

## 某涂料企业遗留生产场地污染调查及风险评估

何缘<sup>1,2†</sup>, 朱纯<sup>2</sup>, 陈志敏<sup>3</sup>, 欧阳璐<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 长沙市公共工程建设中心, 湖南 长沙 410001; 3. 长沙市国土储备中心, 湖南 长沙 410001)

**摘要:**为充分摸清某涂料企业遗留生产场地的污染情况, 评估其按最新规划用地开发后对周边环境和人体健康的风险, 开展了该生产场地的污染调查和风险评估工作。场地调查结果表明, 生产场地主要存在重金属污染, 关注污染物为 As、Cr、Cu、Zn、Pb, 未发现有机污染物, 地下水符合地下水质量标准。风险评估结果表明, 土壤中 As、Cr 通过所有途径的致癌风险和危害商分别大于可接受风险水平  $10^{-6}$  和 1, Cu、Zn 通过所有途径的危害商均小于 1。As、Cr 的致癌危害及非致癌危害均对人体健康有潜在的健康风险, Cu、Zn 的非致癌危害不会对人体健康造成危害。最后, 确定了场地污染物的土壤清理目标值为 As 50 mg/kg、Cr 400 mg/kg、Cu 300 mg/kg、Zn 500 mg/kg 和 Pb 280 mg/kg, 建议对污染的土壤采取修复措施, 确保土壤质量满足规划用地要求。

**关键词:**涂料企业; 遗留生产场地; 环境调查; 重金属; 风险评估

**中图分类号:**X82

**文献标志码:**A

## Pollution Investigation and Risk Assessment of a Production Site Left by a Coating Enterprise

HE Yuan<sup>1,2†</sup>, ZHU Chun<sup>2</sup>, CHEN Zhimin<sup>3</sup>, OUYANG Lu<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Changsha Urban Public Projects Construction Center, Changsha 410001, China;

3. Changsha Urban Land Reserve Center, Changsha 410001, China)

**Abstract:** In order to fully understand the pollution situation of the production site left by a coating enterprise and evaluate the risks to the surrounding environment and human health after the development of the site according to the latest planning, the pollution survey and risk assessment of the production site are launched. The field investigation results show that heavy metal pollution mainly exists in the production site, and the concerned pollutants are As, Cr, Pb, Cu, Zn. No organic pollution is found, and the groundwater satisfies the quality standard of groundwater. The results of risk assessment indicate that the carcinogenic risk and hazard quotient of As and Cr in soil through all pathways are higher than the acceptable risk level of  $10^{-6}$  and 1, respectively, and the total hazard quotient of Cu and Zn through all pathways are less than 1. The carcinogenic hazard and non-carcinogenic hazard of As and Cr have poten-

\* 收稿日期:2019-10-27

基金项目:湖南省长沙市工务局研发项目(QT201801-QT4), Research and Development Project of Changsha Municipal Public Works Bureau (QT201801-QT4)

作者简介:何缘(1982—),男,湖南新邵人,湖南大学博士,长沙市公共工程建设中心工程师

† 通讯联系人, E-mail: hnu17375487135@163.com

tial health risks to human health, while non-carcinogenic hazard of Cu and Zn would not cause harm to human health. Finally, the target values of soil cleanup for site pollutants are determined as As 50 mg/kg, Cr 400 mg/kg, Cu 300 mg/kg, Zn 500 mg/kg, Pb 280 mg/kg, respectively. It is suggested that remediation measures should be taken for polluted soil to ensure that the soil quality meets the requirements of planned land use.

**Key words:** coating enterprise; production site left; environmental investigation; heavy metal; risk assessment

近年来,工业企业因搬迁、关停等原因而遗留的生产场地的环境污染与风险问题受到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>. 遗留生产场地对人体健康和环境保护是一个潜在的重要威胁,尤其对于化工、冶金、火电等重污染行业<sup>[4-5]</sup>. 强化此类遗留场地的监督与管理,对于改善生态环境以及维护人体健康具有重要意义.

2004年至2012年,原国家环保总局及国家环保部相继发布了《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》、《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》等文件,对企业搬迁后原场地需要进行再开发利用的,应对原场地进行环境监测调查和风险评估<sup>[6]</sup>. 2016年5月,国务院印发《土壤污染防治行动计划》,进一步指出重污染企业的遗留生产场地,根据不同适用情况,由土地使用权人或政府负责开展调查评估<sup>[6-7]</sup>. 由此可见,开展对遗留生产场地的调查与风险评估十分必要,需要引起高度重视.

