

塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩 成岩作用与孔隙演化

陈强路^{1,2}, 钱一雄^{1,2}, 马红强¹, 王恕一¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡实验地质研究所, 江苏 无锡 214151;

2. 中国石化石油勘探开发研究院 西部分院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 奥陶系是塔河油田最主要的产层, 该文系统研究了碳酸盐岩成岩作用类型、成岩序列和成岩环境, 分析了对储集性有重要影响的胶结作用、溶解作用、热水成岩作用和破裂作用, 恢复了碳酸盐岩成岩和孔隙演化史, 提出了储层形成的成岩依据。

关键词: 孔隙演化; 成岩作用; 碳酸盐岩; 塔河油田; 塔里木盆地

中图分类号: TE122. 2

文献标识码: A

塔河油田位于塔里木盆地北部阿克库勒凸起中南部, 东邻草湖凹陷, 西与哈拉哈塘凹陷相接, 南面过渡为满加尔生烃坳陷(图 1)。

奥陶系是塔河油田油气的最主要产层, 碳酸盐岩储层的形成主要受原始沉积相带和后期成岩改造的控制, 塔河油田奥陶系实现产能的储层与后期成岩改造有关, 不同期次的成岩作用复合叠加, 形成现今储集体面貌。

研究区下奥陶统主要为一套局限台地- 开阔台地相微晶灰岩、颗粒微晶灰岩沉积, 局部出现台内礁(丘)相及围绕其发育的潮坪相藻粘结灰岩沉积。中上奥陶统为较深水陆棚相泥岩、粉砂岩、泥灰岩、瘤状灰岩沉积及潮缘相藻粘结灰岩沉积。

区域构造演化表明, 阿克库勒凸起是一个长期发展的、经历了多期构造运动、变形叠加的古凸起。加里东晚期- 海西早期构造运动, 造成沉积间断和剥蚀, 阿克库勒凸起大面积缺失中- 上奥陶统、志留系、泥盆系, 下奥陶统也遭到不同程度的剥蚀。海西晚期构造运动使本区再一次遭到沉积间断和剥蚀, 缺失二叠系, 石炭系遭到不同程度的剥蚀。三叠纪后总体持续沉降接受陆相沉积。

1 主要成岩作用类型及对储层影响

对奥陶系碳酸盐岩储集性能有重要影响的成岩

作用包括胶结充填作用、溶解作用、热水成岩作用、破裂作用。

1.1 胶结及充填作用

1.1.1 岩石学特征

胶结及充填作用可划为 4 期, 分别是海底海水胶结充填、浅地表大气淡水胶结充填、暴露期大气淡水胶结充填、浅- 深埋藏成岩环境的胶结充填。其中前两者发生于加里东晚期- 海西期抬升暴露前, 合称为早期胶结, 后两者发生于抬升暴露后称晚期胶结。

早期胶结作用使原生孔隙及早期溶蚀孔隙全部堵塞, 可见到二个世代胶结。第一世代方解石胶结物呈柱粒状、粒状胶结, 主要与奥陶纪方解石的性质有关; 栉壳状胶结, 与浅地表大气淡水环境有关。

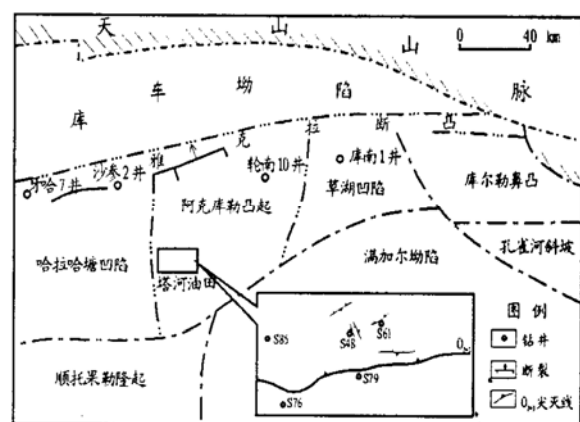


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of study area

收稿日期: 2003- 04- 05; 修订日期: 2003- 10- 28.

