

中国 HCFCs 生产行业淘汰项目

**鹰鹏化工有限公司
风险评估报告**

(生产线关闭)

产品名称：HCFC-22

中节能大地中绿（北京）环境咨询有限公司

2015 年 12 月

目录

1	概述	1
1.1	项目背景.....	1
1.2	编制依据.....	2
1.2.1	法律法规及相关政策.....	2
1.2.2	技术导则与规范.....	2
1.2.3	其他资料.....	3
1.3	工作目的.....	3
1.4	技术路线.....	3
1.5	风险评估范围.....	4
2	场地概况	6
2.1	地理位置.....	6
2.2	地形地貌.....	7
2.3	地质和水文地质.....	7
2.3.1	区域地质条件.....	7
2.3.2	场地水文地质条件.....	7
2.4	周边地表水.....	7
2.5	气候和降雨.....	8
2.6	场地现状和历史.....	8
2.6.1	场地现状.....	8
2.6.2	场地历史.....	8
2.7	场地周边现状和历史.....	9
2.8	场地未来用地规划.....	10
3	前期工作回顾	11
3.1	场地污染识别.....	11
3.1.1	生产原料.....	11

3.1.2	生产工艺流程.....	11
3.1.3	污染物排放.....	12
3.1.4	场地污染识别小结.....	15
3.2	场地环境质量调查工作内容回顾.....	15
3.3	场地环境质量调查结果回顾.....	16
3.3.1	场地水文地质条件.....	16
3.3.2	场地土壤采样分析结果.....	16
3.3.3	场地滞水采样分析结果.....	17
3.4	前期调查工作小结与建议.....	18
3.4.1	前期调查工作小结.....	18
3.4.2	对后续工作建议.....	18
4	场地概念模型	19
4.1	污染源.....	19
4.1.1	场地历史.....	19
4.1.2	关注污染物.....	19
4.1.3	污染释放机理.....	20
4.2	地质和水文地质.....	20
4.2.1	地质条件.....	20
4.2.2	水文地质条件.....	20
4.3	土壤污染情况.....	20
4.3.1	土壤重金属污染状况.....	20
4.3.2	土壤有机物污染状况.....	21
4.4	污染物迁移途径.....	21
4.5	潜在污染受体.....	21
4.5.1	场地利用规划.....	21
4.5.2	潜在污染受体.....	21
5	场地风险评价	22
5.1	工作依据和工作流程.....	22

5.2	风险评估情景假设与暴露途径.....	24
5.3	关注污染物与性质.....	24
5.3.1	场地关注污染物.....	24
5.3.2	场地关注污染物性质.....	25
5.4	风险评估原理与方法.....	26
5.4.1	部分过程参数计算方法暴露模型.....	26
5.4.2	风险表征计算方法.....	29
5.5	风险评估参数.....	31
5.5.1	土壤性质及水文地质参数.....	31
5.5.2	建筑物及其他特征参数.....	32
5.5.3	关注污染物毒理学参数.....	32
5.6	风险表征.....	34
5.7	不确定性分析.....	37
5.8	风险评估小结.....	38
6	初步修复目标计算	39
6.1	修复目标计算方法.....	39
6.1.1	修复目标计算流程.....	39
6.1.2	土壤修复目标值计算.....	39
6.2	可接受风险水平.....	40
6.3	初步修复目标计算参数确定.....	40
6.4	初步修复目标计算结果.....	40
6.5	建议的修复目标值.....	41
7	结论和建议	42
7.1	结论.....	42
7.1.1	场地风险表征结果.....	42
7.1.2	场地修复目标.....	42
7.2	建议.....	42

1 概述

1.1 项目背景

《蒙特利尔议定书》69 次执委会 69/28 号决议批准了中国第一阶段 HCFC 生产行业淘汰管理计划 (HPPMP)，在 2013 年实现 HCFC 生产量冻结在 2009~2010 年的平均生产量 (以下简称“基线产量”)，并在 2015 年实现 HCFC 生产量在基线产量的基础上削减 10% 的淘汰目标。在多边基金执委会与中国达成的 HCFC 生产行业的决定中，要求中国优化实施战略，优先考虑关闭 HCFC 生产线的实施方式，并承诺到 2030 年拆除或报废约 55 万吨的 HCFC 生产能力。同时，多边基金对生产行业的政策指南中也要求关厂的项目应考虑对场地清理的环境管理要求。

世界银行作为该项目的国际执行机构，根据多边基金执委会的政策对项目实施进行监督和指导。世界银行总体上要求中国在项目实施过程中要遵守世行的环境安全政策，特别是对关厂项目有较为严格的环境管理要求。

环境保护部环境保护对外合作中心 (以下简称“对外合作中心”) 负责上述行业计划在中国的具体实施工作。根据对外合作中心提供的数据，中国 HCFCs 生产企业共有 29 家，36 条生产线，可能涉及拆除生产线和关闭工厂的品种为 HCFC-141b、HCFC-142b 和 HCFC-22，生产企业主要分布在山东、江苏、浙江和四川几个省。

鹰鹏化工有限公司 (以下简称“鹰鹏化工”) 位于浙江省永康市永化路 69 号，公司主要产品包括主要产品有无水氟化氢(AHF)、工业氢氟酸(BHF)、HCFC-22、ODS 替代品等。HCFC-22 生产线总规模为 25000 吨/年，其中精馏之前的工艺段共用生产线，精馏工艺段分别使用 15000 吨/年和 10000 吨/年的两套精馏系统。场内建 (构) 筑物包括各产品生产车间、生产原料储存车间、成品灌装车间、生活办公区以及配套实施等。

为响应《蒙特利尔议定书》，鹰鹏化工 HCFC-22 生产线于 2014 年 11 月全部停产，2015 年 5 月拆除，2015 年 6 月 4 日在环保部外经办及永康市环保局的现场见证下完成主要设备的破坏性销毁工作，拆除后场地用途未知。目前企业内与 HCFC-22 相关的生产设施已拆除完毕，鉴于拆除过程中的跑冒滴漏可能污染地

下水及土壤环境，有必要对拆除后场地展开环境调查，中节能大地中绿（北京）环境咨询有限公司（简称“大地中绿”）受鹰鹏化工委托，负责对原 HCFC-22 生产车间、灌装车间及氯仿原料储罐区（以下简称“场地”或“调查区域”）开展场地调查工作。大地中绿于 2015 年 11 月展开并完成该场地调查现场工作，并编制《鹰鹏化工场地调查报告》，调查结果显示调查区域的土壤样品中检出了重金属、SVOCs、VOCs 等污染物，部分污染物超过了筛选值，需要进行风险评估。

为进一步明确场地的人体健康风险，受鹰鹏化工委托，大地中绿在前期调查结果的基础上，对调查区域开展了风险评估工作。

1.2 编制依据

1.2.1 法律法规及相关政策

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》
- (2) 《中华人民共和国固体废物污染防治法》
- (3) 《关于切实做好企业搬迁过程中污染防治工作的通知》（环办〔2004〕47 号）
- (4) 《关于加强土壤污染防治工作的意见》（环发〔2008〕48 号）
- (5) 《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）
- (6) 《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）
- (7) 《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）

1.2.2 技术导则与规范

- (1) 《场地环境调查技术导则》（HJ 25.1-2014）
- (2) 《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2-2014）
- (3) 《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3-2014）
- (4) 《污染场地风险评估技术导则》（DB33/T 892-2013）
- (5) 《污染场地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2014）

- (6) 《污染场地术语》(HJ 682-2014)
- (7) 《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011)
- (8) 美国《区域筛选值》(2015)
- (9) 《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)
- (10) 《环境监测分析方法标准制修订技术导则》(HJ/T 168-2010)
- (11) 《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)
- (12) 《土的分类标准》(GBJ 145-1990)
- (13) 《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)
- (14) 《工程测量规范》(GB 50026-2007)
- (15) 《建筑工程地质勘探与取样技术规程》(JGJ/T 87-2012)

1.2.3 其他资料

- (1) 《中国鹰鹏化工有限公司年产 10000 吨二氟一氯甲烷环境影响评价报告书》，金华市环境科学研究所，2004 年。
- (2) 《中国鹰鹏化工有限公司年产 15000 吨二氟一氯甲烷环境影响评价报告书》，金华市环境科学研究所，2004 年。
- (3) 《鹰鹏化工有限公司 HCFC-22 生产线关闭项目环境管理计划》，中节能大地中绿（北京）环境咨询有限公司，2015 年 4 月。
- (4) 《中国鹰鹏化工有限公司 HCFC-22 生产线关闭项目场地调查报告》，中节能大地中绿（北京）环境咨询有限公司，2015 年。

