

文章编号:0253-9985(2007)06-0745-10

塔里木盆地深层碳酸盐岩储层主控因素探讨

张涛^{1,2}, 闫相宾²

(1. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:塔里木盆地碳酸盐岩储层具有时代老、埋藏深、类型多以及成因复杂的特点。通过分析岩溶型、礁滩型、白云岩型、裂缝型储层特征与成因机理,探讨储层非均质性的控制因素。认为有利沉积相是优质储层发育的物质基础,层序界面控制早期孔隙的形成,古隆起及构造运动控制岩溶型、礁滩型储层的发育及保存,埋藏溶蚀作用对储层的后期改造是形成优质储层的关键。在分析控制因素的基础上,进一步指出岩溶型储层主要受构造抬升、古地貌与古水文体系的控制,礁滩型储层受控于台地边缘高能相带,白云岩储层主要发育在不整合面之下,裂缝储层是多期构造运动的产物。结合宏观地质背景,认为岩溶裂缝型储层、礁滩相储层、内幕白云岩储层是塔里木盆地有利勘探领域。

关键词:岩溶;礁滩;白云岩;碳酸盐岩;储层;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

A discussion on main factors controlling deep carbonate reservoirs in the Tarim Basin

Zhang Tao^{1,2}, Yan Xiangbin²

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The carbonate reservoirs in the Tarim basin are characterized by old age, deep burial, various types and complex genesis. Through analyzing the characteristics and genetic mechanisms of karst reservoirs, reef-bank reservoirs, dolomite reservoirs and fractured reservoirs, this paper discusses the main factors controlling reservoir heterogeneities. It concludes that favorable sedimentary facies was the material base for forming excellent reservoirs, sequence boundaries controlled the early formation of pores, paleouplifts and tectonic movements determined the development and preservation of the karst and reef-bank reservoirs, and later modification by burial and denudation was critical to the formation of quality reservoirs. On the basis of controlling factor analysis, the paper further suggests that the karst reservoirs were mainly controlled by tectonic uplifting, palaeo-geomorphology and palaeo-drainage system, the reef-bank reservoirs were controlled by the edge high energy facies on platform edge, the dolomite reservoirs mainly developed under the unconformity, and the fracture reservoirs were the products of multiphase tectonic movements. Combining with macro geological background, the fractured karst reservoirs, reef-bank reservoirs, and inner dolomite reservoirs are recognized as favorable exploration targets in Tarim basin.

Key words: karst; reef-bank; dolomite; carbonate rock; reservoir; Tarim Basin

对世界大油气田的统计表明,在4 000 ~ 8 000 m 的深度范围内,90%的油气探明储量都与碳酸盐岩有关^[1]。塔里木盆地碳酸盐岩储层以古生界为主,埋深普遍大于4 000 m,如塔中油田、塔

收稿日期:2007-10-11。

第一作者简介:张涛(1974—),男,博士研究生、高级工程师,石油地质。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2005CB422103)。

河油田产层基本在 4 000 ~ 6 900 m; TS1 井在 7 800 ~ 8 405 m 仍发育较好储层,以岩溶缝洞型、礁滩孔隙型、白云岩 3 类储层为主。中国最大整装海相油田——塔河油田是以奥陶系岩溶缝洞为主要储集体,至 2006 年石油储量累计探明 6.68×10^8 t;塔中礁滩相孔隙型储层中也有较好的勘探效果,探明石油储量近 1×10^8 t,碳酸盐岩储层的发育程度是油气高产稳产的关键。塔里木盆地是一个大型叠合盆地,有多个不整合界面和多个沉积体系,经历了多次沉降和隆起的构造演化,伴随发育了白云岩化作用、古表生岩溶、深埋溶蚀、构造破裂等多种成岩作用的发生,因此,多因素联合控制,多阶段复合成因、储层类型多样是塔里木盆地碳酸盐岩储层特有的特征。储集空间类型丰富,普遍发育了溶蚀孔隙、溶蚀孔洞、洞穴、风化裂隙、构造裂隙及其多种组合类型。

1 储层分类与成因

碳酸盐岩储层分类受到岩相、成岩、构造、流体等多方面的控制,根据储层成因机理、主要储渗空间类型和岩石特征将碳酸盐岩储层分为 4 种类型:岩溶型储层——塔河—轮南型;礁滩相溶蚀孔隙型储层——塔中良里塔格组;内幕白云岩储

层——塔深 1 井;裂隙型储层。其中岩溶型、礁滩、白云岩三大类储层是研究重点^[2]。

1.1 岩溶型储层

区内岩溶型储层可进一步细分为灰岩岩溶型储层和白云岩岩溶型储层。灰岩岩溶型储层储集体主要为古表生岩溶作用形成的较大的洞穴、孔洞、地下河储层、角砾孔、裂缝等,表现为钻具放空、泥浆漏失、砂泥质充填(图 1c)、巨晶方解石充填(图 1d)、半充填等特征^[3]。该类储层可以形成较大的洞穴,如塔河油田 T808K 井奥陶系放空 29.4 m,TK409 测井全充填溶洞达 75.0 m。

白云岩岩溶型储层主要表现为溶蚀孔洞缝,孔洞规模不大,钻具放空、泥浆漏失均小于灰岩地层。从 DG1(图 1e)、HT1、Z4、T1 和 XH2(图 1f)等钻井的岩心观察看,孔洞规模都不大,溶蚀孔洞直径为 2 ~ 10 mm。岩溶型储层的非均质性强,产量不稳,储集空间差异大。在塔北地区,主要分布在轮台断裂以北及阿克库勒凸起、沙西凸起等部位;在塔中地区,表生岩溶发育带主要分布于主垒带与 TZ1-8 及 TZ5-38、TZ3 潜山构造带上,其中以 TZ1 井区最为典型。

