

附件 2

地下水污染可渗透反应格栅  
技术指南（试行）  
（征求意见稿）

2020 年 12 月

# 目 录

<b>第一章 总 则</b> .....	1
1.1 编制目的.....	1
1.2 适用范围.....	1
1.3 编制依据.....	1
1.4 术语和定义.....	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> .....	4
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> .....	7
3.1 获取地块资料.....	7
3.2 技术适用性分析.....	8
3.3 经济可行性分析.....	9
<b>第四章 地块概念模型更新</b> .....	12
4.1 地质及水文地质特征.....	12
4.2 地下水中污染物分布特征.....	13
4.3 水文地球化学特征.....	14
<b>第五章 反应介质选择</b> .....	15
5.1 反应介质类型.....	15
5.2 反应介质的筛选.....	15
5.3 反应动力学和停留时间测定.....	16
5.4 反应介质的水力性质测定.....	19
5.5 反应介质寿命评估.....	20
<b>第六章 工程设计</b> .....	22
6.1 工程设计参数.....	22
6.2 工程设计关键步骤.....	23
<b>第七章 工程施工和运行状况监测</b> .....	27

7.1 施工总体要求.....	27
7.2 施工方法.....	27
7.3 运行状况监测.....	28
7.4 运行维护与应急.....	31
<b>第八章 效果评估和后期环境监管.....</b>	<b>33</b>
8.1 效果评估.....	33
8.2 后期环境监管.....	34
<b>第九章 工程关闭.....</b>	<b>35</b>
9.1 关闭条件.....	35
9.2 关闭方案.....	35
附录 A（资料性附录） PRB 技术适用性分析方法.....	36
附录 B（资料性附录） PRB 技术常用的施工方法.....	37

# 地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）

（征求意见稿）

## 第一章 总 则

### 1.1 编制目的

为贯彻落实《全国地下水污染防治规划（2011-2020年）》《水污染防治行动计划》《地下水污染防治实施方案》（环土壤〔2019〕25号），指导和规范可渗透反应格栅（Permeable Reactive Barrier，简称PRB）技术在污染地下水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》及相关法规标准，编制《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）（征求意见稿）》（以下简称指南）。

### 1.2 适用范围

本指南适用于可渗透反应格栅技术筛选、工程建设与运行管理，可作为技术方案制定、工程设计、施工、运行状况监测、效果评估、后期环境监管，和工程关闭的参考依据。

本指南内容包括开展可渗透反应格栅工作的主要技术方法、技术流程、工作内容、技术要求等。

### 1.3 编制依据

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 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.4 建设用地土壤修复技术导则

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境

《地下水污染模拟预测评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770）

当上述标准和文件被修订时，使用其最新版本。

## 1.4 术语和定义

下列术语和定义适用于本指南。

**可渗透反应格栅（PRB）**：通过在受污染地下水流经的途径上建造由反应介质组成的反应格栅，通过反应介质的吸附、沉淀、氧化还原和生物降解等作用去除地下水中的污染物。常见的 PRB 类型有连续反应格栅、漏斗-导水门和注入式反应带。

**反应介质**：指填充在 PRB 中可通过吸附、沉淀、氧化还原或生物降解等作用去除地下水中污染物的反应材料。

**反应容量**：指单位质量的反应介质能去除的污染物的量。

**地下水污染羽**：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。

**地块概念模型（Conceptual Site Model，CSM）**：用文字、图、表等方式综合描述水文地质条件、污染源、污染物迁移途径、人体或生态受体接触污染介质的过程和接触方式等。

**反应半衰期**：污染物浓度在反应介质中减少一半所需要的时

间。

**停留时间：**污染地下水与反应介质作用的平均时间。

**柱实验：**在反应柱内，设置不同的地下水流动条件和污染物浓度，开展污染物与不同反应介质作用的模拟实验，以评估反应介质去除污染物的作用与效果。

## 1.5 指导原则

（1）规范性原则：提出程序化、系统化的工作流程和技术要求，用以规范 PRB 工作中反应介质选择、工程设计、工程施工、运行状况监测、效果评估、后期环境监管、工程关闭等，确保 PRB 工作规范开展。

（2）可行性原则：应充分考虑污染地块的水文地质条件、环境敏感性及地下水污染特征，确保制定技术可行、经济合理的 PRB 工程设计方案。

（3）安全性原则：工程设计应确保工程施工与运行安全，防止对施工人员、周边人群健康及生态环境产生危害和二次污染。

## 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，生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心、生态环境部环境规划院、中国地质大学（北京）、中国科学院南京土壤研究所、华中农业大学、中国地质科学院水文地质环境地质研究所起草编制。

## 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

获取污染地块的地下水污染状况调查和风险评估资料，综合判断污染地块现有资料是否满足开展 PRB 技术适宜性评估要求。结合污染物特征、水文地质特征、工程施工条件，进行技术适用性分析；通过施工前费用、材料和施工费用、运行维护费用等分析经济可行性。通过技术适用性和经济可行性评估 PRB 技术的适宜性。

#### 2.1.2 地块概念模型更新

对地块概念模型进行更新，完整的概念模型应包含地块地质及水文地质特征、地下水中污染物分布特征、水文地球化学特征描述等。

#### 2.1.3 反应介质选择

反应介质应具有反应高效性、导水适宜性、安全稳定性和经济可行性。通过初步筛选、批实验筛选和柱实验筛选确定反应介质；通过柱实验确定反应动力学、停留时间、水力性质等参数，评估反应介质的性能与寿命。

#### 2.1.4 工程设计

通过工程设计，确定 PRB 的类型、位置和尺寸等。PRB 工程设计的关键步骤包括地下水数值模拟、反应格栅厚度设计和地球化学特征评估等。

### **2.1.5 工程施工和运行状况监测**

PRB 的工程施工包括反应格栅开挖、反应介质充填和防渗墙施工等。PRB 运行状况监测包括污染物、水力性能和地球化学特征监测。

### **2.1.6 效果评估和后期环境监管**

效果评估按照 HJ 25.5 和 HJ 25.6 的要求，在工程设施完工 1 年内，在 PRB 上游、下游以及可能涉及的二次污染区域布设监测点，判断工程性能和水质指标是否达到评估标准。效果评估完成后，开展后期环境监管。

### **2.1.7 工程关闭**

当污染物浓度达到修复和风险管控目标，或者改用其他修复和风险管控技术，不再采用 PRB 修复，或者工程达到使用寿命时，可考虑关闭 PRB 系统，制定关闭方案。

## **2.2 工作流程**

PRB 工作流程主要包括技术适宜性评估、地块概念模型更新、反应介质选择、工程设计、工程施工和运行状况监测、效果评估和后期环境监管、工程关闭等步骤。具体工作流程见图 2-1。

