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

袁剑英¹⁾,黄成刚¹⁾,夏青松²⁾,曹正林¹⁾,赵凡¹⁾,万传治¹⁾,潘星³⁾

1) 中国石油勘探开发研究院西北分院油藏描述重点实验室,兰州,730020;

2) 西南石油大学地球科学与技术学院,成都,610500;

3) 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 兰州, 730001

内容提要:近年来,柴达木盆地柴西地区始新统致密油勘探取得了重要进展,其主要岩石类型为混积的湖相碳酸盐岩,其中白云石化岩类为最优质的储集岩。通过系统的岩石学、结构学以及地球化学特征研究发现,白云岩以泥晶结构为主,发育少量藻云岩,具有"中孔一特低渗"型的物性特征,孔隙类型以晶间孔为主,含少量溶蚀孔。电子探针能谱面扫描分析结果显示,藻云岩中 Mg 元素富集区与藻纹层分布高度吻合显示其为微生物成因的原生白云岩,因微生物活动能够克服动力学障碍,为白云石形成营造出有利的微环境;偏光显微镜观察和 X 射线衍射分析结果显示,泥晶白云岩中均含碎屑颗粒和泥质组分,因周缘辫状三角洲沉积带来的碎屑物质混积而成,电子探针岩石组分分析结果显示其具有"高铝硅低铁锰"特征,FeO 的平均含量为0.942%,MnO 的平均含量为0.052%,明显低于文献报道的热液成因的白云岩中的铁锰含量,为准同生交代成因的典型特征。白云石化过程中产生了大量弥散性收缩晶间孔,孔隙半径小而数量众多是其孔隙度较高而渗透率较低的主要原因,这一发现对于柴达木盆地始新统的致密碳酸盐岩油气勘探具有重要意义。

关键词:柴达木盆地;咸化湖盆;碳酸盐岩储层;淮同生交代;白云岩;石膏;晶间孔;成因机理

湖相碳酸盐岩是指在内陆湖泊盆地中形成的碳 酸盐岩,包括淡水湖盆碳酸盐岩、半咸水--咸水湖盆 碳酸盐岩和盐湖中的碳酸盐岩。在一定条件下其既 是重要的生油岩,又可成为重要的储集岩,还能自生 自储成藏(彭传圣,2011;周书欣等,1991;妥进才等, 1995;妥进才和黄杏珍,1996)。国外已广泛发现湖 相碳酸盐岩油气藏(Cohen and Thouin, 1987; Benson, 1993; Bustillo et al., 2002; Tueher and Wright,1990),经过数十年的勘探发现,国内古生 代、中一新生代陆相湖盆广泛发育湖相碳酸盐岩,勘 探实践证实了其具有良好的生油和储油能力(王英 华等,1991),如准噶尔盆地二叠系云质岩(匡立春 等,2012)、川中龙岗地区下侏罗统自流井组大安寨 段的介屑灰岩(丁一等,2013)、松辽盆地白垩系青 山口组生物灰岩(贾承造等,2012)、渤海湾盆地济 阳坳陷古近系沙河街组一段和四段的生物灰岩和礁 灰岩(高胜利等,2012),黄骅坳陷古近系沙河街组 三段的碳酸盐岩(蒲秀刚等,2011)以及苏北盆地古 近系阜宁组的生物灰岩(王彩凤等,2013)、柴达木 盆地柴西地区始新统碳酸盐岩(唐丽等,2013)等都 是良好的湖相碳酸盐岩储油层。截止2012年底,在 四川、渤海湾、柴达木等盆地累计探明湖相碳酸盐岩 油气田 63 个,探明石油地质储量近 6×10⁸ t。

贾承造院士在综述中国致密油的分布时指出, 中国的湖相碳酸盐岩以咸化湖泊白云岩及白云石化 岩类最为有利(贾承造等,2012)。本次研究通过大 量岩芯观察和各种实验室分析测试技术综合研究得 出,白云石化岩类为柴西地区始新统中最为有利的 储集岩,前人关于该区微观储层特征及其孔隙形成 机理的研究较少,缺乏较为有力的直观证据,因此, 本文试图针对这一相对优质的储集岩开展系统的微 观岩石学、结构学和地球化学特征研究,旨在为这种

注:本文为中国石油重大科技专项"柴达木盆地建设千万吨油气田综合配套技术研究"(编号:2011E-03)和国家油气专项"前陆盆地油气 成藏规律、关键技术及目标评价"项目(编号:2011ZX05003)的成果。

收稿日期:2014-12-19;改回日期:2015-11-29。责任编辑:黄敏。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.01.010

作者简介:袁剑英,男,1965年生。博士,教授级高级工程师,中国石油天然气集团公司高级专家。主要从事石油地质勘探与地球化学方面的研究工作。通讯地址:730020,甘肃省兰州市城关区雁儿湾路535号。Email:yuan_jy@petrochina.com.cn。



图 1 柴达木盆地西部沉积相(据曹正林等,2014,有修改) Fig. 1 Sedimentary facies of western Qaidam Basin(Modified from Cao Zhenglin et al., 2014&)

致密岩石中的孔隙发育机制提供更确凿的证据。这 一成果有助于开辟柴达木盆地致密油勘探的新领 域。

1 地质概况

湖相碳酸盐岩的形成明显受控于古气候、古水

动力和古水介质条件的变化,气候对湖泊的影响远 比海洋显著得多(夏青松等,2003)。柴达木盆地地 处中国气候系统聚变交汇区,对于亚洲乃至全球气 候变化反映灵敏(毛玲玲等,2014)。柴西地区位于 柴达木盆地西部,构造分区上属西部坳陷区尕斯库 勒断陷亚区,是盆地内勘探程度最高的地区之一 (曹正林等,2014)。行政上属于青海省海西州茫崖 镇,位于地面海拔 3000m 左右,地貌为平坦的盐碱 戈壁滩地,无植被发育,气候干燥寒冷(黄成刚等, 2014a)。柴西地区在始新世早期湖水面积开始扩 大,半深湖区主要发育在七个泉、狮子沟、扎哈泉一 带,其周边大面积发育辫状河三角洲前缘沉积,始新 世晚期继承了早期的沉积体系,湖水面积进一步扩 大,并明显向东迁移,首次使全盆地接受大面积沉 积,半深湖区主要分布在七个泉一狮子沟一茫崖一 带(付锁堂等,2013),本次研究的重点取样点跃灰 101 井所在的跃进地区也发育湖相沉积(图1),混 积的湖相碳酸盐岩为最主要的岩石类型,由于周缘 辫状三角洲所携带的碎屑物质供给充分,碳酸盐岩 中含有较多的碎屑颗粒组分和泥质组分。

2 样品和方法

本次研究的样品主要来自于跃灰101 井始新统 下干柴沟组的岩芯,埋深范围为2900~3300m。所 做的研究包括薄片观察、覆压孔渗分析、X 射线衍射 全岩矿物含量分析、场发射环境扫描电镜分析以及 电子探针分析等。上述所有分析测试工作在中国石 油天然气集团公司油藏描述重点实验室完成。

用于薄片观察的样品双面剖光至 0.03mm 厚, 偏光显微镜型号为 Zeiss Axio Scope A1。用于覆压 孔渗测试的样品被钻成直径为 2.5cm、高度为 5cm 的圆柱体,所用的仪器型号为美国岩芯公司的 CMS-300,测试气体采用高纯氦气,围压气源采用氮气,测 试围压采用油田实测地层压力值 46MPa。

用于X射线衍射全岩矿物含量分析的样品被 研磨至全部粒径小于40µm的粉末,称取2g后采用 背压法制作成试片,然后测定各种矿物选定衍射峰 的积分强度,从而计算各种矿物的百分含量,所用的 仪器型号为荷兰帕纳科 Empyrean 锐影,分析时的工 作电压为40kV,工作电流40mA,扫描速度2°(2θ)/ min,采样步宽采用0.02°(20)。用于场发射环境扫 描电镜分析的样品被切割成 1cm3 左右的立方体或 不规则块状,洗取较为平整的新鲜断面作为观察面, 在观察面上镀上导电金属元素 Au,用导电胶将样品 固定在样品台上且使得待观察面与样品台连接用于 传导电荷,所用仪器型号为 FEI Quanta 450 FEG,分 析时的工作电压为 20kV, 电子束入射束流大小为 0.3~0.4 nA。白云石成分组成通过电子探针分析 获得,所用的仪器型号为日本岛津公司的 EPMA-1720,分析时的工作电压为15kV,电流强度25µA, 束斑直径小于1μm,每个探针点的检测时间大于2 h,所检测的成分组成包括 MgO、CaO、Na₂O、Al₂O₃、 SiO₂、K₂O、MnO、FeO、SrO 和 BaO。