从成因方面看,不整合和层序界面是岩溶发育的条件,该类储层集中于不整合面附近,具有区



a. TS1井, 8 405.8-8 406 m, 灰白色微粉晶白云岩, 发育不规则溶蚀孔洞, 孔径1-50 mm, 多为5-15 mm, 孔壁多见白云石晶簇; b. TS1井, 7 013.15-7 013.45 m, 浅灰色粉细晶白云岩, 溶洞溶孔较为发育, 孔径0.5-2 mm, 个别大于3 mm, 多数孤立分布, 少数与裂缝连通; c. T615井, 溶洞充填, 浅褐灰色油浸细砂岩; d. S75井洞穴巨晶方解石内高角度微构造裂隙含油并渗出; e. DG1井, 寒武系, 6 259.2 m, 灰色粉晶白云岩, 溶蚀孔隙发育; f. XH2, 上寒部统, 5 590.5m, 浅灰色泥晶白云岩, 溶蚀孔洞发育, 洞内白云石半充填

图1 塔北地区碳酸盐岩储层岩心照片

Fig. 1 Photos of core samples from carbonate rock reservoirs in Tabei area

域对比性。如在塔河油田海西早期不整合面以下约 250 m 的深度范围内,受构造脉动式抬升(或侵蚀基准面脉动式下降)控制,自下而上依次发育 3 个岩溶旋回(图 2)。古地貌是控制岩溶发育程度的重要条件。塔河油田处于阿克库勒凸起海西早期岩溶斜坡部位,岩溶洞穴非常发育,据 320 口井进行综合识别,在 230 口井发现大中型洞穴(包括已充填洞穴),出现频率达 74.3%,其中,发育有效洞穴(放空、钻时加快、漏失)的钻井达 113 口,占钻井总数的 36.8%。由于古构造运动强度不同,古地貌、古水文以及出露的岩性、岩相差异不一,因而岩溶作用强度亦存在差异。在加里东中期,塔中地区冲断褶皱强烈发育,可溶的白云岩或灰岩地层呈窄条带状分散出露,岩溶斜坡发育局限,而塔河地区构造活动微弱。海西早期,塔河地区整体抬升幅度大,地层强烈剥蚀夷平,可溶的灰岩地层大面积平缓出露,岩溶斜坡发育,大气水沿先前的裂隙系统流动并呈管状流溶蚀改造裂隙,形成大型洞穴系统,多套洞穴储层大面积多层系叠置连片分布;塔中地区构造活动却相对平缓^[4]。因此,塔中地区以加里东期岩溶为主,塔河地区以海西期岩溶为主。

1.2 礁滩相溶蚀孔隙型储层

礁滩相溶蚀孔隙型储层按沉积相又可分为台地边缘礁滩型储层和台内点礁点滩型储层,台地边缘礁滩相溶蚀孔隙型储层主要分布在塔中 I 号断裂带良里塔格组台缘,台内点礁点滩型主要分布在塔北一间房组上段。

塔中 I 号断裂带良里塔格组台地边缘礁滩复

合体由珊瑚-层孔虫礁、灰泥丘、礁滩间海亚相组成,沉积相纵向组合以粒屑滩、珊瑚-层孔虫礁、灰泥丘、礁滩间海亚相为主,呈多旋回组合发育。储集空间主要以次生溶蚀孔隙为主,储层段孔隙度一般在 3%~6%,渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。礁滩体储层纵向叠置、横向连片,单层厚度在 1~5 m,叠合厚度达 30~90 m,沿台地边缘广泛分布。台缘礁滩相早期大气水溶蚀作用或白云岩化作用至关重要,此类孔隙是后期酸性流体进入并发生广泛性溶蚀的前提条件,下伏层系烃源岩生成的油气、有机酸和 CO_2 流体必须通过断裂系统运移至该储层,才会发生埋藏溶蚀作用。已发现的塔中 I 号坡折带奥陶系碳酸盐岩凝析油气田,其主力产层位于上奥陶统良里塔格组上部,储层为受坡折带控制的陆棚边缘礁滩体石灰岩,埋藏溶蚀是优质储层形成的直接原因^[5]。

1.3 内幕型白云岩

白云岩的分布受全球性气候(巨型气候旋回的温室效应时期)和相对海平面变化控制。塔里木盆地白云岩储层主要发育于震旦系、寒武系和奥陶系下段,属于全球性白云石化事件的产物^[6]。塔里木盆地白云岩厚度大、埋藏较深,主要以孔隙型、孔洞缝型、裂缝型为主。其储层发育控制因素主要是表生岩溶作用、深埋溶蚀作用、构造破裂作用等。已有几口井钻遇内幕白云岩储层,如古隆 1 井、巴楚隆起西部的 T1 井、YD2 井^[7]证实上寒武统白云岩溶蚀孔洞发育,TZ162 井奥陶系下部内幕白云岩中有效储层是裂缝。TS1 井在埋深大于 8 400 m,温度 160℃,压力 80 MPa 的环境下,仍发

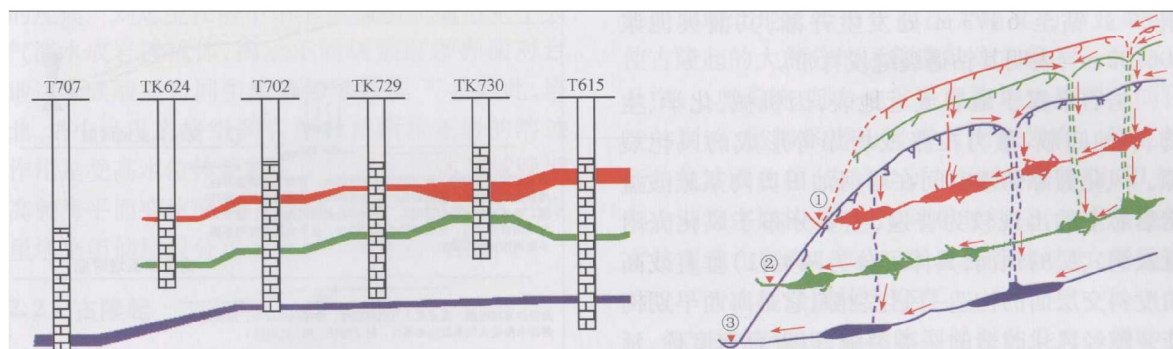


图2 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶储层纵向分布模式图

Fig.2 Vertical distribution pattern of the Ordovician carbonate karst reservoirs in Tahe oilfield

