

附件 3

《污染场地地下水修复技术导则  
(征求意见稿)》编制说明

《污染场地地下水修复技术导则》编制组  
二零一八年十二月

# 目 录

1 项目背景.....	32
1.1 任务来源.....	32
1.2 工作过程.....	32
2 标准制订的必要性分析.....	33
2.1 场地环境管理形势要求.....	33
2.2 国家及生态环境主管部门的相关要求.....	34
2.3 地下水修复和风险管控工程开展的迫切需求.....	34
3 国内外相关标准情况.....	35
3.1 国外相关标准情况.....	35
3.2 国内相关标准情况.....	38
4 污染场地地下水修复和风险管控概况.....	39
4.1 国外地下水修复和风险管控概况.....	39
4.2 国内地下水修复和风险管控概况.....	40
5 标准编制的原则和技术路线.....	40
5.1 编制原则.....	40
5.2 编制依据.....	40
5.3 适用范围.....	41
5.4 技术路线.....	41
6 标准的层次结构.....	42
7 标准主要技术内容和依据.....	43
7.1 适用范围.....	43
7.2 规范性引用文件.....	43
7.3 术语和定义.....	43
7.4 基本原则和工作程序.....	45
7.5 选择地下水修复和风险管控模式.....	48
7.6 筛选地下水修复和风险管控技术.....	52
7.7 制定地下水修复和风险管控技术方案.....	57
7.8 地下水修复和风险管控工程设计及施工.....	60
7.9 地下水修复和风险管控工程运行及监测.....	64
7.10 地下水修复和风险管控效果评估.....	68
8 与国内外同类标准对比与分析.....	75
9 对实施本标准的建议.....	75
10 参考文献.....	76

## 1 项目背景

### 1.1 任务来源

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，完善污染场地环境保护系列标准，在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下，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等单位起草编制了《污染场地地下水修复技术导则（征求意见稿）》。

### 1.2 工作过程

2011年11月至2012年1月，开展污染场地地下水修复和风险管控调研与评估工作。收集国内外污染场地地下水修复和风险管控案例，总结污染场地地下水修复和风险管控的经验教训，进行效果与技术经济分析。对地下水修复和风险管控技术进行调研，总结技术选择要点、适用场地条件、应用风险和成本，形成《污染场地地下水修复和风险管控调研与评估报告》。

2012年2月至4月，编制完成地下水污染修复（防控）技术培训材料，组织、实施地下水修复和防控技术培训。

2012年5月至7月，研究典型场地地下水修复（防控）目标确定方法、技术筛选方法、工程设计与技术经济评估要点，制定《地下水污染修复（防控）工作指南（讨论稿）》框架。

2012年8月至12月，选择地下水重金属污染典型案例，编制《典型地下水重金属污染修复（防控）技术方案》，完善《地下水污染修复（防控）工作指南（讨论稿）》。

2013年1月至9月，选择地下水有机物污染典型案例，编制《典型地下水有机物污染修复技术方案》，进一步完善《地下水污染修复（防控）工作指南（讨论稿）》。

2014年2月，原环境保护部污染防治司组织召开征求意见会，听取了科技司的意见，对《地下水污染修复（防控）工作指南（讨论稿）》相关内容进行了修改和完善，形成了《地下水污染修复（防控）工作指南（征求意见稿）》。

2014年3月至6月，原环境保护部办公厅印发《地下水污染修复（防控）工作指南（征求意见稿）》，征求各省（区、市）环保厅局和各有关单位意见，根据反馈意见，对《地下水污染修复（防控）工作指南（征求意见稿）》相关内容进行了修改和完善。

2014年11月，原环境保护部办公厅印发《关于印发〈地下水环境状况调查评价工作指南（试行）〉等6个工作指南的通知》（环办〔2014〕99），正式发布《地下水污染修复（防控）工作指南（试行）》。

2014年12月，编制组在《地下水污染修复（防控）工作指南（试行）》的基础上，根据HJ 25.1、HJ 25.2、HJ 25.3和HJ 25.4等标准，编制完成了《污染场地地下水修复技术导

则（讨论稿）。原环境保护部污染防治司和科技标准司听取了《污染场地地下水修复技术导则（讨论稿）》编制工作情况，建议由编制组征求污染场地环境保护系列标准参与单位和相关专家的意见。

2015年1月，邀请污染场地环境保护系列标准参与单位和相关专家，召开专家咨询会，根据相关专家意见，进一步完善《污染场地地下水修复技术导则（讨论稿）》。

2015年10月，编制组根据《地下水水质标准》（DZ/T 0290），对《污染场地地下水修复技术导则（讨论稿）》的相应内容进行修改。

2017年9月，编制组根据重金属地下水修复工程的实践，进一步完善《污染场地地下水修复技术导则（讨论稿）》。

2018年1月，编制组根据《地下水质量标准》（GB/T 14848），对《污染场地地下水修复技术导则（讨论稿）》的相应内容进行修改。

2018年3月，编制组根据生态环境部原水环境管理司、原土壤环境管理司和原科技标准司要求，编制《污染场地地下水修复技术导则（征求意见稿）》。

2018年6月，征求原国土资源部和水利部的意见，按照意见进一步完善《污染场地地下水修复技术导则（征求意见稿）》。

2018年11月，土壤生态环境司组织召开《污染场地地下水修复技术导则（征求意见稿）》技术审查会，编制组根据专家技术审查会建议，进一步完善导则。

2018年12月，生态环境部批准将制定《污染场地地下水修复技术导则》纳入国家环保标准制修订项目计划，按标准相关程序开展相应工作。

## 2 标准制订的必要性分析

### 2.1 场地环境管理形势要求

随着我国工业化和城镇化不断推进，部分工业固体废物未得到有效综合利用或处置，铬渣和锰渣堆放场渗漏污染地下水事件时有发生；石油化工行业勘探、开采及生产等活动显著影响地下水水质，加油站渗漏污染地下水问题日益显现；部分工业企业通过渗井、渗坑、裂隙和溶洞非法排放、倾倒工业废水，造成地下水污染。如果这些场地及周边地下水具有饮用或者农田灌溉功能，可能会影响周边人群健康和粮食安全。由于地下水具有流动性，若发现不及时，可能造成更大面积的地下水污染，引发严重后果，因此必须对这些污染场地地下水进行修复和风险管控。

目前我国还没有针对污染场地的地下水修复和风险管控的技术标准，难以科学系统地指导污染场地地下水修复和风险管控工作。在国外，曾经因为缺乏规范的污染场地地下水修复和风险管控技术要求，导致场地开发再利用过程中出现过地下水污染事件。目前我国场地环境管理工作已经取得一定进展，出台了场地环境调查、监测，污染场地风险评估和污染场地土壤修复等标准，但还缺少针对污染场地地下水修复的技术导则。因此，制定《污染场地地

下水修复技术导则》是十分必要的。

## 2.2 国家及生态环境主管部门的相关要求

2011年国务院批复的《全国地下水污染防治规划（2011—2020年）》中明确提出，到2020年，全面监控典型地下水污染源，科学开展地下水修复工作，使地下水污染风险得到有效防范，并建成地下水污染防治体系。2013年原环境保护部、原国土资源部、住房和城乡建设部和水利部印发的《华北平原地下水污染防治工作方案》中指出要适时提出地下水污染修复方案，在条件成熟和污染严重的地区开展地下水重金属和有机污染修复示范，探索地下水污染控制和修复的技术和方法。2015年4月，国务院印发的《水污染防治行动计划》明确要求，公布京津冀等区域内环境风险大、严重影响公众健康的地下水污染场地清单，开展修复试点。

《水污染防治法》明确规定，“县级以上地方人民政府应当组织环境保护等部门，对饮用水水源保护区、地下水型饮用水源的补给区及供水单位周边区域的环境状况和污染风险进行调查评估，筛查可能存在的污染风险因素，并采取相应的风险防范措施。”“有下列行为之一的，由县级以上地方人民政府环境保护主管部门责令停止违法行为，限期采取治理措施，消除污染，处以罚款。”“未采取防渗漏等措施，或者未建设地下水水质监测井进行监测的；加油站等的地下油罐未使用双层罐或者采取建造防渗池等其他有效措施，或者未进行防渗漏监测的；未按照规定采取防护性措施，或者利用无防渗漏措施的沟渠、坑塘等输送或者存贮含有毒污染物的废水、含病原体的污水或者其他废弃物的。”

《中华人民共和国土壤污染防治法》明确规定，“对建设用地土壤污染风险管控和修复名录中需要实施修复的地块，土壤污染责任人应当结合土地利用总体规划和城乡规划编制修复方案，报地方人民政府生态环境主管部门备案并实施。修复方案应当包括地下水污染防治的内容。”

为落实上述要求，需要制定污染场地地下水修复技术导则，明确地下水污染修复和风险管控的技术要求，为我国场地地下水修复和风险管控工作提供支撑。

## 2.3 地下水修复和风险管控工程开展的迫切需求

随着国家相关污染场地环境管理通知和标准的发布，我国的污染场地修复产业发展迅速。2010年从事场地调查与修复的企业不到20家，2013年达到370余家，2015年快速增加到1000余家。地下水修复和风险管控技术也从单一的抽出处理发展到多种技术组合联用。由于缺乏较为完善的技术标准支撑，场地地下水修复过程中遇到的问题也逐渐凸显出来。我国的污染场地修复产业进入快速发展期，相应的污染场地管理标准体系也在不断的制定与完善中。2014年7月，原环境保护部发布了场地环境系列导则，包括《场地环境调查技术导则》（HJ 25.1）《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2）《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3）《污染场地土壤修复技术导则》（HJ 25.4），未涉及场地地下水修复相关内容。在《污染场

地土壤修复技术导则》(HJ 25.4) 中提及地下水修复技术导则另行公布。

2014 年 11 月, 原环境保护部办公厅印发了《地下水污染修复(防控)工作指南(试行)》, 指南虽然涉及地下水修复, 但是文件的约束性及规范性弱于行业标准, 因此迫切需要出台地下水修复技术导则, 用以指导污染场地地下水修复和风险管控工程。

### 3 国内外相关标准情况

#### 3.1 国外相关标准情况

国外发达国家在长期的地下水环境保护过程中, 形成了较为完备的地下水环境保护法律体系和管理机制, 制定了完善的地下水污染修复技术规范, 可为我国污染场地地下水修复和风险管控工作的开展和相关技术标准的制定提供借鉴。

##### 3.1.1 美国

###### 3.1.1.1 美国环保局 《超级基金法污染地下水修复行动指南》

1988 年, 美国环保局针对超级基金场地地下水修复方案选择过程中涉及的政策、决策方法和重点问题发布了指南。规定在开展可行性研究之前, 需制定场地管理计划, 确定修复时间进程, 在进程中根据实际情况不断修订修复方案。修复目标根据地下水功能确定, 如有多种污染物, 应考虑总体影响。

若地下水具有饮用功能, 地下水修复目标值应依据饮用水健康标准确定, 需符合最大污染物浓度(MCL)或州确定的标准; 如没有对应的最大污染物浓度, 可以依据污染物浓度最高目标值(MCLGs)等联邦或州确定的标准。无论采用哪种标准, 都应进行健康风险评估。如果地下水流入生物栖息地, 修复目标值应基于对水生生物的保护。

