

塔里木盆地轮南地区 深层寒武系台缘带新认识及盐下勘探区带 ——基于岩石学、同位素对比及地震相的新证据

倪新锋^{1,2}, 陈永权³, 王永生^{1,2}, 熊冉^{1,2},
朱永峰³, 朱永进^{1,2}, 张天付^{1,2}, 俞广^{1,2}, 黄理力^{1,2}

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室; 3 中国石油塔里木油田公司

摘要 塔里木盆地轮南地区轮探1井在8 000 m以深的下寒武统台缘带白云岩中获得重大突破,证实了寒武系台缘带发育优质生储盖组合,是塔里木盆地深层重要的油气勘探领域。通过岩石学、同位素地层对比及地震相分析,认为轮南地区寒武系台缘带经历了早期碳酸盐缓坡到中后期镶边台地的沉积演化过程,形成寒武系盐下多套优质生储盖组合:早寒武世玉尔吐斯期为富泥质的较深水中缓坡外带—外缓坡沉积,发育一套厚20~30 m的烃源岩;肖尔布拉克期为中缓坡外带石灰岩沉积,构造高部位局部发育潮坪及颗粒滩相白云岩储层;吾松格期,发育8~10 km宽的弱镶边台缘礁(丘)滩相储层;中寒武世发育4~5 km宽的强镶边台缘,台内发育5~8 km宽的膏云坪、泥云坪相泥质白云岩及10~15 km宽的膏盐湖—盐湖相膏盐岩2类优质盖层。指出轮南地区吾松格组弱镶边台缘及礁(丘)后颗粒滩与中寒武统膏盐岩构成的储盖组合是目前最现实的勘探领域;中寒武统沙依里克组盐间颗粒滩储盖组合值得进一步探索;古构造高部位肖尔布拉克组的上部白云岩地层仍具勘探潜力。

关键词 台缘带; 演化; 碳同位素; 勘探区带; 盐下; 寒武系; 塔里木盆地

中图分类号: TE121.3 **文献标识码**: A

0 前言

2020年1月19日,部署在塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起上的重点风险探井——轮探1井在7 940~8 260 m的寒武系盐下台缘带白云岩储层中获得重大突破,完井试油在吾松格组中获高产油流(油管压力11.714 MPa,日产油134 m³,日产气45 917 m³^[1])进一步证实了寒武系台缘带发育优质礁(丘)滩相白云岩储层,8 200 m以深依然发育超深层优质储盖组合,该套组合是塔里木盆地深层重要的油气勘探领域。

塔里木盆地寒武系盐下白云岩尚处于风险勘探阶段,基础地质研究十分薄弱,对许多关键地质要素的认识存在争议,这越来越成为制约寒武系盐

下白云岩领域评价与勘探区带优选的关键因素。轮探1井正是为探索轮南地区寒武系盐下领域的石油地质条件而设计。钻前借鉴安岳气田“四古”成藏理论^[2],刻画轮南地区寒武系台缘带迁移结构,认为下寒武统肖尔布拉克组系列前积地震反射代表3期白云岩礁(丘)滩体发育^[3-5],中寒武统蒸发盐岩及致密碳酸盐岩盖层与下伏的下寒武统礁(丘)滩相白云岩储层可形成良好的储盖组合,并结合轮南低凸起属于继承性稳定古隆起的特点^[6],认为有利于深层油气的聚集与保存。然而,实钻结果与钻前在沉积储层上的认识有2点显著差异:①轮探1井在肖尔布拉克组钻揭354 m厚的泥晶灰岩和泥质灰岩,而非钻前预测的中缓坡丘滩相藻白云岩和藻砂屑白云岩,仅在突破层系吾

收稿日期: 2020-08-11; 改回日期: 2020-10-27; 网络出版日期: 2020-11-16

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号: 2016ZX05004-002)、中国石油科技重大专项“深层/超深层油气成藏规律与先进探测技术”子课题“深层油气储层形成机理与分布规律”(编号: 2018A-0103)和“古老碳酸盐岩油气成藏分布规律与关键技术”子课题“古老海相碳酸盐岩沉积环境与构造岩相古地理研究”(编号: 2019B-0405)联合资助

第一作者: 倪新锋,高级工程师,主要从事沉积学与含油气盆地分析研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: nixf_hz@petrochina.com.cn

松格尔组发育 89 m 厚的砂屑白云岩和泥晶白云岩;② 3 期地震前积反射并不代表高能相带。这给轮南地区甚至整个塔北地区的寒武系盐下是否还具有勘探潜力带来了疑问。关键在于对寒武系台缘带与台内的地层对比关系和台缘带的结构、期次、演化过程及其控源、控储、控盖的认识不清。因此,本文聚焦于轮南地区寒武系碳酸盐缓坡到镶边台地沉积的半定量演化过程,在井震结合的基础上,利用新的地震相、岩石学及同位素对比证据,形成轮南地区寒武系台缘结构、台缘带演化过程及其控源储盖组合的新认识,为塔里木

盆地寒武系盐下台缘带勘探指出有利勘探区带。

1 地质概况

轮南寒武系台缘带位于塔北隆起轮南低凸起之上。轮南低凸起是塔北前石炭纪古隆起保存最完好的部分,属塔北隆起中部的一个二级构造单元(图 1a),北邻轮台凸起,东邻库尔勒凸起,西与英买力低凸起相接,南面过渡为北部坳陷的阿满过渡带,为一个大型古生代鼻状基底背斜,鼻状背斜的最高部位位于轮南断裂带北侧(图 1b),向西南方向倾伏^[7-8]。

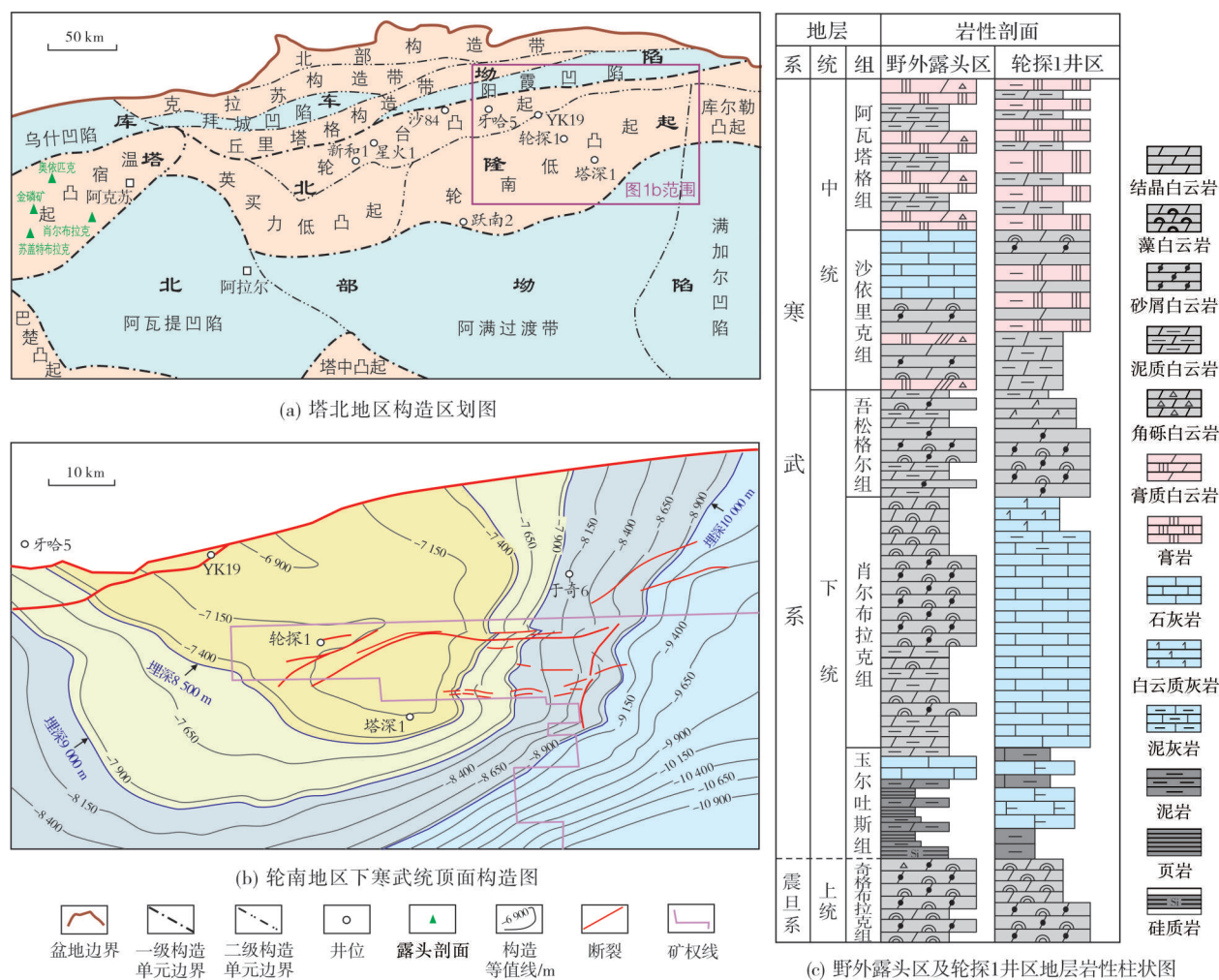


图1 塔里木盆地轮南地区及邻区构造背景及地层岩性柱状图

Fig. 1 Tectonic background and stratigraphic lithology column in Lunnan and adjacent areas, Tarim Basin

