

文章编号: 1001-6112(2010)05-0470-05

塔里木盆地奥陶系孔隙型白云岩储层成因

张 静, 罗 平

(中国石油勘探开发研究院 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:塔里木盆地地下奥陶统存在大量基质孔隙发育的深埋白云岩, 是一类优质储层。岩心、薄片观察和阴极发光分析表明该类白云岩的发育具有明显的相控特征, 以滩相颗粒灰岩为原岩。岩石学特征和微量元素、有序度及包裹体均一温度特征研究表明, 该类白云岩形成于埋藏环境中, 属埋藏白云石化作用的产物。由微量元素、稀土元素及锶同位素特征判断白云石化流体为受改造的海水, 很可能与深部封存的蒸发台地相海水有关。推断塔里木盆地二叠纪大规模火山活动是台地相区白云石化作用的主要驱动机制, 寒武系蒸发台地中富含镁离子的海水在广泛的热作用驱动下交代其上覆灰岩而形成白云岩。

关键词:白云石化; 白云岩; 储层; 下奥陶统; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.2⁺1

文献标识码: A

GENESIS OF ORDOVICIAN MATRIX-POROSITY DOLOMITE RESERVOIR IN THE TARIM BASIN

Zhang Jing, Luo Ping

(State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Research Institute
of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China)

Abstract: There is a large quantity of deeply buried dolomite with well-developed matrix porosity in the Lower Ordovician of the Tarim Basin which can be quality reservoir. The development of this kind of dolomite is facies-controlled and the initial rock is grainstone of grain bank facies, according to the analyses of cores, thin sections and cathodeluminescence. The dolomite formed under burial condition which is the product of burial dolomitization, based on the study of petrology, trace element, degree of order and homogenization temperature of the dolomite. It is predicted from the trace element, rare earth element and Sr isotope that the dolomitizing fluid is modified seawater which may be related to Mg²⁺-bearing seawater in Cambrian evaporative platform. Permian volcanic activity is supposed to be the driving force of dolomitization over the entire platform and the burial dolomite in the Lower Ordovician formed by means of the replacement of overlying limestone by underlying Mg²⁺-bearing seawater in Cambrian evaporative platform through thermal convection.

Key words: dolomitization; dolomite; reservoir; Lower Ordovician; Tarim Basin

1 区域地质概况

塔里木寒武—奥陶纪原型盆地具有典型的三分结构, 即碳酸盐台地区、斜坡区和盆地区, 构成三大类沉积体系组合^[1]。寒武纪—早奥陶世, 塔里木盆地构造活动相对稳定, 地形较为平坦, 气候干热, 盆地中部和西部的海水浅而清澈, 陆源碎屑贫乏, 发育典型的碳酸盐台地, 向东逐渐为斜坡和盆地相所取代(图 1)。

碳酸盐台地沉积体系包括台地相、潮坪相、蒸

发台地相和台地边缘相。寒武—奥陶系总体发育于海平面上升的背景下, 是一个大的海进式沉积序列。台地结构在寒武纪为缓坡型, 其中早寒武世经历了短暂的深水盆地环境。到中寒武世, 虽然海进仍在继续, 但塔里木台地的水体却有所变浅, 气候变干燥, 海水蒸发量大, 形成蒸发台地环境, 发育膏岩湖沉积, 面积约 230 000 km²。从晚寒武世到早奥陶世, 海平面逐渐上升, 台地结构在早奥陶世演变为弱镶边型, 蓬莱坝组沉积期发育台地边缘滩和台内颗粒滩沉积^[2-4]。

收稿日期: 2010-03-12; 修订日期: 2010-09-28。

作者简介: 张静(1979—), 女, 博士, 工程师, 主要从事碳酸盐岩储层研究。E-mail: zj_1224@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202304)。

