

# 电阻率比值法评价油水层的发展及应用

杨克兵, 曹程程

(中国石油华北油田分公司, 河北 任丘 062552)

**摘要:**为提高低阻油层、复杂孔隙结构油层的识别和评价精度,更好地拓展常规测井资料评价油水层的应用范围,对利用电阻率比值法评价油水层的方法开展深入研究。研究发现径向电阻率比值法评价油水层的方法并不是简单通过单条电阻率曲线的高低进行油水层评价,摆脱了单纯认为高阻解释为油层、低阻解释为水层的评价模式,能够有效评价低阻及复杂孔隙结构油水层。径向电阻率比值与储层含水饱和度为幂函数关系,能够反映储层的含油性,是当前值得推广发展的常规测井资料评价油气水层的有效方法。同时,使用径向电阻率比值计算储层含水饱和度的模型具有较大的潜在价值,可为勘探新区、低阻油层发育区测井解释及水淹层评价提供可靠依据,有助于提高测井解释符合率。

**关键词:**电阻率比值法;低阻油层;油水层评价;径向电阻率;复杂孔隙结构;油层识别

**中图分类号:**TE122      **文献标志码:**A

## Development and application of resistivity ratio method for evaluating oil–water layers

YANG Keping, CAO Chengcheng

(PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China)

**Abstract:** In order to improve the identification and evaluation accuracy of low-resistance oil layers and complex pore structure oil layers, and to better expand the application range of conventional logging data to evaluate oil and water layers, the method of evaluating oil and water layers using resistivity ratio method was carried out in-depth research. The study found that the method of evaluating the oil-water layer by the radial resistivity ratio method is not to evaluate the oil-water layer by the height of a single resistivity curve. It gets rid of the evaluation model of high resistance being oil and low resistance being water, and can effectively evaluate oil-water layers with low resistance and complex pores structure. The radial resistivity ratio and the water saturation of the reservoir are in a power function relationship, which can reflect the oil content of the reservoir. It is an effective method for evaluating oil, gas, and water layers with conventional logging data that is worth popularizing and developing. At the same time, the model of calculating reservoir water saturation with the ratio of radial resistivity has great potential value, which can provide a reliable basis for logging interpretation and evaluation of water-flooded formations in new exploration areas and low-resistivity oil layer development areas, and is helpful to improve the coincidence rate of logging interpretation.

**Key words:** resistivity ratio method; low-resistance oil layers; oil-water layer evaluation; radial resistivity; complex pore structure; reservoir identification

随着油气田勘探开发的不断深入,对测井解释而言,各种新的疑难层不断出现,如低阻油气层、致密油气层、水淹层、高阻水层等,导致测井识别评价油气水层的难度进一步加大<sup>[1-4]</sup>。尽管新方法、新技术解决了一些问题,但不可否认的是,由于生产成本的原因,当前用于评价油水层的资料仍以常规测井资料的9条测井曲线为主(9条曲线指的是深中浅三条电阻率曲线,中子、密度、声波三条孔隙度曲线

及自然伽马、自然电位、井径三条泥质评价曲线),大量井并没有阵列声波、成像、核磁等新方法测井

收稿日期:2020-04-08;修回日期:2020-06-10。

第一作者简介:杨克兵(1967—),高级工程师,现主要从事测井解释及油气地质综合研究。E-mail: yjy\_yangkb@petrochina.com.cn。

基金项目:国家重大油气专项课题“华北地区中低煤阶煤层气规模开放区块优选评价”(2016ZX05041-003)。

资料。因此,如何使用常规测井资料的9条曲线提高复杂油气水层的评价精度一直是测井解释人员努力的方向<sup>[5-8]</sup>。

在使用常规测井资料评价油水层的过程中,主要依靠电阻率曲线来评价储层的含油性,形成了许多以电阻率测井资料为基础的油水层识别评价方法。如电阻率-孔隙度交会图版等多种油水层评价图版,含水饱和度的各种计算公式等<sup>[9-10]</sup>。其中,电阻率比值法担当了一个重要角色。因此,对近年来使用电阻率比值评价油水层方法的应用情况进行总结,分析其有利和不利因素,优选最有效评价方法,必将有助于解决低阻油层、复杂油气层等的识别评价问题,有助于提高测井解释符合率,为推动相关领域测井技术发展提供依据。