受早加里东至中加里东时期稳定构造的控制,塔北隆起内幕区寒武系保存完整(图 1c)。寒武系自下而上依次为:下寒武统玉尔吐斯组(E_1y)、肖尔布拉克组(E_1x)、吾松格尔组(E_1w),中寒武统沙依里

克组(E_2s)、阿瓦塔格组(E_2a)和上寒武统下丘里塔格组(E_3xq)。玉尔吐斯组受控于震旦纪末期古地貌,分布在前寒武纪裂坳体系发育区,岩性较为稳定,为一套以黑色泥页岩、薄层含磷结核硅质泥岩、

瘤状灰岩为主的海泛沉积,局部夹薄层白云岩。肖尔布拉克组总体为一个从海平面上升到逐渐下降的三级旋回,受古地貌控制,岩性差异较大:阿克苏乌什地区野外露头区由下往上主要为深灰色薄层(含砂屑)泥—粉晶白云岩,灰色薄层凝块石白云岩、层纹白云岩及石灰岩,灰白色厚层一块状藻丘白云岩、藻砂屑白云岩、泡沫绵层白云岩、粉—细晶白云岩、粘结颗粒白云岩夹薄层泥—粉晶白云岩;新和1井、轮探1井、星火1井、沙84井及YK19井均为泥晶灰岩、球粒灰岩及少量颗粒灰岩(图1c)。吾松格尔组总体为薄—中层泥质白云岩、泥粉晶白云岩与薄层颗粒白云岩互层,但新和1井区为泥晶灰岩。中寒武统沙依里克组为一套中厚层状深灰色、灰褐色泥粉晶白云岩、颗粒白云岩,中上部夹一套稳

定分布的石灰岩。阿瓦塔格组由于台缘的阻隔导致台内水体不畅,发育巨厚的蒸发潟湖或局限台地潮坪相膏盐岩、含膏泥岩以及泥质白云岩等(图1c)。

2 沉积演化过程再认识

轮南地区寒武系台缘带主要经历了早期碳酸盐缓坡到中后期镶边台地的演化过程:早寒武世玉尔吐斯期为富泥质的较深水中缓坡外带—外缓坡沉积,肖尔布拉克期为中缓坡外带沉积,吾松格尔期海平面下降,开始出现8~10 km宽的弱镶边台缘;中寒武世海平面继续下降,发育强镶边礁(丘)台地边缘;晚寒武世发育强镶边礁(丘)台地边缘,礁(丘)出露水面遭遇强剥蚀,在斜坡带形成钙屑浊积岩(图2,图3)。各沉积期具有不同的碳同位素特征(表1,图4)。

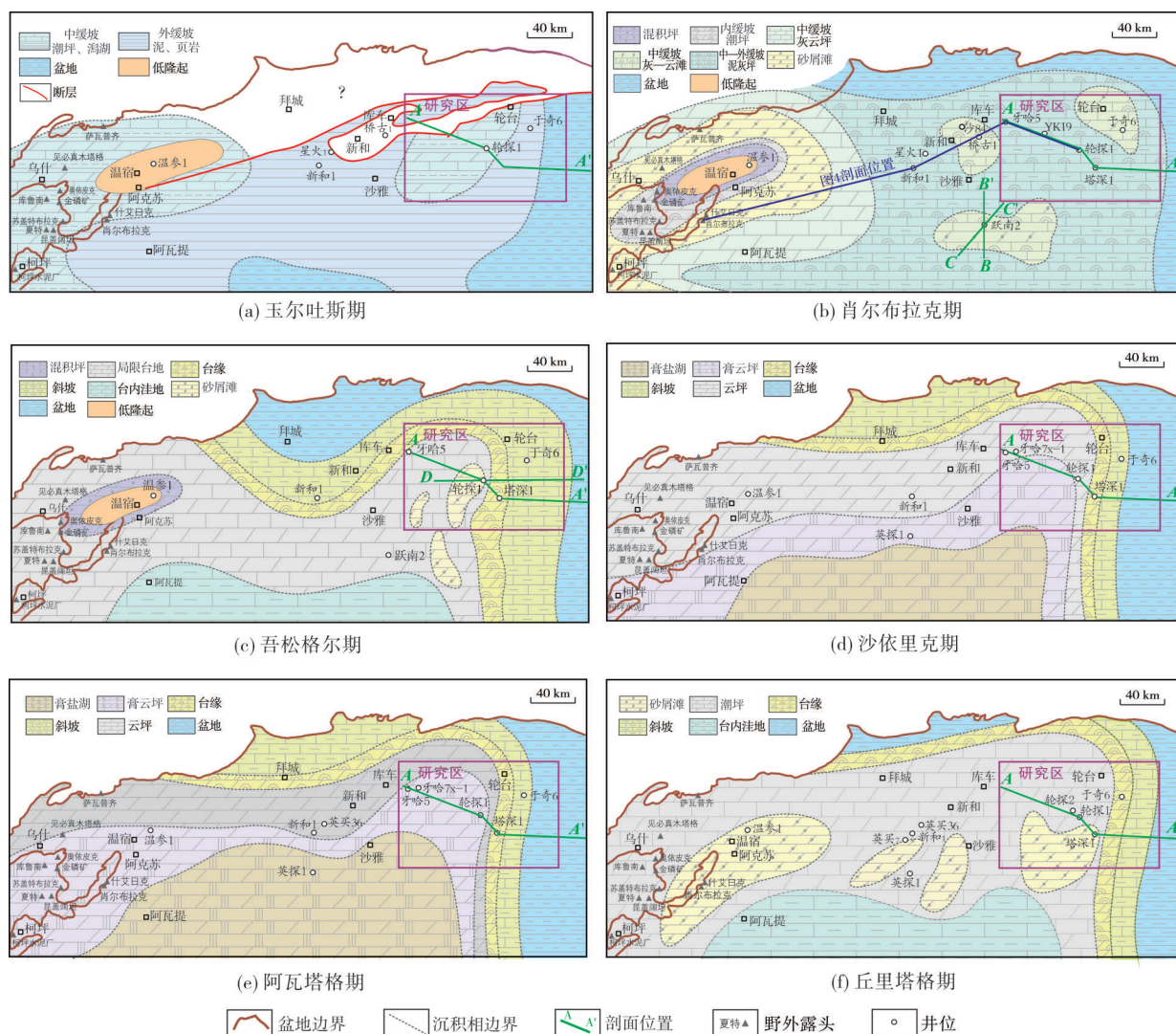


图2 塔北地区寒武纪岩相古地理图

Fig. 2 Lithofacies paleogeography maps of the Cambrian in Tabei area

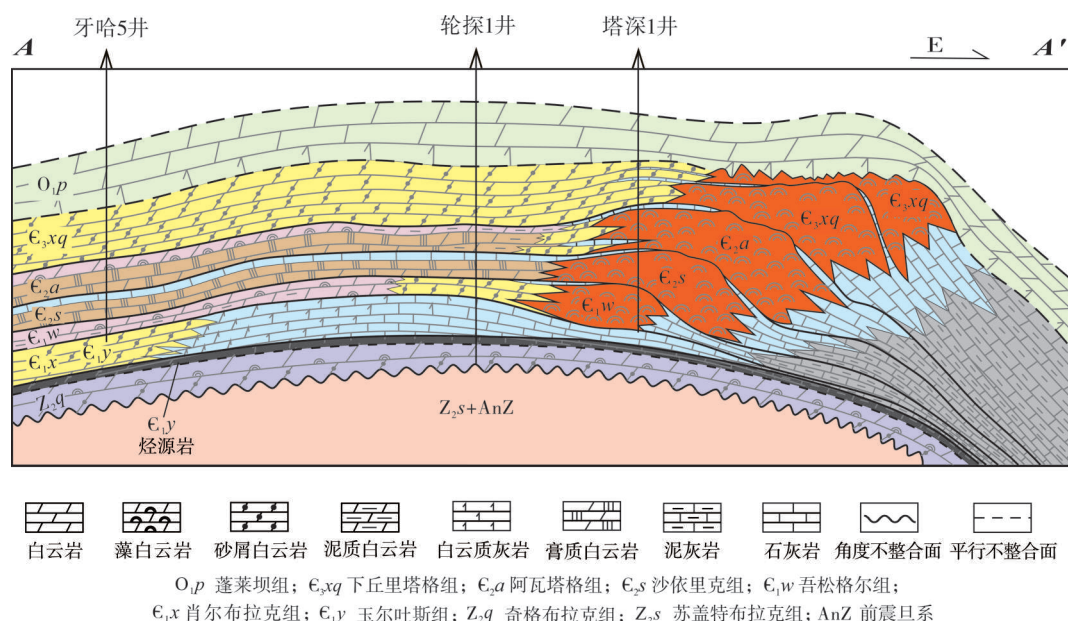


图3 塔北地区过牙哈5井-轮探1井-塔深1井寒武系台缘带演化模式图(剖面位置见图2b)

Fig. 3 The platform margin evolution of Cambrian across Well Yaha 5-Luntan 1-Tashen 1 in Tabei area(the section position is shown in Fig. 2b)

表1 塔北地区中下寒武统碳同位素组成及优势相带统计

Table 1 Statistics of carbon isotopes and dominant facies of Middle-Lower Cambrian in Tabei area

