

第一章 寒武系、奥陶系生物礁储层特征及评价

最近,塔里木盆地以寒武、奥陶系海相碳酸盐岩为重点目的层的油气勘探取得了新的发现与重大的突破。轮南地区解放 128 井在奥陶系顶部风化壳内获得了高产油气流。巴楚凸起南翼的山 1 井、玛 4 井等也在奥陶系顶部风化壳内喜获工业气流,证实了玛扎塔克断裂构造带为天然气聚集区带。新发现了塔中 I 号断裂构造带内的上奥陶统碳酸盐岩油气聚集区带及五个油气藏。这些新进展不仅再次证明了塔里木盆地海相碳酸盐岩并非铁板一块,同时展示了在塔里木盆地寒武、奥陶系碳酸盐岩中寻找大中型油气藏的良好勘探前景,揭开了寻找大场面碳酸盐岩油气藏的序幕。

第一节 层序地层分析

一、层序划分与层序界面

1. 层序的级次

层序是由沉积物在可容纳空间内堆积、固结而形成的,因此它的规模和分布型式在很大程度上取决于可容纳空间的大小,而可容纳空间则是构造沉降和海平面升降量之和。在地质历史中,构造运动和海平面升降变化,尤其是显生宙全球海平面相对升降变化,不仅具有周期性或旋回性,而且其幅度和时间跨度是不同的,从而造成沉积层序具有不同的规律及时间跨度。根据已有的研究成果综合分析,塔里木盆地古生代海平面升降变化规律,总体上与全球海平面变化曲线吻合,因此可以将塔里木盆地层序地层特征与全球层序地层系统进行对比(图 1-1)。

1) 巨层序

塔里木盆地内震旦、寒武、奥陶系沉积十分发育,为该盆地基底上的第一套海相盖层的主要组成部分。其底界为 8 亿年前塔里木运动所形成的区域不整合面,顶界是奥陶纪末晚加里东(艾比湖)运动造成的区域不整合面。它是塔里木克拉通边缘拗拉槽发育阶段的沉积产物,可视为塔里木盆地的第一巨层序(TS),延续时间约 361Ma。在地震剖面上,它相当于反射波 $T_{g5}-T_{g8}$ 所限定的地震反射层系。这一巨层序由六个超层序组成,其内部发育多套由西向东的大型 S 型、S-斜交型和斜交前积型结构。大致在库南 1 井—满参 1 井—若羌一线以西为台地或陆棚区,向东由斜坡渐变为槽盆或盆地。

2) 超层序

超层序大致是在海平面相对变化的二级周期期间沉积形成的,由若干个三级层序组成。其顶、底界为明显的海平面下降所造成的不整合面。这种不整合面在盆地不同部位表现出不同的性质。盆地边缘地带为陆上沉积间断,除出现无沉积作用外,还出现明显的侵蚀现象,地震剖面上显示为顶削。盆地内部则为无沉积作用到连续沉积,地震剖面上表现为上超至平

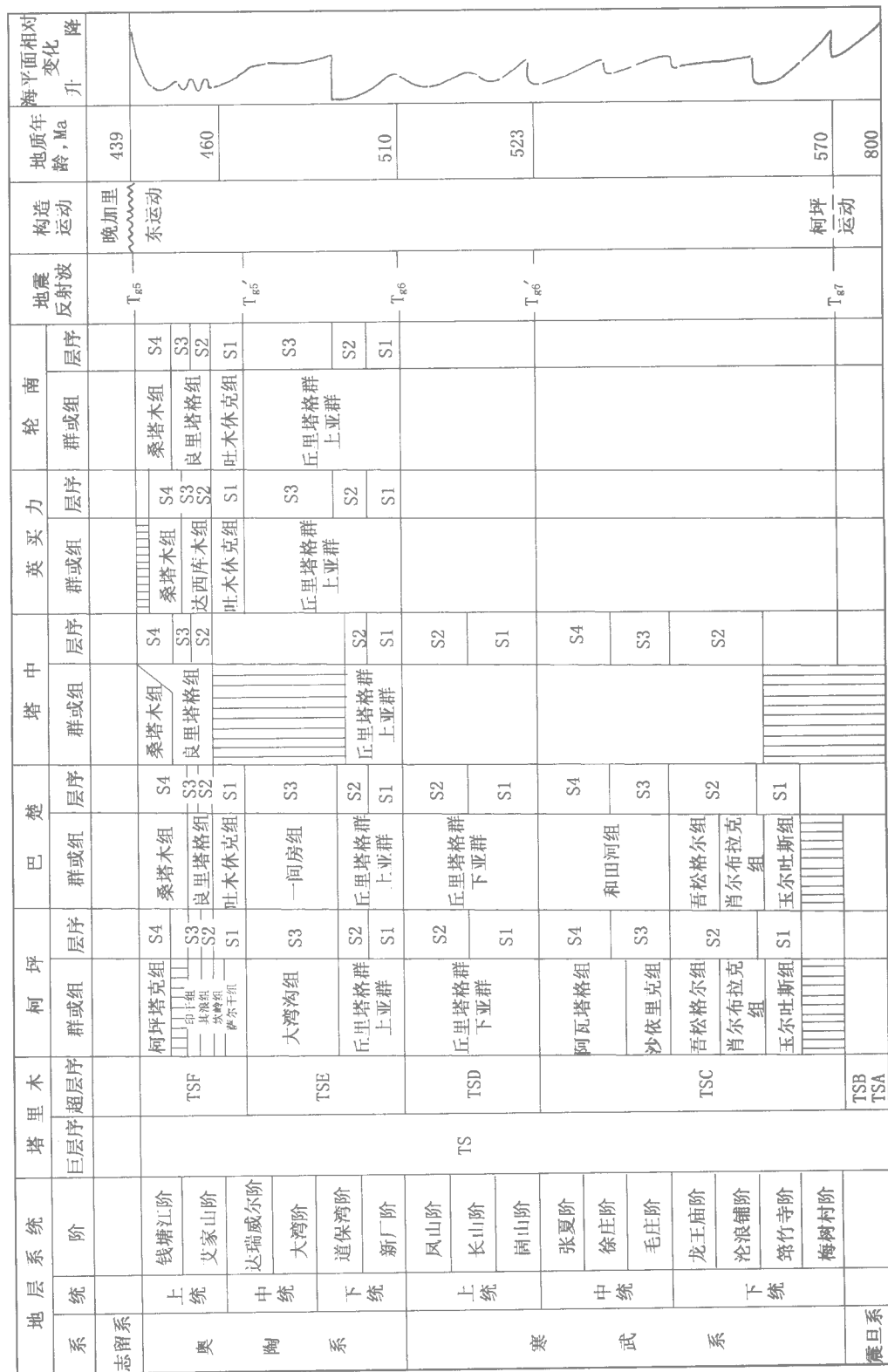


图 1-1 塔里木盆地寒武系、奥陶系层序地层划分简图

行整一。据此,可将塔里木盆地寒武系、奥陶系划分为四个超层序(图 1-1): TSC、TSD、TSE 和 TSF 超层序,大致分别对应于中下寒武统、上寒武统、中下奥陶统和上奥陶统,代表了库一满拗拉槽不同演化阶段的产物。

