

# 鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段 高伽马砂岩测井识别及其展布特征

游富粮<sup>1,2</sup>, 柳广弟<sup>1,2</sup>, 孙明亮<sup>1,2</sup>, 李超正<sup>3</sup>,  
刘祥柏<sup>1,2</sup>, 安成<sup>1,2</sup>, 王子昕<sup>1,2</sup>, 李亿殊<sup>1,2</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要:**鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段泥页岩层系内发育大量的砂岩夹层, 这些砂岩夹层常伴有自然伽马值异常高的现象, 部分砂岩的自然伽马值可高达 330.5 API, 在测井剖面上极易与泥页岩混淆。为识别高伽马砂岩, 按照粒度和结构特征将该区延长组长 7 段碎屑岩划分为细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和页岩, 并应用常规测井数据运算组合成 2 个新参数——参数 A 和参数 B, 参数 A 和参数 B 组成的交汇图版以及自然伽马测井曲线, 可有效区分识别出长 7 段中的正常砂岩和高伽马砂岩。长 7 段高伽马砂岩的累计厚度平面展布图表明, 高伽马砂岩主要位于研究区的西南部; 高伽马砂岩由湖盆边缘向湖盆中心呈指状发散展布的特征指示, 其形成可能与长 7 段沉积期间的火山喷发有关。

**关键词:** 高伽马砂岩; 岩性识别; 长 7 段; 延长组; 三叠系; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.24

文献标识码: A

## Logging identification and distribution characteristics of high-gamma sandstones in the 7th member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

YOU Fuliang<sup>1,2</sup>, LIU Guangdi<sup>1,2</sup>, SUN Mingliang<sup>1,2</sup>, LI Chaozheng<sup>3</sup>,

LIU Xiangbai<sup>1,2</sup>, AN Cheng<sup>1,2</sup>, WANG Zixin<sup>1,2</sup>, LI Yishu<sup>1,2</sup>

1. College of Geosciences, China University of Petroleum Beijing (Beijing), Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract:** A large number of sandstone interlayers were developed in the shale strata of the 7th member of the Triassic Yanchang Formation (Chang 7 member) in the Ordos Basin. These sandstone interlayers are frequently accompanied by abnormally high natural gamma values as high as 330.5 API. As a result, they are undistinguishable from shale on well profile. To characterize the high-gamma sandstones, the elastic rocks of the Chang 7 member were classified into fine sandstone, siltstone, argillaceous siltstone, silty mudstone, mudstone and shale according to grain size and structural characteristics. Conventional logging data were recalculated and combined into two new parameters—A and B. The new intersection chart composed of parameters A and B and natural gamma logging data can effectively distinguish and identify normal sandstone and high-gamma sandstone in the Chang 7 member. The plane distribution of cumulative thickness of high-gamma sandstone in the Chang 7 member shows that the high-gamma sandstone is mainly located in the southwest of the study area. The finger-like distribution of high-gamma sandstone from the edge to the center of the lake basin indicates that its formation may be related to the volcanic eruption during sedimentary period.

**Key words:** high-gamma sandstone; lithologic identification; Chang 7 member; Yanchang Formation; Triassic; Ordos Basin

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-11-29。

作者简介: 游富粮 (1996—), 男, 博士生, 从事油气藏形成机理、分布规律和非常规油气研究。E-mail: 296772108@qq.com。

通信作者: 柳广弟 (1961—), 男, 博士, 教授, 从事油气藏形成与分布等方面的教学与科研工作。E-mail: lgd@cup.edu.cn。

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-02)资助。

鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段页岩层系内普遍发育高伽马砂岩,付金华等<sup>[1]</sup>报道了CY1井在长<sub>7</sub>亚段高伽马砂岩深度段内试油获得了121.38 t/d的高产油流,说明高伽马砂岩相较于物性差、黏土含量高的泥页岩有更大的开采潜能。高伽马砂岩指的是由于放射性元素相对富集,形成具有相对较高自然伽马值的砂岩<sup>[2]</sup>,在测井剖面上极易与泥页岩相混淆。目前关于长7段高伽马砂岩的成因主要有两种看法:一种认为高伽马砂岩形成与盆地西南方向来源的凝灰岩由水流重新改造作为砂岩组成部分再沉积有关<sup>[3]</sup>;另一种认为高伽马砂岩形成与热液作用成因的放射性重矿物富集有关,而在平面上没有观察到高伽马砂岩的物源特征<sup>[4-5]</sup>。可见长7段高伽马砂岩的分布形态和物源方向是分析其成因的重要依据。但是对划分高伽马砂岩和正常砂岩的自然伽马值界线不同学者有不同的看法,如刘行军等<sup>[4]</sup>将自然伽马相对值法计算的泥质含量大于66%的砂岩定义为高伽马砂岩;张小莉等<sup>[3]</sup>将视泥质含量大于40%的砂岩定义为高伽马砂岩。长7段页岩层系内的砂岩夹层厚度相对较薄,高伽马砂岩与泥页岩的自然伽马值分布相互重叠,难以用简单的测井交汇图版进行识别<sup>[3,5-7]</sup>。虽然前人针对长7段提出了许多岩性测井识别方案,但他们要么只注重高伽马砂岩与正常砂岩的区分<sup>[3,6-8]</sup>,要么只对正常自然伽马值的砂岩和其他泥质岩性进行测井识别<sup>[9-11]</sup>。

本文从实际生产和操作简便出发,根据CY1井实施水平井压裂改造的“甜点段”(2 027.5~2 034.1 m)的块状层理油斑细砂岩自然伽马值在100 API左右<sup>[1]</sup>,将自然伽马值大于100 API的细砂岩、粉砂岩以及泥质粉砂岩定义为高伽马砂岩,并应用常规测井数据,对长7段的细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥页岩进行岩性测井识别,来区分高伽马砂岩与正常砂岩。

## 1 地质背景

根据地下岩石的密度、磁性、电阻率等差异,将鄂尔多斯盆地划分为6个一级构造单元,分别为伊陕斜坡、天环坳陷、晋西挠褶带、西缘冲断带、伊盟隆起和渭北隆起<sup>[12]</sup>。鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西南部,三叠纪华北地块与扬子地块碰撞,致使右江海槽和秦岭海槽完全闭合,形成秦岭山脉<sup>[13]</sup>;到晚三叠世,鄂尔多斯盆地西南部演化为前陆盆地,其横截面表现为北东翼坡度低、南西翼坡度高的不对称特征<sup>[14-15]</sup>,在“北东缓、南西陡”的快速拗陷过程中,盆地内沉积了一套厚度约1 000~1 300 m