层位	露头 and 井名	样品数	$\delta^{13}C / \text{‰}$		沉积环境	
			范围	平均值	优势沉积相	台缘礁(丘)滩带宽度
中寒武统 阿瓦塔格组	露头	72	-2.932~1.274	-0.521	云坪+膏云坪	5~8 km, 强镶边加积- 进积型台缘礁(丘)滩
	新和1	11	-2.630~0.330	-0.357	云坪+膏云坪	
	牙哈5					
	轮探1	42	-1.240~2.240	0.258	膏云坪+膏盐湖	
中寒武统 沙依里克组	露头	75	-15.577~-1.170	-5.709	云坪+颗粒滩	4.7~10.2 km, 强镶边 加积-进积型台缘礁 (丘)滩
	新和1	43	-10.010~1.100	-1.219	云坪	
	牙哈5	56	-6.500~1.500	-0.480	云坪	
	轮探1	65	-0.890~1.590	0.205	云坪+膏云坪	
下寒武统 吾松格尔组	露头	26	-2.505~-0.231	-1.480	局限台地潮坪+颗粒滩	8.7~10.6 km, 弱镶边 台缘礁(丘)滩带
	新和1	20	-0.930~0.930	-0.214	斜坡	
	牙哈5	12	-4.500~-1.400	-3.050	潮坪	
	轮探1	24	-0.680~0.890	0.308	台缘礁(丘)后颗粒滩	
下寒武统 肖尔布拉克组	露头	79	0.628~3.055	1.964	内缓坡—中缓坡潮坪+颗粒滩	零星发育灰-云岩颗 粒滩, 复合叠置宽度 在 20 km 左右
	新和1	33	0.250~2.390	1.703	中缓坡灰坪	
	牙哈5	9	-0.100~3.300	1.943	中缓坡颗粒滩+潮坪	
	轮探1	50	-0.190~0.900	0.300	中缓坡外带	
下寒武统 玉尔吐斯组	露头	16	-8.016~-0.694	-1.937	中缓坡潮坪—潟湖	
	轮探1	34	-3.140~0.740	-0.962	中缓坡外带—外缓坡	

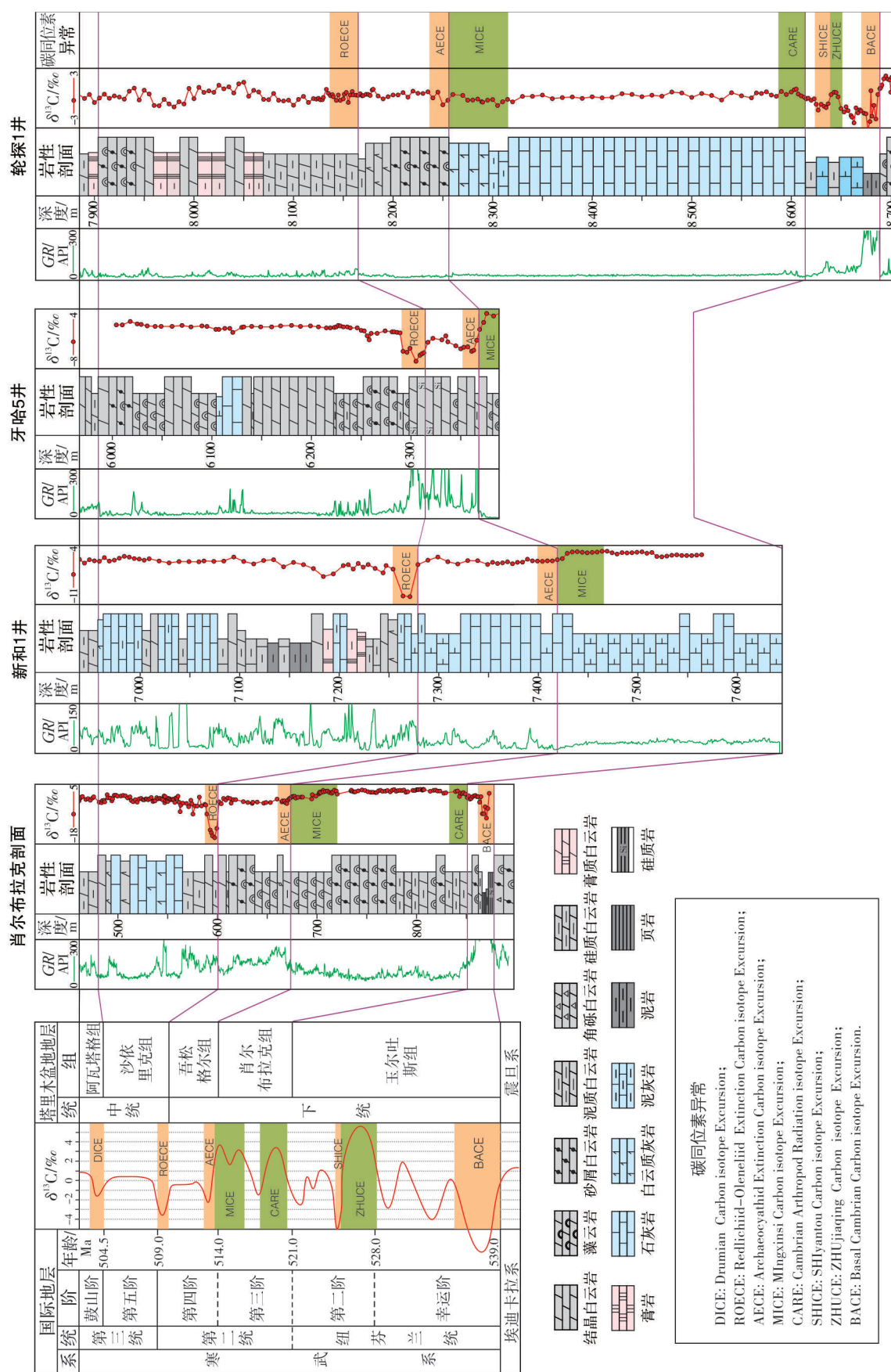


图4 塔北地区肖尔布拉克剖面—新和1井—牙哈5井—轮探1井中下寒武统碳同位素对比图(剖面位置见图2b)

Fig. 4 Carbon isotope comparison profile of Middle-Lower Cambrian across Xiaerbulak outcrop-Well Xinhe 1-Well Yaha 5-Well Luntan 1 in Tabei area (profile position is shown in Fig. 2b)

2.1 早寒武世玉尔吐斯期较深水缓坡

受南华纪—震旦纪裂坳体系及其继承性沉降作用的控制^[9-12],早寒武世玉尔吐斯期塔北地区主体发育向上变浅的较深水缓坡沉积,轮南地区主体位于富泥质的中缓坡外带—外缓坡(图2a)。古生代时期轮南低凸起是一个向西南方向倾伏^[7-8]的大型鼻状基底背斜。在此期间轮台凸起与轮南低凸起的构造演化是一体的,共同构成了塔北前石炭纪古隆起的主体,直到海西末期—印支期轮台—沙雅断裂形成后,两者才明显分开而差异演化。而处于塔北隆起西段的温宿凸起(图1a),核部地层主要由前震旦系组成,向南天山方向抬升,向塔里木盆地方向倾没,构造高部位大面积缺失古生代—中生代地层,晚新生代地层往往直接不整合于前寒武纪变质岩之上。由此可以看出,早古生代,温宿凸起的位置相对轮台凸起及轮南低凸起要高,从而造成位于温宿凸起上的野外露头群的玉尔吐斯组大面积发育白云岩,而位于轮台凸起上的星火1井以及位于轮南低凸起上的轮探1井的玉尔吐斯组甚至肖尔布拉克组则沉积了相对深水的泥晶灰岩(图2a, 2b),形成在轮南地区广泛分布的一套优质烃源岩(图3)。这套烃源岩厚度为20~30 m, TOC平均值为3.6%,最大可达13.39%。

从阿克苏—乌什地区野外露头群12个露头剖面、星火1井、轮探1井的地质特征来看,玉尔吐斯组主要发育上下2个岩性段:下段主要以黑色泥页岩、硅质岩、瘤状泥晶灰岩夹薄层泥质白云岩为主;上段主要为灰色白云岩、石灰岩及黑色泥页岩,顶部见大量陆源碎屑。从东西向对比来看,玉尔吐斯组下段岩性总体稳定,为一套富泥质细粒沉积,仅在昆盖阔坦和苏盖特布拉克剖面中部发育薄层泥晶白云岩;上段岩性变化较大,露头群总体发育一套碳酸盐岩沉积,由西向东白云岩逐渐减少,石灰岩厚度逐渐增大,到星火1井再到轮探1井则变为大套泥晶灰岩夹薄层泥页岩,不发育白云岩。推测这主要是由于分属不同的构造单元造成了岩性上的差异。但从碳同位素对比结果来看(表1,图4),肖尔布拉克野外露头与钻穿玉尔吐斯组的轮探1井的碳同位素变化曲线可良好对比:肖尔布拉克露头 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -8.016‰ ~ 0.694‰ 之间,平均值为 -1.937‰ ;轮探1井 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -3.14‰ ~ 0.74‰

之间,平均值为 -0.962‰ 。两者的 $\delta^{13}\text{C}$ 数值总体偏负,玉尔吐斯组底部均见到寒武系底全球可对比的BACE (Basal Cambrian Carbon isotope Excursion) 负异常,对应埃迪卡拉型动物群的灭绝^[13-14]。

2.2 早寒武世肖尔布拉克期碳酸盐缓坡

早寒武世肖尔布拉克期继承了玉尔吐斯期整体西高东低的沉积格局,沉积了寒武纪第一套大面积分布的缓坡碳酸盐岩(图2b)。由于温宿凸起、轮台凸起及轮南低凸起等继承性古凸起的差异性控制,肖尔布拉克期发育2大相区,温宿凸起上的野外露头群总体为白云岩夹薄层石灰岩,而轮台凸起上的新和1井、星火1井及轮南低凸起上的轮探1井、沙84井、YK19井均为泥晶灰岩(图5a, 5b)、球粒灰岩及少量颗粒灰岩。

