

# 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

孙潇潇, 刘宁\*, 钱新\*, 范海燕, 李雯倩, 周云欣, 陈丽丽

(1. 南京大学环境学院, 江苏南京 210023; 2. 南京大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏南京 210023)

**摘要** 以某多环芳烃污染场地为研究对象, 根据场地未来使用功能和场地实际情况, 对该场地进行了健康风险评价。根据国家环保部新出台的《污染场地土壤修复技术导则》(HJ25.3-2014), 确定了健康风险评价模型中相关参数; 计算得出了该场地的修复目标值苯并(a)芘为 0.012 mg/kg; 茚并(1,2,3-cd)芘为 0.12 mg/kg。

**关键词** 多环芳烃; 污染场地; 健康风险评价; 修复目标值

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)13-04012-03

## The Study of Soil Remediation Objectives Based on the Human Risk Assessment——A Case Study of PAH-contaminated Soil

SUN Xiao-xiao, LIU Ning, QIAN Xin et al (School of Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023; State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023)

**Abstract** Based on site investigation which considering of future function and current situation this paper presents a health risk assessment on a PAH-contaminated site. This paper takes Risk Assessment of Contaminated Sites Technical Guidelines (HJ25.3-2014) as a reference to determine the parameters, and calculates the remediation targets of B[a]P and IPY, which is 0.012, 0.12 mg/kg respectively.

**Key words** PAH; Contaminated site; Health risk assessment; Remediation targets

土壤是人类赖以生存的主要自然资源之一, 也是人类生态环境的重要组成部分。随着我国工业化和城市化进程的进一步发展, 近几年出现了一大批关闭搬迁的化工企业。化工企业由于在生产过程中涉及化学品的使用或生产废物的排放等造成了相当严重的场地污染问题。这些受到污染的场地不仅存在安全隐患, 威胁人体健康和环境安全, 还成为阻碍城市对场地再次开发利用的桎梏。现如今, 如何修复和管理这些场地的污染土壤成为城市可持续发展的一大难题。而在修复和管理污染场地的过程中, 首先要解决的问题就是土壤修复目标值的确定<sup>[1]</sup>。

目前, 被各国学者普遍研究和应用的确定土壤修复目标值的方法主要有 2 种<sup>[2]</sup>。第 1 种方法是依据各个国家已颁布的相关土壤质量标准 and 评价标准, 直接引用标准中相应污染因子的限值作为污染修复目标值, 这种方法虽然简单、易操作但是较为保守和刚性, 以前较常使用; 第 2 种方法是基于风险理论来评估和拟定土壤修复目标值, 是近年来应用较多也是较为客观科学的方法, 它是一种包含场地危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征和风险控制值计算为一体的完整体系, 通过此方法, 可确定基于场地未来用地功能下的风险水平, 得出保护人体健康的土壤修复目标值, 其确定的修复目标值较为灵活。

该研究以某多环芳烃污染场地为例, 通过分析、推导和计算, 确定了污染土壤在未来用地功能中的修复目标。经过土壤监测, 确定原污染土壤中苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘 2 种多环芳烃污染物超标, 其中毒性较大的是苯并(a)芘, 其含量较高。结合场地实际情况和场地未来使用功能, 对该场地进行了健康风险评价。根据国家环保部新出台的

《污染场地土壤修复技术导则》(HJ25.3-2014), 确定了健康风险评价模型中相关参数, 计算得出该场地的修复目标值。

### 1 污染场地健康风险评价

**1.1 评价方法选择** 结合某多环芳烃污染场地的实地现状, 参考国家环保部 2014 年新颁布的《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)<sup>[3]</sup> 和北京市环保局《场地环境评价导则》<sup>[4]</sup> 的要求, 并借鉴美国环保署污染场地健康风险评价 RBCA 模型及部分参考文献, 首先对该场地进行健康风险评价, 进而对污染场地修复目标值进行推算与预测。

**1.2 风险识别** 某公司在选取试验地块经营生产近 15 年, 随着经济和环保等原因, 公司进行了生产结构调整, 将公司进行了关闭搬迁, 场地现为空地。按照南京市的发展规划要求, 该地块已纳入土地储备整理, 主要用于居住用地。

经过场地调查研究可知, 场地土壤中  $w$ [苯并(a)芘] 为 0.2 ~ 2.8 mg/kg,  $w$ [茚并(1,2,3-cd)芘] 为 0.2 ~ 0.7 mg/kg。按照居住用地筛选值进行评价, 对照北京市《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T811-2011) 这 2 种污染物的标准值(均为 0.2 mg/kg), 均已超标。因此, 确定苯并(a)芘与茚并(1,2,3-cd)芘为这次评价的目标污染物。

