



测井技术在柴达木盆地深层卤水勘查中的应用研究

张绍栋¹, 罗维斌², 王 亮³, 刘久波³, 吕志斌³, 张晓冬³, 蔡进福³

1. 青海省地质矿产勘查开发局, 青海 西宁 810000; 2. 甘肃省有色地质调查院, 甘肃 兰州 730000;

3. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海 格尔木 816000

摘 要: 测井技术一直以来普遍应用于煤田、天然气、淡水资源、石油、固体矿产等领域, 取得了不少的成果及经验, 但在深层卤水资源勘查中应用较少。通过分析研究“青海省冷湖镇马海地区深层卤水钾矿勘查”等诸多项目的测井成果, 总结出三侧向电阻率、自然伽马、声波时差、自然电位等参数在新生代地层中的特征, 发现普通测井方法在盐湖资源勘查中有很大的指导作用, 是深层卤水资源勘查不可或缺的勘探方法。通过统计分析大量盆地内的测井资料, 找出测井曲线的形态特征与单井层序之间的关系, 然后使用定量识别来分析和验证自然伽马、声波时差等参数范围及曲线特征, 总结出适合柴达木盆地深层卤水勘查的测井解释方法。

关键词: 测井技术; 柴达木盆地; 深层卤水; 定量识别; 青海省

APPLICATION OF LOGGING TECHNOLOGY IN DEEP BRINE EXPLORATION IN QAIDAM BASIN

ZHANG Shao-dong¹, LUO Wei-bin², WANG Liang³, LIU Jiu-bo³, LYU Zhi-bin³, ZHANG Xiao-dong³, CAI Jin-fu³

1. Qinghai Bureau of Geology and Mineral Exploration, Xining 810000, China; 2. Gansu Institute of Nonferrous Metals Geological Survey, Lanzhou 730000, China; 3. Qinghai Qaidam Institute of Geology and Mineral Exploration, Golmud 816000, Qinghai Province, China

Abstract: Logging Technology has been being widely used in the fields of coal field, natural gas, freshwater resources, petroleum and solid minerals, which has gained lots of achievements and experience, but it is seldom used in the exploration of deep brine resources. By studying the logging results of many projects such as “Exploration of Mahai Deep Brine Potassium Deposit in Lenghu Town of Qinghai Province”, the paper summarizes the characteristics of parameters including laterolog-3 resistivity, natural gamma-ray, sonic differential time and spontaneous potential in Cenozoic strata, and finds the common logging method being an indispensable guide to the exploration for salt lake resources, particularly for deep brine resources. The relation between characteristics of logging curves and single well sequence is found through statistical analysis of large amounts of logging data in the basin. Then the quantitative recognition is used to analyze and verify the parameter range and curve characteristics of natural gamma-ray and sonic differential time, and the logging interpretation method suitable for deep brine exploration in Qaidam Basin is summarized finally.

Key words: logging technology; Qaidam Basin; deep brine; quantitative recognition; Qinghai Province

0 引言

柴达木盆地因盐而名, 面积逾 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地内

现有大小不等的盐湖 33 个, 氯化钾、氯化镁、氯化锂等储量占全国已探明储量的 80% 以上。自 2000 年起, 第

收稿日期: 2020-08-18; 修回日期: 2020-08-27。编辑: 李兰英。

基金项目: 青海省地质局“青海省冷湖镇马海地区深层卤水钾矿勘查”项目(编号 2016020094kc056)。

作者简介: 张绍栋(1987—)男, 本科, 工程师, 主要从事物探方法在盐湖及固体矿产勘查方面的使用研究, 通信地址 青海省西宁市海晏路 77 号, E-mail//344284923@qq.com

四系及新近系深层卤水找钾工作在此起步,从此深层卤水资源逐渐进入了人们的视野。通过近年来的勘查工作,在尕斯库勒、大浪滩、察汗斯拉图、昆特依、马海等次级盆地深部均发现了大厚度砂砾空隙卤水钾盐矿,开拓了柴达木盆地新的找矿空间^[1]。勘查中应用了大地电磁测深、广域电磁、地震、测井等物探方法,结果表明几种方法各有利弊,普通测井作为能直接对地层进行测量的物探方法,优势显著。本次研究依托对柴达木盆地多个区域的钻孔测井资料的分析研究,寻求一种适合柴达木盆地的测井识别思路及方法,以期在深部卤水资源勘查中得到有效的使用。

