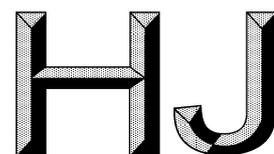


附件 2



中华人民共和国国家环境保护标准

HJ□□□-201□

污染场地地下水修复技术导则

Technical Guideline for Groundwater Remediation of Contaminated Site

(征求意见稿)

201□-□□-□□ 发布

201□-□□-□□ 实施

生 态 环 境 部 发布

目 次

前 言.....	7
1 适用范围.....	8
2 规范性引用文件.....	8
3 术语和定义.....	8
4 基本原则和工作程序.....	9
5 选择地下水修复和风险管控模式.....	12
6 筛选地下水修复和风险管控技术.....	14
7 制定地下水修复和风险管控技术方案.....	15
8 地下水修复和风险管控工程设计及施工.....	17
9 地下水修复和风险管控工程运行及监测.....	18
10 地下水修复和风险管控效果评估.....	21
附录 A （资料性附录） 地下水修复和风险管控技术适用性.....	24
附录 B （资料性附录） 地下水修复和风险管控技术方案编制提纲.....	27
附录 C （资料性附录） 地下水修复和风险管控技术主要设计参数.....	28
附录 D （资料性附录） 地下水修复和风险管控效果评估报告提纲.....	30

前 言

根据《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》和《中华人民共和国土壤污染防治法》，为保护生态环境，保障人体健康，实现污染场地地下水的规范化修复和风险管控，制定本标准。

本标准规定了污染场地地下水修复和风险管控技术方案制定、工程设计及施工、工程运行及监测、效果评估的基本原则、工作程序、内容和技术要求。

本标准由生态环境部土壤生态环境司、水生态环境司和法规与标准司组织制订。

本标准主要起草单位：环境保护部环境规划院、清华大学、中国科学院地理科学与资源研究所、北京建工环境修复股份有限公司、成都理工大学和南方科技大学。

本标准生态环境部 2019 年□□月□□日批准。

本标准自 2019 年□□月□□日起实施。

本标准由生态环境部解释。

污染场地地下水修复技术导则

1 适用范围

本标准规定了污染场地地下水修复和风险管控的基本原则、工作程序、内容和技术要求。

本标准适用于污染场地地下水修复和风险管控的技术方案制定、工程设计及施工、工程运行及监测、效果评估。

本标准不适用于放射性污染和致病性生物污染场地的地下水修复和风险管控。

2 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是未注明日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 3838 地表水环境质量标准

GB/T 14848 地下水质量标准

HJ 25.1 场地环境调查技术导则

HJ 25.2 场地环境监测技术导则

HJ 25.3 污染场地风险评估技术导则

HJ 2050 环境工程设计文件编制指南

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1 地下水 groundwater

地面以下饱和含水层的重力水。

3.2 含水层 aquifer

能够透过并给出相当数量水的岩层。

3.3 地下水污染羽 groundwater plume

污染物随地下水移动从污染源向周边移动和扩散时所形成的污染区域。

3.4 地下水修复 groundwater remediation

采用物理、化学或生物等工程措施与方法，降解、吸附、转化、转移场地地下水中的污染物，将有毒有害的污染物转化为无害物质，或使其浓度降低到可接受水平，满足相应的地下水环境功能或使用功能的过程。

3.5 地下水风险管控 groundwater risk control

采取阻隔、制度控制等工程措施或非工程措施与方法，阻止地下水污染进一步扩散，或

阻断其暴露途径，防止对周边环境敏感点产生影响的过程。

3.6 场地概念模型 site conceptual model

用文字、图、表等方式来综合描述污染源、污染物迁移途径、人体或受体接触污染介质的过程和接触方式等。

3.7 地下水修复和风险管控模式 groundwater remediation and risk control strategy

对污染场地进行地下水修复和风险管控的总体思路，包括原位修复、异位修复、工程控制和制度控制等。

3.8 地下水修复目标 groundwater remediation goal

由场地环境调查或风险评估确定的目标污染物对人体健康和生态受体不产生直接或潜在危害，或不具有环境风险的地下水修复终点。

3.9 地下水风险管控目标 groundwater risk control goal

阻断地下水污染暴露途径，阻止地下水污染扩散，防止对周边环境敏感点产生影响的阶段目标。

3.10 制度控制 institutional control

通过制定和实施管理要求，减少或阻止人群对场地污染物的暴露，从制度上杜绝和防范场地地下水污染可能带来的风险和危害，从而达到利用管理手段对污染场地的潜在风险进行控制的目的。

3.11 工程控制 engineering control

采用阻隔、堵截、覆盖等工程措施，控制污染物迁移或阻断污染物暴露途径，降低和消除场地地下水污染物对人体健康和环境的风险。

4 基本原则和工作程序

4.1 基本原则

4.1.1 统筹性原则

污染场地地下水修复和风险管控应兼顾土壤、地下水和地表水，统筹地下水修复和风险管控措施，防止污染地下水对周边环境产生影响。

4.1.2 规范性原则

采用程序化、系统化方式规范地下水修复和风险管控的过程，制定地下水修复和风险管控方案，实施地下水修复和风险管控工程，开展地下水修复和风险管控效果评估，提出后期环境监管建议。

4.1.3 可行性原则

综合考虑污染场地所在区域地下水使用功能、地下水污染物特性、地下水污染程度和范

围以及对人体健康或生态环境造成的危害，合理选择修复和风险管控技术，因地制宜制定修复和风险管控方案，使修复和风险管控工程切实可行，确保修复和风险管控达到规定要求或者风险达到可接受水平。

4.1.4 安全性原则

制定污染场地地下水修复和风险管控技术方案要确保工程实施安全，地下水修复和风险管控技术工程施工和运行过程中，应防止对施工人员、周边人群健康以及生态环境产生危害和二次污染。