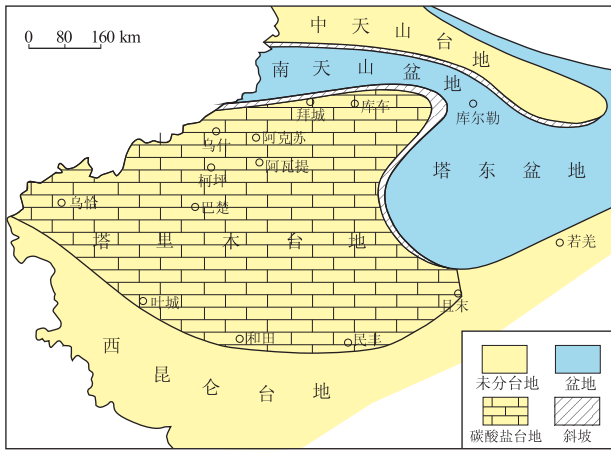


图1 塔里木盆地早奥陶世古地理格局
据冯增昭等^[1],2007,有改动。

Fig.1 Palaeogeographic map of Early Ordovician, Tarim Basin

奥陶系白云岩总厚度为 300~1 000 m,大部分赋存于下奥陶统下部的蓬莱坝组中。白云岩埋深普遍较大,多在 4 000~6 500 m。蓬莱坝组下部的寒武系以发育白云岩为主,上部的鹰山组岩性以灰岩为主,下段可含有少量白云岩。新近的勘探实践表明,下奥陶统白云岩在深部仍有大量基质孔隙发育,是一类重要的油气储层,有较大的勘探潜力和研究价值。本文选取塔中、巴楚和英买力三大地区典型白云岩岩心为分析对象,对孔隙型白云岩的成因进行探讨。

2 岩石学特征及原岩恢复

白云岩类型以粉晶至粗晶的结晶云岩为主,还有部分残余颗粒云岩和藻纹层云岩。其中粉—细晶云岩既可在整个井段大套连续出现,也可与泥晶灰岩间互产出,或是呈薄层状与中—粗晶云岩互层;中—粗晶云岩以稳定的厚层状者居多;残余砂屑云岩仅在局部井段发育;基质孔隙发育的白云岩主要为中—粗晶云岩,另见部分残余砂屑云岩及细晶云岩。

中—粗晶云岩的白云石晶粒以 0.5 mm 左右者居多,少数超过 1 mm,半自形—自形为主。白云岩多为等晶结构,发育大量晶间孔,常呈砂糖状。在发育中—粗晶云岩的井段常见残余灰质云岩,灰质残余多为亮晶颗粒灰岩(图 2a,b),白云岩呈斑块状或云雾状。这说明白云石化作用尚不彻底,同时也说明这类白云岩的原岩是亮晶颗粒灰岩。残余砂屑云岩表现为白云岩中清晰保留了大量砂屑的蚕食交代结构,呈砂屑假象。蚕食砂屑的为自形细晶白云石,发育晶间孔(图 2c,d)。残余砂屑云岩无疑是由砂屑灰岩经白云石化作用改造而成的,是原岩为砂屑灰岩的最有力证据。晶间孔发育的细晶云岩表现为等晶结构,晶体大小 0.15~0.2 mm,自形为主,部分具雾心亮边特征。单偏光下不见残余结构,阴极发光下隐约可见颗粒幻影(图 2e,f),反映原岩亦为颗粒灰岩。

