

# 污染地下水抽出-处理技术指南 ( 试行 )

2022 年 5 月

# 目次

<b>第一章总则 .....</b>	<b>1</b>
1.1 编制目的 .....	1
1.2 适用范围.....	1
1.3 编制依据.....	1
1.4 术语与定义.....	2
1.5 指导原则.....	3
1.6 组织编制单位.....	3
<b>第二章工作内容和流程 .....</b>	<b>4</b>
2.1 工作内容.....	4
2.2 工作流程.....	5
<b>第三章技术适宜性评估 .....</b>	<b>7</b>
3.1 抽出技术适宜性评估.....	7
3.2 处理技术适宜性评估.....	10
<b>第四章地块概念模型更新 .....</b>	<b>13</b>
4.1 水文地质特征刻画.....	13
4.2 污染源特征刻画.....	14
4.3 污染物分布特征刻画.....	14
4.4 敏感受体识别.....	14
<b>第五章工程设计 .....</b>	<b>15</b>
5.1 抽出系统设计.....	15
5.2 处理系统设计.....	21
<b>第六章工程施工 .....</b>	<b>24</b>
6.1 施工组织方案编制.....	24
6.2 施工过程控制.....	26
6.3 设备安装与调试.....	27
<b>第七章工程运行及监测 .....</b>	<b>28</b>
7.1 工程运行与维护.....	28
7.2 工程运行监测.....	29
7.3 工程运行状况分析.....	31
<b>第八章工程效果评估 .....</b>	<b>32</b>
8.1 风险管控效果评估.....	32
8.2 修复效果评估.....	34
<b>第九章工程关闭 .....</b>	<b>37</b>

附录 A 常用水处理技术适宜性.....	38
附录 B 概念模型更新资料来源.....	39
附录 C 捕获区分析与计算方法 .....	40
附录 D 抽出速率评估方法 .....	43

# 污染地下水抽出-处理技术指南（试行）

## 第一章 总 则

### 1.1 编制目的

为贯彻落实《地下水管理条例》《地下水污染防治实施方案》，推进我国地下水污染防治，指导和规范污染地下水抽出-处理技术在地下水污染修复和风险管控中的应用，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》《中华人民共和国土壤污染防治法》及相关法律、法规文件，编制《污染地下水抽出-处理技术指南（试行）》（以下简称指南）。

### 1.2 适用范围

本指南规定了针对受污染地下水开展抽出-处理工作的指导原则、工作流程、工作内容、技术要求等。

本指南适用于采用单一抽出-处理技术或与其他技术组合联用开展地下水污染风险管控和修复的工程。

### 1.3 编制依据

本指南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指南。

GB 8978 污水综合排放标准

GB/T 31962 污水排入城镇下水道水质标准

DZ/T 0148 水文水井地质钻探规程

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 164 地下水环境监测技术规范

HJ 2015 水污染治理工程技术导则

YS 5215 抽水试验规程

## **1.4 术语与定义**

下列术语与定义适用于本指南。

### **(1) 地下水污染羽**

是指进入含水层的污染物从污染源向周边迁移、扩散所形成的污染区域。

### **(2) 抽出-处理技术**

是指根据地下水污染范围，在特定位置布设抽水井，通过抽水设施将污染的地下水从含水层中抽取到地面加以处理的技术。

### **(3) 污染源削减策略**

是指利用抽出-处理技术快速、大幅削减饱和含水层中污染物含量，最大限度减少和降低高浓度/非水溶性有机污染物的工作思路。

### **(4) 污染羽控制策略**

是指利用抽出-处理技术控制地下水流场，阻止污染羽迁移扩散，将污染尽可能限定在最小范围的工作思路。

### **(5) 污染羽修复策略**

是指采用抽出-处理技术降低饱和含水层中污染物浓度至地

下水修复目标的工作思路。

## **(6) 目标捕获区**

是指根据确定的风险管控模式或修复模式下的策略需求，拟实施污染源削减、污染羽控制或污染羽修复的区域。

### **1.5 指导原则**

(1) 规范性原则：采用程序化、系统化方式规范污染地下水抽出-处理技术的工作内容和流程，确保抽出-处理工作的规范开展。

(2) 适宜性原则：根据污染地块水文地质特征、污染物性质及空间分布特征、施工条件以及污染地下水风险管控模式和修复模式选择等，确定适宜的抽出-处理策略。

(3) 科学性原则：综合考虑时间成本、经济成本以及工作目标等约束条件，科学确定设计方案，实现效益最大化。

(4) 渐进性原则：考虑到污染地块水文地质条件、污染物空间分布刻画等的不确定性，在方案设计初始阶段应尽可能保守设计，并在工程运行监测等获取数据的基础上，对设计方案进行动态优化调整。

### **1.6 组织编制单位**

本指南由生态环境部土壤生态环境司组织，生态环境部环境规划院、生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心、中国地质大学（北京）、南方科技大学、上海交通大学等单位起草编制。

## 第二章 工作内容和流程

### 2.1 工作内容

#### 2.1.1 技术适宜性评估

基于地块前期调查、风险评估、概念模型建立等确定的风险管控或修复模式，根据工作目标，结合地块水文地质条件和污染物性质，进行抽出-处理技术应用分析，开展技术适宜性评估，确定地块采用抽出-处理技术的适宜性。

#### 2.1.2 地块概念模型更新

在风险管控和修复的全过程中，通过资料收集、背景信息分析以及工程运行监测等，动态更新地块概念模型，逐步精细刻画水文地质条件、污染源特征、污染羽分布、敏感受体特征等。

#### 2.1.3 工程设计

主要包括抽出系统设计、处理系统设计。其中，抽出系统设计包括抽出策略选择、目标捕获区确定、抽水井及监测井设计及特殊情景改进等。处理系统设计包括处理规模设计、处理工艺设计、辅助设施设计及排水去向设计等。

#### 2.1.4 工程施工

工程施工应满足抽出-处理工程设计方案及相关施工技术规范要求，包括施工方案编制、施工过程控制及设备安装与调试。

#### 2.1.5 工程运行及监测

抽出-处理工程运行及监测应包括工程运行与维护、运行效

果监测、工程运行状况分析。通过评估抽出-处理工程的运行状况，优化工程措施，保障风险管控目标和修复目标可达。若判断风险管控目标或修复目标不可达时，应根据实际情况选择调整工程设计方案或筛选其他技术。

