

文章编号:1001-6112(2012)03-0257-10

塔里木盆地阿瓦提坳陷油气资源潜力分析

顾 忆¹,赵永强¹,贾存善¹,何光玉²,罗 宇¹,王 斌¹,路清华¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126;

2. 浙江大学 地球科学系,杭州 310027)

摘要:阿瓦提坳陷是目前塔里木盆地勘探程度最低的地区,区内及周缘已发现乌鲁桥油苗、志留系沥青砂岩等油气显示。通过对区域构造背景及其演化、主要烃源岩沉积背景及其地球化学特征的研究,明确阿瓦提坳陷及周缘发育潟湖相、陆棚—斜坡相2类沉积背景不同、地球化学特征有别的主力烃源岩。下寒武统玉尔吐斯组、中上奥陶统萨尔夫组、印干组烃源岩以斜坡相为主,是与上升洋流有关的特高丰度烃源岩;中下寒武统则发育以潟湖相为主的较高丰度烃源岩。并提出了本区优质烃源岩的沉积发育模式及其沉积环境的判别指标。通过层序地层、地震相、沉积相研究,开展了层序地层格架下地震相、沉积相约束的烃源岩识别与预测。在典型油藏解剖、油气成藏条件综合分析的基础上,明确了阿瓦提坳陷及邻区有利勘探领域。

关键词:烃源岩;油气地球化学;资源潜力;阿瓦提坳陷;塔里木盆地

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Analysis of hydrocarbon resource potential in Awati Depression of Tarim Basin

Gu Yi¹, Zhao Yongqiang¹, Jia Cunshan¹, He Guangyu², Luo Yu¹, Wang Bin¹, Lu Qinghua¹

(1. Wuxi Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: The degree of petroleum prospecting in the Awati Depression is the lowest comparing with that in platform depression areas of the Tarim Basin. Some oil and gas shows such as the Wuluqiao oil show and the Silurian asphaltic sandstone were found in the depression and its surroundings. Based on the studies of regional tectonic setting and its evolution, depositional environments and geochemical characteristics of the main source rocks, two different kinds of principle source rocks with different sedimentary backgrounds and geochemical features, developed in lagoonal facies and continental shelf and slope facies respectively, were determined. Source rocks developed in the Lower Cambrian Yuertusi Formation, the Middle and Upper Ordovician Saergan Formation and Yinggan Formation were dominated by slope facies and showed extra-high organic content which was related to ascending current. And the Middle and Lower Cambrian source rocks with relative high organic content were developed in lagoonal facies. The sedimentary models for the formation of quality source rocks and the identification marks for depositional environments were proposed. According to the studies of sequence stratigraphy, seismic facies and depositional facies, the identification and prediction of source rocks confined by seismic and depositional facies under sequence stratigraphic framework were carried out. On the basis of dissecting of typical reservoir and synthetic analysis of hydrocarbon accumulation, the potential targets for petroleum exploration were indicated in the Awati Depression and its surrounding areas.

Key words: source rock; petroleum geochemistry; resource potential; Awati Depression; Tarim Basin

阿瓦提坳陷是塔里木盆地东北坳陷区阿—满坳陷的一部分,位于东北坳陷区西部,面积约 3×10^4 km²,是塔里木盆地研究程度最低的地区。目前,在阿瓦提坳陷仅钻探井10口,尚未获得工业油气流,仅发现乌鲁桥油苗、乔1井志留系沥青砂岩、胜利1井志留系沥青砂岩等油气显示。而在周缘地区,柯坪隆

起建化厂发现中奥陶统大湾沟组液态油苗,并广布志留系沥青砂岩;巴楚隆起已发现巴什托、亚松迪油气田及同1井、和4井油气显示;沙西凸起在下古生界也获得高产工业油气流(英买1、2井)。阿瓦提坳陷是否能作为一个有利的生烃坳陷?这对于环阿瓦提坳陷的油气勘探具有重要意义。

收稿日期:2011-12-30;修订日期:2012-04-26。

作者简介:顾忆(1962—),男,教授级高级工程师,从事石油地质研究。E-mail: guyi_syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化海相前瞻性项目(YPH08096)资助。

通过对区域构造背景及其演化、主要烃源岩沉积背景及其地球化学特征、油气资源量估算及评价的综合研究,明确阿瓦提坳陷发育潟湖相、陆棚—斜坡相2类沉积背景不同、地球化学特征有别的主力烃源岩系,并进行了主力烃源岩预测,明确了阿瓦提坳陷油气资源潜力。

