

# 某有机化工污染场地土壤与地下水风险评估<sup>①</sup>

李春平<sup>1,2</sup>, 吴 骏<sup>1</sup>, 罗 飞<sup>1,2</sup>, 韦 婧<sup>1,2</sup>, 陈梦舫<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**以江苏某有机化工污染场地为例,采用美国 RBCA(risk based corrective action)风险评估软件,并依据我国《污染场地风险评估技术导则》(征求意见稿)对模型中的参数进行了本土化设定,开展了典型有机化工类场地土壤与地下水的人体健康与水环境风险评估。结果表明:研究场地土壤污染相对较轻,局部区域存在风险或危害,最大值分别为  $5.44 \times 10^{-5}$  和 54;地下水污染相对严重,有 6 个点位存在不同污染物的风险或危害商超标,其中,1,2-二氯乙烷的最大致癌风险高达 0.174,氯苯的最大非致癌危害商高达 20 586。与保护人体健康的修复目标值相比,保护水环境的值要更为保守。由此,仅基于健康风险的修复仍然存在水环境风险,应当予以重视。

**关键词:**有机化工污染场地;RBCA;修复目标值;土壤与地下水风险评估

**中图分类号:**X820.4

有机化工作为我国经济的支柱产业之一,广泛分布于全国各大中城市<sup>[1]</sup>。伴随我国城市布局的调整与产业结构的升级,大批化工企业关停和搬迁,遗留的工业场地存在不同程度的污染<sup>[2]</sup>。风险管理是现代场地管理系统的核心,近年来,风险评估技术在场地管理中的作用逐渐被人们所认识。鉴于化工产品与其生产工艺的多元化、以及污染特征与过程的复杂化,对于此类场地的管理难度较大<sup>[3]</sup>,国内关于有机化工类污染场地风险评估的报道仍不多见。罗飞等<sup>[4]</sup>及余世清等<sup>[5]</sup>以我国典型农药污染场地为研究对象,开展了土壤人体健康的风险评估,分析了污染物的致癌风险与非致癌危害商,并提出其修复目标值。张新钰等<sup>[6]</sup>分析了华北某有机污染场地地下水中四氯化碳的污染特征,发现地下水相关的暴露途径存在较高的健康风险。仅考虑土壤或地下水的风险评估在某种层面上存在一定的局限性。丁琼等<sup>[7]</sup>在综合考虑土壤与地下水污染情况的基础上,对某农药厂场地进行了风险评估,然而其在风险及危害商的计算时,未对土壤与地下水进行严格的区分,以致场地的风险分析可能存在不全面性。此外,我国对于场地的风险评估多只考虑人体健康,而对于水环境的保护重视不够。因此,本文拟以江苏省某有机化工厂污染场地为例,开展场地土壤与

地下水人体健康与水环境的风险评估,以期为我国类似场地的风险管理工作提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 场地描述

本研究选择的有机化工厂位于江苏省常州市,始建于 1959 年,占地面积约 8 万  $\text{m}^2$ ,主要生产树脂及农药类产品,生产过程中曾使用氯苯类化合物作为原料,该工厂现已停产搬迁完毕,厂房均已拆除,场地基本平整,裸露于地表的水体有明显的颜色且气味异常。场地东侧约 10 m 处为居民区,西侧和南侧被两条城市主要河流包围,北侧紧邻贯穿东西方向的公路。

### 1.2 样品采集与分析

在历史资料收集、人员访谈和场地勘察的基础上,运用网格布点法(50 m  $\times$  50 m),并根据现场情况作适当调整,布设了 30 个土壤采样点(文中记作 S1、S2、S3……S30),以及在其中 15 土壤采样点布设了 15 口地下水监测井(图 1)。

采集土壤样品的点位,用 XY-1A 型钻机回转钻进,钻孔直径为 110 mm,深度至基岩为止,钻孔的同时记录初见地下水的深度、土壤质地的变化及不同质地土层的厚度。钻孔记录表明,地表以上存在 1.5 m 厚的建筑垃圾,地表以下 0 ~ 1.2 m 为粉

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-BR-19),江苏省环保科研课题(2012039)和国家高技术研究发展计划项目(2013AA06A608)资助。