### **2.1.6 工程效果评估**

在风险管控工程施工完工1年内或修复工程经初步判断达到修复目标后，根据风险管控目标或修复目标，开展风险管控或修复效果评估，确定抽出-处理工程效果。

### **2.1.7 工程关闭**

当确定目标污染物的浓度已经达到既定的修复目标或无需抽出-处理工程实施连续2年均满足风险管控目标时，可选择关闭抽出-处理工程。

## **2.2 工作流程**

工作流程包括技术适宜性评估、概念模型更新、工程设计、工程施工、工程运行与监测及工程效果评估等内容。污染地下水抽出-处理技术工作流程如图 1 所示。



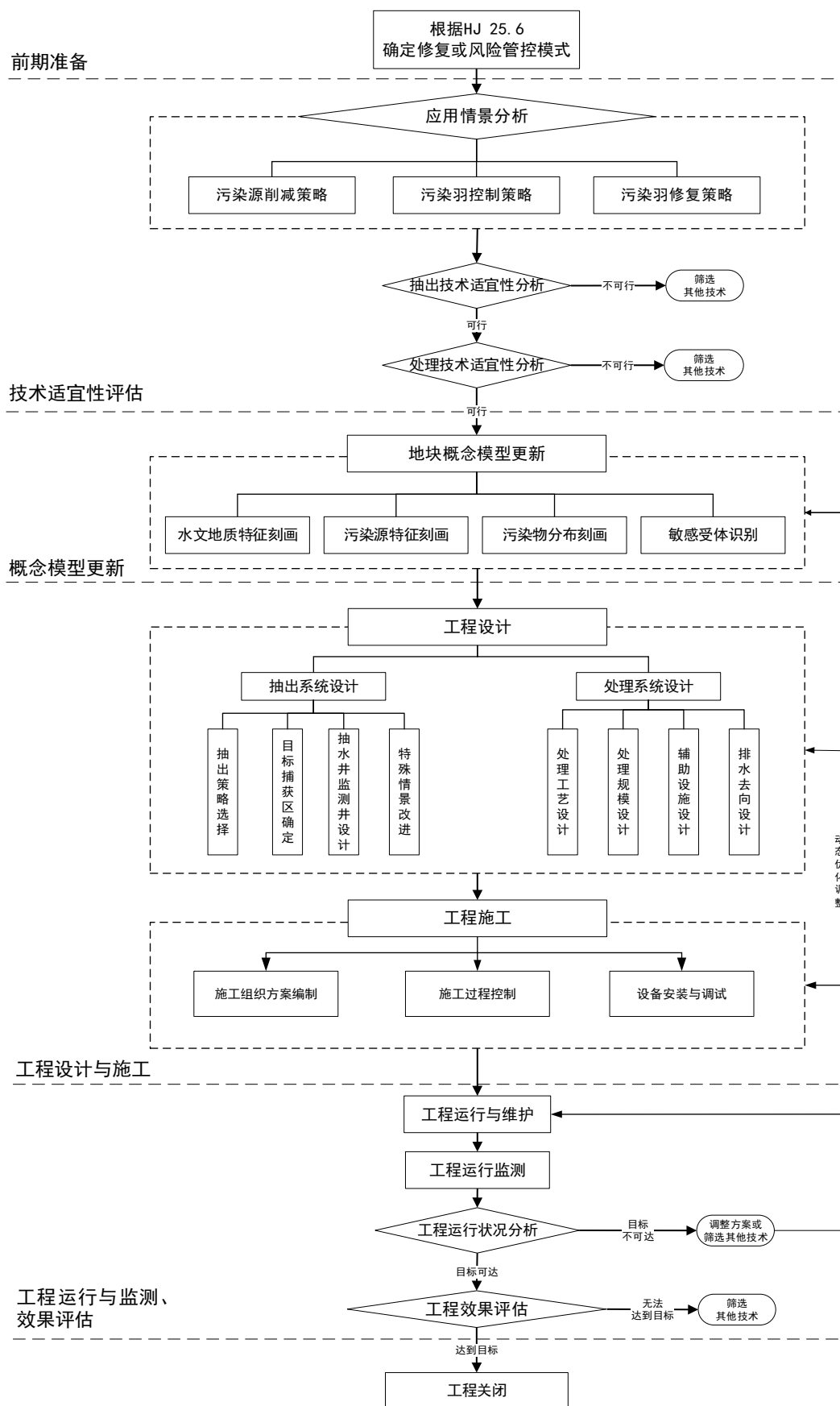


图1 抽出-处理技术工作流程图

## 第三章 技术适宜性评估

根据地下水风险管控或修复治理时间、预期经费投入、土地利用规划，参照 HJ25.6 制定的风险管控目标或修复目标，确定地下水污染风险管控模式或修复模式。根据工作目标，结合地块水文地质条件、污染物性质、污染物空间分布特征等，进行抽出-处理技术应用分析，开展抽出-处理技术适宜性评估。

### 3.1 抽出技术适宜性评估

#### 3.1.1 应用情景分析

在确定的风险管控或修复模式下，可选择单一抽出技术或与其他技术组合联用的方式开展地下水污染风险管控和修复。抽出技术可用于污染源削减、污染羽控制、污染羽修复等抽出策略。风险管控模式下，抽出技术可应用于高浓度区地下水中污染物的削减、污染羽阻控等；修复模式下，抽出技术可应用于修复工程前期地下水中污染物的削减、地下水污染整体修复治理等，详见表 1。

表 1 风险管控或修复模式下抽出技术应用

治理模式	技术应用	抽出策略选择	工作目的
风险管控模式	抽出技术	污染羽控制	采用抽出技术开展水力截获，对污染羽进行捕获，阻止污染羽的进一步扩散
		污染源削减+污染羽控制	采用抽出技术实现高浓度污染物的削减，减小污染源对下游的影响，同时结合水力截获实现对污染羽的阻控
	抽出技术+其他技术	污染源削减	采用抽出技术实现高浓度污染物的削减，结合原位注入、可渗透反应格栅、阻隔等其他技术实现对污染羽的阻控
		污染羽控制	采用抽出技术结合原位注入、可渗透反应格栅、阻隔等其他技术实现污染羽的阻控
		污染源削减+污染羽控制	采用抽出技术结合原位注入、可渗透反应格栅、阻隔等其他技术实现污染物削减及污染羽的阻控
	修复模式	抽出技术	污染羽修复
抽出技术+其他技术		污染羽控制	采用抽出技术开展水力截获，阻止污染羽的进一步扩散，结合原位注入、可渗透反应格栅、阻隔等其他技术达到修复目标
		污染源削减	采用抽出技术实现污染物的削减，结合原位注入、可渗透反应格栅、阻隔等其他技术达到修复目标
		污染源削减+污染羽控制	采用抽出技术实现污染物的削减及污染羽的阻控，结合原位注入、可渗透反应格栅、阻隔等其他技术达到修复目标

### (1) 污染源削减策略

通过在高浓度区布井抽水，改变高浓度区水力梯度，减少高浓度区的污染物随地下水向下游迁移的量，大幅削减含水层中污染物含量，减少污染物扩散通量。风险管控模式下，可采用污染源削减策略，结合水力截获以及其他技术，高效削减含水层中的污染物。修复模式下，可在修复工程前期利用污染源削减策略降

低高浓度区污染物含量，也可在修复工程后期结合原位注入、可渗透反应格栅、阻隔等技术达到修复目标。

## （2）污染羽控制策略

通过对污染羽布井抽水，形成捕获区，阻止污染羽扩散或降低其扩散速度，保护下游敏感受体。风险管控模式下，可采用污染羽控制策略，通过单井或群井抽水，有效阻止污染羽的迁移，也可结合污染源削减策略，实现对高浓度区地下水污染物的削减。修复模式下，可采用污染羽控制策略结合其他治理技术实现既定的修复目标。

## （3）污染羽修复策略

修复模式下，可采用单一抽出技术进行污染地下水修复，通过针对污染羽布井抽水，形成捕获区，逐步减小污染羽的体积，降低污染物浓度，使其达到修复目标。

### 3.1.2 适宜性分析

抽出技术适宜性分析需要综合考虑污染物的特征及含水层渗透性等。污染物方面，抽出技术对于氯代烃、苯系物、重金属等污染物治理具有较好的适用性；含水层渗透性方面，抽出技术一般适用于含水层渗透系数（等效）不小于  $5 \times 10^{-5}$  cm/s 的粉砂至卵砾石的孔隙介质、基岩裂隙介质等。

污染源削减策略以大幅削减污染物含量为主要目的，一般应用于风险管控和修复工程前期，除溶解态污染物外，对非水溶性有机物同样具有一定的去除效果。为达到风险管控和修复目标，

通常需结合其他技术如原位注入、可渗透反应格栅、阻隔等开展。

污染羽控制策略一般用于阻止污染羽的扩散，在渗透性、富水性较好的地区，可形成稳定的降落漏斗截获污染羽，控制溶解态污染物的迁移扩散，对于有机物、重金属等大多数污染物具有较好的适用性。

污染羽修复策略适宜性主要取决于水文地质条件和污染物性质，通常对均质含水层中迁移性较强的污染物适宜性较好，其适宜性见表 2。当存在非水溶性有机物时，可根据地块条件采用污染源削减策略、污染羽控制策略，结合其他技术开展地下水污染修复。

表 2 污染羽修复策略适宜性评估表

污染物性质 水文地质条件	溶解性污染物				非水溶性有机物	
	迁移性强 (可降解/挥发)	迁移性强	吸附性强 (可降解/挥发)	吸附性强	轻质	重质
均质含水层	A(1)	A(1-2)	B(2)	B(2-3)	B(2-3)	B(3)
非均质含水层	B(2)	B(2)	B(3)	B(3)	B(3)	C(4)
裂隙介质	B(3)	B(3)	B(3)	B(3)	C(4)	C(4)