本研究中的涂料生产企业,属于化工行业,生产时间长达50多年. 若该生产场地的土壤及地下水受到污染而未进行科学治理,则按规划用地开发后会对周边环境和人体健康带来一定的风险. 因此,为了防控该涂料企业遗留生产场地的环境风险,确保原场址在开发利用后符合规划用地与环境质量标准的要求,本研究对该遗留生产场地开展了环境调查和污染场地风险评估工作,场地环境调查结果显示As、Cr、Cu、Zn、Pb均为本次风险评估的关注污染物,进一步开展了关注污染物的暴露评估和毒性评估. 最后,提出了场地土壤风险控制值及清理目标值,建议对该遗留生产场地采取土壤修复措施.

## 1 材料与方

### 1.1 研究场地概况

该涂料企业厂区的历史可追溯到1959年,1959年至1981年期间先后短暂生产过红矾钠、铬黄、铬

酸、油墨等产品. 后来,厂区停止油墨及颜料的生产,1984年建设了办公楼及宿舍区和合成树脂车间,1992年建设了色漆分子车间及金属制罐车间,1995年建设了涂料车间等,从而形成了现在的厂区布局. 厂区自2015年12月停产后处于闲置状态,之后于2016年6月关停. 目前,厂区内所有设备及大部分地上构筑物均已拆除,依据最新用地规划,该场地用地类型为二类居住用地、商住用地及公园绿地,拟作为居民小区建设用地重新利用. 场地下主要为建筑垃圾混合渣、杂填土及粉质黏土. 该生产场地位于城区,周边敏感目标较为密集. 生产场地300 m范围内存在居民小区3处,医院1座,学校1所,研究院1所,地表水体2处.

### 1.2 采样点布设和样品采集

场地污染调查分为第一阶段和第二阶段,主要依据为《场地环境调查技术导则》(HJ 25.1-2014)和《场地环境监测技术导则》(HJ 25.2-2014). 第一阶段共布置土壤采样点44处、地下水采样点5处. 其中,初查阶段12处土壤采样点(40 m×40 m 网格)、5处地下水采样点,如图1所示. 详查阶段32处土壤采样点(20 m×20 m 网格),如图2所示. 第一阶段场地调查共采集土壤样品363个,地下水样品4个. 第二阶段采样调查共布置采样点29处,主要在受污染情况较为严重的18#采样点及42#采样点周边进行加密采样,如图3所示. 采样点网格密度15 m×15 m. 第二阶段场地调查共采集土壤及废渣样品304个. 每个采样点取样深度分别为0~50 cm、50~100 cm、100~150 cm、150~200 cm、200~250 cm、250~300 cm、300~400 cm、400~500 cm、500~600 cm、600~700 cm、700~800 cm、800~900 cm和900~1 050 cm.

### 1.3 土壤及地下水检测指标

第一阶段调查,土壤检测指标有重金属8项(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Zn、Ni、Pb)、氧化物、挥发性有机物25项、半挥发性有机物20项和土壤理化性质. 第一阶段调查选取地下水检测指标34项,为pH、溶解

性总固体、高锰酸盐指数、氨氮、铅、总铬、六价铬、镉、砷、汞、铜、锌、锰、镍、钴、钼、钒、氯化物、挥发性酚类、石油类、氟化物、氰化物、硫酸盐、磷酸盐(以P计)、硝酸盐(以N计)、氯甲苯、二氯苯、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、苯乙烯、六氯苯、总大肠菌群。