113

3 结果和讨论

3.1 岩石命名方案

柴西地区古近纪时期是典型咸化湖盆(黄成刚 等,2014b;黄成刚等,2015;金强和朱光友,2006;金 强,2003;张晓宝等,2002),气候干旱,长期处于欠补 偿状态(徐伟等,2014),沉积物主要以湖相碳酸盐 岩为主,粒度较细,具有典型混合沉积特征,岩石组 分除了主要成分碳酸盐外还包括陆源碎屑、泥质以 及盐类矿物等,既有岩石中各组分的混合,又具有互 层或夹层的混合,符合 Mount (1984)提出的混积岩 的概念,指陆源碎屑与碳酸盐组份的混合沉积,或构 成交替互层或夹层的混合(Holmes,1983;Tirsgaard, 1996)。

关于混积岩的分类和命名,学者们观点略有差 别, Mount(1985)采用四分法,由硅质碎屑砂、粉砂 粘土混合泥、碳酸盐异化粒以及灰泥构成一个三角 四面体分类系统,按比例进行划分和命名,较为复 杂。杨朝青和沙庆安(1990)在统计研究的基础上, 提出了由陆源碎屑、碳酸盐(颗粒或灰泥,不包括胶 结物)、粘土三端元组成的混合组分岩石分类图,将 组分落在碳酸盐大于25%、陆源碎屑大于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,按习惯方案在混积岩前加前缀作进一步 描述。张雄华(2000)同样将粘土、陆源碎屑和碳酸 盐作为混积岩分类命名的三个端元,其中粘土含量 >50%的称为粘土岩,碳酸盐含量5%~95%或陆 源碎屑含量 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。

本文采用较为通俗易懂、可操作性强的划分方 案,即将泥质总量、陆源碎屑颗粒和碳酸盐作为混积 岩分类命名的三个端元,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者白云岩。因此在混积岩 命名中,部分样品的白云石含量<50%但仍然是最



图 2 柴西地区跃灰 101 井始新统下干柴沟组岩性综合柱状图 Fig. 2 Comprehensive Lithological column chart of Lower Ganchaigou Group of Eocene in Yuehui- 101 well in Western Qaidam Basin

多的岩石端元组分,也可能被定名为白云岩。

3.2 岩性和物性特征

通过对跃灰 101 井取芯井段始新统下干柴沟组 (E₂x)进行 岩芯观察发现,整个取芯段(2900~ 3300m)岩石颜色较为均一,多以灰白色为主,沉积 物粒度极细,肉眼无法识别岩性类别,后期实验室综 合分析结果显示各种岩性以薄互层状发育,且混积 沉积特征明显,未见纯白云岩或纯灰岩,多含泥或含 粉砂等,其中油气显示主要集中于 2932.50~ 2946.50m、3132.05~ 3160.40m、3188.80~ 3232.48m和3267.02~3286.50m等层段,这些层段 岩石中白云石也较为发育(图2)。据171个岩石样 品的偏光显微镜鉴定和 X 射线衍射全岩矿物含量 分析可以得出,碳酸盐岩为最主要的岩石类型,其中 灰岩占 40%、白云岩占 36%、泥岩占 14%以及粉砂 岩占 11%。白云岩中绝大多数为泥晶白云岩,含极 少量的藻云岩(图 3)。

相对优质的湖相碳酸盐岩储层中白云石含量主 要分布在19.5%~68.7%范围内(表1),其它矿物 含量分别为:方解石(5.4%~31.9%)、泥质(3.5% ~29.1%)、石英(2.8%~21.2%)、菱铁矿(0~ 13.5%)、斜长石(1.1%~12.6%)、黄铁矿(0~ 6.5%)、赤铁矿(0.5%~5.5%)、石膏或硬石膏 (0.5%~5.1%)、方沸石(0~4.5%)、钾长石



图 3 柴西地区始新统白云岩岩芯照片及显微照片

Fig. 3 The photos and microscope photos of the cores from Eocene dolomite in Western Qaidam Basin

(a) YH101-26,2930.05,含泥泥晶白云岩,未染色,铸体薄片,蓝色为微孔隙;(b) YH101-293,3160.40m,含粉砂泥晶白云岩,未染色,铸体 薄片,蓝色为微孔隙;(c) YH101-14,2928.65m,含灰藻云岩,未染色,铸体薄片,蓝色为微孔隙和裂缝;(d) 左为 YH101-1176,含泥泥晶白云 岩,3283.37m;右为 YH101-5,藻云岩,2927.60m

(a) YH101-26,2930.05, containing mud dolomicrite, not dyed, casting thin section, blue color indicating the micropores; (b) YH101-293, 3, 160.40m, containing silt dolomicrite, not dyed, casting thin section, blue color indicating the micropores; (c) YH101-14, 2,928.65m, containing calcite algal dolostone, not dyed, casting thin section, blue color indicating the micropores and fractures; (d) the left is the YH101-1176, containing mud dolomicrite, 3283.37m; the right is the YH101-5, algal dolostone, 2927.60m

(0.2%~2.2%)、石盐(0~0.7%),个别样品还含 有少量菱镁矿、钙芒硝等。

通过对 84 个样品的覆压孔渗分析可得,其平均 孔隙度为 8.6%,平均渗透率为 0.108 × 10⁻³ μ m² (图 4)。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》(国家能源 局,2011)中碳酸盐岩储层孔隙度、渗透率类型划分 (表 2),其可划归为"低孔一特低渗"级别。按照岩 性分,其中白云岩的平均孔隙度为 12.5%,平均渗 透率为 0.194 × 10⁻³ μ m²;灰岩的平均孔隙度为 4.7%,平均渗透率为 0.053 × 10⁻³ μ m²;碎屑岩的平 均孔隙度为 6.9%,平均渗透率为 0.007 × 10⁻³ μ m²。可见白云岩的物性明显好于其它岩性,为研 究区最重要的储集岩类型。

3.3 孔隙类型及成因

116

物性测试结果显示优质的湖相碳酸盐岩储层可 达"中孔一特低渗"级别,孔隙度可达"中孔"级别但



图 4 柴西地区跃灰 101 井始新统下干柴沟组孔渗 关系投点图 Porosity vs. permeability diagram of the Eocene

Lower Ganchaigou Formation in Yuehui-101 well in Western Qaidam Basin

af the Easons in Westorn Ooidem Pasin	501 7011 5
Table 1 The characteristics of mineral content ($\%$) of the high quality lacustrine carbonate re	servoirs
表1 柴西地区始新统相对优质的湖相碳酸盐岩储层全岩矿物含量特征(%)	

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	菱镁 矿	石盐	黄铁 矿	赤铁 矿	方沸 石	石膏	硬石 膏	钙芒 硝	泥质 总量
YH101-12	2928.30	含泥粉砂质碳酸盐岩	21.1	1.4	6.6	17.9	22.7	0.6			4.1	3.4	4.5		0.5		17.2
YH101-14	2928.65	含灰藻云岩	9.8	0.7	3.2	15.4	51.3	0.4			4.3	4.8	2.9				7.2
YH101-26	2930.05	含泥泥晶白云岩	8	0.3	2.7	7.1	68.7										13.2
YH101-71	2943.05	含粉砂泥晶白云岩	7.7	0.6	3	5.7	64.3					4.9	2.1			1.1	10.6
YH101-97	2946.50	含粉砂泥晶白云岩	15.1	0.9	4.6	7.2	44.8	7.5		0.4	3.8	1.1	2.9	0.2	0.4		11.1
YH101-150	3132.05	灰质泥晶白云岩	4.7	0.2	1.5	31.9	39.6	7.2	0.3		2.9	2.5	0.8	5.1			3.3
YH101-190	3139.77	含泥粉砂质碳酸盐岩	20.2	0.4	5.9	9.9	29.7				3.1	2.8	1.8	0.2	3.7		22.3
YH101-238	3150.20	含粉砂泥晶白云岩	9.0	0.2	2.4	7.9	50.2	6.0		0.4	4.0	3.3	1.0		4.7		10.9
YH101-293	3160.40	含粉砂泥晶白云岩	7.3	0.4	2.4	6.6	56.3	7.4	0.0		4.2	3.5	1.9		2.6		7.4
YH101-359	3171.77	含泥粉砂质碳酸盐岩	18.6	0.5	12.6	12.4	20.6	9.1			2.9	2.6	1.4		0.5		18.8
YH101-484	3187.73	含泥粉砂质碳酸盐岩	18.5	1.3	6.1	17.9	26.7			0.4	3.6	0.5	2.7		3.2		19.1
YH101-524	3192.68	含粉砂泥晶白云岩	9.8	0.6	5.4	14.4	39.1	9.3		0.4	6.4	4.1	0.4	0.1	0.4		9.6
YH101-554	3195.47	含粉砂泥晶白云岩	14.8	0.5	4.6	9.2	50.0				6.5	3.9	0.3	0.3			9.9
YH101-560	3196.27	含粉砂泥晶白云岩	8.2	0.4	3.7	6.5	62.1			0.4	5.5	5.5		0.2	0.3		7.2
YH101-566	3197.45	含粉砂泥晶白云岩	15.8	0.8	5.5	9.9	44.9			0.5	5.1	4.5	0.8	0.2	0.5		11.5
YH101-681	3210.19	含泥粉砂质泥晶白云岩	21.2	2.2	5.5	6.9	34.2	5.5		0.2	2.7	3.2	1.1	0.5	0.7		16.1
YH101-687	3210.70	含灰泥晶白云岩	10.1	0.4	5.4	24.6	36.2	5.8		0.7	2.2	1.9		0.3	4.2		8.2
YH101-694	3211.50	含泥碳酸盐岩	16.7	0.8	5.3	9.2	19.5	13.5			3.7	4.4	3.1		0.7		23.1
YH101-710	3213.86	含灰粉砂质碳酸盐岩	23.6	1.6	8.1	20.9	21.3			0.3	3.2	1.5	1.6		3.1		14.8
YH101-970	3255.22	含粉砂泥晶白云岩	14.2	0.7	5.6	6.3	33.5	6.3		0.5	3.0	3.4	2.5		3.8		20.2
YH101-1137	3277.55	含灰泥晶白云岩	2.8	0.2	1.1	20.2	61.9					4.3	0.9		5.1		3.5
YH101-1145	3278.69	含泥碳酸盐岩	9.5	0.5	4.2	24.1	26.5	7.5			2.1	1.5	2.5		0.5	0.4	20.7
YH101-1160	3280.67	含粉砂泥质碳酸盐岩	14.9	0.8	6.7	5.4	29.2	8.0		0.3		2.2	2.7		0.7		29.1
YH101-1176	3283.37	含泥泥晶白云岩	9.0	0.4	3.7	8.3	51.5	0.4		0.4	2.7	2.6	1.7				19.3
YH101-1190	3286.50	含灰泥晶白云岩	7.0	0.4	2.8	15.5	39.8	9.8		0.3	2.4	2.5	0.9		4.8		13.8

