

**济宁中银电化有限公司
原厂区汞污染场地修复工程**

实施方案

山东利源海达环境工程有限公司

二〇一六年十一月

项目名称：济宁中银电化有限公司原厂区汞污染场地修复工程

委托单位：济宁中银电化有限公司

报告编制单位：山东利源海达环境工程有限公司

报告编写及审查人员职责表：

职 责	姓 名	签 名
项目负责人	刘雷	
报告编写人	刘雷	
	董敬	
	李文博	
审 查	马训孟	
审 核	张孝添	
审 定	宫杰超	

前 言

济宁中银电化有限公司原厂区位于济宁市任城区太白楼西路，始建于 1966 年，建成于 1968 年，是鲁西南一家大型氯碱企业，主导产品为烧碱、氯乙烯，配套生产液氯、高纯盐酸、压缩氢、氯化石蜡等。

2009 年 12 月，山东省环境保护研究设计院编制完成《济宁中银电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书》；2009 年 12 月 30 日山东省环保厅《关于济宁中银电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书的批复》（鲁环审〔2009〕257 号）文件，对该报告书进行了批复。该项目 2011 年 3 月 10 日开工建设，2013 年 2 月 16 日竣工，因企业发展需要，于 2015 年 5 月 5 日，企业名称正式变更为济宁中银电化有限公司。根据山东省环保厅《关于山东中联电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书的批复》（鲁环审〔2009〕257 号）及《关于做好原址场地环境调查及治理修复工作的函》（济土储函〔2016〕36 号）文件要求，济宁中银电化有限公司需做好原场地环境调查和风险评估工作，及原厂区装置拆除过程中的污染防治和拆除后的生态恢复工作。

依据国家相关政策和山东省环保厅的相关批复，济宁中银电化有限公司于 2014 年 4 月 8 日委托山东利源海达环境工程有限公司对其原厂区进行场地现状调查和风险评估。根据场地调查及风险评估结果，位于氯苯区的某一取样点（编号：YQ-4）浅层 0.5m 土壤存在汞超标现象，超标范围约占地 22.89m²，修复土方量约为 11.445m³。

在此背景下，济宁中银电化有限公司于 2016 年 7 月 27 日日委托山东利源海达环境工程有限公司进行污染场地修复。我公司接受委托后，于 2016 年 8 月 15 日对本项目进行了资料收集及现场勘查。

依据《污染场地土壤修复技术导则（发布稿）》（HJ25.4-2014）及《工业企业场地环境调查评估与修复指南（试行）》（2014.11）中所述规范要求对中银电化汞污染场地实施修复工程。通过实验室试验，结合对备选修复方案的技术经济分析，确定本项目场地修复工程采用原位“污染土壤混合/稀释+稳定化”的技术

方案修复汞污染土壤。在前期工作基础上，本公司编制完成了《济宁中银电化有限公司原厂区汞污染场地修复工程实施方案》，为后续修复验收工作提供科学依据。

本项目汞污染场地修复工程实施方案编写过程得到了济宁市环保局、济宁市国土资源局和济宁中银电化有限公司各级领导及同仁的大力支持与鼎力协助，项目组在此表示衷心的感谢！鉴于编写经验不足，加之水平有限，行文中存在的不足与疏漏之处敬请批评指正。

2016年11月

目 录

前 言	I
第 1 章 总论	1
1.1 场地基本信息	1
1.2 任务由来	3
1.3 编制目的	3
1.4 编制依据	4
1.4.1 法律法规	4
1.4.2 技术导则、标准及规范	4
1.4.3 其他文件	6
1.5 编制原则	6
1.6 编制内容及技术路线	6
第 2 章 场地污染现状与风险评估	8
2.1 场地污染现状	8
2.1.1 土壤污染现状	8
2.1.2 地下水污染现状	8
2.2 风险评估	9
2.2.1 健康风险评估工作程序	9
2.2.2 土壤中单一污染物的环境风险评估	14
2.2.3 地下水中单一污染物的风险评估	17
2.2.4 场地风险评价结果与讨论	18
2.2.5 风险评价的不确定性分析	21
第 3 章 选择修复策略	25
3.1 动态更新场地概念模型	25
3.2 确认场地总体修复目标	25
3.2.1 土壤修复治理目标	25
3.2.2 地下水修复治理目标	25

3.3 确定修复策略	26
3.3.1 土壤修复目标值和修复范围.....	26
3.3.2 地下水修复目标值和修复范围.....	31
3.3.3 工程量估算.....	32
3.3.4 确定修复策略.....	32
第 4 章 筛选与评估场地修复技术	34
4.1 修复技术筛选过程	34
4.1.1 修复技术筛选原则.....	34
4.1.2 常用土壤修复技术.....	35
4.2 技术评估过程	38
4.2.1 可行性试验的必要性.....	38
4.2.2 筛选性试验过程.....	39
4.2.3 选择性试验过程.....	39
4.2.4 修复技术综合评估.....	40
4.3 确定修复可行技术	40
第 5 章 形成修复备选方案与方案比选	42
5.1 形成潜在可行的修复备选方案.....	42
5.1.1 土壤修复技术备选方案.....	42
5.1.2 地下水修复方案.....	46
5.2 方案比选	46
5.2.1 比选方法与指标.....	46
5.2.2 比选指标比较.....	46
5.2.3 比选结果与方案选择.....	47
第 6 章 场地修复技术方案设计	48
6.1 修复方案的总体技术路线	48
6.2 各修复技术应用规模	48
6.3 土壤修复技术方案	49
6.3.1 工艺流程.....	49

6.3.2	修复技术方案.....	49
6.3.3	修复方案可行性研究.....	51
6.3.4	周期与成本.....	54
6.4	修复工程重难点分析	54
6.5	地下水修复方案	55
第 7 章	制定环境管理计划	56
7.1	修复过程中的污染防治和人员安全保护措施.....	56
7.1.1	土壤污染防治.....	56
7.1.2	水环境污染防治.....	56
7.1.3	大气污染防治.....	56
7.1.4	噪声污染防治.....	57
7.1.5	人员安全保护措施.....	58
7.2	场地环境监测计划	58
7.2.1	监测目的和类型.....	58
7.2.2	采样点布设.....	58
7.2.3	监测项目和标准.....	59
7.2.4	监测进度安排.....	60
7.3	场地修复验收计划	60
7.3.1	验收程序.....	60
7.3.2	验收时段和范围.....	61
7.3.3	验收项目和标准.....	62
7.3.4	采样点布设.....	62
7.3.5	费用估算.....	63
7.4	环境应急安全预案	63
第 8 章	成本效益分析	65
8.1	修复费用	65
8.2	环境效益、经济效益、社会效益	65
8.2.1	环境效益.....	65

8.2.2 经济效益.....	66
8.2.3 社会效益.....	66
第 9 章 施工进度安排	68
第 10 章 结论与建议	69
10.1 修复方案编制的结论	69
10.2 问题与建议	69
附件 1: 关于山东中联化学有限公司变更企业名称的处理意见	71
附件 2: 山东省环保厅《关于山东中联电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书的批复》(鲁环审 [2009] 257 号)	72
附件 3: 关于做好原址场地环境调查及治理修复工作的函	80

第 1 章 总论

1.1 场地基本信息

济宁市任城区位于鲁西南平原，南四湖北端，为济宁市中心城区之一，济宁市主城区，地处东经北纬 35°08'-35°32'，116°26'-116°44'，总面积 1262.1 平方公里。整体格局半城半乡，地理位置优越，处于济（济宁）一兖（兖州）一邹（邹城）一曲（曲阜）一嘉（嘉祥）组团结构大城市的腹地，历来为鲁西南重要的商品物资集散地和政治、经济、文化中心。任城区交通十分便利，京杭运河纵贯南北，新石铁路、日东高速公路横贯东西，京福高速公路、京沪铁路近在咫尺，327、105 国道在境内十字交汇，形成四通八达的交通网络。

济宁中银电化有限公司原厂区位于济宁市任城区太白楼西路，始建于 1966 年，建成于 1968 年，是鲁西南一家大型氯碱企业，主导产品为烧碱、氯乙烯，配套生产液氯、高纯盐酸、压缩氢、氯化石蜡等。济宁中银电化有限公司地理位置如图 1.1-1 所示，原厂区卫星图如图 1.1-2 所示：



图 1.1-1 原厂区地理位置



图 1.1-2 济宁中银电化有限公司原厂区卫星图

济宁中银电化有限公司建厂初期电解烧碱装置设计能力为年产 2000 吨，副产盐酸和漂液。1975 年把烧碱年产能力扩大为 2500 吨。1979 年投资 159 万元，建成了年产 1000 吨的聚氯乙烯车间，翌年又经技术改造，使聚氯乙烯年产能力达到 1500 吨。1981-1985 年投资 226 万元，再次对烧碱装置进行改造，年产能力扩大到 6000 吨；后于 1986-1988 年又投资 977 万元，将烧碱装置扩建到年产 2 万吨。期间，对聚氯乙烯装置经过三次扩建改造，年产能力先后扩大到 4000 吨、5500 吨和 6000 吨；1996 年中外合资后，变更为济宁中银电化有限公司。2010 年 2 月，中银电化有限公司成为联想控股全资子公司。2011 年 3 月，中银电化有限公司为退城进园而设立的山东中联电化有限公司在汶上县寅寺镇动工兴建，因企业发展需要，2015 年 5 月 5 日，企业名称正式变更为济宁中银电化有限公司（见附件 1）。目前，原厂区已将地面及地下建筑物拆除完毕，场地平整，存留有部分硬化地面。

1.2 任务由来

2009年12月，山东省环境保护研究设计院编制完成《济宁中银电化有限公司50万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书》；2009年12月30日山东省环保厅《关于济宁中银电化有限公司50万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书的批复》（鲁环审〔2009〕257号）文件，对该报告书进行了批复。该项目2011年3月10日开工建设，2013年2月16日竣工。2013年2月19日济宁市环保局《关于同意山东中联电化有限公司50万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程一期装置试运行的意见》批准其试生产。2013年5月向山东省环保厅申请竣工验收。山东省环保厅《关于山东中联电化有限公司50万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书的批复》（鲁环审〔2009〕257号）及《关于做好原址场地环境调查及治理修复工作的函》（济土储函〔2016〕36号）文件要求，济宁中银电化有限公司需做好原场地环境调查和风险评估工作，及原厂区装置拆除过程中的污染防治和拆除后的生态恢复工作。因企业发展需要，2015年5月5日，企业名称正式变更为济宁中银电化有限公司。

因此，根据国家相关政策和山东省环保厅的相关批复，济宁中银电化有限公司于2014年4月8日委托山东利源海达环境工程有限公司对其原厂区进行场地现状调查和风险评估。根据场地调查及风险评估结果，位于氯苯区的编号为YQ-4的取样点存在浅层0.5m土壤存在汞超标现象，超标范围约占地22.89m²，修复土方量约为11.445m³。

在此背景下，济宁中银电化有限公司于2016年7月27日日委托山东利源海达环境工程有限公司进行污染场地修复。我公司接受委托后，于2016年8月15日对本项目进行了资料收集及现场勘查。

1.3 编制目的

汞（Hg）是环境中毒性最强的重金属元素之一，汞可以在生物体内积累，很容易被皮肤以及呼吸道和消化道吸收，长时间暴露在高汞环境中可以导致脑损伤和死亡。汞污染不仅严重影响了济宁中银电化有限公司和周围区域的土壤质量，还导致水体和大气环境质量的下降，更严重的是直接危害附近居民的人体健

康及周边环境的生态安全，对后续该场地的使用建设存在较高的风险隐患。对汞污染场地施行修复工程，以阻止和控制受污染土壤中的汞化合物继续释放进入环境，避免周围土壤和大气进一步受到汞污染，控制汞在环境中的不断传播，恢复修复区土壤的生态功能和使用功能，满足用地建设需求，确保周围居民的身体健健康，全面提升土地利用价值。

本次汞污染土壤修复工程的开展及修复工程实施方案编制的目的及重要意义在于：

(1) 项目实施是推进山东省重金属污染治理和落实《重金属污染综合防治“十二五”规划》和《山东省重金属污染综合防治“十二五”规划》的重要行动，有益于推进实施国家和省政府的宏观调控和有关环境保护政策。

(2) 项目实施后可解决并改善济宁中银电化有限公司原厂区的生态环境，确保当地居民的身体健健康，有效改善当地人民的生活环境质量，是构建“和谐社会”的重要体现。

(3) 项目实施后可进行该厂区后期的开发建设，提高土地功能价值，有利于土地资源的综合循环利用，体现了实现国民经济可持续发展的重要内涵。

(4) 本项目的成功实施可为我省其他汞污染地区或重金属污染场地的修复和综合治理工作起到良好的示范和宣传作用。

1.4 编制依据

1.4.1 法律法规

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》 (2015.01)
- (2) 《建设项目环境保护管理条例》 ((98) 国务院令第 253 号)
- (3) 《中华人民共和国固体废物污染防治法》 (2005.04)
- (4) 《国家危险废物名录》 (2008.08)
- (5) 《危险化学品安全管理条例》 (国务院令[2003]344 号)
- (6) 《土壤污染防治行动计划》 (国发[2016]31 号)

1.4.2 技术导则、标准及规范

- (1) 《污染场地土壤环境管理暂行办法（征求意见稿）》 (环办函[2009]1321 号)

- (2) 《关于加强土壤污染防治工作的意见》 (环发[2008]48号)
- (3) 《重金属污染综合防治“十二五”规划》 (2011.02)
- (4) 《山东省重金属污染综合防治“十二五”规划》 (2011.10)
- (5) 《关于保障工业企业场地在开发利用环境安全的通知》 (环发[2012]140号)
- (6) 《关于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的通知》 (国办发[2013]7号)
- (7) 《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》 (环办[2004]47号)
- (8) 《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》 (环发[2012]40号)
- (9) 《场地环境调查技术规范》 (HJ 25.1-2014)
- (10) 《场地环境监测技术导则》 (HJ 25.2-2014)
- (11) 《污染场地风险评估技术导则》 (HJ 25.3-2014)
- (12) 《污染场地土壤修复技术导则》 (HJ 25.4-2014)
- (13) 《场地环境评价导则》 (DB11/T 656-2009)
- (14) 《场地土壤环境风险评价筛选值》 (DB11/T 811-2011)
- (15) 《上海市场地土壤环境健康风险评估筛选值(试行)》 (2015.10)
- (16) 《污染场地风险评估技术导则(试行)》 (DB33/T 892-2013)
- (17) 《建设用地土壤污染风险筛选指导值(三次征求意见稿)》 (2016.3)
- (18) 《污染场地土壤再利用风险评估技术导则(征求意见稿)》 (2015.3)
- (19) 《土壤环境质量标准》 (GB15618-1995)
- (20) 《地下水质量标准》 (GB/T14848-93)
- (21) 《污染场地修复验收技术规范》 (DB11/T 783-2011)
- (22) 《危险废物鉴别标准通则》 (GB 5085.7-2007)
- (23) 《土壤环境监测技术规范》 (HJ/T 166-2004)
- (24) 《岩土工程勘察规范》 (B50021)
- (25) 《土的分类标准》 (GBJ145)
- (26) 《土工试验方法标准》 (GB/T 50123-1999)
- (27) 《供水水文地质勘察规范》 (GB 50027-2001)
- (28) 《固体废物鉴别导则(试行)》 (2006.4)
- (29) 《危险废物鉴别标准毒性物质含量鉴别》 (GB 5085.6-2007)
- (30) 《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》 (2014.11)

