

Pollution Investigation and Remediation of Organic Contaminated Soil of a Chemical Company in Nanjing

Zhe Sun¹, Zhang Zhang¹, Haitao Wang¹, Fuyang Wang², Ning Liu^{2*}

¹Jiangsu Rainfine Environmental Science and Technology Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

²School of Chemistry and Life Science, Nanjing University Jinling College, Nanjing Jiangsu

Email: ^{*}liuning@nju.edu.cn

Received: Apr. 3rd, 2018; accepted: Apr. 17th, 2018; published: Apr. 24th, 2018

Abstract

The organic pollutants investigation and Remediation of a chemical Company in Nanjing were carried out, and the target of pollutant restoration, the area of soil remediation, the volume of soil remediation and the soil remediation technology were put forward. The results indicated that the concentration of Benzo[a]Pyrene (BaP), 1,2-Dichloropropane, 1,2,3-Trichloropropane, Chloroform and Nemamol are excessive in the soil. According to the calculation, the target values of restoration of BaP, 1,2-Dichloropropane, 1,2,3-Trichloropropane, Chloroform and Nemamol are 0.063 mg·kg⁻¹, 0.890 mg·kg⁻¹, 0.005 mg·kg⁻¹, 0.290 mg·kg⁻¹ and 0.210 mg·kg⁻¹ respectively based on human health. The area contaminated by 1,2-Dichloropropane, 1,2,3-Trichloropropane, Chloroform and Nemamol were 814 m², 1376 m², 1246 m² and 1782 m² respectively, which converted into volume of about 9171 m³. This soil should be treated by Soil Vapor Extraction (SVE) technology.

Keywords

Soil, Organic Pollutants, Remediation

南京某化工企业土壤有机污染调查及修复研究

孙哲¹, 张涨¹, 王海涛¹, 王甫洋², 刘宁^{2*}

¹江苏润环环境科技有限公司, 江苏 南京

²南京大学金陵学院, 化学与生命科学学院, 江苏 南京

Email: ^{*}liuning@nju.edu.cn

收稿日期: 2018年4月3日; 录用日期: 2018年4月17日; 发布日期: 2018年4月24日

^{*}通讯作者。

文章引用: 孙哲, 张涨, 王海涛, 王甫洋, 刘宁. 南京某化工企业土壤有机污染调查及修复研究[J]. 环境保护前沿, 2018, 8(2): 144-152. DOI: 10.12677/aep.2018.82018

摘要

对南京市某化工企业土壤进行了有机污染物调查与修复研究,提出了土壤污染物修复目标值和土壤修复面积、土壤修复量和修复方法。结果表明:该场地有机污染物超标的有苯并a芘(BaP)、1,2-二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷、氯仿和双(2-氯异丙基)醚;经计算BaP、1,2-二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷、氯仿和双(2-氯异丙基)醚基于人体健康的修复目标值分别为 $0.063 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.890 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.290 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.210 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;1,2-二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷、氯仿和双(2-氯异丙基)醚的土壤污染面积分别为 814 m^2 、 1376 m^2 、 1246 m^2 、 1782 m^2 ,折算后土壤修复总体积量约 9171 m^3 ;建议对该土壤采用气相抽提法进行治理。

关键词

土壤, 有机污染物, 修复

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着我国城市化进程不断加快,许多城市要求原城区中的工厂迁入工业集中区,这一措施对改善城市生态环境、人居环境起到了重要推动作用,但是,有些工厂由于历史原因在生产过程中,可能对场区土壤和地下水造成了污染,这类污染问题比较特殊,具有隐蔽性、滞后性、潜伏性等特点,一旦这些场地转为民用,则会对当地人居环境造成极大的威胁。例如,“北京地铁五号线宋家庄施工中的农药中毒事件”,“武汉闹市毒地遭遇退地事件”等等,无不引起政府和民众的广泛关注。关注点主要集中在场地有没有受到污染?污染因子有哪些?受污染的场地范围?如何修复?等。因此,对可能受污染的场地进行污染调查与修复研究是非常重要且有现实意义的。

