

海平面波动中的岩溶响应

——以塔里木盆地牙哈—英买力地区下古生界为例

鲍志东¹⁾, 齐跃春^{1,2)}, 金之钧³⁾, 张先龙¹⁾, 胡广成¹⁾, 张清海¹⁾,
时晓章¹⁾, 李伟¹⁾, 杨帆⁴⁾, 潘文庆⁴⁾, 孙玉善⁴⁾

1) 中国石油大学, 北京, 102200; 2) 中国石油吉林油田分公司, 松原, 138000; 3) 中国石化勘探开发研究院, 北京, 100083; 4) 中国石油塔里木油田分公司, 新疆库尔勒, 841000

内容提要:岩溶成因碳酸盐岩油气储层的展布预测, 是全球石油地质家一直在探索的热点问题之一。下古生界岩溶型碳酸盐岩储层是盆地内极有潜力赋存大油气田的储集体。本文以岩溶类型研究为基础、以海平面波动史构建为切入点、以塔里木盆地地下古生界为例, 开展了海平面波动中的岩溶响应研究。分析表明, 塔里木盆地早古生代海平面下降期均发育了准同生岩溶。准同生岩溶为埋藏岩溶和风化壳岩溶提供了良好的溶蚀介质输导孔隙。地球物理资料显示, 塔北下奥陶统的两期风化壳岩溶叠加于先期的准同生岩溶作用之上。海平面波动史的重建及岩溶格架分析表明, 塔里木地区早古生代海平面波动与岩溶发育呈现良好的耦合关系。海平面变化是控制塔里木盆地地下古生界岩溶储层发育的一个重要的因素。

关键词: 岩溶响应; 海平面波动; 塔里木盆地; 早古生代

岩溶成因碳酸盐岩油气储层的发育, 是全球石油地质家一直在探索的热点问题之一。塔里木盆地是我国西部最重要的含油气盆地之一, 下古生界岩溶型碳酸盐岩储层是盆地内极有潜力找到大油气田的储集体(鲍志东等, 1998; 顾家裕等, 2001, 2006; 徐国强等 2005; 何莹等, 2006)。以岩溶类型研究为基础、以海平面波动史构建为切入点、以岩溶储层的地球物理响应为佐证, 以塔里木盆地地下古生界为例开展海平面波动中的岩溶响应研究, 对于碳酸盐岩储层非均质性的研究以及塔里木盆地油气预测, 均具有非常重要的理论与实践意义。

塔里木盆地早古生代寒武纪和奥陶纪地层发育齐全。研究工作分别以早寒武世、中寒武世、晚寒武世、早奥陶世的红花圆—两河口阶、中奥陶世的牯牛潭—大湾阶、晚奥陶世的庙坡阶、宝塔阶、五峰—临湘阶为单位, 以沉积地质学、同位素地球化学和岩石地球物理为手段, 通过塔里木盆地 48 口钻至下古生界钻井的沉积层序与沉积分析、9800 km 地震剖面的地震相分析、72 块样品 Sr 同位素及 55 块样品 C 同位素分析、65 块样品微量元素分析等大量测试工

作, 并结合盆地周边的露头资料和区域地质与石油地质资料, 开展了塔里木地区早古生代岩相古地理恢复及海平面波动重建。并进而开展岩溶响应研究。研究中的锶同位素分析由中国科学院地质研究所陈锦石教授协助完成, 微量元素分析由中国石油勘探开发研究院分析测试中心完成。

1 塔里木盆地早古生代海平面波动特征

大量的沉积地质学、同位素地球化学、微量元素地球化学和岩石地球物理分析表明, 早古生代塔里木区域构造主要经历了 3 个演化阶段, 即寒武纪至中奥陶世大湾期和牯牛潭期的整体拉张阶段、晚奥陶世庙坡期至五峰期的北昆仑洋俯冲阶段和晚奥陶世五峰期末至志留纪的北昆仑洋闭合阶段(关士聪, 1984; 邓万明, 1995; 鲍志东等, 1998, 2006; 姜春发等, 2000)。

与构造演化相应, 塔里木地区在早古生代经历了显著的海平面波动过程(图 1)。在晚震旦世潮坪和泻湖沉积的基础上, 塔里木盆地早寒武世早

注: 本文为国家重点基础研究发展规划“973”项目(编号 G19990433 和 2006CB2023)联合资助的成果。

收稿日期: 2006-12-14; 改回日期: 2007-01-20; 责任编辑: 周健。

作者简介: 鲍志东, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事沉积学及油气形成与分布的研究。通讯地址: 102200, 北京昌平区中国石油大学资源与信息学院, 油气资源与探测国家实验室; 电话: 010-89733103; 传真: 010-89733103; Email: baozhd@cup.edu.cn。

