



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201901098

中图分类号 X53

文献标识码 A

史俊祥, 郑娟, 杨洋, 等. 基于 HERA 土壤分层风险评估的 SVE 修复方案优化[J]. 环境工程学报, 2019, 13(12): 2954-2962.  
SHI Junxiang, ZHENG Juan, YANG Yang, et al. Optimization of SVE remediation project based on soil layer risk assessment with HERA model[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(12): 2954-2962.

## 基于 HERA 土壤分层风险评估的 SVE 修复方案优化

史俊祥<sup>1,2</sup>, 郑娟<sup>3</sup>, 杨洋<sup>2</sup>, 席北斗<sup>1,2</sup>, 李娟<sup>1,2,\*</sup>, 唐军<sup>2</sup>, 汪洋<sup>2</sup>

1. 南昌大学资源环境与化工学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031

2. 中国环境科学研究院, 国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012

3. 陕西省环境调查评估中心, 西安 710054

第一作者: 史俊祥(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 环境污染防治。E-mail: 775102460@qq.com

\*通信作者: 李娟(1981—), 女, 博士, 副研究员。研究方向: 土壤和地下水污染。E-mail: lijuan@craes.org.cn

**摘要** 以新疆某石油炼化污染场地为研究对象, 将场地土壤划分为 4 层, 选取石油烃(C<sub>5</sub>~C<sub>7</sub>)为目标污染物, 基于 HERA (health and environmental risk assessment) 软件开展土壤分层风险评估。结果表明: 各土壤层的危害风险均超过可接受水平, 修复目标值分别为 161.20、182.58、316.75、450.24 mg·kg<sup>-1</sup>。根据风险评估结果, 提出场地土壤气相抽提(soil vapor extraction, SVE)修复方案, 抽提井数量为 20 口, 抽提流量为 0.36 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>, 苯的去除量为 56.71 kg·d<sup>-1</sup>, 需要 147 d 将场地土壤中污染物的浓度降低到修复目标值以下。依据土壤层风险评估结果和土壤污染羽分布不同, 优化了 SVE 抽提井井深和井筛深度设置, 相对于寻常 SVE 修复设计, 可降低修复成本, 提高修复效率, 预防过度修复, 形成了一套基于 HERA 风险评估的 SVE 修复方案设计体系。

**关键词** 石油炼化污染场地; 土壤分层风险评估; 石油烃; HERA; SVE

有“工业血液”之称的石油给社会发展提供动力的同时, 也在其开采、运输、加工及使用过程中产生了一系列的环境问题。《土壤污染防治行动计划》提出, 石油污染场地是重点调查与防控的典型土壤污染场地, 须加以重视, 防控土壤污染。因此, 在对此类污染场地进行环境管理及开发利用时, 亟需开展土壤风险评估及修复治理。欧美国家自 20 世纪 80 年代起先后建立了适合本国实际的污染场地环境风险评估体系<sup>[1-2]</sup>, 并将基于风险评估的风险管理理念运用到场地修复过程中<sup>[3]</sup>。而我国对工业污染场地问题关注较晚, 国内现有的污染场地风险评估技术导则<sup>[4]</sup>也借鉴了美国国家科学院 1972 年提出的风险评估思路, 将整个风险评估分为危害识别、暴露评估、毒性评估及风险表征 4 个步骤<sup>[5-9]</sup>。

目前, 我国的许多学者也开展了污染场地土壤与地下水健康风险评估工作。姜林等<sup>[8]</sup>开展了层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益研究, 发现对于类似大型 VOCs 污染场地, 采用第 3 层次健康风险评价能够节省大量修复成本, 并可带来巨大的经济效益。董敏刚等<sup>[10]</sup>对我

收稿日期: 2019-01-14; 录用日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41703114); 国家科技重大专项项目(2018ZX07109-001)

国南方某典型有机化工污染场地开展了土壤与地下水风险评估，制定了场地特征污染物的筛选值与修复目标值，划分了各层位土壤及地下水的修复区域，并计算了需修复的环境介质体积。张丽娜等<sup>[2]</sup>以某焦化类大型污染场地苯污染土壤为例，针对单一用地、多种用地、考虑建筑设计3种暴露情景，分析不同情景下场地土壤中苯污染的暴露途径并进行健康风险评估。许伟等<sup>[11]</sup>以某有机物-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、粉质黏土、粉土和粉砂等4层，运用HERA (health and environmental risk assessment) 风险评估软件计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、确定修复技术。而国内场地分层健康风险评估尚在研究阶段，有些学者采用美国RBCA模型、英国CLEA模型等模型<sup>[11-13]</sup>进行健康风险评估，这些国外模型并不完全适用于我国的场地，评估结果有待考证。对于石油污染场地，较少有将分层评估结果应用到场地的修复方案的制定和优化中。