是渗透率却极低的主要原因是其孔隙类型以数量众 多但孔隙半径极小的白云石晶间孔为主,少量样品 可见溶蚀孔。铸体薄片在偏光显微镜下可观察到蓝 色铸体(代表微孔隙)呈弥漫式分布(图3a—3c),孔 径太小几乎超过了显微镜的分辨能力,但在场发射 环境扫描电镜下清晰可见白云石晶间孔(图 5a ~ 5f)的大小约数百纳米左右,普遍小于1μm。

117

白云石化作用易形成的收缩晶间孔对碳酸盐岩储层至关重要(郑剑锋等,2013;徐亮,2013),当两个CaCO₃分子中的一个Ca²⁺被Mg²⁺取代后,由于



图 5 柴西地区始新统跃灰 101 井白云岩孔隙类型

Fig. 5 The pore types of the dolostone in Eocene Yuehui-101 well in Western Qaidam Basin

(a) YH101-14,含灰泥晶藻云岩,2928.65m;(b) YH101-71,泥晶白云岩,2943.05m;(c) YH101-225,3147.65m,含泥粉砂质白云岩;(d) YH101-326,3167.20m,含粉砂灰质泥晶白云岩;(e) YH101-970,3255.22m,含粉砂泥晶白云岩;(f) YH101-970,3255.22m,含粉砂泥晶白云岩;(g) YH101-150,3132.05m,灰质泥晶白云岩;(h) YH101-150,3132.05m,灰质泥晶白云岩;(i) YH101-150,3132.05m,灰质泥晶白云岩, 铸体薄片,蓝色为孔隙。(a)—(f) 白云石晶间孔广泛发育;(g)—(i) 石膏与白云石溶蚀孔伴生(a) YH101-14, algal dolostone with calcite,2928.65m;(b) YH101-71, micritic dolostone,2943.05m;(c) YH101-225,3147.65m, silty dolostone with mud;(d) YH101-326, 3167.20m, micritic lime dolostone with silt;(e) YH101-970,3255.22m, micritic dolostone with silt;(f) YH101-970,3255.22m, micritic dolostone with silt;(g) YH101-150,3132.05m, lime micritic dolostone;(i) YH101-150, 3132.05m, lime micritic dolostone;(i) YH101-150, (i) YH101

表 2 碳酸盐岩储层孔隙度、渗透率类型划分的行业标准 Table 2 Division of industry standards about reservoir porosity

and permeability type of carbonate

孔隙度类型	孔隙度(φ,%)	样品数(个)	渗透率类型	渗透率(K, ×10 ⁻³ µm ²)	样品数(个)
青	$\varphi \ge 20$	0	青	K≥100	0
中	$12 \leq \varphi < 20$	19	中	$10 \leq K < 100$	0
低	$4 \leq \varphi < 12$	55	低	$1 \leq K < 10$	0
特低	$\varphi < 4$	10	特低	<i>K</i> < 1	84

前人大量研究成果显示,石膏或硬石膏在白云岩的溶蚀过程中扮演着重要角色。黄思静等通过研究认为地层条件下石膏的存在确实加速了白云岩的溶解,但这种积极作用随着温度升高而有所降低(Huang Sijing et al.,2000;黄思静等,1996);黄成刚等(2014b)通过高温

 Mg^{2+} 离子半径(0.078nm)小于 Ca²⁺的离子半径 (0.106nm)(韩吟文和马振东,2003),因此会造成体 积缩小从而形成收缩晶间孔。通过理论计算可知,1 mol 方解石的体积约为 36.8 cm³,1 mol 白云石的体 积约为 64.5 cm³,白云石化过程中,2 mol 方解石转 化为1 mol 白云石(其中1 mol Ca²⁺被1 mol Mg²⁺取 代)体积会缩小9.1 cm³,其化学反应机理方程式为: 2 CaCO₃ + Mg²⁺ → CaMg(CO₃)₂ + Ca²⁺。

咸化湖的沉积环境造成了柴西地区始新统岩石 中石膏或硬石膏的广泛发育(黄成刚等,2014b;黄 成刚等,2015;金强和朱光友,2006;金强,2003;张晓 宝等,2002),白云石化作用形成的收缩晶间孔为酸 性流体或气体的溶蚀作用提供了通道,在偏光显微 镜下和扫描电镜下见到少数样品发育溶蚀孔隙,且 均与石膏或硬石膏伴生(图 5g~5i),图片中的石膏 或硬石膏经扫描电镜能谱成分分析予以了确认,其 主要成分为 CaSO₄。众所周知,石膏或硬石膏等盐 类矿物的沉淀会占据部分原生储集空间从而对岩石 物性在一定程度上具有负面影响,但其在白云石溶 解过程中具有一定的积极作用,加硬石膏和不加硬 石膏的对照溶解实验结果表明,溶解 CaSO₄ 的加入 可导致 Ca²⁺溶出量的降低和 Mg²⁺溶出量的增加, 即有利于白云石溶解(黄思静等,2012),因此,咸化 湖盆沉积中石膏或硬石膏对白云石化岩类储层质量 的影响是复杂的,这种双面作用造成了岩石中石膏 或硬石膏含量与孔隙度相关关系的规律性不明显 (图6),但它揭示了3个现象:① 当岩石中石膏或 硬石膏含量极少时,岩石孔隙度较大,多以白云石晶 间孔为主,溶蚀孔不发育;② 当岩石中石膏或硬石 膏含量增多时,因其促进了部分溶蚀孔的形成,岩石 孔隙度整体上略有随着石膏或硬石膏含量增大而变 好的趋势;③在相对致密的灰岩中,无论石膏或硬 石膏含量多或少,孔隙度基本维持在较低水平而几 乎不受其影响。

高压模拟实验研究得出,地层条件下石膏在白云石 的溶蚀过程中具有一定的催化作用;闫志为和张志 卫(2009)通过模拟实验研究得出,反应体系中的钙 离子由于同离子效应能抑制方解石的溶解,但却促 进了白云石的溶解。石膏或硬石膏对白云石溶解和 沉淀的影响机理长期为人们所关注。Wright 和 Macey(2004)在地表条件下模拟含有白云石的库隆 湖水通过细菌硫酸盐还原作用(移走 SO4-)沉淀出 了具有有序反射的真正的白云石,说明了 SO₄²⁻ 在 作为白云石沉淀的动力学屏障中的意义。溶解 CaSO₄的加入可导致 Ca²⁺溶出量的降低和 Mg²⁺溶 出量的增加(黄思静等,2012)显然存在同离子效应 因素,较多的 Ca²⁺ 抑制了方解石中 Ca²⁺ 溶出,但 Ca2+的存在对改善 Mg2+溶出状况方面的机制尚不 清楚,同时 SO₄²⁻ 在白云石溶解中的机制也不清楚, 如在加入溶解 CaSO₄ 所导致 Mg²⁺溶出速度增加的 过程中,主要是 Ca²⁺ 的作用还是 SO₄²⁻ 的作用还需 要进一步研究(黄思静等,2012),这涉及到碳酸盐 岩地层中广泛存在的硫酸盐还原作用对碳酸盐矿物



图 6 柴西地区始新统石膏对碳酸盐岩孔隙度的影响 Fig. 6 Effects of gypsum on carbonate rock porosity of Eocene in Western Qaidam Basin

的影响问题。

研究区的湖相碳酸盐岩中白云石含量与物性投 点图(图7)显示出明显的正相关关系,这揭示了湖 相碳酸盐岩中的白云石含量多少对储层物性好坏起 着决定性的控制作用。图中白云石含量与孔隙度的 相关性明显好于其与渗透率的相关性,这与其孔隙 类型有关,孔隙半径极小但数量众多的白云石晶间 孔对孔隙度贡献较大但连通性较差,这类相对优质 的云质岩为研究区最重要的油气储集岩。

