

BLUESTAR

济南裕兴化工有限责任公司原厂区
土壤污染状况调查与风险评估报告

(公示稿)



中蓝连海设计研究院有限公司

2020年10月26日

目 录

目 录.....	I
1 概述.....	1
1.1 项目背景.....	1
1.2 调查和评估目的及原则.....	1
1.2.1 调查及评估目的.....	1
1.2.2 调查及评估原则.....	2
1.3 报告编制依据.....	2
1.3.1 法律法规和政策.....	2
1.3.2 标准导则和规范.....	2
1.3.3 其他相关文件.....	4
1.4 调查和评估内容及程序.....	4
1.4.1 调查和评估工作内容.....	4
1.4.2 技术路线.....	5
2 地块概况.....	7
2.1 地块基本情况.....	7
2.2 地理位置及调查范围.....	7
2.3 地块所有权人.....	7
2.4 地块现状.....	7
2.5 地块历史.....	8
2.6 敏感目标.....	10
2.7 周边地块现状和历史.....	11
2.8 地块利用的规划.....	15
3 地块地质勘察.....	16
3.1 勘查方案.....	16
3.2 水文地质测试.....	17
3.3 调查结果.....	18
3.3.1 地块硬化地面.....	18
3.3.2 土层.....	18
3.3.3 地下水.....	23
4 初步调查.....	27
4.1 初步调查采样点位及检测项目.....	27
4.2 初步调查结果.....	27
4.2.1 土壤污染物.....	27
4.2.2 地下水污染物.....	27
5 详细调查采样及检测.....	29
5.1 详细调查采样点位.....	29
5.2 补充调查点位.....	31
5.2.1 氟化物污染区域布点及采样.....	31
5.2.2 钒污染区域布点及采样.....	31
5.2.3 地下水常规指标及对照点检测布点及采样.....	33
5.3 检测指标.....	34
5.4 污染状况调查结果.....	34
5.4.1 土壤污染状况.....	34
5.4.2 地下水污染状况.....	37
5.4.3 对照点污染物含量.....	42
6 地块污染概念模型.....	43
6.1 地块总体信息.....	43
6.2 地块地理及水文地质特征.....	44

6.3	污染源特征.....	46
6.4	污染物迁移转化机制.....	46
6.5	污染物暴露途径和受体.....	47
7	地块风险评估.....	48
7.1	风险评估流程.....	48
7.2	危害识别.....	49
7.3	暴露评估.....	49
7.3.1	暴露情景.....	49
7.3.2	暴露途径.....	49
7.3.3	暴露模型.....	51
7.3.4	模型参数.....	55
7.4	毒性评估.....	57
7.5	风险表征.....	61
7.6	不确定性分析.....	66
7.7	风险控制值计算.....	66
7.7.1	常规重金属风险控制值计算.....	66
7.7.2	铅的风险控制值.....	69
8	建议修复目标值及修复范围.....	70
8.1	修复及开发思路建议.....	70
8.2	土壤建议修复目标值.....	70
8.2.1	建议土壤清挖目标值.....	71
8.2.2	建议土壤异位修复目标值.....	72
8.2.3	建议土壤原位修复目标值.....	73
8.3	地下水建议修复目标值.....	74
8.3.1	地下水建议原位修复目标值.....	74
8.3.1	基坑水处理水质要求建议.....	74
8.4	修复范围.....	75
9	地块修复技术建议.....	76
9.1	总体方案建议.....	76
9.2	地块阻隔技术建议.....	78
9.3	修复技术建议.....	78
9.4	六价铬原位修复技术经济可行性.....	79
9.5	修复后的后期管理措施建议.....	80

1 概述

1.1 项目背景

济南裕兴化工有限责任公司（以下简称“裕兴化工”）原厂区位于济南市天桥区小清河北路北侧。裕兴化工原厂区建厂于 1919 年，主要生产铬盐、钛白粉、硫酸、磷肥等产品。根据《山东省人民政府关于济南裕兴化工总厂实施限期治理的通知》（鲁政发[2005]105 号文）的要求和多次论证，裕兴化工于 2009 年 12 月实施了搬迁改造项目，搬迁至济南市天桥区化工产业园并建设年产 100kt 金红石型钛白粉项目。原厂区地块规划为住宅用地。

2009 年搬迁后，裕兴化工针对原厂区污染土壤开展了一系列工作：按照政府相关规定要求先后进行了原厂区地块环境调查、风险评估，确定地块特征污染物为 Cr(VI)，污染区域主要分布在高架桥两侧；制定了土壤修复方案，开展了土壤修复可行性研究，编制了土壤修复工程环境影响评价报告；2017 年，《济南裕兴化工有限责任公司原厂区 Cr(VI)污染土壤修复工程环境影响报告书》取得济南市环保局批复后，土壤修复工程正式启动。截止 2018 年底，已按修复方案修复完成部分建筑垃圾和 Cr(VI)污染土壤。

2018 年 8 月 1 日，《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》（GB 36600-2018）开始实施。为满足《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》（GB 36600-2018）和即将于 2019 年 1 月 1 日施行的《中华人民共和国土壤污染防治法》的要求，裕兴化工决定再次开展原厂区地块环境调查、地块污染风险评估，重新确定修复目标值的修复范围，制定新的修复方案。

2018 年 12 月，裕兴化工就原厂区污染土壤修复项目地块环境调查等项目进行公开招标，我公司中标该项目。本报告为裕兴化工原厂区地块的土壤污染调查和风险评估报告。

1.2 调查和评估目的及原则

1.2.1 调查及评估目的

为避免地块内残留的污染物可能对未来地块内及周边活动人员身体健康造成影响，结合收集到的资料进行污染识别，开展地块土壤污染状况调查，根据调查结果和现场实际情况开展风险评估工作。主要目的是明确污染物是否会对人体健康和周边环境产生风险，若存在风险，给出各污染物风险控制值和建议修复目

标值、修复范围和体积。

1.2.2 调查及评估原则

根据土壤污染状况调查和风险评估的内容及管理要求,本项目地块整体调查和评估工作遵循以下原则:

(1) 针对性原则: 针对裕兴化工地块的特征和潜在污染物特性, 进行污染物种类、浓度和空间分布调查, 开展风险评估工作, 为地块的环境管理提供依据。

(2) 规范性原则: 采用程序化和系统化的方式规范土壤污染状况调查和评估过程, 保证调查和评估过程的科学性和客观性。

(3) 可操作性原则: 综合考虑调查方法、时间和经费等因素, 结合当前科技发展和专业技术水平使调查过程切实可行, 使评估结果符合实际。

1.3 报告编制依据

1.3.1 法律法规和政策

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》(2015年1月1日);
- (2) 《中华人民共和国水污染防治法》(主席令【2018】87号);
- (3) 《中华人民共和国土壤污染防治法》(2019年1月1日);
- (4) 《土壤污染防治行动计划》(国发【2016】31号);
- (5) 《污染地块土壤管理办法(试行)》(环保部令第42号);
- (6) 《关于加强工业企业关停、搬迁及原址场地再开发利用过程中污染防治工作的通知》(环发【2014】66号);
- (7) 《山东省环境保护条例》(山东省人大第99号令, 2001年12月7日第九届人大常委会第24次会议修订);
- (8) 《山东省水污染防治条例》(2000年10月26日省九届人大常委会第17次会议通过);
- (9) 《济南市土壤污染治理与修复规划(2018-2020)》;
- (10) 《济南市人民政府关于印发济南市土壤污染防治工作方案的通知》(济政发【2017】15号)。

1.3.2 标准导则和规范

- (1) 《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018);
- (2) 《场地环境调查技术导则》(HJ 25.1-2014);

- (3) 《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2-2014）；
- (4) 《建设用地土壤污染状况调查技术导则》（HJ25.1-2019）；
- (5) 《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》（HJ 25.2-2019）；
- (6) 《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）；
- (7) 《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2019）；
- (8) 《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）；
- (9) 《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》（HJ 682-2019）；
- (10) 《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》；
- (11) 《建设用地土壤环境调查评估技术指南》（环保部公告【2017】第78号）；
- (12) 《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166-2004）；
- (13) 《地下水环境监测技术规范》（HJ/T 164-2004）；
- (14) 《地表水和污水监测技术规范》（HJ/T 91-2002）；
- (15) 《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）；
- (16) 《土的分类标准》（GB J145-90）；
- (17) 《工程测量规范》（GB 50026-2007）；
- (18) 《地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则》（HJ 1019-2019）；
- (19) 《上海市建设用地土壤污染状况调查，风险评估，风险管控与修复方案编制，风险管控与修复效果评估工作的补充规定（试行）》；
- (20) 《建设用地土壤污染风险筛选值》（DB13/T 5216-2020）；
- (21) 《铬渣污染治理环境保护技术规范（暂行）》（HJ/T 301-2007）；
- (22) 《固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法》（HJ/T 300-2007）；
- (23) 《生活垃圾填埋场污染控制标准》（GB16889-2008）；
- (24) 《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》（GB18599-2001）；
- (25) 《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》（GB5085.3-2007）；
- (26) 《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》（HJ/T 299-2007）；

(27) 《固体废物再生利用污染防治技术导则》(HJ1091-2020)；

(28) 《水泥窑协同处置固体废物技术规范》(GB 30760-2014)。

1.3.3 其他相关文件

(1) 《济南裕兴化工有限责任公司原厂区 Cr(VI)污染土壤修复工程环境影响报告书》，山东省环境保护科学研究设计院(2017.03)；

(2) 济南裕兴化工有限责任公司提供的关于原厂区原料、工艺、中间体、产品等与厂地使用历史相关的资料；

(3) 其他与本地块相关的文件资料。

1.4 调查和评估内容及程序

1.4.1 调查和评估工作内容

本次地块土壤污染状况调查主要包括以下几方面：

(1) **资料收集、人员访谈与现场踏勘：**通过资料收集、人员访谈与现场踏勘确认地块内及周围区域当前和历史上有无可能的污染源；

(2) **水文地质勘察：**通过搜集裕兴化工的相关文件、工程地质和岩土工程资料结合现场采用钻探、静力触探等勘探手段，查明地块的地层分布及地下水的埋藏条件，对地块稳定性做出评价，为本项目的后期工作提供水文地质资料。

(3) **地球物理调查：**通过对污染场区分析，及依据场区不同的物性特性与需求，建立污染潜势电性模型或测量准则，进而初步圈定出土壤及地下水污染深度与污染区域的空间分布状况，为后期调查和施工提供可靠信息。

(4) **采样方案制定与确认：**结合国家标准采样规范要求、现场的施工条件与地块人员访谈、踏勘的结果，制定土壤和地下水调查方案，旨在明确地块土壤和地下水的污染种类、污染程度及分布范围；

(5) **现场样品采集及流转：**送往实验室进行 Cr(VI)、砷、铅、镉、镍、汞、铜、镉、钴和总石油烃(TPH)的化学分析；

(6) **实验室检测分析及质量控制：**选择具有 CMA 和 CNAS 认证的第三方实验室分析检测送检样品中的目标污染物，通过提高质量控制手段保证样品分析的准确性和精确性；

(7) **检测结果处理与分析：**将检测结果与相关评价标准进行对比和总结，初步得出地块中主要污染物类型、污染水平，分析污染物种类与浓度及在地块中的分布特征。

(8) **地块风险评估**：包括危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征和土壤和地下水风险控制值的计算等。

1.4.2 技术路线

本次裕兴化工土壤污染状况调查根据《场地环境调查技术导则》（HJ 25.1-2014）开展，风险评估根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）开展。本项目土壤污染状况调查和评估整体技术路线图如图 1.4-1、1.4-2 所示。本报告在风险控制值计算后给出了建议修复目标值和修复范围。

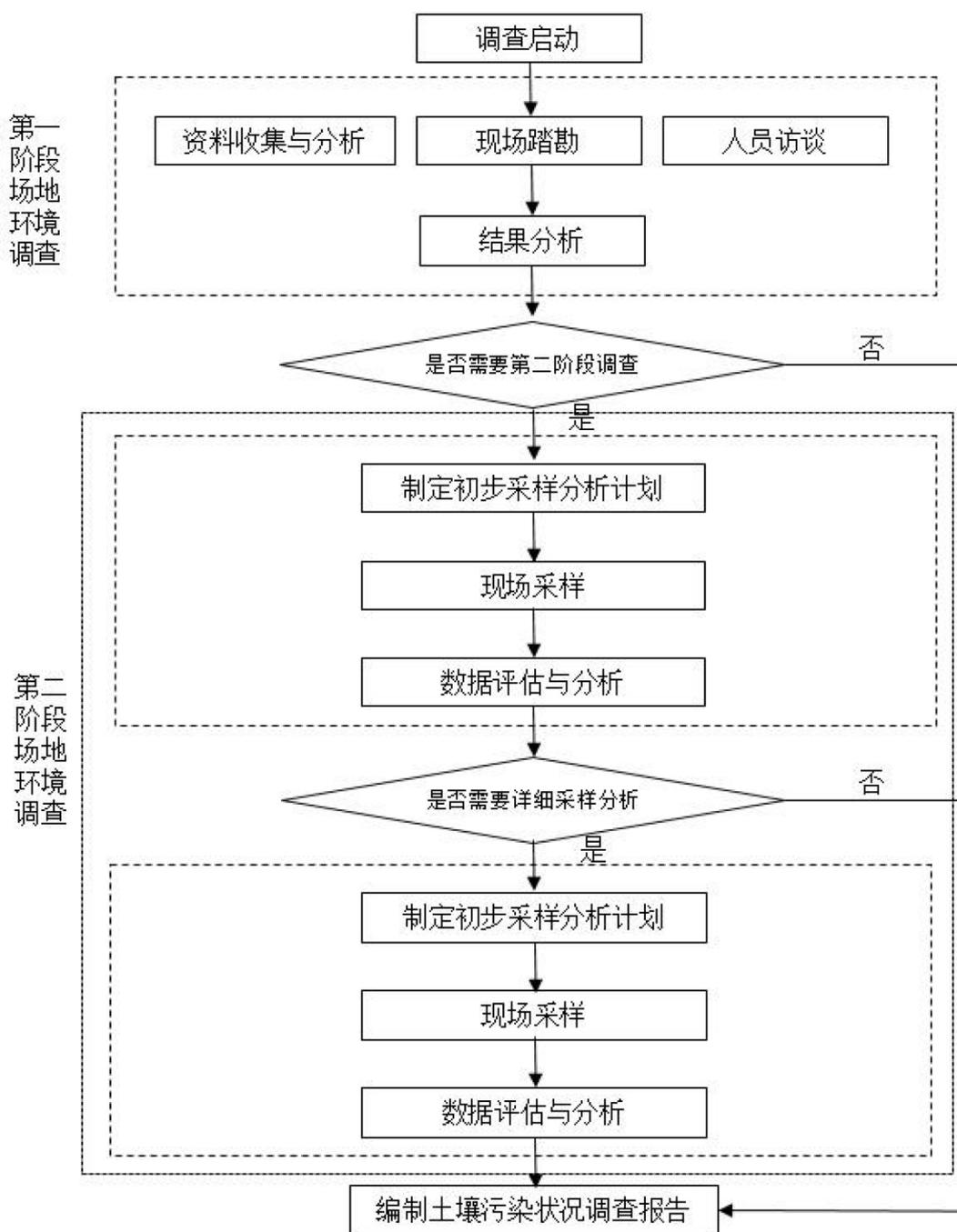


图 1.4-1 土壤污染状况调查技术路线图

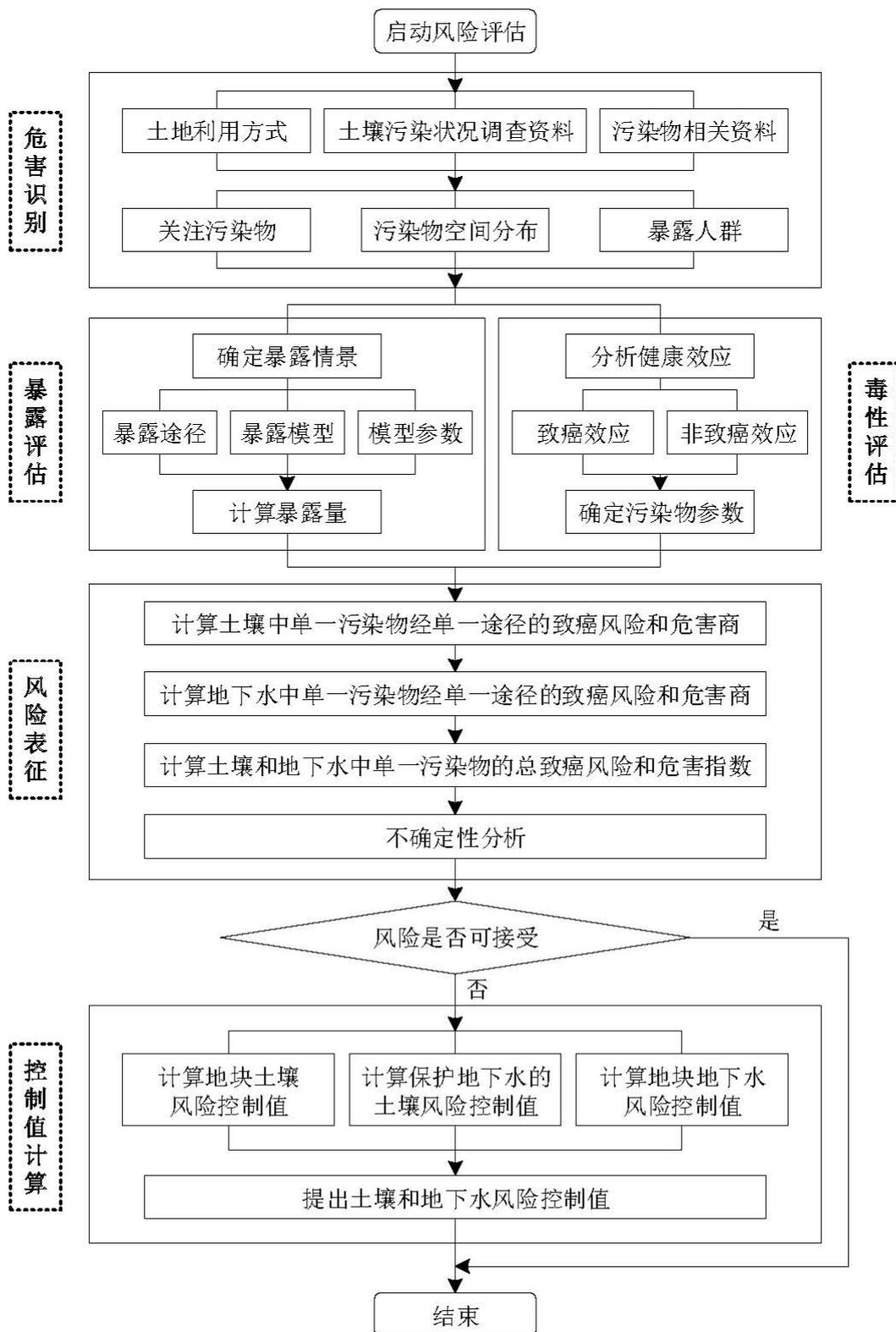


图 1.4-2 土壤污染风险评估技术路线图

2 地块概况

2.1 地块基本情况

- (1) 地块名称：济南裕兴化工有限责任公司原厂区。
- (2) 地块地址：济南市天桥区五柳闸 14 号。
- (3) 地号：041307001-1、041307002-3、041307002-4、041307002-6。

2.2 地理位置及调查范围

济南裕兴化工有限责任公司原厂区位于济南市天桥区，北起新黄路，南临小清河北路，西接舜苑花园小区，东至银座家具批发市场，顺河高架南北向穿过地块。厂区红线内 460.95 亩及高架桥东裕兴租用地约 60 亩，总计 520.95 亩（34,7301m²）（不包括职工宿舍 24.31 亩、高架桥占地、小清河北路占地）。



图 2.2-1 裕兴化工原厂区位置

2.3 地块所有权人

济南裕兴化工有限责任公司原厂区地块所有人为济南裕兴化工有限责任公司，不动产权号为 0092558 号。

2.4 地块现状

根据 Google Earth 影像资料及现场踏勘可知，原有厂房大部分被拆除，详细

照片见附件五。目前地块内主要设施为质检楼，磷肥厂车间，加油站，车队，裕兴分厂，废硫酸储罐，修复公司的修复设施以及渣土堆等。地块内原有地下管线在工厂搬迁之后已经废弃，地块部分区域堆存原有建筑拆除垃圾等杂物。修复公司的修复设施附近有少量修复公司自行布置的管线。第一期地块目前包含的区域为1号建筑废墟、2号办公生活区、3号修复区域、4号办公区、5号建筑废墟、9号磷肥车间和10号硫酸储罐；第二期地块目前包含的区域为6号裕兴分厂、7号车队、8号加油站、11号白石膏堆场、12号白石膏堆场、13号白石膏堆场和污水处理站、14号白石膏堆场与污水处理站、15号建筑废墟和16号建筑废墟；第三期地块目前包含的区域为17号硫酸亚铁堆场、18号硫酸亚铁堆场、19号修复区域、20号修复区域、21号修复区域和22号建筑废墟。



图 2.4-1 裕兴化工原厂区现状

2.5 地块历史

裕兴化工原厂区建厂于1919年，生产颜料煮青（CAS号1326-82-5，英文名2,4-Dinitro-phenol sulfured），最高年产量1500吨。受战乱、自然灾害、外企打压等影响，早期生产时断时续，产量波动较大。1954年裕兴化工公私合营后，逐渐淘汰煮青，转向生产基础化工原料，1956年开始生产磷肥，1958年开始生产

铬盐和硫酸，1960 年开始生产钛白粉，此后历经多次技术改造和装置升级，形成了铬盐、钛白粉、硫酸、磷肥的生产体系。

2009 年 12 月，根据《山东省人民政府关于济南裕兴化工总厂实施限期治理的通知》（鲁政发 [2005]105 号文）的要求，经多次论证，裕兴化工实施了搬迁改造项目，搬离原厂区。图 2.1-4 是搬迁后 2010 年底的卫星图片。2012 年 12 月，裕兴化工原历史堆积的铬渣全部处置完毕并通过省环保厅、省发改委组织的验收。2014 年~2015 年，裕兴化工将新厂区产生的红石膏堆存在原厂区。搬迁后，2010 年起，裕兴化工即着手开始地块环境调查和土壤修复工作。2017 年 3 家企业进场实施修复工程，修建了修复车间、大棚和污水处理站。截至 2018 年年底，已完成部分渣混合物和建筑垃圾的修复处置，堆存于地块内。