基金项目: 中国石化集团公司新星石油公司项目(XYK2001- 47- 1).

作者简介: 陈强路(1962-), 男(汉族), 河北定洲人, 高级工程师, 主要从事油气地质与勘探的研究工作。

第二世代方解石胶结物多为粒状,亮晶棘屑灰岩中,常见棘屑周围形成共轴增长胶结;滩相岩石中,可见粒状悬垂状胶结,反映了滩相沉积物早期局部上升处于淡水渗流带环境。电子探针分析早期胶结物微量元素 FeO、MnO、Na₂O、SrO、BaO 大多为 0.00%, 阴极发光下绝大部分胶结物不发光,只有少量共轴增长胶结物发暗光,以及少量残余孔隙中的胶结物发亮黄色-暗色光,说明早期大气淡水影响相当强烈^[1]。早期胶结物主要发生在淡水环境,少量胶结物发生在海底环境(发暗色的共轴胶结物)以及少量残余孔隙在早期浅埋环境被充填。

晚期胶结充填作用主要表现在对加里东-海西期表生岩溶洞(缝)及后期构造裂缝的充填胶结,如角砾岩、暗河砂泥、渗滤砂泥等溶洞(缝)中岩溶沉积物充填,以及无铁粒状方解石和含铁方解石的充填胶结。

1.1.2 多期胶结同位素分析

碳酸盐岩溶洞和裂隙胶结充填方解石稳定同位素分析^[2](图2)($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均为 ‰PDB,下同),可划分为4组。

a) 最高的 $\delta^{13}\text{C}$ (4.6~6.5)、中等的 $\delta^{18}\text{O}$ (-7.3~-9.4)、最高的盐度值(132.4~136.6)和较低的成岩温度(54.3~65.7℃)为特征。方解石胶结物的形成可能与有机质生物发酵有关,发酵作用产生的甲烷会产生很低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-80),而残余有机质显示出高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,胶结作用混有这种残余有机质的碳将导致带有高 $\delta^{13}\text{C}$ 值的胶结物。由此推测其胶结形成于早期,主要是浅埋藏环境产物。

b) 缝洞方解石充填以较高的 $\delta^{13}\text{C}$ (-3~-1.0)、相对中高的 $\delta^{18}\text{O}$ (-5.6~-9.8)、大于 120 盐度值(124.1~126.0)和较低的成岩温度(45.1~67.8℃)为特征,与奥陶纪原始海相同位素接近,是海水或变质介质胶结的产物。

c) 以中等的 $\delta^{13}\text{C}$ (-3.9~-0.1)和 $\delta^{18}\text{O}$ (-14~-10),介于中间的盐度值(112.1~119.0)和成岩温度(50.9~83.0℃),主要反映淡水淋滤(潜流带为主)方解石特征,对应是主要裂隙、孔洞表生充填期的产物。

d) 充填方解石以最低的 $\delta^{18}\text{O}$ (-15.4~-13.7)、最低的 $\delta^{13}\text{C}$ (-1.7~-6.4)、最低的盐度值(107.1~116.0)和最高的成岩温度(95.5~104.6℃)为特征,是淡水淋滤后经埋藏成岩或有机质作用改造的产物,代表了早期岩溶带胶结充填产物由开放状态逐渐进入到半封闭、封闭状态和较高温度胶结充填特征。

1.1.3 多期胶结包裹体分析

综合分析不同缝洞充填方解石捕获的盐水包裹体表明胶结充填具多期性,表现为同一期形成的裂隙(孔洞)经历了多期的充填,盐水包裹体均一温度表现为不同的几组,如 S76 井 5 744.65m 的一组方解石脉可以检测到低温(<50-60℃)饱气带-潜流带的包裹体,浅埋藏条件下的包裹体(75.5℃)和较高温度(137.3℃)的 3 期包裹体(表 1)。反映了岩溶期及其后埋深地层流体温度不断升高的多期胶结过程。

