



基于地球物理测井参数的深层卤水矿化度方法研究*

黄 华^{1,2}, 余嫦娥³, 张士万¹, 王春连⁴, 张连元¹

(1 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北 武汉 430223; 2 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 3 江汉石油工程有限公司测录井公司, 湖北 潜江 433123; 4 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要 深层富矿卤水是一种重要的矿产资源, 卤水层的矿化度是评价卤水品位和开展卤水试水及采卤重要的参数, 而卤水层矿化度的计算一直是一个难题。文章推导了地层水电阻率法和中子寿命测井法 2 种利用测井资料计算矿化度的方法, 分别适应于低矿化度和高矿化度卤水, 应用这 2 种方法对江汉盆地潜江凹陷潜江组深层卤水矿化度进行了计算, 取得了良好的效果。

关键词 地质学; 深层卤水; 矿化度; 测井资料; 潜江凹陷

中图分类号: P631.1⁺2

文献标志码: A

Research on calculation methods of salinity of deep brine based on geophysical well logging parameters

HUANG Hua^{1,2}, YU Chang'E³, ZHANG ShiWan¹, WANG ChunLian⁴ and ZHANG LianYuan¹

(1 Research Institute of Exploration and Development of Jiangnan Oilfield Branch Company of SINOPEC, Wuhan 430223, Hubei, China; 2 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 Logging and Mud Logging Company of Jiangnan Petroleum Engineering Co., Ltd., Qianjiang 433123, Hubei, China; 4 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The highly-mineralized brine of deep zone is a kind of important mineral resources, the salinity of brine formations is an important parameter of brine grade evaluation, brine testing and brine mining, and the salinity calculation of brine formations has always been a difficult problem. In this paper, the authors used logging data to derive two calculation methods of salinity, i. e., formation water resistivity technique and neutron lifetime technique, respectively, which are suitable for brine with low salinity and high salinity. The authors used these two methods to calculate the deep brine salinity of Qianjiang Formation in the Qianjiang sag of Jiangnan basin and achieved good effect.

Key words: geology, brine of deep zone, salinity, logging data, Qianjiang sag

中国是一个缺钾、硼、碘等资源的国家, 这些资源产品一半以上依赖进口, 严重影响农业和其他产业的发展。卤水中富含多种矿产, 是生产这些资源

性产品的重要化工原材料。目前利用的卤水矿床主要来自于地表和第四纪盐湖, 如青海柴达木盆地和新疆罗布泊(刘成林等, 2007, 2010), 它们已经成为

* 本文得到国家 863 计划项目课题(编号: 2012AA061701)、国家 973 计划项目课题(编号: 2011CB403007)和中石化股份公司科技项目“江陵凹陷新沟嘴组岩性油藏形成条件与分布”(编号: P15120)和“江汉盆地油气聚集规律与精细评价关键技术”联合资助

第一作者简介 黄 华, 男, 1982 年生, 高级工程师, 从事矿产资源地质勘探与开发研究。Email: 876813589@qq.com

收稿日期 2016-09-30; 改回日期 2016-10-17。苏 杭编辑。

中国钾盐生产的主要地区,但仍没有从根本上解决中国缺钾的问题。深层卤水矿床(深度>500 m)目前大多还处于勘探评价阶段,但是由于其资源分布广,资源量大,含有钾、锂、硼、溴、碘、铷、铯等重要资源(刘成林 2013 林耀庭等,1996),潜在经济价值高,勘探开发潜力大(黄华等 2015),已经逐步引起人们的重视。

利用钻井对深层卤水钻探后,如何快速、经济、准确的评价卤水层的位置、卤水层的品质(矿化度、有用元素含量)是下一步进行试水的关键,也是卤水资源勘探开发的基础。利用地球物理测井资料,借用石油相关的测井评价方法,能够判定卤水层的位置、厚度、物性,进而能推算卤水层产能(黄华等,2013 2014)。但是对于深层卤水层,尤其是高矿化度的卤水层品位的确定,一直是一个难点,导致在深井卤水勘探开发中,需要先进行逐层试水,在开展室内品位测试后,再决定对哪一层采卤,这样不仅工程上效率低下,而且不经济。古盐湖盆地中,一般卤水矿化度越高,卤水中的钾、锂、硼、溴、碘、铷、铯等有用离子的含量也越高(黄华等 2015),即矿化度越高卤水的品位也越好。本文基于地球物理测井资料,利用计算的各种参数,推导出 2 种计算深层卤水矿化度的方法,用以评价卤水层的品位,为下一步优选卤水层试水和采卤提供决策。