1.3 工作目的

开展本次场地风险评估的目的包括：

- (1) 完善场地概念模型；
- (2) 结合场地调查结果，开展现状条件下场地风险评估，计算人体健康风险控制值，确定场地污染范围及修复目标值。

1.4 技术路线

本次风险评估工作所处阶段与技术路线见图 1-1。

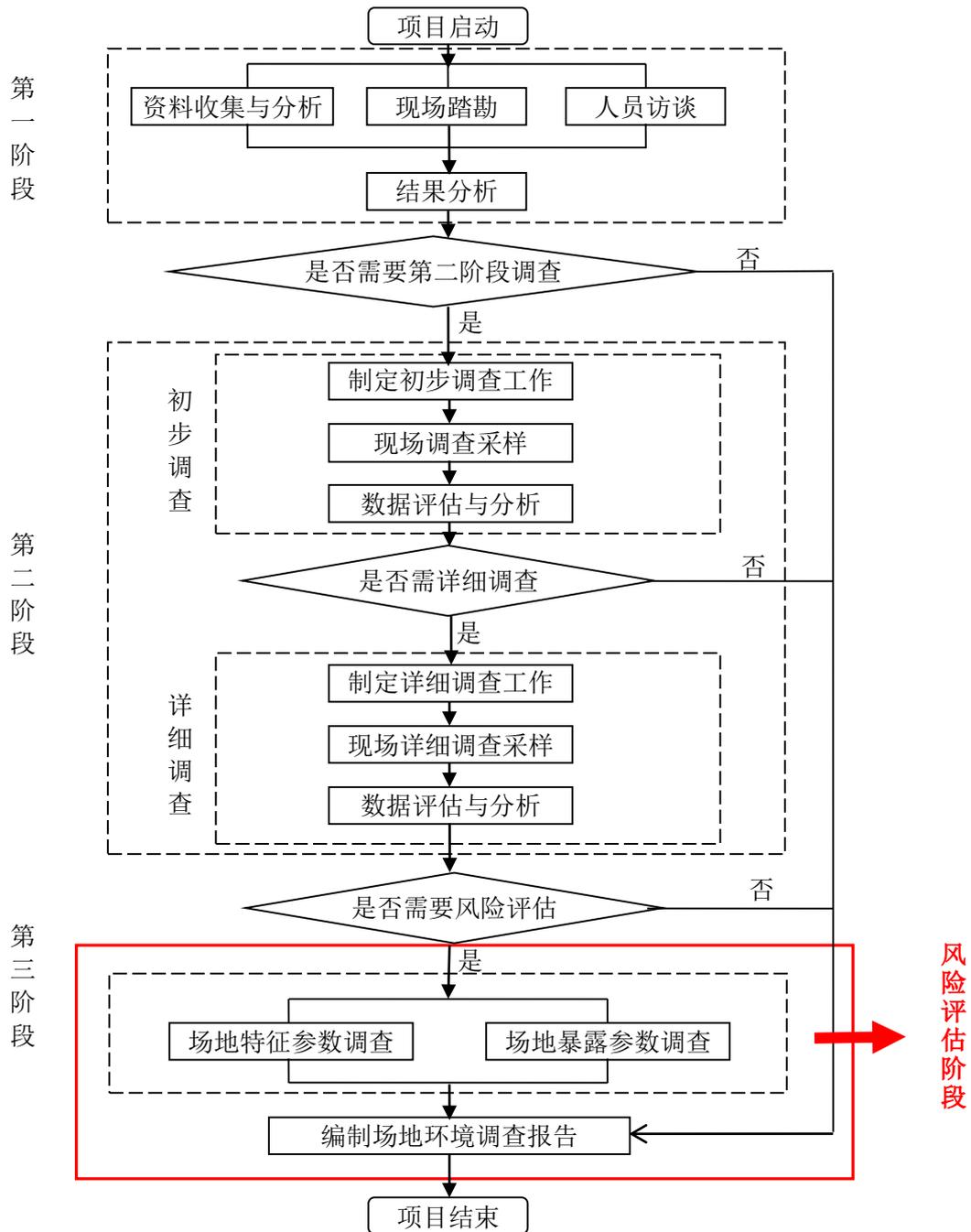


图 1-1 鹰鹏化工 HCFC-22 关闭项目场地风险评估技术路线

1.5 风险评估范围

本次风险评估范围为鹰鹏化工前期调查的原 HCFC-22 生产车间、HCFC-22 灌装车间及氯仿原料储罐区，见图 1-2。

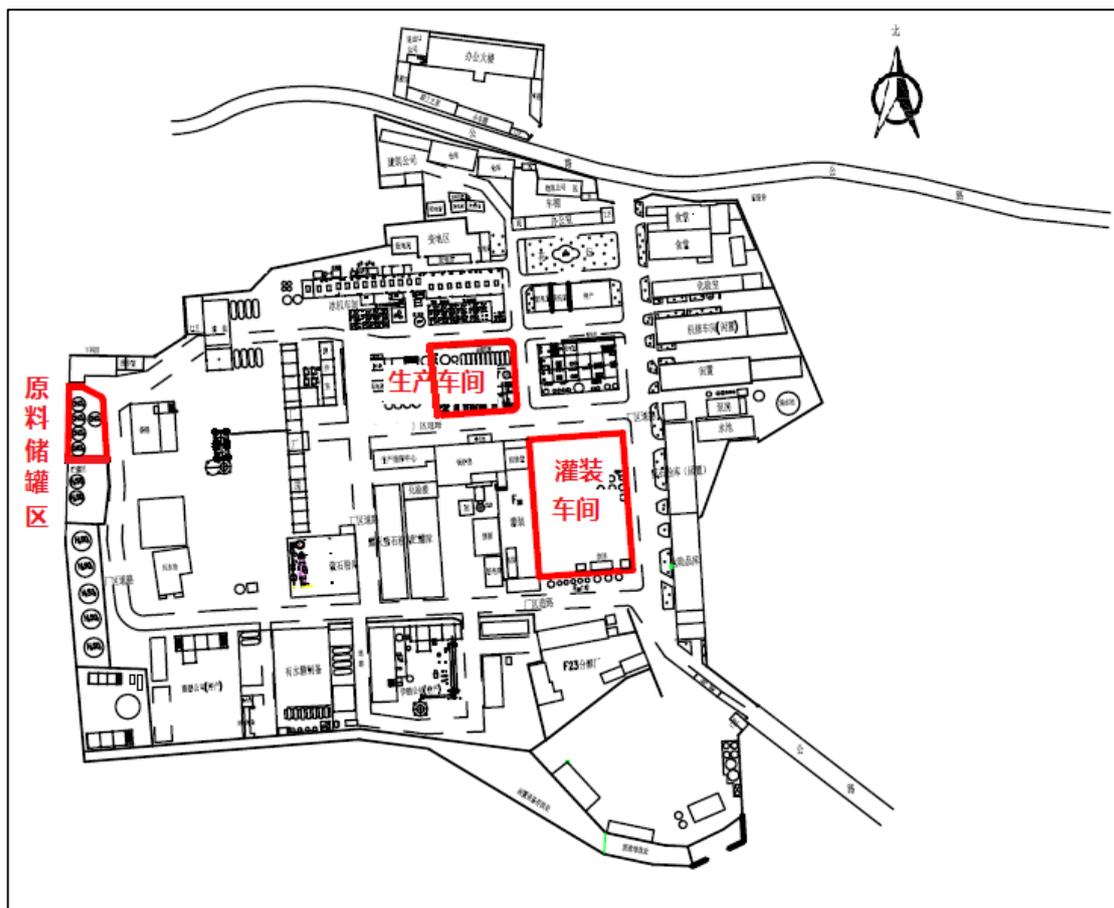


图 1-2 场地风险评价范围

2 场地概况

鹰鹏化工是一家专门从事氟化工产品生产的企业，占地面积约 24 万 m²，公司主要生产无水氟化氢(AHF)、工业氢氟酸(BHF)、HCFC-22、ODS 替代品等。目前，场地上 HCFC-22 所有生产活动已停止，相关设备设施已拆除完毕，原有构筑物基本保持原状。

本次场地风险评估范围基于场地调查范围，主要包括原 HCFC-22 生产车间、原 HCFC-22 灌装车间及氯仿原料储罐区。

2.1 地理位置

鹰鹏化工厂位于浙江省永康市永化路 69 号，东经 120°0'6"~120°0'16"，北纬 28°53'50"~28°54'1"，距市区约 4.0 km，具体位置见图 2-1。



图 2-1 场地位置图

2.2 地形地貌

永康市地处浙中丘陵，北部和东部多山，整个地势以西北部及东南部较高，逐步向内侧倾斜，成台阶形地貌，形成以东北—西南走向的走廊式盆地。全市最高处为永康内部与缙云、磐安的分水岭—黄寮尖山，海拔 936.15 m（黄海高程）；最低处为永康江流出市境处，海拔 72 m（黄海高程）。

永康城区位于盆地的西南部，地面标高在 80~150 m，地势平坦，间有低丘。城区东南部地势较低，以河漫滩地及内侧河谷平原为主，北部、西部则为地势较高的丘陵地，平均坡度 0.1 左右。

2.3 地质和水文地质

2.3.1 区域地质条件

永康市地质构造及岩性比较复杂，土壤类型多样。主要土壤类型有红壤、黄壤、岩性土、潮土和水稻土等，其中盆地中央地势较为平缓的地区主要为潜育化的水稻土；红壤主要分布在盆地内侧的缓坡台地及周缘的丘陵和低山坡麓地带；黄壤则主要分布在海拔 600 m 以上的低中山地，土质贫瘠。

2.3.2 场地水文地质条件

根据调查结果，调查区地层概化如下。

- (1) 水泥地面：顶板埋深 0 m，覆盖全厂区；
- (2) 填土：顶板埋深 0.2~0.4 m，覆盖全厂区；
- (3) 粉质粘土：顶板埋深 4.0 m，分布于原 HCFC-22 灌装车间；
- (4) 粘土：顶板埋深 3.5~5.0 m，未穿透，分布于原 HCFC-22 灌装车间；
- (5) 全风化基岩：顶板埋深：0.5~1.0 m，未穿透，覆盖全厂区。

2.4 周边地表水

场地周边地表水主要是场地以北约 150 m 处的杨官水库及场地东南侧 500 m 处的永康江，永康江属钱塘江水系。

根据《中国鹰鹏化工有限公司年产 10000 吨二氟一氯甲烷环境影响报告书》（以下简称“环评报告”），场地生产废水及生活污水经厂内处理达标后排入永康

江，污水排放执行《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中一级标准。

2.5 气候和降雨

永康市地处亚热带季风气候区，四季分明气温适中，光照充足，雨量充沛（主要集中于4~10月份，占全年降雨量72%，无霜期长；据永康市气象站2014年观测，其主要气象特征如表2-1。

表 2-1 调查场地所在区域主要气象参数汇总表

项目	单位	统计数据	项目	单位	统计数据
年平均气温	℃	18.7	无霜期	天	281
月平均最高气温	℃	29.7	年平均相对湿度	%	77
月平均最低气温	℃	7.2	年平均风速	m/s	1.35
极端最高气温	℃	37.8	年主导风向		NE、E
极端最低气温	℃	-2.7	夏季主导风向		SE
年平均降水量	mm	1737	冬季主导风向		NW
年平均蒸发量	mm	910.8	历年静风频率	%	30.05

2.6 场地现状和历史

2.6.1 场地现状

目前场地内 HCFC-22 的所有生产活动均已停止，设备设施基本已拆除完毕，原有构筑物基本保持原状。厂区地面均进行了硬化。

2.6.2 场地历史

鹰鹏化工前身是永康市化学工业总公司，1996 年与英属维尔京群岛茂业投资公司合资转制为中外合资企业，2001 年由浙江鹰鹏化工有限公司更改为现名。鹰鹏化工主要产品包括主要产品有无水氟化氢(AHF)、工业氢氟酸(BHF)、HCFC-22、ODS 替代品等。

根据厂内工作人员介绍，自建厂至今，HCFC-22 生产及灌装车间厂址未发生变迁。根据《鹰鹏化工有限公司 HCFC-22 生产线关闭项目环境管理计划》（以下简称“环境管理计划”），2011 年至 2013 年 HCFC-22 生产量如表 2-2 所示。2014

年 11 月底关闭 HCFC-22 生产线。

表 2-2 鹰鹏化工 HCFC-22 年生产量 (2011 年-2013 年)

年份	2011 年	2012 年	2013 年
总生产量/吨	24209	24035	20857
原料用途生产量/吨	10251	6912	7865
受控用途生产量/吨	13958	17123	12992

2.7 场地周边现状和历史

场地周边现状情况见图 2-2 及表 2-3。



图 2-2 场地周边现状

表 2-3 场地周边现状情况汇总表

方向	环境
东侧	道路、居民区及汽车维修厂等
南侧	道路、居民区及钢材加工厂等
西侧	新达公寓等
北侧	居民区、杨官水库等

综合考虑本项目场地环境条件及相关环境风险, 环境保护目标具体见表 2-4。

表 2-4 环境保护目标概况

序号	保护目标	方位	距离	备注
1	村落	周边	500 m	周边有较多村落分布, 为人口稠密区域
2	永康江	东南	3 km	—
3	现场工作人员	厂区内	—	厂区管理人员
4	场地环境	厂区内	—	HCFC-22 拆除区域及周边的土壤、地下水等

