

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金



制药



喷涂



橡胶

京津冀

长三角

珠三角

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策 ..... 孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)

长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征 ..... 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)

经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征 ..... 陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)

近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析 ..... 马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)

电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系 ..... 柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)

焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析 ..... 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)

典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟 ..... 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)

多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析 ..... 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)

龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析 ..... 王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)

基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例 ..... 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)

造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估 ..... 张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郑明辉 (1131)

典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估 ..... 胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)

柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响 ..... 宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)

两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积 ..... 郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)

钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征 ..... 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)

盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征 ..... 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)

水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响 ..... 汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)

壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响 ..... 杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)

铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响 ..... 于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)

**研究报告**

COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析 ..... 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)

2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟 ..... 刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)

南京北郊 PM<sub>2.5</sub> 中有机组分的吸光性质及来源 ..... 尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)

西安市大气棕碳污染特性及发色团种类 ..... 陈前, 陈庆彩 (1236)

淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价 ..... 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓雨, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)

北京市控制 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估 ..... 杜沛, 王建州 (1255)

西宁市大气污染来源和输送季节特征 ..... 刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)

青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征 ..... 袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)

基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征 ..... 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)

山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析 ..... 刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)

兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献 ..... 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛潇萱, 马建民 (1315)

2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析 ..... 华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)

生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单 ..... 马占云, 姜显聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)

长江口邻近海域表层沉积物中的细菌藎多醇及对低氧区的响应判别 ..... 尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)

鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估 ..... 徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)

衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析 ..... 刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)

丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征 ..... 潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)

金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价 ..... 黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)

汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响 ..... 李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)

苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征 ..... 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)

娘子关泉群水化学特征及成因 ..... 唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)

过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用 ..... 徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)

亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向 ..... 王丽莎, 李希, 李裕元, 张满意, 吴金水 (1433)

紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂 ..... 刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)

太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能 ..... 马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)

一步法 La@MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的制备及其吸附水中磷的性能 ..... 白润英, 宋博文, 张彧, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)

工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能 ..... 邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (1469)

ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制 ..... 毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)

不同季节城市污水处理厂微生物群落特性 ..... 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)

麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学 ..... 殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)

内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价 ..... 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)

广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素 ..... 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)

超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响 ..... 方丹丹, 张立志, 王强 (1523)

水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响 ..... 陈佳, 赵秀兰 (1535)

四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性 ..... 王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)

地膜覆盖对菜地垄沟 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)

对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)

流域水生态空间管控下生境监测方法概述 ..... 阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)

《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)

# 基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例

李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云

(轻工业环境保护研究所, 工业场地污染与修复北京市重点实验室, 北京 100089)

**摘要:** 全周期场地概念模型可以尽可能准确地表征场地实际污染空间分布和赋存状态, 有效支撑后期场地精准修复或风险管控工作. 本文以京津冀地区某氯代烃污染场地为研究对象, 在污染识别、场地初步调查、详细调查和补充调查各阶段分别构建针对性的场地概念模型. 采用薄膜界面探测器和高密度电阻率法等现场快速筛查设备的应用, 辅助确定了潜在污染源和重点调查区域; 同时针对部分位置大量检出氯代有机物代谢产物氯乙烯, 判断该场已经发生较为明显的污染物生物降解现象. 通过选取典型钻孔和剖面进行降解指示性产物和组分图谱分析, 并结合地下水中氯代烃厌氧生物降解潜力综合评分达到 22 分的结果, 判断该场地具有较强的厌氧生物降解能力. 这种逐级优化形成针对场地污染调查的全周期场地概念模型, 为精准地掌握该场地实际污染情况提供了良好的工作基础和科学支撑.

**关键词:** 场地概念模型; 精准调查; 土壤; 污染场地; 环境修复

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1123-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011011

## Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development

LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, ZHANG Ji, RONG Li-ming, LI Xiang, WEI Wen-xia, SONG Yun  
(Beijing Key Laboratory of Industrial Land Contamination and Remediation, Environmental Protection Research Institute of Light Industrial, Beijing 100089, China)

**Abstract:** A life cycle conceptual site model (LC-CSM) can represent the actual spatial distribution and migration of pollution of a site very accurately and be beneficial in supporting decisions for accurate site remediation or risk management. A volatile chlorinated hydrocarbon contaminated site in the Beijing-Tianjin-Hebei region was chosen as the study case. LC-CSMs were established following the site assessment, preliminary investigation, detailed investigation, and supplementary investigation of each stage. The application of field screening tests such as a membrane interface probe and the multi-electrode resistivity method assisted in identifying potential pollution sources and hot points. Concurrently, a large amount of vinyl chloride, the end product of chlorinated hydrocarbon degradation, was detected in some boreholes, indicating that pollutant biodegradation had occurred at this site. Some typical boreholes and cross-sections were chosen to analyze the biodegradation indicators and chemical fingerprints, combining the results of the comprehensive score of chlorinated hydrocarbon anaerobic biodegradability in groundwater reaching 22. It is judged that the site has strong anaerobic biodegradability. This step-by-step optimization forms an LC-CSM for site investigation, which provides scientific support for accurate site characterization.

**Key words:** conceptual site model; accurately site investigation; soil; contaminated site; environmental remediation

长期工业生产活动所产生的水相、气态和固体等不同环境介质的污染, 大部分最终汇存、富集于土壤和地下水中<sup>[1,2]</sup>, 工业企业搬迁后往往会遗留严重的场地环境污染, 对人体健康<sup>[3]</sup>、饮用水安全<sup>[4]</sup>和生态环境<sup>[5]</sup>等产生威胁, 甚至会造成后果严重的环境污染事件<sup>[6]</sup>. 据报道我国面积超过 1 万 m<sup>2</sup> 的污染场地超过 50 万块, 其中大部分集中在长江三角洲、珠江三角洲和东北老工业基地等重点区域<sup>[7]</sup>. 这些污染造成的损失非常巨大, 初步估计修复这些污染场地需要 5 ~ 50 万亿人民币<sup>[8]</sup>.