本研究以新疆某石油炼化污染场地为研究对象，基于HERA风险评估软件<sup>[14]</sup>，开展了土壤分层风险评估；依据评估结果，设计了土壤气相抽提SVE (soil vapor extraction) 修复方案；根据土壤分层评估结果，进一步筛选出各层土壤修复过程中起主要作用的SVE抽提井，分别对其进行了井深和井筛深度设置，相对于常规的SVE修复，达到节约修复成本、提高修复效率的优化效果，同时也可避免当前石油污染场地SVE修复过程中常见的过度修复问题；形成了一套基于HERA土壤分层风险评估的SVE修复方案设计和优化体系，为我国类似石油污染场地的环境管理、污染防治和修复治理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 场地概况

该场地位于我国西北部地区，场地地势相对平坦，所属地貌类型为构造剥蚀丘陵地貌，主要由新生界古近系地层构成，表层常覆盖薄层第4系下更新统砂砾石顶盖，地下岩性主要为砂砾卵石、砂砾石。场地占地面积约为135 000 m<sup>2</sup>，始建于20世纪60年代，到20世纪90年代一直进行石油炼化。目前调查场区无任何生产活动，主要设备设施已基本拆除。根据场地规划和地层构造，将场地划分为4层：0~1 m为人工堆积层，1~3 m为粉砂质土层，3~5 m为砂土层，5~8 m为砂质粉土层，各层土壤相关参数如表1所示。地下水水位埋深常在10 m左右，含水层介质透气性较强。

表 1 场地各土壤层水文地质参数

Table 1 Hydrogeological parameters of each soil layer in site

土壤层	土壤深度/m	质地	土壤密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	孔隙度	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
1	0~1	人工填土层	2.0	27.2	0.39	4.8×10 <sup>-4</sup>
2	1~3	粉砂土层	1.5	20.7	0.43	6.2×10 <sup>-4</sup>
3	3~5	砂土层	1.7	17.3	0.46	1.7×10 <sup>-3</sup>
4	5~8	砂质粉土层	1.6	19.1	0.40	5.9×10 <sup>-4</sup>

### 1.2 场地调查与样品采集

场地调查分为初步调查和详细调查2个阶段，初步调查在收集场地资料信息的基础上进行了第1次布点采样，主要采用50 m×50 m的网格布设采样点，采样深度为地下1~10 m，共采集21个土壤样品。详细调查阶段以20 m×20 m的网格布点，在油泥池和炼化区加密布点，采样深度加深至地下12 m，共采集375个土壤样品和25个地下水样品。部分采样点位如图1所示。由于厂区最开始炼油工艺相对落后，炼化后的废弃物直接排放在场地内的2个大型油泥池中，油泥池内也并未做有效的防渗措施。样品检测结果显示，区域内土壤中石油烃(C<sub>5</sub>~C<sub>7</sub>)含量超标严重，污染主要

集中在原油炼化区和油泥池区域, 污染深度主要集中在土壤层中的0~8 m, 因工艺流程及场地地形等原因办公区和生活区基本不存在石油烃污染现象。

### 1.3 研究方法

借助 HERA 开展 2 个层次的健康风险评估: 第 1 层次构建较为保守的场地概念模型, 计算土壤中关注污染物的筛选值, 与样品检测值进行对比; 第 2 层次风险评估中, 修正暴露途径, 更新场地概念模型, 计算出关注污染物在所选暴露途径下的风险值和危害商, 对污染物进行风险表征, 并给出场地土壤中关注污染物的修复目标值。同时, 估算场地内各层土壤的修复面积及土壤修复量, 设计场地 SVE 修复方案。

结合各土壤层评估结果和土壤中污染羽的分布范围的差异, 进一步筛选出各层土壤修复过程中起主要作用的 SVE 抽提井, 分别对其进行井深和井筛深度设置, 实现 SVE 修复方案的优化。

## 2 结果与分析

### 2.1 第 1 层次风险评估

1) 污染物识别与暴露途径分析。根据场地实地调查以及样品检测结果, 选取石油烃 ( $C_5\sim C_7$ ) 为关注污染物。当地相关部门对场地所在区域的用地规划为工业用地, 用地类型为非敏感用地, 受体为工业企业厂区内的工人(成人), 确定未来场地规划使用过程中的受体暴露途径。土壤层 1 为经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入室内土壤颗粒物、吸入室外土壤颗粒物、吸入表层土壤室外蒸汽、吸入下层土壤室外蒸汽、吸入下层土壤室内蒸汽; 土壤层 2 为吸入室内土壤颗粒物、吸入室外土壤颗粒物、吸入表层土壤室外蒸汽、吸入层土壤室外蒸汽、吸入下层土壤室内蒸汽; 土壤层 3 为吸入室外土壤颗粒物、吸入表层土壤室外蒸汽、吸入下层土壤室外蒸汽、吸入下层土壤室内蒸汽; 土壤层 4 为吸入表层土壤室外蒸汽、吸入下层土壤室外蒸汽、吸入下层土壤室内蒸汽。

