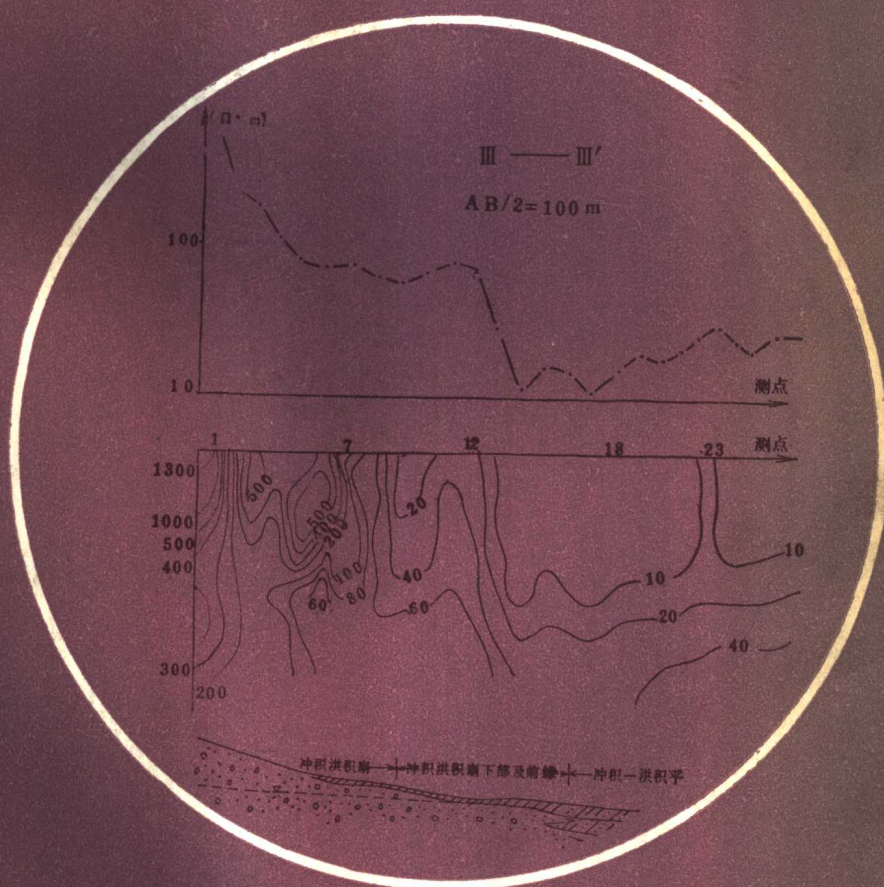


中等专业学校教材

水文地质

地球物理探测原理

朱煥祖 主编



地质出版社

中等专业学校教材

水文地质地球物理探测原理

南京地质学校

朱焕祖 主编

地质出版社

内 容 提 要

根据我国水文物探工作现状,本书内容以地面电法和地球物理测井为主,并适当增强了地震勘探和放射性探测的内容。全书侧重于方法原理的介绍和资料的定性分析、解释和应用。并注意吸取生产单位积累的实践经验,介绍了在寻找不同类型地下水时,物探方法的应用实例。

本书作为中等专业学校水文地质专业的教材,也可供广大水文物探工作者参考。

本书由霍汉兴、李瑞轩同志主审,经地质矿产部中等专业学校物探教材编审委员会于1985年1月南京会议审定,同意作为中等专业学校教材出版。

中等专业学校教材 水文地质地球物理探测原理

南京地质学校 朱焕祖 主编

责任编辑 袁 方

*

地质出版社出版

(北 京 西 四)

妙峰山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 9³/₈ 字数: 219,000

1986年6月北京第一版·1986年6月北京第一次印刷

印数: 1—3,860册 定价: 1.25元

统一书号: 13038·教248

前 言

本书根据地质矿产部教育司1983年制订的教学大纲编写，作为部属中等地质学校水文地质专业的地球物理探测原理教材。

根据我国水文物探工作现状，内容以地面电法中的电阻率法及地球物理测井为主，并适当增强了地震勘探和放射性探测的内容。全书侧重于方法原理、资料的定性分析和解释，并注意吸取生产单位积累的实践经验，加强了各种物探方法在水文地质调查中应用的实例部分，以期作到理论与实际紧密联系。而对野外工作方法及仪器设备仅作简要叙述。

本教材授课总学时约为80学时，其中必讲内容与选讲内容时数比例约为8:2。必讲内容时数安排大体如下：

绪论——2学时；第一章电阻率法的基本原理——8学时；第二章电剖面法——8学时；第三章电测深法——16学时；第四章——地球物理测井——10学时；第五章其它物探方法——8学时；第六章物探在水文地质调查中的应用——8学时。为使用本教材有较大的适应性，各章节具有一定的独立性，在使用中除注明*号的内容可以作为选用外，尚可根据具体要求作适当选取。

本教材第一至四章由南京地质学校朱焕祖编写，第五、六章由郑州地质学校夏启超编写。

在初稿审查中，主审霍汉兴、李瑞轩以及各地质学校的老师戴荣铨、王圆珍、林苏雄、等提出了宝贵的修改意见。山西省地矿局物探队提供了地震勘探应用实例。南京、郑州地质学校李玉、柴风云同志清绘了全部图件，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中的不当之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编 者

1985. 6.

