

文章编号: 1009-3850(2010)02-0032-07

塔里木盆地东部地区寒武系—奥陶系白云岩特征及成因

余宽宏, 金振奎

(中国石油大学 地球科学学院 北京 昌平 102249)

摘要: 通过对塔东低凸起带寒武系—奥陶系白云岩的岩石学特征、碳氧同位素特征、锶同位素比值特征、有序度等的分析, 认为塔东地区带寒武系—奥陶系准同生阶段的泥粉晶白云岩由受潮汐作用的海水泵汲作用形成; 成岩阶段的细—中晶白云岩、粗—巨晶白云岩是在埋藏成岩环境中经过调整白云岩化以及成岩后期的外来热液作用引起的埋藏热液白云岩化作用形成。

关键词: 层状白云岩; 准同生白云岩; 海水泵汲作用; 成岩白云岩; 调整白云岩化; 热液白云岩化

中图分类号: P588.24⁺5 文献标识码: A

白云岩储层是最重要的碳酸盐岩储集体类型。世界范围内高达 50% 的碳酸盐岩储层是白云岩, 北美碳酸盐岩中 80% 以上的油气储存在白云岩中^[1]。我国近年来油气勘探中取得重大进展的也主要为白云岩储层, 如四川普光气田、鄂尔多斯的苏里格气田、塔里木盆地的和田气田等。塔里木盆地东部地区广泛分布层状白云岩储层, 前人对于该地区白云岩成因的研究认为: 研究区白云岩化有渗透回流、深埋藏和高温热液白云岩化^[2]。对于白云岩成因的研究主要有白云岩岩石结构^[3-4]和地球化学分析(微量元素、碳氧同位素、锶同位素、有序度等^[5-8])方法。本文作者主要通过工区白云岩岩石学特征、碳氧同位素、锶同位素、白云岩结晶有序程度、白云岩产状以及沉积相控等方面的研究总结, 认为塔东地区的泥粉晶白云岩海水泵汲作用形成。另外随着埋深的加大, 研究区发育埋藏过程中的调整白云岩化作用以及受热液影响的热液白云岩化作用。

1 研究区概况

研究区位于塔里木盆地东部地区。北起孔雀河

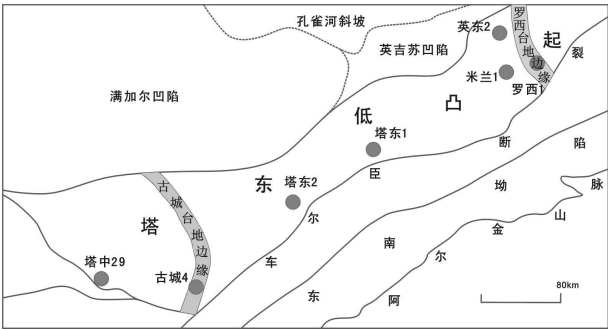


图 1 塔东地区构造单元图
Fig. 1 Tectonic setting of the eastern Tarim Basin

断裂带, 南至车尔臣断裂带, 东起罗西台地边缘带, 西至古城—轮东台地边缘, 面积 10 余万平方公里。构造单元有塔东低凸起带、满加尔凹陷、英吉苏凹陷等。研究区目前共有古城 4 井、塔东 2 井、塔东 1 井、米兰 1 井、英东 2 井、罗西 1 井共 6 口钻井钻遇寒武系—奥陶系碳酸盐岩地层。钻井均分布于塔东低凸起带上, 均钻遇有白云岩储层(图 1)。古城 4 井和罗西 1 井白云岩发育于奥陶系底以及上寒武统, 米兰 1 井及英东 2 井白云岩主要发育在寒武系。在塔东地区, 白云岩呈厚层块状分布, 连续性好, 岩

石类型多样。

2 岩石学特征

2.1 准同生白云岩

准同生成岩阶段形成的白云岩一般为泥粉晶白云岩,常含有粘土等陆源物质,显纹层状^[9]。图2a;图2c为泥粉晶白云岩镜下特征;图2a;图2c为单偏光下的照片,图2a;图2c为阴极发光照片。塔东地区的泥粉晶白云岩主要发育于英东2井和米兰1井,古城4井以及罗西1井均不发育。薄片观察