图 2.5-1 原厂区平面布置图

表 2.5-1 地块变更情况表

	编号	区域名称	拆除时间	现状
第一期地块	1	钛白粉生产区	2012 年	地表以上 2m 高的建筑废墟
	2	办公生活区	未拆除	废弃
	3	钛白粉生产区	2012 年	土壤修复设施
	4	质检区	未拆除	办公区

	5	仓储区	2012 年	地表以上 2m 高的建筑废墟
	9	磷肥车间	未拆除	废弃
	10	废酸储罐	未拆除	废弃
第二期地块	6	裕兴分厂	未拆除	在用
	7	车队	未拆除	在用
	8	加油站	未拆除	废弃
	11	铬渣堆	2012 年处置完毕	2014 年-至今 堆放高白石膏
	12	干法解毒区	2012 年拆除	2014 年-至今 堆放高白石膏
	13	硫酸生产车间	2012 年拆除	2014 年-至今 堆放高白石膏；2018 年-至今 水处理设施
	14	磷矿石区	未拆除	2014 年-至今 堆放高白石膏；2018 年-至今 水处理设施
	15	五金仓库、锅炉房	2012 年拆除	建筑废墟
第三期地块	16	铬盐车间	2012 年拆除	建筑废墟
	17	硫酸亚铁渣堆	未处置	未处置
	18	铬渣堆	2012 年处置完毕	2014 年-至今 堆放高硫酸亚铁
	19	污水处理站	2012 年拆除	修复车间
	20	辅助设施	2012 年拆除	修复车间
	21	重油仓库	2012 年拆除	修复车间
	22	万吨铬盐处理车间	2012 年拆除	建筑废墟

2.6 敏感目标

济南裕兴化工有限责任公司原厂区位于济南市天桥区，周边敏感目标如表 2.6-1 所示。

表 2.6-1 裕兴化工原厂区周边敏感目标

编号	敏感目标	方位	距厂界最近距离 (m)
1	新城小区东苑	W	紧邻
2	舜苑花园	W	紧邻
3	新城小区西苑	W	576
4	新城金水岸小区	W	492
5	河畔景苑	NNW	870
6	舜馨佳园	N	40
7	济南市北苑小学	NNE	400
8	朗润园小区	NE	469
9	水岸名邸	NE	750

10	北徐花园	NE	689
11	盖佳花园西区	NE	876
12	汇源华庭	NE	953
14	藏家屯	SSW	910
15	舜清苑	SSW	270
16	滨河南苑	SSW	284
17	泺河港	S	150
18	海尔云世界	SE	300
19	水园小区	SSE	1100
20	小清河	S	100

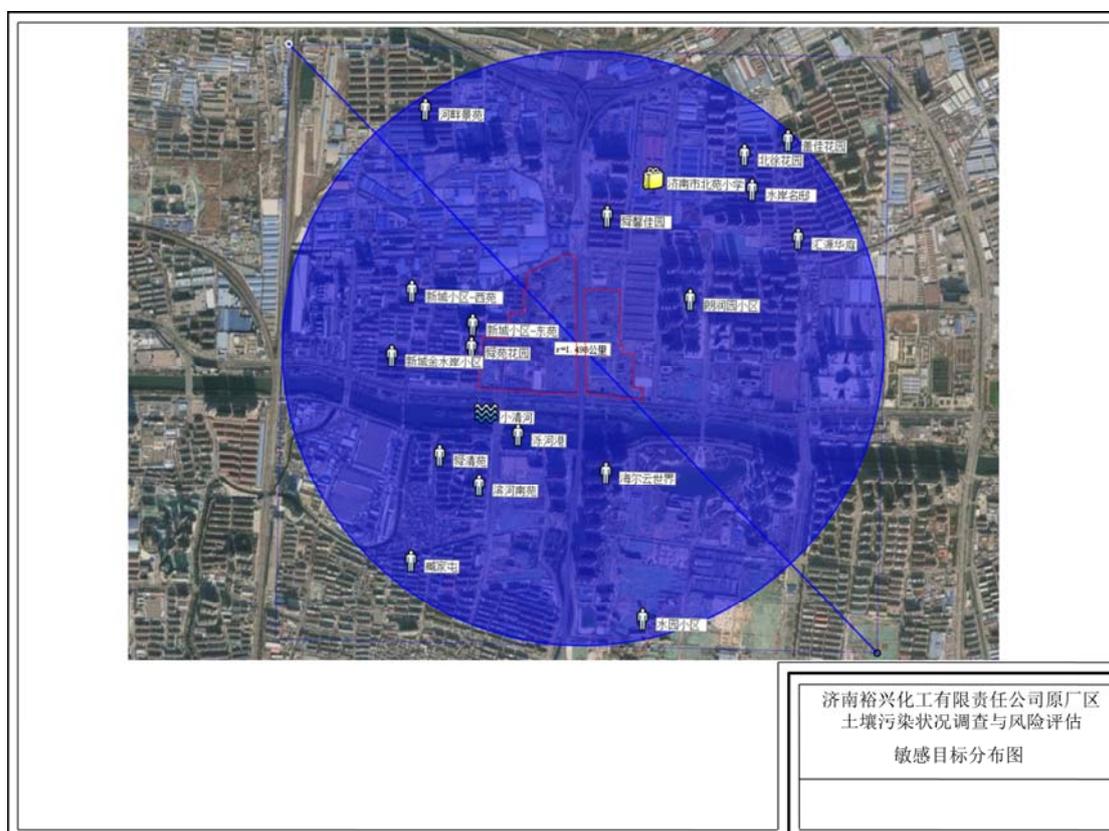


图 2.6-1 敏感目标分布图

2.7 周边地块现状和历史

裕兴化工厂区相邻地块的现状和历史见表 2.7-1 和图 2.7-1。裕兴化工相邻地块为居民区、商场和汽修厂，不会对厂区产生污染。裕兴化工场内第一期地块相邻区域为 8 号加油站、11 号原铬渣堆、13 号原硫酸生产车间、14 号原磷矿石区、15 号原锅炉房和五金仓库、16 号原铬盐车间。上述区域可能会对第一期地块产生影响，污染第一期地块；第二期地块相邻区域为 9 号磷肥车间、3 号原钛白粉

生产区、17号硫酸亚铁堆场、18号原铬渣堆、19号原污水处理站和20号原辅助设施，上述区域可能会对第二期地块产生影响，污染第二期地块；第三期地块相邻区域为11号原铬渣堆、12号原干法解毒区、13号原硫酸生产区域、14号原磷矿石区和16号原铬盐车间，上述区域可能会对第三期地块产生影响，污染第三期地块。裕兴化工厂区上游为居民区和旅游景点，不会对厂区产生污染。

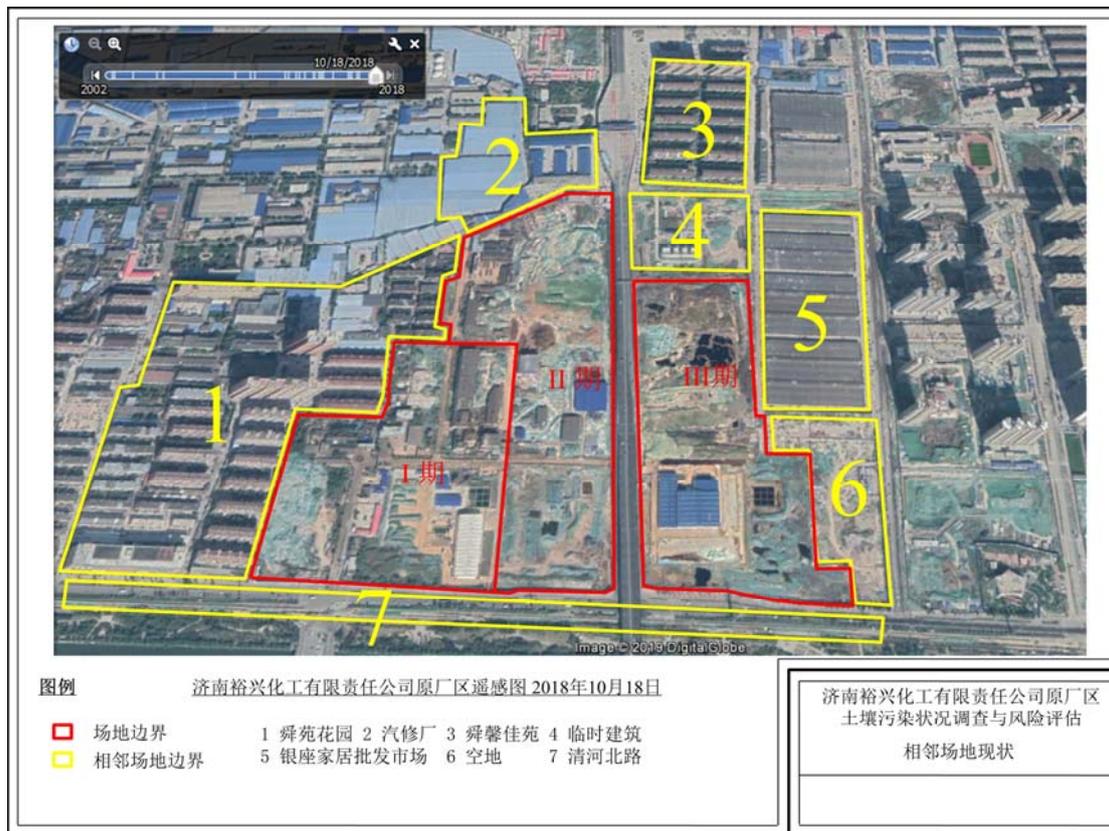


图 2.7-1 厂区相邻地块现状

表 2.7-1 厂区相邻地块的现状和历史

	方位	名称	历史
裕兴 化工 相邻 地块	东北侧	临时建筑和银座家居	兴建于 2013 年之前
	东侧	空地	建筑物于 2010 年被拆除
	西北侧	汽修厂	兴建于 2013 年
	西侧	舜苑花园	兴建于 2005 年~2010 年
	北侧	舜馨佳苑	兴建于 2005 年~2010 年
	南侧	小清河北路	修建于 2010 年
第一期地 块相 邻区 域	北侧	7 号加油站	废弃
	东侧	11 号铬渣堆	2012 年处置完毕；2014 年-至今 堆放白石膏
	东侧	13 号硫酸生产车间	2012 年拆除；2014 年-至今 堆放白石膏；2018 年-至今 水处理设施
	东侧	14 号磷矿石区	2014 年-至今 堆放白石膏；2018 年-至今 水处理设施
	东侧	15 号五金仓库、锅炉房	2012 年拆除；2012 年-至今 建筑废墟
	东侧	16 号铬盐车间	2012 年拆除；2012 年-至今 建筑废墟
第二期地 块相 邻区 域		9 号磷肥车间	未拆除 废弃
		3 号钛白粉生产区	2012 年拆除；2018 年-至今 土壤修复设施
		17 号硫酸亚铁堆场	未处置
		18 号铬渣堆	2012 年处置完毕；2014 年-至今 堆放高硫酸亚铁
		19 号污水处理站	2012 年拆除；2018 年-至今土壤修复设施
		20 号辅助设施	2012 年拆除；2018 年-至今土壤修复设施
第三		11 号铬渣堆	2012 年处置完毕；2014 年-至今 堆放高白石膏

期地 块相 邻区 域		12 号干法解毒区	2012 年拆除 2014 年-至今 堆放高白石膏
		13 号硫酸生产区	2012 年拆除；2014 年-至今 堆放高白石膏；2018 年-至今 水处理设施
		14 号磷矿石区	2014 年-至今 堆放白石膏；2018 年-至今 水处理设施
		16 号铬盐车间	2012 年拆除；2012 年-至今 建筑废墟

2.8 地块利用的规划

根据《济南市北湖片区控制性详细规划》，裕兴化工原厂区所处地块规划为二类住宅用地、商业用地和文化设施用地，详细规划见图 2.8-1。

根据裕兴化工提供的信息，裕兴化工原厂区所处地块后期拟作为二类住宅用地进行开发，属《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》（GB36600-2018）中规定的第一类用地。为保证居民的健康安全，污染地块状况调查将按照第一类用地的要求进行调查。

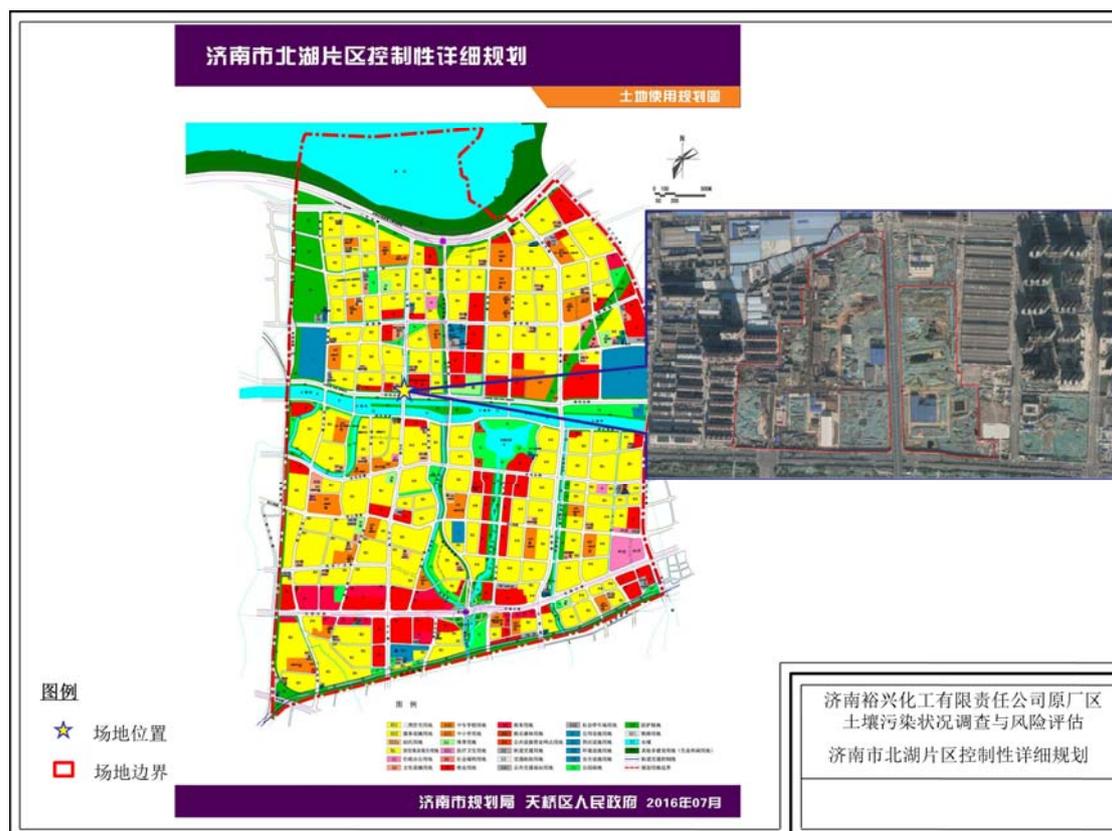


图 2.8-1 济南市北湖片区控制性详细规划

3 地块地质勘察

本次地块地质勘察目的是通过搜集裕兴化工的相关文件、工程地质和岩土工程资料结合现场采用钻探、静力触探等勘探手段，查明地块的地层分布及地下水的埋藏条件，对地块稳定性做出评价，为本项目的后期工作提供水文地质资料。

3.1 勘查方案

根据《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001）（2009年版），本次勘查共布置 28 个勘探孔，根据地块条件布点采用网格状布点，孔间距 100~150m，布点图如图 3.1-1 所示。勘察采用钻探取样分析、孔内标准贯入试验、静力触探相结合的方法进行，其中钻探孔孔深 15.0m~18.0m，静力触探孔孔深 20.0m~30.0m。

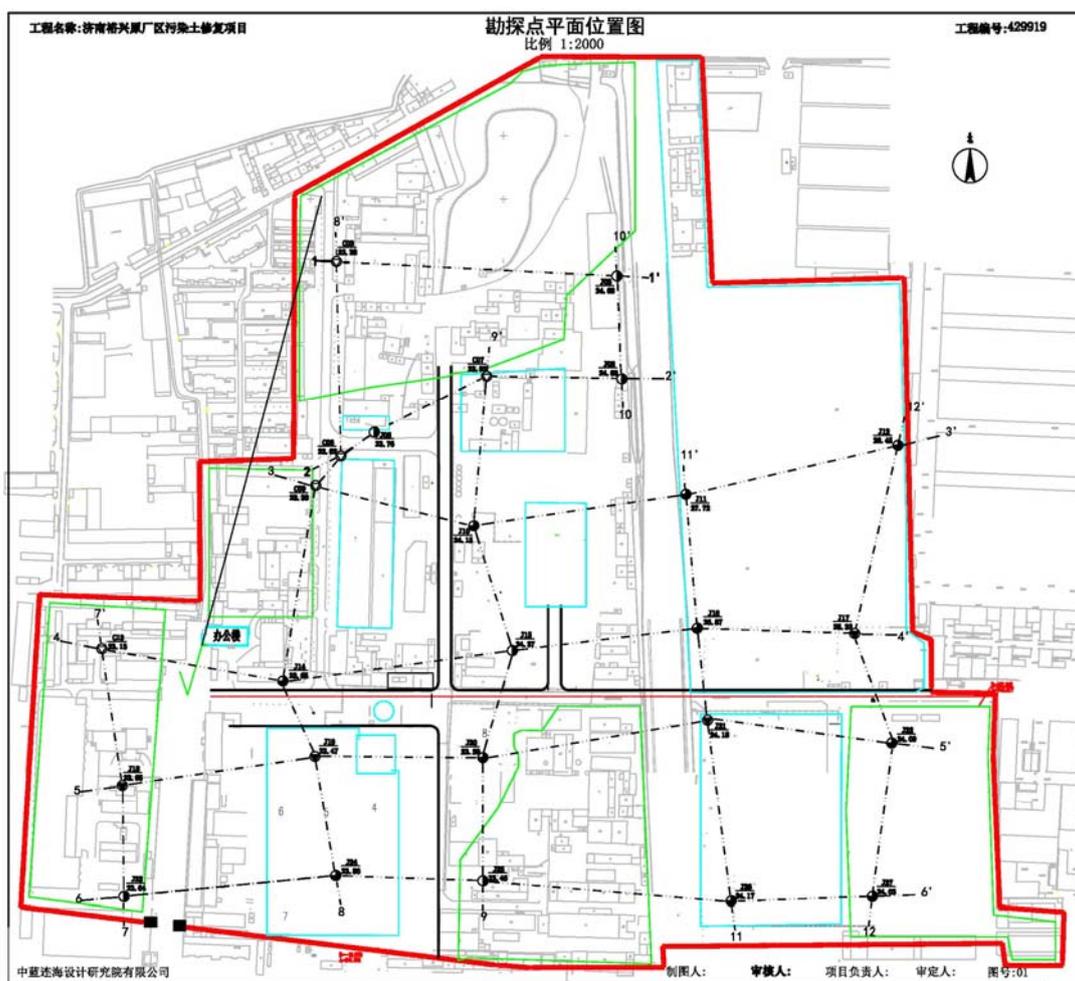


图 3.1-1 勘探点布置图

我公司于 2019 年 03 月 13~03 月 30 日进行外业勘探，土工试验于 2019 年 03 月 20 日开始，室内资料整理从 2019 年 3 月 30 日开始，并于 2019 年 03 月 27 日和 2019 年 09 月 24 日对设置的水位观测井进行了两期地下水位观测，并同时

对黄河及小清河的水位进行了实测。

本工程钻探施工设备为北探 150 型工程钻机，采用岩芯管回转钻进。原状土试样对软塑~可塑状黏性土采用薄壁取土器静压法采取，对硬塑、坚硬的黏性土采用束节式取土器重锤少击法采取，质量等级为I~II级。

标准贯入试验在钻孔中采用导向杆变径自动脱钩自由落锤法进行，锤重 63.5kg、落高 76cm。贯入器打入土中 15cm 后，开始记录每打入 10cm 的锤击数，累计打入 30cm 的锤击数记为标准贯入试验实测锤击数 N。

静力触探施工设备为液压式静力触探仪，探头采用锥头面积 15cm²、侧壁面积 300cm² 的双桥探头，数据采集仪器为 LMC-D310 型静力触探专用微机。

勘探点放点、测点仪器为华测 X91 GpS 接收机，采用 2000 国家大地坐标系，1985 国家高程基准。

土工试验资料整理采用华宁土工试验 HNTGCS5.0 版软件，报告资料整理采用华宁岩土工程勘察软件包 HNCAD17.5 版软件。

本次勘探外业因受地块条件的限制，共完成勘探孔 25 个，其中取土、标贯孔 10 个，总进尺 145.0m；静力触探孔 5 个，总进尺 140.0mm；取土孔 5 个，总进尺 77.5m；标贯孔 5 个，总进尺 75.0m；取原状土样 109 件，标准贯入试验 39 次。勘探孔在外业勘探结束后采用黏土球进行封堵。开展水文地质测试，进行稳定流抽水试验 1 次，包气带土层试坑渗水试验 3 次。井口标高及地面标高测点 28 次，地下水位监测 28 点次（共两期）。

3.2 水文地质测试

根据地块地下水环境调查的要求，结合本次勘察揭露的包气带土层和含水岩层的赋水特性，现场对包气带土层（主要为杂填土）进行了单环法试坑渗水试验 3 组，对潜水含水层进行了潜水完整井稳定流抽水试验 1 次，详细试验资料见本报告附表部分。结合本项目工程地质试验资料，将勘探深度范围内各土层的水文地质特征列于表 3.2-1 中。

3.2-1 岩土层水文地质特征一览表

层号	土层名称	平均厚度 m	天然重度 γ kN/m ³	天然孔隙比 e_0	渗透系数	
					垂直 K_v cm/s	水平 K_H cm/s
①-1	杂填土	3.35	18.5	—	1.39E-03	—
①-2	黏土	1.12	18.2	0.983	4.50E-07	8.70E-07
②-1	粉质黏土 夹粉土	2.11	18.4	0.937	2.95E-06	4.18E-06
②-2	粉土夹粉 质粘土	2.26	18.9	0.859	4.38E-05	2.42E-04
②-3	黏土	2.39	17.6	1.160	6.02E-07	6.56E-07
②-4	粉质黏土 夹粉土	3.16	19.4	0.718	5.84E-06	2.67E-05
③-1	含钙质结 核黏土	3.02	19.5	0.728	4.93E-07	6.30E-07
③-2	黏土	4.84	19.7	—	—	—
④-1	含钙质结 核黏土	6.60	19.9	—	—	—
④-2	粉质黏土	4.96	19.3	—	—	—