###### 3.1.1.2 美国能源局 《针对超级基金法及资源保护和恢复法的地下水修复指南》

1995 年, 美国能源局在美国环保局相关规定的基础上, 整合《超级基金法案》和《资源保护和恢复法》的相关要求, 重点关注受非水相液体污染的地下水, 发布了《针对超级基金法及资源保护和恢复法的地下水修复指南》。该指南指出, 《超级基金法案》和《资源保护和恢复法》都将修复流程分为踏勘、场地调查、可行性研究、研究报告编制、地下水修复和修复评估等。

###### 3.1.1.3 美国环保局 《场地清理达标评估方法卷 2——地下水》

1992 年, 美国环保局针对地下水污染清理达标评估发布了指南。本指南介绍了达标评估的工作程序和评估方法, 并且强调了统计方法对于评估的重要性。本指南提出: 在验收开始前, 必须确定场区地下水流场已经恢复到稳定状态, 包括天然的水位和径流模式; 采样和分析计划需要与选取的统计分析方法配合制定。本指南重点介绍了达标评估过程中的统计方法, 包括条件假设、误差分析、边界界定、目标和地下水状态确定、修复终止判断、地下水

稳定性判断和清理达标评估。

#### 3.1.1.4 美国环保局 《地下水修复可行性评估指南》

收集现场资料应包括水文地质信息和污染状况等，进而分析污染羽的迁移情况，评估潜在治理技术的设计参数，并分析技术的不确定性。在确立修复目标时，要考虑最大污染浓度、基于风险的致癌剂量、参考剂量、水质标准等。建立备选修复技术清单时，要考虑修复行动的目标，包括修复时间和修复范围。一般可选的修复方法包括主动修复、污染源阻隔及制度控制、采取有限的主动措施或不采取主动措施。另外，还应考虑待修复的地下水是否为饮用水源。

#### 3.1.1.5 美国环保局 《修复工程设计/修复行动手册》

1995 年，美国环保局发布了《修复工程设计/修复行动手册》。该手册介绍了开展修复工程可能涉及的所有事项与流程，旨在指导参与人员如何有效地开展修复设计和行动，并针对过程中可能出现的问题提出了参考性处理意见，如组建技术队伍、确定工程进度、估算费用、协调政府关系、签订合同等。

#### 3.1.1.6 美国环保局 《超级基金地下水污染修复建议流程》

2011 年，美国环保局发布了《超级基金地下水污染修复建议流程》。该技术文件总结了美国有关地下水污染修复的指导性文件，制定了修复流程图，将地下水修复分为修复方案制定、修复工程设计与施工、运行及监测、评估与优化、修改修复方案（如有需要）和记录修复完成等部分。如现有方案无法满足修复目标，需要修改修复方案或修复目标，并考虑修改方案对修复范围、效果和成本的影响。

#### 3.1.1.7 美国环保局 《超级基金场地关闭程序》

本指南适用于国家优先治理污染场地顺序名单（NPL）中的场地，主要描述了在名单中的场地关闭时需要考虑的关键原则和目标，总结了超级基金场地关闭的修复设施完成、建设工程完成、场地完成、场地删除和局部删除等四个关键节点，其中修复设施完成指场地某个特定独立单元的污染修复工程完成，对设施是否正常运行的观察期一般小于一年，地下水修复包括地下水风险管控及地下水修复两种类型。建设工程完成指的是整个场地范围的建设工程完成；场地完成即场地修复已经达到修复目标，对人体和环境不产生风险；场地删除和局部删除指当修复场地达到修复标准后，一般还需进行 5 年的跟踪监测，确定稳定达标时，可将其从 NPL 中删除。在整个修复期间，可将场地已稳定达标的部分区域或污染物提前从 NPL 中删除。

### 3.1.2 英国

#### 3.1.2.1 英国环保局 《污染场地管理程序》

本指南中明确规定了修复效果验收的重要性，将验收定义为基于定量分析证明风险已经

降低到修复标准和目标的过程，并对验收计划和验收报告做出了要求，需要制定通过收集数据来证实修复是否达到目标的验收计划；通过提供修复行动的完整记录和验收过程收集的数据，制定验收报告，证明修复是否达到目标和标准。

### 3.1.2.2 英国环保局 《修复目标方法论》

该指南介绍了基于阶段性风险评估和管理，通过持续数据收集和分析、结构性决策及成本效益分析，制定修复目标。修复目标制定步骤为：构建初始场地概念模型，识别所有的污染物及其迁移转化途径；通过场地特征进一步完善模型；确定合规点的污染浓度必须低于限值，以保护受体。合规点可以是受体自身或者邻近区域；确定合规点的目标污染物浓度时，需考虑环境本底值、地下水现状和潜在使用功能及相关环境标准，在每个阶段确定一个修复目标；确定污染源是否会导致受体污染物浓度超过目标污染物浓度；如果监测数据显示场地污染物浓度大于目标污染物浓度，判断是否需进行更详细的风险评估或直接开展修复。

### 3.1.3 德国

2002年，德国政府发布了《土壤和地下水保护工作指南》，针对联邦所属的不动产的土壤和地下水污染的识别、调查和修复，规定了地下水污染修复操作流程，指导相关文件的编制。

### 3.1.4 澳大利亚

2009年，澳大利亚环保局发布了《地下水污染评价和修复指南》。该指南介绍了地下水污染评价与修复。其中地下水污染评估包括：开展风险评估判断场地是否存在地下水污染；确定地下水污染的类型和程度，包含构建场地概念模型、功能价值评估和健康/环境风险评估等；地下水污染修复包括确定该场地适用的修复方案，考虑到修复的限制性，若将地下水修复至原有功能不现实时，确定风险管控目标，基于风险评估将地下水修复到必要的程度。

### 3.1.5 日本

1994年，日本制定了《土壤与地下水污染调查与对策方针及运用标准》。该标准规定了污染的土壤和地下水需要开展污染调查与制定修复对策，确定了土壤和地下水污染修复的工作流程。地下水修复措施主要包括暴露管理、暴露途径阻断和地下水污染的修复等。

通过分析国外的修复技术标准主要内容，主要有以下特点：

- a) 出台了专门的地下水修复技术标准。国外在污染场地修复过程中，强调土壤和地下水的协同修复，同时考虑水文地质条件和地下水污染特性，专门针对污染地下水制定了修复技术标准。如美国环保局的《超级基金场地污染地下水修复行动指南》和澳大利亚的《地下水污染评价和修复指南》；
- b) 地下水修复技术标准涉及了从修复技术筛选到修复效果评估等完整工作流程。包括修复技术筛选、修复方案可行性评估、工程设计及施工、修复效果评估等流程；



- c) 当地下水修复目标无法实现时, 可将风险管控作为地下水修复阶段目标, 防止地下水污染扩散。

## 3.2 国内相关标准情况

为了规范污染场地环境管理工作, 国家和地方相继发布了污染场地相关技术标准。2014年, 原环境保护部发布了《场地环境调查技术导则》(HJ 25.1)《场地环境监测技术导则》(HJ 25.2)《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3)以及《污染场地土壤修复技术导则》(HJ 25.4), 上述导则对污染场地调查、监测、评估以及土壤修复的原则、程序、工作内容和技术要求作了明确的规定。关于污染场地地下水修复, 目前国家层面暂未出台相关的技术导则, 在《污染场地土壤修复技术导则》(HJ 25.4)中明确指出, 地下水修复导则另行公布。

### 3.2.1 行业标准与指南

#### 3.2.1.1 《污染场地环境监测技术导则》(HJ 25.2)

该导则对场地修复工程涉及地下水的监测与效果评估提出了要求, 包括污染场地修复和工程验收中地下水监测点位的布设、污染场地修复工程地下水样品的采集等。

#### 3.2.1.2 《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3)

该导则对地下水中关注污染物的风险控制值的计算提出了规定。

#### 3.2.1.3 《地下水污染修复(防控)工作指南(试行)》(环办〔2014〕99)

该指南规定了地下水污染修复(防控)过程中需遵循的指导性原则、程序和技术要求, 制定了修复(防控)工程的设计、运行、监测及终止方案。

#### 3.2.1.4 《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》(环办〔2014〕137)

该指南规定了工业企业场地污染场地修复管理内容, 对工业企业污染场地修复策略、修复技术筛选和评估、修复技术方案比选和修复方案编制等内容进行了规定。

### 3.2.2 地方标准与指南

#### 3.2.2.1 北京市

2011年, 北京市发布了《污染场地修复验收技术规范》(DB11/T 783), 在规范中对污染场地范围内的土壤和地下水修复验收程序、范围, 地下水采样布点要求和修复效果评价方法等方面做了规定。

2015年, 北京发布了《污染场地修复技术方案编制技术导则》(DB11/T 1280), 该导则规定了污染场地土壤和地下水修复技术方案编制过程中的修复策略选择、修复技术筛选与评估、修复技术方案确定、修复技术方案报告编制等内容和技术要求。

### 3.2.2.2 上海市

2015年，上海市发布了《上海污染场地修复工程验收技术规范（试行）》，该规范规定了上海市污染场地土壤和地下水修复工程验收工作的基本原则、程序、内容和技术要求，制定了污染场地地下水修复工程验收的监测、采样分析、修复效果评估和验收方案。

2018年，上海市发布了《上海污染场地修复技术方案编制规范（修订稿）》，该规范规定了上海市污染场地土壤和地下水修复技术方案编制的基本原则、程序、内容和技术要求。

### 3.2.2.3 重庆市

2016年，重庆市发布了《重庆市污染场地治理修复验收技术导则》（DB50/T 724），该规范规定了重庆市污染场地土壤和地下水修复技术方案编制的基本原则、程序、内容和技术要求。

### 3.2.2.4 浙江省

2018年，浙江省发布了《浙江省污染场地治理修复工程效果评估技术规范》（DB33/T 2128），该规范提出了浙江省污染场地治理修复工程效果评估技术规范的框架，其中包括受污染地下水治理修复工程效果评估，提出了评估程序，明确评估对象、范围和时间段，制定效果评估工作方案、现场采样与实验室检测、治理修复效果评估、效果评估报告编制六个步骤，根据修复和风险管控类项目的特点，对治理修复工程效果评估提出了不同认定方法。

## 4 污染场地地下水修复和风险管控概况

### 4.1 国外地下水修复和风险管控概况

20世纪80年代以来，美国根据不同的管理计划，分类别对污染场地开展大量的修复实践工作，管理计划包括地下储油罐污染清理计划、超级基金清理计划、棕色土地清理计划和军事设施恢复计划等，其中地下储油罐污染清理计划涉及50万个地下储油罐清理项目，超级基金清理计划涉及1.1万个项目，棕色土地清理计划涉及45万个项目，军事设施恢复计划涉及3万个项目等。

在超级基金项目，84%的超级基金场地都开展了地下水修复工作，1986-2014年，原位地下水修复技术应用比例逐渐增加，比例达到了51%；抽出-处理技术应用比例逐渐降低，到2014年已降至17%。几乎所有的项目都采用了制度控制。原位修复技术以生物修复、化学修复为主，部分场地采用监测自然衰减技术。生物修复多采用厌氧生物修复，部分采用好氧生物修复和生物强化技术，化学修复多采用原位化学氧化/还原技术。地下水修复的目标污染物中以氯代烃为主，还包括重金属、苯系物和高氯酸。在地下储油罐清理计划中，2018年，有5.4万个地下埋地罐发生泄漏，超过75%的场地存在地下水污染，已开展了4.8万个污染场地的修复工作。埋地油罐地下水污染修复的技术主要有地下水曝气、多相抽提、化学氧化等。

