

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.地球物理学报,2010,53(1):205~213,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.023

Zhang X L, Feng Q, Sun P, et al. Characteristics of high gamma ray reservoir of Yanchang formation in Ordos basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(1):205~213,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.023

## 鄂尔多斯盆地延长组高自然伽马砂岩储层特征

张小莉<sup>1</sup>,冯 乔<sup>2\*</sup>,孙 佩<sup>1</sup>,李 渭<sup>1</sup>

1 西北大学大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质学系,西安 710069

2 山东科技大学地球信息科学与工程学院,青岛 266510

**摘 要** 鄂尔多斯盆地延长组岩芯分析与测井特征研究表明,相对高自然伽马砂岩具有高长石、高 Th、局部高 U、K 含量变化不大的共同特征,Th、U 含量特征与凝灰岩极为相似;相对高自然伽马砂岩具有相对高自然伽马、高声波时差、低电阻率值的测井曲线特征,与凝灰岩测井曲线特征也极其相似;再者,从长 6 到长 4+5 油层组的各亚组,凝灰岩层逐渐不发育的同时,伴随相对高自然伽马砂岩发育程度依次增强;上述 3 项特征预示着延长组相对高自然伽马砂岩可能为同沉积期或较先期沉积的凝灰岩经搬运后作为砂岩组成部分再沉积形成的.四性关系研究表明:(1)依据自然伽马-自然电位曲线重叠图、声波时差-自然电位曲线重叠图,可快速识别相对高自然伽马砂岩;(2)相对高自然伽马砂岩具有相对发育的次生孔隙,非均质性强,一般物性越好,声波时差-自然电位曲线重叠图幅度差越大;(3)计算自然电位-自然电位曲线重叠图的幅度差,反映相对高自然伽马砂岩含油性,幅度差越大,表明其含油性越好.

**关键词** 高自然伽马砂岩,储层,凝灰岩,测井曲线,四性关系,重叠图幅度差

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.023

中图分类号 P631

收稿日期 2009-03-11,2009-11-29 收修定稿

### Characteristics of high gamma ray reservoir of Yanchang formation in Ordos basin

ZHANG Xiao-Li<sup>1</sup>, FENG Qiao<sup>2\*</sup>, SUN Pei<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory for Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2 College of Geological Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

**Abstract** On the basis of geological analysis and well log interpretation, the characteristics of high gamma ray reservoir of Yanchang formation are analyzed. The results show that high gamma ray reservoir has higher content of feldspar, thorium (Th), uranium (U) and nearly constant content of potassium (K). The characteristics of Th and U contents are just like the tuffs. Second, the results show that the development degree of high gamma ray reservoir increases from Chang6 formation to Chang 4 + 5 formation, while the development of tuffs becomes weaker. Thirdly, the well log curve characteristics of higher gamma ray, higher acoustical slowness and lower resistivity for high gamma ray reservoir are just like the tuffs. The three characteristics indicate that the characteristics of higher gamma ray might be caused by

**基金项目** “十一五”国家科技支撑计划(2007BAB170)与“十一五”国家 863 计划(2006AA09Z313),以及陕西省重点学科“地球探测与信息技术”建设项目共同资助。

**作者简介** 张小莉,女,1968 年生,博士,教授,主要从事测井资料处理与解释、油气田勘探方面的科研与教学工作。

E-mail: xiaoli\_nwu@163.com 或 zhangxlixd@126.com

**通讯作者** 冯 乔, E-mail: fengqiao999@126.com

homochronous sedimentary volcano tuff ash or previous tuffs. The research results about the four-property relationships of high gamma ray reservoir show that: (1) high gamma ray reservoir can be identified by the overlap of gamma ray and spontaneous potential curves, overlap of acoustic curve and spontaneous potential curve; (2) high gamma ray reservoirs have the preferable secondary pores with strong heterogeneity; the better the physical properties are, the more obvious the differential amplitude of overlap of acoustic curve and spontaneous potential curve is; (3) the computation of differential amplitude of overlap of spontaneous potential curve and spontaneous potential curve can reveal the characteristics of reservoir oil-bearing. If the differential amplitude of overlap is obvious, the oil-bearing characteristic is better.

**Keywords** High gamma ray reservoir, Reservoir, Tuff, Well log curve, Four-property relationships, Differential amplitude of overlap

## 1 引言

复杂岩性体勘探是当前油气藏勘探的前沿领域. 而关于复杂储层测井解释理论与处理技术也一直是地球物理学家所关注与探索的焦点.

鄂尔多斯盆地中生界三叠系延长组砂岩储层和上古生界石炭-二叠系砂岩储层中均发现相对高自然伽马砂岩储层并具有可观的产能. 该类砂岩储层因其具有相对“高自然伽马”的特征, 在油气田勘探开发过程中容易被误认为是泥质地层而丢失有效储层<sup>[1~5]</sup>. 因此, 为了提高勘探效率, 正确认识和评价各类复杂储层与预测其产能, 有必要搞清楚这类高放射性砂岩储层的成因, 研究其储集性能, 探索有效测井评价技术方法.