- (31) 《对人体有害物质信息库》-EPA (CASRN319-84-6)
- (32) 《EPA Regional Screening Level》 (2016.5)

1.4.3 其他文件

- (1) 《关于济宁中银电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书的批复》(鲁环审 [2009] 257 号)
- (2) 《济宁中银电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目一期工程环境影响报告书》
- (3) 《济宁市城区工业企业退城进园办法》
- (4) 《济宁中银电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目原厂区场地环境调查及风险评估报告》

1.5 编制原则

根据我国现阶段污染场地修复的内容和相关管理要求,该项目汞污染场地修复方案的编制遵循以下原则:

(1) 科学性原则

采用科学的方法,综合考虑污染场地修复目标、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,制定并编制修复方案。

(2) 可行性原则

制定的污染场地土壤修复方案要合理可行,要在前期工作的基础上,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

制定污染场地土壤修复方案要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。

1.6 编制内容及技术路线

在修复技术方案编制工作开始之前,核实相关的场地调查和风险评估资料、确认场地条件,如发现已有资料不能满足修复技术方案编制基础信息要求,应适

当补充相关资料，必要时应进行补充性场地环境调查和风险评估。

污染场地修复技术方案编制工作分选择修复策略、筛选与评估修复技术、提出修复技术备选方案与方案比选、制定环境管理计划、编制修复技术方案 5 个阶段进行，编制内容及技术路线如图 1.6-1 所示：

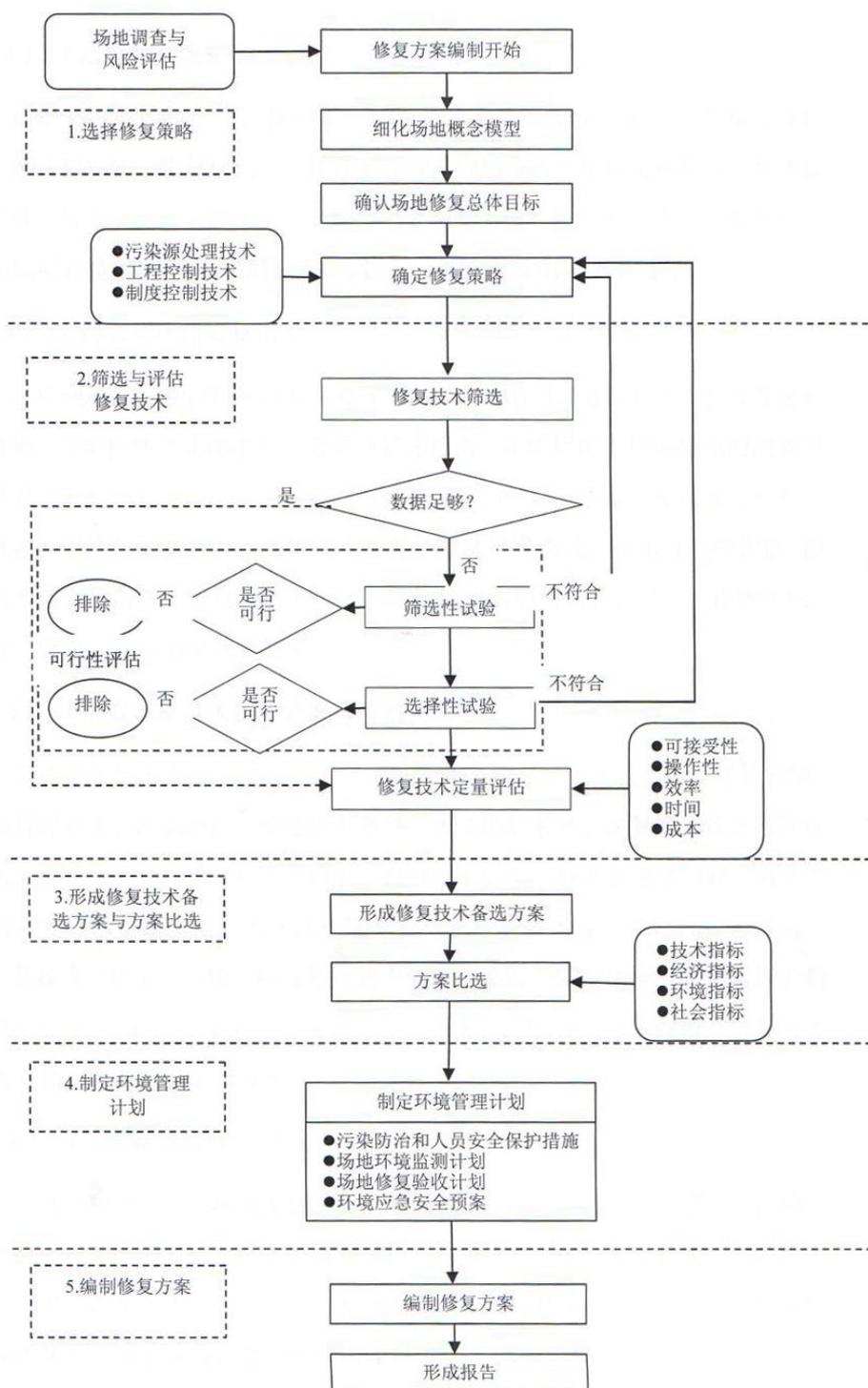


图 1.6-1 污染场地修复技术方案编制的内容及技术路线

第 2 章 场地污染现状与风险评估

2.1 场地污染现状

2.1.1 土壤污染现状

由《济宁中银电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目原厂区场地环境调查及风险评估报告》可知，在进行取样调查的土壤区域中，镍、苯、氯仿等污染物致癌风险均低于 10^{-6} ，危害商均低于 1，说明本场地上述污染物环境风险均在可接受范围内；位于氯苯区的 YQ-4 取样点浅层土样中汞的危害商达到 14.10，环境风险较大，需进行修复；而 YQ-4 周边 8 个取样点（20m 范围内）汞浓度均未超过《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》（HJ350-2007）中土壤环境质量 A 级标准（1.5mg/kg）表明上述土样均未受到汞污染；YQ-4 取样点下层土样第二层（2mg/kg）受到汞轻微污染，但危害商为 0.76，环境风险在可接受范围内，无需修复，第三层（0.36mg/kg）未受污染；本场地其它区域采样点汞的浓度均低于美国 EPA《通用土壤筛选值》及《场地土壤环境风险评价筛选值》（DB11/T 811-2011）中所述的土壤汞污染物限值（10mg/kg）。综上所述，本场地土壤中汞污染修复区域局限于 YQ-4 取样点周边的第一层土壤，受污染面积约 22.89m²，污染深度 0.5m，该区域修复土方量约为 11.445m³，污染区域如图 2.1-1 所示。

2.1.2 地下水污染现状

由《济宁中银电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目原厂区场地环境调查及风险评估报告》可知，依据《地下水质量标准》（GB/T14848-93）对地下水水样中污染物进行筛选，地下水中挥发酚为风险污染物。应用《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ25.3-2014）所述模型对挥发酚（苯酚）的致癌风险和危害商进行了计算，监测井中水样挥发酚危害商均小于 1，也即所能导致的基于非致癌因素的环境风险极低，其存在危及居民人体健康风险较低，因而无需对地下水进行修复；地下水水质检测结果表明，两口井 COD、氯离子、挥发酚等污染物均达到地下水 V 类水水平，不宜饮用，其它用水可根据使用目的选用。因此，在不作为饮用水的条件下，本场地取样范围内所涉及地下水中污染物不构

成健康风险，可以不作修复。



图 2.1-1 汞污染土壤范围

2.2 风险评估

污染场地健康风险评估是指针对特定土地利用方式下的场地条件，评价场地中的一种或多种污染物质对人体健康产生危害可能性的技术方法。

场地健康风险评估是场地开发利用的首要步骤，选用合适的评估方法能准确评估场地的实际风险。为了规范污染场地风险评估，加强污染场地环境保护监督管理，保障周边群众人体健康，本报告依据《污染场地风险评估技术导则》（HJ25.3-2014），结合国内外相关规范标准，查阅国内外相关文献资料，对污染场地进行风险评估。评估结果是进行管理决策及判断土地利用规划合理性的重要依据。

2.2.1 健康风险评估工作程序

污染场地风险评估考虑到多种污染物可能同时存在于场地不同介质之中，通过分析受体相关的多种暴露途径，评估多种污染物的健康风险，以可以接受的

健康风险水平为出发点，提出保护人体健康的风险建议值。

根据场地环境调查结果，确定启动风险评估。由《污染场地风险评估技术导则》（HJ25.3-2014）可知，污染场地风险评估包括危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征以及土壤修复建议目标值的确定等工作程序，如图 2.2-1 所示：

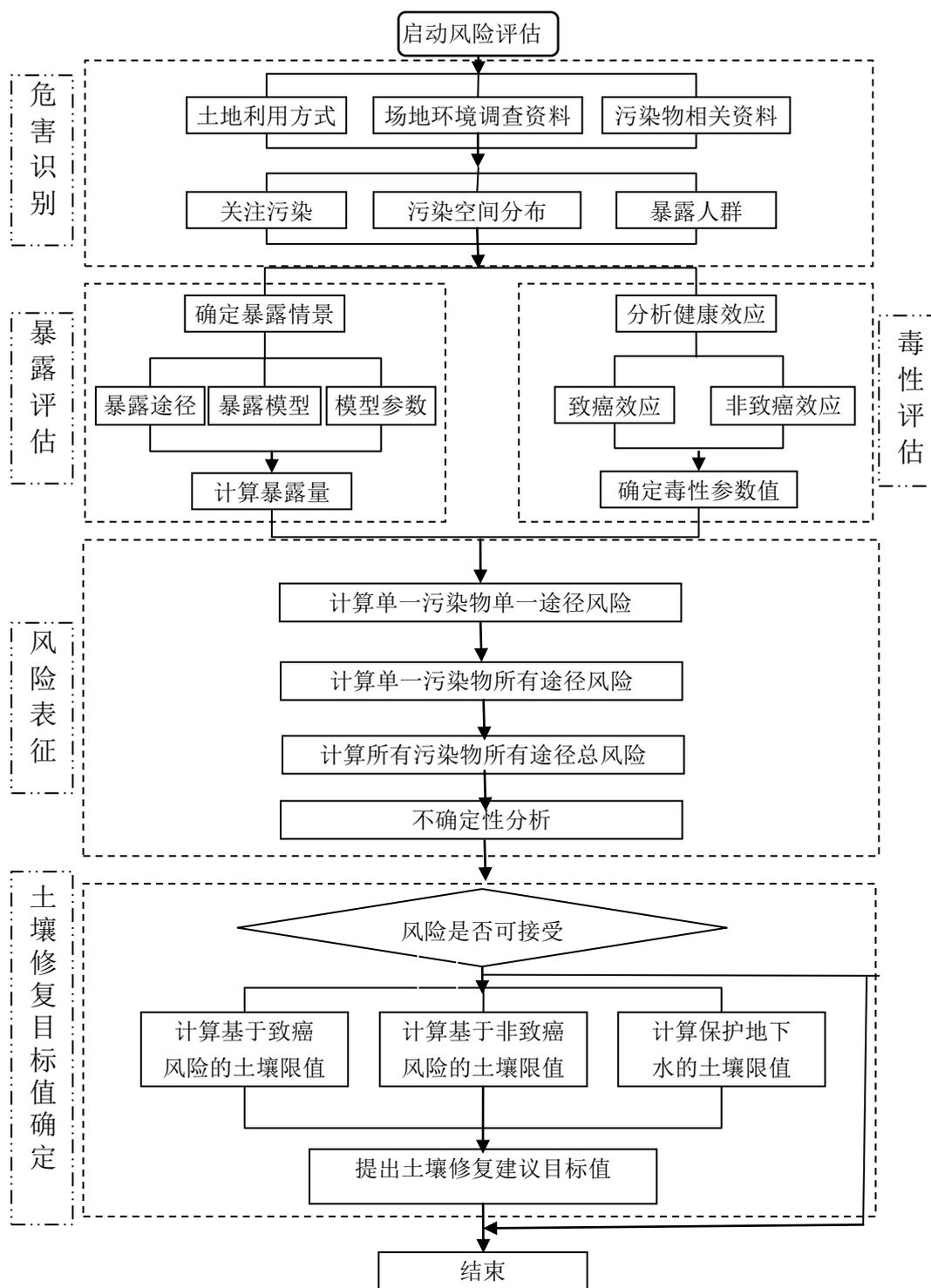


图 2.2-1 污染场地环境风险评估工作流程

(1) 危害识别

根据场地环境调查获取的资料，结合场地土地的规划利用类型，明确污染场地的关注污染物、场地内污染物的浓度及空间分布和可能的敏感受体，如儿童、成人、地下水体等。根据前期对场地环境调查及污染识别，危害识别阶段应获得如下信息：

- 1) 较为详尽的场地相关资料及历史信息；
- 2) 场地土壤和地下水等样品中污染物的浓度数据；
- 3) 场地土壤的理化性质分析数据；
- 4) 场地（所在地）气候、水文、地质特征信息和数据；
- 5) 场地及周边地块土地利用方式、敏感人群及建筑物等相关信息。

场地健康风险评估中，可能对人体健康造成的危害可分为两大类：致癌风险和非致癌风险。风险评估过程中，首先基于上述信息，将对不同敏感受体具有潜在风险的污染物确定为关注污染物，并对目标污染物进行致癌性与非致癌性判定。污染物健康风险判定方法如下：优先依据 IARC（International Agency for Research on Cancer，国际癌症研究机构）的致癌性分类标准，如果目标污染物在 IARC 数据库中属于 G1、G2A 和 G2B 类，则判定该污染物为致癌性物质，否则再查询 USEPA（美国环保总署）的 IRIS（Integrated Risk Information System，综合危险度信息库）数据库，在 IRIS 数据库中属于 A、B1、B2 或 C 类，则判定为致癌性污染物，其他判定为非致癌性污染物。这两个数据库均未查询到的目标污染物，可选择 USEPA 的 PPRTVs（the Provisional Peer Reviewed Toxicity Value，临时性同行审定毒性数据）、R369（Regional Screening Levels，区域筛选值）总表污染物毒性数据（2013 年 5 月发布）、世界卫生组织简明国际化学评估文件与环境健康准则（WJPCICAD; WHOEHC）或 GSI 数据库等对目标污染物的致癌性进行鉴定。