### 1.3 暴露评估

**1.3.1 潜在的暴露途径分析。** 根据国家环境保护部于 2014 年新颁布的《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014), 土壤污染物的暴露途径主要有 6 种, 分别为: 口腔摄入土壤、吸入土壤颗粒物、皮肤接触污染土壤、吸入室外空气中污染物蒸气和吸入室内空气污染物蒸气。通过对场地进行现状调查发现目标场地的主要污染物为多环芳烃, 其不溶于水、不易挥发, 因此这次评价只需考虑口腔摄入土壤、吸入土壤颗粒物和皮肤接触污染土壤 3 种暴露途径。

**1.3.2 暴露量的计算。** 不同的污染场地其含有的污染因子不同且用地功能(如住宅用地、商业服务及工业用地等)也不尽相同, 则其对人体健康产生的危害程度也不同。因此, 在

**基金项目** 江苏省哲学社会科学规划项目(11SHC010)。

**作者简介** 孙潇潇(1989-), 女, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向: 环境规划与管理。\* 共同通讯作者: 刘宁, 讲师, 博士, 从事环境规划与管理研究; 钱新, 教授, 从事环境规划与管理研究。

**收稿日期** 2014-04-16

暴露量计算过程中,应根据污染场地的用地功能选择相应的参数代入计算。该研究的目标修复场地在南京市规划中作为居民住宅用地,所以针对暴露量计算中涉及的相关参数,全部参考国家环保部于2014年新颁布的《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)中关于住宅及公共用地的给定数据。

该研究的暴露量为暴露受体对3种暴露途径(即经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触)摄入土壤剂量的总和。目标场地检测出超标的苯并(a)芘和茚并(1,2,3-cd)芘均具有致癌毒性,而其中苯并(a)芘毒性因子较高,毒性较强,致癌风险也相对较大。因此,选择典型污染物苯并(a)芘作为研究对象,研究其对居民最大致癌暴露风险。

经口摄入途径最大致癌暴露量[ $OISER_{ca}$ , kg/(kg·d)]计算公式<sup>[3]</sup>为:

$$OISER_{ca} = \frac{\left( \frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c}{BW_c} + \frac{OISR_a \times ED_a \times EF_a}{BW_a} \right) ABS_o}{AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (1)$$

其他相关参数的含义及取值如表1所示。

表1 经口摄入途径针对致癌风险的暴露量计算参数取值

参数名称	取值	单位
成人每日摄入土壤量 $OSIR_a$	100	mg/d
儿童每日摄入土壤量 $OSIR_c$	200	mg/d
成人暴露周期 $ED_a$	24	a
儿童暴露周期 $ED_c$	6	a
成人暴露频率 $EF_a$	350	d/a
儿童暴露频率 $EF_c$	350	d/a
经口摄入吸收效率因子 $ABS_o$	1	无量纲
致癌效应的平均时间 $AT_{ca}$	26 280	d
成人平均体重 $BW_a$	56.8	kg
儿童平均体重 $BW_c$	15.9	kg

注:取值来自国家环保部《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)<sup>[3]</sup>。表2、表3同。

皮肤接触途径最大致癌暴露量[ $DCSER_{ca}$ , kg/(kg·d)],计算公式<sup>[3]</sup>为:

$$DCSER_{ca} = \frac{SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} + \frac{SAE_a \times SSAR_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times ABS_d}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

其他相关参数的含义及取值如表2所示。

表2 皮肤接触途径针对致癌风险的暴露量计算参数取值

参数名称	取值	单位
成人暴露皮肤表面积 $SAE_a$	5 074.89	cm <sup>2</sup>
儿童暴露皮肤表面积 $SAE_c$	2 447.56	cm <sup>2</sup>
成人皮肤表面土壤粘附系数 $SSAR_a$	0.07	mg/cm <sup>2</sup>
儿童皮肤表面土壤粘附系数 $SSAR_c$	0.2	mg/cm <sup>2</sup>
皮肤接触吸收效率因子 $ABS_d$	0.13	无量纲
每日皮肤接触事件频率 $E_v$	1	次/d

呼吸吸入途径最大致癌暴露量[ $PISER_{ca}$ , kg/(kg·d)],计算公式<sup>[3]</sup>为:

$$PISER_{ca} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (fsp_o \times EFO_c + fsp_i \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} + \frac{PM_{10} \times DAIR_a \times ED_a \times PIAF \times (fsp_o \times EFO_a + fsp_i \times EFI_a)}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