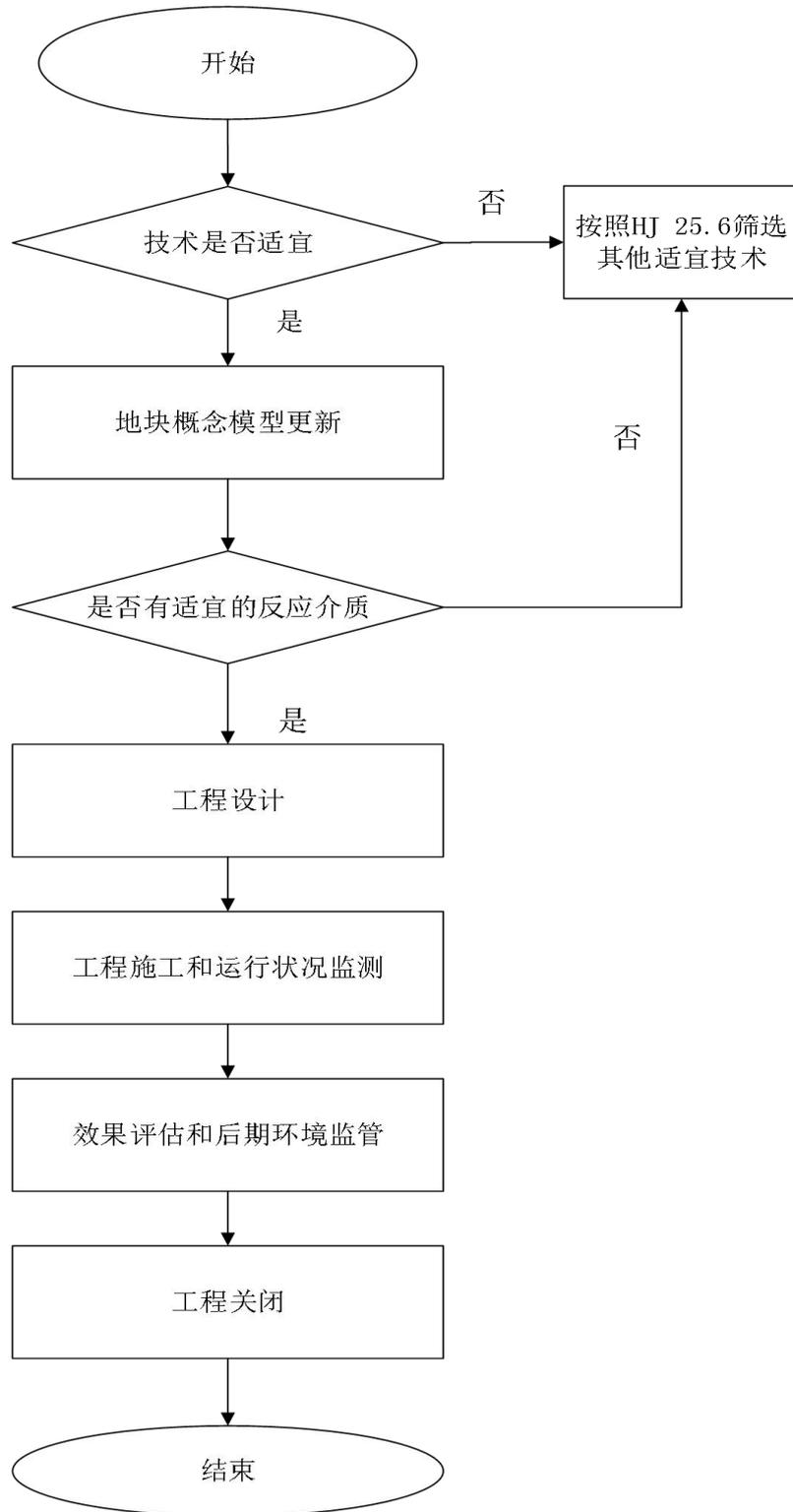


图2-1 工作流程图

### 第三章 技术适宜性评估

技术适宜性评估包括获取地块资料、技术适用性分析、经济可行性分析，当评估结果表明 PRB 不适宜时，可按照 HJ 25.6 筛选其他适宜的修复和风险管控技术。

#### 3.1 获取地块资料

根据按 HJ 25.1、HJ 25.2、HJ 25.3 完成的环境调查和风险评估结果、按照 HJ 25.6 确定的地下水修复和风险管控目标及范围等资料，综合判断污染地块现有资料是否满足开展 PRB 技术适宜性评估要求，资料需求见表 3-1。若现有资料不满足要求，可按照 HJ 25.1、HJ 25.2、HJ 25.3 和 HJ 610 等要求获取相关数据。

表 3-1 PRB 技术适宜性评估的资料需求

数据需求	描述
地下水污染资料	污染羽的位置与范围（水平和垂向）
	污染源范围（水平和垂向），污染物排放历史
	污染物及其降解产物的浓度水平，本底浓度，是否存在非水溶相等
	污染物性质，包括溶解度、密度、土-水分配系数、可降解性等
地质与水文地质资料	地层与岩性特征，包括含水层及隔水层岩性组成、厚度、非均质性、渗透率
	地层的工程地质特征
	地下水流场，包括流速、流向和水位埋深（需考虑季节变化）
	地下水渗流特征，包括水流机制（裂隙流或孔隙流）、优势通道、水力传导率
	地下水地球化学特征，包括阳离子： $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等；阴离子： $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 等；pH、氧化还原电位（Eh）、溶解氧（DO）等
	水文（潮汐）或海洋环境的地球化学影响
地块条件资料	现有或拟建的地面及地下基础设施
	周边地表水或洪涝风险
	地下水开发利用可能对地下水系统产生的影响
	土地利用、规划，土地使用或生态限制等

数据需求	描述
	潜在的健康和环境安全考虑
敏感受体	受体的位置和距离，包括含水层、抽水井、地表水体(河流、湖库等)、其他依赖地下水的生态系统

### 3.2 技术适用性分析

根据污染物特征、水文地质特征、工程施工条件等综合判定 PRB 的技术适用性。

#### (1) 污染物特征

地下水中污染物能否被反应介质去除是评价 PRB 适用性的关键因素，目前已有报道的适合采用 PRB 技术的污染物和对应的反应介质类型见表 5-1。

#### (2) 水文地质特征

PRB 通常安装到污染羽垂向范围以下、含水层隔水底板上，以防止污染物以潜流方式绕过 PRB。

隔水底板埋深过大，会增加施工难度与施工成本。隔水层较薄或者不连续将给 PRB 在隔水层上的固定带来困难，且此类隔水层在施工过程中容易受到破坏，导致污染物向下部含水层扩散。