1.2 溶解作用

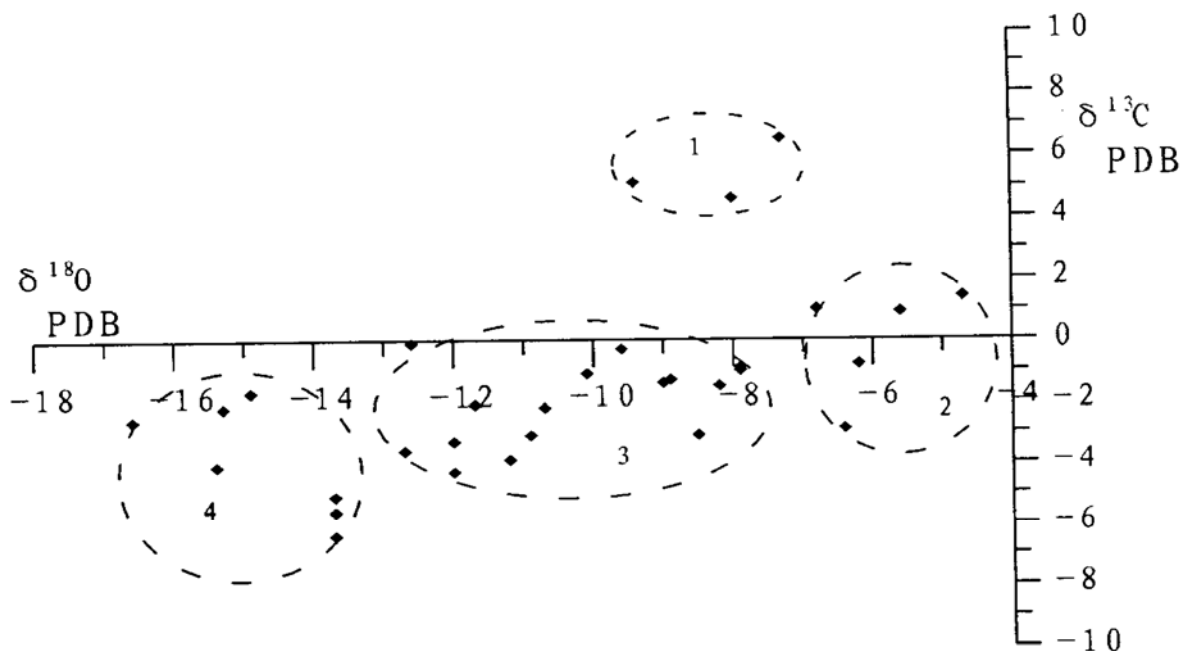


图2 奥陶系方解石胶结物氧碳同位素分布

Fig. 2 Characteristics of the oxygen and carbon isotopes of the calcite fillings in caves and seams

表1 不同期次方解石脉及包裹体发育情况

Table 1 Description of the calcite fillings in seams and fluid inclusions

井号	埋深/m	宿主矿物及产状	平均均一温度/℃	盐度/%	备注
			< 50- 60		
S76	5 744. 65	裂缝充填方解石	75. 5	9. 2	
			137. 3	15. 3	
			56. 5		含 CO ₂ 盐水
S75	5497. 52	裂缝充填方解石	76. 4	3. 71	
			102. 9	2. 41	
		宽方解石脉壁	48. 15	0. 18	含 CO ₂ 盐水
S74	5 557. 65	宽方解石脉	88. 2	3. 06	

溶解作用是本区储集体形成的最主要成岩机制,可分为3期。

一期为成岩早期,沉积物上升处于浅地表淡水环境,产生溶孔,这类溶孔塔河地区总体上不发育,部分滩相岩石可见到有1%~3%的早期溶蚀孔,即颗粒灰岩中粒内、粒缘和一世胶结物的溶解,偶见铸模孔及少量泥微晶灰岩似窗孔的溶蚀孔,这些溶蚀孔隙一般很快被方解石胶结充填,不构成本区现今有效的储集空间。

