

## 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

黄成刚<sup>1,2</sup>, 崔俊<sup>3</sup>, 关新<sup>4</sup>, 常海燕<sup>2</sup>, 杨森<sup>1</sup>, 惠媛媛<sup>1</sup>, 吴梁宇<sup>1</sup>, 吴丽荣<sup>1</sup>

(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; 4. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

**摘要:**近年来,柴达木盆地英西地区渐新统下干柴沟组的油气勘探取得了重大发现,但其主要储集空间类型一直是争论的焦点。基于对 S3-1 井的岩芯观察和系统的微观岩石学、结构学特征研究,总结出其主要储集空间类型为白云石晶间孔,而非溶蚀孔。其主要证据包括:①高沉积速率的暗色层段难以发生暴露溶蚀;②白云石为岩石最重要的矿物组分之一;③场发射扫描电镜下可见棱角状晶间孔广泛发育;④岩芯上观察到的孔洞系统在偏光显微镜下可见其均发育于裂缝之中,为盐类矿物结晶所致,非溶蚀而成;⑤“特低孔-特低渗”的物性特征;⑥较高的排驱压力、较小的连通孔隙半径以及极低的退汞效率;⑦荧光显微镜下表现为整体发光特征。这些发育极广的基质孔隙储油是英西地区亿吨级油田高产稳产的主控因素之一,研究结果对下一步勘探部署具有重要的指导意义。

**关键词:**白云石晶间孔;溶蚀孔;下干柴沟组;特低孔-特低渗;动力学屏障;准同生交代;英西油田;柴达木盆地

**中图分类号:**P618.130.2<sup>+</sup>1;TE122.2 **文献标志码:**A

## Reservoir Space Types of Oligocene Xiaganchaigou Formation from Well S3-1 in Yingxi Area of Qaidam Basin, China

HUANG Cheng-gang<sup>1,2</sup>, CUI Jun<sup>3</sup>, GUAN Xin<sup>4</sup>, CHANG Hai-yan<sup>2</sup>, YANG Sen<sup>1</sup>,  
HUI Yuan-yuan<sup>1</sup>, WU Liang-yu<sup>1</sup>, WU Li-rong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Reservoir Description of CNPC, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Northwest Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736202, Gansu, China; 4. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

**Abstract:** In recent years, there is important discovery for oil and gas exploration of Oligocene Xiaganchaigou Formation in Yingxi area of Qaidam Basin. However, the main reservoir space types have been debated over. Based on core observation and systematically study of the micro petrological and structural characteristics of Well S3-1, the main reservoir space types were concluded. The results show that the main reservoir space types are intercrystalline pores of dolomite rather than dissolution pores. The main evidences include that the dark layers with high

收稿日期:2017-01-13

基金项目:国家科技重大专项项目(2016ZX05003-006);中国石油重大科技专项项目(2011E-03)

作者简介:黄成刚(1979-),男,湖北荆州人,中国石油勘探开发研究院西北分院高级工程师,E-mail:12664018@qq.com。

deposition rate are difficult for exposure and dissolution; dolomite is one of the most important minerals in rocks; under the field emission scanning electron microscope, the angular intercrystalline pores widely develop; because of the crystallization of salt minerals, not dissolution, the pores and holes observed in core are all in the fractures under the polarized microscope; the physical characteristic is “extra low porosity-extra low permeability”; the displacement pressure is high, the pore throat radius is small, and the efficiency of mercury withdrawal is very low; the characteristics under fluorescence microscopy is whole. Oil-bearing matrix porosity widely develop, so that it is one of the main control factors of large oilfield with high and stable yield in Yingxi area; the results have important guide for the further exploration.

**Key words:** intercrystalline pore of dolomite; dissolution pore; Xiaganchaigou Formation; extra low porosity-extra low permeability; kinetics barrier; penecontemporaneous metasomatism; Yingxi oilfield; Qaidam Basin

## 0 引言

柴达木盆地位于青藏高原北麓,自新生代以来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<sup>[1]</sup>。其气候条件恶劣,荒无人烟,油气勘探沉寂了近 30 年后,于近年来取得了令人瞩目的勘探实效。2014~2015 年,S37 井、S38 井、S41 井、S42 井、S43 井、S45 井、S201 井、S32-3 井、S202 井、S1-2 井等均获得工业油流,2016 年 6 月,S205 井在渐新统下干柴沟组( $E_3^1$ )盐下 IV 油层组获得日产油超过 700 t,日产天然气超过  $7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,随后其日产量稳步增长,不久超过了千吨大关。

在英西油田的开采历程中,也出现了“部分油井持续高产”、“部分油井持续低产”、“部分油井短期产量高但衰减极快”等多种复杂情况。储集层的储集空间类型一直是争论的焦点问题之一。究竟是以孔径较小但规模极大的基质晶间孔为主,还是以孔径较大但非均质性较强的溶蚀孔为主?其直接决定了后续油气开采潜力。中国石油青海油田公司勘探开发研究院曾经以“英西油田 S3-1 井发现大量溶蚀孔洞”为题在官方网站上做了特别报道,推测岩芯表面肉眼可见的厘米级溶蚀孔洞可能为其主要储集空间类型。本文通过对 S3-1 井岩芯进行系统的实验室分析(包括偏光显微镜鉴定、物性测试、毛管压力曲线分析、X 射线衍射全岩矿物含量分析、氩离子抛光后场发射扫描电镜研究、能谱成分分析以及荧光显微镜分析),详细阐述了该井的主要储集空间类型及特征,以期对深入剖析亿吨级英西油田的高产稳产主控因素和下一步勘探部署提供参考。