2.8 场地未来用地规划

计划将构筑物拆除后场地由政府收购, 规划后另作它用, 用地性质尚未明确。

3 前期工作回顾

鹰鹏化工于 2015 年 11 月委托大地中绿开展场地调查工作，并编制了《鹰鹏化工有限公司场地调查报告》。

本章对前期的工作内容和成果进行回顾，用于指导后续的风险评估工作。

3.1 场地污染识别

3.1.1 生产原料

根据环评报告，HCFC-22 生产项目主要原料包括无水氟化氢、氯仿及液氯等。15000 吨/年和 10000 吨/年的 HCFC-22 生产项目主要原辅材料的种类及年消耗量见表 3-1。

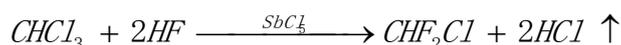
表 3-1 HCFC-22 生产原辅材料消耗表

序号	名称	主要规格	单位	年总耗
1	氯仿	CHCl ₃ >99.0% H ₂ O<0.03%	吨	37000
2	无水氟化氢	HF>99.95%	吨	12000
3	液氯	Cl 含量>99.5%	吨	250
4	锑块	Sb 含量>99.0%	吨	10.5
5	液碱	NaOH 含量>30%	吨	750
6	压缩机油	—	吨	50
7	生产用水	—	m ³	62818.1

注：参考《中国鹰鹏化工有限公司年产 10000 吨二氟一氯甲烷环境影响评价报告书》，2004 年；
《中国鹰鹏化工有限公司年产 15000 吨二氟一氯甲烷环境影响评价报告书》，2004 年。

3.1.2 生产工艺流程

HCFC-22 是由三氯甲烷(氯仿)与无水氟化氢(AHF)在催化剂作用下，加热反应制取。反应方程式如下：



同时，生产工艺中还存在以下副反应：



将原料 CHCl_3 和 AHF 在催化剂存在下,控制一定的温度和压力连续把 CHCl_3 , AHF 加入反应釜内反应转化成粗制 HCFC-22 气体产品,并连续排出氟化反应釜。将粗制 HCFC-22 气体产品经石墨吸收塔水洗碱洗脱除酸性气体,产品气进入压缩机压缩,压缩后的气体再经液化成粗产品,经脱气塔、精馏塔精制,再进入干燥器干燥,最后进入成品贮槽灌装,整个流程见图 3-1。

HCFC-22 中间槽放空的气体,经过除酸器脱除酸性并干燥。经过压缩机增压冷凝、精馏,控制分析塔顶和塔釜组分分离出气体,回收的 HCFC-22 回 HCFC-22 中间槽。

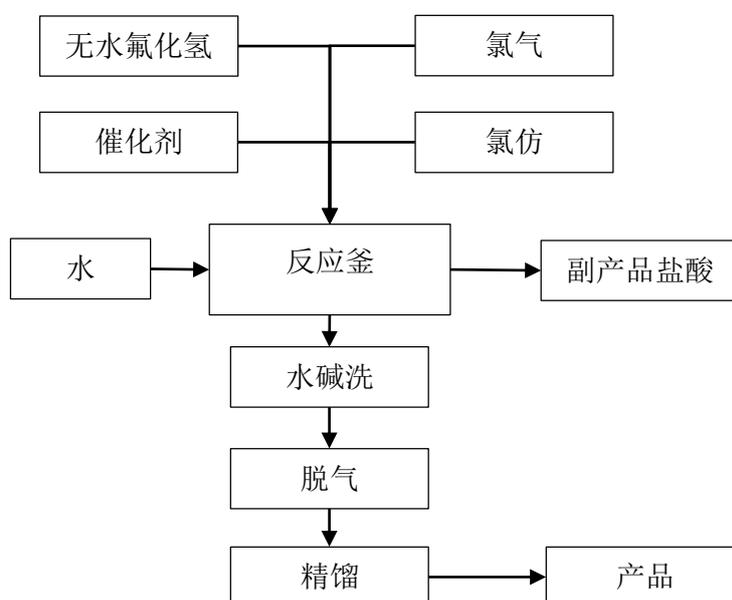


图 3-1 HCFC-22 生产流程图

3.1.3 污染物排放

根据环评报告, HCFC-22 生产项目物料平衡如图 3-2 和图 3-3 所示。10000 吨/年 HCFC-22 项目生产过程中,产生工艺废水 6358.47 吨/年,冲洗废水 3921.8 吨/年,废气 347.3 吨/年,废催化剂 18.32 吨/年,精馏残液及废机油 75.03 吨/年,检修残液 30.58 吨/年。15000 吨/年 HCFC-22 项目生产过程中,产生工艺废水 9537.7 吨/年,冲洗废水 5882.7 吨/年,废气 521.1 吨/年,废催化剂 27.48 吨/年,精馏残液及废机油 112.5 吨/年,检修残液 45.87 吨/年。相关排放污染物成分如图 3-2 和图 3-3 所示。