## 4.2 国内地下水修复和风险管控概况

我国污染场地地下水修复开始于“六五”科技攻关，目前在基础技术理论研究和修复技术集成应用方面取得了较大进展，已逐步开展了 30 多个污染场地地下水污染治理工程，主要集中在北京、江苏、湖南、山东、青海等地，污染物主要包括石油烃、多环芳烃、农药以及重金属等；采用的地下水修复技术主要有抽出-处理、多相抽提、化学氧化、化学还原、地下水空气注射和地下水可渗透反应墙等。与欧美等国家相比，在修复技术、设备及规模化应用上还存在较大差距，缺少适合我国国情的实用修复技术与工程建设经验。随着《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》的实施，将会有越来越多的污染场地面临地下水污染修复的需求。

## 5 标准编制的原则和技术路线

### 5.1 编制原则

(1) 标准编制过程中充分考虑我国地下水环境管理需求，注重与我国已有的环境保护法律法规和技术标准体系相结合，统筹考虑了土壤和地下水、地下水修复和风险管控。

(2) 借鉴发达国家地下水修复和风险管控的程序和方法，规范地下水污染修复和风险管控的工作程序和技术要求，保证地下水污染场地修复和风险管控具有规范性。

(3) 结合国内地下水污染场地修复和风险管控的实践经验，细化各项技术方法，确保标准的可行性。

(4) 标准编制过程注重地下水修复和风险管控工程施工安全和对周边环境的影响，避免对施工人员、周边人群健康以及生态环境产生危害和二次污染。

### 5.2 编制依据

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》(2015 年)
- (2) 《中华人民共和国水污染防治法》(2017 年)
- (3) 《中华人民共和国土壤污染防治法》(2018 年)
- (4) 《全国地下水污染防治规划》(2011 年)
- (5) 《关于开展全国地下水基础环境状况调查评估工作的通知》(2011 年)
- (6) 《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》(2012 年)
- (7) 地下水质量标准 (GB/T 14848)
- (8) 地表水环境质量标准 (GB 3838)
- (9) 地下水环境监测技术规范 (HJ/T 164)
- (10) 场地环境调查技术导则 (HJ 25.1)
- (11) 场地环境监测技术导则 (HJ 25.2)
- (12) 污染场地风险评估技术导则 (HJ 25.3)

(13) 污染场地土壤修复技术导则 (HJ 25.4)

(14) 环境工程设计文件编制指南 (HJ 2050)

当上述标准和文件被修订时, 使用其最新版本。

### 5.3 适用范围

本标准适用于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。

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。

### 5.4 技术路线

通过对国外地下水修复和风险管控技术指南、超级基金污染场地修复决策文件、埋地油罐污染场地修复报告等资料分析, 总结了地下水修复和风险管控的工作程序和技术要求, 针对我国地下水修复和风险管控的技术现状和管理要求, 梳理了地下水修复和风险管控过程中的关键问题, 确定了我国地下水修复和风险管控的工作程序, 针对地下水修复和风险管控目标确定、技术方案制定、工程设计及施工、工程运行及监测、效果评估等关键问题, 提出了具体的技术要求。技术路线如下图 1 所示。

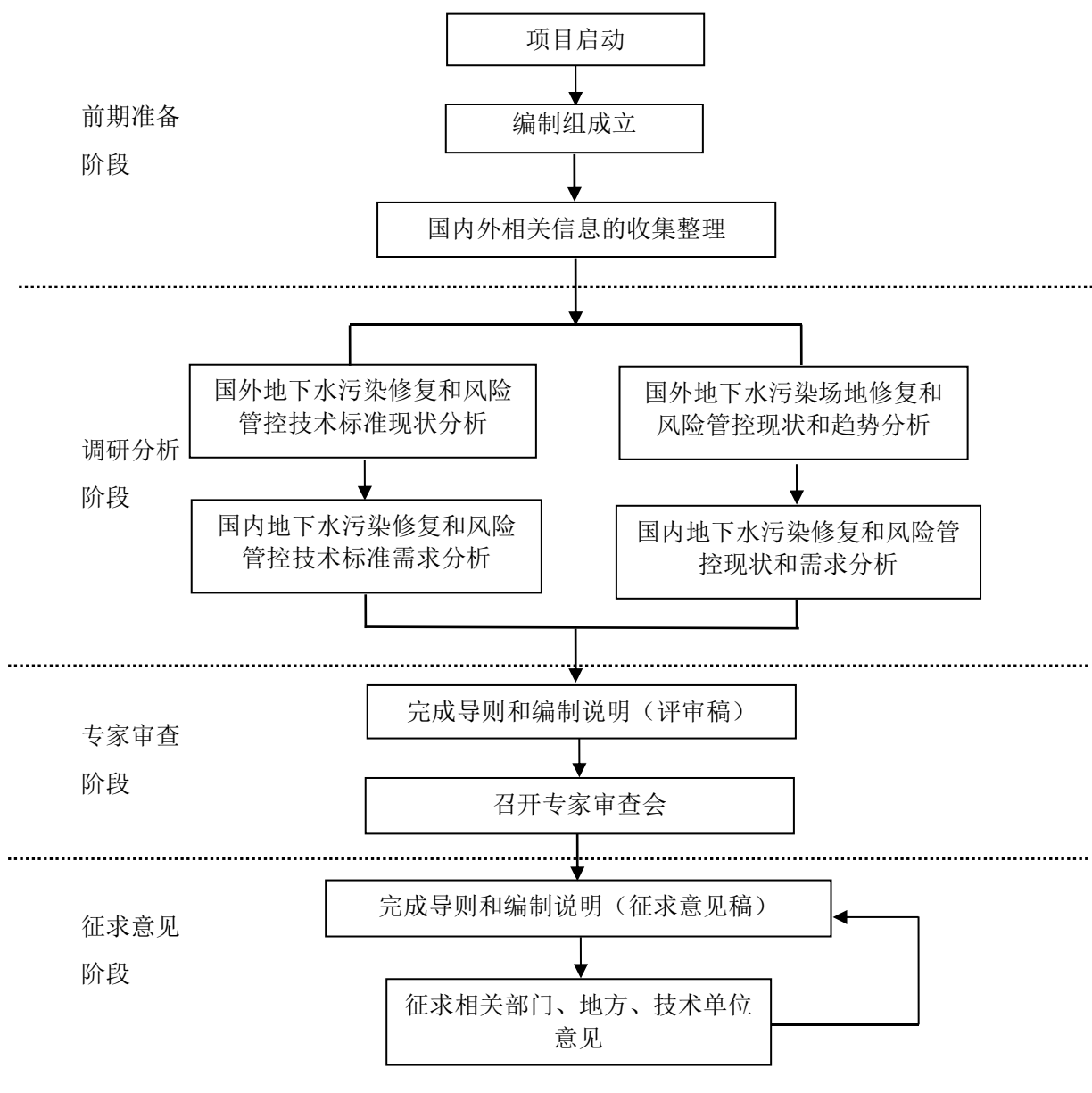


图 1 技术路线

## 6 标准的层次结构

基于国外地下水修复和风险管控工作流程，结合《中华人民共和国土壤污染防治法》《中华人民共和国水污染防治法》等对我国地下水污染修复和风险管控的要求，本标准制订过程中，对于我国地下水修复和风险管控的工作程序、涉及的技术要点进行了梳理，对以往不明确的技术环节提出了技术要求。本标准编制采用标准的导则编制框架，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，主要包括了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、效果评估等内容，对于涉及到的技术性较强的内容以附录的形式给出。

## 7 标准主要技术内容和依据

### 7.1 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。

#### 【说明】

《场地环境调查技术导则》规定了场地中土壤和地下水的初步调查、详细调查的原则、内容、程序和技术要求，《污染场地风险评估技术导则》规定了污染场地土壤和地下水对人体健康风险评估的原则、内容、程序、方法和技术要求，《污染场地土壤修复技术导则》规定了土壤修复技术方案编制的基本原则、程序、内容和技术要求，并未对污染场地地下水修复和风险管控技术方案编制、工程设计施工、运行监测、效果评估等作出规定，因此本标准对污染场地地下水修复和风险管控的基本原则、工作程序、内容和技术要求进行了规定。

### 7.2 规范性引用文件

本标准内容引用了下列文件中的条款。凡是不注明日期的引用文件，其有效版本适用于本标准。

- 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

### 7.3 术语和定义

本标准涉及下列术语和定义。

#### 【3.1 地下水 groundwater】

地面以下饱和含水层的重力水。

#### 【说明】

该术语沿用《环境影响评价技术导则（地下水环境）》的定义。

#### 【3.2 含水层 aquifer】

能够透过并给出相当数量水的岩层。

#### 【说明】

该术语沿用《污染场地术语》的定义。

#### 【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。

**【说明】**

该术语沿用《污染场地术语》的定义。

**【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。

**【说明】**

该术语改编自《污染场地修复技术方案编制导则》（DB11/T 1280）中**【地下水修复 groundwater remediation】**的定义。

**【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。

**【说明】**

该术语参考了《〈中华人民共和国土壤污染防治法〉解读与适用手册》对风险管控的解释，该手册指出“风险管控是指通过切断或阻隔污染物影响受体的途径，以及限制或者避免受体与污染物接触的可能性，以减少风险事件发生时造成的损失”。

**【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。

**【说明】**

该术语沿用《污染场地术语》的定义。

**【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、污染阻隔和制度控制等。

**【说明】**

该术语改编自《污染场地修复技术方案编制导则》（DB11/T 1280）中**【地下水修复策略 remediation strategy】**的定义。

**【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污染修复终点。

**【说明】**

该术语改编自《污染场地术语》（HJ 682）中**【场地修复目标 site remediation target】**的定义。

### 【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。

#### 【说明】

地下水作为生活饮用水的主要来源和重要战略资源，应将恢复其使用功能作为修复的最终目标，受到技术、经济因素的影响，存在不能或者不能及时恢复地下水使用功能的情况，因此本标准将风险管控目标作为阶段性目标，用以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产生不良影响。

### 【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。

#### 【说明】

该术语改编自《污染场地术语》(HJ 682)中【制度控制 institutional control】的定义。

### 【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，降低和消除场地污染物对人体健康和环境的风险。

#### 【说明】

该术语沿用《污染场地术语》的定义。

## 7.4 基本原则和工作程序

### 7.4.1 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污染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，提出后期环境管理建议。

#### 【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,地下水污染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。

#### **【说明】**

《中华人民共和国土壤污染防治法》规定,“修复方案应当包括地下水污染防治的内容”“风险管控措施应当包括地下水污染防治的内容”。《全国地下水污染防治规划(2011-2020年)》提出,应注重地表水和地下水污染协同控制。因此本标准将统筹土壤、地下水和地表水,统筹地下水修复和风险管控作为原则。本标准规范了污染场地地下水修复和风险管控的工作程序和各项技术要求,增强了修复和风险管控的规范性。充分考虑国内地下水环境管理政策要求,结合国内污染场地修复技术与修复实施现状,借鉴国外先进经验,细化各项技术方法,确保本标准的可行性,便于实施与推广。由于修复过程可能涉及二次产物对周边环境产生次生影响,施工对现场工作人员产生健康影响,因此本标准强调修复和风险管控方案编制和施工过程中应注重环境和健康安全。