岩心观察表明,以颗粒灰岩沉积为主的井段白

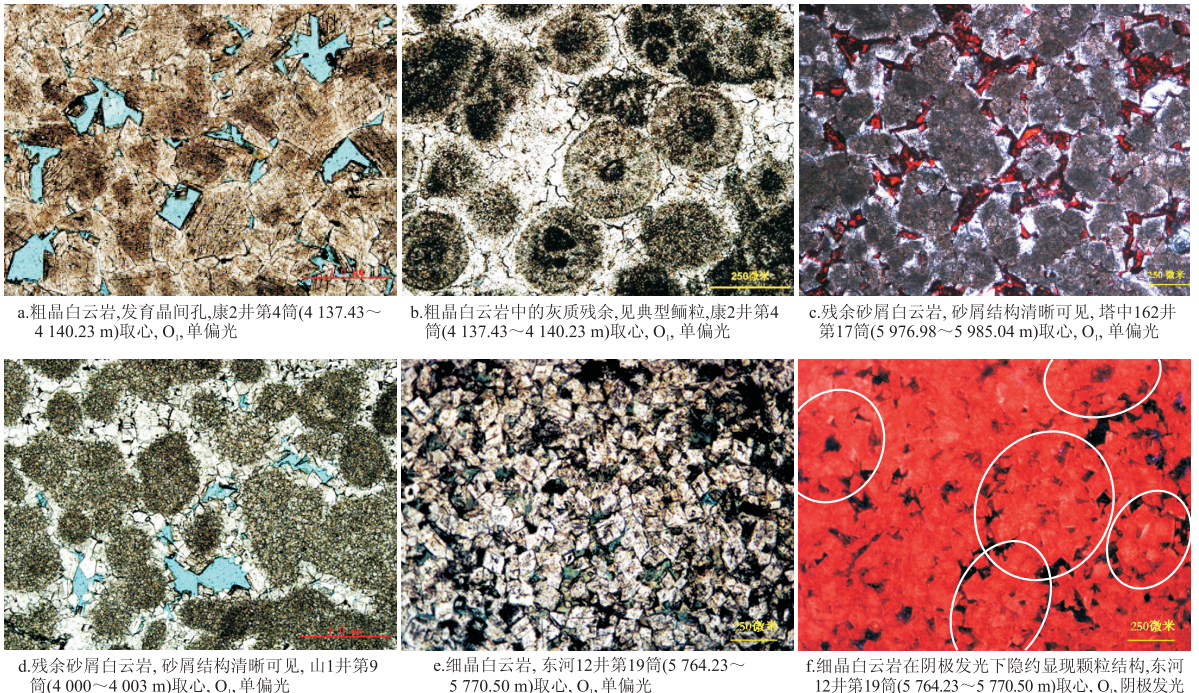


图2 塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组孔隙型白云岩与原岩复原

Fig.2 Porous dolomite and preexisting rock restoration of Penglaiba Formation in Lower Ordovician, Tarim Basin

云岩发育程度往往较高,且孔隙出现的几率大;而以潮间—潮上带或台内洼地等低能相带中泥晶、泥粒灰岩为主的井段白云岩发育程度较差,即便有白云岩,也主要为致密的粉晶类,缺乏基质孔隙。因此,相对于原岩沉积时水体能量以低能为主的环境而言,沉积时水体能量较高的滩相环境更有利于孔隙型白云岩的形成。由此可见,沉积相带和相应的原岩组构对白云石化作用的发生程度以及白云岩的组构有明显影响,进而影响了白云岩孔隙的形成。因此,白云岩储层的发育表现出明显的相控特征。滩相颗粒灰岩是优质白云岩储层发育的重要物质基础。

3 地球化学特征及成岩环境分析

3.1 微量元素特征

3.1.1 锶元素特征

白云石化作用进行时,由于流体的成分和性质不同、被交代对象不同,交代后还可能受后期成岩作用和成岩环境的影响,因此,所形成的白云岩的 Sr 含量也就不一样,可以作为判断白云岩成因的一个辅助依据。

研究区灰岩的 Sr 含量平均值为 171×10^{-6} ; 中—粗晶白云岩的 Sr 含量由 46.4×10^{-6} 至 93.8×10^{-6} 不等,平均值为 72.1×10^{-6} ; 粉—细晶白云岩的 Sr 含量由 82×10^{-6} 至 169×10^{-6} 不等,平均值为 125.7×10^{-6} (表 1)。一般来说,由海水或超咸化卤水直接交代而形成的白云石的原始 Sr 含量较高。如果白云石化作用发生得较早,被交代的是 Sr 含量较高的高镁方解石和文石,那么形成的白云石就将有相对高的 Sr 值;相反,如果白云石化作用发生得较晚,则被交代的一般是经过稳定化之后 Sr 含量较低成

岩方解石,形成的白云石的 Sr 就会相对低一些。此外,白云石中 Sr 的含量还会受成岩作用的影响,后期重结晶作用及温度的升高等都会导致 Sr 的流失^[5-6]。以研究区灰岩的 Sr 平均值 171×10^{-6} 作为稳定化后成岩方解石的 Sr 含量,白云岩的 Sr 含量明显低于该值,这可能主要与白云石化流体的交代对象为埋藏环境中已稳定的灰岩有关,因此,白云石化作用发生的时间应较晚。

