

doi:10.3799/dqkx.2017.053

# 致密砂岩气层中成岩相对岩电特征的影响

刘洪平<sup>1</sup>, 骆 杨<sup>1</sup>, 赵彦超<sup>1\*</sup>, 陈召佑<sup>2</sup>, 穆国栋<sup>3</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 中国石化华北分公司, 河南郑州 450006
3. 英华检测有限公司, 上海 201203

**摘要:** 致密砂岩气层的研究是目前的研究前沿之一. 利用铸体薄片、物性、高压压汞、micro-CT、岩电实验等分析化验资料, 探讨了鄂尔多斯盆地定北地区二叠系太原组致密砂岩不同成岩相类型对岩电特征的控制作用. 研究表明: 研究区可以划分为4种成岩相类型, 包括硅质胶结成岩相、高岭石部分充填成岩相、不稳定组分溶蚀成岩相、压实致密成岩相. 4种成岩相类型地层因素和孔隙度在同一趋势线上, 可以采用统一的  $a, m$  值. 4种成岩相类型的  $n$  值有明显差异, 取值依次为 2.30、1.51、2.03 和 4.04. 含气饱和度解释实例显示, 对不同成岩相取不同  $n$  值与试气结果吻合较好, 优于  $n$  值取理论值 2 的结果.

**关键词:** 致密砂岩; 成岩相; 岩电特征; 测井; 石油地质.

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2017)04-0652-09

收稿日期: 2016-10-25

## Effects of Diagenetic Facies on Rock Electrical Properties in Tight Gas Sandstones

Liu Hongping<sup>1</sup>, Luo Yang<sup>1</sup>, Zhao Yanchao<sup>1\*</sup>, Chen Zhaoyou<sup>2</sup>, Mu Guodong<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resource of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Huabei Company, Sinopec Group, Zhengzhou 450006, China
3. Yinghua Inspection and Testing Co., Ltd., Shanghai 201203, China

**Abstract:** The research about tight gas sandstones is one the forefront research. In order to characterize rock electrical properties in tight gas sandstones of different diagenetic facies in Taiyuan Formation, Dingbei Area, we conducted casting thin sections, porosity and permeability, micro-CT and high pressure mercury intrusion/withdrawal method on these sandstones. Four diagenetic facies are observed in the area, namely, quartz cementation diagenetic facies, kaolinite partially filled diagenetic facies, unstable components resolution diagenetic facies and tight compaction diagenetic facies. The formation factor shows very good relationship with porosity regardless of diagenetic facies, hence  $a$  and  $m$  are set constant at 15.88 and 0.82 for all the diagenetic facies. Saturation exponent ( $n$ ) are variable among the different diagenetic facies, 2.30, 1.51, 2.03 and 4.04 are selected respectively for the  $n$  value of the four diagenetic facies. Examples show that the chosen electrical parameters have good agreements with the gas production test, much better than the result of chosen the theoretical  $n$  value of 2.

**Key words:** tight sandstone; diagenetic facies; rock electrical properties; logging; petroleum geology.

## 0 引言

针对致密砂岩储层的油、气、水层识别, 目前已经采用了电阻率测井、偶极声波测井以及核磁共振

测井等多种技术方法(李鹏举等, 2011; 边会媛等, 2014), 但基于 Archie 公式和电阻率测井的解释方法仍然是最为方便、准确的方法. Archie 公式是油气层测井识别的基础, 主要适用于泥质含量低、孔隙

基金项目: 构造与油气资源教育部重点实验室开放基金(No. TPR-2015-11); 国家自然科学基金青年基金(No. 41402117).

作者简介: 刘洪平(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事油气藏精细描述、非常规油气储层测井评价. ORCID: 0000-0002-0721-7144. E-mail: liuhongping12@126.com

\* 通讯作者: 赵彦超, ORCID: 0000-0003-3459-8656. E-mail: ychzhao2008@163.com

引用格式: 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.

结构简单的储层,储层流体是影响导电性的主导因素.致密砂岩储层储集空间小、岩石成分复杂、成岩作用强烈(于志超等,2016),因而在电阻率测井中,流体对导电性的影响减弱,孔隙结构、微孔隙、泥质附加导电性等都成为影响储层岩电特征的不可忽视的因素.

通过建立变岩电参数( $a, b, m, n$ )的 Archie 公式是目前提高测井解释精度的最重要的方法之一.前人的研究建立了大量的岩电参数与孔隙度、渗透率、孔渗综合指数以及核磁共振特征参数的关系(张明禄和石玉江,2005;Cluff and Byrnes, 2008;李军等,2009;Xiao *et al.*, 2013),同时开展了不同储层宏观和微观孔隙结构特征参数对岩电参数影响的实验以及模拟(Herrick and Kennedy, 1994, 2009; Suman and Knight, 1997;曾文冲和刘学锋,2013).从目前的研究结果来看,单一因素对岩电参数的影响已经有了较为深入的认识,但由于致密砂岩储层的复杂性,其岩电参数通常受多因素的控制,建立合理的解释模型仍然存在较大困难.因此,划分地质特征相似的单元,弱化单因素的讨论,在该单元的基础上进行测井解释,可能是提高测井解释精度的重要手段.

目前,成岩相的研究被广泛关注,并应用于储层评价和优质储层预测(邹才能等,2008;石玉江等,2011;Ozkan *et al.*, 2011).成岩相是成岩作用和构造作用的物质体现,强调岩石目前可观测的成岩面貌特征,包括岩石颗粒、胶结物类型、压实和溶蚀结构、储集空间的类型及组合关系等(邹才能等,2008).相对于沉积相,由于考虑了成岩作用和后期构造运动的影响,成岩相更能反映储层的综合特征.师调调等(2012)研究了华庆地区延长组致密砂岩储层各成岩相的孔隙结构特征,发现相同成岩相类型的孔隙类型组合、孔喉比、配位数具有较好的一致性,并且不同成岩相的生产动态具有差异性. Sakhaee-Pour and Bryant(2014)则直接对比了以粒间孔和粒内孔为主砂岩的孔隙结构特征,发现最终采收率与孔隙类型和组合有密切的关系,这些研究都说明成岩相可能是进行测井解释的地质单元.