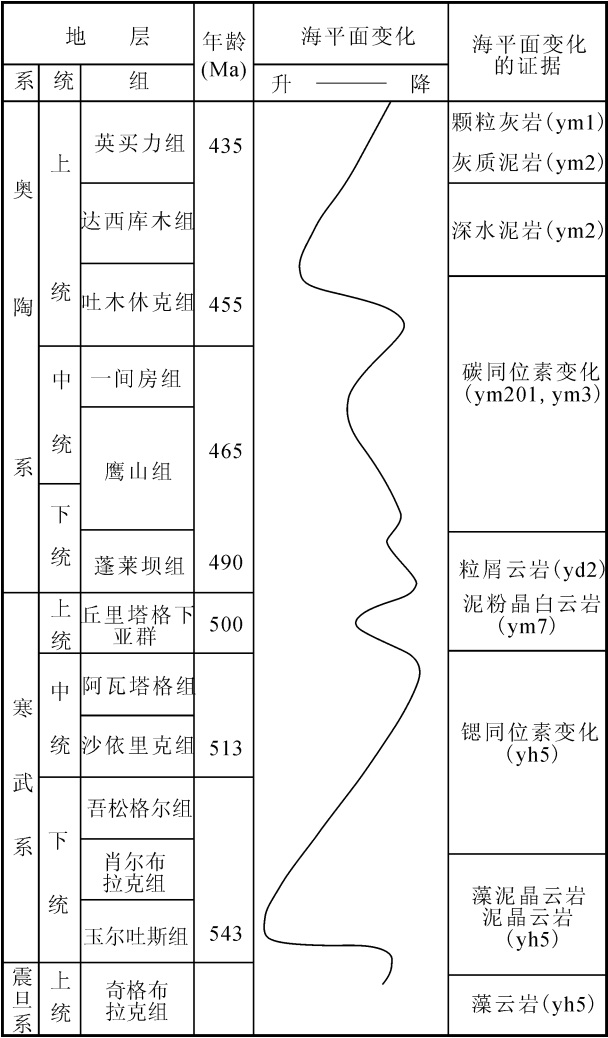


图 1 塔里木地区寒武纪—奥陶纪海平面升降变化图

Fig. 1 Sea-level fluctuation of the Tarim area during Cambrian and Ordovician

海平面变化的证据一栏括弧内字母代表井号
(ym1 and ym2 et al. in the figure stands for the wells in which the rocks were found)

期水体突然上升,牙哈地区在原来局限台地(潮坪、泻湖)的基础上变成开阔台地。早寒武世晚期,水体逐渐变浅,为潮坪和泻湖交替沉积。中寒武世早期,海平面逐渐上升;从中寒武世晚期开始,海平面又开始下降,水体逐渐变浅。晚寒武世,海平面降到最低。整个中寒武世和晚寒武世牙哈地区为潮坪和泻湖交替出现;早奥陶世至中奥陶世,水体开始上升;中奥陶世晚期和晚奥陶世早期,出现一次聚然的海平面下降,而后,海平面快速上升,陆源碎屑开始注入,塔里木碳酸盐台地变为混积陆棚,在陆棚内缓坡上有瘤状灰岩沉积;晚奥陶世晚期,水体开始逐渐下降,陆源物质停止注入,混积陆棚逐渐变为开阔台地

(Richter et al., 1992; Montanez et al., 1996; Ruppel et al., 1996; 顾家裕,1996; Bao Zhidong et al., 1998; 于炳松等,2005; 冯增昭等,2003, 2005; 鲍志东等,2004,2006)。

2 塔里木盆地下古生界岩溶发育特征

碳酸盐沉积物或碳酸盐岩的孔隙水的性质发生变化可引起碳酸盐矿物溶解。如孔隙水长期不饱和且具流动性,碳酸盐矿物就会不断地被溶解和带出,从而形成大量的溶蚀孔隙。岩溶作用在塔里木下古生界相当发育。根据岩溶作用发育时期可将其划分为准同生岩溶、埋藏岩溶和风化壳岩溶。岩溶作用对牙哈—英买力地区下古生界碳酸盐岩储层的形成有着至关重要的影响,是影响本区优质储层形成的重要因素之一。