3.1.2 铁锰元素特征

Fe 和 Mn 的地球化学性质有某些相似性,所以白云岩中除了含有一定量的 Fe 外,有时也含有一定的 Mn,它们对解释矿物形成条件有十分重要的意义。

研究区全部灰岩样品的 Fe、Mn 含量平均值分别为 476×10^{-6} 和 35.63×10^{-6} ,白云岩的则分别高达 $7\,518 \times 10^{-6}$ 和 $1\,789.84 \times 10^{-6}$ (表 1)。在同一口井中,所有白云岩样品的 Fe、Mn 含量均明显高于灰岩的,以英买 4 井最显著。Fe 和 Mn 在海水中含量很低,而在成岩孔隙流体中的含量有时可相当高,因为只有还原环境中,Fe 和 Mn 才能以 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 的形式存在于流体中,从而进入白云石晶格。因此常导致由近地表白云石化作用形成的白云石的 Fe 和 Mn 含量很低,而埋藏成岩作用形成的白云石 Fe 和 Mn 含量相对较高。研究区白云岩的 Fe、Mn 元素特征说明白云岩在形成过程中无疑是受到了埋藏流体的影响,成岩作用发生在埋藏环境中。

3.1.3 钾钠元素特征

灰岩样品的 K、Na 含量平均值分别为 332×10^{-6} 和 284.16×10^{-6} ,白云岩的分别为 $1\,311.4 \times 10^{-6}$ 和 $1\,002.45 \times 10^{-6}$ (表 1),说明在白云石化过

表 1 塔里木盆地奥陶统孔隙型白云岩微量元素特征

Table 1 Trace element of porous dolomite in Lower Ordovician of the Tarim Basin

井号	岩性	样品数/个	微量元素/ 10^{-6}				
			Sr	Fe	Mn	K	Na
YM4	白云岩	4	$\frac{93.8 \sim 127}{109.7}$	$\frac{9\,310 \sim 58\,730}{24\,955}$	$\frac{2\,347.04 \sim 14\,252.64}{6\,547.31}$	$\frac{332 \sim 747}{518.75}$	$\frac{629 \sim 969.4}{786.25}$
	灰岩	2	$\frac{171 \sim 174}{172.5}$	$\frac{350 \sim 980}{665}$	$\frac{38.73 \sim 69.72}{54.23}$	$\frac{249 \sim 581}{415}$	$\frac{222 \sim 362.6}{292.3}$
TZ243	白云岩	8	$\frac{46.4 \sim 169}{100.58}$	$\frac{350 \sim 2\,660}{1\,128.75}$	$\frac{46.48 \sim 85.21}{57.13}$	$\frac{415 \sim 4\,316}{1\,722.25}$	$\frac{880.6 \sim 1\,287.6}{1\,123.88}$
	灰岩	1	$\frac{173 \sim 173}{173}$	$\frac{210 \sim 210}{210}$	$\frac{15.49 \sim 15.49}{15.49}$	$\frac{498 \sim 498}{498}$	$\frac{481 \sim 481}{481}$
K2	白云岩	4	$\frac{65.5 \sim 82}{71.03}$	$\frac{630 \sim 2\,520}{1\,306.67}$	$\frac{46.48 \sim 77.46}{67.13}$	$\frac{415 \sim 2\,739}{1\,272.67}$	$\frac{858.4 \sim 1\,043.3}{966.93}$
	灰岩	1	$\frac{178 \sim 178}{178}$	$\frac{560 \sim 560}{560}$	$\frac{15.49 \sim 15.49}{15.49}$	$\frac{83 \sim 83}{83}$	$\frac{148 \sim 148}{148}$

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

程中有更多的 K、Na 被带入。与 Sr 元素不同, K、Na 在矿物形成后的流失不明显, 因此研究区白云岩中 Na、K 含量特征说明白云石化流体可能比正常海水更趋咸化一些, 如蒸发海水。

