

文章编号: 1000-0550(2007) 06-0858-11

# 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布<sup>①</sup>

陈景山<sup>1</sup> 李忠<sup>2</sup> 王振宇<sup>1</sup> 谭秀成<sup>1</sup> 李凌<sup>1</sup> 马青<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学 成都 610500; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

**摘要** 在塔里木盆地奥陶系海相碳酸盐岩中识别出同生岩溶、风化壳岩溶、埋藏岩溶三种不同类型的古岩溶作用, 综合分析认为它们是控制奥陶系碳酸盐岩储层形成的关键要素。同生期大气淡水选择性溶蚀颗粒碳酸盐岩所形成的粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔等, 为储层提供了基质孔隙, 储层分布受大气成岩透镜体控制, 通常呈透镜体沿台地边缘高能相带断续分布。与风化壳岩溶作用有关的碳酸盐岩储层在区域上主要展布于奥陶系碳酸盐岩裸露的古潜山分布范围内, 垂向上则局限于奥陶系碳酸盐岩侵蚀不整合面以下 200 m 深度范围内。根据风化壳岩溶的垂向与横向发育特征, 指出其储层垂向上主要分布于地表岩溶带的覆盖角砾岩、垂直渗流岩溶带和水平潜流岩溶带内, 平面上主要发育于岩溶高地边缘、岩溶斜坡区、岩溶谷地上游区、岩溶残丘等古地貌单元。埋藏岩溶作用常与有机质热演化过程中伴生的有机酸溶蚀碳酸盐矿物有关, 往往沿原有的孔缝系统进行, 具有期次多、规模不等的特点, 是碳酸盐岩储层优化改造的关键因素之一。

**关键词** 同生岩溶 风化壳岩溶 埋藏岩溶 储层分布 碳酸盐岩 奥陶系 塔里木盆地

**第一作者简介** 陈景山 男 1944 年出生 教授 沉积储层 E-mail: Chenjs2005@163.com

**中图分类号** P618.130.2 TE122.2<sup>+</sup>1 **文献标识码** A

## 1 引言

塔里木盆地奥陶系海相碳酸盐岩不仅厚度大、分布广、类型多, 而且经历了多旋回和多期次重大的构造作用与成岩作用的改造, 导致其储层的形成与演化变化多端。众所周知, 碳酸盐岩储层的发育演化主要受沉积、成岩和构造三大地质因素的控制。总的来说, 沉积相是储层形成的物质基础, 古岩溶作用则是储层发育的关键, 构造破裂作用为储层发育的纽带。根据岩芯观察、薄片鉴定、测井、录井、化验测试等资料的综合分析, 本文着重阐述决定塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩储层形成的古岩溶作用这一关键要素。这里所称的古岩溶作用是指古代地表水和地下水对可溶性岩石的改造过程及由此产生的地表与地下地质现象的总和<sup>[1]</sup>。按碳酸盐岩发生岩溶作用的时间与环境, 通常可将它简单地划分为同生岩溶、风化壳岩溶和埋藏岩溶等三种类型。根据我们的观察和分析, 这三种不同类型的岩溶作用对塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩演化均有不同程度的影响, 但发育与分布不均, 是储层形成不可忽视的控制因素。

## 2 储层发育的沉积基础

奥陶纪塔里木盆地处于克拉通边缘坳拉槽发展阶段<sup>[2]</sup>, 沉积古地理格局表现为盆地—斜坡—台地体系组成的温暖海洋, 总的特征是东深西浅, 东部为继承性的广海陆棚到盆地沉积环境, 中部与西部发育浅海镶边碳酸盐岩台地, 两者之间为一狭窄的斜坡过渡带(图 1)。在中部与西部广阔的碳酸盐岩台地上, 堆积了 1000 多米厚的海相碳酸盐岩<sup>[3]</sup>。早期以发育局限海台地相白云岩为特征, 中期堆积半局限—局限海台地相不等厚互层的石灰岩与白云岩, 晚期演变为开阔海台地相灰岩沉积, 台地边缘相的镶边体系则主要由颗粒滩和生物礁碳酸盐岩组成<sup>[4]</sup>。它们是奥陶系碳酸盐岩储层赖以形成的物质基础。然而, 由于碳酸盐沉积物对成岩作用十分敏感, 所以它们在沉积后很容易在胶结和压实等破坏性成岩作用的影响下演变成致密岩层, 丧失其储集能力。因此, 碳酸盐岩储层的形成往往与成岩过程中诸如岩溶、破裂等建设性成岩作用密切相关。

<sup>①</sup> 中国石油中青年创新基金项目(编号: 06E1018)和四川省重点学科建设项目(编号: SZD0414)资助

收稿日期: 2007-04-21; 收修改稿日期: 2007-06-05



图 1 塔里木盆地奥陶纪沉积相分布略图

Fig 1 Sketch map showing Ordovician facies in Tarim basin

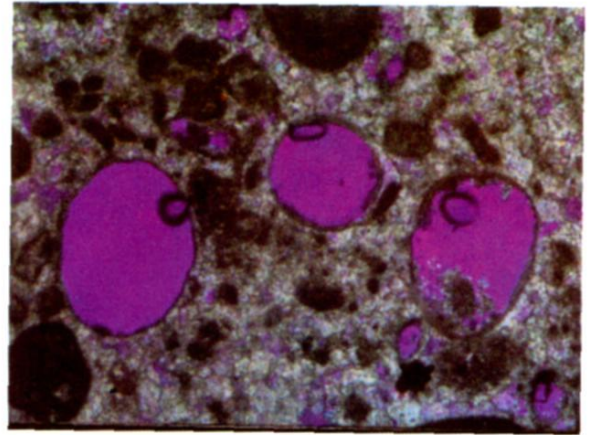


图 2 台地边缘相亮晶砂屑鲕粒灰岩, 发育同期期大气淡水选择性溶蚀作用形成的粒内溶孔和铸模孔

顺 2 井, 6798.60 m, 良里塔格组, 正交偏光, 加石膏试板, × 4

Fig 2 Microphoto showing oospirite of platform margin facies with intragranular solutional pores and mould pores resulted from syndepositional meteoric fresh-water selective dissolution

### 3 同生岩溶与储层分布

同生岩溶作用发生于同生(或者准同生)大气成岩环境中。受次级沉积旋回和海平面升降变化的控制, 颗粒滩、生物礁等浅水碳酸盐沉积体, 尤其是在海退和向上变浅的沉积序列中, 伴随海平面暂时性相对下降, 时而出露海面或处于淡水透镜体内, 在潮湿多雨的气候条件下, 受到富含 CO<sub>2</sub> 的大气淡水的淋溶, 形成大小不一、形态多样的各种孔隙。大气淡水既可以选择性地溶蚀由文石、高镁方解石等不稳定矿物组成的颗粒或第一期方解石胶结物, 形成粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔(图 2), 又可发生非选择性溶蚀作用, 形成溶缝和溶洞。由于大气淡水选择性地溶蚀作用通常发生于文石、高镁方解石等不稳定矿物转变为稳定的低镁方解石之前, 因此, 碳酸盐岩中的粒内溶孔、铸模孔等组构选择性溶孔一般被视为碳酸盐岩发生同生或准同生岩溶作用的主要识别标志之一。显然, 这与碎屑岩储层在埋藏成岩环境中长石粒内溶孔和铸模孔的形成机理明显不同。

