

文章编号: 0253-2697(2012)S2-135-10

# 塔北南缘奥陶系层序地层对岩溶储层的控制作用

斯春松<sup>1</sup> 乔占峰<sup>2,3</sup> 沈安江<sup>2,3</sup> 张丽娟<sup>4</sup> 李国蓉<sup>5</sup> 倪新锋<sup>2,3</sup>

(1. 中国地质大学资源学院 湖北武汉 430074; 2. 中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023;

3. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室 浙江杭州 310023;

4. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000; 5. 成都理工大学能源学院 四川成都 610059)

**摘要:**通过对塔北南缘奥陶系层序地层研究与地质背景、岩石力学性质和水文学进行综合分析,探讨了内幕区岩溶储层的形成和发育分布规律。认识到研究区碳酸盐岩岩溶储层类型多样、特征复杂,但是发育分布上具有较为明显的纵向成层性和平面分带性,并沿断裂富集的规律。同时,认识到层序地层在演化过程中通过对沉积和地层结构等方面的控制,影响了构成岩溶流体渗滤通道和溶蚀场所的孔隙和裂缝带的发育,间接地控制了岩溶储层的形成和发育分布。其主要表现在以下 3 个方面:①层序地层控制的礁滩体构成了岩溶储层的物质基础;②层序演化对地层结构的控制决定裂缝发育密度;③二级层序界面为大气水或埋藏流体运移的指向区,有利后期岩溶作用改造。这些认识将规律性强的层序地层和非均质性强的岩溶储层建立了关系,对非潜山型岩溶缝洞储层的勘探开发具有重要意义。

**关键词:**层序地层;碳酸盐岩;岩溶储层;塔北南缘;奥陶系

中图分类号:TE112.115

文献标识码:A

## The controlling effect of sequence stratigraphy on karst reservoirs of Ordovician in the south margin of northern Tarim Basin

SI Chunsong<sup>1</sup> QIAO Zhanfeng<sup>2,3</sup> SHEN Anjiang<sup>2,3</sup> ZHANG Lijuan<sup>4</sup> LI Guorong<sup>5</sup> NI Xinfeng<sup>2,3</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. PetroChina

Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China; 3. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC,

Hangzhou 310023, China; 4. Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Tarim Oilfield Company,

Kuerle 841000, China; 5. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Based on the study of sequence stratigraphy with integrated analyses of the geologic setting, rock mechanics properties and hydrology, this study investigated the formation and development patterns of the Ordovician internal karst reservoirs in the south margin of northern Tarim Basin. The Ordovician carbonate karst reservoirs were found highly diverse and complex. These carbonate karst reservoirs were characterized by obvious vertical stratification and plane zonation, showing enrichment along the faults. Due to its effect on the sedimentation and stratigraphic structure, the sequence stratigraphy influenced the development of pore and fracture systems which constituted the percolation passages of karst fluid and the dissolution space. It indirectly controlled the formation and development of karst reservoirs from the following aspects: (1) The material basis of karst reservoirs was formed by reef-shoal bodies controlled by sequence stratigraphy; (2) The density of fracture development was determined by the controlling effect of sequence evolution on stratigraphic structure; and (3) The second-order sequence boundary, which was the favorable migration oriented region of meteoric water or burial fluid, favored the late karstification. These established a relationship between the sequence stratigraphy with specific regularity and the karst reservoirs with strong heterogeneity, with implications for further exploration and development of un-buried-hill karst-vuggy reservoirs.

**Key words:** sequence stratigraphy; carbonate rock; karst reservoir; south margin of northern Tarim Basin; Ordovician

层序地层学被很多学者认为是沉积地质学这一广阔领域的理论性变革之一<sup>[1]</sup>,自其提出以来,在碳酸盐岩沉积和储层等研究方面起到了重要的作用。特别是 Moore 出版的“层序格架内碳酸盐岩储层孔隙演化和

成岩作用”一书,系统地阐述了层序地层对碳酸盐岩成岩和孔隙演化的控制作用<sup>[2]</sup>。然而,前人的研究中重点突出了层序地层对准生期成岩作用的控制作用<sup>[3-5]</sup>,更适合于沉积型礁滩和白云岩储层,对岩溶储

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05004-002)资助。

第一作者及通讯作者:斯春松,男,1968年2月生,1990年毕业于中国地质大学(武汉),现为中国地质大学(武汉)石油与天然气工程专业博士研究生,主要从事油气沉积储层方面的研究工作。Email: sics\_hz@petrochina.com.cn

层控制作用的研究则主要局限于与不同级别界面暴露相关的溶蚀作用<sup>[6-8]</sup>。笔者在对塔北南缘中奥陶统岩溶缝洞型储层的研究过程中发现,层序地层对于成岩后期通常被认为是稳定矿物相非组构选择性的岩溶作用也有重要的控制作用。这一认识对于总结岩溶储层成因特征及发育规律具有重要启示,对岩溶储层进一步的勘探开发将具有重要指导意义。

### 1 地质背景

塔里木盆地塔北隆起奥陶系碳酸盐岩地层根据上奥陶统桑塔木组剥蚀线划分为潜山区和内幕区(图1),后者主要分布在塔北南缘。塔北南缘内幕区是塔北隆起轮南低凸起的延伸,向南进入满加尔凹陷,向东进入草湖凹陷,处于大型构造斜坡背景之下。

