

柳州市中铁物流园及周边片区
改造项目地块二
土壤污染风险评估报告

代建单位：广西柳州市元信投资有限公司

编制单位：广西桂寰环保有限公司

编制日期：二〇二一年一月

项目名称：柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二
土壤污染风险评估报告

代建单位：广西柳州市元信投资有限公司

编制单位：广西桂寰环保有限公司

检测单位：广西博测检测技术服务有限公司

水文地质勘查单位：广西智合地质勘察有限公司

项目负责人：郭翔

项目参与人员：

| 序号 | 姓名 | 专业 | 职务/职称 | 职责 |
|----|-----|-----------|-------|------------------|
| 1 | 黄晓峰 | 化学工程与工艺专业 | 中级工程师 | 现场调查/报告 编写/制图 |
| 2 | 杨露思 | 环境科学 | 中级工程师 | 现场调查/报告 编写 |
| 3 | 宋小慧 | 化学工程 | 中级工程师 | 现场调查/校核 |
| 4 | 郭翔 | 环境管理 | 高级工程师 | 报告编写/报告 审核 |
| 5 | 莫丽芬 | 生态学 | 高级工程师 | 报告审定 |

柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染风险评估报

告评审意见修改说明

| 序号 | 审查意见 | 修改说明 |
|----|--|---|
| 1 | 分析地下水类型及污染成因。 | 1、完善补充了地下水类型，详见章节 P21~P22 章节 2.1.6.2 的下划线处。 2、补充完善了污染成因的分析，详见 P71~P72 章节 3.3.5.2 的下划线处及 P81 章节 4.2.1.3 的下划线处。 |
| 2 | 核实土壤镍以及总石油烃的修复目标，按分层采样的情况核实修复范围和修复土方量，在修复范围图上补充拐点位置。 | 1、将土壤镍修复目标值由 150mg/kg，修改为风险控制计算值 212mg/kg，详见 P200 章节 5.1.1 的下划线处，由于镍的修复目标值变更，报告中相应内容进行了修改（P2 概述章节标黄下划线处、P3 概述章节标黄下划线处、P201 章节 5.1.1 表 5.1-1 标黄下划线处、P212 章节 5.2.2.1 图 5.2-7、P213 章节 5.2.2.2 表 5.2-2 和表 5.2-3 标黄下划线处、P231 章节 6.2.2 表 6.2-2 标黄下划线处、P236 章节 7.2 标黄下划线处）；修改了地下水中石油烃(C ₁₀ -C ₄₀)的修复目标值的，详见 P198 章节 5.1.2 的下划线处。 2、根据采样深度以及地块地层岩性性质和污染程度等原因，完善补充了地块修复范围及修复土方量确定方法的依据及合理性，详见 P199~P201 章节 5.2.1 的下划线处。 3、已在修复范围图上添加了相应的拐 |

| | | |
|---|---|---|
| | | 点，并与附件 2 修复范围拐点坐标相对应，详见 P204~P209 章节 5.2.2 的图 5.2-2~图 5.2-7 处和 P212 章节 5.2.3 的图 5.2-8。 |
| 3 | 核实暴露途径和地块特征参数。 | <p>1、根据地块未来规划类型以及与地表水之间的水力联系等，完善了暴露途径选取的原因，详见 P91 章节 4.3.2.2 的下划线处。</p> <p>2、核对了地块特征参数，并进行了相应的修改，详见 P110 章节 4.3.6 的下划线处。</p> |
| 4 | 完善修复建议，补充 7m 以下采用原位阻隔技术的依据。 | 完善补充了 7m 以下采用原位阻隔技术的依据，详见 P228 章节 6.2.2 的下划线处。 |
| 5 | 按与会专家和代表的其他意见修改完善。 | 见全文相应修改下划线处。 |
| 6 | 地下水具有饮用功能的，建议直接参考《地下水质量标准》（GB/T14848-2017）III类水标准限值，地下水修复中需要关注苯并[a]芘。 | <p>1、完善补充了地下水修复目标值确定的依据，详见 P199 章节 5.1.2 的下划线处。</p> <p>2、完善补充了地下水中关注污染物苯并[a]芘风险评估过程。详见 P85 章节 4.2.2.2 的下划线处和 P161 章节 4.5.4.2 的下划线处。</p> |
| 7 | 修改文本中“地下水石油烃（C10-C40）修复目标值参考《荷兰建设部关于土地使用和环 | 完善补充了地下水石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ）修复目标值确定的依据详见 P199~P200 章节 5.1.2 的下划线处。 |

| | | |
|----|---|--|
| | 建议在“5.2.3.1”中分污染物做地下水修复范围图 | 已按照不同污染物进行地下水修复范围图的制作，详见 P212~P213 章节 5.2.3.1 的图 5.2 8 和表 5.2 4 及下划线处。 |
| 8 | 暴露情景考虑过于保守，商住用地未来开发深度是否会达到二十多米，深层土壤考虑暴露情景时是否每一层都按照浅层土壤剥离角度考虑暴露风险，建议需要结合开发需求进一步分析。 | 完善补充了土壤的暴露情景和暴露途径的确定依据，详见 P91 页章节 4.3.2.1 的下划线处。 |
| 9 | 项目场地及下游区域地下水区域无地下水供水水源地，区域地下水不作为饮用水水源。进一步衡量地下水按照 III 类水（即饮用标准）进行修复的必要性。 | 根据地块未来规划类型以及与地表水之间的水力联系等，完善了选取地下水 III 类标准的原因，详见 P58 章节 3.2.3.2 和 P66~P67 章节 3.3.4.2 的下划线处和 P92 章节 4.3.2.2 的下划线处。 |
| 10 | 核实“地块下卵石层中的地下层压水收到场地土壤中的污染物污染”结论的可靠性 | |

目录

| | |
|--------------------------|-----------|
| 概述..... | 1 |
| 第一章 总论..... | 4 |
| 1.1 项目背景..... | 4 |
| 1.2 编制依据..... | 5 |
| 1.3 编制原则..... | 9 |
| 1.4 评估范围..... | 10 |
| 1.5 工作内容..... | 11 |
| 1.6 技术路线..... | 12 |
| 第二章 地块概况..... | 14 |
| 2.1 区域环境概况..... | 14 |
| 2.2 地块现状和历史..... | 25 |
| 2.3 相邻地块现状和历史..... | 37 |
| 第三章 前期调查回顾..... | 49 |
| 3.1 污染识别..... | 49 |
| 3.2 地块土壤污染状况初步调查回顾..... | 53 |
| 3.3 地块土壤污染状况详细调查回顾..... | 61 |
| 第四章 污染地块风险评估..... | 77 |
| 4.1 风险评估工作程序及内容..... | 77 |

| | | |
|--------------|-----------------------|------------|
| 4.2 | 危害识别..... | 77 |
| 4.3 | 暴露评估..... | 91 |
| 4.4 | 毒性评估..... | 119 |
| 4.5 | 风险表征..... | 132 |
| 4.6 | 风险控制值计算方法..... | 186 |
| 第五章 | 地块修复目标值确定..... | 199 |
| 5.1 | 地块修复目标值确定..... | 199 |
| 5.2 | 修复范围及方量确定..... | 202 |
| 第六章 | 地块修复建议..... | 215 |
| 6.1 | 修复技术筛选原则..... | 215 |
| 6.2 | 修复技术比选..... | 216 |
| 第七章 | 结论和建议..... | 234 |
| 7.1 | 地块调查概况..... | 234 |
| 7.2 | 地块风险评估结论..... | 234 |
| 7.3 | 地块修复建议..... | 235 |
| 7.4 | 地块环境管理建议..... | 236 |
| 7.5 | 不确定性分析..... | 237 |
| 附图 | | |
| 附图 1 地块地理位置图 | | |
| 附图 2 区域水文地质图 | | |

附件

附件 1 水文地质勘查报告

附件 2 建议修复范围拐点坐标

附件 3 初步采样检测报告

附件 4 详细采样检测报告

概述

一、地块土壤污染状况调查情况

柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二位于中国铁路物资柳州物流有限公司（以下简称中铁物流园）场地中南部，位于柳州市西环路 31 号（西门）、柳州市河西路 1 号（南门），地块中心地理坐标为东经 109°22'45.98"，北纬 24°19'44.02"，占地面积约 40837m²。根据《柳州市城市总体规划（2010-2020 年）》（2010 年 4 月）和《柳州市西环路东片控制性详细规划》可知，该地块规划用途为商业居住用地，商业居住用地属于《土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）中第一类用地。

为了确保该地块开发利用的安全，根据《中华人民共和国土壤污染防治法》（2019 年 1 月实施）第五十九条规定“用途变更为住宅、公共管理与公共服务用地的，变更前应当按照规定进行土壤污染状况调查”。为此，广西柳州市元信投资有限公司 2019 年 5 月委托柳州市飞轮环保工程有限公司进行土壤污染状况初步调查，并编制《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二场地环境初步调查报告》，初步调查结论为，该地块为污染地块，地块可能存在风险，不满足作为第一类用地开发利用的要求，需对该地块开展详细调查及风险评估工作，进一步确定地块污染物的分布、污染程度及地块污染对人体健康的风险。

因此，广西柳州市元信投资有限公司 2020 年 5 月委托广西桂寰

环保有限公司开展该地块土壤污染状况详细调查，在初步调查的基础上编制《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染状况调查报告》。该报告于2020年11月5日通过柳州市生态环境局和柳州市自然资源和规划局组织的评审，报告结论为：该地块内重金属（砷、六价铬、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、萘）和石油烃（C₁₀-C₄₀）超过《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》（GB36600-2018）的第一类用地筛选值，污染物主要分布在第②层黏土中，缓慢向场地东南方向的下游和地下水迁移，无明显的分布规律，统计核算总污染土方量 578756.36m³；地下水砷、镍、五氯酚、苯并[a]芘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）污染物超过《地下水质量标准》（GB/T14848-2017）III类水标准限值，统计核算地下水的污染总面积为 37483.48m²。该地块为污染地块，建议进一步展开土壤污染风险评估工作。

二、风险评估

广西柳州市元信投资有限公司委托广西桂寰环保有限公司进行该地块的风险评估。评估单位根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）对评估地块开展风险评估，根据评估结果：土壤中关注污染物为重金属（六价铬、砷、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）、石油烃（C₁₀-C₄₀），风险表征结果显示，土壤关注污染物（六价铬、砷、镍、五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]

荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘、石油烃 (C₁₀-C₄₀) 的人体健康风险均超出可接受风险水平, 需要对地块土壤中超出可接受风险水平的关注污染物采取修复或风险管控措施。

地下水中关注污染物为毒理学指标 (砷、五氯酚、苯并[a]芘)、石油烃 (C₁₀-C₄₀), 风险表征结果显示, 地下水关注污染物苯并[a]芘的人体健康风险未超出可接受风险水平, 其余关注污染物 (砷、五氯酚、石油烃 (C₁₀-C₄₀)) 的人体健康风险均超出可接受风险水平, 需要对地块地下水中超出可接受风险水平的关注污染物采取修复或风险管控措施。

土壤各污染物的修复目标值分别为: 六价铬 3mg/kg, 砷 40mg/kg, 镍 212mg/kg, 五氯酚 1.1mg/kg, 苯并[a]蒽 5.5mg/kg, 苯并[a]芘 0.55mg/kg, 苯并[b]荧蒽 5.5mg/kg, 二苯并[a, h]蒽 0.55mg/kg, 茚并[1, 2, 3-cd]芘 5.5mg/kg, 萘 25mg/kg, 石油烃 (C₁₀-C₄₀) 826mg/kg。

地下水各污染物的修复目标值分别为: 砷 0.01mg/L, 五氯酚 0.0009mg/L, 石油烃 (C₁₀-C₄₀) 0.572mg/L。

第一章 总论

1.1 项目背景

柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二位于中国铁路物资柳州物流有限公司（以下简称中铁物流园）场地中南部，位于柳州市西环路 31 号(西门)、柳州市河西路 1 号（南门），地块中心的地理坐标为东经 109°22'45.98"，北纬 24°19'44.02"，占地面积约 40837m²。项目地块在 1957 年至 2005 年期间为柳州木材防腐厂的防腐枕木生产区，2005 年停止生产枕木后地块内生产设施初步拆除，2007 年该地块作为物流商贸企业的仓库和货物中转场地，由中国铁路物资柳州物流有限公司进行运营管理。

广西柳州市元信投资有限公司 2020 年 5 月委托广西桂寰环保有限公司开展该地块土壤污染状况详细调查，在初步调查的基础上编制《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染状况调查报告》，该报告于 2020 年 11 月 5 日通过柳州市生态环境局和柳州市自然资源和规划局组织的评审。该报告和评审意见结论为：该地块内重金属（砷、六价铬、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒎、苯并[b]荧蒎、二苯并[a,h]蒎、苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、萘）和石油烃（C₁₀-C₄₀）超过《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》（GB36600-2018）的第一类用地筛选值。根据《土壤污染防治法》第六十条：“对土壤污染状况调查报告评审表明污染物含量超过土壤污染风险管控标准的建设用地地块，土壤污染责任人、土地使用权人

应当按照国务院生态环境主管部门的规定进行土壤污染风险评估，并将土壤污染风险评估报告报省级人民政府生态环境主管部门。”为此，广西柳州市元信投资有限公司委托广西桂寰环保有限公司进行该地块的风险评估。广西桂寰环保有限公司接受委托后，按照《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）及相关规范对评估地块开展风险评估，依据土壤污染状况调查及其监测分析结果，筛选地块关注污染物，确定相关污染物的污染程度、分布和可能来源，并根据地块未来用途计算人体健康风险，确定地块风险是否可接受，提出地块土壤及地下水的修复目标值，初步确定修复范围和体量，编制《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染风险评估报告》。

1.2 编制依据

1.2.1 法律法规

- (1) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2020年4月29日修订；2020年9月1日起施行）；
- (2) 《中华人民共和国土地管理法》（2020年1月1日起施行）；
- (3) 《中华人民共和国土壤污染防治法》（2019年1月1日起施行）；
- (4) 《中华人民共和国水污染防治法》（2018年1月1日起施行）；
- (5) 《中华人民共和国环境保护法》（2015年1月1日起施行）；

- (6) 《中华人民共和国水土保持法》(2011年3月1日起实施);
- (7) 《中华人民共和国水污染防治法实施细则》(2000年3月20日施行)。

1.2.2 相关规定和政策

- (1) 关于印发《建设用地土壤污染状况调查、风险评估、风险管控及修复效果评估报告评审指南》的通知(环办土壤〔2019〕63号);
- (2) 《自治区生态环境厅自治区自然资源厅关于进一步做好建设用地土壤污染风险管控和修复工作的通知》(桂环发〔2019〕12号);
- (3) 《污染场地土壤环境管理暂行办法(试行)》(2017年7月1日起施行);
- (4) 《土壤污染防治行动计划》(2016年5月28日起实施);
- (5) 《国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知》(国发〔2016〕31号);
- (6) 《国务院关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知》(国发〔2016〕65号);
- (7) 《水污染防治行动计划》(2015年4月2日起实施);
- (8) 《国务院办公厅关于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的安排的通知》(国办发〔2013〕7号);
- (9) 《关于贯彻落实<国务院办公厅关于印发近期土壤环境保

- 护和综合治理工作安排的通知》的通知》(环发〔2013〕46号);
- (10) 《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》
(环发〔2012〕140号);
- (11) 《全国土壤污染状况评价技术规定》(环发〔2008〕39号);
- (12) 《关于加强土壤污染防治工作的意见》(环发〔2008〕48号);
- (13) 《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》(环办〔2004〕47号)。

1.2.3 技术导则、标准及规范

- (1) 《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ25.1-2019);
- (2) 《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》
(HJ25.2-2019);
- (3) 《建设用地土壤污染风险评估技术导则(发布稿)》(HJ
25.3-2019);
- (4) 《建设用地土壤修复技术导则》(HJ25.4-2019);
- (5) 《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》
(HJ25.6-2019);
- (6) 《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》(HJ
682-2019);
- (7) 《地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则》(HJ
1019-2019);

- (8) 《地下水污染健康风险评估工作指南》(2019年9月);
- (9) 《建设用土壤环境调查评估技术指南》(2018年1月1日起施行);
- (10) 《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018);
- (11) 《地下水质量标准》(GB/T14848-2017);
- (12) 《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》(环保部公告2014年第78号);
- (13) 《水质采样样品的保存和管理技术规定》(HJ493-2009);
- (14) 《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004);
- (15) 《地下水环境监测技术规范》(HJ/T164-2004);
- (16) 《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T91-2002);
- (17) 《地表水环境质量标准》(GB3838-2002);
- (18) 《岩土工程勘察规范》(GB50021-2009)。

1.2.4 其他相关文件

- (1) 柳州市人民政府《柳州市城市总体规划(2010-2020年)》(2010年4月);
- (2) 柳州市环境保护局《柳州市土壤污染治理与修复规划》(2018年12月);
- (3) 《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二场地环境初步调查报告》(2019年7月);

(4) 《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染状况第二阶段详细调查场地水文地质调查报告》(2020年6月)

(5) 《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染状况调查报告》(2020年11月)

1.3 编制原则

根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019)、《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》(环保部公告2014年第78号),风险评估遵循以下基本原则:

(1) 合理性原则

采用国际通用的健康风险评估技术方法,确保评估环节的科学性、合理性和可操作性。

(2) 合规性原则

以相关的法律、法规和标准为标尺,严格贯彻国家和地方风险评估相关规定和要求。

(3) 可靠性原则

充分考虑污染地块风险管理的实际需求,重点解决污染场地修复及再利用过程中亟待解决的关键问题,尽全力保证评估结果的可靠性。

(4) 保守性原则

地块地下环境通常较为复杂,在尚不十分明确的情况下,优先选

择较为保守的参数和模型，确保评估结果的严谨性，进而更好地保障环境质量和人民群众的环境安全。

1.4 评估范围

本次风险评估范围为柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二，未来规划用途为商业居住用地，占地面积约为 40837m²，评估范围见图 1.4-1，拐点坐标见表 1.4-1。

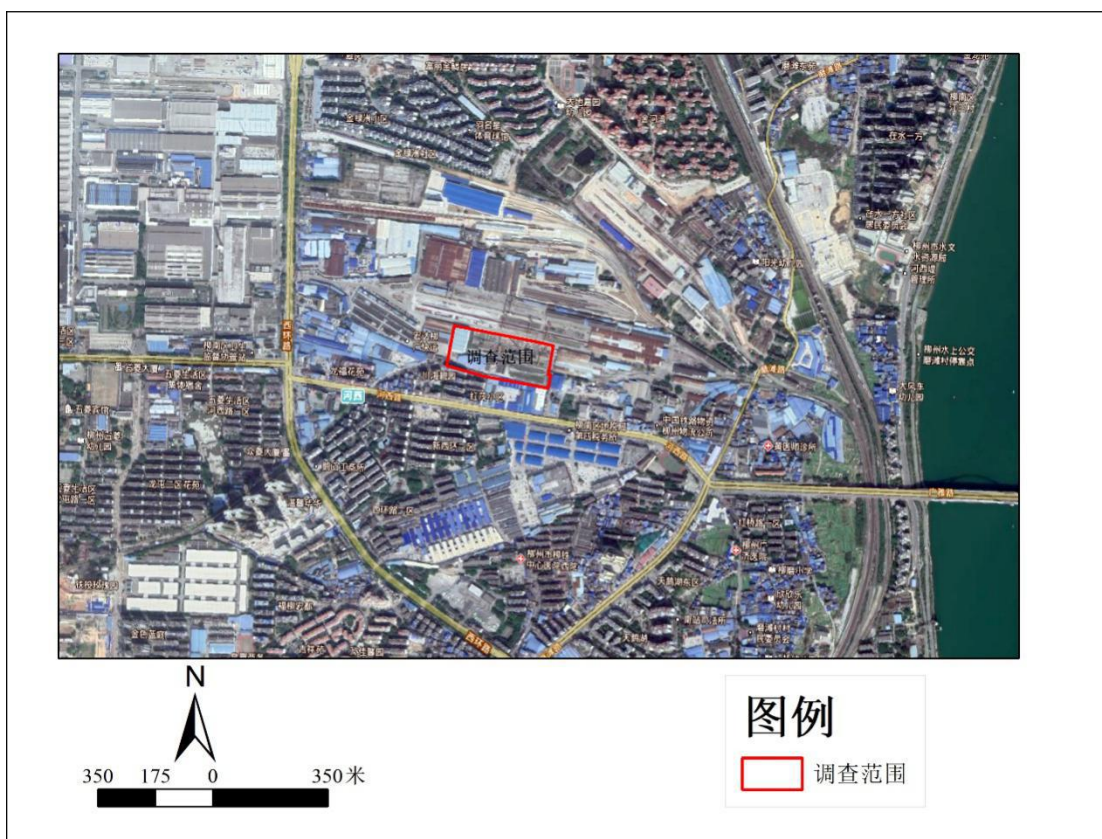


图 1.4-1 调查评估范围图

表 1.4-1 拐点坐标

| 序号 | X (m) | Y (m) |
|----|-----------|-------------|
| 1 | 87754.155 | 2691762.157 |
| 2 | 87808.957 | 2691749.810 |

| 序号 | X (m) | Y (m) |
|----|-----------|-------------|
| 3 | 87793.639 | 2691662.425 |
| 4 | 87801.436 | 2691660.912 |
| 5 | 87793.529 | 2691620.158 |
| 6 | 87601.173 | 2691655.923 |
| 7 | 87484.053 | 2691689.050 |
| 8 | 87506.332 | 2691810.854 |

注：坐标系：CGCS2000 坐标系，3 度带，中央子午线 108°。下同

1.5 工作内容

地块风险评估工作内容包括危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征，以及土壤和地下水风险控制值的计算。

本项目风险评估工作的目的是通过危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征，以及土壤和地下水风险控制值的计算等工作内容，明确地块污染现状在初步确定的地块未来规划下，对未来使用人群的健康风险，确定修复目标值和修复范围，指导合理规划土地用途，为后续相关工作的开展提供依据。

(1) 危害识别：收集地块土壤污染状况调查阶段获得的相关资料和数据，掌握地块土壤和地下水中关注污染物的浓度分布，明确规划土地利用方式，分析可能的敏感受体，如儿童、成人、地下水体等。

(2) 暴露评估：在危害识别的基础上，分析地块内关注污染物迁移和危害敏感受体的可能性，确定地块土壤和地下水污染物的主要暴露途径和暴露评估模型，确定评估模型参数取值，计算敏感人群对土壤和地下水中污染物的暴露量。

(3) 毒性评估：在危害识别的基础上，分析关注污染物对人体健康的危害效应，包括致癌效应和非致癌效应，确定与关注污染物相关的参数，包括参考剂量、参考浓度、致癌斜率因子和呼吸吸入单位致癌因子等。

(4) 风险表征：在暴露评估和毒性评估的基础上，采用风险评估模型计算土壤和地下水中单一污染物经单一途径的致癌风险和危害商，计算单一污染物的总致癌风险和危害指数，进行不确定性分析。

(5) 土壤和地下水风险控制值的计算：在风险表征的基础上，判断计算得到的风险值是否超过可接受风险水平。如地块风险评估结果未超过可接受风险水平，则结束风险评估工作；如地块风险评估结果超过可接受风险水平，则计算土壤、地下水中关注污染物的风险控制值；如调查结果表明，土壤中关注污染物可迁移进入地下水，则计算保护地下水的土壤风险控制值；根据计算结果，提出关注污染物的土壤和地下水风险控制值。

(6) 地块风险评估报告编制：结合样品分析检测结果和未来土地利用规划，对地块土壤和地下水进行风险评价，确定地块土壤及地下水是否会在土地使用性质变更后，对受体存在风险，如存在风险，通过风险评估确定最终的修复目标值和修复方量。

1.6 技术路线

根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019)、《地下水污染健康风险评估工作指南》(2019年9月)，污染地块土壤和

地下水健康风险评估流程如图 1.6-1 所示。

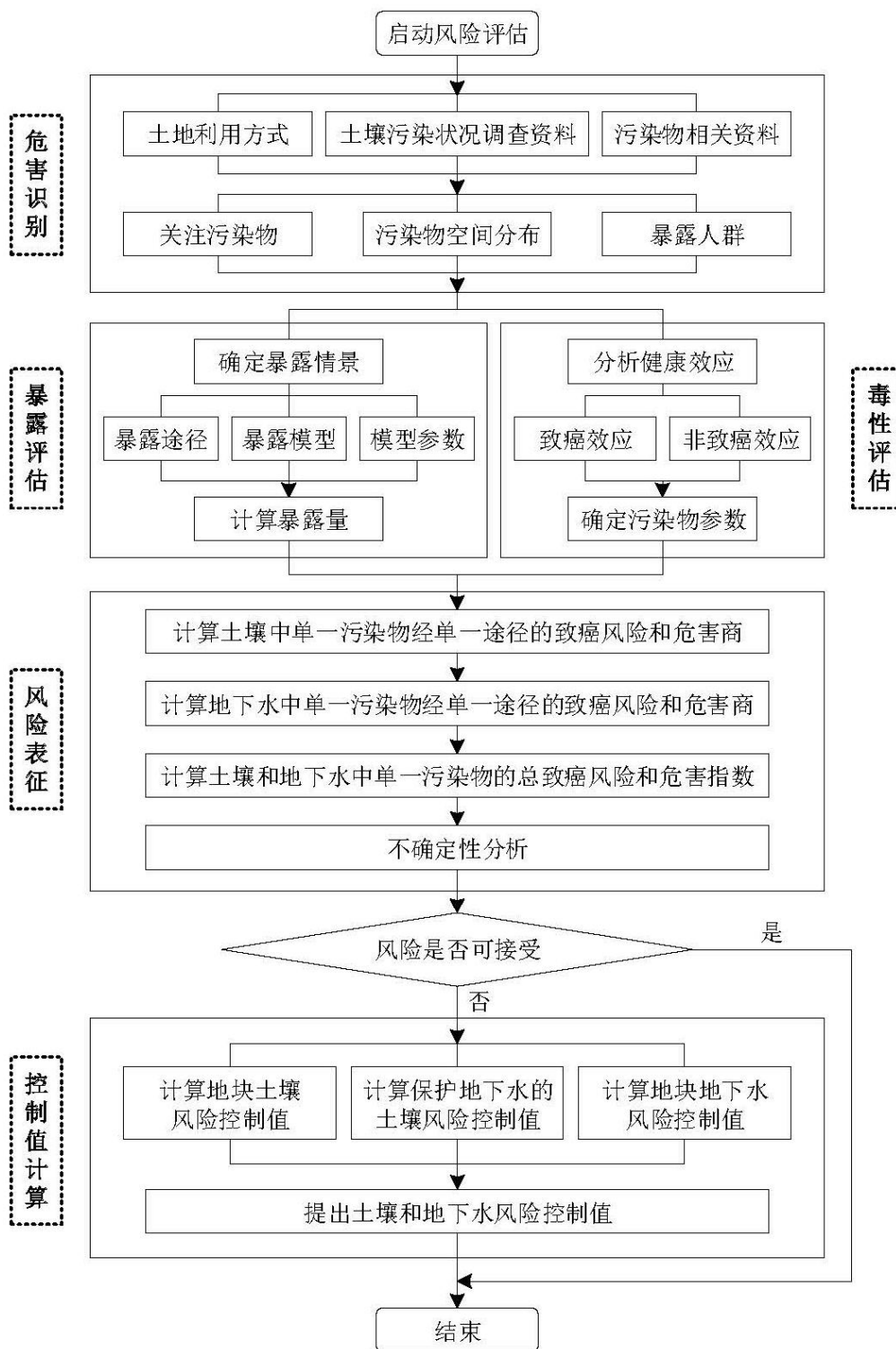


图 1.6-1 地块风险评估流程图

第二章 地块概况

2.1 区域环境概况

2.1.1 地理位置

柳州市位于广西壮族自治区中部偏东北，本次调查的地块为柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二，该地块位于柳州市柳南区政府南侧，河西路以东，磨滩路与河西路交叉口一带，地块中心地理坐标为东经 $109^{\circ}22'45.98''$ ，北纬 $24^{\circ}19'44.02''$ 。中铁物流园位于河西路1号（南门），地处西环路中段，从西环路一直向东延伸至西堤路。园区周边坐落着上汽通用五菱、柳工集团、柳铁机电厂、柳州车辆厂等厂区，处于工业制造和商贸中心区域。此外，其周边西环菜市、潭中人民医院西院、河西小学等各项配套齐全，具有较佳的区位优势。

本次评估区域面积约 40837m^2 。具体位置见图 2.1-1。

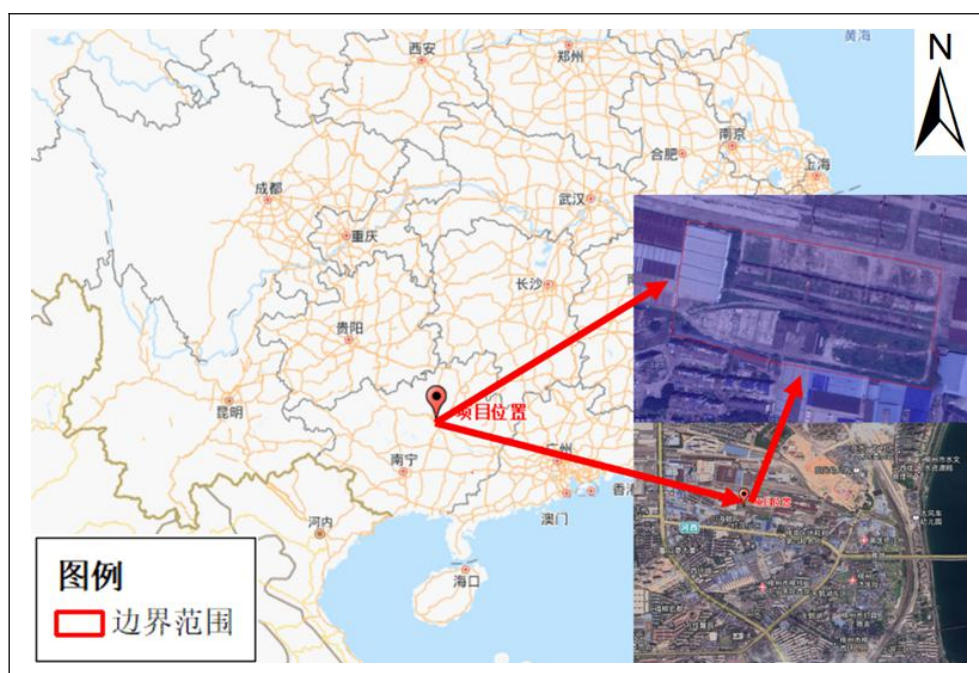


图 2.1-1 地块地理位置图

2.1.2 地质条件

1、地质构造

柳州位于广西山字型构造的马蹄盾地地带，同时受东西向、南北向及新华夏构造体系的共同作用，处于多期次多种构造体系的复合部位。项目场址处于柳江背斜东翼边缘与三门江向斜西翼的过渡地带。本项目区第四纪以来未发现有新构造活动迹象，区域和地块的稳定性较好。调查区的区域地貌属柳江河二级阶地地貌单元，现状地面标高约为 92.16~93.77m，地块内地势较平坦。地块内其他地段及邻近区域未发现滑坡、地面塌陷等不良地质现象，也未见影响地基稳定的不良地质作用。

2、地壳稳定性

柳州地处较稳定的华南准地台范畴。据广西地震志及相关史料记载，自明朝至今的四百九十多年间，柳州市虽然曾发生过数次有感地震，但震级均小于 5.5 级，未造成灾害。二十世纪 70 年代以来的地震记录，2 级以上的有感地震极少，表明本地区的构造运动较微弱。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016 年版)和《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)，场区的抗震设防烈度为 6 度，设计地震分组为第一组，II 类地块设计基本地震加速度值为 0.05g，其特征周期值为 0.35s。总体上，项目场区区域地壳基本稳定，地震危险程度较小。

2.1.3 地形地貌

柳州市地处桂中岩溶盆地的北端，境内地势北高南低，以山地和丘陵为主，其面积占土地总面积 76%。北部为云贵高原东南缘，西北部地处九万大山山脉，海拔在 1000~1200m 之间。东部和东南部为大苗山和大瑶山，中部和东南部为岩溶残蚀峰林、峰林丛洼地、低山丘陵和河谷平原等地形。境内山体主要有九万大山、摩天岭、大苗山和大瑶山等，最高山峰为融水苗族自治县元宝山主峰，海拔 2081m。市内岩溶谷地或平原地面大体呈东、西两侧向中部逐渐低落之势。平原主要分布在融江—柳江和洛清江中下游河谷两岸，有柳江平原、洛满平原、柳城平原和鹿寨平原等。柳江自北向南从中部蜿蜒贯穿全市，境内全长 184km，在市区内长度达 74km。市区地形平坦稍有起伏。地貌以岩溶残蚀峰林平原和峰林丛洼地为主，低山丘陵穿插其中，其中低山丘陵面积占陆地面积 58.4%，地貌成因类型主要有侵蚀堆积，溶蚀堆积，侵蚀溶蚀，构造侵蚀剥蚀四种。

地块辖于柳州市柳南区，依据《柳州市区域水文地质工程地质调查报告》资料，地块宏观地貌属侵蚀堆积类型的河流阶地，河流两岸有不连续的冲积台地，最多可见五级，以柳州市附近柳江河谷发育最完整，地块属 I、II 阶地（堆积阶地）阶面宽 0~150m，标高 80~88m，高出枯水位 10~18m，形成于全新世中期。局部表现为基座阶地，阶面波状起伏，宽 0~2000m，标高 90~100m，高出枯水位 20~30m，形成于晚更新世晚期。场区及其附近地面标高 92.16~93.77m，高差 1.61m，地势整体较平坦。

2.1.4 气象条件

柳州市地处桂中北部，属中亚热带季风气候，影响柳州市的大气环流主要是季风环流，夏半年盛行偏南风，高温、高湿、多雨，冬半年盛行偏北风，寒冷、干燥、少雨。柳州市气象灾害主要有：春季低温阴雨和干旱，夏季的暴雨洪涝和雷雨大风，局部地方春夏之交季节有冰雹，秋季寒露风和秋旱，以及冬季的寒潮霜冻害。

日照：柳州市夏季长冬季短、雨热同季，光、温、水气候资源丰富，但地区差异较大，北部各县具有较明显的山地气候特征。太阳辐射率总量对年平均为 1002.52 千卡/cm²，年有效辐射量为 49.71 千卡/cm²，年日照实数多年平均值为 1200~1635h，南部多于北部，一年中以 7-8 月最高，1-2 月最低。

气温：柳州市气温自北向南渐增，年平均气温北部 18.1-19.4℃，其余地方 20.1-20.7℃，年际变化为北部小于中、南部，最高年与最低年相差 1.3-2.0℃。最冷月 1 月平均气温 7.2-10.4℃，历史上极端最低温度为 -2.5-5.8℃，高寒山区可达 -8℃ 以上。最热月 7 月平均气温 27.2-28.9℃，历史上极端最高气温为 38.6-39.5℃。年总积温 5700-6800℃，南北部相差 1100℃。

降雨：柳州市年总降雨量 1345-1940mm，但地区分布和季节变化很大。雨季一般始于四月下旬，终于 9 月上旬初，这期间降水量占全年降水量的 70% 以上。雨量分布，北部多于南部，山区多于平原。蒸发量自南向北渐减，多年平均蒸发量约为 1600-1700mm，南部超过

1700mm，大于降水量，为半湿半干状态，而北部的降水量多超过蒸发量，气候湿润。柳州市年平均降水量 1818.5mm，折合降水总量为 338.10 亿 m³，比 2015 年减少 19.7%，比多年平均值增加 9.6%。

2.1.5 区域土壤状况

根据《广西红黄壤地区土壤利用改良区划》，柳州盆地区域红壤、棕色石灰土、水稻土分布广泛，总面积 14343km²。

柳州市区土壤的成土母质主要有砂（页）岩、泥岩、泥质灰岩、灰岩，形成的土壤类型有红壤、棕红石灰土、水稻土、河流冲积土、洪积土等 5 种，其中红壤分布面积最广。旱地以红壤为主，次为棕色石灰土，有机质含量较低。根据《柳州市水土保持规划（2019-2030 年）》中的《柳州市土壤分布图》以及国家土壤信息服务平台的检索结果，调查地块的土壤为红壤，详见图 2.1-2。

根据《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染状况第二阶段详细调查场地水文地质调查报告》可知，该地块区域土壤类型属于红壤，土壤呈红褐色、黄棕色、灰褐色，土壤养分含量较低，土壤质地较黏，铁锰质结核较少，下部为黏土夹卵（砾）石，卵（砾）石含量约 10%~46%，粒径 3~10cm，SiO₂/Al₂O₃ 黏粒 1.4~3.0，pH 值 6.60~6.80，有机质含量 1%~4%。

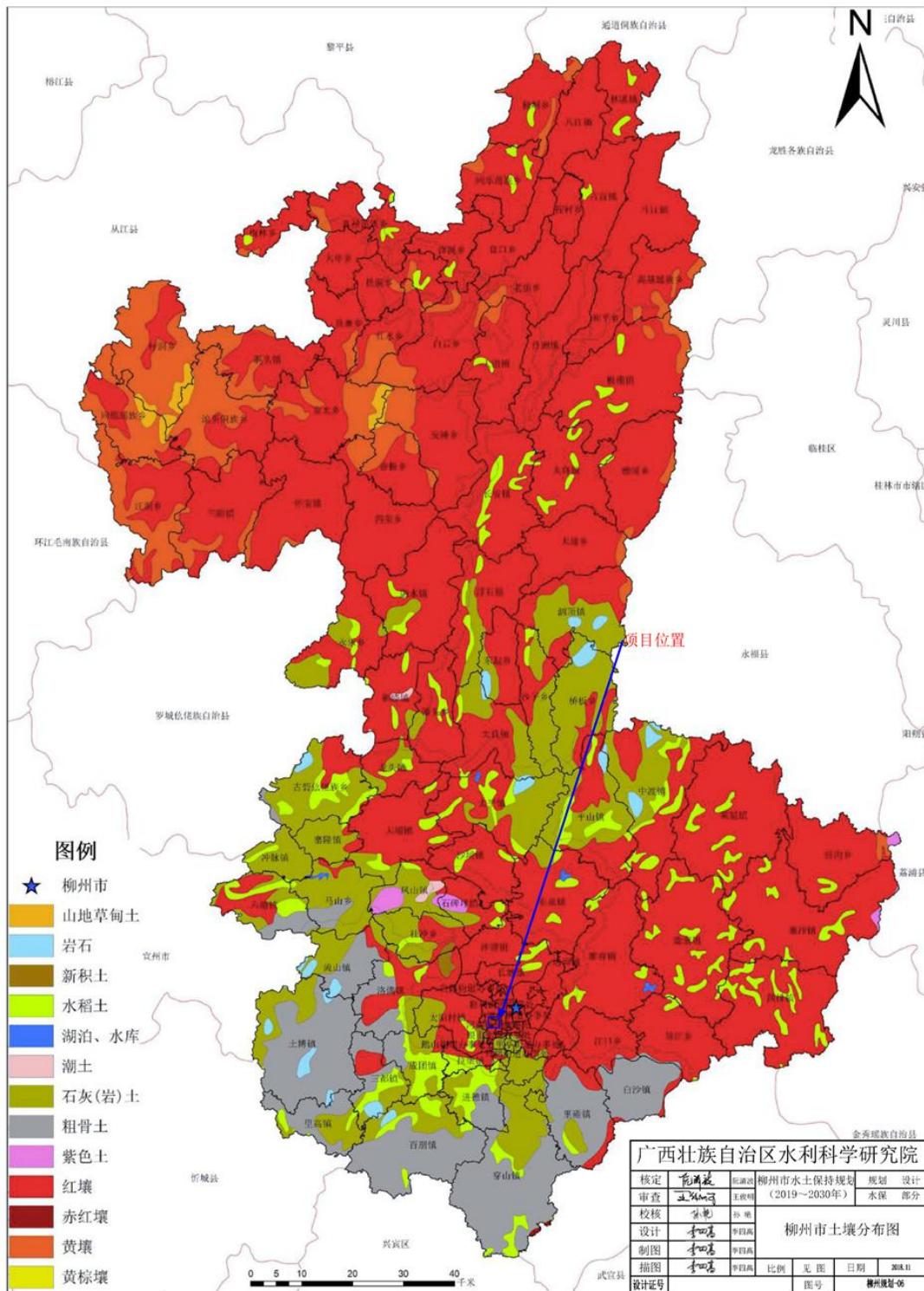


图 2.1-2 柳州市土壤分布图

2.1.6 地块水文地质条件

2.1.6.1 区域地表水特征

柳江为柳南区内的主要河流，柳江蜿蜒曲折从西向东穿市而过。柳江属珠江流域西江水系，是柳州市区的最大河流，呈壶形贯穿柳州市市区，柳江下游红花电站蓄水以来，柳州市区柳江正常蓄水高程为77.80m左右，年水位变幅5.00m。柳江从柳州铁桥流经河东至鹧鸪江为市中心江段，约长4.68km，为柳州全市工业生产用水和生活用水的主要来源，也是地下水的主要补给源。柳江集雨总面积45785km²，年径流深700mm。年径流量402.6亿m³，4月~9月占全年径流量的82%。年平均含沙量0.069kg/m³，最大断面平均含沙量0.48kg/m³，4月~9月输沙量为全年的98%。河道水面宽一般在300m左右，洪水期可达600余米，最高水位92.43m（1996年7月19日），最低水位68.48m（1996年3月3日）；最大流量33700m³/s（1996年7月19日），实测最小流量70m³/s（1992年12月12日）。主槽水深一般5m左右，洪水期可达30m。柳江沿柳南区北部向东往南折，至华丰湾转东向北而去，流经全区约1/3的地域。这一带多是二级阶地，坡度不大，岩溶发育较好，在地表或一些溪沟底部无可见岩溶裂隙，这些发育于地表的岩溶现象，有利于地下水蓄集，是地下水的主要富水地带。区内除柳江外，另有河西地段的竹鹅溪和太阳村地段的太阳村小河。由于河床与岩溶水层相通，沿途渗漏补给地下含水层，或受大气降水及地下补给，但在枯水季节几乎断流，竹鹅溪的正常流量3-5m³/s。

太阳村小河的正常流量则只在 $1\text{m}^3/\text{s}$ 左右。

柳南区处于柳江边，柳江的水位警戒线为 80m ，每当洪水超过警戒达到 85m 时，即淹没地势较低之处，水位超过 88m 以上，区内的东部、东北部和南部的的主要街道均被浸。据水文测定：水位超过 $88-89\text{m}$ 时，柳南区内的飞鹅路、和平路、柳邕路、柳邕路一巷等处将被水淹；水位超过 $89-90\text{m}$ 时，被淹街道为红岩路、磨滩路、上游路五区与河南水厂、电机总厂、柳铁文化宫等单位，水位超过 90 至 91m 以上，区内的谷埠路、革新路、维新巷、飞鹅二路等大部分街道都将在水淹之中。

地块现状及其周边相邻地段不存在常年性地表水体，在雨天时会在地块内低洼处积存临时性地表积水，水深小于 50cm ，较易疏干。

2.1.6.2 区域地下水特征

根据《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染状况第二阶段详细调查场地水文地质调查报告》，地块岩土体为二元结构，上部黏土、黏土夹卵（砾）石为弱透水含水层，下部卵石层为中等透水层，为地块地下水主要含水层。地块内地下水类型分为上层滞水和孔隙潜水。

上层滞水：主要赋存杂填土、黏土及黏土夹卵（砾）石（弱透水）中，下渗补给孔隙潜水，勘察期间测得地下水水位埋深 $0.80\sim 1.80\text{m}$ （标高 $91.26\sim 91.99\text{m}$ ），以大气降水及地表积水入渗补给为主，不具有统一水位，其水量小。

孔隙潜水：主要赋存于卵石层中，分布较均匀，分选性差，粒间夹少量黏性土，接收大气降水及上层滞水的入渗补给，为中等透水层，勘察期间测得稳定水位埋深 2.24~3.12m（标高 89.34~91.24m）。

地块内地下水主要以大气降水补给为主，孔隙地下水的径流特征主要为分散垂直向下渗透，排泄特征主要是以分散渗流的形式下泄补给地下水。地块内地下水水位动态变幅较小，一般 1.00~3.00m。地下水流向自西北向东南径流，最终排泄于柳江河中。地块内地下水流场如图 2.1-3。

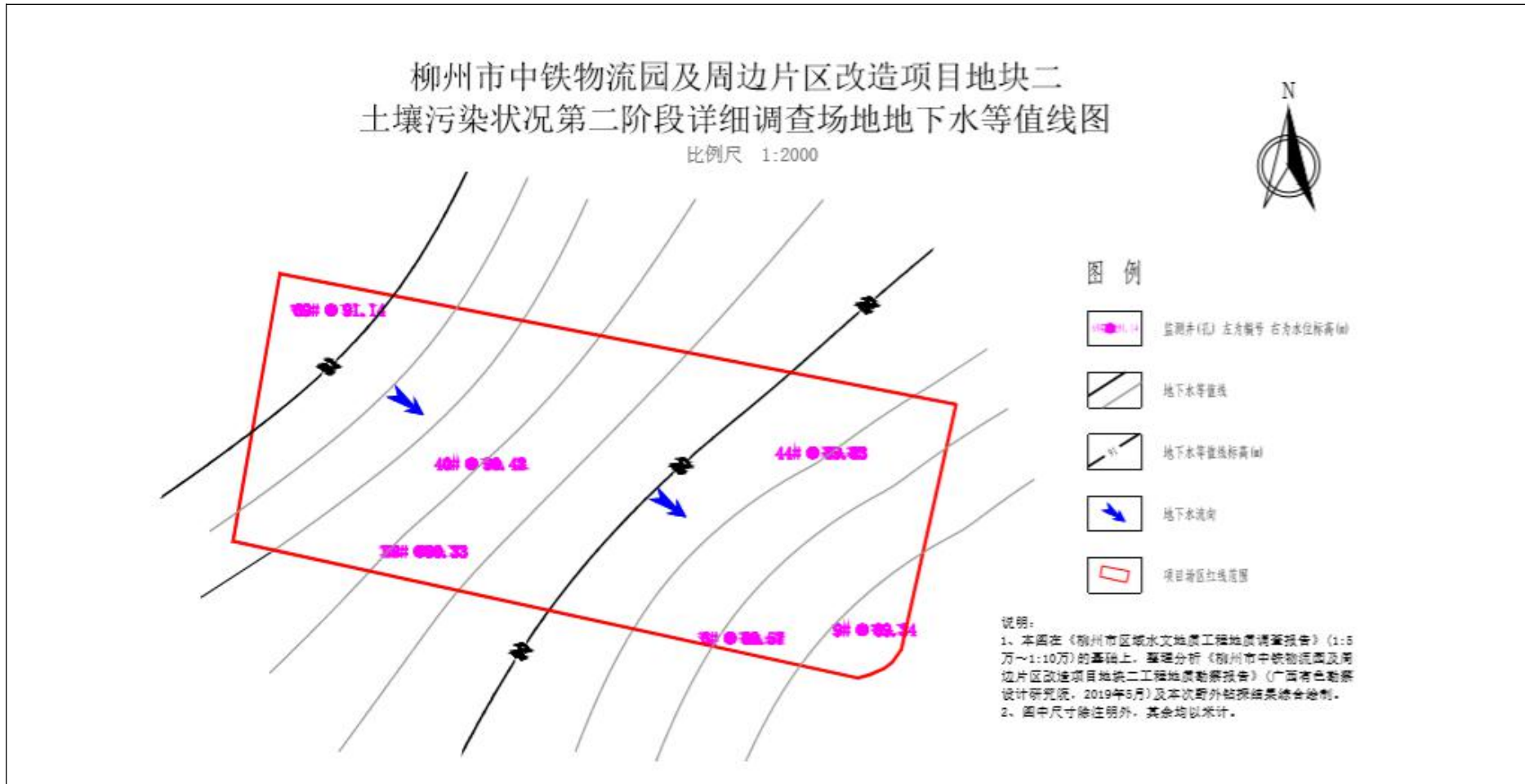


图 2.1-3 地块内地下水流场图

2.1.6.3 地层分布及其性质

调查范围内的地层由上到下可概化为杂填土层、黏土层、卵石层。

杂填土层主要由黏性土组成，含少量碎石及建筑砖块，分布于地块内大部分地段，局部经碾压夯实，未完成自重固结，结构松散。含孔隙水，属透水不含水层，层厚 1.30~3.60m。