#### 3.1 同生岩溶与储层的垂向分布

同生岩溶作用在塔里木盆地奥陶系台地相碳酸盐岩中虽然分布较广, 但其形成的溶蚀孔洞缝随后多数被充填, 能成为有效储集空间保存下来的目前主要发现于塔中地区上奥陶统良里塔格组台地边缘相的镶边体系内, 可以顺 2 井、塔中 161 井等作为典型代表。如图 3 所示, 在顺 2 井良里塔格组灰岩中出现“针孔层”与致密层在垂向上的频繁交互。“针孔层”的孔隙类型主要包括铸模孔、粒内溶孔、粒间溶孔以及被方解石和灰绿色泥质充填的溶洞和溶缝(图 2)。推测这种“针孔层”对应于同生岩溶作用发育段。因

此可根据“针孔层”的垂向分布确定同生岩溶作用发育段的分布。它们从上到下分布于 6 767~ 6 775 m、6 783~ 6 802 m、6 824.5~ 6 829 m、6 838~ 6 848.8 m、6 855~ 6 860 m 和 6 871~ 6 900 m, 厚度变化范围为 4.5~ 30 m。而致密层则是由于未受到大气淡水的淋滤, 在强烈的胶结作用和压实作用下导致原生孔隙大量丧失(图 4)。这表明顺 2 井良里塔格组灰岩至少经历了 6 次大气渗流—潜流成岩环境与海底潜流成岩环境的交替。当海平面暂时相对下降时, 颗粒滩、生物礁等浅水沉积体出露海面或处于淡水透镜体内, 形成大气渗流—潜流成岩环境, 发生显著的选择性与非选择性溶蚀作用, 形成铸模孔、粒内溶孔、粒间溶孔以及溶缝、溶洞等。在单个同生岩溶段内, 高孔隙度层段集中分布于同生岩溶段的上部和中部两个部位, 大致相当于大气渗流带的上部到大气潜流带的中上部。在大气渗流带的中上部, 溶蚀形成的孔洞缝多被粘土、渗流粉砂和方解石等充填, 使得最终增加的孔隙度并不明显, 而大气潜流带的下部则以胶结作用为主, 孔隙度大幅度降低。当海平面发生暂时性相对上升时, 颗粒滩、生物礁等浅水沉积体沉没于海平面之下, 发育海底潜流环境, 方解石胶结作用占主导地位, 形成致密层(图 4)。

#### 3.2 同生岩溶与储层的区域分布

塔中地区上奥陶统良里塔格组灰岩中常见同生

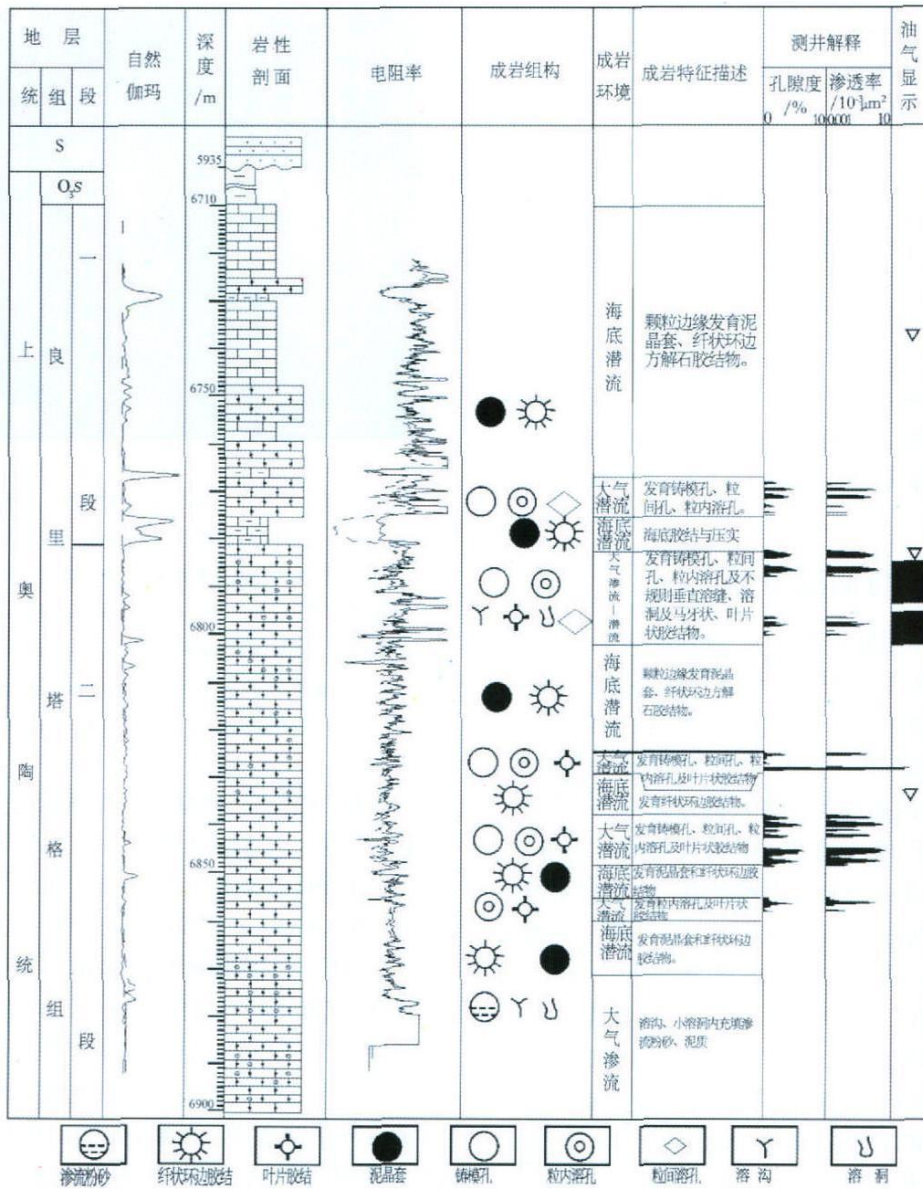


图 3 顺 2 井良里塔格组灰岩早期成岩结构特征及成岩环境柱状剖面图

Fig 3 Columnar section showing early diagenetic fabric and environment of Lantangite limestone in the Well Shun 2

岩溶现象,主要沿塔中 I 号构造带的台地边缘镶边体系集中分布,在顺 2 塔中 30 塔中 44 塔中 16 塔中 161 等井中至少识别出 2~6 个同生岩溶作用段。如图 5 所示,通过大致平行于台地边缘相带的北西—南东向井间同生岩溶发育特征的对比,可见沿该带的良里塔格组灰岩发育了 2~6 期同生岩溶作用及其相应的大气成岩透镜体。良里塔格组一段和二段中发育了两个规模较大的大气成岩透镜体,在北西—南东方向上均可追踪对比。在顺 2 井中识别出 6 个大气成岩透镜体,但单个透镜体的规模相对较小。这或许预示着从顺 2 井朝北西方向的台地边缘相带内,良里塔