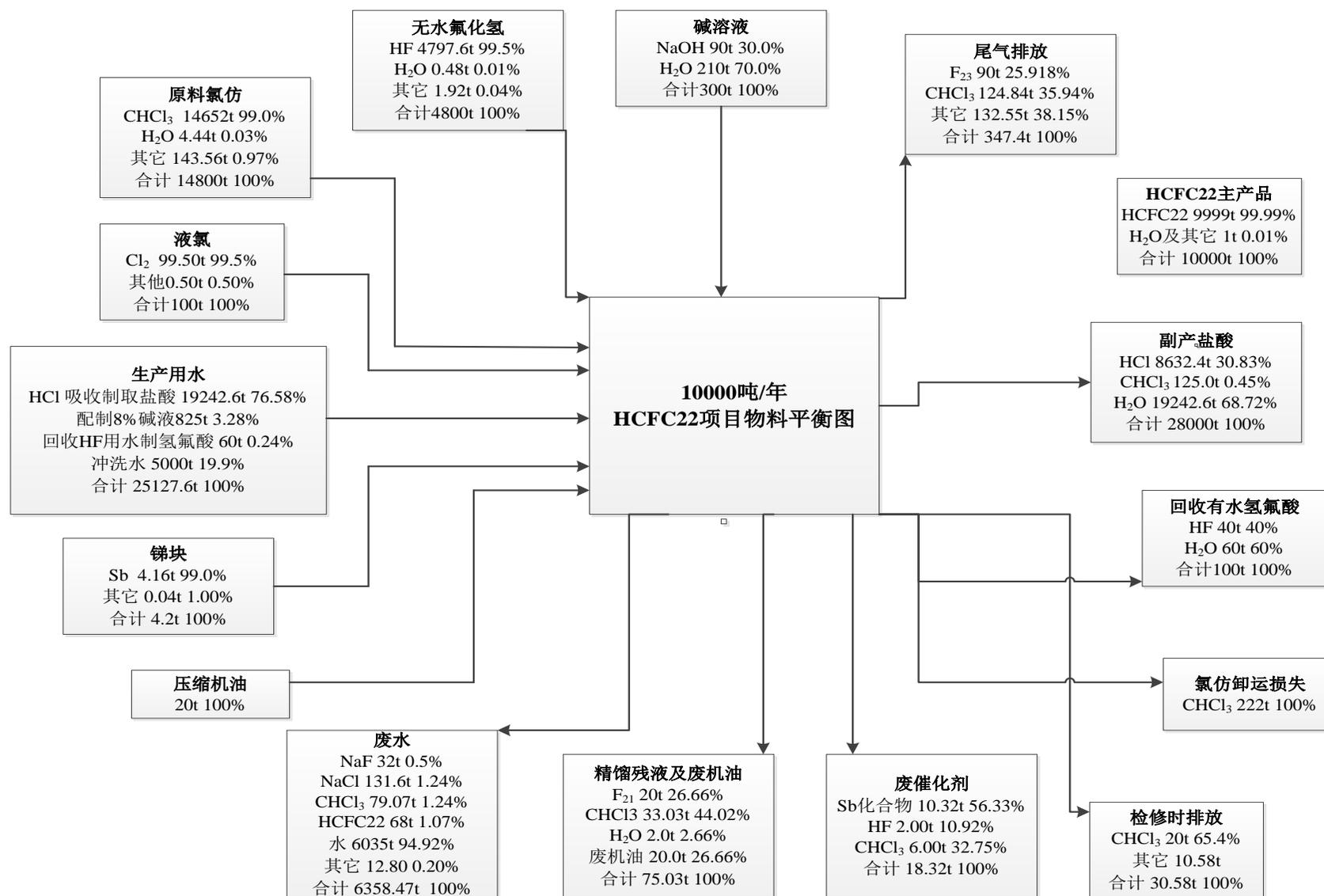


图 3-2 10000 吨/年 HCFC-22 生产项目物料平衡图

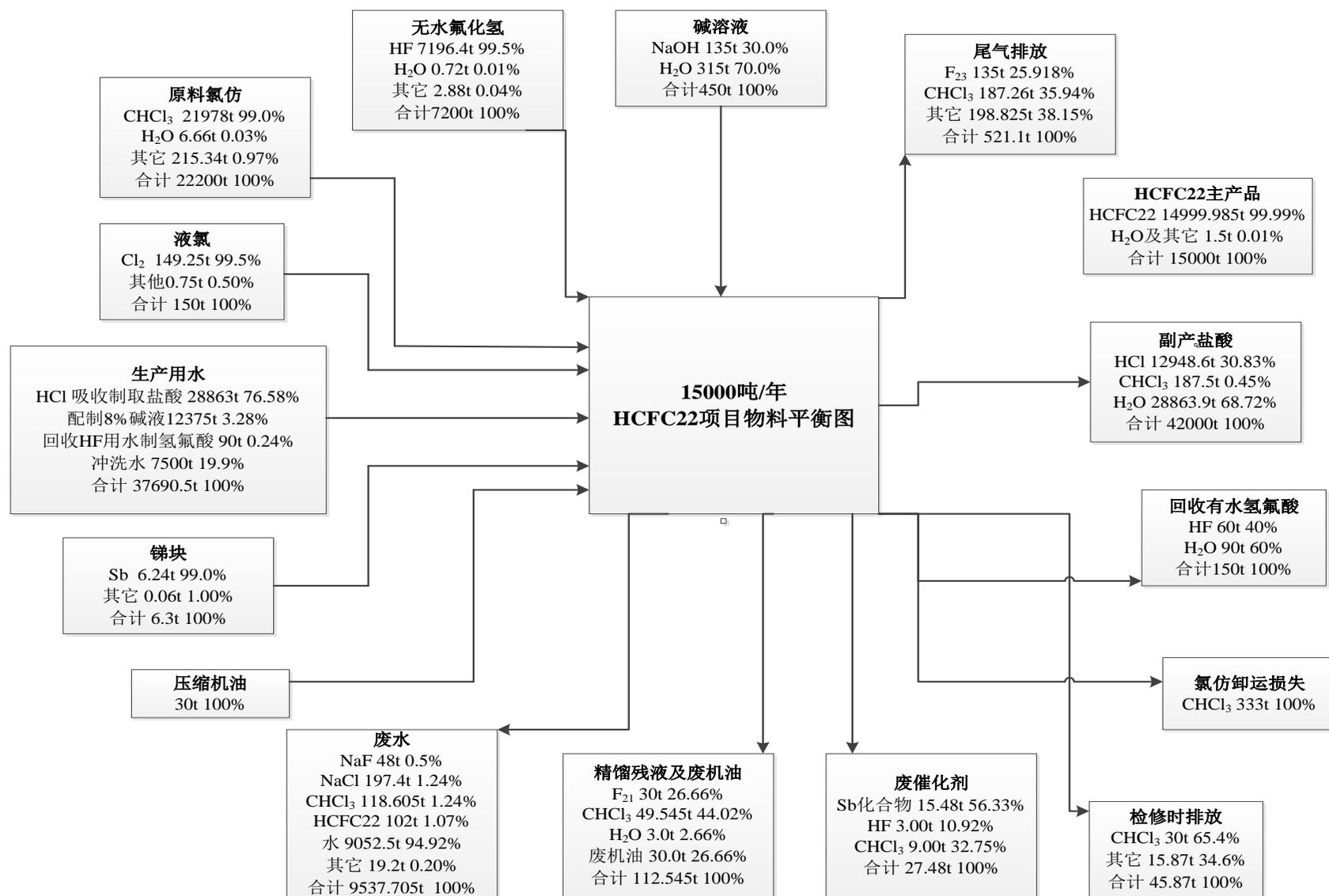


图 3-3 15000 吨/年 HCFC-22 生产项目物料平衡图

3.1.4 场地污染识别小结

- (1) 本场地调查范围涉及原 HCFC-22 生产车间、灌装车间及氯仿储罐区。
- (2) 调查期间，场地上所有生产活动均已停止，设备设施基本已拆除完毕，原有构筑物基本保持原状，土壤无明显人为扰动。
- (3) 企业生产过程中的主要原料包括无水氟化氢、氯仿及液氯等，潜在污染物主要包括重金属、石油烃、挥发性有机物、半挥发性有机物等，可能对场地土壤和地下水造成污染。

3.2 场地环境质量调查工作内容回顾

前期调查依据《场地环境调查技术规范》，开展土壤样品采样分析工作。现场调查工作共布设土壤采样点 7 个，分析检测土壤样品 18 个（含质控平行样）。主要分析指标包括重金属、VOCs（挥发性有机污染物）、SVOCs（半挥发性有机污染物）和 TPH（总石油烃）。地下水采样点 2 个，分析检测样品 2 个。主要分析指标包括重金属、VOCs（挥发性有机污染物）、SVOCs（半挥发性有机污染物）、TPH（总石油烃）及其他常规指标。场地调查采样点位布设情况见图 3-4。

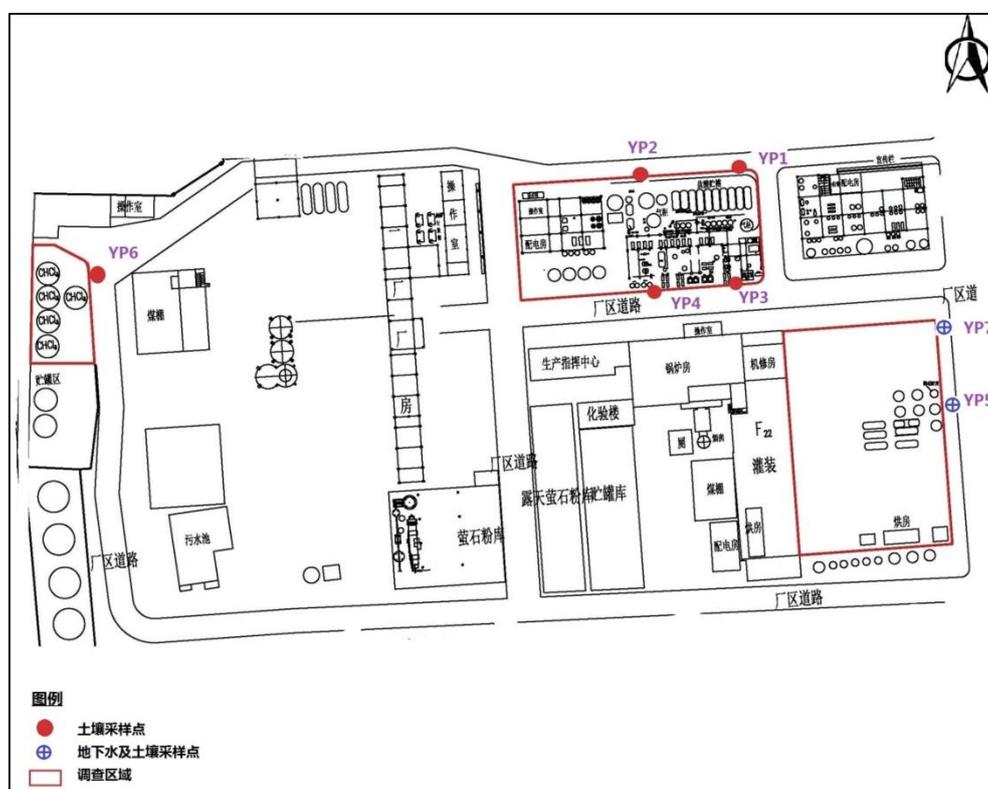


图 3-4 采样点布置图

3.3 场地环境质量调查结果回顾

3.3.1 场地水文地质条件

调查期间场地上所有生产活动均已停止，设备设施基本已拆除完毕，原有构筑物基本保持原状，土壤人为扰动情况较少。根据场地调查工作所揭示的土层情况，并按土层岩性、赋水特征及其物理性质，将最大勘探深度（6.00 m）范围内的土层概化为 5 层：①水泥地面：顶板埋深 0 m，覆盖全厂区；②填土：顶板埋深 0.2~0.4 m，覆盖全厂区；③粉质粘土：顶板埋深 4.0 m，分布于原 HCFC-22 灌装车间；④粘土：顶板埋深 3.5~5.0 m，未穿透，分布于原 HCFC-22 灌装车间；⑤全风化基岩：顶板埋深 0.5~1.0 m，未穿透，覆盖全厂区。

在场地调查过程中未发现地下水，局部区域赋有上层滞水，根据现场测量，滞水埋深 2.71~3.33 m。

3.3.2 场地土壤采样分析结果

总结本次场地环境调查结果，调查区主要土壤污染超标情况见表 3-2。

根据土壤样品分析结果，对于重金属类，调查区内仅砷检出超标，超标点位分布在 YP7 点处。对于有机物类，调查区内有六氯苯和三氯甲烷超标，其中六氯苯超标位于 YP4 点；三氯甲烷除 YP1 点外，其它点位均检出超标。

表 3-2 土壤样品超标污染物统计表

污染物	筛选值 (mg/kg)	超标样品	样品检出浓度 (mg/kg)
砷	20	YP7-4.8	40.8
三氯甲烷	0.5	YP7-4.8	40.8
		YP2-1.0	64.2
		YP2-2.5	5.17
		YP3-0.5	15.5
		YP3-3.0	8.97
		YP4-1.0	330
		YP4-2.0	132
		YP5-1.0	0.63
		YP5-6.0	1.35
		YP6-1.0	0.53

污染物	筛选值 (mg/kg)	超标样品	样品检出浓度 (mg/kg)
		YP6-3.5	0.58
		YP7-0.5	0.52
六氯苯	1	YP4-1.0	8.27
		YP4-2.0	2.28

3.3.3 场地滞水采样分析结果

场地滞水中高锰酸盐指数、氯化物、pH、总氟、铍、硒、六氯乙烷、TPH、顺式-1,2-二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯、1,1,2,2-四氯乙烷及三氯甲烷超标，超标结果见表 3-3。

表 3-3 滞水样品浓度统计表

污染物	单位	标准值	超标样品	超标样品检出浓度
高锰酸盐指数	mg/L	3.0	YP-W1	22.0
			YP-W2	18.6
氯化物	mg/L	250	YP-W1	329
pH	-	6.5~8.5	YP-W1	4.72
			YP-W2	6.10
总氟 (以氟计)	mg/L	1.0	YP-W1	13.6
			YP-W2	1.73
铍	μg/L	0.2	YP-W1	3.3
硒	μg/L	10	YP-W1	12
六氯乙烷	μg/L	0.48	YP-W1	2.1
TPH	μg/L	600	YP-W1	4040
			YP-W2	1450
顺式-1,2-二氯乙烯	μg/L	3.6	YP-W1	25.7
			YP-W2	62.0
三氯乙烯	μg/L	500	YP-W1	1030
四氯乙烯	μg/L	40	YP-W1	120
1,1,2,2-四氯乙烷	μg/L	0.026	YP-W1	511
			YP-W2	69.5
三氯甲烷(氯仿)	μg/L	400	YP-W1	52200
			YP-W2	3460

3.4 前期调查工作小结与建议

3.4.1 前期调查工作小结

前期场地环境调查进行了大量工作，通过场地踏勘、调查访问，收集场地现状和历史资料及相关文献，深入分析鹰鹏化工 HCFC-22 生产的主要及辅助化学试剂、生产工艺、污染物排放特征和处理处置方式，初步判定场地污染途径主要是原生产车间物料存储、运输及生产过程中的渗漏，原车间周围地下污水管线内化学物质的渗出等。根据水文监测数据，并结合整个厂区及灌装车间水文地质特征初步判断该层地下水为上层滞水，对人体健康及场地浅层地下水不产生影响。据此判断，厂区内污染物主要通过土壤介质对人体健康产生影响。

前期场地调查共布设土壤采样点 7 个，分析检测样品 21 个(含质控平行样)；滞水采样点 2 个，分析检测样品 2 个。土壤检测指标包括 pH、VOCs、SVOCs、重金属和总石油烃 (TPH)。上层滞水检测指标包括 pH、高锰酸盐指数、氯化物、总氰化物、总氟 (以氟计)、VOCs、SVOCs、重金属、总石油烃 (TPH)。

调查区土壤中检出的超标重金属为砷，超标点位分布在 YP7 点处；检出的超标有机物类包括六氯苯和三氯甲烷，其中六氯苯超标位于 YP4 点；三氯甲烷除 YP1 点外，其它点位均检出超标。

调查区所有滞水样品中均检出高锰酸盐指数、氯化物、pH 及总氟。对于重金属类，滞水样品中仅铍和硒检出超标，超标点为 YP5 (YP-W1)。对于有机物类，所有滞水样品中 TPH、六氯乙烷、顺式-1,2-二氯乙烯、1,1,2,2-四氯乙烷、三氯甲烷 (氯仿)、三氯乙烯及四氯乙烯均超标。

3.4.2 对后续工作建议

经过场地调查和数据分析，对本场地后续工作提出如下建议：

(1) 原 HCFC-22 灌装车间地质及水文地质情况与场地其它区域差别较大，且赋存滞水，建议在场地进行再次开发利用前对该区域进行补充调查，明确详细污染范围及污染深度；