依据美国 EPA 通用土壤筛选值、《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》（HJ350-2007）以及《场地土壤环境风险评价筛选值》（DB11/T 811-2011），结合场地环境调查取样分析结果，土壤样品中单一污染物检测值超出上述任一标准的筛选值即认为需启动风险评估，从而明确了本项目涉及场地的关注污染物为镍、汞、铜等重金属，以及苯、氯苯、三氯甲烷、苯酚等有机污染物，危害鉴定

结果如表 2.2-1 所示：

表 2.2-1 关注污染物毒性鉴定结果

分类	序号	名称	CAS 码	致癌/非致癌性判定	数据来源
重金属	1	镍	7440-02-0	非致癌	R369
	2	汞	7487-94-7	非致癌	R369
	3	铜	7440-50-8	非致癌	PPRTVs
有机物	4	苯	71-43-2	致癌	IRIS
	5	氯苯	108-90-7	非致癌	PPRTVs
	6	三氯甲烷	67-66-3	致癌	IRIS
	7	苯酚	108-95-2	非致癌	IRIS

注：IRIS (Inergrated Risk Information System) 代表综合危险度信息库数据库；PPRTVs (the Provisional Peer Reviewed Toxicity Value) 代表临时性同行审定毒性数据、R369 (Regional Screening Levels) 代表区域筛选值中污染物毒性数据 (2016 年 5 月发布)。

(2) 暴露评估

1) 暴露评估工作内容

暴露评估的工作内容包括确定特定土地利用方式下人群对污染场地内关注污染物的暴露情景、主要暴露途径、关注污染物迁移模型和暴露评估模型、模型参数取值，以及计算敏感人群的暴露量。

在危害识别工作的基础上，分析场地土壤中关注污染物进入并危害敏感受体的可能性，确定场地土壤污染物对敏感人群的暴露途径，确定污染物在环境介质中的迁移模型和敏感人群的暴露模型，确定与场地污染状况、土壤性质、地下水特征、敏感人群和关注污染物性质等相关的模型参数值，计算敏感人群摄入来自土壤和地下水的污染物所对应的土壤和地下水的暴露量。

2) 暴露情景

暴露途径是特定土地利用方式下，场地污染物经由不同方式迁移并到达受体的一种假设性场景描述，即关于场地污染暴露如何发生的一系列事实、推定和假设。根据场地用地规划，确定场地未来用地情景。根据受体特征，分析受体人群与场地污染物的接触方式。可将用地情形分为敏感用地和非敏感用地，由于绿地情景的暴露途径和暴露参数较为特殊，因此一般将用地情景分为居住、工商业和公园三类用地进行计算和分析。

依据济宁市规划局资料，本项目区域被规划为住宅用地，因此本项目受体分为儿童、青少年和成人，接触方式一般包括：①直接摄入污染土壤；②经皮肤接

触污染土壤而吸收污染物；③通过呼吸系统吸入污染的土壤颗粒物；④吸入土壤及地下水中的挥发性有机污染物；⑤饮用地下水和地表水。

对于污染物的致癌效应，应考虑人群的终身暴露危害；对于污染物的非致癌效应，应以儿童为敏感受体，一般以儿童期来评估污染物的非致癌危害。

3) 暴露途径

本项目调查区域为济宁中银电化有限公司所在地块，目前政府对土地用途规划为住宅类用地，本项目厂址周围 5 公里范围内有潜在污染风险的为鲁抗集团和洗涤剂厂，敏感受体为吴庄、李楼、第十一中学及鲁抗医院。

住宅类用地方式下，人群可因不慎经口摄入污染土壤而暴露于污染物，可因皮肤接触污染土壤而暴露于污染物，也可因吸入室内和室外空气中的来自土壤的颗粒物暴露于污染物，如场地内污染物具有挥发性，人群还可因吸入室内和室外空气中来自土壤的气态污染物而产生健康危害。住宅类用地方式下，儿童和成人均可能会长时间暴露于场地污染物而产生健康危害。对于污染物的致癌效应，健康危害无阈值浓度，考虑人群的终身暴露危害，一般根据儿童和成人期的暴露来评估污染物的终身致癌风险；对于污染物的非致癌效应，一般根据成人期暴露来评估污染物的非致癌风险。

普通住宅、公寓、别墅等居住区按照上述住宅用地方式进行暴露情景分析；幼儿园、学校、医院、养老院、游乐场和公园、绿化景观等用地，参照敏感性用地方式进行暴露情景分析。

综上所述，该地块场地环境风险评价过程中按照敏感用地的要求进行评价。

(3) 毒性评估

在危害识别工作的基础上，分析关注污染物对人体健康的危害效应，包括致癌效应和非致癌效应，确定与关注污染物相关的毒性参数，包括参考剂量、参考浓度、致癌斜率因子和单位致癌因子等。

在土壤环境风险评估工作中，致癌风险斜率因子和慢性毒性参考剂量分别是计算风险值和危害商的必要参数。在本研究过程中，目标污染物包含致癌性物质和非致癌性物质，因此需要确定该污染物的致癌风险斜率因子及非致癌参考剂量。

(4) 风险表征

在暴露评估和毒性评估的工作基础上,采用风险评估模型计算单一污染物经单一暴露途径的风险值、单一污染物经所有暴露途径的风险值、所有污染物经所有暴露途径的风险值;进行不确定性分析,包括对关注污染物经不同暴露途径产生健康风险的贡献率和关键参数取值的敏感性分析,根据需要进行风险的空间表征。风险表征计算的风险值包括单一污染物的致癌风险值、所有关注污染物的总致癌风险值、单一污染物的危害商值和多个关注污染物的危害指数(非致癌风险值)。

(5) 土壤和地下水风险控制值计算

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

2.2.2 土壤中单一污染物的环境风险评估

(1) 单一污染物的暴露量评估

采样测试结果表明,本项目所涉及污染场地污染物主要为镍、汞、铜等重金属污染物,以及苯、氯苯、苯酚、三氯甲烷等有机污染物,可能接触到人体的暴露途径主要为土壤直接接触及颗粒物吸收路径。在进行污染场地健康风险计算中考虑的暴露途径为表层土壤经口直接摄入、土壤的皮肤接触、土壤颗粒物吸入、气态污染物吸入等路径,即受污染的地表土壤可以直接与人体接触,也可能由于风蚀作用或挥发作用进入到大气,通过大气弥散和空间附着累计与人体接触,从而被人体吸收。因此,本项目依据《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)中的土壤暴露评估推荐模型计算单一污染物各途径对应的土壤暴露量,主要考虑经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物、吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物、吸入室内空气中来自表层土壤的气态污染物等途径的暴露量。

模型参数选择根据《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)要求及污染场地的实际状况共同确定,以达到最佳模拟效果。土壤中各项参数取值如表

2.2-2 所示：

表 2.2-2 风险评估模型参数及推荐值

参数名称	符号	单位	敏感用地推荐值
成人暴露周期	ED _a	a	24
儿童暴露周期	ED _c	a	6
成人暴露频率	EF _a	d/a	350
儿童暴露频率	EF _c	d/a	350
成人体重	BW _a	kg	56.8
儿童体重	BW _c	kg	15.9
成人每日摄入土壤量	OSIR _a	mg/d	100
儿童每日摄入土壤量	OSIR _c	mg/d	200
成人每日空气呼吸量	DAIR _a	m ³ /d	14.5
儿童每日空气呼吸量	DAIR _c	m ³ /d	7.5
成人每日饮用水量	DWCR _a	L/d	1.0
儿童每日饮用水量	DWCR _c	L/d	0.7
成人平均身高	H _a	cm	156.3
儿童平均身高	H _c	cm	99.4
成人暴露皮肤所占体表面积比	SER _a	无量纲	0.32
儿童暴露皮肤所占体表面积比	SER _c	无量纲	0.36
成人皮肤表面土壤粘附系数	SSAR _a	无量纲	0.07
儿童皮肤表面土壤粘附系数	SSAR _c	无量纲	0.2
室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例	fspo	无量纲	0.5
致癌效应的平均时间	AT _{ca}	d	26280
非致癌效应的平均时间	AT _{nc}	d	9125
每日皮肤接触事件频率	E _v	次/d	1
吸入土壤颗粒物在体内滞留比例	PIAF	无量纲	0.75

(2) 毒性评估

依据暴露评估计算结果进行毒性评估，旨在分析关注污染物对人体健康的危害性质（致癌效应和/或非致癌效应），以及关注污染物经不同暴露途径对人体健康的毒性危害机理及剂量—效应关系，从而确定污染物的毒性参数值。

目前，国内外已经就这些参数进行了大量研究，并建立了多个数据库以供查询。本项目在选择这些参数时，首选《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)中推荐的参数，若该导则中没有相关参数，则依次选择 USEPA（美国环保总署）的 IRIS（Inergrated Risk Information System，综合危险度信息库）数据库、美国环保总署的 PPRTVs（the Provivial Peer Reviewed Toxicity Value，临时性同行审定毒性数据）、R369（Regional Screening Levels，区域筛选值）总表污染物毒性数据（2013 年 5 月发布）、世界卫生组织简明国际化学评估文件与环境卫生准

则（WJPCICAD; WHOEHC）或 GSI 数据库。通过查询上述数据库，确定目标污染物独立性数据。本污染场地风险评估项目所涉及污染物毒性参数如表 2.2-3 所示：

呼吸吸入致癌斜率因子（ SF_i ）根据呼吸吸入单位致癌因子（ URF ）外推计算得到；呼吸吸入参考剂量（ RfD_i ）根据呼吸吸入参考浓度（ RfC ）外推计算得到；皮肤接触致癌斜率系数（ SF_d ）根据经口摄入致癌斜率系数计算得到；皮肤接触参考剂量（ RfD_d ）根据经口摄入参考剂量计算得到。上述参数分别采用《污染场地风险评估技术导则》所述公式进行计算。

表 2.2-3 主要污染物毒性参数

污染物			汞	镍	氯苯	三氯甲烷	铜
经口摄入吸收致癌斜率因子	SF_0	$(\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1})^{-1}$	1.50E+00	3.80E-01	—	—	—
经口摄入吸收参考剂量	RfD_0	$(\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1})^{-1}$	3.00E-04	1.00E-03	6.00E-01	4.00E-04	4.00E-02
呼吸吸入吸收参考剂量	RfD_i	$(\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1})^{-1}$	8.60E-06	1.00E-03	—	1.40E-05	—
呼吸吸入吸收单位致癌因子	URF	$(\text{mg m}^{-3})^{-1}$	4.3E+00	1.80E+00	—	—	—
皮肤接触吸收效率因子	ABS_d	—	3.00E-02	1.00E-03	—	1.00E-03	—
消化道吸收效率因子	ABS_{GI}	—	1.00E+00	2.50E-02	1.00E+00	1.50E-01	1.00E+00

（3）土壤污染的风险表征

每个采样点关注污染物的浓度数据计算风险值。目前国际上一般认为污染物可接受的致癌风险水平为 10^{-6} ，非致癌危害商为 1，即致癌风险大于 10^{-6} 或非致癌危害商大于 1 可能对人体产生危害，需要采取进一步的管理或修复措施。该场地未来规划为居住用地，考虑到济宁市当地的社会经济发展水平，本报告分别以 10^{-6} 和 1 作为场地可接受致癌风险和非致癌危害商。

风险值(Risk)定义为长期的每日摄入量与致癌斜率因子的乘积，表示暴露该种物质而导致的一生中超过正常水平的癌症发病率。一般认为生物体对非致癌性物质的反应有计量阈值，低于阈值则认为不会产生不利于健康的影响。非致癌风险通常用风险指数描述，即暴露造成的长期日摄入量与参考计量的比值。

本报告依据《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3-2014）中计算致癌风险

和危害商的推荐模型计算单一污染物各途径及所有暴露途径的致癌风险和危害商。

2.2.3 地下水中单一污染物的风险评估

地下水风险评估分为地下水污染风险评估、健康风险评估和生态风险评估。地下水污染风险评估是指应用一定的方法对地下水污染概率进行评价的过程，定性为主，结论为相对概念；地下水生态风险评估应用定量的方法评价和预测各种环境污染物对生态系统可能产生的风险，受地下水相关生态系统复杂性的制约，我国地下水生态风险评估几乎未报道；地下水污染健康风险评估是基于保护人类健康考虑的，以地下水质量标准 and 风险评估的健康基准值为基础，量化地下水污染对人体健康产生潜在影响的方法。

与土壤风险评估流程一致，地下水污染健康风险评估包括危险识别、毒性评估、暴露评估和 risk 表征四部分，如下所述：

- a) 危害识别：识别关注污染物及其释放率；
- b) 暴露评估：定量或定性估计暴露量、暴露频率、暴露期和暴露方式；
- c) 毒性评估：分析目标污染物对人体的健康效应（致癌效应和非致癌效应），确定污染物毒性参数值；
- d) 风险表征：风险计算、不确定性分析和 risk 的空间表征，确定场地的环境及健康 risk。

（1）暴露评估

依据《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3-2014）中的地下水暴露评估推荐模型计算单一污染物各途径对应的地下水暴露量，主要考虑污染物挥发（室内、室外）途径及饮用水摄入途径。

（2）风险表征

依据每个地下水采样点关注污染物的浓度数据计算 risk 值，本报告分别以 10^{-6} 和 1 作为场地可接受致癌 risk 和非致癌危害商。按照《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3-2014）中计算致癌 risk 和危害商的推荐模型计算单一污染物各途径及地下水所有暴露途径的致癌 risk 和危害商。

2.2.4 场地风险评价结果与讨论

由本场地土壤取样分析结果可知，场地内筛选得出的关注污染物的污染情况相对比较集中，具有比较明显的污染区域特征，而不具备正态分布特征，如选用95%置信水平上限值可能无法真实地反映场地内土壤污染的健康风险。此时，选择这些关注污染物的最大超标浓度更为适合。因此，本场地风险评价中，针对每一取样点所测单一污染物浓度计算了致癌风险和危害商。

(1) 土壤污染物风险评价结果及分析

依据美国 EPA《通用土壤筛选值》、《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011) 以及《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》(HJ350-2007)，结合土壤样品检测结果对污染物进行筛选。由检测数据可知，本场地中某些取样点的镍、汞、铜等重金属污染物，以及苯、氯苯、三氯甲烷等有机污染物超过了《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》(HJ350-2007) 中土壤环境质量 A 级标准（低于 A 级标准表明土壤未受污染），而上述土样中部分污染物浓度超过了美国 EPA《通用土壤筛选值》及《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011) 提及的污染物浓度筛选值，但均未达到《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》(HJ350-2007) 中土壤环境质量 B 级标准（土壤修复行动值，当某场地土壤污染物监测值超过 B 级标准限值时，该场地必须实施土壤修复）。土壤样品污染物超标情况如表 2.2-4 所示：

