

塔里木盆地西北缘露头区中-下奥陶统碳酸盐岩层序结构、沉积演化及海平面变化

王清龙¹, 韩剑发², 李浩³, 孙彦达¹, 何海全¹, 任世君⁴

[1. 洲际油气股份有限公司 勘探开发研究院, 北京 100016; 2. 中国石油 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000; 3. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083; 4. 中国石油 青海油田分公司 采油三厂, 青海 816400]

摘要:柯坪和巴楚地区出露了较完整的中-下奥陶统碳酸盐岩沉积地层, 牙形石古生物地层对比表明柯坪水泥厂露头鹰山组与下伏蓬莱坝组呈不整合接触, 缺失 5.9 Ma 地层, 与上覆一间房组呈整合接触, 两者共沉积约 14.4 Ma 地层。综合露头、前人地化指标及盆内塔中隆起区井震资料对比分析, 将鹰山组至一间房组碳酸盐岩划分出 2 套以主要不整合面为边界的复合(二级)层序(CS1 和 CS2), 内部包含 5 套以次一级暴露面、岩相突变面为边界的三级层序(Sq1—Sq5), 可进行区域对比。通过对手标本和镜下薄片分析, 归纳出 11 种和 6 种灰岩、白云岩沉积微相类型, 它们以特定的相序组合成台缘礁滩复合体、潮坪内碎屑滩、台内浅滩-滩后、生屑滩、滩间海、云坪等 7 种微相组合, 指示了研究区由 CS1 时期干旱-半干旱局限台地潟湖、云坪沉积向 CS2 时期开阔台地内碎屑滩、生屑滩和台地边缘礁滩复合体转变及中奥陶世末期台地被淹没的过程。利用 Fischer 图解重建了露头剖面相对海平面变化趋势, 其与岩相旋回和地化指标所反应的古水深演化具有高度一致性, 并与 Haq 海平面变化曲线整体上可进行对比。海平面变化对层序结构和沉积演化起主导作用, 局部受构造和海平面变化双重因素制约, 其中, 四级海平面变化对相序组合具有明显的控制作用。

关键词:微相类型与组合; 海平面变化; 露头剖面; 沉积演化; 层序结构; 碳酸盐岩台地; 中-下奥陶统; 塔里木盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Carbonate sequence architecture, sedimentary evolution and sea level fluctuation of the Middle and Lower Ordovician on outcrops at the northwestern margin of Tarim Basin

Wang Qinglong¹, Han Jianfa², Li Hao³, Sun Yanda¹, He Haiquan¹, Ren Shijun⁴

[1. Exploration and Development Research Institute, Geo-Jade Petroleum Corporation Ltd., Beijing 100016, China; 2. Tarim Oilfield Branch Company Ltd., PetroChina, Kolar, Xinjiang 841000, China; 3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 4. No. 3 Extraction Factory, Qinghai Oil Field Company, PetroChina, Qinghai 816400, China]

Abstract: Carbonate deposits of the Middle and Lower Ordovician develops well on Kalpin and Bachu outcrops, northwestern margin of Tarim Basin. Conodont biostratigraphy shows that the unconformable contact exists between the Ying-shan Formation and its underlying Penglaiba Formation with a 5.9 Ma hiatus, while the Yingshan Formation and its overlying Yijianfang Formation are conformable with a total of 14.4 Ma deposition. Comprehensive analysis of outcrops, existing geochemical indicators, and 3-D seismic and well logging data in Tazhong uplift, indicates that the carbonate rocks of the Yingshan and Yijianfang Formations can be divided into two composite (second-order) sequences (CS1 and CS2) along the major unconformity. From within, five third-order sequences (Sq1-Sq5) are identified along sub-level exposed unconformities or lithofacies mutation boundaries, which may be used for regional correlation. Eleven and six microfacies types are recognized for limestones and dolomites respectively through observation of hand specimens and thin section, which have in turn combined into seven micro-facies associations according to specific facies sequence, namely the reef-shoal complexes at platform margin, clastic shoals within tidal flat, intra-platform shallows and back shoals, bioclast shoals, in-

收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2019-01-17。

第一作者简介: 王清龙(1988—), 男, 硕士研究生, 碳酸盐岩沉积层序研究。E-mail: qinglong.wang@geojade.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201100-03); 国家自然科学基金项目(41130422)。

ter-shoal sea and dolomite flats, indicating a transition from the arid-to-semi-arid restricted platform lagoon and dolomite flat sedimentation of the CS1 to the open intra-platform clastic shoal, bioclast shoal and reef-shoal complex at platform margin of the CS2, as well as the platform drowning in the late of Middle Ordovician. In addition, the fluctuation of relative sea level was reconstructed for the outcrop areas by means of Fischer plot. It's highly consistent with the paleo-water depth evolution demonstrated by facies cycle and geochemical indicators, and can also be correlated with Haq eustatic curve. The eustatic variation dominates the evolution of sequence architectures and deposits, despite that local architectures and deposits are restricted by both eustatic variation and tectonic movement. And the fourth-order eustatic variation starkly controls the facies sequence association.

Key words: micro-facies type and assemblage, eustatic variation, outcrop profile, sedimentary evolution, sequence architecture, carbonate rock platform, Middle and Lower Ordovician, Tarim Basin

层序地层学理论的发展提供了建立等时年代地层对比格架的重要分析技术和方法体系,并已广泛运用于研究碳酸盐岩沉积体系展布、储层孔隙演化、海平面变化及预测有利油气储集体等相关领域,一直以来为国内外研究的重点和热点领域^[1-3]。前人在塔里木盆地层序地层、沉积特征及演化、生物地层(牙形石带或组合)、元素地球化学等方面做了大量的工作,并取得了一系列研究成果和认识^[4-11],但在部分领域仍存在分歧或尚未开展精细研究工作,如层序划分方案多,尺度不统一,对高频层序的特征缺乏认识;露头剖面沉积微相特征研究程度相对较低;资料的综合运用来解剖海平面变化与沉积层序的过程响应关系非常少见。笔者先后两次对巴楚大坂塔格、柯坪水泥厂和西克尔等中、下奥陶统鹰山组—一间房组露头剖面进行详细实地考察和密集取样分析,综合运用露头剖面沉积旋回结构变化,大量岩石手标本和镜下薄片观察,盆内塔中地区井—震资料对比, Fischer 图解,前人牙形石生物地层、碳氧同位素及微量元素数值比分析等多种资料 and 手段,重点探讨以下两方面的科学问题:① 建立塔里木盆地西北缘中—下奥陶统碳酸盐岩沉积微相、组合特征及沉积演化模式;② 研究高精度层序结构特征,海平面变化与层序结构和沉积演化的过程响应关系。围绕上述两个问题,开展了层序地层格架建立与高频层序结构划分,沉积微相及组合特征分析,海平面变化曲线重建及对沉积相序控制作用探讨等相关方面的工作,并取得了系统性认识。

1 地质背景

塔里木盆地经过加里东期、海西期、印支期—燕山期和喜马拉雅期等多期构造旋回运动和漫长地质演化,隆—坳格局及构造古地理发生多次重大变革,并发育了多套区域性不整合面及塔中、塔北、柯坪、巴楚等

多个古隆起带,其中,加里东构造运动对中—下奥陶统碳酸盐岩古地理和沉积演化产生至关重要的影响。加里东构造旋回早期盆地整体处于大陆裂解拉伸的环境,发育被动大陆边缘碳酸盐岩台地和斜坡沉积相带,到中晚期(大致对应于中、晚奥陶世)构造背景发生重大转变,由伸展向挤压环境转变,柯坪—巴楚隆起开始抬升,局部遭受强烈剥蚀,强烈的构造运动也使得塔中隆起碳酸盐岩台地发生暴露剥蚀。奥陶纪末,盆地继续隆升,进入滨浅海陆源碎屑岩沉积发育阶段^[12-16]。

研究区主要位于塔里木盆地西北缘柯坪断隆和巴楚隆起区,目的层为中—下奥陶统鹰山组至一间房组碳酸盐岩地层,并与盆内塔中隆起进行跨构造单元对比(图1)。鹰山组横跨下奥陶统道保湾阶和中奥陶统大湾阶两个时代,前人根据电性、岩性和古生物等特征,将鹰山组自上往下划分为4个岩性段,其中鹰一段和鹰二段属于中奥陶统,以灰岩沉积为主。鹰三段、鹰四段以白云岩沉积为主,隶属于下奥陶统^[17]。一间房组属于中奥陶统达瑞威尔阶沉积地层,其上接受晚奥陶世吐木休克组深水泥页岩与薄层条带灰岩沉积。

2 层序单元划分与层序结构

2.1 牙形石生物地层对比与地层缺失量和沉积年限估算

以牙形石为代表的古生物化石确立了盆地地层年代归属及较完整的生物演化序列,为研究层序结构、沉积特征及演化提供了重要的生物地层参考依据^[18-19]。本文将柯坪露头剖面牙形石分子与前人建立的塔里木盆地西部牙形石带进行对比^[18-19],结果表明新厂阶蓬莱坝组自下往上发育3个牙形石带或组合,顶部缺失2个牙形石带(表1)。道保湾阶鹰山

Fig. 1 Tectonic units of Tarim Basin(modified from reference[4])

表1 塔里木盆地西北缘柯坪水泥厂露头剖面鹰山组-大湾沟组牙形石带或组合

Table 1 Conodont zones or assemblages of the Yingshan-Dawangou Formations on the Shuinchang outcrop in Kalpin area, northwestern margin of Tarim Basin