4.2 工作程序

污染场地地下水修复和风险管控的工作程序如图 1 所示。

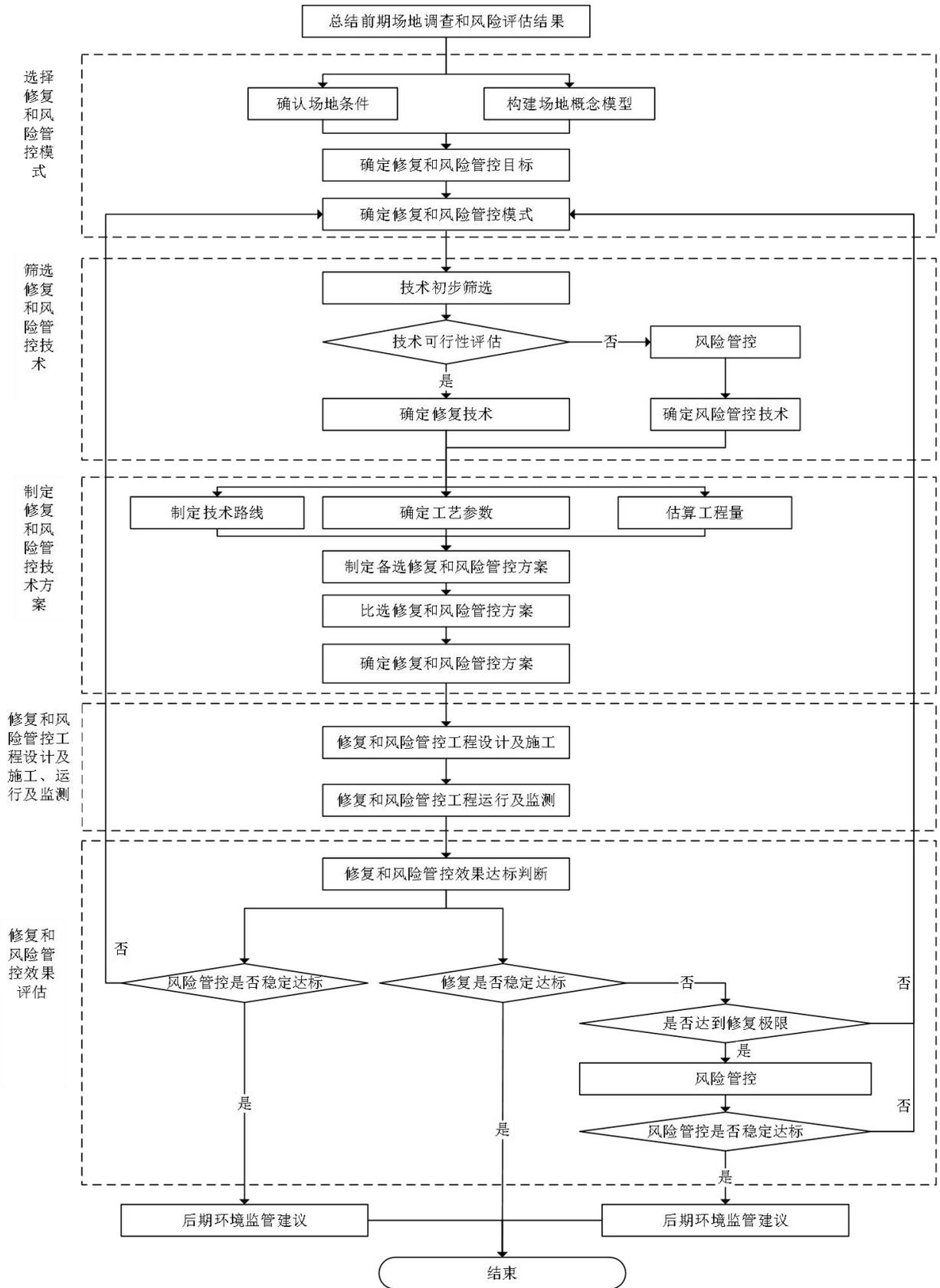


图 1 污染场地地下水修复和风险管控工作程序

4.2.1 选择修复和风险管控模式

确认场地条件，确定场地概念模型。根据地下水使用功能、场地规划和环境要求等因素，确定污染场地地下水修复和风险管控目标，明确污染场地地下水修复和风险管控的总体思路。

4.2.2 筛选修复和风险管控技术

根据污染场地的具体情况，按照确定的修复和风险管控模式，分析不同地下水修复和风险管控技术的适用性。利用对比分析或矩阵评分等方法，初步筛选地下水修复和风险管控技术。通过实验室小试、现场中试和模拟分析等方法，从技术成熟度、适用条件、效果、成本、时间和环境安全性等方面确定适宜的修复和风险管控技术。

4.2.3 制定修复和风险管控技术方案

根据确定的修复和风险管控技术，采用一种或多种技术优化组合集成制定技术路线，确定地下水修复和风险管控技术的工艺参数，估算工程量，提出备选方案。从技术指标、工程费用、环境及健康安全等方面对备选方案进行比较，确定最优方案。

4.2.4 地下水修复和风险管控工程设计及施工

根据确定的修复和风险管控技术方案，开展修复和风险管控工程的设计及施工。工程设计一般包括初步设计和施工图设计；工程施工包括施工准备、施工过程和环境管理与二次污染防治等。

4.2.5 地下水修复和风险管控工程运行及监测

地下水修复和风险管控工程施工完成后，开展工程运行维护、过程监测、趋势预测和运行状况分析等。

4.2.6 地下水修复和风险管控效果评估

明确地下水修复和风险管控效果评估的范围，制定布点和采样方案，开展效果评估，提出后期环境监管建议。

5 选择地下水修复和风险管控模式

5.1 确认场地条件

5.1.1 核实地相关资料

根据前期按照 HJ 25.1 和 HJ 25.2 完成的场地地下水环境调查和按照 HJ 25.3 完成的污染场地风险评估等相关资料，重点核实污染场地基本情况、水文地质条件、场地环境特性、土壤与地下水污染特征等内容。