2) 评估模型构建。本研究场地所在区域气候干旱、年平均降水仅为  $7.46\times 10^{-4}\sim 7.63\times 10^{-4}$  m, 但场地旁存在季节性河流, 场地土质较为松软, 浅层含水层水位较浅, 包气带存在上层滞水。在场地调查过程中, 潜水含水层采集较为困难, 但在场地修复过程及再开发利用过程中, 潜水含水层会被清除。因此, 在对本场地进行模型概化时, 将潜水含水层视为包气带土壤层, 即将场地 0~8 m 地层视为包气带, 将微承压含水层视为潜水含水层。

模型中需要的参数从场地现场调查中获取, 主要包括土壤中污染物浓度、不同深度土壤理化性质、污染土壤厚度、地下水埋深等水文地质参数以及暴露期、暴露频率(经口摄入和皮肤接触)等受体暴露参数, 其他参数采用《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)中的推荐值。

3) 第 1 层次评估结果。《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准》(试行)中规定, 第 2 类用地石油烃 ( $C_{10}\sim C_{40}$ ) 污染物风险评估筛选值为  $4\ 500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由表 2 可知, 借助 HERA 计算出来的石油烃 ( $C_5\sim C_7$ ) 筛选值小于《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准》(试行)中规定的  $4\ 500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在场地自身的水文地质和暴露参数的条件下, 发现即使用低于  $4\ 500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的计算值作为筛选值, 场地内的土壤污染风险仍然处于不可接受水平。因此, 决定选用 HERA 计算值作为本次风险评估的筛选值。

利用计算得出的筛选值对场地各点位污染物浓度进行筛选, 发现各层土壤中石油烃污染物浓

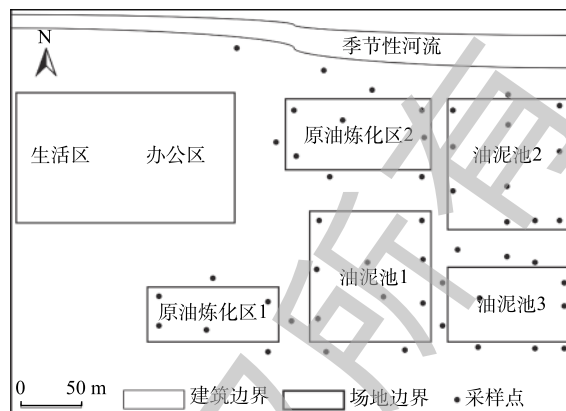


图 1 场地平面布局、采样点布设图

Fig. 1 Field layout and sampling point layout

表 2 各层土壤石油烃浓度统计及第 1 层次风险评估结果

Table 2 Total petroleum hydrocarbon concentration in each soil layer and first-level risk assessment results

土壤层	深度/m	样品数量/个	筛选值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	浓度/(mg·kg <sup>-1</sup> )	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	超标数量/个	超标率/%
1	0~1	125	1 060.15	802.6~12 326	2 031.72	44	35
2	1~3	55	1 089.44	460.7~7 538	1 030.28	18	33
3	3~5	42	1 452.59	463.5~2 455	950.06	15	36
4	5~8	30	1 676.06	480.9~2 939	1 095.29	10	33

度均有超过筛选值。由表 3 的风险评估结果可知,各层土壤污染程度相当,超标率为 33%~36%。

## 2.2 第 2 层次风险评估

1) 模型参数设置。进行第 2 层次风险评估时,须在第 1 层次的基础上进行污染物浓度设置,根据场地调查结果调整模型参数,修正暴露途径,更新场地概念模型。分别对场地各层土壤进行石油烃的致癌风险与非致癌危害商和控制值的计算。

2) 第 2 层次风险评估结果。根据表 2 的样品统计及第 1 层次风险评估结果,采用污染物浓度平均值进行致癌风险和非致癌危害商的计算,风险表征结果如表 3 所示。根据计算结果发现本次风险评估可不考虑选定暴露途径下的致癌风险。由表 3 可知,随着深度的增加,非致癌危害商逐渐降低,但都明显超过可接受水平(非致癌危害商的可接受水平为 1)。其中第 1 层的非致癌危害商达到了 104.64,超出可接受水平 2 个数量级。0~1、1~3、3~5 和 5~8 m 土壤层中的石油烃修复目标值分别为 161.20、182.58、316.75、450.24 mg·kg<sup>-1</sup>,修复目标值随着土壤深度增加而逐渐增大。随着污染物埋深的增大,暴露途径逐渐减少,污染物直接对人体造成伤害的可能性逐渐降低,其风险相对减小,修复目标值则逐渐增大。