1 地质背景

柴达木盆地位于青海省西北部,是青藏高原北部大型内陆断陷构造形成的高山深盆。盆地周边为高山,中间地形起伏不大。盆地内除周边有少量的晚三叠世、早中侏罗世和早白垩世地层分布外,主体为巨厚的古近纪—第四纪沉积物,第四系沉积物尤为发育完全。在丘陵和沙漠间的较低洼地区形成彼此隔绝、大小不均一的封闭式内陆盐湖次级盆地。这些盐湖次级盆地是柴达木盆地的主要沉积区、成矿区。深层卤水资源主要赋存在盆地第四系地层中,属第四系现代盐湖沉积型矿床,主要岩性有下更新统泥岩、砂质泥岩、石膏;中更新统黏土、淤泥、粉砂黏土与石盐;上更新统粉砂黏土、淤泥、砂砾石、含粉砂石盐;全新统卵石、砾石、粗砂、粉细砂质黏土、含粉砂的石盐。矿床主要以2种方式赋存,一种是浅部晶间卤水、层间卤水方式存在,赋卤介质岩性为石盐、含粉砂的石盐、含芒硝的石盐;另一种是深部液体空隙承压方式存在,赋存介质主要为细砂、中细砂、中细砂、粗砂、砾砂、圆砾、卵石。主要隔水层为黏土、粉砂黏土、黏土粉砂等^[2]。

2 测井曲线特征

2.1 三侧向电阻率

三侧向电阻率测井就是通过聚焦供电电流,穿透井壁流入地层,可用来研究岩层更为真实的电阻率的电测井方法。盐湖钻孔中因为泥浆、含水层都为饱和或者半饱和卤水,所以三侧向电阻率值很小,不同层位曲线变化幅度较小,并且会因泥浆及含水层矿化度不同而导致不同钻孔、相同地层电阻率值不同的现象。

通过总结分析发现,在柴达木盆地,三侧向电阻率曲线在各地层的表现如下:黏土、粉砂黏土、黏土粉砂等隔水层表现为最低电阻率值,曲线变化幅度小(图1);细砂、粗砂等作为较好的含水层,表现为相对黏土层较高的电阻率平均值,曲线有明显锯齿状变化现象,曲线波动幅度与所含砾砂呈正相关;砾砂、卵石层作为主要含水层,表现为较高电阻率平均值,曲线变化幅度大;石盐层表现为高电阻率、高幅值变化,相比卵石、砾砂层电阻率高出很多^[3-4]。

2.2 自然伽马

自然伽马测井是通过测量自然伽马强度分析不同水动力条件下形成的沉积层序的粒度、分选、泥质含量等特征的放射性测井方法。本文主要通过分析泥质含量来确定隔水层位置,研究含水层性质、含水情况。盆地中黏土层表现为自然伽马平均值最高,曲线呈锯齿状,变化幅度大;石膏、石盐层自然伽马平均值最低,且变化幅度较小;而含水层井段自然伽马平均值与含水条件呈反相关^[5-7],并且变化幅度也随泥质含量的增多而变大。

2.3 自然电位

自然电位测井就是通过测量井壁附近因电化学过程产生的自然电场来判断渗透层性质的电化学测井方法。盐湖测井中自然电场产生的条件主要是浓度差及压力差。因泥浆与含水层溶液浓度不同,井液柱与地层溶液之间存在压力差,所以所测自然电位是扩散-吸附电动势及动电电势的综合反映。经多个钻孔资料对比分析发现,在黏土、粉砂黏土、淤泥层,表现出较好的黏土基线效应,变化幅度小;在粗砂、中粗砂、砾砂、卵石层会有正异常或者负异常产生,并且曲线幅度相比黏土层较大。但也有个别孔中的自然电位反映很小甚至没有可参考性,由浅到深呈现出一条从大到小、变化幅度很小的曲线^[6-8]。经分析研究发现,导致这种情况的主要原因是泥浆与地层卤水浓度差较小,并且地层水流动性较差。总之,自然电位测井在盐湖测井中的使用有其局限性,可供分层参考。

2.4 声波时差

声波时差测井是通过计算地层中折射波传播时间差来分析地层岩性及空隙度的物理测井方法。盐湖声波时差测井主要目的是划分地层,结合其他测井曲线界定和评价含水层。分析研究发现,如果将声波时差