5.1.2 现场踏勘

考察场地现状，特别关注前期场地环境调查和风险评估后发生的重大变化，以及周边地下水型饮用水源地等环境保护敏感目标的变化情况。考察场地修复和风险管控工程施工条

件，特别关注场地用电、用水、交通、地下水监测井等情况，为修复和风险管控工程施工区布局提供基础信息。

5.1.3 补充相关技术资料

通过核查场地已有水文地质条件和地下水污染情况等相关资料和现场踏勘情况，如发现已有资料不能满足地下水修复和风险管控方案编制要求，应适当补充相关资料。必要时应补充开展水文地质勘查和场地环境调查，进行风险评估与模拟预测，相关技术要求按照 HJ 25.1、HJ 25.2 和 HJ 25.3。

5.2 构建场地概念模型

结合 5.1 收集的相关场地资料，分析场地水文地质条件、污染物的理化参数、空间分布特征及其迁移途径、周边环境敏感点等，构建场地概念模型，重点关注地下水污染羽的变化情况。

场地概念模型一般包括下列信息：

- a) 地下水污染特征：污染源、目标污染物浓度、污染羽范围、污染羽迁移趋势、非水相液体的分布情况；
- b) 水文地质条件：地下水类型、地层分布及岩性、地下水埋藏条件、地下水流场、地下水补给、径流和排泄条件；
- c) 潜在受体与周边环境情况：结合场地地下水使用功能和场地规划，分析污染地下水与受体的相对位置关系、受体的关键暴露途径等。

场地概念模型可用文字、图、表等方式表达，便于指导污染场地地下水修复和风险管控目标确定、方案制定和优化。

5.3 确定地下水修复和风险管控目标

5.3.1 确认目标污染物

按照 HJ 25.3 确定的风险不可接受的污染物，根据场地特征、规划、使用功能和地下水质量要求，确定地下水修复和风险管控目标污染物。

5.3.2 确定修复目标值

5.3.2.1 地下水型饮用水源保护区及其补给区

若污染场地位于集中式地下水型饮用水源（包括已建成的在用、备用和应急水源，在建或规划的地下水型饮用水源）保护区及补给径流区，选择适用标准作为修复目标值。适用标准选择按照以下优先顺序：

- a) GB/T 14848 中Ⅲ类标准；
- b) GB/T 14848 未涉及的目标污染物，按照饮用地下水的暴露途径计算地下水风险控制值作为修复目标值，风险控制值按照 HJ 25.3 计算。采用风险评估计算修复目标值时，单种污染物可接受的非致癌危害商为 1，可接受的致癌风险水平为 10^{-6} 。

5.3.2.2 其它地下水区域

- a) 具有工业、农业等使用功能的地下水污染区域，根据 GB/T 14848 要求，制定修复目标值。若 GB/T 14848 中无目标污染物时，采用风险评估的方法计算风险控制值作为修复目标值，风险控制值按照 HJ 25.3 计算。
- b) 当地下水污染影响或可能影响地表水体等敏感目标，根据地表水（环境）功能要求（GB 3838），确定地下水修复目标值。
- c) 不具有生活饮用、工业和农业等地下水使用功能且不影响地表水（环境）功能的地下水污染区域，基于地下水污染模拟预测结果，采用风险评估的方法计算风险控制值作为修复目标值，风险控制值按照 HJ 25.3 计算。

5.3.3 确定地下水风险管控目标

污染场地经评估难以达到 5.3.2 确定的地下水修复目标值时，应制定地下水风险管控目标作为地下水修复的阶段目标，阻断地下水污染暴露途径，控制地下水污染扩散，防止对周边环境敏感点的影响。

5.3.4 确定地下水修复和风险管控范围

根据 HJ 25.1 确定的地下水污染空间分布，结合地下水修复目标值和风险管控目标，确定地下水的修复和风险管控范围。

5.4 确定地下水修复和风险管控模式

与场地利益相关方确认地下水修复的相关要求，结合污染场地特征条件和目标，明确总体思路，选择污染源处理技术、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中的任意一种或其组合。

6 筛选地下水修复和风险管控技术

6.1 技术初步筛选

根据污染场地水文地质条件、地下水污染特征和确定的修复和风险管控模式等，从适用的目标污染物、技术成熟度、修复效率、成本、时间和环境风险等，分析比较现有地下水修复和风险管控技术的优缺点和适用性，常见技术适用性可参考附录 A。采用对比分析或矩阵评分等方法初步筛选一种或多种修复和风险管控技术。

6.2 技术可行性分析

地下水修复和风险管控技术可行性分析可采用实验室小试、现场中试和模拟分析等方式。

6.2.1 实验室小试

实验室小试应采集场地的污染地下水和含水介质，针对初步筛选的技术，制定实验室试验方案。开展室内试验，用以评估技术的效果，确定技术关键参数。

6.2.2 现场中试

若技术适用性不确定，应在污染场地开展现场中试，验证技术的实际效果，评估技术的适用性，获得设计和施工所需要的工程参数。

现场中试应根据修复和风险管控技术特点，结合场地条件、污染物类型和空间分布特征，选择适宜的单元开展中试。

6.2.3 模拟分析

基于构建的场地概念模型，选择目标污染物作为模拟因子，利用解析法或数值法，评估地下水修复和风险管控技术的有效性、工程修复效果和修复周期等。

6.3 技术综合评估

基于技术可行性分析结果，采用对比分析或矩阵评分法对初步筛选的技术进行综合评估，确定一种或多种可行技术用于制定修复方案。

若修复技术可行性分析结果表明，现有技术无法实现修复目标，需制定风险管控技术方案。

7 制定地下水修复和风险管控技术方案

7.1 制定技术路线

根据场地地下水修复和风险管控模式、技术筛选的结果，结合场地管理要求等因素，采用一种或多种技术优化组合集成制定技术路线。技术路线应反映地下水修复和风险管控的总体思路、方式、工艺流程等，还应包括工程实施过程中二次污染物的处理等。