统	阶	时间/ Ma	牙形石带		柯坪水泥厂牙形石组合	柯坪露头	巴楚露头	西克尔露头
中奥陶统	达瑞威尔阶	468.1	盆地中西部地区		<i>Pygodus anserinus</i> 带下部 <i>Pygodus serra</i> 带	萨尔干组	一间房组	缺失
			<i>Histiodella bellburnensis</i> 带 <i>H. kristinae</i> 带 <i>H. holodentata</i> 带 <i>H. sinuosa</i> 带		大湾沟组			
			<i>Eoplacognathus suecicus</i> 带 <i>Lenodus variabilis</i> – <i>Eoplacognathus crassus</i> <i>Eoplacognathus crassus</i> ; <i>Pallodus remlandrous</i> <i>Polonodus</i> sp.					
			<i>Amorphognathus variabilis</i> - <i>Polonodus</i> 带					
	大湾阶	471	8. <i>Serratognathoides chuxianensis</i> – <i>Scolopodus euspinus</i> – <i>Erraticodon tarimensis</i> 带		K182—K285 <i>Serratognathoides chuxianensis</i> - <i>Scolopodus euspinus</i> – <i>Erraticodon tarimensis</i> 带 <i>Scolopodus tarimensis</i> ; <i>Drepanodus antiletus</i> , D. sp. <i>Paroistodus</i> cf. <i>numarcuatus</i> ; P. <i>proteus</i> <i>Peracontiodus exilis</i> ; <i>Tripodus breibasis</i> T. sp. , <i>Oistodus</i> sp. ; <i>Glyptoconus</i> sp. ; <i>Belodella</i> sp. <i>Juanognathus</i> sp. K135—K181 <i>Paroistodus proteus</i> – <i>Scolopodus tarimensis</i> 带 <i>Glyptoconus filiformis</i> ; <i>Paroistodus</i> et. <i>Numarcuatus</i> <i>Nasusgathus dolonus</i> ; <i>Tripodus breibasis</i> <i>Oistodus</i> sp. , <i>Drepanodus</i> sp.	鹰山组	鹰山组	
下奥陶统	道保湾阶	477.4	7. <i>Serratognathus diversus</i> / <i>Paroistodus proteus</i> 带 ③ <i>Peracontiodus exilis</i> – <i>Bergstroemognathus extensus</i> 亚带 ② <i>Glyptoconus tarimensis</i> 亚带 ① <i>Glyptoconus hemisphaericus</i> 亚带		缺失	蓬莱坝组	蓬莱坝组	
	新厂阶	486.8	6. <i>Tripodus proteus</i> 带					
			5. <i>Glyptoconus floweri</i> 带					
			4. <i>Scolopodus quadruplicatus</i> 带					
			3. <i>Rossodus manitouensis</i> – <i>Chosonodina herfurthi</i> 带					
上寒武统	上寒武统		2. <i>Variabiloconus</i> aff. <i>bassleri</i> 带		蓬莱坝组			
			1. <i>Cordylodus intermedius</i> - <i>Semiacontiodus nogamii</i> 带					



图 2 塔里木盆地巴楚大阪塔格和柯坪水泥厂露头剖面层序界面特征

Fig. 2 Characteristic of sequence boundaries of the Dabantage outcrop in Bachu area and the Shuinichang outcrop in Kalpin area, Tarim Basin

a. 柯坪水泥厂露头剖面 Msb1 不整合面,上下颜色突变;b,c. 柯坪水泥厂露头 Msb1 不整合面古土壤层与下伏岩溶角砾岩手标本;d. 巴楚大阪塔格露头剖面 Sb5 平行不整合面处薄层古土壤层(箭头 1);e. 柯坪水泥厂露头剖面 Sb5 整合界面;f. Msb6 淹没不整合界面之上吐木休克组泥岩与条带状薄层泥晶灰岩沉积;g. 柯坪水泥厂露头剖面 Sb4 层序界面顶部砾屑灰岩

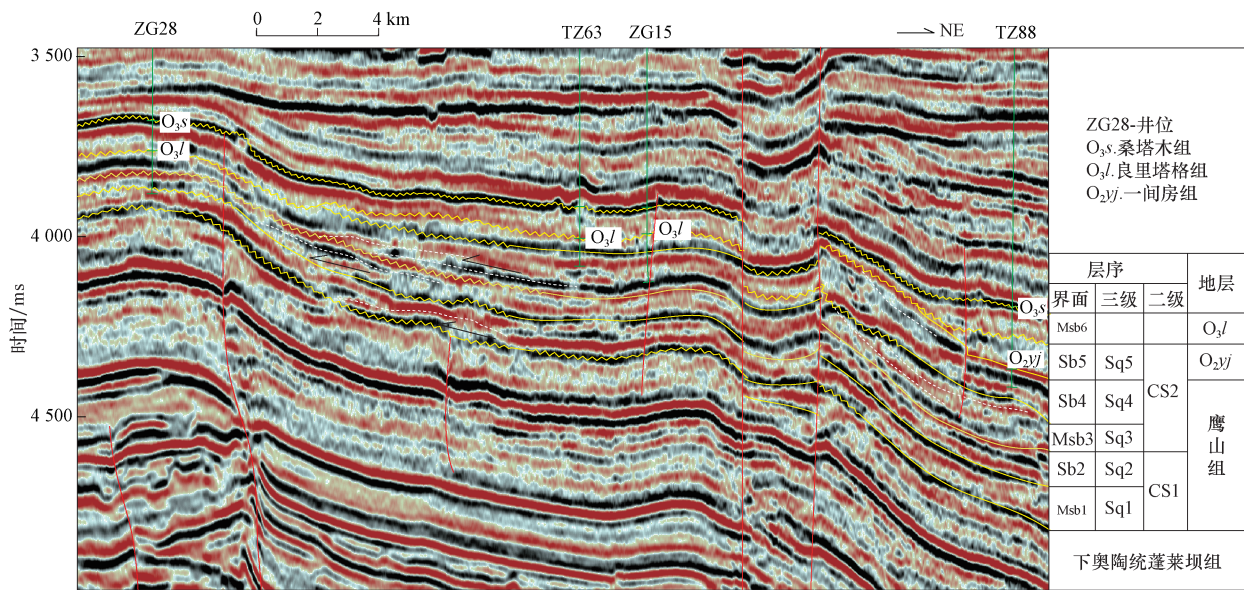


图 3 塔里木盆地塔中隆起区层序界面地震反射响应特征

Fig. 3 Seismic reflection characteristics of sequence boundaries in Tazhong uplift, Tarim Basin

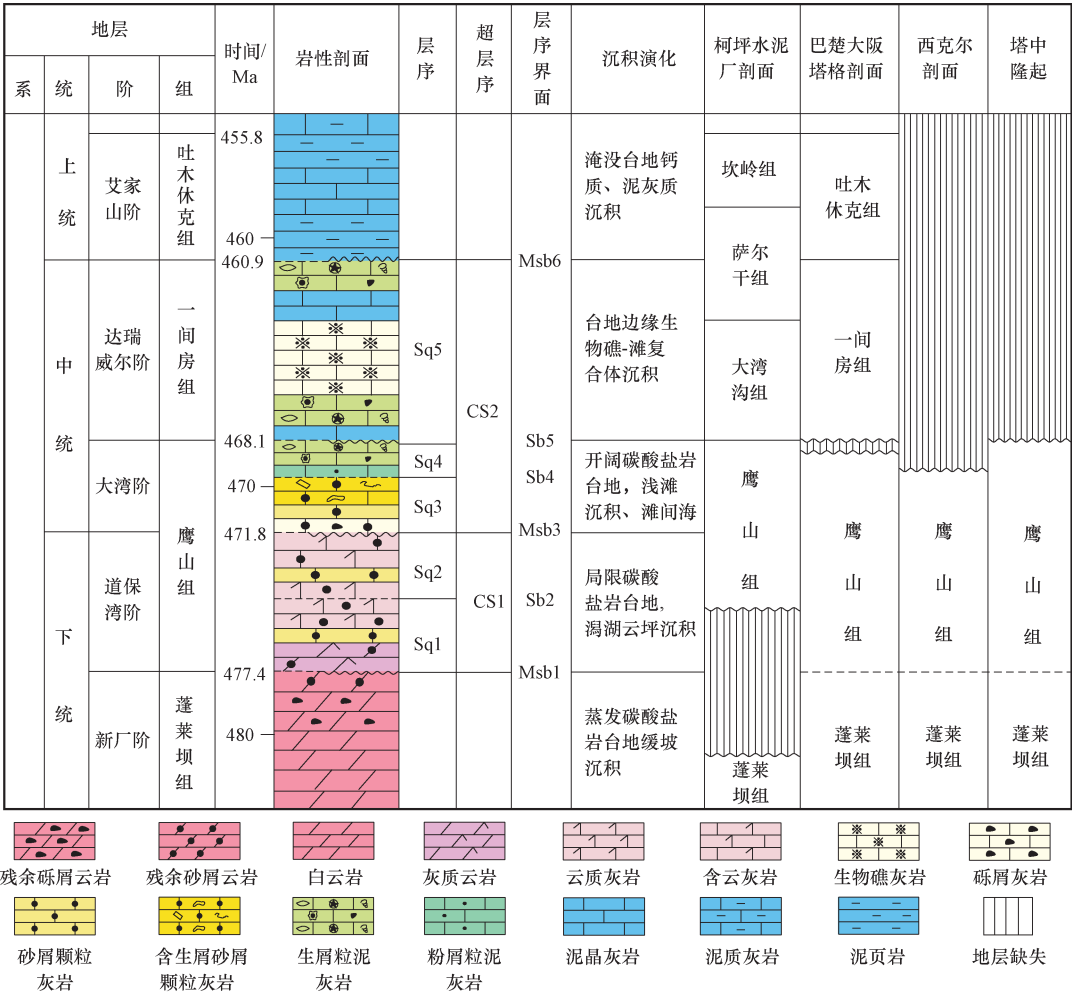


图 4 塔里木盆地西北缘及塔中隆起区中、下奥陶统层序划分及沉积序列
Fig. 4 Sequence division and depositional sequences of the Middle and Lower Ordovician in Tazhong uplift and at the northwestern margin of Tarim Basin