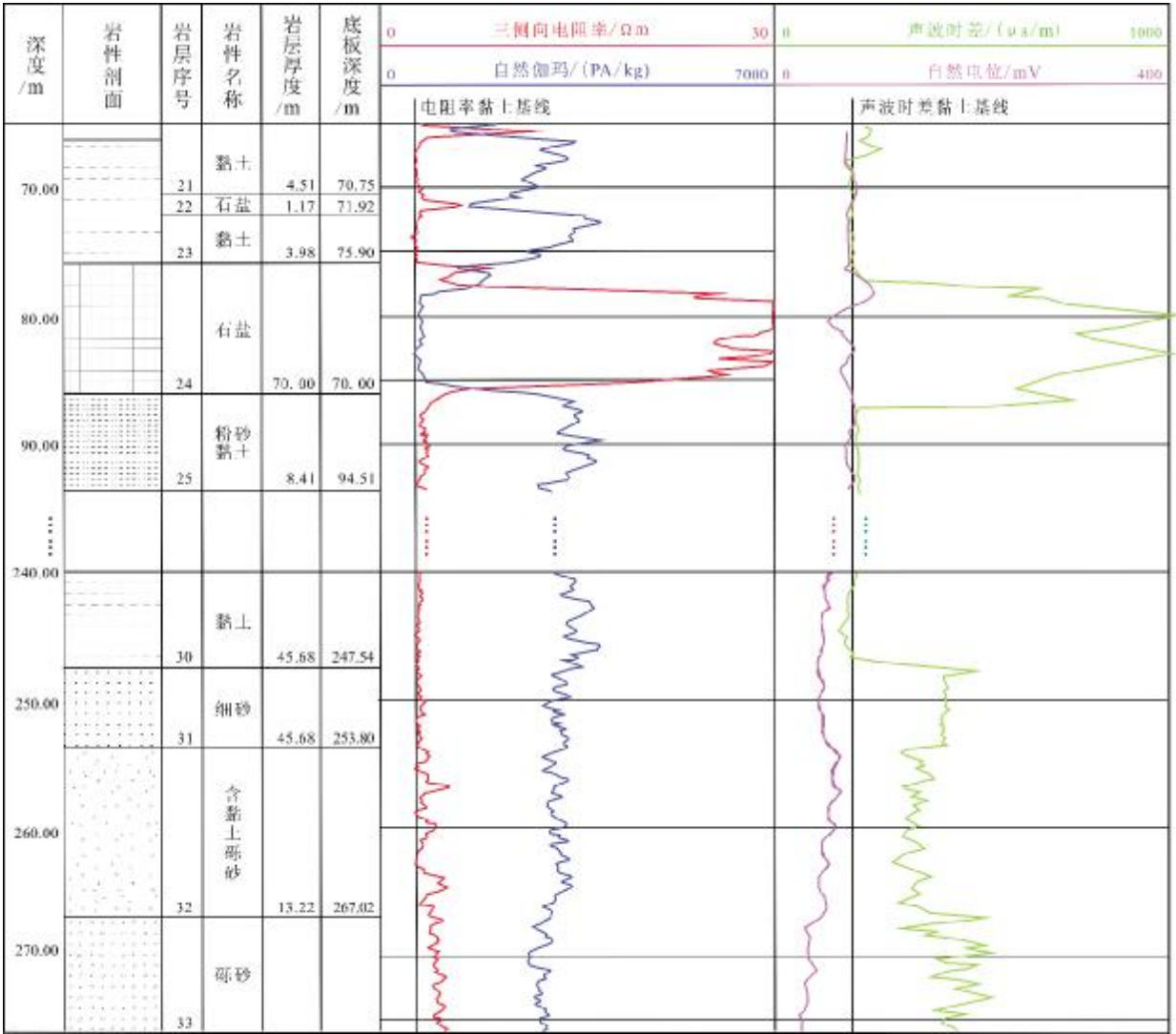


图 1 柴达木盆地深层卤水测井曲线特征图

Fig. 1 Characteristics of deep brine logging curves of Qaidam Basin

在黏土井段的曲线当作是黏土基线的话，那么在黏土井段，时差曲线在基线附近微小波动，波动较大，说明沉积环境相对不稳定，中间夹有砂层。在砂层井段，曲线向右偏移，呈现不稳定性，并且随着岩层颗粒的增大（如砾砂、卵石层）曲线会出现周波跳跃现象^[9-10]，波动幅度较大，声波时差平均值变小。而在石盐层，曲线的形态及变化幅度会因石盐的致密程度而不同。一般浅层石盐结晶较松散，时差曲线会向右偏移，并且波动较大。而在深部，石盐结晶较致密，时差曲线会在黏土基线附近波动，并且波动较小。另外在解释的时候需要考虑主要井径的变化，应排除因井径变化引起的声波时异常。