#### (3) 工程施工条件

评估地块的工程地质条件、地面及地下已有建筑物和设施分布、水电供给等是否满足 PRB 工程施工条件。在选择 PRB 拟建位置时，还需确定可能影响施工设备到达现场的地面设施，例如建筑物或高架线。评估地层的岩土力学性质(含水量、粒度分布、密度、固结程度、强度参数等)，确定可能影响施工的地下因素，

例如岩石、漂砾、地下建筑及设施等。

### **3.3 经济可行性分析**

PRB 成本包括施工前费用、材料和施工费用、运行维护费用。通过比较 PRB 技术和其他技术的成本费用，可以初步分析 PRB 技术的经济可行性。

#### **3.3.1 施工前费用**

施工前费用包括地块详细调查和 PRB 模拟与设计等所需费用。PRB 设计需要查明地块水文地质特征、污染特征、水化学特征，调查的详细程度会因污染物分布情况、水文地质条件复杂性以及前期地块调查程度而异。

PRB 模拟与设计包括分析并解释实验室测试数据和现场特征数据，以确定 PRB 的安装位置、方向、类型和尺寸等。

#### **3.3.2 材料和施工费用**

##### **(1) 材料费用**

材料费用主要为反应介质的购置费和加工费。反应介质的总成本取决于反应介质的单价和所需数量，影响反应介质数量的因素有：

a. 污染物的种类和浓度。污染物的反应半衰期越长，需要的反应格栅厚度越大，所需反应介质数量越多。

b. 修复和风险管控目标。修复和风险管控目标越高，所需的停留时间越长，反应格栅厚度越大。

c. 地下水流速。地下水流速越快，保证足够停留时间所需的

反应格栅厚度越大。

d.地下水和污染物分布。地下水或污染物分布越不均匀，反应介质的利用效率越低，所需的反应格栅厚度越大。

## **(2) 施工费用**

施工费用取决于所选施工技术类型，影响施工费用的因素有：

a.污染羽埋藏深度与厚度。污染羽埋藏深度与厚度越大，所需 PRB 越深，施工成本越高。

b.污染羽宽度。污染羽宽度越大，所需 PRB 越宽，成本越高。

c.岩土工程特征。存在岩石或高度固结的沉积物、地下/高架公用设施等，会增加施工难度和成本。

d.监测井建设。监测井的数量和分布取决于 PRB 运行状况监测和效果评估数据的需求。

e.弃土弃渣鉴定与处理。施工期间产生的弃土弃渣需要处理，成本受施工技术和弃渣性质影响，若在污染羽内设置反应格栅，弃渣应开展固体废物属性鉴别后依规范处置。

### **3.3.3 运行维护费用**

运行维护费用包括在 PRB 使用寿命期内发生的监测和维护费用等。

(1) 监测费用。包括采样、实验室分析和报告编制等所需费用，由监管要求、监测井的数量和采样频率决定。

(2) 定期维护费用。若无机沉淀物积聚，严重影响了反应介质的渗透性或反应介质活性时，需要对 PRB 进行维护，维护

费用包括更换或活化反应介质所需的费用。

PRB 技术适用性分析矩阵表见附录 A。

## 第四章 地块概念模型更新

在开展 PRB 工程设计、施工之前，应确认地块资料和已有的 CSM，分析其是否满足工程设计需求，必要时开展补充调查，对 CSM 进行更新，构建详尽的 CSM。CSM 主要包括：地质及水文地质特征、地下水中污染物分布特征、水文地球化学特征等。

### 4.1 地质及水文地质特征

#### 4.1.1 地层岩性特征

地层岩性特征包括地层岩性、结构、厚度、分布及渗透性能等。可通过收集已有的水井、工程勘察孔、坑探等资料获取参数，也可采用综合物探、水文物探测井、水文地质试验等进行现场参数测定。通过对地层岩性特征的识别，形成地块三维地层岩性结构。

#### 4.1.2 地下水补径排特征

地下水补给项包括降水入渗、灌溉入渗、地表水入渗等，可通过收集地块所在地区的年度和月度降水量及其变化资料，调查灌溉情况，收集或观测地表水水位、流量变化资料等。

地下水径流项应收集地下水埋深、地下水位/水头标高、地下水流速与流向、水力梯度及其动态变化等资料；当污染物可能穿越多个含水层时，还需考虑地下水流向及水力梯度在垂向上的动态变化特征。若依据现有资料不能确定地块地下水流场时，应专门补充地下水监测孔。

地下水流场特征决定了 PRB 捕获区的位置、方向及大小。地下水实际流速和流向可通过现场示踪实验直接测量获得，也可通过流场估算。

地下水排泄项包括蒸发、开采、径流、泉泄流等，应收集地块所在地区的蒸发量年度或月度变化资料，获取地下水开采利用信息，收集或观测地下水水位、泉流量等资料。

### **4.1.3 地下水动态特征**

地下水动态特征包括补给、径流、排泄条件的动态变化，特别是地块地下水流向、水位随季节变化特征。地下水动态特征可通过收集地块所在区域的地下水长期观测资料获取。

## **4.2 地下水中污染物分布特征**

### **4.2.1 污染物的空间分布**

为准确判定污染物的空间分布情况，需对地下水污染羽的三维分布特征进行描述，包括识别受污染的含水层、确定污染羽的深度和宽度、污染物浓度最高值和平均值以及污染羽的运移速度。此外，需确定影响地下水中污染物运移的主要作用，包括吸附、化学反应、生物降解、对流扩散以及由密度效应引起的污染羽垂向运移等。

### **4.2.2 污染羽变化情况**

为判断污染羽随时间的变化情况，需开展污染物的动态监测，通过不同时空的污染物分布特征来评价污染羽的变化情况。

### 4.3 水文地球化学特征

为判断水文地球化学特征对 PRB 性能和寿命的影响，应对地下水中 pH、DO、Eh 等开展现场监测，监测频率一般为每季度一次，评价季节性波动。地块地下水与地表水交互作用较强时，应同时对地表水相关指标进行监测。

与反应介质可能发生反应的水文地球化学组分包括  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{4+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  等。可采用水文地球化学模型来确定地下水与反应介质接触时发生的反应类型和生成的产物。

