

铅冶炼退役场地土壤污染状况调查与风险评估

鲁春艳¹ 廖衡峰¹ 周正伟² 钟阳宇¹ 胡卫文¹

(1. 湖南水口山有色金属集团有限公司, 湖南 衡阳 421200;

2. 中国恩菲工程技术有限公司长沙分公司, 湖南 长沙 410012)

[摘要] 以湖南省某退役铅冶炼厂为研究对象,通过调查地块历史变迁、工艺流程、产污环节、现场踏勘,选择采样点,对土壤、地下水、废渣及构筑物表面附着物进行污染调查。污染调查结果显示,该地块土壤污染超标因子为砷、铅、镉、汞和锑;地下水污染超标因子包括砷、镉、镍、锑、铅、锌、铊、钴、铍等重金属及氟化物;这与历史生产过程中的排污、滴漏跑冒、扬散、废渣无组织填埋等相关。风险评估结果表明,砷、镉、汞、铅的含量大于地块土壤风险控制值,超过可接受水平,存在健康风险。砷、镉、铅、汞、锑的建议修复目标值为60 mg/kg、79.6 mg/kg、1 327 mg/kg、38 mg/kg、180 mg/kg。

[关键词] 重金属污染;土壤污染;地下水污染;退役铅冶炼;污染场地调查;健康风险评估

[中图分类号] X53; X758

[文献标志码] B

[文章编号] 1008-5122(2022)03-0061-08

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2022.03.014

0 前言

随着我国社会经济的高速发展,以及工业化进程的深入推进和升级,我国产业转型速度加快,大量工业企业被关停,但因环保意识薄弱、环保措施不当,遗留了大量受污染工业场地,涉及土壤、地下水、废渣等^[1-3]。铅冶炼厂作为冶炼工业历史中重要的一环,为我国工业发展作出了巨大贡献,但同样面临关停等问题^[4-6]。遗留污染场地污染状况严重,亟须进行土壤污染状况调查、评价及修复工作,以控制污染物在可接受水平内,消除其环境潜在风险,确保场地遗留污染不会在后续开发利用过程中对人体健康产生危害^[7-9]。

湖南某退役铅冶炼场地以重金属污染为主,而重金属污染具有普遍性、隐蔽性和不可逆性,对人体健康具有显著威胁^[10-13]。依据《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ 25.1—2019)及《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)

等导则规范,本文对该场地进行走访调查、样品采集检测,分析该场地主要污染物种类及污染程度,并提出风险评估依据,为土壤环境污染防治和场地后续开发利用提供有力支撑。

1 材料与方 法

1.1 场地概况

研究场地主要用于铅冶炼,厂区主要工作区域包括电铅电解车间、电铅成品车间、反射炉车间、磁选车间、原料库房、产品库房和材料库房、车队厂房、办公生活区。厂区平面布置如图1所示。进行地块现场踏勘时,厂区已封闭管理,建构筑物及设备基本维持原状,且未发现明显污染痕迹及异味。根据该土地利用规划,该地作为博物馆建设用地。

根据地勘单位调查结果分析,本地块地层分布自上而下分别为:杂填土 Q_4^{ml} ;工业废渣 Q_4^{ml} ;第四系淤积 Q^l 淤泥;第四系冲洪积 Q^{al+pl} 粉质黏土;第四系冲洪积 Q^{al+pl} 含砾粉质黏土;第四系冲洪积 Q^{al+pl} 粉细砂。

1.2 污染识别

关停前,该冶炼厂污染源主要为电铅生产线和磁选生产线等生产工艺在以往各个历史生产时期的排放污染物,主要包括阳极熔铅锅废气、阳极泥库房废气、精铅熔铅锅废气、铜浮渣反射炉烟气以及铜浮渣反射炉进料口、出铅口、出渣口等处产生的废气,

[收稿日期] 2022-01-27

[作者简介] 鲁春艳(1978—),女,湖北公安人,硕士,化学工程师,主要从事环保工程管理、环保技术管理、环保现场管理、环境监测管理等工作。

[引用格式] 鲁春艳,廖衡峰,周正伟,等.铅冶炼退役场地土壤污染状况调查与风险评估[J].有色冶金节能,2022,38(3):61-68.