多套大型洞穴系统。Sb2 三级层序界面在露头区是局部小规模暴露-相对整合的界面。Sb4 界面上下沉积微相特征有所不同,内碎屑组明显减少,生物碎屑含量增多,由大套粒屑滩向生屑滩、滩间海沉积转变。柯坪水泥厂露头剖面 Sb5 界面地层呈整合接触,巴楚大坂塔格露头则见薄层古土壤层,指示界面处存在小规模沉积间断。

在对不同级别层序界面识别的基础上,将研究区中下奥陶统鹰山组与一间房组碳酸盐岩地层划分出 2 套由区域性水进到水退沉积旋回组成的高级别复合层序(CS1 和 CS2),沉积时限约 6~10Ma,可作为二级层序(图 4)。复合层序内部根据次一级层序界面(局部暴露界面 Sb2、岩相突变面 Sb4)自下往上又可划分出 5 套三级层序(Sq1-Sq5)。参考露头剖面高分辨率旋回特征,可进一步对更低级别的四级甚至五级层序单元进行划分。总的来说,Sq1-Sq3 分别可划分出 4~5 套四级层序单元,Sq4-Sq5 各自包含 2~4 套四级层

序单元(图 5)。尽管不同地区受所处沉积及构造环境的影响,地层发育及剥蚀情况不尽相同,高频层序数量和规模也有所差别,但在三级层序尺度上是可以进行对比的。

3 沉积微相与沉积演化

3.1 碳酸盐岩沉积微相类型及组合

沉积微相分析是指运用光学显微镜对碳酸盐岩岩石薄片的沉积学和古生物学特征进行研究,构建微相组合序列,进而解释沉积环境^[3]。基于露头剖面、手标本和 120 余张岩石薄片镜下观察描述,总结了研究区碳酸盐岩发育的沉积微相类型。以邓哈姆分类方案为基础,结合内碎屑颗粒粒级及与生屑颗粒组分共生情况,将研究区灰岩归纳出 11 种主要的沉积微相类型,分别为高能沉积水动力条件生物礁灰岩、砾屑灰岩、含生屑砾屑灰岩;中高能沉积水动力条件砂屑颗粒灰岩、

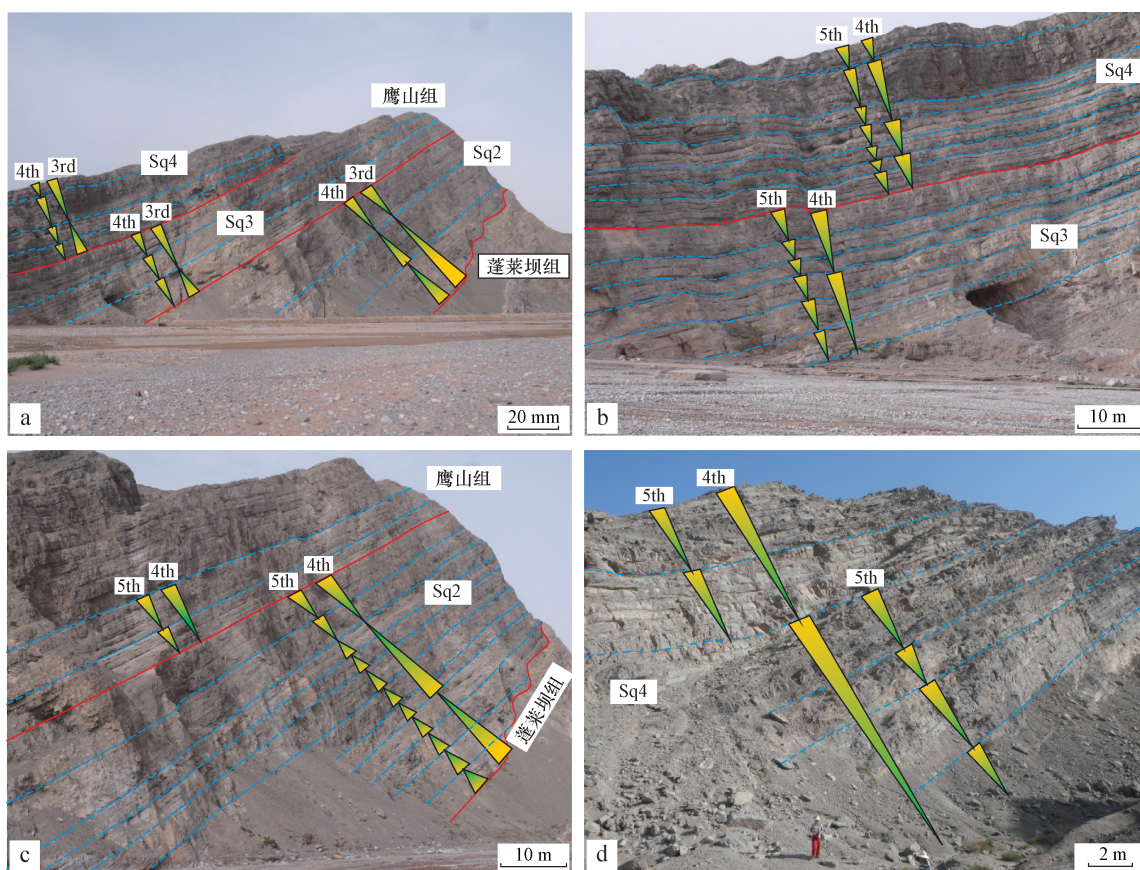


图5 塔里木盆地西北缘露头剖面高分辨率沉积旋回结构及高频层序划分

Fig. 5 Structure of high-resolution sedimentary cycles and division of high-frequency sequences on outcrops at the northwestern margin of Tarim Basin

- a. 柯坪水泥厂露头剖面整体层序结构划分; b. 柯坪水泥厂露头 Sq3 及 Sq4 时期高频层序结构; c. 柯坪水泥厂露头 Sq2 时期高频层序结构; d. 巴楚大阪塔格露头 Sq4 时期高频层序结构; 3rd、4th 和 5th 分别为三级、四级和五级层序

含生屑砂屑颗粒灰岩、粉屑颗粒灰岩、粉-砂屑泥粒灰岩;中低能沉积水动力条件生屑粒泥灰岩及低能沉积水动力条件粉屑粒泥灰岩、泥晶灰岩、藻粘结灰岩等(图6)。白云岩则从交代结构成因与有无伴生交代现象角度出发,共识别出具有残余结构的藻纹层云岩、残余砾屑云岩、残余砂屑云岩及原始结构保存差或不具原始残余结构的粉晶云岩、细晶云岩和中晶云岩等6种沉积微相类型。

上述微相类型能反映出沉积水动力条件的强弱或者能量的高低,但要精确确定沉积环境,还需在其基础上对微相组合特征进行进一步研究。通过对柯坪水泥厂、巴楚大阪塔格等一间房组和鹰山组露头剖面内部不同层段共11个位置进行高频取样分析及精细解释,归纳出发育7种微相组合,包括:MA1 台缘高能厚层浅水礁滩复合体、MA2 潮坪序列高能厚层砂-砾屑滩(图7)、MA3 台内高能浅滩序列中厚层粒屑滩、MA4 滩后中-低能砂屑滩-滩间海薄互层、MA5 台内中-低能薄层生屑滩、MA6 台内低能薄层滩间海、

MA7 干旱-半干旱局限台地潮坪序列中厚层云坪组合等(图8),分别形成于不同的古沉积环境和介质水动力条件^[21]。

综合露头剖面高频旋回结构和密集采样分析成果,研究区单套层序厚度在0.4~2.4 m,参照对应环境下现代碳酸盐岩沉积速率(约0.1~0.5 m/ka),大致推算出这些旋回的沉积年限约4~48 ka,平均约10~30 ka,与米兰科维奇岁差旋回周期(6级)相对应。3~4套6级旋回在空间上叠置则构成约60~120 ka的短偏心率旋回(5级),对应于准层序。

3.2 沉积纵向演化与横向对比

3.2.1 CS1 层序单元

早奥陶世 Sq1—Sq2 沉积期,盆地整体处于大陆裂解弱拉伸的克拉通内台地、大陆边缘斜坡、拗拉槽构造背景,海平面相对较低,构造环境稳定,研究区整体继承了寒武纪及蓬莱坝组的构造沉积格局,以干旱-半干旱的缓坡或局限台地潟湖、云坪、滩间海沉积