## 第五章 反应介质选择

### 5.1 反应介质类型

PRB 中反应介质去除污染物的机理主要有吸附、沉淀、氧化还原和生物降解等，常见的反应介质具体见表 5-1。

表 5-1 PRB 中常见反应介质

污染物	去除机理	常见反应介质
氯代烃、多氯联苯、硝基苯等	还原、降解	零价金属、双金属等
苯系物、石油烃、硝基苯等	吸附	活性炭、生物炭、石墨烯等
	氧化、降解	释氧化合物、微生物等
重金属（铬、铅等）	还原、吸附、沉淀	零价金属、羟基氧化铁、铁屑、双金属、氢氧化亚铁、连二亚硫酸盐等
重金属（铅、锌、铜、砷等）	吸附、沉淀	磷灰石、石灰、活性炭、氢氧化铁、沸石等
其他无机离子（氨氮、硝酸盐、磷酸盐等）	吸附、降解	沸石、活性炭、粘土、微生物等

### 5.2 反应介质的筛选

#### 5.2.1 筛选原则

(1) 反应高效性。首选污染物反应速率常数大的反应介质，同时，反应介质应对污染物具有较高的选择性和较大的反应容量。

(2) 导水适宜性。反应介质的粒径应保证反应格栅具备合理的孔隙度和渗透系数，确保 PRB 具有水力截获污染羽的能力。

(3) 安全稳定性。反应介质的物理及工程性质稳定，具有合适的渗透性，能够维持较长的反应时间。反应介质应环保安全，反应过程中不会产生有毒有害副产物。

(4) 经济可行性。反应介质来源广泛，当不同反应介质对污染物去除效率差别不大时，优选价格低廉的反应介质。

### 5.2.2 筛选方法

(1) 初步筛选。基于目标污染物的性质和地块水文地质条件，查阅国内外已有的相关文献、成功案例，或通过合成、改性和复配研制新型材料等，初步确定备选反应介质。

(2) 批实验筛选。根据初步确定的备选反应介质，通过批实验确定反应介质对污染物的去除性能。批实验包括等温反应实验和反应动力学实验。通过等温反应实验可获得反应介质对污染物的反应容量，通过反应动力学实验可获得反应介质对污染物的反应速率，优选反应容量大、反应速率高的反应介质。

(3) 柱实验筛选。由于批实验未考虑地块的水文地质条件和反应介质的渗透性能，批实验结果外推到动态水流条件时会出现偏差，需通过柱实验进一步明确反应介质对污染物的去除性能和渗透性能，确定反应介质。相关柱实验设计见 5.3.1。

当筛选结果表明没有适宜的反应介质时，可按照 HJ 25.6 筛选其他适宜的修复和风险管控技术。

## 5.3 反应动力学和停留时间测定

确定反应介质后，通过柱实验测定反应介质对污染物的反应动力学和停留时间，为工程设计提供 PRB 厚度等关键参数。

### 5.3.1 柱实验设计

柱实验可评估不同水动力条件下反应介质去除污染物的作

用与效果。柱实验装置在上、下及侧壁设有取样口，装置如图5-1所示。柱中填充反应介质，利用蠕动泵从柱的下部注入污染地下水，从上部流出，根据实验要求设定流速。柱体可选用玻璃、特氟龙和不锈钢等材料，柱体材料不能与污染物发生反应。在装填柱子时，需保证反应介质均匀分布在柱体中，在反应介质的底部和顶部可铺设石英砂，以保证柱体中水流稳定。

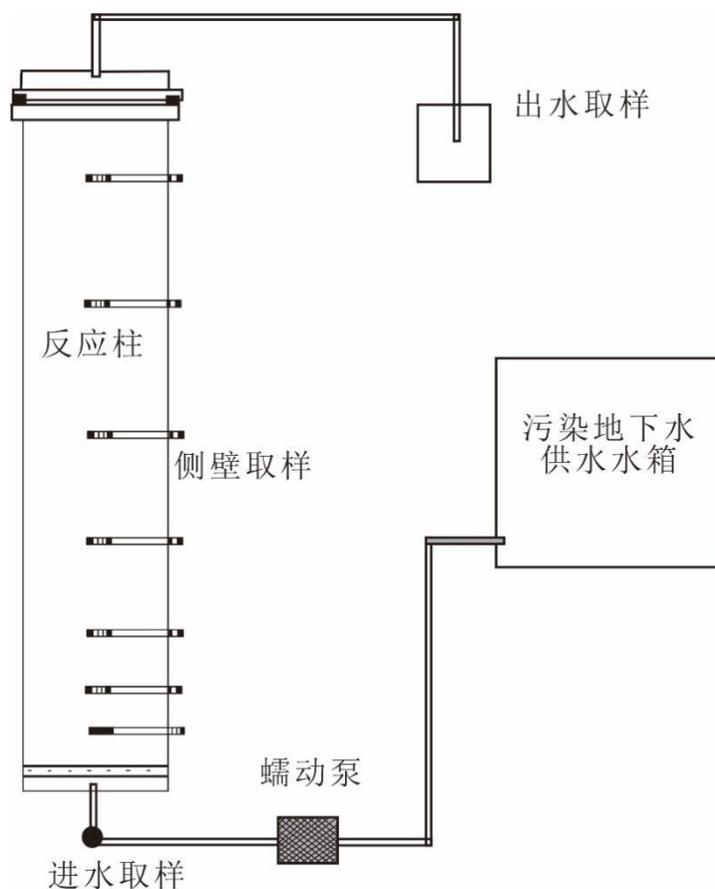


图5-1 柱实验装置示意图

实验期间，应记录地下水流入量、流出量、侧壁取样孔及进出水口处的污染物浓度、Eh、pH等指标。一般实验前期每注入1-2个反应介质的孔隙体积(PV)的污染地下水后取样，后期每注入5-10 PV污染地下水后取样，分析测试污染物的浓度，直到

出水口污染物的浓度与进水口浓度接近。

### 5.3.2 反应半衰期计算

通过柱实验获得污染物浓度随时间变化的曲线，建立反应介质与污染物的反应动力学方程，确定污染物的反应速率常数 ( $k$ ) 和反应半衰期 ( $t_{1/2}$ )，计算公式见 (1) 和 (2)。

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{k} \quad (2)$$

式中：

$C$ — $t$  时刻的污染物浓度，mg/L；

$C_0$ —污染物的初始浓度，mg/L；

$k$ —反应速率常数， $h^{-1}$ ；

$t$ —水流过介质的时间，h；

$t_{1/2}$ —反应半衰期，h。

### 5.3.3 停留时间

根据污染物的反应速率常数计算停留时间，如果存在多种污染物，停留时间由反应半衰期最长的污染物确定。

污染物所需要的停留时间 ( $t_R$ ) 计算公式如 (3) 所示：

$$t_R = \frac{-2.303 \times \ln\left(\frac{C_s}{C_0}\right)}{k} \quad (3)$$

式中：

$t_R$ —污染物的停留时间，h；

$C_0$ —污染物的初始浓度，mg/L；

$C_s$ —污染物修复或风险管控的目标浓度，mg/L；

$k$ —反应速率常数， $h^{-1}$ 。

#### 5.4 反应介质的水力性质测定

PRB设计需要确定反应介质的水力性质，水力性质包括反应介质的渗透系数 ( $K_{\text{介质}}$ )、有效孔隙度 ( $n_e$ ) 和容重 ( $B$ )。

