

# 工业遗留场地复合型污染分层健康风险评估研究<sup>①</sup>

许伟<sup>1</sup>, 施维林<sup>2\*</sup>, 沈桢<sup>1</sup>, 张建荣<sup>1</sup>, 郑家传<sup>1</sup>

(1 苏州市环境科学研究所, 江苏苏州 215007; 2 苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏苏州 215011)

**摘要:**以某典型有机物-重金属复合型污染场地为研究对象, 根据该场地水文地质特征将土层划分为回填土(0~4.1 m)、粉质黏土(4.1~6.5 m)、粉土(6.5~8.5 m)和粉砂(8.5~13.8 m)等 4 层, 运用 HERA 软件分别进行健康风险评估, 推算了土壤和地下水的风险值及修复目标值, 并以此划分修复范围和确定修复技术。结果表明, 土壤中存在严重的有机污染(苯和甲苯)和重金属(Cr(VI))污染, 苯的最大致癌风险为 0.000 155, 甲苯的最大非致癌危害商为 2.14; Cr(VI)在下层土壤中不存在暴露途径危害人体健康, 而仅在表层回填土中存在致癌和非致癌危害商(0.014 2 和 97.6); 地下水中关注污染物健康风险在可接受范围内; 苯、甲苯在各土层中的修复目标值分别为: 回填土层 0.434、708 mg/kg; 粉质黏土层 0.807、2 460 mg/kg; 粉土层 1.42、4 440 mg/kg; 粉砂层 2.51、8 140 mg/kg; Cr(VI)仅在回填土层计算出修复目标值为 0.251 mg/kg。苯、甲苯等挥发性有机物分层修复目标值随土层深度增加而变大, Cr(VI)等重金属修复目标值不遵循这个规律, 因此, 分层健康风险评估更适用于挥发性有机物健康风险评估。

**关键词:**复合型污染; 分层健康风险评估; HERA; 修复目标值

**中图分类号:** X820.4

我国污染场地的健康风险评估尚处在起步阶段, 国内大多数学者<sup>[1-3]</sup>在评估场地健康风险时, 仅考虑了污染物所有暴露途径的综合致癌、非致癌风险<sup>[4]</sup>, 计算出的风险值不存在随污染物埋深变化的情况。实际上, 表层污染物由于存在最多的暴露途径, 容易对人体健康产生直接危害, 其风险相对较大, 修复目标值应严格; 随着污染物埋深的增大, 暴露途径逐渐减少, 污染物不易直接对人体造成伤害, 其风险相对小, 修复目标值可适度放宽。所以, 基于所有暴露途径获得的致癌、非致癌风险以及修复目标值可能过于保守, 将增加后续污染场地修复成本, 导致过度修复。

近年来, 一些学者逐渐认识到这个问题, 并引入污染场地土壤分层健康评估方法。房吉敦等<sup>[5]</sup>采用 RBCA 模型进行污染场地土壤分层健康评估, 根据分层评估结果划定各层次污染土壤的修复范围, 可减少场地修复中的土壤挖方量; 董敏刚等<sup>[6]</sup>对南方某有机污染场地开展了多层次健康风险评估, 发现场地土壤中污染物的修复目标值随着土层深度的增加而增大, 分层风险评估可降低修复成本; 沈桢等<sup>[7]</sup>也对某

化工厂致癌有机污染物进行了分层健康风险评估, 发现表层土壤风险控制值严格, 深层土壤风险控制值宽松。尽管这些研究成果一定程度上推动了污染场地分层健康风险评估研究, 但仍存在不足: 首先, 场地分层健康风险评估侧重于有机污染型场地, 对于既有挥发性有机物污染又有重金属污染的复合型污染场地研究不多, 特别是分层健康风险评估方法对不同深度的重金属污染的适用性尚未明确; 其次, 国内场地分层健康风险评估尚在研究阶段, 还未将分层评估结果应用于修复技术方案的制定; 第三, 国内学者多采用美国 RBCA 模型、英国 CLEA 模型等国外模型<sup>[8-9]</sup>进行健康风险评估, 由于这些模型设定的参数与我国不完全适用, 可能影响评估结果。

本研究以苏州市某复合型污染场地为研究对象, 结合研究区土壤和地下水中挥发性有机物和重金属的分布特征, 采用中国科学院南京土壤研究所污染场地修复中心结合我国实际情况开发的环境与健康风险评估(Health and Environmental Risk Assessment, HERA)软件<sup>[10]</sup>, 根据场地水文地质特征对污染土壤分层健康风险评估。计算了复合型污染场地不同层次

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570515)和苏州市科技发展支撑计划项目(SS201421)资助。

\* 通讯作者(weilin-shi@163.com)

作者简介: 许伟(1982—)男, 江苏苏州人, 硕士, 工程师, 主要从事场地污染调查、场地风险评估与管理、修复治理技术方法等方面的研究。E-mail: xw82514@163.com