3.3 调查结果

3.3.1 地块硬化地面

本次勘察过程中钻探揭露地块除万吨铬盐区域以外的土地地表以下 1m 普遍为硬化地面，地块高架桥东侧土地万吨铬盐区域地表以下 2m 普遍为硬化地面。

3.3.2 土层

根据本次勘察过程中钻探揭露、取样分析以及静力触探等手段获取信息的综合对比、分析，结合区域地质资料，将地块地基土自上而下分为 10 个工程地质层，各层土体的性质简述如下。

①-1 层杂填土 (Q_4^{ml})：杂色，松散~稍密，稍湿，以粉质黏土、粉土为主，混杂有大量的灰渣、化工品废渣、建筑垃圾等，局部表层为厚 20cm 左右的混凝土。地块普遍分布，厚度：1.50~6.50m，平均 3.35m；层底标高：19.09~22.19m，平均 21.01m；层底埋深：1.50~6.50m，平均 3.35m。具有弱~中等透水性；

①-2 层黏土 (Q_4^{al+pl})：灰褐色，可塑，光滑，高韧性，高干强度。地块局部分布，厚度：0.500~1.60m，平均 1.12m；层底标高：18.96~20.44m，平均 19.70m；层底埋深：2.80~4.80m，平均 3.84m。具有微~不透水性；

②-1 层粉质黏土夹粉土 (Q_4^{al+pl})：灰褐色、灰色，可塑，稍光滑，中等韧

性，中等干强度，含有机质，微具臭味，局部夹有粉土，厚 5~15cm，局部为黏土。地块普遍分布，厚度：1.00~3.80m，平均 2.11m；层底标高：16.55~20.69m，平均 18.50m；层底埋深：4.00~8.20m，平均 5.86m。具有弱~微透水性；

②-2 层粉土夹粉质黏土 (Q_4^{al+pl})：灰色，稍密，湿，摇振反应中等~迅速，局部夹可塑状粉质黏土，厚 20~40cm。地块大部分布，厚度：0.90~4.40m，平均 2.26m；层底标高：14.09~17.77m，平均 16.24m；层底埋深：6.60~12.60m，平均 8.12m。具有弱透水性；

②-3 层黏土 (Q_4^{al+pl})：灰色、灰黑色，软塑~可塑，高韧性，高干强度，含大量腐殖质，具臭味，含有少量的贝壳碎屑，局部夹粉质黏土薄层。地块普遍分布，厚度：1.40~4.00m，平均 2.39m；层底标高：12.38~15.15m，平均 13.85m；层底埋深：8.50~14.60m，平均 10.50m。具有微~不透水性；

②-4 层粉质黏土夹粉土 (Q_4^{al+pl})：灰色，可塑，稍光滑，中等韧性，中等干强度，含有少量的钙质结核，局部夹有粉土，厚 5-30cm。地块普遍分布，厚度：1.70~5.50m，平均 3.16m；层底标高：7.28~8.63m，平均 7.78m；层底埋深：12.10~17.70m，平均 15.92m。具有微~不透水性；

③-1 层含钙质结核黏土 (Q_4^{al+pl})：灰色~灰绿色，硬塑，局部坚硬，高韧性，高干强度，含有 5~20%的钙质结核，局部富集，粒径 $\phi=0.5\sim 5\text{cm}$ ，个别较大者粒径 ϕ 达 15cm，局部为粉质黏土。地块普遍分布，厚度：2.70~3.20m，平均 3.02m；层底标高：7.28~8.63m，平均 7.78m；层底埋深：15.30~17.00m，平均 15.92m。具有微~不透水性；

③-2 层黏土 (Q_4^{al+pl})：灰色、灰黄色，硬塑，高韧性，高干强度，含少量的钙质结核，局部为粉质黏土。地块普遍分布，厚度：3.60~6.10m，平均 4.65m；层底标高：1.42~4.08m，平均 2.93m；层底埋深：19.30~22.20m，平均 20.45m。具有微~不透水性；

④-1 层含钙质结核黏土 (Q_{2+3}^{al+pl})：棕黄色，硬塑~坚硬，高韧性，高干强度，含有 10~30%的钙质结核，局部富集，粒径 $\phi=0.5\sim 5\text{cm}$ 。地块普遍分布，厚度：3.10~6.50m，平均 5.10m；层底标高：-2.72~-1.68m，平均-2.17m；层底埋深：25.00~26.10m，平均 25.55m。具有微透水性；

④-2 层粉质黏土 (Q_{2+3}^{al+pl})：灰黄色，硬塑，稍光滑，中等韧性，中等干强度，含有少量的铁锰氧化物及铁锰结核。地块普遍分布，该层未揭穿。具有微透

水性。

部分工程地质剖面图和钻孔柱状图分别如图 3.3-1 至图 3.3-3 所示。

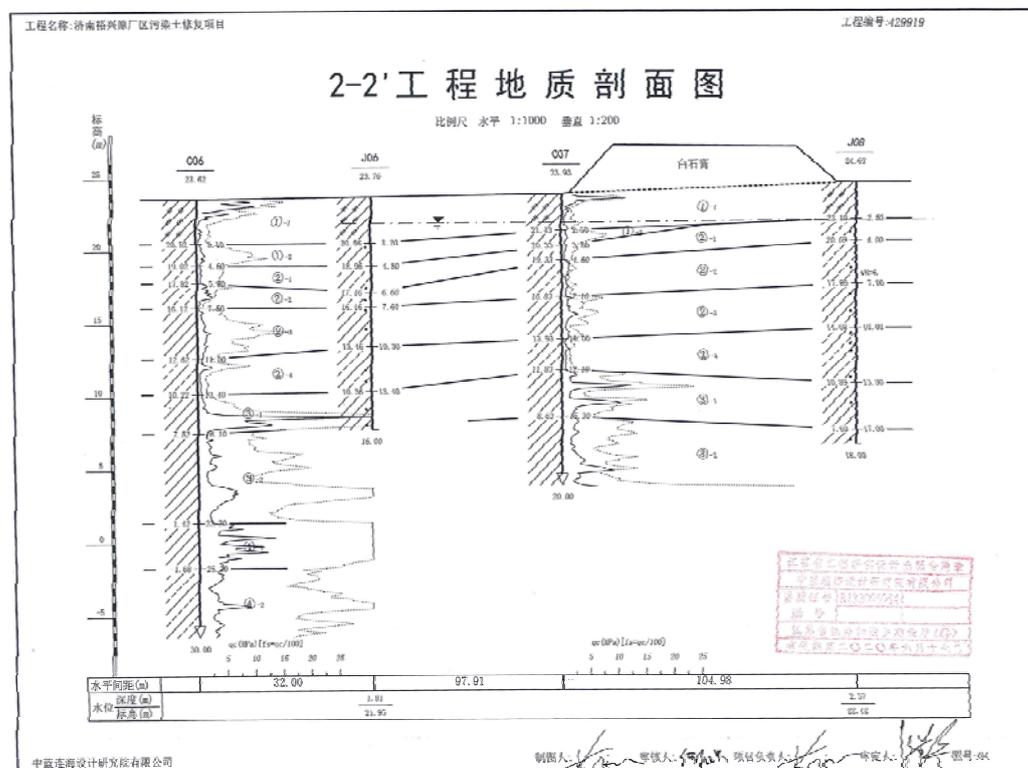
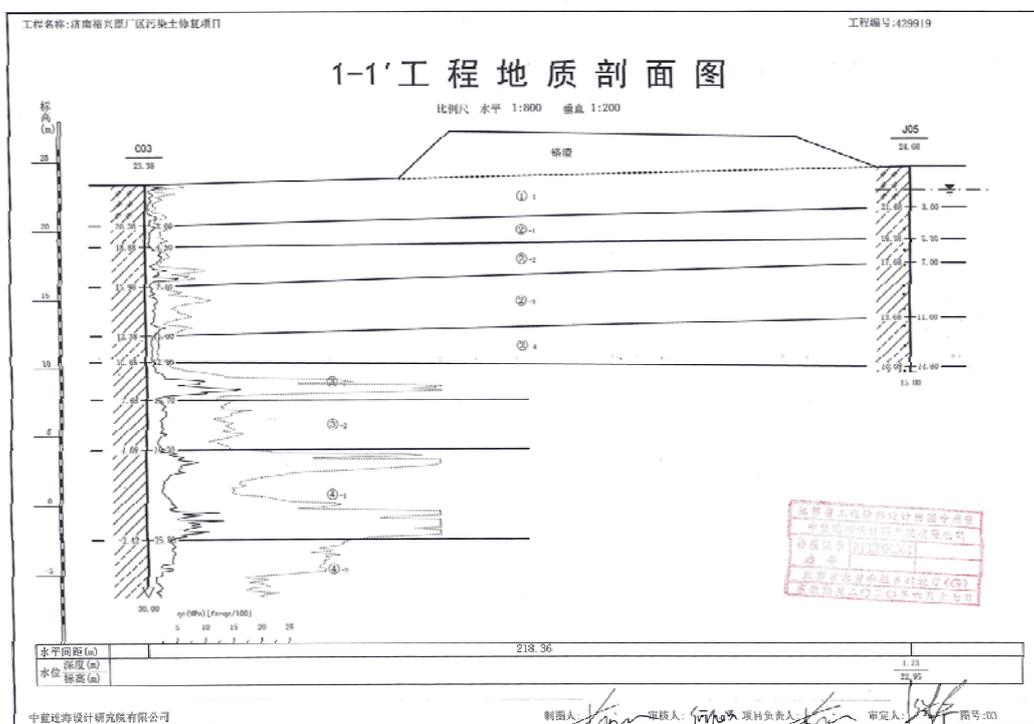


图 3.3-1 部分工程地质剖面图

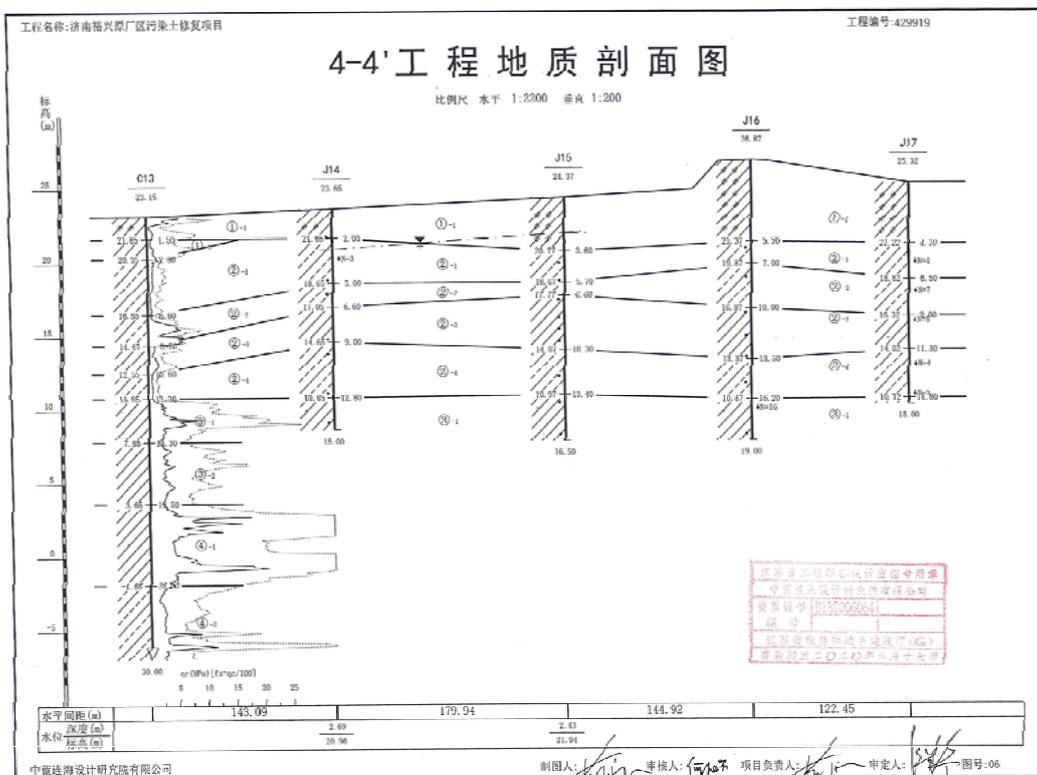
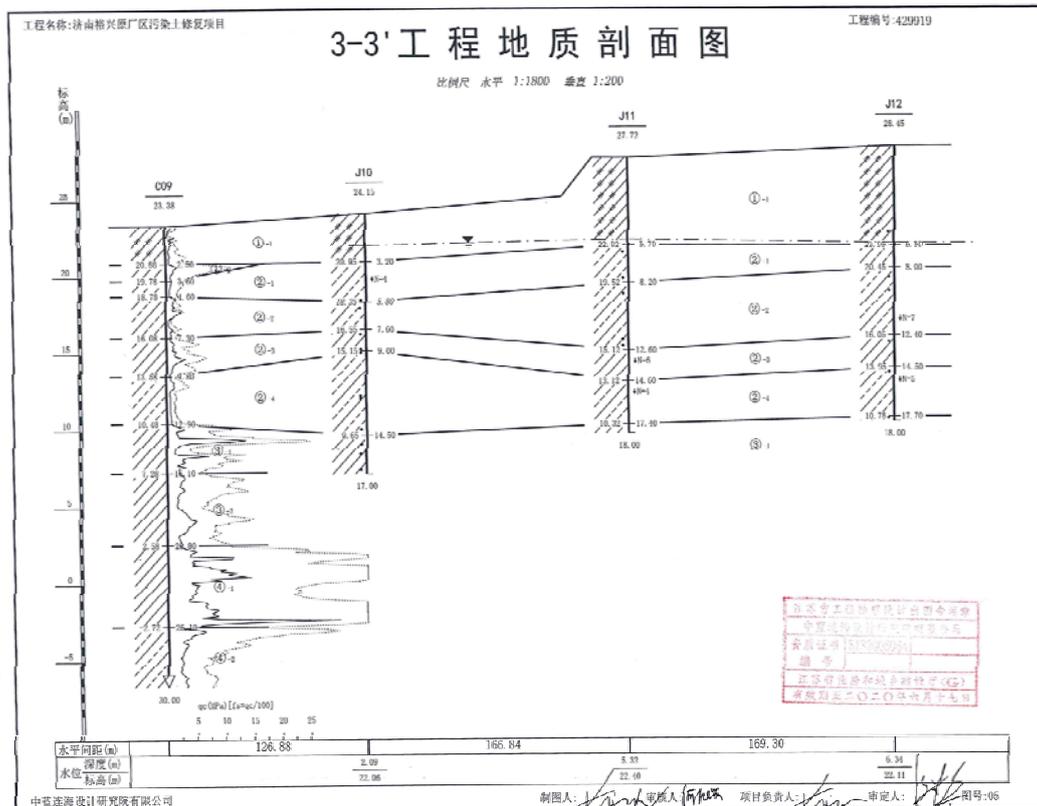


图 3.3-2 部分工程地质剖面图

钻孔柱状图

工程名称		济南裕兴原厂区污染土修复项目			工程编号		429919			
孔号	J05		坐	X=4064127.476m	钻孔直径	110mm		稳定水位深度	1.73m	
孔口标高	24.68m		标	Y=501343.257m	初见水位深度			测量日期		
层号	层底标高 (m)	层底深度 (m)	分层厚度 (m)	柱状图 1:150	岩性描述	标贯中点深度 (m)	标贯实测击数	附注		
①	21.68	3.00	3.00		杂填土:杂色,松散~稍密,稍湿,以黏性土为主,混杂有大量的灰渣、化工产品废渣、建筑垃圾等。					
②	19.38	5.30	2.30		粉质黏土夹粉土:灰褐色、灰色,可塑,稍光滑,中等韧性,中等干强度,含有机质,微具臭味,局部夹有粉土,厚5-15cm。					
③	17.68	7.00	1.70		粉土夹粉质黏土:灰色,稍密,湿,摇振反应中等~迅速,局部夹可塑状粉质黏土,厚20~40cm。					
④	13.68	11.00	4.00		黏土:灰色、灰黑色,软塑~可塑,高韧性,高干强度,含大量腐殖质,具臭味,含有少量的贝壳碎屑,局部夹粉质黏土薄层。					
⑤	10.08	14.60	3.60		粉质黏土夹粉土:灰色,可塑,稍光滑,中等韧性,中等干强度,含有少量的钙质结核,局部夹有粉土,厚5-30cm。					
⑥	9.68	15.00	0.40		含钙质结核黏土:灰色~灰绿色,硬塑,局部坚硬,高韧性,高干强度,含有10~20%的钙质结核,局部富集,粒径 $\varphi=0.5\sim 3\text{cm}$ 。					

中蓝连海设计研究院有限公司
外业日期: 2019.03.22
制图人: 审核人: 何心 图号: 28

钻孔柱状图

工程名称		济南裕兴原厂区污染土修复项目			工程编号		429919			
孔号	J06		坐	X=4064004.963m	钻孔直径	110mm		稳定水位深度	1.81m	
孔口标高	23.76m		标	Y=501154.614m	初见水位深度			测量日期		
层号	层底标高 (m)	层底深度 (m)	分层厚度 (m)	柱状图 1:150	岩性描述	标贯中点深度 (m)	标贯实测击数	附注		
①	20.56	3.20	3.20		杂填土:杂色,松散~稍密,稍湿,以黏性土为主,混杂有建筑垃圾等。					
②	18.96	4.80	1.60		黏土:灰褐色,可塑,光滑,高韧性,高干强度。					
③	17.16	6.60	1.80		粉质黏土夹粉土:灰褐色、灰色,可塑,稍光滑,中等韧性,中等干强度,含有机质,微具臭味,局部夹有粉土,厚5-15cm,局部为黏土。					
④	16.16	7.60	1.00		粉土夹粉质黏土:灰色,稍密,湿,摇振反应中等~迅速,局部夹可塑状粉质黏土,厚20~40cm。					
⑤	13.46	10.30	2.70		黏土:灰色、灰黑色,软塑~可塑,高韧性,高干强度,含大量腐殖质,具臭味,含有少量的贝壳碎屑。					
⑥	10.36	13.40	3.10		粉质黏土夹粉土:灰色,可塑,稍光滑,中等韧性,中等干强度,含有少量的钙质结核,局部夹有粉土,厚5-30cm。					
⑦	7.76	16.00	2.60		含钙质结核黏土:灰色~灰绿色,硬塑,局部坚硬,高韧性,高干强度,含有5~15%的钙质结核,局部富集,粒径 $\varphi=0.5\sim 4\text{cm}$ 。					

中蓝连海设计研究院有限公司
外业日期: 2019.03.18
制图人: 审核人: 何心 图号: 29

图 3.3-3 部分钻孔柱状图

3.3.3 地下水

本次勘察深度范围内地下水类型主要为孔隙潜水。水文地质剖面图如图 3.3-4 所示。

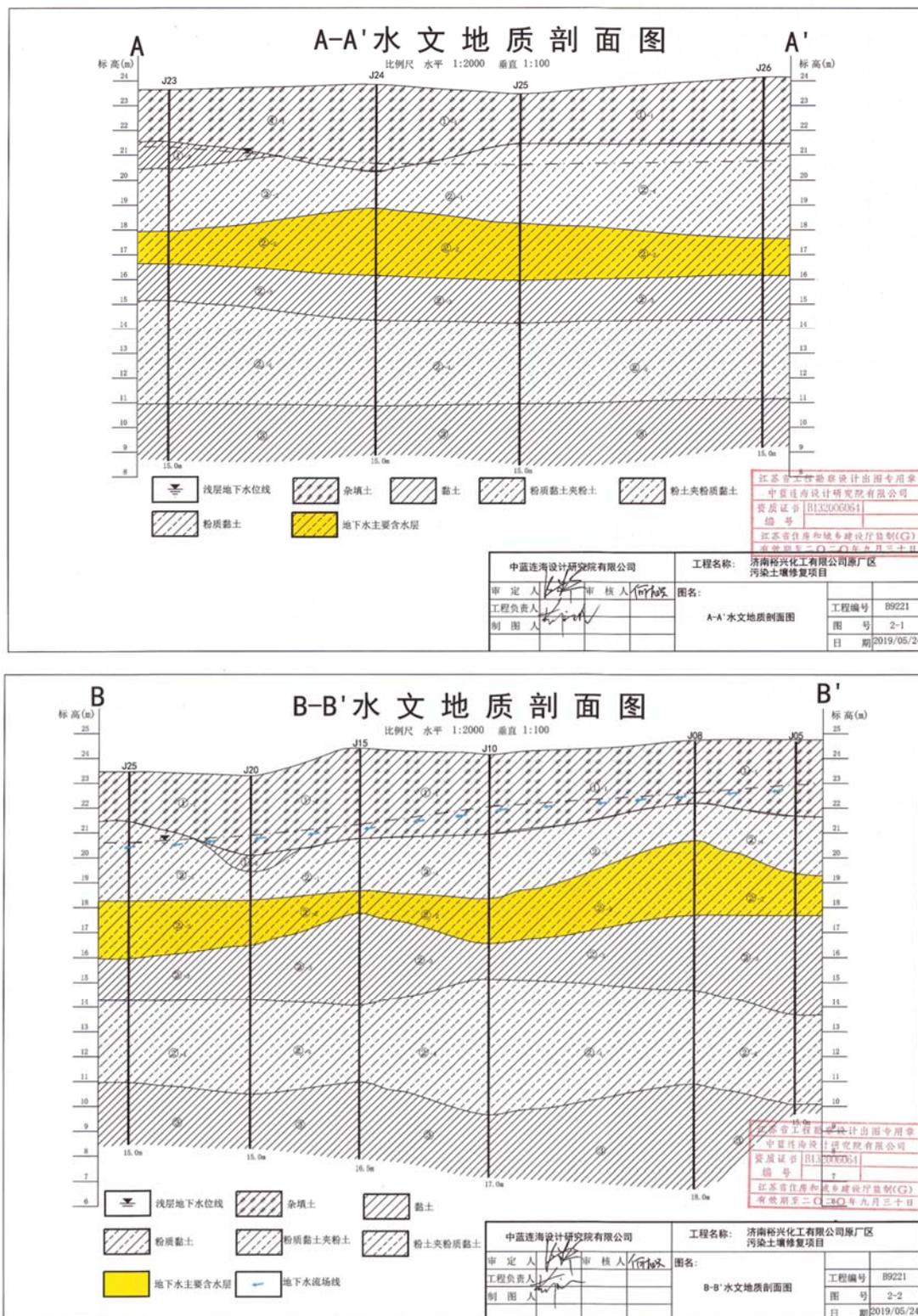


图 3.3-4 水文地质剖面图

潜水赋存于②-4层粉质黏土夹粉土及以上土层中,勘探期间勘探孔揭露的潜水稳定水位埋深为1.73~6.34m,高程20.61~22.95m。水位年变化幅度0.5~2.0m,历史最高水位接近地表。水位动态变化主要受控于大气降水与蒸发,地下水水位较高,常年接近地表。由于地块地势低平、地下水水位较高且土层渗透系数较小,地下水的径流与排泄缓慢,地下水活动不显著。

