
金能科技股份有限公司一厂区污染场 地修复技术方案 (送审稿)

编制单位：博天环境集团股份有限公司

2017 年 5 月

目录

1 总论.....	2
1.1 任务由来.....	2
1.2 项目目标.....	3
1.3 编制依据.....	3
1.3.1 法律、法规.....	3
1.3.2 技术导则、标准及规范.....	4
1.3.3 相关政策、文件.....	6
1.4 编制内容.....	7
1.5 基本原则.....	9
2 场地问题识别.....	10
2.1 所在区域概况.....	10
2.1.1 场地地理位置.....	10
2.1.2 场地历史及现状.....	11
2.2 场地所在区域环境特征.....	12
2.3 场地水文地质条件.....	14
2.3.1 场地地质条件.....	14
2.4 场地污染状况.....	25
2.4.1 场地现状.....	25
2.4.2 场地土壤污染状况.....	26
2.4.3 场地地下水污染状况.....	29
2.5 场地使用规划.....	33
2.6 场地环境健康风险分析.....	34
2.6.1 场地污染土壤环境健康风险分析.....	34
2.7 场地土壤及地下水污染修复目标.....	37
2.8 场地污染土壤及地下水修复范围.....	38
2.8.1 酚类污染修复范围.....	38

2.8.2 砷污染修复范围.....	43
3 场地修复策略选择.....	50
3.1 场地水文地质.....	50
3.2 场地土壤及地下水主要污染物参数.....	51
3.2.1 砷.....	51
3.2.2 苯.....	52
3.2.3 苯酚类污染物.....	53
3.2.4 关注污染物理化毒性参数.....	54
3.3 场地土壤修复模式选择.....	57
3.4 场地地下水修复模式选择.....	60
3.5 污染土壤修复技术筛选.....	61
3.5.1 污染土壤修复技术介绍.....	61
3.5.2 污染土壤修复技术选择.....	63
3.6 污染地下水修复技术筛选.....	69
3.6.1 污染地下水修复技术介绍.....	69
3.6.2 污染地下水修复技术筛选.....	75
3.6.3 污染地下水修复技术总体思路.....	77
3.7 污染土壤修复技术可行性评估.....	77
3.7.1 酚类污染土壤异位氧化修复技术可行性评估.....	77
3.7.2 酚类污染土壤异位热强化气相抽提附技术可行性评估.....	82
3.7.3 砷污染土壤原位稳定化修复技术可行性评估.....	86
3.8.1 砷污染地下水抽出-处理可行性评估.....	88
3.8.2 酚类污染地下水原位氧化修复技术可行性评估.....	90
3.8.3 酚类和砷复合污染地下水抽出处理+原位氧化可行性评估.....	93
4 场地污染土壤和地下水修复技术方案设计.....	97
4.1 总体修复方案.....	97
4.2 酚类污染土壤修复.....	97
4.2.1 技术路线.....	97

4.2.2 修复技术工艺参数.....	99
4.2.3 酚类污染土壤修复工程量估算.....	100
4.3 砷污染土壤修复.....	100
4.3.1 技术路线.....	100
4.3.2 修复技术工艺参数.....	101
4.3.3 砷污染土壤修复工程量估算.....	102
4.4 砷污染地下水修复.....	103
4.4.1 技术路线.....	103
4.4.2 修复技术工艺参数.....	103
4.4.3 砷污染地下水修复工程量估算.....	104
4.5 酚类污染地下水修复.....	104
4.5.1 技术路线.....	104
4.5.2 修复技术工艺参数.....	104
4.5.3 酚污染地下水修复工程量估算.....	105
4.6 砷和酚类污染物复合地下水修复.....	105
4.6.1 技术路线.....	105
4.6.2 修复技术工艺参数.....	107
4.6.3 砷和酚类污染物复合污染地下水修复工程量估算.....	107
5 管理计划.....	107
5.1 修复工程监理.....	107
5.1.1 内容与程序.....	108
5.1.2 工作方法.....	110
5.1.3 工作制度.....	111
5.1.4 能力要求.....	112
5.2 二次污染防范.....	113
5.2.1 二次污染来源及环境影响分析.....	113
5.2.2 二次污染防范措施.....	115
5.3 工程验收监测.....	121

5.3.1 文件审核与现场复察.....	121
5.3.2 修复效果监测.....	122
5.3.3 二次污染监测.....	127
5.4 环境应急方案.....	131
5.4.1 适用范围.....	132
5.4.2 应急组织机构.....	132
5.4.3 应急流程图.....	133
5.4.4 钻探施工特殊情况应急预案.....	134
5.4.5 全过程人员中毒事故应急预案.....	134
5.4.6 消防应急预案.....	135
5.4.7 全过程坍塌、机械伤害事故应急预案.....	136
5.4.8 全过程触电事故应急预案.....	136
5.4.9 应急装备.....	139
6 劳动保护及个人防护措施.....	141
6.1 劳动保护.....	141
6.1.1 劳动保护保障措施.....	141
6.1.2 卫生保障措施.....	142
6.1.3 职业病传染疾病防治措施.....	143
6.1.4 保证劳动物品发放.....	143
6.2 个人防护措施.....	144
6.2.1 一般防护.....	144
6.2.2 专项防护.....	146
7.结论与建议.....	148
7.1 结论.....	148
7.2 建议.....	148
7.2.1 场地开发前.....	148
7.2.2 场地施工过程中.....	149
7.2.3 场地开发后.....	151

附件 A 农地砷、汞污染调查及管理策略研究计划期末报告	152
附件 B 土壤分配系数参考文件	154
附件 C 有机酚污染地下水 I 区中试流程及结果.....	156
附件 D 污染场地修复技术目录（第一批）	157

1 总论

1.1 任务由来

金能科技股份有限公司一厂区是金能科技股份有限公司的前身——山东瑞普生化有限公司，成立于 1998 年并于 2016 年搬迁，主要生产医药中间体对甲基苯酚和山梨酸钾等精细化工产品。公司分为东、西两个厂区。金能东厂区（又称一厂区）场地（简称“场地”）原属于瑞普生化公司用于硫磺装置、对甲基苯酚装置、山梨酸钾装置的生产运营。目前该场地已经停产，场地内的建筑和设施已基本拆除，但拆除后的建筑垃圾尚未运出。生产过程中的主要原材料为甲苯、硫磺、碱、醋酸、盐酸等，潜在污染物主要包括重金属、甲苯、苯酚类污染物等，对场地土壤和地下水造成一定污染。

根据《土壤污染防治行动计划》（国发〔2016〕31 号）、《山东省土壤污染防治工作方案》（鲁政发〔2016〕37 号）、《污染地块土壤环境管理办法（征求意见稿）》，以及《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）等相关文件规定，金能科技股份有限公司于 2016 年 12 月委托中国科学院南京土壤研究所对一厂区场地开展场地调查与健康风险评估工作（场地评价范围如图 1.1-1），确定场地土壤和地下水的污染水平、污染范围和风险水平，并在此基础上编制了《金能科技股份有限公司一厂区污染场地调查及风险评估》报告。基本确定了该场地的污染状况和污染分布，划定了场地污染土壤和地下污水的待处理范围，计算了场地修复目标，原则性提出了场地土壤和地下水的修复技术建议。

根据《齐河县城市总体规划》和《齐河经济开发区总体规划（2006-2020）年》，项目地块未来土地利用方式仍将用于工业用地开发。同时，环保部 2016 年 12 月 27 日发布的《污染地块土壤环境管理办法（试行）》要求“污染地块经治理与修复，并符合相应规划用地土壤环境质量要求后，可以进入用地程序”。为从根本上降低该区域重金属污染隐患，使其符合工业用地的要求，特编制金能科技股份有限公司一厂区污染场地修复技术方案。



图 1.1-1 场地调查评价范围图

1.2 项目目标

通过对金能科技股份有限公司一厂区场地水文地质参数、场地内污染物种类特征、污染物类型和污染程度分布、场地后续利用规划等内容进行整理分析、筛选适合的污染土壤修复技术；根据《污染场地土壤修复技术导则》(HJ25.4-2014)及其相关要求制定该场区污染土壤修复技术方案。编制该技术方案的目的为了安全处置或处理超过相应修复目标值的污染土壤与地下水、保护环境和人员健康、并对施工过程中人员健康与安全防护措施提出建议。

1.3 编制依据

1.3.1 法律、法规

- 1) 《中华人民共和国环境保护法》(修订版)(2015 年 1 月 1 日);
- 2) 《中华人民共和国大气污染防治法》(2000 年 9 月 1 日);
- 3) 《中华人民共和国安全生产法》(2002 年 6 月 29 日);
- 4) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》(2005 年 4 月 1 日);

-
- 5) 《中华人民共和国水污染防治法》(2008 年 2 月 28 日);
 - 6) 《中华人民共和国水污染防治法实施细则》(2000 年 3 月 20 日);
 - 7) 《国家危险废物名录》(环发〔1998〕089 号);
 - 8) 《建设项目环境保护管理条例》(<98>国务院令 第 253 号);
 - 9) 《中华人民共和国环境噪声污染防治法》(1997 年 3 月 1 日);
 - 10) 《中华人民共和国土地管理法》(2004);
 - 11) 《中华人民共和国清洁生产促进法》(2002 年 6 月 29 日)。

1.3.2 技术导则、标准及规范

- 1) 《土壤环境质量标准》(GB15618-1995);
- 2) 《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004);
- 3) 《场地环境调查技术导则》(HJ25.1-2014);
- 4) 《场地环境监测技术导则》(HJ25.2-2014);
- 5) 《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014);
- 6) 《污染场地修复技术方案编制导则》(DB11/T1280-2015)
- 7) 《污染场地土壤修复技术导则》(HJ25.4-2014);
- 8) 《土壤环境质量评价标准》(GB15618-1995);
- 9) 《地表水环境质量标准》(GB3838-2002);
- 10) 《地下水质量标准》(GB/T14848-93);
- 11) 《声环境质量标准》(GB3096-2008);
- 12) 《地下水环境监测技术规范》(HJ/T164-2004);
- 13) 《环境空气质量标准》(GB3095-2012);
- 14) 《污水综合排放标准》(GB8978-1996);
- 15) 《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996);
- 16) 《城市区域环境噪声标准》(GB3096-93);
- 17) 《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ350-2007);
- 18) 《工业企业厂界环境噪声标准》(GB12348-2008);
- 19) 《工业企业设计卫生标准》(GBZ1-2010);
- 20) 《工业企业土壤环境质量风险评价基准》(HJ/T25-1999);

-
- 21) 《环境检测分析方案标准指定技术导则》(HJ/T168-2004);
 - 22) 《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ2.1-2007);
 - 23) 《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素》(GBZ2.1-2010);
 - 24) 《工作场所有害因素职业接触限值第 2 部分：物理因素》(GBZ2.2-2010);
 - 25) 《工作场所物理因素测量第 8 部分：噪声》(GBZ/T189.8-2007);
 - 26) 《工程测量规范》(GB50026-2007);
 - 27) 《建筑机械使用安全技术规程》(JGJ33-2001);
 - 28) 《特种作业人员安全技术考核管理规则》(GB5306-85);
 - 29) 《工作场所空气中有毒物质监测的采样规范》(GBZ159-2004);
 - 30) 《个体防护装备选用规范》(GB/T11651-2008);
 - 31) 《工作场所防止职业中毒卫生工程防护措施规范》(GB/T194-2007);
 - 32) 《质量管理体系》(GB/T19001-2000idtISO9001:2000);
 - 33) 《职业健康安全管理体系》(GB/T28001-2001);
 - 34) 《大气污染物无组织排放监测技术导则》(HJ/T55-2000);
 - 35) 《环境管理体系要求及使用指南》(GB/T24001-2004/ISO14001:2004)
 - 36) 《环境监测分析方法标准制修订技术导则》(HJ/T168-2010);
 - 37) 《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ343-2010);
 - 38) 《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011);
 - 39) 《建筑施工安全技术统一规范》(GB50870-2013);
 - 40) 《污染场地术语》(HJ682-2014);
 - 41) 《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11T811-2011);
 - 42) 《一般工业固体废物暂存场地污染控制标准》(GB18599-2001);
 - 43) 《环境影响评价技术导则总纲》(HJ/T2.1-1993);
 - 44) 《危险废物鉴别技术规范》(HJ/T298-2007);
 - 45) 《展览会用地土壤环境质量评估标准（暂行）》(HJ350-2007);
 - 46) 《场地环境调查技术规范》(HJ25.1-2014);
 - 47) 《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001-2009);
 - 48) 《供水水文地质勘察规范》(GB50027-2001);

-
- 49) 《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999);
 - 50) 《土的工程分类标准》(GB/T50145-2007);
 - 51) 《水位观测标准》(GBJ138-90);
 - 52) 《城市地下水动态观测规程》(CJJ/T76-1998);
 - 53) 《供水水文地质钻探与凿井操作规程》(CJJ13-1987);
 - 54) 《危险废物鉴别标准》(GB5085-1/2/3-1996)。
 - 55) 《工业固体废物采样制样技术规范》(HJ/T20-1998);
 - 56) 《危险废物毒性含量鉴别规范》(GB5085.6-2007);
 - 57) 《建设用地地灾危险性评估技术要求》(DZ/T0245-2004)。

1.3.3 相关政策、文件

- 1) 《土壤污染防治行动计划》(2016 年 5 月 31 号, 国发〔2016〕31 号);
- 2) 《国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定》(国发〔2005〕39 号);
- 3) 《关于开展保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》(环境保护部, 环发〔2012〕140 号);
- 4) 《山东省工业企业场地调查评估及修复管理程序和要求(暂行)》;
- 5) 《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》(国环办〔2004〕47 号);
- 6) 《关于落实科学发展观加强环境保护的决定》(国发〔2005〕39 号);
- 7) 《关于加强土壤污染防治工作的意见》(环发〔2008〕48 号);
- 8) 《国务院关于环境保护若干问题的决定》(国发〔1996〕31 号);
- 9) 《关于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的通》(国办发〔2013〕7 号);
- 10) 《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);
- 11) 《关于保障工业企业及市政场地再开发利用环境安全的管理办法》(沪环保防〔2014〕188 号);
- 12) 《荷兰土壤修复通告》(Soil Remediation Circular,2009);

-
- 13) 《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》；
 - 14) 《金能科技股份有限公司一厂区污染场地调查及风险评估》；
 - 15) 《齐河县城市总体规划》；
 - 16) 《齐河经济开发区总体规划（2006-2020 年）》。

1.4 编制内容

- （1）确定不同类型污染土壤和地下水的修复模式；
- （2）筛选污染土壤和地下水修复技术；
- （3）制定污染土壤和地下水修复方案；

根据确定的修复技术，制定土壤和地下水修复路线，确定土壤修复技术工艺参数，估算土壤修复工程量和地下水修复工程量，从主要技术指标、修复工程费用以及二次污染防治措施等方面进行评估，确定经济、适用、可行的土壤修复方案。

场地污染土壤技术方案编写的主要技术路线如图 1.4-1 所示。

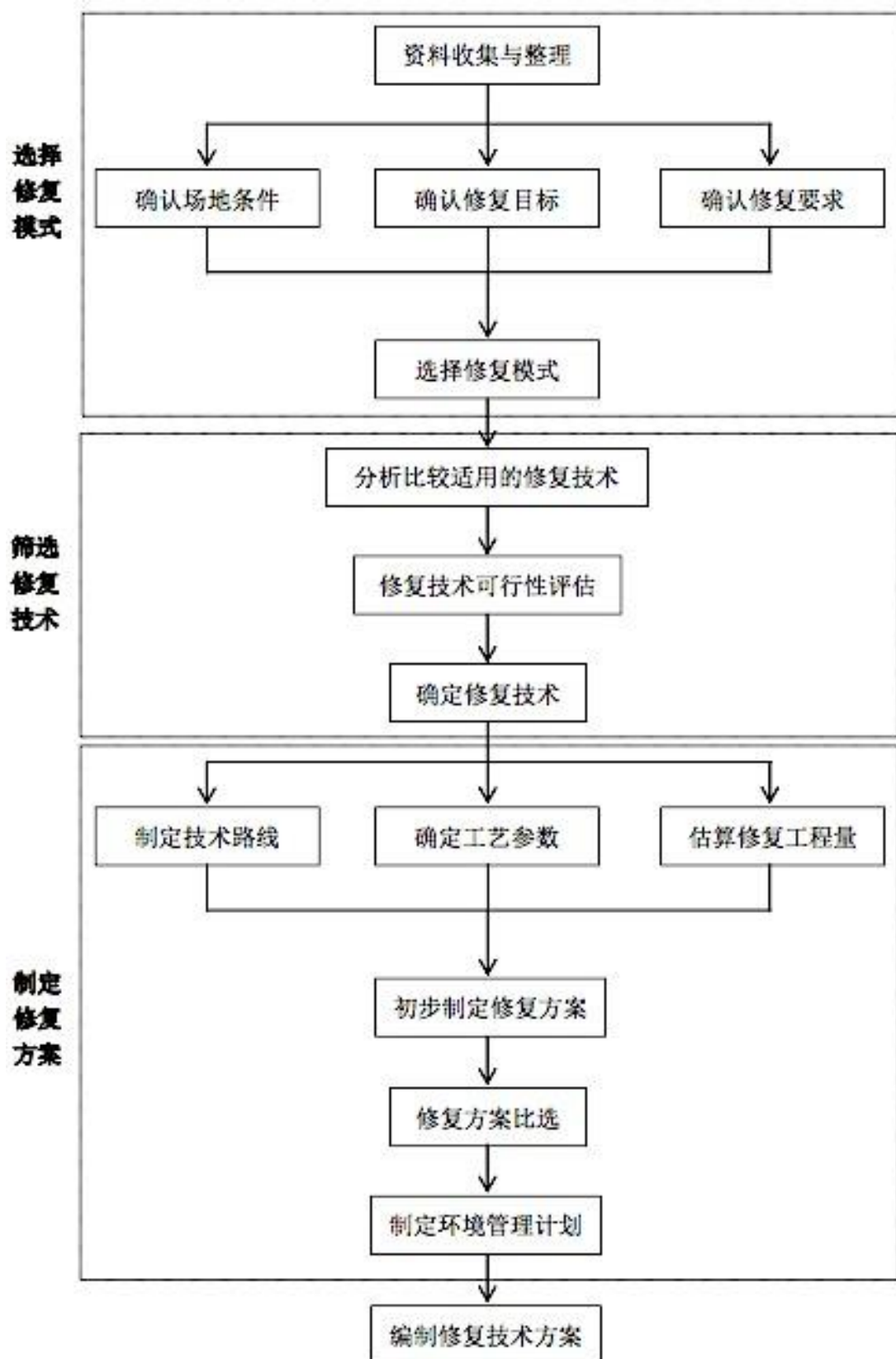


图 1.4-1 修复技术方案编制工作流程

1.5 基本原则

1) 科学性原则

采用科学的方法，综合考虑污染土壤修复目标、土壤修复技术的处理效果、修复时间、修复成本、修复工程的环境影响等因素，制定修复方案；

2) 可行性原则

制定的场地污染土壤修复方案合理可行，在已有工作的基础上，针对污染场地的污染性质、程度、范围以及对人体健康或生态环境造成的危害，合理选择土壤修复技术，因地制宜制定修复方案，使修复目标可达，修复工程切实可行；

3) 安全性原则

制定场地污染土壤修复方案确保污染场地修复工程实施安全，防止对施工人员、周边人群健康以及生态环境产生危害和二次污染。

2 场地问题识别

2.1 所在区域概况

场地自然地理概况主要参考了《金能科技股份有限公司 10 万吨/年焦炉气制甲醇项目环境影响报告书》与《齐河金能甲醇项目地质勘察工程报告》。

2.1.1 场地地理位置

金能科技股份有限公司一厂区污染场地位于齐河县齐河经济开发区。齐河县地处鲁西北平原，行政区划隶属于山东省德州市，距德州市 95km，城区距济南城区 25km。北与禹城市、临邑县相邻，西与聊城市高唐县、茌平县接壤，南邻济南市城区，东邻济南市济阳县。调查场地地理位置见图 2.1-1。

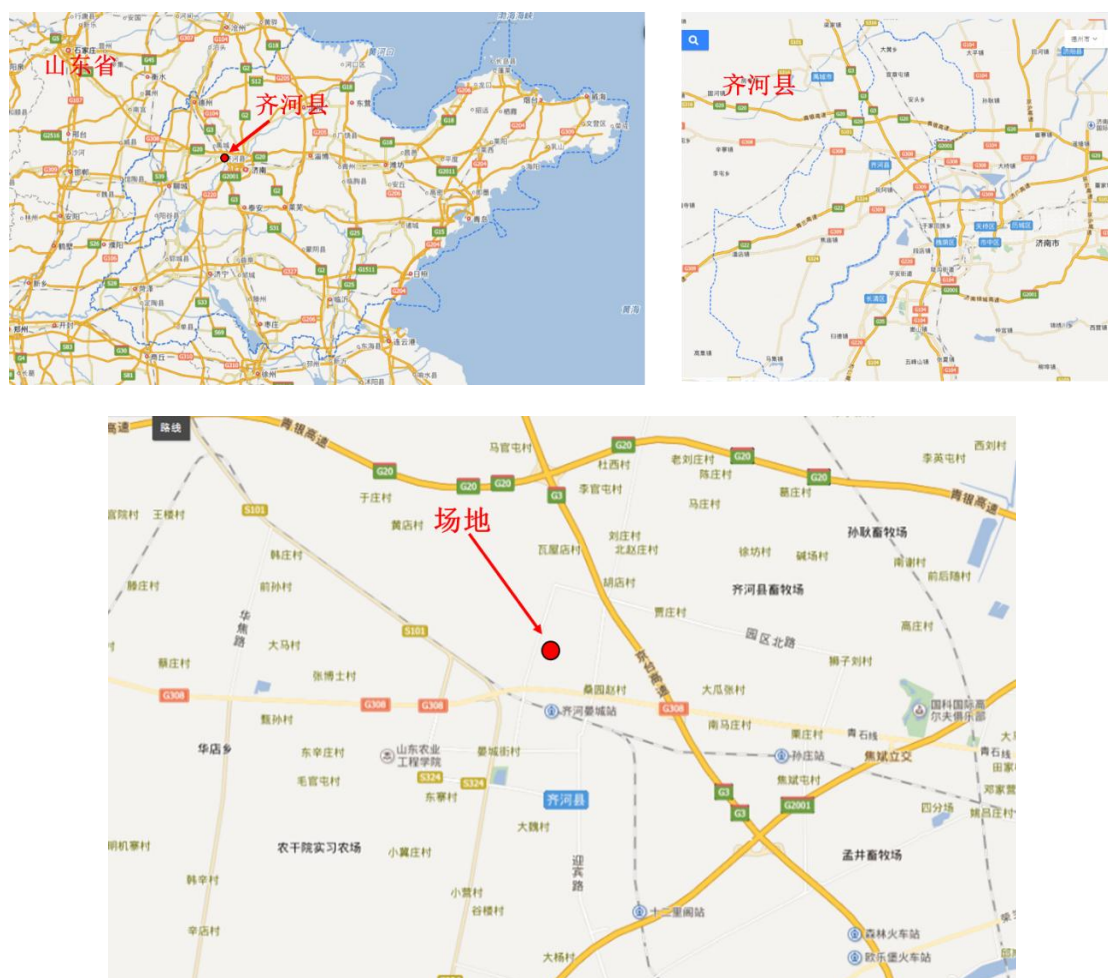


图 2.1-1 场地位置示意图

2.1.2 场地历史及现状

(1) 场地历史

1970 至 1995 年期间，场地曾用作一造纸厂秸秆堆放场地，这一造纸厂后被晨鸣纸板厂兼并。

1998 年 2 月，山东晨鸣集团化工有限公司 4000t/a 对甲基苯酚项目在本场地开工建设，1998 年 10 月建成投产。但因市场原因未达产，至 2001 年 1 月运行负荷达 75%以上投产。

2001 年 6 月，山东瑞普生化有限公司 3000t/a 对甲基苯酚工程开工建设，2002 年 2 月建成投产。山东瑞普生化有限公司是由山东晨鸣集团化工有限公司等 11 位股东共同注资设立。

2004 年 12 月，山东瑞普生化有限公司年产 4000 吨山梨酸项目投产。

2014 年 4 月，场地山梨酸项目停止生产；

2015 年 12 月，场地对甲基苯酚停止生产；

2016 年 3 月至 5 月对场地上的生产车间和设施进行了拆除。

(2) 场地现状

目前该场地已完全停产，除场地西南部一栋办公楼和场地西北部几个地上储罐外，其余车间和设施已全部拆除，场地上有大量的建筑垃圾及多处污水池。场地现状情况见图 2.1-2。





图 2.1-2 场地现状照片

对场地周边 1km 范围进行了调查，场地北侧、东侧和南侧为晨鸣纸板厂，场地西侧为利民监测站。场地周边的敏感目标以住宅区和文教为主，场地周边的主要敏感目标是场地西南侧的现代外国语学校 and 北孙庄村。项目所在地周边环境情况见图 2.1-3。



图2.1-3 场地周边情况与敏感目标

2.2 场地所在区域环境特征

依据《金能科技股份有限公司一厂区污染场地调查及风险评估》报告，关于目前场地条件可以概述如下：

(1) 气候条件

场地所处的齐河属暖温带半湿润季风气候区，四季分明，气候温和，冷热季和干湿季明显。春季干旱少雨多风沙，夏季多雨时有涝，秋季凉爽常有晚秋旱，冬季严寒干燥雨雪稀少。

(1) 气温：根据齐河县气象站 1959 年后的统计资料，本地区年平均气温 13.4℃，年平均最高气温 19.0℃，月均最高气温 33.9℃（1959 年 7 月），日最高气温 41.2℃（1960 年 6 月 21 日）。

(2) 降水及蒸发：本地区年平均降水量为 619.4mm，降雨量多集中在 7、8 月份。年平均蒸发量为 1931.1mm，最大蒸发量为 2584.0mm（1960 年）。

(3) 风向、风速：本地区年主导风向为南西南（SSW）风，年次主导风向为南（S）风，年平均风速为 3.0m/s。最大风速 20.0m/s。春、夏、秋季均以南西南（SSW）风出现频率为最高，冬季以东北（NE）风为最高。

(2) 区域地质条件

齐河县地处华北地层区鲁西北地层分区与华北平原地层分区的结合部，其新生界地层包括下第三系、上第三系和第四系地层，上第三系岩性为胶结及其疏松的砂质粘土岩层，中间夹有数层胶结不牢的砂质岩层。砾石成分为变质岩和寒武系的灰岩，整个岩层内含钙质和铁质较多，沉积粒度由下往上逐渐变细，厚度 130~250m 以上，可分为馆陶组及明化镇组。第四系下部多为砂质粘土层和未胶结的砂砾层，往上部为粘性大的不渗水的砂质黄土，其中砾石较少，厚度 80~135m。项目区域浅层地下水含水层主要为粉细砂和细砂，累计厚度 10~20m，单井出水量一般在 30~50m³/h，水质为 HCO₃-Ca、HCO₃-Ca-Mg 型，矿化度小于 2g/L。中深层地下水 150m 以上有 3~5 个承压含水层，岩性为细砂和中砂，呈透镜状分布。项目区域浅层地下水含水层主要为粉细砂和细砂，累计厚度 10~20m，单井出水量一般在 30~50m³/h，水质为 HCO₃-Ca、HCO₃-Ca-Mg 型，矿化度小于 2g/L。

(3) 区域水文条件

齐河县境内主要河流分属黄河和徒骇河两大水系，其中黄河由齐河县南边境自西南向东北流过，通过引黄灌渠与区内相通，不接纳境内排水，县内长度

62.38km。徒骇河流域在该县境内主要支流有老赵牛河、赵牛新河、齐济河、六六河等，潘庄引黄总干渠由南至北贯穿齐河县西部。区域水系图见图 2.1-2。徒骇河、老赵牛河、邓金河、倪伦河主要水体功能为农灌和泄洪，属雨源型河流，夏秋季雨量剧增容易造成洪涝，春冬季雨量很少容易断流，近年来由于大量工业废水和生活污水排入，致使河流污染严重。

区域地下水资源补给量主要有降雨入渗补给量、黄河侧渗补给量、井灌回归补给量、引黄灌溉补给量等组成。浅层地下水水位随降水增多而水位上升，降水减少水位下降，在丰水年呈回升态势、枯水年呈下降趋势。从多年动态看，地下水总体呈微降趋势，年平均降幅 5mm。根据《海河流域综合规划》可知，该区浅层地下水资源量为 1721 万 m^3 ，浅层地下水可开采量为 1425 万 m^3 。中深层地下水含水层层次多，厚度大，且连续分布，隔水层为砂质粘土，属承压、半承压区，水量比较丰富，水质较好，年可采量为 291 万 m^3 。

齐河县境内饮用水水源保护区分布于县城南侧祝阿镇小姜村以北、晏城镇大魏村以东 3km^2 的范围内，与金能公司距离约为 4.5km。从地下水流向上看，该地下水水源保护区位于县城及拟建项目的上游。

2.3 场地水文地质条件

2.3.1 场地地质条件

该场地内的土层分布如图 2.3-1、2.3-2 所示，主要以粉粘土为主，地层分布是依据现场调查钻探期间的观察和记录来进行描述的，钻探揭露的土层依次为填土、粉质粘土、粉土、粘质粉土、粉土、粉质粘土、粉土和粉质粘土，结合收集的地质勘查资料，最下层的粉质粘土层厚度约在 5 米。场地的地质剖面图见图 2.3-3~图 2.3-6。场地 41 个土壤调查点位的详细地质图 2.3-7、2.3-8。

