

团体标准

T/GDAEPI 35—2025
T/GDSES 21—2025

地下水氨氮和硝酸盐氮污染原位微生物 修复技术规范

Technical specification for in-situ bioremediation of ammonia and
nitrate nitrogen pollution in groundwater

(发布稿)

本电子版为发布稿。请以中国标准出版社出版的正式标准文本为准。

2025-01-15 发布

2025-02-14 实施

广东省环境保护产业协会
广东省环境科学学会

发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术特点及适用条件	2
5 功能菌的选择与培养	2
6 铁基材料的选择与制备	3
7 有机碳源的选择与制备	3
8 修复剂的理化性能要求	4
9 实施流程	4
10 二次污染控制	8
11 监测与效果评估	9
附录 A (资料性) 地下水污染修复技术方案编制提纲	12
附录 B (资料性) 主要工艺参数计算方法	13
附录 C (资料性) 注射井与可渗透反应墙结构示意图	15
附录 D (资料性) 修复工程地下水监测井布设示意图	17
附录 E (资料性) 地下水污染修复效果评估报告编制提纲	18
参考文献	19

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广东省环境科学研究院提出。

本文件由广东省环境保护产业协会和广东省环境科学学会联合归口。

本文件起草单位：广东省环境科学研究院、广州润方环保科技股份有限公司、广东省水文地质大队、广东省环境保护工程研究设计院有限公司、华南师范大学、华南理工大学。

本文件主要起草人：罗育池、韩奕彤、陈俊毅、陈华、康迪、陈翔欣、刘帅、王刚、方战强、吴锦华、刘畅、宋宝德、胡启智、秦海龙、秘昭旭、王先稳、何耀忠。

地下水氨氮和硝酸盐氮污染原位微生物修复技术规范

1 范围

本文件规定了地下水氨氮和硝酸盐氮污染原位微生物修复技术的特点及适用条件、功能菌的选择与培养、铁基材料和有机碳源的选择与制备、修复剂的理化性能要求、实施流程、二次污染控制、监测与效果评估。

本文件适用于氨氮浓度 ≤ 250 mg/L、硝酸盐氮浓度 ≤ 500 mg/L 污染场地的地下水原位微生物修复。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 223.7 铁粉 铁含量的测定 重铬酸钾滴定法
- GB/T 7702.2 煤质颗粒活性炭试验方法 粒度的测定
- HJ 2.2 环境影响评价技术导则 大气环境
- HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境
- HJ 2.4 环境影响评价技术导则 声环境
- 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/T 415 环保用微生物菌剂环境安全评价导则
- HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境
- NY/T 1881.2 生物质固体成型燃料试验方法 第2部分：全水分
- NY/T 2321 微生物肥料产品 检验规程
- NY/T 3672 生物炭检测方法通则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

地下水 groundwater

潜水面以下饱水带中的重力水。

[来源：GB/T 14157—2023, 3.1.4, 有修改]

3.2

原位微生物修复 in-situ bioremediation

不移动受污染地下水，在地块发生污染的位置通过微生物作用清除地下水中的污染物，或是使污染物无害化的过程。

3.3

功能菌剂 functional microorganisms

由一种或多种从自然界分离纯化，通过自然或人工选育所获得微生物菌种（株）所组成的，具有污染物降解功能的微生物菌剂。

3.4

铁基材料 iron-based material

以铁为主要成分的材料，包括零价铁和铁的化合物，可提供或强化微生物生理机能、生长代谢、污染物降解所需的电子供体或电子受体。

3.5

有机碳源 organic carbon source

由有机物质构成的可以为微生物生长或代谢提供碳原子的化合物或物质，在生物体内起到供能和构建有机质的作用。

注：包括液体碳源和固体碳源。

3.6

注射井 injection well

建造于污染区域的固定井，可注入修复剂，使其在地下扩散并与地下水中污染物接触反应，从而去除地下水中的污染物。

3.7

可渗透反应墙 permeable reactive barrier; PRB

通过在受污染地下水流经的方向建造由反应材料组成的反应墙，通过反应材料的吸附、沉淀、化学降解或生物降解等作用去除地下水中的污染物。

[来源：HJ 682—2019, 2.5.39]

4 技术特点及适用条件

4.1 注射井微生物修复技术

该技术通过建造原位注射井，采用高压注射使微生物复配修复剂悬液沿岩石中的空隙快速在目标含水层中扩散，去除地下水中的氨氮、硝酸盐氮污染。修复过程中，可根据地下水水质状况，及时调节修复剂配比和用量等工艺参数，达到最佳去除效果。该技术修复效率高、修复周期较短（一般为数月至1年~2年）、运行维护成本较低。注射井宜布设在含水层渗透系数 10^{-5} cm/s~ 10^{-3} cm/s 的地下水污染羽中心区域。

4.2 可渗透反应墙微生物修复技术

该技术通过开挖基坑并填充颗粒态微生物复配修复剂，建造可渗透反应墙，去除流经反应墙的地下水氨氮、硝酸盐氮污染。修复过程中，可根据地下水水质状况，定期更换修复剂，达到最佳去除效果。该技术修复效率高、持续修复时间长（一般可达数年）、运行维护成本低。反应墙宜布设在地下水污染羽的下游，作为地下水污染风险管控和修复措施。

5 功能菌的选择与培养

5.1 功能菌的选择

5.1.1 功能菌种的选择应遵循以下原则：

- 对氨氮污染场地，应选用具有硝化功能的亚硝化单胞菌属、亚硝化螺菌属、亚硝化球菌属、硝化杆菌属、硝化球菌属、硝化螺菌属等；
- 对硝酸盐氮污染场地，应选用具有反硝化功能且反应产物主要为氮气的菌种，如假单胞菌属、丛毛单胞菌属、产碱杆菌属、副球菌属、硫杆菌属等；
- 对氨氮和硝酸盐氮复合污染场地，应选用具有同步硝化反硝化功能且反应产物主要为氮气的菌种，如陶厄氏菌属、假单胞菌属、丛毛单胞菌属、产碱杆菌属、芽孢杆菌属、副球菌属、硫杆菌属等。

5.1.2 功能菌筛选步骤包括样品采集与储存、菌悬液制备、富集培养筛选、脱氮效果检测和菌种保存等，具体见 HG/T 20719。

5.1.3 功能菌应选择生态风险低的菌种，功能菌及其使用过程中的代谢产物不对人畜健康及生态安全产生有害影响和潜在风险，环境安全评价应按照 HJ/T 415 的规定执行。