①洞穴层 I; ②洞穴层 II; ③洞穴层 III

育白云岩储层,储层类型包括晶间孔、结构选择性的晶间溶孔、无结构选择性的溶蚀孔洞、高角度与水平溶缝等(图1a,b),与有利的沉积相带、白云化作用、油气进入储层后有机酸的埋藏溶蚀作用有关,断裂及其伴生的裂缝对酸性流体的通导和溶蚀作用也起着至关重要的作用。TS1井溶洞充填物铈同位素值比较低,说明不受陆壳铝硅质岩的影响^[8],而与碳酸盐岩地层有关。白云岩储层大部分具有埋藏成因特征,其均一温度没有超过目前埋深的温度,盐水包裹体均一温度一般不超过150℃,主要受埋藏有机质热演化酸性流体溶蚀控制。

1.4 裂缝型储层

裂缝按成因可分构造裂缝、风化裂缝两种。构造裂隙发育最为普遍和重要,其发育与断裂构造关系密切。塔河地区奥陶系相干切片表明加里东中期构造运动主要发育北西向、北东向、北东东-近东西向和近南北向4组断裂,4组断裂在平面上呈现棋盘格式的网状格局,造成与断裂伴生的4组裂缝在平面上的分布具有网状特点。这种格局在牧场北地区S94—S85以北、凸起北部地区S80—S88以西的一个菱形区域内尤其突出,在相干切片上可以清楚地观察到断裂切割形成的田字形网格。经过对钻井放空、漏失现象的统计,位于断裂附近位置的30口钻井有80%出现放空、漏失,表明该区储层的裂缝极其发育,同时说明断裂发育与否直接影响奥陶系储层的发育。另外,地层褶曲部位是应力集中部位,裂缝发育。如S112井位于加里东中期断层上盘,进入良里塔格组57 m钻至6 173 m处发生井漏,共漏失泥浆206.82 m³,表明其钻遇裂缝发育带。

岩石暴露于地表或近地表,因机械、化学、生物、剥蚀卸载、重力拉张或坍塌等形成的风化裂隙。风化裂隙储渗空间在塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩芯上的出现较为普遍,主要分布于风化壳附近及洞穴层的顶面,具体可分为两类:1)垂直或高角度斜交层面的构造-风化裂隙,它是海西早期构造裂隙经风化改造的一类裂隙,以发育密度稀、延伸深度大、缝壁较平直、裂缝宽度较大为特征,裂缝内往往为粒状亮晶方解石、碳酸盐岩角砾、砂-泥填积或部分填积,见于S47,S67,S71,S81,

S86,T301,T403井奥陶系有关层段;2)不规则密集发育的网状风化裂隙系统,以裂隙密集发育,裂隙弯曲,缝壁不平直,裂隙微细为特征,裂隙可为方解石部分充填或未充填。

2 储层非均质性控制因素

2.1 沉积相和层序界面

不同沉积相带的碳酸盐岩,由于起始组成物质不同,它们的成岩与孔隙演化有明显的差异(尤其是在早期阶段),从而导致不同相带储层具有各不相同的储渗空间类型与特性。浅水高能滩相、礁相储层的成岩与孔隙演化,早期溶孔发育期(粒屑滩出露海面,进入大气成岩环境,孔隙度增加10%~15%)至关重要;低能相岩性以粒屑含量低以及灰泥占优势为特征,如果后期不经历构造破裂、表生岩溶、埋藏溶蚀作用,不能形成有效储层。

对于白云岩储层而言,在局限海台地相,一般发育藻白云岩和含膏盐白云岩,并容易发生溶蚀作用和后期改造,形成较好的储层;滩相环境,高位期滩体反复暴露受大气水溶蚀作用,发育溶孔,并易发生混合水白云岩化作用,孔隙进一步发育。

层序界面导致的短暂暴露及其同生期大气淡水溶蚀形成的早期孔隙为后期改造提供条件,沉积高位期滩体沉积与海平面同步,形成加积型礁滩体,多次暴露受大气水溶蚀,大气淡水透镜体厚度大,可以形成优质孔隙型储层(图3)。进积型

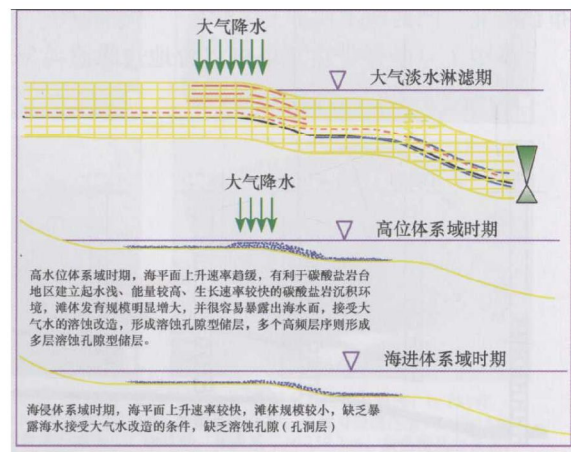


图3 早期孔隙发育与层序关系示意图

Fig. 3 Sketch map showing the relationship between early pore development and strata sequence