(2) 调查结果显示，场地调查范围内土壤局部受到砷、氯代烃污染，为进一步明确场地的健康风险，建议针对场地目前用途，进行人体健康风险评估，评估内容包括危害识别、暴露评估、毒性评估和风险表征。

4 场地概念模型

场地概念模型是综合描述场地污染源释放的污染物通过土壤、水、空气等环境介质进入人体，并对场地周边及场地未来居住、工作人群的健康产生影响的关系模型。场地概念模型包括污染源、污染物的迁移途径、人体接触污染的介质和方式等，一般随着调查和评估的深入逐步完善和细化。建立场地概念模型有利于辨识缺失的数据、降低污染场地调查和修复决策过程中的不确定性。场地概念模型通常包括场地历史、场地地质与水文地质条件、土壤类型与结构、污染类型、污染释放机理、污染范围和深度、污染运移路径以及污染受体等信息。

在本场地环境调查工作中，采用分阶段工作原则：

(1) 通过场地踏勘、调查访问、资料收集，分析场地使用历史、生产工艺、原料辅料使用情况和处置情况、污染排放特征等，确定场地周边的敏感目标，识别场地土壤潜在污染源和潜在污染物，为下一步工作奠定基础。

(2) 采用判断布点法在原 HCFC-22 生产车间等区域进行取样分析，明确场地的污染范围和程度，在采样的同时进行场地水文地质调查，明确场地水文地质条件。

前期工作和本次工作结果用于构建和完善场地概念模型，供后续工作参考。

4.1 污染源

4.1.1 场地历史

鹰鹏化工前身为永康市化学工业总公司，成立时间未知。企业主营产品为无水氟化氢(AHF)、工业氢氟酸(BHF)、HCFC-22、ODS 替代品等 HCFC-22 生产线总规模为 25000 吨/年，其中精馏之前的工艺段共用生产线，精馏工艺段分别使用 15000 吨/年和 10000 吨/年的两套精馏系统。

4.1.2 关注污染物

在场地调查阶段未发现地下水，故本次风险评估不针对地下水开展风险评估，仅针对土壤开展。经过前期场地环境调查的采样分析结果，本场地土壤的关注污染物主要包括：

- (1) 重金属：砷；
- (2) SVOCs：六氯苯；
- (3) VOCs：三氯甲烷。

4.1.3 污染释放机理

场地土壤污染可能主要来自于以下原因：

- (1) 生产区域跑冒滴漏；
- (2) 污水管线泄漏；
- (3) 粉剂扬尘和遗撒：调查区域内存在普遍的砷污染，可能是由于利用萤石加工过程中粉剂扬尘和遗撒导致；
- (4) 降雨入渗：降雨淋滤地面后部分雨水随地表径流汇集至调查区，进而入渗至地下。

4.2 地质和水文地质

4.2.1 地质条件

根据场地调查，获取场地地层结构，见 3.3 节。为开展场地风险评估，对场地地表及全风化基岩间地层需进一步概化，如下表 4-1 所示：

表 4-1 场地关注污染物污染深度及土质

土壤分层	深度 (m)	土壤性质
表层	0~1.5	粉质粘土
深层	1.5~6.0	粉质粘土

4.2.2 水文地质条件

场地调查阶段未发现浅层地下水，场地局部区域地下有滞水，主要分布于原 HCFC-22 灌装车间。

4.3 土壤污染情况

4.3.1 土壤重金属污染状况

关注污染物为砷。根据土壤样品分析结果，砷最大检出浓度为 40.8 mg/kg，最大超过筛选值倍数 1.04 倍。超标点位为原 HCFC-22 灌装车间区域的 YP7 点，

深层土壤超标。

4.3.2 土壤有机物污染状况

关注污染物包括六氯苯及三氯甲烷。根据土壤样品分析结果，六氯苯和三氯甲烷（氯仿）最大检出浓度分别为 8.27 mg/kg 和 330 mg/kg，超过筛选值倍数分别为 7.27 倍和 659 倍。

六氯苯超标点位于原 HCFC-22 生产车间区域的 YP4 点，表层及深层均超标；三氯甲烷超标点位于整个调查区域的 YP2、YP3、YP4、YP5、YP6 和 YP7 点，表层及深层均有超标。

4.4 污染物迁移途径

根据调查和前述分析，土壤污染迁移途径可能包括以下原因：

（1）地表土壤污染物水平迁移：污染物可能以跑冒滴漏等途径进入土壤，后随地表径流或粉尘扩散等进行水平迁移，在迁移路径上污染物吸附于土壤介质。

部分生产区域填土层污染可能是由于地表土壤污染物水平迁移导致。

（2）污染物垂直向下迁移：进入土壤的污染物在外部降雨或自身重力垂直向下迁移，进入下层土壤和滞水；在迁移过程中吸附在土壤介质表面，又会随挥发、解吸附等途径向外释放。

部分生产区域下层污染可能是由于污染物垂直向下迁移导致。

（3）污染物随降雨下渗、滞水的水平迁移：区域浅层滞水污染可能是由于污染物随降雨下渗、滞水的水平迁移导致；部分深层土壤样品受到一定程度影响可能是由于污染物垂直向下迁移或者随滞水垂直向下迁移导致。

4.5 潜在污染受体

4.5.1 场地利用规划

计划将拆除后场地作为企业预留用地，用地性质不变，为二类工业用地。

4.5.2 潜在污染受体

场地周边无地表水体。根据本次场地风险评估范围，考虑本场地作为工业用地的利用现状，场地潜在受体为厂内工作人员。

5 场地风险评价

根据前期土壤样品分析结果，调查区域内多项污染物超出筛选值，按照我国场地风险评估的相关规定，需要进行场地风险评价，结合场地用地性质，计算场地的人体健康风险。

5.1 工作依据和工作流程

根据浙江省 2013 年颁布的《污染场地风险评估技术导则》，土壤环境污染风险评估的主要流程见图 5-1，各部分主要内容如下：

(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方式，确定污染场地的关注污染物、场地内污染物的空间分布和可能的敏感受体，如儿童、成人、地下水等。

(2) 暴露评估：在危害识别的工作基础上，分析场地土壤中关注污染物进入并危害敏感受体的情景，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。

(3) 毒性评估：在危害识别的工作基础上，分析关注污染物对人体健康的危害效应，包括致癌效应和非致癌效应，确定与关注污染物相关的毒性参数，包括参考剂量、参考浓度、致癌斜率因子和单位致癌因子等。确定污染浓度水平与健康反应之间的关系。

(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（非致癌风险值）和多个关注污染物的危害商（非致癌风险值）。

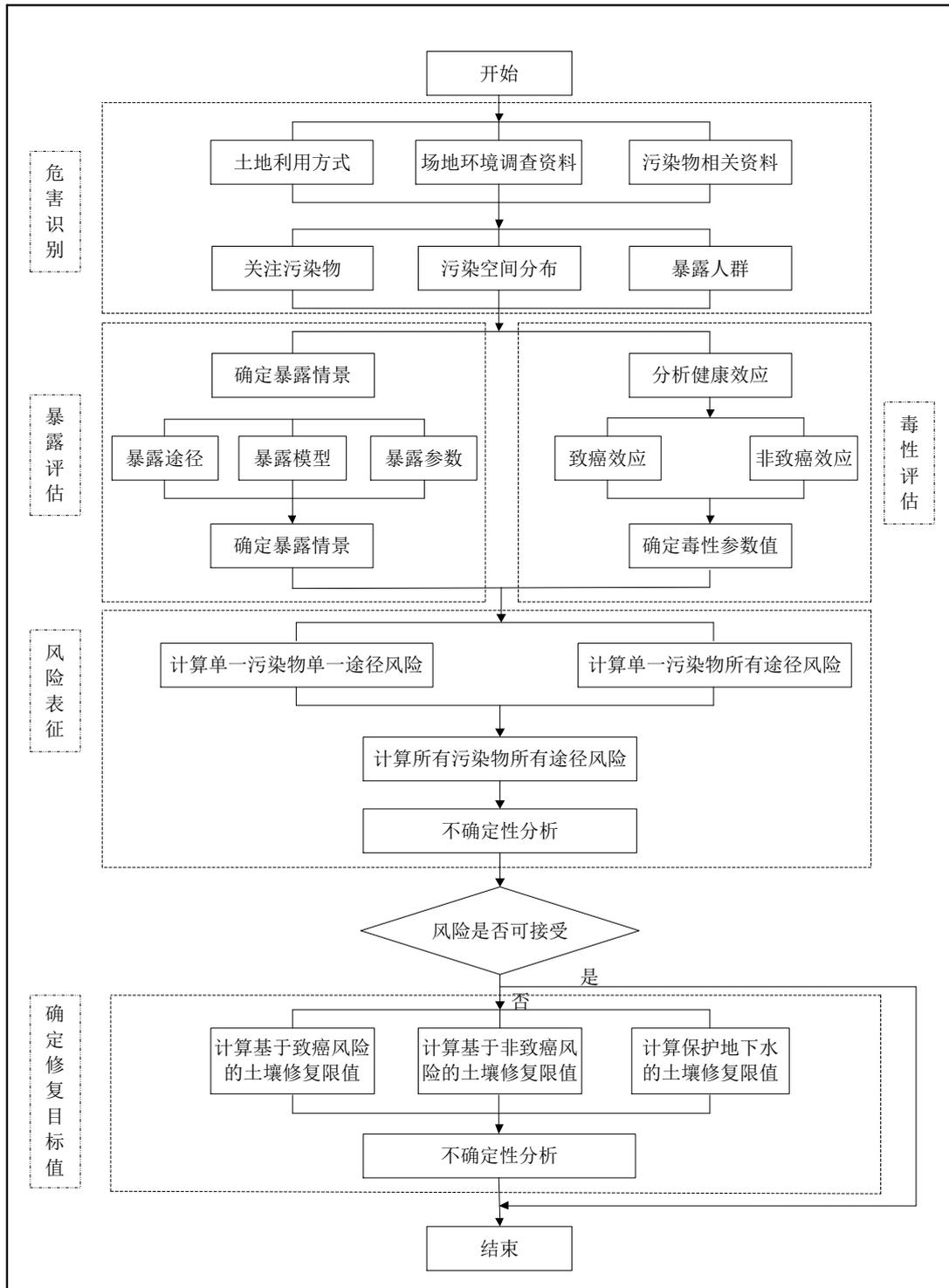


图 5-1 场地土壤污染环境健康风险评价的一般程序

风险评估方法可分定性和定量评价。原则上，场地环境评价应采用定量风险评估方法，但在下列情况，可考虑只进行定性评价：①场地评价人员认为定性的风险评估足以能够说明问题；②受费用与时间限制；③缺少污染物的毒性资料；④其他原因无法计量的风险。本报告中采用定量评价与定性评价相结合的方法。

5.2 风险评估情景假设与暴露途径

考虑到场地目前土地利用方式和未来规划的不确定性，本次人体健康风险评估将考虑本场地作为工业用地的利用现状，对目前该场地上生产人员的健康风险进行计算，并考虑可能的暴露途径，见表 5-1。污染源介质、迁移机制和暴露途径之间关系见图 5-2。