\* 通讯作者(mfchen@issas.ac.cn)

作者简介:李春平(1988—),女,辽宁阜新人,硕士研究生,主要从事污染场地风险评估与场地修复方面的研究。E-mail: cpli@issas.ac.cn

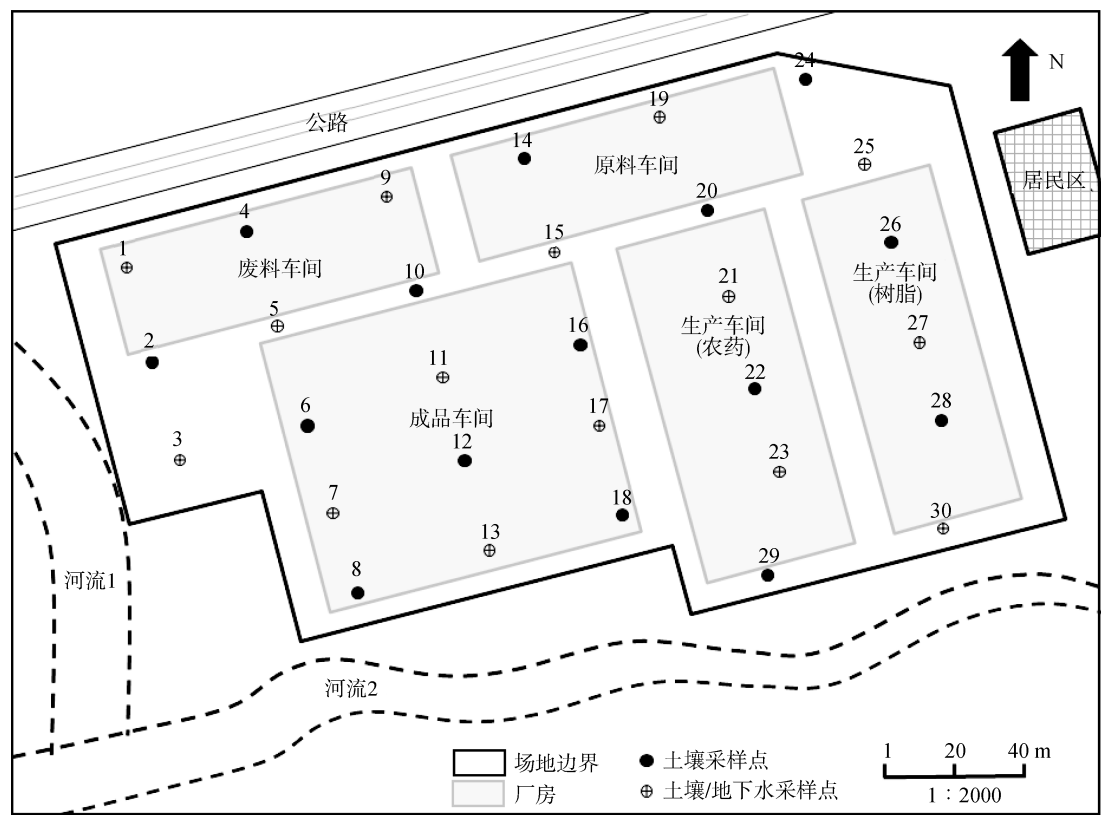


图 1 土壤与地下水采样布点图  
Fig. 1 Layout of soil and groundwater sampling points

质黏土, 1.2~3.5 m 为黏质粉土, 3.5~5.5 m 为砂质粉土, 5.5~7.0 m 为砂土, 7.0 m 以下为基岩。在土壤质地发生变化及存在明显污染迹象的层位采集土壤样品, 共采集 128 个。此外, 根据场地空间布局, 在 S6、S14、S16、S18 和 S26 五个点位的 3.0~3.2 m 深度用上提活阀式取土器采集原状土样 5 个测定土壤的基本理化性质<sup>[8]</sup>。结果为有机质 2.84 g/kg, 体积质量 1.52 g/cm<sup>3</sup>, 颗粒密度 2.71 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 18%。