5.2 功能菌的培养

功能菌的培养应建立在目标场地地下水污染分析的基础上，一般包括功能菌的筛选和驯化、扩大培养等过程。具体培养过程如下：

- a) 硝化菌的培养：应根据场地地下水氨氮浓度，由低到高设置一系列浓度梯度直至高于场地地下水最高检出浓度，在好氧条件下按照氨氮浓度由低到高对菌种（株）进行驯化，驯化过程定期转接；
- b) 反硝化菌的培养：应根据场地地下水硝酸盐氮浓度，由低到高设置一系列浓度梯度直至高于场地地下水最高检出浓度，在厌氧条件下按照硝酸盐氮浓度由低到高对菌种（株）进行驯化，驯化过程定期转接；
- c) 同步硝化反硝化菌的培养：应根据场地地下水氨氮、硝酸盐氮浓度，由低到高设置一系列浓度梯度直至高于场地地下水最高检出浓度，在好氧条件下按照浓度由低到高对菌种（株）进行驯化，驯化过程定期转接。

6 铁基材料的选择与制备

6.1 铁基材料的选择

铁基材料的选择应遵循以下原则：

- a) 注射井微生物修复技术应选用易于迁移的微纳米零价铁或微纳米改性零价铁等；
- b) 可渗透反应墙微生物修复技术应选用改性铁颗粒等。

6.2 铁基材料的制备

微纳米零价铁的制备包括原料选择、预处理、球磨、化学还原，微纳米改性零价铁的制备还包括稳定化处理，改性铁的制备包括原料选择、预处理、稳定化处理，具体步骤如下：

- a) 原料选择：微纳米零价铁和微纳米改性零价铁的制备选择还原性铁粉、羰基铁粉等作为原料，改性铁的制备选择还原性铁颗粒、羰基铁颗粒等作为原料；
- b) 预处理：对铁粉或铁颗粒进行清洗、干燥，去除表面的氧化物和杂质；
- c) 球磨：将预处理后的铁粉放入球磨机中，在真空或惰性气体环境下进行高能球磨，直至粒径达到微纳米级；
- d) 化学还原：球磨过程中使用活性炭等碳还原剂进一步还原微纳米铁表面氧化物，提高零价铁含量；
- e) 稳定化处理：通过羧甲基纤维素、壳聚糖、鼠李糖脂等表面包覆剂对材料进行稳定化处理。

7 有机碳源的选择与制备

7.1 有机碳源的选择

有机碳源的选择应遵循以下原则：

- a) 注射井微生物修复技术应选用易于扩散迁移且环境友好的液体碳源，如甲醇、乙醇、乙酸、葡萄糖等；
- b) 可渗透反应墙微生物修复技术应选用具有缓释效果且环境友好的固体碳源，如改性生物炭、木屑、秸秆、玉米芯等。

7.2 有机碳源的制备

改性生物炭的制备包括原料选择与预处理、混合、炭化、冷却与分离、干燥与筛分，具体步骤如下：

- a) 原料选择与预处理：选择果壳、木屑、秸秆等农林废弃物作为原料，对原料进行清洗、干燥、粉碎等，去除杂质和减小粒度；
- b) 混合：将预处理后的原料混合均匀；
- c) 炭化：将混合物放入炭化炉中，在惰性气体氛围中经 300 °C~600 °C 炭化；
- d) 冷却与分离：炭化完成后，将材料冷却至室温，使用盐酸、氢氧化钾等酸/碱洗涤剂去除残留的杂质；
- e) 干燥与筛分：将洗涤后的材料进行干燥及筛分，获得特定粒度的有机碳源。

8 修复剂的理化性能要求

修复剂的理化性能要求应符合表 1 规定。

表 1 修复剂理化性能要求

修复剂	性能指标		技术工艺要求		检测方法
			注射井微生物修复技术	可渗透反应墙微生物修复技术	
功能菌	外观形态		液体状	粉末状、颗粒状	自然光照下，目测法检验
	功能菌含量/ (CFU/g 或 CFU/mL)		$\geq 1.0 \times 10^9$	$\geq 1.0 \times 10^9$	NY/T 2321
	霉菌杂菌含量/ (CFU/g 或 CFU/mL)		$\leq 3.0 \times 10^6$	$\leq 3.0 \times 10^6$	NY/T 2321
	水分/%		—	40~60	NY/T 1881.2
	保存温度/°C		15~25	15~25	—
铁基材料	外观形态		粉末状	颗粒状	自然光照下，目测法检验
	粒度/mm	含水层渗透系数 $\geq 10^{-3}$ cm/s	—	3~30	GB/T 7702.2
		含水层渗透系数 10^{-4} cm/s ~ 10^{-3} cm/s	0.001~0.1	1~10	GB/T 7702.2
		含水层渗透系数 10^{-5} cm/s ~ 10^{-4} cm/s	0.0001~0.001	0.1~10	GB/T 7702.2
	铁 (Fe) 含量/%		≥ 99	≥ 90	GB/T 223.7
有机碳源	外观形态		液态	固态	自然光照下，目测法检验
	粒度/mm		—	3~30	GB/T 7702.2
	碳含量/%		—	≥ 40	NY/T 3672

9 实施流程

9.1 一般规定

- 9.1.1 修复工艺设计应遵循技术可靠、经济适用、安全节能、操作简便、环境安全的原则。
- 9.1.2 修复工艺设计参数及实施方案应根据场地水文地质条件、地下水污染特征、修复工程量、现场施工条件、修复目标值、修复周期、水源与能源供应条件等因素确定。
- 9.1.3 工艺设计内容包括修复工程、二次污染控制工程等。

9.2 原位修复流程

9.2.1 总体技术路线

开展污染场地调查评估，综合场地条件和地下水污染特征分析，评价原位微生物修复技术适用性，确定修复目标值；筛选修复技术工艺，选择并制备具有适用性的功能菌剂、铁基材料、有机碳源等修复剂；通过小试、中试试验确定修复工艺参数，设计修复方案并实施修复工程；运行期间开展定期监测，对于未达修复目标的区域，优化调整工艺参数，直至达到修复目标，并开展修复后的效果评估。技术路线见图 1。