3.4 白云石化作用机理

关于白云岩(或白云石)成因的探讨一直是学 者们争论的热点,也是一个地质学难题,理清白云岩 成因问题对于开展白云岩储层的油气勘探工作尤为 重要。不同学者对不同地区甚至同一地区得出的白 云岩成因不尽相同(贺训云等,2014),主要包括以 下几种成因:淮同生白云石化(黄正良等,2011)、混 合水白云石化(赵俊兴等,2005)、渗透回流白云石 化(苏中堂等,2011)、埋藏白云石化(赵卫卫和王宝 清,2011)、微生物白云石化(付金华等,2011)以及 国内外研究热点之一的热液白云石化(朱东亚等, 2010; Lavoie and Morin, 2004; Lavoie et al., 2005; Wierzbicki et al., 2006; Hurley and Budros, 1990; Luczaj et al.,2006; Smith,2006; Wilkinson and Earls, 2000)。柴达木盆地柴西地区始新统的白云岩为湖 相沉积,以泥晶白云岩为主,含少量藻云岩。前人研 究成果显示,湖相白云岩的成因相对于海相来说略 显简单,多以准同生交代成因和热液成因为主(郑 荣才等,2006; 文华国等,2014),研究区岩石物性与 其白云石含量呈紧密正相关关系揭示了白云石化作 用对储集性的改善至关重要。

表3 柴西地区始新统下干柴沟组白云石电子探针成分组成分析结果(%)

Table 3 Electron microprobe analysis of chemical compositions (%) of the dolomite from the

									-					-
样品编号	深度 (m)	岩性	探 点	MgO	CaO	Na ₂ O	Al_2O_3	SiO ₂	K ₂ O	MnO	FeO	SrO	BaO	总量
	2020.05	含泥泥晶	1	12.079	20.732	0.156	5.022	9.475	1.303	0.137	1.620	0.012	0.039	50.575
YH101-26	2930.05	白云岩	2	12.203	22.207	0.216	2.681	5.154	0.484	0.003	1.507	0.055	0.022	44.532
			1	20.650	18.874	0.131	1.379	0.192	0.068	0.094	1.122	0.058	0.000	42.568
NU101 51	20.42.05	含粉砂泥	2	19.968	29.017	0.092	0.770	0.461	0.118	0.108	1.319	0.094	0.000	51.947
YH101-/1	2943.05	晶白云岩	3	12.668	33.064	0.257	0.445	1.404	0.059	0.036	0.938	0.173	0.033	49.077
			4	17.329	31.778	0.066	1.543	3.698	0.297	0.024	1.601	0.000	0.028	56.364
			1	11.274	24.603	0.382	6.062	10.381	1.589	0.055	0.756	0.000	0.065	55.167
VIII 01 150	2122.05	灰质泥晶	2	15.862	29.938	0.229	1.188	2.187	0.310	0.032	0.896	0.077	0.000	50.719
YH101-150	3132.05	白云岩	3	13.992	27.273	0.977	2.880	7.208	0.469	0.039	1.240	0.029	0.077	54.184
			4	14.154	30.724	0.166	0.329	1.047	0.118	0.029	0.857	0.193	0.000	47.617
YH101-238 315	2150 20	含粉砂泥	1	12.590	24.991	0.451	1.936	5.991	0.489	0.038	0.646	0.100	0.033	47.265
	3150.20	晶白云岩	2	11.403	21.534	0.051	2.187	6.934	0.552	0.019	1.048	0.168	0.032	43.928
	3192.68	含粉砂泥 晶白云岩	1	10.317	27.936	0.436	3.241	6.635	0.829	0.026	0.761	0.195	0.000	50.376
NU101 524			2	9.895	25.619	0.711	3.540	9.003	0.803	0.057	0.893	0.000	0.000	50.521
YH101-524			3	11.672	25.620	0.657	2.818	6.791	0.618	0.131	0.600	0.065	0.017	48.989
			4	10.565	20.963	0.238	2.357	6.855	0.552	0.060	0.258	0.000	0.028	41.876
		含泥泥晶	1	15.932	31.381	0.135	0.312	0.118	0.028	0.037	0.434	0.355	0.000	48.732
YH101-1176	3283.37		2	15.709	31.342	0.021	0.101	0.156	0.019	0.006	0.817	0.191	0.007	48.369
		日云石	3	14.634	30.239	0.317	0.562	1.686	0.055	0.060	0.584	0.331	0.016	48.484
	最小值			9.895	18.874	0.021	0.101	0.118	0.019	0.003	0.258	0.000	0.000	41.876
	最大值			20.650	33.064	0.977	6.062	10.381	1.690	0.137	1.648	0.355	0.098	56.364
	平均值			13.837	26.728	0.299	2.071	4.493	0.461	0.052	0.942	0.110	0.021	49.015
塔北地区	下奥陶统中	一粗晶热液												
白云岩,	,引自朱东亚	三等(2010)		19.769	30.748	0.014	/	0.003	0.005	0.323	1.917	0.006	0.026	52.810
白	的研究成果数	汝据												
青西凹陷	白垩系湖相	热液成因的												
含铁白云岩,引自文华国等(2014)				11.11	30.74	0.16	0.12	0	0.14	0.36	10.18	0.12	0.13	53.06
的研究成果数据														

Eocene Lower Ganchaigou Formation in Western Qaidam



图 7 柴西地区始新统岩石的孔隙度(a)、渗透率(b)值与白云石含量关系投点图 Fig. 7 The diagram porosity(a) and permeability(b) values vs. dolomite content of Eocene rocks in Western Qaidam Basin

藻云岩中可见藻纹层较为发育,电子探针能谱 面扫描图像(图8)显示,藻纹层分布区与镁元素富 集区高度吻合,充分显示白云石的原生生物成因特 性。目前文献报道的原生白云石的形成时代,基本 上是全新世以来(Wright,1999),最典型的实例为澳 大利亚维多利亚西部大陆盐湖(库隆泻湖)中的灰

白色白云岩与美国加州深泉盐湖底部的白云岩 (Deckker and Last, 1988;冯增昭, 1994;刘宝珺, 1980),在实验室常温常压条件下不易沉淀原生白 云石主要是由于受结晶动力学因素制约,白云岩化 模式的核心是构建富镁流体与先成钙质碳酸盐岩相 互作用的条件。研究区的藻云岩为微生物成因白云



图 8 柴西地区碳酸盐岩电子探针能谱面扫描图中 Mg 元素与藻纹层分布特征 (图片中较亮区域为 Mg 元素富集区,蓝色为底色)

Fig. 8 Mg and laminar algal distribution characteristics on electronic probe spectrum scanning map of Qaidam Basin carbonate (brighter area in the picture is Mg element enrichment zone, blue area is background)

(a)YH101-2,2927.20 m,含粉砂云质藻灰岩;蓝色为底色,图中亮度越大则镁元素含量越高。(b)YH101-5,2927.40 m,含砂灰质藻云岩; 蓝色为底色;图中亮度越大则镁元素含量越高

(a) YH101-2,2927. 20m, containing silt dolomitic algal limestone; blue is background; the greater of the brightness the higher magnesium content in the area. (b) YH101-5,2927. 40 m, containing silt lime algal dolostone; blue is background; the greater of the brightness the higher magnesium content in the area

岩,微生物活动能够克服动力学障碍,为白云石形成 营造出有利的微环境(文华国等,2014;Folk,1993), 柴西地区始新统下干柴沟组伴生的浮游藻类有机质 纹层和 CH₄ 气体的释放,大大消耗了流体中的 SO₄²⁻,使原来与 SO₄²⁻ 紧密结合的 Mg²⁺释放出来, 为白云石的沉淀提供了物质条件(文华国等, 2014),其可能的反应式如下:

 $CH_4 + MgSO_4 + CaCO_3 \longrightarrow$

 $CaMg(CO_3)_2 + H_2O + H_2S$

对泥晶白云岩中的白云石所做的电子探针成分 组成分析结果见表 3。泥晶白云岩中 CaO 的含量 18.874%~33.064%,平均为26.728%,低于白云 石中 CaO 的理论含量 30.411%, MgO 的含量 9.895%~20.650%,平均为13.837%,低于白云石 中 MgO 的理论含量 21.857%,由此可以计算出白云 石中 n(Ca)/n(Mg) 值为 1.388, 高于理想白云石 CaMg(CO₃), 的 n(Ca)/n(Mg) 值1,这种富钙低镁 的特征表明泥晶白云岩不是在成分组成上处于理想 状态的白云岩。Na₂O的含量稍高,0.021%~ 0.977%,平均为0.299%,表明了原始咸化湖盆沉 积的特征。FeO的含量位于 0.258% ~1.648%, 平 均为 0.942%, MnO 的含量 0.003%~0.137%, 平均 为0.052%, FeO和 MnO的平均含量明显低于热液 成因的白云岩中的 FeO 的平均含量 1.917% 和 MnO 的平均含量 0.323(朱东亚等,2010),也低于青西凹 陷受热液流体影响的原生白云岩中的铁锰含量 (FeO 的平均含量 10.18% 和 MnO 的平均含量 0.36)(文华国等,2014)。因各种来源的热液流体 通常都富含 Fe 和 Mn,研究区的这种白云岩具有较 低的 Fe 和 Mn 含量特征表明了其与热液活动无关 (Smith, 2006; Montanez, 1994)。SiO₂的含量 0.118%~10.381%,平均为4.493%, Al₂O₃的含量 0.101%~6.062%,平均为2.071%,反映出一种湖 盆边缘过渡相的混积沉积特征。