#### 7.4.2 工作程序

**【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 2 所示。

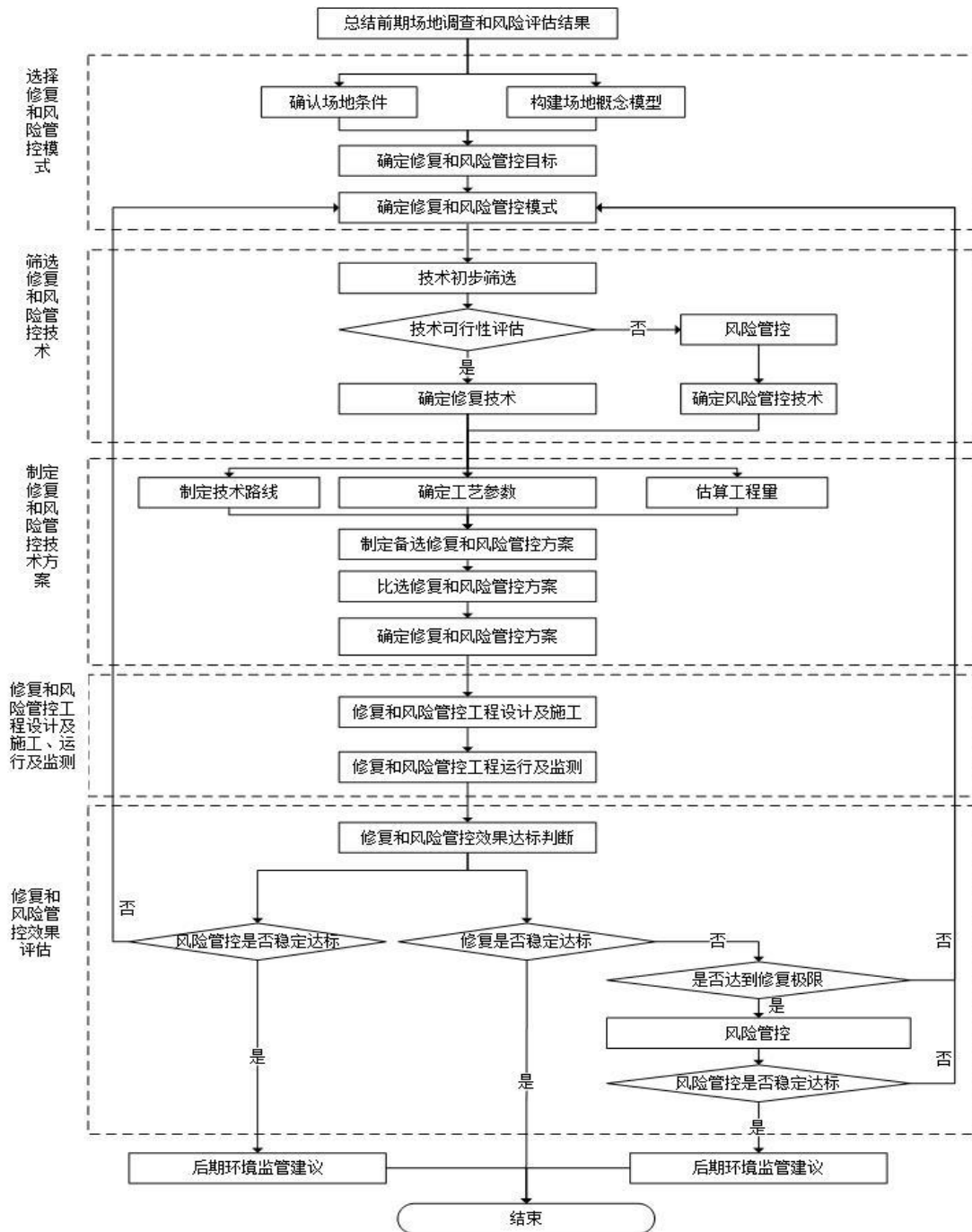


图 2 污染场地地下水修复和风险控制工作程序

**【说明】**

结合国外和国内地下水修复和风险控制技术指南，以及我国修复和风险控制工程的经验，本标准确定了地下水修复和风险控制的工作程序，包括选择地下水修复和风险控制模式、筛选修复和风险控制技术、制定修复和风险控制技术方案、修复和风险控制工程设计及施工、运行及监测、修复和风险控制效果评估等。

1988 年，美国环保局《超级基金污染地下水修复行动指南》中规定了地下水污染修复的流程，包括调查、修复目标确定、修复技术选择、方案确定、修复实施等过程。

2011 年，美国环保局《超级基金地下水污染修复建议流程》梳理和汇总了超级基金地

下水修复涉及的法规、导则、政策、指南等文件。文件指出超级基金地下水修复的流程涉及修复调查、可行性研究、修复技术筛选、修复设计、修复运行和监测、修复效果评估。

2014年，原环境保护部发布了《地下水污染修复（防控）工作指南（试行）》，该指南总体工作程序包括地下水环境调查、修复（防控）目标确定、技术比选及方案确定、工程设计及施工、工程运行及监测、终止等环节。

## 7.5 选择地下水修复和风险管控模式

### 7.5.1 确认场地条件

#### 【5.1.1】核实地场相关资料

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。

#### 【说明】

地下水污染修复和风险管控工作需要场地前期的土壤和地下水环境调查、模拟预测评估和健康风险评估等资料进行核实，因此本标准结合实际修复和风险管控工作经验、以及《场地环境调查技术导则》（HJ 25.1）和《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3）的要求，对修复和风险管控工作开展前需要核实的资料类别进行了说明，包括污染场地基本情况、场地环境特性、地下水污染特征等。当修复和风险管控方案编制距场地环境调查时间较长时，需要重新确认地下水污染羽的范围和污染程度。

#### 【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。

#### 【说明】

污染场地地下水修复和风险管控方案编制前，需要踏勘现场情况，通过现场走访调查、与场地管理方的沟通、简单的水文地质测绘、异常气味的辨识、摄影和照相等现场踏勘方式，关注场地及周边环境是否发生变化，如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，是否影响前期场地调查和风险评估的结果。还可以通过现场踏勘，考察场地施工条件，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的编制要求，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。

### 【说明】

若踏勘时发现现场环境和条件与调查期间发生较大变化时,已有资料不能满足地下水修复和风险管控方案的编制要求,应适当补充相关资料。必要时按照 HJ 25.1、HJ 25.2 和 HJ 25.3 进行补充调查、监测、风险评估与模拟预测。

#### 7.5.2 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、地下水分布条件、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。

### 【说明】

场地各阶段的概念模型极其重要,在场地修复和风险管控方案制定阶段是修复和风险管控模式确定的依据。2011 年美国环保局在《环境清理最佳管理实践: 基于生命周期评价的场地概念模型的有效性》中,规定了修复技术方案编制阶段场地概念模型的特点,比风险评估阶段初步建立的场地概念模型更加细化、更加定量。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,用以指导修复模式制定、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。同时,在技术方案制定的过程中,应根据已有资料重新制定概念模型,以评估不同修复技术方案的实施效果。

场地概念模型是对场地污染源、途径和受体的综合分析,因此本标准推荐采用文字、图、表等方式,尽可能对其进行充分、客观、形象表达。

#### 7.5.3 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。

### 【说明】

目标污染物是指在场址环境中浓度已达到对生态系统和人体健康具有实际影响的，需要进行修复的关注污染物。确定目标污染物一般通过前期场地水文地质条件勘查、环境调查和风险评估资料，判断与场地特征污染物的关联性、与相关标准的符合程度、与可接受风险的符合程度，提出修复和风险管控的目标污染物。

### 【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，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。

### 【说明】

1986 年，美国环保局将地下水分成三类，以确定超级基金场地的地下水修复目标：

- a) I 类：这类地下水是不可取代的，没有其它可代替的水源；地下水从生态角度来说非常重要，含水层为特别敏感的生态系统提供基流，一旦污染，会破坏特有的环境；
- b) II 类：现在和潜在的饮用水源，有其它用途的地下水，正在使用的和可用于饮用水、农业或其它用途的地下水；
- c) III 类：不考虑作为饮用水源，且没有其它有益用途的地下水（分为 IIIA 和 IIIB），III A 和地表水体有联系，而 IIIB 跟地表水体没有联系。

指南中规定具有饮用功能的地下水中污染物修复目标应为最大浓度水平（MCL）或者最大浓度水平目标值（MCLGs），若无 MCL 和 MCLGs，则基于风险值计算修复目标值。对

于非饮用水用途的地下水，若无规定的标准，采用风险评估制定修复目标。

本标准规定按照地下水使用功能，选择适用标准或基于风险评估反推修复目标的方法确定地下水修复目标，适用标准优先采用《地下水质量标准》（GB/T 14848）。若无功能，由污染物可接受风险水平计算地下水污染修复目标值。当地下水污染影响或可能影响地表水体等敏感目标，要根据地表水（环境）功能要求，确定地下水修复目标值。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  $10^{-6}$ 。

#### 【5.3.3】确定地下水风险管控目标

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

#### 【说明】

当地下水无使用功能时，目前国内修复工程常采用风险评估计算修复目标值，因此对其达到修复效果的判断只适用于当前用地暴露情景和地下水利用状态，若改变地下水利用方式，或者周边存在（潜在）地下水敏感点，随着地下水污染羽的迁移，可能会对周边的敏感点产生影响，因此针对这类场地需要开展地下水风险管控，防治污染羽扩散以及对周边环境产生次生影响。澳大利亚环保局制定的《地下水污染评价和修复技术指南》中提出在地下水修复场地中，可实施阶段性修复目标，阶段性修复目标为控制对人群和环境的风险，阻断暴露途径，控制地下水污染羽不会迁移出目前的范围。

#### 【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。

#### 【说明】

美国环保局的《超级基金污染地下水修复行动指南》指出地下水修复和风险管控范围为地下水污染羽的范围。采用浓度插值、单个超标点位代表区域等方法，将采样检测分析结果绘制成等值线图或浓度分区图，与地下水修复和风险管控目标值相对照，将污染物浓度超过地下水修复和风险管控目标值的地下水污染羽，确定为修复和风险管控区域。范围边界可根据场地条件、技术实施可行性等进行合理修正。

### 7.5.4 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。

#### 【说明】

本标准参考美国环保局《超级基金场地修复调查和可行性研究导则》、美国环保局的大量修复案例报告以及我国污染场地修复的实际情况，确定了修复和风险管控模式。主要考虑

下列因素：

- a) 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、是否允许原位修复等；
- b) 应充分考虑场地修复和风险管控过程中土壤和地下水的整体协调性，并综合考虑阶段性目标的要求，以及技术的可行性、成本、周期、民众可接受程度等因素，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。

## 7.6 筛选地下水修复和风险管控技术

### 7.6.1 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。

#### 【说明】

在技术筛选及方案确定环节，美国、澳大利亚的技术导则均给出了技术筛选矩阵，以利于决策人员进行技术初筛，制定备选方案。在技术比选阶段，国外的规范一般只给出需遵循的原则或考虑的因素，据此进行可行性分析，综合考虑技术、环境和经济等因素确定最佳方案。

本标准提出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。

#### (1) 对比分析法

根据污染区域的污染特征筛选修复和风险管控技术。比较分析各修复和风险管控技术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，确定至少 1 种或多种技术，进行下一步可行性评估。

#### (2) 矩阵评分法

表 1 技术矩阵评分法

因子	适用的目标污染物		技术成熟度		修复效率		成本		时间		环境风险		总分	备注
	评分	评述	评分	评述	评分	评述	评分	评述	评分	评述	评分	评述		
权重														
技术 1														
技术 2														
...														

