

塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘滩体系类型及其勘探意义

乔占峰^{1,2}, 沈安江^{1,2}, 倪新锋^{1,2}, 朱永进^{1,2}, 严威³, 郑剑锋^{1,2}, 黄理力^{1,2}, 孙晓伟^{1,2}

(1. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油 碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023;

3. 中国石油 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:基于钻井岩心、薄片以及露头的详细研究,根据地貌背景、沉积物类型和沉积特征差异,将塔里木盆地肖尔布拉克组缓坡丘滩体划分为4种类型:颗粒滩型、丘滩型、滩坪型和台坪型。颗粒滩型主要发育于塔中-巴东地区的“平台”地貌背景下,以鲕粒和砂屑等高能沉积片状发育为特征;丘滩型发育于柯坪-巴楚地区的匀斜缓坡背景,以微生物丘和藻砂屑滩发育为主,呈“小丘大滩”;滩坪型发育于阿克苏地区,微生物丘不发育,颗粒滩和潮坪相大面积发育;台坪型发育于轮南-牙哈区,具类似“孤立台地”特征,东侧边缘陡,发育高能丘滩沉积,西侧较缓,以低能微生物丘/席为主。不同类型丘滩体系的储层差异明显,颗粒滩型和滩坪型以Ⅱ类储层为主,分布稳定,有利于储层规模发育;丘滩型和台坪型可发育Ⅰ类储层,储层呈块状分布,具规模优质储层发育潜力。提出塔中-巴东地区应以寻找岩性圈闭为目标,柯坪地区应寻找构造相对稳定、保存条件较好的目标,轮南-牙哈区高能丘滩带值得探索。

关键词:颗粒滩;丘滩;滩坪;台坪;丘滩体系;缓坡;肖尔布拉克组;塔里木盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Types of mound-shoal complex of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Tarim Basin, northwest China, and its implications for exploration

Qiao Zhanfeng^{1,2}, Shen Anjiang^{1,2}, Ni Xinfeng^{1,2}, Zhu Yongjin^{1,2}, Yan Wei³,

Zheng Jianfeng^{1,2}, Huang Lili^{1,2}, Sun Xiaowei^{1,2}

(1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. Tarim Oilfield Branch Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Based on the observation of cores and thin sections, as well as the detailed survey of outcrops, the ramp mound-shoal complexes of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation of Tarim Basin can be divided into four types: grain beach, mound shoal, shoal flat, and platform inner flat, in accordance with their differences in geomorphology, sediment category, and sedimentary features. The grain-beach type complex, occurring in relatively flat platform settings in the Tazhong-Badong area, is characteristic of high-energy oolites and intraclastic grainstones growth in slices. The mound-shoal type complex, occurring in ramp settings in the Keping-Bachu area, is characterized by the prosperity of microbial mounds and algae-intraclastic grainstone shoals, displaying a feature of large shoals interspersed by small mounds. The shoal-flat type complex usually occurs in Aksu area with absence of microbial mounds and widespread grain beaches and tidal flats. The platform-inner-flat type complex is developed in the Lunnan-Yaha area, characterized by “isolated platform” with a steep eastern slope (filled with high-energy mound shoal deposits) and a relatively gentle western slope (dominated by low-energy microbial mounds or mats). Reservoirs in different mound-shoal complexes developed distinctive features. The grain-beach and shoal-flat types usually develop Type II reservoirs with consistent distribution over large areas; while the mound-shoal and platform-inner-flat types tend to develop Type I reservoirs, which are blocky and high-quality reservoirs, and may distribute in a large scale. In conclusion, lithologic traps should be a focus of exploration in the Tazhong-Badong area. While much attention should be paid to those tectonically stable traps with good

收稿日期:2018-02-22;修订日期:2018-12-03。

第一作者简介:乔占峰(1983—),男,高级工程师、博士研究生,碳酸盐岩层序地层和沉积储层。E-mail:qiaozf_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家油气重大专项(2016ZX05004-002)。

preservation conditions in the Keping area, the high-energy mound-shoal complexes should be the exploration target in the Lunnan-Yaha area.

Key words: grain beach, mound shoal, shoal flat, platform inner flat, mound-shoal complex, ramp, Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

塔里木盆地寒武系—下奥陶统发育巨厚白云岩层,以中寒武统膏盐岩为界,划分为盐上白云岩领域和盐下白云岩领域^[1],具有优质的生储盖配置条件,勘探潜力巨大。中深1C井于2013年在下寒武统肖尔布拉克组获得工业气流,首次发现寒武系盐下内幕原油气藏,宣告塔里木盆地寒武系盐下白云岩勘探获得战略性突破^[1-4]。丘滩体是碳酸盐岩储层发育的物质基础^[3,5-7],钻井与露头也揭示下寒武统肖尔布拉克组发育一套丘—滩相白云岩储层^[2-3]。因此,对丘滩体发育分布的认识对于该领域油气勘探具有重要意义。

多位学者指出塔里木盆地在早寒武世为缓坡—弱镶边台地沉积^[8-12],中缓坡带为丘滩体及储层的有利发育区。随着新和1井在原塔北“台缘带”钻遇厚层泥晶灰岩,揭示了肖尔布拉克组丘滩体及相关储层在盆地范围内发育分布的复杂性,影响着勘探成功率。

本文结合详细的露头、钻井与地震资料分析,对塔里木盆地肖尔布拉克组中缓坡丘滩体系进行了系统分析,划分为颗粒滩型、丘滩型、滩坪型和台坪型4种丘滩体系,总结了他们在沉积背景、沉积物类型、沉积模式以及储层发育分布特征方面的差异,以期指导进一步的油气勘探。

1 地质背景

塔里木盆地处于塔里木板块中部稳定区,面积约 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$,是发育在前寒武纪基底之上的含油气叠合盆地^[13]。在寒武系沉积前,塔里木盆地经历了对其影响深远的柯坪运动,导致盆内大部分地区抬升,造成区域上构造地貌差异^[14],在早寒武世形成了“三隆两凹”的沉积格局(图1a)。盆地周缘发育塔西南古隆起、喀什古隆起—温宿低凸起和轮南—牙哈低凸起3个次级地貌单元,塔西南古隆起和喀什古隆起大部地区缺失肖尔布拉克组(图1a),围斜部位肖尔布拉克组发育不完整,塔中—巴东地区仅发育高水位体系域的肖上段;柯坪—巴楚地区和轮南—牙哈低凸起肖尔布拉克组厚度差异明显。局部上,各隆起围斜部位地形差异明显。塔西南古隆起北斜坡,自塔参1井地层缺失代表的古隆起高点,到塔中—巴东地区地层厚度稳定在30~70 m左右,再到陡增到230 m的和4井代表的外围区,显示出“台阶式”的坡降特点(图2)。塔中—巴东地区坡度小于 1° ,呈“平台”地形特点,平台宽度自东向西逐渐变宽,平均约30 km。柯坪—巴楚地区露头和地下钻井显示肖尔布拉克组厚度为120~200 m,自古隆起向围斜部位逐渐增厚(图3),揭示了由高到低的“匀斜缓坡”地形特征。轮南—牙哈

由肖下段上部和肖上段构成,厚约110 m,高水位下部(肖下段上部)为薄层状—厚层状微生物岩(凝块岩),层厚自下向上变大,内部结构出现凝块状、砾屑状等,表现出向上水体影响强度增加;高水位中部(肖上1段)以微生物丘滩体和藻砂屑滩发育为主要特征^[3];高水位上部(肖上2段)为泥晶云岩或藻纹层云岩夹颗粒云岩,见泥裂和帐篷构造等,为潮坪相。盆地范围内,不同区域由于地貌差异,海平面变化下导致肖尔布拉克组地层结构存在差异,厚度从0 m(塔西南古隆起和温宿古隆起)到约300 m(满加尔凹陷,钻井最大厚度为和4井230 m)不等,造成丘滩体系的发育分布具有一定的复杂性。

