

文章编号:0253-9985(2007)06-0776-08

## 塔里木盆地轮古东奥陶系碳酸盐岩 储层特征与主控因素

胡剑风,蔡振忠,马青,李建军,黄龙藏,李保华

(中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司,新疆库车 841000)

**摘要:**塔里木盆地轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体油气藏是塔里木油田分公司近期重点勘探区带之一。油气藏的储集岩主要有亮晶颗粒灰岩、粉晶颗粒灰岩、泥晶颗粒灰岩、泥晶灰岩,其中亮晶颗粒灰岩的储集性能较好;储层的基质孔隙不发育,主要的孔隙空间为溶蚀孔洞和裂缝;储层分为洞穴型、孔洞型、裂缝型和裂缝-孔洞型,其发育程度主要受沉积相、溶蚀作用和破裂作用控制。形成了轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体储层叠置连片、广泛发育的分布特征。

**关键词:**储层特征;控制因素;礁滩复合体;奥陶系;塔里木盆地

**中图分类号:**TE122.2

**文献标识码:**A

## Characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate rock reservoirs in Lugudong area, the Tarim Basin

Hu Jianfeng, Cai Zhenzhong, Ma Qing, Li Jianjun, Huang Longcang, Li Baohua

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

**Abstract:** The Ordovician carbonate reef-bank complex reservoirs in the Lungudong area of the Tarim Basin are the important exploration targets in the recent development scheme of Tarim Oilfield Company. The reservoir rocks mainly include sparry grainstone, fine-granular grainstone, micritic grainstone, and micrite, among which the sparry grainstone has much better poroperm characteristics. Matrix porosity of these reservoirs are low with dissolution vugs and fractures as the main pore space. The reservoirs can be divided into the following four types: cavity, vug, fracture, and fracture-vugg, whose development was dominated by sedimentary facies, solution, and fracturing. The Ordovician carbonate reef-bank reservoirs in the Lungudong area are characterized by extensive, superimposed and continuous distribution.

**Key words:** reservoir characteristic; controlling factor; reef-bank complex; Ordovician; Tarim Basin

近几年来,塔里木盆地轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体油气勘探<sup>[1-10]</sup>取得了重大突破,探明和控制油气储量总计近亿吨油当量,已经成为塔里木油田分公司近期重点勘探区带之一(图1)。目前的含油气层系包括奥陶系良里塔格组、一间房组和鹰山组鹰一段碳酸盐岩礁滩复合体储层。储层的基质孔隙不发育,主要的孔隙空

间为溶蚀孔洞和裂缝。轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体储层位于轮南奥陶系大型古潜山东斜坡内幕,上覆厚度不等(残厚0~522 m)的上奥陶统碎屑岩,岩性以灰色泥岩为主夹灰色泥质灰岩薄层。