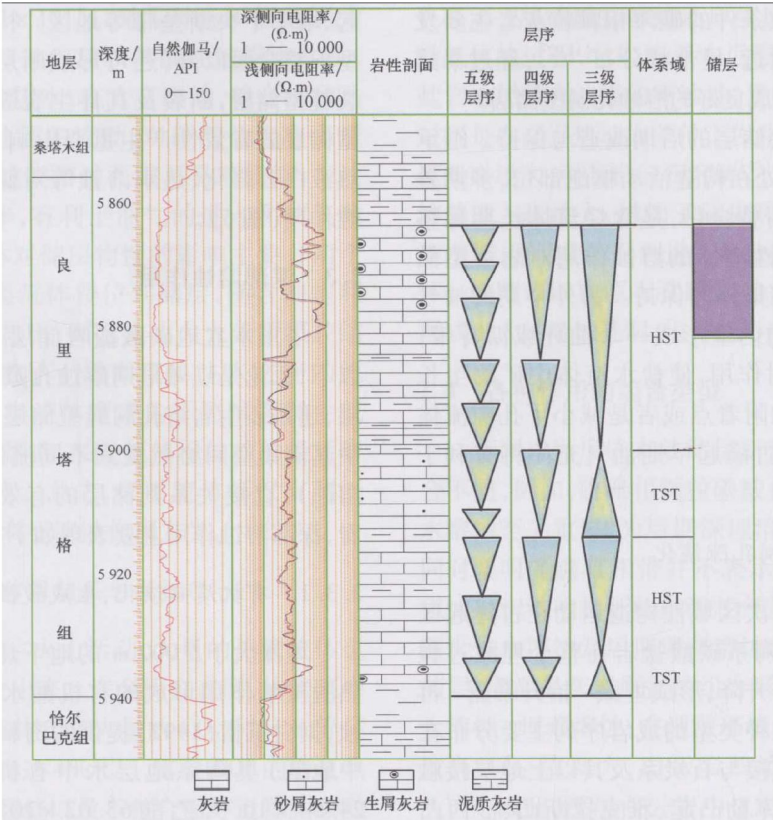


图4 塔河南 S108 井良里塔格组滩相储层发育与层序的关系

Fig.4 Relationship between the development of reef-bank facies reservoirs and strata sequence in the Lianglitage Formation of S108 well in the south part of Tahe oilfield

礁滩体由于相带的迁移可形成面广厚度薄的孔隙型储层;而海平面上升期,以方解石胶结作用为主,因此退积型滩体不利于早期孔隙的发育。可见层序界面导致的短暂暴露及其同生期的成岩作用对台地边缘礁滩相储集体的改造具有重要的促进作用^[9]。准层序组的叠加类型控制该类储集体的规模。刘忠宝在塔中中上奥陶统识别出4个大气淡水成岩透镜体,揭示不同级别层序界面对台地边缘碳酸盐岩同生期岩溶的控制^[10]。因此,塔北、塔中良里塔格组同生期滩相颗粒灰岩的溶蚀作用是受高水位体系域时期或高水位体系域晚期高频海平面变化旋回所控制,如塔河南 S108 井良里塔格组储层段分布在层序界面附近(图4)。

2.2 古隆起

2.2.1 古隆起控制储集体形成

从储层类型上讲,古隆起对储集体的控制表现在3个方面。一是控制岩溶型储层的发育,古

隆起构造活动性和隆升剥蚀持续时间与强度控制着岩溶的发育期次和程度。塔里木盆地岩溶型储层都分布在三大古隆起区,由于古隆起的形成时间、演化性质、形态及内部构造特征及沉降历史等方面具有差异性,对岩溶型储层控制也表现不一。如塔北古隆起在加里东运动中一晚期初具雏形,海西期塔北地区经历了两次大幅度的抬升暴露,使古隆起的大部分地区普遍缺失志留系—泥盆系及中、上奥陶统,部分地区下奥陶统也遭到不同程度的剥蚀,奥陶系潜山岩溶大面积发育。雅克拉断凸及沙西凸起,先后经历加里东、海西期、印支、燕山期等多期构造抬升,间断时间长,白垩系地层直接覆盖在奥陶—寒武—震旦系等地层上,不整合面之下岩溶型储层较为发育。

二是控制礁滩相孔隙型储层的发育。塔中良里塔格组沉积期,由于塔中古隆起早期的隆升使得该地区处于地势相对较高的局限台地沉积环境,同时受塔中古隆起向北前倾古隆起构造形态的控制,

具有较好原生孔隙条件的礁滩相颗粒灰岩主要发育在Ⅰ号断裂带附近,呈带状分布^[11,12],经过暴露地表溶蚀作用后形成良好的溶蚀孔洞型储层。

三是控制有效储层的后期改造与保持。继承性古隆起、古斜坡处在构造活动枢纽部位,多期叠加构成了构造平衡叠合带,是含烃流体长期运移的指向区,后期酸性流体的溶蚀作用对岩溶型储层的改造有利于储集体的保持。另外早期的油气充注往往在孔洞的内壁形成一个油环或沥青带,岩石对原油的吸附作用,使盐水流体中矿物生长时缺少结晶生长的附着点或者是减小了孔隙流体间的连通性,因此古隆起早期油气充注将有利于原始孔洞的保存。

2.2.2 古隆起控制孔隙演化

塔里木盆地6次区域性构造运动在古隆起区表现更为突出,奥陶系碳酸盐岩在整个埋藏过程中经历了多次差异升降,形成埋藏-抬升暴露-再埋藏演化序列。这种类型的成岩序列主要分布在奥陶系碳酸盐岩直接与石炭系及其以上地层接触的地区,例如阿克库勒凸起、雅克拉断凸、沙西凸