1 地层水电阻率法

1.1 计算原理和方法

地层水电阻率法主要原理是利用地层水电阻率、温度和矿化度之间的关系,在测井中能够测量卤水层的温度,利用测井资料计算地层水电阻率,这样可以利用已知的两个量求取卤水层的矿化度。斯伦贝谢等公司通过室内试验,已经将这三者之间的关系编制成图版(张庚骥 2003),也有研究者将图表近似表达为函数关系式(刘应,1988),用以快速求取其间的变量。

浅层矿井中,由于矿化度不高,主要采用自然电位(SP)测井资料求取地层水矿化度(赵发展等,2002;任履兆,1985;魏大农等,2004;肖世匡等,2006)。但是对于深层卤水钻井而言,地层水矿化度高,一般 100~400 g/L,钻井中多采用盐水钻井液,且地层中还有盐层不断溶蚀,这样导致井筒为饱和盐水钻井液,无法直接进行自然电位测井。如果要

进行自然电位测井,则需要在测井前更换钻井液体系,将井筒中的盐水钻井液置换成淡水钻井液,难以实现经济高效,且易出现井壁垮塌现象,导致井下出现危险。因此在深层盐湖盆地中,利用自然电位求取地层水电阻率的方法是不适用的。

本文求取地层水电阻率利用的是阿尔奇公式,由地层电阻率来求取地层水电阻率。

$$\text{阿尔奇公式: } S_w = \sqrt[n]{\frac{abR_w}{R_t\varphi^m}} \quad (1)$$

$$\text{卤水层的含水饱和度为 } 100\%, \text{ 即 } S_w = 100\% \quad (2)$$

$$\text{将(2)代入(1)中得到: } R_w = \frac{abR_t}{\varphi^m} \quad (3)$$

式中 S_w —含水饱和度(f); n —饱和度指数; a , b —与岩性有关的系数; R_w —地层温度下地层水电阻率($\Omega \cdot m$); R_t —地层电阻率($\Omega \cdot m$); φ —孔隙度(f); m —胶结指数。

(3)式中求取的是地层温度下地层水电阻率,将其转换到 18℃ 下地层水的电阻率:

$$R_w(18) = R_w(1 + \alpha(t - 18)) \quad (4)$$

式中 $R_w(18)$ —18℃ 地层水电阻率($\Omega \cdot m$); α —温度系数; t —卤水层温度(℃)。

通过实验室等效氯化钠矿化度与 18℃ 地层水电阻率的关系(图 1),可得到:

$$C_{\text{等}} = 5.601 R_w(18)^{-1.1959} \quad (5)$$

相关系数 $r = 0.99$, 式中 $C_{\text{等}}$ —等效氯化钠矿化度(g/L)。

将(3)代入(4)后再代入(5)中,就可以求取等效氯化钠矿化度。

$$C_{\text{等}} = [5.601(\frac{abR_t}{\varphi^m} / (1 + \alpha(t - 18)))]^{-1.1959} \quad (6)$$

(6)式中 a 、 b 、 m 、 α 均可以由实验获得; φ 可以由常规测井资料或者岩芯实验室测试获得; R_t 用卤水层的测井电阻率(深感应或者深侧向电阻率)。卤水的矿化度只需要将本方法得到的等效氯化钠矿化度根据地区经验公式转换即可。

