



拱北公交综合体（运河新城单元 C-
U21/C2-01、C-R21-09 地块）西区块
【运河新城单元 GS1003-R21-06（拱康
西区）】污染场地
修复技术方案
（简本）

委托单位：杭州市公共交通集团有限公司

编制单位：杭州市环境保护科学研究设计有限公司

二〇二一年七月

目 录

1 总论	- 1 -
1.1 项目背景	- 1 -
1.2 编制依据	- 3 -
1.3 方案编制基本原则	- 5 -
1.4 工作范围	- 5 -
1.5 技术路线	- 6 -
2 原杭州煤气厂地块基本概况	错误!未定义书签。
2.1 所在区域概况	错误!未定义书签。
2.2 地块基本信息	错误!未定义书签。
2.3 地块用地规划及敏感目标	错误!未定义书签。
2.4 地块环境特征	错误!未定义书签。
2.5 地块经营管理现状	错误!未定义书签。
3 前期调查与风险评估	错误!未定义书签。
3.1 三次调查历程	错误!未定义书签。
3.2 地块调查主要结果	错误!未定义书签。
3.3 地块风险评估主要结果	错误!未定义书签。
4 补充调查方案及结果	错误!未定义书签。
4.1 补充调查方案	错误!未定义书签。
4.2 现场采样	错误!未定义书签。
4.3 质量保证和质量控制	错误!未定义书签。
4.4 补充调查结果	错误!未定义书签。
5 西区块土壤修复范围	- 8 -
5.1 西区块修复污染物及目标值	- 8 -
5.2 西区块修复范围及工程量	错误!未定义书签。
6 修复模式	错误!未定义书签。
6.1 污染源削减的修复模式	错误!未定义书签。
6.2 风险管控的修复模式	错误!未定义书签。
6.3 修复模式比选确定	错误!未定义书签。

7 修复技术比选 错误!未定义书签。

 7.1 土壤修复技术简述 错误!未定义书签。

 7.2 土壤修复技术筛选 错误!未定义书签。

 7.3 土壤修复技术可行性评估 错误!未定义书签。

8 修复方案设计 - 17 -

 8.1 方案一：水泥窑协同处置+化学氧化+热脱附修复方案..... - 19 -

 8.2 方案二：水泥窑协同处置+化学氧化修复方案..... - 31 -

 8.3 方案三：热脱附+水泥窑协同处置修复方案..... 错误!未定义书签。

 8.4 方案四：水泥窑协同处置+热脱附修复方案..... 错误!未定义书签。

 8.5 修复方案比选 错误!未定义书签。

 8.6 推荐方案工艺设计 - 33 -

9 环境管理计划 错误!未定义书签。

 9.1 二次污染防治 错误!未定义书签。

 9.2 修复工程监测计划 错误!未定义书签。

 9.3 修复工程监理 错误!未定义书签。

 9.4 修复效果评估监测 错误!未定义书签。

 9.5 劳动安全与个人防护 错误!未定义书签。

 9.6 环境应急方案 错误!未定义书签。

10 成本效益分析 - 43 -

 10.1 修复费用 - 43 -

 10.2 环境效益、经济效益、社会效益 错误!未定义书签。

11 结论与建议 - 43 -

 11.1 结论 - 43 -

 11.2 建议 - 44 -

1总论

1.1项目背景

1.1.1地块背景

本次方案地块属于原杭州煤气厂地块[拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）]内一部分，以下将原杭州煤气厂地块简称“大地块”。

2020 年 8 月，大地块启动修复技术方案，由于公交场站用地需求以及开发时间要求，将地块分为东区块和西区块，修复工程分两期实施，东区块先行实施，具体如图 1.1-1 所示。“拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）东区块”修复技术方案于 2020 年 8 月编制完成，于 2021 年 4 月完成修复并移出污染地块修复名录。

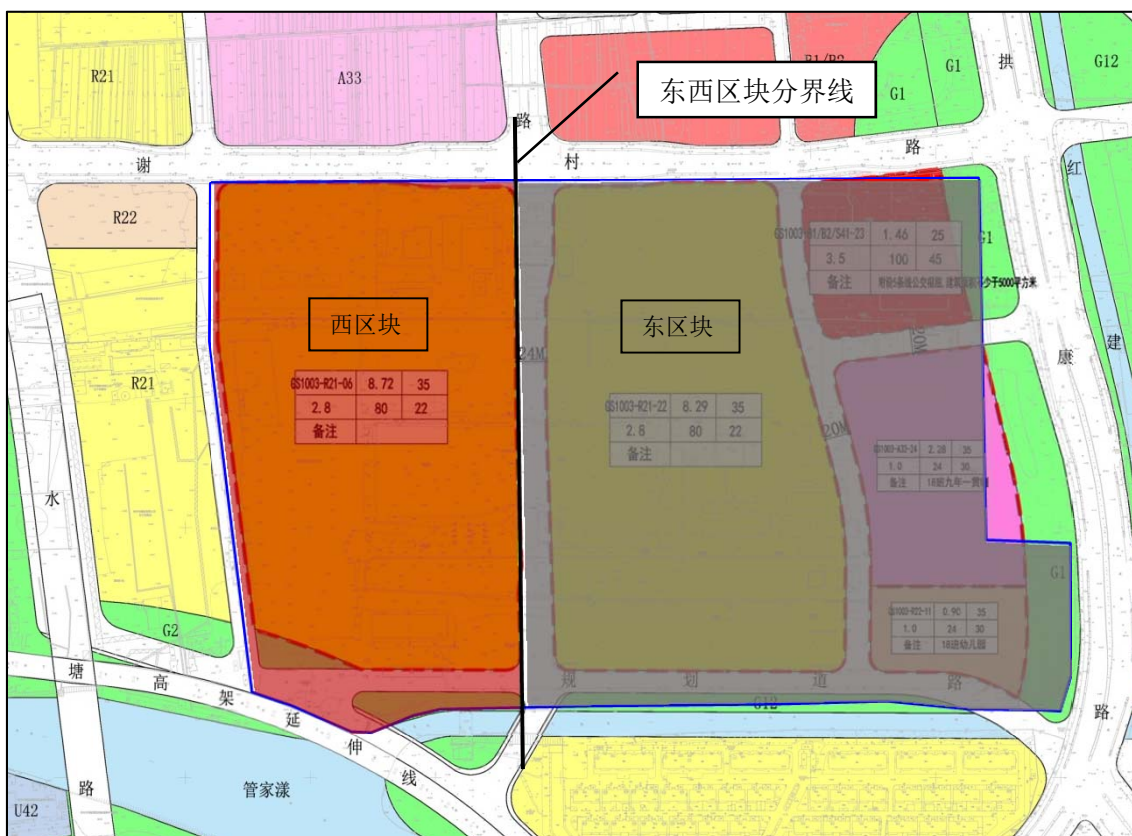


图 1.1-1 东区块和西区块分割示意图

1.1.2地块前期工作

大地块位于拱康路 61 号，总占地面积约 27 公顷，始建于 1986 年，1991 年 8 月 26 日开始正式对外供气，2005 年 6 月 22 日正式停产。2008 年厂区内南侧部分

区域移交给杭州公交集团作为临时停车场使用，北侧部分作为杭州燃气集团储气站储备天然气。2013 年 10 月整个场地移交给杭州公交集团作为停车场使用，使用至今。

大地块于 2019 年 3 月至 2019 年 12 月期间进行了详细调查与风险评估，均取得了相应的备案意见；2020 年针对用地性质调整情况，于 2020 年 6 月进行补充风评，补充风评保守考虑全部按第一类敏感用地进行风险评估，编制完成《拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）污染场地风险评估补充报告》并取得评审意见。

该地块场地调查、风险评估等主要工作节点汇总如下：

序号	时间节点	事项
1	2019 年 3 月 11 日	《原杭州煤气厂地块场地环境详细调查报告》通过专家评审
2	2019 年 4 月 8 日	取得“杭州市生态环境局关于将原杭州煤气厂地块列入污染地块名录的通知”
3	2019 年 8 月 30 日	《拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）污染场地风险评估报告》通过专家评审
4	2019 年 12 月 6 日	取得《风险评估报告》评审意见，该地块列入建设用地土壤污染风险管控和修复名录
5	2020 年 6 月 19 日	《拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）污染场地风险评估补充报告》通过专家评审，根据新规划用地性质（全部按第一类敏感用地）重新提出修复目标和范围
6	2020 年 7 月 7 日	取得《风险评估补充报告》评审意见

根据前期调查风险评估结论，拱北公交综合体地块土壤和地下水存在污染，其中土壤超过人体健康风险。根据环境管理的要求，该地块土壤需要修复达标后才能进行再开发利用。

1.1.3 本方案由来

如地块背景中所述，鉴于杭州市委市政府对大城北开发的时间要求，地块修复与开发任务重时间紧，同时考虑兼顾公交集团作为城市运营保障单位的公交场站用地需求，大地块结合规划用地红线划分为东区块和西区块，修复工程分两期实施。东、西区块的划分基本以今后控规两区中间道路的西侧边界线为分界线，具体如图 1.1-1 所示。

东区块（包含规划红线范围内的 4 块用地、道路、绿化等）已于 2020 年 8 月编制完成《拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）东区

块修复技术方案》并通过专家评审，且地块修复和效果评估均已完成，于 2021 年 4 月通过省厅验收审批，已移出污染地块名录。

本次受杭州市公共交通集团有限公司的委托，杭州市环境保护科学研究设计有限公司（以下简称“我单位”）在分析整理前期调查评估资料以及东区块修复技术方案的基础上，开展拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）西区块的修复技术方案编制工作，由规划图可知，西区块内主要为 GS1003-R21-06 地块，同时含部分道路用地等。根据西区块修复技术方案项目招标文件，此次项目名称以地块控规单元名称命名，为《运河新城单元 GS1003-R21-06（拱康西区）污染场地修复技术方案》（以下文本中简称为“西区块修复技术方案”）。

1.2 编制依据

1.2.1 法律法规与政策

- 1、《中华人民共和国环境保护法》，2015 年 1 月 1 日期实施；
- 2、《中华人民共和国土壤污染防治法》，2019 年 1 月 1 日期实施；
- 3、《中华人民共和国水污染防治法》，2017 年；
- 4、《中华人民共和国环境噪声污染防治法》，1996 年；
- 5、《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，2016 年；
- 6、《国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知》，国发[2016]31 号；
- 7、《污染地块土壤环境管理办法》，生态环境部[2016] 42 号令；
- 8、《浙江省土壤污染防治工作方案》，浙政发[2016]47 号；
- 9、《关于印发<浙江省污染地块开发利用监督管理暂行办法>的通知》，浙环发[2018]7 号；
- 10、《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》，环发[2012]140 号；
- 11、《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；
- 12、《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 号文；
- 13、《关于开展建设项目土壤环境监测工作的通知》，浙环发[2008]8 号；
- 14、《关于开展全省污染场地排查工作的通知》，浙环办函[2012]405 号。

1.2.2 技术导则、标准和规范

- 1、《建设用地土壤环境调查评估技术指南》（环保部公告 2017 年第 72 号）；
- 2、《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》（环保部公告 2014 年第 78 号）；
- 3、《建设用地土壤污染状况调查技术导则》（HJ 25.1-2019）；
- 4、《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》（HJ 25.2-2019）；
- 5、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ25.3-2019）；
- 6、《建设用地土壤修复技术导则》（HJ25.4-2019）；
- 7、《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》（试行）（HJ/25.5-2018）；
- 8、《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）；
- 9、《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）；
- 10、《土壤环境监测技术规范》（HJ/T166-2004）；
- 11、《地下水环境监测规范》（HJ 164-2020）；
- 12、《浙江省场地环境技术调查技术手册（试行）》，2012.12；
- 13、《浙江省地方标准 污染场地风险评估技术导则》（DB33/T892-2013）；
- 14、《浙江省生态环境厅关于印发建设用地土壤污染状况调查报告、风险评估报告和修复效果评估报告技术审查表的函》，2019.6.17；
- 15、《建筑施工安全技术统一规范》（GB50870-2013）。

1.2.3 其他相关文件

- 1、厂区平面布置图；
- 2、《杭州煤气厂退役场地土壤专题评价报告》，2011.3；
- 3、《原杭州煤气厂地块场地环境详细调查报告》，2019.3；
- 4、《杭州市生态环境局关于将原杭州煤气厂地块列入污染地块名录的通知》，杭环函[2019]78 号，2019.4.8；
- 5、《拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）污染场地风险评估报告》，2019.11；
- 6、《浙江省生态环境厅关于拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、

C-R21-09 地块）污染场地风险评估报告的评审意见》，2019.12.6；

7、《拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）污染场地风险评估补充报告》，2020.6；

8、《浙江省生态环境厅关于拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）污染场地风险评估补充报告的评审意见》，2020.7.7；

9、检测报告，实朴检测技术(上海)股份有限公司；

10、杭州市公共交通集团有限公司提供的其它相关资料。

1.3 方案编制基本原则

场地总体修复以降低土壤中的污染物总量或隔离暴露途径目标，以保障上方居住、工作人群的健康风险可接受为宗旨，因此本修复方案遵循“科学性”、“可行性”、“安全性”原则。

（1）科学性原则

采用科学的方法，综合考虑地块修复目标、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

制定的地块土壤修复方案要合理可行，要在前期工作的基础上，针对地块的污染性质、程度、范围以及对人体健康造成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，且修复工程切实可行。

（3）安全性原则

制定地块土壤修复方案要确保地块修复工程实施安全，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。

1.4 工作范围

根据项目由来，本次修复技术方案的工作范围为大地块内的西区块，主要包含运河新城单元 GS1003-R21-06 地块，占地面积约 10 万平方米。具体工作范围拐点坐标如下图表所示。