的河流—三角洲—湖泊相碎屑岩<sup>[16]</sup>,即延长组。根据沉积旋回、标志层和测井响应,可将延长组自上而下划分为10个层段<sup>[16-17]</sup>,其中长7段沉积期是湖泊发育的鼎盛时期,沉积了一套厚度约80~120 m的细粒碎屑岩,其中富有机质的泥页岩是整个中生界储层的主力烃源岩<sup>[18]</sup>。由于长7段沉积期间陆块碰撞和秦岭造山运动加剧,周围火山喷发、地震和湖底热液活动频发<sup>[18-21]</sup>,导致长7段内形成了许多与此相关的特殊岩石,如震积岩、高伽马页岩、高伽马砂岩等。长7段是本文研究的重点层段,自上而下可以划分为长7<sub>1</sub>、长7<sub>2</sub>和长7<sub>3</sub>三个亚段<sup>[18]</sup>,其中长7<sub>3</sub>亚段内高伽马页岩和高伽马砂岩特别常见。本文研究区位于鄂尔多斯盆地内伊陕斜坡西南部和天环坳陷南部长7段页岩主要展布的区域(图1)。

## 2 岩性及测井响应特征

### 2.1 岩性特征

鄂尔多斯盆地长7段岩性主要以陆相细粒碎

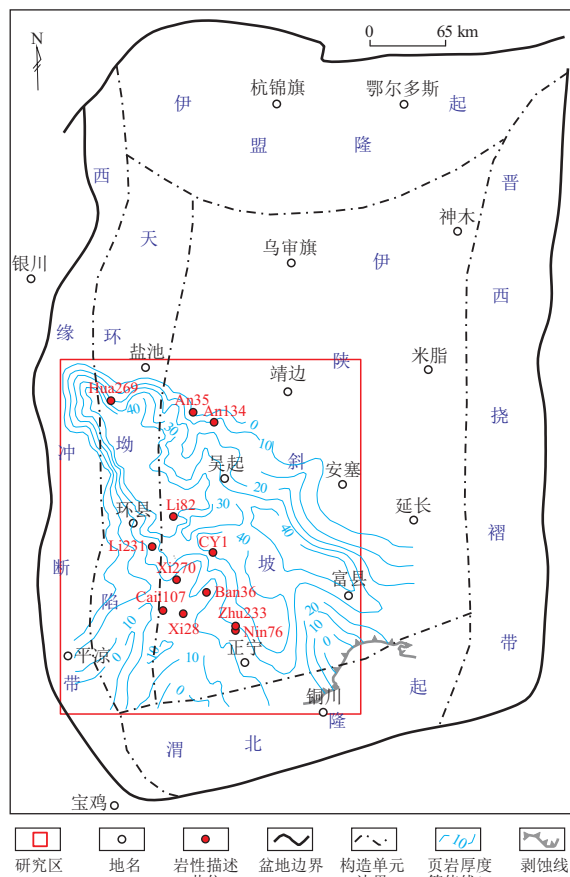


图1 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩和研究区分布范围

页岩厚度等值线图据文献<sup>[22]</sup>。

Fig.1 Location of study area and distribution of Chang 7 shale, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

屑岩为主,整体属于典型的三角洲—湖泊沉积体系。按照三级命名法对长7段碎屑岩进行粒度分类,划分为细砂岩(0.1~0.25 mm)、粉砂岩(0.005~0.1 mm)、泥质粉砂岩(0.005 mm以下的泥质碎屑占25%~50%)、粉砂质泥岩(0.005 mm以下的泥质碎屑占20%~75%)和泥页岩(<0.005 mm),页岩主要以页理发育而区别于泥岩。砂岩颜色以灰色—黑灰色为主,油饱和后呈褐色,表面粗糙且发育交错层理等沉积构造;泥质粉砂岩和粉砂质泥岩颜色以灰黑色为主,表面较粗糙,多为块状层理,属于砂岩和泥页岩之间的过渡岩性;泥岩和页岩都以黑色为主,手感较为光滑,泥岩相较于页岩页理不发育、呈块状,部分页岩可见水平层理缝(图2)。

高伽马砂岩是一类较为特殊的砂岩,单从岩心颜色、岩石粒度上很难将其与正常砂岩区分开,但其自然伽马值相对正常砂岩更高。据长庆油田提供的数据,统计同一口井中相邻正常伽马砂岩与高伽马砂岩的物性和含油性,得到正常砂岩的孔隙度主要为4.73%~9.79%(均值为7.55%),气测水平渗透率主要为 $(0.01\sim 0.13)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (均值为 $0.07\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ),含油饱和度主要为13.44%~37.02%(均值为28.00%);高伽马砂岩的孔隙度主要为0.78%~9.70%(均值为5.83%),气测水平渗透率主要为

$(0.004\sim 0.10)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (均值为 $0.07\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ),含油饱和度主要为7.24%~38.19%(均值为25.12%)。结果表明,高伽马砂岩的储集性和含油性与正常砂岩大致相当,由于高伽马砂岩常出现在长7<sub>3</sub>亚段的厚层泥页岩中,相较于纯泥页岩而言,高伽马砂岩段可作为压裂开采的有利目标(图3)。

## 2.2 岩性测井响应

本文共描述了研究区内12口长7段取心井的岩性特征,井位分布如图1所示。经岩心归位后,选取其中10口井的岩心描述数据及对应深度测井响应值共1088个数据点,其余2口长取心井(CY1和Nin76)将作为测井识别效果检验使用。

研究区长7段常用的测井曲线主要有声波时差测井(AC)、自然伽马测井(GR)、补偿中子测井(CNL)、密度测井(DEN)、自然电位测井(SP)、八侧向电导率测井(CLL8)和深感应电导率测井(CILD)。统计结果(表1,图4)表明,长7段内部岩石的自然伽马值整体偏高,砂岩出现高自然伽马值的现象很明显。其中,页岩的伽马值最高可达到701.1 API,平均值为277.0 API;细砂岩以及粉砂岩的伽马值分别可达189.0 API和217.8 API,平均值分别为116.5 API和140.1 API;泥质粉砂岩由于黏土和有机质含量较纯砂岩高,富集放射性铀元素的