3) 修复范围的确定。根据场地风险评估结果,以表 3 中的修复目标值为基准,根据土壤各层污染超标点的浓度,借助 ArcGIS 进行空间插值。场地内地势相对平坦,各层土壤质地均匀,选取克里金法进行插值计算,同时根据采样监测结果及场地现场实际情况对插值结果进行了修正,最终获取场地各层土壤污染修复范围。场地土壤中石油烃的超标点和修复范围如图 2 所示,各层污染土壤面积分别为 32 906、18 795、18 305 和 9 867 m<sup>2</sup>。其中,修复区域主要包含在原油炼化区和油泥池区域。最表层土壤的修复范围最大,基本涵盖了整个炼化区和油泥排放区。随着土壤层厚度的加深,需要修复的土壤量从 32 906 m<sup>2</sup> 降低至 9 867 m<sup>2</sup>,与风险评估结果中修复目标值随深度增加而增加相对应。整个场地需要修复的土壤面积达 79 873 m<sup>2</sup>,各层土壤污染物分布均匀,则需要修复的土壤体积为 136 707 m<sup>3</sup>。

## 2.3 基于风险评估的 SVE 修复方案

采用 SVE 技术对场地进行修复。对场地进一步调查分析发现,石油烃污染物中苯含量最高,各层土壤中苯的浓度平均值为 855 mg·kg<sup>-1</sup>。在石油烃污染物当中苯挥发性强,因此,以去除苯为修复目标污染物进行保守的 SVE 修复设计计算,土壤样品苯的平均浓度为 855 mg·kg<sup>-1</sup>。

1) SVE 抽提气体浓度。将土壤样品污染物浓度乘以土壤密度,得到土壤污染物浓度为 1 453.5 mg·L<sup>-1</sup>。计算与土壤中苯浓度相平衡的气体浓度方程<sup>[15]</sup>如式(1)所示。

$$\frac{M_t}{V} = \left( \frac{\varphi_w}{H} + \frac{\rho_b K_p}{H} + \varphi_a \right) G \quad (1)$$

表 3 场地土壤第 2 层次风险评估结果

Table 3 Second-level risk assessment results of site soils

土壤层	深度/m	非致癌危害商	修复目标值/(mg·kg <sup>-1</sup> )
1	0~1	104.64	161.20
2	1~3	71.59	182.58
3	3~5	33.30	316.75
4	5~8	21.50	450.24