城市发展、施工扰民和费用压力等因素, 迫使从原来的粗放式的异位扰动修复快速转向精准化的原位修复<sup>[9]</sup>. 根据问卷调查和网络检索收集到国内近期 137 个场地污染修复案例的统计情况来看, 原位修复技术已从 10 年前的不足 2% 快速增加到目前

的 20% 左右. 近年来以原位化学氧化、原位热脱附技术为代表的创新型原位修复技术快速发展, 对污染场地调查提出了更高的要求. 除了传统调查一般给出的主要污染因子、污染程度和污染范围外, 还对污染物赋存情况、区域水文地质特征、潜在污染物总量、污染浓度梯度变化以及潜在迁移转化等细节信息提出了更多的要求<sup>[6,10,11]</sup>. 因此以高精度场地调查 (high-resolution site characterization, HRSC) 和全周期场地概念模型 (life cycle conceptual site model, LC-CSM) 应用为代表的场地环境精准调查技术得以快速发展<sup>[12]</sup>.

场地环境精准调查技术是近年来国外快速发展

收稿日期: 2020-11-01; 修订日期: 2020-12-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1801400); 国家自然科学基金项目 (41907159)

作者简介: 李培中 (1982 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为场地污染调查与修复, E-mail: liepi\_li@163.com

的热门应用技术之一,已经成功应用于美国新泽西州、佛罗里达州和加利福尼亚州等多个涉及土壤蒸气入侵、重质非水溶相有机物(DNAPLs)和深层地下水污染等典型污染场地的环境调查和修复阶段<sup>[12]</sup>.目前场地环境精准调查技术还处于发展阶段,还未形成成熟的定义和完整的技术方法体系,但是总体来看具有如下关键特征:①尽可能准确全面掌握土壤和地下水污染分布情况,从而为后期污染修复提供准确“靶点”;②通过水文地质、地球化学和生物等多元非污染参数,明确污染物赋存状态及短期动态变化趋势,支撑污染修复技术选择和实施;③精确与直观地刻画场地污染特征和赋存环境条件,有效促进场地环境数据管理和分析.场地概念模型是指通过直观的方式,表征污染源、暴露途径和潜在受体实际情况,支撑管理决策<sup>[13]</sup>,在场地环境精准调查与污染修复全过程中起到至关重要的作用<sup>[14]</sup>,尤其是在数据缺口弥补和不确定性降低等方面<sup>[15]</sup>.针对场地环境调查、风险评价、污染修复和再利用全过程的全周期场地概念模型(LC-GSM),近年来成为场地环境管理领域的热门最佳适用技术之一<sup>[16,17]</sup>.

目前,国内在污染场地调查阶段所采用的概念模型主要还是基于污染识别的简化初步场地概念模型,但在初步调查采样和详细调查采样获取大量关于场地污染和水文地质信息后,大部分并未能够及时更新场地概念模型,从而导致后期工作过程中出现过度高成本加密采样分析<sup>[18]</sup>、污染源不清<sup>[19]</sup>、修复范围误差较大<sup>[20]</sup>以及未达到预期修复效果等诸多问题的产生.总体来看,基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查技术在国内应用相对较少.因此,本文以某氯代烃污染场地为研究对象,在污染识别、初步调查、详细调查和补充调查各阶段分别构建针对性的场地概念模型,通过全周期场地概念模型尽可能准确地表征实际污染分布和赋存状态,为后期场地精准修复或风险管控工作提供科学决策支撑,有效地推动我国场地精准调查技术的应用与推广,促进污染场地的绿色可持续修复.

## 1 材料与方法

### 1.1 场地概况

京津冀地区某有机溶剂厂建于1986年初,占地面积约2 000 m<sup>2</sup>.该厂以生产乙二氨和二氯乙烷等有机溶剂为主.1990年左右开始停产搬迁,搬迁时可能存在废弃物倾倒和遗洒等情况.后期该场地在调查前发生较大的土壤扰动现象,周边区域已经建成居民小区,现场踏勘时发现调查区域内有刺鼻异

味存在.场地周边为市政道路和居民区,场地南侧有临时道路,也纳入本地次调查范围,具体如图1所示.

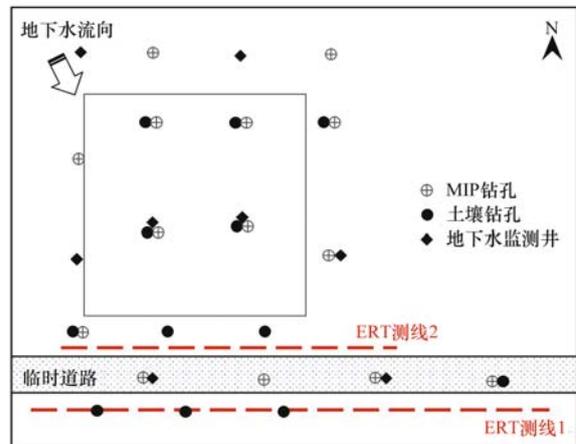


图1 场地调查点位布设示意

Fig. 1 Location of boreholes in site investigation

场地所在区域地层主要为多层砂与粉土交替,由上至下分别为杂填土、粉土夹层和细砂.由西向东杂填土层厚度逐步增加,粉土层厚度逐步加大且变为黏粉,下方的砂层厚度逐步减少.含水层主要由中细砂及砂砾石层组成,地下水埋深在10 m左右,单层厚度小于3 m,主要受大气降水的影响,年内最低水位出现在5~6月,年内最高水位一般出现在8~9月.