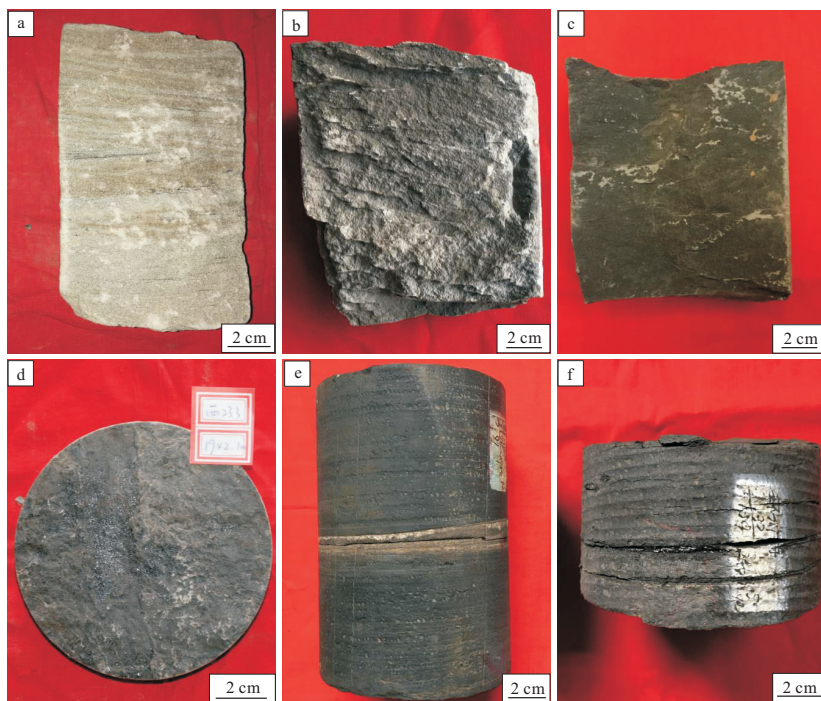


图2 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段碎屑岩岩心照片

a.Zhe86井,2410.4 m,灰色细砂岩,交错层理;b.Zhu174井,1624.5 m,黑灰色粉砂岩,交错层理;c.Li287井,1959.6 m,灰黑色泥质粉砂岩,块状层理,断面较粉砂岩更平整;d.Xi233井,1942.1 m,灰黑色粉砂质泥岩,块状层理;e.Gen138井,2734.92 m,黑色泥岩,块状层理;f.Hua317井,2467.5 m,黑色页岩,水平层理,可见水平层理缝

Fig.2 Core photos of clastic rocks in Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

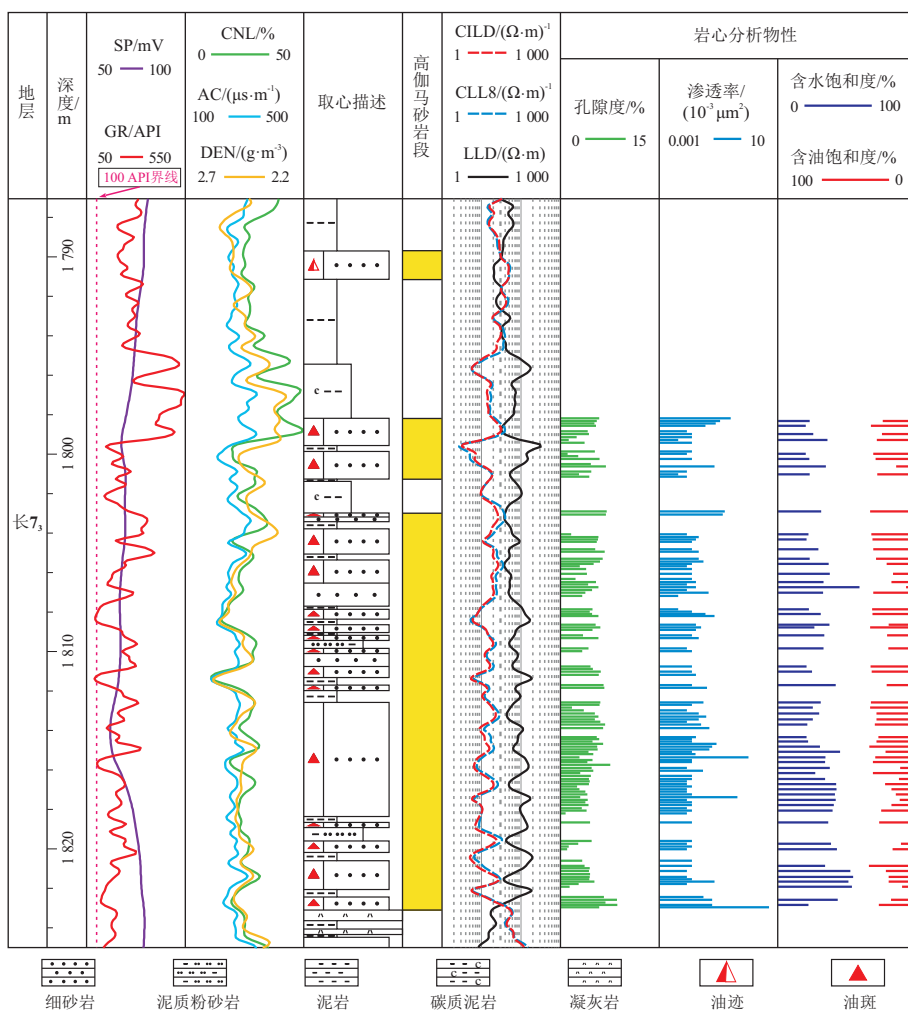


图 3 鄂尔多斯盆地 Zhu233 井三叠系延长组长 7<sub>3</sub>亚段高伽马砂岩测井剖面岩心物性数据据长庆油田。

Fig.3 Logging profile of high-gamma sandstones in Chang 7<sub>3</sub> sub-member, Triassic Yanchang Formation, well Zhu 233, Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段泥页岩层系内不同岩性测井数值