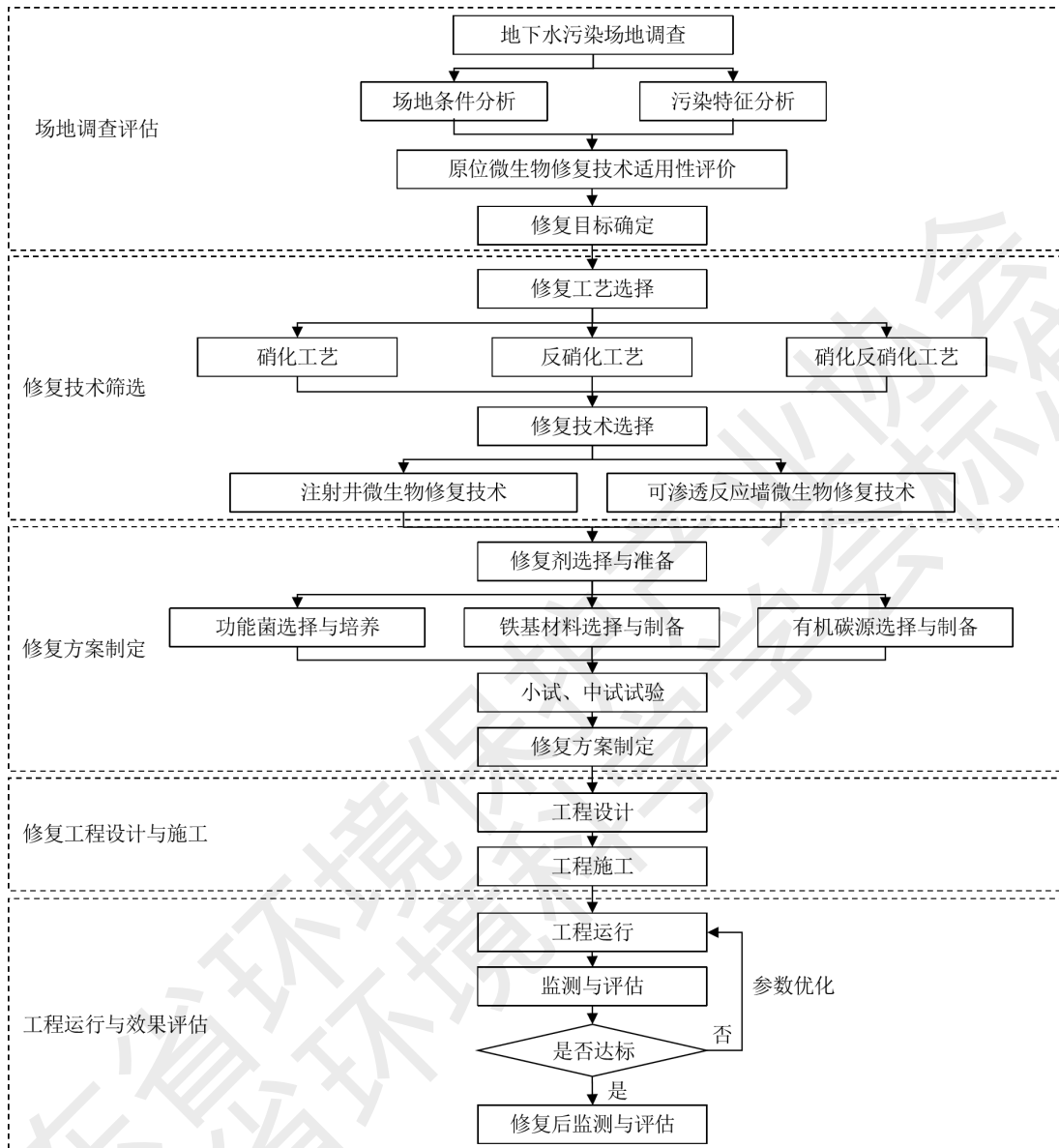


图 1 修复技术路线图

9.2.2 场地调查评估

9.2.2.1 场地调查评估包括场地条件分析和污染特征分析。场地条件包括地形地貌、水文地质条件、工程施工条件等。

9.2.2.2 污染特征包括污染物种类、浓度、分布特征以及微生物群落结构、微生物菌落总数。

9.2.2.3 结合场地调查评估结果，评估场地是否适合采用原位微生物修复技术。

9.2.2.4 根据场地土地利用规划和地下水功能属性，确定修复目标值。

9.2.3 修复技术筛选

9.2.3.1 硝化工艺

针对氨氮污染地下水，宜采用硝化工艺进行修复，将氨氮转化为硝酸盐氮。修复过程中，通过曝气增氧、修复剂复配与注射，调控地下水原位硝化反应条件。

9.2.3.2 反硝化工艺

针对硝酸盐氮污染地下水，宜采用反硝化工艺进行修复，将硝酸盐氮转化为氮气氮。修复过程中，通过修复剂复配与注射，调控地下水原位反硝化反应条件。

9.2.3.3 硝化反硝化工艺

针对氨氮和硝酸盐氮复合污染地下水，宜采用硝化反硝化工艺进行修复，同步将氨氮、硝酸盐氮转化为氮气氮。修复过程中，通过曝气增氧、修复剂复配与注射，调控地下水原位硝化反硝化反应条件。

9.2.4 修复方案制定

根据修复技术工艺，选择并制备功能菌剂等修复材料，开展小试、中试试验，确定修复技术参数，制定修复技术方案。技术方案编制提纲见附录 A。

9.2.4.1 实验室小试

实验室小试应针对原位微生物修复技术的关键环节和参数，制定小试方案，采集污染地下水和含水层介质，或配置污染地下水模拟溶液，根据不同的参数条件进行柱实验或箱体实验，并按照一定时间间隔对实验体系中的地下水和含水层介质进行采样分析，评估氨氮和硝酸盐氮去除效果、氮气转化率、水化学指标变化、微生物群落结构变化，确定实验室最佳工艺条件，估算成本和周期等，获得注射井微生物修复技术的溶解氧（DO）浓度、修复剂配比和用量参数，以及可渗透反应墙微生物修复技术的反应填料粒径、配比和用量等参数。

9.2.4.2 现场中试

对于注射井微生物修复技术，应结合场地条件、污染物类型、污染分布特征和实验室小试结果，选择代表性区域开展中试，评估氨氮和硝酸盐氮去除效果、氮气转化率、水化学指标变化、微生物群落结构变化，获得修复技术方案所需要的注射压力、曝气时间、修复剂配比和用量等技术参数。

9.2.4.3 注射井布设方案

根据场地修复区域和目标层位、含水层渗透系数、地下水流速流向等水文地质参数以及中试结果，获得注射影响半径，制定注射井布设方案，明确注射井布点区域、数量、间距、结构。注射影响半径计算方法见附录 B。

注射井布点方式包括单排布井和交错平行式多排布井，井间距可设定为影响半径的 1.5 倍~2 倍，保证叠加的影响面积能够覆盖整个地下水修复区。注射井结构见附录 C。

9.2.4.4 可渗透反应墙布设方案

根据场地修复区域和目标层位、含水层渗透系数、地下水流速流向等水文地质参数以及小试结果，制定可渗透反应墙布设方案，明确反应墙布设方位、尺寸，以及反应填料粒径、用量和配比等参数。可渗透反应墙参数计算方法见附录 B。

