

郭观林, 王翔, 关亮, 等. 2009 基于特定场地的挥发 / 半挥发有机化合物 (VOC/SVOC) 空间分布与修复边界确定 [J]. 环境科学学报, 29(12): 2597-2605

Guo G L, Wang X, Guan L, et al. 2009. Site-specific spatial distribution of VOC/SVOC and determination of the remediation boundary [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(12): 2597-2605

基于特定场地的挥发 / 半挥发有机化合物 (VOC/SVOC) 空间分布与修复边界确定

郭观林¹, 王翔^{1,2}, 关亮^{1,2}, 颜增光¹, 谷庆宝¹, 李发生^{1,*}

1 中国环境科学研究院土壤污染与控制研究室, 北京 100012

2 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

收稿日期: 2009-03-17

修回日期: 2009-07-08

录用日期: 2009-10-13

摘要: 选择我国某典型的废弃化工污染场地为研究对象, 在对场地全面调查的基础上, 采用美国试验与材料学会 (ASTM) 规范的场地环境评价方法, 对场地中污染物类型、污染程度和空间分布进行了描述。同时, 以人体健康风险为基础对场地修复目标进行推算, 并界定修复边界和测算污染土壤体积。结果表明, 四氯化碳、四氯乙烯、五氯乙烷、六氯丁二烯、六氯乙烷和六氯苯等挥发 / 半挥发性有机化合物为场地土壤中的主要污染物类型, 其含量超过我国现有标准。根据场地特性, 以最大可接受风险水平 1×10^{-4} 、 1×10^{-5} 和 1×10^{-6} 计算得出的修复目标值界定修复边界, 场地中对应区域的污染土壤体积分别为 20457、25600 和 37300 m³。最后, 根据综合场地利用规划和成本投入要求, 对场地中污染土壤分类处理和修复提出了技术建议。

关键词: 污染场地; 挥发 / 半挥发有机污染物; 修复目标值; 修复边界

文章编号: 0253-2468(2009)12-2597-09

中图分类号: X826

文献标识码: A

Site-specific spatial distribution of VOC/SVOC and determination of the remediation boundary

GUO Guanlin¹, WANG Xiang^{1,2}, GUAN Liang^{1,2}, YAN Zengguang¹, GU Qingbao¹, LI Fasheng^{1,*}

1 Department of Soil Pollution and Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Received 17 March 2009

received in revised form 8 July 2009

accepted 13 October 2009

Abstract Types, extents and spatial distributions of contaminants in a typical abandoned industry site were analyzed based on full field investigation according to the site assessment procedure proposed by ASTM. The target level of remediation was determined based on the maximum acceptable environmental health risks. The boundary and total volume of contaminated soil in this site were defined. Results indicated that the contents of carbon tetrachloride, tetrachloroethylene, pentachloroethane, hexachlorobutadiene, hexachloroethane and hexachlorobenzene in the soil exceeded the national standard. According to the target value derived from the acceptable risk level of 1×10^{-4} , 1×10^{-5} , 1×10^{-6} and site characteristics, the total volume of contaminated soils with different risks was 20457, 25600 and 37300 m³ respectively. Treatment and remediation technologies were proposed in view of cost efficiency and future land development.

Keywords contaminated site; volatile/semi-volatile organic compounds; target value; remediation boundary

1 引言 (Introduction)

近年来, 由工业企业搬迁、停产和倒闭所遗留的场地已成为我国污染场地中的重要类型, 特别是

一些位于城市中心、生产历史长、生产工艺变革多的污染企业遗留场地将对人体和周边环境带来风险 (孙俊等, 2003; 张军, 2005)。20 世纪 80 年代以来, 欧美国家先后建立了适合本国实际情况的污染

基金项目: 中央级科研院所公益项目 (No GYK5120803); 全国土壤调查项目 (No NC5120801); 中俄国际合作项目 (No 2008DFR90550)

Supported by the Project of National Non-profit Research Institute (No GYK5120803), the National Soil Survey Program (No NC5120801) and the Sino-Russian International Cooperation Program (No 2008DFR90550)

作者简介: 郭观林 (1977-), 男, 副研究员; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: lif@caes.org.cn

Biography: GUO Guanlin (1977-), male, associate professor * Corresponding author, E-mail: lif@caes.org.cn

场地环境风险评价体系,并逐渐形成了较为成熟的修复技术平台(Colin, 1999; USEPA, 1991).目前,我国还没有针对污染场地管理形成完整的法律法规体系,对污染场地土壤修复和综合治理大多数采用较为粗放的方法,污染边界和修复目标的确定缺乏科学性,大多数污染场地在土地利用类型发生改变时未经过评价和修复,或者是采取不当的修复程序,致使在这些场地上的土地再开发利用过程中污染事故时有发生(陈鸿汉, 2006; Luo *et al.*, 2009; 张胜田等, 2007).