采集地下水样品的点位, 在钻孔完成后放入内径为 60 mm 的硬质聚氯乙烯(PVC)井管布设监测井, 滤管位于地表以下 5~9 m, 长度为 3 m。在井管和钻孔之间填装石英砂为滤料, 膨润土为止水材料成井, 并采用水泵抽水和提水方式相结合完成洗井工作, 用地下水采集器采集不同监测井的地下水样品共 15 个。此外, 参考相关技术标准<sup>[9]</sup>进行

场地地下水流向的测定及现场抽水试验。结果显示: 场地地下水埋深约为地表以下 5 m, 基本存在于砂质粉土层以下, 流向为西南至东北; 地下水渗透系数 1.89 m/d, 水力梯度 0.0022 m/m, 地下水线性流速 0.0042 m/d。另外, 该地区多年平均风速为 2.9 m/s, 地下水补给速率为 1100 mm/a。

采集的所有样品均低温(< 4℃)密封保存并及时(< 2 天)送至实验室分析。根据原企业生产的原料、中间产物和产品等资料信息, 结合我国环境保护部和美国国家环保局(USEPA)优先控制的污染物名单<sup>[10]</sup>, 确定土壤与地下水的分析项目, 分析方法及检出限见表 1, 样品分析过程中设置空白样品及平行样品进行质量控制。

1.3 风险评估方法

本研究依据我国环境保护部编制的《污染场地

表 1 污染物的分析方法与检出限  
Table 1 Analytical methods and detection limits of contaminants

| 污染物种类     | 分析项目                                                                | 分析方法        | 检出限                                |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------|
| 挥发性有机污染物  | 单环芳烃、薰蒸剂、卤代芳香烃、卤代脂肪烃、<br>萘、三卤甲烷类等                                   | USEPA 8260C | 土壤: 0.01 mg/kg<br>地下水: 0.0005 mg/L |
| 半挥发性有机污染物 | 苯酚类、多环芳烃类、酞酸酯类、亚硝胺类、<br>硝基芳烃及环酮类、卤代醚类、氯化烃类、苯<br>胺类和联苯胺类、有机氯/有机磷农药类等 | USEPA 8270D | 土壤: 0.1 mg/kg<br>地下水: 0.0005 mg/L  |

风险评估技术导则》(征求意见稿)(以下简称《导则》)(征求意见稿)<sup>[11]</sup>及美国材料与测试协会(ASTM)基于风险的校正行动指南<sup>[12]</sup>,结合污染场地风险评估的基本流程进行场地的危害识别、暴露评估、毒性评估及风险表征<sup>[13]</sup>。风险表征阶段,应用国际上广泛认可的美国 RBCA 风险评估软件,根据风险评估的多层次性<sup>[14]</sup>,制定基于风险的污染物筛选值与修复目标值,计算污染物的致癌风险或非致癌危害商。

2 结果与讨论

2.1 危害识别

样品分析结果表明(表 2):土壤与地下水中部分挥发性有机污染物检出浓度较高,初步判断四氯化碳、1,2-二氯乙烷、氯苯、1,4-二氯苯、苯和氯仿为土壤与地下水中 6 种潜在的关注污染物。土壤污染相对较轻,在检测的 128 个土壤样品中,氯苯在 57 个样品中检出,最大浓度为 81.5 mg/kg,1,2-二

氯乙烷、1,4-二氯苯、苯和氯仿的浓度平均值均低于 1 mg/L,四氯化碳无检出。地下水污染相对较重,在检测的 15 个地下水样品中,1,2-二氯乙烷和氯苯的检出样品数分为 10 个和 12 个,最大浓度分别为 13.4 mg/L 和 313 mg/L。

2.2 暴露评估

该场地未来的规划用地方式为居住用地,在进行土壤和地下水筛选值与修复目标值的推算时,均分别考虑了保护人体健康(敏感受体:儿童和成人)和保护水环境(敏感受体:地下水)两种情况。污染物经由不同的暴露途径(13 种,见表 3,其中修复目标值的推算需另考虑离场的暴露途径)对敏感受体造成潜在的环境风险,如暴露途径(1):当土壤作为污染源从保护人体健康的角度分析,表层土壤中的污染物通过经口摄入暴露途径到达敏感受体(儿童和成人)。此外,在进行污染物修复目标值的推算过程中,根据场地土壤质地及地下水埋深等实际情况,将土壤划分为 0~1、1~3、3~5 m 三层。

