

团 体 标 准

T/ACEF 258-2026

地下水污染可渗透反应格栅运行性能监测 技术指南 激发极化法

Technical guideline for operating performance monitoring of permeable reactive
barriers for groundwater pollution—Induced polarization

2026-01-19 发布

2026-01-20 实施

中 华 环 保 联 合 会 发 布

目 次

目 次.....	I
前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 总体要求.....	2
5 监测流程.....	3
6 监测方案.....	3
7 监测过程.....	6
8 数据处理与解译.....	7
9 质量保证与质量控制.....	9
10 监测报告.....	10
附录 A（资料性）测量数据记录表.....	11
附录 B（资料性）地下水污染可渗透反应格栅运行性能的激发极化法监测报告大纲.....	12

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。

本文件由中华环保联合会提出并归口管理。

本文件起草单位：山东大学、北京建工环境修复股份有限公司。

本文件主要起草人：毛德强、刘士亮、张家铭、孟健、李书鹏、马新民、郭丽莉、王傲、朱若彤、郑雨生、吴泓霖、王祖祺、马浩。

地下水污染可渗透反应格栅运行性能监测技术指南 激发极化法

1 范围

本文件给出了地下水污染可渗透反应格栅运行性能激发极化法监测的监测流程、监测方案、监测过程、数据处理与解译、质量保证与质量控制等。

本文件适用于地下水污染可渗透反应格栅运行性能监测。

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。

- DL/T 5148 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范
- DL/T 5150 水工混凝土试验规程
- DZ/T 0070 时间域激发极化法技术规程
- DZ/T 0204 井中激发极化法技术规程
- HG/T 20715 工业污染场地竖向阻隔技术规范
- 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 1019 地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则
- T/CSER 005 地下水污染可渗透性反应墙风险管控效果评估技术指南

3 术语和定义

DZ/T 0070 和 T/CSER 005 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可渗透反应格栅 permeable reactive barrier, PRB

在受污染地下水流经的途径上建造由反应介质组成的格栅，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。

3.2

反应介质 reactive material

填充在 PRB 中通过吸附、沉淀、氧化、还原和生物降解等作用去除地下水中污染物的反应材料。

3.3

地下水污染羽 groundwater contaminant plume

污染物随地下水移动从污染源向周边移动和扩散时形成的污染区域。

3.4

截获区 capture zone

地下水形成稳定流场后，流经 PRB 的地下水区域。

3.5

激发极化法 induced polarization, IP

以岩石、水或污染物等介质极化效应差异为基础，通过观测和研究介质激发极化效应来探查地下地质情况或解决某些水文地质、环境地质问题的一类电法勘探方法，可以得到地下介质的电阻率和极化率等信息。

3.6

归一化极化率 normalized chargeability

将实测极化率数据通过标准化处理后得到的无量纲参数，用于消除不同监测条件对极化率测量值的影响。

3.7

空间变异系数 spatial variability coefficient

衡量空间数据离散程度的无量纲统计量，是数据标准差与均值的比值，以百分比形式呈现。

4 总体要求

4.1 激发极化监测过程应防止实施过程中向地下环境产生新污染或造成二次污染，并实现环境扰动最小化。

4.2 激发极化监测实施时，应保障用电安全，防止对操作人员、周边人群健康和生态受体产生危害。

4.3 电极电缆应合理布设，避免破坏 PRB 结构，工作结束后应恢复现场原状。

4.4 激发极化结果与采样数据应相互补充，并进行综合分析与验证。

5 监测流程

地下水污染可渗透反应格栅运行性能的激发极化法监测包括资料收集、方案设计、激发极化测量、基于激发极化结果的布点采样、样品检测、数据处理与综合解译、编制报告等，监测流程见图 1。