基于人体健康风险的场地评价能识别场地潜在危害和风险的空间分布,并能明确场地是否需要修复或采取其他行动,最终为场地管理提供最科学的决策支持(Fernandez *et al.*, 2006; Kao *et al.*, 2007).评价后确认的对人体健康构成风险的场地必须进行修复治理,使风险降低到人体健康可以接受的水平才可以进一步进行场地开发.修复过程中边界的确定是确保修复是否有效的关键所在,在早期的修复治理中,大多数修复边界的确定通过与现有土壤环境质量标准比较后得到,而土壤环境质量标准一般基于通用场地或区域土壤环境背景值得来,因此,这种方法在计算特殊场地修复目标时缺乏科学性.以人体健康风险和场地特性为基础,在确定的最大风险可接受水平下推算污染土壤修复边界是保证环境安全和控制修复成本的有效手段.

因此,本文以我国某典型化工污染场地为研究对象,按照国际通用的场地评估方法(USEPA, 1991; Colin, 1999; Zhao *et al.*, 2002),在完成背景调查的基础上,通过采样分析、空间描述和模型模拟等方法,对场地中污染物类型、含量和空间分布进行描述.同时,结合场地利用规划,对土壤修复目标值进行推算,并制定修复边界和测算污染土壤体积,提出分类处理和修复的技术建议.以期为我国同类型化工污染场地土壤修复与综合治理提供技术依据.

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 场地特性

本文研究的污染场地曾是国内最大规模的氯碱生产企业之一,场地坐落在西北向呈东南走向海拔为 215~270m 的浅丘地区.该厂建于 20 世纪 30 年代末,当时所处环境为郊区,经过近 70 年的发展,该地区逐渐被市区包围,成为城市工业集中地带.目前,居住区、商业区及文化设施区也多散布于场地周围,成为人口密集的环境敏感区.本文评估区域总面积约为 $5 \times 10^4 \text{m}^2$,厂区主要进行甲烷氯化物、山梨醇、金红石、氟里昂、苯系物和四氯化碳等有机化工产品生产,20 世纪五六十年代曾进行六六六等农药产品生产,2004 年底该化工厂生产活动完全停止.2007 年在对该场地开展调查评估时,场地内的生产设备和建筑物已经全部拆除.

2.2 样品采集与分析

对场地污染土壤进行采样时,用挖掘机把地表上的回填物清理出钻探区域,然后采用 Geoprobe 钻机进行土孔钻探,对钻机无法完成的点位通过挖掘机直接采集土壤样品.钻孔取样位置以前期场地调查识别出来的可能污染点或区域为准,同时满足统计分析的要求.根据前期场地调查的结果,场地土层厚度约为 1~4m,其下面为以坚硬密实的砂岩和泥质页岩为主的基岩.采样地位置见图 1,试验共钻探土孔数 42 个,土孔直径 7cm,分别在表层、中间层和基岩的紧邻上层采集土壤样品 148 个,对每一层性质相同的土壤取样时,根据不同深度土壤的颜色、气味和光离子化检测器(Photo Ionization Detector, PID)读数筛选土壤样品.现场样品装入标准密封取样容器后,放入现场低温保存箱中,及时送至实验室进行分析检测,分析检测项目及方法见表 1.在目标区域选取 3 个典型土壤样品,测定其有机质、容重和孔隙度等基本理化性质(鲁如坤, 2000),表 2 中的测定指标为 3 个样品的平均值.

表 1 场地中目标污染物类型及检测方法

Table 1 Target contaminants and corresponding measurements

污染物类型	污染物	方法
挥发性有机物 (VOC)	含氧化合物、含硫化合物、熏蒸剂、卤代脂肪族化合物、卤代芳香族化合物、苯系物等	USEPA 8260B (USEPA, 2006)
半挥发性有机物 (SVOCs)	多环芳烃、邻苯二甲酸酯类、苯酚类、亚硝胺类、硝基芳烃和酮类、卤代醚类、氯化烃类、有机磷/有机氯类农药等	USEPA 8270D (USEPA, 2007)

