

莫欣岳,李 欢,安伟铭,等. 基于健康风险的土壤和地下水修复目标分析——以某石油化工污染场地为例[J]. 江苏农业科学,2017,45(10): 205–208.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.10.057

# 基于健康风险的土壤和地下水修复目标分析 ——以某石油化工污染场地为例

莫欣岳<sup>1</sup>, 李 欢<sup>2</sup>, 安伟铭<sup>1</sup>, 张 镭<sup>1</sup>, 潘 峰<sup>1</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃兰州 730000;

2. 兰州大学信息科学与工程学院, 甘肃兰州 730000)

**摘要:**以某石油化工污染场地为研究对象,参照国家环保部颁布的 HJ25.3—2014《污染场地风险评估技术导则》,确定健康风险评价中的相关参数,对该场地污染土壤和地下水进行健康风险分析。监测结果表明,土壤和地下水中有有机污染物苯超过了其风险筛选值。基于经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入土壤颗粒物、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和吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 6 种暴露途径计算了土壤污染造成的健康风险,并基于吸入室外空气中来自地下水的气态污染物和吸入室内空气中来自地下水的气态污染物污染 2 种暴露途径计算了地下水污染造成的健康风险。结果显示,土壤对人体产生的叠加致癌风险(cancer risk,简称 CR)和非致癌危害商(hazard quotient,简称 HQ)分别达到  $1.62 \times 10^{-3}$ 、9.78,地下水对人体产生的叠加致癌风险 CR 和非致癌危害商 HQ 分别达到  $1.33 \times 10^{-3}$ 、81.80,会对该场地上的工人产生较大健康危害。结合可接受致癌风险(acceptable cancer risk,简称 ACR)、可接受危害商(acceptable hazard quotient,简称 AHQ)的取值  $10^{-6}$ 、1.00,最终将土壤、地下水中苯修复目标值分别确定为 0.34 mg/kg、0.21 mg/L。

**关键词:**污染场地;苯;健康风险评价;致癌风险;危害商;修复目标

**中图分类号:** X53;X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)10-0205-04

污染场地是指通过累积、存储、处置、污染物迁移转化等方式承载有毒有害物质,对环境 and 人群健康产生危害或具有潜在风险的空间区域<sup>[1]</sup>。其中化工场地污染在污染场地中最具代表性,石油化工企业的生产工艺复杂、涉及物料危害性大,石油化工基地长期运行不可避免将造成有毒有害物质排放、泄漏进入场地环境,并通过各种途径影响周边环境与居民健康<sup>[2-3]</sup>。

污染场地健康风险评价是指对场地中各种污染物产生的人体健康危害进行定性和定量估算<sup>[4]</sup>,识别场地潜在危害和风险,明确场地是否需要修复,提出场地修复目标。在污染场地管理中引入健康风险评价理念,有利于克服传统环境标准治理模式存在的问题。基于人体健康和环境安全,开展污染场地内致癌物对周边人群健康风险评价,将有利于充分了解场地污染状况、周围敏感受体分布情况、污染物迁移转化规律以及对人体健康和环境的危害程度,为场地污染治理和政府

性决策提供一定的依据<sup>[5-6]</sup>。

本研究以某省会城市化工污染场地为例,对场地土壤和地下水进行监测。监测结果表明,各污染因子中苯含量较高且毒性较大,故此次以苯为研究对象结合场地实际情况和场地未来使用功能,对场地进行健康风险评价。根据 HJ 25.3—2014《污染场地土壤修复技术导则》确定健康风险评价模型中的相关参数,计算得出该场地污染物苯的土壤和地下水修复目标值。

## 1 场地土壤和地下水环境调查

研究目标场地位于某省会城市化工厂厂区内,厂区建于 20 世纪 50 年代,目标场地长约 1 000 m,宽约 300 m,场地占地面积为 30.1 万 m<sup>2</sup>,场地位于黄河南岸一级阶地。