发现,研究区泥粉晶白云岩发育纹层,含有泥质以及少量黄铁矿;没有发现石膏假晶、鸟眼构造、干裂等明显的潮上带标志;岩心观察也没有发现有膏岩伴生。沉积相分析表明米兰1井和英东2井在这一时期主要为斜坡相沉积,这至少说明该区泥粉晶白云岩形成时缺少强蒸发作用。

准同生白云岩非常致密,即使是重结晶作用也不容易产生有效的晶间孔隙^[3]。这种白云岩多受潮汐作用形成,含有藻类或者泥质,常常出现暗色纹层(图2c)。

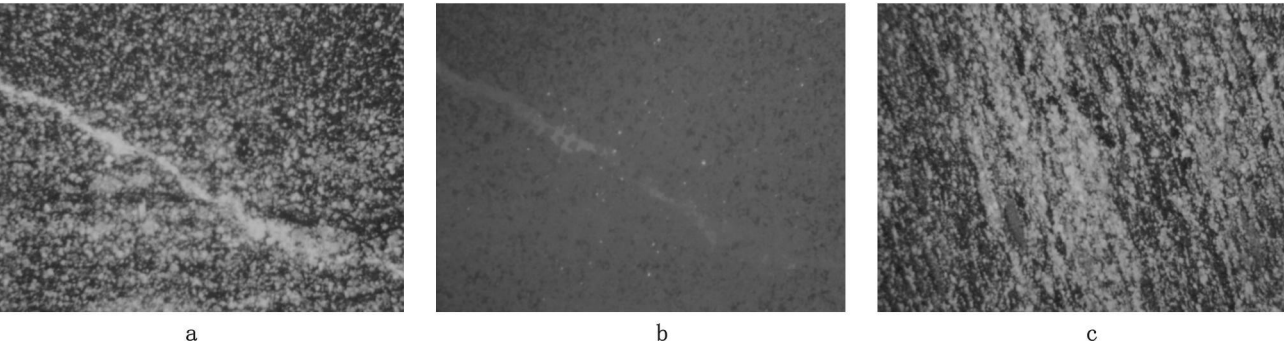


图2 塔东地区寒武系准同生白云岩微观特征

a 泥粉晶白云岩,米兰1井,5252.49m,×60; b 泥粉晶白云岩,泥粉晶白云石发桔红色光,其晶间泥质不发光(黑色质点)构造缝中方解石发桔黄色光。米兰1井5252.49m,×60 寒武系; c 纹层状粉晶白云岩,米兰1井,4588.53m,×140;

Fig.2 Pictures of the Cambrian penecontemporaneous dolostones in the eastern Tarim Basin

a Micritic dolostones from the Milan-1 well 5252.49 m, × 60 b Micritic dolostones with reddish orange light from the Milan-1 well 5252.49 m, × 60 c Laminated micritic dolostones from the Milan-1 well 4588.53 m, × 140 d Laminated micritic dolostones from the Yingdong-2 well 4588.53 m, × 140

2.2 成岩白云岩

成岩白云岩指碳酸钙沉积物在其成岩作用过程中由交代作用或者白云岩化作用形成的白云岩^[9]。砂糖状白云岩、颗粒白云岩以及粒序层白云岩主要形成于埋藏成岩环境。随着埋藏加深,成岩环境的温度会升高,压实作用以及重结晶作用加强。在白云岩晶体粒度上主要表现为由细变粗的过程^[10]。白云岩岩石结构特征随着埋藏深度的加大而发生的变化在米兰1井以及英东2井都表现的较为明显。随着深度的加大,白云石晶体有逐渐变粗的趋势,依次出现细晶白云岩、中细晶白云岩、中晶白云岩、中粗晶白云岩甚至巨晶白云岩。其中细晶白云岩、粉晶白云岩晶间孔隙最发育。随着埋深的加大,泥质含量高的白云岩其白云石自形程度较高(图3a 3b),白云石含量越纯的白云岩随着重结晶作用的加强晶体之间镶嵌越紧密,自形程度也较差。如图3c 3d粗晶及巨晶白云岩的白云石晶体经过反复

的重结晶作用镶嵌紧密,晶体呈它形为主,镶嵌紧密,阴极发光下为连续的桔红色,不发光的晶间孔或者被充填的晶间孔不发育。

深埋环境白云岩更容易发生成岩改造作用,如硅化作用(图3e 3f),白云石因发生硅质交代,阴极射线不发光。受热液作用影响,深埋成岩环境下还容易发育鞍状白云石,其晶体粗大,呈自形菱面体,但晶面或者解理面弯曲,具有波状消光(3g),这种白云石的结构特征也可以作为深埋环境热液白云岩化作用的证据之一。另外,当交代作用不彻底时,容易保留原岩的残余结构(如图3h残余砂屑灰岩)。