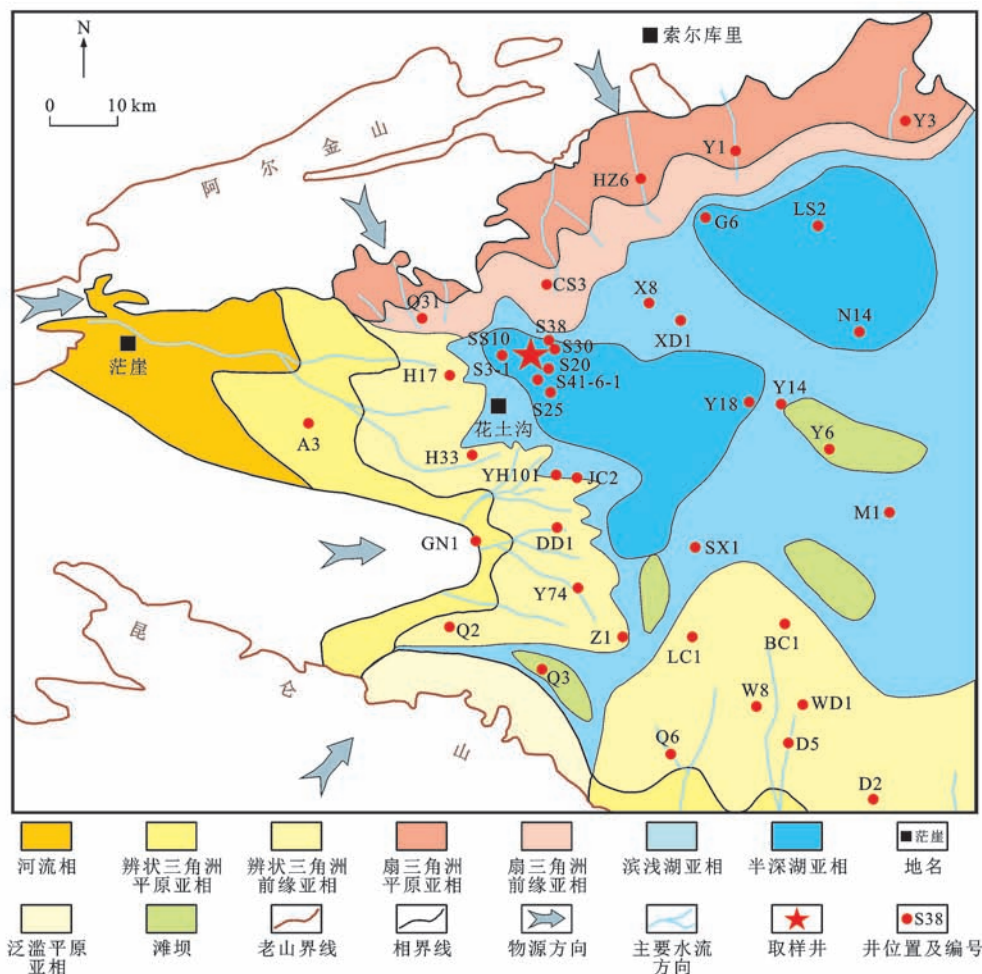
## 1 沉积背景

英西地区渐新统为典型的高原咸化湖盆沉积<sup>[2-14]</sup>。渐新世早期( $E_3^1$ )湖水面积逐渐扩大,沉积中心分布在七个泉—英西—扎哈泉一带,其周缘大面积发育辫状三角洲沉积和扇三角洲沉积,渐新世晚期湖水面积进一步扩大,并逐渐向东迁移,此时几乎全盆地均接受大面积沉积,沉积中心迁移至七个泉—英西—茫崖一带<sup>[15]</sup>。因此,英西地区在渐新世一直是湖相沉积中心区域(图 1),沉积物粒度普遍较细,且现今埋藏较深,储层较为致密。

英西地区沉积背景决定了该地区发生暴露溶蚀的几率极小。主要理由有:①研究区地震剖面解释成果表明,渐新统下干柴沟组(28.5~34.0 Ma)<sup>[16-17]</sup>最厚处沉积超过 2 600 m,由此可推算出其沉积速率高达  $472.7 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$ (如果后期发生了沉积间断或剥蚀作用则该值会更高),远高于柴达木盆地其他地区的沉积速率峰值( $210 \sim 320 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$ )<sup>[18]</sup>;②柴西地区富油气凹陷的主要源岩来自于渐新统下干柴沟组层段<sup>[4,19]</sup>;③整体上,渐新统下干柴沟组岩性以还原环境的暗色色调为主,含白色盐类矿物晶体,未见红色等氧化环境标志,岩性为混积碳酸盐岩、泥岩以及少量细粒碎屑岩,为半深湖相沉积。

## 2 岩性特征

S3-1 井取芯两次,共获得 17.50 m 的岩芯。第一次取芯深度为 4 365.45~4 374.69 m,芯长 8.50 m;第二次取芯深度为 4 374.69~4 383.80 m,芯长 9.00 m,层位上属于渐新统下干柴沟组 IV 油层组。油田生产部门将英西地区渐新统下干柴沟组自上而下划分为 I、II、III、IV、V、VI 等 6 个油层组,其中



图件引自文献[8],有所修改

图1 柴达木盆地英西地区渐新统沉积相

Fig. 1 Sedimentary Facies of Oligocene in Yingxi Area of Qaidam Basin

I、II、III油层组属于“盐间油层组”,埋深为2 400~3 700 m,IV、V、VI油层组属于“盐下油层组”,埋深为3 700~5 000 m。用肉眼观察岩芯可知,岩石普遍较为致密[图2(a)~(f)]。获取的17.50 m岩芯仅有0.10 m可见明显的孔洞发育[图2(g)],部分含内碎屑[图2(b)],裂缝中充填盐类矿物[图2(c)~(e)],X射线衍射分析结果显示盐类矿物主要包括石膏和钙芒硝,部分裂缝被完全充填(图2(d)~(e)),部分裂缝为半充填状态,发育孔洞系统[图2(c)]。在岩芯剖切过程中,钢锯与岩石摩擦产生的高温状态下,水对盐类矿物的溶蚀作用明显,极易造成岩石本身的孔洞被人为加大的现象,给研究者带来溶蚀孔洞极其发育的错觉[图2(g)]。利用水切法将圆柱体岩芯从正中间一分为二后可见数毫米的大孔洞,而利用液氮干切后,同一位置的孔洞明显变小[图2(h)],且其并非溶蚀作用形成的溶蚀孔洞,而是未被完全充填的裂缝[图2(i)]。偏光显微镜下

的研究成果进一步证实了上述推论(图3)。

通过对英西地区S3-1井渐新统下干柴沟组主要储集岩中22个样品进行X射线衍射全岩矿物含量分析(表1),得到样品矿物种类为石英(平均含量(质量分数,下同)为14.5%)、钾长石(1.1%)、斜长石(8.1%)、方解石(15.3%)、白云石(4.5%)、菱铁矿(3.0%)、石盐(1.3%)、黄铁矿(2.3%)、赤铁矿(0.4%)、重晶石(0.1%)、硬石膏(1.7%)、钙芒硝(5.3%)、锐钛矿(0.3%)、铁白云石(23.4%)和黏土矿物(14.8%)等。统计结果显示,碳酸盐岩平均含量约为46.2%,陆源碎屑(粉砂)平均含量约为24.0%,黏土矿物平均含量约为14.8%,样品具有混积成因特征。按照混积岩的分类命名法则<sup>[2,5-6,20-23]</sup>,可将绝大多数样品划归为碳酸盐岩。