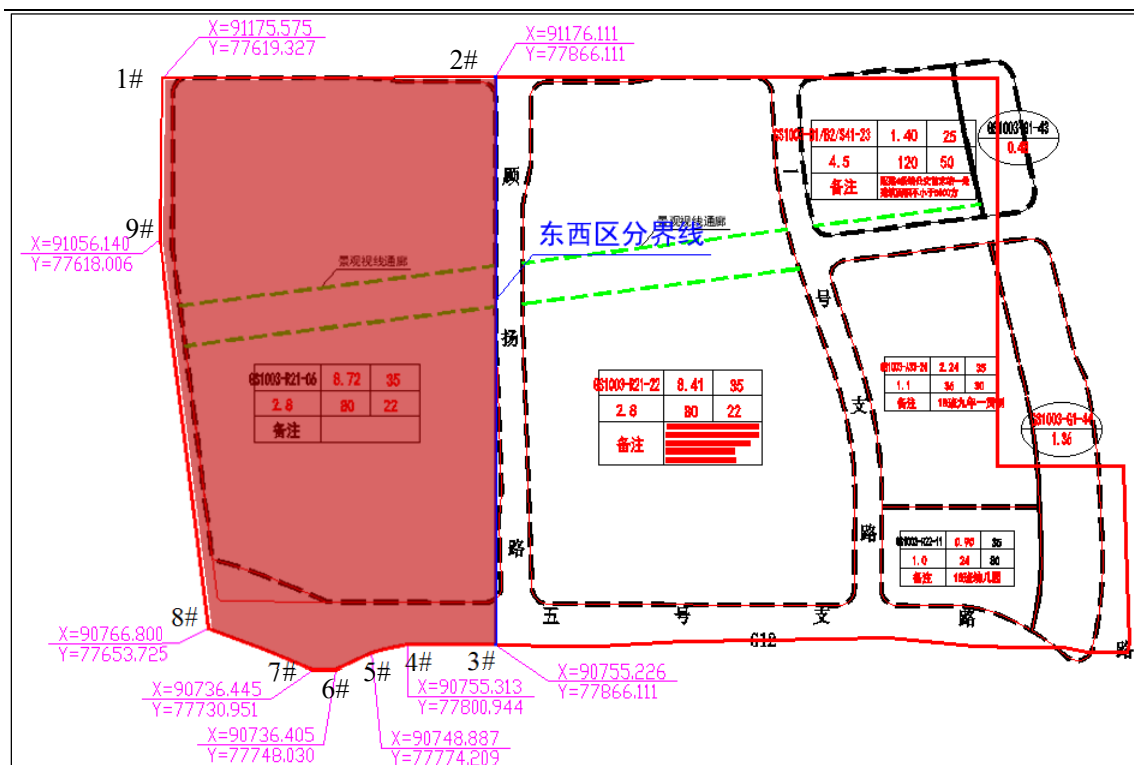


图 1.4-1 拐点坐标图

表 1.4-1 拐点坐标

拐点编号	X	Y
1#	91175.575	77619.327
2#	91176.111	77866.111
3#	90755.226	77866.111
4#	90755.313	77800.944
5#	90748.887	77774.209
6#	90736.405	77748.030
7#	90736.445	77730.951
8#	90766.800	77653.725
9#	91056.140	77618.006

1.5 技术路线

本项目修复技术方案的制订主要分三个步骤，如图 1.5-1 所示。

（1）场地问题识别

在分析前期污染状况调查和风险评估资料的基础上，进行补充调查，进一步确认污染范围。

（2）选择修复模式、筛选修复技术

根据地块特征条件、目标污染物、修复目标、修复范围和修复时间长短，选择确定地块修复总体思路。根据地块的具体情况，筛选实用的土壤修复技术，开

展必要的实验室小试，或对土壤修复技术应用案例进行分析，论证修复技术的可行性。

（3）制定修复方案

根据筛选可行的修复技术，制定土壤修复技术路线，提出初步修复方案，并进行方案可行性比选；识别修复工程中潜在的二次污染源，制定针对性的二次污染防治措施及其他环境管理计划。

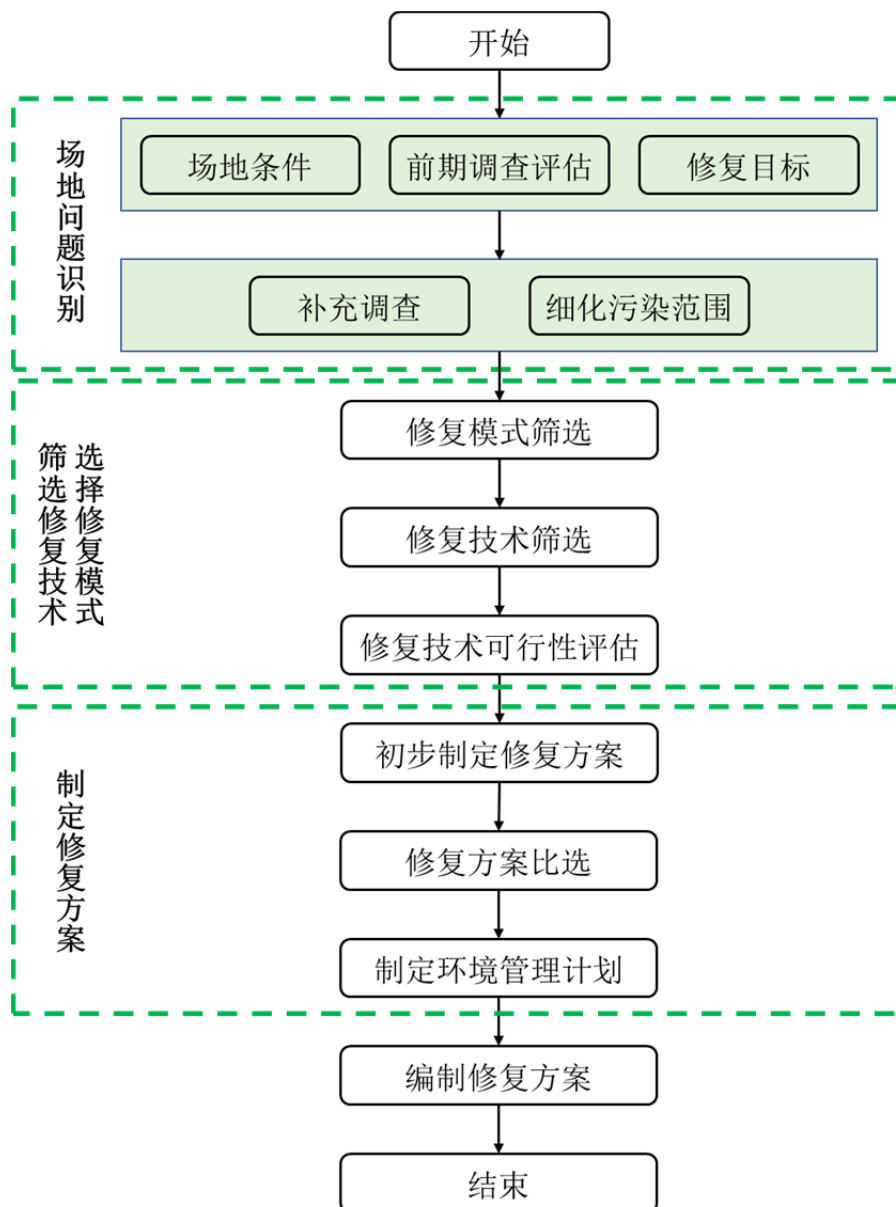


图 1.5-1 技术路线图

2 西区块土壤修复范围

2.1 西区块修复污染物及目标值

通过补充调查，西区块目标污染物增加石油烃 $C_{10}-C_{40}$ ，西区块的目标污染物确定为：苯、7 种多环芳烃类（苯并[a]芘、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、萘）、石油烃 $C_{10}-C_{40}$ 。

通过前期风险评估计算，西区块的目标污染物建议修复目标值汇总如下：

表 2.1-1 西区块建议修复目标值汇总

类型	污染物	建议修复目标值 (mg/kg)	备注
一类用地	苯	1	国家筛选值
	石油烃 $C_{10}-C_{40}$	826	国家筛选值
	苯并[a]芘	0.55	国家筛选值
	苯并[a]蒽	5.5	国家筛选值
	苯并[b]荧蒽	5.5	国家筛选值
	苯并[k]荧蒽	55	国家筛选值
	二苯并[a,h]蒽	0.55	国家筛选值
	茚并[1,2,3-cd]芘	5.5	国家筛选值
	萘	25	国家筛选值

2.1.1 土壤修复范围汇总

西区块需修复污染物共三大类：苯、石油烃 $C_{10}-C_{40}$ 、7 种多环芳烃类（苯并[a]芘、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、萘）。西区块需修复土壤面积与土方量估算见下表，各层修复范围图见图 2.1-1~图 2.1-3。

表 2.1-2 土壤修复范围和土方量

西区块		多环芳烃	多环芳烃+苯	多环芳烃+石油烃	多环芳烃+苯+石油烃	合计
第一层 0-1.5m	面积 (m ²)	16643.7	1166.9	1897.0	928.1	20635.7
	方量 (m ³)	24965.6	1750.3	2845.6	1392.1	30953.6
第二层 1.5-4.0m	面积 (m ²)	18626.8	2024.6	640.4	670.9	21962.7
	方量 (m ³)	46567.1	5061.6	1601.1	1677.1	54906.9
第三层 4.0-7.5m	面积 (m ²)	1690.9	0	0	0	1690.9
	方量 (m ³)	5918.1	0	0	0	5918.1
总方量 (m ³)		77450.8	6811.9	4446.7	3069.2	91778.6

图 2.1-1 核定后西区块土壤第一层 0-1.5m 修复范围图

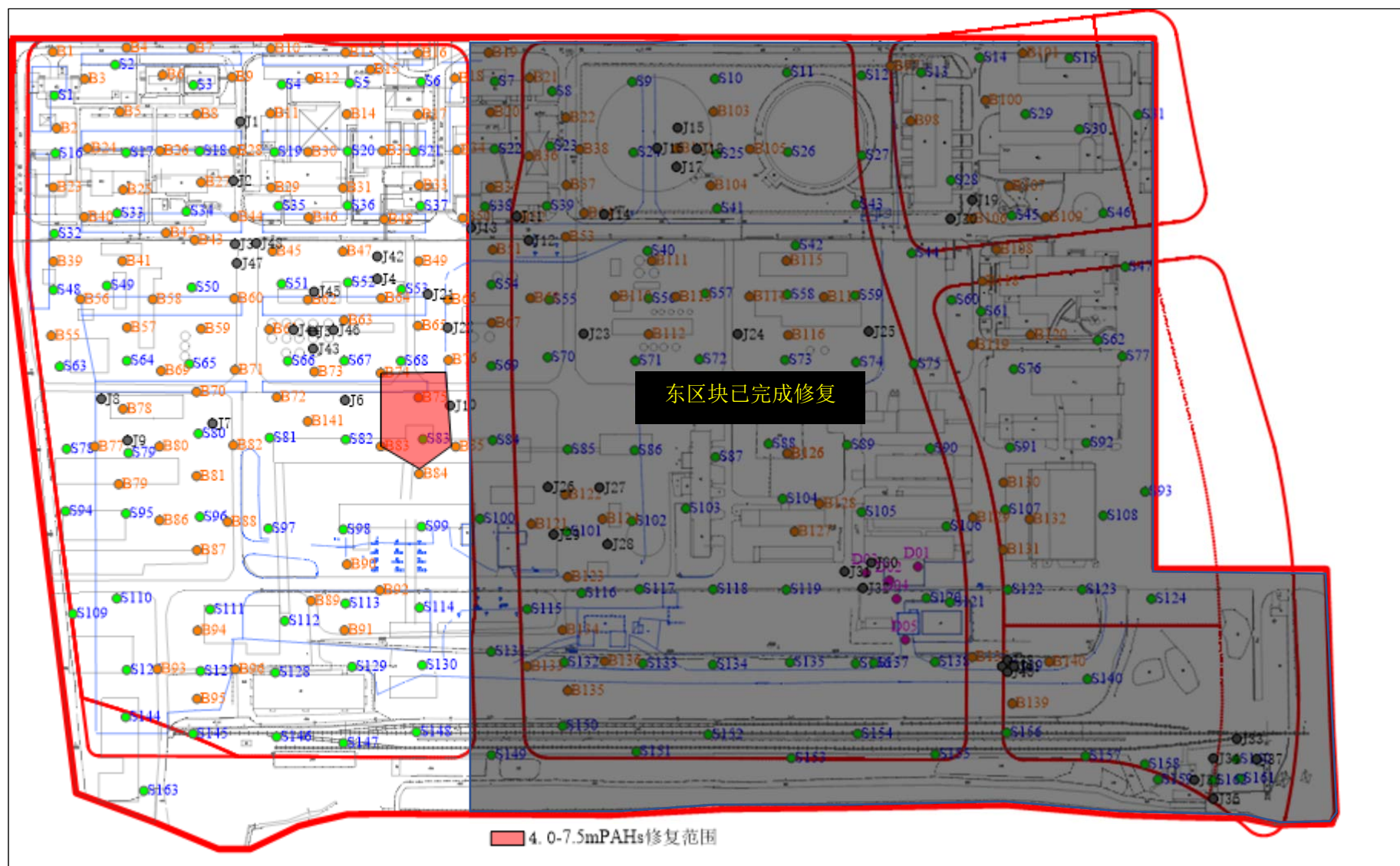


图 2.1-3 核定后西区块土壤第三层 4.0-7.5m 修复范围图

2.1.2 土壤修复范围拐点坐标

表 2.1-3 西区块第一层修复范围拐点坐标

拐点编号	X	Y	拐点编号	X	Y
A1	91168.355	77716.120	B23	91053.953	77739.373
A2	91152.991	77738.835	B24	91053.953	77762.840
A3	91132.213	77718.159	B25	91078.945	77762.999
A4	91152.260	77700.686	B26	91041.269	77785.724
B1	91125.701	77711.099	B27	90996.034	77785.627
B2	91125.701	77725.247	B28	90983.779	77719.429
B3	91114.720	77738.127	B29	90995.808	77699.796
B4	91095.294	77758.399	B30	91012.056	77699.796
B5	91084.947	77763.044	B31	91029.069	77715.207
B6	91060.241	77762.860	B32	91042.919	77765.145
B7	91060.241	77797.674	C1	91080.922	77820.910
B8	91022.655	77798.308	C2	91057.279	77840.548
B9	91000.694	77804.431	C3	91039.579	77830.471
B10	90965.008	77804.431	C4	91034.540	77819.360
B11	90962.685	77770.435	C5	91043.196	77800.884
B12	90978.945	77760.933	C6	91060.121	77798.817
B13	90965.008	77727.147	C7	91070.586	77802.176
B14	90954.450	77662.743	D1	91009.122	77845.526
B15	90997.949	77644.161	D2	90995.214	77861.407
B16	91000.905	77680.270	D3	90955.044	77857.091
B17	91018.854	77679.847	D4	90953.882	77819.245
B18	91035.747	77691.883	D5	90965.008	77804.431
B19	91047.149	77710.043	D6	90992.150	77804.431
B20	91066.154	77688.716	E1	90868.308	77723.364
B21	91114.509	77698.429	E2	90835.697	77723.110
B22	91078.945	77739.373	E3	90835.952	77699.161