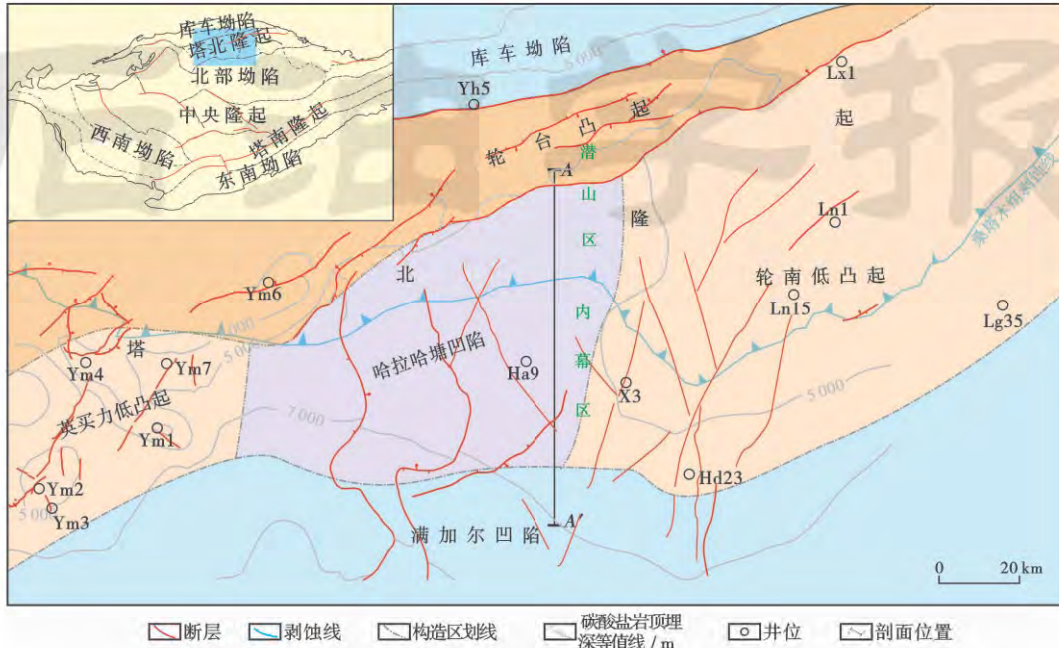


图1 塔北南缘内幕区构造位置

Fig. 1 The location of innerstrata area in south margin of northern Tarim Basin

潜山区志留系或石炭系自北向南依次覆盖中奥陶统鹰山组和一间房组、上奥陶统吐木休克组和良里塔格组,构成大型角度不整合面;内幕区奥陶系内部地层

序列完整,其中一间房组顶发育平行不整合面,良里塔格组顶为平行一角度不整合面,上奥陶统桑塔木组顶与志留系呈角度不整合接触(图2)。

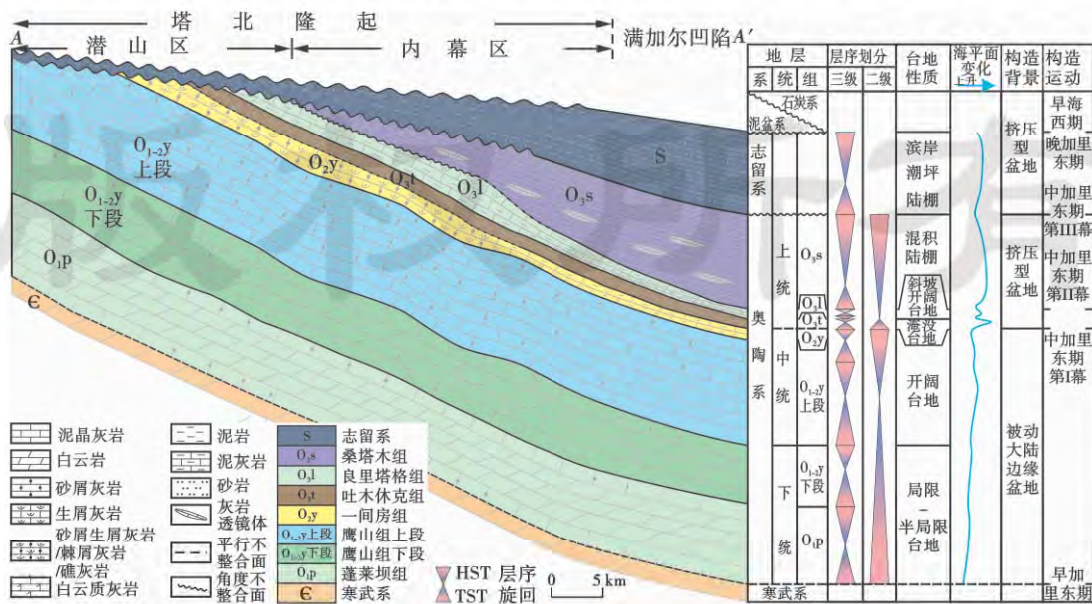


图2 塔北南缘奥陶系层序地层结构(剖面位置见图1)

Fig. 2 Sequence stratigraphy framework of Ordovician in south margin of northern Tarim Basin (Location of A-A' shown in Fig. 1)

塔里木盆地在早奥陶世期间以区域伸展背景下的克拉通内坳陷碳酸盐台地沉积为特征<sup>[9]</sup>。在此期间,塔北和塔中隆起尚未形成,台地未分化。

早奥陶世末,塔里木地区发生区域性挤压构造运动,塔北隆起形成锥形<sup>[9-10]</sup>。由于该次构造运动力源于塔里木板块南部与南昆仑板块的碰撞<sup>[9-11]</sup>,塔北隆起距板块碰撞地较远,受影响相对较弱,显示出向北缓缓抬升的缓坡形态,中奥陶统发育保存较好。

晚奥陶世初,海平面大幅上升<sup>[9]</sup>,沉积了相对深水的吐木休克组泥灰岩或灰质泥岩地层。良里塔格组沉积末期发生又一次地壳抬升,内幕区北侧良里塔格组剥蚀严重,局部缺失,与上覆桑塔木组之间构成平行一角度不整合接触,桑塔木组上超于该不整合面上。

晚奥陶世末,受中加里东第 III 幕构造运动影响,塔北隆起持续抬升,内幕区北部中上奥陶统遭受剥蚀(图 2),后被志留系直接覆盖。

志留纪—泥盆纪,盆地一直处于挤压环境。晚泥盆世末—早石炭世初,海西早期构造运动导致塔里木盆地及周缘地区石炭系与泥盆系及更老地层间区域不整合广泛发育。虽然剥蚀作用未直接影响内幕区奥陶系地层,但期间大型走滑断裂及伴生构造的发育对其改造明显。

二叠纪塔里木盆地发生大规模火山活动,热液活动频繁<sup>[9]</sup>。塔北地区奥陶系钻井中常见辉绿岩,即主要形成于此期间,总体上自西部 Ym1—Ym2 井区向东影响程度逐渐减弱。

其后,塔北地区在多期构造运动下受到不同构造应力的改造,断裂和裂缝大量发育。

## 2 层序地层特征

### 2.1 二级层序特征

多位学者对奥陶系或奥陶系部分地层作了二级旋回或二级层序划分<sup>[7,11-12]</sup>。尽管各自划分的称谓有异,但从实质而论,都表明中下奥陶统构成一个二级层序,上奥陶统构成一个二级层序(图 2)。

#### 2.1.1 层序界面特征

中下奥陶统构成的二级层序底界面为早加里东期构造运动形成的平行不整合面,柯坪露头剖面上表现为上寒武统下丘里塔格群纯白云岩地层顶部发育的侵蚀凹凸面,这一界面又是一个海侵上超面,地震剖面上可见上覆地层上超于该界面上。

该二级层序顶界面为中加里东 I 幕运动形成的平行不整合面。塔里木广大隆起区,与该界面有关的剥蚀作用特征清楚,塔中隆起区(主体区)缺失 8~12 个

牙形石化石带,缺失整个中奥陶统<sup>[13]</sup>;笔者在对塔北南缘一间房组研究过程中发现,其顶面下近垂直溶缝充填泥质和方解石,暴露溶蚀特征明显<sup>[14]</sup>;在盆地相区或台间盆地过渡相区,该界面表现为一连续的整合面,如柯坪剖面。

