

文章编号: 0253-2697(2017)11-1230-14 DOI:10.7623/syxb201711002

柴达木盆地西部地区渐新世沉积特征与油气成藏模式

黄成刚^{1,2} 常海燕² 崔俊³ 李亚锋³ 路艳平³ 李翔² 马新民² 吴梁宇^{1,2}

(1. 中国石油天然气集团公司油藏描述重点实验室 甘肃兰州 730020; 2. 中国石油勘探开发研究院西北分院 甘肃兰州 730020;
3. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院 甘肃敦煌 736202)

摘要:对柴达木盆地西部地区渐新世下干柴沟组上段的沉积特征与成藏模式进行分析。系统地开展了岩石学和矿物学研究、古地貌分析、碳氧同位素与微量元素地球化学研究、地震剖面精细解释与“蚂蚁追踪”裂缝预测、成藏模式研究以及高产控制因素分析,提出英西地区渐新世下干柴沟组上段为一个“半开放—半封闭”的半深湖相咸化沉积环境,基质晶间孔储油、盐下应力聚集造缝、盐层封盖造就了英西地区特殊的成藏模式。研究结果表明:①岩性以深灰色或灰黑色等暗色色调为主并混积盐类矿物,主要受控于沉积环境;②下干柴沟组上段沉积前的古地貌为一个发育湖障壁岛的“西低东高”的局限湖泊;③碳、氧同位素数据点落于开放性湖泊与封闭性湖泊之间;④Sr/Ba平均值为2.01、均大于1, Sr/Cu平均值为109.04、远大于5, U/Th平均值为0.62、均小于1, 指示了咸化、干旱和还原环境;⑤ Σ REE平均值为 87.67×10^{-6} , 分布范围为 $(39.41 \sim 162.67) \times 10^{-6}$, 且存在Eu负异常;⑥盐下主力产层的压力系数可高达2.2, “自源-超压系统”导致应力聚集造缝的推论与“蚂蚁追踪”裂缝预测成果和岩心观察结果完全吻合。

关键词:半开放—半封闭;咸化湖;白云岩;超压造缝;成藏模式;英西地区;柴达木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Oligocene sedimentary characteristics and hydrocarbon accumulation model in the western Qaidam Basin

Huang Chenggang^{1,2} Chang Haiyan² Cui Jun³ Li Yafeng³ Lu Yanping³
Li Xiang² Ma Xinmin² Wu Liangyu^{1,2}

(1. CNPC Key Laboratory of Reservoir Description, Gansu Lanzhou 730020, China; 2. Northwest Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Gansu Lanzhou 730020, China; 3. Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Gansu Dunhuang 736202, China)

Abstract: The sedimentary characteristics and hydrocarbon accumulation model in the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation, Western Qaidam Basin are analyzed in this paper. Comprehensively based on the petrology and mineralogy research, paleo-geomorphology analysis, carbon-oxygen isotopes and microelement geochemistry research, seismic-profile fine interpretation and “ant-tracking” fracture prediction, hydrocarbon accumulation model research and high-yield controlling factor analysis, it is put forward that the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation in Yingxi area is a saline sedimentary environment of “semi open-semi closed” semi-deep lake facies, and the special hydrocarbon accumulation model in Yingxi area is resulted from oil storage in the matrix intracrystalline pore, fracture forming by under-salt accumulation and salt formation seal-capping. Research results show that firstly, the lithology is dominant by dark colors including dark grey or ash black with the mixed sedimentation of saline minerals, mainly controlled by sedimentary environment. Secondly, the paleo-geomorphology prior to the sedimentation in the upper member of Xiaganchaigou Formation is a limited lake “lower in the west while higher in the east” with the development of lake barrier island. Thirdly, the data points of carbon-oxygen isotopes fall between an open lake and a closed lake. Fourthly, Sr/Ba values are all greater than 1 with an average of 2.01, the average value of Sr/Cu is 109.04, far greater than 5, and U/Th values are all less than 1 with an average of 0.62, indicating a saline, arid and reducing environment. Fifthly, the average value of Σ REE is 87.67×10^{-6} with the distribution range of $(39.41-162.67) \times 10^{-6}$, and Eu negative anomaly exists. Sixthly, the pressure coefficient of main under-salt producing formation can be up to 2.2, and the deduction of “self-originating-over-pressured system” resulting in the fracture formed by stress accumulation is completely consistent with the results of “ant-tracking” fracture prediction and core observation.

Key words: semi open-semi closed, saline lake, dolomite, fracture formed by overpressure, hydrocarbon accumulation model, Yingxi area, Qaidam Basin

引用:黄成刚,常海燕,崔俊,李亚锋,路艳平,李翔,马新民,吴梁宇.柴达木盆地西部地区渐新世沉积特征与油气成藏模式[J].石油学报,2017,38(11):1230-1243.

基金项目:国家重大科技专项“前陆冲断带及复杂构造区油气成藏规律、关键技术及目标评价”(2016ZX05003-006)和中国石油天然气集团公司重大科技专项“柴达木盆地建设千万吨油气田综合配套技术研究”(2011E-03)资助。

第一作者及通信作者:黄成刚,男,1979年2月生,2001年获江汉石油学院石油地质勘察专业学士学位,2004年获成都理工大学矿物学、岩石学、矿床学专业硕士学位,现为中国石油勘探开发研究院西北分院高级工程师,主要从事沉积储层方面研究工作。Email:12664018@qq.com

Cite: HUANG Chenggang, CHANG Haiyan, CUI Jun, LI Yafeng, LU Yanping, LI Xiang, MA Xinmin, WU Liangyu. Oligocene sedimentary characteristics and hydrocarbon accumulation model in the western Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(11): 1230-1243.

自新生代以来,柴达木盆地西部(柴西)地区富油气凹陷长期处于青藏高原隆升背景之下,持续分阶段的隆升导致盆地的古海拔变高、湖盆封闭、气候干寒,且盐源供给充足,形成了典型的高原咸化湖盆^[1]。经过数十年的油气勘探,可将柴达木盆地概括为 3 大勘探领域:盆缘古隆起、斜坡带、盆内凹陷带。阿尔金山前东坪大气田的发现证实了盆缘古隆起具有巨大的勘探潜力^[2-3],20 世纪 80 年代在斜坡带的尕斯库勒地区也发现了亿吨级储量规模的整装大油气藏^[3]。随着勘探的不断深入,这些传统的三角洲前缘相带、滩坝砂等有利储集体已基本探明^[4]，“斜坡找油”和“构造高点找圈闭”的勘探思路已取得了丰硕的勘探实效。为了进一步在成熟探区扩大勘探成果,盆内凹陷带亦不失为一个重要的新领域,但勘探家们在凹陷带进行勘探部署时往往存在两大疑虑:①盆内凹陷带多发育烃源岩,是否发育优质储层?②盆内凹陷带埋深往往较大,即使发育储层也多属于致密储层范畴,油气开采成本较高,是否存在较高的商业价值?近年来的勘探部署实效和基础地质研究成果很好地诠释了上述问题。众所周知,渐新统下干柴沟组上段为柴西地区富油气凹陷的主力生油岩发育段^[5],最新的研究成果显示该套地层亦发育湖相混积白云岩等相对优质的“甜点”储层^[6-9],与深灰色泥岩和碳酸盐岩呈薄互层状,其具有优先捕获邻近生油岩所生产油气的天然优势,在这些认识的引领下,勘探家们在盆内凹陷带发现了英西地区“亿吨级”储量规模的大油气田^[6]。前人研究成果显示,渐新世晚期柴西地区湖盆范围非常宽广,全区岩性较为相近,只是各区块储集岩中的各种矿物在含量上存在一定的差异性,在偌大的湖相沉积区为何独有英西地区形成了自生自储型的亿吨级整装大油气田?其沉积特征及成藏模式相对于邻区,如跃进、干柴沟、咸水泉是否具有一定的特殊性?这些都是目前研究亟待解决和深入的关键问题。在消化前人研究成果的基础上,笔者采集并实测了大量的岩心样品,总结了英西地区独特的沉积特征与成藏模式,期望能对湖相碳酸盐岩油气勘探和柴达木盆地下一步井位部署提供借鉴和指导作用。

1 沉积特征

众所周知,柴西地区渐新世为咸化湖相沉积^[6-9],渐新世早期湖水面积开始逐渐扩大,沉积中心主要分布在七个泉—英西—扎哈泉等区域,其周缘大面积发育辫状三角洲和扇三角洲沉积。渐新世晚期湖水面积

进一步扩大,并略向东迁移的趋势,此时几乎全盆地均接受大面积沉积,沉积中心主要分布在英西地区和茫崖地区。因此,英西地区在渐新世一直地处湖相沉积中心区域,为半深湖相沉积,其湖泊周缘的辫状河三角洲沉积普遍具有“窄相带、短物源”的特征,湖泊水下沉积具有“范围大、分布广”的特征。前人已通过大型水槽沉积模拟实验证实了该类型的沉积展布主要受控于古湖水盐度^[7],因在咸水中细粒物质可搬运得更远而粗碎屑颗粒因阻力效应冲入湖泊的动能衰减更大。研究区的河流—三角洲沉积体系与传统沉积模式无异,依然受控于河流与湖泊的相对水动力强弱,而研究区咸化湖泊水下细粒混合沉积则与传统淡水湖泊沉积存在较大的差异性,多为细粒的陆源碎屑、泥质组分、碳酸盐岩以及各种盐类矿物混积而成,既能成为生油岩,又可作为储集层。将从沉积古地貌、岩石学特征、沉积环境元素等 3 方面进行详细研究。

1.1 沉积古地貌

地震剖面解释成果显示^[6],研究区下干柴沟组上段(34~28.5 Ma^[10-11])最厚沉积地层可超过 2 600 m,假设未发生沉积间断和剥蚀作用,可推算出其沉积速率高达 472.7 m/Ma,远高于文献报道的柴达木盆地其他地区的高沉积速率峰值 210~320 m/Ma^[12],因此可以推断英西地区在渐新世晚期为一快速沉积期,很难发生沉积间断和暴露剥蚀作用,且结合岩石学特征和沉积环境的分析,可以得出“下干柴沟组上段适合烃源岩的发育并为还原环境”的结论。大量的岩石样品经氩离子抛光后进行场发射扫描电镜分析,可观察到混积于碳酸盐岩中的陆源碎屑长石未发生任何溶蚀现象^[6],也未见“示顶底沉积构造”等典型大气水的淋滤溶蚀标志,结合区域构造发展史可以认为研究区未发生暴露剥蚀作用。因此,现今地层厚度基本可以代表原始沉积厚度。

综上所述,采用“厚度法”来恢复渐新世下干柴沟组上段沉积前的古地貌具有可行性,具体方法是:将地震剖面上的下干柴沟组上段顶面进行“拉平”处理(图 1),去掉断层重复段,将厚度最大的一个或多个区域判断为当时的沉积凹陷,由此勾勒出研究区厚度等值线图,将等值线数据导入相关成图软件(如 Petrel),生成直观的 3D 古地貌图(图 2)。综合地质认识,整体上柴西地区渐新世晚期接受了大面积的湖相沉积,当时的湖水面积较为宽广,湖底存在地貌上的“凹凸不平”,即下干柴沟组下段沉积末期柴西地区并未发生完全“填平补齐”式沉积,这种湖底样式受控于当时不同方向的物源供给。

从恢复出的下干柴沟组上段沉积前古地貌图可以看出,英西地区为“半封闭一半开放”的局限湖泊沉积环境,从北部物源区延伸出的湖障壁岛未完全将英西湖与其东南部广阔水体隔开,英西以西地区广泛发育的曲流河携带着丰富的矿物质不断注入英西湖中,造成了英西地区为盆地中盐类矿物最为发育的地区。Yuan 等^[13]和黄成刚等^[7]通过研究区下干柴沟组上段碳酸盐岩的碳氧同位素,并与国外典型开放性湖泊(如瑞士 Greifensee 湖、美国 Henderson 湖和以色列 Huleh 湖)和封闭性湖泊(如北美 Great 大盐湖、非洲 Turkana 湖和 Natron-Magadi 湖)进行比对,结果表明研究区碳酸盐岩的碳氧同位素值投点落于开放性湖泊和封闭性湖泊之间(图 3),由此验证了“半封闭一半开放”的局限湖泊沉积环境推论的准确性。