表 2.1-4 西区块第二层修复范围拐点坐标

拐点编号	X	Y	拐点编号	X	Y
F1	91165.541	77628.869	H9	91029.069	77715.207
F2	91170.623	77733.485	H10	91029.069	77740.080
F3	91130.318	77745.752	H11	90993.593	77739.998
F4	91084.406	77745.401	H12	90992.601	77699.796
F5	91060.399	77760.647	H13	91012.056	77699.796
F6	91047.431	77741.020	I1	91107.891	77822.818

拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）西区块【运河新城单元 GS1003-R21-06
（拱康西区）】污染场地修复技术方案

拐点编号	X	Y	拐点编号	X	Y
F7	91047.431	77718.590	I2	91107.891	77850.372
F8	91065.130	77715.436	I3	91085.249	77850.372
F9	91080.726	77676.358	I4	91085.249	77822.818
F10	91109.991	77675.482	J1	91022.665	77765.905
F11	91109.991	77628.869	J2	91022.665	77798.285
G1	91066.108	77628.568	J3	91060.203	77798.175
G2	91065.964	77653.962	J4	91066.231	77830.665
G3	91039.481	77654.157	J5	91055.045	77839.692
G4	91039.675	77641.694	J6	91037.383	77844.794
G5	91048.512	77628.568	J7	91020.114	77839.299
H1	91042.142	77716.524	J8	91001.471	77861.867
H2	91040.120	77737.911	J9	90954.766	77859.708
H3	91025.713	77755.137	J10	90939.851	77842.046
H4	91000.866	77755.242	J11	90957.906	77799.855
H5	90983.779	77719.429	J12	90981.258	77797.107
H6	91000.864	77681.406	J13	90981.258	77777.091
H7	91018.744	77680.895	J14	91001.079	77766.298
H8	91035.602	77693.156			

表 2.1-5 西区块第三层修复范围拐点坐标

拐点编号	X	Y
K1	90994.307	77819.052
K2	90994.885	77854.109
K3	90954.916	77857.095
K4	90942.395	77839.952
K5	90954.723	77819.052

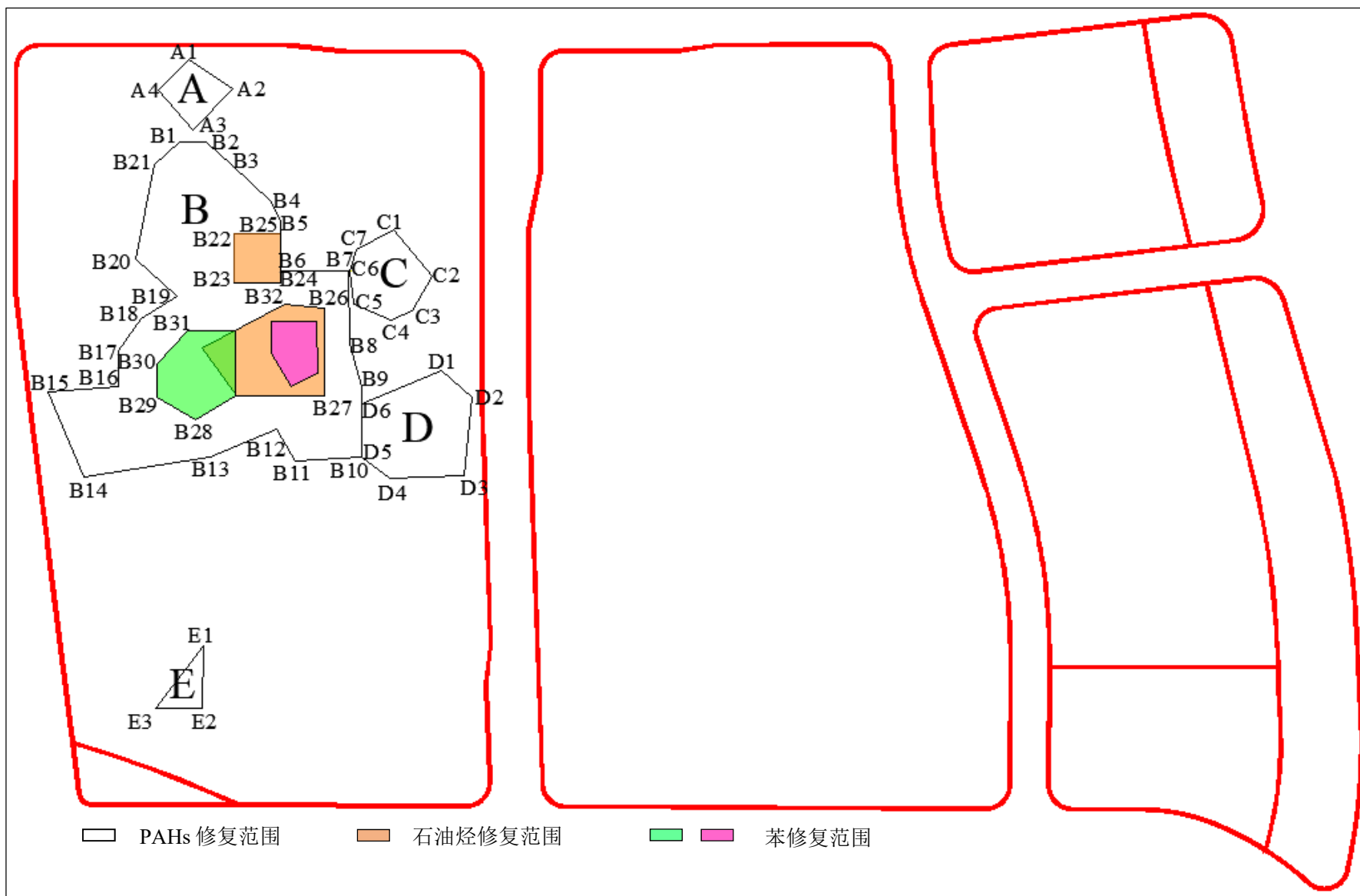


图 2.1-4 西区块第一层土壤修复范围

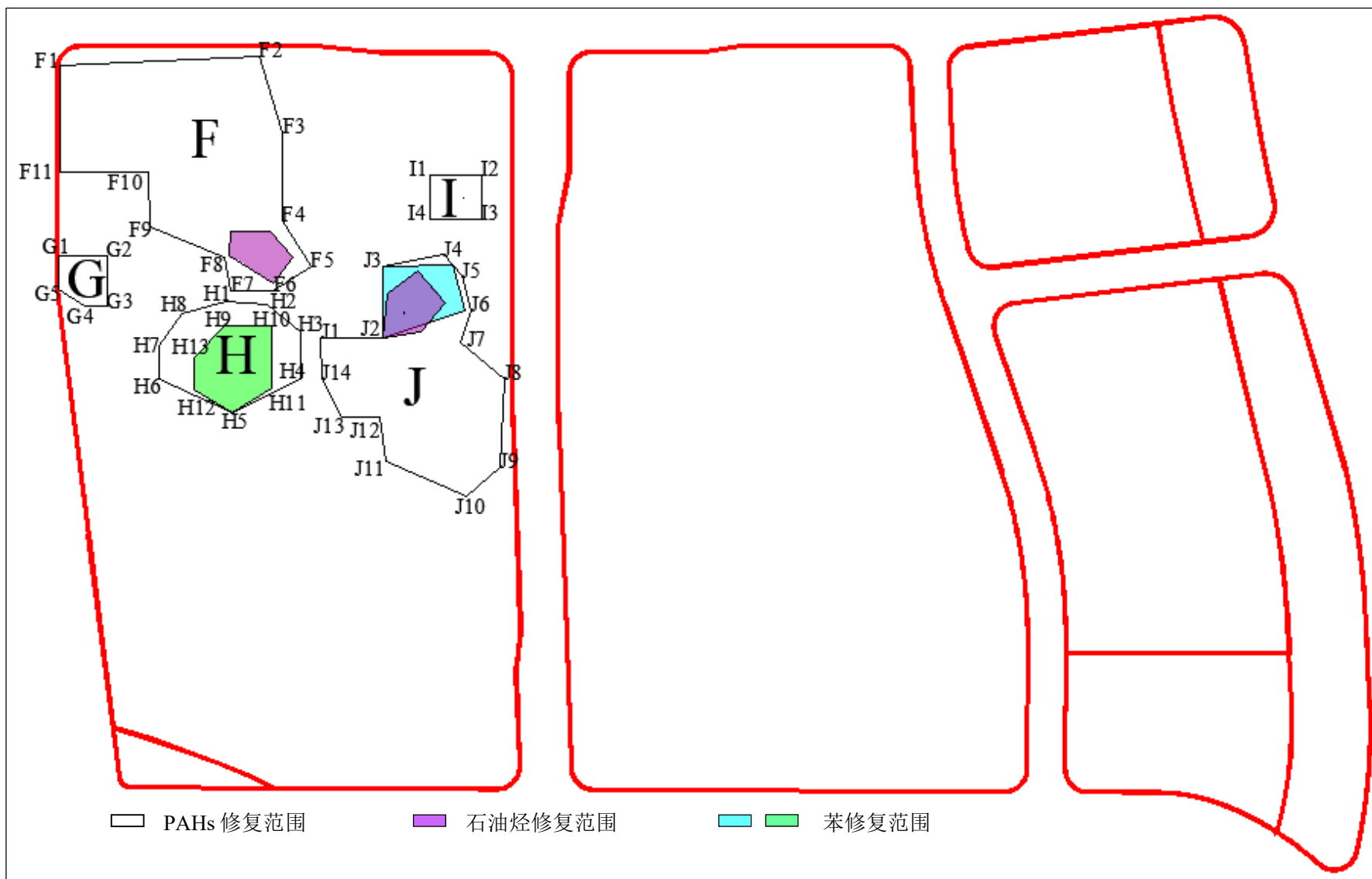


图 2.1-5 西区块第二层土壤修复范围

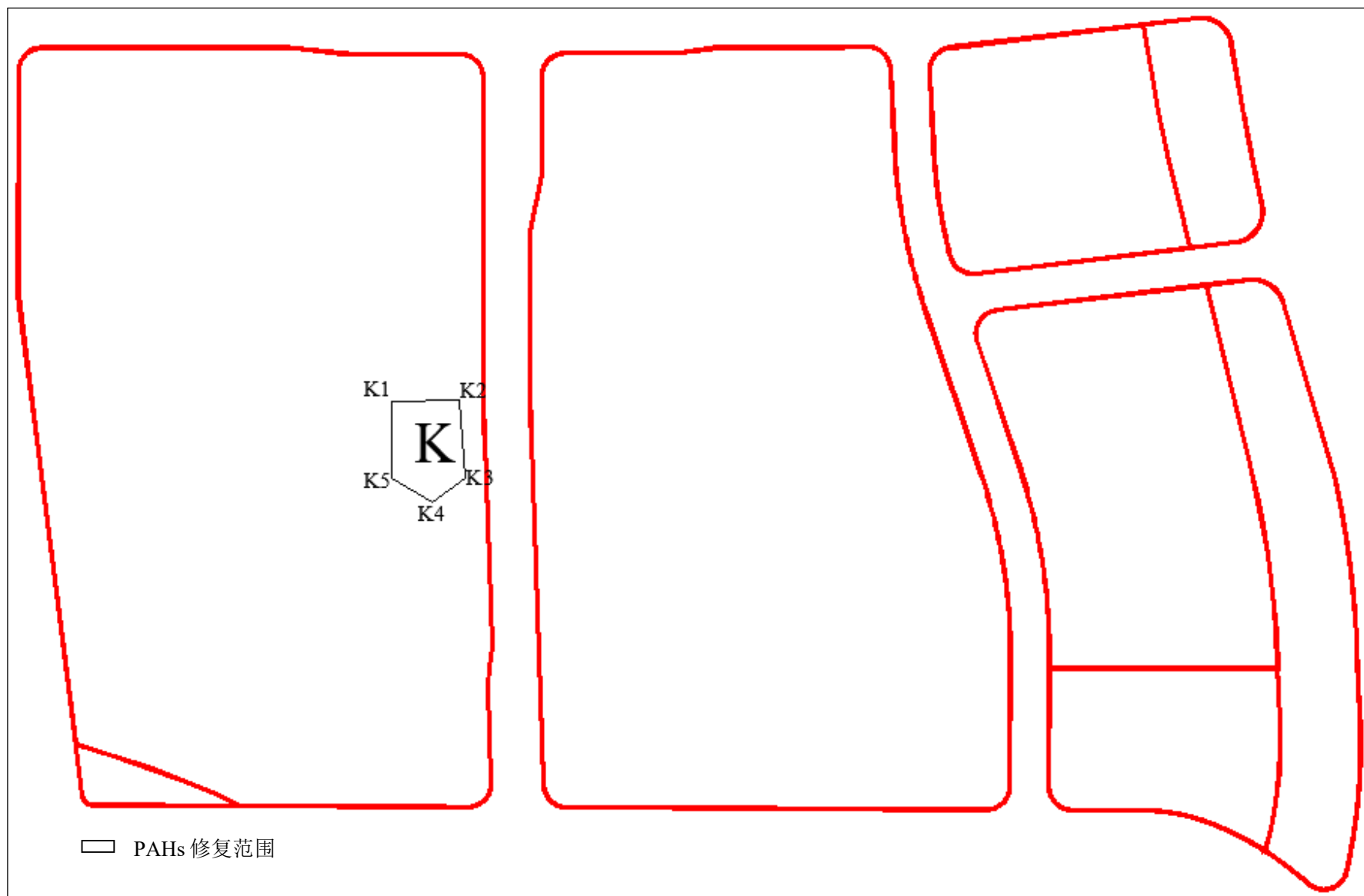


图 2.1-6 西区块第三层土壤修复范围

3 修复方案设计

根据前期调查风评以及补充调查结果，西区块污染物为多环芳烃（苯并[a]芘、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、蒽）、石油烃 C₁₀-C₄₀、苯，污染介质为土壤。其中，多种多环芳烃污染中，以苯并[a]芘修复范围最大、超标倍数最高、最具有代表性。

根据本次修复技术方案思路，首先将多环芳烃单一污染和有机复合污染分区块，而后根据多环芳烃污染浓度划分出轻度多环芳烃污染土壤区块，分三层考虑。有机复合污染区块划分时，考虑区块施工整体性，保守考虑将周边较高浓度单一 PAHs 污染土壤也划入；根据两次小试实验结果，保守考虑 3 倍筛选值（1.65mg/kg）浓度范围内的多环芳烃污染土壤作为轻度污染土壤，初步分类情况见表 8-1，修复过程中可视实际开挖和检测情况进行甄别调整。