可渗透反应墙结构包括连续式和漏斗门式，可根据污染羽分布特征选择适宜的结构类型。反应墙结构见附录 C。

9.3 修复工程实施

9.3.1 施工前准备

9.3.1.1 技术准备

应全面了解修复工程主要内容，编制施工方案，对施工的程序、进度、材料采购、质量控制、安全保障等方面进行合理安排，对施工进度、成本、质量、安全等可能造成负面影响的因素，制定应急方案。根据修复技术方案，完成修复工程设计，开展设计图纸技术交底。

9.3.1.2 组织准备

包括但不限于设置组织机构、建立管理制度、开展人员培训等工作。施工组织机构的设置应结合实际情况，遵循精简、高效的原则，制定具体可行措施并落实责任人。

9.3.1.3 现场准备

应结合场地施工条件进行三通一平，完成总平面布置涉及的施工围挡、现场办公区、生活区、施工便道、施工操作区、临时堆场、二次污染防治设施等临建设施的建设工作。

9.3.1.4 物资准备

包括但不限于施工材料准备、修复剂准备和机械设备准备。应以有效提高施工效率、保证修复质量并节约成本为原则。

9.3.2 修复工程施工

9.3.2.1 注射井微生物修复工程

注射井微生物修复工程施工需包括下列内容。

- a) 注射井建设：
 - 1) 按照设计方案，进行定点放线、钻进成孔、下管、填砾、封孔、成井、洗井；
 - 2) 建井流程见 DZ/T 0270。
- b) 修复剂注射：
 - 1) 硝化工艺：根据氨氮浓度以及 pH、DO 等地下水水化学参数，采用高压注液泵注射酸/碱液调节地下水 pH，采用空压机曝气增氧方式调节不同深度含水层地下水 DO 浓度，形成适宜微生物硝化反应的条件，在此基础上注入硝化功能菌剂，启动硝化反应，去除地下水中的氨氮；
 - 2) 反硝化工艺：根据硝酸盐氮浓度以及 pH、DO、总有机碳（TOC）等地下水水化学参数，采用高压注液泵注射酸/碱液、液体碳源调节地下水 pH、DO 浓度、碳氮比（C/N），形成适宜微生物反硝化反应的条件；应避免碱液和液体碳源投加过量，引起地下水中化学需氧量（COD）等二次污染和矿物质沉淀、微生物大量增长堵塞含水层介质孔隙；在此基础上注入反硝化功能菌剂、铁基材料，启动反硝化反应，去除地下水中的硝酸盐氮；
 - 3) 硝化反硝化工艺：根据氨氮、硝酸盐氮浓度以及 pH、DO、TOC 等地下水水化学参数，采用高压注液泵注射酸/碱液、液体碳源调节地下水 pH、C/N，采用空压机曝气增氧调节地下水 DO 浓度，形成适宜微生物同步硝化反硝化反应的条件；在此基础上注入同步硝化反硝化菌剂、铁基材料，启动同步硝化反硝化反应，去除地下水中的氨氮和硝酸盐氮。

9.3.2.2 可渗透反应墙微生物修复工程

可渗透反应墙微生物修复工程施工需包括下列内容。

- a) 反应单元基坑开挖：
 - 1) 在反应单元建设区域，根据反应单元尺寸及填充方式，选用适宜的机械基坑开挖方式；
 - 2) 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。
- b) 反应单元建设：
 - 1) 反应单元填充方式可采用箱体式或堆填式，填料渗透系数应至少为含水层渗透系数的 10 倍，对于污染浓度较高或修复周期较长（一般 >5 年）的场地，宜采用箱体式，便于反应单元的维护与填料更换，对于污染浓度较低或修复周期较短（一般 ≤5 年）的场地，宜采用堆填式；
 - 2) 硝化反应单元：根据氨氮浓度以及 pH、DO 等地下水水化学参数，复配并填充硝化菌剂、铁基材料，通过硝化去除地下水中的氨氮；
 - 3) 反硝化反应单元：根据硝酸盐氮浓度以及 pH、DO、TOC 等地下水水化学参数，复配并填充反硝化菌剂、铁基材料、固体碳源，通过厌氧反硝化去除地下水中的硝酸盐氮；
 - 4) 硝化反硝化反应单元：根据氨氮、硝酸盐氮浓度以及 pH、DO、TOC 等地下水水化学参数，复配并填充同步硝化反硝化菌剂、铁基材料、固体碳源，通过同步硝化反硝化去除地下水中的氨氮和硝酸盐氮；

- 5) 反应单元建设过程中宜在箱体式反应墙内或堆填式反应墙填料中布设注射井，用于曝气增氧和修复剂补充注射，调控反应条件，建井方法见 9.3.2.1。
- c) 隔水墙建设：
 - 1) 对于漏斗门式反应墙，反应墙基坑开挖前应先建设隔水墙作为地下水阻水屏障和导水通道，对于地下水埋深较大、隔水底板埋深较大的场地，采用连续式反应墙时，宜通过建设反应墙底部隔水墙降低施工难度和成本；
 - 2) 可结合场地地质条件，选用水泥、粘土等材料，采用高压旋喷工艺进行施工，隔水墙底部应深入隔水底板一定深度，无侧限抗压强度应保证墙体结构稳定，渗透系数应满足防渗止水要求；
 - 3) 隔水墙施工前应在上游布设抽水井，在施工过程中及时进行地下水抽出导排；
 - 4) 基坑开挖应至隔水墙出露，开挖过程中不应破坏隔水墙，反应单元应与隔水墙相连，确保无地下水绕流通道。

9.3.3 修复工程运行

9.3.3.1 一般要求

修复工程施工完毕后进行工程运行，注射井微生物修复工程与可渗透反应墙微生物修复工程运行方式相同，分为硝化工艺运行、反硝化工艺运行、同步硝化反硝化工艺运行。

9.3.3.2 硝化工艺运行

运行过程中，先通过高压注液泵注射酸/碱液和空压机曝气增氧，调节地下水 pH 和 DO 浓度，保证地下水 pH=6.5~8.5、DO 浓度 ≥ 2 mg/L，再注射硝化菌剂，使注射井中功能菌含量 $\geq 10^5$ CFU/g。

9.3.3.3 反硝化工艺运行

运行过程中，先通过高压注液泵注射酸/碱液、液体碳源，调节地下水 pH 和 DO 浓度，保证地下水 pH=6~8、DO 浓度 < 1 mg/L、C/N=5~6，再注射反硝化菌剂、微纳米零价铁，使注射井中功能菌含量 $\geq 10^5$ CFU/g、Fe 含量 10 g/kg~20 g/kg。