### 1.2 调查方法

本场地现场调查采样过程分3次进行,分别为:第一次为采用传统调查技术结合全面检测分析的初步调查,第二次采用薄膜界面探测器(membrane interface probe, MIP)和高密度电阻率法(multi-electrode resistivity method)相结合方法的现场辅助判断详细调查<sup>[21,22]</sup>,第三次采用基于预测潜在污染边界区域加密法确定详细污染空间分布情况.每阶段调查后根据所获取的污染数据和水文地质信息,分别构建相应的场地概念模型,递进优化更新.

详细调查共设置14个MIP探测点.每个MIP调查点的调查深度为12 m左右,间隔采样深度不超过5 cm;对每个采样点用火焰电离检测器(flame ionization detector, FID)、光离子化检测器(photo ionization detector, PID)和卤素专用检测器(halogen specific detector, XSD)这3种检测器同时进行实时测试分析.同时采用电极集成土壤电导率(EC)检测器,同步进行土壤电导率测试判断地下土壤质地<sup>[23]</sup>.为了验证MIP的原位探测效果,设置了6个MIP调查对照采样点进行土壤样品采集与实验室检测分析.此外,本次调查选用高密度电阻率法,共布设高密度电法测线2条,以物探技术对大面积疑似

重污染区域进行探测,并以物探影像判断描绘地下污染及地层现状,进一步准确评估污染深度与污染区域。

土壤样品中挥发性有机物的检测方法为 HJ 605,地下水样品中挥发性有机物的检测方法为 HJ 639,地下水样品中的无机指标检测方法参考 GB/T 14848 中推荐的分析方法,另外 pH、温度、ORP 和 DO 等参数为地下水采样过程中便携式多参数水质测试仪(Manta 2)现场检测值。常规检测指标样品从采集、流转到实验室检测分析,全过程严格按国家场地环境调查技术导则规定的质量保证和质量控制措施要求完成。

### 1.3 场地概念模型构建

一般情况下场地概念模型可以按照污染场地环境治理全过程的时间序列将其划分为 6 个阶段:初步场地概念模型、基础场地概念模型、污染表征场地概念模型、修复设计场地概念模型、修复施工场地概念模型和修复后场地概念模型<sup>[17]</sup>。本文重点针对污染场地调查阶段,因此相应的基于全周期场地概念模型主要包括初步场地概念模型、基础场地概念模型和污染表征场地概念模型这 3 个阶段。①初步场地概念模型主要是在污染识别后形成,主要包括潜在关注污染物、潜在污染源、迁移途径和潜在受体等重要信息。②基础场地概念模型主要是在初步调查完成后,通过获取的场地污染特征和影响污染物赋存的场地水文地质信息后,对初步场地概念模型进行适当优化更新后形成的。③污染表征场地概念模型是在详细调查完成后,尤其是使用现场高精度筛选测试方法获取大量数据后,采用三维可视化表征的方式对场地概念模型进行完善优化而成的。

## 2 结果与分析

### 2.1 初步场地概念模型

通过场地踏勘、人员访问和资料收集,初步判定该场地的污染途径主要有:化工产品生产过程中氯代烃等物料存储和使用过程中的遗洒渗漏;部分区域原工艺中生产储罐可能发生泄漏;日常产生的生产固废滴落淋溶造成的污染,潜在污染区域与原生产布局关系较为密切。污染物通过遗洒进入表层土壤,通过淋虑和渗漏进入下层土壤和地下水,对场地内的土壤和地下水造成污染。初步场地概念模型如图 2 所示。

结合初步场地概念模型,污染识别结果认为该场地土壤和地下水存在被污染的可能,需要进行下一步的现场调查采样及分析工作。由于该调查地块范围较小,现场采样时建议采用判断布点和网格布

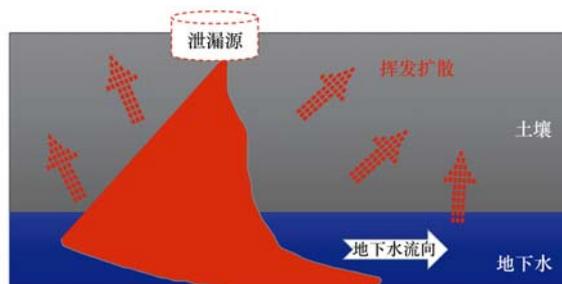


图 2 初步场地概念模型示意

Fig. 2 Preliminary conceptual site model of case site

点相结合的方法确定采样位置,并适当扩大采样范围至场地外临近区域。现场调查采样过程中重点关注污染物为以氯代烃为代表的挥发性有机物,并考虑其代谢降解产物。

### 2.2 基础场地概念模型

初步调查发现土壤中超标污染物主要为苯及氯代有机物,其中 1,1,2-三氯乙烷最高检出含量超过  $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远超过饱和溶解度。污染最严重的点位相对集中,最大污染深度达到地下 10.2 m 左右。地下水中 VOCs 类超标最为严重的是 1,1,2-三氯乙烷,最高含量超过  $500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,超过其饱和溶解度,可能存在重质非水溶相有机物(DNAPLs)<sup>[24]</sup>。同时,发现场地的地层结构特殊,东西方向剖面的地层结构变异显著。最西侧由上至下分别为杂填土、薄粉土夹层和细砂,由西向东杂填土层厚度逐步增加,粉土层厚度逐步加大且变为黏粉,下方的砂层厚度逐步减少。结合南北方向其他钻孔的剖面变化,初步分析该场地所在区域西侧部分原可能为一古河道,后被冲积砂层填平,建厂前可能进行过人工平整和表层回填。这种特殊地层条件可能造成局部区域内污染物垂直向下迁移速度相对较快,并在迁移至饱和层后在水平方向横向迁移,形成相对较大的污染范围。根据这些信息,场地概念模型可以进行适当的优化更新,如图 3 所示。