研究区的这种"高铝硅低铁锰"的地球化学特 征为典型准同生交代成因特征。从岩石孔隙结构上 看,准同生交代成因的白云石晶间孔的孔径大小明 显小于热液重结晶的白云石晶间孔,且相差一个数 量级或以上,前者多小于1µm,偏光显微镜下难以 分辨但在场发射扫描电镜下清晰可见,后者在偏光 显微镜下极易识别,多为数微米甚至十几微米。因 此,有理由相信,研究区的这一湖相泥晶白云岩为准 同生交代成因。

Mg²⁺和 Ca²⁺的离子半径分别为 0.078 nm 和

0.106 nm, Fe²⁺的离子半径为 0.083 nm(韩吟文和 马振东,2003),与 Mg²⁺的离子半径更为接近,因此 通常会取代白云石晶格中的 Mg²⁺,由此就可以把 FeO 的平均含量折算成 MgO 的平均含量,折算方法 为:MgO = FeO × (MgO 分子量/FeO 分子量),与 原来岩石中 MgO 的平均含量相加,可以得到折算 后的 MgO 平均含量为 14.365%, 由此可以重新计算 出白云石中 n(Ca)/n(Mg) 值为 1.337,虽然折算后 仍没有达到成分组成上的理想状态,但比原来的比 值1.388 更加接近于理论组成。X 射线衍射分析结 果显示研究区湖相白云岩中白云石的有序度较低, 分布在 0.35~0.53,这种低有序度和高 CaCO, mol 含量特征表明其形成于成核结晶速度较快的相对不 太稳定的准同生成岩环境(何莹等,2006),在该成 岩体系中,流体中 Mg²⁺置换 Ca²⁺的速度较快,在离 子表面上来不及进行有规律的排列,从而成为有序 度较低的白云岩(王兵杰等,2014;袁剑英等, 2015)

邻近的英西地区狮 38 井岩芯分析资料结果显示,始新统下干柴沟组碳酸盐岩中亦发育这套薄互层状的泥晶碳酸盐岩,其中白云石的电子探针成分组成分析结果(表4)表明,其同样具有较低的 Fe 和 Mn 含量特征(吴丽荣等,2015),SiO₂ 含量介于0.194%~10.675%,平均为4.158%,Al₂O₃含量位于0.206%~9.954%,平均为2.457%,与跃进地区跃灰101 井具有相同的"高铝硅低铁锰"的地球化学特征,反映了柴西地区发育的这一湖相准同生交代成因的泥晶白云岩平面上分布较广。

多年来,学者们提出了不同的白云化模式来解 释交代白云岩的成因(Reinhold, 1998),其中弄清富 镁流体的来源是刻画白云化模式的关键,对世界不 同地区白云岩的研究发现,富镁流体的来源是多种 多样的(张学丰等,2006),湖相沉积中的富镁流体 有的来源于正常湖水或蒸发卤水,有的来源于深部 热液流体,甚至粘土矿物转化亦可产生镁离子(黄 成刚等,2014b;黄成刚等,2015)。柴西地区始新统 的准同生交代白云岩是发生在近地表成岩条件下, 在高盐度的咸化环境中形成。由于蒸发作用使得空 气一液面界面所处的湖水盐度增高,表层形成较重 盐水,重盐水中可分异出 Mg²⁺(王兵杰等,2014), 这些 Mg²⁺ 为研究区富镁流体的重要来源,为白云石 的形成奠定了物质基础。当湖水逐渐由不饱和变成 过饱和或局部过饱和时,CaCO₃和 CaSO₄的不断沉 淀会消耗掉大量Ca²⁺,使得体系中Mg/Ca比值显

表 4 柴达木盆地英西地区始新统下干柴沟组白云石电子探针成分组成分析结果(%)(据吴丽荣等,2015) Table 4 Electron microprobe analysis of chemical compositions (%) of the dolomite from the Eocene Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area in Qaidam Basin(after Wu Lirong et al., 2015&)

	8			0	-		•		0			•	
井	岩性	深度(m)	探针点	MgO	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K20	MnO	FeO	SrO	BaO
狮 38-4	含云灰岩	2800.72	1	13.591	30.517	1.138	3.638	10.675	0.95	0.075	1.683	0	0.008
			2	18.594	38.647	0.187	0.415	0.903	0.133	0.094	1.214	0.134	0
			3	11.592	28.834	0.581	9.954	9.895	0.922	0.064	2.264	0	0.012
	含粉砂白云岩	3146.36	1	22.222	34.066	0.155	0.213	0.836	0.13	0.003	0.773	0.052	0
			2	18.911	37.264	0.293	1.104	0.839	0.141	0.061	0.976	0.096	0
狮 38-6			3	18.216	31.3	1.332	2.904	8.284	0.415	0	0.421	0	0.004
			4	17.918	32.842	0.055	1.218	1.636	0.161	0.062	1.602	0.104	0.023
			5	21.14	35.694	0.16	0.206	0.194	0.035	0.118	1.644	0	0
	平均值			17.773	33.646	0.488	2.457	4.158	0.361	0.06	1.322	0.048	0.006

著升高,从而促进了 CaCO₃ 的被交代(张学丰等, 2006),研究区的岩石在扫描电镜下常见石膏和石 盐晶体(经能谱确认成分为 CaSO₄ 和 NaCl)发育证 实了上述推测,并且这种准同生交代成因的白云岩 往往在平面上分布范围较广,不同于受断裂以及与 断裂相沟通的裂缝控制的热液成因白云岩的分布 (朱东亚等,2010),结合全区钻井资料初步估算,这 类云质岩在柴西地区的分布面积约 1400 km²。

4 结论

(1)柴西地区始新统致密的湖相混积岩以碳酸 盐岩为主,其中相对优质的储集岩为白云石化岩类, 平均孔隙度为 12.5%,平均渗透率为 0.194×10⁻³ μm²,为"中孔一特低渗"型储层。孔隙半径极小但 数量众多的白云石晶间孔极其发育,场发射扫描电 镜下可见其孔径多小于1μm,这种形成于成核结晶 速度较快的准同生成岩环境的白云石晶间孔明显小 于热液重结晶形成的白云石晶间孔,后者通常具有 数微米或十几微米大小的孔径。

(2)通过电子探针能谱元素面扫描分析,发现 了研究区分布极少的一类白云岩——藻云岩,岩石 中藻纹层分布区与镁元素富集区高度吻合,充分显 示白云石的原生生物成因特性,微生物活动克服动 力学障碍为白云石形成营造出有利的微环境。研究 区最主要的白云岩类型为准同生交代成因的泥晶白 云岩,对其中白云石所做的电子探针成分组成分析 结果显示,其具有的"高铝硅低铁锰"的地球化学特 征明显不同于热液白云岩。

(3)在近地表成岩条件下,在高盐度的咸化环 境中形成的准同生交代成因的白云岩通常在平面上 的分布范围较广,蒸发作用致使湖水盐度增高或致 部分盐类矿物沉淀,从而形成富镁流体交代 CaCO₃, 这种准同生交代成因模式形成的白云岩在区域上往 往成片发育,完全不同于受断裂以及与断裂相沟通 的裂缝控制的热液成因白云岩的分布,且交代作用 形成的这类极小的晶间微孔的抗压实能力远大于碎 屑颗粒间堆积形成的较大孔隙的抗压实能力,前者 在深层仍然易于保存,这一研究成果对扩展柴达木 盆地柴西地区的致密碳酸盐岩油气勘探领域具有重 要意义。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 曹正林,袁剑英,黄成刚,魏志福,张世铭,王莹,佘敏.2014. 高温高压 碎屑岩储层中石膏溶解对方解石沉淀的影响. 石油学报,35 (3):450~454.
- 丁一,李智武,冯逢,翟中华,孙玮,汤聪,张葳,张长俊,刘树根. 2013.川中龙岗地区下侏罗统自流井组大安寨段湖相混合沉积 及其致密油勘探意义.地质论评,59(2):389~400.
- 冯增昭.1994.沉积岩石学(第二版).北京:石油工业出版社.
- 付金华,王宝清,孙六一,包洪平,徐波.2011.鄂尔多斯盆地苏里格地 区奥陶系马家沟组白云石化.石油实验地质,33(3):266~273.
- 付锁堂,张道伟,薛建勤,张晓宝.2013. 柴达木盆地致密油形成的地 质条件及勘探潜力分析. 沉积学报,31(4):672~682.
- 高胜利,王连敏,武玺,高鹏鹏.2012. 渤海湾盆地黄骅坳陷齐家务地 区沙一下亚段湖相碳酸盐岩储层地球化学特征. 石油实验地质, 34(3):309~313.
- 国家能源局.2011. 中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T6285 ~2011: 油气储层评价方法.北京:石油工业出版社:2.
- 韩吟文,马振东.2003.地球化学.北京:地质出版社,62,133.
- 何莹,鲍志东,沈安江,申银民,李明和.2006. 塔里木盆地牙哈一英 买力地区寒武系一下奥陶统白云岩形成机理. 沉积学报,24 (6):806~818.
- 贺训云,寿建峰,沈安江,吴兴宁,王永生,胡圆圆,朱吟,韦东晓. 2014. 白云岩地球化学特征及成因——以鄂尔多斯盆地靖西马 五段中组合为例. 石油勘探与开发,41(3):375~384.
- 黄成刚,袁剑英,曹正林,张世铭,王莹,佘敏.2014a. 咸化湖盆中酸性

流体对碎屑岩储层的改造作用.地球科学与环境学报,36(03): 52~60.

