

长沙市固体废弃物处理场水文地质及环境效应评价

贺 勇^{1,2}, 李冰冰^{1,2}, 朱考飞^{1,2}, 李方志³, 张可能^{1,2}

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南 长沙 410083;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 3. 湖南军信环保股份有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为了解垃圾填埋场周边地下水环境污染状况, 以长沙市固体废弃物处理场周边土壤、地下水及下游水库水质为研究对象, 对研究区进行采样分析, 采用单因子污染指数法和内梅罗污染综合指数法对该垃圾填埋场周边环境重金属含量特征进行分析与风险评价。结果表明: As、Cr(VI)、Ni、Pb、Zn、Cu 重金属是填埋场周边环境中的主要污染物, 区域采样点及下游水库中重金属含量均值低于地下水质量标准Ⅲ类, 填埋场区污染状况良好; Cr(VI) 含量在 ZK1 与 R1 样品中均高于地下水质量标准Ⅲ类, 是填埋场周边地下水的主要风险污染物; ZK1~ZK4 中土壤重金属元素以 Pb、Cr(VI) 富集为主, 其达中度污染程度, 应引起重视。

关键词: 垃圾填埋场; 地下水; 重金属污染; 土壤污染; 环境效应; 健康风险评价

中图分类号: P641.4; X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)04-0110-06

Evaluation of hydrogeology and environmental effect of a municipal solid waste landfill in Changsha

HE Yong^{1,2}, LI Bingbing^{1,2}, ZHU Kaofei^{1,2}, LI Fangzhi³, ZHANG Keneng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

3. Hunan Junxin Environmental Protection Co., Ltd., Changsha Hunan 410007, China)

Abstract: In order to understand the environmental pollution of groundwater around the landfill site, the soil, groundwater and downstream reservoir water quality around the solid waste disposal site in Changsha City were taken as the research objects. The single factor pollution index method and Nemerow pollution comprehensive index method were used to analyze the heavy metal content characteristics and risk assessment of the surrounding environment of the landfill site. The results showed that as, Cr(VI), Ni, Pb, Zn and Cu were the main pollutants in the surrounding environment of the landfill site. The average content of heavy metals in the regional sampling points and the downstream reservoirs was lower than that in the groundwater quality standard class Ⅲ, and the pollution status of the landfill site was good. The content of Cr(VI) in ZK1 and R1 samples was higher than that in the groundwater quality standard class Ⅲ, which was the main risk pollutant of groundwater around the landfill site in ZK1~ZK4, Pb and Cr(VI) are the main heavy metal elements in the soil, which are moderately polluted and should be paid attention to.

Key words: landfill; groundwater; heavy metal pollution; soil pollution; environmental effect; health risks assessment

收稿日期: 2020-12-03; **修回日期:** 2021-02-19 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2021.04.015

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“化-渗耦合作用下黏土类工程屏障重金属污染物阻滞性能演变机理”(编号: 42072318)、“干湿-化学耦合作用下混合土封场覆盖系统致裂机理及气-液运移规律”(编号: 41972282); 国家自然科学基金青年基金项目“红黏土-膨润土工程屏障对重金属污染物的阻滞特性与自修复机制”(编号: 41807253); 国家重点研发计划项目“中南有色冶炼场地土壤-地下水协同修复技术与工程示范”(编号: 2019YFC1803600)、“铬渣遗留场地土壤强化生物修复技术与装备”(编号: 2019YFC1805900); 湖南省自然科学基金项目“膨润土系工程屏障对重金属污染物阻滞机理及生态修复技术”(编号: 2019JJ50763)

作者简介: 贺勇, 男, 汉族, 1987年生, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事环境地质和非饱和土力学方面的研究工作, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, heyong18@csu.edu.cn。

引用格式: 贺勇, 李冰冰, 朱考飞, 等. 长沙市固体废弃物处理场水文地质及环境效应评价[J]. 钻探工程, 2021, 48(4): 110-115.

HE Yong, LI Bingbing, ZHU Kaofei, et al. Evaluation of hydrogeology and environmental effect of a municipal solid waste landfill in Changsha[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4): 110-115.

