

鄂尔多斯盆地吴起地区三叠系延长组长6—长9油层组 高自然伽马值砂岩特征及成因

刁豪^{1,2}, 闫新智³, 赵靖舟^{2,4}, 马荣^{4,5}

(1. 西安石油大学 石油工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省油气井及储层渗流与岩石力学重点实验室, 陕西 西安 710065;
3. 延长油田股份有限公司 勘探部, 陕西 延安 716000; 4. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 5. 延长油田股份有限公司 吴起采油厂, 陕西 吴起 717699)

摘要:鄂尔多斯盆地吴起地区延长组长6—长9油层组存在高自然伽马值(简称高伽马)砂岩,该类砂岩极易在常规测井解释中被识别为粉砂岩甚至泥岩,从而造成有效储集层厚度的误判。为了准确判识岩性,从岩心观察入手,并结合粒度资料对不同岩性进行精细划分,总结了研究区高伽马砂岩测井响应、岩石学、物性及含油性特征,并对其成因开展了分析与探讨。研究结果表明:①高伽马砂岩在常规测井上响应特征显著,表现为高自然伽马值、高声波时差以及自然电位明显负异常;在自然伽马能谱测井上,则显示出高铀(U)、高钍(Th)及低钾(K)含量特征。②高伽马砂岩相较于普通砂岩,通常具有更高的长石、云母及黏土矿物含量。两类砂岩的孔隙度较为接近,但高伽马砂岩渗透率略低于常规砂岩,含油饱和度亦相对较低,且含油性均随铀、钍和钾等放射性元素含量的增加而呈现降低趋势。③火山活动、沉积环境和黏土矿物类型是高伽马砂岩形成的主控因素。火山活动喷发的碎屑物质提供了丰富的放射性物质来源,研究区东北部和西南部在放射性元素的迁移、聚集及保存条件方面存在不同,尤其是铀与钍元素在不同沉积环境下富集程度差异明显;不同黏土矿物对放射性元素的吸附能力存在差异,伊利石与伊/蒙混层矿物具有较强的吸附能力,而高岭石与绿泥石对放射性元素的吸附作用有限。对吴起地区高伽马砂岩岩性及发育特征开展精细研究,不仅对鄂尔多斯盆地油气储量提升与产能建设具有重要实际意义,而且也能为中国其他盆地同类储层的勘探与开发提供关键地质依据与理论指导。

关键词: 储层特征;高自然伽马值砂岩;长6—长9油层组;延长组;三叠系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and genesis of high-gamma sandstones in the 6th to 9th oil groups of the Triassic Yanchang Formation, Wuqi area, Ordos Basin

DIAO Hao^{1,2}, YAN Xinzhi³, ZHAO Jingzhou^{2,4}, MA Rong^{4,5}

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Well Stability and Fluid & Rock Mechanics in Oil and Gas Reservoirs, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Exploration Department, Yanchang Oil Field Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000, China; 4. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 5. Wuqi Oil Production Plant, Yanchang Oil Field Co., Ltd., Wuqi, Shaanxi 717699, China)

Abstract: Sandstones with high natural gamma-ray (GR) values (also referred to as high-gamma sandstones) occur in the 6th to 9th oil groups of the Yanchang Formation (collectively referred to as the Chang 6–9 oil groups) in the Wuqi area, Ordos Basin. By conventional log interpretations, these sandstones are often mistakenly identified as siltstones or even mudstones, leading to an underestimation of the effective reservoir thickness. In this study, we conduct a fine-scale lithological division by combining core observations with grain size data. Accordingly, the logging responses, petrological characteristics, physical properties, and oil-bearing properties of high-gamma sandstones in the study area are summarized, followed by an analysis and exploration of their origin. The results indicate that the high-gamma sandstones exhibit significant conventional logging responses, including high GR values, elevated sonic interval transit time, and pronounced negative spontaneous potential (SP) anomalies. In the

收稿日期:2025-08-03;修回日期:2025-09-08。

第一作者简介:刁豪(1994—),男,博士研究生,油气成藏地质学与非常规油气地质。E-mail: dhgzgy@163.com。

通信作者简介:赵靖舟(1962—),男,教授,油气成藏地质学、非常规油气地质与勘探。E-mail: jzzhao@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42202185);中国博士后基金项目(2022MD713801);陕西省教育厅自然科学研究项目(22JK0505)。

spectral GR logs, these sandstones show the characteristics of high uranium (U) and thorium (Th) concentrations, along with low potassium (K) concentration. Compared to common sandstones, the high-gamma sandstones generally contain higher contents of feldspar, mica, and clay minerals. Despite comparable porosity, the high-gamma sandstones show slightly lower permeability and oil saturation than common sandstones. Furthermore, their oil-bearing properties tend to decrease with an increase in the concentrations of radioactive elements such as U, Th, and K. The primary factors controlling the formation of the high-gamma sandstones include volcanic activity, sedimentary environment, and clay mineral type. The debris produced by volcanic eruptions supplies abundant radioactive materials for the study area. The northeastern and southwestern parts of the study area show differences in the migration, accumulation, and preservation conditions of radioactive elements, especially U and Th, which exhibit distinct degrees of enrichment under different sedimentary environments. Clay minerals exhibit varying adsorption capacities for radioactive elements. Specifically, illite and mixed-layered illite-montmorillonite demonstrate higher adsorption capacities, whereas kaolinite and chlorite exhibit limited adsorption capacities. Fine-scale investigations of the lithological and developmental characteristics of high-gamma sandstones in the Wuqi area hold great practical significance for increasing hydrocarbon reserves and enhancing productivity in the Ordos Basin, while also providing a key geological basis and theoretical guidance for the exploration and exploitation of similar reservoirs in other basins of China.

Key words: reservoir characterization, high-gamma sandstone, Chang 6–9 oil groups, Yanchang Formation, Triassic, Ordos Basin

引用格式: 刁豪, 闫新智, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地吴起地区三叠系延长组长6—长9油层组高自然伽马值砂岩特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1700–1716. DOI: 10. 11743/ogg20250519.

DIAO Hao, YAN Xinzhi, ZHAO Jingzhou, et al. Characteristics and genesis of high-gamma sandstones in the 6th to 9th oil groups of the Triassic Yanchang Formation, Wuqi area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1700–1716. DOI: 10. 11743/ogg20250519.

随着油气藏勘探开发的不断深入与发展, 复杂岩性识别已成为当前油气勘探领域的前沿课题, 并受到国内外学者的广泛关注^[1-2]。近年来, 在全球多个含油气盆地中相继发现了高自然伽马值(简称高伽马)储集层, 如准噶尔盆地三叠系百口泉组^[3]、珠江口盆地古近系文昌组^[4]、鄂尔多斯盆地三叠系延长组^[5-7]、渤海湾盆地古近系^[8]、海拉尔盆地白垩系^[9]以及圣胡安盆地白垩系 Fruitland 组^[10]等均发现有高伽马储集层存在。鄂尔多斯盆地高伽马砂岩作为一种复杂储集层, 在油气田勘探开发过程中, 若仅依靠常规测井解释, 则极易被误判为粉砂岩甚至泥岩, 导致有效储层被遗漏。然而在实际开发生产中, 该类储层具有良好的产出能力, 如 H81 井延长组长 6 油层组高伽马砂岩试油获工业油流 6.89 t/d, 产水 19.13 m³/d; A98 井延长组长 6 油层组高伽马砂岩试油获纯工业油流 13.09 t/d。这些实际生产资料证实, 高伽马砂岩具有较高的孔隙度和较好的渗透性, 是有利于油气聚集的重要储层之一^[11-14]。传统上认为, 砂岩通常具有较低的自然伽马值, 然而当砂岩中泥质含量较高时, 由于有机质对铀(U)、钍(Th)及钾(K)等放射性元素具有较强的吸附作用, 因而会呈现出较高的自然伽马响应特征, 且往往与常规自然伽马砂岩共存^[15]。

吴起地区三叠系延长组长 6—长 9 油层组作为鄂

尔多斯盆地勘探开发的主力层位, 其砂岩储层特征一直是研究的重点。近年来, 前人对盆地内延长组各层位砂岩的成岩演化、储集性能及含油性评价进行了深入探讨, 取得了丰富成果, 然而对具有勘探潜力的高伽马砂岩的研究却很少涉及^[16-17]。鉴于高伽马砂岩成因复杂, 且不同地区地质背景具有差异性, 目前国内外学者对高伽马砂岩尚缺乏统一的划分标准, 这在一定程度上制约了该类储层的识别与评价。为此, 本文在前人研究的基础上, 结合鄂尔多斯盆地吴起地区地质特征, 将自然伽马值 85API 界定为本区高伽马砂岩的下限值^[7], 旨在为该区高伽马砂岩的识别提供一个可定量化的参考依据。基于此, 本文系统开展了高伽马砂岩与常规砂岩的对比研究, 从岩心观察、粒度分析及薄片资料入手, 重点对比分析了两类砂岩在测井响应、岩石学、物性及含油性特征方面的异同, 深入探讨了高伽马砂岩形成的主控因素。本研究不仅对深化高伽马砂岩成因认识及储层精细研究具有重要理论指导意义, 更对明确鄂尔多斯盆地的油气富集规律, 指导下一步勘探部署具有重要的现实意义。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于中国东部构造域与西部构造

a. 鄂尔多斯盆地构造单元划分及研究区位置; b. 研究区岩心观察井分布; c. 延长组综合柱状图

2.1 岩性识别

岩心观察与粒度分析是识别复杂岩性最为直观和可靠的研究手段。本次研究基于吴起地区20余口井的岩心观察与归位工作(图1b),并结合钻井、录井及测井资料,对长6—长9油层组的岩性特征进行了综合判别。岩心观察结果表明,常规砂岩和高伽马砂岩多

呈灰色—灰白色,含油部分显灰褐色,发育揉皱变形和平行层理等沉积构造,反映了物源供给丰富、水动力强的沉积环境(图2a—e);粉砂岩以灰色为主,见砂—泥突变界面,层理类型以波纹层理和块状层理为主(图2f—h);泥质粉砂岩多为深灰色,可见揉皱变形构造,推测为滑塌沉积环境的产物(图2i—l);粉砂质泥岩颜色呈灰黑至黑色,出现砂—泥互层现象,反映水体