## 1 电阻率比值法的分类及定义

二十世纪二十年代电阻率测井就已诞生,与自然伽马、中子等测井曲线不同的是,电阻率测井有不同径向探测深度的曲线,如感应电阻率测井有深、中、浅 3 条曲线,阵列感应电阻率曲线有 5 条或 6 条。还有不同设计原理的测井仪器,如侧向测井系列与感应测井系列等,这就为使用多种电阻率比值方式评价油水层提供了基础资料。但严格说,电阻率比值法当前并没有学术上的定义,所有涉及使用各种电阻率比值进行油水层评价的方法都被测井解释人员称为电阻率比值法。如可用井筒不同探测深度的目的层和水层电阻率比值(纵向)来评价储层的含油性,也可用同一探测深度的不同探测半径的电阻率比值(径向)来评价储层的含油性,还可用不同测井仪器(侧向和感应等)同一测量深度的电阻率比值进行油水层评价。从方法上,可用电阻率比值制作交会图版评价油水层,也可用电阻率比值计算含水饱和度来评价油水层。

综上所述,使用电阻率比值评价油水层在方法上都是相通的,即交会图版法和含水饱和度计算法。从电阻率比值使用方法看,可分为纵向电阻率比值法和径向电阻率比值法。因此,纵向电阻率比值法可定义为使用井筒纵向上不同探测深度的电阻率测井曲线比值进行油水层评价的方法;径向电阻率比值法可定义为使用同一个深度点不同径向探测深度的电阻率曲线比值进行油水层评价的方法,无论曲线是否为同一类测井仪器。

## 2 电阻率比值法技术的发展

从二十世纪八十年代中期使用纵向电阻率比值进行油水层评价以来(谭廷栋等)<sup>[11]</sup>,该方法发展至今近四十年,已成为油田勘探开发中广泛应用的一种油水层的识别与评价方法。

### 2.1 纵向电阻率比值法技术的发展

纵向电阻率比值法的核心是用目的层深电阻率与该层计算的水层电阻率或与邻近水层、致密层、围岩等电阻率的比值来评价油水层。资料调研表明,这方面应用早在 1985 年就已开展<sup>[11]</sup>,根据所计算目的层的含水饱和度对砂泥岩剖面的油水层进行评价。该方法以阿尔奇公式为基础<sup>[12]</sup>,通过目的层电阻率与该层计算的水层电阻率比值的高低来评价储层的含油性。这种方法在砂泥岩剖面油水层评价取得了较好效果。其公式为:

$$S_w = \frac{\sqrt[n]{\frac{R_o}{R_l}} - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (1)$$

式中: $R_l$  为储层电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $R_o$  为水层电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $S_w$  为含水饱和度, 小数;  $S_{wi}$  为束缚水饱和度, 小数;  $n$  为饱和度指数, 小数;

从式中可以看出,当储层为水层时,则  $R_l$ 、 $R_o$  相等,计算出  $S_w$  为 1。当储层不为水层时,可根据电阻率比值计算储层含水饱和度,关键是束缚水饱和度  $S_{wi}$  的确定。该公式的优点是使用参数比阿尔奇公式要少,不需要地层水电阻率  $S_w$ , 岩电参数  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$  中只需要  $n$  值。缺点是需要可靠的束缚水饱和度  $S_{wi}$ , 如果  $S_{wi}$  不准确,则会影响  $S_w$  的计算精度。

后来,这一方法被推广应用到砂泥岩剖面气层评价<sup>[13]</sup>,在煤层气解释评价方面也取得了不错的效果<sup>[14]</sup>。此外,在使用纵向电阻率比值交会图方面也取得一些进展,如利用目的层与围岩电阻率比值制作交会图评价低阻气层<sup>[15]</sup>,利用纵向电阻率比值交会图评价白云质泥岩缝洞型储层<sup>[16]</sup>,利用纵向电阻率比值交会图识别储层的流体性质等<sup>[17]</sup>。

可以看出,纵向电阻率比值法在生产中获得了广泛的应用,解决了一些实际问题。但是,该方法评价原理与阿尔奇公式类似,还是依靠单条电阻率曲线值的高低评价油水层,没有消除水性、岩性等变化对储层含油性评价的影响,不能摆脱高阻解释为油、低阻为水的传统解释模式,因而解决不了低阻油气层、复杂油气层等疑难层评价问题<sup>[18-19]</sup>,存在明显的局限性。