的风险值及修复目标值,并以此划分不同层次的污染修复范围。此外,依据分层健康风险评估结果,制定污染场地的分层修复技术方案,在达到修复目标的同时避免过度修复。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究场地概况

**1.1.1 场地生产历史** 苏州市某遗留场地为复合型化工污染场地,场地中部及南部区域(厂门以南为中、南部区域)曾经是生产经营铬酸、重铬酸钠和盐基性硫酸铬等工业化学原料的车间;北部区域(厂门

以北为北部区域)曾经是生产二甲苯甲醛树脂、不饱和聚酯树脂和环氧树脂等树脂产品的车间。化工企业建厂时间较早,相应的污染防治措施严重缺失。目前,场地内化工企业均已关闭停产,设备、厂房全部拆除。

**1.1.2 场地水文地质情况** 根据场地地质勘探结果,除杂填土外,其余均为第四纪滨海、河湖相沉积物,由黏性土、粉土和粉砂组成。第一层为回填土层,第二层为粉质黏土层,第三层为粉土层,第四层为粉砂层,潜水含水层平均埋深约在 1~1.5 m 之间,各土层具体结构特征及相关参数见表 1。

表 1 土壤结构特征及相关参数  
Table 1 Soil structure characteristics and relevant parameters

土层 (m)	质地	平均层厚 (m)	土壤体积质量 (g/cm <sup>3</sup> )	颗粒密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水率 (%)	有机质 (g/kg)	水平渗透系数 (cm/s)	土层描述
0~4.1	回填土	4.1	1.30	2.77	40.5	16.8	5×10 <sup>-5</sup> ~8×10 <sup>-5</sup>	下部(2 m 以下)含淤泥质填土
4.1~6.5	粉质黏土	2.4	1.48	2.77	28.6	9.3	8×10 <sup>-8</sup> ~1.0×10 <sup>-7</sup>	灰黄色
6.5~8.5	粉土	2.0	1.50	2.77	30.0	5.8	1×10 <sup>-5</sup> ~3×10 <sup>-5</sup>	褐黄色
8.5~13.8	粉砂	5.3	1.46	2.70	30.4	7.6	2×10 <sup>-2</sup> ~7×10 <sup>-2</sup>	灰色

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样品采集与分析** 场地污染调查共分两个阶段,初步调查和详细调查阶段。初步调查阶段采用系统布点法,在原有生产车间、原料及产品储存区域、排污管道以及污水处置区域进行布点,以 40 m×40 m 的网格布点,采样深度为地表以下 1.5~2 m 范围内,共采集 19 个土壤样品。详细调查阶段在初步调查的基础上,以 20 m×20 m 的网格布点,局部区域加密为 10 m×10 m 的网格,最深采样深度达到地表以下 13 m,共采集 311 个土壤样品和 6 个地下水样品,采样点位见图 1。

**1.2.2 模型假设** 苏州位于亚热带季风区,河流湖泊众多,当地多年平均年降水量达到 1 000 mm 以上,潜水含水层水位浅,并且包气带多存在上层滞水,在实际场地调查工作中,潜水含水层很难采集,同时,在场地修复过程以及修复后地块再开发利用中,污染的潜水含水层一般情况均会随着污染土壤的治理被清理出地块。因此本研究对场地的概念模型进行假设,将潜水含水层这一层视为包气带土壤,即将约 0~8.5 m 的地层视为包气带,将微承压水含水层视为潜水含水层。

**1.2.3 模型及参数选择** 本研究采用 HERA 软件,并参考《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)<sup>[4]</sup>的相关计算方法构建场地健康风险评估模