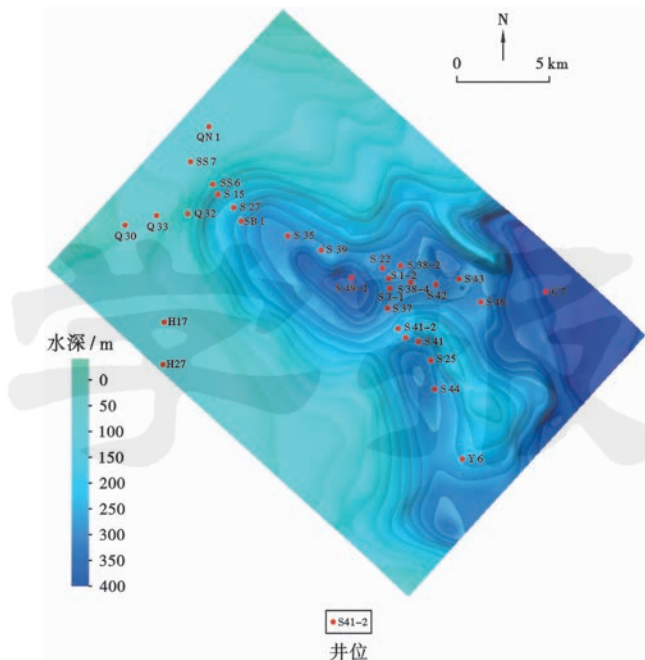


图 2 柴西地区渐新统下干柴沟组上段沉积前古地貌
Fig. 2 Palaeogeomorphology of the western Qaidam Basin before depositional period of the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation

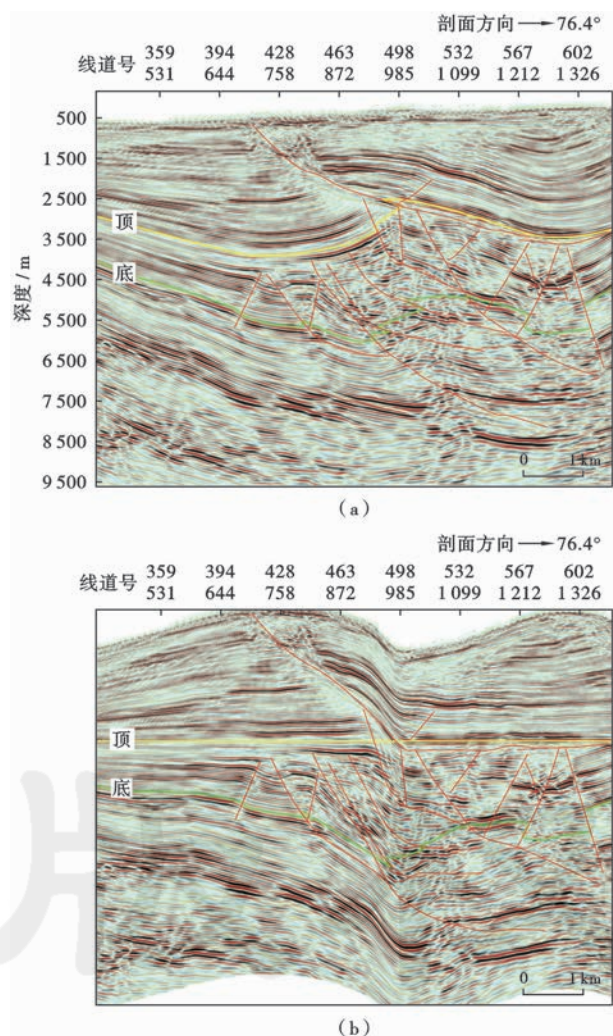


图 1 柴西地区渐新统下干柴沟组上段地震剖面解释成果及顶面拉平剖面
Fig. 1 Interpretation results of seismic profiles of the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation and its seismic profile after flattening of the top surface in the western Qaidam Basin

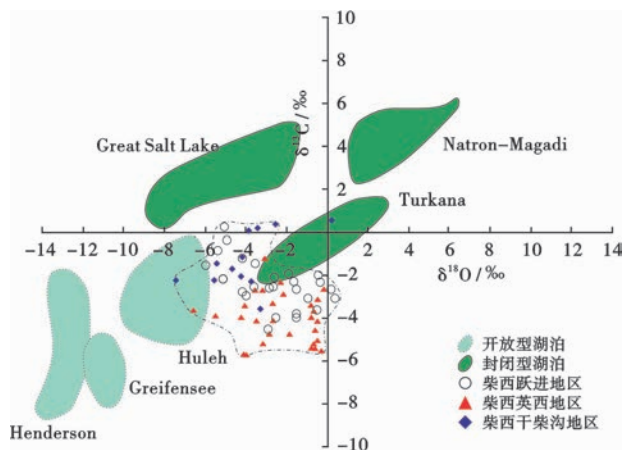


图 3 柴西地区渐新统湖相碳酸盐岩碳氧同位素组成与沉积环境分析(据文献^[13,7,14-16]修改)
Fig. 3 The carbon and oxygen isotope composition of lacustrine carbonate rocks and analysis of sedimentary environment of Oligocene in the western Qaidam Basin

1.2 岩石学特征

大量研究成果显示,柴西地区渐新统下干柴沟组上段为咸化湖泊沉积^[6-9],主要储集岩以泥晶湖相碳酸盐岩为主,岩石组分中混积了不同含量的泥质组分、细粒陆源碎屑以及各种盐类矿物,但跃进、英西、干柴沟以及咸水泉等 4 个区块在岩石学特征上又存在一定的差异性:跃进地区主要储集岩以白云岩为主,含藻白云岩,白云石含量普遍较高,含量为 50%~60%,平均值为 54.6%,单层厚度为数十厘米;英西地区主要储集

岩以含泥或含粉砂的混积白云岩为主,白云石含量为 33.3%~50.0%,平均值为 40.4%,单层厚度为数厘米至数十厘米,白云岩条带多含油;干柴沟地区主要储集岩以含粉砂的混积碳酸盐岩为主,白云石含量为 15%~30%,平均值为 22.8%,细粒的陆源碎屑含量较多,与其北部的物源有关;咸水泉地区主要储集岩以含泥的白云石条带为主,多与暗色泥岩(含部分泥灰岩)呈薄互层状,单层厚度较薄,多为数厘米,白云石含量平均值为 20.0%,样品中泥质含量普遍较高,偶见较为纯净的白云岩层,白云石含量最高可达 61.3%。

通过对柴西地区跃进、英西、干柴沟和咸水泉 4 个区块钻井岩心的 X 射线衍射全岩矿物含量分析(表 1),可以得出 4 个区块的碳酸盐平均含量分别为 69.8%、54.6%、45.0%、37.0%,其陆源碎屑平均含量分别为

11.8%、19.2%、27.8%、30.6%,其泥质平均含量分别为 6.8%、12.8%、18.7%、25.7%,其他自生矿物和盐类矿物含量分别为 11.7%、13.4%、8.6%、6.7%(图 4)。数据表明,跃进和英西地区碳酸盐含量最高(其中白云石含量分别为 54.6%和 40.4%),陆源碎屑以咸水泉和干柴沟地区最高,泥质含量以咸水泉地区最高,盐类矿物以英西地区最高。这些岩石组分特征与其沉积环境紧密相关:研究区东部发育长物源的曲流河,且河水中携带着丰富的盐类矿物溶解物,如 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和少量 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 等,造成了英西地区盐类矿物极其发育,或聚集成具有一定厚度的盐层,或以矿物颗粒形态赋存于碳酸盐岩中^[17];北部发育短物源的扇三角洲,湖泊波浪作用可以将细粒碎屑颗粒和泥质组分沉积于湖泊之中,造成了

表 1 柴西地区渐新统主要储集岩 X 射线衍射全岩矿物含量分析统计

Table 1 Statistics of the whole rock mineral content analysis by XRD of main reservoirs of Oligocene in the western Qaidam Basin

地区	样品号	深度/m	定名	矿物含量/%																		
				石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	文石	菱铁矿	菱镁矿	石盐	黄铁矿	赤铁矿	方沸石	重晶石	硬石膏	锐钛矿	钙芒硝	普通辉石	铁白云石	泥质含量
跃 进	YH101-5	2927.40	含灰藻白云岩	4.9	0.6	3.2	19.5	0	13.3	6.7	0	0	0	6.5	3.2	0	0	0	0	0	39.0	3.1
	YH101-16	2928.85	含泥白云岩	13.3	1.1	4.9	6.4	0	0	0.6	0	0	4.0	2.3	2.3	0	0	0.5	0	0	51.8	12.8
	YH101-71	2943.05	含粉砂白云岩	7.7	0.6	3.0	5.7	0	0	0	0	0	4.9	2.1	0	0	0	1.1	0	0	64.3	10.6
	YH101-293	3160.40	含粉砂白云岩	7.3	0.4	2.4	6.6	0	0	7.4	0	0	4.2	3.5	1.9	0	2.6	0	0	0	56.3	7.4
	YH101-670	3208.64	含灰砂质白云岩	8.1	0.3	4.4	6.7	0	0	5.1	0	0.4	3.9	4.1	0	0	1.1	0	0	0	59.4	6.5
	YH106-2	3281.70	含粉砂白云岩	10.6	1.7	4.4	11.3	0	3.7	6.1	2.6	0	0	5.0	1.4	0	3.1	0	0	0	44.3	5.8
	YH106-3	3294.20	白云岩	4.6	0.2	2.2	7.5	0	0	7.0	0	0	5.6	5.4	0	0	0.4	0	0	0	65.2	1.9
	YH106-11	3366.10	白云岩	4.0	0	1.8	16.7	0	0	0	0	0	5.6	4.5	0	0	9.9	0	0	0	56.6	0.9
	YH106-16	3358.40	白云岩	6.6	0.3	2.9	6.6	0	0	0	0	0.6	6.4	6.1	0.8	0	0.2	0	0	0	61.2	8.3
	YH106-27	3381.90	含粉砂白云岩	9.6	0.5	3.4	11.1	0	0	0.6	0	0	7.0	4.8	1.3	0	0	0	0	3.1	48.3	10.3
	平均值			7.7	0.6	3.3	9.8	0	1.7	3.4	0.3	0.1	3.7	4.7	1.3	0	1.7	0.1	0.1	0.3	54.6	6.8
英 西	S3-1-3	4366.80	白云岩	9.7	0.7	5.1	10.0	20.2	0	17.5	0	0.6	2.9	0	0	0.4	0.6	0	3.1	0	20.1	9.1
	S3-1-7	4369.35	白云岩	13.8	0.7	8.2	4.5	0	0	13.1	0	0.6	4.0	3.7	0	0	0	0.6	1.1	0	41.2	8.5
	S3-1-23	4376.63	白云岩	11.8	1.1	8.0	15.9	0	0	0	0	2.1	4.3	3.2	0	0	0	0	0.8	0	43.3	9.5
	S3-1-38	4371.15	粉砂质白云岩	11.7	1.7	12.6	6.9	0	0	0.2	0	0.4	3.0	0	0	0	2.9	0	1.2	0	39.2	20.2
	S41-6-1-10	3857.35	含粉砂白云岩	5.7	0.7	7.8	9.5	0	0	3.5	0	1.2	2.9	3.6	0	0	10.7	0	1.3	0	42.4	10.7
	S41-6-1-11	3857.95	含粉砂白云岩	12.1	1.3	11.3	7.6	38.2	0	11.7	0	0.5	1.8	0	0	0	0.8	0	4.3	0	0	10.4
	S41-6-1-12	3858.48	含粉砂盐质白云岩	4.2	0.5	6.7	2.2	37.4	0	5.9	0.2	0	3.8	0	0	0	16.1	0	14.0	0	0	9.0
	S41-6-1-22	3867.12	含泥白云岩	6.1	1.1	5.2	5.9	0	0	0	0	0.5	4.5	3.7	0	0	3.6	2.3	0	3.0	51.3	12.8
	S38-1	2794.62	含粉砂泥质白云岩	14.8	0.9	6.5	8.4	16.2	0	0	0	0.6	2.4	0	0	0	4.1	0	2.8	0	17.5	25.8
	S38-11	3147.16	含灰白云岩	8.8	1.0	9.1	18.3	0	0	0	0	1.3	7.2	0	0	0	1.7	0	3.0	0	37.3	12.3
	平均值			9.9	1.0	8.1	8.9	11.2	0	5.2	0	0.8	3.7	1.4	0	4.1	0.3	3.2	0.3	29.2	12.8	
干 柴 沟	C6-1	1916.00	含粉砂碳酸盐岩	15.1	1.0	7.0	13.1	0	6.6	6.3	0	0	4.2	0	0	3.9	0	0	0	26.1	16.7	
	C6-2	2010.00	含泥粉砂质碳酸盐岩	21.9	1.1	8.9	12.6	0	4.6	0	0	0.4	3.6	2.2	1.7	0	1.0	0	0	2.5	16.7	22.8
	C6-3	2115.00	含粉砂碳酸盐岩	15.6	0.8	6.0	9.3	0	3.3	6.8	0	0	4.2	3.6	1.0	0	1.1	0	0	0	28.3	20.0
	C6-4	2214.00	含泥粉砂质碳酸盐岩	23.4	1.4	6.9	15.4	0	7.9	0.2	0	0	3.6	2.7	1.3	0	2.9	0	0	0	15.4	18.9
	C6-5	2260.00	含泥粉砂质碳酸盐岩	19.1	0.8	6.4	15.9	0	1.9	0	0	0.5	2.4	2.2	1.0	0	3.7	0	0	0	28.4	17.7
	C6-6	2347.00	含泥粉砂质碳酸盐岩	17.1	2.7	9.2	14.9	0	4.0	6.8	0	0.5	3.2	2.3	0	0	3.0	0	0	0	17.6	18.7
	C6-7	2413.00	含泥粉砂质碳酸盐岩	18.2	1.2	7.3	17.7	0	0	10.4	0	0.8	2.1	0	0.5	0	3.7	0	0	0	23.7	14.4
	C6-8	3667.00	含泥粉砂质碳酸盐岩	16.7	0.6	8.0	12.2	0	0	10.1	0	0	4.1	0	0	0	4.0	0	0	0	29.0	15.3
	C6-10	3928.00	含泥粉砂质碳酸盐岩	19.0	0.7	11.2	10.9	0	0	9.2	0	0.6	2.3	0	0.8	0	2.0	0	0	0	19.9	23.4
		平均值			18.5	1.1	7.9	13.6	0	3.1	5.5	0	0.3	2.8	1.9	0.7	0	2.8	0	0	0.3	22.8
咸 水 泉	X9-1	1532.95	含泥粉砂质白云岩	17.7	0.9	7.5	4.5	0	2.8	8.4	0	0	2.7	3.0	0	0.7	0	0	0	0	33.7	18.1
	X9-2	1534.40	含白云质粉砂质泥岩	23.7	1.7	6.3	7.3	0	2.6	1.0	0	0.4	0	0	3.5	0	4.0	0	0	0	12.3	37.2
	X9-3	1536.60	含白云质粉砂质泥岩	22.7	0.9	7.1	12.4	0	2.5	0	0	0	1.9	0.5	3.7	0	0	0	0	0	19.3	29.0
	X9-4	1537.27	白云岩	7.7	0.4	2.2	15.2	0	1.9	0	0	0	3.2	0	0	0	0	0	0	0	61.3	8.1
	X9-5	1538.67	含灰粉砂质泥岩	18.3	1.1	7.2	20.6	0	1.9	1.1	0	0	2.4	0.6	5.1	0	1.0	0	0	0	0	40.7
	X9-6	1539.10	含灰粉砂质泥岩	21.6	1.1	10	21.1	0	1.6	0.8	0	0	3.3	0	5.1	0	0	0	0	0	0	35.4
	X9-7	1540.80	含泥粉砂岩	33.6	2.1	11.5	14.8	0	1.8	0	0	0	0	0	3.9	0	4.0	0	0	0	7.2	21.1
	X9-8	1541.20	含泥白云质粉砂岩	26.4	6.0	6.9	11.4	0	2.0	0	0	0	0	1.2	2.9	0	0.8	0	0	0	26.5	15.9
	平均值			21.5	1.8	7.3	13.4	0	2.1	1.4	0	0.1	1.0	1.0	3.4	0	1.3	0	0	0	20.0	25.7

