西北地区孔隙地下水矿化度评价的地球物理方法研究与应用

郭建强 武 毅 曹福祥 朱庆俊

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北保定)

摘 要 地层电阻率值是目前地球物理方法评价地下水矿化度唯一有效的参数,文中分析了影响地层电阻率诸因素的特点和规律,给出了应用地层电阻率值评价孔隙构造地层地下水矿化度的定量关系和评价方法,同时例举了在西北典型地区应用的实例。

关键词 电阻率值 矿化度 地下水 西北地区

西北地区碎屑岩类沉积分布面积广、厚度大,赋存于其中的孔隙类地下水不仅在数量上占主导地位,而且也是这类地区可依赖的最主要的水资源。该地区包括塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地、河西走廊、黄土高原、鄂尔多斯盆地等。孔隙类地下水资源从地质时代上主要为白垩系、第三系的碎屑岩类孔隙地下水以及第四纪以来的松散岩类孔隙地下水,由于地质历史时期的气候、地理条件的变迁,使得这类地下水矿化度在时空分布上呈现一定的复杂性。主要的淡水资源仅赋存于山前倾斜平原、现代河道或'古'河道两侧以及古湿润环境沉积层之中。应用地球物理方法在广泛的咸水分布区内确定淡水资源的存在特征以及形成演化规律是西北地区地下水资源勘查工作的一项重要内容。

1 地层电阻率及表达式

1.1 地层视电阻率的概念

电阻率是表征物质导电性好坏的参数,物质的电阻率越低,其导电性越好;反之,若物质电阻率值越高,则其导电性越差。大地电阻率的测定目前有 2 种方法,即常用的直流电阻率测量和交流电阻率测量,表达式分别为:

$$(\text{直流电阻率})\ \rho = K\frac{\Delta V}{I} \tag{1}$$

$$(\text{交流电阻率})\ \rho = \frac{1}{\omega\mu}|Z|^2 \tag{2}$$

式(1)中 ΔV、I 分别为直流观测的电压(V)和电流值(A);K 是与观测系统电极位置有关的系数,称装置系数,对不同的装置 K 为常数。式(2)中 ω 为电磁场频率;μ 为磁导率;Z 为波阻抗;等于平面极化波正交电场分量与磁场分量的比值。

对于地面为无限大水平面,地下充满均匀各向同性的导电介质时,上两式测得的电阻率为大地电阻率。然而,实际上并不满足上述条件,地下介质是不均匀、地形起伏、相互重叠、断层裂隙纵横交错的。所以,上式求得的电阻率并非地层真电阻率,我们称其为地层视电阻率,用 ρ_s 表示。地层视电阻率是地下所有岩体综合作用的结果。一般 ρ_s 不等于任何岩体的电阻率值。它与地下不均匀体的分布状态和各个不均匀体的真电阻率有关。

1.2 孔隙构造地层电阻率

根据岩石的质量(结晶格架密度)和体积(孔隙度)对岩性密度、波速和电阻率的影响,可将岩石分为孔隙构造和致密构造 2 个亚类(万明浩、秦顺亭,1994)。

对大多数岩石均可视为均匀相连的胶结物与不同形状的矿物颗粒组成。岩石的电阻率决定于这些胶结物和颗粒的电阻率、形状及相对含量。设胶结物的电阻率为 ρ_1,颗粒电阻率为 ρ_2,当岩石由这两种矿物组成时,其电阻率 ρ 与 ρ_1、ρ_2 及颗粒的百分比含量 B 有关。由于致密构造岩石对孔隙地下水研究意义不大,故在此仅讨论孔隙构造岩石的电阻率的影响因素。对孔隙构造岩石而言,其颗粒形状以球形颗粒为主,根据麦克斯韦方程,可得 ρ 与 ρ_1、ρ_2 及颗粒百分含量 B 的关系式为(傅良魁,1983):

$$\rho = \rho_1\frac{(\rho_1+2\rho_2)-(\rho_1-\rho_2)B}{(\rho_1+2\rho_2)+2(\rho_1-\rho_2)B} \tag{3}$$