2.1 准同生岩溶

准同生岩溶作用发生于沉积同生期或准同生期的淡水环境中。在海退序列中,碳酸盐潮坪和颗粒滩等极浅水沉积区,伴随海平面的相对下降而出露海面处于淡水透镜体中,受到富含 CO₂ 的大气淡水淋滤,发生选择性和非选择性溶蚀。在勘探工作中,准同生岩溶的识别可以通过钻井过程中钻时加快、井漏、井喷、钻井放空等现象加以判断。在微观上,准同生岩溶的识别标志包括: ① 灰泥石灰岩中发育非选择性溶蚀形成的溶孔,其中可见到渗流粉砂。如英买 10 井 5274.3 m 处溶孔、溶洞、溶缝中的渗流粉砂沉积。② 发育悬垂型和新月型等特征的大气淡水方解石胶结物。如英买 201 井 6058.6 m 处亮晶颗粒灰岩中的悬垂状亮晶方解石胶结。③ 选择性溶蚀形成的铸模孔、粒间(内)溶孔、泥晶套与氧化圈等与非选择性溶蚀缝(孔)并存。如牙哈 7X1 井 5833 m 处粉晶白云岩中的鲕粒铸模孔和粒间溶孔。塔北牙哈—英买力地区探井取心段准同生岩溶储层的分布层位和储集特征参见表 1。

钻井取心资料揭示,牙哈—英买力地区至少在以下两个层位具备发育上述准同生岩溶型储层: ① 一间房组和吐木休克组之交的沉积间断面,代表较长时间的台地暴露,在英买 3 井、英买 1 井、英买 201 井、英买 10 井等井一间房组的顶部和吐木休克组的底部发育准同生岩溶型储层; ② 上寒武统和中寒武统之交的沉积间断面,代表较长时间台地暴露的沉积间断面,牙哈 7X-1、牙哈 3 井滩相亮晶颗粒灰岩已经发育成暴露浅滩型储层(图 2)。

表 1 塔里木盆地牙哈—英买力地区寒武纪—奥陶纪准同生岩溶型储层分布表

Table 1 Contemporary karst reservoirs distribution of the Cambrian and Ordovician in the Yaha and Yingmaili regions, Tarim Basin

井号	分布层位	原岩及储集岩	储集空间	主要成岩作用	沉积环境
Ym3	吐木休克组底部	均为泥晶灰岩	溶孔,少量溶缝	早期大气淡水淋滤	局限台地
Ym101	吐木休克组底部	均为生屑泥晶灰岩	溶孔、溶洞、溶缝	早期大气淡水淋滤	局限台地
Ym201	吐木休克组底部	均为泥晶灰岩	溶孔、溶洞、溶缝	早期大气淡水淋滤	局限台地
Ym6	蓬莱坝组顶部	原岩为亮晶鲕粒灰岩; 储集岩为白云岩	粒间溶孔	白云化作用; 早期淡水淋滤	障壁滩
Yh7X1	中寒武统顶部	原岩为亮晶鲕粒灰岩; 储集岩为白云岩	粒间溶孔、粒内 溶孔、铸模孔	白云化作用; 早期淡水淋滤	障壁滩
Yh3	上寒武统底部	原岩为亮晶鲕粒灰岩; 储集岩为白云岩	粒间溶孔、粒内溶 孔、铸模孔	白云化作用; 早期淡水淋滤	障壁滩

2.2 埋藏岩溶

埋藏岩溶是指碳酸盐岩在深埋环境与深部流体发生的溶蚀作用。这种岩溶作用常与油气的形成同步或稍晚于油气生成期,其形成的孔洞常被油气充填而为有效的油气储集层。埋藏岩溶的识别标志如下:①紧密排列的中粗晶白云岩晶体间存在的较大

的晶间孔或晶间溶孔,表明了是在深埋环境下经过压实作用后又被深部流体溶蚀而形成的;②沿早期缝合线进行扩溶,形成溶扩压溶缝及溶蚀微孔或者张开的未被完全充填的裂缝;③裂缝中发现有燧石充填,表明发生了深部硅质热液作用;④裂缝附近的白云岩晶体较大,而随着远离裂缝,白云石晶体变小,表明有深部热液通过并在靠近裂缝处发送白云岩重结晶作用;⑤岩溶缝洞中充填的方解石晶体中包体均一化温度都比较高,一般大于 90℃。

塔里木盆地下古生界进入深埋藏成岩环境后,大致相当于石炭纪—三叠纪,寒武—奥陶系埋深达到 5000 m 以下,为埋藏岩溶活动期。这时,高温富 Mg^{2+} 成岩介质的渗入导致白云化、白云石的重结晶的发生,表现为以下几种形式:白云化作用、粉晶白云石的重结晶作用、有机酸的溶蚀作用、硅质充填作用。埋藏岩溶型储层是牙哈—英买力地区非常重要的储层类型。其分布范围、孔隙类型和经历的主要成岩作用可参见表 2。