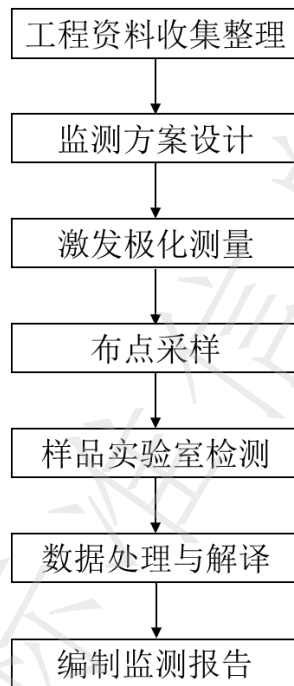


图1 地下水污染PRB运行性能的激发极化法监测流程

6 监测方案

6.1 监测内容

6.1.1 激发极化法监测对象应包括 PRB 上游、下游、两侧的含水层和反应格栅内部的反应介质。

6.1.2 监测范围应包括 PRB 地下水污染风险管控区域，以及工程可能涉及的二次污染区域。

6.1.3 监测性能应包括反应介质性能、目标污染物修复性能、水力截获性能，并应满足下列要求：

- a) 反应介质性能监测指标应包括地表激发极化数据、跨孔激发极化数据；
- b) 目标污染物修复性能监测指标应包括目标污染物浓度、地表激发极化数据、跨孔激发极化数据、辅助性指标；
- c) 水力截获性能监测指标应包括地表激发极化数据、跨孔激发极化数据、地下水位、地下水流速和流向。

6.2 监测节点

6.2.1 监测工作开展应同时满足下列条件：

- a) 可渗透反应格栅工程达到设计方案要求;
- b) 地下水流场达到上游监测井水位日变幅小于 0.3 m, 流向偏差小于 $\pm 15^\circ$ 的稳定状态时。

6.2.2 不相邻的 PRB 管控区域可分批次采用激发极化法监测。

6.3 激发极化测线布置方案

6.3.1 地面激发极化测线应分别垂直于 PRB 方向和沿 PRB 方向布置, 见图 2:

- a) 垂向测线布置应符合下列规定:
 - 测线间距根据场地条件及 PRB 深度确定, 不宜大于 5 m;
 - 存在多层含水层、断层破碎带等地质条件复杂区域, 应适当加密测线;
 - 测线的电极间距应根据探测目标的尺寸调整, 垂向测线的电极间距宜为 0.5 m ~ 2 m;
 - 测线至少 3 条, 分别位于 PRB 中心线和两端边缘处;
 - 探测深度应根据地下水位和 PRB 深度确定, 应覆盖 PRB 设施及周边地下水的主要影响区域。

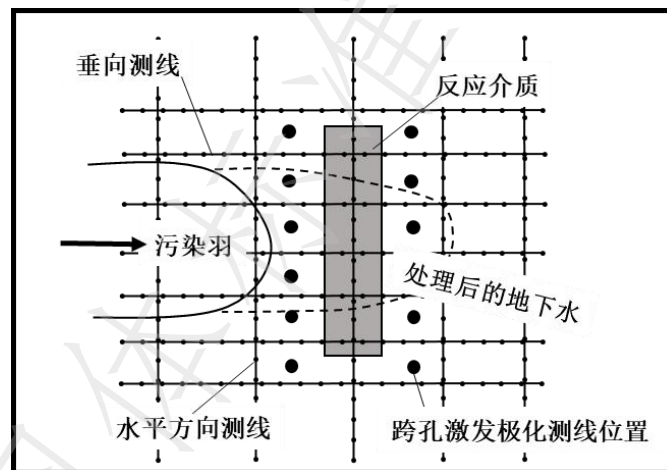


图 2 激发极化测线布置平面示意图

- b) 水平方向测线应在上下游区域沿 PRB 走向平行布置, 形成网格状测网, 水平方向测线布置应符合下列规定:
 - 测线间距应根据场地条件和管控区域的范围确定, 宜为 10 m ~ 20 m;
 - 电极布置应与垂向测线相配合, 应保证三维空间的监测覆盖, 电极间距探测目标的尺寸确定, 宜为 0.5 m ~ 2 m;
 - 测线向上下游延伸长度不小于 PRB 影响半径的 1.5 倍;
 - 对于地形复杂或存在特殊地质构造的区域, 可灵活调整测线布置。

6.3.2 跨孔激发极化测线应在 PRB 的对称方位, 沿 PRB 走向等间距连续布设钻孔对, 在钻孔中布置激发极化测线, 见图 3:

- a) 孔距宜 2 m ~ 15 m, 孔间距离宜为孔内测线长度的一半, 单孔深度应覆盖 PRB 及上下影响带, 不应小于 PRB 高度+ 2 m;

- b) 跨孔激发极化测井的直径应大于测线最大直径的 1.5 倍，筛管应使用非金属材料，缝隙间隔与缝宽应保证电流正常通过；
- c) 采集垂直穿过 PRB 钻孔对的数据，获取 PRB 垂向跨孔激发极化剖面；
- d) 交叉采集相邻钻孔对的数据，探测范围呈“X”型穿过格栅；
- e) 两种采集方式宜交替循环，形成覆盖 PRB 整体范围的监测。

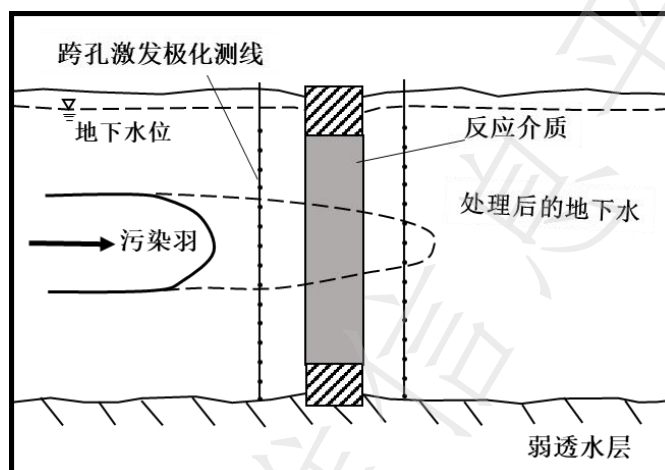


图 3 激发极化测线布置剖面示意图

6.4 激发极化监测方案

6.4.1 激发极化数据采集参数应根据监测对象范围和场地条件设置，数据采集参数宜符合下列规定：

- a) 测量阵列参数的装置类型可选择温纳装置、斯伦贝谢装置、偶极装置、梯度装置，必要时可进行多装置优化组合；
- b) 激发极化单次供电与测量脉冲时长推荐 1 s~2 s；

6.4.2 数据采集频率在工程验收后首年宜每月 1 次，后续根据激发极化结果稳定性调整为每季度 1 次。

6.4.3 当激发极化剖面出现突变区域或极化率数据波动超过历史均值 $\pm 20\%$ 时，应在 7 日内开展加密监测，并同步启动监测井采样。

6.5 采样点位布设与监测方案

6.5.1 目标污染物修复性能监测

6.5.1.1 PRB 管控区域上游、内部、下游以及可能涉及的二次污染区域宜设置地下水监测点。

6.5.1.2 RPB 管控区域内部地下水监测点数量不应少于 3 个，且每 40 m 长度的 PRB，应设置不少于 1 个监测点。

6.5.1.3 PRB 下游监测点不应少于 2 个。

6.5.1.4 在 PRB 上下游不同距离处，宜按照等间距或等比例原则设置采样点。

6.5.1.5 采样点的布设应考虑地质条件、地下水流向等因素，确保采集的样品具有代表性。

- 6.5.1.6 地下水样品采集深度宜符合 HJ 25.6 的规定，并可结合激发极化结果调整采样深度。
- 6.5.1.7 可充分利用地块环境调查、PRB 实施阶段、跨孔激发极化设置的监测井。
- 6.5.1.8 地下水监测指标包括管控的目标污染物和辅助性指标，辅助性指标包括 pH、氧化还原电位、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} ，用于判断含水层性质变化。
- 6.5.1.9 目标污染物监测频次应每季度 1 次，两批次之间的间隔不少于 1 个月，辅助性指标监测可每年开展 1 次。
- 6.5.1.10 对地下水水流场变化快或激发极化测量结果异常的情况，可提高采样频率。
- 6.5.2 水力截获性能监测
 - 6.5.2.1 水力截获性能应通过收集监测井中水位信息确定。
 - 6.5.2.2 利用达西定律确定反应介质渗透系数、含水层渗透系数并绘制地下水渗流图，包括地下水位随季节的变化和地下水流方向的变化。
 - 6.5.2.3 水力截获性能监测频次应每季度 1 次。