表 2.2-4 土壤样品污染物超标情况

污染物种类	取样点编号	污染物浓度 (mg/kg)	美国 EPA 通用土壤筛选值 (mg/kg)	场地土壤环境风险评价筛选值 (mg/kg)	展览会用地土壤环境质量评价标准 (mg/kg)	
					A 级	B 级
镍	PVC-1a	55.2	1600	50	50	2400
	PVC-2b	54.1				
	PVC-3a	51.9				
	YQ-4b	56.8				
	BD-2a	51.2				
	YS-1c	55				
	YS-2c	58.2				
	SJ-1a	53.5				
苯	HW-1	0.23	22	0.64	0.2	13
	BD-2	0.44				
	WS-1	0.57				

污染物种类	取样点编号	污染物浓度 (mg/kg)	美国 EPA 通用土壤筛选值 (mg/kg)	场地土壤环境风险评价筛选值 (mg/kg)	展览会用地土壤环境质量评价标准 (mg/kg)	
					A 级	B 级
	LB-1a	0.45				
	LB-1b	0.92				
	LB-1c	0.73				
	LB-2a	0.7				
	LB-2b	0.63				
	LB-2c	0.56				
	LB-3a	1.21				
	LB-3b	0.98				
	LB-3c	0.65				
	CL-2b	0.69				
	CL-2c	0.48				
	SJ-1a	0.29				
	SJ-1b	0.94				
	SJ-1c	0.95				
	SJ-6a	0.9				
	SJ-6c	0.63				
	SJ-5c	0.28				
	LB-7a	0.25				
LB-7b	0.22					
氯仿	WS-1a	3.7	0.3	0.22	2	28
	LB-1b	3.6				
	LB-3b	3.16				
	CL-1c	8.42				
	SJ-2a	3.43				
	SJ-2b	2.06				
	SJ-6a	3.79				
	LB-13a	2.64				
汞	PVC-9a	5.68	10	10	1.5	50
	PVC-1a	2.18				
	PVC-1c	1.96				
	YQ-4a	37.2				
	YQ-4b	2				
	LB-6a	9.39				
	YS-2a	1.64				
	LB-10b	2.02				
铜	SJ-1a	81.9	—	600	63	600
氯苯	LB-11a	8.3	130	41	6	680

依据美国 EPA《通用土壤筛选值》中的筛选值，以及《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011)中居民用地污染物筛选值中的较低数值对土样中污染物进行筛选，应用《污染场地风险评估技术导则(发布稿)》(HJ25.3-2014)所述模型对筛选出土样中镍、汞等重金属，以及苯、三氯甲烷等有机污染物致癌风险和危害商进行了计算，结果如表 2.2-5 所示：

表 2.2-5 土壤污染物致癌风险和危害商计算结果

污染物种类	取样点编号	污染物浓度 mg/kg	单一污染物致癌风险	单一污染物危害商
镍	PVC-1a	55.2	2.34E-07	0.864246
	PVC-2b	54.1	2.29E-07	0.847024
	PVC-3a	51.9	2.20E-07	0.812579
	YQ-4b	56.8	2.40E-07	0.889297
	BD-2a	51.2	2.17E-07	0.80162
	YS-1c	55	2.33E-07	0.861115
	YS-2c	58.2	2.46E-07	0.911216
	SJ-1a	53.5	2.26E-07	0.83763
苯	LB-1b	0.92	8.51E-08	0.014742
	LB-1c	0.73	6.75E-08	0.011697
	LB-2a	0.7	6.47E-08	0.011217
	LB-2b	0.63	5.83E-08	0.010095
	LB-3a	1.21	1.12E-07	0.019389
	LB-3b	0.98	9.06E-08	0.015703
	LB-3c	0.65	6.01E-08	0.010415
	CL-2b	0.69	6.38E-08	0.011056
	SJ-1b	0.94	8.69E-08	0.015062
	SJ-1c	0.95	8.79E-08	0.015223
	SJ-6a	0.9	8.32E-08	0.014421
	SJ-6c	0.63	5.83E-08	0.010095
氯仿	WS-1a	3.7	1.94E-07	0.023707
	LB-1b	3.6	1.89E-07	0.023066
	LB-3b	3.16	1.66E-07	0.020247
	CL-1c	8.42	4.41E-07	0.053949
	SJ-2a	3.43	1.80E-07	0.021977
	SJ-2b	2.06	1.08E-07	0.013199
	SJ-6a	3.79	1.99E-07	0.024283
	LB-13a	2.64	1.38E-07	0.016915
汞	YQ-4a	37.2	—	14.10464

由计算结果可知，所筛选出的土样中，镍、苯、氯仿等污染物致癌风险均低于 10^{-6} ，危害商均低于 1，说明本场地上述污染物环境风险均在可接受范围内；

位于氯苯区的 YQ-4a 取样点土样中汞的危害商达到 14.10，环境风险较大，需进行修复；而 YQ-4a 周边取样点 YQ-3、PVC-2、PVC-3、PVC-6、DB-2 土样中汞浓度分别为:0.27 mg/kg、0.36mg/kg、0.81mg/kg、0.80mg/kg、0.29mg/kg，均未超过《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》（HJ350-2007）中土壤环境质量 A 级标准（1.5mg/kg）表明上述土样均未受到汞污染；YQ-4a 取样点下层土样 YQ-4b 及 YQ-4c 汞浓度分别为 2mg/kg 及 0.36 mg/kg，说明该取样点第二次受轻微污染，但危害商为 0.76，环境风险在可接受范围内，无需修复，第三层未受污染；本场地其它区域采样点汞的浓度均低于美国 EPA《通用土壤筛选值》及《场地土壤环境风险评价筛选值》（DB11/T 811-2011）中所述的土壤汞污染物限值（10mg/kg）。综上所述，本场地土壤中汞污染修复区域局限于 YQ-4 取样点周边的第一层土壤。

（2）地下水污染物风险评价结果及分析

依据《地下水质量标准》（GB/T14848-93）对地下水水样中污染物进行筛选，地下水中挥发酚为风险污染物。应用《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ25.3-2014）所述模型对挥发酚（苯酚）的致癌风险和危害商进行了计算，计算结果如表 2.2-6 所示：

表 2.2-6 地下水污染物致癌风险和危害商计算结果

污染物种类	监测井号	污染物浓度	单一污染物致癌风险	单一污染物危害商
挥发酚 (以苯酚计)	1#	0.0364	—	0.02561
	3#	0.0204	—	0.01435

由表 2.2-6 可知，1#及 3#监测井中水样挥发酚危害商均小于 1，也即所能导致的基于非致癌因素的环境风险极低，其存在危及居民人体健康风险较低，因而无需对地下水进行修复；地下水水质检测结果表明，上述两口井 COD、氯离子、挥发酚等污染物均达到地下水 V 类水水平，不宜饮用，其他用水可根据使用目的选用。因此，在不作为饮用水的条件下，本场地取样范围内所涉及地下水中污染物不构成健康风险，可以不作修复。

2.2.5 风险评价的不确定性分析

由于风险评价的自身特点，风险分析中具有不确定性。USEPA 将包括在暴露和风险评价中的不确定性分为三种类型，也即：情景、参数、模型不确定性。

情景不确定性是指由于丢失的或不完整的信息而引起的不确定性，需要充分定义暴露和剂量，来源包括描述性误差、聚合误差、专业判断误差和不完整的分析；模型不确定性是指基于因果关系的推论做出的预测中存在的确定性，来源包括建模错误和关系错误；参数不确定性是一种关于参数的不确定性，来源是测量误差、采样误差、变动性和替代数据的使用。

本报告中，综合各种因素考虑，本场地风险评价的不确定性主要源于场地本身的客观因素、暴露评价和毒性评价三方面不确定性。

(1) 场地本身的客观因素

由于场地内原生产活动历史较长，且目标场地范围较大开展现场调查采样时场地内原有地上建筑物、构筑物已部分拆除，部分地面覆以建筑垃圾及回填土，无法确认完整的历史生产活动沿革；场地停用后，周边农民在场地内拾取废旧品对场地造成一定的扰动，这些扰动及其他生产活动对采样过程中污染源的确会产生一定的干扰。

(2) 暴露途径的不确定性

在风险评价过程中，不同国家（地区）或研究机构之间暴露途径选择不尽相同，差异较大。一方面是地区实际情况的差异，另一方面是各国风险评价方法的理论方法带来的差异。本次风险评价主要遵从美国 EPA 的风险评价框架及《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ 25.3-2014）。

对于人体健康的环境风险水平而言，污染物物化特征通过影响介质间的分配影响风险水平。本场地风险评价中，需要修复的区域中仅存在汞超标现象，而汞污染仅存在非致癌风险。对于金属汞污染经不同暴露途径的非致癌风险贡献率，采用下式进行计算：

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

式中：

PHQ_i —汞经第 i 种暴露途径的危害商贡献率，无量纲；

HI_i —汞经第 i 种暴露途径的危害商，无量纲。

作为重金属污染物，汞的暴露途径包括经口摄入、皮肤接触及呼吸吸入等三种。由表 2.2-5 可知，汞的危害商 $HI_n=14.10$ 。基于导则所述模型对 PHQ_i 进行计

算，结果如表 2.2-7 所示：

表 2.2-7 汞的非致癌风险贡献率

暴露途径	经口摄入	皮肤接触	呼吸吸入
危害商 HQ _i	7.48	6.54	0.10
危害商贡献率 PHQ _i (%)	53%	46%	0.7%

由表 2.2-7 计算结果可知，汞污染形成的危害主要是通过经口摄入及皮肤接触两种暴露途径造成的，危害商贡献率分别占 53%和 46%。因而，对该污染场地进行风险控制与管理时，应避免或减少汞的经口摄入或皮肤接触土壤等暴露途径，从而降低对人体的健康风险。

(3) 参数的不确定性

本次场地风险评价严格采用实测数据和《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ 25.3-2014）中的相关参数。由于我国相关基础研究成果匮乏（如对暴露参数和建筑物参数的估计），因此仍有某些参数采用国外相关数据，难免会造成相关参数估计与实际场地情况存在偏差。

应用《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ 25.3-2014）中敏感性比例模型对相关参数进行敏感性分析，模型参数 P 的敏感性比例可表达为：

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

式中：

SR—模型参数敏感性比例，无量纲；

P₁—模型参数 P 变化前的数值；

P₂—模型参数 P 变化后的数值；

X₁—按 P₁ 计算的致癌风险或危害商，无量纲；

X₂—按 P₂ 计算的致癌风险或危害商，无量纲。

依据表 2.2-7 中计算结果，对经口摄入土壤、皮肤接触土壤等风险贡献率超过 20%的暴露途径的模型参数进行敏感性分析，结果如表 2.2-8 所示：

表 2.2-8 模型参数对非致癌风险值的敏感性比例

暴露途径		参数名称及敏感性比例						
口腔 摄入	P	ED _c	EF _c	OSIR _c	BW _c	AT _{nc}		
	SR	1.00	1.00	-0.95	-0.95	-0.95		
皮肤 接触	P	ED _a	EF _a	SER _a	SSAR _a	AT _{nc}	BW _a	H _a
	SR	1.00	1.00	1.00	1.00	-0.95	-0.47	0.41

计算结果表明，进行经口摄入土壤途径及皮肤接触土壤的暴露途径非致癌风险计算时，等模型参数敏感性比例均小于 1，参数敏感性较弱，场地风险评估时可选择默认参数进行计算。

除了常规确定的暴露途径以外，不排除实际过程中的一些特异情况。由于现场情况较为复杂，场地中覆盖有大量回填土壤及建筑垃圾，现场取样中充分考虑了回填覆盖物的影响，但依然不能完全排除上述回填物对取样的影响；本报告在确定暴露因子和毒性参考数据时也存在一定的不确定性，重金属污染物建模中主要参考了《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ 25.3-2014）中的相关暴露因子及数据，并考虑到人口暴露时间、皮肤粘附因子和暴露频率等方面的差异，依据国内研究成果对部分参数进行了修订；本报告中，多种污染物的复合毒性效应的不确定性也会给最终评价结果带来影响。

第 3 章 选择修复策略

3.1 动态更新场地概念模型

修复技术方案编制阶段的场地概念模型，应进一步结合场地水文地质条件、污染物的理化参数、空间分布及其潜在运移途径、风险评估结果等因素，以文字、图、表等方式概念化场地地层分布、地下水埋深、流向、描述污染物的空间分布特征、污染物的迁移过程、迁移途径、污染介质与受体的相对位置关系、受体的关键暴露途径以及未来建筑物结构特征等，用以指导修复策略制定、筛选合适的修复技术并提出潜在可行的修复技术备选方案。

在修复技术方案制定的过程中，应根据所制定的修复技术方案，动态更新场地概念模型，以评估不同修复技术方案的实施效果。

对于重金属污染场地，污染物主要通过摄入土壤、皮肤接触土壤、呼吸吸入土壤颗粒等方式进入人体对人体健康造成危害。因此，在这类场地的污染概念模型中，需清晰描绘污染物与受体的相对位置、在环境介质中的迁移方式、最终进入受体的途径以及场地上未来建筑物的详细结构。由于该场地地下水部分指标超出 V 类水标准，无法作为饮用水进行取用，本模型构建中未考虑饮用受污染地下水和地表水接触方式。根据业主的说明，该场地修复完成后将用于居住用建筑的建设，居住用地情形下，场地未来建筑结构由位于箱型基础内的地下车库，以及位于地上的建筑物主体构成。规划情形下污染场地概念模型如图 3.1-1 所示。

3.2 确认场地总体修复目标

3.2.1 土壤修复治理目标

根据场地风险评估报告，土壤中汞的修复目标值为 2.64mg/kg，对土壤修复治理目标作如下建议：土壤中汞含量 $\leq 2.64\text{mg/kg}$ 。

3.2.2 地下水修复治理目标

根据风险评估结果，1#及 3#监测井中水样挥发酚危害商均小于 1，也即所能导致的基于非致癌因素的环境风险极低，其存在危及居民人体健康风险较低，因而无需对地下水进行修复；地下水水质检测结果表明，上述两口井 COD、氯离

子、挥发酚等污染物均达到地下水V类水水平，不宜饮用，其他用水可根据使用目的选用。因此，在不作为饮用水的条件下，本场地取样范围内所涉及地下水中污染物不构成健康风险，可以不作修复。