塔北寒武系—奥陶系的埋藏岩溶型储层主要分布在英买 7 井和英买 4 井以东的基底为变质岩分布的地区。在平面上,该类储层的分布范围与准同生岩溶储层的分布范围具有相当重叠性(图 3)。塔中的埋藏岩溶主要分布在中、上奥陶统碳酸盐岩的顶

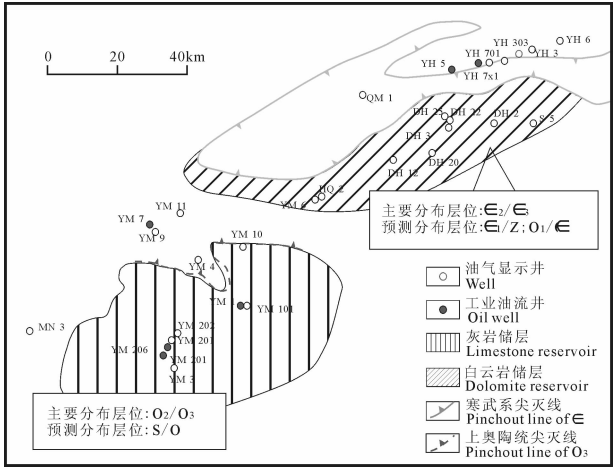


图 2 塔里木盆地牙哈—英买力地区寒武—奥陶系准同生岩溶型储层分布图

Fig. 2 Contemporary karst reservoirs distribution of the Cambrian and Ordovician in the Yaha and Yingmaili regions, Tarim Basin

表 2 塔北牙哈—英买力地区埋藏岩溶型储层的分布范围

Table 2 Buried karst reservoirs distribution of the Cambrian and Ordovician in the Yaha and Yingmaili regions, Tarim Basin

井号	层位	井段(m)	储集岩	孔隙类型	主要成岩作用
英买 4	O ₁	5120~5130	中粗晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔	压实作用、埋藏白云化、深部溶解作用
英买 6	O ₁	5460~5480	细中晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔	压实作用、埋藏白云化、深部溶解作用
英买 7	O ₁	5213~5252	细粉晶白云岩	晶间(溶)孔、裂缝、砾间孔	压实作用、埋藏白云化、深部溶解作用
牙哈 303	Є ₃	5926~5937	细中晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔、裂缝	压实作用、埋藏白云化、深部溶解作用
牙哈 7X-1	Є ₂	5837~5895	细粉晶白云岩	粒间(内)溶孔、铸模孔	压实作用、埋藏白云化、深部溶解作用
牙哈 5	Є ₁	5917~5943	细中晶白云岩	晶间(溶)孔、裂缝、砾间孔	压实作用、埋藏白云化、深部溶解作用
	Є ₂	6122~6140			
东河 12	O ₁	5666~5768	细中晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔、裂缝	压实作用、埋藏白云化、深部溶解作用

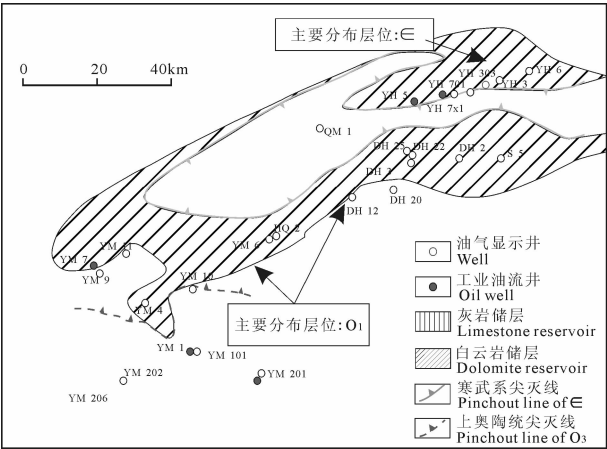


图 3 塔里木盆地牙哈—英买力地区寒武系—奥陶系埋藏岩溶型储层分布图

Fig. 3 Buried karst reservoirs distribution of the Cambrian and Ordovician in the Yaha and Yingmaili regions, Tarim Basin

部,这些埋藏岩溶是在准同生岩溶的基础上由于上覆泥页岩产生的酸性流体再次溶蚀所致;塔中下奥陶统埋藏岩溶发育于其中上部,距侵蚀面约 1000~1500m深处,横向上可对比,以TZ162井与TZ43