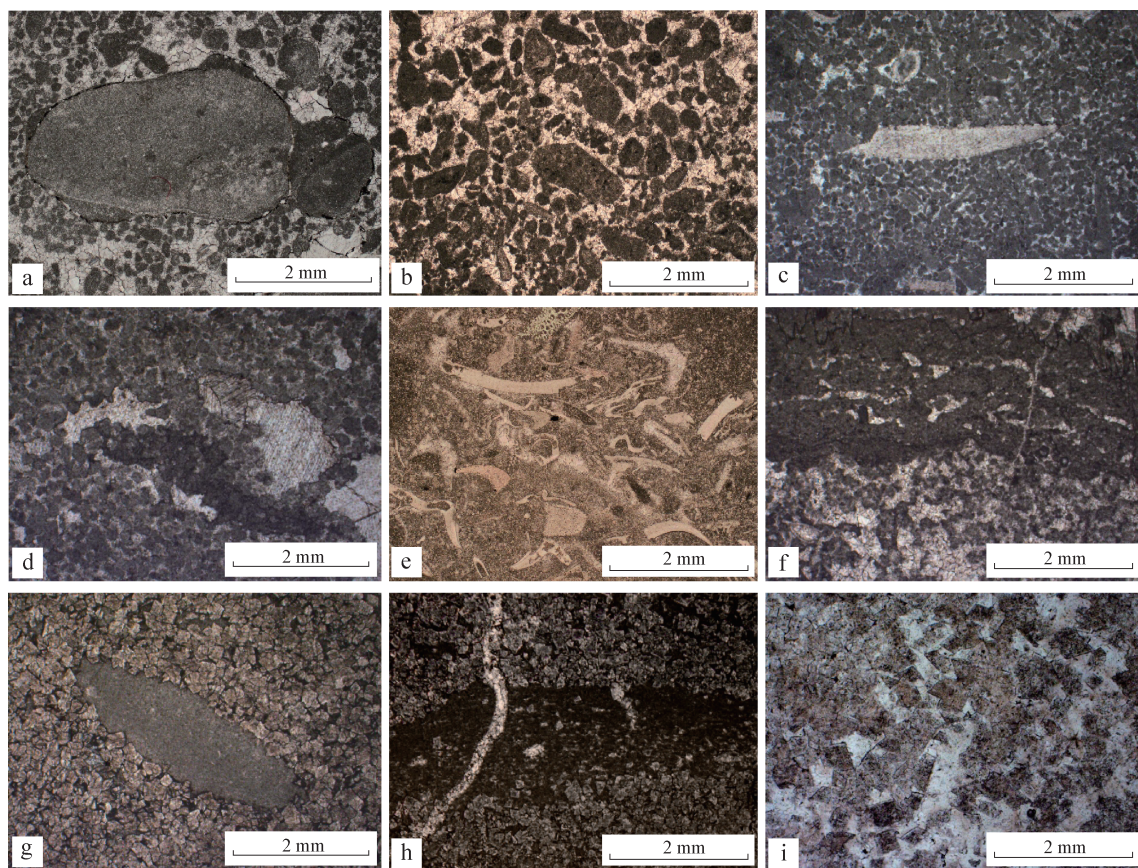


图6 塔里木盆地西北缘露头剖面灰岩和白云岩主要沉积微相类型

Fig. 6 A plot showing the main sedimentary microfacies types of limestones and dolomites on outcrops at the northwestern margin of Tarim Basin

a, b. 内碎屑灰岩, 颗粒支撑, 砾屑、砂屑为主, 粒间被亮晶方解石胶结, 不含灰泥; c. 含生屑砂屑颗粒灰岩, 见生物碎屑镶嵌于砂屑颗粒之间; d. 粉-砂屑泥粒灰岩, 粒间被少量泥晶基质充填; e. 生屑粒泥灰岩, 泥晶基质, 钙藻微体化石、腹足类、双壳类、棘屑等生物碎屑大量发育; f. 藻粘结灰岩, 见粘结作用形成的具明暗相间的条纹结构及葛万藻丝质碎片; g. 残余砾屑云岩; h. 藻纹层云岩, 暗色条带状藻席发育; i. 残余砂屑云岩, 砂屑颗粒被白云石选择性交代, 仍见轮廓残留

为主, 白云岩大规模发育, 蒸发作用强烈, 未见生屑颗粒(图9)。

3.2.2 CS2 层序单元

Sq3 时期, 受加里东期构造运动的影响, 盆地构造环境发生重大反转, 由伸展向挤压环境转变, 产生了多个微角度到局部高角度的不整合面。伴随海平面整体快速上升, 台地也逐渐由局限台地向开阔台地转化, 白云石含量降低至消失, 生屑组分开始出现, 但数量较少, 以大套厚层颗粒滩(砾屑滩、粉-砂屑滩、生屑内碎屑滩)沉积为主。

Sq4 早期, 海平面持续上升并达到最大海泛面, 台内退积作用明显, 内碎屑组分较 Sq3 时期有所减少, 生物碎屑含量大大增加, 并且在晚期高位域内部发育了多套相对低能的中-薄层生屑滩组合。Sq5 时期, 相对海平面整体开始缓慢下降, 构造、古水深、碳酸盐岩

产率处于最佳匹配期, 台地垂向加积作用明显, 以礁滩复合体沉积为主的台地边缘高能沉积相带开始形成。直到中奥陶世末期, 伴随着海平面快速上升, 陆源碎屑物质大量注入, 碳酸盐岩逐渐停止生长, 台地被淹没, 发育了一套由泥页岩与泥晶灰岩薄互层的混积陆棚相沉积。

跨不同构造单元的连井结果表明露头剖面沉积特征及演化与塔中隆起区可以进行很好的对比。中奥陶世塔中地区隆升强烈, 鹰山组顶部至一间房组地层普遍缺失, 斜坡部位仅见部分 Sq4 时期相对低能的滩间海沉积地层残留, 与露头剖面 Sq4 海侵域沉积可对比。Sq3 时期均为中高能厚层颗粒滩发育的最主要时期, 且从盆地西北缘向盆内有明显逐渐增厚的趋势。Sq1—Sq2 时期, 盆缘-盆内均以云坪沉积为主, 表明早奥陶世 CS1 时期两地构造运动相对稳定, 沉积环境大致相同, 海水相对较浅(图10)。

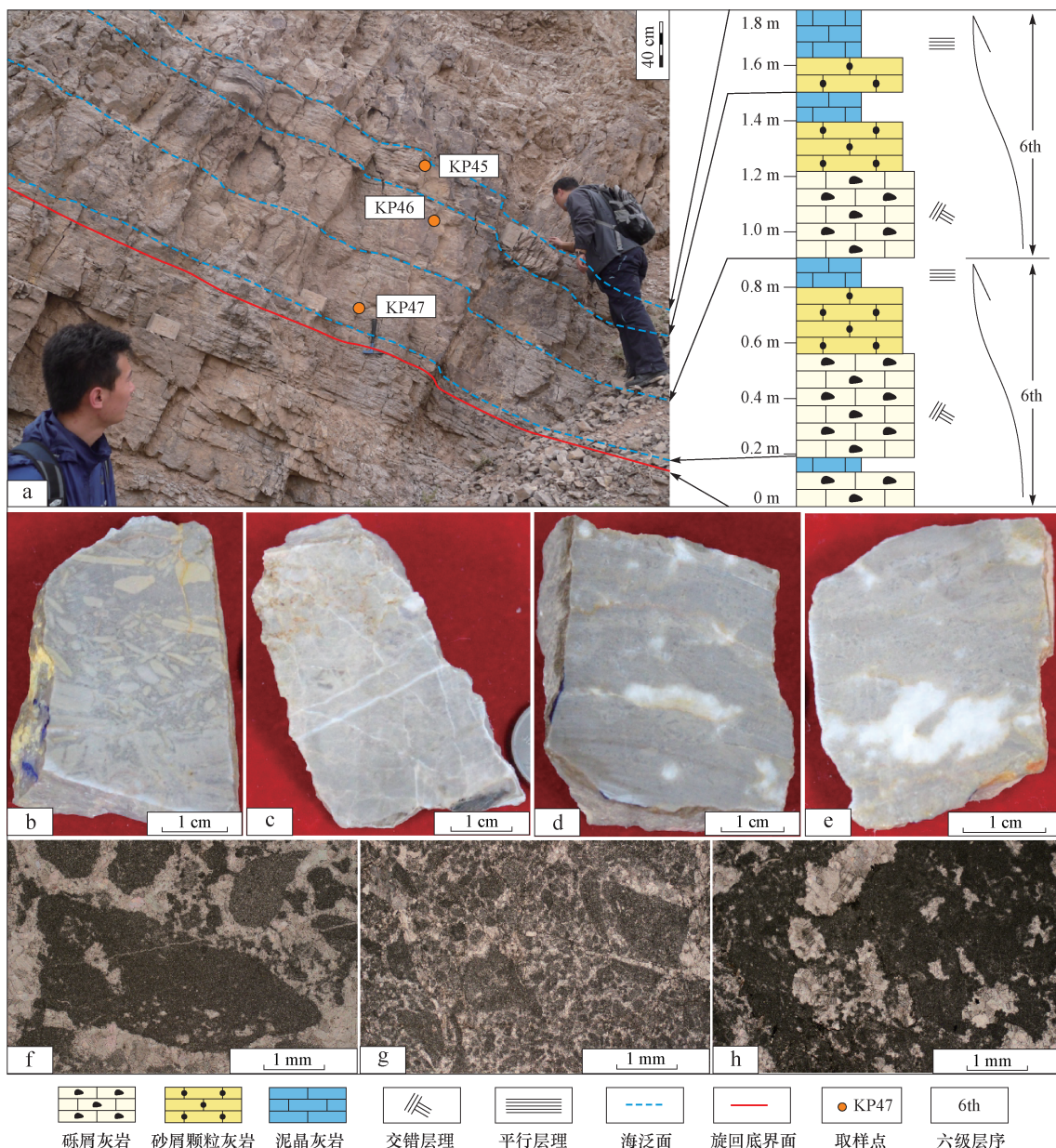


图7 柯坪水泥厂露头剖面潮坪序列高能厚层砂砾屑滩组合特征精细解释

Fig. 7 Fine interpretation of the characteristics of thick-bedded intraclast shoal assemblages in the tidal-flat sequence of the Shuinichang outcrop, Kalpin area, Tarim Basin

a. 柯坪水泥厂露头剖面; b, f. KP47 样品手标本及镜下照片; c, g. KP46 样品手标本及镜下照片; d, e, h. KP45 样品手标本及镜下照片

4 海平面变化与沉积层序的过程响应

4.1 露头剖面 Fischer 图解的建立

Fischer 图解是前人在研究潮坪相碳酸盐岩沉积旋回相对海平面变化时首次提出的,但并非任何环境下都可适用,它限定了浅水沉积环境,构造沉降速率稳定,以旋回为基本单位,同时要求旋回的级次和周期相同等一系列的假定条件^[22]。本文仅将 Fischer 图解应用到巴楚大阪塔格露头鹰山组碳酸盐岩地层研究中,

主要考虑到鹰山组整体处于台地或缓坡沉积环境,古水深相对较浅,构造相对稳定,另外由于鹰山组内部发育大量内碎屑滩、滩间海沉积,宏观层厚变化相对明显,旋回数容易划分并能保证旋回级别的一致性,基本满足假设条件。而一间房组以礁-滩复合体沉积为主,旋回数不好划分,即便划出也难保证尺度统一,其海平面变化主要通过下述元素地球化学特征进行探讨。