1.2 适用范围

以上推导中由于应用到阿尔奇公式,阿尔奇公式成立的前提是砂岩层孔隙度为中高孔,要求卤水层孔隙度在 10%~40%(孙建国 2007),否则误差较大。

从矿化度与地层水电阻率的关系图看出(图 1),

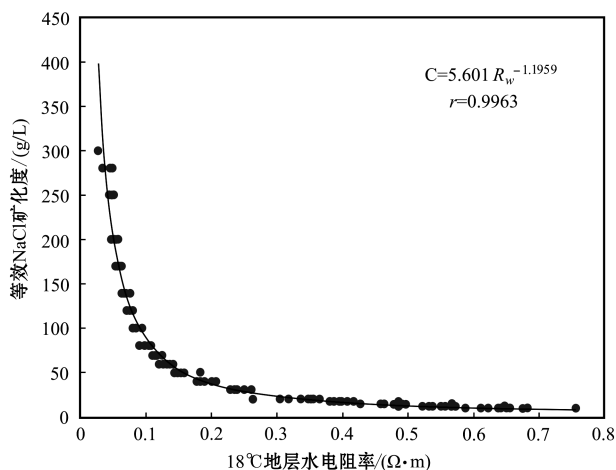
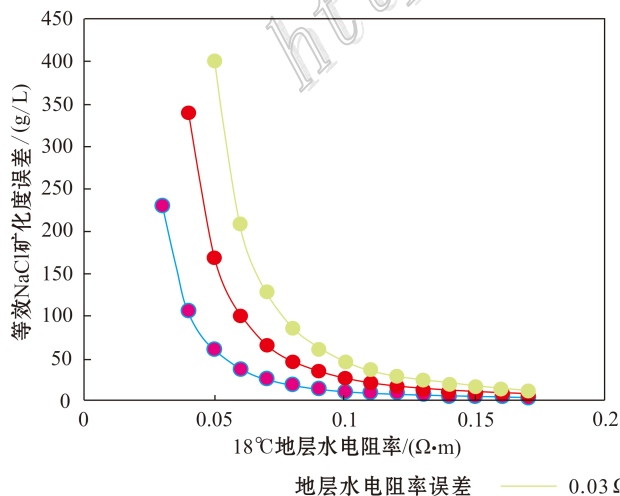


图 1 等效氯化钠矿化度与 18℃ 地层水电阻率的关系图

Fig. 1 Diagram of equivalent NaCl salinity and formation water resistivity at 18℃

当地层水电阻率很小时,此时矿化度较大,矿化度与电阻率关系近似于垂直的直线,即微小的地层水电阻率误差就会带来矿化度很大的变化,使得矿化度计算不准确。

通过开展误差分析(图 2),当矿化度小于 100 g/L,地层电阻率小于 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 时,电阻率误差相对较小;但是当矿化度大于 100 g/L,地层电阻率大于 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 后,电阻率的误差在求取矿化度的过程中被急剧放大,使得卤水层的矿化度误差变大。因此,利用地层水电阻率法适合求取卤水矿化度小于 100 g/L 的地区,矿化度越小,计算越精确。



2 中子寿命测井法

2.1 计算原理

中子寿命测井是最常见的脉冲中子测井,其原理是利用脉冲中子源发射高能快速中子照射地层,探测热中子寿命和地层对热中子的宏观俘获截面(李震,2008),在石油矿产测井中常被用来计算剩余油的饱和度(刘应,1988;戴长林,2005)。由于岩石中不同元素对热中子的俘获截面值是不同的,中子寿命测井记录是单位岩石体积中所有元素俘获中子的截面总和。从不同元素对热中子的俘获截面数据可以看到,硼(B)、锂(Li)元素是最多的(表 1),但是由于其在深层卤水中含量比较低,因此影响是很小的。在剩下的元素中,氯(Cl)元素对热中子的俘获截面最大,由于深层卤水中主要成分是氯化钠(黄华等,2015),因此氯的影响是最大的。以江汉盆地潜江凹陷深层卤水为例,研究各种不同元素对于中子寿命测井中探测的单位岩石体积中俘获截面的影响,发现氯元素的影响占到 98.362%(表 1),其他元素的影响几乎可以忽略,因此可以利用中子寿命测井来计算卤水中等效氯化钠矿化度,从而计算卤水层的矿化度。