井最为典型,这些岩溶是由于烃源岩在成熟过程中产生的有机酸、CO₂、H₂S 的酸性流体溶蚀砂糖状白云岩所致。

2.3 风化壳岩溶

风化壳岩溶的形成原因是由于构造运动的抬升,使地层出露地表接受表生大气淡水淋滤而形成的。准同生岩溶作用和风化壳岩溶作用都与大气淡水的淋滤有关,不过它们在成因机理、层位分布、孔洞规模等方面有较大的差别(徐国强等,2005),风化壳岩溶的主要识别标志参见表 3。

探井岩心、地质录井资料以及镜下薄片的鉴定,识别出了塔北牙哈—英买力地区的风化壳岩溶的分布层位、储集类型以及主要的成岩作用(表 4)。

由表 4 可以看出,牙哈—英买力地区的风化壳岩溶可分为灰岩型和白云岩型风化壳岩溶。灰岩型风化壳岩溶主要分布在英买力地区,原岩为形成于局限台地环境的各种泥晶灰岩,也可以是台内滩和障壁滩相颗粒灰岩;白云岩型风化壳岩溶由于受到深部有机酸、硅质热液以及富 Mg²⁺ 热液的埋藏溶蚀及白云岩作用,其地理位置分布在靠近牙哈—英买力地区变质岩区,在英买力地区和牙哈地区均有

表 3 塔里木盆地牙哈—英买力地区下古生界风化壳岩溶的识别标志

岩心观察	地质录井	测井资料解释
①高角度溶蚀缝被红色、灰绿色泥质充填 ② 中小型溶蚀孔洞多被泥质充填或半充填,孔洞通常呈瓶颈状、葫芦状或串珠状 ③ 岩溶岩性通常有角砾岩和碎屑岩	① 风化壳岩溶发育段,钻井中常有钻速加快、放空、蹩跳钻、井漏、井涌现象发生 ② 钻遇风化壳岩溶发育段、泥浆槽面常见油花、油膜,岩屑有荧光显示,常见油迹、岩屑砂样中常见自形、半自形方解石 ③ 气测油气显示明显,全烃、重烃,烃组分明显提高	风化壳岩溶发育段,井径扩大,中型、大型溶洞自然伽马增高,双侧向电阻率降低 风化壳岩溶发育段测井解释孔隙度、渗透率、含油饱和度都有较大幅度的增高

表 4 塔里木地区寒武纪—奥陶纪风化壳岩溶储层分布表

井号	层位	储集岩	储集空间类型	主要成岩作用	沉积环境
Ym4	蓬莱坝组顶部	泥晶灰岩,中粗晶白云岩	溶孔、溶洞、溶缝、晶间孔、晶间溶孔	深埋白云化作用,裂缝作用,晚期大气淡水淋滤	局限台地
Yd2	鹰山组顶部	粒屑泥晶灰岩	溶孔、溶洞、溶缝	裂缝作用,晚期大气淡水淋滤	台地滩
Hq2	蓬莱坝组顶部	粒屑泥晶灰岩中粗晶白云岩	溶孔、溶洞、溶缝、晶间孔、晶间溶孔	深埋白云化作用,裂缝作用,晚期大气淡水淋滤	台地滩
Ym6	蓬莱坝组顶部	细-粉晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔	深埋白云化作用,裂缝作用,晚期大气淡水淋滤	台地滩
Dh12	蓬莱坝组顶部	残余粒屑白云岩,细、中晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔、裂缝	深埋白云化作用,裂缝作用,晚期大气淡水淋滤	台地滩
Yh5	中寒武统顶部	泥、粉晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔、裂缝	深埋白云化作用,裂缝作用,晚期大气淡水淋滤	局限台地
Yh303	上寒武统顶部	细中晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔、裂缝	深埋白云化作用,裂缝作用,晚期大气淡水淋滤	局限台地
Yh7X1	中寒武统顶部	泥粉晶白云岩	晶间孔、晶间溶孔、裂缝	深埋白云化作用,裂缝作用,晚期大气淡水淋滤	局限台地

分布。白云岩型风化壳储层其原岩一般为台地滩或者障蔽滩环境中的颗粒灰岩,而牙哈地区的白云岩型风化壳储层其原岩可能为局限台地的准同生白云岩,后期又经过埋藏白云岩化作用。这两者的储集空间类型一般都为晶间孔、晶间溶孔、粒间孔、粒间溶孔、次生的溶蚀扩大缝。牙哈—英买力地区寒武系—奥陶系风化壳岩溶型储层的平面分布参见图 4。