表 2 土壤与地下水中关注污染物的浓度范围及数据统计  
Table 2 Concentration range and statistical summary of COCs (chemicals of concern) in soil and groundwater

| 关注污染物    | 土壤   |       |              |             | 地下水  |       |             |            |
|----------|------|-------|--------------|-------------|------|-------|-------------|------------|
|          | 样品总数 | 检出样品数 | 浓度范围 (mg/kg) | 平均值 (mg/kg) | 样品总数 | 检出样品数 | 浓度范围 (mg/L) | 平均值 (mg/L) |
| 四氯化碳     | 128  | 0     | —            | —           | 15   | 3     | 0.04~0.14   | 0.077      |
| 1,2-二氯乙烷 | 128  | 2     | 0.03~0.05    | 0.04        | 15   | 10    | 0.0018~13.4 | 1.45       |
| 氯苯       | 128  | 57    | 0.01~81.5    | 4.61        | 15   | 12    | 0.006~313   | 65.18      |
| 1,4-二氯苯  | 128  | 17    | 0.03~1.98    | 0.19        | 15   | 7     | 0.003~0.4   | 0.11       |
| 苯        | 128  | 11    | 0.01~1.26    | 0.27        | 15   | 8     | 0.007~2.16  | 0.42       |
| 氯仿       | 128  | 12    | 0.01~1.62    | 0.30        | 15   | 8     | 0.002~0.16  | 0.054      |

注:6 种污染物的检出限,土壤:0.01 mg/kg;地下水:0.0005 mg/L。

表 3 场地暴露概念模型  
Table 3 Site exposure conceptual model

| 环境介质 | 保护目标 | 污染源  | 敏感受体  | 暴露途径                                   |
|------|------|------|-------|----------------------------------------|
| 土壤   | 人体健康 | 表层土壤 | 儿童,成人 | (1)经口摄入                                |
|      |      |      |       | (2)皮肤接触                                |
|      |      |      |       | (3)室内颗粒物                               |
|      |      |      |       | (4)室外颗粒物                               |
|      |      |      |       | (5)室外蒸汽                                |
|      | 水环境  | 下层土壤 | 儿童,成人 | (6)室内蒸汽                                |
|      |      |      |       | (7)室外蒸汽                                |
| 地下水  | 人体健康 | 地下水  | 儿童,成人 | (8)土壤淋溶至地下水                            |
|      |      |      |       | (9)土壤淋溶水迁移离场                           |
|      |      |      |       | (10)室内蒸汽                               |
|      | 水环境  | 地下水  | 地下水   | (11)室外蒸汽                               |
|      |      |      |       | (12)地下水环境质量标准 <sup>[15-17]</sup> (MCL) |
|      |      |      |       | (13)地下水迁移离场                            |

注:MCL 表示污染物的最大浓度限值。

模型中制定污染物筛选值所需的包括受体暴露参数,土壤、地下水、空气及建筑物特征参数等在内的主要参数均来源于《导则》(征求意见稿);制定污染物的修复目标值所选取的参数大部分为场地实测参数,其中,土壤、地下水及空气特征参数见材料与方法(第 1.2 小节)。另外,假设地下水污染源至场外敏感受体的距离为 100 m,并应用地理信息系统绘图软件(ArcGIS)测量得到污染羽宽度为 180 m。在应用 RBCA 软件进行风险评估时,由于部分参数的表示形式与《导则》(征求意见稿)存在不同,在实际应用时需对相关受体暴露参数(如呼吸途径的暴露周期等)进行校正。