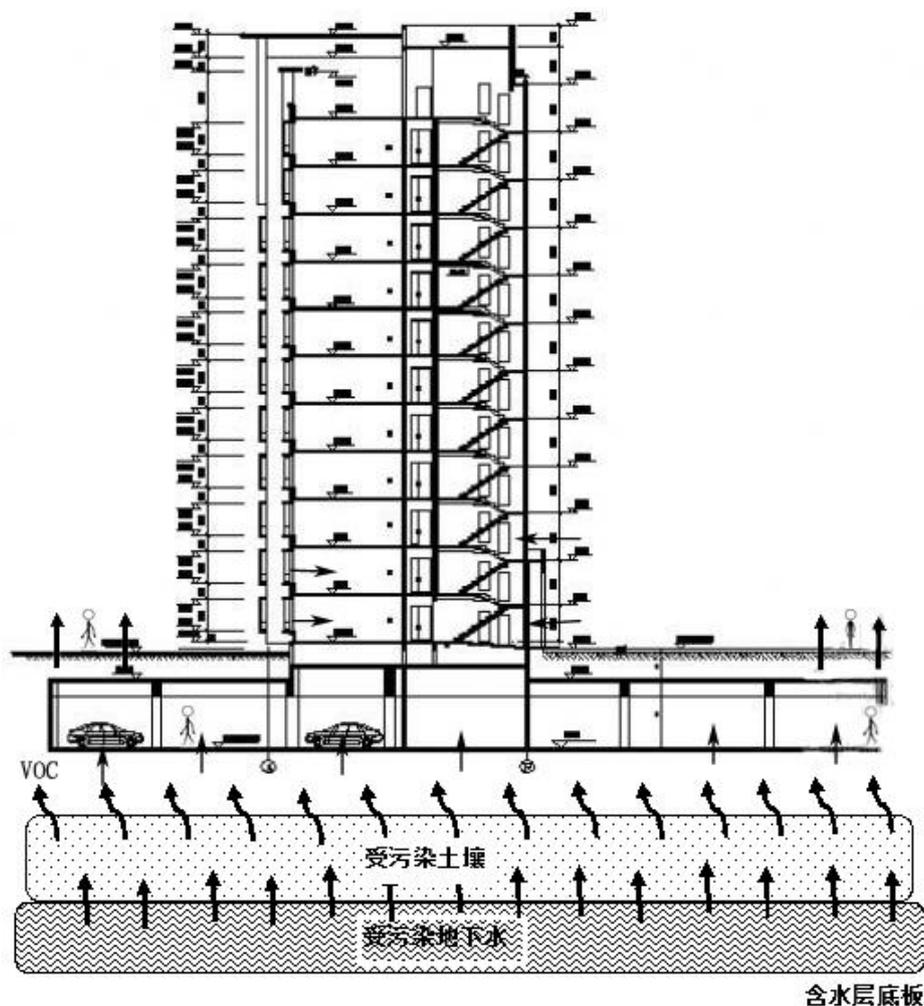


图 3.1-1 房地产开发规划情形下污染场地概念模型

3.3 确定修复策略

3.3.1 土壤修复目标值和修复范围

(1) 土壤修复目标值计算方法

场地修复目标值的计算步骤如下：

- 1) 根据风险评估结果，确定对人体健康具有潜在危害的污染物种类；
- 2) 确定目标风险水平和危害商；
- 3) 整理收集污染物理化参数及毒理学参数；
- 4) 根据土地利用类型和受体特征确定暴露参数；

- 5) 根据场地特征确定场地参数;
- 6) 选择模型或公式计算污染物修复目标值。

本项目修复目标值计算采用《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ25.3-2014）所述模型进行计算。

根据《场地评价技术导则》，污染物可接受的非致癌风险水平即目标污染物危害商为 1，可接受的致癌风险水平为 10^{-6} ~ 10^{-4} 。目前世界各国标准制定时污染物可接受的非致癌危害商一般为 1，致癌风险水平则不尽相同，一般也都在 10^{-6} ~ 10^{-4} 范围内，如荷兰为 10^{-4} ，加拿大和新西兰为 10^{-5} ，美国和澳大利亚均为 10^{-6} 。风险水平的确定在很大程度上与国家的经济技术水平和政策有关。依据济宁市规划局资料显示：该场地未来规划为住宅用地。综合考虑到济宁市当地的社会经济发展水平，本项目场地修复目标值计算时初步选用的目标风险水平为：总致癌风险 10^{-6} ，非致癌危害商为 1。

（2）潜在危害污染物的确定

本报告依据《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ25.3-2014）所述评价模型对现场土壤及地下水采样结果进行计算，以致癌风险 10^{-6} 、非致癌危害商 1 作为可接受风险水平，场地内土壤中共筛选出 1 种可能对人体健康产生危害的污染物，地下水中污染物致癌风险水平低于 10^{-6} ，非致癌危害商低于 1，对表 5.4-1 及 5.4-2 中计算结果进行分析，可得该场地土壤中潜在危害污染物为汞。

（3）参数的确定

土壤修复目标值计算过程涉及到污染物参数和场地特征参数。污染物参数包括污染物理化参数和毒理学参数，场地特征参数包括土壤参数、地下水参数、建筑物参数等。

（4）单一污染物修复目标值的计算

本项目依据《污染场地风险评估技术导则（发布稿）》（HJ25.3-2014）中计算风险控制值的推荐模型进行修复目标值计算。模型内容包括基于致癌效应的土壤风险控制值和基于非致癌效应的土壤风险控制两部分，计算基于经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物等途径致癌效应或非致癌效应的土壤风险控制值计算。

1) 单一污染物风险控制值计算结果

基于前述模型，在本项目取样条件下对土壤中污染物汞进行计算，得出污染物基于致癌效应的风险控制值和基于非致癌效应的风险控制值，如表 3.3-1 所示：

表 3.3-1 土壤中单一污染物风险控制值

污染物	汞
基于致癌效应的风险控制值	—
基于非致癌效应的风险控制值	2.64

2) 单一污染物修复目标值的确定

对表 3.2-1 中单一污染物的致癌风险控制值和危害商控制值取小值，得出单一污染物的计算风险控制值；将该计算风险控制值与《土壤环境质量标准》（GB15618-2008）中二级标准值，以及《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》（HJ350-2007）中目标值与修复启动值，北京（2011）、上海（2015）和浙江（2013）等地方风险筛选值，《建设用地土壤污染风险筛选指导值（三次征求意见稿）》（2016），美国 EPA《Regional Screening Level (RSL) (TR=1E-06, HQ=1)》（2016.5）进行对比，结合实测土壤背景值，得出单一污染物的修复目标值。

由计算结果可知，污染物汞计算风险控制值低于北京市筛选值及土壤环境质量二级标准，但高于修复目标值，兼顾环境风险及修复工程经济性，相关数据及本报告选用修复值如表 3.3-2 所示：

表 3.3-2 单一污染物修复值比选

项目	汞 (mg/kg)	
土壤背景值	0.28	
计算风险控制值	2.64	
土壤环境质量标准（修订）二级标准值（2008）	居住用地	4
	商业用地	20
	工业用地	20
建设用地土壤污染风险筛选指导值（三次征求意见稿）（2016）	住宅用地	4.92
	工业类用地	47.6
北京-场地土壤环境风险评价筛选值（2011）	住宅用地	10
	公园绿地	10
	工业/商服用地	14
上海-风险评估土壤筛选值（2015）	敏感用地	2.3
	非敏感用地	11.2
浙江-污染场地风险评估技术导则（2013）	住宅及公共用地	10
	商服及工业用地	14
展览会用地土壤环境质量评价标准（2007）	A 值	1.5
	B 值	50
美国 EPA《Regional Screening Level (RSL) (TR=1E-06, HQ=1)》（2016.5）	居住用地	23
	工业用地	350
本报告选用修复值	2.64	

综上所述，本场地部分区域受到较为严重的汞污染，超标浓度为 37.2mg/kg，经计算，土壤中汞的修复值应为 2.64mg/kg。

(5) 修复范围的确定

1) 修复范围的确定原则

本报告中污染场地的修复是指通过物理、化学转化过程，将场地中的关注污染物消除或移除，使得场地内土壤中的污染物浓度符合相关标准要求，使其环境风险降低到可以接受的水平。

目前我国尚没有正式制定颁布具体的关于场地污染修复的技术政策和导则。国家环境保护总局《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》(环办[2004]47号)和环境保护部《关于加强土壤污染防治工作的意见》(环发[2008]48号)中，要求“对于已经开发和正在开发的外迁工业企业区域，要尽快制定土壤环境状况调查、勘探、监测方案，对施工范围内的污染源进行调查，确定清理工作计划和土壤功能恢复实施方案，尽快消除土壤环境污染”，并“对污染场地特别是城市工业遗留、遗弃污染场地土壤进行系统调查，掌握原厂址及周边土壤和地下水污染物种类、污染范围和程度，建立污染场地土壤档案和信息管理系统”。

根据以上文件指示精神，确定以下场地修复范围划定的原则：

a) 政府对本项目场地的土地未来利用为住宅用地和商业用地使用，本项目厂址周围 5 公里范围内有潜在污染风险的为鲁抗集团和洗涤剂厂，敏感受体为吴庄、李楼、第十一中学及鲁抗医院，故该场地环境风险评价过程中应按照敏感用地的要求进行评价；

b) 在实际的现场调查工作结束后，结合场地土层分布特征及采样深度确定修复范围；

c) 针对土壤中不同污染物先分别划定单一污染物修复范围，然后再进行叠加合并，得出综合考虑各种污染物后的每一层土壤修复范围；

d) 土壤清理体积是以场地原地面或钻孔的起始零点作为计算起始地面，不包括场地现场调查结束后重新堆积的砖、石、灰等。污染土方量按土层估算，考虑到后期修复工程的可操作性，在对深层污染土壤进行取土或修复作业时，首先需清除地表堆积建筑垃圾及回填土壤；

e) 根据场地调查结果，场地内地下水不存在污染，因而不考虑对厂区地下水进行修复。但需要注意的是，场地所在地块在未来开发利用或修复过程中的开挖会形成基坑积水，地下水将以地表水的形式暴露出来，基坑降水产生的污染废水需要经过相应处理，达到排放标准后方可排放。

2) 场地土壤修复范围

本风险评估采样检测中，只有点 YQ-4a 土样的汞污染超出筛选值，而其周边取样点 YQ-3、PVC-2、PVC-3、PVC-6、DB-2 土样中汞浓度分别为:0.27 mg/kg、0.36 mg/kg、0.81mg/kg、0.80mg/kg、0.29 mg/kg，均未超过《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》（HJ350-2007）中土壤环境质量 A 级标准（1.5mg/kg）表明周边土样均未受到汞污染。鉴于此种情况，该点存在特定区域受到局限性污染的可能性。基于此种考虑，为更加精确地确定修复范围，减小后续修复土方量，降低修复工程费用，项目组后期在该点周边距离 5m、15m 处分别设置取样点 4 个，取样进行汞污染分析，取样点布置位置如图 3.3-1 所示：

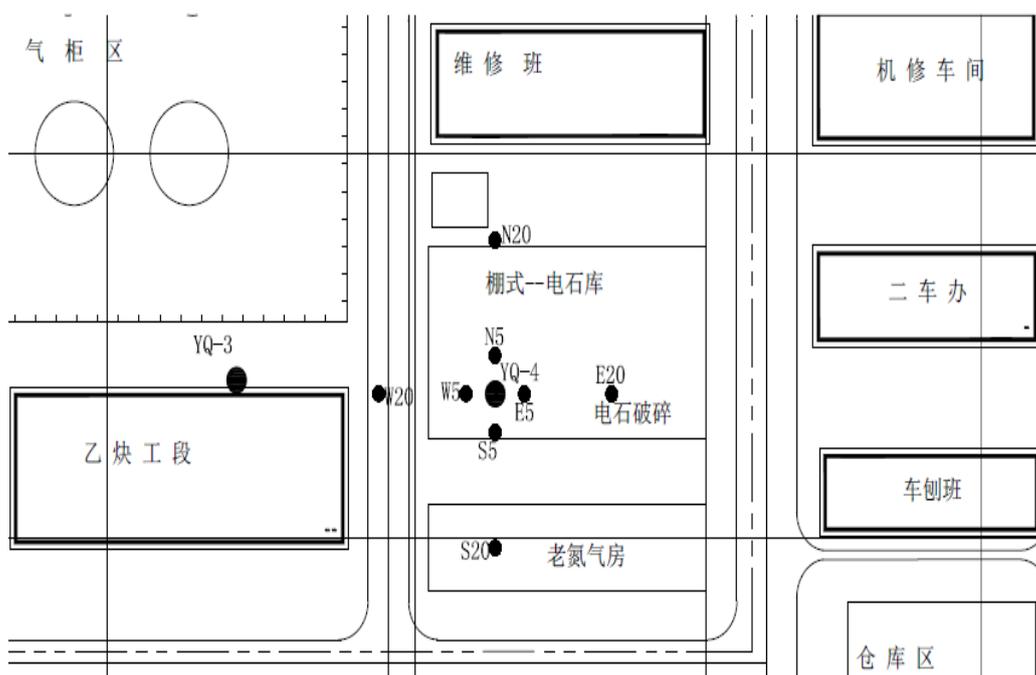


图 3.3-1 YQ-4 周围新增点位图

取样补充分析数据如表 3.3-3 所示：

表 3.3-3 补充取样汞浓度检测结果

取样点编号	1	2	3	4	5	6	7	8
试样编号	E20	W20	S20	N20	E5	W5	S5	N5
与污染点距离	20m				5m			
土样汞浓度	0.067	0.026	0.032	0.086	0.058	0.039	0.149	0.070

由表 3.3-3 分析数据可知，各采样点土壤中汞浓度均不超标，证明 YQ-4 采样点为一特征污染点，污染面积较为局限，而其周边均未受到污染。应用加权插值法对污染范围进行确定，如图 3.3-2 所示：



图 3.3-2 污染物修复范围图

3.3.2 地下水修复目标值和修复范围

根据风险评估结果，1#及 3#监测井中水样挥发酚危害商均小于 1，也即所能导致的基于非致癌因素的环境风险极低，其存在危及居民人体健康风险较低，因而无需对地下水进行修复；地下水水质检测结果表明，上述两口井 COD、氯离子、挥发酚等污染物均达到地下水 V 类水水平，不宜饮用，其他用水可根据使用目的选用。因此，在不作为饮用水的条件下，本场地取样范围内所涉及地下水中

污染物不构成健康风险，无需修复。

3.3.3 工程量估算

根据风险评估结果，本次场地仅存在部分区域的汞污染，由图 3.3-2 可知，该片区修复面积为 22.89m²。由于下层土壤污染物浓度不超标，因而修复深度确定为第一层的 0.5m。综上所述，该片区修复土方量约为 11.445m³。