## 2.2 径向电阻率比值法技术的发展

径向电阻率比值法的核心是采用同一测量深度点的不同径向探测深度的电阻率值进行比较,进而评价储层的含油性。这一方法在二十世纪九十年代初开展应用研究<sup>[20]</sup>,仍采用计算含水饱和度的方式对油水层进行评价。其原理是对阿尔奇公式进行微分运算,推出一套计算储层含水饱和度的公式。后来这一方法被应用到水淹层的解释评价上<sup>[21]</sup>,都取得了一定的效果。公式为:

$$\Delta S_w = \frac{1}{n} \sqrt[n]{\frac{a \cdot b \cdot R_w}{\phi^n R_t}} \left( \frac{\Delta R_w}{R_w} - \frac{\Delta R_t}{R_t} \right) \quad (2)$$

式中: $\Delta S_w$  为含水饱和度的径向变化值,小数; $\Delta R_t$  为储层电阻率的径向变化值,小数; $\Delta R_w$  为地层水电阻率的径向变化值,小数; $a, b, m, n$  为岩电参数,无量纲; $\phi$  为储层孔隙度,小数; $R_w$  为地层水电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。

实际应用表明,微分法计算的含水饱和度能消除泥质及地层水电阻率变化的影响,因此,在油田开发过程中,使用该方法可以有效地识别因混合水、淡水等影响造成的水淹层,也可用来计算剩余油饱和度。但是,该方法合理使用比较复杂,不适合进一步推广使用。

随后,径向电阻率比值法在交会图评价方法和含水饱和度计算方法方面都有了广泛的应用研究。如采用深浅电阻率比值交会图评价复杂油气层<sup>[22]</sup>、低孔低渗储层<sup>[23]</sup>、气水层<sup>[24]</sup>、沥青砂岩储层等<sup>[25]</sup>。之后又将这一技术发展使用深电阻率与冲洗带电阻率比值评价低阻、复杂孔隙结构油气水层,取得了非常显著的效果<sup>[26-27]</sup>。

同时,提出了直接使用阿尔奇公式推导的径向电阻率比值计算储层含水饱和度的公式<sup>[28]</sup>:

$$S_w = \left[ \frac{R_{so} \cdot R_w}{R_t \cdot R_{mf}} \right]^{1/n} \cdot S_{so} \quad (3)$$

式中: $S_{so}$  为冲洗带含水饱和度,小数; $R_{mf}$  为泥浆滤液电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $R_{so}$  为冲洗带储层电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。

这是一种基于阵列感应测井资料的解释方法,该公式计算结果还能反映侵入带的含水饱和度变化,降低泥浆侵入、地层水电阻率变化、冲洗带残余油饱和度的影响,可以作为储层流体综合识别的一种方法。但该方法要获取的参数有地层水电阻率  $R_w$ 、泥浆滤液电阻率  $R_{mf}$ 、饱和度指数  $n$  及冲洗带含水饱和度  $S_{so}$ ,这些参数如何确定并没有给出有效的办法,因此,对其推广应用造成了一定影响。

再后来,视含水饱和度计算模型被提出<sup>[29]</sup>,其原理是用水层深浅电阻率比值作为标准来刻度未知层的含水饱和度,假定含水饱和度为 100% 的纯水层其原状地层电阻率与地层冲洗带电阻率的比值为常数  $a$ ,即  $a=R_t/R_{so}$ ,未知含水饱和度储层其原状地层电阻率与地层冲洗带电阻率的比值为  $b$ ,即  $b=R_t/R_{so}$ ,如果储层深浅电阻率比值能反映储层含油气程度,则  $a$  与  $b$  的比值可定义为储层含水程度。因为  $a$  是储层 100% 含水程度的反映,而  $b$  是储层含水程度不同时的反映,当储层为纯水层时,  $b \approx a$ 。实际资料表明,当储层含油性越高时  $b$  值越大,越低时  $b$  值越小,直到与纯水层相当。纯水层含水程度 100%,纯油层含水程度可能接近 0,与阿尔奇公式计算的含水饱和度  $S_w$  值的特点有相似性,可看作是一种视含水饱和度。公式为:

$$S_{wa} = a / (R_t / R_{so}) \quad (4)$$

式中: $S_{wa}$  为储层视含水饱和度,小数; $a$  为常数,反映单井某一层段内纯水层特征值,小数; $R_t$  为深探测电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $R_{so}$  为冲洗带电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。

