

附件 4

# 地下水污染地球物理探测技术指南

(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 术语与定义.....	2
1.5 指导原则.....	4
1.6 组织编制单位.....	4
<b>第二章 工作内容和流程</b> .....	5
2.1 工作内容.....	5
2.2 工作流程.....	6
<b>第三章 资料收集和调查区物性特征分析</b> .....	8
3.1 基础资料收集.....	8
3.2 污染调查区物性特征分析.....	8
3.3 现场踏勘和人员访谈.....	12
<b>第四章 地球物理探测方法</b> .....	14
4.1 方法概况.....	14
4.2 高密度电阻率法.....	15
4.3 探地雷达法.....	19
4.4 激发极化法.....	24
<b>第五章 数据分析解译</b> .....	29
5.1 高密度电阻率法.....	29
5.2 探地雷达法.....	30
5.3 激发极化法.....	30
5.4 反演结果解译推荐方法.....	31
5.5 数据反演和解译结果与污染区划定.....	31
<b>第六章 质量控制和安全保障</b> .....	33

6.1 仪器质量控制.....	33
6.2 野外测量质量控制.....	33
6.3 数据分析解译质量控制.....	34
6.4 安全保障.....	34
<b>第七章 技术成果.....</b>	<b>36</b>
7.1 报告内容和格式.....	36
7.2 图表集.....	36
7.3 数据文件.....	36
附录 A 不同行业地下水潜在特征污染物类型.....	37
附录 B 地球物理方法正演.....	39
附录 C 不同污染调查区综合地球物理方法选择的主辅关系.....	48
附录 D 高密度电阻率法的原理、测定方法和设备要求.....	49
附录 E 探地雷达法的原理、测定方法和设备要求.....	55
附录 F 激发极化法的原理、测定方法和设备要求.....	59
附录 G 野外地球物理方法测量数据记录表.....	67
附录 H 地下水污染调查区地球物理调查报告大纲.....	70
附录 I 有机物和重金属复合污染电阻率和充电率实验测定.....	71

# 地下水污染地球物理探测技术指南（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），加快推进我国地下水污染防治工作，增强地球物理探测方法在地下水污染防治工作中使用的科学性和规范性，依据《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》及相关法规标准，编制《地下水污染地球物理探测技术指南（试行）》（以下简称指南）。

### 1.2 适用范围

本指南适用于固体废弃物填埋场渗滤液渗漏、污水处理池或车间生产废水等点源泄漏、油气管道和加油站油类泄漏、海水入侵等情况导致地下水污染的调查和修复效果监测，其他类型污染调查可参照使用。

本指南适用于辅助获取地质体空间分布、地下构筑物或埋设物、潜水水位等相关信息。

### 1.3 编制依据

本指南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指南。

GB/T 14848 地下水质量标准；

HJ 25.1 建设用土壤污染状况调查技术导则；

CJJ/T 7 城市工程地球物理探测标准；

DZ/T 0070 时间域激发极化法技术规定；

DZ/T 0073 电阻率剖面法技术规程；

《地下水环境状况调查评价工作指南》（环办土壤函[2019]770号）。

## 1.4 术语与定义

下列术语和定义适用于本指南。

**地球物理探测：**地球物理勘探和地球物理物性测试的统称。

**地球物理勘探：**根据目标物与周边介质的物理性质差异，运用适当的地球物理原理和相应的仪器设备，通过分析研究观测到的物理场，探查地质界线、地质构造及污染物分布等目标的行为。

**地球物理物性测试：**运用适当的地球物理原理和相应的仪器设备，测定地质体、地下人工埋设物或污染物的物理性质或工程特征的方法。

**电阻率法：**利用地壳中不同岩石间导电性的差异，通过观测与研究在地下人工建立的稳定电流场的分布规律，研究解决相关问题的一种电法勘探方法。

**高密度电阻率法：**通过电极阵列技术同时实现电剖面 and 电测深测量，获得二维或三维的电阻率空间分布，进而研究解决相关问题的电阻率法。

**探地雷达法：**通过测量高频电磁波在介质中传播产生的电磁信号，进而研究其在地下介质中的传播速度、介质吸收系数以及界面反射系数等，解决相关地质问题的一种电磁波法。

**激发极化效应：**在人工电流场—磁场或激发场作用下，具有不同电学性质的岩石或矿石，由于电学作用将产生随时间变化的二次电场（激发极化场）。这种物理化学作用称为激发极化效应。

**激发极化法：**以岩、矿石、水或污染物等的激发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。

**探测深度：**地球物理方法在某些条件下所能达到的最大有效探测深度。

**分辨率：**地球物理方法所能分辨的地下目标的几何尺寸，可分为横向分辨率和纵向分辨率。

**正演和反演：**正演是已知物性参数分布来模拟计算对应地球物理场分布的过程。反演是由实测数据求取异常源的几何参数和物性参数的过程。

**视电阻率：**在地下岩石电性分布不均匀（同时赋存有两种或两种以上导电性不同的岩石或矿石）或地表起伏不平的情况下，按测定均匀水平大地电阻率的方法和计算公式求得的电阻率。

**介电常数：**介质在外加电场时会产生感应电荷而削弱电场，原外加电场（真空中）与最终介质中电场比值即为介电常数，是相对介电常数与真空中绝对介电常数乘积。

**极化率：**表征地下介质激电效应强弱的参数，是断电后某一

时刻测得的二次电位差和长时间供电观测到的总场电位差的比值，常用百分数表示。

## 1.5 指导原则

(1) 针对性原则：针对调查区和污染物特性，采取适宜的地球物理方法进行污染空间分布探测，为地下水污染防治提供依据。

(2) 规范性原则：采用程序化和系统化的方式规范地球物理探测过程及探测结果解译；地球物理探测评估的时间可能相当长，不应局限在某个短暂时间内，应具有连续性和可重复性。

(3) 可操作性原则：综合考虑方法成熟度、操作难易程度、时间、经费等因素，使地球物理探测及解译过程切实可行。

## 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、南京大学、中国地质大学（北京）、吉林大学和生态环境部南京环境科学研究所起草编制。

## 第二章 工作内容和流程

### 2.1 工作内容

#### 2.1.1 资料收集及调查区物性特征分析

采用资料收集、前期现场踏勘和人员访谈等方式，收集调查区背景值（受污染前）和地下水污染的相关资料。根据调查区物化特征、水文地质条件，结合工作条件和污染调查不同阶段，确定调查区地球物理方法探测的工作方案。

#### 2.1.2 地球物理探测

根据探测工作方案，结合现场详勘，开展地球物理探测，获得相关地球物理数据。初步分析解译探测数据，对初步调查结果解译的电阻率、极化率等物性异常区可适当修改原定工作方案，在详查阶段增补异常集中区域附近的测线，提高对可疑污染区污染范围的评估精度。考虑资料相互验证的需要，在难以采用钻孔验证时，可采用其他地球物理方法对同一测线（或区域）进行探测。

#### 2.1.3 数据分析解译

采用成熟可靠的数据处理技术或软件，编辑测量数据，剔除具有干扰性的异常值，进行数据分析解译。对比解译结果图像与已收集资料以及不同地球物理方法测试结果，初步判断解译结果的可信程度。对于解译结果可信度不高的区域，应分析查找原因，调整参数重新反演解译，或根据需要做进一步的野外地球物理探

测。对解译结果可信度高的区域，采取钻探取样、检测等方式进行验证。

## **2.2 工作流程**

总体工作流程包括调查区资料收集和现场踏勘、地球物理探测、数据分析解译和污染区划定等环节，具体如图 2-1 所示。

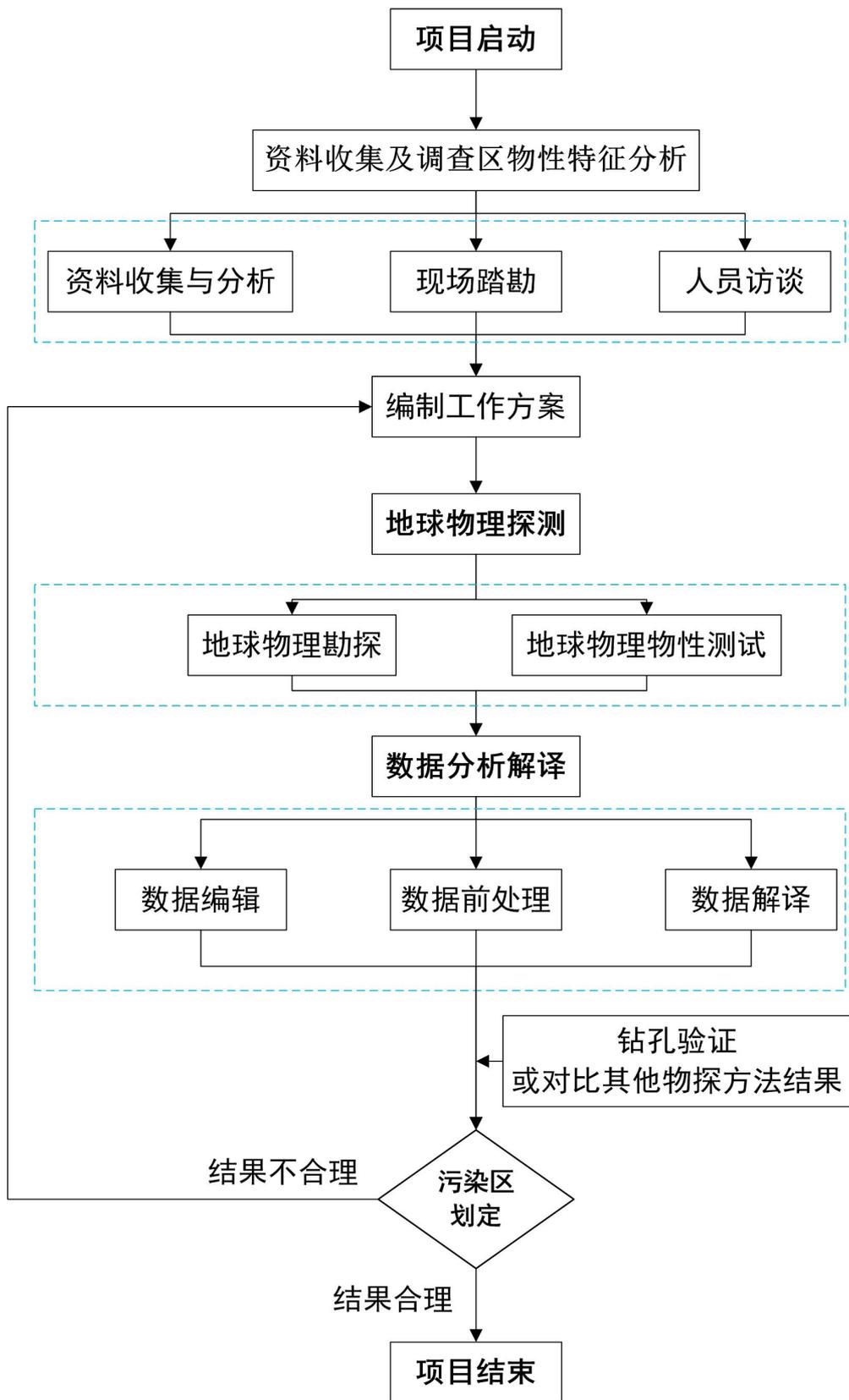


图 2-1 地下水污染地球物理探测工作流程图

## 第三章 资料收集和调查区物性特征分析

### 3.1 基础资料收集

收集和分析调查区水文、气象、地形地貌、水文地质等基础资料（表 3-1），具体方法参照《建设用地土壤污染状况调查技术导则》（HJ 25.1）和《地下水环境状况调查评价工作指南》（环办土壤函[2019] 770 号）。不同行业地下水潜在特征污染物参考附录 A。

表 3-1 调查区基础资料类型

类型	内容
水文水质资料	调查区附近地表水体分布，水位与水量，排污情况（类型、位置、数量等），地表水体中污染物种类、浓度及相关水质信息。
气象资料	调查区及附近区域降水、气温、风向、风速等气象要素资料；大气及降水中污染物信息。
地形地貌、地质、水文地质资料	调查区及周边区域地形地貌，地层岩性，含水层系统结构（水文地质平面图、剖面图和钻孔柱状图等），地下水补给、径流、排泄条件，地下水点（泉、水井）分布，地下水水位、水质动态，地下水与地表水的关系，主要水文地质参数（流速、渗透系数、导水系数、储水系数）等。
地下水利用情况	现状及未来规划情况下，地下水开采布局、水井位置、成井结构、开采量、开采用途等。
土地利用历史、污染状况调查情况	调查区开发利用历史，厂区平面图，地下构筑物分布图等，调查区污染前期评价及调查成果资料。

注：调查区指综合考虑污染物在地下水中运移范围的条件下，调查对象及其影响范围。

### 3.2 污染调查区物性特征分析

在进行调查区地球物理探测之前，要获取调查区地球物理探测的物性参数，包括物性资料收集、调查区物性测试和正演数值模拟等。

### 3.2.1 物性资料收集

物性资料主要包括以下几个方面：

(1) 调查区内不同地层/土样的电阻率、介电常数、极化率等物性参数；

(2) 调查区、相邻地区或其他条件类似地区的地球物理方法探测工作成果报告及图件；

(3) 调查区、相邻地区或其他条件类似地区地球物理方法研究和应用资料文献；

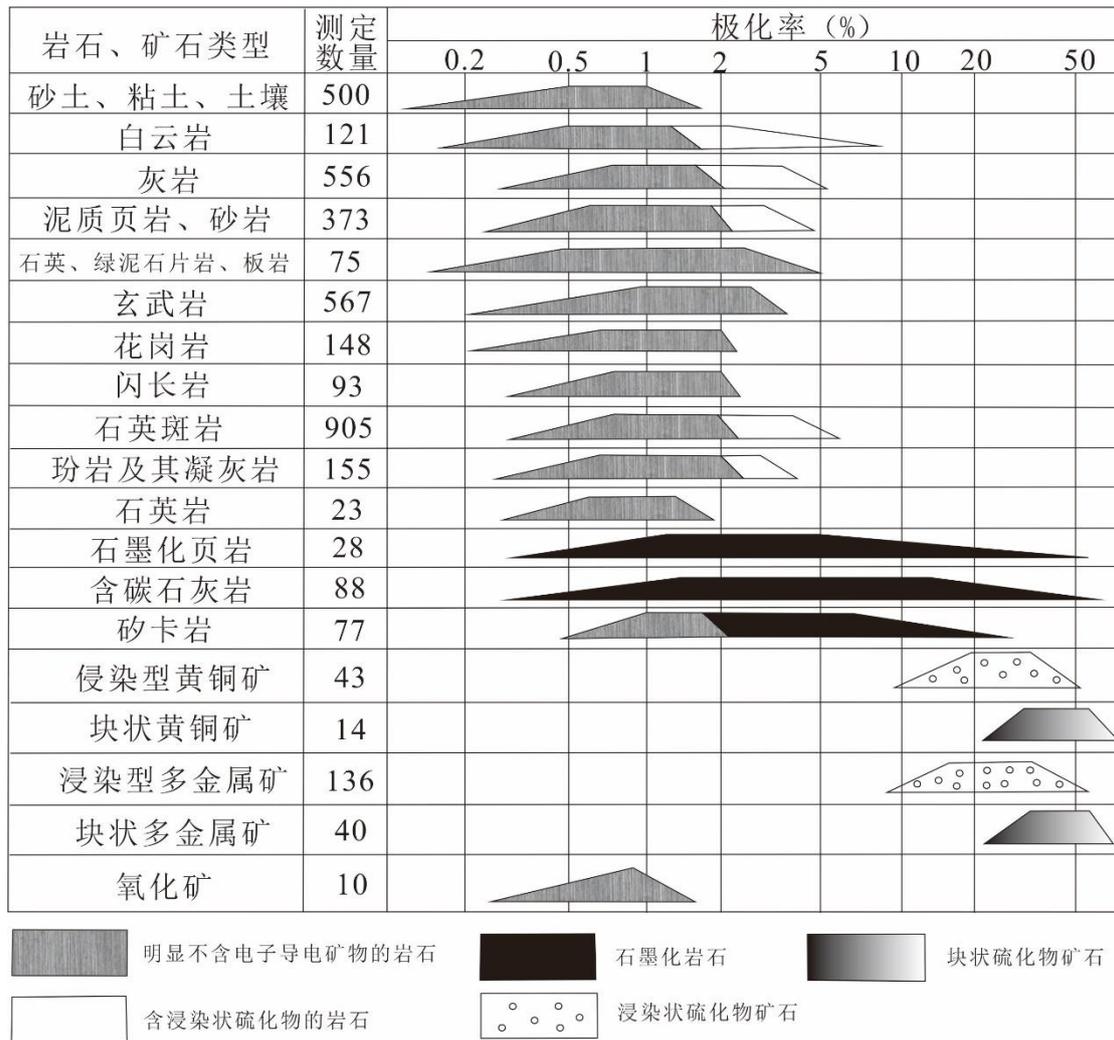
(4) 收集相关污染物的电性特征、电阻率、磁导率、极化率和介电常数的范围，或是参考类似调查区中污染物的参数值。常见物质电阻率和相对介电常数参考值见表 3-2，常见岩石的极化率见图 3-1。