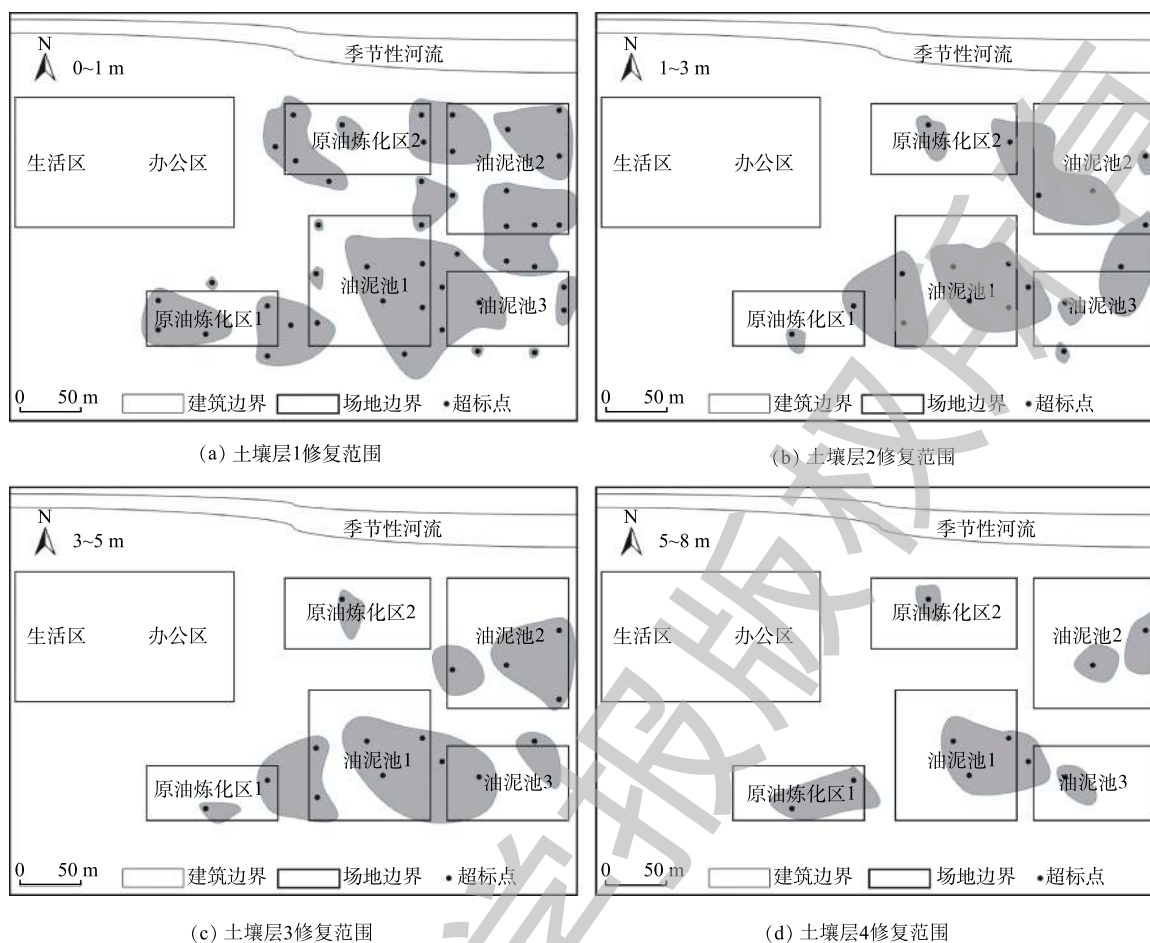


图2 场地各层土壤修复范围

Fig. 2 Remediation range in each soil layer of the site

式中： $M_i$ 为污染羽的质量，mg； $V$ 为污染羽的体积，L； $\rho_b$ 为污染土壤的堆积密度， $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； $K_p$ 为分配系数， $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ ； $H$ 为亨利常数； $\varphi_w$ 为体积含水量； $\varphi_a$ 为空气孔隙度。

2) SVE抽提井布设。原位土壤气相抽提系统设计的主要任务之一是基于影响半径( $R_i$ )来确定气体抽提井的数量和位置，计算方式<sup>[15]</sup>可根据式(2)导出。

$$P_r^2 - P_w^2 = (P_{R_i}^2 - P_w^2) \frac{\ln(r/R_w)}{\ln(R_i/R_w)} \quad (2)$$

式中： $P_r$ 为距离气相抽提井 $r$ 处的压强，kPa； $P_w$ 为气相抽提井的压强，kPa； $P_{R_i}$ 为影响半径处的压强(大气压或某预设值)，kPa； $r$ 为与气相抽提井的距离，m； $R_i$ 为影响半径，m； $R_w$ 为气相抽提井的半径，m。

由式(1)和式(2)计算可得： $R_i \approx 33$  m，即单个抽提井的影响半径为33 m。根据抽提井影响半径，布设抽提井位置，抽提井的影响范围覆盖整个场地各层土壤的污染叠加范围。场地SVE修复实验井布设如图3所示，共须布设20口SVE抽提井，其中2号原油炼化区布设3口，2号油泥池布设7口，1号油泥池布设4口，3号油泥池布设2口，1号原油炼化区布设4口，同时，布设6口SVE监测井。

3) SVE修复时间。根据场地SVE布井情况，进一步计算抽提井的抽提流量以及污染物的去除速率并以此确定修复时间。根据文献中的方法<sup>[15]</sup>计算井壁处的气体流速 $u_w$ (式(3))，进入抽提井的气体流量 $Q_w$ (式(4))，进入抽提井的气体流量换算为排放至大气中的流量 $Q_{\text{atm}}$ (当 $P=P_{\text{atm}}=101.325$

kPa)(式 (5)), 污染物的去除速率  $R_r$ (式 (6)), 清理时间  $T_r$ (式 (7) 和式 (8))。

$$u_w = \left( \frac{k}{2\mu} \right) \left[ \frac{P_w}{R_w \ln(R_w/R_I)} \right] \left[ 1 - \left( \frac{P_{R_I}}{P_w} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中:  $u_w$  为抽提井壁处流速,  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $k$  为地层渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\mu$  为空气黏度,  $\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ;  $P_w$  为气相抽提井的压强, kPa;  $R_w$  为气相抽提井的半径, m;  $R_I$  为影响半径, m;  $P_{R_I}$  为影响半径处的压强, kPa。

$$Q_w = 2\pi R_w u_w H = H \left( \frac{\pi k}{\mu} \right) \left[ \frac{P_w}{\ln(R_w/R_I)} \right] \left[ 1 - \left( \frac{P_{R_I}}{P_w} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中:  $Q_w$  为 SVE 抽提井的气体流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $\pi$  为圆周率;  $H$  为抽提井的开孔区间;  $R_w$  为气相抽提井的半径, m;  $u_w$  为抽提井壁处流速,  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $H$  为抽提井的开孔区间, m;  $k$  为地层渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\mu$  为空气黏度,  $\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ;  $P_{R_I}$  为影响半径处的压强 (大气压或某预设值), kPa;  $P_w$  为气相抽提井的压强, kPa;  $R_I$  为影响半径, m。