可以看出,视含水饱和度仅依靠深浅电阻率资料就能计算,不需要孔隙度、岩电参数等资料。同时,视含水饱和度的高低与储层电阻率的高低无关,取决于深浅电阻率的比值,这就与阿尔奇公式有明显区别,避免了高阻是油、低阻是水的评价局限。使用视含水饱和度理论上可以有效识别评价低阻油层,这一方法也发展到使用深电阻率与冲洗带电阻率比值计算储层含水饱和度,效果要好于深浅电阻率比值法<sup>[26-27]</sup>。

此外,在使用不同仪器的径向电阻率比值评价低阻、复杂孔隙结构储层油水层方面也获得了较好的应用。如利用侧向与感应电阻率比值识别低渗透率储层流体性质<sup>[30]</sup>,采用双电法测井评价低阻油层<sup>[31]</sup>,还可进行复杂断块薄互层储层流体识别等<sup>[32]</sup>。

由上可以看出,径向电阻率比值法的发展有两个主要变化,一是用深电阻率与冲洗带电阻率比值代替原来的深浅电阻率比值评价油气水层,精度明显提高;二是计算含水饱和度的公式从以阿尔奇公式为基础到与阿尔奇公式无关,能够评价低阻油层,摆脱了阿尔奇公式的局限性<sup>[18-19]</sup>。因此,径向电阻率比值法与其它油气水层评价方法相比,有明显的优势。首先是不需要其它任何参数,避免了参数取值误差造成的解释失误;其次,通过比值消除了储层岩性、水性变化对评价含油性的影响<sup>[33]</sup>;再次,



通过比值消除了电阻率绝对值的高低对油水层评价的影响,储层的含油性评价与电阻率绝对值的高低无关,理论上能够识别低阻油气层。

3 应用展望

纵观近四十年来电阻率比值法的发展,使用电阻率比值法评价油气水层的方法较多,但纵向电阻率比值法原理上与阿尔奇公式类似,存在局限性,对复杂油气水层评价没有优势;径向电阻率比值法由于消除了岩性、水性、电性对含油性评价的影响,能够识别低阻、复杂孔隙结构储层的油气水层,因而获得了更加广泛的应用,在使用常规测井资料评价油气水层的方法中,变得越来越重要。因此,径向电阻率比值法代表了电阻率比值法的发展趋势。

当前,除电阻率比值法以外的常规测井资料的油气水层评价技术并无突破性进展,阿尔奇公式仍在发挥主导作用。使用以前的一些经典方法已不能满足水淹层、低阻油气层、致密油气层、高阻水层等日益复杂的疑难层评价要求,径向电阻率比值法为解决这一难题提供了相对有效的方法,因而具有广阔的应用前景。具体表现在三个方面:

(1)对冲洗带完全侵入的油气水层,深电阻率与冲洗带电阻率比值能够反映储层的含油性,补充完善了该方法理论缺陷,表明径向电阻率比值法一

样能够发展成为经典的油气水层评价方法,为该方法的推广应用打下了基础。依据如下:

对于式(3),当地层完全侵入时, $S_{xo}=1$ ,由于  $R_w/R_{mf}$ 、 $n$  为常数,式(3)可变为:

$$S_w=a/(R_d/R_{xo})^{1/n} \tag{5}$$

这就表明对完全侵入地层,储层含水饱和度与深电阻率和冲洗带电阻率比值为幂函数关系,即储层的含油性与深电阻率和冲洗带电阻率比值存在一一对应关系,因此,深电阻率与冲洗带电阻率比值能够反映储层的含油性。

(2)径向电阻率比值法消除了岩性、水性、电阻率的高低对含油性评价的影响,能够进行水淹层、低阻油气层、致密油气层、高阻水层的识别评价,具有其它常规测井资料评价方法所没有的优势。如使用径向电阻率比值交会图能够清楚的区分低阻油层与常规油层、高阻水层等,这是以前任何交会图版都做不到的。电阻率比值的大小本身就能区分油、气、水,这也为制作各种油气水层识别图版打下了基础。图 1 是使用径向电阻率比值进行低阻油层评价的应用实例, $R_d$  为深感应电阻率。图中油层区、油水同层区、水层区能够明显分开,每一区间都可有低阻和高阻之分,这样就比较容易识别低阻及复杂孔隙结构油气层,避免了以前交会图低阻油层落在水层区无法与水层区分局限。