二期为加里东-海西期构造抬升暴露表生岩溶期,形成规模不等、非均质性很强溶蚀缝、洞,纵向上表生岩溶由不整合面向下可划分为地表岩溶带、渗流岩溶带和潜流岩溶带,该期溶蚀作用是塔河地区奥陶系储集体的主要形成期^[3,4]。

三期为海西期后浅-深埋藏期的溶解作用,即埋藏溶解。塔河油田南缘S69井-S60井-TK203井-S76井带为台地内礁滩相亮晶砂屑-生屑灰岩、残余粒屑粗-巨晶灰岩,岩心基质物性分析孔隙度平均4.87%,构成了本区重要的孔隙型储层,该孔隙型储层的成因是埋藏溶解的结果。表现在以下方面。

a) 岩心、薄片、扫描电镜观察分析,这类孔隙主要为次生孔隙。以分布较均匀的针状溶孔为主,孔径0.01~0.03mm或更小,仅少量达0.1mm以上,同时伴有有效构造微缝及其溶蚀,与表生岩溶期产物迥异。

b) 溶蚀作用无选择性,溶蚀孔隙有颗粒内溶孔、粒缘(棘屑)溶蚀孔、砂屑的微泥晶和基质微泥晶的晶间溶孔、亮晶胶结物或重结晶的晶间溶孔,也有沿缝合线发育的溶缝和穿过铁方解石的溶缝以及少量亮晶胶结物晶内溶孔。

c) 部分溶孔发育于萤石中或萤石残留的微晶方解石晶间,以及溶缝穿过铁方解石,是埋藏溶蚀的直接证据。

1.3 热水成岩作用

这里提出热水成岩作用,其特征是成矿物质主要来源于水-岩相互作用,热水指受岩浆期后影响的地层水,不同于岩浆成矿、变质成矿和表生成矿和热液成矿^[5,6]。这次在塔河地区新发现的热水成岩作用主要表现为萤石化、绿泥石化和褪色作用。萤石化一般表现为交代结晶方解石或呈斑块状交代岩石,如S76井5 580.72m可见萤石交代结晶铁方解石,S85井5 872.42m裂缝充填方解石被萤石交代,萤石中盐水包裹体的均一温度208.5~218.5℃,平均为213.6℃,而被交代裂缝方解石盐水包裹体均一温度为125.9~131.4℃,明显高于被交代矿物的成岩温度,即埋藏成岩温度。绿泥石化主要为交代棘屑及其共轴增长边。褪色作用,常与萤石化伴生,在萤石交代方解石部位其周围的岩石或生物碎屑产生褪色,有时还可见到岩石中的海绿石褪色。

热水的地球化学研究是现代地学研究的前沿学科,80年代中期以来人们开始根据热对流理论解释砂岩的成岩作用^[7,8]。笔者认为热水成岩作用主要是岩浆期后热液流体沿裂隙或断裂循环并改造地层水形成的,塔河及其邻区早二叠世大范围发生火山活动,石炭系顶部发育厚度不等的灰绿色英安岩、深灰色玄武岩岩体和辉绿岩岩脉,一些组分与渗滤地层水混合并沿海西期强烈的构造运动产生大量的构造裂隙渗滤,渗透地层水与围岩进行水岩作用,与热液活动有关的微量元素F和B由浅至深含量降低(表2),与地层水的渗透并发生水岩作用有关。

热水成岩作用产生溶蚀,形成新的储集体,钻井发现塔中下奥陶统灰岩中萤石脉连续发育段达28m,萤石晶粒粗大,以自形晶为主,萤石脉分布受断裂、裂隙控制,其发育与早二叠世后期岩浆热液活动有关。萤石发育段发育了较多的溶蚀孔(洞),溶蚀孔(洞)发育于萤石脉内部及萤石脉-围岩接触部位附近,而远离萤石脉的围岩中基本未发育溶洞,

表 2 塔河地区不同层位氟和硼含量

Table 2 Distribution of microelement F and B in the different depth in Tahe oil field