本文以鄂尔多斯盆地西部定北地区二叠系太二段致密砂岩气层为研究区,通过密集采样,开展铸体薄片、物性测试、压汞、micro-CT 扫描,划分研究区的成岩相类型,在成岩相划分的基础上开展岩电实验,分析不同成岩相类型的岩电特征的控制机制,进而建立针对不同成岩相类型的流体饱和度解释模

型,最后通过实例验证解释模型的合理性.

## 1 研究区地质概况

定北地区处于鄂尔多斯盆地西部,研究层段二叠系太原组为目前重要的产气层位.太原组致密砂岩储层为滨浅海背景下的障壁砂坝砂体,平均砂体厚度 16 m,部分井可达 20 m 以上.砂岩以中、粗粒石英砂岩为主,少量岩屑石英砂岩.分选、磨圆中等到好.泥质含量较低,平均为 4.3%,最高为 16.2%.胶结物主要包括石英次生加大、自生黏土矿物以及少量钙质胶结.溶蚀作用发育较弱,主要为岩屑以及早期钙质胶结的溶蚀.X 衍射结果显示,自生黏土矿物以高岭石为主,伊利石主要发育在泥质含量大于 9.0%的储层中,且相对含量在 45.4%以内.孔隙度分布在 3.30%~9.00%,平均 6.26%,渗透率主要分布在 0.007~2.120( $0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),平均为 0.45( $0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),为典型的致密砂岩储层.

## 2 实验样品的选取

由于成岩的划分目前主要基于密集的薄片资料,因此对研究区的 10 口探井,每 2 m 取一块样,同时还应满足一下要求:(1)兼顾岩性,主要选取中砂岩以上粒级,泥质含量有一定的变化;(2)物性有一定的变化范围;(3)考虑电性特征,样品的测井响应存在差异,最终选取 52 块样品.柱样的直径 2.5 cm,长度一般要求大于 6.0 cm.为了研究不同成岩相类型的岩电特征以及孔隙结构特征,柱样分为 3 段,分别为 0.5 cm、4.0 cm 和 2.0 cm、0.5 cm 样品用于制取铸体薄片,4.0 cm 样品用于孔隙度、渗透率以及岩电实验,2.0 cm 样品用于高压压汞实验分析.其中孔、渗测试采用 AP-608 负压孔渗仪,压汞采用 AutoPore 9400 型高压压汞仪.同时还在成岩相划分的基础上选取了 3 块样品开展 micro-CT 扫描,分析不同成岩相的孔、喉发育特征.

## 3 储层成岩相划分

填隙物的类型及含量宏观上影响储层的物性,微观上控制了孔喉的大小以及配置关系.因此成岩相的命名主要采用控制物性的主要胶结物类型、产状和成岩作用来联合命名,在出现两种以上成岩作

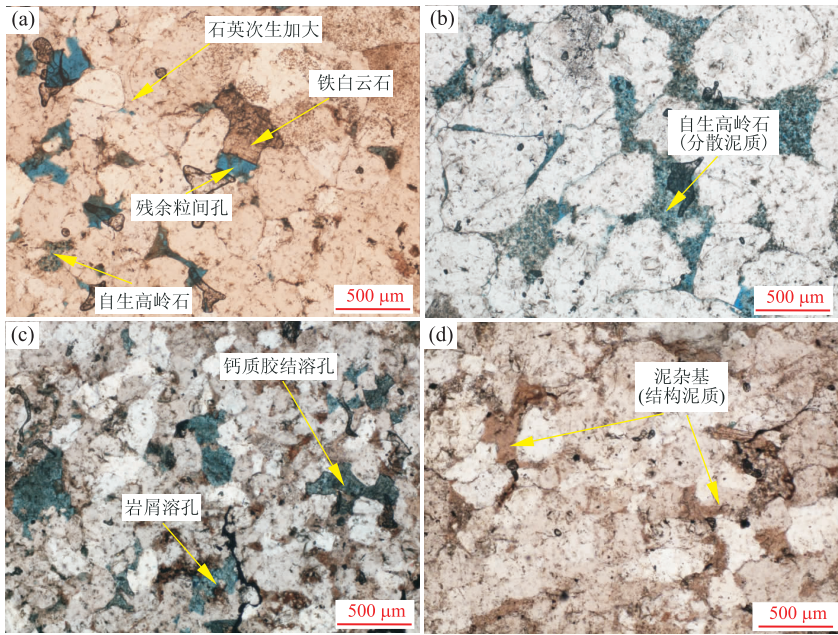


图 1 不同成岩相微观照片

Fig. 1 Photomicrographs of various diagenetic facies

a. 硅质胶结成岩相; b. 高岭石部分充填成岩相; c. 不稳定组分溶蚀成岩相; d. 压实致密成岩相

用时,则采用复合命名法(石玉江等,2011).在对定北地区太原组 52 块样品的铸体薄片观察的基础上,将研究区储层划分为硅质胶结成岩相、高岭石部分充填成岩相、不稳定组分溶蚀成岩相、以及压实致密成岩相等 4 种成岩相类型.不同成岩相的特征如下.