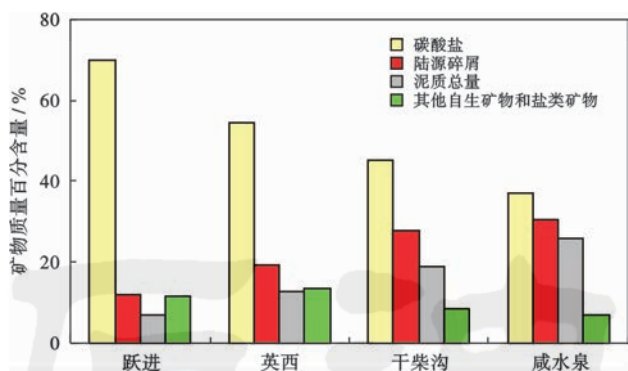


图 4 柴西地区渐新统各区块岩石组分对比

Fig. 4 Comparison of rock components of Oligocene reservoirs in the western Qaidam Basin

北部的干柴沟和咸水泉的陆源碎屑和泥质含量偏高;跃进地区为水体相对较浅的湖湾地区,藻类发育,这类微生物易克服白云石形成的动力学屏障^[18-19],突破在 Mg²⁺ 表面形成的“水化壳”(Hydration shell)^[20],从而有利于白云石化作用,造成了跃进地区白云石含量相对最高。

随着勘探程度的不断深入,前人在各勘探阶段的大量研究成果曾勾勒出不同版本的柴西地区沉积相图^[2-3,5-9,17,20],但对渐新统下干柴沟组上段地层作为整个柴西富油气凹陷最重要的烃源岩发育层段^[21-22]却有共识,109 个暗色泥岩和碳酸盐岩的有机碳分析结果显示,其平均值为 0.77%,分布范围为 0.3%~2.5%。

虽然多数样品有机质丰度不高,但生烃模拟实验显示咸化条件下其烃类转化率较高^[5,23-24],具有较强的生烃能力,为柴西地区各个区块油气藏的形成奠定了坚实的油源基础。

从岩石的整体色调上看,下干柴沟组上段岩性以深灰色或灰黑色的暗色色调为主,未见滨、浅湖沉积中常见的红色、棕红色、褐色等氧化或弱氧化色调,虽然地层中偶尔可见细粒的陆源碎屑条带,但不能以此作为湖水较浅的绝对依据,因湖相碳酸盐岩地层中陆源碎屑含量的多少主要受控于携带碎屑颗粒的河流入湖时动能的衰减指数,在咸水中细粒碎屑物质可搬运得更远而粗碎屑颗粒因阻力效应冲入湖泊的动能衰减更大^[7]。也有学者曾提出质疑,盐类矿物的发育是否意味着湖盆晚期的湖水蒸发干涸? 答案是否定的,因为盐类矿物是否沉淀主要取决于湖水中各种盐类矿物是否达到了其过饱和度而不取决于湖水的深浅,即注入湖泊的河流所携带的矿物质丰度起决定性作用,半深湖—深湖相中亦可发生少量盐类矿物(如硬石膏)的沉淀,2017 年实际钻探(S49-1 井下干柴沟组上段地层)成果显示,地层中可见石膏(经数十个晶体的能谱予以确认)与黑色含灰泥岩共生(图 5),证实了盐类矿物的沉淀不需要蒸发干涸或暴露,深水环境下依然可以发生盐类矿物沉淀。

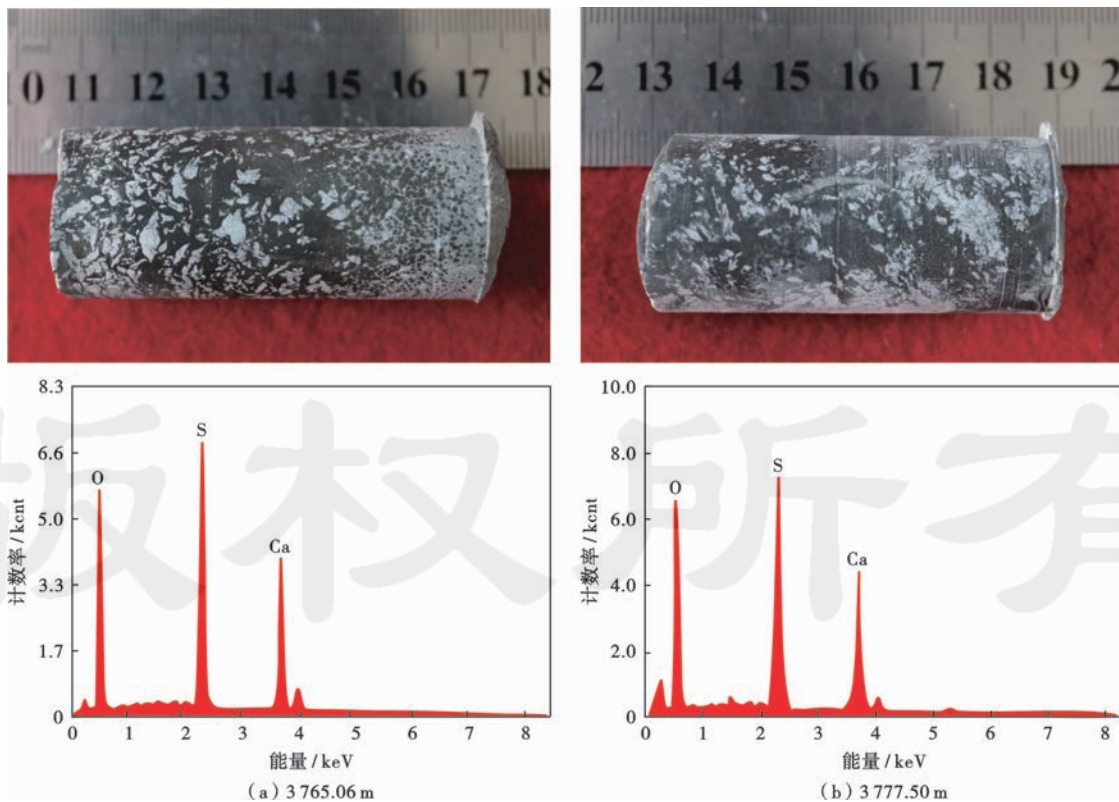


图 5 柴西地区 S49-1 井下干柴沟组上段深水沉积中黑色含灰泥岩与石膏共生

Fig. 5 The symbiosis of black containing calcite mudstone with gypsum of the upper member of Xiaganchaigou Formation reservoirs of deep water deposits from Well S49-1 in the western Qaidam Basin

1.3 沉积环境元素

英西地区下干柴沟组上段湖相碳酸盐岩的 ICP-MS 方法测定的微量元素分析数据详见表 2, Mn/Sr 比值^[25-26]可以用于判别现今地层岩石中的元素组成是否遭受了成岩破坏,可用于挑选高保存度样品,研究样品的 Mn/Sr 比值平均为 0.57,均远小于界限值 3,反映了测试样品没有或仅受到极弱成岩作用的影响^[8],其元素组成可反映沉积时原始地球化学信息。且通过计算可得其 Ce 异常值与 Eu 异常值相关系数仅为 0.02, Ce 异常值与 Σ REE 相关系数仅为 0.06,均无明显相关性,亦反映了测试样品所受成岩作用影响极为

有限,可代表沉积期的流体地球化学特征^[8]。从研究区白云岩微量元素平均上部地壳(UCC)^[27]标准化(图 6)可以看出, Sr、Mo、Cs 和 Bi 显著富集, Nb、Sn、Ta 含量明显低于平均上部地壳(UCC)值。高含量的 Sr 元素组成,为咸化湖盆沉积的产物,扫描电镜的背散色图像中明显可见呈现高亮度特征的天青石(SrSO_4)矿物。

Sr/Ba 比值通常被用来判断湖水的沉积环境^[28],其原理是,在淡水湖泊中,硫酸根离子含量少, Sr 和 Ba 不易沉淀,当湖水逐渐咸化,矿化度增加, BaSO_4 首先沉淀,随着咸化程度的逐渐加深, SrSO_4 也发生沉淀,