7.2 确定工艺参数

地下水修复和风险管控技术的工艺参数通过总结实验室小试、现场中试和模拟分析结果确定，技术的工艺参数包括但不限于抽出或注入量、影响半径，修复材料的投加比、投加方式和浓度，阻隔措施的规模、材料、规格和安装要求等，地上处理单元的处理量和处理效率等。

7.3 估算工程量

根据技术路线，按照确定的单一技术或技术组合的方案，结合工艺流程和参数，估算不同方案的工程量。

7.4 估算费用和周期

应根据污染场地地下水修复和风险管控工程量进行费用估算。费用估算包括场地准备、工程设备设施购置安装费用、污染地下水处理费用、环境管理费用、人员安全防护费用、后期效果评估及后期环境监管费用等。

应根据工程量、工程设计、建设和运行时间、效果评估和后期环境监管要求等进行周期估算。

7.5 制定备选方案

根据水文地质条件、修复和风险管控目标、技术路线、工艺参数、工程量、费用和周期等，制定不少于 2 套的备选方案。

7.6 比选方案

对备选技术方案的主要技术指标、工程费用、环境及健康安全等方面进行比选，采用对比分析或矩阵评分等方法确定最优方案。

7.6.1 主要技术指标

结合场地地下水污染特征、修复和风险管控目标，从符合法律法规、效果、时间、成本和环境影响等方面，比较不同备选方案主要技术的可操作性、有效性。

7.6.2 工程费用

根据地下水修复和风险管控工程量，估算并比较不同备选方案所产生的费用，比较不同备选方案产生费用的合理性。

7.6.3 环境及健康安全

综合比较不同备选方案的二次污染排放情况以及对施工人员和周边人群健康和安全的影

7.7 制定环境管理计划

环境管理计划包括二次污染防治措施、环境监测计划和环境应急安全计划制定等内容。

7.7.1 二次污染防治措施

应对施工过程中废水、废气、噪声和固体废物等二次污染制定详细的防治措施，并分析论证其技术可行性、经济合理性、稳定运行和达标排放的可靠性。

7.7.2 环境监测计划

环境监测计划应包括工程实施过程的环境监理、二次污染物监控和效果评估中的环境监测。应根据确定的方案，结合场地污染特征和所处环境条件，有针对性地制定环境监测计划。相关技术要求按照 HJ 25.2 执行。

7.7.3 环境应急安全计划

为确保场地修复过程中施工人员与周边居民的安全，应根据国家和地方环境应急相关法律法规、标准规范编制环境应急安全计划，内容包括安全问题识别、需要采取的预防措施、突发事件应急措施、紧急情况隔离/保护措施、必须配备的安全防护装备和安全防护培训等。

7.8 编制技术方案

技术方案报告的文字应简洁和准确，并尽量采用图、表和照片等形式描述各种关键技术信息，以利于工程设计和施工方案编制。

技术方案应根据地下水污染场地的水文地质条件、地下水污染特征和工程特点，参考附录 B 全部或部分内容进行编制。

8 地下水修复和风险管控工程设计及施工

8.1 工程设计

地下水修复和风险管控工程设计根据工作开展阶段划分为初步设计、施工图设计，根据涉及专业不同划分为工艺和辅助专业设计。对于技术简单的小型项目，可根据实际情况按单一阶段考虑，直接进行施工图设计，地下水修复和风险管控工程设计参考 HJ 2050。

8.1.1 初步设计和施工图设计

8.1.1.1 初步设计

初步设计文件依据技术方案进行编制，应能满足编制施工图、采购主要设备及控制工程建设投资的需要。初步设计文件一般包括初步设计说明书、初步设计图纸和工程概算书：

- a) 初步设计说明书一般包括设计总说明、各专业设计说明、主要设备及材料表；
- b) 初步设计图纸由总图、工艺、建筑、结构、给排水、采暖通风、电气、自动化等各专业图纸组成，可根据地下水修复和风险管控工程实际情况增减。初步设计图纸的比例设置应使图纸能够清楚表达设计内容，便于装订成册；
- c) 工程概算书包括编制说明、编制依据、工程总概算表、单项工程概算表和其它费用概算表等。

8.1.1.2 施工图设计

施工图设计文件依据初步设计文件编制，应能满足编制工程预算、工程施工招标、设备材料采购、非标准设备制造、编制施工组织计划和工程施工的需要。施工图设计文件一般包括施工图设计说明书、施工图设计图纸、工程预算书：

- a) 施工图设计说明书包括各专业设计说明和工程量表；
- b) 施工图设计图纸由总图、工艺、建筑、结构、给排水、采暖通风、电气、自动化等各专业图纸组成，可根据地下水修复和风险管控工程实际情况增减；
- c) 工程预算书包括编制说明、工程设备材料表、工程总预算书、单项工程预算书、单位工程预算书、需要补充的估价表。

8.1.2 工艺和辅助专业设计

8.1.2.1 工艺设计

工艺设计依据包括场地地下水污染特征、水文地质条件，地下水修复和风险管控方案确定的工艺技术路线、范围及规模、目标、小试及中试试验结果等。地下水修复和风险管控技术主要设计参数可参考附录 C。工艺设计基本要求：

- a) 进行设计相关计算，如物料平衡、能量平衡、化学反应、物理吸附、生物反应、地下水渗流、溶质运移等，并编制设计计算书，绘制物料平衡图（PFD 图），设计计算可采用解析法，也可通过专业软件采用数值法求解；