##### 5.4.1 反应介质的渗透系数 ( $K_{\text{介质}}$ )

实验室中可通过柱实验模拟，利用达西定律，估算出 $K_{\text{介质}}$ 的值，计算公式如(4)所示。

$$K_{\text{介质}} = V \times \frac{L}{A \times t \times h} \quad (4)$$

式中：

$K_{\text{介质}}$ —反应介质的渗透系数，m/d；

$V$ —时间 $t$ 内出水体积， $m^3$ ；

$L$ —实验柱上两个测点间的距离，m；

$A$ —实验柱过水断面面积， $m^2$ ；

$t$ —水流过介质的时间，d；

$h$ —两个测点间水头差，m。

##### 5.4.2 反应介质的有效孔隙度 ( $n_e$ ) 和容重 ( $B$ )

有效孔隙度 ( $n_e$ ) 通过实验柱饱水后在重力作用下疏干排出水的体积与饱水反应介质总体积 (实验柱过水断面面积乘以饱水段长度) 之比计算。当获取地下水实际流速后，需要通过反应介

质的 $n_e$ 来估算PRB的污染物流量。

容重 ( $B$ ) 为单位体积内反应介质的重量, 通过柱子中反应介质的装填重量与柱体积之比计算获得, 单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。通过容重 ( $B$ ) 可初步估算PRB所需反应介质的质量。

$K_{\text{介质}}$ 、 $n_e$ 和 $B$ 三个参数还可通过将购买的反应介质样品送至专门的岩土实验室进行常规分析获得。

## 5.5 反应介质寿命评估

反应介质寿命为柱实验出水口污染物浓度高于修复或风险管控目标值时所用的时间。反应介质寿命可通过理论计算和模拟试验两种方法获得。

### 5.5.1 理论计算

反应介质的理论寿命采用公式 (5) 计算。

$$N = \frac{Q_2 \times W}{Q_1} \quad (5)$$

式中:

$N$ —反应介质的理论寿命, a;

$Q_1$ —每年流过单位反应介质的污染物总量,  $\text{kg}/\text{a}$ 。根据实际地块地下水污染物浓度、地下水流速和流量计算;

$Q_2$ —单位反应介质对污染物的最大去除量,  $\text{kg}/\text{kg}$ 。以实际的地下水为反应体系, 用等温吸附和吸附动力学试验获得;

$W$ —反应介质的添加量,  $\text{kg}$ 。

理论计算没有考虑地下水温度变化、化学组分变化、微生物

堵塞等实际情况，是相对理想状况下获得的数据，理论寿命一般比实际结果偏高。

### 5.5.2 模拟试验

参照5.3.1的柱实验设计方法，设置PRB运行模拟柱实验。通常采用模拟实验的试验流速高于现场地下水流速，或者试验浓度高于实际污染物浓度，以便在短时间内达到PRB长期运行的效果。但若设置的地下水流速过快或者污染物浓度过高，可能会导致测定的反应介质寿命结果偏低。

通过理论计算和模拟试验获得的反应介质寿命仅供实际应用参考，实际反应介质的寿命，应根据PRB运行状况的监测数据确定。

## 第六章 工程设计

PRB工程设计总体应满足HJ 25.4、HJ 25.5和HJ 25.6的规定，并根据地块污染特征、水文地质特征、修复和风险管控目标，结合反应介质选择结果，确定PRB的工程设计方案。

### 6.1 工程设计参数

通过工程设计，确定 PRB 类型、位置、展布方向、尺寸和工程性能监测方案，具体包括：

（1）类型：确定合适的 PRB 类型，如连续反应格栅或漏斗-导水门系统等。

（2）位置：根据污染羽的时空分布、地块水文地质特征、地块特征（如地块边界、地下设施等），确定安装 PRB 的合适位置。

（3）展布方向：根据地块地下水流动方向及季节性变化，设计最佳的 PRB 展布方向，确保能最大程度捕获整个污染羽。

（4）尺寸：通过耦合地下水数值模型、地块概念模型和实验室测试数据，确定 PRB 的宽度和厚度，对于漏斗-导水门系统，还需要设计隔水墙的长度和宽度。

（5）工程性能监测方案：包括工程运行过程中的监测井数量、位置、监测指标和监测频率等。

## 6.2 工程设计关键步骤

### 6.2.1 地下水数值模拟

地下水数值模拟可用于选择和优化PRB类型、位置、展布方向、宽度、深度等；确定PRB工程运行状况监测的合适点位，评价影响运行状况的因素。地下水数值模拟分为以下几个步骤：

(1) 建立概念模型。通过将地质和水文地质、地下水补径排条件、边界和初始条件，污染源及污染物释放特征、污染物运移过程及时空维度、影响污染物运移的含水层物理和化学性质、PRB作用机理与工程条件等概化，构建概念模型。随着相关数据的补充，应及时更新概念模型。

(2) 确定模型范围与边界条件。模型范围通常应包括整个污染羽，如果污染羽范围存在较大不确定性，则模型边界应远离PRB工程区，以减少边界条件对模型预测能力的影响。除对模型外边界概化外，边界条件还应重点考虑PRB工程条件的概化，如漏斗-导水门型的内边界条件、注入式反应带的复杂边界条件等设置。

(3) 设置参数。包括模型的水文地质参数，如渗透系数、孔隙度、入渗量与蒸发量等。若存在运移的优势通道（如大的裂隙、粗颗粒透镜体等），应单独考虑其水文地质参数；PRB工程相关的参数包括反应介质的渗透系数、宽度、表征反应介质活性的物理和化学参数等。

(4) 明确初始条件。初始条件包括地下水流场和污染物浓

度分布情况等，非稳定流模型需设置初始条件，初始条件可采用某一时间的监测结果，也可采用PRB运行前校正过的模型预测结果。

(5) 模型计算。结合地下水流和污染物运移模型，分析PRB运行过程对地下水流场和污染物浓度时空分布的影响，预测污染物的去除效果和反应介质的反应速率，分析不同设计场景和参数下的模拟计算结果，评估设计方案的可行性和可靠性，优化PRB工程设计方案。PRB运行后，可结合实际监测数据，进一步校正模型，预测PRB长期运行效果。