起、塔中中央断垒带等地区。构造运动除形成大型不整合面以外,还可形成断层、裂隙,进而形成裂缝型储层,断裂及其伴生裂缝等还会对其他类型储层的有效性产生重要影响,岩浆活动带来的热液白云岩化、热水溶蚀等对储层形成具有建设性作用(图5)。

2.3 深部溶蚀作用

塔里木盆地碳酸盐岩储层普遍埋深4 000 m以下,无论是礁滩早期溶蚀孔隙型、白云岩内幕储层,还是表生岩溶孔洞缝型储层,在晚期埋藏过程中其储集空间必然受到不同流体的改造(胶结与溶蚀),直接关系到储层的有效性。从流体来源看,深部溶蚀作用主要表现如下在3个方面。

2.3.1 有机质热演化,生成酸性流体

埋深大于5 000 m的地下热水或与有机质成熟脱羧基作用形成的有机酸水对碳酸盐岩的溶蚀,据白玉雷(1992)提供的资料,塔里木盆地(塔中地区)奥陶系地层水中有机酸浓度为:甲酸 24.54×10^{-6} ,乙酸 63.02×10^{-6} ,草酸 $56.95 \times$

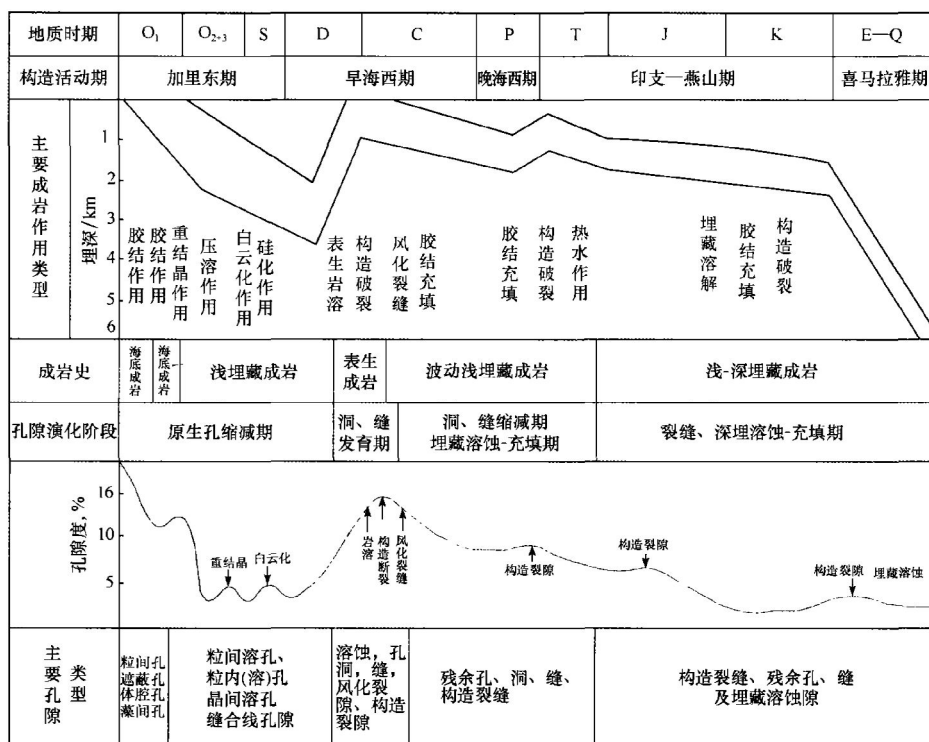


图5 塔河油田下奥陶统成岩与孔隙演化示意图

Fig. 5 Sketch map showing the Lower Ordovician diagenesis and pore evolution of Tahe oilfield

10^{-6} , 丙二酸 5.81×10^{-6} 。地层水 pH 值范围为 5~7, 个别样品达 3~4, 反映具酸性地层水性质。这些有机酸溶入地层水, 在含有裂缝、缝合线和孔隙发育的渗透性地层中流动, 对碳酸盐岩有强烈的溶蚀作用; 而且这类溶蚀孔隙不易被胶结, 与油气的生成几乎同步, 有利于油气的进入和油气藏的形成。烃类流体对储层物性的影响主要分两个方面, 第一, 是烃类流体侵位到储层, 随含油饱和度增高, 孔隙水被排出, 则阻止或大大延缓了胶结物的形成; 第二, 略早于烃类流体注入之前的流体, 或者低成熟烃类流体富含为干酪根裂解生成的 CO_2 和有机酸, 因此, 烃类流体侵位前的最后事件是溶蚀作用发育。总之, 烃类流体不仅有利于孔隙保持, 而且有利于溶蚀作用发生。

2.3.2 热液溶蚀作用储层形成机理

由于强烈岩浆-火山活动, 大量的热液流体也同时从岩浆中释放出来。许多研究表明, 从岩浆中释放出来的热液流体含有大量的 CO_2 和 H_2S 等挥发性物质, 含量可高达 4%^[13]。富含 CO_2 的岩浆热液流体沿着断裂、裂缝以及不整合面等运移到碳酸盐岩地层中, 会对碳酸盐岩发生一定程度的溶蚀作用, 形成各种热液矿物组合、溶孔和热裂缝, 增大储渗空间。常见几种矿物组合有萤石-石英-黄铁矿组合 (TZ45 井)、闪锌矿-绿泥石-方解石组合 (TZ12 井)、重晶石-石英-菱铁矿-黄铁矿组合 (中 4 井) (图 6), 反映了塔中地区的热液活动过程^[14]。

2.3.3 硫酸盐热化学还原作用

硫酸盐热化学还原作用是热动力驱动下烃类

在高温下将硫酸盐矿物还原生成 H_2S 和 CO_2 等酸性气体的过程, 它们溶于水后形成氢硫酸, 对碳酸盐岩地层具有较强的腐蚀性, 发生溶蚀作用。这一过程是在高温热动力条件下发生, 其溶蚀作用的强度势必增大, 引起白云石溶解^[15], 并使早期的溶孔、溶缝进一步扩大, 增加了储集和渗透能力, 使孔隙度增加, 原储集体受到进一步改造成为更好的储集体。它既可以在原有孔隙基础上进行改造和扩容形成更大的溶蚀孔洞, 也可能形成新的溶蚀孔隙。