目 录

绪 论	1
一、物探方法的分类及其应用范围	1
二、水文物探在水文地质调查中的作用和地位	3
三、水文物探发展简史	5
第一章 电阻率法的基本原理	6
第一节 岩石的电阻率	6
一、岩石电阻率的概念	6
二、影响岩石电阻率的主要因素	8
第二节 稳定电流场的分布规律	11
一、描述稳定电流场的三个基本物理量	11
二、点电源的正常场	13
三、稳定电流场的分布规律	15
第三节 岩石电阻率的测定和视电阻率的概念	15
一、岩石电阻率的测定	15
二、视电阻率的概念	16
三、视电阻率的定性分析公式	17
第四节 电阻率法的勘探深度	18
一、电流密度沿 AB 中垂线上的分布	19
二、影响勘探深度的主要因素	21
*第五节 电阻率法的仪器和设备	22
第二章 电测剖面法	23
第一节 对称剖面法	23
一、对称四极剖面法	23
二、复合四极剖面法	25
第二节 联合剖面法	26
一、联合剖面法的装置形式	26
二、典型地质体上的联合剖面曲线	27
第三节 中间梯度法	30
第四节 影响电测剖面 ρ_s 曲线畸变的主要因素	31
一、地表局部电性不均匀和局部地形变化的影响	31
二、地形起伏的影响	31
第三章 电阻率测深法	34
第一节 电测深法的基本原理	34
一、电测深法的实质	34
二、地电断面和曲线类型	36

三、纵向电导和横向电阻	39
四、电测深曲线的对数座标图示	40
第二节 野外工作中的几个问题	40
一、应用电测深的有利条件和范围	41
二、测区和测网的选择	41
三、电极距的确定	42
四、布极线方向的选择	43
第三节 电测深资料的定性解释	43
一、电测深曲线的初步分析	43
二、非理想条件下电测深曲线的分析	46
三、定性图件的编制和分析	51
第四节 电测深资料的定量解释	57
一、理论曲线对比法	57
二、辅助量板法	63
三、其它定量解释方法	67
* 四、中间层电阻率的确定和各向异性系数校正	68
* 第五节 其它电测深法	70
一、三极测深法	70
* 二、环形测深法	71
三、五极纵轴测深	72
第四章 水文地质测井	75
第一节 视电阻率测井 (JDZ _L)	75
一、基本原理	75
二、电极系和测量方式	76
三、视电阻率测量曲线的特点和解释	77
* 四、微电极系测井 (JDZ _{LW})	84
第二节 自然电位测井 (JDHZ)	85
一、自然电位产生的原因	85
二、自然电位曲线的特征和解释	86
第三节 井液电阻率测井 (JDZY)	89
一、井液电阻率测量原理	89
二、静止水位法	90
三、提捞法	91
四、注入法	92
第四节 放射性测井 (JF)	94
一、放射性的基本知识	94
二、天然 γ 测井 (JFG)	95
三、 γ - γ 测井 (JFGG)	96
四、中子- γ 测井 (JFZG)	97
* 第五节 其它测井方法	99
一、钻井技术测井	99
二、井温测量	100

三、井中无线电波透视法	102
第五章 其它物探方法	104
第一节 其它地面电法	104
一、激发极化法	104
二、自然电场法	107
三、充电法	109
第二节 地震勘探	111
一、基本原理	111
二、初至折射波法资料的整理和解释	115
三、岩体声波探测	117
四、地震勘探的应用	118
第三节 放射性探测	121
一、天然放射性元素的迁移的富集	121
二、地面天然 γ 测量	121
三、 α 径迹测量	122
第六章 物探在水文地质调查中的应用	125
第一节 松散沉积层	125
一、洪积扇地区	125
二、河床阶地及古河道地区	127
三、滨海沉积区及内陆盐渍化区	129
四、黄土地区	132
第二节 基岩地区	136
一、寻找基岩裂隙水	136
二、寻找岩溶裂隙水	136
第三节 地下热水探测	140
参考文献	144

绪 论

在当前四化建设进程中,为工农业查明地下水资源,合理开发利用地下水是一项紧迫而繁重的任务。实践证明,地球物理勘探在水文地质调查中的地质效果和经济效益都十分明显,因而它已获得日益广泛的应用,并成为水文地质调查中必不可少的勘探手段。

一、物探方法的分类及其应用范围

地球物理勘探(简称物探)是用物理方法找矿及研究其它地质问题的一种重要的地质勘探手段。它是以地下岩(矿)石间存在物理性质的差异为基础,借助于专门的装置和仪器观测天然或人工物理场的分布,用以研究地质构造,寻找有用矿产和地下水源,以及解决其它地质问题的一门新学科。物探之所以能够用于研究各种地质问题,是因为不同的岩(矿)石常常具有明显不同的物理性质,例如磁铁矿具有很强的磁性,金属硫化矿具有明显的高导电性和电化学反应性,各类岩(矿)石间都存在密度差异等等。这些物理性质的差异能引起天然物理场(如磁场、电场等),或使人工物理场的分布与均匀岩石情况下有差别,这些统称为物探“异常”。用仪器测得异常,并研究物探异常与被探测对象间的内在联系,从而能解决一系列地质问题。这就是物探的实质。