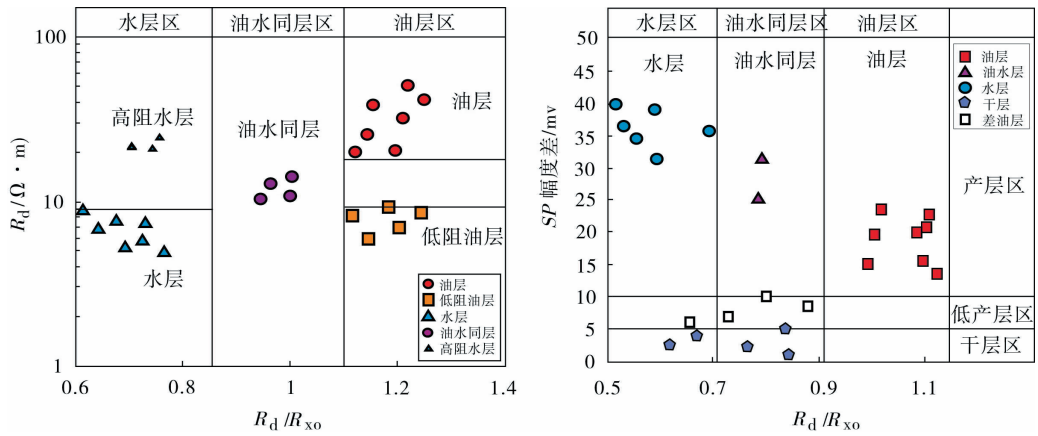


图1 使用径向电阻率比值评价油水层的应用实例

(3)视含水饱和度法计算简单,为推广应用提供了极大便利。具体表现在以下方面:

首先,通过比值能消除岩性、水性变化对电阻率计算含水饱和度的影响,提高含水饱和度的计算精度。如使用阿尔奇公式计算储层含水饱和度时,由于无法得到当储层岩性变化时所导致岩电参数变化,往往导致解释失误。而视含水饱和度法是,当

岩性变化导致储层电阻率较高时,其冲洗带电阻率同时变高,二者比值正好能消除岩性变化的影响。其次,储层电阻率的高低与储层的含油性无关,能够避免因常规的“高阻是油、低阻是水”解释模式与实际资料不吻合造成的解释失误。再次,需要参数较少或不需要其它参数,如不需要计算孔隙度,不需要相关岩电参数,仅仅依靠电阻率资料本身就能

评价,避免了参数确定误差所造成的解释失误。

图 2 是某区块低阻气层解释成功的实例,该井区块气层电阻率一般大于  $25 \Omega \cdot \text{m}$  以上,15 号层电阻率  $15 \Omega \cdot \text{m}$  左右,低于气层解释标准,阿尔奇公式计算含水饱和度偏高,解释为气水同层。经过使用

径向电阻率比值法计算视含水饱和度,15号层与邻近16号气层视含水饱和度数据范围相当,约38%~50%,甚至略好于16号气层,可以解释为气层。经过二层合试,日产气 $3.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,无水,证实径向电阻率比值法评价正确。