系统房以及精练段应急物质仓库对面。

1.4 监测项目和分析方法

根据现场调查情况及相关资料,确定土壤样品检测项目为《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)要求的45项基本项目、总石油烃、多氯联苯、氟化物、锌、镉、铜、砷、锑和多环芳烃等;地下水检测项目为理化指标(11项)、重金属(10项)、VOCs(26项)、SVOCs(10项);废渣及构筑物附着物样品进行水浸和酸浸,检测项目包括pH值以及锌、砷、镉、铬、铜、铅、汞、镍等重金属含量。样品检测分析方法均参考国家标准测试方法、行业标准方法,并由具有CMA资质的实验室进行检测,且出具检测报告。

1.5 评价方法

根据当地政府土地利用规划,本地块未来作为博物馆用地,即二类用地。土壤筛选值选用GB 36600—2018中第二类用地土壤筛选值作为评价依据,土壤中浓度超过筛选值的污染物将被筛选出作

为关注污染物。地下水评价标准选用《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)Ⅲ类标准。根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)进行土壤污染人体健康风险评估。

2 结果与分析

2.1 土壤检测结果

土壤检测结果见表1,全厂土壤污染分布如图3所示。由表1和图3可知,该土壤以重金属超标为主,其中砷、铅、镉、汞、锑等5种重金属超第二类筛选值,且污染深度最大达到10.8 m,水平及垂直分布范围广。根据点位检测结果及厂区资料可知,该冶炼厂区污染物与生产原材料有较强相似性,表明在生产过程中发生一定跑冒滴漏或物料运输散落,导致污染物渗入土壤,形成污染;此外,结合厂区历史变迁,污染分布与废渣填埋等有关。由于该冶炼厂历史久远,此前工作人员环保意识普遍不高,从而导致厂区污染范围较大。

表1 土壤污染检测结果

检测项目	样品个数	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	筛选值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	超筛选值 个数	超筛选值 率/%	最大值超 筛选值倍数
砷	249	1.64	4 520	280.28	60	95	38.15	74.33
镉	246	0	2 020	74.57	65	49	19.92	30.08
铅	251	16.8	47 860	1 855.23	800	82	32.67	58.83
汞	222	0.035	1 030	9.95	38	6	2.7	26.11
锑	102	0	6 470	81.40	180	13	12.75	34.94

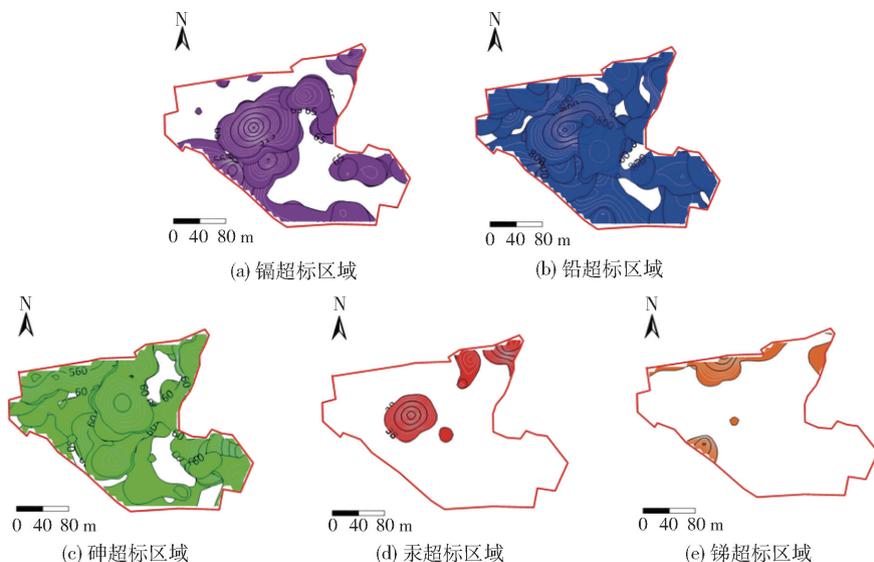


图3 全厂土壤污染分布图

2.2 地下水检测结果

本次研究共布置 6 口地下水监测井和 1 口地下水对照井以监测厂区地下水污染情况,检测结果见表 2。由表 2 可知,厂区地下水点位超标率为 100%,其中 pH、浑浊度、硫酸盐、硝酸盐、氨氮、亚硝酸盐、氟化物、砷、镉、镍、铅、锌、锑、铍、钴等超过《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) III 类标准,