格组灰岩应该还有规模较大的大气成岩透镜体存在。在良里塔格组三段内也识别出两个大气成岩透镜体,但规模较小,呈断续分布。

良里塔格组沉积时,塔中 I 号断层西侧的台地边缘相带,水体较浅,礁滩发育,在礁滩的垂向加积过程中极易造成早期暴露并遭受大气淡水溶蚀改造。受大气淡水作用的礁滩沉积体实际上是一个半浮露在海平面之上的大气成岩透镜体,向下及向台地边缘两侧,沉积物的孔隙中被海水充填,过渡为海水潜流带,以胶结作用为主。在这种大气成岩透镜体内,溶解作用和胶结作用伴随发育,孔隙发育带主要分布于渗流

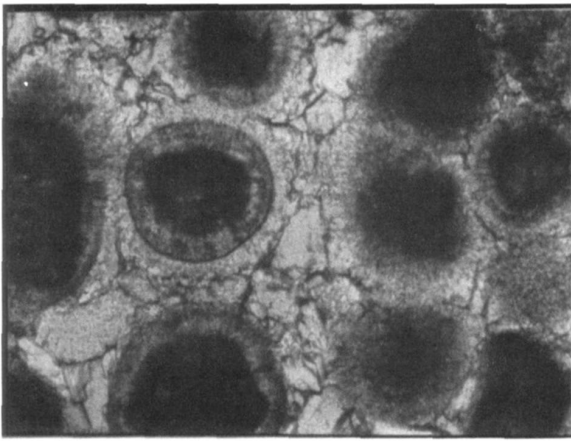


图 4 台地边缘明亮晶砂屑粒灰岩, 发育纤维状环边和细粒状方解石的二期胶结, 粒间孔被完全充填变为致密层  
顺 2 井, 6879.5m, 良里塔格组, 单偏光, × 10

Fig 4 Microphoto showing oospirite of platform margin facies with two generations of the cementation composed of rimmed fibrous and granular calcites coming to the tight stratum due to fully filling of intergranular pores by calcite cements

带及潜流带上部近潜水面处, 孔隙带总体上呈透镜状, 厚度一般为几米至 30 m 不等。潜流带下部则主要为胶结作用带, 这里的孔隙被方解石胶结物大量充填。这种孔隙发育带现今是本区裂缝—孔隙型储层

的主要发育层位。储层基质孔隙度主要是由同生岩溶作用贡献的。因此, 与这种大气成岩透镜体相对应, 受同生岩溶作用控制的储层通常也呈透镜体沿台地边缘高能相带断续分布。

#### 4 风化壳岩溶与储层分布

风化壳岩溶的发育与重大的海平面下降或构造运动造成的陆地大面积暴露有关, 常常是地层学中的主要不整合面。对于碳酸盐岩岩溶而言, 风化壳岩溶和同生岩溶都是受大气淡水淋滤而发生的溶蚀, 它们最大的区别在于同生岩溶发生的时间非常早, 沉积物尚未完全固结成岩, 碳酸盐组分的矿物成分尚未完全稳定化, 而且经历的时间相对较短; 而风化壳岩溶发生的时间比较晚, 是对已经固结成岩、完成矿物稳定化转变后碳酸盐岩产生的岩溶作用, 经历的时间可以很长。

地质历史记录中的古风化壳岩溶主要是根据其广泛存在的侵蚀不整合、地下溶蚀作用及其伴生的孔洞系统和内部充填物的特征等加以识别的<sup>[5]</sup>。在塔里木盆地的塔北、塔中、玛扎塔格等地区, 已在奥陶系碳酸盐岩顶部不整合面之下约 200 m 厚地层内发现了发育程度不同的风化壳岩溶作用及其规模不等、形态各异的岩溶缝洞系统和特征的内部充填物。有关

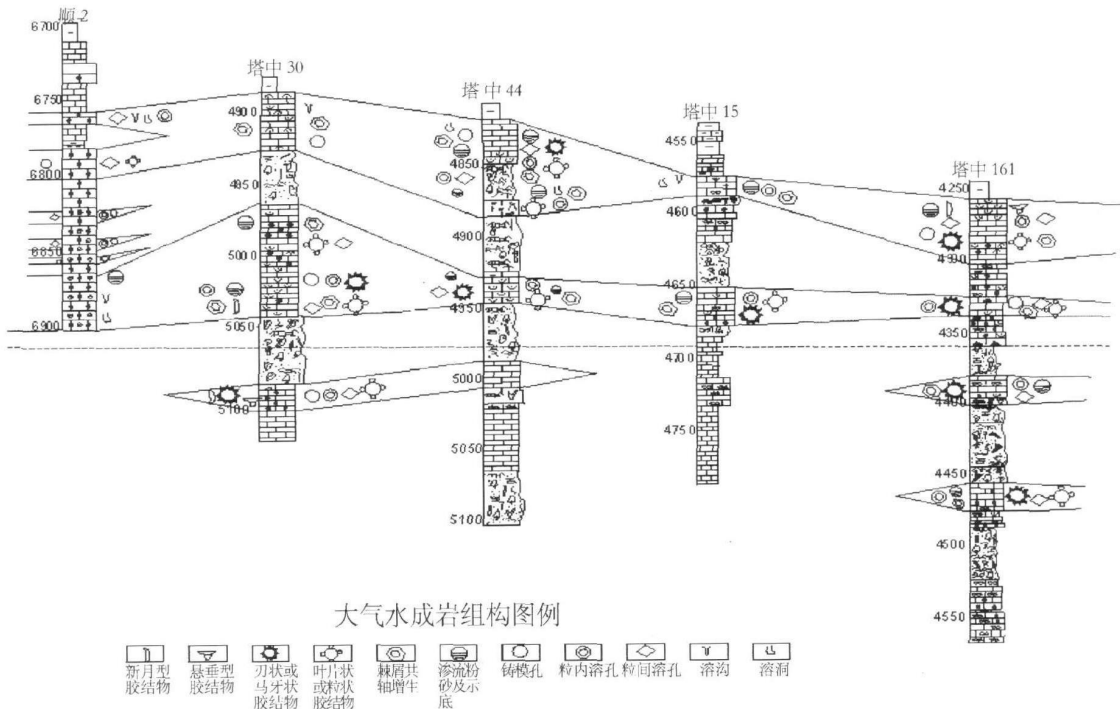


图 5 顺 2—塔中 44—塔中 161 井上奥陶统碳酸盐岩大气成岩透镜体对比图

Fig 5 Comparison diagram of meteoric diagenetic lens in upper Ordovician carbonates across Shun 2-Tazhong 44-Tazhong 161 Wells  
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩风化壳岩溶作用及储层特征已取得了显著的研究进展<sup>[6-10]</sup>。

#### 4.1 风化壳岩溶与储层的垂向分布

一个发育完整的风化壳岩溶序列从不整合面向下一般由地表岩溶带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带等四个岩溶带构成(图 6)。但由于多期岩溶的叠加以及地层的抬升剥蚀往往会造成风化壳的