前人对混积岩的分类和命名存在一定的差异性。Mount曾采用立体四面体(硅质碎屑砂、粉砂黏土混合泥、碳酸盐异化粒和灰泥)的四分法进行分



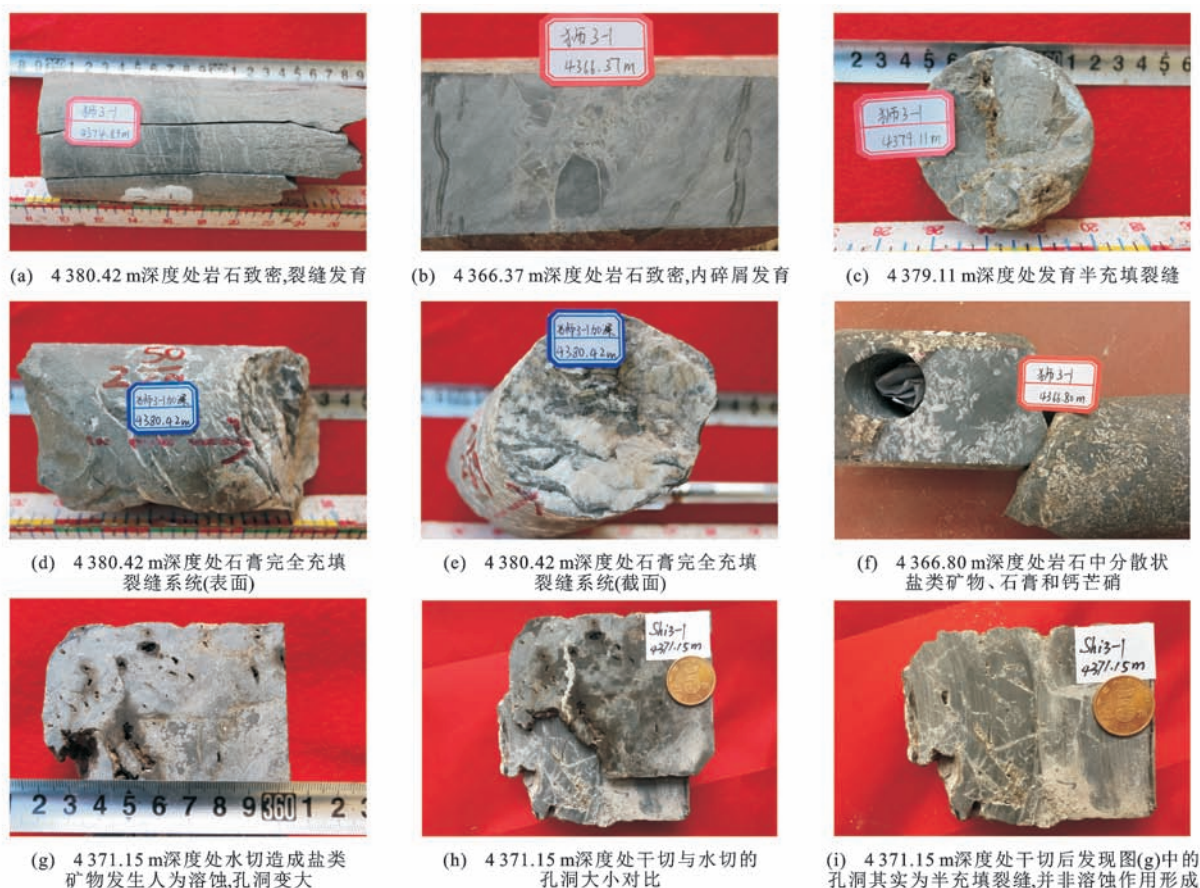


图 2 储集层岩芯照片

Fig. 2 Core Photographs of Reservoirs

类和命名<sup>[20]</sup>,但难以在平面图上展示;杨朝青等提出了三分法的划分方案,由陆源碎屑、碳酸盐(颗粒或灰泥,但不包括胶结物)和黏土 3 个端元组成三角分类图<sup>[21]</sup>,将组分落在碳酸盐含量大于 25%、陆源碎屑含量大于 10% 范围内的岩石称作混积岩,然后根据岩石中各组分的含量及结构,按常规方法在主名前加前缀作进一步描述;张雄华也提出了类似的三分法,将黏土、陆源碎屑和碳酸盐作为混积岩分类命名的 3 个端元<sup>[22]</sup>,其中黏土含量大于 50% 的称为黏土岩,碳酸盐含量或陆源碎屑含量为 5%~95% 的混合沉积物称为混积岩,并将混积岩分为 4 类(含陆源碎屑碳酸盐混积岩、陆源碎屑质碳酸盐混积岩、含碳酸盐陆源碎屑混积岩和碳酸盐质陆源碎屑混积岩),考虑陆源碎屑的粒级、成分和碳酸盐成分,可进一步加前缀。

本文根据前人在柴达木盆地的研究,采用较为通俗易懂、可操作性强的划分方案<sup>[2,5-6,23]</sup>,即将泥质总量、陆源碎屑颗粒和泥晶碳酸盐(研究区均为泥晶结构)作为混积岩分类命名的 3 个端元,将相对含量最多的端元定为主名,其余两个端元则根据岩石“三

级命名法”确定为前缀,将含量在 25%~50% 范围内的定为“质”,将含量在 10%~25% 范围内的定为“含”,如果主名为碳酸盐岩则根据方解石和白云石相对含量多少进一步划分为灰岩或白云岩。因此,在混积岩命名中,部分样品的白云石含量低于 50%,但仍然是最多的岩石端元组分,可能也被定名为白云岩,但其白云石含量必须高于 33.3%。

### 3 物性与孔隙结构特征

#### 3.1 孔隙类型

铸体薄片可见大量淡蓝色环氧树脂被注入到岩石微孔隙中[图 3(a)]。在沉积控制作用下,孔隙随岩性结构构造特征亦呈条带状分布。这些孔径极小的微孔几乎超过了偏光显微镜的分辨能力,隐约可见淡蓝色环氧树脂呈弥散状分布[图 3(b)、(c)],难以识别。但经氦离子抛光后放置于场发射扫描电镜下放大数万倍后,孔隙形貌清晰可见,具有明显的棱角状,为典型的白云石晶间孔孔隙模式[图 3(d)~(l)],经能谱成分分析确认孔隙边缘矿物为  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 。