目前, 对于相对“高自然伽马”砂岩储层并没有确切定义. 对于碎屑岩剖面, 自然伽马测井是有效计算泥质含量的有效资料, 而自然电位测井曲线特征由于受控于多种因素, 如岩性、物性、地层水矿化度、含油性、钻井液侵入等, 在反映泥质含量灵敏度方面较自然伽马曲线差, 因此人们常依据自然伽马曲线特征计算碎屑岩地层的泥质含量, 并根据泥质含量的截止值 40.0% 来区分砂岩和泥岩, 一般砂岩的泥质含量小于 40.0%. 但是, 依据自然伽马测井原理, 自然伽马测井值高低是对岩石放射性特征的反映, 一般碎屑岩地层中泥质岩石的自然伽马测井值相对高、砂岩类岩石的自然伽马测井值相对低. 但是, 在很多地区均发现了一些砂岩具有相对高放射性, 并且与具有常规自然伽马曲线特征砂岩的共生. 一般具有常规自然伽马曲线特征砂岩的泥质含量小于 30.0%. 为了界定相对“高自然伽马”砂岩, 笔者认为自然伽马相对值法所计算的视泥质含量  $>30.0\%$ ,

尤其是视泥质含量  $\geq 40.0\%$  的砂岩为相对“高自然伽马”砂岩. 依据鄂尔多斯盆地定边、吴起、志丹、安塞油区延长组中一般砂岩、泥岩自然伽马数值特征, 自然伽马值大于 85API 的砂岩属于相对高自然伽马砂岩; 而川口油区长 6、长 4+5 油层组中泥岩、砂岩的自然伽马值相对偏高, 自然伽马值大于 97API 的砂岩属于相对高自然伽马砂岩. 因此, 区分相对高自然伽马砂岩的主要依据是自然伽马相对值, 即统一换算为自然伽马相对值法求取的视泥质含量.

## 2 相对高自然伽马砂岩的基本特征与成因

鄂尔多斯盆地三叠系延长组主要可分为 10 个油层组, 从下向上依次为长 10 到长 1 油层组, 各个油层组内部又可以细分为油层亚组, 比如长 7 从下向上细分为长 7<sup>3</sup>、长 7<sup>2</sup>、长 7<sup>1</sup>, 长 6 从下向上细分为长 6<sup>3</sup>、长 6<sup>2</sup>、长 6<sup>1</sup>, 长 4+5 从下向上细分为长 4+5<sup>2</sup>、长 4+5<sup>1</sup>.

川口油田、安塞油田、志丹油田、姬塬油田、白豹油田、吴起油田等油区长 8、长 7、长 6、长 4+5 油层组中均发现存在相对高自然伽马砂岩并具有一定含油性, 分布范围从盆地的中东部到盆地的中西部; 另外, 志丹油田寨科开发区、定边油田东-韩开发区的长 2 油层组中同样存在相对高自然伽马砂岩并具有一定的含油性, 主要分布于盆地的中西部.

国内外含油气盆地中, 已发现较多地区的凝灰岩可以成为有效储层<sup>[6~11]</sup>. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组中的相对高自然伽马砂岩是否与凝灰岩存在一定的关系, 值得探讨.

### 2.1 相对高自然伽马砂岩的岩石地球化学特征

鄂尔多斯盆地姬塬、白豹油田长 6、长 4+5 储

层研究认为,相对高自然伽马砂岩与具有常规自然伽马特征的砂岩比较,具有下列特征<sup>[1]</sup>:①骨架颗粒中长石类矿物含量较高;②放射性的云母类矿物含量相对高;③高岭石含量较高;④粘土矿物总含量较高;⑤具有高 Th 特征,局部出现高 U 特征。

依据安塞、志丹、白豹、吴起、定边油田长 2、长 4+5、长 6 油层组相对高自然伽马砂岩与具有常规放射性特征砂岩的分析化验结果对比分析可知,相对高自然伽马砂岩普遍具有高长石含量、高 Th、局部高 U、K 含量变化不大的共同特征;其中粘土矿物类型及含量在各个地区明显有所差异:定边长 2 油层组相对高自然伽马砂岩中粘土矿物具有相对高的高岭石含量,安塞长 6 油层组中相对高自然伽马砂

岩中粘土矿物具有相对高的绿泥石和伊利石含量,志丹长 6 油层组中相对高自然伽马砂岩中粘土矿物具有相对高的高岭石、绿泥石含量,同时还具有相对高伊利石含量(图 1)。同一时期安塞、志丹等各地区相对高自然伽马砂岩中粘土矿物的差异,反映出各个地区砂岩物源特征及其所经历的成岩作用的差异性。

据川口油田长 4+5、长 6 油层组 169 块砂岩样品中薄片鉴定结果统计反映,岩屑中长石含量变化范围较大,31%~69%,一般 40%~60%,对比分析常规砂岩与相对高自然伽马砂岩中长石含量可知,相对高自然伽马砂岩中长石含量一般大于 50%,明显高于一般砂岩中长石 30%~50%含量(图 2)。