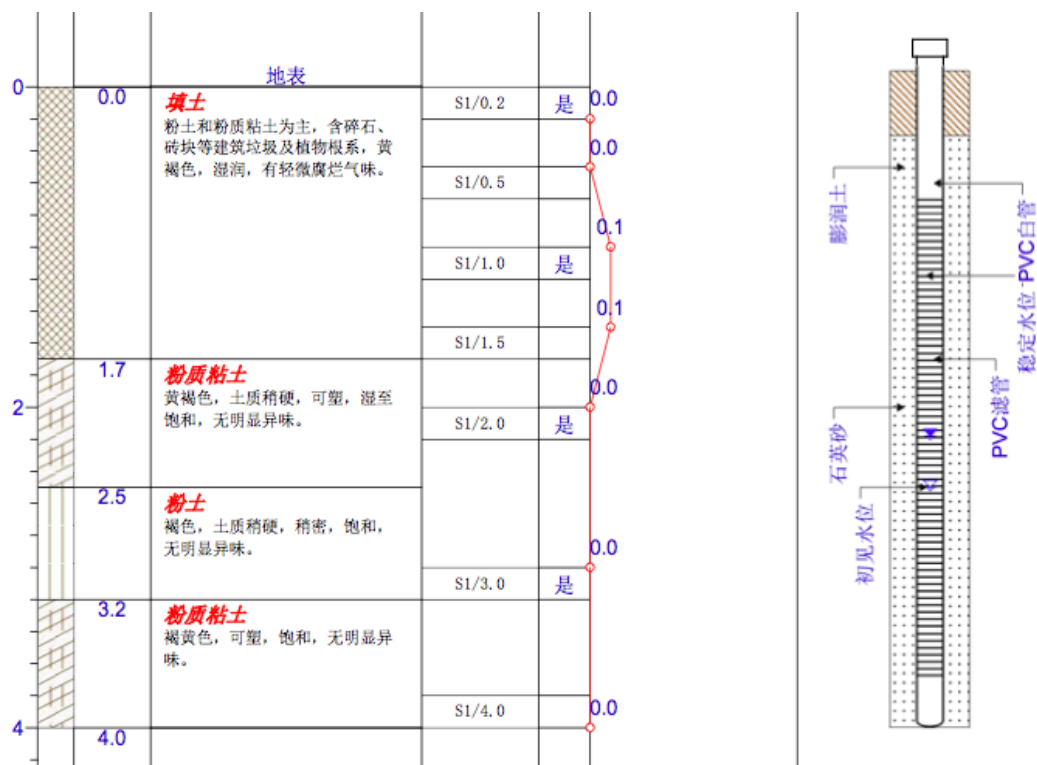


图 2.3-1 场地 S1 点位的土层分布

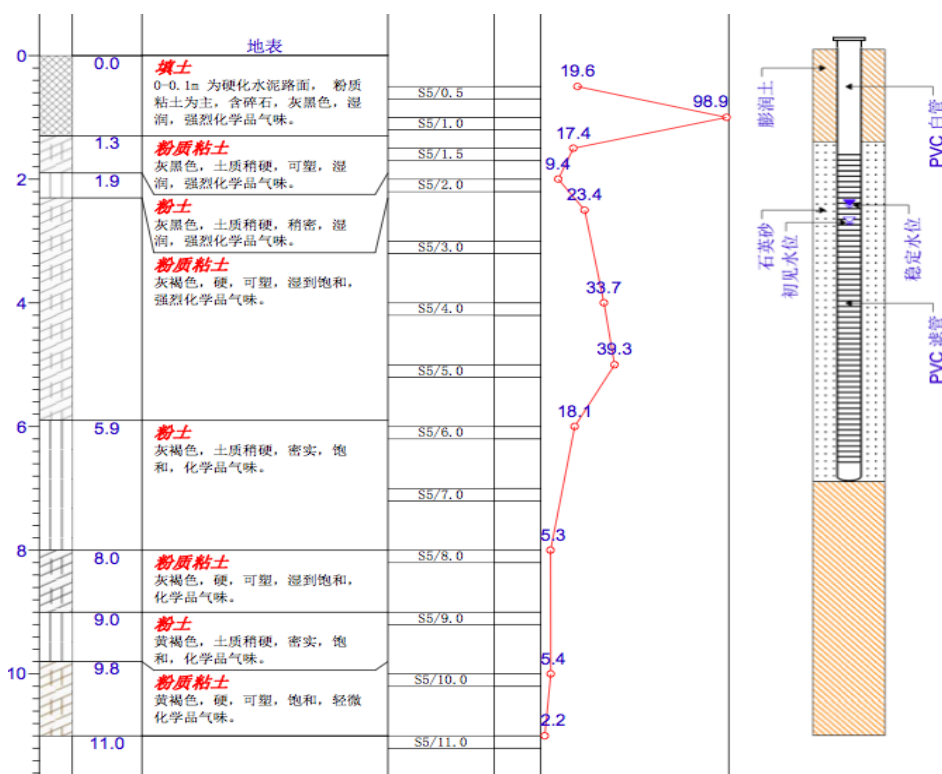


图2.3-2 场地S5点位内的土层分布

地层剖面图

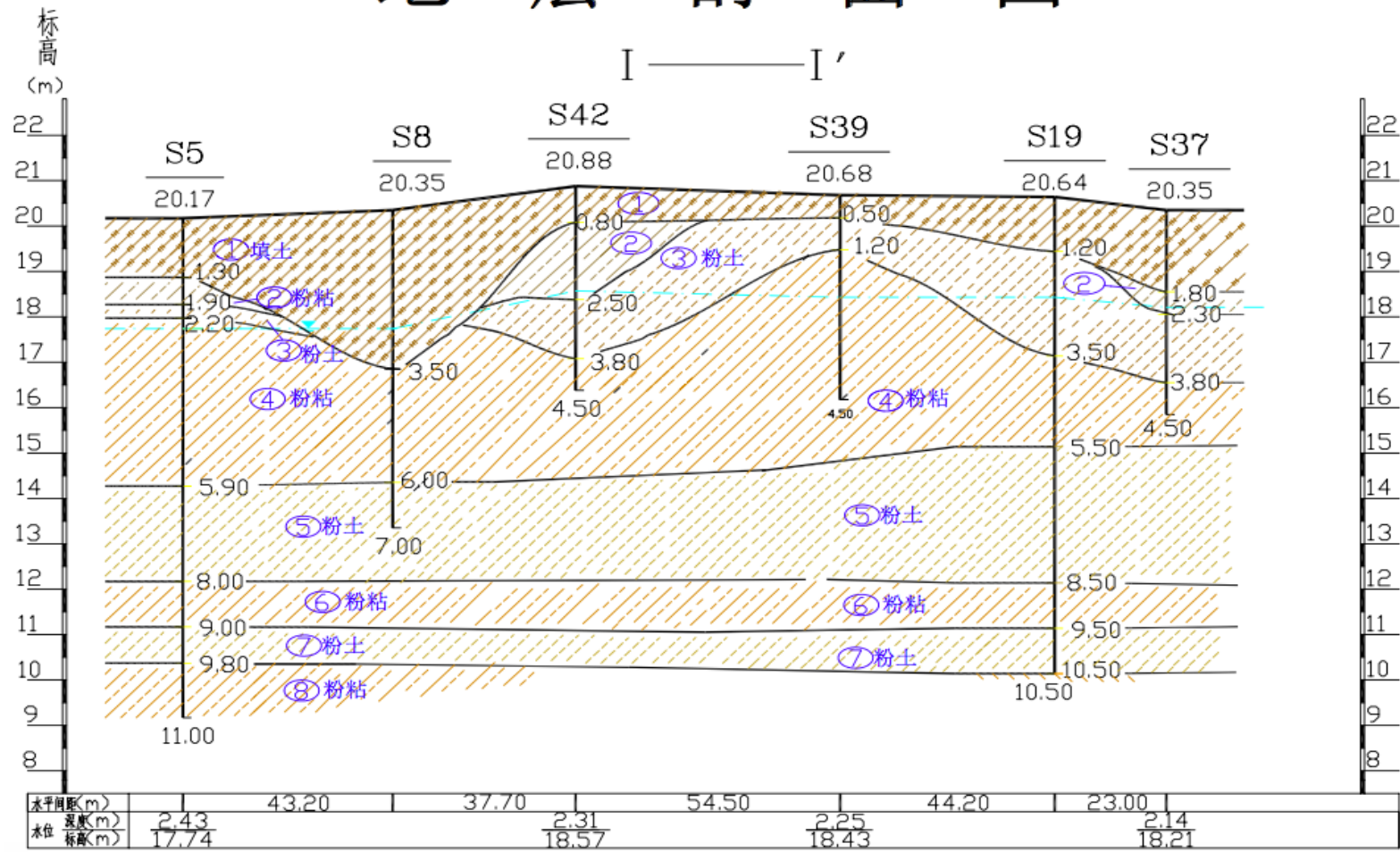


图 23-4 场地地层剖面图

地层剖面图

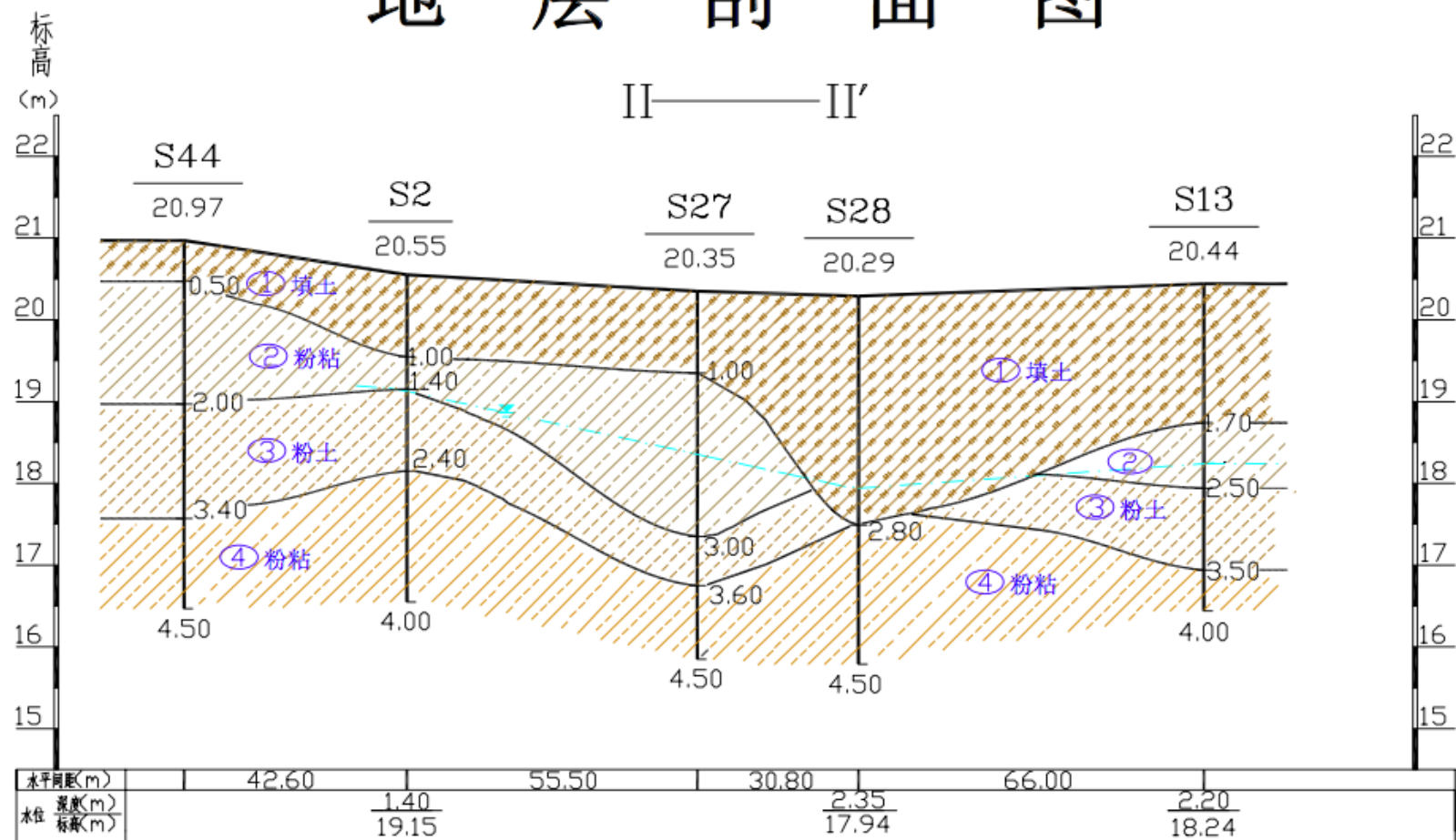


图 23-5 场地地层剖面图

地层剖面图

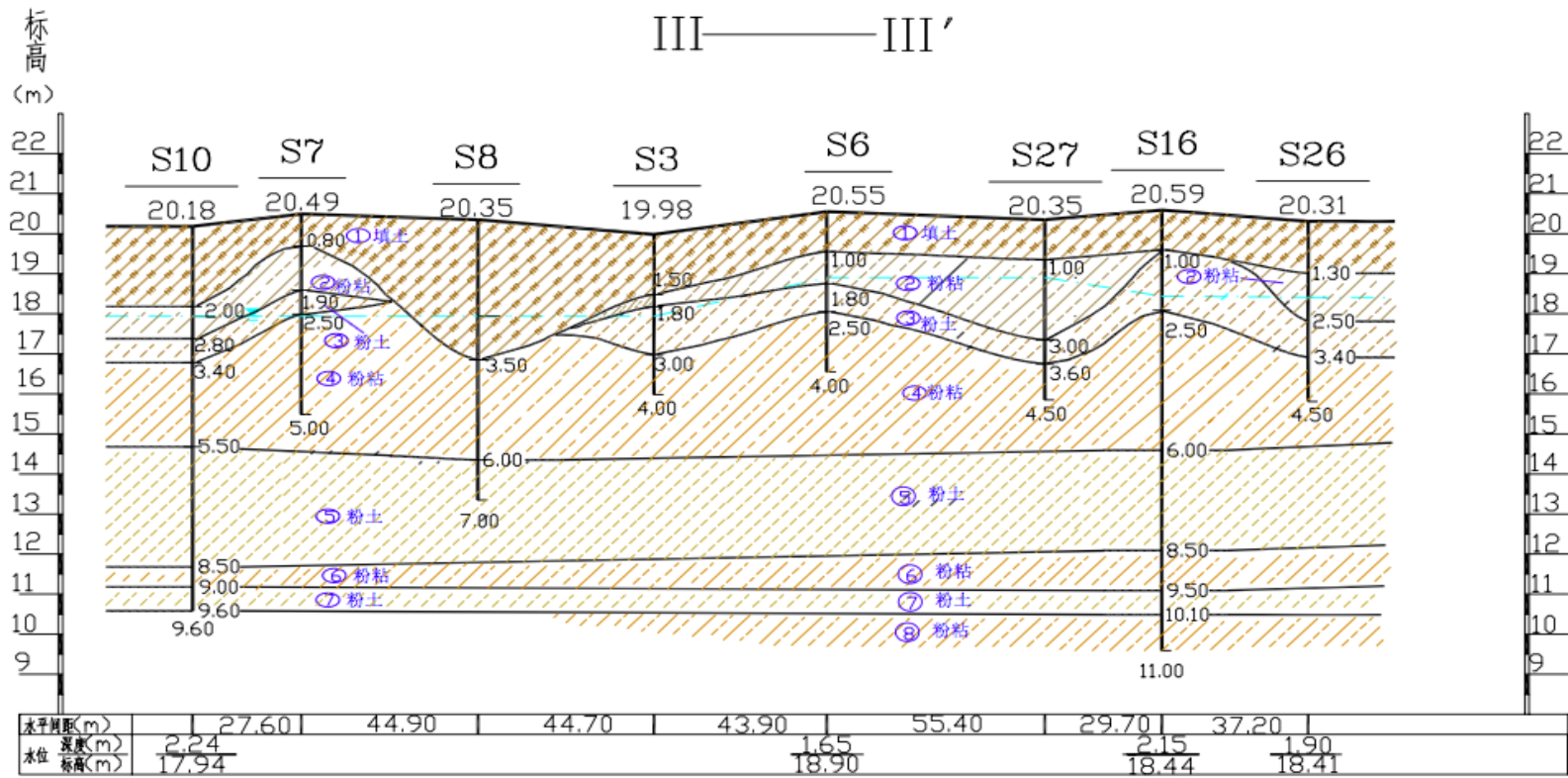


图 2.3-6 场地地层剖面图

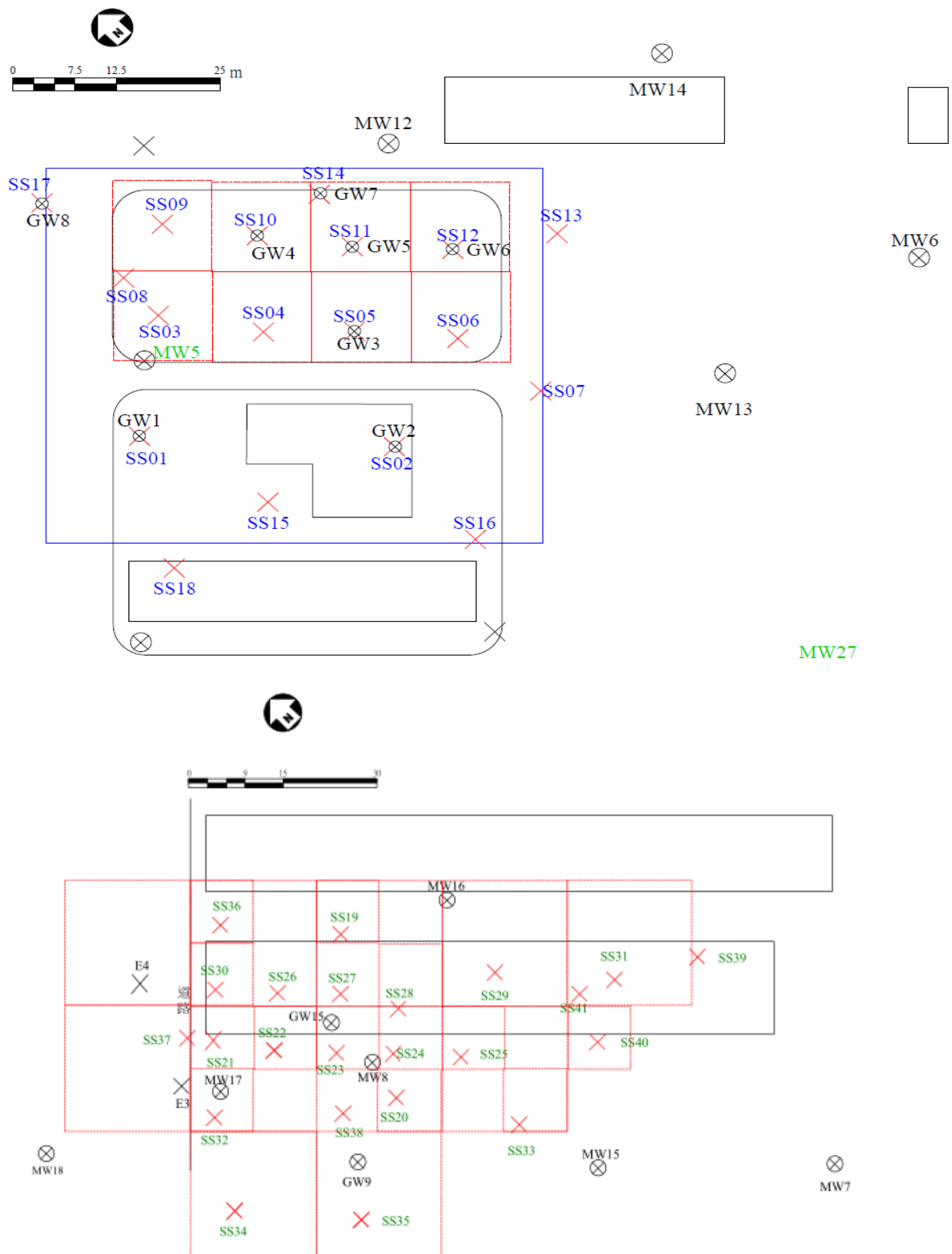


图 2.3-7 场地点位图

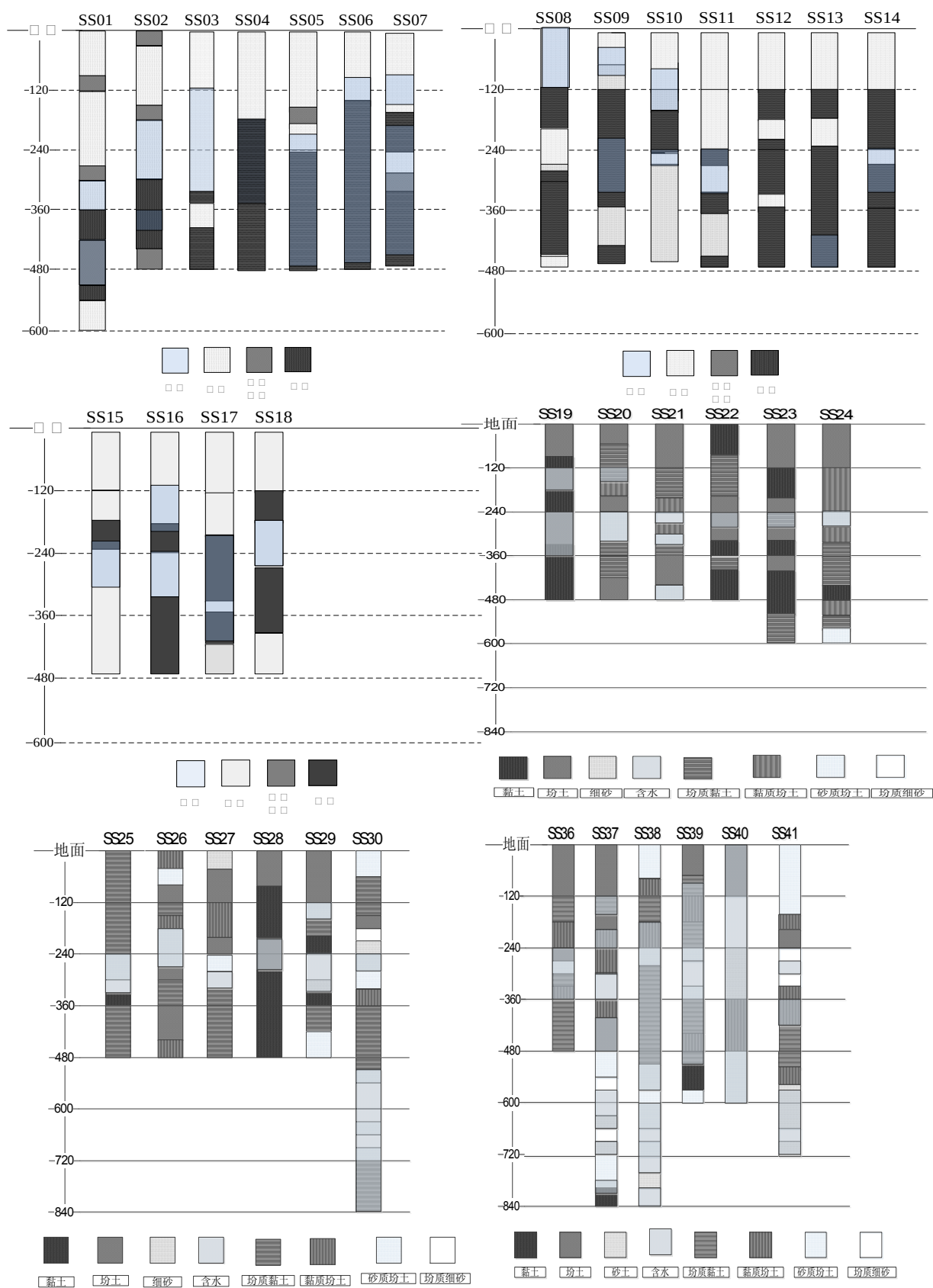


图 2.3-8 场地 41 个点位土层分布

(2) 场地水文地质条件

对监测井洗井并使地下水恢复到稳定水位后，在采集地下水样品前，统一使用水位计对各监测井地下水水位进行了测量，测量精度为 ± 0.01 米，测得的地下水稳定水位在地表下 0.87（MW-9）~2.65m（MW-2）之间。各监测井高程和水位测量结果见表 2.3-1。

表 2.3-1 监测井高程测量结果

监测井编号	地面高程（m）	地下水位埋深（m）	稳定水位高程（m）
MW-1	19.64	1.40	18.24
MW-2	20.55	2.65	17.90
MW-3	20.36	2.43	17.93
MW-4	20.27	2.24	18.03
MW-5	20.43	2.15	18.28
MW-6	20.55	2.20	18.35
MW-7	20.48	2.18	18.30
MW-8	20.33	2.16	18.17
MW-9	20.3	0.87	19.43
MW-10	20.59	2.40	18.19
MW-11	20.36	1.90	18.46
MW-12	20.68	2.35	18.33
MW-13	20.89	2.48	18.41
MW-14	20.97	2.62	18.35
MW-15	20.73	2.48	18.25
MW-16	20.39	2.30	18.09
MW-17	20.31	2.14	18.17
MW-18	19.79	1.65	18.14
MW-19	20.32	2.16	18.16
MW-20	20.42	2.14	18.28
MW-21	20.41	2.25	18.16

监测井编号	地面高程（m）	地下水位埋深（m）	稳定水位高程（m）
MW-22	20.31	2.21	18.10
MW-23	20.36	2.31	18.05
MW-24	20.33	2.24	18.09
MW-25	20.75	2.73	18.02
MW-26	20.55	2.18	18.37
MW-27	20.59	2.03	18.56

该场地的地下水流向主要由东南流向西北，如图 2.3-2 所示。地下水的渗透系数在 6.94×10^{-5} cm/s - 9.41×10^{-5} cm/s 之间。地下水稳定水位在地表下 0.87（MW-9）~2.65m（MW-2）之间，推断的地下水流向图见图 2.3-2。

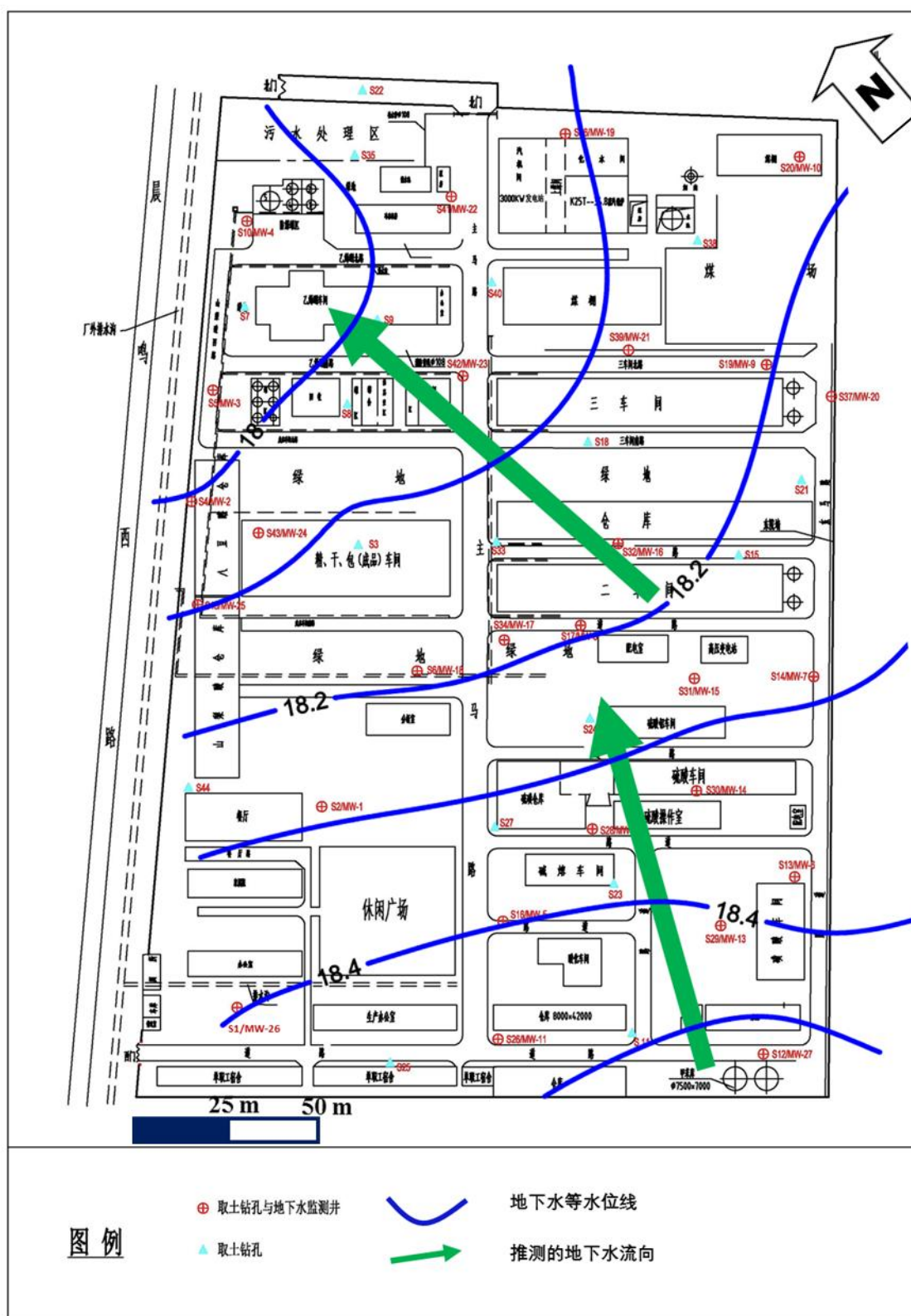


图 2.3-2 地下水等水位线图

2.4 场地污染状况

2.4.1 场地现状

该场地于2016年7月搬迁完毕，现场遗留大量建筑垃圾，局部地区的建筑垃圾高出地面1米以上（见图2.4-1）。所有的建筑和地面铺设都已经被拆迁，地下局部有基础设施遗留，需要在污染修复区域，先将地下基础破碎、清理后再进行修复。还不确定地下是否存在管网。这个不确定因素可能限制原位技术的实施，并需要根据现场工程实施情况随时调整。目前，场地内多个污水池还依然储备有不明来源的污水，如图2.4-2所示。



图 2.4-1 场地拆迁后地表建筑垃圾



图 2.4-2 场地拆迁后场地遗留的多处污水池

2.4.2 场地土壤污染状况

金能科技股份有限公司一厂区场地调查报告及风险评估报告显示该场地存在着以对甲基苯酚为主要有机污染物和砷的污染。

土壤样品中砷的最大检出浓度为 88.9 mg/kg, 超过参考标准(20mg/kg)3.45 倍。4 个土壤对照点样品的砷浓度范围在 8.2-12.2mg/kg 之间。本场地各个区域均由土壤砷超标点位, 深度从 0.5-4 米深度均有超标(详见图 2.4-3)。根据场地的生产活动, 场地土壤中的砷可能与场地应用硫磺制酸有关。另外, 土壤砷最高浓度的点位在场地北部堆煤场附近区域, 场地煤棚附近区域土壤也有超标现象, 因此场地过去堆煤过程也可能会造成土壤受砷的影响。

在 45 个土壤采样点中的 13 个点位检测到苯酚。其中样品 S18/2.0 和 S23/8.5 的苯酚浓度超过参考标准(90mg/kg), 最大值为 102mg/kg。其余土壤样品苯酚浓度均未超过参考标准。苯酚的污染点位见图 2.4-4。

在 45 个土壤采样点中的 17 个点位检测到了 2-甲基苯酚, 但检测到的 2-甲基苯酚浓度范围在 0.1-46mg/kg 之间, 未超过参考标准。

在 45 个土壤采样点中的 25 个点位检测到了 3&4-甲基苯酚, 检测到的 3&4-甲基苯酚浓度范围在 0.1-1300mg/kg 之间。其中其中 6 个点位的不同深度的土壤样品中 3&4-甲基苯酚浓度超过参考标准(90mg/kg), 最大值为 1300mg/kg。3&4-甲基苯酚的污染点位见图 2.4-4。

仅在 8 个土壤采样点位中检测到了 2,4-二甲基苯酚, 检测到的 2,4-二甲基苯酚浓度范围在 0.1-14.1mg/kg 之间, 未超过参考标准。

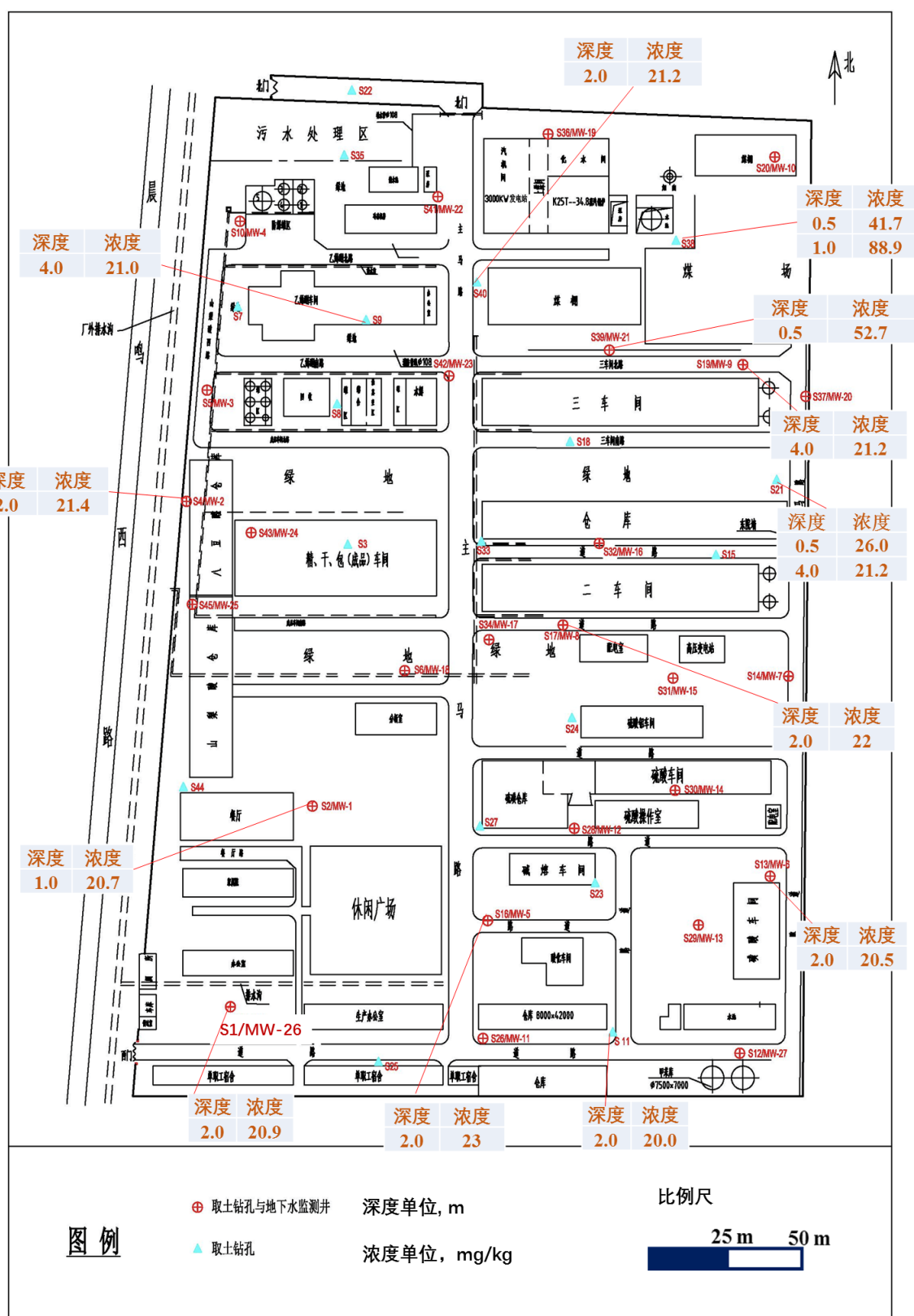


图 2.4-3 土壤中砷浓度超标点位

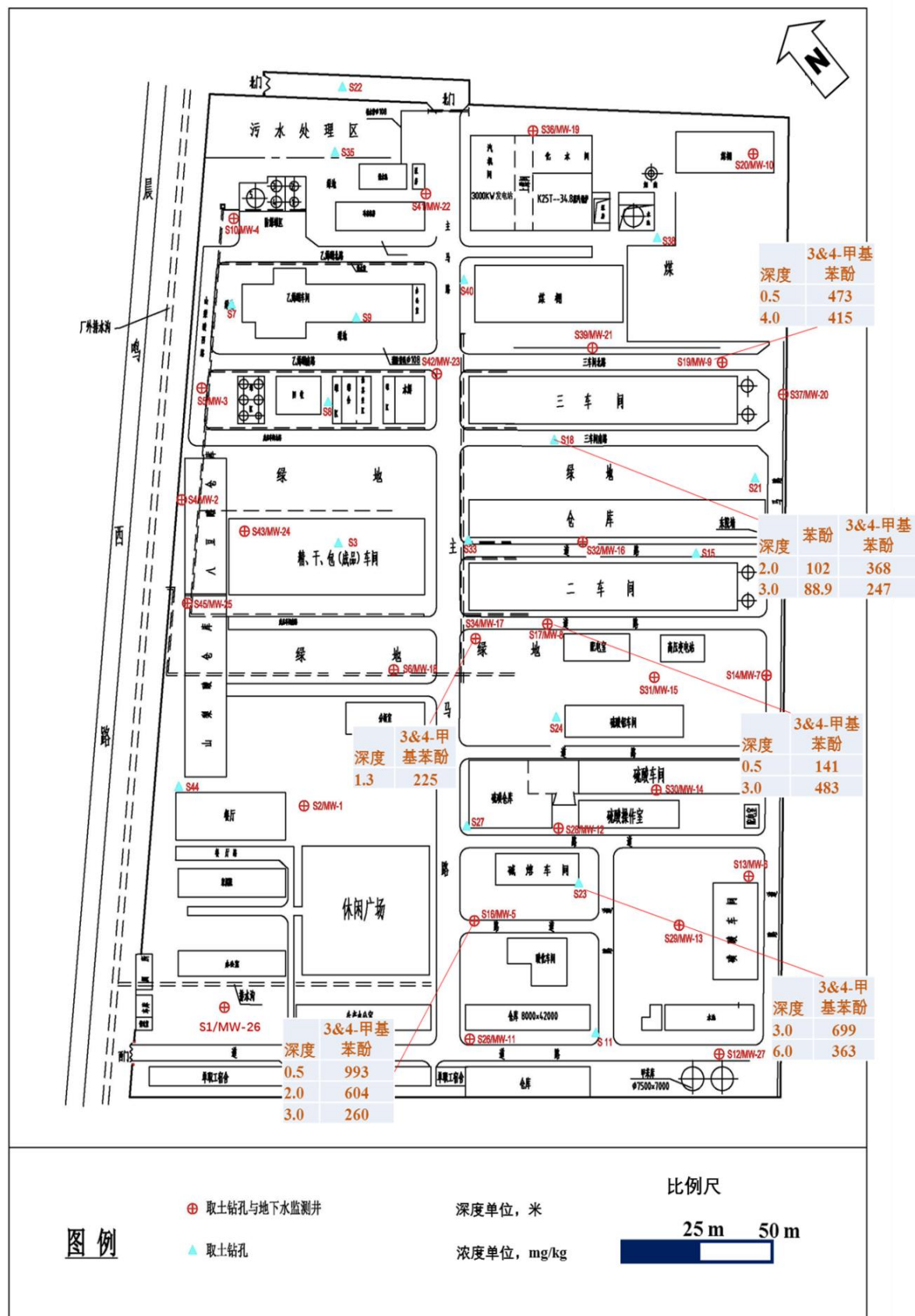


图 2.4-4. 土壤中对甲基苯酚浓度超标点位

2.4.3 场地地下水污染状况

场地调查报告中地下水重金属分析结果表明显示存在镍和砷的污染，地下水受镍影响的范围较小，仅仅局限在监测井 MW9 所在的小范围区域；检测到砷的浓度范围为 0.006-0.793mg/L 之间，MW2、MW3、MW4、MW5、MW8、MW9、MW23、MW24、MW25 中地下水样品中砷浓度超过参考标准（0.10mg/L），其余地下水样品砷浓度未超过参考标准。地下水镍和砷的污染点位见图 2.4-6。

表 2.4-1 地下水重金属分析结果统计表

污染物	对标标准	总数	检出数	检出率	超标数	超标率	最大检出浓度
铜	1.50	10	3	30%	0	0	0.004
铬	0.10	10	5	50%	0	0	0.094
镍	0.10	12	11	92%	1	8%	0.143
锌	5.00	10	2	20%	0	0	0.135
砷	0.05	35	27	77%	9	26%	0.793
钒	0.086	10	1	10%	0	0	0.39

半挥发性有机物包括：苯酚、2-甲基苯酚、3&4-甲基苯酚、2,4-二甲基苯酚、萘和 2-甲基萘。该场地的多个检测井中监测到了超过标准浓度的对甲基酚类污染物和砷污染物。具体数据如表 2.4-2 所示。其超标点位在场地中的分布如图 2.4-5 所示。

表 2.4-2 地下水半挥发性有机物分析结果统计表 （单位， $\mu\text{g/L}$ ）

污染物	对 标 标准	总数	检出数	检出率	超标数	超标率	最大检出浓度
苯酚	10	35	12	34.3%	9	25.7%	122000
2-甲基苯酚	200	35	16	45.7%	4	11.4%	79400
3&4-甲基苯酚	200	35	19	54.3%	9	25.7%	1390000
2,4-二甲基苯酚	200	35	7	20%	1	2.9%	34100
萘	600	10	5	50%	0	0	66
2-甲基萘		10	1	10%	0	0	0.9

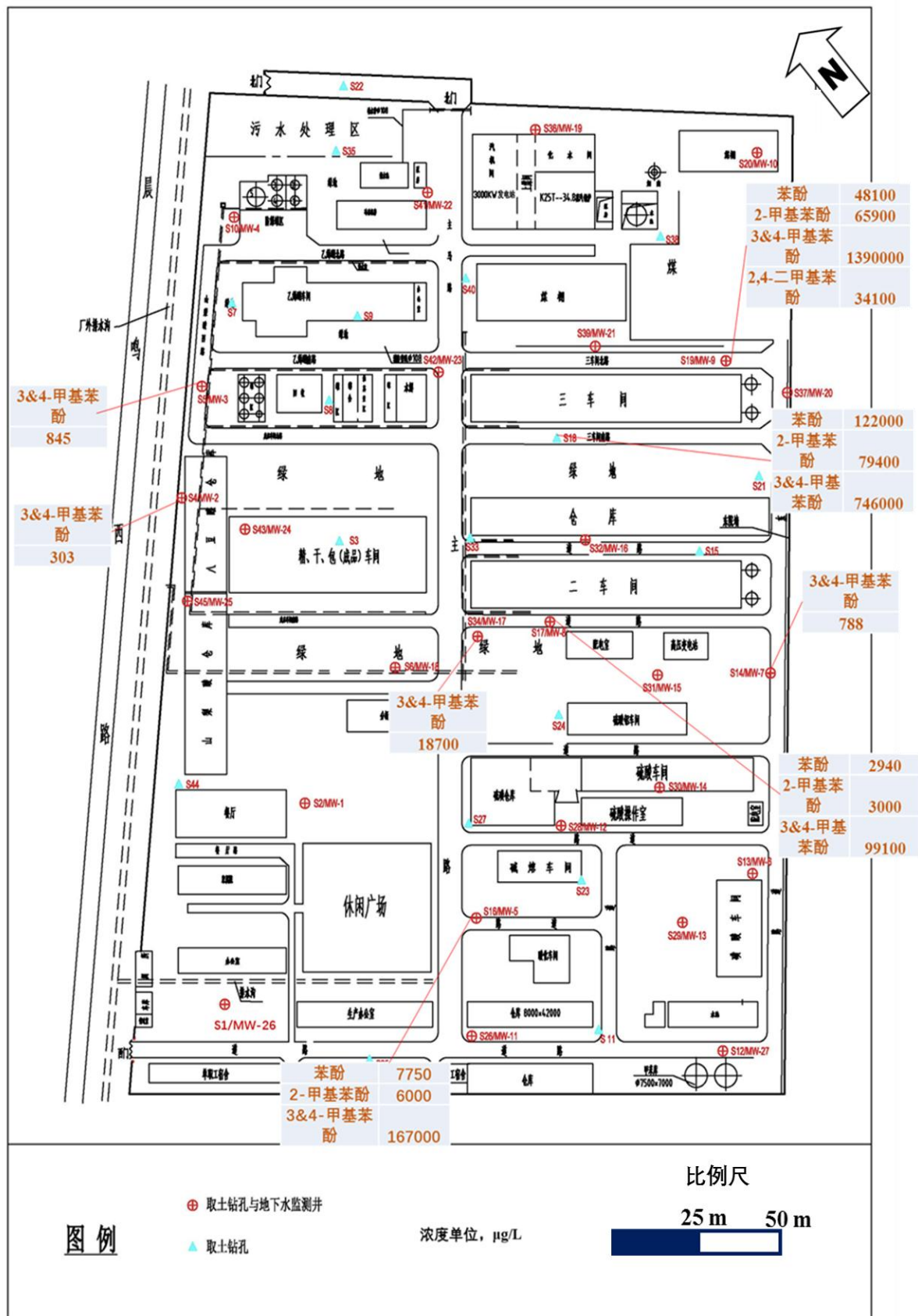


图 2.4-5 地下水中对甲基苯酚浓度超标点位

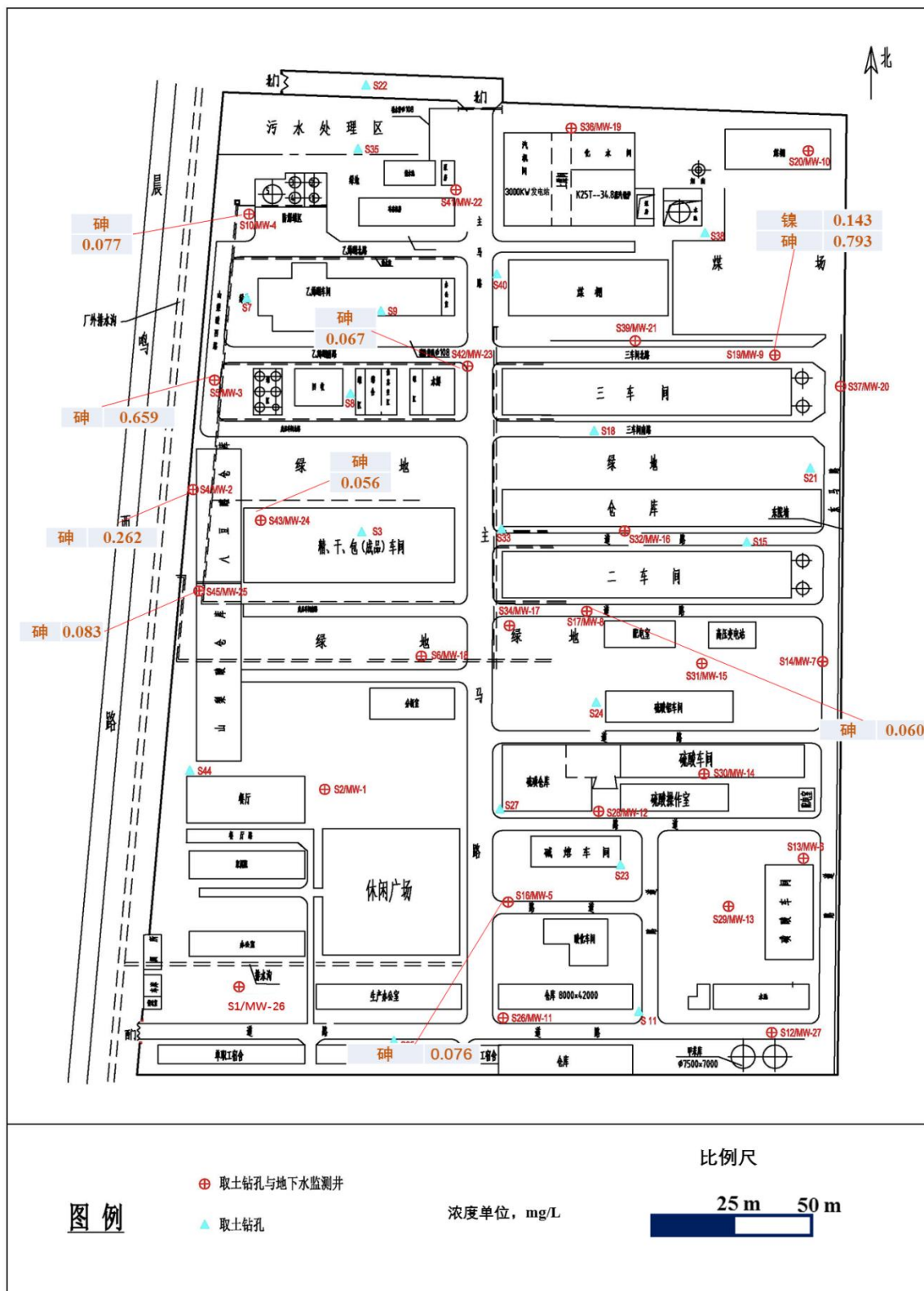


图 2.4-6 地下水中镍及砷浓度超标点位

2.5 场地使用规划

根据《齐河县城市总体规划》和《齐河经济开发区总体规划》,该场地后续仍将作为工业用地开发,规划见图 2.5-1 和图 2.5-2。

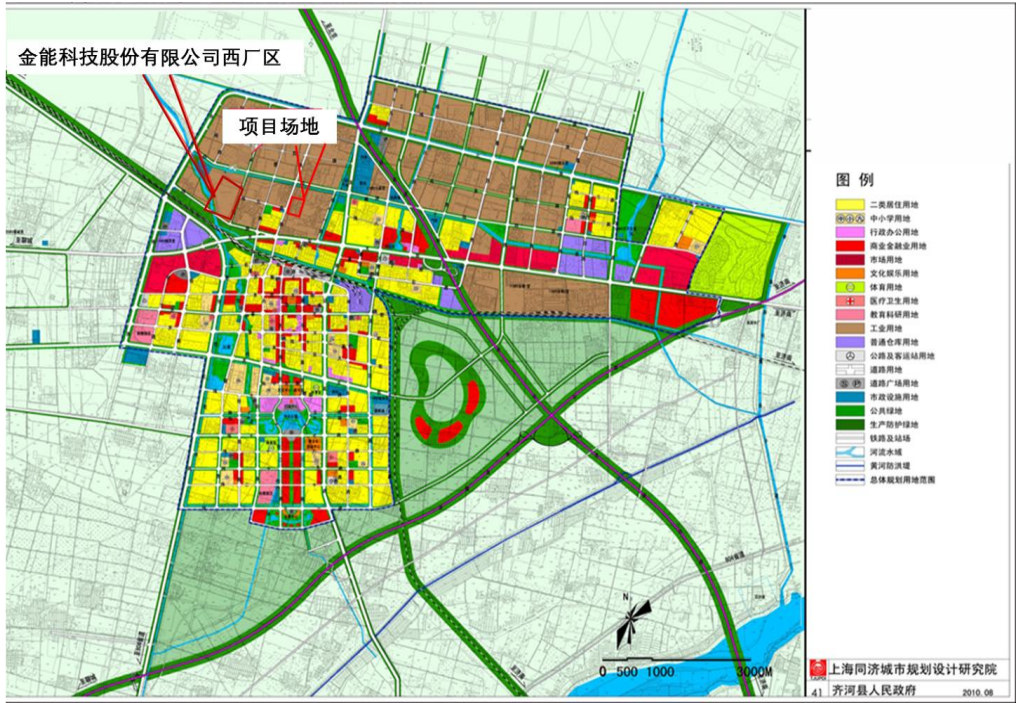


图 2.5-1 齐河县城市总体规划

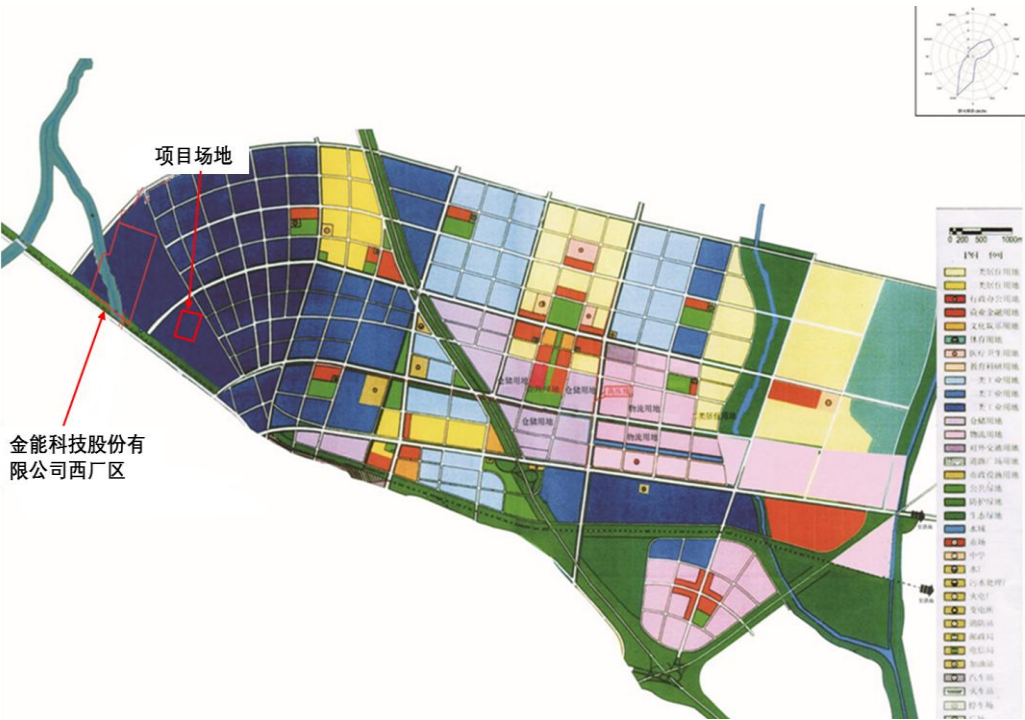


图 2.5-2 齐河经济开发区总体规划

2.6 场地环境健康风险分析

2.6.1 场地污染土壤环境健康风险分析

本场地关注的污染物风险评估结果没有超过致癌风险可接受值 10^{-6} 或者非致癌危害商 1。该场地内土壤关注污染物的致癌风险水平和非致癌危害商可接受，不需要对对甲基苯酚污染土壤进行修复。依据北京工业用地砷污染浓度筛选值 20 mg/kg 标准，该场地存在着大量的砷污染土壤需要治理。