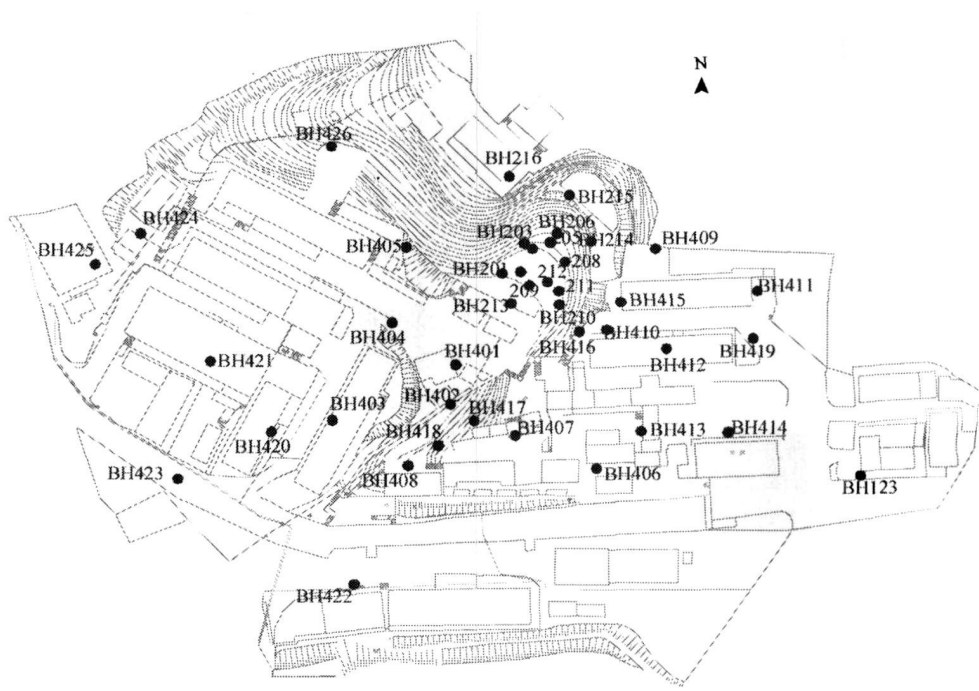


图 1 采样布点图

Fig. 1 Sampling sketch

表 2 土壤基本理化性质

Table 2 Physico-chemical properties of tested soil

pH	水分	总有机碳	有机质	阳离子交换量 /(cmol kg^{-1})	土壤容重 /(g cm^{-3})	孔隙度	氧化还原电位 /mV
8.9±0.4	6.4%±1.1%	0.41%±0.30%	0.78%±0.30%	17±2	1.86±0.20	29.5%±1.7%	54±3

2.3 数据分析方法

本文按当地大地坐标体系用全站仪测定每一取样点的坐标及标高,对污染物在土层空间分布和取土范围确定采用MVS(Mining Visualization System)系统进行模拟,根据场地中各采样点的坐标、标高和地貌特性,确定样点分布的地形曲面,根据测定的污染物含量进行插值,描述各污染物在场地土层的空间分布特征.修复目标值的推算用RBCA(Risk Based Corrective Action)模型完成,RBCA模型是由美国GSI公司根据美国试验与材料学会(ASIM)“基于风险的矫正行动”(Risk-Based Corrective Action, RBCA)标准开发,旨在完成RBCA计划流程中的环境风险分析,并可用来制定基于风险的土壤筛选水平(Soil Screening Levels, SSLs)与初步修复目标(Preliminary Remediation Goals, PRGs)(John *et al.*, 2007).

3 结果(Results)

3.1 污染识别

采样分析结果表明,该场地受到长期工业活动

的影响明显,现场踏勘发现场地土层中有浓烈刺鼻的气味散发,由于场地无大规模地下水,污染主要集中在土层中.原六六六与苯生产车间和原料库存点均有白色晶状物嵌入土层中或散落在地表上.土壤主要污染物为挥发性有机物(VOC)和半挥发性有机物(SVOC)两种类型,其中,挥发有机污染物类型包括四氯化碳、四氯乙烯、五氯乙烷和六氯丁二烯,半挥发性有机污染物包括六氯乙烷和六氯苯.除五氯乙烷以外,这些污染物在土层中的浓度均超过我国土壤环境质量标准(GB15618-1995)、展览会用地环境质量标准(HJ 350-2007)、荷兰标准(Febuari 4 2000)和美国9区标准(RSL Table Research Soil April 2009)(国家环境保护总局,1996-2007;VROM, 2000; USEPA, 2009;北京市环保局,2007).其中,六氯苯作为持久性有机污染物(POPs),最高含量超过我国展览会用地环境质量B级标准3419倍,四氯化碳最高含量超过展览会用地环境质量B级标准674.7倍,四氯乙烯最高超标322.3倍,六氯丁二烯最高超标290.4倍,六氯乙烷

最高超标 4959 倍. 展览会标准是我国根据不同土地开发用途对土壤中污染物含量确定的控制要求, B 级标准为土壤修复行动值, 当场地土壤污染物监测值超过 B 级标准限值时必需进行修复, 场地污染物含量达到 A 级标准时方可作为居住用地进行开发. 在场地评价过程中, 由于特定场地的差异性以及通用场地标准的局限性, 在初步判断场地是否需要修复时, 可以借用相关标准进行筛选和甄别, 而在确定特殊场地的具体修复目标时必需以人体健康风险为基础进行推导和计算.

