



张丽华, 潘保芝, 单刚义, 等. 2023. 阿尔奇公式中饱和度指数影响因素及特征概述. 地球物理学进展, 38(3): 1247-1256, doi: 10. 6038/pg2023GG0430.

ZHANG LiHua, PAN BaoZhi, SHAN GangYi, et al. 2023. Research progress on influencing factors of saturation index n in Archie formula. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 38(3): 1247-1256, doi: 10. 6038/pg2023GG0430.

阿尔奇公式中饱和度指数影响因素及特征概述

Research progress on influencing factors of saturation index n in Archie formula

张丽华, 潘保芝, 单刚义*, 郭宇航

ZHANG LiHua, PAN BaoZhi, SHAN GangYi*, GUO YuHang

吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

College of Geoporation Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

摘要 饱和度指数是预测含水饱和度的一个重要参数。它的影响因素很多。主要的因素有以下几个方面: 微孔隙、润湿性、地层温度压力、地层水矿化度、颗粒粗糙度、成岩相、孔隙空间连通性、泥质含量、驱替顺序、驱替介质和频散特性。本文针对以上影响因素, 简单概述各因素的影响特点及结果, 并分析原因, 给出实际应用建议。旨在为研究饱和度指数相关研究提供参考。

关键词 饱和度指数; 润湿性; 孔隙结构; 频散特性; 成岩相; 驱替; 温度压力

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10. 6038/pg2023GG0430

Abstract Saturation index is an important parameter for predicting water saturation. Many influencing factors exist. The main factors are as follows: micro pores, wettability, formation temperature and pressure, formation water salinity, particle roughness, diagenetic facies, pore space connectivity, shale content, displacement sequence, displacement medium and dispersion characteristics. Aiming at the above influencing factors, this paper briefly summarizes the influencing characteristics and results of each factor, analyzes the reasons, and gives practical application suggestions. The purpose is to provide reference for the study of saturation index.

Keywords Saturation index; Wettability; Pore structure; Dispersion characteristics; Diagenetic facies; Displacement; Temperature and pressure

0 引言

阿尔奇公式将含水饱和度 S_w 和地层电阻率 R_t 联系起来, 利用测井资料, 通过该公式可以定量计算含水饱和度 (Archie, 1942; 李舟波, 2003)。在 $I-S_w$ 交会图中, 如果采用双对数坐标, 交会图的斜率就是饱和度指数 n 。

饱和度指数是预测含水饱和度的一个重要参

数。不同类型的油藏具有不同的岩石物理性质, 饱和度指数 n 也有差异。准确确定饱和度指数 n 值在储层测井评价中具有重要意义。饱和度指数 n 在阿尔奇方程中为幂指数, 因此, 其微小变化可导致含水饱和度的明显变化。饱和度指数 n 一般从测井数据和岩心实验分析得到。影响岩石导电性的因素很多, 主要有地层温度、压力、泥质与导电矿物、岩石孔隙结构特性和连通性、润湿性、流体矿化度以及驱替顺序

收稿日期 2022-10-26; 修回日期 2023-04-15.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金面上项目(42072323)资助。

第一作者简介 张丽华, 女, 1974年生, 博士, 正高级工程师, 现从事石油地球物理测井的处理与解释研究以及岩石物理实验研究。

E-mail: zhanglh@jlu.edu.cn

* 通讯作者 单刚义, 男, 1970年生, 博士, 高级工程师, 现从事地震数据处理与解释研究。E-mail: shangangyi@jlu.edu.cn

和驱替介质等(石玉江等,2011;宋延杰等,2014;高楚桥等,1998;欧阳健等,1999;原海涵,1992;张宏志,2014;石玉江等,2010;沈金松等,2010),进而影响饱和度指数,饱和度指数的变化范围很大,在2~25之间(Keller,1953;Moore,1958;Sweeney and Jennings,1960;Morgan and Pirson,1964;Lewis *et al.*,1988;Chon,1989;Toumelin and Torres-Verdín,2005).

研究发现,研究饱和度指数 n 的影响因素的方法主要有两种:一是通过建立各种模型进行数值模拟;二是用样品进行岩石物理实验.影响饱和度指数 n 的因素,一个是储层本身性质带来的影响,包括微孔隙、润湿性、地层温度压力、地层水矿化度、颗粒粗糙度、成岩相、频散特性、孔隙空间连通性、泥质含量等(王克文,2007;Suman and Knight,1997;Wang and Sharma,1988;Morgan and Pirson,1964;Lewis *et al.*,1988;Fleury,2002;杨春梅等,2006;赵军等,2004;沈爱新等,2005;邓少贵等,2000;Lewis *et al.*,1988;张帆等,2017;关继腾等,1999;高楚桥等,2003;孙建孟等,2006;熊健等,2018;Sbiga,2012;王勇等,2006;夏宏泉等,2002;王楠,2014;王建等,2004;Aboujafar and Amara,2013;Diederix,1982;Toumelin and Torres-Verdín,2005;刘洪平等,2017;Zhou *et al.*,2019;李霞等,2020;Xiao *et al.*,2013;汪中浩和章成广,2004);另一个是实验方法和实验介质带来的影响,包括:实验过程是驱替还是自吸,实验介质是油还是气,测量电阻率使用的频率等(Rust,1957;Lyle and Mills,1989;欧阳健等,1999;Marsden *et al.*,1973;Lewis *et al.*,1988;Knackstedt *et al.*,2007;车宇,2015;范宜仁等,1994;邓少贵等,1998;孙建孟等,2006;Fleury and Liu,2000).多数文献都是从某一方面或某几方面进行研究,关于饱和度指数的影响因素,前人没有专门进行过详细的总结分析.本文概述了饱和度指数的主要影响因素和影响结果,并分析了原因,最后给出了相应的应用建议(Keller,1953;Moore,1958;Sweeney and Jennings,1960;Morgan and Pirson,1964;Lewis *et al.*,1988;Chon,1989;Toumelin and Torres-Verdín,2005).

1 饱和度指数影响因素分析

饱和度指数的影响因素有很多,主要包括以下几个方面:(1)测量手段因素,如温度、压力、矿化度、驱替相、驱替顺序等;(2)岩石微观因素:包括微孔隙、泥质含量、水膜厚度、颗粒粗糙度、润湿性、孔隙连通性和非均质性等;(3)其他因素.