$$Q_{\text{atm}} = \left( \frac{P_w}{P_{\text{atm}}} \right) Q_w \quad (5)$$

式中:  $Q_{\text{atm}}$  为抽提井排放至大气中的流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $P_w$  为抽提井的压强, kPa;  $P_{\text{atm}}$  为标准压强, kPa,  $Q_w$  为抽提井内气体流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

$$R_r = (\eta G) Q \quad (6)$$

式中:  $R_r$  为污染物的去除速率,  $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\eta$  为相对于理论去除速率的综合效率因子;  $G$  为抽提气体浓度,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $Q$  为抽提气体流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

$$M_L = (X_0 - X_T) M_s = (X_0 - X_T) (V_s \rho_b) \quad (7)$$

式中:  $M_L$  为要去除的污染物泄漏量, kg;  $X_0$  为土壤中初始的平均污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $X_T$  为土壤修复目标值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $M_s$  为污染土壤的质量, kg;  $V_s$  为污染土壤的体积,  $\text{m}^3$ ;  $\rho_b$  为土壤密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

$$T_r = M_L / R_r \quad (8)$$

式中:  $T_r$  为清理时间, d;  $M_L$  为要去除的污染物泄漏量, kg;  $R_r$  为污染物的去除速率,  $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

结合式 (3)~式 (8) 的计算结果和图 3 的抽提井布设结果可知: 在场地布设 20 口抽提井, 抽提流量为  $0.36 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , 去除量为  $56.71 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$  的条件下, 需要 147 d 能将场地土壤中的污染物浓度降低到修复目标值以下。

## 2.4 SVE 修复方案优化

根据场地土壤分层风险评估计算结果和 ArcGIS 空间插值得出的各层土壤污染范围, 对 SVE 修复方案进行优化。根据图 3 中场地各层土壤污染范围叠加而得出的 SVE 布井图, 确定场地各层土壤的主要作用抽提井如图 4 所示。可以筛选按照修复方案各层污染土壤修复过程中起主要作用的抽提井, 具体结果见表 4。可以看出, 原修复方案中布设的 20 口 SVE 抽提井在各层污染土壤的作用不同, 0~1、1~3、3~5 和 5~8 m 土壤层的实际作用抽提井数分别为 18、16、15 和 13 口。SVE 抽提井 W1、W3 的主要作用范围在土壤的 0~1 m 层, 因此, 设置井深为 1.5 m, 井筛设置深度为 0.5~1 m。据此优化方式, 优化 20 口抽提井的井深和井筛深度设置, 优化设置结果见表 5。通过对 SVE 抽提井井深和井筛深度的优化设置, 可降低场地修复的经济成本, 提高各层污染土壤的修复