### 3.1 硅质胶结成岩相(图 1a)

主要发育在障壁砂坝中部,垂向上位于砂体中下部.岩性主要为粗粒石英砂岩,分选、磨圆好.粒度中值为 600~850 μm,泥质含量小于 4%(图 2).胶结物类型主要为石英次生加大,含少量自生高岭石胶结和钙质胶结.孔隙类型主要为残余粒间孔,少量自生高

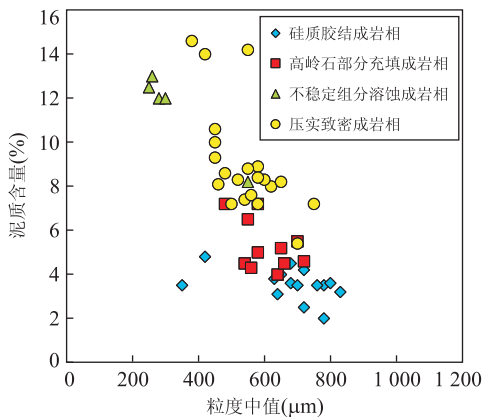


图 2 不同成岩相类型泥质含量与粒度中值关系

Fig. 2 Clay content versus median grain diameter of different diagenetic facies

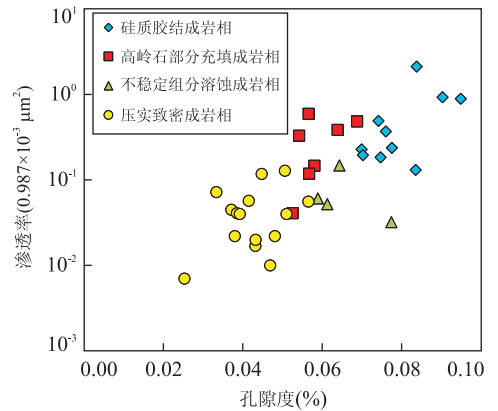


图 3 不同成岩相类型孔隙度与渗透率关系

Fig. 3 Air permeability versus porosity of different diagenetic facies

岭石晶间孔和钙质胶结溶孔.由于泥质含量低,石英的抗压能力强,总体物性较好,孔隙度一般大于 7%,渗透率总体大于 0.3(0.987×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>)(图 3).

### 3.2 高岭石部分充填成岩相(图 1b)

主要发育在障壁砂坝中部,垂向上位于砂体中部.岩石类型以中、粗粒石英砂岩为主,分选、磨圆中等一好,粒度中值为 400~720 μm,泥质含量为 4%~8%(图 2).高岭石部分充填在粒间孔内,保留了大量的晶间孔(图 2b).自形程度较好的高岭石为自生高岭石,其产生与岩屑、泥质杂基溶蚀之后重结晶有关.物性总体表现为低孔相对高渗,孔隙度在

5.5%~7.0%,渗透率总体为 0.20~0.72( $0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )(图 3). 一般认为, 粒间孔内的胶结物充填一般对渗透率影响较小(Torskaya, 2013), 但自生高岭石充填使孔隙度降低.

### 3.3 不稳定组分溶蚀成岩相(图 1c)

分布在障壁砂坝外侧, 垂向上位于砂体的顶部或底部. 主要以中粒石英砂岩和岩屑石英砂岩为主, 分选、磨圆中等一好, 压实强烈, 粒度为 220~400  $\mu\text{m}$ , 泥质含量 8%~13%(图 2). 局部发育溶蚀孔隙, 岩屑和部分钙质胶结发生溶蚀, 形成次生溶孔. 一般而言, 溶蚀作用主要发育在物性较好、地层流体活跃的储层中, 而本区物性较好的储层主要为石英砂岩, 缺少易溶组分, 因此距离烃源岩近、岩屑含量较高的部位溶蚀作用更为发育. 其物性总体表现为相对高孔低渗, 部分样品孔隙度可以达到 7% 以上, 但受高泥质含量影响, 渗透率在 0.2( $0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 以下(图 3).

### 3.4 压实致密成岩相(图 1d)

分布在障壁砂坝外侧, 垂向上位于砂体的中部.

以中粒石英砂岩、岩屑石英砂岩为主. 分选、磨圆中等. 粒度中值为 250~550  $\mu\text{m}$ , 泥质含量一般大于 8%(图 2). 杂基含量高, 黑云母、千枚岩等塑性岩屑含量较高, 压实作用强, 普遍发育杂基的高岭石化和伊利石化. 以杂基晶间微孔为主, 少量残余粒间孔和钙质胶结溶孔, 物性极差, 孔隙度小于 5%, 渗透率小于 0.2( $0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )(图 3).

## 4 不同成岩相的岩电特征

岩电实验采用 SY-HF 型高温高压岩电测试仪. 为了保证测量的精度, 岩芯长度大于 4 cm. 模拟地层水采用 40 000 mg/L 的 NaCl 溶液. 由于样品致密, 在饱和模拟地层水之前抽真空 2 h, 在 30 MPa 压力下饱和和地层模拟地层水 72 h. 在气驱过程中围压为 5 MPa. 地层水温度保持在  $24 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . 地层水电阻率为  $0.16 \pm 0.02 \Omega \cdot \text{m}$ .