2.6.1.1 土壤污染风险表征

根据暴露途径分析，该地块用地类型下建筑工人和商业工作人员通过口腔摄入、皮肤接触和呼吸吸入的暴露途径受到危害。根据保守性原则，采用土壤中关注污染物的最高浓度进行风险表征计算，建筑工人和场地企业工人的健康风险表征如下。

（1）建筑场景

土壤中关注污染物对建筑工人的健康风险见表 2.6-1 和表 2.6-2。根据风险表征结果，在建筑场景下场地土壤砷污染将会给建筑工人带来不可接受的致癌风险和非致癌风险。苯酚类污染物，苯酚、2-甲基苯酚、3&4-甲基苯酚和 2,4-二甲基苯酚不会给未来建筑工人带来不可接受风险。

表 2.6-1 建筑场景土壤污染的致癌风险概率

编号	污染	经口摄入	皮肤接触	室外颗粒物吸入	总致癌风险
1	砷（无机）	6.70E-06	1.02E-06	2.05E-07	7.92E-06

表 2.6-2 建筑场景土壤污染的非致癌风险危害商

编号	污染物	经口摄入	皮肤接触	室外颗粒物吸入	室外表层土壤蒸汽吸入	室外下层土壤蒸汽吸入	总风险指数
1	砷（无机）	5.36E+00	8.16E-01	1.14E+00	-	-	7.32E+00
2	苯酚	6.15E-03	3.12E-03	9.82E-05	2.12E-02	2.41E-03	3.30E-02
3	2-甲基苯酚	1.66E-02	8.45E-03	1.48E-05	2.38E-03	2.02E-04	2.77E-02
4	3&4-甲基苯酚	3.59E-01	1.82E-01	3.19E-04	5.19E-02	4.45E-03	5.98E-01
5	2,4-二甲	1.28E-	6.47E-	-	-	-	1.92E-0

	基苯酚	02	03				2
--	-----	----	----	--	--	--	---

注：3&4-甲基苯酚的风险表征以 3-甲基苯酚计

(2) 工业场景

土壤中关注污染物对工业场景下企业工人的健康风险见表 2.6-3 和表 2.6-4。根据风险表征结果，场地土壤砷污染将会给场地企业工人带来不可接受的致癌风险和非致癌风险。苯酚类污染物，苯酚、2-甲基苯酚、3&4-甲基苯酚和 2,4-二甲基苯酚不会给未来建筑工人带来不可接受风险。

表 2.6-3 工业场景土壤污染的致癌风险概率

编号	污染物	经口摄入	皮肤接触	室内颗粒物吸入	室外颗粒物吸入	总致癌风险
1	砷（无机）	5.58E-05	9.56E-06	6.14E-06	1.28E-06	7.28E-05

表 2.6-4 工业场景土壤污染的非致癌风险危害商

编号	污染物	经口摄入	皮肤接触	室内颗粒物吸入	室外颗粒物吸入	室内下层土壤蒸汽吸入	室外表层土壤蒸汽吸入	室外下层土壤蒸汽吸入	总风险指数
1	砷（无机）	1.79E+00	3.06E-01	1.37E+00	2.85E-01	-	-	-	3.75E+00
2	苯酚	2.05E-03	1.17E-03	1.18E-04	2.46E-05	1.69E-04	1.32E-03	1.51E-04	5.01E-03
3	2-甲基苯酚	4.34E-03	2.48E-03	1.39E-05	2.89E-06	2.73E-05	1.16E-04	9.89E-06	6.99E-03
4	3-甲基苯酚	1.20E-01	6.84E-02	3.83E-04	7.97E-05	5.84E-04	3.24E-03	2.78E-04	1.93E-01
5	2,4-二甲基苯酚	4.25E-03	2.43E-03	-	-	-	-	-	6.68E-03

注：3&4-甲基苯酚的风险表征以 3-甲基苯酚计

2.6.1.2 场地污染地下水环境健康风险分析

根据保守性原则，采用地下水中关注污染物的最高浓度进行风险表征计算，建筑工人和场地企业工人的健康风险表征如下。

(1) 建筑场景

地下水中关注污染物对建筑工人的健康风险见表 2.6-5 和表 2.6-6。根据风险表征结果，在建筑场景下场地地下水砷污染将会给建筑工人带来不可接受的致癌风险和非致癌风险。苯酚类污染物中的 2-甲基苯酚、3&4-甲基苯酚和 2,4-二甲基苯酚可能会给未来建筑工人带来不可接受风险。

表 2.6-5 建筑场景地下水致癌风险概率

编号	污染物	室外地下水蒸汽吸入	经口意外摄入	皮肤接触	总致癌风险
1	砷（无机）	-	1.99E-06	-	1.99E-06
2	苯	1.06E-10	2.33E-08	1.5E-8	3.88E-08

表 2.6-6 建筑场景地下水非致癌风险危害商

编号	污染物	室外地下水蒸汽吸入	经口意外摄入	皮肤接触	总风险指数
1	砷（无机）	-	1.59E+00		1.59E+00
2	镍	-	4.31E-03		4.31E-03
3	苯	1.63E-04	3.81E-02	5.0E-3	4.33E-02
4	苯酚	1.13E-02	2.45E-01	9.5E-3	2.66E-01
5	2-甲基苯酚	2.23E-02	9.57E+00	7.4E-1	1.03E+01
6	3&4-甲基苯酚	3.90E-02	1.68E+01	1.3E+0	1.81E+01
7	2,4-二甲基苯酚	-	1.02E+00	1.3E-1	1.16E+00

注：3&4-甲基苯酚的风险表征以 3-甲基苯酚计

（2）工业场景

地下水中关注污染物对未来场地企业工人的健康风险见表 2.6-7 和表 2.6-8。根据风险表征结果，在未来工业场景下场地地下水中关注污染物不会给未来场地企业工人带来不可接受的致癌风险和非致癌风险。

表 2.6-7 工业场景地下水污染的致癌风险概率

编号	污染物	室外地下水污染蒸汽吸入	室内地下水污染蒸汽吸入	总风险水平
1	砷（无机）	-	-	-
2	苯	2.29E-10	8.66E-08	8.69E-08

表 2.6-8 工业场景地下水污染的非致癌风险危害商

编号	污染物	室外地下水污染蒸汽吸入	室内地下水污染蒸汽吸入	总风险水平
1	砷（无机）	-	-	-
2	镍	-	-	-

3	苯	1.41E-05	5.33E-03	5.35E-03
4	苯酚	9.85E-04	2.24E-03	3.22E-03
5	2-甲基苯酚	1.93E-03	1.08E-02	1.27E-02
6	3-甲基苯酚	3.39E-03	1.44E-02	1.78E-02
7	2,4-二甲基苯酚	-	-	-

注：3&4-甲基苯酚的风险表征以 3-甲基苯酚计；

2,4-二甲基苯酚无相应毒性参数

2.7 场地土壤及地下水污染修复目标

场地调查后，对场地内发现的目标污染物进行了风险评估，风险评估的结果如下：

（1）经过风险评估计算，确定的土壤中砷的修复目标值为 20 mg/kg。

（2）在建筑场景下，计算的地下水砷的风险控制值为 0.1 mg/L，因此建议地下水砷的风险控制值为 0.1 mg/L。

（3）2-甲基苯酚：2-甲基苯酚挥发性较低，本场地条件下基于建筑场景和工业场景的 2-甲基苯酚地下水风险控制值分别为 51.8 mg/L 和 62584 mg/L。本项目建议地下水 2-甲基苯酚的风险控制值为建筑场景的 51.8 mg/L。

（4）3&4-甲基苯酚：3&4-甲基苯酚挥发性较低，本场地条件下基于建筑场景和工业场景的 3&4-甲基苯酚地下水风险控制值分别为 51.8 mg/L 和 78271 mg/L。本项目建议地下水 2-甲基苯酚的风险控制值为建筑场景的 51.8 mg/L。

（5）2,4-二甲基苯酚：2,4-二甲基苯酚挥发性较低，因缺乏相关参数，无法计算基于工业场景的 2,4-二甲基苯酚地下水风险控制值。在建筑场景下，2,4-二甲基苯酚的地下水风险控制值为 20.8mg/L。本项目建议地下水 2,4-甲基苯酚的风险控制值为建筑场景的 20.8 mg/L。

砷污染地下水暴露主要发生在建筑场景，如果在施工期间，人员做好安全防护，暴露风险会非常小。因此，只有在发生建筑抽水时才有可能接触到砷污染地下水，所有做好建筑场景人员的风险管制，可以适当提高风险控制值作为修复目标值。同时，是否存在建筑抽水与后期的规划再开发使用存在着直接相关性，因该场地修复后作为工业用地使用，并且严格工业场地地下水抽出使用，可以大大

降低砷污染地下水暴露风险。风险控制值的重点在于要该情景下采取最安全控制的作为，也可以达成，但是现实情况是结合该场地后期的规划使用目的以及目前有限的修复经费及修复周期，无法将 0.1 mg/L 的砷风险控制值作为修复目标值。根据台湾地区的设定标准（详见附件 A）及国内已有的案例经验（如上海桃浦科技智慧城 621 地块地下水砷修复目标值为 0.5 mg/L），建议将砷污染修复目标值设定为 0.5 mg/L，并且建议通过对修复后地下水进行为期不少于 2 年的长期监测以保证风险可控。

虽然调查报告及风险评估中给出了酚类污染物在土壤中的污染不造成风险，但是经过前期已经完成的加密调查发现，酚类污染地下水区域对应的部分上层土壤存在高浓度污染土壤，会经过降雨淋溶再次污染修复后的地下水（具体计算见下面修复范围确定部分），因此，鉴于防止修复后的污染地下水再次被浅层高浓度污染土壤污染的发生，需要对浅层高浓度污染土壤进行修复。经过计算，浅层污染土壤中需要修复的目标物为 3&4-甲基苯酚，修复目标值为 380 mg/kg。

2.8 场地污染土壤及地下水修复范围

金能科技股份有限公司一区在长时间的生产经营中，跑冒滴漏特别是厂区下水储罐的泄漏造成了场地的土壤地下水中对甲基苯酚污染。

2.8.1 酚类污染修复范围

基于场地调查结果的风险评估显示，该场地土壤中酚类污染物没有超过风险控制，但存在着三个区域的地下水风险值超标（图 2.8-1 所示），初步确定的三个区域的污染面积为 2200 m²、2800 m² 和 5000 m²。

地下水 2-甲基苯酚、3&4-甲基苯酚和 2,4-二甲基苯酚同属于酚类化合物。根据建议的地下水风险控制值和地下水的监测结果，确定地下水中酚类化合物的风险控制范围，估计的范围约为 10000 m²。

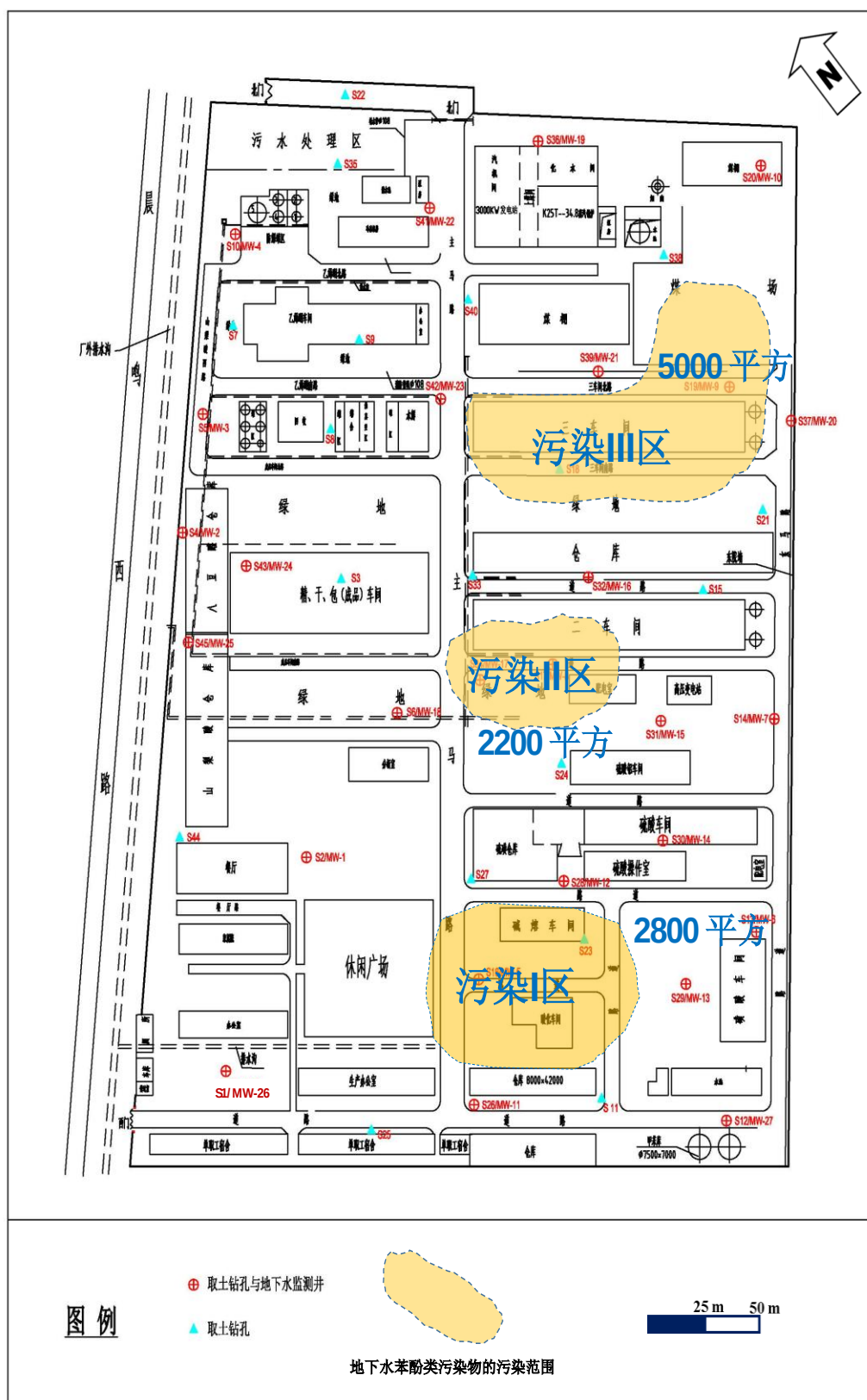


图 2.8-1 地下水中苯酚类浓度超过风险值的区域

土壤中酚类污染物虽没超过风险控制值(1660mg/kg),但污染点位超筛选值较多,又因其易于溶解于偏碱性水中,部分土壤中的酚类污染物会因降水淋溶至地下水。因此,需对三个污染区域酚污染土壤进行挖掘,以降低修复后的地下水因上层土壤在降水淋溶下再次被污染的风险。

3&4-甲基苯酚地下水风险控制值为 51.8 mg/L, 确定苯酚类土壤的控制浓度为 380 mg/kg, 详细浓度分布见图 2.8-2、2.8.3, 详细计算过程如下:

土壤控制浓度 (mg/kg) = 地下水控制浓度 * 单位土壤孔隙水量 * 土壤分配系数 (Koc)

地下水控制浓度: 51.8 mg/L

单位土壤孔隙水量: $1\text{kg} \times 0.625 \text{ (密度)} \times 0.4 \text{ (孔隙率)} = 0.25\text{L}$

土壤分配系数: $K_{oc}=30$ (参考附件 E)

酚类污染地下水三区开挖面积初步估算为 1775 m^2 (点位坐标及面积计算见表 2.8-1), 开挖的深度均为 0.5m, 保守预估需要开挖出的高浓度酚污染土壤为 880 方。

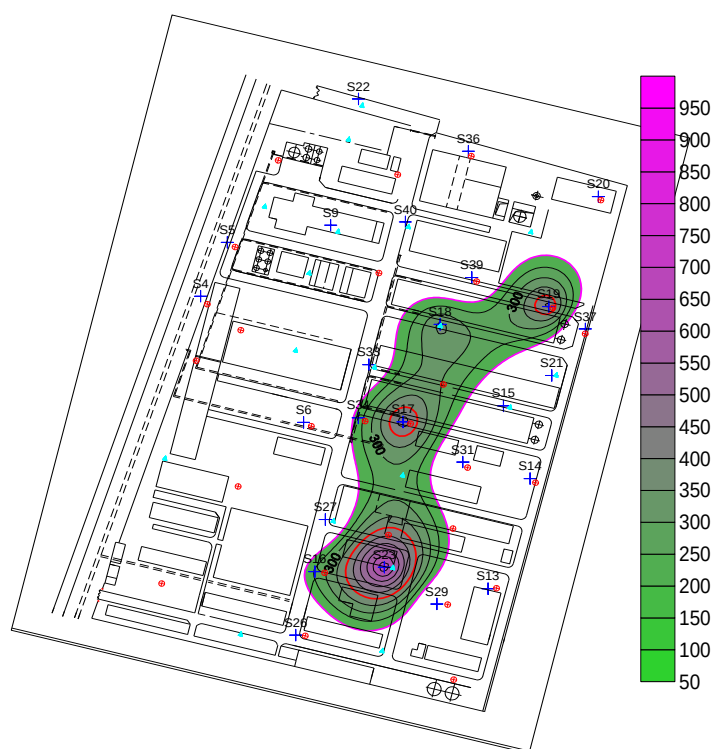


图2.8-2 3&4甲基苯酚类污染浅层高浓度污染区

表2.8-1 苯酚类污染三区坐标及污染面积估算

位置点位	X	Y	面积 (m ²)
区域I			
1	477865.967	4075817.472	800
2	477896.782	4075809.431	
3	477902.995	4075833.864	
4	477872.268	4075841.851	
区域2			
5	477881.827	4075900.423	375
6	477901.56	4075894.937	
7	477906.38	4075912.783	
8	477886.658	4075918.099	
区域3			
9	477907.545	4075956.956	100
10	477917.253	4075954.558	
11	477919.923	4075964.186	
12	477910.213	4075966.584	
区域4			
13	477958.453	4075962.399	500
14	477980.001	4075957.282	
15	477985.482	4075978.525	
16	477963.928	4075983.741	
合计			1775

2.8.2 砷污染修复范围

根据场地环境调查及人体健康风险评估结果，结合风险评估和国内相关的土壤筛选值，场地土壤砷的风险控制值为 20 mg/kg，砷污染土壤超标面积达到 18800 m²，如图 2.8-4 所示。

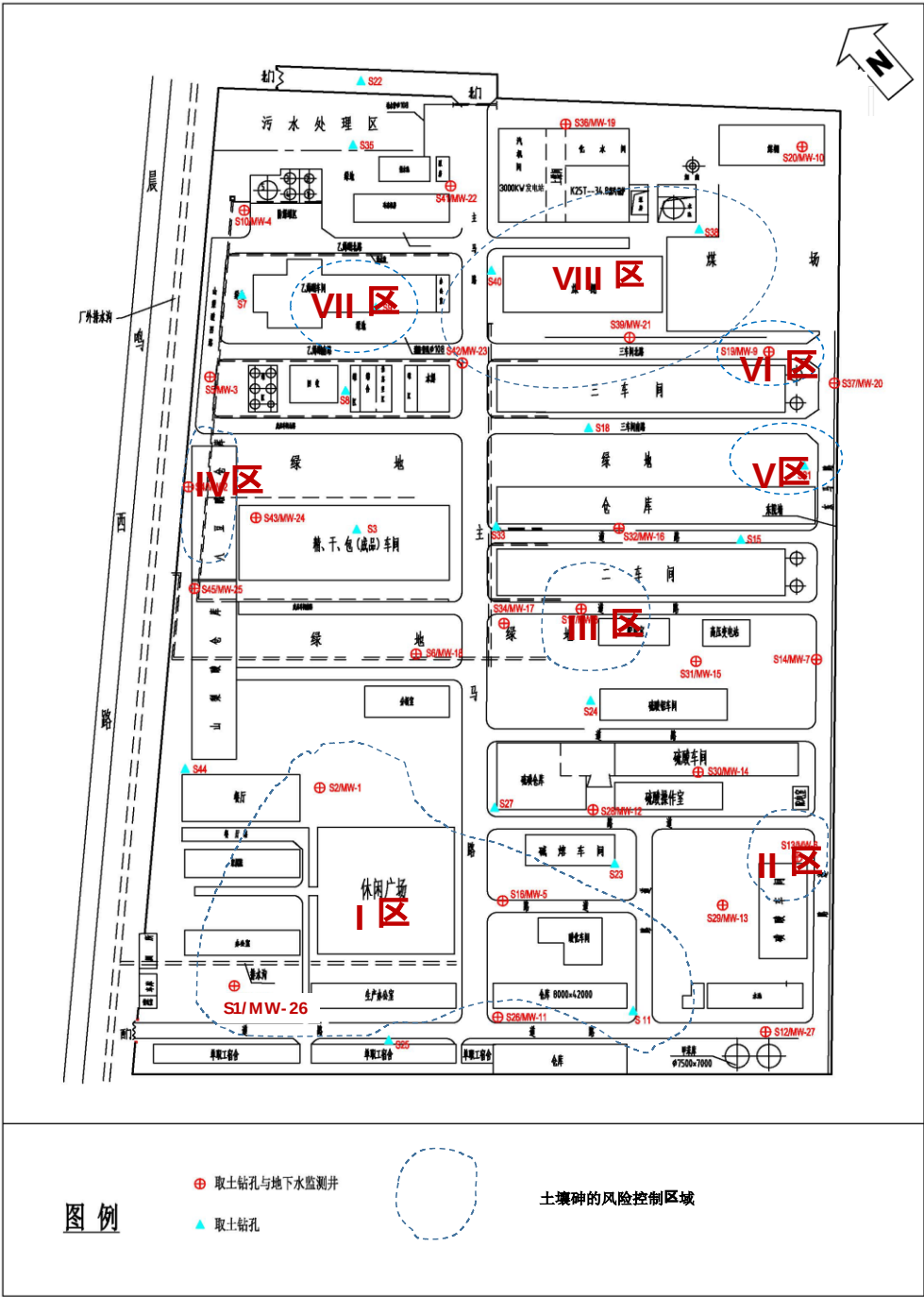


图 2.8-4 土壤砷的风险控制范围图

场调报告显示地下水砷超出风险控制值（0.1mg/L）的区域有两个，分别为 2000 m² 和 3200 m²（如图 2.8-5），详调后确定修复地下水砷污染面积 1100 m² 和 1200 m²（如图 2.8-6），共计 2300m²。地下水砷和苯酚类复合污染区为 1200 m²，如图 2.8-7 所示。

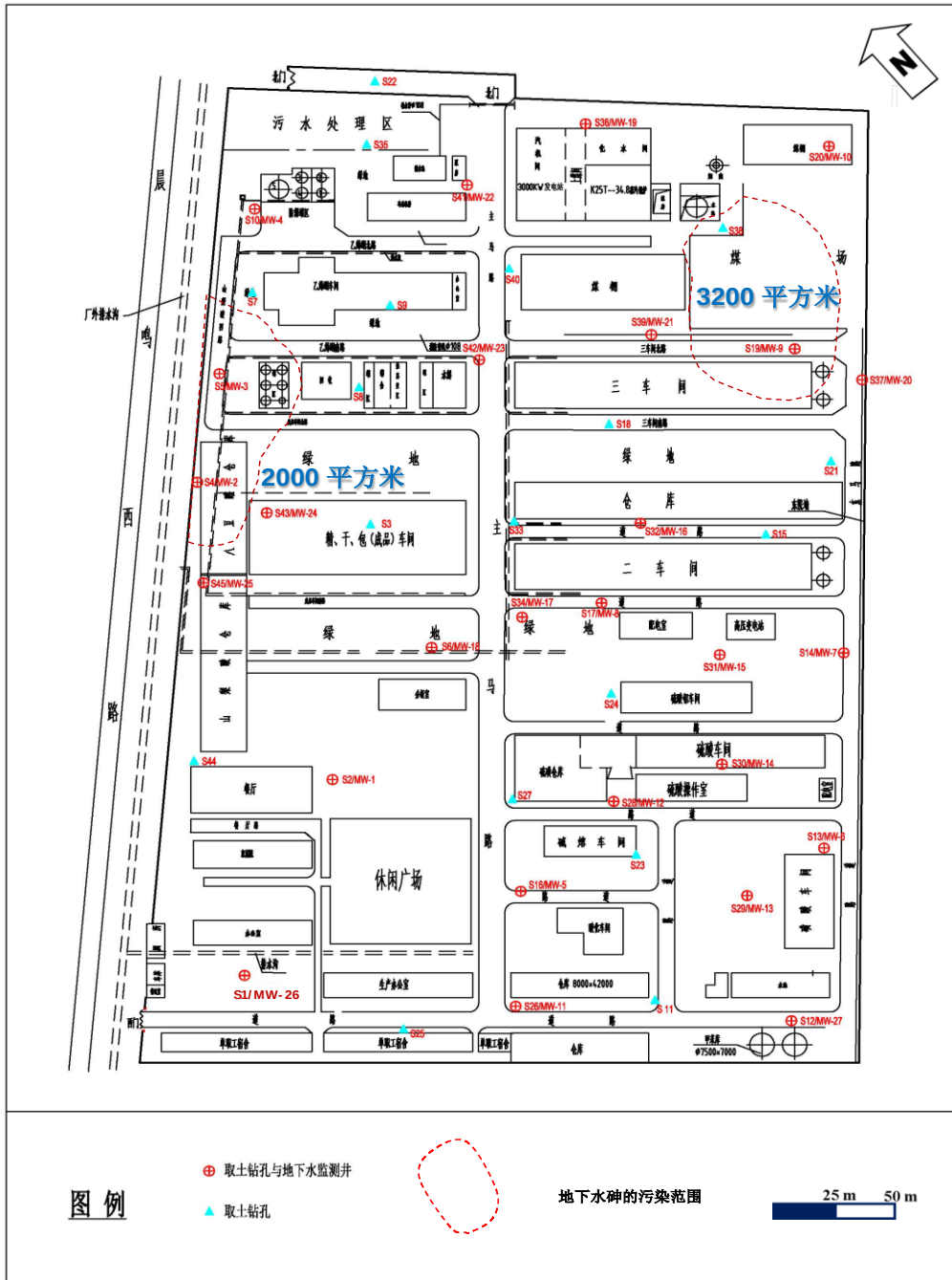


图 2.8-5 地下水中砷浓度高于风险控制值（0.1 mg/L）的区域

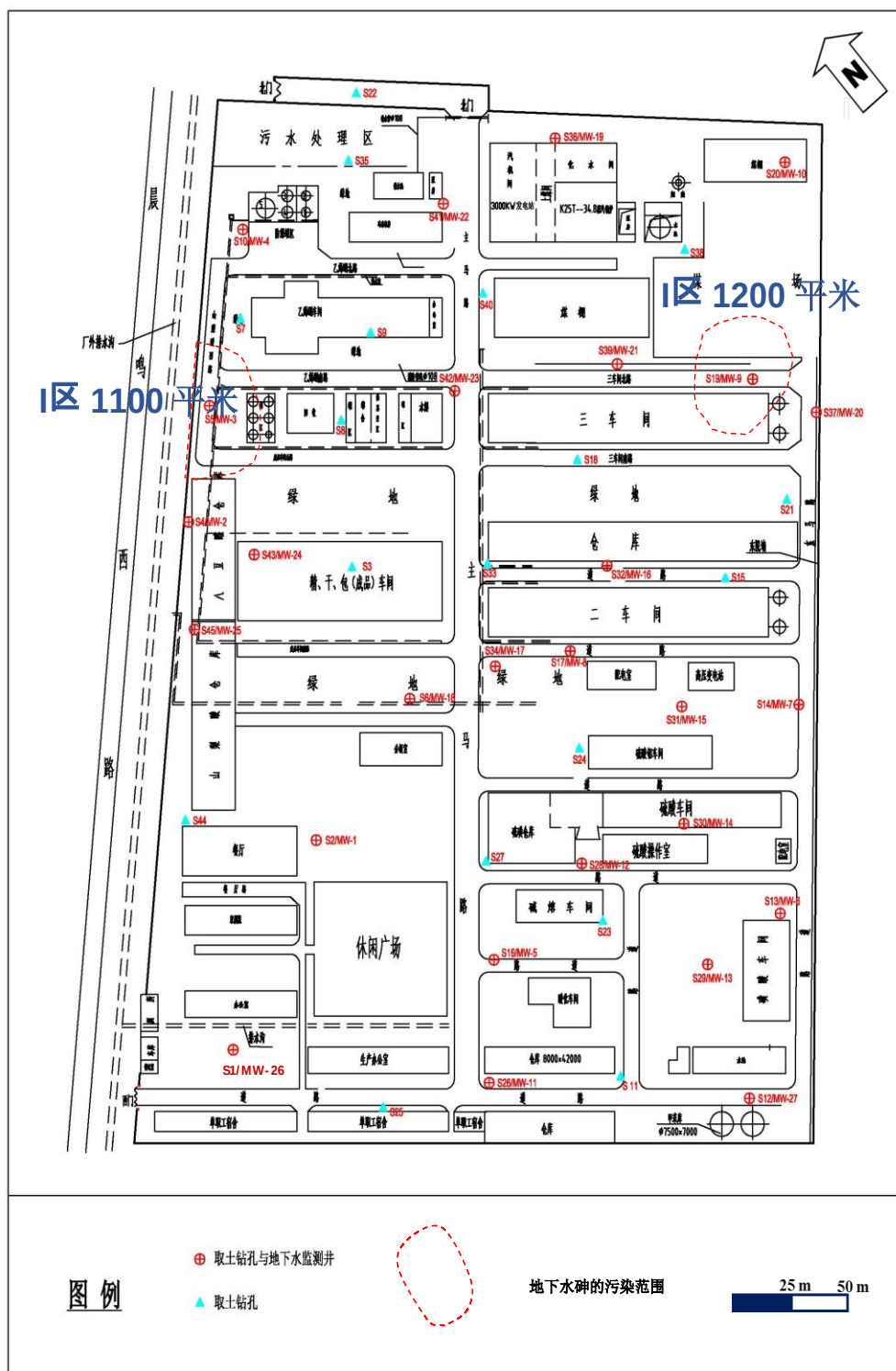


图 2.8-6 地下水中砷污染最终修复区域分布及面积 (0.5mg/L)

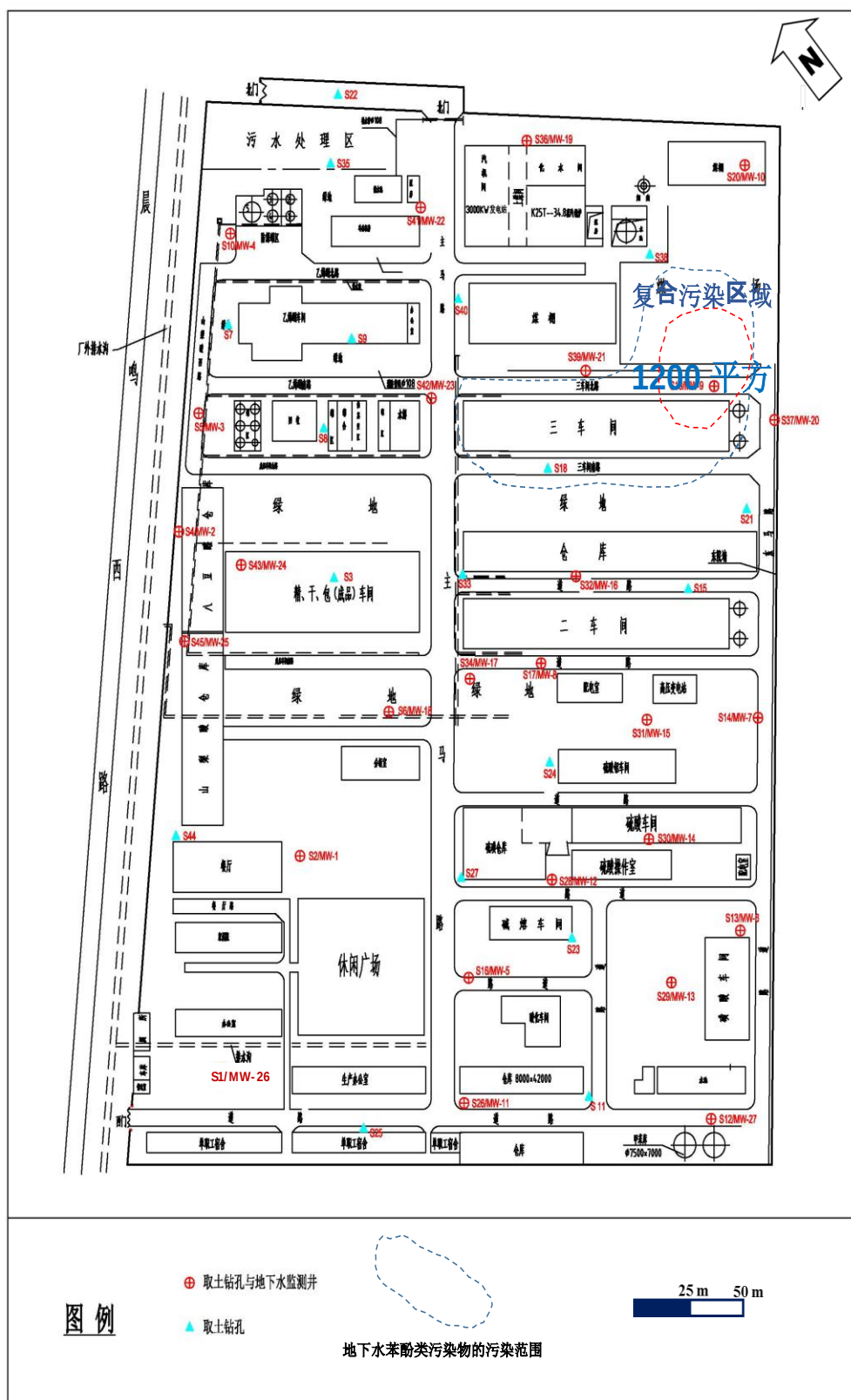


图 2.8-7 地下水中砷（0.5mg/L）和苯酚类污染重叠区域分布及面积

对照每个监测点土壤砷的检出浓度，前期调查报告估计的土壤砷浓度超标范围约为 18800 m²，经过修复前加密调查发现土壤砷污染修复范围见图 2.8-7。土壤砷超标范围约 15840 m²，污染 I 区-VIII 区的污染深度分别从 1 米到 5 米不等，总的修复土方量约为 19160 m³，具体计算见表 2.8-2、表 2.8-3。

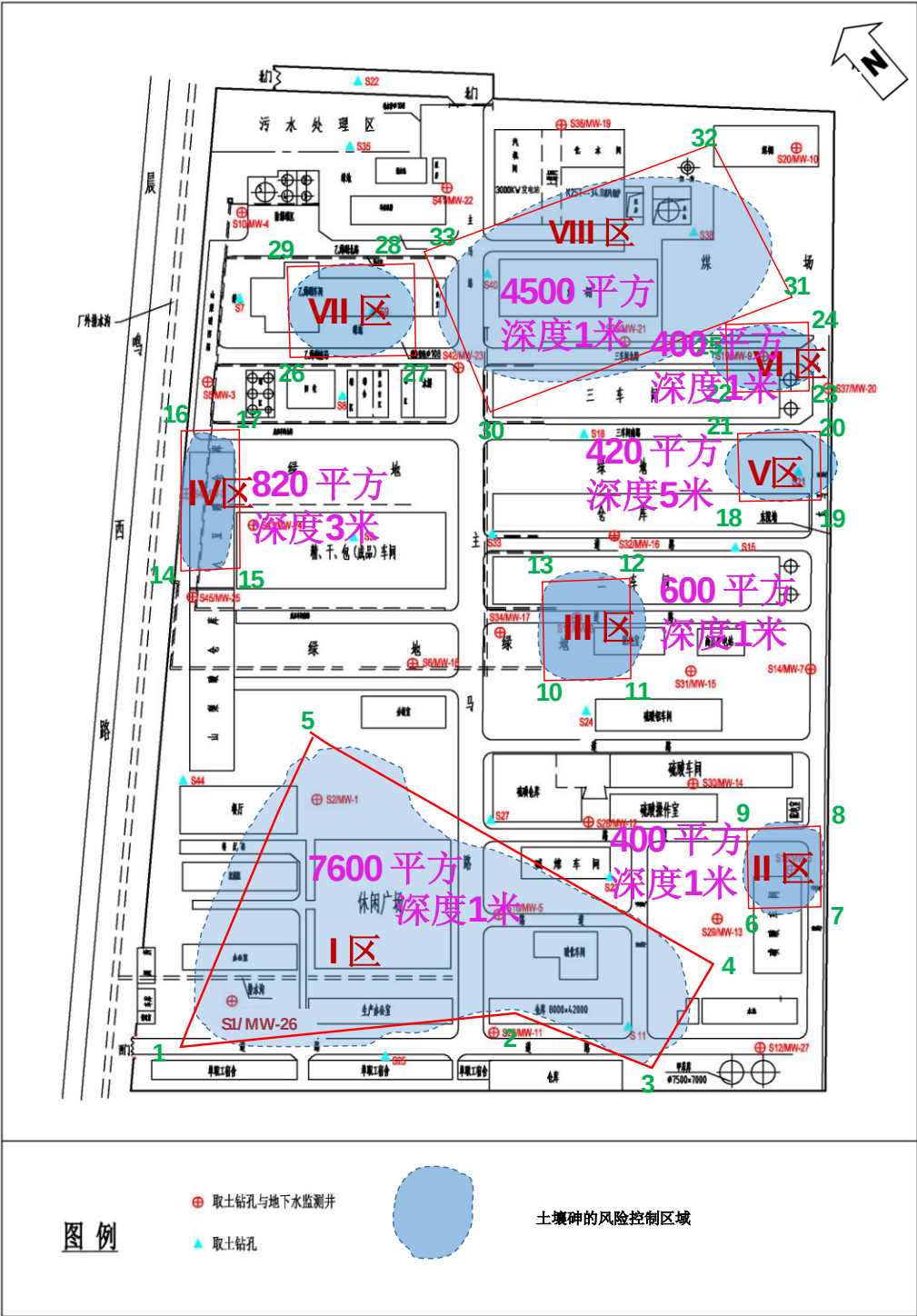


图 2.8-8 最终确定砷浓度超过 20 mg/kg 的各个区域砷污染面积及深度

表 2.8-2 砷污染区域拐点坐标

拐点	x	y
1	477746.8218	4075810.632
2	477842.4	4075792.9
3	477885.4	4075770.4
4	477904.9	4075795.5
5	477797.2	4075883.7
6	477926.24	4075807.53
7	477945.14	4075802.76
8	477950.3	4075823.37
9	477932.74	4075827.76
10	477882.212	4075892.38
11	477901.97	4075887.46
12	477908.79	4075915.25
13	477889.4211	4075920.655
14	477775.9076	4075953.251
15	477793.93	4075947.9
16	477790.37	4075992.91
17	477808.3658	4075988.549
18	477955.03	4075931.27
19	477976.92	4075925.06
20	477981.92	4075943.33
21	477960.5362	4075949.01
22	477963.75	4075965.73
23	477982.1	4075960.76
24	477986.7629	4075977.892
25	477968.6837	4075982.628
26	477830.85	4076016.07
27	477872.2838	4076004.75
28	477878.2492	4076028.612
29	477836.6337	4076038.98
30	477886.0442	4075981.271
31	477977.0474	4075987.465
32	477971.8064	4076038.446
33	477883.3	4076030.05