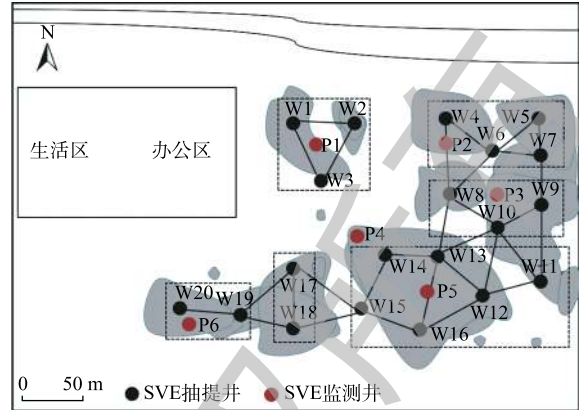


图 3 场地修复 SVE 实验井平面布置图

Fig. 3 Layout of SVE test well for the site remediation

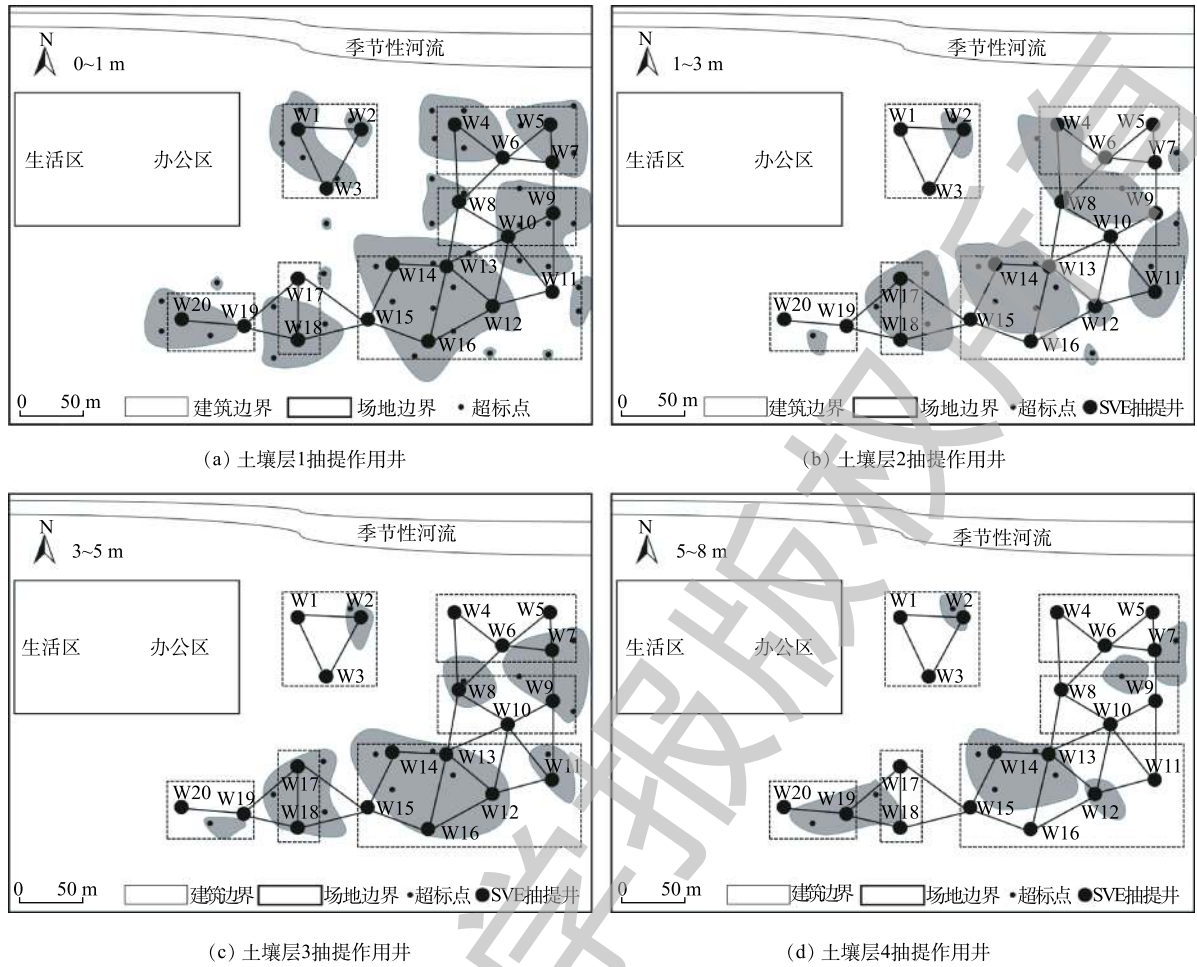


图 4 SVE 修复场地各层土壤抽提井作用图

Fig. 4 SVE extraction wells position in each layer of the site soil

表 4 SVE 修复场地各层土壤作用抽提井

Table 4 Number of SVE extraction wells in each layer of the site soil

土壤层深度/m	SVE抽提井
0~1	W1、W2、W3、W4、W5、W6、W7、W8、W9、W10、W12、W13、W14、W15、W16、W18、W19、W20
1~3	W2、W4、W6、W7、W8、W9、W10、W11、W12、W13、W14、W15、W16、W17、W18、W19
3~5	W2、W5、W6、W7、W8、W9、W11、W12、W13、W14、W15、W16、W17、W18、W19
5~8	W2、W6、W7、W9、W12、W13、W14、W15、W16、W17、W18、W19、W20

表 5 SVE 抽提井井深和井筛深度设置优化结果

Table 5 Optimization results of SVE extraction well and well screen depth

SVE抽提井号	井深/m	井筛设置深度/m	SVE抽提井号	井深/m	井筛设置深度/m
W1	1.5	0.5~1	W11	5.5	1~5
W2	8.5	0.5~8	W12	8.5	0.5~8
W3	1.5	0.5~1	W13	8.5	0.5~8
W4	3.5	0.5~3	W14	8.5	0.5~8
W5	5.5	0.5~5	W15	8.5	0.5~8
W6	8.5	0.5~8	W16	8.5	0.5~8
W7	8.5	0.5~8	W17	8.5	1~8
W8	5.5	0.5~5	W18	8.5	0.5~8
W9	8.5	0.5~8	W19	8.5	0.5~8
W10	3.5	0.5~3	W20	8.5	0.5~8

效率, 在达到经济有效修复的同时也避免了过度修复。

### 3 结论

1) 选取石油烃( $C_5\sim C_7$ )为关注污染物, 分层风险评估结果显示: 各层土壤污染的风险值分别为 104.64、71.59、33.30、21.50, 均超出可接受水平; 各层土壤的修复目标值分别为 161.20、182.58、316.75、450.24  $mg\cdot kg^{-1}$ 。随着土壤层的加深, 土壤修复目标值增大, 需要修复的土壤面积从 32 906  $m^2$  降低至 9 867  $m^2$ 。这与污染物在泄漏及下渗过程中的挥发和地下水波动对污染物的稀释作用有关, 在后续的场地管理及开发利用过程中, 尤其要注意吸入室内外蒸气途径对人体健康产生的风险。