TSC 超层序为塔里木盆地 TS 巨层序中的第三个超层序,主要由早中寒武世地层组成,延续时间约 47Ma,形成于库一满拗拉槽欠补偿快速沉降阶段。其底界为整合面或者是震旦纪末柯坪运动所造成的平行不整合面,相当于 T_{g7} 反射波,在台地和槽盆区内一般表现为平行整一,在斜坡区则显示出明显的底超反射结构。顶界相当于 T_{g6} 反射波,在地震剖面上具有平行整一到顶超特征。这个超层序遍布全盆地,主要由海相碳酸盐岩及少量细碎屑岩组成,西厚东薄,西部台地区上可厚达 1100m,东部槽盆内一般不足 200m 厚。

TSD 超层序为第四个超层序,由晚寒武世地层组成,延续时间约 13Ma,是库一满拗拉槽欠补偿沉降阶段的沉积产物。这个超层序的底界相当于 T_{g6} 反射波,具有明显的下超不整合到平行整一的特征。顶界相当于 T_{g5} 反射波,表现出上超不整合到平行整一特征。这个超层序在盆地内广泛分布,主要由海相白云岩及灰岩组成,东薄西厚。东部槽盆区的层序厚度一般小于 300m,主要由泥晶灰岩和灰质泥岩组成;西部台地区该层序的厚度可达 900m,几乎全部由碳酸盐岩组成。

TSE 为第五个超层序,主要由中下奥陶统组成,延续时间约 50Ma,是库一满拗拉槽稳定沉降阶段的沉积响应。在地震剖面上,它相当于反射波 T_{g6} — T_{g5} 所限定的地震反射层序。其底部边界表现出下超不整合到平行整一。顶部边界在拗陷内显示出上超不整合至平行整一;在隆起上,由于后期抬升剥蚀,表现为明显的削蚀不整合。该超层序在盆地内分布很广,主要由海相碳酸盐岩组成,东薄西厚,东部槽盆区的厚度一般小于 400m,西部台地区可达 1500m 厚。

TSF 为第六超层序,主要包含了晚奥陶世地层,相当于 T_{g5} — T_{g5} 地震反射层序,延续时间约 21Ma。它是库一满拗拉槽快速充填、收缩阶段的沉积产物。这个超层序由巨厚的海相陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成,厚度呈现东厚西薄的特征,东部盆地内以碎屑岩为主,厚度可达 6000m 西部陆棚区一般为 500~1000m 厚。在塔中隆起的局部地区和塔北隆起及塔西南,由于后期抬升剥蚀,缺失该层序;在北部拗陷内,它分布较广,但保存不全。其顶部边界为明显的削蚀不整合,底部边界表现为底超不整合至平行整一。

3) 层序

塔里木盆地内寒武系和中下奥陶统台地区以海相碳酸盐岩占优势,上奥陶统既有碳酸盐岩,也有陆源碎屑岩。根据层序界面的特征,识别出两类不同的层序,即 I 型层序和 II 型层序。

塔里木盆地寒武系包含了两个超层序, TSC 超层序由 4 个三级层序组成, TSD 超层序可进一步细分为 2 个三级层序。奥陶系也包含了两个超层序, TSE 超层序由 3 个三级层序组成, TSF 超层序则可细分为 4 个三级层序(图 1-1)。

2. 层序界面的识别标志

识别层序界面是划分层序类型的关键。层序界面与周期性海平面变化有关,一般对应于海平面下降拐点,并以其本身固有的特征表现在露头剖面和钻井剖面中,也可以反映在测井曲线和地震反射剖面上。

1) I 型层序界面的识别标志

当相对海平面下降速率超过盆地沉降速率时,海平面可下降到台地边缘或陆棚边缘坡折

带以下，台地或陆棚普遍暴露并遭受侵蚀，从而形成 I 型层序界面（SB1）。它通常具有以下的主要识别特征。

(1) 层序界面以下的沉积物具有明显的暴露、侵蚀及古岩溶特征。

碳酸盐岩台地或陆棚的陆上暴露，可通过古岩溶特征来识别，例如风化溶蚀残积角砾灰岩和角砾云岩、古土壤、溶蚀坍塌角砾岩、地下暗河及其充填物等。这是识别 I 型层序界面最直接的标志。相应地，它在地震反射剖面上具有明显的削蚀反射结构。奥陶系顶部普遍具有这类古岩溶特征，例如轮西 2 井、英买 4 井、塔中 1 井等，柯坪露头剖面震旦系顶部也有类似特征。

(2) 斜坡的侵蚀与滑塌沉积的形成。

在 I 型层序界面形成过程中，台地边缘和斜坡上部大量的沉积物常被侵蚀掉，造成大量碳酸盐岩岩块、砾屑等顺坡滑动、滑塌，形成海底滑塌沉积与重力流沉积，并直接覆盖在层序界面上，例如库南 1 井下奥陶统 4639~4901m 井段，塔中 38 井奥陶系 3474~3670m 井段。

(3) 浅水相直接覆盖在深水相之上。

I 型层序边界的一个共同特征是滨岸上超向盆地迁移。它的主要表现形式为浅水相直接覆盖在深水相之上。最典型的实例见于维 1 井，下志留统滨岸相直接覆盖在奥陶系深水盆地相之上。

(4) 层序界面上、下具有明显不同的沉积序列。

在 I 型层序界面之下，一般为晚期高位体系域，其沉积序列常具有向上变浅的特征，而界面之上是海侵体系域，其沉积物显示出向上变深的序列，层序界面往往位于上述两种不同沉积序列变化的转换部位。例如轮南 17 井 5525.73m 以下的下奥陶统碳酸盐岩为向上变浅的沉积序列，而该深度以上的碳酸盐岩具有向上变深的沉积序列，因此层序界面可划在该井的这一深度处。