在笔者及前人对巴楚大阪塔格露头剖面实测的基础上,将鹰山组碳酸盐岩划分出 217 个超短周期的高频旋回,平均旋回厚度约 0.8 ~ 4 m (表 2),据前文沉积

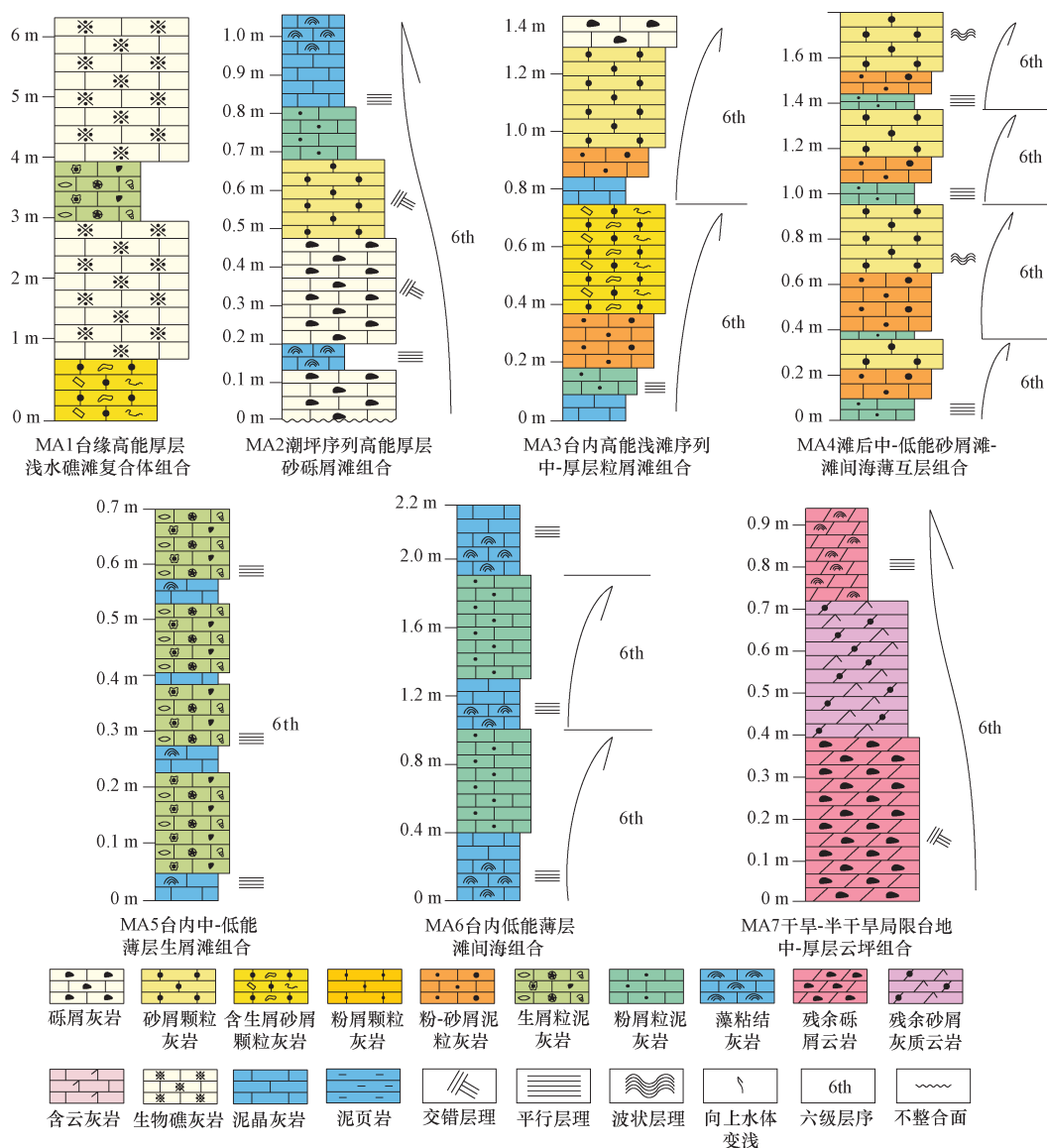


图8 塔里木盆地西北缘露头剖面微相组合特征精细解释

Fig. 8 Fine interpretation of the sedimentary microfacies assemblage characteristics for outcrops at the northwestern margin of Tarim Basin

年限推算,单套旋回形成时间约 4.3×10^4 年,对应于米兰科维奇6级岁差旋回。研究表明,鹰山组相对海平面整体呈“浅—深—浅”的变化趋势,图解明显可划分出2套长周期的旋回与二级层序CS1和CS2对应,最大海泛面分别位于第61旋回(Sq2)和第166旋回(Sq4)位置处,内部可识别出4套次一级的中期旋回与Sq1—Sq4对应。CS1沉积期海平面整体较低,呈缓慢上升的趋势,CS2时期海平面经历两次短暂快速上升后缓慢下降的过程,整个鹰山组最大海泛面位于Sq4时期(图11)。

Fischer图解所反映的露头剖面海平面升降旋回与前文所述沉积微相所代表的古水深的演变有很强的 consistency(图12)。CS1沉积期,干旱—半干旱局限台地、云坪沉积指示海水整体相对较浅的环境。从沉积

纵向演化角度看,自Sq1—Sq2时期,白云石与方解石含量此消彼长,由白云岩向云质灰岩、含云灰岩过渡表明该时期海平面呈逐渐上升的趋势,另外两期海平面缓慢上升—快速海退的结构变化趋势反应了海侵域所占比例等于或超过高位域部分,粒序向上变细,与潮坪沉积垂向结构变化相吻合。CS2沉积期,白云石消失,沉积相由局限台地向开阔台地及台地边缘转变,表明海水较前期而言相对较深。另外与CS1时期海平面变化明显不同的是台地呈现快速海侵—缓慢海退的结构。这也与内部发育大套向上变浅,粒度变粗的台内浅滩沉积序列相吻合。在Sq4达到最大海泛之后,海平面整体下降,到Sq5形成浅水台缘礁滩复合体沉积。总体来看,研究区海平面的升降变化对盆地沉积充填及层序形成演化起主导作用,可通过沉积相纵向演化体现出来。

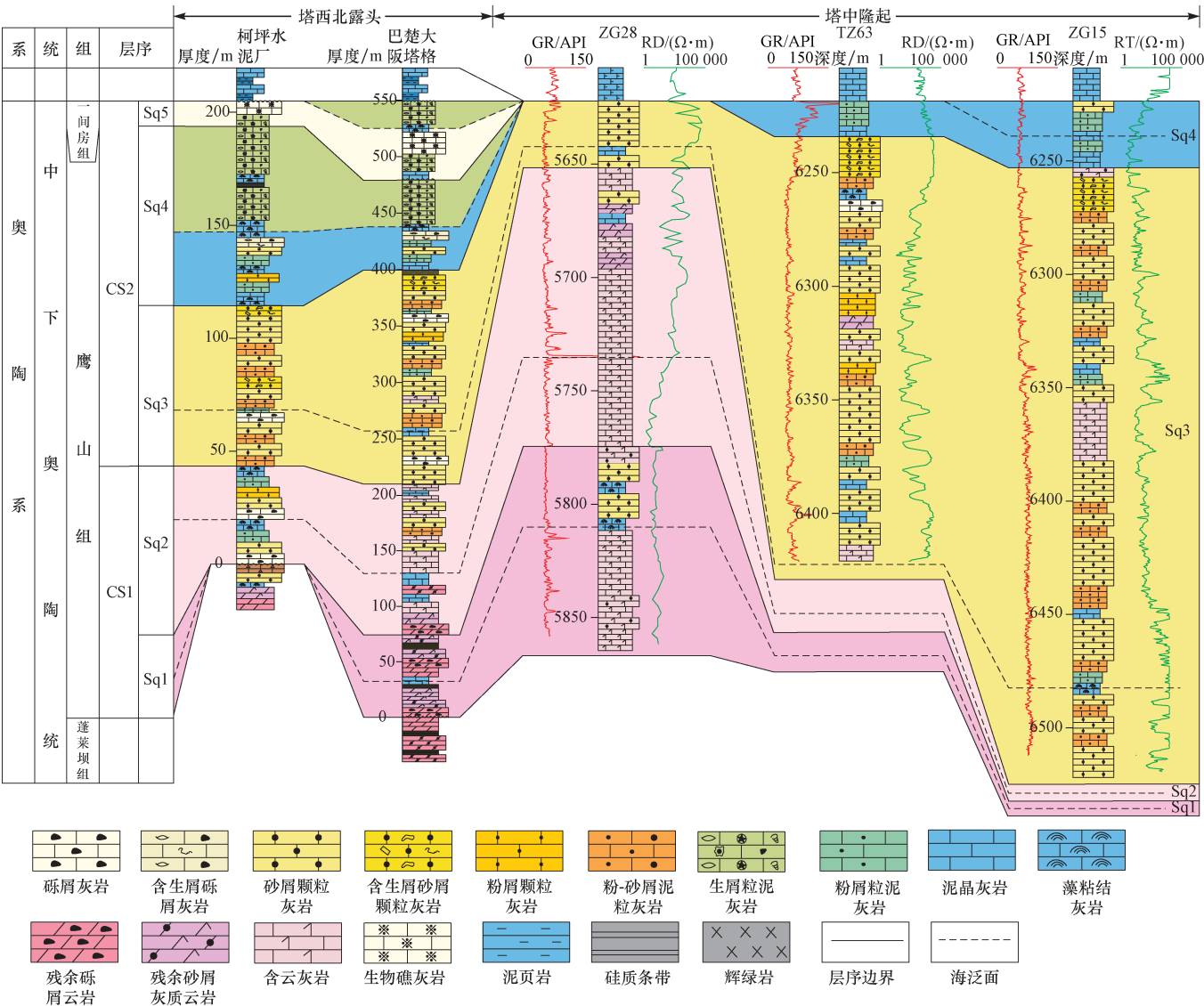


图 10 塔里木盆地西北缘露头剖面与塔中地区钻井沉积特征对比

Fig. 10 Comparison of sedimentary characteristics between Tazhong uplift and outcrops at the northwestern margin of Tarim Basin