由于可被利用的岩(矿)石物理性质的多样性,目前用于地学研究的物探方法很多。根据所利用的岩(矿)石物理性质,物探方法通常可以分成以下几大类:

1. 电法勘探

电法勘探(简称电法)是利用岩(矿)石电学性质之差异,观测和研究人工或天然电磁场的空间和时间分布规律,进行找矿和解决各种地质问题的一组物探方法。目前被利用的岩(矿)石电学性质主要有导电性(电阻率 ρ)、电化学反应性(激发极化特性和自然电位跃变)、介电性(介电常数 ϵ)和导磁性(磁导率 μ)。电法具有能利用的物性参数多,场源和装置形式多,观测要素多,以及应用范围广的特点。所以,针对不同地质任务,为适应不同地质条件,电法勘探在长期的生产实践中形成了许多分支和变种。表01是能用于水文地质调查的电法勘探分类简表。

2. 地震勘探

地震勘探是以各种岩石的弹性不同为基础,研究由人工爆炸(或锤击)在岩石中产生的地震波之传播规律,用以查明地质构造和解决水文地质工程地质问题的一种物探方法。地震波由震源(如爆炸点)出发向地下传播过程中,由于遇到不同弹性介质分界面发生反射和折射而返回地面。用专门的地震仪按一定的间距记录地震波返回地面接收点的旅行时间,用适当方法确定地层的波速,从而计算岩层的埋深和产状,并推断地质构造。反射波法和折射波法是地震勘探的两种基本方法,它们在方法技术上有很大的不同。地震勘探广泛用于寻找油、气和煤田构造,研究地壳的深部结构;在水文地质、工程地质勘察中,主要用来确定含水层的分布和岩土物理力学性质等地质问题。

3 放射性探测

放射性探测是基于测量岩(矿)石的天然和人工放射性强度,来寻找有用矿产及研究

表 01 电 法 勘 探 分 类 简 表

类别	场源性质	方 法 名 称		方法的主要变种	主要应用领域
直流电法(稳定电流场法)	人工电场	电阻率法	电测深法	对称四极测深	石油、煤田构造、 金属、水文工程地质
				三极测深	
				环形测深	
				五极纵轴测深	
			电测剖面法	对称四极剖面	金属、非金属水、文 工程地质、地质填图
				复合四极剖面	
				联合剖面	
				中间梯度	
		充 电 法			金属、水文地质
		直流激发极化			金属、水文地质
天然电场	自然电场法			金属、水文地质	
	声频大地电流法			金属、水文地质工 程地质、地质填图、 石油构造	
	频率测深法				
	无线电波透视法				
地质雷达					
交流电法	人工电场				

其它地质问题的一种物探方法。岩(矿)石均或多或少地含有微量的天然放射性元素;岩石中的天然放射性元素在不同的物理化学条件下经地下水的长期作用,将发生迁移和富集;不同地质体在人工放射性照射下的反应也不相同。这些都为用放射性测量寻找有用矿产、探测地下水源以及研究其它地质问题提供了物理前提。

4. 地热探测法

地热能由地球内部源源不断地向地表传导,形成天然地热场。地热探测法是以岩石热传导性质的差异为基础,通过测量并研究天然或人工地热场的分布规律,来推断地质构造和解决水文地质问题的一种物探方法。岩石中温度场的形成取决于岩石的温度特性和构造,并在很大程度上与地下水的运移特点有关。充满于孔隙和裂隙中运动着的地下水,能加速地热能的对流和迁移,从而形成热异常。故地温测量是一种有效的水文地质调查方法。

5. 重力、磁力测量

重力勘探是以岩(矿)石的密度差异为前提,用高精度重力仪测量地面各点的重力〔注〕异常,来调查地质构造和矿产分布的一种物探方法。局部地质体的密度与围岩有差别时,将使重力分布与区域正常重力分布产生偏差,这种偏差称作局部重力异常;它总与地壳上层的地质构造和有用矿产有关。所以重力勘探在寻找金属矿产和预测油气构造方面得到广泛的应用。

〔注〕 这里的重力系指单位质量的质点所受地球引力和离心力的合力,即重力加速度 g 。

磁法勘探是最常用的物探方法之一。自然界的岩石和矿石具有不同的磁性,这就使得磁场在局部地区发生变化,出现磁异常。利用磁力仪测量,发现并研究磁异常,进而寻找有用矿产和推断地质构造的方法称作磁法勘探。它主要用来探测与磁性矿物有关的金属矿,进行地质填图,研究与油气相关的地质构造。

重、磁测量在水文地质调查中应用较少。它们主要用来预测与区域水文地质有关的地质构造和深部断裂。此外,在有利的条件下,高精度重力测量可以探测溶洞的位置,微磁测量可以寻找挡水岩脉,圈定火成岩体强风化壳的分布范围。