- 黄成刚,袁剑英,曹正林,张世铭,王莹,佘敏.2014b. 咸化湖盆碎屑岩 储层中铁白云石的溶蚀作用模拟实验研究. 石油实验地质,36 (5):650~655.
- 黄成刚,袁剑英,曹正林,张世铭,王莹,佘敏. 2015. 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.矿物岩石地 球化学通报,34(2):345~350.
- 黄思静,杨俊杰,张文正,黄月明,刘桂霞,肖林萍. 1996. 石膏对白 云岩溶解影响的实验模拟研究.沉积学报,14(1):103~109.
- 黄思静,成欣怡,赵杰,张文正.近地表温压条件下白云岩溶解过程的 实验研究.中国岩溶,2012,31(4):349~359.
- 黄正良,包洪平,任军峰,白海峰,武春英. 2011. 鄂尔多斯盆地南部 奥陶系马家沟组白云岩特征及成因机理分析.现代地质,25 (5):925~930.
- 贾承造,邹才能,李建忠,李登华,郑民. 2012. 中国致密油评价标 准、主要类型、基本特征及资源前景. 石油学报,33(3):343 ~ 350.
- 金强,朱光友.2006.中国中新生代咸化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展.高校地质学报,12(4):483~492.
- 金强.2003. 柴达木盆地西部第三系盐湖沉积物微量元素组成及其地 球化学特征. 石油大学学报,27(2):1~5.
- 匡立春,唐勇,雷德文,常秋生,欧阳敏,侯连华,刘得光. 2012.准噶 尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力.石 油勘探与开发,39(6):657~667.
- 刘宝珺.1980.沉积岩石学.北京:地质出版社.
- 毛玲玲,伊海生,季长军,夏国清. 2014. 柴达木盆地新生代湖相碳 酸盐岩岩石学及碳氧同位素特征. 地质科技情报,33(1):41~ 48.
- 彭传圣. 2011. 湖相碳酸盐岩有利储集层分布——以渤海湾盆地沾 化凹陷沙四上亚段为例. 石油勘探与开发,38(4):435~443.
- 蒲秀刚,周立宏,肖敦清,滑双君,陈长伟,袁选俊,韩国猛,张伟. 2011. 黄骅坳陷歧口凹陷西南缘湖相碳酸盐岩地质特征.石油 勘探与开发,38(2):136~144.
- 苏中堂,陈洪德,徐粉燕,魏柳斌,李洁. 2011. 鄂尔多斯盆地马家沟 组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析. 岩石学报,27 (8):2230~2238.
- 唐丽,张晓宝,龙国徽,徐峰,王波,韩海燕,徐丽,杨梅,李海鹏,王国 仓. 2013. 湖相碳酸盐岩油气藏特征及成藏分析——以柴达木 盆地南翼山油气藏为例.天然气地球科学,24(3):591~598.
- 妥进才,黄杏珍.1996. 湖相碳酸盐岩生油岩研究进展. 地球科学进展,11(6):585~589.
- 妥进才,邵宏舜,黄杏珍.1995.湖相碳酸盐岩生油岩及其有机地球化 学特征:以柴达木盆地第三系为例.石油实验地质,17(3):272 ~276.
- 王兵杰,蔡明俊,林春明,张霞,程远忠,曲长伟,张妮. 2014. 渤海湾 盆地塘沽地区古近系沙河街组湖相白云岩特征及成因. 古地理 学报,16(1):65~76.
- 王彩凤,王连进,邵先杰,胥吴,孙玉波,刘英杰. 2013. 苏北盆地湖 相碳酸盐岩油藏油井生产特征及开发技术对策.油气地质与采 收率,20(1):100~104.
- 王英华,周书欣,张秀莲. 1991. 中国湖相碳酸盐岩. 北京:中国矿业大学出版社,9~123.
- 文华国,郑荣才,范铭涛,李雅楠,宫博识. 2014. 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.中国科学:地球 科学,44(4):591~604.
- 吴丽荣,黄成刚,袁剑英,万传治,潘星,张世铭,李智勇.2015.咸化湖 盆混积岩中双重孔隙介质及其油气储集意义.地球科学与环境

学报,37(2):59~67.

夏青松,田景春,倪新锋.2003. 湖相碳酸盐岩研究现状及意义. 沉积 与特提斯地质,23(1):105~112.

123

- 徐亮.2013.东营凹陷碳酸盐岩白云石化储层孔隙形成机理研究.矿 物岩石地球化学通报,32(4):463~467.
- 徐伟,陈开远,曹正林,薛建勤,肖鹏,王文涛. 2014. 咸化湖盆混积 岩成因机理研究.岩石学报,30(6):1804~1816.
- 闫志为,张志卫.2009. 氯化物对方解石和白云石矿物溶解度的影响. 水文地质工程地质,36(1):113~118.
- 杨朝青,沙庆安.1990.云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境:陆源碎 屑与海相碳酸盐的混合沉积.沉积学报,8(2):60~63.
- 袁剑英,黄成刚,曹正林,李智勇,万传治,徐丽,潘星,吴丽荣.2015. 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.地球化学,44(3):254~266.
- 张晓宝,胡勇,马立元,彭德华,孟自芳,段毅,周世新. 2002. 柴达木 盆地西部第三系盐湖相天然气碳同位素特征、成因与分布.中国 科学(D辑),32(7):598~608.

张雄华.2000. 混积岩的分类和成因. 地质科技情报, 19(4):31~34.

- 张学丰,胡文瑄,张军涛.2006.白云岩成因相关问题及主要形成模式,地质科技情报,25:32~40.
- 赵俊兴,陈洪德,张锦泉,刘小丽,付锁堂. 2005. 鄂尔多斯盆地中部 马五段白云岩成因机理研究.石油学报,26(5):38~41.
- 赵卫卫,王宝清.2011.鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系马家沟组马 五段白云岩的地球化学特征.地球学报,32(6):681~690.
- 郑剑锋,沈安江,乔占峰,倪新锋. 2013. 塔里木盆地下奥陶统蓬莱 坝组白云岩成因及储层主控因素分析——以巴楚大班塔格剖面 为例. 岩石学报,29(9):3223~3232.
- 郑荣才,文华国,范铭涛,汪满福,吴国瑄,夏佩芬.2006. 酒西盆地下 沟组湖相白烟型喷流岩岩石学特征. 岩石学报,22(12):3027~ 3038.
- 周书欣,赖特 V P,普拉特 N H. 1991. 湖泊沉积体系与油气. 北京:科 学出版社,81~113.
- 朱东亚,金之钧,胡文瑄.2010.塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶 作用及其油气储集意义.中国科学:地球科学,40(2):156~ 170.
- Benson L. 1993. Factors affecting ¹⁴C ages of lacustrine carbonates: Timing and duration of the last highstand lake in the Labontan Basin. Quaternary Research, 39(2): 163 ~ 174.
- Bustillo M A, Arribas M E, Bustillo M. 2002. Dolomitization and silicification in low-energy lacustrine carbonates (Paleogene, Madrid Basin, Spin). Sedimentary Geology, 151(1~2): 107~126.
- Cao Zhenglin, Yuan Jianying, Huang Chenggang, Wei Zhifu, Zhang Shiming, Wang Ying, She Min. 2014&. Influence of plaster dissolution on calcite precipitation in clastic reservoirs under hightemperature and high-pressure conditions. Acta Petrolei Sinica, 35 (3):450~454.
- Cohen A S, Thouin C. 1987. Near-shore carbonate deposits in lake. Tanganyika Geology, 15: 414~418.
- Deckker P D, Last W M. 1988. Modern dolomite deposition in continental, Saline Lakes, Western Victoria, Australia. Geology, 16: 29 ~ 32.
- Ding Yi, LI Zhiwu, Feng Feng, Zhai Zhonghua, Swn Wei, Tang Cong, Zhang Wei, Zhang Changjun, LIU Shugen. 2013 &. Mixing of Lacustrine Siliciclastic—Carbonate Sediments and Its Significance for Tight Oil Exploration in the Daanzhai Member, Ziliujing Formation, Lower Jurassic, in Longgang Area, Central Sichuan Basin. Geological Review, 59(2):389 ~ 400.
- Feng Zengzhao. 1994 #. Sedimentary petrology (the 2nd edition). Beijing: Petroleum Industry Press.