2.4 各种作用的组合类型

不同岩性形成有效储层所需的各种作用的组合不同, 例如, 礁滩相颗粒碳酸盐岩早期暴露大气水溶蚀至关重要, 为后期深埋溶蚀作用提供通道, 同时要明确礁滩相带并不表示好的储层, 具有加积或进积结构特征的礁滩相经历多次准同生期暴露大气水溶蚀及后期埋藏溶蚀作用才能形成有效储层; 而泥晶灰岩所需的组合形式是构造裂缝-表生溶蚀-埋藏溶蚀; 在埋藏环境中, 由于压力大、温度高、 CO_2 浓度大, 白云岩的溶解度比方解石要大^[16], 因此, 深层白云岩中也可以发育次生孔隙。构造裂缝对于深部白云岩非常重要, 在埋藏条件下白云岩产生的裂缝数是灰岩的近五倍, 仅次于石英岩^[6]。白云岩岩性及结构也是重要因素, 藻屑白云岩中的藻屑多被硅化, 因而其间的白云石胶结物则被溶蚀形成孔隙, 角砾白云岩中的角砾不溶, 但砾间的白云质易溶, 形成蜂窝状溶孔, 成为良好的储集体。硅质白云岩性脆难溶, 但经历多期构造运动, 裂隙发育, 漏失率较高而漏失量少。藻屑白云岩和块状白云岩, 溶蚀作用强, 泥质



图6 塔里木盆地热液作用矿物学证据

Fig. 6 Mineralogical evidences of hydrothermal process in the Tarim Basin

- a. 石灰岩的热褪色现象, TZ18 井, 4 765.5 m, 岩心照片; b. 闪锌矿、方解石与绿泥石共生, TZ12 井, 5 217 m, 下奥陶统, 岩心照片;
c. 重晶石-石英-黄铁矿组合, Z4 井, 3 609.96 m, 奥陶系, 电子探针成分照片

白云岩溶蚀较弱,但可作为隔挡层,使上部可溶岩形成顺层溶蚀。

含有部分方解石的白云岩(方解石呈粒间充填物方式存在)最易于形成有效储层。如含灰云岩和灰质云岩等类型,塔中地区统计表明白云石含量在88%~92%范围内储层较为发育(图7),帕拉多克斯盆地奥陶-泥盆系碳酸盐岩储层孔隙度高达26%,是白云岩中残余灰岩溶解的结果。沙特 Ghawar 油田已在这类储层中发现大型油气田^[17],因此对于构造抬升表生条件下含一定量方解石的灰质白云岩最有利,而过度白云岩化对深埋成因的优质储层发育不利。

深部溶蚀作用,主要包括与有机质热演化过程中形成的酸性水、岩浆热液溶蚀作用、硫酸盐自身的溶解并发生热化学还原作用,对于各类岩性储层的成因非常重要(表1)。

总之,沉积相、各种溶蚀作用、构造裂隙作用

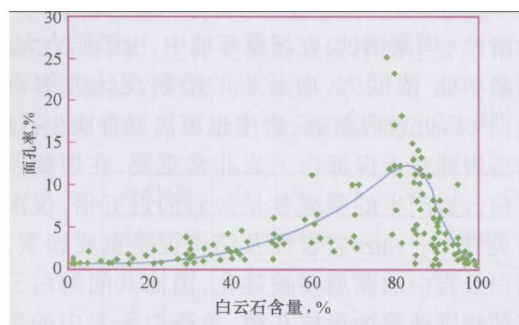


图7 塔中地区白云石含量与面孔率的关系

Fig. 7 Relationship between dolomite content and surface pore ratio in Tazhong area

表1 地质作用类型、岩性与储层发育程度之间的关系
Table 1 Relationship among reservoir development degree, geologic function and lithology

岩性	泥晶灰岩	礁滩相灰岩	灰质云岩	准同生白云岩	埋藏白云岩
早期溶蚀作用		√√√		√	
构造裂缝形成	√	√√	√	√√	√√√
构造破裂作用	√√	√√	√√	√√	√√
表生岩溶作用	√√√√	√√√	√	√√√	√√√
有机酸溶蚀	√√	√√√√	√√√	√√√	√√√

注:√数量的多少代表对储层重要性的大小。

等因素、多阶段的联合、叠加作用,使塔里木盆地碳酸盐岩储层的储集空间类型丰富多样,各类型储集空间的匹配关系极为复杂,但总体上以孔、缝、洞为特征,且以连通的裂缝系统以及与之相联系的孔洞网络构成层位不稳定的、较强非均质性的、多成因类型的复杂储集体。

3 储层分布与勘探方向

3.1 有利储层分布评价

对于塔里木盆地寒武系和奥陶系不同的沉积特征,在进行储层评价时,要侧重于不同的控制因素。寒武系主要为一套以白云岩为主的岩石组成,其间基本没有遭受强烈的暴露剥蚀,其储层物性的主要控制因素是沉积相带、岩相条件和构造裂缝的发育强度的控制。而对奥陶系而言,控制奥陶系储层物性的主要因素除沉积相带之外,更主要的是岩溶作用和构造裂缝的发育强度。储层评价指标如表2。