调查人员应核实收集资料的有效性，根据专业知识剔除错误和不合理的信息。如资料缺失影响判断调查区污染状况时，应在报告中说明。

表 3-2 常见物质的电阻率、相对介电常数及衰减常数

介质名称	电阻率( $\Omega \cdot m$ ) $\rho$	相对介电常数 K	电磁波速度 (m/ns)	衰减常数(dB/m)
干沙	$10^3 \sim 10^7$	3~6	0.1~0.122	<0.0009
饱和含水砂	$10^2 \sim 10^4$	20~30	0.067~0.055	0.3~0.03
粉砂	$10^2 \sim 10^3$	5~30	0.134~0.055	1~100
页岩	$10 \sim 10^3$	5~15	0.134~0.077	
饱和含水黏土	1~10	5~40	0.134~0.047	1~300
湿土	50~100	~30	~0.055	
垦殖土	~200	~15	~0.077	
岩质土	~1000	~7	~0.113	
干砂质土	~7100	~3	~0.173	
湿砂质土	~150	~25	~0.06	~0.002
干壤质土	~9100	~3	~0.173	
湿壤质土	~500	~19	~0.069	
干黏土质土	~3700	~2	~0.21	
湿黏土质土	~20	~15	~0.077	
淡水	$30 \sim 10^4$	~81	~0.033	~0
海水	~0.25	~4	~0.15	~1000
冰	$10^3 \sim 10^5$	3~4	0.173~0.15	
水泥混凝土	0.1~1	6~11	0.09~0.12	0.5~5
空气	无限大	~1	~0.3	~0
汽油	$\sim 2.5 \times 10^{11}$	~1.9		
甲醇	$\sim 2.3 \times 10^5$	~30		
煤油	$\sim 7.3 \times 10^{12}$	2~4		
苯	$1.6 \times 10^{11} \sim 10^{12}$	1~2.5		
DNAPL	$500 \sim 10^5$			
铁、铅、汞	$1.0 \times 10^{-7} \sim 0.1$	<10		
银、铜、金、铝	$1.5 \times 10^{-8} \sim 0.03$	<10		

注：单个数字前的“~”表示“大约”。



梯形下底边两端点位置表示极化率的极大值和极小值；梯形上边两端点位置是不同作者得到的极化率平均值。

图 3-1 部分岩石、矿石极化率实测数据统计结果

(来源：何继善. 双频电法的物理基础[M], 北京：高等教育出版社, 2006.)

### 3.2.2 物性测试

在野外地层露头采用地球物理方法测定其物性参数，同时采集不同地层（包括污染地层和未受污染地层）土样和水样测定其物性参数。其测试可采用露头法、标本法。实际工作中应根据具体情况进行选择。当因客观条件限制或者难于直接确定某种方法的效果时，宜采用综合性的测定方法。

(1) 采用露头法时，应合理选择待测露头、观测装置的参数、测定的方法技术。

(2) 标本采集点应均匀分布在测区中不同介质的天然或人工露头（浅井、探槽、矿坑、钻孔）上，并应以下列对象为研究重点。

a) 污染目标物和干扰介质体；

b) 电阻率、介电常数、极化率等参数变化范围较大的介质；

c) 地下水性质表现复杂地段的介质；

d) 不均匀覆盖层，特别是盐碱化不均匀所引起的电性变化的覆盖层。

### **3.2.3 正演模拟**

地球物理方法探测结果的解译依赖于介质的物性差异，要求污染调查区内污染区和非污染区具有明显物性差异，进行以调查区物性参数为基础的正演数值模拟或模拟实验，具体参考附录 B。

## **3.3 现场踏勘和人员访谈**

现场踏勘、人员访谈和资料收集交错进行。必要时，对收集资料进行补充、核实。

(1) 踏勘野外实地测区的地形、地貌、人文、气象、交通、土壤、植被等条件；

(2) 核对地质情况，了解可供利用的山地工程、测绘标志、

以前的物化探测网及异常标志等；

(3) 查明调查区地质和人文干扰因素（如高压线、地下管道、地下构筑物等）的种类、强度及分布等情况；

(4) 明确测区可布测线的范围、测线方向和长度；

(5) 调查测区电极接地条件；

(6) 采集测区土样、水样或岩芯，用以测定调查区岩层的电阻率、极化率等物性参数。

## 第四章 地球物理探测方法

### 4.1 方法概况

地下水污染调查常用的地球物理方法、参数、代表性仪器类型及应用条件见表 4-1。根据调查区污染物特征、调查规范、仪器发展水平与可操作性，以及相关方法的成功应用案例，选择高密度电阻率法和探地雷达法作为探测调查区污染物的主要地球物理调查方法，并辅以激发极化法。条件允许时，可采用多种方法进行探测。由于不同方法探测精度和深度不同，在同时使用多种方法进行地下水污染调查区探测时，应注意主次搭配，搭配顺序具体参考附录 C。

表 4-1 地下水污染调查中常用的地球物理方法

方法	参数	代表性仪器	应用条件
电阻率法和激发极化法	地层电阻率、极化率、调查区电阻率、极化率空间变化情况	高密度电阻率法测量系统、多功能电法分布式采集工作站	① 石油类渗漏源、污染范围等污染调查； ② 勘测垃圾填埋位置、边界及渗液空间范围； ③ 圈定城市污水渠、管道渗漏及扩散范围； ④ 测量地下水矿化度，划分咸淡水界面； ⑤ 在电阻率物性差异较小调查区，辅助以激发极化法； ⑥ 在石油和重金属等复合污染调查区，辅助激发极化法区分石油和重金属污染。
探地雷达法	介电常数、电磁波速、吸收衰减系数等	探地雷达系统	① 石油类渗漏源、污染范围等污染调查； ② 划定垃圾填埋场边界及渗液污染空间分布； ③ 探测废弃管道、阀井及污染物渗漏位置； ④ 划分调查区地层结构、岩性及静水位等； ⑤ 圈定污灌渠、线状污染及扩散范围。

方法	参数	代表性仪器	应用条件
电磁法	地下介质分层电导率	电导率成像系统、土壤电导率成像仪	① 石油渗漏源、污染范围等污染调查； ② 圈定浅地表污染源、边界范围； ③ 探测城市污水渠、管道渗漏及扩散范围； ④ 测量土壤导电特性、矿化度，以及划分咸淡水界面等。
单孔物探测井法	电阻率、自然电位、自然伽马、伽马-伽马等	成像测井系统、水文物探测井系统	① 适用钻孔深度大于 10 米； ② 原位测量深部地层电阻率值、自然电位、自然伽马和伽马-伽马等参数； ③ 刻画污染土壤与地下水介质弹性参数变化等。
声波跨孔层析法	土壤介质横纵波速 (Vp/Vs)、弹性模量、泊松比、密度等	地震仪、工程测试系统等	① 适用钻孔深度大于 20 米，间距小于 30 米； ② 描述钻孔间土壤介质断面污染源与污染范围的空间变化情况； ③ 评价污染调查区地层结构与岩土特性。
电磁波孔间 CT 成像法	电磁波速、电磁波衰减度等	地下电磁成像系统、孔间成像系统等	① 适用钻孔深度大于 20 米，间距小于 20 米； ② 描述钻孔间土壤介质断面污染源与污染范围的空间变化情况； ③ 评价污染调查区孔间断面电磁衰减分布特征。
钻孔雷达测井法	介电常数、电磁波衰减度等	钻井雷达	① 适用孔深大于 10 米； ② 评价土壤与地下水介质半径小于 10 米； ③ 可用于所有污染调查勘查孔和监测孔。

## 4.2 高密度电阻率法

### 4.2.1 适用条件

- (1) 勘查目标物与周围介质之间存在较明显的电阻率差异；
- (2) 勘查目标物在地表能够引起可测量的异常；
- (3) 勘查目标物的电测异常能从干扰背景中分辨出来；
- (4) 具备必要的接地条件。

## 4.2.2 测线布置原则及仪器布设

### 4.2.2.1 测线布置原则

高密度电阻率法测线布置遵循以下原则：

- (1) 确定测区范围时应考虑地形、地貌，兼顾施测方便，力求资料完整和测区边界规则；
- (2) 测网的覆盖范围要涵盖整个调查区，条件较好的地区应向调查区周边延伸，以了解调查区外围的污染状况，保证有足够的背景场衬托异常，保证异常的完整性；
- (3) 测线布置在覆盖范围内尽可能采用网格状方式布置，测线应尽量平行和垂直于污染区分布方向，并尽可能避免或减小地形和其他干扰因素的影响；
- (4) 测线位置应尽量避免穿越河道、池塘等难以跨越的地方，宜采用直线布置为主；
- (5) 结合调查区地貌以及污染物可能分布深度的资料确定测线长度，方便野外探测设备的准备以及探测到目标污染物；
- (6) 追索性工作的测区范围应包括全部或部分已知区域，在前人工作的基础上扩大测区范围时，测区边缘应重复部分测线或测点；
- (7) 在其他物化探成果基础上布置更大比例尺工作时，应充分利用已知资料来确定测区的实际范围，并应尽可能包括与探测目标物有关的露头；
- (8) 根据收集的资料分析，在可疑的重点污染区需增加测

线数量；

(9) 高密度电阻率法测线一般为直线，结合野外实际布线条件，测线允许稍微偏离直线；

(10) 可采用电极站等间隔布置，进行多种供电和反演模式，构成调查区二维电阻率测量剖面或平面等值图；

(11) 调查区中折线布置等间隔电极网格，构成三维测网；

(12) 依据分辨率和探测深度确定电极间距。

#### **4.2.2.2 测线布设**

(1) 沿预布设测线配置电极棒，根据测定方法配置电极。

电极棒间距及测线长度决定所能探测的深度，间距大测线长则能探测较深的深度，但分辨率会降低。因此需针对探测目标深度，进行初步计算，在电极棒间距及测线长度间选择最佳平衡点。

(2) 测量系统连接及接地电阻检测。

将电极、电缆、测量主机、多道转换器等连接成一系统。正式测量前，检查各电极接地电阻与连通情况，必要时在电极棒接地处灌入水（或盐水）或以数根电极并联取代原电极棒以降低电极的接地电阻。

#### **4.2.3 测量参数设置**

(1) 电极的排列方式

高密度电阻率法探测属于几何探测，需要依据勘测的目标、地质概况等确定合适的电极排列方式。高密度电阻率法按照不同的电极排列方式分为多种测定方式，常用的有温纳装置法、斯伦

贝谢装置法（简称斯贝法）、二极装置法及偶极装置法（参考附录 D）。温纳装置与斯贝装置主要应用于地层平缓的区域做垂直剖面或测深，偶极装置主要应用于剖面勘测（表 4-2）。

## （2）电极距

最大供电电极距 AB 至少应为勘查目标物顶部埋深的 4~6 倍，测量电极距 MN 应不大于勘查目标物的顶部埋深。野外测定过程中，决定探测深度（z）的主要测定参数为：供电电极 A、B 之间的极距 L 和测量电极 M、N 之间极距 a，并与测定方式有关，具体见表 4-3。测定参数选择的正确与否，关系测定结果的好坏。

表 4-2 几种测定方式的优缺点

排列方式	探测深度排序	解析能力
温纳法	2	垂直方向
偶极法	1	侧向变化
斯贝法	3	垂直方向
二极法	4	最差

注：以数字大小表示探测深度排序，即 1 代表可探测深度最小、4 代表可探测深度最大。

表 4-3 探测深度与电极距大致关系

排列方式	间隔系数	$z/a$	$z/L$
温纳法	-	0.519	0.173
偶极法	n=1	0.416	0.139
	n=6	1.730	0.216
斯贝法	n=1	0.519	0.173
	n=8	3.247	0.191
二极法	-	0.867	-

注：n 为两相邻测量、供电电极距与 a 的比值。

#### **4.2.4 数据采集遵循原则**

(1) 记录工作日期及气象信息，确定并记录测线的起止点和控制点坐标，并对测线附近的地形、地表建筑物等作适当描述，当地表高程差异明显（地形坡度大于  $15^\circ$  时），必须对各电极棒进行高程测量，以供后面地形校正使用；

(2) 根据现场状况调整测定参数，采集数据。测定时工作人员必须注意屏幕上各电极间的通电反应，必要时调整测定参数重新测定；

(3) 分别采用不同观测装置完成数据采集，切勿采用同一观测装置中的互相换算值代替另一观测装置的观测数据；

(4) 对于每个排列的观测，坏点总数不应超过测量总数的 1%，对意外中断后的复测，应有不少于 2 个深度层的重测值；

(5) 对二极和三极观测装置，应采集电压和电流值，数据处理时，应另行计算出视电阻率值；当远电极极距  $OC$  不满足 5 倍以上  $OA$  时，应在数据处理中进行远电极修正；

(6) 现场观测时，应记录排列位置，并注明特殊环境因素的位置，同时应在草图上标明。

### **4.3 探地雷达法**

#### **4.3.1 适用条件**

(1) 勘查目标物与周围介质之间存在较明显的介电常数差异；

(2) 功率反射系数应大于 0.01;

(3) 目标体在探测深度或距离范围内, 深度建议不超过 20 m, 目标尺寸应满足探测分辨率的要求;

(4) 测区内不应存在大范围金属构件, 或通过处理可以消除其干扰。

### **4.3.2 测线布置原则与仪器布设**

#### **4.3.2.1 测线布置原则**

探地雷达法调查区布线遵循以下原则:

(1) 同高密度电阻率法 4.2.2.1 中的 (1) - (8);

(2) 根据污染物的可能深度选择合适的天线中心频率, 或是采用低频天线找到污染物的大致位置, 再选用高频天线进行高分辨率测量。

#### **4.3.2.2 仪器布设**

(1) 将发射天线、接收天线、控制主机连接 (有时需要与电脑连接, 电脑上安装好探地雷达数据采集软件);