Table 1 Logging response of different lithologies in mud shale strata, Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

岩性	AC/ ( $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	GR/ API	CNL/ %	DEN/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	SP/ mV	CLL8/ ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) <sup>-1</sup>	CILD/ ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) <sup>-1</sup>
细砂岩	191.8~244.2 220.8	86.8~189.0 116.5	9.2~20.7 15.6	2.5~2.7 2.6	1.4~87.4 71.4	4.4~55.7 24.3	5.6~60.2 18.9
粉砂岩	209.2~262.8 227.4	90.2~217.8 140.1	12.3~26.1 18.1	2.4~2.7 2.5	-2.5~87.3 55.1	1.1~46.1 16.4	2.5~74.9 18.7
泥质粉砂岩	220.3~269.6 232.9	90.9~330.5 149.2	12.9~25.5 19.6	2.4~2.7 2.6	-0.4~106.9 66.7	0.6~111.0 23.8	2.1~84.8 22.1
粉砂质泥岩	228.2~265.5 244.6	99.3~397.4 174.0	17.6~31.4 23.6	2.4~2.7 2.6	-0.4~116.0 60.2	13.4~174.3 40.3	9.4~149.6 37.5
泥岩	246.2~288.0 263.4	115.0~254.0 156.2	19.8~34.4 27.9	2.4~2.6 2.5	55.9~118.1 94.0	8.4~77.3 29.0	7.9~64.0 33.2
页岩	247.7~354.1 286.8	111.0~701.1 277.0	20.9~52.9 32.9	2.1~2.6 2.4	46.2~119.7 68.6	0.5~283.4 27.5	0.6~247.7 27.6

注:表中分式意义为  $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

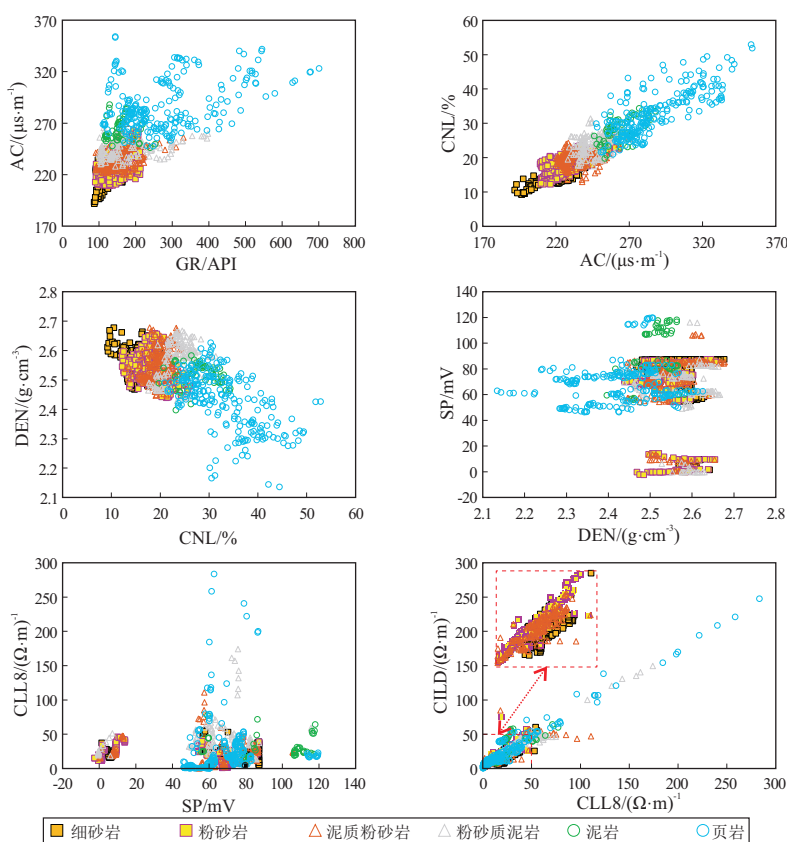


图 4 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段泥页岩层系内不同岩性测井响应

Fig.4 Logging response of different lithologies in mud shale strata, Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

能力增加,伽马值可高达 330.5 API,平均值为 149.2 API。整体上,由细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩到页岩,随着粒度变细以及黏土含量增加,AC、GR、CNL 测井值呈明显的递增趋势, DEN 有所递减, SP、CLL8 和 CILD 测井值的递变趋势不明显。

### 3 岩性测井识别方法及效果

#### 3.1 岩性测井识别方法

长 7 段很大一部分砂岩的伽马值与泥页岩重叠在一起,使得常用的伽马测井不能区分泥页岩与高伽马砂岩;其他测井同样存在不同岩性的测井值交叉重叠的现象,这使得不同类型测井的交汇图版不能有效区分六种岩性(图 4)。造成不同岩性测井响应值区分不明显的原因:一方面是由于研究区内火山灰沉积和构造运动改造的影响;另一方面是长 7 段西南方向物源水道横向迁移变化快、多期重力流砂体叠置改造,湖盆内沉积相变快、砂体尖灭快、泥砂混杂堆积<sup>[23]</sup>,垂向上机械沉积分异作用减弱,导致砂、泥岩之间测井响应差异变小。

针对以上存在的问题,学者们<sup>[3,6-11]</sup>提出了不同的岩性测井识别方法,都取得了不错的应用效

果。其中,张小莉等<sup>[4]</sup>详细探讨了鄂尔多斯盆地延长组高伽马砂岩的储层特征,并总结出定性识别高伽马砂岩的测井响应特征(表 2)。

本文提出一种新的岩性测井识别方法,该方法可以识别出长 7 段不同类型碎屑岩,并且区分开高伽马砂岩与正常砂岩。研究思路可以概括为三点:(1)观察不同测井参数随岩性变化而变化的趋势,以及各岩性之间测井响应差异的大小;(2)选择除 GR 以外的 AC、CNL、DEN、CLL8 和 CILD 五个测井参数进行运算组合,组合得到的新参数使各岩性之间的区分度最大;(3)识别出砂岩后,根据 GR 测井识别出自然伽马值大于 100 API 的高伽马砂岩。