2.3 毒性评估

本研究污染物的毒性参数来源于《导则》(征求意见稿),并参照美国国家环保局(USEPA)标准对污染物进行毒性分级<sup>[18]</sup>,详见表 4。

表 4 关注污染物的毒性参数  
Table 4 Toxicity parameters of COCs

| 关注污染物    | 经口摄入参考<br>剂量 RfD <sub>o</sub><br>(mg/(kg·d)) | 皮肤接触参<br>考剂量 RfD <sub>d</sub><br>(mg/(kg·d)) | 呼吸吸入参<br>考剂量 RfD <sub>i</sub><br>(mg/(kg·d)) | 经口摄入致癌<br>斜率因子 SF <sub>o</sub><br>(mg/(kg·d)) <sup>-1</sup> | 皮肤接触致癌<br>斜率因子 SF <sub>d</sub><br>(mg/(kg·d)) <sup>-1</sup> | 呼吸吸入致癌斜<br>率因子 SF <sub>i</sub><br>(mg/(kg·d)) <sup>-1</sup> | USEPA 毒<br>性分级 |
|----------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------|
| 四氯化碳     | 0.0007                                       | 0.0007                                       | 0.054                                        | 0.13                                                        | 0.13                                                        | 0.053                                                       | B2             |
| 1,2-二氯乙烷 | 0.02                                         | 0.02                                         | 0.69                                         | 0.091                                                       | 0.091                                                       | 0.091                                                       | B2             |
| 氯苯       | 0.02                                         | 0.02                                         | 0.014                                        | —                                                           | —                                                           | —                                                           | NA             |
| 1,4-二氯苯  | 0.07                                         | 0.07                                         | 0.23                                         | 0.0054                                                      | 0.0054                                                      | 0.039                                                       | C              |
| 苯        | 0.004                                        | 0.004                                        | 0.0086                                       | 0.055                                                       | 0.055                                                       | 0.027                                                       | A              |
| 氯仿       | 0.01                                         | 0.01                                         | 0.028                                        | 0.031                                                       | 0.031                                                       | 0.081                                                       | B2             |

注：A：人类致癌污染物；B2：很可能的人类致癌污染物；C：可能的人类致癌污染物；NA：暂时未对其致癌性进行划分。

2.4 风险表征

本研究中污染物致癌风险的计算<sup>[11]</sup>见公式(1)、(2)，非致癌危害商的计算见公式(3)、(4)。

$$CR_s = C_{sur} \times (OISER_{ca} \times SF_o + DCSER_{ca} \times SF_d + PISER_{ca} \times SF_i + IoVER_{ca1} \times SF_i) + C_{sub} \times (IoVER_{ca2} \times SF_i + liVER_{ca1} \times SF_i) \quad (1)$$

$$CR_{gw} = C_{gw} \times (IoVER_{ca3} \times SF_i + liVER_{ca2} \times SF_i) \quad (2)$$

$$HQ_s = \frac{C_{sur}}{RAF} \times \left( \frac{OISER_{nc} + DCSER_{nc}}{RfD_o + RfD_d} + \frac{PISER_{nc} + IoSER_{nc1}}{RfD_i + RfD_i} \right) + \frac{C_{sub}}{RAF} \times \left( \frac{IoVER_{nc2} + liVER_{nc1}}{RfD_i + RfD_i} \right) \quad (3)$$

$$HQ_{gw} = \frac{C_{gw}}{RAF} \times \left( \frac{IoVER_{nc3} + liVER_{nc2}}{RfD_i + RfD_i} \right) \quad (4)$$

式中，CR<sub>s</sub>、CR<sub>gw</sub>分别表示土壤、地下水中污染物的致癌风险；HQ<sub>s</sub>、HQ<sub>gw</sub>分别表示土壤、地下水中污染物的非致癌危害商；C<sub>sur</sub>、C<sub>sub</sub>依次为表层土壤和下层土壤中污染物浓度(mg/kg)；C<sub>gw</sub>为地下水中污染物浓度(mg/L)；SF<sub>o</sub>、SF<sub>d</sub>、SF<sub>i</sub>依次为经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入的致癌斜率因子((mg/(kg·d))<sup>-1</sup>)；RfD<sub>o</sub>、RfD<sub>d</sub>、RfD<sub>i</sub>依次为经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入的参考剂量(mg/(kg·d))；OISER、DCSER依次为经口摄入、皮肤接触对应的土壤暴露量(kg/(kg·d))；PISER、IoVER<sub>1</sub>、IoVER<sub>2</sub>、liVER<sub>1</sub>依次为吸入颗粒物、表层土壤室外蒸汽、下层土壤室外蒸汽、下层土壤室内蒸汽对应的土壤暴露量(kg/(kg·d))；IoVER<sub>3</sub>、liVER<sub>2</sub>依次为吸入地下水室外蒸汽、地下水室内蒸气对应的地下水暴露量(L/(kg·d))；RAF：参考剂量分配系数，无量纲；ca：致癌效应；nc：非致癌效应。