垂向分带不完整或是不同期次岩溶带的叠加。岩溶带的发育程度与深度随地区、岩性、构造部位、古地貌位置、古水文条件以及暴露时间长短等因素的差异而有一定的变化。下面选择有代表性的轮南地区为例来说明奥陶系碳酸盐岩风化壳岩溶及储层的垂向分带特征(表 1)。

表 1 轮南地区奥陶系碳酸盐岩风化壳岩溶的垂向分带及特征

Table 1 The vertical zoning and features of weathering karstification of Ordovician carbonates in the Lunnan area

岩溶带	地表岩溶带	垂直渗流岩溶带	水平潜流岩溶带	深部缓流岩溶带
距侵蚀面距离	侵蚀面附近(0~30 m)	侵蚀面之下 0~80 m, 个别井区较深, 在 150 m 左右	侵蚀面之下 30~200 m	侵蚀面之下岩溶作用底界, 最深可达 281 m
地下水作用方式	地表径流水向下渗流	地下水向下渗流和淋滤溶蚀	地下水沿近水平方向运动及溶蚀	地层水沿裂缝的垂向和侧向运动
代表性的岩溶形态	岩溶谷地、洼坑、落水洞	垂直或近于垂直的溶缝及拉伸状的小型溶洞	水平溶洞和暗河	零星发育溶缝及小型溶蚀孔洞
岩溶充填物	风化残积物、洞壁塌积物、洼坑堆积物	渗流机械充填物、化学充填物	机械充填物(河成角砾岩)、崩塌堆积物及化学充填物	化学充填物、泥砂质机械充填物
自然伽玛响应特征	曲线呈锯齿状, 比致密灰岩高, 一般为 30~60 API	与致密灰岩接近, 曲线呈微锯齿状, 或近于平直	溶洞和暗河未充填的: 一般较低; 砂泥质充填的: 起伏较大, 值高, 一般 45~100 API; 角砾岩充填的: 曲线略呈锯齿状, 一般 30~60 API; 较致密灰岩高	一般较低, 呈锯齿状
电阻率响应特征	比致密灰岩明显降低, 呈剧烈的锯齿状	双侧向电阻率较低, 且出现正差异	溶洞和暗河未充填的: 电阻率值低; 砂泥质充填的: 电阻率值低, 呈锯齿状, 出现正差异; 角砾岩充填的: 比致密灰岩明显降低, 呈剧烈的锯齿状, 正差异	电阻率值低, 呈锯齿状
代表井段	轮古 42 井: 5 661.5~5 693.5 m	轮古 41 井: 5 561~5 625 m	轮古 41 井: 5 625~5 697 m; 解放 126 井: 5 201.5~5 240 m	轮南 12 井: 5 340~5 468 m

##### 4.1.1 地表岩溶带

地表岩溶是指侵蚀面附近的岩溶地表形态及其伴生的风化残积物、覆盖堆积物的综合特征。在地表岩溶带中, 常发育 0 至几十米厚的由紫红色泥岩、灰绿色铝土质泥岩、粉砂岩等组成的古土壤层以及角砾灰岩、角砾云岩等覆盖堆积物和风化残积物。其中, 碎屑支撑的角砾灰岩、角砾云岩发育粒间孔、粒间溶孔等孔隙, 孔渗性较好, 可作为良好的储层, 但分布局限。

##### 4.1.2 垂直渗流岩溶带

垂直渗流岩溶带位于侵蚀面之下到潜水面之上

的地下水渗流带。岩溶水主要沿着岩层中的垂直裂隙向下渗流, 以垂向岩溶为主, 形成溶缝、溶扩缝、垂直拉伸状的小型溶洞等, 多为泥、砂、方解石以及不同来源和成因的渗流物质混合充填。这些充填体的形态很不规则, 大体上呈与围岩垂直或近于垂直的囊状体或脉状体产出, 与围岩呈清晰的侵蚀接触。该带一般分布在侵蚀面之下 0~80 m 范围内, 例如轮古 41 井分布于侵蚀面之下 14~78 m, 厚 64 m(图 6)。与这种岩溶作用有关的储层孔隙类型主要为半充填的高角度溶缝以及中小型溶蚀孔洞。