与塔中I号坡折带镶嵌台地边缘-开阔台地沉积体系不同,轮古东地区奥陶系为大型缓坡沉

收稿日期:2007-09-18。

第一作者简介:胡剑风(1968—),男,博士、高级工程师,油气地质与勘探。

基金项目:国家“十五”重点科技攻关项目(2003B613A-04)。

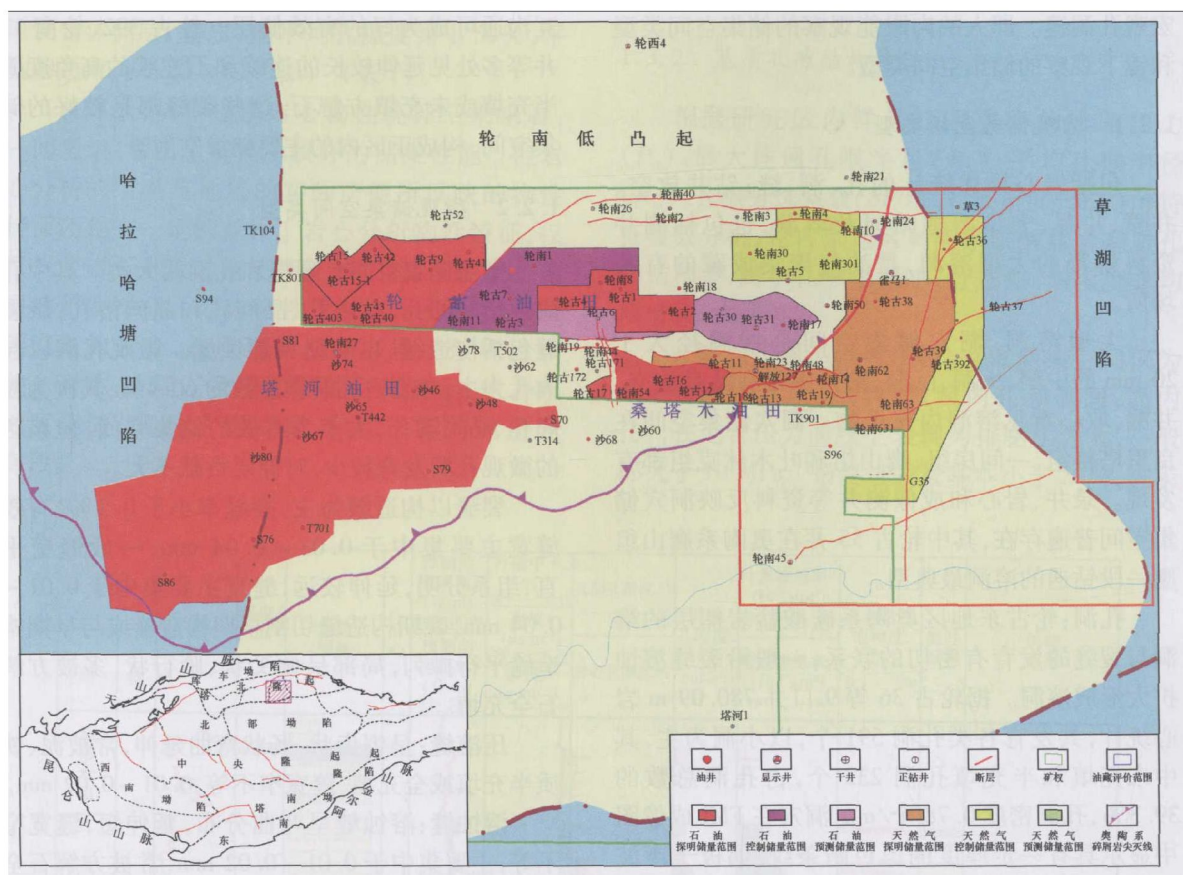


图1 轮古东油气藏构造位置示意图

Fig. 1 Sketch map showing the structural location of Lungudong oil and gas pool

积体系,主要发育开阔台地沉积体系,仅晚奥陶世良里塔格期发育台地边缘相。叠置连片、广泛发育的开阔台地台内滩相储层、台地边缘台缘滩相和台缘礁相储层是控制轮古东地区奥陶系油气分布与富集的主要因素之一。因此,进行储层特征、储层发育的主控因素的研究,有利于预测有利储层的分布,有助于油气成藏、分布与富集模式研究,对于轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体油气勘探将具有十分重要的指导作用。

## 1 储层基本特征

### 1.1 储集岩类型

轮古东地区奥陶系含油气层系包括奥陶系良里塔格组、一间房组和鹰山组鹰一段,其储集岩主要有四大类:亮晶颗粒灰岩、粉晶颗粒灰岩、泥晶颗粒灰岩和泥晶灰岩。其中亮晶颗粒灰岩

中的亮晶鲕粒灰岩、亮晶砂屑灰岩、亮晶砂砾屑灰岩的储集性能较好。一间房组和鹰山组鹰一段亮晶颗粒灰岩占绝大多数,形成于开阔台地水动力较强的鲕粒滩、生屑滩、粒屑滩。这类灰岩以纯净、泥质含量低为主要特征,岩石性脆、易溶,为后期的岩溶、破裂等建设性改造作用奠定了良好的物质基础,是轮古东地区奥陶系优质岩溶型储集层之一。

### 1.2 主要储集空间

根据对研究区录井资料、岩心、普通薄片、铸体薄片以及成像测井资料等观察和研究,认为轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体储层的储集空间主要有孔、洞、缝三大类。根据孔径和缝宽可划分为宏观孔洞缝和微观孔洞缝。其中,孔径小于0.01 mm,缝宽小于0.1 mm的称为微观孔洞缝;孔径大于0.01 mm,缝宽大于0.1 mm的称为

宏观孔洞缝。即人的肉眼能观察的储集空间类型和镜下观察的储集空间类型。

### 1.2.1 宏观储集空间类型

包括岩心描述统计的孔、洞、缝;钻井放空、井喷、井漏、大型溶蚀暗河及溶洞,也包括测井资料解释的大型溶洞,是油气聚集成藏的有利场所。

大型溶洞:洞穴储集空间是指洞径大于20 mm的中洞、大洞、巨洞,钻井中常有钻具放空,井漏,取心看见溶洞内充填物。洞穴储集空间在良里塔格组、一间房组、鹰山组和吐木休克组都有发现。录井、岩心和成像测井等资料反映洞穴储集空间普遍存在,其中轮古35井在奥陶系鹰山组鹰一段钻遇的溶洞最典型。