黏土层上部为黏土，含少量铁锰质结核，下部为黏土夹卵（砾）石，卵（砾）石的主要矿物成分为石英、白云石、长石等，整个地块均有分布，顶面埋深 1.30~3.6m，层厚 3.70m~22.0m；含孔隙水，属弱透水不含水层，整个场地均有分布。

卵石层主要成分为搬运砂岩、泥岩、硅质岩及石英颗粒，磨圆度好，呈次圆状或椭圆状，分布较均匀，分选性差，粒间骨架充填物以砾砂为主，局部夹少量黏性土。含孔隙潜水，属中等透水层。

地块岩土体为二元结构，上部黏土、黏土夹卵（砾）石为弱透水不含水层，下部卵石层为中等透水层。

根据《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二土壤污染状况第二阶段详细调查场地水文地质调查报告》的井（孔）地质剖面图，1#剖面两端的仓库区和污水处理站区域黏土层厚度相对较小，厚度约 7.9m 至 10.1m；2#剖面东段储罐区黏土层厚度相对较小，厚度约 3.7m 至 6.8m；5#剖面贯穿的防腐生产车间和储罐区黏土层厚度相对较小，厚度约 6.8m 至 10.1m。

2.2 地块现状和历史

2.2.1 地块现状

本次调查地块为柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块二，位于中国铁路物资柳州物流有限公司（中铁物流园）中南部。中铁物流园位于柳州市西环路 31 号（西门）、柳州市河西路 1 号（南门），占地面积约 420 亩，主营业务主要有钢材仓储及深加工业务、白糖贸易及仓储业务、集装箱业务、货运配送业务、铁路运输代理业务、仓单质押业务、装卸业务等资源物资贸易。本次调查地块位于中铁物流园中南部。中铁物流园地块划入柳州市 2019 年第一批旧城改造土地熟化项目后，中铁物流园地块划分为两个地块，地块一包括北部的大部分仓库区域，占地面积近 360 亩；地块二位于物流园中南部的装卸站场区域，2020 年 5 月进场调查期间原有建筑主要有闲置的仓库、站场。地块二西部和西南部为曾作为仓库，用于堆存钢材，中南部的厂房曾转租给个体商户作为办公用房，东南部为闲置的空地，地块中部区域用于成品钢材堆存货场及货品集散，北部空地现用于新汽车停放。截至 2020 年 10 月前，地块内的建筑已基本拆除。地块现状见图 2.2-1。



地块现状卫星图（2020年5月6日）



地块现状航拍图（2020年10月13日）



地块二中部集散货场（2020.7.15）



地块二东南部闲置空地（2020.7.15）



地块二东南部原油罐区（2020.10.13）



地块二西部已拆除的仓库区（2020.10.13）

图 2.2-1 地块现状图

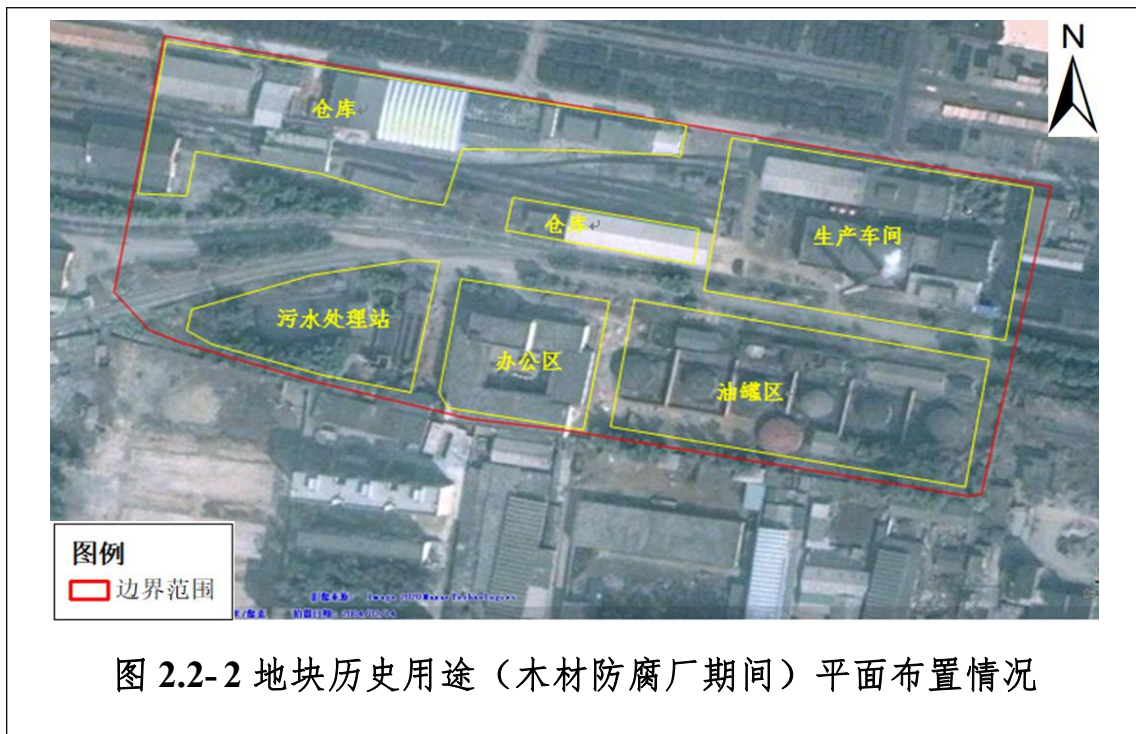
2.2.2 地块历史

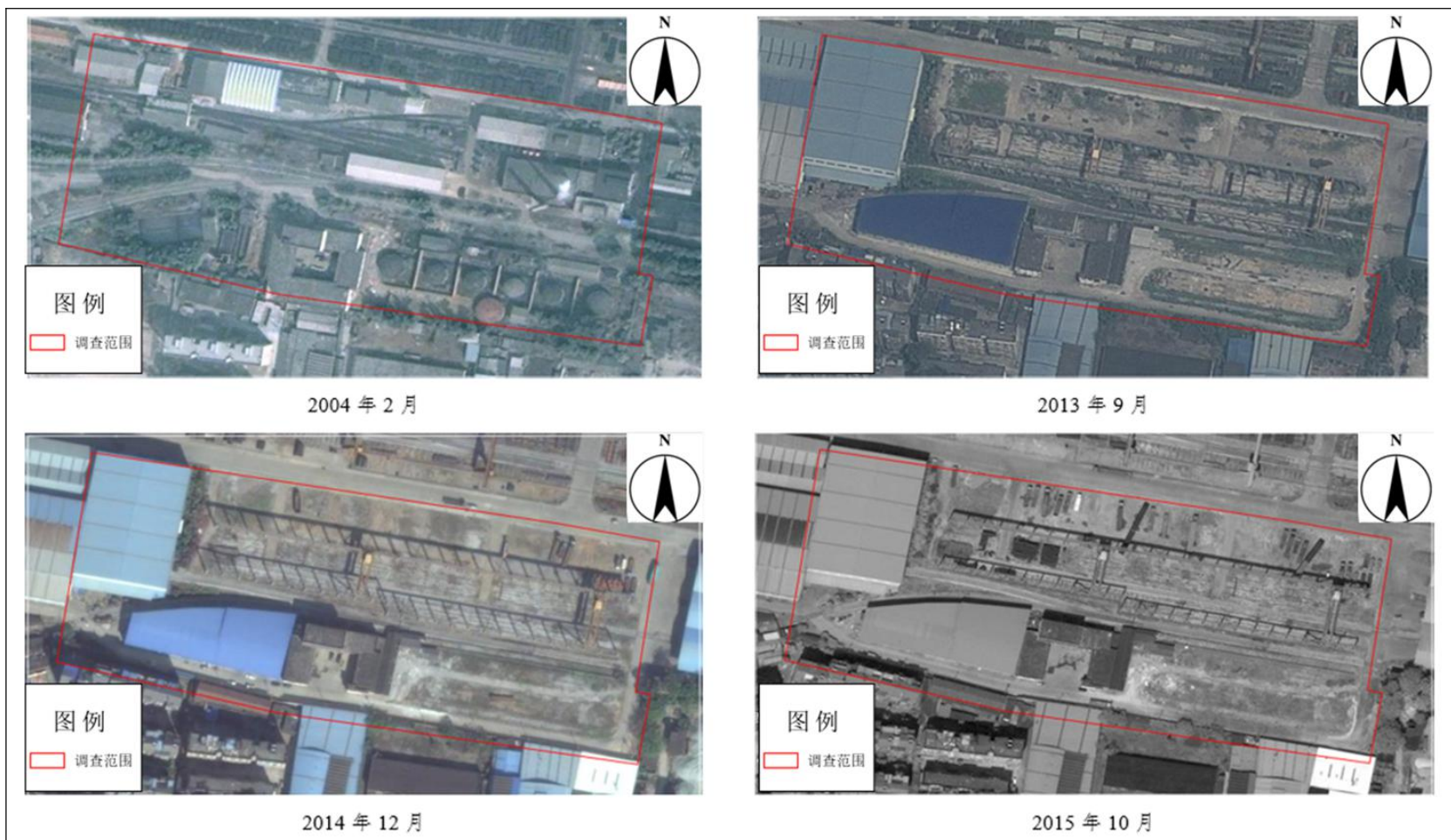
本次调查的中铁物流园地块二为原柳州木材防腐厂的生产区域，主要用于防腐枕木加工。地块历史布置情况及影像图分别见图 2.2-2 和图 2.2-3。

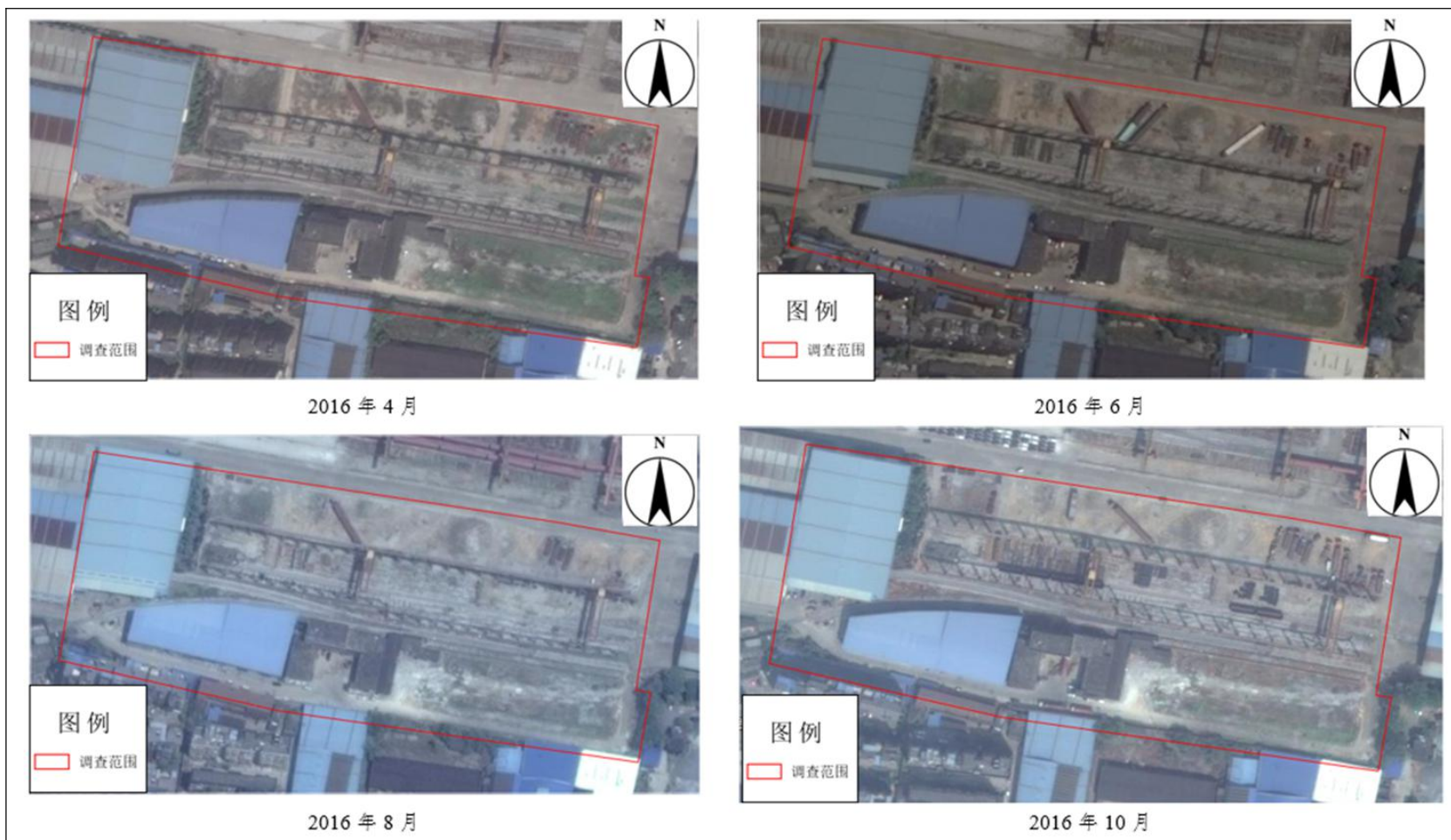
中国铁路物资柳州物流有限公司（中铁物流园）是中国铁路物资（集团）总公司在中西南地区的全资子公司，前身为铁道部柳州枕木防腐厂。解放后，为解决南方铁路枕木防腐问题，铁道部决定在广西

木材集散地的柳州，修建木材防腐基地。1955年11月，成立柳州枕木防腐厂筹备组，1956年建厂，1957年12月25日柳州木材防腐厂正式投产，1960年，柳州枕木防腐厂改为柳州木材防腐厂，隶属铁道部物资总公司管辖。柳州木材防腐厂于2005年停产，开始转型为物流商贸企业。2007年由中铁物资（集团）总公司和中铁物资柳州物流有限公司共同投资转型建设成为第三方专业物流商贸企业。

根据调查地块历史影像，结合调查资料分析，调查地块在2005年柳州木材防腐厂停产后，地块内的产品和半成品枕木全部清理出售，原料全部由原供货厂家低价回购，生产设备和厂房全部拆除后，2006年地块内逐步进行地面硬化，重新搭建仓库，地块现状布局见图2.2-1。2007年起，调查地块作为钢材、建筑材料、木制品等物料的转运站场、仓库以及汽车停放场。地块污染主要来自于原柳州木材防腐厂。







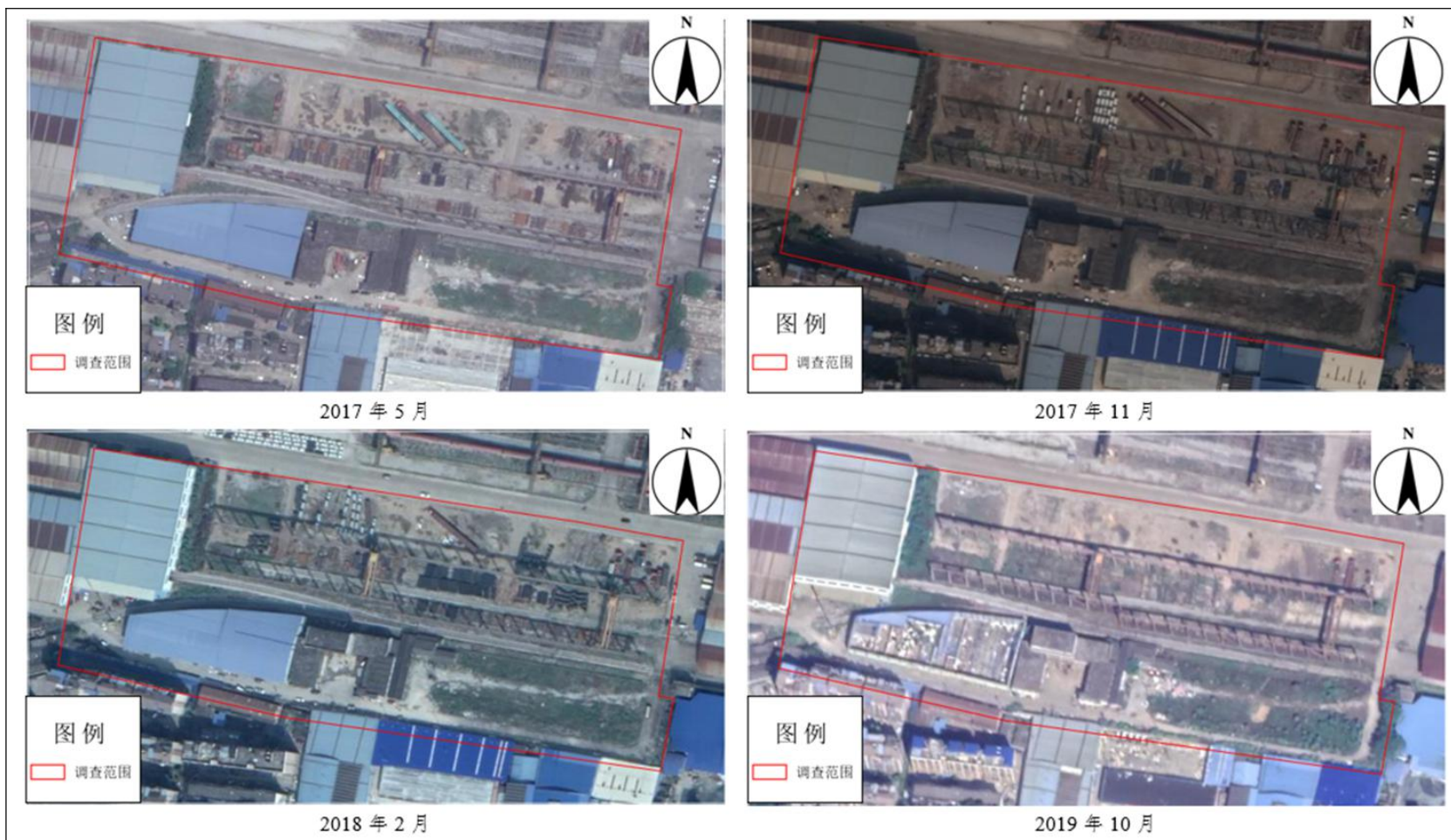




图 2.2-3 地块历史影像（2004 年~2020 年）图

2.2.3 地块规划

根据《柳州市城市用地规划图（2010-2020）》和《柳州市西环路东片控制性详细规划》，本次调查的地块已明确未来规划为商业居住用地，修建一层开挖到 5m 的地下室。地块具体规划见图 2.2-4~图 2.2-5。

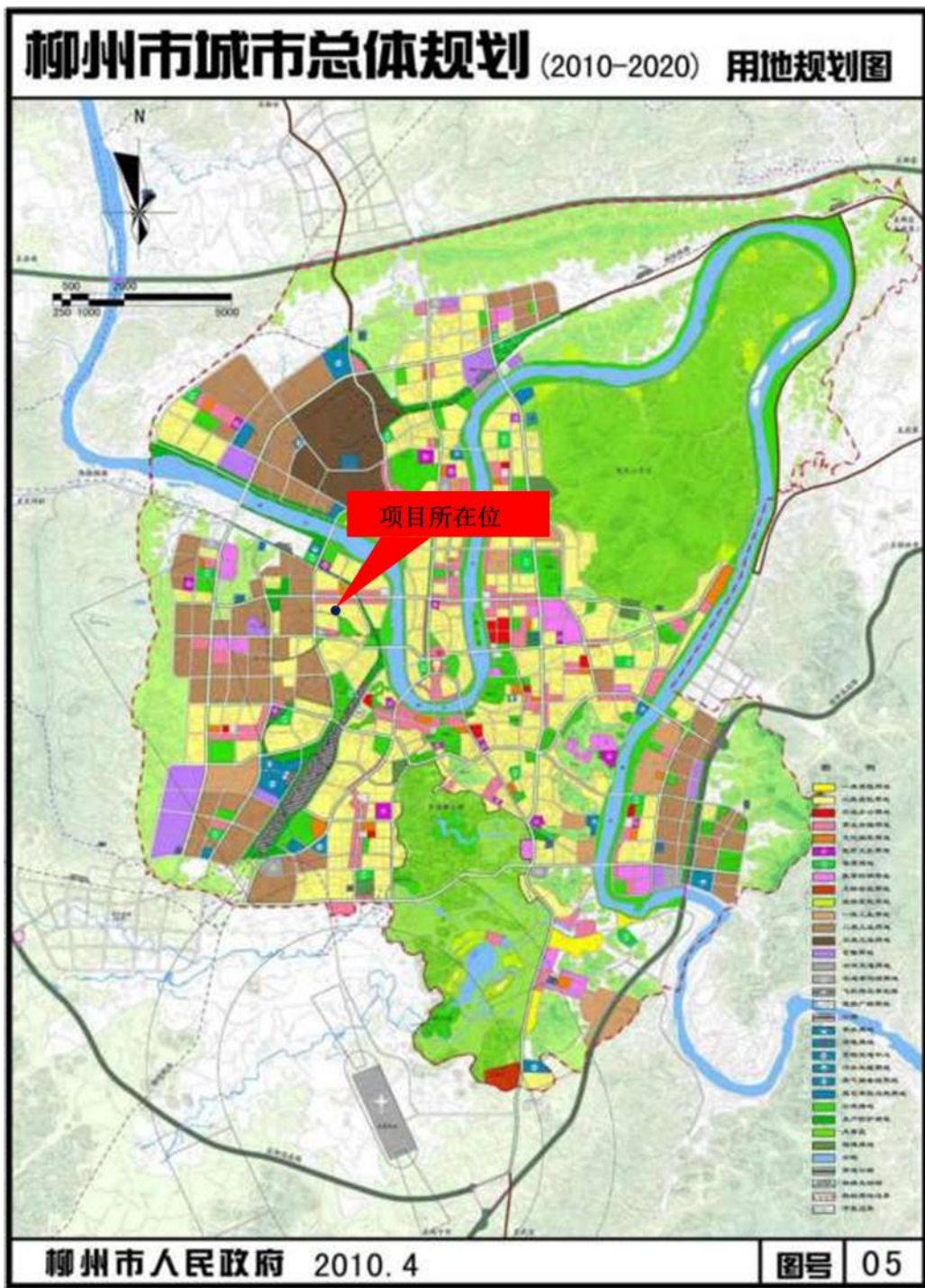


图 2.2-4 柳州市城市总体用地规划图



图 2.2-5 柳州市西环路东片控制性详细规划图

2.3 相邻地块现状和历史

2.3.1 相邻地块现状

本次调查地块处于城市建成区，区域为居住、商业、行政办公、物流和工业混杂区，以居住和商业功能为主。地块西面、北面和东面被柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块一所包围，南面为居住小区（包括川海碧园和红茂小区）和商铺（包括汽车销售、餐饮和汽车美容等），东南面为柳州市市政设施维护管理处沥青砼拌合站。相邻地块现状见图 2.3-1~图 2.3-2。



图 2.3-1 相邻地块现状图（2020 年 5 月 6 日影像图）



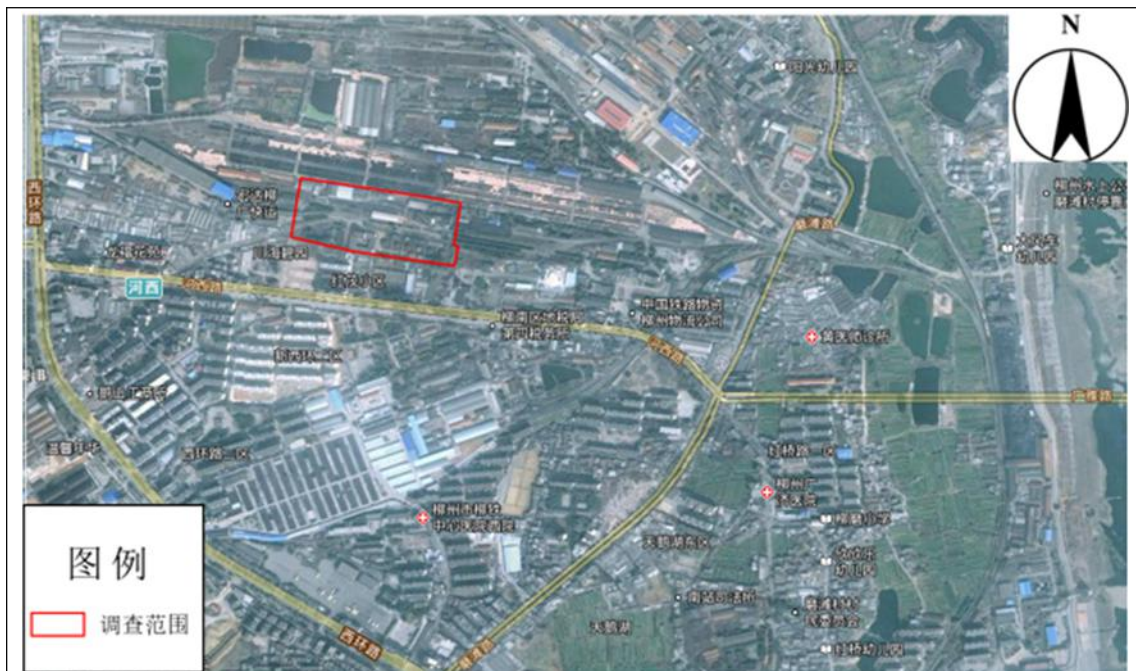
图 2.3-2 相邻地块照片（2020 年 10 月 13 日拍摄）

2.3.2 相邻地块历史

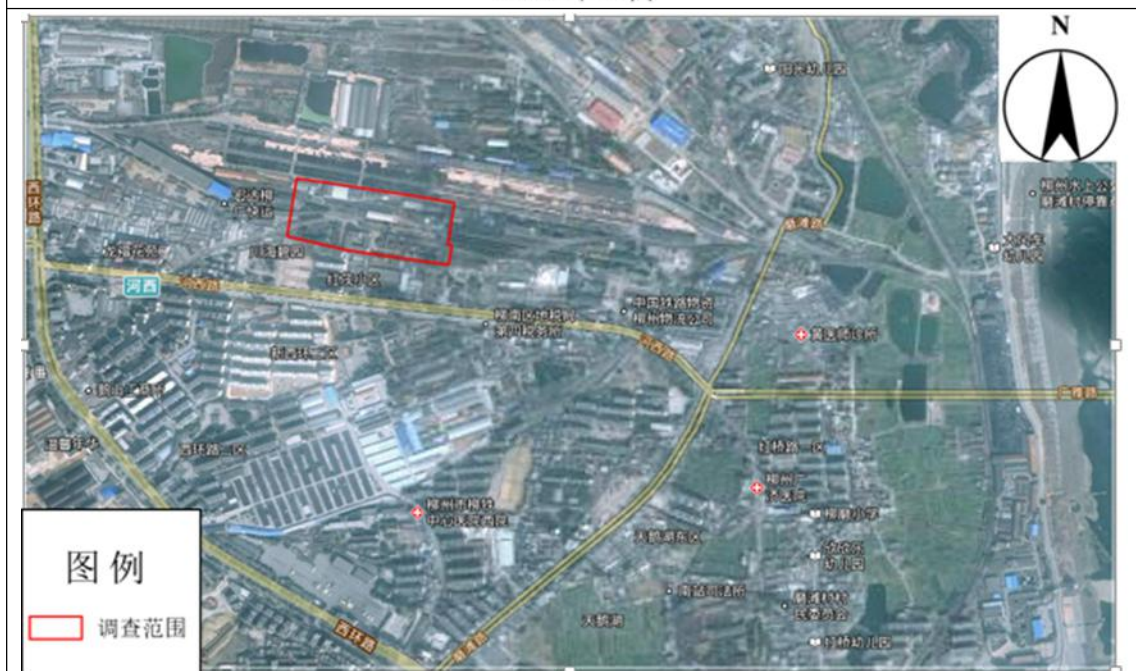
本次调查地块西面、北面和东面为柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块一，地块一主要作为仓储使用，不涉及木材防腐厂的生产加工；该地块东南部为生活、园区安保、物流园管理核心办公用区域，建有中铁物流公司大楼，并有西南门连通河西路可供出入；而西侧设有物流园正门，地块西部主要为中铁汽配城及其中介办公区域，而东、北部主要为钢材、汽配、食品、快递物流等多种类大型仓库。2019 年 5 月，广西柳州市元信投资有限公司委托柳州市飞轮环保工程有限公司对柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块一进行了

场地环境调查，并编制了《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块一场地环境调查报告》，该报告于2019年11月通过了柳州市生态环境局和柳州市自然资源和规划局组织的评审（柳环土函〔2019〕44号），该报告及其评审意见的结论为：柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块一内地下水污染物监测值均满足《地下水质量标准》（GB/T14848-2017）III类水标准限值，该地块土壤样品未超过《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）第一类用地筛选值或区域土壤类型背景值，不列入污染地块管理。地块一位于项目调查地块的上游区域，土壤环境受该地块内自身仓储物流企业和周边企业影响较小，可按规划的用途进行开发利用，地块一土壤对本项目调查地块土壤环境影响不大。

本次调查地块南面为城市建成区内的居住区和商铺，居民生活和商业活动对土壤环境影响很小。相邻地块历史影像（2004~2020）见图2.3-3。



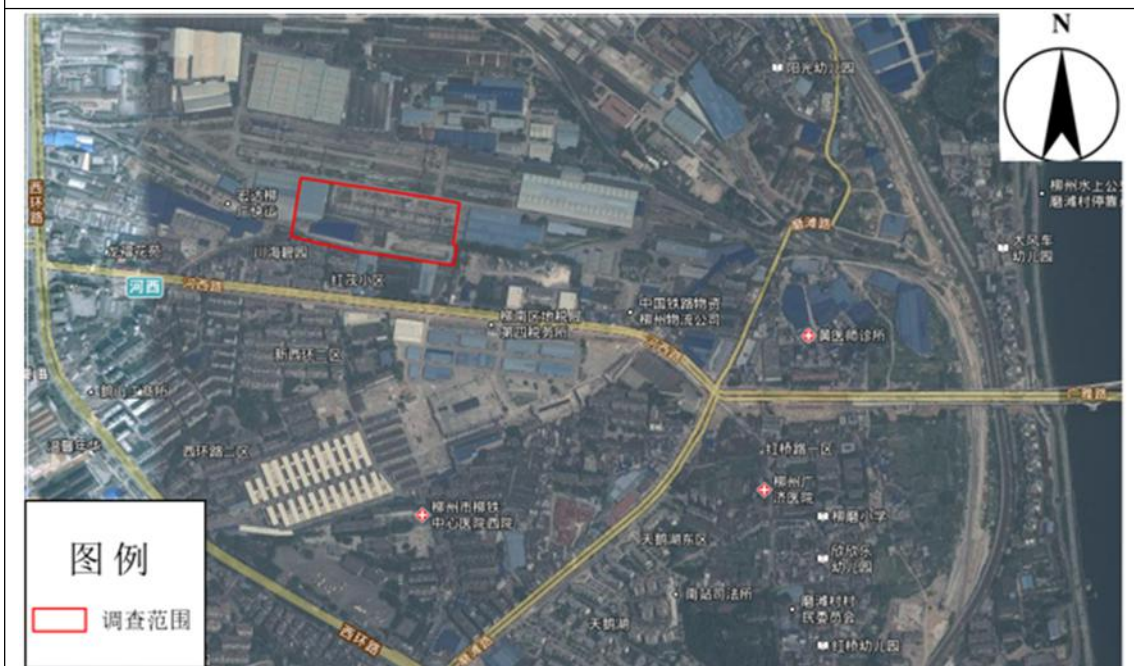
2004年2月



2006年11月



2012年4月



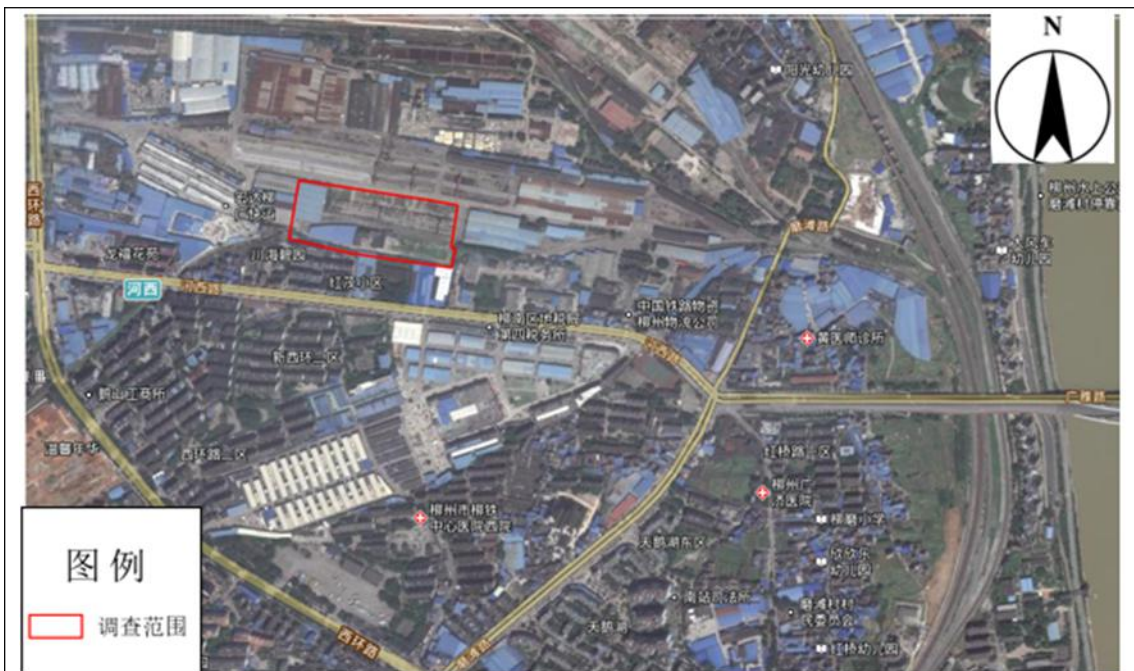
2013年9月



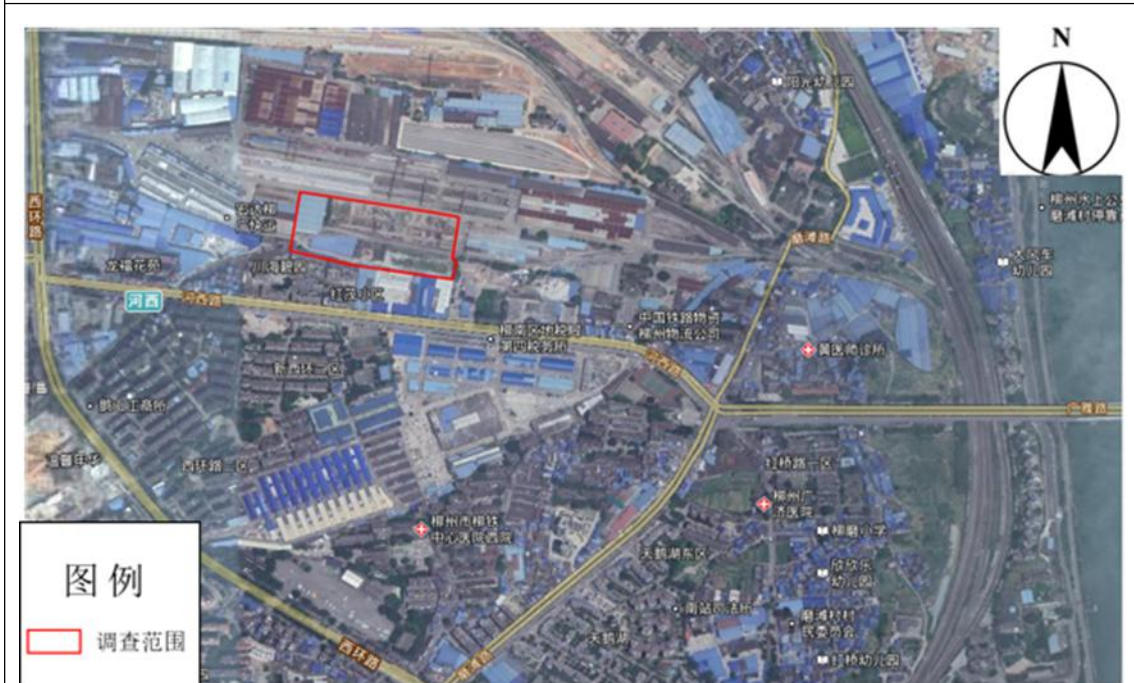
2014年12月



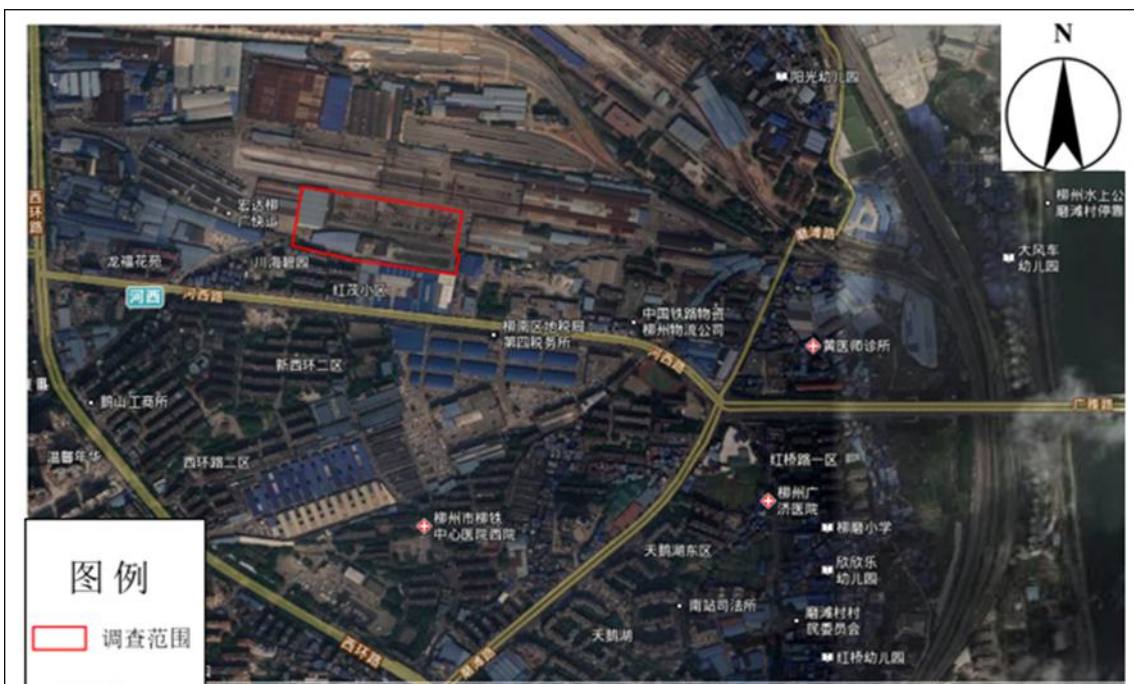
2015年10月



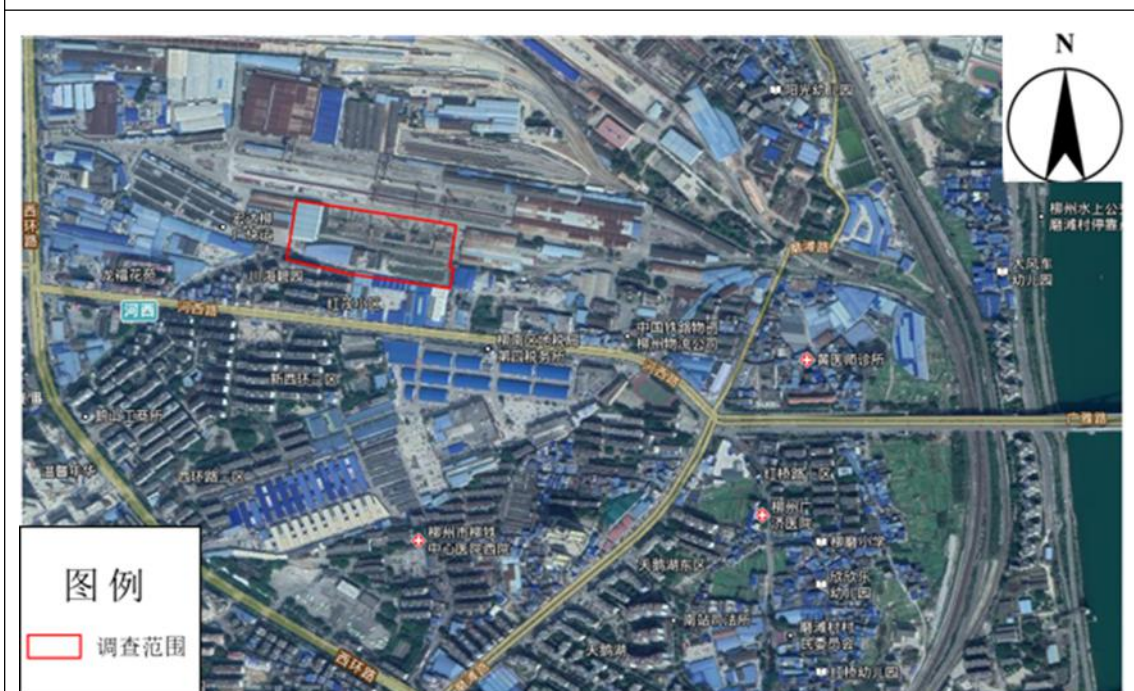
2016年4月



2017年5月



2017年11月



2018年2月

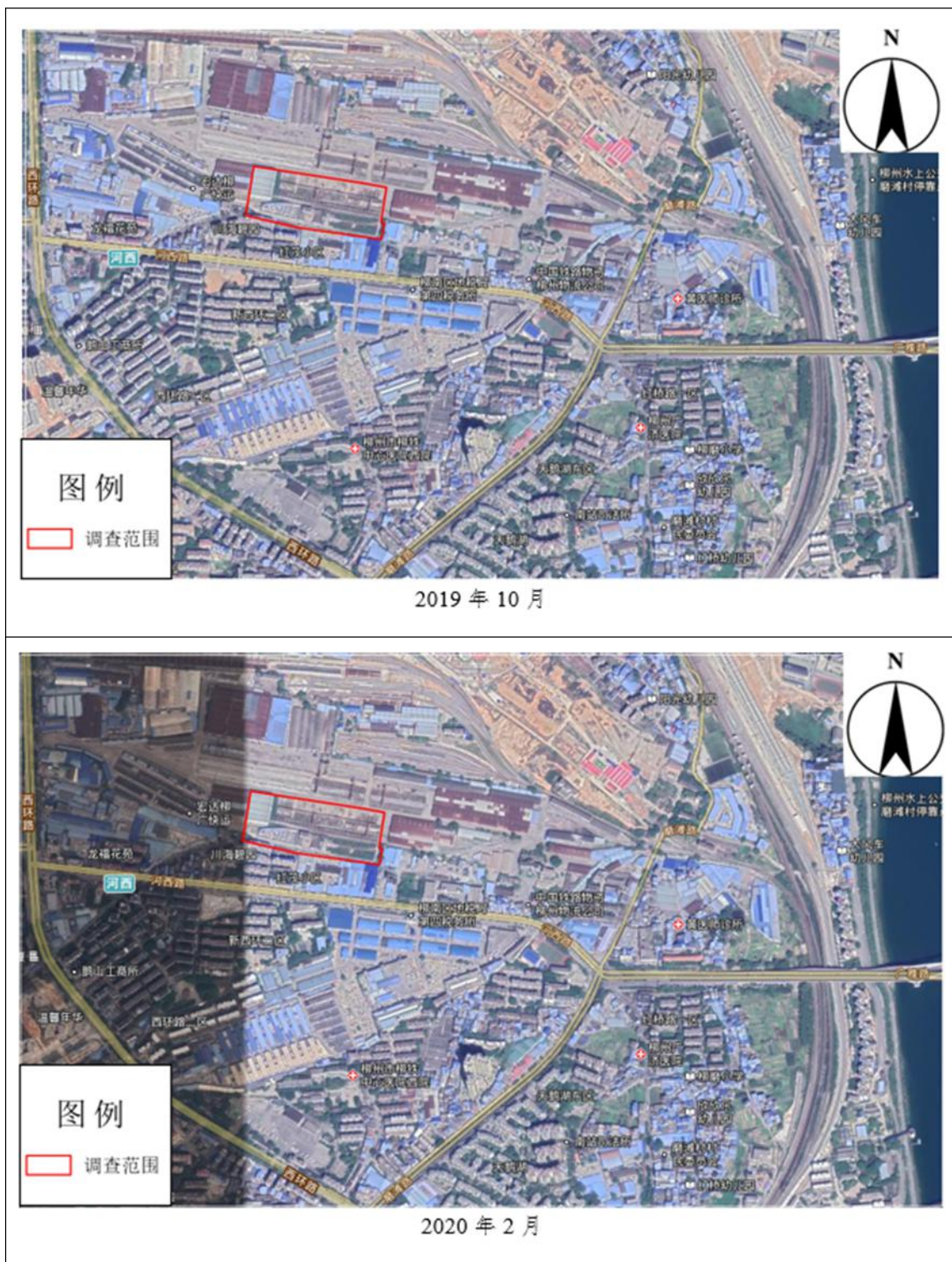


图 2.3-3 相邻地块历史影像图

2.3.3 区域其他污染源

本次调查地块处于已居住功能为主的城市建成区，工业污染源除了地块西北面的上汽通用五菱汽车股份有限公司（河西基地）外，基

本无其他工业污染源。

上汽通用五菱汽车股份有限公司 2002 年 11 月 18 日正式挂牌成立的上汽通用五菱汽车股份有限公司（英文缩写 SGMW），是由上海汽车集团股份有限公司、美国通用汽车公司、广西汽车集团有限公司（原柳州五菱汽车有限责任公司）三方共同组建的大型中外合资汽车公司，其前身可以追溯到 1958 年成立的柳州动力机械厂。河西基地占地约 89.2 万平方米，在岗员工 2 万多人，拥有以冲压、车身、涂装、总装为主体的现代化整车生产车间。

根据《柳州市中铁物流园及周边片区改造项目地块一场地环境调查报告》及其评审意见可知，上汽通用五菱汽车股份有限公司河西基地生产过程中中铁物流园地块土壤环境影响较小。

2.3.4 区域敏感目标

根据《建设用地土壤污染状况调查技术导则》（HJ25.1-2019），敏感目标是指地块周围可能受污染物影响的居民区、学校、医院、饮用水源保护区以及重要公共场所等。

经现场踏勘，地块位于工业制造和商贸中心区域，地块周边有居民楼、小区、行政办公区等，地块范围内无国家保护的野生动植物、历史文物等需要特殊保护的目标。地块所属区域饮用水均为市政用水，项目所在区域日常供水由柳南供水厂供应，根据《柳州市市区饮用水水源保护区划分方案》，本项目不在柳州市市区饮用水源保护区范围。地块周边环境敏感目标位置分布情况见图 2.3-4，各敏感点的信息见表 2.3-1。