3.3.3.1 地下水的流向及流速

根据区域水文地质资料,地块位于黄河与小清河之间,地下水以小清河为界,小清河以北地下水流向与黄河的侧向渗透方向一致,即由北向南流动;小清河以南地下水流向为由南向北。小清河为浅层孔隙水的汇水地带和排泄渠道。

根据对地块内浅层孔隙水的水位的实测,地下水的等水位线见图3.3-5和图3.3-6。

利用工程地质手册第五版中的公式9-3-1进行地下水流速的计算: $V=kI$,其中 k 为渗透系数, I 为水力坡度,取抽水试验的试验成果 $k=2.67E-05cm/s$, I 取平均值,枯水期为4.65‰,丰水期为2.60‰,经计算枯水期地下水流速 $V=1.24E-07cm/s=1.08E-04m/d$,丰水期地下水流速 $V=6.94E-08cm/s=6.00E-05m/d$ 。

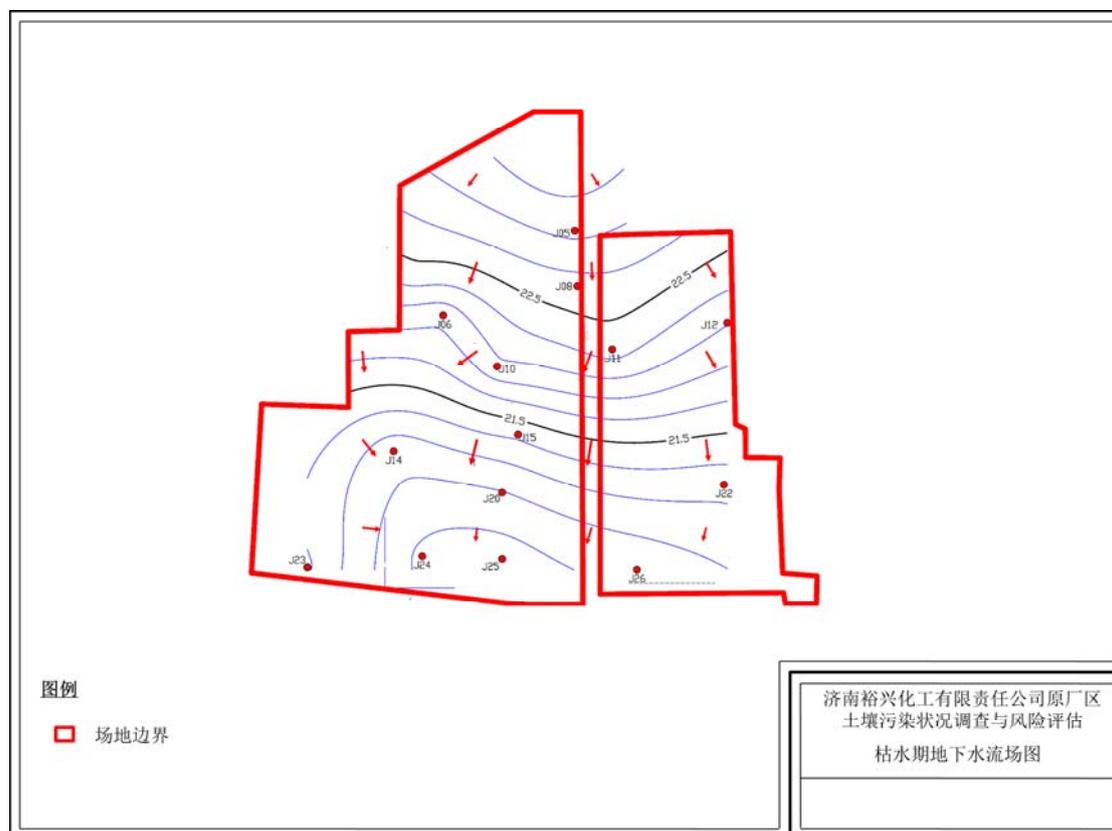


图 3.3-5 枯水期地下水流程图

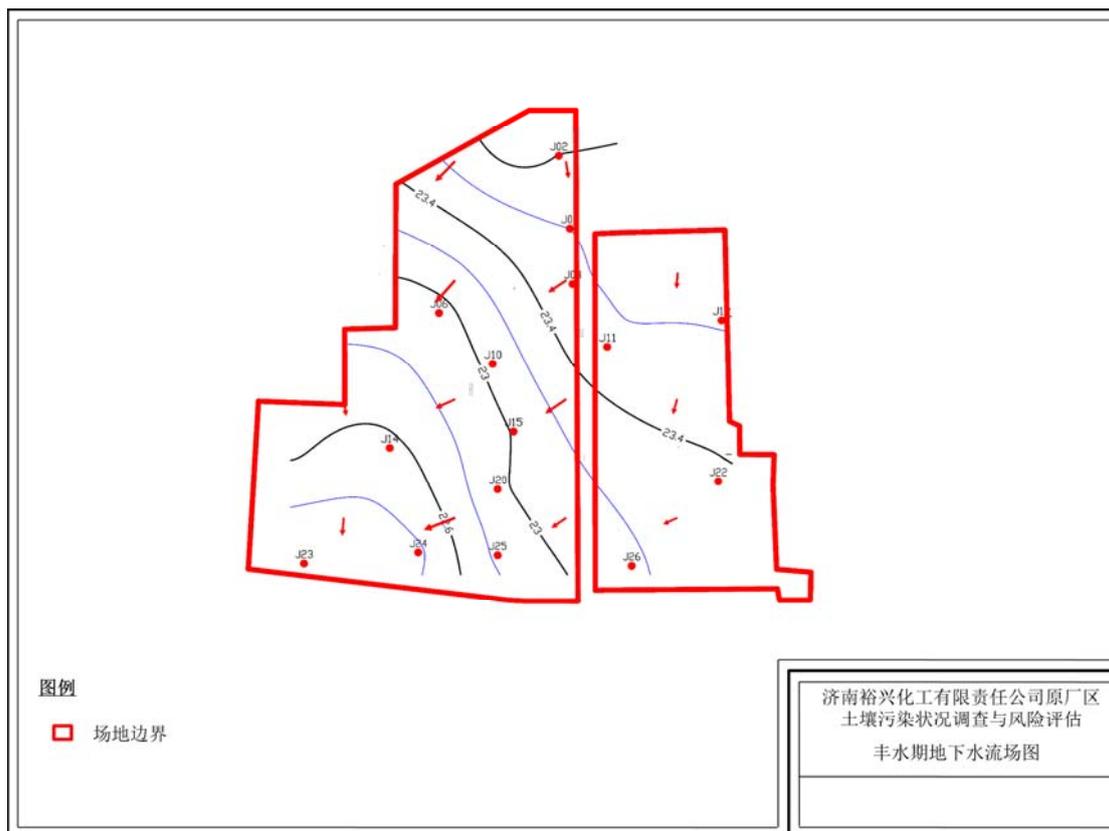


图 3.3-6 丰水期地下水流场

3.3.3.2 场区地下水的补径排条件

(1) 补给条件

浅层孔隙水含水岩性以粉土夹粉质黏土、粉质黏土及粉土为主，局部夹有黏土隔水层，浅层孔隙水表现为潜水、弱承压水性质。其补给来源主要为大气降水，其次为黄河的侧渗补给及地下水上游的径流补给。

(2) 径流条件

浅层孔隙水的总体流向与地形坡向一致，由北向南流向小清河，地下水水力坡度较小，径流缓慢。

(3) 排泄条件

场区内浅层孔隙水埋深较浅，蒸发较强烈，为地下水的主要排泄途径，地下水以垂直运动为主，以侧向径流的方式向小清河排泄为辅。浅层孔隙水与下部深层承压水之间有较厚的黏性土层隔水层，两层含水层之间不存在水力联系。本次勘察钻孔未揭示下部承压含水层，未形成竖向水力联系通道。

(4) 地块地下水的动态变化

地块位于黄河-小清河冲积平原区，第四系地层厚度大，含水层岩性多为粉

土以及夹有粉土的粉质黏土为主，浅层孔隙水的下水位埋深浅。根据区域水文地质资料，浅层孔隙水水位年变化幅度 0.5~2.5m。水位动态受降水、蒸发影响明显，本区最大降水集中在 7~9 月份，最大蒸发月份为 4~6 月份，水位最低值一般出现在 5~6 月份，水位最高值一般出现在 9~10 月份。浅层孔隙水由枯水期~丰水期~枯水期，地下水位呈低~高~低的季节性变化规律。

4 初步调查

4.1 初步调查采样点位及检测项目

结合厂区的资料、污染物识别结论现场踏勘与地球物理探查结果，初步调查共布设 97 个土壤取样点，41 个地下水取样点和 6 个地表水取样点。97 个土壤取样点共取土壤样品 1020 个，土壤平行样品 94 个，土壤样品总数量为 1114 个。41 个地下水取样点共取地下水样品 82 个，地下水平行样品 9 个，地下水样品总数量为 91 个。地表水样品 6 个。具体的点位见图 4.1-1。

采样过程中每隔 0.5m 用快速筛测设备 XRF 和 PID 对土壤关注污染物进行筛测，并取其中总铬最高的样品送实验室进行检测。根据项目经验，地块快筛仪器 XRF 总铬读数为 60mg/kg 时，绝大部分 Cr(VI)实验室检测结果低于检测限，因此取样深度以总铬读数达到 60mg/kg 为止。

检测项目为地块的特征污染物和《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）表 1 中 45 项指标。

4.2 初步调查结果

4.2.1 土壤污染物

本地块土壤超过筛选值的主要污染物为 Cr(VI)与砷，部分区域铅、镉、汞、镍、锑、钴和总石油烃超过筛选值。仅有 2 个点位地表以上堆存物多环芳烃超过筛选值。

Cr(VI)来自于铬盐生产过程。砷来自于硫酸生产过程。总石油烃来自于地下柴油罐。酸和碱来自于硫酸、钛白粉和铬盐的生产过程。裕兴化工的生产过程并不涉及到多环芳烃，且多环芳烃仅在 2 个点位的地表以上堆存物中有检出，具有一定的偶然性。铅、镉、汞、镍、锑、钴主要来源于生产所需的矿石。

4.2.2 地下水污染物

本地块地下水主要污染物为 Cr(VI)、砷、铜、镍、铅、镉和苯。其中苯仅在一个点位的浅层地下水中有检测出，浓度较低，具有一定的偶然性。

地下水污染分布不规律，需要在详细调查时进一步确认地下水污染分布情况。

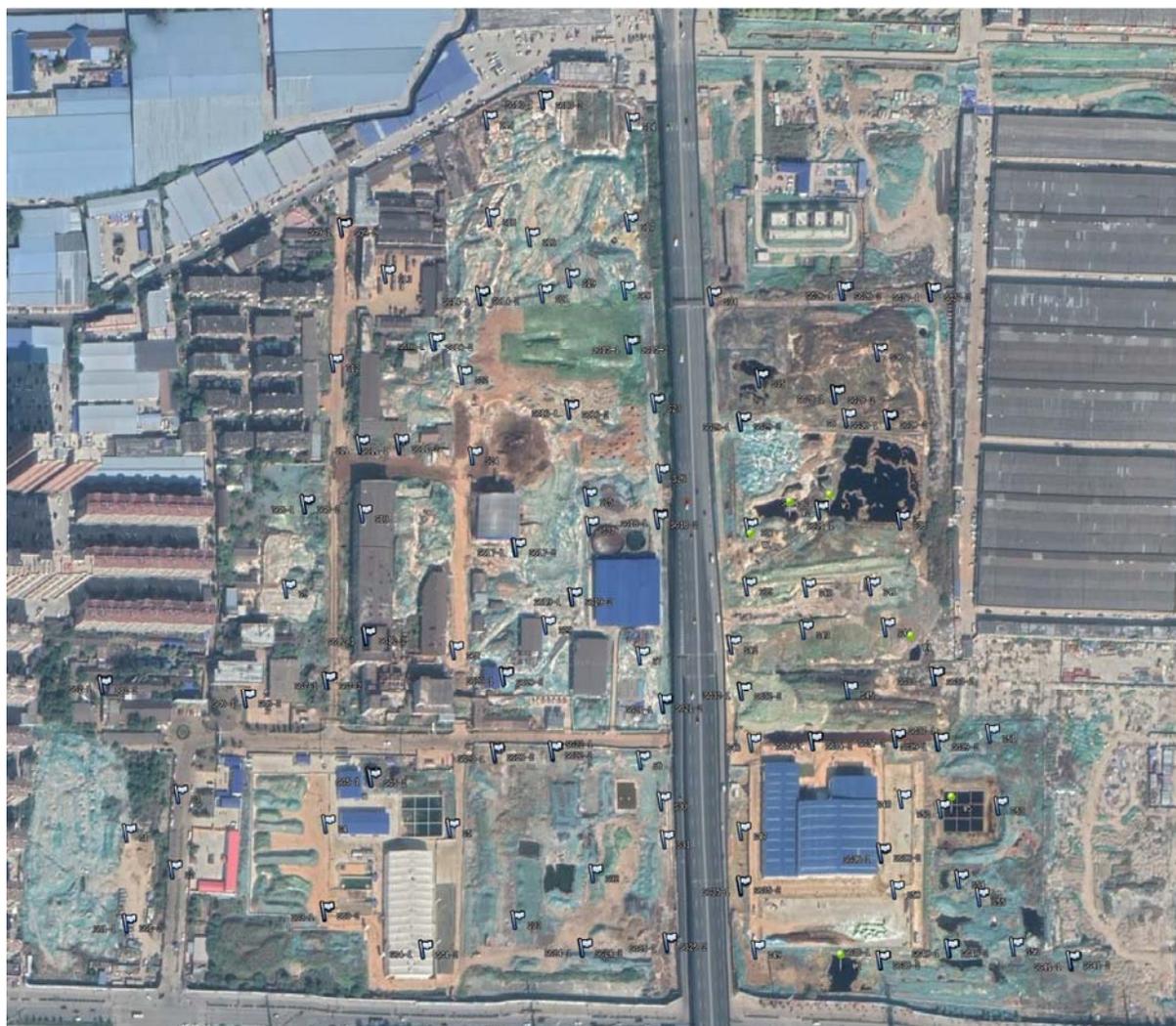


图 4.1-1 初步调查布点图

5 详细调查采样及检测

5.1 详细调查采样点位

结合厂区的资料、现场踏勘、水文地质、地球物理、初步调查和快速筛测的采样结果，根据《建设用地土壤环境调查评估技术指南》的要求，对裕兴化工厂区全部区域采取密度为 20m×20m 的网格法进行布点，布设 503 个土壤采样点，18 个地下水采样点，10 个地表水采样点，12 个背景采样点，12 个已修复污染土壤采样点，7 个底泥采样点，采集土壤样品 2739 个（含平行样），地下水样品 40 个（含平行样），地表水样品 10 个，背景土壤样品 24 个，底泥样品 7 个。采样点位见图 5.1-1。

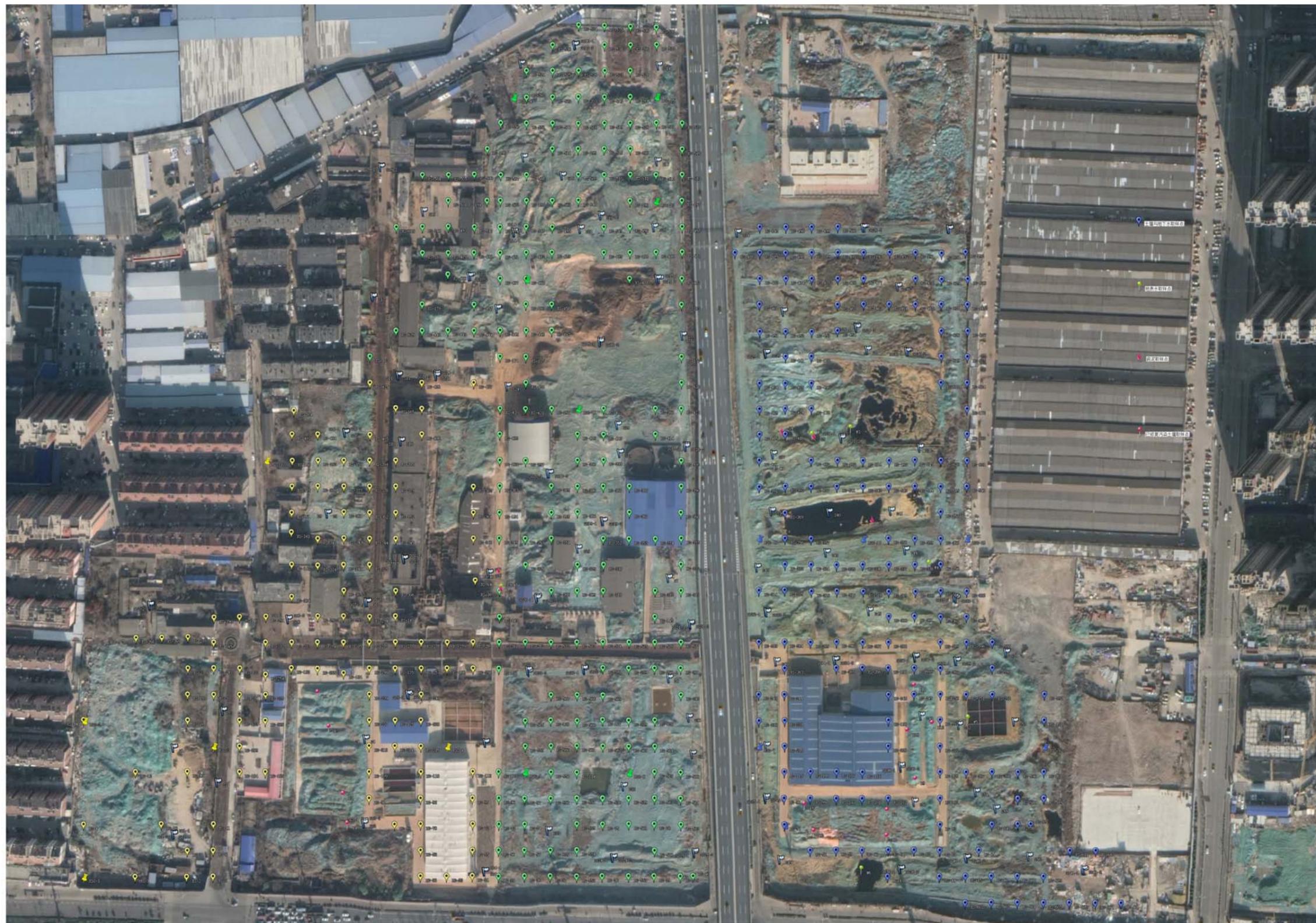


图 5.1-1 详细调查布点图

5.2 补充调查点位

2020年9月我公司对该地块进行了补充检测，针对钒共设置了41个土壤取样点，采集土壤样品207个（含平行样）。针对氟化物共设置了49个土壤检测点，检测土壤样品111个。针对地下水常规指标设置了13个地下水取样点，采集地下水样品29个（含平行样），设置了1个地下水对照点，采集地下水样品1个。取样点位图见图5.2-1和5.2-2。

5.2.1 氟化物污染区域布点及采样

结合裕兴化工提供的资料判断裕兴化工厂区内原磷肥车间、原磷矿石区与原锅炉房存在氟化物污染风险。根据《建设用地土壤环境调查评估技术指南》的要求，对上述区域采取密度为20m×20m的网格法进行布点。在原采样点位置重新布设土壤取样点49个，采集土壤样品111个。

考虑到该地块除Cr(VI)以外的绝大部分的污染物都集中在0~4m，土壤取样深度设置为：地表以上渣土混合物和建筑垃圾每4.5m取一个样品，地表以下表层土0~1.5m内取一个样品，1.5m~4m内取一个样品。

5.2.2 钒污染区域布点及采样

根据初步调查结果、详细调查的快筛结果和裕兴化工提供的资料判断裕兴化工厂区内11号白石膏堆部分区域和17号硫酸亚铁堆存在钒污染风险。根据《建设用地土壤环境调查评估技术指南》的要求，对上述区域采取密度为20m×20m的网格法进行布点。在原采样点位置重新布设土壤取样点41个，采集土壤样品207个。

考虑到该地块除Cr(VI)以外的绝大部分的污染物都集中在0~4m，土壤取样深度设置为：地表以上渣土混合物和建筑垃圾每4.5m取一个样品，地表以下表层土0~1.5m内取一个样品，1.5m~4m内取一个样品。