根据地下水污染场地的实际情况，确定表 1 中各指标的权重，权重总值为 1。各指标按 1~5 分赋值。每项技术的总分为将各因子权重与分值乘积加和，总分越高表明该技术越有利于在该对象中应用，选择得分较高的至少一种或多种技术，进行下一步可行性评估。

本标准在总结美国环保局的大量修复案例报告的基础上，参考美国环保局发布的《处理

技术筛选矩阵》，从技术成熟度、优缺点、场地适用性等方面对抽出处理技术、微生物修复技术等常用的地下水修复和风险管控技术的特性进行分析，形成附录 A。

修复技术的筛选具有灵活性，需要从各个方面权衡进行确定，本标准提供了对比分析法和矩阵评分法用于修复技术初筛。对比分析法可参考标准正文附录 A 地下水修复技术适用条件，结合场地的特征条件，列出各项技术的适用性，筛选适合的几项技术。利用矩阵评分法，对潜在适用的修复技术进行进一步筛选。由场地修复的专业人员对场地进行评分，筛选的指标包括目标污染物、技术成熟度、修复效率、成本、时间和环境风险等。

2017 年《超级基金修复报告（第 15 版）》总结了地下水修复和风险管控技术，主要包括：

#### （1）抽出处理技术

抽出处理技术是根据地下水污染范围，在污染场地布设一定数量的抽水井，通过水泵和水井将被污染的地下水抽取上来，然后利用地面净化设备对抽出的地下水进行处理。抽出处理技术适用于渗透性较好的饱和层，对于污染范围大、污染羽埋藏深的污染场地治理比其它技术具有优势，修复周期短，但涉及地下水的抽提或回灌，对修复区域干扰大，可能导致地下水资源的浪费或引起地面沉降，当存在非水相液体时，由于毛细张力而滞留的非水相液体难以通过抽出的方法清除干净，当停止抽水时，可能存在拖尾和反弹。

#### （2）微生物修复技术

原位微生物修复技术是通过天然土著微生物或人工培养驯化微生物的吸收、吸附、降解等作用，以降低环境中的污染物毒性或将污染物转变成无毒物质。其原理是向地下水注射电子供体、电子受体或营养剂，有时也需注入特定微生物，以促进污染物的生物降解。能够处理的污染物包括卤代烃、苯系物、多环芳烃、燃料油、爆炸物、农药等能够被微生物降解的物质。适用于大面积污染区域的治理，成本较低，对环境无害，是生态友好型的环境治理技术。但微生物修复具有选择性，且修复效率低，所需修复时间较长，通常需数年。

#### （3）植物修复技术

利用植物进行提取、根际滤除、挥发和固定等方式移除、转变和破坏地下水中的污染物，使污染地下水恢复其正常功能。适用于污染土壤和地下水，可处理重金属（如砷、镉、铅、镍、铜、锌、钴、锰、铬、汞等）以及特定的有机污染物（如石油烃、五氯酚、多环芳烃等）。处理周期需 3-8 年。美国应用的成本约为 25-100 美元/吨，国内的工程应用成本约为 100-400 元/吨。国外应用广泛，国内已有工程应用。

#### （4）地下水曝气技术

地下水曝气技术是修复地下水有机污染物的一种有效方法，即通过垂直或水平井，用气泵以一定的曝气压力和流量将压缩空气注入地下水中，空气穿过包气带进入地下水中，上升过程中挥发性有机污染物不断进入空气中并被带入包气带；同时压缩空气中的氧气不断溶于地下水，增加地下水中溶解氧含量，有利于微生物生长，加速地下水有机污染物的微生物



降解。该技术通常用于治理地下水中的有机污染，一般与土壤气相抽提技术联合使用。设备简单，安装方便，易操作，可以利用现有的监测井作为注入井，修复效率高，治理时间短，能够处理毛细管边缘和水位以下的污染物，对修复地下水中难处理的污染物(如非水相液体)具有优势。但对于非挥发性的污染物不适用，且空气曝气过程中，气体可能会迁移，释放到地表造成二次污染。

#### (5) 化学氧化技术

化学氧化技术是将化学氧化剂以泥浆或溶剂的形式注入到地下环境中，通过它们与污染物之间的化学反应将地下水或土壤中的污染物转化为二氧化碳、水等无害化学物质的方法。原位化学氧化修复技术可应用于石油类碳氢化合物、苯、酚类、甲基叔丁基醚、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等在环境中长期存在，难于被生物降解的污染物的修复。原位化学氧化修复技术适于处理渗透性较好的均质和非均质含水层，化学反应速度快，处理时间短。

#### (6) 化学还原技术

化学还原技术是将化学还原剂注入到地下环境中，通过还原剂与污染物之间的化学反应，降低对氧化还原电位敏感的污染物的移动性，或利用还原脱氯作用降解含氯有机溶剂。原位化学还原技术适用的污染物有氯代烃，六价铬等。但场地水文地质条件可能会限制化学物质的传输。

#### (7) 可渗透反应墙技术

可渗透反应墙是一个填充有活性反应介质(包括还原剂、螯合剂、吸附剂、微生物和营养物质等)的被动反应区，当被污染的地下水通过该反应区时，反应介质能够降解和滞留地下水中的污染物，从而达到治理污染物的目的。可用于重金属、氯代烃、苯系物以及多环芳烃的治理，对石油烃的效果较差。可渗透反应墙技术的工程设施较简单，安装操作可一次完成，后期的运转及维护费用较低。但随着有毒金属、盐和生物活性物质在可渗透反应墙中不断沉积和积累，可渗透反应墙可能会逐渐失去活性，需要适时更换。

#### (8) 双/多相抽提技术

通过真空提取手段，抽取地下污染区域的气体、地下水和浮油层到地面进行相分离及处理，以控制和修复土壤与地下水中的有机污染物。适用于污染土壤和地下水，可处理易挥发、易流动的非水相液体(如汽油、柴油、有机溶剂等)。不宜用于渗透性差或者地下水水位变动较大的场地。清理污染源区域的速度相对较快，通常需要 1-24 个月的时间。该技术成熟，在国外应用广泛。国内已有少量工程应用。

#### (9) 热处理技术

热处理技术是利用有机污染物的挥发性，通过加热有机污染物使其在地下水中移动或流通，利用土壤抽气方法，将挥发的污染物从受污染区抽出。目前运用的热处理技术有蒸气注入法、电阻加热法、射频加热法等。热处理技术可有效去除重质非水相流体，如三氯乙烯与四氯乙烯溶剂，以及轻质非水相液体，如柴油与汽油等。热处理技术不适用于非均质性场地，

成本和后期维护费用较高。热处理技术在国外应用广泛。国内已有少量工程应用。

#### (10) 电动修复技术

电动修复是将电极插入受污染地下水和土壤中，施加直流电压形成电场梯度，利用电场产生的电渗析、电迁移和电泳等电动力学效应，使污染物通过电梯度进行定向移动并在介质中发生氧化还原反应而被去除的修复方法。与其他修复技术相比，该技术处理效果彻底，不需要或仅需要添加少量化学药品，易于自动控制，占地面积小，运行成本较低，二次污染少，适用于处理多项不均匀介质，易与其他修复技术联合使用。电动修复技术不适于低渗透性黏土含水层。

#### (11) 监测自然衰减技术

监测自然衰减技术是基于污染场地自身理化条件和污染物自然衰减能力进行污染修复，从而达到降低污染物浓度、毒性及迁移性等目的，另外，还须根据污染区域的治理目标，采用相应的监测控制技术，对地下水的自然修复过程进行监测评价。监测自然衰减技术适用于含氯有机溶剂、石油燃料、多环芳烃、苯系物、金属、放射性核素、爆炸物、木材防腐剂、农药、杀虫剂等各种污染物。该技术适用范围较窄，对区域环境和污染物自然衰减能力要求较高，一般仅适用污染程度较低、污染物自然衰减能力较强的区域，且前期需要对场地进行详细勘察，修复周期长，但修复费用远远低于其它修复技术。

#### (12) 阻隔技术

阻隔技术通常是利用土壤、膨润土和水混合形成泥浆墙，阻隔受污染的地下水，阻止其向下游扩散。适用于污染物总量较大，且可溶性和可移动的污染组分可能会对饮用水源造成影响的情况。该技术只能将污染物阻隔在一个特定的区域中，而不能将污染物从地下环境中去除，只能起到控制作用。

#### (13) 制度控制

制度控制是指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。制度控制实施流程主要包括制度控制方案的筛选、制度控制方案的评估、制度控制方案的审批与制度控制方案的跟踪评价。制度控制的优点是尽可能减少工程技术修复活动，与工程技术修复活动配合使用可以降低修复过程的成本和风险。制度控制的缺点是：污染物仍在原位，没有去除；实施制度控制的地块开发利用活动受到限制；制度控制的效果需要利益相关方的协调保证。制度控制在美国污染场地风险管控中使用已有 30 余年，国内已少量应用。

### 7.6.2 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，验证试验技术的实际效果，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。

#### 【说明】

对初步筛选的修复和风险管控技术进行可行性分析，确定技术是否适用于特定的目标场地。

美国环保局《超级基金场地修复调查和可行性分析导则》对小试和中试的规模与类型、数据要求、重现性、试验周期和模拟分析等具体技术要求进行了详细规定。

##### （1）规模与类型

可行性研究可在实验室或现场完成，可以是小试或中试。小试应采集实际场地的污染介质，采用不同的工艺组合来试验效果，从而确定最佳工艺参数，并以此估算成本和周期等；中试应根据修复和风险管控模式、技术类型的特点，在现场选择具有代表性的区域进行试验，来验证技术的实际效果，以确定合理的工艺参数、成本和周期。选择具有代表性的区域时应尽量兼顾不同区域、不同浓度、不同介质类型。中试所利用的设备通常是基于现场实际应用按比例加工制造。

##### （2）数据需求

采用定量数据，确定技术能否满足修复和风险管控目标、工艺参数、成本和周期。

##### （3）试验结果的重现性

至少需要重复 2 次或 3 次。试验过程需有严格的质量保证和质量控制。

##### （4）试验周期

试验周期主要取决于技术类型、污染物种类、目标等因素。当试验过程难以选择出合适技术时，应考虑调整修复和风险管控模式。

##### （5）模拟分析

随着地下水污染模拟技术的发展，地下水污染模拟预测评估成为地下水修复和风险管控方案制定的一种重要技术手段。地下水模型可以用来帮助了解地下水系统的特性，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。

## 7.7 制定地下水修复和风险管控技术方案

### 7.7.1 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，制定采用一种或多种技术优化组合集成的技术路线。技术路线应反映地下水污染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。

#### 【说明】

修复和风险管控技术路线是技术方案中重要的内容，可反映修复和风险管控的总体思路、方式、工艺流程、工程实施过程中二次污染物的处理等。一般以框图的形式体现。

### 7.7.2 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。

#### 【说明】

地下水修复和风险管控技术的工艺参数主要通过总结实验室小试、现场中试的实验结果确定，也可考虑模拟分析的结果。明确了工艺参数的类型，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。

### 7.7.3 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。

#### 【说明】

地下水修复和风险管控的工程量估算方法应根据具体场地情况确定，可采用地下水修复面积、污染地下水含水层体积或孔隙中污染地下水体积等表示，本标准不做具体要求。根据确定的技术或技术组合方案，结合工艺流程和参数，以及污染物种类、污染程度、目标值、污染分布等综合确定修复和风险管控范围及对应的工程量。估算工程量时，以目标污染物的浓度等值线图为基础，涵盖场地内外的污染羽，以修复目标值为依据，采用专业软件估算地下水修复的工程量。对于复合型污染，应将每种目标污染物的浓度等值线图进行叠加，主要有以下几种方式：