2 丘滩体系类型划分

通过对盆地范围内钻井和露头揭示的肖尔布拉克组的丘滩沉积背景、沉积物类型和沉积模式等的详细分析、对比,将丘滩体系划分为颗粒滩型、丘滩型、滩坪型和孤立台坪型4种类型(图1a;表1)。

2.1 沉积背景

古隆起地形差异控制丘滩发育,丘滩体系主要发育于古隆起围斜部位。由地层发育特征可知,塔里木盆地早寒武世区域上和局部上地貌起伏较大。区域上,发育塔西南古隆起、喀什古隆起—温宿低凸起和轮南—牙哈低凸起3个次级地貌单元,塔西南古隆起和喀什古隆起大部地区缺失肖尔布拉克组(图1a),围斜部位肖尔布拉克组发育不完整,塔中—巴东地区仅发育高水位体系域的肖上段;柯坪—巴楚地区和轮南—牙哈低凸起肖尔布拉克组厚度差异明显。局部上,各隆起围斜部位地形差异明显。塔西南古隆起北斜坡,自塔参1井地层缺失代表的古隆起高点,到塔中—巴东地区地层厚度稳定在30~70 m左右,再到陡增到230 m的和4井代表的外围区,显示出“台阶式”的坡降特点(图2)。塔中—巴东地区坡度小于 1° ,呈“平台”地形特点,平台宽度自东向西逐渐变宽,平均约30 km。柯坪—巴楚地区露头和地下钻井显示肖尔布拉克组厚度为120~200 m,自古隆起向围斜部位逐渐增厚(图3),揭示了由高到低的“匀斜缓坡”地形特征。轮南—牙哈

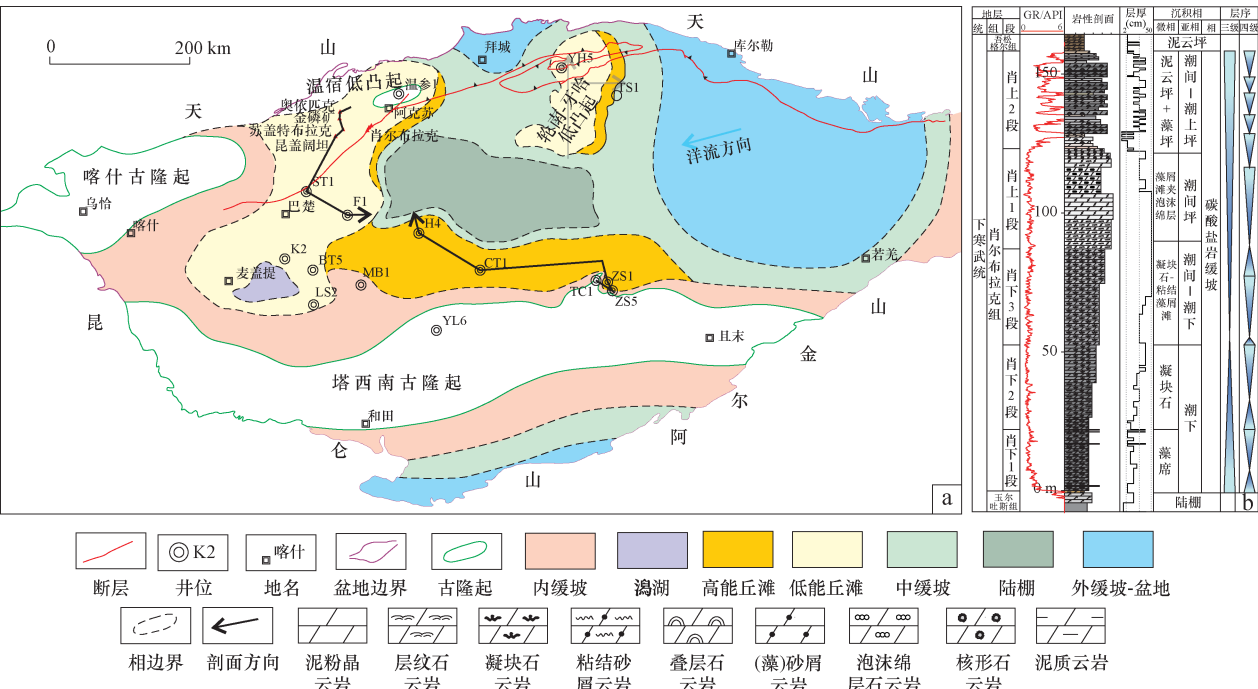


图1 塔里木盆地地下寒武统肖尔布拉克组沉积格局(a)和地层柱状图(b)

Fig.1 The sedimentary framework(a) and stratigraphic column(b) of the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation,Tarim Basin

表1 塔里木盆地地下寒武统肖尔布拉克组中缓坡丘滩体系类型与特征

Table 1 Types and features of medium-rampmound-shoal complexes of the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation,Tarim Basin

	颗粒滩体系	丘滩体系	滩坪体系	孤立台坪型
重点地区	塔中-巴东地区	柯坪-巴楚地区	阿克苏地区	轮南-牙哈地区
古海洋背景	面向广海	相对静水海湾	面向广海	面向广海
古地貌	“台阶式”坡降	匀斜缓坡	匀斜缓坡	“孤立台地”
岩性	鲕粒云岩、砂屑云岩	微生物岩(叠层石、凝块石、藻砂屑云岩)	藻砂屑云岩、泡沫棉云岩、帐篷构造泥晶云岩	藻粘结云岩、颗粒云岩等
叠置结构	向上变浅/变粗旋回为主	向上变浅/变细旋回为主	向上变浅/变细旋回为主	向上变浅变粗/变细
储集空间类型	粒间孔、体腔孔、粒内溶孔等	藻格架孔、粒间溶孔等	粒间溶孔、膏模孔、鸟眼孔	藻格架孔等
储层质量	Ⅱ类为主	Ⅰ-Ⅱ类较发育	Ⅱ类为主	Ⅰ-Ⅱ类
储层非均质性	弱	中-弱	弱	中-弱
储层发育	带状、片状	块状	片状	带状

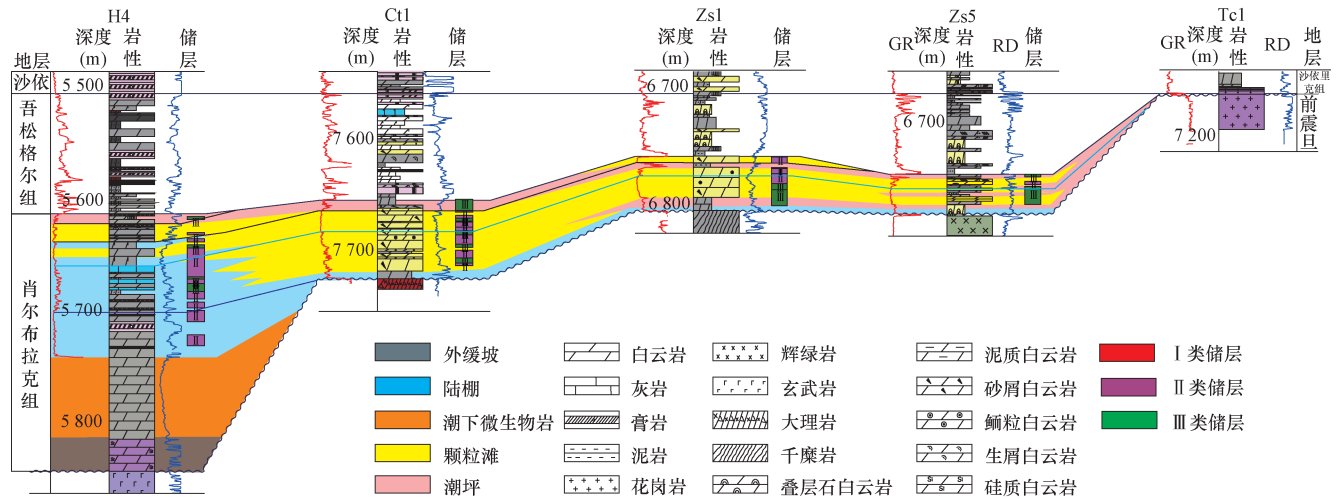


图2 塔中-巴东地区颗粒滩体系连井对比

Fig.2 Well correlation of grain beach complexes in the Xiaoerbulake Formation,Tazhong-Badong area