3 地球化学特征

3.1 碳、氧同位素

本文白云岩碳、氧同位素的统计数据主要来自于本文实测的数据和收集到的由中国石化胜利油田

有限公司地质科学研究院石油地质中心、中国石油勘探开发研究院石油地质试验研究中心的实测数据

(表 1)。其中,微 粉晶白云岩样品 55件,细晶、中晶白云岩 22件,粗晶白云岩 30件。

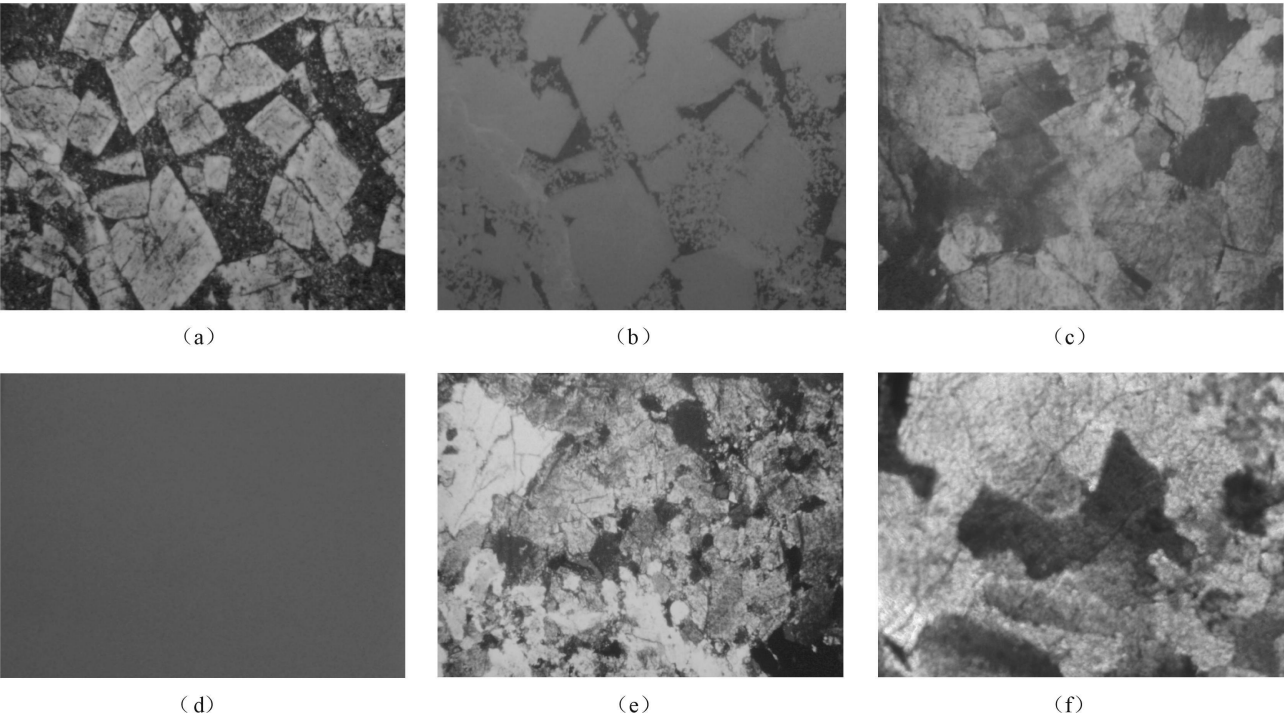


图 3 塔东地区寒武系白云岩显微照片

a 泥晶粗晶灰质白云岩,自形菱面体状白云石,泥质、沥青质,米兰 1井,5254.45m,×140 b 泥晶粗晶灰质白云岩,自形菱面体状白云石发橙黄色光,泥晶方解石发浅橙黄色光,泥质、沥青质不发光,米兰 1井,5254.45m,×140 c 粗晶白云岩,白云石镶嵌紧密,米兰 1井,5524.5m,×140 d 粗晶白云岩,白云石发桔红色光,米兰 1井,×140 e 硅质团块中晶白云岩,白云石、石英、黑色沥青,古城 4井,6504.2m,×60 f 硅质团块中晶白云岩不发光,白云岩发桔红色光,黑色沥青不发光,古城 4井,6504.2m×60 g 英东 2井,4589.21m细晶白云岩,马鞍状白云石, +N×10 h 英东 2井,4456.25m细一粉晶云岩,残余砂屑, - N×4