9.3.3.4 同步硝化反硝化工艺运行

运行过程中，先通过高压注液泵注射酸/碱液、液体碳源和空压机曝气增氧，调节地下水 pH 和 DO 浓度，保证地下水 pH=6~8、DO 浓度 ≥ 2 mg/L、C/N=5~6，再注射硝化反硝化菌剂、微纳米零价铁，使注射井中功能菌含量 $\geq 10^5$ CFU/g、Fe 含量 5 g/kg~10 g/kg。

10 二次污染控制

10.1 施工期二次污染控制

10.1.1 施工期二次污染

废气：土方开挖及材料运输产生的扬尘、施工机械和运输车辆产生的尾气等。

废水：成井和基坑开挖过程中产生的泥浆水、隔水墙施工抽出导排水、机械设备清洗废水、施工人员生活污水、修复剂制备过程中产生的废水。

噪声：施工机械设备产生的噪声等。

固体废物：生活垃圾、施工弃土弃渣、废弃的材料包装及边角料等。

10.1.2 施工期防治措施

大气环境保护措施：应加强回填土堆放场管理，及时运走多余泥土及弃渣，清扫运输过程中散落的泥土，浇洒和清洗施工现场及车辆进出道路地面，尾气排放达标的设备和车辆方可进场使用。

地表水环境保护措施：应加强成井和基坑开挖过程中产生的泥浆水、隔水墙施工抽出导排水、机械设备清洗废水、人员生活污水、修复剂制备过程中产生的废水收集与处理，并做到达标排放。

声环境保护措施：应选用低噪声的施工机械设备，并做好减振降噪措施。

固体废物处理措施：应加强生活垃圾、废弃材料包装及边角料收集与转运，并做到无害化处理。

10.2 运行期二次污染控制

10.2.1 运行期二次污染

废气：材料运输产生的扬尘、运行设备和运输车辆产生的尾气。

废水：运行设备清洗废水、运行人员生活污水、修复剂制备过程中产生的废水。

噪声：运行设备产生的噪声等。

固体废物：生活垃圾、反应墙废弃填料、废弃材料包装及边角料等。

污染地下水：有机碳源等修复剂过量、降解反应不完全等造成地下水 COD、亚硝酸盐等污染。

10.2.2 运行期防治措施

大气环境保护措施：应及时浇洒和清洗施工现场及车辆进出道路地面，尾气排放达标的设备和车辆方可进场使用。

地表水环境保护措施：应加强运行设备清洗废水、人员生活污水、修复剂制备过程中产生的废水收集与处理，并做到达标排放。

声环境保护措施：应选用低噪声的运行设备，并做好减振降噪措施。

固体废物处理措施：应加强生活垃圾、废弃填料、废弃材料包装及边角料收集与转运，并做到无害化处理。

地下水环境保护措施：应调节适宜的曝气时间、功能菌剂用量、有机碳源用量等修复技术参数，促进微生物代谢作用，防止二次污染。

11 监测与效果评估

11.1 运行监测与效果评估

11.1.1 监测井布设

11.1.1.1 一般要求

地下水监测井应按照 HJ 25.6 的规定布设，充分考虑地下水流向、污染羽形状及工程建设方案等，确定监测井位置、数量、深度及滤水管的位置。地下水监测井布设还宜考虑以下几方面：

- a) 在垂向上依据含水层的结构特征设置监测层位和井深。若污染物在含水层垂向上分布不均匀或含水层厚度大于 6 m，宜分层设置监测井；
- b) 监测井布设应充分利用已有监测井；
- c) 监测井布设应兼顾修复后监测与效果评估的需要。

11.1.1.2 注射井微生物修复工程监测井布设

注射井微生物修复工程监测井布设具体内容如下：

- a) 注射区上游监测井：应沿垂直于地下水流向至少布设 1 排监测井，同排监测井的间距取决于注射区长度，一般是注射区长度的 1/2~1/4 之间，监测目标污染物的进水浓度；
- b) 注射区内监测井：应至少布设 2 排监测井，同排监测井的间距取决于注射区长度，一般是注射区长度的 1/2~1/4 之间，一排用于监测注射区地下水污染物浓度以及相关水化学参数；另一排利用现有注射井，用于监测注射区含水层菌剂、铁基材料等修复剂含量；
- c) 注射区下游监测井：应沿垂直于地下水流向至少布设 1 排监测井，同排监测井的间距取决于注射区长度，一般是注射区长度的 1/2~1/4 之间，监测目标污染物的去除效果、反应副产物的产生情况以及水化学参数的变化情况；
- d) 注射井微生物修复工程监测井布设见附录 D。

11.1.1.3 可渗透反应墙微生物修复工程监测井布设

可渗透反应墙微生物修复工程监测井布设具体内容如下：

- a) 反应墙上游监测井：应沿垂直于地下水流向至少布设 1 排监测井，同排监测井的间距取决于墙体长度，一般是墙体长度的 $1/2 \sim 1/4$ 之间，监测目标污染物的进水浓度和地下水量的动态变化特征；
- b) 反应墙内监测井：应至少布设 1 排监测井，同排监测井的间距取决于墙体长度，一般是墙体长度的 $1/2 \sim 1/4$ 之间，监测墙内污染物浓度以及相关水化学参数；
- c) 反应墙下游监测井：应至少布设 1 排监测井，同排监测井的间距取决于墙体长度，一般是墙体长度的 $1/2 \sim 1/4$ 之间，监测目标污染物的去除效果、反应副产物的产生情况以及水化学参数的变化情况；
- d) 隔水墙监测井：对于漏斗门式反应墙，应在隔水墙上游和下游至少各布设 1 个监测井，监测地下水水位的变化情况、隔水墙的止水效果；
- e) 可渗透反应墙微生物修复工程监测井布设见附录 D。

11.1.2 监测要求

监测要求如下。

- a) 监测指标：
 - 1) 应对水文地质参数、地下水污染物指标、水化学指标、微生物指标开展定期监测；
 - 2) 水文地质参数包括地下水水位、流向、流速、含水层渗透系数等；
 - 3) 地下水污染物指标包括氨氮 (NH_4^+-N)、硝酸盐氮 (NO_3^--N)、亚硝酸盐氮 (NO_2^--N)、COD 以及可能抑制微生物生长的重金属、类金属和有机物等，水化学指标包括 pH、DO、TOC、钙 (Ca^{2+})、镁 (Mg^{2+})、钠 (Na^+)、钾 (K^+)、Fe、锰 (Mn)、氯化物 (Cl^-)、碳酸氢根 (HCO_3^-)、碳酸根 (CO_3^{2-})、硫酸根 (SO_4^{2-})、硫化物 (S^{2-})，监测应符合 HJ 164 的规定；
 - 4) 微生物指标包括微生物有效活菌数、群落结构、生物学特性、环境安全评价等，分析方法应按 NY/T 2321、HJ/T 415 执行。
- b) 监测频次：应根据目标污染物浓度、修复技术工艺合理确定，一般为每半月一次或每月一次。