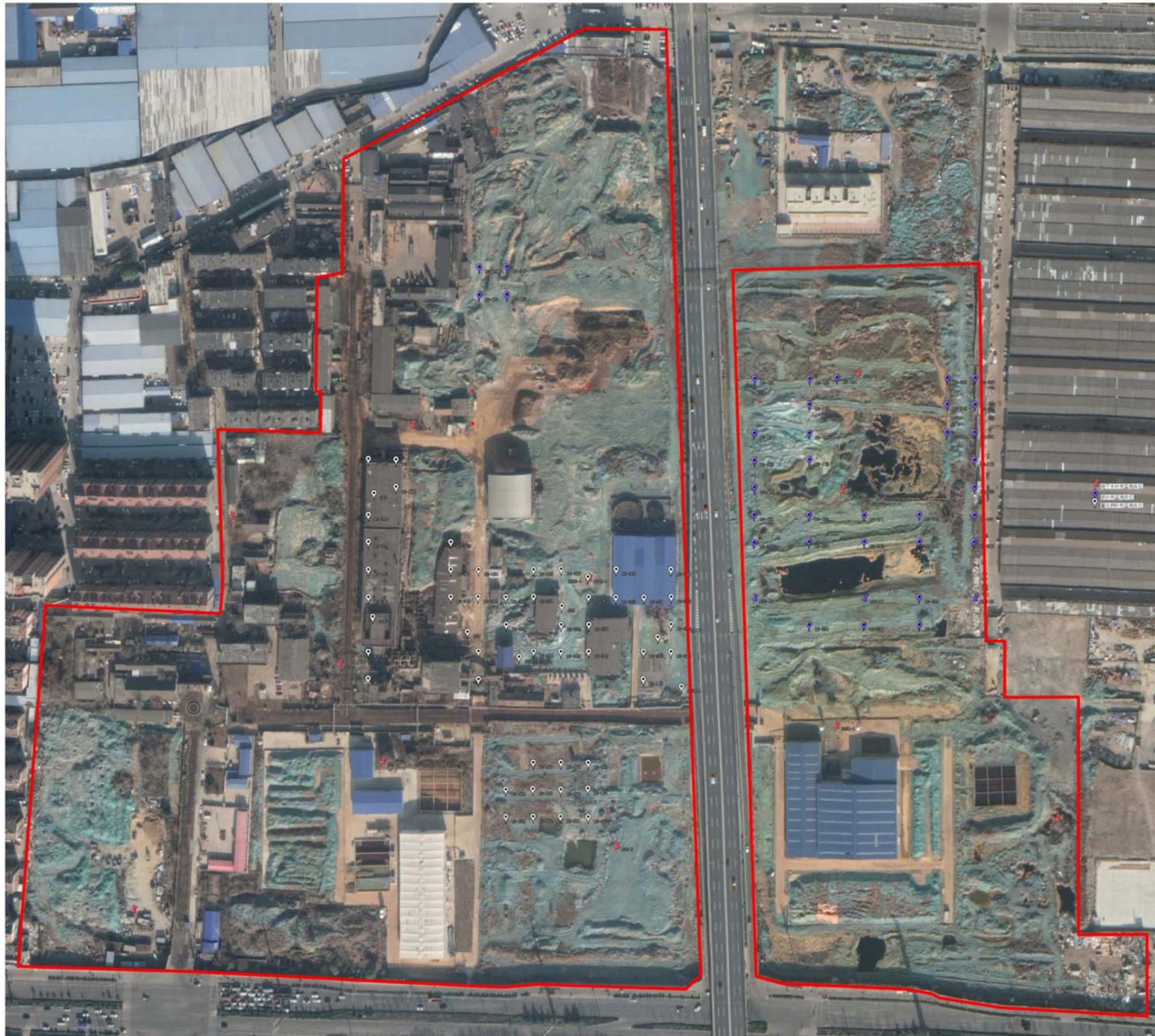


图 5.2-1 钒、氟化物和地下水补充调查点位

5.2.3 地下水常规指标及对照点检测布点及采样

为了解该地块地下水常规指标的情况，本次补充调查在地块共设置 13 个地下水监测点，地下水监测点以组井的形式设置地下水监测井，每一组地下水监测井设置 2 口地下水监测井，开筛深度分别为含水层的中部和底部。每个地下水监测点取地下水样品 2 个。全厂区共取地下水检测样品 29 个（含平行样）。

在地块上游约 1.5 公里处的黄河景区内一处农庄内部的水井中取了地下水作为对照点的水样。

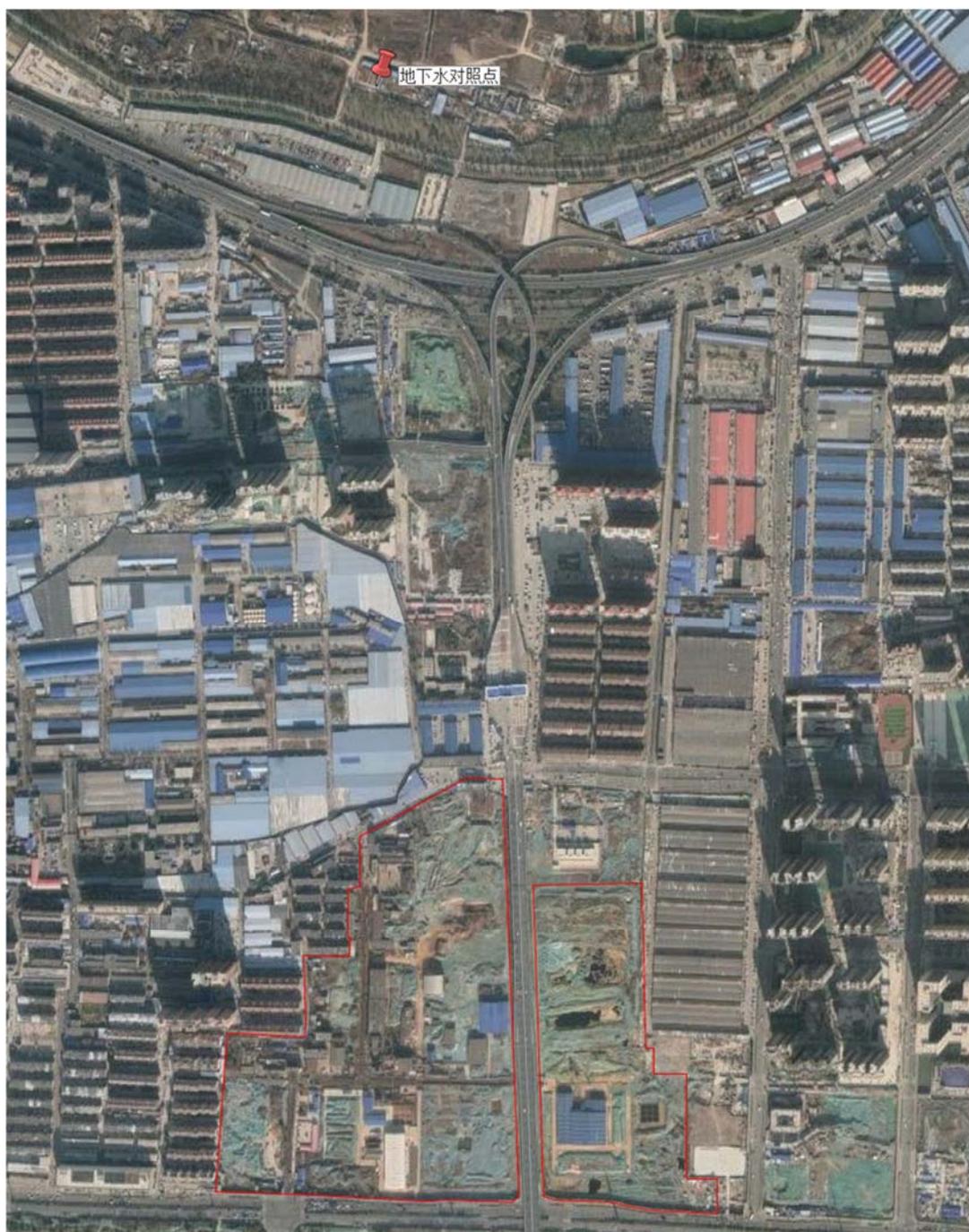


图 5.2-2 地下水对照点点位

5.3 检测指标

详细调查针对初步调查的污染物和后期污染识别的新增污染物开展。根据初步调查确定的每种污染物的疑似污染区域，在该污染区域内和可能污染边界区域的采样点位检测该污染物含量，以此确定该污染物的边界。

5.4 污染状况调查结果

5.4.1 土壤污染状况

地块环境调查共设土壤采样点 600 个，共采集土壤样品 3894 个。检测项目为 Cr(VI)、砷、镍、铅、镉和汞，部分点位考虑现场实际情况加测了锑，钴，钒，氟化物、总石油烃等。

本次地块环境调查的筛选值采用《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》第一类用地筛选值。氟化物选用河北省《建设用地土壤污染风险筛选值》（DB13/T 5216-2020）第一类用地筛选值。具体数值见表 5.1-1。

表 5.4-1 各污染物筛选值

项目	筛选值 (mg/kg)
Cr(VI)	3
砷	20
镍	150
铅	400
镉	20
汞	8
锑	20
钴	20
钒	160
C ₁₀ ~C ₄₀	826
氟化物	1950

检测出超过筛选值的污染物包括：Cr(VI)、砷、镍、铅、汞、镉、锑、钴、钒、C₁₀-C₄₀ 和氟化物。超过筛选值的各污染物统计如表 5.4-2 所示。

表 5.4-2 各污染物超筛选值数量统计表

名称	Cr(VI)	砷	铅	镉	镍	铋	钴	钒	汞	C ₁₀ -C ₄₀	氟化物
单位	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
最大值	19900	1540	6420	249	765	473	413	596	113	4520	32100
检出样品数	1858	1806	1116	1114	1216	504	357	280	1059	25	111
检出百分比	55.67%	99.83%	100%	99.82%	100%	100%	100%	100%	100%	92.59%	100%
筛选值	3	20	400	20	150	20	20	160	8	826	1950
最大超标倍数	6633	16.7	16.05	12.45	5.1	23.65	17.85	3.72	14.12	5.47	16.46
超标样品数	1284	77	28	11	125	271	179	77	15	5	26
超标百分比	38.47%	17.96%	1.55%	0.09%	10.27%	53.76%	50.14%	27.5%	1.41%	18.51%	23.42%
超标深度	0~20m	0~7m	0-4m	0-4m	0-4m	0-4m	0-4m	0-4m	0-2m	4-7m	0-4m

本地块土壤超过筛选标准的污染物共有 12 种，包括 9 种重金属（Cr(VI)、砷、镍、铅、镉、汞、锑、钴、钒）、总石油烃（C₁₀~C₄₀）、氟化物和三环芳烃。

7m 以下的土壤污染物以 Cr(VI) 主，污染范围以超过 Cr(VI) 筛选值的土壤分布范围为准。

下面对各种污染物分别论述：

（1）Cr(VI)

Cr(VI) 分布在裕兴化工全厂区内，主要集中在原铬渣堆和铬盐车间区域以及周边区域，最深达到地下 17.5 米。裕兴化工生产历史较长，受生产过程中的长时间的跑冒滴漏与大气降尘的影响，与铬盐生产无关的区域零星分散着 Cr(VI)，深度较浅，集中分布在 0~4m 表层土中。

（2）砷

砷分布在裕兴化工全厂区内，主要集中在原硫酸生产区和硫酸亚铁堆场区域及周边区域，最深达到地下 11m。裕兴化工生产的主要产品铬盐和钛白粉在生产过程中均需要使用大量的硫酸，受硫铁矿的影响，硫酸中含有一定量的砷。生产过程中的跑冒滴漏造成了非硫酸生产区受到了砷的影响，非硫酸生产区砷深度较浅，集中分布在 0~4m 表层土壤中。受电缆沟的影响，3 号和 15 号区域之间的区域砷超过筛选值。

（3）镍

镍主要分布在原铬渣堆和铬盐生产车间区域内，深度较浅，集中分布在 0~4m 表层土壤中。初步判断镍来源于铬盐生产过程的矿石。

（4）铅

铅主要分布在硫酸生产车间和钛白粉生产区，深度较浅，集中分布在 0~4m 表层土壤中。初步判断铅来源于硫酸以及硫铁矿。5 号区域曾存在搪铅工艺，该工艺导致 5 号区域部分点位铅浓度超过筛选值。

（5）镉

镉主要分布在硫酸生产车间和钛白粉生产区，深度较浅，集中分布在 0~4m 表层土壤中。初步判断镉来源于硫酸以及硫铁矿。

（6）汞

汞在厂区内零星分布，没有规律。裕兴化工提供的资料显示磷肥生产过程中使用的磷矿石可能含有汞。初步判断汞可能来源于磷矿石和生产生活中使用的灯

管。

(7) 铈

铈主要分布在硫酸亚铁堆场，结合生产工艺判断铈主要来源于硫酸生产过程中使用的催化剂。

(8) 钴

钴主要分布在铬盐和硫酸生产区以及硫酸亚铁堆场。初步判断钴主要来源于铬盐与硫酸生产过程中使用的矿石。

(9) 钒

钒主要分布在硫酸亚铁堆场区域，初步判断钒主要来源于硫酸生产过程中使用的五氧化二钒催化剂。

(10) 氟化物

氟化物主要分布在磷肥车间、磷肥堆场和锅炉房，初步判断氟化物主要来源于磷矿石和锅炉房使用的煤。

(11) 总石油烃

总石油烃分布在 3 号区域东南方向，该处曾存放过一个柴油储罐，现已移除，受柴油储罐的影响，该处总石油烃超过筛选值，集中分布在 4~7m。

(12) 有机物

考虑到裕兴化工的生产过程并不涉及到有机物，有机物仅在 2 个点位的地表以上堆存物中有检出，且地表堆存物的污染物分布没有规律，具有一定的偶然性，建议将两个点位地表以上堆存物周边 40m×40m 的区域定为超筛选值区域并进行风险评估，确定是否需要进行修复。详细调查不针对有机物进行检测。

5.4.2 地下水污染状况

本次地块环境初步调查共设地下水取样点 41 个，共采集地下水样品 91 个（含平行样品），详细调查共设地下水取样点 18 个，共采集地下水样品 98 个（含平行样品），本次地块环境调查共采集地下水水样 118 个。检测项目为 Cr(VI)、砷、镍、铜、铅、镉、铈、钴和汞。

本次地块环境调查采用《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）III 类标准。具体数值见表 5.4-3。

表 5.4-3 各污染物标准值

项目	标准值 (μg/L)
Cr(VI)	50
砷	10
镍	20
铅	10
镉	5
铜	1000
汞	1
铊	5
钴	50

检测出超过《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）III类标准的污染物包括：砷、镍、铅、铜、镉。各污染物统计如表 5.4-4 所示。

表 5.4-4 各污染物数量统计表

名称	镍	砷	铅	镉	铜	Cr(VI)	汞	锑	钴
单位	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L
最大值	30700	524	652	310	9930	5290	1.21	128	31200
检出样品数	103	78	24	46	59	53	26	11	64
检出百分比	87.28%	66.10%	20.33%	38.98%	50%	44.91%	22.03%	12.5%	72.72%
III类标准值	20	10	10	5	1000	50	1	5	50
最大超标倍数	1535	52.4	65.2	62	9.93	105.8	1.21	25.6	624
超标样品数	34	23	3	5	4	34	2	11	30
超标百分比	28.81%	19.49%	2.54%	4.23%	3.38%	28.81%	1.69%	12.5%	34.09%
超标深度	0~12m	0~12m	0~12m	0~12m	0~12m	0~12m	0~12m	0~12m	0~12m

各种污染物分别论述如下：

(1) Cr(VI)

浅层（2~7m）：该层 Cr(VI)主要分布在 3、6、7、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21 和 22 号区域。浅层 Cr(VI)的分布与土壤中 Cr(VI)浓度最高的 0~2m 的 Cr(VI)的分布重叠。

深层（7~12m）：该层 Cr(VI)主要分布在 3、6、7、11、12、13、14、15、16、17、18 号、19、20、21 和 22 号区域。纵向上深层地下水范围相对浅层地下水污染范围较小，横向上未发现 Cr(VI)在向下迁移时有明显的横向迁移迹象，与地质勘察得到的地下水以垂直运动为主的结论相符合。

(2) 砷

浅层（2~7m）：该层砷主要分布在 1、3、4、6、7、9、11、12、14、15、16、18、19、20、21 和 22 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 140,720m²。除 3 号地块 SG-5 点位区域外，浅层砷的分布与土壤中砷浓度最高的地上堆存物和 0~2m 的砷的分布重叠。据裕兴化工员工提供信息，在 3 号地块 SG-5 区域附近曾存在过酸洗工艺，酸洗产生的废水长时间渗入地下造成 SG-5 附近 3、4、9、15 号区域受到砷的污染。

深层（7~12m）：该层砷主要分布在 2、11、15、17、18、19、20、21 和 22 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 69,460m²。纵向上深层地下水范围相对浅层地下水污染范围较小，横向上未发现砷在向下迁移时有明显的横向迁移迹象，与地质勘察得到的地下水以垂直运动为主的结论相符合。

(3) 镍

浅层（2~7m）：该层镍主要分布在 1、3、4、6、7、9、11、12、15、17、18 和 22 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 173,626m²。除 3 号地块 SG-5 点位区域外，浅层镍的分布与土壤中镍浓度最高的地上堆存物的镍的分布重叠。受酸洗工艺影响，SG-5 点位附近的 1、3、4、9 和 15 号区域浅层地下水镍浓度超过 III 类标准值。

深层（7~12m）：该层镍主要分布在 1、3、11、12、16、17、18、19 和 22 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 124,027m²。纵向上深层地下水范围相对浅层地下水污染范围较小，横向上未发现镍在向下迁移时有明显的横向迁移迹象，与地质勘察得到的地下水以垂直运动为主的结论相符合。

(4) 铅

浅层（2~7m）：该层铅主要分布 3、4、9 和 17 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 61,469m²。除 17 号区域外，浅层铅的分布与土壤中铅浓度最高的 0~2m 的铅的分布重叠。受酸洗工艺影响，3、4 和 9 号区域浅层地下水铅浓度超过 III 类标准值。17 号区域浅层地下水铅浓度超过 III 类标准值，初步判断受到地上堆存物的影响。

深层（7~12m）：该层在 XSG-9 点位发现铅浓度超过 III 类标准值。超 III 类标准值区域总面积约为 4,606m²。经过复测后该层 XSG-9 点位依然超过 III 类标准值。该点铅浓度 96μg/L，未超过 IV 类标准值，具有一定的偶然性。

(5) 镉

浅层（2~7m）：该层镉主要分布在 3、4、9、11 和 17 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 74,124m²。除 17 号区域外，浅层镉的分布与土壤中镉浓度最高的 0~2m 的镉的分布重叠。受酸洗工艺影响，3、4 和 9 号区域浅层地下水镉浓度超过 III 类标准值。17 号区域浅层地下水镉浓度超过 III 类标准值，初步判断受到地上堆存物的影响。

深层（7~12m）：该层 XSG-9 点位发现镉浓度超过地下水 III 类标准值。超 III 类标准值区域总面积约为 8,356m²。经过复测后该层 XSG-9 点位依然超过 III 类标准值。该点镉浓度为 9μg/L，未超过 IV 类标准值，具有一定的偶然性。

(6) 铜

浅层（2~7m）：该层铜主要分布在 3、9、18、19 和 21 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 50,994m²。土壤中铜未检测出超过筛选值。受酸洗工艺的影响，3 号和 9 号区域的浅层地下水受到影响。18 号硫酸亚铁堆场长期堆放各种矿石残渣，受矿石残渣的影响，该区域及 18 号区域下游的 19 号区域浅层地下水受到影响。

深层（7~12m）：该层未发现铜超过 III 类标准值。

(7) 汞

汞在厂区内地下水中分布较少，且浓度较低。

(8) 锑

浅层（2~7m）：该层锑主要分布在 13、14、17 和 18 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 66,884m²。浅层锑的分布与土壤中锑浓度最高的地上堆存物

的锑的分布重叠。

深层（7~12m）：该层锑主要分布在 11、14、16 和 18 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 48,126m²。纵向上深层地下水范围相对浅层地下水污染范围较小，横向上未发现锑在向下迁移时有明显的横向迁移迹象，与地质勘察得到的地下水以垂直运动为主的结论相符合。

（9）钴

浅层（2~7m）：该层钴主要分布在 1、3、4、11、12、17、18、20 和 22 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 124,408m²。浅层钴的分布与土壤中钴浓度最高的地上堆存物和 0~2m 的钴的分布重叠。

深层（7~12m）：该层钴主要分布在 1、11、12、17、18 和 22 号区域。超 III 类标准值区域总面积约为 89,149m²。纵向上深层地下水范围相对浅层地下水污染范围较小，横向上未发现钴在向下迁移时有明显的横向迁移迹象，与地质勘察得到的地下水以垂直运动为主的结论相符合。

5.4.3 对照点污染物含量

本次土壤污染状况调查共在裕兴化工厂区四周各 0.5km、1.0km 和 1.5km 处布设 12 个对照点，检测 Cr(VI)、砷、镍、铅、镉和汞。取样原则为在上述各区域寻找未受扰动的区域，采集 1m~2m 的土壤样品作为地块对照样品。平均检测结果见下表，详见检测报告。

表 5.4-5 土壤对照点检测值

项目	平均浓度 (mg/kg)
Cr(VI)	0.15
镍	39.9
砷	11.7
铅	37
镉	0.27
汞	0.11
钴	10.85
锑	2.48

在地块上游约 1.5 公里处的黄河景区内一处农庄内部的水井中取了地下水作为对照点的水样。检测结果显示除氟化物之外的所有物质均满足地下水 III 类水标准，氟化物的浓度为 1.22mg/L，满足地下水 IV 类水标准。

6 地块污染概念模型

地块污染概念模型是一个组织、分析和整合地块特征的信息系统。它能够形象的反映地块已有的信息，发现概念模型所需的数据缺口，进而优化调查方案和辅助修复方案的决策制定。考虑到合理的地块污染概念模型对于有效指导后期污染地块的重要性，地块污染概念模型的建立需要基于地块调查过程中收集的各种信息，如地块总体信息（场区生产历史、工艺设施和前期的环境调查等）、地块总体特征（地块地理、水文地质和气候等）、污染源特征、污染物的迁移转化机制、污染物暴露途径和可能的敏感受体等，进而合理解释污染物在地块内的分布、迁移途径以及可能存在的人体健康风险。

6.1 地块总体信息

根据前期调查可知，裕兴化工原厂区建厂于 1919 年，至上世纪 50 年代末产品多元化，主要产品为铬盐、钛白粉、硫酸、磷肥。90 年代，从斯洛文尼亚引进 1.5 万 t/a 金红石型钛白粉生产。根据《山东省人民政府关于济南裕兴化工总厂实施限期治理的通知》（鲁政发 [2005]105 号文）的要求，经多次论证，裕兴化工于 2009 年 12 月实施了搬迁改造项目，搬离原厂区。2019 年 4 月，裕兴化工开始地块环境调查和土壤修复工作。2012 年 12 月，裕兴化工原历史堆积的铬渣全部处置完毕并通过省环保厅、省发改委组织的验收。2014 年~2015 年，裕兴化工将新厂区产生的红石膏堆存在原厂区。

2019 年 3 月我公司中标后即成立了项目团队着手开展工作，收集相关资料，踏勘项目现场，进行人员访谈，完成了地质、水文地质勘查和地球物理勘查，掌握了第一手基础资料，为制定地块环境初步调查方案提供了基础信息。

2019 年 5 月我公司进行了地块环境初步调查，共设置了 97 个土壤取样点，41 个地下水取样点，6 个地表水取样点，共采集土壤样品 1114 个（包含平行样），地下水样品 91 个（包含平行样），地表水样品 6 个。在根据历史生产工艺、原料进行筛选，对现场进行详细踏勘的基础上，确定土壤检测项目为《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 36600-2018）中表一建设用地土壤污染风险筛选值和管制值（基本项目）规定的参数，结合生产工艺、原料以及现场快速筛测实际情况，对部分点位加测锑、钴、总石油烃、苯系物和多环芳烃。地下水监测项目为《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试