- b) 根据计算书及物料平衡图，细化设计，内容包括系统中各处理单体的结构形式、尺寸和数量，并结构、材料和数量，主要设备及仪表、控制阀门的类型、材料、规格和数量，处理系统各部分及各处理单体之间连接管路的材料、规格和数量，各类修复材料如药剂、活性炭、阻隔材料等规格和用量，汇总整理设备、仪表清单和主要材料清单等；
- c) 根据单体设计结果，进行修复工程总平面设计，并根据需要进行地面处理系统的水力高程设计，设计工作开展过程中将单体设计和总图设计互相调整完善；
- d) 合理确定管线的位置、敷设和连接方式，完成管线总平面设计；
- e) 完善主要材料、设备清单，绘制工艺仪表流程控制图（PID图）。

8.1.2.2 辅助专业设计

辅助专业设计包括总图、建筑、结构、给排水、采暖通风、电气、自动化等，可根据具体地下水修复和风险管控工程情况增减，辅助专业设计在工艺设计基础上进行，为修复和风险管控工艺设计提供支持。

8.2 工程施工

8.2.1 施工准备

工程施工准备工作主要包括技术准备、施工现场准备、材料准备、施工机械和施工队伍准备等内容。根据设计施工图纸，综合考虑现场条件、施工企业的情况，编制施工组织设计，并完成相关审核。根据工艺的不同，应特别关注场地的地下管线情况、周边建构筑物情况、抽水及排水许可、用水、用电等问题。

8.2.2 施工过程

现场施工主要包括地下水修复和风险管控系统建设安装、调试等，需严格按照工程设计图纸和相关技术规范文件开展。施工过程中做好工程动态控制工作，通过落实质量安全保证措施、工程建设安装成本、关注工程施工进度，保证质量、进度、成本、安全目标的全面实现。施工过程发现设计问题，经建设、监理单位同意，由设计单位进行设计变更。

地下水修复和风险管控工程施工过程中应根据工艺的不同，监测地下水水位和水质，分析地下水流场和地下水污染羽扩散情况等。

8.2.3 环境管理与二次污染防治

根据国家和地方环境管理法律法规，结合工程施工工艺特点以及工程周边环境，识别施工中的大气、水、噪声、固体废物等环境要素排放，确定环境管理控制目标，建立环境管理体系，实施环境管理计划，达到环境管理标准。

9 地下水修复和风险管控工程运行及监测

9.1 工程运行维护

为确保地下水修复和风险管控工程的有效运行，应对工程运行进行管理，对设备设施进行维护保养。

9.1.1 维护方案编制

地下水修复和风险管控工程应建立设备台账，并编制相关运行及维护方案。内容包括：系统运行管理手册、设备操作手册、设备维护保养手册、安全运行管理制度、设备检修计划等。当涉及地下水修复药剂、阻隔材料、二次污染物处理等材料使用时，应建立材料进场及试验台账，并存储及使用台账。

9.1.2 维护内容

- a) 设备设施运行记录，包括计量仪器仪表读数、材料使用情况等，记录应及时、准确、完整；
- b) 设备设施检查及维护保养；
- c) 设备设施运行不正常时，及时检修、更换或调整；
- d) 对系统运行过程中可能产生环境和安全事故的单元进行定期检查。

9.1.3 设备维护保养

设备的维护保养包括设备检查维修、设备清洁、润滑及保养、易损件的更换，设备计划检修和计量设备的精度检测等。

9.2 过程监测

9.2.1 运行过程中地下水监测

运行过程中地下水监测内容应反映污染羽水平和垂向的分布及变化特征，以及地下水污染物迁移对周边环境敏感点的影响。监测井应充分利用场地调查评估阶段设置的监测井。

9.2.1.1 监测井布设要求

- a) 修复监测井布设：
 - 1) 根据场地水文地质条件、地下水污染特征和采取的修复技术进行布设，分为对照井、污染羽内部的监测井和控制井；
 - 2) 对照井设置在污染羽地下水流向上游，应反映区域地下水质量；
 - 3) 控制井设置于地下水污染羽边界的位置，一般布设在污染羽的上游、下游以及垂直于径流方向污染羽两侧的边界位置。当污染地下水可能影响临近含水层时，需针对该含水层设置监测井，以评估修复工程对该含水层的影响；当周边存在敏感点时，需在地下水污染羽边缘和敏感点之间设置监测井；
 - 4) 内部监测井设置于污染羽内部，反映修复过程污染羽浓度变化情况。内部监测井可结合环境调查结果，间隔一定距离，按三角形或四边形布设；
 - 5) 监测井数量需满足污染羽特征刻画、工程运行状况分析的要求。对照井至少设置 1 个，控制井至少设置 5 个，内部监测井至少设置 2 个；
 - 6) 当含水层厚度大于 6 m 时，应分层设置监测井。
- b) 风险管控监测井布设：根据场地水文地质条件、地下水污染特征和采取的风险管控技术，一般在风险管控范围的上游、下游，以及潜在二次污染区域、风险管控薄弱

位置和周边环境敏感点设置监测井。监测井结构、位置、数量要充分满足用于评估风险管控效果的监测和采样要求。

9.2.1.2 监测指标

工程运行期间需对地下水水位、水质、次生污染物、注入药剂特征参数、阻隔性能参数等进行监测。

- a) 水质监测包括污染物浓度监测、非水相液体的分布情况监测等；
- b) 次生污染物监测主要是对地下水原位修复过程中产生的对环境有不良影响的污染物进行监测；
- c) 注入药剂特征参数主要包括药剂浓度以及药剂注入导致地下水水质变化的参数，如pH值、温度、电导率、总硬度、氧化还原电位、溶解氧等；
- d) 阻隔性能监测参数取决于阻隔系统的类型，如帷幕墙、泥浆墙技术需监测墙体地下水流向上游及下游的监测井水位、目标污染物浓度。