按照不同的测量空间,物探又可分为地面物探、海洋物探、航空物探和地下物探。地下物探主要在钻孔和坑道中观测。在钻孔中进行的各种物探测量总称为地球物理测井,其主要任务是研究井壁周围岩层的状态和性质,划分钻孔地层剖面 and 了解地下水的活动规律。

二、水文物探在水文地质调查中的作用和地位

应用于水文地质调查的各种物探方法总称为水文物探,它与用于其它地质勘探领域的物探方法一样,是一组探索性较强的综合勘探手段。目前在水文地质调查中应用最广的是直流电法中的电阻率法和地球物理测井,本课程重点介绍这方面的内容。

在水文地质调查的各个阶段,特别是普查和详查阶段,水文物探可以用来解决以下地质问题:

1. 查明第四系孔隙含水层分布、厚度及埋藏深度,寻找古河道,区分并圈定咸淡水的范围;
2. 探测基岩的起伏和埋深,确定隐伏构造的位置,查明断层破碎带及岩溶的发育规律;
3. 探查控制地下热水泄露的断裂构造,圈定热矿水的分布范围;
4. 测定地下水的流速流向,分析地下水的补给、排泄和径流条件;
5. 划分钻井地质剖面 and 咸、淡水界线,确定地下水矿化度,研究地下水的活动规律。

水文物探无论在第四系孔隙水分布区、基岩地区、岩溶发育区和地热开发区,只要具备一定的地质、地球物理条件,都能取得较好的地质效果。

图01是河北吴桥县某地用电测剖面法圈定古河道的成果图。由于古河道中富水砂层与周围粘土电阻率有明显的差异,因此剖面平面图上高电阻异常呈带状分布,并在北部分成两个叉枝,清楚地反映了古河道的分布范围和走向,为打井提供了可靠的依据。

又如广东某地用电阻率剖面法在隐伏火成岩体上,追索控制地下热水的断层破碎带取得了令人满意的地质效果(见图02)。图中,在断裂破碎带上 ρ_1^s 和 ρ_2^s 曲线出现明显的低阻异常带和低阻交点,并与100m深温度曲线的高温异常相对应。

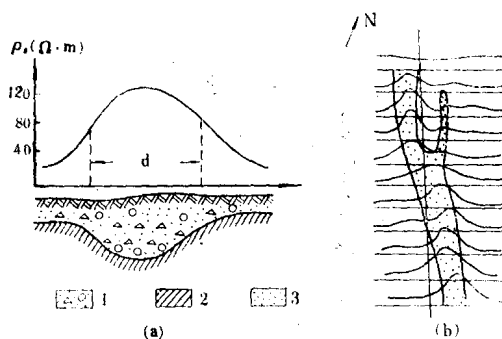


图 01 用电测剖面法圈定古河道
(a) 某一测线 ρ_s 、地质综合剖面图; (b) ρ_s 剖面平面图

1—砂卵石; 2—砂粘土; 3—推断的古河道

再如图03是广西某地在石炭系灰岩中寻找岩溶水的一条电阻率测深曲线。若粘土层之下为致密完整石灰岩，则曲线在 $AB/2$ 大于30m之后应按图中虚线所示的直线上升。但

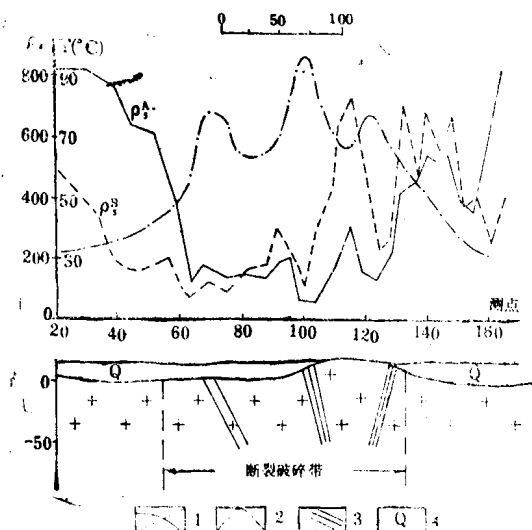


图 02 广东某温泉物探地质综合剖面图
1— ρ_s 曲线； 2—100米深温度曲线； 3—热水出露断裂； 4—第四系覆盖层

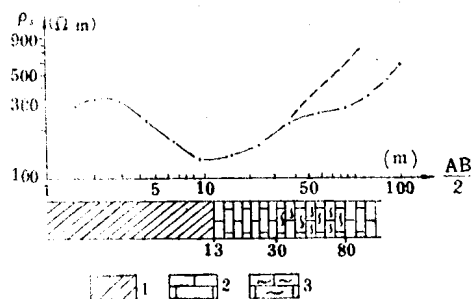


图 03 寻找岩溶裂隙水的电测深曲线
1—粘土； 2—完整灰岩； 3—岩溶裂隙灰岩

曲线中段上升缓慢，尾部又呈 45° 上升。推测曲线缓慢上升段为岩溶裂隙富水带的反映。后经钻探证实，孔深30~80m岩溶裂隙发育，涌水量达1920t/d(吨/日)。