注：A类代表利用现行技术可达修复目标。B类代表利用现行技术是否可达修复目标需要具体评估。C类代表利用现行技术无法达到修复目标。括号内数字代表修复难度，1代表最容易，4代表最难。

## 3.2 处理技术适宜性评估

### 3.2.1 应用情景分析

处理技术应根据污染物类型、浓度水平和抽水量进行选择，可借鉴工业废水的处理方法，主要分为两大类，即物理/化学法和生物法，见表 3。

表 3 常用不同类型水处理方法

类别	适用条件	工艺类型
物理/ 化学	利用物理方法、化学方法、物理-化学联用方法对污染物进行去除，适用的污染物类型多，浓度范围大	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 沉淀</li> <li>◇ 化学氧化</li> <li>◇ 化学还原</li> <li>◇ 蒸馏</li> <li>◇ 吹脱</li> <li>◇ 汽提</li> <li>◇ 活性炭吸附</li> <li>◇ 蒸发</li> <li>◇ 浮选</li> <li>◇ 膜分离</li> <li>◇ 离子交换</li> <li>◇ 油水分离</li> </ul>
生物	利用微生物对有机物进行降解去除，适用于浓度较低且生物过程不受抑制的污染物处理	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 活性污泥系统</li> <li>◇ 序批处理反应器</li> <li>◇ 好氧流化床生物反应器</li> </ul>

### 3.2.2 适宜性分析

处理技术适宜性分析一般包括技术初筛和技术可行性分析。

#### (1) 技术初筛

根据抽出地下水中污染物类型、污染物浓度水平、抽水量，结合地块条件，确定处理规模、进水浓度要求，对比不同水处理技术的优缺点，初步筛选一种或多种适宜的处理技术，常用水处理技术的适宜性参见附录 A。

#### (2) 技术可行性分析

通过实验室小试、现场中试，针对初步筛选的一种或多种适宜的处理技术，开展可行性分析。实验室小试根据受污染地下水的污染物类型、浓度水平开展实验，分析技术可行性，确定工艺

参数，如污染物处理浓度上限、预处理要求、成本等。现场中试应结合地块条件、污染物类型、浓度水平等选择适宜的中试单元开展，识别潜在问题，确定经济、有效的处理技术，优化工程设计和施工所需要的参数。

经小试或中试验证，处理技术无法有效降低污染物浓度、缺乏施工条件、建设或运行成本超出可接受范围时，需考虑选择其他技术开展地下水污染风险管控和修复工作。

## 第四章 地块概念模型更新

在地块环境调查和风险评估阶段构建的概念模型基础上，根据资料收集、背景信息分析以及工程运行监测等获取的数据，在风险管控和修复的全过程中进行概念模型的动态更新，逐步完善水文地质条件、污染源特征、污染羽分布、敏感受体特征等刻画。概念模型更新资料来源参见附录 B。

### 4.1 水文地质特征刻画

抽出-处理工程设计应强化水文地质条件分析，包括含水岩组类型、结构、空间延展形态，地下水的补径排条件等。设计所需的水文地质参数包括地下水水位埋深、地下水流速、渗透系数、给水度、有效孔隙度、水力梯度等，见表 4。

表 4 抽出-处理技术所需水文地质参数

水文地质参数	参数用途	数据获取方法
渗透系数	用于计算地下水抽出速率、地下水抽水量	抽水试验、微水试验
有效孔隙度	用于计算地下水实际流速	室内试验
弹性释水系数	用于计算承压含水层地下水抽水量	抽水试验
给水度	用于计算潜水含水层地下水抽水量	
水力梯度	用于确定地下水流及污染物迁移方向和速度	水位统测
地下水流速	用于确定污染物迁移的方向和速度	水位统测、抽水试验、流向流速仪、示踪试验
地下水水位（丰、平、枯）及含水层顶底板高程	用于确定抽水井的筛管位置，用于确定非水溶性有机物的迁移方向和可能的富集区域	水位统测、钻探、物探
介质粒径分布	用于确定填料粒径及井筛滤网的筛孔尺寸	岩心采样、土工试验



## 4.2 污染源特征刻画

应明确污染源类型，地面、地下装置/设施渗（泄）漏情况，污染源释放特征，以及特征污染物是否以非水溶相形式存在等。

## 4.3 污染物分布特征刻画

污染物分布特征可通过资料收集、地块调查、抽出-处理工程运行监测数据进行刻画。具体包括：（1）污染物类型、性质、毒理参数、污染程度及范围；（2）污染物分布随时间、空间的变化特征。

## 4.4 敏感受体识别

敏感受体识别可通过资料收集、地块调查，结合调查阶段健康风险评估结果，对污染源周边受到潜在影响的水源、地表水体和居民区等进行分析确认。具体包括：（1）敏感受体的分布；（2）地下水与地表水体的水力联系；（3）人群健康风险。

布设抽水井应能保证形成的捕获区足够大，可有效阻止污染向下游敏感受体进一步扩散。实施抽出-处理工程过程中，应对敏感受体开展周期性采样和评估。

## 第五章 工程设计

抽出-处理工程设计工作的主要内容应包括抽出系统设计、处理系统设计等。抽出系统设计包括抽出策略选择、目标捕获区确定、抽水井及监测井设计及特殊情景改进等。处理系统设计包括处理规模设计、处理工艺设计、辅助设施设计及排水去向设计等。

### 5.1 抽出系统设计

在不同抽出策略下，根据地块特征资料，确定目标捕获区，评估抽水井的抽出速率，设计抽水井布置方案。必要时，可利用模拟软件优化布井方案，具体模拟步骤可参考《地下水污染模拟预测评估工作指南》。当涉及敏感建（构）筑物、道路等时，应考虑地面沉降、建（构）筑物变形等影响。

#### 5.1.1 抽出策略选择

在确定的修复或风险管控模式下，综合考虑污染物削减、污染羽阻控或达到修复目标等目的，可采用不同的抽出策略，基于约束条件，合理布设抽出井、注水井等。当采用抽出技术或与其他技术联用实现高浓度污染物的大幅削减，减小污染源对下游的影响时，可选择污染源削减策略；当采用抽出技术开展水力截获或其他技术联用，实现对污染羽的阻控时，可选择污染羽控制策略；当采用抽出技术实现修复目标时，可选择污染羽修复策略。

## (1) 污染源削减策略

根据污染源削减策略的工作目的，捕获区范围（捕获区分析与计算方法见附录 C）、污染物抽出速率（抽出速率评估方法见附录 D）、污染物削减率是评估污染源削减策略的重要指标，抽水井布设时主要考虑以下约束条件：1）抽水流量相同时，抽出速率最大化；2）在抽出速率相当时，抽水流量最小化。

抽出系统布设要求包括：

1）抽水井应布设于高浓度区内，通过抽水改变水力梯度，形成向高浓度区流动的污染物捕获区域，降低高浓度区向下游迁移扩散的污染物通量。

2）在不超过处理能力的前提下，最大限度提高污染物总削减率。

3）可同时在高浓度区下游设置注水井，通过注水形成阻水帷幕，抽注结合迫使下游污染羽向上游高浓度区迁移。

4）随着污染物削减率的增加，应合理优化抽水流量、抽水井井位，以保证较高的抽出速率。

污染源削减策略抽水井布设示意图如图 2 所示。

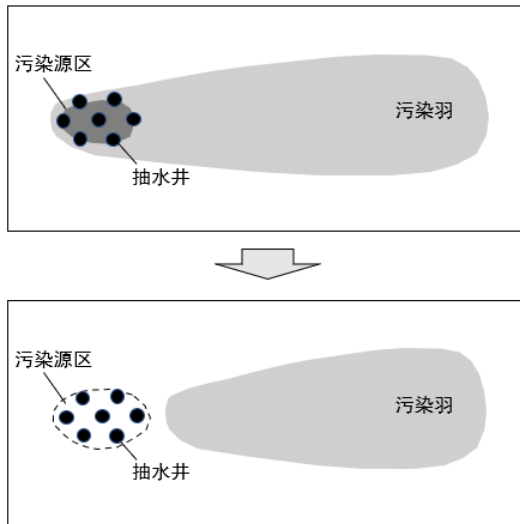


图2 污染源削减策略抽水井布设示意图

## (2) 污染羽控制策略

根据污染羽控制策略的工作目的，捕获区范围、流场控制情况是评估污染羽控制策略的重要指标，抽水井布设时主要考虑以下约束条件：1) 抽水降深足以形成有效的水力阻隔；2) 抽水流量最小化。