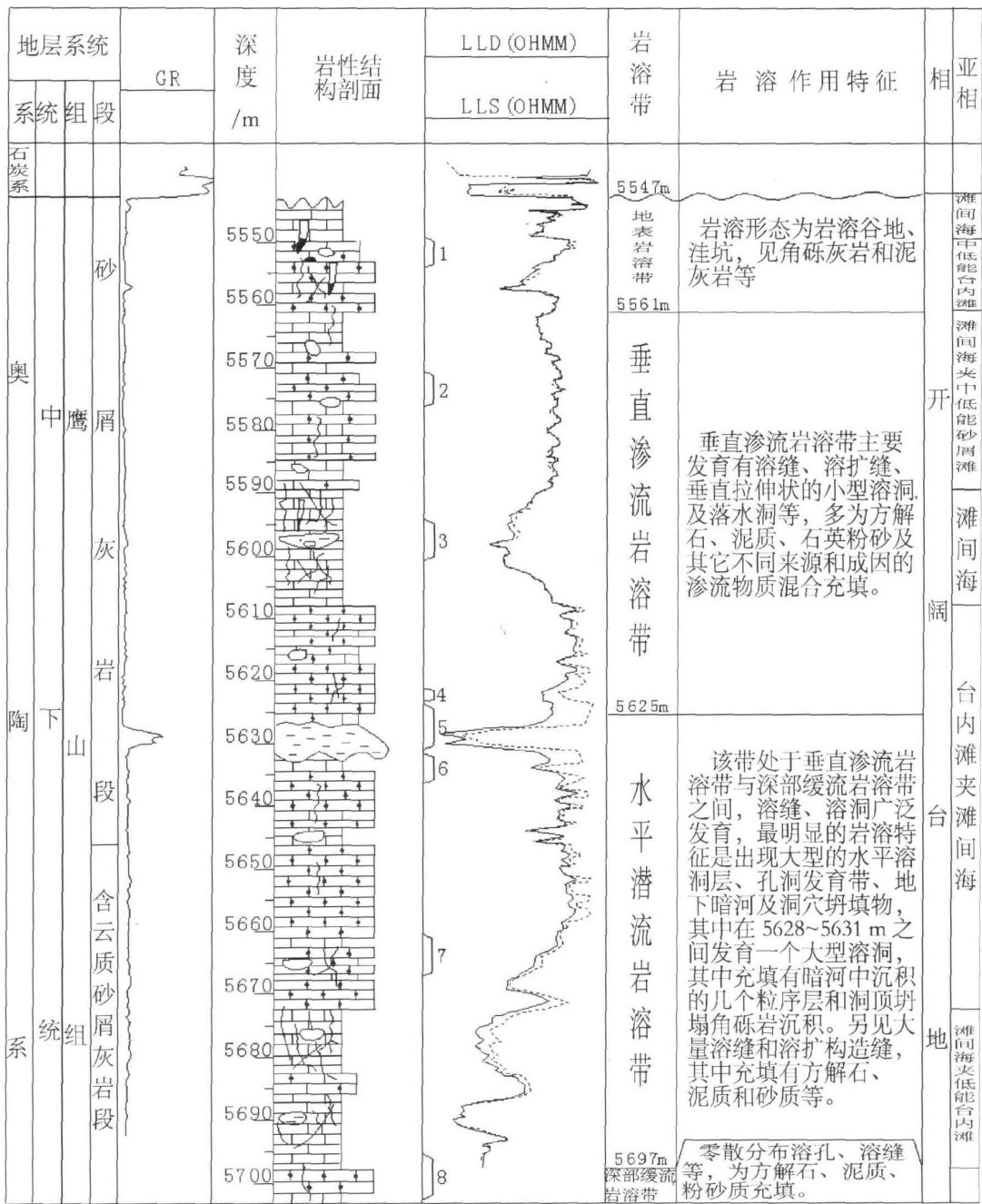


图 6 轮古 41 井奥陶系风化壳岩溶柱状剖面图

Fig 6 Columnar section showing the weathering karstification of Ordovician carbonates in the Well Lungu41

4.1.3 水平潜流岩溶带

水平潜流岩溶带位于垂直渗流岩溶带与深部缓流岩溶带之间的地下水潜流带, 一般分布在侵蚀面之下 30~200 m 范围内, 例如轮南 12 井为 30~180 m, 轮古 41 井为 78~150 m (图 6)。该带岩溶水受压力梯度控制并沿水平方向流动, 溶蚀能力较强, 最显著的岩溶特征是出现大型的水平溶洞层、缝洞发育带、地下暗河以及洞穴坍塌物等。轮南地区奥陶系碳酸

盐岩中的水平潜流岩溶带发育良好, 有的甚至发育二个或二个以上的水平潜流岩溶带, 例如轮西 2 井, 溶洞直径一般都在 1 m 以上, 最大可达数米, 并可见多个溶洞叠置。根据轮古 40、41、42 等井中溶洞充填物的特征, 可将它们从洞底至洞顶分为下部塌积相、中部地下暗河充填相以及上部洞顶破裂相。有关的储层孔隙类型主要包括半充填的中小型溶蚀孔洞、溶缝、洞顶破裂缝以及粒间溶孔和晶间溶孔等。

表 2 风化壳岩溶作用形成的储集空间类型及其分布表

Table 2 Type and characteristic of reservoir space formed by the weathering karstification

岩溶带	主要储集空间类型	充填情况	评价
剥蚀面上的风化残积层	粒间孔和粒间溶孔	未充填或半充填	好
垂直渗流岩溶带	以高角度溶缝为主, 中小型溶蚀孔洞 大型水平溶洞, 中小型溶蚀孔洞, 溶缝,	半充填或全充填	中
水平潜流岩溶带	洞顶破裂缝, 粒间溶孔, 晶间溶孔	大洞多全充填, 其它的为半充填或全充填	好
深部缓流岩溶带	零散分布的溶孔和溶缝	半充填或全充填	差

#### 4.1.4 深部缓流岩溶带

这个岩溶带位于水平潜流岩溶带之下, 最大底界深度是岩溶作用的下限, 最深可达 281 m。该带地下水的运动和交替极为缓慢, 因此岩溶作用也比较微弱, 主要以溶孔和溶缝的零散发育为特征, 但多为粒状方解石、泥、砂充填或半充填。

综上所述, 由风化壳岩溶作用在奥陶系碳酸盐岩中形成的储集空间类型及其在各岩溶带内的分布情况列于表 2 中。

#### 4.2 风化壳岩溶与储层的区域分布

目前至少已在塔里木盆地的塔河、轮南、塔中、玛扎塔格等地的奥陶系碳酸盐岩中发现了风化壳岩溶及其相关的储层<sup>[6, 7, 10]</sup>。然而, 由于各地区奥陶系地层的岩性、分布特征、古构造与古地形以及岩溶期次的不同, 导致了风化壳岩溶在区域上的发育和分布存在着明显的差异。限于篇幅, 这里仅以轮南地区为例加以说明。

轮南地区奥陶系碳酸盐岩在沉积之后, 由于加里东期至海西期的多期构造抬升和断块差异升降, 导致奥陶系地层遭到不同程度的剥蚀, 形成区内广泛分布的古风化壳及其岩溶系统。以石炭系双峰灰岩顶面作为基准面, 采用地层厚度印模法恢复该区石炭系沉积前的古地形。如图 7 所示, 该区石炭系沉积前的古地形总体上表现为北高南低的区域性缓斜坡, 东西方向上则为中部高, 西部和东部边缘低。根据岩溶地貌的形态与特征, 可将其划分为岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶谷地三个大单元。古地形总体上表现为由北向南倾斜的格局, 使得北部地区成为主要的淡水补给区, 从而保证了古水流总体上由北向南流动。

##### 4.2.1 岩溶高地

岩溶高地位于古地形较高的部位, 地貌形态表现为高台、残台、局部浅坑等, 主要分布于轮南 1 井—轮南 34 井—轮南 8 井—一线以北地区以及与之相连片的呈北东—南西向带状展布的轮南 11 井—轮南 15 井一带。在轮南 2Q 轮南 15 井区发育有岩溶浅坑。在

轮南断垒带的 1 号和 2 号构造高点附近, 早海西期形成的风化壳岩溶作用带, 由于晚海西运动导致断块抬升而遭剥蚀。在岩溶高地上, 垂直渗流岩溶带发育良好且厚度大, 岩溶形态以漏斗、落水洞、溶隙为主, 发育孤立溶洞, 多为泥砂和角砾混合充填。水平潜流岩溶带在岩溶高地边缘和岩溶浅坑部位发育较好, 所形成的岩溶缝洞多为泥砂、岩溶角砾和方解石充填或半充填。

##### 4.2.2 岩溶斜坡

岩溶斜坡位于岩溶高地与岩溶谷地之间的过渡地带, 处于岩溶高地边缘的下倾部位, 地貌形态主要表现为斜坡及其上的岩溶残丘、峰丛、溶沟等。岩溶残丘主要出现于轮南 32 井以北地区以及轮南 1Q 44 39 井区。溶沟多出现在岩溶残丘之间相对低洼的部位。岩溶斜坡的坡度直接影响着岩溶水的渗透量。坡度比较平缓的岩溶斜坡, 地表径流的流速缓慢, 渗透量大, 垂直渗流岩溶带厚度小, 水平潜流岩溶带发育较好, 例如轮南 4 18 21 井区。

##### 4.2.3 岩溶谷地

岩溶谷地是指切割相对较深的、呈带状展布的岩溶地貌, 主要出现于轮南 2 井—轮南 30 井—轮南 17 井—轮南 23 井—轮南 16 井一带, 以及南部、东北部和西部边缘。在岩溶谷地中常发育一些小型的岩溶洼地和岩溶残丘。沙 14 井—轮南 14 井—一线以北的岩溶谷地较狭窄, 地形相对较高, 属谷地上游区。南部的岩溶谷地较宽, 地形相对较低, 属谷地下游区。岩溶谷地上游区与岩溶斜坡区呈过渡关系, 垂直渗流岩溶带的厚度小, 水平潜流岩溶带极为发育, 例如轮南 3 5 14 17 井区等。在岩溶谷地下游区, 垂直渗流岩溶带较薄或者不发育, 在地表甚至可以形成积水区。