图 2.3-4 敏感目标分布图

表 2.3-1 敏感点的信息

| 序号 | 敏感点名称 | 方位/距离 | 备注 |
|----|--------------------|----------|-----------|
| 1 | 中铁物流园地块一 | 北面相邻 | 规划为商业居住用地 |
| 2 | 川海碧园小区 | 南面相邻 | 居住区 |
| 3 | 红茂小区 | 南面相邻 | 居住区 |
| 4 | 新西环二区 | 南面/130m | 居住区 |
| 5 | 中山城市花园 | 西南面/200m | 居民区 |
| 6 | 国家税务总局/柳南区税务 总局 | 西南面/450m | 行政办公 |
| 7 | 五菱社区 | 西南面/550m | 居住区 |
| 8 | 温馨年华 | 西南面/600m | 居住区 |
| 9 | 宏都社区 | 西南面/800m | 居住区 |
| 10 | 吉祥苑 | 西南面/780m | 居民区 |
| 11 | 万佳馨园 | 西南面/780m | 居民区 |

| 序号 | 敏感点名称 | 方位/距离 | 备注 |
|----|------------------------|----------|----------------------|
| 12 | 公交小区 | 南面/630m | 居民区 |
| 13 | 磨滩四区 | 东南面/400m | 居住区 |
| 14 | 天鹅湖社区 | 东南面/670m | 居民区 |
| 15 | 红桥路一区 | 东南面/640m | 商贸、物流、办公、生活 |
| 16 | 磨滩二区 | 东南面/350m | 地表水Ⅲ类 |
| 17 | 国际城 | 东北面/300m | 居住区，在建 |
| 18 | 磨滩三区 | 东北面/580m | 居住区 |
| 19 | 金河湾 | 东北面/590m | 居住区 |
| 20 | 智美小学 | 北面/760m | 学校 |
| 21 | 富丽嘉园 | 北面/570m | 居住区 |
| 22 | 金绿洲 | 北面/430m | 居住区 |
| 23 | 商铺 | 西面相邻 | 主要为汽修、汽车贸易和餐饮 |
| 24 | 商铺 | 南面相邻 | 主要为汽修、汽车贸易和餐饮 |
| 25 | 柳州市市政设施维护管理处 沥青砼拌合站 | 东南面相邻 | 沥青砼拌和 |
| 26 | 西环建材市场 | 南面/130m | 建材贸易 |
| 27 | 商铺和仓库 | 北面/200m | 商铺主要为汽修、汽车贸易；仓库为汽配仓库 |
| 28 | 上汽通用五菱汽车股份有限公司（河西基地） | 西北面/500m | 汽车整车生产 |

第三章 前期调查回顾

3.1 污染识别

根据第一阶段调查的资料收集与分析、现场踏勘和人员访谈可知：调查范围内存在污染风险，地块潜在的污染物有重金属（砷、镉、铅、铬、镍等）以及有机物和石油烃。资料收集情况见表 3.1-1。

本次调查地块主要用于生产防腐枕木，防腐枕木生产过程中用的主要原材料为枕木、防腐剂。原木材防腐厂所使用的防腐剂主要有水载型、有机溶剂（油载型、油溶型）及油类防腐剂，其中水载型的木材防腐剂的使用是重金属污染的主要来源。有机溶剂（油载型、油溶型）及油类防腐剂是有机物及石油烃污染的主要来源。

水载型木材防腐剂有：铬砷酸铜 CCA、氨溶季氨铜 ACQ、铜唑（CA-B、CB-A）、氨溶砷酸铜锌 ACZA、酸性铬酸铜 ACC、柠檬酸铜 CC 等。其中 CCA 防腐剂主要化学成分为铬化砷酸铜，活性成分砷、六价铬；ACQ 防腐剂主要化学成分为烷基铜铵化合物，活性成分为铜、季铵盐；CA-B 主要组成成分为铜；ACZA 主要化学成分为砷酸锌铜铵，主要活性成分有砷、锌等；ACC 主要化学成分为铬酸铜，活性成分为六价铬、铜。

油类防腐剂有：煤焦油、葱油、克里苏油。

防腐枕木的生产工艺流程见图 3.1-1。主要的产污环节有原木加工环节和枕木加热浸渍环节。

（1）原木加工环节：主要是对木材原料根据需要进行锯切、刨

光等，这一环节会产生噪声以及无用的边角废料，会对周边声环境造成影响以及产生工业固体废物。

(2) 枕木加热浸渍环节：枕木加热浸渍主要是将加工成型的木材放入装有防腐剂的蒸制罐内，加热至特定温度，使木材能最大程度吸收防腐剂，是防腐枕木生产的核心步骤，也是最主要的产污环节。

调查范围内地块潜在的污染物、产污环节以及污染迁移途径详见图 3.1-1。

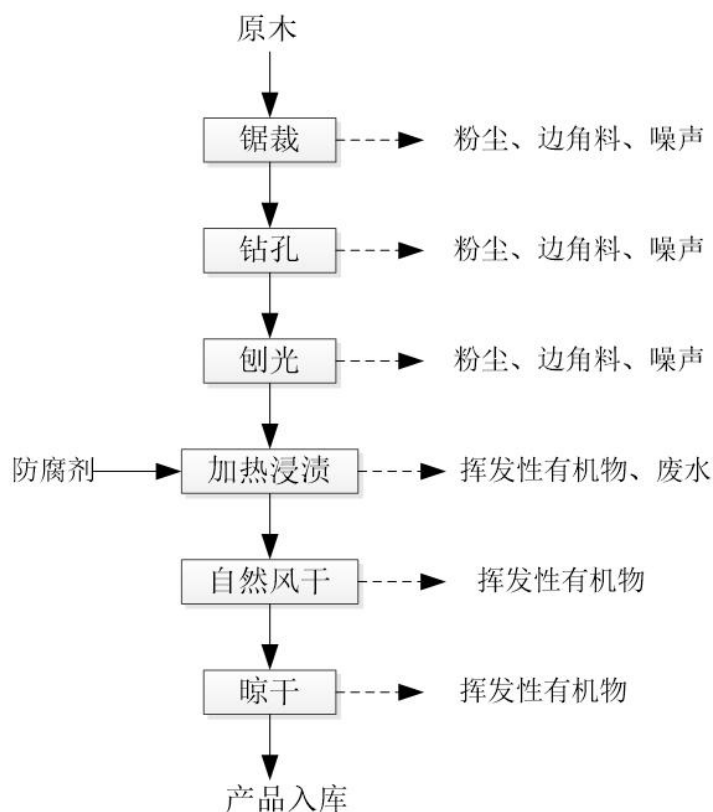


图 3.1-1 防腐枕木生产工艺流程图

表 3.1-1 资料搜集清单

| 序号 | 资料类别 | 资料名称 | 获取情况 | 说明 |
|----|------|---------------|------|-----|
| 1 | 地块环境 | 地块内土壤及地下水污染记录 | 未获取 | 无记录 |

| 序号 | 资料类别 | 资料名称 | 获取情况 | 说明 |
|----|---------|---------------------------|------|----|
| 2 | 资料 | 地块及其相邻地块的航片或卫星图片 | 已获取 | |
| 3 | | 环境监测数据、地勘报告 | 部分获取 | |
| 4 | | 产品、原辅材料和中间体清单 | 部分获取 | |
| 5 | | 厂区平面布置图 | 已获取 | |
| 6 | | 工艺流程图 | 已获取 | |
| 7 | 自然、社会信息 | 地理位置图、地形、地貌、土壤、水文、地质、气象资料 | 已获取 | |
| 8 | | 人口密度和分布、敏感目标分布 | 已获取 | |
| 9 | | 区域所在地的经济现状和发展规划 | 已获取 | |
| 10 | | 区域土地利用方式或规划 | 已获取 | |

表 3.1-2 地块潜在污染物分析表

| 产污环节 | 产污过程 | 关注潜在污染物类型 | | | | 污染途径 |
|----------|--|-----------|-----|-----|----|-------|
| | | 重金属 | 有机物 | 石油烃 | 粉尘 | |
| 原木加工环节 | 对木材原料进行锯切、刨光。 | | | | √ | 沉降 |
| 枕木加热浸渍环节 | 防腐剂 CCA 的使用：其主要化学成分为铬化砷酸铜，活性成分砷、六价铬，在使用过程中会造成重金属污染。 | √ | | | | 沉降、迁移 |
| | ACQ 防腐剂的使用：其主要化学成分为烷基铜铵化合物，活性成分为铜、季铵盐，使用过程中易造成重金属污染。 | √ | | | | 沉降、迁移 |
| | CA-B 防腐剂的使用：其主要组成成分为铜，使用过程中易造成重金属污染。 | √ | | | | 沉降、迁移 |
| | ACZA 防腐剂的使用：其化学成分为砷酸锌铜铵，主要活性成分有砷、锌等，生产过程使用中易造成重金属污染。 | √ | | | | 沉降、迁移 |
| | ACC 防腐剂的使用：其主要化学成分为铬酸铜，活性成分为六价铬、铜，生产过程使用中易造成重金属污染。 | √ | | | | 沉降、迁移 |
| | 有机溶剂（五氯酚、百菌清等）及油类防腐剂（葱油）、煤焦油、克里苏油的使用，防腐剂不慎滴漏易造成有机物及石油烃的污染。 | | | √ | √ | |

根据地块生产历史前期资料收集、现场走访情况及初步调查，该地块可能存在的污染物为重金属（砷、汞、镍等）以及有机物（苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）以及石油烃（C₁₀-C₄₀）。本地块污染情况汇总如下：

- (1) 通过对调查地块生产历史情况、主要生产工艺、地形地貌等资料进行分析，结合现场踏勘与人员访谈结果，初步确认该地块存在污染；
- (2) 主要污染物来源为防腐枕木生产环节产生的，污染物通过地表下渗、横向与纵向地表径流迁移及随着地下水迁移；同时粉尘及飘尘颗粒物通过干湿沉降下渗造成污染。
- (3) 本次调查的下一步工作需根据可能污染区域及具体污染物，进行土壤、地下水取样与实验室分析检测，确认地块土壤、地下水是否受到污染及污染的程度。

3.2 地块土壤污染状况初步调查回顾

3.2.1 初步调查采样点位布设

初步调查阶段采用系统随机布点法，并结合专业判断布点法进行布点。根据现场踏勘和收集到的资料，调查地块范围内无地表水存在，无地下水出露点，无废弃构筑物，结合现场情况，初步调查期间在可能存在土壤污染的原柳州木材防腐厂油罐区、生产区和仓储区共布设13个钻探点位，13个钻探点位均采集土壤样品，其中6个点位为地下水采样点。由于初步调查阶段未查明场地内存在柳州木材防腐厂污

水处理站，因此，初步调查阶段未在原污水处理厂区域布设监测点。为了解区域水文地质状况，在项目所处的中铁物流园厂区范围内布设3个水文地质监测点位。共采集52个土壤样品、9个水样样品。点位分布图分别见图3.2-1~图3.2-2。

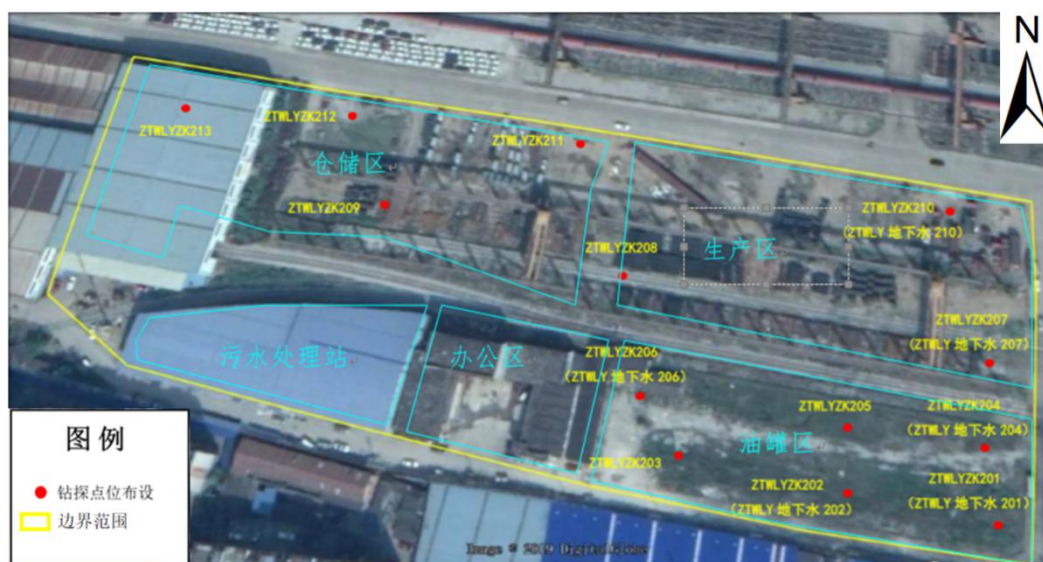


图 3.2-1 钻探点位分布图



图 3.2-2 水文地质监测点位分布图

3.2.2 初步调查样品检测指标及检测方法

初步调查阶段共采集了 52 个土壤样品、9 个地下水样品。土壤样品监测项目除《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）表 1 的 45 项必测项目外，还加测石油烃、五氯酚、六氯苯检测指标。并选取具有代表的土壤样品进行有机物含量检测，并根据需要增加检测指标。9 个地下水样品检测指标为：pH、镉、汞、砷、铅、六价铬、铜、镍、锌。检测指标及方法分别见表 3.2-1~表 3.2-2。

表 3.2-1 土壤样品全量检测指标及检测方法

| 序号 | 检测指标 | 检测方法 | 检出限 |
|----|--|--|------------|
| 1 | pH | NY/T 1377-2007《土壤 pH 的测定》 | 无量纲 |
| 2 | 铜 | GB/T17138-1997《土壤质量铜、锌的测定火焰原子吸收分光光度法》 | 1.0mg/kg |
| 3 | 锌 | | 0.5mg/kg |
| 4 | 铅 | GB/T 17141-1997《土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法》 | 0.1mg/kg |
| 5 | 镉 | | 0.01mg/kg |
| 6 | 汞 | HJ 680-2013《土壤和沉积物汞、砷、硒、铋、锑的测定微波消解原子荧光法》 | 0.002mg/kg |
| 7 | 砷 | | 0.01mg/kg |
| 8 | 铬（六价） | HJ 687-2014《固体废物六价铬的测定碱消解/火焰原子吸收分光光度法》 | 2mg/kg |
| 9 | 镍 | GB/T17139-1997《土壤质量镍的测定火焰原子吸收分光光度法》 | 5.0mg/kg |
| 10 | 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | 《全国土壤污染状况调查样品分析测试方法技术规范》国家生态环境部（2017 年） | 6mg/kg |
| 11 | 四氯化碳 μg/kg | HJ605-2011《土壤和沉积物挥发性有机物的测定吹扫捕集/气相色谱—质谱法》 | 1.3μg/kg |
| 12 | 氯仿 μg/kg | | 1.1μg/kg |
| 13 | 氯甲烷 μg/kg | | 1.0μg/kg |
| 14 | 1, 1-二氯乙烷 μg/kg | | 1.2μg/kg |
| 15 | 1, 2-二氯乙烷 μg/kg | | 1.3μg/kg |
| 16 | 1, 1-二氯乙烯 μg/kg | | 1.0μg/kg |
| 17 | 顺-1, 2-二氯乙烯 μg/kg | | 1.3μg/kg |

| 序号 | 检测指标 | 检测方法 | 检出限 | |
|----|---|------|--------------------------------------|------------|
| 18 | 反-1, 2-二氯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 19 | 二氯甲烷 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 20 | 1, 2-二氯丙烷 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 21 | 1, 1, 1, 2-四氯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 22 | 1, 1, 2, 2-四氯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 23 | 四氯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 24 | 1, 1, 1-三氯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 25 | 1, 1, 2-三氯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 26 | 三氯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 12 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 27 | 1, 2, 3-三氯丙烷 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 28 | 氯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 29 | 苯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 30 | 氯苯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 31 | 1, 2-二氯苯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 32 | 1, 4-二氯苯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 33 | 乙苯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 34 | 苯乙烯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 35 | 甲苯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 36 | 间二甲苯+对二甲苯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 37 | 邻二甲苯 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | | 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ | |
| 38 | 硝基苯 mg/kg | | HJ834-2017《土壤和沉积物半挥发性有机物的测定气相色谱—质谱法》 | 0.09mg/kg |
| 39 | 苯胺 mg/kg | | HJ834-2017《土壤和沉积物半挥发性有机物的测定气相色谱—质谱法》 | 0.001mg/kg |
| 40 | 2-氯酚 mg/kg | | HJ703-2014《土壤和沉积物酚类化合物的测定气相色谱法》 | 0.04mg/kg |
| 41 | 苯并[a]蒽 mg/kg | | HJ805-2016《土壤和沉积物多环芳烃的测定气相色谱-质谱法》 | 0.12mg/kg |
| 42 | 苯并[a]芘 mg/kg | | | 0.17mg/kg |
| 43 | 苯并[b]荧蒽 mg/kg | | | 0.17mg/kg |
| 44 | 苯并[k]荧蒽 mg/kg | | | 0.11mg/kg |
| 45 | 蒽 mg/kg | | | 0.14mg/kg |
| 46 | 二苯并[a, h]蒽 mg/kg | | | 0.13mg/kg |
| 47 | 茚并[1, 2, 3-cd]芘 mg/kg | | | 0.13mg/kg |

| 序号 | 检测指标 | 检测方法 | 检出限 |
|----|---------|--------------------------------------|-----------|
| 48 | 萘 mg/kg | | 0.09mg/kg |
| 49 | 五氯酚 | HJ834-2017《土壤和沉积物半挥发性有机物的测定气相色谱—质谱法》 | 0.2mg/kg |
| 50 | 六氯苯 | HJ835-2017《土壤和沉积物有机氯农药的测定气相色谱—质谱法》 | 0.1mg/kg |

表 3.2-2 水样检测指标及检测方法

| 序号 | 检测指标 | 检测方法 | 检出限 |
|----|------|-------------------------------------|-----------|
| 1 | pH | GB/T6920-1986《水质 pH 值的测定玻璃电极法》 | / |
| 2 | 砷 | HJ700-2014《水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法》 | 0.12ug/L |
| 3 | 镉 | | 0.05ug/L |
| 4 | 铅 | | 0.09ug/L |
| 5 | 铜 | | 0.08ug/L |
| 6 | 镍 | | 0.06ug/L |
| 7 | 锌 | GB7475-1987《水质铜、锌、铅、镉的测定原子吸收分光光度法》 | 0.01mg/L |
| 8 | 六价铬 | GB/T7467-1987《水质六价铬的测定二苯碳酰二肼分光光度法》 | 0.004mg/L |
| 9 | 汞 | HJ694-2014《水质汞、砷、硒、钼和锑的测定原子荧光法》 | 0.04ug/L |

3.2.3 评价标准

3.2.3.1 土壤样品全量检测结果评价标准

调查地块未来的规划用途为商业居住用地即第一类用地，样品检测结果选用《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）第一类用地筛选值进行评价。

3.2.3.2 地下水样品检测结果评价标准

由于地块地下水埋深较浅，并且该地块邻近III类地表水的柳江，考虑到本地块与柳江之间可能存在水力联系，并且未来规划为居住用地，地下水样品评价标准参照《地下水质量标准》（GB/T14848-2017）中的III类标准的限值进行评价。

3.2.4 初步调查采样分析结论

3.2.4.1 土壤采样分析结论

本次地块初步调查阶段对 43 个土壤样品进行 pH、锌、砷、镉、铬（六价）、铜、铅、汞、镍、石油烃（C₁₀-C₄₀）指标检测。检测结果表明，pH 范围 6.2~7.4；砷、镉、铜、铅、锌、镍检出率均为 100%，砷的最大值 45.1mg/kg，镍的最大值 222mg/kg，锌的最大值为 145mg/kg；六价铬均未检出；汞检出数量为 40 个，检出率 93.02%；石油烃检出数量为 32 个，检出率 74.42%。

通过与第一类用地筛选值对比发现，该地块存在重金属（砷、汞、镍）及石油烃（C₁₀-C₄₀）超标，砷的超标数量为 1，最大值超标倍数 0.13；汞的超标数量为 1，最大值超标倍数为 6.91；镍的超标数量为 10 个，最大值超标倍数 0.48；石油烃的超标数量为 9 个，最大值超标倍数 19.85。其中石油烃（C₁₀-C₄₀）污染较为严重，最大值为 17219mg/kg，最大值远超第一类用地的筛选值。超标点位主要分布在原木材防腐厂储罐区、生产区以及仓库和原料堆放区域。

对送检的 9 个样品检测《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》表 1 中的挥发性有机物及半挥发性有机物并加测检

测指标五氯酚、六氯苯、pH、锌。检测结果表明，该地块存在半挥发性有机物（苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒹、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、萘）指标超标，苯并[a]蒽最大值为 27.5mg/kg，超筛选值 4 倍；苯并[a]芘最大值为 13.1mg/kg，超筛选值 22.8 倍，超管控值 1.38 倍；苯并[b]荧蒹最大值为 13.6mg/kg，超筛选值 1.47 倍；二苯并[a,h]蒽最大值为 1.1mg/kg，超筛选值 1 倍；茚并[1,2,3-cd]芘最大值为 7.4mg/kg，超筛选值 0.35 倍；萘最大值为 54.8mg/kg，超筛选值 1.19 倍。初步调查污染物点位分布见图 3.2-3。初步调查土壤超标污染物检测数据统计见表 3.2-3。

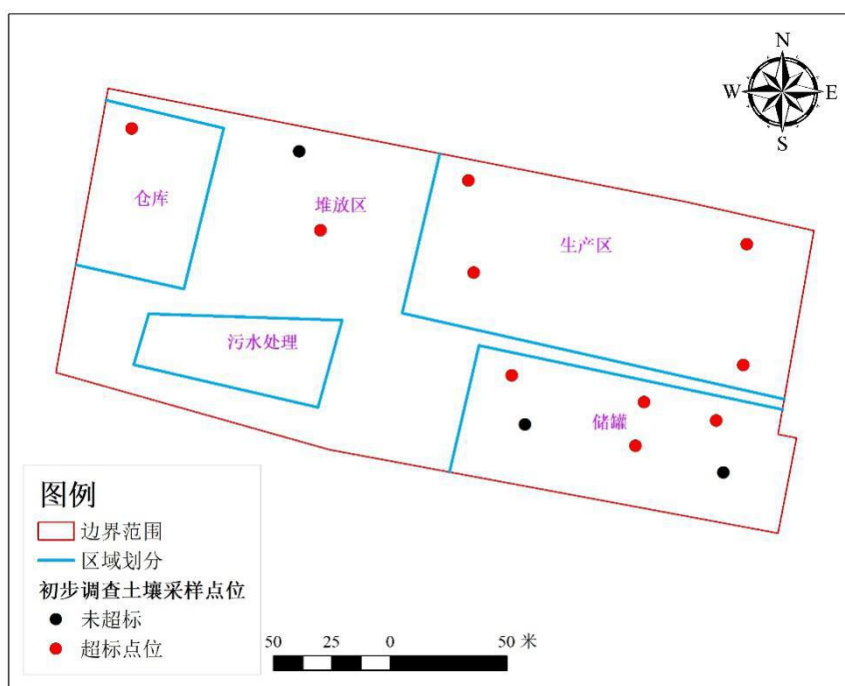


图 3.2-3 初步调查污染物点位分布

表 3.2-3 初步调查土壤污染物检测数据统计

| 污染物 | 筛选值 (mg/kg) | 最大值 (mg/kg) | 最大值超标倍数 |
|-----|-------------|-------------|---------|
| 砷 | 40 | 45.1 | 0.13 |
| 汞 | 8 | 63.3 | 6.91 |
| 镍 | 150 | 222 | 0.48 |

| 污染物 | 筛选值 (mg/kg) | 最大值 (mg/kg) | 最大值超标倍数 |
|--|-------------|-------------|---------|
| 苯并[a]蒽 | 5.5 | 27.5 | 4 |
| 苯并[a]芘 | 0.55 | 13.1 | 22.8 |
| 苯并[b]荧蒽 | 5.5 | 13.6 | 1.47 |
| 二苯并[a,h]蒽 | 0.55 | 1.1 | 1 |
| 茚并[1,2,3-cd]芘 | 5.5 | 7.4 | 0.35 |
| 萘 | 25 | 54.8 | 1.19 |
| 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) | 826 | 17219 | 19.85 |

3.2.4.2 地下水采样分析结论

本次地块初步调查阶段，对采集的 9 个地下水样品进行 pH、镉、汞、砷、铅、六价铬、铜、镍、锌检测。初步调查阶段地下水样品检测结果为，地块存在砷、镍超标，砷最大浓度值 0.138mg/L，超标倍数为 12.8 倍；镍最大浓度值 0.158mg/L，超标倍数为 6.9 倍。超标点位均位于防腐枕木生产区域。

3.2.4.3 初步调查结论及建议

经初步调查结果可知，该地块土壤存在重金属（砷、汞、镍）、半挥发性有机物（苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）以及石油烃（C₁₀-C₄₀）污染；地下水存在砷、镍污染。

初步调查阶段未对原污水处理站去进行布布设点位，并且初步调查阶段地下水的检测指标中对特征污染物的检测存在缺项漏项。针对初步调查和阶段存在的问题，在详细调查阶段进行进一步的完善。

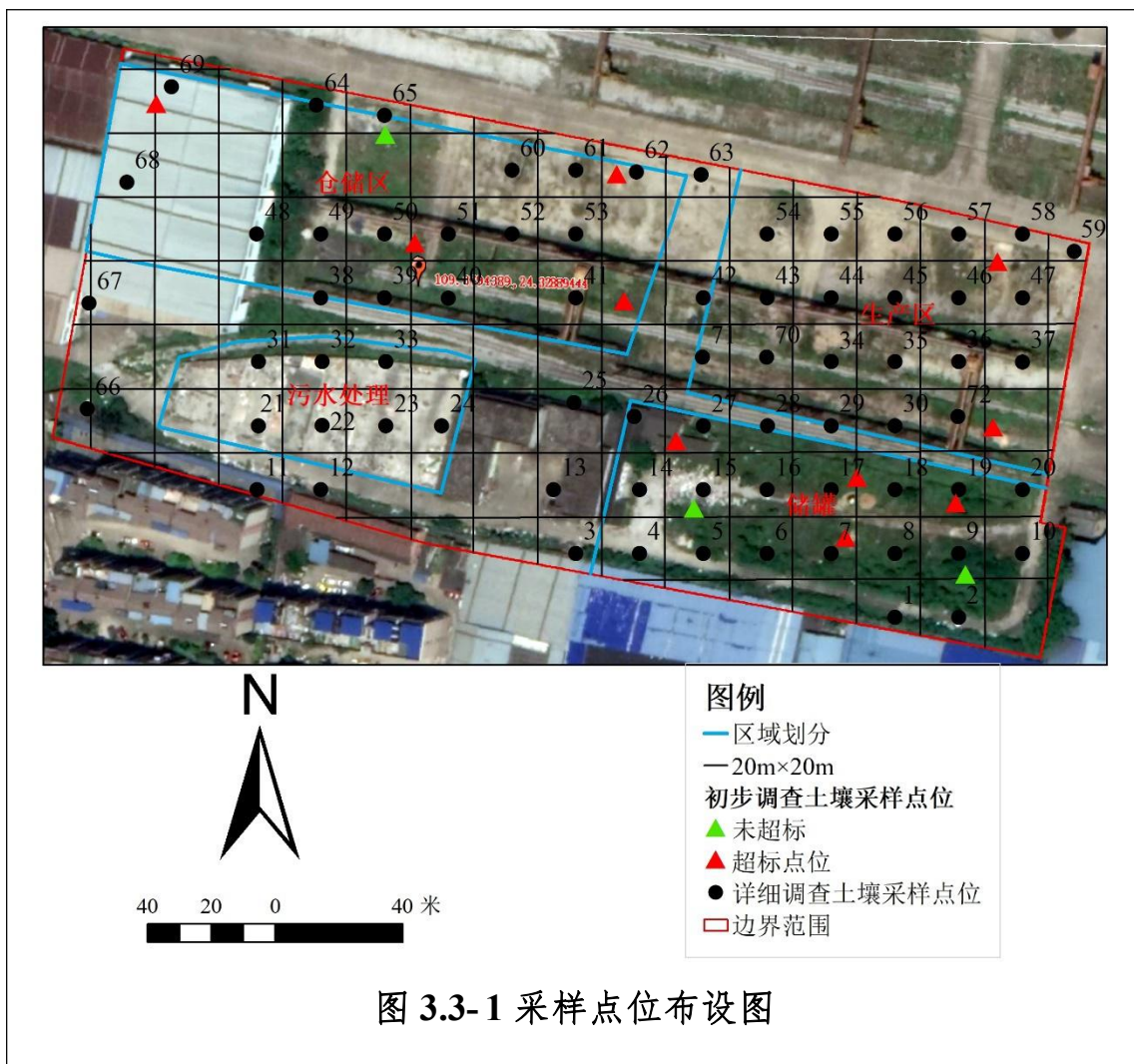
该地块为污染地块，不满足作为商业居住用地开发利用的要求，建议对该地块开展详细调查采样分析工作。

3.3 地块土壤污染状况详细调查回顾

由于初步调查阶段未查明原木材防腐厂污水处理站的污染情况，因此详细调查阶段在补充调查的基础上对原污水出站区域进行调查，直接按照详细调查的要求进行采样布点。另外，初步调查阶段亦未查明原柳州木材防腐厂的特征污染物五氯酚、氰化物、铜、锌、镉。因此详细调查阶段除了补充对原污水处理站区域进行调查之外，增加了各监测点特征污染物因子（五氯酚、氰化物、铜、锌、镉）的监测。

3.3.1 地块土壤布点方案

本次详细调查阶段采样点位布设是在初步调查的结果上，针对初步调查的超标点位区域采用 20m×20m 网格进行加密布点，大致分三个区域：第一区域：原生产区，29~30、37~37、42~47、54~59 以及 71、72 号点；第二区域：原储罐区域，1、2、4~10、14~20 号点；第三区域：原仓储区，38~41、48~53、60~62、64、65、68、69 号点。针对初步调查未布设点位的原污水处理站区域，详细调查阶段按照 20m×20m 网格在污水处理站区域布设 21~24、31~33 号点。对于初步调查非超标的其他区域采用随机布点法。详细调查阶段合计布设 72 个采样点，采样深度 27m，此深度已经采到沙砾石层，沙砾石层很厚无法打穿，而且已经达到稳定地下水水位。采样点位布设见图 3.3-1。



3.3.2 地块地下水布点方案

本次详细调查阶段共布设 7 个地下水监测点位，点位编号为 69、22、40、6、9、15、44。具体的采样点位布设见图 3.3-1。

根据调查地块的相关资料分析、历史生产情况及初步调查结果可知，该调查地块内的地下水中有可以以重质非水相液体（DNAPL）和轻质非水相液体（LNAPL）存在的污染物，根据《地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则》（HJ 1019-2019）的要求，本次调查对地下水进行分层取样分别采集含水层顶部和底部的地下水样品。

3.3.3 详细调查样品检测指标及检测方法

3.3.3.1 土壤样品检测指标及检测方法

本着保守性原则，详细调查阶段土壤检测指标包括初步调查阶段超标的污染物：重金属砷、汞、镍；半挥发性有机物苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、萘；石油烃（C10-C40），还包括包括详细调查阶段发现的原柳州木材防腐厂的特征污染物：氰化物、重金属（铜、锌、镉）、半挥发性有机物五氯酚。检测指标及检测方法见表 3.3-1。

表 3.3-1 检测指标及检测方法

| 检测指标 | 检测方法 | 检出限 |
|-----------|---|------------|
| pH 值（无量纲） | 土壤检测第 2 部分：土壤 pH 的测定 NY/T 1121.2-2006 | 0.01（无量纲） |
| 铜 | 土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法 HJ 491-2019 | 1mg/kg |
| 锌 | | 1mg/kg |
| 镉 | 土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法 GB/T 17141-1997 | 0.01mg/kg |
| 汞 | 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法第 1 部分：土壤中总汞的测定 GB/T 22105.1-2008 | 0.002mg/kg |
| 六价铬 | 固体废物六价铬的测定碱消解/火焰原子吸收分光光度法 HJ 687-2014 | 2mg/kg |
| 砷 | 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法第 2 部分：土壤中总砷的测定 GB/T 22105.2-2008 | 0.01mg/kg |
| 镍 | 土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法 HJ 491-2019 | 3mg/kg |
| 铅 | 土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法 GB/T 17141-1997 | 0.1mg/kg |
| 氰化物 | 土壤氰化物和总氰化物的测定分光光度法 HJ 745-2015 | 0.01mg/kg |
| 五氯酚 | 土壤和沉积物酚类化合物的测定气相色谱法 HJ 703-2014 | 0.07mg/kg |
| 苯并[a]蒽 | 土壤和沉积物半挥发性有机物的测定气相色谱-质谱法 HJ 834-2017 | 0.1mg/kg |
| 苯并[a]芘 | | 0.1mg/kg |

| 检测指标 | 检测方法 | 检出限 |
|--|---|-----------|
| 苯并[b]蒽 | | 0.2mg/kg |
| 二苯并[a,h]蒽 | | 0.1mg/kg |
| 茚并[1,2,3-cd]芘 | | 0.1mg/kg |
| 萘 | | 0.09mg/kg |
| 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) | 土壤和沉积物石油烃(C ₁₀ -C ₄₀)的测定气相色谱法 HJ 1021-2019 | 6mg/kg |

3.3.3.2 地下水样品检测指标及检测方法

本着保守性原则，详细调查阶段地下水样品检测指标包括初步调查阶段超标的污染物、以及初步调查阶段未进行检测的特征污染物。地下水样品具体检测指标及检测方法见表 3.3-2。

表 3.3-2 地下水样品检测指标及检测方法

| 感官性状及一般化学指标 | | |
|-------------|--|-----------|
| 检测指标 | 检测方法 | 检出限 |
| pH 值（无量纲） | 水质 pH 值的测定玻璃电极法 GB/T 6920-1986 | 0.01（无量纲） |
| 浑浊度 NTU | 浊度的测定便携式浊度计法《水和废水监测分析方法》（第四版增补版）国家环境保护局（2002 年） | / |
| 氨氮 | 水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法 HJ 535-2009 | 0.025mg/L |
| 耗氧量 | 生活饮用水标准检验方法有机物综合指标（1.1 耗氧量酸性高锰酸钾滴定法）GB/T 5750.7-2006 | 0.05mg/L |
| 溶解性总固体 | 生活饮用水标准检验方法感官性状和物理指标（8.1 溶解性总固体称量法）GB/T 5750.4-2006 | / |
| 氯化物 | 水质氯化物的测定硝酸银滴定法 GB/T 11896-1989 | 10mg/L |
| 铜 | 水质 32 种元素的测定电感耦合等离子发射光谱法 HJ 776-2015 | 0.04mg/L |
| 锌 | 水质 32 种元素的测定电感耦合等离子发射光谱法 HJ 776-2015 | 0.009mg/L |

| | | |
|--|--|------------|
| 挥发酚 | 水质挥发酚的测定 4-氨基安替比林分光光度法 HJ 503-2009 | 0.0003mg/L |
| 硫酸盐 | 水质硫酸盐的测定铬酸钡分光光度法（试行）HJ/T 342-2007 | 8mg/L |
| 毒理学指标 | | |
| 检测指标 | 检测方法 | 检出限 |
| 氰化物 | 水质氰化物的测定容量法和分光光度法（方法 3 异烟酸-巴比妥酸分光光度法）HJ 484-2009 | 0.001mg/L |
| 硝酸盐(以氮计) | 水质硝酸盐氮的测定紫外分光光度法（试行）HJ/T 346-2007 | 0.08mg/L |
| 亚硝酸盐(以氮计) | 水质亚硝酸盐氮的测定分光光度法 GB/T 7493-1987 | 0.003mg/L |
| 镉 | 生活饮用水标准检验方法金属指标（9.1 镉无火焰原子吸收分光光度法）GB/T 5750.6-2006 | 0.5μg/L |
| 汞 | 水质汞、砷、硒、铋和锑的测定原子荧光法 HJ 694-2014 | 0.04μg/L |
| 六价铬 | 水质六价铬的测定二苯碳酰二肼分光光度法 GB/T 7467-1987 | 0.004mg/L |
| 砷 | 水质汞、砷、硒、铋和锑的测定原子荧光法 HJ 694-2014 | 0.3μg/L |
| 镍 | 水质 32 种元素的测定电感耦合等离子体发射光谱法 HJ 776-2015 | 0.007mg/L |
| 铅 | 生活饮用水标准检验方法金属指标（11.1 铅无火焰原子吸收分光光度法）GB/T 5750.6-2006 | 2.5μg/L |
| 五氯酚 | 水质酚类化合物的测定液液萃取/气相色谱法 HJ 676-2013 | 1.1μg/L |
| 萘 | 水质多环芳烃的测定液液萃取和固相萃取高效液相色谱法 HJ 478-2009 | 0.012μg/L |
| 苯并[a]芘 | 水质多环芳烃的测定液液萃取和固相萃取高效液相色谱法 HJ 478-2009 | 0.004μg/L |
| 苯并[b]荧蒽 | 水质多环芳烃的测定液液萃取和固相萃取高效液相色谱法 HJ 478-2009 | 0.004μg/L |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | 水质可萃取性石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ）的测定气相色谱法 HJ 894-2017 | 0.01mg/L |

3.3.4 评价标准

3.3.4.1 土壤污染评价标准

本次调查地块未来规划用途为商业居住用地，该地块土壤样品检测指标按照《土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）中第一类用地的筛选值、管制值和标准对污染物超标情况进行评价。相关评价标准见表 3.3-3。

表 3.3-3 建设用地土壤污染风险筛选值和管制值（mg/kg）

| 序号 | 污染物项目 | 筛选值 | 管制值 |
|----|--|-----------------|------|
| 1 | 铜 | 2000 | 8000 |
| 2 | 锌 | - | - |
| 3 | 镉 | 20 | 47 |
| 4 | 汞 | 8 | 33 |
| 5 | 六价铬 | 3.0 | 30 |
| 6 | 砷 | 40 ^① | 120 |
| 7 | 镍 | 150 | 600 |
| 8 | 铅 | 400 | 800 |
| 9 | 氰化物 | 22 | 44 |
| 10 | 五氯酚 | 1.1 | 12 |
| 11 | 苯并[a]蒽 | 5.5 | 55 |
| 12 | 苯并[a]芘 | 0.55 | 5.5 |
| 13 | 苯并[b]荧蒽 | 5.5 | 55 |
| 14 | 二苯并[a, h]蒽 | 0.55 | 5.5 |
| 15 | 茚并[1, 2, 3-cd] | 5.5 | 55 |
| 16 | 萘 | 25 | 255 |
| 17 | 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) | 826 | 5000 |

注：①地块处于赤红壤与红壤过度带区域，参考《土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）第一类用地筛选值、管制值，及附录 A，并参照柳州市土壤过渡带（红壤与赤红壤、石灰岩土）的砷含量背景值作为评价依据。

3.3.4.2 地下水评价标准

由于地块地下水埋深较浅，并且该地块邻近Ⅲ类地表水的柳江，

考虑到本地块与柳江之间可能存在水力联系，并且未来规划为居住用地，调查地块所在区域地下水采用《地下水质量标准》（GB/T14848-2017）III类标准的限值作为评价标准。部分检测指标在标准中没有规定限值的以国外相关标准为补充，石油烃（C₁₀-C₄₀）选用《荷兰建设部关于土地使用和干预值标准》进行评价。相关评价标准见表 3.3-4。

表 3.3-4 地下水环境质量标准限值

| 序号 | 指标 | III类限值 |
|--------------------|--|------------|
| 感官性状及一般化学指标 | | |
| 1 | pH | 6.5≤pH≤8.5 |
| 2 | 浑浊度/NTU | ≤3 |
| 3 | 溶解性总固体/(mg/L) | ≤1000 |
| 4 | 硫酸盐/(mg/L) | ≤250 |
| 5 | 氯化物/(mg/L) | ≤250 |
| 6 | 铜/(mg/L) | ≤1.00 |
| 7 | 锌/(mg/L) | ≤1.00 |
| 8 | 耗氧量(COD _{Mn} 法，以 O ₂ 计)/(mg/L) | ≤3.0 |
| 9 | 氨氮(以 N 计)/(mg/L) | ≤0.5 |
| 10 | 挥发酚(mg/L) | ≤0.002 |
| 毒理学指标 | | |
| 11 | 亚硝酸盐(以 N 计)/(mg/L) | ≤1.00 |
| 12 | 硝酸盐(以 N 计)/(mg/L) | ≤20.0 |
| 13 | 氰化物/(mg/L) | ≤0.05 |
| 14 | 汞/(mg/L) | ≤0.001 |
| 15 | 砷/(mg/L) | ≤0.01 |
| 16 | 镉/(mg/L) | ≤0.005 |

| 序号 | 指标 | III类限值 |
|------------------------------|---|----------|
| 17 | 铬(六价)/(mg/L) | ≤0.05 |
| 18 | 铅/(mg/L) | ≤0.01 |
| 19 | 镍 (mg/L) | ≤0.02 |
| 20 | 五氯酚 (mg/L) | ≤0.009 |
| 21 | 萘 (mg/L) | ≤0.1 |
| 22 | 苯并(b)荧蒽 (mg/L) | ≤0.004 |
| 23 | 苯并(a)芘(mg/L) | ≤0.00001 |
| 24 | 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) **/(mg/L) | 0.6 |
| 注: **参考《荷兰建设部关于土地使用和环境干预值标准》 | | |

3.3.5 详细调查采样分析结论

3.3.5.1 土壤检测结果分析

本次详细调查检测结果表明,该地块土壤存在重金属(六价铬、砷、镍)、半挥发性有机物(五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、萘)、石油烃(C₁₀-C₄₀)超标。

3种重金属污染中,六价铬含量的变化范围为0~77.8mg/kg,超标深度0~3m;砷含量的变化范围为0.710~342mg/kg,超标深度0~23m;镍含量的变化范围为9~490mg/kg,超标深度18~23m。砷的超标样品个数最多为29个,超筛选值比率4.6%,而六价铬和镍的超筛选值的比率分别为为2.22%和1.11%,六价铬的最大值超标倍数最大为25.93倍。

7种半挥发性有机物污染中,五氯酚含量范围0~1580mg/kg,超标深度0~25m;苯并[a]蒽含量范围0~39.6mg/kg,超标深度0~20m;

苯并[a]芘含量范围 0~12.2mg/kg，超标深度 0~23.5m；苯并[b]荧蒽含量范围 0~29.9mg/kg，超标深度 0~20m；二苯并[a,h]蒽含量范围 0~20.1mg/kg，超标深度 0~20m；茚并[1,2,3-cd]芘含量范围 0~27.1mg/kg，超标深度为 0~15m；萘含量范围 0~61.4 mg/kg，超标深度 0~11m。五氯酚超标样品最多为 279 个，五氯酚最大值超标倍数最大为 1436.36 倍。

土壤超标污染物石油烃（C₁₀-C₄₀）含量范围 0~123000mg/kg，平均值 815.72mg/kg，超标深度 0~25m，最大值超标倍数 148.91 倍，有 93 个样品超过筛选值，超筛选值比率 14.7%，有 20 个样品超过管制值，超管制值比率 3.17%。土壤超标点位分布见图 3.3-2。详细调查土壤超标点位污染物检测结果统计见表 3.3-5。

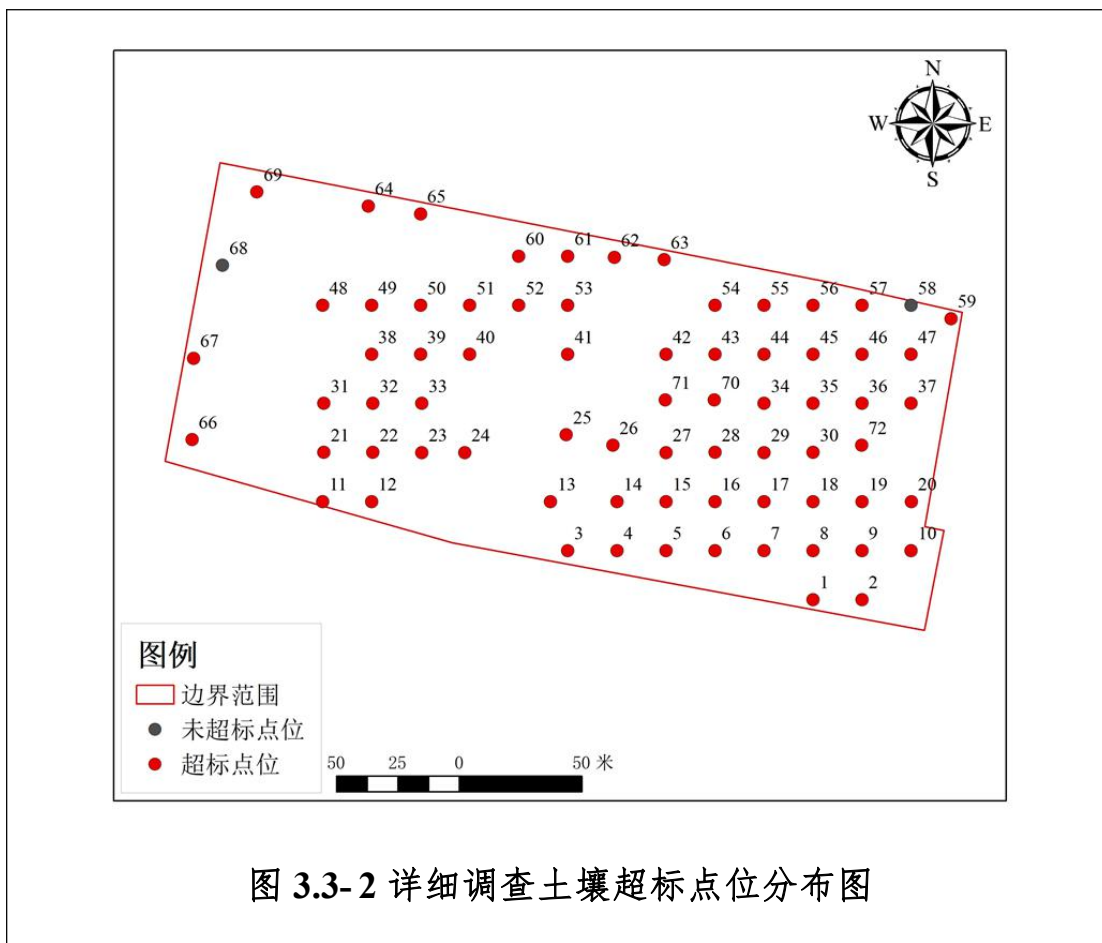


表 3.3-5 详细调查土壤污染指标检测结果统计

| 污染物 | 筛选值 (mg/kg) | 管制值 (mg/kg) | 浓度范围 (mg/kg) | 平均值 (mg/kg) | 最大值超 标倍数 | 超筛选值数 量(个) | 超筛选值比 率(%) | 超管制值 数量(个) | 超管制值 比率(%) |
|--|----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 六价铬 | 3 | 30 | 0~77.8 | 0.47 | 25.93 | 14 | 2.22 | 3 | 0.48 |
| 砷 | 40 | 120 | 0.710~342 | 18.93 | 8.54 | 29 | 4.6 | 2 | 0.32 |
| 镍 | 150 | 600 | 9~490 | 43.24 | 3.27 | 7 | 1.11 | / | / |
| 五氯酚 | 1.1 | 12 | 0~1580 | 26.60 | 1436.36 | 279 | 44.2 | 141 | 22.3 |
| 苯并[a]蒽 | 5.5 | 55 | 0~39.6 | 1.42 | 7.21 | 48 | 7.61 | / | / |
| 苯并[a]芘 | 0.55 | 5.5 | 0~12.2 | 0.45 | 22.18 | 89 | 14.1 | 14 | 2.22 |
| 苯并[b]荧蒽 | 5.5 | 55 | 0~29.9 | 0.96 | 5.44 | 32 | 5.07 | / | / |
| 二苯并[a,h]蒽 | 0.55 | 5.5 | 0~20.1 | 0.45 | 36.55 | 68 | 10.78 | 13 | 2.06 |
| 茚并[1,2,3-cd]芘 | 5.5 | 55 | 0~27.1 | 0.69 | 4.93 | 20 | 3.17 | / | / |
| 萘 | 25 | 255 | 0~61.4 | 1.97 | 1.49 | 9 | 1.43 | / | / |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 826 | 5000 | 0~123000 | 815.72 | 148.91 | 93 | 14.7 | 20 | 3.17 |

3.3.5.2 地下水样品检测结果分析

本次详细调查检测结果表明，该地块地下水主要存在一般化学指标（氨氮、耗氧量、挥发酚）、毒理学指标（砷、五氯酚、苯并[a]芘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）超标。因一般化学指标超标无需展开后续的风险评估，故，只针对毒理学指及石油烃（C₁₀-C₄₀）超标标进行检测结果统计。检测结果统计见表 3.3-6。

砷仅在点位 44 上层、点位 15 上层地下水样品中出现了超标，最大值超标倍数为点位 44 上层 2.52 倍。

五氯酚在点位 44 上下层、点位 22 上下层、点位 6 上下层及点位 40 下层、点位 15 上层、点位 9 下层地下水样品中出现超标，最大值超标倍数为点位 22 下层 20.56 倍。