2) II 型层序界面的识别标志

当海平面下降速率小于盆地沉降速率时，多形成 II 型层序界面（SB2）。此时海平面并没有降低到陆棚或台地边缘坡折带以下，因此仅有潮缘区、礁、滩等正向沉积体出露海面，陆棚或台地边缘向陆的上超向下迁移，形成陆棚边缘体系域。与 I 型层序界面相比，II 型界面经历暴露的时间较短，范围较小，侵蚀量也小。在一般情况下，如果不考虑界面上覆沉积物，I 型和 II 型层序界面实际上不仅难以区分，而且也不易识别。下列特征有助于判别 II 型层序界面。

(1) 陆棚边缘沉积具有平行和加积型序列。

在陆棚边缘，II 型层序界面上覆的地层一般为平行的和垂向加积型的，而 I 型的则主要表现为斜向的和进积型的。

(2) 蒸发台地相和潮上相发育。

在陆棚边缘体系域时期，随着相对海平面的逐渐下降，潮缘区的蒸发台地相、尤其是潮上相特别发育。在 II 型层序界面上堆积了膏质云岩、石膏岩、泥质云岩、云质泥岩、膏泥岩等组成的向上变浅的沉积序列。

(3) 浅滩具暴露特征。

伴随相对海平面的下降，滩体顶部出露海面，遭受同生期大气淡水的溶蚀，形成铸模孔、粒间溶孔等溶蚀孔隙，而且生成新月形、悬垂形、桥式等渗流带胶结物，还可能出现同

生期混合水白云石化。

二、寒武系层序及体系域特征

塔里木盆地寒武系发育了 2 个超层序和 6 个三级层序。超层序的顶底界均为 I 型层序界面，除下寒武统下部和上寒武统下部为 I 型层序外，其余均为 II 型层序。然而，除塔东 1 井、和 4 井、方 1 井、塔参 1 井钻穿寒武系外，其余均未钻穿它。这里以柯坪露头剖面为例，分析其层序及体系域特征（图 1-2）。

1. 陆棚边缘体系域

寒武系除两个 I 型层序外，其他 4 个 II 型层序中均发育有陆棚边缘体系域，处于每个层序的底部，其底界为 II 型层序界面。它们的沉积物主要包括孔洞发育的中、细晶云岩、角砾云岩、紫红色云质泥岩、泥砂质云岩等，常见石膏、石膏假晶、鸟眼构造，属于海平面逐渐降低时期蒸发台地相或潮坪相沉积，厚度一般为 22~45m，最厚可达 126m。显然，在陆棚边缘体系域背景下，有利于同生期大气淡水溶蚀作用的进行，形成具孔洞的白云岩，是寻找同生期岩溶型白云岩储层的最佳层位。

2. 海侵体系域

海侵体系域在寒武系的 6 个层序中均很发育，其沉积物既有磷质硅质岩和泥岩，例如下寒武统玉尔吐斯组下部，也有藻云岩、粉晶—细晶云岩、灰岩等，厚度变化也大，薄者仅有 8m，厚的可达 145m。它们的一个共同特点是沉积序列均表现为退积式和加积式。沉积环境主要为开阔海台地的滩间海或局限海台地的泻湖，只有 S1 层序的海侵体系域为浅海盆地环境。它们在盆地内的地震反射特征主要表现为强振幅连续平行地震相、中弱振幅乱岗状地震相等。在塔东地区，大致在草 1 井—满参 1 井一线以西的碳酸盐岩台地边缘，根据地震反射特征分析，推测发育有海侵体系域背景下的生物礁和粒屑滩组成的镶边体系。它们多表现为杂乱反射或丘形反射特征。

值得指出的是：在三个层序的海侵体系域顶部均识别出密集段，主要由富含生物或具生物扰动构造的暗色薄层状灰岩、页岩、页片状泥晶灰岩或硅质岩组成。这意味着盆地内发育有良好的生油岩层。

3. 高位体系域

早期高位体系域，海平面上升相对缓慢，有利碳酸盐岩沉积物的产生与堆积以及礁、滩体的建设。其沉积物主要为砂屑云岩和粉、细晶云岩，以进积式和加积式的沉积序列为特征，厚度为 10~79m 不等。它们在盆地内的地震反射特征多表现为弱振幅乱岗状地震相和中弱振幅断续地震相。在台地边缘，仍然有礁、滩复合体的地震反射特征。

高位体系域晚期，海平面开始缓慢下降，沉积环境以半局限—局限海台地为主，潮缘区多有暴露特征。沉积物主要包括粉、细晶云岩，常具针孔构造，厚度从 25m 到 113m 不等，多数为 25~40m。这是另一个有利于发育同生期岩溶型白云岩储层的层位。

三、中下奥陶统层序及体系域特征

中下奥陶统为塔里木盆地内的第五个超层序（TSE），其顶底界均为 I 型层序界面。根据露头 and 钻井剖面的层序地层分析，这个超层序可划分为三个层序：下部和上部为 I 型层序，中部为 II 型层序。根据斜坡区钻井和地震剖面的分析，中下奥陶统发育有低位体系域。

统	组或群	岩性剖面	厚度 m	体系域	层序	超层序	层序界面	沉积相			
								相	亚相		
下奥陶统	丘里塔格群 上亚群		25.6	TST			SB1		台内滩		
上寒武统	丘里塔格群 下亚群		78.7	EHST	S2	TSD		局限海台地	泻湖	湖	
			3.0	CS							
			145.2	TST							
			45.4	SMST	S1			局限海台地	潮坪	潮坪	台内滩
			24.9	LHST							
			42.4	EHST							
40.9	TST		S4	局限海台地	藻坪	蒸发潮坪					
46.8	HST										
19.5	TST										
中寒武统	阿瓦塔格组	126.5	SMST	S3	TSC		半局限海台地	潮坪	泻湖		
		40	LHST								
		24.4	EHST								
	沙依里克组	41.2	TST	S2			局限海台地	泻湖	藻坪	潮坪	
		32.0	SMST								
		41.4	LHST								
下寒武统	吾松格尔组	57.9	EHST	S1			局限海台地	泻湖	藻坪		
		3.7	CS								
		61.8	TST								
	肖尔布拉克组	33.8	SMST	S1			局限海台地	泻湖	潮坪		
		112.8	LHST								
		9.9	EHST								
玉尔吐斯组	8.5	CS	S1	开阔海台地	泻湖	潮坪					
	8.0	TST									
	8.0	TST									
上震旦统							SB2		广海陆棚		