综上所述, 风化壳岩溶体系内的储层有利发育区主要分布于岩溶高地边缘、岩溶斜坡区、岩溶谷地上游区、岩溶残丘等古地貌单元。因此, 风化壳岩溶作用是奥陶系碳酸盐岩储层形成的关键要素, 它不仅为

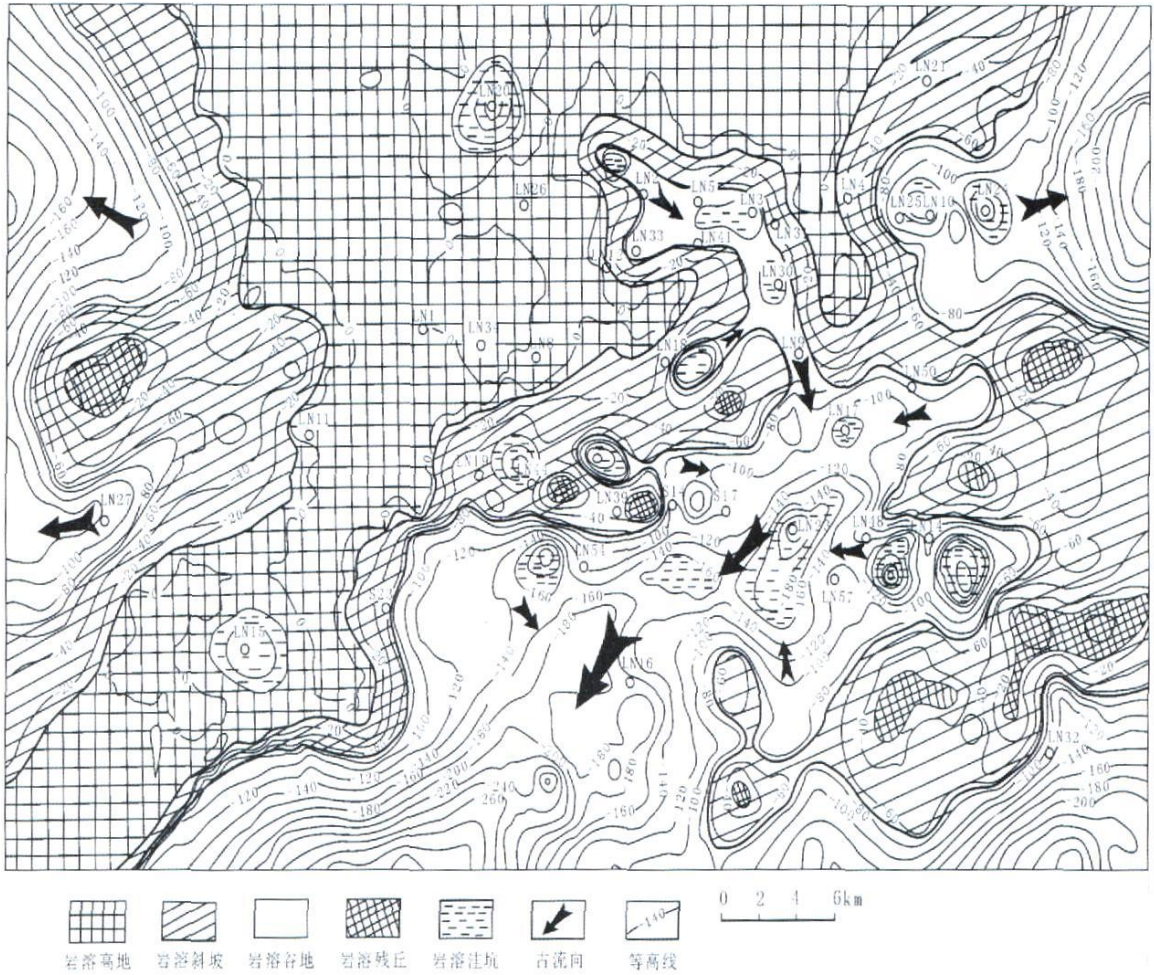


图 7 轮南地区奥陶系风化壳岩溶古地形及古水文体系图

Fig. 7 Diagram showing palaeotopography and palaeohydrologic system of weathering karstification of Ordovician carbonates in the Lunan area

原来致密的碳酸盐岩提供了数量不等的有效储集空间, 并且使现今奥陶系碳酸盐岩储层主要分布于风化壳岩溶发育范围与发育深度的框架内, 即与风化壳岩溶有关的碳酸盐岩储层在区域上主要展布于奥陶系碳酸盐岩裸露的古潜山分布范围内, 垂向上则局限于奥陶系碳酸盐岩侵蚀不整合面以下 200 m 深度范围内。

### 5 埋藏岩溶及其对储层的贡献

埋藏岩溶作用系指碳酸盐岩在中—深埋藏阶段主要与埋藏成岩作用相联系的溶蚀作用现象及过程, 尤其是与有机质热演化过程中伴生的有机酸溶蚀碳酸盐矿物有关, 有人也称之为深部溶蚀作用、热水岩溶作用、深部岩溶作用、埋藏期岩溶作用、构造期岩溶作用等。在塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩中已发现了

多期次的、不同规模的埋藏岩溶作用。

#### 5.1 埋藏岩溶作用形成的孔隙类型

奥陶系碳酸盐岩中的埋藏岩溶成因的孔隙以非组构选择型为主, 主要包括溶扩构造缝、溶扩压溶缝、溶蚀孔洞及溶扩孔洞等。组构选择型相对少见, 以微孔为主, 主要包括粒间溶孔和晶间溶孔两种类型。

(1)粒间溶孔: 粒间孔内的方解石胶结物被溶蚀而成, 如粒间溶孔等, 该类型较少见;

(2)晶间溶孔和晶内溶孔: 孔洞充填物中的方解石或白云石的晶间溶孔和晶内溶孔, 该类型常见(图 8);

(3)溶扩压溶缝: 沿晚期缝合线进行溶蚀, 另可见少量串珠状溶孔沿缝合线分布, 该类型较少见;

(4)溶扩构造缝: 表现为沿构造裂缝的扩溶, 甚至发展为溶蚀孔洞, 该类型常见, 且以晚期的溶扩构





图 8 亮晶砂屑灰岩孔洞中的方解石充填物经埋藏溶蚀作用形成的晶间溶孔, 随后又被黑色沥青半充填 (塔中 44 井, 4881. 2m, 良里塔格组, 铸体片, 单偏光,  $\times 2.5$ )

Fig 8 Microphoto showing intercrystalline solutional pores formed by the buried corrosion of cave calcite fillings in sparry calcarenite, and partially filled by black bitumen

造缝为主 (图 9);