(2) 开启电源, 热机并测试仪器。

#### **4.3.3 测量参数设置**

探地雷达探测系统需设定的测定参数, 包括: 天线频率、时间取样间隔、天线移动间距、天线间距、时间窗口及迭加次数、滤波参数、增益参数等。而测定参数选择的正确与否, 关系测定结果质量。

探地雷达系统提供参数取值建议见表 4-4，详细解释可参考附录 E，实际探测过程需根据实际情况适时调整相关参数。在勘测过程中应调整参数找到最符合调查区状态的测定参数。

表 4-4 探地雷达参数设定建议表

天线频率	取样频率 (MHz)	时间视窗 (ns)	取样间距 (m)
25	150-600	3400-850	0.30-0.75
50	400-800	1280-640	0.20-0.50
100	800-1800	640-280	0.10-0.30
200	1600-3500	320-150	0.03-0.10
1000	25000-110000	5-20	0.01-0.05

#### (1) 天线频率

天线频率选择与目标体大小及所处深度有关。常见的天线频率有 25MHz、50MHz、100MHz、200MHz、500MHz 和 1000MHz 等可供选择，天线频率与探测目标大小和深度之间大致关系见表 4-5。探测深度与地下介质类型紧密相关，以 25MHz 天线为例，一般岩土介质介电常数和电导率（或电阻率）差异较大，一般介电常数控制电磁波传播速度，电导率与电磁能量吸收正相关，能量衰减越大，探测深度越浅。对于湿黏土，25MHz 天线探测深度在 5 m 左右，而湿沙土的探测深度在 10-30 m，干沙土的探测深度在 15-40 m，具有较大的差异。建议在应用时进行实地试验，选择合适的天线频率。

表 4-5 天线频率选择建议表

天线频率(MHz)	适合的目标大小(m)	大致深度范围(m)		大致最大探测深度(m)
25	大于 1	常见岩土	5-40	25-60
		湿黏土	5±1	
		湿沙土	10-30	
		干沙土	20-60	
50	大于 0.5	5-20		20-30
100	0.1-1.0	2-15		15-25
200	0.05-0.80	1-10		5-15
500	0.05-0.50	0.5-5		5-10
1000	cm 级	0.05-2		0.5-4

### (2) 天线移动间距

最大天线移动间距与天线频率的对应关系见表 4-6。

表 4-6 不同天线频率的最大天线移动间距建议值

探地雷达天线频率 (MHz)	最大天线移动间距(m)
25	1
50	0.5
100	0.25
200	0.10
1000	0.02

### (3) 时间取样间隔

时间取样间隔与天线频率的对应关系如表 4-7。

### (4) 时间窗口

常见探地雷达系统允许的时间窗口范围为 1 ns ~ 32767 ns。

### (5) 迭加次数

常见的探地雷达系统可供选择的迭加次数有 1、2、4、8、

16、32、64、128、256、512、1024 及 2048 次（表 4-8），为兼顾效率与信号质量，野外测定建议采用 128 次迭加次数。

表 4-7 探地雷达不同频率天线对应建议使用的的时间取样间隔

探地雷达天线频率(MHz)	时间取样间隔 (ps)
25	3200
50	1600
100	800
200	800
1000	100

表 4-8 探地雷达迭加次数的选择

迭加次数					
低	4	8	32		
中	16	32	64		
高	128	256	512	1024	2048

#### (6) 取样频率

建议取样频率不小于 6 倍天线频率，通常设定为 6~15 倍的天线中心频率，取样频率建议值如表 4-4 所示。

### 4.3.4 数据采集遵循原则

根据现场状况调整测定参数，采集数据。测定时工作人员必须注意屏幕上接收信号曲线的形态，必要时调整测定参数重新测定。

(1) 应通过试验选择天线的工作频率，确定介电常数、电磁波的传播速度等；当探测条件复杂时应选择两种或两种以上不同频率的天线进行测试；

(2) 应选择合适的时间窗口和采样间隔，并在数据采集过程中根据干扰情况及图像效果及时调整测定参数；

(3) 连续测量时，天线移动速度应均匀，并与仪器扫描率相匹配；使用分离天线进行点测时，应调整天线距离使来自目标体的反射信号最强；使用偶极天线时，天线取向宜使电场的极化方向与目标体长轴或走向平行，当目标体长轴方向不明时，宜使用两组正交方向的天线分别进行观测；

(4) 遇有干扰影响或处在异常点位置应在记录中予以标注，重点异常区应重复观测，重复性较差时，应查明原因。

## **4.4 激发极化法**

### **4.4.1 适用条件**

(1) 同高密度电阻率法 4.2.1 的 (2) - (4)；

(2) 勘查目标物与周围介质之间存在较明显的极化率差异；

(3) 地质条件比较简单、勘查对象与周围介质间具有明显极化效应差异的地区；

(4) 地质条件比较复杂，但用综合物化探方法、地质方法能够大致区分异常的性质或能减少异常多解性的地区。

### **4.4.2 测线布置与仪器布设**

#### **4.4.2.1 测线布置原则**

激发极化法调查区布线遵循以下原则：

(1) 同高密度电阻率法 4.2.2.1 中 (1) - (8)；

(2) 测线应尽量垂直于目标极化体的走向、地质构造方向或垂直于其它物化探异常的长轴方向；目标极化体走向有变化时，测线应垂直于其平均走向；目标极化体走向变化较大时，应分别布置垂直于走向的测线，进行面积性的工作；

(3) 普查线距应不大于最小探测对象的走向长度，点距应保证在异常区内至少有三个满足观测精度的观测点；

(4) 线距应保证至少有三条测线通过最小目标极化体上方，点距应保证在异常区内至少有五个满足观测精度的观测点；

(5) 精测剖面，通常使点距密度达到即使再加密测点，异常的细节特征也不会有明显的改变。

#### **4.4.2.2 仪器布设**

(1) 根据探测的深度以及调查区的条件计算最大的电极距，连接仪器和电极；

(2) 设定参数，并进行测量。

#### **4.4.3 测量参数设置**

激发极化法按照供电电流性质的不同，分为时间域激电法和频率域激电法。在实际应用中，时间域激电法或频率域激电法的选择应根据地质任务、调查区地形、地质、地球物理条件以及各种干扰情况等酌情而定。一般来说，地形比较平坦，干扰比较小，接地条件也较好的地区，宜选用时间域激电法。对于地形起伏较大、干扰较大，接地条件较差的地区，则宜选用频率域激电法。

激发极化法设定的参数包括装置类型和时间制式，根据测量

需要进行设定，具体参考附录 F。

### (1) 装置种类

激发极化法装置应用条件见表 4-9。

表 4-9 激发极化法装置的选择

装置名称	应用条件
中间梯度装置	① 大范围内观测，应用于区域初查； ② 异常形态简单并易于解译。
联合剖面装置	① 勘探深度大，效率低，应用于详查； ② 研究相对围岩为低电阻率、陡产状的污染目标体。
对称四极装置	① 勘探深度大，效率低，应用于重点异常区； ② 研究地层电性的垂向变化。

### (2) 时间制式

#### a) 脉宽

在时间域激电法中，岩、矿石的极化率是充电时间（T）和放电取样时间（t）的函数，因此根据工作地区的地电条件，合理选择充、放电时间，是取得有效、可靠资料的重要保证。按照充电脉宽的长短和方向不同，分为单向长脉冲和双向短脉冲两种制式，对应适用条件见表 4-10。

表 4-10 激发极化法脉宽的选择

按充电脉宽分类	应用条件
单向长脉冲	① 选择不极化电极作为测量电极； ② 观测时间长，工作效率低，适用于测量标本极化率或研究目标体的时间特性。
双向短脉冲	① 可采用常规铜电极做测量电极； ② 耗电少，工作效率高，常用的野外工作方法，用于初查和大部分详查。

#### b) 延时

①一般情况下，二次场电位差与断电后的时间呈近于指数衰

减。因此取短延时二次场电位差大，观测精度高；

②时间域激发极化法也存在电磁耦合干扰，其强度与  $t$ 、 $\rho$ 、 $L$  的乘积成正比（ $t$  为断电后计算极化率  $\eta$  的时间， $\rho$  为均匀大地的电阻率， $L$  为供电电极与测量电极间的距离）。

在工作区选择典型剖面，地质情况比较清楚，极化率变化较大的地段做延时参数试验，确定最佳延时时间，即在工区典型剖面上选择至少 3 个不同电阻率的点，使用接收机观测所有延时。如选择 50、100、150 等三个点，然后绘制放电曲线，选择取得极大值点（即能获得的最大观测信号），或者比极大值点大一点（相对信号稳定一些，重复观测好）作为延时。为了避免小延时电磁耦合干扰，取得较大二次场电位差及极化率，一般延时多选用 100~200 毫秒。

#### 4.4.4 数据采集遵循原则

（1）测线长度应大于  $2AB/3$ ， $AB$  为供电电极距，需移动供电电极完成整条测线的观测时，在相邻观测段间应有 2~3 个重复观测点；

（2）一线供电多线观测时，旁测线与主测线间的最大距离不应大于  $AB/5$ ；

（3）供电电流强度变化不应大于 5.0%；

（4）在观测过程遇有干扰时，应分析原因并采取相应措施消除或减小干扰影响；

（5）二次场的电位差值应大于 1mV；

(6) 仪器的调零工作应在规定的供电时间内完成，不得延长；

(7) 凡出现下列情况之一者，应进行重复观测和检查观测：

a) 断电后某一瞬间的二次场电位差小于 1mV；

b) 采用短导线测量直读视极化率时，二次正向供电与反向供电所测出的视极化率的平均值之差，正常时超过 0.1% 或干扰较严重时超过 0.2%；

c) 在观测读数的前后，发现有明显的干扰现象。

## 第五章 数据分析解译

在对原始采集数据进行预处理的基础上,可采用成熟可靠的数据处理技术或者反演软件对数据进行分析解译。

### 5.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法测量数据分析解译步骤如下:

#### (1) 数据读取及检查

用数据线将保存在测量主机中的野外测量数据导入到计算机中。检查测量数据中是否有异常数据点,进行前期处理。

#### (2) 转换数据格式

将导入的数据转换成反演软件能识别的格式,高密度电阻率法的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。

#### (3) 反演

设定合适反演参数,对数据进行反演,并将反演的结果保存。

a) 为得到更精确的反演结果,结合测量实际情况,可在反演过程中进行二次数据处理,包括:

##### ① 坏点剔除

在采集数据过程中,对由仪器、人为错误、外界干扰或电极接地不良等产生的量值较大的虚假或突变的“尖点”数据,需进行剔除和插值替换处理,以消除或减小其对反演结果的不利影响;

##### ② 带地形反演

高密度电阻率法的测量结果受地形影响较大，记录测线中有代表性点的位置和高程需做带地形数据的反演。

### b) 数据混合反演

采用同一种地球物理方法不同装置测定的数据，可以将测量数据融合在一起进行反演，有效提高反演结果的可靠性。

## 5.2 探地雷达法

探地雷达法数据处理步骤主要包括数据读取，滤波处理和偏移、反褶积、图像显示等，测量数据处理过程如图 5-1 所示。

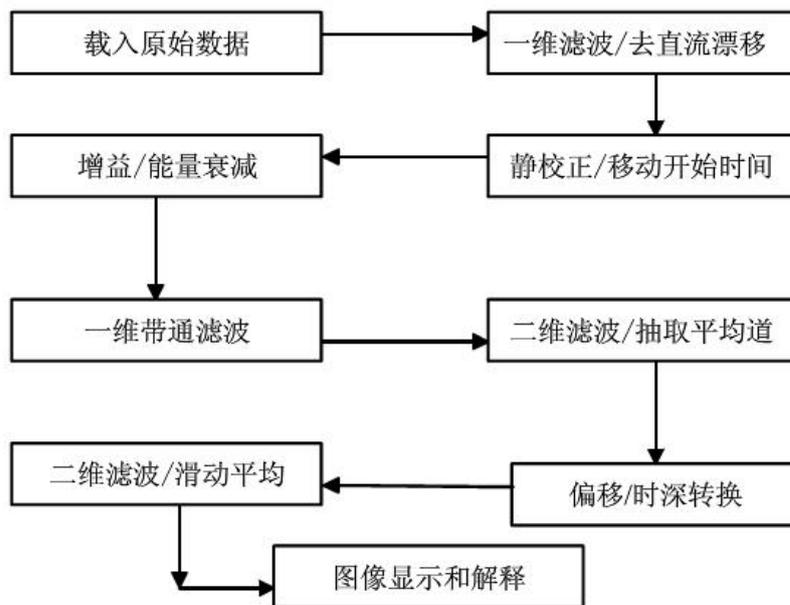


图 5-1 探地雷达测量数据处理基本流程

## 5.3 激发极化法

激发极化法的反演步骤与高密度电阻率法的步骤一致，主要包括数据读取与检查、转换数据格式、反演。

## 5.4 反演结果解译推荐方法

地球物理方法的反演结果有多解性，为增加测量数据反演结果解译的可靠性，推荐以下方法：

(1) 剖面分析：对单个剖面进行分析，确定出剖面中的电性结构及其异常区带。分析时应充分利用已知信息，剔除地形、局部不均匀体等干扰因素引起的假异常；

(2) 对比分析：对比正演与地球物理方法测试结果，研究异常的特征、性质；

(3) 电阻率、介电常数、极化率等值比对标定：将测区测得的视电阻率、介电常数、极化率等值与钻孔岩石及地表出露地层岩石的相应值进行比对，建立本区的物性参数“标定值”，依据“标定值”对测定的剖面进行地质解译；

(4) 深度标定：依据钻孔或其他方法取得的可靠的深度值与计算的深度值的关系来标定计算的深度值，推算目标物的深度；

(5) 综合分析解译：利用多种装置的观测结果并结合其他物化探资料、钻孔（或探井）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、互证式综合推断解译，以提高解译精度，减少多解性。

## 5.5 数据反演和解译结果与污染区划定

地球物理方法测量数据经过反演或解译后，以数据和图的形

式展示。根据不同探测区数据反演和解译结果显示的物性参数差异或异常来判断污染区分布。结合调查区前期资料、调查区物性测试、不同物探方法结果、实际钻孔数据，综合判断物性异常区是否为污染区。

## 第六章 质量控制和安全保障

### 6.1 仪器质量控制

(1) 在运至野外使用前，应仔细检查仪器和各类技术装备是否齐全，并携带常用的检测校验仪表和工具；

(2) 检查连接线、通讯光缆等设备是否完好；试运行仪器，确认仪器可正常运行。

### 6.2 野外测量质量控制

(1) 野外进行地球物理调查污染时，在一条测线重复测量一次；

(2) 数据采集时要注意观察是否有异常值的出现；人工测量数据应至少由两人读取。数据记录表参考附录 G；

(3) 野外工作结束后，及时对原始数据进行存储和备份；

(4) 对地球物理勘测数据及时处理和反演解译，发现电阻率等异常区，应加密勘测，同时可施工钻孔，进行结果比对；

(5) 野外测量过程中，应采取有效措施（如电极的擦拭）防止调查工具带来的交叉污染；

(6) 野外工作使用的仪器、设备等应经常维护，保证正常运行。正式使用前应测试校正并做记录，校正符合要求后，方可采集数据；

(7) 野外记录本仅用于记录与观测有关的事项，不得兼作其他用途。记录本不应空页，撕页或粘贴其他纸张；

(8) 记录本中记录的各项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) 野外记录应使用中等硬度(2H)的铅笔，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；