孔洞:轮古东地区奥陶系碳酸盐岩储层的溶洞与裂缝的发育有密切的联系,一般沿裂缝溶蚀扩大形成溶洞。据轮古36等9口井780.09 m岩心统计,共发育各类孔洞591个,以小洞为主,其中未充填和半充填孔洞232个,占孔洞总数的39.3%,孔洞密度0.78个/m。洞穴在FMI成像图中显示具有一定厚度的黑色暗条纹,偶极子声波成像测井(DSI)变密度图上表现为“人”字形条纹;在常规测井响应上的特征表现为深浅侧向电阻率曲线显示较低的电阻率值,井径异常扩径,声波时差增大,密度异常降低,自然伽马明显比灰岩段的高。

岩心裂缝特征:据轮古36等9口井统计,780.09 m岩心共发育各类裂缝1895条,其中未充填和半充填缝1279条,占裂缝总数的67.5%,以倾角大于75°的立缝为主,缝密度2.43条/m。裂缝既是储集空间,又是渗滤通道,当多组裂缝相互沟通或者裂缝与发育的溶蚀孔、洞储集空间相

互沟通可成为好的有效储层。轮古392、轮南17井等多处见延伸较长的连续和不连续的高角度缝半充填或未充填方解石,这些裂缝都是较好的储集空间,构成工区内的主要储渗空间。

### 1.2.2 微观储集空间类型

微观储集空间有裂缝和孔洞两大类。其中孔洞包括粒间孔、粒内孔、晶间孔和晶间溶孔;微裂缝包括构造缝、压溶缝和溶蚀缝。微观孔洞以粒内孔为主,分别占孔洞样品数的60.4%;其次为粒间孔、晶间溶孔,大多为有效的储集空间,但该区的微观孔洞发育较少,对储层贡献不大。

裂缝以构造缝为主,裂缝率小于0.1%,有效缝宽主要集中于0.01~0.04 mm,一般缝壁平直,组系分明,延伸较远,缝宽主要集中于0.01~0.04 mm,晚期构造缝切割早期构造缝或与早期构造缝平行排列,局部呈枝叉状、雁行状,多被方解石全充填。

压溶缝:呈锯齿状,肠状弯曲延伸,常被泥、铁质半充填或全充填,缝宽窄不等,0.01~0.02 mm。

溶蚀缝:溶蚀缝呈弯曲分布,延伸短,缝宽窄不等,主要集中于0.01~0.02 mm,常被方解石全充填。

总之,轮古东地区奥陶系碳酸盐岩储层的主要储集空间首推大型溶洞,其次是构造缝、网状微裂缝和微观孔洞系统,储层主要的渗滤通道是构造缝和微裂缝系统。

## 1.3 储层物性

### 1.3.1 储层孔渗特征

通过研究区内13口井共1257块岩心常规物性分析数据统计,轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁

表1 轮古东地区奥陶系碳酸盐岩常规物性分析数据统计

Table 1 Data statistics of conventional geophysical property analysis on the Ordovician carbonate rocks in Lungudong area

| 地层     | 孔隙度, %     |      | 渗透率/(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> ) |      | 样品数/个 |
|--------|------------|------|-----------------------------------------|------|-------|
|        | 分布范围       | 平均值  | 分布范围                                    | 平均值  |       |
| 良里塔格组  | 0.20~16.70 | 1.52 | 0.01~112.18                             | 1.67 | 411   |
| 一间房组   | 0.20~10.98 | 1.60 | 0.01~358.00                             | 2.53 | 520   |
| 鹰山组鹰一段 | 0.21~5.09  | 1.62 | 0.02~389.78                             | 3.48 | 326   |

滩复合体储层(基岩)的平均孔隙度为1.59%,平均渗透率为 $2.38 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$ (表1)。

总体上,从小柱塞岩心物性统计结果来看,一间房组、鹰山组都显示较好的储集性能。但岩心分析的结果与地层的实际产能所反映的物性特征还是有一定的差异。岩心分析物性特征,仅代表岩石基块的物性特征,并不能代表整个储层的物性特征。因为物性比较好的井段很难取到完整的岩心,能取到岩心的井段一般物性较差。测井、地震以及很多钻井资料显示,轮古东地区裂缝、溶洞系统发育,存在很好的储层发育段。

1.3.2 基质孔隙结构特征

根据研究区内样品压汞获得的排驱压力( $P_d$ )、最大连通孔喉半径( $R_d$ )、平均孔喉半径( $R_m$ )、孔喉分选系数( $SPO$ )、孔喉歪度( $SKP$ )等特征参数分析,轮古东地区奥陶系碳酸盐岩基质孔隙结构差,属于孔喉半径小、分选差、细歪度非均质低孔、渗储层。