地下水不作为饮用水使用，因而本方案设计中未考虑地下水修复相关内容。

3.3.4 确定修复策略

场地修复策略包括采用污染源处理技术、切断暴露途径的工程控制技术以及限制受体暴露行为的制度控制技术的任意一种及其组合。

确定修复策略应遵循以下原则：

(1) 应与场地相关利益方进行充分交流和沟通，确认场地未来的用地发展规划、场地开发方式、时间进度、是否允许原位修复、修复后土壤的再利用或处置方式等。

(2) 应充分考虑场地修复过程中土壤和地下水的整体协调性，并综合考虑近期、中期和长期目标的要求，以及修复技术的可行性、成本、周期、民众可接受程度等因素。

(3) 污染场地风险评估可作为评估采取不同修复策略是否可以达到修复目标的评估工具。

(4) 应选择绿色的、可持续的修复策略，使修复行为的净环境效益最大化。

(5) 确定修复策略后，应明确各种修复技术的修复介质、具体修复范围与目标，具体如下：

1) 采用污染源处理技术时，可进一步划分为具体的处理技术类型（原位生物、原位物理、原位化学、异位生物、异位物理、异位化学），针对各种技术类型，应根据污染介质确定目标污染物、明确具体的处理目标值和处理技术所针对的处理介质（土壤或地下水）范围。对于污染土壤而言，处理目标值应根据风险评估结果、处理技术的特点以及土壤的最终去向或使用方式来综合确定。当采用降低土壤中目标污染物浓度的源处理技术时，处理目标值应为将土壤中的目标污染物浓度降低到符合土壤再利用用途的风险可接受水平；当采用化学氧化等降低

污染物浓度的技术时，还应考虑可能产生的中间产物及控制指标。当采用降低土壤中目标污染物的活性和迁移性控制其风险的固化/稳定化技术时，应根据固化体最终处置地的环境保护要求，确定其浸出浓度限值。待处理介质范围描述应包括需处理的污染土壤的深度、面积与边界、土方量。对于污染地下水而言，应明确不同阶段的处理目标值，地下水的处理目标值与其将要达到的功能密切相关；待处理介质范围的描述应包括需处理的污染地下水的面积、深度、出水量。

2) 采用工程控制技术时，应根据污染介质，确定目标污染物、修复范围、暴露途径，选择合适的阻止污染物扩散或切断暴露途径方式，如覆盖清洁土、建立阻截工程等，从而降低和消除场地污染物对人体健康和环境的风险。由于工程控制并不彻底去除场地中的污染物，因此工程控制应和制度控制相结合，如定期监测和评估制度等。

3) 采用制度控制技术时，通过制定和实施各项条例、准则、规章或制度，减少或阻止人群对场地污染物的暴露，防范场地污染可能带来的风险和危害，达到利用行政管理手段对污染场地的潜在风险进行管理与控制的目的。

4) 在一个大型复杂场地的修复工程中，污染源处理技术、工程控制技术和制度控制宜联合起来使用。

根据场地调查及风险评估结果，位于氯苯区的某一取样点（编号：YQ-4）浅层 0.5m 土壤存在汞局部超标现象，超标范围约占地 22.89m²，超标区域内已知样品的最大汞浓度为 37.2mg/kg，修复目标值为 2.64mg/kg。考虑到本项目污染现状及修复目标，本场地修复策略采用污染源处理技术。

第4章 筛选与评估场地修复技术

4.1 修复技术筛选过程

4.1.1 修复技术筛选原则

污染场地修复技术路线的确定，需要综合考虑场地实际状况、业主要求、开发利用规划、修复成本以及修复技术成熟度等因素，并需要对不同性质的土壤进行修复实验，确定修复工艺和参数，以达到安全、彻底和高效地修复污染场地的目标。在修复技术的筛选方面必须遵循以下原则：

（1）修复技术成熟性原则

目前，国内外有多种污染场地修复技术，有些技术已经成熟，有些还在研究试验阶段。为了保证该场地修复顺利完成，本方案设计采用成熟可靠的修复技术，避免采用处于研究初期或中试阶段的技术。

（2）修复时间合理性原则

在保证修复效果达标的前提下，为降低修复过程中的潜在环境风险，早日进行后续开发利用，需尽快完成该地块土壤和对下水的修复，选择修复时间短的修复技术。

（3）修复费用经济性原则

制定方案将结合场地中的污染物特性，将尽可能选择经济可行的修复技术，既满足修复要求，又尽量削减修复费用。

（4）修复过程环保性原则

该场地东侧与北侧为居民区，北靠商场东街，紧邻淄博涝淄河。因此修复工程实施过程中要严格控制污染物对周围环境的影响，做好工程实施过程中的各项环境保护措施，如防尘，防噪声，防二次污染，防臭味等，将对周围居民的影响降到最低。各种污染物排放必须符合国家相关标准。

（5）修复效果达标性原则

场地中各目标污染物的修复结果要达到预期目标，场地修复的最终目标是必须满足今后的土地规划和开发标准，确保环境安全及居民健康。

4.1.2 常用土壤修复技术

根据上述场地修复技术筛选原则，在全面调研国内外土壤修复技术的基础上，对国内外目前采用的土壤修复技术的优缺点和技术可行性进行了分析，并在此基础上初步筛选出适合本场地污染土壤的修复技术。

当前发展较为成熟或已在国内外有所应用的土壤重金属污染修复技术包括土壤混合/稀释技术、污染土壤填埋技术、污染土壤固化/稳定化技术、土壤淋洗技术、土壤焚烧技术及植物修复技术等种类，分述如下：

(1) 土壤混合/稀释技术(Soil Blending, Mixing or Dilution)

土壤混合/稀释技术是应用清洁土壤取代或者部分取代污染土壤，覆盖在土壤表层或者混匀，使污染物浓度降低到临界危害浓度以下的一种修复技术。通过混合和稀释，减少污染物与植物根系的接触，并减少污染物进入食物链。土壤混合/稀释修复技术可以是单一的修复技术，也可以作为其它修复技术的一部分，如固定化稳定化、氧化还原等。土壤混合/稀释修复技术作为其它修复技术的一部分，其主要目的是增加添加剂（如固化/稳定化剂、氧化剂、还原剂）的传输速度，使添加剂尽量和反应剂接触。使用此技术时需根据土壤污染物浓度、范围和土壤修复目标值，计算需要混合的干净土壤的量。混合时尽量垂直方向混合，少水平方向混合，以免扩大污染面积。混合/稀释可以是原位混合，也可以是异位混合。

该技术适用于土壤渗流区，即土壤含水率较低的土壤，当土壤含水量较高时，混合不均匀会影响混合效果。另外，该技术不适用于土壤污染物浓度过高的情形。

(2) 污染土壤填埋技术(Landfill Cap)

污染土壤填埋技术是将污染土壤进行掩埋覆盖，采用防渗、封顶等配套设施防止污染物扩散的处理方法。土壤填埋技术不能降低土壤中污染物本身的毒性和体积，但可以降低污染物在地表的暴露及其迁移性。

污染土壤填埋技术是土壤修复技术中最常用的技术之一。在填埋污染土壤的上方需布设阻隔层和排水层。阻隔层应是低渗透性的粘土层或者土工合成粘土层，排水层的设置可以避免地表降水入渗造成污染物的进一步扩散。通常干旱气候条件要求填埋系统简单一些，湿润气候条件可以设计比较复杂的填埋系统。填埋法的费用通常小于其它技术。

该技术在填埋场合适的情况下，可以用来临时存放或者最终处置各类污染土壤，通常适用于地下水位之上的污染土壤。由于填埋的顶盖只能阻挡垂向水流入渗，因此需要建设垂向阻隔墙以避免水平流动导致的污染扩散。填埋场需要定期进行检查和维护，确保顶盖不被破坏。

(3) 固化/稳定化技术 (Solidification/Stabilization)

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。固化是指将污染物包裹起来，使之呈颗粒状或者大板块存在，进而使污染物处于相对稳定的状态；稳定化是指将污染物转化为不易溶解、迁移能力或毒性变小的状态和形式，即通过降低污染物的生物有效性，实现其无害化或降低其对生态系统危害性的风险。按处置位置的不同，分为原位和异位固化/稳定化。

在异位固化/稳定化过程中，许多物质都可以作为黏结剂，如硅酸盐水泥（Portland cement）、火山灰（Pozzolana）、硅酸酯（Silicate）和沥青（Bitumen）以及各种多聚物（Polymer）等。硅酸盐水泥以及相关的铝硅酸盐（如高炉溶渣、飞灰和火山灰等）是最常用的黏结剂。有许多因素可能影响异位固定化稳定化技术的实际应用和效果，如最终处理时的环境条件可能会影响污染物的长期稳定性；一些工艺可能会导致污染土壤或固化后体积显著增大；有机物质的存在可能会影响黏结剂作用的发挥等。固定化/稳定化方法可单独使用，也可与其它处理和处置方法结合使用。污染物的埋藏深度可能会影响、限制一些具体的应用过程。原位修复时必须控制好黏结剂的注射和混合过程，防止污染物扩散进入清洁土壤区域。

固化/稳定化技术的成本和运行费用较低，适用性较强，原位异位均可使用。该技术应用于重金属污染土壤修复效果较好。

(4) 土壤淋洗技术 (Soil Flushing)

土壤淋洗是指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。此技术分原位和异位土壤淋洗。原位土壤淋洗一般是指将冲洗液由注射井注入或渗透至土壤污染区域，携带污染物质到达地下水后用泵抽取

污染的地下水，并于地面上去除污染物的过程。异位化学淋洗技术需要将污染土壤挖掘出来，用水或淋洗剂溶液清洗土壤、去除污染物，再对含有污染物的清洗废水或废液进行处理，洁净土可以回填或运到其他地点回用。

异位土壤淋洗在使用时，一般需要先根据处理土壤的物理状况对土壤进行分类，再基于二次利用的用途和最终处理需求将其清洁到不同的程度。清洗液可以是清水，也可以是包含冲洗助剂的溶液。冲洗剂主要有无机冲洗剂、人工螯合剂、阳离子表面活性剂、天然有机酸、生物表面活性剂等。无机冲洗剂具有成本低、效果好、速度快等优点，但用酸冲洗污染土壤时，可能会破坏了土壤的理化性质，使大量土壤养分淋失，并破坏土壤微团聚体结构。人工螯合剂价格昂贵，生物降解性差，且冲洗过程易造成二次污染。在处理质地较细的土壤时，需多次清洗才能达到较好效果。低渗透性的土壤处理困难，表面活性剂可粘附于土壤中降低土壤孔隙度，冲洗液与土壤的反应可降低污染物的移动性。较高的土壤湿度、复杂的污染混合物以及较高的污染物浓度会使处理过程更加困难。冲洗废液如控制不当会产生二次污染，因此需回收处理。淋洗过程通常采用可移动处理单元在现场进行，因此该技术所需的实施周期主要取决于处理单元的处理速率及待处理的土壤体积。该技术要求较大的处理场地。

该技术可用来处理重金属污染物，对于大粒径级别污染土壤的修复更为有效，砂砾、沙、细沙以及类似土壤中的污染物更容易被清洗出来，而粘土中的污染物则较难清洗。一般来说，当土壤中粘土含量达到 25%~30%时，不考虑采用该技术。

(5) 焚烧技术 (Incineration)

焚烧技术是使用 870~1200℃ (1400~2200 ℉) 的高温，挥发和燃烧 (有氧条件下) 污染土壤中的卤代和其他难降解的有机成分。高温焚烧技术是一个热氧化过程，在这个过程中，有机污染物分子被裂解成气体或不可燃的固体物质。

焚烧技术主要是采用多室空气控制型焚烧炉和回转窑焚烧炉，与水泥窑联合进行污染土壤的修复是目前国内应用较为广泛的方式。焚烧过程需要对废物焚烧后的飞灰和烟道气进行检测，防止二噁英等毒性更大的物质的产生，并需满足相关标准。焚烧技术通常需要辅助燃料来引发和维持燃烧，并对尾气和燃烧后的残余物进行处理。

焚烧技术可用来处理大量高浓度的 POPs 污染物以及半挥发性有机污染物以及重金属等。对污染物处理彻底，清除率可达 99.99%。如果与水泥窑协同处置，需要对污染土壤进行分选，并对其中的重金属等成分进行检测，保证出产的水泥的质量符合相关标准。

(6) 植物修复技术 (Phytoremediation)

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。植物修复主要通过三种方式进行污染土壤的修复，包括：植物对污染物的直接吸收及对污染物的超累积作用；植物根部分泌的酶来降解有机污染物；根际与微生物的联合代谢作用，从而吸收、转化和降解污染物。

植物修复技术与物理和化学修复技术相比具有成本低、效率高、无二次污染、不破坏植物生长所需的土壤环境等特点，非常易于就地处理污染物，操作方便。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。有毒或有害化合物可能会通过植物进入食物链，所以要控制修复后植物的利用。污染深度不能超过植物根之所及。较之其他修复技术，具有良好的美学效果和较低的操作成本，比较适合与其他技术结合使用。

植物修复对于特定重金属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，但尚不能达到完全修复有机污染土壤的目的。目前植物修复大多只能针对一种或两种重金属进行累积，对于几种重金属的复合污染的处理效果一般。某些重金属，如铅和镉，尚未发现自然中的超累积植物。本技术一般仅适用于浅层污染的土壤。

4.2 技术评估过程

4.2.1 可行性试验的必要性

修复技术的筛选需要充分考虑场地的现状、场地开发、修复成本、修复时间、

修复效果、业主要求等因素，综合分析修复技术的有效性、经济性、实用性、成熟可靠性等因素。

修复方案选择的修复技术要合理可行，具有可操作性，要针对污染场地特性、污染物特性，因地制宜选择修复技术，并运用实验室小试对筛选的修复技术进行可行性评估，确保修复目标可达，修复工程切实可行。