本文由原地质矿产部'九五'重点科技攻关项目(编号 9505109)资助。
责任编辑:宫月萱。

第一作者:郭建强,1964 年生,高级工程师,从事水文物探技术研究,邮编:071051。

万方数据

或
$$\rho = \rho_1 \frac{3\rho_2 + (\rho_1 - \rho_2)\varphi}{3\rho_1 - 2(\rho_1 - \rho_2)\varphi} \tag{4}$$

式(4)中 $\varphi = 1 - B$ 为岩石的孔隙度。

由上式可以看出,整个岩石的电阻率(ρ)受 ρ_2 之影响甚小,仅当颗粒体积含量相当大($B \geqslant 60\%$)时,ρ_2 才对 ρ 有明显作用。这是由于颗粒体积含量不大时,各颗粒是相互分离的,而胶结物是彼此连通的,故矿物颗粒整体岩石电阻率的影响不大,此时胶结物起着导电作用。

各类岩石的主要造岩矿物的化学成分为 SiO_2,而沉积岩的主要矿物成分为石英、白云母、粘土矿物等。因此,其电阻率 ρ_2 远远大于水的电阻率。对于大部分松散类沉积岩,其地层的胶结物实际是地下水,故 $\rho_1 = \rho_{水}$,将 $\rho_2 > \rho_1$ 的关系代入式(4)得:
$$\rho = \rho_{水} \frac{3 - \varphi}{2\varphi} \tag{5}$$

式(5)表明,对纯净不含泥质的松散类沉积层,其电阻率是由地层孔隙度和充填其中水的电阻率构成,对于广泛意义上的孔隙构造地层,其地层电阻率与水电阻率之间的关系可以表达为:
$$\rho_{含水} = P \cdot \rho_{水} \tag{6}$$

式(6)中 $\rho_{含水}$ 是岩石完全含水时的电阻率,P 为相对电阻率(孔隙参数)(万明浩、秦顺亭,1994),即孔隙构造地层的电阻率由孔隙参数和地层中水的电阻率决定。

2 孔隙参数

对于纯净不含泥的岩石,孔隙参数与孔隙结构有关,而与孔隙所含水的矿化度无关。孔隙参数与孔隙度 φ 的关系可用经验公式表达:
$$P = \frac{a}{\varphi \cdot m} \quad \text{(达哈诺夫公式)} \tag{7}$$
$$P = \frac{1}{\varphi \cdot m} \quad \text{(阿尔奇公式)} \tag{8}$$

式中 a,m 是反映孔隙空间结构的经验系数,具体到某一种类型的沉积岩是常数(达哈诺夫公式广泛适用于孔隙度从 3% ~ 5% 至 30% ~ 40% 的介质)。对松散纯净沉积,其 P 值为$(3 - \varphi)/2\varphi$。

对于含泥质的岩石,孔隙参数的数值将与其饱和液体的矿化度 C 有关。此时,孔隙参数由(岩石颗粒表面的)偶电层的表面电导率所决定,可用表面电导系数 G 表示:
$$G = \frac{P_\varphi}{P_n} \tag{9}$$

式中 P_φ 为当岩石饱和高电阻水(淡水)时孔隙参数的虚拟值,P_n 为当岩石在饱和盐水(矿化度为极大值,对 NaCl 溶液,这一矿化度极限值为 $C = 4 \sim 5$ mol 所充满时,所观测到的孔隙参数的最大值。

对含有泥质的松散碎屑沉积而言,G 小于 1,即由于泥质的存在,降低了孔隙参数,而且泥质含量越大,P 值越小。

3 影响地下水电阻率的主要因素

假设地下水的电阻率 $\rho_{水}$,其值由下式决定(傅良魁,1983):
$$\rho_{水} = \frac{1}{e^+ n^+ v^+ + e^- n^- v^-} \tag{10}$$

