ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 34 卷　第 3 期
2013 年 3 月 15 日

目　次

BP 网络框架下 MODIS 气溶胶光学厚度产品估算中国东部 $PM_{2.5}$ …… 郭建平, 吴业荣,张小曳,李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究 …… 林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析…… 浦静姣,徐宏辉,顾骏强,马千里,方双喜,周凌晞(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析 …… 路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量 …… 何真,陆小兰,杨桂朋(849)
2000 ~ 2010 年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化 …… 李绪录,周毅频,夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析 …… 周然,彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化 …… 王鹏,尚英男,沈立成,伍坤宇,肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选 …… 徐华山,徐宗学,刘昌(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法 …… 邹锐,周璟,刘永,朱翔,赵磊,阳平坚,郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献…… 罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究 …… 钟茂生,姜林,姚珏君,樊艳玲,夏天翔,李婷婷,田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究 …… 李秀利,杨君君,卢晓霞,张姝,侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究 …… 李海燕,徐波平,徐尚玲,崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中 5 种典型 PPCPs 的赋存特征和生态风险…… 温智皓,段艳平,孟祥周,陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价…… 孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究…… 李伟,赵晶,余健,任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究…… 范举红,余素林,张培帅,兰亚琼,刘锐,陈吕军(950)
γ-Al_2O_3 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红 3R 的研究 …… 岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙 G 动力学 …… 杨梅梅,周少奇,刘聃,郑可(962)
ABR 反应器处理碱减量印染废水的启动研究 …… 杨波,钟启俊,李方,田晴(968)
O_3-BAF 深度处理制革废水中沿程污染物降解规律 …… 余彬,刘锐,程家迪,范举红,李昌湖,冉坤,曹国华,陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水 UASB-SFSBR-MAP 处理工艺中试研究 …… 王亮,陈重军,陈英旭,吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究 …… 牛姝,段百川,张祚黧,刘士峰,张家铭,王聪,周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为 EBPR 碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立 …… 张超,陈银广(993)
乙酸/丙酸作为 EBPR 碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟 …… 张超,陈银广(998)
乙酸/丙酸作为 EBPR 碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用 …… 张超,陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面 CO_2、CH_4 通量比较初探 …… 李哲,白镭,郭劲松,方芳,蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素 …… 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素 …… 周小刚, 张彦军, 南雅芳,刘庆芳,郭胜利(1026)
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 …… 姜林,钟茂生,梁竞,姚珏君,夏天翔,樊艳玲, 李敬东,唐振强(1034)
海州湾潮滩重金属污染的历史记录…… 张瑞,张帆,刘付程,尹福军,丁迎军,高金荣,陈晶,邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价 …… 张清海,林昌虎,谭红,林绍霞,杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析 …… 程芳,程金平,桑恒春,于金莲,席磊,皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估 …… 李如忠,姜艳敏,潘成荣,陈婧,徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估 …… 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究 …… 陈秀端,卢新卫,杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义 …… 龚仓,徐殿斗,成杭新,任雅阁,刘志明,刘应汉,刘飞,聂海峰,郑祥,马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究 …… 张树楠,贾兆月,肖润林,杨凤飞,余红兵,刘锋,吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究…… 孙文彬,杜斌,赵秀兰,何丙辉(1107)
Triton X-100 在黄土上的吸附行为及影响因素 …… 钟金魁,赵保卫,朱琨,钱小龙,张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险 …… 马子龙,毛潇萱,丁中原,高宏,黄韬,田慧,郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源…… 何畅,金军,马召辉,王英,扎西卓玛,马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布 …… 马召辉, 金军, 亓学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析…… 刘近,邓代永,许玫英,孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性…… 谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究 …… 牟玲,彭林,刘效峰,白慧玲,张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较 …… 崔玉波,孙红杰,冉春秋,李金凤,谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响 …… 刘敬勇,孙水裕,陈涛 (1166)
铸造废砂的环境毒性研究 …… 张海凤,王玉珏,王劲璘,黄天佑,熊鹰 (1174)
Cr^{6+} 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器 CB10 的构建及其响应特征 …… 侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析 …… 于皓,王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 数量的影响 …… 胡春晓,陈耀宁,张嘉超,唐聪,曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白 PRDX 基因对土壤 PAHs 污染胁迫的转录响应 …… 林康丽,郑森林,宋玉芳,邱晓燕,薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究 …… 周耀渝, 汤琳, 李贞,刘媛媛,杨贵德,伍梦诗,雷晓霞,曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究 …… 贺桂珍,吕永龙 (1218)
《环境科学》征订启事(942)　《环境科学》征稿简则(992)　信息(932, 949, 1061, 1210)　专辑征稿通知(1173)

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

姜林[1,2,3],钟茂生[1,2,3],梁竞[1,2,3],姚珏君[1,2,3],夏天翔[1,2,3],樊艳玲[1,2,3], 李敬东[4],唐振强[4]

(1. 北京市环境保护科学研究院,北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心,北京 100037; 3. 污染场地风险模拟与修复北京市重点实验室,北京 100037; 4. 北京市固体和化学品管理中心,北京 100089)

摘要: 以北京某大型苯污染场地为例,详细介绍了如何开展层次化健康风险评估. 同时,结合场地污染调查结果,比较了不同层次风险评价确定的土壤苯修复目标、修复量及修复成本的差异. 结果表明,在 1×10^{-6} 可接受致癌风险水平下,该场地第二层次风险评价确定的 0 ~ 1.5 m 深度范围内土壤苯修复目标为 0.26 mg·kg^{-1}、1.5 ~ 10 m 范围内土壤苯修复目标为 0.15 mg·kg^{-1},相应的土壤修复量约为292 759 m^3,修复成本约 2.06 亿元. 但是,基于该场地苯污染区域土壤气中苯浓度进行的第三层次风险评价确定的 0 ~ 1.5 m 深度范围内土壤苯修复目标为 2.6 mg·kg^{-1}、1.5 ~ 10 m 范围内土壤苯修复目标为 1.5 mg·kg^{-1},相应的土壤修复量约为153 222 m^3,减少139 537 m^3,修复成本为 1.49 亿元,减少了5 700万元,修复成本的降低远多于因开展第三层次风险评价所付出的约 10 万元的成本. 因此,对于类似大型 VOCs 污染场地,开采第三层次健康风险评价能够节省大量修复成本、带来巨大的经济效益.