表 2.8-3 砷污染土壤土方量统计

分区	面积（平方米）	厚度（米）	土方量（立方米）
I	7600	1	7600
II	400	1	400
III	600	1	600
IV	820	3	2460
V	420	5	2100
VI	400	1	400
VII	1100	1	1100
VIII	4500	1	4500
总量	15840		19160

3 场地修复策略选择

根据场地环境调查结果、水文地质参数、土壤中污染物的特性等资料信息确定污染土壤的总体修复模式以及污染地下水的总体修复模式，在污染土壤和地下水的总体修复模式的基础上，根据污染场地的具体情况，筛选适用的土壤和地下水修复技术，并对相关案例进行适用性分析，从适用条件、对本场地污染土壤的修复效果、成本和环境安全等方面进行评估，选择适合本场地使用的土壤和地下水修复技术。

3.1 场地水文地质

该场地地层主要由第四纪冲洪积相堆积物组成，沉积韵律明显，层位较稳定。根据现场调查数据分析。根据场地地质钻探数据，可以将场区内地层分为杂填土层、粉质粘土层、粘土层，具体见表 3.1-1。土壤其他相关参数见表 3.1-2 所示。地下水相关参数见表 3.1-3 所示。

表 3.1-1.金能科技有限公司一区场地地层分布一览表

地层编号	地层名称	地层埋深(m)	污染土壤修复面积(m ²)	污染土壤修复土量(m ³)	主要污染物	地层描述及特征
1	杂填土	0~2.0m	9524	14286	As、苯酚类	灰黑色；粉质粘土为主，杂碎石，灰黑色，湿润，有化学品气味
2	粉质粘土	2~2.8m	1614	1614	As、苯酚类	灰黑色；土质稍硬，可塑，湿到饱和，有化学品气味
3	粉土	2.8~3.4m	3396	3396	As、苯酚类	灰褐色；土质稍硬，稍密，
4	粉质粘土	3.4~5.5m				黄褐色；硬，可塑，湿到
5	粉土	5.5~8.5m				灰褐色；土质稍硬，密实，饱和，轻微化学品气味
6	粉质粘土	8.5~9.0m				黄褐色；硬；可塑；湿到饱和，轻微化学品气味
7	粉土	9.0~9.6m				黄褐色；土质稍硬；密实；饱和，轻微化学品气味
8	粉质粘土	9.6~10.0m				黄褐色；硬；可塑；饱和，轻微化学品气味

3.1-2 土壤相关参数（参考场地调查报告）

参数	数值	参数	数值
土壤颗粒密度	2.16-2.35 g/cm ³	土壤有机碳含量	5-9%
土壤容积密度	1.85-2.01 g/cm ³	土壤 pH	碱性，最高值 12.6
土壤渗透系数	6.94×10^{-5} cm/s- 9.41×10^{-5} cm/s	土壤孔隙率	0.38

3.1-3 地下水相关参数

参数	数值	参数	数值
地下水流向	东南-西北	地下水 pH 值	6.5-8.5
地下水导电系数	330 ~2000μS/cm	地下水氧化还原电位	-14~-92mv

3.2 场地土壤及地下水主要污染物参数

根据场地调查的检测分析结果，土壤中超出相应筛选值的污染物是砷，地下水中超出相应风险值的污染物是砷、苯酚、2-甲基苯酚、3&4-甲基苯酚及 2,4-二甲基苯酚。相应污染物的毒性描述如下：

3.2.1 砷

单质砷无毒性，砷化合物均有毒性。三价砷比五价砷毒性大，约为 60 倍；有机砷与无机砷毒性相似。三价砷会抑制含-SH 的酵素，五价砷会在许多生化反应中与磷酸竞争。氢化砷被吸入之后会很快与红血球结合并造成不可逆的细胞膜破坏。低浓度时氢化砷会造成溶血（有剂量-反应关系），高浓度时则会造成多器官的细胞毒性。人吸入三氧化二砷致死浓度为 0.16mg/m³（吸入 4h），长期少量吸入或口服可产生慢性中毒。在含砷化氢为 1mg/L 的空气中，呼吸 5~10 分钟，可发生致命性中毒。

在食入砷或经由其它途径大量吸收砷之后，肠胃道血管的通透率增加，造成体液的流失以及低血压。肠胃道的黏膜可能会进一步发炎、坏死造成胃穿孔、出血性肠胃炎、带血腹泻。慢性砷食入可能会造成非肝硬化引起的门脉高血压。急性且大量砷暴露除了其它毒性可能也会发现急性肾小管坏死，肾丝球坏死而发生蛋白尿。砷暴露会引起皮肤过度角质化和皮肤癌，在大部分砷中毒的人皮肤上的过度角质化的皮肤病变可以数十年都没有癌化的变化，但是有少部分人的过度角

质化病灶会转变为癌症前期病灶。

不管是急性或慢性砷暴露都会影响到血液系统，可能会发现骨髓造血功能被压抑且有全血球数目下降的情形，常见白血球、红血球、血小板下降，而嗜酸性白血球数上升的情形。

砷还会透过胎盘影响到胎儿。砷中毒的症状可能很快显现，也可能在饮用含砷水十几年甚至几十年之后才出现。这主要取决于所摄入砷化物的性质、毒性、摄入量、持续时间及个体体质等因素。

急性砷中毒急性砷中毒多为大量意外地砷接触所致，主要损害胃肠道系统、呼吸系统、皮肤和神经系统。砷急性中毒的表现症状为可有恶心、呕吐、口中金属味、腹剧痛、米汤样粪便等，较重者尿量减少、头晕、腓肠肌痉挛、发绀以至休克，严重者出现中枢神经麻痹症状，四肢疼痛性痉挛、意识消失等。注意：皮肤癌与摄入砷和接触砷有关，肺癌与吸入砷尘有关。

3.2.2 苯

由于每个人的健康状况和接触条件不同，对苯的敏感程度也不相同。苯主要通过呼吸道吸入（47-80%）、胃肠及皮肤吸收的方式进入人体。一部分苯可通过尿液排出，未排出的苯则会在肝中被氧化为环氧苯。环氧苯与它的重排产物氧杂环庚三烯存在平衡，是苯代谢过程中产生的有毒中间体。苯的代谢物进入细胞后，与细胞核中的脱氧核糖核酸（DNA）结合，会使染色体发生变化，引发癌变和癌症。

在短期接触暴露过程中，苯对中枢神经系统产生麻痹作用，引起急性中毒。重者会出现头痛、恶心、呕吐、神志模糊、知觉丧失、昏迷、抽搐等，严重者会因为中枢系统麻痹而死亡。少量苯也能使人产生睡意、头昏、心率加快、头痛、颤抖、意识混乱、神志不清等现象。摄入含苯过多的食物会导致呕吐、胃痛、头昏、失眠、抽搐、心率加快等症状，甚至死亡。吸入 20000 ppm 的苯蒸气 5-10 分钟会有致命危险。

长期接触苯会对血液造成极大伤害，引起慢性中毒。引起神经衰弱综合症。苯可以损害骨髓，使红血球、白细胞、血小板数量减少，并使染色体畸变，从而导致白血病，甚至出现再生障碍性贫血。苯可以导致大量出血，从而抑制免疫系统的功用，使疾病有机可乘。有研究报告指出，苯在体内的潜伏期可长达 12-15

年。妇女吸入过量苯后，会导致月经不调达数月，卵巢会缩小。

国际癌症研究中心（IARC）将苯确认为致癌物。

3.2.3 苯酚类污染物

（1）苯酚

苯酚对皮肤、粘膜有强烈的腐蚀作用，可抑制中枢神经或损害肝、肾功能。

急性中毒：吸入高浓度苯酚蒸气可致头痛、头晕、乏力、视物模糊、肺水肿等。误服引起消化道灼伤，出现烧灼痛，呼出气带酚味，呕吐物或大便可带血液，有胃肠穿孔的可能，可出现休克、肺水肿、肝或肾损害，出现急性肾功能衰竭，可死于呼吸衰竭。眼接触可致灼伤。可经灼伤皮肤吸收经一定潜伏期后引起急性肾功能衰竭。

慢性中毒：可引起头痛、头晕、咳嗽、食欲减退、恶心、呕吐，严重者引起蛋白尿，可致皮炎。

（2）2-甲基苯酚

亚急性和慢性毒性：将小鼠暴露于含有饱和该品蒸气的空气中，短暂接触看来无害，但反复接触却能引起死亡，大鼠在室温下吸入大致为蒸气饱和的空气以后，尚能存活。

2-甲基苯酚通过破损皮肤、胃肠道及呼吸道的黏膜而吸收。经皮的吸收率主要取决于接触的部位和方式，其次为接触的浓度。2-甲基苯酚吸收后，分布于全身各组织。2-甲基苯酚在体内部分被氧化为氢醌和焦儿茶酚，大部分是以原形或与葡萄糖醛酸和硫酸根结合，主要从尿中排出。2-甲基苯酚三种异构体的吸收、代谢、解毒和排泄速度与酚相似。

酚类为细胞原浆毒，能使蛋白变性和沉淀，对皮肤及黏膜有明显的腐蚀作用，故对各种细胞有直接损害。经口中毒时，口腔、咽喉及食管黏膜有明显腐蚀和坏死，周围组织有出血及浆液性浸润。蒸气经呼吸道吸收时，可引起气道刺激，肺部充血，水肿和支气管肺炎伴胸膜上出血点。吸收入血后，分布到全身各组织，透入细胞后，引起全身性中毒症状。酚类主要对血管舒缩中枢及呼吸、体温中枢有明显抑制作用。可直接损害心肌和毛细血管，使心肌变性坏死。肝细胞肿胀、炎性变化及脂肪变性。肾表现实质性损害和出血性肾炎。还可作用于脊髓，引起阵挛性抽搐和肌束颤动。

(3) 3,4-甲基苯酚

3,4-甲基苯酚对中枢神经有毒害作用，严重时可致死。3,4-甲基苯酚主要经吸入、食入、皮肤接触途径进入人体。3,4-甲基苯酚对皮肤、粘膜有强烈刺激和腐蚀作用，可引起多脏器损害。

急性暴露下，3,4-甲基苯酚会引起肌肉无力、胃肠道症状、中枢神经抑制、虚脱、体温下降和昏迷，并可引起肺水肿和肝、肾、胰等脏器损害，最终发生呼吸衰竭。慢性影响：可引起消化道功能障碍，肝、肾损害和皮疹。

(4) 2,4-二甲基苯酚

2,4-二甲基苯毒性分级属于中毒。2,4-二甲基苯的蒸气能刺激眼睛、皮肤和呼吸系统，误服或经皮肤吸收能导致头痛、眩晕、恶心、呕吐、腹痛、衰竭、昏迷等症状，对皮肤可造成腐蚀性灼伤；并对环境有危害，对水体和大气可造成污染。

3.2.4 关注污染物理化毒性参数

场地关注污染物的主要理化性质及毒性参数见表 3.2-1。

表 3.2-1 场地关注污染物理化性质

编号			1	2	3	4	5	6	7
污染物（中文）			砷（无机）	苯酚	2-甲基苯酚	3-甲基苯酚	2,4-二甲基苯酚	镍	苯
污染物（英文）			Arsenic	Phenol	Cresol, o-	Cresol, m-	Dimethyl phenol, 2,4-	Nickel	Benzene
CAS 编号	N	-	7440-38-2	108-95-2	95-48-7	108-39-4	105-67-9	7440-02-0	71-43-2
类型	T	-	无机	有机	有机	有机	有机	无机	有机
分子量	MW	g/mol	7.49E+01	9.41E+01	1.08E+02	1.08E+02	1.22E+02	5.87E+01	7.81E+01
水中溶解度	S	mg/L	0.00E+00	8.28E+04	2.59E+04	2.27E+04	7.87E+03	0.00E+00	1.79E+03
蒸汽压	Pv	mm Hg	0.00E+00	4.63E-01	3.20E-01	1.40E-01	1.26E-01	0.00E+00	9.50E+01
亨利常数	H	-	0.00E+00	1.36E-05	4.91E-05	3.50E-05	3.89E-05	0.00E+00	2.27E-01
经口摄入致癌斜率因子	SF _o	1/(mg/kg/d)	1.50E+00	-	-	-	-	-	5.50E-02
呼吸吸入单位致癌风险	IUR	1/(mg/m ³)	4.30E+00	-	-	-	-	2.60E-01	7.80E-03
经口摄入参考剂量	RfD _o	mg/kg/d	3.00E-04	3.00E-01	5.00E-02	5.00E-02	2.00E-02	2.00E-02	4.00E-03
呼吸吸入参考浓度	RfC	mg/m ³	1.50E-05	2.00E-01	6.00E-01	6.00E-01	-	9.00E-05	3.00E-02
参考剂量分配比例	RAF	-	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-01
消化道吸收因子	ABS _{gi}	-	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.00E-02	1.00E+00
皮肤吸收效率因子	ABS _d	-	3.00E-02	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01	-	-
空气中扩散系数	D _{air}	m ² /s	0.00E+00	8.34E-06	7.28E-06	7.29E-06	6.22E-06	0.00E+00	8.95E-06
水中扩散系数	D _{wat}	m ² /s	0.00E+00	1.03E-09	9.32E-10	9.32E-10	8.31E-10	0.00E+00	1.03E-09
水体最大浓度限值	MCL	mg/L	1.00E-02	2.00E-03	-	-	-	2.00E-02	1.00E-02
土壤有机碳-水分配系数	K _{oc}	cm ³ /g	-	1.87E+02	3.07E+02	3.00E+02	4.92E+02	-	1.46E+02
土壤-水分配系数	K _d	cm ³ /g	2.50E+01	-	-	-	-	1.60E+01	-

辛醇-水分配系数	K_{ow}	-	4.78E+00	3.26E+01	1.15E+02	1.15E+02	4.05E+02	2.69E-01	9.84E+01
半衰期（一阶衰减）	HL	饱水带 d	-	1.00E+01	1.40E+01	4.90E+01	1.40E+01	-	7.20E+02
		包气带 d	-	1.00E+01	1.40E+01	4.90E+01	1.40E+01	-	7.20E+02
衰减常数（计算值）	λ	饱水带 1/d	-	6.93E-02	4.95E-02	1.41E-02	4.95E-02	-	9.63E-04
		包气带 1/d	-	6.93E-02	4.95E-02	1.41E-02	4.95E-02	-	9.63E-04
传输因子	TF	g/g	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01
EPA 毒性分级		-	A	D	C	C	NA	A	A

3.3 场地土壤修复模式选择

综合考虑场地条件，识别场地污染问题，结合场地污染修复目标以及修复要求，确定污染场地的总体修复模式。在污染场地的总体修复模式的基础上，根据污染场地的具体情况，筛选适用的场地修复技术，并对相关案例进行适用性分析或进行相应的实验室小试和现场中试，从适用条件、对本场地土壤和地下水修复效果、成本和环境安全等方面进行评估，选择适合本场地使用的污染修复技术。污染场地土壤修复技术可按暴露情景和处置地点分类。

（1）按暴露情景分类

土壤修复技术可分为污染源处理技术、暴露途径阻断技术和制度控制措施。对污染源进行处理的技术有生物修复（植物修复、生物通风、自然降解、生物堆等）、化学氧化、土壤淋洗、电动分离、气提技术、热处理、挖掘等；对暴露途径进行阻断的技术有稳定/固化、帽封、垂直/水平阻控系统。降低受体风险的制度控制措施有增加室内通风强度、引入清洁空气、减少室内外扬尘、减少人体与粉尘的接触、对裸土进行覆盖、减少人体与土壤的接触、改变土地或建筑物的使用类型、设立物障、减少污染食品的摄入、工作人员及其他受体转移等。

场地污染修复技术按暴露情景分类完成情况如图 3.3-1 所示。

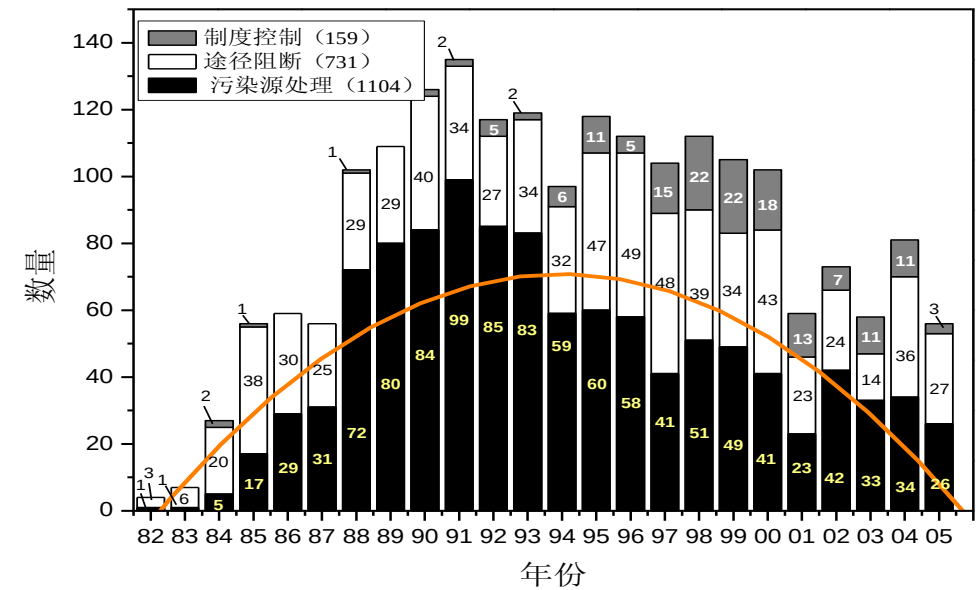


图 3.3-1 场地污染修复技术按暴露情景分类完成情况（1982-2005）

（2）按处置地点分类

可分为原位（in-situ）修复技术和异位（ex-situ）修复技术。原位修复技术又可分为原位处理技术和原位控制技术。异位修复技术可分为挖掘和异位处理处置技术。异位处理处置技术可以按照土壤修复工程是在场地内还是将污染土壤转移到场地外进行修复，可以分为现场（on-site）修复技术和离场（off-site）修复技术。超级基金场地中修复技术按处置地点分类完成情况如图 3.3-2 所示。

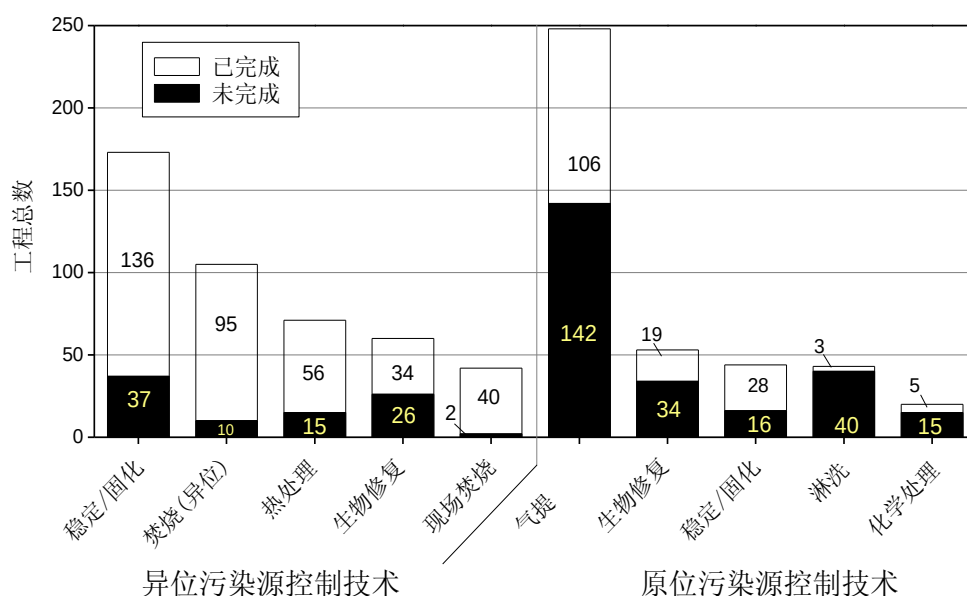


图 3.3-2 超级基金场地中修复技术按处置地点分类完成情况（1982-2005）

①原位处理

原位处理是指对场地内污染土壤不进行挖掘或清理，采用物化或生物方法直接对地下环境中的土壤有机污染物进行处理，或采用物理方法对污染区域进行隔离工程处理。修复工程基本在场地范围内完成，污染土壤在修复过程中以及修复结束后都不离开场地，可有效避免污染土壤挖掘、转移处理可能造成的二次污染。

②原地异位处理

原地异位处理是指将场地污染土壤进行挖掘清理，在场地范围内完成对土壤中污染物的处理，并尽可能在场地内资源化利用。修复工程基本在场地范围内完成，污染土壤在修复过程中以及修复结束后可以不离开场地，可有效避免污染土壤转移处理可能造成的二次污染。

③异地处理

异地处理处置是指将场地内污染土壤进行挖掘清理后，运至场地外的专门场所处理处置。与原位或原位异地处理相比，因涉及污染土壤的挖掘清理、运输、异地堆置和处理，容易造成二次污染，必须在污染土壤转运、存放、处理、处置的全过程进行严格监督，对管理上的要求较高。三种修复模式的主要因素比较及利弊分析见表 3.3-1。

表 3.3-1 三种修复模式比较

因素	原位处理	原地异位处理	异地处理
场地清理时间	—	短	较短
场地清理风险	较低	高	高
对客土的需求	不需要	-	可能需要
运输成本	—	低	高
运输过程风险	—	低	高
堆置成本	—	低	高
堆置过程风险	—	低	高
土壤修复成本	低	中	高
土壤修复时间	较长	短	较短
工程初投资	高	高	低
工程成本	低	高	中
工程实施风险	较大	小	较小
工程实施时间	长	中	短

根据场地的后续使用计划，该场地计划将在 2018 年年初交还给齐河县县政府，用于工业场地开发。由于该地块修复周期时间较紧，场地内酚类污染土方量较少，酚类污染物对微生物有毒性不利于选择微生物修复，综合考虑场地污染分布（较浅）、修复工程实施风险、工程成本、工程实施时间等因素的情况下，推荐采用原地异位处理处置的修复模式。对于砷污染土壤采用原位修复模式。

3.4 场地地下水修复模式选择

相对而言，地下水修复主要采用原位修复技术如原位氧化技术、原位生物强化降解技术、人工监测自然衰减技术、原位电加热技术、渗透性反应墙技术等，原地异位处理技术主要是抽出-现地处理技术，异位处理技术主要为抽出-离地处理。

使用意大利 D'Apollonia 公司与中国环境科学研究院合作开发的 RTSM 修复技术筛选矩阵（Remediation Technologies Screening Matrix, RTSM），针对场地砷与对甲基酚类复合污染地下水修复技术进行了初筛，结果见表 3.4-1。RTSM 软件对本场地地下水修复技术的评分排序见表 3.4-2。自然衰减、化学氧化、空气吹脱和吸附技术为系统辨识的修复效果有限或需要借助其他技术进行补充修复的方法，不建议作为地下水修复的备选技术。其中，抽出处理技术和防渗墙技术为系统默认的永久性安全控制措施，可优先考虑作为备选技术使用。结合金能污染场地条件及国内场地修复的资源、修复周期、技术和经济条件，本方案确定以抽出-处理技术作为本场地砷污染地下水修复技术，以原位氧化作为酚类污染地下水修复技术。

表 3.4-1 RTSM 系统对地下水重金属砷与对甲基酚类复合污染修复技术的赋分排序

修复技术	适用性	成熟性	可获取型	预算投入	可操作性	国内成本	修复时间	总分
抽出处理技术	2	3	3	3	1	3	2	17
自然衰减	1	2	3	3	3	3	1	17
原位化学氧化	1	3	3	2	2	2	3	16
加热修复技术	2	2	3	2	3	2	1	15
防渗墙技术	2	3	2	2	1	3	1	14
空气吹脱	1	3	2	2	1	3	1	13
吸附技术	2	2	0	1	2	1	2	10

注：绿色底纹表示该修复技术为永久性安全控制措施，可作为优先备选技术；
红色底纹表示该技术效果有限或需要进一步处理，不建议采用该技术。

表 3.4-2 RTSM 系统对地下水对甲基酚类复合污染修复技术的赋分排序

修复技术	适用性	成熟性	可获取型	预算投入	可操作性	国内成本	修复时间	总分
原位化学氧化	2	3	3	3	1	3	2	17
自然衰减	1	2	3	3	3	3	1	17
抽出处理技术	1	3	3	2	2	2	3	16

加热修复技术	2	2	3	2	3	2	1	15
防渗墙技术	2	3	2	2	1	3	1	14
空气吹脱	1	3	2	2	1	3	1	13
吸附技术	2	2	0	1	2	1	2	10
注：绿色底纹表示该修复技术为永久性安全控制措施，可作为优先备选技术； 红色底纹表示该技术效果有限或需要进一步处理，不建议采用该技术。								

3.5 污染土壤修复技术筛选

3.5.1 污染土壤修复技术介绍

国内外最常见的有机土壤污染物修复方法包括物理方法、化学方法、生物方法等，如图3.5-1所示。

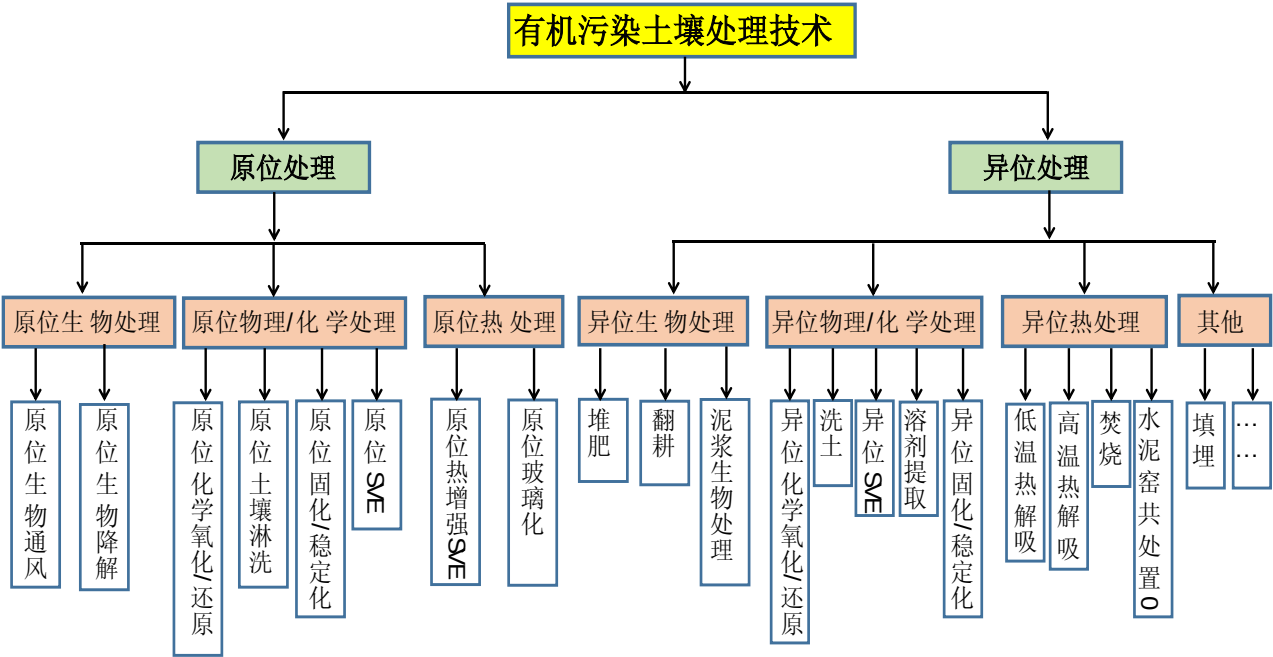


图3.5-1 国内外最常见的有机土壤污染物修复方法

国内外最常见的化工场地砷土壤污染物修复方法包括物理方法和化学方法等，如图 3.5-2 所示。

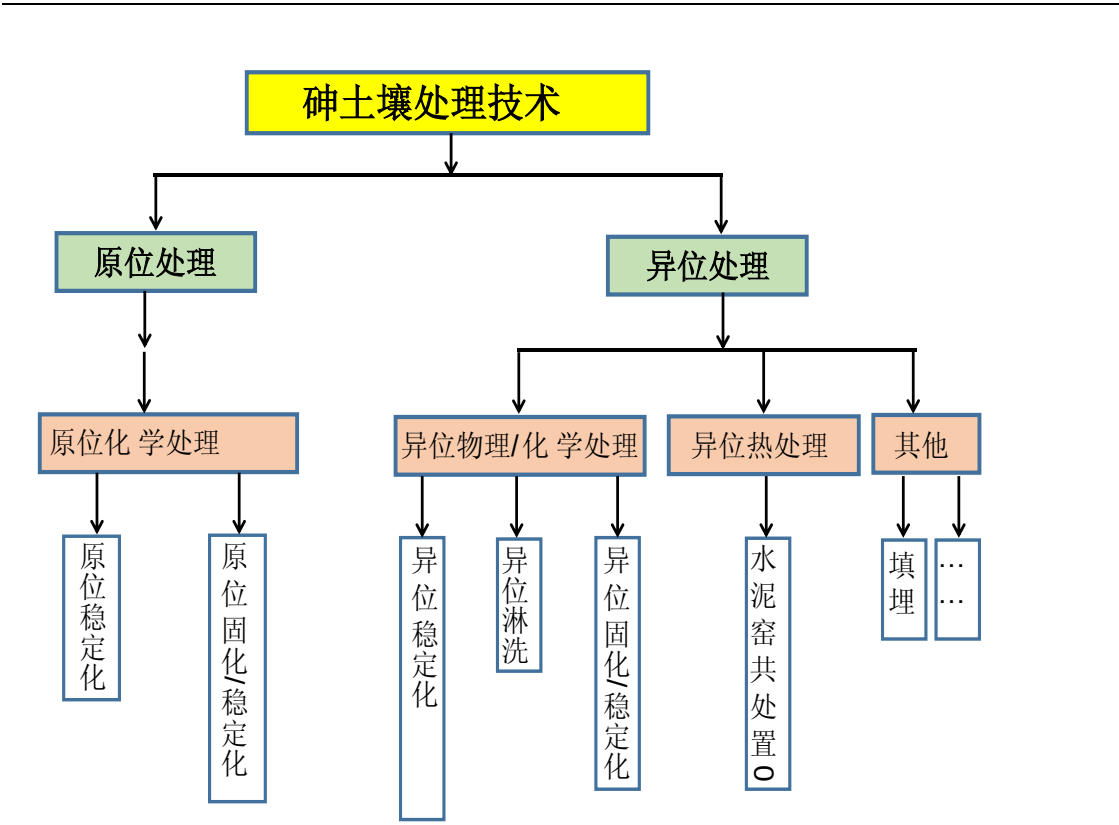


图3.5-2 国内外最常见的化工场地砷土壤污染物修复方法

表 3.5-1 列举了国内外最常见的污染物修复方法包括物理方法、化学方法、生物方法、热方法等污染物修复方法的介绍。

表3.5-1 国内外最常见的污染物修复方法

修复技术	成熟性	实用的污染物类型	土壤质地	成本	脱除效率	修复时间
植物修复	P	a~f	无关	¥	< 75	2 年以上
化学氧化（原位）	F	a~f	不详	¥ ¥	> 50	1~12 个月
化学氧化/还原（异位）	F	a~f	不详	¥ ¥	> 50	1~12 个月
热处理	F	a~f, 除了 c	A~I	¥ ¥	> 90	1~12 个月
土壤淋洗（原位）	F	a~f	F~I	¥ ¥	50~90	1~12 个月
土壤淋洗（异位）	F	b~f	F~I	¥ ¥ +	> 90	1~6 个月
电动	P	e~f	不详	¥ ¥ ¥	> 50	— ⁶⁾
挖掘	F	a~f	A~I	¥	> 95	1~3 个月
帽封	F	c~f	A~I	¥	75~90	6 个月~2 年
稳定/固化	F	c, e~f	A~I	¥ ¥	> 90 ⁷⁾	6~12 个月
垂直/水平阻控系统	F	c~f	A~I	¥ ¥	—	2 年以上
改变土地利用方式	F	a~f	A~I	¥	—	—
移走受体	F	a~f	A~I	¥	—	—

注：1) 成熟性：F-规模应用；P-中试规模。
2) 污染物类型： a- 挥发性；b-半挥发性；c-重碳水化合物；d-杀虫剂；e-无机物；f-重金属。
3) 土壤质地：A-细粘土；B-中粒粘土；C-淤质粘土；D-粘质壤土；E-淤质壤土；F-淤泥；G-砂质壤土：

H-砂质肥土；I-砂土。

- 4) Y = 低成本；Y+ = 低到中等成本；YY=中等成本；YYY= 高成本。
- 5) 修复时间为每种技术的实际运行时间，不包括修复调查、可行性研究、修复技术筛选、修复工程设计等的时间。
- 6)“—”表示不确定
- 7) 对稳定/固化技术，污染物去除率特指土壤浸出液中污染物去除率

3.5.2 污染土壤修复技术选择

根据场地的规划和工程进度安排，该场地将作为工业用地进行使用，且场地的工程建设进度安排比较紧急，污染土壤的处理时间紧迫。因此适于选择处理周期较短的污染土壤修复技术。根据推荐的污染土壤修复模式，使用异位修复方式对酚污染土壤进行处理。国内常见的污染土壤异位处理处置技术有：热脱附、水泥窑共处置、异位土壤气相抽提、焚烧、异位生物修复、异位化学氧化/还原、异位土壤淋洗、填埋等。

3.5.2.1 酚类污染土壤修复技术的选择

从场地的现场调查结果可知，场地内的污染物主要为多环芳烃类有机物污染物，场地土壤以粉土为主。因此从土壤修复模式、土壤污染物类型、土壤类型、修复时间、土地利用计划等方面的要求对污染土壤的修复技术进行初步的筛选。筛选条件如表3.5-2所示，有机污染物土壤修复技术初步筛选矩阵如表3.5-3所示。

表3.5-2 酚类污染土壤修复技术初步筛选条件

筛选因素	内容
土壤修复模式	异位修复
主要土壤污染物类型	苯酚、对甲基苯酚、二甲基苯酚等
主要污染土壤类型	填土、粉土、粉粘土
污染土壤修复土方量	880 立方米
场地内污染土壤清理时间	3-4个月

序号	技术名称	技术简介	应用参考因素				适用性	局限性	结论
			成熟性	时间条件	修复费用	对污染物处理效果			
1	填埋阻隔	将污染土壤挖掘运输到填埋场进行安全填埋	技术成熟/国内应用较	处理速度快，<0.5年	低	污染物未被处理，只是转移位置	适用于迁移性较差的污染物的迁移	无法降低毒性且占地面积大,存在二次污染的风险，挥发性污染物难以密闭填埋，若全部开挖填埋，土方量巨大，对填埋场的处理量有要求	不建议采用
2	高温热脱附	通过加热的方式，使得有机污染物从污染介质上得以挥发或分离的过程	技术成熟/国内已有工程应用	处理速度快，周期短<0.5年	高	好	适用于处理挥发性物质污染的土壤的处理技术	挥发出来的废气需要进行处理，防止挥发物扩散到大气。	不建议采用
3	化学氧化	通过加入氧化剂，利用化学方法使有毒有害物质转化，从而去除污染物毒性	技术成熟/国内外有工程应用	处理速度快，周期短<0.5年	中等	中，达到修复效果比较困难	对于高浓度、难生物降解的有机物降解效率比较高	影响处置效果的主要因素是土壤性质，污染物成分的影响。需要进行系统建设的前期投入，国内确实相关污染土壤接收单位	建议采用

4	溶液浸提	利用溶剂将土壤中的有害化学物质提取出来	技术成熟/国外偶有应用	周期长	中等	好	对于PCBs、石油烃、氯代烃、多环芳烃、多氯联苯、二噁英/呋喃及农药等有机污染物去除效果较好	受现场条件限制,且不适合修复大面积污染土壤,渗透性较差的土壤不适宜使用;需要进行系统建设的前期投入,国内确实相关污染土壤接收单位	不建议采用
5	微生物	应用微生物降解土壤、污泥和固体废物中的有机污染物	技术成熟/国内外有应用	速度慢,周期长	低	差,达到修复效果比较困难	好氧生物可以部分降解低浓度挥发性有机物,设备技术简单,施工运行方便	处理周期长对于高浓度以及不宜降解的有机物效果较差,需要确定降解产物对环境的危害风险	不建议采用
6	水泥窑共处置	利用水泥窑中的高温,将土壤中的有机物焚烧成为无毒无害的CO ₂ 和H ₂ O	技术成熟/国内有应用	处理速度快,周期短<0.5年	高	好	适用于各类复合有机污染土壤,处理比较彻底	受水泥品质限制污染土的添加量低,完全消耗污染土耗时较长,需要对常规水泥窑尾气处理系统进行改造减少二噁英的排放	不建议采用
7	异位SVE	将挖掘出的污染土壤在地面堆放,利用土壤气抽提系统将污染土壤土壤孔隙中的VOCs类污染物抽出进行处理	技术成熟/国内有应用	周期短0.5-1年	低	中,达到修复效果比较困难	适用于各种挥发性和半挥发性有机物的处理	处理效果与土壤的渗透性和污染物的挥发性相关;需要进行系统建设的前期投入,国内确实相关污染土壤接收单位	建议采用

根据上述污染土壤修复技术筛选结果及其适用性和条件限值，同时为了有效清除污染物，达到经济上、时间上和技术上的可行性，综合考虑技术因素、经济因素、时间因素和环境因素，得出本场地有机污染物的修复技术方案。推荐采用原地异位化学氧化和原地异位热强化气相抽提两种方式对本场地酚污染土壤进行处理。

3.5.2.2 砷污染土壤修复技术的选择

砷污染土壤修复技术筛选参照3.5.2.1苯酚污染土壤修复技术的筛选方式，砷污染土壤修复技术初步筛选条件条件如表3.5-4所示，砷污染土壤修复技术初步筛选矩阵如表3.5-5所示。

表3.5-4 砷污染土壤修复技术初步筛选条件

筛选因素	内容
土壤修复模式	原位修复
主要土壤污染物类型	砷
主要污染土壤类型	填土、粉土（浅层土）
污染土壤修复土方量	19160 立方米
场地内污染土壤清理时间	3-4个月

表3.5-5 砷污染土壤修复技术选择矩阵

序号	技术名称	技术简介	应用参考因素				适用性	局限性	结论
			成熟性	时间条件	修复费用	对污染物处理效果			
1	填埋阻隔	将污染土壤挖掘运输到填埋场进行安全填埋	技术成熟/国内应用较广	处理速度快, <0.5 年	低	污染物未被处理, 只是转移位置	适用于迁移性较差的污染物的迁移	无法降低毒性且占地面积大, 存在二次污染的风险, 挥发性污染物难以密闭填埋, 若全部开挖填埋, 土方量巨大, 对填埋场的处理量有要求	不建议采用
2	土壤淋洗技术	借助能够促进土壤环境中污染物溶解或迁移作用的溶剂, 通过将溶剂与污染土壤混合, 然后再把包含有污染物的液体从土壤中抽提出来, 进行分离处理的技术。	技术成熟/国内外有应用	处理速度快, 周期较长, 3-12 个月	中	好	可处理重金属及半挥发性有机污染物、难挥发性有机污染物。不宜用于土壤细粒(粘/粉粒)含量高于 25% 的土壤	处理周期长, 对于高浓度以及不宜降解的有机物效果较差, 需要确定降解产物对环境的危害风险	不建议采用
3	水泥窑共处置	将土壤与水泥生料共处置, 经过回转窑高温煅烧, 可以将污染物分解或固定, 达到无害化处置。	技术成熟/国内有应用	处理周期与水泥生产线的生产能力及污染土壤添加量相关	高	好	适用于污染土壤, 可处理有机污染物及重金属, 不宜用于汞、砷、铅等重金属污染较重的土壤	受水泥品质限制污染土的添加量低, 完全消耗污染土耗时较长, 需要对常规水泥窑尾气处理系统进行改造减少二噁英的排放	不建议采用

4	原位固化 / 稳定化技术	固化稳定化技术是指将污染土壤与黏结剂混合形成凝固体而达到物理封锁（如降低孔隙率等）或发生化学反应形成固体沉淀物（如形成氢氧化物或硫化物沉淀等），从而达到降低污染物迁移性和活性的目的。	国外已经形成较完善的技术体系，应用广泛	处理速度 快， 处理周期 3-6 个月	适中	好	适用于污染土壤，可处理金属类、石棉、放射性物质以及砷化合物等无机物	不宜用于挥发性有机化合物，不适用于以污染物总量为验收目标的项目	建议采用
5	土壤植物修复技术	植物修复主要是利用特定植物的吸收、转化、清除或降解土壤中的污染物，从而实现土壤净化、生态效应恢复的治理技术。	技术成熟 / 国内外均有应用	处理周期长， 3-8 年	低	好	植物修复对于特定重金属（如砷、镉、铅、镍、铜、锌、汞、铬等）具有较好的效果和应用，对于 PAHs、DDT 和 POPs 等污染物也有过先例，	植物修复技术的中间代谢产物复杂，代谢产物的转化难以观测，有些污染物在降解的过程中会转化成有毒的代谢产物。修复植物对环境的选择性强，很难在特定的环境中利用特定的植物种；气候或是季节条件会影响植物生长，减缓修复效果，延长修复期；修复技术的应用需要大的表面区域；一些有毒物质对植物生长有抑制作用，因此植物修复多只用于低污染水平的区域。	不建议采用