上奥陶统构成的二级层序顶界面为中加里东 III 幕运动形成的角度不整合面。塔北地区桑塔木组顶部削截特征明显,志留系上超其上。

#### 2.1.2 层序结构特征

由于研究区位于古隆起区,两个二级层序分别由海侵体系域和高位体系域构成,未识别出低位体系域。两个二级层序的接触面是该地区由拉张转为挤压的构造转换面,导致上、下两个二级层序单元的沉积物组合面貌截然不同。

中下奥陶统二级层序为克拉通碳酸盐台地沉积,由下而上包括蓬莱坝组、鹰山组和一间房组,为一个不对称旋回,以上升半旋回占明显优势。

该二级层序海侵体系域由蓬莱坝组和鹰山组下段及鹰山组上段下部构成,厚约 1000 m。其中蓬莱坝组和鹰山组下段各构成一个三级层序,蓬莱坝组以白云岩为主夹少量灰岩,中下部藻叠层石发育;鹰山组下段以半局限—开阔台地相的白云岩和灰岩间互为主要特点。鹰山组上段单独构成一个三级层序,为开阔台地相沉积,其下部处于该二级层序海侵体系域,为颗粒灰岩与泥晶灰岩互层,白云石主要呈零散或斑状分布在泥晶灰岩当中<sup>[15]</sup>。总体上,自下而上地层中白云石含量逐渐减少,沉积环境由局限—半局限台地向开阔台地演化,反映了相对海平面的总体上升和海水性质的变化<sup>[15]</sup>。

高位体系域由中奥陶统鹰山组上段上部 and 一间房组构成,厚约 150~200 m。高位早期为鹰山组上段上部沉积,以泥晶灰岩为主,偶见其中白云石零星分布,测井曲线上表现为高阻段,横向可对比性强。一间房组构成一个三级层序,在内幕区为以亮晶砂屑棘屑灰岩或礁灰岩为主的台内—台缘礁滩相沉积,无白云石发育,向南靠近满加尔凹陷区 Ym3 井一带开始发生相变,生屑灰岩中泥晶含量大幅增加,反映中加里东构造运动在此时已开始导致塔里木盆地分异。

上奥陶统二级层序转为边缘挠曲盆地类型,也是一个不对称旋回,但以下降半旋回占明显优势。受全球海平面大幅上升和构造挤压掀斜作用的影响,晚奥陶世初期塔北地区表现为快速的海平面上升,碳酸盐台地被“淹没”<sup>[16]</sup>,从此晚奥陶世长期保持以富泥碳酸盐沉积为主,如泥灰岩或灰质泥岩等。构造活动间歇

期,良里塔格组发育多期台缘礁滩,表现为进积型,以轮古地区为典型;哈拉哈塘地区良里塔格组上部剥蚀强烈,主要残留斜坡沉积物,但台缘地层加厚形态在地震剖面仍可识别;而 Ym1—Ym2 井区位于斜坡一盆地相,以泥岩或钙质泥岩为主要沉积。

## 2.2 相对海平面变化

相对海平面变化是构造沉降和绝对海平面变化的综合表现。绝对海平面变化具有全球性,受控于冰期和间冰期转换,寒武纪—奥陶纪为全球淹没期,绝对海平面表现为总体上升<sup>[9,17-19]</sup>。受控于局部构造运动,塔里木盆地二级相对海平面变化具有一定程度的地区性,奥陶纪经历了2个大的海侵和海退旋回<sup>[9]</sup>。

早奥陶世塔里木盆地构造沉降稳定,相对海平面变化受控于全球背景的海平面上升,以上升为主旋律,虽然三级海平面变化存在波动,但总体上相对海平面下降所占比例较小。

中奥陶世中加里东期构造运动开始对塔里木盆地施加影响,南部昆仑洋的关闭导致塔中隆起大幅形成,塔北隆起雏形显现,其间满加尔凹陷发育。因此某种程度上,一间房组沉积时期塔北隆起具有前陆隆起的性质,构造抬升导致相对海平面下降,构成二级层序海退期,有别于全球海平面变化。通过区内一间房组岩性结构和岩心薄片观察可知,一间房组顶部泥质含量明显增加,海绿石发育,反映中奥陶世末期相对海平面可能已开始继续上升。

晚奥陶世早期海平面经历快速上升后,受静水海平面变化和构造活动导致相对海平面多次升降,在良里塔格组和桑塔木组沉积末期分别发生较大规模暴露,但总体上长期保持较深水环境。

## 3 岩溶储层特征

### 3.1 岩溶储层类型及特征

塔北南缘内幕区中奥陶统钻井过程中漏失和放空较为频繁,岩溶储层特征明显。通过岩心、常规测井、成像测井及生产资料的综合分析,认识到该区岩溶储层类型非常复杂,包括孔洞型、裂缝型、裂缝-孔洞型和洞穴型储层4类,进一步可识别出6种储集空间组合类型(图3)。

孔洞型储层的主要储集空间是孔隙和孔洞,可发育少量裂缝,岩心上表现为斑状油浸,薄片见孔隙发育,成像测井上表现为暗色斑点呈顺层状发育,宏观上呈透镜状[图3(a)]。该类型为礁滩体受同生岩溶改造后,粒内溶孔和粒间溶孔发育。埋藏期,岩溶流体可进入先前形成的孔隙进行扩溶,从而形成更大的孔洞,但储层宏观形态未变。

裂缝型储层主要由构造作用形成的裂缝体构成[图3(b)],可发育少量孔洞。岩心和成像测井上表现为未完全充填裂缝和残留的少量孔洞。后期也可有流体进入而发生扩溶。裂缝既是渗滤通道,也是储集空间,要求裂缝体具有一定规模,才具生产意义。