关键词:层次化; 苯; 健康风险; 效益评估; 成本节约

中图分类号: X53; X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2013)03-1034-10

Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene

JIANG Lin[1,2,3], ZHONG Mao-sheng[1,2,3], LIANG Jin[1,2,3], YAO Jue-jun[1,2,3], XIA Tian-xiang[1,2,3], FAN Yan-ling[1,2,3], LI Jing-dong[4], TANG Zheng-qiang[4]

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. Beijing Key Laboratory for Risk Modeling and Remediation of Contaminated Sites, Beijing 100037, China; 4. Beijing Municipal Solid Waste and Chemical Management Center, Beijing 100089, China)

Abstract: The procedures of implementing tiered health risk assessment approach were introduced in detail, and took a large-scale site polluted by benzene in Beijing as an example, the difference on the remediation target of benzene in soil, as well as the corresponding soil remediation volume and costs, were compared. The results indicate that the benzene concentration in soil within 1.5 m in depth and the one below should be remediated to 0.26 mg·kg^{-1} and 0.15 mg·kg^{-1}, respectively, in order to keep the cumulative carcinogenic health risk below 1×10^{-6} based on tiered Ⅱ assessment. However, according to tiered Ⅲ assessment result, which is based on the benzene in soil gas within the contaminated areas in the investigated site, the soil in the corresponding depth should only be remediated to 2.6 mg·kg^{-1} and 1.5 mg·kg^{-1}, respectively. That means the soil remediation volume delimited on tiered Ⅲ assessment result is less than the one on tiered Ⅱ by 139 537 m^3 and the corresponding remediation costs will be reduced by 57 million Yuan, meaning the enormous economic benefits compared to the costs (around 100 thousands Yuan) spent to carry out tiered Ⅲ assessment in the site.

Key words: tiered approach; benzene; health risk; benefits evaluation; cost saving

随着我国城市化进程的不断推进,许多城市为满足城市建设用地需求及改善城市环境质量,已逐渐将原本位于城市中心的一些重污染企业(如化工厂、炼焦厂、炼钢厂等)迁至城郊集中工业园区或将其关闭,原场址将被规划为商业或居住用地. 但是,由于企业疏于对生产过程中产生的废弃物进行严格管理以及废弃物存储设施泄露等原因,一些厂区土壤及地下水有可能被污染. 因此,对这类场地,需在开发利用前进行健康风险评估,以确定场地未来使用人群的风险水平并依此制定相应的控制及管理措施.

收稿日期: 2012-06-27; **修订日期**: 2012-09-17

基金项目: 北京市科委重大项目(D08040900360804); 环境保护公益性行业科研专项(201009032)

作者简介: 姜林(1964 ~),男,博士,研究员,主要研究方向为污染场地调查、评估、修复与固体废弃物污染控制,E-mail:jl-iep@vip.163.com

目前，国内现有的污染场地风险评估技术导则[1~3]在核心思想上依然沿用美国国家科学院于1972 年提出的风险评估思路，即将整个风险评估分为危害识别、暴露评估、毒性评估及风险表证 4 个步骤[4,5]. 但是，整个评估过程中（尤其是暴露及毒性评估），由于涉及许多场地特征及受体暴露特征参数，针对某一特定场地如需非常精确的评估该场地污染物的健康风险，需对这些参数逐个进行详细调查，其成本将极其高昂、项目调查周期也将相应延长. 因此，为平衡调查结果精确性与调查成本间的矛盾，同时又不低估污染物的健康风险，采用层次化风险评价技术显得尤为重要[3,5~7]. 欧美许多国家在制定污染场地风险评估技术导则时，均强调应用层次化风险评价思路，以避免在调查阶段投入过多不必要的资源[5,8~10]. 由于我国在工业污染场地风险评价领域起步相对较晚，虽然相关技术导则中业已提及采用层次化思路开展污染场地风险评价[3,11,12]，但文献显示当前已完成的评估项目大部分均只进行到第二层次[13~16]，即利用拟评估场地部分实测参数对评估模型中的默认参数进行替代以进行风险评估. 对于大型的污染场地，当风险评估仅进行到这一层次时，其结果可能仍过于保守，最终导致场地过度修复.

姜林等[17]比较某大型苯污染场地土壤中实测土壤气浓度与采用模型基于土壤中苯浓度计算对应点土壤气中苯浓度发现，实测值低于模型计算值 1 ~2 个数量级，基于实测土壤气中苯浓度计算的风险也相应低 1 ~2 个数量级，建议以土壤气中实测苯浓度对该场地开展第三层次风险评估. 因此，在以上研究成果的基础上，本研究依然以该大型苯污染场地为例，详细介绍了在这个实际评估项目中如何开展层次化风险评估. 同时比较了该场地第二层次与第三层次风险评价结果的差异、评估了其对该场地苯污染土壤修复带来的经济效益，以期为国内同类大型 VOCs 污染场地开展层次化风险评估提供借鉴和参考.

1　研究方法

1.1　层次化评估方法概述

与传统水及大气污染不同，场地土壤及地下水污染可能通过多途径对人体健康产生危害，各种途径产生的危害程度与场地的地质条件、受体的暴露特性、场地污染特性等众多因素有关. 因此，无法采用类似水与大气污染管理思路对污染场地进行管理，期待通过制定一个统一的国家或地方标准来评价具体项目的污染状况. 针对这种情况，国外通常做法是在国家或地方层面推荐一个通用筛选值. 出于保护人体健康的考虑，在制定该筛选值的过程中，充分考虑各种不利因素，同时在建立暴露评估及毒性评估模型过程中做了大量非常保守性的假设，确保该筛选值能够充分起到保护人体健康的目的，但是却非常保守[5,7,9,16]. 因此，针对具体项目，评估人员可以根据现场勘查结果，首先在疑似重污染区域采集部分样品进行分析并将结果与保守的筛选值进行比较，如果样品最大检出浓度低于筛选值，则可判定该场地污染对未来人群产生的健康风险可以接受，调查评估工作可结束，即该场地只需进行第一层次风险评价. 当有样品检测浓度高于筛选值时，此时评估人员需与业主沟通，决定是依据现有检测数据及筛选值保守地确定修复范围并进行修复，还是开展第二层次风险评价，即对场地进行更为详细的采样调查、获取更多场地特征参数后计算基于该场地污染特征及暴露特性的筛选值，之后再次进行污染评估及修复范围确定. 通常情况下，当第一层次确定的修复范围较大，核算的修复成本较高时，建议开展第二层次风险评估以计算该特定场地的风险筛选值并据此重新确定修复目标及修复量. 但是，如果依据第二层次评估结果确定的修复范围及修复成本依然较高，评估人员需与业主再次就评估结果进行沟通，决定是按第二层次评估结果进行场地修复还是继续开展第三层次风险评价、即对场地再次进行补充采样、同时对暴露评估模型及毒性参数进行修正，使其更符合该场地污染物的迁移特性及受体的暴露特征. 如果决定开展第三层次评估，整个评估过程中涉及的评估模型及参数将基本依据评估场地自身情况进行替代或修正，之后再重新计算场地的修复目标及修复量. 此时的计算结果一般更为客观、据此确定的修复工程量将减少、修复成本也将降低. 具体评估项目中，层次化风险评估方法的执行程序及决策过程如图 1 所示.

由图 1 可以看出，随着风险评价层次的不断提高，虽然评估结果的不确定性逐渐减小、精度逐步升高，确定的修复目标可能更符合场地客观情况. 但其代价是需对场地开展更为详细的调查采样分析，调查的经济及时间成本也将随评估层次的升高而增加. 不同层次风险评价结果的不确定性、调查结果的精确性、对未来人群健康的保障、需要投入的调查成本及场地最终修复成本间的关系如图 2 所示.