3.2 包裹体均一温度

白云石中的原生包裹体是白云石化流体性质的真实反映。研究区白云石中包裹体较丰富, 以 1~5 μm 者居多, 主要为气—液两相型。由于包裹体体积普遍很小, 测温时所选择的包裹体也均随机分布不连线, 且未发现均一温度与包裹体体积之间存在线性关系, 因此认为测试对象发生过再平衡作用的可能性较小, 是较理想的原生包裹体, 测温结果基本能代表白云石形成时的真实温度。

包裹体均一温度分布范围为 70~140 °C, 主体分布在 80~110 °C (图 3), 说明此类白云岩是在较高的温度下形成的。对于雾心亮边白云石而言, 亮边温度要高于雾心温度。如在英买 4 井部分典型的雾心亮边白云石中, 亮边的均一温度平均为 123.98 °C; 雾心的平均温度为 105.4 °C。在循序渐进的埋藏过程中, 随着埋深的加大和温度的升高, 白云石化作用不断进行, 白云岩在受到成岩流体的不断改造时就会造成其捕获的包裹体温度内外有别, 内低外高。这说明白云石化作用是在高温环境下的一定阶段内持续进行的。

总之, 所有测试样品的包裹体均一温度中都没有过低的值出现, 即没有数据支持白云岩曾经在低温条件下形成, 说明此类白云岩仅形成于温度较高的埋藏环境中。由于样品中包裹体体积过小, 不符合盐度与成分分析的要求, 因此进一步借助包裹体的其它信息恢复当时白云石化流体的性质尚存在困难。

3.3 有序度特征

矿物的有序度是其结晶程度好坏的一个标志, 也是其形成时环境的物理化学条件的反映。因此,

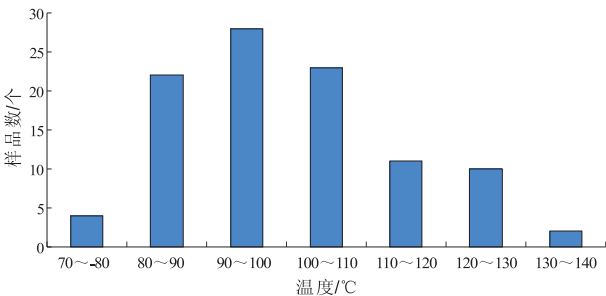


图 3 塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组白云石包裹体均一温度分布特征

Fig. 3 Homogenization temperature of dolomite inclusions in Penglaiba Formation of Lower Ordovician, Tarim Basin

表 2 塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组孔隙型白云岩有序度特征

Table 2 Degree of order of porous dolomite of Penglaiba Formation in Lower Ordovician, Tarim Basin

井号	岩性	白云石有序度
TZ243	中—粗晶白云岩	$\frac{(0.82 \sim 0.97)}{0.88(7)}$
	粉—细晶白云岩	$\frac{(0.74 \sim 0.81)}{0.77(3)}$
K2	中—粗晶白云岩	$\frac{(0.93 \sim 0.94)}{0.94(3)}$
	粉—细晶白云岩	$\frac{(0.94 \sim 0.94)}{0.94(1)}$
YM4	中—粗晶白云岩	$\frac{(0.4 \sim 0.59)}{0.48(3)}$
	粉—细晶白云岩	$\frac{(0.67 \sim 0.67)}{0.67(1)}$

注: 表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}(\text{样品数})}$ 。

在白云岩研究中常把有序度作为判别其形成环境的依据之一。

研究区白云岩的有序度除了英买 4 井 3 个粗晶样品和 1 个细晶样品小于 0.7 外, 其余 14 个样品均在 0.7 以上, 中—粗晶白云岩样品的有序度超过 0.8 (表 2), 总体而言较高。与地表—近地表环境中形成的准同生白云岩相比, 埋藏环境中白云石的成核速度比较慢, 能够更为从容地晶出, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的占位排列相对规则, 形成的白云石较稳定, 因而常具有较高的有序度。综合已知资料, 埋藏白云岩的有序度多在 0.74 以上^[7]。而英买 4 井白云岩有序度明显偏低则很可能是受到了该井白云石晶格中大量 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的影响, 导致 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不能够很好地占据各自应有的位置。综合认为, 研究区白云岩在埋藏环境中形成的可能性较大。