11.1.3 参数优化与效果评估

11.1.3.1 根据地下水监测结果，对于修复效果未达到修复目标的，应及时调整曝气时间、修复剂配比和用量等技术参数，直至达到修复目标；对于修复效果达到修复目标的，启动工程验收以及修复后监测与效果评估。效果评估报告编制提纲见附录 E。

11.1.3.2 运行期效果评估方法具体为若地下水中污染物浓度均低于修复目标值，则判断达到修复目标。

11.2 二次污染监测与影响评估

工程施工及运行期间，应对场地边界及周边的大气环境、地表水环境、声环境、地下水环境开展定期监测，评估施工及运行期环境影响、二次污染防治措施有效性等，作为工程验收的参考依据，具体如下：

- a) 大气环境：应根据大气污染物排放特点和相关规定设置监测点位，监测点位一般布设在场地边界或大气环境防护距离（如有）外侧，监测应符合 HJ 2.2 的规定；
- b) 地表水环境：应根据水污染物排放特点和相关规定设置监测断面，排放口附近有重要水功能区及特殊用水需求时，应对排放口下游控制断面进行定期监测，监测应符合 HJ 2.3 的规定；
- c) 声环境：应根据噪声源分布和声环境保护目标特点以及相关规定设置监测点位，监测点位一般布设在场地边界和代表性声环境保护目标周边，监测应符合 HJ 2.4 的规定；
- d) 地下水环境：应根据地下水流场特点和相关规定设置监测井，监测井一般布设在场地地下水下游及两侧边界，监测应符合 HJ 610 的规定。

11.3 修复后监测与效果评估

11.3.1 选用运行监测布设的地下水监测井，定期开展地下水水质监测，用于修复后期场地的环境监管。

11.3.2 修复后监测一般为每1年~2年开展一次,可根据实际情况进行调整。

11.3.3 监测指标包括 pH、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 等。

11.3.4 监测要求应符合 HJ 164 的规定。

11.3.5 修复后效果评估方法具体为若地下水中污染物浓度均低于修复目标值且呈现稳态或下降趋势,可判断地下水达到修复效果,若地下水中污染物浓度呈上升趋势或高于修复目标值,可判断地下水未达到修复效果。

山东省环境保护产业协会标准

附录 A
(资料性)
地下水污染修复技术方案编制提纲

下面给出了地下水污染修复技术方案的编制提纲。

- 1 总论
 - 1.1 任务由来
 - 1.2 编制依据
 - 1.3 编制内容
- 2 场地调查评估
 - 2.1 场地基本情况
 - 2.2 场地条件分析
 - 2.3 地下水污染特征分析
 - 2.4 地下水污染修复目标确定
- 3 地下水修复技术筛选
 - 3.1 技术初步筛选
 - 3.2 技术可行性分析
 - 3.3 技术综合评估
- 4 地下水修复技术方案制定
 - 4.1 技术路线
 - 4.2 工艺参数
 - 4.3 工程量估算
 - 4.4 费用和周期估算
- 5 环境管理计划
 - 5.1 环境影响分析
 - 5.2 二次污染防治措施
 - 5.3 环境监测计划
- 6 成本效益分析
 - 6.1 修复成本分析
 - 6.2 环境、经济和社会效益分析
- 7 施工进度及人员安排
 - 7.1 施工进度
 - 7.2 人员安排
- 8 结论

附录 B
(资料性)
主要工艺参数计算方法

B.1 注射井影响半径计算方法

B.1.1 注射体积计算法

修复剂影响半径可根据单井注射体积进行计算,修复剂注入地下水后的影响半径按式(B.1)计算。

$$R^2 = V / (\pi \times h \times p_{\text{介质}}) \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- R ——修复剂影响半径,单位为米(m);
- V ——修复剂注射体积,单位为立方米(m^3);
- h ——注射含水层厚度,单位为米(m);
- $p_{\text{介质}}$ ——注射区含水层介质孔隙度,单位为无量纲。

B.1.2 柱形渗流计算法

修复剂影响半径也受到注入压力、修复剂类型、含水层性质等因素影响。假设土体是均匀且各向同性的,注液孔是一个完整的孔,不考虑地下水流速,则根据宾汉姆流体的柱形渗流研究,直压注射流体的径向注入半径(R_1)按式(B.2)计算。

$$R_1^2 = 2 \times K_{\text{介质}} \times h_1 \times t / (n \times \theta \times \ln(R_1/R_0)) \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

- R_1 ——注入半径,单位为米(m);
- $K_{\text{介质}}$ ——土壤的渗透系数,单位为米每秒(m/s);
- h_1 ——注浆压力水头,单位为米(m);
- t ——注浆时间,单位为秒(s);
- n ——土体孔隙率, %;
- θ ——浆液运动黏滞系数与水运动黏滞系数的比值,单位为无量纲,对稀溶质可以取为1;
- R_0 ——渗透注浆处的半径,单位为米(m)。

B.2 可渗透反应墙参数计算方法

B.2.1 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)按式(B.3)计算。

$$t_R = -2.303 \times \ln(C_s/C_0) / K \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

- t_R ——污染物停留时间,单位为小时(h);
- C_s ——污染物修复目标值,单位为毫克每升(mg/L);
- C_0 ——污染物初始浓度,单位为毫克每升(mg/L);
- K ——反应速率常数, h^{-1} 。

B.2.2 渗透系数

实验室中可通过柱实验模拟,利用达西定律,按式(B.4)计算出活性填料的渗透系数($K_{\text{填料}}$)。

$$K_{\text{填料}} = V \times L / (A \times t \times h) \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

- $K_{\text{填料}}$ ——活性填料的渗透系数,单位为米每秒(m/s);
- V ——时间 t 内出水体积,单位为立方米(m^3);

- L ——实验柱上两个测点间的距离，单位为米（m）；
 A ——实验柱过水断面面积，单位为平方米（m²）；
 t ——水流过介质的时间，单位为天（d）；
 h ——两个测点间水头差，单位为米（m）。

B.2.3 厚度计算

可渗透反应墙的厚度为反应墙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，按式（B.5）、式（B.6）计算。对于漏斗门式反应墙，应采用布置隔水墙后地下水流经活性填料区的实际流速计算。

$$B = V_X \times t_R \times SF \dots\dots\dots (B.5)$$

$$V_X = K_{\text{填料}} \times I / P_{\text{填料}} \dots\dots\dots (B.6)$$

式中：

- B ——反应墙的厚度，单位为米（m）；
 V_X ——通过反应墙的地下水实际流速，单位为米每天（m/d），计算见式 B.6；
 t_R ——污染物停留时间，单位为天（d）；
 SF ——安全系数，单位为无量纲。
 $K_{\text{填料}}$ ——活性填料的渗透系数，单位为米每天（m/d）；
 I ——水力梯度，单位为无量纲；
 $P_{\text{填料}}$ ——活性填料的有效孔隙度，单位为无量纲。