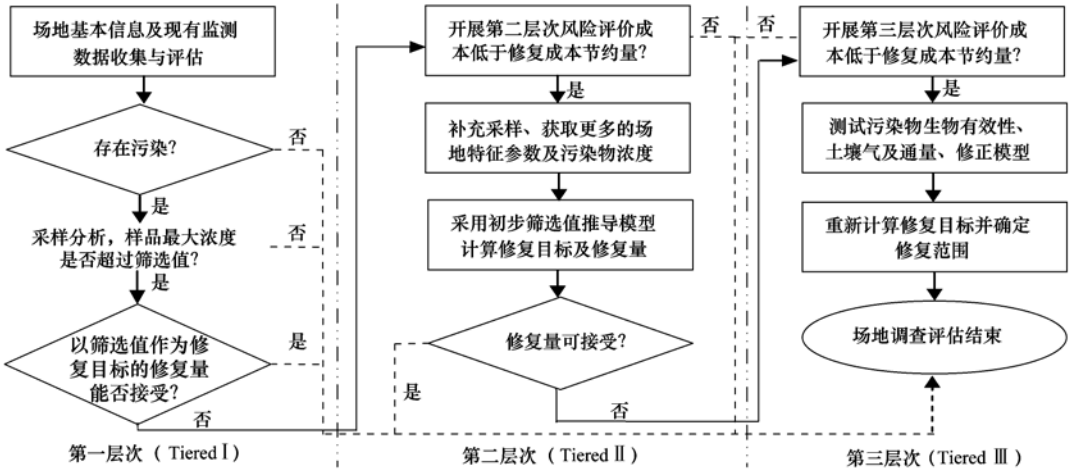

图 1 层次化评估流程

Fig. 1 Tiered risk assessment procedures

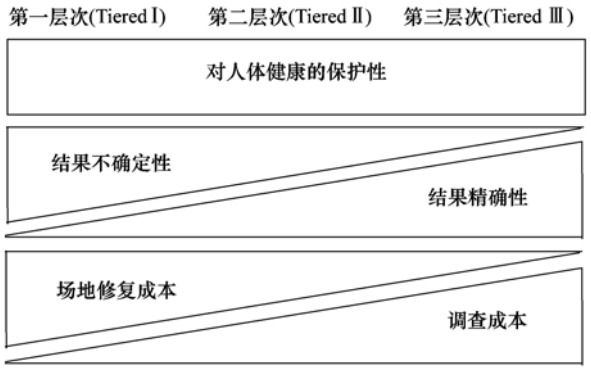

图 2 层次化风险评估的特点

Fig. 2 Characteristic of tiered assessment approach

1.2 案例场地基本概况

本研究选取的大型苯污染场地位于北京市东 5 环垡头地区,场地占地面积约 136 万 m^2. 自 1953 年以来,该场地一直作为北京某焦化厂生产用地,主要以煤为原料进行煤气生产,同时回收焦油、苯等化工产品. 前期调查显示,该场地地层结构主要分 4 层,各层土壤中苯浓度含量均较高. 其中,0 ~ 1.5 m 回填土,苯最高浓度达到 4.86 $mg\cdot kg^{-1}$. 1.5 ~ 6.5 m 黏粉层,苯最高浓度达到3 240 $mg\cdot kg^{-1}$. 6.5 ~ 9.5 m 黏土层,苯最高浓度为3 190 $mg\cdot kg^{-1}$. 9.5 ~ 10 m 砂质土层,苯浓度最高达到2 800 $mg\cdot kg^{-1}$. 同时,厂区 48 口地下水监测井水位资料显示该场地地下水埋深 10 ~ 11 m. 样品监测结果显示,场地地下水也受到严重的苯污染,最高浓度达到 76.4 $mg\cdot L^{-1}$.

1.3 第二层次风险评估

2008 年对该场地进行了不同用地情形下(住宅、商业及公园)的健康风险评价. 综合该焦化厂生产工艺、排污特性及现场踏勘结果,在疑似污染区域共采集了 102 个土壤样品进行分析并与国内居住情形下苯筛选浓度的模型计算值 0.017 $mg\cdot kg^{-1}$ 进行比较(即第一层次风险评价). 结果表明,样品超标比较严重,以筛选浓度确定的修复范围巨大. 因此,决定对该场地开展更深层次的风险评价. 同时,对于苯这类 VOCs(挥发性有机污染物)污染场地,当地下水已不再作为生活用水时,污染物的关键暴露途径是呼吸土壤及地下水中挥发至室内或室外的苯蒸气[18~20]. 因此,本研究仅详述假设场地未来开发为居住用地情形时在这一关键暴露途径下的第二层次健康风险评价方法及修复目标的计算. 考虑到案例场地土壤与地下水均被苯污染这一特殊情况,将分别计算表层(即 0 ~ 1.5 m 回填土层)、深层(即 1.5 m 以下非饱和土壤层)及地下水的健康风险,计算过程中假设目标计算层之上的非饱和土层为清洁土壤,最后将不同层计算的风险值进行线性叠加作为场地受体的最终累积健康风险. 其中,在计算深层土壤及地下水风险时非饱和层土壤的理化参数采用加权平均值作为模型输入值. 评价过程中采用的模型如式(1) ~ (10)所示[3].

(1)表层土壤呼吸途径风险计算模型

室外呼吸风险 $R_{\text{ss-inhal-outdoor}}$:

$$R_{\text{ss-inhal-outdoor}} = \frac{\text{CS}\times\text{EF}\times\text{ED}\times\text{URF}}{\text{AT}_c\times 365}\times \frac{W\times\rho_s\times d}{U_{\text{air}}\times\delta_{\text{air}}\times\tau}\times 10^6 \quad (1)$$

室内呼吸风险 $R_{\text{ss-inhal-indoor}}$:

$$R_{\text{ss-inhal-indoor}} = \frac{\text{CS}\times\text{EF}\times\text{ED}\times\text{URF}}{\text{AT}_c\times 365}\times$$

$$\frac{(H\times\rho_s)/(\theta_{ws}+k_s\times\rho_s+H\times\theta_{as})}{1+(\mathrm{ER}\times L_B\times L_{crack})/(D^{eff}_{crack}\times\eta)}\times10^6 \quad (2)$$

地板中污染物有效扩散系数:

$$D^{eff}_{crack}=D^{air}\times\frac{\theta^{3.33}_{acrack}}{\theta^2_T}+\frac{D^{wat}}{H}\times\frac{\theta^{3.33}_{wcrack}}{\theta^2_T} \quad (3)$$