行)》(GB 36600-2018)中表一建设用地土壤污染风险筛选值和管制值(基本项目)规定的参数,对部分点位加测锑、钴、总石油烃、苯系物和多环芳烃。

2019年9月我公司在地块环境初步调查的基础上进行了地块环境详细调查,共设置了503个土壤取样点,18个地下水取样点,12个土壤背景点,12个已修复土壤采样点,10个地表水取样点,7个底泥取样点,共采集土壤样品2739个(包含平行样),地下水样品40个(包含平行样),地表水样品8个,底泥样品7个。在地块环境初步调查的基础上,确定土壤检测项目(包括土壤背景样品、已修复土壤样品和底泥样品)为Cr(VI)、砷、铅、镉、镍、汞,视情况对部分样品加测锑、钴和总石油烃;地下水检测项目为Cr(VI)、砷、铅、镉、镍、汞、铜、锑和钴;地块内地表水检测项目为总铬、Cr(III)、二价铁和三价铁,地块外小清河地表水检测项目为Cr(VI)、砷、铅、镉、镍、汞、铜、锑和钴。

本地块土壤超过筛选标准的污染物共有9种,包括8种重金属(Cr(VI)、砷、镍、铅、镉、汞、锑、钴)、总石油烃(C10~C40)和多环芳烃。

本地块超过地下水质量标准 III 类标准的污染物共有9种,均为重金属(Cr(VI)、砷、镍、铅、镉、汞、铜、锑、钴)。

6.2 地块地理及水文地质特征

济南地处中纬度地带,由于受太阳辐射、大气环流和地理环境的影响,属于温带季风气候。其特点是季风明显,四季分明,春季干旱少雨,夏季温热多雨,秋季凉爽干燥,冬季寒冷少雪。年平均气温13.8°C,无霜期178天,气温最高42.5°C(1955年7月24日),最低气温零下19.7°C(1953年1月17日)。最高月均温27.2°C(7月),最低月均温-3.2°C(1月)。年平均降水量685毫米。年日照时数1870.9小时(2009年)。

根据本次勘察过程中钻探揭露、取样分析以及静力触探等手段获取信息的综合对比、分析,结合区域地质资料,将地块地基土自上而下分为10个工程地质层,各层土体的性质简述如下。

①-1层杂填土(Q₄^{ml}):杂色,松散~稍密,稍湿,以粉质黏土、粉土为主,混杂有大量的灰渣、化工品废渣、建筑垃圾等,局部表层为厚20cm左右的混凝土。地块普遍分布,厚度:1.50~6.50m,平均3.35m;层底标高:19.09~22.19m,平均21.01m;层底埋深:1.50~6.50m,平均3.35m。具有弱~中等透水性;

①-2层黏土(Q₄^{al+pl}):灰褐色,可塑,光滑,高韧性,高干强度。地块局

部分布,厚度:0.500~1.60m,平均 1.12m;层底标高:18.96~20.44m,平均 19.70m;层底埋深:2.80~4.80m,平均 3.84m。具有微~不透水性;

②-1 层粉质黏土夹粉土 (Q_4^{al+pl}): 灰褐色、灰色,可塑,稍光滑,中等韧性,中等干强度,含有机质,微具臭味,局部夹有粉土,厚 5~15cm,局部为黏土。地块普遍分布,厚度:1.00~3.80m,平均 2.11m;层底标高:16.55~20.69m,平均 18.50m;层底埋深:4.00~8.20m,平均 5.86m。具有弱~微透水性;

②-2 层粉土夹粉质黏土 (Q_4^{al+pl}): 灰色,稍密,湿,摇振反应中等~迅速,局部夹可塑状粉质黏土,厚 20~40cm。地块大部分布,厚度:0.90~4.40m,平均 2.26m;层底标高:14.09~17.77m,平均 16.24m;层底埋深:6.60~12.60m,平均 8.12m。具有弱透水性;

②-3 层黏土 (Q_4^{al+pl}): 灰色、灰黑色,软塑~可塑,高韧性,高干强度,含大量腐殖质,具臭味,含有少量的贝壳碎屑,局部夹粉质黏土薄层。地块普遍分布,厚度:1.40~4.00m,平均 2.39m;层底标高:12.38~15.15m,平均 13.85m;层底埋深:8.50~14.60m,平均 10.50m。具有微~不透水性;

②-4 层粉质黏土夹粉土 (Q_4^{al+pl}): 灰色,可塑,稍光滑,中等韧性,中等干强度,含有少量的钙质结核,局部夹有粉土,厚 5-30cm。地块普遍分布,厚度:1.70~5.50m,平均 3.16m;层底标高:7.28~8.63m,平均 7.78m;层底埋深:12.10~17.70m,平均 15.92m。具有微~不透水性;

③-1 层含钙质结核黏土 (Q_4^{al+pl}): 灰色~灰绿色,硬塑,局部坚硬,高韧性,高干强度,含有 5~20%的钙质结核,局部富集,粒径 $\phi=0.5\sim 5\text{cm}$,个别较大者粒径 ϕ 达 15cm,局部为粉质黏土。地块普遍分布,厚度:2.70~3.20m,平均 3.02m;层底标高:7.28~8.63m,平均 7.78m;层底埋深:15.30~17.00m,平均 15.92m。具有微~不透水性;

③-2 层黏土 (Q_4^{al+pl}): 灰色、灰黄色,硬塑,高韧性,高干强度,含少量的钙质结核,局部为粉质黏土。地块普遍分布,厚度:3.60~6.10m,平均 4.65m;层底标高:1.42~4.08m,平均 2.93m;层底埋深:19.30~22.20m,平均 20.45m。具有微~不透水性;

④-1 层含钙质结核黏土 (Q_{2+3}^{al+pl}): 棕黄色,硬塑~坚硬,高韧性,高干强度,含有 10~30%的钙质结核,局部富集,粒径 $\phi=0.5\sim 5\text{cm}$ 。地块普遍分布,厚度:3.10~6.50m,平均 5.10m;层底标高:-2.72~-1.68m,平均-2.17m;层底

埋深：25.00~26.10m，平均 25.55m。具有微透水性；

④-2 层粉质黏土（ Q_{2+3}^{al+pl} ）：灰黄色，硬塑，稍光滑，中等韧性，中等干强度，含有少量的铁锰氧化物及铁锰结核。地块普遍分布，该层未揭穿。具有微透水性。

本次勘察深度范围内地下水类型主要为孔隙潜水。

潜水赋存于②-4 层粉质黏土夹粉土及以上土层中，勘探期间勘探孔揭露的潜水稳定水位埋深为 1.73~6.34m，高程 20.61~22.95m。水位年变化幅度 0.5~2.0m，历史最高水位接近地表。水位动态变化主要受控于大气降水与蒸发，地下水水位较高，常年接近地表。由于地块地势低平、地下水水位较高且土层渗透系数较小，地下水的径流与排泄缓慢，地下水活动不显著。

根据区域水文地质资料，地块位于黄河与小清河之间，地下水以小清河为界，小清河以北地下水流向与黄河的侧向渗透方向一致，即由北向南流动；小清河以南地下水流向为由南向北。小清河为浅层孔隙水的汇水地带和排泄渠道。

根据对地块内浅层孔隙水的水位的实测，地下水的等水位线见图 5.3-1 和图 5.3-2。地块内浅层孔隙水的流向由北向南。

6.3 污染源特征

由于裕兴化工原厂区成立时间早，早期生产工艺较为粗放，可能对厂区土壤和地下水产生危害的途径主要有以下几方面：

- （1） 钛白粉、铬盐生产车间生产过程中产生的跑冒滴漏以及携带重金属的粉尘的飘落、沉降，可能对车间及周边环境造成一定的重金属等影响；
- （2） 原硫酸亚铁堆和铬渣堆场在长时间的堆放的过程中向周边环境不断释放重金属，可能对周边环境造成一定的重金属等影响；
- （3） 5 号区域曾开展过搪铅工作，搪铅过程中的跑冒滴漏可能造成局部土壤、地下水污染。

6.4 污染物迁移转化机制

地块内关注污染物（重金属和多环芳烃）的迁移转化可能主要通过以下途径：

- （1） 非饱和层中的污染物随雨水淋溶下渗；
- （2） 淋溶出的污染物下渗至地下水水面后随地下水迁移、稀释和吸附；
- （3） 污染物吸附在土壤颗粒上随风力传播。

6.5 污染物暴露途径和受体

地块中污染物经一定的方式迁移到达并进入人体的过程称之为迁移和暴露途径。土壤中的重金属主要会附着在土壤颗粒上，当土壤被风蚀或者人类活动等因素扰动后，含重金属的土壤颗粒可以通过直接摄入、皮肤接触、呼吸摄入危害人体健康。本项目地块污染物通过土壤介质接触人体的主要途径为皮肤接触、经口摄入。通过地下水介质的接触人体的主要途径为地下水的直接饮用。

根据规划，本地块未来将作为住宅用地，地块所在区域不属于地下水型饮用水源保护区及补给区、不具有工业和农业用水等使用功能。因此将地块的未来使用情境设定为住宅用地，敏感受体为成人和儿童。

7 地块风险评估

7.1 风险评估流程

根据《建设用土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019）中相关规定，污染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、土壤及地下水风险控制值的计算。

（1）危害识别

危害识别是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，如儿童、成人、地下水体等。

（2）暴露评估

在危害识别的工作基础上，分析地块土壤中关注污染物进入并危害敏感受体的情景，确定地块土壤污染物对敏感人群的暴露途径，确定污染物在环境介质中的迁移模型和敏感人群的暴露模型，确定与地块污染状况、土壤性质、地下水特征、敏感人群和关注污染物性质等相关的模型参数值，计算敏感人群摄入来自土壤和地下水的污染物所对应的土壤和地下水的暴露量。

（3）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，包括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）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

在风险表征的工作基础上，判断计算得到的风险值是否超过可接受风险水平。如污染地块风险评估结果未超过可接受风险，则结束风险评估工作。如污染地块风险评估结果超过可接受水平，则计算土壤、地下水中关注污染物的风险控制值；根据最终根据计算结果，提出关注污染物的土壤和地下水风险控制值。

7.2 危害识别

根据前期土壤污染状况调查工作的成果，以及裕兴化工提供的地块未来发展规划和计划采取的风险管控措施等相关信息，本次地块风险评估的关注污染物被确认为在地块土壤中检出浓度超过《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》第一类用地筛选值，或在地块地下水中检出浓度超过《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）三类标准，且在地块内多个区域被检出超过相关标准的污染物。土壤关注污染物包括：Cr(VI)、镍、镉、砷、汞、铅、镉、钴、钒、总石油烃、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽、苯及 1,2-二氯丙烷。地下水关注污染物包括：Cr(VI)、镍、镉、砷、汞、铅、镉、钴及铜。

除铅以外，其余关注污染物均依据《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019）相关要求与健康风险评估。铅由于不适用于《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019），因此选用美国环境保护署（USEPA）的综合暴露吸收生物动力学（Integrated Exposure Uptake Biokinetic, IEUBK）模型进行健康风险评估。

7.3 暴露评估

7.3.1 暴露情景

根据裕兴化工提供的地块未来发展规划，地块未来拟开发为住宅小区，根据《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019），属于敏感用地暴露情景。敏感用地方式下，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。

7.3.2 暴露途径

暴露途径是地块土壤和浅层地下水中污染物迁移到达和暴露于人体的方式，《污染地块风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）中规定了 9 种主要暴露途径和暴露评估模型，包括 6 种土壤污染物暴露途径：

- （1）经口摄入土壤；
- （2）皮肤接触土壤；
- （3）吸入土壤颗粒物；

- (4) 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物；
- (5) 吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物；
- (6) 吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物。

以及 3 种地下水污染物暴露途径：

- (1) 吸入室外空气中来自地下水的气态污染物；
- (2) 吸入室内空气中来自地下水的气态污染物；
- (3) 饮用地下水。

本项目地块地下水不作为饮用水，污染物均为重金属，无气态污染物，因此不存在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及饮用地下水暴露途径等 6 个暴露途径。

9 类暴露途径中本项目地块有 3 类暴露途径，即经口摄入土壤、皮肤接触土壤和吸入土壤颗粒物，均直接通过表层土暴露。深层土不能直接对敏感受体产生影响，但可通过地下水将污染物扩散至表层土壤，间接影响敏感受体。本项目地块地下水最高初见水位为 0.5m，杂填土深度为 2~4m，4m 以下为渗透系数较低的粘土。考虑到含水层土壤无经口摄入、皮肤接触和吸入颗粒物等直接敏感受体暴露途径，并结合地块地质情况，本报告将地下 0~0.5m 认定为表层土，0.5~4m 米认为浅层土，4m 以下认定为深层土，按照不同暴露途径分别进行风险评估。

表层土暴露途径为经口摄入土壤、皮肤接触土壤和吸入土壤颗粒物。浅层土和深层土虽然无直接暴露途径，但污染物可通过地下水迁移至表层土，间接影响敏感受体。尤其是 Cr(VI)，在土壤毛细作用下，可迁移至表层土，并随着水分蒸发而富集，造成表层土壤 Cr(VI)含量过高。在进行风险评估及修复方案制定时，需充分考虑 Cr(VI)的这一特性。

本项目地块所在区域不是地下水型饮用水源保护区及补给区，不具有工业及农业用水使用功能，再考虑到地下水中关注污染物均为重金属，不存在挥发性，因此地下水的 3 种暴露途径均不完整。

根据上述分析，本地块暴露的概念模型如图 7.3-1 所示：

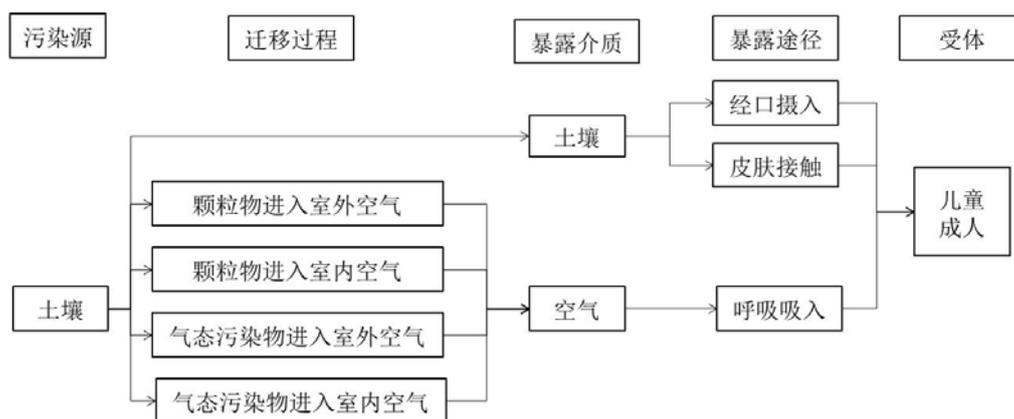


图 7.3-1 地块暴露概念模型

7.3.3 暴露模型

根据《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019），该地块适用的各暴露途径暴露模型如下：

（1）经口摄入土壤途径（致癌效应）

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

其中：

OISER_{ca} 一经口摄入土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

OSIR_c 一儿童每日摄入土壤量，mg·d⁻¹；

OSIR_a 一成人每日摄入土壤量，mg·d⁻¹；

ED_c 一儿童暴露期，a；

ED_a 一成人暴露期，a；

EF_c 一儿童暴露频率，d·a⁻¹；

EF_a 一成人暴露频率，d·a⁻¹；

ABS_o 一经口摄入吸收效率因子，无量纲；

BW_c 一儿童体重，kg；

BW_a 一成人体重，kg；

AT_{ca} 一致癌效应平均时间，d。

（2）经口摄入土壤途径（非致癌效应）

$$OISER_{nc} = \frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c \times ABS_o}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

其中：

OISERnc 一经口摄入土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

OSIRc 一儿童每日摄入土壤量，mg·d⁻¹；

EDc 一儿童暴露期，a；

EFc 一儿童暴露频率，d·a⁻¹；

ABSo 一经口摄入吸收效率因子，无量纲；

BWc 一儿童体重，kg；

ATnc 一非致癌效应平均时间，d。

（3）皮肤接触土壤途径（致癌效应）

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

其中：

DCSERca 一皮肤接触途径的土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤 kg⁻¹ 体重 d⁻¹；

SAEc 一儿童暴露皮肤表面积，cm²；

SAEa 一成人暴露皮肤表面积，cm²；

SSARc 一儿童皮肤表面土壤粘附系数，mg·cm⁻²；

SSARa 一成人皮肤表面土壤粘附系数，mg·cm⁻²；

ABSd 一皮肤接触吸收效率因子，无量纲；

EDc 一儿童暴露期，a；

EDa 一成人暴露期，a；

EFc 一儿童暴露频率，d·a⁻¹；

EFa 一成人暴露频率，d·a⁻¹；

E_v 一每日皮肤接触事件频率，次·d⁻¹；

BWc 一儿童体重，kg；

BWa 一成人体重，kg；

ATca 一致癌效应平均时间，d。

（4）皮肤接触土壤途径（非致癌效应）

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

其中：

DCSER_{nc} —皮肤接触的土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤•kg⁻¹ 体重•d⁻¹；

SAEc —儿童暴露皮肤表面积，cm²；

SSARc —儿童皮肤表面土壤粘附系数，mg•cm⁻²；

EFc —儿童暴露频率，d•a⁻¹；

EDc —儿童暴露期，a；

E_v —每日皮肤接触事件频率，次•d⁻¹；

ABS_d —皮肤接触吸收效率因子，无量纲；

BW_c —儿童体重，kg；

AT_{nc} —非致癌效应平均时间，d。

（5）吸入土壤颗粒物途径（致癌效应）

$$PISER_{ca} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_c + f_{spi} \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} + \frac{PM_{10} \times DAIR_a \times ED_a \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_a + f_{spi} \times EFI_a)}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6}$$

其中：

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；

PM₁₀ —空气中可吸入浮颗粒物含量，mg•m⁻³；

DAIR_a —成人每日空气呼吸量，m³•d⁻¹；

DAIR_c —儿童每日空气呼吸量，m³•d⁻¹；

PIAF —吸入土壤颗粒物在体内滞留比例，无量纲；

f_{spi} —室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例，无量纲；

f_{spo} —室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例，无量纲；

EFI_a —成人的室内暴露频率，d•a⁻¹；

EFI_c —儿童的室内暴露频率，d•a⁻¹；

EFO_a —成人的室外暴露频率，d•a⁻¹；

EFO_c —儿童的室外暴露频率，d•a⁻¹；

ED_c —儿童暴露期，a；

EDa —成人暴露期， a;

BWc —儿童体重， kg;

BWa —成人体重， kg;

ATca —致癌效应平均时间， d。

(6) 吸入土壤颗粒物途径（非致癌效应）

$$PISER_{nc} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_c + f_{spi} \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \dots$$

其中：

PISERnc —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;

PM10 —空气中可吸入浮颗粒物含量， mg·m⁻³;

DAIRc —儿童每日空气呼吸量， m³·d⁻¹;

PIAF —吸入土壤颗粒物在体内滞留比例， 无量纲;

fspi —室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例， 无量纲;

fspo —室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例， 无量纲;

EFic —儿童的室内暴露频率， d·a⁻¹;

EFOc —儿童的室外暴露频率， d·a⁻¹;

EDc —儿童暴露期， a;

BWc —儿童体重， kg;

ATnc —非致癌效应平均时间， d。

(7) 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径（致癌效应）

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

IOVERca1 —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·m⁻³;

DAIRa —成人每日空气呼吸量， m³·d⁻¹;

DAIRc —儿童每日空气呼吸量， m³·d⁻¹;

EFOa —成人的室外暴露频率， d·a⁻¹;

EFOc 一儿童的室外暴露频率， $d \cdot a^{-1}$ ；

EDc 一儿童暴露期，a；

EDa 一成人暴露期，a；

BWc 一儿童体重，kg；

BWa 一成人体重，kg；

ATca 一致癌效应平均时间，d。

(8) 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径（非致癌效应）

$$IOVER_{nc1} = VF_{suroa} \times \frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}}$$

其中：

IoVERnc1 一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）， $kg \text{ 土壤} \cdot kg^{-1} \cdot \text{体重} \cdot d^{-1}$ ；

VF_{suroa} 一表层土壤中污染物扩散进入室外空气的挥发因子， $kg \cdot m^{-3}$ ；

DAIRc 一儿童每日空气呼吸量， $m^3 \cdot d^{-1}$ ；

EFOc 一儿童的室外暴露频率， $d \cdot a^{-1}$ ；

EDc 一儿童暴露期，a；

BWc 一儿童体重，kg；

ATnc 一非致癌效应平均时间，d。

7.3.4 模型参数

暴露评估所需的相关参数主要包括地块特征参数（土壤、地下水参数等）、建筑物参数、暴露因子及污染物理化性质等。本评价所用模型参数优先考虑地块实测数据或地块所在地政府部门公开发布的数据，其余参数主要参考《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019）中的推荐值。

具体参数取值详见表 13.3-1：

表 13.3-1 暴露模型参数表

参数符号	参数名称与单位	数值	数据来源
OSIRc	儿童每日摄入土壤量， $mg \cdot d^{-1}$	200	HJ 25.3-2019
OSIRa	成人每日摄入土壤量， $mg \cdot d^{-1}$	100	HJ 25.3-2019
EDc	儿童暴露期，a	6	HJ 25.3-2019
EDa	成人暴露期，a	24	HJ 25.3-2019
EFc	儿童暴露频率， $d \cdot a^{-1}$	350	HJ 25.3-2019