土壤污染的修复研究起步于20世纪70年代,欧美工业国家陆续开始解决工矿企业搬迁、遗留所形成的土壤污染项目治理,土壤修复技术应运而生。近三十年来,发达国家在污染土壤的物理修复[1][2][3]、化学修复[4][5]、植物修复[6][7][8]与微生物修复[9][10]技术方面取得了显著发展。近年来,我国也开始逐渐重视土壤污染问题并于2016年制定印发了《土壤污染防治行动计划》,简称“土十条”。相较于欧美发达国家,我国对土壤修复技术研究起步较晚,技术水平与应用经验与发达国家有很大差距,但是近些年国家有关部门有计划地部署了一些土壤修复专题,有力地促进了国内土壤污染修复技术的研究与发展工作[11][12][13]。

本研究以南京市某化工有机污染土壤为研究对象,对此进行污染调查与土壤修复研究,为当地场地土壤污染治理和环境管理提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 场地概况

该公司占地面积约为 6922.5 m^2 ,装置用地为 3138.75 m^2 ,其他用地为存储用地。装置组成有四部分:

原料罐区、生产装置区、堆桶区及办公区(其中有:配电间、更衣室、沐浴室、办公室、实验室)。主要原料种类有:基础聚醚、胺类催化剂、稳定剂、阻燃剂及水。该公司主要产品为组合聚醚,组合聚醚生产工艺流程是依照配方将基础聚醚与添加剂进行混配,混配过程中无化学反应,没有高温高压,为物理混配过程。根据该市工业产业布局规划,要求对该企业进行整治搬迁,并将该企业所在地块规划为 R2 二类居住用地,该企业于 2013 年 1 月 1 日停产关闭。

根据场地已完成的工程勘察及现场钻探情况,将地质和地质条件相近的土层归为相同层。本场地设置两个地质剖面,描述如下:

第一层为杂填土(深度范围 0~0.35 m~0~2.5 m,包括混凝土及水泥垫层),灰黑色松散含碎石、建筑垃圾。

第二层为粉质黏土(深度范围 0.35~2.5 m~6.0~7.0 m),黄褐色(部分为灰色)、可~硬塑、夹高岭土团块及铁锰结核。

2.2. 场地监测布点

根据《场地环境调查技术导则》(HJ25.11-2014)、《场地环境监测技术导则》(HJ25.2-2014)、《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)、《地下水环境监测技术规范》(HJ/T164-2004)和《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)等文件的相关要求以及潜在污染区域和潜在污染物的识别结果,对该场地内土壤进行布点采样监测。

该公司北面与某化工有限公司聚醚装置隔路相望,东面与丙稀球罐相邻,西面与破乳车间(已停产)相邻,西北角是环丙装置。这些化学装置主要涉及的易爆、剧毒危险化学品有:苯乙烯、丙烯腈、氯气、环氧丙烷、环氧乙烷、液化丙烯等,周围装置分布图见图 1。本场地在 2013 年已经停产,原有生产设备及地上建筑物、构筑物等于场地初步调查结束后全部拆除,场地表层水泥层已经全部破坏,形成大量建筑碎块。

前期初步调查布设 7 个土壤监测点位(WS1~WS7)。根据前期初步调查结果,在初步调查检测出有污染物的 WS1 和 WS5 号点位周边按照 20 m × 20 m 加密布点,共布设详细监测点位 11 个(WS8~WS18),各采样点见图 1。

采取的土壤样品层数,主要根据现场土质结构、所在装置区以及观察结果进行适当调整。采样后立即测定样品 PID 值。

2.3. 土壤采样

采集土样采用 50 钻机螺旋钻杆进行钻井,为防止交叉污染,不同点位的土壤取样前用纯净水清洗二遍钻头后再次取样,样品采集深度 3 m 以内每 0.5 m 采集一个样,3 m 以外每 1 m 采集一个样,采样深度达 9 m。土壤样品装样过程中,快速采集钻探出来的样品至 1000 mL 棕色广口玻璃瓶中,将容器装满(消除样品顶空),所有样品采集后及时放入装有冷冻蓝冰的低温保温箱中,并及时送至实验室-23℃ 冷冻保存。分析前剔除砂砾、植物残根,研磨过 1 mm 筛,备用。