3.4 稀土元素特征

稀土元素(REE)的化学性质稳定, 均一化程度高, 相对不易受干扰, 一经“记录”于地质体中就容易保存下来, 是良好的地球化学指示剂^[8], 可以为岩石成因研究提供信息。

研究区碳酸盐岩稀土元素总量很低。灰岩的 $\sum \text{REE}$ 为 $(1.427 \sim 4.287) \times 10^{-6}$, 平均 2.920×10^{-6} 。白云岩的 $\sum \text{REE}$ 为 $(1.614 \sim 21.849) \times 10^{-6}$, 平均 5.996×10^{-6} 。白云岩与灰岩的稀土元素配分模式相似, 均表现为富集轻稀土元素、铈负异常(图 4)。由与灰岩相似的配分模式推断, 白云岩形成过程中, 白云石化流体与灰岩沉积时的海水存在一定亲缘关系, 因而基本继承了原始海水中稀土元素的配分模式。而由白云岩稀土元素总含量略高于灰岩判断, 白云石化流体又不完全等同于沉积时的海水, 很有可能是被改造了的海水。

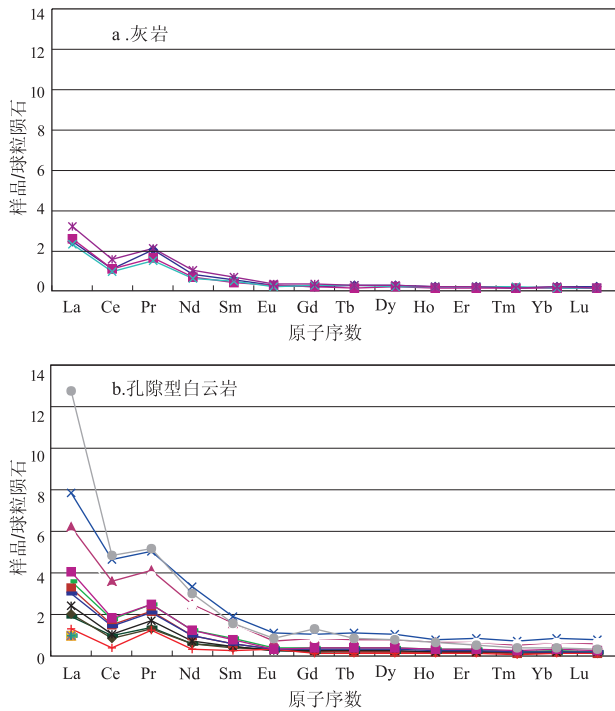


图 4 塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组灰岩与孔隙型白云岩稀土元素配分曲线

Fig. 4 REE patterns of limestone and porous dolomite of Penglaiba Formation in Lower Ordovician, Tarim Basin

3.5 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值特征

由塔中地区的相关研究^[5]可知,塔里木盆地早奥陶世⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值与全球海水的 Sr 同位素比值相当,其中与蓬莱坝组沉积期对应的海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值大致为 0.709 1。2 个泥晶灰岩样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的平均值为 0.709 0,基本代表了沉积时海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr。13 个白云岩样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的平均值为 0.709 524,普遍高于灰岩的 Sr 同位素比值,也高于古海水的 Sr 同位素比值。表明白云石化流体的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值高于灰岩沉积期正常海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值。有研究表明^[9,10],地下深部卤水形成的白云石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值一般比原岩沉积时海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值要高,即更具放射性。因此,云化流体可能与地下深部卤水有关。

4 白云石化作用机理分析

对研究对象而言,较高的自形程度和/或较粗大的晶粒、较高的有序度和包裹体均一温度、相对于原岩偏低的 Sr 含量和明显偏高的 Fe、Mn 含量等特征说明,该类白云岩是埋藏成岩作用的产物。从沉积学的角度出发,作为原岩的滩相颗粒灰岩在沉积时无疑水体循环条件良好、盐度正常,这也与准同生白云岩形成时所需的高盐度蒸发环境是相悖的。此外,由地球化学特征和包裹体均一温度判断,与中—