(2)深层土壤呼吸途径风险计算模型

室外呼吸风险 $R_{s\text{-}inhal\text{-}outdoor}$:

$$R_{s\text{-}inhal\text{-}outdoor}=\frac{CS\times EF\times ED\times URF}{AT_c\times365}\times\frac{W\times\rho_s\times d}{U_{air}\times\delta_{air}\times\tau}\times10^6 \quad (4)$$

室内呼吸风险 $R_{s\text{-}inhal\text{-}indoor}$:

$$R_{s\text{-}inhal\text{-}indoor}=\frac{CS\times EF\times ED\times URF}{AT_c\times365}\times\frac{[(H\times\rho_s)/(\theta_{ws}+\kappa_s\times\rho_s+H\times\theta_{as})]\times[(D^{eff}_s/L_s)/(\mathrm{ER}\times L_B)]}{1+[(D^{eff}_s/L_s)/(\mathrm{ER}\times L_B)]+(D^{eff}_s/L_s)/[(D^{eff}_{crack}/L_{crack})\times\eta]}\times10^6 \quad (5)$$

土壤中污染物有效扩散系数:

$$D^{eff}_s=D^{air}\times\frac{\theta^{3.33}_{as}}{\theta^2_T}+\frac{D^{wat}}{H}\times\frac{\theta^{3.33}_{ws}}{\theta^2_T} \quad (6)$$

(3)地下水呼吸途径风险计算模型

室外呼吸风险 $R_{w\text{-}inhal\text{-}outdoor}$:

$$R_{w\text{-}inhal\text{-}outdoor}=\frac{CW\times EF\times ED\times URF}{AT_c\times365}\times\frac{H}{1+(U_{air}\times\delta_{air}\times L_{gw})/(D^{eff}_{gw}\times W_{gw})}\times10^3 \quad (7)$$

室内呼吸风险 $R_{w\text{-}inhal\text{-}indoor}$:

$$R_{w\text{-}inhal\text{-}indoor}=\frac{CW\times EF\times ED\times URF}{AT_c\times365}\times\frac{H\times[(D^{eff}_{gw}/L_{gw})/(\mathrm{ER}\times L_B)]}{1+(D^{eff}_{ws}/L_s)/(\mathrm{ER}\times L_B)+(D^{eff}_{ws}/L_{gw})/[(D^{eff}_{crack}/L_{crack})\times\eta]}\times10^3 \quad (8)$$

包气带土壤中污染物有效扩散系数:

$$D^{eff}_{ws}=(h_c+h_v)\left[\frac{h_c}{D^{eff}_{cap}}+\frac{h_v}{D^{eff}_s}\right]^{-1} \quad (9)$$

毛细带土壤中污染物有效扩散系数:

$$D^{eff}_{cap}=D^{air}\times\frac{\theta^{3.33}_{acap}}{\theta^2_T}+\frac{D^{wat}}{H}\times\frac{\theta^{3.33}_{wcap}}{\theta^2_T} \quad (10)$$

模型中各参数的定义及取值如表 1 所示.

目前,在进行污染场地健康风险评价时,通常选取关注区域样品检测浓度的 95% 置信上限浓度作为该介质的代表浓度进行风险计算[21]. Pro-UCL 软件计算结果显示,0 ~ 1.5 m 表层土 208 个样品苯 95% 置信上限浓度 CS 为 0.08 mg·kg^{-1}、深层土 392 个土壤样品 CS 为 14.85 mg·kg^{-1},厂区 48 个地下水样品的 95% 置信上限浓度 CW 为 87.6 mg·L^{-1}. 同时,由于缺乏受体在室内和室外的确切暴露时间,评价时通常假设受体 24 h 处于室外及室内分别进行

表 1　参数定义及取值

Table 1　Definition and parameter values

参数	定义	取值	来源	参数	定义	取值	来源
ρ_s	土壤密度,kg·L^{-1}	表层:1.44 深层:1.72	实测	θ_{as}	土壤中空气含量,无量纲	表层:0.29 深层:0.19	实测
θ_{ws}	土壤中水分含量,无量纲	表层:0.16 深层:0.18	实测	θ_T	包气带土壤总孔隙度,无量纲	表层:0.45 深层:0.38	实测
H	亨利常数,无量刚	0.227	[1]	τ	表层土壤中挥发性物质释放时间,s	9.46×10^8	[1]
κ_s	土壤-水吸附系数,L·kg^{-1}	$K_{oc}\times f_{oc}=0.61$		D^{air}	物质在空气中的扩散系数,m^2·s^{-1}	8.8×10^{-6}	[1]
K_{oc}	有机碳-水吸附系数,L·kg^{-1}	61	[1]	D^{wat}	物质在水中的扩散系数,m^2·s^{-1}	9.8×10^{-10}	[1]
L_B	封闭空间体积与渗透区面积的比例,m	2	[1]	f_{oc}	土壤有机碳含量,无量纲	0.01	实测
L_{crack}	封闭空间地下基础或墙的厚度,m	0.75		θ_{acrack}	基础裂缝土壤中的空气体积含量,无量纲	0.26	[5]
η	建筑基础面积中裂缝所占比例,无量纲	0.01	[5]	θ_{wcrack}	基础裂缝土壤中的水体积含量,无量纲	0.12	[5]
ER	建筑室内换气率,s^{-1}	1.4×10^{-4}	[5]	W_{gw}	平行于地下水流向污染羽宽度,m	881	实测
U_{air}	混合区风速,m·s^{-1}	2	[1]	h_c	毛细带厚度,m	0.05	[5]
L_s	深层土壤埋深,m	1.5 m	实测	h_v	包气带厚度,m	10.95	[5]
δ_{air}	混合区高度,m	2	[5]	θ_{wcap}	毛细带土壤中水的体积含量,无量纲	0.34	[5]
W	平行于风向污染带宽度,m	881	实测	θ_{acap}	毛细带土壤中空气的体积含量,无量纲	0.04	[5]
L_{gw}	地下水埋深,m	10	实测	ATc	致癌平均作用时间,a	70	[1]
d	表层土壤厚度,m	1.5	[5]	EF	暴露频率,d·a^{-1}	365	[1]
URF	单位致癌斜率因子,(μg·m^{-3})$^{-1}$	2.2×10^{-6}	[1]	ED	暴露周期,a	30	[1]

风险计算,出于保守考虑最终选择其中较大的值作为受体的暴露风险. 根据以上计算原则,研究场地未来受体累积风险计算公式如式(11)所示.

$$R_{\text{total}} = \text{Max}(R_{\text{ss-inhol-outdoor}}, R_{\text{ss-inhol-indoor}}) + \text{Max}(R_{\text{s-inhol-outdoor}}, R_{\text{s-inhol-indoor}}) + \text{Max}(R_{\text{w-inhol-outdoor}}, R_{\text{w-inhol-indoor}}) \quad (11)$$