表 2 柴西地区渐新统下干柴沟组上段湖相白云岩微量元素地球化学分析结果

Table 2 Analysis of trace element geochemistry results of the lacustrine dolomite of the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation in the western Qaidam Basin

样品 编号	深度/ m	岩性	含量/ 10^{-6}														
			Li	Be	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr
S1-2-8	2758.19	含粉砂白云岩	30.21	1.07	4.21	1605.41	45.50	38.91	567.34	16.12	19.57	20.29	36.50	7.64	0.51	52.68	1187.82
S1-2-11	2758.52	含泥白云岩	39.35	1.37	3.58	1780.34	53.62	40.40	498.44	9.67	21.07	25.45	56.51	9.31	0.63	65.54	3410.48
S203-1	1502.70	含粉砂白云岩	67.58	1.65	8.52	2321.40	66.88	60.37	617.73	16.06	27.69	23.98	32.39	13.72	0.95	96.92	675.05
S203-3	4486.40	含粉砂白云岩	46.43	1.52	8.71	2444.84	81.43	61.64	461.54	30.12	31.11	26.98	162.31	16.59	1.09	100.82	1722.24
S203-6	4495.35	含粉砂白云岩	35.10	1.08	3.38	906.30	31.85	34.88	480.89	11.82	13.88	14.05	3.01	5.68	0.33	37.07	3031.38
S203-7	4496.90	含粉砂白云岩	95.55	1.91	9.63	3338.82	101.53	73.91	522.84	24.80	38.46	41.83	43.87	19.46	1.37	150.63	243.76
S203-8	4500.00	粉砂质白云岩	60.53	1.97	5.62	2442.57	73.31	54.68	637.75	24.60	28.96	29.80	51.95	13.17	0.90	102.99	460.87
S23-1	4034.90	含钙芒硝白云岩	52.37	1.65	6.74	2187.10	61.49	62.66	527.02	11.34	25.44	24.37	62.08	11.59	0.79	90.44	841.17
S23-3	4173.00	含灰白云岩	15.80	0.68	4.82	1084.24	26.84	29.31	332.18	6.31	12.05	10.78	22.41	4.57	0.32	30.95	1841.98
S25-1	4177.50	含灰白云岩	13.45	0.59	2.45	581.88	31.74	38.41	414.28	8.92	10.27	6.15	50.04	3.76	0.23	18.26	1771.26
S25-4	4216.80	含膏白云岩	26.59	1.26	6.02	1240.04	33.08	29.11	432.20	15.56	12.03	12.30	30.89	6.30	0.43	32.63	1666.25
S25-6	4221.50	白云岩	13.61	1.01	2.43	601.92	25.15	37.48	414.33	4.93	7.52	5.35	9.44	3.65	0.21	25.62	2188.01
S30-1	4081.00	含粉砂白云岩	15.92	0.79	6.75	1498.20	35.93	38.06	477.86	11.04	15.90	11.35	31.35	6.85	0.39	36.66	990.21
S32X-6	4094.22	含灰白云岩	24.85	0.70	0.85	1024.73	23.67	36.48	482.66	4.33	11.60	11.48	12.05	4.39	0.45	29.04	1061.46
S32X-7	4097.74	含灰白云岩	30.87	0.95	2.09	1103.61	30.07	31.02	420.56	8.38	14.12	12.45	19.28	5.56	0.58	32.70	2629.72
S32X-8	4100.98	含泥粉砂质白云岩	49.20	1.64	5.26	1616.63	52.93	44.72	679.77	7.92	20.11	20.55	30.85	9.88	1.12	66.52	1539.85
S32X-9	4102.33	含粉砂泥质白云岩	35.86	1.62	9.16	2607.42	83.84	60.90	690.83	15.22	33.53	39.51	118.01	14.05	1.75	82.83	546.94
S32X-10	4112.53	含云粉砂质灰岩	36.86	1.30	8.91	1923.25	54.68	44.17	671.74	18.81	23.11	24.61	45.21	10.67	1.00	66.10	1410.86
S32X-11	4117.04	含粉砂灰岩	38.13	1.45	10.28	2292.16	80.92	58.15	507.31	13.48	31.73	24.11	51.67	14.95	1.26	91.18	1755.76
S32X-12	4121.50	含粉砂白云岩	20.14	1.04	4.36	1529.52	36.99	48.21	494.68	10.07	17.02	14.55	25.57	6.17	0.58	41.67	603.86
S32X-13	4127.93	含灰白云岩	41.59	1.81	7.62	277.19	79.91	86.49	661.27	12.53	30.36	25.11	61.72	14.29	1.09	95.78	1982.75
样品 编号	深度/ m	岩性	含量/ 10^{-6}														
			Y	Zr	Nb	Mo	Cd	Sn	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Bi	Th	U	
S1-2-8	2758.19	含粉砂白云岩	10.64	58.96	5.03	2.33	0.06	1.31	4.32	450.31	1.81	0.42	13.97	0.23	4.99	2.64	
S1-2-11	2758.52	含泥白云岩	13.05	75.99	5.47	2.34	0.08	1.55	5.59	1142.73	2.33	0.45	15.14	0.25	5.89	3.87	
S203-1	1502.70	含粉砂白云岩	17.05	93.09	7.46	3.19	0.06	2.15	10.25	373.52	2.70	0.56	18.91	0.29	7.77	3.70	
S203-3	4486.40	含粉砂白云岩	16.19	93.88	7.59	3.94	0.63	2.33	10.61	1092.27	2.83	0.57	20.64	0.35	9.37	4.19	
S203-6	4495.35	含粉砂白云岩	7.95	38.86	3.27	1.99	0.03	0.85	4.75	789.29	1.13	0.23	9.69	0.13	3.63	2.31	
S203-7	4496.90	含粉砂白云岩	23.88	128.90	10.59	5.82	0.06	3.31	14.97	376.62	3.90	0.83	24.84	0.47	13.27	6.57	
S203-8	4500.00	粉砂质白云岩	18.39	97.89	8.03	2.01	0.08	2.24	8.95	392.26	2.93	0.63	26.66	0.37	8.66	3.34	
S23-1	4034.90	含钙芒硝白云岩	15.03	86.31	7.16	1.04	0.10	1.78	7.44	512.31	2.59	0.56	30.28	0.29	7.36	2.83	
S23-3	4173.00	含灰白云岩	7.48	71.61	3.38	2.58	0.06	0.85	2.45	1213.69	1.83	0.25	7.59	0.11	3.62	1.65	
S25-1	4177.50	含灰白云岩	6.40	24.89	1.68	2.13	0.03	0.60	1.48	1077.57	0.68	0.14	3.15	0.08	1.56	1.53	
S25-4	4216.80	含膏白云岩	11.17	64.95	5.01	7.51	0.08	1.20	4.58	1404.60	1.94	0.37	8.65	0.12	4.44	3.99	
S25-6	4221.50	白云岩	9.41	19.19	2.20	0.76	0.02	0.49	1.42	1333.58	0.56	0.23	5.25	0.08	2.19	1.56	
S30-1	4081.00	含粉砂白云岩	9.62	61.78	4.33	1.53	0.07	0.99	2.97	445.26	1.81	0.35	13.19	0.15	4.62	2.95	
S32X-6	4094.22	含灰白云岩	7.36	30.52	4.07	2.25	0.03	0.91	2.82	599.97	0.87	0.33	7.27	0.10	2.04	1.73	
S32X-7	4097.74	含灰白云岩	7.66	41.13	3.35	2.13	0.05	0.91	3.04	590.07	1.17	0.28	9.21	0.14	3.41	1.72	
S32X-8	4100.98	含泥粉砂质白云岩	14.59	67.92	5.01	5.16	0.05	3.29	6.54	782.59	2.03	0.40	10.13	0.19	6.20	4.41	
S32X-9	4102.33	含粉砂泥质白云岩	20.53	115.35	8.02	6.87	0.21	2.58	8.69	539.78	3.45	0.66	25.15	0.40	9.92	9.56	
S32X-10	4112.53	含云粉砂质灰岩	16.52	95.06	5.98	5.26	0.06	1.47	7.21	762.36	2.76	0.50	15.23	0.23	7.72	4.50	
S32X-11	4117.04	含粉砂灰岩	17.09	90.42	6.59	6.28	0.06	2.24	9.86	821.41	2.63	0.52	17.00	0.30	7.64	4.93	
S32X-12	4121.50	含粉砂白云岩	10.10	89.66	5.12	3.10	0.06	1.00	3.31	227.55	2.58	0.40	12.53	0.19	5.17	2.84	
S32X-13	4127.93	含灰白云岩	16.27	85.46	6.50	6.31	0.07	2.10	9.35	1134.32	2.56	0.50	16.67	0.29	7.58	4.46	

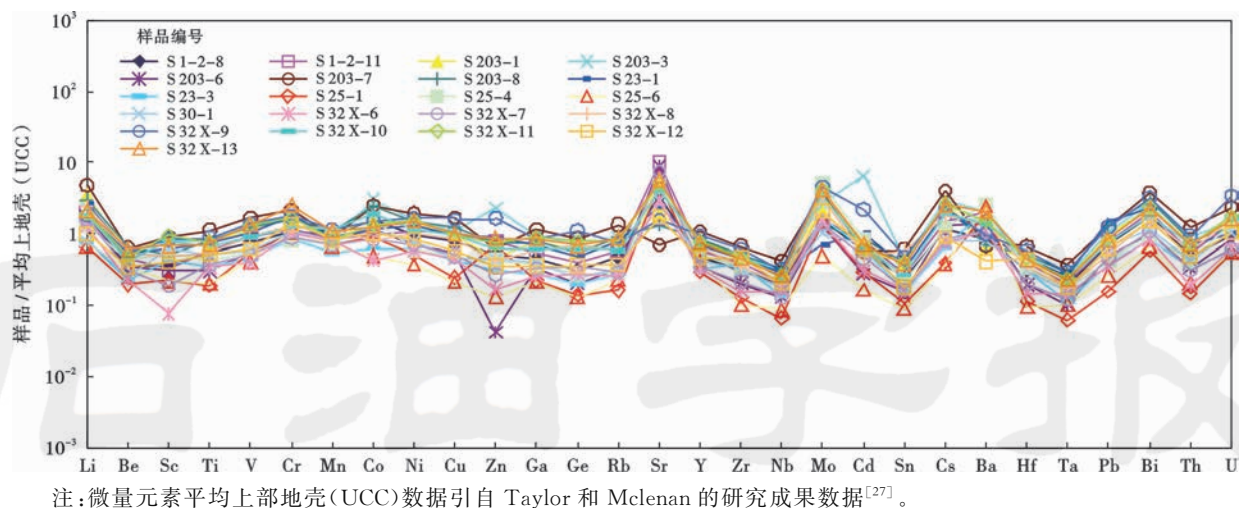


图6 柴西地区渐新统下干柴沟组上段湖相白云岩平均上部地壳标准化微量元素

Fig. 6 The average standardized upper crust discrete trace element's spider web of the lacustrine dolomites of the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation in the western Qaidam Basin

因此沉积物中 Sr/Ba 比值越大代表咸化度越高。研究区 21 个样品的 Sr 含量的最小值为 243.76×10^{-6} , 最大值为 3410.48×10^{-6} , 平均值为 1502.94×10^{-6} ; Ba 含量的最小值为 227.55×10^{-6} , 最大值为 1404.60×10^{-6} , 平均值为 764.86×10^{-6} ; Sr/Ba 平均值为 2.01, 大于 1, 可判断为咸水湖沉积。也有学者通过对 Sr/Ba 比值与 B 元素和 Cl 元素这两个盐度指示元素进行相关关系分析, 却得出了无相关性的结论, 而 Sr/Ba 比值与碳酸盐含量之间却存在良好的正相关关系^[29], 由此得出沉积物中碳酸盐会影响 Sr/Ba 比值, 使其不能正确反映该沉积环境的原始 Sr/Ba 比和古盐度, 因为 Sr 容易进入碳酸盐中取代少量 Ca^[30], 主要受控于其在碳酸盐中的分配系数。因此非以硫酸盐状态存在的少量 Sr 会使得古盐度判断存在一定的误差^[31]。研究区样品中, 通过其 ICP-MS 测试出的 Sr/Ba 比值与 X 射线衍射测试出的碳酸盐含量进行相关关系分析(图 7), 可以得出两者相关性较弱(相关系数仅为 0.19), 即碳酸盐对 Sr/Ba 比值的影响较弱, 因此基本可以认定, 研究区通过 Sr/Ba 比值判断咸水湖沉积环境是准确的。