3.1.1 下寒武统

由下寒武统沉积相展布特点可知,沿着柯坪—F1井—H4井—BD2井—TS1井—线发育北西向展布的局限台地相带,白云岩发育。该局限台地相带向东西两侧过渡为开阔台地相带、台缘斜坡相带和陆棚—盆地相带。而巴楚隆起和卡塔克隆起所经历的构造活动较强烈,断裂和裂缝较发育,据K2, TS1, F1, H4等井揭示,应属Ⅱ—Ⅲ类储层分布区(图8)。该隆起带两侧的广大碳酸盐岩台地区由于水体相对较开阔,加之在后期的发育演化中处于相对稳定的地区,构造裂缝的发育程度较

表2 塔里木碳酸盐岩储层评价指标

Table 2 Evaluation indexes of carbonate rock reservoirs in the Tarim Basin

类型	评价指标	储集空间类型
I	台地相、台地边缘相、岩溶、断裂作用较为发育	裂缝-孔洞型、裂缝-溶洞型及孔洞-裂缝型,以大型孔洞发育
II	台地相、台地边缘相、岩溶、断裂作用发育程度中等	孔洞-裂缝型为主,次为裂缝型
III	台地相、断裂作用发育程度中等	裂缝型、孔隙型

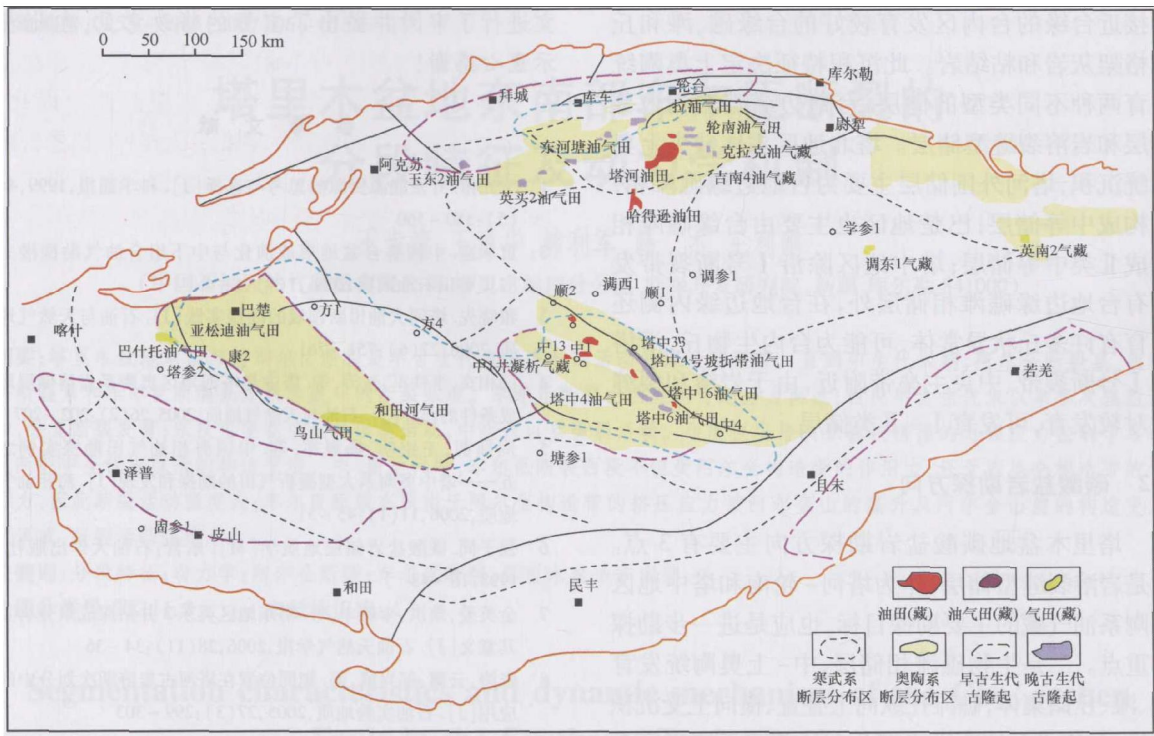


图8 塔里木盆地古隆起与储层分布

Fig.8 Distribution of palaeouplifts and reservoirs in the Tarim Basin

差,推测主体为Ⅲ类储层区。满加尔坳陷区的沉积环境为斜坡-盆地相带,岩性主要为泥晶灰岩、泥质灰岩和泥质岩,并且后期改造作用相对较弱,故应为差-非储层。

3.1.2 上寒武统

塔里木盆地上寒武统储层的发育特征与下寒武统相似,沿着巴楚—F1—H4—塔中地区一线呈北西向发育局限台地相带,向东西两侧过渡为开阔台地、台缘斜坡和陆棚盆地相带。巴楚隆起—卡塔克隆起一线由于沉积相带较浅,断裂构造发育,据 K2, F1, H4 和 TS1 等井揭示,储层质量较好,属 I—II 类储层发育区。沙雅隆起区与巴楚—卡塔克隆起区具有相似的岩性组成和相似的构造裂缝发育背景,推测也应为 I—II 类储层发育区。盆地内其它地区与下寒武统相似,在台地相区主要应为 Ⅲ 类差储层,在东部斜坡-盆地相区则属于差-非储层(图8)。

3.1.3 中-下奥陶统

中-下奥陶统是塔里木盆地的主力产油层系之一。除沉积相带的影响之外,多期暴露剥蚀和

多期构造运动导致的岩溶和裂缝发育对下奥陶统储层的控制显得更为重要。下奥陶统的沉积格局基本延续了上寒武统的特点,与上寒武统不同的是,中-下奥陶统受到强烈的暴露和岩溶作用,导致中-下奥陶统碳酸盐岩发育大量的溶蚀孔洞,使其成为塔里木盆地最重要的储集层段之一。塔北阿克库勒凸起和沙西地区、塔中中央主坳带及其南部潜山带和巴楚隆起西部的下奥陶统遭受强烈岩溶作用,加之岩溶发育带主要是沿重要的断裂构造带发育,故其中构造裂缝较发育区是盆地内下奥陶统最好的储层发育区。I—II 类好储层主要发育于沙雅、卡塔克和巴楚这 3 个岩溶作用强烈、构造裂缝发育的隆起区。三大隆起区周围的储层发育条件相对较差,主要为 Ⅲ 类储层发育区(图8)。