- a) 地下水污染面积可采用地下水修复范围对应的投影面积；
- b) 污染含水层体积可采用地下水污染面积乘以该含水层平均厚度确定，也可根据含水层顶板、底板标高数据通过插值计算污染含水层体积；
- c) 污染含水层赋存地下水水量可以采用污染含水层体积乘以含水层孔隙度确定。当涉

及地下水抽出处理或止水帷幕封闭基坑内地下水疏干等情况时,采用给水度代替孔隙度估算污染含水层可抽出地下水水量。

#### 7.7.4 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、运行时间、效果评估和后期环境监管要求等进行周期估算。

##### 【说明】

地下水修复和风险管控工程费用可划分为直接费用和间接费用,也可划分为工程实体项目费用和措施费。如《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》(环办〔2014〕137)规定: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技术方案对应的工程主体设备、场地准备、污染场地土壤和地下水处理等费用总和;间接费用包括工程环境监理、二次污染监测、效果评估、人员安全防护费用以及不可预见费用等。本标准未对工程费用进行分类,但对主要工程费用组成内容进行了详列,具体工程费用估算时可参考。

修复和风险管控工程周期一般包括自进场施工开始的场地准备、设备材料购置、建设安装、运行、效果评估等阶段工作时间,应根据工程施工总体进度安排进行计算。

#### 7.7.5 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。

#### 7.7.6 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的影响等,选择对环境及健康影响较小的方案。

##### 【说明】

本标准在美国环保局修复方案评估选择标准以及《污染场地土壤修复技术导则》(HJ 25.4)基础上,充分考虑技术、经济、环境等层面的诸多因素,并突出地下水修复和风险管控的特点,确定最优方案。对于技术方案的最终选择,可以采用2种方式:一是利用详细分析结果,通过不同指标的对比、综合判断后,选择更为合适的备选方案作为场地修复技术方案;二是利用矩阵评分的方式,在备选技术方案中选择得分最高的方案作为场地修复技术方案。

#### 7.7.7 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风险应急计划制定等内容。

##### 【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、突发事故应急措施、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。

##### 【说明】

我国场地修复和风险管控工程实施阶段的环境污染控制,主要通过施工方参照技术方案中环境管理计划实施,委托第三方开展环境监理。本标准规定在确定最优技术方案后,需制定配套的环境管理计划。环境管理计划包括提出工程中污染防治和人员安全保护措施、场地环境监测计划、环境应急安全预案。

#### 7.7.8 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。

##### 【说明】

本标准规定的技术方案编制内容与国外可行性研究报告编制内容总体上一致。本标准规定技术方案报告须全面准确地反映出场地地下水修复和风险管控技术方案编制全过程的所有工作内容。报告中的文字须简洁、准确,宜采用图、表和照片等形式表示出各种关键技术

信息，以利于施工方制定污染场地地下水修复和风险管控工程的设计和施工方案。

## 7.8 地下水修复和风险管控工程设计及施工

### 7.8.1 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。

#### 【说明】

本标准规定了地下水修复和风险管控工程设计的内容和要求。根据《建筑工程设计文件编制深度规定（2016 版）》规定，“各阶段设计文件编制深度应按以下原则进行：方案设计文件，应满足编制初步设计文件的需要，应满足方案审批或报批的需要；初步设计文件，应满足编制施工图设计文件的需要，应满足初步设计审批的需要；施工图设计文件，应满足设备材料采购、非标准设备制造和施工的需要。”根据《环境工程设计文件编制指南》（HJ 2050）规定，“环境工程设计一般分为前期工作和工程设计两部分。前期工作包括项目建议书、预可行性研究、可行性研究，工程设计包括初步设计和施工图设计。本指南包括可行性研究、初步设计和施工图设计三个阶段。”

本标准规定地下水修复和风险管控设计工作包括初步设计和施工图设计两个阶段。本标准规定地下水修复和风险管控工程设计工作应依据《环境工程设计文件编制指南》（HJ 2050）开展。针对技术简单的小型修复项目或应急项目，特别提出可根据实际情况直接开展施工图设计工作。项目规模可以参考《城市污水处理工程项目建设标准》。

根据《建筑工程设计文件编制深度规定（2016 版）》规定：对于技术要求相对简单的民用建筑工程，当有关主管部门在初步设计阶段没有审查要求，且合同中没有做初步设计约定时，可在方案设计审批后直接进入施工图设计。根据《市政公用工程设计文件编制深度规定（2013 年版）》规定：对于技术简单、方案明确的小型建设项目，经主管部门批准，工程设计可按一阶段直接进行施工图设计。根据《关于印发〈工程设计资质标准〉的通知》附件 6 “工程设计专项资质标准”的规定：污染修复工程，包括污染水体、土壤、矿山修复等工程，根据投资额进行规模划分。投资额小于 500 万元的为小型、大于 500 万元且小于 3000 万元的为中型、大于 3000 万元的为大型。

本标准规定，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，以简化“简单、小型项目”的设计流程、缩短设计周期。关于“简单、小型项目”的具体界定，建议项目规模按上述投资额进行确定，项目复杂程度可根据地下水修复和风险管控的工程工艺使用情况，将使用单一工艺的项目确定为简单项目。具体是否可直接进行施工图设计，需满足主管部门要求。

#### 【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。

#### **【说明】**

根据《环境工程设计文件编制指南》（HJ 2050）规定，“环境工程初步设计文件应依据已批准的环境工程可行性研究报告（项目申请书）、环境影响评价报告、安全评估报告、自然灾害评估报告、节能评估报告、水土保持评估报告书及其批准、核准、批复意见编制。”污染地下水修复和风险管控工程一般作为临时工程、半永久工程，针对其工程设计，相关要求较少，一般不开展可行性研究报告、安全评估报告、自然灾害评估报告、节能评估报告、水土保持评估报告书等的编制，因此本标准规定，初步设计工作开展依据为已批准的污染地下水修复和风险管控方案、环境影响评价报告。

初步设计说明书中各专业设计内容包括：污染物收集及转输工程、污染物处理（处置）工程、总图工程、建筑工程、结构工程、给排水工程、采暖通风工程、电气工程、自动化工程、维修工程、通讯工程、环境保护、劳动安全及卫生等。地下水修复和风险管控项目主要涉及的专业设计内容包括总图、工艺、建筑、结构、给排水、电气、自动化、环境保护等，不同地下水污染场地涉及专业并不相同，不宜统一规定。

#### **【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。施工图设计文件应包括施工图设计说明书、施工图设计图纸、工程预算书：

- a) 施工图设计说明书应包括各专业设计说明和工程量表；
- b) 施工图设计图纸应由总图、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。

#### **【说明】**

《环境工程设计文件编制指南》（HJ 2050）规定，环境工程施工图文件应依据已批准的环境工程初步设计文件编制，环境工程施工图方案应符合已批准的环境工程初步设计技术方案。在施工图设计过程中有优化调整的，应说明调整的内容及原因。环境工程施工图内容应



满足编制环境工程预算、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、工程施工的需要。环境工程施工图文件应作为环境工程建设管理必需的技术文件。环境工程施工图文件涵盖专业和组成内容可根据工程特点合理增减。环境工程施工图文件比例应能够清楚表达设计内容，并便于装订、使用。

#### 【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。

#### 【说明】

地下水修复和风险管控工程的工艺设计是地下水修复和风险管控工程设计区别于一般环境工程设计的主要内容，因此将地下水修复和风险管控工程设计进一步划分为修复工艺设计和辅助专业设计。地下水修复和风险管控工程的辅助专业设计包括总图、建筑、结构、给水排水、采暖通风、电气、自动化等专业；根据选择的工艺及场地条件和建设单位要求的不同，可能需要的辅助专业包括建筑、结构、给水排水、采暖通风等。各辅助专业设计应在工艺设计提供的条件基础上完成，并编制各自的设计章节、提供各辅助专业设备和材料清单，绘制相应设计图纸。由于辅助专业设计工作按照《环境工程设计文件编制指南》（HJ 2050）开展即可，因此本标准不进行细化要求，仅规定辅助专业设计应在修复工艺设计基础上进行，

为修复工艺实施提供支持。

## 7.8.2 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障措施、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。

### 【说明】

a) 可参照的主要环境质量标准：

- 《环境空气质量标准》(GB 3095)
- 《声环境质量标准》(GB 3096)
- 《地表水环境质量标准》(GB 3838)
- 《土壤环境质量标准》(GB 15618)
- 《地下水质量标准》(GB/T 14848)

b) 可参照的污染物排放标准：

- 《污水排放标准》(GB 8798)
- 《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348)
- 《恶臭污染物排放标准》(GB 14554)
- 《大气污染物综合排放标准》(GB 16927)
- 《一般工业固体废物贮存、处置场地污染控制标准》(GB 18599)

## 7.9 地下水修复和风险管控工程运行及监测

### 7.9.1 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。

#### 【说明】

本标准主要是对修复和风险管控的工程运行提出基本要求。定期记录和检查工程的运行及维护情况，记录应及时、准确、完整。运行不正常时，需进行维护或调整，并对调整情况进行记录。地下水修复和风险管控工程运行管理应包括：系统设备设施的日常运行、检查、维护保养，同时包括计量仪器仪表读数记录、材料使用记录。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、计量设备的精度检测。风险管控设施的监测、检查和维护，如阻隔墙的渗透性和垂直阻隔墙连续性、井的检查及维护；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。修复和风险管控工程运行过程需要保证上述设备、设施正常运行，包括确保材料使用按设计方案执行，进行相应参数的采集、记录，及时对监测数据进行分析，发现问题及时整改等。

### 7.9.2 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。

#### 【说明】

地下水监测是地下水修复和风险管控工程运行的重要内容，地下水修复和风险管控运行过程监测主要目的是及时掌握修复效果是否达到预期，以及及时发现污染羽扩散、迁移、风险管控失效等不利情况，在此基础上评估地下水修复和风险管控方案调整的必要性。本标准

对地下水监测内容的要求参考了美国《超级基金污染地下水修复行动指南》，并进行了扩展。

#### 【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 6m 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。

#### 【说明】

《场地环境监测技术导则》(HJ 25.2) 虽然没有对地下水修复过程中的地下水监测提出具体要求，但是其针对场地环境调查阶段地下水监测点位思路是可以借鉴的，其规定一般情况下，应在地下水流向上游的一定距离设置对照监测井。地下水监测点位应沿地下水流向布设，可在地下水流向上游、可能污染严重区域和地下水流向下游分别布设监测井。基于上述考虑，本标准将运行期地下水监测井进一步划分为污染羽外部的对照井、污染羽边界的控制井、污染羽内部的监测井等类型，对设置位置进行了规定，对设置数量提出了最低要求。实际修复和风险管控过程中应根据地下水修复和风险管控区域面积对运行过程监测井数量进行适当增加。

一般根据工程经验判断，当相邻两个含水层之间隔水层岩性为黏性土且隔水层厚度小于 5m 时，可认为两个含水层互为临近含水层；当含水层厚度大于 6m 时，可认为其为厚层含水层。

#### 【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次生污染物进行监测；
- 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。

#### 【说明】

不同的地下水污染场地及修复和风险管控工艺情况下监测指标并不相同，本标准对监测指标进行了初步分类，分为地下水特性、处理材料和工程控制参数等，具体修复和风险管控过程应在方案中明确相应监测指标。

#### 【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。

#### 【说明】

不同的地下水污染场地其污染特征、水文地质条件、工艺及周期等均不相同，因此修复工程运行过程地下水监测频次也难以详细规定。国外相关标准对此一般提出原则性要求，即一般在修复初期采用较高的监测频次，之后监测频次可根据修复阶段逐步降低。工程运行阶段根据目标污染物浓度变化特征进行划分，工程运行初期为目标污染物浓度变化剧烈或呈波动情形的阶段；修复工程运行中期为目标污染物浓度均匀持续下降的阶段；修复工程运行后期为目标污染物浓度持续达到或低于修复目标值的阶段。