由于中子寿命测井不受孔隙度的影响,受到温度影响也不大,因此使用范围比较广泛。根据计算原理可知,本方法要求卤水层中氯离子含量高,卤水矿化度越大,计算越精准。

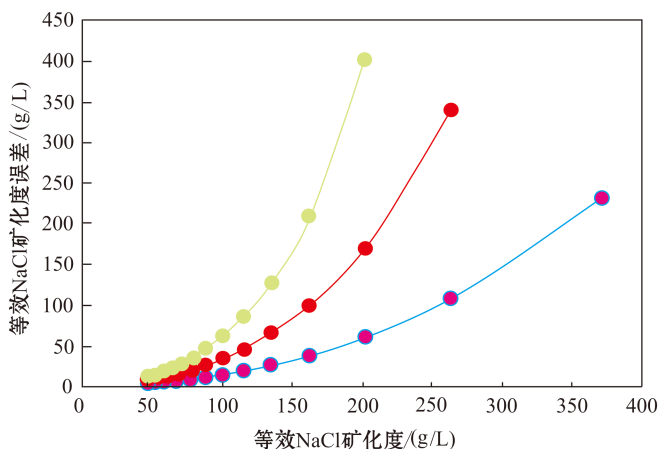


图 2 地层水电阻率在求取卤水矿化度过程中误差分析图

Fig. 2 Error analyses in the process of brine salinity calculation by formation water resistivity technique

表 1 深层卤水中不同元素热中子俘获截面指数影响因素统计表

影响因素	Cl	Ca	Na	Fe	Li	H	Al	Mg	S	P	O	Si	C	B
Σ 值/c. u.	33.6	0.42	0.53	2.53	71	0.33	0.22	0.06	0.51	0.19	0	0.16	0	759
卤水质量含量/%	57.10	0.51	37.73	—	0.005	—	—	0.12	—	—	—	—	—	0.015
影响因素/%	98.362	0.011	1.025	—	0.018	—	—	0.0004	—	—	—	—	—	0.584

注：深层卤水元素含量来自潜江凹陷潜江组卤水层的平均含量；“—”表示未检测到。

2.2 计算方法

将地层中的砂岩卤水层抽象成一个体积模型，即整个体积是由泥质、砂岩和砂岩孔隙中的卤水组成，三者体积为 1 个单位，其中泥质的体积含量 V_{sh} ，卤水的体积百分含量 φ ，因此砂岩的骨架体积百分含量为 $1 - V_{sh} - \varphi$ 。砂岩卤水层总的俘获截面值是砂岩骨架的俘获截面值、砂岩中卤水的俘获截面值和泥质的俘获截面值之和。因此相应的测井方程为：

$$\Sigma = \Sigma_{ma}(1 - \varphi - V_{sh}) + \varphi \Sigma_w + V_{sh} \Sigma_{sh} \tag{7}$$

式中： Σ —砂岩卤水层总俘获截面值(c. u.)； Σ_{ma} —砂岩骨架的俘获截面值(c. u.)； φ —卤水层孔隙度； V_{sh} —地层的泥质含量； Σ_w —卤水的俘获截面值(c. u.)； Σ_{sh} —泥岩的俘获截面值(c. u.)。

根据实验室卤水等效氯化钠矿化度和与其俘获截面值的关系函数(图 3)：

$$\Sigma_w = 0.4223 C_{NaCl} + 21.842 \tag{8}$$

相关系数 $r = 0.9999$ ，式中： C_{NaCl} —卤水层的等效氯化钠矿化度(g/L)。

将(7)和(8)联合起来，可以得到等效氯化钠矿化度：

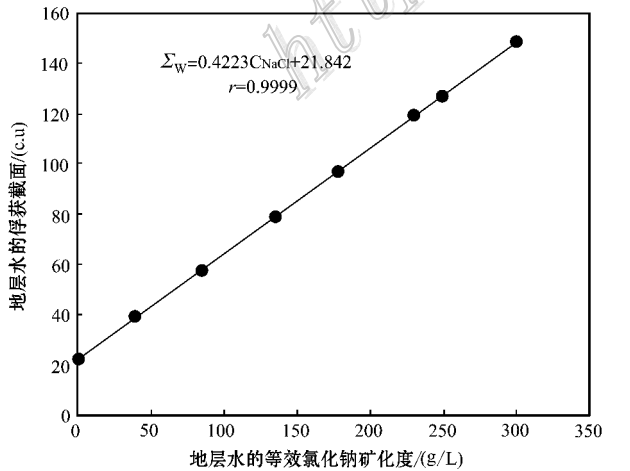


图 3 卤水等效氯化钠矿化度与俘获截面指数关系图
Fig. 3 Diagram of the equivalent NaCl salinity and the capture cross-section index in brine

$$C_{NaCl} = [(\Sigma - \Sigma_{ma}(1 - \varphi - V_{sh}) - V_{sh} \Sigma_{sh}) / \varphi - 21.842] / 0.4223 \tag{9}$$