根据 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》,本次土壤样品采样深度设计为 0.5、1.5、3.0、4.5 m,共布设 68 个土壤采样点,其中在场地重度污染区采用 40 m×40 m 网格布点,共布设 32 个土壤采样点;场地其他区域采用 80 m×80 m 网格布点,共布设 34 个土壤采样点<sup>[7]</sup>。根据《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》《地下水环境状况调查评价工作指南(试行)》和 HJ 25.2—2014《场地环境监测技术导则》(简称《导则》)并考虑场地污染状况和季节性,洪水及降水等事件引起的地下水位、水质变化,地下水监测井共布设 20 口浅部地下水监测井,8 口深部地下水监测井<sup>[8-10]</sup>。

根据监测结果,目标场地土壤和地下水均受到不同程度的污染,通过查阅厂区历史资料,确定化工区某车间曾发生渣

收稿日期:2016-10-31

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:41475008);国家自然科学基金创新研究群体科学基金(编号:41521004);国家自然科学基金青年科学基金(编号:41605005);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(编号:lzujbky-2016-k06)。

作者简介:莫欣岳(1991—),男,甘肃兰州人,博士研究生,主要研究方向为环境管理、大气物理学与大气环境、应用气象学。E-mail: moxy14@lzu.edu.cn。

通信作者:张 镭,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为大气物理学与大气环境。E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn。

油泄漏且未能采取有效措施对其进行回收,同时早期生产装置设计建设标准低、跑冒滴漏严重,为造成污染物累积主要原因。

2 污染场地人体健康风险评价

2.1 危害识别

我国污染场地调查与风险评价工作起步较晚,目前使用的土壤筛选值包括 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》、GB 15618—2008《土壤环境质量标准(征求意见稿)》和 HJ 350—2007《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》等。由于场地未来仍作为工业用地,结合场地的实际情况,参考国内类似项目经验,确定以 2008 年发布的《土壤环境质量标准》(征求意见稿)二级工业用地标准作为土壤中污染物的筛选值<sup>[11-13]</sup>;我国 GB/T 14848-93《地下水质量标准》主要针对重金属等无机污染物,除了滴滴涕、六六六,缺乏其他有机污染物的标准,无法满足本项目需求,本研究地下水污染物的浓度值优先选择我国 2009 年发布的《地下水质量标准》(报批稿)中的Ⅳ类水标准<sup>[14-15]</sup>作为参照。

根据苯的检出结果,对场地苯污染物浓度的各层分布进行非参数置信上限(upper confidence limit,简称 UCL)计算,确定场地土层和地下水中苯的筛选浓度值,计算结果见表 1、表 2。

表 1 场地各土层苯污染物的 UCL 计算结果

筛选值 (mg/kg)	土层 95% UCL(mg/kg)		
	0~1.0 m	1.0~2.5 m	2.5~4.5 m
5	139.15	1 265.51	182.98

表 2 场地地下水苯污染物的 UCL 计算结果

筛选值 (mg/L)	取值方法	浅井 95% UCL (mg/L)	深井最大值 (mg/L)
0.1	95% 对数正态分布	278.8	206

注:此次场地调查深井监测井的地下水样品数为 8 个,用作统计分析的数量过少,不能获得准确的统计值,因此保守考虑深井中污染物浓度,采用最大值进行风险计算。

2.2 暴露评估

2.2.1 暴露途径 污染物的暴露途径不同,敏感受体不同,对人体健康的危害也存在差异。根据调查,本研究场地未来仍然作为工业用地,工人是未来居住场景下的主要风险受体,本研究将重点对非敏感用地类型情况下的工人人体健康风险暴露评估进行介绍和分析。苯为挥发性有机物,在土壤中具有持久性和迁移性,在一定的条件下(如合适的温度、气压及

土层受到扰动等)<sup>[16]</sup>,污染的土壤颗粒可以通过直接摄入、皮肤接触、呼吸摄入危害人体健康。同时,挥发的苯通过土壤裂隙、孔隙等优先通道挥发到室内(室外)空气中,进而被人体吸入造成人体健康风险。因此,苯通过表层土壤介质接触人体的主要途径为经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入土壤颗粒和室外吸入污染物蒸气,通过下层土壤介质接触人体的主要途径为室外吸入污染物蒸气和室内吸入污染物蒸气,以上为本研究土壤接触人体的 6 种暴露途径。地下水接触人体的暴露途径不考虑地下水饮用,考虑吸入室内地下水污染蒸气和室外地下水污染蒸气 2 种暴露途径。