0 引言

随着城市规模的扩张和人民生活水平的不断提高,人类所产生的生活垃圾数量逐年增加。随着填埋场库容逐渐饱和,生活垃圾从之前的填埋处理逐渐转向焚烧处理。据国家统计局统计数据,2019年我国生活垃圾清运量已达2.42亿t,而生活垃圾焚烧处理量约占清运量的50%,其高达1.21亿t(中华人民共和国国家统计局,2020)。垃圾填埋及焚烧飞灰的不合理处置加剧了环境的污染,如焚烧飞灰和垃圾填埋场中产生的渗沥液有可能扩散到地下水系统中造成区域地下水污染。重金属污染评价是对研究区环境中发生污染的可能性进行定性或定量评价。随着环境保护理念由先污染后治理转向污染前的预测和有效管理,垃圾填埋场周边地下水风险评价具有重要的研究价值^[1]。

生活垃圾焚烧飞灰含大量重金属元素,经雨水或酸性渗沥液淋滤后重金属离子大量释放,对周围环境造成污染进而威胁周边人民身体健康^[2-3];同时,垃圾填埋过程中产生的渗沥液是具有复杂成分的高浓度污染物,其易导致周边地表水恶化、土壤功能失调等严重问题。因此,有学者对填埋场及周边地区环境状况进行了研究,如王凌青等^[4]研究发现,宝鸡燃煤电厂周围土壤中Hg具有很强的生态危害,Hg含量随着距电厂距离的增大表现为先增加,后减少,再增加。钱丽萍等^[5]对哈尔滨柳树林垃圾填埋场周边土壤进行调查,研究表明渗沥液导致填埋场周围200 m范围内的表层土壤严重污染。洪梅等^[6]对北京23个非正规生活垃圾填埋场进行地下水污染的风险评价,发现地下水污染的风险级别很高,多数填埋场5.51 km²范围内的地下水已不能饮用。由此可见,垃圾填埋场中的渗沥液对周边生态环境以及人体健康产生的危害不容忽视。垃圾填埋场中产生的垃圾渗沥液极易进入周边土壤和地下水并造成污染^[7],尤其是渗沥液中的重金属,其污染扩散易对周边居民带来潜在的健康威胁。重金属具有毒性大、潜伏期长且难降解的特点,伴随渗沥液进入地下水系统,通过食物链的生物放大作用富集到人体内,从而对人体产生直接或间接的危害^[8-9]。随着垃圾填埋问题的突出,填埋场污染物带来的环境健康风险逐渐引起人们的关注,因此有必要对垃圾填埋场周边的污染状况以及居民的健康风险进行评估^[10]。

本文以长沙市某固体废弃物处理场为研究对象,通过对垃圾填埋场周边土壤、地下水及下游水库水质进行分析,探讨了6种重金属(As、Cr(VI)、Ni、Pb、Zn、Cu)元素的总量及分布规律,并采用单因子污染指数法和内梅罗(Nemrow)污染综合指数法来评价填埋场土壤污染状况^[11-15],以为垃圾填埋场周边地下水重金属污染防控与健康风险评价提供参考依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙市北部,地貌单元属构造剥蚀丘陵地貌,地势总体是南西高,北东低。填埋作业区属于山谷型填埋场,占地约2600亩(1亩=666.7 m²)。固体废弃物处理场西侧为望湘岩基,以侵蚀构造地貌为主,主要表现为低山—丘陵与冲沟形态。山脉脉络清晰,山顶一般较圆滑,个别较尖。山脊大多数开阔舒缓,局部地段狭窄,而形成窄陡山脊。山脊线走向受断裂影响大多呈北东向展布。地势总体东、南、西三面高,中间沟谷及北侧低。地形起伏大,场地范围内地面标高介于110.35~165.49 m之间。基岩裸露,冲沟低洼地段表层有少量种植土及坡洪积成因的砂质粘性土,下伏基岩为花岗岩。本区属温暖湿润的亚热带季风气候,具有四季分明、温暖潮湿、雨量充沛、严寒期短等特点。自2019年以来,年平均气温17.4℃,常年主导风向为东南风;年平均降雨量1394.6 mm,每年5—9月为雨季,其降雨量约占全年的80%。研究区地表水系及分水岭示意如图1所示。