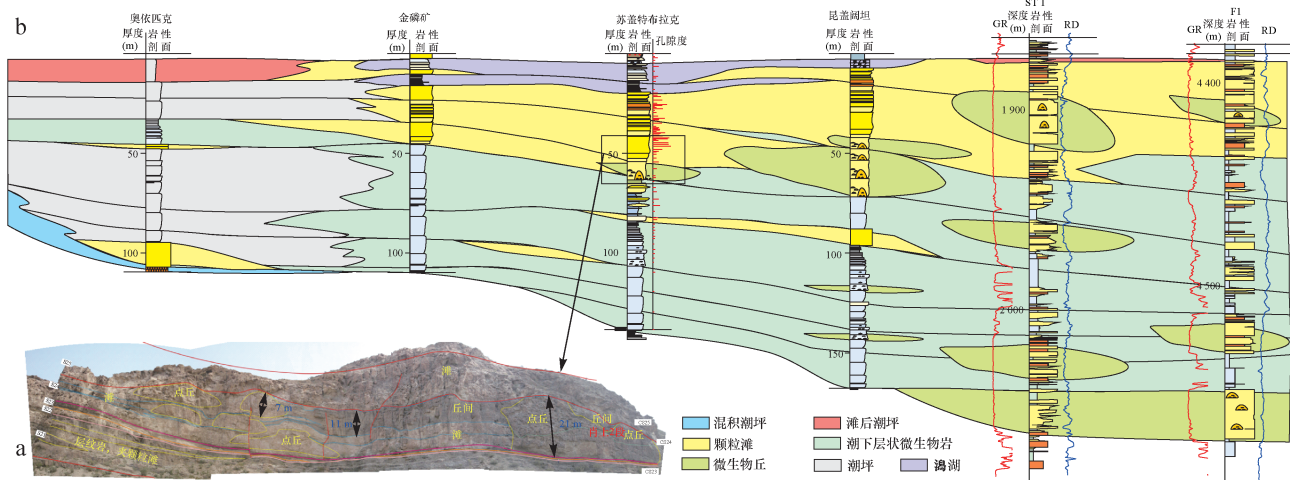


图3 柯坪-巴楚地区露头(a)和钻井岩相对比(b)

Fig. 3 Outcrop (a)-well (b) correlation of the Xiaerbulake Formation in the Keping-Bachu area, Tarim Basin

地区表现为四周深水包围的“似孤立台地”地形特征,地震剖面上可识别前积体环绕发育(图1a,图4)。总之,在肖尔布拉克组沉积期间,沉积地貌上具有“三隆两洼”的地貌特征,且各隆起围斜部位的局部地形差异明显。

塔里木板块在早寒武世位于赤道与北纬 30° 之间,长轴为北东-南西向,洋流为自北东向西南方向^[15](图1a)。北东向而来的洋流在“隆-凹”格局的复杂地貌影响下导致板块内部水体能量存在差异(图1a),靠近塔东盆地广海且直面洋流方向的轮南-牙哈地区“孤立台地”东侧和塔中-巴东地区的平台区水体能量最高,轮南-牙哈西侧和柯坪-巴楚地区水体能量相对较低。水体能量差异必然造成沉积物分异,是造成肖尔布拉克组丘滩体系类型多样和分布复杂的主要因素。

2.2 沉积物构成与沉积环境

钻井及露头揭示,古隆起周缘丘滩体沉积物类型差异明显。

颗粒滩体系以塔中-巴东地区为典型。岩心与薄片揭示,该区肖尔布拉克组主体以细-中晶残余颗粒云岩为典型特征,原岩结构为鲕粒云岩(图5a),颗粒结构清晰,鲕粒分选和磨圆均好,亮晶胶结,见三叶虫和棘屑等生物碎片发育,自然伽马曲线低且平直,代表高能正常海水滩相沉积。

丘滩体系以柯坪-巴楚地区为典型,主要表现为微生物丘-颗粒滩复合体发育。微生物丘由凝块岩云岩、叠层石云岩和藻格架云岩(图5b)构成。藻砂屑滩在薄片下显示为粘结藻砂屑云岩(图5c),可识别藻砂屑颗粒,但颗粒结构不甚清晰,局部为粘结结构。总体上,丘滩复合体为微生物强烈参与的、水体能量相对中等的沉积物。

滩坪体系以阿克苏地区为主,微生物丘不发育,滩相与潮坪相大范围稳定发育。该体系发育4种岩相类型:藻砂屑云岩、潮间上部泡沫棉云岩、核形石/粒屑云岩和帐篷构造泥晶云岩。其中,藻砂屑白云岩为颗粒滩沉积,于露头可见交错层理发育(图5d),总体似向南前积叠置,但是微观上颗粒结构不甚清晰,能量中

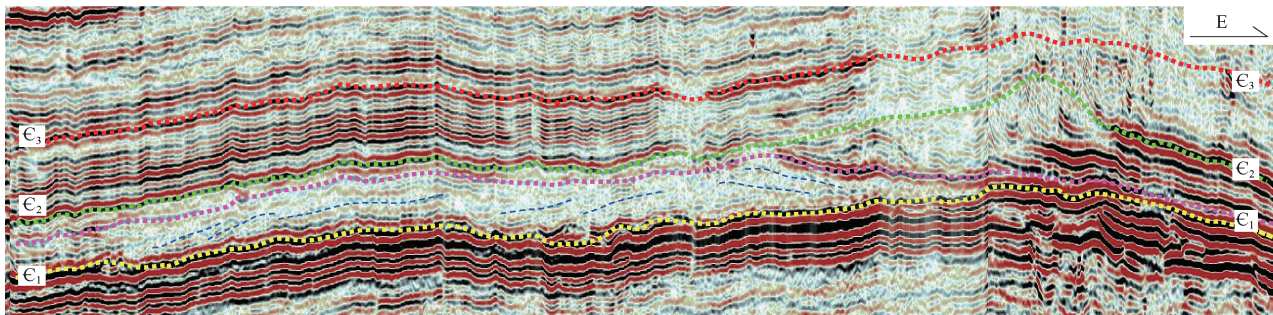


图4 塔里木盆地肖尔布拉克组台坪体系地震响应特征(轮南牙哈地区东西向地震剖面)

Fig. 4 Seismic response characteristics of the platform inner flat complexes in the Xiaerbulake Formation, Tarim Basin (EW-trending seismic profile in the Lunan-Yaha area)