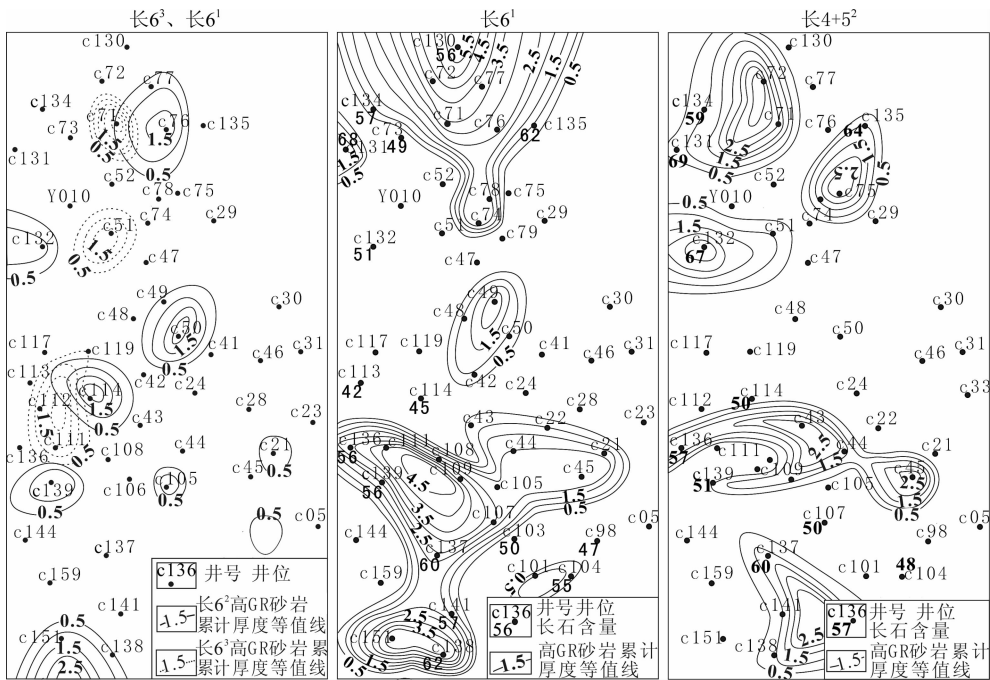


图 2 川口油田 C46 井区长 4+5、长 6 油层组长石含量与相对高自然伽马砂岩厚度(单位:m)分布平面图

Fig. 2 Content of feldspar and distribution of high gamma ray sandstone in Chang4+5 and Chang6 formation, Chuankou oilfield

## 2.2 测井资料识别相对高自然伽马砂岩

放射性测井是对岩石放射性特征的总体反映,即对岩石中 U、Th、K<sup>40</sup> 元素含量的综合反映,因此对于复杂岩性体,需要借助于自然伽马能谱测井和元素俘获谱(ECS)测井共同来识别岩性<sup>[1,2,12,13]</sup>。因为高放射性不一定是泥质岩石的反映,有可能是砂岩或其他岩石类型<sup>[13,14]</sup>,因此需要更新传统认识,以便于正确认识岩性,进而为测井解释建立良好的基础。

岩性解释是测井资料处理与解释的基础,鄂尔多斯盆地延长组长 6、长 4+5、长 2 等地层中含有相

对高放射性砂岩,李高仁等人应用自然伽马能谱测井和元素俘获谱(ECS)测井、补偿密度和补偿中子测井等资料来识别相对高放射性砂岩,形成了有效方法,并取得了较好效果<sup>[1,2,4,12~15]</sup>。

自然伽马能谱测井、元素俘获谱测井属于特殊测井系列,目前在鄂尔多斯盆地中生界的探井中仅个别井中进行了测量,对于仅具有常规测井系列的大部分钻井,在岩芯分析、特殊测井系列资料对应分析解释的基础上,经过“四性”关系研究,充分挖掘常规测井资料中信息,方可达到有效识别相对高放射性砂岩的目的。

川口、安塞、志丹、姬塬、白豹、吴起等油田长 4+5<sup>2</sup> 油层亚组、长 6 油层组中相对高自然伽马砂岩四性关系研究表明, 相对高自然伽马砂岩储层测井响应特征如表 1 所示, 其中除自然电位 (SP) 曲线存在明显负异常外, 相对高自然伽马砂岩储层的测井响应特征与泥质岩石极其相似. 图 3 为川口油田 C45 井长 4+5、长 6<sup>1</sup> 四性关系图. 图中显示出常规砂岩与相对高自然伽马砂岩的测井曲线特征差异明显, 应用自然电位曲线明显负异常、自然伽马相对高值、微电极曲线幅度差, 以及声波时差曲线与自然电

位曲线重叠图中明显幅度差, 可以快速识别出相对高自然伽马砂岩储层, 并与泥质岩石区分. 这是因为相对高自然伽马砂岩一般具有一定渗透能力, 因而自然电位曲线上存在明显负异常, 而泥质岩石一般因为渗透性差导致自然电位曲线异常幅度降低; 同时, 因为相对高自然伽马砂岩储层具有一定孔隙度和渗透率, 在声波时差与自然电位曲线重叠图中存在明显幅度差, 特征与常规砂岩储层的特征类似, 而在泥质岩石段, 自然电位曲线和声波时差曲线基本重叠.

表 1 相对高自然伽马砂岩储层的测井响应特征表  
Table 1 Characteristics of well logging responses of high gamma ray reservoir

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 <sub>v</sub> ) 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

### 2.3 高自然伽马砂岩的成因

鄂尔多斯盆地长 6、长 4+5 沉积期不同三角洲砂体的物源特征有所差异<sup>[16,17]</sup>, 但同期沉积砂体均不同程度存在相对高自然伽马砂岩的共同特征, 预示着相对高自然伽马砂岩成因可能与同期火山作用有关<sup>[18~21]</sup>.

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7、长 6、长 4+5 油层组中的凝灰岩是地层划分与对比的主要标志层. 凝灰岩层具有典型的高自然伽马、高声波时差、低电阻率、大井径的测井曲线特征, 易于识别. 川口、安塞、志丹、白豹、吴起等油田延长组中相对高自然伽马砂岩具有与凝灰岩极为类似的测井响应特征, 也预示着相对高自然伽马砂岩的成因与凝灰岩可能有一定的关系.

川口油田长 4+5、长 6 油层组储层特征及测井响应特征分析可知, 长 4+5<sup>2</sup> 油层亚组砂体主要为

一套河流三角洲平原分流河道沉积和河道间沉积, 长 6<sup>1</sup> 油层亚组砂体主要为河流三角洲前缘分流河道沉积, 而长 6<sup>2</sup>、长 6<sup>3</sup> 油层亚组砂体除三角洲前缘分流河道沉积外, 主要为浅湖-深湖相沉积<sup>[22]</sup>. 钻录井、取芯与测井资料综合分析发现, 川口油田从长 6<sup>3</sup> 下部到长 4+5<sup>2</sup> 上部, 凝灰岩层的发育程度依次减弱, 而相对高自然伽马砂岩的发育程度依次增强. 由于长 6<sup>2</sup> 期以前整体沉积背景为相对弱的沉积水动力环境, 有利于凝灰岩层保存, 而长 6<sup>1</sup> 到长 4+5<sup>2</sup> 期整体属于较强沉积水动力环境, 一则容易对其先期沉积凝灰岩层冲刷破坏, 二则同期沉积的凝灰岩易被水体携带搬运再沉积, 成为砂岩组成部分, 致使部分砂岩段中具有相对高自然伽马特征.