2.5 岩层定量识别

分析对比盆地多个钻孔测井资料发现，三侧向电阻率、自然电位在不同钻孔中表现的参数区间不同，所以不能用来做前期的定量识别，但自然伽马(GR)及声波时差(AC)可有效将各岩层进行定量识别。笔者优选盆地内测井效果相对较好的几口井制作不同岩性的自然伽马与声波时差交会图(图 2)。从图 2 可以看出，岩层参数特征清楚、分区明显。具体定量识别标准如下，石盐：450<AC<1175，490<GR<710，地表石盐松散，AC、GR 值较大，深层石盐密实，AC、GR 值较小；黏土：250<AC<320，3330<GR<4110，随着细粉砂含量的增多，AC 值变大，GR 值变小，粉砂黏土 AC 值增大到

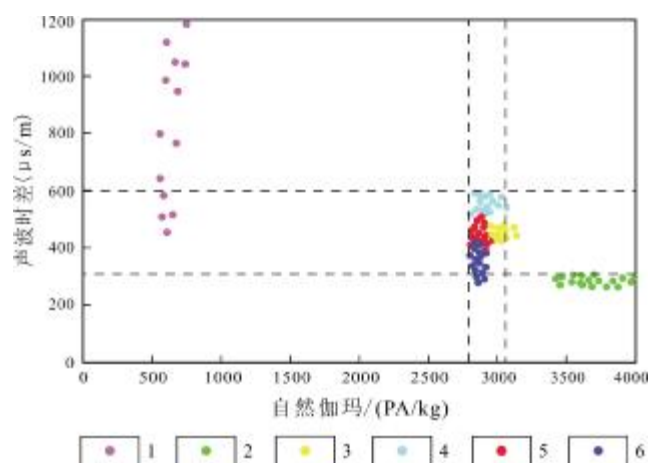


图2 柴达木盆地第四系地层测井定量识别图

Fig. 2 Quantitative recognition of the Quaternary formation logging in Qaidam Basin

1—石盐 (halite); 2—黏土 (clay); 3—粉细砂 (fine silt); 4—中粗砂 (medium-coarse sand); 5—含砾中粗砂 (gravelly medium-coarse sand); 6—含卵石中粗砂 (pebbly medium-coarse sand)

420 左右, 自然伽马变小至3000 左右; 中粗砂: $501 < AC < 590$, $2889 < GR < 3080$, 随着黏土、细粉砂等填充物的增多 AC 值变小, GR 值变大; 含砾中粗砂: $390 < AC < 520$, $2901 < GR < 2998$, 含卵石中粗砂: $280 < AC < 410$, $2912 < GR < 2990$ (以上数据单位, AC: $\mu s/m$, GR: PA/kg).

通过以上对比分析发现, 石盐、黏土层特征明显, 容易识别, 成为测井解释的有效切入点. 中粗砂、含砾中粗砂、含卵石中粗砂等有效含水层在图中分布较集中, 自然伽马值介于 2800~3080 之间, 声波时差介于 310~600 之间, 成为识别含水层的参数区间标志. 从黏土、粉细砂至中粗砂, 随着颗粒的变粗, 声波时差值变大, 自然伽马值变小, 两曲线波动幅度较小. 但从中粗砂至含卵石中粗砂, 自然伽马保持在 2800~3080 之间, 声波时差出现反转, 随着岩层颗粒的变大, 声波时差值变小, 由最高的 600 变成最低的 310, 并且曲线出现锯齿状波动(周波跳跃)现象^[11-12], 这种周波跳跃现象也成为划分卵砾石含水层的曲线标志.

3 方法总结

综合分析研究盆地地质、测井资料, 笔者总结出普通测井在深层卤水勘查中的解释方法步骤如下.