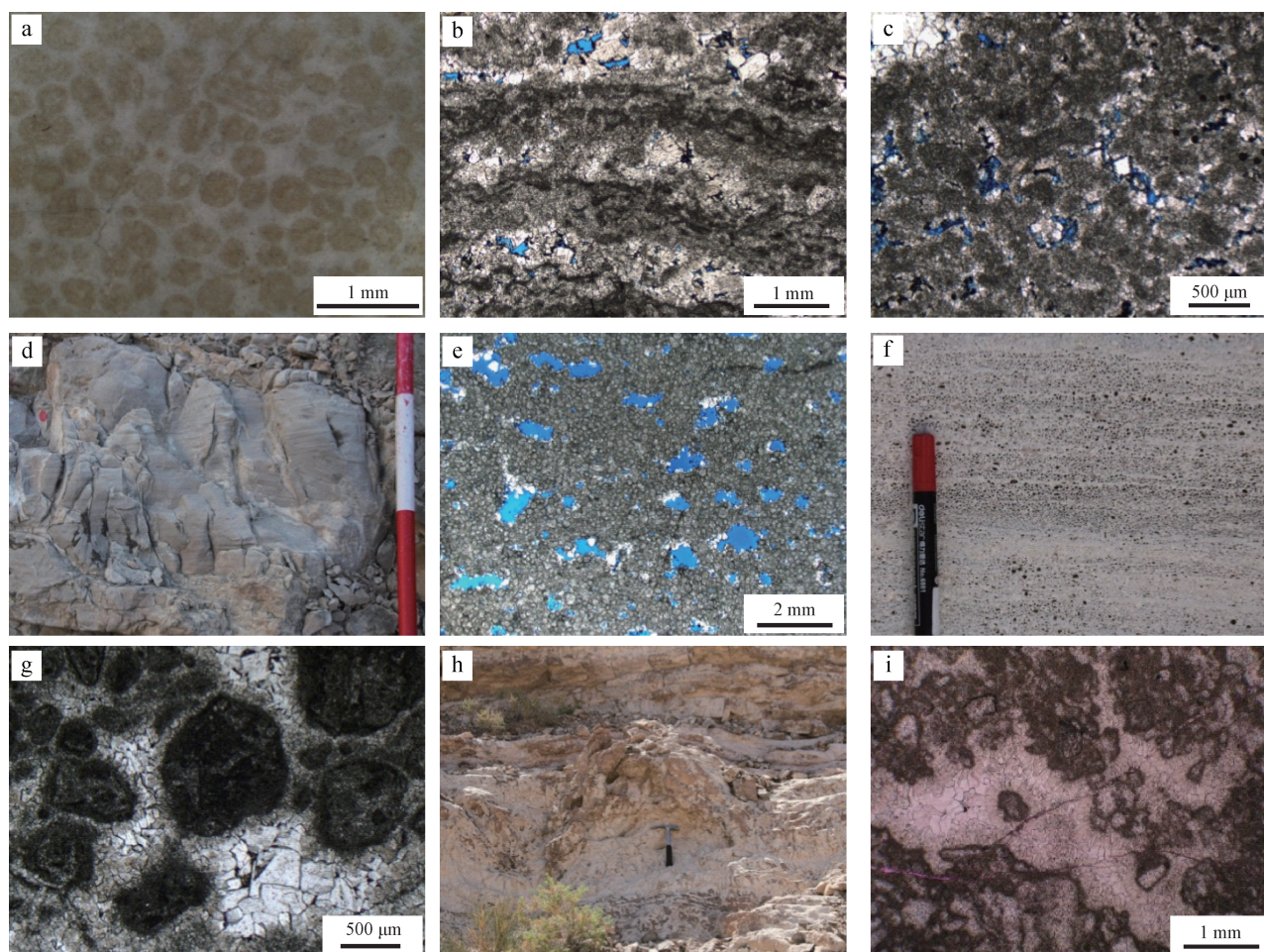


图5 塔里木盆地肖尔布拉克组中缓坡不同类型丘滩体系的宏观与微观照片

Fig. 5 Macro-and micro-scope photos of different mound-shoal complexes in the medium-ramps of the Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

a. 鲕粒云岩, 鲕粒磨圆和分选均好, 亮晶胶结, 肖尔布拉克组, 埋深 7 765.87 m, CT1 井 (原岩结构恢复后); b. 藻格架云岩, 藻格架孔发育, 苏盖特布拉克剖面, 肖尔布拉克组, 蓝色铸体; c. 藻砂屑颗粒云岩, 砂屑颗粒边界欠清晰, 局部为粘结结构, 粒间孔发育, 苏盖特布拉克剖面, 肖尔布拉克组, 蓝色铸体; d. 藻砂屑云岩, 交错层理发育, 肖尔布拉克剖面, 肖尔布拉克组, 露头照片; e. 泡沫棉白云岩, 球状藻密集发育, 膏模孔和鸟眼孔发育, 肖尔布拉克剖面, 肖尔布拉克组, 蓝色铸体, 单偏光; f. 泡沫棉白云岩, 膏模孔和鸟眼孔呈层状富集发育, 肖尔布拉克剖面, 肖尔布拉克组, 露头照片; g. 核形石/粒屑白云岩, 粒屑磨圆较差, 粒缘见薄层微生物包壳发育, 粒间亮晶胶结, 粒间溶孔少量发育, 肖尔布拉克剖面, 肖尔布拉克组, 单偏光; h. 帐篷构造, 肖尔布拉克剖面, 肖尔布拉克组, 露头照片; i. 藻格架云岩, 格架孔被白云石完全充填, Yh5 井, 埋深 6 396.86 m, 粉色铸体, 单偏光。

等。泡沫棉白云岩为球状藻构成 (图 5e), 露头上呈纹层状水平叠置, 分布稳定, 可见膏模孔和鸟眼孔顺层富集发育 (图 5f), 与四川盆地飞仙关组发育的藻纹层云岩特征相似^[16-17], 为滩后潮坪沉积, 能量较低。核形石/粒屑白云岩为颗粒-粘结结构, 颗粒为粒屑, 磨圆较差, 粒缘发育藻纹层 (图 5g), 为内碎屑向核形石转变, 反映水体能力不高, 为潮道-滩后泻湖受水体间歇性改造沉积物。帐篷构造泥晶白云岩发育典型的帐篷构造 (图 5h), 与 Guadalupe 剖面的典型帐篷构造非常相似, 横向分布稳定, 为滩后潮坪沉积。总体上, 该体系为大型丘滩复合体背侧相对低能环境的中-低能沉积。

孤立台坪体系主要发育于轮南-牙哈地区, 仅有牙哈 5 井揭示该体系沉积物为藻格架云岩 (图 5i), 以

原地微生物生长为主, 未见水流改造影响, 格架孔被白云石完全充填, 为高能带背风侧相对低能沉积环境。

2.3 丘滩体系发育规律

受控于沉积地貌、层序演化及沉积物特点, 不同丘滩体系的发育规律和沉积构型存在差异。

1) 颗粒滩体系

主要发育于塔中-巴东地区的“平台”之上, 以厚层鲕滩沉积为主, 具滩体单层厚度大、滩地比高的特点。由于肖尔布拉克组沉积期该区地貌较高, 在海侵早中期一直处于前寒武系基底暴露状态, 在海侵晚期到最大海泛面期间海水覆盖该区, 并在高水位早中期维持了较长时期的浅水环境, 导致该区肖尔布拉克组中下

部沉积了厚度可达 53 m 的鲕粒云岩,单层厚度可达 10 m,占地层厚度比例近 80%。局部夹薄层泥晶生屑砂屑云岩,构成向上变粗的变浅旋回。高水位体系域晚期,随着海平面下降,可容纳空间减小,滩体顶部为潮坪相泥质泥晶云岩覆盖。横向上,肖尔布拉克组鲕粒滩在平台区可对比,顶部覆盖薄层潮坪相可作为标志层,靠近古隆起处潮坪相泥质泥晶云岩比例升高(图 2),与鲕粒云岩指状交互。鲕滩向凹陷方向转变为低能相带,并随海平面下降不断前积叠置,呈“片状”发育。

2) 丘滩型体系

可发育于匀斜缓坡背景下层序演化的各个阶段,在海平面变化过程的各个阶段均发育较大面积的浅水高能环境,有利于丘滩体发育,只是不同阶段丘滩特征略有差异。海侵期间(肖下段沉积期),地貌平缓,以发育稳定的纹层状白云岩为主要特征,局部发育扁平透镜状凝块石微生物丘,厚度多小于 5 m,横向延伸可达数公里。随着海平面持续上升,微生物丘可多期叠置发育,以金磷矿剖面 and 肖尔布拉克露头西侧为典型。相比之下,周围不发育微生物丘的剖面,在海侵晚期接近最大海平面处,以层纹石(代表浓缩段)为典型特征,揭示微生物丘规模与其生长速度和海平面上升速度相关。海侵期的另一特点是以发育微生物丘为主,高能滩相对欠发育,与海平面持续上升,高能带稳定发育时间有限相关。高位域期间,地貌仍较平缓,但由于海平面长期保持稳定,有利于丘滩体系大面积发育,以准层状藻屑滩夹微生物丘为典型特征,表现为“小丘大