表 2 中凝灰岩微量元素测定结果显示, 以 Th、U 明显富集为特征, 尤其以 Th 富集为特征. 图 1 中相对高自然伽马砂岩放射性测定结果反映具有相对

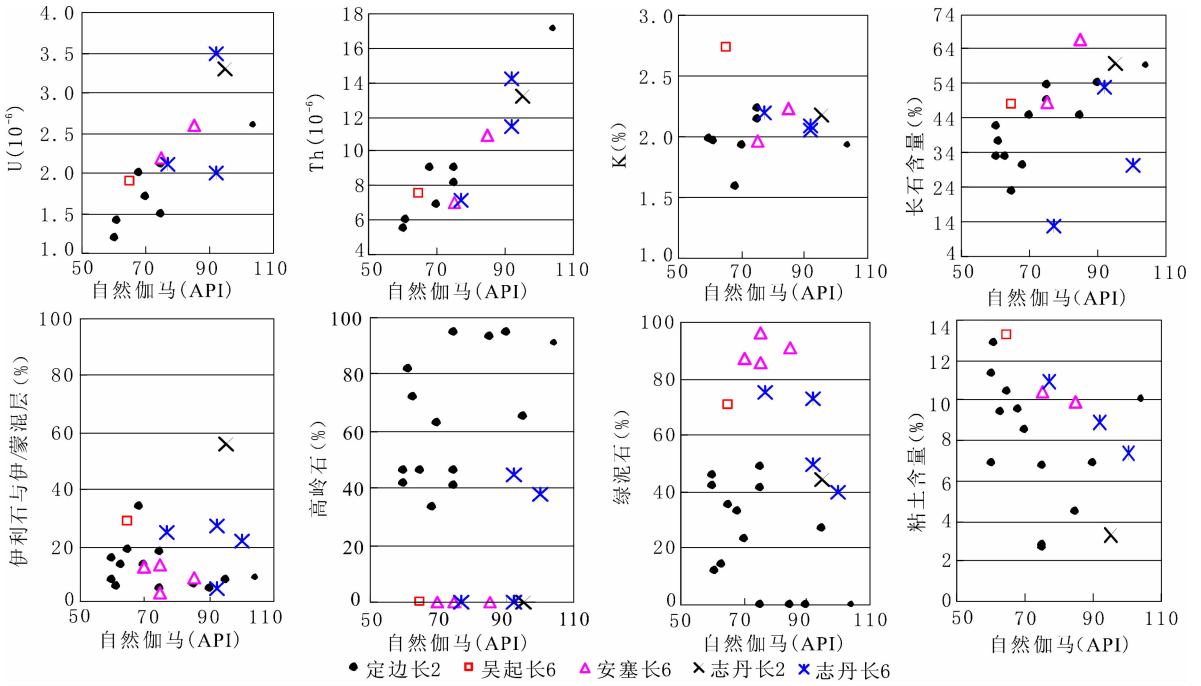


图 1 鄂尔多斯盆地安塞油田等砂岩自然伽马与岩石组分、粘土矿物及 Th、U、K 含量关系  
 Fig. 1 Relationship between gamma ray and sandstone composition, clay contents and contents of Th, U and K in Ansai oilfield and others, Ordos basin