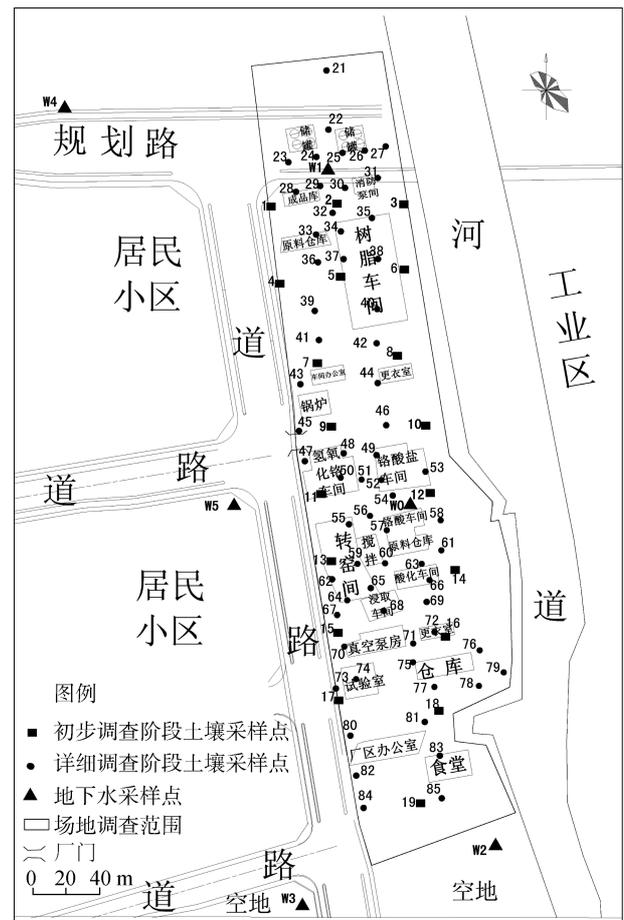


图 1 采样点分布图  
Fig. 1 Soil sampling points

型。模型中需要的参数从场地调查中获取,主要包括土壤或地下水中污染物的浓度、不同深度土壤的理化性质、污染土层的厚度与深度、地下水的埋深等特征参数,其余参数采用《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)中的推荐值。

## 2 结果与分析

### 2.1 危害识别

根据场地两次调查的结果表明,场地存在有机物-重金属复合型污染,各层关注污染物及超标情况见表 2。

表 2 关注污染物的调查情况  
Table 2 Results of concerned potential contaminants

土层	环境介质	污染物	样品总数 (个)	超标率 (%)	均值	浓度范围
回填土层	土壤	苯	38	18.4	3.16	nd ~ 6.63
		甲苯	38	21.05	38.26	nd ~ 509
		二甲苯	38	2.63	1.05	nd ~ 33.6
		总铬	158	48.10	1 360.61	59.1 ~ 17 800
		Cr( )	158	42.41	358.74	nd ~ 5 270
粉质黏土层	土壤	苯	18	38.89	4.05	nd ~ 57.4
		甲苯	18	66.67	386.51	nd ~ 5 260
		二甲苯	18	0	0.37	nd ~ 3.3
		总铬	48	18.75	538.73	57.1 ~ 5 240
		Cr( )	48	35.42	301.43	0.01 ~ 3 730
粉土层	土壤	苯	23	86.96	21.05	0.29 ~ 220
		甲苯	23	91.30	1 465.57	0.54 ~ 8 520
		二甲苯	23	0	0.11	nd ~ 0.68
		总铬	11	0	103.43	46.1 ~ 345
		Cr( )	11	20	16.0	nd ~ 111
粉砂层	土壤	苯	12	8.33	0.31	nd ~ 2.55
		甲苯	12	41.67	26.60	0.8 ~ 169
		二甲苯	12	0	0.06	nd ~ 0.12
		总铬	3	0	57.3	51.1 ~ 66.7
		Cr( )	3	0	0.20	nd ~ 0.407
	地下水	苯	6	16.7	0.072	nd ~ 0.724
		甲苯	6	0	0.73	nd ~ 4.34
		二甲苯	6	0	0.012	nd ~ 0.048
		Cr( )	6	0	0.006	nd ~ 0.01

注: 北部区域有机物污染范围较集中,样品数相对较少;中部和南部区域重金属污染面积较大,样品数相对较多;本表中关注的污染物标准参照《土壤环境质量标准(修订)》(征求意见稿 2009-07-15)中居住用地标准和《地下水质量标准》(报批稿,2009年)表 2 中 Ⅲ类水质标准。均值和浓度范围的单位:土壤 mg/kg;地下水 mg/L;nd 表示未检出。

从表 2 可以看出,有机物中二甲苯仅在回填土层发现超标点位,其余土层和地下水中均未发现超标情况;苯和甲苯由回填土层向下,超标点位逐渐增多,超标程度增大,至粉砂层后,超标情况逐渐减少,地下水中仅发现苯超标;重金属总铬和 Cr( ) 在回填土层污染程度最为严重,特别是在回填土层上部(0 ~ 2 m)区域 Cr( ) 超标尤为明显,随着土层深度的加深,污染程度逐渐减小,粉砂层及地下水中均未发现总铬和 Cr( ) 污染情况。

### 2.2 暴露途径

在居住用地情景下,敏感受体为住宅区内的成人和儿童,按照场地内水文地质条件分为 4 层,其主要暴露途径见表 3。

表 3 各层暴露途径  
Table 3 Exposure pathway of each layer

土层	暴露途径
回填土层	经口摄入、皮肤接触、吸入室内土壤颗粒物、吸入室外土壤颗粒物、吸入表层土壤室外空气、吸入下层土壤室外空气、吸入下层土壤室内空气
粉质黏土层	吸入下层土壤室外空气、吸入下层土壤室内空气
粉土层	吸入下层土壤室外空气、吸入下层土壤室内空气
粉砂层	吸入下层土壤室外空气、吸入下层土壤室内空气、吸入地下水室内空气、吸入地下水室外空气

2.3 毒性表征

污染物的毒性参数主要来源于《污染场地风险评估技术导则》推荐值，见表 4。

2.4 风险表征

运用 HERA 软件，分别计算土壤回填土层、粉

质黏土层、粉土层、粉砂层及地下水中关注的污染物的致癌风险值和非致癌危害商(表 5)。单一污染物的可接受致癌风险为  $10^{-6}$ ，可接受非致癌危害商值为 1，大于可接受的风险值就表明该污染物存在相应的致癌或者非致癌风险。