对于场地土壤及地下水修复目标的计算,首先需要确定单一污染物致癌风险可接受水平. 由于目前国外大多数国家及国内一般将 1×10^{-6} 作为污染场地中单一污染物的可接受致癌风险[2,22~24],这一风险值包括来自不同深度土壤及地下水中的同一污染物. 因此,对于本研究场地,需将 1×10^{-6} 可接受致癌风险在厂区不同深度土壤及地下水中进行分配,以分别计算不同土层及地下水中苯的修复目标. 本研究将来自于表层土壤苯的可接受风险假定为 1×10^{-7},深层土壤苯的可接风险假定为 8×10^{-7},地下水苯的可接受风险假定为 1×10^{-7}. 因此,研究场地中每层土壤及地下水的修复目标可通过式(12)~(14)计算.

$$\text{RG 1} = \frac{\text{CS}\times1\times10^{-7}}{\text{Max}(R_{\text{ss-inhol-outdoor}}, R_{\text{ss-inhol-indoor}})} \quad (12)$$

$$\text{RG 2} = \frac{\text{CS}\times8\times10^{-7}}{\text{Max}(R_{\text{s-inhol-outdoor}}, R_{\text{s-inhol-indoor}})} \quad (13)$$

$$\text{RG 3} = \frac{\text{CS}\times1\times10^{-7}}{\text{Max}(R_{\text{w-inhol-outdoor}}, R_{\text{w-inhol-indoor}})} \quad (14)$$

式中,RG1 为表层土壤的修复目标,$mg\cdot kg^{-1}$; RG2 为深层土壤的修复目标,$mg\cdot kg^{-1}$; RG3 为地下水的修复目标,$mg\cdot L^{-1}$; 其余符号同前.

1.4 第三层次风险评估

对于大型 VOCs 污染场地,当评价进行到第二层次时计算的修复目标及据此确定的土壤修复量依然巨大、修复成本仍然较高时,可考虑测试场地土壤气中 VOCs 的浓度或其挥发通量,并利用测试结果对第二层次评估结果进行校正,使修复目标更接近客观事实. 该方法的详细理论依据可参见文献[17, 25~29],具体校正步骤如下: ①以第二层次风险评估计算的修复目标为标准,确定场地超标点的空间分布及需修复土壤所在区域; ②结合样品分析结果,在土壤超标区域布设一定数量的土壤气监测井. 同时,建井过程中采集各土壤气监测井所在位置不同深度的典型土壤样品及地下水样品进行目标污染物分析; ③依据土壤气采样技术规范,采集不同监测井的土壤气样品进行目标污染物分析; ④采用基于土壤气中实测污染物浓度的评估模型及基于对应监测位置土壤及地下水中污染物浓度的评估模型分别计算同一暴露情形下的健康风险并计算二者的比值,获取模型校正因子; ⑤利用模型校正因子对第二层次风险评价计算的修复目标进行校正,以获取该场地更为客观的修复目标. 以 VOCs 室外呼吸暴露途径为例,模型校正因子可通过以下公式计算(公式 15)

$$\text{CF} = \frac{\text{RI 1}}{\text{RI 2}} \quad (15)$$

式中,CF 为模型校正因子,无量纲; RI 1 为基于土壤气中 VOCs 浓度的健康风险,无量纲,其计算模型如式(16)所示,详细推导过程可参见文献[17]. IR 2 为基于对应监测位置土壤及地下水中 VOCs 浓度的健康风险,无量纲,详细计算模型及方法可参见文献[7].

$$\text{RI 1} = c_{\text{sg}}\times\frac{D_{\text{s}}^{\text{eff}}\times W}{D_{\text{s}}^{\text{eff}}\times W + U_{\text{air}}\times\delta\times L_{\text{g}}}\times\frac{\text{EF}\times\text{ED}}{\text{AT}}\times\text{URF}\times10^{3} \quad (16)$$

式中,c_{sg}为土壤气中苯浓度,$mg\cdot m^{-3}$; 其余符号含义同前.

获取模型校正因子后,可采用公式(17)~(19)对第二层次风险评价计算的修复目标进行校正.

$$\text{RG 12} = \frac{\text{RG 1}}{\text{CF}} \quad (17)$$

$$\text{RG 22} = \frac{\text{RG 2}}{\text{CF}} \quad (18)$$

$$\text{RG 32} = \frac{\text{RG 3}}{\text{CF}} \quad (19)$$

式中,RG 12、RG 22、RG 32 为校正后场地土壤及地下水中目标污染物的修复目标,$mg\cdot kg^{-1}$; 其余符号同前.

案例场地第二层次风险评价结果显示,苯污染较重的区域主要位于粗苯生产车间及焦油分厂所在区域,因此在 2010 年开展该场地第三层次风险评价时在这两个区域布置 5 口土壤气监测井进行土壤气中苯浓度的监测. 土壤气采样深度为地表以下 1.5 m,样品分析方法参见文献[30]. 每口土壤气监测井建井过程中在每一土层中采集一个代表性土壤样品进行土壤中苯浓度分析,方法参见文献[30]. 同时,通过土壤气监测井所在区域已有地下水监测井,采集地下水样品进行苯浓度分析,方法参见文献[30].

2 结果与分析

2.1 第二层次风险评估结果

该场地土壤第二层次风险评估结果如表 2 所示.

表 2　第二层次风险评估结果

Table 2　Tiered Ⅱ assessment results

土层	表层	深层
风险值	3.1×10^{-8}	7.9×10^{-5}
修复目标/mg·kg^{-1}	0.26	0.15

由表 2 可知,仅考虑表层土壤污染时,其致癌风险低于 1×10^{-6},可接受,土壤不需进行修复. 但是,当同时考虑表层、深层土壤时,受体的累积风险远高于可接受风险水平,需进行修复. 以表 2 中计算的修复目标为基准,采用 ArcGIS 软件进行污染空间插值,同时根据采样点的监测结果及场地现场实际情况对插值结果进行适当修正,最终获取场地中需修复土壤所在区域、面积以及相应的土方量. 插值结果如图 3 所示.

图 3　第二层次风险评估确定的修复范围

Fig. 3　Remediation area on Tiered Ⅱ assessment

从图 3 可看出,各层土壤中超标点位置主要集中在粗苯回收车间、焦油分厂所在区域. 其中,粗苯车间所在区域整个纵剖面土壤均超过修复目标. 而且,地下水苯浓度最高的点也位于这一区域. 现场进一步勘查发现,该区域现场至今仍存在废水及废液池往地下渗液体的现象. 因此,可初步判断这一区域的污染途径主要是含苯废水或废液自上而下渗漏导致的污染. 而且,9.5 ~ 10 m 插值结果显示该层土壤污染范围明显大于其它层,原因可能是早期地下水水位相对较高,污染物随地下水流动而大范围扩散. 后期地下水开采导致水位下降,但污染物依然被吸附截留在土壤中,进而导致这层土壤也被污染.

根据图 3 的插值结果,可计算不同层土壤的修复量. 其中,表层土壤修复量为33 996 m^3、1.5 ~ 6.5 m 的土壤修复量为69 810 m^3、6.5 ~ 9.5 m 的土壤修复量为140 208 m^3、9.5 ~ 10 m 的土壤修复量为48 745 m^3,总计修复土壤约292 759 m^3.