Fig 3 Pictures of the Cambrian dolostones in the eastern Tarim Basin

a Micritic to coarse crystalline liny dolostones from the Milan-1 well 5254.45 m, ×140 b Micritic to coarse crystalline liny dolostones with reddish orange light from the Milan-1 well 5254.45 m, ×140 c Coarse crystalline dolostones from the Milan-1 well 5524.5 m, ×140 d Coarse crystalline dolostones with reddish orange light from the Milan-1 well ×140 e Crystalline dolostones from the Gucheng-4 well 6504.2 m, ×60 f Medium crystalline dolostones with reddish orange light from the Gucheng-4 well 6504.2 m, ×60 g Fine crystalline dolostones from the Yingdong-2 well 4589.21 m, ×10 h Fine crystalline dolostones from the Yingdong-2 well 4456.25 m, ×4

表 1 塔东地区白云岩碳、氧同位素分布范围及平均值

白云岩类型	井号 (样品数)	碳、氧同位素 ‰			
		¹³ C _{PDB}	平均值	¹⁸ O _{PDB}	平均值
微一粉晶白云岩	英东 2井 (22); 米兰 1井 (33)	-1.1 ~ -2.5	1.0375	-12.6 ~ -2.7	-7.4857
细一中晶白云岩	英东 2井 (6); 米兰 1井 (15); 古城 4井 (1)	-0.4 ~ -1.81	0.6487	-12.93 ~ -6.9	-9.8248
粗晶白云岩	英东 2井 (1); 米兰 1井 (23); 古城 4井 (6)	-1.57 ~ -1.1	-0.3145	-16.2 ~ -6.41	-9.0876

通过统计发现,白云岩的碳、氧同位素呈有规律的变化。随着白云石晶径的增大,其碳、氧同位素值呈下降的趋势。图 4 a反映塔东地区不同晶径白

云岩碳、氧同位素分布散点图。从图 4 a中可见,微一粉晶白云岩碳氧同位素值都靠近正值分布,基本上为准同生阶段形成的白云岩。随着晶体的增大,碳

同位素值减小的趋势明显, 氧同位素总体上随着晶径的增大而偏负值, 中晶、粗晶之间差值减小, 晶体粗大的白云岩多是在埋藏环境中形成。在埋藏的过程中, 成岩作用较缓慢, 这时白云石有足够的时间结晶, 形成晶体粗大的白云岩。根据流体的来源, 可以

主要分为埋藏环境的调整白云岩化作用和外来高镁流体作为补充的深部热液白云岩化作用。图 4 b为米兰 1 井不同晶径的白云岩碳、氧同位素值的分布散点图。

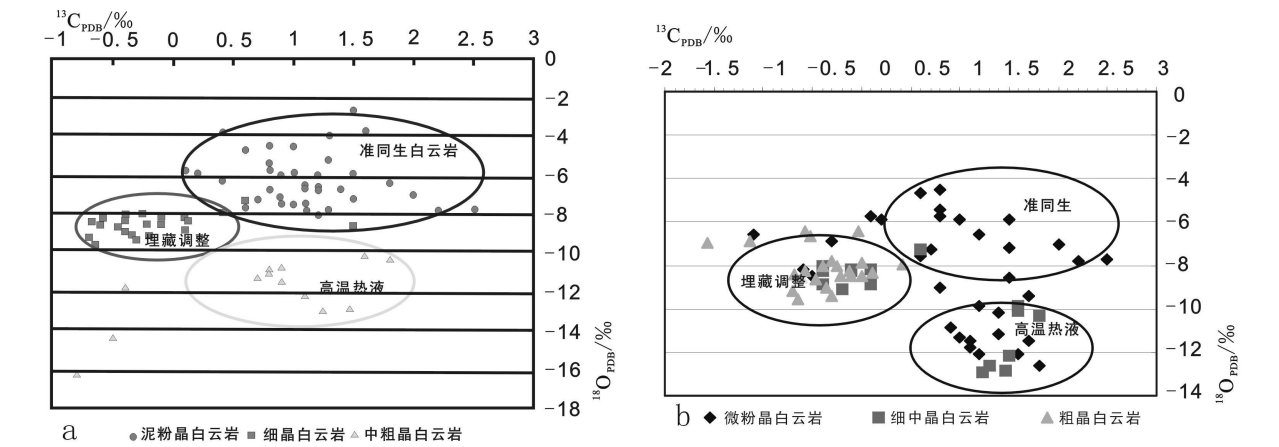


图 4 塔东地区白云岩碳氧同位素值分布特征

a塔东地区不同晶径白云岩碳、氧同位素分布图; b米兰 1 井不同晶径白云岩碳、氧同位素图;
Fig 4 Distribution of the carbon and oxygen isopic values for the dolostones from the eastern Tarim Basin (a ; d) and Milan 1 well (b)