表 2 巴楚大阪塔格露头剖面旋回数据统计
Table 2 Statistics of sedimentary cycles on the Dabantage outcrop in Bachu area, Tarim Basin

剖面	厚度/m	旋回数/ 个	平均厚 度/m	最大旋回 厚度/m	最小旋回 厚度/m
巴楚大阪塔格	480	217	2.212	8.7	0.6

-3‰,指示最大古水深,与前文 Fischer 图解分析的鹰山组最大海泛面位置相当。之后 $\delta^{13}\text{C}$ 值大幅正偏,海平面相对下降,至 Sq5 顶部再次发生明显的负偏移,该界面与 Msb6 淹没不整合界面位置一致,另外,钒、镍等微量元素指标在快速升高^[24],两者均指示中奥陶世末期古水深突然增加,相对海平面快速上升的过程(图 13)。巴楚大阪塔格剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化呈明显的 5 段式,与该剖面 Fischer 图解及由岩相变化所反应的古水深演变具有明显的一致性(图 12)。

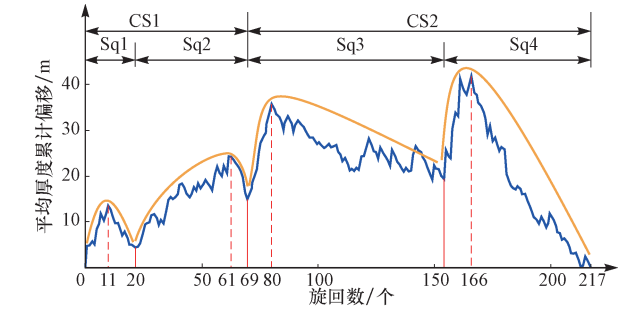


图 11 巴楚大阪塔格露头剖面鹰山组 Fischer 图解
Fig. 11 Fischer plots of Yingshan Formation on Dabantage outcrop, Bachu area, Tarim Basin

两条露头剖面碳氧同位素数值垂向变化均可以精确到与四级层序对应的海平面升降进行很好的对比,再加上微量元素指标的变化,更好的指示了中-下奥陶统鹰山组与一间房组碳酸盐岩旋回结构变化及最大

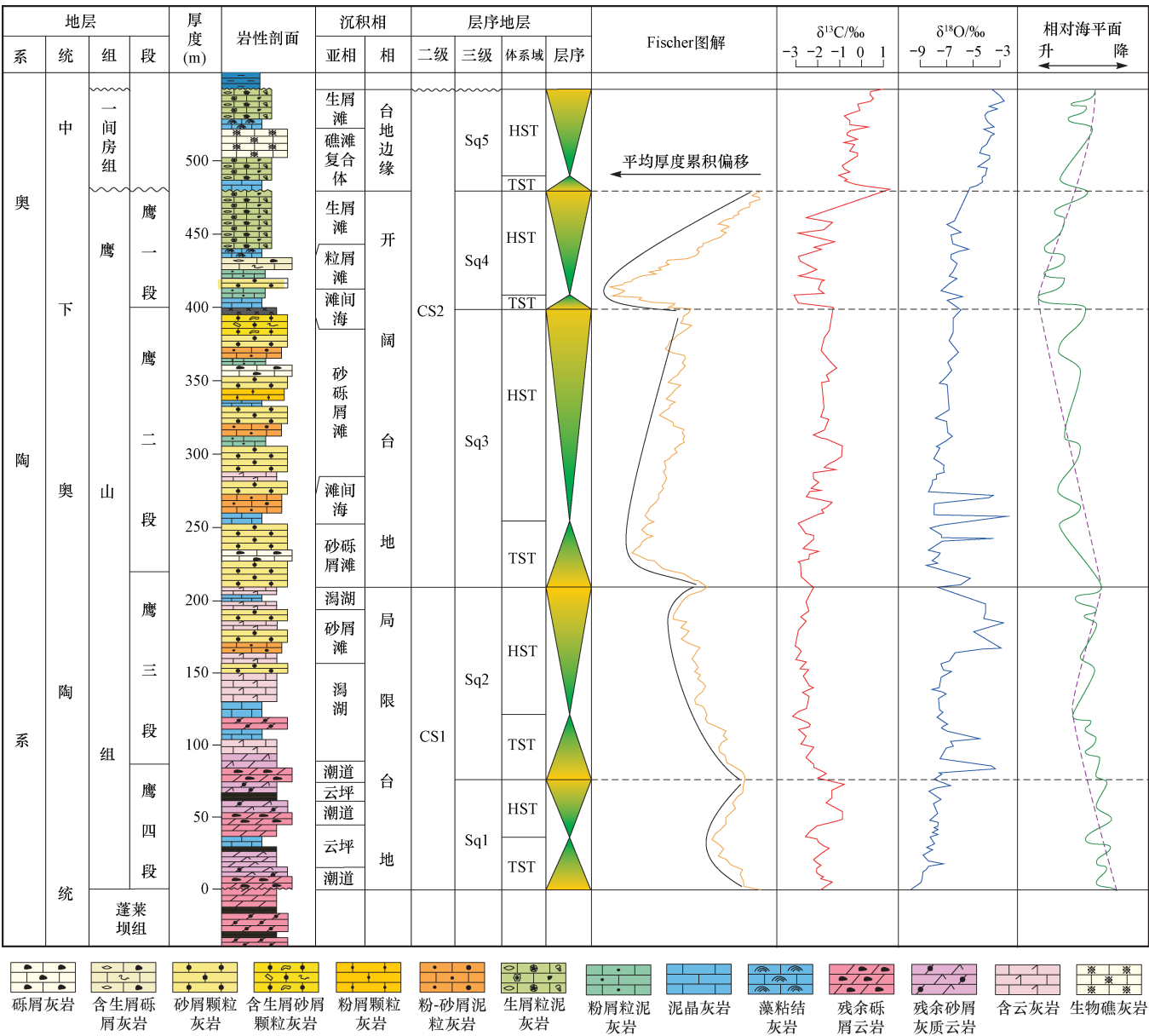


图 12 巴楚大坂塔格剖面 Fischer 图解、岩相及碳氧同位素组成变化对比(同位素数据据前人成果^[6])

Fig. 12 Correlation of Fischer plots, lithofacies and carbon-oxygen isotope changes for Dabantage outcrop in Bachu area, Tarim Basin(the isotopes are cited from previous studies^[6])

海泛的位置,与前文层序划分和沉积演化吻合度很高,使之均得到了很好的验证。

4.3 与全球海平面变化曲线对比

从沉积旋回、Fischer 图解和地化指标等不同角度所得出的相对海平面变化与 Haq 全球海平面变化曲线^[25]对比似乎局部存在一定差异: Sq3 高位域及 Sq5 一间房组相对海平面变化总体呈下降趋势,但 Haq 曲线指示海平面是上升的(图 14)。这可能与加里东运动中期构造反转作用导致盆地沉降速率改变相关。伸展向挤压构造背景的转变,使研究区相对隆升速率加快,在全球海平面上升期间,研究区海平面因此表现为

相对下降。但是总的来看,复合(二级)层序和层序(三级)所反映的水进 - 水退的沉积旋回结构变化整体上与 Haq 全球海平面变化曲线的旋回结构很相似,一些重要的水进 - 水退事件也可与之进行对比(如 Sq4 沉积期的大规模海侵与全球海平面上升相吻合)。显然,研究区局部层序结构和沉积充填演化受到全球海平面变化与区域构造作用叠加的制约,但整体上海平面变化仍起主导作用。