表 4 关注污染物毒性参数  
Table 4 Toxicity parameters of concerned potential contaminants

污染物	经口摄入参考剂量 (mg/(kg·d))	呼吸吸入参考浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	皮肤接触参考剂量 (mg/(kg·d))	呼吸吸入参考剂量 (mg/(kg·d))	经口摄入致癌斜率因子 (mg/(kg·d)) <sup>-1</sup>	皮肤接触致癌斜率因子 (mg/(kg·d)) <sup>-1</sup>	呼吸吸入致癌斜率因子 (mg/(kg·d)) <sup>-1</sup>	呼吸吸入单位致癌风险 (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>
苯	0.004	0.03	0.004	0.007 7	0.055	0.055	0.031	0.007 8
甲苯	0.08	5.0	0.08	1.28	-	-	-	-
二甲苯	0.20	0.1	0.20	0.025 5	-	-	-	-
Cr(Ⅲ)	1.50	-	0.019 5	-	-	-	-	-
Cr(Ⅵ)	0.003	0.000 1	0.000 075	0.000 025 5	0.5	20.0	329.0	84.0

注：“-”表示不存在。

表 5 关注污染物风险表征  
Table 5 Summary of carcinogenic risks and non-carcinogenic hazard quotients of concerned contaminants

土层	环境介质	苯		甲苯		二甲苯		Cr(Ⅲ)		Cr(Ⅵ)	
		致癌风险	危害商	致癌风险	危害商	致癌风险	危害商	致癌风险	危害商	致癌风险	危害商
回填土层	土壤	$1.52 \times 10^{-5}$	1.28	-	$5.15 \times 10^{-1}$	-	$5.31 \times 10^{-2}$	-	$1.83 \times 10^{-1}$	$1.42 \times 10^{-2}$	97.60
粉质黏土层	土壤	$7.11 \times 10^{-5}$	5.76	-	2.14	-	$4.25 \times 10^{-2}$	-	N	N	N
粉土层	土壤	$1.55 \times 10^{-4}$	12.5	-	1.92	-	$5.69 \times 10^{-3}$	-	N	N	N
粉砂层	土壤	$1.02 \times 10^{-6}$	$8.23 \times 10^{-2}$	-	$2.08 \times 10^{-2}$	-	$5.28 \times 10^{-4}$	-	N	N	N
	地下水	$2.67 \times 10^{-7}$	$2.12 \times 10^{-2}$	-	$6.84 \times 10^{-4}$	-	$4.05 \times 10^{-4}$	-	N	N	N

注：“-”表示不存在致癌风险；“N”表示无法计算；参照的《土壤环境质量标准(修订)》中仅有总铬和六价铬评价标准，自然界土壤中总铬一般包括 Cr(Ⅲ)和 Cr(Ⅵ)两种形态存在，因此在计算土壤中 Cr(Ⅲ)非致癌危害商过程中，以对应点位的总铬浓度与六价铬浓度之差作为 Cr(Ⅲ)浓度。

由表 5 可见，苯和 Cr(Ⅲ)既存在致癌风险又存在非致癌危害商，其余污染物仅存在非致癌危害商，并且二甲苯和 Cr(Ⅲ)的非致癌危害商均小于1，在可接受风险范围内。土壤中超过可接受风险范围的污染物主要为苯、甲苯和 Cr(Ⅲ)，地下水中关注的污染物风险值均在可接受范围内。

从分层计算的结果来看：有机物中苯在粉土层的致癌风险值和非致癌危害商值最大，明显高于可接受风险值水平，粉砂层及地下水中苯的致癌风险值和非致癌危害商均在可接受范围内；甲苯在粉质黏土层非致癌危害商最大，高于可接受风险水平，粉砂层及地下水中非致癌危害商在可接受范围内；Cr(Ⅲ)从回填土层至粉土层土壤均存在不同程度的污染(表 2)，但是仅在回填土层计算出 Cr(Ⅲ)高于可接受水平的致癌风险值和非致癌危害商，其余各层的风险值无法计算，主要原因是表层土壤中的 Cr(Ⅲ)可以通过摄入、呼吸、皮肤吸收等暴露途径影响人体健康；

Cr(Ⅵ)在自然环境下无法形成气态(不存在如亨利常数、空气中扩散系数等<sup>[4]</sup>理化性质参数)，在较深层次土壤(粉质黏土层至粉砂层)和(微)承压地下水层中不存在暴露途径影响人体健康，因而无法计算 Cr(Ⅵ)的致癌风险值和非致癌危害商。

2.5 不确定性评价

不确定性评价可以明确风险评估结果的可靠性和实用性，有助于污染场地风险管理，本研究通过暴露风险贡献率分析和模型参数敏感性分析两方面<sup>[4]</sup>进行不确定性评价。