(6) 模拟结果及不确定性评估。通过对渗透系数、PRB厚度、反应介质与污染物反应速率等关键参数的敏感性分析，定量评估数值模拟的不确定性，不确定性分析可参考《地下水污染模拟预测评估工作指南》。分析数值模拟结果的可靠程度，为评估数值模型的适用性提供依据。

### 6.2.2 反应格栅厚度设计

反应格栅的厚度为反应格栅中沿地下水水流方向的实际流速与污染物停留时间及安全系数的乘积，可采用公式(6)确定。

$$b = V_x \times t_R \times SF \quad (6)$$

式中：

$b$ —PRB 的厚度，m；

$V_x$ —通过 PRB 的地下水实际流速，m/d。可通过公式(7)计算；

$t_R$ —污染物的停留时间，通过公式（3）计算；

$SF$ —安全系数（无量纲）。

$$V_x = \frac{K \times I}{n_e} \quad (7)$$

式中：

$V_x$ —地下水实际流速，m/d；

$K$ —反应介质的渗透系数，m/d；

$I$ —水力梯度，无量纲；

$n_e$ —反应介质的有效孔隙度，无量纲。

考虑到水流的季节性变化、反应介质活性的损失及其它不确定因素等，在计算 PRB 厚度时，需乘以安全系数。基于地下水数值模拟结果、修复目标可达性，综合考虑工程施工难度和成本效益，确定合理的安全系数。一般当计算的反应格栅厚度超出试验确定厚度的 2~3 倍时，需采用安全系数。

### 6.2.3 地球化学特征评估

反应介质与天然地下水化学组分发生地球化学反应，可能在介质表面产生沉淀并导致 PRB 的反应性和/或渗透性减弱，影响 PRB 寿命。在 PRB 设计过程中，可通过地球化学参数和地球化学模型来评估上述影响。

#### （1）地球化学参数

采集污染地块地下水样品，测试包括 pH、Eh、DO、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $HCO_3^-$ 、 $CO_3^{2-}$ 、 $SO_4^{2-}$ 等指标，分析上述指标通过 PRB 前后的变化，初步评估 PRB 反应介质内

形成沉淀的情况。

## (2) 地球化学模型

利用水岩作用的地球化学模型，计算地球化学组分不同形态的饱和指数、地下水流过 PRB 前后的矿物溶解和沉淀量。也可将地球化学模型集成到溶质运移模型中，模拟和预测在 PRB 运行期间地下水中不同地球化学组分的溶解和沉淀，评估反应介质的性能及寿命。

## 第七章 工程施工和运行状况监测

### 7.1 施工总体要求

PRB 工程的施工应符合国家和行业相应专项工程施工规范、施工程序及管理文件的要求。

施工中采用的工程技术文件、承包合同文件对施工质量验收的要求不得低于国家相关专项工程规范的规定。

施工应按设计文件和施工图纸的规定进行，工程变更应取得设计单位确认并出具设计变更文件后再进行施工。

### 7.2 施工方法

PRB 的施工包括反应格栅开挖、反应介质充填和防渗墙施工等。影响施工方法选择的因素有：（1）安装深度；（2）反应格栅的渗透性；（3）地形条件；（4）地块通行和施工空间；（5）开挖地层的工程地质条件；（6）开挖沟槽污染弃土处置等。

#### 7.2.1 反应格栅开挖

针对反应格栅埋深较浅的污染地块，常用的开挖方法有反铲式挖掘机开挖、抓斗式挖掘机开挖、沉箱开挖和空心螺旋钻开挖等，详见附录 B 中的 B.1。

针对 PRB 埋深较深的污染地块，可无需挖槽，选用直接将反应介质引入地下的方法，常见的施工方法有水力压裂、注浆和深层搅拌等，详见附录 B 中的 B.2。

## 7.2.2 反应介质充填

完成开挖后，开始进行反应介质充填。反应介质充填过程要保证反应介质分布均匀，密实度达到设计要求。常见的反应介质充填方法有：

（1）直接充填法。适用于连续反应格栅、漏斗-导水门，将反应介质通过反铲挖掘机或重力作用直接充填到开挖的沟槽中。

（2）钻机或注入井充填法。适用于注入式反应带，将反应介质用钻机或者注入井直接注入形成反应格栅，可使用压裂技术或压力脉冲技术，使反应介质能快速在含水层中扩散。

## 7.2.3 防渗墙施工

防渗墙最常用的类型是钢板桩防渗墙和泥浆沟防渗墙，详见附录 B 中的 B.3。通常，防渗墙底部应嵌入到隔水层中，在 PRB 导水门的附近加厚防渗墙墙体，保证防渗墙与 PRB 导水门的连续性，避免发生绕流。

## 7.3 运行状况监测

PRB 工程运行期间，需对 PRB 性能进行监测，判定 PRB 修复和风险管控效果是否达到可接受水平、是否需要启动应急预案、概念模型是否需要修正等。PRB 性能监测指标包括污染物、水力性能和地球化学特征等。

### 7.3.1 污染物监测

PRB 工程运行期间的污染物监测井一般布设在 PRB 上游、下游、两侧和反应格栅内部。在 PRB 上游可设置一个或多个监

测井，监测 PRB 进水浓度。在 PRB 两侧各布设一个监测井，监测 PRB 截获污染羽情况。在 PRB 反应介质中可安装小口径的监测井，监测污染物在反应格栅中是否存在穿透和绕流。在 PRB 下游设置一个或多个监测井，监测 PRB 对污染物的去除效果。如果污染物在含水层垂向分布不均匀，可分层设置监测井，形成垂向分布的监测剖面。

一般情况下，PRB 工程运行的监测频率为 1 次/季度，在水力停留时间长的地块可适当降低采样频次，运行过程中可根据长期监测数据，对监测方案进行优化。

### 7.3.2 水力性能评估

通过水力性能评估可评价 PRB 对污染羽的捕获性能和污染物的停留时间。水力性能评估包括水力截获区和停留时间计算。

#### (1) 水力截获区计算

工程运行过程中实际水力截获区的宽度和方向可通过水力梯度计算法、原位地下水流速探测法、示踪实验等确定，通过计算 PRB 水力截获区的大小，评估 PRB 是否有效截获污染羽。

##### a.水力梯度计算法

水力梯度计算法是通过测量 PRB 及周围的地下水水位，确定地下水流向，根据等水位线图绘制流线，确定截获区。在 PRB 周围安装监测井和水位计，为减小不确定性，水力梯度监测应集中在 PRB 上游的过渡带内。