图04是于南京某地用放射性探测在红层中寻找断层裂隙水的例子。区内大部分为覆盖

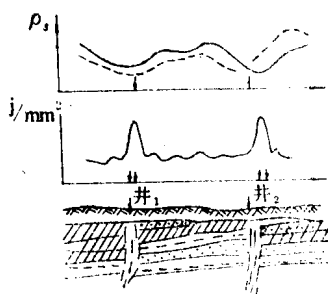


图 04 南京某地物探地质综合剖面图
(a) 联合剖面曲线；
(b) α 径迹剖面曲线

6~10m厚粘土层的高岗地，下伏白垩系浦口组暗红色泥岩、泥质砂岩和粉砂岩。由图可见，在剖面上相距90m处， α 径迹测量出现两个明显的径迹密度异常，且 ρ_s 和 ρ_{α} 曲线在相应位置上显示同步下降的低阻异常或低阻交点。据此，在异常处分别布置井₁和井₂，钻探结果均见有破碎带，岩芯裂隙发育；井₁的涌水量达819t/d，井₂的涌水量为766t/d。

用物探解决水文地质问题有它独特的优越性。首先，以上实例说明，物探可以透过覆盖层了解深部的地质情况，具有“透视性”的优点。其次，它具有工作效率高，装备轻便和成本低的优点。物探不但可以在大区域内进行面积性的工作，而且是一种大体积的宏观地质勘探手段。因此，水文物

探已经成为水文地质勘察中必不可少的勘探手段。

但是，水文物探不是直接观察含水岩层、储水构造或地下水，而是观测它们在地面产生的地球物理场的异常来达到找水目标。所以，它毕竟是一种间接的勘探手段，有一定的局限性。物探方法的有效性，首先决定于被探测对象与围岩是否具有明显的物性差异和被探测对象的规模大小，以及在现有技术条件下能否把异常从各种干扰因素中分辨出来。换言之，必须具备一定的地质、地球物理条件，物探才有可能取得预期的地质效果。其次，同一物理现象可以由多种不同地质因素所引起，这就使物探异常的解解释出现多解性。因

此,除了少数简单情况外,要想凭借某一种物探异常作出单一的地质结论是困难的。为了取得预期的地质效果,必须根据具体的地质、地球物理条件,合理采用综合物探方法,密切结合地质和钻探资料进行深入细致的分析和研究,及时采用钻探和山地工程验证物探异常;否则是难以奏效的。

综上所述,可见物探工作绝不能完全替代其它地质勘探手段。它的作用是普查储水地质体,配合进行水文地质填图,以及进行水文地质参数和岩土工程力学参数的测定。利用它可使勘探工程布置得更加合理,减少钻探和山地工作量,加快勘探工作的速度。因此,在生产实践中,当具备应用水文物探的地质、地球物理条件时,必须充分发挥水文物探的优势,不失时机地恰当选择物探方法;在地质、地球物理条件不利甚至根本不具备时,又绝不要勉强使用物探方法。

三、水文物探发展简史

在世界范围,到本世纪三十年代后,物探方法才开始用来解决某些水文地质和工程地质问题。近年来,一些国家的水文地质工程地质物探方法已经迅速发展成为地球物理勘探中的一个分支学科。

解放前我国的水文物探工作还是空白。新中国成立以后,随着社会主义建设和科学技术的发展,物探技术也得到迅速发展,并广泛应用于水文地质和工程地质领域。早在1950年,顾功叙先生就亲自指导利用电法勘探为北京钢铁基地寻找地下水源。五十年代,地质系统和其它建设部门相继开展了水文物探工作,有的还成立了水文工程物探专业队。值得提出的是,山西省水利厅及其下属地、县水利局,在五十年代后期就因简陋就开展了大量的水文物探工作,并取得了较好的地质效果,为干旱、半干旱地区寻找地下水源作出了贡献。六十年代和七十年代,水文物探有了较大的发展。现在,全国建立了许多水文物探专业队伍,一些省(市)尤其是干旱、半干旱地区,群众性电法找水工作得到了普及,并取得了大量的成果和丰富的经验。很多地质研究所都有技术干部从事与本专业有关的水文地质和工程地质物探专题研究,有的还成立了专业研究所或研究室。近年来,许多水文地质工程地质队装备了先进的物探仪器和微型电子计算机,为水文物探的参数测定、数据处理和异常解释,提供了更加有利的条件,进一步扩大了它的应用范围。

水文物探的技术水平及其在水文地质调查中的地质效果和经济效益,是衡量水文地质工作现代化水平的标志之一。目前,水文物探的很多成果解释还处于定性阶段,一些方法的理论尚需进一步研究,许多新的课题有待进一步探索,所有这些都需要水文物探和水文地质人员去努力解决,使水文物探方法日臻完善,水平不断提高。

第一章 电阻率法的基本原理

电阻率法是以岩（矿）石的电阻率差异为基础，研究人工稳定电流场在地下介质中的分布和变化规律，用以查明地质构造，寻找地下水和有用矿产，以及解决其它地质问题的一组电法勘探方法。它在水文地质、工程地质调查中应用广泛，地质效果良好。用电阻率法解决地质问题，必须首先了解和掌握天然状态下岩石的电阻率，稳定电流场在地下的分布规律以及视电阻率的概念，这是本章叙述的主要内容。