其中 n^+ 和 n^- 为水中的正负离子数;e^+ 和 e^- 为每个正、负离子所带的电量;v^+ 和 v^- 为正负离子的迁移速度。上式表明,水中导电离子数目的电荷量以及迁移速度越大,则岩石电阻率值越低,反之则高。由此可以看出,影响水电阻率的主要因素是水的矿化度和温度即矿化度高离子含量高,温度高离子迁移过度大。

3.1 矿化度对地下水电阻率的影响

电阻率随着水矿化度的增长呈线性下降,这对任何盐类都一样。水的矿化度最有代表性的变化是 0.01 ~ 1 g/L,这样大小的变化可使水的电阻率变化 100 倍,但在有盐溶液存在的情况下,则可达几个数量级。图 1 示出电阻率与溶盐的成份的关系曲线,在水中含有与 NaCl 的数值相等的 KCl、$CaSO_4$ 或 $CaCl_2$ 时,水的电阻率变化不大,但若水中溶解有 HCl 时,则其电阻就大不相同;在 HCl 和 NaCl 浓度相同时,水的电阻率在第一种情况下减少 5 倍。

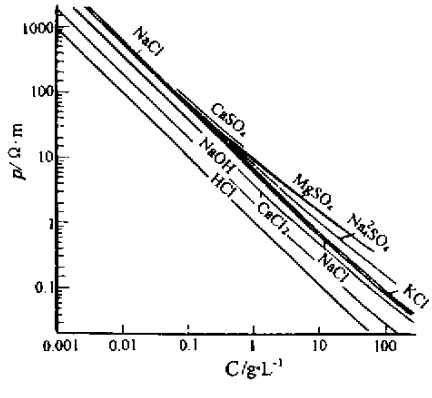


图 1 各种溶液的电阻率与其矿化程度的关系

Fig.1 The relation between the resistivity of many kind solutions and salinity

(根据 B.H.达赫诺夫)

设水的矿化度为 $C_{水}$,那么对不同的溶液,其溶液的电阻率满足:

万方数据

$$\log\rho_{水} = a + b\log C_{水} \tag{11}$$

其中 b 为一常数,a 为一与温度有关的系数。

3.2　温度对地下水电阻率的影响

一般认为,温度对地下水电阻率的影响包括 2 部分:①由于温度升高离子活性增加,导致电阻率降低;②温度升高引起地下水中离子浓度增加造成电阻率值降低。而对于温度大于 0 ~ 200 ℃温度范围内,水溶液的电阻率与温度的关系为:

$$\rho(t) = \frac{\rho(18)}{1 + \alpha(t - 18)} \tag{12}$$

其中 $\rho(t)$ 为温度 t ℃时溶液的电阻率;$\rho(18)$ 为温度 18℃时溶液电阻率;α 为温度系数(大多数电解质为 0.025)。

上式表明,水溶液电阻率随温度的变化不受水溶液矿化度的制约。无论矿化度多大,均满足式(12)。水溶液的电阻率以 18 ℃为界限,温度大于 18 ℃时,电阻率值开始下降;小于 18 ℃时,电阻率值开始上升。对于某一矿化度的水溶液而言,$\rho_w(18)$ 为一常数,表 1 给出 18 ℃时,不同矿化度水溶液的电阻率值。

图 2 是几个不同温度下 NaCl 溶液与矿化度之间的关系曲线,由图可见不同温度时 NaCl 溶液与矿化度的曲线在双对数坐标中为一组互相平行的直线。由式(12)可以看出,各条直线的斜率 b 是相同的,而截距 a 仅与温度有关。

表 1　18 ℃时不同矿化度水溶液的电阻率值

Table 1　The resistivity of aqueous solution with different salinity in 18 ℃

矿化度/g·L^{-1}	电阻率/Ω·m	矿化度/g·L^{-1}	电阻率/Ω·m
12.6	0.54	1.48	4.0
10.76	0.6	1.27	4.5
9.44	0.7	1.16	5.0
8.32	0.8	0.96	6.0
7.2	0.9	0.84	7.0
6.36	1.0	0.72	8.0
4.2	1.5	0.64	9.0
3.4	2.0	0.55	10
2.42	2.5	0.37	15
2.00	3.0	0.276	20
1.68	3.5	0.216	25