##### b.原位地下水流速探测法

通过在监测井中安装原位地下水流向流速仪，长期监测地下水流速和流向。原位地下水流速探测法可提供连续的监测数据，适用于评价短期或季节性流速和流向波动。

#### c. 示踪试验法

通过在 PRB 上游地下水监测井中注入已知量的示踪剂（如荧光剂、溴化物等），在注入井下游的 PRB 边界处布设监测井，监测示踪剂的浓度，可提供上游水流流入 PRB 的直接证据。

#### （2）停留时间计算

污染物在 PRB 的停留时间会影响地下水中污染物去除效果，PRB 内地下水流速的动态变化可反映污染物停留时间，可利用达西定律、示踪实验、原位流量探测仪等确定地下水流速。

### 7.3.3 地球化学特征监测

PRB 因反应介质表面产生沉淀导致反应性和/或渗透性减弱，影响使用寿命，可通过地球化学特征变化来评估反应介质使用寿命。地球化学特征监测包括地下水地球化学参数监测和反应介质岩芯测试等。

#### （1）地下水地球化学参数监测

污染地下水流过反应介质前后，地球化学参数的变化是反映沉淀反应发生程度的重要指标，监测的指标有 pH、Eh、DO、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等。通常每年开展一次无机化学组分监测。

## (2) 反应介质岩芯测试

反应介质岩芯测试是评价 PRB 中地球化学行为最直接的方式。反应介质岩芯取样时，应尽可能靠近上游部分。

岩芯样品测试项目及方法详见表 7-1。

表 7-1 岩芯样品的测试项目及方法

测试项目	测试方法	用途
矿物组成	X 射线衍射 (XRD)	定性，或半定量分析反应介质中的矿物组分，如碳酸盐、磁铁矿、针铁矿等
元素含量	X 射线荧光光谱 (XRF)	无损测定反应介质中不同元素的含量
不同元素在反应介质表面的分布	拉曼光谱 (RS)，拉曼成像	半定量表征非晶体矿物以及晶体组分的分布。适用于铁的氧化物和氢氧化物、硫化物和碳酸盐的识别
有机组分中不同的官能团	傅里叶红外光谱仪 (FTIR)，FTIR 与自动成像显微镜联用	测定反应介质中有机组分中不同官能团的存在
介质表面形态及元素分布	扫描电子显微镜 (SEM)，二次成像 (SEI)，能量色散光谱仪 (EDS)	高分辨率表征介质表面形态和元素分布

## 7.4 运行维护与应急

### 7.4.1 运行维护

PRB 的运行、维护和安全应符合 HJ 25.6 及其他现行有关标准的要求。根据工艺要求，定期对工程设施进行检查维护，确保工程性能稳定。应建立健全与 PRB 工程相关的各项规章制度，以及运行、维护和操作规程。维护人员应根据技术要求与规范对工程设施开展定期检查和维修，重点维护 PRB 的工程性能。

### 7.4.2 应急安全计划实施

当 PRB 内部或下游监测井中污染物浓度高于运行控制浓度

水平，或监测结果显示PRB未按设计参数运行，如由于PRB内发生水流短路或反应介质活性降低而导致污染物浓度升高时，应启动应急安全计划，应急安全计划可参照HJ 25.6制定。

常见的PRB应急处置措施有以下两种方式，一是提高监测频率以确定污染物的浓度变化趋势，分析引起变化的原因；二是采取相应的应急处置措施，如更换反应介质、进行水力控制、改变地球化学条件或实施其他的修复和风险管控措施。

## 第八章 效果评估和后期环境监管

### 8.1 效果评估

按照 HJ 25.5 和 HJ 25.6 的要求，PRB 属于工程设施，需在工程设施完工 1 年内开展效果评估，并开展后期环境监管。

#### 8.1.1 采样频次

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。工程性能指标应按照工程实施评估周期和频次进行评估。

#### 8.1.2 布点数量与位置

地下水监测井设置需结合 PRB 的布置情况，在 PRB 上游、下游，以及可能涉及的二次污染区域设置监测点。可充分利用地块环境调查和工程运行状况阶段设置的监测井。

#### 8.1.3 检测指标

检测指标包括工程性能和水质指标。工程性能指标包括 PRB 的宽度、深度、厚度，PRB 的渗透性能、防渗墙的阻隔性能，PRB 设施的连续性与完整性等。水质指标包括地下水的污染物和可能涉及的二次污染物。可增加地下水水位、地下水流速、地球化学参数等指标作为 PRB 效果的辅助判断依据。

#### 8.1.4 现场采样与实验室检测

PRB 效果评估现场采样与实验室检测参照 HJ 25.1 和 HJ 25.2

执行。

### **8.1.5 效果评估标准**

工程性能指标应满足设计要求，如 PRB 能有效捕获地下水污染羽等。PRB 下游地下水中污染物浓度应满足地下水修复和风险管控目标值。

### **8.1.6 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 PRB 达到预期效果，可对 PRB 继续开展运行与维护。若工程性能指标或污染物指标未达到评估标准，则判定 PRB 未达到预期效果，应对 PRB 进行优化或调整。

## **8.2 后期环境监管**

一般通过设置地下水监测井进行周期性地下水样品采集和检测，通过污染物、水力性能和地球化学特征监测，判定 PRB 的长期运行性能。

## 第九章 工程关闭

### 9.1 关闭条件

下列情况下可考虑关闭 PRB:

- (1) PRB 上下游的污染物浓度已达到修复和风险管控目标，污染源已完全去除或通过其他手段控制，风险已经可控；
- (2) 使用其他修复和风险管控技术，不再需要采用 PRB 进行修复和风险管控；
- (3) 工程达到使用寿命。

### 9.2 关闭方案

关停 PRB，需确定 PRB 系统的相关组件（如，监测井、反应格栅或防渗墙等）是否需要拆除，或关闭后保留在原地。

如果选择保留 PRB，制定关闭方案时，需要考虑以下因素：

- (1) 反应介质不会成为二次污染源；
- (2) 随着 PRB 渗透性改变，不会影响地下水位；
- (3) 随着地下环境的改变，吸附在反应介质上的污染物不会存在再释放的风险。