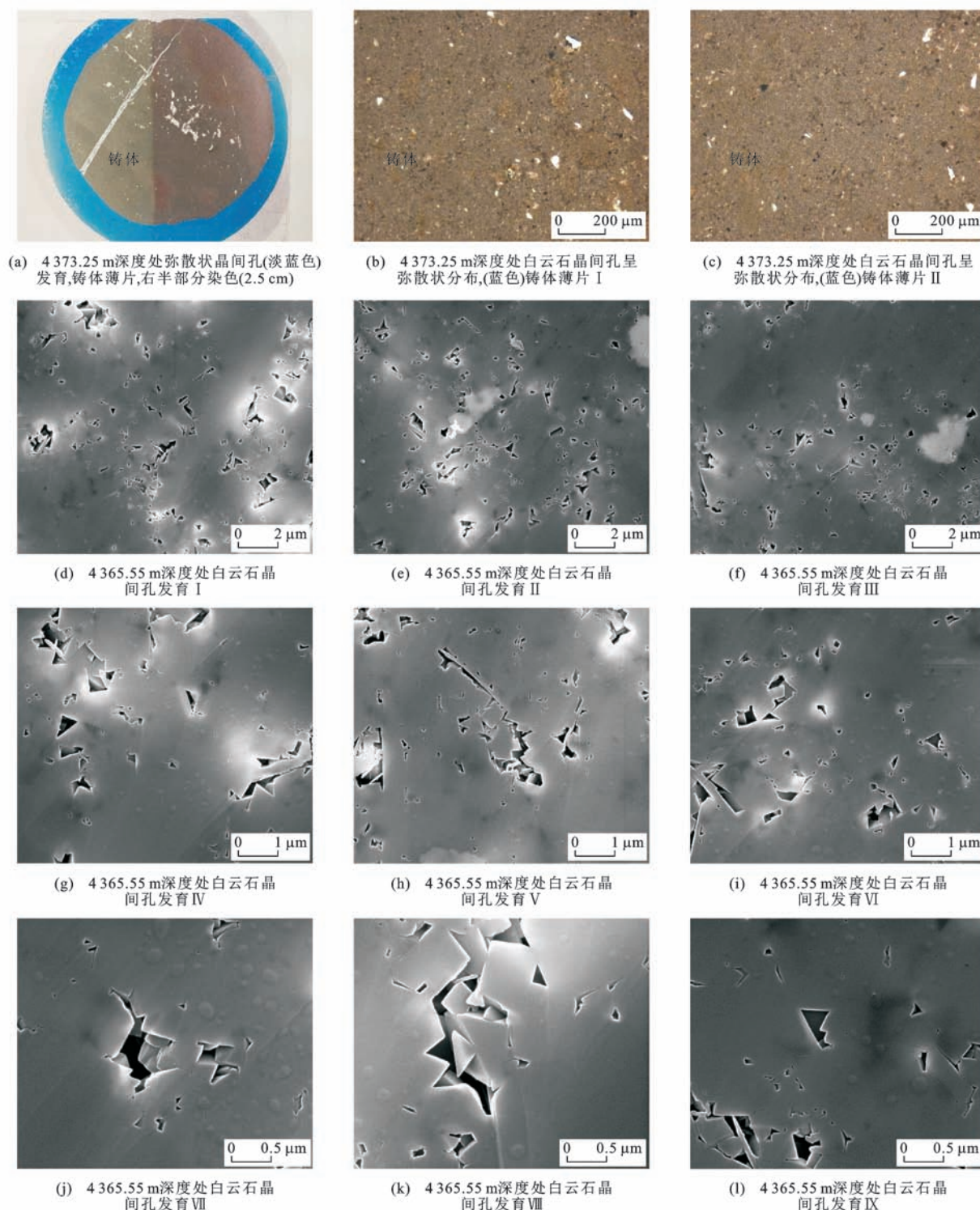


图3 白云石晶间孔微观特征

Fig. 3 Microscopic Features of Intercrystalline Pores of Dolomite

通过偏光显微镜鉴定与能谱成分分析可知,岩芯中大量裂缝充填物为硬石膏和钙芒硝,其主要成分分别为  $\text{CaSO}_4$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ 。铸体薄片显示,这些裂缝并未被完全充填,而是存在一定的储集空间,呈规则状,可推测为在构造应力作用下形成的裂缝被咸化湖盆中的盐水灌注胶结所致,不排除存

在后期少量的微弱溶蚀改造作用,但未见大量溶蚀作用形成的不规则港湾状,且这些显而易见的孔隙仅存在于裂缝之中,连通性较差(图4)。

### 3.2 物性特征

25个样品的物性分析结果显示(表2):最小孔隙度为0.33%,最大孔隙度为4.85%,平均为1.94%;



表 1 储集岩 X 射线衍射全岩矿物含量分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Whole-rock Mineral Contents of Reservoir Rocks by X-ray Diffraction

%

样品编号	深度/m	岩性	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	石盐	黄铁矿	赤铁矿	重晶石	硬石膏	钙芒硝	锐钛矿	铁白云石	黏土矿物
S3-1-2	4 366.28	钙质粉砂岩	23.3	2.2	12.7	17.8			1.4	2.9					1.3	20.5	18.0
S3-1-3	4 366.80	白云岩	9.7	0.7	5.1	10.0	20.2	17.5	0.6	2.9		0.4	0.6	3.1		20.1	9.0
S3-1-4	4 367.11	云质粉砂岩	20.0	1.2	13.2	6.5			1.6	2.6			1.0			27.5	26.3
S3-1-6	4 368.70	粉砂质白云岩	15.0	1.5	9.8	5.9			1.5	4.7			6.1	2.5		34.4	18.6
S3-1-7	4 369.35	白云岩	13.8	0.7	8.2	4.5		13.1	0.6	4.0	3.7			1.1	0.6	41.2	8.4
S3-1-8	4 369.55	碳酸盐岩	11.5	0.5		34.1		12.2				0.6	0.6	34.9			5.7
S3-1-9	4 369.70	碳酸盐岩	13.5	1.1	9.7	25.1		4.1		1.4			0.9	10.8		13.2	20.2
S3-1-11	4 369.95	粉砂质碳酸盐岩	15.5	1.0	9.9	15.6		0.4	2.1				5.0	0.5		26.4	23.7
S3-1-14	4 371.25	粉砂质碳酸盐岩	14.0	0.4	12.9	8.0		4.2	1.5	3.6			0.6	15.1		26.0	13.8
S3-1-16	4 371.95	白云岩	14.3	0.9	8.7	23.3	20.2		0.7	2.0			0.5			15.7	13.7
S3-1-17	4 372.28	钙芒硝	2.4			3.2		6.6						78.4		9.3	
S3-1-18	4 372.88	碳酸盐岩	13.7	0.7	6.2	49.9			0.9	1.0			3.2			7.6	14.4
S3-1-19	4 373.25	白云岩	6.8	0.5		5.5	20.3	8.3		1.6			0.3	33.8		17.1	5.8
S3-1-21	4 374.99	粉砂质碳酸盐岩	19.0	1.7	7.8	32.6			1.4	3.1			0.8		1.6	12.1	19.9
S3-1-23	4 376.63	白云岩	11.8	1.1	8.0	15.9			2.1	4.3	3.2			0.8		43.3	9.5
S3-1-25	4 377.44	白云岩	9.7	0.4	4.1	18.0			1.4	3.1	2.7	0.5				47.5	12.7
S3-1-27	4 377.84	钙质粉砂岩	23.5	1.8	7.5	11.6			1.0	1.8			3.8			17.0	32.1
S3-1-28	4 378.63	粉砂岩	33.3	3.2	10.3	5.5			9.7	1.5				11.7		8.1	11.6
S3-1-29	4 378.76	钙质粉砂岩	23.1	1.1	17.5	21.1	7.5		1.5	2.4			3.6	1.5			20.6
S3-1-37	4 365.55	白云岩	7.6	0.7	7.6	9.4			0.5	4.9			1.8		2.4	52.0	13.0
S3-1-38	4 371.15	粉砂质白云岩	11.7	1.7	12.6	6.9		0.2	0.4	3.0			2.9	1.2		39.2	20.3
S3-1-39	4 373.25	白云岩	6.5	0.4	5.4	6.8	29.8		0.4			0.4	6.2			35.9	7.9

大多数样品的渗透率低于仪器的检出限 ( $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 最大渗透率为  $1.355 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。依照石油天然气行业标准《油气储层评价方法》(SY/T 6285—2011) 中碳酸盐岩储层孔隙度、渗透率类型划分标准<sup>[24]</sup>, 其可划归为“特低孔-特低渗”型储层。在岩性上与研究区较为相近的准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组白云(灰)岩类储层亦形成于咸化湖泊沉积环境, 其 97 块样品的平均覆压孔隙度为 10.8%, 覆压渗透率为  $(0.001 \sim 0.600) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 较大的孔隙度主要得益于溶蚀孔的广泛发育, 包括碳酸盐组分和碎屑组分的溶蚀<sup>[25]</sup>。S3-1 井样品如此低的孔隙度说明岩石中溶蚀孔隙不太发育, 结合偏光显微镜下规则的孔隙边缘形貌可以推测, 大多数孔隙主要为盐类矿物结晶所致, 非溶蚀孔洞, 当然

也可能存在一种现象: 后期裂缝中的盐类矿物因结晶作用产生了一定储集空间, 从而提供了酸性流体的运移通道, 酸性流体进入后对已经存在的孔隙边缘再次进行微弱溶蚀改造, 这种酸性流体产生于与储集层共生的烃源岩中。袁剑英等研究认为英西地区渐新统下干柴沟组不仅发育优质“甜点”白云质岩类储层, 而且是全区最重要的烃源岩发育层段, 有机碳平均含量为 0.64%, 最大可达 1.98%<sup>[4-6]</sup>。