层系或井号	样品数	F/10 ⁻²	B/10 ⁻⁶
下石炭统(C _{1b})	16	0.078 33	73.317
中上奥陶统(O ₂₊₃)	24	0.042 13	33.567
下奥陶统(O ₁)	274	0.014 55	4.624

着截然不同的成因,笔者在塔河地区首次发现了热水矿物萤石,萤石中有溶孔、缝发育,预示了新的勘探线索,热水作用发育区是值得关注的潜在的储集体发育区。

1.4 破裂作用

按成因主要有构造裂隙、风化裂隙和压溶缝合线。

构造破裂作用形成构造裂隙,不同期次构造运动形成的构造裂隙对奥陶系储集体有不同的影响。海西早期及以前的构造裂缝,当其在发生大规模岩溶作用时期为有效缝时,其本身可以被溶蚀扩大为

不整合侵蚀面或在其下附近不均匀发育风化裂隙角砾,风化裂隙主要有高角度裂隙及不规则状裂隙。裂隙内为碳酸盐岩角砾、亮晶方解石、石英砂及泥质充填,是抬升暴露期风化-充填的产物。风化裂隙是大气淡水渗透溶滤原始通道之一,沿裂隙发育溶蚀孔缝洞。

缝合线是压溶作用的产物,塔河岩溶洞穴中沉积的岩溶角砾岩、灰岩角砾中缝合线发育,表明缝合线形成于构造抬升期。随着构造上升和上覆地层的剥蚀,卸载作用可能使缝合线形成开启的流体渗滤通道。塔河地区碳酸盐岩缝合线发育需要具备的条件和

机质,充填沥青的缝合线既发育于灰黑色和黑白花斑状灰岩中,也发育于灰色、灰白色碳酸盐岩缝合线中,可见不可能仅仅是压溶有机质富集的结果。

除上述成岩作用外,奥陶系碳酸盐岩还经历了泥晶化作用、压实作用、硅化作用、白云石化作用、去白云石化作用、重结晶作用、黄铁矿化作用。

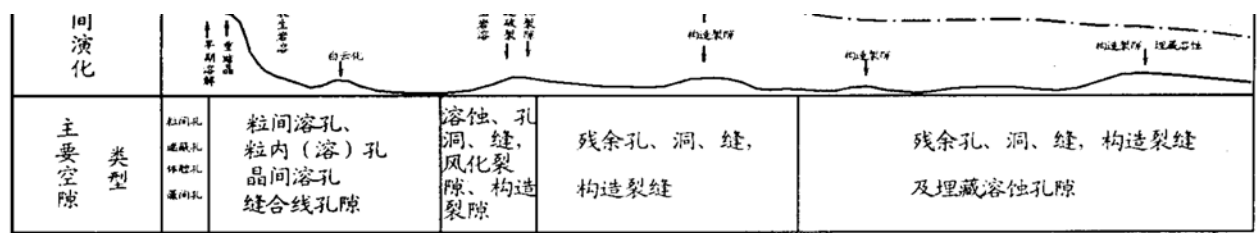
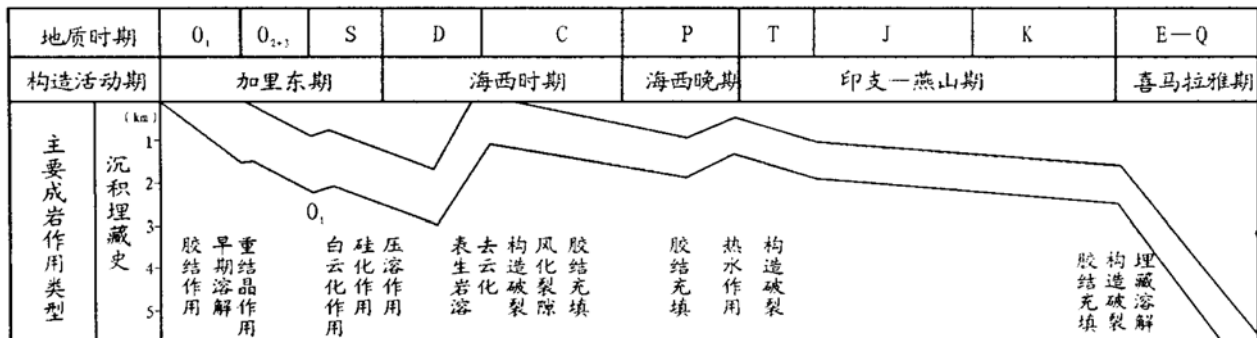
2 成岩中与孔隙演化模式