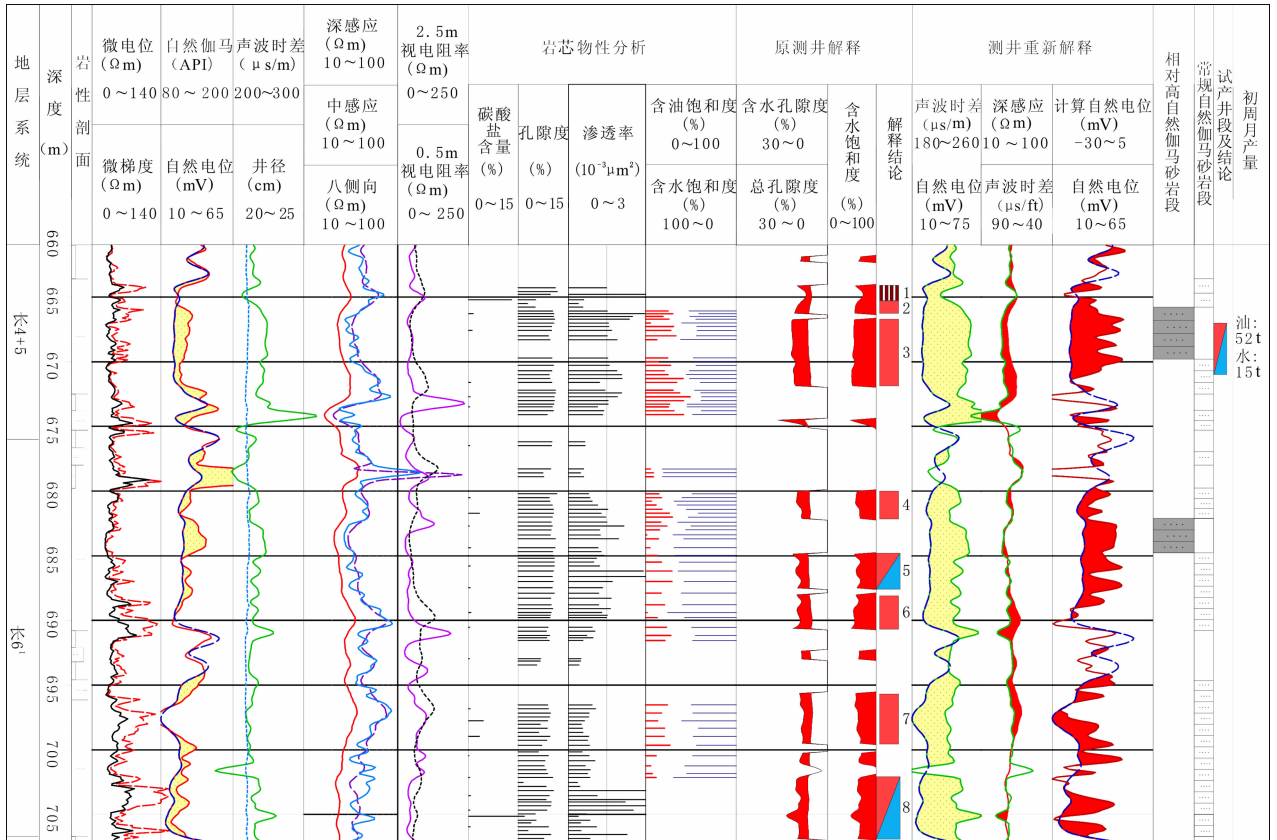


图 3 C45 井相对高自然伽马砂岩储层四性关系图  
 Fig. 3 Four-property relationships of high gamma ray reservoir, C45 well

表 2 延长组凝灰岩层主要元素和微量元素含量分析数据表

Table 2 Major elements and trace elements of tuffs, Yanchang formation

样号	层位	井深/m	Th/ $10^{-6}$	U/ $10^{-6}$	样号	层位	井深/m	Th/ $10^{-6}$	U/ $10^{-6}$	常量分析 K <sub>2</sub> O/%
an64	长 9 <sup>1</sup>	2220.00	52.21	11.55	rock1	长 7	2438.30	79.60	4.30	4.53
b140	长 6	2168.70	11.90	2.62	rock2	长 9	2641.20	16.10	2.14	5.24
b270	长 7 <sup>2</sup>	2061.70	58.98	15.87	rock3	长 7	2566.60	43.80	8.35	2.52
b269	长 6 <sup>2</sup>	1873.70	5.39	1.28	rock4	长 9	2639.40	17.00	3.19	5.08
g16	长 7 <sup>3</sup>	2233.80	41.22	8.99	rock5	长 4+5	2511.80	57.90	5.13	4.16
g236	长 7 <sup>3</sup>	2678.45	36.02	7.12	rock6	长 7	2689.40	46.50	4.59	4.34
g236	长 7 <sup>3</sup>	2679.05	49.68	13.93	rock7	长 7	1952.00	44.80	5.61	4.32
h159	长 8	2159.00	53.54	10.15	rock8	长 7	2460.50	20.20	3.67	3.45
l27	长 8 <sup>1</sup>	2566.93	38.24	8.45	rock10	长 9	2324.50	15.80	3.09	3.84
l27	长 8 <sup>1</sup>	2566.93	36.80	7.81	N33-1	长 7	1744.70	51.70	10.10	4.00
m10	长 6	2010.70	15.11	3.11	N33-2	长 7	1722.00	22.40	6.32	3.97
n33	长 7 <sup>3</sup>	1744.60	43.40	9.14	N42-1	长 7	1556.20	47.40	9.25	3.82
n42	长 7 <sup>3</sup>	1557.53	6.65	11.21	N42-2	长 7	1542.40	42.10	13.40	4.34
x63	长 8 <sup>1</sup>	2288.50	42.48	11.28	N42-4	长 7	1557.30	34.70	13.60	4.27
xi187	长 8 <sup>1</sup>	2133.00	17.77	3.35	X187-1	长 8	2132.80	24.80	7.07	4.82
xi259		1997.10	28.57	8.30	X187-2	长 8	2133.60	39.30	8.29	3.6
yhpm-1	长 1	康家沟	16.84	3.27	ZH50	长 7	1948.30	40.40	8.60	4.23
yhpm-2	长 6	英旺东	14.38	3.80	ZH80-1	长 7	2024.50	42.90	9.04	5.35
yhpm-3	长 7	刘家河	8.48	1.55	ZH80-2	长 7	2034.50	16.80	6.10	4.44
yhpm-4	长 7		4.57	64.80	ZH210	长 8	1704.40	53.70	11.60	5.38
yhpm-5	长 7		4.51	63.41	ZH112	长 7	1846.30	47.60	7.89	5.61
y22-1	长 7 <sup>3</sup>	2671.12	32.02	8.10	MU9	长 7	2311.70	19.30	8.04	3.35
y22-2	长 7 <sup>3</sup>	2661.17	33.38	8.77	B270-1	长 7	2061.60	57.80	16.10	3.4
y22-3	长 7 <sup>3</sup>	2671.20	37.43	9.17	ZH33	长 7	2256.70	23.60	6.31	3.34
y22-4	长 10	2874.10	18.69	3.21	ZH36-1	长 3	1831.20	19.50	3.18	3.40
yuan170	长 8 <sup>1</sup>	2322.68	21.96	6.13	ZH36-2	长 3	1832.20	18.30	5.20	3.06
yuan172	长 8 <sup>1</sup>	2296.50	13.98	3.46	ZH11-1	长 7	926.10	22.20	6.51	4.28
zh80	长 7 <sup>3</sup>	2023.80	17.79	6.65	ZH11-2	长 7	927.00	23.40	9.71	3.98
					ZH11-3	长 7	926.50	56.30	16.70	4.49
					LI51	长 7	2269.50	41.20	9.15	3.28

注: K<sub>2</sub>O 含量: 2.89%~4.20%

上述样品分析数据引自文献[18]

富集 Th 和 U 特征. 由于 Th 元素具有相对稳定性, 微量元素测试数据进一步说明, 相对高放射性砂岩的高放射性特征可能与火山作用有关, 是火山灰或凝灰岩经搬运后成为砂岩组成部分再沉积而形成的.