图 1-2 柯坪地区寒武系露头剖面层序地层特征简图

在台地上，每个层序均以陆棚边缘体系域或海侵体系域开始。应该指出的是，在盆地内的隆起区上，由于后期构造抬升、剥蚀，S3层序大多数保存不全甚至缺失，尤其在塔中地区。总的来说，S1层序以白云岩为主，S2层序为灰岩与白云岩及其过渡岩类的不等厚互层，S3层序以灰岩占优势。现主要以巴楚露头剖面为例说明（图 1-3）。

统	组或群	岩性剖面	厚度 m	体系域	层序	层序界面	沉积相	
							相	亚相
上奥陶统								
中—下奥陶统	一间房组		63	LHST	S3	SB1	开阔海台地	台内滩
			52.8	EHST				滩间海
			45	TST				
下奥陶统	丘里塔格群上亚群		101.6	LHST	S2	SB1	半局限—开阔海台地	潮坪
			118.1	EHST				台内滩
			59.6	TST				泻湖
			66.6	SMST		潮坪		
			99.4	LHST	S1	SB2	半局限—局限海台地	台内滩
								潮坪
			136.1	EHST				台内滩
		143	TST			泻湖		
上寒武统	丘里塔格群下亚群					SB1		

图 1-3 巴楚地区中下奥陶统露头剖面层序地层特征简图

1. 陆棚边缘体系域

中下奥陶统 S₂ 层序的陆棚边缘体系域，主要由局限海台地相潮坪白云岩组成，溶蚀孔隙较发育，局部含石膏，多表现为向上变浅的沉积序列，反映了潮缘区相对海平面的下降。该体系域为有利于针孔白云岩储层发育的层位。

2. 海侵体系域

海侵体系域在中下奥陶统 3 个层序内均有发育，岩性主要为泥晶灰岩、粉细晶云岩、隐藻云岩或藻叠层石云岩，常夹有砂屑灰岩或砂屑云岩，厚度为 45~143m 不等。沉积环境可以是开阔海台地的台内粒屑滩与滩间海，也可以是局限海台地的浅水潮下或泻湖。沉积序列以向上变深为特点，表现为退积式或加积式。它们在盆地内的反射特征主要表现为中弱振幅较连续平行地震相或中弱振幅乱岗状地震相。在轮南 17 井—满西 1 井—塔中 162 井—塔中 5 井一带的台地边缘，经钻探证实，发育有海侵体系域背景下由粒屑滩和生物礁（S₃ 层序）组成的镶边体系，但在常规地震反射剖面上，其特征不显著，难以识别。

3. 高位体系域

高位体系域以粒屑滩发育良好为特征，岩性以粒屑灰岩和粒屑云岩占优势，具有向上变浅的沉积序列，表现为加积式或进积式。它们在盆地内的地震反射特征主要表现为中弱振幅乱岗状地震相。这一时期，台地边缘粒屑滩发育最好，例如塔中 162 井 S₂ 层序的高位体系域内，台缘粒屑滩的单层厚度达 187.5m。这暗示着 S₂ 层序在塔中 I 号断层西侧发育有粒屑滩组成的台地镶边体系。

在台地内部，早期高位体系域常表现出台内滩的粗结构沉积物与滩间海或泻湖的细粒沉积物不等厚互层，厚度为 53 m~136m。晚期高位体系域位于层序的顶部，对应于海平面上升到高点后的初始下降阶段，以加积式沉积为主，粒屑滩和潮坪沉积较发育，顶部常有暴露特征。

4. 低位体系域

低位体系域发育于上述台地边缘相带以东的斜坡区，主要分布于 S₂ 和 S₃ 层序的底部，其下为层序界面，上覆海侵体系域。它的主要特征表现为碳酸盐岩碎屑流与浊流成因的砾屑灰岩、砂屑灰岩或者角砾云岩、砾屑云岩、砂屑云岩等组成的低位斜坡扇。典型剖面见于库南 1 井 4639~4901m 井段，塔中 5 井 3508.40~3771.78m 井段，塔中 38 井下奥陶统。它们的地震反射特征显示为中弱振幅较连续前积斜坡相。

四、上奥陶统层序及体系域特征

与前述三个超层序明显不同的是，由上奥陶统组成的第六超层序（TSF）既有海相碳酸盐岩，又有海相陆源碎屑岩，并且以发育 I 型层序为特征。根据露头 and 钻井剖面的层序地层分析，这个超层序由 4 个 I 型层序组成，分布较广，但塔中地区缺失 S₁ 层序，S₄ 层序顶部普遍遭受削蚀。S₁~S₃ 层序主要由碳酸盐岩组成，S₄ 层序则由混积陆棚相的陆源碎屑岩夹碳酸盐岩混合组成。在台地上，每个层序均由下部的海侵体系域和上部的高位体系域构成，如塔中 12 井上奥陶统 S₂ 和 S₃ 层序（图 1-4）。在斜坡区，体系域发育完整，在地震剖面上可以识别出低位、海侵及高位体系域。

1. 低位体系域

低位体系域分布于斜坡区。它直接覆盖在 I 型层序界面上，以发育低位斜坡扇或斜坡楔

统	组或群	井深 m	岩性剖面	厚度 m	体系域	层序	层序 界面	沉积相			
								相	亚相		
上 奥 陶 统	桑塔木组	4644			TST		SB1				
	良里塔格组	4700		64.6	HST	S3	台地边缘	台缘滩			
									滩间海		
		4750		78.4	TST	灰泥丘					
						滩间海					
						台缘滩					
	塔格组	4800		115.6	HST	S2	开阔海台地	台内缓坡			
		4850						生屑滩			
		4900						3.4	CS	台内缓坡	
		4950								灰泥丘	
		5000						218.0	TST	台内缓坡	
5050											
	5100				砂屑滩						
下奥陶统		5124		HST		SB1					

图 1-4 塔中 12 井上奥陶统层序特征简图

为典型特征。在地震反射剖面上，它们具有丘形或楔形的反射外形，内部反射结构复杂。据塔中 28 和塔中 29 井揭露，它们主要由海底重力流成因的砾屑及砂屑灰岩组成，其沉积物来源于台地边缘和斜坡上部，可能暗示着台地的暴露。例如，位于台地边缘上的塔中 35 井，