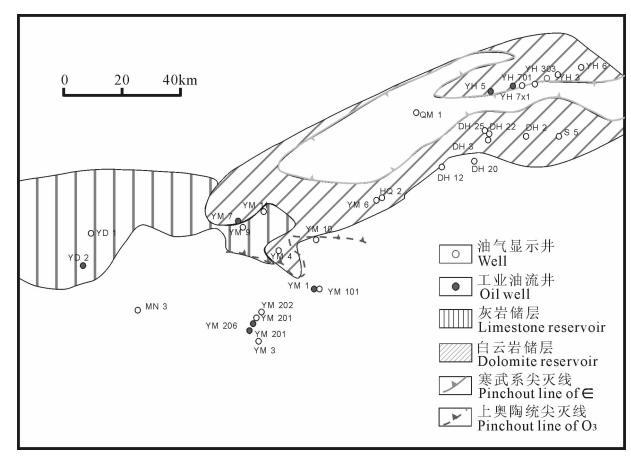


图 4 塔里木牙哈—英买力地区寒武系—奥陶系风化壳岩溶型储层分布图

Fig. 4 Karst reservoirs distribution of the Cambrian and Ordovician in the Yaha and Yingmaili regions, Tarim Basin

3 埋藏岩溶及风化壳岩溶与准同生岩溶耦合关系

准同生岩溶作用受到海平面升降的控制,一般发育于相对海平面下降期;同时受沉积环境控制,主要发育于潮坪相、泻湖相以及台地内的滩相。在英买力地区,这类储层主要分布在其南部的英买 1 井、英买 2 井和英买 3 井区,纵向上主要分布于中奥陶统与上奥陶统之间的吐木休克组中,这与该时期的海平面突然下降是一致的。准同生岩溶型储层一般顺层较稳定分布,可预测性强。

埋藏岩溶作用受埋藏期深部成岩作用的影响,其分布受深埋热液的活动范围控制。在平面上,这类储层的分布范围与白云岩型风化壳岩溶储层的分布大致是一致的,主要分布在英买力地区的英买 7 井和英买 4 井以东的地区以及整个牙哈地区;这类储层的发育主要受深部流体的流动范围的控制,而深埋热液的流体通道主要为准同生岩溶孔隙、古潜山面及裂缝系统等。这类储层往往有较高的孔隙度和渗透率,以基质准同生岩溶孔叠加后期再溶蚀空

洞为特征,均质性相对较好。

风化壳岩溶作用主要受古潜山范围的控制,是后期构造运动导致地层抬升接受晚期大气淡水的淋滤而发育的,其形成的储层一般分布在古潜山面之下。塔北地区石灰岩型风化壳岩溶储层主要分布在英买力的英买 4 井、玉东 2 井和红旗 2 井等井区,其原始沉积环境包括局限台地、台内滩和障壁滩相;白云岩型风化壳岩溶主要分布在牙哈地区和英买力的东部地区,其原始沉积环境为台地滩、障蔽滩或局限台地(顾家裕等,2001;徐国强等,2005)。在这些石灰岩型岩溶储层及白云岩型岩溶储层中,均发育强烈的准同生溶蚀作用和准同生后溶蚀作用的印迹(鲍志东等,2006)。

综上所述,塔里木地区下古生界各类岩溶具有复杂而显著的耦合关系。对比图 2、图 3 和图 4 可以看出,准同生期岩溶为后期的埋藏岩溶准备了基础通道;随后发育的埋藏及风化壳岩溶则是继承并叠加早期准同生岩溶通道的发育,最终成为潜在的优质储层。

4 塔里木早古生代海平面波动的岩溶响应特征

海平面的升降变化控制着溶蚀作用的期次和潜流带的垂向分布,造成各类溶蚀作用在垂向上的叠加。准同生溶蚀作用保留下来的孔洞为后期溶蚀作用提供了有利条件。准同生后岩溶作用与准同生岩溶作用的叠加响应关系显示,海平面变化直接控制着准同生岩溶作用的进行,同时也是埋藏岩溶和风化壳岩溶的间接控制因素之一。塔里木盆地早古生代海平面波动活跃,准同生岩溶比较发育,准同生溶蚀作用形成的孔洞可以作为准同生后溶蚀作用的通道,有利于同生后岩溶的发育(Bao Zhidong, 1998)。