- Folk R L. 1993. SEM imaging of bacteria and nannobacteria in carbonate sediments and rocks. J Sediment Petrol, 63: 990 ~ 999.
- Fu Jinhua, Wang Baoqing, Sun Liuyi, Bao Hongping, Xu Bo. 2011&. Dolomitization of Ordovician Majiagou Formation in Sulige Region, Ordos Basin. Petroleum Geology & Experiment, 33 (3): 266 ~ 273.
- Fu Suotang Zhang Daowei Xue Jianqin, Zhang Xiaobao. 2013&. Exploration Potential and Geological Conditions of Tight Oil in the Qaidam Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 31(4):672~682.
- Gao Shengli, Wang lianmin, Wu Xi, Gao Pengpeng. 2012 &. Geochemical characteristics of lacustrine carbonate rocks in lower part of first member of Shahejie Formation in Qijiawu area of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. Petroleum Geology&Experiment, 34 (3):309 ~ 313.
- Han Yinwen, Ma Zhendong. 2003#. Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House: 62,133.
- He Xunyun, Shou Jianfeng, Shen Anjiang, Wu Xingning; Wang Yongsheng; Hu Yuanyuan; Zhu Yin; Wei Dongxiao. 2014&. Geochemical characteristics and origin of dolomite: A case study from the middle assemblage of Majiagou Formation Member 5 of the west of Jingbian Gas Field, Ordos Basin, North China. Petroleum Exploration and Development,41(3): 375 ~ 384.
- He Ying, Bao Zhidong, Shen Anjiang, Shen Yinmin, Li Minghe. 2006&. The Genetic Mechanism of Dolostones of the Cambrian—Lower Ordovician in Yaha—Yingmaili Region, Tarim Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 24(6):806~818.
- Holmes CW. 1983. Carbonate and siliciclastic deposits on slope and abyssal floor adjacent to southwestern Florida platform. AAPG Bulletin, 67(3): 484~485.
- Huang Chenggang, Yuan Jianying, Cao Zhenglin, Zhang Shiming, Wang Ying, She Min . 2015&. The study of simulate experiment about the saline fluid—rock interaction in clastic reservoir in saline lacustrine basin. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemist, 34(2): 345~350.
- Huang Chenggang, Yuan Jianying, Cao Zhenglin, Zhang Shiming, Wang Ying, She Min . 2014 &. Reconstruction of Acid Fluid on Clastic Reservoir in Saline Lacustrine Basin. Journal of Earth Sciences and Environment, 36(03):52~60.
- Huang Chenggang, Yuan Jianying, Cao Zhenglin , Zhang Shiming, Wang Ying, She Min . 2014&. Simulation experiment for the ankerite dissolution in clastic reservoir of saline lacustrine basin. Petroleum Geology&Experiment, 36(5):650~655.
- Huang Sijing, Xiao Linping, Yang Junjie, Zhang Wenzheng, Huang Yueming, Liu Guixia. 2000. Experimental simulation of dolomite dissolution under burial diagenesis condition and thermodynamic interpretation. Chinese J Geology Chemical, 19(1): 58 ~ 64.
- Huang Sijing, Cheng Xinyi, Zhao Jie, Zhang Wenzheng. 2012&. Test on the dolomite dissolution under subaerial temperature and pressure. Carsologica Sinica, 31(4):349 ~ 359.
- Huang Sijing; Yang Junjie, Zhang Wenzheng, Huang Yueming, Liu Guixia and Xiao Linping. 1996 &. Effects of gypsum (or anhydrite) on dissolution of dolomite under different temperatures and pressures of epigenesis and burial diagenesis. Acta Sedimentologica Sinica, 14 (1):103 ~ 109.
- Huang Zhengliang, Bao Hongping, Ren Junfeng, Bai Haifeng, Wu Chunying. 2011&. Characteristics and genesis of dolomite in Majiagou Formation of Ordovician, south of Ordos Basin. Geoscience, 25(5): 925 ~ 930.
- Hurley N F, Budros R. 1990. Albion-scipio and stony point fields-USA Michigan Basin. In: Beaumont E A, Foster N H, eds.

 $\label{eq:stratigraphic Traps 1, AAPG Treatise of Petroleum Geology, Atlas of Oil and Gas Fields. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1 ~38.$

- Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, Li Denghua, Zheng Min. 2012&. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in china. Acta Petrolei Sinica, 33 (3): 343 ~ 350.
- Jin Qiang, Zhu Guangyou. 2006&. Progress in research of deposition of oil source rocks in Saline lakes and their hydrocarbon generation. Geological Journal of China Universities, 12(4): 483 ~ 492.
- Jin Qiang. 2003 &. Geochemistry characteristics of trace elements in evaporates of the tertiary in wastern Qaidam basin. Journal of the University of Petroleum, China, 27(2):1~5.
- Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, Chang Qiusheng, Ouyang Min, Hou Lianhua, Liu Deguang. 2012 &. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 39(6): 657 ~ 667.
- Lavoie D, Chi G, Brennan-Alpert P, Desrochers A, Bertrand R. 2005. Hydrothermal dolomitization in the lower Ordovician Romaine formation of the Anticosti basin: Significance for hydrocarbon exploration. Bull Can Petrol Geol, 53: 454 ~ 472.
- Lavoie D, Morin C. 2004. Hydrothermal dolomitization in the lower Silurian Sayabec formation in northern Gaspé—Matapédia (Québec): Constraint on timing of porosity and regional significance for hydrocarbon reservoirs. Bull Can Petrol Geol, 52: 256 ~ 269.
- Liu Baojun. 1980 #. Sedimentary petrology. Beijing: Geological Publishing House.
- Luczaj J A, Harrison III W B, Williams N S. 2006. Fractured hydrothermal dolomite reservoirs in the Devonian Dundee Formation of the central Michigan Basin. Am Assoc Petrol Geol Bull, 90: 1787 ~ 1801.
- Mao Lingling, Yi Haisheng, Ji Changjun, Xia Guoqing. 2014&. Petrography and carbon—oxygen isotope characteristics of the Cenozoic lacustrine carbonate rocks in Qaidam Basin. Geological Science and Technology Information, 33(1): 41~48.
- Montanez I P. 1994. Late diagenetic dolomitization of Lower Ordovician Upper Knox carbonates: A record of the hydrodynamic evolution of the southern Appalachian Basin. Am Assoc Petrol Geol Bull, 78: 1210 ~ 1239.
- Mount J F. 1984. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. Geology, 12:432~435.
- Mount J F. 1985. Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification. Sedimentology, 32(3):435 ~ 442.
- National Energy Administration. 2011#. The people's Republic of China Petroleum and natural gas industry standards SY/T 6285 – 2011 – Method for reservoir evaluation of oil and gas. Beijing: Petroleum Industry Press: 2.
- Peng Chuansheng. 2011 &. Distribution of favorable lacustrine carbonate reservoirs: A case from the Upper Es4 of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin. Petroleum Exploration and Development ,38(4):435 ~443.
- Pu Xiugang, Zhou Lihong, Xiao Dunqing, Hua Shuangjun, Chen Changwei, Yuan Xuanjun, Han Guomeng, Zhang Wei. 2011&. Lacustrine carbonates in the southwest margin of Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. Petroleum Exploration and Development, 38(2):136~144.
- Reinhold C. 1998, Multiple episodes of dolomitization and dolomite recrystallization during shallow burial in Upper Jurassic shelf carbonates eastern Swabian Alb, southern Germany . Sedimentary