5391~5407m井段发育了代表深切谷充填沉积的 16m 厚的浅灰色灰质细砂岩。

2. 海侵体系域

塔中 12 井 S₂ 层序的海侵体系域直接覆盖在 I 型层序界面上, 主要由开阔海台地相的台内缓坡暗色泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、隐藻泥晶灰岩、泥质灰岩及泥灰岩组成, 夹有砂屑滩和灰泥丘灰岩, 厚 218m, 以追补型沉积为主。S₃ 层序的海侵体系域则由台地边缘相的台缘滩、灰泥丘及滩间海灰岩组成, 厚 78m。在台地边缘的其他井中, 例如塔中 30、塔中 44 井等还发育有骨架礁和障积礁。在台地内部, 也发育有零星分布的补丁礁, 例如塔中 23 井。

斜坡区的海侵体系域位于低位体系之上, 由较深水沉积的泥页岩、泥质灰岩和泥晶灰岩组成。在地震反射剖面上, 显示出较连续的平行反射, 并具有明显的上超反射结构。

3. 高位体系域

塔中 12 井 S₂ 和 S₃ 层序的高位体系域分别由台内缓坡亚相与台地边缘相灰岩组成 (图 1-4)。前者为浅缓坡微相的隐藻灰岩、泥晶灰岩和生屑灰岩, 厚 116m; 后者以发育台缘粒屑滩沉积为特征, 厚 65m, 在其他井中还可见台缘生物礁灰岩。它们往往具有向上变浅的沉积序列, 表现为进积式或加积式。在地震反射剖面上, 下超反射结构明显。

五、层序与储层

碳酸盐岩储层的形成, 受多种地质因素的制约。其中, 沉积相是控制碳酸盐岩储层原生孔隙的主要因素。然而, 由于碳酸盐岩沉积物对成岩作用十分敏感, 它们在沉积期后阶段容易发生一系列重大的成岩变化, 因此其储层质量的好坏受后期成岩作用与构造破裂作用这两个关键因素的影响很大。这里仅仅从层序地层学的观点来讨论碳酸盐岩储层发育的层位与层序的关系。

随海平面周期性的升降变化, 沉积盆地内的碳酸盐沉积物形成了具有特定叠置型式的地层序列。当海平面下降速率小于盆地沉降速率时, 形成 II 型层序界面, 台地上的潮缘区以及滩、礁等建隆短期出露海面, 遭受地表侵蚀, 并发生一系列与淡水作用有关的成岩变化, 例如同沉积期岩溶作用、淡水胶结作用、混合水白云化作用等。在富含 CO₂ 大气淡水的作用下, 碳酸盐岩内可发育粒内溶孔、铸模孔、粒间溶孔、甚至溶蚀缝洞等储集空间。因此, 位于 II 型层序界面之上的陆棚边缘体系域, 是一个有利于碳酸盐岩储层、尤其是白云岩储层发育的层位。它们在中下寒武统的 S₂、S₃、S₄ 层序、上寒武统 S₂ 层序以及中下奥陶统 S₂ 层序内的陆棚边缘体系域中广泛分布, 发育较好。

当海平面快速下降并低于台地边缘坡折带时, 形成 I 型层序界面, 其下伏广阔的碳酸盐岩台地出露地表遭受风化、剥蚀、淋滤, 容易形成分布广、厚度大、缝洞发育的风化壳岩溶型碳酸盐岩储层。因此, 从理论上讲, I 型层序界面以下的碳酸盐岩层是有利于这类储层发育的良好层位。在塔里木盆地的寒武系、奥陶系, 至少发育有 8 个以上的 I 型层序界面, 但据露头与钻井剖面以及地震剖面的分析, 并非每一个 I 型层序界面下的碳酸盐岩层都有发育良好的古风化壳及其古岩溶型储层。发育较好的基本上与区域性构造抬升运动有关, 主要有晚震旦世末柯坪运动造成的震旦系顶部的古风化壳; 早奥陶世末满加尔运动在塔中地区下奥陶统顶部形成的古风化壳; 晚加里东运动、早海西运动等在塔北、塔中、巴楚等地区的奥陶系顶部造成的古风化壳。显然, 碳酸盐岩古风化壳及其岩溶型储层的发育程度, 除了与暴露过程有关外, 还受到暴露时间的长短、古地形、古气候、古水文系统、岩性等诸多因素的联

合控制。这是有待于深入研究的问题。

在海平面下降处于低位时期 斜坡区发育了碳酸盐岩低位体系域 形成了低位斜坡扇 斜坡楔等海底重力流成因的粗结构碳酸盐岩。它们一般具有较发育的原生孔隙 但随后即被胶结充填 如果未经后期岩溶等建设性成岩作用的改造 难以形成有效的碳酸盐岩储集体。

在海侵体系域和高位体系域背景下,碳酸盐岩台地上,尤其是在台地边缘,发育了成排成带分布的由粒屑滩、生物礁等组成的碳酸盐岩建隆。根据海平面上升速率与沉积物沉积速率之间的关系,追补型的碳酸盐岩建隆不利于原生孔隙的发育,而并进型的碳酸盐岩建隆一般都具有发育很好的原生孔隙。因此,晚期高位体系域是最有利于形成原生孔隙发育的碳酸盐岩建隆的层位,例如轮南 17 井中下奥陶统 S₃ 层序的晚期高位体系域,塔中 44 井上奥陶统 S₃ 层序的晚期高位体系域。在潮缘区,晚期高位体系域也是另一个有利于孔隙性白云岩储层发育的层位。虽然这类碳酸盐岩的原生孔隙多被后期胶结物充填,储集性能变差,但为后期建设性成岩作用改造奠定了有利的物质基础。

第二节 储层沉积相分析

塔里木盆地寒武系、奥陶系以海相碳酸盐岩沉积为主,其次为陆源碎屑岩以及它们之间的过渡岩类。由于大地构造作用、海平面升降变化、气候、物源、水深、地形、水动力等环境因素的差异变化,造成了塔里木盆地寒武系、奥陶系沉积相类型繁多,沉积特征复杂多变。这里首先按照海域地理和地貌特征将塔里木盆地寒武系、奥陶纪沉积相分为陆源碎屑滨海、碳酸盐岩台地、浅海陆棚、斜坡—槽盆四大相区,然后再根据局部的沉积环境和沉积特征等进一步划分相、亚相及微相(表 1-1)。总的来说,塔里木盆地寒武系、奥陶纪主要发育镶边碳酸盐台地—斜坡—欠补偿槽盆体系,其沉积模式如图 1-5 所示,仅在晚奥陶世晚期形成混积陆棚—斜坡—补偿槽盆体系。