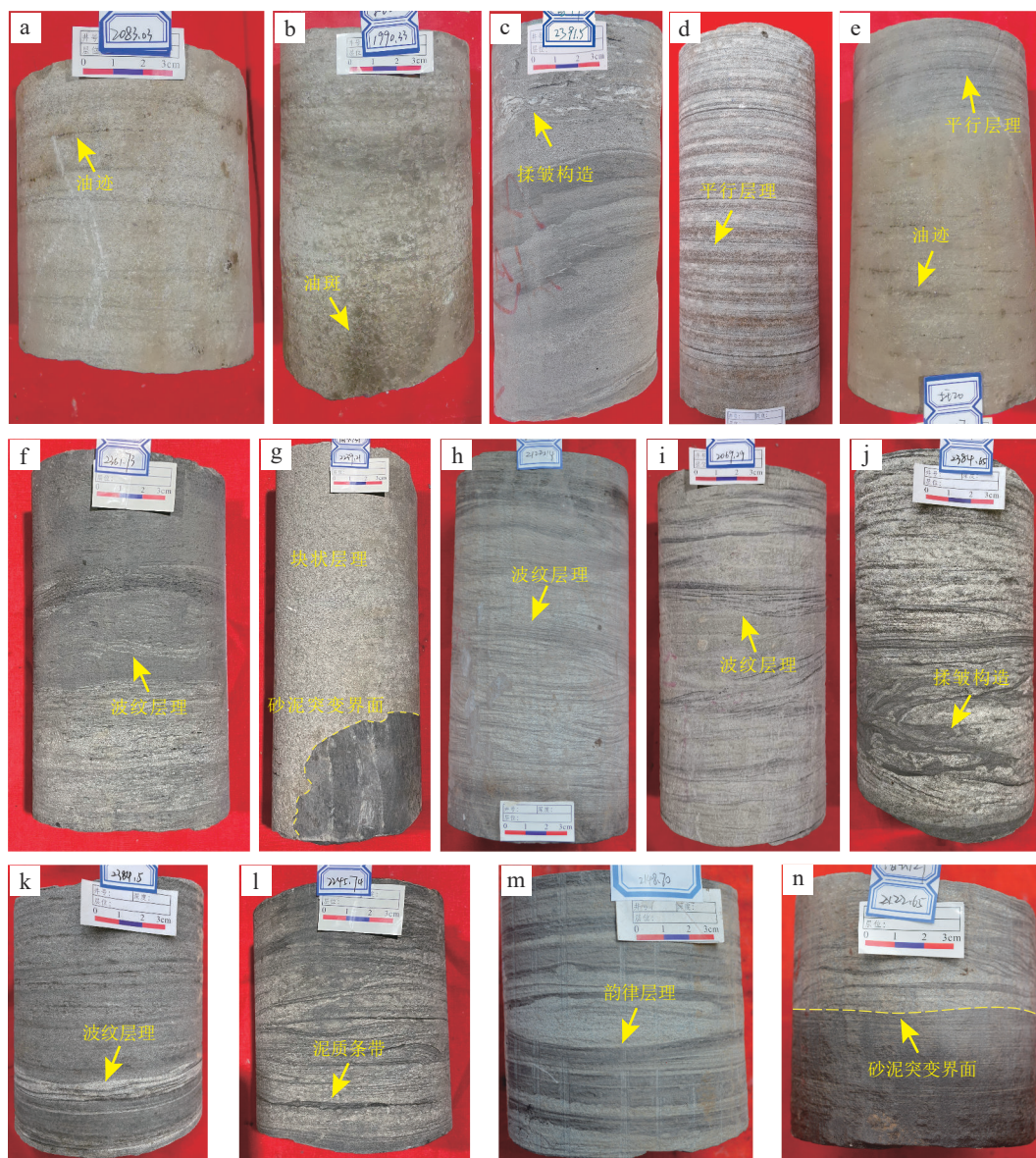


图2 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组沉积构造特征岩心照片

Fig. 2 Core photos showing the characteristics of sedimentary structures of the Chang 6–9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

a. 砂岩,见油迹,T20井,长8油层组,埋深2 083.03 m;b. 砂岩,见油斑,T22井,长8油层组,埋深1 990.33 m;c. 高伽马砂岩,灰白色,见揉皱构造,ZE77井,长9油层组,埋深2 391.50 m;d. 高伽马砂岩,平行层理,S3井,长6油层组,埋深1 715.20 m;e. 细砂岩,平行层理,见油迹,T20井,长9油层组,埋深2 154.70 m;f. 粉砂岩,波纹层理,ZE128井,长9油层组,埋深2 361.73 m;g. 粉砂岩,见砂泥突变界面,ZC131井,长9油层组,埋深2 239.21 m;h. 粉砂岩,波纹层理,ZC129井,长7油层组,埋深2 122.14 m;i. 泥质粉砂岩,波纹层理,Z12井,长9油层组,埋深2 069.29 m;j. 泥质粉砂岩,揉皱构造,W84井,长9油层组,埋深2 384.65 m;k. 泥质粉砂岩,波纹层理,W84井,长9油层组,埋深2 384.50 m;l. 泥质粉砂岩,见大量泥质条带,ZC131井,长9油层组,埋深2 245.74 m;m. 粉砂质泥岩,韵律层理,Ti72井,长7油层组,埋深2 148.70 m;n. 粉砂质泥岩,见砂泥突变界面,ZC129井,长7油层组,埋深2 122.65 m

较深、能量较低的沉积环境(图2m,n)。上述岩心观察揭示研究区长6—长9油层组沉积时期发育多种类型的岩相序列,整体形成于物源供给充沛、水动力条件多变且伴有地质事件沉积(如滑塌作用)的湖盆环境,该认识为本区沉积相研究提供了直接的地质依据。

通过建立岩性和电性的对应关系可以看出(表1),随着岩石粒径逐渐变细(岩性由砂岩到泥页岩),自然伽马值(GR)、声波时差(AC)、自然电位(SP)、泥质含量(SH)平均值逐渐升高,深感应电阻率(RILD)平均值逐渐降低。值得注意的是,前人只注重高伽马砂岩与泥页岩的区分,但在常规测井曲线中,往往是高伽马砂岩与粉砂岩不易区分^[5,22]。为了在测井曲线上区分高伽马砂岩、常规砂岩和粉砂岩,首先需确定高伽马砂岩的下限值,其依据有两点:①根据本区不同岩性的测井参数统计结果(表2),将自然伽马值85 API确定为常规砂岩与高伽马砂岩的界限值;②借鉴前人研究成果,如张小莉等^[7]对包括吴起在内的陕北地区也将自然伽马值大于85 API的砂岩界定为高伽马砂岩。对于高伽马砂岩上限值,本研究采用对岩性识别

较为精准的粒度分析资料,即基于本区132个粒度样品数据,经岩心归位后,最终将高伽马砂岩上限值确定为自然伽马值100 API(表2)。综合上述分析,认为本研究区高伽马砂岩的自然伽马值应介于85~100 API,该定量范围的确定为高伽马砂岩的精准识别提供了重要的测井解释标准。

2.2 测井响应特征

岩性解释是测井资料处理的基础工作,然而仅依靠常规测井技术往往难以有效识别复杂岩性。前人通过陕北地区长6油层组中的高伽马砂岩“四性关系”研究,提出可利用声波时差与自然电位、深感应电阻率与声波时差以及计算自然电位(PSP)与实测自然电位之间的幅度差,对高伽马砂岩进行定性识别^[7]。

声波时差主要反映地层的压实程度及孔隙发育情况,常规砂岩因分选好、泥质含量低,声波时差通常较低,而高伽马砂岩中长石、云母及凝灰质含量高,岩石结构相对疏松,有效孔隙度通常高于常规砂岩,因此表现出较高的声波时差;自然电位曲线主要反映地层的

表1 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组不同岩性测井参数统计
Table 1 Statistics of logging parameters of different lithologies in the Chang 6–9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

岩性	GR/API	AC/(μs/m)	SP/mV	SH/%	RILD/(Ω·m)
砂岩	46.4~97.9	183.9~266.9	21.1~85.6	2.2~60.9	9.4~155.2
	77.8	222.2	50.5	23.2	46.3
粉砂岩	102.1~110.7	200.3~245.6	21.2~90.2	14.8~57.0	16.6~97.2
	105.8	222.5	44.9	34.2	43.1
泥质粉砂岩	112.3~120.1	203.17~286.8	26.2~97.0	18.7~88.7	11.6~145.3
	115.5	233.4	54.4	45.9	31.8
粉砂质泥岩	120.7~132.2	210.9~286.1	25.7~97.1	33.9~95.8	8.8~160.1
	126.9	244.5	61.3	64.1	30.7
泥页岩	141.9~200.2	229.2~336.6	25.7~55.9	51.1~99.9	15.9~86.8
	167.4	256.6	35.3	87.4	46.2

注:表中数据格式为(最小值~最大值)/平均值。
GR. 自然伽马;AC. 声波时差;SP. 自然电位;SH. 泥质含量;RILD. 深感应测井。

表2 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组不同岩性样品自然伽马值统计
Table 2 Statistics of the GR values of samples with different lithologies from the Chang 6–9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

层位	自然伽马值/API		
	常规砂岩	高伽马砂岩	粉砂岩
长6油层组	53.0~85.1	86.1~102.3	100.2~106.0
	74.2	96.2	102.1
长7油层组	53.6~84.9	89.8~101.7	—
	75.5	98.3	
长8油层组	59.0~84.4	88.8~97.5	101.3~105.8
	71.8	93.5	103.6
长9油层组	60.1~85.0	86.4~109.0	102.5~105.2
	74.8	96.5	104.2

注:表中数据格式为(最小值~最大值)/平均值;“—”代表无统计数据。

渗透性及泥质含量,高伽马砂岩虽含有较多高放射性矿物及凝灰质,但仍可保留一定的渗透能力,因此常呈现明显的自然电位负异常。因此,自然伽马值与自然电位、声波时差与自然电位之间的幅度差,可有效反映储层物性,孔隙度越大,声波时差越大,自然电位负异常越明显^[23-24]。