(10) 野外调查与记录表格应实行调查人、记录人、审核人三级审验与签字制度。

为减小测量时的噪音干扰，测量过程应确保规范。不同物探方法测量时的细节要求可参考相应物探方法的专项规范 DZ/T 0073、DZ/T 0070 等。

### **6.3 数据分析解译质量控制**

(1) 为保证测量结果的质量，可以对比不同地球物理方法测量结果，进行相互验证；

(2) 地球物理方法作为传统钻孔方法的补充，在地球物理调查中显示的异常区，应增加钻孔对数据结果解译验证。

### **6.4 安全保障**

(1) 野外工作期间，必须进行安全生产教育；

(2) 注意安全用电；

(3) 所有野外工作人员，必须有安全用电和触电后急救的常识，电源和发送机必须有绝缘胶鞋，绝缘手套等防护用品。供电电极附近应设有明显的警告标志，必要时应有专人看守；

(4) 开工前，必须在确认供电回路、电极接地均属正常，确保布极人员已离开裸露导线和供电电极时方可供电；在未确认停止供电时不得触摸电极。在发电机停车后方可通知收线和移动电极。在供电回路上有人处理故障时不得供电，即使故障已经排除，也要与处理故障者取得联系后方可供电；

(5) 雷雨时不得进行野外工作。

## 第七章 技术成果

### 7.1 报告内容和格式

报告内容主要包括地下水污染调查概述、调查区描述、工作方案、现场勘测和工作程序、结果分析、调查结论与建议等部分。报告格式可参考附录 H。

### 7.2 图表集

一般包括交通位置图、实际材料图、地球物理方法测线布置图、污染物分布范围综合断面图、综合平面图、解译推断成果图、测线工作成果表和解译成果表等。

### 7.3 数据文件

地球物理方法测量数据及时保存，作为成果之一与报告同时提交。

## 附录 A 不同行业地下水潜在特征污染物类型

(资料性附录)

不同行业地下水潜在特征污染物类型可参考表 A-1，实际调查应根据具体情况确定。

表 A-1 不同行业地下水潜在特征污染物

行业大类	行业种类	潜在特征污染物类型
制造业	化学原料及化学品制造	挥发/半挥发性有机污染物、重金属、持久性有机污染物、农药
	电气机械及器材制造	重金属、有机氯溶剂、持久性有机污染物
	纺织业	重金属、氯代有机物
	造纸及纸制品	重金属、氯代有机物
	金属制品业	重金属、氯代有机物
	金属冶炼及延压加工	重金属
	机械制造	重金属
	塑料和橡胶制品	挥发/半挥发性有机污染物、重金属
	石油加工	挥发/半挥发性有机污染物、重金属、石油烃
	炼焦厂	挥发/半挥发性有机污染物、重金属
	交通运输设备制造	重金属、石油烃、持久性有机污染物
	皮革、皮毛制造	重金属
	废弃资源和废旧材料回收加工	持久性有机污染物、半挥发性有机污染物、重金属、农药
采矿业	煤炭开采和洗选业	重金属
	黑色金属和有色金属矿采选业	重金属、氰化物
	非金属矿物采选业	重金属、氰化物、石棉
	石油和天然气开采业	石油烃、挥发/半挥发性有机污染物
电力燃气及水生产和供应	火力发电	重金属、持久性有机污染物
	电力供应	持久性有机污染物
	燃气生产和供应	挥发/半挥发性有机污染物、重金属
水利、环境和公共设施管理业	水污染治理	持久性有机污染物、半挥发性有机污染物、重金属、农药
	危险废物的治理	持久性有机污染物、挥发/半挥发性有机污染物、重金属
	其他环境治理（工业固废、生活垃圾处理）	持久性有机污染物、挥发/半挥发性有机污染物、重金属

行业大类	行业种类	潜在特征污染物类型
其它	军事工业	挥发/半挥发性有机污染物、重金属
	研究，开发和测试设施	挥发/半挥发性有机污染物、重金属
	干洗店	挥发性有机污染物、有机氯溶剂
	交通运输工具维修	重金属、石油烃

## 附录 B 地球物理方法正演

(资料性附录)

### B-1 电阻率法和激发极化法正演

#### (1) 微分方程

根据点电源场论理论, 在稳定的电流场中, 地表、地井、井地和井间的电场与电势的关系、欧姆定律以及电荷守恒定律都满足:

$$\begin{cases} E = -\nabla\varphi \\ j = \sigma E \\ \nabla \cdot j = -\partial q / \partial t \end{cases}$$

式中,  $E$  为电场强度;  $\varphi$  为电位;  $j$  为电流密度;  $\sigma$  为地下介质的电导率;  $q$  为电荷密度。

在已知地下电导率的情况下, 由以上三个方程可以推出电位与电荷密度的关系式:

$$\nabla \cdot [\sigma \nabla \varphi] = \partial q / \partial t$$

引入狄拉克函数  $\delta$ , 可将上式右端转化为:

$$\partial q / \partial t = \partial e / \partial t \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)$$

式中,  $e$  为点电荷;  $\delta$  函数表示在  $(x_0, y_0, z_0)$  处存在电流值, 再从电流强度的定义出发:

$$I = \frac{\partial e}{\partial t}$$

得到电位  $\varphi$  与电流强度  $I$  的关系, 即在稳定的电流场中, 点电源三维地电场电位满足的微分方程:

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = -I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)$$

#### (2) 边界条件

边界指的是网格剖分区域模拟无穷远的边界, 以及地表与空气界面。在这些边界处需要添加边界条件。边界条件分为三类: 狄里克莱条件 (第一类边界条件)、诺依曼条件 (第二类边界条件)、混合边界条件 (第三类边界条件)。

$$\begin{cases} \varphi = 0, \in \Gamma_{\infty} \\ \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, \in \Gamma_s \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} + \frac{\cos \theta}{r} \varphi = 0, \in \Gamma_{\infty} \end{cases}$$

如上式所示，第一类边界条件指的是在边界上的电位值为0；第二类边界条件是指电流密度的法向量，即电位的法向导数为0；第三类边界条件公式中， $n$ 为边界外法向量， $r$ 为源点到边界的距离， $\theta$ 是 $n$ 与 $r$ 的夹角。混合边界条件不仅在边界处保持电位的连续性，也消除了对地下边界虚源所产生的反射作用。第三类边界条件所得到的计算结果精度相对较高。

## B-2 探地雷达正演

### (1) 麦克斯韦方程组

探地雷达信号的采集原理是，通过发射天线发射高频电磁波，然后利用电磁波在介质中的传播与反射原理，接收天线接收反射回来的电磁波信号，进行探测采集数据。根据电磁波的传播理论，高频电磁场在介质中的传播，严格服从麦克斯韦方程组。

麦克斯韦方程组既可以写成微分形式，也可以写成积分形式。而时域有限差分(FDTD)方法则是以其微分形式的旋度方程作为出发点，对其进行差分离散从而得到一组时域推进公式。

麦克斯韦方程组如下，即法拉第电磁感应定律和安培环路定律：

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} - J_m \\ \nabla \times H &= \frac{\partial D}{\partial t} + J\end{aligned}$$

式中， $J$ 为电流密度(A/m<sup>2</sup>)； $D$ 为电位移(C/m<sup>2</sup>)； $B$ 为磁感应强度(T)； $E$ 为电场强度(V/m)； $H$ 为磁场强度(A/m)。

介质的本构关系是指各场量之间的关系，具体说就是在相同电磁场的条件下，具有不同电磁性参数的介质中会出现不同的极化和磁化现象。因为介质种类的多样性和复杂性，对应的本构关系也具有多样性和复杂性的特征。针对无源空间，考虑的是均匀的、线性的和各向同性的介质，其对应的本构关系可以简化成以下形式：

$$\begin{aligned}D &= \varepsilon E \\ B &= \mu H \\ J &= \sigma E \\ J_m &= \sigma_m H\end{aligned}$$

式中， $\sigma$ 为电导率(S/m)； $\sigma_m$ 为导磁率( $\Omega$ /m)； $\varepsilon$ 为介电常数(F/m)； $\mu$ 为磁导率(H/m)；以上均为标量场量。

综合上述公式，可得到以下形式的麦克斯韦旋度方程：

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \sigma_m H$$

$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E$$

### (2) Yee 元胞

时域有限差分 (FDTD) 法的思想是把空间划分为规模为  $i \times j \times k$  ( $i, j, k$  分别为长、宽、高的网格数) 的矩形差分网格, 而 Yee 元胞则是作为时域有限差分法中最小的单位差分网格, 它反映的是 FDTD 离散中电磁场分量各个节点的空间坐标分布情况。

在三维空间直角坐标系中, 时域有限差分的 Yee 元胞如图 B-1:

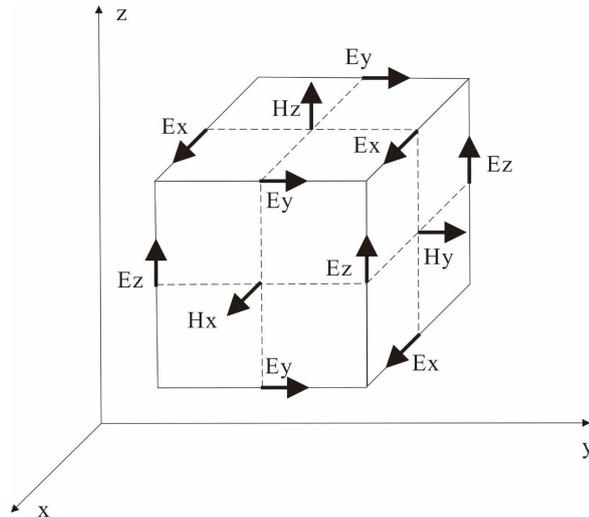


图 B-1 三维 Yee 元胞

由三维 Yee 元胞示意图可知, 空间网格中, 磁场和电磁相互交替环绕排列, 每个电磁分量的四周由磁场分量所环绕, 与此同时, 每个磁场分量的四周也是电场分量所环绕。并且, 这种电场和磁场的空间分布方式是同时符合法拉第电磁感应定律和安培环路定律, 即麦克斯韦方程组, 能够很好的适用于麦克斯韦方程组的差分计算, 从而能够很好的反映电磁波在介质中的传播特性。同时, 可以看出电场和磁场在时间顺序上交替换取, 并且在空间上都满足取样的时间间距彼此相差半个时间步长, 使离散后麦克斯韦旋度方程成为显式差分方程, 克服了矩阵求逆运算的麻烦, 可以直接在时间上迭代求解。因此, 只要给予空间电磁问题以初始值和适当的边界条件, 就能够利用时域有限差分 (FDTD) 的方法逐步循环推进求解, 从而得到整个空间电磁场的分布情况。

### (3) 吸收边界条件

吸收边界条件在时域有限差分方法中起着至关重要的作用。因为在 FDTD 的计算机实现的过程中, 受到计算机储存空间的限制, FDTD 的计算空间范围是有限的, 在计算中, 计算机无法模拟一个无限大区域。因此, 为了更好的模拟电磁波在开域中的传播过程, 我们需要在 FDTD 计算区域的边缘分界处施加合适的电磁波吸收层, 使电磁波到达边缘分界处的时候, 能够被吸收边界条件所尽量吸收, 不会因为边界截断处的非物理因素而产生虚假的电

磁波反射现象，干扰计算结果。

目前，构造吸收边界条件的思路主要有两种：一种是从外行波方程出发的透射边界条件，例如 Mur 吸收边界条件，这种吸收边界条件构造较简单，内存需求小，但是其反射系数较高；还有一种是利用吸收材料的原理，在边界处施加一层吸收材料，使电磁波进入吸收材料层后，被吸收材料所较好的吸收衰减，例如 PML 吸收边界条件，这种吸收边界条件构造较复杂，内存需求大，但是吸收效果有较大的改善，其反射系数能低于-70dB，较其它的吸收边界条件改善约 40dB，对于吸收边界条件的研究起着更大的作用。

现运用较广泛的几种吸收边界条件有：Mur 吸收边界条件、廖氏吸收边界条件、超吸收边界条件、完全匹配层吸收边界条件。

## B-3 污染模型

### (1) 理论模型

污染理论模型由 8 个部分组成，分别是地表层，包气带，含水层，隔水层以及污染物的自由相，挥发相，残余相和溶解相。污染物的自由相和残余相分布在模型的中间位置，向下逐渐延伸扩展。自由相已达到潜水面并且污染到了含水层部分，自由相上方的包气带内是污染物的残余相，残余相从地表向下扩展贯穿整个包气带。自由相两侧是污染物的溶解相，由于已经处于含水层位置，污染物在地下水的作用下会出现一些物质的溶解现象。残余相两侧是污染物的挥发相，从残余相的底部向上至地表逐渐扩展。污染物的浓度在自由相中最大，残余相和挥发相中其次，溶解相中浓度最低。但是由于有地下水的参与，在电导率和介电常数上的表现将会更加复杂，也会具有更大的差别。

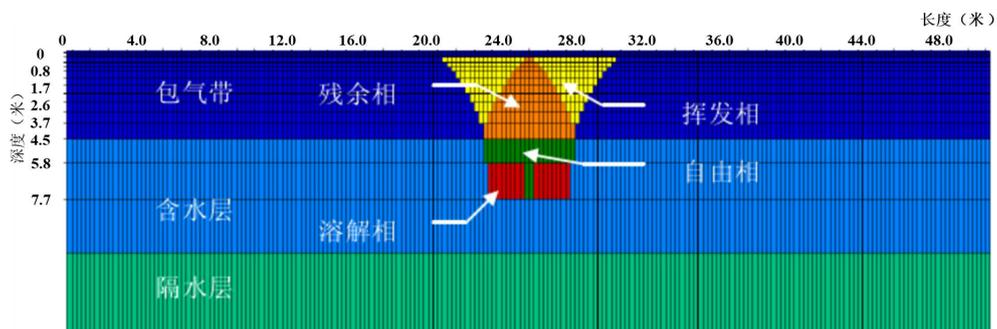


图 B-2 高密度电阻率法的污染理论模型

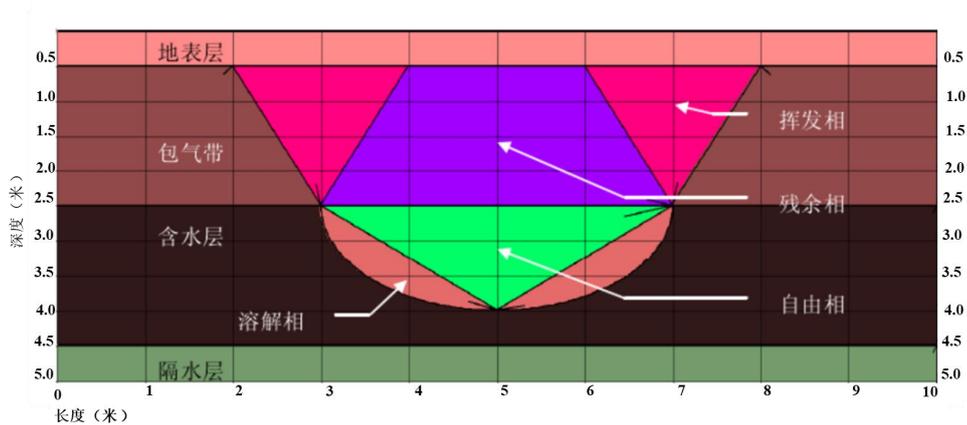


图 B-3 探地雷达法的污染理论模型

高密度电阻率法浅部污染模型如图 B-2 所示。模型剖面长度设置为 50m，将断面分成了 15 个数据层，电极间距设置为 1m，每个电极间距剖分成了 4 个节点。自由相分布在第 12~13 个数据层，残余相分布在第 2~11 个数据层，挥发相分布在残余相两侧的第 2~10 个数据层，溶解相分布在自由相两侧的第 13 个数据层。