抽出系统布设要求包括：

1) 井群的数量、间距及排列方式应最大限度地阻隔和截获污染羽。

2) 应在抽水形成的局部流场有效阻止污染物向下游迁移的前提下，设计最小抽水量。

3) 捕获区之外的污染羽，应可通过污染物的对流弥散、自然衰减或结合其他技术达到风险管控目标或修复目标。

污染羽控制策略抽水井布设示意图如图3所示。

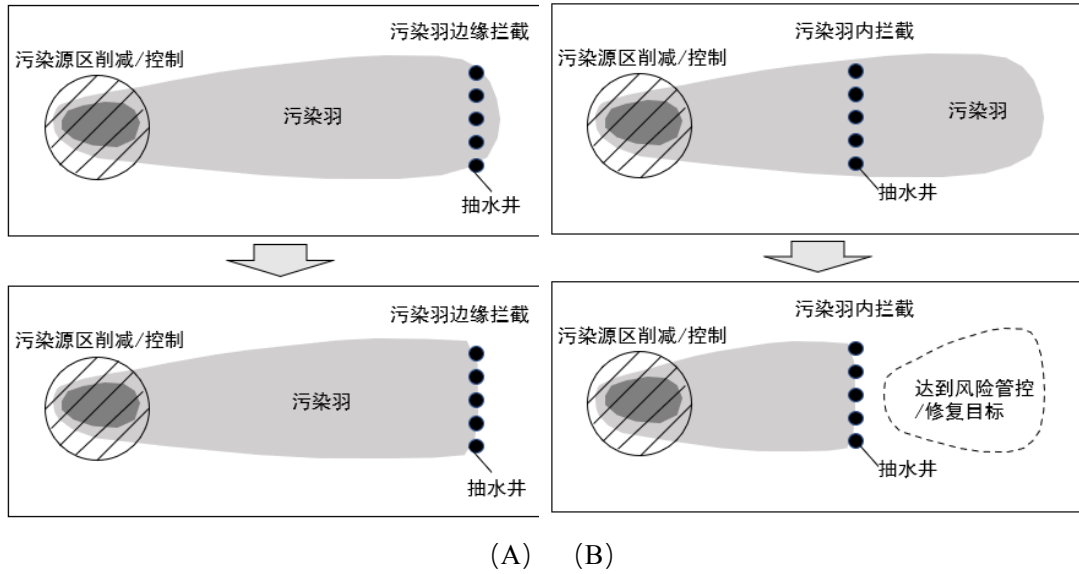


图3 污染羽控制策略抽水井布设示意图

### (3) 污染羽修复策略

根据污染羽修复策略的工作目的，捕获区范围、污染物削减率、修复达标情况等是评估污染羽修复策略的重要指标，抽水井布设时主要考虑以下约束条件：降低污染物浓度至修复目标；抽出速率最大化；修复所用时间最小化；成本最小化。

抽出系统布设要求包括：

- 1) 抽水井群应能够最大限度捕获污染羽，常见的布设方法是将抽水井沿污染羽轴线布设。
- 2) 合理优化抽水井数量、井位、间距、抽水流量、开筛位置，最大限度提高抽出速率。
- 3) 根据运行效果监测，识别存在问题，及时优化调整方案，确保达到修复目标。

污染羽修复策略抽水井布设示意图如图 4 所示。

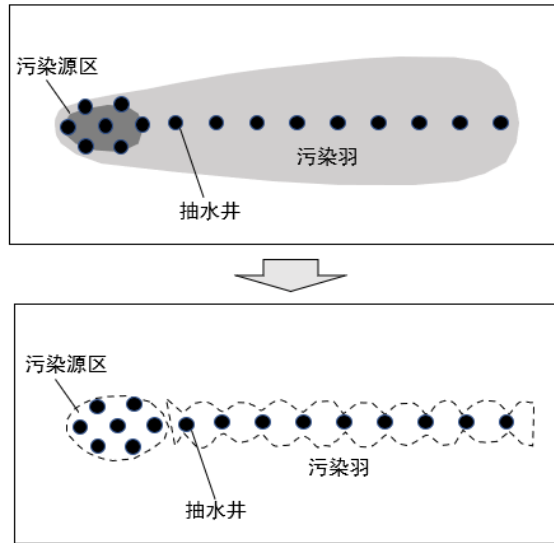


图4 污染羽修复策略抽水井布设示意图

### 5.1.2 目标捕获区确定

根据地下水污染特征分布，基于确定的风险管控模式或修复模式，明确污染源削减、污染羽控制以及污染羽修复等不同抽出策略下的目标捕获区。

目标捕获区应该根据所需捕获的污染羽范围变化进行动态调整。当存在多种目标污染物时，目标捕获区应能捕获每种目标污染物。目标捕获区应在地块修复方案和监测计划中明确，并在相关平面图和剖面图上标明。

### 5.1.3 抽水井及监测井设计

抽水井和监测井应根据掌握的相关资料，结合现场条件，科学设计。必要时，抽水井和监测井可统筹考虑，同步设计，同时满足抽水和监测的有关要求，做到一井多用。如果垂向上存在多个含水层受到污染，为防止串层污染，应针对每个目标含水层设计单独的抽水井和监测井，做好分层止水。

### （1）筛管设计要求

抽水井筛管顶部应高于污染羽的顶部，筛管底部应延伸至污染羽的底部，以满足垂向上污染羽的捕获要求。筛管具体长度和开筛位置可结合抽出策略，根据含水层结构优化调整。

监测井设置在污染羽所在目标含水层，应满足地下水水位、水温、水质等指标的监测要求。筛管顶部至少高于丰水期水面 1.0 m 以上，筛管底部至少低于枯水期水面以下 1.0 m。当涉及重质非水相液体时，筛管应设置在目标含水层底部；当涉及轻质非水相液体时，筛管应设置在目标含水层的顶部。筛管具体长度和开筛位置可根据监测目的优化调整。

### （2）孔径、井径设计要求

抽水井井管的内径要求不小于 110 mm，以能够满足预计抽水量、安装水泵等要求，可依据实际需求增大。终孔直径应根据井的类型、井管与筛管的规格、填砾厚度等确定。孔径相关标准可参考 DZ/T 0148。监测井井管的内径要求不小于 50 mm，以能够满足洗井和采样要求的口径为准，其他监测井建设要求参照 HJ 164 执行。兼具抽水和监测功能的井应同时满足 DZ/T 0148、HJ 164 的建设要求。

### （3）井管材质设计要求

井管材质选择需考虑井深、井径、材料强度、材料化学性能、地下水的腐蚀性、微生物作用及成本等因素，应由坚固、耐腐蚀、对地下水水质无影响的材料制成。一般可使用 PVC 材质、钢管

或不锈钢管等作为井管材料，并考虑井管材料与污染物的相容性，避免井管材料影响水质监测结果。井管应采用螺纹接口，不得使用任何粘接剂。

#### **5.1.4 特殊情景改进**

当含水层非均质性较强，局部存在低渗透区，或存在非水溶性有机物时，为防止产生污染物浓度的拖尾和反弹现象，可通过以下措施改进抽出效果。

(1) 可结合监测数据、数值模型对井位分布、筛管位置、抽水量等进行调整。

(2) 针对构造裂隙水、岩溶水等复杂情景，应逐步更新地块概念模型，结合污染物分布特征，针对主径流带等重点区域布设抽水井。

(3) 可将注水井与抽水井相结合，增加水力梯度，提高目标含水层地下水流速，提高抽出速率。抽注结合时，应保证回注至目标含水层，且避免污染羽扩散或造成含水层二次污染。工程结束时，应保证污染物浓度和污染羽范围达到风险管控目标或修复目标。