2.4.1 筛选值与修复目标值 应用 RBCA 软件推算了土壤与地下水中污染物的筛选值(表 5)，对比污染物的检测浓度，筛选出土壤的关注污染物为：

1,2-二氯乙烷、氯苯、1,4-二氯苯、苯和氯仿；地下水的关注污染物为：四氯化碳、1,2-二氯乙烷、氯苯、1,4-二氯苯、苯和氯仿。由此，进一步推算关注污染物的修复目标值。考虑到不同质地的土壤理化性质的差异及其对污染物迁移转化行为的影响，将场地土壤分为 0~1、1~3 和 3~5 m 三层推算基于保护人体健康的修复目标值<sup>[19]</sup>。由表 5 可见，基于不同深度土壤的修复目标值有显著差异，深度越大，其数值越大。修复目标值的分层计算有助于提高后续土方量估算的精度，此外，对于土壤不同深度的风险评估结果将为该土地后续地下空间的利用模式提供依据。

从土壤的角度分析，基于保护人体健康与保护水环境所得到的修复目标值相差并不大，以 1,4-二氯苯为例，对比保护人体健康的修复目标值，0~1 m：1.64 mg/kg，1~3 m：2.32 mg/kg，3~5 m：5.03 mg/kg，其保护水环境的修复目标值(1.31 mg/kg)数值相对偏小，但基本在 1 个数量级之内，其余几种污染物有同样的规律。而从地下水的角度分析，基于保护人体健康的修复目标值相比于保护水环境的目标值均超过了一个数量级，苯甚至高达 50 倍。由此可见，从保护水环境的角度对污染物的修复提出了更高的要求。因此，在开展场地土壤与地下水的风险评估时，不应该忽视保护水环境的重要性，实际污染物的修复目标值应考虑选择两者中更为保守的值，以实现同时保护人体健康与水环境的目标。

对比污染物的检测浓度与修复目标值，其中，土壤超标污染物为氯苯、苯和氯仿，除氯仿在 S11 和 S16 点位分别超标达 47 倍和 54 倍外，其他点位各污染物超标倍数的范围为 1.7~6.3 倍。地下水中 6 种关注污染物均超标，其中，基于保护人体健康的角度，1,2-二氯乙烷在 S23 点位超标 16.8 倍，氯苯有 6 个点位分别超标 1.6~20.9 倍不等；基于保护水环境的角度，污染物超标严重，如：氯

表 5 土壤与地下水中关注污染物的筛选值及修复目标值  
Table 5 Screening levels and remediation targets of COCs in soil and groundwater

| 关注污染物    | 土壤 (mg/kg) |         |         |         |         |       | 地下水 (mg/L) |       |         |       |
|----------|------------|---------|---------|---------|---------|-------|------------|-------|---------|-------|
|          | 保护人体健康目标   |         |         | 保护水环境目标 |         |       | 保护人体健康目标   |       | 保护水环境目标 |       |
|          | 筛选值        | 修复目标值   |         |         | 筛选值     | 修复目标值 | 筛选值        | 修复目标值 | 筛选值     | 修复目标值 |
|          |            | 0 ~ 1 m | 1 ~ 3 m | 3 ~ 5 m |         |       |            |       |         |       |
| 四氯化碳     | 0.001 6    | —       | —       | —       | 0.002 7 | —     | 0.003 5    | 0.098 | 0.002   | 0.004 |
| 1,2-二氯乙烷 | 0.002 2    | 0.050   | 0.071   | 0.15    | 0.005 4 | 0.21  | 0.02       | 0.77  | 0.03    | 0.06  |
| 氯苯       | 2.91       | 4.24    | 6       | 13      | 0.41    | 7.92  | 4.57       | 15.20 | 0.3     | 0.6   |
| 1,4-二氯苯  | 0.12       | 1.64    | 2.32    | 5.03    | 0.29    | 1.31  | 0.060      | 2.11  | 0.075   | 0.15  |
| 苯        | 0.069      | 0.12    | 0.16    | 0.35    | 0.004 9 | 0.074 | 0.32       | 1.01  | 0.01    | 0.02  |
| 氯仿       | 0.001 7    | 0.031   | 0.044   | 0.096   | 0.004 4 | 0.022 | 0.01       | 0.33  | 0.012   | 0.024 |