2.4. 样品分析

土壤样品检测指标包括有机污染物、土壤 pH 值和总石油烃类。其中有机检测项目包括挥发性有机化合物(VOCs)和半挥发性有机化合物(SVOCs),土壤检测指标具体见表 1。

场地内土壤污染物监测指标分析均采用美国环保署(USEPA)标准方法、国家环境保护标准(HJ)或国标(GB)标准方法。

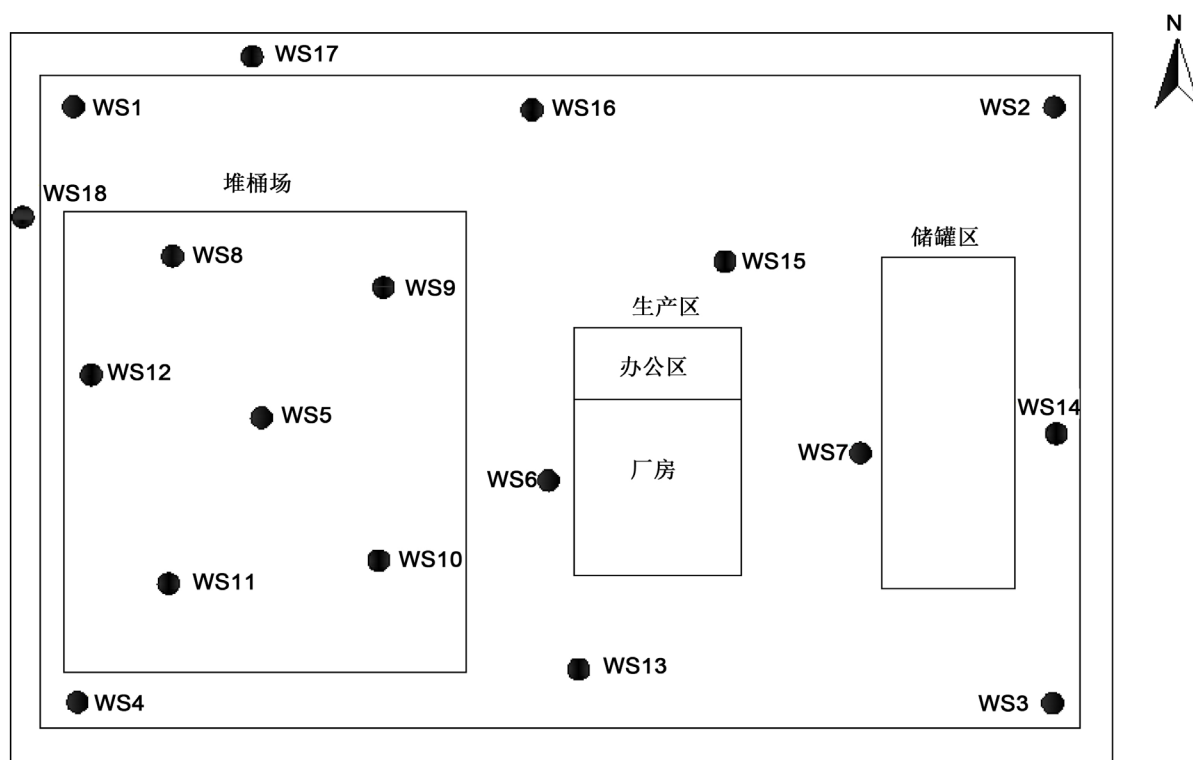


Figure 1. Sampling map of soil samples

图 1. 采样点位分布图

3. 结果与讨论

3.1. 土壤 pH 值分布特征

11 个详细监测点位土壤 pH 数值如表 2 所示, 从表中可看出, 同一监测点位土壤 pH 随深度呈现出减小的趋势。

3.2. 土壤有机污染物种类及超标污染物分析

该场地中检测出的有机物污染物包括挥发性有机污染物(VOCs)和半挥发性有机污染物(SVOCs)两类, 检出率列于表 3。

VOCs 的检出率分别为双(2-氯异丙基)醚 25%; 1,2-二氯丙烷和 1,2,3-三氯丙烷 13.89%; 氯仿 11.11%; 苯酚 5.56%; 乙苯、间和对-二甲苯、邻-二甲苯和邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯均为 2.78%。