2.5.1 暴露风险贡献率分析 采用 HERA 模型，计算了各深度单一污染物经不同暴露途径的致癌和非致癌贡献率，见表 6。

从表 6 可以看出，暴露风险贡献率因关注污染物类型不同而呈现变化，与污染物埋深关系不大。挥发性有机物苯、甲苯和二甲苯，从回填土层至粉砂层，吸入室内空气暴露途径在致癌或非致癌总风险的贡

表 6 单一污染物经不同暴露途径的致癌和非致癌风险贡献率(%)  
Table 6 Contributions of exposure pathways of individual contaminants to carcinogenic and non-carcinogenic risks

土层	贡献率类别	苯		Cr( )		甲苯	二甲苯	Cr( )
		致癌	非致癌	致癌	非致癌	非致癌	非致癌	非致癌
回填土层	$PPC_s^{ing}$	3.37	6.99	19.67	73.56	34.99	19.09	100
	$PPC_s^{ip}$	0.01	0.01	66.48	21.88	0.01	0.38	-
	$PPC_s^{op}$	0	0	13.85	4.56	0	0.08	-
	$PPC_s^{sur-ov}$	0.29	0.28	-	-	0.13	7.34	-
	$PPC_s^{sub-ov}$	0.1	0.1	-	-	0.07	0.08	-
	$PPC_s^{iv}$	96.23	92.62	-	-	64.8	73.04	-
粉质黏土层	$PPC_s^{sub-ov}$	0.11	0.11	-	-	0.11	0.11	-
	$PPC_s^{iv}$	99.89	99.89	-	-	99.89	99.89	-
粉土层	$PPC_s^{sub-ov}$	0.1	0.1	-	-	0.1	0.1	-
	$PPC_s^{iv}$	99.9	99.9	-	-	99.9	99.9	-
粉砂层 (含地下水)	$PPC_s^{sub-ov}$	0.1	0.1	-	-	0.1	0.1	-
	$PPC_s^{iv}$	99.9	99.9	-	-	99.9	99.9	-
	$PPC_{gw}^{ov}$	0.1	0.1	-	-	0.1	0.1	-
	$PPC_{gw}^{iv}$	99.9	99.9	-	-	99.9	99.9	-

注： $PPC_s^{ing}$ 表示单一污染物经口摄入土壤暴露途径风险贡献率， $PPC_s^{ip}$ 表示单一污染物经吸入室内土壤颗粒物暴露途径的风险贡献率， $PPC_s^{op}$ 表示单一污染物经吸入室外土壤颗粒物暴露途径的风险贡献率， $PPC_s^{sur-ov}$ 表示单一污染物经吸入表层土壤室外空气暴露途径的风险贡献率， $PPC_s^{sub-ov}$ 表示单一污染物经吸入下层土壤室外空气暴露途径的风险贡献率， $PPC_s^{iv}$ 表示单一污染物经吸入室内空气暴露途径的风险贡献率， $PPC_{gw}^{ov}$ 表示单一污染物经吸入地下水室外空气暴露途径的风险贡献率， $PPC_{gw}^{iv}$ 表示单一污染物经吸入地下水室内空气暴露途径的风险贡献率。

献率均为最大,超过 60%;重金属 Cr( )和 Cr( )仅在回填土层计算出致癌和非致癌风险,Cr( )经吸入室内土壤颗粒物暴露途径的致癌风险贡献率达到 64.84%,Cr( )和 Cr( )的非致癌风险中经口摄入的风险贡献率最大,分别为73.5%和 100%。因此,在场地风险控制和管理过程中,应避免或减少苯、甲苯通过吸入室内空气途径而暴露,Cr( )通过经口摄入和吸入室内土壤颗粒物途径而暴露,降低关注污

染物对人体健康风险。

2.5.2 模型参数敏感性分析 单一暴露途径风险贡献率超过 20%时,应进行相关参数的敏感性分析<sup>[4]</sup>。根据暴露风险贡献率分析结果,选择具有代表性的挥发性有机物苯吸入室内空气暴露途径和重金属 Cr( )经口摄入暴露途径的模型参数进行分析。模型不同参数对致癌和非致癌风险值的敏感性比例见表 7。

表 7 模型参数对致癌和非致癌风险值的敏感性比例<sup>①</sup>  
Table 7 Parameter sensitivity ratios of carcinogenic and non-carcinogenic risks

污染物	暴露途径	模型参数及敏感性比例						
		$\rho_s$	$\rho_b$	$P_{ws}$	$E_{Da}$	$E_{Fla}$	$D_{AIRa}$	$A_{Tca}$
苯	吸入室内空气	-607.15	170.97	-34.92	0.66	0.66	-0.26	-0.92
		$A_{Tnc}$	$L_B$	$E_R$	$B_{Wa}$	$f_{om}$	$\theta_{acrack}$	$\theta_{wcarck}$
		-0.94	-0.92	-0.92	-0.26	-1.11	0.13	0
Cr( )	经口摄入	$\rho_s$	$\rho_b$	$P_{ws}$	$E_{Da}$	$E_{Fla}$	$O_{SIRa}$	$B_{Wa}$
		0	0	0	0.70	0.18	0.14	0.28
		$f_{om}$	$A_{Tca}$	$A_{Tnc}$				
		0	-0.85	-0.96				

