选值且小于管控值，则选择风险控制值作为修复目标值；若风险控制值小于筛选值，则选择筛选值作为修复目标值；若风险控制值大于管制值，则选择管制值作为修复目标。

根据上表中计算出的风险控制值，对比目前试行的《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》(GB36600－2018)可知，三价铬和六价铬的风险控制值均低于相应筛选值，在风险评估过程中参数选择较为保守。为避免过度修复，且考虑到后期地块管理的需要，采用筛选值作为土壤修复目标值[14]，最终确定土壤中污染物的修复目标值见表5。

表 5 地块土壤建议修复目标污染物及目标值

Tab.5 Proposed remediation target pollutants and target vfor soil of the plot

污染物	CAS 编号	最大值 /(mg·kg^{-1})	风险控制值 /(mg·kg^{-1})	筛选值 /(mg·kg^{-1})	管制值 /(mg·kg^{-1})	修复目标值 /(mg·kg^{-1})
三价铬	16065-83-1	5 580.0	2 400.0	2 500.0	—	2 500.0
六价铬	18540-29-9	489.0	3.4	5.7	78.0	5.7

2 结果与分析

2.1 修复范围与修复量

通常情况下，修复范围是根据修复目标值来圈定的，凡是污染物浓度大于或等于修复目标值的污染土壤都须进行修复。根据前期地块的调查结果及确定地块的土壤污染建议修复目标值，调查地块土壤建议修复目标值的污染物为六价铬和三价铬。根据地质资料中的土层类型以及采样检测目标污染物的深度分布情况，修复土层共划分为六层：第一层0～1.0 m、第二层1.0～2.0 m、第三层2.0～3.0 m、第四层3.0～4.0 m、第五层4.0～5.0 m和第六层5.0～6.0 m。六价铬、总铬节选0～1.0 m超二类筛选值范围的平面图作为示例。

建议修复范围：根据本地块土壤污染状况的自身特点，在评估地块建议修复范围的圈定时，选择在空间上采用不超标点连线的方法估算，采用Ordinary Kriging(普通克里金插值法)对圈定区域边界轮廓线进行修整。建议修复土壤深度：以上下层不超修复目标样品所在的深度划定深度范围。建议修复土壤土方量为面积与污染土壤厚度的乘积。两种统计方法刻画的修复范围见图1。

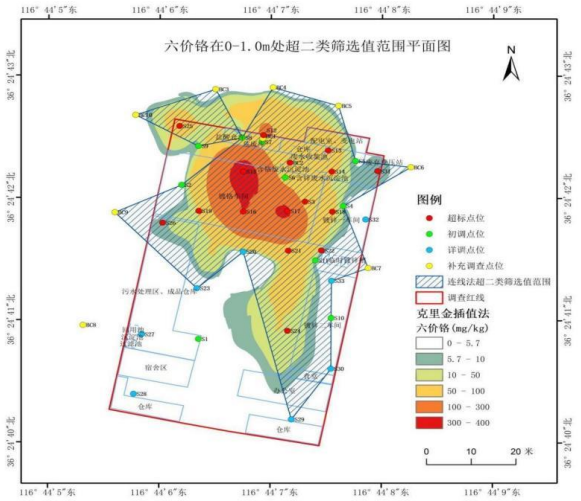

图 1　六价铬在 0～1 m 处修复范围图

Fig.1　Repair range chart of hexavalent chromium from 0 to 1 m depth

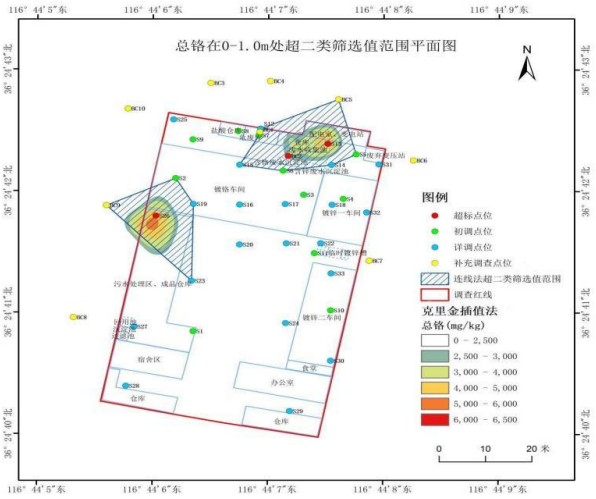

图 2　总铬在 0～1 m 处修复范围图

Fig.2　Repair range chart of total chromium from 0 to 1 m depth

由图1和图2可知，连线法相较于克里金插值法统计的修复范围更为保守。克里金插值法是根据样品空间位置和样品间相关程度的不同对每个样品品位赋予不同的权，然后进行滑动加权平均，以估计中心块段平均品位。在地块较大、点位数量较多的情况下估算的修复面积更为可靠。且克里金插值法是是基于土壤匀质性的假设前提，故插值估算本身具有一定的不确定性[11]。