2) 选取苯作为修复目标污染物, 设计 SVE 修复方案。在场地布设 20 口抽提井, 抽提流量为 0.36  $m^3\cdot min^{-1}$ , 去除量为 56.71  $kg\cdot d^{-1}$  的情形下, 需要 147 d 能将场地土壤中污染物浓度降低到修复目标值以下。对提出的 SVE 修复方案进行进一步优化, 确定各土壤层的实际作用抽提井数分别为 18、16、15 和 13 口。并对每层选定的主要作用抽提井进行井深和井筛深度设置, 达到了节约成本、提高修复效率的优化效果。

3) 通过对石油污染场地进行土壤分层, 并借助 HERA 软件进行各土壤层的土壤风险评估, 结合风险评估结果和场地实际情况设计 SVE 修复方案。依据分层评估结果优化 SVE 抽提井井深、井筛深度等参数设置, 形成一套基于 HERA 风险评估的 SVE 修复方案设计体系, 达到降低修复成本、提高修复效率、避免过度修复的效果, 为我国类似石油污染场地提供污染防治和修复技术参考。

### 参 考 文 献

- [1] FERGUSON C. Assessing risk from contaminated sites: Policy and practice in 16 European countries[J]. *Land Contamination and Reclamation*, 1999, 7(2): 33-54.
- [2] 张丽娜, 姜林, 钟茂生, 等. 基于用地规划的大型污染场地健康风险评估[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(5): 788-795.
- [3] STAVRIANOU W. The western Australian contaminated sites act 2003: The applicability of risk assessment as a basis for the assessment and management of site contamination[EB/OL]. [2019-01-03]. Western Australian, www.awu.edu.aupp.1-92.
- [4] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [5] 姜林, 钟茂生, 张丽娜, 等. 基于风险的中国污染场地管理体系研究[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(8): 1-10.
- [6] 刘蕊, 张辉, 勾昕, 等. 健康风险评估方法在中国重金属污染中的应用及暴露评估模型的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1239-1244.
- [7] 罗泽娇, 贾娜, 刘仕翔, 等. 我国污染场地土壤风险评估的局限性[J]. *安全与环境工程*, 2015, 22(5): 40-46.
- [8] 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): 1034-1043.
- [9] USEPA. Risk Assessment Guidance for Superfund: Vol II. Human Health Evaluation Manual[M]. Washington D C: Office of Emergency and Remedial Response and US Environmental Protection Agency, 1989.
- [10] 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.
- [11] 许伟, 施维林, 沈楨, 等. 工业遗留场地复合型污染分层健康风险评估研究[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 322-330.
- [12] 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.

[13] 贾晓洋, 姜林, 夏天翔, 等. RBCA、CLEA及CalTOX模型在苯并[a]芘污染场地健康风险评估中的应用比较[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(3): 277-284.

[14] 陈梦舫. 污染场地健康与环境风险评估软件(HERA)[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 344-344.

[15] JEFF K. 土壤及地下水修复工程设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

(本文编辑: 曲娜, 郑晓梅, 张利田)

## Optimization of SVE remediation project based on soil layer risk assessment with HERA model

SHI Junxiang<sup>1,2</sup>, ZHENG Juan<sup>3</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>, XI Beidou<sup>1,2</sup>, LI Juan<sup>1,2,\*</sup>, TANG Jun<sup>2</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3. Shaanxi Environmental Investigation and Assessment Center, Xi'an 710054, China

\*Corresponding author, E-mail: lijuan@craes.org.cn

**Abstract** A petroleum refining contaminated site in Xinjiang and the petroleum hydrocarbons ( $C_5\sim C_7$ ) were selected as the research object, and the soil of site was divided into four layers to assess their environmental risks with HERA (health and environmental risk assessment) model. The results showed that the hazard risk of each soil layer was unacceptable, and the remediation target values were 161.20, 182.58, 316.75 and 450.24  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. The SVE (soil vapor extraction) remediation scheme was proposed according to the risk assessment result. The number of extraction well was set as 20 and the extraction flow was  $0.36\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ . The removal rate of benzene was  $56.71\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ , and it would take 147 days to reach the remediation target values. The optimized SVE extraction well depth and well screen depth were designed based on the risk assessment results of soil layer and the different distribution of soil pollution plume. The optimized SVE remediation scheme can reduce the repair cost, improve the repair efficiency and prevent excessive repair compared with ordinary SVE design. A SVE remediation scheme optimization system was formed based on HERA risk assessment.

**Keywords** petroleum refining contaminated site; soil layer risk assessment; petroleum hydrocarbons; HERA; SVE