(4) 可与其他技术如原位化学氧化、化学还原、生物强化、热脱附等联合应用达到风险管控或修复目标。

### **5.2 处理系统设计**

处理系统设计主要包括处理规模、处理工艺、辅助设施及排水去向等设计，其设计所需参数可通过小试和中试获取，并根据



工程运行过程监测数据进行优化调整。处理系统整体应在考虑建设费用和运行费用的基础上确定成本投入。若污染地块及周边已有污水处理设施，应充分利用现有条件进行处理，节约建设成本。设计时应考虑二次污染的控制，并采取除臭和降噪措施，尤其是在含有挥发性有机污染物时，应采取相应处置措施。

### **5.2.1 处理规模设计**

处理规模应满足不同抽水方案下的最大日抽水量，避免进水量超过设计流量导致污水直排情况发生。

### **5.2.2 处理工艺设计**

处理工艺应根据污染物类型和处理规模等确定，保证出水水质能持续稳定达标，处理工艺和方法可参照 HJ 2015 及相关工程技术规范执行。

### **5.2.3 辅助设施设计**

辅助设施包括给水排水系统、流量计、水质监测设备、电气与自控系统、设备房等，应在处理系统主体基础上进行设计，为后续工程运行提供支持。

### **5.2.4 排水去向设计**

地块处理系统出水可选择排放入环境水体或排放至公共污水处理系统。排放水污染物应符合国家和地方水污染物排放标准要求。环境影响评价批复文件有更严格要求的，从其规定。处理系统建成运行前产生的污染地下水应转运至污水集中处理设施，不得以逃避监管的方式排放污染物。

当选择排入环境水体时，地块处理系统设计出水水质应结合国家和地方水污染物排放标准要求、受纳水体环境质量现状、水环境保护目标等综合评估确定。

当选择排放至公共污水处理系统时，地块处理系统设计出水水质应依据 GB 8978、GB/T 31962 及有关行业标准综合确定。对地块处理系统业主与公共污水处理系统运营单位签订具有法律效力纳管协议的，地块处理系统设计出水水质还应满足纳管协议的要求。禁止通过稀释法降低污染物浓度后排入公共污水处理系统。禁止向公共污水处理系统排放、倾倒剧毒、易燃易爆、腐蚀性废水，不应影响公共污水处理系统的正常运行。

对于未列入上述标准的污染物，其排放限值应由地方生态环境主管部门审批确认后排入环境水体或公共污水处理系统，必要时可增加生物综合毒性作为污染物控制指标。

## 第六章 工程施工

工程施工应满足抽出-处理工程设计方案及相关施工技术规范要求，包括施工方案编制、施工过程控制及设备安装与调试。

### 6.1 施工组织方案编制

工程施工组织应根据工程设计方案执行，且应满足相关施工技术规范，并应在施工过程中根据现场实际情况适当调整。工程施工组织方案编制还应重点关注施工条件分析、建井、洗井、抽水试验、设备物资准备等环节。

#### 6.1.1 施工条件分析

施工前应核实以下情况，并根据工程设计要求，编制施工组织方案。

- (1) 现场地形、地貌、建（构）筑物、地下管道、其他设施及障碍物情况。
- (2) 工程地质和水文地质资料。
- (3) 气象、水文资料。
- (4) 工程用地、交通运输及其环境条件。
- (5) 施工供水、排水、通信、供电和其他动力条件。
- (6) 与施工有关的其他情况和资料。

#### 6.1.2 建井

建井施工过程一般包括钻进、护壁与冲洗、岩土样采取、井管安装、填充滤料及止水等，施工工艺可参照 DZ/T 0148 执行。

在施工过程中，应注意避免由于钻探过程导致的串层污染以及设备设施清洗等带来的二次污染。由于地面设施限制而无法钻井施工等特殊情景，可使用定向斜井、水平井或排水沟替代竖井。在地块施工条件允许的情况下也可采用其他施工措施截获污染地下水。

钻进方法有取芯钻进、全面钻进和扩孔钻进。典型的开孔工艺有一径成孔（井）、多径成孔（井），在条件具备时，应采用一径成井工艺。

筛管类型包括缠丝筛管、条缝筛管和包网筛管等，筛管选择应根据含水层类型、水质、孔深、建井需求等确定，具体可参考 DZ/T 0148。目标含水层为基岩裂隙水或岩溶水，宜采用条缝筛管或缠丝筛管。目标含水层为松散岩类孔隙水，若含水介质为砾石、卵石等，宜采用条缝筛管或缠丝筛管；若含水介质为中砂、细砂、粉细砂等，宜采用配合管外填砾的包网筛管、条缝筛管或缠丝筛管。

滤料应由经过清水或蒸汽清洗、按比例筛选、化学性质稳定、成分已知、尺寸均匀的球形颗粒构成。具体滤料粒径、筛缝宽度与含水层介质粒径的换算关系参照 DZ/T 0148 执行。滤料使用、存储时应确保不与污染物接触并防止外部杂质混入。

在过滤层上下部环状间隙应使用膨润土（黏土球）作为止水材料进行封隔，具体止水要求可参考 DZ/T 0148。

### 6.1.3 洗井

建井完成后应及时进行洗井。洗井方法可选用气提或抽水方法，不得采用化学洗井法。洗井设备可采用活塞、空压机、离心泵、潜水泵等，抽水泵主要根据地下水位埋深和出水量等条件进行选择，具体可参考 DZ/T 0148。

#### **6.1.4 抽水试验**

成井后应开展抽水试验，计算渗透系数，评价出水量。根据含水层性质和污染物性质、浓度等设计合适的抽水量。根据设计抽水量、稳定水位降深、季节性水位变化等因素，选择合适的水泵类型、规格、放置方式等，具体试验方法可参照 YS 5215 执行。

#### **6.1.5 设备物资准备**

方案中应明确主要水处理设备、工程材料、施工机械和特种物资准备情况，并向施工人员说明施工图和工程设计要求，确保处理设施安装施工有序开展。

### **6.2 施工过程控制**

施工所用的设备设施、管材、管道附件和主要原材料等进入施工现场时必须进行进场验收并妥善存放。

施工过程中应实施动态管理，做好质量控制，保证质量、进度、成本、安全目标。各单体设施、构筑物等应按照施工组织方案进行施工，施工完成后，应进行检验；各单体设施、构筑物之间的衔接须满足工艺设计要求，且应进行交接检验。

当施工过程中出现技术问题时，应根据具体情况对设计作必要的修改和调整。

### 6.3 设备安装与调试

抽水井建设并洗井完成后，应严格按照设计要求开展水泵、输水管道、流量计、自动化控制设备等设备安装与调试。水处理设施、构筑物等施工完成后，应根据相关技术规范开展必要的满水试验、气密性试验等。处理系统整体施工完成后，应试运行一段时间，确保处理系统运转正常。处理系统正式运行前，在进水符合设计要求的前提下，处理终端出水水质应稳定达到设计标准要求。

## 第七章 工程运行及监测

抽出-处理工程运行及监测应包括工程运行与维护、运行效果监测、工程运行状况分析等。通过评估抽出-处理工程的运行状况，优化工程措施，保障风险管控目标或修复目标可达。

### 7.1 工程运行与维护

抽出-处理工程运行与维护应包括运行计划制定、设备操作与维护、运行维护过程记录、药剂与材料管理等。

#### 7.1.1 运行计划制定

根据工作目标，针对抽水井、水泵和水处理设施提出运行维护要求，记录运行过程，制定设备操作规程与维护方案，制定药剂与材料管理办法等。

#### 7.1.2 设备操作与维护

抽出-处理工程的设备设施包括抽水井和监测井、在线监测系统（水温、水位、基本理化指标等）、自动化控制设备、水处理设备等，应根据设备相应的操作规程进行操作。

抽水井应设置专门的井口保护装置，定期测量井口高程，根据抽水井出水量与水位降深变化，以便掌握抽水井运行状况。当出现坍塌、损坏、堵塞等情况，应及时维修或重建。定期检查自动化控制设备和水泵运行情况，若出现输出水量、水压或电能消耗异常时，应停机检修。定期检修管网运行状况，若出现堵塞、泄漏等情况，应及时维修或更换。定期检查水处理设备运行状况，