1.1 温度、压力、矿化度的影响

温度升高有两方面作用:一是改变孔隙里两相流体的分布状态,使岩石更亲水;二是增大岩石孔隙,孔隙喉道膨胀,增强岩石导电能力,使饱和度指数 n 值减小.如果矿化度增高,会增加可移动的导电离子的数量,会减小岩石的电阻率,使得 n 值增大(杨春梅等,2006);当压力增加时,孔隙中导电流体的含量会减少,但是,压力变化对 R_i 与 R_0 的影响一样.因此,当压力增大时, n 值也随着增大(图1和图2)(赵军等,2004;沈爱新等,2005;邓少贵等,2000;Lewis *et al.*,1988;张帆等,2017;关继腾等,1999).高楚桥等(2003)认为饱和度指数 n 随着温度增加而降低,随着压力增加而增加.孙建孟等(2006)等通过多种压力实验得到的结论是,随着压力的增大,饱和度指数是增大的,但增大幅度较小.熊健等(2018)对碳酸盐岩的研究,也得出相同的结论.Sbiga(2012)认为随着应力增大, n 值有时增大,有时减小,受岩样的力学性质以及孔隙结构的影响.如果同时考虑温度和压力,情况就更加复杂.王勇等(2006)和夏宏泉等(2002)等通过实验发现:油藏条件下的 n 值小于常规条件的 n 值.而王楠(2014)认为饱和度指数与孔隙度大小有关,当孔隙度大于14%时,常温常压条件下的饱和度指数 n 值小于高温高压下的饱和度指数 n ;当孔隙度小于14%时,规律是相反的.王建等(2004)测量得出的地层条件下的饱和度指数小于地面条件测得的饱和度指数.

Lewis等(1988)发现:水湿岩心和油湿岩心的饱和度指数随压力的增加而增加.对于水湿岩心,在排驱过程和渗吸过程中,饱和度指数变化分别为7%和7.6%.压力对油湿岩芯的影响甚至更小,饱和度指数幅度变化仅为4%.所有样品的压力最大影响仅为8%左右.Aboujafar和Amara(2013)用驱替法得到油藏条件下的饱和度指数大于地层条件,一般高出0.3左右.

1.2 驱替的影响

Rust(1957)用三种类型的岩心做实验:干膜A类样品,疏水或优先油湿的样品;经酸处理的B类样品,亲水或优先为水湿的样品;以及天然的C类样本.将油作为驱替相得到的饱和度指数与空气驱替得到的饱和度指数进行了比较.对于天然的和优先水湿样品,二种驱替相得到的 n 值具有可比性.但是,非水湿样品的 n 值不同,通过空气驱替,获得的 n 值较低, n 值为3.5,通过油驱替, n 值为13.5(如图3所示).

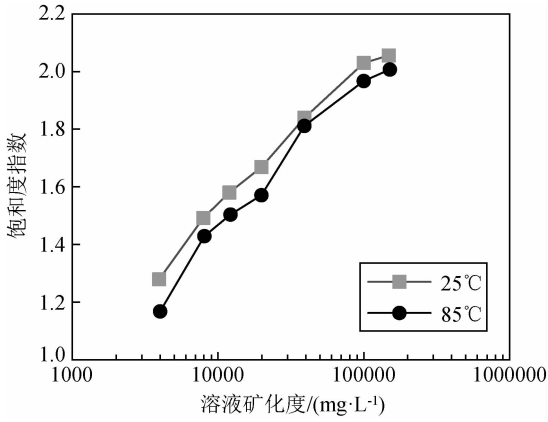


图1 饱和度指数与温度、矿化度关系图
Fig.1 Relationship between saturation index, temperature and salinity

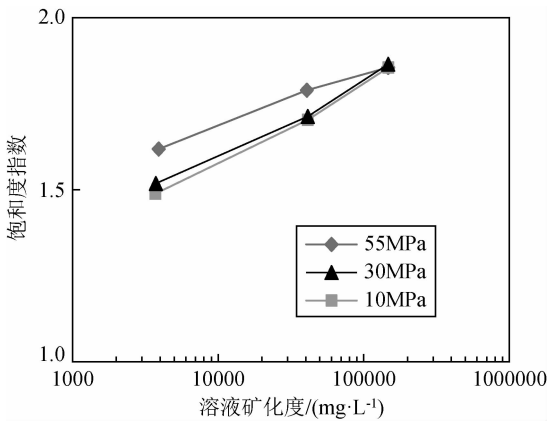


图2 饱和度指数与压力、矿化度关系图
Fig.2 Relationship between saturation index, pressure and salinity

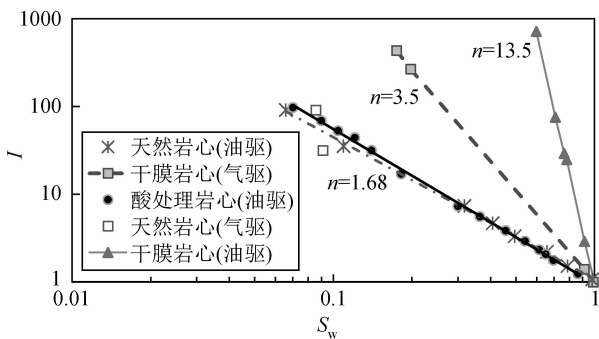


图3 不同驱替相的 I-S_w 关系图
Fig.3 I-S_w diagram of different displacement phases

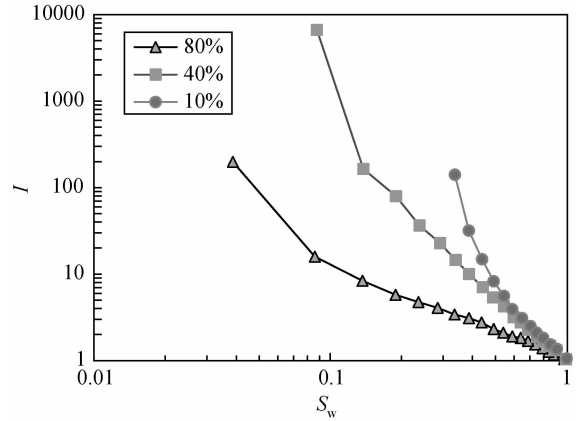


图4 微孔隙对 I-S_w 关系的影响图
Fig.4 Effect of micropore on I-S_w relationship

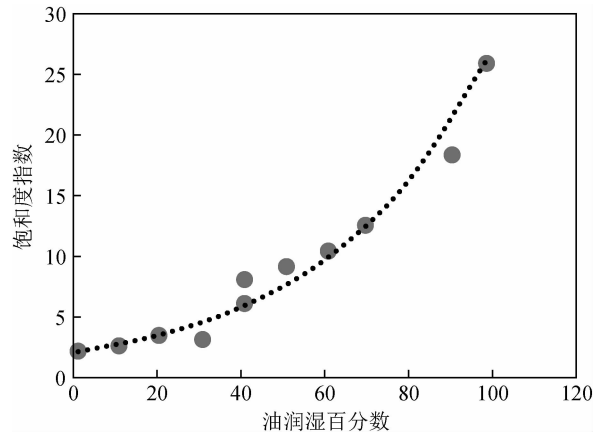


图5 油湿比例与饱和度指数关系图
Fig.5 Diagram of saturation exponent and fractional oil wettability