在溶蚀孔洞不发育层段,有效储集空间仅为残余的原生基质孔(粒间、粒内孔和晶间、晶内孔),在毛管压力曲线上表现为排驱压力大,一般都大于10 MPa。最终进汞量基本小于20%,进汞

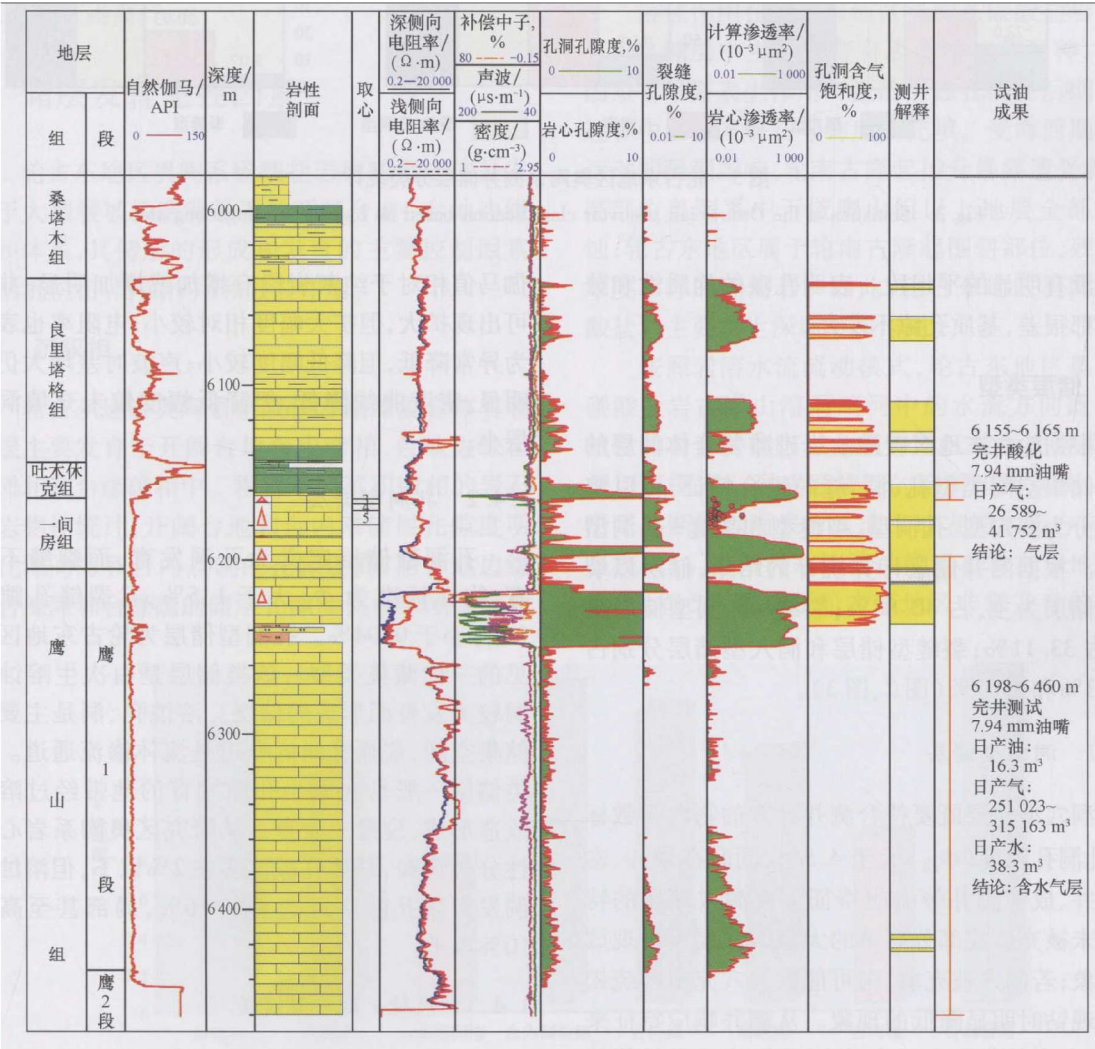


图2 轮古东轮古35井奥陶系四性关系图

Fig. 2 Relationships among the lithology, geophysical properties, electric properties and hydrocarbon-bearing properties of the Ordovician in Well Lungu 35 in Lungudong area