远光辉等系统计算了单位质量干酪根的生酸潜力及其增孔能力, 认为在缺少断层和不整合等优势运移通道时有机酸溶蚀碳酸盐矿物的能力有限, 对储集层所能增加的最大次生孔隙度为 1.54%~2.56%; 不认可部分学者将中深层异常高孔隙度储层中大量的粒间孔隙猜测为早期碳酸盐胶结物完全

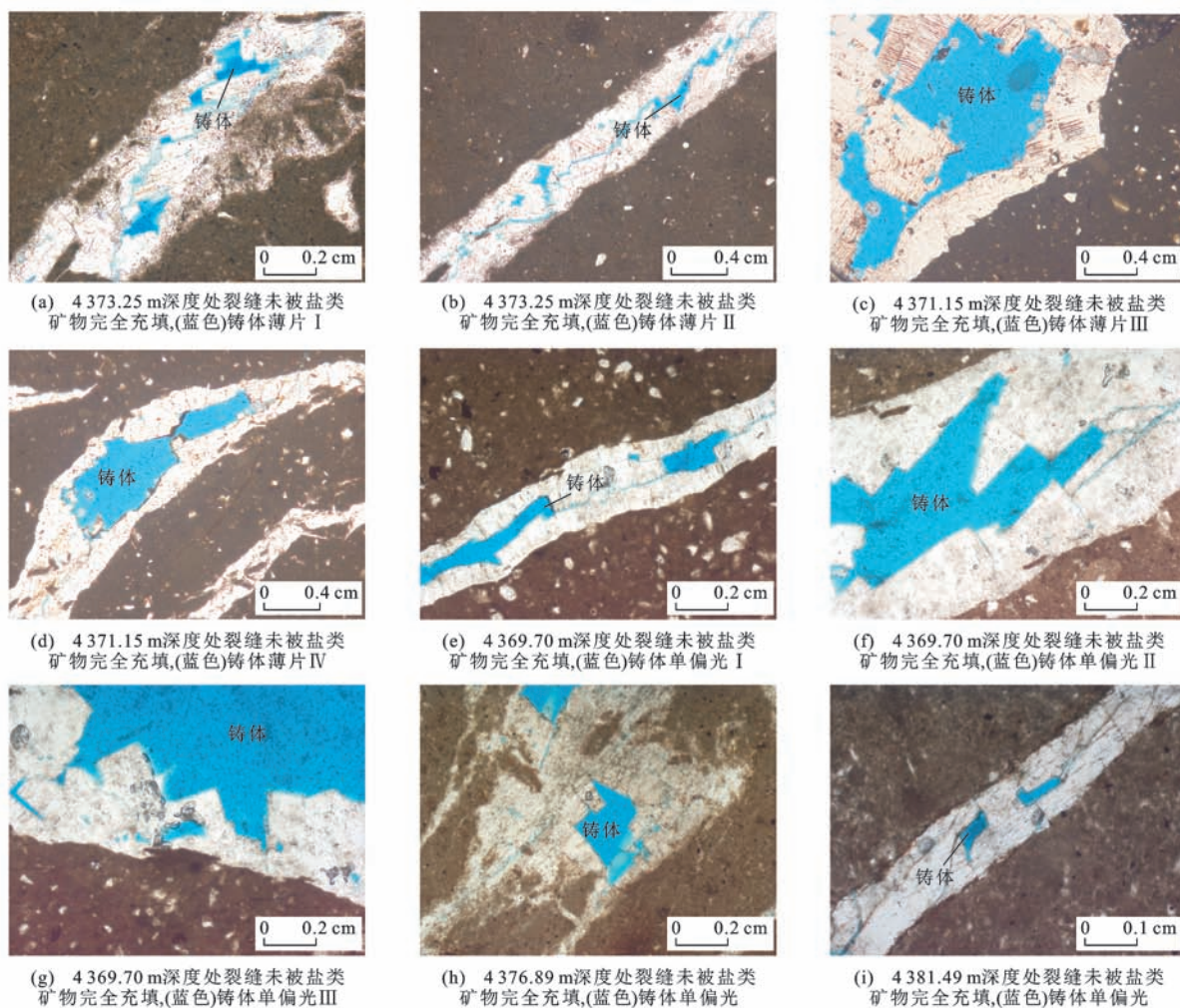


图4 储集层半充填裂缝微观特征

Fig. 4 Microscopic Features of Incompletely Filled Fractures of Reservoirs

溶蚀而成的观点,但承认有机酸溶蚀铝硅酸盐碎屑矿物能够产生大量的次生孔隙,大约能产生4.49%~7.48%的增孔量<sup>[26]</sup>。黄思静等通过对鄂尔多斯盆地三叠系延长组储集层特征研究认为,大气水对碎屑岩的溶蚀可以使之达到9%~15%的孔隙度,增孔效果显著<sup>[27]</sup>。综上所述,有机酸对碳酸盐矿物的溶蚀即便存在也是微弱的,但碎屑矿物的被溶蚀(无论是有机酸溶蚀还是大气水溶蚀),均可产生较大的增孔量。

在英西地区 S3-1 井渐新统下干柴沟组白云岩储集层中,偶尔可见白云石晶间孔被弱溶蚀改造的现象,在放大 50 000 倍的场发射扫描电镜下可见少量碳酸盐矿物被溶蚀成港湾状[图 5(a)],对数百纳米的晶间孔具有一定的溶蚀加大作用。这类溶蚀往往发育于与烃源岩共生的储集层中,为有机酸溶蚀,但并未见强烈溶蚀成肉眼可见的毫米级或厘米级孔洞。与基质碳酸盐岩混积的碎屑

组分也未见孔隙发育[图 5(b)],即使是最易发生溶蚀的长石在放大 10 000 倍的场发射扫描电镜下也未见溶蚀。

### 3.3 孔隙结构特征

从压汞法毛管压力曲线分析结果可以得出,5 个样品的最大进汞饱和度分别为 85.74%、76.67%、65.27%、35.16%和 31.61%,对应的排驱压力分别为 2.58、33.79、23.31、74.48、21.38 MPa,对应的最大连通喉道半径分别为 0.285、0.022、0.032、0.010、0.034  $\mu\text{m}$ (图 6)。毛管压力曲线具有以下特征:①样品非均质性强,部分样品进汞饱和度较高,部分较低,与岩芯柱钻取过程中是否钻遇白云石发育层段有关;②排驱压力普遍较高,除 1 个样品外,普遍在数十兆帕以上,孔径较小;③退汞效率普遍极低,最大连通喉道半径普遍较小。这些特征主要受控于场发射扫描电镜下观察到的孔径极小的白云石晶间孔。

表 2 储集层物性分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Physical Property of Reservoirs

深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
4 365.55	2.28	—
4 366.28	0.48	0.073
4 366.80	1.88	—
4 367.11	1.17	—
4 368.30	2.47	—
4 368.70	1.22	—
4 369.55	2.07	0.284
4 369.70	2.48	1.355
4 369.87	1.04	—
4 369.95	3.16	—
4 370.19	0.43	—
4 370.84	0.65	—
4 371.75	3.56	—
4 372.28	4.67	0.020
4 372.88	2.31	0.014
4 373.25	4.85	—
4 373.91	0.74	—
4 375.64	4.18	—
4 376.63	1.56	0.021
4 376.89	2.11	—
4 377.59	0.98	0.193
4 380.02	0.48	0.192
4 380.42	0.33	—
4 382.26	1.59	0.018
4 382.37	1.71	—