(9) 式中， Σ 可通过中子寿命测井得到； Σ_{ma} 可利用理论值得到，也可用卤水层附近干砂层的俘获截面值代替； Σ_{sh} 也可用理论值得到，也可用砂岩卤水层附近纯泥岩的俘获截面值代替； φ 可以由常规测井资料或者岩芯实验室测试获得； V_{sh} 可以由常规测井资料计算得到。根据本方法得到的等效氯化钠矿化度再由地区经验公式换算成卤水矿化度。

3 应用实例

运用以上 2 种计算卤水矿化度的方法，在江汉盆地潜江凹陷潜江组深层卤水中进行了应用。

以广 3~10 井为例，该井 2526.6~2538.0 m 为一标准砂岩卤水层(图 4)，该层声波时差平均值为 250 $\mu s/m$ ，砂岩卤水层总俘获截面值 Σ 平均为 38 c. u.， $\Sigma_{ma} = 12$ c. u.， $\Sigma_{sh} = 63$ c. u.，通过计算平均泥质含量 $V_{sh} = 0.1$ ，平均孔隙度为 14.8%，通过中子寿命计算等效 NaCl 矿化度为 311.1 g/L。通过潜江凹陷等效 NaCl 与试水资料的转换，其最终矿化度为 320.4 g/L。该层实际试水资料的矿化度为 320.4 g/L，通过中子寿命计算的矿化度与实际矿化度一致。通过地层水电阻率法计算后矿化度为 302.4 g/L，相对误差为 8.6%。由于地层矿化度高，因此中子寿命测井法计算的矿化度明显精度较高(表 2)。

对另外 5 口井也进行了计算(表 2)。通过对比中子寿命计算的矿化度与实际矿化度发现，最小误差为 0，最大误差为 -7.8%，平均误差为 3.5%，能够满足矿化度求取要求。利用地层水电阻率法求取的矿化度与实际矿化度比较，最小误差为 -1.4%，最大误差为 44.3%，平均误差为 19.3%，误差相对较大。由此可见，在高矿化度卤水层计算矿化度时，中子寿命测井法比地层水电阻率法精度更高，潜江凹陷潜江组的深层卤水矿化度计算更适合于中子寿命