首先,观察图 4 中不同岩性的测井响应参数随岩石特征变化的规律。GR 反映碎屑岩中黏土和有机质含量的差异,黏土和有机质会富集 U、Th、K 等放射性元素,导致岩石的自然伽马值增大。AC 反映了声波在固体有机质和骨架矿物中传播速度的差异,所以 AC 值可以反映有机质含量的高低。CNL 主要反映岩石内部氢元素的含量,孔隙中完全充满液体(油和水)时,CNL 可直接反映孔隙度的大小。由于泥页岩具有更多的束缚水、结晶水以及干酪根氢元素,故富含黏土和有机质的岩性

表 2 鄂尔多斯盆地三叠系延长组相对高自然伽马砂岩储层的测井响应特征<sup>[3]</sup>

Table 2 Logging response characteristics of relatively high natural gamma sandstone reservoirs in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

项目	常规砂岩储层	相对高自然伽马砂岩储层	泥质岩石
微电极(微电位、微梯度)	两条曲线呈现明显正幅度差	两条曲线呈现明显正幅度差	两条曲线基本重叠或正负不定幅度差
自然电位(SP)	明显负异常	明显负异常	基线附近,平直
自然伽马(GR)	低值	相对高值	中—高值
自然电位(SP)与自然伽马(GR)曲线幅度差	按照曲线左右幅度基本重合的原则,两条曲线基本重叠	按照曲线左右幅度基本重合原则,两条曲线之间存在明显幅度差	两条曲线基本重叠
声波时差(AC)曲线	相对低—中值	相对高值	中—高值
双感应(ILD)—八侧向(LL8)曲线	相对中—高值,特征明显,不同探测范围电阻率曲线之间一般存在差异	相对低值,特征明显,不同探测范围的电阻率曲线之间一般存在差异	一般为低值,含有机质时为相对高值,曲线之间基本重叠
视电阻率( $R_a$ )曲线	相对高值	相对低值	一般为低值,含有机质时为相对高值
声波时差(AC)—自然电位(SP)曲线重叠图	明显幅度差	明显幅度差	曲线基本重叠
深感应(Rd)—声波时差(英制)曲线重叠图	含油时存在明显幅度差,干层、水层处两条测井曲线基本重叠	对含油性反映不灵敏,含油层、水层、干层处两条测井曲线基本重叠	一般重叠,含有机质时曲线存在幅度差
计算自然电位与实测自然电位(SP)曲线重叠图	含油时存在明显幅度差,干层、水层处两条测井曲线基本重叠	含油时存在明显幅度差,干层、水层处两条测井曲线基本重叠	曲线基本重叠

CNL 更大<sup>[24]</sup>。DEN 与岩石组成矿物密度和压实结晶程度有关,通常岩石中脆性矿物富集程度越高,岩石的密度越大。CLL8 和 CILD 的比值则反映了井壁周围泥浆冲洗过渡带和原状地层电导率的差异,使用同种类型泥浆时,泥浆冲洗程度受岩石的孔隙度和渗透率大小的控制。以上测井特征表明,细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和页岩的碎屑粒度、孔隙度和渗透率依次减小,黏土矿物和有机质含量依次增大,随之造成 AC 和 CNL 呈线性增大, DEN 略微线性减小(图 4)。虽然大部分岩性之间 CLL8 和 CILD 的比值差异并不明显,但 CLL8 和 CILD 交汇图(图 4)中放大部分  $[0 \sim 50 (\Omega \cdot m)^{-1}]$  表明,部分细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩之间 CLL8 和 CILD 的比值存在差异,由细砂岩到泥质粉砂岩该比值整体有所减小。

然后,组合参数是为了使不同岩性之间的测井响应差异扩大化,即通过不同岩性之间存在差异的测井参数相互做乘除等运算得到新的参数,使各类岩性的新参数值的交叉重叠范围变小,最终区分开不同岩性。经过不断尝试和组合测井参数,得到了 2 个识别岩性效果很好的新参数 A 和 B:

$$A = (AC - 180) \cdot CNL / 100 \quad (1)$$

$$B = \ln[(CLL8 / CILD) \cdot DEN] \quad (2)$$

李雪英等<sup>[25]</sup>就应用过深电阻率与密度组合的商( $LLD / DEN$ )来区分大庆黑帝庙层的泥质粉砂岩和

粉砂质泥岩。由于长 7 段富有机质页岩的 GR、AC 和 CNL 测井异常高值在长 7<sub>1</sub> 和长 7<sub>2</sub> 亚段内分布不均匀,测井数据归一化处理比较困难,并且为了凸显平面上测井响应的变化趋势,故本文不对测井数据进行归一化处理。

在组合参数时,引入了一些常数和自然对数运算来减小不同测井参数响应幅度的差异,绘制六种岩性的参数 A 和参数 B 的交汇图版(图 5)。依据图 5 不同岩性之间的界线,将细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥页岩区分开,效果相较于单个测井参数组成的交汇图更好。但泥岩和页岩无论用新的测井参数图版还是单个测井交汇图,都无法将它们完全区分开。所以本文将沿袭前人的认识,即大部分页岩的自然伽马值较泥岩高、密度较泥岩低,一般认为页岩的自然伽马值大于 180 API、密度低于  $2.4 \text{ g/cm}^3$ <sup>[26]</sup>; 而将识别出的细砂岩、粉砂岩以及泥质粉砂岩自然伽马值高于 100 API 的部分作为高伽马砂岩。长 7 段岩性识别流程如图 6 所示。

### 3.2 岩性测井识别效果

选取 CY1 和 Nin76 两口长取心井来验证岩性测井识别的效果,两口井的取心描述数据由长庆油田提供,使用油田的取心描述是为了保证识别效果的对比性和可靠性。油田习惯将泥质粉砂岩直接描述为粉砂岩,页岩描述为碳质泥岩,由于岩性描述者视觉的偏差以及岩性分类方法的差异,所以此处的岩性识别率指的是取心描述和计算岩性结