表 8-1 污染程度分类表

污染深度	污染介质	面积 (m ²)	土方量 (m ³)	区块范围	备注
第一层 0-1.5m	a 复合污染土壤	5210	7815		多环芳烃、石油烃、苯有机复合污染，且浓度较高
	b 高浓度 PAHs 污染土壤	13437	20155	其他	超标倍数在 3 倍以上
	c 低浓度 PAHs 污染土壤	1989	2984		超标倍数相对较小（3 倍以内）
第二层 1.5-4.0m	a 复合污染土壤	6703	16757		
	b 高浓度 PAHs 污染土壤	12896	32240	其他	
	c 低浓度 PAHs 污染土壤	2364	5910		
第三层 4.0-7.5m	c 低浓度 PAHs 污染土壤	1691	5918		
合计	a 复合污染土壤	11913	24572		
	b 高浓度 PAHs 污染土壤	26333	52395		
	c 低浓度 PAHs 污染土壤	6044	14812		
全场		44290	91779		

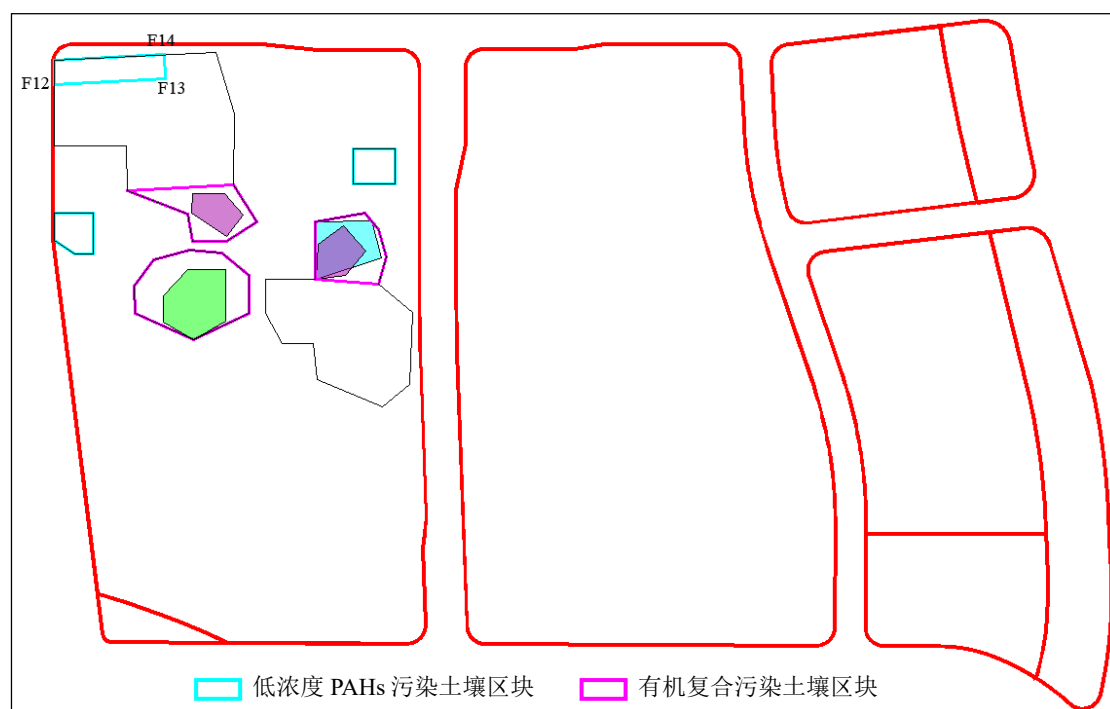
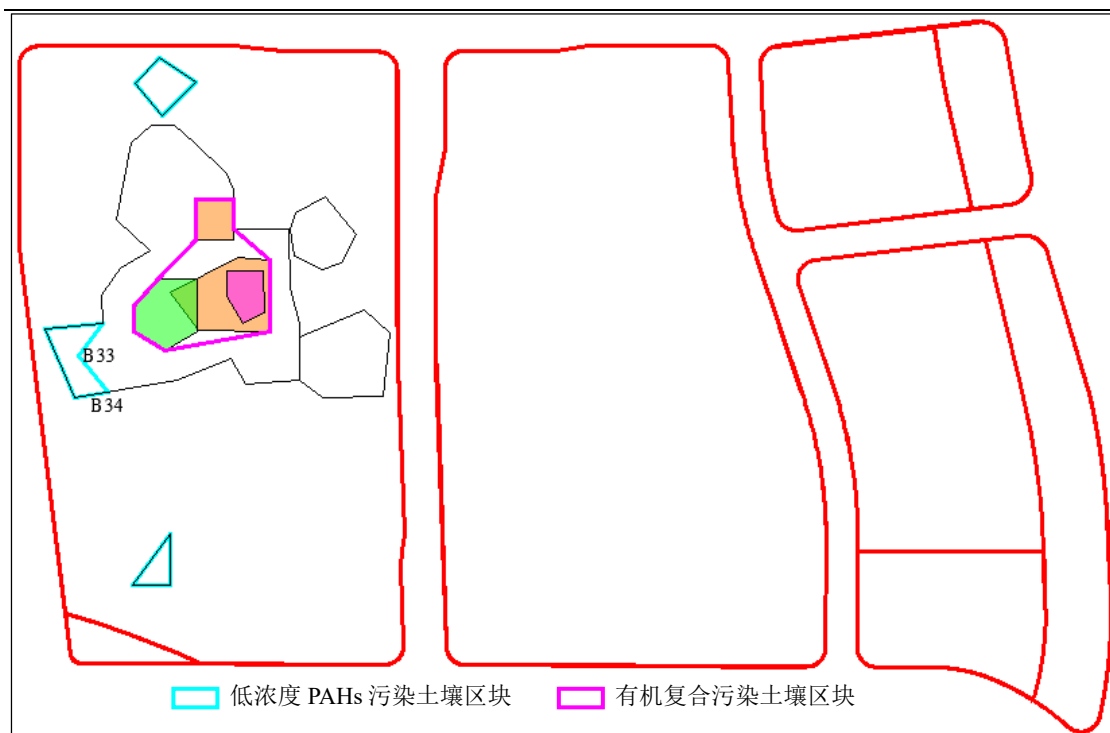


表 8-2 低浓度单一 PAHs 污染区块内部拐点坐标

拐点编号	X	Y	拐点编号	X	Y
B33	90980.3544	77665.0841	F12	91149.6777	77628.8686
B34	90957.8905	77684.0832	F13	91153.5346	77700.9519
			F14	91169.0058	77700.2004

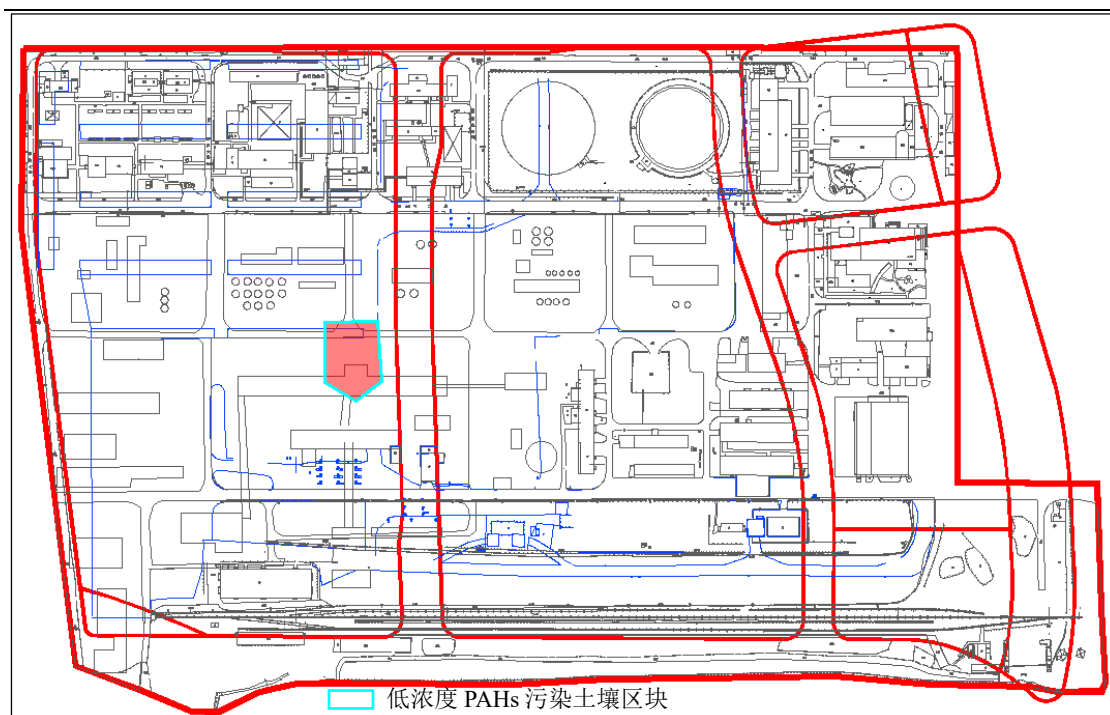


图 8-3 第二层 4.0-7.5m 土壤修复范围图

通过土壤修复模式筛选，建议普遍采用异地模式修复，场地内有部分场地可流转使用，低浓度多环芳烃污染土壤体量相对较小，可适用于原地异位修复模式。通过土壤修复技术筛选，考虑到水泥窑的温度比热脱附高，从污染严重程度排序，有机复合污染土壤>高浓度 PAHs 污染土壤>低浓度 PAHs 污染土壤，因此，优先推荐有机复合污染土壤和高浓度 PAHs 污染土壤使用水泥窑协同处置或热脱附技术，低浓度 PAHs 污染土壤优先推荐化学氧化技术或热脱附技术。

经过对各方案的综合评估，特别是充分考虑技术可行性、费用及时间周期这三个主要因素，最终推荐使用方案一（水泥窑+热脱附+化学氧化）作为本方案涉及地块污染土壤修复项目的最优技术方案，同时考虑杭州周边水泥厂处置能力较为饱和的状态，且本地块污染物热脱附均可处理，故将方案四（热脱附+化学氧化）作为备选方案。

3.1 方案一：水泥窑协同处置+热脱附+化学氧化修复方案

3.1.1 技术路线

根据本项目提供的风评报告描述的关于现场污染实际情况，提出第一种修复方案：水泥窑协同处置+热脱附+化学氧化修复方案。

（1）进场后进行三通一平、降水井、异地热脱附设备安装试运行等施工准

备。

（2）土方开挖，与此同时进行基坑支护、基坑降水。基坑的五类土壤和降水产生的废水需分别处理。

（3）地表硬化：破碎冲洗后资源化利用（路基或进砂石厂）。

（4）上层清洁土壤和放坡清洁土壤：开挖后单独转运、暂存至清洁区，待基坑验收后回填至基坑。

（5）高浓度 PAHs 污染土壤：①开挖后转运至预处理大棚；②进行筛分等预处理，去除土壤中大块渣石，针对湿度过大的土壤进行干化，节约后续热脱附能耗；③土方外运，注意二次污染防治；④热脱附，其中经过处理后的土壤若未达修复目标，再次回到设备中处理；⑤直至通过修复效果评估，所有土壤均达到修复目标；⑥修复后的土壤作为土壤按相关规范要求就近消纳。

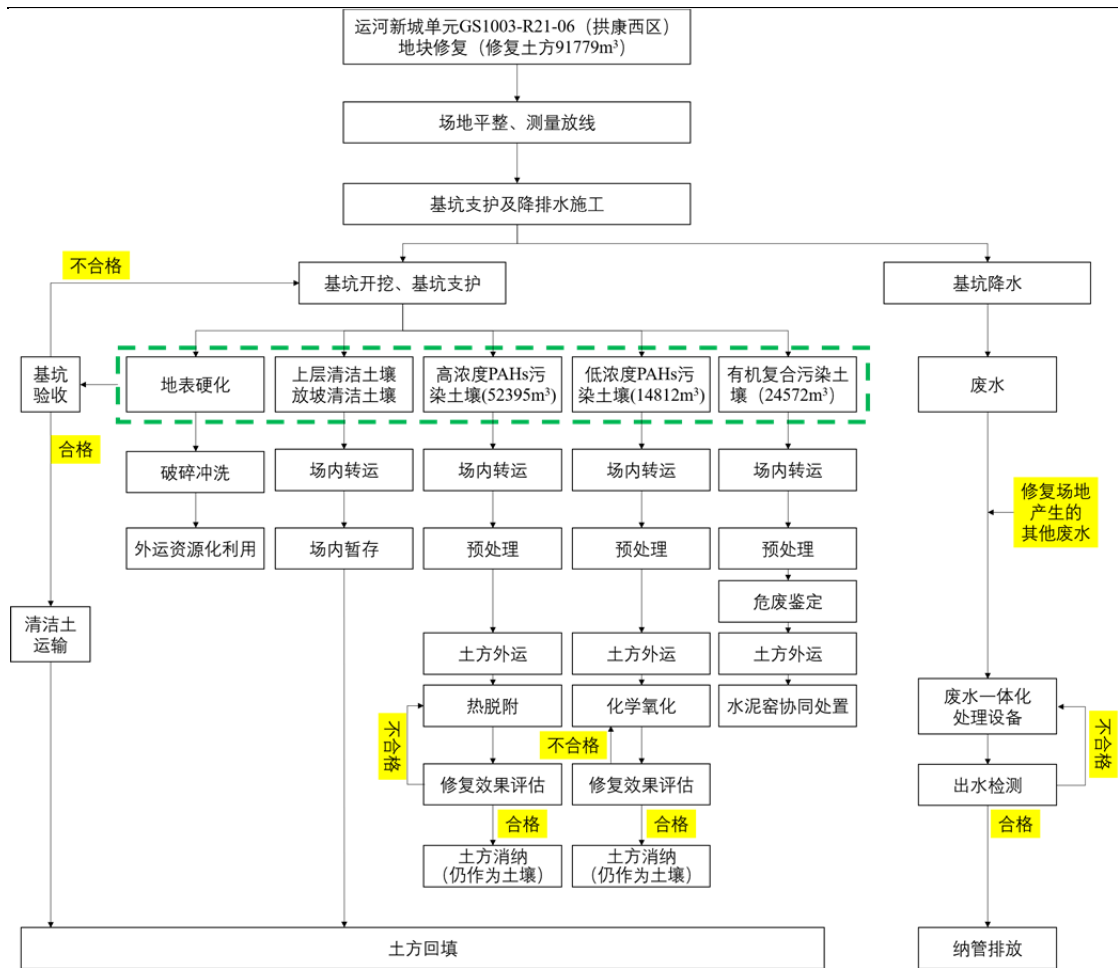
（6）低浓度 PAHs 污染土壤：①开挖后转运至预处理大棚；②进行筛分等预处理，去除土壤中大块渣石，针对湿度过大的土壤进行干化，减小土壤颗粒间的粘合力，增加氧化药剂拌合效果；③土方场地内流转，注意二次污染防治；④异位化学氧化，其中经过处理后的土壤若未达修复目标，再次回到设备中加药处理；⑤直至通过修复效果评估，所有土壤均达到修复目标；⑥修复后的土壤作为土壤按相关规范要求就近消纳。