苯有 5 个点位分别超标 124 ~ 522 倍不等,四氯化碳在 S21 点位超标 224 倍,苯在 S19 点位超标 108 倍。由此可见,该场地土壤与地下水存在不同程度的污染,需要进一步对其风险进行定量表征。

**2.4.2 风险及危害商** RBCA 依据毒性特征将污染物分为致癌和非致癌两类,其中致癌污染物计算其致癌风险(简称风险),非致癌污染物计算其非致癌危害商(简称危害商)。各国对单一污染物目标致癌风险的选择有所不同,我国《导则》(征求意见稿)中建议与美国一致,采用  $10^{-6}$ ,英国在实际工作中通常采用  $10^{-5}$ ,而荷兰则建议使用比较宽松的  $10^{-4}$ 。此外,单一污染物目标危害商通常设定为 1<sup>[20]</sup>。

本文计算了土壤与地下水中超标污染物的人体健康风险与危害商,风险或危害商超标的点位及污染物统计见表 6。风险定量结果显示:土壤污染相对较轻,共有 5 个点位存在污染物的风险或危害商

超标,主要污染物为氯苯、苯和氯仿,风险和危害商的最大值分别为 S10 点位的苯: $5.44 \times 10^{-5}$ 和 S11 点位的氯仿:54,土壤存在风险或危害的点位集中于场地原成品车间的东部;地下水污染相对严重,有 6 个点位存在不同污染物的风险或危害商超标,主要污染物为四氯化碳、1,2-二氯乙烷和氯苯。其中,四氯化碳和 1,2-二氯乙烷同时存在致癌效应和非致癌效应,对人体健康的危害极大,两者的最大风险分别高达  $5.73 \times 10^{-3}$ 和 0.174。氯苯虽为非致癌污染物,然其多作为工业原料,人类长期接触后会导致严重的器官损害,其最大危害商高达 20 586,地下水存在风险或危害的点位主要分布于场地原成品车间及农药生产车间的南部。鉴于上述分析,场地原成品车间及农药生产车间为土壤与地下水污染较为集中的区域,且该场地地下水的风险与危害不容忽视,应该作为重点修复的对象。

表 6 土壤与地下水中风险或危害商超标的点位及污染物统计  
Table 6 Statistics of risks or hazard quotients excessive points and contaminants in soil and groundwater

| 环境介质       | 风险或危害商超过可接受水平的点位及污染物                                                              |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 土壤(0 ~ 1)m | S10: 苯; S16: 氯仿                                                                   |
| 土壤(1 ~ 3)m | S11: 氯仿                                                                           |
| 土壤(3 ~ 5)m | S10: 氯苯; S12: 氯苯、氯仿; S17: 氯苯、苯                                                    |
| 地下水        | S3: 四氯化碳、氯苯; S7: 氯苯; S11: 氯苯;<br>S13: 1,2-二氯乙烷、氯苯; S17: 氯苯; S23: 四氯化碳、1,2-二氯乙烷、氯苯 |

3 结论

(1) 该场地土壤污染较轻,关注污染物为 1,2-二氯乙烷、氯苯、1,4-二氯苯、苯和氯仿,在 128 个土壤样品中,氯苯有 57 个样品检出污染物,最大浓度为 81.5 mg/kg;地下水污染相对严重,在 15 个地下水样品中,1,2-二氯乙烷和氯苯分别有 10 个和 12 个样品检出,最大浓度分别为 13.4 mg/L和 313 mg/L。

(2) 该场地土壤局部区域存在风险或危害,最大值分别为 S10 点位的苯: $5.44 \times 10^{-5}$ 和 S11 点位的氯仿:54;地下水有 6 个点位存在不同污染物的风险或危害商超标,其中,1,2-二氯乙烷的最大风险高达 0.174,氯苯的最大危害商高达 20 586。场地原成品车间及农药生产车间为土壤与地下水污染较为集中的区域。