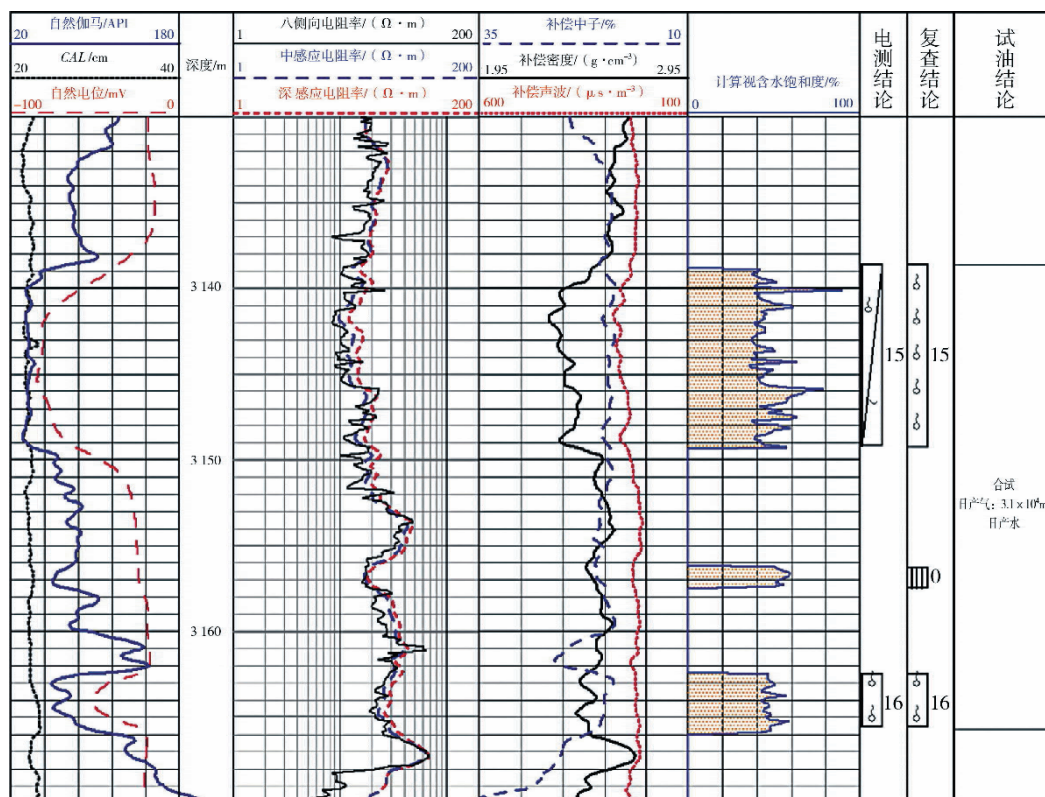


图2 某区块使用径向电阻率比值法评价低阻气层

可以看出,径向电阻率比值法有助于提高低阻油气层、复杂孔隙结构油气层的识别精度,具有其它测井油水层评价方法所不具备的优势。经过不同区块的应用,发现这一方法还存在一些问题,主要有两个方面:

①实际应用表明,冲洗带测井资料如八侧向测井、微球聚焦测井有时存在一些质量问题,可能是测井时仪器与井壁之间没有贴紧,表现在与深、浅电阻率资料反映具有不一致现象,匹配性不好,导致径向电阻率比值法无法使用或使用效果不好。阵列感应仪器的曲线匹配性效果较好,建议使用径向电阻率比值法以阵列感应资料为主。

②钻井时地层的侵入特性受影响因素较多,而比值法需要完全侵入地层的冲洗带电阻率。当地层不完全侵入时,冲洗带电阻率失真,其比值会导致计算结果产生误差。于是在使用径向电阻率比值法进行油水层评价时,要先进行冲洗带地层侵入特征

预判, 如何确定地层完全侵入是需要解决的问题。

因此,随着径向电阻率比值法的完善和发展,必将在复杂储层油气水层评价中发挥越来越重要的作用。

## 4 结论

(1)电阻率比值法可划分为纵向电阻率比值法和径向电阻率比值法,但二者解决问题的能力和应用效果差别较大。只有径向电阻率比值法能够有效评价复杂储层油气层,具有更广阔的应用前景。

(2) 径向电阻率比值法经过发展, 利用深电阻率与冲洗带电阻率比值代替深浅电阻率比值评价油气水层, 精度明显提高, 是对该方法的完善。进一步研究表明, 只有深电阻率与完全侵入的冲洗带电阻率比值能够反映储层的含油性, 理论上解决了径向电阻率比值法评价油气水层的有效性问题, 为该方法的推广使用提供了有力支撑。