9.2.1.3 监测频次

工程运行期间的地下水监测应包括地下水修复和风险管控工程运行的完整周期。监测频次应根据工程运行阶段、效果、监测指标种类合理确定。

- a) 工程运行初期应采用较高的监测频次，稳定运行期及后期可适当降低监测频次。一般要求工程运行初期每半个月监测1次；运行中期每月监测1次；运行后期可适当增加监测时间间隔，修复工程运行监测时间间隔一般不大于3个月，风险管控工程运行监测频次取决于风险管控技术的类型；
- b) 当修复或风险管控效果低于预期、局部区域修复和风险管控失效、污染羽扩散等不利情况时，应适当提高监测频次。

9.2.2 二次污染物监测

二次污染物监测需要制定监测方案，内容包括布点方案、监测频次、监测指标等。监测方案应满足地下水修复和风险管控工程环境影响评价报告提出的环境监测要求。

9.3 趋势预测

根据工程运行过程中的地下水监测结果，开展趋势预测，判断技术方案的有效性和目标可达性。可依据趋势预测结果对技术方案进行调整和优化。获取过程监测数据后及时进行趋势预测，可对全部或部分参数开展趋势预测，如对目标污染物浓度进行趋势预测。可利用图表方式、数值模拟和统计学等方法进行趋势预测。

9.4 工程运行状况分析

根据工程运行过程中的地下水监测数据及趋势预测结果，开展工程运行状况分析，主要分析工程运行阶段的有效性、目标可达性、环境保护措施和经济可行性等，判断技术方案、工程设计、施工和运行有无调整的必要性。

10 地下水修复和风险管控效果评估

10.1 评估布点

10.1.1 评估范围

评估范围包括地下水修复和风险管控范围的上游、内部和下游，以及可能涉及的两侧区域等潜在的二次污染区域。

10.1.2 采样节点

a) 修复效果评估采样节点：初步判断地下水中污染物浓度稳定达标时，且地下水系统达到稳定状态，可开始修复效果评估。原则上采用修复工程运行监测数据进行修复达标初判，至少需要连续 4 个批次的季度地下水水质监测数据。

- 1) 若地下水中污染物均未检出或浓度低于修复目标值，则初步判断达到修复目标；
- 2) 若部分浓度高于修复目标值，可采用均值检验和趋势检验方法分析污染物浓度趋势，当均值的置信上限低于修复目标值且浓度稳定或持续降低时，则初步判断达到修复目标。

b) 风险管控效果评估采样节点：初步判断地下水污染扩散得到控制，地下水污染暴露途径得到阻断，且地下水系统达到稳定状态，可开始风险管控效果评估。原则上采用工程设施完工后的监测数据进行风险管控达标初判，至少需要连续 8 个批次的季度地下水水质监测数据。若地下水风险管控范围下游的地下水中污染物浓度保持稳定或持续降低，地下水污染羽扩散得到控制，则初步判断达到风险管控目标。

10.1.3 布点数量与位置

10.1.3.1 地下水修复布点数量与位置

原则上修复效果评估范围上游至少设置 1 个采样点，内部至少设置 3 个采样点，下游至少设置 2 个采样点。原则上修复效果评估范围内部采样网格不大于 $80\text{m} \times 80\text{m}$ ，存在或可能存在非水相液体区域，污染物浓度高的区域采样网格不大于 $40\text{m} \times 40\text{m}$ 。地下水采样点原则上应优先设置在修复设施运行薄弱区、地质与水文地质条件不利的区域。

可充分利用地下水环境调查评估、工程运行阶段设置的监测井，但原监测井数量不应超过效果达标评估时监测井总数的 60%。

10.1.3.2 地下水风险管控布点数量与位置

地下水监测井应设置在风险管控范围的上游、内部、下游，可能涉及的潜在二次污染区域，风险管控的薄弱位置，地下水污染羽边缘与周边环境敏感点之间的位置，原则上不少于 6 个。

可充分利用地下水环境调查评估、工程运行阶段设置的监测井，但原监测井数量不应超过效果达标评估阶段监测井总数的 60%。

10.1.4 采样周期和频次

- a) 修复效果评估采样周期和频次：应根据地下水修复方式及场地水文地质条件确定，如水力坡度、渗透系数和其它因素等。修复达标评估阶段最少采集 8 个批次的样品，原则上采样频次为每季度一次，两个批次之间间隔不得少于一个月。对于地下水流场变化较大的场地，可适当提高采样频次。发现地下水水质异常时，应加大取样频次，查明原因及时进行补救。
- b) 一般地下水风险管控效果评估阶段需采集 16 个批次的地下水样品数据，采样周期至少 8 年或达到设计使用年限，建议每半年采集一次。发现地下水水质异常时，应加大取样频次，查明原因及时进行补救。

10.2 效果评估

10.2.1 地下水修复效果评估

- a) 评估标准值：地下水修复效果评估标准值为修复方案中目标污染物的修复目标值。化学氧化/还原修复、微生物修复等技术的潜在次生污染物的评估标准值，原则上应根据修复技术方案中的可行性分析结果，选择适用标准或者利用风险评估方法进行确定，风险评估按照 HJ 25.3 执行。
- b) 评估方法：原则上每口监测井中的检测指标均持续稳定达标，方可认为地下水达到修复效果。可采用趋势分析法进行持续稳定达标判断，在 95% 的置信水平下，趋势线斜率显著大于 0，说明地下水污染物浓度呈现上升趋势；若趋势线斜率显著小于 0，说明地下水污染物浓度呈现下降趋势；若趋势线斜率与 0 没有显著差异，说明地下水污染物浓度呈现稳态。地下水中污染物浓度呈现稳态或者下降趋势，可判断地下水达到修复效果。
- c) 修复极限判断与残留污染物风险评估：当初步判断地下水污染物无法达到地下水修复目标，但判断地下水已达到修复极限，可在实施控制措施的前提下，对残留污染物进行风险管控。