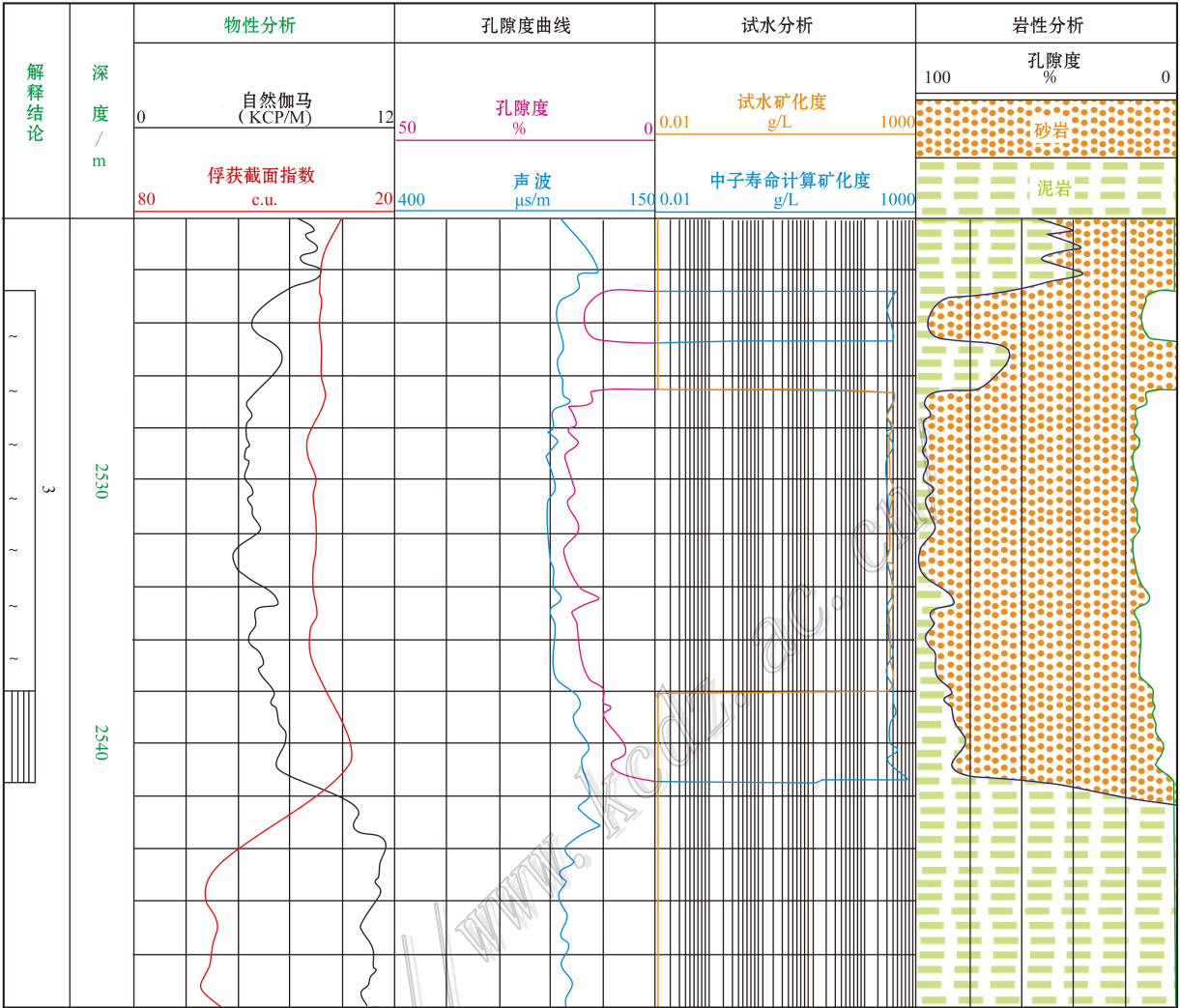


图 4 广 3-10 井中子寿命与完井测井曲线图

Fig. 4 Neutron lifetime and well completion logging curves of well Guang 3-10

表 2 潜江凹陷潜江组深层卤水不同方法计算矿化度统计表

Table 2 Calculation results of the deep brine salinity of Qianjiang Formation in the Qianjiang sag by different methods									
序号	井名	层位	井段/m		水样分析 矿化值/(g/L)	地层水电阻率法		中子寿命测井法	
			顶深	底深		计算矿化度/g/L	相对误差/%	计算矿化度/g/L	相对误差/%
1	广 3-10	Eq3 ²	2526.6	2538.0	320.4	302.4	−8.6	320.4	0
2	代 6	Eq4 ¹ _下	955.0	958.0	270.0	266.3	−5.0	248.9	−7.8
3	高 11 斜-1	Eq3 ²	1814.0	1818.5	325.0	469.1	41.9	315.8	−2.8
4	浩 82 斜-4	Eq4 ¹	1691.4	1703.6	310.0	328.9	3.1	312.7	0.9
5	浩斜 82-2	Eq3 ³	1508.0	1520.0	310.0	258.4	−19.8	293.8	−5.2
6	钟 5 斜-7	Eq3 ¹	1750.0	1762.0	314.0	445.1	39.1	326.3	3.9
平均	—	—	—	—	—	—	19.3	—	3.5