对于轮南地区早寒武世肖尔布拉克期的沉积有2点新认识:

(1)依据碳同位素地层对比厘定牙哈5井底部争议段归属肖尔布拉克组,指出轮南地区肖尔布拉克组沉积期的晚期或构造高部位仍可发育藻白云岩和泥粉晶白云岩。

碳同位素地层对比结果表明(表1,图4),轮探1井肖尔布拉克组基本以下部的碳同位素 CARE (Cambrian Arthropod Radiation isotope Excursion) 正异常和上部的碳同位素 MICE (Mingxinsi Carbon isotope Excursion) 正异常为主,之间有1~2次小的负异常波动, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -0.19‰ ~ 0.9‰ 之间(表1),平均为 0.3‰ 。这两个正异常与寒武纪生物大爆发的顶峰时期基本对应^[13,15-17],分别对应著名的寒武纪大爆发的主幕澄江动物群(CARE)以及古杯动物群(MICE)的大量繁盛期。这是由于海平面上升导致水体加深,浪基面也随之上升,生物光合作用所能达到的界面随之上移,原来水体耗氧量增大,溶解氧被消耗,导致缺氧或还原环境的扩大;同时,海平面上升还能引起底层热卤水的形成和海水密度分层。这些因素都会促进富集 ^{12}C 的有机碳保存,从而使碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值正向漂移^[18]。新和1井虽未钻穿肖尔布拉克组,但其保留了上部的碳同位素 MICE 正异常, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 0.25‰ ~ 2.39‰ 之间,平均为 1.703‰ 。阿克苏地区野外露头肖尔布拉克剖面的变化趋势与轮探1井基本相同,肖尔布拉克组 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本偏正,均保留了碳同位素 CARE 和 MICE 正异常,之间有1

次小的负异常波动, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 0.628‰ ~ 3.055‰ 之间, 平均为 1.964‰ 。由此可见, 塔北地区完全符合全球寒武系第二统碳同位素变化规律。

根据以上碳同位素变化规律, 对牙哈5井底部的 $6\,369\sim 6\,399.06\text{ m}$ 归属争议段开展碳同位素研究, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -0.1‰ ~ 3.3‰ 之间(表1, 图4), 平均为 1.943‰ 。由此, 认为牙哈5井底部钻揭的 30 m 厚的争议井段应归属为肖尔布拉克组。推断有2种可能: 一种可能是牙哈5井在肖尔布拉克组沉积期比轮探1井和新和1井的位置要高, 从而形成了一套礁(丘)滩相沉积的藻白云岩(图5c—5e)和粉晶白云岩, 下部未钻揭的肖尔布拉克组有可能和野外露头一样均为白云岩; 另外一种可能就是钻揭的 30 m 厚的争议井段为白云岩, 而未钻揭的下部地层发育

石灰岩, 原因是肖尔布拉克组沉积早期的水体相对要深, 未能形成渗透回流型白云岩。这种现象在四川盆地楼探1井的寒武系龙王庙组以及鄂尔多斯盆地麟探1井的寒武系张夏组均有见到, 其上部发育一套粉—细晶白云岩、残余颗粒白云岩, 而下段则为白云质灰岩、鲕粒灰岩和泥晶灰岩。对位于轮台凸起的新和1井第2筒岩心肖尔布拉克组石灰岩作了全岩矿物分析, 白云石含量可达 19.4% , 微观结构上与石灰岩呈纹层状或团块状分布(图5f), 镜下可见 $5\%\sim 8\%$ 的陆源碎屑, 指示肖尔布拉克期塔北地区整体水体不深。这种认识提升了牙哈—轮南地区肖尔布拉克组的勘探潜力, 认为其位于中缓坡中—外带, 只要构造及海平面位置适宜, 轮南地区依然存在白云岩相区发育的可能。

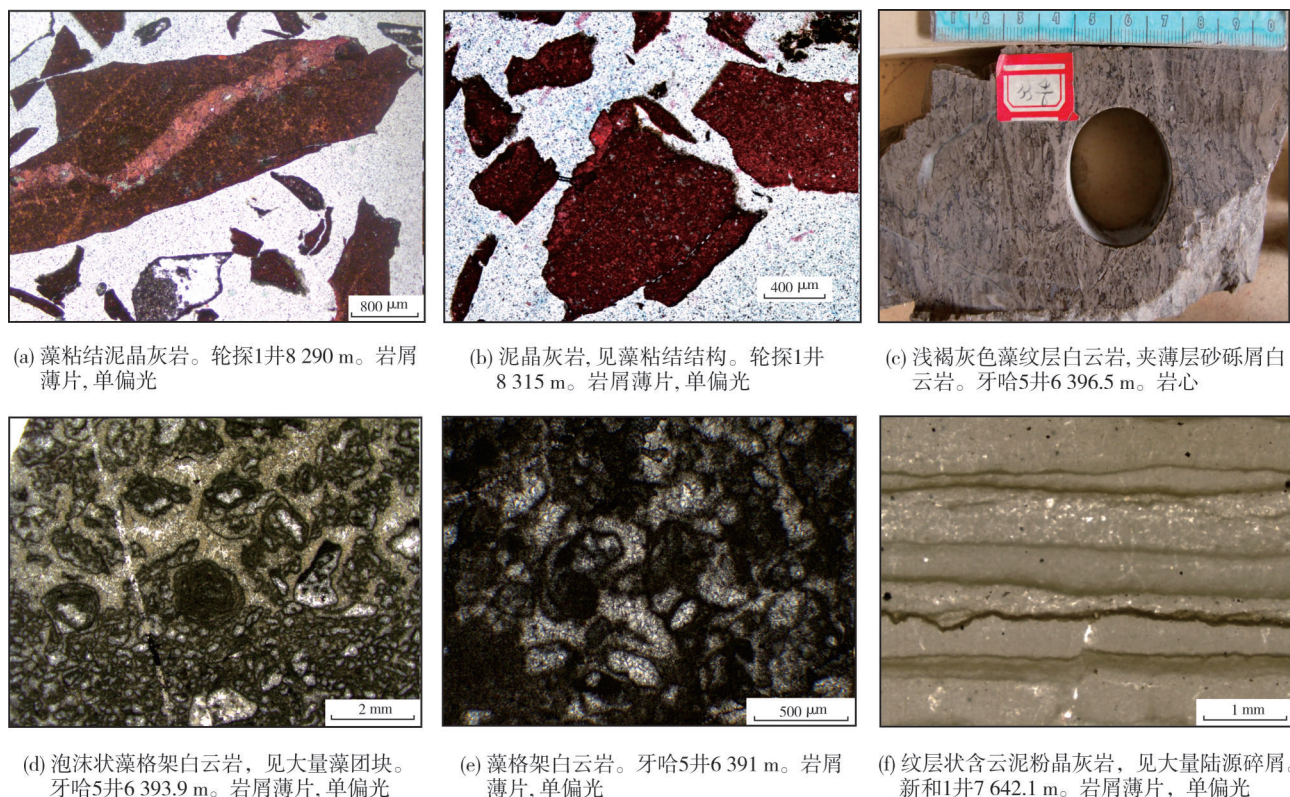


图5 轮南地区下寒武统肖尔布拉克组岩性特征

Fig. 5 Lithologic characteristics of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Lunan area

(2) 通过地震正演模拟和地震相刻画, 提出轮探1井西南部可能发育高能相带。

以柯坪地区肖尔布拉克组长约 28 km 、近北东向的条带状露头区为基础^[19-20], 开展地震正演模拟研究, 模拟不同频率下丘滩复合体的地震响应, 并系统总结其地震反射特征。露头区主要发育碳酸

盐缓坡背景下的以“微生物层—微生物丘滩—潮坪”为主的丘滩体系。其中的丘主要以粘结结构藻丘和泡沫绵层石丘为主, 具丘状结构、充填结构, 规模较小; 滩主要以藻砂屑滩为主, 具席状结构, 成层性好, 厚度相对稳定, 横向展布具有连续性, 规模较大; 丘滩体整体表现为“小丘大滩”的特征。通过设

定不同的频率(25 Hz、50 Hz、75 Hz、100 Hz)进行模拟,结果表明:针对研究区目的层丘滩体的厚度,当频率为25 Hz时无法识别内部结构,仅大致识别丘滩体为丘状/亚平行反射。只有当频率提高到100 Hz时,才能识别丘滩体内部结构及外部形态。藻丘往往表现为高频、强振幅、较连续反射,呈丘状外形,具充填结构;藻砂屑滩往往表现为中—高频、中—强振幅、连续席状反射,内部斜交叠置;丘滩复合体则表现为弱反射背景下的强反射,呈丘状外形,内

部层状叠置。基于上述正演模拟结果,认为在实际常规地震资料仅有20 Hz频率的情况下无法识别丘滩体的内部结构,可大致识别丘滩体为丘状/亚平行反射。由此对轮南地区的地震相重新进行刻画,认为跃南2井周缘地震前积反射后端的丘状/亚平行反射为高能相带(图6),推测发育准层状藻云坪及藻砂屑滩体,丘滩体碳酸盐工厂宽度可达32~54 km,仅轮探1井西南部跃南2井周缘丘状/亚平行反射的高能相带面积可能达 $0.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