3.2 污染物空间分布

由于土壤的异质性, 评估区域内各目标监测点数据的空间关联性相对较弱, 这一点可以从插值后的数据精度表现出来, 场地中经过插值后的数据置信区间为 $85\% \pm 5\%$. 从图 2(图中的 X、Y、Z 轴分别表示大地坐标中的东、北方向和标高)中可以看出, 场地中的 BH 24、BH 21Q、BH 42 和 BH 417 为高风险

集中点, 结合原化工企业的生产活动历史和工艺布局可知, 这些点位主要集中分布在工业垃圾堆放地、苯生产车间和原料库存地. 部分取样点(如 BH 24、BH 42、BH 417)污染物呈集中分布趋势, 这些点位中四氯化碳、四氯乙烯、五氯乙烷、六氯丁二烯、六氯乙烷和六氯苯同时伴生, 其含量均超过上述的土壤相关标准. 污染物在土层中呈不均匀性分布, 部分取样点底层土壤中污染物含量超过表层土壤, 在 BH 42、BH 416 和 BH 417 等这些点位中, 深度为 1.5m 的采样层中污染物含量超过土壤其它层次, 这与现场污染物在土壤剖面中的分布相符, 在这个区域中, 含有强烈刺激气味的卤代物生产原料和半成品嵌入土壤剖面中并呈条带分布. 在 BH 210 点位随着采样深度增加, 污染物浓度呈上升趋势, 其原因可能主要因为该点位地势低洼, 土壤湿度大, 污染向下迁移性强.

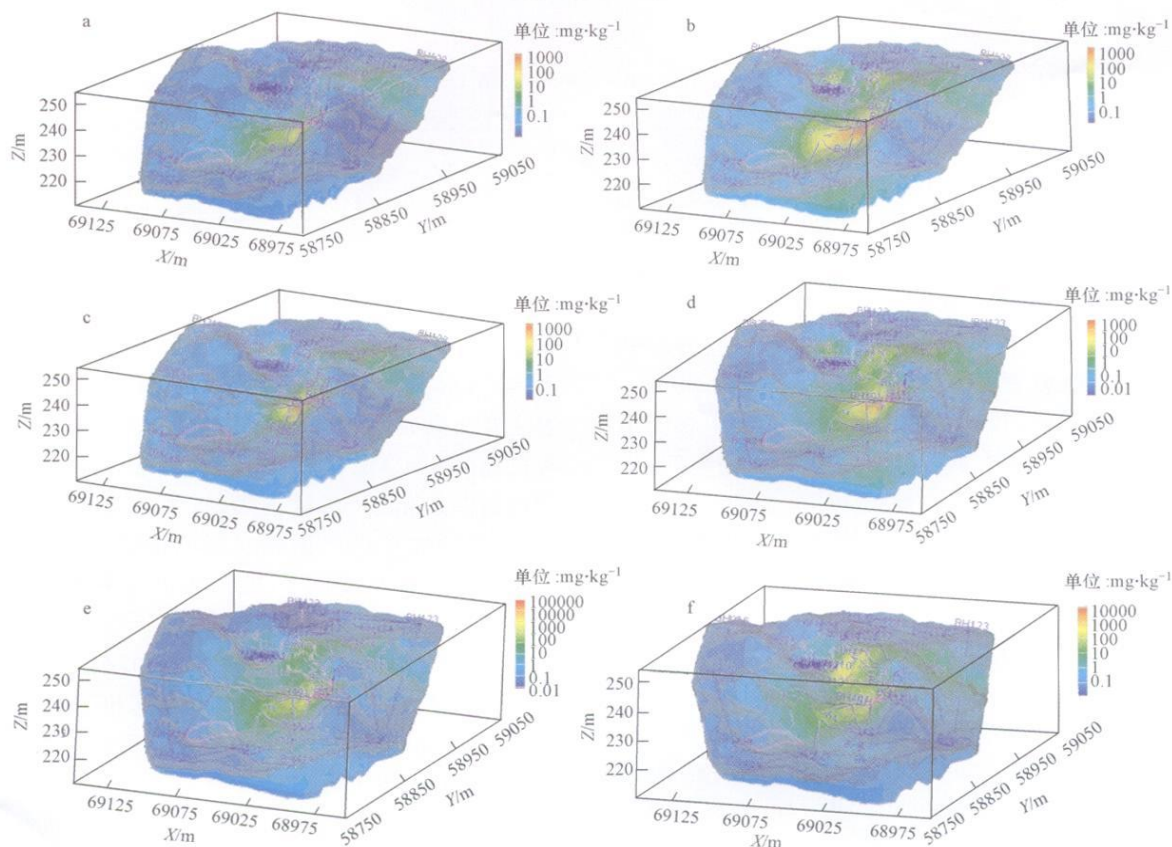


图 2 污染物空间分布 (a 四氯化碳; b 四氯乙烯; c 五氯乙烷; d 六氯丁二烯; e 六氯乙烷; f 六氯苯)

Fig 2 Spatial distribution of contaminants in site (a Carbon tetrachloride; b Tetrachloroethylene; c Pentachloroethane; d Hexachlorobutadiene; e Hexachloroethane; f Hexachlorobenzene)

3.3 场地修复目标值

根据未来土地利用规划和场地人群活动类型,在确定最大风险可接受水平后,某一种污染物在场地中修复目标值与不同暴露途径指导值的关系可以通过公式(1)进行推算(John *et al.*, 2007).本文中,计算修复目标值时只考虑通过口腔直接摄入、皮肤接触和呼吸吸入暴露途径,场地上没有种植蔬菜和果实,因此,不考虑直接食用蔬菜和果实等暴露途径.