表 5-1 污染源、受体和暴露途径归纳

暴露途径	0~1.5m	1.5~6.0m
经口摄入土壤	√	
皮肤接触土壤	√	
吸入空气中土壤颗粒物途径	√	
吸入室外空气中污染物蒸汽途径	√	√
吸入室内空气中污染物蒸汽途径		√

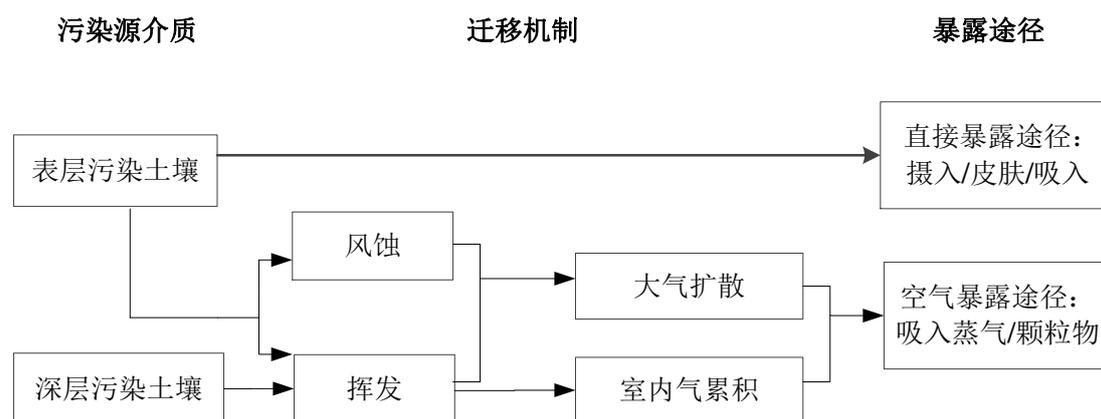


图 5-2 暴露流程图

5.3 关注污染物与性质

5.3.1 场地关注污染物

经过前期场地环境调查的采样分析结果，本场地土壤中的关注污染物主要包括：

- (1) 重金属：砷；
- (2) VOCs：三氯甲烷（氯仿）；
- (3) SVOCs：六氯苯。

关注污染物的污染深度和对应土层情况如表 5-2 所示。

表 5-2 场地关注污染物污染深度及土质

深度 (m)	土质	关注污染物
0~1.5	粉质粘土	三氯甲烷、六氯苯
1.5~6.0	粉质粘土	砷、三氯甲烷、六氯苯

5.3.2 场地关注污染物性质

5.3.2.1 砷

砷单质很活泼，在空气中加热至约 200℃时，会发出光亮，于 400℃时，会有一种带蓝色的火焰燃烧，并形成白色的三氧化二砷烟。金属砷易与氟和氧化合，在加热情况亦与大多数金属和非金属发生反应。不溶于水，溶于硝酸和王水，也能溶解于强碱，生成砷酸盐。最常见的化合物为砷的氢化物或称胂、五氧化二砷和三氧化二砷，及其对应的水化物-砷酸和亚砷酸。此外，还有一甲基胂、二甲基胂、三甲基胂、甲基胂酸、二甲基次胂酸等有机砷化合物。

单质砷无毒性，砷化合物均有毒性。砷可能在某些酶反应中起作用，以砷酸盐替代磷酸盐作为酶的激活剂，以亚砷酸盐的形式与巯基反应作为酶抑制剂，从而可明显影响某些酶的活性。

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。

5.3.2.2 三氯甲烷（氯仿）

无色透明液体，味甜，溶于醇、醚、苯，在日光、氧或湿空气中，特别是在铁的存在下，易分解生成氯化氢有光气。

对实验动物具有致癌作用，但对人类的致癌作用尚不确定，IARC 将其归类为 2B，大鼠吸入 LC_{50} 为 47702 mg/m³/4hr，雄大鼠经口 LD_{50} 为 908 mg/kg，雌大鼠经口 LD_{50} 为 1117 mg/kg 或 695 mg/kg，小鼠经口 36 mg/kg，腹腔注射 623 mg/kg，皮下 704 mg/kg，可通过皮肤吸收，吸入或食入而进入人体，氯仿主要对中枢神经及心脏有损害作用，对肾脏及肝脏也有毒害。常见的症状为恶心、呕吐、食欲减退、嗜睡、头昏、定向困难、头痛、胸痛、尿痛。吸入还可引起鼻喉刺激、

口干、呼吸困难等。

5.3.2.3 六氯苯

白色结晶。在高温下，在碱性溶液中能分解生成五氯酚钠盐。受高热分解产生有毒的腐蚀性烟气。接触后引起眼刺激、烧灼感、口鼻发干、疲乏、头痛、恶心等。中毒时可影响肝脏、中枢神经系统和心血管系统。可致皮肤溃疡。常积蓄在人类多脂质的组织内，如肾上腺皮质、骨髓、皮肤及内分泌组织，并可通过胎盘和母乳传递给婴儿，在体内可以有限降解而成五氯苯，四氯苯及五氯苯酚。可以影响亚铁血红蛋白的生物合成，可以对肝、肺、肾、甲状腺、神经系统产生危害作用，具有氯代烃的毒性，大鼠经口 LD₅₀ 为 3500 mg/kg，小鼠经口为 4000 mg/kg，对人类的致癌作用，IARC 将其归类为 2B。

场地关注污染物的物理化学性质见表 5-3 所示。

表 5-3 场地关注污染物化学特性

污染物	砷	六氯苯	三氯甲烷
CAS	7440-38-2	118-74-1	67-66-3
密度 (g/cm ³)	5.72	2.44	1.5
溶解度 (mg/L)	不溶于水	不溶于水	7920
熔点 (°C)	819	226	-63.5
沸点 (°C)	614	323~326	61.3
蒸汽压 (kPa)	/	0.13	1.98E+02
亨利常数	/	5.41E-02	1.53E-01
Koc	2.90E+01	5.50E+04	3.98E+01

5.4 风险评估原理与方法

本项目风险评估原理及方法主要依据浙江省《污染场地风险评估技术导则》(DB33/T 892-2013)。

5.4.1 部分过程参数计算方法暴露模型

根据浙江省《污染场地风险评估技术导则》(DB33/T 892-2013)，本场地为非敏感用地，暴露途径包括：经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入空气中土壤颗

颗粒物、吸入室外空气中污染物蒸气、吸入室内空气中污染物蒸气。对于致癌污染物，考虑成人健康危害效应；对于非致癌污染物，考虑成人健康危害效应。各途径的暴露模型如下：

(1) 经口摄入土壤途径

$$OIS_{ca} = \frac{ING(soil)_a \times EF_a \times ED_a \times RAF_o}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6}$$

式中：

OIS_{ca} ——经口摄入土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

$ING(soil)_a$ ——成人每日摄入土壤量，mg/d；

BW_a ——成人平均体重，kg；

EF_a ——成人暴露频率，d/yr；

ED_a ——成人暴露周期，yr；

RAF_o ——经口摄入吸收效率因子，无量纲；

AT_{ca} ——致癌效应的平均时间，d。

$$OIS_{nc} = \frac{ING(soil)_a \times EF_a \times ED_a \times RAF_o}{BW_a \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

式中：

OIS_{nc} ——经口摄入土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

AT_{nc} ——非致癌效应的平均时间，d。

(2) 皮肤接触土壤途径

$$DCS_{ca} = \frac{SSA(soil)_a \times EF_a \times ED_a \times M_a \times RAF_d}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6}$$

式中：

DCS_{ca} ——皮肤接触途径的土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

$SSA(soil)_a$ ——成人暴露皮肤表面积，cm²；

M_a ——成人皮肤表面土壤粘附系数，mg/cm²；

RAF_d ——皮肤接触吸收效率因子，无量纲。

$$DCS_{nc} = \frac{SSA(soil)_a \times EF_a \times ED_a \times M_a \times RAF_d}{BW_a \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

式中：

DCS_{nc} ——皮肤接触的土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)。

(3) 吸入空气中土壤颗粒物途径

$$PIS_{ca} = \frac{TSP \times INH_a \times ED_a \times PIAF \times (fspo \times EF(out)_a + fspi \times EF(ins)_a)}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6}$$

式中：

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

TSP ——空气中总悬浮颗粒物含量，mg/m³；

INH_a ——成人每日空气呼吸量，m³/d；

$PIAF$ ——吸入土壤颗粒物在体内滞留比例，无量纲；

$fspo$ ——室外空气中来自土壤颗粒物所占比例，无量纲；

$fspi$ ——室内空气中来自土壤颗粒物所占比例，无量纲；

$EF(out)_a$ ——成人的室外暴露频率，d/yr；

$EF(ins)_a$ ——成人的室内暴露频率，d/yr。

$$PIS_{nc} = \frac{TSP \times INH_a \times ED_a \times PIAF \times (fspo \times EF(out)_a + fspi \times EF(ins)_a)}{BW_a \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

式中：

PIS_{nc} ——室外吸入土壤颗粒物的土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)。

(4) 吸入室外空气中污染物蒸气途径

$$VOC_{ca1} = \frac{INH_a \times ET(out)_a \times EF_a \times ED_a \times VF_{ss}}{BW_a \times AT_{ca}}$$

$$VOC_{ca2} = \frac{INH_a \times ET(out)_a \times EF_a \times ED_a \times VF_{s,amb}}{BW_a \times AT_{ca}}$$

式中：

VOS_{ca1} ——吸入室外空气中来自表层土壤的污染物蒸气对应的土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

VOS_{ca2} ——吸入室外空气中来自下层土壤的污染物蒸气对应的土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

VF_{ss} ——室外空气中来自表层土壤的污染物蒸气因子，kg/m³；

$VF_{s,amb}$ ——室外空气中来自下层土壤的污染物蒸气因子，kg/m³；

$ET(out)_a$ ——成人每日室外暴露时间，d。

$$VOC_{nc1} = \frac{INH_a \times ET(out)_a \times EF_a \times ED_a \times VF_{ss}}{BW_a \times AT_{nc}}$$

$$VOC_{nc2} = \frac{INH_a \times ET(out)_a \times EF_a \times ED_a \times VF_{s,amb}}{BW_a \times AT_{nc}}$$

式中：

VOS_{nc1} ——吸入室外空气中来自表层土壤的污染物蒸气对应的土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

VOS_{nc2} ——吸入室外空气中来自下层土壤的污染物蒸气对应的土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

(5) 吸入室内空气中污染物蒸气途径

$$VIS_{ca1} = \frac{INH_a \times ET(ind)_a \times EF_a \times ED_a \times VF_{s,esp}}{BW_a \times AT_{ca}}$$

式中：

VIS_{ca1} ——吸入室内空气中来自下层土壤的污染物蒸气对应的土壤暴露量（致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

$VF_{s,esp}$ ——室内空气中来自下层土壤的污染物蒸气因子，kg/m³；

$ET(ind)_a$ ——成人每日室内暴露时间，d。

$$VIS_{nc1} = \frac{INH_a \times ET(ind)_a \times EF_a \times ED_a \times VF_{s,esp}}{BW_a \times AT_{nc}}$$