2.2　修复范围优化

本着保守原则，最终采用连线法进行修复面积统计，并综合考虑克里金插值法的渲染面积对连线法进行修正，以明确最终的修复范围。以下为本次分层圈闭土壤的建议修复范围。

2.2.1　六价铬

根据检测结果，0～1 m深度土壤样品中，六价铬超标点位16个(S25、S26、S19、S16、S15、S12、BC2、S13、S14、S3、S17、S31、S18、S21、S22和S24)，超标样品共计18个，超标面积为2 593.26 m^2；1～2 m深度土壤样品中，六价铬超标点位10个(S27、S12、BC1、 S16、S15、S17、S3、S31、S18和S22)，

超标样品共计12个，超标面积为1 551.02 m^2；2～3 m深度土壤样品中，六价铬超标点位4个(S12、BC1、S17和S18)，超标样品共计4个，超标面积为699.23 m^2；3～4 m深度土壤样品中，六价铬超标点位5个(S12、S7、BC1、S14和S18)，超标样品共计5个，超标面积为452.86 m^2；4～5 m深度土壤样品中，六价铬超标点位2个(S12和BC1)，超标样品共计2个，超标面积为302.16 m^2；5～6 m深度土壤样品中，六价铬超标点位5个(S12、S7、BC1、BC2和S18)，超标样品共计5个，超标面积为479.31 m^2。

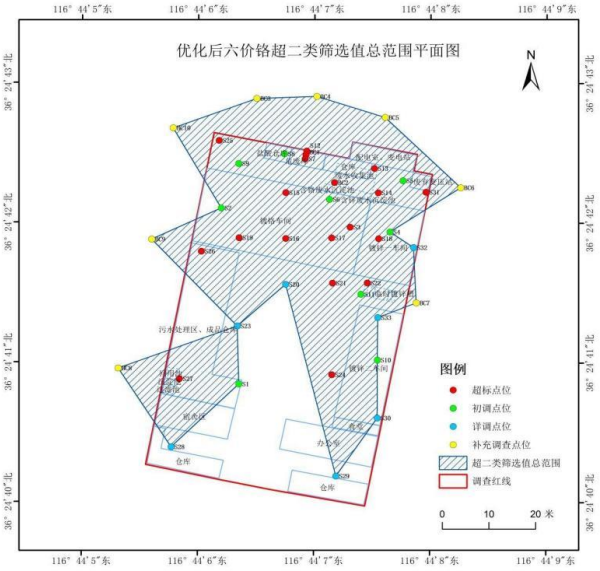

图 3　优化后六价铬 0～6 m 处修复范围图

Fig.3　Repair range of hexavalent chromium at 0-6 m after optimization

2.2.2　总铬

总铬超标情况分布如图4所示。

根据检测结果，0～1 m深度土壤样品中，总铬超标点位3个（S26、BC2和S13），超标样品共计3个，超标面积为524.15 m^2。

2.2.3　土壤污染风险控制范围及深度

第二类用地方式下的土壤建议修复土方量见图5。调查根据地形特征及地层结构、各分层叠加面积，本地块土壤修复总面积约为3 323.04 m^2。

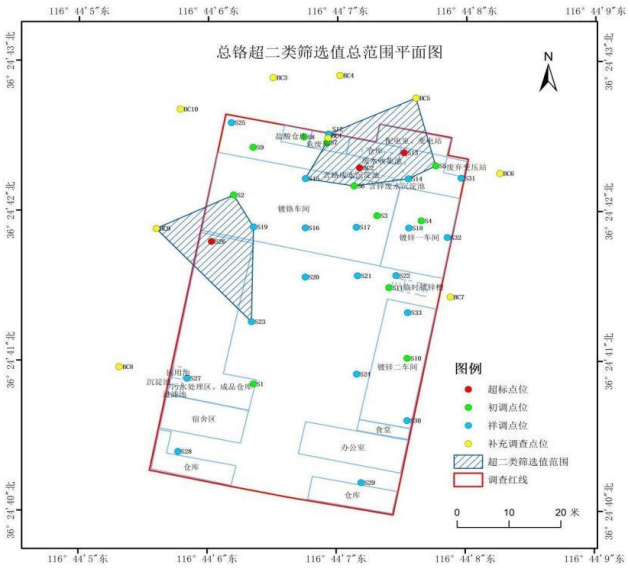

图 4　总铬总修复范围图(仅 0~1m 层位超标)