在塔北轮南地区,早奥陶世存在两期同生期溶蚀作用,在下奥陶统发育了两套碳酸盐岩储层。地震资料解释显示,在轮南地区下奥陶统发育两个很明显的地震强反射层,探井标定这两个强反射层对应于两套碳酸盐岩风化壳储层——两次海平面下降期与两套储层发育期基本一致(图 5),而且在两套碳酸盐岩风化壳储层中可识别出前期准同生岩溶的成岩作用印迹(徐国强等,2005;鲍志东等,2006)。这两套准同生岩溶在塔中地区的对应层位也发育,且两套储层间隔厚度均为 100~120 m,其代表的沉积时限在两个地区基本一致。这些表明,塔里木

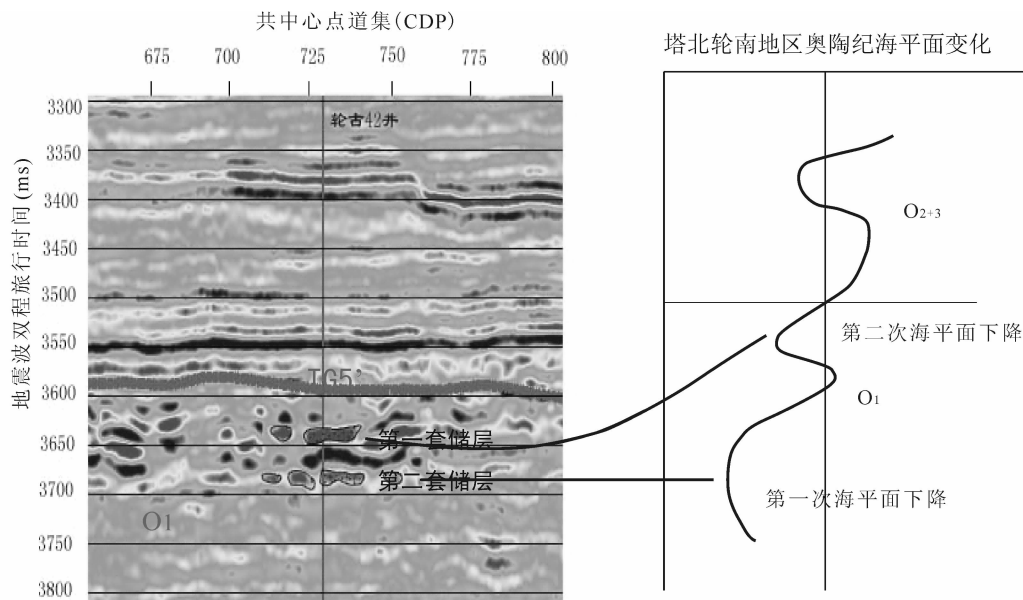


图 5 塔里木盆地轮南地区早奥陶世海平面波动与岩溶储层发育关系图(图中 Tg5'代表地震反射层)

Fig. 5 Relationship between karst reservoir development and sea-level fluctuation of the Early Ordovician in the Lunnan region, northern Tarim Basin (Tg5' stands for seismic reflection)

地区早古生代海平面波动与岩溶发育显示出良好的耦合关系。海平面变化是控制塔里木盆地下古生界岩溶储层发育的一个重要的因素。

5 结论

(1)塔里木下古生界碳酸盐岩中岩溶发育。准同生岩溶为埋藏岩溶和风化壳岩溶提供了良好的溶蚀介质输导孔隙。

(2)塔北和塔中牙哈—英买力地区下奥陶统的两期风化壳岩溶叠加于先期的准同生岩溶作用及埋藏岩溶作用之上。地震-钻井相互标定剖面显示,下奥陶统的两期风化壳岩溶储层基本上对应于两期准同生岩溶发育的碳酸盐岩储层。

(3)海平面波动史及岩溶发育特征分析表明,塔里木地区早古生代海平面波动与岩溶发育呈现良好的耦合关系。海平面变化是控制塔里木盆地下古生界岩溶储层发育的一个重要的因素。

致谢:研究工作得到了塔里木油田公司田军、王招明、江同文、刘胜、张光亚、杨文静、郭宏、李勇、胡剑锋、张丽娟等领导和专家的宝贵支持。中国石油大学冯增昭教授给予了建设性的指导。审稿人朱筱敏教授的修改建议使论文增色不少。在此一并致谢!

参 考 文 献

鲍志东,朱井泉. 1998. 塔里木盆地奥陶系层序地球化学研究. 地质科技情报,17(4):43~47.

顾家裕,周兴熙. 2001. 塔里木盆地轮南潜山岩溶及油气分布规律. 北京:石油工业出版社.

徐国强,李国蓉,刘树根,武恒志,田纳新,李智武. 2005. 塔里木盆地早海西期多次风化壳岩溶洞穴层. 地质学报,79(4):557~568.