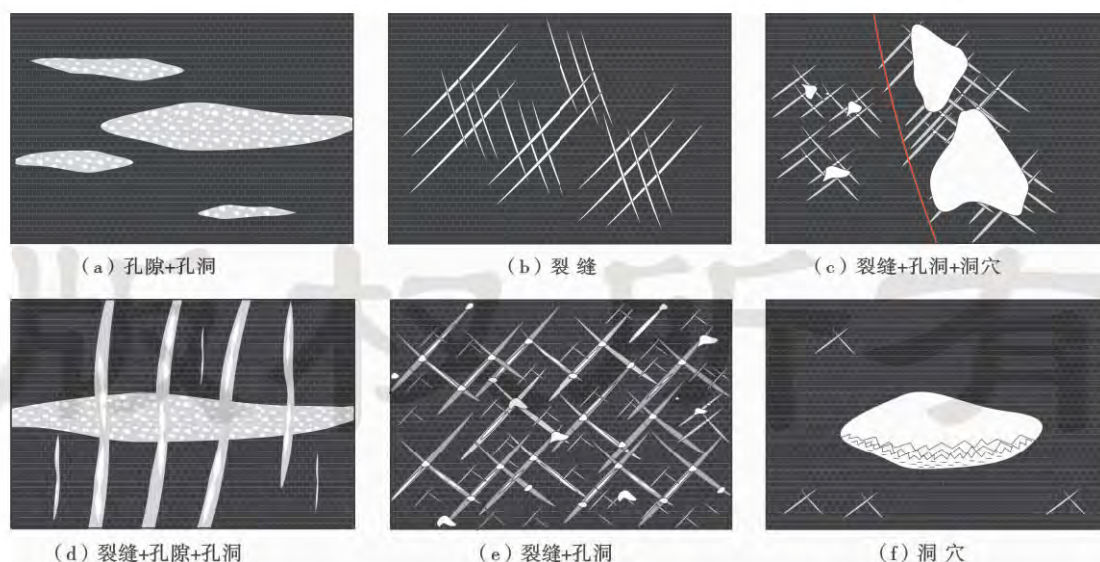


图3 塔北南缘中奥陶统岩溶储层孔-缝-洞组合类型模式

Fig. 3 Models of pore-fracture-cavern combination of Middle Ordovician karst reservoir in south margin of northern Tarim Basin

裂缝-孔洞型储层为裂缝和孔洞的有机组合体,根据储集空间类型及组合特征,存在2种成因和表现形式:①裂缝切割孔洞层[图3(d)],裂缝充填物中也可

以发育溶蚀孔洞,成像测井上表现为暗色正弦曲线切割暗色斑点发育层,主要是在先前孔洞型储层基础上裂缝叠加改造而成的储层类型;②沿裂缝发育大量溶

蚀孔洞[图 3(e)],成像测井上表现为暗色正弦曲线被不规则溶蚀扩大,为晚期流体进入裂缝型储层大规模溶蚀扩大形成的储层类型。

洞穴型储层取心困难,但可通过钻井放空、漏失和生产酸压测试等方面的资料进行识别,进一步可划分为裂缝+孔洞+洞穴型[图 3(e)]和洞穴型[图 3(f)]。前者除洞穴外,裂缝和孔洞也具有一定程度的储集能力,在钻井过程中会发生不同程度的漏失和放空,试油求产显示产能较好,表现为裂缝、孔洞、洞穴相互连通;后者以孤立洞穴为主要储集空间,成像测井上为暗色段,裂缝不发育,酸压过程中泵压上升迅速,井周储层不发育。

各项资料综合显示,塔北南缘内幕区岩溶储层中裂缝(溶缝)是否发育及发育规模对油气产能至关重要,而孔洞(与洞穴)的发育程度则控制着稳产效果,生产实践也显示各类储层中以裂缝-孔洞型储层和洞穴型储层储集性能和生产效果最好,因此可以说孔隙和裂缝的有机结合是岩溶储层形成以及油气生产达到高产稳产效果的前提。

### 3.2 岩溶储层发育规律

塔北南缘中奥陶统岩溶缝洞型储层虽类型复杂,但发育分布具有较强的规律性(图 4)。

纵向上,储层发育具有明显的成层性,集中发育于二级层序高位体系域上部,即一间房组顶面不整合面之下 100 m 范围内的碳酸盐岩地层中,在构造变形强烈及走滑断裂影响地区,发育深度可达 300 m。局部受断裂和裂缝发育的影响,岩溶储层可向上突破二级层序界面,发育在吐木休克组内。

平面上,自潜山区向内幕区方向,岩溶储层发育程度逐渐减弱,沿断裂富集。储层类型由潜山区洞穴型和裂缝-孔洞型共同发育为主,向内幕区储层类型逐渐变单一,裂缝型、孔洞型或洞穴型均有发育。

储层发育程度与构造变形程度明显相关,Ym2 井区和哈拉哈塘地区形成了明显的对比,Ym2 井区为典型的高陡构造,走滑断裂发育,构造变形强烈,虽面积小,但是储层富集程度非常高;而哈拉哈塘地区总体较为平缓,构造变形相对较弱,储层虽发育,但不够富集,沿断裂发育的特征明显。

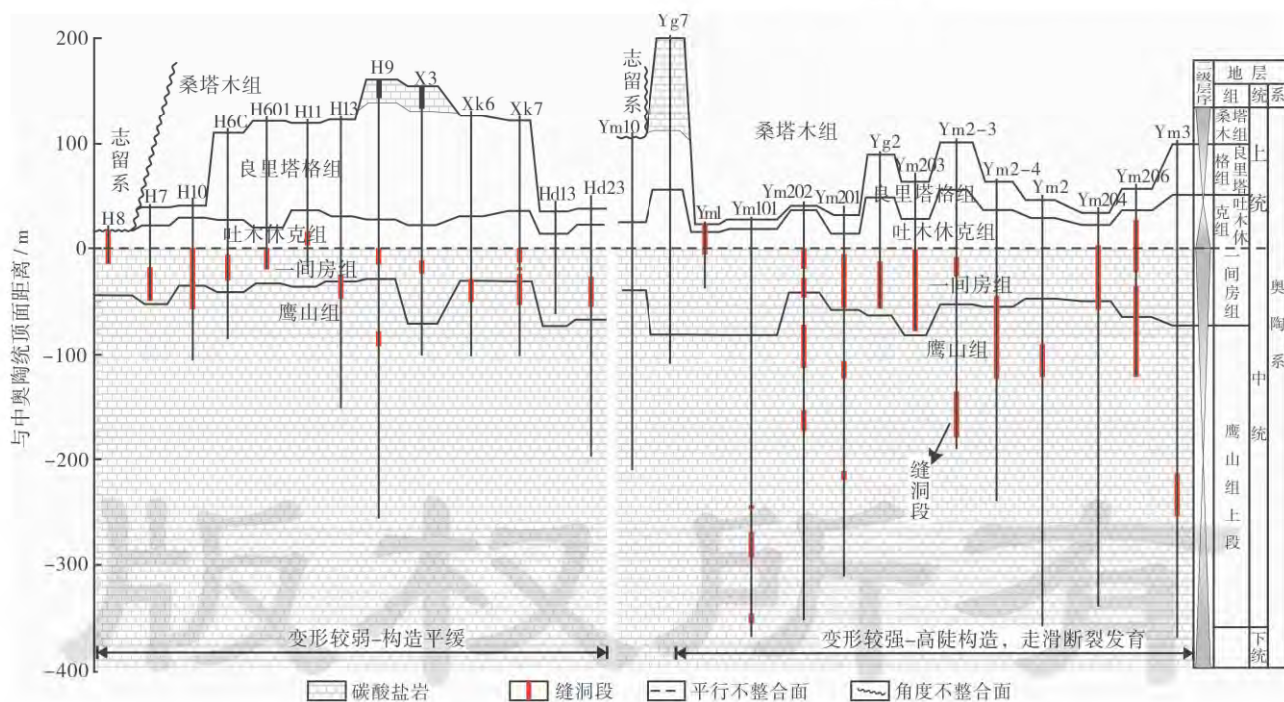


图 4 塔北南缘中奥陶统岩溶储层发育分布

Fig. 4 The development and distribution of Middle Ordovician karst reservoirs in south margin of northern Tarim Basin