若发生异常情况，宜根据使用与维护手册进行检修。

### **7.1.3 运行维护过程记录**

应准确、完整记录抽水井、在线监测系统、自动化控制设备、水泵、管网和水处理设备的运行参数和运行维护情况，对采集、记录的数据进行分析，及时发现潜在问题。

### **7.1.4 药剂与材料管理**

药剂与材料的进场检测、试验、登记、储存和使用应建立相应台账，妥善管理。

## **7.2 工程运行监测**

### **7.2.1 运行效果监测**

围绕污染源削减、污染羽控制和污染羽修复等策略的风险管控目标或修复目标，开展工程运行效果监测。监测井应包括对照井、内部监测井和控制井，并应充分利用已有抽水井、监测井，必要时可新建监测井，以满足污染羽特征刻画、工程运行状况分析的监测要求，监测井的布设要求和监测频次可参考 HJ 25.6。

#### **(1) 污染源削减策略**

监测井应针对高浓度区进行布设，定期监测高浓度区抽水井和监测井污染物浓度（涉及非水溶性有机物的还应考虑饱和度等）、水位和抽水量，掌握地下水中污染物的动态变化特征，评估抽出系统的抽出速率、捕获区范围变化情况以及高浓度区污染物削减效果。

#### **(2) 污染羽控制策略**



监测井应针对污染羽边界内外进行布设，定期监测捕获区及周边的抽水井、监测井污染物浓度、水位和抽水量，掌握抽出系统形成的捕获区动态变化特征，评估阻控污染羽迁移的成效。若污染羽周边存在受体，宜在污染羽边界和受体之间布设监测井。

应及时分析监测结果，必要时可对监测点位进行适当调整。水位的监测频次应高于水质监测频次，以保证分析捕获区动态变化特征的需要，通常抽水期内不少于5次/月，有条件的地区建议采用在线监测，实时掌握水位动态。在系统运行初期和抽水方案优化调整水位变化较大时，应提高监测频次。

### （3）污染羽修复策略

监测井应针对整个污染羽进行布设，定期监测抽水井和监测井污染物浓度、水位和抽水量等，识别地下水污染羽动态变化特征，评估污染物去除情况，判断地下水修复效果。若污染羽周边存在受体，宜在污染羽边界和受体之间布设监测井。

#### 7.2.2 监测方案的优化

监测方案可根据概念模型更新情况，结合数值模型计算进行优化调整。当存在非水溶性有机物、污染物迁移性较强、含水层非均质性较强或地下水补径排条件发生变化时，宜适当加密监测点位，提高监测频次。若污染物在含水层中存在较为明显的垂向差异，应加强垂向上的水质监测。

#### 7.2.3 处理系统运行监测

应对水处理设备的进水水质和出水水质开展监测，以确保处

理设备进出水水质满足系统设计要​​求。若进水水质不符合系统要​​求导致出水水质不稳定的，应增加必要的预处理环节。

#### **7.2.4 监测方式选择**

地下水监测方式主要以定期人工采样为主，同时可根据样品采集难易程度、经济条件、数据采集精度等因素，使用在线实时监测设备，鼓励使用在线监测技术监测地下水位。

### **7.3 工程运行状况分析**

应根据运行监测获取的地下水流场、污染羽分布及变化、捕获区动态变化特征等，分析工程运行状况，结合数值模型计算，对污染羽阻控、污染物削减趋势进行评价，判断当前抽出-处理工程的有效性，分析风险管控目标或修复目标的可达性，必要时可对抽水井井位、数量、抽水量等进行优化。修复模式下，在停止抽水之后，应持续监测地下水中污染物浓度变化，并参照 HJ 25.6 采用运行阶段监测数据进行修复达标初判。若无法达到修复目标，出现浓度反弹，应及时开展反弹原因分析，选择调整工程设计方案或根据实际情况结合其他修复技术进行修复。

## 第八章 工程效果评估

风险管控模式下，抽出-处理工程施工完工1年内，应开展风险管控效果评估；修复模式下，抽出-处理工程经初步判断达到修复目标后，可开展修复效果评估；采用抽出-处理技术与其他技术组合的风险管控和修复效果评估工作，可参照 HJ 25.6开展。

### 8.1 风险管控效果评估

#### 8.1.1 评估范围

抽出-处理工程采用污染羽控制、污染源削减结合污染羽控制等策略时，风险管控效果评估范围应包括污染羽的上游、内部和下游，以及可能受工程影响的区域。

#### 8.1.2 采样频次

(1) 在抽出-处理工程完工1年内开展。

(2) 污染物指标应至少采集4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1个月。对于地下水流场变化较大的地块，可适当提高采样频次。

#### 8.1.3 布点数量与位置

(1) 地下水监测井设置需结合风险管控措施的布置，在风险管控范围的上游、内部和下游，以及可能受工程影响的区域设置监测点。

(2) 可充分利用地块环境调查和工程运行阶段设置的监测井，现有监测井应满足风险管控效果评估采样要求。

#### **8.1.4 评估内容**

监测地下水水位、污染物浓度及其他相关指标，获取污染羽边界和捕获区范围，评估风险管控措施对污染羽的阻控效果。

#### **8.1.5 现场采样与实验室检测**

风险管控效果评估现场采样与实验室检测参照 HJ 25.1、HJ 25.2 和 HJ 164 执行。

#### **8.1.6 评估标准**

形成稳定的地下水流场，实施风险管控措施区域的下游地下水中污染物浓度持续下降或保持稳定，地下水污染扩散得到有效控制。

#### **8.1.7 评估方法**

若评估内容达到评估标准，则判断风险管控达到预期效果，风险管控地块可开展后期环境监管。

若评估内容未达到评估标准，则判断风险管控未达到预期效果，应对风险管控措施进行优化调整，或选择其他技术进行风险管控。

#### **8.1.8 后期环境监管**

对实施风险管控的地块，原则上应开展后期环境监管。后期环境监管方式包括长期环境监测与制度控制。

长期环境监测应重点关注地下水流场变化和污染羽扩散情况，监测宜每年至少开展一次，可根据实际情况进行调整。在长期环境监测过程中，应持续对抽出-处理工程的工程性能进行监

测和评估，评估内容包括抽水量、进出水污染物浓度、处理能力以及运行成本等。当地下水污染扩散得到有效控制，出水水质持续稳定达标且成本和效益达到预期时，可认为满足风险管控效果，应对抽出-处理工程继续开展运行与维护；否则应对抽出-处理工程进行优化或调整。

制度控制包括限制地块使用、限制地下水利用、通知和公告地块潜在风险、制定限制进入或使用的管理要求等方式，多种制度控制方式可同时使用。

## **8.2 修复效果评估**

### **8.2.1 评估范围**

修复效果评估范围应包括地下水修复范围的上游、内部和下游，以及可能受工程影响的区域。

### **8.2.2 评估节点**

经达标初判，地下水中污染物浓度稳定达标且地下水流场达到稳定状态时，可进入抽出-处理修复效果评估阶段。

### **8.2.3 采样持续时间和频次**

(1) 采样频次应根据地块水文地质条件、抽出-处理情况确定，如水力梯度、渗透系数、季节水位变化、抽水量和其他因素等。

(2) 污染物指标应至少采集8个批次的样品，采样持续时间至少为1年。

(3) 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1个月。对于地下水流场变化较大的地块，可适当提高采样频次。

#### **8.2.4 布点数量与位置**

(1) 原则上修复效果评估范围内部至少设置3个监测点，下游应至少设置2个监测点，上游设置1个监测点。原则上内部采样网格不宜大于80 m×80 m，存在非水溶性有机物或污染物浓度高的区域，采样网格不宜大于40 m×40 m。