根据上述污染土壤修复技术筛选结果及其适用性和条件限值,同时为了有效清除污染物,达到经济上、时间上和技术上的可行性,综合考虑技术因素、经济因素、时间因素和环境因素,得出本场地砷污染物的修复技术方案。推荐可以采用原位稳定化进行处理。

3.6 污染地下水修复技术筛选

3.6.1 污染地下水修复技术介绍

常见的地下水修复技术包括抽出处理技术、原位处理技术、阻隔技术及自然衰减技术等。

(1) 抽出处理技术

抽出处理技术是根据地下水污染范围,在污染场地布设一定数量的抽水机,通过水泵和水井将被污染的地下水抽取上来,然后利用地面净化设备进行地下水污染治理。处理方法可以是物理方法、化学方法、也可以是微生物方法。在抽取过程中,水井水位不断下降,在水井周围形成地下水降落漏斗,是周围地下水不断流向水井,减少了污染扩散。抽出处理过程一般可分为两大部分,即地下水动力控制过程和地上污染物处理过程。

抽出处理技术适用于渗透性较好的土壤饱和层,例如砂质土到粉质砂土。抽出处理技术的适用范围广,对于污染范围大,污染羽埋藏深的污染场地治理比其他技术具有优势;但其局限性在于开挖处理工程费用昂贵,而且涉及地下水的抽提回灌,对修复区干扰大,地下水的抽出可能导致地下水资源的浪费,一方面不利于地下水的补给,另一方面可能产生地面沉降,从而带来严重的影响。当存在非水相液体时,由于毛细张力而滞留的非水相溶液几乎不太可能通过泵抽的办法清除;如果不封闭污染源,当抽水停止时,拖尾和反弹现象严重。除此之外,需要持续的能量供给,以确保地下水的抽出和水处理系统的运行,同时还要求对系统进行定期的维护与监测。

抽出处理技术实施过程中,通过监测地下水水位判断抽提系统的影响半径,通过检测处理前和处理过程中(处理后)的污染物浓度确定修复效果。

(2) 原位处理技术

原位修复技术按照其性质可分为物化修复技术、生物修复技术和集成修复技术，以下是对几种常见的原位修复技术所做的简要介绍。

①原位微生物修复技术

原位微生物修复是借助天然土著微生物或人工培养驯化微生物的吸收、吸附、降解等作用，来弱化环境中的污染物毒性或把污染物转变成无毒物质。其原理是向地下水注射电子供体（针对卤代烃的厌氧生物降解）、电子受体（针对苯系物的好氧生物降解）、营养剂，有时候也会涉及到特定的微生物(bio-augmentation)，以促进污染物的生物降解。通常注射的电子供体包括乳酸盐、乳化的植物油、糖蜜或氢气释放化合物（Hydrogen Release Compound，或 HRC）等，电子受体包括氧气释放化合物（Oxygen Release Compound，或 ORC）等。微生物消解有机化合物，提供自身所需养分和能量，将有机污染物分解为二氧化碳和水。对于重金属污染的地下水，可通过微生物的积累与转化作用修复。经过胞外的络合、沉淀和胞内积累作用，有毒重金属可被储存在细胞的不同部位或结合到细胞外基质上，通过代谢过程，这些离子可被沉淀或被螯和在可溶或不溶性的生物多聚物上。生物修复技术起源于70年代，发展与90年代，最先在美国被应用于海面溢油、河流和湖泊的富营养化、土壤有机污染、地下水系污染等环境修复工程中，但直到20世纪90年代后期，生物修复法还只是应用于处理污染羽中的污染物，后来才开始用于地下水的修复。

根据降解机理不同，可包括厌氧生物降解（卤代烃）及好氧生物降解（苯系物）等。适用于大面积污染区域的治理，成本较低，对环境无害，是生态友好型的环境治理技术。

②植物修复技术

植物修复技术是利用天然植物及其根际微生物的生长代谢去除、转化和固定地下水中的污染物，从而实现地下水净化目的的技术。植物处理方法分为五种：植物根部吸收法、植物吸取法、植物转化法、植物刺激或植物辅助下的微生物降解法、植物稳定法。机理包括强化根际微生物降解、水力控制、植物降解、植物挥发。

植物修复技术可用于多种污染物的处理，包括多数金属和放射性物质，及各

种有机化合物（如卤代烃、BTEX、PCBs、PAHs、农药、杀虫剂、炸药、营养物质和表面活性剂等）。美国空军利用杨树处理 TCE 污染，杨树组织降解 TCE，杨树吸取大量水，产生漏斗，限制 TCE 污染羽的扩散。美国环保署通过终止杨树控制杀虫剂、农药、肥料的运移。

植物修复技术操作简单，成本相对较低；不破坏地质结构，生态风险小；适用于范围较大、污染程度较低的场地的修复。但其使用受环境因素限制；植物对不同类型污染物的耐受差异较大，因此对污染物性质敏感；植物修复的深度通常决定于根系分布状况，而根际有效区域通常较小；植物生长速度通常较慢，因此修复周期也较长。富集了污染物的植物，在修复结束后的处理处置是必须考虑的问题。

③空气注入技术

空气注入技术是修复饱和区有机污染物的一种有效方法，即通过垂直或水平井，用气泵以一定的曝气压力和流量将压缩空气注入地下水饱和区，空气穿过地下水饱和区进入非饱和区，上升过程中挥发性有机污染物不断进入空气中并被带入非饱和区；同时压缩空气中的氧气不断溶于地下水，增加地下水中的溶解氧含量，有利于微生物的活动，加速饱和带、非饱和带有机污染物的微生物降解。空气喷射技术一般与土壤气提技术联用，其他的辅助设施包括水平井建设、土壤加热、热空气/蒸汽注入、营养物质添加等。空气喷射过程中有机污染物的去除机理包括三个方面：1）含水层介质中吸附态和残余态有机污染物的挥发，2）地下水中溶解性有机污染物的气提，3）污染物的微生物降解。

空气注入技术通常用来治理地下饱和带及毛细饱和带的有机污染，比如各种燃料（如汽油、柴油、航空柴油、润滑油和润滑脂、苯系物）、卤代烃等，一般与SVE技术联合使用。适用于粗颗粒的（中等-高渗透性）较均匀的土质，有利于空气在介质中的迁移。

空气注入技术对修复场地干扰小，设备简单，安装方便，已操作，可以利用现有的监测井作为喷射井；修复效率高，治理时间段，一般情况下修复期为1-4年；能够处理毛细管边缘和水位以下的污染物；运行和维护费用相对较低。但其使用受到很多限制，对于非挥发性的污染物不适用，含有自由相时，有的不允许

使用空气喷射，或者是要与自由相回收联用；受地质条件限制，不适合在低渗透率或高黏土含量的地区使用，需要与地下水回收系统或 SVE 联用；需要考虑污染物的深度和场地的地质条件，不能应用于承压含水层及土壤分层情况下的污染物治理；蒸气可能会迁移和释放到地表，进入周围空气中或在建筑物上积累，造成二次污染。

④原位化学氧化技术

原位化学氧化技术是将化学氧化剂通过泥浆或溶剂的形式注入到地下环境中，通过它们与污染物之间的化学反应将地下水或土壤中的污染物转化为二氧化碳、水等无害的化学物质的方法。常用的化学氧化药剂包括过氧化氢、芬顿试剂、高锰酸钾、臭氧、活化的过硫酸盐等等。可与压力破裂、土壤气相抽提方法以及微生物降解等其他修复方法结合起来应用。原位化学氧化技术可应用于石油类碳氢化合物、苯、酚类、MTBE、卤代烃、多环芳烃、农药等在环境中长期存在，难于被微生物降解的污染物质的修复。化学氧化修复效率的影响因素包括氧化剂在地下水中的传输、氧化剂类别、氧化剂投加量、污染物类型及浓度、PH、土壤渗透性、温度、深度、天然有机质和无机还原性物质、氧化剂的分解速率等。

原位化学氧化法化学反应速度快，清除时间短（一般几个月就可以清除干净），反应强度大，对污染物性质和浓度不敏感。原位化学氧化法不需要挖出或移出污染地下水，只需要利用在污染场址中埋设不同深度的通道，将氧化剂注射到地下，因此成本相对较低，污染物彻底氧化后，只产生水、二氧化碳等无害的反应产物，对环境造成二次污染的风险较小。但在渗透性较差区域（如粘土层中），氧化剂传输速率可能较慢；土壤中存在的一些腐殖酸、还原性金属等，会消耗大量氧化剂，从而使氧化剂需要量增加。

⑤原位化学还原技术

原位化学还原技术是将化学还原剂注入到地下环境中，通过还原剂与污染物之间的化学反应，降低对氧化还原电位敏感的污染物的移动性，或利用还原脱氯降解含氯的有机溶剂。常见的还原剂包括二亚硫酸钠、硫化氢、零价铁等。零价铁还原含氯有机溶剂污染物主要是通过 β -消除反应，相比强化厌氧生物降解技术中的氢解反应， β 消除反应反应速度比较迅速，而且由于不涉及到生物降解，

因而其受地下水条件影响要小得多。

原位化学还原技术适用的污染物主要为卤代烃、六价铬等，但场地水文地质条件可能会限制化学物质的传输。一些含氯有机污染物的降解产物仍有一定的毒性，这也会限制原位化学还原技术的使用。

⑥渗透反应墙技术

渗透反应墙是一个填充有活性反应介质（包括还原剂、螯和剂、吸附剂、微生物、营养物质等）的被动反应区，当被污染的地下水通过该反应区时，反应介质能够降解和滞留地下水中的污染组分，并为有毒污染物提供后续处理，从而达到治理污染组分的目的。污染物靠自然水力传输通过预先设计好的介质时，溶解的有机物、金属、核素等污染物被降解、吸附、沉淀或去除。按反应类型，可分为化学沉淀反应格栅，吸附反应格栅，生物降解反应格栅，以及氧化还原反应格栅。按结构形式可分为隔水漏斗-导水门式、连续墙式、灌注处理带式。通常情况下，零价铁是最为广泛应用反应剂，其对常见的有机污染物及无机污染物去除效果较好。渗透反应墙技术主要用于金属（Cr、Mn、Cu、Zn、Pb）、非金属、卤代烃、BTEX、杀虫剂、除草剂以及多环芳烃的治理均适用，而对一些燃料碳氢化合物的效果很差。渗透反应墙适用于埋深较浅的受污染潜水含水层，连续反应墙一般使用在污染羽流横截面较小的情况下，而漏斗—通道系统更适用于污染羽流横截面较大的情况。渗透反应墙的底部应尽量保证位于渗透性比修复区域内土质更低的土层内（如粘土层），以防止污染羽流从渗透反应墙底部绕过而未经有效处理。另外连续反应墙与漏斗—通道系统中的地下水流经路径上应使用渗透性比修复区域内土壤渗透性好的材料。

（3）阻隔技术

阻隔技术常常使用泥浆墙阻隔污染物在地下水中的迁移。泥浆墙通常由土壤、膨润土和水混合而成，由于阻隔受污染的地下水，阻止其进入饮用水源，改变未受污染地下水的流向，并兼做地下水处理系统。通常是在垂直挖掘的沟渠两侧填充泥浆，减少地下水流，阻隔污染物。泥浆墙是一种场地规模的技术，通常与封盖技术联用。

阻隔技术适用于污染物总量较大，且可溶性和可移动的污染组分可能会对饮

用水源造成影响的情况，没有特定的目标污染物。

泥浆墙的阻隔效果受下列因素的影响：最大允许渗透性、预期的水力梯度、所需的墙的强度、膨润土的级别、污染边界、污染物与墙体材料的兼容性、基体的性质（深度、渗透性和连续性）、墙体填充材料的性质以及现场地形和物理布局等。泥浆墙的深度通常小于15m，厚度通常为0.6-1.2m。一种为嵌入墙，通常将0.6-0.9m的泥浆墙安装于低渗透层（粘土或基岩），作为低渗透的结构。另一种形式是悬挂墙，安装于地下水中，组织低密度的悬浮的污染物（油、燃料或气体）的移动。

阻隔技术只能将污染物阻隔在一个特定的区域中；地下水中的酸、碱、盐溶液和一些有机化合物（添加的特殊物质）可能会破坏泥浆墙，从而使阻隔效率降低；效果受污染物类型、活性、分布、墙体的深度、长度和宽度、场地水文地质条件、泥浆及回填材料的类型等影响。

（4）自然衰减技术

自然衰减技术是基于污染场地自身理化条件和污染物自然衰减能力进行污染修复，从而达到降低污染物浓度、毒性及迁移性等目的，另外，还必须根据污染区域的治理目标，采用相应的监测控制技术，对地下水的自然修复过程进行监测评价。监测自然衰减是一种被动修复技术，其机制包括土壤颗粒吸附、微生物降解、地下水中的稀释和弥散。由于突然颗粒的吸附，是一些污染物不会迁移到场地以外，微生物降解是污染物分解的重要作用，稀释和弥散虽然不能分解污染物，但也可以有效地降低场地的污染风险。自然衰减技术于 20 世纪 90 年代开始正式用于地下水污染治理。适用于含氟有机溶剂、石油燃料、金属、放射性核素和爆炸物等各种污染物。一般不会产生二次污染物，对生态环境的干扰程度较小，且工程设施简单，修复费用远远低于其他修复技术；但相比其他地下水修复技术，对区域环境和污染物自然衰减能力要求较高，一般仅适用污染程度较低、污染物自然衰减能力较强的区域。

3.6.2 污染地下水修复技术筛选

地下水修复技术比选见表 3.6-1。

表3.6-1 地下水修复技术比选矩阵

序号	技术名称	技术路线简介	应用参考因素				适用条件	不适用条件	本项目建议
			修复效率	环境风险	时间条件	资金水平			
1	自然衰减技术	在没有人为干预的情况下，地下水中的污染物发生生物降解、吸附、挥发、扩散等作用，污染物的总量，毒性，迁移性、浓度得以减少或降低，污染场地的地下水环境功能得以恢复。	低-中	低	长	低	修复费用低于其他修复技术；不产生二次污染，对生态环境干扰小。	适用于污染程度较低，自然衰减能力较强的区域，受限于地下微生物的活性和污染物的可降解程度，修复期长，过程难以控制。	可考虑与其他方法联用
2	强化生物降解技术	人为加入某些代谢物质，刺激微生物的活性和数量，提高有机污染物的代谢降解效率，从而达到对污染物的有效去除，使地下水环境得以恢复。	中	低	长	中	依靠微生物完成降解，能耗低，降解运营成本小，没有次生和遗留残余物，不需要残留废物处理和污水处理。	技术难度高，控制要求严，进度较慢，不适合城市用地开发要求。	可进一步通过实验探讨可行性
3	可渗透反应墙技术（PRB）	沿地下水流方向，在污染场地下游安置连续或非连续的渗透性反应墙，使含有污染物质的地下水流经渗透墙的反应区，通过地下水与反应墙中添加剂的化学反应达到去除污染物质的目的，并利用 PRB 物理屏障阻止污染晕向下游进一步扩散。	较高，可以有效阻隔地下水污染	低	较长	中	能持续原位处理污染物（5-10 年），处理多种污染物（如重金属、有机物等），处理效果好，安装施工方便，性价比相对较高。	反应堆要足够深度。一般需要与地下水抽出处理系统联用，效果受地下水中酸碱成分，墙体深度，场地水文地质条件等影响。	不建议采用

4	原位化学氧化技术	将化学氧化剂溶液注射项地下水污染区域，氧化剂与目标污染物发生氧化还原反应，污染物被破坏，达到修复目的。	较高	较高	数月到数年	中到高	反应速度快，消除时间段，反应强度大。对污染物性质和浓度不敏感，二次污染风险较小。	在渗透性较差区域氧化剂传输速率较慢；土壤中存在的一些腐殖酸、还原性金属等，会消耗大量氧化剂，从而增加氧化剂用量。	建议采用
5	空气注入技术	空气注入技术是将加压后的气体（通常采用空气或氧气）注射到地下水的饱和带中，以降低吸附在土壤以及溶解在地下水中的可挥发性物质的浓度。	较高	较高	数月到数年	中	对修复场地干扰小，设备简单，安装方便，修复效率高，治理时间短，运行和维护费用较低。	不适用于低渗透率或高黏土含量场地及承压含水层的污染物治理；控制不当能导致地下水中污染羽扩散；蒸汽可能迁移和释放到地表，造成二次污染。	不建议采用
6	抽出处理技术	抽出处理技术是采用水泵将污染地下水从蓄水层抽出来，在地面进行处理净化，使水中的污染物得以去除。一方面可以阻止受污染的地下水向周围迁移，减少污染物的扩散，另一方面抽取出来的地下水在地面得到合适的处理净化，对抽取出来的水中污染物进行去除，然后重新注入地下或做其他途。	初期效果好，后期较差	低	数年到数十年	投资中等，运行成本较高	对于污染范围大，污染羽埋藏深的污染场地治理具有优势；系统运行初期污染物去除率较高，设备简单，易于安装。	适用于渗透性较好的含水层，修复周期长；对修复区干扰大；可能导致地下水资源浪费；非水相液体难以清出干净；存在反弹现象。	建议采用
7	阻隔技术	阻隔技术常常使用泥浆墙阻隔污染物在地下水中的迁移。泥浆墙通常由土壤，膨润土和水混合而成，用于阻隔受污染的地下水，组织其进入饮用水源，改变污染地下水的流向，并兼做地下水处理系统。	较高，可以有效阻隔地下水污染	低	较长	中	泥浆墙施工相对简单，使用的泥浆及回填材料也较为普遍，可有效将污染物阻隔在特定区域中。	泥浆墙底部频进入到低渗透性土层（比如粉土）足够深度。一般情况下需要与地下水抽出处理系统联用；效果受地下水中酸碱组分，污染物类型、分布，墙体深度，场地水文地质条件等影响。	不建议采用

3.6.3 污染地下水修复技术总体思路

本项目的修复目标值为本项目修复的最终目标，修复完成后地下水中的各因子的监测值符合《地下水质量标准》中相应水体功能区的限值要求。本项目地块规划用地为工业用地，项目周边 2.5km 内无集中居民点等敏感目标。结合本项目的实际情况、国内外同类项目的经验及地下水修复技术比选情况，金能科技股份有限公司一场地污染场地修复项目地下水修复将设定砷污染地下水采用抽出-处理技术、酚类污染地下水采用原位化学氧化技术、砷和酚类污染物复合污染地下水采用先抽出-处理后原位氧化的技术。

3.7 污染土壤修复技术可行性评估

3.7.1 酚类污染土壤异位氧化修复技术可行性评估

（1）异位氧化修复技术介绍

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。

适用性：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（详见附件 C，附件场地修复技术目标（第一批））。

成熟度：技术目录已明确指明该技术国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛，在国内也得到了快速发展，并有大量工程案例（详见附件 C，附件场地修复技术目标（第一批））。

选用原地异位化学氧化搅拌工艺，可实现药剂与污染物的充分混合及反应。药剂采用某 K 药剂（主要成分为过硫酸盐及专利活化剂）。主要工序为：定位放线→土方清挖→筛分预处理→土壤倒运至反应池→药剂投加→机械搅拌 7~8 天（pH 值监测）→倒运至待检区反应（氧化剂残留）→验收合格→土壤干化→土壤回填→工程竣工。

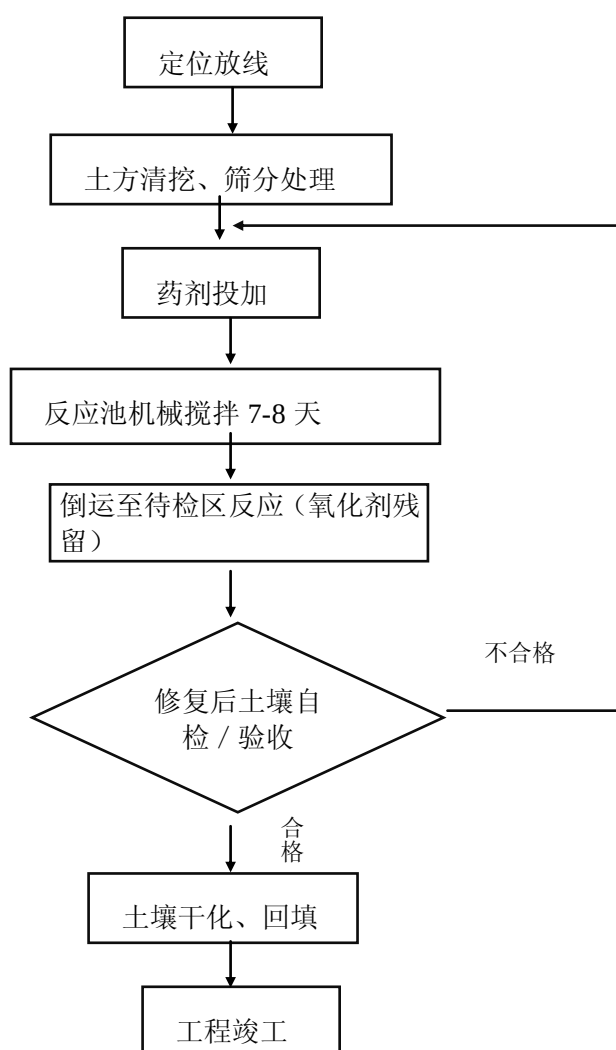


图 3.7-1 污染土壤化学氧化处理工艺流程图

主要使用挖掘机设备，用于土壤挖掘筛分、药剂添加、土壤搅拌、土壤干化处理等。监测仪器有氧化剂残留测试套件、pH 计等。

原地异位反应池化学氧化搅拌费用主要包括反应池建设费用、药剂费用、机

械设备费用、过程监测费用、检测费用等，其中药剂费用占总修复费用的40%~50%。综合分析，项目修复费用为1100元/m³。

污染场地修复技术目录(第一批)中的第二项即明确指出异位氧化适用于处理石油烃、BTEX、酚类、MTBE、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机污染物。

(2) 异位氧化修复有机污染土壤案例及案例介绍

1) 国外的应用典型案例如下表 3.7-1

表 3.7-1 异位化学氧化技术国内、外应用案例

序号	场地名称	修复药剂	目标污染物	规模
1	美国明尼苏达州某木材制造厂	芬顿试剂和活化过硫酸盐	五氯苯酚	656 吨
2	韩国光州某军事基地燃料存储区	过氧化氢	石油烃	930m ³
3	美国马里兰州某赛车场地	某 K 药剂	苯系物、甲基 萘	662m ³
4	加拿大亚伯达某废弃管道场地	过氧化氢	苯系物	8800 m ³
5	广州红云涂料化工厂污染场地	过硫酸盐及专利活化剂	苯系物	近 2 m ³

2) 国内应用案例

该技术在国内外污染场地修复中的应用越来越广泛。如江苏某钢铁厂场地南侧主要污染物为多环芳烃类。其中苯并(a)芘最高检出含量为23.1mg/kg，萘的最高检出浓度为23.2mg/kg，其他污染物浓度在10~20mg/kg之间，污染深度为0~2m。项目采用原地异位化学氧化搅拌工艺处理，处理土方量3500m³。该修复工艺可实现药剂与污染物的充分混合及反应，药剂采用某K药剂（主要成分为过硫酸盐及专利活化剂）。项目苯并(a)芘、萘、二苯(a,h)蒽的修复目标值1.56mg/kg、

2.93mg/kg、1.56mg/kg。施工工期 100 日历天。修复后检验结果合格，场地用于居住用地。

某企业始建于 1958 年，是特殊钢生产基地，场地南侧为焦化厂，场地污染区块主要靠近焦化厂附近，主要污染物为多环芳烃类。其中苯并（a）芘、萘、二苯并（a,h）蒽的修复目标值为 1.56mg/kg、2.93mg/kg、1.56mg/kg。施工工期 100 日历天。采用原地异位化学氧化搅拌工艺处理，处理土方量为 3500m³。场地土壤检出率较高的污染物为苯并（a）芘、萘、二苯并（a，h）蒽、苯并（a）蒽、苯并（b）荧蒽、茚并（1，2，3-cd）芘。其中苯并（a）芘最高检出含量为 23.1mg/kg，萘的最高检出浓度为 23.2mg/kg，其他污染物浓度在 10~20mg/kg 之间。本场地污染深度为 0~2m。本场地表面 1m 左右为素填土，-1.0m~-7.2m 均为粉质粘土。场地内地下水为潜水，初见水位约为-1.5m，稳定水位在-1.0m~-1.8m 左右，地下水受大气降水入渗补给明显。

（3）现场实施异位氧化酚污染土壤的硬件条件

金能科技股份有限公司在拆迁过程遗留下大片水泥硬化的原仓库区域，在此水泥硬化基础上通过铺设防渗膜，现场已经建立了密闭充气大棚，用以作为异位氧化的操作车间。展示如图 3.7-2 所示。





图 3.7-2 现场密闭大棚建设情况

密闭大棚长 30 m，宽 20 m，最高点约 10 m，车间内面积 600 m²，设有一个车辆进出口的大门。密闭大棚大门处预留车辆操作区 5m，其他三面各预留 3 m 布设通风管道。通风出口处设有活性炭过滤层。大棚采用膜结构搭建，由整幅单层多功能膜、铝合金固定卡具、充气风机、止回阀、充气软管及控制装置组成，底部设计圈梁基础保持大棚的整体密封。大棚进出口设置密闭双层门，方便运输车辆进出。大棚设置引流风机将从污染土壤中挥发的污染物集中引致排气筒，废气经排气筒进入除尘、活性炭吸附处理后达标排放。膜材料是阻燃材料，符合消防规定，结构简单，安装周期短，拆除方便。气膜表面覆盖斜向索网系统，提高了气膜建筑的抗大风能力、整体稳定性和安全性。

(4) 现场小试

取场地内 I 区污染土壤，筛分（大于 5 mm 的颗粒筛分出去）、晾干至含水率为 10%，送检测得其中含酚总浓度为 1000 ppm，PID 读数为 108。取 3 kg 土壤加入 120 g 自主研发的高效氧化剂（含有高效催化剂及 H₂O₂），充分搅拌（见下图）。反应 48 小时后，现场取样 PID 检测，读数为 0.8。取样送第三方检测机构检测，总酚浓度降低到 3.6 ppm，没有检测中任何中间产物如苯等。



图 3.7-3 现场人员取样情况

3.7.2 酚类污染土壤异位热强化气相抽提附技术可行性评估

3.7.2.1 热强化气相抽提技术介绍

(1) 技术简介

热强化气相抽提技术（Thermally Enhanced Vapor Extraction Technology-TEVENT）通常用于原地脱除并降解污染土壤中 VOC、PAHs 和 TPH 污染物，其主要原理是基于气相抽提及热处理技术的联合使用。该项技术已经使用了超过 20 年，使用在大量修复案例中，对一系列污染物及不同性质的土壤均有极好的效果。大量案例表明，TEVENT 可以成功、快速地脱除污染中的石油烃类污染物和氯代烃污染物。

TEVET 土壤处理单元包括受污染的土壤堆（该土壤堆中铺设有热空气分布管道系统）和防渗衬垫。土壤处理单元与热强化气相抽提系统相连接。一个标准的 TEVET 系统包括下面几个部分：

- 1) 蒸汽收集和大气分离系统，当抽提出的土壤蒸气流经压缩阀、压缩过滤分离器和热交换器时，土壤湿气被脱离处理。

- 2) 通风系统，通风系统被用于收集土壤气体并将土壤气体送入蒸汽收集系统和加热系统。

3) 加热系统，在加热系统中，空气蒸汽被加热并被通入加热系统的丙烷或液化石油气热氧化，确保关注的污染物组分被热处理掉。

4) 热强化系统，通过高压通风设备向管道中通入加热了的空气。

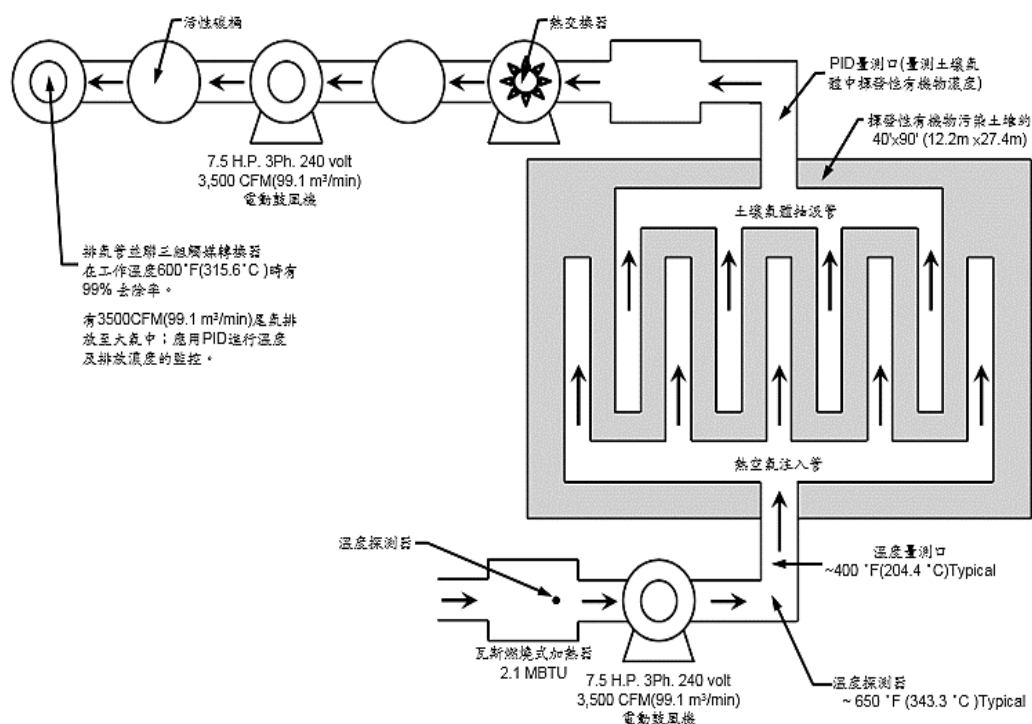


图3.7-4 TEVET技术工艺路线图

(2) 技术适用性

1) 适用污染物类型

适用于挥发污染物及部分碳数小于 28 的半挥发性污染物污染土壤的修复。

2) 应用限制条件

常规气相抽提不宜用于渗透性差或者地下水水位变动较大的场地，但热强化气相抽提技术（TEVET）适用于各种土壤类型。

3) 应用实施过程

通常，使用 TEVET 处理系统修复污染土壤需要经过 4 个过程：



图3.7-5 TEVET 土壤修复过程

a.过程 1-土壤成堆

先将一种防渗膜内衬以周边路边屏障的形式铺设在设计处理区地面上。将有机氯溶剂污染的土壤堆放到渗透膜上。初始土堆的高度设计为 0.5 m 高，随后在此高度的土堆上铺设加热空气分布管道。接着在管道上堆放 0.5m 高土堆，并随后铺设热空气管道回路。土堆最终设计的长度、宽度和高度分别为 25m、12 m 和 2.4 m。随后，在土堆顶部铺设一层防渗内衬并与底部的防渗内衬连接。任何渗透点都需要严格焊接并保证密封性。每次这样一个土堆的土量约为 1000 吨。处理场地需要经过严格筛选。需要保证土方清挖工程与堆土工作的合理安排，每次堆土需要花费的时间约为 2.5 天。

b.过程 2-土壤修复和蒸汽管理

采用燃烧丙烷加热的空气通入土壤堆中，经过土壤并将污染物挥发出来，最终以蒸汽形式在蒸汽管道中。注射到土堆中的空气的温度约为 400 °C。采用一个单独的抽提系统将收集的蒸汽收集并经过压缩箱，随后进入活性炭单元。

根据运行条件，土壤温度可以从环境温度升高到 65°C 到 232°C 之间。通常氯代烃的挥发温度为 80°C 到 120°C 之间。在此加热条件下土壤中的氯代烃污染物可以很容易被强化挥发，达到修复污染土壤的目标。可以预期在春季到秋季这个时

间段，每一拨土壤处理所需要的时间约为 7 天，即使在冬季，处理一拨土壤，也仅需 14 天的时间。系统需要每天 24 小时连续运行，直到修复完成为止。

c.过程 3-为第三方检测提供的土壤取样

当空气蒸汽监控显示修复目标已经达到时，需要对处理后的土壤样品进行取样分析。需要按照通常可以被接受的取样方法取足够量的土壤样品（每堆土壤约取 5-6 个土壤样品），并送到实验室分析，以校验土壤堆是否已经被处理达到修复目标值。这项工作主要是其他第三方及监管部门的工作，但这项工作必须及时。

d.过程 4-土壤堆拆堆

一旦验证土壤修复已经达到修复目标，土壤堆就可以拆堆了，这包括清除土壤堆顶部的防渗内衬以及内部的管网。这项工作需要占用一定面积的场地。拆土堆的工作成本在目前这个概念方案里以 1.5 天的拆卸时间计算的。

（3）运行安全措施

TEVET 系统上安装有自动和紧急开关、丙烷压力开关、通风压力开关、火焰稳定性开关、限制温度超标开关等。

1) 控制和电开关：关闭的面板、满足 NEMA4 项标准、锁定/弹开（LOTO）功能；

2) 温度控制系统：热和冷控制、超出范围情况下的自动关闭、常规温度监控、紧急停止开关、CO 及烟雾探头、灭火器以及防热手套等；

3) 系统管网、电缆、水管：PID/FID/LED 监控、防热 PPE、所有管网上的合适耐热隔膜、CO 和烟雾探头以及紧急停止开关；

4) 气控阀和煤气燃烧器：该单元配备有各种监控、停止燃烧器的控制阀、LEL、CO 及烟雾探头等；

5) 丙烷储罐：每天需要检查储罐及安装在储罐周边的路肩以防治车辆进入、带有标记的灭火器、LEL 仪表、储罐的压力控制仪表等；

6) 通风动力系统：爆炸证据、级别 I。

完成土壤处理后，满足修复目标的修复后的土壤将被回填。取决于被处理土壤的湿度，可能需要向土壤堆上喷淋水以防治土壤太干形成扬尘。

将处理后的土壤回填后，还需要移除地面上铺设的防渗内衬膜以及系统基建等。

3.7.2.2 热强化气相抽提技术案例

(1) 热强化土壤气相抽提技术是一种高效的土壤治理技术，广泛应用于包气带土壤中挥发性有机污染物的去除。在天津某有机污染场地开展射频加热强化土壤气相抽提技术应用研究，研究了射频阳极连接方式对场地加热效果的影响，并考察了该技术对实验场地的实际修复效果。结果表明，射频阳极采用并联方式连接对场地的加热效果较好，加热 10d 后，场地温度升高约 40℃；随着 SVE 系统工作时间的延长，场地温度逐渐下降，土壤气中 TVOCs 的浓度逐渐下降；经过约 2 个月的修复，中浅层土壤中污染物的总去除率约 90%，氯仿去除率达 95%，深层土壤中的污染物去除率约 64%。

(2) 江苏某公司在某搬迁化工厂有机污染场地针对其中的重污染土壤,开展热强化 SVE 修复工程,考察热强化 SVE 技术对此类污染场地的修复效果。结果表明:经过 1 个月的修复,重污染土壤中甲苯、二甲苯两种目标污染物完全达标,通过加热有效提高了土壤中苯系物的去除效率,为类似工程的开展提供参考依据。

3.7.3 砷污染土壤原位稳定化修复技术可行性评估

(1) 砷污染土壤原位稳定化修复技术介绍

重金属原位稳定化修复技术主要是指使用机械设备将重见污染土壤原位破

碎、翻抛并将稳定化药剂均匀搅拌入污染土壤的技术。稳定化药剂主要由沉淀剂、粘土矿物、胶凝材料等多种成分组成,主要通过以下反应原理降低污染物的毒性、生物有效性和生态风险。

1) pH 控制技术: 药剂自身具有强 pH 缓冲能力, 可将土壤的 pH 值调整并维持在大部分重金属阳离子最小溶解度的 pH 范围内。

2) 沉淀与共沉淀技术: 药剂的组分可有效捕捉自由态的重金属离子 (通常为二价重金属离子), 并通过分子间的强化学结合力, 与单一重金属或复合重金属形成最稳定的沉淀物。

3) 吸附晶化包封技术: 药剂具有高空隙结构, 可以将沉淀态和自由态的重金属通过分子间的弱作用力吸附于空隙结构内, 进一步实现稳定化, 并在长时间的凝结组分作用下, 将包封于空隙中的重金属矿化, 固定在稳定晶状体中, 最终实现无害化处理过程。

稳定化药剂已在国内多个重金属修复项目中使用, 并已证明对土壤中的重金属具有良好的稳定化处理效果。

(2) 砷污染土壤原位稳定化修复技术实施案例

上海某地块治理修复工程项目, 占地约 17000 平方米。地块历史上曾作为某化肥生产厂, 由于城市规划需要进行了停产拆除, 拆除后拟规划为住宅用地。通过对场地开展场地环境调查及风险评估工作, 确定该场地内土壤有污染存在, 需进行修复工作。场地土壤中污染物均为重金属铬和砷, 使用异位稳定化技术进行修复。其中砷污染土壤采用的是双药剂进行处理, 首先使用药剂 CCT02 对砷污染土壤进行处理, 然后再将药剂 SMR- II 与土壤进行混合。修复后的污染土进行了采样, 全部样品的浸出液中砷含量均远低于报告限值 0.05mg/L 的要求。该项

目已于 2015 年 4 月已经完工并通过了环保部门的验收。

(3) 该项目砷污染土壤情况说明

本场地中污染物砷为变价金属，分为五价砷和三价砷，三价砷较五价砷毒性更大，迁移性更强。因此，本项目拟选用专门针对砷的特效修复药剂 CCT02，该药剂可将土壤中的三价砷氧化为五价砷，再搭配药剂 CCT01 进行稳定化处理。根据修复药剂与目标污染物反应的化学反应方程式计算理论药剂投加比，同时考虑水分、土壤理化性质等影响因素，预计药剂 CCT02 投加比为 1.8%，药剂 CCT01 投加比为 1%，实际处理中稳定化药剂的投加比例还需要依据土壤实际浓度及土壤膨胀比调整优化。

3.8.1 砷污染地下水抽出-处理可行性评估

(1) 抽出处理技术介绍

抽出-处理技术基本原理是根据地下水污染范围，在污染场地布设一定数量的抽水井，通过水泵和水井将污染地下水抽取上来，然后利用地面设备处理处理 后用原位化学药剂配制药剂用回注回地下。该技术作为污染场地地下水修复以及应急处理的主要技术得到广泛应用。因为抽出-处理技术既可以有效的清除污染物和控制污染羽扩散，达到水力控制的要求，又可以节约很大部分的资金和时间。该技术的修复过程一般分为地下水动力控制过程和地上污染物处理过程。该技术适用范围广，用于有机或重金属污染地下水的处理，见效比较快，修复效率高，对于污染范围大，污染羽埋藏深的污染场地也适用，抽水井的安装也比较简单，成本相对较低。缺点是容易出现拖尾效应，修复效果受诸多因素影响，达到修复目标所需的修复时间可能较长。

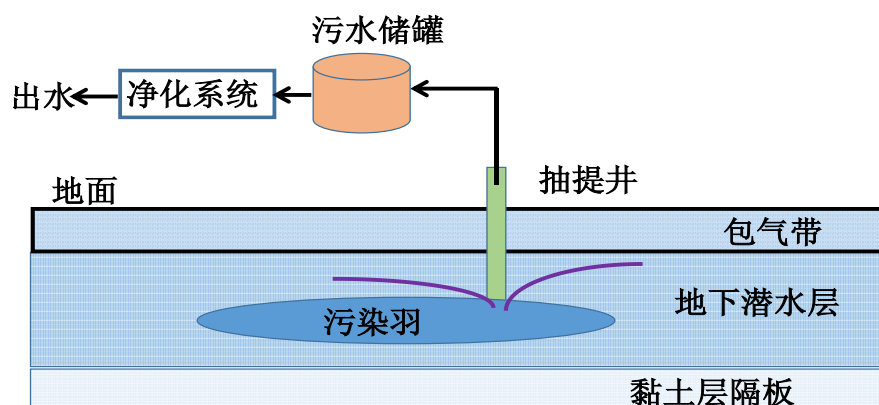


图 3.8-1 污染地下水抽出-处理流程示意图

(2) 抽出处理技术实施案例

该技术在国外已经形成了较完善的技术体系,应用广泛。据美国环保署统计,1982 - 2008 年期间,在美国超级基金计划完成的地下水修复工程中,涉及抽出处理和其他技术组合的项目 798 个。

表 3.8-1 地下水抽出处理技术国内、外应用案例

序号	场地名称	修复药剂	目标污染物	规模
1	美国明尼苏达州某木材制造厂	芬顿试剂和活化过硫酸盐	五氯苯酚	656 吨
2	韩国光州某军事基地燃料存储区	过氧化氢	石油烃	930m ³
3	美国马里兰州某赛车场地	某 K 药剂	苯系物、甲基 萘	662m ³
4	加拿大亚伯达某废弃管道场地	过氧化氢	苯系物	8800 m ³
5	广州红云涂料化工厂污染场地	过硫酸盐及专利活化剂	苯系物	近 2 m ³