苯并[a]芘在点位 44 上层、点位 15 上层地下水样品中出现超标，最大值超标倍数为点位 44 上层 5.8 倍。

石油烃在点位 44 上下层、6 上下层及点位 15 上层、点位 9 下层地下水样品中出现超标，最大值超标倍数为点位 44 上层 52.5 倍。

地块下层卵石层中的地下承压水受到到场地土壤中污染物的污染。项目地块水文地质调查报告，项目地块内原柳州木材防腐厂污水处理站区域、生产车间区域和储罐区区域的粘土层厚度相对较小，从 3.7m 至 10.1m 不等，土壤层的防污性能相对较小，而此三处区域为地块内原柳州木材防腐厂污染土壤污染最为严重的区域，从土壤污染状况调查结果可知，地块内监测到的土壤污染深度到达了 26m 的卵石层，由此判断，地块内的土壤污染物经过长期的渗透扩散已经穿透

黏土层至卵石层和地下水承压水层中扩散，造成地下水污染。

原柳州木材防腐厂 1957 年建成投产，至 2005 年停产，前后生产运营近 50 年，建厂初期物质条件落后，环保意识薄弱，走的是大上大干的粗放生产路线，缺乏地面硬化和污染治理措施，先污染后治理，这些原因很有可能导致项目场地在该木材防腐厂投产以来一直受到生产废水、废液等的污染，从现场土壤采样情况可知（见图 3.3-3 和图 3.3-4），场地内原木材防腐厂生产车间、污水处理站等区域黏土层底部土壤中仍有污染因子超标的情况，由此判断土壤中的污染物迁移至地下水承压水层。



图 3.3-3 32#点原木材防腐厂污水处理站处土壤采样照片



图 3.3-4 54#点原木材防腐厂生产车间处土壤采样照片

3.3.6 结论及建议

本次详细调查结论为，地块内土壤存在重金属（六价铬、砷、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）超标，污染指标均超出《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）第一类用地筛选值。地下水主要存在一般化学指标（氨氮、耗氧量、挥发酚）、毒理学指标（砷、五氯酚、苯并[a]芘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）超标，一般化学指标及毒理学指标超出《地下水质量标准》（GB/T14848-2017）III类水标准限值，石油烃（C₁₀-C₄₀）超出《荷兰建设部关于土地使用和干预值标准》规定的限值。这些污染物可能对地块周边活动的居民和水环境产生人体健康风险及环境风险。

故，建议对本地块土壤污染物重金属（六价铬、砷、镍）、半挥

发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、萘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）及地下水超标毒理学指标（砷、五氯酚、苯并[a]芘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）等进行人体健康风险评估和环境评估，为后期土壤及地下水治理范围、体量、污染羽面积及修复目标确定提供可靠的基础数据。

表 3.3-6 地下水部分检测指标结果统计

| 毒理学指标 | | | | | | | | | |
|--|--------------------|---------------|--------------|------------|---------------|---------------|--------------|------------|------------|
| 检测指标 | III类标准限值 (mg/L) | 送检样品 数 (个) | 检出样品数 (个) | 检出率 (%) | 平均值 (mg/L) | 最大值 (mg/L) | 超标样品数 (个) | 超标率 (%) | 最大超标 倍数 |
| 砷 | 0.01 | 12 | 8 | 66.67 | 0.0067 | 0.0352 | 2 | 16.67 | 2.52 |
| 五氯酚 | 0.009 | 12 | 11 | 91.67 | 0.0824 | 0.1940 | 10 | 83.30 | 20.56 |
| 苯并[a]芘 | 0.00001 | 12 | 2 | 16.67 | 0.000009 | 0.000068 | 2 | 16.67 | 5.8 |
| 石油烃指标 | | | | | | | | | |
| 检测指标 | III类标准限值 (mg/L) | 送检样品 数 (个) | 检出样品数 (个) | 检出率 (%) | 平均值 (mg/L) | 最大值 (mg/L) | 超标样品数 (个) | 超标率 (%) | 最大超标 倍数 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 0.6 | 12 | 12 | 100.00 | 4.5818 | 32.1 | 6 | 50.00 | 52.5 |

第四章 污染地块风险评估

4.1 风险评估工作程序及内容

地块风险评估工作程序包括危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征和确定修复目标值。本次健康风险评估程序见 1.6 章节的图 1.6-1。

4.2 危害识别

根据地块环境调查获取的资料，结合地块土地的规划利用类型，明确污染地块的关注污染物、地块内污染物的浓度及空间分布和可能的敏感受体。

4.2.1 地块污染成因

4.2.1.1 地块特征

1、地形地貌

地块宏观地貌属侵蚀堆积类型的河流阶地，河流两岸有不连续的冲积台地，最多可见五级，以柳州市附近柳江河谷发育最完整，地块属 I、II 阶地（堆积阶地）阶面宽 0~150m，标高 80~88m，高出枯水位 10~18m。局部表现为基座阶地，阶面波状起伏，宽 0~2000m，标高 90~100m，高出枯水位 20~30m。场区及其附近地面标高 92.16~93.77m，高差 1.61m，地势整体较平坦。

2、水文地质条件

地块内地下水类型分为上层滞水和孔隙潜水。上层滞水主要赋存

杂填土、黏土及黏土夹卵（砾）石中，下渗补给孔隙潜水，勘察期间测得地下水水位埋深 0.80~1.80m（标高 91.26~91.99m），以大气降水及地表积水入渗补给为主，其水量小；孔隙潜水主要赋存于卵石层中，分布较均匀，分选性差，粒间夹少量黏性土，接收大气降水及上层滞水的入渗补给，为中等透水层，勘察期间测得稳定水位埋深 2.24~3.12m（标高 89.34~91.24m）。地块岩土体为二元结构，上部黏土、黏土夹卵（砾）石为弱透水不含水层，下部卵石层为中等透水层。

地块内地下水主要以大气降水补给为主，孔隙地下水的径流特征主要为分散垂直向下渗透，排泄特征主要是以分散渗流的形式下泄补给地下水。地块内地下水水位动态变幅较小，一般 1.00~3.00m。地下水流向自西北向东南径流，最终排泄于柳江河中。

3、地块内地层分布

地层由上到下可概化为杂填土层、黏土层、卵石层。其中，杂填土层主要由黏性土组成，含少量碎石及建筑砖块，分布于地块内大部分地段，层厚 1.30~3.60m；黏土层上部为黏土，含少量铁锰质结核，下部为黏土夹卵（砾）石，卵（砾）石的主要矿物成分为石英、白云石、长石等，整个地块均有分布。顶面埋深 1.30~3.6m，层厚 3.70m~22.0m；卵石层主要成分为搬运砂岩、泥岩、硅质岩及石英颗粒，磨圆度好，呈次圆状或椭圆状，分布较均匀，分选性差，粒间骨架充填物以砾砂为主，局部夹少量黏性土。

地块岩土体为二元结构，上部黏土、黏土夹卵（砾）石为弱透水不含水层，下部卵石层为中等透水层。

4、土壤理化性质

表 4.2-1 土壤部分理化性质表

| 试样 编号 | 试样 顶深 (m) | 取样长 度 (m) | 含水率 ω (%) | 重 度 γ (kN/m ³) | 比重 G_s | 孔隙比 e | 饱和 度 S_r (%) | 液 限 ω_L (%) | 塑限 ω_P (%) | 塑性 指数 I_P | 液性 指数 I_L | 渗透系数 k_{20} (cm/s) | 有机质 含量 (g/kg) | 室内 定名 |
|----------|-----------------|--------------|------------------------|--|-------------|------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|----------|
| 6-1 | 5.00 | 0.20 | 32.4 | 18.9 | 2.75 | 0.889 | 100 | 49.0 | 28.7 | 20.3 | 0.18 | 1.34×10^{-6} | 14.0 | 黏土 |
| 9-1 | 4.00 | 0.20 | 23.3 | 19.5 | 2.74 | 0.699 | 91 | 45.1 | 26.7 | 18.4 | -0.18 | 1.58×10^{-5} | 4.12 | 黏土 |
| 22-1 | 5.50 | 0.20 | 23.0 | 20.4 | 2.73 | 0.614 | 100 | 37.4 | 22.8 | 14.6 | 0.01 | 7.02×10^{-5} | 6.01 | 粉质 黏土 |
| 40-1 | 3.00 | 0.20 | 22.1 | 19.6 | 2.75 | 0.680 | 89 | 49.2 | 28.7 | 20.5 | -0.32 | 3.94×10^{-7} | 14.80 | 黏土 |
| 44-1 | 3.40 | 0.20 | 21.2 | 19.6 | 2.75 | 0.668 | 87 | 49.8 | 29.0 | 20.8 | -0.37 | 3.50×10^{-6} | 20.40 | 黏土 |
| 69-1 | 3.20 | 0.20 | 30.4 | 18.3 | 2.76 | 0.929 | 90 | 55.6 | 31.8 | 23.8 | -0.06 | 4.97×10^{-6} | 5.28 | 黏土 |

4.2.1.2 污染源分布

1、重金属污染分布及污染原因

本次调查地块为原木材防腐厂生产区域，根据收集资料分析和人员访问可知，在防腐枕木生产工艺流程中的枕木加热浸渍环节，需添加防腐剂。其中应用的水载型防腐剂 CCA、ACZA、ACC 的使用是造成重金属污染的重要原因。CCA 的活性成分主要为砷、六价铬；ACZA 的活性成分主要为砷、锌等；ACC 活性成分主要为六价铬。故，CCA 在使用过程中会产生砷、六价铬等污染物，ACZA 使用过程中会产生砷、锌等污染物，ACC 使用过程中会产生六价铬等污染。因此，水载型防腐剂的使用及使用过程中不慎滴漏和原料长期的堆放是造成地块土壤重金属污染的主要原因。土壤重金属超标点位分布见图 4.2-1。

此外，污染的土壤经大气降雨淋溶浸出下渗污染地下水，以及木材防腐废水的排放下渗导致地下水受到污染。

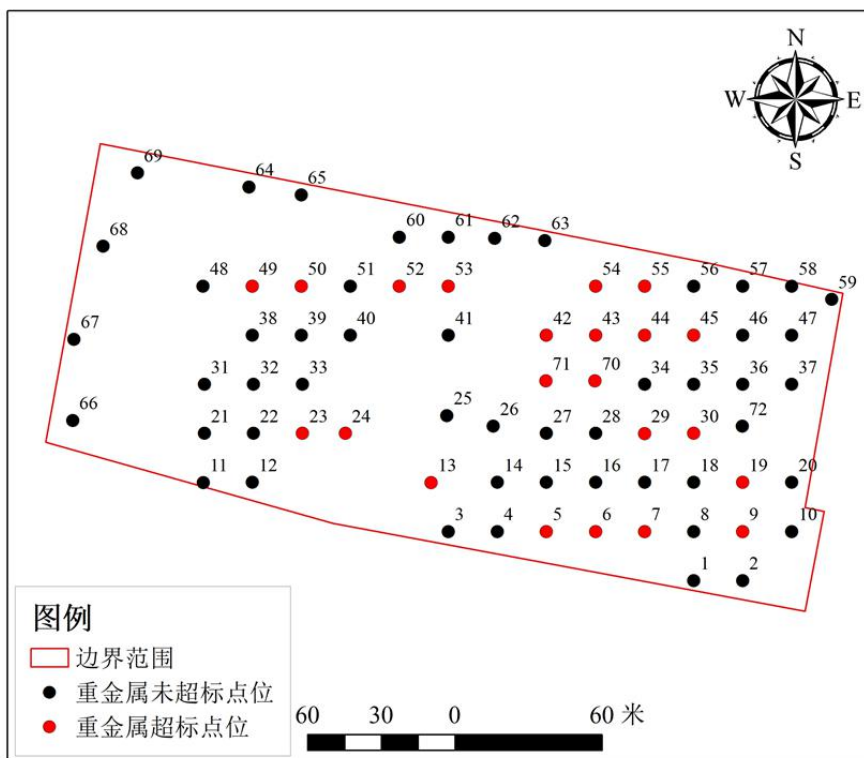


图 4.2-1 土壤重金属超标点位分布

2、半挥发性有机物污染分布及污染原因

根据污染识别，在防腐枕木生产工艺流程中的枕木加热浸渍环节，添加防腐剂是有机物污染重要来源，其中有机溶剂防腐剂（五氯酚）及油类防腐剂（葱油）使用过程中的不慎泄漏，以及实际生产使用过程中原料防腐剂的转化或木材防腐生产废水排放是造成土壤及地下水半挥发性有机物污染的主要原因。土壤半挥发性有机物超标点位分布见图 4.2-2。

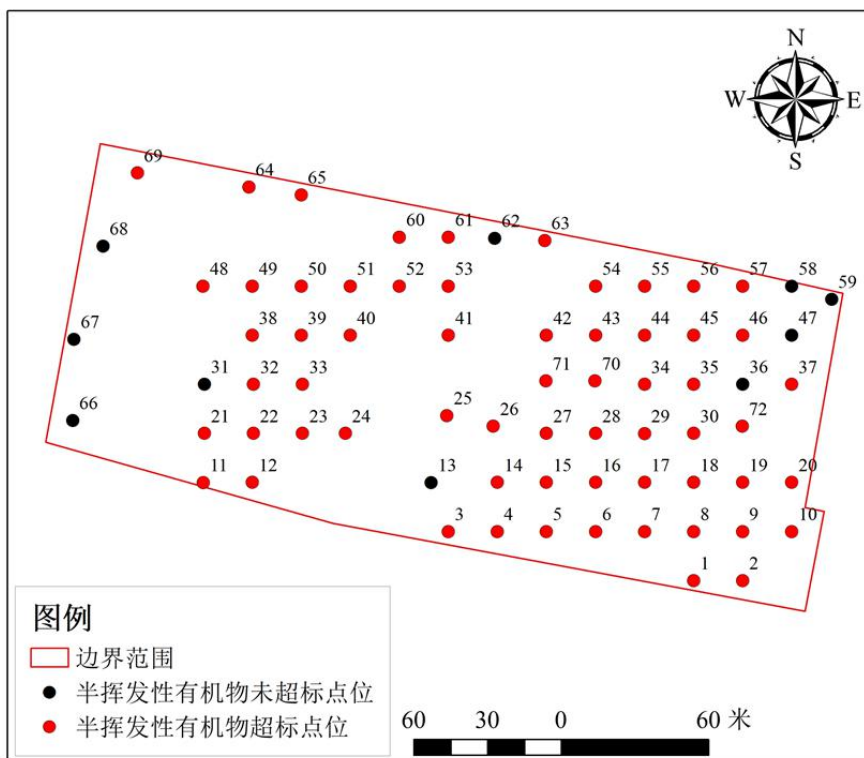


图 4.2-2 土壤半挥发性有机物超标点位分布

3、石油烃（C₁₀-C₄₀）污染分布及污染原因

根据污染识别，在防腐枕木生产工艺流程中的枕木加热浸渍环节，添加防腐剂。其中防腐剂（煤焦油、克里苏油）的使用过程中原料防腐剂的转化及不慎滴漏或生产废水的排放是造成土壤及地下水石油烃（C₁₀-C₄₀）污染的主要原因。土壤石油烃（C₁₀-C₄₀）超标点位分布见图 4.2-3。

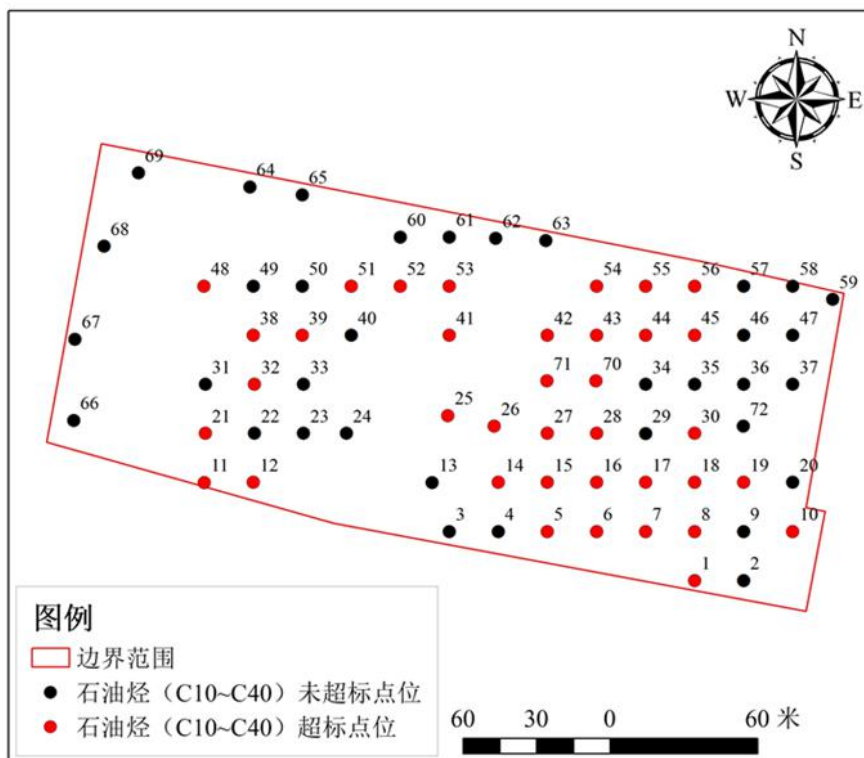


图 4.2-3 土壤石油烃 (C₁₀-C₄₀) 超标点位分布

4.2.1.3 污染物迁移转化机制

1、污染物迁移机制

结合地块历史及现状,该地块污染迁移途径主要包括:人为扰动、大气扩散与沉降、地表径流、地下水迁移、挥发。本地块土壤的污染扩散途径包括:

(1) 大气扩散与沉降: 生产期间及停产拆除时, 由于未做好污染防治措施, 重金属粉尘或半挥发性有机物气体会散发至空气, 随着风力传播并沉降, 且污染物附着在土壤颗粒表面, 表层土壤也会随风力传播, 并将污染物带往周围各个地方, 将对周边敏感目标造成污染。

(2) 地表污染物水平迁移: 在运送原料及工厂拆除设备的时候,

污染物可能通过跑冒滴漏、遗撒、堆放等途径落地或者构筑物和设备拆迁过程中，表面污染物的散落和扩散后随地表径流或粉尘扩散等进行水平迁移，在迁移路径上污染物吸附于土壤介质。

(3) 污染物垂直向下迁移：由于在生产过程中，会出现原料跑冒滴漏、逸撒等途径落地，大气扩散与沉降、地表径流途径会对浅层土壤造成影响，木材防腐厂的原料液态防腐剂，以及木材防腐厂废水的外排，是污染物的主要来源，漏出后位于浅层的污染物直接随岩土孔隙进入地下水，降水入渗加速污染物的下渗，在下渗过程中吸附在土壤介质表面或漂浮（沉底）于地下水水面（或底部），进而影响通过路径的土壤及地下水。本地块岩土体呈现为二元结构，上部为黏土、黏土夹卵（砾）石为弱透水不含水层，下部为中等透水的卵石层，根据详细调查结果可知，污染物含量总体随深度增加而递减，表明污染物在垂向上发生迁移。

(4) 污染物随地下水迁移：据勘察可知地块内岩土体二元结构明显，上部黏土、黏土夹卵（砾）石为弱透水不含水层，下部为中等透水的卵石层，地块内地下水为埋深较浅。地块内的上层滞水赋存于黏性土、黏土夹卵（砾）石中，为弱透水不含水层，并且上层滞水入渗补给地块内的孔隙潜水，孔隙潜水赋存于中等透水的卵石层中。由于木材防腐厂生产经营时间较长，土壤中部分污染物随降雨入渗到上层滞水中，污染物随着上层滞水入渗补给中等透水的孔隙潜土层，随着孔隙潜水分散垂直下渗径流特征，以及分散渗流的排泄方式，对更深层的土壤及地下水造成一定污染。

(5) 挥发：对于土壤和地下水的半挥发性有机物，液态转为气态，挥发至大气或在土壤空气中传播。

2、污染物转化机制

污染物在环境中迁移常伴随着形态的转化，如通过一系列化学反应从低污染的形态转化为高污染的形态，或被分解成低毒甚至无害的化合物。因此，结合地块内关注污染物的特征和地块特点，污染物的转化主要通过以下途径：

(1) 微生物作用：本地块污染物存在有机污染物，在迁移过程中，土壤中的微生物等会将部分污染物分解成水和二氧化碳等无害化合物；或将高分子的有机化合物逐步分解成低分子有机化合物；如：萘在一系列酶的作用下转化为水杨酸，然后根据不同的分解途径代谢为儿茶酚或龙胆酸，最后被彻底分解为二氧化碳和水。

(2) 吸附和解吸作用：污染物进入土壤后，将会与土壤中的矿物质及有机质等成分发生一系列物理、化学和生物反应过程，使部分有机物被固定在土壤中，致使水相中有机污染物浓度下降。吸附作用的反作用是解吸作用，污染物从土壤颗粒表面脱离，再次溶解到地下水或变成水相的过程。这些反应过程的速率与程度，以及吸附/解吸过程的机理取决于有机污染物的分子结构与理化性质以及土壤的特性。例如，粘土易附着砷等污染物，在一定条件下，污染物可解吸进入地下水，从而对地下水造成污染。

4.2.2 关注污染物

4.2.2.1 土壤关注污染物识别

根据该地块土壤污染状况调查结果，并依照《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）的第一类用地筛选值（表 4.2-2），筛选出地块中土壤的关注污染物为重金属（六价铬、砷、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）、石油烃（C₁₀-C₄₀），需要进入下一步风险计算环节。

表 4.2-2 土壤关注污染物筛选表

单位：mg/kg

| 序号 | 污染物类别 | 最大值 | 第一类用地筛选值 (GB36600-2018) / (DB44/T1415-2014) | 是否关注 污染物 |
|----|--|-------------|---|-------------|
| 1 | pH | 10.66 (无量纲) | - | 否 |
| 2 | 氰化物 | 0.18 | 22 | 否 |
| 3 | 铜 | 173 | 2000 | 否 |
| 4 | 锌 | 773 | - | 否 |
| 5 | 镉 | 172 | 20 | 否 |
| 6 | 汞 | 2.860 | 8 | 否 |
| 7 | 六价铬 | 77.8 | 3 | 是 |
| 8 | 砷 | 342 | 40 | 是 |
| 9 | 镍 | 490 | 150 | 是 |
| 10 | 铅 | 144 | 400 | 否 |
| 11 | 五氯酚 | 1580 | 1.1 | 是 |
| 12 | 苯并[a]蒽 | 39.6 | 5.5 | 是 |
| 13 | 苯并[a]芘 | 12.2 | 0.55 | 是 |
| 14 | 苯并[b]荧蒽 | 29.9 | 5.5 | 是 |
| 15 | 二苯并[a, h]蒽 | 20.1 | 0.55 | 是 |
| 16 | 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 27.1 | 5.5 | 是 |
| 17 | 萘 | 61.4 | 25 | 是 |
| 18 | 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) | 123000 | 826 | 是 |

4.2.2.2 地下水关注污染物识别

根据该地块土壤污染状况调查结果，并依照《地下水质量标准》（GB/T14848-2017）的III类标准的限值，石油烃（C₁₀-C₄₀）依照《荷

兰建设部关于土地使用的和环境干预值标准》的标准（表 4.2-3），筛选出地块中地下水的关注污染物为毒理学指标（砷、五氯酚、苯并[a]芘）、石油烃（C₁₀-C₄₀），需要进入下一步风险计算环节。

表 4.2-3 地下水关注污染物筛选表

单位：mg/L

| 序号 | 污染物类别 | 最大值 | Ⅲ类限值 (GB/T14848-2017) | 是否关注 污染物 |
|----|---|---------------|--------------------------|-------------|
| 1 | pH | 8.14 (无量纲) | 6.5≤pH≤8.5 | 否 |
| 2 | 溶解性总固体 | 730 | ≤1000 | 否 |
| 3 | 硫酸盐 | 103 | ≤250 | 否 |
| 4 | 氯化物 | 34 | ≤250 | 否 |
| 5 | 铜 | 0 | ≤1.00 | 否 |
| 6 | 锌 | 0 | ≤1.00 | 否 |
| 7 | 耗氧量(COD _{Mn} 法, 以 O ₂ 计) | 76.8 | ≤3.0 | 否 |
| 8 | 氨氮(以 N 计) | 3.64 | ≤0.5 | 否 |
| 9 | 挥发酚 | 0.0124 | ≤0.002 | 否 |
| 10 | 亚硝酸盐(以 N 计) | 0.352 | ≤1.00 | 否 |
| 11 | 硝酸盐(以 N 计) | 3.08 | ≤20.0 | 否 |
| 12 | 氰化物 | 0.001 | ≤0.05 | 否 |
| 13 | 汞 | 0 | ≤0.001 | 否 |
| 14 | 砷 | 0.0352 | ≤0.01 | 是 |
| 15 | 镉 | 0.0015 | ≤0.005 | 否 |
| 16 | 铬(六价) | 0 | ≤0.05 | 否 |
| 17 | 铅 | 0.0045 | ≤0.01 | 否 |
| 18 | 镍 | 0 | ≤0.02 | 否 |
| 19 | 五氯酚 | 0.194 | ≤0.009 | 是 |
| 20 | 苯 | 0.00261 | ≤0.1 | 否 |

| 序号 | 污染物类别 | 最大值 | Ⅲ类限值 (GB/T14848-2017) | 是否关注 污染物 |
|----|--|-----------------|--------------------------|-------------|
| 21 | 苯并(b)荧蒽 | 0.000247 | ≤0.004 | 否 |
| 22 | 苯并(a)芘 | 0.000068 | ≤ 0.00001 | 是 |
| 23 | 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) ** | 32.1 | 0.6 | 是 |

注: **参考《荷兰建设部关于土地使用和环境干预值标准》

4.2.3 敏感受体

本地块未来规划为商业居住用地，商业居住用地属于《土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）中第一类用地，故本地块采用第一类用地暴露情景进行风险评估。根据本地块未来的使用情况，可分为三个阶段，即地块现有利用阶段、地块修复阶段和地块开发阶段。

1、地块现有利用及地块修复阶段

在这两个阶段，项目管理人员及修复施工人员将是主要的污染受体，地块内及周边在周边工作的群众也会受到影响。土壤暴露途径包括经口摄入、皮肤接触、吸入空气中土壤颗粒物、吸入室外空气中气态污染物等途径。本着保守性原则，地下水暴露途径包括吸入室外空气中来自地下水的气态污染物、吸入室内空气中来自地下水的气态污染物、饮用地下水及皮肤接触地下水。

在地块修复治理阶段，考虑到污染土壤需要逐层开挖，故将深层土壤作为表层土壤进行风险评估。该阶段的受体为成人。

2、地块开发利用阶段

在未来使用阶段，主要以地上建筑为主，土壤暴露途径包括经口

摄入、皮肤接触、吸入空气中土壤颗粒物、吸入室外空气中气态污染物、吸入室内空气中气态污染物途径等途径。本着保守性原则，地下水暴露途径包括吸入室外空气中来自地下水的气态污染物、吸入室内空气中来自地下水的气态污染物、饮用地下水途径、皮肤接触地下水途径。该阶段的受体为成人和儿童。

4.2.4 地块污染概念模型的建立

根据地块内原生产工艺、平面布置和潜在污染识别情况，分析本地块在过去的历史使用过程中可能的污染来源、暴露传输、环境介质归趋分析等，构建地块污染概念模型，并通过图示的方式表征出来，从而为后期的污染分析工作提供明确的技术支撑。通过地块调查工作，收集地块现状和历史资料及相关文件，对本地块的主要原料、产品、生产工艺、污染物排放情况和处理处置方式进行分析，可以确定该地块的污染途径主要有：

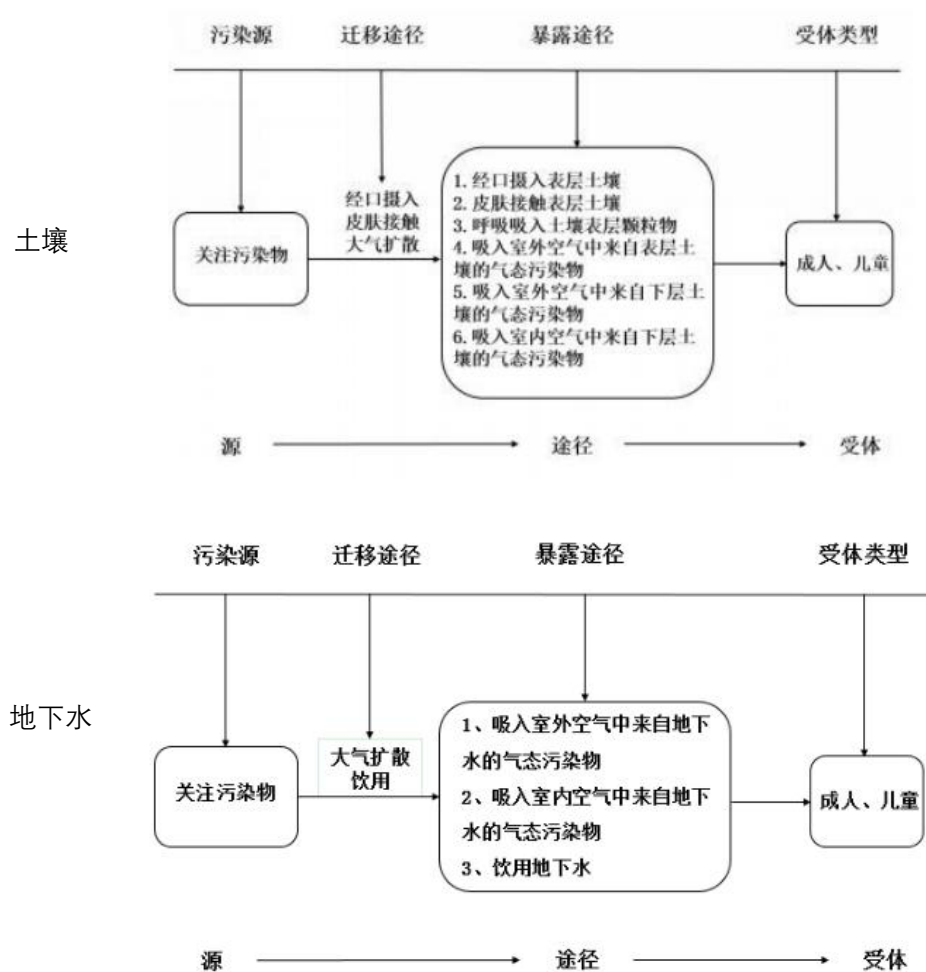
(1) 生产过程中原料及堆存期间的泄漏、使用过程中的遗洒、渗漏、沉降等，污染范围与地块生产布局关系较为密切；

(2) 厂房、设备等在拆迁过程中可能导致原本在车间、硬化地面或沟槽内的污染物进入土壤环境；

(3) 厂房、设备拆除过程中罐体中残留物质的泄漏易造成污染物进入土壤和地下水环境造成污染；另外，设备拆除过程中对地块原有环境扰动大，可能造成污染物的大范围迁移扩散。

在未来开发利用阶段，若地块土壤及地下水未采取修复或风险管控措施，直接按照第一类用地规划进行开发利用，根据污染物的性质、

地块的水文地质情况，本地块未来开发利用阶段的污染整体概念模型示意图见图 4.2-4。



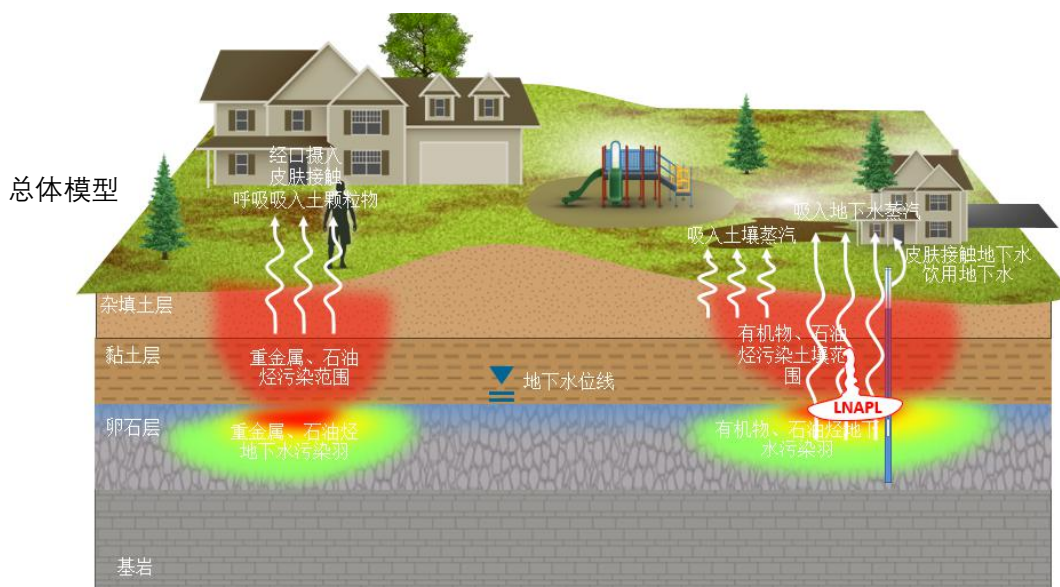


图 4.2-4 地块风险评估概念模型示意图

4.3 暴露评估

4.3.1 暴露情景

暴露情景是指特定土地利用方式下，地块污染物经由不同途径迁移和到达受体人群的情况。根据不同土地利用方式下人群的活动模式，主要有 2 类典型用地方式下的暴露情景，即以住宅用地为代表的“第一类用地”和以工业用地为代表的“第二类用地”的暴露情景。暴露情景主要根据三个方面的因素进行确定。三个方面的因素包括：

- 1、地块内污染源的相关信息，包括关注污染物的浓度、毒性及理化性质等；
- 2、污染的迁移模式及地块的特征信息，包括污染物通过空气、水体及土壤迁移的可能性，地块的土地利用方式，地块内土壤及地下水的特征信息等；

3、地块内敏感人群的相关信息，包括敏感人群组成、地块内的活动时间及频率等。

当地块面积较大、地块内污染物分布不均匀、地块内曾经有明显区块划分等情况时，应根据实际情况按照不同的暴露情景对地块各区域分别进行暴露评估。在确定暴露情景后，根据暴露情景的三个方面的因素，确定该暴露情景下存在的所有暴露途径，并对地块进行暴露评估。

本项目地块未来规划为商业居住用地，商业居住用地属于《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）中第一类用地，故本地块采用第一类用地暴露情景进行风险评估。依据《建设用地土壤污染状况调查风险评估技术导则》（HJ25.3-2019）进行判断，第一类用地方式下，儿童和成人均可能会长时间暴露于地块污染而产生健康危害。对于致癌效应，考虑人群的终生暴露危害，一般根据儿童期和成人期的暴露来评估污染物的终生致癌风险；对于非致癌效应，儿童体重较轻、暴露量较高，一般根据儿童期暴露来评估污染物的非致癌危害效应。

4.3.2 暴露途径

4.3.2.1 土壤暴露途径

根据《建设用地土壤污染状况调查风险评估技术导则》（HJ25.3-2019）可知，对于第一类用地方式下，污染物暴露途径包括经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物、吸入室外空气中

来自表层土壤的气态污染物、吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物、吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 6 种土壤污染暴露途径。

本地块内的土壤污染物主要为重金属（六价铬、砷、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）。

由于本地块未来作为一类商业居住用地，地下设施的情况不明确，无法确定未来的土壤扰动情况，根据采样深度和土壤类型性质以及污染检测分析的结果，本着保守性原则，将本地块概化成 6 个土层（见表 4.3-1），每一层中均出现了污染物超标，根据保守性原则，地块未开挖、扰动土壤时，将第 1 层土壤作为上层土壤暴露途径，下方的第 2 层~第 6 层设为下层土壤暴露途径；地块完成第 1 层开挖后，将第 2 层土壤作为表层土壤暴露途径，第 3 层~第 6 层作为下层土壤暴露途径，依此类推，逐层划分，逐层评价。

表 4.3-1 地块分层情况

| 序号 | 层次 | 土壤深度 (m) | 土壤质地 |
|----|-----|----------|------|
| 1 | 第一层 | 0~2 | 杂填土层 |
| 2 | 第二层 | 2~5 | 黏土层 |
| 3 | 第三层 | 5~10 | 黏土层 |
| 4 | 第四层 | 10~15 | 黏土层 |
| 5 | 第五层 | 15~20 | 卵石层 |
| 6 | 第六层 | 20~26 | 卵石层 |

4.3.2.2 地下水暴露途径

根据《建设用土壤污染状况调查风险评估技术导则》（HJ25.3-2019）及《地下水污染健康风险评估工作指南》（2019年9月）可知，地下水暴露途径包括吸入室外空气中来自地下水的气态污染物、吸入室内空气中来自地下水的气态污染物、饮用地下水、皮肤接触地下水共4种地下水污染暴露途径。

地下水污染物主要为毒理学指标（砷、五氯酚、苯并[a]芘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）。

在地块未来采取修复措施或进行建设期间，需进行土壤基坑开挖，由于地块地下水埋深较浅，并且该地块邻近III类地表水的柳江，考虑到本地块与柳江之间可能存在水力联系，并且未来规划为居住用地，考虑居民自建井饮用地下水，故本着保守性原则，地下水仍需考虑饮用地下水、皮肤接触地下水暴露途径。

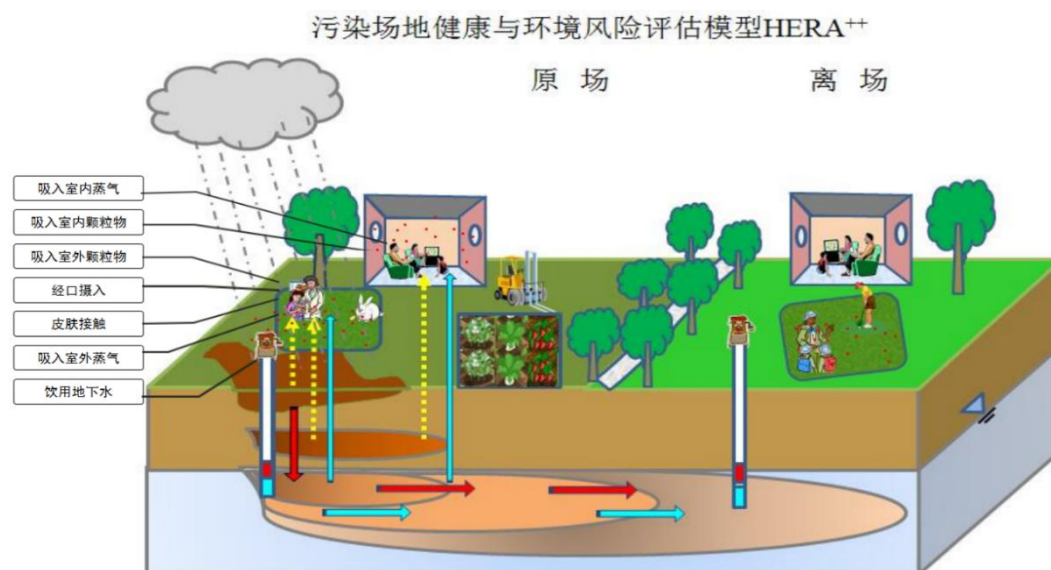
综合上述分析，并结合污染物的理化性质，本报告选取的暴露途径详见表4.3-2。

表 4.3-2 污染物暴露途径表

| 污染源 | 污染物 | | | | | | | | | | | 污染暴露途径 | 暴露受体 |
|------|-----|---|---|-----|--------|--------|---------|------------|-----------------|---|--|---------------------|-------|
| | 六价铬 | 砷 | 镍 | 五氯酚 | 苯并[a]蒽 | 苯并[a]芘 | 苯并[b]荧蒽 | 二苯并[a, h]蒽 | 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 萘 | 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) | | |
| 表层土壤 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 经口摄入土壤 | 成人和儿童 |
| | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 皮肤接触土壤 | |
| | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 吸入土壤颗粒物 | |
| | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | |
| 下层土壤 | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | |
| | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | |
| 地下水 | | | | √ | | √ | | | | | | 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物 | |
| | | | | √ | | √ | | | | | | 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物 | |
| | | √ | | √ | | √ | | | | | √ | 饮用地下水 | |
| | | √ | | √ | | √ | | | | | √ | 皮肤接触地下水 | |

4.3.3 地块暴露概念模型

根据地块污染源、污染物迁移途径、敏感受体以及暴露途径分析，建立本地块的“污染源-途径-受体”概念模型。地块土壤和地下水的暴露概念模型示意图见图 4.3-1。



注：图中黄色箭头表示污染物气相迁移方向，红色箭头表示污染物的水相迁移方向，蓝色箭头表示地下水的迁移方向。

图 4.3-1 地块暴露概念模型示意图

4.3.4 暴露评估模型

本地块未来利用规划属于第一类用地类型，地块按第一类用地暴露评估模型如下：

4.3.4.1 经口摄入土壤途径

对于单一污染物的致癌效应，考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害，经口摄入土壤途径的土壤暴露量采用公式（A.1）计算：

$$OISER_{ca} = \frac{\left(\frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c}{BW_c} + \frac{OSIR_a \times ED_a \times EF_a}{BW_a} \right) \times ABS_o}{AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (A.1)$$

式中：

$OISER_{ca}$ —经口摄入土壤暴露量（致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

$OSIR_c$ —儿童每日摄入土壤量， $mg \cdot d^{-1}$ ；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

$OSIR_a$ —成人每日摄入土壤量， $mg \cdot d^{-1}$ ；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

ED_c —儿童暴露期， a ；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

ED_a —成人暴露期， a ；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

EF_c —儿童暴露频率， $d \cdot a^{-1}$ ；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

EF_a —成人暴露频率， $d \cdot a^{-1}$ ；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

BW_c —儿童体重， kg ，推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

BW_a —成人体重， kg ，推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

ABS_o —经口摄入吸收效率因子，无量纲；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

AT_{ca} —致癌效应平均时间， d ；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1。

对于单一污染物的非致癌效应,考虑人群在儿童期暴露受到的危害,经口摄入土壤途径的土壤暴露量采用公式(A.2)计算:

$$OISER_{nc} = \frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c \times ABS_o}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (A.2)$$

式中:

$OISER_{nc}$ 一经口摄入土壤暴露量(非致癌效应), $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1}$ 体重 $\cdot d^{-1}$;

AT_{nc} 一非致癌效应平均时间, d ; 推荐值见(HJ25.3-2019)附录 G 表 G1;

公式(A.2)中 $OSIR_c$ 、 ED_c 、 EF_c 、 ABS_o 和 BW_c 的参数含义见公式(A.1)。

4.3.4.2 皮肤接触土壤途径

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害,皮肤接触土壤途径土壤暴露量采用公式(A.3)计算:

$$DCSER_{ca} = \frac{SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} + \frac{SAE_a \times SSAR_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times ABS_d}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (A.3)$$

式中:

$DCSER_{ca}$ 一皮肤接触途径的土壤暴露量(致癌效应), $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1}$ 体重 $\cdot d^{-1}$;

SAE_c 一儿童暴露皮肤表面积, cm^2 ;

SAE_a 一成人暴露皮肤表面积, cm^2 ;

$SSAR_c$ 一儿童皮肤表面土壤粘附系数, $mg \cdot cm^{-2}$;

$SSAR_a$ —成人皮肤表面土壤粘附系数, $mg \cdot cm^{-2}$;

ABS_d —皮肤接触吸收效率因子, 无量纲; 推荐值见 (HJ25.3-2019) 附录 B 表 B.1;

E_v —每日皮肤接触事件频率, $次 \cdot d^{-1}$; 推荐值见 (HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

公式 (A.3) 中 EF_c 、 ED_c 、 BW_c 、 AT_{ca} 、 EF_a 、 ED_a 和 BW_a 的参数含义见公式 (A.1), SAE_c 和 SAE_a 的参数值分别采用公式 (A.4) 和公式 (A.5) 计算:

$$SAE_c = 239 \times H_c^{0.417} \times BW_c^{0.517} \times SER_c \quad (A.4)$$

$$SAE_a = 239 \times H_a^{0.417} \times BW_a^{0.517} \times SER_a \quad (A.5)$$

式中:

H_c —儿童平均身高, cm , 推荐值见 (HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

H_a —成人平均身高, cm ; 推荐值见 (HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

SER_c —儿童暴露皮肤所占面积比, 无量纲, 推荐值见 (HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

SER_a —成人暴露皮肤所占面积比, 无量纲; 推荐值见 (HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1。

公式 (A.4) 和公式 (A.5) 中 BW_c 和 BW_a 的参数含义见公式 (A.1)。

对于单一污染物的非致癌效应,考虑人群在儿童期暴露受到的危害,皮肤接触土壤途径对应的土壤暴露量采用公式(A.6)计算:

$$DCSER_{nc} = \frac{SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (A.6)$$

式中:

$DCSER_{nc}$ —皮肤接触的土壤暴露量(非致癌效应), $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1}$ 体重 $\cdot d^{-1}$;

公式(A.6)中 SAE_c 、 $SSAR_c$ 、 E_v 和 ABS_d 的参数含义见公式(A.3), EF_c 、 ED_c 和 BW_c 的参数含义见公式(A.1), AT_{nc} 的参数含义见公式(A.2)。

4.3.4.3 吸入土壤颗粒物途径

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害,吸入土壤颗粒物途径对应的土壤暴露量采用公式(A.7)计算:

$$PISER_{ca} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (fspo \times EFO_c + fspl \times EFL_c)}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} + \frac{PM_{10} \times DAIR_a \times ED_a \times PIAF \times (fspo \times EFO_a + fspl \times EFL_a)}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (A.7)$$

式中:

$PISER_{ca}$ —吸入土壤颗粒物的土壤暴露量(致癌效应), $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1}$ 体重 $\cdot d^{-1}$;

PM_{10} —空气中可吸入浮颗粒物含量, $mg \cdot m^{-3}$; 推荐值见(HJ25.3-2019)附录G表G.1;

$DAIR_a$ —成人每日空气呼吸量, $m^3 \cdot d^{-1}$; 推荐值见(HJ25.3-2019)

附录 G 表 G.1;

$DAIR_c$ 一儿童每日空气呼吸量, $m^3 \cdot d^{-1}$; 推荐值见(HJ25.3-2019)

附录 G 表 G.1;

$PIAF$ 一吸入土壤颗粒物在体内滞留比例, 无量纲; 推荐值见(HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

$fspi$ 一室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例, 无量纲; 推荐值见(HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

$fspo$ 一室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例, 无量纲; 推荐值见(HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

EFI_a 一成人的室内暴露频率, $d \cdot a^{-1}$; 推荐值见(HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

EFI_c 一儿童的室内暴露频率, $d \cdot a^{-1}$; 推荐值见(HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

EFO_a 一成人的室外暴露频率, $d \cdot a^{-1}$; 推荐值见(HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

EFO_c 一儿童的室外暴露频率, $d \cdot a^{-1}$; 推荐值见(HJ25.3-2019) 附录 G 表 G.1;

公式(A.7)中 ED_c 、 BW_c 、 ED_a 、 BW_a 和 AT_{ca} 的参数含义见公式(A.1)。

对于单一污染物的非致癌效应, 考虑人群在儿童期暴露受到的危害, 吸入土壤颗粒物途径对应的土壤暴露量采用公式(A.8)计算:

$$PISER_{nc} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (fspo \times EFO_c + fspi \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (A.8)$$

式中：

$PISER_{nc}$ —吸入土壤颗粒物的土壤暴露量（非致癌效应）， kg 土壤· kg^{-1} 体重· d^{-1} 。

公式（A.8）中 PM_{10} 、 $DAIR_c$ 、 $fspo$ 、 $fspi$ 、 EFO_c 、 EFI_c 和 $PIAF$ 的参数含义见公式（A.7）， ED_c 、 BW_c 、 ED_a 、 BW_a 的参数含义见公式（A.1）， AT_{nc} 的参数含义见公式（A.2）。

4.3.4.4 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径

对于单一污染物的致癌效应，考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害，吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径对应的土壤暴露量，采用公式（A.9）计算：

$$IOVER_{cal} = VF_{suroa} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right) \quad (A.9)$$

式中：

$IOVER_{cal}$ —吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量（致癌效应） kg 土壤· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

VF_{suroa} —表层土壤中污染物扩散进入室外空气的挥发因子， $kg \cdot m^{-3}$ ；根据（HJ25.3-2019）附录 F 公式（F.17）计算。

公式（A.9）中， $DAIR_c$ 、 $DAIR_a$ 、 EFO_c 和 EFO_a 的参数含义见公式（A.7）， ED_c 、 BW_c 、 ED_a 、 BW_a 、 AT_{ca} 的参数含义见公式（A.1）。