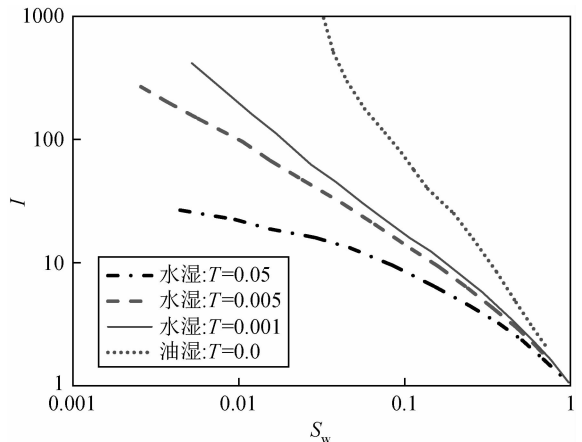


图6 水膜厚度对 I-S_w 关系的影响图
Fig.6 Influence of water film thickness on I-S_w relationship

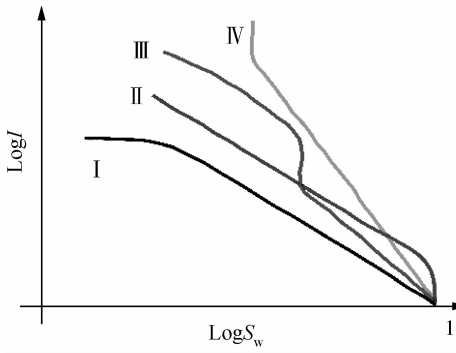


图 7 $I-S_w$ 交会图
Fig. 7 Crossplot of $I-S_w$

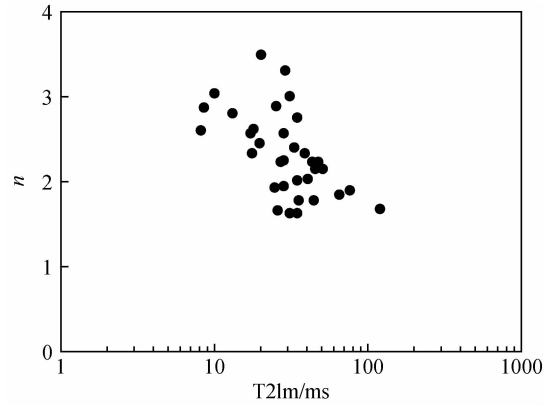


图 10 T_2 几何均与饱和度指数交会图
Fig. 10 The cross plot of T_2lm vs. saturation exponent

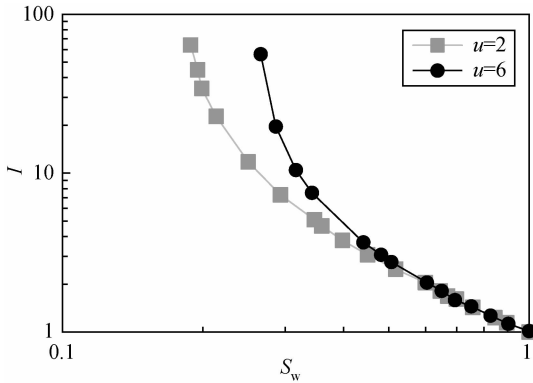


图 8 平均孔隙尺寸对 $I-S_w$ 曲线的影响关系图
Fig. 8 Effect of average pore size on $I-S_w$ curve

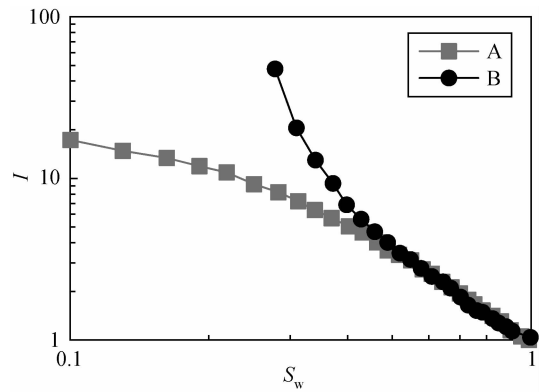


图 11 连通性对 $I-S_w$ 关系影响图
Fig. 11 Influence diagram of connectivity on $I-S_w$ relationship

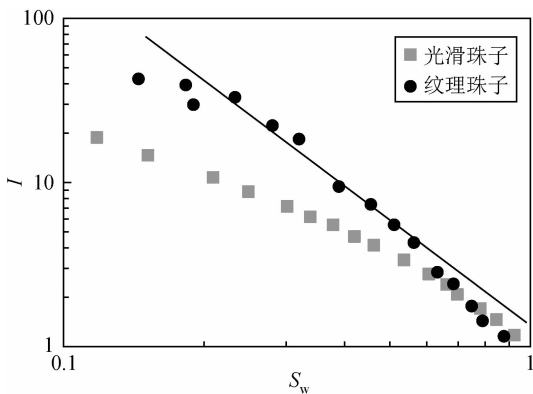


图 9 由玻璃珠构成的样品 $I-S_w$ 关系图
Fig. 9 $I-S_w$ diagram of sample composed of glass beads

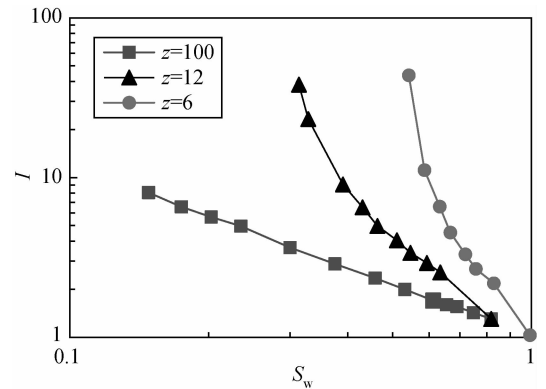


图 12 不同配位数下 $I-S_w$ 关系图
Fig. 12 $I-S_w$ diagram under different coordination numbers

Longeron(1991)对比了砂岩岩样气驱水和油驱水时的电性差异. 也发现:气驱水实验得到的 n 值小于油驱水得到的 n 值. 油驱时, n 值是 2.04, 气驱时, n 值是 1.62. 因为使用气体作为驱替介质, 孔隙中水膜的厚度和分布情况不同于用油驱水.

1.3 驱替顺序对饱和度指数的影响

驱替时, 岩心中润湿相存在滞后现象, 岩心中的流体呈现不均匀分布状态. 当用非润湿相流体驱替

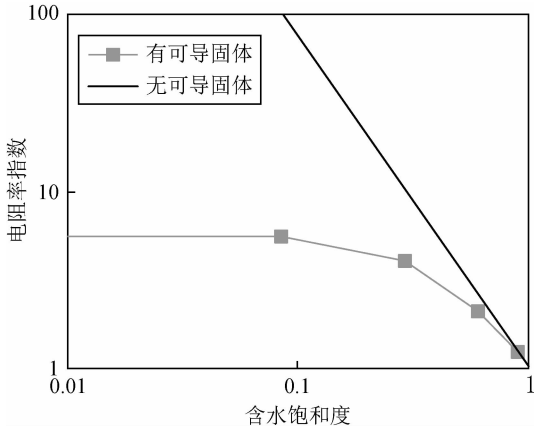


图 13 Stevens 砂岩中可导固体对电阻率指数与含水饱和度关系的影响

Fig. 13 Effect of conductive solids in Stevens Sandstone on the relationship between resistivity index and water saturation