1) 粗略定量识别大层, 划出电阻率黏土基线及声

波黏土基线. 通过自然伽马、声波时差定量识别出较厚的石盐、黏土、砂层(细砂、粗砂、砾砂、含卵石中粗砂)等主要地层. 定量识别标准如下. 石盐: $590 < AC < 1175$, $490 < GR < 710$; 黏土: $250 < AC < 320$, $3330 < GR < 4110$; 细砂、粗砂、砾砂、含卵石中粗砂等有利含水层: $320 < AC < 590$, $2800 < GR < 3080$. 定位黏土层的三侧向电阻率曲线及声波时差曲线, 画出两曲线黏土基线(如图1中黑粗线所示).

2) 分析三侧向电阻率、自然伽马曲线, 补充划分较厚层. 将三侧向电阻率、自然伽马曲线放在同一曲线道中进行重叠(如图1), 对比矫正步骤1中已定量识别的黏土层, 两曲线相离较大(低三侧向电阻率值且曲线波动幅度小, 高自然伽马值且曲线波动幅度较大)为黏土层; 两曲线相交且电阻率波动较大井段(低自然伽马, 高三侧向电阻率)为石盐; 两曲线相离较小(低三侧向电阻率且波动幅度相比黏土层大, 较高自然伽马且曲线波动幅度较大)为细砂、粗砂、砾砂、含卵砾粗砂等主要含卤水层^[13-15].

3) 已知推未知, 结合黏土基线详细划分细砂、粗砂、砾砂、含卵砾粗砂. 因为砂层的测井参数识别区间有重叠现象, 不好直观区分, 所以, 只能在后期作人工划分. 通过以上步骤已基本划分出黏土、石盐及砂层. 砂层井段, 在充分考虑各砂砾石层识别区间的同时需结合步骤一画的黏土基线进行人工识别. 人工识别标准如下. 细砂: $410 < AC < 480$, $2900 < GR < 3150$, 三侧向电阻率曲线在电阻率黏土基线附近偏右, 波动极小, 声波曲线在声波黏土基线右侧偏移最大, 波动较小^[16-17]; 中粗砂: $510 < AC < 590$, $2889 < GR < 3080$, 三侧向电阻率曲线在其黏土基线右侧, 波动相对黏土及细砂层较大, 声波曲线向右偏移最大, 有波动; 含砾粗砂: $390 < AC < 520$, $2901 < GR < 2998$, 三侧向电阻率、声波时差曲线波动大; 含卵石中粗砂: $300 < AC < 410$, $2912 < GR < 2990$, 三侧向电阻率曲线向右偏移最大, 波动也最大, 声波时差曲线在基线附近偏右, 波动最大^[18-19].

4) 结合地面物探工作, 划分较好含水层, 为钻孔抽水、储量计算及后续工作提出有效建议.

4 结论

通过对柴达木盆地测井资料的分析研究, 总结出柴达木盆地深层卤水资源勘查中测井资料的解释方法

及步骤。

1)通过自然伽马及声波时差曲线界定较厚地层;

2)结合三侧向电阻率、自然电位参数定量识别地层的各曲线参数范围;

3)最后利用识别的地层参数进行建模特征反演解释。该方法结合了地区经验、人工调试、智能识别,可有效改善传统测井解释方法在卤水钻孔中的识别困难及误差问题^[20-21],可为以后的深层卤水资源勘查起到积极的推进作用。

参考文献(References):