探地雷达污染模型如图 B-3 所示，模型剖面长度设置为 10m，将 X 方向剖分成了 1000 个网格单元，Y 方向剖分成了 500 个网格单元，每个网格单元大小设置为 1cm。自由相分布在 2.5m~4m 的深度范围，并且具有向下延伸的趋势，残余相在纵向上占据了 0.5m~2.5m 的整个包气带，两侧伴随着挥发相，自由相两侧伴随有少量的溶解相。

## (2) 低介低导污染模型

低介低导污染模型各部分电性参数如表 B-1

表 B-1 低介低导污染模型各部分电性参数

参 组 分	电导率 (S/m)	电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	介电常数
地表层	0.0002	5000	1
包气带	0.001	1000	5
含水层	0.01	100	15
隔水层	0.0025	400	10
自由相	0.0001	10000	2
挥发相	0.0005	2000	4
残余相	0.00025	4000	3
溶解相	0.005	200	8

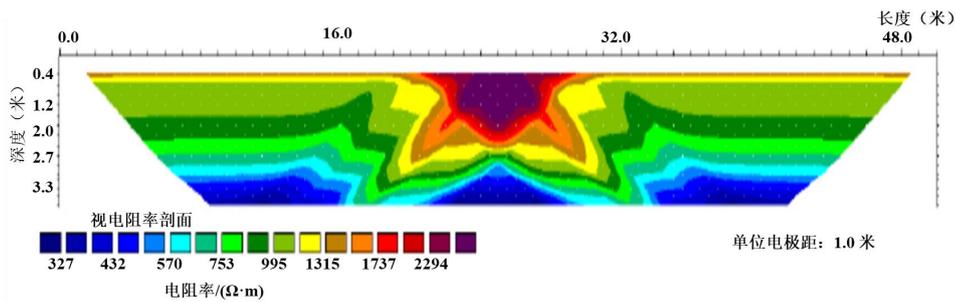


图 B-4 低介低导污染模型的正演结果(偶极-偶极)

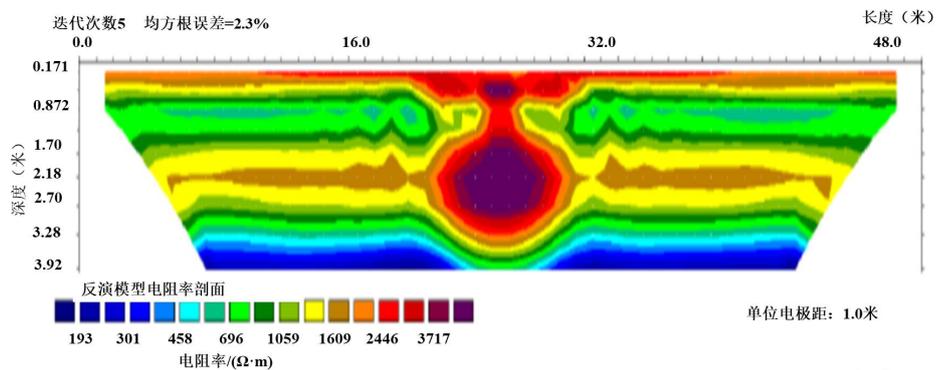


图 B-5 低介低导污染模型的反演结果（偶极-偶极）

正演结果显示，剖面两侧的部分仍然呈现出良好的分层现象，在剖面中间区域存在明显的高阻异常，并且相比于浅部污染出现的位置，此高阻异常的位置更深，范围更宽。反演结果显示，剖面中部出现了明显的高阻异常，相比于浅部污染，剖面中的高阻异常向下发生了迁移，可以判定为污染物的自由相。高阻异常与地表层之间存在有拖尾现象，可以判定为污染物的残余相。在深层部分，原来的横向分层变得弯曲向下，从形态上来看具有向下发展的趋势，可以判定是存在污染物的溶解相的原因。主要高阻异常两侧存在次一级的高阻异常，可以判定为污染物的挥发相。

低介低导浅部污染模型的探地雷达法的正演模拟，时间窗口设置为 150ns，天线中心频率设置为 100MHz，采样点数设置为 500，横向扫描 1000 道。

从正演结果图中可以看到分层迹象，并且在浅层部分仍然可以看到连续的振幅同相轴，但是在剖面中部位置出现了明显的振幅减小现象。接收到的反射波最大振幅出现在 15ns 左右的早期时刻，代表浅层部分的反射。45ns 左右的时刻也出现了相对比较强的反射，但是在剖面中部位置出现了振幅同相轴间断，间断部分的同相轴呈现向上隆起的弧形，在 75ns 和 90ns 左右的时刻也存在着雷达波的反射，并且振幅同相轴在剖面中部都出现了间断现象，间断部分的同相轴呈现向上隆起的弧形。

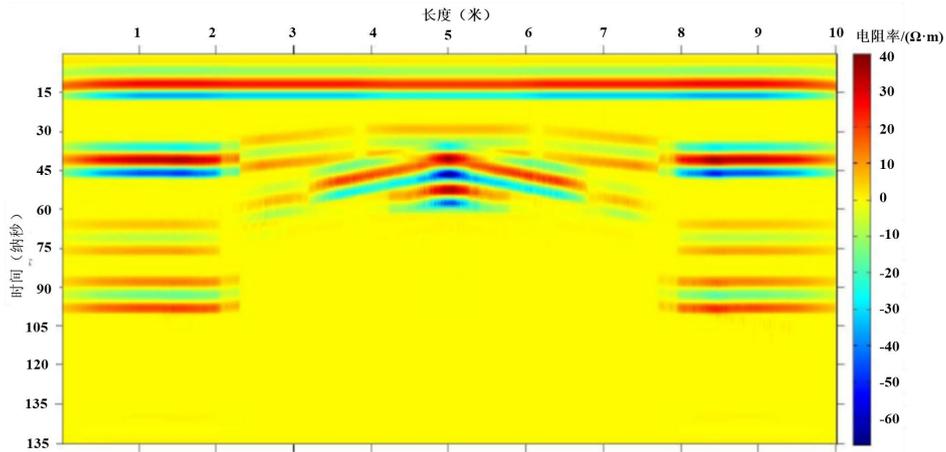


图 B-6 低介低导污染模型的探地雷达正演结果

(3) 高介高导污染模型

高介高导污染模型各部分电性参数如表 B-2。

表 B-2 高介高导污染模型各部分电性参数

参 组 分	电导率 (S/m)	电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	介电常数
地表层	0.0002	5000	1
包气带	0.001	1000	5
含水层	0.01	100	15
隔水层	0.0025	400	10
自由相	0.1	10	40
挥发相	0.002	500	20
残余相	0.004	250	25
溶解相	0.02	50	30

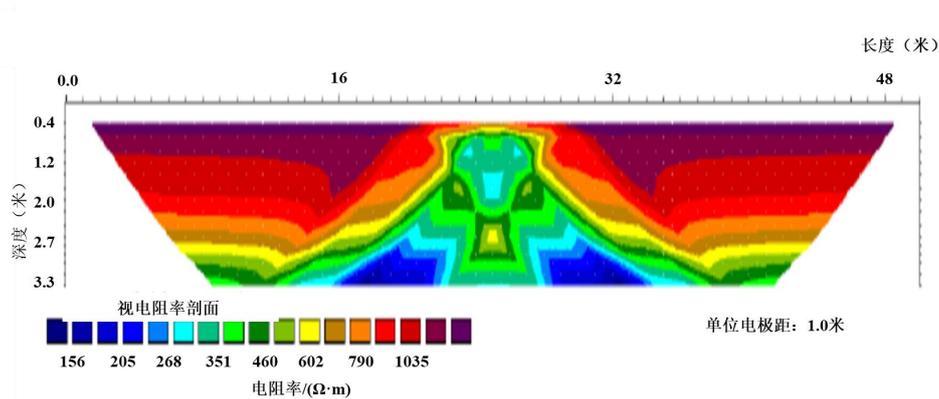


图 B-7 高介高导污染模型的正演结果(偶极-偶极)

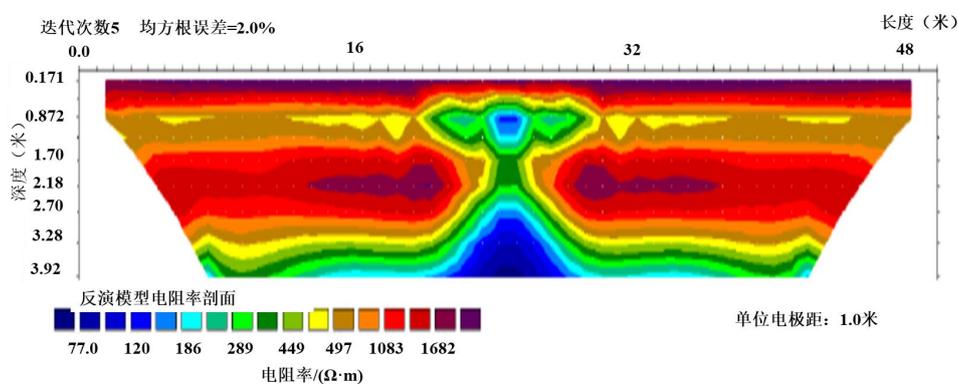


图 B-8 高介高导污染模型的反演结果(偶极-偶极)

正演结果显示，剖面两侧的部分仍然呈现出良好的分层现象，在剖面中间区域存在明显的低阻异常，并且相比于浅部污染出现的位置，此低阻异常的位置更深，范围更宽。低阻异常与剖面底部连成了一片区域，并且向下扩展。反演结果显示，剖面中部出现了明显的低阻异常，低阻异常向下一直延伸到剖面底部，低阻异常与地表层之间存在有拖尾现象，主要低阻异常两侧存在有虚假的高阻异常。

高介高导浅部污染模型的探地雷达法的正演模拟，时间窗口设置为 200ns，天线中心频率设置为 100MHz，采样点数设置为 500，横向扫描 1000 道。

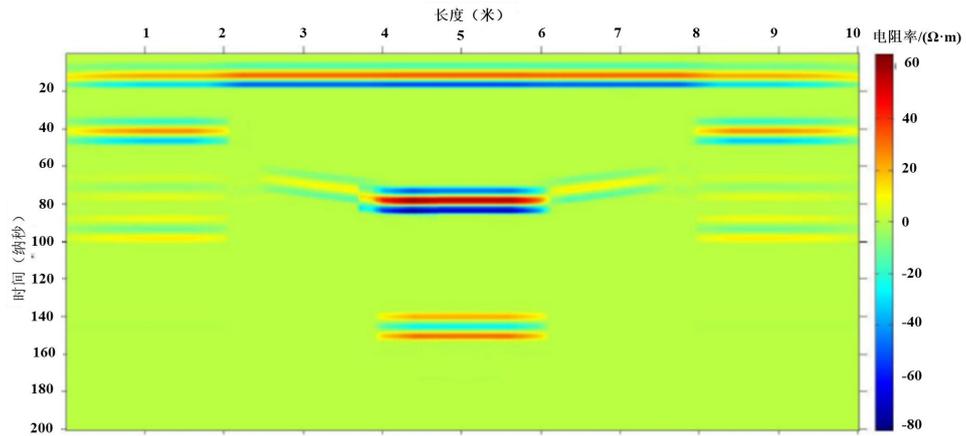


图 B-9 高介高导污染模型的探地雷达正演结果

从正演结果图中可以看到分层迹象，并且在浅层部分仍然可以看到连续的振幅同相轴，但是在剖面中部位置出现了明显的振幅增强现象。接收到的反射波最大振幅出现在 20ns 左右的早期时刻，代表浅层部分的反射。40ns 左右的时刻也出现了相对比较强的反射，但是在剖面中部位置出现了振幅同相轴间断，间断部分的同相轴出现缺失，在 70ns 和 100ns 左右的时刻也存在着雷达波的反射，并且振幅同相轴在剖面中部都出现了间断现象。在 80ns 和 150ns 左右的时刻，剖面中部又各出现了一段同相轴，并且能量相对集中。

### 附录 C 不同污染调查区综合地球物理方法选择的主辅关系

不同探测深度范围内，使用不同地球物理方法主辅关系可见表 C-1；不同污染程度调查区使用不同地球物理方法的主辅关系可见表 C-2。

表 C-1 不同探测深度地球物理方法选择原则

地球物理方法	探测深度	
	<10 米	10-30 米
高密度电阻率法	辅助方法	主要方法
探地雷达法	主要方法	辅助方法

表 C-2 不同污染程度调查区地球物理方法选择原则

地球物理方法	污染调查区类型	
	污染物浓度较低	污染物浓度较高
高密度电阻率法	辅助方法	主要方法
探地雷达法	主要方法	辅助方法

附录 D 高密度电阻率法的原理、测定方法和设备要求  
(资料性附录)

## D-1 原理

高密度电阻率法是电阻率法的一种，就其基本原理而言，与传统的电阻率法完全相同。电阻率法是利用直流电通入地层以测定地下地层的电阻率值，并由此判定地层地电结构的方法，以电阻率剖面图的形式展现地层地电特性的空间分布图像。影响地层电阻率的因素有矿物成分、颗粒大小和分布、地层的含水量及水中溶质浓度，当地层在空间上有明显的电阻率变化时，较适合电阻率法勘查。饱和条件下不同地层岩性以及 DNAPL 污染物所对应的电阻率分布范围如图 D-1 所示。

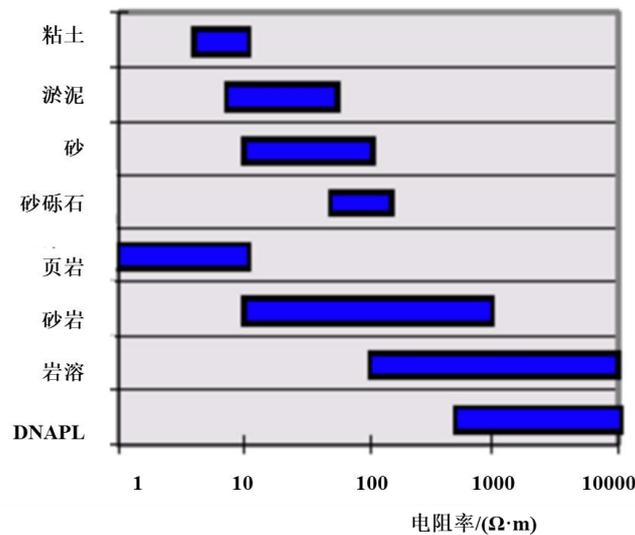


图 D-1 饱和条件下不同岩性地层及 DNAPL 对应电阻率值分布范围

(摘自 NFESC: Naval Facilities Engineering Service Center, 1998, High Resolution, Electromagnetic Resistivity Surveys for 3-D Imaging of DNAPL Contamination, California.)