注： $E_{Da}$ ：成人暴露期； $E_{Fla}$ ：成人室内暴露频率； $D_{AIRa}$ ：成人每日空气呼吸量； $A_{Tca}$ ：致癌效应平均时间； $A_{Tnc}$ ：非致癌效应平均时间； $L_B$ ：室内空间体积与气态污染物入渗面积之比； $E_R$ ：室内空气交换速率； $B_{Wa}$ ：成人平均体重； $\theta_{acrack}$ ：地基裂隙中空气体积比； $\theta_{wcarck}$ ：地基裂隙中水体积比； $O_{SIRa}$ ：成人每日摄入土壤量；其余参数见表 1。敏感性比例为无量纲，“-”表示参数与风险值呈负相关关系。表示利用参数实测值与默认值<sup>[4]</sup>进行敏感性分析；其余使用的默认参数选择化勇鹏<sup>[11]</sup>提出的参数值小范围变动进行敏感性分析。

结果表明,计算挥发性有机物苯的吸入室内空气暴露途径的致癌和非致癌风险时,土壤颗粒密度、土壤体积质量、土壤含水率以及土壤有机质含量等参数敏感性比例均大于1,对风险值的影响较为显著;然而 Cr( )计算经口摄入暴露途径的致癌和非致癌风险时,这4个参数对风险值几乎没有影响。因此,挥发性有机物风险评估时应实地获取这 4 个参数,而

重金属进行风险评估时则可选择默认值计算。其余参数的敏感性比例均小于 1,可以选择默认值进行计算。

## 2.6 场地修复目标值

根据《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014),利用 HERA 软件分别计算关注污染物不同深度基于保护人体健康<sup>[12]</sup>的土壤及地下水的修复目标值(表 8)。

表 8 基于不同土层健康风险的修复目标值  
Table 8 Remediation targets of health risk assessments with different depths

土层	环境介质	苯	甲苯	二甲苯	Cr( )	Cr( )
回填土层	土壤	0.434	708	43.3	24 900	0.251
粉质黏土层	土壤	0.807	2460	77.7	N	N
粉土层	土壤	1.42	4 440	119	N	N
粉砂层	土壤	2.51	8 140	227	N	N
	地下水	2.76	6 340	118	N	N

注：“N”表示无法计算；土壤修复目标值单位 mg/kg，地下水修复目标值单位 mg/L。

从计算结果来看,有机物苯、甲苯和二甲苯等修复目标值随着土层深度的不断加深而增大,以苯和甲苯为例,粉砂层的修复目标值分别是回填土目标值的 5.9 倍和 11.5 倍;由于较深层次的土壤和地下水中重金属 Cr( )和 Cr( )不存在暴露途径可以影响人体健康,因此,仅在回填土层存在修复目标值。

## 2.7 修复范围和修复技术的确定

2.7.1 修复范围 场地北部区域以有机物(苯、甲苯)污染为主,中南部区域重金属(Cr( ))污染为主,根据污染物分布情况、分层计算的修复目标值,利用空间插值法,确定了场地有机物(苯、甲苯)污染范围(表 9、图 2)。

表 9 苯和甲苯修复范围  
Table 9 Remediation ranges of benzene and methylbenzene

土层	回填土层	粉质黏土层	粉土层	粉砂层
污染范围(m <sup>2</sup> )	1 600	3 180	3 134	1 927

尽管只有回填土层 Cr( )污染土壤存在健康风险,但是,场地不同深度土壤均有大量点位 Cr( )超标情况,必须进行修复。对于 Cr( )不同深度的污染范围均以基于健康风险评估计算的回填土层修复目标值(0.251 mg/kg)进行划分(表 10)。

2.7.2 修复技术 1)苯、甲苯污染修复技术苯和甲苯修复目标值随深度逐渐增大,回填土层至粉质黏土层(0~6.5 m)污染土壤,修复目标值较为严格,由于异位修复技术相比原位修复技术修复效果好<sup>[13-14]</sup>,选择对挥发性有机物具有较高的去除率的异位土壤气相抽提(SVE)技术修复;粉土层至粉砂层(6.5~13.8 m)污染的土壤,考虑到土层渗透性远高于上两层,并且修复目标值相对宽松,对于深层的污染土壤,选用原位化学氧化技术修复。

2)重金属 Cr( )污染修复技术。Cr( )毒性较大,通过健康风险评估计算,修复目标值相当严格(0.251 mg/kg),相反,Cr( )的毒性较低,修复目标

值较为宽松(24 900 mg/kg),为节约修复成本,Cr( )的修复技术以还原稳定化固化为主,将土壤中毒性高的 Cr( )通过还原剂改变为毒性较低的 Cr( ),并固定在土壤中。因此,Cr( )污染最严重的回填土层上部(0~2 m)采用异位化学还原稳定化固化修复技术,其余各土层(2~8.5 m)采用原位生物还原稳定化固化修复技术。