### 3 相对高自然伽马砂岩的储集性能

凝灰岩样品分析测试结果统计表明, 主要为

SiO<sub>2</sub> 含量 53%~66% 的中性(安山质)凝灰岩, 少量为 SiO<sub>2</sub> 含量 45%~53% 的基性(玄武质)凝灰岩和 SiO<sub>2</sub> 含量 >66% 的酸性(流纹质)凝灰岩.

鄂尔多斯盆地延长组整体上属于煤系地层, 沉积背景以及后期的油气形成, 使地下整体属于弱酸性流体介质环境, 该环境有利于安山质火山成分溶蚀, 形成次生孔隙. 文献[18]详细分析了安塞油田浊沸石成因及浊沸石分布与次生孔隙之间的关系.

川口油田长 4+5、长 6 油层组砂岩薄片分析孔隙类型、面孔率与自然伽马测井值对应关系统计表明,无论自然伽马测井值高或低,其面孔率分布范围基本一致,均为 2%~8%,但是当自然伽马值大于 97API 时,砂岩中溶蚀孔隙相当发育,溶蚀孔/粒间孔比值明显大于 1(图 4),反映相对高自然伽马储层中溶蚀孔较为发育。

图 5 中砂岩自然伽马测井值与物性参数之间关系反映出,相对高自然伽马砂岩具有一定的储集物

性,其孔隙度、渗透率以及孔隙结构指数( $\sqrt{k/\phi}$ ,  $k$  为渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\phi$  为孔隙度, 小数)与具有常规放射性特征的砂岩基本相同。

川口、安塞、志丹、白豹、吴起油田长 4+5、长 6 以及志丹油田寨科油区长 2、定边油田东韩开发区长 2 油层组相对高自然伽马砂岩储层薄片分析、物性分析结果显示,该类储层的非均质也较为严重。图 3 中显示,相对高自然伽马砂岩储层段渗透率级差较大,渗透率非均质性严重。对于以低孔、低渗-特低渗为背景的延长组长 4+5、长 6 储层,如果储层层内渗透率几何平均值达到一定下限标准,则渗透率非均质性严重意味着存在相对高渗层段,也就是相对高渗优质储层段,优质储层的存在有利于油气富集成藏。

图 3 中 C45 井四性关系分析可知,声波时差(AC)-自然电位(SP)曲线重叠图幅度差可以反映储层物性相对好坏。图 3 中所显示的 2 段相对高自然伽马砂岩段岩芯物性分析结果与曲线重叠图对比分析可知,可以应用声波时差(AC)-自然电位(SP)曲线重叠图来快速反映相对高自然伽马砂岩的储集性能。

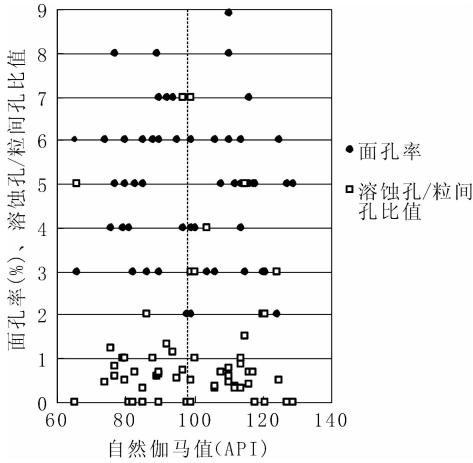


图 4 川口油田长 4+5、长 6 油层组砂岩自然伽马与面孔率、溶蚀孔/粒间孔关系图

Fig. 4 Relationship between gamma ray and plane porosity, the ratio between dissolving pores and intergranular pores in Chang4+5 and Chang6 formation, Chuankou oilfield

#### 4 相对高自然伽马砂岩储层含油性测井评价

储层含油气评价向来是储层评价和测井解释的核心。由于相对高自然伽马砂岩电阻率相对较低,按照常规 Archie 公式解释方法进行分析,容易导致计

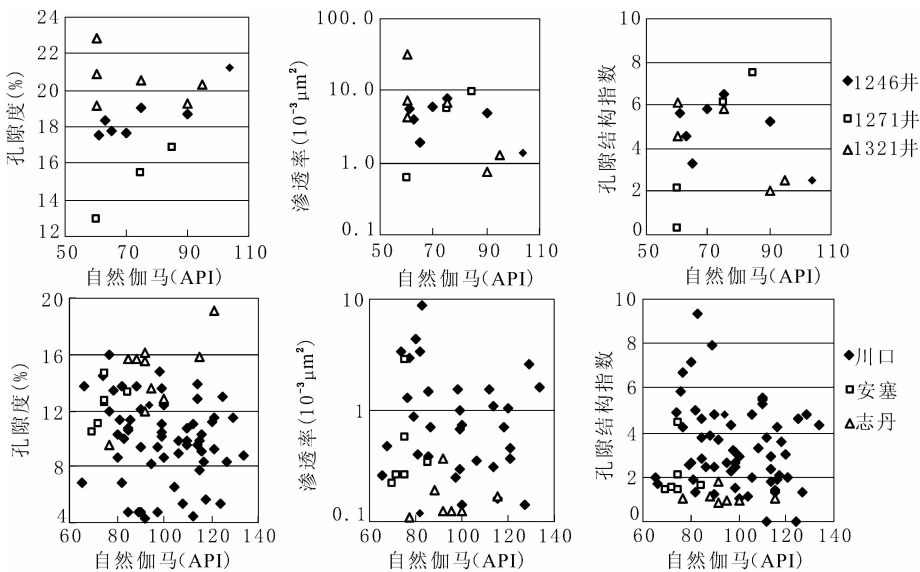


图 5 长 2、长 4+5、长 6 砂岩储层自然伽马与物性参数关系图

Fig. 5 Relationship between gamma ray and physical property parameters in chang4+5 and chang6 formation, Chuankou oilfield

算含油饱和度偏低而误判为含水层. 因此, 对于相对高自然伽马砂岩储层含油气性的评价, 提出了在岩性、储层物性评价的基础上, 针对物性偏优层段, 应用计算自然电位(也称为视自然电位)<sup>[23]</sup>与实测自然电位重叠图来快速评价其含油性.