其他相关参数的含义及取值如表3所示。

表3 呼吸吸入途径针对致癌风险的暴露量计算参数取值

参数名称	取值	单位
空气中可吸入颗粒物含量 $PM_{10}$	0.15	mg/m <sup>3</sup>
成人每日空气呼吸量 $DAIR_a$	14.5	m <sup>3</sup> /d
儿童每日空气呼吸量 $DAIR_c$	7.5	m <sup>3</sup> /d
吸入土壤颗粒物在体内滞留比例 $PIAF$	0.75	无量纲
室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例 $fsp_i$	0.8	无量纲
室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例 $fsp_o$	0.5	无量纲
成人的室内暴露频率 $EFI_a$	262.5	d/a
儿童的室内暴露频率 $EFI_c$	262.5	d/a
成人的室外暴露频率 $EFO_a$	87.5	d/a
儿童的室外暴露频率 $EFO_c$	87.5	d/a

将以上参数代入相应计算公式中,得出的暴露量计算结果中经口摄入途径的致癌风险暴露量为  $1.568 \times 10^{-6}$  kg/(kg·d),而皮肤接触途径和呼吸吸入途径的致癌暴露量分别为  $5.797 \times 10^{-7}$  和  $9.80 \times 10^{-9}$  kg/(kg·d)。

1.4 风险表征 污染物的毒理学性质见表4。

表4 两种污染物的相关污染参数

参数名称	苯并(a)芘 茚并(1,2,3-cd)芘		单位
	苯并(a)芘	茚并(1,2,3-cd)芘	
经口摄入吸收致癌斜率因子 $SFO$	7.3	0.73	[mg/(kg·d)] <sup>-1</sup>
皮肤接触吸收致癌斜率因子 $SFD$	7.3	0.73	[mg/(kg·d)] <sup>-1</sup>
呼吸吸入吸收致癌斜率因子 $SFI$	4.309	0.430 9	[mg/(kg·d)] <sup>-1</sup>
经口摄入吸收参考剂量 $R/Do$	-	-	mg/(kg·d)
皮肤接触吸收参考剂量 $R/Dd$	-	-	mg/(kg·d)
呼吸吸入吸收参考剂量 $R/Di$	-	-	mg/(kg·d)
呼吸吸入吸收参考浓度 $R/C$	-	-	mg/m <sup>3</sup>
呼吸吸入吸收单位致癌因子 $IUR$	1.1	0.11	(mg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>
皮肤接触吸收效率因子 $ABSd$	0.13	0.13	-
消化道吸收效率因子 $ABSgi$	1.00	1.00	-

剂量反应研究结果表明,若暴露受体长期的每日摄入量是低剂量的,那么致癌风险与毒性因子呈线性关系<sup>[5]</sup>。因此,苯并(a)芘的经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入的最大致癌风险水平为最大暴露量与毒性因子的乘积。从中华人民共和国国家环境保护标准《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)查询得到,苯并(a)芘的经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入的毒性因子分别为7.3、4.309和7.3 [mg/(kg·d)]<sup>-1</sup>,那么场地土壤苯并(a)芘经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入途径最大致癌风险水平分别为  $1.14 \times 10^{-5}$ 、 $4.23 \times 10^{-6}$  和  $4.22 \times 10^{-8}$ 。由此看出场地土壤中苯并(a)芘经口摄入和皮肤接触的最大致癌风险水平均超出了中国规定的单致癌污染物的可接受风险水平( $\leq 10^{-6}$ )。所以,苯并(a)芘具有潜在致癌风险,有进行修复的必要。

## 2 污染土壤修复目标的确定

根据风险评价模型可知,在确定一定风险值目标的前提下,土壤表层污染物浓度可由公式计算得出。针对单一暴露途径的土壤修复目标值计算公式如下:

表层土壤污染物浓度(致癌风险) =

### 风险值

暴露量 × 致癌斜率因子

根据国家环保部于2014年新颁布的《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014),致癌风险水平可确定为 $10^{-6}$ ,即致癌概率为1人/100万人。这次评价使用 $10^{-6}$ 这一数据。

由以上得到的参数分别针对3种不同的暴露途径进行计算,具体数值如表5所示。

表5 不同暴露途径的暴露量与相关参数

暴露途径	暴露量(致癌效应)	致癌斜率因子	风险值
经口摄入	$1.14 \times 10^{-5}$	7.3	$10^{-6}$
皮肤接触	$4.23 \times 10^{-6}$	7.3	$10^{-6}$
呼吸吸入	$4.22 \times 10^{-8}$	4.309	$10^{-6}$

经计算,苯并(a)芘的各单一途径基于致癌风险的修复目标值分别为:经口摄入途径0.012 mg/kg,皮肤接触途径0.0324 mg/kg,呼吸吸入途径5.50 mg/kg。

将经口摄入、皮肤接触及呼吸吸入3种途径的计算结果进行比较,选择其中的最小值为建议修复目标值<sup>[6]</sup>。由此得出该目标污染场地苯并(a)芘临界含量(致癌风险)为0.012 mg/kg。采用相同计算方法,可计算得出茚并(1,2,3-cd)芘的修复目标值为0.12 mg/kg。