参数符号	参数名称与单位	数值	数据来源
EFa	成人暴露频率, $d \cdot a^{-1}$	350	HJ 25.3-2019
ABSo	经口摄入吸收效率因子, 无量纲	1	HJ 25.3-2019
BWc	儿童体重, kg	19.2	HJ 25.3-2019
BWa	成人体重, kg	61.8	HJ 25.3-2019
ATca	致癌效应平均时间, d	27740	HJ 25.3-2019
ATnc	非致癌效应平均时间, d	2190	HJ 25.3-2019
Hc	儿童平均身高, cm	113.15	HJ 25.3-2019
Ha	成人平均身高, cm	161.5	HJ 25.3-2019
SERc	儿童暴露皮肤所占体表面积比, 无量纲	0.36	HJ 25.3-2019
SSARc	儿童皮肤表面土壤粘附系数, $mg \cdot cm^{-2}$	0.2	HJ 25.3-2019
SSARa	成人皮肤表面土壤粘附系数, $mg \cdot cm^{-2}$	0.07	HJ 25.3-2019
Ev	每日皮肤接触事件频率, $次 \cdot d^{-1}$	1	HJ 25.3-2019
ABSd	皮肤接触吸收效率因子, 无量纲	详见污染物毒性参数表	HJ 25.3-2019
PM10	空气中可吸入颗粒物含量, $mg \cdot m^{-3}$	0.075	山东省环保厅统计数据(1)
DAIRa	成人每日空气呼吸量, $m^3 \cdot d^{-1}$;	14.5	HJ 25.3-2019
DAIRc	儿童每日空气呼吸量, $m^3 \cdot d^{-1}$	7.5	HJ 25.3-2019
PIAF	吸入土壤颗粒物在体内滞留比例, 无量纲	0.75	HJ 25.3-2019
fspi	室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例, 无量纲	0.8	文献数据(2)
fspo	室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例, 无量纲	0.5	济南市当地统计数据(3)
EFIa	成人的室内暴露频率, $d \cdot a^{-1}$	262.5	HJ 25.3-2019
EFIc	儿童的室内暴露频率, $d \cdot a^{-1}$	262.5	HJ 25.3-2019
EFOa	成人的室外暴露频率, $d \cdot a^{-1}$	87.5	HJ 25.3-2019
EFOc	儿童的室外暴露频率, $d \cdot a^{-1}$	87.5	HJ 25.3-2019
fom	土壤有机质含量, $g \cdot kg^{-1}$	15	HJ 25.3-2019
ρ_b	土壤容重, $kg \cdot dm^{-3}$	1.43	地块实测数据
Pws	土壤含水率, $kg \cdot kg^{-1}$	0.32	地块实测数据
ρ_s	土壤颗粒密度, $kg \cdot dm^{-3}$	2.74	地块实测数据
Uair	混合区大气流速风速, $cm \cdot s^{-1}$	200	HJ 25.3-2019
δ_{air}	混合区高度, cm	200	HJ 25.3-2019
hcap	土壤地下水交界处毛管层厚度 c, cm	5	HJ 25.3-2019
θ_{acap}	毛细管层孔隙空气体积比, 无量纲	0.038	HJ 25.3-2019
θ_{wcap}	毛细管层孔隙水体积比, 无量纲	0.342	HJ 25.3-2019
I	土壤中水的入渗速率, $cm \cdot a^{-1}$	1382	地块实测数据

注:

 (1) 山东省环保厅统计数据; (<http://sthj.shandong.gov.cn/zwgk/sqcspm/>)

7.4 毒性评估

毒性评估的工作内容包括分析关注污染物的健康效应(致癌和非致癌效应),确定污染物的毒性参数值。毒性参数主要用以计算呼吸吸入致癌斜率因子(SFi)、呼吸吸入参考剂量(RfDi)、皮肤接触致癌斜率因子(SFd)和皮肤接触参考剂量(RfDd),《建设用地土壤污染分析评估技术导则》(HJ25.3-2019)中相应计算模型如下:

(1) 呼吸吸入致癌斜率因子

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

其中:

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

IUR —呼吸吸入单位致癌因子, m³·mg⁻¹;

BWa —成人体重, kg;

DAIRa —成人每日空气呼吸量, m³·d⁻¹。

(2) 呼吸吸入致癌斜率因子

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

其中:

RfDi —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, mg·m⁻³;

BWa —成人体重, kg;

DAIRa —成人每日空气呼吸量, m³·d⁻¹。

(3) 皮肤接触致癌斜率因子

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

其中:

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

SFo —经口摄入致癌斜率因子, (mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹;

ABSgi —消化道吸收效率因子, 无量纲。

(4) 皮肤接触参考剂量

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

其中：

RfDd —皮肤接触参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

RfDo —经口摄入参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

ABSgi —消化道吸收效率因子，无量纲。

关注污染物具体毒性参数取值详见表 13.4-1。

表 7.4-1 污染物毒性参数表

污染物	经口摄入致癌斜率因子 (SF ₀)	呼吸吸入单位致癌因子 (IUR)	经口摄入参考剂量 (RfDo)	呼吸吸入参考浓度 (RfC)	消化道吸收效率因子 (ABS _{gi})	皮肤接触吸收效率因子 (ABS _d)
Cr(VI)	/	1.20E+01 (1)	3.00E-03 (2)	1.00E-04 (2)	2.50E-02 (2)	/
镍	/	2.60E-01 (2)	2.00E-02 (2)	9.00E-05 (2)	4.00E-02 (2)	/
镉	/	1.80E+00 (2)	1.00E-03 (2)	1.00E-05 (2)	2.50E-02 (2)	1.00E-03 (2)
砷	1.50E+00 (2)	4.30E+00 (2)	3.00E-04 (2)	1.50E-05 (2)	1.00E+00 (2)	3.00E-02 (2)
汞	/	/	3.00E-04 (2)	3.00E-04 (2)	7.00E-02 (2)	/
铈	/	/	4.00E-04 (2)	/	1.50E-01 (2)	/
钴	/	/	3.00E-04 (2)	6.00E-06 (2)	1.00E+00 (2)	/
钒	/	8.30E+00 (2)	9.00E-03 (2)	7.00E-06 (2)	2.60E-02 (2)	/
氟化物	/	/	4.00E-02 (2)	1.30E-02 (2)	/	/
脂肪烃 C ₁₀ -C ₁₂	/	/	1.00E-01 (4)	5.00E-01 (4)	5.00E-01 (4)	1.00E-01 (4)
脂肪烃 C ₁₃ -C ₁₆	/	/	1.00E-01 (4)	5.00E-01 (4)	5.00E-01 (4)	1.00E-01 (4)
脂肪烃 C ₁₇ -C ₂₁	/	/	2.00E+00 (4)	/	5.00E-01 (4)	1.00E-01 (4)
脂肪烃 C ₂₂ -C ₄₀	/	/	2.00E+00 (4)	/	5.00E-01 (4)	1.00E-01 (4)
芳香烃 C ₁₀ -C ₁₂	/	/	4.00E-02 (4)	2.00E-01 (4)	5.00E-01 (4)	1.00E-01 (4)
芳香烃 C ₁₃ -C ₁₆	/	/	4.00E-02 (4)	2.00E-01 (4)	5.00E-01 (4)	1.00E-01 (4)
芳香烃 C ₁₇ -C ₂₁	/	/	3.00E-02 (4)	/	5.00E-01 (4)	1.00E-01 (4)
芳香烃 C ₂₂ -C ₄₀	/	/	3.00E-02 (4)	/	5.00E-01 (4)	1.00E-01 (4)

污染物	经口摄入致癌斜率因子 (SFo)	呼吸吸入单位致癌因子 (IUR)	经口摄入参考剂量 (RfDo)	呼吸吸入参考浓度 (R fC)	消化道吸收效率因子 (ABSgi)	皮肤接触吸收效率因子 (ABSd)
苯并(a)蒽	1.00E-01 (2)	6.00E-02 (2)	/	/	1.00E+00 (2)	1.30E-01 (2)
苯并(b)荧蒽	1.00E-01 (2)	6.00E-02 (2)	/	/	1.00E+00 (2)	1.30E-01 (2)
苯并(a)芘	1.00E+00 (1)	6.00E-01 (2)	3.00E-04 (1)	2.00E-06 (1)	1.00E+00 (2)	1.30E-01 (2)
茚并(1,2,3-cd)芘	1.00E-01 (2)	6.00E-02 (2)	/	/	1.00E+00 (2)	1.30E-01 (2)
二苯并(a,h)蒽	1.00E+00 (2)	6.00E-01 (2)	/	/	1.00E+00 (2)	1.30E-01 (2)
苯	5.50E-02 (1)	7.80E-03 (1)	4.00E-03 (1)	3.00E-02 (1)	1.00E+00 (2)	/
1,2-二氯丙烷	3.70E-02 (2)	3.70E-02 (2)	4.00E-02 (2)	4.00E-03 (1)	1.00E+00 (2)	/

注:

(1)数据来源: USEPA Integrated Risk Information System (IRIS);

(2)数据来源: HJ 25.3-2019;

(3)数据来源: USEPA Regional Screening Level (RSL, 2019-11);

(4)数据来源: 《上海市建设用地土壤污染状况调查, 风险评估, 风险管控与修复方案编制, 风险管控与修复效果评估工作的补充规定(试行)》

7.5 风险表征

根据《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019）中的规定，单一污染物的可接受致癌风险水平为 10^{-6} ，可接受危害指数为 1。即当单一污染物致癌风险水平大于 10^{-6} ，危害指数大于 1 时，可能对人体具有危害，需采取进一步的管理措施。

如前所述，地下 4 米以上的土壤按照表层土壤进行评估。地下 4 米以下的土壤按照下层土壤进行评估，不存在暴露途径。在前述危害识别、暴露评估和毒性评估的基础上，根据《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019）中规定的风险计算模型，对关注污染物经口摄入土壤、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途径的致癌和非致癌风险进行计算。计算模型如下：

(1) 经口摄入土壤途径致癌风险

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

其中：

CR_{ois} 一经口摄入土壤途径的致癌风险，无量纲；

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

C_{sur} 一表层土壤中污染物浓度， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

SF_o 一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) 经口摄入土壤途径非致癌危害商

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

其中：

HQ_{ois} 一经口摄入土壤途径的危害商，无量纲；

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

C_{sur} 一表层土壤中污染物浓度， $mg \cdot kg^{-1}$ ；

RfD_o 一-经口摄入参考剂量， $mg \text{ 污染物} \cdot kg^{-1} \text{ 体重} \cdot d^{-1}$ ；

SAF 一暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲。

(3) 皮肤接触土壤途径致癌风险

$$CR_{dcs} = DCSE_{Rca} \times C_{sur} \times SF_d$$

其中：

CR_{dcs} — 皮肤接触土壤途径的致癌风险，无量纲；

DCSE_{Rca} — 皮肤接触途径的土壤暴露量（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⁻¹；

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

(4) 皮肤接触土壤途径非致癌危害商

$$HQ_{dcs} = \frac{DCSE_{Rnc} \times C_{sur}}{RfD_d \times SAF}$$

其中：

HQ_{dcs} — 皮肤接触土壤途径的危害商，无量纲；

DCSE_{Rnc} — 皮肤接触的土壤暴露量（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⁻¹；

RfD_d — 皮肤接触参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

SAF — 暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲。

(5) 吸入土壤颗粒物途径致癌风险

$$CR_{pis} = PISE_{Rca} \times C_{sur} \times SF_i$$

其中：

CR_{pis} — 吸入土壤颗粒物途径的致癌风险，无量纲；

PISE_{Rca} — 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⁻¹；

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

(6) 吸入土壤颗粒物途径非致癌危害商

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

其中：

HQ_{pis} 一吸入土壤颗粒物途径的危害商，无量纲；

PISER_{nc} 一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；

C_{sur} 一表层土壤中污染物浓度，mg·kg⁻¹；

RfDi 一呼吸吸入参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

SAF 一暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲。

(7) 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物致癌风险

$$CR_{iov1} = IOVER_{cal} \times C_{sur} \times SF_i$$

其中：

CR_{iov1} 一吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径的致癌风险，无量纲；

IOVER_{cal} 一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；

C_{sur} 一表层土壤中污染物浓度，mg·kg⁻¹；

SF_i 一呼吸吸入致癌斜率因子，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹。

(8) 吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物非致癌危害商

$$HQ_{iov1} = \frac{IOVER_{nc1} \times C_{sur}}{RfD_i \times SAF}$$

其中：

HQ_{iov1} 一吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径的危害商，无量纲；

IoVER_{nc1} 一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），kg 土壤·kg⁻¹·体重·d⁻¹；

C_{sur} 一表层土壤中污染物浓度，mg·kg⁻¹；

RfDi 一呼吸吸入参考剂量，mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

SAF 一暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲。

(9) 土壤中单一污染物经所有暴露途径的总致癌风险

$$CR_n = CR_{ois} + CR_{dcs} + CR_{pis} + CR_{iov1}$$

其中：

CR_n —土壤中单一污染物（第 n 种）经所有暴露途径的总致癌风险，无量纲；

CR_{ois} —经口摄入土壤途径的致癌风险，无量纲；

CR_{dcs} —皮肤接触土壤途径的致癌风险，无量纲；

CR_{pis} —吸入土壤颗粒物途径的致癌风险，无量纲；

CR_{iov1} —吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径的致癌风险，无量纲。

(10) 土壤中单一污染物经所有暴露途径的非致癌危害指数

$$HI_n = HQ_{ois} + HQ_{dcs} + HQ_{pis} + HQ_{iov1}$$

其中：

HI_n —土壤中单一污染物（第 n 种）经所有暴露途径的危害指数，无量纲；

HQ_{ois} —经口摄入土壤途径的危害商，无量纲；

HQ_{dcs} —皮肤接触土壤途径的危害商，无量纲；

HQ_{pis} —吸入土壤颗粒物途径的危害商，无量纲；

HQ_{iov1} —吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径的危害商，无量纲。

根据上述模型，地块各层土壤中关注污染物最大检出浓度点位相对应致癌与非致癌风险计算结果如下列各表所示：

表 7.5-1 风险计算结果（地上）

污染物	最大检出浓度（mg/kg）	总致癌风险	非致癌危害指数
Cr(VI)	19900	3.33E-03	1.58E+02
镉	9.92	2.49E-07	3.50E-01
砷	598	1.29E-03	4.84E+01
镍	765	2.77E-06	1.87E+00
汞	20	/	1.34E+00
锑	409	/	2.04E+01
钴	97.5	1.22E-05	8.61E+00
钒	554	6.41E-05	1.15E+01
氟化物	/	/	/

污染物	最大检出浓度 (mg/kg)	总致癌风险	非致癌危害指数
苯	1.95	1.37E-07	/
苯并(a)蒽	48.0	8.73E-06	/
苯并(b)荧蒽	39.4	7.16E-06	/
苯并(a)芘	37.0	6.73E-05	5.78E+00
茚并(1,2,3-cd)芘	22.0	4.00E-06	/
二苯并(a,h)蒽	7.3	1.33E-05	/

表 7.5-2 风险计算结果 (0-2m)

污染物	最大检出浓度 (mg/kg)	总致癌风险	非致癌危害指数
Cr(VI)	8850	1.48E-03	7.05E+01
镉	249	6.25E-06	8.78E+00
砷	1540	3.33E-03	1.25E+02
镍	661	5.58E-06	3.77E+00
汞	53.7	/	3.60E+00
锑	473	/	2.36E+01
钴	92.4	1.16E-05	8.16E+00
钒	308	3.57E-05	6.41E+00
氟化物	32100	/	1.64E+01
1,2-二氯丙烷	1.35	6.46E-08	1.09E-03

表 7.5-1 风险计算结果 (2~4m)

污染物	最大检出浓度 (mg/kg)	总致癌风险	非致癌危害指数
Cr(VI)	7870	1.32E-03	6.27E+01
镉	215	5.40E-06	7.58E+00
砷	1000	2.16E-03	8.10E+01
镍	615	2.23E-06	1.50E+00
汞	113	/	7.57E+00
锑	455	/	2.27E+01
钴	94	1.18E-05	8.30E+00
钒	306	3.54E-05	6.37E+00
氟化物	12200	/	6.22E+00
C10-C40	917	/	4.01E-01

土壤中总致癌风险大于 10E-06 或非致癌危害指数超过 1 的污染物包括 Cr(VI)、镉、砷、镍、汞、锑、钴、钒、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘和二苯并(a,h)蒽。

7.6 不确定性分析

本次地块风险评估以给出数值的方式量化污染物对人体健康的风险。其中模型参数、数据差异性等因素会影响风险计算结果，因此计算所得的风险值存在一定不确定性。不确定性主要有如下几类：

(1) 地块信息

地块状况、历史、周边状况、当前和未来规划的土地利用方式均对危害识别和暴露评估的结果有影响。本次地块风险评估通过在前期地质勘察、地球物理勘察、地块环境初步调查和详细调查阶段收集了相关信息。所收集的信息包括地块土层状况、地下水水位、土壤地下水中污染物浓度水平。相关工作均依照国内和国际技术导则及标准操作程序进行，数据质量符合技术导则要求。

(2) 毒性数据

污染物的毒性数据可显著影响风险评估的结果。本次地块风险评估所使用的毒性数据均引用自《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019）、USEPA IRIS 和 USEPA RSL。上述数据库中的毒性数据主要基于动物实验的结果。由于化学物质对动物的毒性值不能直接拿来表征对人体的毒性值，因此需要通过一定的演算，得到针对人体的毒性值。从动物 NOAEL 或 LOAEL 推算到人体 RfD 的过程中，引入不确定参数(UF)和修正参数(MF)。UF 和 MF 的取值存在一定的不确定性，因此计算得到的针对人体的毒性值也存在不确定性。对毒性参数数值的低估或高估都将影响风险计算结果。

(3) 模型与参数

地块风险评估所使用的模型及其参数可显著影响暴露量和风险计算的结果。此次人体健康风险评估中所使用的模型和大部分参数均引用自《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019）。部分参数引用自当地政府公布的数据（如：PM₁₀）或使用地块实测数据（如：土壤性质参数），由于土壤性质参数为统计平均值，其与各暴露点位实际土壤性质存在一定的差异。

7.7 风险控制值计算

7.7.1 常规重金属风险控制值计算

根据《建设用地土壤污染分析评估技术导则》（HJ25.3-2019）：在风险表征的基础上，判断计算得到的污染物风险值是否超过可接受风险水平。如污染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；如污染地块风险评

估结果超过可接受风险水平，则计算土壤中关注污染物的风险控制值。除铅以外的其他重金属风险控制值相关计算模型如下：

(1) 基于全部土壤暴露途径综合致癌效应的土壤风险控制值

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

其中：

RCVS_n — 单一污染物（第 n 种）基于全部土壤暴露途径综合致癌效应的土壤风险控制值，mg·kg⁻¹；

ACR — 可接受致癌风险（10⁻⁶），无量纲；

OISER_{ca} — 经口摄入土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

DCSE_{nc} — 皮肤接触的土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

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；

IOVER_{ca1} — 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；

IOVER_{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），kg 土壤·kg⁻¹ 体重·d⁻¹；

IIVER_{ca1} — 吸入室内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；

SF_o — 经口摄入致癌斜率因子，(mg 污染物·kg⁻¹ 体重·d⁻¹)⁻¹；

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

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

(2) 基于全部土壤暴露途径综合非致癌效应的土壤风险控制值

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

其中：

HCVS_n — 单一污染物（第 n 种）基于 6 种土壤暴露途径综合非致癌效应的土壤风险控制值，mg·kg⁻¹；

AHQ — 可接受非致癌危害商（1），无量纲；

SAF —暴露于土壤的参考剂量分配系数，无量纲；

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

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

PISERnc —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} ；

IOVERca1 —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）， $\text{kg 土壤}\cdot\text{kg}^{-1}$ 体重 $\cdot\text{d}^{-1}$ ；

IoVERnc2 —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）， $\text{kg 土壤}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{体重}\cdot\text{d}^{-1}$ ；

IIVERnc1 —吸入室内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）， $\text{kg 土壤}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{体重}\cdot\text{d}^{-1}$ ；

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

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

RfDi —呼吸吸入参考剂量， $\text{mg 污染物}\cdot\text{kg}^{-1}$ 体重 $\cdot\text{d}^{-1}$ 。

根据上述模型，地块土壤中关注污染物的风险控制值计算结果如下表所示：

表 7.7-1 土壤中关注污染物的风险控制值计算结果

污染物	基于全部土壤暴露途径综合致癌效应的土壤风险控制值 (mg/kg)	基于全部土壤暴露途径综合非致癌效应的土壤风险控制值 (mg/kg)
Cr(VI)	5.98	125.61
镍	275.79	408.89
镉	167.43	39.45
砷	39.84	28.35
汞	/	14.92
铊	/	20.02
钴	7.97	11.33
钒	8.64	48.03
氟化物	/	1,962.92
苯并(a)蒽	5.50	/
苯并(b)荧蒽	5.50	/
苯并(a)芘	0.55	6.40
茚并(1,2,3-cd)芘	5.50	/
二苯并(a,h)蒽	0.55	/

7.7.2 铅的风险控制值

由于铅的暴露途径与模型不同于一般污染物，其风险评估采用 USEPA IEUBK 模型进行。IEUBK 模型可用于预测暴露于铅污染环境中的 0~84 个月儿童的血铅值及分布概率。IEUBK 模型中铅来源途径包括土壤、室内外灰尘、饮用水、空气和饮食等。在计算铅的风险控制值时模型关键参数取值如下表所示：

表 7.7-2 IEUBK 模型关键参数取值

参数	单位	取值	备注
室外空气铅浓度	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.5	《环境空气质量标准》GB3095-2012 二级标准
饮用水中铅浓度	$\mu\text{g}/\text{L}$	10	《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)
室外土壤铅浓度	$\mu\text{g}/\text{g}$	3650	地块土壤中铅的最大检出浓度
儿童血铅几何标准差	/	1.6	模型默认值
血铅关注值或分割值	$\mu\text{g}/\text{dL}$	10	模型默认值

IEUBK 模型计算结果表明，当地块土壤中铅的浓度水平不超过 331 mg/kg 时，可满足儿童血铅含量不超过 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$ ，即土壤中铅的风险控制值为 331 mg/kg。

8 建议修复目标值及修复范围

8.1 修复及开发思路建议

本报告建议总体修复及后期开发思路简要叙述如下，将在第 15 章详细论述。

(1) 项目地块全场及各分期地块均采用垂直防渗防止污染物迁移导致已修复土壤再次污染；

(2) 一期地块污染土壤全部采取异位修复技术修复；二、三期地块整体至少清挖至地下 4m，清挖的污染土壤异位修复后外运，未污染土壤回填；

(3) 二、三期地块清挖后剩余污染土壤原位修复，修复后铺设水平防渗层，防止 Cr(VI)通过地下水污染上层土壤和地下水；

(4) 建筑地下室底板和水平防渗层之间保留一定间隔，防止施工破坏水平防渗层。

8.2 土壤建议修复目标值

相关导则和技术指南对于修复目标值的相关规定如下：

《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2019）的规定，修复目标值确定的依据为：分析比较按照 HJ25.3 计算的土壤风险控制值和地块所在区域土壤中目标污染物的背景含量和国家有关标准中规定的限值，合理提出土壤目标污染物的修复目标值。