7 监测过程

7.1 激发极化测量

7.1.1 地面激发极化测量

- 7.1.1.1 按方案设计的要求，备齐全部仪器、工具、数据记录表，配备安全生产防护用品，检查供电电源或供电电池电压。
- 7.1.1.2 核实测线、测点编号，装置类型，极距及电极排列方向，电极的种类与数量，接地技术措施等。
- 7.1.1.3 数据采集过程中，详细记录采集时间、位置、仪器参数等信息。
- 7.1.1.4 仪器自动读取数据，数据记录以文件形式存储，原始记录应由两人完成，数据记录表参见附录 A。
- 7.1.1.5 野外工作结束后，及时对原始数据进行存储和备份。

7.1.2 跨孔激发极化测量

- 7.1.2.1 核实钻井编号、所在位置、井深、井液性质、液面高度、井内安全等有关资料，核实测量仪器、工具、材料等。
- 7.1.2.2 准确记录电缆放置的深度，计算深度应以地面作为深度起算点。
- 7.1.2.3 电缆与仪器应连接可靠，所有电极应下放到井内液面以下，并通电检查。
- 7.1.2.4 数据采集、数据记录宜符合 DZ/T 0204 的规定。

7.2 现场采样与样品检测

- 7.2.1 地下水样品采集宜符合 HJ 164 的规定。
- 7.2.2 采样工作的组织和现场人员防护宜符合 HJ 25.1 和 HJ 25.6 的规定。

7.2.3 地下水样品的现场检测与实验室检测宜符合HJ 25.2的规定。

8 数据处理与解译

8.1 激发极化数据处理与反演

8.1.1 数据处理与反演过程中，应建立质量控制体系。

8.1.2 将数据转换为反演软件能识别的数据格式，测量数据在转换格式时要设置测量方法、电极个数、电极距等参数。

8.1.3 进行反演得到地下介质的激发极化参数分布剖面图，激发极化参数包括电阻率、极化率等。

8.1.4 反演软件推荐 Res2DInv、EarthImage2D 等。

8.1.5 根据反演软件的要求，设定合适的反演参数（如反演最大迭代次数，数据拟合差阈值等），并将保存反演结果文件。

8.1.6 对监测过程中得到的时间序列数据，应进行时移反演，识别地下介质激发极化参数随时间的变化。

8.2 激发极化结果定性解译

8.2.1 对剖面结果进行分析，确定剖面中电性结构及异常区域，异常划分宜遵循以下原则：

- a) 根据与背景值的相对差异大小来圈定异常，应根据已知目标和潜在目标可能的差异相对大小来圈定异常；
- b) 推断为同一异常源引起的异常宜划为同一异常；
- c) 推断地下介质属性相同且位置邻近的不同异常源引起的同类异常可划分为同一异常区域。