- [1]余俊清,洪荣昌,高春亮,等.柴达木盆地盐湖锂矿床成矿过程及分布规律[J].盐湖研究,2018,26(1):7-14.
Yu J Q, Hong R C, Gao C L, et al. Lithium brine deposits in Qaidam Basin: Constraints on formation processes and distribution pattern[J]. Journal of Salt Lake Research, 2018, 26(1): 7-14.
- [2]陈柳竹,马腾,马杰,等.柴达木盆地盐湖物质来源识别[J].水文地质工程地质,2015,42(4):101-107.
Chen L Z, Ma T, Ma J, et al. Identification of material source for the salt lakes in the Qaidam Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 101-107.
- [3]陈天慧.基于电测井方法的咸淡水含水层划分研究[J].工程勘察,2013,41(11):88-94.
Chen T H. Dividing saltwater and freshwater aquifers by electrical logging[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(11): 88-94.
- [4]赖锦,韩能润,贾云武,等.基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述[J].中国地质,2018,45(2):304-318.
Lai J, Han N R, Jia Y W, et al. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs[J]. Geology in China, 2018, 45(2): 304-318.
- [5]黄华,余嫦娥,张士万,等.基于地球物理测井参数的深层卤水矿化度方法研究[J].矿床地质,2016,35(6):1293-1299.
Huang H, Yu C E, Zhang S W, et al. Research on calculation methods of salinity of deep brine based on geophysical well logging parameters[J]. Mineral Deposits, 2016, 35(6): 1293-1299.
- [6]宋子齐,景成,孙宝佃,等.自然电位、自然伽马测井曲线在文15块的应用[J].断块油气田,2011,18(1):130-133.
Song Z Q, Jing C, Sun B D, et al. Application of self-potential and Gamma ray logging curves in Block Wen 15[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 130-133.
- [7]胡素华,冯迎辉,申潞玲,等.成都盐盆富钾卤水储层测井解释方法初探[J].中国井矿盐,2008,39(6):11-14.
Hu S H, Feng Y H, Shen Q L, et al. Preliminary approach on the explanatory method of well logging in the potassium-rich brine reservoir in Chengdu Salt Basin[J]. China Well and Rock Salt, 2008, 39(6): 11-14.
- [8]丁秋红,李晓海,李文博,等.辽宁北部秀水盆地义县组地层划分的地球物理响应特征[J].地质与资源,2020,29(1):44-52,6.
Ding Q H, Li X H, Li W B, et al. Geophysical response of the stratigraphic division of Yixian Formation in Xiushui Basin, Northern Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 44-52, 6.
- [9]张利.声速测井技术在加格斯台煤矿普查中的应用[J].现代矿业,2016,32(10):121-122.
Zhang L. Application of sonic logging technology in general survey of Jiagestai Coal Mine[J]. Modern Mining, 2016, 32(10): 121-122. (in Chinese)
- [10]冯彦谦,孟宪波.声速测井技术在工程勘察中的应用研究[J].化学工程与装备,2010(11):71-73.
Fen Y Q, Meng X B. Application of sonic logging technology in engineering investigation[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010(11): 71-73. (in Chinese)
- [11]赵金环,邹长春,王稳石,等.松科二井东孔营城组火山岩测井响应特征及岩性评价[J].中国地质,2019,46(5):1174-1183.
Zhao J H, Zou C C, Wang W S, et al. Log response characteristics and lithological evaluation of volcanic rocks in Yingcheng Formation from the second scientific drilling borehole (SK-2 east borehole) in Songliao basin of Northeast China[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 1174-1183.
- [12]符伟,侯贺晟,张交东,等.松科二井邻域沙河子组含油气地层结构特征——基于测井和地震数据的分析[J].中国地质,2019,46(5):1052-1060.
Fu W, Hou H S, Zhang J D, et al. Structural characteristics of Shahezi Formation beneath the Well SK-2 and its periphery: An analysis of logging and seismic data[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 1052-1060.
- [13]王胜建,任收麦,周志,等.鄂西地区震旦系陡山沱组二段页岩气储层测井评价初探[J].中国地质,2020,47(1):133-143.
Wang S J, Ren S M, Zhou Z, et al. Discussion on petrophysical evaluation of shale gas reservoir in the second Member of Sinian Doushantuo Formation in Western Hubei Province, South China[J]. Geology in China, 2020, 47(1): 133-143.
- [14]陈敬武,宋建伟,孙平昌.采用支持向量回归从测井曲线定量计算油页岩含油率[J].地质与资源,2017,26(2):157-160,183.
Chen J W, Zhu J W, Sun P C. Quantifying oil content of oil shale from well logs using supportvector regression[J]. Geology and Resources, 2017, 26(2): 157-160, 183.

(下转第125页/Continued on Page 125)