对于单一污染物的非致癌效应，考虑人群在儿童期暴露受到的危害，吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径对应的土壤

暴露量，采用公式 (A.10) 计算：

$$\text{IOVER}_{\text{ncl}} = \text{VF}_{\text{suroa}} \times \frac{\text{DAIR}_c \times \text{EFO}_c \times \text{ED}_c}{\text{BW}_c \times \text{AT}_{\text{nc}}} \quad (\text{A.10})$$

式中：

$\text{IOVER}_{\text{ncl}}$ —吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量（非致癌效应）， $\text{kg 土壤} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$ ；

公式 (A.10) 中， VF_{suroa} 的参数含义见公式 (A.9)， DAIR_c 和 EFO_c 的参数含义见公式 (A.7)， AT_{nc} 的含义见公式 (A.2)， ED_c 和 BW_c 的参数含义见公式 (A.1)。

4.3.4.5 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物途径

对于单一污染物的致癌效应，考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害，吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物途径对应的土壤暴露量，采用公式 (A.11) 计算：

$$\text{IOVER}_{\text{ca2}} = \text{VF}_{\text{suboa}} \times \left(\frac{\text{DAIR}_c \times \text{EFO}_c \times \text{ED}_c}{\text{BW}_c \times \text{AT}_{\text{ca}}} + \frac{\text{DAIR}_a \times \text{EFO}_a \times \text{ED}_a}{\text{BW}_a \times \text{AT}_{\text{ca}}} \right) \quad (\text{A.11})$$

式中：

$\text{IOVER}_{\text{ca2}}$ —吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量（致癌效应）， $\text{kg 土壤} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$ ；

VF_{suboa} —下层土壤中污染物扩散进入室外空气的挥发因子， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；根据 (HJ25.3-2019) 附录 F 公式 (F.20) 计算。

公式 (A.11) 中， DAIR_c 、 DAIR_a 、 EFO_c 和 EFO_a 的参数含义见公式 (A.7)， ED_c 、 BW_c 、 ED_a 、 BW_a 、 AT_{ca} 的参数含义见公式 (A.1)。

对于单一污染物的非致癌效应，考虑人群在儿童期暴露受到的

危害,吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物途径对应的土壤暴露量,采用公式(A.12)计算:

$$I\text{VOER}_{\text{nc}2} = \text{VF}_{\text{suboa}} \times \frac{\text{DAIR}_{\text{c}} \times \text{EFO}_{\text{c}} \times \text{ED}_{\text{c}}}{\text{BW}_{\text{c}} \times \text{AT}_{\text{nc}}} \quad (\text{A.12})$$

式中:

$I\text{OVER}_{\text{nc}2}$ —吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量(非致癌效应), $\text{kg 土壤} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$;

公式(A.12)中 VF_{suboa} 的参数含义见公式(A.11), DAIR_{c} 和 EFO_{c} 的参数含义见公式(A.7), AT_{nc} 的含义见公式(A.2), ED_{c} 和 BW_{c} 的参数含义见公式(A.1)。

4.3.4.6 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害,吸入室外空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量,采用公式(A.13)计算:

$$I\text{OVER}_{\text{ca}3} = \text{VF}_{\text{gwoa}} \times \left(\frac{\text{DAIR}_{\text{c}} \times \text{EFO}_{\text{c}} \times \text{ED}_{\text{c}}}{\text{BW}_{\text{c}} \times \text{AT}_{\text{ca}}} + \frac{\text{DAIR}_{\text{a}} \times \text{EFO}_{\text{a}} \times \text{ED}_{\text{a}}}{\text{BW}_{\text{a}} \times \text{AT}_{\text{ca}}} \right) \quad (\text{A.13})$$

式中:

$I\text{OVER}_{\text{ca}3}$ —吸入室外空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量(致癌效应), $\text{L 地下水} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$;

VF_{gwoa} —地下水中污染物扩散进入室外空气的挥发因子, $\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$; 根据(HJ25.3-2019)附录F公式(F.21)计算。

公式(A.13)中, DAIR_{c} 、 DAIR_{a} 、 EFO_{c} 和参数含义见公式(A.7), ED_{c} 、 BW_{c} 、 ED_{a} 、 BW_{a} 、 AT_{ca} 的参数含义见公式(A.1)。

对于单一污染物的非致癌效应,考虑人群在儿童期暴露受到的危害,吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径对应的地下水暴露量,采用公式(A.14)计算:

$$IOVER_{nc3} = VF_{gwoa} \times \frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} \quad (A.14)$$

式中:

$IOVER_{nc3}$ —吸入室外空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量(非致癌效应), L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} 。

公式(A.14)中, VF_{gwoa} 参数含义见(A.13), $DAIR_c$ 、 EFO_c 的参数含义见公式(A.7), AT_{nc} 含义见公式(A.2), ED_c 、 BW_c 的参数含义见公式(A.1)。

4.3.4.7 吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物途径

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害,吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物途径对应的土壤暴露量,采用公式(A.15)计算:

$$IOVER_{ca1} = VF_{subia} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right) \quad (A.15)$$

式中:

$IOVER_{ca1}$ —吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量(致癌效应), kg 土壤· kg^{-1} 体重· d^{-1} ;

VF_{subia} —下层土壤中污染物扩散进入室内空气的挥发因子, $kg \cdot m^{-3}$; 根据(HJ25.3-2019)附录F公式(F.26)计算。

公式(A.15)中, EFO_c 、 EFO_a 、 EFl_c 、 EFl_a 、 $DAIR_c$ 和 $DAIR_a$

的参数含义见公式 (A.7), ED_c 、 BW_c 、 ED_a 、 BW_a 、 AT_{ca} 的参数含义见公式 (A.1)。

对于单一污染物的非致癌效应,考虑人群在儿童期暴露受到的危害,吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物途径对应的土壤暴露量,采用公式 (A.16) 计算:

$$IOVER_{nc1} = VF_{subia} \times \frac{DAIR_c \times EFI_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}} \quad (A.16)$$

式中:

$IOVER_{nc1}$ —吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量 (非致癌效应), $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$;

公式 (A.16) 中, VF_{subia} 的参数含义分别见公式 (A.15), $DAIR_c$ 、 EFI_c 的参数含义见公式 (A.7), AT_{nc} 的参数含义见公式 (A.2), ED_c 和 BW_c 的参数含义见公式 (A.1)。

4.3.4.8 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物途径

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害,吸入室内空气中来自地下水的气态污染物途径对应的地下水暴露量,采用公式 (A.17) 计算:

$$IIVER_{ca2} = VF_{gwia} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFI_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFI_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right) \quad (A.17)$$

$IIVER_{ca2}$ —吸入室内空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量 (致癌效应), $L \text{ 地下水} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$;

VF_{gwia} —地下水中污染物扩散进入室内空气的挥发因子, $L \cdot m^{-3}$; 根据 (HJ25.3-2019) 附录 F 公式 (F.29) 计算。

公式 (A.17) 中, EFO_c 、 EFO_a 、 EFI_c 、 EFI_a 、 $DAIR_c$ 和 $DAIR_a$ 的参数含义见公式 (A.7), ED_c 、 BW_c 、 ED_a 、 BW_a 、 AT_{ca} 的参数含义见公式 (A.1)。

对于单一污染物的非致癌效应,考虑人群在儿童期暴露受到的危害,吸入室内空气中来自地下水的气态污染物途径对应的地下水暴露量,采用公式 (A.18) 计算:

$$IIVER_{nc2} = VF_{gwia} \times \frac{DAIR_c \times EFI_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}} \quad (A.18)$$

式中:

$IIVER_{nc2}$ —吸入室内空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量 (非致癌效应), L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} 。

公式 (A.18) 中, VF_{gwia} 的参数含义见公式 (A.17), $DAIR_c$ 、 EFI_c 的参数含义见公式 (A.7), AT_{nc} 的参数含义见公式 (A.2), ED_c 、 BW_c 的参数含义见公式 (A.1)。

4.3.4.9 饮用地下水途径

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害,饮用地下水途径的地下水暴露量,采用公式 (A.19) 计算:

$$CGWER_{ca} = \frac{\left(\frac{GWCR_c \times ED_c \times EF_c}{BW_c} + \frac{GWCR_a \times ED_a \times EF_a}{BW_a} \right)}{AT_{ca}} \quad (A.19)$$

式中:

$CGWER_{ca}$ —饮用受影响地下水对应的地下水的暴露量 (致癌)

效应), L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} ;

GWCR_c —儿童每日摄入地下水量, $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$;

GWCR_a —成人每日摄入地下水量, $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$;

公式 (A.19) 中, EF_c 、 EF_a 、 ED_c 、 ED_a 、 BW_c 和 BW_a 、 AT_{ca} 的参数含义见公式 (A.1), AT_{nc} 的参数含义见公式 (A.2)。

对于单一污染物的非致癌效应,考虑人群在儿童期暴露受到的危害,饮用地下水途径对应的暴露量,采用公式 (A.20) 计算:

$$\text{CGWER}_{nc} = \frac{\text{GWCR}_c \times \text{ED}_c \times \text{EF}_c}{\text{BW}_c \times \text{AT}_{nc}} \quad (\text{A.20})$$

式中:

CGWER_{nc} —饮用受影响地下水对应的地下水的暴露量 (非致癌效应), L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} ;

公式 (A.20) 中, GWCR_c 的参数见公式 (A.19), EF_c 、 ED_c 、和 BW_c 的参数含义见公式 (A.1)、 AT_{nc} 参数含义见公式 (A.2)。

4.3.4.10 皮肤接触地下水途径

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害,皮肤接触地下水途径地下水暴露量采用下式计算:

$$\text{DGWER}_{ca} = \frac{\text{SAE}_c \times \text{EF}_c \times \text{ED}_c \times E_v \times \text{DA}_{ec}}{\text{BW}_c \times \text{AT}_{ca}} \times 10^{-6} + \frac{\text{SAE}_a \times \text{EF}_a \times \text{ED}_a \times E_v \times \text{DA}_{ea}}{\text{BW}_a \times \text{AT}_{ca}} \times 10^{-6}$$

式中:

DGWER_{ca} —皮肤接触途径的地下水暴露量 (致癌效应), mg 污染物· kg^{-1} 体重· d^{-1} ;

SAE_c—儿童暴露皮肤表面积，cm²；

SAE_a—成人暴露皮肤表面积，cm²；

SAR_c—儿童皮肤表面土壤粘附系数，mg·cm⁻²；

SAR_a—成人皮肤表面土壤粘附系数，mg·cm⁻²；

ABS_d—皮肤接触吸收效率因子，无量纲；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 B 表 B.1；

E_v—每日皮肤接触事件频率，次·d⁻¹；推荐值见（HJ25.3-2019）附录 G 表 G.1；

公式中 EF_c、ED_c、BW_c、AT_{ca}、EF_a、ED_a 和 BW_a 的参数含义见公式上文，SAE_c 和 SAE_a 的参数值分别采用如下公式计算：

$$SAE_c = 239 \times H_c^{0.417} \times BW_c^{0.517} \times SER_c$$

$$SAE_a = 239 \times H_a^{0.417} \times BW_a^{0.517} \times SER_a$$

式中：

H_c—儿童平均身高，cm；

H_a—成人平均身高，cm；

SER_c—儿童暴露皮肤所占面积比，无量纲；

SER_a—成人暴露皮肤所占面积比，无量纲；

对于单一污染物的非致癌效应，考虑人群在儿童期暴露受到的危害，皮肤接触地下水途径对应的地下水暴露量采用如下公式计算：

$$DGWER_{nc} = \frac{SAE_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times DA_{ec}}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

式中：

DGWER_{nc}—皮肤接触的地下水暴露量（非致癌效应），kg 土

壤·kg⁻¹·体重·d⁻¹。其余参数含义见上文。

无机污染物吸收剂量采用如下公式计算：

$$DA_{ec} = K_p \times C_{gw} \times t_c \times 10^{-3}$$

$$DA_{ea} = K_p \times C_{gw} \times t_a \times 10^{-3}$$

式中：

K_p —皮肤渗透系数 (cm/h)；

t_c —儿童次经皮肤接触时间 (h)；

C_{gw} —地下水中污染物浓度 (mg/L)；

t_a —成人次经皮肤接触时间 (h)。

4.3.5 受体暴露参数

本地块的敏感受体主要为未来居住于此处的成人及儿童,计算人体健康风险时使用的受体暴露参数主要来源于《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019),详见表 4.3-3。

表 4.3-3 受体暴露参数表

| 符号 | 含义 | 单位 | 取值 | 数据来源 |
|------|----------|-------------------|-------|-------------|
| EDa | 成人暴露期 | a | 24 | HJ25.3-2019 |
| EDc | 儿童暴露期 | a | 6 | HJ25.3-2019 |
| EFa | 成人暴露频率 | d·a ⁻¹ | 350 | HJ25.3-2019 |
| EFc | 儿童暴露频率 | d·a ⁻¹ | 350 | HJ25.3-2019 |
| EFiA | 成人室内暴露频率 | d·a ⁻¹ | 262.5 | HJ25.3-2019 |
| EFic | 儿童室内暴露频率 | d·a ⁻¹ | 262.5 | HJ25.3-2019 |
| EFOa | 成人室外暴露频率 | d·a ⁻¹ | 87.5 | HJ25.3-2019 |
| EFOc | 儿童室外暴露频率 | d·a ⁻¹ | 87.5 | HJ25.3-2019 |
| BWa | 成人平均体重 | kg | 61.8 | HJ25.3-2019 |

| 符号 | 含义 | 单位 | 取值 | 数据来源 |
|-------|---|---------------------------------|--------|-------------|
| BWc | 儿童平均体重 | kg | 19.2 | HJ25.3-2019 |
| Ha | 成人平均身高 | cm | 161.5 | HJ25.3-2019 |
| Hc | 儿童平均身高 | cm | 113.15 | HJ25.3-2019 |
| DAIRa | 成人每日空气呼吸量 | m ³ ·d ⁻¹ | 14.5 | HJ25.3-2019 |
| DAIRc | 儿童每日空气呼吸量 | m ³ ·d ⁻¹ | 7.5 | HJ25.3-2019 |
| GWCRa | 成人每日饮用水量 | L·d ⁻¹ | 1 | HJ25.3-2019 |
| GWCRc | 儿童每日饮用水量 | L·d ⁻¹ | 0.7 | HJ25.3-2019 |
| OSIRa | 成人每日摄入土壤量 | mg·d ⁻¹ | 100 | HJ25.3-2019 |
| OSIRc | 儿童每日摄入土壤量 | mg·d ⁻¹ | 200 | HJ25.3-2019 |
| Ev | 每日皮肤接触事件频率 | 次·d ⁻¹ | 1 | HJ25.3-2019 |
| fspi | 室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例 | 无量纲 | 0.8 | HJ25.3-2019 |
| fspo | 室外空气中来自土壤的颗粒物比例 | 无量纲 | 0.5 | HJ25.3-2019 |
| SAF | 暴露于土壤的参考剂量分配比例 (SVOCs、重金属、石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀)) | 无量纲 | 0.5 | HJ25.3-2019 |
| WAF | 暴露于地下水的参考剂量分配比例 (SVOCs、重金属、石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀)) | 无量纲 | 0.5 | HJ25.3-2019 |
| SERa | 成人暴露皮肤所占体表面积比 | 无量纲 | 0.32 | HJ25.3-2019 |
| SERc | 儿童暴露皮肤所占体表面积比 | 无量纲 | 0.36 | HJ25.3-2019 |
| SSARa | 成人皮肤表面土壤粘附系数 | mg·cm ⁻² | 0.07 | HJ25.3-2019 |
| SSARc | 儿童皮肤表面土壤粘附系数 | mg·cm ⁻² | 0.2 | HJ25.3-2019 |

| 符号 | 含义 | 单位 | 取值 | 数据来源 |
|----------------|-----------------------|-----|------------------|---------------------|
| PIAF | 吸入土壤颗粒物在体内滞留比例 | 无量纲 | 0.75 | HJ25.3-2019 |
| ABSo | 经口摄入吸收因子 | 无量纲 | 1 | HJ25.3-2019 |
| ACR | 单一污染物可接受致癌风险 | 无量纲 | 10 ⁻⁶ | HJ25.3-2019 |
| AHQ | 单一污染物可接受危害熵 | 无量纲 | 1 | HJ25.3-2019 |
| ATca | 致癌效应平均时间 | d | 27740 | HJ25.3-2019 |
| ATnc | 非致癌效应平均时间 | d | 2190 | HJ25.3-2019 |
| t _a | 成人次经皮肤接触的时间 | h | 0.5 | 地下水污染健康风评工作指南（附录 G） |
| t _c | 儿童次经皮肤接触的时间 | h | 0.5 | 地下水污染健康风评工作指南（附录 G） |
| SAF | 暴露于土壤的参考剂量分配比例（VOCs） | 无量纲 | 0.33 | HJ25.3-2019 |
| WAF | 暴露于地下水的参考剂量分配比例（VOCs） | 无量纲 | 0.33 | HJ25.3-2019 |

4.3.6 地块特征参数

地块特征参数见下表。

表 4.3-4 地块特征参数表

| 污染区参数 | | | | |
|-------|-----------|----|------|------|
| 符号 | 含义 | 单位 | 取值 | 数据来源 |
| d | 表层污染土壤层厚度 | cm | 500 | 实测平均 |
| LS | 下层污染土壤层埋深 | cm | 500 | 实测平均 |
| dsub | 下层污染土壤层厚度 | cm | 2100 | 实测平均 |

| | | | | |
|--------------|------------------|---------------------------|------------|--------------------|
| A | 污染源区面积 | cm ² | 1.6E+07 | HJ25.3-2019 |
| Lgw | 地下水埋深 | cm | 277 | 实测平均 |
| 土壤参数 | | | | |
| 符号 | 含义 | 单位 | 取值 | 来源 |
| fom | 土壤有机质含量 | g·kg ⁻¹ | 10.77 | 实测平均 |
| ρb | <u>土壤容重</u> | <u>kg·dm⁻³</u> | <u>1.5</u> | <u>HJ25.3-2019</u> |
| Pws | 土壤含水率 | kg·kg ⁻¹ | 0.254 | 实测平均 |
| ρs | 土壤颗粒密度 | kg·dm ⁻³ | 2.75 | 实测平均 |
| PM10 | 空气中可吸入颗粒物含量 | mg·m ⁻³ | 0.119 | HJ25.3-2019 |
| Uair | 混合区大气流速风速 | cm·s ⁻¹ | 200 | HJ25.3-2019 |
| δair | 混合区高度 | cm | 200 | HJ25.3-2019 |
| W | 污染源区宽度 | cm | 4000 | HJ25.3-2019 |
| hcap | 土壤地下水交界处毛管层厚度 | cm | 5 | HJ25.3-2019 |
| hv | 非饱和土层厚度 | cm | 295 | HJ25.3-2019 |
| θacap | 毛细管层孔隙空气体积比 | 无量纲 | 0.038 | HJ25.3-2019 |
| θwcap | 毛细管层孔隙水体积比 | 无量纲 | 0.342 | HJ25.3-2019 |
| Ugw | 地下水达西 (Darcy) 速率 | cm·a ⁻¹ | 2500 | HJ25.3-2019 |
| δgw | 地下水混合区厚度 | cm | 200 | HJ25.3-2019 |
| I | 土壤中水的入渗速率 | cm·a ⁻¹ | 50.56 | 实测平均 |
| 建筑物参数 | | | | |
| 符号 | 含义 | 单位 | 取值 | 来源 |
| θack | 地基裂隙中空气体积比 | 无量纲 | 0.26 | HJ25.3-2019 |
| θwack | 地基裂隙中水体积比 | 无量纲 | 0.12 | HJ25.3-2019 |
| Lck | 室内地基厚度 | cm | 35 | HJ25.3-2019 |

| | | | | |
|-------------|--------------------|------------------------------------|----------|-------------|
| LB | 室内空间体积与气态污染物入渗面积之比 | cm | 220 | HJ25.3-2019 |
| ER | 室内空气交换速率 | 次·d ⁻¹ | 12 | HJ25.3-2019 |
| η | 地基和墙体裂隙表面积所占面积 | 无量纲 | 0.0005 | HJ25.3-2019 |
| τ | 气态污染物入侵持续时间 | a | 30 | HJ25.3-2019 |
| dP | 室内室外气压差 | g·cm ⁻¹ ·s ² | 0 | HJ25.3-2019 |
| Kv | 土壤透性系数 | cm ² | 1.00E-08 | HJ25.3-2019 |
| Zcrack k | 室内地面到地板底部厚度 | cm | 35 | HJ25.3-2019 |
| Xcrack k | 室内地板周长 | cm | 3400 | HJ25.3-2019 |
| Ab | 室内地板面积 | cm ² | 700000 | HJ25.3-2019 |

经过查阅《USEPA, Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC, 2004》可知，水中砷的皮肤渗透系数为 $1.8 \times 10^{-3} \text{cm/h}$ 、五氯酚的皮肤渗透系数为 $3.9 \times 10^{-1} \text{cm/h}$ 、苯并[a]芘的皮肤渗透系数为 $7.0 \times 10^{-1} \text{cm/h}$ 。

4.3.7 暴露量计算结果

基于上文计算的污染物暴露量如下见表 4.3-5~表 4.3-6。

表 4.3-5 致癌效应暴露量计算结果

| 序号 | 指标 | 致癌 | | | | | | | | | |
|----|---------|---|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | | 土壤 (kg 土壤·kg ⁻¹ 体重·d ⁻¹) | | | | | 地下水 (L 地下水·kg ⁻¹ 体重·d ⁻¹) | | | | |
| | | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物 | 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物 | 饮用地下水 | 皮肤接触地下水 |
| | | OISER _{ca} | DCSER _{ca} | PISER _{ca} | IOVER _{ca1} | IOVER _{ca2} | IIVER _{ca1} | IOVER _{ca3} | IIVER _{ca2} | CGWER _{ca} | DGWER _{ca} |
| 1 | 六价铬 | 1.28E-06 | 1.23E-07 | 6.51E-09 | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 砷 | 1.28E-06 | 1.23E-07 | 6.51E-09 | - | - | - | - | - | 7.66E-03 | 1.19E-12 |
| 3 | 镍 | 1.28E-06 | | 6.51E-09 | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 五氯酚 | 1.28E-06 | 1.02E-06 | 6.51E-09 | 7.05E-08 | 3.26E-09 | 4.40E-10 | 1.31E-08 | 1.76E-09 | 7.66E-03 | 1.42E-09 |
| 5 | 苯并[a]蒽 | 1.28E-06 | 5.32E-07 | 6.51E-09 | 3.88E-09 | 1.49E-11 | 3.27E-11 | - | - | - | - |
| 6 | 苯并[a]芘 | 1.28E-06 | 5.32E-07 | 6.51E-09 | 1.93E-09 | 2.44E-12 | 9.72E-13 | 9.08E-09 | 3.62E-09 | 7.66E-03 | 8.94E-13 |
| 7 | 苯并[b]荧蒽 | 1.28E-06 | 5.32E-07 | 6.51E-09 | 1.91E-09 | 3.59E-12 | 1.24E-12 | - | - | - | - |
| 8 | 二苯并[a, | 1.28E-06 | 5.32E-07 | 6.51E-09 | 1.03E-09 | 1.05E-12 | 1.49E-13 | - | - | - | - |

| 序号 | 指标 | 致癌 | | | | | | | | | |
|----|--|---|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | | 土壤 (kg 土壤·kg ⁻¹ ·体重 ⁻¹ ·d ⁻¹) | | | | | 地下水 (L 地下水·kg ⁻¹ ·体重 ⁻¹ ·d ⁻¹) | | | | |
| | | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物 | 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物 | 饮用地下水 | 皮肤接触地下水 |
| | | OISER _{ca} | DCSER _{ca} | PISER _{ca} | IOVER _{ca1} | IOVER _{ca2} | IIVER _{ca1} | IOVER _{ca3} | IIVER _{ca2} | CGWER _{ca} | DGWER _{ca} |
| | h]葱 | | | | | | | | | | |
| 9 | 茚并[1,2,3-c]芘 | 1.28E-06 | 5.32E-07 | 6.51E-09 | 1.03E-09 | 1.04E-12 | 2.30E-13 | - | - | - | - |
| 10 | 萘 | 1.28E-06 | 5.32E-07 | 6.51E-09 | 5.67E-08 | 3.16E-09 | 2.73E-07 | - | - | - | - |
| 11 | 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) | 1.28E-06 | 2.04E-06 | 6.51E-09 | - | - | - | - | - | 7.66E-03 | - |

表 4.3-6 非致癌效应暴露量计算结果

| 序号 | 指标 | 非致癌 | | | | | | | | | |
|----------|---------|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|---------------------|---------------------|----------|----------|
| | | 土壤 (kg 土壤·kg ⁻¹ ·体重·d ⁻¹) | | | | | 地下水 (L 地下水·kg ⁻¹ ·体重·d ⁻¹) | | | | |
| | | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物 | 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物 | 饮用地下水 | 皮肤接触地下水 |
| OISE Rnc | DCSERnc | PISERnc | IOVERnc ₁ | IOVERnc ₂ | IIVERnc ₁ | IOVERnc ₃ | IIVERnc ₂ | CGWER _{nc} | DGWER _{nc} | | |
| 1 | 六价铬 | 9.99E-06 | 8.53E-07 | 2.42E-08 | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 砷 | 9.99E-06 | 8.53E-07 | 2.42E-08 | - | - | - | - | - | 3.50E-02 | 4.51E-09 |
| 3 | 镍 | 9.99E-06 | | 2.42E-08 | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 五氯酚 | 9.99E-06 | 7.11E-06 | 2.42E-08 | 2.63E-07 | 1.21E-08 | 1.64E-09 | 4.87E-08 | 6.56E-09 | 3.50E-02 | 5.38E-06 |
| 5 | 苯并[a]蒽 | 9.99E-06 | 3.70E-06 | 2.42E-08 | 1.45E-08 | 5.53E-11 | 1.22E-10 | - | - | - | - |
| 6 | 苯并[a]芘 | 9.99E-06 | 3.70E-06 | 2.42E-08 | 7.18E-09 | 9.09E-12 | 3.62E-12 | 3.38E-08 | 1.35E-08 | 3.50E-02 | 3.39E-09 |
| 7 | 苯并[b]荧蒽 | 9.99E-06 | 3.70E-06 | 2.42E-08 | 7.11E-09 | 1.34E-11 | 4.60E-12 | - | - | - | - |
| 8 | 二苯并[a, | 9.99E-06 | 3.70E-06 | 2.42E-08 | 3.85E-09 | 3.93E-12 | 5.54E-13 | - | - | - | - |

| 序号 | 指标 | 非致癌 | | | | | | | | | |
|----------|---|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|---------------------|---------------------|----------|---------|
| | | 土壤 (kg 土壤·kg ⁻¹ ·体重·d ⁻¹) | | | | | 地下水 (L 地下水·kg ⁻¹ ·体重·d ⁻¹) | | | | |
| | | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物 | 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物 | 饮用地下水 | 皮肤接触地下水 |
| OISE Rnc | DCSERnc | PISERnc | IOVERnc ₁ | IOVERnc ₂ | IIVERnc ₁ | IOVERnc ₃ | IIVERnc ₂ | CGWER _{nc} | DGWER _{nc} | | |
| | h]蒽 | -06 | | | | | | | | | |
| 9 | 蒽并[1, 2, 3-c d]芘 | 9.99E-06 | 3.70E-06 | 2.42E-08 | 3.82E-09 | 3.86E-12 | 8.58E-13 | - | - | - | - |
| 10 | 萘 | 9.99E-06 | 3.70E-06 | 2.42E-08 | 2.11E-07 | 1.18E-08 | 1.02E-06 | - | - | - | - |
| 11 | 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 9.99E-06 | 1.42E-05 | 2.42E-08 | - | - | - | - | - | 3.50E-02 | - |

4.4 毒性评估

在危害识别的工作基础上,分析关注污染物对人体健康的危害效应。根据关注污染物毒理学性质的不同将分别考虑致癌效应和非致癌效应,确定与关注污染物相关的毒性参数,包括参考剂量、参考浓度、致癌斜率因子和单位致癌因子等。

4.4.1 关注污染物的危害

本地块土壤关注污染物为重金属(六价铬、砷、镍)、半挥发性有机物(五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、萘)、石油烃(C₁₀-C₄₀);地下水关注污染物为毒理学指标(砷、五氯酚、苯并[a]芘)、石油烃(C₁₀-C₄₀)。

(1) 六价铬

铬是一种毒性很大的重金属,容易进入人体细胞,对肝、肾等内脏器官和DNA造成损伤,在人体内蓄积具有致癌性并可能诱发基因突变。

六价铬对人体主要产生慢性毒害,它可以通过消化道、呼吸道、皮肤和黏膜侵入人体,在体内主要积聚在肝、肾和内分泌腺中。通过呼吸道进入则易积存在肺部。六价铬具有强氧化作用,所以慢性中毒往往以局部损害开始逐渐发展到不可救药。经呼吸道侵入人体时,开始侵害上呼吸道,引起鼻炎、咽炎和喉炎、支气管炎。六价铬过量摄入会造成中毒,引起肾脏、肝脏、神经系统和血液的广泛病变,严重结果导致死亡。长期接触、空气污染或接触铬的灰尘,

可引起皮肤过敏和溃疡，鼻腔的炎症、坏死，甚至肺癌。经口摄入，可引起胃肠道损伤，循环障碍、肾衰竭。

(2) 砷

砷属于重金属，一般在自然界中以氧化物、氯化物或者硫化物的无机化合物形式存在。大部分的无机砷化合物不具备挥发性，且无色无味。砷在自然界中无法被降解，只会通过与其他物质，例如氧气，发生反应或者微生物作用改变其价态生成各类化合物。无机砷化合物在土壤中的迁移能力，受PH值，氧化还原电位，生化反应，以及其与土壤颗粒之间的吸附作用影响。砷易于吸附在黏土物质、有机质以及铁、铝、锰的氢氧化物沉淀上。砷属于剧毒性物质，虽然各种无机砷化合物的毒性有所不同，但差异并不明显，只有砷化氢的毒性远远高于其他的无机砷化合物。无机砷化合物可以通过呼吸、直接摄入、皮肤接触三种主要途径进入体内。呼吸摄入会引发肺癌、呼吸道炎症、皮肤炎症及神经系统紊乱等病状。皮肤接触一般会引发局部皮肤炎症及湿疹。直接摄入会引起皮肤角质化，同时还会引起末梢血管病变，例如发绀病，坏疽等。

(3) 镍

镍作为一种具有生物学作用的元素，镍能激活或抑制一系列的酶而发生其毒性作用。动物吃了镍盐可引起口腔炎、牙龈炎和急性胃肠炎，并对心肌和肝脏有损害。

试验证明，镍及其化合物对人皮肤黏膜和呼吸道有刺激作用，可引起皮肤炎和气管炎，甚至发生肺炎。镍具有积存作用，在肾、

脾、肝中积存最多，可诱发鼻咽癌和肺癌。吸入金属镍的粉尘易导致呼吸器官障碍，肺泡肥大。镍盐的毒性强，特别是羰基镍有非常强的毒性，因为它容易挥发，又易溶于脂肪组织，很容易进入细胞膜内，而且与蛋白质及核酸的结合力强。镍盐，特别是羰基镍由呼吸道进入体内，首先伤害肺病，引起肺水肿、急性肺炎，并诱发呼吸系统癌，镍作业工人中，呼吸道癌发病率高于一般人群，据统计，肺癌发生率高出 2.6 倍到 16 倍，鼻腔癌高出 37~196 倍。

(4) 五氯酚

五氯酚是毒性物质，颜色为无色到白色之间，分解可能产生氯化氢、一氧化碳和其他刺激的毒性气体。五氯酚可经由呼吸、皮肤接触、误食侵入人体，导致人员严重受到伤害或者死亡。五氯酚中毒是过量接触导致的，动物半致死剂量（LD50）为 146mg/kg（大鼠，吞食）。重度中毒主要影响为高热、大汗、极度疲乏无力、烦躁不安、甚至昏迷、抽搐，并且引起心、肝、肾损害。轻度中毒主要影响为头晕、头痛、多汗、发热、烦渴、心悸、气急并可伴有恶心、呕吐、腹痛等。

(5) 苯并[a]蒽

苯并[a]蒽是一种四环结构的多环芳烃类物质，不完全燃烧的副产物，与其它的多环芳烃以混合物的形式存在。2017 年 10 月 27 日，世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中，苯并[a]蒽为 2B 类致癌物。

苯并[a]蒽可通过食入、吸入、皮肤接触等多种方式对人体产

生危害。急性毒性：LD₁₀:10 毫克/公斤（小鼠-静脉）。致癌性：小鼠伤寒沙门氏菌 TA100、T98、+S9，阳性；小鼠皮下最小中毒剂量 2mg/kg，阳性；小鼠非肠道最小中毒剂量 8mg/kg，阳性；小鼠种植最小中毒剂量 80mg/kg，阳性；小鼠经皮最小中毒剂量 240mg/kg（5 周），阳性。致突变性：鼠伤寒沙门氏菌 50μg/plate；DNA 损伤：大肠杆菌 10μmol/L。人类长期接触苯并[a]蒽可能引发肺癌、胃癌及消化道癌的发病率。

（6）苯并[a]蒽

苯并[a]蒽是一种由 5 个苯环构成的多环芳烃，沸点 310~312°C，熔点 178°C，不溶于水，微溶于乙醇、甲醇，溶于苯、甲苯、二甲苯、氯仿、乙醚等有机溶剂。

侵入途径：吸入、食入、经皮吸收。

属中毒类。急性毒性：LD₅₀500 mg/kg（小鼠腹腔）；50mg/kg（大鼠皮下）；LDLo9mg/kg（青蛙肾）。

致癌性：TDL₀15mg/kg（大鼠经口）；TDL₀120mg/kg（小鼠经皮）。

致畸性：1000mg/kg 妊娠大鼠经口，胎儿致畸。

致突变性：1 次 40mg/kg，田鼠经腹膜，染色体试验多种变化，小鼠，遗传表型试验多种变化。昆虫，遗传表型试验多种变化。微生物，遗传表型试验多种变化。人体细胞培养 DNA 多种变化。

苯并[a]蒽的毒性具有长期和隐匿的特性，当人体接触或摄入苯并[a]蒽后即便当时没有不适应，但会在体内蓄积，在表现出症

状之前有较长的潜伏期。长期呼吸含有苯并[a]芘的空气，饮用或者食用含有苯并[a]芘的水和食物，会造成慢性中毒，可能引发皮肤癌、肺癌、直肠癌、胃癌、膀胱癌等疾病。

(7) 苯并[b]荧蒽

苯并[b]荧蒽在环境中通常以多环芳烃的一种组分形式存在，是物质不完全燃烧的产物。可通过呼吸道及皮肤进入到体内。研究表明，苯并[b]荧蒽在体内具有多种毒性作用，如：血液毒性、生殖和发育毒性及免疫毒性，在低剂量时具有致癌性和致畸性。人们长期处于苯并[b]荧蒽污染的环境中，可引起急性或慢性伤害，常见的症状有日光性皮炎、痤疮型皮炎、毛囊炎及疣状赘生物等。长期或反复接触苯并[b]荧蒽，可能引起人类遗传损伤。

(8) 二苯并[a, h]蒽

二苯并[a, h]蒽的熔点 266~267°C，常压下的沸点 524°C，溶于石油醚、丙酮、乙酸、苯、甲苯、二甲苯和油类，微溶于乙醇和乙醚。2017 年 10 月 27 日，世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中，二苯并[a, h]蒽为 2A 类致癌物。二苯并[a, h]蒽可以通过食入、吸入、皮肤接触进入体内。长期或反复接触，可能导致对光过敏，可能引发癌症等疾病。

(9) 茚并[1, 2, 3-cd]芘

茚并[1, 2, 3-cd]芘的熔点 162.5~164°C，沸点 536°C，水中溶解度 0.062mg/L，溶于有机溶剂。2017 年 10 月 27 日，世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中，茚并[1, 2, 3-cd]芘为

2B 类致癌物。茚并[1, 2, 3-cd]芘可通过呼吸道、皮肤进入到体内，对人体产生一定的危害。茚并[1, 2, 3-cd]芘致癌性较弱，但是长期接触亦可能引发癌症等疾病。

(10) 萘

萘是一种稠环芳香烃，无色，有毒，熔点 80.5℃，沸点 217.9℃，折射率 1.58212，易挥发。2017 年 10 月 27 日，世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中，萘为 2B 类致癌物。萘可通过吸入、食入、皮肤接触的方式进入体内，对人体造成危害。可能造成严重的皮肤病、贫血、肝肾损害等。

毒性属于低毒类，急性毒性：LD50：490mg/kg（大鼠经口）；人经口 5g，引发白内障及肾损害；人经口 5~15g，致死；儿童经口 2.0g/2 日，致死；慢性毒性：兔经口 1g/（kg·天），3 天，见晶状体浑浊，20 天后形成白内障，小鼠吸入 60~500mg/m³，5 个月，条件反射紊乱，呼吸系统损害。

致突变性：仓鼠卵巢 15mg/L，姊妹染色单体交换。

致癌性：大鼠皮下最低中毒剂量（TDLo）：3500mg/kg（12 周，间歇），疑致肿瘤剂，致淋巴瘤，包括何杰金氏病，致子宫肌瘤。小鼠吸入最低中毒浓度（TDLo）：30ppm（6 小时）（2 处，间歇），致肿瘤、致肺癌。

萘急性中毒表现为头痛、恶心、呕吐、食欲减退、腰痛、尿频、尿中出现蛋白及红白细胞，易出现神经炎和视网膜炎。重者可发生中毒性脑病和肝损害。口服中毒者易引发溶血和肝、肾损害，甚至

发生急性肾功能衰竭和肝坏死等疾病；慢性中毒表现为头痛、乏力、恶心、呕吐和血液系统损害，也可引起白内障、视神经炎和视网膜病变及皮炎等症状。

(11) 石油烃 (C₁₀-C₄₀)

石油烃 (C₁₀-C₄₀) 是多种烃类和少量其他有机物的混合物，其可通过吸入、食入，经皮肤进入体内，对人体产生危害。长期接触石油烃 (C₁₀-C₄₀)，可以影响中枢神经系统，易造成头痛、头晕及神经障碍等症状。

4.4.2 污染物毒性效应分析

4.4.2.1 非致癌物质毒性效应

(1) 阈值

一般认为化学物质的非致癌毒性存在阈值现象，即低于某一剂量，不会产生可观察到的不良反应。非致癌毒性评价的主要内容即如何估计化学物质的致毒阈值，并根据阈值确定并计算非致癌风险的标准建议值，如参考剂量，参考浓度和其它健康建议值等。

(2) 参考值

参考值 (Reference Value, RfV) 定义为根据暴露期和暴露途径估计的预期不会对人群 (包括敏感亚人群) 一生中产生不良健康效应的暴露剂量。非致癌风险的参考值包括美国环保部提出的参考剂量/参考浓度 (RfD/RfC)，加拿大环境局的可容忍摄入量 (TDI) 和世界卫生组织的可接受日摄入量 (ADI) 等，均指人体暴露于化

学物质一定时间不会产生不良反应的日摄入量。分析人体摄取化学物质的方式，参考剂量分为经口摄取方式的参考剂量（RfD_o），呼吸摄取方式的参考浓度（RfC）和皮肤接触方式的参考剂量（RfD_d）。

对于非致癌物质，假定其在高浓度条件下都会产生不良的健康效应；然而，当剂量非常低时，不存在或观察不到典型的不良效应。因此，定性化学物质的非致癌效应时，关键参数是阈值剂量。阈值指在此剂量下不良的效应开始出现。低于阈值剂量被认为是安全的，而高于阈值剂量可能会导致不良的健康效应。

非致癌效应毒性参数包括呼吸吸入参考浓度（RfC）、呼吸吸入参考剂量（RfD_i）、经口摄入参考剂量（RfD_o）和皮肤接触参考剂量（RfD_d）。污染物非致癌效应毒性参数 RfD_o 和 RfD_d 推荐值见表 4.4-1。

呼吸吸入参考剂量（RfD_i），根据表 4.4-1 中的呼吸吸入参考浓度（RfC）外推计算得到。皮肤接触参考剂量（RfD_d），根据表 4.4-1 中的经口摄入参考剂量（RfD_o）外推计算获得。

呼吸吸入参考剂量（RfD_i）和皮肤接触参考剂量（RfD_d）的计算过程分别如下：

$$RfD_i = \frac{RfC \times DAIR_a}{BW_a}$$

$$RfD_d = RfD_o \times ABS_{gi}$$

式中：

RfD_i—呼吸吸入参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

RfC—呼吸吸入参考浓度， $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；

DAIR_a—成人每日空气呼吸量， $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ；

BW_a—成人体重，kg；

RfD_o—经口摄入参考剂量， $\text{mg 污染物}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ 体重}\cdot\text{d}^{-1}$ ；

RfD_d—皮肤接触参考剂量， $\text{mg 污染物}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ 体重}\cdot\text{d}^{-1}$ ；

ABS_{gi}—消化道吸收效率因子，无量纲。

4.4.2.2 致癌物质毒性效应

致癌物质分为基因致癌物（Genotoxic Chemical）和非基因致癌物（Non-genotoxic Chemical）。基因致癌物为直接 DNA 作用物，其致癌方式包括致癌物或其代谢产物直接与 DNA 共价结合或直接改变染色体结构或数量。非基因致癌物即非直接 DNA 作用物，这类致癌物主要通过杀死细胞，诱导再生细胞增殖和通过与细胞感受器发生作用引起器官增生等继发方式致癌，包括细胞毒害物和致细胞分裂物。

（1）致癌性分类

化学物质的致癌性分类以人体流行病学和动物实验研究为依据，根据所掌握的致癌证据的充分程度和数据的质量与可信度，参考其它证据进行。目前，采用较广的分类方法包括世界卫生组织和美国钟山县相关部门的分类方法。WHO 将化学物的致癌性分为四类，第 1 类为确定的人类致癌物；第 2 类为由于研究程度不够，目前还不能确定其人类致癌类别的化学物质；第四类为可能对人体不具有致癌性的物质。US.EPA 将物质的致癌性分为 A, B, C, D 和

E类五类。A类物质为确定的人类致癌物，表示有足够的流行病学研究来证实接触剂量与致癌的因果关系；B类为很可能的人类致癌物，包括由流行病学研究得到人类致癌证据从“足够”到“不足”的物质，又分类B1和B2两类，其中B1类为有限的人类证据具有致癌性的物质，B2类为动物实验证据充分而人类证据不充分或无证据的物质；C类为可能的人类致癌物；D类为尚不能进行人类致癌分类的组分；E类为有对人类无致癌证据的组分。

(2) 致癌风险表示法

目前，致癌风险表示法主要有三种：斜率因子（Slope Factor, SF），单位风险和 RfD/RfC。对于基因致癌物，一般认为致癌物的单个分子既可以诱发癌症，在剂量条件下，基因致癌物的剂量-反应关系呈线性变化趋势，可采用斜率因子计算致癌风险。单位风险表示人体摄取单位浓度化学物质的风险，由呼吸途径产生的单位风险为：斜率因子 \times 日呼吸量 \div 平均体重；由饮水途径产生的单位风险为：斜率因子 \times 日饮水量 \div 平均体重。对于非基因致癌物，其剂量-反应关系常常表现为非线性，可采用 RfF/RfC 计算致癌风险。

致癌效应毒性参数包括呼吸吸入单位致癌因子（IUR）、呼吸吸入致癌斜率因子（SF_i）、经口摄入致癌斜率因子（SF_o）和皮肤接触致癌斜率因子（SF_d）。污染物的致癌效应毒性参数 SF_o和 IUR 的推荐值见表 4.4-1。

呼吸吸入致癌斜率因子（SF_i），根据表 4.4-1 中的呼吸吸入单位致癌因子（IUR）外推计算获得；皮肤接触致癌斜率系数（SF_d），

根据表 4.4-1 中的经口摄入致癌斜率系数 (SF_o) 外推计算获得。

用于外推获得 SF_i 和 SF_d 的推荐模式分别如下：

$$SF_i = \frac{IUR \times BW_a}{DAIR_a}$$

$$SF_d = \frac{SF_o}{ABS_{gi}}$$

式中：

SF_i —呼吸吸入致癌斜率因子, $(\text{mg 污染物} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$;

IUR —呼吸吸入单位致癌因子, $\text{m}^3 \cdot \text{mg}^{-1}$;

$DAIR_a$ —成人每日空气呼吸量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;

BW_a —成人体重, kg ;

SF_d —皮肤接触致癌斜率因子, $(\text{mg 污染物} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$;

SF_o —经口摄入致癌斜率因子, $(\text{mg 污染物} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$;

ABS_{gi} —消化道吸收效率因子, 无量纲。

4.4.3 关注污染物毒性参数

根据《建设用地土壤污染状况调查风险评估技术导则》(HJ25.3-2019), 地块关注污染物的毒性参数见表 4.4-1, 关注污染物理化性质参数见表 4.4-2。

表 4.4-1 污染物的毒性参数

| 污染物 | 经口摄入 致癌斜率 因子 SFo | 数据 来源 | 呼吸吸 入单位 致癌因 子 IUR | 数据 来源 | 经口摄入 参考剂量 RfDo | 数据 来源 | 呼吸吸入 参考浓度 RfC | 数据 来源 | 消化道吸 收因子 ABSgi | 数据 来源 | 皮肤吸 收因子 ABSd | 数据 来源 |
|--|--|----------|---------------------------------|----------|--|----------|-------------------------------|----------|----------------------|----------|--------------------|----------|
| | ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) ⁻¹ | | $\text{m}^3\cdot\text{mg}^{-1}$ | | $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ | | $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ | | 无量纲 | | 无量纲 | |
| 六价铬 | 0.5 | C | 2.3 | I | 0.0031 | T | 0.00022 | T | 0.025 | RSL | / | / |
| 砷 | 1.5 | I | 0.15 | T | 0.0003 | I | 1.50E-05 | RSL | 1 | RSL | 0.03 | RSL |
| 镍 | / | / | 0.17 | T | 2.00E-02 | I | 0.00023 | T | 0.04 | RSL | / | / |
| 五氯酚 | 4.00E-01 | I | 5.10E-03 | RSL | 5.00E-03 | I | / | / | 1 | RSL | 0.25 | RSL |
| 苯并[a]蒽 | 1.00E-01 | RSL | 6.00E-02 | RSL | / | / | / | / | 1 | RSL | 0.13 | RSL |
| 苯并[a]芘 | 1.00E+00 | I | 6.00E-01 | RSL | 3.00E-04 | I | 2.00E-06 | I | 1 | RSL | 0.13 | RSL |
| 苯并[b]荧蒽 | 1.00E-01 | RSL | 6.00E-02 | RSL | / | / | / | / | 1 | RSL | 0.13 | RSL |
| 二苯并[a, h]蒽 | 1.00E+00 | RSL | 6.00E-01 | RSL | / | / | / | / | 1 | RSL | 0.13 | RSL |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 1.00E-01 | RSL | 6.00E-02 | RSL | / | / | / | / | 1 | RSL | 0.13 | RSL |
| 萘 | 0.12 | C | 3.40E-02 | RSL | 2.00E-02 | I | 3.00E-03 | I | 1 | RSL | 0.13 | RSL |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | / | / | / | / | 4.0E-02 | HKC | / | / | 1 | HIKC | 0.5 | HKC |