2.2.2 暴露剂量评估 不同的污染场地因污染因子、用地功能(如住宅用地、商业服务及工业用地等)不同<sup>[17-18]</sup>,而对人体健康产生的危害程度也不同。本研究的目标修复场地为工业用地,故暴露剂量计算公式取 HJ 25.3—2014《污染场地风险评估技术导则》中关于非敏感用地土壤和地下水的暴露量的计算公式,暴露因子参数选择 HJ 25.3—2014《污染场地风险评估技术导则》中附录的风险模型参数及推荐值<sup>[19]</sup>。计算得到的非敏感用地各种暴露途径下,敏感人群对土壤和地下水中污染物暴露量见表 3、表 4。

表 3 敏感人群对土壤污染物的暴露量

接触人体途径	致癌效应	危害商
经口摄入	$1.25 \times 10^{-5}$	$1.21 \times 10^{-6}$
皮肤接触	0.00	0.00
颗粒吸入	$1.47 \times 10^{-8}$	$1.18 \times 10^{-8}$
室外表层蒸气	$3.78 \times 10^{-8}$	$4.68 \times 10^{-8}$
室外下层蒸气	$2.45 \times 10^{-7}$	$1.86 \times 10^{-8}$
室内下层蒸气	$7.35 \times 10^{-5}$	$7.09 \times 10^{-6}$

注:因缺乏皮肤效率吸收因子的毒理参数,未计算该暴露量。

表 4 敏感人群对地下水污染物的暴露量

暴露途径	致癌效应	危害商
室外蒸气	$4.34 \times 10^{-7}$	$1.25 \times 10^{-6}$
室内蒸气	$1.54 \times 10^{-4}$	$4.44 \times 10^{-4}$

2.3 毒性评估

根据 EPA 致癌物质分类标准<sup>[20]</sup>,苯为致癌性污染物,国际癌症研究署(IARC)确定苯为环境致癌物,长期接触苯作业工人患各种类型的白血病和恶性淋巴瘤的危险性升高<sup>[21]</sup>。毒性评估的工作内容包括分析关注污染物的健康效应(致癌和非致癌效应),确定污染物的毒性参数值。本研究所参考毒性参数来源于 HJ 25.3—2014《污染场地风险评估技术导则》<sup>[22]</sup>,关注污染物斜率因子及参考剂量见表 5。

表 5 关注污染物(苯)斜率因子及参考剂量

斜率因子[ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ]			参考剂量[ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ]		
经口摄入( $SF_o$ )	呼吸吸入( $SF_i$ )	皮肤接触( $SF_d$ )	经口摄入( $RfD_o$ )	呼吸吸入( $RfD_i$ )	皮肤接触( $RfD_d$ )
$5.50 \times 10^{-2}$	$3.10 \times 10^{-2}$	$5.50 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-3}$	$7.60 \times 10^{-3}$	$4.00 \times 10^{-3}$

2.4 风险表征

土壤和地下水中的污染物的风险可以通过暴露剂量与对应土壤和地下水中污染物浓度、致癌风险斜率因子的相关计算得出,非致癌风险则采用危害商进行表述,它由暴露剂量和对应土壤和地下水中污染物浓度、毒理学参考剂量的相关计

算得出。

目标场地土壤和地下水监测浓度经处理后见表 1、表 2,由于场地土壤各层污染物的分布不均匀,土壤各途径的致癌风险值详见表 6,危害商详见表 7。场地地下水根据初期调查浅井和深井污染物浓度的不同,场地地下水中的污染物风险