(3) 抽出处理技术实施案例介绍

该技术在国内已有工程应用。如某电子企业厂区内土壤和地下水受到了总石油烃类化合物 (TPH) 的污染,该类污染物质主要来源于化学品泄漏和含有污水

的排水系统。该修复工程工期为半年，通过异位修复技术，清除场地内污染源，使场地内的污染土壤和地下水得到有效地治理。修复目标值参考荷兰标准干预值（Dutch Intervention Value），即土壤样品检出的总石油烃不超过 5000mg/kg。经可行性分析，该场地的污染土壤采用挖出-外运处置的方法进行治理，而污染地下水采用抽出-处理和原位化学氧化的方法进行联合治理。工程共修复处理土壤 168m³，地下水 130m³，其中包括 LNAPL（轻质非水相液体）污染物 0.2m³。工程抽出处理工艺流程为抽提井中的 LNAPL 污染物和污染地下水首先通过气动隔膜泵和空压机抽出地面，然后在隔油池内进行分离，分离出的 LNAPL 污染物作为危险废物外运处置，分离出的地下水通过活性炭吸附处理后外运至有资质的废水处理厂处理。最终，在 180d 的运行时间内，抽出-处理系统从 10 口井中总共抽出约 130m³ 流体（LNAPL 和受污染的地下水），其中去除 LNAPL 污染物 0.2m³，修复完成后，监测井中没有观察到 LNAPL 污染物。由结果可知，抽出-处理技术对场地 LNAPL 污染物的去除有较好的效果。后续原位化学氧化处理实施后，地下水最终达到修复目标。由于本场地内部分地下水也受到污染，且抽出一处理技术对于地下水修复效果明显，在国内外都有广泛使用，因此，抽出-处理技术对于本场地地下水污染是适用的。

3.8.2 酚类污染地下水原位氧化修复技术可行性评估

（1）原位化学氧化修复技术介绍

原位化学氧化技术能够对多种污染物进行修复，适用性较广，可以处理石油烃、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。原位化学氧化技术把氧化剂直接注射到地下氧化有机污染物，将其氧化为二氧化碳或低毒的中间体；避免挖

掘及运输过程中产生的污染物逃逸及扩散；能处理大部分难降解有机污染物。此外污染物在原位被处理，避免了开挖或抽取等附加工程，显著降低修复费用。反应周期短，往往快速（几个星期到几个月）、工程量相对较少，通常在处理严重污染场地及地下水方面有成本效益优势，修复过程中不会产生二次污染，且可同时修复受污染的土壤和地下水。不足是需要对场地水文地质条件、污染范围和程度比较明确，强氧化药剂选择不当可能有健康和安全的风险问题。

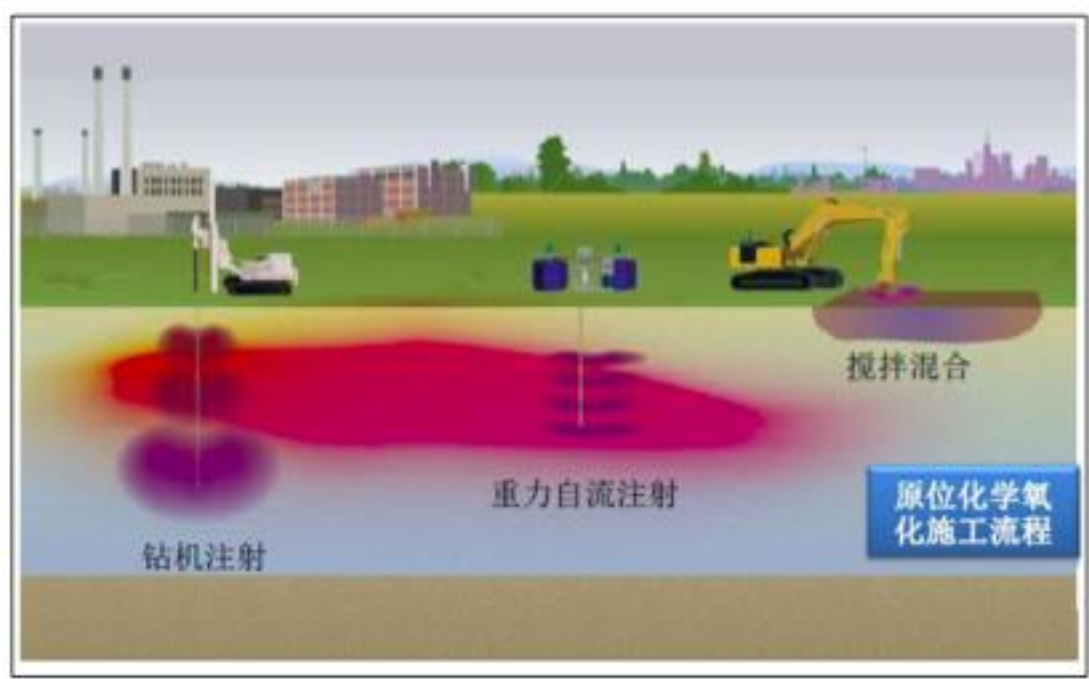


图 3.8-2 原位化学氧化施工流程

(2) 原位化学氧化修复技术实施案例

该技术在国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。

表 3.8-3 原位化学氧化技术国内、外应用案例

序号	场地名称	修复药剂	目标污染物	规模
1	美国明尼苏达州某木材制造厂	芬顿试剂和活化过硫酸盐	五氯苯酚	656 吨
2	韩国光州某军事基地燃料存储区	过氧化氢	石油烃	930m ³
3	美国马里兰州某赛车场地	某 K 药剂	苯系物、甲基	662m ³

			萘	
4	加拿大亚伯达某废弃管道场地	过氧化氢	苯系物	8800 m ³
5	广州红云涂料化工厂污染场地	过硫酸盐及专利活化剂	苯系物	近 2 m ³

(3) 原位化学氧化修复技术案例介绍

原位化学氧化技术在国内发展较快，已有工程应用。如某农药生产场地部分区域存在土壤或地下水污染，主要污染物为邻甲苯胺、对氯甲苯、1,2-二氯乙烷，需要进行修复。土壤污染量约 25000m³，地下水污染面积约 6000m²，深度 18m。土壤中邻甲苯胺、对氯甲苯、1,2-二氯乙烷最大污染浓度分别为 10.6mg/kg、36mg/kg、8.9mg/kg，地下水中邻甲苯胺、1,2-二氯乙烷最大污染浓度分别为 1.27mg/kg、2mg/kg。土壤的修复目标值为对氯甲苯 6.5mg/kg，邻甲苯胺 0.7mg/kg，1,2-二氯乙烷 1.7mg/kg。综合场地污染物特性、污染物浓度及土壤特征以及项目开发需求，选定原位化学氧化技术进行非挖掘区地下水污染治理。修复后地下水中邻甲苯胺和 1,2-二氯乙烷浓度分别低于修复目标值，满足修复要求并通过环保局的修复验收。原位化学氧化技术在国内外使用广泛，既可以单独使用也可以和其他修复技术联合使用，修复效果明显。因此本场地原地化学氧化技术是具有可行性的。

(4) 原位氧化技术说明

原位化学氧化技术说明（详见附件 D“地下水原位氧化相关计算及现场小试结果”）和现场小试结果表明采用自主研发的、以 H₂O₂ 为主要氧化剂的氧化酚类污染物不会带来中间产物污染物，而是直接将酚类污染物氧化为 CO₂ 和 H₂O。

3.8.3 酚类和砷复合污染地下水抽出处理+原位氧化可行性评估

按照上述描述，该场地单一酚类污染地下水区域采用原位氧化技术，单一砷污染地下水区域采用抽出-处理技术。对于场地内存在的一块即存在酚类污染又存在砷污染的复合污染区，拟采用抽出-处理+原位氧化的联合技术进行处理。

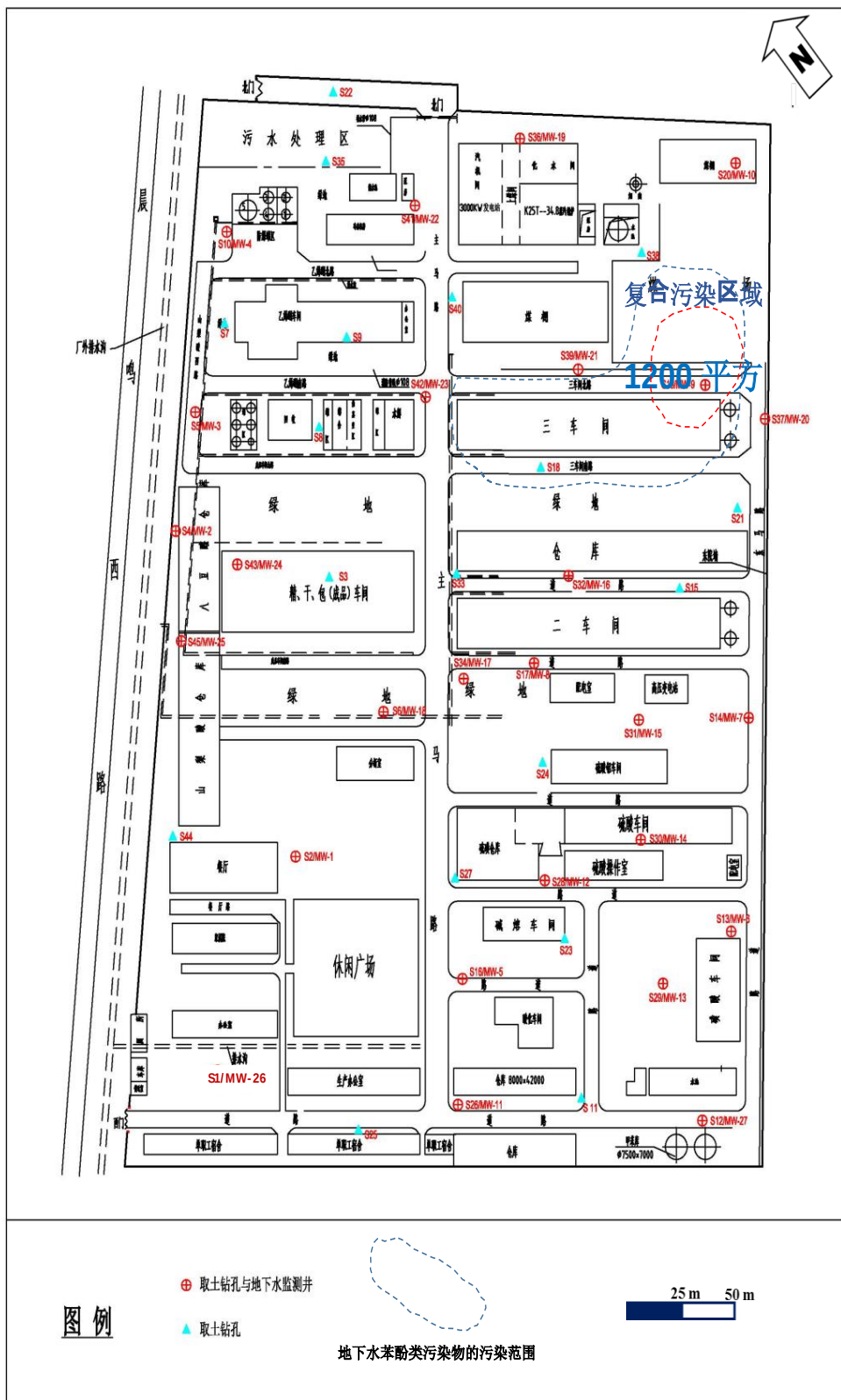


图 3.8-3 酚类污染物和砷污染物同时存在的复合污染地下水区域

因如要彻底清除污染地下水中的砷，可选技术有限，仅限于抽出-处理技术。因此对于含有砷污染物的复合污染地下水区域首先需要采取抽出-处理技术，先将地下水中的砷污染治理达标。在保证砷处理达标期间，虽然也会有一些酚类污染物会被同时抽出-处理，但并不能保证可以将此复合污染区域的有机物治理达标，因此，该区域的地下水修复将使用原位化学氧化修复技术作为补充，确保酚类污染物也可以修复达标。需要补充的是，原位氧化所使用的药剂为自主研发的含有高效催化活性的 H_2O_2 氧化剂，在使用后，场地地下水的 pH 值会有一定程度的降低（主要是 H_2O_2 反应过程中会释放 H^+ ），而该场地由于前期生产工艺过程中使用了大量片碱，导致整个场地的土壤和地下水普遍显碱性（地下水 pH 为 6.5-8.5，90% 的监测地下水样品显示碱性），因此，原位氧化后，复合污染地下水区域的地下水 pH 值将会降低，进而有利于残留砷的稳定（见下图砷的 pe-pH 关系图）。

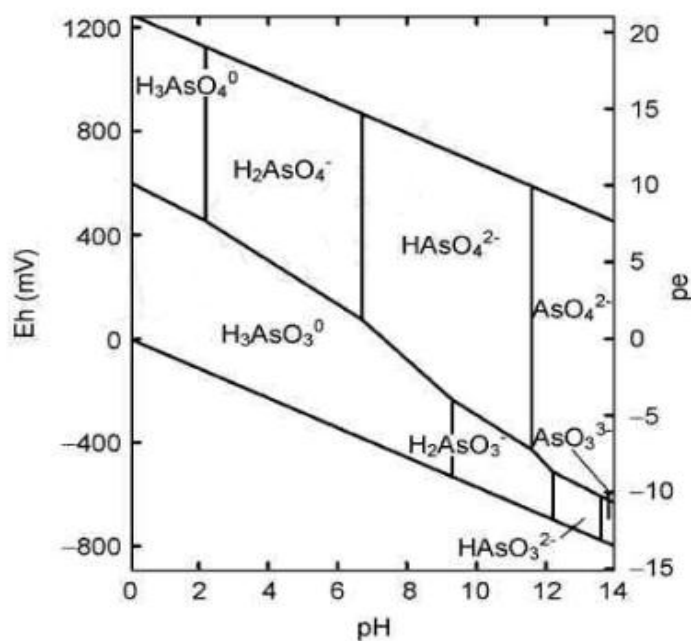


图 3.8-4 砷的 pe-pH 图

国内也有砷和有机污染物复合污染地下水采用抽出-处理+原位氧化的联合技术进行修复的案例，如上海桃浦科技智慧城 621 地块的地下水存在着砷、铅、铜及 TPH、氯乙烯等有机污染物，该复合污染地下水即采用了抽出-处理将重金属污染物修复达标后，继续采用原位氧化技术确保将有机污染物修复达标。

此外，国内宁夏蓝丰精细化工厂有限公司蒸发池地下水污染修复也采取了抽出处理+原位氧化+自然衰减的联系修复技术，以确保修复达标。

4 场地污染土壤和地下水修复技术方案设计

4.1 总体修复方案

该场地污染土壤和地下水修复涉及原位稳定化、原位氧化、抽出-处理、异位氧化等修复技术，整个场地的修复技术路线图如下面图 4.1-1 所示。

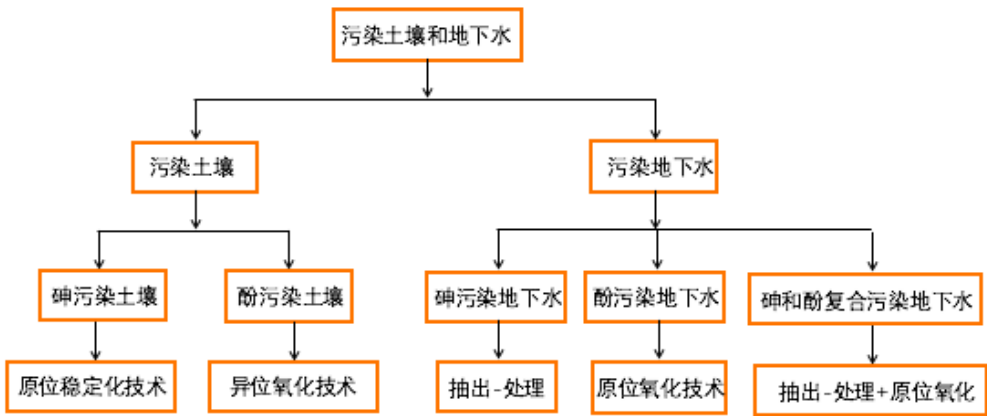


图 4.1-1 污染土壤和地下水修复技术路线

4.2 酚类污染土壤修复

4.2.1 技术路线

综合污染场地的实际污染情况，土地后期规划、开发要求，以及修复技术的

特点，酚类污染场地土壤异位修复包括以下内容：

（1）原地异位修复车间建立

主要包括地面硬化、防渗膜铺设、主体大棚搭建、尾气处理系统搭建等。

（2）污染土壤清理

对场区内需要修复的土壤进行清挖，运送到异位修复车间大棚内。

（3）污染土壤修复

对清挖到修复车间大棚内的土壤进行筛分、破碎、氧化搅拌、养护等处理。

（4）处理后土壤回填

处理后经检测达到修复标准的土壤回填到场地内。

酚污染土壤的修复技术路线如下图 4.1-1 所示。

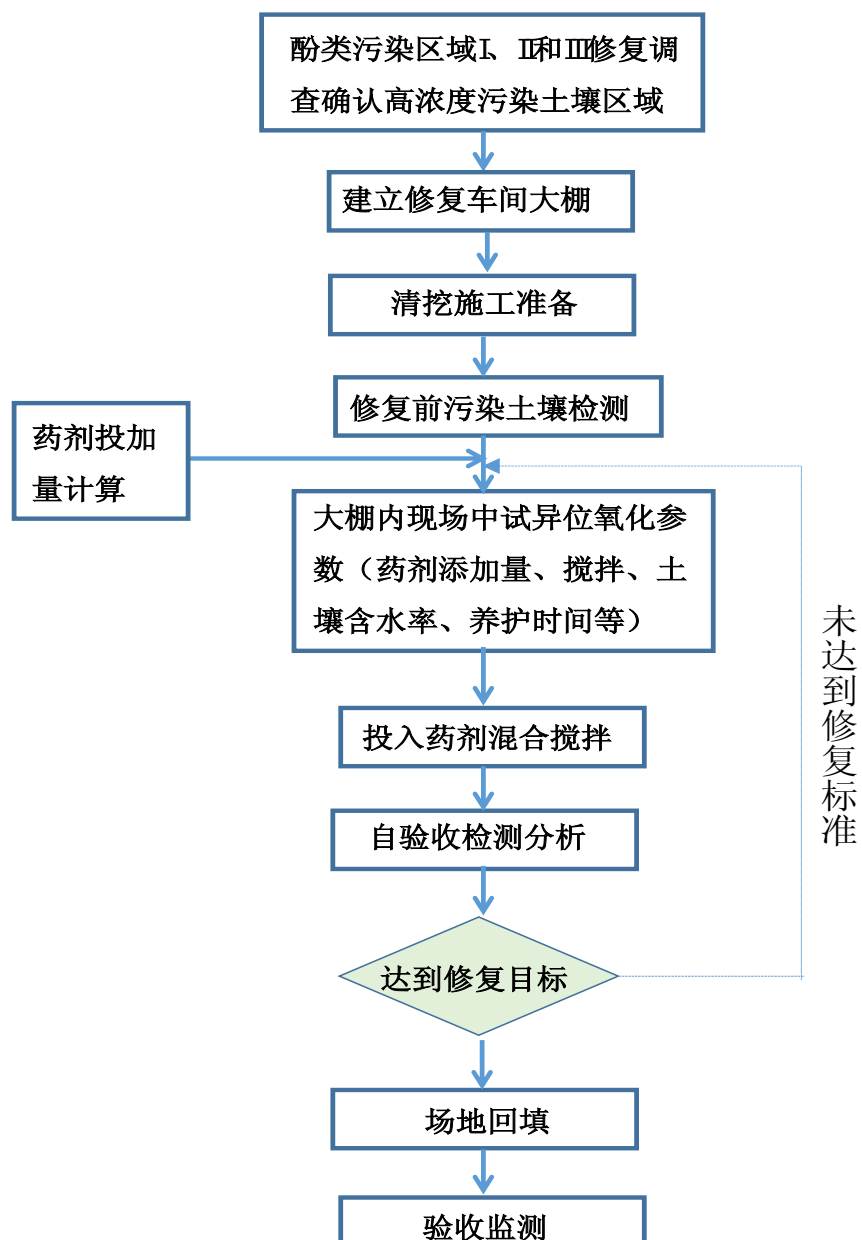


图 4.2-1 酚类污染土壤异位氧化修复技术路线

4.2.2 修复技术工艺参数

4.2.2.1 污染土壤清挖、处理、回填

(1) 污染土基坑的开挖，应先进行测量定位，抄平放线，定出开挖场地，按放污染场地污染土壤清挖。

(2) 大棚内异位氧化处理

影响化学氧化效果的主要工艺参数包括氧化药剂的选择、氧化剂的添加量、

土壤含水率、搅拌时间、土壤颗粒大小、氧化时间等。

按照现场中试结果发现，通过筛分机筛分后粒径小于 5 mm 的土壤颗粒可以被有效氧化；添加质量比为 4% 的自主研发的高效氧化剂连续搅拌 5 小时并氧化 48 小时，可将污染土壤中的酚类污染物降低到修复目标值以下。

（3）处理完回填

处理后的土壤经过检测达标后直接回填现场。

（4）长期监测计划

对处理后回填的污染土壤部分计划进行为期 2 年、每 6 个月取样的长期监测计划。因异位氧化处理的污染土土壤量仅 880 m³，因此，每次监测取土壤样品 3 个。

4.2.3 酚类污染土壤修复工程量估算

金能科技股份有限公司一厂区修复项目场地酚类污染土壤土约为 880 m³，苯酚、2-甲基苯酚，3&4-甲基苯酚，2,4-二甲基苯酚为场地内主要污染物，具体污染范围见图 2.4-8 和图 2.4-9。

4.3 砷污染土壤修复

4.3.1 技术路线

综合污染场地的实际污染情况，土地后期规划、开发要求，以及修复技术的特点，砷污染土壤原位稳定化处理包括以下内容：

（1）场地清理

主要包括地面建筑垃圾清理、地下基础设施破碎清理、地下管网排查清理等。

（2）施工准备

对目标修复范围进行划线确认，药剂进场、强力搅拌头及配套设备进场等。

(3) 污染土壤修复

对目标修复区域进行原位搅拌并喷洒稳定化药剂、养护、再次搅拌稳定化药、养护等处理。

(4) 检测及长期监测

对原位稳定化处理后的土壤取样并进行浸出检测（HJ299），浸出液中砷浓度低于 0.05 mg/L 即为达标，并设计长期监测方法（为期两年，每半年取样检测分析）。

砷污染土壤的修复技术路线如下图 4.3-1 所示。

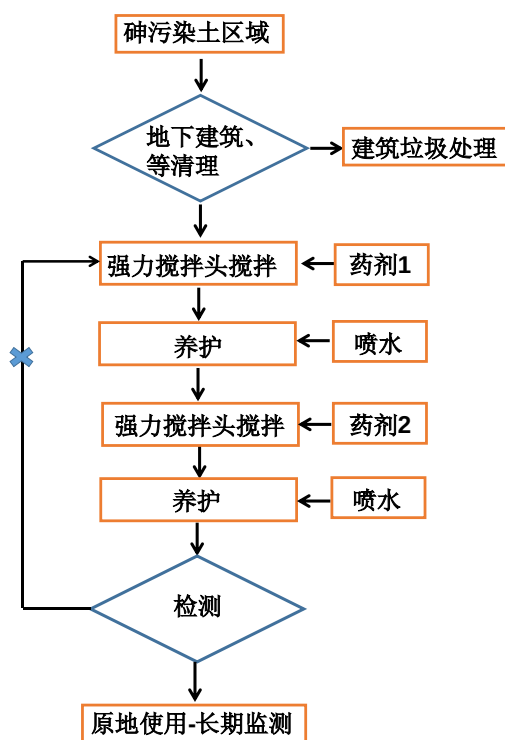


图 4.3-1 砷污染土壤原位稳定化技术路线

4.3.2 修复技术工艺参数

(1) 将药剂1灌入强力搅拌头内，随着搅拌头搅动污染区域的土壤，药剂1

被均匀喷洒到土壤中，与污染土壤混合均匀；

(2) 均匀混入药剂1后，对修复区域养护 72 h，养护时需保持土壤含水率（防止雨水浸入并及时向修复区域表层喷水）；

(3) 在经药剂1处理后的区域，使用强力搅拌头搅动土壤并均匀混入药剂2；

(4) 将混合后的土壤养护7天，养护期间可通过向修复区域表层喷洒水保持含水率；

(5) 养护结束后，取样（连同原土样-空白样）检测土壤中砷的浸出浓度。

4.3.3 砷污染土壤修复工程量估算

砷污染土修复工程量估算如下面表 4.3-1 所示。

表 4.3-1 砷污染土壤土方量统计

分区	面积（平方米）	厚度（米）	土方量（立方米）
I	7600	1	7600
II	400	1	400
III	600	1	600
IV	820	3	2460
V	420	5	2100
VI	400	1	400
VII	1100	1	1100
VIII	4500	1	4500
总量	15840		19160

4.4 砷污染地下水修复

4.4.1 技术路线

砷污染地下水抽出一处理主要包括现场中试确定抽提井的设井（包括井深、井间距、抽水速率、抽水方法等），抽出污染地下水、污水现场处理达标排放等过程。具体技术路线如下图 4.4-1 所示。针对污水抽出处理问题，暂定为现场处理达标技术路线，现场施工阶段需要根据工期进展情况考虑是否需要更改为污水外送处理技术方案。抽出的污水主要含有砷污染物，拟定采用混凝-沉淀（辅助吸附）技术路线处理污水，其中的砷浓度达到污水综合排放标准(GB 8978-1996)中的三级标准 0.5 mg/L 后排放。

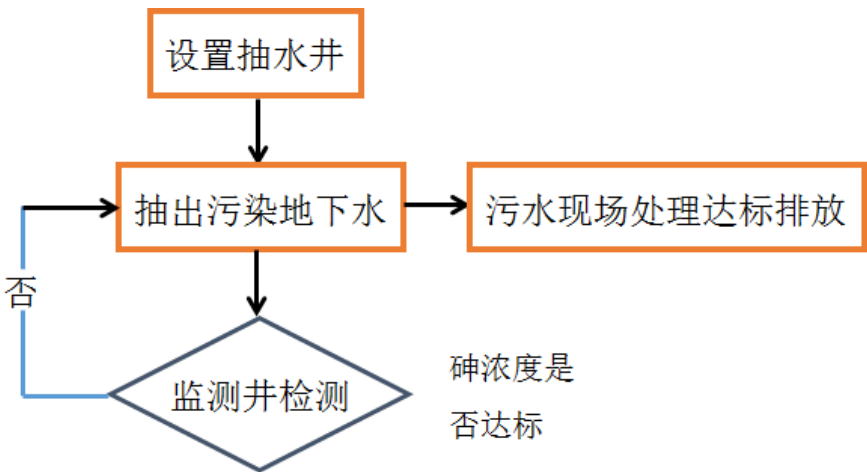


图 4.4-1 砷污染地下水抽出一处理技术路线

4.4.2 修复技术工艺参数

场地中面积为 1100 平方米的单一砷污染地下水区域,按照 12m×12m 的布点设置抽提井。抽提井的深度初步设计为 5.4 米。

抽水过程中将初步按照抽水 24 小时-停止 72 小时的循环模式抽水，抽水及停止抽水时间也会根据工程进展及随着抽水引起的地下水流动的变化做出相应

调整。为了保证抽水行动不会导致污染物扩散到污染边界外，需要保证抽提从污染地下水区域的上游开始依次向下游推进。

4.4.3 砷污染地下水修复工程量估算

场地中面积为 1100 平方米的单一砷污染地下水区域，按照调查报告初步估算水层厚度为 4 米，地下水土壤孔隙率为 0.38，总共需要抽出的污水量约为 2000 方。

4.5 酚类污染地下水修复

4.5.1 技术路线

酚类污染地下水原位氧化修复技术主要包括注药井的建井、药剂注入、监测井检测、效果评估、长期监测等。原位氧化的技术路线图如图 4-4 所示。

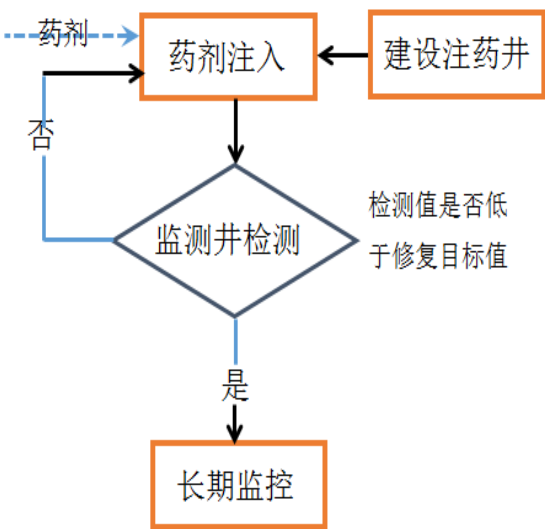


图 4.4-1 酚类污染地下水原位氧化技术路线

4.5.2 修复技术工艺参数

影响原位氧化效果的主要工艺参数包括注射井的布点、氧化药剂的选择、注入的氧化剂的量、注入速率、循环注入药剂的间隔时间、注药井的开筛位置、注药压力等。

经现场中试，该场地内注药井的影响半径为 2 米，采用梅花桩式布井，井与井间的间距为 3.5 米。在 I 区需要布置 90 口注药井（如图 4.4-2 所示）。采用的氧化药剂为自主研发的高效氧化剂，每口井需要注药 3 次，每次注药 320L，注药压力为 1PSI，采用空压机及隔膜泵组合注药，注药速度为 8L/min。注药井的开筛位置在地下 2 米到地下 5 米。

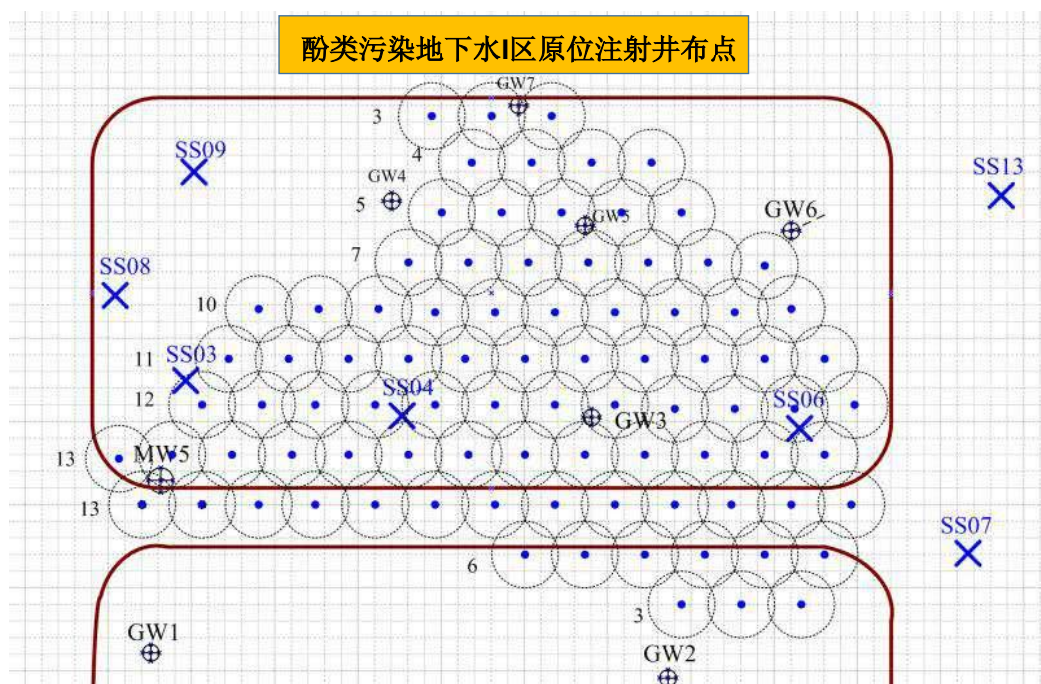


图 4.4-2 酚类污染地下水 I 区原位注射井布点示意图

4.5.3 酚污染地下水修复工程量估算

场地中总面积为 8800 平方米的单一酚类污染地下水区域，按照调查报告初步估算水层厚度为 4 米，地下水土壤孔隙率为 0.38，总共需要处理的污水量约为 14000 方。

4.6 砷和酚类污染物复合地下水修复

4.6.1 技术路线

砷和酚类污染物复合地下水修复技术主要是上述单一砷污染地下水抽出-处

理技术和单一酚类污染地下水原位氧化修复技术的路线组合，具体技术路线如图 4.6-1 所示。针对污水抽出处理问题，暂定为现场处理达标技术路线，现场施工阶段需要根据工期进展情况考虑是否需要更改为污水外送处理技术方案。抽提出的污水主要含有砷和甲基苯酚，其现场处理工艺将主要采取混凝-沉淀及吸附，保证污水中砷污染浓度达到《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）中的三级排放标准（0.5 mg/L）后，采用氧化-沉淀工艺处理污水中的酚类污染物，达到污水综合排放标准中的三级标准（苯酚 1.0 g/L，间-甲酚 0.5 mg/L）后排放处理。

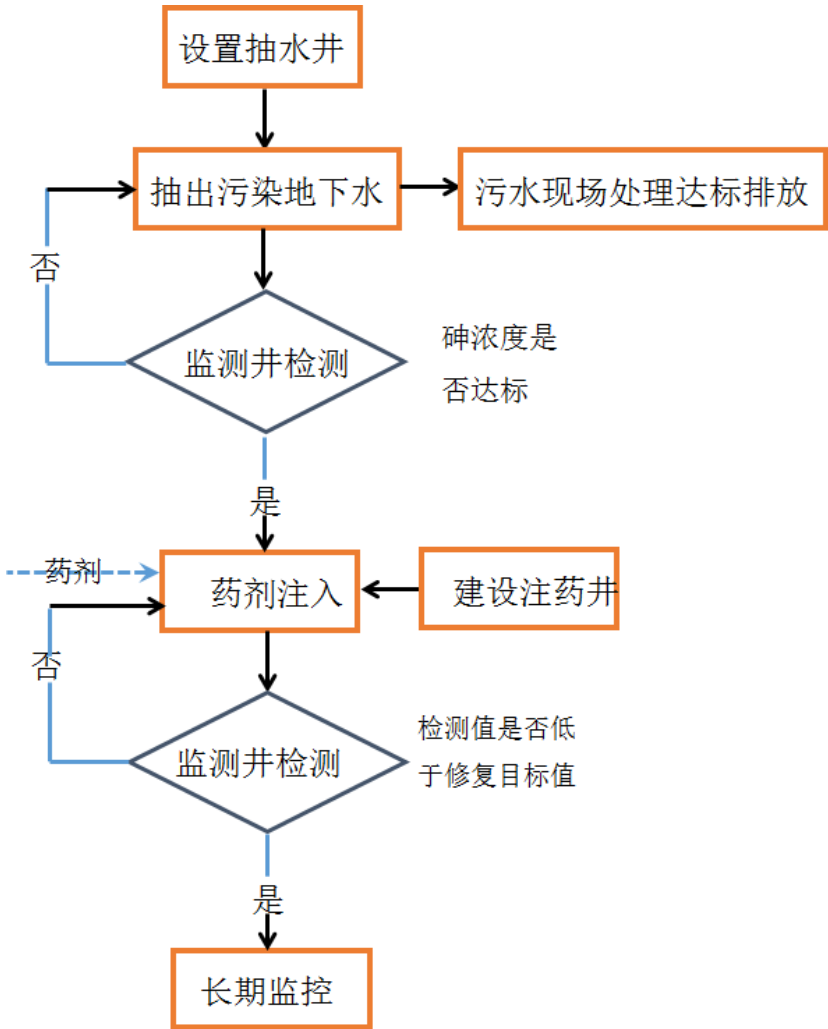


图 4.6-1 砷和酚类污染物复合地下水抽出-处理和原位氧化联合修复技术路线

4.6.2 修复技术工艺参数

因采用的抽出-处理和原位氧化联合修复技术，其中的抽出-处理技术工艺参与与上述单一砷污染地下水采用的抽出-处理技术工艺参数相同，后续的原位氧化技术工艺参数与上述单一酚类污染地下水所采用的原位氧化技术工艺参数相同。

4.6.3 砷和酚类污染物复合污染地下水修复工程量估算

场地中面积为 1200 平方米的砷和酚类污染物复合污染地下水区域，按照调查报告初步估算水层厚度为 4 米，地下水土壤孔隙率为 0.38，总共需要抽出的污水量约为 2000 方。

5 管理计划

5.1 修复工程监理

根据《污染场地修复工程环境监理技术导则 DB11/T 1279—2015》，为了落实本项目的各项方案，对本项目施工期生态保护和预防环境污染及生态恢复进行监督管理，同时对配套的环保工程实施进行监督管理，确保本项目目标的实现。在本项目设计、施工阶段委托有环境工程监理资质的机构进行环境监理，并作为工程竣工环保验收的依据，并配合环保主管部门开展工作。本项目的第三方监理单位为山东环保产业集团，在开始修复施工时，由监理单位根据技术方案进行具体计划的编制。

监理单位作为环境监理单位，需要对本场地污染土壤和地下水修复实施过程开展现场监督，监理工作至修复后土壤达标，以及抽出地下污水外送金能科技有

限公司现有污水处理系统进行处理为止结束。环境监理过程重点关注修复实施过程与专家评审通过的修复方案的相符性、修复过程的二次污染防治情况以及修复后土壤的外运过程，确保该修复工程按照修复方案实施，将对周边环境影响降低到最低。

5.1.1 内容与程序

本项目监理工作具体工作内容如下（程序如图 5.1-1 所示）。

5.1.1.1 施工准备阶段环境监理

（1）资料收集与分析。收集和分析场地调查、风险评估和污染场地修复技术方案等技术资料，收集相关法律法规和技术规范。

（2）现场踏勘。环境监理人员现场考察污染场地现状，重点关注场地施工条件和周边环境敏感区域。

（3）组建环境监理机构。监理单位对该污染场地修复工程环境监理人员进行明确分工，并对责任、权利进行明确规定，确定人员之间互相协作的方式、方法。针对本项目，监理单位需要设置专业的环境监理机构。环境监理机构包括但不限于环境监理总监、环境监理工程师及监理员等，形成职责明确、知识多元化、经验丰富、配置合理、年富力强的团队。

（4）审核施工方案。重点审核修复工程规模、施工工艺、配套二次污染防治措施与修复方案的相符性；审核修复后土壤最终去向。

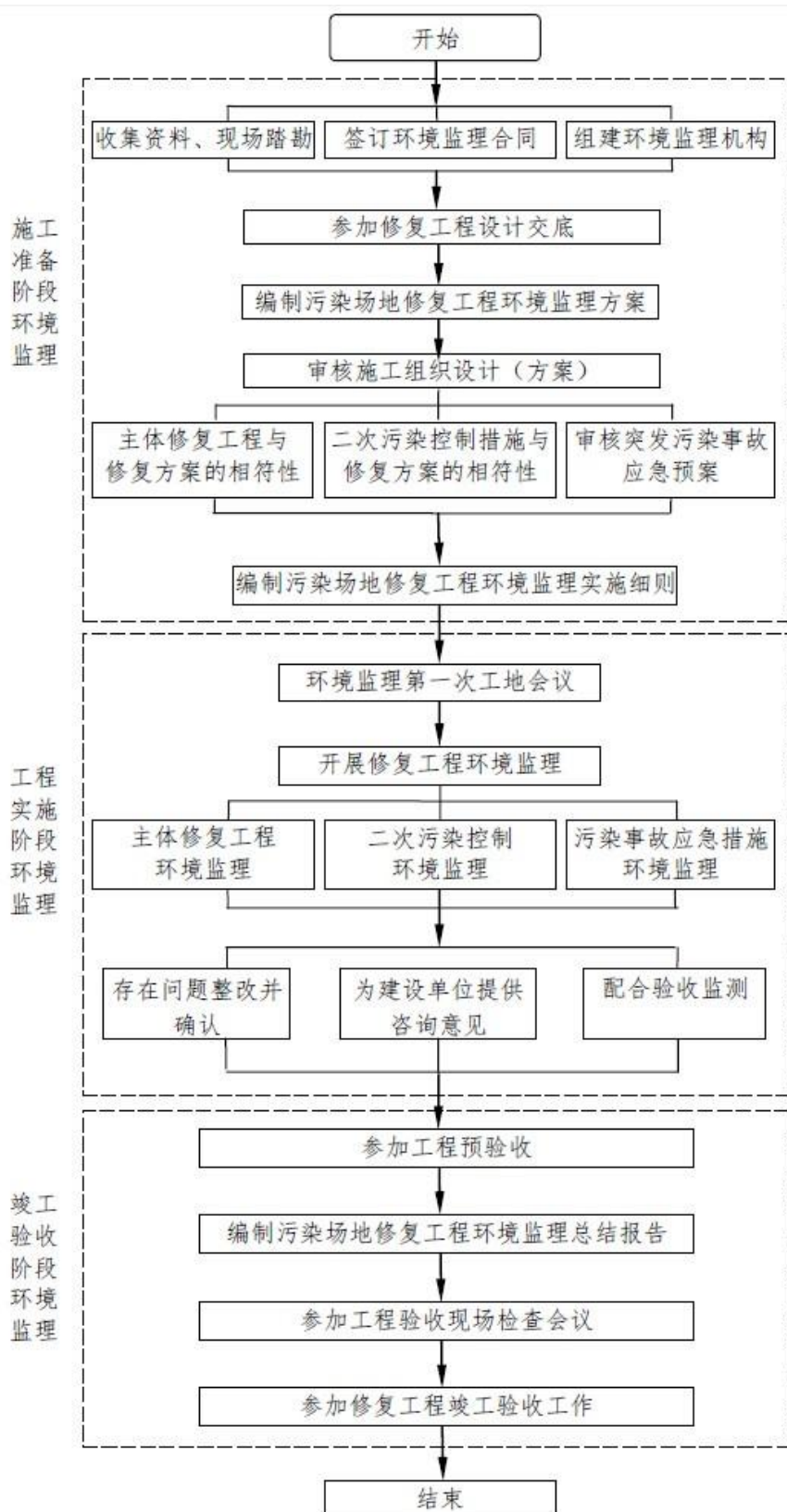


图5.1-1 环境监理工作程序图

5.1.1.2 工程实施阶段环境监理

(1) 主体修复工程环境监理。根据污染场地修复技术方案，监理单位对土壤污染区域拐点坐标进行复查并严格满足修复技术方案要求，处理过程中确保施工人员防护工具安全佩戴，并确保修复工作严格按照施工工艺开展。监理单位需要对施工过程中的监理工作严格记录，作为环境监理总结报告的数据基础。