高密度电阻率法虽然依然属于电阻率法的范畴，但相对于常规电阻率法而言，具有以下的特点：（1）电极布设是一次完成的，这不仅减少了因电极设置而引起的故障和干扰，而且为野外数据的快速和自动测量奠定了基础；（2）能有效地进行多种电极排列方式的扫描测量，因而可以获得较丰富的关于地电断面结构特征的地质信息；（3）野外数据采集实现了自动化或半自动化，不仅采集速度快（大约每一测点需 2s-5s），而且避免了由于手工操作所出现的错误；（4）可以对资料进行预处理并显示剖面曲线形态，脱机处理后还可以自动绘制和打印各种成果图件；（5）与传统的电阻率法相比，成本低、效率高，信息丰富，解译方便，勘探能力显著提高。

电阻率法的测量原理是将直流电或低频的交替直流电经由一对供电电极 A、B 通入地

下，建立人工电场。利用另一对测量电极 M、N 测量电场在 M、N 之间造成的电位差，由此求出地层的视电阻率，通过大量的测定，进而获得地层的导电特性的电阻率分布图像。

在一电阻率为  $\rho$  的半无限均匀介质中如图 D-2，以点 O 处通以电流强度为 I 的电流，则在距离 O 点为 R 处的电位为

$$V = \rho I / 2\pi R \quad (1)$$

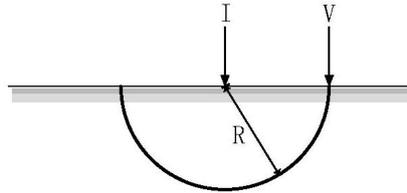


图 D-2 电阻率法单供电电极、测量电极在均质等向半空间示意图

由通入地下的电流强度 (I)、测量电极之间的电位差 ( $\Delta V$ ) 以及电极之间的距离，经数学推导，即可得到  $\Delta V$ 、I、电极间距与地层电阻率之间的关系式。假设一任意四极装置如图 D-3，以 A、B 极通电流 I，及 M、N 极度量电位差  $\Delta V$ ，其关系式为：

$$\begin{aligned} \Delta V &= V(AM) - V(AN) - V(BM) + V(BN) \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $AM$ 、 $BM$ 、 $AN$ 、 $BN$  为供电电极至测量电极之间的距离， $I$  为通往地下的电流强度，

$\rho$  为介质电阻率， $\Delta V$  为电位电极间的电位差。

(2) 式可以改写为：

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

式中

$$K = 2\pi \left\{ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\}^{-1}$$

称为几何装置因子，根据电极间的相对位置而定。

由于地层实际上并非是均质各向同性的半无限介质，真实的地层可能由多层组成，因此根据式 (3) 算得的电阻率称为视电阻率，故式 (3) 的正确表示为：

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

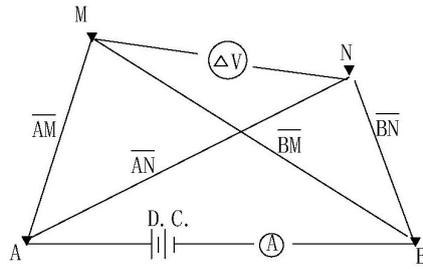


图 D-3 电阻率法任意四极装置示意图 (A、B 表供电电极, M、N 表测量电极)

通常视电阻率并不一定是地下各电性地层的真实电阻率, 而是表示在设定之电极排列下, 所有小于与电极排列有关之某深度范围内的地层的综合效应, 地下各电性地层的电阻率及厚度需要进一步数据处理方可求得。

## D-2 测定方法

高密度电阻率法有多种测定方式, 常用的有温纳装置法、斯伦贝谢装置法 (简称“斯贝”法)、二极装置法及偶极装置法等, 不同的测定方式受地形及测定环境的影响不同, 结果各有优劣, 本指南所采用的方法包括了温纳装置法、斯伦贝谢装置法、二极装置法、偶极装置法, 分别介绍如下:

### (1) 温纳装置法

温纳装置法是以一对供电电极 A 和 B, 另一对测量电极 M 和 N 相互对称排成一直线, 相邻电极间距相等的方法, 即  $AM=MN=NB=a$ , 如图 D-4。其探测的深度约为 MN 的间距, 当加大 AB 及 MN 间距时, 可逐次得到由浅至深的地层信息。温纳装置法受地形限制较大, 在测定上比较耗时, 且愈深层的数据所含的噪声比亦较高, 但其优点在于测定值比较稳定, 对地层电性在垂直方向上变化的分辨率较高, 测量露头电阻率时大多采用此电极装置法。

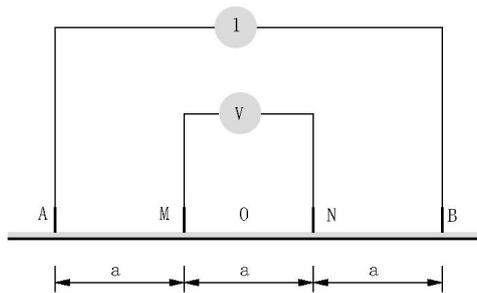


图 D-4 温纳装置示意图

### (2) 斯贝装置法

斯贝装置法是以一对供电电极 A 和 B, 另一对测量电极 M 和 N 成一直线, 以 O 为中心点成对称状, 向外展开排列的方法, 如图 D-5。当半展距逐渐加大时, 便可以得到地层由浅至深的电阻率变化。其主要优点是仪器精度要求不高, 且计算视电阻率容易。缺点是探测时较费人工, 且每次移动测量电极, 有时会因地层浅部的局部非均质与地下测定信号混合而影响数据质量。

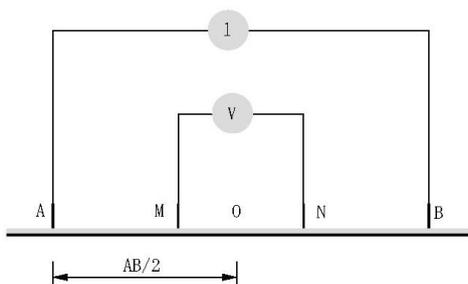


图 D-5 斯贝装置示意图

### (3) 二极装置法

二极装置法中一个供电电极和一个测量电极固定于无限远处，在野外测定时，此距离设为最大测深的十倍以上，另外两个电极中的一个当作供电电极，另一个作为测量电极，此时供电电极固定不动，只要移动测量电极，等到供电电极和测量电极无法再展开时，再移动供电电极，重复上述步骤，就可以得到地层由浅至深的电阻率变化。二极装置法所受到的地形限制较小，数据质量亦稳定可靠，并在测定时可以减少更换电极的数目，达到节省测定时间的效果，如图 D-6。

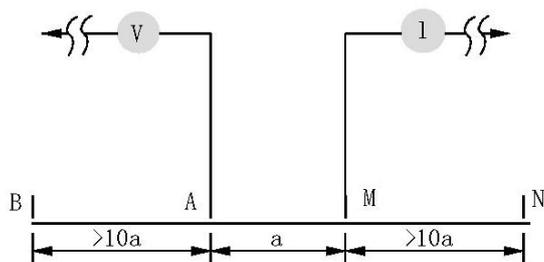


图 D-6 二极装置法示意图

### (4) 偶极装置法

偶极装置法的电极排列顺序，如图 D-7。测深参数  $n$  为内侧供电电极与测量电极之间的间距和供电电极间距（或测量电极间距）之比值。供电电极 AB 在测量电极 MN 的一侧。偶极剖面法的  $\rho$ -S 曲线特点是异常变化明显。但是，由于该异常变化也可能是由于假异常点的存在所至，使解译复杂化。所以，目前此法应用较少。

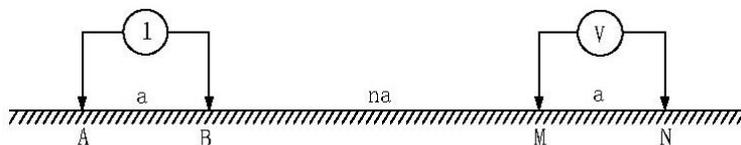


图 D-7 偶极装置法示意图

## D-3 设备要求

对高密度电阻率法测量仪器的一般要求：

高密度电阻率法仪器一般是集供电和测量功能为一体的。就供电来说，要求供电电流稳定，供电电流大小可以在一定范围内调节。对测量来说，有如下 4 个基本要求：

(1) 灵敏度高，测量范围大。在待测的视电阻率和电极装置大小一定时，仪器灵敏度越高，可以准确测量的电位差越小，需要的供电电流就越小。这有利于减轻电源、供电电极和供电导线等装备的重量，提高工作效率；

(2) 抗干扰能力强。野外存在各种天然和人文的干扰信号，要求仪器对各种干扰信号有很强的压制能力。在我国，特别要求能够很好地压制 50Hz 的人文干扰信号；

(3) 较高的稳定性。要求仪器能够适应潮湿和温度大幅度变化等比较恶劣的野外工作条件；

(4) 输入阻抗高。要保证仪器在电极接地条件不良、接地电阻比较大时仍然能够获得准确的测量结果。

高密度电阻率法设备包括：

(1) 主机：电流供应器和电压与电流表。（一般需要使用专门的电法仪器）；

(2) 电极棒：非极化材质的电极棒；（供电电极：为使 100~1000V 的电压能将 0.1~10A 的电流供入地下，供电电极必须是低阻抗的。通常可以用长约 40~50cm、直径 1~2cm、打入地下约 30cm 的铜钎或铁钎作为供电电极；测量电极：要求必须是低噪声的，即电极电位必须是稳定的。通常电阻率法使用长约 40~50cm、直径 1~2cm 的铜钎作为测量电极。）

(3) 电源：供电电源，蓄电池或发电机；（通常使用干电池，用特制的电池箱将大号电池串联在一起，也可以使用特制的可充电的电池箱，还可以使用 45V 乙型电池。如果需要的功率比较大，也可以使用小型发电机。）

(4) 数据采集和反演解译软件；

(5) 专用电缆；（要求导线具有抗拉、绝缘好、耐磨损的性质，通常使用内芯为 4 钢 3 铜的绝缘导线。1000m 这样的导线的电阻约有 110Ω。）

(6) 附件。（记录纸、铁锤、罗盘、皮尺、GPS 仪、通讯设备（对讲机）、水壶等）

## D-4 电极接地原则

(1) 电极布设时位置应准确，接触应密实；

(2) 电极埋入深度一般应小于 AB 的 1/20，当 AB 很小时，也不应超过 AB 的 1/10。高密度电阻率法电极布设时，各电极保持竖直状态；当供电电极距很小时，电极埋入深度一般应小于供电—测量电极间距的 1/5。对高密度电阻率法，由于电极间距不断变化，因此电极埋入深度至少要求电极稳固不晃动；

(3) 电极布设位置应避开沥青、垃圾堆、炉渣、碎石等高阻地点。在冰上或表层土壤冻结地区进行电阻率剖面法测量时，电极应穿透冰层、冻土层。在孔隙较大的干燥地段宜浇盐水，必要时使用长电极；

(4) 测量电极应使用相同电极，测量前应使电极接地时间尽可能长，当使用非极化电

极时，应在布极完成至少 1min 后方可进行观测；

(5) 各电极与电缆线接口应保持良好的接触；

(6) 当电极因客观条件限制只能偏离预定接地点时，其垂直于测线方向的位移应小于 AO 的 2.5%，沿测线方向的位移应小于 AO 的 1.0%。当偏离量不能满足此要求时，应按一定精度测出其移动距离，并予以记录，同时重新计算 K 值；

(7) 当单根电极接地不能满足作业要求时，可采用多根电极的并联电极组，该电极组通常应沿垂直测线方向排列，只有当受客观条件限制时，才可以绕接地点环形分布或沿测线排列。电极组任意两电极间的距离应大于 2 倍电极埋入深度；

(8) 并联电极组中单根电极与预定接地点之间的最大距离 d 应满足：

a) 当电极组垂直测线排列时，d 应不大于 AO/10，且电极组在接地点的测线的两侧应对称分布；

b) 当电极组沿测线排列时，d 应不大于 AO/20；

c) 当电极组环形排列时，d（半径）不应大于 AO/20。

(9) 如采用多根电极的并联组仍不能满足作业要求时，应在接地点浇（盐）水或堆放良导电物质或改用铝箔电极，但堆放的良导电物质、铝箔电极的直径不得大于 AO/10；

(10) 水上电阻率剖面法布极时应遵守下列原则：

a) 水面布极时，在岸边用测地仪器确定电极水面位置，把电极固定在水中；

b) 水底布极时，为确定接地点位置，把电极放入水底，在岸边用测地仪器逐步加以修正，确定接地点位置。

**附录 E 探地雷达法的原理、测定方法和设备要求**  
(资料性附录)

## E-1 原理

探地雷达所发射的雷达波属于一种高频电磁波，其频率通常介于 10 MHz~1500 MHz 之间。雷达波的频率越高，波长越短，分辨率相对提高但探测深度则变小；反之雷达波频率越低，波长越长，虽然探测深度加深，但分辨率变差。

决定雷达波探测深度的最重要两个因子就是物质的相对介电常数与雷达波的衰减常数。相对介电常数的物理意义如下：

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

式中， $\varepsilon_r$  为相对介电常数； $\varepsilon$  为材料的介电常数 (F/m)； $\varepsilon_0 \cong 8.85 \times 10^{-12}$ ，为真空中的介电常数 (F/m)。

电磁波在介质中传送的速率可以下式表示：

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}}$$

式中， $K$  为介质的相对介电常数； $c$  为光速。

当电磁波自介质 A 向介质 B 入射，遇介质 A 与介质 B 之界面时，其反射系数“R”，定义为：

$$R = \frac{\sqrt{K_a} - \sqrt{K_b}}{\sqrt{K_a} + \sqrt{K_b}}$$

式中， $K_a$  为物质 A 的相对介电常数； $K_b$  为物质 B 的相对介电常数

当两物质间的介电常数差值越大时，所显示的反射面越明显。

电磁波的探测深度除了天线频率是一个重要的因子之外，介质的衰减常数亦决定了探测的深度。衰减常数，定义为：

$$\alpha = 1.69 \frac{\sigma}{\sqrt{K}}$$

式中， $\sigma$  为物质的电导率，因此电导率越大的物质，因其电磁波衰减更大的缘故，探测深度也越浅。

## E-2 测定方法

探地雷达法在野外测定常使用的方法有两种：一是水平剖面法，发射天线与接收天线以

等间距移动测定，可直接反应地层结构；二为同中点测定法，其目的是求得介质速度，以便将水平剖面法所测得之时间轴，换算成真实的深度使用。

#### (1) 水平剖面法（又称为等间距测定法）

其特点为接收天线与发射天线的间距固定不变，整组天线沿着测定方向移动，所得到的剖面可直接反应地层构造。测定时天线配置如图 E-1 (a) 所示。测定时所应设定的参数包括使用频率、天线间距、天线组移动距离、天线排列方式、时间窗口及迭加次数等，可依野外测定实际状况进行调整；

#### (2) 同中点测定法

其特点为发射天线与接收天线对同一对称中点逐渐展开测定，可反应出发射与接收天线中点下介质速度讯息。因同中点测定剖面反应的是地下同一位置的结果，故以不同速度作 NMO 修正，当所用速度能将同中点测定法测定数据呈现的抛物线修正为水平，此时所用的速度即为雷达波在探测地层中的传播速度，天线配置如图 E-1 (b) 所示。测定参数与水平剖面法一致。