## 4 层序地层对岩溶储层的控制作用

塔北南缘中奥陶统顶部虽存在暴露,但是时间短,不足以形成大规模岩溶缝洞型储层,而且由于中奥陶世该地区构造活动相对较弱,断裂和裂缝欠发育,与现今岩溶缝洞储层的发育特征不相符,因此塔北南缘中

奥陶统岩溶储层应形成于埋藏期。

埋藏期岩溶作用的发生同样需要满足岩石可溶、岩石具透水性、流体具溶蚀性及流体可流动 4 个条件,地质背景的复杂性导致由这些因素决定的岩溶储层特征和分布也非常复杂。但是通过进一步分析发现,岩溶作用的各影响因素在层序格架下存在一

定联系,层序地层对岩溶储层形成和发育具有重要控制作用。

### 4.1 层序地层控制的礁滩体构成岩溶储层物质基础

二级旋回高位体系域期间,三级海平面以下降为主旋律<sup>[7]</sup>。特别是一间房组沉积于二级旋回高位体系域晚期,同时受中加里东I幕构造运动影响,海平面较低,能量较高,有利于礁滩体的发育,致使整个塔北南缘和盆地西北部的巴楚地区一间房组均以生物礁和棘屑滩为主要组成部分。储层解剖及对比揭示,塔北南缘岩溶储层与礁滩体发育部位相重叠(图5),主要发育于二级层序高位体系域上部。岩心及成像测井资料揭示,一间房组三级层序高位体系域中上部和四级层序中上部溶蚀孔隙段发育,可明显识别出3个礁灰岩—颗粒灰岩的旋回,肉眼可见孔隙在旋回上部的颗粒灰岩中更为发育,受旋回控制明显,与野外露头揭示信息一致。这类孔隙横向上连通性较好,可构成晚期流体运移的重要通道,即岩石具有较好

的透水性。

相比之下,鹰山组位于二级层序海侵晚期—高位早期,海平面以总体上升为主要趋势,即使在三级层序高位体系域,海平面下降幅度也相对较小。虽然地层中颗粒灰岩所占比例也较高,但颗粒沉积后更倾向于保持在海水中,胶结作用强烈,颗粒灰岩通常非常致密。对塔北地区数百件薄片的观察过程中,未发现鹰山组颗粒灰岩中准同生期溶孔的存在。

埋藏条件下,接触面积是控制溶蚀作用的重要因素。二级层序高位体系域沉积晚期的颗粒灰岩易发育早期溶蚀微孔,透水性较好,可有效改善反应面积,有利于晚期溶蚀作用发生,形成孔洞型储层,也是后期裂缝改造形成裂缝—孔洞型储层的基础,该类储层主要发育于一间房组;而泥晶灰岩和胶结完全的颗粒灰岩太过致密,流体难以进入,很难被大规模溶蚀,除非有裂缝改造,沿裂缝发生溶蚀形成孔洞、溶缝、甚至洞穴,该类储层与裂缝发育程度密切相关。

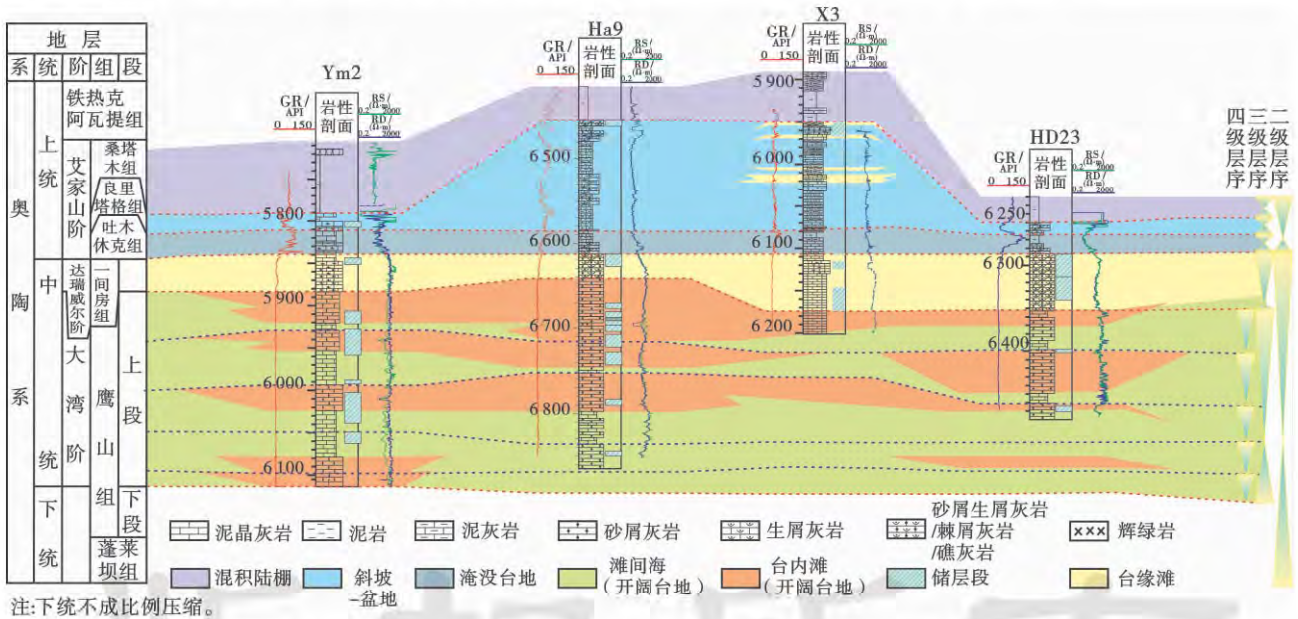


图5 塔北南缘奥陶系层序地层格架内沉积相及储层对比

Fig. 5 The correlation of sedimentary facies and reservoirs in sequence stratigraphic framework of Ordovician in south margin of northern Tarim Basin

### 4.2 层序演化对地层结构的控制影响断裂和裂缝密度

塔里木地区中奥陶世由拉张向挤压环境的转变,导致奥陶系两个二级层序具有完全不同的地层面貌(图2),中下奥陶统以纯碳酸盐岩地层为主,上奥陶统则为一套富泥地层,二者岩石强度差异非常明显。晚期构造变动过程中,受岩石力学性质的控制,与上覆泥岩地层接触的碳酸盐岩地层上部将是主要的应力集中区,断裂和裂缝更容易大规模发育。