3.1.4 上奥陶统

晚奥陶世,盆地沉积古地理发生了巨大变化。在寒武纪一早中奥陶世西浅东深的古地理基础上,叠加了南北向隆坳相间的格局,在塔北、塔中及巴楚唐王城一带发育 3 个碳酸盐岩台地^[18],台地上主要为泥晶灰岩、泥质灰岩、泥岩,而在台缘

和接近台缘的台内区发育较好的台缘礁、滩和丘相格架灰岩和粘结岩。此沉积特征决定上奥陶统发育两种不同类型的储层,台地边缘礁滩相内幕储层和岩溶裂缝型储层。塔北地区主体缺失上奥陶统沉积,塔河外围储层主要为台地边缘礁滩相,可构成中等储层;巴楚地区也主要由台缘礁滩相构成Ⅱ类中等储层;塔中地区除沿Ⅰ号断裂带发育有台地边缘礁滩相储层外,在台地边缘内侧还发育有许多丘状异常体,可能为台内生物丘,沿塔中Ⅰ号断裂带、中央主垒带附近,由于岩溶和裂缝相对较发育,可发育Ⅰ-Ⅱ类储层。

3.2 碳酸盐岩勘探方向

塔里木盆地碳酸盐岩勘探方向主要有3点。一是岩溶裂缝型储层,作为塔河-轮南和塔中地区奥陶系油气藏的主要勘探目标,也应是进一步勘探的重点。二是生物礁滩相储层,中-上奥陶统发育礁、滩、丘储集体,礁滩丘纵向上叠置、横向上受沉积相控制,构成台地边缘成带分布的礁滩丘沉积复合体,形成塔北、塔中镶边边缘的储集体主体;同时,塔中西部、哈得逊-塔河等地区,沿台地边缘带发育形态各异、成带展布的地质异常体,是值得重视的非构造油藏勘探目标。三是内幕白云岩储层,其勘探领域的有利含油气区带为阿克库勒及塔中地区。

4 结论

1) 多因素联合控制,多阶段复合成因、储层类型多样是塔里木盆地碳酸盐岩储层特有的特征,古隆起控制岩溶型、礁滩孔隙型碳酸盐岩储层的形成、发育和改造。

2) 层序界面导致的短暂暴露及其同生期大气淡水溶蚀形成的早期孔隙为后期改造提供条件,加积型礁滩体可以形成优质孔隙型储层,进积型礁滩体由于相带的迁移可形成面广厚度薄的孔隙型储层,而退积型滩体不利于早期孔隙的发育。

3) 礁滩相孔隙型储层受沉积相、早期溶蚀、准层序组的叠加方式、构造裂隙作用、埋藏、热水溶蚀等因素的叠合复合作用控制,内幕白云岩储层晶间孔、溶蚀孔洞缝发育,沉积环境和成岩作用决定白云岩储层形成与分布。

致谢:王庭斌教授和金晓辉高级工程师对全

文进行了审阅并提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢!

参考文献

- 1 王先彬. 开发能源资源的思考与选择[J]. 科学通报, 1999, 44(5): 550 ~ 560
- 2 贾承造. 中国叠合盆地形成演化与中下组合油气勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2006, 1(1): 1 ~ 4
- 3 翟晓先. 塔河大油田新领域的勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 751 ~ 761
- 4 闫相宾, 李铁军, 张涛, 等. 塔中与塔河地区奥陶系岩溶储层形成条件的差异[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 202 ~ 207
- 5 周新源, 王招明, 杨海军, 等. 中国海相油气田勘探实例之五——塔中奥陶系大型凝析气田的勘探和发现[J]. 海相油气地质, 2006, 11(1): 45 ~ 51
- 6 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998. 18 ~ 48
- 7 金英爱, 桑洪, 李毓丰, 等. 塔东地区英东2井钻探成果分析及意义[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(11): 34 ~ 36
- 8 张涛, 云露, 郭兴威, 等. 锶同位素在塔河古岩溶期次划分中的应用[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 299 ~ 303
- 9 于炳松, 陈建强, 林畅松, 等. 塔里木盆地奥陶系层序地层格架及其对碳酸盐岩储集体发育的控制[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 305 ~ 316
- 10 刘忠宝, 于炳松, 李廷艳, 等. 塔里木盆地塔中地区中上奥陶统碳酸盐岩层序发育对同生期岩溶作用的控制[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 103 ~ 109
- 11 代宗仰, 周翼, 陈景山, 等. 塔中中上奥陶统礁、滩相储层的特征及评价[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(4): 1 ~ 4
- 12 王兴志, 王振宇, 马青, 等. 塔里木盆地中部生物屑灰岩段滩体特征及储集性[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 58 ~ 62
- 13 Hedenquist J W, Henley R W. The important of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions: evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition[J]. Economic Geology, 1985, 80(1): 1 379 ~ 1 405
- 14 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. 地质学报, 2006, 80(2): 245 ~ 253
- 15 朱光有, 张水昌, 梁英波. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2 182 ~ 2 194
- 16 杨俊杰, 张文正, 黄思静, 等. 埋藏成岩作用的温压条件下白云岩溶解过程的实验模拟研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(3): 83 ~ 87
- 17 Peter K, Swart. Origin of dolomite in the Arab-D reservoir from the Ghawar field, Saudi Arabia: evidence from petrographic and geochemical constraints[J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(3): 476 ~ 491
- 18 王恕一, 黄继文, 蒋小琼. 塔里木盆地上奥陶统沉积及古地理特征[J]. 石油实验地质, 2006, 28(3): 236 ~ 242

(编辑 董立)