根据初步采样调查结果和基础场地概念模型,

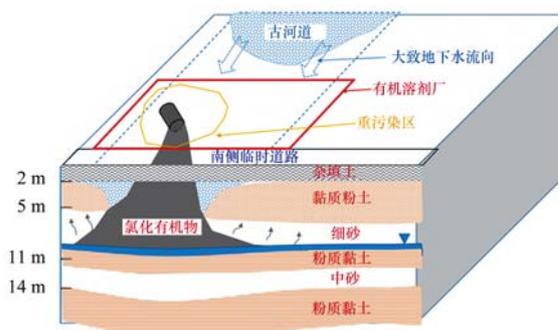


图 3 基础场地概念模型示意

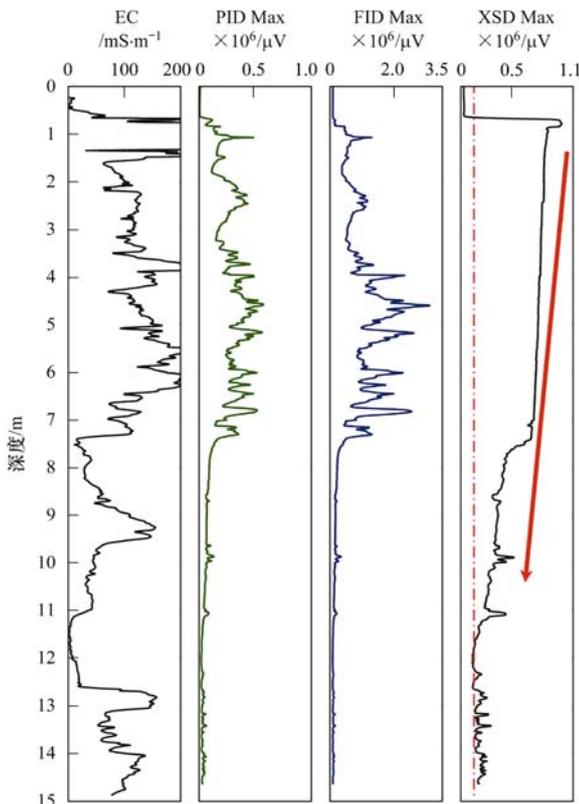
Fig. 3 Baseline conceptual site model of case site

确定详细调查可以分两阶段进行. 首先, 利用 MIP 和高密度电阻法进行现场辅助调查判断, 初步判定污染源的位置及潜在污染边界; 然后再进行加密的土壤和地下水采样, 这些加密点位主要布设在潜在的污染边界区域, 以核实或确定地下污染物的空间分布情况, 同时根据污染羽的浓度梯度和空间分布情况, 判断场地内主要的污染源分布以及是否存在多个污染源.

### 2.3 污染表征场地概念模型

MIP 配置的 PID、FID 和 XSD 检测器结果表明, 大部分剖面测量信号表明单独 XSD 响应值较为明显. 通过各点位的 XSD 测量值进行三维差值分析, 确定了潜在污染区域为原厂区的南部区域, 且污染羽已向外迁移至南侧的临时道路下方. 从图 4~6 中可以看出不同区域的典型剖面 MIP 测量信号变化情况, 并且可以判断地下污染物的潜在空间分布情况. 图 4 为潜在的污染源, XSD 测量值从地下 1 m (表层 1 m 内可能存在扰动、挥发和生物降解等作用) 开始自上至下不断降低; 图 5 为潜在污染羽的边缘区域, 埋深 10 m 以内 XSD 数值都很低, 但是

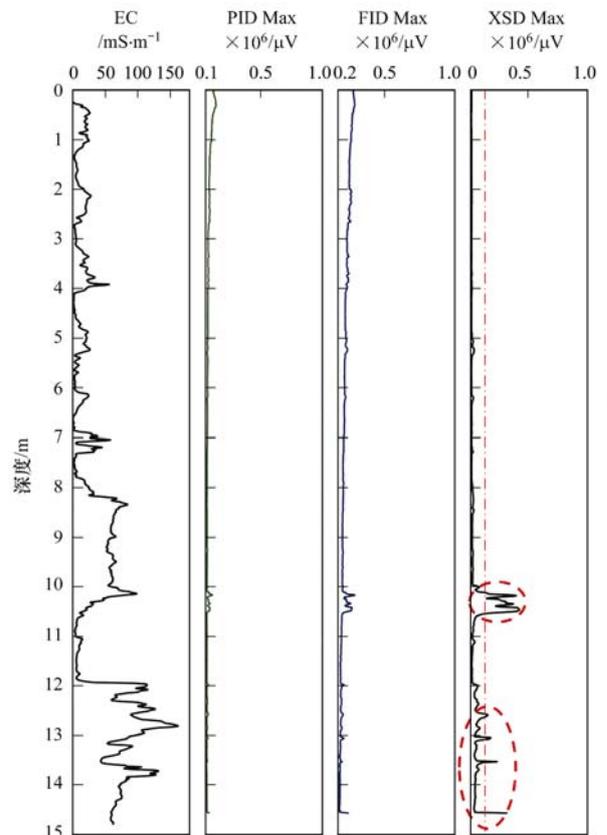
到了第一个含水层(10 m 左右), XSD 异常升高, 说明可能是污染物随水力作用迁移至本区域, 但是含量相对较低; 图 6 说明本场地还可能还存在其他表层污染源, 但是含量相对较低, 可能是后期污染倾倒或场地扰动造成的污染扩散. 另外, 根据高密度电阻法测量的场地典型剖面电阻率结果和现场记录情况推测, 深度 1.4 m 内的连续高电阻层异常特征可能是由于表层回填土中的建筑垃圾等回填物造成. 剖面出现的 3 处不连续异常高阻区, 则可能为有机污染造成, 最深污染深度可达 13.7 m 左右.