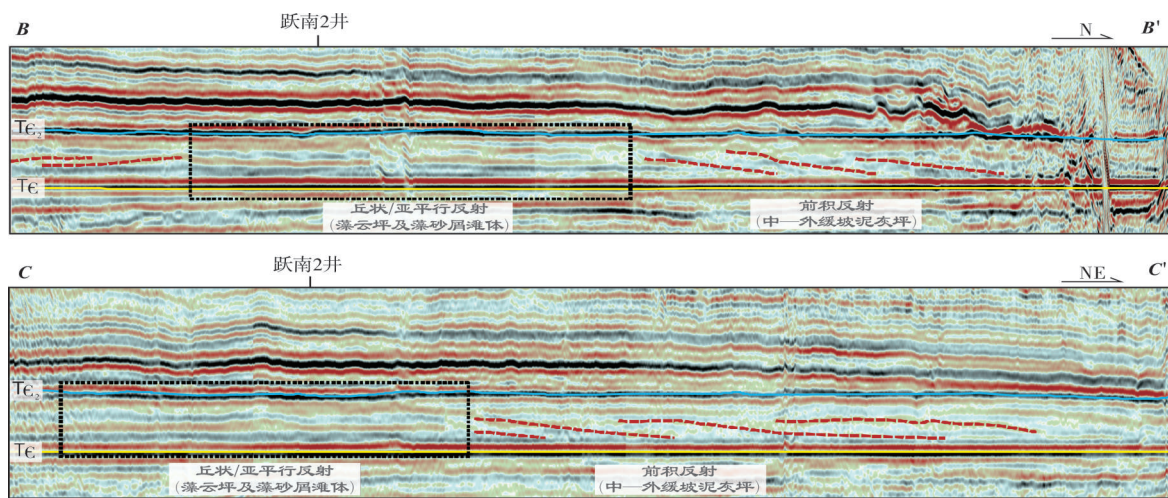


图6 塔北地区过轮探1井西南部跃南2井地震剖面(剖面位置见图2b)

Fig. 6 Seismic profile across Well Yuenan 2 in southwest of Well Luntan 1 in Tabai area(the position is shown in Fig. 2b)

2.3 早寒武世吾松格尔期弱镶边碳酸盐台地

吾松格尔组沉积期,海平面下降,开始出现8.7~10.6 km宽的弱镶边沉积(图2c),藻类大量发育,地震上表现为丘状杂乱反射特征(图7),向台内方向逐渐表现为亚平行、较连续、低频中振幅反射特征,向斜坡方向逐渐表现为斜交前积—平行连续强振幅反射特征。从井震标定结果来看,轮探1井为镶边礁(丘)后颗粒滩沉积,岩性主要为镶嵌状残余颗粒细晶白云岩(图8a)、藻粘结颗粒白云岩(图8b)、白云石化藻粘结颗粒灰岩及少量泥晶藻灰岩。牙哈5井岩性主要为藻粘结粉晶白云岩(图8c)、藻砂屑白云岩、镶嵌状粉晶白云岩,局部见雾心亮边及异形白云石,硅化较严重(图8d),部分岩溶角砾化,但与藻相关的原岩结构明显。其中镶嵌状残余颗粒粉晶白云岩与轮探1井岩性基本一致。而该时期的新和1井为纹层状泥晶灰岩、薄层粒泥灰岩、亮晶藻砂屑灰岩、泥晶球粒灰岩,局部白云石化,部分见陆源碎屑。吾松格尔组在野外露头群的

肖尔布拉克剖面、夏特剖面、奥依皮克剖面、见必真木塔格剖面及萨瓦普齐剖面均有良好出露,总体可分为上下两段,下部以藻白云岩、泥晶白云岩、泥质白云岩夹薄层颗粒白云岩为主,上部以粉晶白云岩、藻白云岩及泥质白云岩为主,主体为潮坪相沉积,发育中薄层颗粒滩(图8e,8f)。

碳同位素地层对比结果表明,轮探1井、牙哈5井、新和1井及野外露头均在吾松格尔组底部普遍发育碳同位素 AECE(Archaeocyathid Extinction Carbon isotope Excursion)负异常(表1,图4),与寒武纪古杯动物群的大规模灭绝基本对应^[13,15-17],进一步明确了地层的等时效应。轮探1井吾松格尔组 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -0.68‰ ~ 0.89‰ 之间(表1),平均为 0.308‰ ,底部 AECE 负漂移段为 -0.68‰ ~ -0.22‰ 。牙哈5井吾松格尔组 $\delta^{13}\text{C}$ 数值总体上偏负,变化在 -4.5‰ ~ -1.4‰ 之间,平均为 -3.05‰ ,底部 AECE 负漂移段为 -4.5‰ ~ -2.3‰ 。新和1井吾松格尔组 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -0.93‰ ~ 0.93‰ 之间,平均为 -0.214‰ ,与轮探1井和牙哈5井相比底部 AECE 负漂移不是

很明显,与下部肖尔布拉克组 MICE 正异常相比存在略偏负的跳跃。野外露头肖尔布拉克剖面的变化趋势与上述钻井基本相同,吾松格尔组碳同位素总体偏轻,底部见 AECE 负异常, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 $-2.505\text{‰} \sim -0.231\text{‰}$ 之间,平均为 -1.48‰ ,底部 AECE 负漂移段为 $-2.409\text{‰} \sim -0.268\text{‰}$ 。总体而言,吾松格尔组的碳同位素较肖尔布拉克组偏轻,表明吾松格

尔组沉积期的海平面较肖尔布拉克期低,这也能充分解释为什么轮探1井在肖尔布拉克组发育石灰岩,而在吾松格尔组开始大面积发育渗透回流型白云岩,说明轮探1井所处的区带在吾松格尔组沉积期为一个台缘带转换的关键部位。碳同位素对比结果(表1,图4)也进一步证实了轮南地区开始出现弱镶边台缘沉积具有充足的地质背景。

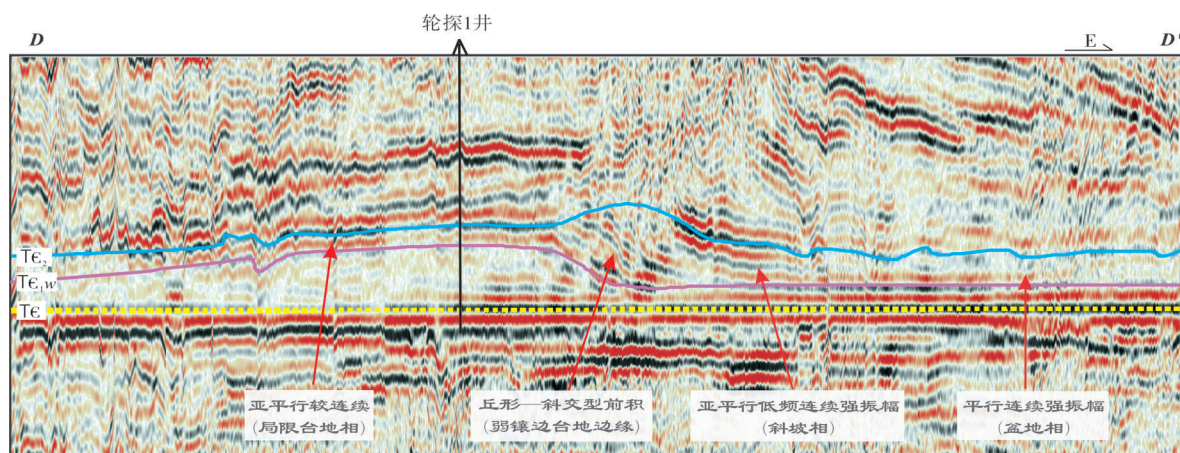


图7 塔北地区吾松格尔组地震相特征(剖面位置见图2c)

Fig. 7 Seismic facies of Wusongger Formation in Tabei area(the position is shown in Fig. 2c)

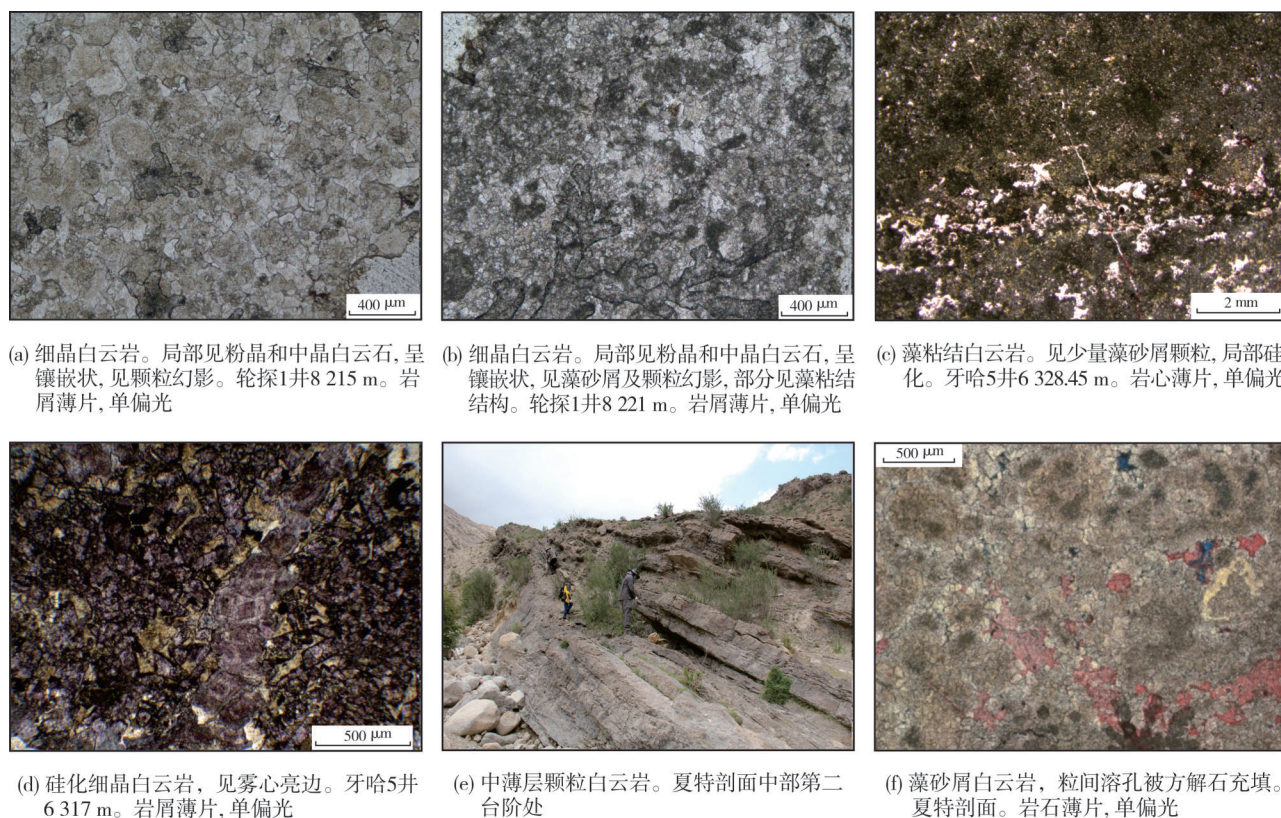


图8 塔北地区吾松格尔组宏观地质特征

Fig. 8 Macro-micro geological characteristics of Wusongger Formation in Tabei area