$$SSTL = \left(\frac{1}{RBSL_{Ingest}} + \frac{1}{RBSL_{Dermal}} + \frac{1}{RBSL_{Inhal}} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$RBSL_{Ingest} = \frac{TR \cdot BW \cdot AT}{ED \cdot EF \cdot R \cdot RBAF \cdot SF} \quad (2)$$

$$RBSL_{Dermal} = \frac{TR \cdot BW \cdot AT}{ED \cdot EF \cdot SA \cdot M \cdot RAF \cdot SF} \quad (3)$$

$$RBSL_{Inhal} = \frac{TR \cdot AT}{ED \cdot EF \cdot URF \cdot (VF_{ss} + PEF)} \quad (4)$$

$$PEF = \frac{P_c W}{U_{air} \delta_{air}} \times 10^3 \quad (5)$$

$$VF_{ss} = \frac{W \rho_s d_s}{U_{air} \delta_{air} \tau} \times 10^3 \quad (6)$$

式中, SSTL为土壤修复目标值 ($mg \cdot kg^{-1}$); $RBSL_{Ingest}$

为基于直接摄入途径的修复目标 ($mg \cdot kg^{-1}$); $RBSL_{Dermal}$ 为基于皮肤接触途径的修复目标 ($mg \cdot kg^{-1}$); $RBSL_{Inhal}$ 为基于呼吸吸入途径的修复目标 ($mg \cdot kg^{-1}$).

TR表示场地最大风险可接受水平; PEF为土壤颗粒释放因子; VF_{ss} 为污染物从表层土壤挥发到空气中的系数,其他参数含义及其取值见表3

修复目标值推算过程中暴露因子和其他相关参数的确定也是数值计算的重要内容,暴露因子中受体的类型、暴露频率、暴露持续时间、土壤日摄入量、体重、平均作用时间、皮肤接触面积、生物有效性系数和皮肤接触面积等构成了计算过程中的主导参数.与此同时,场地平行风向长度、风速和土壤理化性质等场地特征参数也影响场地土壤的修复目标.目前,我国尚缺乏较完善的参数和标准体系,这些参数的确定大多数沿用美国和欧洲的标准(Fernandez *et al.*, 2006; Luo *et al.*, 2009).因区域分异性和人群特征的差别,本文在确定参数时主要参考北京市环保局暂行发布的场地环境风险评价导则和香港按风险制定土地污染整治目标的背景文件(北京市环保局, 2007; EPD Hong Kong, 2007),同时根据场地特性进行修正和补充(表3).

表3 暴露因子及模型参数

Table 3 Exposure factors and model parameters

参数	名称	单位	数值	
			儿童	成年
EF	暴露频率 ^①	$d \cdot a^{-1}$	350	350
ED	暴露持续时间 ^①	a	6	24
R	土壤日摄入量 ^①	$mg \cdot d^{-1}$	200	100
BW	体重 ^①	kg	15	55.9
τ	气体暴露持续时间 ^①	a	6	24
AT_c	致癌平均作用时间 ^①	a	70	70
AT_n	非致癌平均作用时间 ^①	a	6	24
SA	接触污染土壤的皮肤面积 ^①	cm^2	1800	5000
M	皮肤对土壤的吸附系数 ^①	$mg \cdot cm^{-2}$	0.5	0.5

参数	名称	单位	参数	名称	单位
W	平行风向场地长度 ^②	m	d_s	受影响的亚表层土壤厚度 ^②	m
U_{air}	空气混合区的风速 ^②	$m \cdot s^{-1}$	SF	致癌风险斜率因子 ^③	$(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})^{-1}$
δ_{air}	室外空气混合区高度 ^②	m	URF	单位风险因子 ^③	$(mg \cdot m^{-3})^{-1}$
ρ_s	土壤容重 ^②	$g \cdot cm^{-3}$	RAF _d	皮肤吸收系数 ^③	
P_c	土壤粉尘释放率 ^③	$g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$	RBAF	生物有效性系数 ^③	

注: ①北京市《场地环境风险评价导则》和香港《按风险制定土地污染整治目标的背景文件》; ②场地特征参数; ③参考美国环保局综合风险信息数据库(USEPA, IRIS).

本文讨论的6种污染物均为致癌性有机污染物.表4结果表明,随着最大可接受风险水平的变

化,对应的污染土壤修复目标值也发生变化.五氯乙烷、六氯丁二烯和六氯苯的修复目标随风险水平数量级变化呈10的倍数差别,而四氯化碳、四氯乙烯和六氯乙烷的修复目标值并未呈现这种变化规律.这是因为在目标风险水平下,污染物(如四氯化碳和四氯乙烯)按照致癌风险推算出来的含量值高于按危害商推算出来的含量值(危害商是指当某种污染物的含量超过这种物质的毒理学参考剂量时,可能对场地上的人群产生非致癌性的伤害,其值为不同途径暴露剂量与毒理学参考剂量的比值),所以,在选择这种污染物的土壤修复目标值时以低值(危害商)为准.例如,六氯乙烷在 1×10^{-5} 和 1×10^{-6} 风险水平下计算得出修复目标本来应该为59和 590 mg kg^{-1} ,但按危害商为1通过毒性剂量计算得到的污染物含量为 41 mg kg^{-1} ,因此,在 1×10^{-5} 和 1×10^{-6} 风险水平下选择的修复目标均为 41 mg kg^{-1} , 1×10^{-6} 风险水平下四氯化碳和四氯乙烯