第一节 岩石的电阻率

一、岩石电阻率的概念

在物理学中用下式表示一个导体的电阻

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (1-1-1)$$

即电流沿着导体的长度方向通过时，该导体的电阻(R)与其长度(L)成正比，与横截面积(S)成反比，它们之间的比例系数(ρ)称作组成该导体物质的电阻率（见图1-1-1）。

由于这个比例系数仅仅决定于物质的性质及其所处的物理状态（例如温度等），与物体的形状、大小以及通电方式无关。因此，电阻率是表示物质导电性能的物理量。

岩石的导电性能也用电阻率来表示。岩石电阻率越大，导电性能越差；电阻率越小，导电性能越好。由式（1-1-1）可知，对边长为1米的正立方体岩石，当垂直其一对截面通电时所测得的电阻（见图1-1-2），在数值上等于该岩石的电阻率。其单位为“ $\Omega \cdot m$ ”（欧姆米）。

自然界中，物质的导电方式一般可以分为电子导电和离子导电。前者的电阻率取决于其中自由电子的多少，后者取决于溶液的性质和浓度。

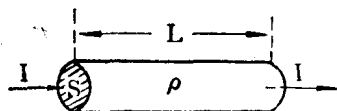


图 1-1-1 一个物体的电阻

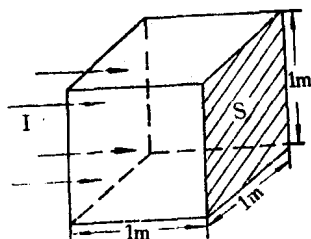


图 1-1-2 岩石的电阻

金属元素和固体矿物主要是借助于其中的自由电子来导电。由于天然矿物内部分子结构的不同，导电性差异很大。绝大部分金属硫化物、石墨和部分金属氧化物的电阻率最低（小于 $1\Omega \cdot m$ ）；造岩矿物的电阻率最高（大于 $10^6\Omega \cdot m$ ）。表1-1列出了主要矿物的电阻率值。

岩石是靠离子来导电的，生产实践和试验研究表明，不同种类岩石的电阻率存在差别，

表 1-1 矿 物 电 阻 率($\Omega \cdot m$)

良 导 电 性 矿 物		中 等 导 电 性 矿 物		不 良 导 电 性 矿 物	
$10^{-6} \sim 10^{-8}$	$10^{-8} \sim 1$	$1 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^6$	$>10^6$	
斑 铜 矿	黄 铜 矿	菱 铁 矿	铬 铁 矿	云 母	石 英
铜 兰	辉 钼 矿	软 锰 矿	闪 锌 矿	萤 石	方 解 石
磁 铁 矿	黄 铁 矿	黑 钨 矿	褐 铁 矿	长 石	石 榴 石
磁黄铁矿	辉 铜 矿	辉 金 矿	钛 铁 矿	辉 石	角 闪 石
石 墨	方 铅 矿	辉 铋 矿	蛇 纹 石	霞 石	石 青

有的差别十分明显(见表1-2)。一般地说,火成岩的电阻率最大,变质岩次之,沉积岩最

表 1-2 岩 石 电 阻 率

岩类	岩 石 名 称	电 阻 率($\Omega \cdot m$)	岩 石 名 称	电 阻 率($\Omega \cdot m$)
火 成 岩	花 岗 岩	$3 \times 10^2 \sim 10^6$	闪长斑岩	$1.9 \times 10^3(\text{湿}) \sim 2.8 \times 10^4(\text{干})$
	花岗斑岩	$4.5 \times 10^3(\text{湿}) \sim 1.3 \times 10^6(\text{干})$	熔 岩	$10^3 \sim 5 \times 10^4$
	正 长 岩	$10^2 \sim 10^6$	辉 长 岩	$10^3 \sim 10^6$
	闪 长 岩	$10^4 \sim 10^5$	玄 武 岩	$10 \sim 1.3 \times 10^7(\text{干})$
变 质 岩	片 岩	$20 \sim 10^4$	片 麻 岩	$6.8 \times 10^4(\text{湿}) \sim 3 \times 10^6(\text{干})$
	石墨片岩	$10 \sim 10^2$	大 理 岩	$10^2 \sim 2.5 \times 10^3(\text{干})$
	板 岩	$6 \times 10^2 \sim 4 \times 10^7$	石 英 岩	$10^3 \sim 2 \times 10^8$
沉 积 岩	粘 土	$1 \sim 10^2$	泥 灰 岩	$10^0 \sim 10^2$
	泥 岩	$10 \sim 10^2$	石 灰 岩	$10^2 \sim 10^4$
	冲积层和砂	$10 \sim 10^3$	固结页岩	$20 \sim 2 \times 10^3$
	砂 岩	$10 \sim 10^3$	粉 砂 岩	$10 \sim 10^2$
	砾 岩	$10 \sim 10^4$	白 云 岩	$3.5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^3$