本标准提出建议的监测频次，即按照修复工程运行初期、中期、后期 3 个阶段分别给出监测频次。这个频次是个建议值，如有的地下水修复和工程可能周期很短，则不一定采用该建议频次。美国《超级基金污染地下水修复行动指南》（1988）建议采用尽可能短的监测时间间隔，一般工程运行开始一年内时间间隔不大于 1 个月，之后可以增加时间间隔，当污染羽变化趋于稳定时，或针对长期（如数年）的地下水修复周期的情况，监测时间间隔可以采用 1 个季度。

根据一般工程经验，考虑样品采集及送检的成本、周期问题，一般修复初期监测周期确定为半个月为宜，因此本标准给出了相应建议监测频次。同时，考虑现阶段监测设备水平，针对可以实时监测、在线监测、现场检测等特征的监测项目，单独提出应根据需要提高监测频次。针对地下水位因其年动态特征表现为丰、平、枯水期的情况，本标准仅提出在必要时给予考虑。根据国内土壤、地下水修复项目场地调查工作开展情况，一般前期场地调查阶段并未对地下水丰、平、枯水期开展针对性工作，现行《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2）也未对此提出专门要求，因此本标准未对此种情况进行普遍要求。

#### 【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。

#### 【说明】

《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2）对污染土壤清挖、治理修复的监测进行了规定，但对其它环境因素仅进行了原则性要求：“治理修复过程中，如需对地下水、地表水和环境空气进行监测，监测点位应按照工程环境影响评价或修复工程设计的要求布设。”本标准对环境监测也仅提出原则性要求，即应满足修复工程环境影响评价的要求，并进一步明确了环境监测的内容，不再对监测频次、监测指标等作出更细的要求。具体使用时可参照《建筑施工场界噪声排放标准》（GB 12523）《大气污染物综合排放标准》（GB 16297）《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2）《突发环境事件应急监测技术规范》（HJ 589）《地下水环境监测技术规范》（HJ/T 164）的相关规定进行监测。

### 7.9.3 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。

#### 【说明】

修复和风险管控系统运行过程中应对监测数据进行分析，开展效果趋势预测。趋势预测用于判断地下水污染特征参数的变化趋势，地下水污染特征参数包括污染范围、污染地下水体积、污染物浓度、污染物扩散方向和速度等内容。在地下水过程监测开展 2~3 次后可以进行趋势预测；之后，每次监测数据获取后应及时进行趋势预测分析。趋势预测方法主要包含以下几种：

- a) 图表方式对趋势进行直观分析，包括污染物浓度等值线图、时间序列图。
- b) 数值模拟是通过建立数学模型进行趋势预测，趋势预测结果应采用后续的监测数据进行验证，并根据需要对数值模型进行修正。
- c) 统计学方法主要包括算术平均法、移动平均法、指数平滑法、线性回归法、非线性

拟合等，分析中要注意周期性、季节性等波动因素。一般根据工程运行情况，每半年或一年开展 1 次阶段性评估工作；当根据趋势预测结果分析修复和风险管控效果不能满足预期目标时，应增加阶段性评估工作的次数。评估从工程运行开始、或自上一次阶段性评估期间结束时间点开始，到本次评估报告形成时间点为止。

#### 7.9.4 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。

##### 【说明】

基于过程监测和趋势预测结果，对工程运行状况进行分析，重点分析内容有：

- a) 根据污染羽的监测及趋势预测结果分析评估地下水修复和风险管控效果是否达到预期，以判断效果的有效性。
- b) 根据污染羽特征参数的变化趋势，结合工程运行周期核算，确认修复和风险管控目标的可达性。
- c) 根据二次污染物排放监测数据判断环境保护措施的有效性。
- d) 将阶段性工程费用支出数据与预算费用对比，通过核算确定工程经济可行性。

当分析认为目标可达、环境保护措施有效且经济可行，则认为技术方案、工程设计、施工和运行合理有效，应继续运行。当综合分析认为不能通过原技术方案、工程设计、施工和运行解决问题时，应及时反馈并调整。需要重点反馈和对照的环节有污染场地调查评估结论、修复目标制定、修复技术筛选、修复工程投资等。当出现先前未识别的敏感受体正在受到威胁或出现比原污染物具有更高迁移特性和更大危险性的中间产物时，应该及时做出应对措施。

### 7.10 地下水修复和风险管控效果评估

#### 7.10.1 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。

##### 【说明】

地下水修复和风险管控工程的实施应阻止地下水污染羽迁移扩散和将污染物降低到可接受的水平。但工程运行过程中，过量修复药剂或空气的注入、不可预见的非均质性地层环境等因素可能导致污染羽的扩大，形成二次污染区域。因此，地下水修复和风险管控效果评估的范围应基于场地修复概念模型进行确定，包括修复和风险管控范围的内部及上下游，特别关注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、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。

### 【说明】

根据工程实践,地下水修复过程容易出现修复效果反弹的问题,采用阻隔和水力截获的地下水风险管控措施可能出现污染泄漏或者污染羽扩散等问题。根据国外经验,修复达标效果评估须在地下水修复效果达到稳定开展。地下水稳定状态的判断依据包括地下水流场稳定与污染物浓度稳定达标。美国《评价地下水修复行动完成的方法》中提出,效果评估必须在确定工程运行监测阶段地下水污染物浓度达到稳态时才可开展。地下水污染物浓度是否达到稳态可利用非统计或图示方法进行数据分析来确定。若监测值均为未检出或部分未检出,则可直接确定地下水污染物浓度达到修复目标值;若部分监测值高于修复目标值,则应采用均值检验或趋势检验的方法确定地下水污染物浓度是否达到修复目标值。评估过程中,最小样本量可以基于现有的地下水监测和统计学规律来确定。对于正态分布而言,4个样本足以反映地下水污染情况,因此建议判断达到稳定状态的最低样本量为4个。美国《优先场地名单关停程序》中对于污染源去除和风险阻隔进行了不同的要求。对于工程措施,要求在一年内进行运行和功能评价,确认工程措施的性能可达到要求。考虑到地下水流速缓慢等因素,风险管控的效果短期内难以确定,故本标准将风险管控效果评估的采样节点定于至少获得需要连续8个批次的季度地下水水质监测数据后。

### 【10.1.3】布点数量和位置

#### 【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80m×80m,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 40m×40m。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、工程施工及运行设置的监测井，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%。

#### 【说明】

目前，国内已有相关文件对布点做出了规定，具体如下：

《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2）中规定，地下水监测点位应沿地下水流向布设，可在地下水流向上游、地下水可能污染较严重区域和地下水流向下游分别布设监测点位。一般情况下，在地下水流向上游的一定距离设置对照监测井。

《地下水污染修复（防控）工作指南》（环办〔2014〕99 号）中规定，评估修复（防控）效果的监测井应不低于 6 口。验收监测井应根据地下水的流向进行设置，其中修复（防控）工程所在区域的地下水上游不少于 1 口，修复（防控）工程区内不少于 3 口，修复（防控）工程所在区域的地下水下游不少于 2 口。验收的监测井可以利用地下水环境调查和修复（防控）工程运行中建设的监测井，但其数量一般不应超过验收监测井总数的 60%。新建监测井布设在地下水环境调查确定的污染最严重的区域，或者根据不同类型的修复（防控）工程进行合理的布设。未通过验收前，应保持地下水验收监测井完好。

《污染场地修复验收技术规范》（DB11/T 783）中规定，地下水监测井应依据地下水的流向及污染区域地理位置进行设置，修复范围上游地下水采样点不少于 1 个，修复范围内采样点不少于 3 个，修复范围下游采样点不少于 2 个。可利用场地环境评价和修复过程建设的监测井，但原监测井数量不应超过验收时监测井总数的 60%。

2017 年，广东省的《污染场地治理与修复效果评估技术指南》中规定，对于采取阻隔措施的风险管控项目，在阻隔墙上游和下游分别设置至少 2 口监测井，及时监测隔离墙的隔离效果。在关注对象周边布设至少 2 口监测井，监测地下水浓度是否保持持续下降，同时也侧面反映隔离墙的隔离效果。

《建设用地土壤环境调查评估技术指南》中规定，地下水采样点位数每 6400 m<sup>2</sup> 不少于 1 个。本标准规定修复效果评估范围内部采用网格不大于 80 m×80 m。对于污染物浓度高的区域，特别是非水相液体存在时，采样网格应缩小至不大于 40 m×40 m，以保证效果评估结果的准确性。

考虑到地下水修复技术的不同、修复设施设置间距的不同、场地水文地质条件的差异，本标准编制过程中对地下水监测井的数量仅做基本要求；规定只要是场地内可以使用的监测井，均可作为修复效果评估的采样井。但监测井的布设能反映修复活动的整体效果，重点要针对最不利的区域，例如设施运行薄弱区、污染源浓度高的区域、水文地质条件不利的区域等。

#### 【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。修复达标评估评价阶段最少采集 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。

#### 【说明】

地下水采样频次和采样持续时间应根据具体场地的水流条件来确定，如水力梯度、渗透系数、季节变化和其它因素等。采样频次应确保有足够的数据用于修复监测和达标监测评估，应避免采样间隔过长，许多场地采用季节性采样频次，同时采样频次应确保含水层的代表性样品，建议以每月一次作为最短的时间间隔。

美国《评价地下水修复行动完成的方法》（2014）中提出，达标检验阶段的决策对于地下水最终达标的决策更为重要，需要确保目前地下水达标且未来持续达标，建议最低样本量为 8 个，以确保图示或者统计评估方法（趋势检验或均值检验）的有效性。尽管上述指南推荐了最低样本量，但是本标准也建议应考虑具体场地的条件和采用的统计方法及其置信区间，确定合适的样本量。

《生活垃圾卫生填埋场环境监测技术》（GB/T 18772）要求每年按丰、平、枯水期各监测一次。《污染场地修复技术指南—土壤固化/稳定化技术（试行）》中要求“前两年每季度监测一次，后三年每半年监测一次，第五年后视具体情况进行调整。”为便于执行，本标准推荐采用季度性采样的方式。

《铬污染场地风险管控技术指南》（征求意见稿）中规定，阻隔控制技术的服务年限至少 10 年以上。参考上述指南的服务年限规定，综合风险管控技术所用材料的设计使用年限等因素，本标准规定风险管控工程的运行时间至少为持续 10 年。在判断风险管控效果评估节点时，已至少采集了连续 8 个批次的季度地下水水质监测数据，即风险管控工程已运行 2 年。故此处风险管控的效果评估阶段至少持续 8 年。

## 7.10.2 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二次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，风险评估可按照 HJ 25.3 执行。

### 【说明】

经过地下水修复后的场地应能满足场地开发利用的要求，因此其地下水中污染物浓度的评估标准值应为本场地调查评估和修复方案确定的目标污染物的目标值，若由于开发情景、建筑情景等的变化造成地下水暴露情景和地下水使用功能有变，应根据实际情况进行调整。

地下水污染的修复是采用物理、化学或生物等方法，降低地下水中污染物浓度或污染风险水平到可接受程度的过程，但目标污染物的降解产物或中间产物仍存在有毒有害的可能性。例如，氯代脂肪烃还原脱氯过程可能产生有害的中间产物，氯乙烯。故潜在的二次污染物应纳入地下水修复效果评估的范围之内。