Sr/Cu 比值对古气候具有较高的敏感度, 通常认为 Sr/Cu 比值大于 5 指示干旱气候^[32], 而研究样品 Sr/Cu 比值为 5.83~408.92, 平均值为 109.04, 远大于界限值 5, 为干旱气候, 与岩石学特征中盐类矿物较为发育所反映出的蒸发环境相一致。U/Th 比值能反映沉积环境的富氧性和缺氧性, 一般认为其比值大于 1 则为富氧环境, 比值小于 1 则为缺氧环境^[32], 研究样品 U/Th 比值为 0.38~0.98, 平均值为 0.62, 均低于界限值 1, 为缺氧还原环境, 与前文中“高沉积速率推算结论”、“有机碳测试结论”和“下干柴沟组上段为全区主力烃源岩层段的

地质背景”等各结论所反映出的还原环境相匹配。 δC_e 的分布范围为 0.98~1.02, 平均值为 1.01, 基本无异常, 暗示了沉积时期处于还原环境中^[32-33]。

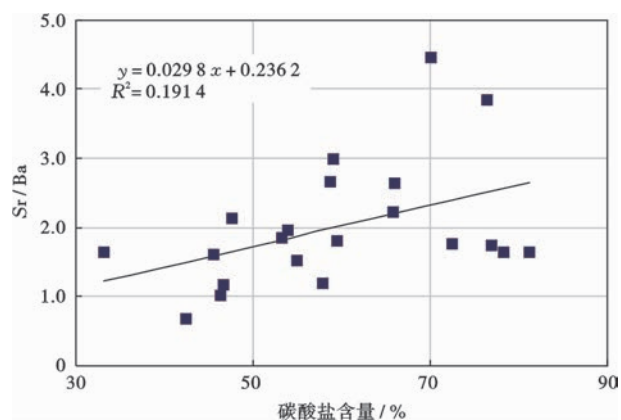


图7 柴西地区渐新统下干柴沟组上段主要储集岩中碳酸盐含量与 Sr/Ba 比值相关性

Fig. 7 Correlation between the carbonate content and Sr/Ba ratio of the reservoirs of the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation in the western Qaidam Basin

ICP-MS 方法测定的稀土元素分析数据(表 3)显示, 柴西地区湖相白云岩样品稀土总量平均值为 87.67×10^{-6} , 数值分布范围为 $(39.41 \sim 162.67) \times 10^{-6}$, 介于球粒陨石 ΣREE 值 (2.56×10^{-6})^[34] 和平均上地壳 ΣREE 值 (146.37×10^{-6})^[27] 之间。一般来说, 碳酸盐岩中稀土元素总量在沉积岩中较低, 一般低于 100×10^{-6} ^[35], 有的仅 $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ ^[36], 热液白云岩同样也具有低稀土元素含量的特点^[37-38], 少数稀土元素总量极低(如 39.41×10^{-6})的样品可能存在局部热液流体作用痕迹, 部分样品稀土元素总量较高(如 162.67×10^{-6}), 可能与混积的

表 3 柴西地区渐新统下干柴沟组上段湖相白云岩稀土元素组成

Table 3 Analysis of REE results list of the Eocene lacustrine dolomite of the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation in the western Qaidam Basin

样品 编号	深度/m	岩性	含量/ 10^{-6}											
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
S1-2-8	2 758.19	含粉砂白云岩	15.61	32.07	3.61	14.25	2.57	0.51	2.21	0.36	1.95	0.38	1.07	0.17
S1-2-11	2 758.52	含泥白云岩	18.78	38.05	4.42	16.88	3.03	0.67	2.79	0.47	2.46	0.48	1.37	0.21
S203-1	4 502.70	含粉砂白云岩	23.29	47.45	5.51	20.84	3.72	0.78	3.35	0.57	2.94	0.57	1.63	0.26
S203-3	4 486.40	含粉砂白云岩	25.32	50.55	5.95	22.47	3.87	0.81	3.30	0.56	2.91	0.57	1.64	0.26
S203-6	4 495.35	含粉砂白云岩	10.52	21.50	2.39	9.51	1.71	0.36	1.48	0.24	1.29	0.25	0.72	0.11
S203-7	4 496.90	含粉砂白云岩	33.72	68.49	7.68	30.65	5.24	1.05	4.82	0.80	4.29	0.82	2.36	0.38
S203-8	4 500.00	粉砂质白云岩	27.03	53.70	6.30	23.00	4.15	0.86	3.80	0.65	3.42	0.67	1.94	0.29
S23-1	4 034.90	含钙芒硝白云岩	21.72	42.68	5.01	18.75	3.34	0.70	3.03	0.52	2.72	0.54	1.55	0.24
S23-3	4 173.00	含灰白云岩	9.65	19.17	2.25	8.74	1.56	0.37	1.41	0.24	1.25	0.25	0.69	0.11
S25-1	4 177.50	含灰白云岩	8.01	16.19	1.90	7.36	1.45	0.36	1.36	0.23	1.12	0.21	0.58	0.09
S25-4	4 216.80	含膏白云岩	13.91	27.27	3.22	12.56	2.38	0.53	2.13	0.35	1.88	0.37	1.04	0.16
S25-6	4 221.50	白云岩	11.33	21.37	2.44	9.97	2.01	0.48	1.94	0.33	1.63	0.31	0.82	0.13
S30-1	4 081.00	含粉砂白云岩	12.66	24.81	3.06	11.29	2.05	0.42	1.79	0.29	1.61	0.32	0.89	0.14
S32X-6	4 094.22	含灰白云岩	12.25	23.06	2.62	10.46	1.72	0.36	1.47	0.23	1.27	0.25	0.68	0.11
S32X-7	4 097.74	含灰白云岩	10.36	20.28	2.40	8.39	1.64	0.34	1.44	0.23	1.25	0.24	0.69	0.11
S32X-8	4 100.98	含泥粉砂质白云岩	19.22	38.26	4.52	17.81	3.26	0.68	2.89	0.47	2.53	0.50	1.37	0.22
S32X-9	4 102.33	含粉砂泥质白云岩	29.16	57.79	6.73	26.29	4.81	0.99	4.35	0.73	3.81	0.74	2.13	0.33
S32X-10	4 112.53	含白云质粉砂质灰岩	20.88	42.79	4.83	19.23	3.47	0.80	3.26	0.55	2.87	0.56	1.60	0.25
S32X-11	4 117.04	含粉砂灰岩	24.89	49.21	5.62	21.98	3.92	0.79	3.31	0.53	2.89	0.57	1.61	0.26
S32X-12	4 121.50	含粉砂白云岩	14.13	27.96	3.32	12.95	2.28	0.47	2.08	0.35	1.82	0.36	1.03	0.16
S32X-13	4 127.93	含灰白云岩	22.78	43.80	5.29	21.24	3.59	0.81	3.27	0.56	2.88	0.57	1.64	0.26

样品 编号	深度/m	岩性	含量/ 10^{-6}										
			Yb	Lu	Σ REE	LREE	HREE	LREE/ HREE	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
S1-2-8	2 758.19	含粉砂白云岩	1.06	0.17	75.83	68.63	7.37	9.31	10.60	3.92	1.73	0.65	1.05
S1-2-11	2 758.52	含泥白云岩	1.32	0.21	90.93	81.83	9.31	8.79	10.19	4.00	1.75	0.70	1.02
S203-1	4 502.70	含粉砂白云岩	1.60	0.25	112.52	101.61	11.17	9.10	10.44	4.04	1.73	0.67	1.03
S203-3	4 486.40	含粉砂白云岩	1.62	0.25	119.83	108.97	11.12	9.79	11.19	4.23	1.68	0.70	1.01
S203-6	4 495.35	含粉砂白云岩	0.71	0.11	50.79	45.99	4.92	9.35	10.60	3.97	1.72	0.69	1.05
S203-7	4 496.90	含粉砂白云岩	2.37	0.37	162.67	146.84	16.21	9.06	10.21	4.15	1.68	0.64	1.04
S203-8	4 500.00	粉砂质白云岩	1.83	0.29	127.65	115.03	12.91	8.91	10.57	4.21	1.71	0.66	1.01
S23-1	4 034.90	含钙芒硝白云岩	1.49	0.24	102.29	92.19	10.33	8.92	10.44	4.20	1.68	0.67	1.00
S23-3	4 173.00	含灰白云岩	0.68	0.11	46.36	41.74	4.73	8.82	10.17	3.99	1.71	0.76	1.01
S25-1	4 177.50	含灰白云岩	0.55	0.09	39.41	35.27	4.22	8.35	10.45	3.55	2.05	0.79	1.02
S25-4	4 216.80	含膏白云岩	1.02	0.16	66.83	59.87	7.12	8.41	9.80	3.77	1.73	0.72	1.00
S25-6	4 221.50	白云岩	0.77	0.12	53.51	47.60	6.04	7.88	10.55	3.64	2.08	0.75	1.00
S30-1	4 081.00	含粉砂白云岩	0.89	0.14	60.22	54.29	6.07	8.94	10.22	3.99	1.67	0.66	0.98
S32X-6	4 094.22	含灰白云岩	0.65	0.10	55.11	50.46	4.75	10.62	13.46	4.60	1.86	0.68	1.00
S32X-7	4 097.74	含灰白云岩	0.70	0.11	48.09	43.42	4.78	9.09	10.68	4.08	1.71	0.68	1.00
S32X-8	4 100.98	含泥粉砂质白云岩	1.36	0.22	93.05	83.73	9.54	8.78	10.16	3.81	1.76	0.68	1.01
S32X-9	4 102.33	含粉砂泥质白云岩	2.03	0.32	139.88	125.78	14.43	8.71	10.32	3.91	1.77	0.66	1.01
S32X-10	4 112.53	含白云质粉砂质灰岩	1.55	0.25	102.63	92.00	10.88	8.45	9.65	3.88	1.74	0.73	1.04
S32X-11	4 117.04	含粉砂灰岩	1.62	0.26	117.18	106.41	11.03	9.64	11.04	4.10	1.69	0.67	1.02
S32X-12	4 121.50	含粉砂白云岩	1.02	0.16	67.94	61.11	6.99	8.75	9.92	4.01	1.68	0.66	1.00
S32X-13	4 127.93	含灰白云岩	1.63	0.26	108.30	97.50	11.06	8.82	10.04	4.09	1.66	0.73	0.98

注:稀土元素球粒陨石标准化数据引自文献[34]; δ Eu = (Eu)_N/SQRT(Sm × Gd)_N; δ Ce = (Ce)_N/SQRT(La × Pr)_N; N—球粒陨石标准化后的值。

以细粒黏土矿物为代表的陆源物质有关,这类物质往往富集稀土元素^[39],在一定程度上会提升整个岩石的稀土元素总量。稀土元素配分模式图显示其存在低—中等程度的 Eu 负异常(图 8),一般认为这与上地壳物质的介入紧密相关^[40],即在一定程度上受到了湖相白云岩中混积的泥质组分影响,绝大多数样

品的 Eu 负异常的存在及 Eu 正异常的缺失指示了幔源流体并未大规模参与白云石的沉淀^[35],前人大量研究成果也证实了研究区为准同生交代成因类型^[6-11,13-14],而非热液白云岩。LREE/HREE、(La/Yb)_N、(La/Sm)_N 和 (Gd/Yb)_N 的平均值分别为 8.98、10.51、4.01 和 1.75,反映了湖相白云岩中轻重稀土具有一定的分异现象,

且轻稀土的分馏程度比重稀土要高,稀土配分曲线均呈右倾型,重稀土曲线平缓,这种配分模式特征反映了岩石中含多种矿物组分和具有多种物质来源的混积成因特征。

2 沉积模式

前文已从沉积古地貌、岩石学特征、沉积环境元素3个方面基本证实了英西地区渐新统晚期以咸化半深湖相沉积为主,英西以西地区广泛发育河流和三角洲沉积,河流侵蚀地表含盐地层后使得河流水体溶解了丰富的矿物质,源源不断地注入到英西湖中,半开放一半封闭的沉积环境使得英西湖的盐度远高于其东南部的广阔水体(图9),英西地区与干柴沟地区之间的湖障壁岛的存在(图10),对英西地区“半开放一半封闭”的沉积环境的形成至关重要,其阻止了湖水中盐类矿物的东扩,使之大量保存于英西地区。