SVOCs 检出率分别为: 萘 27.78%; 2-甲基萘 16.67%; 荧蒽和芘 11.11%; 苯并(a)蒽和蒽 5.56%; 屈、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘和苯并(g,h,i)花、均为 2.78%。其余有机污染物均未检出。

将检出结果与北京市地方标准《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T811-2011)进行比较, 对于该标准缺乏的污染物风险评价标准, 选择美国区域筛选值(Regional Screening Level (RSL) Summary Table May 2013)进行对比, 因本场地未来规划为二类居住用地, 因此, 地块按照居住用地筛选值进行评价, 最终得到土壤样品超标有机污染物种类和污染层次, 结果列于表 4。

表 4 可以看出: 0~2 m 土壤超标点位 WS16: 苯并 a 芘, 超标倍数 2 倍。

2~4 m 土壤超标点位 WS18: 1,2 二氯丙烷超标 7.6 倍; 1,2,3-三氯丙烷超标 8.7 倍; 双(2-氯异丙基)醚超标 2.6 倍。

Table 1. Soil pollutant detection factor
表 1. 土壤污染物检测因子

序号	污染物类型	污染物因子名称
1	pH	
2	苯系物	苯、甲苯、乙苯、间和对二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯、异丙苯、正丙苯、1,3,5-三甲苯、叔丁苯、1,2,4-三甲苯、仲丁苯、对异丙基甲苯、正丁苯
3	VOCs	1,1-二氯乙烯、二氯甲烷、反-1,2-二氯乙烯、1,1-二氯乙烷、顺-1,2-二氯乙烯、溴氯甲烷、氯仿、2,2-二氯丙烷、1,2-二氯乙烷、1,1,1-三氯乙烷、1,1-二氯丙烷、四氯化碳、二溴甲烷、1,2-二氯丙烷、三氯乙烯、溴二氯甲烷、顺-1,3-二氯丙烯、反-1,3-二氯丙烯、1,1,2-三氯乙烷、1,3-二氯丙烷、二溴氯甲烷、1,2-二溴乙烷、四氯乙烯、1,1,1,2-四氯乙烷、溴仿、1,2,3-三氯丙烷、1,1,2,2-四氯乙烷、1,2-二溴-3-氯丙烷、六氯丁二烯
4	卤代芳香烃	氯苯、溴苯、2-氯甲苯、4-氯甲苯、1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2-二氯苯、1,2,4-三氯苯、1,2,3-三氯苯
5	苯酚类	苯酚、2-氯苯酚、2-甲基苯酚、3,4-甲基苯酚、2-硝基苯酚、2,4-二甲苯酚、2,4-二氯苯酚、4-氯-3-甲基苯酚、2,4,6-三氯苯酚、2,4,5-三氯苯酚、2,4-二硝基苯酚、4-硝基苯酚、4,6-二硝基-2-甲基苯酚、五氯苯酚
6	亚硝胺类	N-亚硝基二甲胺、N-亚硝基二正丙基胺
7	硝基芳烃和酮类	硝基苯、异氟乐酮、2,6-二硝基甲苯、2,4-二硝基甲苯
8	偶氮和卤代醚类	偶氮苯、双(2-氯乙基)醚、双(2-氯异丙基)醚、双(2-氯乙氧基)甲烷、4-氯二苯基醚、4-溴二苯基醚
9	SVOCs	氯代烃类
10	苯胺和联苯胺类	1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2-二氯苯、六氯乙烷、1,2,4-三氯苯、六氯丁二烯、六氯环戊二烯、六氯苯
11	邻苯二甲酸酯类	4-氯苯胺、2-硝基苯胺、3-硝基苯胺、二苯并呋喃、4-硝基苯胺、咔唑
12	多环芳烃	邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二正丁酯、邻苯二甲酸丁苄酯、邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯、邻苯二甲酸二正辛酯
13	总石油烃	萘、2-甲基萘、2-氯萘、蒽、蒽、芘、菲、蒽、蒽、芘、苯并(a)蒽、蒽、苯并(b)蒽、苯并(k)蒽、苯并(a)芘、芘并(1, 2, 3-cd)芘、二苯并(a, h)蒽、苯并(g, h, i)芘
		C6-C9、C10-C18、C19-C28、C29-C36