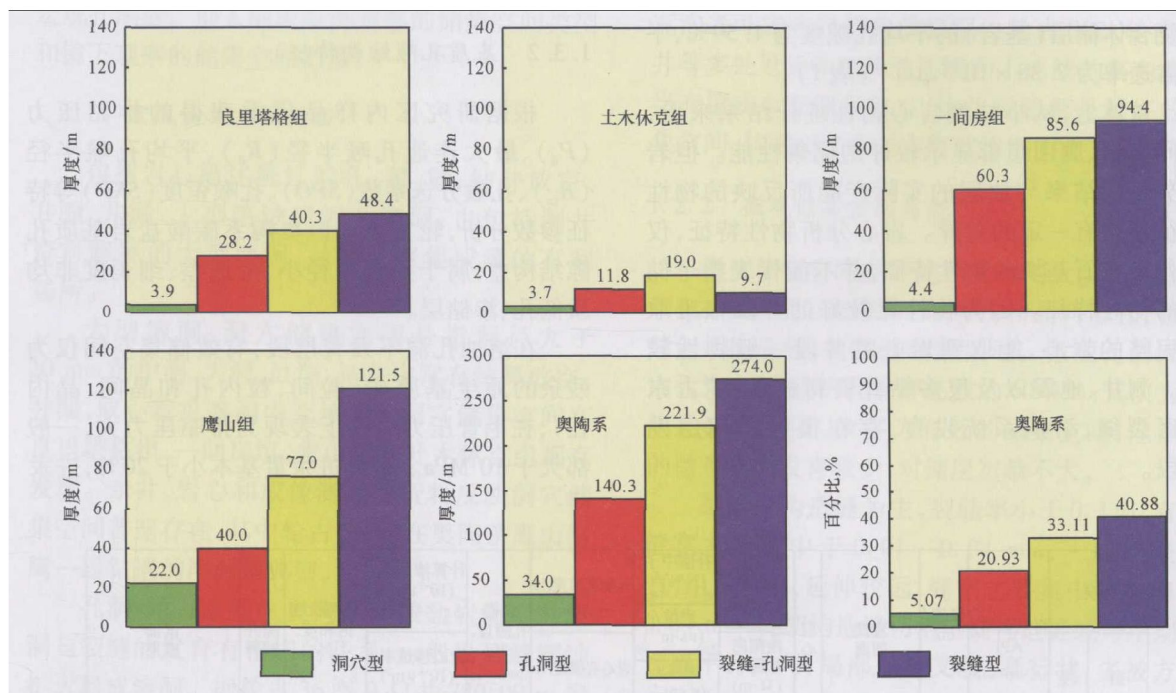


图3 轮古东地区奥陶系测井储层分类统计

Fig. 3 Statistics of the Ordovician reservoir classification based on logging in Lungdong area

曲线没有明显的平坦段。表明孔喉的均质性和分选性都很差,基质孔隙不发育。

#### 1.4 储层类型

根据轮古东地区碳酸盐岩礁滩复合体储层的主要储集空间类型孔、洞、缝的组合特征,可以将储层分为洞穴型、孔洞型、裂缝型和裂缝-孔洞型储层。根据测井储层计算统计的结果,储层以裂缝型储层为主,占40.88%;裂缝-孔洞型储层次之,占33.11%;裂缝型储层和洞穴型储层分别占20.93%和5.07%(图2,图3)。

##### 1.4.1 洞穴型储层

洞穴型储层既要符合测井计算的物性参数标准,孔洞孔隙度( $\Phi_{kd}$ )大于4.5%,同时在录井、常规测井、成像测井等响应特征上有洞穴储层的特点。未被充填或部分充填的大型洞穴层可出现放空现象;若洞穴被充填,则可能因洞穴充填物疏松而出现钻时明显降低的现象。从测井响应特征来看,前者自然伽马和纯灰岩相近仍然显示低值特征;井径异常扩大;电阻率迅速由高阻值变化为低阻值;声波时差增大;密度值异常降低。后者自然

伽马值相对于纯灰岩段有增加或增加明显;井径可出现扩大,但扩大幅度相对较小;电阻率也表现为异常降低,但降低幅度较小;声波时差增大仍然明显;密度曲线降低,但降低幅度较未充填洞穴层小。

##### 1.4.2 孔洞型储层

孔洞型储层定义为孔洞发育,而裂缝不发育,物性标准为 $\Phi_{kd}$ 大于1.5%,且裂缝孔隙度( $\Phi_f$ )小于0.04%。孔洞型储层为轮古东地区常见的一种储集类型。该类储层是由次生溶蚀孔洞较为发育而形成的储层。溶蚀孔、洞是主要的储集空间,连通孔洞的喉道是流体渗流通道。这类储层一般是在原生孔隙发育的地带经过溶蚀改造形成,裂缝欠发育。从研究区奥陶系岩心物性分析可知,基质孔隙度多在2%以下,但溶蚀孔洞发育段孔隙度可达4%~6%,局部甚至高达10%以上。