**附录 A**  
**(资料性附录)**  
**PRB 技术适用性分析方法**

**表 A.1 PRB 技术适用性分析矩阵表**

筛选原则	适用性		
	高	中	低
<b>A. 技术因素</b>			
水文地质特征和污染羽刻画程度	详细	中等详细	不详细
污染物去除能力	已有 PRB 工程案例	污染物可以被去除	污染物不易被去除
副产物的毒性	低于污染物	等于污染物	高于污染物
地下水的污染源	清除	可控, 且清除时间较短	持续泄漏
存在多种污染物	污染物均可处理	污染物需要其他处理	污染物影响 PRB 的性能
污染物的解吸风险	污染物解吸附或再活化对受体无风险		污染物解吸附或再活化对受体有风险
含水层非均质与各向异性	相对均质含水层	中等非均质含水层	高度非均质和各向异性
PRB 的长期效果	PRB 可恢复或反应介质可更换		存在堵塞或活性损失的风险, 且反应介质不可更换
水流方向	恒定的流速、方向和水位		水位或水流方向随时间变化, 存在不确定性
含水层埋深	<20 米	20~50 米	>50 米
<b>B. 监管因素</b>			
受体 (敏感点)	可保护受体	受体处于低风险水平	不能保护受体
维护	可以进行长期维护		PRB 不能恢复或拆除
时间要求	在时间要求内可达到修复和风险管控目标		达到修复和风险管控目标所需的时间不确定
可否被监测	可开展监测		不能开展监测
<b>C. 成本约束</b>			
成本效益	和其他修复和风险管控技术相比, 成本效益更高		存在成本效益更高的其他修复和风险管控技术
经济保障	高	中	低
工程实施操作性	可行	不确定	建筑物限制了 PRB 的构建、复原或拆除
运行效果监测位置	可用	可能可用	受限制或不可用
总体评价	选项都是高/中; 无低等级选项	选项有高, 中和低, 但无制约因素	存在一个或多个制约因素; 无高等级选项

## 附录 B (资料性附录) PRB 技术常用的施工方法

### B.1 埋深浅、开挖型 PRB 施工方法

#### (1) 反铲式挖掘机开挖

反铲式挖掘机是沟槽开挖最常用的设备。采用反铲挖掘机来开挖 10m 内的浅层沟槽（最大可达 25m），是一种廉价、便捷的方法。反铲式挖掘机可以在地面上直接开挖至设计深度，或借助于中间平台，将深部地层的岩土运送到地表。

#### (2) 抓斗式挖掘机开挖

抓斗式挖掘机可用于开挖 60m 深度的沟槽。钢索悬吊式机械抓斗挖掘机依靠起重机重力实现抓取，能进行准确地挖掘。

#### (3) 沉箱开挖

当开挖区域四周不稳定，有发生坍塌的危险时，可采用成本相对较低的沉箱承重罩来保护开挖区域。沉箱截面有多种形式，可以预制，或分段制成，然后在现场将每段焊接起来，形成沉箱。

#### (4) 空心螺旋钻开挖

采用空心螺旋钻开挖时，要用一个或一排空心螺旋钻在地面钻直径达 760mm 的孔，达到所需的 PRB 深度时，取出螺旋钻，将反应介质通过空心杆引入沟槽内。另外，反应介质可与可生物降解的浆料混合，通过中空杆泵入。通过钻一系列重叠的孔，安装连续 PRB。

### B.2 非开挖式 PRB 施工方法

由于开挖方法的经济成本与 PRB 安装的深度有很大的关系，开挖深度越大，所需费用越高。当深度较大时，可选择不开挖沟槽，采用直接将反应介质引入地下的方法进行 PRB 施工。

#### (1) 水力压裂

构建较深 PRB 时，水力压裂是一种有效的方法。首先，沿拟建格栅位置构建一系列水井；然后，将专用钻井工具插入到每口水井中，在所需的方位和深度进行压裂。将钻井工具取出后，在每口水井内安装密封器。然后通过一系列的水井注入反应介质，形成反应格栅。需要实时监测裂缝延伸的几何参数，以确保裂缝如预期的连通或重叠。

## (2) 注浆

注浆通过高压输送将浆体注入地下，利用高速注浆的冲蚀作用，使注入的浆液部分或全部取代土壤。根据不同的运送机，注浆系统分为单杆系统、双杆系统和三杆系统等。在单杆系统中，注入的流体为浆料；在双杆系统中，注入的是浆料和压缩空气，在高压浆料和空气的综合效应下，大部分土壤被浆料取代，剩余的土-浆料混合物形成 PRB 介质；在三杆系统中，注入的是浆料、空气和水，三者结合能使更多的土壤被移除，采用三杆系统，几乎可以用浆料替换土壤。

## (3) 深层搅拌

在深层搅拌时，将配有搅拌浆的两个或三个专用推进器一字排开。这些推进器穿透地面，在旋转时搅拌土壤，当推进器撤回地面时，通过中空钻杆同时将反应介质注入。通过采用深层搅拌器连续重叠穿透地面，形成反应格栅，产生一系列反应介质土柱。通常情况下，每个土柱含 40~60% 的反应介质。用该方法可获得深度为 35m 的反应格栅。一般在不能挖掘的污染地块可采用该方法。这种方法适用于软土层。但需注意的是，注浆过程中不能引起土壤水力压裂。通常，深层搅拌比注浆水泥浆价廉且效率高。

### B.3 常用的防渗墙施工方法

当采用漏斗-导水门型 PRB 时，需在侧翼构建隔水墙，使污染地下水以漏斗形式流至导水门，常见的防渗墙类型有钢板桩防渗墙、泥浆沟防渗墙和 HPDE 膜。防渗墙需嵌入隔水层，以防止地下水向下迁移，或安装为悬挂墙以限制漂浮污染物。

#### (1) 钢板桩

在大多数地块，可以相对迅速地安装钢板桩，尤其当安装受到水平空间限制时，采用钢板桩非常有效。就传统的钢板桩而言，密封钢板桩在 18m 内，足以保持钢板桩的完整和性能。在安装期间，岩质土壤和固结/压实沉积物都可能破坏钢板桩。

虽然通过工程改造可以克服防渗墙和导水门之间适当密封的难度，但在使用沉箱门的漏斗-导水门系统中很难采用钢板桩。

#### (2) 泥浆墙

施工中较常见的泥浆墙是土基膨润土泥浆墙和水泥-膨润土泥浆墙，另一种

较少见的类型是塑性混凝土泥浆墙。地块条件、渗透性、可塑性和性能是决定泥浆防渗墙的可行性和使用寿命的重要因素。虽然泥浆墙有多种形式，但因泥浆墙和反应介质之间的缝隙很容易密封，特别适合安装在采用沉箱门的漏斗-导水门系统中。首先用反铲或抓斗，在液体泥浆下开挖一个沟槽进行施工。泥浆通常是膨润土和水的混合物，在墙面上方形成滤饼，有利于保持沟槽的完整性。在沟槽开挖后，迅速用水泥-膨润土或选定的土基膨润土回填，形成泥浆墙。