修复技术可行性试验根据目的和手段的不同分为筛选性试验和选择性试验（见图 4.2-1）。

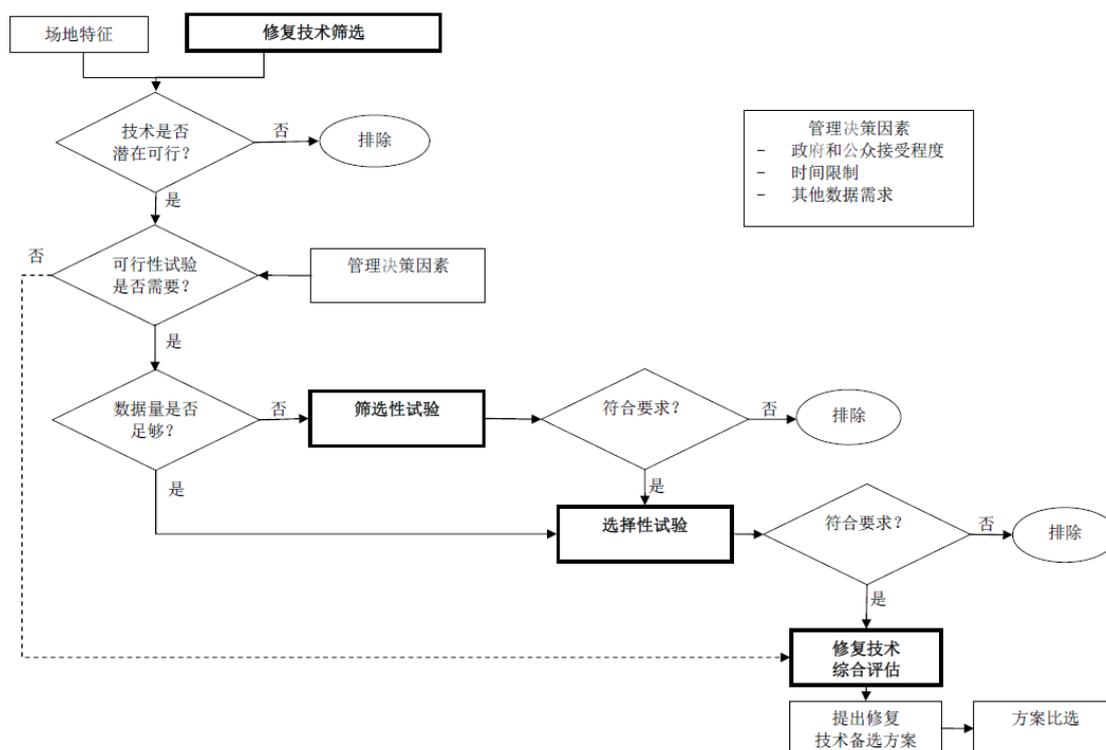


图 4.2-1 修复技术可行性试验流程

4.2.2 筛选性试验过程

结合污染场地污染特征、土壤特性和选择的修复模式，从技术成熟度、适合的目标污染物和土壤类型、修复的效果、时间和成本等方面分析比较现有的土壤修复技术优缺点，重点分析各修复技术工程应用的实用性。筛选并提出 1 种或多种实用的修复技术进行下一步评估。

4.2.3 选择性试验过程

根据筛选出的土壤修复技术，对技术的可行性进行进一步的选择性试验，选择出最佳的应用于该场地工程的修复技术，并对修复技术涉及到的工程量、药剂

的使用添加量等等进行选择性的试验,结合污染场地的现状,对所筛选出的修复技术进行选择性的试验,选择出最佳的施工方案,确保土壤修复施工过程的顺利开展。

4.2.4 修复技术综合评估

对通过选择性的试验的修复技术,可进一步采用列举法定性描述各技术的原理、适用性、限制性、成本等方面来综合评估,或利用修复技术评估工具表以可接受性、操作性、效率、时间、成本为指标来定量评估得到目标场地实际工程切实可行的修复技术。

4.3 确定修复可行技术

由本项目环境风险评估结果可知,本场地污染物特征体现在以下几方面:其一,本场地土壤污染类型较为单一,依据风险评估结论,本场地土壤污染仅体现为汞污染,而其它重金属及有机物均未超标;其二,土壤汞污染区域较为局限,应用筛选值进行筛选,需修复污染区域共计 1 处,面积较为局限,且超标取样点周边污染物浓度均较低;其三,本场地汞污染深度较浅,仅局限于第一层的 0~0.5m 范围内,第二层以下均未见污染物超标现象;其四,土壤汞污染浓度较低。基于上述分析,对适用于土壤重金属污染的修复技术进行筛选,如表 4.3-1 所示。

由表 4.3-1 分析可知,适用于本项目场地重金属污染修复的技术包括污染土壤混合稀释、污染土壤填埋、固化/稳定化、土壤淋洗等。但结合本修复项目特点:土壤汞污染浓度最高为 37.2mg/kg,尚未达到《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ350-2007)中污染土壤修复启动值,且范围较为局限(超标范围约占地 22.89m²,深度为 0.5m),周边及深层污染物浓度均较低。因此,对于该污染场地,本方案建议采用“原位土壤混合稀释+稳定化技术”进行土壤修复。

表 4.3-1 土壤修复技术筛选

序号	1	2	3	4	5	6	
备选修复技术	土壤混合/稀释	污染土壤填埋	固化/稳定化	土壤淋洗	焚烧	植物修复	
技术原理	应用清洁土壤取代污染土壤，使污染物浓度降低到临界危害浓度以下	将污染土壤进行掩埋覆盖，采用防渗、封顶等配套设施防止污染物扩散的处理方法	将污染土壤与黏结剂混合形成凝固体而达到固化/稳定化的目的	借助能够促进土壤环境中污染物溶解或迁移作用的溶剂将污染物从土壤中洗出	使用高温挥发和燃烧（有氧条件下）污染土壤中的污染物	利用特定植物的吸收、转化、清除或降解土壤中的污染物，从而实现土壤修复	
适用条件	土壤含水率较低，污染物浓度较低	在填埋场合适的情况下，应用于地下水位以上的污染土壤	适用于重金属污染土壤修复	要求较大的处理场地，可用来处理砂土中重金属	适用于重金属污染土壤修复	对于特定重金属具有较好的效果和應用	
应用于本项目	优点	可用于本场地污染物修复	可用于本场地污染物修复	可用于本场地污染物修复	污染物去除彻底	污染物去除彻底	可修复 1~2 种重金属污染
	缺点	不能彻底解决污染问题	不能彻底解决污染问题	不能彻底解决污染问题	处理系统复杂	重金属浓度高，影响水泥窑产品质量	修复周期较长
应用于本项目的技术可行性	可行	可行	可行	可行	可行	可行	

第5章 形成修复备选方案与方案比选

5.1 形成潜在可行的修复备选方案

5.1.1 土壤修复技术备选方案

进一步综合考虑场地总体修复目标、修复策略、环境管理要求、污染现状、场地特征条件、水文地质条件、修复技术筛选、可行性试验与评估结果，对各种可行技术进行合理组合，提出若干能够实现修复总体目标的潜在可行的修复技术备选方案。流程示意图参见图 5.1-1。

修复技术备选方案应包括：详细的修复目标/指标、修复技术方案设计、总费用估算、周期估算等内容，具体要求如下：

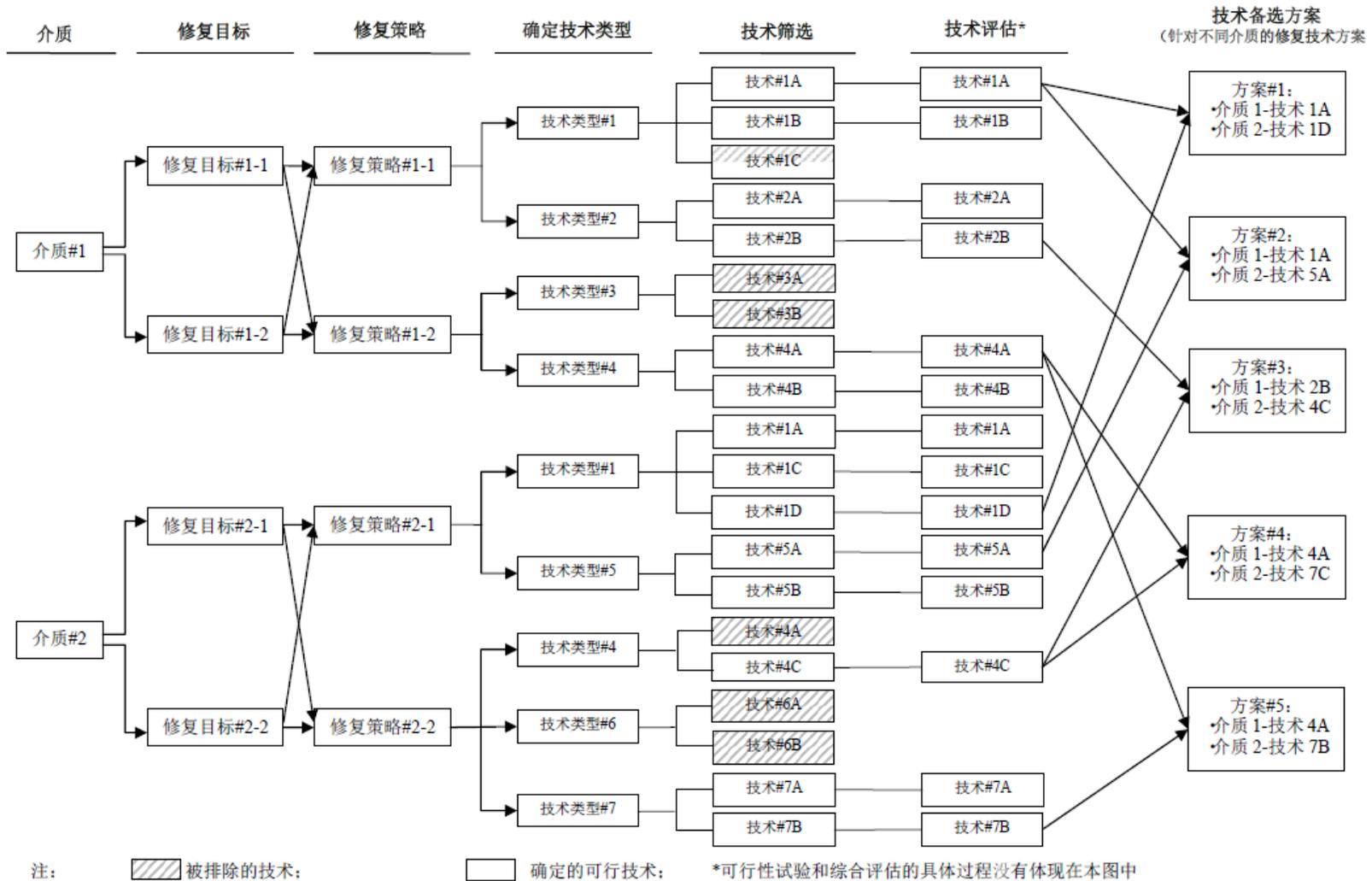
(1) 详细的修复目标/指标需根据不同的污染介质，按未来使用功能的差异，分区域、分层次制定。

(2) 修复技术方案设计包括制定修复技术方案的技术路线、确定各修复技术的应用规模、确定涵盖工艺流程与相关工艺参数和周期成本在内的具体的土壤修复技术方案和地下水修复技术方案。修复技术方案的总体技术路线应反映污染场地修复总体思路、修复工艺流程；各修复技术的应用规模应涵盖污染土壤需要修复的面积、深度、土方量，污染地下水需修复的面积、深度、出水量，同时应考虑修复过程中开挖、围堵等工程辅助措施的工程量；工艺参数应包括设备处理能力、或每批次处理所需时间、处理条件、能耗、设备占地面积或作业区面积等。

(3) 总费用估算包括直接费用和间接费用，其中直接费用包括所选择的各种修复技术的修复工程主体设备、场地准备、污染土壤和地下水处理等费用总和；间接费用包括修复工程环境监理、二次污染监测、修复验收、人员安全防护费用，以及不可预见费用等。

(4) 周期估算包括各种技术的修复工期及所需的其他时间估算。大型污染场地修复技术方案中的可行技术一般不止一种，可能是多种技术的组合。修复技术方案可以是多个可行技术的“串联”，也可以是多个可行技术的“并行”；可行技术的“串联”中，每个可行技术的应用具有先后顺序，而可行技术的“并行”则没有先后顺序，可行技术可同时在污染场地上开展修复工程。

可行技术的组合集成有多种方式，相应的可形成多个修复技术备选方案。

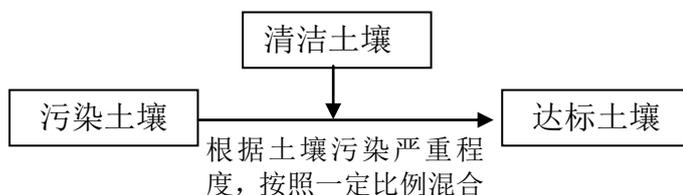


5.1-1 提出修复技术备选方案过程图

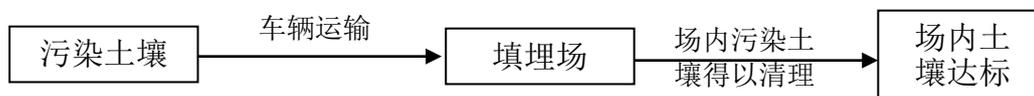
根据《济宁中银电化有限公司 50 万吨/氯碱搬迁项目原厂区场地环境调查及风险评估报告》及土壤修复技术筛选（表 4.3-1）可知，原则上来讲，土壤混合/稀释、污染土壤填埋、固化稳定化、土壤淋洗、焚烧、植物修复等技术均可用于本场地汞污染土壤的修复。但由于本工程土壤修复量较小，且工期要求较为紧张，决定不使用土壤淋洗及植物修复技术，仅考虑土壤混合/稀释、污染土壤填埋、焚烧、固化/稳定化中的一种或多种技术，现对此四种技术在技术路线、成本、规模等方面进行对比分析。现分别对各类技术在本场地修复工程中的可行性进行详细的分析。

5.1.1.1 技术路线

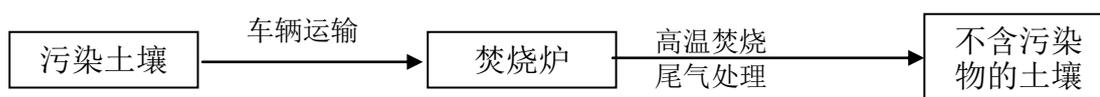
1) 土壤混合/稀释技术



2) 污染土壤填埋技术



3) 焚烧技术



4) 固化/稳定化技术



5.1.1.2 工艺及应用规模

根据查阅相关资料得知，以上所列出的各类土壤修复技术的原理不同，基本可以划分为物理和化学修复两类。原理不同，其应用规模也就不同。

1) 土壤混合/稀释技术

该技术的基本原理及过程是将污染土壤与清洁土壤进行混合,从而实现单位体积土壤中污染物浓度的降低。土壤污染程度不同,所需混合掺入的清洁土壤的体积也不同,污染物含量越高,需要掺入的清洁土壤也就越多,因此须有较多的清洁土壤,若从场外运输,则需考虑场内土壤的增容。该技术处理适用于处理污染浓度较低、污染范围较小的污染场地。

由本项目的风险评估报告可知:仅位于氯苯区的某一取样点(编号:YQ-4)浅层0.5m土壤存在汞超标现象,浓度为37.2mg/kg,超标范围约占地22.89m²,周边及下层属于清洁土壤。如果本修复工程采用该修复技术,只需将周边及下层土壤作为清洁土与污染区域的土壤进行混掺即可,该技术工程量小、工艺简单,不易造成二次污染,具有较高的可行性。

2) 污染土壤填埋技术

该技术是将污染土壤作为固体废物,直接填埋处理,所有污染土壤经车辆运输至填埋场进行填埋,场内则不存在污染现象。此法原理简单,适用于处理较小污染规模的场地,但是需考虑场内挖出后土壤的基坑填埋,并且在运输过程中容易造成二次污染。

结合本项目的特点,若本修复工程采用该技术,则需将污染区域的土壤开挖,然后运输至填埋区,工艺简单,工程量较小,但须做好运输过程中的防护工作,具有一定的可行性,可以作为备选方案。

3) 焚烧技术

该技术是将污染土壤运输至焚烧炉进行焚烧,也可以有效去除土壤中的汞,但是尾气处理设备必须到位,以防止汞以气体的形式扩散至空气中引起二次污染;此外,运输过程中也容易造成二次污染,该法能耗高,从经济方面考虑,不适合大规模污染场地的修复工程。

结合本项目特点,若本修复工程采用该技术,可能会造成资源的过度消耗,并且带来二次污染,而且工程量及工艺相对复杂,因此不适合本修复项目。

4) 固化/稳定化技术

固化/稳定化技术是指将固化/稳定化药剂与污染土壤混匀,使游离态/可转换态重金属转换至残渣态或沉淀态,将其固定于土壤中,使其不浸出,从而降低了

重金属污染物的毒性及生物可利用性。根据土壤污染程度不同，加入不同量的固化/稳定化药剂，与混合/稀释技术相比，土壤增容作用小。

结合本项目特点，该技术可以有效地减少土壤中汞的有效态含量，降低浸出毒性，而且工艺简单、工程量小，适用于本修复项目。

5.1.2 地下水修复方案

因本场地地下水不作为饮用水用途使用，无需修复，本方案不编制地下水修复方案。

5.2 方案比选

5.2.1 比选方法与指标

前面已对所可能用到的修复技术的定义及技术路线进行了描述，本次方案比选方法是采用列表的形式，比较各修复技术的优缺点，综合技所选用的修复技术工艺、经济、环境、社会各方面效益，最终确定所选用的修复方案。

5.2.2 比选指标比较

各技术比选指标比较结果见表 5.2-1.