由表 2 可知,温度 18 ℃时,C = 1 g/L 时,ρ = 5.6 Ω·m,那么,任意温度(0 ~ 200 ℃)a 值为:

$$a = \log\rho(t) = \log\frac{5.6}{1 + \alpha(t - 18)}$$

万方数据

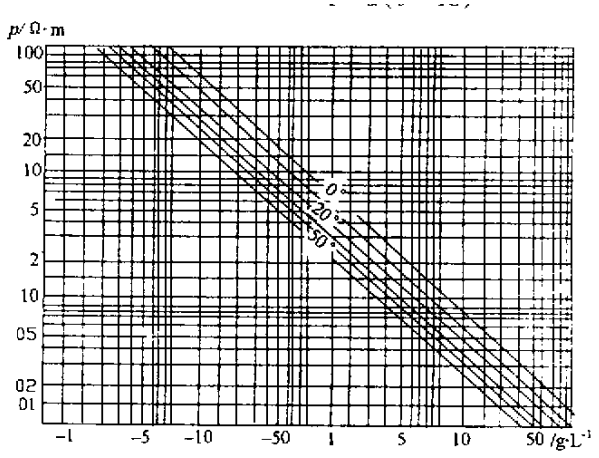


图 2　不同温度下氯化钠浓度和溶液电阻率间的关系曲线

Fig.2　The relational curve between NaCl Concentration and solution resistivity at different temperature

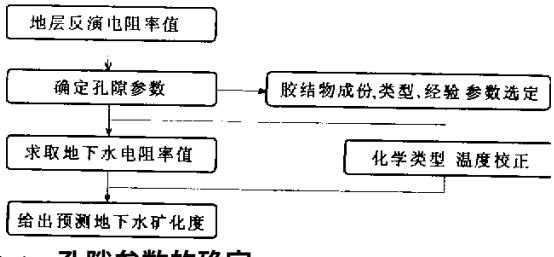
故可得由矿化度和温度同时作用时,水溶液的电阻率表达式:

$$\rho = \frac{5.6}{1 + \alpha(t - 18)} \tag{13}$$

式中 C 为地下水矿化度(g/L),t 为温度(℃),b = −0.95,α = 0.025。

4　地下水矿化度的评价方法

实际观测并反演后的电阻率,代表着一定范围内地层的真实电阻率值,由其值进行地下水矿化度的求取实际上是一个反问题,基本评价过程如下:



4.1　孔隙参数的确定

如把公式(5)中的 $3 - \varphi/2\varphi$ 项定义成颗粒状沉积物的相对电阻率 P 的话,则 P 值主要取决于沉积地层的孔隙度。φ 值越大,P 值越小;φ 值越小,P 值则越大。对于特定地区地层的孔隙度基本为一定值。它们可以参考综合测井资料获取。对没有孔隙度资料的可用不同岩性的孔隙度参考值代替(岩性可由区域或钻孔资料推测或确认)。表 2 是常见松散类沉积物(岩)孔隙度参考值。

表 2 常见松散类沉积物(岩)孔隙度

Table 2 The porosity of loose sediment

岩石名称	砾石	粗砂	细砂	亚粘土	粘土	泥岩	砂岩	粉砂岩	页岩	灰岩
孔隙度/%	27	40	42	47	50	80	2~18.4	5~26	1.5~44.8	0.7~10

据 H.B.多尔特罗,1985。

各种岩石的孔隙度均有一个变化范围,主要是由于分选性、胶结物、泥质含量等决定。一般分选性好,胶结物少、泥质少的孔隙度大。这可以根据沉积环境的相关资料对参考值作适当调整。

4.2 温度的校正

地壳常温带在自地表向下约 20~25 m,该带的地下水水温为当地常年平均气温。此值可在区域地质报告和地方气象资料中获得。在常温带以下,地温随深度的增加而变大。一般将地温每升高一度所下降的深度称地温增加率,而将每 100 m 的温度增加称为地热增温度。其值因地而异,且同一地区不同深度也不一致。我国的平均地热温度约为 3 ℃。对松散地层增温度略小,而致密地层则略大。