鲍志东,金之钧,孙龙德,王招明,王清华,张清海,时晓章,李伟,吴茂炳,顾乔元,武新民,张宏伟. 2006. 塔里木地区早古生代海平面波动特征:来自地球化学及岩溶的证据. 地质学报,80(3):366~373.

何莹,鲍志东,沈安江,申银民,李明和. 2006. 塔里木盆地牙哈—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.

关士聪. 1984. 中国海陆变迁海域沉积相与油气. 北京:科学出版社.

姜春发,王宗起,李锦轶. 2000. 中央造山带开合构造. 北京:地质出版社,10~170.

邓万明. 1995. 喀喇昆仑—西昆仑地区蛇绿岩的地质特征及其大地构造意义. 岩石学报,11:98~111.

顾家裕. 1996. 塔里木盆地沉积储层特征及其演化. 北京:石油工业出版社.

冯增昭,彭勇明,金振奎,鲍志东. 2003. 中国中奥陶世岩相古地理. 古地理学报,5(3):263~278.

冯增昭,鲍志东,金振奎,吴茂炳,等. 2005. 塔里木地区早古生代岩相古地理. 北京:地质出版社.

于炳松,Dong Hailiang,陈建强,李兴武,林畅松. 2005. 塔里木盆地

下寒武统底部层位硅质岩微量元素和稀土元素地球化学特征及其成因意义. 地质学报(英文版),79(2):215~224.

Bao Zhidong. 1998. Continental slope limestones of Lower and Middle Triassic, South China. *Sedimentary Geology*, 118(1~4): 77~93.

鲍志东,陈践发,张水昌,赵洪文,张清海,李燕. 2004. 北华北中上元古界烃源岩发育环境及其控制因素. *中国科学*, 34(增 1): 114~119.

Montanez I P, Banner J L, Olseger D A, Borg L E, Bosserman P J. 1996. Integrated Sr isotope variation and sea-level history of Middle to Upper Cambrian platform carbonates: Implications for the evolution of Cambrian seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Geology*, 24(10): 917~920.

Richter F M, Rowley D B, DePaolo D J. 1992. Sr isotope evolution of seawater: the role of tectonics. *Earth and Planetary Science Letters*, 109: 11~23.

Ruppel S C, James E W, Barrick J E, Nowlan G, Uyeno T T. 1996. High-resolution $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ chemostratigraphy of the Silurian: Implications for event correlation and strontium flux. *Geology*, 24(9): 831~834.

Bao Zhidong, Zhu Jingquan, Jiang Maosheng, Xia Yong. 1998. Strontium isotope evolution: responding with sea-level fluctuation——An example of Ordovician in middle Tarim area. *Scientia Geologica Sinica*, 7(3): 329~333.

**Karst Development Response to Sea-Level Fluctuation:
a Case from the Tarim Area in the Early Paleozoic**

BAO Zhidong¹⁾, QI Yaochun^{1, 2)}, JIN Zhijun³⁾, ZHANG Xianlong¹⁾, HU Guangcheng¹⁾,
ZHANG Qinghai¹⁾, SHI Xiaozhang¹⁾, Li Wei¹⁾, YANG Fan⁴⁾, PAN Wenqing⁴⁾, SUN Yushan⁴⁾
1) *China University of Petroleum, Beijing*, 102200; 2) *Jilin Oilfields Company, CNPC, Songyuan, Jilin*, 138000
3) *Institute of Exploration and Development, Sinochem, Beijing*, 100083
4) *Tarim Oilfields Company, CNPC, Korla, Xinjiang*, 841000

Abstract

Karst carbonate reservoir development prediction draws much attention from petroleum geologists all over the world. Paleozoic karst carbonates is the most favorable for giant hydrocarbon pools exploration in the Tarim Basin, northwestern China. Based on karstification type and paleogeography evolution analyses, the paper investigates the karst development response to sea-level fluctuation taking the early Paleozoic Tarim Basin as an example. The analyses shows the penecontemporary karstification was developed during the regression stage in the Early Paleozoic Tarim Basin, which provides diagenetic fluid conduct layer for the subsequent buried and freshwater karstification. The seismic reflection profile shows there are two stages of freshwater karstification, which rebuilt upon the former penecontemporary karstification. Integrated research reveals that there was remarkable relationship between the karstification and the sea-level fluctuation in the Early Paleozoic Tarim Basin. The sea-level fluctuation was an important controlling factor for karst carbonate reservoir development in the Early Paleozoic Tarim Basin.

Key words: karstification response; sea level fluctuation; Tarim Basin; Early Paleozoic