Geology, $121:\!71\sim\!95.$

- Smith L B. 2006. Origin and reservoir characteristics of Upper Ordovician Trenton—Black River hydrothermal dolomite reservoirs in New York. Am Assoc Petrol Geol Bull, 90: 1691 ~ 1718.
- Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, Wei Liubin, Liu Jie. 2011&. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China. Acta Petrologica Sinica, 27(8): 2230 ~ 2238.
- Tang Li ,Zhang Xiaobao ,Long Guohui ,Xu Feng ,WangBo ,Han Haiyan ,Xu Li, Yang Mei, Li Haipeng, Wang Guocang. 2013 &. Pool features and hydrocarbon accumulation analysis of lacustrine carbonate rock: Take Nanyishan Reservior in Qaidam Basin as an example. Natural Gas Geoscience, 24(3):591 ~ 598.
- Tirsgaard H. 1996. Cyclic sedimentation of carbonate and siliciclastic deposits on a Late Precambrian ramp: The Elisabeth Bjerg Formation (Eleonore Bay Supergroup) , East Greenland. Journal of Sedimentary Research, 66 (4): 699 ~712.
- Tueher M E, Wright V P. 1990. Carbonate sedimentology. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Tuo Jincai, Huang Xingzhen. 1996&. Advances on lacustrine carbonate source rocks research. Advances in Earth Science, 11(6): 585 ~ 589.
- Tuo Jincai, Shao Hongshun, Huang Xingzhen. 1995 &. Lacustrine carbonate source rocks and their organic geochemical characteristics: Taking the Tertiary system of Qaidam Basin as an example. Experimental Petroleum Geology, 17(3): 272 ~ 276.
- Wang Bingjie, Cai Mingjun, Lin Chunming, Zhang Xia, Cheng Yuanzhong, Qu Changwei, Zhang Ni. 2014 &. Characteristics and origin of lacustrine dolostone of the Paleogene Shahejie Formation in Tanggu area, Bohai Bay Basin. Journal of Palaeogeography, 16(1): 65 ~ 76.
- Wang Caifeng, Wang Lianjin, Shao Xianjie, Xu Hao, Sun Yubo, Liu Yingjie. 2013&. Well production characteristics and development technical measures in lacustrine carbonate reservoir of Subei Basin. Petroleum. Geology and Recovery Efficiency, 20(1): 100 ~104.
- Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. 1991 #. Lacustrine carbonate rocks in China. Beijing: China University of Mining and Technology Press: 9 ~ 123.
- Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Qing Hairou, Li Yanan, Gong Boshi. 2014
 #. Primary dolostone related to the Cretaceous lacustrine hydrothermal sedimentation in Qingxi sag, Jiuquan Basin on the northern Tibetan Plateau. Science China: Earth Sciences, 44(4): 591 ~ 604.
- Wierzbicki R, Dravis J J, Al-Aasm I, Harland N. 2006. Burial dolomitization and dissolution of Upper Jurassic Abenaki platform carbonates, Deep Panuke reservoir, Nova Scotia, Canada. Am Assoc Petrol Geol Bull, 90: 1843 ~ 1861.
- Wilkinson J J, Earls G. 2000. A high temperature hydrothermal origin for black dolomite matrix breccias in the Irish Zn—Pb orefield. Mineral Mag, 64: 1017 ~1036.
- Wright D T, Macey D. 2004, Sedimentary dolomite: A reality check Braithwaite C. J. R., Rizzi G., Darje G., (eds). The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs. Geological Society (London), Special Publications, 235:65 ~ 74.
- Wright D T. 1999. The role of sulphate reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia. Sediment Geol, 126: 147 ~ 157.
- Wu Lirong, Huang Chenggang, Yuan Jianying, Wan Chuanzhi, Pan Xing, Zhang Shiming, Li Zhiyong. 2015&. The Double-porosity

System of Mixed Sediments in the Saline Lacustrine Basin and its Significance to Reservoir. Journal of Earth Sciences and Environment, 37(3) : Printing.

- Xia Qingsong, Tian Jingchun, Ni Xinfeng. 2003&. Lacustrine carbonate rocks in China: An overview. Sedimentary Geology and Tethyan Geology ,23(1):105 ~ 112
- Xu Liang. 2013&. Effects of dolomitization in carbonate rocks on reservoir porosity in the Dongying Depression. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(4):463~467.
- Xu Wei, Chen Kaiyuan, Cao Zhenglin, Xue Jianqin, Xiao Peng, Wang Wentao. 2014 &. Original mechanism of mixed sediments in the saline lacustrine basin. Acta Petrologica Sinica. 30(6): 1804 ~ 1816.
- Yan Zhiwei , Zhang Zhiwei. 2009&. The effect of chloride on the solubility of calcite and dolomite. Hydrogeology & Engineering Geology, 36(1):113~118.
- Yang Chaoqing, Sha Qingan. 1990&. Sedimentary environment of the Middle Devonian Qujiang Formation, a kind of mixing sediment at ion of terrigenous clastics and carbonate. Acta Sedimentologica Sinica, 8(2): 60~63.
- Yuan jianying, Huang Chenggang, Cao Zhenglin , Wan Chuanzhi, Xu Li, Pan Xing, Wu Lirong. 2015 &. The Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Saline Lacustrine Dolomite and Palaeoenvironmental significance: a Case Study of the Eocene Lower Ganchaigou Formation in Western Qaidam Basin. Geochemistry, 44 (3): 254 ~ 266.
- Zhang Xiaobao, Hu Yong, Ma Liyuan, Peng Dehua, Meng Zifang, Duan Yi, Zhou Shixin. 2002 #. Carbon isotope compositions of natural gases from saline sediments in Qaidam Basin and their origin and distribution. China Science (ser. D), 32(7): 598 ~608.
- Zhang Xionghua. 2000 &. Classification and origin of mixosedimentite. Geological Science and Technology Information, 19 (4): 31 ~ 34.
- Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao. 2006 &. Critical problems for dolomite formation and dolomitization models. Geological Science and Technology Information, 25(5): 32 ~40.
- Zhao Junxing, Chen Hongde, Zhang Jinquan, Liu Xiaoli, Fu Suotang. 2005& . Genesis of dolomite in the fifth member of Majiagou Formation in the middle Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica,26(5): 38~41,47.
- Zhao Weiwei, Wang Baoqing. 2011 &. Geochemical characteristics of dolomite from 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in Sulige Area, Ordos Basin. Acta Geoscientica Sinica, 32(6): 681 ~690.
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, Ni Xinfeng. 2013&. Genesis of dolomite and main controlling factors of reservoir in Penglaiba Formation of Lower Ordovician, Tarim Basin: A case study of Dabantage outcrop in Bachu area. Acta Petrologica Sinica, 29 (9): 3223 ~ 3232.
- Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Fan Mingtao, Wang Manfu, Wu Guoxuan, Xia Peifen. 2006&. Lithological characteristics of sublacustrine white smoke type exhalative rock of the Xiagou Formation in Jiuxi Basin. Acta Petrologica Sinica, 22(12):3027 ~ 3038.
- Zhou Shuxin, Jester V P, Pulater N H. 1991#. The lake sedimentary system and oil and gas. Beijing: Science Press: 81 ~ 113.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. 2010 #. Hydrothermal recrystallization of the Lower Ordovician dolomite and its significance to reservoir in northern Tarim Basin. Science China: Earth Sciences,40(2): 156~170.

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

YUAN Jianying¹⁾, HUANG Chenggang¹⁾, XIA Qingsong²⁾, CAO Zhenglin¹⁾, ZHAO Fan¹⁾, WAN Chuanzhi¹⁾, PAN Xing³⁾

1) Key Laboratory of Reservoir Description, Northwest Branch of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Lanzhou, 730020;

2) School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500;

3) Geological Science and Mineral Resources of Lanzhou University, Lanzhou, 730001

Objectives: In recent years, significant progress has been achieved in exploring petroleum of dense reservoir of Eocene in Western Qaidam Basin. It mainly consists of lacustrine carbonate rocks. Among these rocks, dolomitization rocks are high quality reservoir rocks.

Methods and Results: By combining the petrologic, structural and geochemical methods, most dolomite rocks has the clay crystal structure and minority was algal dolomite. They have characteristics of "medium porosity – ultra – low permeability", which mainly includes micrite dolomite and a little of algal dolomite. The pores of the rocks are mainly the intercrystalline pores, and there are a little of dissolution pores locally. The analysis based on electronic probe energy spectrum scanning instrument shows that the enrichment region of element Mg in the algal dolomite is highly consistent with the distribution of algal laminas, which means the algal dolomite is a microbiogenic primary dolomite, because the microbial activities can overcome the kinetic obstacles and create a favorable microenvironment for the formation of dolomite. The observation results under the microscope and the analysis based on X – ray diffraction instrument shows that most dolomicrite includes clastic particles and argillaceous components because of the combined sedimentation of clastic materials brought from the peripheral braided delta deposit. The rock composition analysis based on the electronic probe shows that the rock has the characteristics of high Si and Al content and low content of Fe and Mn. The average content of FeO in the dolomicrite is 0.942%, and that of MnO is 0.052%, which are obviously lower than the average contents of Fe and Mn in the hydrothermal dolomite reported in literature. It is considered that the dolomicrite has a penecontemporaneous metasomatic origin.

Conclusions: This type of dolomicrite generated a lot of dispersive intercrystalline pores during the metasomatism. The pore radius is small and the pore number is enormous, which are the main cause of relatively high porosity and relatively low permeability. This discovery has important implications for the oil and gas exploration in the carbonate rock reservoir of the Eocene in Qaidam Basin.

Keywords: Qaidam Basin; saline lacustrine basin; carbonate reservoirs; penecontemporaneous metasomatism; dolomite; plaster; intercrystalline pore; formation mechanism.

Acknowlegements: Financial supports by the major scientific and technological projects of Petrochina, called "Research on the construction of oil and gas output of 10 million tons in the Qaidam Basin(No. 2011E - 03)" and the national oil and gas projects, called "Oil and gas accumulation rule, key technique and target evaluation in foreland basin (No. 2011ZX05003)" are gratefully acknowledged.

First Author: YUAN Jianying, born in 1965, professor, mainly engaged in the study of petroleum geology and geochemistry. Email address: yuan_jy@ petrochina. com. cn.

Manuscript received on: 2014-12-19; Accepted on: 2015-11-29; Edited by: HUANG Min.

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.01.010