2.2 第三层次风险评估

由于第二层次风险评价在计算 VOCs 自土壤颗粒相解吸至土壤孔隙气体中假设其符合三相平衡理论[31]. 但是,越来越多的研究发现,这一假设并不完全成立,非平衡吸附更普遍[32~34]. 因此,本研究第二层次评价虽然用场地实测的土壤及水文地质参数代替了导则推荐值,但由于模型自身的保守性假设导致该层次评价结果依然非常保守[35],确定的修复面积及修复量非常大. 对此,可开展第三层次风险评价,以场地实测土壤气中苯浓度或挥发通量进行评价[17, 25~29].

本研究最终选择在苯污染较重的粗苯车间、焦油分厂所在区域布置 5 口土壤气监测井,采集对应位置的土壤气分析苯浓度. 之后,分别基于各监测井土壤与地下水及土壤气中苯浓度计算同一暴露情形下的健康风险. 最后,通过式(15)计算校正因子 CF. 各土壤气监测井的具体位置、土壤气监测井的建设、土壤气样品的采集及风险计算模型可参见文献[17]. 各监测点土壤气中苯实测浓度与模型计算浓度的比较如表 3 所示.

表 3 土壤气中苯实测浓度与模型计算浓度比较

Table 3 Comparison of benzene concentration measured in soil gas and calculated by model

监测点	实测土壤气浓度 /mg·m^{-3}	ASTM 模型计算土壤气浓度 /mg·m^{-3}
1	4	26.71
2	0.1	3.85
3	2.7	23.02
4	22	162.16
5	16	277.35

由表 3 可知,各监测点土壤气中实测苯浓度低于 ASTM 模型计算值 1 个数量级以上,与国外研究结果类似[36~38]. 原因包括:①土壤中 VOCs 可能存在老化“锁定”行为[33,34,36,37,39],如 VOCs 在土壤微孔隙和硬碳中的缓慢扩散导致的锁定[40~42]及土壤中某些官能团对 VOCs 的“物理包埋”导致的锁定[43]; ②ASTM 模型并未考虑深层土壤中易生物降解的 VOCs 迁移至地表过程中的微生物降解作用. 有研究表明,苯在好氧条件下易发生生物降解作用,深层土壤中的苯蒸气在迁移至地表的过程中将大部分被微生物降解[44]. 本研究进一步测试不同深度土壤气中苯、O_2 及 CO_2 浓度发现,苯浓度随深度降低而降低,2.5 m 处苯浓度已低于 10 m 处 2 个数量级. O_2 浓度随深度降低而增加,在 2.5 m 处已达到 6%,超过了土壤中发生好氧降解对 O_2 含量 4% 的要求[45].

分析式(15)可知,模型校正因子与具体的暴露途径无关. 因此,出于计算简便,本研究将以室外呼吸暴露途径为例,基于不同介质中苯浓度计算健康风险及模型校正因子,如表 4 所示.

表 4 基于不同介质中苯浓度的健康风险计算结果

Table 4 Risk calculation based on benzene in different matrices

监测点	基于土壤气浓度计算的风险值 RI 1	基于 ASTM 模型计算的风险值 RI 2	CF = RI 1/RI 2
1	2.83×10^{-7}	1.89×10^{-6}	0.15
2	6.65×10^{-9}	2.56×10^{-7}	0.03
3	1.63×10^{-7}	1.39×10^{-6}	0.12
4	2.45×10^{-6}	1.80×10^{-5}	0.14
5	2.90×10^{-6}	5.02×10^{-5}	0.06

由表 4 可知,基于土壤气中苯浓度计算的健康风险低于基于对应监测井土壤及地下水中苯浓度计算风险 1~2 个数量级,模型校正因子 CF 值为 0.03~0.15,平均值 0.1. 因此,最终以 5 个土壤气监测井 CF 的平均值 0.1 作为该场地的模型校正因子对第二层次风险评价结果进行相应校正,结果如表 5 所示.

表 5 第三层次风险评价结果

Table 5 Tiered Ⅲ assessment results

土层	表层	深层
风险值	3.1×10^{-9}	7.9×10^{-6}
修复目标/mg·kg^{-1}	2.6	1.5

由表 5 可知,校正后受体的累积致癌风险依然高于可接受风险水平,但不同土层中苯的修复目标相应提高了一个数量级. 据此,采用 ArcGIS 软件并结合个采样点监测结果重新进行苯污染土壤修复范围的空间插值,结果如图 4 所示.

根据图 4 的插值结果,可计算校正后不同层土壤的修复量. 其中,表层土壤修复量为3 043 m^3、1.5~6.5 m 的土壤修复量为13 962 m^3、6.5~9.5 m 的土壤修复量为119 937 m^3、9.5~10 m 的土壤修复量为 16 280 m^3,总计修复土壤放量约 153 222 m^3.

2.3 效益分析

比较该场地第二层次与第三层次风险评价结果可知,进行更深层次风险评价带来的直接效益是土壤修复量的减少. 其中,表层土方量减少30 953 m^3,约 91%、1.5~6.5 m 土方量减少55 848 m^3,约 80%、6.5~9.5 m 土方量减少20 271 m^3,约 14%、9.5~10 m 土方量减少32 465 m^3,约 67%,总计减少约 14 万 m^3,约 47.7%.