温度校正的关键是适当地把握地热增温的选择和常温带水温的确定。在我国西北地区,平均气温一般较低,对电阻率的解释要注意温度的因素,特别是深度大于 300 m 以上钻孔,尤其要进行温度校正。校正的办法是先计算温度对地下水的影响,然后估计其对地层电阻率的影响。

5 实例

5.1 塔里木盆地地下水矿化度评价

塔里木盆地是我国最大的内陆盆地,70%以上的面积为塔克拉玛干沙漠覆盖。据有关资料,其第三系和第四系松散沉积厚度达 10 00 余米,岩性单一,95%以上为粉细砂,为一巨大的水盆,但由于沉积环境以蒸发为主,其地下水矿化度普遍偏高,但在整个盆地的形成过程中,各个不同时期的'古'河道或冲积地层中可能赋存有可供利用的淡水或微咸水资源,为了了解塔里木盆地沙漠腹地地下水矿化度在横向和垂向的变化特征,曾在塔中油田的供水井附近开展了实验研究,图 4 便是其中 KT1 孔孔旁及南侧电阻率剖面,该孔孔深 653.8 m,抽水段为 425~528.4 m,矿化度为 2.27 g/L,抽水段水温为 22 ℃,根据实际地质情况,KT1 号孔全孔以粉细砂为主,由表 2 可得其孔隙度平均值约为 45%,由(3)式可得孔隙参数 $P\approx2.83$(视为纯净松散沉积)。塔中地区年平均气温为 12 ℃,由 KT1、KT2 两孔计算的平均百米增温率为 2.31 ℃,电阻率剖面在抽水段的电阻率值为 8 Ω·m 左右,由式(6)可得 $P_{水}$ 为2.82,经温度校正相当于 18 ℃时电阻率为 3.0 Ω·m。

5.2 鄂尔多斯盆地地下水矿化度评价

鄂尔多斯盆地为一巨型中生代沉积盆地,除南部、东部黄土覆盖以外,全区大部分为浅覆盖区或裸露区,其西部的白垩系巨型盆地称白垩系盆地,地层产状较缓,倾角小于 10°~15°,西侧边界略陡。由于受古气候、古地理条件的控制,赋存于其间孔隙地下水矿化度变化复杂。图 5 是鄂尔多斯白垩系盆地中部靖边至安边电阻率剖面,剖面起始端为白垩系边界,下伏侏罗系地层为低阻,电阻率小于 22 Ω·m,图中所标 BK1 和 BK2 为 2 勘探孔,相距约 50 km。BK1 孔第一含水岩组环河-华池组 68.0~262.3 m,岩性以中细粒长石石英砂岩为主,平均孔隙度