粗晶白云岩共存的粉—细晶白云岩也应该形成于埋藏环境中。二者晶粒大小的差异主要与原始沉积微相和由此导致的原岩结构的不同有关。

埋藏环境中的白云石化作用必须能够解释两个基本问题:第一是镁的来源;第二就是对于含 Mg²⁺ 地层水在埋藏灰岩中的有效流动问题。目前应用最多的是压实排挤流云化模式。照此云化机制,台地东部的盆地相泥岩受到压实后形成富 Mg²⁺ 流体,进入到西部碳酸盐岩地层中对灰岩进行交代。但是,这种泥岩压实流体是很有限的。由台地边缘向台地内部,白云石化作用程度应该有一个明显的由强到弱的变化趋势,但下奥陶统白云岩的发育并不存在这种规律,而是全台地范围的。泥岩压实排挤流难以导致如此大范围、大规模白云石化作用的发生。此外,由白云岩中绝对含量很低的 ∑REE 判断,成岩流体受粘土矿物影响的可能性并不大。如果云化流体是泥岩压实流体,∑REE 值应该会远高于本研究的测试结果。

塔里木盆地二叠纪发生了一次最强烈的火山活动,在盆地中—西部地区广泛存在,火山岩分布面积可达 20×10⁴ km²^[11]。这期火山活动在台地相区的下部构成了一个广阔、持续的热源。对于白云石化作用而言,这无疑是一种有效的驱动机制。同时,中寒武世蒸发台地的海水富含镁离子,是理想的白云石化流体。其中一部分在准同生期交代中寒武统灰岩,另一部分残留下来。这种残留海水在热的驱动下产生向上部运动的趋势,而塔里木盆地频繁的构造活动造就了十分发育的断裂裂缝系统和不整合面,为埋藏流体的循环流动提供了条件;同时,滩相颗粒灰岩由于原始孔渗条件相对较好,易于流体流动,从而有利于交代作用的发生。残留海水在向上运动的过程中与上覆地层中的埋藏流体相接触,其性质会有所改变,成为被改造了的海水,其既可以保留蒸发海水的某些特征,如 K、Na 含量较高,同时也可以具备埋藏流体的一些特征,如 Fe、Mn 含量较高。由于二叠纪火山热事件波及范围广,同时又有大范围的云化流体来源,因此引发下奥陶统全台地范围的白云石化便不足为奇了。

纵观塔里木盆地上寒武统至下奥陶统,白云岩发育程度有一个明显的向上逐渐减弱的趋势,即上寒武统全部为白云岩,到下奥陶统蓬莱坝组出现大量灰岩,再向上到鹰山组,白云岩逐渐消失。白云岩发育的这一纵向变化趋势符合下部流体受热向上部交代灰岩这一假设,即越向上,流体的交代作

gaseous hydrocarbons in subsurface environments; Theoretical considerations of carbon isotope distribution [J]. *Chemical Geology*, 1988,71:97-104.

[29] JAMES A T, BURNS B J. Microbial alteration of subsurface natural gas accumulations[J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68:957-960.

[30] HUANG H, LARTER S R, BOWLER B F J, et al. A dynamic biodegradation model suggested by petroleum compositional gradients within reservoir columns from the Liaohe basin, NE China[J]. *Organic Geochemistry*, 2004,35 (3): 299-316.

[31] AITKEN C M, JONES D M, LARTER S R. Anaerobic hydrocarbon biodegradation in deep subsurface oil reservoirs[J]. *Nature*, 2004, 341:291-294.

[32] FREDRICKS H F, HINRICHS K U. Data report: intact membrane lipids as indicators of subsurface life in cretaceous and paleogene sediments from sites 1257 and 1258[R]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 207*, 2007

[33] FLORES R M, RICE C A, STRICKER G D, et al. Methanogenic pathways of coal-bed gas in the Powder River Basin, United States: The geologic factor[J]. *International journal of coal geology*, 2008,76:52-75.