本文在前人研究的基础上,根据测井曲线左、右幅度基本重合的原则,采用自然伽马值与自然电位及声波时差与自然电位的幅度差识别高伽马砂岩。ZE77井高伽马砂岩段自然伽马值介于86.5~100.8 API,无铀伽马测井曲线(KTH)与常规自然伽马测井曲线形态相似(图3a),且表现出高钍、高铀及低钾的特征(图2c);S3井高伽马砂岩段自然伽马值含量介于88.2~100.5 API(图3b),呈现高钍、低铀及低钾含量的特征(图2d)。

3 高伽马砂岩储层特征

基于测井曲线与实验分析资料,综合运用砂岩X射线衍射(XRD)、薄片鉴定、扫描电镜及物性测试等方

法,对鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组中的高伽马砂岩矿物组成、储层物性及放射性元素特征开展系统性对比研究,旨在揭示其岩石学特征、形成机制及其对储层性能的影响。

3.1 岩石学特征

对吴起地区10口井共34个砂岩样品(包括16个常规砂岩和18个高伽马砂岩)进行X射线衍射分析。结果表明,高伽马砂岩中的长石、云母及黏土矿物平均含量高于常规砂岩,而石英含量则相对较低(表3),具体矿物组成差异如下。

1) 高伽马砂岩中石英平均含量为31%,低于常规砂岩的34.4%。薄片观察显示,石英颗粒多呈磨圆至次棱角状,发育次生加大边,从而降低孔隙连通性,导致储层物性变差(图4b,f)。纯砂岩中石英含量较高,泥质含量低,整体与自然伽马值呈明显负相关关系(图5a)。

2) 高伽马砂岩中斜长石平均含量为44%,高于常规砂岩的36.5%,钾长石含量则变化不大。薄片可见长石溶蚀孔、挤压断裂长石以及聚片双晶的斜长石

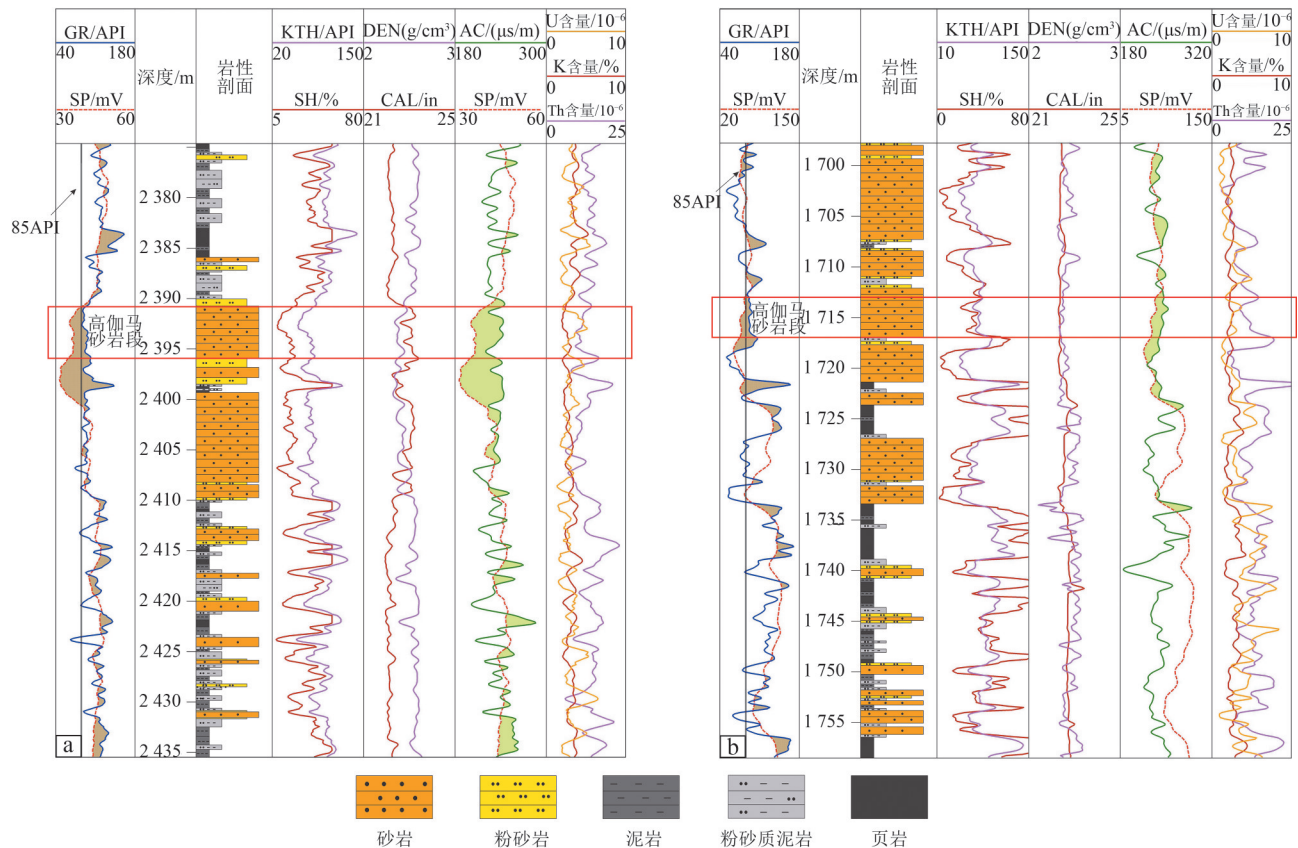


图3 鄂尔多斯盆地吴起地区ZE77井和S3井测井响应曲线特征剖面

Fig. 3 Logging response sections of wells ZE77 and S3 in the Wuqi area, Ordos Basin

a. ZE77井,高伽马砂岩段,埋深2391~2396 m,自然伽马值86.5~100.8 API;b. S3井,高伽马砂岩段,埋深1713~1717 m,自然伽马值

88.2~100.5 API

表3 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组砂岩样品矿物组成统计

Table 3 Statistics of mineral components in sandstone samples from the Chang 6–9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

类别	井号	深度/m	自然	矿物组分含量/%						
			伽马值/API	石英	斜长石	钾长石	碳酸盐矿物	云母	黄铁矿	黏土矿物
常规砂岩	Ti70	2 439.8	65.7	35.4	42.7	12.4	2.0	—	—	7.5
	S5	2 142.2	75.7	42.6	35.4	9.0	0.8	—	—	12.2
	W79	2 435.5	82.3	41.5	33.5	8.7	1.2	—	—	15.1
	ZE88	2 320.8	83.2	41.7	50.2	—	0.7	—	—	7.4
	W71	2 120.2	66.2	49.4	25.6	16.0	3.9	—	—	5.1
		2 125.7	81.9	22.1	39.3	10.5	21.2	—	—	7.0
		2 126.6	69.5	27.3	23.7	7.7	32.8	—	—	8.4
		2 127.5	75.3	38.8	39.5	7.6	2.4	—	—	11.7
		2 345.2	54.6	21.5	24.4	15.2	30.0	—	—	9.0
		2 346.1	53.6	20.0	42.5	7.2	25.2	—	—	5.2
	W94	2 331.5	79.4	37.8	40.1	9.5	0.9	—	—	11.7
		2 333.4	77.5	29.9	26.1	6.7	27.5	—	0.5	9.3
		2 334.3	76.0	32.2	42.3	12.7	2.1	—	0.5	10.2
		2 337.3	75.3	36.6	40.5	7.6	3.2	—	0.6	11.5
		2 337.8	74.1	34.8	39.5	8.8	6.3	—	—	10.6
		2 338.4	56.2	38.8	39.0	9.6	0.4	—	0.5	11.7
	平均值	—	71.7	34.4	36.5	9.9	10.0	—	0.5	9.6
高伽马砂岩	Ti70	2 439.3	103.1	33.1	44.8	6.1	7.3	—	—	8.7
	T22	2 042.4	93.2	30.6	19.8	6.3	4.9	—	0.5	37.9
	ZE95	2 047.2	89.5	40.9	47.8	—	1.2	—	—	10.1
	ZE88	2 322.6	87.4	25.3	41.2	—	29.9	—	—	6.2
		2 326.7	89.2	32.4	53.4	—	—	4.2	—	10.0
	W71	2 128.4	88.5	32.6	34.6	15.5	3.0	—	—	14.3
		2 343.3	85.8	20.6	36.9	9.5	21.3	—	—	11.8
		2 343.6	85.6	20.8	29.7	9.3	31.7	—	—	8.5
	W94	2 332.9	93.5	38.7	43.0	6.3	3.1	—	0.4	8.6
		2 335.0	92.4	35.1	38.4	7.8	7.3	—	—	11.4
		2 335.4	93.1	35.2	38.6	8.1	2.2	—	—	15.9
		2 336.6	87.0	26.0	28.6	8.2	28.8	—	—	8.5
		2 098.4	97.6	34.7	49.9	—	2.9	1.7	—	10.8
	ZE96	2 098.9	86.7	37.4	49.6	—	3.9	—	—	9.1
		2 099.8	89.3	29.7	57.3	—	4.2	—	—	8.9
		2 101.2	102.5	28.6	55.8	—	1.6	3.7	—	10.4
		2 104.9	99.4	24.0	62.5	—	2.2	7.3	—	5.1
		2 105.0	102.2	33.1	59.9	—	—	—	—	7.0
	平均值	—	92.6	31.0	44.0	8.6	9.7	4.2	0.45	11.0

注：“—”表示未检出含量或无统计数据。

(图4a,c,e)。研究区经历了较强溶蚀作用,长石蚀变明显,其释放的钾离子促进了蒙脱石向伊利石转化。同时,长石表面附着的黏土矿物对放射性元素具有吸附作用,这些因素共同导致自然伽马值升高,与自然伽马呈正相关关系(图5b)。