（7）有机复合污染土壤：①开挖后转运至预处理大棚；②进行筛分等预处理，去除土壤中大块渣石，针对湿度过大的土壤进行干化，节约后续水泥窑能耗；③危废鉴定。④土方外运，经鉴定不属于危险废物的，按照《中华人民共和国土壤污染防治法》要求运输，经鉴定属于危险废物的，按照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》要求运输，注意二次污染防治；⑤水泥窑协同处置。

（8）基坑降水废水：抽出后进入废水一体化处理设备，处理达标后排入市政管网。

（9）基坑开挖完成后进行基坑验收，通过验收的基坑可将清洁土回填、平整。

具体的修复工艺技术路线见图 3.1-1。



3.1.2关键技术参数

3.1.2.1土壤清挖

污染土壤开挖深度按照场地环境调查取样检测孔口标高为基准向下开挖至该区域要求的修复深度。1.5 米以内深度基坑无需考虑放坡，一次开挖到达深度；1.5 米深以上基坑需根据土质情况按规范要求放坡，并分层开挖。有机污染区及重金属因处理方式不相同，需要分开清挖、运输、存储及处理。一般的污染土壤清挖流程如下。

- 1) 场地清表：挖除、清理污染场地地块表面的垃圾、废弃物、构建筑物等，并凿除部分区域表层的混凝土面层。
- 2) 定位放线：开挖前由测量员根据开挖平面图和测量定位图用白灰划出开挖边缘线，同时测量现状标高，与场地风险评估报告确定的孔口标高进行核对。
- 3) 验线复核：项目测量人员放完开挖边线后请监理工程师验线，经监理工程师认可后方可破土开挖。

4) 土壤清挖：清挖过程必须严格按照挖土顺序挖土，为使得土方施工能按计划顺利实施，必须保证土方施工连续。严格按照放出的灰线开挖边界开挖，不准出现多挖、漏挖的情况；由于方案变动造成的多挖，必须出具监理及业主意见，方可重新放线开挖；开挖以场地风险评估报告给定的孔口标高为基准标高，按修复深度要求开挖。

5) 土壤转运

使用渣土运输车，随挖随装车，装车高度不超过车厢槽帮，并采用挖掘机进行表面平整和简单沉压后，根据污染物类别分别运至相对应的预处理场地，保证污染土壤不落地，尽量减少污染土的现场堆存，避免造成二次污染。

6) 边坡修整：对基坑边坡某些不稳定、有碍进一步施工等区域进行修整，保证施工顺畅，保障施工安全。

7) 基坑验收：基坑开挖到位且边坡修理完成后，及时请工程监理进行基坑开挖工程验收；办理完成基坑工程验收后，由环境监理及委托的第三方检测机构对基坑清理效果取样检测。

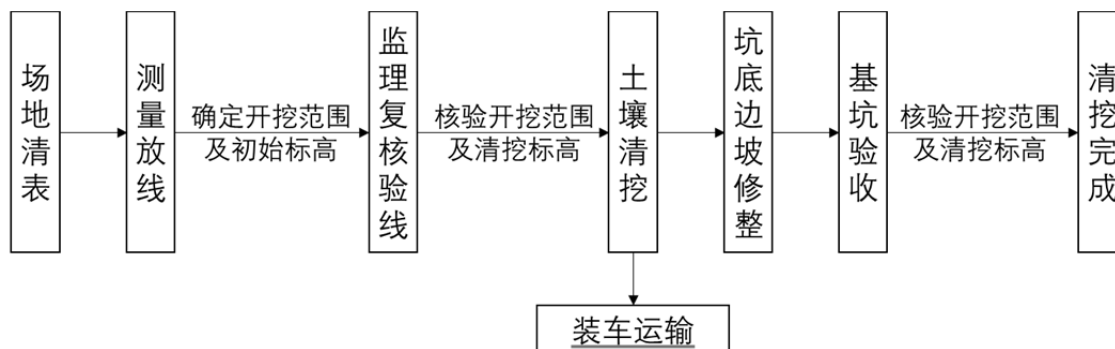


图 3.1-2 土壤清挖流程图

根据场地调查和风险评估结果，以及补充调查结果，最终绘制完成本项目各层的清挖范围如图 3.1-3 所示。各层修复范围存在叠加的情况，在进行清挖范围统计时，需考虑下层的叠加情况。部分下层污染土壤被上层非污染土覆盖，清挖时需先将上层非污染土壤清挖。各层清挖范围如图 3.1-4、图 3.1-5、图 3.1-6 所示。

拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）西区块【运河新城单元 GS1003-R21-06（拱康西区）】污染场地修复技术方案



图 3.1-3 土壤修复范围图

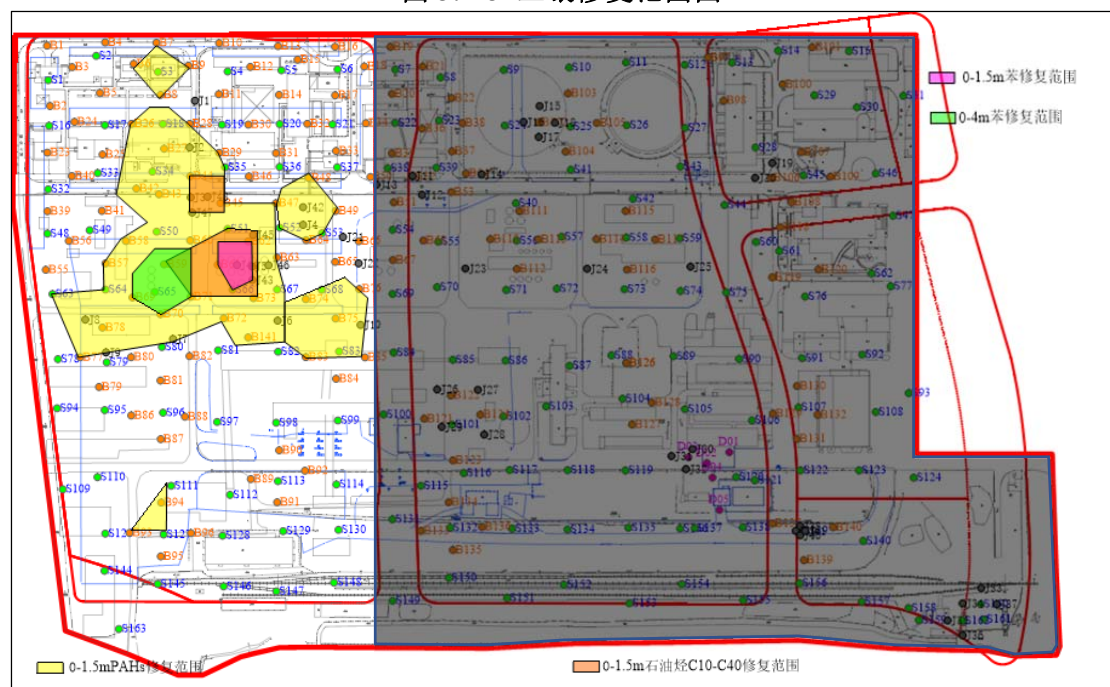


图 3.1-4 第一层 0-1.5m 土壤修复范围图

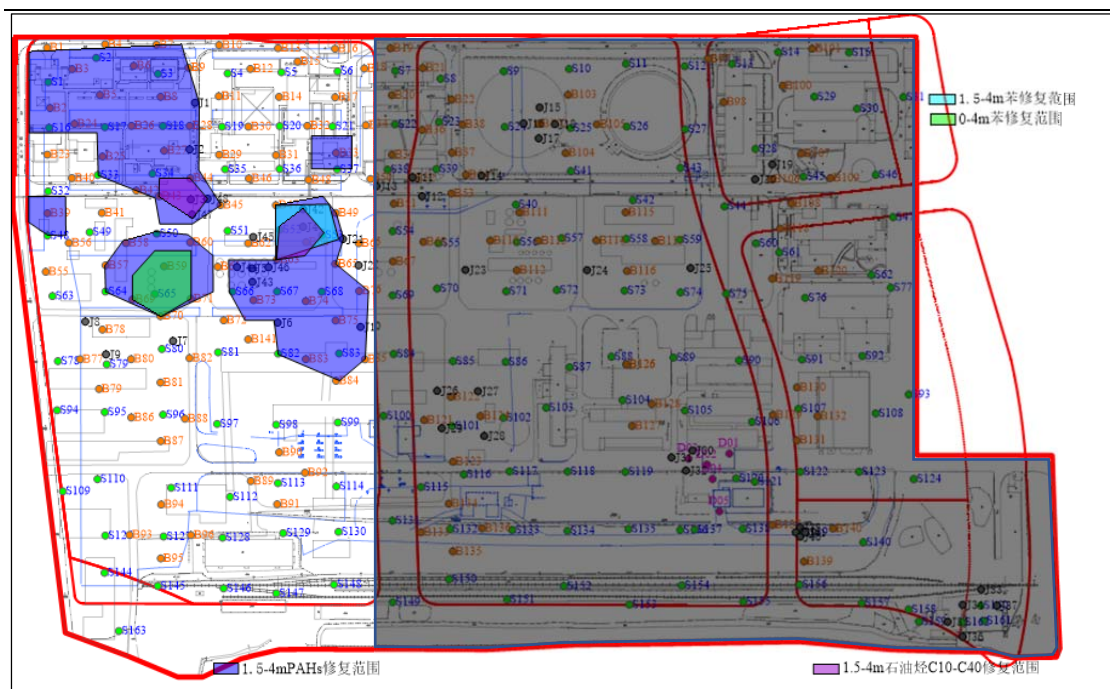


图 3.1-5 第二层 1.5-4m 土壤修复范围图

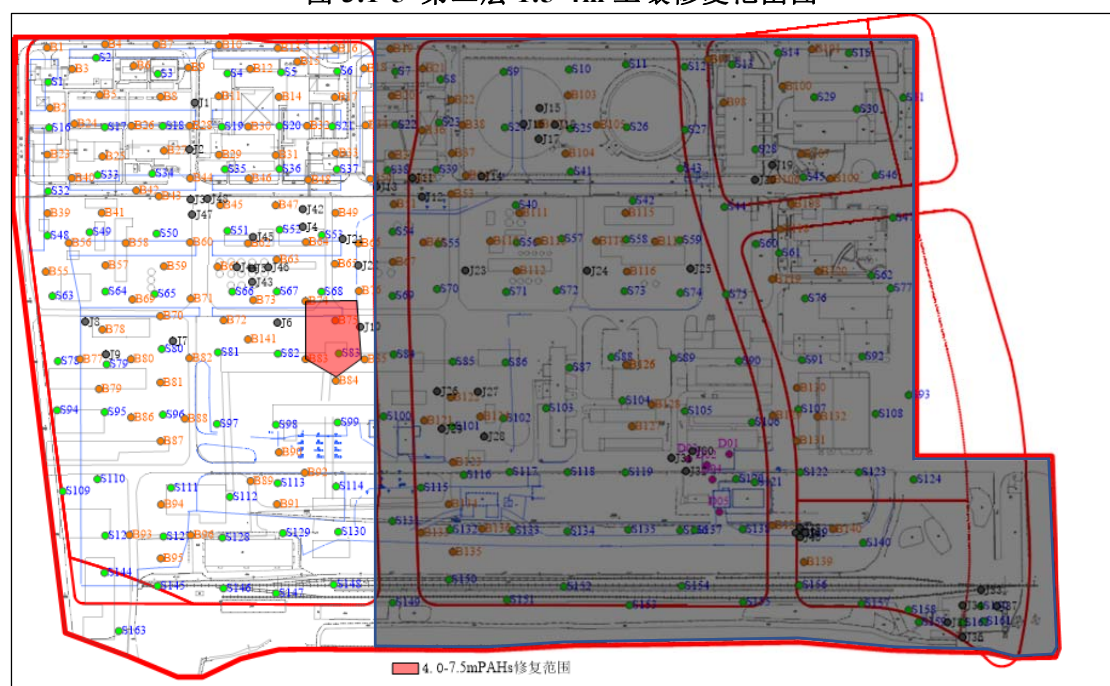


图 3.1-6 第三层 4.0-7.5m 土壤修复范围图

3.1.2.2 热脱附处理

通过加热将污染物从土壤中转移至气体中，再通过气体净化实现污染物去除。污染土壤经破碎、筛分等预处理后送入污染土壤与加热介质间接接触的加热装置；通过控制污染土壤的加热温度和停留时间将目标污染物加热到沸点以上，从而使污染物气化挥发达到污染物与土壤分离目的；气化污染物进入气体处理系统去除或回收。

1、工艺流程

一般的热脱附技术工艺流程为：

1) 设备安装调试：污染土壤热脱附处理前需进行污染土壤暂存车间建造、待检区设置、地磅等辅助设施建设。设备安装维护及调试：通过处理 1~2 个批次的污染土壤，对设备相关的运行参数进行优化设置，确保后续处理的顺利进行。

2) 预处理与上料：将土壤输入振荡筛，小于设定粒径的土块落入进料皮带输送机，被送入回转窑；超规格的土块落入通往破碎机的皮带输送机，经过破碎后再次返回振荡筛进行筛分。

3) 回转窑加热：污染土壤进入回转窑后，在窑体的转动过程中，燃烧器产生的火焰均匀加热窑体，污染土壤被间接加热至设定的温度，达到污染物的沸点后，有机污染物气化挥发。在系统负压作用下，富含污染物的气体进入尾气处理系统，不含有有机污染物的土壤在窑口出料。