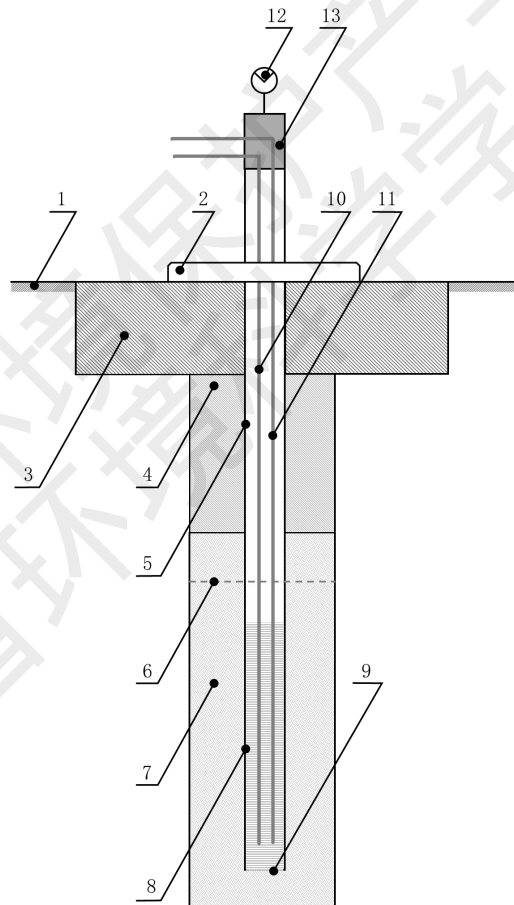
考虑到水流的季节性变化、反应介质活性的损失及其它不确定因素等，在计算可渗透反应墙厚度时，需乘以安全系数。基于地下水数值模拟结果、修复目标可达性，综合考虑工程施工难度和成本效益，确定合理的安全系数。一般当计算的反应墙厚度超出试验确定厚度的 2 倍~3 倍时，需采用安全系数。

附录 C
(资料性)
注射井与可渗透反应墙结构示意图

C.1 注射井结构

注射井微生物修复工程中的注射井可采用螺旋钻进方式钻孔，成孔通常为 $\Phi 300\text{ mm}\sim 400\text{ mm}$ ，深度钻至目标修复层位底部。井管通常采用 $\Phi 100\text{ mm}\sim 200\text{ mm}$ 的PVC塑料管，管壁厚度不小于 8.4 mm ，由底部不封堵、管壁可滤水的筛管、上部延伸至地表的实管组成，筛管应位于地下水水位以下。下部筛管段与钻孔之间的间隙用洁净石英砂回填，石英砂粒径通常为 $2\text{ mm}\sim 3\text{ mm}$ ，上部实管段与钻孔之间的间隙用粘土进行止水，井口周边用水泥封孔，并建设井台进行井口保护。注射井构建完成后应及时洗井，保证注射井出水水清砂净。

注射井曝气注液时，井管中插入曝气管与注液管直达注射井下部筛管，曝气管与注液管通常采用 $\Phi 20\text{ mm}\sim 40\text{ mm}$ 高压软管，井口顶部安装高压密封阀用以防止压力泄漏和修复剂外溢，压力计用于监测注射压力。



标引序号说明：

- 1 —— 地表；
- 2 —— 井台；
- 3 —— 水泥封口层；
- 4 —— 粘土止水层；

图 A.1 注射井结构图

- 5 ——PVC实管;
- 6 ——地下水水位;
- 7 ——洁净石英砂;
- 8 ——PVC筛管;
- 9 ——不封堵管底;
- 10——注液管;
- 11——曝气管;
- 12——压力计;
- 13——高压密封阀。

图 A.1 注射井结构图 (续)

C.2 可渗透反应墙结构

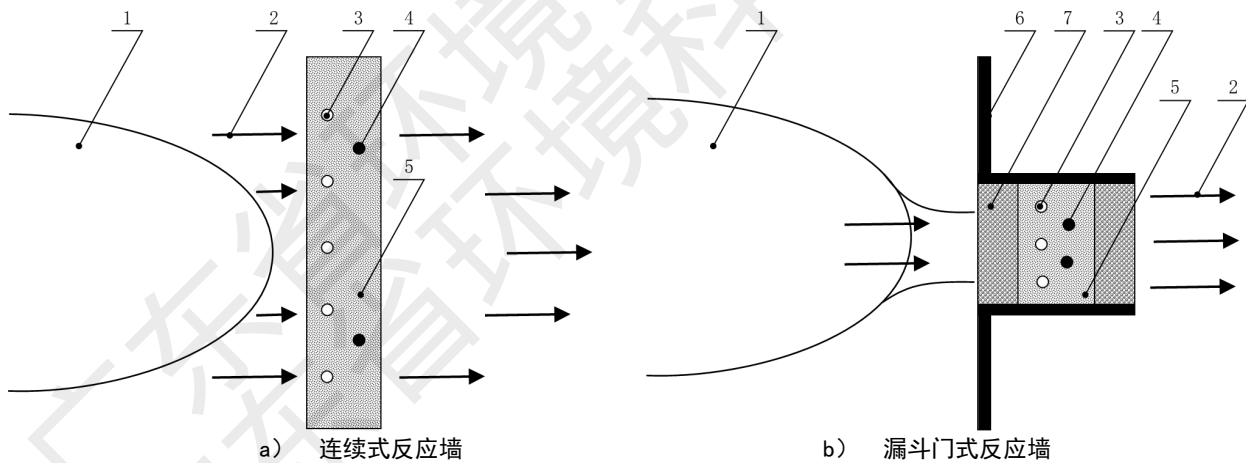
C.2.1 连续式反应墙

连续式反应墙适用于地下水污染羽状体较小的场地。反应墙应位于污染羽下游,垂直于地下水流向,其宽度、深度应保证整个污染羽状体都能通过墙体,厚度应保证污染物通过反应单元处理后浓度能达到修复目标。连续式反应墙结构见图 C.2 a)。

C.2.2 漏斗门式反应墙

漏斗门式反应墙适用于地下水污染羽状体较大的场地,由隔水漏斗、导水门及反应单元组成。隔水漏斗由水泥隔水墙组成,并嵌入到隔水层中,引导或汇集地下水流进入导水门,使污染物通过反应单元处理后浓度达到修复目标。反应单元进水面和出水面分别布设砾石层,用于均匀布水以及防止含水层介质堵塞反应单元。漏斗门式反应墙结构见图 C.2 b)。