注：I代表数据来自“美国环保局综合风险信息系统（USEPA）”，RSL代表数据来自美国环保局“区域筛选值总表”污染物毒性数据（2018年5月发布）。

表 4.4-2 关注污染物的理化性质参数

| 污染物 | 亨利常数 H' | 数据 来源 | 空气中扩 散系数 Da | 数据 来源 | 水中扩散 系数 Dw | 数据 来源 | 土壤-有机碳分 配系数 Koc | 数据 来源 | 水中溶解 度 S | 数据 来源 |
|--|------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------------|----------|
| | (无量纲) | | cm ² /s | | cm ² /s | | cm ³ /g | | mg/L | |
| 六价铬 | / | / | / | / | / | / | / | / | 1.69E+06 | RSL |
| 砷 | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| 镍 | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| 五氯酚 | 1.00E-06 | EPI | 2.95E-02 | WATER9 | 8.01E-06 | WATER9 | 5.92E+02 | EPI | 1.40E+01 | EPI |
| 苯并[a]蒽 | 4.91E-04 | EPI | 2.61E-02 | WATER9 | 6.75E-06 | WATER9 | 1.77E+05 | EPI | 9.40E-03 | EPI |
| 苯并[a]芘 | 1.87E-05 | EPI | 4.76E-02 | WATER9 | 5.56E-06 | WATER9 | 5.87E+05 | EPI | 1.62E-03 | EPI |
| 苯并[b]荧 蒽 | 2.69E-05 | EPI | 4.76E-02 | WATER9 | 5.56E-06 | WATER9 | 5.99E+05 | EPI | 1.50E-03 | EPI |
| 二苯并 [a, h]蒽 | 5.76E-06 | EPI | 4.46E-02 | WATER9 | 5.21E-06 | WATER9 | 1.91E+06 | EPI | 2.49E-03 | EPI |
| 茚并[1, 2, 3-cd] 芘 | 1.42E-05 | RSL | 4.48E-02 | WATER9 | 5.23E-06 | WATER9 | 1.95E+06 | RSL | 1.90E-04 | RSL |
| 萘 | 1.80E-02 | EPI | 6.05E-02 | WATER9 | 8.38E-06 | WATER9 | 1.54E+03 | EPI | 3.10E+01 | EPI |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |

注：EPI 代表美国环保局“化学品性质参数估算工具包”数据；WATER9 代表美国环保局“废水处理模型”数据；RSL 代表数据来自美国环保局“区域筛选值总表”污染物毒性数据（2018 年 5 月发布）。

4.5 风险表征

在暴露评估和毒性评估的工作基础上,采用风险评估模型计算单一污染物经单一暴露途径的风险值、单一污染物经所有暴露途径的风险值、所有污染物经所有暴露途径的风险值。风险表征计算的风险值包括单一污染物的致癌风险值、所有关注污染物的总致癌风险值、单一污染物的危害商(非致癌风险值)和多个关注污染物的危害指数(非致癌风险值)。

4.5.1 风险表征模型

4.5.1.1 土壤中单一污染物的致癌风险

(1) 经口摄入土壤中单一污染物的致癌效应

$$CR_{ois} = OISER_{ca} \times C_{sur} \times SF_o$$

式中:

CR_{ois} —经口摄入土壤致癌效应,无量纲;

C_{sur} —表层土壤中污染物浓度, mg/kg;

SF_o —经口摄入吸收致癌斜率因子, $(\text{mg 污染物} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$ 。

(2) 皮肤接触土壤中单一污染物的致癌效应

$$CR_{dcs} = DCSER_{ca} \times C_{sur} \times SF_d$$

式中:

CR_{dcs} —皮肤接触土壤的致癌效应,无量纲;

C_{sur} —表层土壤中污染物浓度, mg/kg;

SF_d—皮肤接触吸收致癌斜率因子, (mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹。

(3) 吸入受污染土壤颗粒物中单一污染物的致癌效应

$$CR_{pis} = PISER_{ca} \times C_{sur} \times SF_i$$

式中:

CR_{pis}—吸入受污染土壤颗粒物的致癌效应, 无量纲;

PISER_{ca}—吸入土壤颗粒物的土壤暴露量 (致癌效应), kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹;

C_{sur}—表层土壤中污染物浓度, mg/kg;

SF_i—呼吸吸入吸收致癌斜率因子, (mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹。

(4) 吸入室外空气中来自表层土壤单一污染物蒸汽的致癌效应

$$CR_{iovl} = IOVER_{ca1} \times C_{sur} \times SF_i$$

式中:

CR_{iovl}—吸入室外空气中来自表层土壤污染物蒸汽的致癌效应, 无量纲;

IOVER_{ca1}—吸入室外空气来自表层土壤的气态污染物途径暴露量 (致癌效应), kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹;

C_{sur}—表层土壤中污染物浓度, mg/kg;

SF_i—呼吸吸入吸收致癌斜率因子, (mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹。

(5) 吸入室外空气中来自下层土壤单一污染物蒸汽的致癌效应

$$CR_{iovl2} = IOVER_{ca2} \times C_{sub} \times SF_i$$

式中:

CR_{iov2} —吸入室外空气中来自下层土壤污染物蒸汽的致癌效应，无量纲；

$IOver_{ca2}$ —吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物途径暴露量（致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

C_{sub} —下层土壤中污染物浓度， mg/kg ；

SF_i —呼吸吸入吸收致癌斜率因子， $(mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(6) 吸入室内空气中来自下层土壤单一污染物蒸汽的致癌效应

$$CR_{iiv1} = IIVER_{ca1} \times C_{sub} \times SF_i$$

式中：

CR_{iiv1} —吸入室内空气中来自下层土壤污染物蒸汽的致癌效应，无量纲；

$IIVER_{ca1}$ —吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物途径暴露量（致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

C_{sub} —下层土壤中污染物浓度， mg/kg ；

SF_i —呼吸吸入致癌斜率因子， $(mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(7) 地块土壤中单一污染物经所有暴露途径的总致癌效应

$$CR_i = \sum CR_n$$

式中， CR_i 为第*i*种污染物所有暴露途径的致癌效应，无量纲； CR_n 为单一暴露途径的致癌效应。

4.5.1.2 土壤中单一污染物非致癌效应

(1) 经口摄入土壤中单一污染物的非致癌效应

$$HQ_{ois} = \frac{OISER_{nc} \times C_{sur}}{RfD_o \times SAF}$$

式中：

HQ_{ois} 一经口摄入土壤途径的非致癌效应；

$OISER_{nc}$ 一经口摄入土壤暴露量（非致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

RfD_o 一呼吸吸入参考浓度， $(mg/m^3)^{-1}$ ；

C_{sur} 一表层土壤中污染物浓度， mg/kg ；

SAF 一暴露于土壤的参考剂量分配系数。

(2) 皮肤接触污染土壤中单一污染物的非致癌效应

$$HQ_{dcs} = \frac{DCSER_{nc} \times C_{sur}}{RfD_d \times SAF}$$

式中：

HQ_{dcs} —皮肤接触土壤途径的非致癌效应；

$DCSER_{nc}$ —皮肤接触土壤暴露量（非致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

RfD_d —皮肤接触参考剂量， $(mg/m^3)^{-1}$ ；

C_{sur} —表层土壤中污染物浓度， mg/kg ；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数。

(3) 吸入污染土壤颗粒物中单一污染物的非致癌效应

$$HQ_{pis} = \frac{PISER_{nc} \times C_{sur}}{RfD_i \times SAF}$$

式中：

HQ_{pis} —经吸入土壤颗粒物途径的非致癌效应；

$PISER_{nc}$ —经吸入土壤颗粒物土壤暴露量（非致癌效应）， kg 土壤· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

RfD_i —呼吸吸入参考剂量， $(mg/m^3)^{-1}$ ；

C_{sur} —表层土壤中污染物浓度， mg/kg ；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数。

(4) 吸入室外空气中来自表层土壤单一污染物蒸汽的非致癌效应

$$HQ_{ivo1} = \frac{IOVER_{nc1} \times C_{sur}}{RfD_i \times SAF}$$

式中：

HQ_{ivo1} —吸入室外空气中单一污染物蒸汽的非致癌效应，无量纲；

$IOVER_{nc1}$ —吸入室外空气来自表层土壤的气态污染物途径暴露量（非致癌效应）， kg 土壤· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

C_{sur} —表层土壤中污染物浓度， mg/kg ；

RfD_i —呼吸吸入参考剂量， $(mg/m^3)^{-1}$ ；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数；

(5) 吸入室外空气中来自下层土壤单一污染物蒸汽的致癌效应

$$HQ_{iov2} = \frac{IOVER_{nc2} \times C_{sub}}{RfD_i \times SAF}$$

式中：

HQ_{iov2} —吸入室外空气中来自下层土壤污染物蒸汽的非致癌效应，无量纲；

$IOVER_{nc2}$ —吸入室外空气来自下层土壤的气态污染物途径暴露

量（非致癌效应）， $\text{kg 土壤} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$ ；

C_{sub} —下层土壤中污染物浓度， mg/kg ；

RfD_i —呼吸吸入参考剂量， $(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$ ；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数

(6) 吸入室内空气中来自下层土壤单一污染物蒸汽的致癌效应

$$\text{HQ}_{\text{iiv1}} = \frac{\text{IIVER}_{\text{nc1}} \times C_{\text{sub}}}{\text{RfD}_i \times \text{SAF}}$$

式中：

HQ_{iiv1} —吸入室内空气中来自下层土壤污染物蒸汽的非致癌效应，无量纲；

$\text{IIVER}_{\text{nc1}}$ —吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物途径暴露量（非致癌效应）， $\text{kg 土壤} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$ ；

C_{sub} —下层土壤中污染物浓度， mg/kg ；

RfD_i —呼吸吸入参考剂量， $(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$ ；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数

(7) 单一污染物所有途径的非致癌效应

$$\text{HQ}_i = \sum \text{HQ}_n$$

式中， HQ_i 为第*i*种污染物所有暴露途径的非致癌效应，无量纲； HQ_n 为单一暴露途径的非致癌效应。

4.5.1.3 地下水中单一污染物的致癌效应

(1) 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径的致癌效应

吸入室外空气中来自地下水的气态污染物的致癌效应采用下式

计算：

$$CR_{iov3} = IOVER_{ca3} \times C_{gw} \times SF_i$$

式中：

CR_{iov3} —吸入室外空气中来自地下水的气态污染物的致癌效应，无量纲；

$IOVER_{ca3}$ —吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径暴露量（致癌效应）， L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

C_{gw} —地下水中污染物浓度， mg/L ；

SF_i —呼吸吸入吸收致癌斜率因子， $(mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(2) 吸入室内空气来自地下水的气态污染物途径的致癌效应

吸入室内空气来自地下水的气态污染物的致癌效应采用下式计算：

$$CR_{iiv2} = IIVER_{ca2} \times C_{gw} \times SF_i$$

式中：

CR_{iiv2} —吸入室内空气来自地下水的气态污染物的致癌效应，无量纲；

$IIVER_{ca2}$ —吸入室内空气来自地下水的气态污染物途径暴露量（致癌效应）， L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

C_{gw} —地下水中污染物浓度， mg/L ；

SF_i —呼吸吸入吸收致癌斜率因子， $(mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(3) 饮用地下水中单一污染物的致癌效应

$$CR_{cgw} = CGWER_{ca} \times C_{gw} \times SF_0$$

式中：

CR_{cgw} —饮用地下水途径的致癌效应，无量纲；

$CGWER_{ca}$ —饮用受影响地下水对应的地下水的暴露量（致癌效应）， L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

C_{gw} —地下水中污染物浓度， mg/L ；

SF_o —经口摄入吸收致癌斜率因子， $(mg$ 污染物· kg^{-1} 体重· $d^{-1})^{-1}$ 。

(4) 皮肤接触地下水中单一污染物的致癌效应

$$CR_{dgw} = DGWER_{ca} \times SF_d$$

式中：

CR_{dgw} —皮肤接触地下水暴露单一污染物地下水的致癌风险，无量纲。

(5) 地块地下水中单一污染物经所有暴露途径的总致癌效应

$$CR_n = \sum CR_x$$

式中， CR_n 为污染物所有暴露途径的致癌效应，无量纲； CR_x 为单一暴露途径的致癌效应。

4.5.1.4 地下水中单一污染物非致癌效应

(1) 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径的非致癌效应

吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径的非致癌效应采用下式计算：

$$HQ_{iov3} = \frac{IOVER_{nc3} \times C_{gw}}{RfD_i \times WAF}$$

式中：

HQ_{iov3} —吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径的非致癌效应，无量纲；

$IOVER_{nc3}$ —吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径暴露量（非致癌效应）， L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

C_{gw} —地下水中污染物浓度， mg/L ；

RfD_i —呼吸吸入参考剂量， $(mg/m^3)^{-1}$ ；

WAF —暴露于地下水的参考剂量分配比例，无量纲。

(2) 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物途径的非致癌效应

吸入室内空气中来自地下水的气态污染物途径的非致癌效应采用下式计算：

$$HQ_{iiv2} = \frac{IIVER_{nc2} \times C_{gw}}{RfD_i \times WAF}$$

式中：

HQ_{iiv2} —吸入室内空气中来自地下水的气态污染物的非致癌效应，无量纲；

$IIVER_{nc2}$ —吸入室内空气中来自地下水的气态污染物途径暴露量（非致癌效应）， L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

C_{gw} —地下水中污染物浓度， mg/L ；

RfD_i —呼吸吸入参考剂量， $(mg/m^3)^{-1}$ ；

WAF —暴露于地下水的参考剂量分配比例，无量纲。

(3) 饮用地下水中单一污染物途径的非致癌效应

$$HQ_{cgw} = \frac{CGWER_{nc} \times C_{gw}}{RfD_0 \times WAF}$$

式中：

HQ_{cgw} —饮用地下水途径的非致癌效应，无量纲；

$CGWER_{nc}$ —饮用受影响地下水对应的地下水的暴露量（非致癌效应）， L 地下水· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

C_{gw} —地下水中污染物浓度， mg/L ；

RfD_0 —经口摄入参考剂量， $(mg/m^3)^{-1}$ ；

WAF —暴露于地下水的参考剂量分配比例，无量纲。

（4）皮肤接触地下水中单一污染物途径的非致癌效应

$$HQ_{dgdw} = \frac{DGWER_{nc}}{RfD_d}$$

式中：

HQ_{dgdw} —譬如接触地下水污染物的非致癌效应，无量纲。

（5）地块地下水中单一污染物经所有暴露途径的总非致癌危害伤

$$HI_n = \sum HQ_x$$

式中， HI_n 为污染物所有暴露途径的非致癌效应，无量纲； HQ_x 为单一暴露途径的非致癌效应。

4.5.2 人体可接受风险水平

根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）中的规定，单一污染物的可接受致癌风险水平为 10^{-6} ，可接受危害商为 1。即当风险表征得到的地块污染物的致癌风险和危害商，可作为确

定地块污染范围的重要依据。计算得到单一污染物的致癌风险值大于 10^{-6} 或危害商大于1的采样点，其代表的地块区域应划定为风险不可接受的污染区域，该区域对人体具有危害，需采取进一步的管理措施。

4.5.3 暴露浓度确定

根据《柳州市城市用地规划图（2010-2020）》和《柳州市西环路东片控制性详细规划》可知，该地块明确规划为商业居住用地，属于第一类用地。第一类用地人流量大、活动频繁，受污染影响的时间长，对人体健康风险要求高。故，本次该地块的风险评估将按章节 4.3.2 的分层情况逐层进行，选择概化分层中每层各个污染物的最大值作为该层该污染物的暴露浓度值。因为该层污染物的最大值都没风险的情况下，该层同一种污染物别的浓度也不会有风险，如果该层污染物的最大值有风险那说明该层土壤存在人体健康风险。各层土壤各污染物暴露浓度见表 4.5-1。同理，选择地下水中污染物的最大值作为地下水的暴露浓度值，地下水中各个污染物的暴露浓度见表 4.5-7。

表 4.5-1 第一层 (0~2m) 土壤各污染物暴露浓度

| 相关参数 | 关注污染物 | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|------|------|--------|--------|---------|------------|-----------------|------|--|
| | 六价铬 | 砷 | 五氯酚 | 苯并[a]蒽 | 苯并[a]芘 | 苯并[b]荧蒽 | 二苯并[a, h]蒽 | 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 萘 | 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) |
| 暴露浓度 (mg/kg) | 77.8 | 74.8 | 1280 | 31.8 | 11.5 | 29.9 | 20.1 | 27.1 | 61.4 | 15900 |
| 表层污染土壤厚度 (m) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 下层污染埋深 (m) | - | - | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 下层污染土壤厚度 (m) | - | - | 24 | 18 | 24 | 18 | 18 | 13 | 13 | 24 |
| 下层污染物含量 (mg/kg) | - | - | 1580 | 39.6 | 12.2 | 21.9 | 18.4 | 23.3 | 56.9 | 123000 |

表 4.5-2 第二层（2~5m）土壤各污染物暴露浓度

| 相关参数 | 关注污染物 | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-----|------|--------|--------|---------|-----------|---------------|------|--|
| | 六价铬 | 砷 | 五氯酚 | 苯并[a]蒽 | 苯并[a]芘 | 苯并[b]荧蒽 | 二苯并[a,h]蒽 | 茚并[1,2,3-cd]芘 | 萘 | 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) |
| 暴露浓度 (mg/kg) | 15.3 | 342 | 1580 | 28.0 | 12.2 | 21.9 | 18.4 | 23.3 | 56.9 | 123000 |
| 表层污染土壤厚度 (m) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 下层污染埋深 (m) | - | - | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 下层污染土壤厚度 (m) | - | - | 21 | 15 | 21 | 15 | 15 | 10 | 10 | 21 |
| 下层污染物含量 (mg/kg) | - | - | 459 | 39.6 | 6.1 | 11.0 | 12.2 | 14.6 | 32.4 | 15100 |

表 4.5-3 第三层（5~10m）土壤各污染物暴露浓度

| 相关参数 | 关注污染物 | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-----|--------|--------|---------|-----------|---------------|------|--|
| | 砷 | 五氯酚 | 苯并[a]蒽 | 苯并[a]芘 | 苯并[b]荧蒽 | 二苯并[a,h]蒽 | 茚并[1,2,3-cd]芘 | 萘 | 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) |
| 暴露浓度 (mg/kg) | 42.4 | 424 | 9.3 | 3.4 | 8.2 | 5.6 | 6.7 | 32.4 | 12500 |
| 表层污染土壤厚度 (m) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 下层污染埋深 (m) | - | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 下层污染土壤厚度 (m) | - | 16 | 10 | 16 | 10 | 10 | 5 | 5 | 16 |
| 下层污染物含量 (mg/kg) | - | 459 | 39.6 | 6.1 | 11.0 | 12.2 | 14.6 | 28.3 | 15100 |

表 4.5-4 第四层（10~15m）土壤各污染物暴露浓度

| 相关参数 | 关注污染物 | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-----|--------|--------|---------|-----------|---------------|------|--|
| | 砷 | 五氯酚 | 苯并[a]蒽 | 苯并[a]芘 | 苯并[b]荧蒽 | 二苯并[a,h]蒽 | 茚并[1,2,3-cd]芘 | 萘 | 石油烃(C ₁₀ -C ₄₀) |
| 暴露浓度 (mg/kg) | 44.5 | 395 | 39.6 | 6.1 | 11.0 | 12.2 | 14.6 | 28.3 | 8380 |
| 表层污染土壤厚度 (m) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 下层污染埋深 (m) | - | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 下层污染土壤厚度 (m) | - | 11 | 5 | 11 | 5 | 5 | - | - | 11 |
| 下层污染物含量 (mg/kg) | - | 459 | 7.3 | 5.6 | 8.8 | 4.7 | - | - | 15100 |

表 4.5-5 第五层（15~20m）土壤各污染物暴露浓度

| 相关参数 | 关注污染物 | | | | | | | |
|----------------|-------|-----|-----|--------|--------|---------|-----------|--|
| | 砷 | 镍 | 五氯酚 | 苯并[a]蒽 | 苯并[a]芘 | 苯并[b]荧蒽 | 二苯并[a,h]蒽 | 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） |
| 暴露浓度（mg/kg） | 86.9 | 482 | 292 | 7.3 | 5.6 | 8.8 | 4.7 | 8650 |
| 表层污染土壤厚度（m） | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 下层污染埋深（m） | - | - | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 下层污染土壤厚度（m） | - | - | 6 | - | 6 | - | - | 6 |
| 下层污染物含量（mg/kg） | - | - | 459 | - | 1.8 | - | - | 15100 |

表 4.5-6 第六层（20~26m）土壤各污染物暴露浓度

| 相关参数 | 关注污染物 | | | | |
|-----------------|-------|-----|-----|--------|---|
| | 砷 | 镍 | 五氯酚 | 苯并[a]芘 | 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) |
| 暴露浓度 (mg/kg) | 95.7 | 490 | 459 | 1.8 | 15100 |
| 表层污染土壤厚度 (m) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 下层污染埋深 (m) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 下层污染土壤厚度 (m) | - | - | - | - | - |
| 下层污染物含量 (mg/kg) | - | - | - | - | - |

表 4.5-7 地下水各污染物暴露浓度

| 关注污染物 | 最大浓度值 (mg/L) |
|---|--------------|
| 砷 | 0.0352 |
| 五氯酚 | 0.194 |
| 苯并[a]芘 | 0.000068 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 32.1 |

4.5.4 风险表征结果

4.5.4.1 土壤风险表征结果

地块土壤中关注污染物重金属（六价铬、砷、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）的致癌风险结果见表 4.5-8~表 4.5-13 和非致癌风险结果见表 4.5-14~表 4.5-19。

根据土壤风险表征结果可知：

土壤污染物六价铬最大致癌风险为 5.47E-05，最大非致癌危害商

为 $5.74E-01$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 。

土壤污染物砷最大致癌风险为 $7.20E-04$ ，最大非致癌危害商为 $2.94E+01$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 及非致癌危害商 1。

土壤污染物镍最大致癌风险为 $2.31E-06$ ，最大非致癌危害商为 $9.30E-01$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 。

土壤污染物五氯酚最大致癌风险为 $1.46E-03$ ，最大非致癌危害商为 $1.08E+01$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 及非致癌危害商 1。

土壤污染物苯并[a]蒽最大致癌风险为 $7.27E-06$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 。

土壤污染物苯并[a]芘最大致癌风险为 $2.23E-05$ ，最大非致癌危害商为 $2.75E+00$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 及非致癌危害商 1。

土壤污染物苯并[b]荧蒽最大致癌风险为 $5.48E-06$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 。

土壤污染物二苯并[a, h]蒽最大致癌风险为 $3.68E-05$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 。

土壤污染物茚并[1, 2, 3-cd]芘最大致癌风险为 $4.96E-06$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 。

土壤污染物萘最大致癌风险为 $1.62E-05$ ，最大非致癌危害商为 $2.91E-01$ ，超过可接受致癌风险水平 $10E-6$ 。

土壤污染物石油烃 ($C_{10}-C_{40}$) 最大非致癌危害商 $1.49E+02$ ，超过可接受非致癌危害商水平 1。

综上所述，在第一类用地性质下，地块土壤关注污染物中六价铬、

砷、镍、五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘、石油烃（C₁₀-C₄₀）人体健康风险均超过可接受风险水平。因此，需对土壤进行风险管控或修复治理等措施。

表 4.5-8 第一层 (0~2m) 土壤风险表征结果-致癌风险

| 关注污染物 | 经口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径致癌风险 |
|---|-----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 六价铬 | 4.97E-05 | - | 4.97E-06 | - | - | - | <u>5.47E-05</u> |
| 砷 | 1.43E-04 | 1.38E-05 | 3.11E-07 | - | - | - | <u>1.58E-04</u> |
| 五氯酚 | 6.55E-04 | 5.23E-04 | 1.81E-07 | 1.96E-06 | 1.68E-07 | 1.51E-08 | <u>1.18E-03</u> |
| 苯并[a]蒽 | 4.07E-06 | 1.69E-06 | 5.29E-08 | 3.16E-08 | 1.50E-10 | 3.31E-10 | <u>5.84E-06</u> |
| 苯并[a]芘 | 1.47E-05 | 6.11E-06 | 1.91E-07 | 5.67E-08 | 1.14E-10 | 3.03E-11 | <u>2.11E-05</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | 3.82E-06 | 1.59E-06 | 4.98E-08 | 1.46E-08 | 2.01E-11 | 6.92E-12 | <u>5.48E-06</u> |
| 二苯并[a, h]蒽 | 2.57E-05 | 1.07E-05 | 3.35E-07 | 5.32E-08 | 4.96E-11 | 7.00E-12 | <u>3.68E-05</u> |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 3.46E-06 | 1.44E-06 | 4.51E-08 | 7.11E-09 | 6.18E-12 | 1.37E-12 | <u>4.96E-06</u> |
| 萘 | 9.42E-06 | 3.92E-06 | 5.79E-08 | 5.04E-07 | 2.61E-08 | 2.25E-06 | <u>1.62E-05</u> |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | - | - | - | - | - | - | - |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物致癌风险“超过可接受致癌风险水平”。

表 4.5-9 第二层 (2~5m) 土壤风险表征结果-致癌风险

| 关注污染物 | 经口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径致癌风险 |
|---|-----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 六价铬 | 9.78E-06 | - | 9.76E-07 | - | - | - | <u>1.08E-05</u> |
| 砷 | 6.56E-04 | 6.29E-05 | 1.42E-06 | - | - | - | <u>7.20E-04</u> |
| 五氯酚 | 8.08E-04 | 6.46E-04 | 2.24E-07 | 2.42E-06 | 3.26E-08 | 4.39E-09 | <u>1.46E-03</u> |
| 苯并[a]蒽 | 3.58E-06 | 1.49E-06 | 4.66E-08 | 2.78E-08 | 1.00E-10 | 3.30E-10 | <u>5.14E-06</u> |
| 苯并[a]芘 | 1.56E-05 | 6.49E-06 | 2.03E-07 | 6.02E-08 | 3.81E-11 | 1.52E-11 | <u>2.23E-05</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | 2.80E-06 | 1.16E-06 | 3.65E-08 | 1.07E-08 | 6.73E-12 | 3.48E-12 | <u>4.01E-06</u> |
| 二苯并[a, h]蒽 | 2.35E-05 | 9.78E-06 | 3.06E-07 | 4.87E-08 | 2.19E-11 | 4.64E-12 | <u>3.37E-05</u> |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 2.98E-06 | 1.24E-06 | 3.88E-08 | 6.11E-09 | 2.58E-12 | 8.60E-13 | <u>4.26E-06</u> |
| 萘 | 8.73E-06 | 3.63E-06 | 5.37E-08 | 4.67E-07 | 9.90E-09 | 1.23E-06 | <u>1.41E-05</u> |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | - | - | - | - | - | - | - |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物致癌风险“超过可接受致癌风险水平”。

表 4.5-10 第三层（5~10m）土壤风险表征结果-致癌风险

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径致癌风险 |
|--|----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 砷 | 8.13E-05 | 7.80E-06 | 1.76E-07 | - | - | - | <u>8.93E-05</u> |
| 五氯酚 | 2.17E-04 | 1.73E-04 | 6.00E-08 | 6.50E-07 | 1.95E-08 | 4.39E-09 | <u>3.91E-04</u> |
| 苯并[a]蒽 | 1.19E-06 | 4.94E-07 | 1.55E-08 | 9.24E-09 | 6.02E-11 | 3.30E-10 | <u>1.71E-06</u> |
| 苯并[a]芘 | 4.35E-06 | 1.81E-06 | 5.66E-08 | 1.68E-08 | 2.29E-11 | 1.52E-11 | <u>6.23E-06</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | 1.05E-06 | 4.36E-07 | 1.37E-08 | 4.00E-09 | 4.04E-12 | 3.47E-12 | <u>1.50E-06</u> |
| 二苯并[a, h]蒽 | 7.16E-06 | 2.98E-06 | 9.32E-08 | 1.48E-08 | 1.32E-11 | 4.64E-12 | <u>1.02E-05</u> |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 8.57E-07 | 3.56E-07 | 1.12E-08 | 1.76E-09 | 1.55E-12 | 8.60E-13 | <u>1.23E-06</u> |
| 萘 | 4.97E-06 | 2.07E-06 | 3.06E-08 | 2.66E-07 | 5.19E-09 | 9.90E-07 | <u>8.33E-06</u> |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - | - |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物致癌风险“超过可接受致癌风险水平”。

表 4.5-11 第四层（10~15m）土壤风险表征结果-致癌风险

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径致癌风险 |
|--|----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 砷 | 8.53E-05 | 8.19E-06 | 1.85E-07 | - | - | - | <u>9.37E-05</u> |
| 五氯酚 | 2.02E-04 | 1.62E-04 | 5.59E-08 | 6.06E-07 | 1.95E-08 | 4.39E-09 | <u>3.64E-04</u> |
| 苯并[a]蒽 | 5.06E-06 | 2.11E-06 | 6.59E-08 | 3.93E-08 | 1.11E-11 | 6.08E-11 | <u>7.27E-06</u> |
| 苯并[a]芘 | 7.80E-06 | 3.24E-06 | 1.02E-07 | 3.01E-08 | 2.10E-11 | 1.39E-11 | <u>1.12E-05</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | 1.41E-06 | 5.85E-07 | 1.83E-08 | 5.37E-09 | 3.23E-12 | 2.78E-12 | <u>2.01E-06</u> |
| 二苯并[a, h]蒽 | 1.56E-05 | 6.49E-06 | 2.03E-07 | 3.23E-08 | 5.07E-12 | 1.79E-12 | <u>2.23E-05</u> |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 1.87E-06 | 7.76E-07 | 2.43E-08 | 3.83E-09 | - | - | <u>2.67E-06</u> |
| 萘 | 4.34E-06 | 1.81E-06 | 2.67E-08 | 2.32E-07 | - | - | <u>6.41E-06</u> |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - | - |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

表 4.5-12 第五层（15~20m）土壤风险表征结果-致癌风险

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径致癌风险 |
|--|----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 砷 | 1.67E-04 | 1.60E-05 | 3.62E-07 | - | - | - | <u>1.83E-04</u> |
| 镍 | - | - | 2.27E-06 | - | - | - | <u>2.27E-06</u> |
| 五氯酚 | 1.49E-04 | 1.19E-04 | 4.13E-08 | 4.48E-07 | 1.95E-08 | 4.39E-09 | <u>2.69E-04</u> |
| 苯并[a]蒽 | 9.33E-07 | 3.88E-07 | 1.22E-08 | 7.25E-09 | - | - | <u>1.34E-06</u> |
| 苯并[a]芘 | 7.16E-06 | 2.98E-06 | 9.32E-08 | 2.76E-08 | 6.74E-12 | 4.47E-12 | <u>1.03E-05</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | 1.13E-06 | 4.68E-07 | 1.47E-08 | 4.30E-09 | - | - | <u>1.61E-06</u> |
| 二苯并[a, h]蒽 | 6.01E-06 | 2.50E-06 | 7.83E-08 | 1.24E-08 | - | - | <u>8.60E-06</u> |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - | - |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

表 4.5-13 第六层（20~26m）土壤风险表征结果-致癌风险

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径致癌风险 |
|--|----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 砷 | 1.84E-04 | 1.76E-05 | 3.98E-07 | - | - | - | <u>2.02E-04</u> |
| 镍 | - | - | 2.31E-06 | - | - | - | <u>2.31E-06</u> |
| 五氯酚 | 2.35E-04 | 1.88E-04 | 6.50E-08 | 7.04E-07 | - | - | <u>4.23E-04</u> |
| 苯并[a]芘 | 2.30E-06 | 9.57E-07 | 3.00E-08 | 8.88E-09 | - | - | <u>3.30E-06</u> |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - | - |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

表 4.5-14 第一层 (0~2m) 土壤风险表征结果-非致癌危害商

| 关注污染物 | 经口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径非致癌危害商 |
|---|-----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 六价铬 | 5.01E-01 | - | 7.31E-02 | - | - | - | 5.74E-01 |
| 砷 | 4.98E+00 | 4.26E-01 | 1.03E+00 | - | - | - | <u>6.44E+00</u> |
| 五氯酚 | 5.11E+00 | 3.64E+00 | - | - | - | - | <u>8.76E+00</u> |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 0.77E+00 | 0.28E+00 | 1.19E+00 | 0.35E+00 | 7.09E-04 | 1.88E-04 | <u>2.59E+00</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | - | - | - | - | - | - | - |
| 萘 | 6.13E-02 | 2.27E-02 | 4.23E-03 | 3.68E-02 | 1.90E-03 | 1.64E-01 | 2.91E-01 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 7.94E+00 | 1.13E+01 | - | - | - | - | <u>1.92E+01</u> |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

表 4.5-15 第二层（2~5m）土壤风险表征结果-非致癌危害商

| 关注污染物 | 经口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径非致癌危害商 |
|--|-----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 六价铬 | 9.86E-02 | - | 1.44E-02 | - | - | - | 1.13E-01 |
| 砷 | 2.28E+01 | 1.95E+00 | 4.71E+00 | - | - | - | <u>2.94E+01</u> |
| 五氯酚 | 6.31E+00 | 4.49E+00 | - | - | - | - | <u>1.08E+01</u> |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 8.12E-01 | 3.01E-01 | 1.26E+00 | 3.73E-01 | 2.36E-04 | 9.41E-05 | <u>2.75E+00</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | - | - | - | - | - | - | - |
| 萘 | 5.68E-02 | 2.10E-02 | 3.92E-03 | 3.41E-02 | 7.23E-04 | 8.97E-02 | 2.06E-01 |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | 6.14E+01 | 8.75E+01 | - | - | - | - | <u>1.49E+02</u> |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

表 4.5-16 第三层（5~10m）土壤风险表征结果-非致癌危害商

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径非致癌危害商 |
|--|----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 砷 | 2.82E+00 | 2.41E-01 | 5.84E-01 | - | - | - | <u>3.65E+00</u> |
| 五氯酚 | 1.69E+00 | 1.21E+00 | - | - | - | - | <u>2.90E+00</u> |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 2.26E-01 | 8.38E-02 | 3.51E-01 | 1.04E-01 | 1.42E-04 | 9.41E-05 | 7.66E-01 |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | - | - | - | - | - | - | - |
| 萘 | 3.24E-02 | 1.20E-02 | 2.23E-03 | 1.94E-02 | 3.79E-04 | 7.23E-02 | <u>1.39E-01</u> |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | 6.24E+00 | 8.89E+00 | - | - | - | - | <u>1.51E+01</u> |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

表 4.5-17 第四层（10~15m）土壤风险表征结果-非致癌危害商

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径非致癌危害商 |
|--|----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 砷 | 2.96E+00 | 2.53E-01 | 6.13E-01 | - | - | - | <u>3.83E+00</u> |
| 五氯酚 | 1.58E+00 | 1.12E+00 | - | - | - | - | <u>2.70E+00</u> |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 4.06E-01 | 1.50E-01 | 6.30E-01 | 1.87E-01 | 1.30E-04 | 8.63E-05 | <u>1.37E+00</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | - | - | - | - | - | - | - |
| 萘 | 2.83E-02 | 1.05E-02 | 1.95E-03 | 1.70E-02 | - | - | 5.76E-02 |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | 4.19E+00 | 5.96E+00 | - | - | - | - | <u>1.01E+01</u> |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

表 4.5-18 第五层（15~20m）土壤风险表征结果-非致癌危害商

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 | 单一污染物经所有暴露途径非致癌危害商 |
|--|----------|-----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 砷 | 5.79E+00 | 4.94E-01 | 1.20E+00 | - | - | - | <u>7.48E+00</u> |
| 镍 | 4.81E-01 | | 4.33E-01 | - | - | - | 9.14E-01 |
| 五氯酚 | 1.17E+00 | 8.31E-01 | - | - | - | - | <u>2.00E+00</u> |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 3.73E-01 | 1.38E-01 | 5.78E-01 | 1.71E-01 | 4.18E-05 | 2.78E-05 | <u>1.26E+00</u> |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - | - |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | 4.32E+00 | 6.15E+00 | - | - | - | - | <u>1.05E+01</u> |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

表 4.5-19 第六层（20~26m）土壤风险表征结果-非致癌危害商

| 关注污染物 | 口摄入土壤 颗粒物 | 皮肤接触土 壤颗粒物 | 吸入土壤 颗粒物 | 吸入室外空气中 来自表层土壤的气态 污染物 | 吸入室外空气 中来自下层土 壤的气态污染 物 | 吸入室内空气 中来自下层土 壤的气态污染 物 | 单一污染物经所 有暴露途径非致 癌危害商 |
|--|--------------|---------------|-------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 砷 | 6.37E+00 | 5.44E-01 | 1.32E+00 | - | - | - | <u>8.24E+00</u> |
| 镍 | 4.89E-01 | - | 4.40E-01 | - | - | - | 9.30E-01 |
| 五氯酚 | 1.83E+00 | 1.31E+00 | - | - | - | - | <u>3.14E+00</u> |
| 苯并[a]芘 | 1.20E-01 | 4.44E-02 | 1.86E-01 | 5.51E-02 | - | - | 4.05E-01 |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | 7.54E+00 | 1.07E+01 | - | - | - | - | <u>1.83E+01</u> |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物非致癌危害商“超过可接受非致癌危害商水平”。

4.5.4.2 地下水风险表征结果

地下水关注污染物指标为砷、五氯酚、苯并[a]芘，石油烃（C₁₀-C₄₀）。经计算，各个污染物的风险表征结果详表 4.5-20。

地下水中污染物砷致癌风险为 4.04E-04，非致癌危害商为 8.20E+00，超过可接受致癌风险水平 10E-6 及非致癌危害商 1。

地下水中污染物五氯酚致癌风险为 5.94E-04，非致癌危害商为 2.71E+00，超过可接受致癌风险水平 10E-6 及非致癌危害商 1。

地下水中污染物苯并[a]芘致癌风险为 5.21E-07，非致癌危害商为 1.58E-02，未超过可接受致癌风险水平 10E-6 及非致癌危害商 1。即地下水中污染物苯并[a]芘的人体健康风险未超过可接受风险水平，结束下一步的风险评估工作。

地下水中污染物石油烃（C₁₀-C₄₀）非致癌危害商为 5.61E+01，超过可接受非致癌危害商 1。

综上所述，在第一类用地性质下，地块地下水关注污染物中砷、五氯酚、石油烃（C₁₀-C₄₀）人体健康风险均超过可接受风险水平。因此，需对地块地下水采取风险管控或修复治理等措施。

表 4.5-20 地下水污染物风险表征结果

| 序号 | 指标 | 吸入室外空气中 来自地下水的气 态污染物 | 吸入室内空气中 来自地下水的气 态污染物 | 饮用地下水 | 皮肤接触地下水 | 合计 |
|-----|---|----------------------------|----------------------------|----------|----------|-----------------|
| 致癌 | 砷 | - | - | 4.04E-04 | 1.79E-12 | <u>4.04E-04</u> |
| | 五氯酚 | 5.51E-11 | 7.43E-12 | 5.94E-04 | 5.68E-10 | <u>5.94E-04</u> |
| | 苯并[a]芘 | 1.58E-12 | 6.29E-13 | 5.21E-07 | 8.94E-13 | 5.21E-07 |
| | 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | - | - | - | - | - |
| 非致癌 | 砷 | - | - | 8.20E+00 | 1.35E-12 | <u>8.20E+00</u> |
| | 五氯酚 | - | - | 2.71E+00 | 2.69E-08 | <u>2.71E+00</u> |
| | 苯并[a]芘 | 9.80E-06 | 3.90E-06 | 1.58E-02 | 1.02E-12 | 1.58E-02 |
| | 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | - | - | 5.61E+01 | - | <u>5.61E+01</u> |

注：字体加粗、加下划线的为单一污染物表示“风险表征结果”超过可接受风险水平。

4.5.5 风险评估不确定分析

4.5.5.1 参数和模型的不确定性

本报告风险评估的不确定主要包括暴露情景参数的不确定性、毒性参数的不确定性和模型及其参数的不确定性。

(1) 暴露情景参数

暴露情景参数的选择直接影响暴露剂量的大小,较大程度上影响着风险的高低。本次评估中主要暴露情景参数包括暴露人群体重、暴露期、土壤摄入量等使用《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019)的推荐值。然而,对于个体的实际暴露剂量因人而异。体重越轻、暴露期越短、土壤摄入量越大,则暴露剂量越大,而实际面临的风险水平就越高,反之亦然。

(2) 毒性效应参数

本报告在进行健康风险评估计算时采用的毒性效应参数主要源自美国环保 IRIS 毒性数据库、美国环保局“临时性同行审定毒性数据库”以及美国环保署第 3、6、9 区域筛选值提供的污染物毒性效应参数。

目前常用的毒性效应参数主要基于动物实验的结果,而化学物质对于不同动物以及人类的毒性效应存在差异,在从动物无可见有害水平或者观察到损害作用的最低剂量推算至针对人类的摄入量参考剂量(RfD)时引入了不确定性因子(UF)和修正因子(MF)。UF和MF的取值也存在一定的不确定性,导致其推导得出的针对人类的毒性效应参数也存在不确定性。

(3) 气态污染物扩散模型

挥发性有机物或半挥发性有机物从地下土壤或地下水中迁移扩散至空气中，它在空气中的浓度直接影响暴露受体通过呼吸暴露途径的风险值。主要影响计算结果的参数包括气态污染物挥发因子 VF 和气态污染物扩散因子 DF。VF 和 DF 的计算过程涉及的参数较多，主要包括地块土壤特征参数、室外空气扩散条件参数、室内空气扩散条件参数、建筑物特性等。

土壤特征性参数主要采用本地块的实际测量值进行计算，以减少不确定性。而室外空气扩散条件参数、室内空气扩散条件参数、建筑物特性等参数主要采用《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ25.3-2019）的推荐值。然而，导则中的推荐值与实际情况可能存在一定差异，空气扩散条件越好、建筑物与地下气态污染物之间的隔离条件越好，暴露的风险水平就越小，反之亦然。

4.5.5.2 暴露风险贡献率分析

贡献率分析是指单一污染物经不同暴露途径的致癌风险和危害商贡献率，贡献率越大，表示特定暴露途径或特定污染物对于总风险值或危害指数的影响越大。单一暴露途径风险贡献率超过 20%时，应进行受体参数和与该暴露途径相关参数的敏感性分析。包括敏感参数确定、敏感性分析方法和敏感性比例计算等内容。计算公式如下：

$$PCR_i = \frac{CR_i}{CR_n} \times 100\%$$

$$PHQ_i = \frac{HQ_i}{HI_n} \times 100\%$$

式中：

PCR_i (或 PHQ_i) — 为单一污染物经第 i 中暴露途径致癌风险 (或非致癌危害商) 贡献率, 无量纲;

CR_i (或 HQ_i) — 为单一污染物经第 i 种暴露途径的致癌风险 (或非致癌危害商), 无量纲;

CR_n (HI_n) — 为单一污染物的致癌风险 (或非致癌危害商), 无量纲。

本地块土壤中存在重金属、有机物、石油烃 ($C_{10}-C_{40}$) 污染, 重金属污染物的暴露途径为经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入土壤颗粒, 其中暴露风险贡献率超过 20% 的暴露途径为经口摄入土壤颗粒。有机污染物的暴露途径为经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入土壤颗粒、吸入表层室外蒸气, 吸入下层室外蒸气, 吸入下层室内蒸气, 其中暴露风险超过 20% 的暴露途径为经口摄入土壤。石油烃的暴露风险超过 20% 的暴露途径为经口摄入和皮肤接触。

地下水污染物中贡献率占比超过 20% 的暴露途径为饮用地下水。

根据污染物风险评估计算模型, 相应污染物在其主要暴露途径下的参数取值对风险计算的结果影响较大, 因而计算时特别注意贡献率大的途径下参数的准确性。土壤中各污染物暴露风险贡献率见表 4.5-21~表 4.5-32, 地下水中各污染物暴露风险贡献率见表 4.5-33。

表 4.5-21 第一层（0~2m）土壤污染物致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 经口摄入土壤 颗粒物 | 皮肤接触土壤 颗粒物 | 吸入土壤颗粒 物 | 吸入室外空气 中来自表层土 壤的气态污染 物 | 吸入室外空气 中来自下层土 壤的气态污染 物 | 吸入室内空气 中来自下层土 壤的气态污染 物 |
|--|---------------|---------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 六价铬 | 90.92% | - | 9.08% | - | - | - |
| 砷 | 91.07% | 8.74% | 0.20% | - | - | - |
| 五氯酚 | 55.46% | 44.34% | 0.02% | 0.17% | 0.01% | 0.00% |
| 苯并[a]蒽 | 69.61% | 28.94% | 0.91% | 0.54% | 0.00% | 0.01% |
| 苯并[a]芘 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 苯并[b]荧蒽 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 二苯并[a, h]蒽 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | 0.00% | 0.00% |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | 0.00% | 0.00% |
| 萘 | 58.23% | 24.21% | 0.36% | 3.12% | 0.16% | 13.93% |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-22 第二层（2~5m）土壤污染物致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 经口摄入土壤 颗粒物 | 皮肤接触土壤 颗粒物 | 吸入土壤颗粒 物 | 吸入室外空气 中来自表层土 壤的气态污染 物 | 吸入室外空气 中来自下层土 壤的气态污染 物 | 吸入室内空气 中来自下层土 壤的气态污染 物 |
|--|---------------|---------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 六价铬 | 90.92% | - | 9.08% | - | - | - |
| 砷 | 91.07% | 8.74% | 0.20% | - | - | - |
| 五氯酚 | 55.46% | 44.34% | 0.02% | 0.17% | 0.01% | 0.00% |
| 苯并[a]蒽 | 69.61% | 28.94% | 0.91% | 0.54% | 0.00% | 0.01% |
| 苯并[a]芘 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 苯并[b]荧蒽 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 二苯并[a, h]蒽 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | 0.00% | 0.00% |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | 0.00% | 0.00% |
| 萘 | 61.83% | 25.71% | 0.38% | 3.31% | 0.07% | 8.70% |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-23 第三层（5~10m）土壤污染物致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 砷 | 91.07% | 8.74% | 0.20% | - | - | - |
| 五氯酚 | 55.46% | 44.34% | 0.02% | 0.17% | 0.01% | 0.00% |
| 苯并[a]蒽 | 69.60% | 28.94% | 0.91% | 0.54% | 0.00% | 0.02% |
| 苯并[a]芘 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 苯并[b]荧蒽 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 二苯并[a, h]蒽 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | 0.00% | 0.00% |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | 0.00% | 0.00% |
| 萘 | 59.68% | 24.81% | 0.37% | 3.19% | 0.06% | 11.89% |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-24 第四层（10~15m）土壤污染物致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 砷 | 91.07% | 8.74% | 0.20% | - | - | - |
| 五氯酚 | 55.46% | 44.35% | 0.02% | 0.17% | 0.01% | 0.00% |
| 苯并[a]蒽 | 69.60% | 28.94% | 0.91% | 0.54% | 0.00% | 0.02% |
| 苯并[a]芘 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 苯并[b]荧蒽 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 二苯并[a, h]蒽 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | 0.00% | 0.00% |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | - | - |
| 萘 | 67.78% | 28.18% | 0.42% | 3.63% | - | - |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-25 第五层（15~20m）土壤污染物致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 砷 | 91.07% | 8.74% | 0.20% | - | - | - |
| 镍 | - | - | 100.00% | - | - | - |
| 五氯酚 | 55.46% | 44.35% | 0.02% | 0.17% | 0.01% | 0.00% |
| 苯并[a]蒽 | 69.60% | 28.94% | 0.91% | 0.54% | - | - |
| 苯并[a]芘 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | 0.00% | 0.00% |
| 苯并[b]荧蒽 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | 69.89% | 29.06% | 0.91% | 0.14% | - | - |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-26 第六层（20~26m）土壤污染物致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 砷 | 91.07% | 8.74% | 0.20% | - | - | - |
| 镍 | - | - | 100.00% | - | - | - |
| 五氯酚 | 55.46% | 44.35% | 0.02% | 0.17% | - | - |
| 苯并[a]芘 | 69.80% | 29.02% | 0.91% | 0.27% | - | - |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-27 第一层 (0~2m) 土壤污染物非致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 经口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|---|-----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 六价铬 | 87.28% | - | 12.72% | - | - | - |
| 砷 | 77.38% | 6.61% | 16.01% | - | - | - |
| 五氯酚 | 58.41% | 41.59% | - | - | - | - |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 29.57% | 10.95% | 45.87% | 13.59% | 0.03% | 0.01% |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | - | - | - | - | - | - |
| 萘 | 21.04% | 7.79% | 1.45% | 12.63% | 0.65% | 56.43% |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 41.25% | 58.75% | - | - | - | - |

表 4.5-28 第二层（2~5m）土壤污染物非致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 经口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|-----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 六价铬 | 87.28% | - | 12.72% | - | - | - |
| 砷 | 77.38% | 6.61% | 16.01% | - | - | - |
| 五氯酚 | 58.41% | 41.59% | - | - | - | - |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 29.57% | 10.95% | 45.87% | 13.59% | 0.03% | 0.01% |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | - | - | - | - | - | - |
| 萘 | 27.54% | 10.20% | 1.90% | 16.53% | 0.35% | 43.48% |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | 41.25% | 58.75% | - | - | - | - |