注：相对误差平均值是相对误差绝对值的平均值。

测井法。

通过以上 2 种基于地球物理测井参数的深层卤水矿化度方法，可以计算得到较为准确的深层卤水矿化度。江汉盆地潜江凹陷深层卤水矿化度和有

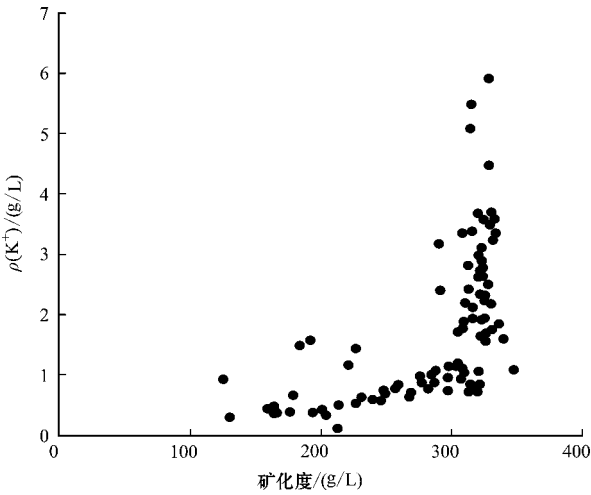


图 5 潜江凹陷潜江组深层卤水矿化度与钾离子含量关系图
Fig. 5 Diagram of the salinity of deep brine and the content of potassium ions in the Qianjiang Formation of Qianjiang sag

用的离子(钾、锂、硼、溴、碘、铷、铯)含量成正比,以钾离子为例(图 5),当矿化度在 100~300 g/L 时, $\rho(K^+)$ 随着矿化度的升高呈缓慢线性增加, $\rho(K^+)$ 在 0~1.5 g/L;当矿化度在 300~350 g/L 时, $\rho(K^+)$ 随着矿化度的升高呈快速指数增加, $\rho(K^+)$ 在 1.5~6.0 g/L。因此通过对矿化度的精准计算,利用深层卤水矿化度与有用离子含量之间的关系,可以判断出卤水的品位,为卤水层试水和采卤提供决策依据。

4 结 论

(1) 地层水电阻率法计算深层卤水矿化度时,由于计算原理的限制,使用范围受到孔隙度和卤水层矿化度的严重制约,适用于中高孔低矿化度的卤水层。

(2) 中子寿命测井法要求卤水层浓度大且卤水中氯离子含量高,该方法解决了大多数深层卤水层矿化度的计算问题。

(3) 通过在潜江凹陷潜江组深层卤水区进行应用,证实在以氯化钠含量为主的浓卤水中,中子寿命测井法计算卤水层矿化度精度要明显高于地层水电阻率法。因此建议在明确卤水层特点的情况下,酌情互补使用这 2 种方法计算卤水矿化度。

(4) 通过对卤水层矿化度的精准计算,利用深

层卤水矿化度与有用离子含量之间的关系,可以判断出卤水的品位,为卤水层试水和采卤提供决策依据。

志 谢 本文完成过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所刘成林、焦鹏程研究员的指导,江汉油田分公司勘探开发研究院陈晓和谢浪工程师对相关图件进行了编制,在此一并表示感谢。

References

Dai C L. 2005. Evaluation of remaining oil saturation by use of neutron-lifetime logging[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 18(2):22-26 (in Chinese with English abstract).

Huang H, Liu C L, Zhang S W, Xu H M, Ye J Z, Wang C L, Peng W and Wen H. 2014. Application of geophysical detection method to exploration of deep potassium-rich brine formation: A case study of Jiangling Depression[J]. Mineral Deposits, 35(5):1101-1107 (in Chinese with English abstract).

Huang H, Zhang S W and Zhang L Y. 2015. Mineral characteristics and resources assessment of the deep brine in qianjiang formation, jianghan depression[J]. Journal of Salt Lake Research, 23(2):34-43 (in Chinese with English abstract).

Huang H, Zhang S W, Zhang L Y and Yu C E. 2013. Logging identification of brine mineral bed in the sandstone of qianjiang formation, qianjiang depression[J]. Geology of Chemical Minerals, 35(2):65-71 (in Chinese with English abstract).

Li Z. 2008. Advances in Neutron Lifetime Log[J]. Petroleum Instruments, 23(6):24-26 (in Chinese with English abstract).