综上所述,虽然2种化合物同为多环芳烃类有机污染物,但是其毒理性质的差异导致同一场地不同污染因子的修复目标值不同。

(上接第4011页)

计,针对饮用水水源保护的各个环节,建立健全“市-县-乡镇”三级地方性法规政策体系;严格落实已出台的饮用水水源保护法规政策,开展饮用水管理地方法规政策实施绩效评估。

**3.2 加强组织领导,强化绩效考核** 成立由北海市人民政府牵头,有关部门组成的饮用水源地管理机构,明晰管理机构中各成员部门的权责;建立水源地保护与管理联席会议制度,构建水源地日常监察执法体系,完善水源地应急管理机制与公众监督机制;实行水环境保护目标责任制和考核评价制度,将饮用水水源保护和污染整治目标完成情况作为对北海市人民政府考核评价的内容。

**3.3 严格环境执法,加大污染整治** 大力推进保护区内生活源治理,依法拆除或关闭保护区内生活污水排出口,加快城镇污水管网建设,大力推动居民点搬迁与农村连片综合整治工作;分类开展保护区内畜禽水产养殖污染治理,依法取缔保护区内网箱养殖与规模化畜禽养殖,逐步加强农村分散式畜禽养殖污染控制;加强农、林种植面源污染治理,减少化肥、农药、除草剂等对水源的污染;加大水质超标水源地各类污染源的排查和监管力度,以涉重企业、尾矿库、矿山为重点,摸清水质超标原因,提出针对性治理措施。

**3.4 加快能力建设,提升监管水平** 加快北海市水质常规监测与水质全指标监测分析能力建设,逐步构建市、县两级

### 3 结论

目前,土壤环境问题越来越受到大众关注,尤其是污染场地修复问题更是关系着社会经济和环境保护的协调发展。在污染场地修复和管理过程中,修复目标值的选择和确定将直接影响到整个修复方案的选择和确定,其重要性不言而喻。相对于传统的标准值方法,基于健康风险的土壤修复目标值方法由于其灵活性和科学性等优点而逐渐发展。通过风险评估计算得到的修复目标值综合考虑了污染场地的实际现状和未来用地功能,比质量标准值更合理、更客观。

该研究以某多环芳烃污染场地为研究对象,对其进行了健康风险评估,根据国家环保部于2014年新颁布的《污染场地土壤修复技术导则》(HJ25.3-2014),确定了健康风险评估模型中的相关参数,得出了在一定暴露途径下的场地健康风险值,推导出了客观、合理的土壤修复目标值。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 毛小琴, 刘阳生. 国内外环境风险评估研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(3): 266-273.
- [3] 国家环境保护部. 污染场地土壤修复技术导则(HJ25.3-2014)[S]. 北京, 国家环境保护部, 2014.
- [4] 北京市环保局. 场地环境评价导则[S]. 北京: 北京市环保局, 2009.
- [5] 台湾行政院保护署. 健康风险评估技术规范[SB/OL]. (1999)[2010-07-23]. <http://www.edu.tw/bulletin.asp?bulletin-sn=6257>.
- [6] 黄尧. 基于健康风险评估方法的青岛市某铬渣污染场地土壤修复-目标值研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.

的水质监测体系,分阶段推动水源地自动在线监测站建设;从人员、车辆、应急监测设备、执法取证设备方面加强应急能力建设水平,打造水源地突发环境事件应急体系;整合水源地监测数据、污染源信息、风险源信息等,建设水源地信息化管理平台,并实现跨部门、跨行政区域共享;加快水源地污染防治、污染监控与应急响应等技术的研发与示范,提高水源地保护科技支撑。

**3.5 强化风险防范,提高抗险能力** 进一步完善环境风险源名录,将各类风险源纳入日常监管,围绕各类风险源,建立分级、分类的风险源管理控制措施;着力完善保护区标志牌设置和隔离防护设施建设;加快备用水源地及其配套设施的建设和保护,保障市县应急供水;完善水源地突发环境事件应急预案,定期开展水源应急演练,跨行政区域的水源地加强应急联动管理,提高水源地风险防范能力。

### 参考文献

- [1] 谢洲. 浅谈广西主要城市饮用水水源环境问题及防治保护[J]. 法制与经济, 2011(9): 156-157.
- [2] 国家环境保护总局. GB3838-2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [3] 国家技术监督局. GB/T14848-1993. 地下水环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [4] 环境保护部. 环办[2012]50号. 集中式饮用水水源环境保护指南(试行)[S]. 2012.
- [5] 环境保护部. HJ/T 433. 饮用水水源保护区标志技术要求[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.