塔北南缘虽处于塔北隆起围斜区,但是自中加里东运动开始到晚海西期,受到了多期不同方向持续的应力作用。在轮南古隆起和英买力构造的形成与晚期再改造过程中,塔北南缘也发生了不同程度的变形, NNE-NW向“X”型走滑断裂发育(图1),伴生形成了以 Ym1—Ym2 井区为代表的走滑断裂相关穹隆状高陡构造,构造隆起和走滑断裂双重作用导致中奥陶统碳酸盐岩地层中断裂和裂缝大规模发育<sup>[14]</sup>。哈拉哈

塘地区和哈德地区构造相对较平缓,主体表现为由北向南的单斜构造,但是从井剖面和地震资料分析可知,断裂和裂缝也较为发育,地震储层预测成果显示,90%以上的溶蚀孔洞及洞穴均与断裂及裂缝有关,并通过断裂及裂缝相连通。另外,勘探实践证实,地震剖面上的“串珠”为岩溶缝洞储层的响应,其平面分布具有明显的规律性,多集中发育于断裂附近,且多见数个串珠相互靠近呈线状排列,笔者在对哈拉哈塘地区研究过程中,首次将多于2个的相邻“串珠”用短线相连,发现短线走向与断裂走向非常吻合<sup>[20]</sup>,证明串珠的发育

与断裂关系非常密切,这更反映了断裂和裂缝对岩溶缝洞发育的控制作用。

虽然塔北南缘各地区构造变形程度不同,但总体上奥陶系“串珠”和裂缝带呈准层状集中发育于中奥陶统(图4、图6),以二级层序界面之下100m范围内最为发育,变形程度较强的区域可达300m。

以上分析可知,层序地层演化过程中,从沉积和地层结构上控制了孔隙层和裂缝体的发育规律,二者相互重叠,改善了流体的流动条件并提升了岩石表面积,构成了岩溶流体的主要运移通道和溶蚀场所。

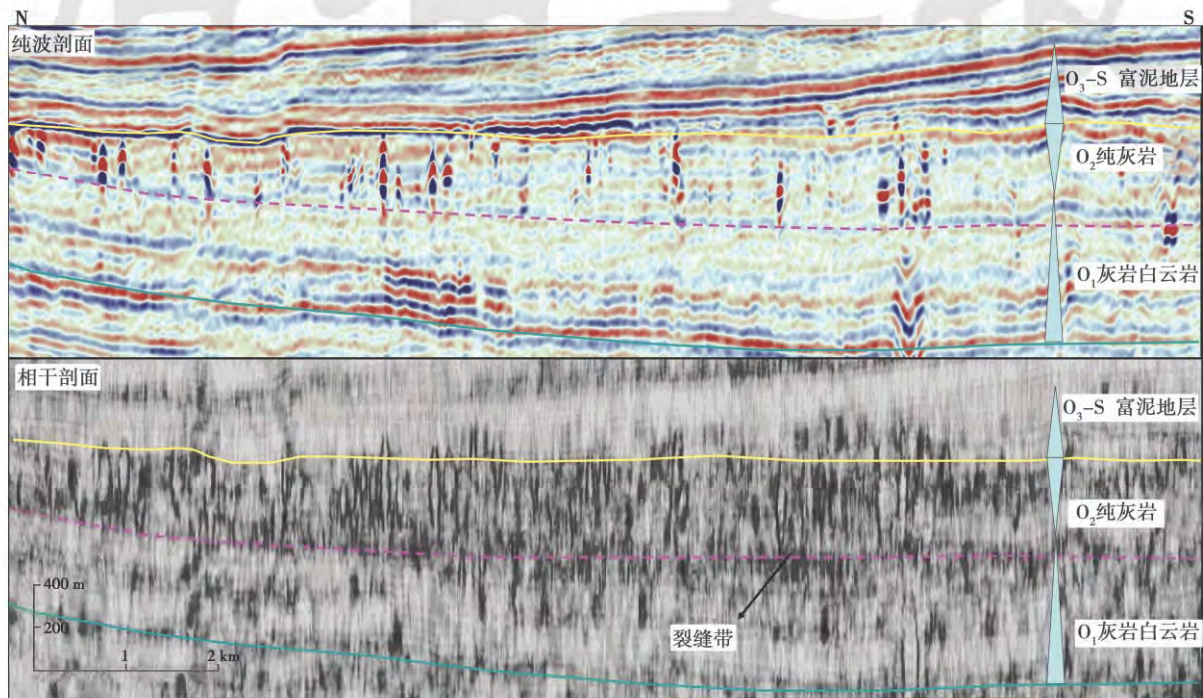


图6 塔北南缘奥陶系南北向地震剖面

Fig. 6 N-S seismic and coherence profiles of Ordovician in south margin of northern Tarim Basin

#### 4.3 二级层序界面为流体运移指向区,有利后期改造

埋藏地层流体相当复杂,包括大气水和埋藏流体等,流体通道包括断裂、裂缝带、孔隙层、缝合线和不整合面等。层序地层结构导致地层流体运动具有一定规律性,概括为下降型和上升型2种类型(图7),但二级层序界面都是流体运移的指向区。

下降型发生于特定的地质背景下,即大型古隆起围斜区,该区域由于碳酸盐岩地层上覆富泥地层未完全被剥掉,水上暴露的潜山在岩性上分割为两个区域,一是古隆起核部碳酸盐岩地层直接裸露地表(潜山区),受到大气水改造形成喀斯特地貌;二是围斜区富泥地层裸露区(内幕区),其本身不具可溶性,是水文学上的隔水层。由于隔水层的存在,影响了潜山区潜流带地下水的流线方向,地表泄水点将集中在泥岩地层的尖灭线附近,远高于正常裸露碳酸盐岩潜山的水压

平衡点位置,这种情况下潜水面并非处于完全稳定状态,潜水面之下的“缓流带”仍具有一定的水力梯度,具有向内幕区运移的趋势。塔北南缘中奥陶统经历同生溶蚀作用和构造作用的改造后,形成了由“孔隙层-裂缝体-断裂带”构成的“潜山—内幕—地表(上升泉)”的水循环通道,使得潜山区仍具水力梯度的深部缓流带流体,经过孔隙-裂缝带顺层向盆地区运移,最后经过断裂沟通向地表泄水,导致岩溶作用持续发生[图7(a)]。该模式下形成的岩溶储层具有自潜山区向内幕区发育程度逐渐减弱的趋势,同时,由于断裂重要的泄水作用,沿断裂附近也将是主要的岩溶储层发育区,与哈拉哈塘地区岩溶储层分布规律一致。