(2) 地下水采样点应优先设置在高浓度区、可能的拖尾或反弹区、修复设施运行薄弱区、水文地质条件不利区域等。

(3) 可充分利用地块环境调查和工程运行阶段设置的监测井，现有监测井应符合修复效果评估采样条件。

#### **8.2.5 评估内容**

(1) 通过监测地下水中目标污染物浓度、捕获区范围、污染羽边界及其他相关指标，评估地下水污染修复达标的情况。

(2) 可根据地下水常规指标、修复设施运行参数等辅助判断修复效果。

#### **8.2.6 现场采样与实验室检测**

现场采样与实验室检测参照 HJ 25.1、HJ 25.2 和 HJ 164 执行。

#### **8.2.7 评估标准**

原则上每口监测井地下水中污染物浓度均应持续稳定达标，方可认为达到修复效果。可根据 HJ 25.6，采用趋势分析进行持续稳定达标判断。

### **8.2.8 评估方法**

若根据 HJ 25.6 判断修复达到预期效果或修复极限，可终止修复工程或进入风险管控阶段。否则，应对修复工程进行优化或调整。

### **8.2.9 残留污染物风险评估**

若目标污染物浓度未达到评估标准，但判断地块地下水已达到修复极限，可在实施风险管控措施的前提下，根据 HJ 25.6 对残留污染物进行风险评估。若残留污染物对环境和受体产生的风险可接受，则认为达到修复效果；若残留污染物对受体和环境产生的风险不可接受，则需对现有风险管控措施进行优化或提出新的风险管控措施。

## 第九章 工程关闭

经污染地下水风险管控和修复效果评估，无需实施抽出-处理工程连续 2 年均达到风险管控目标，或目标污染物浓度达到既定的修复目标，修复工程不再继续时，可选择关闭抽出-处理工程。

关闭抽出-处理工程后，应对相关构筑物、处理设备设施等进行拆除，废弃井可根据《废弃井封井回填技术指南（试行）》进行回填，妥善处置固体废弃物，防止造成二次污染，逐步恢复场地条件。开展后期环境监管的地块，应保留必要的地下水环境监测井，并根据后期环境监管要求，每年至少应开展一次监测。

关闭和拆除的标准应该在运行维护计划中明确，并得到生态环境等相关部门及业主的同意。



附录 A  
(资料性附录)  
常用水处理技术适宜性

水处理 技术  污染物 类型	沉淀	化学 氧化	化学 还原	蒸 馏	吹 脱	汽 提	活 性 炭 吸 附	蒸 发	浮 选	膜 分 离	离 子 交 换	油 水 分 离
<b>重金属</b>												
六价铬	●	×	●	×	×	×	○	●	×	○	●	×
砷	○	○	×	×	×	×	○	×	×	●	●	×
汞	●	×	●	×	×	×	●	×	×	○	●	×
其他	●	×	○	×	×	×	○	●	×	●	●	×
<b>挥发性有机物 (VOCs)</b>												
酮类	×	●	×	●	●	●	×	×	×	×	×	○
苯系物	×	●	×	×	●	●	●	●	×	○	○	×
卤代烃	×	●	×	×	●	●	●	○	×	○	●	×
其他	×	●	×	●	●	●	●	×	×	○	○	○
<b>半挥发性有机物 (SVOCs)</b>												
农药	○	●	×	●	×	○	●	○	○	●	●	×
多氯联苯	●	●	×	●	×	×	●	●	●	●	●	×
油脂	●	×	×	●	×	×	×	●	●	●	●	●
其他	○	●	×	●	×	●	●	○	○	●	●	○

注：●适宜，○较适宜，×较不适宜

**附录 B**  
**(资料性附录)**  
**概念模型更新资料来源**

所需资料类型	数据来源	资料信息要求与说明
<p>水文地质条件资料</p> <p>1) 含水层系统 包括地质、构造、地层、地形坡度、地表水体等方面的资料</p> <p>2) 含水层结构 包括含水层的水平延伸、边界类型、顶底板埋深、含水层厚度、基岩结构等</p> <p>3) 水文地质参数 包括渗透系数、给水度、储水系数、弥散系数及孔隙度等</p> <p>4) 钻孔 包括钻孔位置、孔口标高、岩性描述及成井结构等</p>	<p>1) 地形图、地貌图</p> <p>2) 地质图与水文地质图</p> <p>3) 相关钻探地球物理勘探、水文地质试验等方面的研究报告</p> <p>4) 地层岩性柱状图、地层剖面图及钻孔结构图、成井报告等</p> <p>5) 有关学术刊物上及会议上发表的论文</p> <p>6) 行政部门及企业的有关数据</p>	<p>1) 应有一定数量的控制点</p> <p>2) 地质单元的厚度、延伸以及含水层的识别</p> <p>3) 地形标高等值线、含水层厚度等值线</p> <p>4) 含水层立体结构图、水文地质参数分布图</p> <p>5) 地表水与地下水以及不同含水层之间的水力联系程度</p>
<p>水资源及其开发利用资料</p> <p>1) 各种源汇项及其对地下水动力场的作用</p> <p>2) 天然排泄区及人工开采区地理位置、排泄速率、排泄方式及持续时间</p> <p>3) 地表水体与地下水的相互作用</p> <p>4) 地下水人工开采、回灌及其过程</p> <p>5) 土地利用资料、灌溉方式、蒸发、降雨情况等</p>	<p>1) 降雨量及蒸发量</p> <p>2) 地表水体流量及现状</p> <p>3) 抽水试验及长期观测井的地下水水位监测数据</p> <p>4) 地下水及地表水的开发利用量</p> <p>5) 灌溉区域、作物类型及分布情况</p> <p>6) 水资源需求量及污水排放量预测分析</p> <p>7) 其他政府、企业等有关部门的水资源开发利用数据</p>	<p>1) 降雨量、蒸发量通常为时间序列数据,最小时间单元应到月,必要时可到天</p> <p>2) 数据采集的时间、地点、数值及测量单位应准确</p> <p>3) 对于地下水数据,应注明是否为动水位</p> <p>4) 不同时期地下水等水位线图</p>
<p>水质监测资料</p> <p>1) 常规水质指标数据</p> <p>2) 非常规水质指标数据</p>	<p>1) 建设项目环境影响评价报告</p> <p>2) 地块及周边相关取水单位或饮用水监督管理部门水质检测报告</p> <p>3) 地下水环境调查报告</p>	<p>1) 不同时期及不同点位的水质数据</p> <p>2) 不同含水层位的水质数据</p> <p>3) 不同类型监测指标数据</p>
<p>污染源资料</p> <p>1) 污染源空间分布特征</p> <p>2) 污染排放特征</p> <p>3) 特征污染因子</p>	<p>1) 建设项目建设及生产记录与生产报告</p> <p>2) 土地利用资料及图像解译</p> <p>3) 污染普查资料</p> <p>4) 地下水环境调查报告</p>	<p>1) 追溯污染主体变迁历史</p> <p>2) 污染源解析</p> <p>3) 生产工艺分析</p>

附录 C  
(资料性附录)  
捕获区分析与计算方法

捕获区分析是指基于地下水流场变化特征对捕获区进行分析,根据平面流场和剖面水力梯度,分析水平或垂向捕获的程度。其中,水平捕获区根据流线与水位等值线正交构成的流网图确定;垂向捕获区根据含水单元的垂向水力梯度确定,并考虑污染物垂向运移到相邻含水层的可能性。

捕获区计算包括流量计算和捕获区宽度计算。其中,流量计算指利用抽水井捕获污染羽计算所需的抽水流量。捕获区宽度计算指对于给定的抽水井,试算给定抽水流量下的捕获区宽度。

当水文地质条件较为简单时,如对于均质含水层,可采用公式法进行近似计算。

假设含水层为均质各向同性、承压等厚无限大,地下水流为均匀稳定流,垂向水力梯度忽略不计,无补给,抽水井为完整井。抽水流量估算可采用公式(C.1)计算:

$$Q=B \times U \times W \text{ 公式 (C.1)}$$

公式(C.1)中: $Q$ 为抽水井的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $B$ 为含水层厚度,  $\text{m}$ ;  $U$ 为地下水流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $W$ 为捕获区宽度,  $\text{m}$ 。