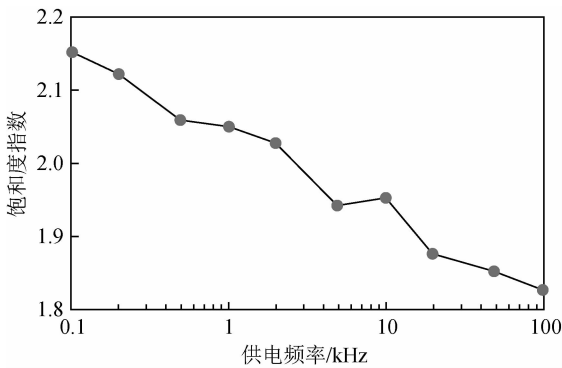


图 14 供电频率与饱和度指数关系图

Fig. 14 Relationship between power supply frequency and saturation index

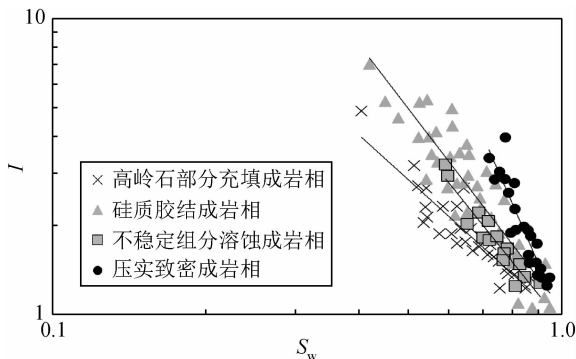


图 15 不同成岩相类型 I-S_w 关系图

Fig. 15 I-S_w of different diagenetic facies

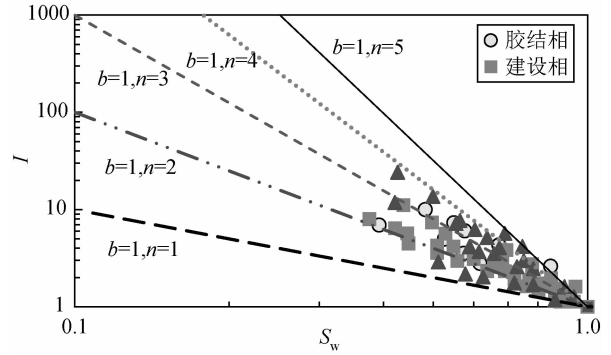


图 16 不同成岩相的 I-S_w 关系图

Fig. 16 Relationship between resistivity index and water saturation of different diagenetic facies types

润湿相流体时, n 值偏大; 反过来, 则 n 值偏小. 对于同一块岩心而言, 用注入和驱替润湿相这两种方法得到的 n 值会有差异. 研究表明, 饱和度指数 n 值, 在不同的驱替方式下是明显不同的 (Lyle and Mills, 1989; 欧阳健等, 1999), 但是不同研究人员得到的结论并不一致. Wang 和 Sharma (1988) 发现: 自吸过程的 n 值明显比驱替过程的 n 值大. Marsden 等 (1973) 对于 Berea 砂岩, 灰岩和 Boise 砂岩, 在特定的温度下, 自吸过程的饱和度指数等于或大于排驱过程的饱和度指数. Lewis 等 (1988) 发现: 水湿岩心, 在排驱过程中, 饱和度指数在 1.87 到 1.99 之间变化, 然后再下降到 1.87, 对于渗吸情况, 从 1.28 到 1.37. Knackstedt 等 (2007) 实验方法和模拟方法得到的结果是一致的. 自吸过程的饱和度指数 n 是 1.5, 排驱过程的饱和度指数 n 是 2. 吴需要 (2016) 的实验结论是: 饱和度指数与岩样渗透率有关. 如果岩样渗透率大于 $0.0003 \mu\text{m}^2$, 气驱法饱和度指数 n 小于自吸法; 如果岩样渗透率小于 $0.0001 \mu\text{m}^2$, 气驱法饱和度指数大于自吸法. Lyle 和 Mills (1989) 发现: 是由如果岩心内流体分布不均匀会引起饱和度指数 n 值升高. 而欧阳健等 (1994) 的实验结论是: 由隔板法驱替得到的饱和度指数 n 值大于常规驱替实验得到的 n 值. 车宇 (2015) 认为, 对于渗透率大于 $0.001 \mu\text{m}^2$ 的岩样, 气驱降水法和自吸增水法得到的饱和度指数基本相同. 对于渗透率小于 $0.001 \mu\text{m}^2$ 的岩样, 气驱降水法得到的饱和度指数大于自吸增水法.

在含水饱和度较低时, 自吸法使地层水更多地分布于中孔隙或者大孔隙里, 更容易形成有效的导电通路, 因此与气驱法的岩石电阻率相比, 自吸法的

岩石电阻率较低;在含水饱和度较高时,自吸法和气驱法形成的地层水分布状态趋于一致,岩石的电阻率没有明显差别.油气运移形成油藏的过程是油驱水的过程,与驱替过程类似,钻井液侵入是吸吮过程,与自吸法过程类似,开展驱替顺序实验研究具有实际意义.

1.4 微孔隙的影响

半径尺寸小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙通常称为微孔隙.大多数储层是水湿的(Cuiec,1984),流体需要有很高的毛细管压力才能进入微孔隙,在一般的地层压力条件下,油气是很难进入的,一般情况下,毛管束缚水全部占据微孔隙,这些水是具有导电特性的,能够为电流提供附加的传导路径,因此微孔隙的数量多少会明显影响岩石的电阻率.图4是王克文(2007)基于逾渗网络模型研究微孔隙对电阻率指数影响规律的结果,图例中的百分数为微孔隙率,等于微孔隙的孔隙体和喉道所占比例.假设含水饱和度相同,如果储层微孔隙不发育,那么饱和度指数明显大于微孔隙发育的储层.这是由于微孔隙的存在,使岩石的电阻率大幅度降低.

1.5 润湿性的影响

孔隙中流体分布的几何形状和是否连通会受到储层润湿性的影响,而孔隙中水相的连续性直接影响岩石电阻率,因此润湿性直接影响电阻率的大小.学者们的实验研究工作表明,饱和度指数的值随着多孔介质对水或油的优先润湿而发生显著变化,润湿性强烈影响 n 的大小.对于水湿岩心, n 值近似为常数.对于油湿岩心, n 值要复杂得多.Keller(1953)表明,如果润湿性改变,在同一含水饱和度下可以获得不同的电阻率值.对于同一块岩石,他的 n 值在 1.5 到 11.7 之间.Moore(1958)测量了宾夕法尼亚州 Bradford Third sand 两口井的 150 个岩心的电阻率,发现在垂直方向和横向方向上都存在显著变化.电阻率的变化归因于润湿性的差异.饱和度指数的范围为 1.6 至 2.7.Sweeney 和 Jennings(1960)获得了碳酸盐岩中 n 的变化范围从 1.6 到 5.7,他们得出结论,在给定的含水饱和度下,当表面优先为油湿时,电阻率(因此 n)更大.Morgan 和 Pirson(1964)用有机氯代苯胺溶液将一部分玻璃珠子处理成油湿.“剩下的珠子”未经处理,因此是水湿的.通过改变油湿和水湿珠的比例,实现不同油湿比例下电阻率的测量.当所有的珠子都是水湿时, n 是 2.5,当所有的珠子都是油湿时, n 是 25.饱和度指数与样品的润湿性几乎呈线性关系(如图5所示).Lewis 等(1988)