表 4.5-29 第三层（5~10m）土壤污染物非致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 砷 | 77.38% | 6.61% | 16.01% | - | - | - |
| 五氯酚 | 58.41% | 41.59% | - | - | - | - |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 29.57% | 10.95% | 45.87% | 13.59% | 0.02% | 0.01% |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | - | - | - | - | - | - |
| 萘 | 23.34% | 8.64% | 1.61% | 14.01% | 0.27% | 52.12% |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-30 第四层（10~15m）土壤污染物非致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 砷 | 77.38% | 6.61% | 16.01% | - | - | - |
| 五氯酚 | 58.41% | 41.59% | - | - | - | - |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 29.57% | 10.95% | 45.87% | 13.59% | 0.02% | 0.01% |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | - | - | - | - | - | - |
| 萘 | 49.03% | 18.15% | 3.38% | 29.43% | - | - |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-31 第五层（15~20m）土壤污染物非致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 砷 | 77.38% | 6.61% | 16.01% | - | - | - |
| 镍 | 52.65% | - | 47.35% | - | - | - |
| 五氯酚 | 58.41% | 41.59% | - | - | - | - |
| 苯并[a]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 29.57% | 10.95% | 45.87% | 13.59% | 0.02% | 0.01% |
| 苯并[b]荧蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 二苯并[a, h]蒽 | - | - | - | - | - | - |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-32 第六层（20~26m）土壤污染物非致癌暴露风险贡献率分析表

| 关注污染物 | 口摄入土壤颗粒物 | 皮肤接触土壤颗粒物 | 吸入土壤颗粒物 | 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 | 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物 | 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物 |
|--|----------|-----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 砷 | 77.38% | 6.61% | 16.01% | - | - | - |
| 镍 | 52.65% | - | 47.35% | - | - | - |
| 五氯酚 | 58.41% | 41.59% | - | - | - | - |
| 苯并[a]芘 | 29.57% | 10.95% | 45.87% | 13.59% | - | - |
| 石油烃（C ₁₀ -C ₄₀ ） | - | - | - | - | - | - |

表 4.5-33 地下水暴露风险贡献率分析表

| 序号 | 指标 | 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物 | 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物 | 饮用地下水 | 皮肤接触地下水 |
|-----|---|--------------------|--------------------|--------|---------|
| 致癌 | 砷 | - | - | 100% | - |
| | 五氯酚 | - | - | 100% | - |
| | 苯并[a]芘 | - | - | 100% | - |
| | 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | - | - | - | - |
| 非致癌 | 砷 | - | - | 100% | - |
| | 五氯酚 | - | - | 100% | - |
| | 苯并[a]芘 | 0.06% | 0.02% | 99.91% | - |
| | 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | - | - | 100% | - |

4.5.5.3 暴露参数敏感性分析

选定需要进行敏感性分析的参数应为对风险计算结果影响较大的参数，参数包括人群相关参数（体重、暴露期、暴露频率等）、暴露途径相关的参数（每日摄入土壤量、暴露皮肤表面积、皮肤表面土壤粘附系数、每日吸入空气体积等）。敏感性分析选择风险贡献率超过 20% 的暴露途径，进行人群相关参数和与该途径相关的参数的敏感性分析。采用敏感性比例表征模型参数敏感性，即参数取值变动对模型计算风险值的影响程度。参数的敏感性比例越大，表示风险变化程度越大，该参数对风险计算的影响也越大。模型参数的敏感性可用模型参数值的变化（±10%）与致癌风险或非致癌危害商发生变化的比值来表示。

相关参数敏感性比例计算公式见如下：

$$SR = \pm \frac{\frac{X_2 - X_1}{X_1}}{\frac{P_2 - P_1}{P_1}} \times 100\%$$

式中：

SR 为模型参数敏感性比例，无量纲；

P1 为模型参数 P 变化前的数值，无量纲；

P2 为模型参数 P 变化后的数值，无量纲；

X1 为按 P1 计算的致癌风险或非致癌危害商，无量纲；

X2 为按 P2 计算的致癌风险或非致癌危害商，无量纲；

当 P2 增加时，计算结果取正，反之取负。

本地块涉及的污染物种类包括重金属、半挥发性有机物及石油烃（C₁₀-C₄₀），结合其他文献资料，各暴露途径受参数影响的敏感性变化趋势基本相同，因此仅选择部分具有代表性的指标进行敏感性分析即可。根据风险评估和风险暴露途径贡献率的分析结果，选取部分贡献率大于 20%的指标为代表的进行暴露参数敏感性分析，本次选择砷的经口摄入、五氯酚的经口摄入、石油烃（C₁₀-C₄₀）的皮肤接触摄入途径进行模型参数敏感性分析。暴露浓度选取检测结果中的最大值。

本次敏感性分析方法为单因素局部分析法，分别改变模型中每日空气呼吸量或每日摄入土壤量、暴露频率、暴露期、体重的数值，计算各污染因子的风险水平，通过对比参数改变前后的风险水平，分析各参数在不同污染因子模型计算敏感性。本次将对上述参数分别按照+10%变化进行输入，初始值见表 4.3-3。具体参数敏感性分析结果见下表。

表 4.5-34 砷经口摄入土壤颗粒物途径参数敏感分析结果

| 污 染 物 | 评 估 参 数 | 原计算结果 | | 新计算结果(+10%) | | 敏感性比例 | |
|-------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| | | 致 癌 风 险 | 非 致 癌 风 险 | 致 癌 风 险 | 非 致 癌 风 险 | 致 癌 风 险 | 非 致 癌 风 险 |
| 砷 | 成人暴露期 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.81E-04 | 2.28E+01 | 38.17% | 0.00% |
| | 儿童暴露期 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.96E-04 | 2.51E+01 | 61.52% | 100.00% |
| | 成人暴露频率 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.81E-04 | 2.28E+01 | 38.17% | 0.00% |

| 污染物 | 评估参数 | 原计算结果 | | 新计算结果(+10%) | | 敏感性比例 | |
|-----|-----------|----------|----------|-------------|----------|---------|---------|
| | | 致癌风险 | 非致癌风险 | 致癌风险 | 非致癌风险 | 致癌风险 | 非致癌风险 |
| | 儿童暴露频率 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.96E-04 | 2.51E+01 | 61.52% | 100% |
| | 成人平均体重 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.33E-04 | 2.28E+01 | -34.99% | 0.00% |
| | 儿童平均体重 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.19E-04 | 2.07E+01 | -56.21% | -90.91% |
| | 成人每日空气呼吸量 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | -0.15% | 0.00% |
| | 儿童每日空气呼吸量 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | -0.15% | 0.00% |
| | 成人每日摄入土壤量 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.81E-04 | 2.28E+01 | 38.17% | 0.00% |
| | 儿童每日摄入土壤量 | 6.56E-04 | 2.28E+01 | 6.96E-04 | 2.51E+01 | 61.52% | 100.00% |

表 4.5-35 五氯酚经口摄入途径参数敏感分析结果

| 污染物 | 评估参数 | 原计算结果 | | 新计算结果(+10%) | | 敏感性比例 | |
|-----|-------|----------|----------|-------------|----------|--------|---------|
| | | 致癌风险 | 非致癌风险 | 致癌风险 | 非致癌风险 | 致癌风险 | 非致癌风险 |
| 五氯酚 | 成人暴露期 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 8.39E-04 | 6.31E+00 | 38.39% | 0.44% |
| | 儿童暴露期 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 8.58E-04 | 6.94E+00 | 61.74% | 100.49% |

| 污染物 | 评估参数 | 原计算结果 | | 新计算结果 (+10%) | | 敏感性比例 | |
|-----|-----------|----------|----------|--------------|----------|---------|---------|
| | | 致癌风险 | 非致癌风险 | 致癌风险 | 非致癌风险 | 致癌风险 | 非致癌风险 |
| | 露期 | | | | | | |
| | 成人暴露频率 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 8.39E-04 | 6.31E+00 | 38.39% | 0.44% |
| | 儿童暴露频率 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 8.58E-04 | 6.94E+00 | 61.74% | 100.49% |
| | 成人平均体重 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 7.80E-04 | 6.31E+00 | -34.78% | 0.44% |
| | 儿童平均体重 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 7.63E-04 | 5.74E+00 | -56.01% | -90.51% |
| | 成人每日空气呼吸量 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 0.06% | 0.44% |
| | 儿童每日空气呼吸量 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 0.06% | 0.44% |
| | 成人每日摄入土壤量 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 8.39E-04 | 6.31E+00 | 38.39% | 0.44% |
| | 儿童每日摄入土壤量 | 8.08E-04 | 6.31E+00 | 8.58E-04 | 6.94E+00 | 61.74% | 100.49% |

表 4.5-36 石油烃 (C₁₀-C₄₀) 皮肤接触摄入途径参数敏感分析结果

| 污染物 | 评估参数 | 原计算值 | 新计算值 (+10%) | 敏感性比例 |
|-----|------|-------|-------------|-------|
| | | 非致癌风险 | 非致癌风险 | 非致癌风险 |
| | | | | |

| 污染物 | 评估参数 | 原计算值 | 新计算值 (+10%) | 敏感性比例 |
|--|---------------|----------|----------------|---------|
| | | 非致癌风险 | 非致癌风险 | 非致癌风险 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 成人暴露期 | 8.75E+01 | 8.75E+01 | 0.00% |
| | 儿童暴露期 | 8.75E+01 | 9.62E+01 | 100.00% |
| | 成人暴露频率 | 8.75E+01 | 8.75E+01 | 0.00% |
| | 儿童暴露频率 | 8.75E+01 | 9.62E+01 | 100.00% |
| | 成人平均体重 | 8.75E+01 | 8.75E+01 | 0.00% |
| | 儿童平均体重 | 8.75E+01 | 8.35E+01 | -44.99% |
| | 成人每日空气 呼吸量 | 8.75E+01 | 8.75E+01 | 0.00% |
| | 儿童每日空气 呼吸量 | 8.75E+01 | 8.75E+01 | 0.00% |
| | 成人每日摄入 土壤量 | 8.75E+01 | 8.75E+01 | 0.00% |
| | 儿童每日摄入 土壤量 | 8.75E+01 | 8.75E+01 | 0.00% |

经分析，经口摄入土壤颗粒物途径下选定的四类参数中，暴露期、暴露频率和每日摄入土壤量对风险的影响均大于体重对风险的影响，而且儿童相关敏感性比成人高，结合其它文献资料的一般规律，四类参数对风险的影响依次为：暴露频率 \geq 暴露期 \geq 每日土壤摄入量 \geq 体重；皮肤接触摄入途径下选定的四类参数对风险的影响依次为：暴露频率 \geq 暴露期 \geq 每日空气呼吸量 \geq 体重。本项目土壤每日摄入量值、暴露期、暴露频率、体重、每日空气呼吸量等参数均来源于《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019)中的推荐值，参数的取值准确度较高，基本符合国内情况，可认为参

数取值对评估结果准确性影响较小，但是这些参数并不是实测数据，这对风评结果还是会产生一定的不确定性。

4.6 风险控制值计算方法

4.6.1 计算步骤与方法

通过风险表征，当污染地块风险表征结果未超过可接受风险时，则结束进一步风险评估工作；当污染地块风险表征结果超过可接受风险水平，则计算关注污染物基于致癌风险的风险控制值及基于危害商的风险控制值。

污染地块修复建议目标值，应根据上述基于致癌风险的土壤风险控制值、基于危害商的土壤风险控制值、基于致癌风险的地下水风险控制值、基于危害商的地下水风险控制值以及地块的实际情况和用途确定。

地块风险控制值的计算包括：计算单一关注污染物经单一和所有暴露途径致癌风险所推导的土壤风险控制值，计算单一关注污染物经单一暴露途径的危害商和基于所有暴露途径的危害商所推导的土壤风险控制值，计算单一关注污染物经单一和所有暴露途径致癌风险所推导的地下水风险控制值，计算单一关注污染物经单一的危害商和基于所有暴露途径的危害商所推导的地下水风险控制值。

4.6.1.1 基于致癌效应计算的土壤风险控制值

(1) 基于经口摄入土壤途径致癌效应的土壤风险控制值

$$RCVS_{ois} = \frac{ACR}{OISER_{ca} \times SF_o}$$

式中：

$RCVS_{ois}$ —基于经口摄入途径致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$OISER_{ca}$ —经口摄入土壤暴露量（致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

ACR —可接受致癌效应，无量纲，取值为 10^{-6} ；

SF_o —经口摄入致癌斜率因子， $(mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(2) 基于皮肤接触土壤途径致癌效应的土壤风险控制值

$$RCVS_{dcs} = \frac{ACR}{DCSER_{ca} \times SF_d}$$

式中：

$RCVS_{dcs}$ —基于皮肤接触途径致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$DCSER_{ca}$ —皮肤接触土壤暴露量（致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

ACR —可接受致癌效应，无量纲，取值为 10^{-6} ；

SF_d —皮肤接触致癌斜率因子， $(mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(3) 基于吸入土壤颗粒物途径致癌效应的土壤风险控制值

$$RCVS_{pis} = \frac{ACR}{PISER_{ca} \times SF_i}$$

式中：

$RCVS_{pis}$ —基于皮肤接触途径致癌效应的土壤风险控制值，

mg·kg⁻¹;

PISER_{ca}—皮肤接触土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹;

ACR—可接受致癌效应，无量纲，取值为 10⁻⁶;

SF_i—呼吸吸入致癌斜率因子，(mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹。

(4) 基于吸入室外空气中表层土壤气态污染物途径致癌效应的土壤风险控制值

$$RCVS_{iov1} = \frac{ACR}{IOVER_{ca1} \times SF_i}$$

式中:

RCVS_{iov1}—基于吸入室外空气中来自表层土壤气态污染物途径致癌效应的土壤风险控制值，mg·kg⁻¹;

IOVER_{ca1}—吸入室外空气来自表层土壤的气态污染物途径（致癌效应），kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹;

ACR—可接受致癌效应，无量纲，取值为 10⁻⁶;

SF_i—呼吸吸入致癌斜率因子，(mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹。

(5) 基于吸入室外空气中来自下层土壤气态污染物途径致癌效应的土壤风险控制值

$$RCVS_{iov2} = \frac{ACR}{IOVER_{ca2} \times SF_i}$$

式中:

RCVS_{iov2}—基于吸入室外空气中来自下层土壤气态污染物途径致癌效应的土壤风险控制值，mg·kg⁻¹;

$IOVER_{ca2}$ —吸入室外空气来自下层土壤的气态污染物途径（致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

ACR—可接受致癌效应，无量纲，取值为 10^{-6} ；

SF_i —呼吸吸入致癌斜率因子， $(mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(6) 基于吸入室内空气来自下层土壤气态污染物途径致癌效应的土壤风险控制值

$$RCVS_{iiv} = \frac{ACR}{IIVER_{ca1} \times SF_i}$$

式中：

$RCVS_{iiv}$ —基于吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物途径致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$IIVER_{ca1}$ —吸入内外空气来自下层土壤的气态污染物途径（致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

ACR—可接受致癌效应，无量纲，取值为 10^{-6} ；

SF_i —呼吸吸入致癌斜率因子， $(mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(7) 基于所有暴露途径总致癌效应的土壤风险控制值

$$RCVS_n = \frac{ACR}{OISER_{ca} \times SF_o + DCSER_{ca} \times SF_d + (PISER_{ca} + IOVER_{ca1} + IOVER_{ca2} + IIVER_{ca1}) \times SF_i}$$

式中：

$RCVS_n$ —单一污染物（第 n 种）基于 6 种土壤暴露途径综合致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ 。

4.6.1.2 基于非致癌风险计算的土壤风险控制值

(1) 基于经口摄入土壤途径非致癌效应的土壤风险控制值

$$HCVS_{ois} = \frac{RfD_o \times SAF \times AHQ}{OISER_{nc}}$$

式中：

$HCVS_{ois}$ —基于经口摄入途径非致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$OISER_{nc}$ —经口摄入土壤暴露量（非致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

AHQ —可接受危害商，无量纲，取值为 1；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲；

RfD_o —经口摄入参考剂量， $mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ 。

(2) 基于皮肤接触土壤途径非致癌效应的土壤风险控制值

$$HCVS_{dcs} = \frac{RfD_d \times SAF \times AHQ}{DCSER_{nc}}$$

式中：

$HCVS_{dcs}$ —基于皮肤接触途径非致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$DCSER_{nc}$ —皮肤接触土壤暴露量（非致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

AHQ —可接受危害商，无量纲，取值为 1；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲；

RfD_d —皮肤接触参考剂量， $mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ 。

(3) 基于吸入土壤颗粒物途径非致癌效应的土壤风险控制值

$$HCVS_{pis} = \frac{RfD_i \times SAF \times AHQ}{PISER_{nc}}$$

式中：

$HCVS_{pis}$ —基于吸入土壤颗粒物途径非致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$PISER_{nc}$ —吸入土壤颗粒物土壤暴露量（非致癌效应）， kg 土壤· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

AHQ —可接受危害商，无量纲，取值为 1；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲；

RfD_i —吸入土壤颗粒物参考剂量， mg 污染物· kg^{-1} 体重· d^{-1} 。

(4) 基于吸入室外空气中表层土壤气态污染物途径非致癌效应的土壤风险控制值

$$HCVS_{iov1} = \frac{RfD_i \times SAF \times AHQ}{IOVER_{nc1}}$$

式中：

$HCVS_{iov1}$ —基于吸入室外空气中表层土壤气态污染物途径非致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$IOVER_{nc1}$ —吸入室外空气来自表层土壤的气态污染物途径（非致癌效应）， kg 土壤· kg^{-1} 体重· d^{-1} ；

AHQ —可接受危害商，无量纲，取值为 1；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲；

RfD_i —吸入土壤颗粒物参考剂量， mg 污染物· kg^{-1} 体重· d^{-1} 。

(5) 基于吸入室外空气中下层土壤气态污染物途径非致癌效应

的土壤风险控制值

$$HCVS_{iov2} = \frac{RfD_i \times SAF \times AHQ}{IOVER_{nc2}}$$

式中：

$HCVS_{iov2}$ —基于吸入室外空气中下层土壤气态污染物途径非致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$IOVER_{nc2}$ —吸入室外空气来自下层土壤的气态污染物途径（非致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

AHQ—可接受危害商，无量纲，取值为 1；

SAF—暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲；

RfD_i —吸入土壤颗粒物参考剂量， $mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ 。

(6) 基于吸入室内空气中下层土壤气态污染物途径非致癌效应的土壤风险控制值

$$HCVS_{iiv} = \frac{RfD_i \times SAF \times AHQ}{IIVER_{nc1}}$$

式中：

$HCVS_{iiv}$ —基于吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物途径非致癌效应的土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

$IIVER_{nc1}$ —吸入室外空气来自下层土壤的气态污染物途径（非致癌效应）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

AHQ—可接受危害商，无量纲，取值为 1；

SAF—暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲；

RfD_i —吸入土壤颗粒物参考剂量， $mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ 。

(7) 基于所有暴露途径总非致癌效应的土壤风险控制值

$$HCVS_n = \frac{SAF \times AHQ}{\frac{OISER_{nc}}{RfD_0} + \frac{DCSER_{nc}}{RfD_d} + \frac{PISER_{nc} + IOVER_{nc1} + IOVER_{nc2} + IIVER_{nc1}}{RfD_i}}$$

式中：

$HCVS_n$ —单一污染物（第 n 种）基于 6 种土壤暴露途径综合的非致癌效应土壤风险控制值， $mg \cdot kg^{-1}$ 。

4.6.1.3 基于致癌效应计算的地下水风险控制值

(1) 基于吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径致癌效应的地下水风险控制值

$$RCVG_{iov} = \frac{ACR}{IOVER_{ca3} \times SF_i}$$

式中：

$RCVG_{iov}$ —基于吸入吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径致癌效应的地下水风险控制值， mg/L ；

$IOVER_{ca3}$ —吸入室外空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量（致癌效应）， L 地下水 $\cdot kg^{-1}$ 体重 $\cdot d^{-1}$ ；

ACR —可接受致癌风险，无量纲；

SF_i —呼吸吸入致癌斜率因子， $(mg$ 污染物 $\cdot kg^{-1}$ 体重 $\cdot d^{-1})^{-1}$ 。

(2) 基于吸入室内空气来自地下水的气态污染物途径致癌效应的地下水风险控制值

$$RCVG_{iiv} = \frac{ACR}{IIVER_{ca2} \times SF_i}$$

式中：

$RCVG_{iiv}$ —基于吸入室内空气中来自地下水的气态污染物途径致癌效应的地下水风险控制值, mg/L;

$IIVER_{ca2}$ —吸入室内空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量 (致癌效应), $L \text{ 地下水} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$;

ACR—可接受致癌风险, 无量纲;

SF_i —呼吸吸入致癌斜率因子, $(\text{mg 污染物} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$ 。

(3) 基于饮用地下水途径致癌效应的地下水风险控制值

$$RCVG_{cgw} = \frac{ACR}{CGWER_{ca} \times SF_o}$$

式中:

$RCVG_{cgw}$ —基于饮用地下水途径致癌效应的地下水风险控制值, mg/L;

$CGWER_{ca}$ —饮用受影响地下水对应的地下水的暴露量 (致癌效应), $L \text{ 地下水} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$;

ACR—可接受致癌风险, 无量纲;

SF_o —经口摄入致癌斜率因子, $(\text{mg 污染物} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$ 。

(4) 基于皮肤接触地下水途径致癌效应的地下水风险控制值

$$RCVG_{dgdw} = \frac{ACR}{DGWER_{ca} \times SF_d}$$

式中:

$RCVG_{dgdw}$ —基于皮肤接触致癌效应的地下水风险控制值, mg/L;

$DGWER_{ca}$ —皮肤接触受影响地下水对应的地下水的暴露量 (致癌效应) $L \text{ 地下水} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 体重} \cdot \text{d}^{-1}$;

ACR—可接受致癌风险，无量纲；

SF_d—皮肤接触致癌斜率因子(mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹。

(5) 基于所有暴露途径综合致癌效应的地下水风险控制值

$$RCVG_n = \frac{ACR}{(IOVER_{ca3} + IIVER_{ca2}) \times SF_i + CGWER_{ca} \times SF_o}$$

式中：

RCVG_n—单一污染物（第 n 种）基于 3 种地下水暴露途径综合的致癌效应地下水风险控制值，mg/L。

4.6.1.4 基于非致癌风险计算的地下水风险控制值

(1) 基于吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径非致癌效应的地下水风险控制值

$$HCVG_{iov} = \frac{RfD_i \times WAF \times AHQ}{IOVER_{nc3}}$$

式中：

HCVG_{iov}—基于吸入室外空气中来自地下水的气态污染物途径非致癌效应的地下水风险控制值，mg/L；

IOVER_{nc3}—吸入室外空气中来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量（非致癌效应），L 地下水·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

RfD_i—吸入土壤颗粒物参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

WAF—暴露于地下水的参考剂量分配系数，无量纲；

AHQ—可接受危害商，无量纲，取值为 1。

(2) 基于吸入室内空气中来自地下水的气态污染物途径非致癌效应的地下水风险控制值

$$HCVG_{iiv} = \frac{RfD_i \times WAF \times AHQ}{IIVER_{nc2}}$$

式中：

$HCVG_{iiv}$ —基于吸入室内空气来自地下水的气态污染物途径非致癌效应的地下水风险控制值，mg/L；

$IIVER_{nc2}$ —吸入室内空气来自地下水的气态污染物对应的地下水暴露量（非致癌效应），L地下水·kg⁻¹体重·d⁻¹；

RfD_i —吸入土壤颗粒物参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹体重·d⁻¹；

WAF —暴露于地下水的参考剂量分配系数，无量纲；

AHQ —可接受危害商，无量纲，取值为 1。

(3) 基于饮用地下水途径非致癌效应的地下水风险控制值

$$HCVG_{cgw} = \frac{RfD_o \times WAF \times AHQ}{CGWER_{nc}}$$

式中：

$HCVG_{cgw}$ —基于饮用地下水途径非致癌效应的地下水风险控制值，mg/L；

$CGWER_{nc}$ —饮用受影响地下水对应的地下水的暴露量（非致癌效应），L地下水·kg⁻¹体重·d⁻¹；

RfD_o —经口摄入参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹体重·d⁻¹；

WAF —暴露于地下水的参考剂量分配系数，无量纲；

AHQ —可接受危害商，无量纲，取值为 1。

(4) 基于皮肤接触地下水途径非致癌效应的地下水风险控制值

$$HCVG_{dgw} = \frac{RfD_d \times AHQ}{DGWER_{nc}}$$

式中：

$HCVG_{dgw}$ —基于皮肤接触地下水途径非致癌效应的地下水风险控制值，mg/L；

$DGWER_{nc}$ —皮肤接触受影响地下水对应的地下水的暴露量（非致癌效应），L 地下水·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

RfD_d —皮肤接触参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

AHQ —可接受危害商，无量纲，取值为 1。

（5）基于所有暴露途径综合非致癌效应的地下水风险控制值

$$HCVG_n = \frac{WAF \times AHQ}{\frac{IOVER_{nc3} + IIVER_{nc2}}{RfD_i} + \frac{CGWER_{nc}}{RfD_o}}$$

式中：

$HCVG_n$ —单一污染物（第 n 种）基于 3 种地下水暴露途径综合的非致癌效应地下水风险控制值，mg/L。

4.6.2 风险控制值计算所需参数

土壤和地下水修复目标值计算过程涉及到污染物参数和地块特征参数。污染物参数包括污染物理化参数和毒理学参数，地块特征参数包括土壤参数、地下水参数、建筑物参数等，参考章节 4.3.6，详见表 4.3-4。

4.6.3 风险控制值计算结果

从便于修复实施和验收的角度出发，建议修复土壤时，各层土

壤选用统一的修复标准。并应将基于风险评估模型计算出的风险控制值作为主要参考值，结合标准筛选值及成熟修复地块经验，确定修复目标值。土壤风险控制值计算结果表 4.6-1。地下水风险控制值计算结果见表 4.6-2。

表 4.6-1 土壤中污染物的风险控制值结果

单位：mg/kg

| 污染物 | 风险控制值 |
|---|-------|
| 六价铬 | 1.42 |
| 砷 | 0.475 |
| 镍 | 212 |
| 五氯酚 | 1.08 |
| 苯并[a]蒽 | 5.44 |
| 苯并[a]芘 | 0.546 |
| 苯并[b]荧蒽 | 5.46 |
| 二苯并[a, h]蒽 | 0.547 |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 5.47 |
| 萘 | 3.82 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 826 |

表 4.6-2 地下水中污染物的风险控制值结果

单位：mg/L

| 污染物 | 风险控制值 |
|---|----------|
| 砷 | 0.000087 |
| 五氯酚 | 0.000326 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 0.572 |

第五章 地块修复目标值确定

5.1 地块修复目标值确定

5.1.1 土壤修复目标值确定

目前,我国对于土壤环境质量评价的标准或规范主要有《土壤环境质量建设用 地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018) 以及其他的 地方标准,《土壤环境质量建设用 地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018) 于 2018 年 8 月 1 日实施,是国内目前为止唯一的一个全国性的土壤标准,也是最新的标准,根据其编制说明,该标准中筛选值和管制值的计算和选用均采用目前符合国情的参数,因此在全国范围内具有较强的适用性;本地块修复目标值主要是由计算出风险控制值和《土壤环境质量建设用 地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018) 筛选值对比制定。

根据风险控制值计算结果,土壤砷(As)的风险控制计算值为 0.475mg/kg,远小于《土壤环境质量建设用 地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018) 中的第一类用地筛选值(20mg/kg)。如果选用风险控制计算值作为修复目标值,则可能造成过度修复。根据《土壤环境质量建设用 地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018) 表 1 底部“注:①具体地块土壤中污染物检测含量超过筛选值,但等于或者低于土壤环境背景值水平的,不纳入污染地块管理。土壤环境背景值可参见附录 A。”可知砷的评价标准以当地土壤类型的背景值为依据。根据广西环境科学研究所编制、广西科

学技术出版社出版的《土壤背景值研究方法及广西土壤背景值》中砷背景值数据作为调整后的修复目标值，以确保土壤修复后能达到受污染影响前的土壤砷含量水平。据调查显示，广西全区土壤背景 95% 置信上限值为 61.03mg/kg。本项目地块确属赤红壤与红壤过渡带区域，并且柳南片区大部分为石灰（岩）土，结合地块的规划用途、土壤类型、调查范围中砷含量、后期修复等因素综合考虑，本地块土壤砷的修复目标值建议采用 40 mg/kg。

土壤六价铬、五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘风险控制值计算结果均小于《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）的第一类用地筛选值。如果选用风险控制计算值作为修复目标值，则可能造成过度修复，建议修复目标值选取《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）的第一类用地筛选值。

土壤镍的风险控制值计算结果为 212mg/kg，如果选用《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）的第一类用地筛选值 150mg/kg 作为目标值，则可能造成过度修复，建议修复目标值选用风险控制计算值 212mg/kg。

土壤石油烃（C₁₀-C₄₀）的风险控制值计算结果为 826mg/kg，等于《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）的第一类用地筛选值，建议修复目标值选取《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》

(GB36600-2018) 的第一类用地筛选值。

具体的土壤修复目标比选见表 5.1-1。

表 5.1-1 土壤修复目标比选表

单位 mg/kg

| 污染物 | 风险 控制值 | (GB36600-2018) 一类用地 | | 红壤土背 景值 | 建议修复目 标值 |
|---|-----------|------------------------|------|------------|-------------|
| | | 筛选值 | 管制值 | | |
| 六价铬 | 1.42 | 3 | 30 | | 3 |
| 砷 | 0.475 | 20 | 120 | 40 | 40 |
| 镍 | 212 | 150 | 600 | / | 212 |
| 五氯酚 | 1.08 | 1.1 | 12 | / | 1.1 |
| 苯并[a]蒽 | 5.44 | 5.5 | 55 | / | 5.5 |
| 苯并[a]芘 | 0.546 | 0.55 | 5.5 | / | 0.55 |
| 苯并[b]荧蒽 | 5.46 | 5.5 | 55 | / | 5.5 |
| 二苯并[a, h]蒽 | 0.547 | 0.55 | 5.5 | / | 0.55 |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 5.47 | 5.5 | 55 | / | 5.5 |
| 萘 | 3.82 | 25 | 255 | / | 25 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 826 | 826 | 5000 | / | 826 |

5.1.2 地下水修复目标值确定

地下水砷、五氯酚风险控制值计算结果远远低于《地下水质量标准》(GB/T14848-2017) III类水标准限值，为了防止过度修复，建议地下水砷、五氯酚修复目标值选取《地下水质量标准》(GB/T14848-2017) III类水的标准限值。

地下水石油烃 (C₁₀-C₄₀) 风险控制值计算结果 0.572mg/L 与《荷兰建设部关于土地使用和环境干预值标准》中规定的标准值 0.6mg/L 接近，建议将计算的风险控制值 0.572 作为修复目标值。具体的地下水修复目标比选见表 5.1-2。

表 5.1-2 地下水修复目标比选表

单位：mg/L

| 污染物 | 风险控制值 | III类标准限值 | 修复目标值 |
|---|----------|----------|--------------|
| 砷 | 0.000087 | 0.01 | 0.01 |
| 五氯酚 | 0.000326 | 0.0009 | 0.0009 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 0.572 | 0.6* | <u>0.572</u> |

5.2 修复范围及方量确定

5.2.1 地块修复范围及修复量确定方法和原则

应用插值的方法估算污染土方量在其他地块的项目得到广泛应用，国内外亦有大量关于此类方法的研究数据及文献资料。本次调查地块地形相对平坦，土层较为均一等满足插值方法的应用条件。故，本项目修复范围的确定采用空间加权反距离插值法相结合的方法进行划定。

1、修复范围及修复方量确定原则

根据《建设用地土壤修复技术导则》(HJ 25.4-2019)中相关技术要求，确定以下地块修复范围划定的原则：

(1) 地块内的土壤和地下水分别以其修复目标值为基础进行污染边界划分；

(2) 根据样品采集的深度、地块土壤类型性质及污染程度来对地块土壤进行科学化分层，进一步确定污染范围及边界；

(3) 土壤清理体积是以地块原地面或钻孔的起始零点作为计算起始地面，不包括地块上现场调查后重新堆积的砖、石、灰、渣和水

泥等建筑垃圾。土方量按层分别计算，考虑到修复工程的可操作性，在对深层污染土壤进行取土或修复时，不可避免地涉及到对浅层土壤的扰动，但不同层次土壤在空间上相重叠的部分若只在深层有污染而浅层不污染，则浅层部分只需取土，无需修复，将总取土量和除这一部分的土方量后即得到需要处理的污染土方量。

(4) 针对土壤中不同的污染物先分别划定单一污染物的修复范围，然后再进行叠加合并，得出综合考虑各种污染物后的每一层需要修复的范围。

2、污染土方量估算方法如下：

(1) 岩土概化分层

为了合理确定修复范围，简化后续的污染土方量计算难度，同时考虑后续修复工程修复的可行性，将土壤性质均匀及水文和地质条件相近的土层归为相同层。

根据勘察可知，地块地层从上至下可分为杂填土层、黏土层和卵石层。为了准确计算修复范围及修复方量，根据采样深度和地块地层岩性分布和污染程度，保守性原则将地块地层自上而下概化为 6 个分层：第一层（0~2m）为杂填土层，第二层（2~5m）到第四层（10~15m）为黏土层，第五层（15~20m）到第六层（20~26m）为卵石层。具体分层见表 5.2-1。

(2) 分层插值数据的选取

当同一土层中有多个土壤样品时，将选取该层各样品检测结果的最大值作为本点位在本土层中的污染物含量；当该土层未送检样品

时,则使用本深度相邻土层中污染物含量的最大值作为本点位在本土层中的污染物含量。

表 5.2-1 地块地层分层

| 序号 | 层次 | 土壤深度 (m) | 土壤质地 |
|----|-----|----------|------|
| 1 | 第一层 | 0~2 | 杂填土层 |
| 2 | 第二层 | 2~5 | 黏土层 |
| 3 | 第三层 | 5~10 | 黏土层 |
| 4 | 第四层 | 10~15 | 黏土层 |
| 5 | 第五层 | 15~20 | 卵石层 |
| 6 | 第六层 | 20~26 | 卵石层 |

(2) 软件计算

首先,依据各采样点坐标和污染物检测浓度进行插值,初步确定修复范围:反距离插值法(Inverse Distance to a Power 插值法)的基本原理是设平面上分布一系列离散点,已知其坐标 (x_i, y_i) 和属性值 $z_i (i=1, 2, \dots, n)$, $p(x, y)$ 为任一网格点,根据周围离散点的属性值,通过距离加权插值求 p 点属性值。距离加权插值法综合了泰森多边形的邻近点法和多元回归法的渐变方法的长处,它假设 p 点的属性值是在局部领域内中所有数据点的距离加权平均值,可以进行确切的或者圆滑的方式插值。其相关步骤和示意图如下:

计算未知点到所有点的距离;

计算每个点的权重:权重是距离的倒数的函数。

$$\lambda_i = \frac{\left(\frac{1}{d}\right)^{-p}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d}\right)^{-p}}$$

$$\hat{Z}(X_0, Y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i, Y_i)$$

式中： λ 为权重； d 为距离； Z 为已知值； Z 为估计值； p 为权重。

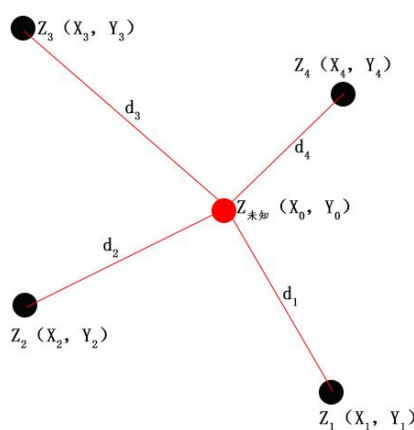


图 5.2-1 反距离插值法示意图

在本次插值分析将基于 ArcGIS 10.2 平台进行计算与展示。根据相关文献，插值权重为 2 时即可达到较高的差值精度，且计算工作量较小；计算时的数据搜索半径越大，计算精度越高，一般情况下大于 10 时亦可达到较高的插值精度，但半径越大，计算量也就越大，因此综合考虑各种因素，本次插值选择的搜索半径为 12；象元大小表示的是将矢量点数据插值成栅格的面数据后的栅格大小，栅格越小，其插值精度越高，插值的工作量也越大，因此综合考虑各种因素，本次插值选择的象元大小将比默认值小两个数量级，即 0.05。综上，本次插值分析的预设参数为：插值权重 7，搜索半径 12，象元大小 0.05。

并在插值结束后，计算相关区域的面积及拐点。

其次，结合加密检测结果及地块实际情况进行修正，即依据加密布点后超标样品点和不超标样品点来判断修复边界，根据实际污染及地块特征等情况，结合专业判断的方式确定最终的修复范围。