##### 1.4.3 裂缝-孔洞型储层

裂缝-孔洞型储层定义为裂缝发育,孔洞也发育,物性标准为 $\Phi_{kd}$ 大于1.5%,且 $\Phi_f$ 大于0.04%。裂缝-孔洞型储层是轮古东地区主要的

储层类型之一。这类储层不但孔洞发育,而且裂缝也发育。孔洞是其主要的储集空间,裂缝既作为储集空间,但更为重要的是作为连通渠道。相比孔洞型及裂缝型储层,次生溶蚀孔洞和裂缝的存在大大提高了地层的储集能力,改善了地层的渗流能力。

#### 1.4.4 裂缝型储层

裂缝型储层的裂缝发育,而孔洞不发育,物性标准为  $\Phi_f$  大于 0.04%, 且  $\Phi_{kd}$  小于 1.5%。裂缝型储层是以裂缝为其主要储集空间和连通渠道,通常岩石基质物性较差,原生孔隙和次生孔洞均不发育。但当裂缝厚度、裂缝孔隙度达到一定数值,也可获得高产。

## 2 储层发育主控因素

轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体是发育于大型缓坡构造背景下的开阔台地-台地边缘沉积体系,其储层的形成和发育的主要控制因素包括沉积相、溶蚀作用和破裂作用。

### 2.1 沉积相

轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体有利储层主要发育于开阔台地台内滩相、台地边缘台缘滩相和台缘礁相中。根据不同沉积微相的岩石基岩物性统计,开阔台地和台内滩储层孔隙度明显比滩间海和台内点礁的孔隙度高,而台地边缘的台缘滩和台缘礁的储层孔隙度比台缘滩间海的

孔隙度高(图4)。台内滩、台缘滩和台缘礁以亮晶砂屑灰岩、亮晶砂砾屑灰岩沉积为主,属于高能环境,原始粒间孔、粒内溶孔和晶间孔较发育,岩性较纯,脆性较大,泥质含量少,这些特点决定了岩层易受构造破裂作用和岩溶作用的影响,出现较好的储层发育段。而奥陶系吐木休克组上部和良里塔格组的岩石类型主要为泥灰岩、泥质灰岩和瘤状灰岩,所处沉积环境为盆缘和斜坡相,岩石泥质含量较高,原始孔隙不发育,构造破裂作用和岩溶作用不能有效进行,导致储层极不发育。

### 2.2 溶蚀作用

溶蚀作用在轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体储层中主要发育有表生和埋藏两种,早期因短暂暴露表生作用产生的溶蚀孔洞在后期埋藏过程中多被方解石等物质所充填。受海西期构造运动的强烈影响,轮南古隆起抬升暴露遭受剥蚀。高部位奥陶系中下统鹰山组以上地层全部被剥蚀;轮古东地区属于轮南古隆起围斜部位,残留了厚度不等的碎屑岩。因此,轮古东地区奥陶系碳酸盐岩主要发生深埋溶蚀作用。

按照岩溶水流流动模式,轮古东地区奥陶系碳酸盐岩古潜山溶洞暗河中的水流方向既有区域性的由高势能区域向低势能区域运动溶蚀(如深切谷模式),形成区域性的溶洞暗河系统,又有沿平移断层以涌泉方式流出地表的水流方向(涌泉模式)。这两种水流溶蚀模式在轮古东地区均发育(图5),形成了轮古东地区非常发育的溶洞

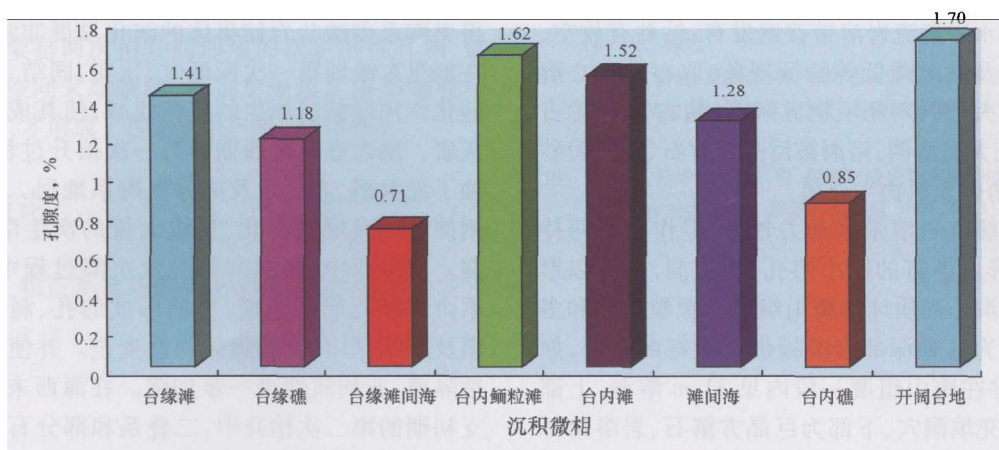


图4 不同沉积微相储层孔隙度分布对比

Fig. 4 Correlation of reservoir porosity distribution in different sedimentary micro-facies