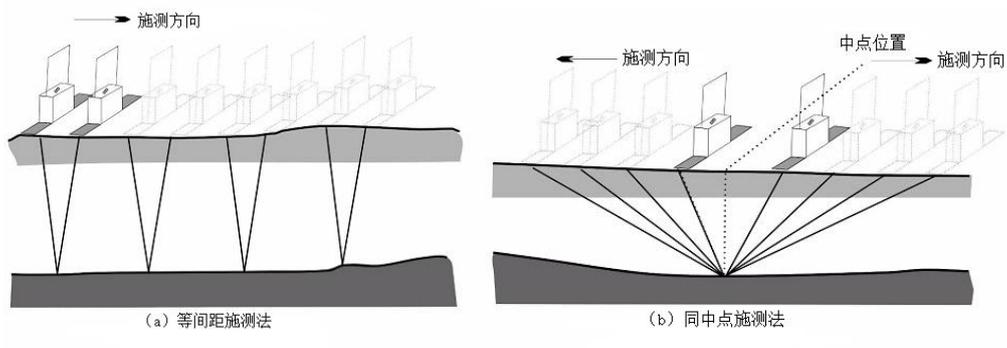


图 E-1 探地雷达野外测定天线排列示意图

### E-3 设备要求

探地雷达系统设备主要分为五大部分：主机、雷达天线、屏幕显示器（或笔记本电脑）、电源供应器和传输线，其功能如下所述：

(1) 主机功能包括控制天线发射和接收信号的时机、设定介电常数、测定轨迹间隔、信号的增益大小、滤波范围和取样速度等参数；

(2) 雷达天线经由传输线与主机连接，通过主机控制收、发电磁波信号。需根据勘测目的准备合适的天线；

(3) 屏幕显示器为附在主机上的彩色液晶显示器（也可用笔记本电脑代替），可从屏幕显示器上实时显示天线所接收到的信号，同时储存为数据文件；

(4) 电源供应器一般为 12 伏特的可充式镍镉电池；

(5) 传输线连接雷达主机和天线，是主机和天线之间的信号联络桥梁；

(6) 数据采集及反演解译软件；

(7) 运送箱（装仪器）；

(8) 附件（记录纸、罗盘、皮尺、GPS 仪等）。

## E-4 参数解释

### (1) 天线频率

探地雷达测定时天线频率决定了其探测深度与解析能力。高频的天线频率拥有较佳的解析能力，但其探测深度较浅；而低频的天线频率虽然解析力没有高频佳，但其探测深度更深。故在测定前确定待测目标的大约深度后，选择对应的使用天线频率，有效完成测定。

### (2) 天线移动间距

天线移动间距是发射器与接收器每次所移动的距离，即两测点间距。

### (3) 时间取样间隔

时间取样间距是指接收器每隔多少时间接收一个振幅的数据。探地雷达探测所接收的数据为时间域，故连续接收信号时，资料量过于庞大，因此需要根据实际需要与精度要求，选择合适的时间取样间隔。若时间取样间隔过大，则会因振幅数据点较少使空间取样率降低，造成失真现象；反之过小则因振幅资料点过多，而需要更多储存空间和测定时间。

### (4) 时间窗口

时间窗口是指探地雷达接收天线接收信号的时间范围，其相对时间零点以接收天线开始接收电磁波算起。时间窗口开得越大，则接收天线接收信号的时间也就越长，使所得信号包含了待测体较深部分，即探测深度受时间窗口控制。常见探地雷达系统允许的时间窗口范围为  $1\text{ ns} \sim 32767\text{ ns}$ 。

时间窗口设定的大小与天线频率和被探测体电性有极大的关系，所以通常需要先使用较大的时间窗口掌握较深的整体情况之后，再决定适当的时窗。决定窗口大小的原则如下：

a) 若使用的天线频率越高，或探测体的导电度越大，也就是衰减系数较大，雷达波贯入深度将会较浅，因此时间窗口就不宜设定过大，试验时若欲探测深度较浅的物质，则选择较小的时间窗口较佳；

b) 若所使用的天线频率越低，或被探测体的导电度较小，也就是衰减系数较小，雷达波贯入深度也就较深，因此时间窗口就可设定的较大，若欲探测深度较深的物质时，则选择较大的时间窗口较佳。

### (5) 迭加次数

迭加次数为发射天线在同一测点发射信号的次数，亦为接收天线于同一测点上接收信号的次数。在探地雷达系统中，该参数用于将信号加强并消除随机噪声，其原理为将同一测点中重复接收得到的振幅数据加以迭加，然后再平均，将随机噪声消除，提高信号噪声比，而将平均后的振幅数据表示为一条重叠于面积变化下之摇摆描线显示。常见的探地雷达系统中，可供选择的迭加次数有 1、2、4、8、16、32、64、128、256、512、1024 及 2048 次，为兼顾效率与信号质量，故野外实验建议采用 128 次迭加次数进行。

### (6) 取样频率

取样频率为取样数与时间窗口的比值。取样频率设定时应尽可能的高，如此可提高分辨率以及时间准确性，但无法避免迭加失真效应，根据信号取样定理又称为奈奎斯特取样定理，建议取样频率不低于 6 倍天线频率，通常的设定为 6~15 倍的天线中心频率。

## E-5 数据处理

(1) 可根据需要选取删除无用道、水平比例归一化、增益调整、地形校正、频率滤波、f-K 倾角滤波、反褶积、偏移归位、空间滤波、点平均等处理方法；

(2) 选择处理方法和处理步骤应根据外业记录数据质量及解译要求进行，当反射信号弱、数据信噪比低时不宜进行反褶积、偏移归位处理，在进行 f-K 倾角滤波和偏移归位处理前应删除无用道，并进行水平比例归一化和地形校正；

(3) 在数据处理各阶段均可选择频率滤波，消除某一频段的干扰波；

(4) 用 f-K 倾角滤波消除倾斜层干扰波的前提是确定无同样倾角的有效层状的反射波；

(5) 可用反褶积来压制多次反射波，用于反褶积的反射子波宜是最小相位子波；

(6) 可采用时间偏移或深度偏移方法将倾斜层反射波界面归位，使绕射波收敛，在进行深度偏移处理时应选择可靠的介质电磁波速度；

(7) 可选用空间滤波的有效道叠加和道间差两种方法，使异常具有更好的连续性或独立性，提高数据图像的可解译性；改变反射信号的振幅特征应在其他方法处理完成后进行；

(8) 可用平滑数据的点平均法消除信号中的高频干扰，参与计算的点数宜为奇数，最大值宜小于采样率与低通频率之比。

**附录 F 激发极化法的原理、测定方法和设备要求**  
(资料性附录)

## F-1 原理

激发极化法(或称激电法)就是以岩、矿石或介质激发效应的差异为基础,通过观测和研究大地激电效应来探查地下地质情况或解决某些水文地质问题的一类电法勘探方法。采用直流电或交流电都可以研究地下介质的激电效应,前者称为时间域激发极化法,后者称为频率域激发极化法。二者在基本原理方面是一致的,只是在方法技术上有较大差异。

### (1) 直流电场作用下的激发极化性

#### a) 时间特性

激电效应可在稳定电流下激发,其特点是表现为电场随时间的变化(充电和放电过程),故亦称它为“时间”域中的激电效应。图 F-1 (a) 是测量体极化标本的装置。图 F-1 (b) 是用这种装置对一块黄铁矿化岩石标本测得 的电位差随时间的变化曲线。电位差随时间的变化,是由于激发极化产生的电位差(简称二次电位差)在供电后从零开始逐渐变大(充电过程)及断电后二次电位差逐渐衰减到零(放电过程)的结果。在无激电效应时,电流流过标本由于欧姆电压降形成的电位差,称为一次电位差,它在稳定电流条件下,不随时间而变。在标本被激发极化后,供电时间为  $T$  时观测到的电位差实为一次电位差和二次电位差之和,称为总场电位差,图 F-1(b)中的虚线 b,是二次电位充电曲线。

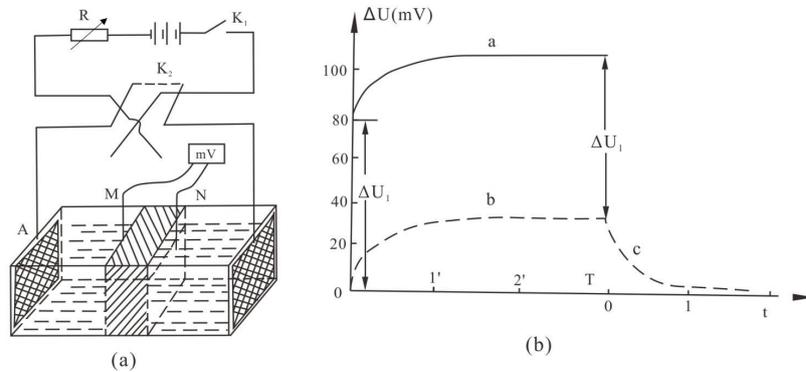


图 F-1 测量体极化标本激电性质的装置 (a) 和一块黄铁矿化岩石标本的测量结果

(b) a-实测  $\Delta U_2(T)$  充电曲线; b-换算的  $\Delta U_2(T)$  充电曲线; c-实测  $\Delta U_2(t)$  放电曲线

#### b) 极化率参数

对星散浸染状矿石或矿化、石墨化岩石标本的实验观测结果表明,在相当大范围内改变供电电流  $I$  时,在观测误差范围内 ( $<10\%$ ) 二次电位差与  $I$  成正比,二次电位差的绝对值与供电方向无关。因此,在地面电法通常采用的电流密度范围内,体极化效应实际上是线性的。为此引入一个称为极化率的参数,来表征体极化介质的激电性质。极化率是用百分数表示的无量纲参数,是一个与电流无关的常数,其值的计算公式为:

$$\eta(T, t) = \frac{\Delta U_2(T, t)}{\Delta U(T)} \times 100\%$$

其中,  $\Delta U_2(t)$ 也可用一段时间内( $t_1 \sim t_2$ )积分的平均值来表示, 即

$$\eta(T, t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Delta U_2(t) dt \times 100\%$$

但极化率与供电时间  $T$  和测量延迟时间  $t$  有关, 因此, 当提到极化率时, 必须指出其对应的供电和测量时间  $T$  和  $t$ 。为简单起见, 如不特加说明, 一般便将极化率定义为长时间供电和无延时的极限极化率, 即

$$\eta(T, 0) = \eta(T, t) \Big|_{t \rightarrow 0} = \frac{\Delta U_2(T, t) \Big|_{t \rightarrow 0}}{\Delta U(T)} = \frac{\Delta U(T) - \Delta U(0)}{\Delta U(T)}$$

## (2) 交流电场作用下激发极化性

### a) 频率特性

激电效应也可在交变电流激发下, 其特点是表现为电场随频率的变化(频率特性), 此时称之为“频率域”中的激电效应。在图 F-1 (a) 所示装置中, 将供电电源改为交流电源, 并逐次改变所供交变电流的频率  $f$ , 便可根据测量电极间交变电位差随频率的变化, 观测到频率域的激电效应。

### b) 频散率参数

仿照时间域极化率的计算式可根据两个频率(低频)和(高频)的总场电位差的幅值来计算“频散率”, 对岩、矿石供以两个不同频率( $f_D, f_G$ )的交变电流, 分别测量其电位差  $\Delta U(T)_{f_D}, \Delta U(T)_{f_G}$ , 并按下式计算其频散率。

$$P = \frac{\Delta U_{f_D} - \Delta U_{f_G}}{\Delta U_{f_G}}$$

## (3) 时间域激电法与频率域激电法的优点比较

### a) 时间域激电法的优点

①时间域激电法在通常情况下, 用长脉冲供电时可以获得最大限度的激电异常, 因而有利于在极化效应较弱情况下进行测量, 有可能发现较小的地质目标。相对频率域激电法来说可有较大的勘探深度;

②时间域激电法可以在断去供电电源后, 观测和研究激电二次场的时间特性, 而频率域激电法只能在供电过程中观测和研究极化场, 因而在避免电磁耦合干扰方面和研究激电场的电学放电特性方面, 时间域激电法优于频率域激电法;

③时间域激电法可以在很长的时间范围内观测和研究激电异常场, 而频率域激电法在实

际工作中，只能在一定的频率段内（一般为 0.1~10Hz）观测和研究极化场。因此，时间域激电法研究的电化学过程较长，有可能在更广阔的时间域内，揭示激电异常源的性质。

#### b) 频率域激电法的优点

①由于频率域激电法观测的是极化场（总场），所以与时间域激电法相比供电电流可以很小，因而供电系统的装备十分轻便，有利于在地形复杂，交通不便地区采用偶极装置或近场源四极装置开展普查矿工作；

②由于接收机具有选频和滤波系统，它只接收由发送机发出的固定频率信号，因此在克服电极极化不稳和不良接地条件方面，以及在避免工业游散电流和天然大地电流场的影响方面均比时间域激电法有较强的抗干扰能力。致使在某些相当困难的条件下仍能获得较好的观测资料；

③频率域激电法相对时间域激电法而言，可观测研究的参数较多，如振幅和相位，虚分量和实分属，幅频特性，相频特性等。因而可以从不同角度，侧重于不同方面去研究电化场的特征，有可能对评价激电异常源性质，提供较多的途径。

## F-2 测定方法

一般来讲，激电法可采用电阻率法中的各种装置类型。但究竟选择哪种装置采用多大电极距，还需根据任务要求，工作地区的地质、地球物理条件和装置本身的特点等进行综合考虑。现对激电法中目前常用的几种装置类型特点及电极距的确定原则介绍如下，供参考。

### (1) 中间梯度装置

#### a) 装置特点

中间梯度位置（简称中梯装置），它的最大优点，就是铺设一次供电导线和供电电极（A、B）能在相当大的面积上进行测量，特别是能用几台接收机同时在几条测线上进行观测，因而具有较高的生产效率。最适于做面积性普查工作。

另外，由于中梯装置的观测范围处于 A、B 之间的中间地段，接近于水平均匀极化条件，故对各种产状和不同相对电阻率的目标极化体，均能产生较明显的异常，且异常形态比较简单，易于解释。

中间梯度装置有纵向中梯和横向中梯之分。纵向中梯的 AB 连线方向（测线方向）垂直于目标极化体的走向。而横向中梯的 AB 连线方向则是与目标极化体的走向平行。由于横向中梯只适于勘查良导电或低阻脉状目标极化体，而对电阻率与围岩相近或高于围岩的目标极化体则效果不佳。

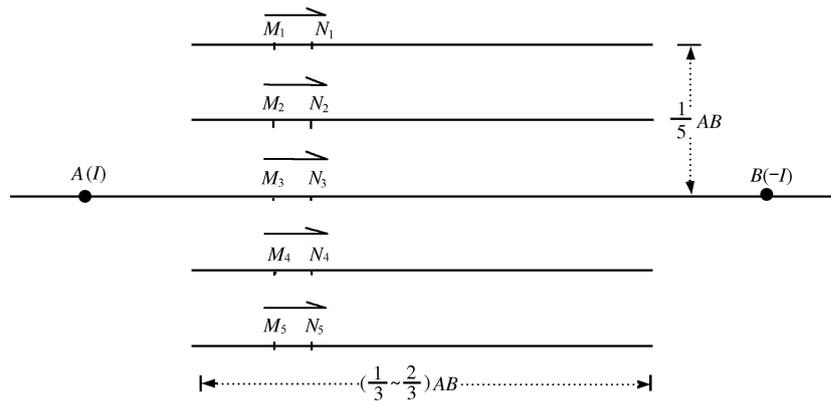


图 F-2 中间梯度装置示意图

此外，由于中梯装置的供电电极距离较大，要求的供电电流强度也大，因而供电系统的装备比较笨重，不利于在地形复杂、交通不便的地区开展工作，并且易产生较强的电磁耦合干扰，所以在做频率域激电法时不宜采用中梯装置。时间域激电法由于可利用断电后的延时有效地压制这种干扰，故中梯装置在时间域激电法中最为常用。

b) 中梯装置的电极距

① 供电电极距 (AB)