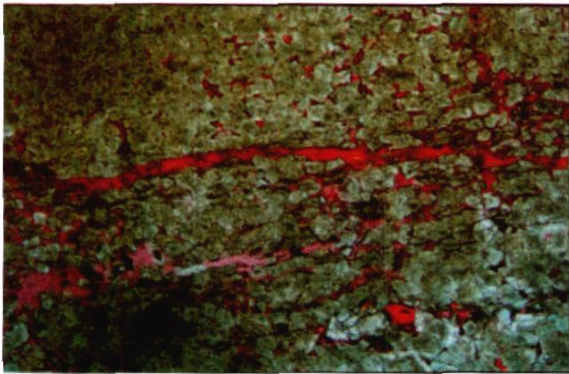


图 9 细晶云岩中沿微裂缝及其附近发生埋藏岩溶作用, 形成溶扩缝和晶间溶孔 (中 11 井, 5640. 2m, 鹰山组, 铸体片, 单偏光,  $\times 4$ )

Fig 9 Microphoto showing dissolution expanded fissures and intercrystalline solutional pores formed by the buried corrosion along the microfracture of finely crystalline dolostone

(5) 溶蚀孔洞: 多沿裂缝分布, 溶蚀充填物及围岩, 形状不规则, 大小不一, 呈串珠状或囊状, 该类型常见;

(6) 溶扩孔洞: 原有的孔洞主要形成于风化壳岩溶期间, 在岩溶期后的埋藏阶段, 主要表现为对溶洞充填物及洞壁的扩溶 (图 10)。其孔径大小和分布受早期岩溶孔洞的控制, 该类型常见。

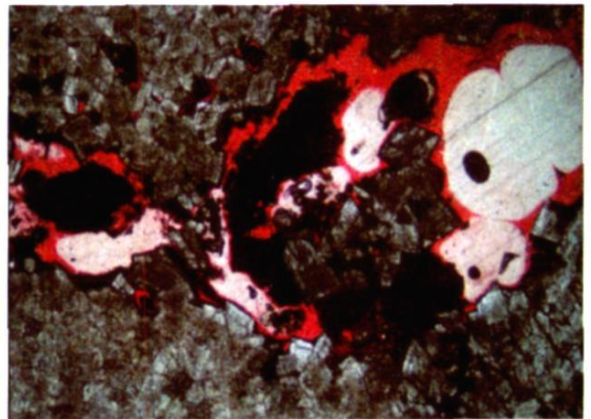


图 10 细晶云岩中由风化壳岩溶作用形成的小型溶洞及其白云石充填物, 后期被埋藏岩溶作用再改造, 并被黑色沥青半充填 (中 1 井, 5367. 6m, 山组, 铸体片, 单偏光,  $\times 4$ )

Fig 10 Microphoto showing small-scale caves and dolomite filling formed by the weathering karstification in finely crystalline dolostone, late reworking by the buried corrosion and partially filled by black bitumen

从上述的埋藏岩溶形成的孔隙类型可以看出, 埋藏岩溶作用一般是沿着原有的孔缝系统进行的, 并对原有的孔洞缝扩溶, 虽然一般只增加不超过 5% 的孔隙度, 但是由于这种孔隙度的增加通常与油气运移同步, 因此更富有实际意义。显然, 与油气运移同步的埋藏岩溶作用是碳酸盐岩储层优化改造的关键因素之一。在埋藏环境的封闭体系中, 碳酸盐岩地层的总孔隙度基本保持不变, 溶蚀作用与充填作用呈孪生关系, 处于一个物质—空间相平衡的状态中, 其溶蚀量近似等于胶结量。但通过溶蚀—充填位置的变化, 可导致储层发育位置的变化, 即“孔隙度的转换”。一般来说, 在埋藏成岩流体的来源方向上, 有可能形成溶蚀孔洞缝发育带, 而下游方向则可能出现孔洞缝充填带。对于缺少孔缝的致密碳酸盐岩而言, 由于缺乏成岩流体运移通道, 因此很难发生这种埋藏岩溶作用。

## 5.2 埋藏岩溶作用的发育分布

埋藏岩溶作用在塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩中分布较广, 但不同区块和不同期次的埋藏岩溶作用的发育程度各不相同, 现以塔中地区奥陶系碳酸盐岩为例说明。

塔中地区奥陶系碳酸盐岩至少发育三期埋藏岩溶作用 (表 3)。第一期埋藏岩溶作用发生于晚加里东至早海西期, 在全区均有分布, 但其溶蚀作用较弱。

发育场所受台地边缘礁滩沉积体、同生期大气成岩透镜体以及晚加里东—海西期裂缝和风化壳岩溶发育带的控制。在塔中 I 号构造带, 第一期埋藏岩溶作用主要发育于台地边缘礁滩沉积体和大气成岩透镜体中, 表现为对早期孔隙和孔洞充填物的扩溶(图 8)。骨架礁中原生残余孔洞层和同生岩溶作用形成的孔隙层为该期地层酸性水的运移、溶蚀提供了活动通道和场所。晚加里东—早海西期第一期油气的充注, 成为第一期聚集的古油藏, 但大部分已遭后期的构造、热液或氧化水洗的破坏, 成为孔隙中的干沥青(图 8)。第一期埋藏岩溶作用的另一个发育场所受构造裂缝发育区、风化壳岩溶作用区的控制, 例如塔中 16 号构造, 埋藏岩溶作用总体上不强烈, 表现为充填裂缝的方解石被溶蚀后形成的晶间溶孔为沥青充填。

第二期埋藏岩溶作用发生于晚海西期至印支早期, 其分布区受构造作用、先期孔隙层和有利沉积相

带的控制, 并且可能与晚海西期岩浆热液活动有关。它主要发育于次级断裂和裂缝发育区, 如塔中 12 井区、塔中 45 井区。该期形成的岩溶缝洞, 既可以被原油充注, 也可以被萤石、方解石、石英、石膏、天青石等矿物充填。有关塔中 45 井区岩溶缝洞及其充填物的成因与形成时期至今仍有不同的认识<sup>[11~13]</sup>, 但是, 从该井区奥陶系碳酸盐岩缝洞现深埋于 6 000 m 以下以及缝洞充填物的矿物共生组合来看, 它们显然与大气淡水无关, 更可能是晚海西岩浆期后热液活动或者油田水活动的产物。

第三期埋藏岩溶作用发生于燕山期至喜山期, 在不同井区或区块表现较为复杂, 主要发育于塔中 I 号构造带, 例如塔中 54 井区奥陶系碳酸盐岩的埋藏岩溶缝洞比较发育, 主要为地层水所充填; 塔中 44 塔中 24 塔中 26 井区的第三期埋藏岩溶缝洞主要为轻质原油和天然气充填。

表 3 塔中地区奥陶系碳酸盐岩埋藏岩溶作用特征表

Table 3 Characteristics of buried corrosion of Ordovician carbonates in the Tazhong area