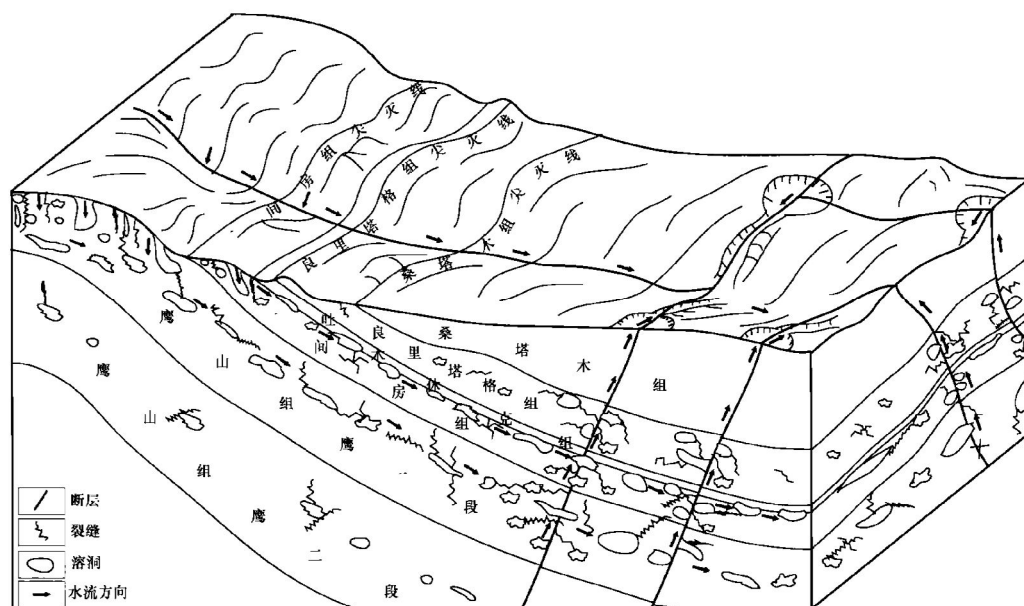


图5 轮古东地区奥陶系碳酸盐岩古潜山岩溶模式图

Fig. 5 Karst pattern of the Ordovician carbonate-rock buried hills in Lungudong area

系统,而涌泉溶蚀方式最突出的特点就是在断层带附近叠加了非常发育的溶洞裂缝体系,并且在良里塔格组中出现了局部发育的溶洞裂缝型储层。另外顺层溶蚀作用在模式图中表现的尤为明显。

轮古东地区主要发育水平潜流带和深部缓流带岩溶体系,岩溶作用非常强烈,形成溶洞裂缝体系,在后期的成岩作用过程中,溶洞裂缝体系未被完全充填,形成了现今有效的储层系统。

钻井、测井、地震反射等信息都表明,在轮古东地区奥陶系吐木休克组底部——一间房组顶部顺层岩溶的水平潜流岩溶带普遍发育:钻井有放空、泥浆漏失及钻时降低等特征现象;取心见岩心溶蚀孔洞及大型洞穴充填物方解石,轮古391、轮古35井都见大型溶洞,溶洞被巨晶方解石、泥质粉砂岩、岩溶角砾充填物半充填。

深部缓流岩溶带水动力较弱,但作用时间持久,可以形成丰富的微小溶孔、小溶洞,也可以形成大型溶洞。而质纯的鹰山组滩相颗粒灰岩和后期构造缝为这种深部岩溶提供了很好的条件,如轮古35井在鹰山组鹰一段内见31 m溶洞,上部6 m为未充填洞穴,下部为巨晶方解石、岩溶角砾半充填。

统计结果表明孔洞型储层和孔洞-裂缝型储

层的数量占总量的54.04%,若计入洞穴型储层高达59.11%。因此,溶蚀作用是轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体有利储层形成的关键控制因素。

### 2.3 裂缝

构造作用产生的裂缝体系极大地改善了轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体储层。

#### 2.3.1 构造作用

轮南地区3次沉降、2次抬升的构造历史,使得奥陶系碳酸盐岩储集体的演化发展非常复杂。在加里东晚期第一次深埋时,压实,固结,压溶和硅化作用使储层原生的孔隙锐减,使其成为致密灰岩。随之在早海西期的第一次抬升过程中,剥蚀了泥盆系、志留系及部分奥陶系地层。表生作用使潜山表层岩溶化,形成大量的次生溶蚀孔、洞。在海西中、晚期的第二次沉降过程中,石炭系由南往北层层超覆,早期形成的孔、洞发生充填及胶结作用,使储集体物性变差。并使储集体被隔离,非均质性进一步加强。在海西末期一印支初期的第二次抬升中,二叠系和部分石炭系遭到剥蚀。轮南断垒带西段奥陶系再次暴露。断裂活动使储集体彼此分隔,规模变小,但此时形