英西湖内部呈现出“西低东高”的地貌特征(图2),可将其划分为“西英西湖”和“东英西湖”,渐新统晚期末,蒸发作用逐渐变强,水体变浅,“东英西湖”可谓一个天然的“晒盐场”(图10),“西英西湖”的盐度较“东英西湖”略淡,主要受控于北部阿尔金山淡水持续供给的影响(图9)。现今钻探结果显示,英西地区下干柴沟组上段地层中常可见数米厚的石盐(NaCl)层,这些厚盐

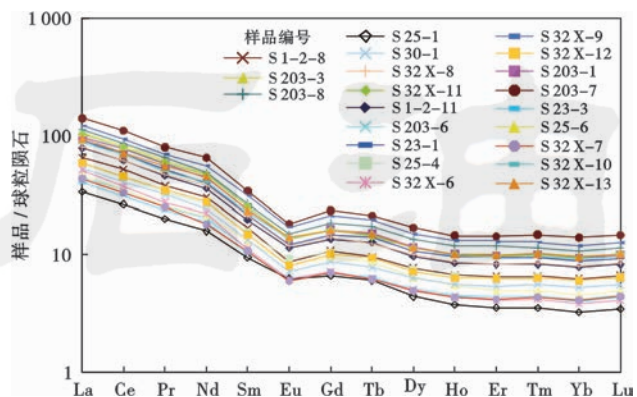


图8 柴西地区渐新统下干柴沟组上段湖相白云岩稀土元素配分模式

Fig. 8 REE distribution patterns of the lacustrine dolomites of upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation in the western Qaidam Basin

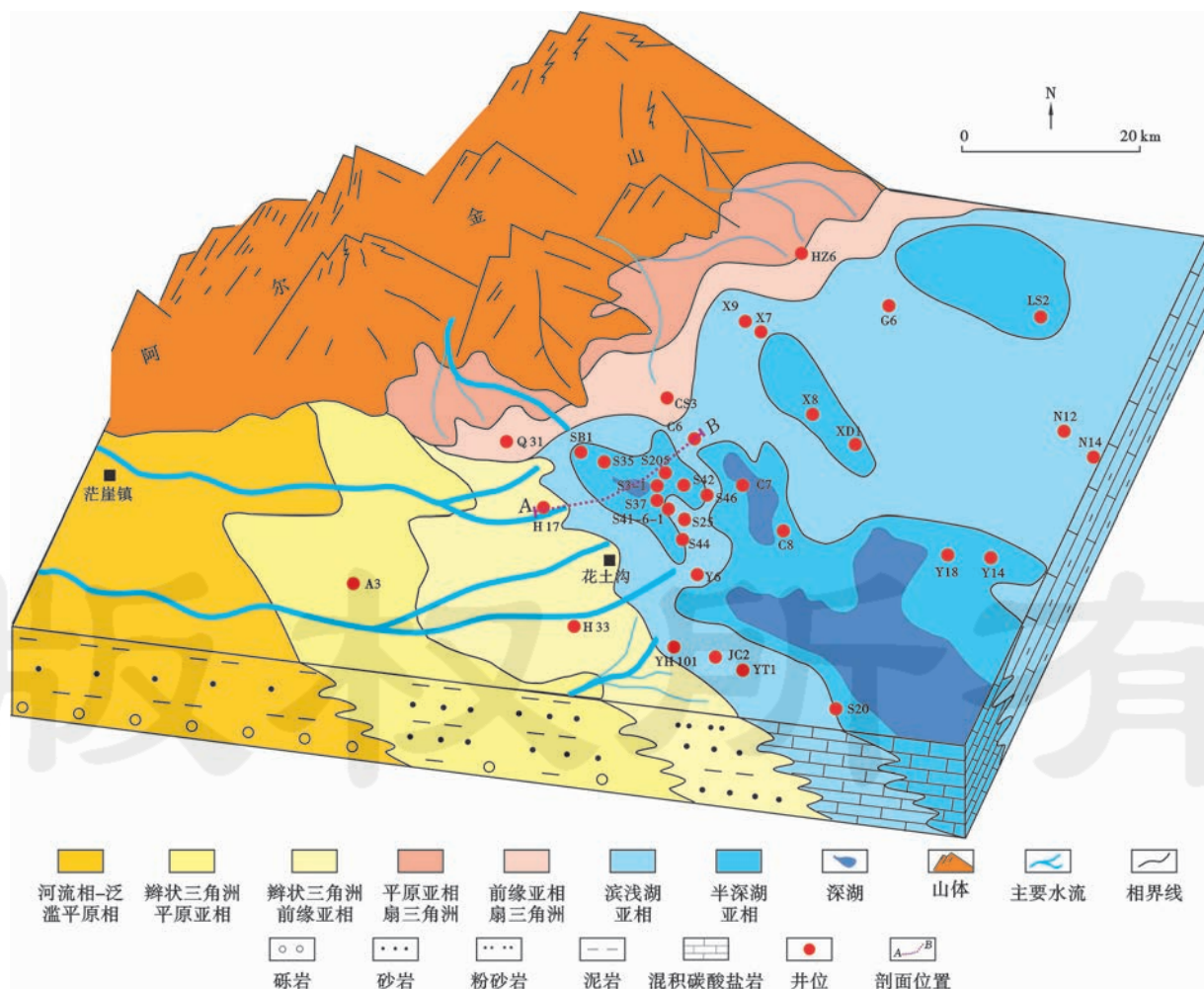


图9 柴西地区渐新世晚期沉积模式(据文献[13]修改)

Fig. 9 Sedimentary pattern of Late Oligocene in the western Qaidam Basin

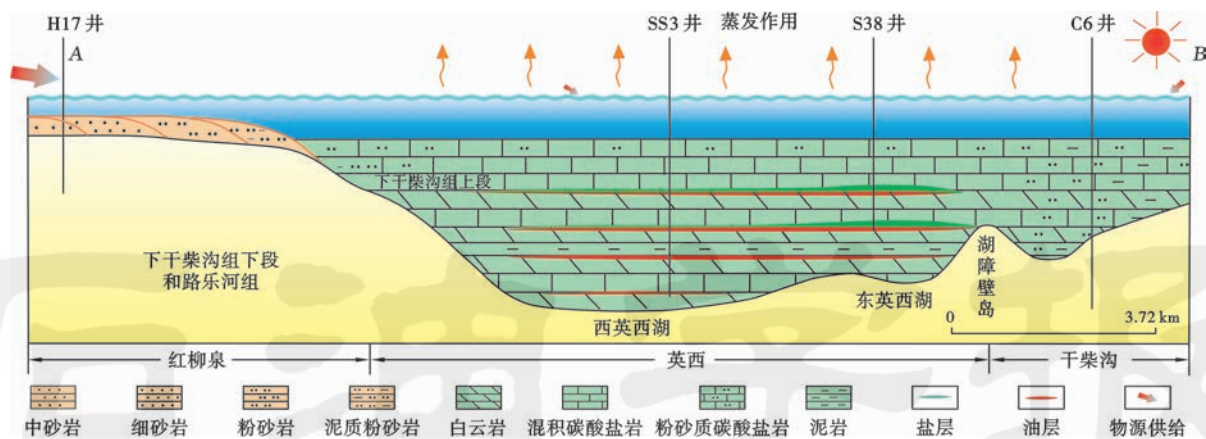


图 10 柴西地区渐新世晚期沉积剖面(剖面位置见图 9)

Fig. 10 Sedimentary section of Late Oligocene in the western Qaidam Basin

层主要分布于当时的“东英西湖”区域,因此 S38 井区下干柴沟组上段的中上部普遍可见单层厚度达 4.00~5.15 m 的石盐(NaCl)层,为后期油气藏的形成和保存提供了良好的封盖作用。虽然英西地区后期遭受了强构造运动,但大部分油气资源依然被牢牢封堵于这些具有塑性的优质岩盐盖层之下。不仅如此,较高的咸度条件也使得英西地区有机质的烃类转化率有较大幅度的提高^[5,16-17],为研究区“满凹含油”和“井井见油”的油气富集格局奠定了坚实的油源基础。

3 油气成藏模式与高产主控因素

3.1 成藏模式

优质的白云岩储集岩中晶间孔的广泛发育和普遍储油特征^[6]为英西地区“满凹含油”的主要控制因素,现有勘探成果显示,整个英西地区的几乎每口钻探到目的层下干柴沟组上段的井都能或多或少地产出一定量的油气,但不同构造、区域和细分小层中,油气产量高低存在着较大的差异性,尤其是“盐间油层组”和“盐下油层组”(油田生产部门将下干柴沟组上段自上而下分别划分为 I、II、III、IV、V、VI 共 6 个油层组,其中 I、II、III 为盐间油层组,IV、V、VI 为盐下油层组)。

前人大量研究成果显示,英西地区下干柴沟组上段油气藏为“自生自储型”油气藏,下干柴沟组上段不仅为全区最重要的烃源岩发育层段^[14-15],而且发育优质的白云岩储集层^[6,8],两者呈互层状。现有勘探成果表明下干柴沟组上段自生自储的原生油气藏的规模远大于上覆次生油气藏,主要受控于其上部的 I、II、III 油层组广泛发育封盖条件极好的盐层(石盐 NaCl),这些盐层具有很高的毛细管突破压力和很

强的塑性特征,且这些性能几乎不受成岩演化的影响,即使在受到极强烈的构造挤压破碎后依然会迅速弥合,仍可保持盖层的封闭性^[41],且英西地区下干柴沟组上段的盐下油层组 IV、V、VI 埋深普遍较大,多分布在 3700~5000 m,实验模拟结果显示盐层塑性随着埋深增大而更强,对油气的封堵效果更好^[42]。发育于盐下的自生自储的碳酸盐岩油气藏,极易形成如库车前陆盆地的“自源-超压系统”^[42],超压导致应力聚集同时产生大量微裂缝,这一推论在过 S205 井的主测线地震解释剖面中得到了印证(图 11)。实测地层压力数据也显示存在异常高压,如 S38 井平均压力系数约为 1.7,主力产油层(IV 油层组 3804.62 m)的压力系数高达 2.2。过 S205 地震剖面解释成果显示,盐下地层的裂缝和微裂缝十分发育,油气可通过这些裂缝快速递补到采油井井口,从而使之获得持续高产。油气田生产数据显示,截至目前,已钻探出 3 口日产量超过千吨的高产工业油流井,均在盐下地层(如图 11 中的 S205 井,IV 油层组 3380.00~3598.66 m)获得高产。

综上所述,英西地区下干柴沟组上段具有“源-储-盖”三者的完美组合特征:烃源岩生油后就近运移至与之呈互层状的白云岩优质储层中,这类优质储层基质晶间微孔极其发育但渗透性较差(因白云石晶间孔的孔径小而数量多),而优质盖层(岩盐)下覆地层的“自源-超压系统”造成应力聚集产生了大量微裂缝,具有良好的油气疏导作用。

3.2 高产主控因素

已有研究成果表明^[6-7,43],英西地区下干柴沟组上段储集层以白云石晶间孔为主,根据其化学成因机理可推算出研究区纯白云石的理论孔隙度值为 13.36%,并通过 X 射线衍射全岩矿物含量分析出的