2.4 中寒武世沙依里克期镶边碳酸盐台地

中寒武世沙依里克期,轮南地区在吾松格期弱镶边的基础之上发育强镶边礁(丘)台地边缘(图2d),礁(丘)滩体碳酸盐工厂宽度缩减至4.7~10.2 km,其中边缘相带为3~5 km,并迅速过渡为5 km宽的泥云坪和膏云坪以及宽泛分布的台内的膏盐湖—盐湖(图2d),类似美国二叠盆地 Grayburg 和 Queen 组的沉积^[21]。该时期轮探1井沉积了一套与藻相关的白云岩,主要为藻砂屑白云岩、藻粘结白云岩、粉—细晶白云岩、细—中晶白云岩及藻纹层泥晶白云岩;牙哈5井的岩性总体与轮探1井类似,主要的区别在于牙哈5井沙依里克组中部6 107.2~6 121.4 m段发育了一套藻粘结泥晶灰岩、亮晶藻砂屑灰岩;新和1井及野外露头在岩性上总体表现为上下两段,下部为一套泥晶白云岩夹薄层颗粒白云岩,上部为一套石灰岩及白云石化石灰岩,指示中寒武世沙依里克中后期存在一个规模性海侵过程,而此时边缘相带的轮探1井及牙哈5井总体位于古地貌高部位,因此发育一套与藻相关的白云岩。由于台缘带继承性发育,加积—进积作用不断增强,轮南—塔中32井区演化为典型的强镶边型台缘,地震反射外部形态为大型丘状,内部结构分为较连续相和斜交前积相2个亚相区。向斜坡方向,逐渐过渡为平行、较连续、中振幅反射;向台内方向,逐渐过渡为低频、平行、连续强振幅反射(图7)。

碳同位素地层对比结果表明,轮探1井、牙哈5井、新和1井及野外露头均在沙依里克组底部普遍发育碳同位素 ROECE(Redlichiiid-Oleneliid Extinction Carbon isotope Excursion)负异常(图4),代表莱德利基虫类(Redlichiiid)/小油栉虫类(Oleneliid)集群灭绝,这已被大量文献证实可作为寒武系第二统底界的重要等时对比标志^[13,16]。轮探1井沙依里克组 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -0.89‰ ~ 1.59‰ 之间,平均为 0.205‰ ;底部存在轻微的 ROECE 负异常漂移段为 -0.44‰ ~ 0.32‰ 。牙哈5井沙依里克组 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体呈上部偏正、底部强烈偏负的特征,变化在 -6.5‰ ~ 1.5‰ 之间,平均为 -0.48‰ ;底部的 ROECE 负异常特别典型, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -6.5‰ ~ -0.3‰ 之间,平均为 -2.438‰ 。新和1井沙依里克组 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化规律与牙哈5井基本一致,总体呈上部偏正、下部强烈偏负的特征,变化在 -10.01‰ ~ 1.1‰ 之间,平均为 -1.219‰ ;底部的 ROECE 负异常更具偏负的典型

特征, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -10.01‰ ~ -0.42‰ 之间,平均为 -2.948‰ 。野外露头肖尔布拉克剖面变化趋势与上述钻井基本相同,沙依里克组 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体仍为上部偏正、下部偏负的特征;底部见典型的 ROECE 负异常, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -15.577‰ ~ -1.17‰ 之间,平均为 -5.709‰ (表1)。与前人^[16,22]在塔里木盆地寒武系已发现的 ROECE 碳同位素负漂移完全一致,该负漂移与西伯利亚、华南及北美地区的 ROECE 可对比性好。总体而言,沙依里克组呈现上部偏正、底部强烈偏负的 ROECE 负漂移的特征,表明沙依里克组沉积期海平面早期下降、中后期上升,这和沙依里克组下部发育白云岩、中部及上部发育石灰岩的岩性变化特征完全吻合。轮探1井碳同位素组成变化没有台内敏感,仅表现为底部 ROECE 负异常略偏负的跳跃,这为其属于台缘礁(丘)后滩沉积提供了可靠的同位素证据。

2.5 中寒武世阿瓦塔格期碳酸盐强镶边台地

中寒武阿瓦塔格期,轮南地区继承性发育强镶边礁(丘)台地边缘(图2e),海平面继续下降,台缘向盆地方向进积迁移约5~8 km,礁(丘)出露水面形成强障壁,形成以蒸发潟湖为主导的强镶边碳酸盐台地沉积,主要表现为蒸发台地—台地边缘—斜坡—盆地相模式(图3)。蒸发台地内部又进一步分异出膏盐湖、膏云坪及(泥)云坪等亚相带。此时,轮探1井主体位于膏云坪、(泥)云坪相带,岩性以膏岩、膏质白云岩为主,夹膏泥岩、泥质云岩和泥晶白云岩。塔深1井揭示中寒武世发育2期台缘带,阿瓦塔格组沉积期的礁(丘)滩体碳酸盐工厂宽度约为5~8 km,相带更窄,并由于台缘带的障壁作用,迅速过渡为5~8 km宽的泥云坪和膏云坪,并在台内形成宽泛分布的膏盐湖—盐湖沉积。由于阿瓦塔格组的岩性特征非常典型,主要是一套红褐色的碳酸盐岩—膏盐岩共生体系,因此没有开展大量的同位素工作。从目前轮探1井和野外剖面的碳同位素特征来看,阿瓦塔格组 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体略偏负,轮探1井变化在 -1.24‰ ~ 2.24‰ 之间,平均为 0.258 ;野外露头变化在 -2.932‰ ~ 1.274‰ 之间,平均为 -0.521‰ (表1)。

2.6 晚寒武世剥蚀型强镶边碳酸盐台地

晚寒武世,轮南地区发育强镶边礁(丘)台地边缘(图2f),总体发育2期礁(丘),礁(丘)出露水面遭

遇强剥蚀,斜坡带可能发育由削蚀作用带来的钙屑浊积岩。由于2期礁(丘)滩体的叠置及侧向加积,该时期台缘带较宽,可达15 km左右,礁(丘)后滩也可达几十公里。台地及台缘带类型的转变控制了台缘斜坡带的分布和礁(丘)滩复合体的发育类型及特征,受台地结构类型影响,晚寒武世礁(丘)滩复合体剖面结构表现为强烈的加积-进积型(图3)。上寒武统主要发育一套厚层结晶白云岩,部分层位白云岩具颗粒幻影结构,反映了半局限—开阔台地台内滩(主要为藻砂屑滩)沉积;局部发育泥粉晶白云岩、含灰白云岩,代表半局限—局限台地潮坪、潟湖亚相的产物。总体而言,晚寒武世受塔西大台地控制逐渐变得平缓,相对海平面较中寒武世明显升高,沉积格局演化为半局限—开阔台地。与早中寒武世岩相古地理相比,轮南地区晚寒武世沉积具有以下2个明显特征:一是海平面上升,蒸发盐消失,取而代之的是广布的半局限台地成因的结晶白云岩,厚度不等的台内滩广泛发育,叠合厚度可达400 m以上;二是东部台缘带呈现出典型的镶边特征且明显向周缘进积,受晚寒武世与早奥陶世之间不整合的影响,顶部晚期礁(丘)滩遭受剥蚀,保存程度较低,塔深1井、于奇6井钻揭了上寒武统这套台缘沉积,推测东部台缘斜坡处发育巨厚的重力流沉积^[3]。

3 生储盖组合与勘探区带优选

大量研究成果表明,碳酸盐缓坡到镶边台地沉积演化有利于形成良好的生储盖组合,这样的实例有阿巴拉契亚盆地的寒武系、中国黔东南江地区的寒武系、坎宁盆地的泥盆系、美国二叠盆地的二叠系、摩洛哥的侏罗系以及墨西哥湾的白垩系等^[21]。轮南地区寒武系碳酸盐缓坡到镶边台地沉积演化过程对生储盖组合同样具有重要的控制作用(图3)。