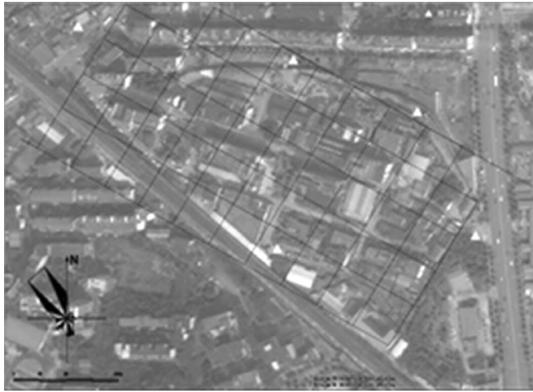


图1 初查阶段采样布点

Fig.1 Sampling points in preliminary investigation stage



图2 详查阶段采样布点

Fig.2 Sampling points in detailed investigation stage

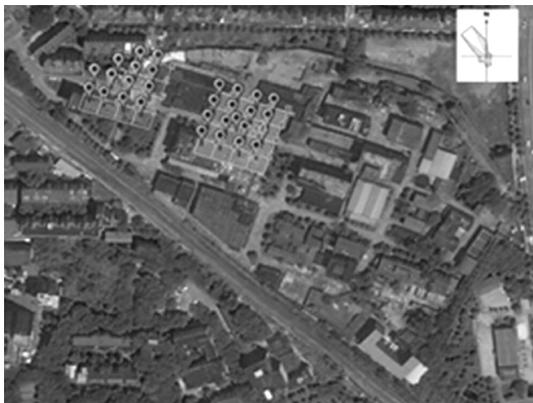


图3 第二阶段场地调查布点

Fig.3 Sampling points in the second stage

第二阶段调查,土壤检测项目有无机类:As、Cr、Pb、Zn、Cu、Cr<sup>6+</sup>,共计6项;有机类:苯、甲苯、二甲苯,

共计3项。

#### 1.4 环境质量评价标准

本次评估的场地规划为居住及绿化用地,环境质量评价参考的标准有:《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)、《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350-2007)、《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)和《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011)<sup>[8-11]</sup>。

#### 1.5 风险评估方法及内容

根据该区域未来的用地规划,该场地规划为居住和绿化用地,均属于敏感用地。本次风险评估主要依据《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)来进行<sup>[12]</sup>,风险评估的工作内容包括以下几个方面:

- 1) 筛选关注污染物,进行土壤的危害识别;
- 2) 确定关注污染物暴露途径,计算敏感用地土壤暴露量;
- 3) 确定关注污染物致癌效应及非致癌效应毒性参数;
- 4) 计算关注污染物致癌风险及危害商,进行风险评估结果不确定性分析;
- 5) 推导评估范围内土壤和地下水风险控制值及土壤清理目标值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 危害识别

#### 2.1.1 场地污染识别

遗留生产场地的用地规划为居住及绿化用地等,无工业用地及仓储用地。规划为绿化用地的区域属于《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350-2007)中的II类用地。规划为居住用地的区域,可参照《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350-2007)中规定的I类用地类型。根据厂区土壤的采样检测结果,对照《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350-2007)中B级标准,土壤中含有的重金属As、Cr、Cu、Zn、Pb均有不同程度的超标,未发现有机物污染情况。As、Cr、Pb超标区域集中在厂区西北角,主要是因为其生产车间在五六十年来生产过红矾钠、铬黄等无机颜料产品,对土壤可能造成了一定污染。根据地下水监测结果,该生产场地内及周边的地下水目前未受到重金属及有机污染物的污染。

#### 2.1.2 确定关注污染物

As、Cr、Cu、Zn、Pb 5种重金属在土壤中的含量均

超过了《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350-2007)中 B 级标准.同时,参照《土壤环境质量 建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)中第一类建设用土壤污染风险筛选值,可以确定 As、Cr、Cu、Zn、Pb 均为本次风险评估的关注污染物.具体见表 1.

同时,根据《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)的适用范围,该导则不适用于铅污染的风险评估,因此,本评估的后续仅对 As、Cr、Cu、Zn 进行致癌风险、危害商及风险控制值的计算.铅的风险启动值的计算采用敏感用地下基于血铅的土壤风险控制值.由于该地块属地没有相关的地方污染场地风险评估标准等,故参考较为严格的浙江省地方标准《污染场地风险评估技术导则》(DB 33/T 892-2013)对铅的土壤风险控制值进行评估.

表 1 风险评估关注污染物

Tab.1 Pollutants concerned in risk assessment

污染物名称	检测最高质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	GB 36600-2018 第一类建设用土壤污染风险筛选值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	HJ 350-2007 B 级标准/(mg·kg <sup>-1</sup> )	是否列为关注污染物
As	384	20	80	是
Cr	10 200	—	610	是
Cu	651	2 000	600	是
Zn	2 400	—	1 500	是
Pb	4 340	400	600	是

## 2.2 暴露评估

### 2.2.1 暴露情景分析

As、Cr 的致癌和非致癌性兼备,既评估其致癌风险,又评估其非致癌危害<sup>[13]</sup>;Cu、Zn 为非致癌性,只评估其非致癌危害.根据场地的规划用地类型,本次评估按照敏感用地提出各污染物的土壤暴露量.

### 2.2.2 暴露途径

本次风险评估的暴露途径分析主要从以下 3 个方面进行.

#### 1)关注污染物特性

根据场地环境调查结果和场地监测报告,场地周边土壤中 As、Cr、Cu、Zn、Pb 均有超过评价标准的现象,厂区外围及厂区内地下水污染物中无重金属超标.本次关注的 As、Cr、Cu、Zn、Pb 均属于重金属污染物,根据其理化性质,该 5 种污染物均为非挥发性

重金属.同时,考虑到受降雨淋滤作用,本场内土壤中的污染物存在向地下水或周边水体迁移的情况,造成地下水污染或地表水污染,进而影响场地外人群(例如场地周边居民、周边工作人员等).但根据规划,本工程场地及周边的居民饮用水源为自来水,不使用地下水,且根据对场内地下水的监测结果,场内地下水目前未受到重金属污染.因此,地下水环境对场地内及周边居民饮水不敏感,本次评估暂不考虑与地下水相关的暴露途径对人群的风险.