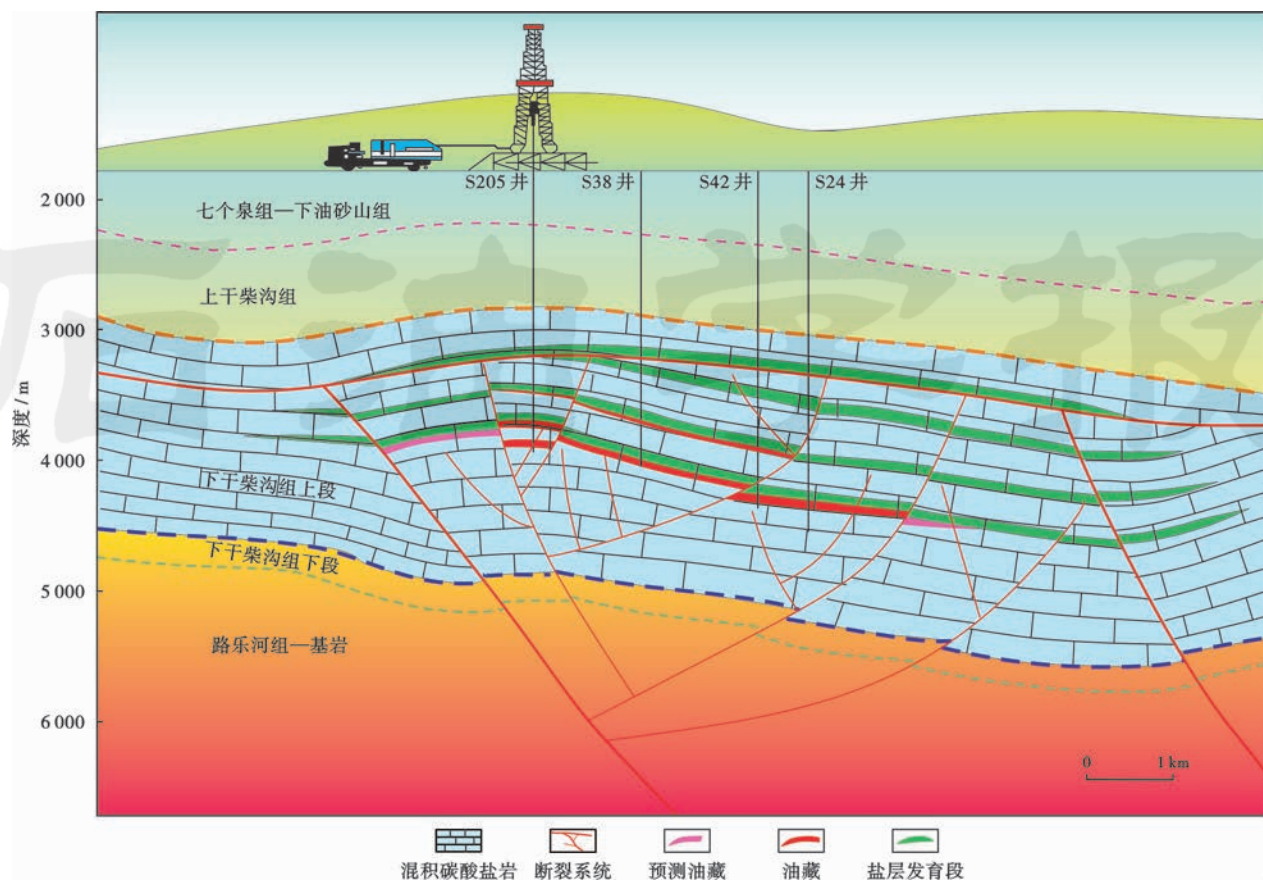


图 11 柴西地区渐新统下干柴沟组上段油气成藏模式(过 S205 井主测线)

Fig. 11 Hydrocarbon accumulation pattern of reservoir of the upper member of Xiaganchaigou Formation in the western Qaidam Basin

岩石中白云石含量进一步确定出整块岩石的孔隙度值,发现其与实测氦孔隙度值极为吻合,并利用场发射扫描电镜实测白云石晶体的边长大小和理论收缩率值再次验证了该理论孔隙度值的科学性。白云石晶间孔的二次电子成像与背散射电子成像的同视域对比和荧光显微镜观察等这两种方法均验证了这些晶间微孔中储集着石油。

数百个岩心样品的常规物性分析结果显示,多数样品的孔隙度分布在 5%~10%,绝大多数样品的渗透率小于 0.1 mD,按照中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 6285-2011 油气储层评价方法^[44]中的碳酸盐岩储层孔隙度、渗透率类型划分标准,绝大多数样品可被划归为“低孔—特低渗”级别^[7]。英西地区普遍较低的物性特征怎么会造就如此高产的工业油流井?因此有理由推测裂缝或微裂缝在研究区是广泛发育的^[45],2017 年新钻的 4 口开发井 S38-2 井、S38-4 井、S41-2 井和 S49-1 井的岩心观察结果显示,微裂缝广泛发育,其中部分为层间缝,部分为垂直或斜交于岩层的裂缝。宏观上,裂缝对油气运移的控制作用可以分为以下两种情况^[46]:①侧向运移,油源区的油通过层间

缝或近似该方向进行横向运移,当采油井井口附近的原油被抽取后,变为暂时的低势区,附近高势区的原油可以快速递补到采油井井口,使之持续高产。②纵向运移,断层可使油气从一个深度的地层向另一个深度的地层中运移,由高势区向低势区运移,尤其是英西地区湖相碳酸盐岩、钙质泥岩和薄石膏层常呈层状分布,在这些层与层之间隔断明显的地层中发育穿层裂缝显得尤为重要^[47-48]。

通过对英西地区过 S205 井联络测线进行地震剖面精细解释和“蚂蚁追踪”裂缝预测,可以发现盐下油层组裂缝非常发育,而盐间油层组裂缝不发育(图 12),S1-2 井的主力产层位于盐间油层组,初期日产量超过 600 t/d,半个月后日产量快速降低至不足 1 t/d,而 S205 井的主力产层位于盐下油层组,初期日产量超过 600 t/d,半个月后日产量升至千吨以上,现今仍能维持 200~300 t/d。可见盐间油层组在裂缝不发育的背景下,依靠渗透性极低的白云石晶间孔进行油气运移是相当缓慢的,而盐下油层组在裂缝非常发育的条件下可以持续高产。并且,这些持续高产的油井还受益于盐下油层组中的异常超压。

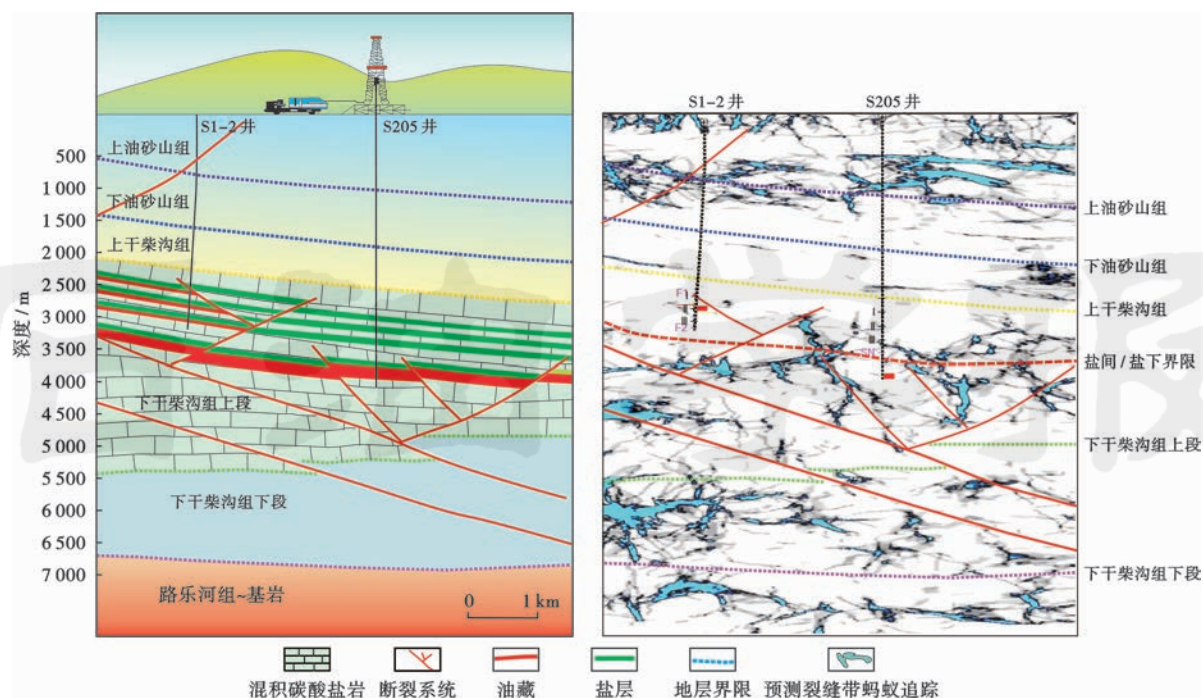


图 12 英西地区下干柴沟组上段地震剖面解释与“蚂蚁追踪”裂缝预测(过 S205 井联络测线)

Fig. 12 Interpretation results of seismic profiles and results of the “ant tracking” fracture prediction of reservoir of the upper member of Xiaganchaigou Formation in the Yingxi area

4 结 论

(1) 柴西地区渐新统下干柴沟组上段主要发育泥晶湖相碳酸盐岩,但不同区块的岩石学特征存在一定的差异性;跃进和英西地区碳酸盐含量最高,尤其是优质白云岩储层较为发育,陆源碎屑以咸水泉和干柴沟地区最高,泥质含量以咸水泉地区最高,盐类矿物以英西地区最高,这些岩石组分特征主要受控于其沉积环境。

(2) 沉积期湖障壁岛的发育、英西湖“西低东高”的古地貌特征、富含盐类物质的西部物源和富含淡水的北部物源共同控制了“东英西湖”和“西英西湖”在盐类矿物组成和含量上的差异性。

(3) 基质晶间孔的广泛发育并储油、盐下“自源-超压系统”导致应力聚集造缝、厚层石盐的优质封盖作用造就了英西地区特殊的成藏模式和“满凹含油”、“井井见油”的油气富集格局。“蚂蚁追踪”裂缝预测成果和岩心观察成果均证实了英西盐下油层组的裂缝十分发育,且存在异常超压,为油气高产主控因素。

参 考 文 献

- [1] 黄成刚,袁剑英,曹正林,等. 咸化湖盆储集层中咸水流体与岩石矿物相互作用实验模拟研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(2): 343-348.
HUANG Chenggang, YUAN Jianying, CAO Zhenglin, et al. Simulate experiment study about the saline fluid-rock interaction in the clastic reservoir of the saline Lacustrine Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(2): 343-348.
- [2] 吴丽荣,黄成刚,袁剑英,等. 咸化湖盆高效基岩气藏储层中基质孔

隙的发现及意义[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(4): 54-62.

WU Lirong, HUANG Chenggang, YUAN Jianying, et al. Discovery of matrix pore of high efficiency bedrock gas reservoir in saline basin and its significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(4): 54-62.

- [3] 石亚军,曹正林,张小军,等. 大型高原内陆咸化湖盆油气特殊成藏条件分析及勘探意义:以柴达木盆地柴西地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 577-583.

SHI Yajun, CAO Zhenglin, ZHANG Xiaojun, et al. Special reservoir formation conditions and their exploration significance of the large saline lacustrine basin of inland plateau-taking the western Qadam Basin for example[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 577-583.

- [4] 肖传桃,肖胜,叶飞,等. 柴达木盆地昆北—阿拉尔地区坡折带及其对岩性油气藏的控制[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2085-2092.

XIAO Chuantao, XIAO Sheng, YE Fei, et al. Slope-break zone and its controls on lithologic reservoir of Kunbei-Alaer area, Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(11): 2085-2092.

- [5] 付锁堂,张道伟,薛建勤,等. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 672-682.

FU Suotang, ZHANG Daowei, XUE Jianqin, et al. Exploration potential and geological conditions of tight oil in the Qaidam Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 672-682.

- [6] 黄成刚,王建功,吴丽荣,等. 古近系湖相碳酸盐岩储集特征与含油性分析:以柴达木盆地英西地区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 1102-1115.

HUANG Chenggang, WANG Jianguo, WU Lirong, et al. Characteristics of Paleogene lacustrine carbonate reservoirs and oil-bearing property analysis: a case study of the Yingxi area of western Qaidam Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 1102-1115.