计算自然电位是基于径向不同探测范围内深浅电阻率的关系, 结合自然电位测井的原理计算出的一个参数. 其计算方法为: 根据深、浅电阻率测井结果, 应用八侧向电阻率( $R_{LLS}$ )与深电阻率( $R_{ILD}$ )测井值的比值, 即径向电阻率比值, 并结合自然电位测井原理, 依据区域温度资料, 确定自然电位测井原理公式中的电位系数  $K$ , 应用公式  $PSP = K \lg(R_{LLS}/R_{ILD})$  计算出自然电位值, 并把计算自然电位曲线(PSP)与实测自然电位曲线(SP)组合, 采用曲线重叠法原则进行重叠, 进而根据曲线之间的幅度差反映其含油性. 如果储层含水或位于纯泥岩部位时, 二曲线基本重合; 当地层含油时, 径向电阻率存在差异, 常造成计算的自然电位曲线(PSP)异常幅度较实测自然电位曲线(SP)异常幅度偏低, 两曲线存在一定幅度差, 含油性越好, 二者之间幅度差越大. 因此, 根据上述特征, 在泥岩处或确定水层处让两条曲线基本叠合, 就可根据两曲线之间关系, 定性分析含油性. 由于该方法应用了同一储层径向上的参数进行比较来反映含油性的, 因此对于地层水矿化度变化较大, 岩石孔隙结构复杂, 岩电参数变化较大的地区, 往往能取得较好的效果, 有利于油、水层识别. 但是, 该方法的有效应用取决于微电阻率/深电阻率比值, 微电阻率曲线变化不能太剧烈, 并且深、浅电阻率测井具有同样的纵向特征, 否则, 计算自然电位曲线“跳”现象明显, 难于与实测自然电位曲线进行对比.

针对川口、安塞、志丹、白豹、吴起、定边长 2、长 4+5、长 6 油层组中的试油或试产段中包含有相对高自然伽马砂岩的井段处理结果证实, 应用计算自然电位与实测自然电位重叠法同样可以快速反映相对高自然伽马砂岩储层的含油性. 图 3 中清楚显示出该方法的应用效果.

## 5 结 论

(1) 鄂尔多斯盆地延长组长 2、长 4+5、长 6 油层组中相对高自然伽马砂岩普遍具有高长石含量、高 Th、局部高 U、K 含量变化不大的共同特征, 其地球化学及其分布特征反映, 其成因可能与凝灰岩存

在密切关系, 是同沉积期或较前期沉积的凝灰岩经搬运成为砂岩组成部分再沉积而形成的.

(2) 相对高自然伽马砂岩具有自然电位明显负异常、高自然伽马、高声波时差、低电阻率的典型测井响应特征. 除自然电位曲线特征外, 自然伽马、声波时差、电阻率曲线特征与泥质岩石极为相似. 四性关系分析可知, 应用自然电位-自然伽马曲线重叠图以及声波时差-自然电位曲线重叠图法, 可以快速识别出相对高自然伽马砂岩.

(3) 相对高自然伽马砂岩的次生孔隙发育, 储层非均质性严重. 声波时差(AC)-自然电位(SP)曲线重叠图幅度差可定性反映储集性能, 幅度差越大, 物性越好.

(4) 计算自然电位与实测自然电位曲线重叠图幅度差, 同样可快速反映出相对高自然伽马砂岩储层的含油性, 两条曲线幅度差越大, 含油性越好.

## 参考文献(References)

- [1] 李高仁, 郭清娅, 石玉江. 鄂尔多斯盆地高伽马储层识别研究. 国外测井技术, 2006, **21**(5): 33~35  
Li G R, Guo Q Y, Shi Y J. Research on identifying the reservoir of high gamma in Ordos basin. *World Well Logging Technology* (in Chinese), 2006, **21**(5): 33~35
- [2] 侯雨庭, 李高仁. 元素俘获谱测井在长庆天然气勘探中的应用. 中国石油勘探, 2005, **3**(3): 46~49  
Hou Y T, Li G R. Application of element capture spectroscopy logging in Changqing gas exploration. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 2005, **3**(3): 46~49
- [3] 黄建松, 安文武, 白武厚. 陕北榆林气田山 2 段高自然伽马储集层特征及其成因分析. 录井工程, 2007, **18**(4): 74~79  
Huang J S, An W W, Bai W H. The reservoir features and genetic analysis of high natural gamma for member 2 of Shanxi group in Yulin gas field of north Shanxi. *Mud Logging Engineering* (in Chinese), 2007, **18**(4): 74~79
- [4] 冯春珍, 林伟川, 梁重阳. 低渗透岩性气藏高自然伽马砂岩识别方法. 石油天然气学报, 2005, **27**(1): 201~203  
Feng C Z, Lin W C, Liang C Y. Methods for recognizing natural gamma sandstones in low permeability and lithologic gas reservoirs. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute* (in Chinese), 2005, **27**(1): 201~203
- [5] 谭成仟, 刘池洋, 赵军龙等. 鄂尔多斯盆地典型地区放射性异常特征及其地质意义. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, **37**(S1): 147~156  
Tan C Q, Liu C Y, Zhao J L, et al. Feature of high natural gamma anomaly and its geological implication of the typical area in Ordos basin. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2007, **37**(S1): 147~156
- [6] 张新荣, 王东坡. 火山岩油气储层特征浅析. 世界地质, 2001, **20**(3): 272~278  
Zhang X R, Wang D P. Analysis on oil and gas reservoir