地下水对照井检测指标皆未超标。根据检测结果,厂区地下水污染主要集中于重金属及氟化物等因子,地下水重金属及氟化物超标分布如图 4 所示。重金属及氟化物超标与厂区土壤污染以及历史生产过程中的排污、跑冒滴漏、废渣填埋等相关,污染物通过土壤下渗至地下水。

表 2 地下水检测结果

检测指标	样品个数	最小值	最大值	平均值	III类标准值	最大超标倍数	超标个数	超标率/%
pH 值	6	5.81	7.24	6.89	$6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$	-	1	16.8
浑浊度/NTU	6	4	10	8.33	≤ 3	2.33	6	100
总硬度	6	285	1 690	665.83	≤ 450	2.76	2	33.3
氯化物/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	28.3	47.9	35.32	≤ 250	0	0	0
硫酸盐/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	323	1 982	769.83	≤ 250	6.93	6	100
耗氧量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.9	2.4	1.42	≤ 3	0	0	0
硝酸盐(以 N 计)/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.73	57	10.33	≤ 20	1.85	1	16.7
氨氮(以 N 计)/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.776	3.74	1.72	≤ 0.5	9.48	6	100
亚硝酸盐(以 N 计)/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.014	3.3	0.60	≤ 1.00	2.30	1	16.7
氟化物/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.42	18.5	4.11	≤ 1.00	17.50	4	66.7
砷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.001 9	0.039 2	0.02	≤ 0.01	2.92	4	66.7
镉/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.043	1.36	0.43	≤ 0.005	26.4	6	100
六价铬/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.006	0.016	0.01	≤ 0.05	0	0	0
汞/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.000 04	0.000 05	0.000 1	≤ 0.001	0	0	0
镍/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.003 57	0.1	0.03	≤ 0.02	4.00	3	50
铅/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.043 4	1.79	0.78	≤ 0.01	178.00	6	100
铜/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.078 1	0.759	0.37	1	0	0	0
锌/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	0.036 1	85.6	19.01	1	84.60	4	66.7
锑/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5	0.000 08	0.000 73	0.000 41	$\leq 0.000 1$	6.30	3	60
钴/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5	0.000 69	0.244	0.088 9	≤ 0.05	3.88	3	60
铍/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5	0.000 26	0.002 09	0.001 29	≤ 0.002	0.004 5	1	20
锑/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5	0.002 2	0.012 1	0.007 1	≤ 0.005	1.42	3	60

2.3 废渣检测结果与分析

该场地运行时间长,生产工段发生较大的变迁,导致土壤填埋及堆放废渣较多,范围广。废渣也是对厂区造成污染的重要隐患,其中的有害物质可通过雨水冲刷下渗至土壤及地下水,此外扬散现象也会导致污染泄露,因此采集 34 个废渣样品进行酸浸和水浸检测,以监测厂区废渣污染超标情况及探究其对土壤、地下水的污染风险。废渣样品检测结果见表 3 和表 4。结果表明,有 14 个废渣样品水浸检测值超过《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)最

高允许排放浓度。此外,有 11 个废渣样品检测值高于浸出毒性鉴别标准值。废渣污染超标分布范围如图 5 所示。

2.4 地面构筑物墙壁附着物检测结果与分析

研究发现,构筑物附着物污染超标程度较重。地面构筑物墙壁附着物检测结果见表 5 和表 6。由表 5 和表 6 可知,水浸的点位超标率为 100%,酸浸超标率为 76.92%,镉元素在水浸检测中超标率最高,为 76.92%;其次为铅和锌,超标率分别为 53.85% 和 61.54%。在酸浸结果中,镉元素超标率