4 m 以下土壤超标点位较多，有 WS8，WS11，WS12，WS18。其中，WS8 点位超标物质为氯仿和 1,2,3-三氯丙烷，超标倍数分别为 4 倍和 53 倍；WS11 点位超标物质为 1,2 二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷和双(2-氯异丙基)醚，超标倍数分别为 15 倍，20 倍和 4 倍；WS12 点位超标物质为 1,2 二氯丙烷和 1,2,3-三氯丙烷，超标倍数分别为 4 倍和 6 倍；WS18 点位超标物质为 1,2 二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷和双(2-氯异丙基)醚，超标倍数分别为 5 倍，5 倍和 1.6 倍。

因此，从以上不同深度土壤样检测结果来看，该场地土壤主要污染物有：

- 1) VOCs: 1,2 二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷和氯仿；
- 2) SVOCs: 双(2-氯异丙基)醚和苯并 a 芘。

3.3. 土壤修复目标值研究

上述几种关注污染物筛选值的推导依据《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)推荐的评估模型和参数，并采用中国科学院南京土壤研究所污染场地修复中心研发的环境风险评估软件 HERA (Version

Table 2. The pH value of soil from different areas
表 2. 不同区域土壤样品 pH 值

点位	采样深度(m)	位置说明	pH
8	0.3~0.5	堆桶场西北侧	10.88
	2.3~2.5		5.38
	7.7~8.0		4.68
9	0.3~0.5	堆桶场东北侧	7.85
	1.7~2.0		4.51
	7.7~8		3.57
10	1.3~1.5	堆桶场东南侧	8.98
	2.7~3.0		4.33
	5.7~6.0		5.56
11	0.3~0.5	堆桶场南侧	10.15
	2.7~3.0		5.57
	7.7~8.0		4.79
12	1.3~1.5	堆桶场西侧	6.63
	3.8~4.0		6.60
	5.8~6.0		5.54
13	0.3~0.5	房南侧近地磅处	7.47
	2.3~2.5		2.93
	5.7~6.0		4.31
14	0.7~1.0	储罐区东侧	4.15
	1.7~2.0		3.34
	2.7~3.0		4.21
15	0.3~0.5	生产、办公区东北角	4.76
	2.3~2.5		3.82
	5.8~6.0		3.66
16	0.7~1.0	厂区北侧	6.67
	2.3~2.5		4.24
	4.8~5.0		3.06
17	0.7~1.0	厂区西北厂界北外侧	5.49
	2.3~2.5		4.07
	4.8~5.0		3.19
18	0.7~1.0	厂区西北厂界西外侧	5.65
	2.7~3.0		3.08
	8.8~9.0		3.14

1.0)来推导保护人体健康的土壤修复目标值。根据《污染场地风险评估技术导则》，污染物可接受的非致癌风险水平即目标危害熵为 1，可接受的致癌风险水平为 10^{-6} 。通过 HERA 软件计算了可接受的致癌风险水平为 10^{-6} 的修复目标值，修复目标值列于表 5。评价参数选择除现场测得的所需参数外均选择我国《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)所推荐的默认值。

Table 3. The detected contaminants and detection rates
表 3. 检出物质及检出率

污染物类别	污染物质名称	检出率(%)
VOCs	双(2-氯异丙基)醚	25
	1,2-二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷	13.89
	氯仿	11.11
	苯酚	5.56
	乙苯、间-二甲苯、对-二甲苯、邻-二甲苯、邻苯二甲酸、双(2-乙基己基)酯	2.78
SVOCs	萘	27.78
	2-甲基萘	16.67
	荧蒽、芘	11.11
	苯并(a)蒽、蒽	5.56
	屈、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、苯并(g,h,i)、芘	2.78

Table 4. Statistics of excessive pollutants at different points (mg/kg)
表 4. 不同点位超标污染物统计(mg/kg)