红色箭头表示 XSD 信号值垂直方向逐步下降, 反映污染物由上至下迁移

图 4 潜在污染源区 MIP 探测点位剖面测量信号变化与污染分布情况判断

Fig. 4 Potential source area judged by vertical logs of chemical detector and electrical conductivity of typical profile

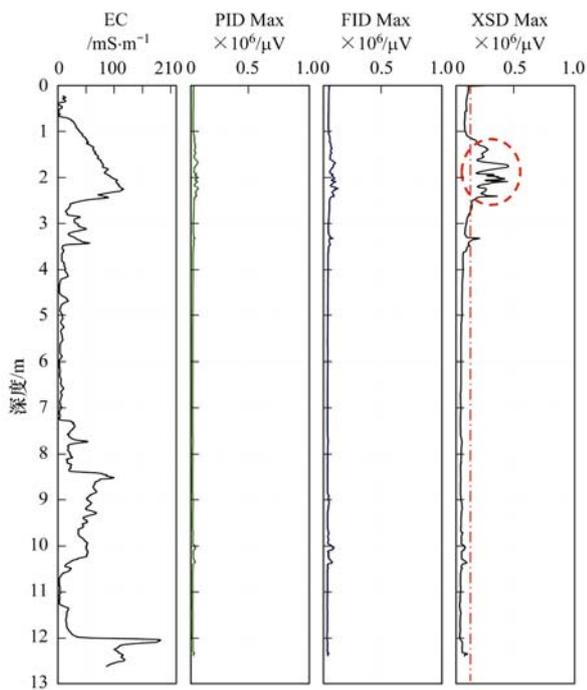


红色虚线圈表示内含水层附近 XSD 信号值异常升高(相对较低), 为污染羽边缘

图 5 污染羽边缘区 MIP 探测点位剖面测量信号变化与污染分布情况判断

Fig. 5 Potential pollution plume edge judged by vertical logs of chemical detector and electrical conductivity of typical profile

根据初步调查和详细调查的结果, 综合判断认为污染物在包气带内主要以垂直迁移为主, 同时伴随着土壤气的挥发进行横向迁移; 污染通过垂直迁移进入第一含水层后, 污染物随着地下水流场进行横向迁移, 此时污染物以横向扩散为主. 由于此类污染物比水密度大, 进入含水层后继续垂直向下迁移, 通过第一含水层底部的弱透水层时, 大部分污染物被吸附截留. 但是该场地范围内第一含水层和第二



红色虚线圈表示表层土壤 XSD 信号值相对较高, 但未发生明显垂向迁移, 可能会后期扰动形成的表层污染源  
图 6 其他表层污染源(扰动区)的 MIP 探测点位剖面测量信号变化与污染分布情况判断

Fig. 6 Potential another source area (surface disturbed pot) judged by vertical logs of chemical detector and electrical conductivity of typical profile

含水层之间的阻隔层厚度不均匀, 局部厚度较小且存在联通可能, 总体属于一个大的含水层. 比水密度大的氯代烃污染物可能局部已经进入第二含水层. 因此, 该场地污染概念模型进行了进一步的优化调整, 具体如图 7 所示.

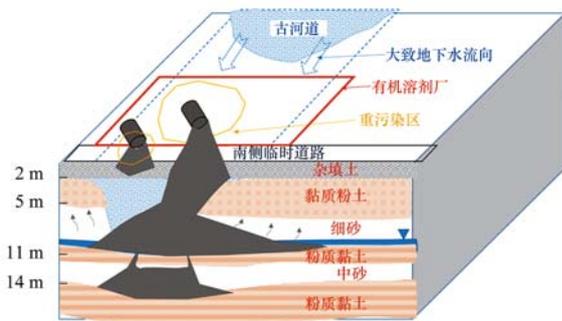


图 7 污染表征场地概念模型示意

Fig. 7 Characterization conceptual site model of case site

### 3 讨论

#### 3.1 污染物赋存及降解潜力分析

综合初步调查和详细调查的结果确定场地污染程度和范围后, 发现该场地土壤中大量检出氯代烃代谢产物氯乙烯<sup>[25]</sup>, 且氯乙烯的空间分布情况相对较为广泛, 既在表层重污染区域大量检出, 又在下层

土壤中甚至地下水隔水地板的黏土中检出. 从图 8 中典型剖面中由上至下氯代烯烃类污染的组分图谱可以看出, 浅层(埋深 5~8 m)重污染土壤中的 PCE 占比相对较大, 但是典型的还原脱氯降解产物 TCE 和 1,1-DCE 等占比也较为明显, 尤其厌氧生物降解终端产物氯乙烯, 说明这一区域中发生显著厌氧还原脱氯生物降解作用. 同时在 10 m 以下的深层土壤(饱和层)中氯乙烯占比最大, 说明污染物向下迁移过程中发生较为明显的还原脱氯反应, 并造成氯乙烯的大量聚集. 另外, 部分地下水样品中检出氯乙烯厌氧还原最终代谢产物乙烯和强厌氧还原条件指示剂甲烷气, 再次证明该场地具较强的厌氧生物降解氯代烃污染物的能力<sup>[26]</sup>.