对于碳、氧同位素值的变化, 作者认为: ①随着埋藏深度的加大, 地温升高, 轻的氧会优先进入晶格, 导致 ^{16}O 富集, ^{18}O 偏负值; ②随着埋深的加大, 白云石会发生重结晶作用。在埋藏成岩环境中发生的白云岩溶解再沉淀, 使得 ^{18}O 减少。随着重结晶作用的加强, 白云岩晶粒由细变粗, ^{18}O 值呈明显的下降趋势; ③不同的成岩环境形成的白云岩岩石学特征不同, 其碳、氧同位素值也随着晶体大小出现显著的变化。近地表同生成岩环境形成的白云岩 ^{18}O 值较高, 一般均为正值, 且离散度较小。在蒸发环境形成的白云岩一般为细粒白云岩, 其 ^{18}O 和 ^{13}C 值高, 基本均为正值。在埋藏环境中, 随着深度的加大和温度的升高, 会发生各种成岩作用, 比如压实作用, 重结晶作用, 热液作用等, 这些都会使 ^{18}O ^{13}C 大量流失。在埋藏过程中由白云石重结晶作用形成的中晶、粗晶白云岩的 ^{18}O ^{13}C 表现为低值。

3.2 锶同位素

锶同位素由中国石油勘探开发研究院测定。表 2 为不同晶径白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布范围及平均值。

表 2 塔东地区不同晶径白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布范围及平均值

Table 2 Ranges and mean values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios for the dolostones from the eastern Tarim Basin

岩性 (样品数)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布范围	平均值
泥粉晶白云岩 (14)	0.70892 ~ 0.71331	0.71064
细中晶白云岩 (5)	0.70922 ~ 0.71021	0.70934

随着晶径的变化, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也出现有规律的变化。泥粉晶白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布范围为 0.70892 ~ 0.71331, 平均值 0.71064 细中晶白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布范围 0.70922 ~ 0.71021, 平均值 0.70934。随着晶径的变大, 该比值总体上呈现变小趋势。

图 5 为白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和深度的关系。图 5 a 为米兰 1 井白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 随着深度的变化关系图, 图 5 b 为英东 2 井白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值随着深度的变化关系图。总体上, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值随着深度加大而变小, 这反映了随着埋深的加大, 重结晶作用加强, 受深部低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 流体影响, ^{87}Sr 析溶, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变小。

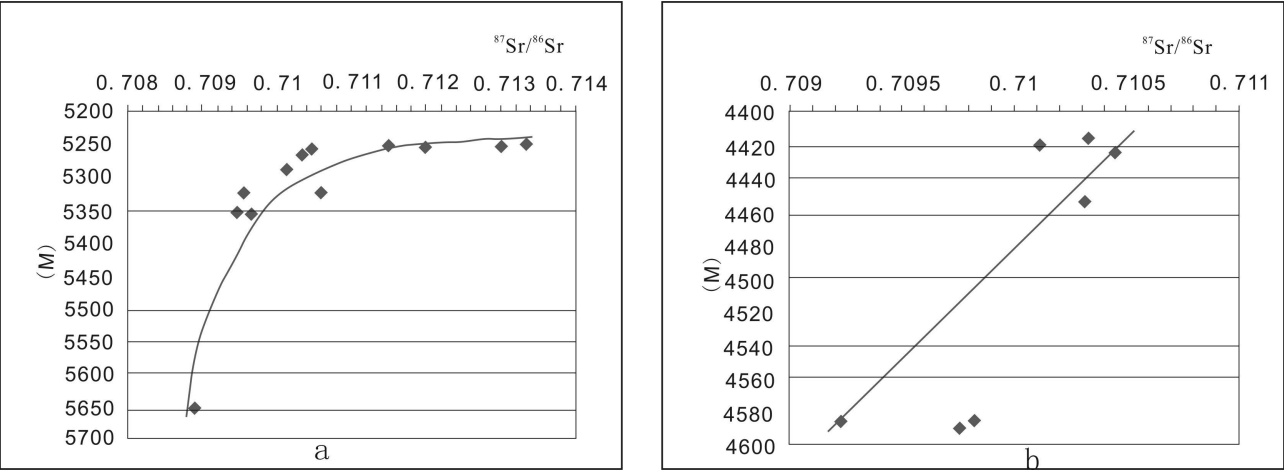


图 5 白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与深度的关系
a 米兰 1 井; b 英东 2 井