式中：

VIS_{nc1} ——吸入室内空气中来自下层土壤的污染物蒸气对应的土壤暴露量（非致癌效应），kg 土壤/(kg 体重 d)；

5.4.2 风险表征计算方法

5.4.2.1 致癌风险计算

单一污染物的致癌风险计算方法如下：

(1) 经口摄入土壤

$$CR_{OIS} = OIS_{ca} \times C_{sur} \times SF_o$$

式中：

CR_{OIS} ——经口摄入污染土壤的致癌风险，无量纲；

C_{sur} ——表层土壤中污染物浓度，mg/kg。

(2) 皮肤接触土壤

$$CR_{DCS} = DCS_{ca} \times C_{sur} \times SF_d$$

式中：

CR_{DCS} ——皮肤接触污染土壤的致癌风险，无量纲。

(3) 吸入空气中土壤颗粒物途径

$$CR_{PIS} = PIS_{ca} \times C_{sur} \times SF_i$$

式中：

CR_{PIS} ——吸入受污染土壤颗粒物的致癌风险，无量纲。

(4) 吸入室外空气中污染物蒸气途径

$$CR_{VOS} = (VOS_{ca1} \times C_{sur} + VOS_{ca2} \times C_{sub}) \times SF_i$$

式中：

CR_{VOS} ——吸入室外空气中来自土壤污染物蒸气的致癌风险，无量纲；

C_{sub} ——下层土壤中污染物浓度，mg/kg；

C_{gw} ——地下水中污染物浓度，mg/L。

(5) 吸入室内空气中污染物蒸气途径

$$CR_{VIS} = (VIS_{ca1} \times C_{sub}) \times SF_i$$

式中：

CR_{VIS} ——吸入室内空气中来自土壤污染物蒸气的致癌风险，无量纲。

单一污染物经所有暴露途径的致癌风险计算方法如下：

$$CR_i = CR_{OIS} + CR_{DCS} + CR_{PIS} + CR_{VOS} + CR_{VIS}$$

式中：

CR_i ——第*i*种污染物经所有暴露途径的致癌风险，无量纲。

5.4.2.2 危害商计算

单一污染物的危害商计算方法如下：

(1) 经口摄入土壤

$$HQ_{OIS} = \frac{OIS_{nc} \times C_{sur}}{RfD_o}$$

式中：

HQ_{OIS} ——经口摄入污染土壤的危害商，无量纲。

(2) 皮肤接触土壤

$$HQ_{DCS} = \frac{DCS_{nc} \times C_{sur}}{RfD_d}$$

式中：

HQ_{DCS} ——皮肤接触污染土壤的危害商，无量纲。

(3) 吸入空气中土壤颗粒物途径

$$HQ_{PIS} = \frac{PIS_{nc} \times C_{sur}}{RfD_i}$$

式中：

HQ_{PIS} ——吸入受污染土壤颗粒物的危害商，无量纲。

(4) 吸入室外空气中污染物蒸气途径

$$HQ_{VOS} = \frac{VOS_{nc1} \times C_{sur} + VOS_{nc2} \times C_{sub}}{RfD_i}$$

式中：

HQ_{VOS} ——吸入室外空气中来自土壤污染物蒸气的危害商，无量纲。

(5) 吸入室内空气中污染物蒸气途径

$$HQ_{VIS} = \frac{VIS_{nc1} \times C_{sur}}{RfD_i}$$

式中：

HQ_{VIS} ——吸入室内空气中来自土壤污染物蒸气的危害商，无量纲。

单一污染物经所有暴露途径的危害商计算方法如下：

$$HQ_i = HQ_{OIS} + HQ_{DCS} + HQ_{PIS} + HQ_{VOS} + HQ_{VIS}$$

式中：

HQ_i ——第*i*种污染物经所有暴露途径的危害商，无量纲。

5.5 风险评估参数

5.5.1 土壤性质及水文地质参数

本项目评价所需的土壤性质及场地特征参数主要采用现场调查的实测数值，对于现场调查无法获得实测数值的参数采用浙江省《污染场地风险评估技术导则》（DB33/T 892-2013）中推荐值，见表 5-4。

表 5-4 场地土壤特征参数

分层	深度 m	含水量 %	容重 g/cm ³	土壤颗粒密度 g/cm ³	有机质含量 g/kg
第一层	0~1.5	16.2	1.81	2.70	10
第二层	1.5~6.0	16.2	1.93	2.72	10

5.5.2 建筑物及其他特征参数

建筑物及其他特征参数主要选自浙江省《污染场地风险评估技术导则》(DB33/T 892-2013), 见表 5-5。

表 5-5 风险评估模型建筑及土质参数统计表

参数符号	参数名称	单位	工业及其他用地推荐值
U_{air}	土壤污染区近地面年平均风速	$cm\ s^{-1}$	200
δ_{air}	土壤污染区上方近地面大气混合层高度	cm	200
W_{dw}	平行于主导风向的土壤污染区长度	cm	1500
θ_{acap}	毛细管层土壤中孔隙空气体积比	无量纲	0.038
θ_{acrack}	地基与墙体裂隙中空气体积比	无量纲	0.26
θ_{wearck}	地基或墙体裂隙中水体积比	无量纲	0.12
L_{crack}	室内地基厚度	cm	15
L_B	室内空间体积与蒸气入渗面积之比	cm	300
ER	室内空气交换速率	次 s^{-1}	0.00023
η	地基和墙体裂隙表面积所占比例	无量纲	0.01
τ	气态污染物入侵持续时间	s	7.88×10^8

5.5.3 关注污染物毒理学参数

污染物的毒理学参数参考浙江省《污染场地风险评估技术导则》(DB 33/T 892-2013) 及 EPA (美国国家环保署) 毒理学数据库。详见表 5-6。

表 5-6 关注污染物毒理学参数

序号	污染物	经口摄入 吸收致癌 斜率因子	呼吸吸入 吸收致癌 斜率因子	皮肤接触 吸收致癌 斜率因子	经口摄入 吸收参考 剂量	呼吸吸入 吸收参考 剂量	皮肤接触 吸收参考 剂量	呼吸吸入 吸收参考 浓度	呼吸吸入 吸收单位 致癌斜率 因子	皮肤接触 吸收效率 因子	消化道吸 收效率因 子
	符号	SF ₀	SF _i	SF _d	RfD ₀	RfD _i	RfD _d	RfC	URF	RAF _d	ABS _{gi}
	单位	(kg d)/mg	(kg d)/mg	(kg d)/mg	mg/(kg d)	mg/(kg d)	mg/(kg d)	mg/m ³	m ³ /mg	无量纲	无量纲
1	砷	1.50E+00	—	1.50E+00	3.00E-04	8.60E-06	1.23E-04	—	4.30E+00	3.00E-02	1.00E+00
2	氯仿	3.10E-02	—	3.10E-02	1.00E-02	1.40E-02	1.00E-02	—	2.30E-02	1.00E-02	—
3	六氯苯	1.60E+00	—	3.20E+00	8.00E-04	8.00E-04	8.00E-04	—	4.60E-01	1.00E-01	1.00E+00

5.6 风险表征

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

本场地针对目前工业场地进行生产活动的工人,根据暴露评估和毒性评估结果,分别对土壤中的关注污染物进行了风险计算。根据浙江省《污染场地风险评估技术导则》(DB33/T 892-2013),本项目风险评价时选定致癌风险水平 $1E-6$ 、危害商 1 作为依据。

为了能反映场地土壤的总体污染水平,一般在场地风险评价中采用 95% 置信上限(95%UCL)和最大浓度相结合的方式 进行风险计算。具体方法为当污染物的土壤样品检出数量不少于 8 个时,则采用该种污染物的 95% 置信上限浓度(95%UCL)进行风险评估计算;如该种污染物的土壤样品检出数量少于 8 个,采用该种污染物的最大检出浓度进行风险计算。本次风险评估区域范围较小,因此选择污染物浓度最大值进行风险评估(见表 5-7)。

表 5-7 场地土壤关注污染物统计表(单位: mg/kg)

污染物	土壤样品浓度最大值 (mg/kg)	
	表层 (0~1.5m)	下层 (1.5~6.0m)
砷	17.3	40.8
六氯苯	8.27	2.28
三氯甲烷(氯仿)	330	132

注:黄色底纹代表风险计算选用值。白色底纹代表检出值未超过筛选值。

(1) 现状情景表层 (0~1.5 m) 土壤风险计算结果

在本场地表层 0~1.5 m 土壤中,关注污染物六氯苯及三氯甲烷(氯仿)的风险计算结果见表 5-8。

由表 5-8 可见,场地表层土壤中六氯苯的致癌风险分别为 $8.41E-06$,关键暴露途径为经口摄入;三氯甲烷(氯仿)的致癌风险为 $2.35E-05$,关键暴露途径为室外呼吸吸入土壤蒸气。六氯苯及三氯甲烷(氯仿)的致癌风险均超过了可接受水平 $1E-6$,非致癌危害商均未超过可接受水平 1。

(2) 现状情景下层 (1.5 m~6.0 m) 土壤风险计算结果

在本场地下层 1.5 m~6.0 m 土壤中，关注污染物砷、六氯苯及三氯甲烷（氯仿）的风险计算结果见表 5-9。

根据表 5-9，场地下层土壤中砷缺乏呼吸吸入途径相关参数的亨利系数，无法进行风险计算；六氯苯的致癌风险为 $3.70\text{E}-06$ ，关键暴露途径分别为室内呼吸吸入；三氯甲烷（氯仿）的致癌风险为 $1.86\text{E}-02$ ，关键暴露途径分别为室内呼吸吸入，其危害商为 $4.78\text{E}+01$ ，三氯甲烷（氯仿）的致癌风险和危害商均超过了可接受水平。

综上所述，在现状情景下，调查区域的表层及下层土壤中六氯苯及三氯甲烷（氯仿）致癌风险超过可接受水平，需要进一步计算修复目标值。

表 5-8 现状情景表层 (0~1.5 m) 土壤风险评估计算结果

污染物	致癌风险					总计	危害商					总计
	经口摄入	皮肤接触	室外呼吸吸入	室外颗粒物吸入	室内呼吸吸入		经口摄入	皮肤接触	室外呼吸吸入	室外颗粒物吸入	室内呼吸吸入	
六氯苯	5.54E-06	1.49E-06	1.31E-06	7.28E-08	/	8.41E-06	6.23E-02	3.56E-02	/	/	/	9.79E-02
三氯甲烷	4.28E-06	1.15E-06	1.79E-05	1.45E-07	/	2.35E-05	1.99E-01	1.14E-01	1.15E-01	9.28E-04	/	4.29E-01