低。但是,沉积岩中的化学沉积岩,如岩盐、石膏和碳酸盐类的石灰岩等,它们的电阻率相当大。某些变质岩,如石墨片岩等的电阻率却很小。应该指出,即使是同一种岩石,其电阻率也是在一定的范围内变化。

不同类型水的电阻率也是不同的(见表1-3)。而地下水的电阻率还与它的矿化度和温度有着密切的关系。

表 1-3 水的电阻率

名 称	电 阻 率($\Omega \cdot m$)	名 称	电 阻 率($\Omega \cdot m$)
雨 水	$>10^3$	海 水	$n \times 10^{-1} \sim n \times 10^0$
河 水	$n \times 10^{-1} \sim n \times 10^2$	热 矿 水	$n \times 10^0$
潜 水	$<10^2$	深成盐渍水	$n \times 10^{-1}$

由表1-2可知,岩石的电阻率没有一个固定的数值,而是在一个较大的范围内变化。有时甚至在同一地区,同样一种岩石的电阻率也会发生变化,即出现岩石电阻率不稳定的情况。一个地区各岩层的电阻率是否相对稳定并有明显的电阻率差异,是电阻率法能否取得良好地质效果的物理前提。因此有必要讨论影响岩石电阻率的因素。

二、影响岩石电阻率的主要因素

岩石的电阻率与组成岩石的矿物成分、结构构造、孔隙度及其中含水程度与矿化度等因素有关。

(一)岩石电阻率与矿物成分的关系

由表1-1可知,不同矿物的电阻率并不固定,它随着组成矿物的物质成分及其内部结构的不同在相当大的范围内变化。由于岩石和矿石都是由各种矿物组成的,因此它们的电阻率随着矿物成分及其含量的变化而有明显的差异。金属硫化物、部分金属氧化物和石墨等,与岩石相比具有很低的电阻率。

火成岩,沉积岩和变质岩,多数是由造岩矿物组成。重要的造岩矿物,如石英,云母,长石,角闪石,方解石等的电阻率高达 $10^6 \Omega \cdot m$ 以上。一般说来,在干燥状态下火成岩、沉积岩和变质岩的电阻率都很高。由于组成火成岩的斑晶和基质的导电性很差,所以火成岩的电阻率很高。沉积岩碎屑颗粒的电阻率比较高,其导电性取决于胶结物的电阻率:钙质胶结沉积岩的电阻率很高,泥质胶结沉积岩的电阻率较低。变质岩的电阻率与原岩的电阻率和变质程度密切相关。只有少数岩石含有相当数量连续分布的良导电矿物,才有很低的电阻率,如碳质页岩、石墨化页岩等。然而,如果岩石含水,则其电阻率将降低,故岩石电阻率一般与矿物成份的关系不大,而主要决定于岩石孔隙中地下水的含量和性质。

(二)岩石电阻率与孔隙水的关系

岩石中存在着或多或少的孔隙。岩石经过构造运动和某些地质作用,常常形成构造裂隙、岩溶裂隙和风化裂隙。岩石中的孔隙、裂隙及溶隙,是地下水赋存和活动的场所,而地下水中常常含有各种盐类的离子,即有一定的矿化度。含有一定地下水的岩石,其电阻率比致密完整或干燥岩石的电阻率要低得多。由于地下水呈良导性物质充填于岩石的孔隙、裂隙和溶隙中,彼此连通,就大大改变了岩石的导电性。因此岩石的电阻率主要决定于孔隙度(或裂隙率、岩溶率)、含水量和矿化度。

从表1-4中可以看出,水溶液的电阻率与盐类的成份关系不大,基本上决定于矿化度。在孔隙度(裂隙率、岩溶率)、含水量一定的条件下,矿化度越高,岩石的电阻率就越低,矿化度越低,则电阻率越大。地下水的矿化度变化范围很大,淡水矿化度低至 $0.1g/L$ (克/升),咸水可高达 $10g/L$,含不同地下水的岩石,其电阻率亦随之有明显的变化。因此,在岩性条件和富水程度变化不大的情况下,有可能在地面或井中用电阻率法确定咸、淡水

表 1-4 地下水中常见盐类水溶液的电阻率与矿化度的关系表

矿化度 (g/L)	地 下 水 电 阻 率($\Omega \cdot m$)			
	NaCl	KCl	MgCl ₂	CaCl ₂
0.010	511	578	438	483
0.100	55.2	58.7	45.6	50.3
1.000	5.83	6.14	5.06	5.56
10.000	0.657	0.678	0.614	0.666
100.000	0.0809	0.0776	0.0936	0.0930
纯 水	25×10^4	25×10^4	25×10^4	25×10^4

的层位和界线。

孔隙度(裂隙率、岩溶率)的大小及水文地质环境是岩石能否含水和含水多少的先决条件。一般来说,当岩石的含水饱和度和矿化度一定时,孔隙度越大,则富水性越好,电阻率也越低。