注：“—”表示低于检测下限。

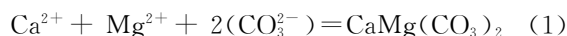
#### 4 晶间孔含油的荧光特征

从荧光显微镜分析结果可以得出,英西地区白云石晶间孔含油与扎哈泉地区碎屑岩粒间孔或溶蚀孔含油具有完全不同的荧光特征(图 7)。白云石晶间孔含油在荧光显微镜下呈整体发光特征,因弥散状的晶间孔广泛分布,孔径极小但数量巨大,显微镜下呈现整体含油特征[图 7(d)、(e)];而扎哈泉地区碎屑岩粒间孔或溶蚀孔含油在荧光显微镜下呈局部发光特征,碎屑颗粒(如石英内部)无孔隙不含油,镜下呈黑色不发光特征,仅在含油部位的粒间或粒内溶孔处具有发荧光特征[图 7(c)、(f)]。

#### 5 晶间孔成因机制探讨

探讨白云石晶间孔的成因机制,首先要弄清楚

白云岩成因,这一直是争论的焦点问题之一。其主要形成机理的化学反应式为



如果按照反应式(1)直接沉淀白云石,Hsu 估算其平衡常数为  $1.0 \times 10^{-17}$ <sup>[28]</sup>,后来 Hardie 将其修正为  $1.0 \times 10^{-16.5}$ <sup>[29]</sup>;如果按照反应式(2)先生成灰岩,再被  $\text{Mg}^{2+}$  交代为白云石,其平衡常数为 0.67,当平衡常数大于 0.67 时,这个反应会向右进行。海水具有充足的  $\text{Ca}^{2+}$  (含量为  $411 \times 10^{-6}$ ,或浓度为  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和  $\text{Mg}^{2+}$  (含量为  $1\,290 \times 10^{-6}$ ,或浓度为  $0.052 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ );通过计算可得 Mg 与 Ca 质量比为 3.14,摩尔比为 5.2<sup>[30]</sup>,按照常理来说,它应该有能力在地球表面或邻近地球表面形成大量广泛分布的沉积白云岩<sup>[31-32]</sup>,不仅能直接按照反应式(1)沉淀白云石,而且可以按照反应式(2)使灰岩白云石化。然而,为什么现代海底没有大量白云石产生呢?这可能很大程度上取决于动力学机制的缘故,要想生成大量白云石除了需要具备水体中富含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  的物质基础条件,还需要外界因素克服其动力学屏障<sup>[33]</sup>。

2004 年,Wright 等在有细菌参与的常温常压条件下首次人工合成了具有有序反射的化学计量白云石,表明微生物是克服白云石形成的动力学屏障的外界因素之一<sup>[34]</sup>,后来陆续有实例证实了这一观点<sup>[35-36]</sup>。袁剑英等通过能谱面扫描研究发现藻云岩中的藻纹层分布与 Mg 元素富集处完全重叠<sup>[5]</sup>。

关于柴达木盆地英西地区泥晶白云岩的成因,大量研究成果已经证实了其为准同生交代成因类型。论证的主要依据包括:①储层宏观展布呈成片大规模分布<sup>[6]</sup>;②“孔径小、数量多”的微观孔隙结构特征<sup>[5]</sup>;③Ca 与 Mg 摩尔比值高的非理想状态的成分组成<sup>[5]</sup>;④“低 Mn”元素地球化学特征<sup>[2]</sup>;⑤离散的微量元素蛛网图、不高的稀土元素总含量特征和不具有明显的 Eu 负异常的稀土元素分配模式<sup>[6]</sup>;⑥“碳偏负、氧偏正”的同位素地球化学特征及其反映的低温成因<sup>[4]</sup>;⑦成核结晶速度较快的不稳定环境造成的低有序度结构特征<sup>[2]</sup>。Yuan 等通过同位素推算了研究区平均古盐度为 32.1‰,平均成岩温度为  $26.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (分布在  $15 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  之间)<sup>[3]</sup>。在绝大多数样品未见藻纹层等微生物克服白云石形成的动力学屏障的证据基础上,研究区白云石是如何克服结晶动力学屏障而生成的,目前还缺乏有力的证据和试验模拟数据来确定;推测当时的湖水可能经



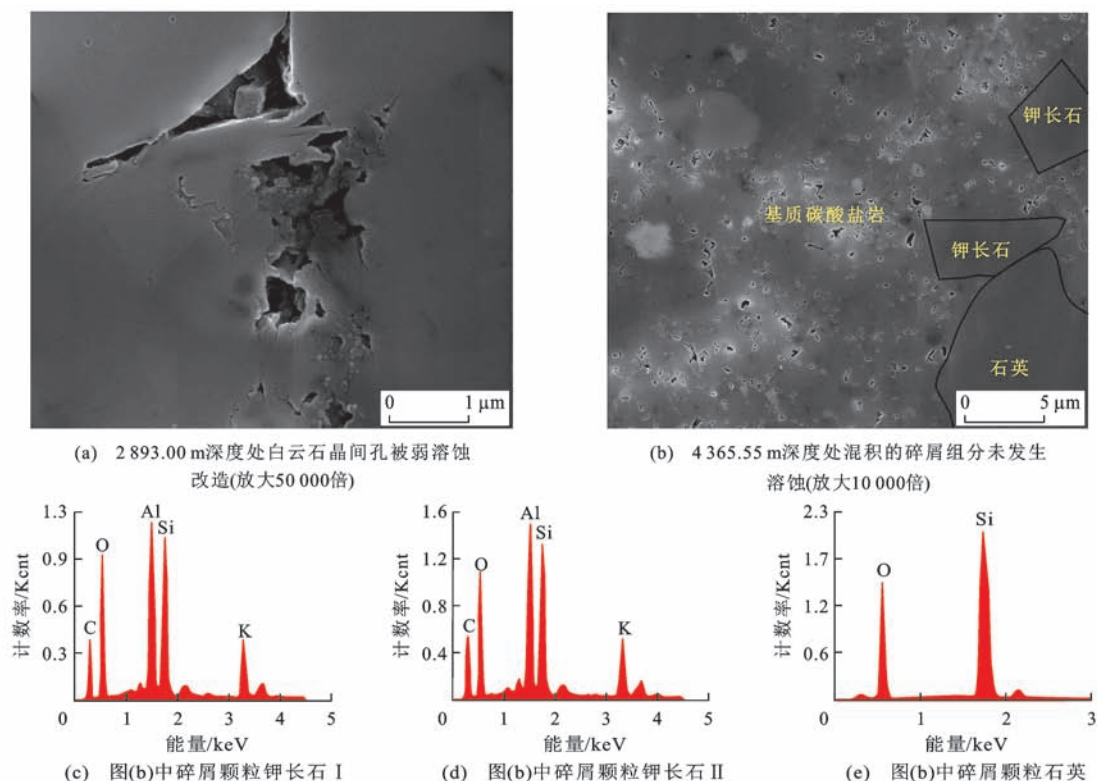


图5 白云石晶间孔被弱溶蚀改造与碎屑组分未发生溶蚀对比

Fig. 5 Comparison of Slight Dissolution and Alteration of Intercrystalline Pores of Dolomite and Clastic Composition Without Dissolution