构造作用控制了储层埋藏史和构造裂隙及风化裂隙的形成。

塔河地区奥陶系沉积后,经受了早成岩期的海底成岩和近地表成岩作用,并逐步埋藏进入中成岩期,受加里东-海西运动影响,该区强烈抬升剥蚀,经受了暴露溶蚀(古岩溶),其后随中新生界的沉积,再次埋藏,构成了中期开启型成岩演化系统^[10-16]。

早奥陶世碳酸盐沉积,随着海平面多次短暂升降变化经受了海底生物粘结、泥晶化和少量胶结作用,以及浅地表大气水环境下的溶解-胶结,重结晶等成岩作用。早奥陶世末,由于全球海平面下降及水

后,压实-压溶作用逐渐增强,缝合线广泛发育,沿缝合线及其他裂缝发生了白云岩化和烃类的运移侵入;加里东末期-海西早期受区域性挤压抬升的影响,塔河地区下奥陶统抬升暴露,进入表生成岩环境,遭受不同程度的剥蚀、风化淋滤,发生强烈的岩溶作用,形成以溶蚀洞缝为主体的储集体;海西晚期至印支期多次构造升降,下奥陶统抬升、埋深不断变化,总体处于波动浅埋成岩环境;燕山期构造运动相对较弱,奥陶系上覆地层持续堆积,埋深不断增加,进入中新世以来,受喜马拉雅运动的影响,地层急剧下降,奥陶系快速埋深达 5 000 m 以上,由于浅埋-深



下 4 个阶段。

2.1 原生孔隙形成- 缩减期

台地、礁滩相的碳酸盐岩沉积物由生物骨架、颗粒支撑形成大量原生孔隙, 主要孔隙类型为粒间孔、体腔孔、藻间孔、遮蔽孔、晶间孔。海底环境、浅地表

海西- 印支期的波动浅埋成岩, 充填和胶结作用非常强烈, 表现对孔、洞、缝的充填, 同时在构造应力作用下发生构造破裂, 孔隙空间主要是残余的孔、洞、缝和构造裂缝。

2.4 裂缝、埋藏溶蚀- 充填期

陶系碳酸盐岩的主要孔隙类型为粒间溶孔、粒内(溶)孔、晶间溶孔及缝合线孔隙, 孔隙度降低到 5% 以下。

2.2 洞、缝发育期

加里东中晚期- 海西期, 塔河地区奥陶系经历了数次抬升剥蚀, 下奥陶统碳酸盐岩长期处于表生大气淡水环境, 发生了多期古岩溶作用, 不整合面之下一定深度范围内形成大规模的溶蚀缝、孔、洞, 同时构造裂隙及风化裂隙发育。该期尽管化学胶结和机械充填作用(岩溶塌积角砾岩、暗河砂泥岩、角砾岩、渗流泥砂的充填)也非常强烈, 储层空隙空间仍

喜马拉雅期构造应力场影响, 发育一些高角度构造微裂缝, 大多未充填, 对储集空间有一定贡献。浅- 深埋藏成岩期, 以构造裂隙和埋藏溶蚀孔隙以及保留下来的残余孔、洞、缝构成了现今储层的储集空间。

3 结论

奥陶系碳酸盐岩经历了早成岩期的海底成岩和近地表成岩作用, 受加里东-海西构造运动影响, 遭受暴露溶蚀, 其后随中生界的沉积, 再次埋藏, 构成了中期开启型成岩演化系统。相应地空隙演化经