### 4.1 不同成岩相与胶结指数 $m$ 的关系

图 4a 给出了 4 种成岩相类型的地层因素—孔隙

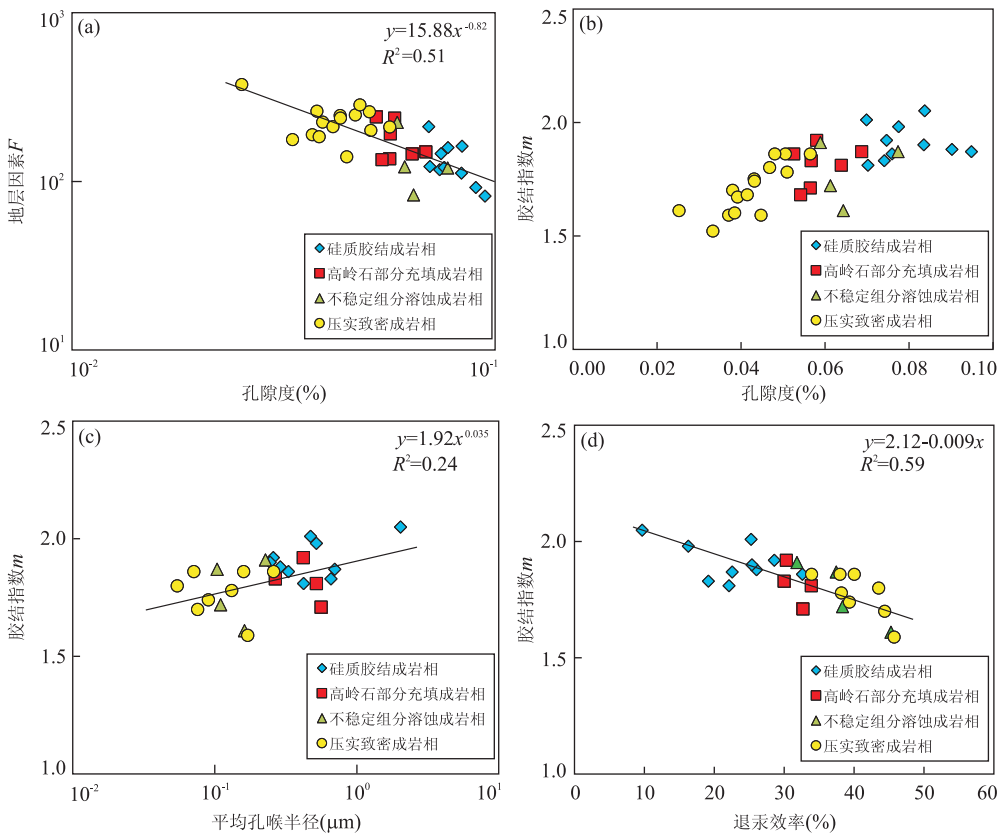


图 4 不同成岩相类型与各种参数的关系

Fig. 4 The relationship between porosity of different diagenetic facies

a. 不同成岩相类型地层因素和孔隙度的关系; b. 不同成岩相类型胶结指数与孔隙度的关系; c. 不同成岩相类型胶结指数与平均孔喉半径的关系; d. 不同成岩相类型胶结指数与退汞效率的关系



度之间的关系,可以看出,当孔隙度相同时,不同成岩相的地层因素  $F$  相当,因此地层因素与成岩相类型无关,而与孔隙度相关性较好.这一结果在不同的致密砂岩储层中具有普遍性,张明禄和石玉江(2005)在鄂尔多斯盆地上古生界以及 Cluff and Byrnes(2008)在 Piceance, Uinta, Green River, Wind River 和 Powder River Basin 等多个盆地的致密砂岩岩电实验均发现,当孔隙度小于 12% 时,  $m$  值为 1~2,与孔隙度正相关;当孔隙度大于 12% 时,  $m$  值在 2 附近.在其建立孔隙度和  $m$  值的关系时,为了方便探讨  $m$  值变化规律,通常令  $a$  为 1.本研究区的实验结果与上述结果一致,孔隙度的分界点略有差异,在 8% 左右(图 4b).

由于不同的成岩相类型,泥质含量、类型、微孔隙的发育程度均存在差异,但  $m$  值仍然主要与孔隙度有较好的相关关系,说明  $m$  值主要与孔隙结构相关.大量实验以及数值模拟(Herrick and Kennedy, 1994, 2009; Viewer *et al.*, 2011; 曾文冲和刘学锋, 2013)的研究发现,岩石的孔喉比是影响  $m$  值的最主要的因素.图 4c 和图 4d 为胶结指数与平均孔喉半径和退汞效率的关系,可以看出平均孔喉半径与  $m$  值的关系较差,退汞效率与  $m$  值有很好的线性关系,而退汞效率主要反映孔喉比,退汞效率越大,孔喉比越小.因此,对于研究区,当孔隙度较低时(小于 8%),孔隙度的减小在微观上来看是孔喉比的减小.这实际上与致密砂岩孔隙度减小的机制有关,在碳酸盐岩中孔隙度较低时可能存在溶蚀产生的孤立大孔,而在砂岩储层中,大孔隙反而会由于压实,石英次生加大、自生泥质胶结而减小,而喉道半径总体变化不大,因此孔喉比减小.

#### 4.2 不同成岩相与饱和度指数 $n$ 的关系

图 5 为研究区不同成岩相的电阻率增大系数与含水饱和度的关系图,不同成岩相类型的  $b$  值在 1 附近,但饱和度指数  $n$  有明显的差异.饱和度指数  $n$  由大到小依次为压实致密成岩相、硅质胶结成岩相、不稳定组分溶蚀成岩相和高岭石部分充填成岩相.

为了理解不同成岩相对饱和度指数的影响,图 6 给出了不同成岩相饱和度指数与孔隙度、渗透率、平均孔喉半径以及泥质含量的关系,其中令  $b=1$ .饱和度指数和孔隙度的关系来看较为复杂,当不考虑高岭石部分充填成岩相时,总体呈现饱和度指数随孔隙度增大而减小.这一特征与张明禄和石玉江(2005)对鄂尔多斯盆地靖边—乌审旗地区山 1 段砂岩和苏里格庙地区盒 8 及榆林区盒 5 段砂岩的岩电实验结果以及 Xiao *et al.* (2013)对四川盆地须家河