Fig 5 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios vs depth for the Milan-1 well (a) and Yingdong-2 well (b)

微粉晶白云岩一般是在准同生阶段以及早成岩阶段形成的。原岩有一部分是来源于陆源石灰岩风化产物,富含锶同位素。在白云岩化的过程中,锶并没有大量出溶, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化不大,数值较高。随着埋藏深度的加大,白云石晶体由细到粗反映了重接晶作用的加强。在重结晶的过程中,经过多次的溶解—再沉淀作用,部分的锶出溶并被孔隙水带走,使得锶同位素有随着晶体增大而有降低的趋势。

3.3 白云石有序度

白云石的化学式为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 $[\text{CO}_3]^{2-}$ 这 3 种离子呈现出完全有序的排列,这种情况下的白云石的有序度为 1。有序度低的白云石一般富含 Ca^{2+} ,在一般情况下是准稳定矿物。在成岩过程中,随着埋藏深度的加大,白云石的晶体结构会不断地调整,这时 Mg^{2+} 会不断地置换 Ca^{2+} ,白云石的有序度会不断地增高^[11]。

白云岩有序度反映的是其结晶程度的好坏,也能反映其形成时的物理化学条件。一般认为(准)同生成岩环境的白云岩具有低的有序度,在埋深的过程中,随着白云石的调整重结晶作用,晶径会增大,有序度也会相应的增高。

根据 68 个样品统计分析,我们统计出研究区白云石的有序度的分布范围及平均值(表 4)。泥晶白云岩有序度明显偏低,中晶白云岩有序度明显增高。泥粉晶白云岩的有序度值较小,离散度大,细中晶白云岩有序度值高,离散度较泥粉晶白云岩偏小。总体上,白云岩的有序度值是随着晶径变大而增高的,反映了结晶程度逐渐变好。初期形成的泥粉晶白

云岩反映了早期沉积时白云石晶体结晶快,镁离子来源较单一的特点。化学成分趋向于定比,但是有序度低。晶径变大反映在白云岩形成的过程中有充足的富镁流体并且有充足的时间来形成晶体结构较好的白云石。

表 3 塔东地区白云岩有序度分布范围及平均值
Table 3 Ranges and mean values of the ordering degree for the dolostones from the eastern Tarim Basin

岩性	样品数	峰高		峰面积	
		分布范围	平均值	分布范围	平均值
泥晶白云岩	41	0.26~0.9	0.5573	0.4~1.33	0.7498
粉晶白云岩	7	0.75~1.01	0.9029	0.87~1.08	0.97
细中晶白云岩	17	0.57~1.14	0.8676	0.61~1.09	0.9488

4 白云岩成因模式

4.1 海水泵汲模式

海水泵汲是 Saller (1984) 研究太平洋 Enewetak 环礁时提出的(图 6)。这种模式下白云岩形成于潮下环境。当海水与沉积物内部发生温度或者盐度差的时候,形成海水泵汲作用。冷的海水进入沉积物中,在海水下的一定深度对于方解石是不饱和的,而对于白云石是饱和的。这种模式更适合于解释台地边缘白云岩化。台地边缘通常容易发育断裂,与沉积物接触的海水循环好,这样就更容易为海水泵汲作用的发生提供新鲜海水。

米兰 1 井、英东 2 井区发育有具有纹层的泥粉晶白云岩,而且发育具有交代残余结构的颗粒白云

岩。岩心及薄片研究表明, 英东 2 井及米兰 1 井准同生白云岩不具有明显的蒸发沉积特征, 比如鸟眼构造、干裂、膏岩夹层、假晶等, 而且局部伴生有少量黄铁矿。用海水泵汲作用为主夹有潮汐泵汲作用解释更具有合理性。白云岩化发生在潮下还原环境,