孔隙度、含水量和矿化度对岩石电阻率的影响是互相关联、不可分割的。表1-5列举了松散冲积物电阻率的实验数据,它反映了电阻率同岩性、孔隙度及矿化度诸因素的关系。

表 1-5

岩性和孔 隙度(%) 矿 $\rho(\Omega \cdot m)$ 化度(g/L)	15%~25% 砂 砾 石	25%~35% 粗 中 砂	30%~40% 细 粉 砂	40%~50% 粘土、亚粘土
1	150~75	70~30	40~25	25~20
2	90~45	45~18	24~15	15~12
3	60~30	30~12	16~10	10~8
4	30~15	15~6	8~5	5~4
5	18~9	9~3.6	4.8~3	3~3.2

由于渗透性和持水度不同的影响,第四系松散沉积物的电阻率与孔隙度、富水性的关系比较复杂。干燥砂砾石的电阻率高达几千欧姆米,饱水砂砾石的电阻率显著下降。在同样饱水情况下,粗颗粒的砂砾石电阻率比细颗粒的细砂、粉细砂高。粗颗粒砂砾石的孔隙大,地下水的渗透性好,持水度低,径流强度大,因持续的溶滤作用常常形成以难溶的 HCO_3^{1-} 及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主的低矿化水。因此,粗颗粒砂砾石的电阻率比细颗粒的细砂、粉细砂高。具有结构空隙的粘土,其孔隙度很大,看起来似乎有利于水的贮存。但是粘土的给水度很小或等于零;从岩石的渗透性来看,粘土的孔隙直径小,由于结合水的缘故,其孔隙的渗透断面很小,重力水所能达到的最大流速也很小,因此其中的孔隙水呈停滞状态。这样粘土孔隙水中可溶性盐类的长期积累,使其矿化度增高,电阻率变低。在第四系地层中,砂砾石含水层(淡水层)相对于粘土类隔水层,总是呈现高电阻率反映。鉴于上述电性特点,通常采用地面电阻率法和电阻率测井探测并划分含水层与隔水层,判断其富水性。

坚硬岩石在成岩和长期的地质历史中,由于内力和外力地质作用,形成构造裂隙、风化裂隙和成岩裂隙;碳酸盐类等可溶性岩石发育有溶洞、溶隙、地下暗河等。当裂隙、风化裂隙和溶洞中充填了不同矿化度的地下水或粘土类物质,此时与完整岩层相比,它们的电阻率显著降低;如果它们处在潜水面之上,为无限大电阻率的空气所充满,则电阻率急剧增大。人工开挖的地道、井巷以及大型古墓穴也有类似的情况。坚硬岩石的这些电性特点为电阻率法寻找基岩裂隙水和岩溶水提供了地球物理依据。

(三) 岩石电阻率与结构构造的关系

除了良导电矿物的含量外,矿物的颗粒大小和分布状况也影响岩石的电阻率。当良导电矿物孤立地分散在非良导电矿物中,呈不连续状态,则电阻率较高;良导电矿物呈连续状态分布于非良导电矿物之中时,电阻率较低(见图1-1-3)。

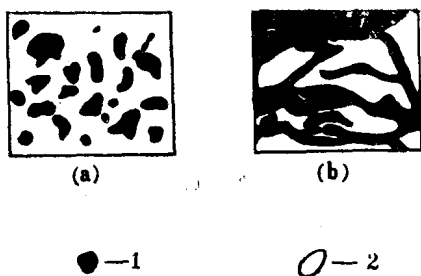


图 1-1-3 岩石中矿物分布示意图

1—良导电矿物; 2—不良导电矿物

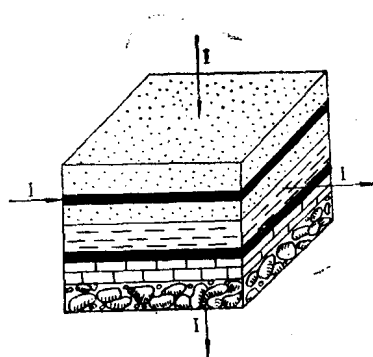


图 1-1-4 岩石各向异性示意图

在任何点上和任何方向上,电阻率都相同的岩石称均匀各向同性岩石。具有层理、页理、片理构造的沉积岩和变质岩,当沿不同方向通电时,其电阻率不同:沿层理方向通电时测得的电阻率小,称其为纵向电阻率,用 ρ_l 表示;垂直层理方向通电时测得的电阻率大,称作横向电阻率,用 ρ_h 表示。这种沿层理方向和垂直层理方向电阻率不同的性质,称作岩石电阻率各向异性(见图1-1-4)。

常用“平均电阻率”来表示各向异性岩石的电阻率,即

$$\bar{\rho} = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_h} \quad (1-1-2)$$

各向异性程度则用各向异性系数“ λ ”表示,即

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_h}{\rho_l}} \quad (1-1-3)$$

假设岩系(或岩层)由已知电阻率为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$,厚度为 $h_1, h_2, \dots, h_n$ 的各向同性薄层岩石所组成,且总厚度为 H 。从岩系中取一高为 H ,底面(平行层理)面积为1平方米的直角平行六面体,如图1-1-5所示,根据并联和串联电路的理论,岩系的纵向电阻率 ρ_l 为

$$\rho_l = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}} = \frac{H}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}} \quad (1-1-4)$$

横向电阻率 ρ_h 为