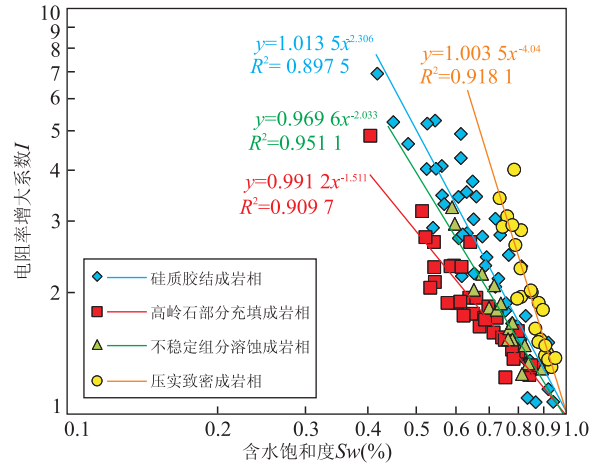


图 5 不同成岩相类型电阻率增大系数与含水饱和度的关系  
Fig. 5 Resistivity index versus water saturation of different diagenetic facies

组的岩电实验结果相似,但高岭石部分充填成岩相的饱和度指数低值比较特殊,特别是部分值在 1.2 左右,与裂缝性储层的饱和度指数相似.因此,简单地建立饱和度指数和孔隙度的关系很难准确确定其值.

目前的研究认为饱和度指数受流体的空间分布状态控制,而流体的空间分布又受润湿性和孔隙结构控制(Suman and Knight, 1997; Wang *et al.*, 2005).由于研究区为水湿,因此孔隙结构是影响饱和度指数的最重要因素.图 6b 和图 6c 给出了渗透率和平均孔喉半径与饱和度指数的关系,可以看出二者与  $n$  值相关性差,但如果将硅质胶结成岩相和压实致密成岩相作为一组,高岭石部分充填成岩相和不稳定组分溶蚀成岩相作为一组,则发现每组  $n$  值随渗透率和平均孔喉半径的减小而增大,也就是孔喉结构越差,  $n$  值越大(图 6b 和图 6c).根据铸体薄片分析(图 1),从硅质胶结成岩相到压实致密成岩相,泥质含量的增加,特别是结构泥质的增加是导致孔喉半径减小的最主要机制;同样从高岭石部分充填成岩相到不稳定组分溶蚀成岩相,结构泥质也增加.图 7a~7c 分别为硅质胶结成岩相、高岭石部分充填成岩相和不稳定组分溶蚀成岩相的高精度 CT 扫描图像,图像的分辨率分别为 1.5、0.9 和 0.9  $\mu\text{m}$ .图 7c 和图 7a、图 7b 相比,喉道半径明显减小.而对比图 7a 和图 7b,图 7b 中高岭石充填(分散泥质)的含量增加,但由于结构泥质含量较低,压汞得到的孔喉半径相差不大.因此,结构泥质是孔喉半径减小的主要机制,而分散泥质主要减小孔隙度,而对孔喉半径的减小贡献不大.结构泥质使喉道变小,导电性变差,饱和度指数增大;分散泥质

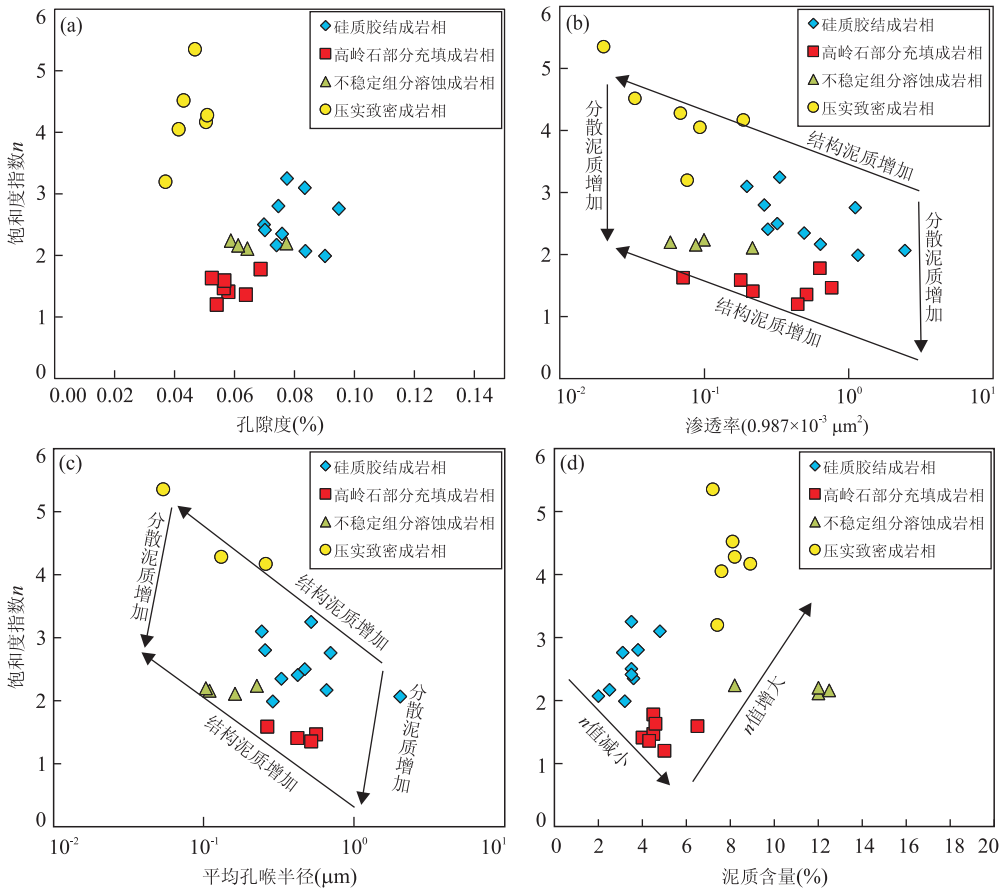


图 6 不同成岩相类型与各种参数的关系

Fig. 6 The relationship between porosity of different diagenetic facies

a. 不同成岩相类型饱和度指数和孔隙度的关系; b. 不同成岩相类型饱和度指数和渗透率的关系; c. 不同成岩相类型饱和度指数与平均孔喉半径的关系; d. 不同成岩相类型饱和度指数和泥质含量的关系