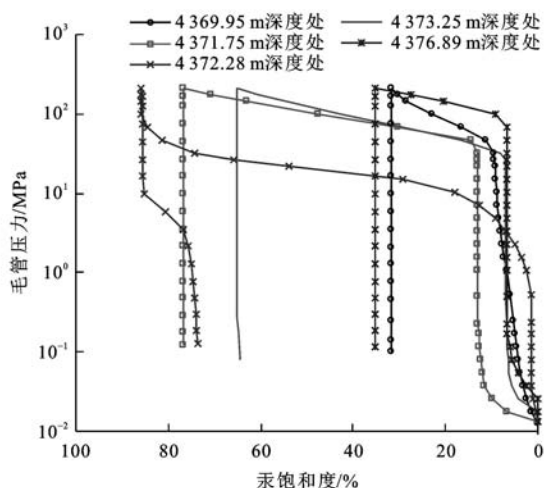


图6 毛管压力曲线

Fig. 6 Curves of Capillary Pressure

历了一个浓缩、加热、冷却、稀释、硫酸盐降低到一定程度或者有活性的  $\text{CO}_3^{2-}$  增加到一定程度等一系列复杂过程,  $\text{CO}_3^{2-}$  突破了在  $\text{Mg}^{2+}$  表面形成的“水化壳”(Hydration Shell), 高盐度湖水含有较高的  $\text{Mg}^{2+}$  也意味着水化障碍更容易被突破<sup>[30]</sup>。现代海水中主要沉积的碳酸盐岩多为文石, 主要原因是  $\text{Mg}^{2+}$  具有更强的亲水性, 易在其表面形成一个难以突破的“水化壳”。

综上所述, 微生物成因的白云石更有可能按照反应式(1)进行, 准同生交代成因的白云石更有可能按照反应式(2)进行。从化学计算的角度考虑, 较小离子半径的  $\text{Mg}^{2+}$  (离子半径为 0.078 nm) 取代了  $\text{CaCO}_3$  分子中较大离子半径的  $\text{Ca}^{2+}$  (0.106 nm) 时, 会造成体积收缩从而形成晶间孔, 方解石的摩尔体积约为  $36.8 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ , 白云石的摩尔体积约为  $64.5 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ , 交代过程中, 2 mol 方解石被交代为 1 mol 白云石, 会造成体积缩小  $9.1 \text{ cm}^3$ 。

## 6 结 语

(1) 柴达木盆地英西油田 S3-1 井渐新统下干柴沟组储集空间主要发育白云石晶间孔, 含少量微弱溶蚀改造的晶间加大孔(多为数百纳米), 而非大溶蚀孔洞。在岩芯表面肉眼可见的毫米级或厘米级大孔洞均为钻井液溶蚀, 并非地层条件下真实的储集空间。其主要证据包括: ①高沉积速率的暗色层段难以发生暴露溶蚀; ②岩石的矿物组分中白云石为重要组成部分; ③经氩离子抛光后可见棱角状孔隙形貌(典型的白云石晶间孔孔隙模式), 且通过能谱成分分析予以确认; ④岩芯干切后能肉眼观察到的孔隙均发育于裂缝之中, 为盐类矿物结

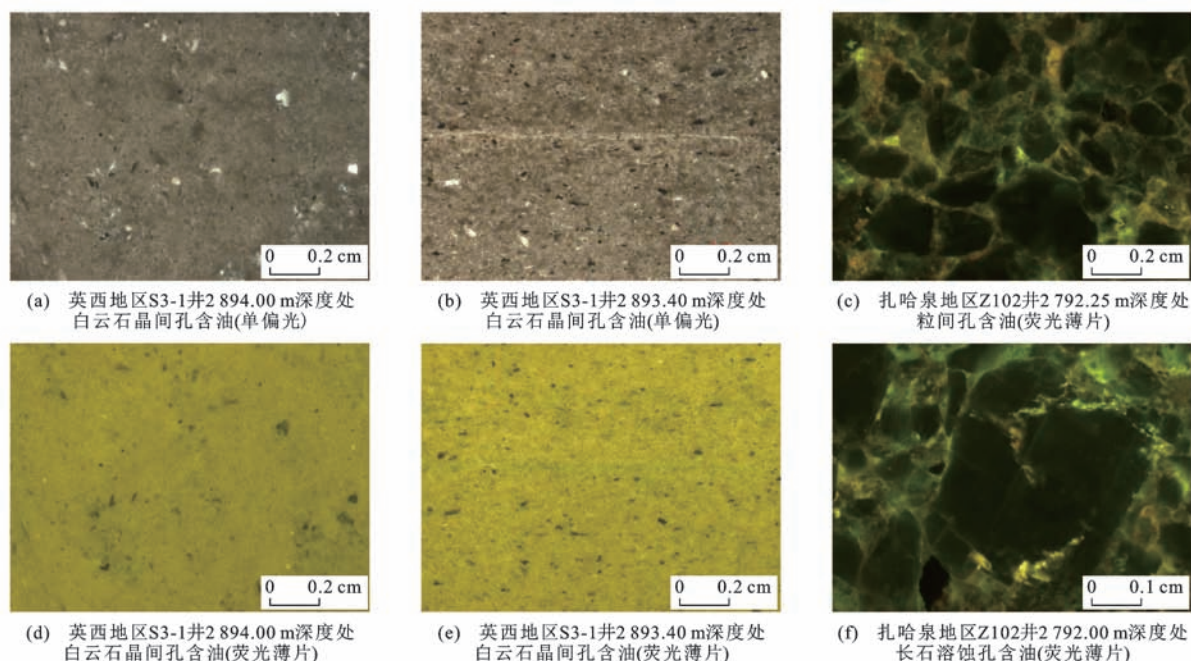


图7 英西地区 S3-1 井白云石晶间孔含油荧光特征与扎哈泉地区 Z102 井粒间孔、溶蚀孔含油的差别

Fig. 7 Comparison of Oil-bearing Fluorescence Features of Intercrystalline Pores of Dolomite from Well S3-1 in Yingxi Area and Those of Intergranular and Dissolution Pores from Well Z102 in Zhahaquan Area

晶所致,非溶蚀而成;⑤“特低孔-特低渗”的物性特征为白云石晶间孔形成,因大量溶蚀孔洞发育必然会形成高孔隙度;⑥较高的排驱压力、较小的连通孔喉半径以及极低的退汞效率均为晶间孔典型孔隙结构特征;⑦晶间孔整体含油的荧光特征与扎哈泉地区碎屑岩的粒间孔或溶蚀孔含油的局部发光特征截然不同。

(2)孔径虽小但数量巨大的基质孔隙储油是英西地区亿吨级油田持续稳产的重要控制因素。优质储集层的主要储集空间类型的确定对下一步勘探部署具有重要的指导意义。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 黄成刚,袁剑英,曹正林,等. 咸化湖盆储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):345-350.  
HUANG Cheng-gang, YUAN Jian-ying, CAO Zheng-lin, et al. Simulate Experiment About the Saline Fluid-rock Interaction in Clastic Reservoir of the Saline Lacustrine Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(2): 345-350.
- [2] 吴丽荣,黄成刚,袁剑英,等. 咸化湖盆混积岩中双重孔隙介质及其油气储集意义[J]. 地球科学与环境学报,2015,37(2):59-67.  
WU Li-rong, HUANG Cheng-gang, YUAN Jian-ying,

et al. Double-porosity System of Mixed Sediments in the Saline Lacustrine Basin and Its Significance to Reservoir[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(2): 59-67.