3) 高伽马砂岩云母含量增加,而在常规砂岩中未见。高伽马砂岩放射性元素钾主要赋存于长石和云母

中,薄片可见云母受挤压变形(图4b,d)。

4) 高伽马砂岩中黏土矿物平均含量为11%,扫描电镜下可见发丝状伊利石、片状伊/蒙混层及六方片状高岭石(图4g,h,i)。伊利石和蒙脱石等黏土矿物对放射性元素具有较强的吸附能力,因此黏土含量与自然伽马呈良好正相关关系(图5c)。

此外,两类砂岩的碳酸盐矿物含量差异不显著。薄

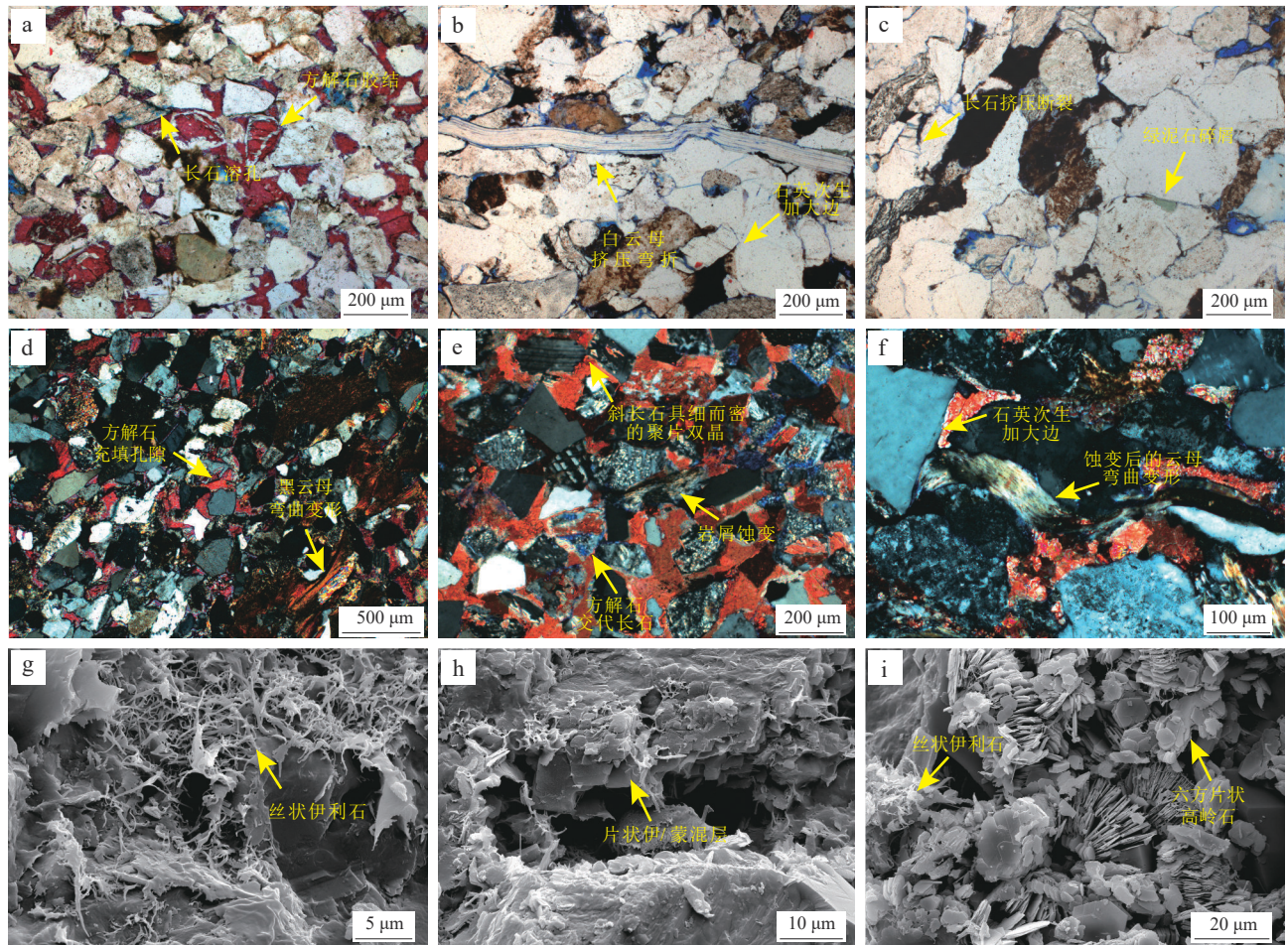


图4 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组砂岩样品显微照片

Fig. 4 Micrographs of sandstone samples from the Chang 6–9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

a. 砂岩,分选好,磨圆为次棱角状,以点-线接触为主,见方解石胶结物,WU18井,长7油层组,埋深2 033.25 m,单偏光,铸体薄片;b. 砂岩,分选差,磨圆为次圆状,以线接触为主,见石英次生加大边,WU19井,长7油层组,埋深2 158.20 m,单偏光,铸体薄片;c. 砂岩,分选差,磨圆为次圆状,以线接触为主,见长石被挤压断裂,WU20井,长7油层组,埋深2 156.10 m,单偏光,铸体薄片;d. 砂岩,分选中等,磨圆为次棱角状,以点-线接触为主,见黑云母弯曲变形,WU36井,长9油层组,埋深2 153.50 m,正交光,铸体薄片;e. 砂岩,分选中等,磨圆为次棱角状,以点-线接触为主,见方解石交代长石,WU29井,长8油层组,埋深2 148.70 m,正交光,铸体薄片;f. 砂岩,分选差,磨圆为次棱角状,见石英次生加大边,W23井,长9油层组,埋深2 401.20 m,正交光,铸体薄片;g. 砂岩,丝状伊利石充填孔隙,T17井,长7油层组,埋深2 019.45 m,扫描电镜;h. 砂岩,颗粒表面分布片状伊/蒙混层,T17井,长7油层组,埋深2 019.12 m,扫描电镜;i. 砂岩,丝状伊利石、片状高岭石,Z13井,长6油层组,埋深1 950.05 m,扫描电镜

片中见大量方解石胶结物充填孔隙,降低储层渗透率(图4a,d),并见方解石交代长石现象(图4e),且碳酸盐矿物含量与自然伽马值之间无显著相关性(图5d)。

3.2 物性特征

对研究区长6—长9油层组31个样品开展储层物性分析(表4),结果表明:常规砂岩的孔隙度、渗透率和含油饱和度平均值分别为8.68%, $0.55 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和69.50%;而高伽马砂岩相应参数分别为8.80%, $0.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和57.66%。两类砂岩的孔隙度较为接近,但高伽马砂岩渗透率略低于常规砂岩,含油饱和度亦相对较低。

进一步的相关性分析表明,研究区两类砂岩的渗

透率与孔隙度呈明显正相关关系,而渗透率与含油饱和度呈弱负相关关系(图6a,b)。整体上,常规砂岩的含油饱和度高于高伽马砂岩,反映渗透率对含油饱和度的控制作用比孔隙度更为直接。

3.3 放射性元素含量

如图7所示,研究区自然伽马值与铀、钍元素含量表现出良好的相关性,而与钾元素含量的相关性较弱,表明自然伽马值的升高主要来源于铀、钍元素的贡献,而钾元素的作用相对较弱(图7a,c,e),该认识与前文基于能谱测井所识别的高伽马砂岩特征一致(图3)。研究区含油饱和度同样与铀、钍元素含量表现出良好

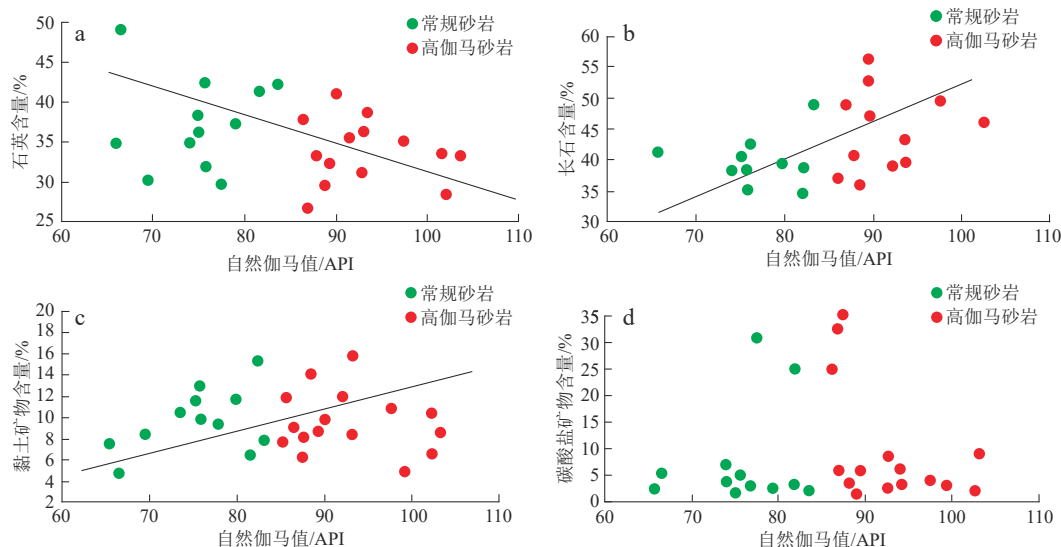


图5 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组砂岩样品矿物组分含量与自然伽马值关系

Fig. 5 Relationships between mineral components and GR values for sandstone samples from the Chang 6–9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

a. 自然伽马值与石英含量关系; b. 自然伽马值与长石含量关系; c. 自然伽马值与黏土矿物含量关系; d. 自然伽马值与碳酸盐矿物含量关系

相关性,这是由于铀和钍元素含量的增加,伴随较多的黏土矿物存在(如伊利石、蒙脱石、高岭石等),易造成孔隙堵塞、微孔隙增多及喉道变细,从而降低有效渗透率,增大毛细管阻力,最终影响油气的充注与聚集,导致含油饱和度偏低(图7b,d,f)。

对于铀和钍元素,国外学者 Tyson 在其著作《Sedimentary Organic Matter》中指出,铀元素在还原环境中易被有机质吸附并固定,而有机质通常与细粒沉积物(如泥质)共生;钍元素主要赋存于重矿物和黏土矿物中,化学性质稳定、不易迁移,能很好地代表原生放射性^[25]。本研究中自然伽马值与铀和钍元素含量的良好相关性进一步指示了沉积环境与黏土矿物对高伽马砂岩形成的控制作用。