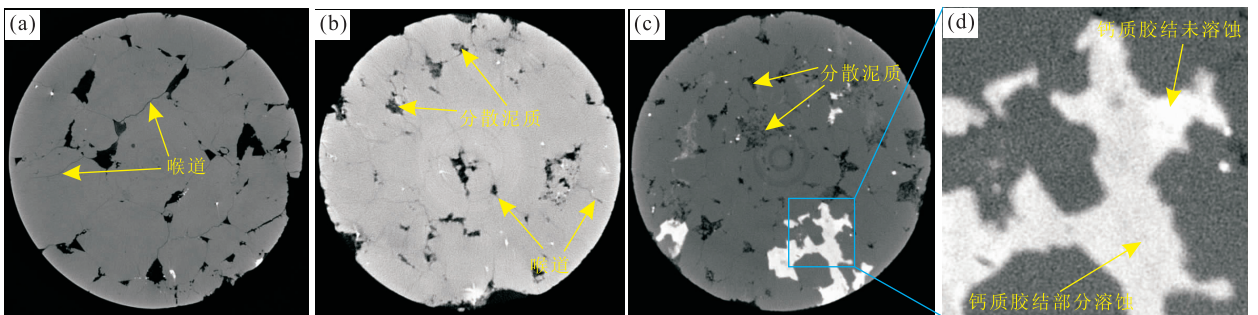


图 7 不同成岩相类型 micro-CT 扫描图

Fig. 7 Micro-CT image of different diagenetic facies

分辨精度分别为 1.5、0.9 和 0.9  $\mu\text{m}$ ; a. 硅质胶结成岩相; b. 高岭石部分充填成岩相; c. 不稳定组分溶蚀成岩相

使束缚水含量增加,饱和度指数减小.

同时,泥质的分布形式与泥质含量也有一定的关系. 当泥质含量较低时,主要以分散泥质为主;当泥质含量增大,孔隙度低时,主要以结构泥质为主;当泥质含量和孔隙度均较高时,说明分散泥质、以及溶蚀作用发育,进而分散泥质和结构泥质均发育. 因

此,图 6d 中饱和度指数随泥质含量增加表现为先减小后增大的趋势.