修复目标值的选择同样以危害商计算结果为准.表4中化学物质的致癌性大小按照美国环保局(Standard Guide for Risk-based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites ASIM standard: E1739-95)将其分为5类:A表示为人类致癌物,流行病学调查证据充分;B1表示很可能的人类致癌物,流行病学调查证据有限;B2表示很可能的人类致癌物,动物研究证据充分,流行病学调查证据不充分或无数据;C表示有可能的人类致癌物,动物研究证据有限,无流行病学调查数据;D表示不能划分为人类的致癌物;E表示非人类致癌物;NA表示目前没有分类标准.表4中四氯化碳在 1×10^{-6} 和 1×10^{-5} 风险水平下对应的清理和修复体积一样,这是因为这两种最大风险可接受水平下所对应的修复目标值均低于该种物质的检出限 0.2 mg kg^{-1} ,在这种情况下用检出限作为修复目标进行边界确定并计算修复体积.

表4 各污染物的修复目标及对应的污染土壤清理或修复体积

Table 4 Target values of different contaminants and corresponding clean-up volumes of contaminated soil

污染物质	EPA 致癌分类 (USEPA, 2009)	基于致癌风险的修复目标值 / (mg kg^{-1})			清理或修复体积 / m^3		
		1×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-4}
四氯化碳	B2	0.017	0.17	0.22	21704	21704	20457
四氯乙烯	B2	0.48	4.80	32.00	26662	11223	4847
五氯乙烷	NA	1.10	11.00	110.00	11308	3192	515
六氯丁二烯	C	0.39	3.90	39.00	27489	10657	2844
六氯乙烷	C	5.90	41.00	41.00	10819	4565	4565
六氯苯	B2	0.17	1.70	17.00	33300	12072	2682
所有污染物		综合各目标值确定的最大边界			37300	25600	20457

3.4 修复边界及修复量的确定

基于最大风险可接受水平推算的修复目标值作为场地修复边界,不同最大风险可接受水平对应的修复目标值不同,依据这些目标值制定对应的修复边界,结果见图3.同时,根据钻探深度和污染物的空间分布,确定污染物在土层中的影响深度,并最终计算出需要修复的污染土壤体积(表4).由图3和表4可知,最大风险可接受水平较低时(1×10^{-6}),土壤中各种污染物修复目标值也低,在修复过程中所确定的边界范围变大,需要清理或修复的污染土壤体积也越大,对应的技术难度和成本也将增高.

3.5 修复技术建议

污染场地的修复是指通过物理、化学和生物转化的过程,将场地中的高浓度污染物消除、降解或

清理,使得场地土壤中的污染物浓度符合目标要求,环境风险降低到可以接受的水平(Kao *et al.*, 2007; Carlon *et al.*, 2008).根据污染物特性和在场地中可能产生的危害,对不同风险的污染土壤进行分类处置,将有利于提高修复效率和降低修复成本.对风险水平大于或等于 1×10^{-4} 的污染土壤(图3c和表4),由于其在场地中的潜在风险,这部分土壤急需从场地上清理出来并进行处理,根据现有国内外场地环境风险评估相关技术要求和规范,在技术上,选择可以达到目标且最安全但快速的途径或方法,如焚烧、热解吸或物理化学分离等方法.对风险水平介于 1×10^{-5} 和 1×10^{-4} 之间的污染土壤,在经济上,场地修复技术方案兼顾考虑目前对修复费用实际承受能力,使得不仅在目前,而且从较长远来看,修复技术方案合理安全,且具有一定的借鉴