对于钾元素,结合前文中的砂岩X射线衍射分析结果与图7e可以看出,尽管高伽马砂岩中含钾矿物(如长石和云母)含量较高,但其在成岩过程中易发生溶蚀,所释放的钾元素常发生迁移或参与形成伊利石等次生黏土矿物,导致钾元素的原始赋存状态发生改变。因此,钾元素对自然伽马值的贡献相对不稳定且有限,表明研究区长石和云母等碎屑矿物对砂岩自然伽马值升高贡献不大。

4 高伽马砂岩成因

基于火山活动、沉积环境及黏土矿物类型,系统开展鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组高伽马砂

岩成因机制分析,旨在揭示研究区火山物质来源、沉积环境保存条件以及黏土矿物吸附能力对高伽马砂岩形成的控制作用,为该类储层油气勘探提供地质依据。

4.1 火山活动

前人基于微量元素研究证实,鄂尔多斯盆地中生界延长组凝灰岩中铀和钍元素含量较高,其物源可能与秦岭造山带相关的大陆边缘钙碱性火山弧有关^[21]。因此,深入分析鄂尔多斯盆地晚三叠系火山活动,对揭示高伽马砂岩的成因具有重要意义。资料表明,该时期盆地内火山活动频繁,地层中发育凝灰岩薄夹层,并伴随有黄铁矿和方铅矿等金属矿物的形成^[26–28]。一般认为,凝灰岩有两种赋存形式:一类是以火山碎屑颗粒分布于砂岩中;另一类为沉凝灰岩薄层,呈夹层赋存于泥岩层中,由火山灰直接沉积形成^[29–30]。

研究表明,高伽马砂岩表现出与凝灰岩相似的高钍、高铀地球化学特征,推测可能为同期或先期形成的凝灰岩经搬运、改造后,作为砂岩组成部分再次沉积形成^[7]。前人通过薄片分析进一步指出,岩石中的火山物质以流纹质、安山质和浆屑等凝灰质碎屑或以蚀变黏土状火山尘为主,该类物质均具有强放射性^[31–32]。

笔者认为,高伽马砂岩可存在于三角洲前缘和半深湖—深湖区域。在三角洲沉积环境中,放射性元素主要来源于火山灰,这些物质经风化、淋滤和搬运后作为砂岩组分参与再沉积;而在半深湖—深湖区域,放射性元素不仅源自火山灰,还可能与近火山口的凝灰

表4 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组砂岩样品物性统计

Table 4 Statistics of the physical properties of sandstone samples from the Chang 6–9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

岩性	井号	深度/m	物性参数			测井值			
			渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	孔隙度/%	含油饱和度/%	GR/API	U含量/10 ⁻⁶	Th含量/10 ⁻⁶	K含量/%
常规砂岩	ZE84	2 456.42	0.11	4.90	64.78	76.89	1.97	9.71	2.02
		2 458.05	0.08	4.06	—	84.94	1.87	10.75	2.61
	Ti15	2 323.08	0.09	7.40	73.80	84.97	2.97	11.67	2.29
	Ti27	2 095.98	1.48	15.90	58.21	81.74	3.48	8.48	1.95
		2 096.13	1.10	14.90	58.22	78.42	1.52	5.46	1.91
		2 384.69	0.31	9.40	68.62	78.24	2.14	7.04	1.65
	X2	2 086.69	0.71	6.25	69.38	67.61	2.16	5.50	2.12
		2 087.60	0.73	9.24	—	79.42	1.52	6.87	2.47
		2 088.26	0.73	5.91	79.65	75.66	2.30	6.05	2.38
		2 089.14	0.77	8.14	—	79.20	2.57	4.95	2.57
	X53	1 963.03	0.32	8.60	74.54	84.43	3.48	4.84	2.68
	L27	2 067.26	0.22	9.51	78.27	72.73	2.38	7.35	2.27
	平均值	—	0.55	8.68	69.50	78.69	2.36	7.39	2.24
高伽马砂岩	ZE84	2 459.68	0.07	5.10	63.25	87.86	3.04	8.66	2.52
		2 460.39	0.11	4.50	57.51	94.21	2.78	7.08	2.88
	ZE86	1 974.59	0.54	13.53	57.34	90.70	3.19	10.05	2.47
		1 976.61	0.55	12.48	51.14	94.12	3.64	9.35	2.17
		1 979.44	0.89	15.32	56.33	94.08	3.74	11.71	2.06
	Ti15	2 318.22	0.42	4.40	51.73	89.45	3.17	14.52	1.84
		2 319.09	0.07	6.00	64.10	91.66	4.67	10.21	2.16
		2 323.08	0.09	7.40	73.80	85.97	2.97	11.67	2.29
		2 323.94	0.18	4.80	53.56	91.08	2.76	13.69	2.18
		2 250.20	0.06	5.90	45.94	95.01	2.24	10.86	3.13
	Ti31	2 131.75	0.15	3.83	—	90.13	2.38	11.69	1.66
		2 132.11	0.24	10.60	62.10	89.98	2.58	11.07	1.42
	ZE48	2 346.34	0.37	5.15	—	98.55	2.51	13.67	2.47
	Ti27	2 095.83	1.08	14.6	61.78	85.7	10.6	8.46	1.96
		2 097.17	0.27	8.60	59.25	89.47	9.79	8.37	2.68
	ZE55	2 288.63	0.06	6.73	—	94.70	2.25	13.79	2.29
	X56	1 914.70	0.26	12.90	44.90	95.42	2.15	12.73	2.32
		1 915.39	0.53	12.10	—	90.05	2.51	11.57	2.51
	W118	1 904.59	0.64	13.22	62.22	86.80	2.45	7.49	2.67
	平均值	—	0.35	8.80	57.66	91.31	3.65	10.88	2.30

注：“—”表示未检出含量或无统计数据。

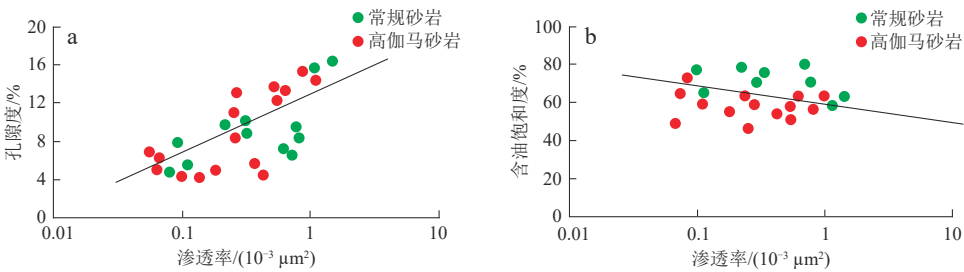


图6 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组砂岩孔隙度、含油饱和度与渗透率关系

Fig. 6 Relationships of porosity with permeability and oil saturation for sandstone samples from the Chang 6–9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

a. 孔隙度与渗透率关系; b. 含油饱和度与渗透率关系

质碎屑有关,该类碎屑与砂岩在地震等触发机制下发生滑塌,同砂岩共同沉积,最终形成高伽马砂岩(图8)。

4.2 沉积环境

自然界中不同放射性元素的保存条件存在差异。

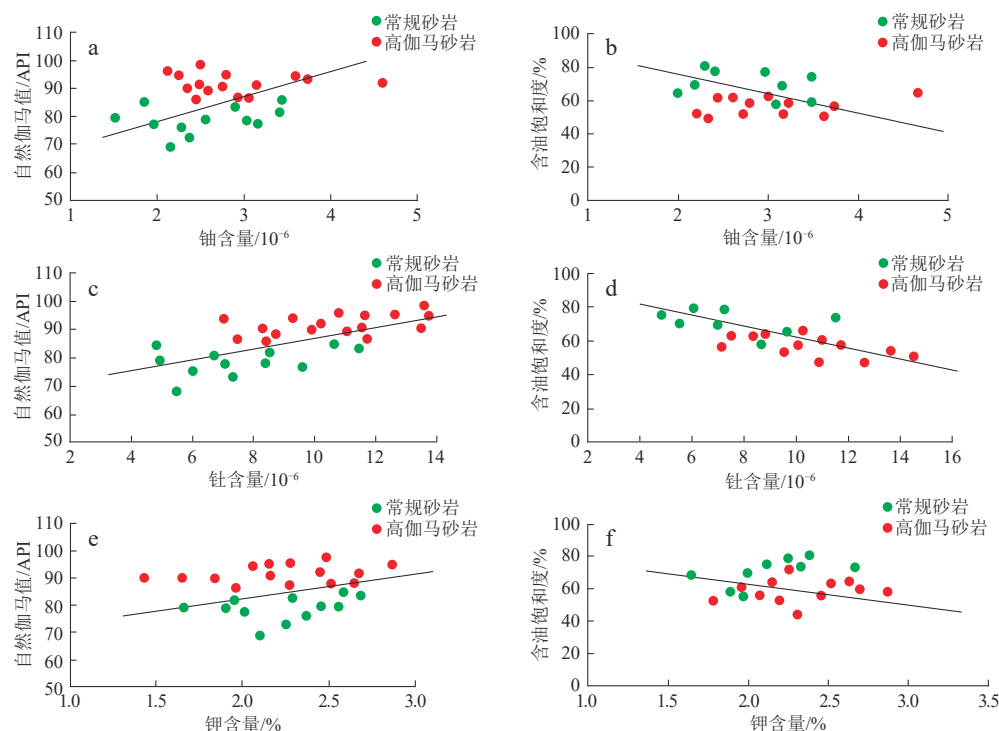


图7 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组砂岩铀、钍和钾含量与自然伽马值和含油饱和度关系

Fig. 7 Cross plots of the U, Th, and K concentrations vs. GR values and oil saturation for sandstone samples from the Chang 6-9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

a. 自然伽马值与铀含量关系; b. 含油饱和度与铀含量关系; c. 自然伽马值与钍含量关系; d. 含油饱和度与钍含量关系; e. 自然伽马值与钾含量关系; f. 含油饱和度与钾含量关系