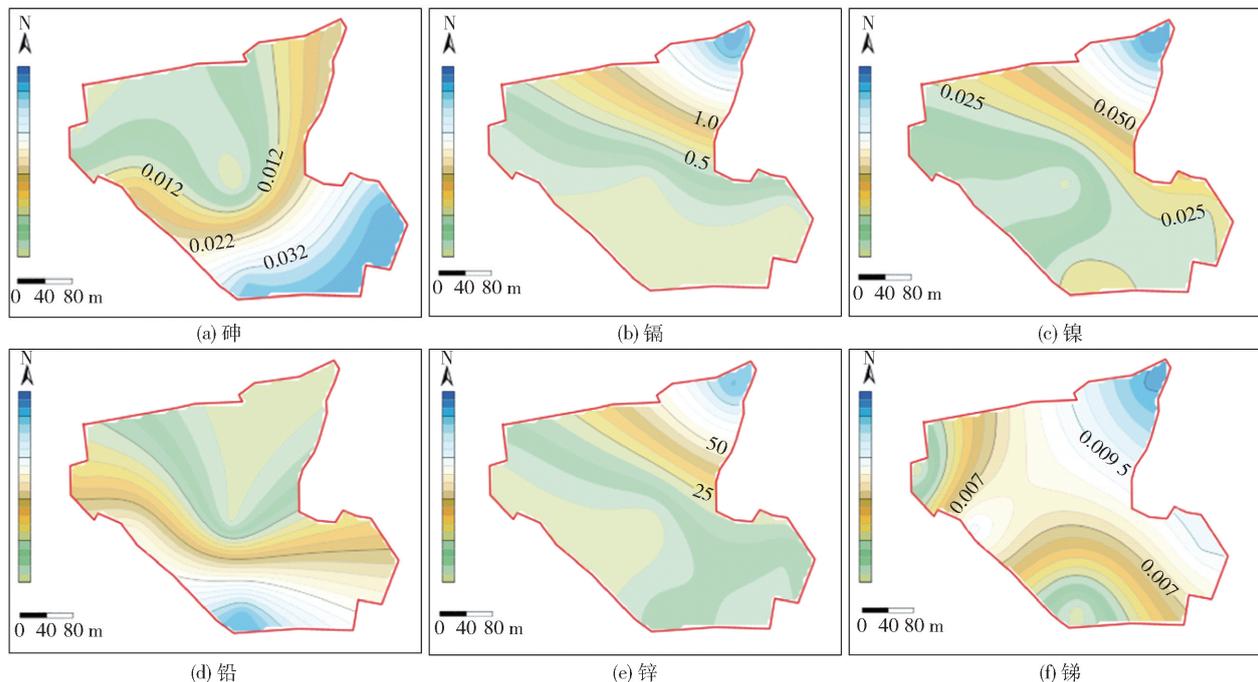


图4 地下水重金属超标分布图

表3 废渣样品水浸检测结果

检测指标	样品个数	第一类污染物最高		第二类污染物最高		超标准个数	超标率/%
		最大值	允许排放浓度/ mg·L ⁻¹	最大值	允许排放浓度/ mg·L ⁻¹		
pH	34	-	-	6~9	-	6	17.65
锌	34	24.20	-	2	-	4	11.77
砷	34	0.711	0.5	-	-	1	2.94
镉	34	1.87	0.1	-	-	7	20.59
铬(六价)	34	0.14	0.5	-	-	0	0.00
铜	34	1.29	-	0.5	-	3	8.82
铅	34	2.10	1	-	-	1	2.94
汞	34	0.00	0.05	-	-	0	0
镍	34	0.00	1	-	-	0	0

表4 废渣样品酸浸检测结果

检测指标	样品个数	最大值	浸出毒性鉴别标准值/ mg·L ⁻¹	超标准个数	超标率/%
砷	34	3.16	5	0	0.00
镉	34	12.60	1	8	23.53
铬(六价)	34	0.019	5	0	0.00
铜	34	24.60	100	0	0.00
铅	34	5.10	5	1	2.94
汞	34	0.00	0.1	0	0.00
镍	34	0.17	5	0	0.00