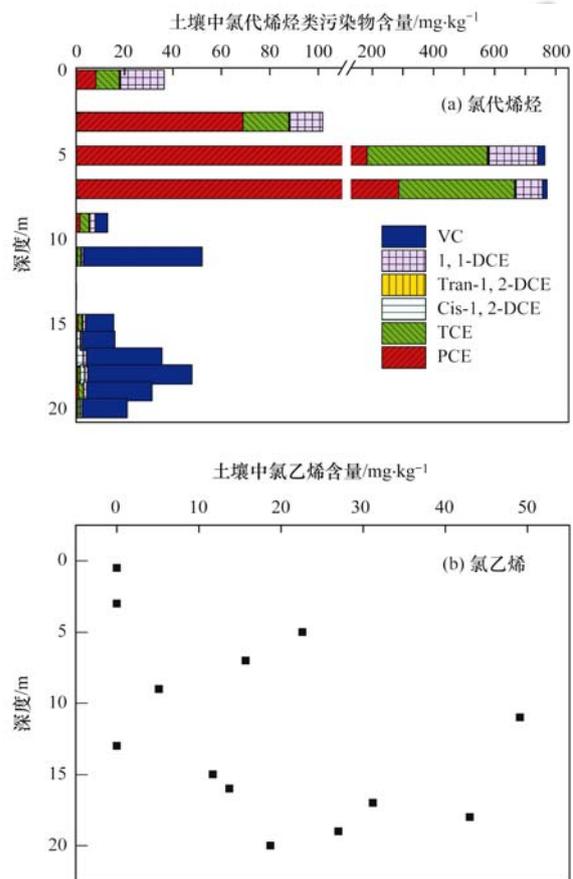


图 8 典型剖面土壤中氯代烯烃类污染物组分图谱及降解指示剂氯乙烯含量

Fig. 8 Fingerprint of ethylene chloride degradation and concentration of degradation indicator vinyl chloride in a typical profile

后期的补充调查时在对地下水中污染物组分变化情况测试的同时, 增加测试了非污染理化特性参数, 尤其重点关注是否有最终厌氧还原降解最终产物乙烯或乙烷存在. 结果表明该场地地下水厌氧还原条件良好, 部分区域检出强还原条件的指示剂甲

烷,同时检出氯代烯烃还原降解最终产物乙烯,最高含量达到  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上. 这些都说明了该场地地下水具有良好氯代烃厌氧生物降解潜力<sup>[26,27]</sup>. 根据地下水中各项指标的检测结果,参考美国 EPA 地下

水氯代烃厌氧生物降解能力综合判断标准对该场地进行综合打分<sup>[28]</sup>,如表 1 所示. 结果表明该场地综合得分为 22 分,属于厌氧生物降解能力很强的等级,具有较强的自然衰减降解潜力.

表 1 地下水中氯代烃厌氧生物降解潜力评价打分情况

Table 1 Results of preliminary screening for anaerobic biodegradation processes in groundwater

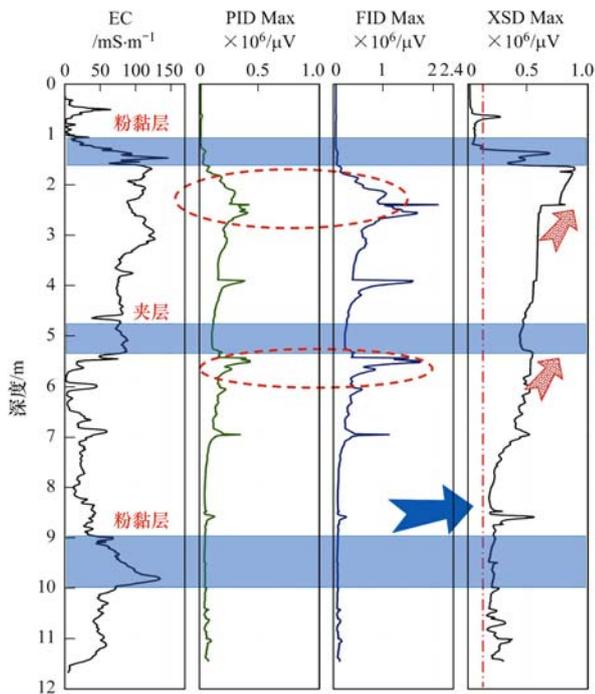
分析指标	数值	指标说明	分值	场地得分
DO	$<0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	还原脱氯作用的含量上限	3	
DO	$>5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	无法还原脱氯;但 VC 可能好氧降解	-3	-3
$\text{NO}_3^-$	$<1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	更高含量时可能与脱氯作用竞争还原	2	2
$\text{Fe}^{2+}$	$>1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	有还原脱氯反应潜力;三价铁氧化 VC 潜力	3	3
$\text{SO}_4^{2-}$	$<20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	更高含量时可能与脱氯作用竞争还原	2	0
$\text{S}^{2-}$	$>1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	具有发生还原脱氯反应潜力	3	0
$\text{CH}_4$	$<0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	VC 可能好氧降解	0	0
$\text{CH}_4$	$>0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最终还原产物;VC 富集	3	
ORP	$<50 \text{ mV}$	具有发生还原脱氯反应潜力	1	1
ORP	$<-100 \text{ mV}$	很可能发生还原脱氯反应	2	
pH 值	5~9	还原脱氯最佳 pH 值范围	0	0
pH 值	$<5$ 或 $>9$	还原脱氯不利 pH 值范围	-2	
TOC	$>20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	碳源和能量源,驱动脱氯反应	2	2
温度	$>20^\circ\text{C}$	超过 $20^\circ\text{C}$ 生物反应加速	1	0
$\text{CO}_2$	$>2$ 倍背景值	最终氧化降解产物	1	0
碱度	$>2$ 倍背景值	$\text{CO}_2$ 与含水层矿物反应产物	1	0
$\text{Cl}^-$	$>2$ 倍背景值	有机氯脱氯产物	2	2
$\text{H}_2$	$>1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	有发生还原脱氯反应潜力;VC 可能富集	3	
$\text{H}_2$	$<1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	VC 好氧降解	0	0
挥发性脂肪酸	$>0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	复杂生物降解中间产物;碳源和能量源	2	0
BTEX	$>0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	碳源和能量源,驱动脱氯反应	2	2
PCE		污染源	0	0
TCE		污染源/PCE 降解产物	0/2	2
DCE		污染源/TCE 降解产物(若 cis-DCE 占总 DCE80% 以上,则 1,1-DCE 为 TCA 降解产物)	0/2	2
VC		污染源/DCE 降解产物	0/2	2
1,1,1-TCA		污染源	0	0
DCA		TCA 还原降解产物	2	2
四氯化碳		污染源	0	0
CA		DCA 或 VC 还原降解产物	2	0
乙烯/乙烷	$>0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	VC 或乙烯还原降解产物	2	
乙烯/乙烷	$>0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	VC 或乙烯还原降解产物	3	3
氯仿		污染源/四氯化碳降解产物	0/2	2
二氯甲烷		污染源/氯仿降解产物	0/2	0
场地总分				22