## 3 结论与建议

1)研究场地为有机物-重金属复合型污染场地,关注的污染物有苯、甲苯、二甲苯、Cr( )和 Cr( ),其中苯和 Cr( )的致癌风险值均超过人体可接受水平(10<sup>-6</sup>);苯、甲苯和 Cr( )的非致癌危害商均大于 1;其余污染物及地下水中关注污染物的风险值均未超过可接受水平。

2)根据场地水文地质特征将场地土壤分为回填土、粉质黏土、粉土和粉砂等 4 层,HERA 软件分层

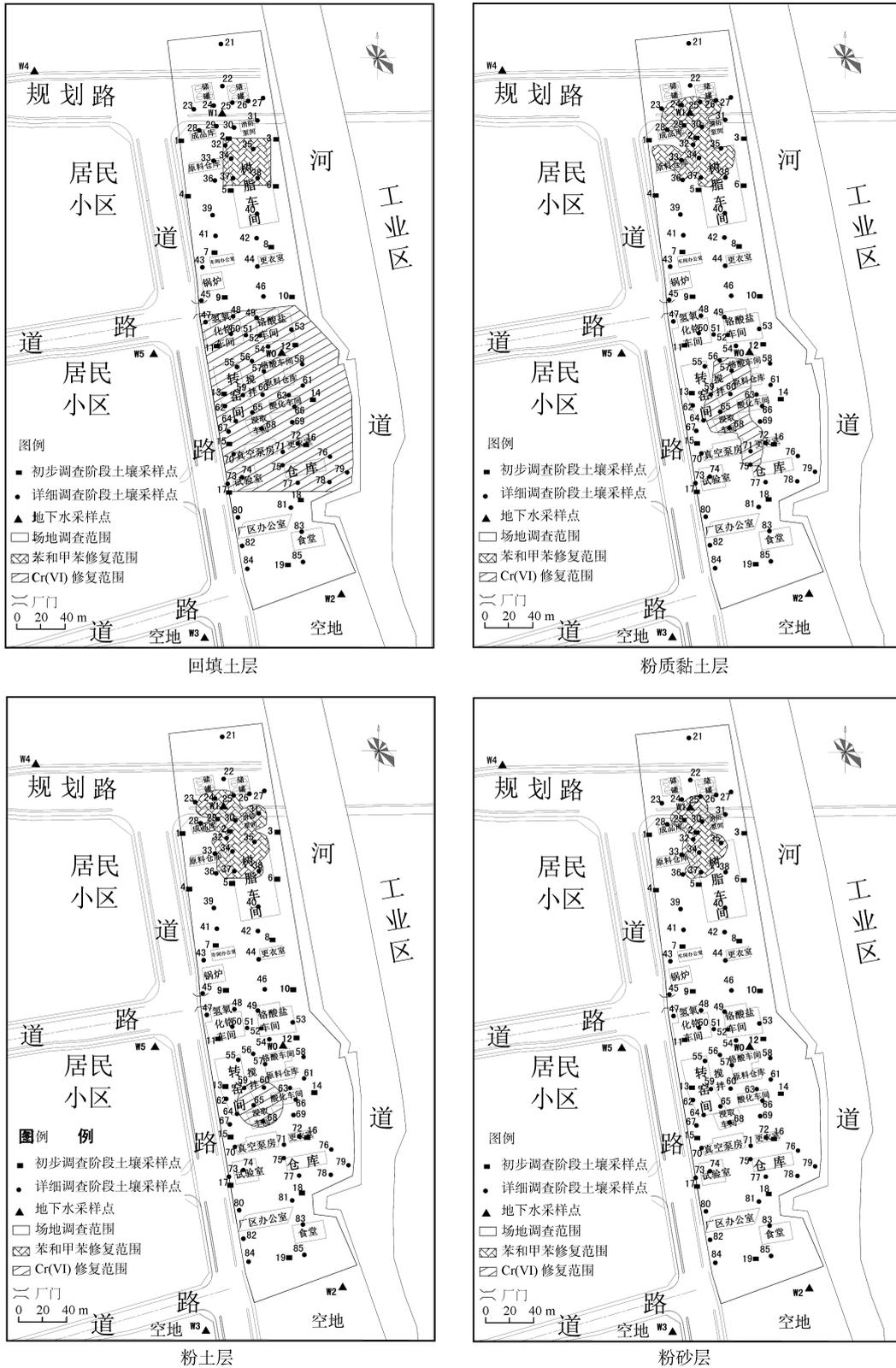


图 2 不同深度污染物修复范围  
Fig. 2 Remediation ranges at different soil depths

表 10 Cr(VI) 的修复范围  
Table 10 Remediation range of Cr(VI)