表 6 不同土壤深度下苯的致癌风险水平

暴露途径	苯的致癌风险水平		
	第 1 层 (0~1.0 m)	第 2 层 (1.0~2.5 m)	第 3 层 (2.5~4.5 m)
经口摄入	$3.20 \times 10^{-6}$	$2.91 \times 10^{-5}$	$4.21 \times 10^{-6}$
皮肤接触	0.00	0.00	0.00
颗粒吸入	$2.11 \times 10^{-8}$	$1.91 \times 10^{-7}$	$2.77 \times 10^{-8}$
室外表层蒸气	$6.88 \times 10^{-8}$	$6.25 \times 10^{-7}$	$3.23 \times 10^{-8}$
室外下层蒸气	$9.38 \times 10^{-7}$	$3.13 \times 10^{-7}$	$1.56 \times 10^{-7}$
室内下层蒸气	$1.40 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-3}$	$1.50 \times 10^{-4}$
分层风险	$1.44 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-3}$	$1.54 \times 10^{-4}$

注:因缺乏皮肤效率吸收因子的毒理参数未计算该风险。表 7 同。

值见表 8。

根据表 6 至表 8 不同土壤深度下苯的累积风险分析可知,第 1 层(0~1.0 m)、第 2 层(1.0~2.5 m)、第 3 层(2.5~4.5 m)的致癌风险值分别为  $1.44 \times 10^{-4}$ 、 $1.33 \times 10^{-3}$ 、 $1.54 \times 10^{-4}$ ,由此看出场地土壤不同深度中苯的致癌风险水平超出了《导则》中的单一污染物的可接受致癌风险水平(取值为  $10^{-6}$ ),因此,土壤中的苯具有潜在致癌风险,应对其进行修复。对不同土壤深度下苯的危害商分析可知,第 1 层(0~1.0 m)、第 2 层(1.0~2.5 m)、第 3 层(2.5~4.5 m)的

表 8 地下水苯致癌风险水平和危害商

暴露途径	浅井		深井	
	致癌风险	非致癌危害商	致癌风险	非致癌危害商
室外蒸气	$3.75 \times 10^{-6}$	0.23	$2.77 \times 10^{-6}$	0.17
室内蒸气	$1.33 \times 10^{-3}$	81.60	$9.84 \times 10^{-4}$	60.30
总风险	$1.33 \times 10^{-3}$	81.80	$9.87 \times 10^{-4}$	60.50

### 3 污染土壤和地下水修复目标的确定

由风险评价模型可知,修复目标值是基于已确定的人体健康致癌或非致癌可接受风险水平,利用风险评估模型模拟暴露场景,并根据场地特征参数反推计算得到的<sup>[23-24]</sup>。本研究根据 HJ 25.3—2014《污染场地风险评估导则》,可接受致癌风险(ACR)取值为  $10^{-6}$ ,可接受的非致癌危害商(AHQ)取值为 1.00。根据风险表征结果,土壤中不同深度苯的致癌风险和地下水中苯的致癌风险超过  $10^{-6}$ ,土壤中第 2 层苯的危害商和地下水中苯的危害商超过了 1.00,场地土壤和地下水须要进行修复后方能再次使用。对于土壤中苯的修复限值考虑致癌风险和非致癌危害 2 个方面,分别采用公式(1)、公式(2)进行计算,对于地下水中苯的修复限值同样也考虑致癌风险和非致癌危害 2 个方面,分别采用公式(3)、公式(4)进行计算。

$$RCVS_n = \frac{ACR}{OISER_{ca} \times SF_0 + (PISER_{ca} + IOVER_{ca1} + IOVER_{ca2} + IOVER_{ca1}) \times SF_i} \quad (1)$$

式中: $RCVS_n$  表示单一污染物基于所有土壤暴露途径综合致癌效应的土壤风险控制值; $ACR$  表示可接受致癌风险; $OISER_{ca}$  表示经口摄入土壤暴露量; $SF_0$  表示经口摄入致癌斜率因子; $PISER_{ca}$  表示吸入土壤颗粒物的土壤暴露量; $IOVER_{ca1}$  表示吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物对应的土壤