此外,在中奥陶统被富泥地层覆盖的高陡构造区(Ym1—Ym2井区),大气水沿构造高部位断裂下渗进入中奥陶统发生岩溶作用,岩溶储层同样主要发育于

二级层序界面下,为下降型流体流动的另一实例<sup>[14]</sup>。

上升型主要是指下伏地层中的埋藏流体通过断裂向上运移,或沿不整合面或地层内部通道向上倾方向运移[图7(b)]。层序界面上、下由于断裂和裂缝发育程度不同,上覆富泥地层容易构成流体的遮挡层,从而流体在层序界面之下孔、缝发育段富集并向上倾方向流动。埋藏流体类型多样,包括有机质成熟过程释放的有机酸和酸性气体,以及火山热液,其本身的酸性及其上涌过程中环境温度压力的变化,致使其对碳酸盐岩不饱和,容易发生岩溶作用,改造先期形成的孔隙和裂缝系统。前人关于有机质成熟相关流体对塔北南缘

一间房组颗粒灰岩的埋藏溶蚀作用进行了较详尽的阐述<sup>[21-22]</sup>;本次研究发现塔北南缘 RP4 井一间房组岩心裂缝中充填萤石等热液矿物,反应了热液流体经断裂运移的存在。但不论是何种流体,其运移模式及溶蚀效果和溶蚀场所均相似。

此外,二级层序界面作为流体运移指向区不单单针对岩溶流体,对于油气运移同样成立。下方油气运移类似于上升型埋藏流体运移过程,二级层序界面之下是非常有利的油气成藏区,这也是除储层发育条件优越之外,目前油气产出主要来自中奥陶统的主要原因之一。

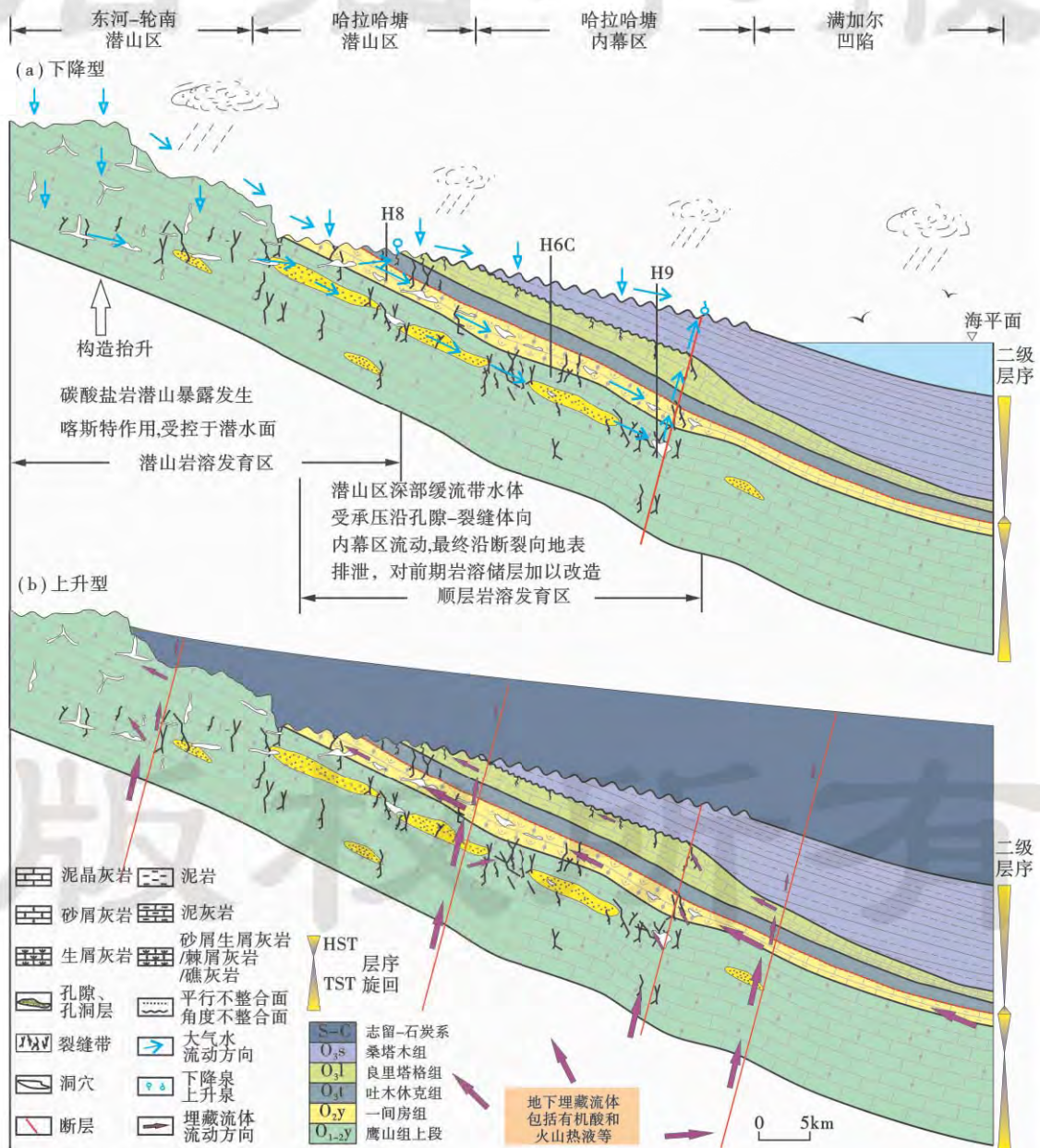


图7 塔北南缘流体流动及岩溶储层形成模式

Fig. 7 The model of fluids-flowing and formation of karst reservoir in south margin of northern Tarim Basin



以上分析可知,由于受到构造运动和海平面变化综合影响,层序地层演化过程中,沉积物性质变化较大。碳酸盐岩沉积物在经历成岩作用改造后,虽然矿物相变稳定,性质变均一,岩溶作用以非组构选择性为主,导致岩溶储层非均质性非常强烈,但是宏观上的地层结构、力学性质和流体通道等方面的特性仍与层序地层演化相关,这些因素决定着后期岩溶改造的难易程度和主要场所。因此,层序地层间接地对岩溶储层的形成和发育起到了重要作用。通过层序地层的分析,对岩溶储层的形成和发育分布的研究更能从非均质性中找出规律性。

## 5 结 论

岩溶储层虽常给人以非均质性非常强烈、发育规律性弱等印象,但是通过将塔北南缘内幕区岩溶储层与层序地层进行结合分析,认识到层序地层演化对于内幕岩溶储层形成和发育分布具有重要的控制作用,表现在 3 个方面:①层序地层控制的礁滩体构成了岩溶储层的物质基础;②层序演化对地层结构的控制决定裂缝发育密度;③二级层序界面为流体运移指向区,有利后期改造。