1.2 样品的采集与保存

为了分析研究区土壤和地下水的重金属污染状况,在场区内共布设4个地下水钻孔采样点,沿垃圾填埋场西南方向分布,分别距填埋场551、744、775和1312 m处,钻孔位置采样点如图2所示。取样时每次取5件水样与土样,采样深度分别在井水位以下1.0、1.5、2.0、2.5和3 m处,使用贝勒管取足量体积的水样装于附有相应标签的样品瓶中,并滴加1~2滴1%硝酸溶液后用聚乙烯瓶保存待测。本次共采集20个地下水混合样品与土样,按照钻孔位置依次编号为G1~G20和A1~A20(如表1所示)。采用上述取样方法对距填埋场水平距离为1500 m的下游水库再进行水样采集,其中流入水库口处样

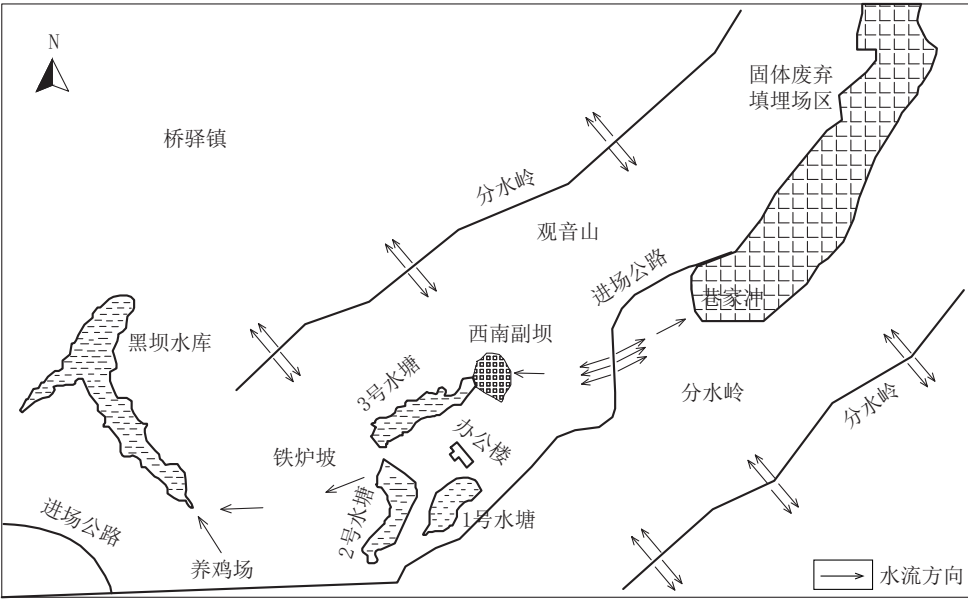


图1 地表水系及分水岭示意
Fig.1 Surface water system and watershed

品编号记为R1~R3,水库水面下0.5 m处样品编号记为S1~S3,水库出水口处样品编号记为C1~C3。

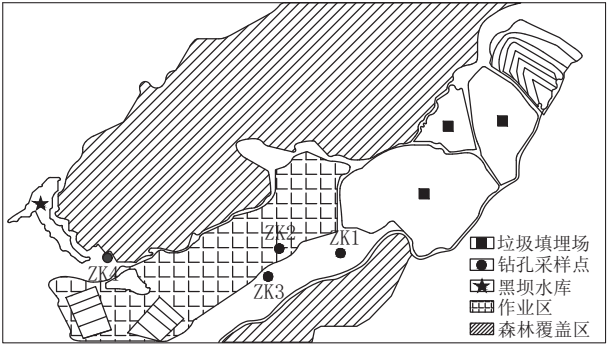


图2 研究区及钻孔采样点位置
Fig.2 Location of study area and sampling point of borehole

表1 钻孔取样详细工作量

Table 1 Detailed workload of borehole sampling				
孔号	地下水位/m	距填埋位置/m	水、土样数量/件	编号
ZK1	6.5	551	5	G1~G5/A1~A5
ZK2	3.5	744	5	G6~G10/A1~A5
ZK3	3.2	775	5	G11~G15/A1~A5
ZK4	1.0	1312	5	G16~G20/A1~A5