#### 2)污染物迁移路径

土壤中的污染物主要通过空气、地下水、地表水等介质进行迁移.《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)规定 As、Cr、Cu、Zn 均无“空气中扩散系数( $D_a$ )”和“水中扩散系数( $D_w$ )”.

综合考虑,本次风险评估的关注污染物 As、Cr、Cu、Zn 均只考虑经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物 3 种暴露途径.

### 2.2.3 土壤暴露量计算

单一污染物的致癌和非致癌效应下不同暴露途径对应土壤暴露量,根据《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)计算,结果见表 2.

表 2 各污染物经 3 种暴露途径的土壤暴露量

Tab.2 Soil exposure of each pollutant through three exposure routes

类型	关注污染物	土壤暴露量/(kg·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )		
		经口摄入土壤途径	皮肤接触土壤途径	吸入土壤颗粒物途径
致癌效应	As	1.568×10 <sup>-6</sup>	1.338×10 <sup>-7</sup>	9.730×10 <sup>-9</sup>
	Cr	1.568×10 <sup>-6</sup>	4.459×10 <sup>-9</sup>	9.730×10 <sup>-9</sup>
非致癌效应	As	1.206×10 <sup>-5</sup>	8.857×10 <sup>-7</sup>	3.689×10 <sup>-8</sup>
	Cr	1.206×10 <sup>-5</sup>	2.952×10 <sup>-8</sup>	3.689×10 <sup>-8</sup>
	Cu	1.206×10 <sup>-5</sup>	2.952×10 <sup>-8</sup>	3.689×10 <sup>-8</sup>
	Zn	1.206×10 <sup>-5</sup>	2.952×10 <sup>-8</sup>	3.689×10 <sup>-8</sup>

## 2.3 毒性评估

本次关注的 As、Cr 均属于有毒污染物,对照 HJ 25.3-2014,本次评估 As、Cr 考虑致癌效应和非致癌效应毒性参数.Cu、Zn 只考虑非致癌效应毒性参数,仅采用参考剂量来表述其非致癌效应的危害商.污染物相关毒性参数的确定参考 HJ 25.3-2014 得出,见表 3 和表 4.

表3 污染物的致癌效应毒性参数

Tab.3 Carcinogenic toxicity parameters of pollutants

关注 污染物	呼吸吸入	呼吸吸入	经口摄入	皮肤接触
	单位致癌 因子	致癌斜率 因子	致癌斜率 因子	致癌斜率 因子
	(IUR)/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{mg}^{-1}$ )	(SF <sub>i</sub> )/ ( $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ )	(SF <sub>o</sub> )/ ( $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ )	(SF <sub>d</sub> )/ ( $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ )
As	4.3	16.84	1.5	1.5
Cr	12	47.01	0.5	38.46

表4 污染物的非致癌效应毒性参数

Tab.4 Non carcinogenic toxicity parameters of pollutants

关注 污染物	呼吸吸入	呼吸吸入	经口摄入	皮肤接触
	参考质量 浓度(RfC)/	参考剂量 (RfD <sub>i</sub> )/	参考剂量 (RfD <sub>o</sub> )/	参考剂量 (RfD <sub>d</sub> )/
	( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	( $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ )	( $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ )	( $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ )
As	$1.5 \times 10^{-5}$	$3.83 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4}$
Cr	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.55 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-5}$
Cu	$1.5 \times 10^{-3}$	$2.55 \times 10^{-4}$	0.04	0.04
Zn	1.175	0.3	0.3	0.3

## 2.4 风险表征

### 2.4.1 污染物致癌风险及危害商

根据表层土壤 0~50 cm 的污染物监测数据进行风险表征,风险表征计算所用的污染物浓度参数  $C_{\text{sur}}$  取值,采用所有采样点浓度数据 95% 置信区间的上限值进行计算. Cu、Zn 均不计算致癌风险,仅计算其危害商(非致癌风险值).

#### 1) 土壤中单一污染物致癌风险

敏感用地方式下,单一污染物的致癌风险及总致癌风险计算结果见表 5.