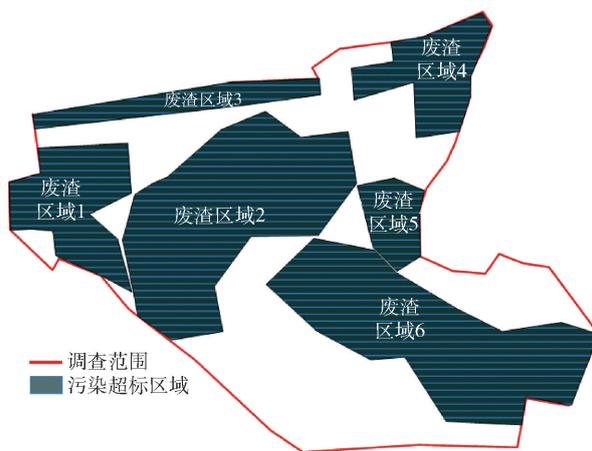


图5 废渣污染分布

表5 地面构筑物墙壁附着物水浸检测结果

检测指标	样品个数	最大值	污水综合排放标准/ mg·L ⁻¹	超标准个数	超标率/%
pH	13	-	6~9	7	53.85
铜	13	168	≤0.5	7	53.85
锌	13	289	≤2	8	61.54
铅	13	324	≤1	7	53.85
镉	13	9.5	≤0.1	10	76.92
总铬	13	1.77	≤0.5	2	15.39
汞	13	0	≤0.05	0	0
砷	13	45.9	≤0.5	6	46.15
镍	13	9	≤1	3	23.07

表 6 地面构筑物墙壁附着物酸浸检测结果

检测指标	样品个数	最大值	浸出毒性鉴别标准值/ mg·L ⁻¹	超标准个数	超标率/ %
			≤		
铜	13	97.3	≤100	0	0
锌	13	847	≤100	2	15.39
铅	13	550	≤5	6	46.15
镉	13	38.9	≤1	8	61.54
总铬	13	2.32	≤6	0	0
汞	13	0	≤0.1	0	0
砷	13	95.3	≤5	5	38.46
镍	13	13.1	≤5	1	7.69

最高,为 61.54%,其次为铅的超标率 46.15%。

3 建设用地污染风险评估

3.1 确定关注污染物

该场地地下水不作为饮用水,且地下水中汞未超标,所以地下水污染物不纳入评估范围。因此,本次风险评估范围主要针对场地内污染土壤。根据该地块土壤污染状况调查,该场地超过 GB 36600—2018 第二类用地筛选值的污染物共 5 种,分别为

砷、镉、铅、汞、镉。这些污染物对人体均有潜在危害健康的风险,因此列为本场地的关注污染物,选取特征因子最大值作为暴露浓度进行风险评估。

3.2 暴露评估

由于根据场地利用规划,本地块未来用于建设博物馆,该场地暴露情景为未来博物馆建设、运行期间工人、游客的健康风险。暴露受体为在此地块上活动的成年工人、游客。暴露途径主要为 6 种:经口摄入土壤颗粒物、皮肤接触土壤颗粒物、吸入土壤颗粒物、吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物、吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物、吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物。由于该厂区地下水不作为饮用水,无人体暴露途径,故不需做健康风险评估。

3.3 毒性评估

毒性评估是评估人群对污染物的暴露程度与产生负面效应的可能性两者之间关系的方法。根据不同暴露途径对人体健康产生的危害效应,毒性评估包括致癌效应和非致癌效应。根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)附录 B 表 B.1 中的毒性参数,计算得到的主要毒理参数见表 7。

表 7 污染物毒性数据

污染物	经口摄入致癌斜率因子 SF ₀ / (mg/kg-d) ⁻¹	呼吸吸入单位致癌因子 IUR/ (mg/m ³) ⁻¹	经口摄入参考剂量 RD ₀ / (mg/kg-d)	呼吸吸入参考浓度 RfC/ (mg/m ³)	消化道吸收效率因子 ABS _{gi} (无量纲)	皮肤吸收因子 ABS _d (无量纲)
镉	-	-	0.000 4	0.000 300	0.150	-
砷(无机)	1.5	4.3	0.000 3	0.000 015	1.000	0.030
镉	-	1.8	0.001 0	0.000 010	0.025	0.001
汞(无机)	-	-	0.000 3	0.000 300	0.070	-