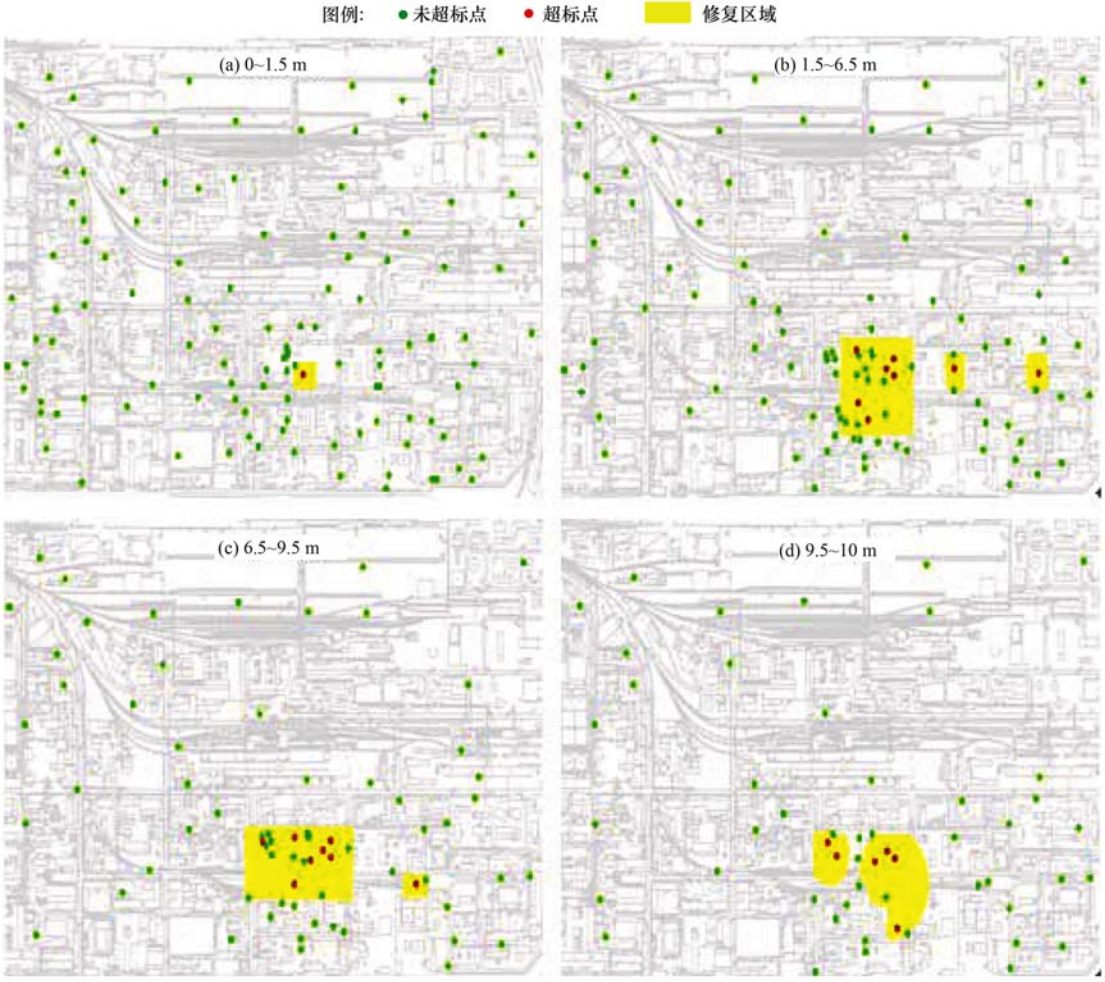

图 4　第三层次风险评估确定的修复范围

Fig. 4　Remediation area on Tiered Ⅲ assessment

对该场地不同土质苯污染土壤修复技术可行性测试结果表明,该场地 0 ~6.5 m 以内的回填土及粉土以及 9.5 ~10 m 的砂土采用原位气相抽提(SVE)技术可以满足修复要求,修复成本分别为 374 元·m^{-3}、104 元·m^{-3}. 但是,对于 6.5 ~9.5 m 这层黏土,由于其较低的渗透性,SVE 技术现场测试结果并不理想,不能满足相应的修复要求. 对于这层污染土壤,可行性测试结果表明,采用原位热强化-机械搅拌技术能够满足修复要求,修复成本约1 176 元·m^{-3}. 因此,根据各可行技术的单位修复成本及对应的修复土方量可大致估算不同层次苯污染土壤的直接修复费用. 其中,依据第二层次评价结果确定的需修复的土方量所对应的修复成本约为 2.06 亿,而依据第三层次评价结果确定的需修复的土方量所对应的修复成本约为 1.49 亿,减少5 700万,约 27.7%. 相比而言,该场地开展第三层次风险评价(即采集主要污染区域土壤气样品进行苯浓度分析及相应的风险评估)所付出的所有成本约 10 万,远低于因此而减少的修复成本. 由此可见,本研究所选取的苯污染场地,开展第三层次风险评价将带来巨大的经济效益.

3　结论

(1) 在同一可接受风险水平下,基于污染区域土壤气中苯浓度的第三层次风险评价确定的该场地土壤中苯的修复目标高出第二层次基于污染区土壤中苯浓度计算的修复目标 1 个数量级.

(2) 依据该场地第三层次风险评价结果确定的场地苯污染土壤修复土方量总计153 222 m^3,修复成本约 1.49 亿,比基于第二层次风险评价结果确定的修复土方量减少约 14 万 m^3,修复成本减少 5 700万.

参考文献:

[1] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地风险评估技术导则(征求意见稿)[S]. 2010.

[2] 姜林, 李立新, 黄海林, 等. 场地环境评价导则[S]. DB11/

T 656-2009.
[3] 姜林, 龚宇阳, 张丽娜, 等. 场地与生产设施环境风险评价及修复验收手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. 9-11.
[4] USEPA. Risk Assessment Guidance for Superfund: Vol Ⅱ. Human Health Evaluation Manual [M]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response and US Environmental Protection Agency, 1989.
[5] ASTM. Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites[S]. E1739-95, 2002.
[6] Crawford R L, Alcock J, Couvreur J F, *et al*. European oil industry guideline for risk-based assessment of contaminated sites (revised) [R]. Concawe: CONCAWE Water Quality Management Group, 2003.
[7] ASTM (American Society for Testing and Material). Standard guide for risk-based corrective action[S]. E2081-00, 2004.
[8] MfE (Ministry for Environment). Guidelines for assessing and managing petroleum hydrocarbon contaminated sites in New Zealand[S]. Revised 2011.
[9] Eilen A V, Gijsbert B, Terje F, *et al*. Guidelines for the risk assessment of contaminated sites[R]. Norwegian: SFT, 1999. 11-18.
[10] DEC (Department of Environment and Conservation). The use of risk assessment in contaminated site assessment and management [S]. 2006.
[11] 姜林, 余立风, 丁琼, 等. 杀虫剂类持久性有机污染物污染场地环境风险管理技术研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012. 34-36.
[12] 姜林, 钟茂生, 张丹, 等. 污染场地土壤多环芳烃(PAHs)生物可利用浓度的健康风险评价方法[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(7): 1168-1175.
[13] 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.
[14] 余世清, 唐伟, 卢滨. 某农药厂废弃场地六六六和滴滴涕污染分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2645-2653.
[15] 谌宏伟, 陈鸿汉, 刘菲, 等. 污染场地健康风险评价的实例研究[J]. 地学前沿, 2006, **13**(1): 230-235.
[16] 李 鹏, 何江涛, 陈鸿汉, 等. 某农药厂场地土壤地下水污染修复指导值探讨[J]. 水文地质工程地质, 2011, **38**(3): 98-103.
[17] 姜林, 钟茂生, 夏天翔, 等. 基于土壤气中实测苯浓度的健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(6): 717-723.
[18] 中国环境科学研究院. 场地环境风险评价筛选值(编制说明)[R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2008.
[19] 武晓峰, 谢磊, 赵洪阳. 土壤及地下水污染点不同暴露途径的健康风险比较[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(2): 345-350.
[20] Chihhao F, Wang G S, Yen C C, *et al*. Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in groundwater in Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(7): 2165-2174.
[21] 武晓峰, 谢磊. Johnson & Ettinger 模型和 Volasoil 模型在污染物室内挥发风险评价中的应用和比较[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 984-991.
[22] USEPA. Calculating upper confidence limits for exposure point concentrations at hazardous waste sites[S]. Washington DC: OSWER 9285, 2002, 6-10.
[23] Friebel E, Nadebaum P. Health screening levels for petroleum hydrocarbons in soil and groundwater part1: technical development document[S]. 2011.
[24] DEFRA. Assessing risk from contaminated land contamination-a proportionate approach[S]. 2006.
[25] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地风险评估技术导则(征求意见稿)[S]. 2011.
[26] New York state department of health. Guidance for evaluating soil vapor intrusion in the state of New York[S]. New York, 2006.
[27] US Department of Defense. Detailed field investigation of vapor intrusion processes[R]. GSI Environmental Inc, 2008.
[28] The Interstate Technology and Regulatory Council Vapor Intrusion Team. Vapor Intrusion Pathway: Investigative Approaches for Typical Scenarios[R]. Washington DC: ITRC, 2007.
[29] New Jersey department of environmental protection. Vapor intrusion guidance[S]. New Jersey, 2005.
[30] USEPA. Draft guidance for evaluating the vapor intrusion to indoor air pathway from groundwater and soils[S]. OSWER, 2002.
[31] USEPA. Volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) [S]. Washington DC: USEPA, 2006.
[32] Lee J L, Kommalapati R, Ualsaraj, *et al*. Rate-limiting desorption of volatile organic compound from soils and implications for the remediation of a Louisiana superfund site[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002, **75**(1): 87-105.
[33] Steinberg S M, Pignatello J, Sawhney B L. Persistence of 1, 2-dibromoethane in soils: entrapment in intra-particle micropores [J]. Environmental Science and Technology, 1987, **21**(12): 1201-1208.
[34] Pavlostathis S G, Jaglal K. Desorptive behavior of trichloroethylene in contaminated soil[J]. Environmental Science and Technology, 1971, **25**(2): 274-279.
[35] Chen J J, Dai J, Xu Z Y, *et al*. Numerical modeling of radionuclide migration in porous media with non-equilibrium sorption[J]. Journal of Environmental Science, 1996, **8**(1): 86-93.
[36] Paul C J, Mariush W K, Richard L J. Assessing the significance of subsurface contaminant vapor migration to enclosed [R]. Washington DC: Health and Environmental Science Department, 1998. 1.
[37] Chen W, Kan A T, Newell C J, *et al*. More realistic soil cleanup standards with dual-equilibrium desorption[J]. Ground Water, 2002, **40**(2): 153-164.