表5 污染物的致癌风险

Tab.5 Carcinogenic risk of pollutants

关注 污染物	经口摄入	皮肤接触	吸入土壤	总计
	土壤途径的 致癌风险	土壤途径的 致癌风险	颗粒物途径 的致癌风险	
As	$2.06 \times 10^{-5}$	$1.76 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-6}$	$2.38 \times 10^{-5}$
Cr	$2.22 \times 10^{-4}$	$4.86 \times 10^{-5}$	$1.30 \times 10^{-4}$	$4.01 \times 10^{-4}$

敏感用地方式下,对照 HJ 25.3-2014 规定的可接受致癌风险  $10^{-6}$ ,在调查场地表层土壤中,As、Cr 污染物通过经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒物 3 种途径的总致癌风险均大于  $10^{-6}$ . 场地内 As、Cr 污

染物的致癌危害对人体健康有潜在的健康风险. As、Cr 污染物的总致癌风险水平主要体现在 Cr 污染物.

#### 2) 土壤中单一污染物危害商

污染物的危害商如表 6 所示.

表6 污染物的危害商

Tab.6 Hazard quotient of pollutants

关注 污染物	经口摄入	皮肤接触	吸入土壤	总计
	土壤途径 的危害商	土壤途径 的危害商	颗粒物途径 的危害商	
As	1.76	0.13	0.42	2.31
Cr	5.70	1.07	2.05	8.82
Cu	$2.9 \times 10^{-2}$	$7.2 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$4.3 \times 10^{-2}$
Zn	$1.4 \times 10^{-2}$	$3.5 \times 10^{-5}$	$4.4 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-2}$

对照 HJ 25.3-2014 规定的可接受危害商 1,在调查场地表层土壤中,As、Cr 污染物通过经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒物 3 种途径的总危害指数均大于 1; Cu、Zn 污染物通过经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒物 3 种途径的总危害指数均小于 1. As、Cr 污染物的非致癌危害对人体健康有潜在的健康风险; Cu、Zn 污染物的非致癌危害均低于 1,不会对人体健康造成危害. As、Cr 污染物的非致癌危害风险主要体现在 Cr 污染物.

### 2.4.2 不确定性分析

#### 1) 关注污染物和暴露途径风险贡献率分析

根据表 5 和表 6 的各污染物经不同暴露途径致癌风险和非致癌风险危害商的计算结果,评估区域内土壤中 As、Cr 污染物经不同暴露途径的致癌风险和非致癌风险贡献率,统计结果见表 7.

土壤中,As 污染物对于致癌风险的贡献率较高,Cr 污染物对于非致癌风险的贡献率较高. 经口摄入土壤暴露途径对于致癌风险与非致癌风险的贡献率均较高. 制定场地土壤污染风险管理和修复方案过程中,应重视经口摄入土壤途径及 As、Cr 污染物的影响.

#### 2) 模型参数敏感性分析

Cr 污染物经口摄入土壤和吸入土壤颗粒物的致癌风险及非致癌风险的贡献率均超过 20%,As 污染物经口摄入土壤途径的致癌风险及非致癌风险的贡献率均超过 20%,因此,As、Cr 污染物均应进行人群和该途径相关参数的敏感性分析. 敏感性分析结果见表 8.

表 7 不同暴露途径的致癌风险及非致癌风险贡献率

**Tab.7 Contribution rate of different exposure pathways to cancer risk and non-carcinogenic risk** %

暴露途径	致癌风险贡献率				单一暴露途径 所有污染物 贡献率	暴露途径	非致癌风险贡献率				单一暴露途径 所有污染物 贡献率
	As	Cr	Cu	Zn			As	Cr	Cu	Zn	
经口摄入土壤	86.55	55.36	—	—	57.11	经口摄入土壤	76.19	64.63	67.44	99.44	67.07
皮肤接触土壤	7.39	12.12	—	—	11.85	皮肤接触土壤	5.63	12.13	0.17	0.25	10.73
吸入土壤颗粒物	6.06	32.42	—	—	30.94	吸入土壤颗粒物	18.18	23.24	32.29	0.31	22.20
污染物经所有暴露途径的贡献率	56.03	43.97	—	—	100	污染物经所有暴露途径的贡献率	20.65	78.84	0.38	0.13	100