(3) 不同深度土壤的修复目标值存在显著差

异, 分层对土壤进行风险评估将为后续地下空间的高效利用提供依据。相比于污染物基于保护人体健康的修复目标值, 保护水环境目标值要更为保守, 由此, 仅基于保护人体健康的修复工程仍然存在水环境风险, 应当予以重视。

#### 参考文献:

- [1] Geng CN, Luo QS, Chen MF, Li ZY, Zhang CB. Quantitative risk assessment of trichloroethylene for a former chemical works in Shanghai, China[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2010, 16(2): 429-443
- [2] 陈梦舫, 骆永明, 宋静, 李春平, 吴春发, 韦婧, 罗飞. 场地含水层氯代烃污染物自然衰减机制与纳米铁修复技术的研究进展[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(3): 85-89
- [3] 钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜. 基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 647-652
- [4] 罗飞, 宋静, 潘云雨, 韦婧, 黄玉娟, 骆永明. 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
- [5] 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): 2 645-2 653
- [6] 张新钰, 王晓红, 辛宝东, 叶超, 郭高轩. 典型场地四氯化碳污染的健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2 578-2 584
- [7] 丁琼, 余立风, 田亚静, 刘俐, 李发生. 某农药生产场地中特征 POPs 的环境风险研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(12): 1 528-1 534
- [8] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准(GB/T 50123-1999)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999
- [9] 原国家冶金工业局. 供水水文地质勘察规范(GB/T 50027-2001)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001
- [10] 谌宏伟, 陈鸿汉, 刘菲, 何江涛, 沈照理, 孙静. 污染场地健康风险评价的实例研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 230-235
- [11] 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). 2009-09-29 [2013-04-10]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/200910/t20091022-175070.htm>
- [12] American Society for Testing and Materials. Standard Guide for Risk-based Corrective Action, ASTM E2081-00. 2000-01-01[2013-04-10]. <http://www.astm.org/Standards/E2081.htm>
- [13] Chang SH, Kuo CY, Wang JW, Wang KS. Comparison of RBCA and CalTOX for setting risk-based cleanup levels based on inhalation exposure[J]. Chemosphere, 2004, 56(4): 359-367
- [14] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 李发生. 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
- [15] 国家技术监督局. 地下水质量标准(GB/T 14848-93)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993
- [16] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准(GB/T 5749-2006)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
- [17] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准(GB/T 3838-2002)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [18] United State Environmental Protection Agency. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. 2005-03 [2013-04-10]. [http://www.epa.gov/osa/mmoaframework/pdfs/CANCER-GUIDELINES-FINAL-3-25-05\[1\].pdf](http://www.epa.gov/osa/mmoaframework/pdfs/CANCER-GUIDELINES-FINAL-3-25-05[1].pdf)
- [19] 姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强. 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
- [20] 陈梦舫, 骆永明, 宋静, 李春平, 吴春发, 罗飞, 韦婧. 中、英、美污染场地风险评估导则异同与启示[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(3): 14-18

## Risk Assessment of Soil and Groundwater for An Organic Chemical Contaminated Site

LI Chun-ping<sup>1,2</sup>, WU Jun<sup>1</sup>, LUO Fei<sup>1,2</sup>, WEI Jing<sup>1,2</sup>, CHEN Meng-fang<sup>1\*</sup>

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Human health and environmental risk assessment of soil and groundwater was undertaken for a typical organic chemical site in Jiangsu Province. The risk assessment was conducted using RBCA (Risk Based Corrective Action) model that was modified to fully comply with Chinese Technical Guidelines for Risk Assessment of Contaminated Sites (draft). It was found that, soil was contaminated, part of it presented risk or harm, the maximum values were  $5.44 \times 10^{-5}$  and 54 respectively. Groundwater contamination was relatively severe, six sampling points presented risk or harm, the greatest risk of 1,2-dichloroethane was 0.174, the greatest hazard quotient of chlorobenzene was 20 568. Remediation targets aimed at protecting water environment were relatively conservative than that of protecting human health. Therefore, we should pay attention that remediation that only aims at protecting human health may still have risk of water environment.

**Key words:** Organic chemical contaminated site, RBCA, Remediation targets, Soil and groundwater risk assessment