- 气关系研究[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 279-287.
- Liu W S, Zhao X Q, Shi Q P, et al. Research on relationship of oil-gas and sandstone-type uranium mineralization of northern China[J]. *Geology in China*, 2017, 44(2): 279-287.
- [20] 刘建军, 李怀渊, 陈国胜. 利用铀油关系寻找可地浸砂岩型铀矿[J]. 铀矿地质, 2006, 22(1): 29-37.
- Liu J J, Li H Y, Chen G S. To prospect for ISL-amenable sandstone-type uranium deposit by using the association of uranium with oil[J]. *Uranium Geology*, 2006, 22(1): 29-37.
- [21] 张振强, 董文明, 余新民, 等. 浅析油气对松辽盆地南部姚家组砂岩型铀矿成矿的作用[J]. 铀矿地质, 2008, 24(1): 43-47, 23.
- Zhang Z Q, Dong W M, She X M, et al. Primary studies on the role of oil-gas in sandstone type uranium mineralization of Yaojia formation in south Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 2008, 24(1): 43-47, 23.
- [22] 冯子辉, 廖广志, 方伟, 等. 松辽盆地北部西斜坡区稠油成因与油源关系[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 25-28.
- Feng Z H, Liao G Z, Fang W, et al. Formation of heavy oil and correlation of oil-source in the western slope of the northern Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(4): 25-28.
- [23] 商斐, 周海燕, 刘勇, 等. 松辽盆地嫩江组泥页岩有机质富集模式探讨——以嫩江组一、二段油页岩为例[J]. 中国地质, 2020, 47(1): 236-248.
- Shang F, Zhou H Y, Liu Y, et al. A discussion on the organic matter enrichment model of the Nenjiang Formation, Songliao Basin: a case study of oil shale in the 1st and 2nd members of the Nenjiang Formation[J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 236-248.
- [24] 付晓飞, 王朋岩, 申家年, 等. 简单斜坡油气富集规律——以松辽盆地西部斜坡北段为例[J]. 地质论评, 2006, 52(4): 522-531.
- Fu X F, Wang P Y, Shen J N, et al. Migration and accumulation of oil and gas in a simple slope area: a case study on the western slope of the northern Songliao Basin[J]. *Geological Review*, 2006, 52(4): 522-531.
- [25] 张敏, 黄光辉, 胡国艺, 等. 原油裂解气和干酪根裂解气的地球化学研究(I)—模拟实验和产物分析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(S2): 1-8.
- Zhang M, Huang G H, Hu G Y, et al. Geo-chemical research of kerogen-cracken gases and oil-cracked gases (I): simulation experiments and product analysis[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 38(S2): 1-8. (in Chinese)
- [26] 向才富, 夏斌, 解习农, 等. 松辽盆地西部斜坡带油气运移主导通道[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 204-208, 215.

(上接第 172 页/Continued from Page 172)

- [15] 李欣伟, 杜彦军, 席建桢, 等. 鄂尔多斯盆地海子塌地区长 6 油层组测井曲线标准化研究[J]. 地质与资源, 2018, 27(2): 192-198.
- Li X W, Du Y J, Xi J Z, et al. Log curve normalization of C-6 oil-bearing formation in Haizita Area, Ordos Basin[J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(2): 192-198.
- [16] 张志珪, 张昌民, 侯国伟, 等. 东海盆地某凹陷 P 井区平湖组沉积微相及沉积模式[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 142-151, 160.
- Zhang Z Y, Zhang C M, Hou G W, et al. Microfacies distribution and sedimentary model of Pinghu Formation in P Well Area, East China Sea Basin[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(2): 142-151, 160.
- [17] 牛雪, 焦鹏程, 曹养同, 等. 青海察尔汗盐湖别勒滩区段杂卤石成因及其成钾指示意义[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2087-2095.
- Niu X, Jiao P C, Cao Y T, et al. The origin of polyhalite and its indicating significance for the Potash Formation in the Bieletan Area of the Qarhan Salt Lake, Qinghai[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 2087-2095.
- [18] 杨生鹏, 刁俊魏, 周钰邦, 等. 青海海西 W 地区卤水钾盐矿的地球物理测井响应特征[J]. 科技创新与应用, 2019(4): 69-70.
- Yang S P, Diao J W, Zhou Y B, et al. Geophysics logging response characteristics of brine potash mine in Haixi W area, Qinghai Province[J]. *Technology Innovation and Application*, 2019(4): 69-70. (in Chinese)
- [19] 李大潜, 蔡志杰, 陈妮, 等. 自然电位测井数学模型与求解方法[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 211-224.
- Li D Q, Cai Z J, Chen W, et al. Mathematical modeling and numerical method for the spontaneous potential well-logging[J]. *Well Logging Technology*, 2012, 36(3): 211-224.
- [20] 潘保芝, 段亚男, 张海涛, 等. BFA-CM 最优化测井解释方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 391-398.
- Pan B Z, Duan Y N, Zhang H T, et al. BFA-CM optimization log interpretation method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(1): 391-398.
- [21] 李延丽, 王建功, 石亚军, 等. 柴达木盆地西部盐湖相有效烃源岩测井识别[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(6): 69-75.
- Li Y L, Wang J G, Shi Y J, et al. Logging identification of effective source rocks in salt-lake facies in western Qaidam Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(6): 69-75.