表 8 敏感性分析结果  
Tab.8 Sensitivity analysis result

类型	参数			暴露途径	致癌效应-敏感性 比值 SR/%		非致癌效应-敏感性 比值 SR/%	
	参数名称	变化前	变化后		Cr	As	Cr	As
		参数值 P <sub>1</sub>	参数值 P <sub>2</sub>					
人群 相关 参数	成人平均 体重 BW <sub>a</sub>	56.8	59.64	经口摄入土壤	-96.29	-96.29	-101.2	-94.83
				皮肤接触土壤	-45.67	-32.26	-47.62	-50
				吸入土壤颗粒物	0	0	0	0
	成人暴露 期 ED <sub>a</sub>	25	26	经口摄入土壤	107.8	99.72	104.2	107.8
				皮肤接触土壤	97.03	100.8	119	62.5
				吸入土壤颗粒物	90.1	90.67	94	104.7
成人暴露 频率 EF <sub>a</sub>	250	263	经口摄入土壤	102.2	97.9	100.2	107.8	
			皮肤接触土壤	101	108.6	91.6	147.9	
			吸入土壤颗粒物	0	0	0	0	
与暴露 途径 相关的 参数	每日摄入土壤量 OSIR <sub>a</sub>	100	105	经口摄入土壤	106.3	99.04	83.3	103.4
	每日吸入空气体积 DAIR <sub>a</sub>	14.5	15.2	吸入土壤颗粒物	0	0	0	0
	皮肤表面土壤粘附 系数 SSAR <sub>a</sub>	0.2	0.21	皮肤接触土壤	100.5	112.9	95.2	100

由表 8 可知,成人平均体重的变化,对经口摄入受 Cr 污染的土壤产生的非致癌风险影响较大;成人暴露期的变化,对经皮肤接触受 Cr 污染的土壤产生的非致癌风险影响较大;成人暴露频率的变化,对经皮肤接触受 As 污染的土壤产生的非致癌风险影响较大;每日摄入的土壤量的变化,对 Cr 污染物经口摄入土壤途径产生的致癌风险影响较大;每日吸入空气体积的变化,对各污染物经吸入土壤颗粒物途径产生的致癌风险及非致癌风险均无影响;皮肤表面土壤粘附系数的变化,对 As 污染物经皮肤接触土壤途径产生的致癌风险影响较大。

污染场地风险评估结果存在不确定性. 不确定性主要来源于以下几个方面:

1)模型参数.评估中的模型参数大多采用默认参数作为参数值,默认参数的设定均需考虑最保守的状态(即最严格控制风险)<sup>[4]</sup>,因而由此计算的关注污染物的风险控制值可能比较严格。

2)人群活动方式.人群活动方式决定着人群的暴露频次、暴露周期、暴露量等主要参数.游客及居民的暴露频次和暴露周期等的不确定性也会给评估结果带来一定的不确定性。

3)食物链暴露.土壤中重金属污染物通过食物链对人体也会产生很大的危害<sup>[15-16]</sup>,主要针对的是土壤重金属污染物直接接触、经口摄入、吸入人体的情况.该场地规划后用于住宅和绿化,不再种植水稻、蔬菜等,若在实际开发过程中,这种情况发生改变,也会导致评估结果存在一定的不确定性.

2.5 风险控制值及土壤清理目标值

2.5.1 计算场地土壤风险控制值

1)场地土壤的风险控制值

基于单一污染物可接受致癌风险水平  $10^{-6}$  和可接受危害商 1,计算单一污染物所有暴露途径的风险控制值,具体见表 9.通过计算所得的土壤风险控制值对应的可接受风险指污染物全部可被人体所吸收利用情况下污染物引起的风险,实际应用时应考虑当地土壤中污染物的背景含量及目前我国土壤重金属污染修复的实际水平,所计算的风险控制值仅为场地土壤清理行动值的确定提供科学依据,而并非最终的土壤清理目标值.

表 9 污染物的计算风险控制值

Tab.9 Calculated risk control value of pollutants

关注 污染物	致癌效应的风险控制值 /( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	非致癌效应的风险控制值 /( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
As	0.37	3.79
Cr	0.71	32.14
Cu	—	447.63
Zn	—	4 947.19

2)土壤中铅允许含量计算

按照以 IEUBK 默认参数及设定的除土壤以外的铅含量<sup>[17-18]</sup>,不论在绿地用地方式和住宅用地方式下,以 0~6 岁儿童为对象,儿童血铅质量浓度超过  $10\ \mu\text{g}/\text{dL}$  的比例低于 5%,儿童血铅几何标准偏差 1.6,推算土壤中铅的允许含量.假设规划后,场地空气达到环境空气质量标准: $1.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,土壤中铅质量分数应达到的标准为  $301\ \text{mg}/\text{kg}$ .