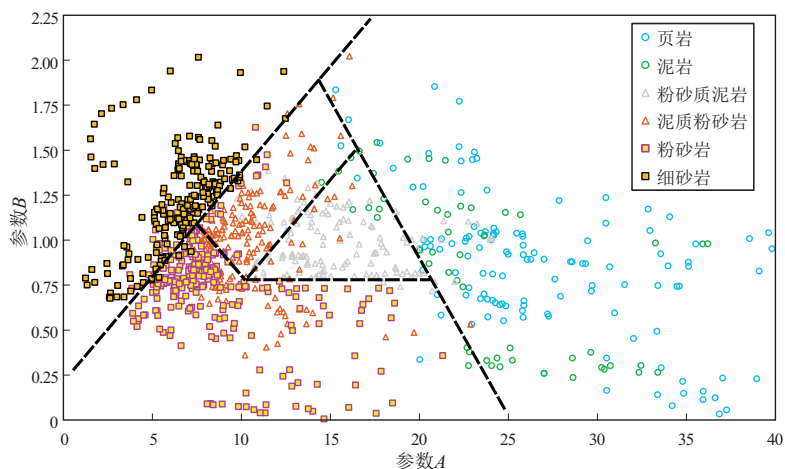


图 5 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段岩性测井识别参数 A 和参数 B 交汇图版

Fig.5 Intersection chart of parameters A and B for lithology logging identification of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

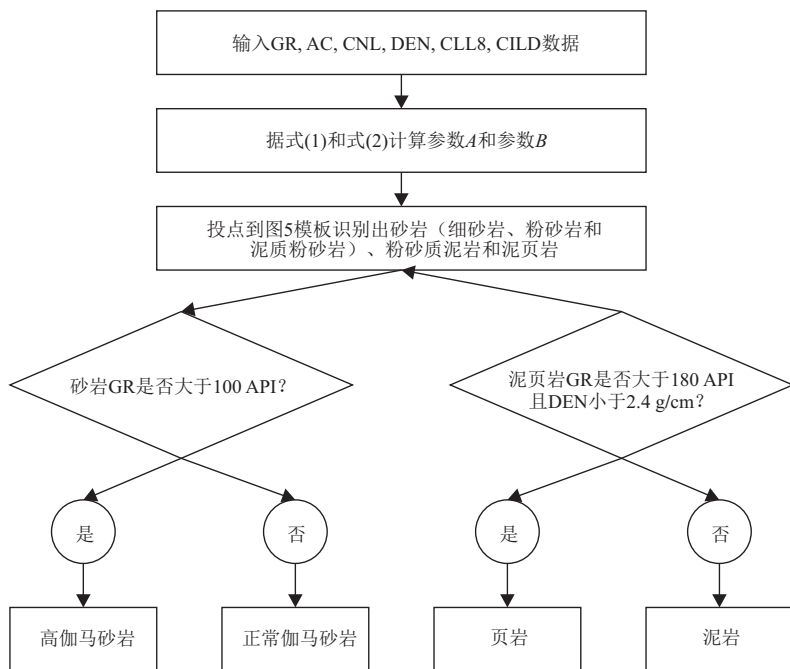


图 6 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段高伽马砂岩测井识别流程

Fig.6 Flow chart of logging identification of high-gamma sandstones in Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

果砂岩类(细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩)和泥岩类(粉砂质泥岩、泥岩和页岩)正确对应的厚度占长 7 段总取心厚度的百分比。最终,CY1 井的测井岩性识别率为 82.7%,Nin76 井的测井岩性识别率为 84.4%,识别效果都很不错(图 7)。

#### 4 高伽马砂岩展布特征

选择研究区内钻穿长 7 段的 269 口钻井,基本覆盖了页岩展布的主要区域。应用宏程序自动计算和统计每口井长 7 段内高伽马砂岩的厚度,由

Kriging 插值法绘制高伽马砂岩的累计厚度等值线图(图 8)。研究区长 7 段的高伽马砂岩主要分布于该区西南部,由盆地边缘向湖盆内部呈指状发散展布,物源方向主要来自研究区的西缘和西南缘两个方向。研究区北部和东部几乎没有高伽马砂岩分布,并且高伽马砂岩的物源与凝灰岩的物源方向一致,凝灰岩的物源也来自研究区西南缘<sup>[16]</sup>,可推测高伽马砂岩形成可能与鄂尔多斯盆地长 7 段沉积期西南缘的火山喷发有关,这与张小莉等<sup>[3]</sup>的结论一致。