一、局限海台地相

局限海台地环境较闭塞,能量较低,岩性以灰泥岩、粒泥灰岩和白云岩为主,少量为泥粒灰岩,夹砾砂屑颗粒灰岩。岩石中颗粒含量低,以砂屑、藻砂屑为主,灰泥支撑。生物及其碎片少,以广盐度的蓝绿藻和介形虫为主。该相一般包括潮上、潮间、泻湖以及台内滩等微相。

1. 潮上亚相

位于平均高潮面以上的潮上带,长期暴露于大气下,仅在风暴大潮期才被海水淹没。沉积物主要包括干燥气候条件下形成的膏云岩、云岩、泥云岩。石膏假晶、鸟眼构造、藻纹层等比较发育。根据沉积物类型,它可细分为盐坪、膏云坪、泥云坪、云泥坪等微相。柯坪地区肖尔布拉克中寒武统阿瓦塔格组中部发育这种潮上亚相。它由云岩、泥质云岩及云质泥岩组成沉积序列。每个序列厚 14~16m 不等。序列底部为灰色粉晶砂屑云岩或藻叠层石云岩;向上为浅紫红色粉晶云岩,含石膏假晶和鸟眼构造;上部为紫红色泥质云岩和云质泥岩,除藻叠层石外,未见其他生物。

由上述序列组合可以看出,序列底部为潮间下带,处于弱还原—弱氧化环境,蓝绿藻十分发育,形成丰富的藻叠层石。向上为潮上带,变为氧化环境,致使沉积物由灰色变为紫红色,蒸发作用强烈,藻类不发育,有泥质沉积物混入。显然,这是一个向上变浅的沉积序

列。

表 1-1 塔里木盆地寒武、奥陶系沉积相划分表

相 区	相	亚 相	微 相
陆源碎屑滨海	陆源碎屑潮坪	潮上	泥坪、沼泽
		潮间	泥坪、混合坪、沙坪、潮沟
		浅水潮下	潮沟、砂质浅滩
碳酸盐台地	局限海台地	潮坪	灰坪、云灰坪、灰云坪、云坪、藻坪、潮沟
		潮上	
		潮间	
	泻湖	灰质泻湖、云质泻湖、灰云质或云灰质泻湖、蒸发泻湖	
	开阔海台地	台内滩、台内礁	砂屑滩、生屑滩；丘核、丘翼、丘坪；礁核、礁坪、礁翼
		台内缓坡	
		台内洼地	
	台地边缘	滩（丘）间海	
		台缘滩	砂屑滩、砂砾屑滩、鲕滩、生屑滩
台缘礁		礁核、礁坪、礁翼；丘核、丘坪、丘翼	
浅海陆棚	广海陆棚		
	混积陆棚		
斜坡—槽盆	斜坡	上斜坡	岩崩与滑塌沉积、碎屑流沉积、浊流沉积、水道充填沉积、较深水静水沉积
		下斜坡	
		坡脚—盆地边缘	
		斜坡灰泥丘	
	槽盆	半深海槽盆	海底扇、盆地平原
深海槽盆			

在英买 7 井和塔中 1 井，该亚相由膏质云岩、含石膏假晶的云岩或微、粉晶云岩组成。塔参 1 井、方 1 井、和 4 井中寒武统发育潮上云膏坪，由膏岩与云岩互层组成，局部形成由石盐组成的盐坪。

2. 潮间亚相

处在平均高潮面与平均低潮面之间的潮间带，环境条件变化频繁，以周期性发生出露与淹没和强、弱水动力条件交替变化为特征。沉积物以灰质云岩、云质灰岩、云岩为主，藻类发育，常夹有干裂片经水流改造而成的砾、砂屑灰岩或云岩。根据沉积特征，一般可识别出潮间上部的灰云坪、潮间下部的云灰坪、隐藻发育的藻坪以及潮沟等微相。下面描述其中的两个微相。

1) 藻坪微相

这个微相的岩性为灰色、紫灰色藻叠层石、藻层纹石、藻凝块石云岩和泥晶—粉晶云岩。常见鸟眼、干裂等构造。

柯坪地区中寒武统阿瓦塔格组的上部，其叠层石呈波状、柱状和卷心菜状。塔中 1 井 3994~4414m 和 4748~4970m 井段藻叠层石云岩和藻凝块石云岩发育。由此可见，这些叠层石的形态多种多样。一般说来，叠层石的形态与生物本身无关，而与生成环境的水动力条件有关，层纹状和波状形态生长于水动力较弱的潮间带上部环境，柱状、分枝状、半球状叠层石多为水动力较强的潮间带下部及潮下带上部的产物。

2) 潮沟微相

主要为含砾砂屑云岩、砾屑云岩组成。砾屑常为藻纹层云岩，多呈板条状，略定向排列。有时见核形石。向上一般变为藻纹层云岩。其底部为冲刷侵蚀接触。

3. 泻湖亚相

为局限海台地内较低洼的区域，水体循环受到限制，以静水沉积为主。主要岩石为灰—浅灰色泥晶灰岩、球粒灰岩和藻屑砂屑泥晶灰岩，夹亮晶砾砂屑灰岩。它们或多或少地被云化，形成豹斑状、条带状云质灰岩、灰质云岩，甚至形成泥晶—粉晶云岩。生物极少，为广盐度的蓝绿藻—介形虫组合，仅有蓝绿藻团和介形虫，有时见海绵骨针。偶见鸟眼、藻纹层、藻叠层石等构造，潜穴发育，水平层理为主，偶见波状层理。

这些岩石都以灰泥为主，蓝绿藻较发育，说明水体浅（一般小于 5~6m），能量低，当水体变浅时，局部可出现潮间环境，形成藻纹层和叠层石。该环境局部可发育成蒸发泻湖，形成巨厚的石膏和盐岩，例如和 4 井、方 1 井中寒武统。该亚相主要见于柯坪、巴楚、塔北和塔中地区上寒武统丘里塔格群下亚群和下奥陶统丘里塔格群上亚群的中、下部，柯坪地区下寒武统的吾松格尔组和上寒武统的沙依里克组，巴楚地区中寒武统和田河组。

4. 台内滩亚相

这个亚相位于局限海台地与开阔海台地过渡地带。由于面临开阔海，水体流通较畅，波浪作用相对较强，为弱动荡到中等动荡环境。颗粒组分含量较高，以藻屑和砂屑为主，形成中—低能粒屑滩。当受到风暴作用时，可形成砾砂屑灰岩和粒序层理。这个亚相分布广，其岩石类型主要有以下两种：亮泥晶藻屑—砂屑灰岩以及具粒屑残余结构的粉—细晶云岩。