埋藏岩溶期次	第一期	第二期	第三期
发育时间	晚加里东期至早海西期	晚海西至印支期	燕山期至喜山期
储集空间类型	晶间溶孔, 粒间溶孔, 溶扩缝, 溶洞	晶间溶孔, 非组构溶孔, 小型溶蚀孔洞, 溶缝和溶洞	溶扩缝, 串珠状溶孔和小型溶洞, 晶间溶孔
充填情况	黑色沥青	原油, 萤石, 方解石, 石英, 石膏, 天青石	轻质原油, 天然气, 地层水, 方解石
主要分布区	塔中 I 号和 II 号构造带	塔中 I 号构造带东侧	塔中 I 号构造带, 中 I、中 II、中 III 井区
评价	差	中等—好	好

## 6 结论

(1) 古岩溶作用是塔里木盆地奥陶系海相碳酸盐岩储层形成的关键要素, 主要包括同生岩溶、风化壳岩溶、埋藏岩溶三种不同的岩溶类型。

(2) 同生岩溶作用控制早期碳酸盐岩储层的形成与分布, 储集空间类型以大气淡水选择性溶蚀形成的粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔等为主, 其储层一般呈透镜体沿台地边缘高能相带断续分布。

(3) 风化壳岩溶作用是奥陶系碳酸盐岩储层形成的关键作用, 它不仅为原来致密的碳酸盐岩提供了数量不等的有效储集空间, 并且使现今奥陶系碳酸盐岩储层主要分布于风化壳岩溶发育范围与发育深度的框架内。

(4) 埋藏岩溶作用一般沿原有的孔缝系统进行, 是碳酸盐岩储层优化改造的关键因素之一。

## 参考文献 (References)

- 王大纯, 张人权, 等. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 1986. 105-115 [Wang Dachun, Zhang Renqian, et al. The Basis of Hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House, 1986. 105-115]
- 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1997. 183-204 [Jia Chengzao. The Tectonic Features and Petroleum in the Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 183-204]
- 顾家裕, 朱筱敏, 贾进华, 等. 塔里木盆地沉积与储层. 北京: 石油工业出版社, 2003. 124-146 [Gu Jiayu, Zhu Xiaomin, Jia Jinhua, et al. The Sedimentation and Reservoir of Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. 124-146]
- 陈景山, 王振宇, 代宗仰, 等. 塔中地区上奥陶统碳酸盐岩台地镶边体系分析. 古地理论, 1999, 1(2): 8-17 [Chen Jingshan, Wang Zhenyu, Dai Zongyang, et al. Study of the Middle and Upper Ordovician rimmed carbonate platform system in the Tazhong area, Tarim Basin. Journal of Paleogeography, 1999, 1(2): 8-17]
- James N P, Choquette P W. Paleokast. New York: Springer-Verlag, 1988
- 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. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 202-207 [Yan Xiangbin, Li Tiejun, Zhang Tao, et al. Differences in the formation conditions of Ordovician rock dissolution reservoirs in the Tazhong and Tazhong areas. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 202-207]

- bin, Li Tiejun, Zhang Tao, *et al.* Difference between formation conditions of Ordovician karstic reservoirs in Tazhong and Tahe areas. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 202-207]
- 7 鲁新便, 高博禹, 陈妹媚. 塔河油田下奥陶统碳酸盐岩古岩溶储层研究. *矿物岩石*, 2003, 23(1): 87-91 [Lu Xinbian, Gao Boyu, Chen Shumei. Study on characteristics of paleokarst reservoir in Lower Ordovician carbonate of Tahe Oil Field. *Journal of Mineral Petrology*, 2003, 23(1): 87-91]
  - 8 钱一雄, 蔡立国, 李国蓉, 等. 碳酸盐岩溶作用的元素地球化学表征. *沉积学报*, 2002, 20(4): 70-75 [Qian Yixiong, Cai Liguo, Li Guorong, *et al.* Element geochemical implications for carbonate karstification interpretation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 70-75]
  - 9 钱一雄, 邹远荣, 陈强路, 等. 塔里木盆地塔中西北部多期多成因岩溶作用地质-地球化学表征. *沉积学报*, 2005, 23(4): 596-603 [Qian Yixiong, Zou Yuanrong, Chen Qianglu, *et al.* Geological and geochemical implications for multi-period and origin of carbonate karstification in the northwest Tazhong. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 596-603]
  - 10 顾家裕, 周兴熙. 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, 2001. 67-103 [Gu Jiayu, Zhou Xingxi. Buried Hill Karsts and Distribution Pattern of Oil and Gas in Lunnan, Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. 67-103]
  - 11 张兴阳, 顾家裕, 罗平, 等. 塔里木盆地奥陶系萤石成因及其油气地质意义. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2220-2228 [Zhang Xinyang, Gu Jiayu, Luo Ping, *et al.* Genesis of the fluorite in the Ordovician and its significance to the petroleum geology of Tarim basin. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2220-2228]
  - 12 朱东亚, 胡文宣, 宋玉才, 等. 塔里木盆地塔中45井油藏萤石化特征及其对储层的影响. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(3): 205-215 [Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Song Yucan, *et al.* Fluoritization in Tazhong 45 reservoir characteristics and its effect on the reservoir bed. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(3): 205-215]
  - 13 王嗣敏, 金之钧, 解启来. 塔里木盆地塔中45井区碳酸盐岩储层的深部流体改造作用. *地质论评*, 2004, 50(5): 543-547 [Wang Simin, Jin Zhijun, Xie Qilai. Transforming effect of deep fluids on carbonate reservoirs in the Well TZ45 region. *Geological Review*, 2004, 50(5): 543-547]

## Paleokarstification and Reservoir Distribution of Ordovician Carbonates in Tarim Basin

CHEN Jing-shan<sup>1</sup> LI Zhong<sup>2</sup> WANG Zhen-yu<sup>1</sup> TANG Xiu-cheng<sup>1</sup> LI Ling<sup>1</sup> MA Qing<sup>1</sup>

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract** Three types of paleokarstification, including syndepositional, weathering-crust and buried ones, are distinguished in Ordovician marine carbonate within Tarim basin. It is synthetically considered that the paleokarstification is a key factor of the formation of Ordovician carbonate reservoirs. Intragranular and intergranular solution spaces and moldic pores formed by syndepositional meteoric fresh-water selective dissolution, are provided matrix porosity for the carbonate reservoir. These reservoirs are controlled by meteoric diagenetic lens in the distribution and are generally developed along the high-energy platform margin facies in the shape of discontinuous lenticle. The carbonate reservoirs related to weathering karstification are regionally distributed within ancient buried hills of exposed Ordovician carbonate, and are vertically limited within 200 meters below erosional unconformity interface of Ordovician carbonate. Based on vertical and lateral development characteristics of weathering karstification, it is directed that karst-type reservoirs are largely distributed within cap rock of surface karst, vertical vadose and horizontal phreatic zones in the vertical direction, and generally developed at karst upland margin, karst slope, upstream karst valley and karst hammock in the region. Burial karstification is generally related to the dissolution of carbonate minerals resulted from organic acid by which the thermal evolution of organic matter accompanied, is commonly proceeded along previous pore and fissure system, is characterized by more stages and various scales, and is a key factor for the optimized reworking of carbonate reservoir.

**Key words** syndepositional karstification, weathering karstification, buried karstification, reservoir distribution, carbonate, Ordovician, Tarim Basin