确定水湿贝蕾砂岩的饱和度指数为 2.0,油湿贝蕾砂岩的饱和度指数为 5.2.Chon(1989)得到水湿岩石的 n 值为 1.7~2.5,而油湿岩石的 n 值为 2.5~20.Donaldson 和 Bizerra(1984)得到的岩心的饱和度指数 n 的范围是 3.82~8.45.Toumelin 和 Torres-Verdín(2005)认为,在油润湿岩石中,饱和度指数可以达到 10 以上.王克文(2007)利用逾渗网络模型通过微观数值模拟研究了润湿性对饱和度指数的影响,模拟结果表明:油润湿储层与水润湿储层相比,油润湿储层的饱和度指数较大.谢然红等(2002)研究结果表明:岩石越油湿,饱和度指数越大.

1.6 水膜厚度的影响

由于储层不同特性,在含水饱和度较低的情况下,润湿水膜的存在形式有连续型和分散型.连续型是指水膜在孔隙之间连在一起,能够形成宏观的电流通道,该水膜主要存在于均质、孔隙之间连通性好的储层中.分散型水膜以孤立状存在,被相邻孔隙中的油气捕集起来,宏观的连续电流通道不能形成,该水膜主要存在于非均质性强、孔隙之间连通性差的储层中.王克文(2007)利用逾渗网络模型通过微观数值模拟研究水膜厚度对电阻率指数影响的结果表明:随着水膜厚度增大,电阻率指数逐渐降低,饱和度指数变小,如图6所示.图中 T 是水膜厚度,单位为微米.

Suman 和 Knight(1997)研究了三个水膜厚度:0 m,1.0~8 m 和 1.0~7 m 对电阻率指数的影响,它们相当于网络的平均孔径半径的 0%,0.37% 和 3.70%.得到的 n 值分别是 2.01,1.69,1.09.随着水膜厚度增加, n 值降低.Wang 和 Sharma(1988)在他的三维孔隙网络模型中,用有效介质理论模拟电和水的电导性.设置水膜厚度分别为 $0 \mu\text{m}$, $0.001 \mu\text{m}$, $0.01 \mu\text{m}$.结果是随着水膜厚度的增加, n 值也是降低的.Dicker 和 Bemelmans(1984)也得到了相似的结论.

1.7 孔隙尺寸的影响

Fleury(2002)总结了碳酸盐岩地层 $I-S_w$ 交会图的不同类型(如图7所示).交会图中 I、II 和 III 是由于孔隙尺寸分布引起的,而 IV 是受润湿性影响.Wang 和 Sharma(1988)研究了平均孔隙尺寸 μ 对水湿的岩石驱替行为的影响.图8显示了平均孔隙尺寸 μ 对水湿岩石驱替行为的影响.随着平均孔隙尺寸的增大, $I-S_w$ 曲线向上凹的形态更明显,在给定的 S_w 值下, n 值都更大.

1.8 颗粒粗糙度的影响

Diederix(1982)分别对光滑玻璃珠和纹理玻璃珠制成的人造样品进行了饱和度指数测量.结果表明,粗糙表面确实会导致对 $I-S_w$ 关系有影响.如果是光滑的珠子,在低含水饱和度时,只有很薄的水膜覆盖在珠子上,这种情况下的导电率很低.如果是纹理珠子,即使是水饱和度与光滑珠子的饱和度相等,则更多的水通过微孔系统中的毛细管力保持在整个颗粒表面上,从而产生相当高的导电率.在高含水饱和度时,这一影响可以忽略.可以预料,在高含水饱和度下,当粗糙度增加时,曲率将向更高的 S_w 值移动,从而形成一条具有低斜率(n^*)的单一曲线(如图9所示).Toumelin和Torres-Verdín(2005)用随机游走方法模拟了水膜对电阻率指数的影响.用300 nm的水膜模拟的结果和粗糙表面的泥质砂岩的结果是一致的.

1.9 孔隙结构对饱和度指数的影响

核磁共振 T2 谱能直观地反映岩石孔隙分布(邓克俊和谢然红,2010;YAN *et al.*,2017).T2 几何均值 T2_{lm} 反映了核磁共振 T2 分布的总体特征,与岩石孔隙结构密切相关.对于孔隙结构好的岩石,占主导地位的是大孔隙组分的比例,T2_{lm} 值较大;相反,孔隙结构差的岩石一般是以小孔隙组分的比例占主导地位,T2_{lm} 值较小.李霞等(2020)认为饱和度指数 n 值受大小孔隙比例的控制,随着 T2_{lm} 几何均值增大,饱和度指数减小.

Xiao等(2013)的研究结果是,饱和度指数与小孔部分的比例成正比,与 T2_{lm} 成反比(图10).李奎周等(2011)通过核磁发现,对于孔隙度较低的储层,孔隙结构越复杂,饱和度指数越大.因为束缚水的含量随着孔隙结构的复杂而增高,高束缚水会引起强附加导电性,含水饱和度的较小变化会引起其较大的电阻率变化,从而引起饱和度指数增大.

1.10 孔隙空间连通性与均质状况对饱和度指数的影响

王克文等(2006)利用逾渗网络模型模拟水湿储层中连通性好坏对饱和度指数的影响.图11“*A*”是指均质,孔隙连通性好的储层,“*B*”是指非均质较强,孔隙连通性差的储层.从图11可以看出:如果储层均质,孔隙之间连通性好,那么即使含水饱和度很低,连续的润湿水膜也会形成连续的电流通道,产生附加导电性.随着含水饱和度逐渐减小,电阻增大率接近一固定值,饱和度指数减小.如果储层非均质性较强,连通性不好,那么孔隙表面的润湿水膜呈不连

续、分散状态,不能形成连续的电流传导通道,随着含水饱和度逐渐减小,饱和度指数 n 和电阻增大率 I 都迅速增高.

Xiao等(2013)从铸体薄片获得了平均配位数,并用于表征连通性(Wangand Sharma,1988).平均配位数,即连接到孔隙体的孔喉的平均数量,配位数越大,表示孔隙的连通性越好.饱和度指数与平均配位数成反比.连通性越好,饱和度指数越小.Wang和Sharma(1988)将多孔介质用孔喉和孔隙体组成的网络表示.相邻孔隙体通过孔喉连接.孔隙空间的拓扑结构用配位数 z 表征, z 是指连接到孔隙体的孔喉的数量. z 值越大,表示连通性越好.研究结果如图12所示,连通性越好, n 值越小.