3)保护地下水的土壤风险控制值

土壤中 As、Cr、Cu、Zn 污染物可迁移进入地下水,保护地下水的土壤风险控制值计算公式如下:

$$\text{CVS}_{\text{pgw}} = \frac{\text{MCL}_{\text{gw}}}{\text{LF}_{\text{sgw}}} \quad (1)$$

式中: $\text{CVS}_{\text{pgw}}$  为保护地下水的土壤风险控制值, $\text{mg}/\text{kg}$ ; $\text{MCL}_{\text{gw}}$  为地下水中污染物的最大质量浓度限值, $\text{mg}/\text{L}$ ,取值参照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017),As 为  $0.05\ \text{mg}/\text{L}$ ,Cr 为  $0.05\ \text{mg}/\text{L}$ ,Zn 为  $1.0\ \text{mg}/\text{L}$ ,Cu 为  $1.0\ \text{mg}/\text{L}$ ; $\text{LF}_{\text{sgw}}$  为土壤中污染物进入地下水的淋溶因子, $\text{kg}/\text{L}$ .

经计算,土壤中 As、Cr、Zn、Cu 污染物迁移进入地下水中,保护地下水的土壤风险控制值为 As  $0.034\ \text{mg}/\text{kg}$ ,Cr  $0.029\ \text{mg}/\text{kg}$ ,Cu  $0.63\ \text{mg}/\text{kg}$ ,Zn  $0.63\ \text{mg}/\text{kg}$ .

2.5.2 分析确定土壤风险控制值

1)土壤风险控制值

根据上述计算结果,各污染物的计算土壤风险控制值及相关标准见表 10.

表 10 土壤风险控制值的选择与确定

Tab.10 Selection and determination of soil risk control values  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

类型	污染场地的计算 风险控制值	DB11/T811-2011 标准值		确定的土壤 风险控制值
		住宅	公园与绿地	
As	0.37	20	20	0.37
Cr	0.71	250	800	0.71
Cu	447.63	600	700	447.63
Zn	4947.19**	3 500	5 000	3500
Pb*	301	400	400	301

注:\* 铅的土壤风险控制值按居住敏感用地方式进行计算;\*\* 计算得到的锌的土壤风险控制值远高于《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350-2007)中 B 级标准  $1\ 500\ \text{mg}/\text{kg}$ 、场地内实际监测的最大值  $2\ 400\ \text{mg}/\text{kg}$  及厂区外对照点的最大值  $1\ 450\ \text{mg}/\text{kg}$ ,因此采用《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011)住宅类的土壤筛选值作为本次评估场地锌污染物的土壤风险控制值.

2)保护地下水的土壤风险控制值

考虑该区域场地规划用地类型和场地周边的实际用地类型,本场地的污染治理充分考虑对该区域地下水的保护,其地下水质量按《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) III 类地下水质量指标进行保护.如表 11 所示,将保护地下水的土壤风险控制值计算结果与该标准对照,以确定最终的取值,铅的取值则参考该标准值.

表 11 保护地下水的土壤风险控制值

Tab.11 Soil risk control value of groundwater protection  
mg·L<sup>-1</sup>

类型	GB/T 14848-2017 III 类标准值	保护地下水的 土壤风险控制值
As	0.01	0.034
Cr(VI)	0.05	0.029
Cu	1.00	0.63
Zn	1.00	0.63
Pb	0.01	0.01

2.5.3 土壤清理目标值的确定

本次风险评估确定的土壤清理目标值仅作为后续土壤修复方案设计阶段确定土壤修复目标值的主要参考值,并不直接作为土壤修复目标值.本次土壤清理目标值的选择主要考虑如下几个方面:

- 1) 基于确定的土壤风险控制值;
- 2) 保护地下水的土壤风险控制值;

3) 区域土壤背景值资料.本次采样过程中在现场 4 个方位对照点采样检测的土壤重金属质量浓度比该属地的重金属背景值高,因此,背景值采用该属地土壤背景值.

4) 我国已颁布的相关环境标准限定值及地方标准.

综上所述,本次评估土壤各污染物的清理目标值确定数据见表 12.

表 12 污染物的土壤清理目标值

Tab.12 Soil cleaning target values for pollutants

污染物	敏感用地方式下 清理目标值/(mg·kg <sup>-1</sup> )
As	50
Cr	400
Cu	300
Zn	500
Pb	280

3 结 论

1) 本次评估的涂料企业遗留生产场地规划为居住及绿地.该场地的关注污染物主要为 As、Cr、Cu、

Zn 和 Pb,污染物的主要暴露途径为:经口摄入土壤途径、皮肤接触土壤途径和吸入土壤颗粒物途径.

2) 场地土壤污染物的致癌风险及非致癌危害商的结果表明,土壤中 AS、Cr 污染物经过所有途径的总致癌风险和危害商分别大于可接受风险值 10<sup>-6</sup> 和 1,Cu、Zn 污染物经过所有途径的危害商均小于 1.因此,本项目 As、Cr 污染物的致癌危害及非致癌危害均对人体健康有潜在的健康风险,Cu、Zn 污染物的非致癌危害不会对人体健康造成危害.