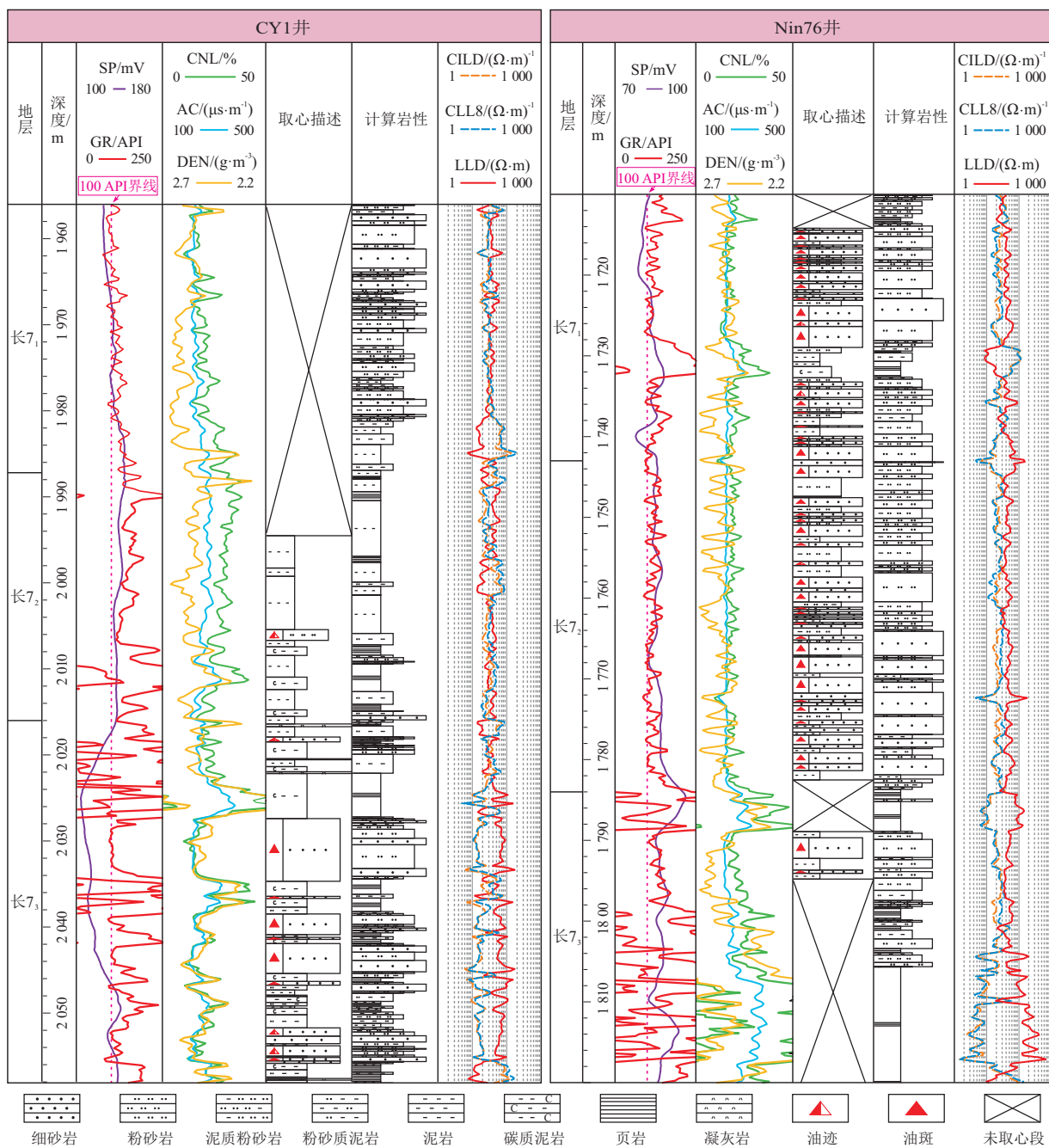


图 7 鄂尔多斯盆地 CY1 井和 Nin76 井的岩性识别效果  
取心描述数据长庆油田。

Fig.7 Lithology identification effect of wells CY 1 and Nin 76 in Ordos Basin

## 5 结论

(1)鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段内岩石的自然伽马值整体偏高,存在大量的高自然伽马砂岩,高伽马砂岩中细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩的自然伽马值分别可高达 189.0, 217.8, 330.5 API。

(2)应用常规测井参数组合运算得到了 2 个新的参数——参数 A 和参数 B,根据参数 A 和参数

B 的交汇图版、自然伽马测井和密度测井,可有效识别出长 7 段内的细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥页岩,以及高伽马砂岩。

(3)长 7 段内自然伽马值大于 100 API 的高伽马砂岩主要分布在研究区的西南部,砂体由湖盆的西缘和西南缘向湖盆内部呈指状发散展开,厚度整体向北部和东部逐渐变薄,其形成可能与长 7 段沉积时期盆地西南方向的火山喷发是有关的。



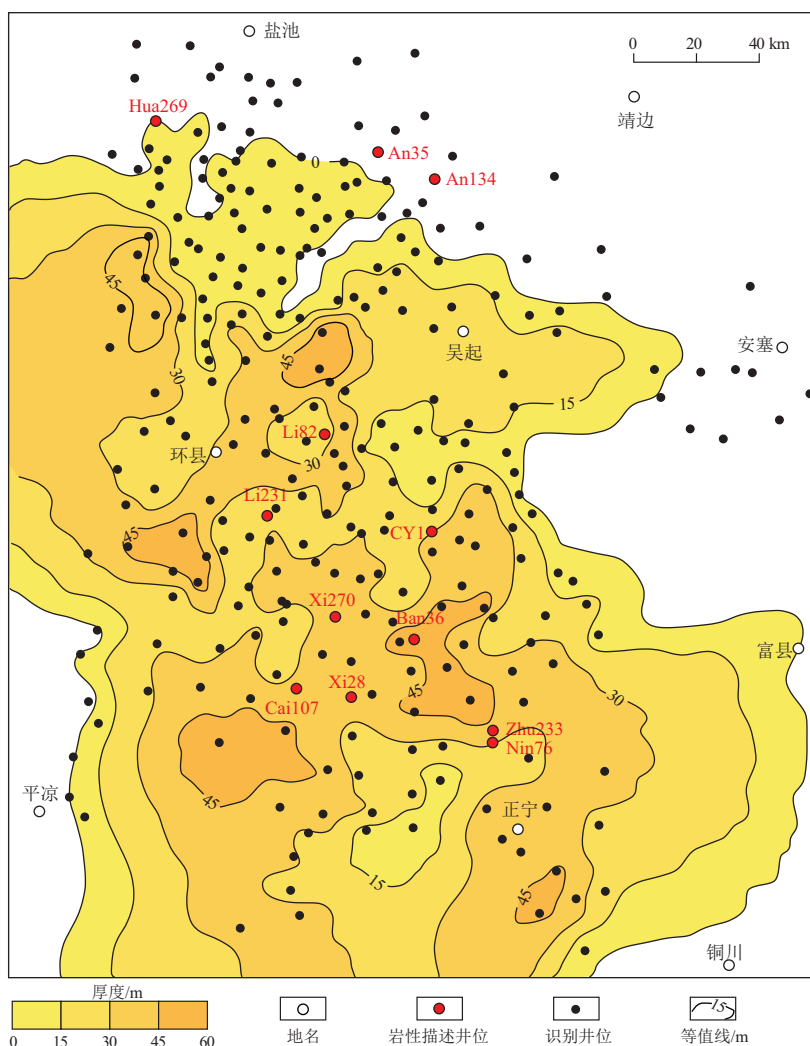


图 8 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段高伽马砂岩累计厚度分布  
Fig.8 Contour map of accumulated thickness of high-gamma sandstones in Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

参考文献:

[1] 付金华, 李士祥, 侯雨庭, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段 II 类页岩油风险勘探突破及其意义 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 78-92.  
FU Jinhua, LI Shixiang, HOU Yuting, et al. Breakthrough of risk exploration of class II shale oil in Chang 7 member of Yanchang Formation in the Ordos Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 78-92.

[2] IMAM B, TREWIN N H. Factors contributing to high gamma-ray levels in Upper Jurassic sandstone reservoirs of the Claymore oilfield, North Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 1991, 8(4): 452-460.