(2) 二次污染控制环境监理。根据污染场地修复技术方案识别二次污染控制要点，以核查、巡视、旁站、培训、记录、文件、跟踪检查和报告等方式开展环境监理工作。

5.1.1.3 竣工验收阶段环境监理

(1) 参加竣工验收工作。环境监理单位协助业主单位进行修复工程竣工验收监测工作，并提供工程相关档案文件。

(2) 编制环境监理总结报告。

5.1.2 工作方法

本场地修复工程的环境监理应采用以下工作方法：

(1) 核查：依照相关管理文件和技术文件，在修复工程各个阶段对修复工程的实施及二次污染措施的落实情况进行核实和检查。

(2) 巡视：对修复工程施工现场进行的定期或不定期的检查活动。

(3) 旁站：对修复工程的关键部位或关键工序的施工质量进行的监督活动。

(4) 会议：定期或不定期召开环境监理会议，包括环境监理例会、专题会议和现场协调会等。会议由环境监理总监或由其授权的环境监理工程师主持，修复工程相关单位派员参加。

(5) 检测：为掌握日常施工造成的二次污染情况，环境监理单位通过便携

式环境监测仪器进行现场环境检测，辅助环境监理工作。

（6）培训：对修复工程实施单位及其管理和施工人员进行污染场地修复工程专业知识及技能培训。

（7）记录：包括环境监理日志、环境监理巡视记录和环境监理旁站记录。

（8）文件：采用环境监理联系单、环境监理整改通知单、环境监理停工通知单以及环境问题返工或复工指令单等文件形式进行主体工程实施情况和二次污染控制措施落实情况的管理。

（9）跟踪检查：对其发出文件的执行情况进行检查落实，监督施工单位严格执行的过程。

（10）报告：包括环境监理定期报告、专题报告、阶段报告和环境监理总结报告，报告应报送业主单位。

5.1.3 工作制度

本场地修复工程的环境监理应采用以下工作制度：

（1）工作记录制度：环境监理记录是修复工程信息汇总的重要渠道，是项目环境监理机构作出决定的重要基础性资料。其内容主要包括环境监理日志、现场巡视和旁站记录、会议记录以及监测记录等，记录形式包括文字、数据、图表和影像等。

（2）文件审核制度：是环境监理单位对施工单位编制的与污染场地修复相关的工程措施和工程设施的组织设计进行审核的规定。施工单位编制的施工组织设计和施工措施计划等，均应经环境监理单位审核。

（3）报告制度：环境监理单位应结合会议制度和工作记录制度实施环境监理报告制度。环境监理报告包括定期报告、专题报告和阶段报告。

（4）函件往来制度：环境监理工程师在施工现场检查过程中发现的问题，应通过下发环境监理通知单等形式，通知业主单位采取纠正或处理措施。环境监理工程师对施工方某些方面的规定或要求，必须通过书面形式通知。情况紧急需口头通知时，随后必须以书面函件形式予以确认。业主单位及施工方对施工现场问题处理结果的答复以及其他方面的问题，应致函给环境监理单位。

（5）会议制度：包括第一次环境监理工地会议、工程例会、专题会议、现场协调会等。环境监理总监或环境监理工程师可根据修复工程情况不定期召开不同层次的施工现场协调会。会议对具体施工活动进行协调和落实，对发现的问题及时予以纠正。

（6）人员培训制度：开展环境监理现场培训工作，制度化地实施业主单位管理人员和工程施工单位人员污染场地修复相关培训工作。

（7）质量保证制度：为保证和控制环境监理的工作质量，环境监理应严格按照国家及地方有关规定开展工作。环境监理从业人员应按规定持证上岗。环境监理应严格按照监理方案及实施细则进行，并对工程期间发生的各种情况进行详细记录。环境监理相关报告应执行内部多级审核制度。

5.1.4 能力要求

为有效开展本场地修复工程的环境监理工作，其环境监理单位及其相关工作人员应满足以下能力要求：

（1）监理单位：为独立的法人机构，应当熟悉场地污染土壤的防治和修复技术，具有从事土壤污染防治相关工作经验，承担过与本项目相近的污染土壤调查、评价和修复等相关项目。

（2）监理负责人：具有土壤环境保护领域高级专业技术职称，有污染土壤

修复防治等方面 3 年以上的工作或研究经历,并主持过国内与污染场地相关的场地调查、评估与修复的项目。

(3) 监理团队:专业配备齐全。除负责人外,监理团队还需不少于三名从事土壤修复和土壤分析专业的技术人员。

5.2 二次污染防范

场地修复过程中,要严格避免有毒有害气体、废水、噪声、废渣对周围环境和人员造成危害和二次污染。污染防治措施主要包括土壤污染防治、大气污染防治、废水污染防治和噪声污染防治措施等。

5.2.1 二次污染来源及环境影响分析

5.2.1.1 大气环境影响

本项目场地内土壤和地下水的主要污染物为砷和甲基苯酚类,污染物挥发性较低,且污染物在土壤中含量低,挥发到大气中使污染物产生暴露的可能较小,所以地表扬尘和异位修复清挖过程中产生的粉尘是导致污染物暴露的主要途径,易造成人员和环境的危害,因此做好修复过程各生产环节的大气二次污染防治非常重要。

根据本场地修复方案的工作内容及其工艺特点,场地的修复过程可能造成的大气环境影响如下:

(1) 污染土壤清挖、转运、暂存过程土壤受到强烈扰动引起的污染物无组织排放和修复过程密闭大棚的尾气排放;

(2) 修复过程还会产生扬尘,对环境产生一定的影响。本工程施工过程中可能产生的扬尘主要来源于建井和土壤挖掘及运输车辆、施工机械走行车道所带

来的扬尘；施工材料（药剂、砂石料）的装卸、运输过程中造成扬起和洒落、建筑垃圾的堆砌和处理过程中产生的扬尘以及异位土壤修复过程中的搅拌可能造成的扬尘等。

5.2.1.2 污染土壤影响

根据本场地修复方案的工作内容及其工艺特点，场地修复过程可能造成的土壤污染主要来自于以下几个方面：

（1）污染土壤的遗撒污染：在污染土壤的清挖、运输过程中，可能产生遗撒，污染周边土壤或道路；

（2）污染土壤的堆放污染：在污染土壤清挖过程中，临时堆放、污染土壤修复过程中污染土壤的暂存及修复过程中，如果不做好相关区域的地表防渗措施，污染土壤堆置可能造成暂存预处理区、化学氧化施工区和修复待检区等区域地表原有无污染土壤的二次污染。

（3）污染土壤原位修复衍生物污染：土壤中的有机污染物在进行原位化学氧化的反应时，会产生一些中间产物，如苯系物等，选取的自主研发的高效氧化剂在小试过程中并未检测出任何中间产物，但修复施工过程中仍需防控，如不进行适当的监测和防护措施，可能会造成污染土壤及其附近区域二次的污染。土壤中的砷污染土壤进行原位稳定化修复后，土壤中添加稳定化药剂，充分搅拌后，会对土壤原有质地等物理性质造成影响。同时受自然条件影响，稳定化之后的砷存在转变回活跃态的风险，对土壤重新造成污染。

5.2.1.3 噪声环境影响

根据本场地修复方案的工作内容及其工艺特点，场地的修复过程可能造成的噪声环境影响主要来源包括：污染土壤原位修复的建井、药剂配置、药剂注入和

原位搅拌过程，异位修复的清挖、运输、暂存、修复过程，相关的施工机械、施工设备、运输车辆、处理设备等产生的噪音。

5.2.1.4 水环境影响

根据本场地修复方案的工作内容及其工艺特点，场地的修复过程可能造成的水环境影响如下：

（1）修复过程中的废水排放，包括污染土壤修复过程产生的基坑积水、工程机械和筛上物冲洗产生废水。相对来说，工程机械和筛上物冲洗所产生的废水由于其中含有一定量的污染土壤颗粒，其中的甲基苯酚类浓度相对较高，应该重点关注；

（2）修复过程密闭大棚中异位修复土壤的渗滤液；

（3）工作人员的生活污水排放。

5.2.1.5 固体废弃物环境影响

根据本场地修复方案的工作内容及其工艺特点，场地的修复过程可能产生环境二次污染影响的固体废弃物主要为：施工中的包装材料、生活固废等一般固废和饱和活性炭等危废，分类收集并采用不同方式处置。

5.2.2 二次污染防治措施

5.2.2.1 大气污染防治措施

针对本工程中污染物的特点和对人体健康的影响，主要防治措施如下：

（1）采用满足国家 III 阶段排放标准（GB17691-2005）要求的施工机械，防止施工机械产生尾气污染大气环境；

（2）场地污染物为砷和甲基苯酚类，挥发性较差，所以在污染土壤原位修复的过程中，尽量减少扰动强度和作业面、尽可能采用现场喷水雾除尘或表面覆

盖等手段，减少土壤中污染物的扩散；

（3）氧化剂等运输过程中，运输车辆应进行苫盖，运输线路尽量避开人口密集区，并减少期间停留时间；

（4）化学氧化剂原料为粉末状物质，搬运及配置过程中会产生扬尘，应将氧化剂原料一次性固定保存，除配制外不进行其他搬运，配制中动作应迅速，减少扬尘的产生；

（5）对甲基苯酚采用原场异位化学氧化技术进行修复，在对对甲基苯酚进行清挖时，清挖后立即喷水和洒水降尘，并喷洒气味抑制剂，使污染物不能随土壤粉尘扩散至区域外围，扬尘污染基本可忽略。（洒水和喷洒气味抑制剂如图5.1-2所示）；



图5.1-2 洒水及喷洒气味抑制剂

（6）施工区人员污染物携入，针对施工区人员鞋帽、工作服等携带污染物扬尘造成的二次污染，项目部将办公区与作业区进行隔离，并保持安全距离。同时，在办公区外设置洗鞋池、工作间以及更衣室、淋浴间等，现场施工人员在完成工作后需要在工作间进行清洗方可进入办公区。在工作间，施工人员需要脱掉防护服、呼吸器具和手套等防护装备。所有使用完毕的防护设备需要进行收集，一次性防护服和手套按照当地规定处理，不可和生活垃圾放在一起。呼吸器具和其它非一次性器材应被彻底清洁后置于洁净的存储区域。至少每天清洁一次呼吸器。将面罩拆卸下来，扔掉滤盒，将所有其它部件置于清洗液中；

(7) 治理区域边界处无组织废气执行《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996) 无组织浓度监控限制。居民区大气环境质量符合《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中二级标准。

5.2.2.2 土壤污染防治措施

为防止车运输过程可能造成污染土壤的遗撒，针对运输过程中的环境因素，具体防范措施如下：

根据本项目土壤转运路线，土壤的运输路线为汽车运输，由项目现场使用汽车将对甲基苯酚污染土壤短驳转运至密闭大棚。为避免运输过程中由于场地内临时道路颠簸，造成土壤遗撒，采取了多重措施，避免污染土壤直接暴露在大气环境中。

(1) 施工组织设计统一指定的机械行驶、车辆运输路线；

(2) 运输司机证件由项目部备案，并接受项目部的安全教育，注意行驶安全，一般情况下禁止快速行驶与突然快速启动或制动；

(3) 按照环保要求，计划针对本项目污染土采取自卸车运输；污染土壤装车后，覆盖苫布，防止遗撒和淋雨，进行全封闭运输；

(4) 所有运载污染土壤的车辆均需帆布覆盖防护，车速平稳控制 20 km/h 以内。同时组织巡视及环保小组，配清运车进行跟车监测，实行实时监测控制，特别注意临时道路拐弯处及可能产生紧急停车等容易造成遗撒处。配备充足的清扫工具及铺盖材料，发现遗撒及时清理干净。自觉接受监理单位的监督管理，一旦发现遗撒，及时组织人力清扫，并迅速冲洗干净。

(5) 堆存期间，污染土壤中的污染物存在迁移至周围土壤的风险，造成交叉污染。为防止交叉污染，堆存车间地面铺设防渗层，防止污染物的迁移。防渗

层设计为 HDPE 膜+土工布的防渗结构，HDPE 膜厚度 2 mm，幅宽为>6.5 m，土工布 400 g/cm²，钢筋混凝土厚度 200 mm。其防渗透系数可到达 1.0×10^{-8} cm/s，确保本项目土壤堆存期间不会产生交叉污染。

（6）原位修复酚类污染土壤在药剂注入阶段对表层土壤产生扰动，可能会造成少量扬尘和污染物扩散，需进行洒水和喷洒气味抑制剂防止其扩散；在药剂注入阶段和后期养护阶段，使用便携式 PID 检测仪器进行实时快速监测，实时监测数据超标时，需要通过减小原位修复扰动作业面积、喷洒气味抑制剂等方法保证污染物或氧化反应中间产物不能扩散到空气中；原位氧化的养护期对污染区域及其周边土壤进行样品采集，并送第三方检测单位进行样品检测，检测指标为苯系物等中间产物，确保原位氧化修复过程中的反应中间产物不会造成二次污染；原位修复后，修复区域土壤收到扰动，土壤孔隙率、承载力等物理性质受到影响，修复施工完成后，会将原位修复区域拐点坐标提交给业主单位，后期建设施工单位可根据原位修复区域范围，按照未来用地规划进行土地夯实或清挖。

5.2.2.3 噪声防治措施

（1）控制噪声措施

1) 加强施工管理，尽量降低施工现场噪声，如合理安排强噪声施工机械的工作频次，合理调配车辆来往行车密度，做好劳动保护工作，为强噪声源的施工机械操作人员配备必要的防护耳塞或耳罩等。

2) 尽量选用低噪声的机械设备或带隔声、消声的机械设备，对大型机械采取一定的防噪措施。严格控制噪声的产生，使噪声污染限制在最小程度并做好隔声、消声处理，确保工地场界外噪声符合相关标准。

3) 做好施工机械的维护和保养，有效降低机械设备运转的噪声源强，避免异常噪音的产生。

4) 严格执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011), 定期对施工场界环境噪声进行监测。

(2) 控制人为噪声

施工现场提倡文明施工, 建立健全的控制人为噪声管理制度, 尽量减少人为的大声喧哗, 增强全体施工人员噪声扰民的自觉意识。

(3) 控制作业时间

1) 合理安排施工作业时间, 避免在夜间进行施工作业。根据实际情况, 如需进行晚上施工的, 应经过业主许可并事先向当地环境保护部门提出申请, 得到批准后方可进行夜间施工。

2) 特殊情况需连续作业(或夜间作业)时, 须采取有效的降噪措施, 并事先做好当地居民的工作。

(4) 控制施工环境

在修复工程施工过程中, 机械作业产生的噪声需定期监测。测量时尽量选择无雨雪、无雷电天气, 风速为 5 m/s 以下的气候, 且选择在场地平坦、无大反射物的场地中进行监测。按照《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB 12523-2011) 中规定, 测点应设在厂界外 1 m, 高于围墙 0.5 m 且距离噪声敏感点最近的位置。采用积分平均声级计测量, 监测方法和治理过程中噪声排放控制严格按照《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB 12523-2011) 执行(如表 5.2-1 所示)。

表5.2-1 噪声监测指标

控制项目	昼间	夜间
场界	70	55
居住区	60	50

5.2.2.4 水污染防治措施

施工期间, 基坑积水、抽出处理地下水、土壤渗滤液、生活污水等抽入场地污水处理设施, 处理达标后市政管网排放(如表 5.2-2 所示)。

(1) 地表浅层积水、抽出处理地下水。本项目场地调查发现地下水中存在一定的污染，并且对甲基苯酚异位修复清挖施工过程中会形成较大基坑，因降水可能产生一定量废水，基坑降水不得直接排放，需要和污染地下水一同处理后方可排放，要求施工企业将这些废水收集后经场地临时污水处理设施，达标后排入市政管网。

(2) 土壤渗滤液

对甲基苯酚污染土壤在密闭大棚中进行异位化学氧化修复，在药剂搅拌后的养护期间，会有少量渗滤液流出，渗滤液废水需要收集后经场地临时污水处理设施处理达标后方可排放。

(3) 生活污水

生活污水厕所、淋浴室污水进入化粪池后，再进入厂区污水处理站处理；项目兼职环保管理员与当地环卫部门联络，定期对化粪池进行清理。办公区所有的污水，均应经过沉淀池后，再进入厂区污水处理站处理。项目委托分包单位定期清理沉淀池内的泥沙。

表5.2-2 《污水排入城镇下水道水质标准》（CJ 343-2010）B等级

控制项目名称	单位	B等级
pH值	-	6.5~9.5
悬浮物	mg/L	400
化学需氧量（COD）	mg/L	500
总砷	mg/L	0.5
苯系物	mg/L	2.5

5.2.2.5 固体废弃物污染防治措施

场地固体废弃物包括施工中的包装材料、生活固废等一般固废。

(1) 施工现场设立专门的封闭式废弃物临时贮存场地存放一般固废储存区，废弃物分类存放，对有可能造成二次污染的废弃物必须单独贮存、设置安全防范措施且有醒目标志；

(2) 施工现场设置若干活动垃圾箱，派专人管理和清理，做到日产日清。

办公区生活垃圾实行袋装，专人集中运送至垃圾房，并及时组织外运；

(3) 禁止在工地焚烧残留的废物或将废物随意堆放；

(4) 场内废弃物统一集中管理，废弃物的运输确保不遗撒、不混放，送到政府批准的单位或场所进行处理、消纳（场内进行分检），不污染土地，控制率达 100%；

(5) 可回收的废弃物做到再回收利用。

5.3 工程验收监测

5.3.1 文件审核与现场复察

(1) 文件审核

1) 审核资料范围

在验收场地开展之前，应收集与场地环境污染和修复相关的资料，主要包括：

①修复方案相关文件：场地修复方案及其备案意见、其他相关资料。

②场地修复工程资料：修复过程的原始记录、修复实施过程的记录文件、修复设施运行记录、二次污染物排放记录、修复工程竣工报告等。

③工程及环境监理文件：工程及环境监理记录和监理报告。

④其它文件：环境管理组织机构、相关合同协议（如委托处理污染土壤的相关文件和合同）等。

⑤相关图件：场地地理位置示意图、总平面布置图、修复范围图、污染修复工艺流程图、修复过程照片和影像记录等。

2) 审核内容对收集的资料进行整理和分析，并通过与现场负责人、修复实

施人员、监理人员等相关人员进行访谈，明确以下内容：

①根据风险评估报告、修复方案及相关行政文件、确定场地的目标污染物、修复范围及修复目标，作为验收依据。

②通过审查场地修复过程监理记录和监测数据，核实修复方案和环保措施的落实情况。

③通过审查相关运输清单和接收函件，结合修复过程监理记录，核实污染土壤的数量和去向。

（2）现场复查

现场复察是验收的重要工作程序之一，污染场地修复验收现场复察主要包括核定修复范围和识别现场遗留污染痕迹。

1) 核定修复范围

根据修复过程环境监理出具的相关报告，确定场地修复范围和深度，核实修复范围是否符合场地修复方案的要求。

2) 识别现场遗留污染

对场地表层土壤、遗留物品等进行观察和判断，可使用便携式测试仪器进行现场测试，辅以目视、嗅觉等方法，识别现场遗留污染痕迹。

5.3.2 修复效果监测

根据《场地环境监测技术导则》（HJ25.2-2014）和《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》的相关规定，本项目工程治理质量验收将由业主单位委托有资质的第三方检测单位，督查施工工程量和施工资料的完成情况，确保按照施工组织设计施工，污染土壤有效治理，规范管理，各环节资料齐全，

避免二次污染。验收工作小组在监理单位的监督与见证下完成资料文件审核与现场复察后，明确验收对象和标准，制定采样布点方案，并向监理单位报审，经监理单位同意后在监理单位的旁站见证下进行现场布点采样与送检，根据第三方有资质的检测单位的检测报告数据进行验收对象的修复效果评价，如果修复不达标，则识别不合格区域，确定修复方法，继续治理，修复后再组织自验收，直到验收合格为止（验收工作流程如图 5.3-1 所示）。

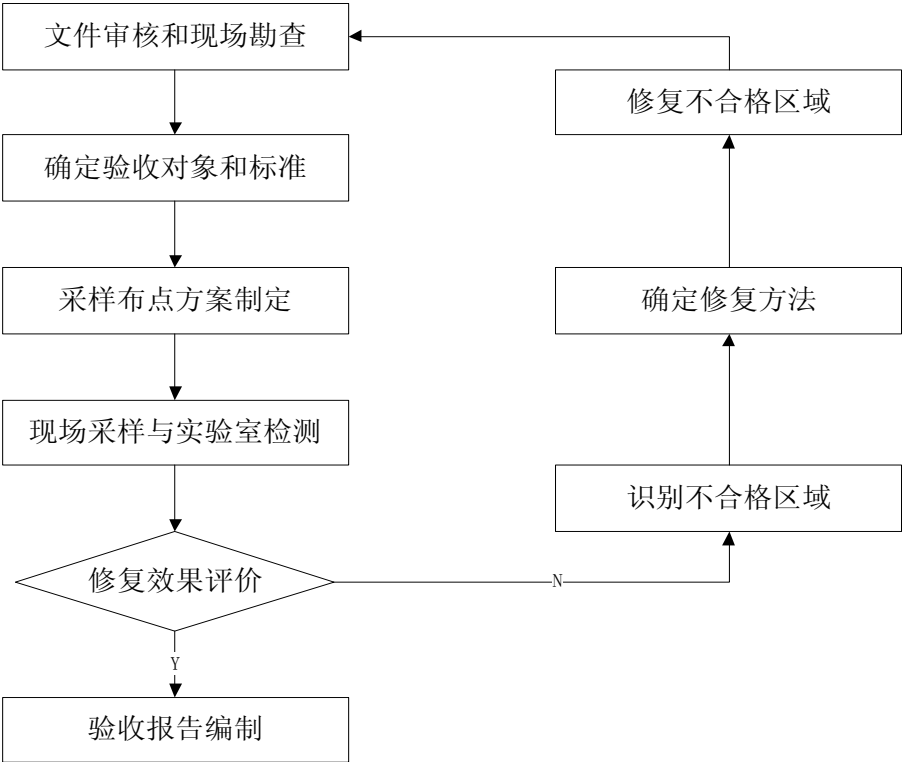


图5.3-1 修复验收工作程序

5.3.2.1 确定验收对象和标准

本项目场地修复验收的对象主要包括以下几项内容。

（1）修复后场地土壤

1) 原场异位修复污染土壤

根据前期场地调查及风险评估结果，对甲基苯酚类污染地下水区域所对应的

区域浅层土壤发现可疑污染源，需要清挖到密闭大棚内通过异位氧化方法处置，其处理量约为 880 m³，对清挖之后的基坑需要进行验收，以确保污染土壤清挖到位；原场异位修复后的污染土壤需要进行修复后验收，以确保污染土壤修复后目标污染物含量满足修复目标值的要求；

2) 原位修复污染土壤

按照前期场地调查及风险评估结果，本场地需要修复砷污染土壤面积约 15840 m²，深度从地面到地下 0.5 m 至地下 5 m，需要修复的土方量为 19160 m³，采用原位稳定化修复的方法进行修复处理，对修复完成后的污染土壤需要进行采样验收，以确保原位修复后的污染土壤中修复目标污染物含量满足修复目标值的要求。

(2) 原位化学氧化注入修复后的地下水

按照前期场地调查及风险评估结果，场地内地下水修复面积为 11100 m²，其中砷污染地下水面积为 2300 m²，砷和酚混合污染区域面积 1200 m²，多种酚类污染地下水约 8800 m²。需要抽出处理的砷污染地下水水量为 2000 m³，抽出的复合污染地下水约 2000 m³，原位氧化处理的多种酚类污染地下水约 14000 m³。验收指标见地下水修复目标值，验收时须对修复后的地下水进行监测井布设和采样检测，分析修复区域是否还存在污染。

5.3.2.2 采样布点方案确定

采样布点方案应包括采样介质、采样区域、采样点位、采样深度、采样数量、监测项目等内容。应根据目标污染物、修复目标值的不同情况在场地修复范围内进行分区采样；采样点的位置和深度应覆盖场地修复范围及其边缘；场地环境调查评估确定的污染最重区域，必须进行采样。

(1) 土壤采样布点

根据前期场地调查及风险评估结果,对甲基苯酚类污染地下水区域所对应的区域浅层土壤发现可疑污染源,需要清挖到密闭大棚内通过异位氧化方法处置,其处理量约为 880 m³,污染土壤清挖面积约为 690 m²,清挖深度最深为 1.2m。所以土壤完成清挖后,需要对清挖完成后的基坑底部和侧壁进行修复,考虑到清挖后基坑底部还存在污染土壤,故基坑底部验收面积约为 700m²。根据取样数量要求(如表 5.3-1 所示),验收基坑底部面积在 500~1000m² 之间,土壤采样点数目为 5 个样品,采样中质量控制样的总数应不少于总样品数的 10%,故基坑底部需要采集 6 个土壤样品。如表 5.3-2 所示,清挖基坑侧壁周长在 200~300 m 之间,需要对基坑侧壁的水平方向设立 7 个土壤采样点。采样中质量控制样的总数应不少于总样品数的 10%,故基坑侧壁需要采集约 31 个土壤样品。

表5.3-1土壤采样布点及采样数量

采样区域面积 (m ²)	土壤采样点数目 (个)
小于 100	3
100~500	4
500~1000	5
1000~1500	6
1500~2500	7
2500~3500	8
3500~5000	9
大于 5000	≥10

表5.3-2土壤采样布点——侧壁采样数量

采样区域周长 (m)	土壤采样点数目 (个)
50	4
50~100	5
100~200	6

采样区域周长 (m)	土壤采样点数目 (个)
200~300	7
300 以上	≥8

原场异位化学氧化修复污染土壤方量为 880 m³，根据“对于异位修复后的土壤，采用随机布点法布设采样点，原则上每个样品代表的土壤体积不应超过 500 m³ 的要求，每 500 m³ 取一个土壤样品，采样中质量控制样的总数应不少于总样品数的 10%，所以原场异位修复污染土壤验收检测需要采集 3 个土壤样品。

进行原位修复的修复场地，水平方向布点方案与异位修复后的基坑布点方法相同。修复范围内部应钻孔分层采样，采样点深度要求与异位修复采样要求相同。本场地需要修复砷污染土壤面积约 15840m³，土壤采样点数目原则上每 400 m² (20 m×20 m) 取一个样品，采样中质量控制样的总数应不少于总样品数的 10%，故基坑底部需要采集 50 个土壤样品。

(2) 地下水采样布点

根据《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》，地下水采样应依据地下水流向及污染区域地理位置设置地下水监测井，修复范围上游地下水采样点不少于 1 个，修复范围内采样点不少于 3 个，修复范围下游采样点不少于 2 个。原则上监测井布设在地下水环境调查确定的污染最严重的区域，或者根据不同类型的修复（防控）工程进行合理的布设。

由于地下水监测井建井较为繁琐，并有可能对地下水造成扰动，因此规定原则上可以利用场地环境调查评估和修复时的监测井，但原监测井的使用数量不应超过验收时总监测井数的 60%。未通过验收前，被验收方应尽量保持场地环境调查评估和修复过程中使用的地下水监测井完好。

5.3.2.3 修复效果评价

修复验收时，除了进行严密的采样和实验室检测之外，还需要对检测数据进行科学合理的分析，确定场地污染物是否达到验收标准，以判定场地是否达到修复效果要求。若达不到修复效果要求，需要给出继续修复建议。场地如需开展后期管理，还应评估后期管理计划合理性及落实程度。

将所采土壤或地下水样品污染物浓度测定值与修复目标值比对，超过修复目标值表示未修复合格，需进一步修复；低于修复目标值，土壤或地下水修复合格。

5.3.3 二次污染监测

5.3.3.1 地下水监测

（1）监测对象

修复期间修复场地内地下水情况。

（2）监测井布置

场地周围布置 3 口地下水监测井，地下水上游 1 口，下游 2 口。检测井深度为原场地地面以下 6m。

（3）地下水样品的采集

监测井建设完成后先洗井，采样在洗井后两个小时进行。抽取水样时，应当减缓流速，避免冲进产生气泡。

（4）监测因子

监测因子为本场地地下水目标污染物，监测标准值等同于修复目标值。

（5）监测频次

场地周边监测井每半月 1 次，监测工作至项目整体验收完成后为止。之后开

始进行修复后长期监测工作，为期两年，每半年取样检测分析。

5.3.3.2 污水排放监测

（1）点位布设

废水处理设施入口、排放口各设置 1 个监测点。

（2）监测项目

结合本项目土壤污染物，污水在满足地下水修复目标要求外，还需要满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中污染物三级排放标准则排入市政管网（三级排放标准指标如表 5.3-3 所示）。设定的监测项目为悬浮物、COD、pH。

表5.3-3. 《污水综合排放标准》（GB8978-1996）部分污染物三级排放要求

序号	控制项目名称	单位	B 等级
1	悬浮物	mg/L	400
2	COD	mg/L	500
3	pH	—	6~9

（3）监测频次

监测频次每月 1 次。

5.3.3.3 大气环境监测

（1）场地周边监测点位

根据前期场地调查及风险评估结果，本污染场地周边的敏感目标以住宅区和文教为主，场地周边的主要敏感目标是场地西南侧的现代外国语学校 and 北孙庄村。根据现有资料，此地区敏感点比较少，见图 5.3-2。因此将敏感点设置在污染场为中心点 500 m 范围内的西南侧学校、西南角北孙庄村、西北角王官屯村和东南角的晨鸣纸板厂，共 4 个。



图 5.3-2 污染场地周边 500 m 范围内敏感目标

(2) 场地内监测点位

在场地四向边界各设置 1 个大气监测点位，在场地内部设置 1 个大气监测点位，共 5 个。

(3) 监测因子

根据本项目污染种类，选取《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)并借鉴《大气污染物综合排放标准》(DB11/ 501—2007)中的砷及其化合物、非甲烷总烃、颗粒物作为主要监测因子，如表 5.3-4 所示。

表 5.3-4 大气污染物无组织排放监测项目

控制项目名称	监测点位	频次	限值
砷及其化合物	9	4 次/月	0.003 mg/m ³
非甲烷总烃			5.0 μg/m ³
颗粒物			5.0 mg/m ³

(4) 固定源废气监测

本项目污染场地修复需要建设密闭大棚，所以存在固定源尾气排放烟囱，需要对固定源废气进行监测。选取《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)

并借鉴《大气污染物综合排放标准》（DB11/ 501—2007）中的砷及其化合物、非甲烷总烃、颗粒物作为主要监测因子，如表 5.3-5 所示。修复及养护期间固定源监测频次为每 1 周 1 次。

表 5.3-5 固定源废气排放空气环境质量监测标准

污染物	大气污染物最高允许排放浓度 (mg/m ³)	大气污染物最高允许排放速率 (kg/h)	监测 频次
砷及其化合物	0.5 mg/m ³	0.16 kg/h	4 次/ 月
非甲烷总烃	150 mg/m ³	170 kg/h	
颗粒物	150 mg/m ³	10 kg/h	

5.3.3.4 噪声监测

(1) 点位布设

场内噪声监测点位在项目场地四向边界各设置 1 个噪声监测点位，同时对场地东西两侧最近的 2 个敏感点进行监测，共 6 个，手持式噪声监测仪器操作见图 5.3-3。



图 5.3-3 手持式分贝计监测示意图

(2) 监测项目

场地周边噪声监测按照《建筑施工场界噪声测量方法》（GB 12523-2011），噪声监测围绕施工场区边界线噪声点布设。采用积分平均声级计采样，以 20 min

的等效声级表征该点的噪声值。昼间限值为 70 dB(A)，夜间限值为 55 dB(A)。

敏感点噪声监测按照《声环境质量标准》(GB3096-2008)，昼间限值为 60 dB(A)，夜间限值为 55 dB(A)。

(3) 监测频次

自检每天 1 次，每 2 周监督性监测 1 次。

5.3.3.5 土壤二次污染区域

按照前期场地调查及风险评估结果，项目场地在修复施工过程中需要建设临时建筑以供施工使用，污染土壤在场内短驳过程中会存在污染土壤遗撒的现象，在修复过程中可能会出现二次污染的现象。在污染修复完成后，需要对临建道路和建筑物进行拆除，拆除后的临建下方土壤和修复施工规划道路两侧的土壤需要进行采样检测，以确认项目场地在修复过程中是否出现了二次污染的问题，若土壤检测结果无法满足修复目标值的要求，需要对这部分土壤重新进行修复处置，修复达标后，污染场地方能认为达到修复目标要求。

对于场地内修复范围外可能产生二次污染的区域，可采用判断布点的方法，结合实际情况进行布点。按照《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》中基坑底部验收取样的要求，每 400 m²（20 m×20 m）取一个样品，修复基地初步估算临时建筑占地面积约 1100 m²，污染周边区域二次污染取样范围面积约为 10000 m²，增加 10%的质量控制样品，共需采集土壤样品 31 个。

5.4 环境应急方案

根据《中华人民共和国安全生产法》、《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》以及业主要求，为确保安全生产及施工人员的生命安全，防止可能发生的

紧急情况继续扩大，并尽可能地排除险情，减少事故造成的人员伤亡、财产损失和对环境产生的不利影响。同时，为了能在事故发生后，使承担事故救援的人员和队伍分工明确，应急救援工作有条不紊的迅速展开，及时控制危险源，抢救受伤人员，指挥群众防护和疏散，特制定本应急预案。

5.4.1 适用范围

本预案适用于该项目现场废弃物清理处置和土壤、地表水、地下水采样过程中意外突发环境污染事故以及可能对附近居民和公众有健康和安全影响的环境污染事故。

5.4.2 应急组织机构

本项目设总指挥及副总指挥，其职责：组织制订环境事故应急总体原则，对子项目部的应急准备工作提出指导性意见；发生重大事故时，由总指挥发布和解除应急开始及终止的命令，发布信号及信息、实施救援行动；负责人员资源配置、应急队伍的调动；监督、检查安全生产、环境保护、应急准备工作的落实情况。

5.4.3 应急流程图

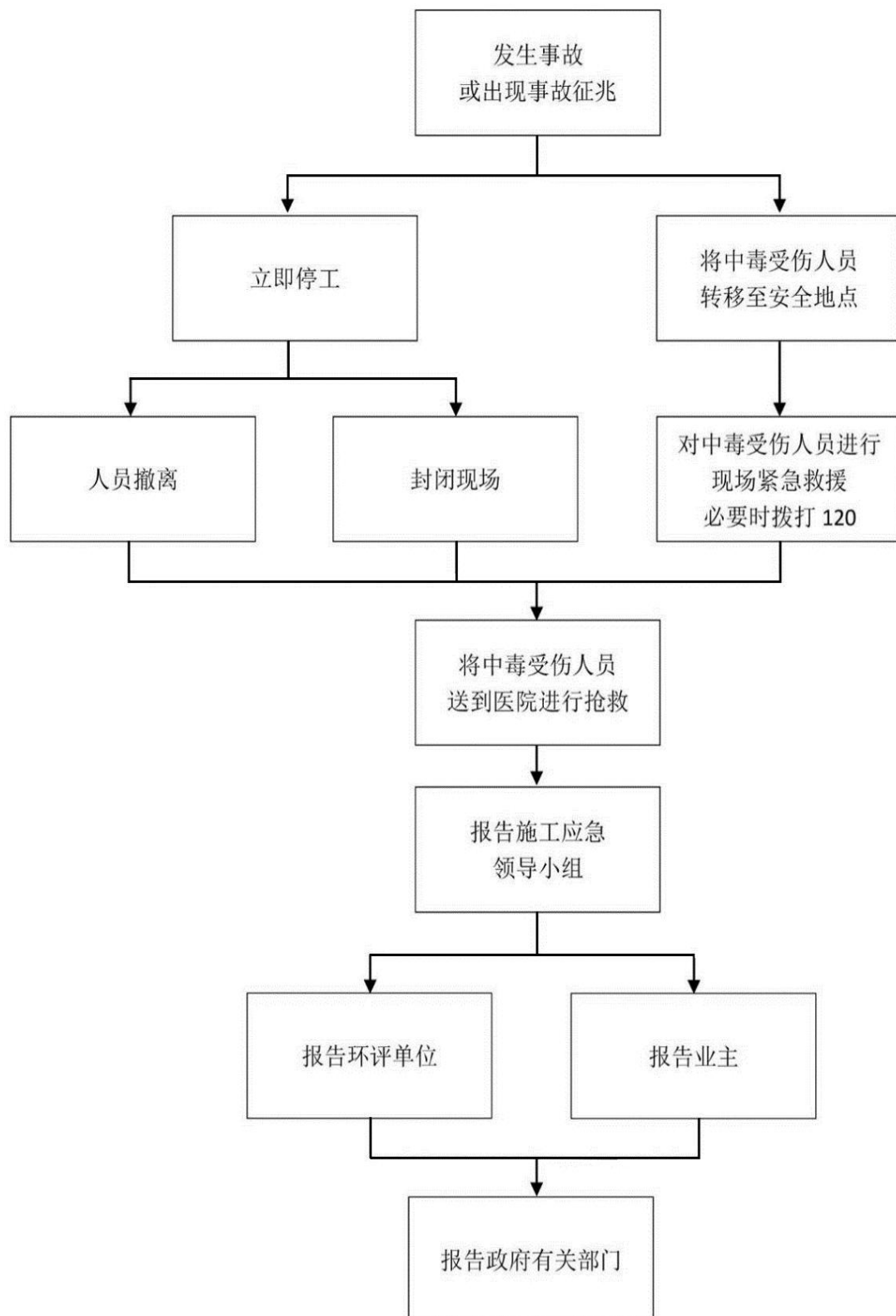


图5.4.1 应急流程

5.4.4 钻探施工特殊情况应急预案

(1) 如出现滑坡迹象（裂缝、滑动等）时，暂停施工，所有人员迅速离开基坑，必要时，迅速采取处理措施，如用挖掘机在坡脚迅速回填。根据滑动迹象设置观测点，观测滑坡体平面位移和沉降变化，并做好记录。

(2) 施工过程中如遇地下障碍物（包括古墓、文物、古迹遗址、各种管道、管沟、电缆、人防等）时，应立即停止施工，及时报告应急项目部，待妥善处理后方可继续施工。

(3) 在现场人工钻探排查地下管线过程中，若遭遇地下设施（包括电线电缆，给排水管道等），则须及时向业主现场安全监管人员汇报，在获得其认可之后，方能变更钻探点位，并继续采用人工钻探的方式排查。

(4) 在现场钻探过程中，若遭遇地下设施阻挡，而难以钻入，则须立即停止钻探，在进一步现场人工排查确认安全后方可继续钻探，否则，须在获得现场人员确认后，移动点位。

(5) 在现场钻探过程中，若破坏地下管线，则须立即停止所有工作，第一时间向业主现场人员及相关负责人汇报，协助工厂及时采取对策，尽可能减少损失或破坏。若遭遇安全事故，还须及时采取自救，确保人员健康安全

5.4.5 全过程人员中毒事故应急预案

现场如发生人员中毒事件，第一发现人应及时与事故应急小组联系。接到消息后，应急小组应立即赶到出事地点，确认其中毒症状，并应根据中毒症状及时施救。立即拨打“120”急救电话，通知专业医护人员到现场施救，并组织组织人员赶到事故发生地点，立即将抬到大门口，等救护车的到来，或直接送往就近医院，积极配合急救人员的后勤工作。同时应向应急小组成员报告，相关负责人

要及时赶到现场进行处理，并向上级部门报告情况。

急救措施：

（1）皮肤接触：脱去污染的衣着，用肥皂水和清水彻底冲洗皮肤。

（2）眼睛接触：提起眼睑，用流动清水或生理盐水冲洗。

（3）吸入：迅速脱离现场至空气新鲜处。保持呼吸道通畅。如呼吸困难，给输氧。如呼吸停止，立即进行人工呼吸。

（4）食入：实施催吐，并送至医院洗胃。

5.4.6 消防应急预案

（1）如果发生火灾，现场人员应立即用配备的消防设施进行扑救，并立即通知应急指挥部相关负责人，相关负责人要及时赶到现场进行处理，并向上级部门报告情况。

（2）如火势较大、危险性较高，难以在短时间内扑灭，应当立即拨打“119”报警电话，电话描述如下内容：单位名称、所在区域、周边显著标志性建筑物、主要路线、候车人姓名、主要特征、等候地址、火源、着火部位、火势情况及程度。随后到路口引导消防车辆。