### 5 岩电参数的选取及效果分析

从成岩相与岩电参数的关系来看,在成岩相划

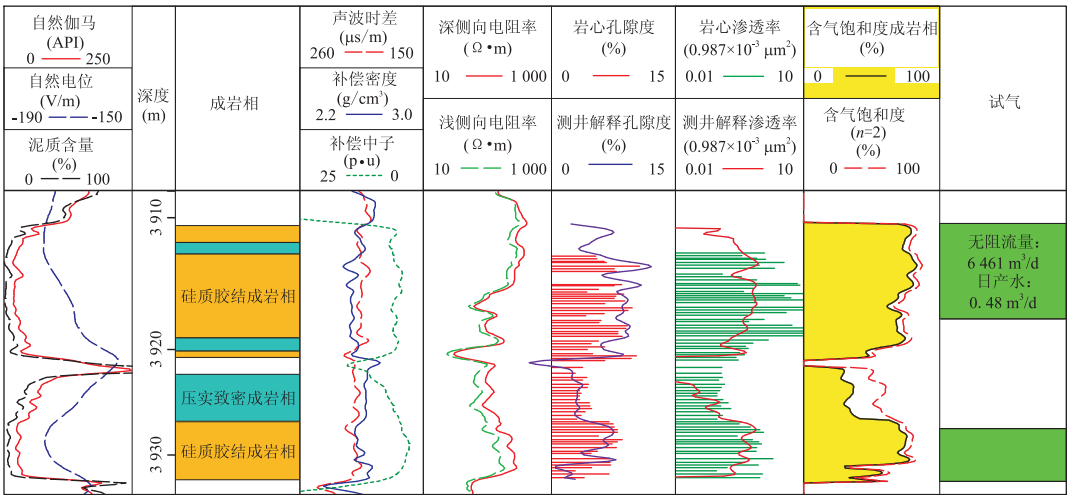


图 8 DB13 井测井综合解释

Fig. 8 Well logging interpretation graph of well DB13

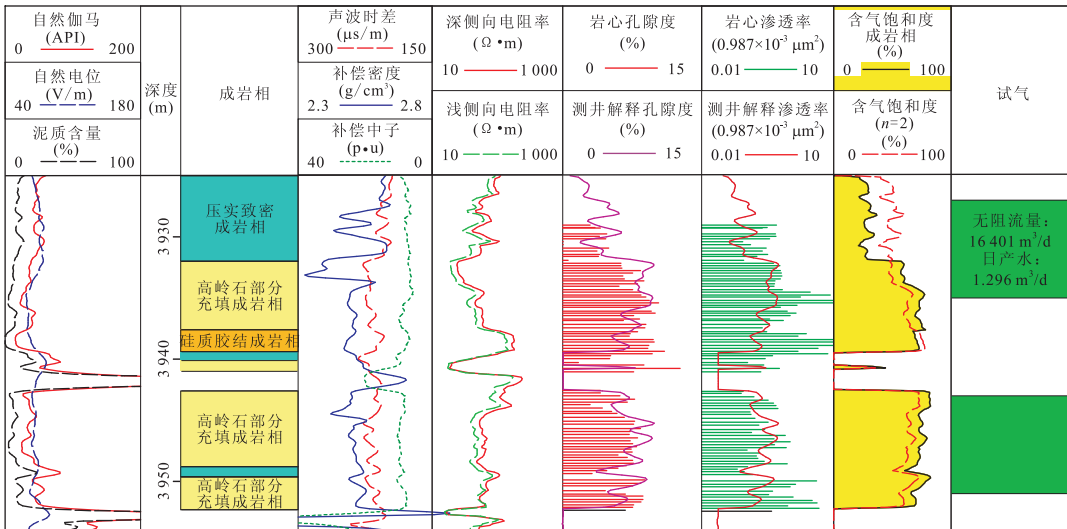


图 9 DB17 井测井综合解释

Fig. 9 Well logging interpretation graph of well DB17

分的基础上研究岩电参数变化规律更为合理. 单因素对岩电参数的影响目前已经有大量的讨论, 并且单因素对岩电参数的变化规律的认识已经较为清晰. 然而岩石是复杂的地质体, 岩电参数往往是多种因素综合作用的结果, 同一种成岩相类型, 岩石的颗粒大小、成分、胶结物、孔隙类型以及孔隙结构特征均有一定的相似性. 合理的划分成岩相, 能够简化研究流程, 提高测井解释的精度.

根据薄片成岩相分析的结果, 在不同井纵向上划分成岩相类型, 然后对不同成岩相取相应的岩电参数, 利用 Archie 公式计算含气饱和度. 由于不同的成岩相类型, 地层因素与饱和度之间仍然为幂律关系, 因此解释中不同的成岩相取相同的  $a, m$  值,

取值别为 15, 88, 0.82. 从不同成岩相的电阻率增大系数和含水饱和度的关系来看,  $b$  值在 1 附近, 因此, 不同的成岩相  $b$  值均取 1, 硅质胶结成岩相、高岭石部分充填成岩相、不稳定组分溶蚀成岩相以及压实致密成岩相的  $n$  值分别取 2.30、1.51、2.03 和 4.04.

图 8~图 10 为 DB13 井, DB17 井以及 DB27 井的四性关系图. DB13 井主要为硅质胶结成岩相, 含部分压实致密成岩相, 含气饱和度计算时不同成岩相类型取相应的  $n$  值, 同时  $n$  取理论值 2 作为对比. 从结果来看, 硅质胶结成岩相饱和度解释结果与理论计算值相当, 略小于理论值. DB17 井主要为高岭石部分充填成岩相, 其含气饱和度的计算值比理论值高约 10%. 对比 DB13 井和 DB17 井, DB13 井硅

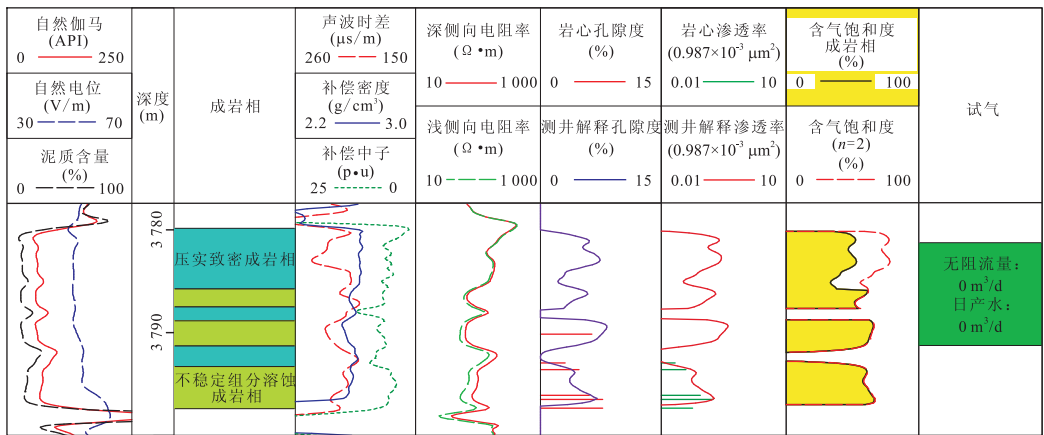


图 10 DB27 井测井综合解释

Fig. 10 Well logging interpretation graph of well DB27

质胶结成岩相的孔隙度和渗透率平均分别为 7% 和 0.72 ( $0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 深侧向电阻率平均 240  $\Omega \cdot \text{m}$ , 计算含气饱和度 74%; DB17 井高岭石部分充填成岩相的孔隙度和渗透率平均分别为 7.4% 和 0.5 ( $0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 深侧向电阻率平均 61  $\Omega \cdot \text{m}$ , 计算含气饱和度 73%。从试气的结果来看, DB13 井和 DB17 井的无阻流量分别为 6 461  $\text{m}^3/\text{d}$  和 16 401  $\text{m}^3/\text{d}$ , 在二者物性相当时, DB17 井产量较高, DB17 井的含气饱和度应该高于或接近 DB13 井。可以看出区分成岩相类型计算的 DB17 井含气饱和度更为准确。DB17 井的较低电阻率实际上受  $n$  值的控制, 如果仅根据电阻率大小判断气层, 必然会漏掉气层。DB27 井主要的成岩相类型为不稳定组分溶蚀成岩相和压实致密成岩相, 利用理论值计算的压实致密成岩相部分平均含气饱和度为 71%, 而该段的试气结果显示无阻流量和日产水量均为 0  $\text{m}^3/\text{d}$ , 为典型的干层。根据不同成岩相的  $n$  值计算的试气层段的平均含气饱和度为 48%, 显然后者更为准确。

## 6 结论

(1) 根据胶结物的类型、产状以及主要的成岩作用类型将研究区划分为硅质胶结成岩相、高岭石部分充填成岩相、不稳定组分溶蚀成岩相以及压实致密成岩相等 4 种成岩相类型。

(2) 不同成岩相类型地层因素与孔隙度关系一致, 说明泥质含量、微孔隙等因素对  $a, m$  值的影响较小, 孔隙结构是主控因素。研究区不同的成岩相类型能够应用统一的  $a, m$  值进行饱和度解释。

(3) 不同成岩相类型  $n$  值有明显差异, 硅质胶结成岩相、高岭石部分充填成岩相、不稳定组分溶蚀成岩相以及压实致密成岩相的  $n$  值分别为 2.30、1.51、2.03 和 4.04。泥质的分布形式是影响  $n$  值的最主要因素, 分散泥质、溶蚀孔隙增加,  $n$  值减小, 结构泥质增加,  $n$  值增大。

(4) 在成岩相划分的基础上开展测井解释对于深入了解岩电特征的形成机理、提高测井解释精度有重要意义。

## References

Bian, H. Y., Wang, F., Yue, C. W., et al., 2014. Fluid Property of Sandstone Reservoir Identified with Elastic Parameters. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(4): 99—106 (in Chinese with English abstract).