历了原生孔隙缩减期、洞缝发育期、洞缝缩减期和裂缝、深埋溶蚀-充填期4个阶段,原生孔隙胶结殆尽,早期溶蚀孔基本填充,不构成有效储渗空间;加里东-海西期表生岩溶对本区储渗空间的形成起了决定性作用,溶蚀孔、洞、缝和构造破裂缝隙构成了塔河地区碳酸盐岩储层主体;深埋溶蚀形成次生孔隙,对储层起建设性作用,形成重要的孔隙型储层。

参考文献:

- [1] 李双应,等.碳酸盐岩成岩作用的微量元素地球化学特征[J].石油实验地质,1995,17(1):55-62.
- [2] 杨长庚.扬子地区奥陶系碳酸盐岩氧、碳同位素与成岩作用[J].石油实验地质,1994,16(3):267-273.
- [3] 陈强路,王恕一,钱一雄,等.塔里木盆地阿克库勒地区下奥陶统古岩溶及油气分布[J].沉积学报,2002,20(4):633-638.
- [4] 张抗.塔北隆起南坡奥陶系油气藏类型辨析[J].新疆石油地质,2003,24(1):13-18.
- [5] 刘立,于均民,孙晓明,等.热对流成岩作用的基本特征与研究意义[J].地球科学进展,2000,15(5):583-585.
- [6] 陈多福,陈先沛,陈光谦,等.热水沉积作用与成矿效应[J].地质地球化学,1997,(4):7-12.
- [7] Girard J P, Deyonoux M, Nahon D. Diagenesis of the upper proterozoic siliclas sediments of the Taoudeni Basin (west Africa) and relation to diabase emplacement [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1989, 59: 233-248.
- [8] Merino E, Gierre J- P, May M T, et al. Diagenetic mineralogy, geochemistry, and dynamics of Mesozoic arkoses, Hartford drift basin, Connecticut, USA [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1997, 67: 212-224.
- [9] 钟广法,马在田,刘瑞林,等.塔里木盆地奥陶系萤石脉-油气叠合成藏作用[J].高校地质学报,2000,6(4):576-581.
- [10] 顾忆.塔里木盆地北部塔河油田油气藏成藏机制[J].石油实验地质,2002,22(4):307-342.
- [11] 何发岐,周家驹,云露,等.塔里木盆地塔河油田油气勘探新技术[J].石油实验地质,2001,23(3):318-232.
- [12] 周玉琦,黎玉战,候鸿宾,等.塔里木盆地塔河油田的勘探实践与认识[J].石油实验地质,2001,23(4):363-369.
- [13] 蔡立国,钱一雄,刘光祥,等.塔河油田及邻区地层水成因探讨[J].石油实验地质,2002,24(1):57-60.
- [14] 刘文,李永富,张涛,等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩沉积相及地层学研究[J].石油实验地质,2002,24(2):104-109.
- [15] 翟晓先,俞仁连,何发岐,等.塔河地区奥陶系一间房组微裂隙颗粒灰岩储集体的发现与勘探意义[J].石油实验地质,2002,24(5):387-392.
- [16] 王敦则.塔里木盆地塔河油田下奥陶统油藏特征及成藏条件分析[J].石油实验地质,2003,25(2):122-128.

DIAGENESIS AND POROSITY EVOLUTION OF THE ORDOVICIAN CARBONATE ROCKS IN TAHE OILFIELD, TARIM BASIN

CHEN Qiang-lu^{1,2}, QIAN Yixiong^{1,2}, MA Hong-qiang¹, Wang Shuyi¹

(1. Wuxi Research Institute of Experimental Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China;

2. Western Subdivision of Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The carbonates of Ordovician are the principal reservoirs in Tahe oilfield, Tarim Basin. The diagenesis of Ordovician carbonates is characterized by multiple stages, different types and environments. The major diagenesis includes cementation, solution, fracture and hydrothermal diagenesis which controlled the evolution of reservoirs. The history of diagenesis and porosity evolution and the origin of formation of the Ordovician reservoirs were reconverted.

Key words: porosity evolution; diagenesis; carbonate rock; Tahe oilfield; Tarim Basin