(3)使用径向电阻率比值计算储层含水饱和度的模型还可进一步完善,有望解决参数确定问题,为今后获得可靠的含水饱和度资料指明了方向。

#### 参考文献:

- [1] 何伶,丁娱娇,迟秀荣,等.歧口凹陷内因低电阻率油气层饱和度定量评价方法[J].测井技术,2014,38(1):51-58, 89.
- [2] 郭迎春,庞雄奇,陈冬霞,等.致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题[J].石油与天然气地质,2013,34(6):717-724.
- [3] 张帆,闫建平,李尊芝,等.碎屑岩阿尔奇公式岩电参数与地层水电阻率研究进展[J].测井技术,2017,41(2):127-134.
- [4] 袁伟,张占松,吕洪志,等.水淹层混合液地层水电阻率的计算方法[J].石油天然气学报,2014,36(9):78-83.
- [5] 宋延杰,陈济强,唐晓敏,等.低孔渗泥质砂岩三水孔隙结合导电模型及其在海上油田的应用[J].大庆石油学院学报,2010,34(6):100-105.
- [6] 刘行军,崔丽香,李香玲,等.苏里格气田致密砂岩气层识别难点及方法评述[J].天然气勘探与开发,2015,38(1):22-29.
- [7] 张海涛,任战利,时卓,等.苏里格气田东区低阻气层成因机理分析[J].西北大学学报(自然科学版),2011,41(4):663-668.
- [8] 中国石油勘探与生产公司.低阻油气藏测井识别评价方法与技术[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [9] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释[M].东营:石油大学出版社,1996.
- [10] 张丽华,潘保芝,李舟波,等.新三水导电模型及其在低孔低渗储层评价中的应用[J].石油地球物理勘探,2010,45(3):431-435.
- [11] 谭廷栋,张龙海.电阻率浮动比值法 泥质砂岩油气、水层一个有效的评价新技术 [J]. 石油学报,1985,6(2):39-50.
- [12] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining Some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54-62.
- [13] 谭廷栋.测井解释凝析油气层[J].天然气工业,1987,7(1):21-27.
- [14] 潘和平,黄智辉.测井资料解释煤成气层方法研究[J].现代地质,1994,8(1):119-125.
- [15] 何胜林,张迎朝,高华,等.一种新的交会图流体识别方法在气层识别中的应用——以莺歌海盆地东方 13 区为例[J].石油天然气学报,2012,34(11):79-82, 169.
- [16] 赵俊峰,田素月,李凤琴,等.白云质泥岩缝洞型储层测井评价技术[J].测井技术,2014,38(5):581-586.
- [17] 程希,惠晨,路云峰,等.岩性构造控制储层流体评价技术——以鄂尔多斯盆地 CHN 油田为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2017,32(6):29-34, 43.
- [18] 孙建国.阿尔奇(Archie)公式:提出背景与早期争论[J].地球物理学进展,2007,22(2):472-486.
- [19] 杨克兵,王竞飞,马凤芹,等.阿尔奇公式的适用条件分析及对策[J].天然气与石油,2018,36(2):58-63.
- [20] 王协生,凌寿培.由径向电阻率求含水饱和度的方法及其应用[J].地球物理测井,1990,14(6):378-384.
- [21] 申本科.用微分法定量判别水淹层级别的条件[J].测井技术,1996,20(1):37-40.
- [22] 丁娱娇,邵维志,李庆合,等.一种利用阵列感应测井技术识别储层流体性质的方法[J].测井技术,2009,33(3):238-242.
- [23] 李功强,赵永刚,温伟.鄂尔多斯盆地镇泾油田长 8 段储层的判别标准 [J]. 石油地质与工程,2010,24(5):16-19.
- [24] 侯科锋,田敏,张志刚,等.苏里格气田气水层快速识别方法研究 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2017,19(2):69-74.
- [25] 黄若坤,齐婷婷,韩闯,等.塔中志留系沥青砂岩储层流体性质识别方法及应用 [J]. 工程地球物理学报,2017,14(1):116-122.
- [26] 赵璐阳,孙越,赵自民,等.电阻率比值法在苏里格低电阻率气层测井解释中的应用[J].测井技术,2018,42(6):689-694.
- [27] YANG Kebing, Li Shidong, Wang Huijing. Discussion on the method of evaluating oil and water layers by using ratio of deep resistivity and flush Zone resistivity [J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering, 2019, 7(1): 7-12.
- [28] 申辉林,张静,刘正锋.利用阵列感应测井资料计算储层含水饱和度方法[J].石油地质与工程,2010,24(6):76-78.
- [29] 杨克兵,袁晓红,刘明波,等.使用电阻率比值法评价油水层的方法研究 [J]. 天然气勘探与开发,2015,38(1):37-39, 67.
- [30] 杨洪明,谢丽,马建海,等.用侧向与感应电阻率比值识别低渗透率储层流体性质 [J]. 测井技术,2005,29(1):49-51.
- [31] 郑雷清.双电法测井在低电阻率储层流体性质识别中的应用[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006,28(3):304-306, 451-452.
- [32] 张凤生,隋秀英,房国庆,等.复杂断块长井段薄互层储层及流体快速识别[J].测井技术,2018,42(2):156-162.
- [33] 张明禄,石玉江.复杂孔隙结构砂岩储层岩电参数研究[J].石油物探,2005,44(1):21-23, 28.

(编辑 杨芝文)