对于硝化工艺和同步硝化反硝化工艺,活性填料回填时,同步安装注射井,用于曝气增氧和补充注液,调节地下水反应条件。注射井结构见图 C.1。

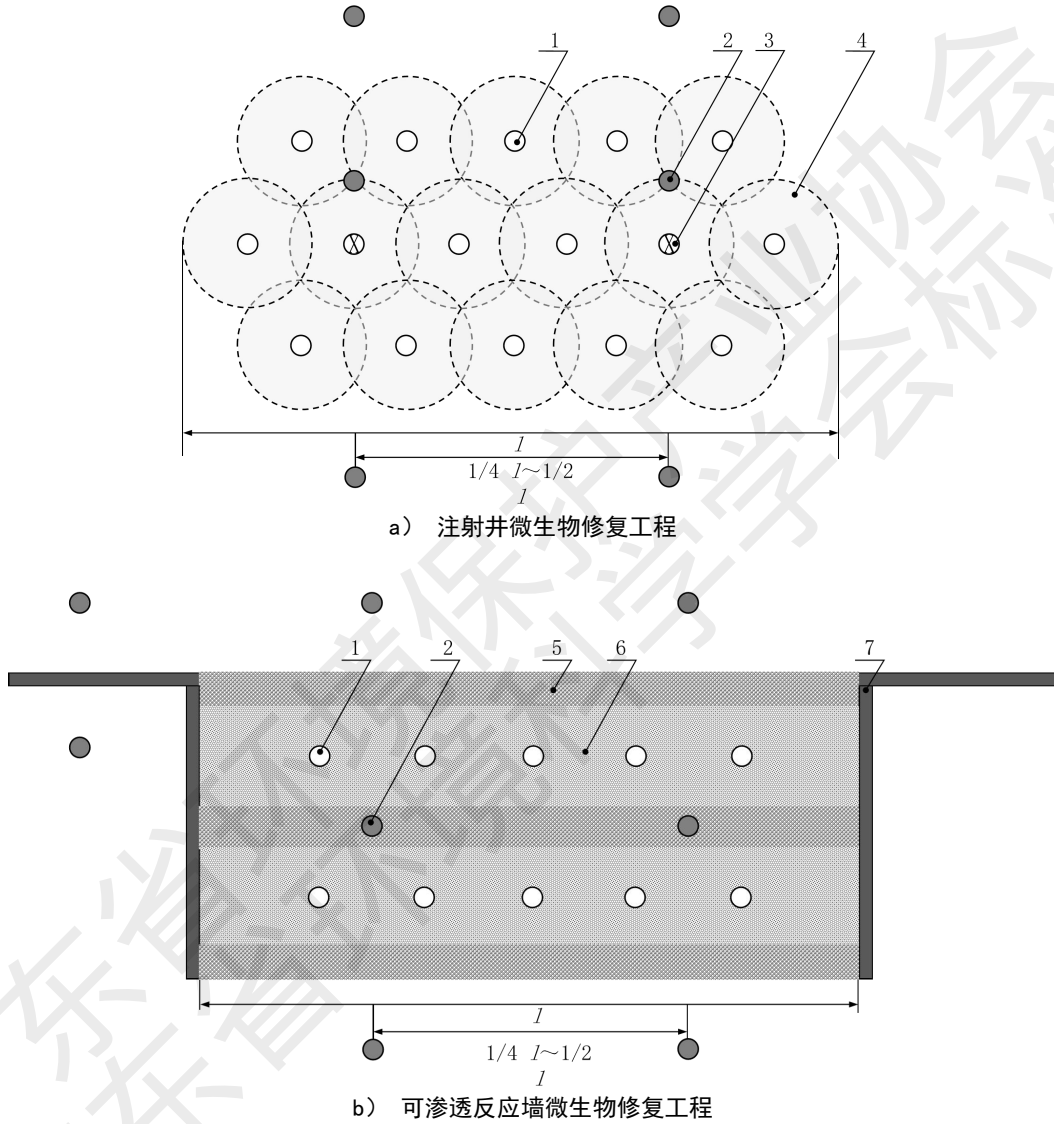


- 标引序号说明:
- 1 ——地下水污染羽;
 - 2 ——地下水流向;
 - 3 ——注射井;
 - 4 ——监测井;
 - 5 ——反应单元;
 - 6 ——隔水墙;
 - 7 ——砾石层。

图 A.2 可渗透反应墙结构图

附录 D
(资料性)
修复工程地下水监测井布设示意图

下面给出了修复工程地下水监测井布设示意图。



- 标引序号说明：
- 1 —— 注射井；
 - 2 —— 监测井；
 - 3 —— 注射井/监测井；
 - 4 —— 注射影响范围；
 - 5 —— 砾石层；
 - 6 —— 反应单元；
 - 7 —— 隔水墙。

图 A.3 修复工程地下水监测井布设示意图

附录 E
(资料性)
地下水污染修复效果评估报告编制提纲

下面给出了地下水污染修复效果评估报告的编制提纲。

- 1 项目背景
 - 1.1 场地基本情况
 - 1.2 修复相关工作情况
 - 1.3 相关批复情况
- 2 工作依据
 - 2.1 法律法规依据
 - 2.2 标准规范依据
 - 2.3 项目文件
- 3 场地概况
 - 3.1 场地调查评估结论
 - 3.2 修复技术方案
 - 3.3 修复工程实施情况
 - 3.4 二次污染防治措施落实情况
- 4 布点与采样方案
 - 4.1 评估范围
 - 4.2 采样布点
 - 4.3 监测指标
 - 4.4 监测频次
 - 4.5 评估标准
 - 4.6 样品采集与检测
- 5 效果评估
 - 5.1 监测结果分析
 - 5.2 修复效果评估
- 6 结论与建议
 - 6.1 修复效果评估结论
 - 6.2 后期环境监管建议

参 考 文 献

- [1] GB/T 14157 水文地质术语
 - [2] GB/T 14848 地下水质量标准
 - [3] DZ/T 0270 地下水监测井建设规范
 - [4] HG/T 20719 微生物法修复化工污染土壤技术规范
 - [5] HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则
 - [6] HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则
 - [7] HJ 682 建设用地土壤污染风险管控和修复术语
 - [8] HJ 2050 环境工程设计文件编制指南
 - [9] NY/T 4159 生物炭
 - [10] DB41/T 2664 可渗透反应墙地下水监测技术规范
 - [11] 地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）（环办土壤〔2022〕16号）
-