4.4 高频层序组合与有利储集相带预测

基于露头剖面旋回结构和高密度碳同位素数据对高频海平面变化的响应来识别的四级层序对相序组合

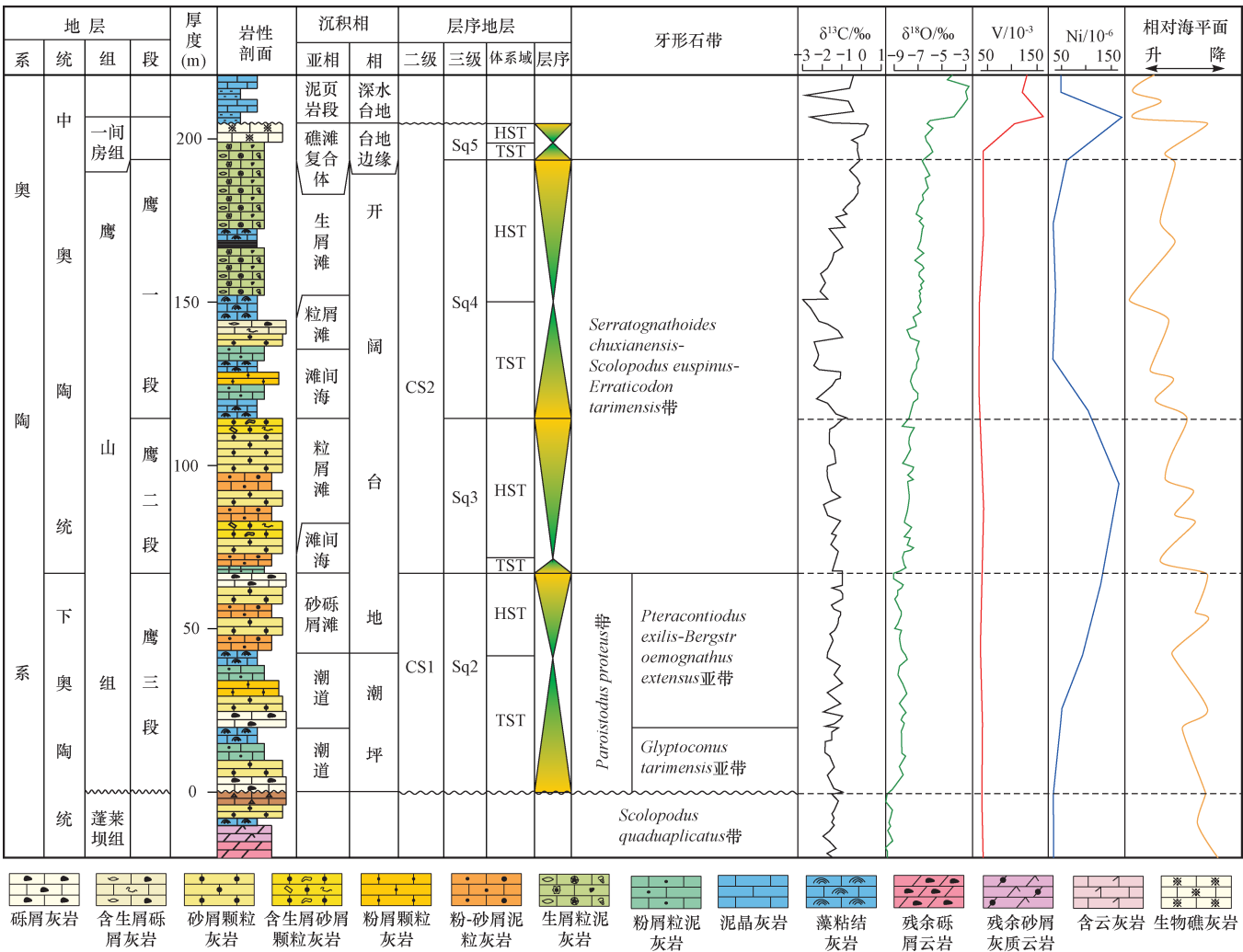


图 13 柯坪水泥厂剖面岩相、碳氧同位素及微量元素组成变化(同位素及微量元素据前人成果^[6,24])
Fig. 13 Variation of lithofacies, carbon-oxygen isotopes and trace element compositions of Shuinchang outcrop in Kalpin area, Tarim Basin(isotopes and trace element compositions are cited from previous studies^[6,24])

有明显的控制作用,它们往往以相近的沉积序列成群成带分布。如巴楚大坂塔格露头剖面 Ss3 和 Ss5 内部台内浅滩和台缘礁滩复合体沉积序列,记录了四级层序控制的由低能泥晶灰岩、(生屑)粒泥灰岩向高能内碎屑滩和生物礁过渡的向上粒度变粗、水体变浅的沉积旋回。而柯坪水泥厂露头剖面 Ss2 内部的潮坪沉积序列则记录了四级旋回控制的由底部粒度较粗的潮道高能砾屑灰岩向顶部粒度较细的潮上泥晶灰岩、藻粘结灰岩演化的向上变浅的沉积过程(图 15)。

根据上述层序结构、沉积演化与海平面变化的沉积学过程响应关系,指出研究区存在 3 套主要的有利储集相带可优先作为下一步油气勘探的主攻方向:① Ss5 一间房组台缘礁滩复合体沉积,生物礁灰岩与上覆的泥页岩与薄层泥晶灰岩可构成良好的储盖组合。② Ss3 台内颗粒滩沉积,受高频旋回控制的高能滩相储集体往往在水退末期出露水面,遭受溶解淋滤而成为有利的岩溶

储层,上覆 Ss4 底部相对深水的海侵域泥晶灰岩、(生屑)粒泥灰岩则具有良好的封盖能力。③ CS1 时期云坪沉积,普遍的白云岩化作用使得岩层的孔渗性大大提高,孔隙类型以溶蚀孔、晶间孔及晶间溶孔为主,露头剖面可看到大量顺层发育的溶蚀孔隙和裂缝带。

5 结论

1) 柯坪水泥厂露头鹰山组与下伏蓬莱坝组呈不整合接触,利用牙形石生物地层资料估算地层缺失量约 5.9 Ma,鹰山组与一间房组呈整合接触,沉积年限约 14.4 Ma。巴楚大坂塔格露头鹰山组顶部存在小规模地层缺失。在此基础上共对中下奥陶统鹰山组-一间房组碳酸盐岩地层识别出 6 个主要层序界面,包括 3 个较高级别的二级层序界面和 3 个次一级的三级层序界面,据此划分出 2 套复合(二级)层序 CS1 和 CS2,

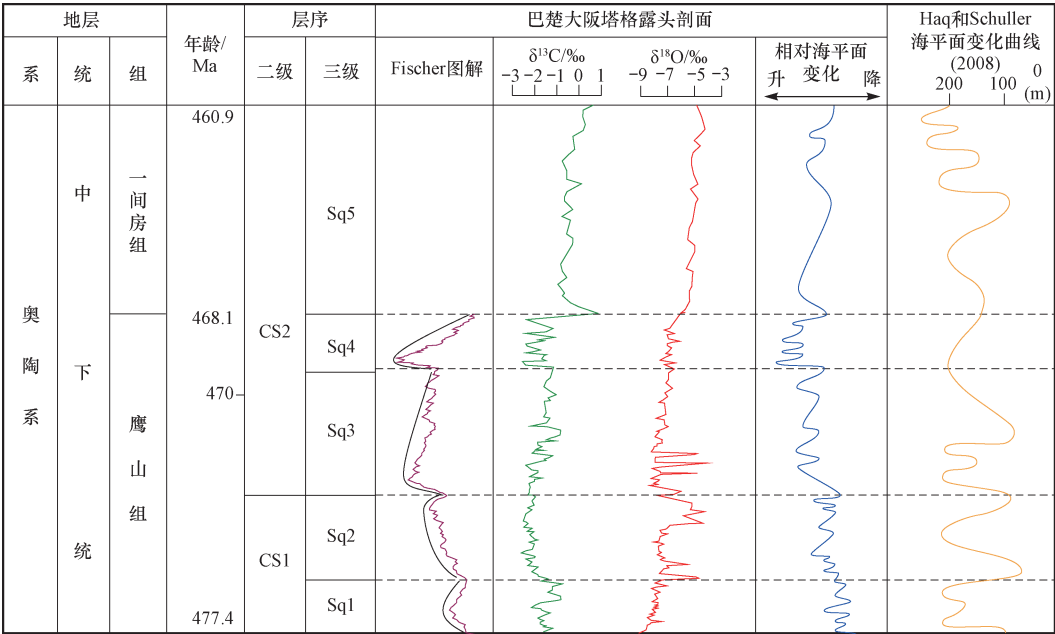


图 14 巴楚大阪塔格露头 Fischer 图解、同位素及岩相旋回结构反映的相对海平面变化趋势与 Haq 曲线对比
Fig. 14 Comparison of the relative sea-level change tendency reflected by the Fischer plot, isotope and lithofacies cycle structure with the Haq eustatic curve of Dabantage outcrop in Bachu area, Tarim Basin

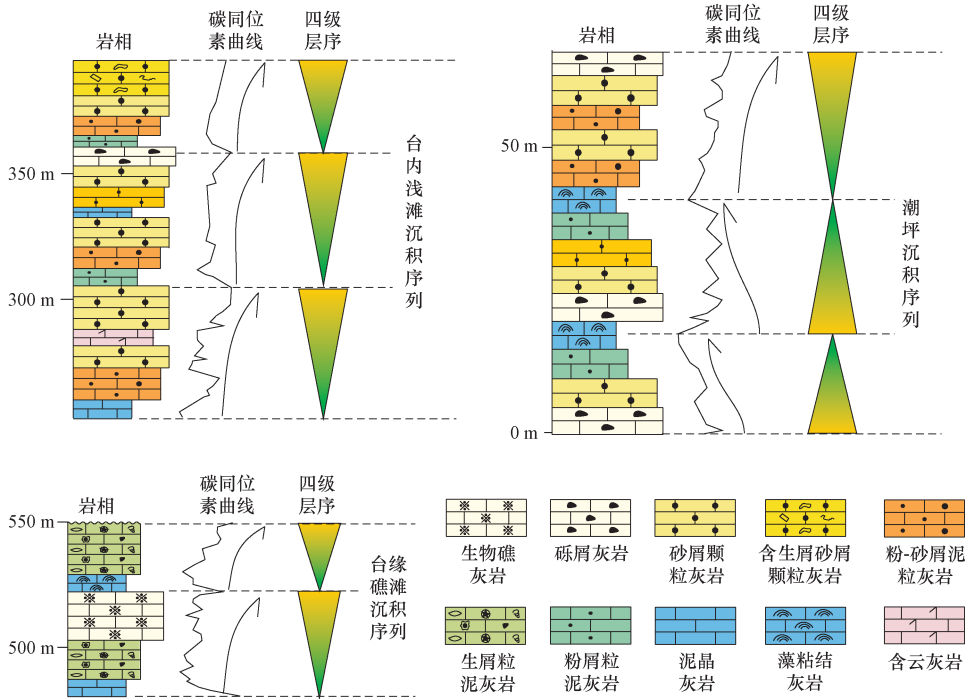


图 15 四级海平面变化控制的沉积相序特征
Fig. 15 Characteristics of sedimentary facies sequences controlled by the fourth-order eustatic variation

5 套三级层序 (Sq1—Sq5), 内部根据露头剖面沉积旋回结构进一步识别出 13 ~ 15 套更低级别的高频旋回或四级层序。

2) 研究区灰岩和白云岩可分别归纳出 11 种和 6 种沉积微相类型, 不同沉积微相以特定的相序组合成台缘高能厚层礁滩复合体、潮坪序列高能厚层砂 - 砾

屑滩、台内高能中厚层内碎屑 - 生屑浅滩、滩后中 - 低能砂屑滩 - 滩间海薄互层、台内中 - 低能薄层生屑滩、台内低能薄层滩间海、干旱 - 半干旱局限台地中厚层云坪等 7 种主要的微相组合, 反映出特定的沉积环境和生物建造特征, 指示了研究区沉积环境由潮坪、局限台地向开阔台地、台地边缘转变。CS1 沉积期, 整体以