理论和实验研究表明，中梯装置的异常幅值不是随着供电电极距的增加而无限增大的。在 AB 相对目标极化体的埋深不太大时，随着 AB 的加大异常值增加比较明显，当 AB 进一步增大时，对低阻极化脉状体而言，异常将趋于某一饱和值；而对高阻极化脉状体来说，异常在某一 AB 极距将取得极大值，然后又逐渐减小。因此 AB 极距的选择不是越大越好，应根据工作地区的地电条件通过在已知矿上的试验来确定。在无已知矿的情况下，通常根据任务要求的一般勘探目标体深度，按以下关系确定。

$$AB = (4 \sim 10) h$$

式中，h 为目标极化体的顶端埋深。

② 测量电极距 (MN)

理论和实验研究表明，测量电极距 MN 的选择除应考虑近地表的干扰体大小外（通常取 MN 大于干扰体的直径），还应以取得最大的异常为前提。对不同形状的矿体，其最佳 MN 与埋藏深度有以下关系：

球体：  $MN = 1.4 h_0$  ( $h_0$  为球心深度)

水平圆柱体：  $MN = 2 h_0$  ( $h_0$  为柱心深度)

直立板状体：  $MN = 2h \sqrt{1 + \frac{l}{h}}$  ( $h$  为顶端埋深， $l$  为下延长度)

综合考虑时，通常取

$$MN = (1.4 \sim 2.8)h$$

或

$$MN = \left( \frac{1}{20} \sim \frac{1}{50} \right) AB$$

应当指出，在做普查工作时，为了保持一定的分辨能力，MN 应等于 1 或 2 倍的点距，但不得大于点距的两倍。

## (2) 联合剖面装置

### a) 装置特点

联合剖面装置（简称联剖装置），是由两个三极装置组成。其最大特点就是在一观测剖面上能得到两条视极化率曲线。将这两条曲线配合起来作解译，能较准确地确定极化体位置（根据所谓“反交点”）和判断目标极化体的产状。但联剖装置的曲线比较复杂，对相邻目标极化体的分辨能力较差，但对近地表小极化体反应也比较灵敏。另外，从方式技术上看，在每个测点上均需作两次测量，有时还要做几种极距才好对异常作解译，因而这种装置的生产效率很低，再加上有个无穷远极，装置也比较笨重。所以它不宜作为普查的基本装置。而只能在详查中为解决某些特定问题，如确定目标极化体位置和判断目标极化体产状等少量剖面性工作。

### b) 电极距

对一般常见的脉状目标极化体而言，联剖装置的电极距可由以下关系确定。

$$AO = BO = \frac{1}{2}(L + l)$$

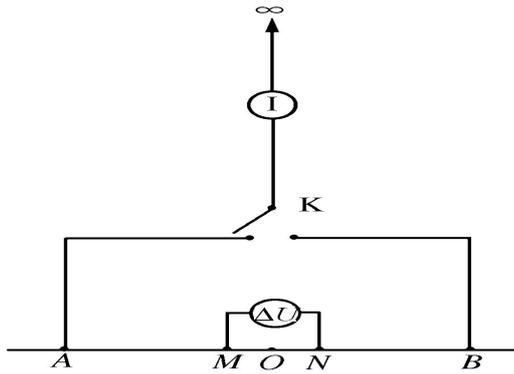
或

$$AO = BO = (5 \sim 10)h$$

式中， $L$  为目标极化体走向长度； $l$  为目标极化体下延长度； $h$  为目标极化体顶端埋藏深度。

$$MN = \left( \frac{1}{3} \sim \frac{1}{5} \right) AO$$

“无穷远”极，应垂直测线方向布设，它与最近测线的距离应大于  $AO$  的 3-5 倍。当斜交测线方向布设时，它与最近测线的距离应大于  $AO$  的 10 倍。

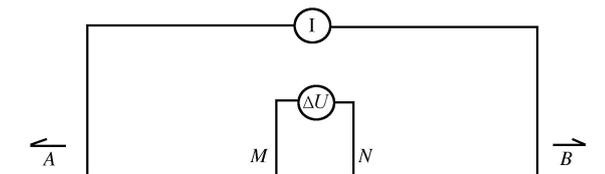


F-3 联剖装置示意图

### (3) 对称四极测深装置

#### a) 装置特点

对称四极测深装置的主要特点是在测量电极 M、N 不动的情况下，供电电极 A、B 对称地逐渐向两边拉开，通过不断加大 AB 距离，来达到了解从浅到深地下电性（导电性和激电性）变化的测深目的。



F-4 对称四极测深装置示意图

在金属矿激电法中，它主要用来确定目标极化体的埋藏深度，如布置一条包括几个测深点的测深剖面，则可通过绘制  $\eta_s$  等值断面图，了解断面中目标极化体的公布和产状。由于激电测深的生产效率较低，所以在实际生产中，一般只在已发现的异常中心先做个十字测深（垂直异常走向和沿异常走向布极）或在异常上做一条测深剖面，很少进行面积性的工作。另外，为了选择中梯装置的供电电极距或了解工作地区的物性变化时，通常在设计之前也要在个别点上做一些激电测深工作。

#### b) 电极距

对称四极电测深装置的供电电极距，有最小和最大之分。一般来说，最小供电电极距应使激电测深曲线的首支，显示出前渐近线；最大供电电极距应使激电测深曲线的尾支，显示出后渐近线。其中  $\left(\frac{AB}{2}\right)_{\text{最小}}$  为 1.5 米或 3 米， $\left(\frac{AB}{2}\right)_{\text{最大}}$  则与探测目标体的埋藏深度、产状、导电性和激电性地电条件有关。在金属矿区取  $\left(\frac{AB}{2}\right)_{\text{最大}} = (2 \sim 5)h$  即可达到中梯装置的标准。如果只是为了确定目标极化体的顶端埋深 ( $h$ ) 则只需测到接近饱和值或极大值再稍加延长即可。

在 $\left(\frac{AB}{2}\right)_{\text{最小}}$ 和 $\left(\frac{AB}{2}\right)_{\text{最大}}$ 之间的极距点,原则上应使其在模数为6.25cm的对数坐标纸上,

大致均匀分布。一般 $\left(\frac{AB}{2}\right)_n$ 和 $\left(\frac{AB}{2}\right)_{n+1}$ 的距离为0.8~1.2cm。

关于测量电极距 $MN$ ,则可按 $\frac{AB}{3} \geq MN \geq \frac{AB}{30}$ 的常规关系确定。为了满足这一关系,

通常在一条测深曲线上会出现 $MN$ 的接头点。

### F-3 设备要求

常用仪器包括:接收机、发送机、供电电源、导线、电极、通讯设备、电性参数测定及模拟实验设备、必需的测试仪表和检修工具。各种仪器设备应性能良好,并有一定的备用量。各种仪器设备的易损、易耗零件也应有足够的储备。

对主要仪器设备的基本性能要求如下:

#### (1) 接收机

对时间域激发极化法接收机的基本要求是灵敏度和观测精度要高,性能稳定,抗干扰能力强。

a) 测量电位最高分辨率,取决于整个工区设计的测量精度。A级为 $10\mu\text{V}$ ,B级为 $30\mu\text{V}$ 。测量极化率分辨率,也取决于整个工区设计的测量精度。A级为0.01%、B级为0.1%;

b) 仪器测量精度取决于整个工区规定的测量精度。电位和极化率精度,A级为 $\pm 4\% \pm 1$ 个字;

c) 仪器输入阻抗必须大于 $3\text{M}\Omega$ ;

d) 仪器的延时与积分的时间应可变;

e) 仪器的延时与积分时间的误差应小于 $\pm 1\%$ ;

f) 使用两台或两台以上(包括备用的)仪器在同一地区工作时,各台仪器之间应有良好的一致性和较小的均方差。用同一模拟器可对各台仪器的一致性进行标定,但这种标定只能作为日常对各台仪器一致性的检查。仪器一致性的观测精度应在野外观测条件下标定;

g) 用于激电找水或研究异常的仪器,应能测出二次电位衰变曲线;

h) 仪器工作环境温度 $-10\sim 50^\circ\text{C}$ (液晶显示的仪器可为 $0^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$ ),在相对湿度93%( $40^\circ\text{C}$ )情况下能正常工作。

#### (2) 发送机

根据输出功率。可分为小功率、中功率和大功率三种。根据需要,选择一定功率的发送机。对发送机的具体要求如下:

a) 短脉宽的标准供电制式:即占空比为1:1的正反向供电方式(以供电周期8s为例:正向供电2s,停电2s,反向供电2s,停电2s)。标准供电制式的供电周期为4s、8s、16s、

和 32s 四种；

b) 供电时间的精度应不低于 $\pm 1\%$ ；

c) 对具有稳流功能的发送机，在测量过程中不监视电流变化时其稳流精度应高于 $\pm 2\%$ ；

d) 为监测电阻率的需要，表头显示电流的发送机，电流测量精度应高于满度的 $\pm 3\%$ ，数字显示电流的发送机应高于 $\pm 1\%$ ；

e) 应有完善的保护电路；

f) 仪器外壳、面板上各旋钮、插孔等与人体可接触部分均应与内线路绝缘，绝缘电阻应大于  $100\text{M}\Omega/500\text{V}$ ；

g) 为了满足抗干扰及井中激电需要，发送机应具有外控功能。

### (3) 供电电源

供电电源为发电机或电池组。对它们的基本要求是输出足够的功率，满足接收机野外测量精度的要求。

a) 用发电机作电源时，要求部件和组装都完好，起动及运转正常，电路与外壳间的绝缘电阻应大于  $5\text{M}\Omega/500\text{V}$ ，输出电压变化不超过 5%；

b) 用交流发电机时，必须配有整流器（包括调压器）和负载平衡器；

c) 用干电池作电源时，要求电池组的无负荷电压与额定电压差不超过 10%。

### (4) 导线和电极

a) 导线的规格和数量应根据用途、电极距大小、供电电流强度和工区自然条件选择。一般应选用内阻小、绝缘性能好、轻便、强度高的导线；

①中间梯度装置工作，供电导线电阻一般不超过  $10\Omega/\text{km}$ ，耐压必须高于发送机的工作电压；

②导线的绝缘电阻应每公里大于  $2\text{M}\Omega/500\text{V}$ 。对于长度为  $D(\text{km})$ 的导线，其绝缘电阻应

$$R_D \geq \frac{1}{D} \times 2(\text{M}\Omega)$$

按 要求。

b) 供电电极用不极化电极，要求性能稳定，内阻应小于  $2\text{k}\Omega$ 。

## 附录 G 野外地球物理方法测量数据记录表

(资料性附录)

表 G-1 高密度电阻率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。

表 G-2 探地雷达法数据采集野外记录表

测试目的					测线编号	
天线主频					测试点距	
测线布置						
编号	位置	起点坐标	终点坐标	移动 方向	测线示意图	
备注						
测试日期		测试人员		现场技术员		审核



## 附录 H 地下水污染调查区地球物理调查报告大纲

第一章 前言

第二章 概述

2.1 调查目的和原则

2.2 调查范围

2.3 相关法律法规和标准规范

2.4 已有工作成果总结分析

第三章 调查区污染概况及物性特征

3.1 自然地理概况

3.2 地质构造和水文地质条件

3.3 污染状况调查

3.4 调查区物性特征

第四章 地球物理探测和测量数据解译

4.1 工作方案

4.2 工作流程

4.3 数据采集

4.4 数据解译

第五章 结果和分析

第六章 结论和建议

第七章 附件（地理位置图、测线平面布置图、地球物理调查成果图、周边关系图、现场记录照片、现场探测的记录、法规文件等）

## 附录 I 有机物和重金属复合污染电阻率和充电率实验测定

实际污染调查区中的污染物主要可分为无机污染物、有机污染物和复合型污染物三种，但目前关于复合型污染物的物性参数研究较少，目前本实验主要研究了在砂介质和粘土中有机物和重金属复合型污染物的电阻率和充电率的变化。

实验中选择的重金属为  $Pb^{2+}$ ，有机物为柴油、汽油、三氯乙烯 (TCE)、四氯乙烯 (PCE)，实验结果图如下：

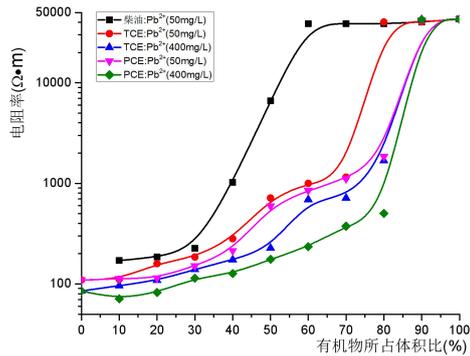


图 I-1 石英砂中电阻率随有机物所占体积比变化曲线

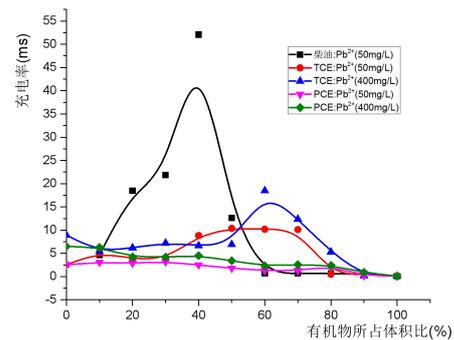


图 I-2 石英砂中充电率随有机物所占体积比变化曲线

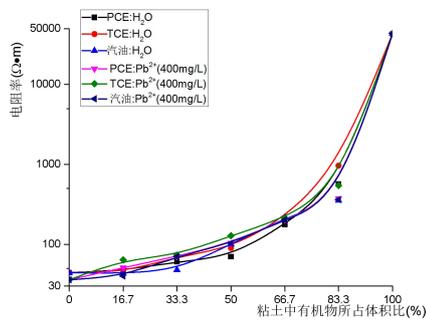


图 I-3 粘土中电阻率随有机物所占体积比变化曲线

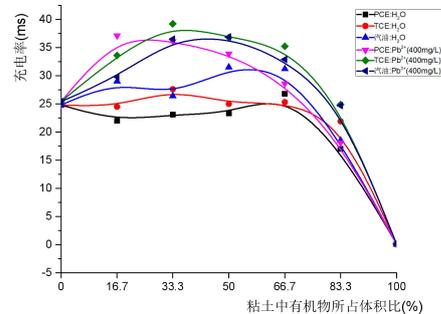


图 I-4 粘土中充电率随有机物所占体积比变化曲线

从图 I-1 和 I-3 可以得到，电阻率随有机物的体积比的变化分为三个阶段：第一阶段（有机物所占体积比小于 30%），电阻率随有机物所占体积比例的增加而缓慢增大，砂介质中电阻率在  $50\sim 200\Omega\cdot m$ ，在粘土中的电阻率在  $30\sim 80\Omega\cdot m$ ；第二阶段（粘土中有机物所占体积比例大约在 30%~80%之间，砂介质中的有机物所占比例跟有机物的种类有关），电阻率随有机物所占比例的增加增大较快，粘土中的电阻率为  $80\sim 1000\Omega\cdot m$ ；第三阶段（粘土中有机物所占体积比大于 80%），在砂介质中，电阻率达到最大值后稳定，而在粘土中，电阻率依然呈增长趋势到最大值，在两种介质中达到的最大值为  $43000\Omega\cdot m$  左右。从图 I-2 和 I-4 中可以得到，充电率随有机物的体积比的变化分为两个阶段，即前期的随有机物所占体

积比增加而增大和后期的随有机物所占体积比增大而减小到最小值。在砂介质中， $\text{Pb}^{2+}$ 与柴油、TCE 的混合后的充电率随有机物体积变化明显；砂介质中的充电率主要集中在 0.1~10 ms；粘土中的充电率主要集中在 15~40 ms，另外，在粘土中还可以得到，在相同条件下，400 mg/L 的  $\text{Pb}^{2+}$ 溶液与有机物混合的充电率大于纯水与有机物混合的充电率。