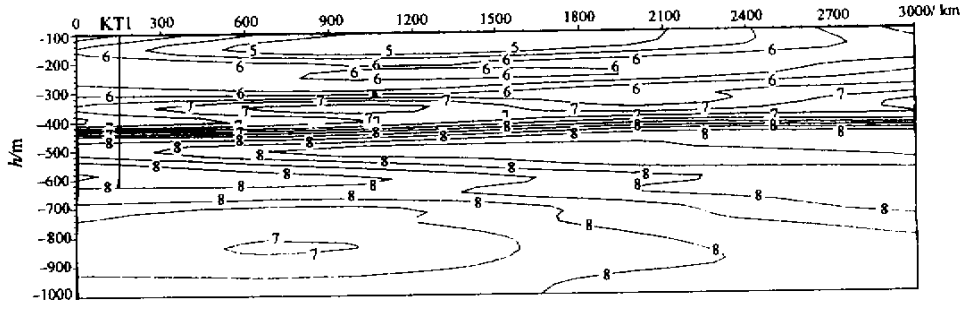


图 4 塔里木盆地 KT1 孔孔南 EH-4 勘测剖面图

Fig.4 The EH-4 surveying section located the south of KT1 hole in Taim basin

万方数据

27.8%,矿化度 0.46 g/L;第二含水岩组洛河组 262.93 ~ 596.85 m 岩性以中粗粒长石石英砂岩为主,平均孔隙度 24.5%,矿化度 0.55 g/L。BK2 孔第一含水岩组环河-华池组 32.0 ~ 563.0 m,岩性为中细粒长石石英砂岩为主,平均孔隙度 12%,矿化度 4.46 g/L;第二含水岩组洛河组 563.0 ~ 841.20 m,岩性为石英长石细砂岩,平均孔隙度为 17%。上述各含水岩组均以泥质胶结为主,可以看出,白垩系地层无论其电阻率,还是地下水矿化度、地层孔隙度在纵横方向上有较大变化,且含水层为半胶结类碎屑岩,根据地层结构特征,取达哈诺夫公式中 $m = 1.5$(代表结构因子),$a = 0.7$(代表泥质因子)(表 3)。

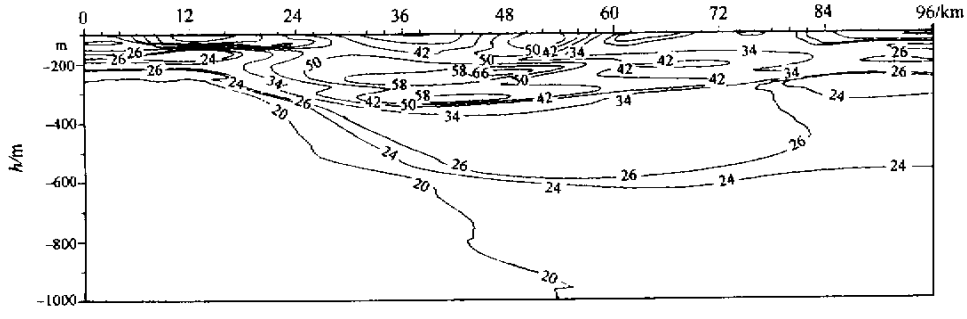


图 5　靖边至安边 EH-4 勘测剖面

Fig.5　The EH-4 surveying section between Jingbian and Anbian

表 3　含水岩组参数计算结果

Table 3　The resules of parameters fo aquifer groups

孔号	含水组	参数	电阻率 Ω·m	温度/℃	矿化度 g·L⁻¹
BK1	环河-华池	$a = 0.7$ $m = 1.5$	65		0.55 ~ 0.37
	洛 河	$a = 0.7$ $m = 1.5$	30		1.16 ~ 2.96
BK2	环河-华池	$a = 0.7$ $m = 1.5$	22		4.2 ~ 3.4
	洛 河	$a = 0.7$ $m = 1.5$	21	32	2.0 ~ 2.4

由以上计算推测的地下水矿化度可以基本反映地下水水质的变化。

利用地层电阻率进行孔隙地下水矿化度的评价是一种有效的方法,但受各种因素的制约,一般不可能十分精确,因此,在应用中对不同地区应尽可能多地获取有关信息,提高推测矿化度的准确程度。

参 考 文 献

傅良魁.1983.电法勘探教程.北京 地质出版社.

万明浩,秦顺亭.1994.岩石物理性质及其在石油勘探中的应用.北京 地质出版社.

H.B.多尔特罗(苏).1985.岩石和矿物的物理性质.北京 科学出版社.

The Application of Geophysical Techniques to Estimating Salinity of Porous Goundwater in Northwest China

Guo Jianqing　Wu Yi　Cao Fuxiang　Zhu Qingjun

(*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Baoding, Hebei*)

Abstract　This paper has analyzed characteristics of various factors affecting layer resistivity and described the estimating method and the quantitative relationship between the salinity of porous groundwater and the layer resistivity. An example is also given illustrating the practical application of such techniques in a typical area of the northwest of China.

Key words　resistivity　salinity　groundwater　the nothwest of China

万方数据