二、开阔海台地相

这个相位于台地边缘与局限海台地之间，海域广阔，海水循环较好，盐度基本正常，水深由数米至几十米。沉积物从粒屑到灰泥都有。生物种类和数量较丰富，藻类特别丰富，可见蓝绿藻、海绵、苔藓虫、棘皮、介形虫和完整的腕足介壳等，一般都是正常盐度生物，该相的分布很广，寒武系和奥陶系中均有发育，见于盆地周边露头及塔北和塔中地区，推测北部坳陷西部也相当发育。

根据地貌及沉积特征，在开阔海台地内可识别出台内粒屑滩、台内生物礁、滩间海、台内缓坡、台内洼地等亚相。

1. 台内滩亚相

台内滩一般形成于台内相对较高的部位，以波浪作用为主，能量中等—低。按粒屑成分可分为以下几种类型。

1) 砂屑滩微相

岩性为泥—亮晶藻砂屑灰岩、含砾屑的藻砂屑灰岩，砂屑含量 60%~75%，见棘皮、三叶虫、腕虫、介形虫等碎片。

2) 生屑滩微相

岩性为亮—泥晶棘屑灰岩、泥晶生屑灰岩等，生屑含量 55%~75%，主要为棘皮、三叶虫、苔藓虫、腹足、绿藻等。

3) 核形石滩微相

岩性主要为核形石灰岩，常含泥质。核形石含量 80%~85%，粒径 1~3cm。

该亚相在受到风暴和风暴流影响的情况下，能量增高，形成了亮晶砾屑砂屑灰岩，显出粒序层理，并向上过渡为藻屑砂屑泥粒—粒泥灰岩和灰泥岩。该亚相与局限海台地的台内滩亚相相似，但含有正常盐度生物如腕足和棘皮等。

2. 滩间海亚相

它位于正常浪基面之下，水深较大，但一般不超过 50m，海底能量通常很低。沉积物以粒细、色暗为特征。生物以腕足为主，其次为蓝绿藻、棘皮、介形虫、苔藓虫等。生物扰动构造和潜穴发育，主要的岩石类型有两种：泥晶灰岩和含藻屑、砂屑泥晶灰岩。

3. 台内缓坡亚相

台内缓坡为台地内平缓倾斜的斜坡带，通常处于岩岛礁或滩边缘至台内洼地的过渡带上，水体不深，常受风暴浪和风暴流的扰动改造。沉积物以含泥质条带、条纹的泥晶灰岩以及风暴沉积为特征。它大致可分为两种不同的类型。

一类为灰色生物泥晶灰岩、藻屑泥晶灰岩、泥晶灰岩和泥晶藻灰岩，常发育斑块状、假角砾状和角砾状构造，“角砾”间被粉砂和泥充填，生物以葛万藻为主。其特征主要为：底部冲刷标志不明显，由块状、斑块状、假角砾状灰岩向上递变为角砾灰岩。角砾灰岩厚 10~40cm，角砾含量 60%~80%，砾径 0.3~0.5cm，次棱角一次圆状，砾间被砂屑、泥和粉砂充填，可显示一定的近距离搬运特征。再向上变为块状灰岩或薄层泥岩。角砾状构造是由极强的风暴扰动形成的，由于灰岩的固结能力较强，故未造成明显的冲刷、搬运。这类型的风暴岩较常见，主要分布于正常浪基面以下附近，或者台内缓坡的上部。

另一类为灰—深灰色薄层泥晶灰岩，可间夹具冲刷面、粒序层、交错层层理和水平层理的薄层泥晶灰岩、粉屑灰岩。常与灰绿、灰黑色泥岩、钙质泥岩组成不等厚互层状，生物以三叶虫、头足类和腕足类为主。水体相对较深，主要分布于台内缓坡的下部。

4. 台内洼地亚相

台内洼地是指台地上相对低洼、水体相对较深的地区，其底部位于晴天浪基面之下，但通常在风暴浪基面之下 (Read, 1985)，水体深度一般不超过外陆棚的水体深度 (<200m)。在风暴浪基面之下的沉积物，则可以出现静海到贫氧的石灰岩和页岩 (Mumis, 1980)。台洼亚相可包含以下三种微相类型。

(1) 泥页岩微相：岩性为灰色—灰黑色钙质泥岩、钙质页岩，常夹泥灰岩、泥质泥晶灰岩及条带状粉砂岩，含黄铁矿，发育微细水平层理和水平虫迹，产个体细小的腕足、三叶虫、笔石等。

(2) 泥灰岩及泥质泥晶灰岩微相：岩性为灰—灰黑色薄层至薄板状泥质灰岩、泥灰岩、含生屑泥晶灰岩，常呈夹层产于泥页岩中，部分灰岩层具有瘤状、豆荚状构造。

(3) 泥质、灰质粉砂岩微相：粉砂岩多呈条纹状或条带状薄层，厚 0.3~5cm，可发育小型冲刷、粒序层及小型波纹层理，产于泥岩中。系风暴流搬运、沉积而成。

三、台地边缘相

台地边缘面向广海，背靠开阔海台地，水浅能量高，主要发育粒屑滩和生物礁组成的镶边体系，包括台缘滩、台缘骨架礁、台缘灰泥丘及滩间海等亚相。

1. 台缘滩亚相

发育于台地边缘的碳酸盐岩浅滩，以砂屑滩为主，其次是生屑滩、砂砾屑滩，鲕滩较少

见。

1) 砂屑滩微相

岩性为灰—浅灰色中厚层状亮晶藻砂屑灰岩、亮—泥晶藻砂屑灰岩，夹薄—中层状泥—亮晶含砾屑的砂屑灰岩、含核形石的砂砾屑灰岩。

颗粒含量一般 65%~75%。藻砂屑 40%~55%，砾屑 10%~15%，核形石一般 3%~5% 最高可达 15%~20%。生屑一般 8%~10%。生物主要为葛万藻、球松藻、棘皮、腹足、腕足、三叶虫、苔藓虫、蠕孔藻、努亚藻、介形虫、海绵等。化石以近距离搬运或原地埋藏为主。颗粒磨圆、分选中等—好，粒间胶结物主要为亮晶方解石。

2) 生屑滩微相

岩性为灰—深灰色薄—中层状泥晶生屑灰岩、泥—亮晶棘屑灰岩，常夹深灰色泥质条带和泥质条纹。

生物碎屑含量 50%~80%，以棘皮为主，其次为苔藓虫、腕虫、三叶虫、介形虫等，可含少量的核形石。见冲刷面、水平层理和波状层理。在垂向层序上，下部生屑灰岩层厚、质纯，仅见少量泥质条纹，颗粒间以亮晶方解石胶结为主；上部，生屑灰岩厚度减薄，泥质条带夹层增多、增厚，生屑含量减少，颗粒间的灰泥填隙物含量增加。