[38] Dong J K, Nag C, Song B K. Quantification of irreversible benzene sorption in sandy materials[J]. Hydrological Process, 2004, **18**(17): 3229-3234.

[39] Spyros G P, Geeyerpuram N M. Desorption kinetics of selected volatile compounds from field contaminated soils [J]. Environmental Science and Technology, 1992, **26**(3): 532-538.

[40] Ball W P, Roberts P V. Long-term sorption of halogenated organic chemicals by aquifer-material 1. Equilibrium [J]. Environmental Science and Technology, 1991, **25**(7): 1223-1236.

[41] Pignatell J J, Xing B S. Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles[J]. Environmental Science and Technology, 1996, **30**(1): 1-11.

[42] Luthy R G, Aiken G R, Brusseau M L, *et al*. Sequestration of hydrophobic organic contaminants by geo-sorbent [J]. Environmental Science and Technology, 1997, **31**(12): 3341-3347.

[43] Ran Y, Xing B S, Rao P S C, *et al*. Importance of adsorption (hole-filling) mechanism for hydrophobic organic contaminants on an aquifer kerogen isolate[J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(16): 4340-4348.

[44] Sander M, Lu Y, Pignatello J J. Conditioning-annealing studies of natural organic matter solids linking irreversible sorption to irreversible structural expansion[J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(1): 170-178.

[45] Davis G B, Wright J, Patterson B M. Field assessment of vapors [R]. Australia, Adelaide: Cooperative Research Centre for Contamination Assessment and Remediation of the Environment, 2009.

[46] Robin V D. Bio-attenuation of petroleum hydrocarbon in subsurface[J]. LUSTLine Bulletin 61, 2009(5): 11-15.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 34 No. 3

Mar. 15, 2013

CONTENTS

Estimation of $PM_{2.5}$ over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network ····· GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, *et al.* (817)

Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City ····· LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, *et al.* (826)

Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta ····· PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, *et al.* (835)

Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition ····· LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, *et al.* (842)

Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter ····· HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)

Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010 ····· LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)

Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay ····· ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, *et al.* (864)

Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau ····· WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, *et al.* (874)

Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin ····· XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)

An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control ····· ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, *et al.* (892)

Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland ····· LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, *et al.* (900)

Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater ····· ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, *et al.* (907)

Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier ····· LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, *et al.* (914)

Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District ····· LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, *et al.* (919)

Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water ····· WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, *et al.* (927)

Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses ····· SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, *et al.* (933)

Study on Removal of Di-(2-Ethylhcxyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter ····· LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, *et al.* (943)

Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment ····· FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, *et al.* (950)

Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ-Al_2O_3 ····· YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, *et al.* (955)

Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G ····· YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, *et al.* (962)

Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-deweighting and Dyeing-printing Wastewater ····· YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, *et al.* (968)

Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O_3-BAF ····· YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, *et al.* (974)

Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment ····· WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, *et al.* (979)

Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow ····· NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, *et al.* (986)

Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (Ⅰ): Model Constitution ····· ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)

Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (Ⅱ): Process Simulation ····· ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)

Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (Ⅲ): Model Application ····· ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)

Comparative Study on Water-air CO_2, CH_4 Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China ····· LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, *et al.* (1008)

Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes ····· CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, *et al.* (1017)

Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau ····· ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, *et al.* (1026)

Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene ····· JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, *et al.* (1034)

History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay ····· ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, *et al.* (1044)

Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province ····· ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, *et al.* (1055)

Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island ····· CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, *et al.* (1062)

Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City ····· LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, *et al.* (1067)

Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City ····· LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, *et al.* (1076)

Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City ····· CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)

Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China ····· GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, *et al.* (1094)

Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch ····· ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, *et al.* (1101)

Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir ····· SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, *et al.* (1107)

Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors ····· ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, *et al.* (1114)

Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk ····· MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, *et al.* (1120)

Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China ····· HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, *et al.* (1129)

Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake ····· MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, *et al.* (1136)

Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone ····· LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, *et al.* (1142)

Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car ····· TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, *et al.* (1150)

Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production ····· MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, *et al.* (1156)

Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed ····· CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, *et al.* (1161)

Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge ····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)

Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand ····· ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, *et al.* (1174)

Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr^{6+} ····· HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, *et al.* (1181)

Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process ····· YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)

Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes *nirK*, *nirS* and *nosZ* During Agricultural Waste Composting ····· HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, *et al.* (1196)

Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (*Eisenia fetida*) ····· LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, *et al.* (1204)

Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol ····· ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, *et al.* (1211)

Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant ····· HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2013 年 3 月 15 日　34 卷　第 3 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 34　No. 3　Mar. 15, 2013

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订　购　处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：90.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行