1.3 样品分析

垃圾渗沥液是高浓度高污染水样,在测定前需对样品进行预处理。所有水样都经0.45 μm滤膜过滤后加优级纯硝酸酸化至pH值<2,置于聚乙烯塑料瓶中密封保存。记录每个采样点的信息,为保证结果的准确性,所有采样点样品均进行平行采样、测试。测试工作中南大学化学成分分析中心实验室完成,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES型,Optima 5300DV型)测定水样中As、Cr(VI)、Ni、Pb、Zn、Cu的浓度,检测结果差异均小于10%。

1.4 重金属污染评价方法

填埋场中重金属元素常富集在周边土壤中,对土壤中重金属元素进行评价具有重要意义。目前,常用的重金属污染评价方法主要有单因子污染指数法、内梅罗指数法、富集因子法、地累积指数法和潜在生态危害指数法,其中单因子污染指数法可以清晰地判断出评价样本与评价标准的比值关系,易判断研究区主要污染因子及污染状况,常用于重金属污染区域评价中。本文采用单因子污染指数法和内梅罗(Nemrow)污染综合指数法来评价填埋场土壤污染状况。单因子污染指数的计算公式如下^[16]:

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中: P_i —— i 污染物指数; C_i —— i 污染物实测值; S_i —— i 污染物评价标准。

内梅罗(Nemrow)污染综合指数法是一种兼顾极值的综合方法,既考虑了单元的作用而又突出了某些污染最严重的元素的贡献值,其计算公式如下^[17-18]:

$$P=\sqrt{\frac{1}{2}[(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n P_i)^2+\max(P_i)^2]} \tag{2}$$

式中: P ——土壤污染综合指数; n ——评价因子个数; $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n P_i$ ——元素污染指数的平均值; $\max(P_i)$ ——元素污染指数的最大值。

根据内梅罗(Nemrow)污染综合指数法可以得到各重金属污染物的污染指数。因此,本文中用综合污染指数代表 As、Cr(Ⅵ)、Ni、Pb、Zn、Cu 等 6 种重金属对填埋场场区的综合污染程度进行评价。结合地区实际情况和国家标准,可将土壤污染等级如表 2 进行划分。

表 2 土壤污染指数分级			
Table 2 Grading of soil pollution indices			
等级	P	污染程度	污染水平
1	≤ 0.7	安全	清洁、绿色
2	0.7~1.0	警戒线	尚清洁,有污染风险
3	1.0~2.0	轻污染	超过背景值,开始受到污染
4	2.0~3.0	中污染	土壤、环境均受到中度污染
5	≥ 3.0	重污染	污染已相当严重

2 结果与讨论

2.1 填埋场地下水重金属污染特征

通过测定,该垃圾填埋场周边土壤 pH 值为 6.9~8.0,其平均值为 7.32,因此土壤中的重金属污染状况采用《土壤环境质量标准—农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值($6.5<\text{pH 值}\leq 7.5$),《生活饮用水采用地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中的Ⅲ类标准来判断(表 3)。图 3、图 4 分别表示钻孔 ZK1~ZK4 中样品(即 G1~G20)重金属元素的平均含量,其结果表明:重金属含量随着样品与填埋场距离的增加而降低;个别元素呈波动性差异;场地中重金属元素 As、Ni、Pb、Zn、Cu 含量均低于标准污染风险筛选值,而 G1~G5 中 Cr(Ⅵ)元素的平均含量高于标准污染风险筛选值。其原因可能为金属加工废弃物、废弃电池和皮革制品等垃圾随意堆放,渗沥液随着大气降水流向地下,导致 ZK1 中地下水 Cr(Ⅵ)元素

含量过高。

表 3 地下水Ⅲ类标准污染风险筛选值
Table 3 Ⅲ class standards of groundwater pollution risk screening value

污染物类型	风险筛选值/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
砷(As)	50
铬(Cr(Ⅵ))	10
镍(Ni)	50
铅(Pb)	50
锌(Zn)	1000
铜(Cu)	1000