土层	回填土层	粉质黏土层	粉土层	粉砂层
污染范围(m <sup>2</sup> )	16 938	2 700	1 200	0

健康风险评估结果表明：苯和甲苯的分层修复目标值遵循随土层深度增加而变大的规律，可明显减少土壤污染面积；由于重金属理化性质特征，Cr( )修复目标值不存在随深度变化的情况，仅在表层(回填土层)计算出修复目标值，下层土壤中无法计算相应的修复目标值。因此，分层健康风险评估适用于挥发性有机物污染，而对于重金属污染物来讲意义不大。

3) 挥发性有机物(苯、甲苯)修复目标值分层变化的规律可用于修复技术方案的制定。表层修复目标值较为严格，可采用修复效果较好的异位修复技术<sup>[15]</sup>，深层土壤修复目标值相对宽松，可选择修复成本更低、对土壤破坏小的原位修复技术<sup>[15]</sup>，避免过度修复。

4) 计算挥发性有机物吸入室内空气暴露途径的致癌和非致癌风险，土壤颗粒密度、土壤体积质量、土壤含水率和土壤有机质含量是敏感参数，应从实地获取；而计算重金属经口腔摄入土壤暴露途径的致癌和非致癌风险，模型参数可选择默认值。

#### 参考文献：

- [1] 罗飞, 宋静, 潘云雨, 等. 典型滴滴涕废弃生产场地污染土壤的人体健康风险评估研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 26-35
- [2] 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
- [3] 郭观林, 王世杰, 施烈焰, 等. 某废弃化工场地 VOC/SVOC 污染土壤健康风险分析[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 397-402
- [4] 环保部. 污染场地风险评估技术导则(HJ25.3-2014)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014
- [5] 房吉敦, 杜晓明, 李政, 等. 某复合型化工污染场地分层健康风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(5): 451-457
- [6] 董敏刚, 张建荣, 罗飞, 等. 我国南方某典型有机化工污染场地土壤与地下水健康风险评估[J]. 土壤, 2015, 47(1): 100-106
- [7] 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]. 环境监测管理与技术, 2015, 27(2): 31-34
- [8] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA 和 CLEA 模型在某重金属污染场地环境风险评价中的应用比较[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 241-247
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM E-1739-95 standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release site[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2002
- [10] 陈梦舫, 罗飞, 韩璐, 等. 污染场地健康与环境风险评估软件 (HERA, Version 1.0)[P]. 中国科学院南京土壤研究所, 2012
- [11] 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]. 武汉: 中国地质大学, 2012: 81-82
- [12] 姜林, 钟茂生, 梁竞, 等. 层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1 034-1 043
- [13] Contaminated Sites Management Working Group. Site remediation technologies: a reference manual[R]. Canada: Water Technology International Corp, 1997
- [14] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [15] 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 等. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 197-202

## Layered Health Risk Assessment in a Compound Industrial Contaminated Site

XU Wei<sup>1</sup>, SHI Weilin<sup>2\*</sup>, SHEN Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Jianrong<sup>1</sup>, ZHENG Jiachuan<sup>1</sup>

(1 *Suzhou Environmental Science Research Institute, Suzhou, Jiangsu 215007, China*; 2 *School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China*)

**Abstract:** Taking a typical organic and heavy metal contaminated site as the study object, the soils were divided into four layers, backfill soil layer (0 – 4.1 m), silty clay layer (4.1 – 6.5 m), silt soil layer (6.5 – 8.5 m) and silty sand layer (8.5 – 13.8 m) based on hydro-geological characteristics. Layered health risk assessment was carried out by HERA software. The risk levels and remediation targets of concerned contaminants in soil and groundwater were estimated, and on the basis remediation area and technology were determined. The results indicated the presence of serious organic (benzene and methylbenzene) and heavy metal (Cr( VI )) contamination in soil. The maximum carcinogenic risk of benzene and non-carcinogenic hazard quotient of methylbenzene were 0.000 155 and 2.14; Cr( VI ) in surface soil had carcinogenic risks (0.014 2) and non-carcinogenic hazard quotients (97.6), while Cr( VI ) in lower soil was not harmful to health due to no exposure pathway. The health risk of concerned contaminants in groundwater was within the acceptable range. The remediation targets of benzene and methylbenzene in different layers were 0.434, 708 mg/kg in backfill soil layer, 0.807, 2 460 mg/kg in silty clay layer, 1.42, 4 440 mg/kg in silt soil layer and 2.51, 8 140 mg/kg in silty sand layer. However, the remediation target of Cr( VI ) only calculated was 0.251 mg/kg in backfill soil layer. The remediation targets of VOCs (benzene and methylbenzene) increased with soil depth increase, while the remediation targets of heavy metal (Cr( VI )) did not follow this rule. Therefore, layered health risk assessment is more suitable for the health risk assessment of VOCs.

**Key words:** Compound chemical contaminated; Layered health risk assessment; HERA; Remediation target