3.1 早寒武世玉尔吐斯期较深水缓坡控制规模烃源岩分布

早寒武世玉尔吐斯组沉积期为较深水缓坡,发育一套以黑色泥页岩为主、有机质丰富的主力烃源岩,代表这一时期存在一次快速海侵事件(图2a,图3)。轮南—牙哈地区钻井揭示玉尔吐斯组发育的规模烃源岩厚度为22~30 m,其中轮探1井钻揭玉尔吐斯组烃源岩22 m,TOC最高达13.39%;星火1井钻揭玉尔吐斯组烃源岩30 m,TOC为3%~9%;野外露头群16个剖面的玉尔吐斯组烃源岩厚度为10~14 m,

TOC平均值大于4%^[23]。玉尔吐斯组在地震剖面上表现为连续强反射特征,依据沉积相控制烃源岩分布的认识,计算北部坳陷玉尔吐斯组烃源岩厚度为0~80 m,分布面积可达 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

3.2 早寒武世肖尔布拉克期碳酸盐缓坡控制3类规模储层分布

肖尔布拉克组沉积期,海平面逐渐下降,水体能量明显增强,同时构造相对稳定、地形平坦,造就了肖尔布拉克组广泛发育藻云坪及相关的藻砂屑滩体,呈准层状分布(图3),构成了良好的储层发育基础。轮南地区肖尔布拉克期主体发育浅水中缓坡外带泥晶灰岩、球粒灰岩沉积,上部地层或构造高部位可过渡为藻白云岩和泥粉晶白云岩沉积。从目前已有的新认识来看,只要构造及海平面位置适宜,轮南—牙哈地区依然存在发育白云岩相区的可能,预测面积可达 $0.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。对于整个塔北—柯坪地区,受温宿低隆控制,野外露头区周缘地区肖尔布拉克组规模发育滩坪型、丘滩型及颗粒滩型3类相控储层,孔隙类型为溶蚀孔洞、晶间溶孔、粒间(内)溶孔、藻格架孔等,属中孔—中低渗储层,孔隙度为2.5%~10%,渗透率为 $(0.01 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,分布面积可达13 970 km^2 。

3.3 早寒武世吾松格尔期弱镶边碳酸盐台地控制两类规模储层分布

吾松格尔组沉积期,海平面进一步下降,轮南地区开始发育弱镶边台缘沉积,台内开始大规模出现潮坪相沉积,藻类大量发育,同时局部出现蒸发潮坪沉积(图2c)。新发现轮南—塔中32井区吾松格尔期发育第1套弱镶边台缘建隆,认为吾松格尔组发育台内潮坪及台缘丘滩两类储层。轮南—塔中32井区弱镶边台缘带宽15~30 km,长310 km,面积为7 080 km^2 。轮探1井吾松格尔组为礁(丘)后滩储层,测井解释Ⅱ类储层11 m/2层,孔隙度为3.1%~3.5%,属裂缝—孔洞型储层;解释Ⅲ类储层40 m/3层。井震标定后发现,吾松格尔组在地震上为一个相位(约30 ms),地震剖面显示弱镶边台缘丘状反射特征,台内向盆地方向地震相由低频平行强反射—丘状杂乱—斜交前积—平行连续相的变化,指示从台地—台缘—斜坡—盆地相的变化。台内颗粒滩储层主要发育在柯坪露头区及京能公司柯探1井区,岩性以潮坪相泥粉晶白云岩、颗粒白云岩为

主, 储集空间以晶间微溶孔、粒间溶孔为主, 孔隙度最高可达13%, 分布面积可达 $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

3.4 中寒武世镶边碳酸盐台地控制两类规模储层及膏盐岩盖层分布

中寒武世是海平面整体下降期, 古气候也变得干旱炎热, 塔北地区主体发育了一个规模较大的膏盐湖, 与周缘膏云坪等构成了膏盐湖—膏云坪—(泥)云坪—台地边缘等组合, 具有明显的分带性(图2d, 2e)。中寒武统广泛发育萨布哈白云岩及渗透回流白云岩两类规模储层, 在膏盐湖周缘的膏云坪主体发育萨布哈白云岩储层, 局部发育薄层的颗粒滩型渗透回流白云岩储层。储集空间以膏模孔、晶间微溶孔、粒间溶孔为主, 孔隙度最高可达12.63%, 分布面积可达 $5.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。随着海平面高频旋回升降, 台内膏云坪及颗粒滩与膏盐岩互层可形成良好的盐间储盖组合。台地边缘则规模发育礁(丘)滩相及礁(丘)后滩渗透回流型白云岩储层, 分布面积可达 $1.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。此外, 中寒武统发育膏盐湖、膏云坪相的蒸发岩及泥云坪相的泥质白云岩两大类优质盖层。蒸发岩盖层厚度为300~800 m, 面积达 $14.3 \times 10^4 \text{ km}^2$; 致密泥质白云岩盖层厚度为100~300 m, 面积达 $13.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。例如牙哈10井中寒武统沙依里克组发育一套35 m厚的潟湖相泥晶白云岩, 井深6 448.95 m处泥晶白云岩样品的突破压力达到23.061 MPa, 突破半径为6.189 nm, 是一套优质的区域性盖层^[3]。

3.5 晚寒武世强镶边碳酸盐台地控制两类规模储层分布

受区域构造演化的影响及海平面逐渐上升, 在晚寒武世整体继承中寒武世沉积格局的基础上, 塔北地区由膏盐湖为中心的沉积体系转化为半局限—开阔台地为主的沉积, 总体发育台缘礁(丘)滩及台内颗粒滩两类规模储层(图2f)。轮南地区发育强镶边台地, 塔深1井、于奇6井钻揭了上寒武统这套台缘礁(丘)滩储层, 轮探1井属于台缘礁(丘)后滩沉积, 储集空间以溶蚀孔洞、粒间溶孔、晶间溶孔为主, 加权平均孔隙度为3.52%, 最高孔隙度可达11.05%, 这类储层分布面积可达 $1.71 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。台内规模发育了数量众多、厚度较大的台内滩沉积, 主要分布在满西台洼周缘, 滩体厚度不等, 叠合厚度最厚可达400 m以上, 且受白云石化、热液改造及晚寒武世晚期层间岩溶作用

的影响, 形成了分布面积大且质量良好的优质台内颗粒滩渗透回流型白云岩储层, 面积可达 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

3.6 勘探区带优选

轮南地区的勘探实践表明, 白云岩是寒武系盐下勘探的主体, 没有白云岩就没有规模储层。从整个塔北地区来看, 寒武系为继承性古隆起, 处于油气运聚的长期有利指向区, 轮南低凸起是塔北隆起中部的一个二级构造单元, 石油地质条件优越。以上研究表明, 轮南地区中下寒武统发育优质的储盖组合, 储层以台缘礁(丘)滩白云岩与礁(丘)后白云岩储层为主, 盖层以蒸发盐湖相膏盐岩与蒸发潮坪相膏泥质白云岩为主。轮探1井、星火1井实钻与地震研究成果证实, 下寒武统玉尔吐斯组烃源岩在塔北隆起内广泛分布, 烃源岩演化程度较低, 以生油为主^[1, 24-25]。同时, 轮南地区中、下寒武统台缘礁(丘)滩及礁(丘)后白云岩相带发育规模性构造岩性圈闭。塔北隆起寒武系盐下区带8 500 m以浅的面积约为6 000 km^2 , 是塔里木盆地古生界黑油勘探的重要接替区带, 潜在资源量超过 $4 \times 10^8 \text{ t}$ ^[3], 展现了轮南地区寒武系盐下广阔的油气勘探前景。

从勘探层系来说, 主力勘探层集中在下寒武统吾松格尔组—肖尔布拉克组, 主要为缓坡背景下的中缓坡颗粒滩及弱镶边台缘带礁(丘)后颗粒滩沉积。由于轮南地区下寒武统吾松格尔组—肖尔布拉克组处于缓坡到镶边台地的转换位置和转换时期, 因此需将下寒武统作为一个整体研究。中寒武统规模膏盐岩盖层下的颗粒白云岩储层是最重要的勘探目的层段。对于肖尔布拉克组而言, 由于轮南地区缓坡背景下发育的岩性变化较大, 存在上部为一套粉—细晶白云岩、残余颗粒白云岩, 下部为白云质灰岩、鲕粒灰岩和泥晶灰岩的可能性, 因此, 古构造高部位的上部白云岩地层值得探索。从轮探1井实钻、地震反射特征及缓坡到台缘带的演化过程推测, 位于轮探1井西侧的牙哈5井—跃南2井一带为有利区。但由于现今北高南低的构造格局的影响, 北部的牙哈5井区目的层埋深在6 500 m左右, 而到南部的跃南2井区目的层埋深则达11 000 m。对于新突破的吾松格尔组来讲, 轮南地区弱镶边台缘带及其礁(丘)后的颗粒滩储层规模发育, 生储盖组合条件优越, 埋深适中, 保存条件良好, 是目前轮南地区最现实的勘探领域。

中寒武统沙依里克组在轮探1井获良好油气显

示,从岩性特征以及盆地其他钻井(如中深1井、中深5井等)来看,该组储层发育,属于盐间颗粒滩、膏云坪与膏盐岩互层,具有良好的储盖组合,值得进一步探索。

对上寒武统的剥蚀型强镶边台缘的勘探,保存条件是关键。该套储层有塔深1井、轮深2井、于奇6井、轮探1井等井钻遇,主要为一套藻礁(丘)型的白云岩,此类白云岩储层以细—粗晶白云岩为主,部分见藻粘结结构,孔隙成因主要为原岩孔隙的继承和再调整,部分来自埋藏溶蚀作用。如塔深1井溶蚀孔洞及晶间溶孔发育,孔隙度可达9.7%;油气显示活跃,见规模沥青发育;试油产水,见少量天然气,火焰高0.5~1 m。但由于整体缺乏有效致密层的封盖导致了塔深1井的失利^[25]。此类加积—进积型台缘带储层非常发育、连通性过高,盖层的封盖能力往往是这类储层成藏的关键。因此,勘探目标应瞄准台缘带后侧、潟湖靠海一侧的礁(丘)后滩白云岩储层发育区,该相带的储层往往上覆致密碳酸盐岩盖层,可形成优良的储盖组合。