- characteristics of volcanic rocks. *World Geology* (in Chinese), 2001, **20**(3):272~278
- [7] 张子枢, 吴邦贵. 国内外火山岩油气藏研究现状及勘探技术调研. *天然气勘探与开发*, 1994, **16**(1):1~26  
Zhang Z S, Wu B G. Research status and survey on exploration technologies of volcanic reservoir. *Natural Gas Exploration & Development* (in Chinese), 1994, **16**(1):1~26
- [8] 王宏斌, 王璞珺, 陈弘. 中国东部中生代火山-碎屑-凝灰岩储层研究综述. *世界地质*, 1997, **16**(3):34~41  
Wang H B, Wang P J, Chen H. A summary of the studies on volcanic-clastic-tuff rock reservoirs of Mesozoic and Kainozoic in eastern China. *World Geology* (in Chinese), 1997, **16**(3):34~41
- [9] 冯子辉, 邵红梅, 童英. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究. *地质学报*, 2008, **82**(6):760~767  
Feng Z H, Shao H M, Tong Y. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen gas field, Songliao basin. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2008, **82**(6):760~767
- [10] 李军, 王炜, 王书勋. 青西油田沉凝灰岩储集特征. *新疆石油地质*, 2004, **25**(3):288~290  
Li J, Wang W, Wang S X. Bedded tuff reservoir in Qingxi oilfield. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 2004, **25**(3):288~290
- [11] 杨辉, 张研, 邹才能等. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩分布及天然气富集规律. *地球物理学报*, 2006, **49**(4):1136~1142  
Yang H, Zhang Y, Zou C N, et al. Volcanic rock distribution and gas abundance regularity in Xujiaweizi faulted depression, Songliao basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(4):1136~1142
- [12] 张景廉, 刘全新, 梁秀文. 有关自然伽马能谱测井在储层预测中的应用讨论. *石油地球物理勘探*, 2000, **35**(3):395~400  
Zhang J L, Liu Q X, Liang X W. Discussion on the application of natural gamma spectrometry log to reservoir prediction. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2000, **35**(3):395~400
- [13] 钱志, 金强, 王锐. 自然伽马能谱测井在西部油气勘探中的应用. *石油仪器*, 2005, **19**(5):62~64  
Qian Z, Jin Q, Wang R. Application of natural gamma spectroscopy logging in the west oil field prospecting. *Petroleum Instruments* (in Chinese), 2005, **19**(5):62~64
- [14] 刘东付, 邵春华, 胡再凯. 富含放射性矿物剖面岩性解释及泥质校正. *新疆石油地质*, 2005, **26**(3):307~309  
Liu D F, Shao C H, Hu Z K. Lithologic interpretation of high-radioactivity mineral profile and its shale correction. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 2005, **26**(3):307~309
- [15] 冯宝华. 火山沉积岩及其矿床研究中伽马测井曲线解释的误区. *物探与化探*, 2007, **32**(2):171~174  
Feng B H. A mistake in the interpretation of gamma log curve for the study of volcanic sedimentary rocks and related ore deposits. *Geophysical & Geochemical Exploration* (in Chinese), 2007, **32**(2):171~174
- [16] 杨华. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积体系及含油性研究 [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2005  
Yang H. Deposition system and oil accumulation research of Yanchang formation in Triassic, Ordos basin [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005
- [17] 赵俊兴, 吕强, 李凤杰等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长6时期物源状况分析. *沉积学报*, 2008, **26**(4):610~615  
Zhao J X, Lü Q, Li F J, et al. Sediment provenance analysis of the Chang 6 oil-bearing of Yanchang formation in the South of Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 2008, **26**(4):610~615
- [18] 左智峰, 戚颖, 葛小瑞. 鄂尔多斯盆地晚三叠世火山物质对油气成藏条件的影响. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2008, **44**(3):12~15  
Zuo Z F, Qi Y, Ge X R. Effect of late Triassic volcanic sediment event on hydrocarbon accumulation conditions in Ordos Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* (in Chinese), 2008, **44**(3):12~15
- [19] 邱欣卫. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层特征和形成环境 [硕士学位论文]. 西安: 西北大学地质学系, 2008  
Qiu X W. Characteristics and forming environments of tuffs in Yanchang formation in Ordos basin [Master's thesis] (in Chinese). Xi'an: Department of Geology, Northwest University, 2008
- [20] 赵俊兴, 陈洪德, 付锁堂. 鄂尔多斯盆地南部延长组中几个重要事件沉积及其油气聚集关系. *矿物岩石*, 2008, **28**(3):90~95  
Zhao J X, Chen H D, Fu S T. Discussion on some important depositional event and their relationship with hydrocarbon accumulation of Yanchang formation in south Ordos basin. *Journal of Mineralogy and Petrology* (in Chinese), 2008, **28**(3):90~95
- [21] 杨华, 杨奕华, 石小虎等. 鄂尔多斯盆地周缘晚古生代火山活动对盆内砂岩储层的影响. *沉积学报*, 2007, **25**(4):526~532  
Yang H, Yang Y H, Shi X H, et al. Influence of the Late Paleozoic volcanic activity on the sandstone reservoir in the interior of Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 2007, **25**(4):526~532
- [22] 赵希刚, 吴汉宇, 王靖华等. 综合测井资料在研究油气藏沉积相中的应用—以川口油田长六油层组为例. *地球物理学进展*, 2004, **19**(4):918~923  
Zhao X G, Wu H N, Wang J H, et al. Application of comprehensive logging information for researching the sedimentary facies of oil/gas reservoirs in the Chang-6 oil layer of Chuankou oil field. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, **19**(4):918~923
- [23] 侯雨庭, 时振峰. 利用自然电位差识别油水层的方法. *国外测井技术*, 2005, **20**(2):17~18  
Hou Y T, Shi Z F. A method of identifying oil and water layers through spontaneous potential difference. *World Well Logging Technology* (in Chinese), 2005, **20**(2):17~18