4) 土壤加湿降温：回转窑中处理后灼热的土壤落入土壤混合器内，经间接喷水混合进行冷却。

5) 处理后土壤堆放：冷却后的土壤经皮带输送至暂存区堆放。

6) 出土：用铲车将暂存区土壤装载至运输车内，运至待检场堆置待检。

7) 尾气处理：富含有机污染物的尾气通过系统负压，进入尾气处理系统，依次通过过滤器、冷凝器、除水装置等环节去除尾气中污染物。气体通过冷凝器后可进行油水分离，浓缩、回收有机污染物。过滤除尘工序是将颗粒大、比重大的粉尘，借助重力沉降作用落入灰斗，而含有较细粉尘的气体在通过滤料时被阻留，使气体得到净化；急冷降温工序是将高温气体的温度急速降低至 200℃ 以下，避免二噁英的生成温度区间（200~500℃），防止二噁英的产生；除水工序是对气体中含有的水进行吸收，达到去除气体中水分的目的。

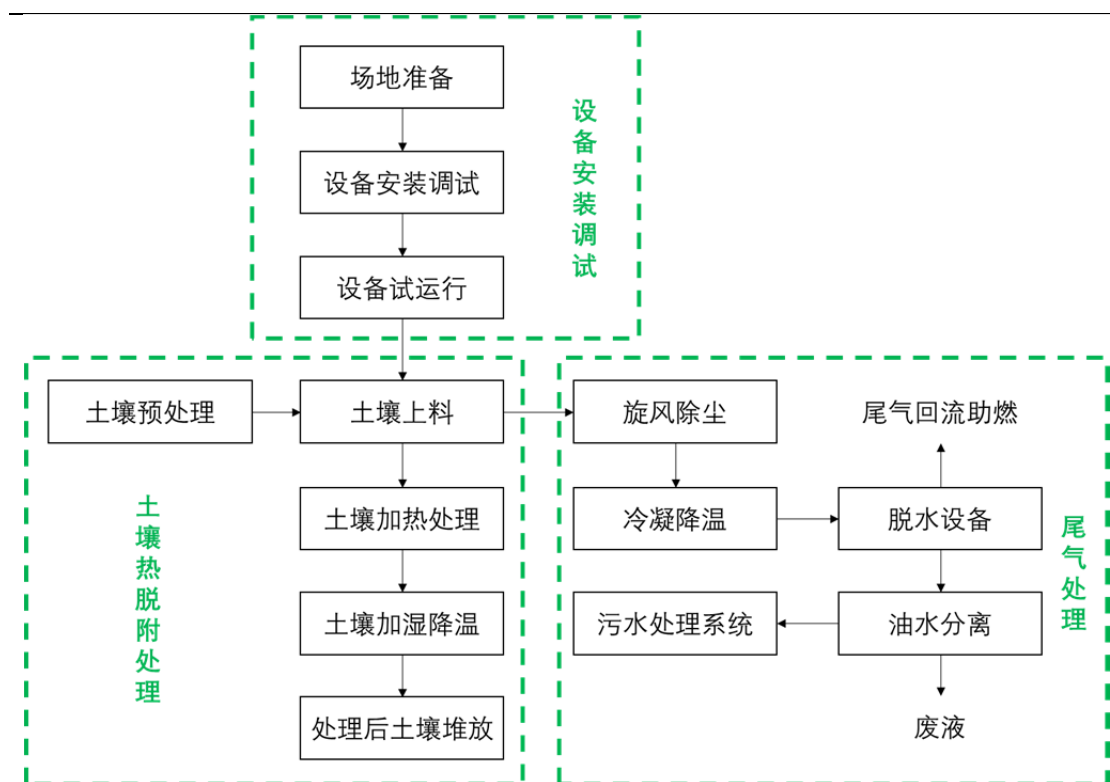


图 3.1-7 热脱附技术工艺流程图

2、工艺参数

（1）预处理

1）预处理车间（大棚）应保持密闭和负压状态；应设置机械通风，车间内排出的空气应经过滤、吸附处理或引入运行的尾气处理设施进行处理。具体设计参数见密闭大棚建设章节。

2）污染土壤预处理车间应根据预测总库存容量、配套设施要求及现有地块条件进行设计和建设。

3）车间内应进行功能区划分，可分为污染土壤卸车区、暂存区、预处理区等。

（2）系统进料

根据污染土壤特性和处理规模的要求，选择适当的进料方式及进料速度。进料系统应能自动进料，并配置可调节投加速率的投料装置，保证进料均匀。进料设备应尽量密闭或隔离，防止污染物及粉尘污染场区周围环境。

（3）加热处理

1）污染土壤直接热解吸的热处理设备宜为回转窑，间接热解吸的热处理设备宜为回转窑或螺旋推进式热解炉。

- 2) 热处理设备的转动速率应能够在一定范围内进行调节。
- 3) 热处理设备应具备耐高温能力，能在系统设计加热温度的条件下长期连续运行。
- 4) 土壤出料温度应控制为 100~550 °C，停留时间为 15~120 min，使其能够满足污染土壤处理的要求。本方案的热脱附修复技术修复的目标污染物沸点最高的为茚并[1,2,3-cd]芘，沸点为 536°C。
- 5) 热处理设备的热源负荷应符合 65%~110%的要求。
- 6) 热处理设备的进出料口、与尾气处理连接处、检修口等的设计均应满足系统密闭性的要求。
- 7) 采用燃料为热源的热处理设备，燃料和空气进气量应能够进行调节。
- 8) 热处理设备的驱动装置应采用变频控制。
- 9) 热处理设备腔内应配置防板结装置。

表 3.1-1 目标有机物沸点

污染物	沸点/°C	污染区块
苯	80.1	B、H、J
石油烃 C ₁₀ -C ₄₀	<500	B、F、J
苯并[a]芘	496	A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K
苯并[a]蒽	437	B、F、H、J
苯并[b]荧蒽	481	B、F、H、J
苯并[k]荧蒽	480	B
二苯并[a,h]蒽	524	B、C、F、H、J
茚并[1,2,3-cd]芘	536	B、F、H、J
萘	221.5	B、F、H、J

3.1.2.3 化学氧化处理

根据本项目小试结果，推荐使用碱活化的过硫酸钠作为氧化剂。过硫酸钠具有较好的稳定性、水溶性、强氧化性等优势，经过活化可生成硫酸根自由基 SO₄^{·-}和羟基自由基·OH，这些活性基团具有强氧化性，可去除大部分有机污染物。

一般的化学氧化技术工艺流程为：

- 1) 污染土壤清挖；
- 2) 将污染土壤破碎、筛分，筛除建筑垃圾及其它杂物；
- 3) 药剂喷洒；

4) 通过多次搅拌将修复药剂与污染土壤充分混合，使修复药剂与目标污染物充分接触；

5) 监测、调节污染土壤反应条件，直至自检结果显示目标污染物浓度满足修复目标要求；

6) 通过验收的修复土壤按设计要求合理处置（仍作为土壤利用）。

修复系统包括土壤预处理系统、药剂混合系统和防渗系统等。其中：

1) 预处理系统。对开挖出的污染土壤进行破碎、筛分或添加土壤改良剂等。该系统设备包括破碎筛分铲斗、挖掘机、推土机等。

2) 药剂混合系统。将污染土壤与药剂进行充分混合搅拌，按照设备的搅拌混合方式，可分为两种类型：采用内搅拌设备，即设备带有搅拌混合腔体，污染土壤和药剂在设备内部混合均匀；采用外搅拌设备，即设备搅拌头外置，需要设置反应池或反应场，污染土壤和药剂在反应池或反应场内通过搅拌设备混合均匀。该系统设备包括行走式土壤改良机、浅层土壤搅拌机等。

3) 防渗系统为反应池或是具有抗渗能力的反应场，能够防止外渗，并且能够防止搅拌设备对其损坏，通常做法有两种，一种采用抗渗混凝土结构，一种是采用防渗膜结构加保护层。

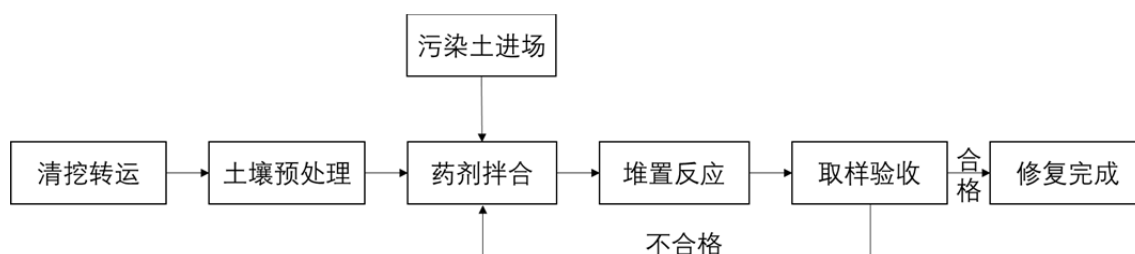


图 3.1-8 化学氧化技术工艺流程图

其中，根据小试结果，过硫酸钠的添加比例设置在 5%（药剂与土壤的质量比）左右。污染较轻的土壤需要投加的氧化剂相对较少，污染较重的土壤需要投加的氧化剂相对较多；由于土壤具有异质性，污染程度不一，因此施工过程中可对氧化剂投加比例进行进一步优化。

3.1.2.4 污染土危废鉴定

采用水泥窑协同处置的污染土壤属于固体废物，需要进行危废鉴定，即根据《危险废物鉴别标准通则(GB 5085.7-2019)》及本项目土壤污染情况，对污染土壤的腐蚀性、急性毒性、浸出毒性、反应性等鉴别。污染土壤采集方法、部

位、份样数等参照《工业固体废物采样制样技术规范（HJ/T 20-1998）》和《危险废物鉴别技术规范（HJ/T 298-2019）》执行。其中，最小份样数和一个份样所需采集的最小份样量规定见表 3.1-2、表 3.1-3。最终危废鉴定办法以本项目污染土壤危废鉴定方案为准。

表 3.1-2 待鉴别固废采样最小份样数

固体废物质量（以 q 表示）（吨）	最小份样数（个）
$q \leq 5$	5
$5 < q \leq 25$	8
$25 < q \leq 50$	13
$50 < q \leq 90$	20
$90 < q \leq 150$	32
$150 < q \leq 500$	50
$500 < q \leq 1000$	80
$q > 1000$	100

表 3.1-3 不同颗粒直径的固态废物的一个份样所需采集的最小份样量

原始颗粒最大粒径（以 d 表示）（厘米）	最小份样量（克）
$d \leq 0.50$	500
$0.50 < d \leq 1.0$	1000
$d > 1.0$	2000

关于污染土壤外运审批流程，对不属于危险废物的外运污染土壤，根据《中华人民共和国土壤污染防治法》第四十一条规定，“修复施工单位转运污染土壤的，应当制定转运计划，将运输时间、方式、线路和污染土壤数量、去向、最终处置措施等，提前报所在地和接收地生态环境主管部门”。对外运的污染土壤属于危险废物的，应该遵照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的有关规定执行，“转移危险废物的，应当按照国家有关规定填写、运行危险废物电子或者纸质转移联单。运输危险废物，应当采取防止污染环境的措施，并遵守《危险货物道路运输安全管理办法》等国家有关危险货物运输管理的规定。禁止将危险废物与旅客在同一运输工具上载运”。

3.1.2.5 水泥窑协同处置

污染土壤水泥窑协同处置是将污染土壤作为水泥生料的一小部分制成水泥，同时在制成水泥的过程中又能达到有效去除污染物的目的。该法可有效处理含多环芳烃、苯系物及总石油烃等有机污染物的土壤，它将污染土壤按一定比例添加到水泥生料中，在水泥回转窑系统中经过预处理后，污染土壤和其它生料

一起进入回转窑，通过回转窑的 1200-1750℃ 高温加热，直接彻底焚毁有机污染物，土壤和其他生料煅烧后变成水泥熟料。

水泥窑窑尾烟尘（包括重金属等）经现有布袋除尘处理、氮氧化物经脱硝处理、二噁英经急冷作用和布袋除尘处理，窑尾废气中各类污染经处理后引至高空排放，窑头粉尘经现有静电除尘处理后引至高空排放，物料卸料、破碎、输送、投料等产生的粉尘及臭气经集收后通过布袋除器处理入窑焚烧，固废车间恶臭废气通过将车间设置成负压状态，废气经集收后进入水泥窑焚烧处理。

一般的水泥窑协同处置技术流程为：

1) 污染土接收，有机污染土和重金属污染土单独计量，并在土壤运输五联单上签字。其中可产生挥发性气体的有机污染土壤卸料及装车空间应采用密封的构筑物或建筑物，并应配置通风、降尘、除臭系统，同时应保持系统与车辆卸料动作联动。

2) 有机污染土壤和重金属污染土壤应分类存放，并与水泥厂常规原料、燃料和产品分开贮存。其中重金属污染土贮存设施需具备防渗能力，暂存期间仍需加强防渗、苫盖防止扬尘。苯常温较易挥发，暂存期间需加强污染土气体的处置，优先水泥窑协同处置该部分污染土壤，减少挥发性气体的污染。

3) 污染土壤投加，水泥窑协同处置的废物可以在生料磨、上升烟道、分解炉、窑尾、窑罩门和主燃料六处投加。由于有机类污染土在升温过程中易挥发，为保证有机类污染物经过高温焚烧分解后达标排放，避免出现由水泥窑的低温段加入，污染土壤中有机物脱附后直接排放造成烟气污染物超标的情况，建议有机污染土壤在温度 1100℃ 以上的区域投入，烟气停留时间应大于 2 秒。因此，有机污染土壤应由水泥窑的窑头、窑尾、分解炉等部位投料。但由于从水泥窑的窑头、窑尾、分解炉等部位投料，对水泥产品质量有一定的影响，故应严格控制各处的投加量。对于场地内的重金属污染土壤，为降低污染土的添加对水泥产品质量的影响，建议在生料磨处添加。



图 3.1-9 水泥窑协同处置工艺流程图

3.2方案四：热脱附+化学氧化修复方案

3.2.1技术路线

根据本项目提供的风评报告描述的关于现场污染实际情况，提出第四种修复方案：热脱附+化学氧化修复方案。

（1）进场后进行三通一平、降水井等施工准备。

（2）土方开挖，与此同时进行基坑支护、基坑降水。基坑的四类土壤和降水产生的废水需分别处理。

（3）地表硬化：破碎冲洗后资源化利用（路基或进砂石厂）。

（4）上层清洁土壤和放坡清洁土壤：开挖后单独转运、暂存至清洁区，待基坑验收后回填至基坑。

（5）低浓度 PAHs 污染土壤：①开挖后转运至预处理大棚；②进行筛分等预处理，去除土壤中大块渣石，针对湿度过大的土壤进行干化，减小土壤颗粒间的粘合力，增加氧化药剂拌合效果；③土方场地内流转，注意二次污染防治；④异位化学氧化，其中经过处理后的土壤若未达修复目标，再次回到设备中加药处理；⑤直至通过修复效果评估，所有土壤均达到修复目标；⑥修复后的土壤作为土壤按相关规范要求就近消纳。