这种白云岩化作用主要形成于海底成岩环境, 时间上是相对短暂的, 那些敏感的沉积物, 如灰泥, 细粉屑等会优先白云岩化, 形成泥 粉晶白云岩, 且容易发生交代残余, 形成交代不彻底的白云岩。

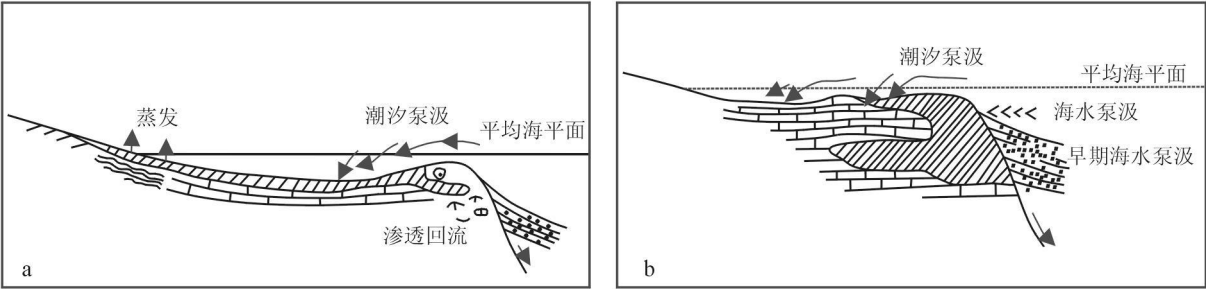


图 6 塔东地区准同生白云岩化模式图^[10]

a 潮汐泵汲白云岩化作用模式; b 海水泵汲作用和潮汐泵汲作用白云岩化模式

Fig 6 Models for the Penecontemporaneous dolomitization in the eastern Tarim Basin (after Fang Shaoxian et al., 1999)
a Tidal pumping b Mixed tidal pumping and seawater pumping

4.2 埋藏成岩环境白云岩化模式

1. 埋藏调整白云岩化

随着埋深加大, 地温的升高和压实作用强度的加大, 一些细粒沉积物中富含 Mg^{2+} 的流体会向遭受压实作用弱的方向转移; 粘土矿物的转化会排出一部分的富含 Mg^{2+} 的流体; 碳酸盐矿物之间的转化也会提供部分的 Mg^{2+} (图 7 a)。在埋藏过程中白云岩化动力障碍的减弱以及富 Mg^{2+} 会的转移为白云岩化提供了条件。

另外, 在有有机质残余的深埋藏环境, 孔隙流体较浅埋藏环境的流动速度慢, 流体在孔隙中停留的时间比较长, 因此白云石的交代、次生加大和重结晶作用比较充分, 从而导致细 中晶、中晶或者不等晶体糖粒状白云岩的形成。中 粗晶白云岩、巨晶白云岩以及不等晶白云岩大多是这个阶段形成。在古城 4 井、米兰 1 井以及英东 2 井的白云岩晶体之间充填有丰富的沥青, 有机质在埋藏白云岩化的过程中起着重要的作用。

2. 埋藏热液白云岩化

在深埋藏环境 (成岩作用的后期阶段), 残余孔隙水已经不多, 压实排挤作用提供的 Mg^{2+} 枯竭, 此

时外来的富含 Mg^{2+} 流体在白云岩化的过程中发挥着重要的作用。在塔东地区, 古城 4 井、米兰 1 井、英东 2 井的岩心资料都表明: 该地区深部广泛发育裂缝和断裂, 这些断裂为白云岩提供了丰富的富含 Mg^{2+} 的流体, 为成岩作用后期阶段的白云岩化提供了条件 (图 7 b)。

包裹体测温表明, 埋藏热液白云岩形成的温度多大于 $140^{\circ}C$ 。甚至有的超过碳酸盐岩晚成岩作用的温度界限值 ($200^{\circ}C$), 此阶段容易形成白云石充填胶结物以及次生加大的白云石。在米兰 1 井、英东 2 井的白云岩中广泛发育这种白云石。

5 结论

(1) 塔东地区寒武系—奥陶系白云岩层状连续分布, 岩石类型多样, 有纹层状泥粉晶白云岩、细晶白云岩、中晶白云岩、粗晶白云岩以及巨晶白云岩, 还有交代彻底的白云岩和残余砂屑白云岩。