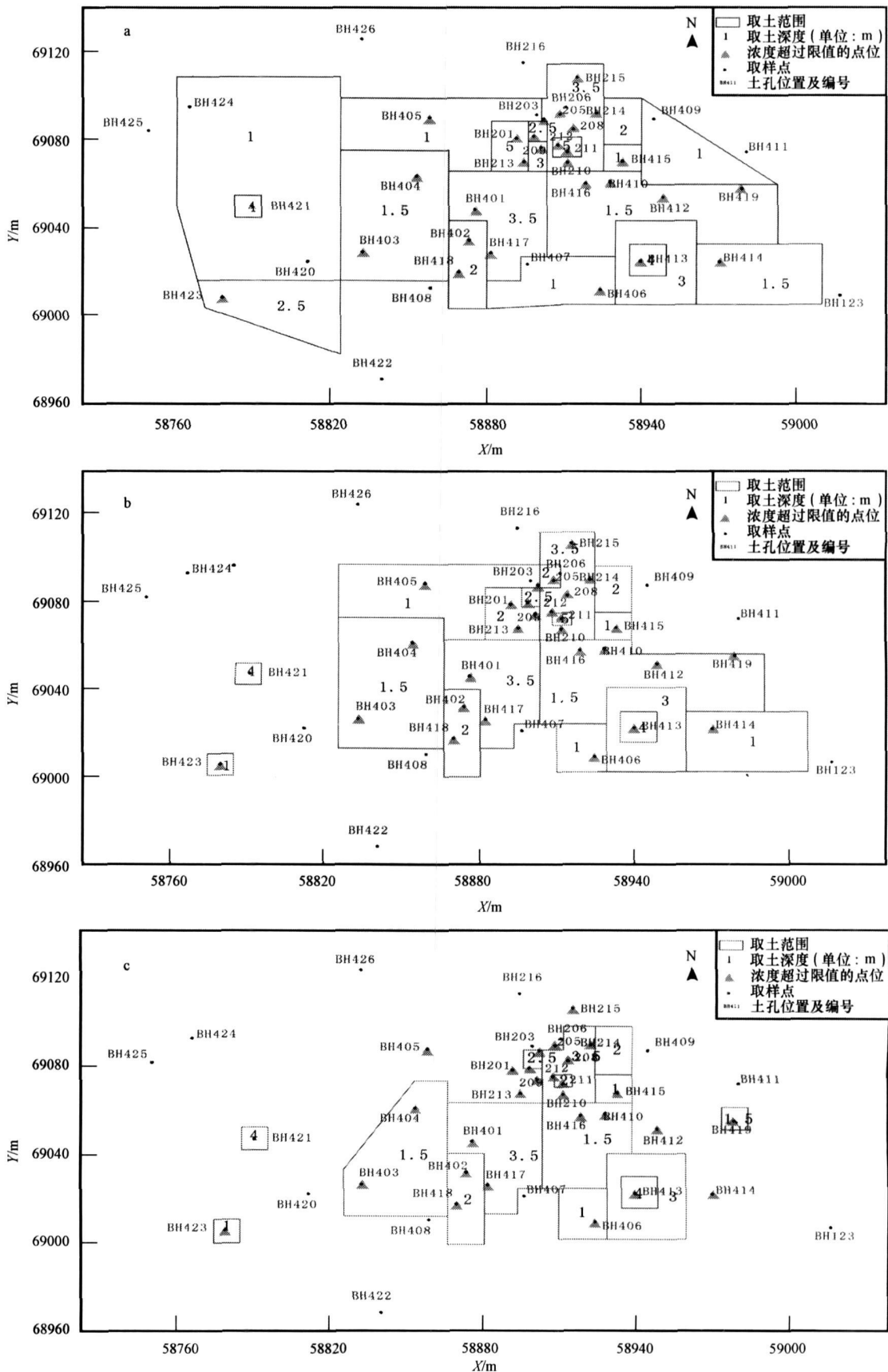


图 3 最大风险水平为 1×10^{-6} (a)、 1×10^{-5} (b)和 1×10^{-4} (c)对应的污染土壤修复边界

Fig 3 Remediation boundary of contaminated soils based on risk level of 1×10^{-6} (a), 1×10^{-5} (b) and 1×10^{-4} (c)

性和推广性,如化学氧化、气相抽提或生物降解等方法.对风险水平小于 1×10^{-5} 的污染土壤(图 3a 和表 4),采用原位或异位填埋、生物降解等方法进行处理.所有采取的修复技术其目标是保障人体健康,使场地土壤中污染物的环境风险降低到可以接受的水平,同时符合当前和长期的政策需求,具有实际可操作的特点.

4 结论 (Conclusions)

1) 场地中挥发/半挥发性有机污染物的分析结果表明,经过长期化工生产活动影响的目标场地已经受到四氯化碳、四氯乙烯、五氯乙烷、六氯丁二烯、六氯乙烷和六氯苯等有机物的污染.这些污染物在场地部分区域土层中的浓度超过我国展览会用地标准(HJ300-2007)、荷兰修复标准干涉值以及美国环保局 9 区标准,场地进行居住用地开发时需对污染土壤进行修复.

2) 目标污染场地由于土地使用功能发生改变,在拆迁过程中地层表面受人为扰动很大,污染物在土层空间中的分布呈不均匀性,污染主要集中在工业垃圾堆放点、苯生产车间和原料库存地.根据未来的土地利用规划,以最大可接受风险水平 1×10^{-4} 、 1×10^{-5} 和 1×10^{-6} 为基础推算场地污染土壤的修复目标后,对应的污染土壤清理或修复体积分别为 20457、25600 和 37300 m³.

3) 场地修复过程中可以综合修复周期、成本投入、修复目标和操作可行性等要求,依据风险对污染土壤进行分类处理,消减污染源或切断暴露途径,使环境风险降低到人体可接受的水平,场地才能进行下一步居住或商业用地开发.