表 7 不同土壤深度下苯的危害商

暴露途径	苯的危害商		
	第 1 层 (0~1.0 m)	第 2 层 (1.0~2.5 m)	第 3 层 (2.5~4.5 m)
经口摄入	0.21	1.91	0.28
皮肤接触	0.00	0.00	0.00
颗粒吸入	$1.30 \times 10^{-3}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.70 \times 10^{-3}$
室外表层蒸气	$4.23 \times 10^{-3}$	$3.85 \times 10^{-2}$	$1.99 \times 10^{-3}$
室外下层蒸气	$5.77 \times 10^{-2}$	$1.92 \times 10^{-2}$	$9.58 \times 10^{-3}$
室内下层蒸气	0.65	5.90	0.70
分层风险	0.92	7.88	0.99

危害商分别为 0.92、7.88、0.99,其中第 2 层(1.0~2.5 m)土壤中苯的危害商超过《导则》中的单一污染物的可接受危害商(1.00),它代表的场地土壤区域应划定为风险不可接受的污染区域。

浅井和深井苯的总致癌风险值分别为  $1.33 \times 10^{-3}$ 、 $9.87 \times 10^{-4}$ ,由此看出地下水中苯的致癌风险也超出了《导则》中的单一污染物的可接受致癌风险水平(取值为  $10^{-6}$ ),因此,地下水中的苯也具有潜在致癌风险,应对其进行修复。浅井和深井苯的危害商分别为 81.80、60.50,地下水中苯的危害商超过导则中的单一污染物的可接受危害商(1.00),它代表的场地地下水区域应划定为风险不可接受的污染区域。

暴露量; $IOVER_{ca2}$  表示吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量; $IOVER_{ca1}$  表示吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量; $SF_i$  表示呼吸吸入致癌斜率因子(以上变量为致癌效应)。

$$HCVS_n = \frac{AHQ \times SAF}{\frac{OISER_{nc}}{RfD_0} + \frac{PISER_{nc} + IOVER_{nc1} + IOVER_{nc2} + IOVER_{nc1}}{RfD_i}} \quad (2)$$

式中: $HCVS_n$  表示单一污染物基于所有土壤暴露途径综合非致癌效应的土壤风险控制值; $AHQ$  表示可接受危害商; $SAF$  表示暴露于土壤的参考剂量分配系数; $OISER_{nc}$  表示经口摄入土壤暴露量; $PISER_{nc}$  表示吸入土壤颗粒物的土壤暴露量; $IOVER_{nc1}$  表示吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量; $IOVER_{nc2}$  表示吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量; $IOVER_{nc1}$  表示吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量; $RfD_0$  表示经口摄入参考剂量; $RfD_i$  表示呼吸吸入参考剂量(以上变量为非致癌效应)。

$$RCVG_n = \frac{ACR}{(IOVER_{ca3} + IOVER_{ca2}) \times SF_i} \quad (3)$$

式中: $RCVG_n$  表示单一污染物基于所有地下水暴露途径综合致癌效应的地下水风险控制值; $IOVER_{ca3}$  表示吸入室外空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量; $IOVER_{ca2}$  表

示吸入室内空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量; $SF_i$  表示呼吸吸入致癌斜率因子(以上变量为致癌效应)。

$$HCVG_n = \frac{AHQ \times WAF \times RfD_i}{IOVER_{nc3} + IIVER_{nc2}} \quad (4)$$

式中: $HCVG_n$  表示单一污染物基于所有地下水暴露途径综合非致癌效应的地下水风险控制值,mg/kg; $WAF$  表示暴露于地下水的参考剂量分配比例; $IOVER_{nc3}$  表示吸入室外空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量; $IIVER_{nc2}$  表示吸入室内空气来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量; $RfD_i$  表示呼吸吸入参考剂量(以上变量为非致癌效应)。

结合表 3 和表 4 中敏感人群对土壤和地下水中污染物的暴露量以及表 5 中污染物斜率因子及参考剂量进行计算,利用公式(1)~(4)最终计算得到土壤中污染物苯的基于致癌风险、非致癌危害商的修复值分别为 0.34、5.04 mg/kg,地下水中污染物苯的基于致癌风险、非致癌危害商的修复值分别为 0.21、3.41 mg/L。为确保场地上工人的健康安全,应选择二者中的较小值作为修复限值,即土壤中苯的修复限值为 0.34 mg/kg,地下水中苯的修复值为 0.21 mg/L。