表 5.2-1 土壤修复技术比选结果

技术名称	混合/稀释技术	填埋技术	焚烧技术	固化/稳定化技术
工艺过程	污染土壤与洁净土壤混合	污染土壤运输至场外填埋场填埋	污染土壤经高温焚烧处理	污染土壤中加入固化/稳定化药剂
经济层面 对比	清洁土壤购买、运输费用，资金较为节省	运输费用、填埋费用，资金较为节省	运输费、燃料费、燃烧尾气处理费，能耗大	药剂购买、运输，较为节省资金
环境层面 对比	车辆运输可能造成噪声污染，影响较小	运输途中容易造成二次污染	运输途中及焚烧尾气容易造成二次污染	药剂运输应确保安全，污染风险较小
社会层面 对比	对居民影响较小	对居民影响较小	焚烧尾气应妥善处理，否则会影响周围居民的健康	化学药剂需妥善管理
可行性	较高可行性	可作为备选方案	资源过度消耗，尽量不予采用	较高可行性

5.2.3 比选结果与方案选择

通过对可能采用到的修复技术进行比选，本次方案编制人员认为，可以考虑使用场地内土壤原位“混合/稀释+稳定化技术”修复并消除场地内土壤的汞污染。通过在污染土壤混合/稀释的过程中加入稳定化药剂，在保证药剂与土壤混合均匀的前提下，可以更加有效的消除土壤中的汞污染。

第 6 章 场地修复技术方案设计

6.1 修复方案的总体技术路线

综合第四章土壤修复技术的概念描述以及第五章各土壤修复技术的比选结果，本次济宁中银电化有限公司原厂区汞污染场地修复工程采用原位“污染土壤混合/稀释+稳定化技术”修复汞污染土壤。总体技术路线如图 6.1-1 所示。

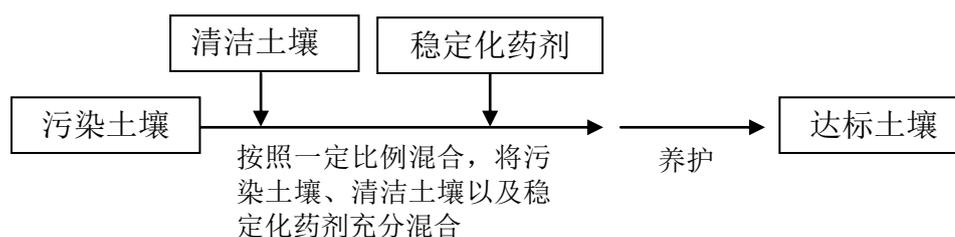


图 6.1-1 本项目汞污染土壤修复工程技术路线

根据《济宁中银电化有限公司 50 万吨/年氯碱搬迁改造项目原厂区环境调查及风险评估报告》的调查评估结果，考虑到该场地汞污染范围较小，污染区域周边土壤中汞的浓度均低于修复值（2.64mg/kg），本修复工程施工过程中以污染区域以外的周边土壤为清洁土（修复区域 10m*10m 范围），用于稀释污染土壤，通过在土壤稀释混匀过程中加入稳定化药剂，进一步稳定土壤中的汞化合物，实现汞污染土壤的修复。

6.2 各修复技术应用规模

本次修复方案选用的修复技术包括两种：混合/稀释技术与固化/稳定化技术。原理上讲，混合/稀释技术属于物理修复技术，而固化/稳定化技术则属于化学修复技术，两种技术的原理不同，应用的规模也不同。

(1) 混合/稀释修复技术

混合修复技术是简单将污染土壤与清洁土壤混合，以降低单位体积土壤内污染物的浓度。污染严重的土壤需要大量的清洁土，无疑增加了工程量，增容效果明显，因此，该技术适用于修复污染范围小、污染程度较轻的场地，应用规模较小。

根据调查报告，济宁中银电化有限公司原厂区仅部分区域存在汞污染，污染

区域占地面积约 22.89m²，所采集土样中，汞污染最大浓度为 37.2mg/kg，是土壤修复目标值的 14 倍。由于污染范围小，且污染区域周边及下层土壤汞浓度均小于土壤修复目标值，因此考虑将场地内附近清洁土用于污染土壤的混合稀释。

(2) 固化/稳定化技术

固化/稳定化是指在污染土壤中加入相应的化学药剂，以将游离态/可转换态重金属化合物转换为沉淀态或者残渣态的化合物，降低土壤中重金属的可检测浓度，使重金属浸出浓度较低，较少可生物利用性的重金属的含量。本技术是在土壤中引入化学药剂，因大部分化学药剂溶于水，且在液态下与土壤中的超标污染物发生化学反应。因此，与混合/稀释修复技术相比，固化/稳定化技术的应用范围更广、应用规模更大。

6.3 土壤修复技术方案

综上所述，济宁中银电化有限公司原厂区汞污染场地修复工程选用的土壤修复方案为“原位土壤混合/稀释+稳定化技术”。

6.3.1 工艺流程

本工程项目总体工艺流程如图 6.3-1 所示。

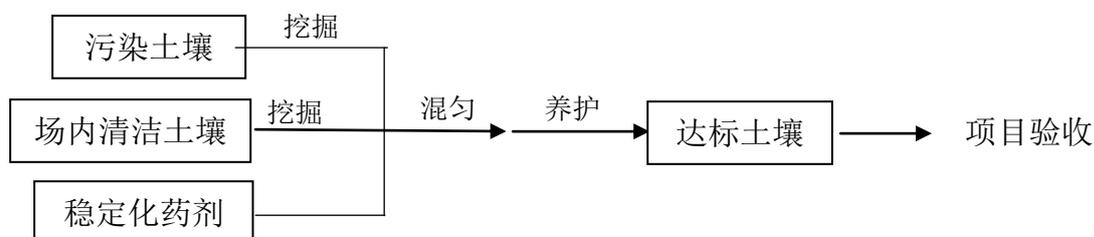


图 6.3-1 本项目土壤修复工艺流程图

6.3.2 修复技术方案

(1) 确定施工范围

本项目土壤修复工程的污染范围较小，污染区域周边土壤汞含量均低于修复值，因此，本次土壤修复工程计划以污染区域作为中心位置，污染区域周边土壤作为清洁土壤用于混合及稀释污染土壤。施工区域为将污染区域作为中心位置的 10m*10m 场地，施工深度 1m，土壤修复施工范围如图 6.3-2 所示：



图 6.3-2 本修复工程施工范围图

(2) 修复施工过程

本次修复施工首先挖掘污染区域的土壤，将土壤运输至施工范围内的清洁土壤区域，尽量做到污染土壤的均匀运输，污染土壤挖掘完毕后，对其他位置的土壤进行翻耕混匀处理，混匀过程中施洒稳定化药剂，根据计算，本工程所需稳定化药剂剂量约为 10kg 左右，施洒过程中尽量保证药剂的均匀性。

(3) 修复后土壤的养护

加入稳定化药剂的作用是结合土壤中游离态/可交换态的汞化合物，将其稳定于土壤中，可大大降低汞化合物对环境的危害。为保证施洒的药剂与土壤中的汞更加有效的发生化学反应，土壤翻耕混合完成后，应对翻耕后土壤进行洒水养护处理，通过洒水，人为的增加土壤的含水率，有利于化学药剂在土壤中的扩散传播，从而提高药效。养护时间 15 日，养护过程中，为防止水分过度蒸发，应采取帆布遮盖措施遮蔽土壤，并且每日观察土壤干燥情况，根据现场情况定期洒水，确保氧化效果。

(4) 场地回填及平整

养护完成后，组织挖掘机及渣土运输车辆对场地内挖掘土壤进行回填及平整工作，将场地恢复至原状。

6.3.3 修复方案可行性研究

为验证所设计方案在实际场地修复过程中的可行性及实际应用修复效果，方案设计人员以场地内汞污染土为试验样品、硫化钠为稳定化药剂，设置 3 个平行实验组，进行实验室小试研究。药剂添加比例（投加药剂质量占土壤质量的百分比，土壤比重按照 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 计算），主要通过考察不同污染土壤稀释倍数、药剂添加量、稳定化时间，研究了硫化钠稳定化药剂对汞污染土壤的修复效果。实验室小试实验及实验结果见图 6.3-3、6.3-4、6.3-5 及 6.3-6。



图 6.3-3 汞污染土壤修复实验室小试研究

(1) 不同清洁土添加量对 Hg 污染土壤修复效果的研究

小试试验中，场地修复技术人员以污染区域周边土壤为清洁土壤，考察了不同清洁土/污染土比例对土壤修复效果的影响，修复效果见图 6.3-4。

通过图 6.3-4 可以看出，随着清洁土/污染土混合比例的增加，土壤内汞含量呈现不断降低的趋势，表明污染区域周边土壤为清洁土壤，可以与污染土壤混合以稀释污染土壤中的汞含量，从而降低汞在土壤中的浓度。

(2) 不同量稳定化药剂对 Hg 污染土壤修复效果的研究

在本项目小试试验中，我单位以含硫化合物稳定化剂为主要成分的药剂作为修复汞污染土壤的稳定化药剂使用，由于硫离子能与汞离子能够反应生成难溶解的 HgS 沉淀（反应方程式见下图），因此能够降低土壤中游离态及离子态汞的含量，进而降低汞在土壤中的迁移性，因此进一步降低了汞的风险。本项目以土壤中汞的浸出浓度量化稳定化药剂对土壤中游离态汞离子的稳定化效果。小试试验中，首先将固态稳定化药剂加入至汞污染土壤中，然后加入一定量的水，搅拌均匀，至土壤呈现湿润状态，再将盛装土壤的容器密封保存，以防止水分挥发影响修复效果。量化后的修复结果见图 6.3-5。

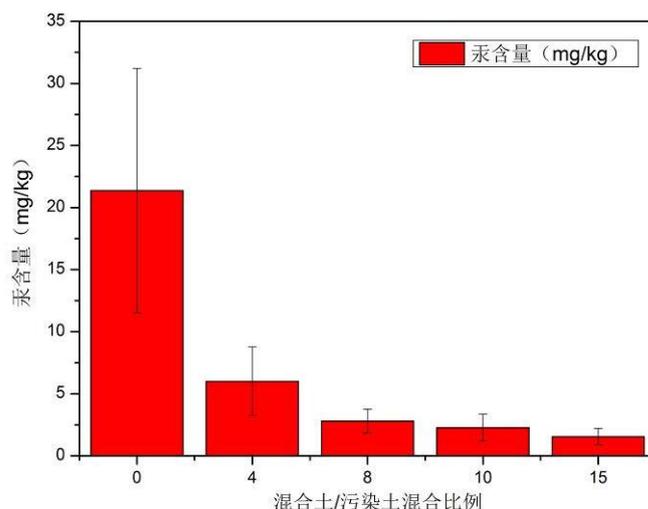


图 6.3-4 不同清洁土添加量对 Hg 的稀释效果

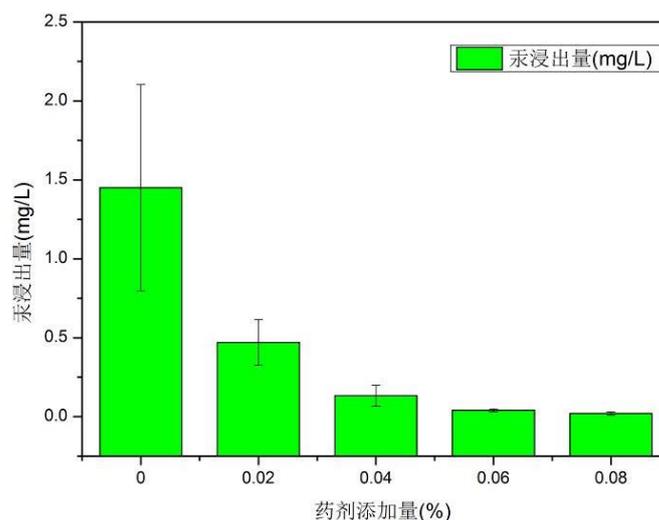


图 6.3-5 不同稳定化药剂添加量对土壤中汞的浸出毒性的影响

注：药剂添加量为稳定化药剂与土壤的质量比，土壤的比重按照 1.5g/cm³ 计。

通过对比各实验结果可以看出，随着稳定化药剂投加量的增大，土壤中汞的浸出浓度逐渐降低，表明稳定化药剂能够较有效的与土壤中游离态的汞发生反应，促使游离态汞离子向沉淀态/残渣态转化，有效的降低了汞在土壤中的迁移性，降低了环境风险。

综上所述：使用清洁土对汞污染土壤进行稀释时，当稀释 15 倍时，效果最佳，可小于修复目标值 2.64mg/kg；当使用稳定化试剂对汞的浸出量进行控制时，药剂添加量为 0.08%时效果最佳。

(3) 养护时间对修复效果的影响