滩”(图 3a)。微生物丘大小不等,高可达 21 m,宽达 50 m,呈丘状,丘间间隔为数米到数十米。丘间和丘顶为藻砂屑滩,露头显示层面平整,未见交错层理发育,横向延伸范围超出露头范围。露头与钻井的横向对比显示,该丘滩体系围绕古隆起大面积分布(图 3b),发育典型丘滩复合体的露头或钻井还有金磷矿剖面、英尔苏剖面以及舒探 1 井等,均位于高水位体系域的肖上 2 段,横向上具有非常好的可对比性。层序演化末期的高位域晚期,以发育潮坪相为典型特征,丘滩体系表现为薄层状的叠层石与砂屑滩互层,夹于泥晶云岩等之间。

3) 滩坪型体系

以颗粒滩和潮坪相互层、大范围发育为典型,同样发育于高位域中部,与大型丘滩型体系发育阶段相同。垂向上,藻砂屑白云岩-泡沫棉白云岩与核形石/粒屑白云岩-帐篷构造泥晶白云岩分别构成两个向上变浅的旋回,并合并构成一个向上变浅的旋回,代表了两期高能滩带前积导致伴生岩相的叠置;在横向上,以上 4 类岩相分布均非常稳定,延伸 28 km 范围内均可对比,且厚度稳定(图 6),代表平坦的沉积地貌和稳定的沉积环境,为坡度非常小的缓坡背景下,随海平面旋回性上升下降,中缓坡颗粒滩带发生前积,并伴随滩后泻湖和滩后潮坪的迁移。

4) 孤立台坪体系

总体呈“丘状”或“似孤立台地状”,且具有较为明显的东西分异性(图 4)。东侧边缘明显更陡,且迁移范围较小,表现为加积-前积,构成较为稳定的向上生

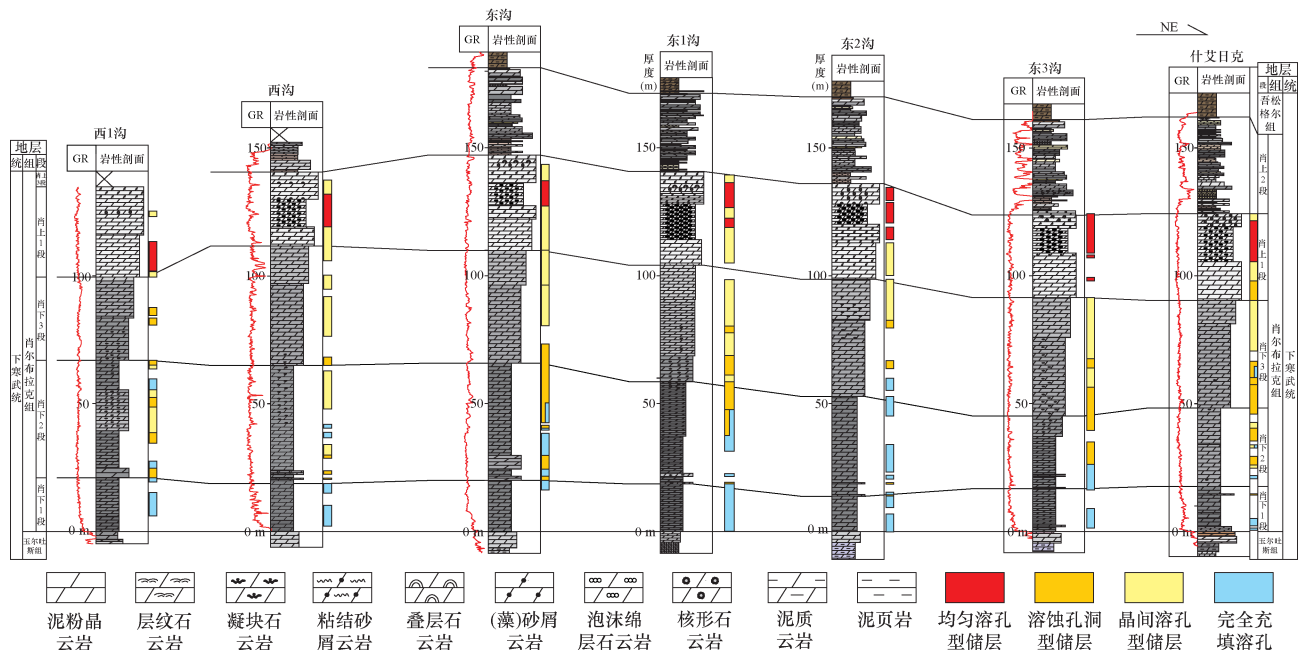


图 6 阿克苏地区肖尔布拉克剖面肖尔布拉克组岩相对比剖面

Fig. 6 Lithofacies correlation of the Xiaerbulake Formation in the Xiaerbulake outcrop in Aksu area

长的建隆,推测为丘滩复合体,与处于迎风面的沉积背景一致;而向西侧,表现为自东侧建隆逐渐向西前积生长,地貌上明显低于东侧建隆,为背风侧典型沉积特点。结合牙哈5井揭示的低能藻格架云岩,推测该区以水下微生物丘或藻席叠置为主要沉积物。

2.4 沉积模式

综合分析,受地形地貌、相对海平面变化和洋流作用方向差异控制,肖尔布拉克组丘滩体系发育3种沉积模式(图7)。

颗粒滩体系发育于大型古隆起围斜区的“平台”之上。在高位域中晚期,相对海平面以缓慢下降为主

旋律。由于洋流方向与“平台”展布方向近一致,沿岸流可使平台区具有持续较高的水体能量。在持续的沿岸流作用下,鲕粒沉积自东向西前积叠置,从而大面积发育。井间对比可见,自古隆起向外围鲕滩厚度有所增加,与地貌和滩体前积叠置相关。随着海平面下降,鲕滩最终被潮坪相所覆盖(图7a)。

丘滩型沉积体系发育于塔西南古隆起和柯坪-温宿低凸起夹持的海湾区(图1a)。研究显示,微生物岩生长与水体深度密切相关^[18-19],其中丘滩体系主要发育于潮间带,潮上带以发育藻纹层云岩为主;潮下带水体作用弱,微生物同样可呈席状发育,形成层厚稳定的微生物岩,即层纹岩(图7b)。寒武纪初期的“隆-凹”