序号	采样点	深度(m)	氯仿	1,2-二氯丙烷	1,2,3-三氯丙烷	双（2-氯异丙基）醚	BaP
1	WS8	7.7~8	0.99 (4 倍)		2.66 (53 倍)		
2	WS11	7.7~8		75.71 (15 倍)	1.01 (20 倍)	18.45 (4 倍)	
3	WS12	5.8~6		19.37 (4 倍)	0.30 (6 倍)		
4	WS16	0~2					0.40 (2 倍)
5	WS18	2~4		34.50 (7.6倍)	0.47 (8.7倍)	12.22 (2.6倍)	
		8.8~9		22.70 (5 倍)	0.27 (5 倍)	7.52 (1.6 倍)	

Table 5. The target values of restoration of pollutants (mg/kg)
表 5. 污染物修复目标值(mg/kg)

序号	污染物种类	10 ⁻⁶
		SSAC _s ^{int}
1	1,2-二氯丙烷	0.89
2	1,2,3-三氯丙烷	0.005
3	氯仿	0.29
4	二(2-氯异丙基)醚	0.21
5	苯并(a)芘	0.063

由表 5 可见，1,2 二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷、氯仿、双(2-氯异丙基)醚和苯并 a 芘(BaP)基于健康风险评价的修复目标值分别为 0.890 mg·kg⁻¹、0.005 mg·kg⁻¹、0.290 mg·kg⁻¹、0.210 mg·kg⁻¹、0.063 mg·kg⁻¹。

3.4. 土壤修复范围的确定

依据《污染场地修复的技术导则》(HJ25.4-2014)，确定了以下原则划定场地修复范围：

1) 修复范围的确定以居住用地情景下的风险计算得到的修复目标值进行边界划分和土方量的计算。

2) 针对土壤中不同的污染物先分别划定单一污染物的修复范围，然后再进行叠加合并，得出各种污染物后的需要修复的范围。

3) 土壤清理体积以场地原地面或钻孔的起始零点作为计算起始地面，不包括场地内现场调查结束后由于其他活动重新堆积的砖、石、灰等。污染土壤方量按土层分别计算，考虑到后期修复工程的可操作性，在对深层污染土壤进行取土或修复作业时，不可避免地涉及对浅层土壤的扰动，但不同土壤层次间在空间上相重叠的部分若只在深层存在污染而浅层不存在污染，则浅层部分土壤只需取土，无需修复，将总取土量扣除这一部分土方量后即得到需要处理修复的污染土壤方量。

根据调查数据，进行综合分析，以修复目标值为出图基线，以监测点位周边 5 米为统计范围，各调查点位距离较近，在计算初步修复土方量时，均按照假设该点超标，则超标范围延伸到周边调查点位处，因此，本场地估算的修复土方量比较保守。土壤中超过修复目标值的点位有 WS8、WS11、WS12 和 WS18 (厂界外，不做统计)。土壤中各污染物污染面积统计见表 6。由于苯并 a 芘不超过修复目标值，因此，未统计苯并 a 芘污染面积。

3.5. 土壤修复量的确定

场地在竖直方向调查深度范围内，土壤主要成分为杂填土、粉质粘土夹粉土、粉质粘土。综合考虑场地初步调查和监测结果，土壤污染面积叠加后土壤总污染面积为 2038 m²。本场地土壤样品 4 m 以下均为黏土层，土壤污染层厚度为 6 m。检测出的污染物多为挥发性有机污染物，故保守考虑污染深度以稳定地下水埋深所达到的土层计算，场地内监测点位平均水位埋深为 1.87 m，0~1.5 m 为场地内厚水泥层和杂填土，因此土壤修复深度定为 4.5 m，折算后土壤修复总量约 9171 m³。

3.6. 土壤修复方法的确定

本次监测发现该场地土壤污染物质主要以挥发性有机物为主，并且该场地土壤质地松散、多含碎石、建筑垃圾等，所以建议采用气相抽提法处理。气相抽提法是处理有机污染土壤最广泛的技术之一，技术成熟、处理效果、成本都符合一般要求，也不会破坏土壤结构和生态系统，可作为本案例的推荐处理方案。