- [3] YUAN J Y, HUANG C G, ZHAO F, 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(11): 596-607.
- [4] 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,2015,44(3):254-266.  
YUAN Jian-ying, HUANG Cheng-gang, CAO Zheng-lin, et al. C-O Isotopic Composition of Saline Lacustrine Dolomite and Its Palaeoenvironmental Significance: A Case Study of the Lower Eocene Ganchaigou Formation in Western Qaidam Basin[J]. Geochimica, 2015, 44(3): 254-266.
- [5] 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 Jian-ying, HUANG Cheng-gang, XIA Qing-song, 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.
- [6] 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 Cheng-gang, YUAN Jian-ying, TIAN Guang-rong, 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.
- [7] 黄成刚,袁剑英,曹正林,等.咸化湖盆中酸性流体对碎屑岩储层的改造作用[J].地球科学与环境学报, 2014, 36(3): 52-60.
- HUANG Cheng-gang, YUAN Jian-ying, CAO Zheng-lin, et al. Reconstruction of Acid Fluid on Clastic Reservoir in Saline Lacustrine Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(3): 52-60.
- [8] HUANG C G, ZHAO F, YUAN J Y, et al. The Characteristics of Dolomite Reservoir in Saline Lacustrine Basin, Qaidam, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2016, 31(3): 307-317.
- [9] 夏志远,刘占国,李森明,等.岩盐成因与发育模式:以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例[J].石油学报, 2017, 38(1): 55-66.
- XIA Zhi-yuan, LIU Zhan-guo, LI Sen-ming, et al. Origin and Developing Model of Rock Salt: A Case Study of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in the Yingxi Ridge of Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 55-66.
- [10] 黄成刚,关新,倪祥龙,等.柴达木盆地英西地区 E<sub>3</sub> 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 Cheng-gang, GUAN Xin, NI Xiang-long, et al. The Characteristics and Major Factors Controlling on the E<sub>3</sub> Dolomite Reservoirs in Saline Lacustrine Basin in the Yingxi Area of Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(2): 219-231.
- [11] 张浩,陈刚,朱玉双,等.柴达木盆地英西地区渐新统热液改造型白云岩的发现及意义[J].地质科技情报, 2017, 36(1): 87-97.
- ZHANG Hao, CHEN Gang, ZHU Yu-shuang, et al. Discovery and Significance of Dolomites Altered by Hydrothermal Fluid in Oligocene Reservoirs of the Yingxi Area, Qaidam Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(1): 87-97.
- [12] 陈登钱,沈晓双,崔俊,等.柴达木盆地英西地区深部混积岩储层特征及控制因素[J].岩性油气藏, 2015, 27(5): 211-217.
- CHEN Deng-qian, SHEN Xiao-shuang, CUI Jun, et al. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of Deep Diamictite in Yingxi Area, Qaidam Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 211-217.
- [13] 田继先,曾旭,易士威,等.咸化湖盆致密油储层“甜点”预测方法研究:以柴达木盆地扎哈泉地区上干柴沟组为例[J].地学前缘, 2016, 23(5): 193-201.
- TIAN Ji-xian, ZENG Xu, YI Shi-wei, et al. The Prediction Method of the Tight Oil Reservoirs “Sweet Spot” in Saline Lacustrine Basin: A Case Study of the Upper Ganchaigou Formation in the Zhahaquan District of Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(5): 193-201.
- [14] 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 Li-rong, HUANG Cheng-gang, YUAN Jian-ying, 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.
- [15] 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 Suo-tang, ZHANG Dao-wei, XUE Jian-qin, et al. Exploration Potential and Geological Conditions of Tight Oil in the Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 672-682.
- [16] YIN A, DANG Y Q, ZHANG M, 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//[C]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. Boulder: Geological Society of America, 2007: 369-390.
- [17] SUN Z M, YANG Z Y, PEI J L, 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.
- [18] 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 Ke-xin, JI Jun-liang, 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.
- [19] 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 Suo-tang, MA Da-de, GUO Zhao-jie, 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.
- [20] MOUNT J. Mixed Siliciclastic and Carbonate Sediments: A Proposed First-order Textural and Compositional Classification[J]. Sedimentology, 1985, 32(3): 435-442.
- [21] 杨朝青, 沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境: 一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积[J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 59-65.
- YANG Chao-qing, SHA Qing-an. Sedimentary Environment of the Middle Devonian Qujing Formation, Qujing, Yunnan Province: A Kind of Mixing Sedimentation of Terrigenous Clastics and Carbonate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(2): 59-65.
- [22] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 31-34.
- ZHANG Xiong-hua. Classification and Origin of Mixo-sedimentite[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(4): 31-34.
- [23] 徐伟, 陈开远, 曹正林, 等. 咸化湖盆混积岩成因机理研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1804-1816.
- XU Wei, CHEN Kai-yuan, CAO Zheng-lin, et al. Original Mechanism of Mixed Sediments in the Saline Lacustrine Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1804-1816.
- [24] SY/T 6285—2011, 油气储层评价方法[S].
- SY/T 6285—2011, Method for Reservoir Evaluation of Oil and Gas[S].
- [25] 匡立春, 王霞田, 郭旭光, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地质特征与勘探实践[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 629-634.
- KUANG Li-chun, WANG Xia-tian, GUO Xu-guang, et al. Geological Characteristics and Exploration Practice of Tight Oil of Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 629-634.
- [26] 远光辉, 操应长, 杨田, 等. 论碎屑岩储层成岩过程中有机酸的溶蚀增孔能力[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 207-219.
- YUAN Guang-hui, CAO Ying-chang, YANG Tian, et al. Porosity Enhancement Potential Through Mineral Dissolution by Organic Acids in the Diagenetic Process of Clastic Reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 207-219.
- [27] 黄思静, 武文慧, 刘洁, 等. 大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用[J]. 地球科学, 2003, 28(4): 419-424.
- HUANG Si-jing, WU Wen-hui, LIU Jie, et al. Generation of Secondary Porosity by Meteoric Water During Time of Subaerial Exposure[J]. Earth Science, 2003, 28(4): 419-424.
- [28] HSU K J. Chemistry of Dolomite Formation[J]. Developments in Sedimentology, 1967, 9: 169-191.
- [29] HARDIE L A. Dolomitization; A Critical View of Some Current Views[J]. Journal of Sedimentary Research, 1987, 57(1): 166-183.
- [30] WARREN J. Dolomite: Occurrence, Evolution and Economically Important Associations[J]. Earth-science Reviews, 2000, 52(1/2/3): 1-81.
- [31] LAND L S. The Isotopic and Trace Element Geochemistry of Dolomite: The State of the Art[J]. SEPM Special Publication, 1980, 28(28): 87-110.
- [32] LAND L S. The Origin of Massive Dolomite[J]. Journal of Geological Education, 1985, 33(2): 112-125.
- [33] 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 Cheng-gang, YUAN Jian-ying, WU Liang-yu, et al. Origin and Research Methods of Lacustrine Dolomite[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(2): 7-15.
- [34] WRIGHT D T, WACEY D. Sedimentary Dolomite: A Reality Check[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 235: 65-74.
- [35] 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 Xue-lian, SUN Shu, ZHU Jing-quan, et al. Progress in the Study of Microbial Dolomite Model[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 52-64.
- [36] MASTANDREA A, PERRI E, RUSSO F, et al. Microbial Primary Dolomite from a Norian Carbonate Platform: Northern Calabria, Southern Italy[J]. Sedimentology, 2006, 53(3): 465-480.