1)第三列中“/”是指前面 1 种情况或后面 1 种情况,分别对应第四列中“/”前后分值

### 3.2 全周期场地概念模型在场地精准调查的作用

前面场地调查阶段全周期场地概念模型的构建和持续优化,表明除了能够准确表征场地污染分布情况,还能够基于污染物的赋存情况和转化情况,对污染物的变化趋势进行适当的预测<sup>[29]</sup>,从而指导后期的污染修复技术选择. 根据后期补充调查获取的污染自然降解信息,可以对场地概念模型进行进一步优化更新. 由图 9 可知,在污染源扩散区发现明显

的污染降解情况,结合场地的实际地层特征可知该场地埋深 2 m 和 5 m 处分别有两层粉黏土层(或夹层),对深层污染物通过气体挥发向上逸散能够起到一定的阻隔作用. 这一点从这两层粉黏土层下方氯代有机物的异常增大,可以推测发生气体聚集现象<sup>[30,31]</sup>. 但是,同时这些区域可能也会造成湿度、养分和微生物的显著增加,进而造成氯代烃发生脱氯生物反应,生成烃类化合物,因此造成相应的 PID 和



红色虚线圈表示脱氯生物降解产生烃类化合物,红色箭头为氯代烃气相向上迁移并在顶板处富集,蓝色箭头为污染物在饱和层底板处横向迁移

图9 典型剖面氯代烃类污染物降解情况分析

Fig. 9 Potential degradation of chloro-hydrocarbons in typical profile

FID 测量信号在这一深度范围内明显增加。

#### 4 结论

(1) 本研究通过现场分阶段调查,逐级优化形成针对场地污染调查的全周期场地概念模型。MIP 等现场快速筛查设备的应用,帮助确定了重点区域和调查对象,为后期场地详细调查提供了重要的决策支撑。

(2) 针对场地详细调查过程中发现该场地土壤中大量检出氯代有机物代谢产物氯乙烯,判断该场地中氯代有机污染物可能已经发生较为明显的生物降解作用。

(3) 通过选取典型剖面和区域进行综合分析测试,并结合地下水水质综合分析判断污染物自然衰减潜力大小。这些都为精准地掌握该场地实际污染情况提供了良好的工作基础和科学数据支撑。

#### 参考文献:

[ 1 ] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 145-152.  
Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 145-152.

[ 2 ] Naidu R, Smith E, Wong M H, *et al.* Remediation of site contamination[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, 224(12), doi: 10.1007/s11270-013-1723-x.

[ 3 ] 谢剑, 李发生. 中国污染场地修复与再开发[J]. 环境保护, 2012, (Z1): 15-24.

[ 4 ] 宋云, 李培中, 郭逸飞. 关于兰州石化泄漏导致自来水苯超标事件的解析[J]. 环境保护, 2015, 43(19): 54-57.  
Song Y, Li P Z, Guo Y F. Analysis about tap water benzene exceeding event caused by Lanzhou petrochemical leakage[J]. Environmental Protection, 2015, 43(19): 54-57.

[ 5 ] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [ J ]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 750-759.

[ 6 ] 姜林, 梁竞, 钟茂生, 等. 复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J]. 环境科学研究, 2020, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.07.14.  
Jiang L, Liang J, Zhong M S, *et al.* Challenges and response to risk management of complex contaminated sites[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.07.14.

[ 7 ] 宋昕, 林娜, 殷鹏华. 中国污染场地修复现状及产业前景分析[J]. 土壤, 2015, 47(1): 1-7.  
Song X, Lin N, Yin P H. Contaminated site remediation industry in China: current state and future trends[J]. Soils, 2015, 47(1): 1-7.

[ 8 ] 尧一骏. 我国污染场地治理与风险评估[J]. 环境保护, 2016, 44(20): 25-28.  
Yao Y J. Risk assessment and remediation of soil contamination in China[J]. Environmental Protection, 2016, 44(20): 25-28.

[ 9 ] 李发生. 新形势下我国污染场地修复技术决策和产业发展探析[J]. 环境保护, 2016, 44(20): 12-15.  
Li F S. Analysis on the remediation technology decision and industry development of the contaminated site in China under the new situation[J]. Environmental Protection, 2016, 44(20): 12-15.

[ 10 ] ITRC. Technical and regulatory guidance for the triad approach: a new paradigm for environmental project management [ R ]. ITRC, 2003.

[ 11 ] USEPA. Superfund remedy report (SRR) 16<sup>th</sup> edition [ R ]. EPA-542-R-20-001, USEPA, 2020.

[ 12 ] ITRC. Environmental molecular diagnostics new site characterization and remediation enhancement tools [ R ]. ITRC, 2013.

[ 13 ] Day-Lewis F D, Slater L D, Robinson J, *et al.* An overview of geophysical technologies appropriate for characterization and monitoring at fractured-rock sites [ J ]. Journal of Environmental Management, 2017, 204: 709-720.