3) 评估场地污染物的土壤清理目标值为 As 50 mg/kg,Cr 400 mg/kg,Cu 300 mg/kg,Zn 500 mg/kg,Pb 280 mg/kg.本次风险评估确定的土壤清理目标值仅作为后续土壤修复方案设计阶段确定土壤修复目标值的主要参考值,并不直接作为土壤修复目标值.

参考文献

[1] 刘颖,周念清.复合污染场地污染特征分析及健康风险评估[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(7):934—943.  
LIU Y,ZHOU N Q. Pollution characteristics and health risk of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in a co-contaminated site [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2018,46 (7):934—943. (In Chinese)

[2] 廖晓勇,崇忠义,阎秀兰,等.城市工业污染场地:中国环境修复领域的新课题[J]. 环境科学,2011,32(3):784—794.  
LIAO X Y,CHONG Z Y,YAN X L,*et al.* Urban industrial contaminated sites:a new issue in the field of environmental remediation in China [J]. Environmental Science,2011,32 (3):784—794. (In Chinese)

[3] REN W,GENG Y,MA Z,*et al.* Reconsidering brownfield redevelopment strategy in China's old industrial zone;a health risk assessment of heavy metal contamination [J]. Environmental Science & Pollution Research,2015,22(4):2765—2775.

[4] REN W,XUE B,GENG Y,*et al.* Inventorying heavy metal pollution in redeveloped brownfield and its policy contribution:Case study from Tiexi District,Shenyang,China [J]. Land Use Policy,2014,38:138—146.

[5] ZHOU X,WANG X. Impact of industrial activities on heavy metal contamination in soils in three major urban agglomerations of China [J]. Journal of Cleaner Production,2019,230:1—10.

[6] 刘乙敏,李义纯,肖荣波.西方国家工业污染场地管理经验及其对中国的借鉴[J]. 生态环境学报,2013,22(8):1438—1443.  
LIU Y M,LI Y C,XIAO R B. Management experience of industrial contaminated sites in western countries and its implications for China [J]. Ecology and Environmental Sciences,2013,22(8):1438—

1443. (In Chinese)
- [7] 崔轩,李志涛,王夏晖,等. 污染地块再开发利用准入管理机制探讨[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(1): 118—123.  
CUI X, LI Z T, WANG X H, *et al.* Study on the admittance management mechanism for the redevelopment of contaminated sites [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41 (1): 118—123. (In Chinese)
- [8] GB 36600-2018 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].北京:中国环境出版集团, 2018: 2—3.  
GB 36600-2018 Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of development land [S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2018: 2—3. (In Chinese)
- [9] HJ 350-2007 展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)[S].北京:中国环境出版集团, 2007: 1—2.  
HJ 350-2007 Standard of soil quality assessment for exhibition sites [S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2007: 1—2. (In Chinese)
- [10] GB/T 14848-2017 地下水质量标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2017: 1—2.  
GB/T 14848-2017 Standard for groundwater quality [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1—2. (In Chinese)
- [11] DB11/T 811-2011 场地土壤环境风险评价筛选值[S].北京:北京市生态环境局, 2011: 1—2.  
DB11/T 811-2011 Screening levels for soil environmental risk assessment of sites [S]. Beijing: Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau, 2011: 1—2. (In Chinese)
- [12] HJ 25.3-2014 污染场地风险评估技术导则[S].北京:中国环境出版集团, 2014: 1—2.  
HJ 25.3-2014 Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites [S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2014: 1—2. (In Chinese)
- [13] WANG M, HAN Q, GUI C, *et al.* Differences in the risk assessment of soil heavy metals between newly built and original parks in Jiaozuo, Henan Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 676: 1—10.
- [14] 李飞, 王晓钰, 李雪. 土壤重金属的健康风险评价及其参数不确定性的量化研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 119—126.  
LI F, WANG X Y, LI X. Health risk assessment for heavy metals in soils and quantitative study of parameter uncertainty [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(6): 119—126. (In Chinese)
- [15] LIU J, CAO L, DOU S. Trophic transfer, biomagnification and risk assessments of four common heavy metals in the food web of Laizhou Bay, the Bohai Sea [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 508—522.
- [16] RAI P K, LEE S S, ZHANG M, *et al.* Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management [J]. *Environment International*, 2019, 125: 365—385.
- [17] LI Y, HU J, WU W, *et al.* Application of IEUBK model in lead risk assessment of children aged 61—84 months old in central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 673—682.
- [18] BRIAN G, ALAN T, MARC S. Lead exposure in young children over a 5-year period from urban environments using alternative exposure measures with the US EPA IEUBK model - A trial. [J]. *Environmental Research*, 2018, 161: 87—96.