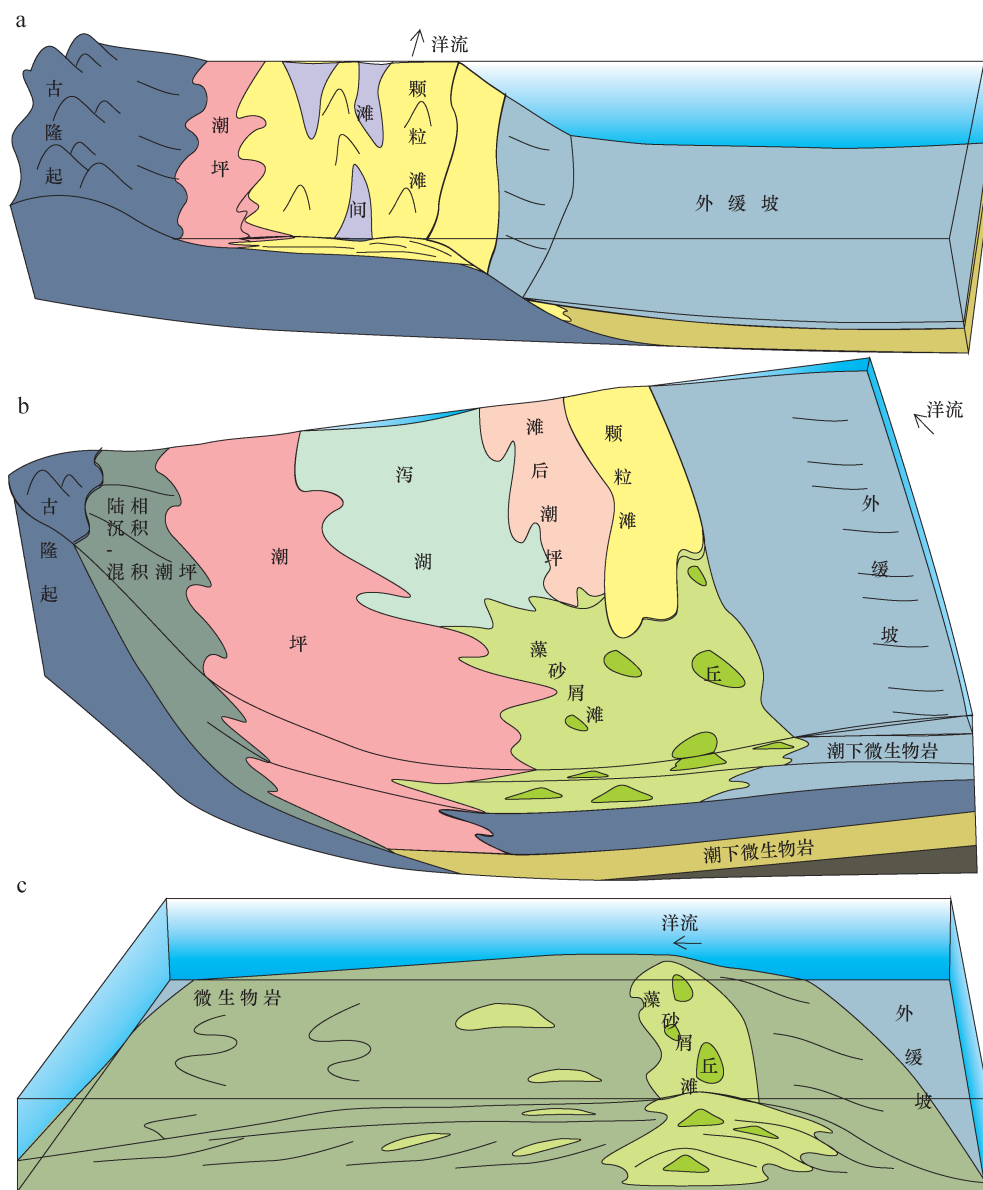


图7 塔里木盆地肖尔布拉克组丘滩体系沉积模式

Fig. 7 Depositional models of mound-shoal complexes of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

a. 颗粒滩沉积模式; b. 丘滩-滩坪型沉积模式; c. 台坪型沉积模式

地貌在经历玉尔吐斯组和肖尔布拉克组海侵体系域一定程度的填平补齐后,变得较为平缓,在古凸起围斜部位形成稳定且较大范围的潮间带。该环境下,微生物繁盛发育,形成丘状局部地貌,在潮汐作用期间,丘间构成主要的水流通道,导致相对高能的藻砂屑沉积,构成丘滩复合体发育(图7b)。层序演化不同阶段海平面的变化特征,对丘滩体系的表现造成一定影响。海侵期以海平面较快速上升为主旋律,仅在靠岸局部微生物生长速度与海平面上升速度相近的区域,形成了丘状的微生物丘体,滩体欠发育。相比之下,高位域中期,由于海平面相对保持稳定,高能带得以长期稳定发育,微生物丘大规模发育,并导致丘间形成高能水体而发育高能滩相,形成大型丘滩复合体。高水位体系域晚期,丘滩体表现为薄层状叠层石和滩体互层,夹于潮坪相泥晶云岩之中。

在下风侧的阿克苏地区,地形相对较高,受洋流影响相对较弱,在高水位体系域中期海平面旋回变化期间,相对高能的颗粒滩沉积与伴生的滩后潮坪相呈旋回性叠置,构成滩坪体系(图7b)。滩坪体系分布揭示,其可能与丘滩体系伴生发育,主要处于丘滩体系背风侧的地形平缓区。

台坪型沉积体系类似于孤立台地特征,迎风面建

隆高度更大、斜坡更陡(图7c),发育规模较大的丘滩复合体。背风侧地形相对较低,以发育水下微生物岩为主,表现为低幅度微生物丘或地层丘为主。

3 丘滩体系储层特征

不同丘滩体系在储集空间类型、储层形成和演化、以及发育规律等方面存在一定的差异。

3.1 储集空间特征

颗粒滩体系的储集岩以细晶(残余)鲕粒云岩为主,以粒间(溶)孔为主要储集空间,发育粒内溶孔和生物体腔孔(图8a),总体上以原生基质孔隙为主,平均孔隙度为2.5%,最高可达4%。

丘滩体系储集岩包括藻砂屑云岩、叠层石云岩、藻格架云岩和藻凝块云岩,以及粘结颗粒云岩。储集空间类型有藻格架孔、粒间溶孔和溶蚀孔洞等。其中藻格架孔主要发育于叠层石云岩和藻格架云岩以及藻凝块云岩(图8b),即微生物丘,为典型的原生孔隙^[3];粒间溶孔和溶蚀孔洞主要发育于藻砂屑云岩和粘结颗粒云岩中。储层平均孔隙度可达4%,最高可达10%。

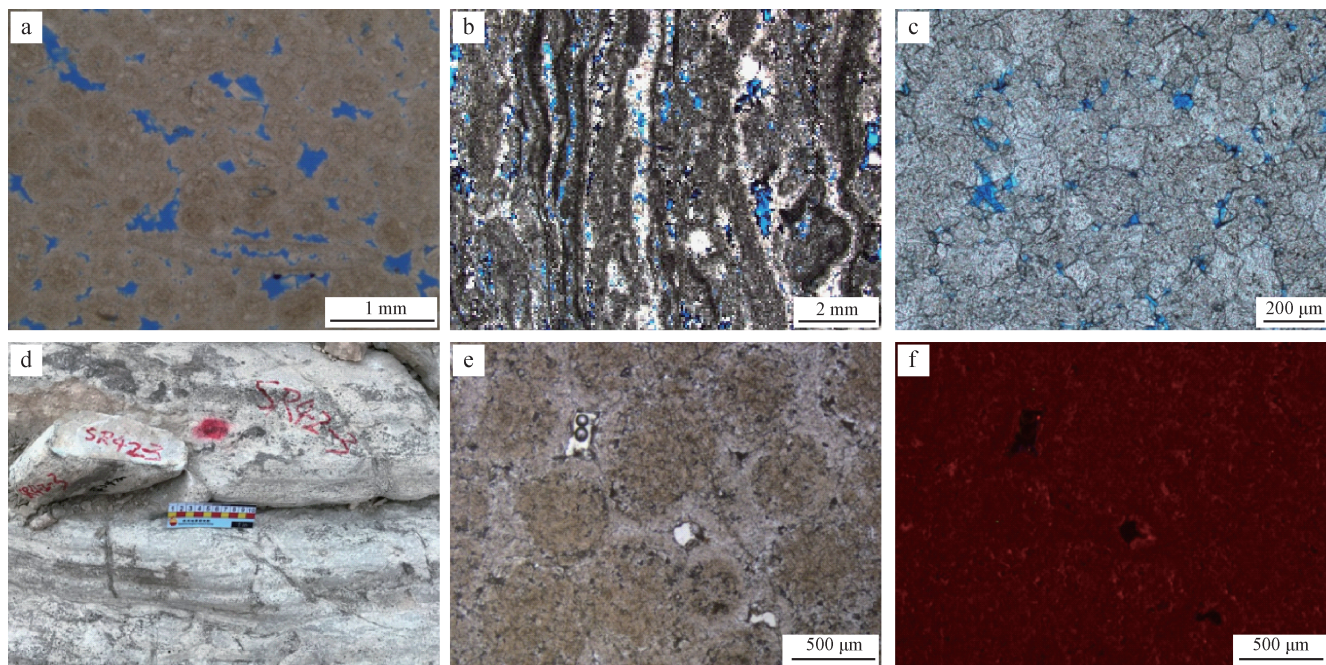


图8 塔里木盆地肖尔布拉克组储层岩石学特征

Fig. 8 Photos showing the reservoir petrologic features of the Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

a. 生屑鲕粒云岩,粒间溶孔、体腔孔发育,局部可见颗粒为线接触,受压实作用改造, C_{1x} , 7 767.6 m, CT1 井(原岩结构恢复后); b. 藻格架岩,格架孔发育,白云石部分充填, C_{1x} , 1 885.6 m, ST1 井,铸体薄片; c. 晶粒云岩,晶间溶孔发育,什艾日克剖面, C_{1x} , 铸体薄片; d. 藻砂屑颗粒云岩,溶蚀孔洞呈层状富集发育,什艾日克剖面,肖尔布拉克组,露头照片; e. 鲕粒云岩,鲕粒分选好,环边胶结发育,残余粒间孔发育, C_{1x} , 7 757.6 m, CT1 井; f. 鲕粒云岩阴极发光,鲕粒与胶结物均昏暗发光, C_{1x} , 7 757.6 m, CT1 井,视域同 e