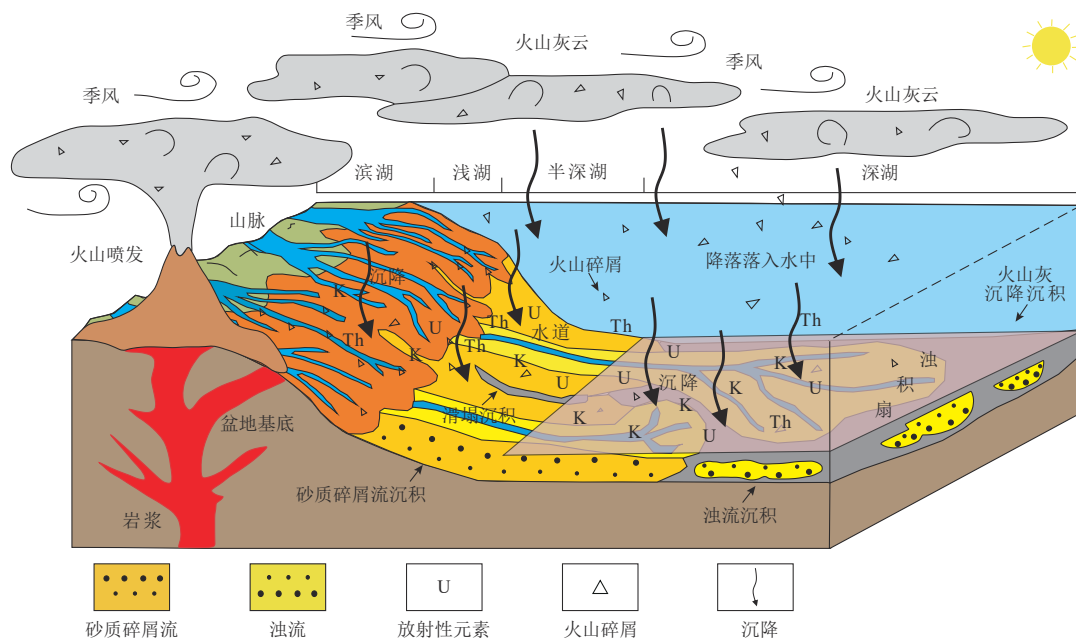


图8 鄂尔多斯盆地火山活动模式示意图(据文献[33]修改)

Fig. 8 Schematic diagram showing volcanic activity in the Ordos Basin (modified after reference [33])

铀元素在表生作用下易被氧化为可溶的铀酰离子(UO_2^{2+}),表现出较强的迁移能力,但在缺氧环境下,以正四价的铀离子(U^{4+})形式被固定保存;钍元素化学性

质稳定,通常保留于原生矿物中,或随碎屑颗粒经机械搬运富集于风化残余物中^[34];自然界中放射性同位素 ^{40}K 广泛存在于钾长石和云母等硅酸盐矿物中,部分

黏土矿物因较强吸附能力而富集钾元素^[35-37]。

前文已探讨铀、钍、钾元素对砂岩自然伽马值的贡献程度,其中钍元素影响最大,铀元素次之,钾元素对砂岩自然伽马值影响最低。为深入评价沉积环境对放射性元素保存能力的差异性,本文根据研究区36口能谱测井进行了系统分析,并将研究区划分为东北部和西南部。前人研究表明,研究区沉积相分布受西北及东北物源影响^[38-39],在此基础上绘制了长6—长9油层组高伽马砂岩放射性元素分布等值线图(图9)。

值得注意的是,铀和钍放射性元素在还原条件下地球化学性质相似,但在氧化条件下差别甚大^[40]。U/Th含量比值常被用作判别古氧化-还原环境,U/Th比值越高表示环境中的还原性越强。Jones等研究指出,在缺

氧环境中,U/Th比值大于1.25;在贫氧环境中,U/Th比值介于0.75~1.25;在氧化环境中,U/Th比值小于0.75^[41]。研究区东北部U/Th比值范围在0.1~0.4,平均值为0.2;西南部U/Th比值范围在0.1~0.5,平均值为0.3。大致可以判别出研究区东北部与西南部沉积环境有所不同,且西南部紧邻湖盆中心,还原性相对较强(表5;图9a)。前文提及铀元素在氧化环境下易溶解,同时经风化淋滤作用,铀元素发生迁移并重新富集。由图9b可以看到,西南部铀元素含量等值线高于东北部,表明铀元素可能从东北部向西南部发生迁移并富集。钍元素与自然伽马值显著相关,其高值区同样集中于西南部,进一步印证沉积环境对放射性元素分布具有控制作用(图9c)。此外,钾元素分布广泛,影响因素多样,其在

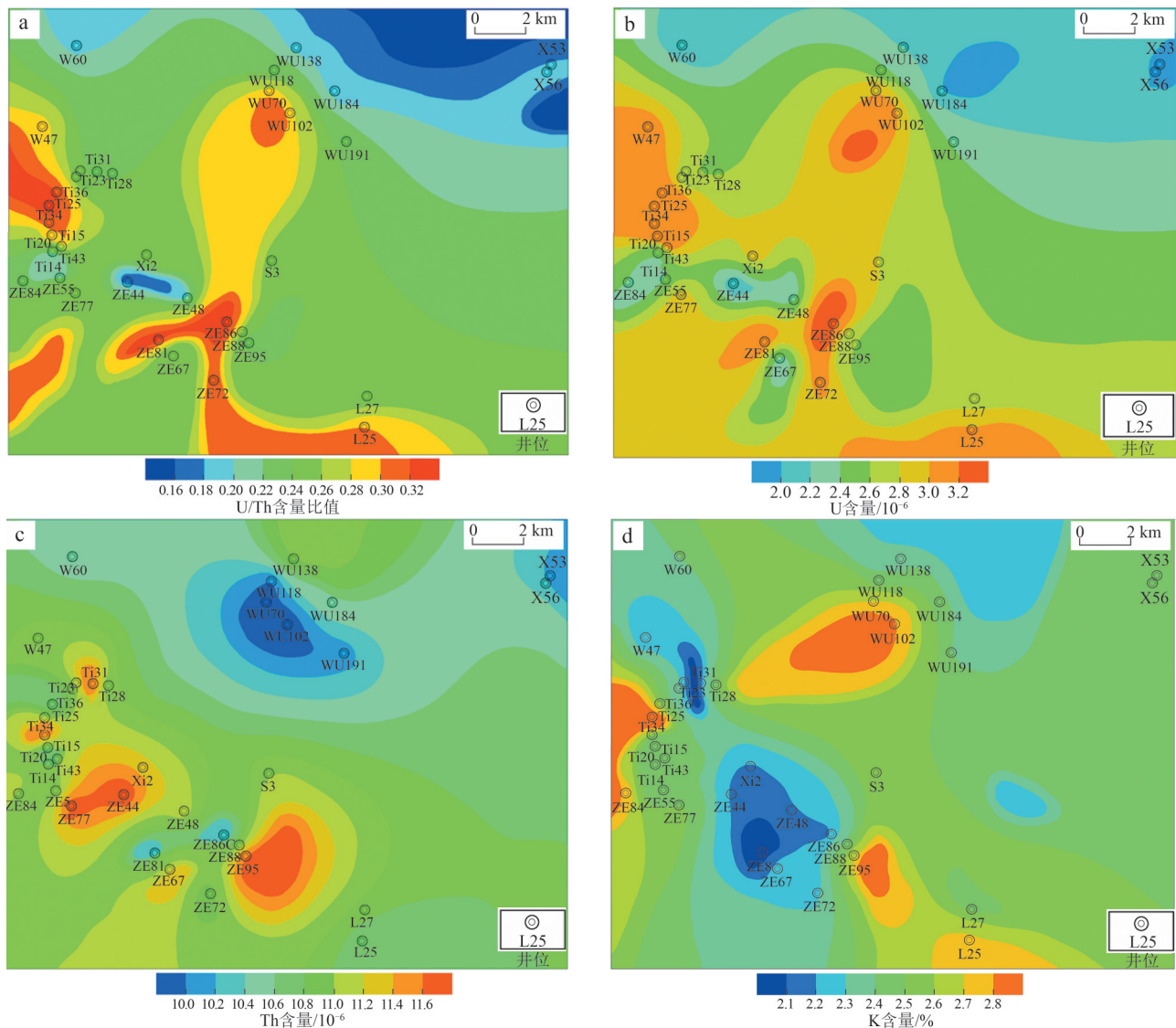


图9 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组高伽马砂岩放射性元素分布等值线图

Fig. 9 Contour maps showing the distribution of radioactive element concentrations in high-gamma sandstones of the Chang 6-9 oil groups,

Wuqi area, Ordos Basin

a. U/Th 含量比值等值线图; b. 铀含量等值线图; c. 钍含量等值线图; d. 钾含量等值线图

研究区均有分布(图9d)。以上结果表明,沉积环境对放射性元素的保存与富集具有重要控制作用。

4.3 黏土矿物类型

根据研究区砂岩中黏土矿物的相对含量统计结果,黏土矿物以绿泥石为主,伊利石次之,高岭石、伊/蒙混层相对含量较低(表6)。通过不同黏土矿物相对含量与自然伽马值交会图对比发现,随着伊利石相对含量的增加,自然伽马值亦增加,两者呈正相关关系(图10a)。一般认为,在成岩演化过程中,蒙脱石经由伊/蒙混层向伊利石转化,该过程中矿物体积减小,形成黏土矿物孔并发育大量层间微裂隙^[42]。伊/蒙混层与自然伽马也呈现较好的线性关系(图10b),说明其转化过程对放射性有重要贡献。绿泥石和高岭石相对

含量与自然伽马未发现显著相关性(图10c,d),表明二者对放射性物质的吸附能力较弱,该认识与前人研究结果一致。

吴一雄^[43]和杨涛涛^[44]对储层段黏土矿物研究表明,黏土矿物中蒙脱石表面积最大,吸附能力最强,具有最大放射性贡献;伊利石对氧化铀具有一定吸附能力;而高岭石和绿泥石本身不含放射性元素,吸附能力差。因此,黏土矿物对放射性元素的吸附能力主要取决于蒙脱石和伊利石的相对含量,整体吸附能力为蒙脱石>伊/蒙混层>伊利石>绿泥石>高岭石^[45-47]。