1.11 泥质含量对饱和度指数的影响

汪中浩和章成广(2004)认为,如果岩石中存在一定的泥质,会降低饱和度指数 n 值.原因一是因为泥质的存在使岩石的孔隙结构变得比较复杂,减小了毛管孔径的分布指数,进而使 n 值降低.原因二是,假设岩石孔隙结构不变,由于岩石中含有泥质,等同于与一个较小的电阻并联,如果岩石饱和水,它对 R_0 的影响甚微,当岩石含油时,与具有相同孔隙结构的纯砂岩相比,泥质岩石的电阻率显著降低,并且随着含油饱和度增高,影响增大.Liu等(2015)也得出相同的结论.Patnode和Wyllie(1950)的实验结果(图13)证实了这一结论,图中可导电体指的是黏土.

结构泥质一般是减小孔喉半径,使喉道变小,导电性变差,增大饱和度指数;而分散泥质是使孔隙度减小,束缚水含量变大,饱和度指数降低.刘洪平等(2017)得出饱和度指数先随着泥质含量增加而减小,然后随着泥质含量增加而增大.Kurniawan和Bassiouni(2007)实验结论是饱和度指数与阳离子交换容量正相关.

1.12 频散特性对饱和度指数的影响

在不同的频率下,岩石的电阻率是不同的,这会引起含水饱和度 S_w 和电阻率增大系数 I 的关系发生变化(范宜仁等,1994),继而导致饱和度指数 n 不同.邓少贵等(1998)测量了同一块岩样在不同频率下的电阻率和饱和度,结果表明:在不同的频率下,饱和度指数是不同的(如图14所示).频率越大,饱和度指数越小.孙建孟等(2006)也得到了同样的结论.Fleury(2000)认为频率对电阻率的最主要影响是降低饱和度指数.频率从10 Hz到2000000 Hz,亲油岩样的饱和度指数从2.7下降到2.0,亲水的

砂岩和碳酸盐岩样品的饱和度指数从 2 下降到 1. 井下各种测量电阻率的仪器使用的频率是不同的, 岩电测量实验应该在测井的频率基础上进行实验. 如果要满足多种频率下岩电参数的需求, 在实验室就要进行多种频率的电阻率测量, 这样才能确定正确的饱和度指数.

2 不同岩性与岩相的饱和度指数特征

成岩相一般指岩石颗粒、胶结物类型、组构、孔隙、洞和裂缝及组合关系等(邹才能等, 2008). 刘洪平等(2017)把致密砂岩划分为高岭石部分充填成岩相、硅质胶结成岩相、不稳定组分溶蚀成岩相和压实致密成岩相(图 15), 它们的饱和度指数 n 依次为 1.51, 2.3, 2.03, 4.04.

Zhou 等(2019)将岩相分为胶结相, 建设相和破坏相. 不同岩相, 饱和度指数是不同的(如图 16 所示). 胶结相饱和度指数 n 是 2.3, 而建设相和破坏相的饱和度指数 n 值范围很大.

3 总结与展望

- (1) 微孔隙的含量越大, 饱和度指数越小.
- (2) 润湿性对饱和度指数具有影响. 如果储层是油湿的, 它的饱和度指数会比水湿储层的饱和度指数大.
- (3) 饱和度指数也受水膜厚度的影响, 水膜越厚, 饱和度指数越小.
- (4) 孔径分布越宽, 饱和度指数越小.
- (5) 颗粒粗糙度对饱和度指数有影响. 颗粒越粗糙, 饱和度指数越小.
- (6) 成岩相和泥质的分布形式对饱和度指数有影响. 不同成岩相类型 n 值有明显差异. 泥质含量越高, 饱和度指数越小; 分散泥质使 n 值减小, 结构泥质使 n 值增大.
- (7) 孔隙连通性越好, 储层越均质, 饱和度指数越小. 孔隙结构越复杂, 饱和度指数越大.
- (8) 驱替顺序对饱和度指数有影响, 自吸过程的 n 值明显比驱替过程的 n 值大.
- (9) 气驱的饱和度指数小于油驱的饱和度指数.
- (10) 频率越大, 饱和度指数越小.

文中总结的影响饱和度指数的因素是该研究领域的现实状况, 在实际应用中, 各影响因素的影响侧重点不同. 要根据具体应用情况来考虑. 随着理论的完善和算法的改进, 将来可能建立更符合实际地质

情况, 更复杂的模型来研究这些影响因素, 以确定更准确的饱和度指数 n .

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Aboujafar S M, Amara M A. 2013. A comparison between capillary and electrical properties of rock samples obtained at ambient conditions and reservoir conditions. //83rd Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Archie G E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME, 146(1): 54-62.
- Che Y. 2015. Study on the relationship between pore structure parameters and electrical properties of tight sandstone [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Southwest Petroleum University.
- Chon B. 1989. Measurement of reservoir rock properties in their natural condition [Ph. D. thesis]. College Station: Texas A&M University, 27-38.
- Cuieck L. 1984. Rock/crude-oil interactions and wettability; an attempt to understand their interrelation. //54th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Deng K J, Xie R H. 2010. Theory and Application of Nuclear Magnetic Resonance Measurement (in Chinese). Qingdao: China University of Petroleum Press, 46-47.
- Deng S G, Bian R X, Fan Y R, et al. 1998. Study on rock resistivity dispersion and its effect on parameters for Archie Formula. Well Logging Technology (in Chinese), 22(4): 227-230.
- Deng S G, Fan Y R, Duan Z F, et al. 2000. Experiment study of rock resistivity with multi-temperature and multi-salinity. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 35(6): 763-767.
- Dicker A I M, Bemelmans W A. 1984. Models for simulating the electrical resistance of porous media. //54th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Diederix K M. 1982. Anomalous relationships between resistivity index and water saturations in the Rotliegend sandstone (the Netherlands). //52th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Donaldson E C, Bizerra M J. 1984. Relationship of wettability to the Archie saturation exponent. //3rd international UNITAR/UNDP Heavy Crude and Tar Sands Conference, Preprints v. 2: United Nations Institute for Training and Research, Information Center for Heavy Crude and Tars, New York, 664-684.
- Fan Y R, Lu J M, Wang G H, et al. 1994. Experimental study on the dispersion of rock resistivity. Journal of the University of Petroleum, China (in Chinese), 18(1): 17-23.
- Fleury M. 2002. Resistivity in carbonates: new insights. //72nd Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts, 1-9.
- Fleury M, Liu F H. 2000. Frequency effect on resistivity index curves using a new method. //70th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Gao C Q, Li X P, Wu H S, et al. 2003. An experimental study on the influence of temperature and pressure on petrophysical and electrical properties. Well Logging Technology (in Chinese), 27(2): 110-112.
- Gao C Q, Zhang C G, Mao Z Q. 1998. The effects of wettability on the electrical properties of rocks. Progress in Geophysics (in Chinese), 13(1): 60-72.
- Guan J T, Fang W J, Wang Y D. 1999. The effect of reservoir characteristics on Archie saturation index. Well Logging Technology (in Chinese), 23(6): 419-423.
- Keller G V. 1953. Effect of wettability on the electrical resistivity of sand. Oil and Gas Journal, 51(1): 62-65.