4 结论与认识

通过岩石学、同位素地层对比及轮探1井井震标定后的地震相分析,本文取得以下3点新认识:

(1)轮南地区寒武系台缘带主要经历了从早期碳酸盐缓坡到中后期镶边台地的沉积演化过程,早寒武世玉尔吐斯期为富泥质的较深水中缓坡外带—外缓坡沉积,已证实轮南地区发育一套厚20~30 m的广覆式优质烃源岩;早寒武世肖尔布拉克期为中缓坡外带泥晶灰岩、球粒灰岩沉积,构造高部位可过渡为藻白云岩和泥粉晶白云岩沉积,顶底呈现两套碳同位素正异常,预测轮探1井前积反射后的丘状/亚平行反射地震特征为准层状藻云坪及藻砂屑滩体的响应,丘滩体碳酸盐工厂宽度可达32~54 km;吾松格尔组沉积期,海平面下降,开始出现8.7~10.6 km宽的弱镶边沉积,碳酸盐工厂宽度缩减至20 km;随着海平面的继续下降,中寒武世发育强镶边礁(丘)台地边缘,礁(丘)滩体碳酸盐工厂宽度缩减至4.7~10.2 km,并迅速过渡为5~8 km宽的膏云坪、泥云坪以及10~15 km宽的膏盐湖—盐湖;晚寒武世发育强镶边礁(丘)台地边缘,礁(丘)出露水面遭遇强剥蚀,斜坡带可能发育由削蚀作用带来的碳酸盐岩形成的钙屑浊积岩。由于几期礁(丘)滩体的叠置,该时期台缘带较宽,可达22 km,礁(丘)后滩也可达

15 km左右。

(2)明确了轮南地区形成由下寒武统玉尔吐斯组烃源岩、中下寒武统多套丘滩相颗粒白云岩储层与中寒武统蒸发盐湖相膏盐岩以及蒸发潮坪相膏质、泥质白云岩盖层构成的多套优质生储盖组合。

(3)指出轮南地区吾松格尔组弱镶边台缘带及其礁(丘)后的颗粒滩储层规模发育,生储盖组合条件优越,埋深适中,保存条件良好,是目前轮南地区最现实的勘探领域;中寒武统沙依里克组储层发育,属于盐间颗粒滩、膏云坪与膏盐岩互层,具有良好的储盖组合,值得进一步探索;古构造高部位肖尔布拉克组的上部白云岩地层仍具勘探潜力;轮南南部目的层埋深达11 000 m的跃南2井区可作为远景勘探区带。

参考文献

- [1] 杨海军,陈永权,田军,等.塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J].中国石油勘探,2020,25(2): 62-72.
- [2] 邹才能,杜金虎,徐春春,等.四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力与勘探发现[J].石油勘探与开发,2014,41(3): 278-293.
- [3] 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.
- [4] 闫磊,李洪辉,曹颖辉,等.塔里木盆地满西地区寒武系台缘带演化及其分段特征[J].天然气地球科学,2018,29(6): 807-816.
- [5] 曹颖辉,李洪辉,闫磊,等.塔里木盆地满西地区寒武系台缘带分段演化特征及其对生储盖组合的影响[J].天然气地球科学,2018,29(6): 796-806.
- [6] 陈永权,严威,韩长伟,等.塔里木盆地寒武纪/前寒武纪构造—沉积转换及其勘探意义[J].天然气地球科学,2019,30(1): 39-50.
- [7] 李曰俊,杨海军,张光亚,等.重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元[J].岩石学报,2012,28(8): 2466-2478.
- [8] 陈赅俊,何登发,孙方源,等.温宿凸起构造几何学与运动学特征[J].新疆石油地质,2018,39(3): 318-325.
- [9] 冯许魁,刘永彬,韩长伟,等.塔里木盆地震旦系裂谷发育特征及其对油气勘探的指导意义[J].石油地质与工程,2015,29(2): 5-10.
- [10] 管树巍,张春宇,任荣,等.塔里木北部早寒武世同沉积构造:兼论寒武系盐下和深层勘探[J].石油勘探与开发,2019,46(6): 1075-1086.
- [11] 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.
- [12] 吴林,管树巍,杨海军,等.塔里木北部新元古代裂谷盆地古地理格局与油气勘探潜力[J].石油学报,2017,38(4): 375-385.
- [13] ZHU Maoyan, BABCOCK L E, PENG Shanchi. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenviron-

- mental reconstruction [J]. *Palaeoworld*, 2006, 15(3/4): 217–222.
- [14] STEINER M, ZHU Maoyan, ZHAO Yuanlong, et al. Lower Cambrian burgess shale-type fossil associations of South China [J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2005, 220 (1/2): 129–152.
- [15] 朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 等. 中国寒武纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(1): 26–65.
- [16] WANG Xiaolin, HU Wenxuan, YAO Suping, et al. Carbon and strontium isotopes and global correlation of Cambrian Series 2–Series 3 carbonate rocks in the Keping area of the northwestern Tarim Basin, NW China [J]. *Marine & petroleum geology*, 2011, 28(5): 992–1002.
- [17] GUO Qingjun, DENG Yinan, HU Jian, et al. Carbonate carbon isotope evolution of seawater across the Ediacaran–Cambrian transition: evidence from the Keping area, Tarim Basin, NW China [J]. *Geological magazine*, 2017, 154(6): 1–13.
- [18] VEIZER J, FRITZ P, JONES B. Geochemistry of brachiopods: oxygen and carbon isotopic records of Paleozoic oceans [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1986, 50(8): 1679–1696.
- [19] 郑剑锋, 潘文庆, 沈安江, 等. 塔里木盆地柯坪露头区寒武系肖尔布拉克组储集层地质建模及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 1–13.
- [20] 郑剑锋, 陈永权, 黄理力, 等. 苏盖特布拉克剖面肖尔布拉克组储集层建模研究及其勘探意义[J]. *沉积学报*, 2019, 37(3): 601–609.
- [21] KERANS C, PLAYTON T, PHELPS R, et al. Ramp to rimmed shelf transition in the Guadalupian (Permian) of the Guadalupe Mountains, West Texas and New Mexico [M]// *SEPM Special Publication* 105, 2014: 26–49.
- [22] 陈永权, 张艳秋, 周鹏, 等. 塔里木盆地寒武系苗岭统碳同位素地层学与等时对比[J]. *地层学杂志*, 2019, 43(3): 324–332.
- [23] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 8–21.
- [24] 翟晓先, 顾忆, 钱一雄, 等. 塔里木盆地塔深1井寒武系油气地球化学特征[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(4): 329–333.
- [25] 云露, 翟晓先. 塔里木盆地塔深1井寒武系储层与成藏特征探讨[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(6): 726–732.

编辑: 黄革萍

Recognition of platform margin and subsalt exploration prospect of deep-buried Cambrian in Lunnan area of Tarim Basin, Northwest China: new understanding based on evidence of petrology, isotope comparison and seismic facies

NI Xinfeng, CHEN Yongquan, WANG Yongsheng, XIONG Ran, ZHU Yongfeng, ZHU Yongjin, ZHANG Tianfu, YU Guang, HUANG Lili

Abstract: Well Luntan 1 in the Lunnan area of the Tarim Basin has made a major breakthrough in the dolomites of the Lower Cambrian platform margin zone at a depth of more than 8 000 m, which proves that the Cambrian platform margin zone has developed high-quality source-reservoir-cap assemblages and is an important oil and gas exploration field in the deep layers of the Tarim Basin. Based on petrology, isotope stratigraphic comparison and seismic facies analysis, it is believed that the Cambrian platform margin belt in Lunnan area has experienced the sedimentary evolution process from the early carbonate gentle slope to the middle-late rimmed platform, forming multiple sets of high quality Cambrian subsalt source-reservoir-caprock assemblage. The Lower Cambrian Yuertus Formation was developed in mud-rich middle gentle slope outer zone-outer gentle slope in relatively deep water, and a set source rock of 20–30 m was developed in the formation. The Lower Cambrian Xiaoerbulak Formation was developed in middle gentle slope outer zone with limes depositing on it, and tidal flats and granular shoal dolomite reservoirs developed locally in high structural positions. In the Wusonggeer period of Early Cambrian, 8–10 km wide mound-shoal reservoir was developed in weak-rimmed margin. During the Middle Cambrian, strong-rimmed platform margin with a width of 4–5 km was developed; 5–8 km wide argillaceous dolomite of gypsum dolomite flat-argillaceous dolomite flat facies and 10–15 km wide gypsum-salt rock of gypsum salt lake-salt lake facies were developed in platform interior, which formed two kinds of high quality cap rock. It is pointed out that the most realistic exploration field in the Lunnan area is the reservoir-cap assemblage of the granular shoal reservoir in weak-rimmed platform margin and behind the reef of Wusonggeer Formation and gypsum-salt cap rock of Middle Cambrian. It is worth exploring for the reservoir-cap assemblage of the inter-salt granular shoal in the Middle Cambrian Shayilik Formation. The dolomite strata in the upper part of the Xiaoerbulak Formation in the high part of the paleostructure still have exploration potential.

Key words: platform margin; evolution; carbon isotope; exploration zone; subsalt; Cambrian; Tarim Basin

NI Xinfeng, First author: Senior Engineer, engaged in sedimentology and petroliferous basin analysis and research. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China