Fig.4　Repair range map of total chromium (only 0-1m layer exceeds the standard)

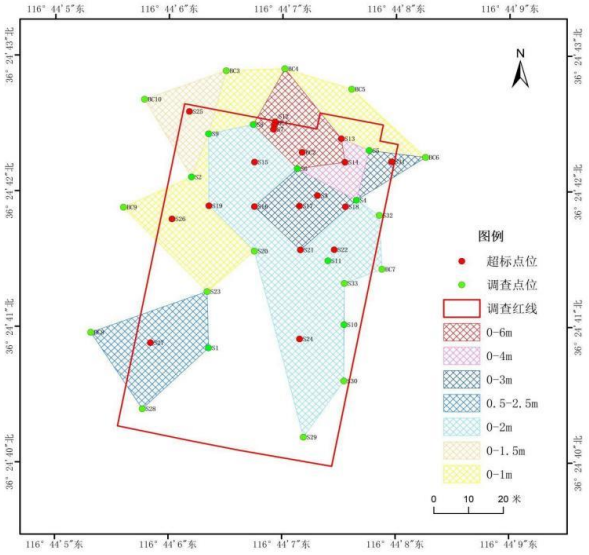

图 5　第二类用地方式下土壤修复范围及深度

Fig.5　Scope and depth of soil remediation under the second type of land use

3　讨 论

根据地块调查与风险评估，地块土壤受到六价铬、总铬和锌污染物污染。在地块实施修复工程之前，需要开展相应的风险控制与监测活动，防止地块污染进一步扩散和地块污染给周边人群带来风险。对地块内的一般废物，需要合理的分类、收集、贮存和处理，减少废物对环境的影响。地块内污水处理池现已被填埋，后期需妥善处置，防止污染物进一步扩散。地块修复完成之前，对地块进行必要的控制，防止闲杂人员进入引起污染物暴露，导致健康风险[12]。在地块修复阶段需要制定合理的施工安全计划，在施工过程中采取暴露防范措施，降低人体接触污染土壤和地下水的频率，减小建筑工人的直接暴露风险。例如：采取土堆铺盖塑料薄膜、在土堆表面洒水等措施，防止工地尘土飞扬。主动采取必要的受体防护措施，减小建筑工人直接暴露风险。例如：工人在施工期间必须佩戴口罩、穿工作服、戴手套、穿防水靴，夏天避免穿短袖衣和短裤施工。

3.1　风险管控方案建议和风险管控模式选择

风险管控，即采取移除或清理重污染源、污染隔离阻断、环境介质长期监测、污染扩散及时补救等工程和张贴告示牌等非工程措施防止污染扩散和暴露的过程。风险管控技术属于被动控制方法。通过将污染物封存在原地截断污染迁移途径、限制地块开发利用、禁止无关人员活动和切断风险暴露途径等方式，达到风险控制的目的，保护公众健康和环境安全。由于地块暂无开发建设计划，结合污染地块污染特征及现状，建议本地块应开展制度控制并结合土壤长期监测的措施来防止污染扩散、减少受体暴露；根据动态监测结果及时调整或进一步完善风险管控措施。待项目地块具备开发建设条件后，应开展后续修复工程，消除污染物对环境以及人体健康的风险。

表 6　风险管控的主要措施

Tab.6　Main measures of risk management and control

风险管控措施类型	管控措施
制度控制	设置管控区边界围挡
	设置地块信息公告牌
	配备管控人员 2～4 人
	地块资料管理
	地块内定期巡检雨水导流槽、地面等状况
	定期检查环境保护相关器材
风险管控措施类型	管控措施
	场内固体废物清理
	隔离重点区域
工程措施	地块内裸露区域防渗硬化
	建设排水沟渠
	土壤介质长期监测