滩坪体系储集岩包括藻砂屑白云岩、泡沫棉白云岩和核形石/粒屑白云岩,储集空间包括两种类型:一种是藻砂屑白云岩和核形石/粒屑白云岩发育的粒间溶孔或晶间溶孔(图8c),和少量溶蚀孔洞(图8d),平均孔隙度为4.01%;另一种是泡沫棉白云岩发育的膏模孔和鸟眼孔(图5e,f),薄片可见膏模孔呈板状,露头上为扁平状,部分孔隙孔径可达2 mm以上,该类储层平均孔隙度达8.1%。

3.2 储层形成与演化特征

不同类型丘滩储层的形成和演化具有相似性,均以丘滩相为物质基础,白云石化作用对储层保存起重要作用,后期改造强化储层质量,具有明显的相控性。

肖尔布拉克组储层以丘滩相为物质基础,各类储层均发育在丘/滩相中。岩石学特征揭示储集空间以丘/滩沉积中的原生孔为基础,如粒间孔、藻格架孔和生物体腔孔等(图8a,b),其本身即可构成有效储层,并构成后期改造的基础。准同生期,由于丘滩相沉积水体较浅,受高频海平面变化,频繁发生暴露遭受准同生溶蚀作用改造,形成粒内溶孔或铸模孔、膏模孔(图5e,f),进一步强化了丘/滩基质孔的发育程度。需指出的是,因原生孔的发育,尽管准同生溶蚀作用可优化储层质量,但并非储层形成的必要条件。

准同生期-浅埋藏期白云石化作用对丘滩体系基质孔保存起重要作用。丘滩体系中,微生物的介入可能促使(准)同生期微生物白云石化作用的发生,使得叠层石和凝块石等微生物丘具有更好的抗压实能力,其中发育的格架孔在埋藏期得以保存(图9b)。滩坪体系,在准同生期潮坪间歇性暴露期间,导致蒸发泵白云石化作用发生,形成两个产物:①使岩石骨架抗压实能力增强;②暴露期间蒸发作用导致石膏析出,受大气水溶蚀后形成膏模孔,与微生物腐化形成鸟眼孔一起,构成重要的储集空间类型(图5e,f)。颗粒滩体系中,颗粒沉积物在经历了一定程度的海水胶结后,受到压实作用较强烈的改造,部分鲕粒表现为线接触,鲕粒环边胶结略有变形(图8a)。阴极发光显示鲕粒与胶结物发光特征一致(图8e,f),证明白云石化作用发生于海水胶结之后的浅埋藏期。浅埋藏期的白云石化作用增强了岩石抗压实能力,使得剩余粒间孔和体腔孔得以保存,并构成主力储集空间类型,但是由于白云石化作用发生相对较晚,已经历较强压实作用改造,基质孔明显减少,孔隙度在4%左右。

埋藏溶蚀作用对储层质量起重要调整作用。前人研究显示,埋藏溶蚀作用以改造先期储层为主^[7]。各

类丘滩体系均不同程度发育基质孔,构成了后期改造的先期储层。露头与钻井岩心均揭示,肖尔布拉克组晚期溶蚀改造的溶蚀孔洞主要发育于丘滩体系,多为基质孔隙的溶蚀扩大。

3.3 储层发育规律与空间结构特征

3.3.1 储层发育规律

宏观上,储层发育受相控作用明显,储层主体主要发育于高水位中期的中缓坡带(图9)。中缓坡带各类岩石平均孔隙度为2.32%~5.50%,最大孔隙度可达9.39%,具有较好的储集性能;而外缓坡各类岩性孔隙度均小于2%,不构成储层;内缓坡粘结颗粒云岩具有较好的储集性能,平均孔隙度达2.76%,但所占比例较低,该相带占主体地位的泥粉晶云岩平均孔隙度偏低,为1.56%。区域上,中缓坡带围绕古隆起连片发育。

3.3.2 储层空间结构

尽管丘滩体系在沉积期后经历了较复杂的成岩作用改造,但研究显示储层的发育严格受岩相控制,储层结构受沉积体系结构控制。不同丘滩体系岩相类型与发育特征差异导致储层空间结构有所不同。

颗粒滩型储层以原生孔隙为主,具有大面积发育的物质基础,其发育分布严格受控于颗粒滩体的分布,于平台之上沿隆起斜坡呈片状叠置,总体呈条带状分布。受准同生期暴露溶蚀与水下胶结作用改造,使得纵向上储层与非储层互层发育。储层单层厚度可达10米,储滩比近65%。

丘滩型储层主要发育于丘滩复合体,虽然微生物丘和颗粒滩储层物性差异较大,但是均可构成有效储层,储层单层厚度可达50 m,储层占丘滩的厚度比近

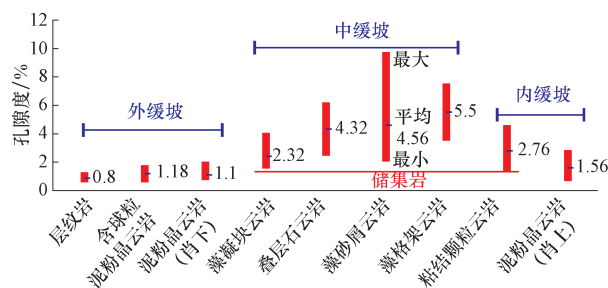


图9 塔里木盆地柯坪地区苏盖特布拉克剖面肖尔布拉克组主要储集岩与孔隙度分布

Fig. 9 Distribution of major reservoirs and porosities of the Xiaerbulake Formation in the Sugaitebulake outcrop in the Keping area, Tarim Basin

80%。因此,丘滩复合体储层总体呈块状,如苏盖特布拉克剖面、昆盖阔坦剖面和舒探1井处(图4),也反应该类储层在横向上具有一定的非均质性。

滩坪储层分布严格受岩相分布控制,储层平均厚度达33 m,横向分布稳定,均质性好,在28 km的露头范围内连续发育,具有大规模发育的潜力。

虽然尚无钻井直接钻揭肖尔布拉克组孤立台坪体系东侧建隆,但根据以上分析,推测该建隆带有利于储层发育。可能的储集岩为丘滩复合体,藻格架孔和粒间溶孔与粒内溶孔为主要储集空间类型,具备发育规模优质储层的潜力。

4 对油气勘探的指导意义

前人研究指出礁(丘)滩相是碳酸盐岩储层形成的物质基础^[5-7],本文的研究中也揭示塔里木盆地肖尔布拉克组储层主要发育于丘滩体当中,但是不同类型的丘滩体中发育的储层存在差异,对应的勘探策略也应有所差别。

颗粒滩体系和滩坪型体系中储层具有一定的相似性,储层均质性好,片状大范围发育,储层具有更好的规模性,只是颗粒滩储层以粒间溶孔等基质孔为主,具有较高的孔隙度的同时,渗透率也较高,而滩坪型储层以膏模孔或鸟眼孔为主,渗透率偏低,这两种储层在该类相带中均具有较高的发育储层的潜力,钻井成功率更高,是勘探初期保证油气发现的首选。而对于丘滩体系的储层,其储层质量好,可达Ⅰ类储层(平均孔隙度大于4.5%),但储层横向分布不均匀,在丘滩复合体发育部位优先发育,宏观上呈块状,因此钻探的成功率可能偏低,但该类储层具有成为规模优质储层的潜力,最可能实现高产稳产。