Lin Y T, Yan Y J and Wu Y L. 1996. High-grade brine in the sichuan basin: Hydrogeochemistry, origin and its resource significance[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 16(4):12-22 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Jiao P C and Wang M L. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China[J]. Mineral Deposits, 29(4):581-592 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Jiao P C, Wang M L and Chen Y Z. 2007. Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur salt lake, Xinjiang, China[J]. Mineral Deposits, 26(3):322-329 (in Chinese with English abstract).

Liu C L. 2013. Characteristics and formation of potash deposits in conti-

- nental rift basins :A review[J]. Acta Geoscientica Sinica , 34(5): 515-527(in Chinese with English abstract).
- Liu Y. 1988. Determination of salinity and oil saturation using neutron life time and induction logs[J]. Well Logging Technology , 12(1): 49-79(in Chinese with English abstract).
- Ren L Z. 1985. Problems concerning the calculation of mineralization intensity of strata water by means of self-potential curves[J]. Geophysical and Geochemical Exploration , 9(5): 377-384(in Chinese with English abstract).
- Sun J G. 2007. Archie 's formula :Historical background and earlier debates[J]. Progress in Geophysics , 22(2): 472-486(in Chinese with English abstract).
- Wei D N and Ouyang H. 2004. Typical application of neutron lifetime log of dynamic reservoir evaluation in L oilfield[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute , 26(3): 67-69(in Chinese with English abstract).
- Xiao S K and Shi Y H. 2006. Neutron lifetime logging technology of determine remaining oil saturation[J]. Journal of Oil and Gas Technology , 26(3): 67-69(in Chinese with English abstract).
- Zhang G J. 2003. Electrical logging [M]. University of Petroleum Press. 1-191(in Chinese).
- Zhao F Z. 2002. A geophysical logging method to detect the water mineralization intensity underground[J]. Progress in Geophysics , 17(3): 551-558(in Chinese with English abstract).
- 黄华, 张士万, 张连元, 于嫦娥. 2013. 潜江凹陷潜江组砂岩卤水矿床测井识别方法研究[J]. 化工矿产地质, 35(2): 65-71.
- 黄华, 刘成林, 张士万, 徐海明, 叶建中, 王春连, 彭伟, 文辉. 2014. 深层富钾卤水的地球物理探测技术及应用——以江陵凹陷为例[J]. 矿床地质, 33(5): 1101-1107.
- 黄华, 张士万, 张连元. 2015. 潜江凹陷潜江组深层卤水矿产特征与资源评价[J]. 盐湖研究, 23(2): 34-43.
- 李震. 2008. 中子寿命测井技术的发展[J]. 石油仪器, 22(6): 24-26.
- 林耀庭, 颜仰基, 吴应林. 1996. 四川盆地某地富钾卤水水文地球化学特征及其成因资源意义[J]. 岩相古地理, 16(4): 12-22.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 陈永志. 2007. 罗布泊盐湖巨量钙芒硝沉积及其成钾效应分析[J]. 矿床地质, 26(3): 322-329.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-592.
- 刘成林. 2013. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用[J]. 地球学报, 34(5): 515-527.
- 刘应. 1988. 利用中子寿命和感应测井资料计算地层水矿化度和含油饱和度[J]. 测井技术, 12(1): 49-79.
- 任履兆. 1985. 用自然电位曲线计算地层水矿化度的几个问题[J]. 物探与化探, 9(5): 377-384.
- 孙建国. 2007. 阿尔奇(Archie)公式:提出背景与早期争论[J]. 地球物理学进展, 22(2): 472-486.
- 魏大农, 欧阳华. 2004. 中子寿命测井在 L 油田储层动态评价中的典型应用[J]. 江汉石油学院学报, 26(3): 67-69.
- 肖世国, 石元会. 2006. 确定剩余油饱和度的中子寿命测井技术[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 26(3): 67-69.
- 张庚骥. 2003. 电法测井[M]. 东营:石油大学出版社. 1-191.
- 赵发展. 2002. 地层水矿化度检测的地球物理测井方法[J]. 地球物理学进展, 17(3): 551-558.

附中文参考文献

- 戴长林. 2005. 利用中子寿命测井进行剩余油饱和度评价[J]. 江汉石油职工大学学报, 18(2): 22-26.