- Knackstedt M A, Arns C H, Sheppard A P, *et al.* 2007. Archie's exponents in complex lithologies derived from 3D digital core analysis. //77th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Kurniawan B, Bassiouni Z. 2007. Use of CEC-dependent cementation and saturation exponents in shaly sand resistivity models. //77th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Lewis M G, Sharma M M, Dunlap H F. 1988. Wettability and stress effects on saturation and cementation exponents. //58th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Li K Z, Ge X M, Wang H L, *et al.* 2011. Study on influence factors of saturation index of low porosity and permeability cores under experiment condition. Special Oil and Gas Reservoirs (in Chinese), 18(3): 35-38.
- Li X, Li C L, Li B, *et al.* 2020. Response laws of rock electrical property and saturation evaluation method of tight sandstone. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 47(1): 202-212.
- Li Z B. 2003. Geophysical Logging Data Processing and Comprehensive Interpretation (in Chinese). Changchun: Jilin University Press, 10-13.
- Liu H P, Luo Y, Zhao Y C, *et al.* 2017. Effects of diagenetic facies on rock electrical properties in tight gas sandstones. Earth Science (in Chinese), 42(4): 652-660.
- Liu X F, Li D Y, Zhao T P, *et al.* 2015. Effect of pore geometries on Archie's exponents in tight sandy conglomerate. //85th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Longeron D G. 1991. Laboratory measurements of cementation and saturation exponent under reservoir conditions on ASSB reservoir rock samples. SCA9117.
- Lyle W D, Mills W R. 1989. Effect of nonuniform core saturation on laboratory determination of the archie saturation exponent. //59th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Marsden S S, Ramey H J, Sanyal S K. 1973. Effect of temperature on electrical resistivity of porous media. The Log Analyst, 14(1): 12-26.
- Moore J. 1958. Laboratory determined electric logging parameters of the bradford third sand. Production Monthly, 25(3): 30-39.
- Morgan W B, Pirson S L. 1964. The effect of fractional wettability on the archie saturation exponent. //34th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Ouyang J, Lin C Z, Yan J, *et al.* 1994. Oil log interpretation-an application science in geophysical logging discipline. Well Logging Technology (in Chinese), 18(5): 313-317.
- Ouyang J, Wang G W, Wu J Y, *et al.* 1999. Logging Geological Analysis and Quantitative Evaluation of Oil and Gas Reservoir (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 121-128.
- Patnode H W, Wyllie M R J. 1950. The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation. Journal of Petroleum Technology, 2(2): 47-52.
- Rust C F. 1957. A laboratory study of wettability effects on basic core parameters. //27th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Sbiga H. 2012. Electric properties and its effect on microporosity rocks. //82nd Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Shen A X, Chen S J, Wang L, *et al.* 2005. Experimental study of lithology and nuclear magnetic resonance for medium sand rock in low resistivity reservoir. Well Logging Technology (in Chinese), 29(3): 191-194.
- Shen J S, Liu Z X, Wang S H, *et al.* 2010. Analysis of the mechanism of the effects of secondary porosities on the cementation factor and saturation index in reservoir formation with vugs and fractures. Well Logging Technology (in Chinese), 34(1): 9-15.
- Shi Y J, Xiao L, Mao Z Q, *et al.* 2011. An identification method for diagenetic facies with well logs and its geological significance in low-permeability sandstones: a case study on Chang 8 reservoirs in the Jiyuan region, Ordos basin. Acta Petrolei Sinica (in Chinese), 32(5): 820-828.
- Shi Y J, Zhang X L, Shen Y B, *et al.* 2010. Rock-logging relation of Chang 6 formation, southeast of Ordos Basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 25(5): 1716-1722, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.027.
- Song Y J, Jiang Y J, Song Y, *et al.* 2014. Experimental on the influencing factors of m and n of low resistivity oil reservoirs in southern Gulong Area. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 44(2): 704-714.
- Suman R J, Knight R J. 1997. Effects of pore structure and wettability on the electrical resistivity of partially saturated rocks; a network study. Geophysics, 62(4): 1151-1162.
- Sun J M, Wu J L, Yu D G, *et al.* 2006. Influential factors in Archie parameters experiment. Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing (in Chinese), 25(2): 39-41.
- Sweeney S A, Jennings H Y. 1960. The electrical resistivity of preferentially water-wet and preferentially oil-wet carbonate rocks. Producers Monthly, 24(5): 29-32.
- Toumelin E, Torres-Verdin C. 2005. Influence of oil saturation and wettability on rock resistivity measurements: a uniform pore-scale approach. //75th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Wang J, Lü C Y, Hu Y H, *et al.* 2004. Experiment of rock resistivity under formation conditions. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 31(1): 113-115.
- Wang K W. 2007. Reservoir rock electrical properties study based on percolation network model and upscaling [Ph. D. thesis] (in Chinese). Qingdao: China University of Petroleum (East China).
- Wang K W, Sun J M, Guan J T. 2006. Impacts of reservoir wettability on resistivity. Natural Gas Industry (in Chinese), 26(12): 86-88.
- Wang N. 2014. Effect of temperature, pressure and salinity on core electricity parameters. Science Technology and Engineering (in Chinese), 14(22): 141-145.
- Wang Y, Zhang C G, Li J F, *et al.* 2006. Study on influencing factors of rock electrical parameters. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI) (in Chinese), 28(4): 75-77.
- Wang Y M, Sharma M M. 1988. A network model for the resistivity behavior of partially saturated rocks. //58th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts.
- Wang Z H, Zhang C G. 2004. Logging Evaluation Method in Low Permeability Sand Reservoir (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 39-42.
- Wu X Y. 2016. Study on the relationship between permeability and electrical parameters of tight sandstone [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Southwest Petroleum University, 39-41.
- Xia H Q, Liu Z D, Li M, *et al.* 2002. Experimental study on the relationship between M , n parameters in Archie formula and formation water salinity, confining pressure and temperature. Foreign Well Logging Technology (in Chinese), 17(5): 51-54.
- Xiao L, Zou C C, Mao Z Q, *et al.* 2013. Estimation of water saturation from nuclear magnetic resonance (NMR) and conventional logs in low permeability sandstone reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering, 108: 40-51.
- Xie R H, Gao G Z, Feng Q N, *et al.* 2002. Wettability forecast of reservoirs using log data. Well Logging Technology (in Chinese), 26(4): 265-268.
- Xiong J, Zhang C Y, Liu X J, *et al.* 2018. Study on the influence of confining pressure on m and n parameters of carbonate reservoir (in Chinese). //Electronic proceedings of CPS/SEG Beijing 2018 International Geophysical conference and Exhibition. Beijing: Editorial Department of Petroleum Geophysical Exploration, 1110-1113.
- Yan J P, He X, Geng B, *et al.* 2017. Nuclear magnetic resonance T_2 spectrum: multifractal characteristics and pore structure evaluation. Applied Geophysics, 14(2): 205-215.
- Yang C M, Wang J Q, Zhang M, *et al.* 2006. Analysis of saline type and salinity effect on parameters m , n and B of saturation evaluation models. Progress in Geophysics (in Chinese), 21(3): 926-931.
- Yuan H H. 1992. The factors affecting saturation exponent, n . Journal of Jiangnan Petroleum Institute (in Chinese), 14(2): 48-55.
- Zhang F, Yan J P, Li Z Z, *et al.* 2017. Analysis of rock electrical