2) 塔东地区寒武系—奥陶系白云岩系准同生阶段的海水泵汲作用、埋藏环境调整白云岩化以及深埋环境热液白云岩化的产物。

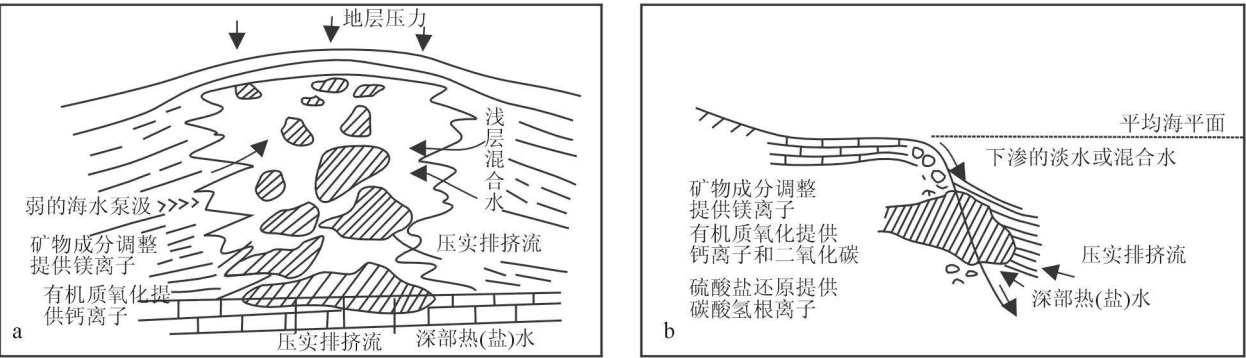


图 7 塔东埋藏成岩环境白云岩化模式^[10]

a 埋藏环境调整白云岩化作用模式 b 埋藏环境热液白云岩化作用模式

Fig 7 Models for the burial diagenetic dolomitization in the eastern Tarim Basin (after Fang Shaonian et al., 1999)

a Regulation dolomitization b Hydrothermal dolomitization

参考文献:

[1] ZENGER D H, DUNHAM J B, ETHINGTON R L. Concepts and Models of Dolomitization[M]. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1980

[2] 刘永福、殷军、孙雄伟, 等. 塔里木盆地东部寒武系沉积特征及优质白云岩储层成因[J]. 天然气地球科学, 2008, 19 (1): 127—132

[3] 高梅生、郑荣才、文华国, 等. 川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因—来自岩石结构的证据[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2007, 34(3): 298—304.

[4] 张传禄、张永生、康祺发, 等. 鄂尔多斯南部奥陶系马家沟群马六组白云岩成因[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 23—26.

[5] 郑荣才、耿威、郑超, 等. 川东北地区飞仙关组优质白云岩储层的成因[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 816—821

[6] 毕胜宇、郑聪斌、李振宏, 等. 鄂尔多斯盆地环北段白云岩成因分析[J]. 东华理工学院学报, 2005, 28(1): 2—4

[7] 王家生、甘华阳、魏清, 等. 三峡“盖帽”白云石的碳、硫稳定同位素研究及其成因探讨[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 11—19

[8] 顾炎午、李国蓉、李宇翔, 等. 塔中地区中下奥陶统白云岩特征及成因[J]. 天然气技术, 2009, 3(1): 19—22

[9] 赵澄林、朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 石油工业出版社, 2001.

[10] 方少仙、董兆雄、侯方浩, 等. 层状白云岩储层特征与成因——以黔桂地区泥盆系、石炭系及湘鄂交界地区三叠系为例子[M]. 北京: 地质出版社, 1999 57—61

[11] 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—72

Genesis of the Cambrian—Ordovician dolostones in the eastern Tarim Basin, Xinjiang

YU Kuan-hong, JIN Zhen-kui

(School of Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The laterally persistent dolostones in the eastern Tarim Basin, Xinjiang are of important significance of research. Three genetic models are constructed on the basis of lithology, carbon and oxygen isopes, strontium isotopic ratios, and ordering degree. The penecontemporaneous micritic dolostones are generated by the seawater pumping due to tidal effects in the subtidal reducing conditions during the Penecontemporaneous stages. The fine- to medium-crystalline dolostones and coarse-crystalline dolostones result from regulation dolomitization in the burial diagenetic conditions, and hydrothermal dolomitization in the deeper parts.

Key words: stratified dolstone, penecontemporaneous dolostone, seawater pumping, diagenetic dolostone, regulation dolomitization, hydrothermal dolomitization