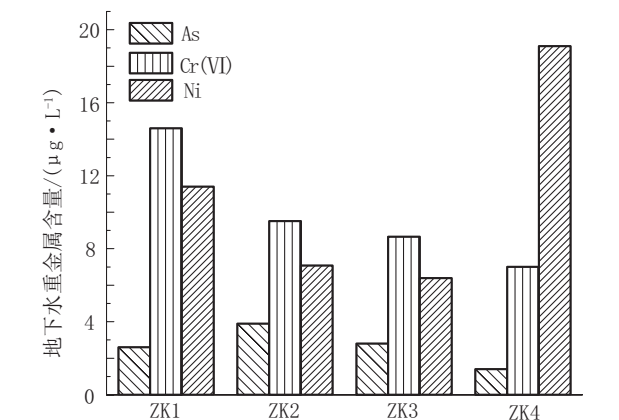


图 3 ZK1~ZK4 中致癌重金属元素平均含量
Fig.3 Average content of carcinogenic heavy metal elements in ZK1~ZK4

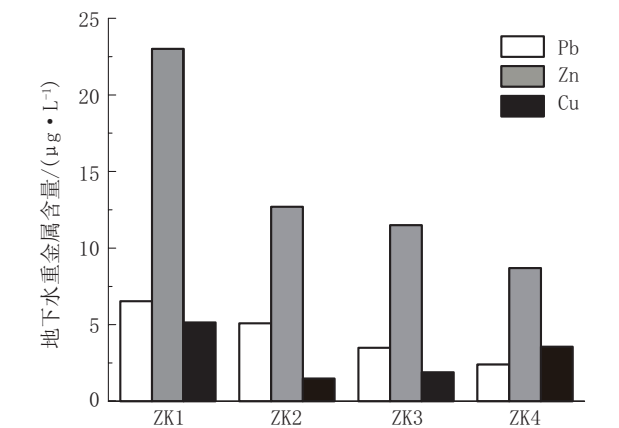


图 4 ZK1~ZK4 中非致癌重金属元素平均含量
Fig.4 Average content of non-carcinogenic heavy metal elements in ZK1~ZK4

2.2 下游水库重金属污染特征

样品编号 R1~R3、S1~S3 和 C1~C3 分别代表

水库入口处、水库水面下 0.5 m 处及水库出水口处样品,分别对它们进行重金属含量测定,结果见表 4。As、Cr(VI)、Ni、Pb、Zn、Cu 的浓度分别为 1.33~23.06、7.01~12.36、3.02~30.68、1.66~7.13、7.91~254.56、1.56~63.21 $\mu\text{g/L}$,平均值分别为 7.67、8.95、8.81、4.13、57.95、13.55 $\mu\text{g/L}$,其中样品 R1 中 Cr(VI) 的浓度值是地下水质量标准中Ⅲ类标准的 1.236 倍。R1 和 R3 均存在 Cr(VI) 超标现象,As、Ni、Cu、Zn、Pb 未存在超标现象,说明研究区有受 Cr(VI) 元素污染的风险。

表 4 下游水库周边水样重金属含量

采样点	As	Cr(VI)	Ni	Pb	Zn	Cu
R1	15.80	12.36	11.32	6.52	35.90	5.23
R2	14.62	9.66	30.68	7.13	160.55	63.21
R3	23.06	11.88	7.07	5.68	254.56	1.65
S1	3.94	7.01	6.39	2.34	14.82	34.90
S2	2.80	7.67	7.42	3.49	17.66	5.76
S3	1.65	7.95	5.38	3.88	11.93	4.23
C1	2.32	7.34	3.02	2.13	8.30	1.56
C2	3.45	8.44	4.65	1.66	7.91	3.42
C3	1.33	8.23	3.37	4.33	9.91	1.98
最大值	23.06	12.36	30.68	7.13	254.56	63.21
平均值	7.67	8.95	8.81	4.13	57.95	13.55
Ⅲ类标准	50	10	50	50	1000	1000

2.3 研究区土壤重金属污染风险评价

长沙市土壤重金属含量背景值见表 5。从表 5 中可知长沙市中 Zn、Pb 重金属元素背景值普遍较高。

表 5 长沙市土壤重金属含量背景值

重金属	As	Cr(VI)	Ni	Pb	Zn	Cu
范围值	2.5~79.8	28.0~795.0	6.3~226.7	7.8~412.6	38.0~986.0	9.8~245.5
平均值	32.8	9.7	30.68	89.4	276.0	51.4
标准差	18.4	11.9	31.7	75.9	237.0	43.5