[3] 张小莉, 冯乔, 孙佩, 等. 鄂尔多斯盆地延长组高自然伽马砂岩储层特征 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 205-213.  
ZHANG Xiaoli, FENG Qiao, SUN Pei, et al. Characteristics of high gamma ray reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 205-213.

[4] 刘行军, 冯春珍, 柳益群, 等. 陕北长 6 段高自然伽马砂岩地

球化学特征及意义 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2013, 40(4): 445-456.  
LIU Xingjun, FENG Chunzhen, LIU Yiqun, et al. Geochemical characteristics and significance of Chang 6 high natural gamma sandstones in Yanchang Formation in north of Shaanxi, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(4): 445-456.

[5] LIU Huaqing, LI Xiangbo, LIAO Jianbo, et al. Genesis of the high gamma sandstone of the Yanchang Formation in the Ordos Basin, China [J]. Petroleum Science, 2013, 10(1): 50-54.

[6] ZHENG Qinghua, LIU Xingjun, YOU Jiyan, et al. Discovery and prediction of high natural gamma sandstones in Chang 7<sub>3</sub> submember of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7): 1840-1855.

[7] LI Yajun, ZHANG Xiaoli, YAN Yuanzi. Quantitative identification of relatively high-level radioactive sandstone in the Upper Triassic Yanchang Formation of the Ordos Basin, China [J]. Applied Geophysics, 2019, 16(3): 314-320.

- [8] 李高仁,郭清姬,王玉江,等.鄂尔多斯盆地高自然伽马储层识别研究[J].测井技术,2006,30(6):511-515.  
LI Gaoren, GUO Qingya, SHI Yujiang, et al. Identification of high gamma ray reservoir in Ordos Basin [J]. Well Logging Technology, 2006, 30(6): 511-515.
- [9] LYU Qiqi, LUO Shunshu, GUAN Yulong, et al. A new method of lithologic identification and distribution characteristics of fine-grained sediments: a case study in southwest of Ordos Basin, China [J]. Open Geosciences, 2019, 11(1): 17-28.
- [10] 成大伟,袁选俊,周川闽,等.测井岩性识别方法及应用:以鄂尔多斯盆地中西部长7油层组为例[J].中国石油勘探,2016,21(5):117-126.  
CHENG Dawei, YUAN Xuanjun, ZHOU Chuamin, et al. Logging-lithology identification methods and their application: a case study on Chang 7 Member in central-western Ordos Basin, NW China [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(5): 117-126.
- [11] FENG Congjun, YANG Hua, PU Renhai, et al. Lithology and oil-bearing properties of tight sandstone reservoirs: Chang 7 member of Upper Triassic Yanchang Formation, southwestern Ordos Basin, China [J]. Geosciences Journal, 2017, 21(2): 201-211.
- [12] 杨华,席胜利.长庆天然气勘探取得的突破[J].天然气工业,2002,22(6):10-12.  
YANG Hua, XI Shengli. Having made a breakthrough in natural gas exploration at Changqing [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(6): 10-12.
- [13] 杨俊杰.鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M].北京:石油工业出版社,2002:36-37.  
YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 36-37.
- [14] LIU Shaofeng. The coupling mechanism of basin and orogen in the western Ordos Basin and adjacent regions of China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1998, 16(4): 369-383.
- [15] LIU Shaofeng, YANG S G. Upper Triassic-Jurassic sequence stratigraphy and its structural controls in the western Ordos Basin, China [J]. Basin Research, 2000, 12(1): 1-18.
- [16] QIU Xinwei, LIU Chiyang, MAO Guangzhou, et al. Late Triassic tuff intervals in the Ordos Basin, Central China; their depositional, petrographic, geochemical characteristics and regional implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 80: 148-160.
- [17] ZHANG Wenzheng, YANG Weiwei, XIE Liqin. Controls on organic matter accumulation in the Triassic Chang 7 lacustrine shale of the Ordos Basin, Central China [J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 183: 38-51.
- [18] 杨华,张文正.论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:地质地球化学特征[J].地球化学,2005,34(2):147-154.  
YANG Hua, ZHANG Wenzheng. Leading effect of the seventh member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: geology and geochemistry [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.
- [19] 张文正,杨华,彭平安,等.晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响[J].地球化学,2009,38(6):573-582.  
ZHANG Wenzheng, YANG Hua, PENG Ping'an, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2009, 38(6): 573-582.
- [20] YUAN Wei, LIU Guangdi, BULSECO A, et al. Controls on U enrichment in organic-rich shales from the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, Northern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2021, 212: 104735.
- [21] 邱欣卫,刘池洋,毛光周,等.鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物岩石地球化学特征[J].地球科学(中国地质大学学报),2011,36(1):139-150.  
QIU Xinwei, LIU Chiyang, MAO Guangzhou, et al. Petrological-geochemical characteristics of volcanic ash sediments in Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2011, 36(1): 139-150.
- [22] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报,2013,34(1):1-11.  
YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [23] 付锁堂,姚绍利,李士祥,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力[J].石油实验地质,2020,42(5):698-710.  
FU Suotang, YAO Jingli, LI Shixiang, et al. Enrichment characteristics and resource potential of continental shale oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 698-710.
- [24] 宋延杰,陈科贵,王向公.地球物理测井[M].北京:石油工业出版社,2011:109-110.  
SONG Yanjie, CHEN Kegui, WANG Xianggong. Geophysical logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 109-110.
- [25] 李雪英,赵玉秋,范长海,等.超浅疏松地层泥质粉砂岩与粉砂质泥岩识别方法:以大庆某地区黑帝庙层为例[J].地球物理学进展,2015,30(1):159-164.  
LI Xueying, ZHAO Yuqiu, FAN Changhai, et al. An identification method of argillaceous siltstone and silty mudstone in extra shallow unconsolidated formation: taking an example of Heidimiao reservoir in an area of Daqing [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 159-164.
- [26] 杨华,牛小兵,徐黎明,等.鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J].石油勘探与开发,2016,43(4):511-520.  
YANG Hua, NIU Xiaobing, XU Liming, et al. Exploration potential of shale oil in Chang 7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 511-520.