8.2.2 解译推断的首要任务是对异常源的性质属性作出定性解释，根据物性和已有资料分析异常的多解性，制定减少多解性的措施。

8.2.3 进行模型对比分析，将正演模拟结果与测量数据结果对比，研究异常特性。

8.2.4 应分析、评价每个异常定性解译的依据及其可靠性。

8.3 激发极化结果定量解译

8.3.1 反应介质性能结果解译

8.3.1.1 将现场反应介质区域内激发极化反演的电阻率、极化率与相同状态反应介质实验室内的相应值进行比对，建立物性参数标定值，依据标定值对测定的剖面进行解译。

8.3.1.2 可通过模拟或实验建立反应介质全生命周期的表面活性面积与极化率之间的对应关系，根据现场极化率剖面值定量推断反应介质的状态。

8.3.1.3 对特征区域进行钻井验证与标定，建立激发极化参数与反应介质的相关关系，建立关系后应对激发极化结果进行再解译，并提出是否达到目的。

8.3.1.4 电阻率和极化率反演结果数值分布的均匀性可作为反应介质分布一致性的判断依据，电阻率空

间变异系数大于 0.25 或极化率差异大于 15%时，提示反应介质沉降或反应不均匀。

8.3.1.5 电阻率上升一般表明反应介质孔隙堵塞或杂质混入，影响其基本物理结构与导电性能。

8.3.1.6 极化率反演结果数值及空间变异系数可作为反应介质活性的判断依据，极化率与反应介质表面活性面积呈显著正相关，极化率下降提示反应介质表面活性减少。

8.3.1.7 若因原推断可靠性问题或钻井偏移等原因未验证推断目标体，依据再解译结果开展激发极化探测后再次验证,或通过反应介质直接再验证。

8.3.1.8 PRB 结构稳定性解译方法宜符合 DL/T 5148 和 DL/T 5150 的规定，阻隔格栅解译方法宜符合 HG/T 20715 的规定。

8.3.2 目标污染物修复性能结果解译

8.3.2.1 利用多剖面的观测结果，并结合其他物化探资料、钻孔资料、地质资料，对同源异常起因和异常源几何参数、电性参数进行相互约束的综合解译，以减少解译的多解性，提高资料解译精度。

8.3.2.2 通过监测井取样得到的污染物浓度数据，结合相同位置激发极化剖面的参数值，建立污染物浓度与特征参数之间的对应关系。

8.3.2.3 对比激发极化参数异常变化值与目标污染物浓度数据，重点关注 PRB 下游激发极化参数的变化，定量解译目标污染物修复性能的演变。

8.3.2.4 电阻率和极化率数值可作为目标污染物修复性能的判断依据，应采用下列解译方法：

- a) PRB 下游电阻率恢复至背景值 $\pm 10\%$ 且极化率波动小于 5%，表明目标污染物被有效截留；
- b) 归一化极化率与累计污染物去除量呈正相关，可量化实时去除效率；
- c) 在激发极化剖面异常区的监测井，井中的检测指标均持续稳定达标，方可认为 PRB 运行性能稳定；
- d) 采用监测井的目标污染物去除效果解译宜符合 T/CSER 005 的规定。

8.3.3 水力截获性能结果解译

8.3.3.1 通过激发极化剖面结果与定量关系判断 PRB 厚度、漏斗段连续性及优先通道位置，重点关注反应介质电阻率与极化率异常区域的数值与分布特征。

8.3.3.2 通过激发极化法监测地下水流场，依据激发极化剖面异常区域的扩展方向与速率，定量判定 PRB 对地下水污染羽的截获范围。

8.3.3.3 依据监测井中地下水位深度值与激发极化反演解译深度值的关系来标定实际深度，定量推算地下水位的埋藏深度。

8.3.3.4 结合反应介质性能解译同步开展水力截获性能解译，对比 PRB 上下游的激发极化参数异常区分布变化，分析反应介质的性能衰减对渗透性的影响。

8.3.3.5 电阻率异常区域变化可表示渗透路径改变，影响截获性能与截获区范围，应采用下列解译方法：

- a) 特定区域电阻率变低，提示此处可能形成优先通道；
- b) 特定区域电阻率变高，提示此处可能渗透性能降低；
- c) 特定区域电阻率变化动态范围变窄，影响地下水污染羽截获的效果；

d) 根据 PRB 运行之后的水力截获性能及截获区范围变化, 综合判断风险管控的长期效果。

9 质量保证与质量控制

9.1 质量控制要求

9.1.1 操作人员应具有环境、地球物理、场地监测等相关专业知识, 熟悉现场监测流程, 掌握激发极化测量、现场采样、样品保存与流转的技术要求和相关设备的操作方法。

9.1.2 激发极化仪器应符合下列规定:

- a) 输出功率应大于 80 W, 输出电压应大于 100 V, 输出电流应大于 50 mA;
- b) 供电时间的精度不应低于 $\pm 1\%$;
- c) 在测量过程中稳流精度应高于 $\pm 2\%$;
- d) 仪器的延时与积分时间的误差应小于 $\pm 1\%$;
- e) 仪器工作环境温度为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$, 在相对湿度 93% 情况下能正常工作。

9.1.3 激发极化电极应满足点电极条件, 测量电极一般应挖坑埋设, 电极坑内不应有碎石和植物, 干燥时应提前向坑内浇水, 电极接地电阻宜小于 $1\text{ k}\Omega$ 。