根据钻孔 ZK1~ZK4 所取的 20 个土壤样本测定结果,计算 6 种重金属元素单项污染指数及内梅罗综合污染指数见表 6。从表 6 中可以看出,Pb、Cr

(VI) 为 ZK1、ZK3 中主要重金属污染物,已达中度污染程度,As、Ni、Zn、Cu 属于轻度污染;Pb、Cr(VI) 污染物在 ZK2 中已超长沙市土壤背景值,是 ZK2 中主要的重金属污染物,已经开始受到污染;ZK4 重金属污染普遍较少,只有 Ni 元素超过背景值处于中度污染,As、Cr(VI)、Pb、Zn 与 Cu 元素均处于警戒线水平,有污染风险。从内梅罗综合污染指数可以看出,ZK1 和 ZK3 污染水平较 ZK2 和 ZK4 处高,ZK1 和 ZK3 已达中度污染。

表 6 钻孔点土壤重金属污染指数

孔号	重金属元素单项污染指数						内梅罗综合污染指数
	As	Cr(VI)	Ni	Pb	Zn	Cu	
ZK1	1.43	3.42	1.22	2.66	1.87	0.90	3.68
ZK2	0.98	1.56	0.83	1.24	0.99	1.22	1.75
ZK3	1.33	2.87	0.75	2.11	1.33	0.93	3.07
ZK4	0.63	0.92	2.88	0.72	0.83	0.74	2.99

ZK1~ZK4 钻孔位置距填埋区距离逐渐增大,而污染程度却不成正相关,表现为 ZK1、ZK3 为重金属污染主要聚集地,ZK2 与 ZK4 污染水平较低,这可能与 ZK1 与 ZK3 钻孔水平位置处于同一地层有关,使得 ZK1 中污染物更多的富集在 ZK3 中,导致 ZK3 中重金属污染水平高于 ZK2 处。黑坝水库中 Ni 元素含量较高,ZK4 与黑坝水库可能存在水力联系,导致了 ZK4 中 Ni 元素污染指数较高。总之,填埋场区中只有 As、Zn、Cu 处于轻度污染或清洁区,Cr(VI)、Pb、Ni 重金属均有中等程度污染风险,其中 Cr(VI)、Pb 污染较为严重,应该引起注意。

3 结论

(1) 对该填埋场周边地下水样品分析,针对 As、Cr(VI)、Ni、Pb、Zn、Cu 六种重金属元素,发现其含量均值均低于《土壤环境质量标准—农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中风险筛选值。下游水库入水库口处 R1 与 R2 样品中 Cr(VI) 含量略高于地下水质量标准Ⅲ类,其它元素含量均低于Ⅲ类。场区所有采样点的综合污染指数平均值低于地下水质量标准Ⅲ类,说明填埋场地下水总体处于警戒线等级以下。

(2) 钻孔采样位置 ZK1~ZK4 中元素含量逐渐降低趋势,与取样点至填埋场中心距离有关:距离

越远,元素含量越低;其中ZK1(G1~G5)样品中Cr(VI)元素均值高于地下水质量标准Ⅲ类,可能与填埋过多皮革制品、塑料制品及过期药品有关。

(3)ZK1~ZK4重金属元素单项污染指数得出Pb、Cr(VI)为场区污染主要重金属污染物,在ZK1与ZK3中富集,达中度污染程度。

(4)内梅罗综合污染指数结果表明,ZK1和ZK3污染水平较ZK2和ZK4处高,污染程度与钻孔位置距填埋区距离不成正相关,这可能和ZK1与ZK3存在直接的水力联系有关。

(5)为降低填埋场中重金属元素对周边及下游环境污染的风险,可采取以下工程防治措施:增加垃圾堆体中导排管,加强渗沥液的收集与管控;对于近场环境污染明显、重金属含量较高的填埋场,可在下游布设粘土类竖向工程屏障。

参考文献(References):