3.2　修复技术路线建议

本地块仅涉及到重金属的污染，因此针对重金

属开展修复技术筛选。适用于修复重金属污染土壤的方法主要有固化/稳定化、土壤淋洗、植物修复、水泥窑协同处置、土壤阻隔修复等[13]。按处置地点分类主要分为原地修复技术和异地修复技术。

3.2.1 原地修复技术

原地修复技术包含原地异位修复技术和原地原位修复技术。原地异位修复技术是将地块污染土壤进行挖掘清理，在地块范围内完成对土壤中污染物的处理，并尽可能在地块内资源化利用。原地原位修复技术是对地块内污染土壤不进行挖掘或清理，采用物化或生物方法直接对地下环境中的土壤有机污染物进行处理，或采用物理方法对污染区域进行隔离工程处理。修复工程基本在地块范围内完成，污染土壤在修复过程中以及修复结束后都不离开地块，可有效避免污染土壤挖掘、转移处理可能造成的二次污染。

3.2.2 异地修复技术

异地修复技术是将污染介质移动至该地块以外区域进行处置的技术。与原位或原地处理相比，因涉及污染土壤的挖掘清理、运输、异地堆置和处理，容易造成二次污染。必须在污染土壤转运、存放、处理、处置的全过程进行严格监督，对管理上的要求较高。

从本地块污染特征上来看，土壤污染物为重金属，污染范围几乎覆盖全场。污染土修复结合地块开发规划，采取原地异位修复，对地块内规划开挖深度范围内的污染土壤全部清挖。

3.3 土壤修复防护要求

地块内进行土壤修复工程时严格执行水、气、声污染防护措施，避免二次污染问题。同时，为避免带来次生的环境问题，要求在工程施工过程中，加强安全防护设计。

地块后期安全管理要求地块不能在修复后立刻投入开发利用，因此要求施工单位在修复工程结束后对地块进行安全管理，如建立地块隔离设施、设置警示牌、要求管理人员24 h值守和防止社会人群入场等。

土壤修复过程需要用到药剂等化学品，要求统一贮存于相应车间内，分区存放，设置围堰和安全警示牌；明确化学品的名称、最大贮存规模、成份、危害以及人身接触后的应急处理措施；建立化学品档案，明确记录来源、入场数量、使用数量和去向、暂存量等；明确责任人、配备安全防护、处理设施。

3.4 地块后期管理与监测要求建议

贯彻执行有关环境的法律法规及地方有关规定，做好管控区的环境保护工作，坚持预防为主、防治结合的原则。设立地方环保部门、块管理单位和值班人员的三级管理体系，对环境保护工作实施统一监督管理，同时配备与开展工作相适应的环保管理人员；在管理过程中要加强检查，及时排查环境保护相关设施存在的隐患，并将环保设施进行统一管理；对保护设施检修时，要对其处理或产生的污染物进行安全处置，保证污染物得到有效处理和达标排放；在地块内重点区域范围内设置至少2个土壤监测点位，其中至少1个为深层点位，深度应至风化岩层；在地块东、南、北地势坡向下方向10m处分别设置1个土壤深层点位，深度应至风化岩层，用以控制因雨水冲刷、下渗等导致土壤中污染物发生的迁移变化；长期监测频次设为每半年1次，并及时向监管部门汇报监测结果。

参考文献

[1] 陈志明, 王玉军, 于淼, 等. 某电镀厂附近土壤铬污染及植物富集特征研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(19): 363-368.

[2] 杭小帅, 王火焰, 周健民. 电镀厂下游水体中重金属的分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2736-2742.

[3] 李姗姗, 谭光超, 彭晓晨, 等. 重要风险区域土壤重金属污染特征及来源分析[J]. 资源环境与工程, 2019, 33(4):495-498.

[4] 黄顺红. 铬渣堆场铬污染特征及其铬污染土壤微生物修复研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.

[5] 王照宜. 污染场地铬、镍、铜、镉的垂向迁移及地下水可渗透反应墙修复技术[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.

[6] 张红娣, 熊昊, 孙强国. 黄石市某化工厂周围环境铬污染现况调查研究[J]. 公共卫生与预防医学, 2009, 20(4): 70-72.

[7] 王妍. 我国有色金属工业土壤重金属污染防治的现状与对策[J]. 有色金属, 2021, 15(3):1-9.

[8] 范俊楠, 贺小敏, 陆泗进, 等. 重点行业企业周边土壤重金属污染现状及潜在生态危害评价[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(5):7-13.

[9] 徐争启, 倪师军, 庹先国, 等. 潜在生态危害指数法评

下转 114 页