捕获区宽度可采用公式(C.2)计算:

$$W=Q/BU \text{ 公式 (C.2)}$$

垂直于地下水流向的单排多井捕获带根据井数可采用公式(C.3)、公式(C.4)、公式(C.5)和公式(C.6)计算:

1) 假设单个抽水井抽水时抽水井位置设为原点,其捕获区边界的曲线方程为

$$y + \frac{Q}{2\pi BU} \arctan \frac{y}{x} = \pm \frac{Q}{2BU} \text{ 公式 (C.3)}$$

单井抽水捕获区的解析解典型曲线示意图如图 C.1 所示。

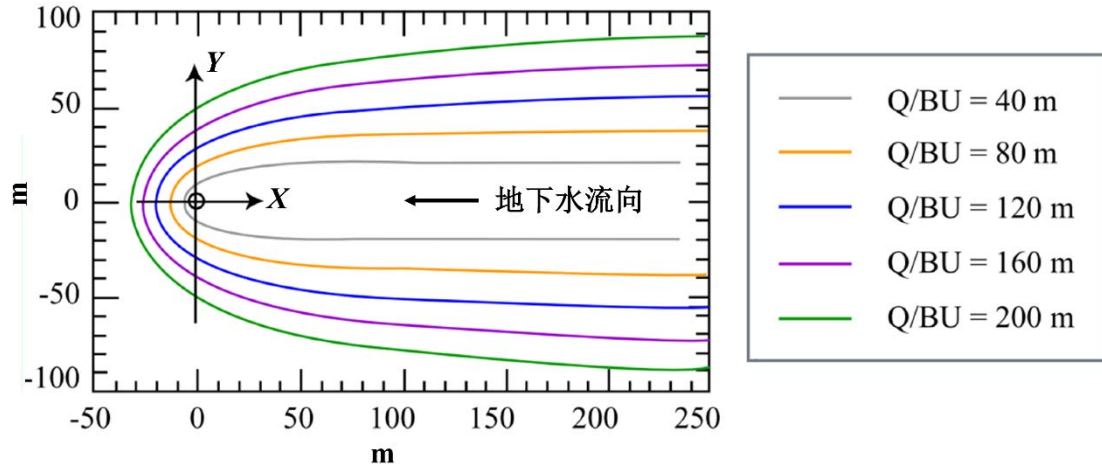


图 C.1 单井抽水捕获区的解析解典型曲线示意图

所有流线在抽水井位置汇合，在抽水井下游形成一个驻点。驻点为地下水的分水岭点，分水岭一侧的水流流向抽水井，另一侧沿区域水流方向。

每口抽水井都有一个最大抽水量。如果单井以最大抽水量抽水其捕获区还不能包围整个污染羽，那么就要采用多口抽水井进行抽水。

2) 假设有两口抽水井，如果水井之间的距离不大于  $Q/\pi BU$ ，那么捕获区就会重叠，因此井的最优间距为  $Q/\pi BU$ 。设两口抽水井的间距为  $2d$ ，且其值不大于  $Q/\pi BU$ ，其捕获区边界的曲线方程为

$$y + \frac{Q}{2\pi BU} \left( \arctan \frac{y-d}{x} + \arctan \frac{y+d}{x} \right) = \pm \frac{Q}{BU} \quad \text{公式 (C.4)}$$

3) 假设有三口抽水井，其中有一口井位于原点，另两口井位于  $y$  轴距离原点分别为  $+d$  和  $-d$  的位置，则最优井距为  $1.26Q/\pi BU$ ，其捕获区边界的曲线方程为

$$y + \frac{Q}{2\pi BU} \left( \arctan \frac{y}{x} + \arctan \frac{y-d}{x} + \arctan \frac{y+d}{x} \right) = \pm \frac{3Q}{2BU} \quad \text{公式 (C.5)}$$

4) 假设有  $n$  口抽水井，其捕获区边界的曲线方程为

$$y + \frac{Q}{2\pi BU} \left( \arctan \frac{y-y_1}{x} + \arctan \frac{y-y_2}{x} + \arctan \frac{y-y_3}{x} + \dots + \arctan \frac{y-y_n}{x} \right) = \pm \frac{nQ}{2BU} \quad \text{公式 (C.6)}$$

公式 (C.6) 中： $y_n$  为第  $n$  口抽水井的坐标， $m$ 。

考虑捕获区内可能存在的其他潜在补给，抽出流量计算中的“ $Q$ ”可以包含一个修正因子，通常取 1.5 到 2.0。捕获区宽度计算中的抽水量“ $Q$ ”则不需考虑任何修正因子。

当水文地质参数，如渗透系数、水力梯度等分布不均时，可通过合理范围内的参数取值，计算得出结果的上限和下限。

假设含水层为均质各向同性、潜水，地下水流为均匀稳定流，垂向水力梯度忽略不计，无补给，抽水井为完整井，抽水井降深远小于含水层厚度。捕获区宽度可采用公式 (C.7)

近似计算：

$$W = \frac{2QL}{K(h_1^2 - h_2^2)} \quad \text{公式 (C.7)}$$

公式 (C.7) 中：W 为捕获区宽度，m； $h_1$ 、 $h_2$  分别为流线上距抽水井等距离的上下游观测孔处含水层厚度，m；L 为观测孔之间的距离，m；K 为含水层渗透系数，m/d。

当水文地质条件复杂时，可以使用数值模型（常用数值模拟工具见表 C.1）进行捕获区计算，利用粒子追踪进行水平向和垂向捕获区分析。粒子追踪所指示的捕获区的准确性及不确定性取决于参数选取的准确性及不确定性。数值模型可通过模拟不同抽水条件下的水位降深进行验证。

表 C.1 计算捕获区的数值模拟工具一览表

模拟方法	模拟程序	说明
地下水水流数值模拟	MODFLOW、FEFLOW	采用有限差分和有限元地下水流动模型模拟各向异性、非均质、多层含水层系统中的二维、三维稳定流或非稳定流。针对各类复杂边界条件，可开展捕获区分析，抽出设计分析
流线和粒子追踪模拟	MODPATH、GPTRAC	使用粒子追踪来计算基于地下水流模型输出的粒子路径、捕获区域和运移时间
地下水溶质运移模拟	MT3D、MOC、TOUGH	用于评估抽出方案，定量分析由于抽出造成的污染物空间分布随时间的变化
最优化模拟	MGO、MODMAN	通过设定抽出速率目标函数，约束水力梯度、抽出流量等条件，计算求解最优方案。如优化抽水井/注水井的位置、井间距、单井抽水流量等。模型可设定多种目标和约束限制，优化各类抽出方案

附录 D  
(资料性附录)  
抽出速率评估方法

在特定抽出流量下，利用单位时间内抽水井抽出的污染物质量表征污染物的抽出速率，可通过井间距、抽水流量、点位布设调整优化抽出速率。结合风险管控和修复目标，综合考虑地块条件、水处理能力与水平、运行成本、周期，确定抽出流量及优化抽出方案。

单井抽出速率可采用公式 (D.1) 计算：

$$m_i = q_i c_i \quad \text{公式 (D.1)}$$

公式 (D.1) 中： $m_i$  为  $i$  井抽出速率，mg/d； $q_i$  为  $i$  井单位时间内抽水量， $m^3/d$ ； $c_i$  为  $i$  井抽出水中的目标污染物浓度， $mg/m^3$ 。

地块综合抽出速率可采用公式 (D.2) 计算：

$$M_R = \sum_{i=1}^n q_i c_i \quad \text{公式 (D.2)}$$

公式 (D.2) 中： $M_R$  为整个抽出系统的目标污染物综合抽出速率，mg/d；其他参数同上。

目标污染物总削减率可采用公式 (D.3) 计算：

$$P_e = \frac{t \times \sum_{i=1}^n q_i c_i}{M_0} \quad \text{公式 (D.3)}$$

公式 (D.3) 中： $P_e$  为目标污染物总削减率； $M_0$  为目标污染物的总质量，mg； $t$  为抽出系统的运行时间，d；其他参数同上。