（3）发生火情后，电工负责断电，负责水源，组织各部门人员用灭火器材等进行灭火。如果是由于电路失火，必须先切断电源，严禁使水或液体灭火器灭火以防触电事故发生。

（4）火灾发生时，为防止有人被困，发生窒息伤害，准备部分毛巾，湿润后蒙在口、鼻上，抢救被困人员时，为其准备同样毛巾，以备应急时使用，防止有毒有害气体吸入肺中，造成窒息伤害。被烧人员救出后应采取简单的救护方法急救，如用净水冲洗一下被烧部位，将污物冲净。再用干净纱布简单包扎，同时联

系急救车抢救。

(5) 火灾事故后，保护现场，组织抢救人员和财产，防止事故扩大，必须以最快的方式逐级上报，如实汇报，不得隐瞒。

5.4.7 全过程坍塌、机械伤害事故应急预案

(1) 防坍塌事故发生，项目部成立义务小组，由项目经理担任组长，生产负责人及安全员，各专业工长为组员，主要负责紧急事故发生时有条有理的进行抢救或处理，其他管理人员及后勤人员，协助项目经理做相关辅助工作。

(2) 发生坍塌事故后，由项目经理负责现场总指挥，发现事故发生人员首先高声呼喊，通知现场安全员，安全员拨打事故抢救电话“120”，向上级有关部门或医院打电话抢救，同时通知项目副经理组织紧急应变小组进行现场抢救。

(3) 施工员组织有关人员进行清理土方或杂物，如有人员被埋，应首先按部位进行抢救人员，其他组员采取有效措施，防止事故发展扩大，随时监护，边坡状况，及时清理边坡上堆放的材料，防止造成再次事故的发生。

(4) 在向有关部门通知抢救电话的同时，对轻伤人员在现场采取可行的应急抢救，如现场包扎止血等措施。防止受伤人员流血过多造成死亡事故发生。

(5) 预先成立的应急小组人员分工，各负其责，门卫在大门口迎接救护的车辆，有程序的处理事故、事件，最大限度的减少，人员和财产损失。

5.4.8 全过程触电事故应急预案

(1) 脱离电源对症抢救

当发生人身触电事故时，首先使触电者脱离电源，迅速急救，关键是“快”。对于低压触电事故，可采用下列方法使触电者脱离电源。如果触电地点附近有电源开关或插销，可立即拉开电源开关或拔下电源插头，以切断电源。可用有绝缘

手柄的电工钳、干燥木柄的斧头、干燥木把的铁锹等切断电源线。也可采用干燥木板等绝缘物插入触电者身下，以隔离电源。当电线搭在触电者身上或被压在身下时，也可用干燥的衣服、手套、绳索、木板、木棒等绝缘物为工具，拉开提高或挑开电线，使触电者脱离电源。切不可直接去拉触电者。

(2) 对于高压触电事故，可采用下列方法使触电者脱离电源。

立即通知有关部门停电。带上绝缘手套，穿上绝缘鞋，用相应电压等级的绝缘工具按顺序拉开开关。用高压绝缘杆挑开触电者身上的电线。

(3) 触电者如果在高空作业时触电，断开电源时，要防止触电者摔下来造成第二次伤害。

如果触电者伤势不重，神志清醒，但有些心慌，四肢麻木，全身无力或者触电者曾一度昏迷，但已清醒过来，应使触电者安静休息，不要走动，严密观察并送医院。如故触电者伤势较重，已失去知觉，但心脏跳动和呼吸还存在，应将触电者抬至空气畅通处，解开衣服，让触电者平直仰卧，并用软衣服垫在身下，使其头部比肩稍低，一面妨碍呼吸，如天气寒冷要注意保温，并迅速送往医院。如果发现触电者呼吸困难，发生痉挛，应立即准备对心脏停止跳动或者呼吸停止后的抢救。

如果触电者伤势较重，呼吸停止或心脏跳动停止或二者都已停止，应立即进行口对口人工呼吸法及胸外心脏挤压法进行抢救，并送往医院的途中，不应停止抢救，许多触电者就是在送往医院途中死亡的。人触电后会出现神经麻痹、呼吸中断、心脏停止跳动、呈现昏迷不醒状态，通常都是假死，一定要及时抢救。

对于触电者，特别高空坠落的触电者，要特别注意搬运问题，很多触电者，除电伤外还有摔伤，搬运不当，如折断的肋骨扎入心脏等，可造成死亡。对于假

死的触电者，要迅速持久的进行抢救，有不少的触电者，是经过四个小时甚至更长时间的抢救而抢救过来的。有经过六个小时的口对口人工呼吸及胸外挤压法抢救而活过来的实例。只有经过医生诊断确定死亡，停止抢救。

（4）人工呼吸是在触电者停止呼吸后应用的急救方法。各种人工呼吸方法中以口对口呼吸法效果最好。

施行人工呼吸前，应迅速将触电者身上妨碍呼吸的衣领、上衣等解开并取出口腔内妨碍呼吸的食物，脱落的断齿、血块，粘液等，以免堵塞呼吸道，使触电者仰卧，并使其头部充分扣仰（可用一只手托触电者颈后），鼻孔朝上以利呼吸道畅通。

救护人员用手使触电者鼻孔紧闭，深吸一口气后紧贴触电者的口向内吹气，约 2 秒中。吹气大小，要根据不同的触电人有所区别，每次呼气要个触电者胸部微微鼓起为宜。

吹气后，立即离开触电者的口，并放松触电者的鼻子，使空气呼出，约 3 秒钟。然后再重复吹气动作。吹气要均匀，每分钟吹气约 12 次。触电者已开始恢复自由呼吸后，还应仔细观察呼吸是否会再度停止。如果再度停止，应再继续进行人工呼吸，这时人工呼吸要与触电者微弱的自由呼吸规律一致。如无法使触电把口张开时，可改用口对鼻人工呼吸法，即捏紧嘴巴紧贴鼻孔吹气。

（5）胸外心脏挤压法是触电者心脏停止跳动后的急救方法，做胸外挤压时使触电者仰卧在比较坚实的地方，姿势与口对口人工呼吸法相同，救护者跪在触电者一侧或跪在腰部两侧，两手相叠，手掌根部放在，心窝上方，胸骨下三分之一至二分之一处。掌根用力向下（脊背的方向）挤压压出心脏里面的血液。成人应挤压 3-5 厘米，以每秒钟挤压一次，太快了效果不好，每分钟挤压 60 次为宜。

挤压后掌根迅速全部放松，让触电者胸廓自动恢复，血液充满心脏。放松时掌根不必完全离开胸部。

应当指出，心脏跳动和呼吸是无法联系的。心脏停止跳动了，呼吸很快会停止。呼吸停止了，心脏跳动也维持不了多久。一旦呼吸和心脏跳动都停止了，应当同时进行口对口人工呼吸和胸外心脏挤压。如果现场只有一人抢救，两种方法交替进行。可以挤压 4 次后，吹气一次，而且吹气和挤压的速度都应提高一些，以不降低抢救效率。对于儿童触电者，可以用一只手挤压用力要轻一些免损伤胸骨，而且每分钟宜挤压 100 次左右。

（6）事故后处理工作

查明事故原因及责任人。以书面形式向上级写出报告，包括发生事故时间、地点、受伤（死亡）人员姓名、性别、年龄、工种、伤害程度、受伤部位。制定有效的预防措施，防止此类事故再次发生。向所有人员进行事故教育，向所有人员宣读事故结果，及对责任人的处理意见。

5.4.9 应急装备

（1）内部联络或警报系统（附使用指南）以及请求外部支援的设施。包括应急联络的电话、对讲机、传真等通信设备如表 2。

（2）信息采集和监测设备。包括应急监测的设施、设备、药剂、气象监测设备（如风向标）等。

（3）应急辅助性设施和设备。如应急照明、应急供电系统等如表 3。

（4）安全防护用具。包括保障一般工作人员、应急救援人员的安全防护设备、器材、服装，安全警戒用围栏、警示牌等。应急人员防护设备有：防护服、呼吸器、防毒面具、防毒口罩、安全帽、防酸碱手套及长统靴等。

表5.4-1 通讯设备配置

通讯设备名称	数量	备注
电话	4 部	
对讲机	4 部	
手机	每人 1 部	
传真机	3 部	

表5.4-2 应急辅助设备配置

应急设备名称	数量	备注
手电筒	4	
应急灯	2	
灭火器	每车一部	
笤帚、簸箕	每车一套	

6 劳动保护及个人防护措施

6.1 劳动保护

6.1.1 劳动保护保障措施

(1) 项目部每周召开交班会，由项目经理主持，全体技术和管理人员参加，由安全员对本周安全情况进行总结，对出现的安全隐患进行分析，提出往后施工中应注意的事项。各班组交班会上，由班组长对项目部安全会议进行落实。每班作业前，各班组长对本班作业安全注意事项进行交代。

(2) 所有施工人员都必须通过安全教育，实现三级教育制度。未经安全教育的管理人员及施工人员不准上岗。对安全员和班组长进行重点教育和考核。

(3) 从事特种作业的电工、机械工、机动车辆驾驶等特殊岗位的人员必须持证上岗。

(4) 认真执行安全操作规程，做到不违章指挥、不违章操作、不伤害自己、不伤害他人、不被他人伤害，确保自身和他人安全，提高职工整体安全防护意识和自我防护能力。

(5) 定期和不定期组织安全检查，作业班组实行每班班前、班中、班后三检制。不定期检查视工程进展情况而定。

(6) 检查中发现的安全隐患，以书面形式进行登记、汇报，按照“四不放过”的原则制定整改措施，以消除安全隐患。

(7) 在安全隐患没有消除前，必须采取可靠的防护措施。如有危及人身安全的险情，必须立即停工，整改合格后方可施工。

（8）严格遵守国家和地方颁发的各项劳动法规、安全法规、安全技术规则及联营体有关施工安全的管理办法和各项安全措施。主要注意事项需在现场挂牌明示。项目经理部对易产生职业危害的工点、工序、项目，如：挖掘现场、污水抽出-外运处理、密闭大棚氧化车间、各种药剂的存放与使用、夏季施工等重点项目列出重点检查内容和规定日期。

（9）针对危险废物和其它污染物的安全防护必须严格遵守安全防护措施。做好劳动保护工作，确保施工人员身体健康。根据劳动强度等级，合理安排施工人员。充分做好生产物资、生活资料供应准备。劳动保护用品和生活物资采购供应由专人负责，采购供应要严把质量关，注意审核产品的“生产许可证”、“产品合格证”和“安全鉴定”等有关资料。

（10）制定劳动防护用品发放标准及管理办法。根据施工需要配备劳动保护用品。并按规定配发、穿戴和使用。对在使用中的劳动防护用品要定期检查，做到有效防护，安全使用。建立防护用品收发台帐，指定专人管理，建立职工个人劳动防护用品登记卡（册）。

6.1.2 卫生保障措施

（1）保持驻地环境整洁，定期消毒、杀虫和灭鼠，归类处理生活垃圾，做到卫生工作经常化。树立职工责任心，建立卫生检查评比制度。

（2）严格执行《中华人民共和国传染病防治法》、《中华人民共和国食品卫生法》和有关卫生法律、法规、规章，建立健全完善的各项卫生管理制度，配置具备相应卫生知识的专职（兼）人员定期向食品卫生监督部门报告。

（3）严格实行食品卫生监督和管理，接受上级和地方管理。

（4）严禁饮用不洁净生水。

6.1.3 职业病传染疾病防治措施

(1) 项目经理部职业健康安全保障领导小组，除自身坚持不懈的努力搞好防尘防毒工作外，还应当经常保持与当地防疫部门、卫生部门、劳动部门的联系，以便取得当地权威部门的支持和帮助。

(2) 配合施工队不断改进设备的选型和改进施工工艺、施工方法，通力合作，使作业点的尘、毒浓度达到国家卫生标准以下。

(3) 采取合理措施，避免因施工方法不当而引起尘、毒污染，并防止噪声和其它原因造成对作业人员的伤害

(4) 加强机械设备的保养和正常操作，尽量使机械噪声维持其最低级水平。严防油品泄露。

(5) 对污染处理区域采取喷洒水幕的措施，防止粉尘飞扬。

(6) 超前地质探测，做好监测和处理，减少有害气体的排放。工程垃圾、生活垃圾按有关规定排放、处理。

(7) 做好疾病和突发病传染病的预防工作，一旦发生，及时与专科医院取得联系，抓紧采取措施进行治疗。按规定发放防暑降温用品；配备齐全的隧道施工和粉尘施工的保护用品。

6.1.4 保证劳动物品发放

在施工现场的现场操作人员和进出人员穿戴规定的安全防护用具，根据现场作业风险的不同，配备不同等级的防护装备。目的是最大可能地保护工作人员在工作场地的健康与安全。

在作业场地内，个人的安全防护主要包括两部分：

一是限制进入机械作业区域；

二是根据工作性质穿戴适当的防护装备等。

(1) 基本安全防护

①挖掘机械进行施工作业时，禁止任何人员进入挖掘机的回转半径内；

②禁止无关人员进入运输车辆的周转区域；

③清洗处置设备危险区域设置防护栏。

(2) 污染安全防护

①挖掘区、装卸区域的操作人员，佩戴半面过滤式防毒面罩、乳胶防护手套和防护鞋（靴）以及劳保服，每天更换防毒面罩滤芯。

②其他区域作业的人员穿戴劳保服，戴普通劳动手套，无需戴防毒面罩。

③每人配备 2 套工作服，以便更换。

6.2 个人防护措施

6.2.1 一般防护

施工人员在污染区域施工时，佩戴半面式防尘面具（由于不存在有机污染物的风险，可以考虑使用防尘滤毒盒），同时穿戴护目镜、手套及长袖工服，避免皮肤直接接触重金属导致皮肤疾病。在处置区内作业的人员及人工清挖土壤的人员均为直接接触人员，必须严格按照要求佩戴个人防护用品。

(1) 直接接触人员的安全防护

参加污染区域开挖施工和污染土壤处置场内修复作业，并直接暴露于污染环境下的人员应提前对本区域污染物的性质进行充分地了解，并组织学习施工安全手册。

施工过程中，所有人员尽可能在高处和上风处进行作业。施工前根据污染物

的性质和污染程度选择适当的防护用品，防止施工过程中发生中毒等事故。

本项目对劳动人员需考虑的暴露途径包括呼吸吸入、皮肤接触和经口摄入三类。由于本项目土壤污染因子为六价铬，毒性大，施工现场人员需穿戴的防护用品为：安全头盔、自吸式全面罩防毒面具，连体防护服，橡胶安全手套，橡胶安全靴。

1) 吸入途径

在施工现场应注意防尘，不可野蛮施工，定期进行喷雾加湿。

制定有效的呼吸防护方案，防止污染物通过呼吸道进入人体，避免作业人员受到污染物侵害。该项目污染物是铬，需要选择合适的防毒面具对呼吸系统进行有效的保护。

2) 皮肤接触途径

要文明施工，防止因野蛮施工造成污染土壤沾染作业区人员。

作业人员应穿戴连体服、防护手套等劳动防护用品，防止污染物质直接接触人体表皮。

3) 食入途径

施工区域禁止饮水、吃饭，离开施工区域以后，须在防护用品管理人员监督和指导下进行衣物清洁，未清洗干净之前不可进食。

4) 地下水摄入途径

在地下水抽出区域，须要求施工人员进区戴口罩，穿戴连体服、防护手套，防止砷污染物通过不慎行为吸入口中或者与皮肤直接接触。

(2) 间接接触人员的安全防护

对于在基坑和污染土壤处置场内作业，但由于操作机械等原因不直接接触污

染物的人员应注意以下事项：

1) 呼吸系统防护

为保证施工安全，进入施工作业区须佩戴折叠式防尘口罩。

2) 身体防护

为了避免皮肤收到损伤，间接接触人员需穿长袖，长裤保护皮肤。

3) 手防护

为保护手不受损伤，作业时须佩戴劳保手套。

6.2.2 专项防护

在施工过程中，需要识别和评估在项目的完成过程中可能遇到的潜在物理和化学危险，并针对这些风险进行专项防护。

（一）物理危害风险及防护

在项目工作中可能出现的物理危险包括：噪音、车辆交通和控制、电气危险、临边支护以及可能的不良天气条件等。此外，员工必须清楚穿戴防护器材可能会限制其灵活性和视野，增加其实施某些任务的难度。

（1）噪音

使用动力工具和原料加工设备等项目活动会产生超过一定分贝范围（85 dBA）的噪音。当噪音等级超过 85 dBA 时，需要使用噪音降低等级至少为 20 dBA 的听力防护。员工或需要进入该区域的来访者需配备听力防护装置（如耳塞/耳罩）。

当正常谈话距离难以听清他人讲话时，噪音等级即为接近或超过 85 dBA，听力防护就是必需的。

（2）车辆交通和控制

可能暴露于车辆交通中的施工人员应采取以下安全措施：

1) 在施工现场一律穿戴高可见度安全背心。

2) 车辆运行路线上规定人车分流。

(3) 电气危险

任何员工不允许在电力线路的任何部位上操作，除非电路断开并接地，得到防电击保护，或确保其上锁并标记隔离。

所有带电电线或仪器均应有人看护。

(4) 临边防护

施工过程中，为防止人员或者设备坠落到基坑内，必须在边沿做硬质围挡并拉设警示线。

(5) 不良天气条件

项目现场负责人应根据目前或未来天气条件来决定继续或暂停工作。如遇有雷阵雨或强风天气应该要求暂停工作和疏散场地。

(二) 化学危害风险及人员防护

现场活动中相关的化学危害包括：在现场活动中场地污染物的潜在暴露，例如污染土壤挖掘、装载、修复药剂的存储、使用等。还包括设备去污所使用的产品以及燃油等辅助产品的危害。这些物质在日常使用中的潜在暴露途径为气体/灰尘吸入、直接接触或原料吸收。本项目施工过程中的土壤中含重金属、酚类污染物、氧化药剂、砷稳定化药剂可能对人体健康产生伤害。因此，在工程开工前，请相关安全人员对全体员工进行安全教育，在施工过程中加强劳动保护，所有进入施工现场的人员必须配戴防毒面具、安全防护眼镜，工作现场禁止吸烟、进食和饮水。

7.结论与建议

7.1 结论

1) 场地内土壤中的污染物为砷污染物和有机酚类污染物，地下水中的污染物为砷污染物和有机酚类污染物，需要处理的砷污染土方为 19160 方，需要处理的酚污染土壤约 880 方，需要处理的砷污染地下水 2000 方，需要处理的有机酚类污染地下水约 14000 方，需要处理的砷和酚污染物复合污染地下水约 2000 方。

2) 综合分析该场地地下水污染特征、地下水风险计算结果和产地修复后作为工业场地再开发的结果，在该场地内地下水不作为饮用水使用，同时建议对该场地内的地下水进行长期监控；对于该场地内原位稳定化修复后的砷污染土壤，需要采用制度控制进行管理，后期开发过程中该场地内的土壤不得离场，并需要长期监控，建议后期开发过程中，将砷污染浓度较高的区域作为绿地使用。

3) 金能科技股份有限公司一区场地修复项目砷污染土壤建议采用原位稳定化修复技术，有机酚类污染浅层土壤采用异位氧化修复技术，砷污染地下水采用抽出处理技术，有机酚污染地下水采用原位氧化修复技术，砷和有机酚污染物复合污染地下水采用抽出-处理和原位氧化联合修复技术。

4) 在施工前制定详细的环境管理方案，对污染土挖掘过程中的空气质量、环境噪声、废水等进行环境检测，对施工过程中产生的受污水，经过暂存、处理达标后排放。

5) 在施工前制定详细的应急预案，做好安全管理和防护。

7.2 建议

建议场地开发利用前，进行污染土壤和污染地下水修复。在修复过程中采取下列保护措施。

7.2.1 场地开发前

建议在场地开发前，相关业主应聘请具有污染土壤修复经验的资质单位，依

据此论证报告进行详细的土壤污染设计施工治理方案，并报相关部门审批。

7.2.2 场地施工过程中

(1) 对房屋拆卸后存留在场地上的建筑垃圾进行妥善处理；场地开挖过程中，遇到地表遗漏罐体或者地下储罐时，一定要安全处置。

(2) 相关业主应对对场地内目前存在的多个污水池中的污染水进行处理，以防污水渗透继续扩大地下水污染面积。

(3) 依据场区控制桩和污染治理范围图，确定修复范围，并在施工中应做好覆土处理。施工人员必须有相应的防护措施，避免污染物随扬尘对施工人员以及周边人群造成危害。

(4) 土壤施工作业过程中要严格按照监理指示进行施工，各区域内的污染土在挖掘完成后要及时进行苫盖，四级以上大风停止土方施工作业，防止二次污染，并在施工中铺设防渗设施。

(5) 对于土壤污染严重的区域，要保证现场土地的充分通风透气后，施工人员穿上密封防护服方可施工作业，且现场需配备光离子化有害气体检测仪（PID）对现场味道较重的土壤随时进行检测。

(6) 异位氧化密闭大棚内，施工人员需要穿上密封防护服方可施工作业，需要对大棚内进行实施在线检测以及污染浓度报警预测系统。施工区内应装置互锁警示灯及无关人员进入的障碍。防止非施工人员的直接接触，降低施工场地对周边环境的影响。施工区、装卸区应设置围墙。时刻注意保持饮食的清洁卫生，防止污染物经口进入人体。

(7) 进场施工设备及机械离场后，需要经过洗车台对车辆及设备进行清洗，清洗后的污水经过沉淀-氧化-混凝-沉淀处理，达标后可在洗车台循环使用。

(8) 现场实施抽出处理时，施工人员需要佩戴时时佩戴口罩，严禁抽出的水进入人口。

(9) 现场实施原位氧化注药井时，需要喷洒气味抑制剂，已控制气味、打井暴露出的高浓度污染物对施工人员的伤害。

(10) 在四级以上大风及低气压天气时，需要对场地内的部分区域进行气味

抑制，以保证现场施工人员因气味引起的身体不适，并控制气味外散。

(11) 打井和取样过程中所挖掘出的水和土壤需要进行妥善收集和处理，土壤样品进入大棚内氧化处理；水收集后和抽出污水同时外送入污水接受单位进行处理。

(12) 现场的所有修复药剂需要安全存放，并有明确的指示标志。作人员针对场地污染状况应具有二套以上的人体防护设备，浓度较低时佩戴如手套、防护服、眼罩、呼吸罩等。装卸浓度较高的污染土壤应配备特殊的防护设备（如氧化剂、气味抑制剂等）。

(13) 施工单位应结合天气情况，充分考虑到区域的特点，与当地气象部门联系后确保操作

周期内为晴天，风速、风向、温度及湿度都应有利于处置作业，防止二次污染。环境监测或监理单位应进行监督并对处理后的土壤、水质等进行检测。

(14) 针对施工场区突发情况制定相应的紧急行动预案：

1) 对于开挖施工现场污染情况及不确定因素（如液态废物、地埋污罐、管线等）应设置收集槽、缓冲罐和适当的消防设备，这些设备应有明确的指示标志。

2) 现场所有工作人员需接受现场急救培训，一旦发生中毒事故，选择有利地形设置急救点，立即进行处理，作好自身及伤病员的个体防护，经现场处理后，迅速护送至医院救治。

(15) 针对现场存放的修复药剂发生泄漏制定相应的紧急行动预案：

1) 对于修复药剂发生泄漏的情况，需要切断现场一切电源，并且紧急疏散现场人员，紧急报 119 及消防部门；现场修复药剂存储仓库需要备有紧急情况下人员清洗所需水。

2) 现场所有工作人员需接受现场急救培训，一旦发生氧化剂腐蚀皮肤或者大面积烧伤事故，选择有利地形设置急救点，立即进行处理，作好自身及伤病员的个体防护，经现场处理后，迅速护送至医院救治。

(16) 针对大棚内发生高浓度警报制定相应的紧急行动预案

7.2.3 场地开发后

(1) 对原位进行处理的污染区，要有良好的检测井及监测点位布设；

(2) 本区域的地下水源不能直接作为居民饮用水源，同时禁止任何方式利用该区域的浅层地下水。

(3) 禁止该区域土壤的随意挖掘，同时对该区域污染土壤进行备案管理，当该区域进行再次开发利用时，对该区域的污染土壤进行处理。

(4) 对有机酚污染土壤修复后回填区域进行明确标识，对场地内所修复的地下水污染区域进行明确标识，并送当地环保系统进行备案，提示后期开发需要根据现场所发生过的污染区域情况进行合理规划。

附件 A 农地砷、汞污染调查及管理策略研究计划期末
报告

行政院環境保護署

**農地砷、汞污染調查及管理策略研析計畫
期末報告
(定稿本)**

計畫編號：EPA-102-GA11-03-A267

執行期間：102年9月11日至103年12月10日完成

計畫經費：新台幣12,277,918元整

受託單位：富立業工程顧問股份有限公司

計畫主持人：高增閔 技師

**受託單位執行人員：周書興技師、陳尊賢 教授、王尚禮 教授、黃
政恆 副教授、陳柏青 教授、張馨方、李起睿、
劉威志、陳思穎、葉禹辰、鄭世堃、范惠茹**

行政院環保署編印

中華民國104年1月

表 2.2-1 我國與其他國家地下水砷之法規標準彙整表

項次	各國水標準		砷 (μg/L)
1	台灣	第一類管制標準 第二類管制標準	50 500
2	比利時	地下水-不分土地利用型態	20
3	荷蘭	地下水-住宅用地	60
4	德國	地下水-監測標準	10
5	法國	地下水-種植蔬菜的住宅用地 地下水-只限於工業用地	50 250
6	瑞典	地下水-限於加油站或飲用水質地區	50
7	奧地利	-	6 (啟動值) 10 (介入值)
8	波蘭	-	10
9	義大利	-	10
10	愛爾蘭	-	10
11	美國	-	10
12	日本	-	10
13	韓國	地下水-生活用水 地下水-農業/漁業用水 地下水-工業用水	50 50 100
14	立陶宛	飲用水/非飲用水之最大容許值	50
15	澳大利亞	地下水	13
16	加拿大	淡水(保護水生生物的水品質) 海水(保護水生生物的水品質) 灌溉用水(保護農業的水品質) 家畜用水(保護農業的水品質)	5 12.5 100 25
17	斯洛伐克	-	10

資料來源：彙整各國環保單位管制值

西湖底泥对水中苯胺、苯酚的吸附性能及机理*

朱利中, 徐霞, 胡松, 邹忠利, 鲍卫民, 陈宝梁(浙江大学环境科学系, 杭州 310028, E-mail: lizhu@mail.hz.zj.cn)

摘要: 研究了杭州西湖 5 个不同采样点底泥对水中苯胺、苯酚的吸附性能及机理。初步探讨了 pH 和振荡时间对吸附的影响。结果表明, 西湖底泥中有机碳含量较高(5.66% ~ 11.90%), 对水中苯胺的吸附作用及其去除率与底泥的有机碳含量成正相关($r = 0.998$); 对苯酚的吸附作用及其去除率与底泥的比表面积成正相关($r = 0.942$)。

关键词: 底泥, 吸附, 苯胺, 苯酚, 西湖

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)-02-0028-04

Adsorption and Partition of Aniline and Phenol on West Lake's Sediments

Zhu Lizhong, Xu Xia, Hu Song, Zou Zhongli, Bao Weimin, Chen Baoliang(Department of Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China E-mail: lizhu@mail.hz.zj.cn)

Abstract Sorption properties and mechanisms of aniline and phenol to five West Lake's sediments in different sites were investigated in detail. Effects of pH and shaking time on aniline and phenol sorption to sediments from water were evaluated. The organic carbon contents of West Lake's sediments were 5.66% ~ 11.90%. Aniline sorption to sediments from water was proportional to the organic carbon contents of sediments. Sorption and removal rates of phenol from water were proportional to the specific surface areas of sediments.

Keywords sediments, sorption, aniline, phenol, West Lake.

沉积物是水中各种污染物的源和汇, 其对有机化合物吸附主要有 2 种机理, 即分配作用(partition)和表面吸附作用(adsorption)。研究表明^[1~3], 底泥对水中疏水有机物的富集主要是分配作用所致, 与底泥(沉积物)中有机物的结构和有机碳含量有关^[4~6]。但迄今研究较多的是底泥对非极性有机物的吸附作用及机理, 也有一些对极性或可离子化有机污染物吸附性能及机理的研究^[7~9]。

西湖水体富营养化及有机物污染严重, 但迄今人们还未研究过有机污染物在西湖底泥/水间的环境化学行为。本文研究了西湖底泥对水中苯胺、苯酚的吸附作用, 探讨了底泥的有机碳含量及比表面积对吸附作用的影响。

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器

(1)底泥样品的采样及制备 5 个底泥样品分别取自西湖不同地点(图 1)的表层泥(0~20cm), 去除碎石、败叶等杂物, 经空气自然风干, 样品用研钵捣碎研细, 过 100 目孔径筛, 备用。

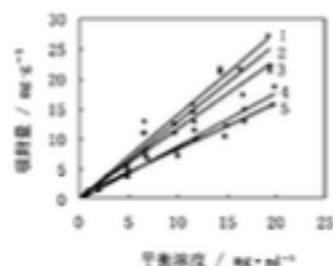
(2)仪器及试剂 THZ-82 型恒温调速振荡器, LD4-2 低速离心机, 722 型光栅分光光度计。苯胺、苯酚等均为分析纯试剂。

1.2 水中有机物的测定

水中苯胺、苯酚的测定分别用盐酸萘乙二胺和 4-氨基氮替比林分光光度法, 其检测限分别为 0.03mg/L 和 0.05mg/L。

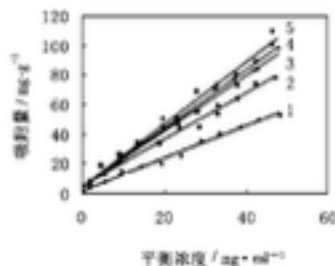
1.3 吸附实验方法

* 浙江省自然科学基金青年科技人才培养专项资金资助项目
作者简介: 朱利中(1959-), 男, 浙江上虞人, 教授, 主要研究方向有污染控制化学、环境污染化学和环境分析化学
收稿日期: 1999-07-26



1. 湖心 2. 少年宫 3. 三公园 4. 里西湖 5. 岳庙

图2 苯胺的等温吸附曲线



1. 湖心 2. 少年宫 3. 三公园 4. 里西湖 5. 岳庙

图3 苯酚的等温吸附曲线

表3 苯胺、苯酚的线性等温吸附曲线方程

底泥	苯 酚		苯 胺	
	线性方程	r	线性方程	r
湖心	$Q = 1.059C_e + 1.999$	0.995	$Q = 1.395C_e + 0.042$	0.984
少年宫	$Q = 1.582C_e + 5.146$	0.989	$Q = 1.294C_e + 0.042$	0.977
三公园	$Q = 1.867C_e + 5.026$	0.990	$Q = 1.162C_e + 0.095$	0.973
里西湖	$Q = 1.997C_e + 3.453$	0.994	$Q = 0.894C_e + 0.161$	0.991
岳庙	$Q = 2.130C_e + 4.494$	0.992	$Q = 0.779C_e + 0.524$	0.984

碳标化过的分配系数(K_{oc})表示,即

$$K_{oc} = K/f_{oc} \quad (2)$$

式中, K_{oc} 为底泥有机碳标化过的分配系数, f_{oc} 为底泥中有机碳的百分含量。5种西湖底泥对苯胺、苯酚吸附的 K_{oc} 值见表4。

表4 底泥吸附苯胺、苯酚的吸附常数

底泥	苯 酚		苯 胺	
	K	K_{oc}	K	K_{oc}
湖心	1.10	9.24	1.40	11.76
少年宫	1.58	15.82	1.29	12.91
三公园	1.87	21.15	1.16	13.12
里西湖	2.00	32.79	0.89	14.59
岳庙	2.13	37.63	0.78	13.78

研究结果表明,①西湖底泥对水中苯胺、苯酚的吸附(sorption)作用机理并不相同。苯胺的吸附系数与西湖底泥中有机碳的含量成正相关(图4),相关系数为0.988,即有机碳含量较高的底泥对苯胺的吸附能力较强;而苯酚的吸附系数与底泥中有机碳含量成负相关,与比表面积(SA)成正相关,其相关系数为0.979(图5)。②苯胺的 K_{oc} 值在11.76~14.59之间(平均值为13.23),基本为一常数;而苯酚的 K_{oc} 值在9.24~37.63之间,相差4倍多;其原因是苯胺

为碱性有机物,它与底泥中腐殖质等酸性物质结合,而苯酚则不能。因此,可认为西湖底泥对苯胺的吸附主要是分配作用(partition),分配作用的强弱与底泥中有机碳含量成正相关;底泥对苯酚的吸附可能由表面吸附作用(adsorption)所致,吸附作用的大小与底泥的比表面积成正相关,其吸附机理有待进一步探讨。

为证实底泥对苯胺、苯酚吸附作用的机理,利用1.00g不同底泥分别处理200mg/L的苯胺或苯酚水溶液,计算有机物的去除率,并将底泥对苯胺、苯酚的去除率分别对 f_{oc} 、SA作回归分析。图6表明,底泥对水中苯胺的去除率与其有机碳含量(f_{oc})成正相关($r=0.996$),即底泥有机碳含量越高,对苯胺的去除率越高。图7则表明,底泥对苯酚的去除率与其比表面积成正相关($r=0.959$)。这进一步说明,底泥对水中苯胺的吸附以分配作用为主,而对苯酚的吸附可能以表面吸附为主。

3 结论

西湖底泥有机碳含量较高;底泥对水中苯胺的吸附(sorption)主要是分配作用

附件 C 有机酚污染地下水 I 区中试流程及结果

有机酚污染地下水 I 区中试流程及结果

1、理论计算量

甲基苯酚与双氧水反应方程式如下：



双氧水（ H_2O_2 ）的分子量= $1\times 2+16\times 2=34\text{g/mol}$

3&4 甲基苯酚（ $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$ ）= $12\times 7+1\times 8+16\times 1=108\text{g/mol}$

检测 3&4 甲基苯酚（ $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$ ）在水样中的浓度= $644000\mu\text{g/L}=0.644\text{ g/L}$

根据反应式所示，完全氧化 1mol 的 3&4 甲基苯酚（ $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$ ）需要 17 mol 的双氧水即 1g3&4 甲基苯酚（ $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$ ）被完全氧化需要双氧水的含量为：

$$(34\text{g/mol})\times 17/(108\text{g/mol})=5.35\text{g}$$

1L 水样中的 3&4 甲基苯酚（ $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$ ）被完全氧化需要 $0.644\times 5.35\text{g}=3.45\text{g}$ 双氧水。自主研发的高效氧化剂中双氧水的体积浓度为 10.3%，氧化药剂的密度为 1.13 g/ml，所以 1L 水样所需消耗该浓度双氧水 $3.45\text{ g}/1.13\text{ g/mL}/10.3\% =29.64\text{ mL}=2.96\times 10^{-2}\text{L}$ 氧化药剂。

2、氧化反应后反应产物说明

取现场监测井中地下水水样，测试其中的 3&4-甲基苯酚的浓度为 216 mg/L，2-甲基苯酚的浓度为 167 mg/L。向 1L 水样中加入 20 mL 高效氧化剂后，摇振均匀，反应 20 小时后，取样送检，其中的 3&4-甲基苯酚和 2-甲基苯酚及苯的浓度均低于监测限（0.5 ug/L）。

附件 D 污染场地修复技术目录（第一批）

污染场地修复技术目录

（第一批）

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
1	异位固化/稳定化技术	适用于污染土壤。可处理金属类、石棉、放射性物质、腐蚀性无机物、氰化物以及砷化合物等无机物；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。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。	向污染土壤中添加固化剂/稳定化剂，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系数的固化体，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。	日处理能力通常为 100-1200 立方米（m ³ ）。据美国 EPA 数据显示，对于小型场地（1000 立方码（cy），约合 765 m ³ ）处理成本约为 160-245 美元/m ³ ，对于大型场地（50000cy，约合 38228 m ³ ）处理成本约为 90-190 美元/m ³ ；国内处理成本一般为 500-1500 元/m ³ 。	国外应用广泛。据美国环保署统计，1982-2008 年已有 200 余项超级基金项目应用该技术。国内有较多工程应用。

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
2	异位化学氧化/还原技术	适用于污染土壤。其中，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。 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。	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。	处理周期较短，一般为数周到数月。 国外处理成本为 200-660 美元/m ³ ；国内处理成本一般为 500-1500 元/m ³ 。	国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。国内发展较快，已有工程应用。
3	异位热脱附技术	适用于污染土壤。可处理挥发及半挥发性有机污染物（如石油烃、农药、多氯联苯）和汞。 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。	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。	处理周期为几周至几年。 国外对于中小型场地（2 万吨（t）以下，约合 26800m ³ ）处理成本约为 100-300 美元/m ³ ，对于大型场地（大于 2 万吨，约合 26800m ³ ）处理成本约为 50 美元/m ³ 。 国内处理成本约为 600-2000 元/吨。	国外已广泛应用于工程实践。1982-2004 年约有 70 个美国超级基金项目采用该技术。国内已有少量工程应用。

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
4	异位土壤洗脱技术	适用于污染土壤。可处理重金属及半挥发性有机污染物、难挥发性有机污染物。 不宜用于土壤细粒（粘/粉粒）含量高于 25% 的土壤。	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，并有效地减少污染土壤的处理量，实现减量化。洗脱系统废水应处理去除污染物后回用或达标排放。	处理周期约为 3-12 个月。 美国处理成本约为 53-420 美元/m ³ ；欧洲处理成本约 15-456 欧元/m ³ ，平均为 116 欧元/m ³ 。 国内处理成本约为 600-3000 元/m ³ 。	美国、加拿大、欧洲及日本等已有较多的应用案例。国内已有工程案例。
5	水泥窑协同处置技术	适用于污染土壤，可处理有机污染物及重金属。 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壤的添加量。	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。	处理周期与水泥生产线的生产能力及污染土壤添加量相关，添加量一般低于水泥熟料量的 4%。 国内的应用成本为 800-1000 元/m ³ 。	国外发展较成熟，广泛应用于危险废物处理，但应用于污染土壤处理相对较少。国内已有工程应用。
6	原位固化/稳定化技术	适用于污染土壤，可处理金属类、石棉、放射性物质、腐蚀性无机物、氰化物以及砷化合物等无机物；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。不宜用于挥发性有机化合物，不适用于以污染物总量为验收目标的项目。	通过一定的机械力在原位向污染介质中添加固化剂/稳定化剂，在充分混合的基础上，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系数的固化体，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。	处理周期一般为 3-6 个月。 根据美国 EPA 数据显示，应用于浅层污染介质处理成本约为 50-80 美元/m ³ ，应用于深层处理成本约为 195-330 美元/m ³ 。	国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。据美国环保署统计，2005-2008 年应用该技术的案例占修复工程案例的 7%。国内处于中试阶段。

序号	名称	适 用 性	原 理	修复周期及参考成本	成熟程度
7	原位化学氧化/还原技术	适用于污染土壤和地下水。其中，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。 受腐殖酸含量、还原性金属含量、土壤渗透性、pH 值变化影响较大。	通过向土壤或地下水的污染区域注入氧化剂或还原剂，通过氧化或还原作用，使土壤或地下水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。常见的还原剂包括硫化氢、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。	清理污染源区的速度相对较快，通常需要 3-24 个月的时间，使用该技术修复地下水污染羽流区通常需要更长的时间。 美国使用该技术修复地下水处理成本约为 123 美元/m ³ 。	国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。据美国环保署统计，2005-2008 年应用该技术的案例占修复工程案例总数的 4%。 国内发展较快，已有工程应用。
8	土壤植物修复技术	适用于污染土壤，可处理重金属（如砷、镉、铅、镍、铜、锌、钴、锰、铬、汞等）以及特定的有机污染物（如石油烃、五氯酚、多环芳烃等）。	利用植物进行提取、根际滤除、挥发和固定等方式移除、转变和破坏土壤中的污染物，使污染土壤恢复其正常功能。	处理周期需 3-8 年。 美国应用的成本约为 25-100 美元/吨，国内的工程应用成本约为 100-400 元/吨。	国外应用广泛。 国内已有工程应用，常用于重金属污染土壤修复。
9	土壤阻隔填埋技术	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。	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，使污染土壤与周围环境隔离，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。	处理周期较短。国内处理成本为 300-800 元/m ³	国外应用广泛，技术成熟。 国内已有较多工程应用。

序号	名称	适 用 性	原 理	修复周期及参考成本	成熟程度
10	生物堆技术	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，粘土类污染土壤修复效果较差。	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。	处理周期一般为 1-6 个月。 在美国应用的成本约为 130-260 美元/m ³ ，国内的工程应用成本为 300-400 元/m ³ 。	国外已广泛应用于石油烃等易生物降解污染土壤的修复，技术成熟。 国内已有用于处理石油烃污染土壤及油泥的工程应用案例。
11	地下水抽出处理技术	适用于污染地下水，可处理多种污染物。 不宜用于吸附能力较强的污染物，以及渗透性较差或存在 NAPL（非水相液体）的含水层。	根据地下水污染范围，在污染场地布设一定数量的抽水井，通过水泵和水井将污染地下水抽取至地面进行处理。	处理周期一般较长。美国处理成本约为 15-215 美元/m ³ 。	国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。据美国环保署统计，1982-2008 年期间，在美国超级基金计划完成的地下水修复工程中，涉及抽出处理和其他技术组合的项目 798 个。 国内已有工程应用。