10.2.2 地下水风险管控效果评估

- a) 评估标准：风险管控工程性能指标应能满足设计要求或不影响预期效果。风险管控措施下游地下水中污染物浓度应保持稳定或持续下降，地下水污染羽扩散得到控制。
- b) 评估方法：若工程性能指标和污染物指标均达到评估标准，则判断风险管控达到效果，可继续开展运行与维护。若工程性能指标和污染物指标未达到评估标准，则判断风险管控未达到效果，须对风险管控措施进行优化或对风险管控设施进行修理。

10.3 后期环境监管建议

存在下列情景下，应开展后期环境监管：

- a) 实施风险管控的地下水污染场地；
- b) 地下水中污染物浓度未达到 GB/T 14848 中地下水使用功能对应标准值时的地下水污染场地。

后期环境监管方式包括长期环境监测与制度控制，两种方式可结合使用。原则上后期环境监管直至地下水中污染物浓度分别达到 GB/T 14848 中地下水使用功能对应标准值。

当开展长期环境监测时，需制定地下水水质监测计划，开展地下水监测，监测井位置应优先考虑修复效果评估阶段污染物浓度高的区域、污染羽下游及敏感点所处位置，监测时间应不少于 2 年，每个季度至少监测 1 次。

制度控制包括限制场地使用方式、限制地下水利用方式、通知和公告场地潜在风险、制定限制进入或使用条例等方式，多种制度控制方式可同时使用。

10.4 效果评估报告编制

效果评估报告应当包括地下水修复和风险管控工程概况、环境保护措施落实情况、效果评估布点与采样、检测结果分析、效果评估结论及后期环境监管建议等内容。参考附录 D 全部或部分內容编制地下水修复和风险管控效果评估报告。

附录 A

(资料性附录)

地下水修复和风险管控技术适用性

技术分类	技术名称	优点	缺点	适用的目标污染物	场地适用性	技术成熟度	效率	成本	时间	环境风险
异位修复	抽出处理技术	对于地下水污染物浓度较高、地下水埋深较大的污染场地具有优势；对污染地下水的早期处理见效快。设备简单，施工方便	不适用于渗透性较差或存在非水相液体的含水层；对修复区域干扰大；能耗大	适用于多种污染物	适用于渗透性较好的含水层、污染范围大、地下水埋深较大的污染场地	国外已广泛应用，国内已有工程应用	初期高，后期低	初期中等，中后期高	处理周期较长，数年到数十年	低
原位修复	微生物修复技术	对环境影响较小	部分地下水环境不适宜微生物生长	适用于易生物降解的有机物	适用于大面积污染区域的治理	国外已广泛应用，国内已有工程应用	中	低	处理周期较长，数年到数十年	中
原位修复	植物修复技术	施工方便，对环境影响较小	效果受地下水埋深、污染物性质和浓度影响较大；需考虑植物的后续处理	适用于重金属、特定的有机污染物	适用于地下水埋深较浅的污染场地	实际应用较少	低	中	处理周期较长，数年到数十年	低
原位修复	地下水曝气技术	对修复场地干扰小；设备简单，施工方便	不适用于低渗透性的多孔介质区域、承压含水层的污染物治理，不适用于非挥发性的污染物；可能导致地下水中污染羽扩散；气体可能会迁移和释放到地表，造成二次污染	适用于苯系物和氯代烃等	适用于具有较大饱和厚度和埋深的含水层	国外已广泛应用，国内已有工程应用	中	中	处理周期较短，数月数年	中

技术分类	技术名称	优点	缺点	适用的目标污染物	场地适用性	技术成熟度	效率	成本	时间	环境风险
原位修复	化学氧化技术	反应速度快，修复时间短	场地水文地质条件可能会限制化学物质的传输；受腐殖酸含量、还原性金属含量、土壤渗透性、pH 值变化影响较大	适用于石油烃、苯系物、酚类、甲基叔丁基醚、氯代烃、多环芳烃、农药等	适用于渗透性较好的多孔介质区域	国外已广泛应用，国内已有工程应用	高	高	处理周期较短，数月 to 数年	中
原位修复	化学还原技术	反应速度快，修复时间短	场地水文地质条件可能会限制化学物质的传输；一些含氯有机污染物的降解产物有一定的毒性；部分污染物的还原效果不稳定	适用于重金属类和氯代烃等	适用于渗透性较好的多孔介质区域	国外已广泛应用，国内已有工程应用	高	高	处理周期较短，数月 to 数年	高
原位修复	可渗透反应墙技术	反应介质消耗较慢，具备几年甚至几十年的处理能力	可渗透反应墙填料需要适时更换；需要对地下水的 pH 等进行控制；可能存在二次污染	适用于苯系物、石油烃、氯代烃、重金属等	适用于潜水含水层，对反应墙中沉淀和反应介质的更换、维护、监测要求较高	国外已广泛应用，国内已有工程应用	中	中	处理周期较长，数年到数十年	高
原位修复	双/多相抽提技术	可处理易挥发、易流动的非水相液体	效果受场地水文地质条件和污染物分布影响较大；需要对抽提出的气体和液体进行后续处理	适用于苯系物、石油烃、氯代烃等	不适用于渗透性差或者地下水水位变动较大的场地	国外已广泛应用，国内已有工程应用	高	高	处理周期较短，数月 to 数年	中
原位修复	热处理技术	修复时间短、修复效率高	设备及运行成本较高，施工及运行专业化程度要求高	适用于石油烃和氯代烃等	适用于低渗透性的多孔介质区域	国外已广泛应用，国内已有工程应用	高	高	处理周期较短，数月 to 数年	中
原位修复	电动修复技术	适用于低渗透性的多孔介质区域	易出现活化极化、电阻极化和浓差极化等情况，降低修复效率	适用于重金属、石油烃和重质非水相液体等	适用于低渗透性的多孔介质区域	工程应用较少	高	高	处理周期较短，数月 to 数年	低