结合前人研究成果^[1-2]可知,塔中-巴东地区具有非常有利的生储盖匹配条件,发育的颗粒滩体系具有大面积发育鲕粒云岩储层的潜力,钻探成功的可能性大,但是对于该类储层,在无后期改造的情况下,储层孔隙度最高在4%左右,要实现高产难度较大。因此,对于该地区的目标选择,应加强对断裂的分析,寻找后期改造优化的储层,以实现高产井的突破。对于巴楚地区,该区最具有发育规模优质储层的潜力,但该地区构造改造强烈,一方面对储层优化起作用,如舒探1井,另一方面对油气成藏和保存起破坏作用,导致舒探1井和和4井等均仅见油气显示,而无工业油气流。因此,对于该地区,在深化丘滩型储层发育分布刻画的同时,应搜寻构造相对稳定,保存条件相对较好的区

域,更有可能实现高产井的突破。轮南-牙哈地区东部具有发育规模优质储层的潜力,有必要进行深入研究,论证该区成藏条件,特别是盖层的有效性,在盖层有效的区域,实现突破的可能性大。

5 结论

1) 根据大量的岩心和薄片观察,以及露头剖面的详细观察,指出塔里木盆地肖尔布拉克组发育四种丘滩体系类型:颗粒滩型、丘滩型、滩坪型、孤立台坪型,在沉积背景、沉积物类型和储层特征等方面存在差异,具有重要的油气勘探指导意义。

2) 颗粒滩型中缓坡以发育鲕滩为典型特征,储层以基质孔为主要储集空间,以Ⅱ类储层为主,可大面积发育;丘滩型中缓坡以发育微生物丘和藻砂屑滩为典型特征,储层以藻格架孔和粒间溶孔等为主要储集空间,可发育Ⅰ类储层,优质储层呈块状分布,有利于规模优质储层发育;滩坪型中缓坡以微生物丘不发育,且藻砂屑滩和潮坪相大面积发育为典型特征,以发育粒间溶孔的藻砂屑云岩和发育膏模孔和鸟眼孔的潮坪相泡沫棉白云岩为主要储集岩类型,横向上大面积发育,延伸超28 km;孤立台坪型中缓坡丘滩体形似“孤立台地”,东侧迎风面发育较大规模丘滩建隆,具备发育规模优质储层的潜力。

3) 根据储层发育规律,指出塔里木盆地盐下白云岩领域勘探方向:塔中-巴东地区应着重分析断裂期次和机制,寻找优质储层分布范围;巴楚地区应重点寻找构造相对稳定的有利成藏区;轮南-牙哈地区东部值得重视,应重点分析盖层条件,搜寻有利成藏区。

参 考 文 献

- [1] 杨海军,塔里木盆地古生界内幕白云岩勘探认识与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1213-1223.
Yang Haijun, Exploration knowledge and direction of Lower Proterozoic inner dolostones, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7): 1213-1223.
- [2] 王招明,谢慧文,陈永权,等.塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 1-13.
Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, et al. Discovery and exploration of Cambrian Subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 1-13.
- [3] 沈安江,郑剑锋,陈永权,等.塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 340-349.

- Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, et al. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in Lower-Middle Cambrian, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 340–349.
- [4] 张纪智, 王招明, 杨海军, 等. 塔里木盆地中深地区寒武系盐下白云岩油气来源及差异聚集 [J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 40–47.
- Zhang Jizhi, Wang Zhaoming, Yang Haijun, et al. Origin and differential accumulation of hydrocarbons in Cambrian sub-salt dolomite reservoirs in Zhongshen Area, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 40–47.
- [5] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 塔里木盆地寒武–奥陶系白云岩储层类型与分布特征 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 758–768.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Types and distributional features of Cambrian-Ordovician dolostone reservoirs in Tarim Basin, northwestern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 758–768.
- [6] 赵文智, 沈安江, 胡安平, 等. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(11): 3495–3508.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Anping, et al. A discussion on the geological background of marine carbonate reservoirs development in Tarim, Sichuan and Ordos Basin, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(11): 3495–3508.
- [7] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 545–554.
- Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 545–554.
- [8] 赵宗举, 张运波, 潘懋, 等. 塔里木盆地寒武系层序地层格架 [J]. *地质论评*, 2010, 56(5): 609–620.
- Zhao Zongju, Zhang Yunbo, Pan Mao et al. Cambrian Sequence Stratigraphic Framework in Tarim Basin [J]. *Geological Review*, 2010, 56(5): 609–620.
- [9] 陈永权, 严威, 韩长伟, 等. 塔里木盆地寒武纪–早奥陶世构造古地理与岩相古地理格局再厘定——基于地震证据的新认识 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(10): 1832–1843.
- Chen Yongquan, Yan Wei, Han Changwei, et al. Redefinition on structural paleogeography and lithofacies paleogeography framework from Cambrian to Early Ordovician in the Tarim Basin: A New approach based on seismic stratigraphy evidence [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(10): 1832–1843.
- [10] 李保华, 邓世彪, 陈永权, 等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统台缘相白云岩储层建模 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1233–1244.
- Li Baohua, Deng Shibiao, Chen Yongquan, et al. The reservoir modeling of platform margin dolostone of Xiaoerblak Formation, Lower Cambrian, Kalpin Area, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1233–1244.
- [11] 熊益学, 陈永权, 关宝珠, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组北部台缘带展布及其油气勘探意义 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 408–415.
- Xiong Yixue, Chen Yongquan, Guan Baozhu, et al. Distribution of northern platform margin and implications to favorable exploration regions on Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(2): 408–415.
- [12] 倪新锋, 沈安江, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武系碳酸盐岩台地类型、台缘分段特征及勘探启示 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1245–1255.
- Ni Xinfeng, Shen Anjiang, Chen Yongquan, et al. Cambrian carbonate platform types, platform margin segmentation characteristics and exploration enlightenment in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1245–1255.
- [13] 吴林, 管树巍, 任荣, 等. 前寒武纪沉积盆地发育特征与深层烃源岩分布——以塔里木新元古代盆地与下寒武统烃源岩为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 905–915.
- Wu Lin, Guan Shuwei, Ren Rong, et al. The characteristics of Precambrian sedimentary basin and the distribution of deep source rock: a case study of Tarim Basin in Neoproterozoic and source rocks in Early Cambrian, Western China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 905–915.
- [14] 杨鑫, 徐旭辉, 陈强路, 等. 塔里木盆地前寒武纪古构造格局及其对下寒武统烃源岩发育的控制作用 [J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(8): 1164–1171.
- Yang Xin, Xu Xuhui, Chen Qianglu, et al. Palaeotectonics pattern in Pre-Cambrian and its control on the deposition of the Lower Cambrian source rocks in Tarim Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(8): 1164–1171.
- [15] 李江海, 姜洪福. 全球古板块再造、岩相古地理及古环境图集 [M]. 北京: 地质出版社, 2013, 1–127.
- Li Jianghai, Jiang Hongfu. The Atlas of global plate reconstruction, paleo-geography, and paleo-environment [M]. Beijing: Geology Press, 2013, 1–127.
- [16] Qiao Z F, Janson X, Shen A J, et al. Lithofacies, architecture, and reservoir heterogeneity of tidal-dominated platform marginal oolitic shoal: An analogue of oolitic reservoirs of Lower Triassic Feixianguan Formation, Sichuan Basin, SW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 290–309.
- [17] Qiao Z F, Shen A J, Zheng J F, et al. Digitized outcrop geomodeling of ramp shoals and its reservoirs: as an example of Lower Triassic Feixianguan Formation of Eastern Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017.
- [18] Jahnert R J, Collins L B, Characteristics, distribution and morphogenesis of subtidal microbial systems in Shark Bay, Australia [J]. *Marine Geology*, 2012, 303–306: 115–136.
- [19] Jahnert R J, Collins L B, Controls on microbial activity and tidal flat evolution in Shark Bay, Western Australia [J]. *Sedimentology*, 2013, 60, 1071–1099.

(编辑 张玉银)