《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》的规定：初步修复目标值，是根据地块可接受污染水平、地块背景值或本底值、经济技术条件和修复方式（修复和工程控制）、当地社会经济发展水平等因素综合确定的、地块土壤和地下水中的污染物修复后需要达到的限值。我国为发展中国家，经济和土壤、地下水修复技术水平相对欧美国家较落后。因此，在提出地块修复目标时，应综合考虑实际修复技术的可达性及当地经济的承受水平等因素，参考风险控制值及可接受风险水平，合理确定地块建议修复目标值。

污染地块最终修复目标的确定，还应综合考虑修复后土壤的最终去向和使用方式、修复技术的选择、修复时间、修复成本以及法律法规、社会经济等因素。本报告综合考虑各因素，针对地面以上和地下清挖土壤给出建议清挖目标值，清挖的异位修复土壤给出建议修复目标；针对地下原位修复土壤给建议修复目标值。

8.2.1 建议土壤清挖目标值

一期地块污染土壤全部清挖，二、三期地块整体至少清挖至地面以下 4m，本部分针对一期地块基坑和侧壁，以及二、三期地块侧壁提出清挖目标值。

按照 HJ25.3 计算的各分层土壤风险控制值，采用污染土壤人体健康风险评估计算得到的土壤污染风险管控值(筛选值)是确定地块土壤清挖目标值的依据。

将土壤风险控制值计算结果(理论值)与《土壤环境质量建设用地污染风险管控标准》(GB36600-2018)等国内外其他标准进行比较，并综合考虑用地性质和污染物性质等因素，选择合理清挖目标值。

Cr(VI)、镍、镉、砷、汞和锑的风险控制值计算结果处于《土壤环境质量建设用地污染风险管控标准》(GB36600-2018)第一类用地筛选值与管制值之间，考虑到该地块位于市区，且未来规划用途为第一类用地，建议以 Cr(VI)、镍、镉、砷、汞、锑、钴和钒的筛选值为清挖目标值，至少清挖至污染物筛选值边界。

钒、钴、铅和氟化物的风险控制值计算结果小于第一类用地筛选值，选用《土壤环境质量建设用地污染风险管控标准》(GB36600-2018)和《建设用地土壤污染风险筛选值》(DB13/T 5216-2020)第一类用地筛选值作为铅和氟化物的建议清挖目标值。

地面以上和地下 0~4m 建议清挖目标值如表 8.2-1 所示。

表 8.2-1 本项目地块建议清挖目标值

污染物	建议清挖目标值 (mg/kg)	参考标准
Cr(VI)	3	GB36600 第一类用地筛选值
镍	150	GB36600 第一类用地筛选值
镉	20	GB36600 第一类用地筛选值
砷	20	GB36600 第一类用地筛选值
汞	8	GB36600 第一类用地筛选值
锑	20	GB36600 第一类用地筛选值
钴	20	GB36600 第一类用地筛选值
铅	400	GB36600 第一类用地筛选值
钒	165	GB36600 第一类用地筛选值
氟化物	1,950	DB13/T 5216-2020 第一类用地筛选值
苯并(a)蒽	5.50	GB36600 第一类用地筛选值
苯并(b)荧蒽	5.50	GB36600 第一类用地筛选值
苯并(a)芘	0.55	GB36600 第一类用地筛选值
茚并(1,2,3-cd)芘	5.50	GB36600 第一类用地筛选值

污染物	建议清挖目标值 (mg/kg)	参考标准
二苯并(a,h)蒽	0.55	GB36600 第一类用地筛选值

8.2.2 建议土壤异位修复目标值

清挖的污染土壤异位修复后去向可能有：填埋、综合利用。填埋可进入生活垃圾填埋场和一般工业固废填埋场；综合利用可用作路基材料和混凝土骨料、用于生产水泥、制砖及砌块、制陶粒等。针对不同去向的建议修复目标值不同。

(1) 进入生活垃圾填埋场污染物浸出值要求

按照《铬渣污染治理环境保护技术规范（暂行）》（HJ/T 301-2007）规定，六价铬污染土壤经过解毒、固化等预处理后，按照《固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法》（HJ/T 300-2007）制备的浸出液中任何一种危害成分的浓度均低于表 7 中的限值，则经过处理的六价铬污染土壤可以进入符合《生活垃圾填埋场污染控制标准》（GB16889-2008）的生活垃圾填埋场进行填埋。根据此项规定，进入生活垃圾填埋场的土壤修复后污染物浸出值要求如表 8.2-2 所示。

表 8.2-2 进入生活垃圾填埋场的土壤污染物浸出值要求

污染物	浸出值要求 (mg/L)	参考标准
总铬	4.5	HJ/T 301-2007 表 7 进入生活垃圾填埋场要求 GB16889-2008 表 1 进入生活垃圾填埋场要求
Cr(VI)	1.5	HJ/T 301-2007 表 7 进入生活垃圾填埋场要求 GB16889-2008 表 1 进入生活垃圾填埋场要求
镍	0.5	GB16889-2008 表 1 进入生活垃圾填埋场要求
镉	0.15	GB16889-2008 表 1 进入生活垃圾填埋场要求
砷	0.3	GB16889-2008 表 1 进入生活垃圾填埋场要求
汞	0.05	GB16889-2008 表 1 进入生活垃圾填埋场要求
铅	0.25	GB16889-2008 表 1 进入生活垃圾填埋场要求

(2) 进入一般工业固废填埋场污染物浸出值要求

按照《铬渣污染治理环境保护技术规范（暂行）》（HJ/T 301-2007）规定，六价铬污染土壤经过解毒、固化等预处理后，按照《固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法》（HJ/T 300-2007）制备的浸出液中任何一种危害成分的浓度均低于表 8 中的限值，则经过处理的六价铬污染土壤可以进入符合《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》（GB18599-2001）的第二类一般固废填埋场进行填埋。第二类一般固废浸出值不应超出《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴

别》（GB5085.3-2007）中表 1 危废浸出毒性鉴别标准值。根据此项规定，进入第二类一般固废填埋场的土壤修复后污染物浸出值要求如表 8.2-3 所示。

表 8.2-3 进入第二类一般固废填埋场的土壤污染物浸出值要求

污染物	浸出值要求 (mg/L)	参考标准
总铬	9	HJ/T 301-2007 表 8 进入第二类一般固废填埋场要求
Cr(VI)	3	HJ/T 301-2007 表 8 进入第二类一般固废填埋场要求
镍	5	GB5085.3-2007 表 1 危废浸出毒性鉴别标准值
镉	1	GB5085.3-2007 表 1 危废浸出毒性鉴别标准值
砷	5	GB5085.3-2007 表 1 危废浸出毒性鉴别标准值
汞	0.1	GB5085.3-2007 表 1 危废浸出毒性鉴别标准值
铅	5	GB5085.3-2007 表 1 危废浸出毒性鉴别标准值
氟化物	100	GB5085.3-2007 表 1 危废浸出毒性鉴别标准值

注：GB5085.3-2007 表 1 对氟化物的要求是无机氟化物（不含氟化钙）

8.2.3 建议土壤原位修复目标值

二、三期土壤整体清挖至一定深度（至少 4m 以下），土壤不再进行开挖，采用原位修复技术修复，修复后采取措施防渗处理，将来不存在直接及间接暴露风险，建议选取《土壤环境质量建设用地污染风险管控标准》（GB36600-2018）第一类用地管制值作为 Cr(VI)、镍、镉、砷、汞、锑、钴、钒和铅的修复目标值。

因氟化物尚无相关管制值要求，所以建议选取《建设用地土壤污染风险筛选值》（DB13/T 5216-2020）第一类用地筛选值作为氟化物的建议修复目标值。

表 8.2-4 建议土壤原位修复目标值

污染物	建议修复目标值 (mg/kg)	参考标准
Cr(VI)	30	GB36600 第一类用地管制值
镍	600	GB36600 第一类用地管制值
镉	47	GB36600 第一类用地管制值
砷	120	GB36600 第一类用地管制值
汞	33	GB36600 第一类用地管制值
锑	40	GB36600 第一类用地管制值
钴	190	GB36600 第一类用地管制值
铅	800	GB36600 第一类用地管制值
钒	330	GB36600 第一类用地管制值
氟化物	1950	DB13/T 5216-2020 第一类用地筛选值

8.3 地下水建议修复目标值

8.3.1 地下水建议原位修复目标值

地面下 4m 以下土壤为黏土，渗透系数低，难以抽出处理，建议原位修复。

已通过评审的《济南裕兴化工有限责任公司原厂区 Cr(VI)污染土壤修复工程环境影响报告书》(2016.11)及批复中规定 Cr(VI)的建议修复目标值为 0.5mg/L。地块未来未计划开采饮用地下水，地下水中关注污染物为重金属，因此不存在暴露途径，无人体健康风险，因此建议其他关注污染物地下水中修复目标值参考《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) IV 水的要求。因《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)对钒无管制要求，因此钒不作为地下水的关注污染物。具体建议地下水原位修复目标值如下。

表 8.3-1 建议地下水修复目标值

污染物	建议修复目标值 (mg/L)	来源
Cr(VI)	0.5	《济南裕兴化工有限责任公司原厂区 Cr(VI)污染土壤修复工程环境影响报告书》
镍	0.1	《地下水质量标准》(GBT14848-2017) IV 类标准
铜	1.5	《地下水质量标准》(GBT14848-2017) IV 类标准
镉	0.01	《地下水质量标准》(GBT14848-2017) IV 类标准
砷	0.05	《地下水质量标准》(GBT14848-2017) IV 类标准
汞	0.002	《地下水质量标准》(GBT14848-2017) IV 类标准
铅	0.1	《地下水质量标准》(GBT14848-2017) IV 类标准
氟化物	2	《地下水质量标准》(GBT14848-2017) IV 类标准

8.3.1 基坑水处理水质要求建议

土壤清挖将产生基坑水。《济南裕兴化工有限责任公司原厂区 Cr(VI)污染土壤修复工程环境影响报告书》(2016.11)批复中规定：基坑降水和污染区雨水经处理达到《山东省小清河流域水污染物综合排放标准》(DB37/656-2006)及其修改单标准，其中 COD、氨氮满足《济南市人民政府办公厅关于提高部分排污企业水污染物排放执行标准的通知》(济政办字[2011]49 号)要求后部分用于厂区抑尘、渣土调湿等，剩余部分经专用管网排入小清河。

目前《山东省小清河流域水污染物综合排放标准》(DB37/656-2006)已被《流域水污染物综合排放标准 第 3 部分：小清河流域》(DB37/3416.3-2018)取代，根据新标准，本项目地块属重点保护区域，执行重点保护区域“其他排污单

位”标准限值。

根据以上规定，建议基坑水处理至表 8.3-2 所示水质要求后再直排至小清河或用于厂区抑尘、渣土调湿。

表 8.3-2 基坑水处理水质要求建议

污染物	建议水质要求 (mg/L)	来源
COD	40	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
氨氮	4.5	《济南市人民政府办公厅关于提高部分排污企业水污染物排放执行标准的通知》
总铬	0.5	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
Cr(VI)	0.2	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
镍	1	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
铜	0.5	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
镉	0.05	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
砷	0.2	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
汞	0.005	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
铅	0.5	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》
氟化物	2	《流域水污染物综合排放标准第 3 部分：小清河流域》

8.4 修复范围

裕兴化工厂区待修复土壤及地下水体积汇总如表 8.4-1 所示。

表 8.4-1 修复土壤及地下水体积

项目	体积 (m ³)
地表以上待修复堆存物	***
地表以下待修复土壤	***
浅层地下水	***
深层地下水	***

9 地块修复技术建议

9.1 总体方案建议

在本报告 8.1 部分已简要叙述修复及后续开发总体思路建议，本部分详述如下。

(1) 由于本项目地块部分相邻区域受到六价铬等重金属污染，需对地块全场采取垂直防渗措施，防止地块外污染物迁移至地块内。高架下区域虽在地块内，但现阶段无法修复，因此地块以高架桥为界，东西两侧地块分别做垂直防渗。

(2) 高架桥西地块分为一、二期地块，两个地块间采取垂直分期修复地块间以垂直防渗措施阻隔，防止因修复时序差异导致污染物在两个地块间迁移；

(3) 一期地块土壤全部采取异位方式修复，二、三期地块整体至少清挖至地下 4m；污染土壤异位修复后外运，未污染土壤回填；

(4) 二、三期地块清挖后，剩余污染土壤原位修复，然后做水平防渗层，防止污染物通过地下水向上迁移；

(5) 在水平防渗层上回填一定深度未污染土壤后再进行地下室底板施工。地下室底板延伸至垂直防渗墙，底板和防渗墙之间再次做防渗处理。

根据以上总体思路，未来建筑建成后的地上地下剖面示意图如图 9.1-1 所示。

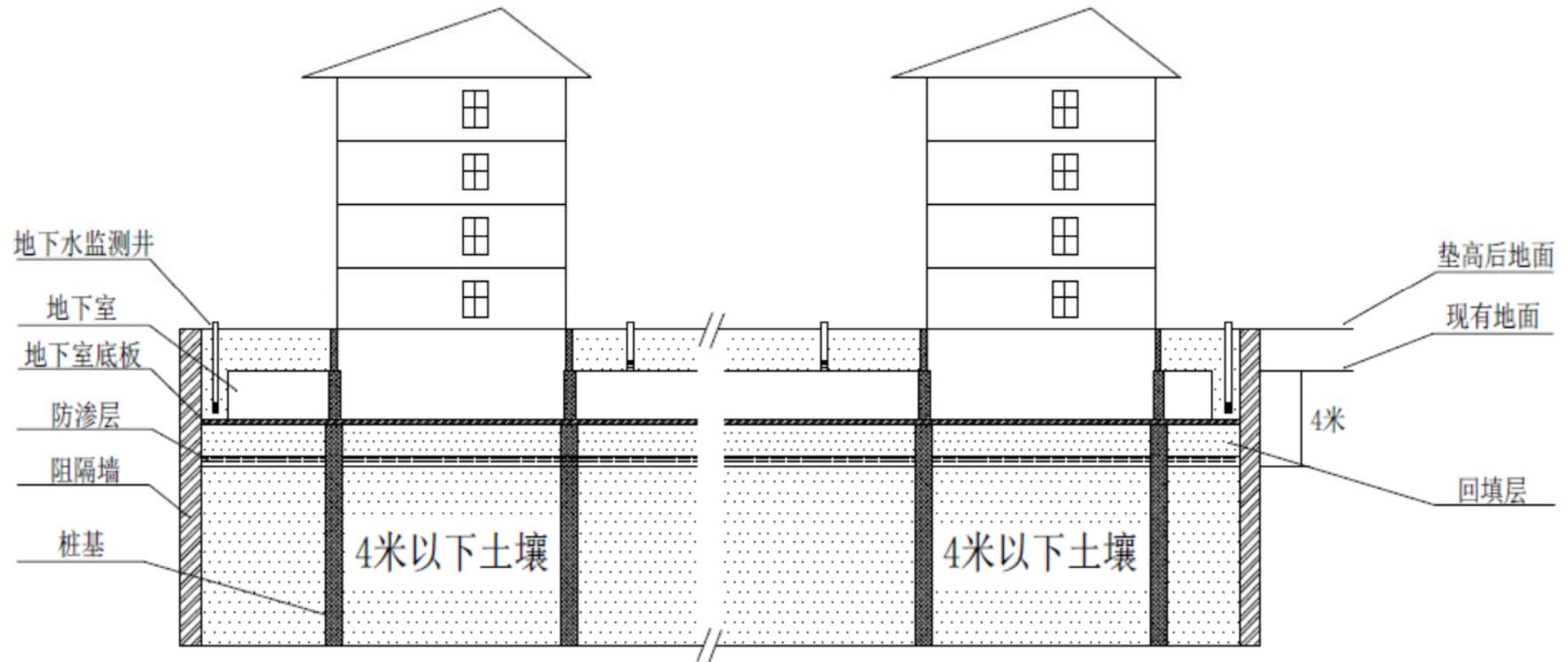


表 9.1-1 地块开发后地上地下剖面示意图

9.2 地块阻隔技术建议

地块阻隔的目的是：防止地块外和高架桥下污染物进入地块内导致已修复土壤和地下水污染；防止污染物在分期地块内迁移导致已修复土壤和地下水污染；对于二、三期地块，防止下层污染物通过地下水污染上层土壤和地下水。建议采取垂直阻隔的方式将裕兴化工原厂区与周边的居民区以及顺河高架桥阻隔开，将每期地块隔开；在二、三期地块清挖深度处建水平阻隔层，将清挖深度以下的土壤和地下水与清挖深度以上的土壤和地下水进行阻隔。建议结合实际情况采用以下阻隔墙技术。具体阻隔技术在修复技术方案中经过比选后确定。

9.2-1 建议阻隔技术

技术	主要污染物	备注
原位反应带	Cr(VI)、砷、铅、汞、镉、镍、锑、钴、钒、氟化物、钒	可采用组合技术
连续墙防渗墙（层）		
可渗透反应墙（层）		
柔性防渗墙（层）		

9.3 修复技术建议

该地块主要污染物为重金属和其他无机物，包括 Cr(VI)、砷、铅、汞、镉、镍、锑、钴、钒、氟化物。地块情况复杂，地块上存在建筑废墟、渣土混合物、杂填土、受污染土壤、地下水等各种形态的污染介质。制定修复技术方案时应综合考虑上述几种重金属的理化特性及其存在的介质。建议结合实际情况采用以下修复技术方案。具体修复技术在修复技术方案中经过比选后确定。

表 9.3-1 建议修复技术及去向

	污染介质	主要污染物	建议技术	建议去向
地上异位修复部分	渣土混合物	Cr(VI)、砷、镍、锑、钴、氟化物、钒	湿法解毒、还原稳定化等	填埋场
	白石膏	Cr(VI)、砷	还原稳定化	填埋、路基、水泥添加剂
	建筑垃圾	Cr(VI)，砷	淋洗、浸泡、还原稳定化等	填埋
地下异位修复部分	杂填土及建筑垃圾	Cr(VI)、砷、铅、汞、镉、镍、锑、钴、氟化物、钒	淋洗、还原稳定化、固化稳定化、干法还原资源化等	陶粒、制砖及砌块、路基、填埋
	黏土	Cr(VI)、砷、铅、汞、镉、镍、锑、钴、氟化物、钒	还原稳定化、固化稳定化、干法还原资源化等	陶粒、制砖及砌块、路基、填埋

	污染介质	主要污染物	建议技术	建议去向
地下原位修复部分	黏土	Cr(VI)	原位还原稳定化	
地下水	地下水	Cr(VI)、砷、铅、汞、镉、镍、锑、钴	开挖部分基坑降水抽出处理，其余原位处理	基坑水抽出处理后原位注入、修复循环用水、外排至小清河

9.4 六价铬原位修复技术经济可行性

六价铬、砷、铅、汞、镉、镍、锑、钴、氟化物、钒等重金属的异位修复技术均较成熟，已有诸多成功案例，且清挖至筛选值，土壤修复后离场，未来开发使用不存在风险。因此本部分主要论述六价铬原位修复可行性。

为验证原位修复技术是否能够达到要求，裕兴化工于 2012 年委托相关单位开展了土壤修复工程中试。试验条件及结果汇总如下。

中试区位于地块北部、高架桥西侧，土质及六价铬、总铬含量见表 9.4-1。

表 9.4-1 中试区六价铬及总铬含量

点位	深度 (m)	土质	六价铬 (mg/kg)	总铬 (mg/kg)
1	1.8	粘粉	529	1080
	4.0	粘粉	196	422
	5.5	粉砂	94.5	965
	9.0	粉粘	1.1	89.6
2	1.5	粉土	54.6	879
	5	粉砂	205	270
	9.5	粉粘	<1.0	127
3	1.5	粘粉	40.5	1740
	5	粘粉	1.2	246
	9.5	粉粘	<1.0	254

原位修复药剂有效成分见表 9.4-2。

表 9.4-2 修复药剂有效成分

药剂种类	药剂主要成分	反应类型	污染介质类型
C	多硫化钙	化学还原	污染土
E	零价铁、生物缓释碳源、生物络合剂	生物化学还原	饱和含水层

修复药剂采用原位注入技术分别从两个注入点施加，以土壤六价铬 70mg/kg、

地下水六价铬 0.5mg/L 为修复目标值。自检后委托 SGS 和原澳实 (ALS) 检测，土壤及地下水检测结果分别见表 9.4-3 和表 9.4-4。

从检测结果可见，两种修复药剂均能达到本报告土壤六价铬 30mg/kg、地下水六价铬 0.5mg/L 的修复目标值，技术上可行。

表 9.4-3 土壤原位修复效果汇总

药剂	深度 (m)	六价铬含量 (mg/kg)				
		初始样品				
E	3	初始样品	614			
		SGS	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
		ALS	0.7	0.7	0.6	0.6
	5	初始样品	38.6			
		SGS	<0.5	<0.5	0.6	<0.5
		ALS	<0.1	<0.1	1	0.2
	7	初始样品	2.1			
		SGS	<0.5	<0.5	0.6	<0.5
		ALS	<0.1	0.1	0.2	<0.1
C	3	初始样品	3795			
		SGS	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
		ALS	0.2	9	<0.1	0.8
	5	初始样品	4570			
		SGS	<0.5	<0.5	0.6	<0.5
		ALS	<0.1	0.1	0.1	<0.1
	7	初始样品	365			
		SGS	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
		ALS	0.4	0.2	0.3	0.2

表 9.4-4 地下水原位修复效果汇总

药剂	初始六价铬浓度 (mg/L)	修复后六价铬浓度 (mg/L)
E	716	0.03
C	4100	<0.01

经估算，中试修复药剂 E 和 C 的土壤修复成本分别为 786.63 元/方和 955.26 元/方。考虑到修复工程成本将低于中试工程，原位修复在经济上是可行的。

9.5 修复后的后期管理措施建议

六价铬迁移性较强，本项目地块虽将采取严格的阻隔措施防止地块污染物进入地块以及防止二、三期地块深层土壤六价铬通过地下水污染上层土壤及地下水，一旦存在泄漏点，也可能导致已修复区域被再次污染。六价铬污染土壤修复后，

土壤及资源化产品均可能因各种原因发生“返黄”现象。因此建议修复后采取以下管理措施。

(1) 在本项目地块垂直防渗墙内、各分期修复地块敏感点布设地下水监测井，长期监测六价铬含量变化情况，发现异常立即采取有效措施加以修复，防止污染扩散；

(2) 对于进入填埋场的修复土壤，长期监测土壤六价铬含量变化，检查是否发生“返黄”现象，如有必要采取措施重新修复；

(3) 对于六价铬污染土壤的资源化产品，跟踪其使用去向，并长期观测使用情况，如有异常立即采取相应措施予以消除。