5.2.2 土壤修复范围与方量

5.2.2.1 修复范围及拐点

(1) 第一层（0-2m）污染区域

具体修复范围见图 5.2-2，修复范围拐点坐标见附件 2。

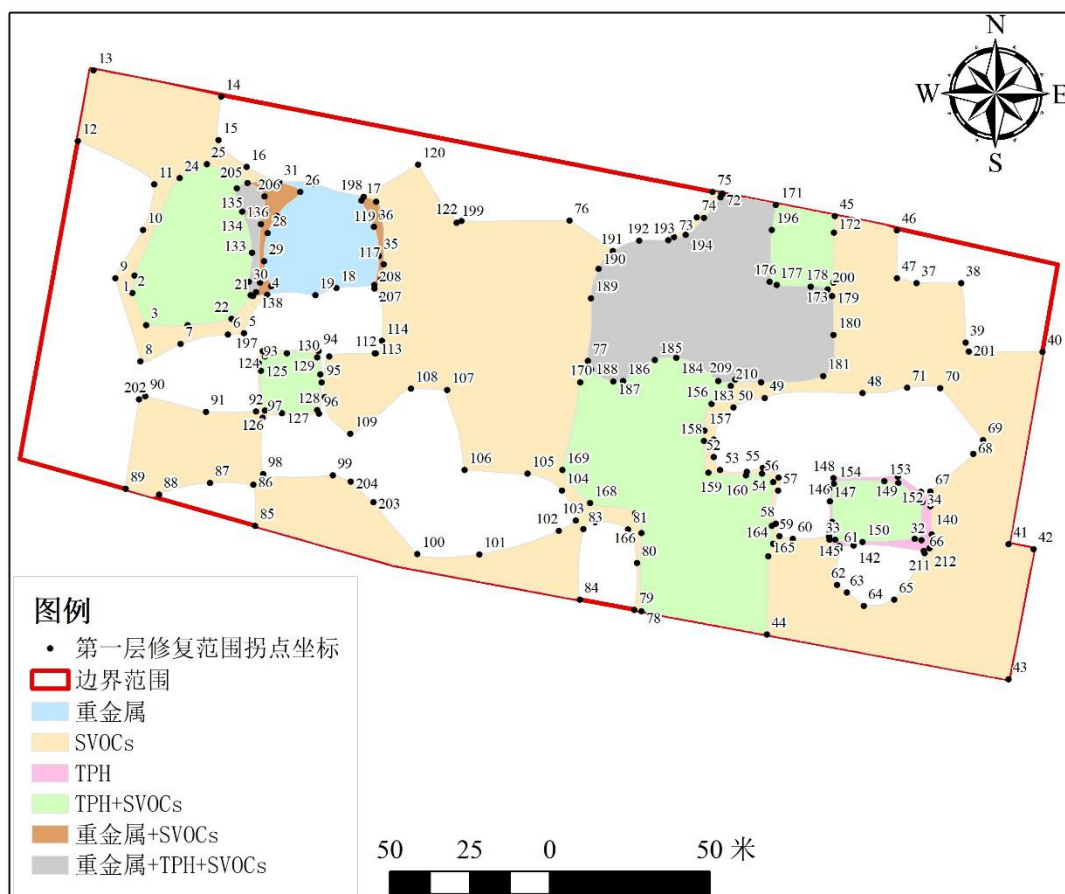


图 5.2-2 第一层（0~2m）土壤修复范围

(2) 第二层 (2-5m) 污染区域及拐点

具体修复范围见图 5.2-3，修复范围拐点坐标见附件 2。

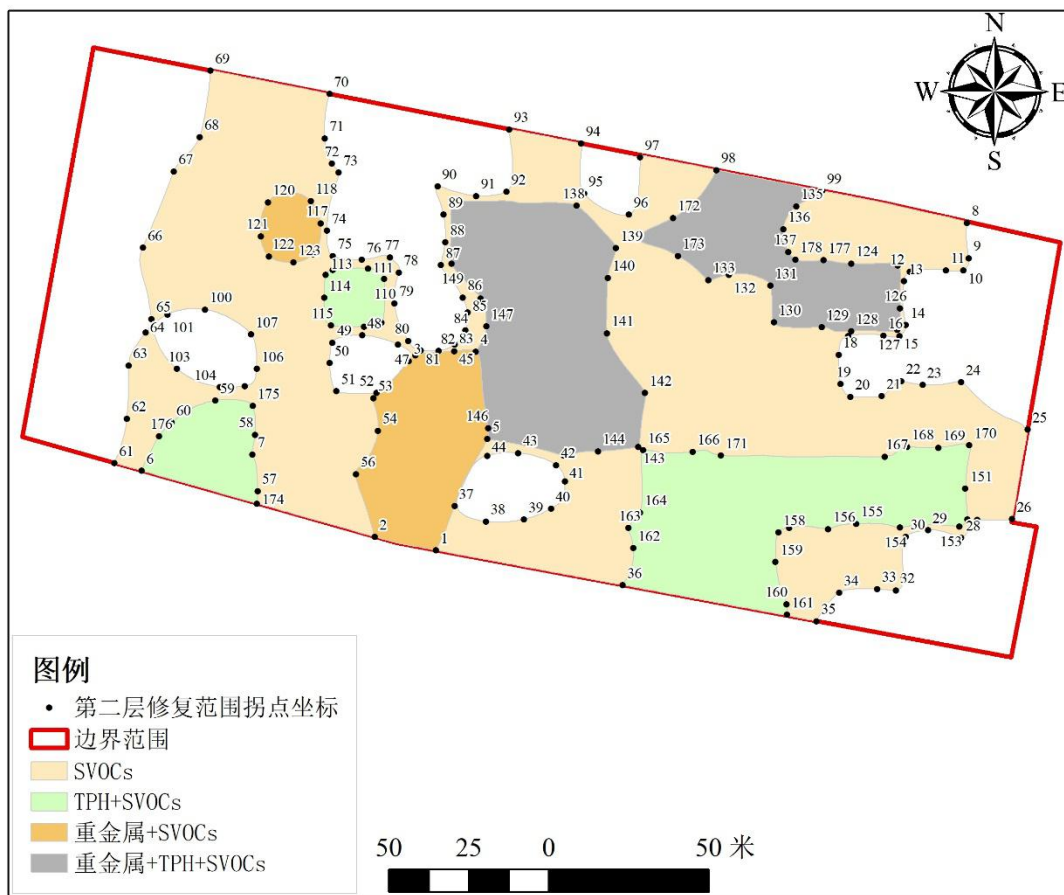


图 5.2-3 第二层 (2~5m) 土壤修复范围

(3) 第三层 (5-10m) 污染区域及拐点

具体修复范围见图 5.2-4，修复范围拐点坐标见附件 2。

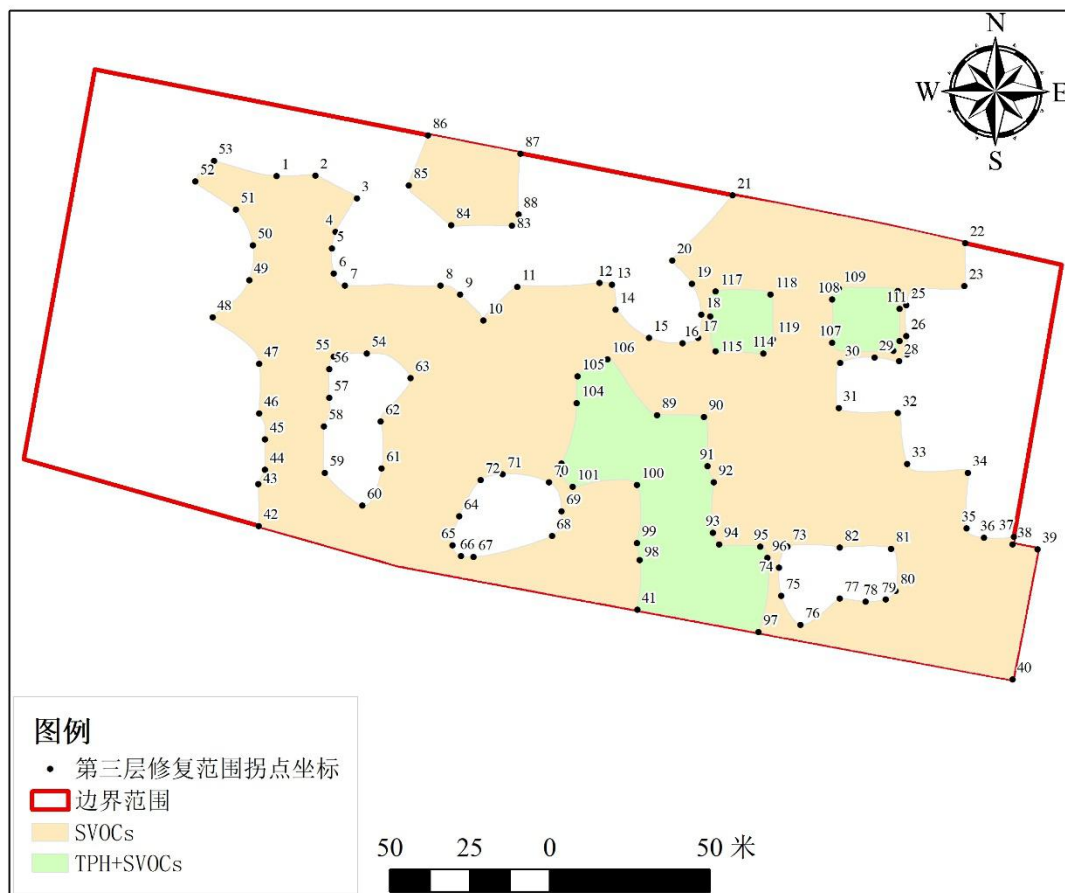


图 5.2-4 第三层 (5~10m) 土壤修复范围

(4) 第四层 (10-15m) 污染区域及拐点

具体修复范围见图 5.2-5，修复范围拐点坐标见附件 2。

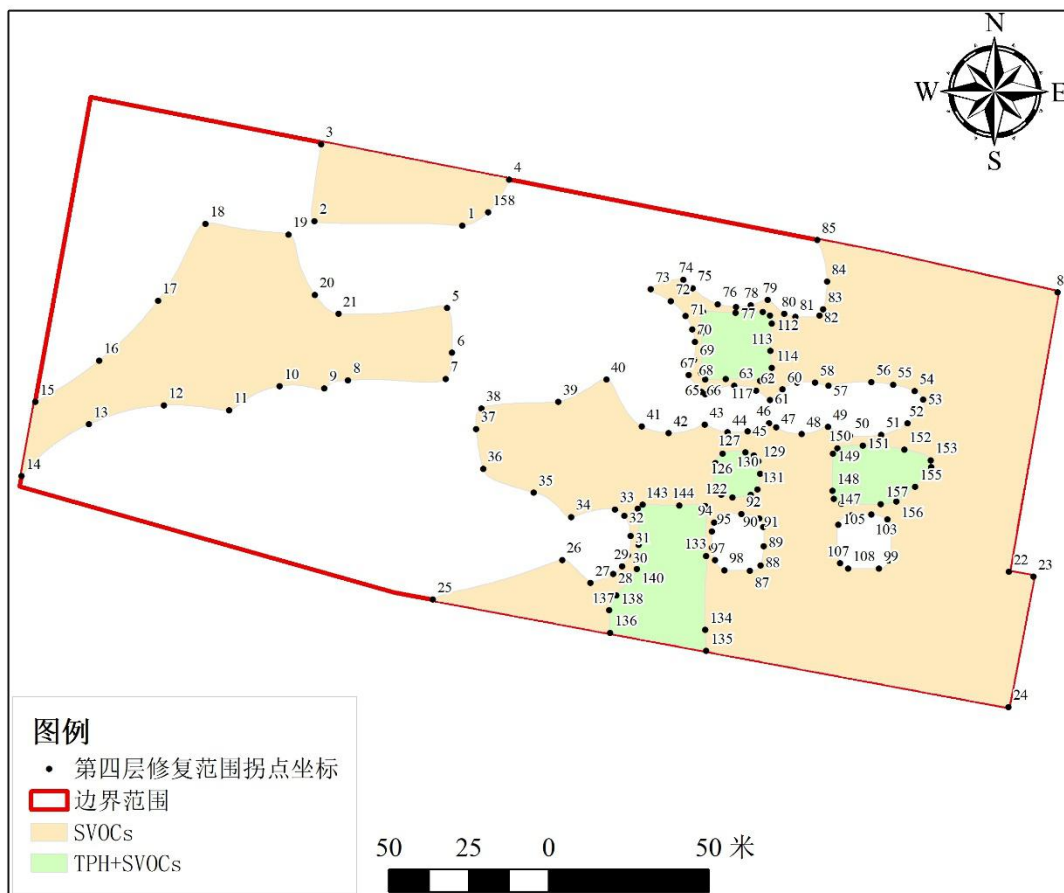


图 5.2-5 第四层 (10-15m) 土壤修复范围

(5) 第五层 (15-20m) 污染区域及拐点

具体修复范围见图 5.2-6，修复范围拐点坐标见附件 2。

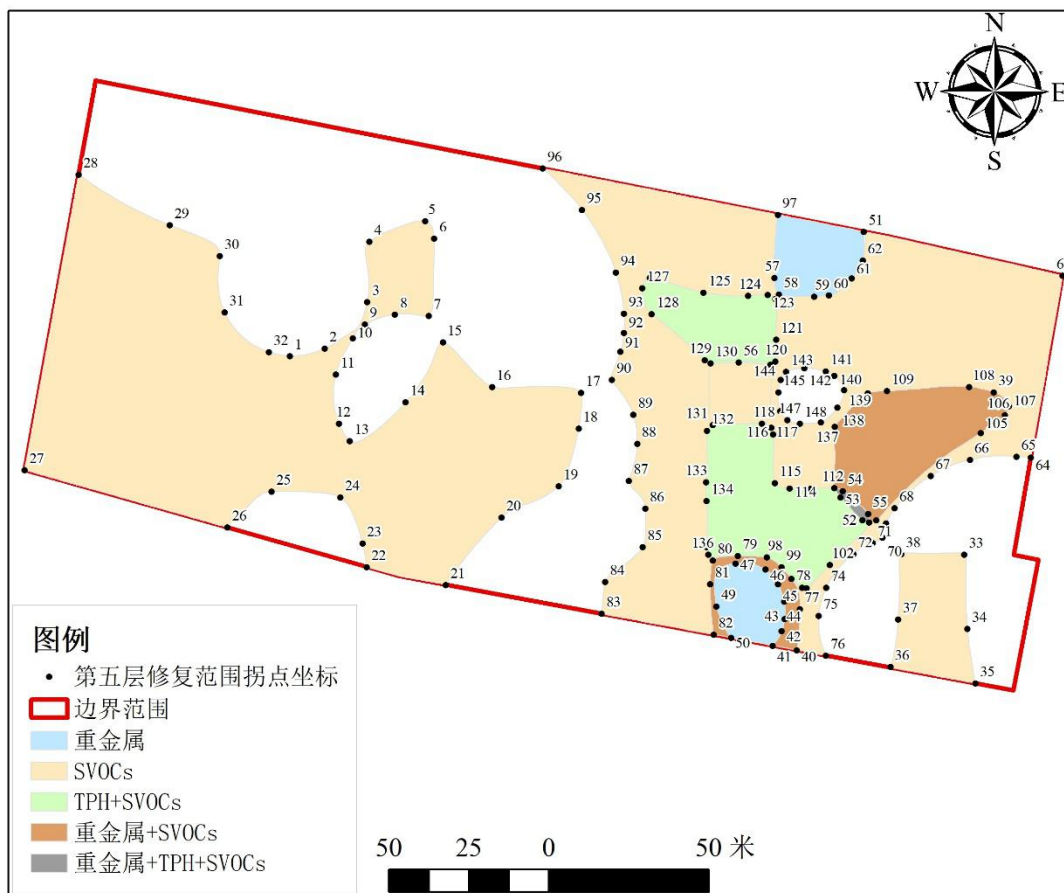


图 5.2-6 第五层 (15-20m) 土壤修复范围

(6) 第六层 (20-26m) 污染区域及拐点

具体修复范围见图 5.2-7，修复范围拐点坐标见附件 2。

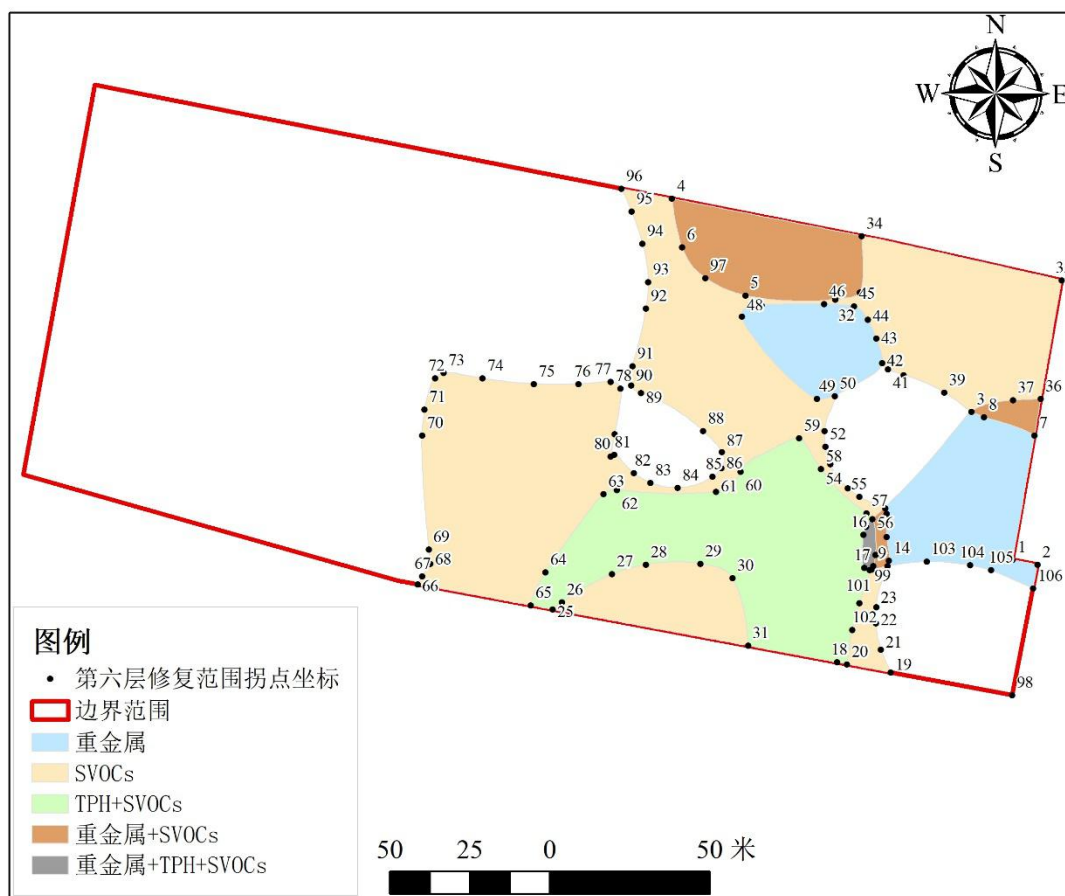


图 5.2-7 第 6 层 (20-26m) 土壤修复范围

5.2.2.2 土壤修复面积及方量

基于上文的计算结果，采用“面积 (m²) × 厚度 (m) = 方量 (m³)”的公式，计算出每一层的污染土方量，总污染土方量 578756.36m³，各层污染土方量详见表 5.2-2 地块土壤修复面积及污染土方量，不同的污染类型土壤修复面积及污染土方量统计见表 5.2-3。

表 5.2-2 地块土壤修复面积及污染土方量

| 分层 | 污染类型 | 面积 (m ²) | 厚度 (m) | 方量 (m ³) |
|-----------------|---------------|----------------------|--------|----------------------|
| 第一层 (0~2m) | 重金属 | 996.29 | 2 | 1992.58 |
| | SVOCs | 15409.39 | 2 | 30818.78 |
| | TPH | 161.81 | 2 | 323.62 |
| | TPH+SVOCs | 6229.94 | 2 | 12459.88 |
| | 重金属+SVOCs | 230.92 | 2 | 461.84 |
| | 重金属+TPH+SVOCs | 3278.56 | 2 | 6557.12 |
| 第二层 (2~5m) | SVOCs | 16018.30 | 3 | 48054.9 |
| | TPH+SVOCs | 4534.70 | 3 | 13604.1 |
| | 重金属+SVOCs | 2142.38 | 3 | 6427.14 |
| | 重金属+TPH+SVOCs | 5404.60 | 3 | 16213.8 |
| 第三层 (5~10m) | SVOCs | 19146.60 | 5 | 95733 |
| | TPH+SVOCs | 3381.41 | 5 | 16907.05 |
| 第四层 (10~15m) | SVOCs | 18443.62 | 5 | 92218.1 |
| | TPH+SVOCs | 2169.98 | 5 | 10849.9 |
| 第五层 (15~20m) | 重金属 | 1043.29 | 5 | 5216.45 |
| | SVOCs | 20318.49 | 5 | 101592.5 |
| | TPH+SVOCs | 2260.18 | 5 | 11300.9 |
| | 重金属+SVOCs | 1576.91 | 5 | 7884.55 |
| | 重金属+TPH+SVOCs | 33.87 | 5 | 169.35 |
| 第六层 (20~26m) | 重金属 | 1351.17 | 6 | 8107.02 |
| | SVOCs | 10140.4 | 6 | 60842.4 |
| | TPH+SVOCs | 3617.45 | 6 | 21704.7 |
| | 重金属+SVOCs | 1503.93 | 6 | 9023.58 |
| | 重金属+TPH+SVOCs | 48.85 | 6 | 293.1 |
| 合计 | | | | 578756.36 |

表 5.2-3 不同污染类型污染土方量统计

| 污染类型 | 方量 (m ³) |
|-------|----------------------|
| 重金属 | 15316.05 |
| SVOCs | 429259.68 |
| TPH | 323.62 |
| 复合物污染 | 133857.01 |
| 合计 | 578756.36 |

5.2.3 地下水修复范围与面积

5.2.3.1 修复范围及拐点

根据样品检测数据、修复目标值，利用 ArcGIS10.2 软件计算出的修复范围见图 5.2-8。修复范围拐点见附件 3。

地下水总的修复面积为 37483.48m²，其中半挥发性有机物五氯酚的修复面积为 16339.6m²，石油烃（C₁₀-C₄₀）和半挥发性有机物五氯酚的复合污染修复面积为总 16752m²，重金属砷和石油烃（C₁₀-C₄₀）和半挥发性有机物五氯酚的复合污染的修复面积为 4391.88m²。

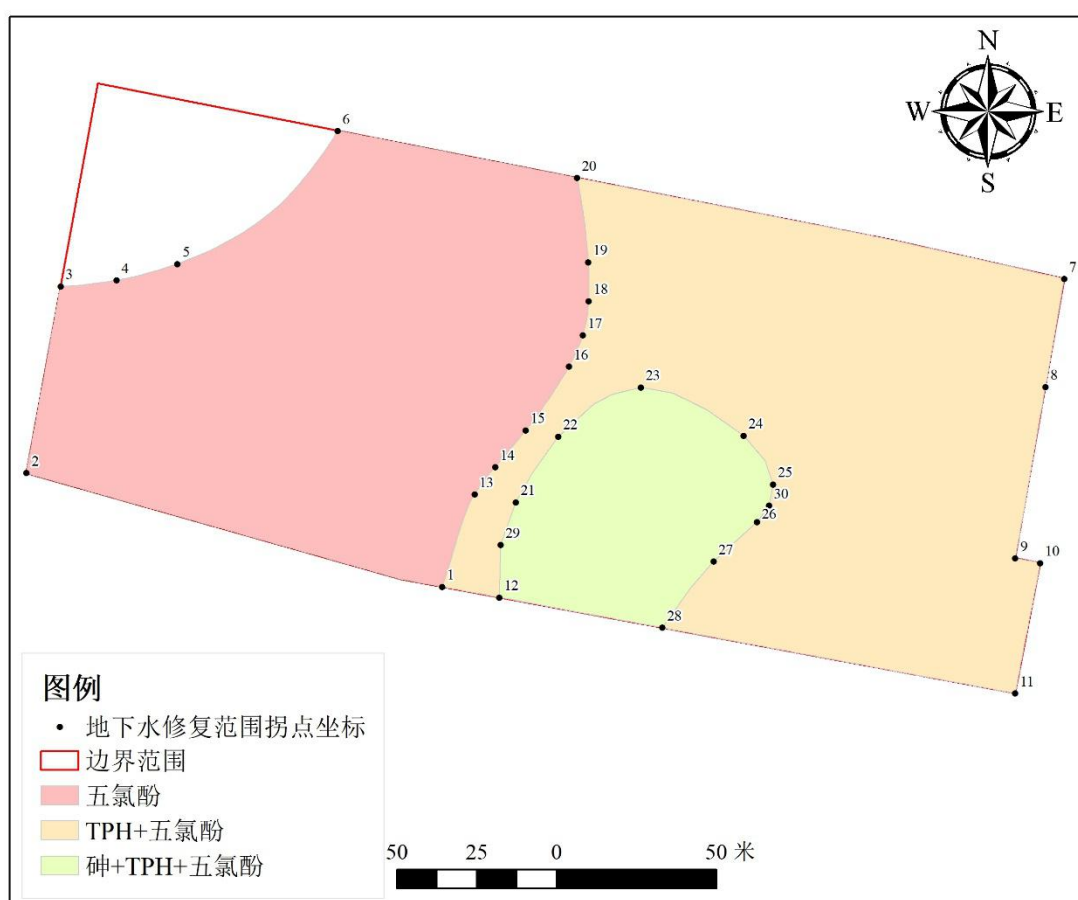


图 5.2-8 地下水修复范围

表 5.2-4 地下水修复面积

| 污染类型 | 面积 (m ²) |
|------|----------------------|
| 五氯酚 | 16339.6 |

| | |
|-------------|-----------------|
| TPH+五氯酚 | 16752 |
| 重金属+TPH+五氯酚 | 4391.88 |
| 合计 | 37483.48 |

第六章 地块修复建议

6.1 修复技术筛选原则

在选择修复与处置技术的过程中首先必须下列要求：

- (1) 修复技术成熟可靠性原则；
- (2) 修复技术经济可行性原则；
- (3) 修复技术安全性原则；
- (4) 修复技术环境可行性原则。

针对本地块，从以下方面对涉及到的修复技术进行筛选：污染现状及区域水文地质特征、污染物的毒性和迁移性、修复技术的可实施性、修复的短期和长期效果、修复成本、健康与环境安全、政府和公众接受程度等方面筛选可以量化的指标，主要包括地块特征依赖性、资源需求、环境影响和经济因素四个方面，应根据地块特征、区域环境特征和环境保护要求确定。

地块特征依赖性指标主要包括土壤温度、土壤湿度、土壤颗粒粒径、渗透性/粘土含量、空间需求等。

资源需求方面的指标主要包括修复前的预处理、对水电消耗、添加剂、修复监测、运输、技工、土壤气体处理和后处理等。

环境影响程度指标主要包括修复工程对环境的影响程度、二次污染的危险程度、对施工人员和周边人群安全和健康的影响等。

经济因素指标按处理步骤分成预处理成本、处理成本、后处理成本。每一种均可以包括劳动力成本、监测成本、燃料成本、装置成本、

安装/拆卸成本、操作维护成本、运输成本、水电成本、专利成本等。

初始筛选条件主要包括修复技术是否能针对性地处理关注污染物、修复效果的好坏、修复技术是否成熟、成本/效益是否合理、能否和其它修复技术集成、修复技术是否容易获得、修复时间是否允许、修复过程是否对环境和安全产生不利影响、是否满足法律法规等要求。

6.2 修复技术比选

6.2.1 土壤修复技术比选

根据调查及风险评估结果，本地块土壤中污染物为重金属（六价铬、砷、镍）、SVOCs（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）和石油烃（C₁₀-C₄₀）。

综合考虑项目的后续开发情况、修复周期及成本，初步筛选出如下适用技术：

适用于土壤重金属污染的修复技术主要有异位固化/稳定化技术、土壤淋洗技术、异位化学还原技术等；

适用于土壤 SVOCs 污染的修复技术主要有异位热脱附技术、化学氧化/还原技术、生物堆技术等；

适用于土壤石油烃污染的修复技术主要有生物堆技术、异位化学氧化技术、异位热脱附技术、水泥窑协同处置技术等。

6.2.1.1 异位固化/稳定化技术

(1) 适用的介质：污染土壤

(2) 可处理的污染物类型：金属类、石棉、放射性物质、腐蚀性无机物、氰化物、砷化合物等无机物以及农药/除草剂、石油或多环芳烃类、多氯联苯类以及二噁英等有机化合物。

(3) 应用限制条件：不适用于挥发性有机化合物和以污染物总量为验收目标的项目。当需要添加较多的固化/稳定剂时，对土壤的增容效应较大，会显著增加后续土壤处置费用。

(4) 原理：向污染土壤中添加固化剂/稳定剂，经充分混合，使其与污染介质、污染物发生物理、化学作用，将污染土壤固封为结构完整的具有低渗透性的固化体，或将污染物转化成化学性质不活泼形态，降低污染物在环境中的迁移和扩散。

(5) 系统构成和主要设备：主要由土壤预处理系统、固化/稳定剂添加系统、土壤与固化/稳定剂混合搅拌系统组成。其中，土壤预处理系统具体包括土壤水分调节系统、土壤杂质筛分系统、土壤破碎系统。主要设备包括土壤挖掘系统（如挖掘机等）、土壤水分调节系统（如输送泵、喷雾器、脱水机等）、土壤筛分破碎设备（如振动筛、筛分破碎斗、破碎机、土壤破碎斗、旋耕机等）、土壤与固化/稳定剂混合搅拌设备（双轴搅拌机、单轴螺旋搅拌机、链锤式搅拌机、切割锤击混合式搅拌机等）。

(6) 项目适用性：能有效处理本项目的重金属污染土壤，多环芳烃、石油烃污染土壤亦有一定的处理效果。

6.2.1.2 土壤淋洗技术

(1) 适用的介质：污染土壤。

(2) 可处理的污染物类型：重金属及半挥发性有机污染物、难挥发性有机污染物

(3) 应用限制条件：不适合于土壤细粒（粘/粉粒）含量高于 25% 的土壤；处理含挥发性有机物污染土壤时，应采取合适的气体收集处理设施。

(4) 原理：污染物主要集中分布于较小的土壤颗粒上，异位土壤洗脱是采用物理分离或增效洗脱等手段，通过添加水或合适的增效剂，分离重污染土壤组分或使污染物从土壤相转移到液相的技术。经过洗脱处理，可以有效地减少污染土壤的处理量，实现减量化。

(5) 系统构成和主要设备：异位土壤洗脱处理系统一般包括土壤预处理单元、物理分离单元、洗脱单元、废水处理及回用单元及挥发气体控制单元等。具体场地修复中可选择单独使用物理分离单元或联合使用物理分离单元和增效洗脱单元。

(6) 主要设备包括土壤预处理设备（如破碎机、筛分机等）、输送设备（皮带机或螺旋输送机）、物理筛分设备（湿法振动筛、滚筒筛、水力旋流器等）、增效洗脱设备（洗脱搅拌罐、滚筒清洗机、水平振荡器、加药配药设备等）、泥水分离及脱水设备（沉淀池、浓缩池、脱水筛、压滤机、离心分离机等）、废水处理系统（废水收集箱、沉淀池、物化处理系统等）、泥浆输送系统（泥浆泵、管道等）、自动控制系统。

(7) 项目适用性：本项目污染土壤黏土含量较高，不适用于该技术，故不建议采用本技术。

6.2.1.3 生物堆技术

(1) 适用的介质：污染土壤、油泥

(2) 可处理的污染物类型：石油烃等易生物降解的有机物。

(3) 应用限制条件：不适用于重金属、难降解有机污染物污染土壤的修复，粘土类污染土壤修复效果较差。

(4) 对污染土壤堆体采取人工强化措施，促进土壤中具备污染物降解能力的土著微生物或外源微生物的生长，降解土壤中的污染物。

(5) 系统构成和主要设备

生物堆主要由土壤堆体、抽气系统、营养水分调配系统、渗滤液收集处理系统以及在线监测系统组成。其中，土壤堆体系统具体包括污染土壤堆、堆体基础防渗系统、渗滤液收集系统、堆体底部抽气管网系统、堆内土壤气监测系统、营养水分添加管网、顶部进气系统、防雨覆盖系统。抽气系统包括抽气风机及其进气口管路上游的气水分离和过滤系统、风机变频调节系统、尾气处理系统、电控系统、故障报警系统。营养水分调配系统主要包括固体营养盐溶解搅拌系统、流量控制系统、营养水分投加泵及设置在堆体顶部的营养水分添加管网。

渗滤液收集系统包括收集管网及处理装置。在线监测系统主要包括土壤含水率、温度、二氧化碳和氧气在线监测系统。

主要设备包括抽气风机、控制系统、活性炭吸附罐、营养水分添加泵、土壤气监测探头、氧气、二氧化碳、水分、温度在线监测仪器

等。

(6) 项目适用性：可处理本项目石油烃等易生物降解的污染土壤，不过修复周期较长，且对黏土类土壤效果不佳，不建议采用。

6.2.1.4 异位热脱附修复技术

(1) 适用的介质：污染土壤

(2) 可处理的污染物类型：挥发及半挥发性有机污染物（如石油烃、农药、多环芳烃、多氯联苯）和汞。

(3) 应用限制条件：不适用于无机物污染土壤（汞除外），也不适用于腐蚀性有机物、活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤。

(4) 原理：通过直接或间接加热，将污染土壤加热至目标污染物的沸点以上，通过控制系统温度和物料停留时间有选择地促使污染物气化挥发，使目标污染物与土壤颗粒分离，去除。

(5) 系统构成和主要设备：

异位热脱附系统可分为直接热脱附和间接热脱附，也可分为高温热脱附和低温热脱附。

1) 直接热脱附由进料系统、脱附系统和尾气处理系统组成。进料系统：通过筛分、脱水、破碎、磁选等预处理，将污染土壤从车间运送到脱附系统中。脱附系统：污染土壤进入热转窑后，与热转窑燃烧器产生的火焰直接接触，被均匀加热至目标污染物气化的温度以上，达到污染物与土壤分离的目的。尾气处理系统：富集气化污染物的尾气通过旋风除尘、焚烧、冷却降温、布袋除尘、碱液淋洗等环节去除尾气中的污染物。

2) 间接热脱附由进料系统、脱附系统和尾气处理系统组成。与直接热脱附的区别在于脱附系统和尾气处理系统。脱附系统：燃烧器产生的火焰均匀加热转窑外部，污染土壤被间接加热至污染物的沸点后，污染物与土壤分离，废气经燃烧直排。尾气处理系统：富集气态污染物的尾气通过过滤器、冷凝器、超滤设备等环节去除尾气中的污染物。气体通过冷凝器后可进行油水分离，浓缩、回收有机污染物。

主要设备包括进料系统：如筛分机、破碎机、振动筛、链板输送机、传送带、除铁器等；脱附系统：回转干燥设备或是热螺旋推进设备；尾气处理系统：旋风除尘器、二燃室、冷却塔、冷凝器、布袋除尘器、淋洗塔、超滤设备等。

(6) 项目适用性：能有效处理本项目的多环芳烃类及石油烃污染土壤。

6.2.1.5 异位化学氧化/还原技术

(1) 适用的介质：污染土壤

(2) 可处理的污染物类型：化学氧化可处理石油烃、BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、酚类、MTBE（甲基叔丁基醚）、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机物；化学还原可处理重金属类（如六价铬）和氯代有机物等。

(3) 应用限制条件：异位化学氧化不适用于重金属污染土壤的修复，对于吸附性强、水溶性差的有机污染物应考虑必要的增溶、脱附方式；异位化学还原不适用于石油烃污染物的处理。

(4) 原理：向污染土壤添加氧化剂或还原剂，通过氧化或还原

作用，使土壤中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常见的氧化剂包括高锰酸盐、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸盐和臭氧。常见的还原剂包括连二亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、硫酸亚铁、多硫化钙、二价铁、零价铁等。

(5) 系统构成和主要设备：修复系统包括土壤预处理系统、药剂混合系统和防渗系统等。其中：1) 预处理系统。对开挖出的污染土壤进行破碎、筛分或添加土壤改良剂等。该系统设备包括破碎筛分铲斗、挖掘机、推土机等。2) 药剂混合系统。将污染土壤与药剂进行充分混合搅拌，按照设备的搅拌混合方式，可分为两种类型：采用内搅拌设备，即设备带有搅拌混合腔体，污染土壤和药剂在设备内部混合均匀；采用外搅拌设备，即设备搅拌头外置，需要设置反应池或反应场，污染土壤和药剂在反应池或反应场内通过搅拌设备混合均匀。该系统设备包括行走式土壤改良机、浅层土壤搅拌机等。3) 防渗系统为反应池或是具有抗渗能力的反应场，能够防止外渗，并且能够防止搅拌设备对其损坏，通常做法有两种，一种采用抗渗混凝土结构，一种是采用防渗膜结构加保护层。

(6) 项目适用性：能处理本项目的石油烃及部分低浓度多环芳烃污染土壤，能处理六价铬污染土壤，建议采用。

6.2.1.6 水泥窑协同处置技术

- (1) 适用的介质：污染土壤；
- (2) 可处理的污染物类型：有机污染物及重金属；
- (3) 应用限制条件：不宜用于汞、砷、铅等重金属污染较重的

土壤；由于水泥生产对进料中氯、硫等元素的含量有限值要求，在使用该技术时需慎重确定污染土的添加量。

(4) 原理：利用水泥回转窑内的高温、气体长时间停留、热容量大、热稳定性好、碱性环境、无废渣排放等特点，在生产水泥熟料的同时，焚烧固化处理污染土壤。有机物污染土壤从窑尾烟气室进入水泥回转窑，窑内气相温度最高可达 1800℃，物料温度约为 1450℃，在水泥窑的高温条件下，污染土壤中的有机污染物转化为无机化合物，高温气流与高细度、高浓度、高吸附性、高均匀性分布的碱性物料（CaO、CaCO₃ 等）充分接触，有效地抑制酸性物质的排放，使得硫和氯等转化成无机盐类固定下来；重金属污染土壤从生料配料系统进入水泥窑，使重金属固定在水泥熟料中。

(5) 系统构成和主要设备：水泥窑协同处置包括污染土壤贮存、预处理、投加、焚烧和尾气处理等过程。在原有的水泥生产线基础上，需要对投料口进行改造，还需要必要的投料装置、预处理设施、符合要求的贮存设施和实验室分析能力。

水泥窑协同处置主要由土壤预处理系统、上料系统、水泥回转窑及配套系统、监测系统组成。土壤预处理系统在密闭环境内进行，主要包括密闭贮存设施（如充气大棚），筛分设施（筛分机），尾气处理系统（如活性炭吸附系统等），预处理系统产生的尾气经过尾气处理系统后达标排放。上料系统主要包括存料斗、板式喂料机、皮带计量秤、提升机，整个上料过程处于密闭环境中，避免上料过程中污染物和粉尘散发到空气中，造成二次污染。水泥回转窑及配套系统主要包

括预热器、回转式水泥窑、窑尾高温风机、三次风管、回转窑燃烧器、篦式冷却机、窑头袋收尘器、螺旋输送机、槽式输送机。监测系统主要包括氧气、粉尘、氮氧化物、二氧化碳、水分、温度在线监测以及水泥窑尾气和水泥熟料的定期监测，保证污染土壤处理的效果和生产安全。

(6) 项目适用性：能有效处理本项目的多环芳烃及石油烃污染土壤，对污染浓度较低的重金属污染土壤亦能有效处理。

6.2.1.7 土壤阻隔填埋技术

(1) 适用的介质：污染土壤。

(2) 可处理的污染物类型：适用于重金属、有机物及重金属有机物复合污染土壤。

(3) 应用限制条件：不宜用于污染物水溶性强或渗透率高的污染土壤，不适用于地质活动频繁和地下水水位较高的地区。

(4) 原理：将污染土壤或经过治理后的土壤置于防渗阻隔填埋场内，或通过敷设阻隔层阻断土壤中污染物迁移扩散的途径，使污染土壤与四周环境隔离，避免污染物与人体接触和随降水或地下水迁移进而对人体和周围环境造成危害。按其实施方式，可以分为原位阻隔覆盖和异位阻隔填埋。

原位阻隔覆盖是将污染区域通过在四周建设阻隔层，并在污染区域顶部覆盖隔离层，将污染区域四周及顶部完全与周围隔离，避免污染物与人体接触和随地下水向四周迁移。也可以根据场地实际情况结合风险评估结果，选择只在场地四周建设阻隔层或只在顶部建设覆盖

层。

异位阻隔填埋是将污染土壤或经过治理后的土壤阻隔填埋在由高密度聚乙烯膜（HDPE）等防渗阻隔材料组成的防渗阻隔填埋场里，使污染土壤与四周环境隔离，防止污染土壤中的污染物随降水或地下水迁移，污染周边环境，影响人体健康。该技术虽不能降低土壤中污染物本身的毒性和体积，但可以降低污染物在地表的暴露及其迁移性。

（5）系统构成和主要设备：原位土壤阻隔覆盖系统主要由土壤阻隔系统、土壤覆盖系统、监测系统组成。土壤阻隔系统主要由 HDPE 膜、泥浆墙等防渗阻隔材料组成，通过在污染区域四周建设阻隔层，将污染区域限制在某一特定区域；土壤覆盖系统通常由粘土层、人工合成材料衬层、砂层、覆盖层等一层或多层组合而成；监测系统主要是由阻隔区域上下游的监测井构成。异位土壤阻隔填埋系统主要由土壤预处理系统、填埋场防渗阻隔系统、渗滤液收集系统、封场系统、排水系统、监测系统组成。其中：该填埋场防渗系统通常由 HDPE 膜、土工布、钠基膨润土、土工排水网、天然粘土等防渗阻隔材料构筑而成。根据项目所在地地质及污染土壤情况需要，通常还可以设置地下水导排系统与气体抽排系统或者地面生态盖系统。

主要设备包括：阻隔填埋技术施工阶段涉及大量的施工工程设备，土壤阻隔系统施工需冲击钻、液压式抓斗、液压双轮铣槽机等设备，土壤覆盖系统施工需要挖掘机、推土机等设备，填埋场防渗阻隔系统施工需要吊装设备、挖掘机、焊膜机等设备，异位土壤填埋施工

需要装载机、压实机、推土机等设备，填埋封场系统施工需要吊装设备、焊膜机、挖掘机等设备。阻隔填埋技术在运行维护阶段需要的设备相对较少，仅异位阻隔填埋土壤预处理系统需要破碎、筛分设备、土壤改良机等设备。

(6) 项目适用性：成本较低，且能有效降低污染物对周边环境的影响，不过需结合后续地块开发情况进行设计。

表 6.2-1 土壤修复技术比选表

| 技术名称 | 技术路线简介 | 应用参考因素 | | | 适应性 | 应用的不适应性 | 结论 |
|-----------|---|---------------|------------------|-------|---|--|-------|
| | | 成熟性 | 时间条件 | 资金水平 | | | |
| 异位固化/稳定化 | 通过物理或化学的方法固定土壤中的污染物防止其在环境中的进一步迁移、扩散。要对污染区域进行封闭或对人类活动有限制。要定时对地块进行监测。 | 技术成熟 | 需要时间中等，如6-8个月。 | 较低到中等 | 对于重金属和放射性污染土壤比较合适。 | 固化材料会老化或失效，而且水浸泡、冰冻/融化都会影响固化效果，一般不用于含氯有机物和农药地块。增大污染物的体积。地块依然存在潜在的较大风险。 | 建议采用 |
| 土壤淋洗 | 用水或添加表面活性剂、螯合剂的水溶液来淋洗土壤，将土壤中污染物淋洗到溶液中。被清洗后的土壤经检测合格后可以回收利用。淋洗土壤的溶液需要收集起来进行无害化处理，处理后的水可以回用于淋洗，处理后的残渣可以填埋。 | 技术成熟/国内未见应用报道 | 需要时间中等，如6-8个月 | 较高 | (1) 可以同时去除土壤中的有机污染物和重金属。(2) 对于大粒径、低有机碳的土壤较适合。项目地块较多污染土壤粒径较大，重金属污染面积较大使用该技术经济。 | 对粘土和粉土中的污染物相对较难清洗出来，后续的泥水分离比较困难。 | 不建议采用 |
| 异位化学氧化/还原 | 向污染土壤添加氧化剂或还原剂，通过氧化或还原作用，使土壤中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常用的氧化剂有含催化剂的过氧化氢类物质、高锰酸钾、臭氧、过硫酸钠等。要对污染区域进行封闭或对人类活动有限制。需定期监测。 | 技术成熟/国内有一定应用 | 需要时间较短，一般为数周到数月。 | 中等 | 对于较高浓度、难生物降解的有机污染物相对比较有效和经济。 | 化学氧化效果受土壤迁移作用影响较大，化学氧化的注入半径需根据具体土质情况根据经验或进行试验后确定。不适于重金属修复。 | 建议采用 |

| 技术名称 | 技术路线简介 | 应用参考因素 | | 适应性 | 应用的不适应性 | 结论 | |
|-----------|---|--------------|---------------------------------|-----|--|--|-------------|
| 水泥窑协同处置技术 | 将污染土和水泥生料一起进入回转窑,通过高强度的加热,将土壤熔化,被污染的土壤转变成稳定的玻璃和固态晶体。控制污染土壤的配比,将污染土壤烧制为水泥。 | 较成熟/国内工程案例较多 | 由于受水泥品质限制,添加比例低,处理能力视水泥窑数量和容量而定 | 高 | 适用于不宜挥发的重金属污染的固化及几乎全部有机污染物的破坏去除,污染物去除比较长久彻底。 | 需合理调控添加比,控制不当会对水泥产品质量有影响;汞砷等易挥发重金属不适合。(2)常规水泥窑尾气处理系统需改造以减少二噁英排放。 | 不建议使用 |
| 异位热脱附技术 | 将土壤输入旋转的容器中,并保持容器中的真空以及低氧条件,通过火焰、蒸汽、热油等方式将容器加热,使得容器内的土壤保持某一温度,并且持续一定的时间。在此过程中,土壤中的污染物和水分将成为气体或呈细颗粒状进入气相。挥发性气体进入燃烧室焚烧摧毁其中的有机物质。最后的尾气经过洗涤处理后排放。通过控制反应器的温度及土壤在反应器中的停留时间,可使污染物挥发出来,但是不发生氧化、分解等化学反应。 | 技术成熟/国内已有应用 | 处理周期几周到几年。 | 高 | (1)针对挥发性和半挥发性有机化合物比较有效,辅以合适的尾气处理系统,适应的污染物浓度水平也比较宽泛。(2)热处理可采用原地修复,节约污染土壤运输费用。 | (1)需要消耗大量的燃料,且焚烧后土壤丧失土壤的正常性质,修复后土壤用途受限。(2)需要较准确的控制回转窑内温度和土壤的停留时间 | 建议使用 |
| 生物堆技术 | 对污染土壤堆体采取人工强化措施,促进土壤中具备降解特定污染物能力的土著微生物或外源微生物的生长,降解土壤中的污染物。 | 技术成熟/国内已有应用 | 处理周期一般为1-6个月。 | 较低 | 适用于污染土壤,可处理石油烃等易生物降解的有机物。 | 不适用于重金属、难降解有机污染物污染土壤的修复,黏土类污染土壤修复效果较差。 | 不适用黏土,不建议采用 |

| 技术名称 | 技术路线简介 | 应用参考因素 | | | 适应性 | 应用的不适应性 | 结论 |
|--------------|--|---------------|---------|----|-------------------------------|--|------|
| 土壤阻隔 填埋技术 | 将污染土壤或经过治理后的土壤置于防渗阻隔填埋场内，或通过敷设阻隔层阻断土壤中污染物迁移扩散的途径，使污染土壤与四周环境隔离，避免污染物与人体接触和随土壤水迁移进而对人体和周围环境造成危害。 | 技术成熟/国内工程案例较多 | 处理周期较短。 | 较低 | 适用于重金属、有机物及重金属有机物复合污染土壤的阻隔填埋。 | 不宜用于污染物水溶性强或渗透率高的污染土壤，不适用于地质活动频繁和地下水水位较高的地区。 | 建议采用 |

6.2.2 地块土壤修复建议

结合场地污染物特性、污染特征、场地土壤和水文地质条件及施工限制、当地社会经济实际情况、地块未来规划条件，充分考虑我国污染土壤修复技术的成熟性、时效性、修复成本及适用性等方面，对污染土壤进行修复技术的初步筛选，考虑地下水水位和地块污染特征，并结合地块未来规划修建一层开挖到 5m 的地下室，建议针对 0~7.0m 深度范围内的污染土壤进行开挖修复，7m 以下采取阻隔技术进行风险管控，本项目土壤修复建议如下：

(1) 针对 0~7.0m 重金属污染的土壤建议采用异位固化/稳定化技术修复，修复后产物按照《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》（HJ557-2010）作浸出实验，浸出液满足《地下水质量标准》III 类水质标准作为土壤修复目标值；

(2) 针对 0~7mSVOCs 和石油烃污染土壤建议采用化学氧化/还原技术或异位热脱附技术修复。

(3) 对于 7m 以下的污染土壤及地下水建议采用土壤阻隔技术进行风险管控。

(4) 针对 0-7m 土壤污染土方量合计 181969.78m³。

表 6.2-2 地块污染物修复目标

| 污染物 | 修复目标值 (mg/kg) |
|--------|---------------|
| 六价铬 | 3 |
| 砷 | 40 |
| 镍 | 212 |
| 五氯酚 | 1.1 |
| 苯并[a]蒽 | 5.5 |
| 苯并[a]芘 | 0.55 |

| 污染物 | 修复目标值 (mg/kg) |
|---|---------------|
| 苯并[b]芘 | 5.5 |
| 二苯并[a, h]蒽 | 0.55 |
| 茚并[1, 2, 3-cd]芘 | 5.5 |
| 萘 | 25 |
| 石油烃 (C ₁₀ -C ₄₀) | 826 |

6.2.3 地块地下修复建议

本地块的超标毒理学指标为砷、五氯酚、苯并[a]芘、石油烃 (C₁₀-C₄₀)，考虑地下水中超标有害污染物苯并[a]芘未超过可接受风险；此外，地块内地下水类型主要为上层滞水和孔隙潜水，地块岩土体为二元结构，上部黏土、黏土夹卵（砾）石为弱透水含水层。地块内地下水水位动态变幅较小，一般 1.00~3.00m，地下水主要以大气降水补给为主，水量小，对备用水源地的影响较小且不存在直接饮用的暴露途径，其风险可接受。

因此，综合土壤修复过程可能涉及上层滞水和孔隙潜水的渗出可能性，建议如下：

(1)对 0-7m 修复过程的上层滞水和孔隙潜水渗出形成的基坑降水或现场遗留的地表积水进行统一收集后，进入现场污水处理设施妥善治理；

(2)7m 以下的地下水配合土壤阻隔技术进行风险管控和制度控制。

(3)地下水的修复面积约 37483.48m²。

表 6.2-3 地下水修复和风险管控技术适用性分析表

| 技术分类 | 技术名称 | 优点 | 缺点 | 适用的目标污染物 | 地块适用性 | 技术成熟度 | 效率 | 成本 | 时间 | 环境风险 | 技术适用性 |
|------|----------|--|--|----------------------|---|------------------|---------|----------|----------------|------|-------|
| 异位修复 | 抽出处理技术 | 对于地下水污染物浓度较高、地下水埋深较大的污染地块具有优势；对污染地下水的早期处理见效快；设备简单，施工方便 | 不适用于渗透性较差的含水层；对修复区域干扰大；能耗大 | 适用于多种污染物 | 适用于渗透性较好的孔隙、裂隙和岩溶含水层，污染范围大、地下水埋深较大的污染地块。也可用于采空区积水 | 国外已广泛应用，国内已有工程应用 | 初期高，后期低 | 初期中等，后期高 | 周期较长，需要数年到数十年 | 低 | 不适用 |
| 原位修复 | 监测自然衰减技术 | 费用低，对环境的影响较小 | 需要较长监测时间 | 适用于易降解的有机物 | 适用于污染程度较低、污染物自然衰减能力较强的孔隙、裂隙和岩溶含水层 | 国外已广泛应用 | 低 | 低 | 周期较长，需要数年或更长时间 | 低 | 适用 |
| 风险管控 | 垂直阻隔技术 | 施工方便，使用的材料较为普遍，可有效将污染物阻隔在特定区域 | 阻隔效果受地下水中 pH，污染物类型、活性、分布，墙体的深度、长度、宽度，地块水文地质条件等影响 | 适用于“三氮”、重金属和持久性有机污染物 | 适用于地下水埋深较浅的孔隙、岩溶和裂隙含水层 | 国外已广泛应用，国内已有工程应用 | 高 | 低 | 周期较长，需要数年或更长时间 | 低 | 不适用 |

| 技术分类 | 技术名称 | 优点 | 缺点 | 适用的目标污染物 | 地块适用性 | 技术成熟度 | 效率 | 成本 | 时间 | 环境风险 | 技术适用性 |
|------|----------|-------------------------|--|-----------------|---|------------------|----|----|----------------|------|-------|
| 风险管控 | 制度控制 | 费用低，环境影响小 | 存在地下水污染扩散风险；时间较长 | 适用于多种污染物 | 适用于需减少或阻止人群对地下水中污染物暴露的地块，孔隙、裂隙和岩溶含水层均适用 | 国外已广泛应用，国内已有应用 | 低 | 低 | 周期较长，需要数年或更长时间 | 低 | 适用 |
| 风险管控 | 可渗透反应墙技术 | 反应介质消耗较慢，具备几年甚至几十年的处理能力 | 可渗透反应墙填料需要适时更换；需要对地下水的 pH 等进行控制；可能存在二次污染 | 适用于石油烃、氯代烃和重金属等 | 适用于渗透性较好的孔隙、裂隙和岩溶含水层 | 国外已广泛应用，国内已有工程应用 | 中 | 中 | 周期较长，需要数年到数十年 | 中 | 不适用 |

第七章 结论和建议

7.1 地块调查概况

本次调查地块土壤存在重金属（六价铬、砷、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）污染，相应污染物在土壤中的监测浓度超过《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》（GB36600-2018）的第一类用地筛选值。地下水存在毒理学指标（砷、五氯酚、苯并[a]芘）、石油烃（C₁₀-C₄₀）污染，地下水污染物浓度超过《地下水质量标准》（GB/T14848-2017）III类水标准限值。经土壤污染状况调查判断该地块为污染地块，不能满足后续开发利用的要求，后续需要对本地块进行风险评估，以确定本地块的污染情况对人体健康的风险和相应的管控或修复目标要求。

7.2 地块风险评估结论

土壤中关注污染物为重金属（六价铬、砷、镍）、半挥发性有机物（五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘）、石油烃（C₁₀-C₄₀），风险表征结果显示，土壤关注污染物（六价铬、砷、镍、五氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘、萘、石油烃（C₁₀-C₄₀））的人体健康风险均超出可接受风险水平，需要对地块土壤中超出可接受风险水平的关注污染物采取修复或风险管控措施，经过风险评估计算，地块中土壤污染物修复目标值与《土壤环境质量建设用地土壤污

染风险管控标准》(GB36600-2018)的第一类用地筛选值一致,土壤各污染物的修复目标值分别为:六价铬 3mg/kg, 砷 40mg/kg, 镍 212mg/kg, 五氯酚 1.1mg/kg, 苯并[a]蒽 5.5mg/kg, 苯并[a]芘 0.55mg/kg, 苯并[b]荧蒽 5.5mg/kg, 二苯并[a, h]蒽 0.55mg/kg, 茚并[1, 2, 3-cd]芘 5.5mg/kg, 萘 25mg/kg, 石油烃(C₁₀-C₄₀) 826mg/kg。总的污染土方量合计 578756.36m³。

地下水中关注污染物为毒理学指标(砷、五氯酚、苯并[a]芘)、石油烃(C₁₀-C₄₀), 风险表征结果显示, 地下水关注污染物苯并[a]芘的人体健康风险未超出可接受风险水平, 其余关注污染物(砷、五氯酚、石油烃(C₁₀-C₄₀))的人体健康风险均超出可接受风险水平, 需要对地块地下水中超出可接受风险水平的关注污染物采取修复或风险管控措施。经过风险评估计算, 地块中地下水污染物砷和五氯酚修复目标值与《地下水质量标准》(GB/T14848-2017) III类水的标准限值一致, 石油烃(C₁₀-C₄₀)修复目标值参考《荷兰建设部关于土地使用和环境干预值标准》。地下水各污染物的修复目标值分别为: 砷 0.01mg/L, 五氯酚 0.0009mg/L, 石油烃(C₁₀-C₄₀) 0.572mg/L。地下水总的修复面积为 37483.48m²。

7.3 地块修复建议

7.3.1 土壤修复建议

根据技术可行性评估结果、地块污染物特征、地块未来规划, 并综合考虑资金成本及时间成本等因素, 本地块修复建议如下:

(1) 针对 0~7m 重金属污染土壤建议采用异位固化/稳定化修复技术。

(2) 针对 0~7m SVOCs 和石油烃 (C₁₀-C₄₀) 污染土壤建议采用异位化学氧化/还原或异位热脱附技术。

(3) 对于 7m 以下的污染土壤及污染地下水建议采用阻隔技术进行风险管控。

(4) 针对 0-7m 土壤污染土方量合计 181969.78m³。

7.3.2 地下水修复建议

(1) 对 0-7m 修复过程的上层滞水和孔隙潜水渗出形成的基坑降水或现场遗留的地表积水进行统一收集后, 进入现场污水处理设施妥善治理;

(2) 7m 以下的地下水配合土壤阻隔技术进行风险管控和制度控制。

(3) 地下水的修复面积约 37483.48m²。

7.4 地块环境管理建议

(1) 在未来开发利用其间, 应防止外部污染源输入地块, 或地块内的污染物外流造成污染。

(2) 制定修复过程汇总的环境监测方案和二次污染防治方案, 包括水、气、声、固体废物以及土壤等。

(3) 本地块为污染地块, 在相关修复等工作完成前, 严禁进行进一步开发。

7.5 不确定性分析

风险评估过程受各种因素的影响，比如数据来源、模型概化、物化与生化过程中的识别程度等，均可能导致结果的不确定性。综合各种因素考虑，本次地块风险评价的不确定性主要源于暴露评价、毒性评价、模型及其参数等的不确定性。

(1) 暴露情景参数：本次评估中主要暴露情景参数包括暴露人群体重、暴露期、土壤摄入量等。计算时这些参数均来自《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3-2019)的推荐值。然而，对于个体的实际暴露剂量因人而异。

(2) 毒性效应参数：目前常用的毒性效应参数主要基于动物实验的结果，而化学物质对于不同动物以及人类的毒性效应存在差异，在从动物无可见有害水平或者观察到损害作用的最低剂量推算至针对人类的摄入量参考剂量 (RfD) 时引入了不确定性因子 (UF) 和修正因子 (MF)。UF 和 MF 的取值也存在一定的不确定性，导致其推导得出的针对人类的毒性效应参数也存在不确定性。

(3) 气态污染物扩散模型：挥发性有机物或半挥发性有机物从地下土壤中迁移扩散至空气中，它在空气中的浓度直接影响暴露受体通过呼吸暴露途径的风险值。主要影响计算结果的参数包括气态污染物挥发因子 VF 和气态污染物扩散因子 DF。VF 和 DF 的计算过程涉及参数较多，主要包括地块土壤特征参数、室外空气扩散条件参数、室内空气扩散条件参数、建筑物特性等等。

土壤特征性参数主要采用本地块的实际测量值进行计算，以减少

不确定性。室外空气扩散条件参数、室内空气扩散条件参数、建筑物特性等参数主要采用《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ25.3-2019）的推荐值。然而，导则中的推荐值与实际情况可能存在一定差异。