塔北南缘奥陶系层序地层的演化特征决定了该区岩溶储层虽然类型多样、特征复杂,但是发育分布具有较强的规律性,主要分布在二级层序界面以下 100~300 m 范围内的中奥陶统,发育深度受控于构造变形程度,平面上沿断裂富集。

岩溶储层的勘探开发过程中,除了解决其非均质性,还应该重视受层序地层控制下的规律性,这将有助于对非潜山型岩溶储层的进一步勘探。

## 参 考 文 献

- [1] Miall A D. Whither stratigraphy? [J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 100 (1/4): 5-20.
- [2] Moore C H. 碳酸盐岩储层——层序地层格架中的成岩作用和孔隙演化[M]. 沈安江, 潘文庆, 罗宪婴, 译. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1-393.  
Moore C H. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Translated by Shen Anjiang, Pan Wenqing, Luo Xianying. Beijing: Petroleum Industrial Press, 2008: 1-393.
- [3] 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.  
Liu Zhongbao, Yu Bingsong, Li Tingyan, et al. Sequence development controls on syngensis karst of the Middle-Upper Ordovician carbonate in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 103-109.
- [4] 马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等. 四川盆地东北部飞仙关组层序地层与储层分布[J]. *矿物岩石*, 2005, 25(4): 73-79.  
Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Guo Tonglou, et al. Sequence stratigraphy and reservoir distribution of Feixianguan Formation in northeastern Sichuan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(4): 73-79.
- [5] 林小兵, 李国忠, 田景春, 等. 黔南石炭系层序地层格架中碳酸盐岩成岩作用研究[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2007, 34(3): 267-272.  
Lin Xiaobing, Li Guozhong, Tian Jingchun, et al. Study on diagenesis of the carbonate rocks in the Carboniferous sequence stratigraphic framework of south Guizhou[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2007, 34(3): 267-272.
- [6] 于炳松, 樊太亮, 黄文辉, 等. 层序地层格架中岩溶储层发育的预测模型[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 41-45.  
Yu Bingsong, Fan Tailiang, Huang Wenhui, et al. Predictive model for karst reservoirs in sequence stratigraphic framework [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 41-45.
- [7] 李国蓉, 王鑫, 周心怀, 等. 碳酸盐岩层序地层储层预测——十万大山地区的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(3): 413-421.  
Li Guorong, Wang Xin, Zhou Xinhui, et al. Carbonate reservoirs prediction with sequence stratigraphy: application in Shiwandashan area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(3): 413-421.
- [8] 乔占峰, 李国蓉, 李骥, 等. 泸州古隆起地区嘉陵江组层序特征及其对碳酸盐岩储层的控制[J]. *沉积学报*, 2008, 26(1): 92-99, 110.  
Qiao Zhanfeng, Li Guorong, Li Tao, et al. Sequence-stratigraphic features and their controls on carbonate reservoirs for the Triassic Jialingjiang Formation of the Luzhou paleohigh in Sichuan basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(1): 92-99, 110.
- [9] 何登发, 周新源, 张朝军, 等. 塔里木地区奥陶纪原型盆地类型及其演化[J]. *科学通报*, 2007, 52(S1): 126-135.  
He Dengfa, Zhou Xinyuan, Zhang Chaojun, et al. Tectonic types and evolution of Ordovician proto-type basins in the Tarim region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(S1): 164-177.
- [10] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-438.  
Jia Chengzao. Tectonic characteristics of Tarim Basin in China and petroleum[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1-438.
- [11] 赵宗举, 潘文庆, 张丽娟, 等. 塔里木盆地奥陶系层序地层格架[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 175-188.  
Zhao Zongju, Pan Wenqing, Zhang Lijuan, et al. Sequence stratigraphy in the Ordovician in the Tarim Basin[J]. *Geotectonica et Metalogenia*, 2009, 33(1): 175-188.
- [12] 于炳松, 陈建强, 林畅松. 塔里木地台北部寒武纪—奥陶纪层序

- 地层及其与扬子地台和华北地台的对比[J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31(1): 17-26.
- Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Lin Changsong. Sequence stratigraphy of Cambrian-Ordovician of north Tarim platform and its correlation to the Yangtz and Huabei platforms[J]. Science in China; Series D, 2001, 44(4): 373-384.
- [13] 张达景, 吕海涛, 张涛, 等. 塔河油田加里东期岩溶储层特征及分布预测[J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 511-522.
- Zhang Dajing, Lü Haitao, Zhang Tao, et al. Characteristics of Caledonian karstification reservoir in Tahe oilfield and its distribution[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 511-522.
- [14] 乔占峰, 沈安江, 邹伟宏, 等. 断裂控制的非暴露型大气水岩溶作用模式——以塔北英买 2 构造奥陶系碳酸盐岩储层为例[J]. 地质学报, 2011, 85(12): 2070-2083.
- Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Zou Weihong, et al. A fault-controlled non-exposed meteoric karstification: a case study of Ordovician carbonate reservoir at Structure YM2 in northern Tarim Basin, northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(12): 2070-2083.
- [15] 乔占峰, 沈安江, 郑剑锋, 等. 塔里木盆地奥陶统白云岩类型及成因探讨[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 21-32.
- Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. Classification and origin of the Lower Ordovician dolostone in Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 21-32.
- [16] 楼雄英, 许效松. 塔里木盆地早古生代晚期构造-沉积响应[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(3): 72-79.
- Lou Xiongying, Xu Xiaosong. Tectonic-sedimentary responses of the Tarim Basin, Xinjiang during the late early Palaeozoic[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2004, 24(3): 72-79.
- [17] Denison R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  curve [J]. Chemical Geology, 1998, 152 (3/4): 325-340.
- [18] 黄思静, 刘树根, 李国蓉, 等. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(1): 1-7.
- Huang Sijing, Liu Shugen, Li Guorong, et al. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2004, 31(1): 1-7.
- [19] Bilal U H, Stephen R S. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. Science, 2008, 322 (5898): 64-68.
- [20] 倪新锋, 杨海军, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 933-940.
- Ni Xinfeng, Yang Haijun, Shen Anjiang, et al. Characteristics of Ordovician limestone fractures in the northern Tarim Basin and their controlling effects on karst reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 933-940.
- [21] 朱东亚, 胡文瑄, 张学丰, 等. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 57-62.
- Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, et al. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 57-62.
- [22] 郑和荣, 刘春燕, 吴茂炳, 等. 塔里木盆地奥陶系颗粒石灰岩埋藏溶蚀作用[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 9-15.
- Zheng Herong, Liu Chunyan, Wu Maobing, et al. Burial dissolution of Ordovician granule limestone in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 9-15.

(收稿日期 2012-06-11 改回日期 2012-09-25 责任编辑 张怡)

版权所有