[34] FUJIWARA K, MUKAIDANI T, Kano S, et al. Research

study for microbial restoration of methane deposit with subsurface CO₂ sequestration into depleted gas/oil fields[J]. *SPE*, 2006,101248.

[35] ZENGLER K, RICHNOW H H, ROSSELLA-MORA R, et al. Methane formation from long-chain alkanes by anaerobic microorganisms[J]. *Nature*, 1999, 401: 266-269.

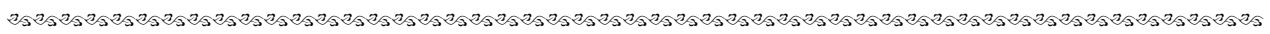
[36] LAMBO A J, YURKIW M, VOORDOUW G. Biogenic methane production from crude oil by enrichment from a low-temperature Western Canadian oil reservoir[C]. Abstract for CSPG, CSEG and CWLS Convention, Calgary, Alberta, May 4-8, 2009.

[37] EHRENBERG S N, JAKOBSEN K G. Plagioclase dissolution related to biodegradation of oil in Brent Group sandstones (Middle Jurassic) of Gullfaks Field, northern North Sea[J]. *Sedimentology*, 2001,48:703-721.

[38] BEECY D J, FERRELL F M, CAREY J K. Biogenic methane: A long-term CO₂ recycle concept[OL]. http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/5a1.pdf.

[39] FUJIWARA K, MUKAIDANI T, KANO S, et al. Research study for microbial restoration of methane deposit with subsurface CO₂ sequestration into depleted gas/oil fields[J]. *SPE*, 2006,101248.

(编辑 徐文明)



(上接第 474 页)

用越弱直至消失。

5 结论

塔里木盆地地下奥陶统孔隙型白云岩主要为晶间孔发育的结晶白云岩。沉积相对该类白云岩的发育有明显的控制作用,有利相带为颗粒滩相。白云石化作用仅发生在埋藏环境中,白云岩属典型的埋藏成因。塔里木盆地中一西部地区中寒武世蒸发台地相富含镁离子的海水作为潜在的云化流体,受到二叠纪火山作用的热驱动,对其上覆灰岩进行交代,导致整个台地相区蒸发岩系之上大规模白云石化作用的发生,是下奥陶统广泛发育的孔隙型白云岩储层的主要成因。

参考文献:

[1] 冯增昭,鲍志东,吴茂炳,等. 塔里木地区奥陶纪岩相古地理[J]. *古地理学报*,2007,9(5):447-460.

[2] 冯增昭,鲍志东,吴茂炳,等. 塔里木地区寒武纪和奥陶纪岩

相古地理[M]. 北京:地质出版社,2005.

[3] 何宏,彭苏萍,邵龙义,等. 巴楚隆起与阿瓦提凹陷寒武系及奥陶系沉积古地理分析[J]. *煤田地质与勘探*,2002,30(6):1-4.

[4] 高志前,王惠民,樊太亮,等. 塔里木盆地寒武—奥陶系沉积相、沉积体系及其组合序列[J]. *新疆石油天然气*,2005, 1(1):30-35.

[5] 黄文辉,杨敏,于炳松,等. 塔中地区寒武—奥陶系碳酸盐岩 Sr 元素和 Sr 同位素特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*,2006,31(6):839-845.

[6] 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 北京:石油大学出版社, 1995.

[7] 曾理,万茂霞,彭英. 白云石有序度及其在石油地质中的应用[J]. *天然气勘探与开发*,2004,27(4):64-67.

[8] 刘英俊. 元素地球化学导论[M]. 北京:地质出版社,1987.

[9] 李伟,蒲仁海,卿海若. 威林斯顿盆地奥陶系白云岩储层同位素与成岩作用分析[J]. *石油实验地质*,2009,31(1):87-91.

[10] ALLEN J R, MATTHESS R K. Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis [J]. *Sedimentology*, 1982,29:797-817.

[11] 康玉柱. 新疆两大盆地石炭—二叠系火山岩特征与油气[J]. *石油实验地质*,2008,30(4):321-327.

(编辑 徐文明)