4. 结论

1) 本次场地调查为共布设土壤监测点位 11 个，采集土壤样品 102 个。经过检测分析并对照有关风险评价标准和修复目标值，该场地土壤有机污染物超过标准的污染物有苯并 a 芘、1,2 二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷、氯仿和双(2-氯异丙基)醚，但仅苯并 a 芘不超过修复目标值。

Table 6. The area of soil contamination
表 6. 土壤污染面积

序号	污染物种类	最大浓度(mg/kg)	污染面积(m ²)
1	1,2-二氯丙烷	75.71	814
2	1,2,3-三氯丙烷	2.66	1376
3	氯仿	0.97	1246
4	二(2-氯异丙基)醚	18.45	1782

2) 经计算 1,2-二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷、氯仿、双(2-氯异丙基)醚和苯并 a 芘(BaP)基于人体健康的修复目标值分别为 $0.890 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.290 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.210 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.063 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3) 经综合分析, 1,2-二氯丙烷、1,2,3-三氯丙烷、氯仿和双(2-氯异丙基)醚的土壤污染面积分别为 814 m^2 、 1376 m^2 、 1246 m^2 、 1782 m^2 , 折算后土壤修复总体积量约 9171 m^3 。

4) 根据场地土壤特征, 推荐采用原位气相抽提技术处理土壤污染。

基金项目

江苏省环保厅课题(项目编号: 2016022)。

参考文献

- [1] Lee, W.J., Shih, S.I., Chang, C.Y., *et al.* (2008) Thermal Treatment of Polychlorinated Dibenzo-*p*-Dioxins and Dibenzofurans from Contaminated Soils. *Journal of Hazardous Materials*, **160**, 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.113>
- [2] Aresta, M., Dibenedetto, A., Fragale, C., *et al.* (2008) Thermal Desorption of Polychlorobiphenyls from Contaminated Soils and Their Hydrodechlorination Using Pd- and Rh-Supported Catalysts. *Chemosphere*, **70**, 1052-1058. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.074>
- [3] Di, P., Chang, D.P. and Dwyer, H.A. (2002) Modeling of Polychlorinated Biphenyl Removal from Contaminated Soil Using Steam. *Environmental Science & Technology*, **36**, 1845-1850. <https://doi.org/10.1021/es010739o>
- [4] Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., *et al.* (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>
- [5] Saichek, R.E. and Reddy, K.R. (2005) Electrokinetically Enhanced Remediation of Hydrophobic Organic Compounds in Soils: A Review. *Critical Reviews in Environment Science and Technology*, **35**, 115-192. <https://doi.org/10.1080/10643380590900237>
- [6] Ma, L.Q., Komar, K.M., Tu, C., *et al.* (2001) A Fern That Hyperaccumulates Arsenic. *Nature*, **409**, 579. <https://doi.org/10.1038/35054664>
- [7] Mendez, M.O. and Maier, R.M. (2008) Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments—An Emerging Remediation Technology. *Environmental Health Perspectives*, **116**, 278-283. <https://doi.org/10.1289/ehp.10608>
- [8] Roy, S., Labelle, S., Mehta, P., *et al.* (2005) Phytoremediation of Heavy Metal and PAH-Contaminated Brownfield Sites. *Plant Soil*, **272**, 277-290. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-5295-9>
- [9] Hwang, H.M., Hu, X. and Zhao, X. (2007) Enhanced Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Environmentally Friendly Techniques. *Journal of Environmental Science & Health Part C: Environmental Carcinogenesis & Ecotoxicology Reviews*, **25**, 313-352. <https://doi.org/10.1080/10590500701704011>
- [10] Li, P., Sun, T., Stagnitti, F., *et al.* (2002) Field-Scale Bioremediation of Soil Contaminated with Crude Oil. *Environmental Engineering Science*, **19**, 277-289. <https://doi.org/10.1089/10928750260418926>
- [11] 李安婕, 全向春, 王龔, 等. 基于 PROMETHEE 法的污染场地土壤修复技术筛选及应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(10): 3767-3773.
- [12] 蒋世杰, 王金生, 翟远征. 基于条件模拟的污染场地土壤修复量的确定研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(7): 2596-2604.
- [13] 朱先强, 石林. 矿物质钝化剂对铅铜复合型污染土壤的修复作用[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 708-713.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org