成的众多的断层及伴生的裂缝是油气运移的通道,对储集体的改造起重要作用。燕山期—喜马拉雅期,轮南潜山被迅速埋藏。从中生代晚期开始的有机质热演化所产生的酸性液体沿裂缝和孔缝渗入,潜山原有的孔、洞、缝发生扩溶。这个时期的深埋扩溶是形成有效储集空间的重要作用。

构造应力引发的破裂作用和岩溶作用是储集性能得以改善的主控因素;构造应力产生的构造缝为岩溶水提供了很好的通道,是岩溶发生并不断深化的关键。

### 2.3.2 构造裂缝

本区裂缝是影响奥陶系碳酸盐岩储层储渗性质的重要因素之一,尤其是晚加里东—早海西期及其以后(主要为海西晚期—印支早期及喜马拉雅期)构造运动形成的裂缝对本区储层物性影响更是重大,其间构造运动形成的裂缝往往未充填,构成本区重要储渗空间之一。

裂缝是岩溶发育的初始条件,它把孔洞连接起来,形成有效储渗系统。裂缝不仅是油气运移的主要通道,同时也是重要的储集空间。

根据岩心资料以及薄片观察表明,轮南地区奥陶系一间房组及鹰山组裂缝均较发育,构造裂缝至少有3期。取心观察裂缝发育并主要为高角度构造缝,各井中铸体薄片统计基本能见到微裂缝,其中未充填或未完全充填的微裂缝占样品总数的一半以上。

轮古东地区奥陶系碳酸盐岩储集层在3期埋藏过程中变得致密,基质孔隙度很低,储层的储集空间主要是两次抬升期形成的次生溶蚀孔洞,这些储集空间又靠裂缝,特别是经过扩溶的裂缝串联起来,才形成了连通的孔—洞—缝体系。

## 3 结论

### 1) 轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体

油气藏的储集岩主要有亮晶颗粒灰岩、粉晶颗粒灰岩、泥晶颗粒灰岩、泥晶灰岩,其中亮晶鲕粒灰岩、亮晶砂屑灰岩、亮晶砂砾屑灰岩的储集性能较好。

2) 礁滩复合体储层的基质孔隙不发育,根据主要的孔隙空间溶蚀孔、洞和裂缝的组合特征,储层可分为洞穴型、孔洞型、裂缝型和裂缝—孔洞型4种类型。

3) 礁滩复合体储层的发育程度主要受沉积相、溶蚀作用和破裂作用控制。正是上述因素形成了轮古东地区奥陶系碳酸盐岩礁滩体复合储层叠置连片、广泛发育的分布特征。

## 参 考 文 献

- 1 刘静江,袁玉春,龙维华,等.塔里木盆地轮南奥陶系研究新进展[J].新疆石油地质,2006,27(6):667~669
- 2 杨栓荣,潘文庆,韩剑发,等.轮南奥陶系碳酸盐岩储集体控油机理探讨[J].天然气地球科学,2006,17(1):85~88
- 3 赵宗举,王招明,吴兴宁,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系储层成因类型及分布预测[J].石油实验地质,2007,29(01):40~46
- 4 韩剑发,梅廉夫,杨海军,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体油气来源与运聚成藏研究[J].天然气地球科学,2007,18(3):426~435
- 5 陈新军,蔡希源,徐旭辉,等.塔中地区中上奥陶统礁、滩相隐蔽圈闭研究[J].天然气工业,2007,27(1):17~23
- 6 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
- 7 黎平,陈景山,王振宇.塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层形成控制因素及储层类型研究[J].天然气勘探与开发,2003,26(1):37~42
- 8 张涛,闫相宾,王恕,等.塔河油田奥陶系一间房组礁滩相溶蚀孔隙型储层特征与成因[J].石油与天然气地质,2004,25(4):462~471
- 9 邓小江,梁波,莫耀汉,等.塔河油田奥陶系一间房组礁滩相储层特征及成因机制新认识[J].地质科技情报,2007,26(04):63~69
- 10 刘忠宝,孙华,于炳松,等.裂缝对塔中奥陶系碳酸盐岩储集层岩溶发育的控制[J].新疆石油地质,2007,28(3):289~291

(编辑 陈喜禄)