#### 4 结论

以某省会城市化工厂区内场地为研究对象,在调查目标场地背景和历史资料的基础上,对场地土壤和地下水环境质量进行环境现状监测,监测结果表明,场地土壤和地下水主要污染因子为苯,超过了相应筛选环境质量标准。由于场地未来规划为工业用地继续使用,需要对场地土壤和地下水进行人体健康风险评价。

确定目标场地为非敏感用地类型中的工业用地,工人是未来居住场景下的主要风险受体,分析污染物在环境中的迁移,确定场地土壤污染物的暴露途径为经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒、室外吸入表层土壤污染物蒸气、室外吸入下层土壤污染物蒸气和室内吸入下层土壤污染物蒸气,确定场地地下水污染物的暴露途径为吸入室内地下水污染蒸气和室外地下水污染蒸气。在综合考虑污染物相关毒理学参数基础上,运用《导则》中的风险评价模型,对场地土壤和地下水中苯进行致癌风险和非致癌危害商计算,结果表明,场地土壤和地下水中苯叠加的致癌风险和非致癌危害商超过了可接受的风险水平。

根据致癌风险、非致癌危害商可接受的风险水平  $10^{-6}$ 、1.00,将土壤、地下水中苯的修复限值分别确定为 0.34 mg/kg、0.21 mg/L。

#### 参考文献:

[1] 柳伟,叶路生,罗海霞,等. 健康风险评估在污染场地土地再利用中的案例探讨[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(3): 1207 - 1208, 1212.

[2] 李春平, 吴俊, 罗飞, 等. 某有机化工污染场地土壤与地下水风险评估[J]. 土壤, 2013, 45(5): 933 - 939.

[3] 沈桢, 张建荣, 郑家传. 某化工厂致癌有机污染物分层健康风险评估[J]. 环境监测管理和技术, 2015, 27(2): 31 - 34, 66.

[4] 肖随丽, 陆铁青, 林臻, 等. 关于加强我国污染场地环境管理政策建议探讨[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(6): 38 - 40.

[5] 章蔷. 污染场地调查及健康风险评估的研究——以南京某化工污染场地为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.

[6] 吴育林, 冯世进, 许丽萍, 等. 污染场地综合风险评估体系的建立及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增刊2): 1986 - 1991.

[7] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166—2004[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.

[8] 环境保护部. 工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.

[9] 环境保护部. 地下水环境状况调查评价工作指南(试行)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.

[10] 环境保护部. 场地环境监测技术导则: HJ 25.2—2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.

[11] 国家环境保护总局. 土壤环境质量标准: GB15618—1995[S]. 北京: 中国环境出版社, 1995.

[12] 环境保护部. 土壤环境质量标准(征求意见稿): GB 15618—2008[S]. 北京: 中国环境出版社, 2008.

[13] 国家环境保护总局. 展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行): HJ350—2007[S]. 北京: 中国环境出版社, 2007.

[14] 国家技术监督局. 地下水质量标准: GB/T14848 - 1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.

[15] 国家质量监督检验检疫总局. 地下水质量标准(报批稿): GB/T14848—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[16] 化勇鹏, 罗泽娇, 程胜高, 等. 基于健康风险的场地土壤修复限值分析[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(4): 68 - 71.

[17] 盛利伟, 冯裕钊, 余海波, 等. 污染场地再利用环境风险评价探讨[J]. 四川环境, 2014, 33(6): 156 - 162.

[18] 孙潇潇, 刘宁, 钱新, 等. 基于健康风险的土壤修复目标值的研究——以某多环芳烃污染场地为例[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(13): 4012 - 4014.

[19] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3—2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.

[20] 胡二邦. 环境风险评价实用技术、方法和案例[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.

[21] 杜岩, 葛宪民. 苯及其代谢产物的遗传毒性和血液毒性研究进展[J]. 华夏医学, 2009, 22(3): 594 - 598.

[22] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3—2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.

[23] 李青青. 基于健康风险的土壤修复目标研究程序与方法——以多环芳烃污染土壤再利用工程为例[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 610 - 615.

[24] 化勇鹏. 污染场地健康风险评价及确定修复目标的方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.