[ 14 ] Shultz M, Cramer R, Plank C, *et al.* Best practices for environmental site management: a practical guide for applying environmental sequence stratigraphy to improve conceptual site models [ R ]. EPA/600/R-17/293, Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2017.

[ 15 ] Freedman V, Connelly M, Rockhold M, *et al.* A multiple lines of evidence approach for identifying geologic heterogeneities in conceptual site models for performance assessments [ J ]. Science of the Total Environment, 2019, 692: 450-464.

[ 16 ] Tomlinson D W, Rivett M O, Wealthall G P, *et al.* Understanding complex LNAPL sites: illustrated handbook of LNAPL transport and fate in the subsurface [ J ]. Journal of Environmental Management, 2017, 204: 748-756.

[ 17 ] USEPA. Environmental cleanup best management practices: effective use of the project life cycle conceptual site model [ R ]. EPA 542-F-11-011, USEPA, 2011.

- [18] 杜保森, 阳杰. 污染场地调查存在的问题及解决对策[J]. 上海环境科学, 2020, **39**(4): 181-184.  
Du B S, Yang J. Existential problems and countermeasures in the investigation of contaminated sites[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2020, **39**(4): 181-184.
- [19] 刘泽宇, 赵胜豪, 廖朋辉, 等. 某工业场地砷污染的加密布点优化与精度对比分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(9): 3415-3421.  
Liu Z Y, Zhao S H, Liao P H, *et al.* Optimization and accuracy comparative analysis of sampling methods in an Arsenic pollution site survey[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(9): 3415-3421.
- [20] 孙兴凯, 黄海, 王海东, 等. 大型污染场地修复过程中的问题探讨与工程实践[J]. 环境工程技术学报, 2020, **10**(5): 883-890.  
Sun X K, Huang H, Wang H D, *et al.* Discussion of problems in the process of large-scale contaminate sites remediation and project practice [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, **10**(5): 883-890.
- [21] 王海见, 杨苏才, 李佳斌, 等. 利用 MIP 快速确定某苯系物污染场地污染范围[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(2): 96-100, 189.  
Wang H J, Yang S C, Li J B, *et al.* Application of the membrane interface probe to delineate subsurface BTEX pollution plume at a BTEX contaminated site[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(2): 96-100, 189.
- [22] 张辉, 杨青, 胡饶, 等. 电法勘探在探测加油站石油烃污染中的应用[J]. 物探与化探, 2013, **37**(6): 1114-1119.  
Zhang H, Yang Q, Hu R, *et al.* The application of electrical method to detecting petroleum hydrocarbon contamination in a gas station[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, **37**(6): 1114-1119.
- [23] McCall W, Christy T M, Pipp D A, *et al.* Evaluation and application of the optical image profiler (OIP) a direct push probe for photo-logging UV-induced fluorescence of petroleum hydrocarbons [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(10), doi: 10.1007/s12665-018-7442-2.
- [24] Kueper B H, Davies K. Assessment and Delineation of DNAPL source zones at hazardous waste sites[R]. EPA/600/R-09/119, Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2009.
- [25] Nobre R C M, Nobre M M M, Campos T M P, *et al.* In-situ biodegradation potential of 1, 2-DCA and VC at sites with different hydrogeological settings [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **340**: 417-426.
- [26] Richards P M, Liang Y, Johnson R L, *et al.* Cryogenic soil coring reveals coexistence of aerobic and anaerobic vinyl chloride degrading bacteria in a chlorinated ethene contaminated aquifer [J]. Water Research, 2019, **157**: 281-291.
- [27] Puigserver D, Herrero J, Parker B L, *et al.* Natural attenuation of pools and plumes of carbon tetrachloride and chloroform in the transition zone to bottom aquitards and the microorganisms involved in their degradation [J]. Science of the Total Environment, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135679.
- [28] USEPA. Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water[R]. EPA/600/R-98/128, Washington DC: Office of Research and Development, 1998.
- [29] 孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 等. 某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 377-384.  
Meng X S, Wu M M, Chen H H, *et al.* Vertical pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in a heterogeneous unsaturated zone under a coking plant [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 377-384.
- [30] Murray A M, Ottosen C B, Maillard J, *et al.* Chlorinated ethene plume evolution after source thermal remediation: determination of degradation rates and mechanisms[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2019, **227**, doi: 10.1016/j.jconhyd.2019.103551.
- [31] Gafni A, Siebner H, Bernstein A. Potential for co-metabolic oxidation of TCE and evidence for its occurrence in a large-scale aquifer survey[J]. Water Research, 2020, **171**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115431.

## CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas .....	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt .....	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas .....	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors .....	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China .....	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors .....	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City .....	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park .....	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City .....	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development .....	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area .....	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter .....	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil .....	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses; A Field Experiment .....	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings .....	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hytololephium spectabile</i> Under Salt Stress .....	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil .....	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice .....	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes .....	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic .....	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ .....	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM <sub>2.5</sub> Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing .....	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an .....	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City .....	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM <sub>2.5</sub> Pollution Control in Beijing .....	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City .....	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region .....	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China .....	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter .....	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China .....	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019 .....	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste .....	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage-polysylls to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas .....	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin .....	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake .....	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries .....	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir .....	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season .....	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou .....	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring .....	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO <sub>2</sub> Remolded Sediment .....	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinooides</i> Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China .....	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> Advanced Reduction Process .....	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate .....	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions .....	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility .....	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia .....	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons .....	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish ( <i>Danio rerio</i> ) .....	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia .....	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China .....	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields .....	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice .....	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics .....	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field .....	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N <sub>2</sub> O Emission from a Wheat Maize Rotation System .....	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management .....	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)