- parameters and R_w in Archie formula for clastic rock. Well Logging Technology (in Chinese), 41(2): 127-134.
- Zhang H Z. 2014. Factors of influencing the determination of Archie parameters. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing (in Chinese), 33(3): 155-157.
- Zhao J, Liu X L, Li J F, et al. 2004. On Experimental relations of parameters m and n with different temperatures, pressures and salinities. Well Logging Technology (in Chinese), 28(4): 269-272.
- Zhou X Q, Zhang C, Zhang Z S, et al. 2019. A saturation evaluation method in tight gas sandstones based on diagenetic facies. Marine and Petroleum Geology, 107: 310-325.
- Zou C N, Tao S Z, Zhou H, et al. 2008. Genesis, classification and evaluation method of diagenetic facies. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 35(5): 526-540.
- ### 附中文参考文献
- 车宇. 2015. 致密砂岩孔隙结构参数与电学性质关系研究[硕士论文]. 成都: 西南石油大学.
- 邓克俊, 谢然红. 2010. 核磁共振测井理论及应用. 青岛: 中国石油大学出版社, 46-47.
- 邓少贵, 边瑞雪, 范宜仁, 等. 1998. 岩石电阻率频散及其对阿尔奇参数的影响. 测井技术, 22(4): 227-230.
- 邓少贵, 范宜仁, 段兆芳, 等. 2000. 多温度多矿化度岩石电阻率实验研究. 石油地球物理勘探, 35(6): 763-767.
- 范宜仁, 陆介明, 王光海, 等. 1994. 岩石电阻率频散现象的实验研究. 石油大学学报(自然科学版), 18(1): 17-23.
- 高楚桥, 李先鹏, 吴洪深, 等. 2003. 温度与压力对岩石物性和电性影响实验研究. 测井技术, 27(2): 110-112.
- 高楚桥, 章成广, 毛志强. 1998. 润湿性对岩石电性的影响. 地球物理学进展, 13(1): 60-72.
- 关继腾, 房文静, 王玉斗. 1999. 油藏储渗特性对阿尔奇饱和度指数的影响. 测井技术, 23(6): 419-423.
- 李奎周, 葛新民, 汪海龙, 等. 2011. 基于实验条件下的低孔低渗岩心饱和度指数影响因素研究. 特种油气藏, 18(3): 35-38.
- 李霞, 李潮流, 李波, 等. 2020. 致密砂岩岩电响应规律与饱和度评价方法. 石油勘探与开发, 47(1): 202-212.
- 李舟波. 2003. 地球物理测井数据处理与综合解释. 长春: 吉林大学出版社, 10-13.
- 刘洪平, 骆杨, 赵彦超, 等. 2017. 致密砂岩气层中成岩相对岩电特征的影响. 地球科学, 42(4): 652-660.
- 欧阳健, 林纯增, 燕军, 等. 1994. 石油测井解释: 地球物理测井学中一支应用型学科. 测井技术, 18(5): 313-317.
- 欧阳健, 王贵文, 吴继余, 等. 1999. 测井地质分析与油气层定量评价. 北京: 石油工业出版社, 121-128.
- 沈爱新, 陈守军, 王黎, 等. 2005. 低电阻率油层中孔砂岩岩电及核磁实验研究. 测井技术, 29(3): 191-194.
- 沈金松, 刘子煊, 王素红, 等. 2010. 缝洞型储层中次生孔隙类型对胶结指数和饱和度指数影响的机理分析. 测井技术, 34(1): 9-15.
- 石玉江, 肖亮, 毛志强, 等. 2011. 低渗透砂岩储层成岩相测井识别方法及其地质意义——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8段储层为例. 石油学报, 32(5): 820-828.
- 石玉江, 张小莉, 申贻博, 等. 2010. 鄂尔多斯盆地东南部长6储层岩电关系特征. 地球物理学进展, 25(5): 1716-1722, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.027.
- 宋延杰, 姜艳娇, 宋杨, 等. 2014. 古龙南地区低阻油层胶结指数和饱和度指数影响因素实验. 吉林大学学报(地球科学版), 44(2): 704-714.
- 孙建孟, 吴金龙, 于代国, 等. 2006. 阿尔奇参数实验影响因素分析. 大庆石油地质与开发, 25(2): 39-41.
- 汪中浩, 章成广. 2004. 低渗砂岩储层测井评价方法. 北京: 石油工业出版社, 39-42.
- 王建, 吕成远, 胡永华, 等. 2004. 地层条件下岩石电性特征实验研究. 石油勘探与开发, 31(1): 113-115.
- 王克文. 2007. 基于逾渗网络模型和升尺度方法的储层岩石电性研究[博士论文]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- 王克文, 孙建孟, 关继腾. 2006. 油气层润湿特性对电阻率的影响规律研究. 天然气工业, 26(12): 86-88.
- 王楠. 2014. 温压及地层水矿化度变化对岩电参数的影响. 科学技术与工程, 14(22): 141-145.
- 王勇, 章成广, 李进福, 等. 2006. 岩电参数影响因素研究. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 28(4): 75-77.
- 吴需要. 2016. 致密砂岩渗透率与电学参数的关系研究[硕士论文]. 成都: 西南石油大学, 39-41.
- 夏洪泉, 刘之的, 李美, 等. 2002. 阿尔奇公式中 m , n 参数与地层水矿化度、围压和温度的实验关系研究. 国外测井技术, 17(5): 51-54.
- 谢然红, 高国忠, 冯启宁, 等. 2002. 用测井资料预测储层的润湿性. 测井技术, 26(4): 265-268.
- 熊健, 张重阳, 刘向君, 等. 2018. 围压对碳酸盐岩储层 m 和 n 参数的影响研究. //CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览电子论文集. 北京: 石油地球物理勘探编辑部, 1110-1113.
- 杨春梅, 王建强, 张敏, 等. 2006. 矿化度及水型变化对饱和度评价模型中 m 、 n 、 B 值的影响机理研究. 地球物理学进展, 21(3): 926-931.
- 原海涵. 1992. 影响饱和度指数 n 的因素. 江汉石油学院学报, 14(2): 48-55.
- 张帆, 闫建平, 李尊芝, 等. 2017. 碎屑岩阿尔奇公式岩电参数与地层水电阻率研究进展. 测井技术, 41(2): 127-134.
- 张宏志. 2014. 影响阿尔奇参数测定的因素. 大庆石油地质与开发, 33(3): 155-157.
- 赵军, 刘兴礼, 李进福, 等. 2004. 岩电参数在不同温度、压力及矿化度时的实验关系研究. 测井技术, 28(4): 269-272.
- 邹才能, 陶士振, 周慧, 等. 2008. 成岩相的形成、分类与定量评价方法. 石油勘探与开发, 35(5): 526-540.