责任作者简介:李发生(1966—),理学博士,研究员,第九届“中国青年科技奖”获得者. E-mail lif@ craes.org.cn

参考文献 (References):

- 北京市环保局. 2007. 京环发〔2007〕8号场地环境评价导则[S]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjhb/publish/porta0/tab40/in613483.htm>
- Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2007. Beijing (2007) No. 8 Guideline of Site Environment Assessment[S]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjhb/publish/porta0/tab40/in613483.htm> (in Chinese)
- Carlón C, Pizzol Critto A, *et al.* 2008. A spatial risk assessment methodology to support the remediation of contaminated land [J]. *Environment International* 34: 397–411
- 陈鸿汉, 谌宏伟, 何江涛, 等. 2006. 污染场地健康风险评价的理论和方法[J]. *地学前缘*, 13(1): 216–223
- Chen H H, Chen H W, He J T, *et al.* 2006. Heat-based risk assessment of contaminated site: Principles and methods [J]. *Earth Science Frontiers* 13(1): 216–223 (in Chinese)
- Colin C F. 1999. Assessing risk from contaminated sites: Policy and practice in 16 European countries [J]. *Land Contamination and Reclamation*, 7(2): 33–54
- Environmental Protection Department, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region. 2007. Guidance manual for Use of Risk-Based Remediation Goals for Contaminated Land Management [S]. http://www.epd.gov.hk/epd/tc_chi/environmentinhk/waste/guide-ref/files/0056485-GM-6Jun07.pdf
- Fernandez M D, Vega M M, Tarazona J V. 2006. Risk-based ecological soil quality criteria for the characterization of contaminated soils: Combination of chemical and biological tools [J]. *Science of the Total Environment* 366: 466–484
- 国家环境保护总局. 1996. GB15618-1995土壤环境质量标准[S]. <http://bz.mep.gov.cn>
- Ministry of Environmental Protection. 1996. GB15618-1995 Soil Environment Quality Standard[S]. <http://bz.mep.gov.cn> (in Chinese)
- 国家环境保护总局. 2007. HJ 350-2007展览会用地土壤环境质量评价标准[S]. <http://bz.mep.gov.cn>
- Ministry of Environmental Protection. 2007. HJ 350-2007 Standard of Soil Quality Assessment for Exhibition Sites[S]. <http://bz.mep.gov.cn> (in Chinese)
- John A C, Richard L B, Thomas E M, *et al.* 2007. Risk-Based Corrective Action Toolkit (Version 2) [M]. Houston, Texas GSI Environmental Inc. A1–A17
- Kao W Y, Ma H W, Wang L C, *et al.* 2007. Site-specific health risk assessment of dioxins and furans in an industrial region with numerous emission sources [J]. *Journal of Hazardous Materials* 145(3): 471–481
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社. 35–48
- Lu R K. 2000. Analytical Methods of Soil and Agro-Chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 35–48 (in Chinese)
- Luo Q S, Catney P, Lemer D. 2009. Risk-based management of contaminated land in the UK: Lessons for China [J]. *Journal of Environmental Management* 90(2): 1123–1134
- 孙俊, 陈晓东, 常文越, 等. 2003. 搬迁企业环境遗留问题分析及修复对策研究[J]. *环境保护科学*, 29(118): 40–42
- Sun J, Chen X D, Chang W Y, *et al.* 2003. Analysing of environmental problems carry-over by the (move) transferred enterprises and research of restore measures [J]. *Environmental Protection Science* 29(118): 40–42 (in Chinese)
- VROM, Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. 2000. Circular on Target Values and Intervention Values for Soil Remediation [OL]. 2000-02-04. <http://www2.vrom.nl>

- USEPA. 2009. Integrated Risk Information System (RIS) [OL]. 2009-05-21. <http://www.epa.gov>
- USEPA. 2008. Preliminary Remediation Goals-Screening Levels for Chemical Contaminants [OL]. 2009-04-05. <http://www.epa.gov>
- USEPA. 1991. Risk assessment guidance for superfund Human Health Evaluation Manual (Part C, Risk Evaluation of Remedial Alternatives) [R]. EPA/540/R-92/003. Office of Emergency and Remedial Response. Washington, DC 20460
- USEPA. 2007. Semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS): Method 8270D [OL]. 2007-02-10. <http://www.epa.gov>
- USEPA. 2006. Volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry: Method 8260B [OL]. 2006-08-05. <http://www.epa.gov>
- 张军. 2005. 某污染企业搬迁替代方案的优化选择[J]. 中国公共卫生, 21(5): 600—601
- Zhang J. 2005. Optimization of moving projects for a contaminative factory [J]. Chinese Journal of Public Health 21(5): 600—601 (in Chinese)
- 张胜田, 林玉锁, 华小梅, 等. 2007. 中国污染场地管理面临的问题及对策[J]. 环境科学与管理, 32(6): 5—8
- Zhang S T, Lin Y S, Hua X M, *et al*. 2007. The facing problems and countermeasures of Chinese contaminated site management [J]. Environmental Science and Management 32(6): 5—8 (in Chinese)
- Zhao Q, Kaluarachchi J J. 2002. Risk assessment at hazardous waste-contaminated sites with variability of population characteristics [J]. Environment International 28: 41—53