- [1] 张云龙,何佼.垃圾填埋场地下水污染风险评价研究[J].资源节约与环保,2016,171(2):162-163.
ZHANG Yunlong, HE Jiao. Research on groundwater pollution risk assessment of landfill sites[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2016,171(2):162-163.
- [2] Fujii T, Kashimura K, Tanaka H. Microwave sintering of fly ash containing unburnt carbon and sodium chloride[J]. Journal Hazardous Material, 2019,369:318-323.
- [3] Shiota K, Nakamura T, Takaoka M, et al. Stabilization of cesium in alkali-activated municipal solid waste incineration fly ash and a pyrophyllite-based system[J]. Chemosphere, 2017,187:188-195.
- [4] 王凌青,卢新卫,王利军,等.宝鸡燃煤电厂周围土壤环境Hg污染及其评价[J].土壤通报,2007,38(3):622-624.
WANG Lingqing, LU Xinwei, WANG Lijun, et al. Evaluation of Hg pollution of soil around the Baoji Coal-fired Power Plant [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007,38(3):622-624.
- [5] 钱丽萍,赵士德.哈尔滨市柳树林垃圾场垃圾渗滤液对周边土壤污染状况的调查[J].黄山学院学报,2006,8(3):76-79.
QIAN Liping, ZHAO Shide. Investigation of landfill leachate pollution in surrounding soil at Liushulin Dump in Harbin [J]. Journal of Huangshan University, 2006,8(3):76-79.
- [6] 洪梅,张博,李卉,等.生活垃圾填埋场对地下水污染的风险评价——以北京北天堂垃圾填埋场为例[J].环境污染与防治,2011,33(3):88-91,95.
HONG Mei, ZHANG Bo, LI Hui, et al. Risk assessment of domestic garbage landfill site for groundwater pollution—A case study of Beijing Beitiantang Landfill Site[J]. Environmental Pollution and Prevention, 2011,33(3):88-91,95.
- [7] 吴文伟,苏昭辉,王峰,等.非正规垃圾填埋场危害风险评估与治理[J].环境卫生工程,2013,21(5):11-14.
WU Wenwei, SU Zhaohui, WANG Feng, et al. Hazard risk assessment and management of informal landfills[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2013,21(5):11-14.
- [8] 张光贵,张屹.洞庭湖区城市饮用水源地水环境健康风险评价[J].环境化学,2017,36(8):1812-1820.
ZHANG Guanggui, ZHANG Yi. Water environmental health risk assessment of urban drinking water sources in Dongting Lake district[J]. Environmental Chemistry, 2017,36(8):1812-1820.
- [9] 边博,周燕,张琴,等.太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价[J].环境科学,2017,38(4):1442-1450.
BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in sediments from river network on the west coast of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2017,38(4):1442-1450.
- [10] Environment Agency UK. Guidance on assessment on risks from landfill sites[M]. Bristol, UK: Environment Agency Publisher, 2004.
- [11] 王宗爽,段小丽,刘平,等.环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J].环境科学研究,2009,22(10):1164-1170.
WANG Zongshuang, DUAN Xiaoli, LIU Ping, et al. Discussion on exposure parameters of Chinese residents in environmental health risk assessment[J]. Environmental Science Research, 2009,22(10):1164-1170.
- [12] Eduljee G H. Trends in risk assessment and risk management [J]. Science of the Total Environment, 2000,249(1):13-23.
- [13] Wu K, Zhang L. Progress in the development of environmental risk assessment as a tool for the decision-making process [J]. Journal of Service Science & Management, 2014,7(2):131-43.
- [14] National Academy of Science. Risk assessment in the Federal Government: Managing the process[M]. Washington: National Academy Press, 1983:1-8.
- [15] Zhou Q X, Rainbow P S, Smith B D. Comparative study of the tolerance and accumulation of the trace metals zinc, copper and cadmium in three populations of the polychaete Nereis diversicolor [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2003,83(1):65-72.
- [16] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South pole[J]. Science, 1974,183(4121):198-200.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [18] Yang Z, Wang Y, Shen Z, et al. Distribution and speciation of heavy metals in sediments from the mainstream, tributaries, and lakes of the Yangtze River catchment of Wuhan, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,166(2/3):1186-1194.

(编辑 荐华)