技术分类	技术名称	优点	缺点	适用的目标污染物	场地适用性	技术成熟度	效率	成本	时间	环境风险
原位修复	监测自然衰减技术	费用低，对环境影响较小	需要较长监测时间	适用于易降解的有机物	适用于污染程度较低、污染物自然衰减能力较强的区域	国外已广泛应用	低	低	处理周期较长，需要数年或更长时间	低
风险管控	阻隔技术	施工方便，使用的材料较为普遍，可有效将污染物阻隔在特定区域中	阻隔效果受地下水中 pH，污染物类型、活性、分布，墙体的深度、长度、宽度和场地水文地质条件等影响	适用于三氮、重金属和持久性有机污染物	适用于地下水埋深较浅的区域	国外已广泛应用，国内已有工程应用	高	低	处理周期较长，需要数年或更长时间	低
风险管控	制度控制	费用低，环境影响小	地下水污染扩散风险依旧存在；时间较长	适用于多种污染物	适用于需减少或阻止人群对地下水中污染物暴露的场地	国外已广泛应用，国内已有应用	低	低	处理周期较长，需要数年或更长时间	低

附录 B

(资料性附录)

地下水修复和风险管控技术方案编制提纲

1 总论

- 1.1 任务由来
- 1.2 编制依据
- 1.3 编制内容

2 场地问题识别

- 2.1 场地基本信息
- 2.2 场地地下水污染现状
- 2.3 风险评估

3 地下水修复和风险管控模式选择

- 3.1 确认场地条件
- 3.2 构建场地概念模型
- 3.3 确定地下水修复和风险管控目标
- 3.4 确定地下水修复和风险管控模式

4 地下水修复和风险管控技术筛选

- 4.1 技术初步筛选
- 4.2 技术可行性分析
- 4.3 技术确定

5 地下水修复和风险管控方案制定

- 5.1 技术路线
- 5.2 工艺参数
- 5.3 工程量估算
- 5.4 费用和周期估算
- 5.5 方案比选

6 环境管理计划

- 6.1 环境影响分析
- 6.2 环境保护措施
- 6.3 监测计划
- 6.4 环境应急安全计划

7 成本效益分析

- 7.1 修复费用
- 7.2 环境效益、经济效益和社会效益

8 施工进度安排

9 结论

附录 C

(资料性附录)

地下水修复和风险管控技术主要设计参数

技术分类	技术名称	抽出井结构	注入/回灌/加热井/电极结构	监测井结构	抽出/注入/回灌/加热影响半径	修复药剂投加比	抽出水量/水处理量	抽出气量/尾气处理量	抽出负压	注入/回灌水/药剂剂量	注入气量	注入压力	反应时间/降解速率	活性炭用量	污泥产量	目标温度	系统功率	墙体几何参数	墙体材料配比	墙体渗透性
异位修复	抽出处理技术	√	※	√	√	×	√	×	×	※	×	※	√	※	※	×	※	×	×	×
原位修复	微生物修复技术	×	√	√	√	√	×	×	×	√	×	√	√	×	×	×	×	×	×	×
原位修复	植物修复技术	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×
原位修复	地下水曝气技术	※	√	√	√	×	※	※	※	×	√	√	√	※	※	×	※	×	×	×
原位修复	化学氧化技术	×	√	√	√	√	×	×	×	√	×	√	√	×	×	×	※	×	×	×
原位修复	化学还原技术	×	√	√	√	√	×	×	×	√	×	√	√	×	×	×	※	×	×	×
原位修复	可渗透反应墙技术	×	×	√	×	※	×	×	×	×	×	×	√	※	×	×	×	√	√	√
原位修复	双/多相抽提技术	√	※	√	√	×	√	※	√	×	×	×	√	※	※	×	※	×	×	×
原位修复	热处理技术	√	√	√	√	×	√	√	√	×	×	×	√	※	※	√	√	×	×	×
原位修复	电动修复技术	√	√	√	√	×	√	×	※	×	×	×	√	※	※	×	√	×	×	×
原位修复	监测自然衰减技术	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×
风险管控	阻隔技术	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	√	√	√

技术分类	技术名称	抽出井结构	注入/回灌/加热井/电极结构	监测井结构	抽出/注入/回灌/加热影响半径	修复药剂投加比	抽出水量/水处理量	抽出气量/尾气处理量	抽出负压	注入/回灌水/药剂注入量	注入气量	注入压力	反应时间/降解速率	活性炭用量	污泥产量	目标温度	系统功率	墙体几何参数	墙体材料配比	墙体渗透性
注：√ 需要，※ 可能需要，× 不需要。																				

附录 D

(资料性附录)

地下水修复和风险管控效果评估报告提纲

1 项目背景

简要描述污染场地基本信息，调查评估及修复和风险管控的时间节点与概况、相关批复情况等。简明列出以下信息：项目名称、项目地址、业主单位、调查评估单位、技术方案编制单位、设计单位、施工运行单位、工程监理单位、环境监理单位、修复或风险管控效果评估单位。

2 工作依据

2.1 法律法规

2.2 标准规范

2.3 项目文件

3 场地概况

3.1 场地调查评价结论

3.2 修复和风险管控技术方案

3.3 修复和风险管控实施情况

3.4 环境管理计划实施情况

3.5 场地概念模型

4 布点与采样方案

4.1 评估范围

4.2 采样节点、周期和频次

4.3 布点数量与位置

4.4 检测指标

4.5 评估标准值

5 现场采样与实验室检测

5.1 样品采集

5.2 实验室检测

6 效果评估

6.1 检测结果分析

6.2 修复和风险管控效果评估

7 结论和建议

7.1 结论

7.2 建议