3) 砂砾屑滩微相

岩性为灰—浅灰色亮晶藻砂砾屑灰岩、泥—亮晶含砾藻砂屑灰岩、亮晶生物砾屑灰岩、亮晶藻砂屑灰岩夹泥晶砂屑灰岩。

颗粒含量一般 65%~85%，主要为藻砂屑，含量 35%~68%，砾屑 4%~50%，其次为核形石、藻鲕和球粒。生屑含量 0~30%，主要为藻类、棘皮、腕足、腹足、介形虫、三叶虫，其次为层孔虫、苔藓虫、珊瑚等生物砾屑。藻类以管孔藻、蠕孔藻和努亚藻为主，其次为葛万藻、球松藻、表附藻、丛藻、基座藻等。

颗粒磨圆较好，分选中等—好，粒间以亮晶方解石胶结为主，含量为 5%~18%，具 2~3 个世代的胶结物。

2. 滩间海亚相

滩（丘）间海是指位于滩（丘）间地形相对低洼，水体相对较深的环境。它位于正常浪基面之下，水体较滩、丘深，但一般不超过 50m，海底能量通常较低。沉积物以层薄、粒细、色暗和泥质含量相对较高为特征。生物以介形虫、蓝绿藻、腕足、海绵骨针为主，其次可见有棘皮、苔藓虫等生物。生物扰动构造发育。可见冲刷面和薄粒序。另外，生物种类及含量在滩间与丘间还有区别。滩间海亚相中生物类型及含量相对丰富，而丘间海亚相中生物类型和含量相对单一和少。

四、斜 坡 相

斜坡位于台地与槽盆之间，也称为台—盆或台—槽过渡带，其底界深度一般不超过氧化界面。寒武系、奥陶系的斜坡相带围绕库—满拗拉槽呈向西凸出的马蹄形带状展布。根据沉积特征、斜坡带宽度、斜坡坡度及古水深等，将斜坡相分为以碳酸盐岩为主的台地边缘缓斜坡、陡斜坡以及以陆源碎屑为主的混积陆棚边缘斜坡等三种相，并且可识别出上斜坡、下斜坡、坡脚及斜坡灰泥丘等亚相。

1. 缓斜坡相

主要特征表现为碳酸盐岩重力流成因的灰色薄—中层细砾屑灰岩、砂屑灰岩，呈夹层状

或互层状产于较深水静水斜坡沉积的灰—深灰色薄—中层状泥质灰岩、泥晶灰岩、灰质泥岩及扁豆状灰岩中。常见的沉积构造有：冲刷面、粒序层、水平纹层、波状纹层等。完整的生物化石及碎片见有三叶虫、腕足、棘皮、介形虫及牙形石等，另见水平的遗迹化石。化石具搬运—原地埋藏特征。既有浅水区由重力流搬运到较深水区的生物及碎片，又有较深水区原地生长的生物。

该相以库南 1 井下奥陶统 4639~4901m 井段较为典型，并且主要表现为下斜坡亚相。它主要包含以下两种微相：较深水静水沉积微相以及碎屑流—浊流沉积微相。

2. 陡斜坡相

其沉积特征主要表现为岩崩与滑塌成因的巨砾—粗砾级的角砾云岩，夹碎屑流成因的中—细砾云岩和斜坡上静水沉积的薄层灰质粉晶云岩。滑动、滑塌及变形构造十分发育。白云岩系沉积期后经云化作用而成。

典型剖面以塔中 5 井下奥陶统 3508.40~3771.78m 井段为代表。该段发育厚 260 余米的以岩崩与滑塌成因为主的巨—粗砾云岩。其上覆层和下伏层均为台缘高能粒屑滩沉积。在纵向层序上，由于岩崩与滑塌堆积以及粒屑滩的进积作用，晚期靠近台地的断阶被掩埋、变浅，至 3367.00~3508.40m，又演变为台缘粒屑滩。塔中 5 井位于塔中 I 号断层附近，距 I 号断层水平距离约 13km。该断层是发育于加里东期的大断裂。推测这个断阶式陡斜坡的发育与该断裂在早奥陶世的活动有关。

向东 29km 至塔中 38 井，角砾白云岩砾径变细，厚度变薄。岩性为中—细砾白云岩，含砾屑的砂屑白云岩，厚度 200m 左右，属碎屑流—浊流沉积。

五、奥陶纪层序沉积相平面展布

在盆缘露头剖面和盆内基干井剖面详细相分析的基础上，结合地震相研究，以层序地层学的观点为指导，以三级层序为作图单位，研究塔里木盆地奥陶纪主要目的层序的沉积相平面分布特征与规律，为碳酸盐岩储层预测提供可靠的沉积相基础。总的来说，奥陶纪各三级层序的沉积格局基本上均表现为东盆西台，台—盆之间为一向西凸出的马蹄形斜坡相带。下面从早到晚分别简述之。

1. 早奥陶世 S₁ 层序

如图 1-6 所示，东部发育半深海—深海槽盆相，以细粒沉积物为主，堆积了不足 100m 厚的硅质岩、泥页岩、泥灰岩夹条带状粉砂岩，可以塔东 1 井为代表，反映沉积物供给不足，为欠补偿槽盆。在槽盆西缘，发育有从台地顺坡搬运来的碳酸盐岩重力流沉积物。地震反射特征主要表现为弱振幅断续亚平行盆地充填相。

在这个槽盆以西，是一个向西凸出的马蹄形东倾斜坡带，大致在库南 1 井—满参 1 井—若羌一带，以发育钙屑碎屑流和浊流沉积为特征，属沉积型缓斜坡，可以库南 1 井为代表。地震反射特征表现为中弱振幅较连续前积斜坡相。

在这个斜坡带以西的广大地区，发育了广阔的碳酸盐岩台地环境，堆积了巨厚的浅水碳酸盐岩。台地上相带的展布基本上呈南北对称型式。北侧的英买力—阿克苏一带和南侧的塔中—巴楚一带，为局限海台地发育区，并且以堆积 1000 多米厚的白云岩为特征，主要包含了潮坪、台内滩、台内泻湖等三种不同的亚相。这三种亚相所占的地层厚度比分别为 42%、40% 和 18%。满西 1 井—柯坪为半局限—开阔海台地展布区，主要由云岩、灰岩及其过渡