5 结论

1) 基于岩心、粒度及测井资料的综合分析,建立

表5 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组高伽马砂岩放射性元素含量对比

Table 5 Comparison of radioactive element concentrations in high-gamma sandstones from the Chang 6-9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin					
吴起地区位置	层位	U 含量/ 10^{-6}	Th 含量/ 10^{-6}	K 含量/%	U/Th
东北部	长6油层组	$\underline{2.0 \sim 3.1}$ 2.3(8)	$\underline{8.9 \sim 10.6}$ 9.9(8)	$\underline{2.4 \sim 3.1}$ 2.7(8)	$\underline{0.2 \sim 0.3}$ 0.2(8)
	长7油层组	$\underline{1.9 \sim 3.4}$ 2.3(8)	$\underline{7.3 \sim 10.7}$ 9.4(8)	$\underline{2.5 \sim 3.6}$ 2.8(8)	$\underline{0.2 \sim 0.4}$ 0.2(8)
	长8油层组	$\underline{1.8 \sim 3.1}$ 2.4(8)	$\underline{9.4 \sim 11.0}$ 10.1(8)	$\underline{2.2 \sim 3.0}$ 2.5(8)	$\underline{0.2 \sim 0.3}$ 0.2(8)
	长9油层组	$\underline{1.9 \sim 3.6}$ 2.5(8)	$\underline{10.8 \sim 13.2}$ 11.7(8)	$\underline{2.0 \sim 2.8}$ 2.3(8)	$\underline{0.1 \sim 0.3}$ 0.2(8)
西南部	长6油层组	$\underline{1.6 \sim 4.0}$ 2.7(27)	$\underline{8.8 \sim 12.8}$ 10.8(27)	$\underline{1.5 \sim 3.0}$ 2.5(27)	$\underline{0.1 \sim 0.4}$ 0.3(27)
	长7油层组	$\underline{1.5 \sim 4.5}$ 3.0(28)	$\underline{8.7 \sim 13.1}$ 11.3(28)	$\underline{1.4 \sim 3.1}$ 2.4(28)	$\underline{0.1 \sim 0.5}$ 0.3(28)
	长8油层组	$\underline{2.1 \sim 5.4}$ 3.3(21)	$\underline{8.8 \sim 17.7}$ 11.8(21)	$\underline{1.4 \sim 3.1}$ 2.3(21)	$\underline{0.2 \sim 0.4}$ 0.3(21)
	长9油层组	$\underline{1.4 \sim 4.3}$ 2.9(26)	$\underline{9.7 \sim 14.0}$ 11.7(26)	$\underline{1.2 \sim 2.8}$ 2.2(26)	$\underline{0.1 \sim 0.4}$ 0.3(26)

注:表中数据格式为(最小值~最大值)/平均值(样品个数)。

表6 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组砂岩黏土矿物组分相对含量统计

Table 6 Statistics of the relative contents of different clay minerals in sandstones from the Chang 6-9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin									
类别	井号	深度/m	自然伽马值/API	黏土矿物组分相对含量/%					
				蒙皂石	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层	绿/蒙混层
常规砂岩	S5	2 142.2	75.7	—	38	7	52	3	—
	ZC129	2 126.1	82.6	—	9	10	76	5	—
	W79	2 435.5	82.3	—	31	6	50	13	—
	W91	2 345.8	71.3	—	17	4	54	25	—
高伽马砂岩	Z12	2 065.7	88.8	—	31	6	51	12	—
	T22	2 042.4	94.3	—	50	2	34	14	—

注:“—”表示未检出含量。

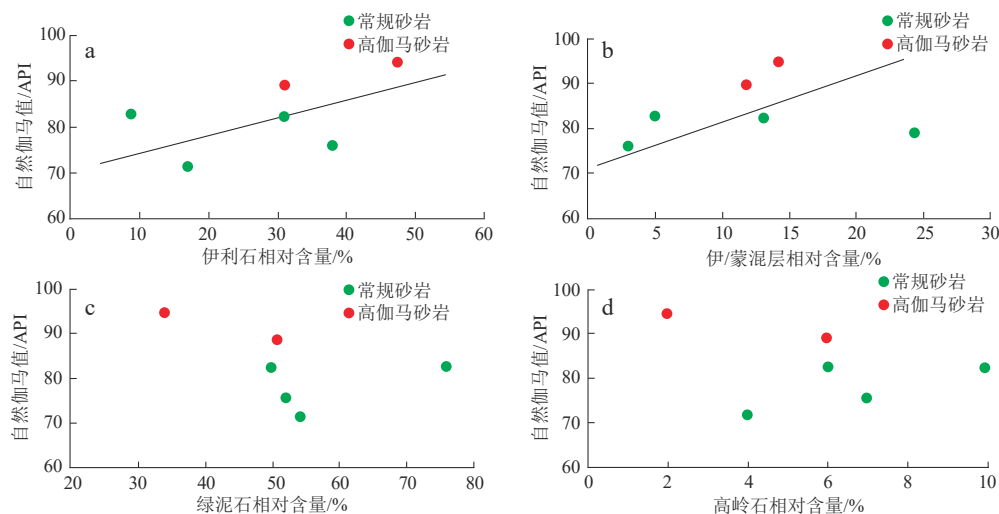


图10 鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组砂岩黏土矿物组分相对含量与自然伽马值关系

Fig. 10 Relationships between the relative contents of different clay minerals and GR values for sandstones from the Chang 6-9 oil groups, Wuqi area, Ordos Basin

a. 自然伽马值与伊利石相对含量关系; b. 自然伽马值与伊/蒙混层相对含量关系; c. 自然伽马值与绿泥石相对含量关系; d. 自然伽马值与高岭石相对含量关系

了鄂尔多斯盆地吴起地区长6—长9油层组高伽马砂岩的定量识别标准,将其自然伽马值界定于85~100 API,自然伽马能谱测井响应表征为“高铀、高钍、低钾”特征。声波时差与自然电位以及自然伽马值与自然电位的幅度差可有效识别高伽马砂岩,并指示其具备一定储集空间与渗流能力,且幅度差与物性正相关,可作为该类砂岩储层评价的重要测井标志。

2) 高伽马砂岩中长石、云母及黏土矿物含量虽普遍高于常规砂岩,但其高自然伽马值主要源于铀和钍元素的富集,而非碎屑矿物的直接贡献。铀和钍元素含量的增加通常伴随黏土矿物的富集,易导致孔隙堵塞、微孔隙发育与喉道细化,进而降低储层渗透率,增大毛细管阻力,并最终降低油气的充注与聚集效率,造成高伽马砂岩含油饱和度偏低。

3) 高伽马砂岩的成因主要受火山活动、沉积环境及黏土矿物类型共同控制。火山活动为研究区提供了丰富的放射性物质来源,沉积环境控制放射性元素迁移与富集,黏土矿物类型则决定了岩石对放射性元素的吸附能力,三者共同控制了高伽马砂岩的形成与分布。

参 考 文 献

- [1] 孟卫工. 辽河高成熟探区持续勘探发现技术及应用[J]. 特种油气藏, 2020, 27(6): 1-11.
MENG Weigong. Continuous exploration and discovery technology and Its application in Liaohai high mature exploration area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6): 1-11.
- [2] 谢万学, 梅安鑫, 陈丹, 等. 转换波地震成像技术在川南碳酸盐岩储层勘探中的应用及效果[J/OL]. 地球物理学进展: 1-17 [2025-09-04]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20250707.1343.002>.
XIE Wanxue, MEI Anxin, CHEN Dan, et al. Application and effect of converted wave seismic imaging technology in carbonate reservoir exploration in southern Sichuan [J/OL]. Progress in Geophysics: 1-17 [2025-09-04]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20250707.1343.002>.
- [3] 周俊林, 王仲军, 丁超, 等. 准噶尔盆地乌尔禾油田高自然伽马砂砾岩特征及其沉积微相研究——以乌36井区百口泉组为例[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 734-743.
ZHOU Junlin, WANG Zhongjun, DING Chao, et al. High GR glutinite feature and micro-sedimentary facies in Wuerhe oil-field, Junggar Basin——Taking the Baikouquan group in Wu 36 area as an example [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 734-743.
- [4] 向巧维, 李小平, 丁琳, 等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系高自然伽马砂岩形成机制及油气地质意义[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(2): 93-103.
XIANG Qiaowei, LI Xiaoping, DING Lin, et al. Formation mechanism and petroleum geological significance of Paleogene sandstone with high natural gamma value in Zhuyi Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(2): 93-103.
- [5] 刘行军, 柳益群, 周鼎武, 等. 鄂尔多斯盆地深部流体示踪: 三叠系延长组高自然伽马砂岩特征及成因分析[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 149-165.
LIU Xingjun, LIU Yiqun, ZHOU Dingwu, et al. Deep fluid tracer