3.4 风险表征

根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)附录 C 中的风险评估模型,计算

土壤中各关注污染物单一途径的致癌风险和危害商,以及各关注污染物的总致癌风险和总危害商,结果见表 8。污染物可接受的致癌风险水平为 10⁻⁶,

表 8 地块土壤中污染物的危害风险计算结果

危害类型	污染物指标	口摄入土壤颗粒物	皮肤接触土壤颗粒物	吸入土壤颗粒物	吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物	吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物	吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物	合计
					-	-	-	
致癌风险	砷	8.44E-04	1.53E-04	4.63E-05	-	-	-	1.04E-03
	镉	-	-	1.86E-06	-	-	-	1.86E-06
非致癌危害商	砷	1.14E+01	2.07E+00	4.37E+00	-	-	-	1.78E+01
	镉	3.27E-01	7.93E-02	6.27E-01	-	-	-	1.03E+00
	汞	3.51E-01	-	6.72E-03	3.12E-01	1.49E-01	5.35E-01	1.35E+00
	镉	1.08E-01	-	-	-	-	-	1.08E-01

可接受的非致癌风险水平即目标危害商为1。由表9可知,污染场地中砷、镉致癌风险均大于 10^{-6} ,处于不可接受水平;土壤的砷、镉、汞元素非致癌危害商大于1,处于不可接受水平,锑的非致癌危害商小于1,处于可接受水平。

然而,铅在该场地是主要超标因子,由于铅对儿童认知能力和神经系统具有强烈毒性,通常认为不存在铅暴露量最低限值的安全水平,因此在对铅污染的毒性评价时不再采用RfD/RfC方法,转而采用基于受体血铅浓度水平的方法。由于本项目不涉及敏感用地,故采用ALM模型对铅进行风险评估。ALM模型评估结果表明,本地块土壤风险控制值为1 327 mg/kg,而铅暴露浓度大于该值,风险为不可接受。

3.5 风险控制值及修复目标值

根据场地健康风险评估结果,土壤中重点关注目标污染物为镉、砷、汞、铅,它们的含量均在不可接受水平,可对人体形成健康隐患,需要进行土壤修复控制值计算。计算基于致癌效应的土壤风险控制值时,采用的单一污染物可接受致癌风险为 10^{-6} ;计算基于非致癌效应的土壤风险控制值时,采用的单一污染物可接受危害商为1。根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)计算土壤风险控制值,计算结果见表9。

修复目标值选取原则为:如果计算值大于筛选值,则采用计算值作为污染土壤的修复目标值;反之,如果计算值小于筛选值,则采用筛选值作为污染土壤的修复目标值。综合风险控制值计算结果、国家相关标准和管控值统计结果,最终确定的土壤中污染物建议修复目标值见表9。

表9 土壤修复风险控制值及目标值 mg/kg

污染物	风险控制值 计算结果	国标筛选值	国标管控值	建议修复 目标值
砷	1.41	60	140	60.0
镉	79.60	65	172	79.6
铅	1 327.00	800	2 500	1 327.0
汞	23.10	38	82	38.0
锑	176.00	180	-	180.0

4 结论

1)本研究以湖南某退役铅冶炼厂区为研究对象,对该厂区进行土壤、地下水、废渣及构筑物表面

附着物进行污染调查。研究发现,该厂区土壤以重金属污染(砷、铅、镉、汞、锑)为主,水平方向污染范围广,垂直超标深度最大可达10.8 m。厂区布设的6口地下水监测井检测结果全部超过Ⅲ类水标准,重金属超标因子包括砷、镉、镍、铅、锌、铊、钴、锑、铍等,其中铅、镉超标率为100%,此外地下水氟化物、硫酸盐、氨氮等指标也出现超标情况。土壤、地下水的重金属污染均与厂区历史生产排污、发生滴漏跑冒、扬散、废渣无组织填埋等现象有直接关系。废渣也以重金属超标为主,厂区构筑物表面附着物重金属污染物超标倍数较大,污染较严重。

2)本场地土壤中主要关注污染物包括镉、铅、砷、汞、锑五种重金属。场地健康风险评估结果表明,镉、砷、汞、铅含量均在不可接受水平,其中砷、镉致癌风险均大于 10^{-6} ,土壤的砷、镉、汞元素非致癌危害商大于1,处于不可接受水平,锑的非致癌危害商小于1,处于可接受水平。经计算,土壤中砷、镉、铅、汞、锑建议修复目标值为60 mg/kg、79.6 mg/kg、1 327 mg/kg、38 mg/kg、180 mg/kg。