Cluff, R. M., Byrnes, A. P., 2008. Evidence for a Variable Archie Porosity Exponent ‘m’ and Impact on Saturation Calculations for Mesaverde Tight Gas Sandstones; Piceance, Uinta, Green River, Wind River, and Powder River Basins. Proceeding of the AAPG Rocky Mountain Section Meeting, Denver.

Herrick, D. C., Kennedy, W. D., 1994. Electrical Efficiency—A Pore Geometric Theory for Interpreting the Electrical Properties of Reservoir Rocks. *Geophysics*, 59(6): 918—927. doi:10.1190/1.1443651

Herrick, D. C., Kennedy, W. D., 2009. A New Look at Electrical Conduction in Porous Media; A Physical Description of Rock Conductivity; SPWLA 50th Annual Logging Symposium, Woodlands.

Li, J., Zhang, C. M., Xiao, C. W., 2009. Influence of Sandstone Pore Texture on Cementation Exponent and Saturation Error Analysis in Kuche Area, Tarim Basin. *Well*



- Logging Technology*, 33 (4): 325—328 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. J., Zhang, Z. P., Jiang, D. P., 2011. Review on Fluid Identification Methods with NMR Logging. *Well Logging Technology*, 35 (5): 396—401 (in Chinese with English abstract).
- Ozkan, A., Cumella, S. P., Milliken, K. L., et al., 2011. Prediction of Lithofacies and Reservoir Quality Using Well Logs, Late Cretaceous Williams Fork Formation, Mamm Creek Field, Piceance Basin, Colorado. *AAPG Bulletin*, 95 (10): 1699—1723. doi: 10.1306/01191109143
- Sakhaee-Pour, A., Bryant, S. L., 2014. Effect of Pore Structure on the Producibility of Tight-Gas Sandstones. *AAPG Bulletin*, 98 (4): 663—694. doi: 10.1306/08011312078
- Shi, T. T., Sun, W., He S. P., et al., 2012. Diagenetic Facies and Its Micro-Pore Structure of Yanchang Formation Chang 6 Reservoir in Huaqing Area. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 48 (3): 7—12 (in Chinese with English abstract).
- 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*, 32 (5): 820—828 (in Chinese with English abstract).
- 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. doi: 10.1190/1.1444216
- Torskaya, T. S., 2013. Pore-Scale Analysis of Grain Shape and Sorting Effects on Fluid Transport Phenomena in Porous Media (Dissertation). The University of Texas at Austin, Austin: 59—63.
- Verwer, K., Eberli, G. P., Weger, R. J., 2011. Effect of Pore Structure on Electrical Resistivity in Carbonates. *AAPG Bulletin*, 95 (2): 175—190. doi: 10.1306/06301010047
- Wang, K. W., Sun, J. M., Guan, J. T., et al., 2005. Percolation Network Modeling of Electrical Properties of Reservoir Rock. *Applied Geophysics*, 2 (4): 223—229. doi: 10.1007/s11770-005-0028-2
- Xiao, L., Zou, C. C., Mao, Z. Q., 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.
- Yu, Z. C., Liu, K. Y., Zhao, M. J., et al., 2016. Characterization of Diagenesis and the Petroleum Charge in Kela 2 Gas Field, Kuqa Depression, Tarim Basin. *Earth Science*, 41 (3): 533—545 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, W. C., Liu, X. F., 2013. Interpretation of Non-Archie Phenomenon for Carbonate Reservoir. *Well Logging Technology*, 37 (4): 341—351 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. L., Shi, Y. J., 2005. On Archie's Electrical Parameters of Sandstone Reservoir with Complicated Pore Structures. *Well Logging Technology*, 29 (5): 59—61 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Tao, S. Z., Zhou, H., et al., 2008. Genesis, Classification and Evaluation Method of Diagenetic Facies. *Petroleum Exploration and Development*, 35 (5): 526—540 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 边会媛, 王飞, 岳崇旺, 等, 2014. 利用弹性参数识别致密砂岩储层流体性质. *地球科学与环境学报*, 36 (4): 99—106.
- 曾文冲, 刘学锋, 2013. 碳酸盐岩非阿尔奇特性的诠释. *测井技术*, 37 (4): 341—351.
- 李军, 张超馍, 肖承文, 等, 2009. 库车地区砂岩孔隙结构对胶结指数影响及饱和度误差分析. *测井技术*, 33 (4): 325—328.
- 李鹏举, 张智鹏, 姜大鹏, 2011. 核磁共振测井流体识别方法综述. *测井技术*, 35 (5): 396—401.
- 师调调, 孙卫, 何生平, 等, 2012. 华庆地区延长组长 6 储层不同类型成岩相微观孔隙结构特征及生产动态分析. *兰州大学学报(自然科学版)*, 48 (3): 7—12.
- 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.
- 于志超, 刘可禹, 赵孟军, 等, 2016. 库车凹陷克拉 2 气田储层成岩作用和油气充注特征. *地球科学*, 41 (3): 533—545.
- 张明禄, 石玉江, 2005. 复杂孔隙结构砂岩储层岩电参数研究. *测井技术*, 29 (5): 59—61.
- 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.