- 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。

### 【说明】

综合地下水修复工程实施情况，参考国外文献，本标准要求地下水中污染物浓度原则上应逐点达标并稳定达标。关于稳定达标可采用趋势分析方法，美国《评价地下水修复行动完成的方法》（2014）中规定：地下水关注污染物达标稳态评估方法为当数据服从正态分布或者可以转换为正态分布，可以采用参数时间趋势分析；若时间不服从正态分布，则可以采用非参数时间序列分析。若趋势线斜率与 0 无显著差异或显著小于 0，则说明地下水关注污染物浓度呈现稳态或者下降趋势，则可以断定地下水关注污染物浓度将持续达标；若趋势线斜率显著大于 0，即趋势线呈现上升趋势，则地下水关注污染物浓度存在反弹的情况，仍需要继续进行达标监测。若置信上限低于修复目标且趋势线斜率与 0 无显著差异或者显著小于 0，这说明地下水已达标。当每一监测井的所有关注污染物达标监测均完成后，还应考虑监测井的未来用途。在一些情况下，还需在一定时间间隔内进行井的监测以确保监测井的达标，直到井的解除。

- 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评估。

#### **【说明】**

大量修复项目，特别是地下水修复经验表明：虽然初始阶段的修复实施可使地下水环境得到很大程度的改善，但是当修复活动进入拖尾期后，即使再投入大量时间和资源的消耗，都很难使残留污染物去除，土壤和地下水水质往往难以达到相应的标准。在此情况下可在建立与完善场地概念模型的基础上，根据样品检测结果、场地水文地质条件、场地未来的开发方案，表征场地中残留污染物的空间分布、污染物与未来受体的相对位置关系以及未来受体潜在的风险暴露途径，对场地污染物的残余健康风险进行分析预测，避免过度修复。

美国《超级基金场地地下水修复推荐程序》中阐述了若修复期间数据分析和概念模型证明修复技术不能达到修复目标，则需要改变修复技术或综合修复措施。修改步骤包括：评估修复潜在可能性、评估是否现有修复目标和相应的清理标准值有其它技术可达、修改修复目标并选择其它修复策略，记录技术不可实施性评估过程。

残留污染物风险评估与场地风险评估与治理修复环节的判断与选择相同。若达到修复极限后，需开展风险管控，直到场地内残留污染物分别达到《地下水质量标准》（GB/T 14848）中地下水使用功能对应标准值。

#### **【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。

#### **【说明】**

由于风险管控技术是对污染物迁移途径的限制或切断，因此其短期效果评估的指标主要为工程性能指标和地下水污染浓度。工程性能指标根据不同的风险管控方式有所不同，例如阻隔设施为阻隔性能等，对于工程性能的评判要求一般须达到设计要求，方可起到风险控制的作用，若实施过程中与设计有所不同，也应不影响预期效果。

除工程性能指标外，对于风险管控措施的考核最终应为其预期效果，例如对地下水污染源的阻隔等，其下游的污染物浓度应保持稳定或持续下降。

##### 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。

#### **【说明】**

主要参考美国《优先场地名单关停程序》（2011）中对于工程措施的要求，若确认工程措施的性能及其风险管控效果不能达到预测要求，须对工程措施进行维护与优化。

### 7.10.3 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分别达到 GB/T 14848 中地下水使用功能对应标准值为准。

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与污染羽下游，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。

#### 【说明】

目前，国内修复工程采用修复方案中确定的修复目标值，此目标值多为根据场地使用途径场地风险评估计算的数值，因此对其是否达到修复效果的判断只适用于规定用地情景，若改变未来用途，则其所达到的目标值不一定不超过可接受风险。例如某商业情景下修复后的场地在多年后可能作为居住用地开发和使用。因此，理论上讲，对于虽然达到修复目标值，但是未达到对应使用功能筛选值或标准值的场地，均应开展后期环境监管。

后期环境监管常采用长期环境监测与制度控制措施。当需通过工程措施阻断风险途径，需进行长期环境监测。制度控制属于非工程类的措施，包括行政和法律控制等，可减少污染物对人类和环境的暴露风险，保护修复和风险管控措施的完整性。制度控制可以通过限制公众对土地或资源的使用，引导公众远离污染场地，减少污染物对人类和环境的暴露风险。

2014 年，台湾地区实施《土壤及地下水污染整治计划撰写指引》，要求污染行为人、潜在污染责任人或土地关系人应就场地实际情况，预先规划提出修复工程结束后土壤、地下水持续定期监测计划，应自修复工程结束后持续 2 年。为了保证修复效果，避免反弹，本标准也规定地下水污染修复工程验收后，需定期开展地下水持续监测，监测时间至少 2 年，每个季度至少监测 1 次。

当污染场地刚被发现或者修复正在实施时，场地上的残留污染无法达到任意使用和任意暴露的标准时，需要使用制度控制。美国联邦应急计划强调，制度控制是风险管控的补充，很少作为唯一的污染场地修复措施。美国出台了一系列指南来指导制度控制的实施与使用等。

### 7.10.4 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。选择附录 D 全部或部分内容编制地下水修复和风险管控工程评估报告。

## 【说明】

污染场地土壤环境管理办法（部令第 42 号）第二十六条规定“治理与修复效果评估报告应当包括治理与修复工程概况、环境保护措施落实情况、治理与修复效果监测结果、评估结论及后期监测建议等内容。”本章节主要依据其要求编写，对报告内容的真实性、科学性进行要求。可参考标准文本附录 D。

## 8 与国内外同类标准对比与分析

本标准是我国污染场地环境保护系列标准之一，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，是《场地环境调查技术导则》（HJ 25.1）《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2）《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3）《污染场地土壤修复技术导则》（HJ 25.4）《污染场地术语》（HJ 682）系列导则的补充。本标准制定过程中，充分调研了国内外场地环境管理相关标准的使用情况，充分借鉴了发达国家地下水修复和风险管控工作流程和技术要求，对于在实施过程中得到公认的基本技术要求进行了明确、对重要技术要点进行了梳理、对关键技术要点进行了补充。本标准的工作流程涵盖了地下水修复和风险管控的全过程，工作程序完整，技术要点明确。

## 9 对实施本标准的建议

本标准的实施需要配套管理措施；建议标准发布实施后，根据标准实施情况适时对本标准进行修订；建议开展与本标准实施相关的科学研究，建议制定各种污染场地地下水修复和风险管控技术应用的技术规范，与本标准配套使用。

## 10 参考文献

- [1] 《全国地下水污染防治规划（2011—2020年）》. 2011.
- [2] 《华北平原地下水污染防治工作方案》. 2013.
- [3] 《水污染防治行动计划》. 2015.
- [4] 《中华人民共和国水污染防治法》. 2018.
- [5] 《中华人民共和国土壤污染防治法》. 2018.
- [6] GB/T 14848—2017 地下水质量标准.
- [7] GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准.
- [8] GB 5084—2005 农田灌溉水质标准.
- [9] GB 8537—2008 饮用天然矿泉水.
- [10] GB 3838—2002 地表水环境质量标准.
- [11] HJ 25.1—2014 场地环境调查技术导则.
- [12] HJ 25.2—2014 场地环境监测技术导则.
- [13] HJ 25.3—2014 污染场地风险评估技术导则.
- [14] HJ 25.4—2014 污染场地土壤修复技术导则.
- [15] HJ/T 164—2004 地下水环境监测技术规范.
- [16] HJ 2050—2015 环境工程设计文件编制指南.
- [17] GB/T 18772—2017 生活垃圾卫生填埋场环境监测技术要求.
- [18] 污染场地修复技术指南—土壤固化/稳定化技术（试行）. 2017.
- [19] 地下水污染修复（防控）工作指南（试行）. 2014.
- [20] 工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）. 2014.
- [21] DB11/T 783—2011 污染场地修复验收技术规范.
- [22] DB11/T 1280—2015 污染场地修复技术方案编制技术导则.
- [23] 上海污染场地修复工程验收技术规范（试行）. 2015.
- [24] 上海污染场地修复技术方案编制规范（修订稿）. 2018.
- [25] DB50/T 724—2016 重庆市污染场地治理修复验收技术导则.
- [26] DB33/T 2128—2018 浙江省污染场地治理修复工程效果评估技术规范.
- [27] 广东省污染场地治理与修复效果评估技术指南. 2018.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程设计文件编制深度规定. 2016.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 市政公用工程设计文件编制深度规定. 2013.
- [30] 德国. 土壤和地下水保护的工作指南. 2002.
- [31] 日本. 土壤与地下水污染调查与对策方针及运用标准. 1999.
- [32] 台湾. 土壤及地下水污染整治计划撰写指引. 2014.

- [33] Michigan DNR. Groundwater and Soil Closure Verification Guidance. 2006.
- [34] OSWER. Close Out Procedures for National Priorities List Sites. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation. 2011.
- [35] OSWER. Recommended Approach for Evaluating Completion of Groundwater Restoration Remedial Actions at a Groundwater Monitoring Well. 2014.
- [36] South Australia 环保局. Guidelines for the assessment and remediation of groundwater contamination. 2009.
- [37] UK. Model Procedures for the Management of Land Contamination. 2004.
- [38] UK Environment Agency. Remedial Targets Methodology. 2006.
- [39] US ASTM. Standard guide for remedy selection integrating risk-based corrective action and non-risk considerations. 2009.
- [40] US ASTM. E1739 - 2002. Standard Guidance for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. 2002.
- [41] US DOE. Guide to Ground Water Remediation at CERCLA Response Action and RCRA Corrective Action Sites. 1995.
- [42] US EPA. Guidance on Remedial Actions for Contaminated Ground Water at Superfund Water at Superfund Sites. 1988.
- [43] US EPA. Methods for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 2: Ground Water. 1992.
- [44] US EPA. Guidance for Evaluating Technical Impracticability of Ground-Water Restoration. 1993.
- [45] US EPA. Remedial Design/Remedial Action Handbook. 1995.
- [46] US EPA. Recommended Process for Restoring Contaminated Groundwater at Superfund Sites. 2011.
- [47] US EPA. Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model. 2011.
- [48] US EPA. Guidance for conducting remedial investigations and feasibility studies under CERCLA. 1988.
- [49] US EPA. Handbook of Groundwater Protection and Cleanup Policies for RCRA Corrective Action for Facilities Subject to Corrective Action Under Subtitle C of the Resource Conservation and Recovery Act. 2004.
- [50] US EPA. Treatment Technologies Screening Matrix.
- [51] US EPA. Pump-and-Treat Ground-Water Remediation. 1996.
- [52] US EPA. Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation. 1988.



- [53] US EPA. A Practical Guide to Estimating Cleanup Costs. 2001.
- [54] US EPA. Final Guidance on Completion of Corrective Activities at RCRA Facilities. 2003.
- [55] US EPA. Cleaning up the Nation's Waste Sites: Markets and Technology Trends. 2004 Edition.
- [56] US EPA. Superfund Remedy Report. Thirteenth Edition. 2014.
- [57] US EPA. Superfund Remedy Report. Fifteenth Edition. 2014.
- [58] Anderson W. C. Remediation technologies screening matrix and reference guide. Annapolis, Md: American academy of Environmental engineers. 2007.
- [59] Robert L. S., Michelle C. and Thomas J. S. In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation. SERDP/ESTCP, volume 3. 2011.
- [60] 龚宇阳.污染场地管理与修复[M].北京: 中国环境出版社, 2012.
- [61] 廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 等.污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨[J]. 环境科学, 2014, 35 (1) : 1566-1570.