干旱-半干旱局限台地潟湖、云坪沉积为主,蒸发作用强烈,发育大套白云岩。Sq3 早期,海平面整体快速上升,白云石消失,并发育大套厚层粒屑滩沉积。Sq4 时期,内碎屑含量减少,生屑含量增加,并在鹰山组顶部发育中薄层生屑滩组合。Sq5 时期,以台地边缘相带礁滩复合体沉积为主,中奥陶世末期,台地被淹没。

3) 利用岩相旋回结构、Fischer 图解、元素地球化学指标等不同手段重建了研究区海平面变化曲线,三者之间具有高度一致性。研究区海平面整体呈“浅-深-浅”的变化趋势,最大海泛面位于 Sq4 的海侵域部分,与 Haq 全球海平面变化曲线对比结果表明局部层序结构和沉积演化受全球海平面变化及区域构造作用叠加制约,但整体上海平面变化仍占主导地位。四级海平面变化对相序组合具有明显的控制作用,台缘高能礁滩复合体、台内颗粒滩及云坪沉积体应为下步优先勘探的有利储集相带。

参 考 文 献

- [1] 王华,陆永潮,任建业,等. 层序地层学基本原理、方法与运用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2008:0-30.
Wang Hua, Lu Yongchao, Ren Jianye, et al. Basic principle, method and application of sequence stratigraphy[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008:0-30.
- [2] Clyde H, Moore. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Holland: Elsevier BV, 2001:349-352.
- [3] Erik Flugel. Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application (2nd edition) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 1-6.
- [4] 林畅松,杨海军,蔡振中,等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩台地的层序结构演化及其对盆地过程的响应[J]. 沉积学报, 2013, 31(5):907-919.
Lin Changsong, Yang Haijun, Cai Zhenzhong, et al. Evolution of depositional architecture of the Ordovician carbonate platform in the Tarim basin and its response to basin processes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5):907-919.
- [5] 郭峰,赖生华,郭岭,等. 塔里木盆地大坂塔格奥陶系地层层序及沉积演化[J]. 地层学杂志, 2010, 34(2):135-144.
Guo Feng, Lai Shenghua, Guo Ling, et al. Ordovician sequence stratigraphy and sedimentology in the Dabantage area, Tarim Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(2):135-144.
- [6] 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 Metallogenia, 2009, 33(1):175-188.
- [7] 赵宗举,吴兴宁,潘文庆,等. 塔里木盆地奥陶纪层序岩相古地理[J]. 沉积学报, 2009, 27(5):939-955.
Zhao Zongju, Wu Xingning, Pan Wenqing, et al. Sequence lithofacies paleogeography of Ordovician in Tarim basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5):939-955.
- [8] 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.
Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Lin Changsong, et al. Sequence stratigraphic framework and its control on development of Ordovician carbonate reservoir in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3):305-316.
- [9] 赵治信,张桂芝,肖继南,等. 新疆古生代地层及牙形石[M]. 北京:石油工业出版社,2002:1-88.
Zhao Zhixin, Zhang Guizhi, Xiao Jinan, et al. Paleozoic stratigraphy and conodonts in Xinjiang[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:1-88.
- [10] 高志前,樊太亮,焦志峰,等. 塔里木盆地寒武-奥陶系碳酸盐岩台地样式及其沉积响应特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(1):19-27.
Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Jiao Zhifeng, et al. The structural types and depositional characteristics of carbonate platform in the Cambrian-Ordovician of Tarim basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1):19-27.
- [11] 高志前,樊太亮,李岩,等. 塔里木盆地寒武-奥陶纪海平面升降变化规律研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(4):550-556.
Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Li Yan, et al. Study on eustatic sea-level change rule in Cambrian-Ordovician in Tarim basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(4):550-556.
- [12] Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Distribution and erosion of the Paleozoic tectonic unconformities in the Tarim basin, Northwest China: Significance for the evolution of paleo-uplifts and tectonic geography during deformation [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 46:1-19.
- [13] 林畅松,杨海军,刘景彦,等. 塔里木早古生代原盆地古隆起地貌和古地理格局与地层圈闭发育分布[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2):189-197.
Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleohigh geomorphology and paleogeographic framework and their controls on the formation and distribution of stratigraphic traps in the Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2):189-197.
- [14] Lin Changsong, Li Hao, Liu Jingyan, et al. Major unconformities, tectonostratigraphic framework and evolution of the superimposed Tarim basin, Northwest China[J]. Journal of Earth Science, 2012, 23(4):395-407.
- [15] 林畅松,李思田,刘景彦,等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J]. 岩石学报, 2011, 27(1):210-218.
Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic framework and paleo-geographic evolution of the Tarim basin during the Paleozoic major evolutionary stages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):210-218.

- clusions in a middle Proterozoic igneous intrusion: implications for the source of hydrocarbons in crystalline rocks [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(8): 937–957.
- [52] 金强. 有效烃源岩的重要性及其研究[J]. *油气地质与采收率*, 2001, 8(1): 1–4.
- Jin Jiang. Importance and research about effective hydrocarbon source rocks [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2001, 8(1): 1–4.
- [53] 饶丹, 章平澜, 邱蕴玉. 有效烃源岩下限指标初探[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(增刊): 578–581.
- Rao Dan, Zhang Pinglan, Qiu Yunyu. Discussion on lower of content of organic matters for effective source rocks [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(S): 578–581.
- [54] 朱光有, 金强, 王锐. 有效烃源岩的识别方法[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(2): 6–10.
- Zhu Guangyou, Jin Jiang, Wang Rui. Identification methods for efficient source rocks [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2003, 27(2): 6–10.
- [55] 肖晖, 赵靖舟, 熊涛, 等. 鄂尔多斯盆地古隆起西侧奥陶系烃源岩评价及成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1087–1097.
- Xiao Hui, Zhao Jingzhou, Xiong Tao, et al. Evaluation of Ordovician source rocks and natural gas accumulation patterns in west flank of a paleo-uplift, Ordos basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1087–1097.
- [56] 钱宇, 王作栋, 张婷, 等. 准噶尔盆地东部侏罗系烃源岩和天然气地球化学特征及低熟气勘探前景[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 44–54.
- Qian Yu, Wang Zuodong, Zhang Ting, et al. Geochemical characteristic of Jurassic source rocks and natural gas in the eastern Jungar and exploration potential of low-mature gas [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 44–54.
- [57] 中国石油天然气总公司. 陆相烃源岩地球化学评价方法: SY/T5735-1995[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- China National Petroleum Company. Geochemical evaluation standard of terrestrial hydrocarbon source rock: SY/T5735-1995 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [58] 成海燕, 李安龙, 龚建明. 陆相烃源岩评价参数浅析[J]. *海洋地质动态*, 2008, 24(2): 6–10.
- Cheng Haiyan, Li Anlong, Gong Jianming. Appraisal parameters of terrestrial hydrocarbon source rocks [J]. *Marine Geology Letters*, 2008, 24(2): 6–10.
- [59] 侯读杰, 张林晔. 实用油气地球化学图鉴[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- Hou Dujie, Zhang Linye. Practical oil and gas geochemical map [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.

(编辑 张亚雄)

(上接第850页)

- [16] 丁文龙, 林畅松, 漆立新, 等. 塔里木盆地巴楚隆起构造格架及形成演化[J]. *地学前缘*, 2008, 15(2): 242–252.
- Ding Wenlong, Lin Changsong, Qi Lixin, et al. Structural framework and evolution of Bachu uplift in Tarim basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 242–252.
- [17] 蔡习尧, 钱一雄, 陈跃, 等. 塔中地区中下奥陶统划分与对比[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(3): 292–295.
- Cai Xiyao, Qian Yixiong, Chen Yue, et al. Division and correlation of middle–lower Ordovician in Tazhong area, Tarim basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(3): 292–295.
- [18] 赵治信, 谭泽金, 唐鹏, 等. 塔里木盆地覆盖区奥陶纪生物地层[J]. *新疆石油地质*, 1999, 20(6): 493–500.
- Zhao Zhixin, Tan Zejin, Tang Peng, et al. Biostratigraphy of Ordovician in cover area of Tarim basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1999, 20(6): 493–500.
- [19] 赵宗举, 赵治信, 黄智斌, 等. 塔里木盆地奥陶系牙形石带及沉积层序[J]. *地层学杂志*, 2006, 30(3): 193–203.
- Zhao Zongju, Zhao Zhixin, Huang Zhibin, et al. Ordovician conodont zones and sedimentary sequences of the Tarim Basin, Xin Jiang, N W China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2006, 30(3): 193–203.
- [20] 景秀春. 塔里木盆地奥陶纪台地相区牙形石及寒武–奥陶系界线[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- Jing Xiuchun. The Ordovician conodonts and the Cambrian-Ordovician boundary at the platform facies in the Tarim basin, China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [21] 王清龙, 林畅松, 李浩, 等. 塔里木盆地西北缘中下奥陶统碳酸盐岩沉积微相特征及演化[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(9): 1274–1288.
- Wang Qinglong, Lin Changsong, Li Hao, et al. Carbonate sedimentary microfacies characteristic and evolution of the middle and lower Ordovician in northwestern of Tarim basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(9): 1274–1288.
- [22] Fischer A G. The lofter cyclothems of the alpine Triassic [J]. *Kansas Geological Survey Bulletin*, 1964, 169: 107–149.
- [23] 鲍志东, 朱井泉, 江茂生, 等. 海平面升降中的元素地球化学响应—以塔中地区奥陶纪为例[J]. *沉积学报*, 1998, 16(4): 32–36.
- Bao Zhidong, Zhu Jingquan, Jiang Maosheng, et al. Isotope and trace element evolution: Responding to sea-level fluctuation—an example of Ordovician in middle Tarim basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(4): 32–36.
- [24] 胡明毅. 塔北柯坪奥陶系碳酸盐岩地球化学特征及环境意义[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(2): 158–163.
- Hu Mingyi. Geochemical characters and environmental significance of Ordovician carbonate rocks in Keping area, Tarim basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(2): 158–163.
- [25] Haq B U, Stephen R S. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. *Science*, 2008, 322(5898): 64–68.

(编辑 张亚雄)