（6）高浓度 PAHs 污染土壤和有机复合污染土壤：①开挖后转运至预处理大棚；②进行筛分等预处理，去除土壤中大块渣石，针对湿度过大的土壤进行干化，节约后续热脱附能耗；③土方外运，注意二次污染防治；④热脱附，其中经过处理后的土壤若未达修复目标，再次回到设备中处理；⑤直至通过修复效果评估，所有土壤均达到修复目标；⑥修复后的土壤作为土壤按相关规范要求就近消纳。

（7）基坑降水废水：抽出后进入废水一体化处理设备，处理达标后排入市政管网。

（8）基坑开挖完成后进行基坑验收，通过验收的基坑可将清洁土回填、平整。

具体的修复工艺技术路线见图 3.2-1。

拱北公交综合体（运河新城单元 C-U21/C2-01、C-R21-09 地块）西区块【运河新城单元 GS1003-R21-06（拱康西区）】污染场地修复技术方案

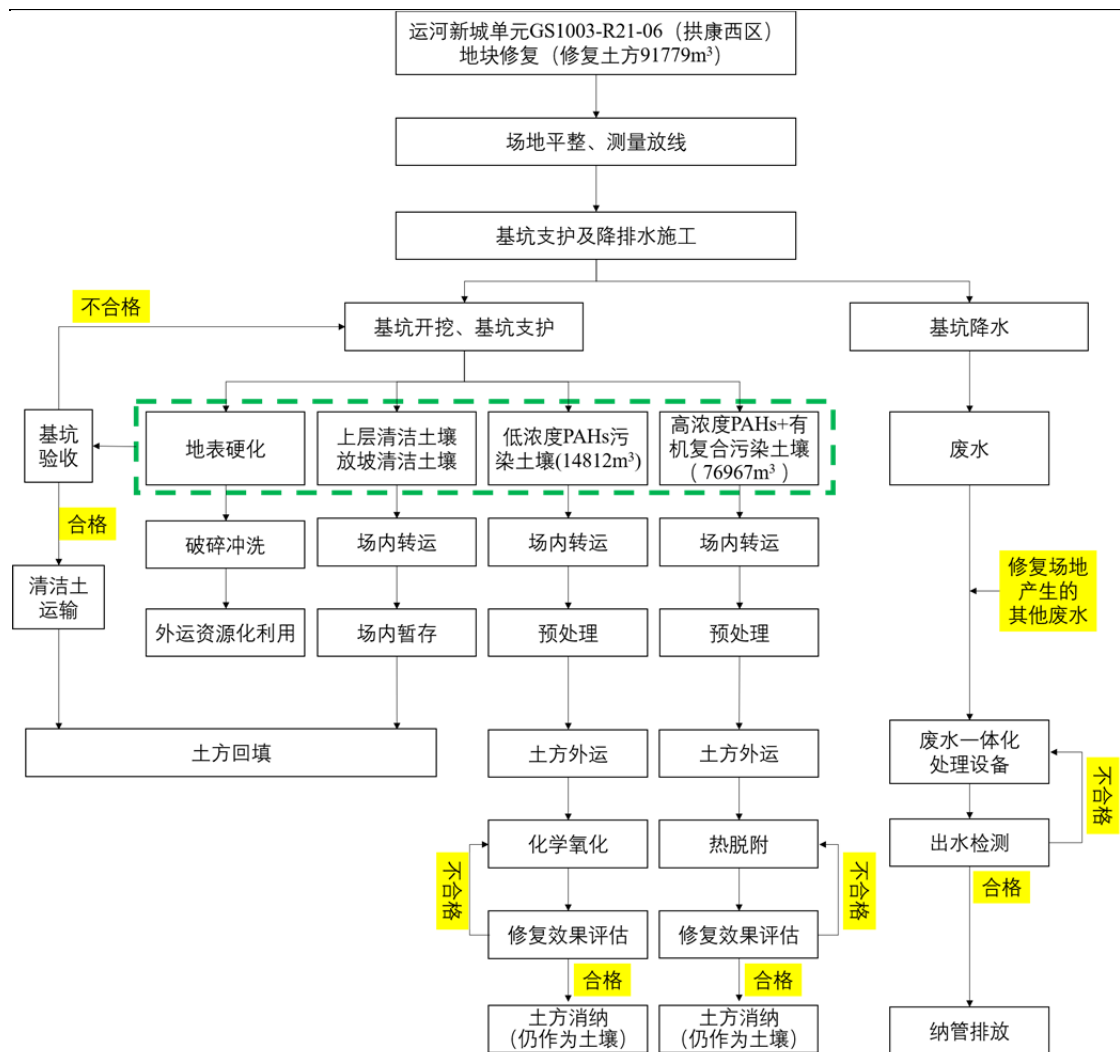


图 3.2-1 方案四技术路线图

3.3 推荐方案工艺设计

本项目推荐选用方案一：水泥窑协同处置+热脱附+化学氧化修复方案。有机复合污染土壤进行水泥窑协同处置，高浓度单一多环芳烃污染土壤进行热脱附处理，低浓度单一多环芳烃污染土壤进行异位化学氧化处理。需要说明的是，本场地所有污染土壤，水泥窑协同处置和热脱附处理技术均可修复，因此本方案主要是考虑保留异位化学氧化这条技术路线，同时在实际工程实施时，水泥窑和热脱附技术处理的土方量还可根据市场处理能力两者之间进行协调。

3.3.1 污染土壤属性检测鉴别

污染土壤属性检测鉴别将根据 2019-04-30 生态环境部部长信箱《关于污染土壤外运是否需要对其进行危废鉴定的回复》中相关规定进行。具体如下：

一、关于判断异位修复的污染土壤外运是否要进行危废鉴定的有关程序

1、鉴别是否属于固体废物。主要依据是：《固体废物鉴别标准通则》（GB34330-2017）中“4 依据产生来源的固体废物鉴别”和“6 不作为固体废物管理的物质”的有关规定：“在污染地块修复、处置过程中，采用下列任何一种方式处置或利用的污染土壤属于固体废物：1）填埋；2）焚烧；3）水泥窑协同处置；4）“生产砖、瓦、筑路材料等其他建筑材料”、“修复后作为土壤用途使用的污染土壤不作为固体废物管理”。

2、经鉴别属于固体废物的，需要进行危废鉴定。

二、关于污染土壤外运审批流程对不属于危险废物的外运污染土壤，根据《中华人民共和国土壤污染防治法》第四十一条规定，“修复施工单位转运污染土壤的，应当制定转运计划，将运输时间、方式、线路和污染土壤数量、去向、最终处置措施等，提前报所在地和接收地生态环境主管部门”。对外运的污染土壤属于危险废物的，应该遵照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的有关规定执行。

根据《危险废物鉴别技术规范》(HJ298-2019)4.1.2 规定：水体环境、污染地块治理与修复过程产生的，需要按照固体废物进行处理处置的水体沉积物及污染土壤等环境介质，以及突发环境事件及其处理过程中产生的固体废物，如鉴别过程已经根据污染特征进行分类，可适当减少采样份样数，每类固体废物

的采样份样数不少于 5 个。

本项目采用水泥窑协同处置的土壤中污染物为多环芳烃、苯、石油烃的有机复合污染，土壤取样数量不少于 5 个，危废鉴别检测项目为拟外运土壤中超标污染物。

3.3.2 污染土壤开挖、转运及存放

3.3.2.1 测量放线及区域标识

施工前应对场地污染土壤进行合理分区，制定衔接顺畅的清挖、处理及回填顺序方案。在土壤清挖开始前对各个开挖区域进行严格仔细的测量定位，并对清挖深度进行明确标识；在土壤清挖过程中对开挖区域的定位、深度和进度进行及时确认，标准测量控制流程如图 3.3-1 所示。

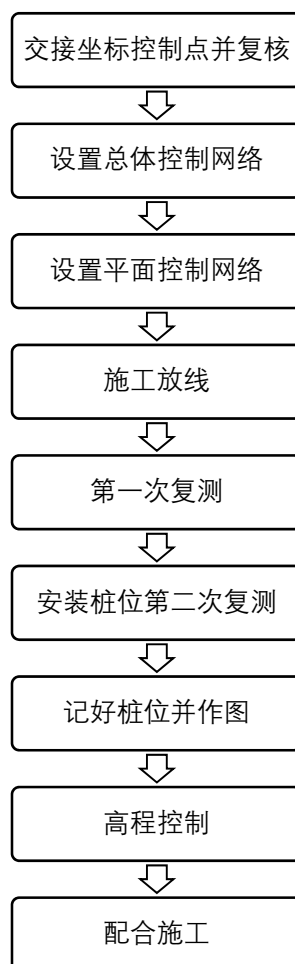


图 3.3-1 测量控制流程

标识是根据土壤调查及监测报告，对污染区域进行识别，并进行污染区域的划分和标记。依据场地调查及评价报告、场地特点、结合修复与风险管控技

术路线和工程措施，明确工程作业场所、作业设备及作业人员的特征。

3.3.2.2 基坑降水及支护

本场地地下水位埋深较浅，由于场地土壤修复的最大开挖深度设计为 7.5 m，为了保证开挖的顺利进行，需要在施工过程中持续对基坑进行抽水以降低地下水水位及排出降雨。建议在开挖进程中，随时在基坑底部四周设置排水明沟及集水井。明沟宽 0.4m，向集水井两侧各防坡 1%，明沟边缘离开边坡脚不小于 0.3m，底面比开挖面低 0.5m。为保证明沟中地下水集中抽出，每隔 30~50m 设置集水井，集水井底面比沟底面低 0.5m，集水井具体数量根据现场地下水分布情况和水量而定。

基坑支护可根据开挖的位置不同选择不同方式进行。支护桩需安装至清挖最大深度以下 2m，在地块土壤清挖周边区域，可采用放坡支护方式，放坡边底比为 1:1。由于部分基坑开挖将达到超过 5m 以上的深度，这部分基坑支护需要做专项设计，以确保基坑的稳定性和施工工程中的安全性。

3.3.2.3 密闭大棚建设

由于场地污染物的性质，为了防止修复预处理过程中可能产生挥发性有机物挥发形成二次污染物，有机污染土壤的预处理应置于密闭大棚中。针对有机物污染土壤预处理设备的大棚可建设为全封闭负压防护大棚，大棚的主体结构可使用钢结构覆膜，并配套相应的污染气体吸收净化设备。

大面积的大棚所在场地需在平整后进行大棚的建设，保证周边交通运输便利，水电接入条件齐备。由于大棚是临时工程，治理完成后需将所有建构筑物及设备拆除，因此，水电接入使用临时设施，临时建筑均采用结构简单的可拆卸的临时建筑（即轻钢结构），以此降低建设成本循环使用材料。

大棚的通风系统直接外接尾气处理系统，尾气处理系统可采用活性炭等物质进行污染物的吸附，确保排放空气达标。

3.3.2.4 污染土壤挖掘

在本场地污染土壤清挖前及实施过程中，应本着最大可能减小开挖作业面积及对未受污染土壤的扰动的原则，对污染土壤清挖区域进行水平和纵向上的分区。同时根据不同区域的面积和深度，制定详细的放坡地点及清挖顺序，在土壤扰动最小化的同时，提高开挖效率，缩短开挖时间。

根据修复设计，本场地不同类型污染土壤采用不同的处置技术分别处理，因此开挖过程中需要将采用不同修复技术处置的土壤以及开挖中产生的未污染土进行分区开挖，清挖出的污染土壤运至污染土壤预处理区按照将采用的不同修复技术进行分区堆放及预处理，等待修复处理。清挖出的未受污染土壤与污染土壤隔离堆放，以作后期场地建设使用。

土壤清挖时由地表向下按顺序分层开挖，清挖时边坡采用 1:1 比例自然放坡方式或安装支护桩进行支护。在每一层清挖完成后，对基坑侧壁及基坑底均进行检测，合格后进行下一层土壤清挖。

3.3.2.5 污染土壤转运

本工程污染场区内所有的污染土壤需运输到场地内指定位置进行预处理后再进行外运。施工单位需要根据本工程特点，建立科学的运输管理体系，从而保障土方运输工作安全、按期完成。

1、组织准备：项目部由项目负责人牵头成立污染土壤运输领导小组，全面领导土壤运输的施工指挥工作，建立完善的运输监督制度，及时做好运输记录及交接班工作。

2、现场准备：施工场地出口设置冲洗池和沉淀池，车轮冲洗水循环利用，当冲洗池移动或工程完毕时，需检测车轮冲洗水的水质情况。如水质参数达到市政污水管网接收标准，则可以直接排入市政污水管网；如未达到市政污水管网接收标准，则需将洗车水输送至项目污水处置设施进行处置后达标后再进行排放。

土方车辆冲洗后方能进入市政道路，场内道路做好地面硬化。开挖前完成坡顶护栏及临时排水沟的砌筑，基坑场地安装照明灯，做好夜间施工的照明准备工作。施工过程中随时进行测量，保证开挖线尺寸与标高。

3、协调准备：提前办好渣土受纳许可证，核查运输车、挖掘机及操作司机的有关证件，保证各项手续齐全完善。做好施工协调配合工作，积极与市政道路及交通主管部门协调，并做好场地周边及运输道路沿线单位和居民的配合工作，为土方外运工作的顺利进行创造有利条件。

4、机械设备配备：根据施工进度计划安排，结合土方外运距离及现场施工实际情况，计划配备挖掘机、渣土专用运输车、洒水车等，并做好相应的管理

部门的登记及备案工作。

表 3.3-1 运输过程设备安排表

序号	设备名称	备注
1	挖土机	土方开挖
2	渣土专用运输车	土方运输
3	铲车	清理场地
4	推土机	土壤平整
5	洒水车	现场及道路防尘
6	巡逻车	机械抢修遗洒清扫