9.1.4 测量过程噪声控制宜符合 DZ/T 0070 的规定。

9.1.5 进行激发极化测量时, 测区内须选择部分测线进行重复观测、检查观测及系统观测。

9.1.6 地下水采样过程涉及的现场质量控制宜符合 HJ 25.1 和 HJ 25.6 的规定。

9.1.7 地下水样品的保存与流转宜符合 HJ 164 和 HJ 1019 的规定。

9.1.8 地下水样品检测的质量控制宜符合 HJ 164 的规定。

9.2 数据记录与处理

9.2.1 激发极化数据采集时要注意观察是否有异常值出现。

9.2.2 确保监测数据的完整性, 全面、真实、客观地反映监测结果。

9.2.3 野外记录本中记录的各项相关事项应在观测现场完成, 不得事后追记或修改, 不能以转抄的结果来替代原始野外记录。

9.2.4 野外记录本不应空页, 撕页或粘贴其他纸张; 野外记录应准确、工整、字迹清晰, 不得涂改或擦改, 记错的内容应划去, 另起一行重记, 并注明原因。

9.2.5 原始数据和处理数据应分别保存, 为保证数据处理的质量, 可以对比正演模拟结果。

9.3 结果解译与报告

9.3.1 定量解译的阈值判据来源于激发极化法监测 PRB 运行性能的室内试验与现场工程验证, 宜根据场地背景值及介质类型进行现场标定。

9.3.2 对解译结果应进行合理性判定, 判定结果不合理时, 应重新测定。合理性判定应满足下列要求:

- a) 基于激发极化法获得的判定结论，应与监测井采样数据的判定结论一致；
- b) 解译结果应体现反应介质性能、污染物修复性能与水力截获性能之间的内在关联与逻辑一致性；
- c) 对上述性能之间的关联性，应通过地球物理、水文地质及生物化学等机理合理解释与原因分析。

9.3.3 初级报告由现场技术负责人审核，重点检查数据逻辑性与质控符合性，终版报告需经质量负责人批准。

10 监测报告

监测报告应全面、准确反映 PRB 运行性能的激发极化法监测结果和解译结论。报告应包括下列内容：

——项目概述：介绍 PRB 工程的基本情况、监测目的和任务；

——监测方法与质量评述：说明激发极化法测网布置方案、数据采集及参数设置、数据质量评价等；

——现场采样与实验室检测：展示现场采样点位布置、样品采集情况及实验室检测数据，分析样品检测结果与激发极化监测结果的相关性；

——监测结果与解译：根据监测和检测结果，对 PRB 的反应介质性能、目标污染物修复性能和水力截获性能进行综合解译；

——结论：总结监测工作的主要结论，为 PRB 的运行维护和优化提供决策依据；

——附表与附图：包括报告正文中未完全展示的附表及附图。

——报告格式见附录 B。

附录 A
(资料性)
测量数据记录表

激发极化数据采集野外记录表见表A.1。

表 A.1 激发极化法数据采集野外记录表

测线编号	起点坐标	终点坐标	电极个数	电极间距	测量方法	测量参数	数据存储位置
备注							
测试日期		测量位置		测试人员		审核	

“备注”项中主要包括：干扰具体情况（干扰因素种类、干扰程度和分布范围），仪器设备性能，检查点位置，物性测定点位置等；测点坐标可以采用手持 GPS 进行测定。

附录 B

(资料性)

地下水污染可渗透反应格栅运行性能的激发极化法监测报告大纲

B.1 项目概述

- B.1.1 自然地理概况和水文地质条件
- B.1.2 可渗透反应格栅工程概况
- B.1.3 监测目的和任务
- B.1.4 相关法律法规和标准规范
- B.1.5 已有工作成果总结分析

B.2 监测方法与质量评述

- B.2.1 激发极化法原理与监测可行性分析
- B.2.2 测网布置方案
- B.2.3 野外数据采集
- B.2.4 数据质量评价

B.3 现场采样与实验室检测

- B.3.1 布点与采样方案
- B.3.2 样品采集与实验室检测
- B.3.3 检测结果分析

B.4 监测结果与解译

- B.4.1 处理解译方法
- B.4.2 数据处理
- B.4.3 结果解译推断

B.5 结论

B.6 附表与附图

地理位置图、激发极化测线平面布置图、激发极化调查成果图、现场记录照片、现场探测的记录、法规文件等。