- in Ordos Basin: Characteristics and origin of high natural gamma sandstone in Triassic Yanchang Formation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(5): 149–165.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 焦玉玺, 鄢继华, 陈世悦, 等. 沧东凹陷孔二段高伽马砂岩成因探讨及识别[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(3): 309–313.
JIAO Yuxi, YAN Jihua, CHEN Shiyue, et al. Genesis and identification of sandstones with high gamma values in the second member of Kongdian Formation, Cangdong Sag [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(3): 309–313.
- [9] 于振锋, 程日辉, 赵小青, 等. 海拉尔盆地乌南凹陷南一段高伽马砂岩成因与识别[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(3): 76–83.
YU Zhenfeng, CHENG Rihui, ZHAO Xiaoqing, et al. Genesis and identification of high gamma sandstone in the first member of Nantun Formation of Wunan Depression in Hailar Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(3): 76–83.
- [10] ASQUITH G, KRYGOWSKI D, HENDERSON S, et al. Basic well log analysis [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2004.
- [11] 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[J]. *中国石油勘探*, 2005, 10(3): 46–49.
HOU Yuting, LI Gaoren. Application of element capture spectroscopy logging in Changqing gas exploration [J]. *China Petroleum Exploration*, 2005, 10(3): 46–49.
- [12] 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[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, 37(增刊1): 147–156.
TAN Chengqian, LIU Chiyang, ZHAO Junlong, et al. Characteristics and geological significance of radioactive anomalies in typical areas of the Ordos Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2007, 37(S1): 147–156.
- [13] 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 ray sandstones in Yanchang Formation in North of Shaanxi, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(4): 445–456.
- [14] 马艳丽, 辛红刚, 马文忠, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区长7段页岩油富集主控因素及甜点区预测[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(12): 1822–1829.
- MA Yanli, XIN Honggang, MA Wenzhong, et al. The main controlling factors on the enrichment and sweet-spot area prediction of Chang 7 Member shale oil in northern Shaanxi area, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(12): 1822–1829.
- [15] SZALAY A. Cation exchange properties of humic acids and their importance in the geochemical enrichment of UO_2^{++} and other cations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28 (10/11): 1605–1614.
- [16] 孙佩, 张小莉, 郭兰, 等. 相对高放射性砂岩成因及储集性能定性评价——以鄂尔多斯盆地志丹油田长6油层组为例[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 25(2): 18–21, 109.
SUN Pei, ZHANG Xiaoli, GUO Lan, et al. Genesis of the sandstone with higher radioactivity and the qualitative evaluation of its reservoir property: Taking Chang 6 oil-bearing strata in Zhidan Oilfield, Ordos Basin as an example [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2010, 25(2): 18–21, 109.
- [17] 李高仁, 郭清娅, 石玉江, 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.
- [18] 李士祥, 周新平, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地长7₃亚段页岩油可动烃资源量评价方法[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(12): 1771–1784.
LI Shixiang, ZHOU Xinping, GUO Qiheng, et al. Research on evaluation method of movable hydrocarbon resources of shale oil in the Chang 7₃ sub-member in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(12): 1771–1784.
- [19] 梁庆韶, 田景春, 王峰, 等. 构造活动影响下地质事件沉积序列——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. *地质论评*, 2023, 69(2): 481–495.
LIANG Qingshao, TIAN Jingchun, WANG Feng, et al. Sedimentary sequence of geological events under the influence of tectonic activities—A case from Chang 7 oil member of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Geological Review*, 2023, 69(2): 481–495.
- [20] 王子野, 毛治国, 袁选俊, 等. 鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长9段事件沉积类型、特征及地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 516–529.
WANG Ziye, MAO Zhiguo, YUAN Xuanjun, et al. Types, characteristics and geological significance of event deposits of Chang 9 Member of Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 516–529.
- [21] 刘广林, 邓静, 王艳梅, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组凝灰

- 岩标志层识别、分布及意义[J]. 天然气地球科学: 1-15 [2025-09-06]. <https://doi.org/10.11764/j.issn.1672-1926>. 2025. 06. 009.
- LIU Guanglin, DENG Jing, WANG Yanmei, et al. Identification, distribution, and significance of tuff marker layers in the Mesozoic Yanchang Formation of the Ordos Basin [J/OL]. Natural Gas Geoscience: 1-15 [2025-09-06]. <https://doi.org/10.11764/j.issn.1672-1926>. 2025. 06. 009.
- [22] 张涛, 林承焰, 张宪国, 等. 高伽马值储层成因分析及识别方法[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 491-495, 359-360, 518.
- ZHANG Tao, LIN Chengyan, ZHANG Xianguo, et al. Genesis analysis of high GR reservoir and its well-log based recognition method [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 491-495, 359-360, 518.
- [23] 游富粮, 柳广弟, 孙明亮, 等. 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[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 99-108.
- YOU Fuliang, LIU Guangdi, SUN Mingliang, et al. Logging identification and distribution characteristics of high-gamma sandstones in the 7th member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(1): 99-108.
- [24] 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 Chuanmin, 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.
- [25] TYSON R V. Sedimentary organic matter: Organic facies and palynofacies[M]. Dordrecht: Springer, 1995.
- [26] 付金华, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1702-1716.
- FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1702-1716.
- [27] 高嘉洪, 金之钧, 梁新平, 等. 火山活动对鄂尔多斯盆地三叠系长7段淡水湖盆富营养化与沉积水体介质环境的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 887-898.
- GAO Jiahong, JIN Zhijun, LIANG Xinping, et al. The impact of volcanism on eutrophication and water column in a freshwater lacustrine basin: A case study of Triassic Chang 7 Member in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 887-898.
- [28] 王梓毅, 付金华, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地地上三叠统延长组7段埋藏期热液活动对页岩油储层的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 899-909.
- WANG Ziyi, FU Jinhua, LIU Xianyang, et al. The influence of hydrothermal activities on shale oil reservoirs during the burial period of the Upper Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 899-909.
- [29] 李明, 高建荣. 鄂尔多斯盆地基底断裂与火山岩的分布[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(8): 1005-1013.
- LI Ming, GAO Jianrong. Distribution of basement faults and volcanic rocks in the Ordos Basin [J]. Science China Earth Sciences, 2010, 40(8): 1005-1013.
- [30] 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.
- [31] 师学耀, 高超利, 刘伟, 等. 洛河地区高自然伽马砂岩识别及主控因素[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(3): 530-538.
- SHI Xueyao, GAO Chaoli, LIU Wei, et al. Identification and main controlling factors of method high gamma sandstone in Luohe area [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(3): 530-538.
- [32] 潘保芝, 李舟波, 付有升, 等. 测井资料在松辽盆地火成岩岩性识别和储层评价中的应用[J]. 石油物探, 2009, 48(1): 48-52, 56, 16.
- PAN Baozhi, LI Zhoubo, FU Yousheng, et al. Application of logging data in lithology identification and reservoir evaluation of igneous rock in Songliao Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(1): 48-52, 56, 16.
- [33] 李庆, 卢浩, 吴胜和, 等. 鄂尔多斯盆地南部三叠系长7³亚段凝灰岩沉积成因及储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1141-1154.
- LI Qing, LU Hao, WU Shenghe, et al. Sedimentary origins and reservoir characteristics of the Triassic Chang 7³ tuffs in the southern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1141-1154.
- [34] 王敏, 李菲. 放射性元素在测井解释中的应用进展及分析[J]. 地质论评, 2023, 69(增刊1): 423-424.
- WANG Min, LI Fei. Application progress and analysis of radioactive elements in logging interpretation [J]. Geological Review, 2023, 69(S1): 423-424.
- [35] 司庆红, 朱强, 苗培森, 等. 鄂尔多斯盆地彭阳地区洛河组砂岩褪色蚀变特征及对铀成矿流体的指示作用[J]. 中国地质, 2024, 51(5): 1455-1468.
- SI Qinghong, ZHU Qiang, MIAO Peisen, et al. Alteration characteristics and implication to uranium metallogenetic fluids of faded sandstones in Luohe Formation, Pengyang area, Ordos Basin [J]. Geology in China, 2024, 51(5): 1455-1468.
- [36] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地

- 球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1265-1273.
- WANG Feng, LIU Xuanchun, DENG Xiuqin, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [37] 郭艳琴, 李文厚, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 293-320.
- GUO Yanqin, LI Wenhao, GUO Bincheng, et al. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2019, 21(2): 293-320.
- [38] 付金华, 郭正权, 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 34-44.
- FU Jinhua, GUO Zhengquan, DENG Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2005, 7(1): 34-44.
- [39] 李元昊. 鄂尔多斯盆地西部中区延长组下部石油成藏机理及主控因素[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- LI Yuanhao. The oil reservoir forming mechanisms and its main controlling factors of the Lower Yanchang Formation in the middle of the west Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [40] ROGERS J J W, ADAMS J A S. Handbook of thorium and uranium geochemistry[M]. Beijing: Atomic press, 1976.
- [41] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [42] 陈更生, 王林琪, 石学文, 等. 川北地区大隆组页岩储层特征及勘探潜力[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 361-378.
- CHEN Gengsheng, WANG Linqi, SHI Xuewen, et al. Characteristics and potential for exploration of shale reservoir in Dalong Formation in northern Sichuan [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(3): 361-378.
- [43] 吴一雄, 高华, 吴健, 等. 高伽马含气储层泥质含量精细评价——以莺歌海盆地 BV 气田为例[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(6): 26-31.
- WU Yixiong, GAO Hua, WU Jian, et al. Shale content precise evaluation of gas reservoir with high gamma——For example of BV Gas Field of Yinggehai Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(6): 26-31.
- [44] 杨涛涛, 吕福亮, 李林, 等. 西沙海域上新统一全新统高伽马地层的发现及地质分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2526-2532.
- YANG Taotao, LYU Fuliang, LI Lin, et al. Identification and geology analysis of high natural gamma value formation of Pliocene-Holocene in Xisha offshore[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(6): 2526-2532.
- [45] 彭军, 张新怡, 许天宇, 等. 四川盆地元坝地区千佛崖组二段细粒沉积岩岩相特征及储集性分析[J]. 石油实验地质, 2024, 46(2): 247-262.
- PENG Jun, ZHANG Xinyi, XU Tianyu, et al. Lithofacies characteristics and reservoir capacity of fine-grained sedimentary rocks of second member of Qianfoya Formation in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2024, 46(2): 247-262.
- [46] 夏文谦, 朱祥, 金民东, 等. 川北地区上二叠统吴家坪组火山碎屑岩油气藏储层特征及主控因素[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 307-316.
- XIA Wenqian, ZHU Xiang, JIN Mindong, et al. Characteristics and controlling factors of volcaniclastic rock reservoirs in Wujiaping Formation of Upper Permian in northern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(2): 307-316.
- [47] 石立华, 师调调, 廖志昊, 等. 低渗致密砂岩油藏水驱储层变化规律[J]. 特种油气藏, 2024, 31(3): 106-115.
- SHI Lihua, SHI Diaodiao, LIAO Zhihao, et al. The variation law of water flooding reservoir in low permeability tight sandstone reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(3): 106-115.

(编辑 张玉银)