5、人员配备

土壤运输需配备人员如下表。

表 3.3-2 人员配备表

序号	设备名称	备注
1	挖掘机司机	现场挖土
2	运输车司机	污染土的运输
3	推土机司机	配合挖运卸载
4	洒水车司机	现场及道路防尘
5	巡逻车司机	机械抢修遗洒清扫
6	现场清洁人员	负责现场清扫
7	记录员	车辆进出管理
8	巡视员	负责巡逻排查

3.3.2.6 污染土壤存放

场区内清挖出的污染土壤、非污染土壤以及初步处置后土壤应分别存放，污染土壤的存放区分为处置前的污染土壤存放区（预处理区）及处置后的污染土壤存放区。

1、总体要求

（1）单一污染土壤和有机复合污染土壤应分类存放。

（2）已经过检测和未经过检测的工业废物应分区存放；已经过检测的工业废物还应按物理、化学性质分区存放。

（3）场地清挖的有机污染土壤如挥发性较强（例如挥发性有机物等），应采用密封仓存放；如挥发性较弱（例如多环芳烃的半挥发性有机物等），建议采用防水布对土堆进行覆盖。

（4）存放设施应采取防震、防火、换气、空气净化等措施，并应配备应急

安全设备。

（5）运送至水泥窑/砖窑现场的污染土壤应与水泥窑/砖窑常规原料、燃料和产品分开存放，禁止共用同一存放设施。

2、有机污染土壤贮存

场地内土壤中的有机物污染物主要为多环芳烃，具有一定挥发性，还存在挥发性强的苯，存放不当容易造成环境污染。因此，有机物污染土壤的暂存应采用覆盖，防止并控制有机物挥发进入周边空气，并需加强暂存场的防渗能力，暂存期间更需加强防渗、苫盖防止扬尘及异味，避免人体与污染土的直接接触，同时避免降雨导致土壤中有有机物迁移进入地下水。

3.3.2.7 污染土壤预处理

污染土壤清挖后在异位处置或者外运前需进行预处理，不同的处置技术采用不同的暂存及预处理工艺。

污染土壤清挖后，利用场地内原房屋或仓库建成暂存场地，密封形成预处理车间，通过筛分、破碎等设备分离污染土、普通渣土、建筑垃圾等杂物，形成经过初步处理的污染土壤，然后根据不同处置技术进行分类处理。针对采用水泥窑协同处置污染土壤需要将本部分污染土封闭保存，外运至水泥窑协同处置厂家进行处置，而普通（清洁）渣土回填或运输至渣土消纳场，垃圾等杂物回收或交市政环卫处置。针对采用热脱附处置技术处理的污染土壤，需要进行筛分、调节土壤含水率等步骤后送至热脱附设备进行处理。

3.3.3 异位化学氧化

异位化学氧化技术是指向污染土壤添加氧化剂，通过氧化作用，使土壤中的污染物转化为无毒或毒性相对较小的物质。本方案推荐使用碱活化过硫酸钠氧化法。

1、系统构成和主要设备

修复系统包括：

（1）预处理系统（碎筛分铲斗、挖掘机、推土机）

用于对开挖出的污染土壤进行破碎、筛分或添加土壤改良剂等。

（2）药剂混合系统（行走式土壤改良机、浅层土壤搅拌机）

用于将污染土壤与药剂进行充分混合搅拌。按照设备的搅拌混合方式，可

分为两种类型：

a.内搅拌设备，即设备带有搅拌混合腔体，使污染土壤和药剂在设备内部混合均匀。

b.外搅拌设备，即设备搅拌头外置，需要设置反应池或反应场，污染土壤和药剂在反应池或反应场内通过搅拌设备混合均匀。

（3）防渗系统

一般是反应池或是具有抗渗能力的反应场，能够防止液体外渗，并且要防止搅拌设备对其造成损坏，通常做法有两种：a.采用抗渗混凝土结构；b.采用防渗膜结构加保护层。

2、主要实施过程

主要实施过程如下：

（1）污染土壤清挖；

（2）将污染土壤破碎、筛分，筛除建筑垃圾及其它杂物；

（3）药剂喷洒；

（4）通过多次搅拌将修复药剂与污染土壤充分混合，使修复药剂与目标污染物充分接触；

（5）监测、调节污染土壤反应条件，直至自检结果显示目标污染物浓度满足修复目标要求；

（6）通过验收的修复土壤按设计要求合理处置。

3、关键技术参数

影响异位化学氧化/还原技术修复效果的关键技术参数包括：污染物的性质、浓度、药剂投加比、土壤渗透性、土壤活性还原性物质总量或土壤氧化剂耗量 (SoilOxidant Demand, SOD)、氧化还原电位、pH、含水率和其它土壤地质化学条件。

（1）土壤活性还原性物质总量

实施氧化反应工程时，除考虑土壤中还原性污染物浓度外，还应兼顾土壤活性还原性物质总量的本底值，因此需要计算出所有还原性物质质量的总和，由此再推算出需要消耗的氧化药剂总量。

（2）药剂投加比

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，并根据实验结果予以校正。

（3）土壤 pH

根据土壤初始 pH 条件和药剂特性，有针对性的调节土壤 pH，一般 pH 范围 4.0-9.0。常用的调节方法如加入硫酸亚铁、硫磺粉、熟石灰、草木灰及缓冲盐类等。

（4）含水率

对于异位化学氧化/还原反应，土壤含水率宜控制在土壤饱和持水能力的 90%以上。

4、运行维护和监测

（1）异位化学氧化反应实施过程中，应监测污染物浓度变化，判断反应效果。通过监测残余药剂含量、中间产物、氧化还原电位、pH 及含水率等参数，根据数据变化规律判断反应条件并及时加以调节，保证反应效果，直至修复完成。

（2）异位化学氧化技术所需要的工程维护工作较少，如采用碱激活过硫酸盐氧化时，需要监测并维持一定的 pH 值，使用氧化剂时要根据氧化剂的性质，按照规定进行存储和使用，避免出现危险。

3.3.4 水泥窑协同处置

污染土壤水泥窑协同处置是将污染土壤作为水泥生料的一小部分制成水泥，同时在制成水泥的过程中又能达到有效去除污染物的目的。该法可有效处理含多环芳烃、苯系物及总石油烃等有机污染物的土壤，它将污染土壤按一定比例添加到水泥生料中，在水泥回转窑系统中经过预处理后，污染土壤和其它生料一起进入回转窑，通过回转窑的 1200-1750℃ 高温加热，直接彻底焚毁有机污染物，土壤和其他生料煅烧后变成水泥熟料。

本项目采用“水泥窑协同处置+热脱附+异位化学氧化修复方案”，总工程量约为 24572m³ 污染土壤，按一般土壤容重 1.6t/m³ 计算，水泥窑最大处理工程量约为 40000t 污染土壤，按 6 个月工期要求，日均需处理量为 223t。根据市场调研，杭州周边水泥窑至少有 10 家公司可协同处置固废或危废，调研范围内的水泥窑全部满负荷运行，日处理量可达 2992 吨，可满足本项目的处理量需求。

本项目污染土处理处置过程中，有机复合污染土壤建议进行水泥窑协同处置，其余污染土壤根据市场情况，水泥厂相对空闲可以接受并处置本项目单一 PAHs 污染土时，也采用水泥窑协同处置。

3.3.5 异位热脱附处理

通过加热将污染物从土壤中转移至气体中，再通过气体净化实现污染物去除。污染土壤经破碎、筛分等预处理后送入污染土壤与加热介质间接接触的加热装置；通过控制污染土壤的加热温度和停留时间将目标污染物加热到沸点以上，从而使污染物气化挥发达到污染物与土壤分离目的；气化污染物进入气体处理系统去除或回收。

异位热脱附的技术工艺流程主要包括：1）污染土壤清挖、转运及存放；2）污染土壤筛分预处理；3）污染土壤加热、混合；4）修复完成土壤取样检测；5）热脱附尾气处理；6）最终处置、临时存放等工序。土壤出料温度应控制为 100~550℃，停留时间为 15~120min，使其能够满足污染土壤处理的要求。

本方案设计高浓度单一多环芳烃污染土进行异位热脱附处理，该部分土壤主要涉及 0-1.5m、1.5-4.0m 两层，根据前期场调、风评以及修复方案补充调查，处理方量约 52395m³，实际处理量将根据现场污染土壤清挖、检测鉴别结果进行调整。其余污染土壤根据市场情况，异地处理区相对空闲可以接受并处理本项目有机污染土且经处理后的土壤有资源化利用的去向时，采用异地热脱附修复，也可在水泥厂处理能力还有空余时，将该部分土壤运送至水泥厂处置。

3.3.6 现场污水处理

本项目现场污水主要来源于基坑开挖过程中产生的基坑废水、土壤暂存过程产生废水、异位处置过程中可能产生的废水、施工设备清洗废水、基坑、地表可能受污染的雨水、生活污水等。本项目产生的污水都应统一收集后汇入收集池后经污水处理设施处理。

现场收集的污水通过排水沟汇入水处理站前端的泥沙沉淀池，首先沉淀掉泥沙颗粒，然后利用水泵将沉淀池内的污水抽入水处理站。水处理站先通过调节池均衡进水水质，然后通过沉淀池对污水进行絮凝沉淀，投加 PAC、PAM，去除地下水中的悬浮物；然后污水流入氧化反应池，在氧化反应池里投加双药剂进行反应，去除污水中潜在的污染物；然后处置后污水流入活性炭滤罐进行吸附，保证出水通过活性炭吸附达到排放标准。完成上述步骤后，处置后水体流经流量计计量，最终流入市政污水排入管网。

4 成本效益分析

4.1 修复费用

运河新城单元 GS1003-R21-06（拱康西区）污染场地推荐使用“水泥窑协同处置+热脱附+异位化学氧化修复方案”作为本项目的最优污染土壤修复方案。有机污染土中多环芳烃、苯、石油烃的有机复合污染土建议进行水泥窑协同处置；高浓度单一多环芳烃污染土建议采用热脱附进行修复；低浓度单一多环芳烃污染土建议进行异位化学氧化修复。有机复合污染土和高浓度单一多环芳烃污染土可根据处置设备工况负荷情况及工程进度情况，在水泥窑和热脱附技术之间进行协调。同时考虑杭州周边水泥厂处置能力基本饱和的状态，且本地块污染物均可采用热脱附处理技术，故将“热脱附+化学氧化”作为本项目的备选方案。

根据第八章对各方案的一次性整体修复费用估算，修复费用在 11341 万元左右。水泥窑协同处置单价略高于热脱附，化学氧化处置单价最低，虽不会产生明显差异，但随处理土方量之间的分配变化会存在上下浮动。其中推荐方案采用三种修复技术，修复费用为 11341 万元，备选方案未采用水泥窑协同处置，修复费用最低约 10685 万元。

5 结论与建议

5.1 结论

根据本目前期调查和本次补充调查数据，本项目目标污染物为7种多环芳烃类（苯并[a]芘、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、萘）、苯以及石油烃C₁₀-C₄₀，修复范围工程量为91779m³污染土，均为有机污染土壤。

根据本场地的污染特征、场地水文地质条件、土地利用规划和场地未来的开发建设计划，经修复技术的初步筛选和进一步的可行性评估。通过修复模式的筛选和综合评估，推荐本场地土壤采用原地异位修复模式和异地修复模式相结合。

经对地块污染土壤修复适用技术的合理组合，形成了场地污染土壤修复的四套方案。经方案比选，推荐使用“**水泥窑协同处置+热脱附+异位化学氧化修复方案**”作为本项目的污染土壤修复方案。有机污染土中多环芳烃、苯、石油烃的有机复合污染土建议进行水泥窑协同处置；高浓度单一多环芳烃污染土建议采用热脱附进行修复；低浓度单一多环芳烃污染土建议进行异位化学氧化修复。有机复合污染土和高浓度单一多环芳烃污染土可根据处置设备工况负荷情况及工程进度情况，在水泥窑和热脱附技术之间进行协调。同时考虑杭州周边水泥厂处置能力较为饱和的状态，本地块污染物均可采用热脱附处理技术，故将“热脱附+化学氧化”作为备选方案。

5.2 建议

（1）前期调查与修复工程实施间隔较长时间，可能产生污染情况的变化。本方案中虽进行了补充调查，在风险评估阶段确定的污染区域边界处进一步监测污染情况，但由于土壤异质性较强，补充调查的工作量有限，仍存在一定不确定性。因此建议在场地污染土壤修复施工过程中，时刻关注和防范现场突发情况，根据现场情况实时调整污染土壤清理边界，以保证场地修复方案能够达到预期目标。

（2）建议及早实施场地污染土壤的修复，避免污染扩散。在自然作用下，土壤中的污染物会发生迁移。如风会促使污染物挥发；降雨入渗或地面径流会使污染物产生水平和垂向迁移等。如不及时进行修复，长此以往，势必会造成场地污染范围的不断扩大。因此，应尽快开展场地的修复工作。

（3）避免场地拆迁过程造成新的环境污染。对于场地内现有地上和地下建筑物的拆除，建议选择具有相关资质和经验的设施拆除单位进行施工，避免造成新的场地污染。在场内地下管道、地基等地下构作物的清挖过程中，应尽量减少污染土壤的扰动。如确需清挖，则应将挖出的污染土壤和非污染土壤分别堆置，严禁混放。污染土壤应放置在污染区内，并采取相应的防雨、防扬、防挥发性污染物挥发等措施，防止二次污染。场内的建筑垃圾应在相关修复工作开始前清运干净。

（4）在修复施工前应及时向环保、安监等主管部门备案，施工前进一步分

析、排查场地内地下暗管、储槽等的分布情况。场地应配置危险化学品、不明废液等收集储罐，在开挖过程中管道、储槽中残留的不明液体、危险废物应及时转移至备用的储罐中，不得随意丢弃。若有有毒有害气体产生，应及时启动应急预案。

（5）场地修复过程应采取有效的安全和环保措施，防止二次污染和健康风险。因地下水非饮用，经风险评估判断本项目地下水无健康风险。但基坑降水过程可能将地下水抽出，因此建议在基坑降水初期尤其注意二次污染防范，优先对土壤污染相对严重的基坑区域降水，减少地下水中污染物扩散。

（6）由于施工场地周围有居民区等环境敏感点，因此容易出现因施工造成的扰民和民扰问题。在场地修复过程中需要更加注重环境的影响监测和二次污染防治，严格执行方案中给出的扰民和民扰对策，加强同周围居民的沟通交流，妥善处理可能出现的扰民、民扰问题。

（7）在场地未来开发建设过程中，若发现疑似污染土壤或不明物质，应立即停工，并采取相应的环保措施，不得随意处置。