- [7] 黄成刚,关新,倪祥龙,等. 柴达木盆地英西地区 E_3^2 咸化湖盆白云

- 岩储集层特征及发育主控因素[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(2): 219-231.
- HUANG Chenggang, GUAN Xin, NI Xianglong, et al. The characteristics and major factors controlling on the E₃² dolomite reservoirs in saline lacustrine basin in the Yingxi area of Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(2): 219-231.
- [8] 黄成刚, 袁剑英, 田光荣, 等. 柴西地区始新统湖相白云岩储层地球化学特征及形成机理[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 230-242.
- HUANG Chenggang, YUAN Jianying, TIAN Guangrong, et al. The geochemical characteristics and formation mechanism of the Eocene lacustrine dolomite reservoirs in the Western Qaidam[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3): 230-242.
- [9] 袁剑英, 黄成刚, 夏青松, 等. 咸化湖盆碳酸盐岩储层特征及孔隙形成机理: 以柴西地区始新统下干柴沟组为例[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 111-126.
- YUAN Jianying, HUANG Chenggang, XIA Qingsong, et al. The characteristics of carbonate reservoir, and formation mechanism of pores in the saline lacustrine basin: a case study of the lower Eocene ganchaigou formation in western Qaidam Basin[J]. *Geological Review*, 2016, 62(1): 111-126.
- [10] YIN An, DANG Yuqi, ZHANG Min, et al. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam basin and its surrounding regions (part 2): wedge tectonics in southern Qaidam basin and the Eastern Kunlun Range[M] // SEARS J W, HARMS T A, EVENCHICK C A. *Whence the Mountains? Inquiries into the Evolution of Orogenic Systems: A Volume in Honor of Raymond A. Price*. New York: Geological Society of America, 2007, 433: 369-390.
- [11] SUN Zhimin, YANG Zhenyu, PEI Junling, et al. Magnetostratigraphy of Paleogene sediments from northern Qaidam basin, China: implications for tectonic uplift and block rotation in northern Tibetan plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(3/4): 635-646. DOI: 10. 1016/j. epsl. 2005. 07. 007.
- [12] 韦一, 张克信, 季军良, 等. 青藏高原柴达木盆地新生代沉积充填速率演化及其对构造隆升的响应[J]. 地质通报, 2013, 32(1): 105-110.
- WEI Yi, ZHANG Kexin, JI Junliang, et al. Cenozoic sedimentation rate evolution of Qaidam Basin in the Tibetan Plateau and its response to the uplift of the plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1): 105-110.
- [13] YUAN Jianying, HUANG Chenggang, ZHAO Fan, et al. Carbon and oxygen isotopic compositions, and palaeoenvironmental significance of saline lacustrine dolomite from the Qaidam Basin, Western China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 135: 596-607. DOI: 10. 1016/j. petrol. 2015. 10. 024.
- [14] TALBOT M R. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 1990, 80(4): 261-279.
- [15] TALBOT M R, KELTS K. Paleolimnological signatures from carbon and oxygen isotopic ratios in carbonates, from organic carbon-rich lacustrine sediments[M] // KATZ B J. *Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs*. Tulsa: AAPG, 1990: 99-112.
- [16] 刘传联, 赵泉鸿, 汪品先. 湖相碳酸盐氧碳同位素的相关性与生油古湖泊类型[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 363-367.
- LIU Chuanlian, ZHAO Quanhong, WANG Pinxian. Correlation between carbon and oxygen isotopic ratios of lacustrine carbonates and types of oil-producing paleolakes[J]. *Geochimica*, 2001, 30(4): 363-367.
- [17] HUANG Chenggang, YUAN Xiaoyu, SONG Chunhui, et al. Characteristics, origin, and role of salt minerals in the process of hydrocarbon accumulation in the saline lacustrine basin of the Yingxi Area, Qaidam, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2017, 32: 1-16.
- [18] 黄成刚, 袁剑英, 吴梁宇, 等. 湖相白云岩成因模式及研究方法探讨[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(2): 7-15.
- HUANG Chenggang, YUAN Jianying, WU Liangyu, et al. Origin and research methods of lacustrine dolomite[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(2): 7-15.
- [19] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 等. 微生物白云岩模式研究进展[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 52-64.
- YOU Xuelian, SUN Shu, ZHU Jingquan, et al. Progress in the study of microbial dolomite model[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 52-64.
- [20] 黄成刚, 崔俊, 关新, 等. 柴达木盆地英西地区 S3-1 井渐新统下干柴沟组储集空间类型[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(2): 255-266.
- HUANG Chenggang, CUI Jun, GUAN Xin, et al. Reservoir space types of oligocene Xiaganchaigou Formation from well S3-1 in Yingxi Area of Qaidam Basin, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(2): 255-266.
- [21] 袁剑英, 黄成刚, 曹正林, 等. 咸化湖盆白云岩碳氧同位素特征及古环境意义——以柴西地区始新统下干柴沟组为例[J]. 地球化学, 2017, 44(3): 254-266.
- YUAN Jianying, HUANG Chenggang, CAO Zhenglin, et al. The Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Saline Lacustrine Dolomite and Palaeoenvironmental significance: a Case Study of the Lower Eocene Ganchaigou Formation in Western Qaidam Basin[J]. *Geochemistry*, 2017, 44(3): 254-266.
- [22] 付锁堂, 马达德, 郭召杰, 等. 柴达木走滑叠合盆地及其控油气作用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 712-722.
- FU Suotang, MA Dade, GUO Zhaojie, et al. Strike-slip superimposed Qaidam Basin and its control on oil and gas accumulation, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 712-722.
- [23] 施辉, 刘震, 连良达, 等. 高原咸化湖盆岩性油气藏富集规律: 以柴达木盆地西南区为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 701-711.
- SHI Hui, LIU Zhen, LIAN Liangda, et al. Enrichment regularity of lithologic reservoirs in Plateau saline lacustrine basin: taking the Southwestern Qaidam Basin for example[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(4): 701-711.
- [24] CAO Z, WEI Z, LIN C, et al. The kinetics of oil generation in a saline basin: a case study of the source rock of tertiary in Zha-haquan Depression, Qaidam Basin, China[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2014, 32(21): 2648-2657. DOI: 10. 1080/10916466. 2014. 913623.
- [25] 文华国, 郑荣才, QING Hairuo, 等. 青藏高原北缘酒泉盆地青西凹陷白垩系湖相热水沉积原生白云岩[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 591-604.
- WEN Huaguo, ZHENG Rongcai, QING Hairuo, et al. Primary dolostone related to the Cretaceous lacustrine hydrothermal sedimentation in Qingxi sag, Jiuquan Basin on the northern Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(12): 2080-2093.
- [26] 周传明, 张俊明, 李国祥, 等. 云南永善肖滩早寒武世早期碳同位素记录[J]. 地质科学, 1997, 32(2): 201-211.
- ZHOU Chuanming, ZHANG Junming, LI Guoxiang, et al. Carbon and oxygen isotopic record of the early Cambrian from the Xiaotan Section, Yunnan, South China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1997, 32(2): 201-211.

- [27] TAYLOR R, MCLENAN S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. London: Blackwell, 1985: 57-72.
- [28] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 18-31.
DENG Hongwen, QIAN Kai. Sedimentary geochemistry and environmental analysis[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 18-31.
- [29] 叶爱娟, 朱扬明. 柴达木盆地第三系咸水湖相生油岩古沉积环境地球化学特征[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(5): 472-480.
YE Aijuan, ZHU Yangming. Geochemical and sedimentary features of tertiary saline lacustrine source rocks in Qaidam Basin[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, 37(5): 472-480.
- [30] 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 125-142.
SUN Zhencheng, YANG Fan, ZHANG Zhihuan, et al. Sedimentary environments and hydrocarbon generation of cenozoic salinized lakes in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 125-142.
- [31] 冯洪真, 俞剑华, 方一亭, 等. 五峰期上扬子海古盐度分析[J]. 地层学杂志, 1993, 17(3): 179-185.
FENG Hongzhen, YU Jianhua, FANG Yiting, et al. Analysis of paleosalinity during the Wufeng age in Upper Yangtze Sea[J]. Journal of Stratigraphy, 1993, 17(3): 179-185.
- [32] 李兴远, 周永章, 安燕飞, 等. 钦—杭成矿带南段丰村铅锌矿区下园垌矿段围岩微量元素地球化学特征及其意义[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 131-143.
LI Xingyuan, ZHOU Yongzhang, AN Yanfei, et al. Geochemical characteristics of trace elements and their implications for the Xiayuanlong ore section of Fengcun lead-zinc deposits in Qingzhou-Hangzhou metallogenic belt[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 131-143.
- [33] 赵振华. 铕(Eu)地球化学特征的控制因素[J]. 南京大学学报: 地球科学版, 1993, 5(3): 271-280.
ZHAO Zhenhua. Geochemical characteristics of the control factor of the Eu[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 1993, 5(3): 271-280.
- [34] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [35] 李乐, 姚光庆. 讨论: 青藏高原北缘酒泉盆地青西凹陷白垩系湖相热水沉积原生白云岩[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(3): 406-410.
LI Le, YAO Guangqing. Primary dolostone related to the Cretaceous lacustrine hydrothermal sedimentation in Qingxi sag, Jiuquan Basin on the northern Tibetan Plateau: Discussion[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 59(4): 866-870.
- [36] 王中刚. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
WANG Zhonggang. Geochemistry of rare earth element[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [37] KUČERA J, CEMPÍREK J, DOLNÍČEK Z, et al. Rare earth elements and yttrium geochemistry of dolomite from post-Variscan vein-type mineralization of the Nizký Jeseník and Upper Silesian Basins, Czech Republic[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 103(2/3): 69-79.
- [38] TANG Haoshu, CHEN Yanjing, SANTOSH M, et al. REE geochemistry of carbonates from the Guanmenshan Formation, Liaohé Group, NE Sino-Korean Craton: implications for seawater compositional change during the Great Oxidation Event[J]. Precambrian Research, 2013, 227: 316-336.
- [39] HENDERSON P. Rare earth element geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 52-71.
- [40] GAO S, WEDEPOHL K H. The negative Eu anomaly in Archean sedimentary rocks: Implications for decomposition, age and importance of their granitic sources[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 133(1/2): 81-94.
- [41] 卓勤功, 赵孟军, 李勇, 等. 膏盐岩盖层封闭性动态演化特征与油气成藏: 以库车前陆盆地冲断带为例[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 847-856.
ZHUO Qingong, ZHAO Mengjun, LI Yong, et al. Dynamic sealing evolution and hydrocarbon accumulation of evaporite cap rocks: an example from Kuqa foreland basin thrust belt[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5): 847-856.
- [42] 赵孟军, 鲁雪松, 卓勤功, 等. 库车前陆盆地油气成藏特征与分布规律[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 395-404.
ZHAO Mengjun, LU Xuesong, ZHUO Qingong, et al. Characteristics and distribution law of hydrocarbon accumulation in Kuqa foreland basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 395-404.
- [43] 黄成刚, 倪祥龙, 马新民, 等. 致密湖相碳酸盐岩油气富集模式及稳产、高产主控因素——以柴达木盆地英西地区为例[J]. 西北大学学报自然科学版, 2017, 47(5): 724-738.
HUANG Chenggang, NI Xianglong, MA Xinming, et al. Petroleum and gas enrichment pattern and major controlling factors of stable and high production of tight lacustrine carbonate rock reservoirs: a case study of the Yingxi area in Qaidam Basin[J]. Journal of northwestern university, 2017, 47(5): 724-738.
- [44] 国家能源局. SY/T 6285-2011 油气储层评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
National Energy Administration. SY/T 6285-2011 Evaluating methods of oil and gas reservoirs[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [45] 高树生, 胡志明, 刘华勋, 等. 不同岩性储层的微观孔隙特征[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 248-256.
GAO Shusheng, HU Zhiming, LIU Huaxun, et al. Microscopic pore characteristics of different lithological reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 248-256.
- [46] 杜江民, 张小莉, 王青春, 等. 柴达木盆地英西地区 E₃² 储层裂缝发育特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(4): 452-458.
DU Jiangmin, ZHANG Xiaoli, WANG Qingchun, et al. Characteristics of the fractures of E₃² reservoir in Yingxi Area, Qaidam Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2017, 53(4): 452-458.
- [47] 王珂, 张惠良, 张荣虎, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征及影响因素: 以塔里木盆地克深 2 气田为例[J]. 石油学报, 2016, 37(6): 715-727.
WANG Ke, ZHANG Huiliang, ZHANG Ronghu, et al. Characteristics and influencing factors of ultra-deep tight sandstone reservoir structural fracture: a case study of Keshen-2 gas field, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 715-727.
- [48] 王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 等. 渝东南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征与主控因素[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 832-845.
WANG Ruyue, DING Wenlong, GONG Dajian, et al. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation, southeastern Chongqing-northern Guizhou area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7): 832-845.