本地块主要污染为重金属,根据场地调查及风险评估结果结合地块用地类型,可采用固化稳定化、水泥窑等技术对污染土壤进行修复。

[参考文献]

- [1] 钱华. 工业企业搬迁污染场地的管理与对策[J]. 北方环境, 2013, 25(7): 102 - 104.
- [2] LU Y, SONG S, WANG R, et al. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China [J]. Environment International, 2015, 77: 5 - 15.
- [3] 罗泽娇, 贾娜, 刘仕翔, 等. 我国污染场地土壤风险评估的局限性[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(5): 40 - 46, 58.
- [4] 张兆虎, 薛丽洋, 曹兴, 等. 废弃铅冶炼厂及周边土壤铅分布特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2019, 55(5): 597 - 603, 609.
- [5] 莫小荣, 吴烈善, 邓书庭, 等. 某冶炼厂拆迁场地土壤重金属污染健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(4): 235 - 243.
- [6] 袁艺宁, 杨志辉, 柴立元, 等. 铅锌冶炼厂渣堆场周边土壤铅污染特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 307 - 311.
- [7] 李丽, 张兴, 李军宏, 等. 土壤污染现状与土壤修复产业进展及发展前景研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(3): 45 - 48.
- [8] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. 中国科

学院院刊, 2015, 30(4):477-483.

- [9] 陈泽雄, 张倩华, 何坤志. 工业企业搬迁遗留地块重金属污染的调查、评价及修复初探[J]. 广州化工, 2008, 36(3):62-64.
- [10] 苏畅. 关于土壤重金属污染危害分析及修复方法探讨[J]. 环境与发展, 2020, 32(3):98-99.
- [11] ZHANG W L, DU Y, ZHAI M M, et al. Cadmium exposure and its health effects: A 19-year follow-up study

of a polluted area in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 470-471:224-228.

- [12] 陈婧, 王博, 郭昱言, 等. 土壤重金属污染及其修复技术研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2010, 20(5):66-67,72.
- [13] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3):315-320,350,272.

Survey and Risk Assessment of Soil Contamination in Decommissioned Lead Smelting Site

LU Chun-yan, LIAO Heng-feng, ZHOU Zheng-wei, ZHONG Yang-yu, HU Wei-wen

Abstract: Taking a retired lead smelter as the research object, through investigating the historical changes of plots, process flow, pollution production links and site reconnaissance, appropriate sampling points were selected to conduct pollution investigation on soil, groundwater, waste residue and surface attachments of structures. Revealed by pollution survey results, the soil pollution exceedance factors are arsenic, lead, cadmium, mercury and antimony, while groundwater pollution exceedance factors include arsenic, cadmium, nickel, antimony, lead, zinc, thallium, cobalt, beryllium and other heavy metals and fluoride. This is related to pollutant discharge, leak and spill, fugitive matters as well as unplanned land-fill of slags and other activities in historical production process. The risk assessment results show that arsenic, cadmium, mercury and lead are higher than the risk control limit of the site soil, exceeding the acceptable level and posing health risks. The recommended remediation targets for arsenic, cadmium, lead, mercury and antimony are 60 mg/kg, 79.6 mg/kg, 1 327 mg/kg, 38 mg/kg and 180 mg/kg respectively.

Key words: heavy metal pollution; soil pollution; groundwater pollution; decommissioned lead smelter; contaminated site survey; health risk assessment

(上接第 56 页)

- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电力装置的继电保护和自动装置设计规范:GB/T 50062—2008[S]. 中国计划出版社, 2008.

[5] 国家能源局. 继电保护和安全自动装置通用技术条件:DL/T 478—2013[S], 2013.

[6] 国家能源局. 火力发电厂、变电站二次接线设计技术规程:DL/T 5136—2012[S], 2012.

Design of Integrated Electrical Protection System for Small Thermal Power Plant

GU Da-wei

Abstract: Taking 35 kV small thermal power plant as an example, according to the actual requirements of the local power grid, the technical indicators configuration scheme of the electrical comprehensive protection automation system was flexibly designed, and some design details of the comprehensive protection system of thermal power plants were summarized.

Key words: comprehensive protection; automation system; thermal power plant; ECMS