注：/表示缺乏该途径的毒理参数或这种介质中这种污染物不作为关注污染物进行风险计算。

表 5-9 现状情景下层 (1.5~6.0 m) 土壤风险评估计算结果

污染物	致癌风险					总计	危害商					总计
	经口摄入	皮肤接触	室外呼吸吸入	室外颗粒物吸入	室内呼吸吸入		经口摄入	皮肤接触	室外呼吸吸入	室外颗粒物吸入	室内呼吸吸入	
砷	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
六氯苯	/	/	1.34E-08	/	3.69E-06	3.70E-06	/	/	/	/	/	/
三氯甲烷	/	/	2.68E-05	/	1.86E-02	1.86E-02	/	/	1.71E-01	/	4.76E+01	4.78E+01

注：/表示缺乏该途径的毒理参数或这种介质中这种污染物不作为关注污染物进行风险计算。

5.7 不确定性分析

本项目开展的污染场地人体健康风险评估是在对场地污染情况进行全面调查的基础上进行的。评估过程中考虑了土地利用方式、土地规划、受体活动方式（暴露情景）等。基本上比较全面、准确定量的评估了场地现状污染对人体健康的风险，筛选出了在本次调查基础上需要优先关注的污染物，并计算出了这些关注污染物的风险控制值。

本次调查亦存在一些不确定因素，因此评估计算中所需要的某些特征参数信息不完善，进行评估和风险控制值计算时采用的模型参数比较多的采用默认参数，因此评估结果也存在一定的不确定性。

本次风险评估的不确定性主要来源于以下几个方面：

（1）根据导则，本场地仅针对场地调查时检测出浓度超过筛选值的污染物进行风险评估，可能存在检出浓度没超过筛选值的污染物在调查范围内还有浓度更高的点，从而在风险评估阶段有所遗漏。

（2）土地规划利用方式

本次风险评估基于场地现状作为工业用地使用，不进行开挖或建设活动，若今后土地规划利用方式发生改变，则计算结果可能不再适用。

（2）模型参数

评估中采用的模型参数大多采用默认参数，默认参数的设定均考虑的为最保守的状态（即最严格控制风险），评估出的风险区域有可能过高，而计算的优先控制污染物的风险控制值可能比较严格。

（3）人群活动方式

人群活动方式决定着人群的暴露频次、暴露周期、暴露量等主要参数，本次评估中仅能确定部分区域人群活动方式信息，由此也对最终评估结果也会产生一定的不确定性。

（4）场地土壤污染物浓度随时间的自然衰减

人体健康风险评估针对的是人体长期微量自环境中摄入化学品产生的危害，以风险的形式进行表征。进行风险评估是以尽可能保守的思路，对人体在整个生命周期中可能的暴露情景、暴露途径及产生的暴露量进行评估，因此对所评估的土壤污染物在所评估的人体整个暴露周期期间的自然衰减并未进行考虑。由此可

能会过高估计对人体健康产生的风险,但不至于遗漏或忽略对人体可能产生的危害。

(5) 降雨等自然环境因素

评估过程中未考虑人体整个暴露周期内降雨等对土壤及中污染物的冲刷作用。

根据以上的讨论,评估计算的不确定性是不可避免的。不过在计算中尽可能采取了一些措施来减少了不确定性。

5.8 风险评估小结

根据场地规划用途,结合现场水文地质参数、土壤参数和气候特征参数,结合超标污染物的毒性特征,设定致癌风险为 $1E-6$,非致癌物目标危害商为 1。对场地现状情况进行风险表征。

现状情况风险结算结果表明,表层及下层土壤中六氯苯及三氯甲烷致癌风险均超过可接受水平,需要进一步计算修复目标值。

(1) 场地表层土壤中六氯苯的致癌风险分别为 $8.41E-06$,关键暴露途径为经口摄入;三氯甲烷(氯仿)的致癌风险为 $2.35E-05$,关键暴露途径为室外呼吸吸入土壤蒸气。六氯苯及三氯甲烷(氯仿)的致癌风险均超过了可接受水平 $1E-6$,非致癌危害商均未超过可接受水平 1。

(2) 场地下层土壤中砷缺乏呼吸吸入途径相关参数的亨利系数,无法进行风险计算;六氯苯的致癌风险为 $3.70E-06$,关键暴露途径分别为室内呼吸吸入;三氯甲烷(氯仿)的致癌风险为 $1.86E-02$,关键暴露途径分别为室内呼吸吸入,其危害商为 $4.78E+01$,三氯甲烷(氯仿)的致癌风险和危害商均超过了可接受水平。

6 初步修复目标计算

本次评价范围为鹰鹏化工的原 HCFC-22 生产车间、HCFC-22 灌装车间及原料储罐区，因场地未来利用规划存在不确定性，本次场地初步修复目标值计算是基于上述区域作为工业用地的现状而进行。同时，采用较为保守的方法针对上述区域的开发（全部开挖至地表以下 6.0 m）情景，计算初步修复目标值。

6.1 修复目标计算方法

6.1.1 修复目标计算流程

场地污染物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。

本项目污染物修复目标值的计算采用 RBCA 模型，计算步骤如图 6-1 所示。

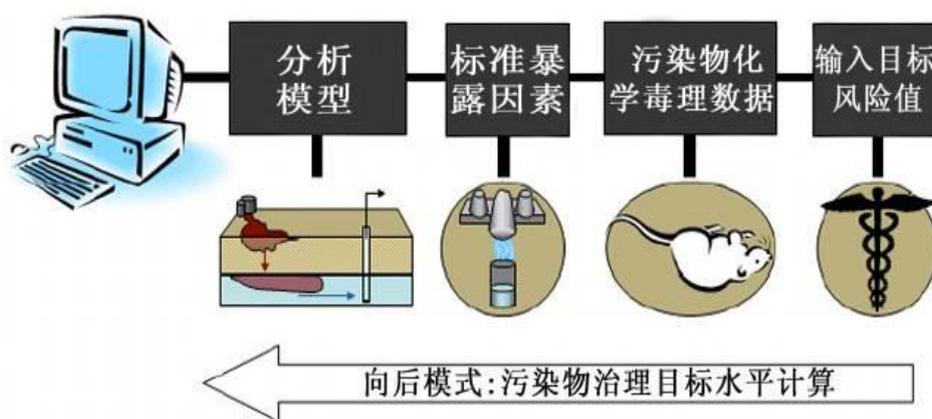


图 6-1 场地风险评估工作流程

6.1.2 土壤修复目标值计算

基于所有暴露途径总致癌风险的土壤修复限值计算方法如下：

$$RBSL_{Soil} = \frac{TR}{OIS_{ca} \times SF_o + DCS_{ca} \times SF_d + (PIS_{ca} + VOS_{ca1} + VOS_{ca2} + VIS_{ca1}) \times SF_i}$$

式中：

$RBSL_{soil}$ ——基于所有暴露途径总致癌风险的土壤修复限值，mg/kg；

TR ——目标可接受致癌风险，无量纲。

基于所有暴露途径总危害商的土壤修复限值计算方法如下：

$$HBSL_{Soil} = \frac{THQ}{OIS_{nc} \times RfD_o + DCS_{nc} \times RfD_d + (PIS_{nc} + VOS_{nc1} + VOS_{nc2} + VIS_{nc1})/RfD_i}$$

式中：

$HBSL_{soil}$ ——基于所有暴露途径总危害商的土壤修复限值，mg/kg；

THQ ——目标可接受危害商，无量纲。

6.2 可接受风险水平

根据场地目前用途，结合现场水文地质参数、土壤参数和气候特征参数，结合关注污染物的毒性参数，设定可接受致癌风险水平为 10^{-6} ，可接受危害商为 1，计算作为现状工业用地的风险表征。

6.3 初步修复目标计算参数确定

土壤初步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、建筑物参数等。这些参数的取值同 5.5 节。

6.4 初步修复目标计算结果

因场地未来利用规划存在不确定性，本次场地初步修复目标值计算是基于上述区域作为工业用地的现状而进行。同时，采用较为保守的方法针对上述区域的开发（全部开挖至地表以下 6.0 m）情景，选定 10^{-6} 为目标可接受致癌风险，1 为目标可接受危害商。土壤污染物的修复目标值见**错误!未找到引用源。**

由于没有后期详细规划资料，本次修复目标计算在没有结合规划的情况下，

仅计算了初步修复目标,并未结合实际开发情况深入评价和讨论,仅供后续参考。建议后续再开发利用前,进行深入的评估和计算,再次确定修复目标。

表 6-1 风险评估修复目标计算结果

污染物	修复目标 (mg/kg)	
	表层 (0~1.5 m)	下层 (1.5~6.0 m)
六氯苯	0.38	0.38
三氯甲烷	0.018	0.018

6.5 建议的初步修复目标值

针对计算出的场地土壤初步修复目标值(表 6-2 所示),综合场地修复技术可行性与经济性,与浙江省《污染场地风险评估技术导则》(DB33/T 892-2013)和《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)中土壤筛选值进行比对,按 10^{-6} 为目标可接受致癌风险,1 为目标可接受危害商,建议本场地土壤初步修复目标值(见表 6-2)。

表 6-2 初步修复目标计算结果

污染物	筛选值 (mg/kg)	风险评估修复目标计算值 (mg/kg)		修复目标 (mg/kg)
		表层 (0~1.5 m)	下层 (1.5~6.0 m)	
六氯苯	1	0.38	0.38	1
三氯甲烷	0.5	0.018	0.018	0.5

7 结论和建议

7.1 结论

7.1.1 场地风险表征结果

根据场地现状用途，结合现场土壤性质及水文地质参数，结合关注污染物的毒性参数，设定可接受致癌风险水平为 $1E-6$ ，可接受危害商为 1，计算本场地调查区域现状风险表征。结果显示在现状条件下，调查区域表层及下层中六氯苯及三氯甲烷均致癌风险均超过可接受水平，需要进行修复。

7.1.2 场地修复目标建议值

根据风险评估及筛选值对比，最终选择本场地的修复目标建议值汇总见表 7-1。

表 7-1 场地土壤建议修复目标值汇总（单位：mg/kg）

污染物	修复目标建议值 (mg/kg)
六氯苯	1
三氯甲烷	0.5

7.2 建议

经过场地调查和风险评估工作，通过对数据的分析，对场地后续工作提出如下建议：

(1) 在目前工业用地的情景下，本场地风险评价范围内污染土壤中的砷、三氯甲烷和六氯苯对人体健康的风险超过可接受水平，建议针对本场地的污染特征，编制修复技术方案，进行场地修复工作，消除或控制人体健康风险至可接受水平。

(2) 上述修复目标建议值是基于本场地目前土地利用现状开发的情景而提出的，由于没有后期详细规划资料，本次修复目标计算在没有结合规划的情况下，仅计算了初步修复目标，并未结合实际开发情况深入评价和讨论，仅供后续参考。建议后续再开发利用前，进行深入的评估和计算，再次确定修复目标。

(3) 前期场地环境调查和本次风险评价范围为原 HCFC-22 生产车间、HCFC-22 灌装车间及原料储罐区，上述风险评估结果是基于这些工作形成的。为了明确厂区其它区域是否潜在污染源，并分析其对上述工作范围内土壤和地下水造成污染的可能性，建议针对全厂区进行场地调查和风险评估工作，并结合场地明确的未来规划提出修复目标建议值。