1 区域构造背景及其演化

塔里木盆地是一个多旋回克拉通盆地,其演化先后受古亚洲及特提斯两大构造域的影响,形成了古生代与中生代上下2个盆地演化阶段和2个世代盆地的叠加复合。

受晚震旦世的强烈伸展作用,塔里木克拉通周边出现了扩张和分裂,在塔里木北缘形成被动大陆边缘盆地。阿瓦提坳陷西部、巴楚东部强烈活动,并形成一系列断陷,阿瓦提、巴楚与麦盖提斜坡地区处于一种中部深、南北浅、西深东浅、向北北西开口的古海槽的古地理环境。晚震旦世的伸展活动为早寒武世烃源岩的发育提供了良好的构造—沉积背景。

阿瓦提坳陷断裂系统主要呈北东向、北西西向和北西向展布,且主要分布于坳陷的周缘,以压扭断层为主;而坳陷内部则断层较少,变形较弱,主要为逆冲断层,且主要分布于古生界地层之中。这些断层主要活动于加里东中期、海西晚期和喜马拉雅中期,以喜马拉雅中期最为强烈,其次是海西晚期,加里东中期相对较弱。

晚奥陶世开始的加里东中期运动以来,柯坪与阿瓦提坳陷逐步分离,形成柯坪(低)隆起;晚三叠世开始,区域应力场又变为挤压状态,其后发生的印支—燕山运动使巴楚北侧近东西向的吐木休克断裂(西段)和南侧的玛扎塔格断裂开始活动,巴楚东部地区开始抬升,巴楚东部隆起开始逐步形成,并与北侧的阿瓦提坳陷分离。

地震剖面解释表明,阿瓦提坳陷与巴楚隆起在寒武纪、奥陶纪为一个统一的坳陷,两者的地层在厚度和岩性上具有连续渐变的关系,无明显差异。

阿瓦提坳陷与柯坪隆起自中志留世以来,沉积的地层基本不同,表明两者自中志留世以来处于明显不同的古地理和构造环境,即加里东中期运动已使阿瓦提与柯坪分离开来。

从地震剖面、钻井地质剖面来看,沙西地区在三叠纪和新生代时期基本上处于稳定沉降接受沉积的状态,构造变形微弱。三叠系以下地层的一致陡倾或缺失,是受海西晚期运动与海西末期运动的

影响。另外,该区三叠系以下地层展布平稳,构造变形微弱,表明沙西地区在海西晚期运动以前应该与阿瓦提坳陷属于一个统一的沉降、沉积坳陷,其构造—古地理的重大分异起源于海西晚期运动。

而阿瓦提坳陷与卡塔克隆起,在晚震旦世—早中寒武世时期,两者均处于坳陷的构造—古地理环境,其东侧则为塔中古斜坡。地层西厚东薄,并向东超覆。之后,塔中地区强烈沉降,接受了巨厚的上寒武统和奥陶系沉积。中、晚奥陶世—志留纪和早—中泥盆世时期,卡塔克隆起带强烈活动并大幅度抬升,阿瓦提处于坳陷,而卡塔克地区则处于西倾斜坡。

2 烃源岩沉积背景及地化特征

如前所述,阿瓦提是一个新生代断陷,早古生代的构造沉积则有和柯坪隆起相对统一发展的特点。在目前研究程度尚低、钻井也未揭露的情况下,借鉴柯坪隆起、沙雅隆起下古生界烃源岩特征,通过层序地层、地震相、沉积相划分对比,是认识阿瓦提坳陷烃源条件的有效途径。

柯坪隆起寒武系—奥陶系地表露头剖面作为塔里木盆地古生界经典剖面,曾多次进行过剖面测制及采样分析工作。在前人研究的基础上,补充采集柯坪隆起、沙雅隆起星火1井烃源岩及相关样品开展相关研究。

2.1 层序地层划分与沉积相

根据柯坪露头和钻井层序地层、岩石地层和沉积学等的综合研究,在寒武—奥陶系中识别出26个三级层序(表1),可归纳为6种类型(表2)。

从和田1井—和4井—方1井—肖尔布拉克及大湾沟综合剖面—星火1井层序对比中可见,下寒武统主要发育一套烃源岩密集段(凝速段),该密集段主要分布在北部,由北向南厚度逐步减薄,受沉积环境控制明显;中下寒武统膏盐岩与碳酸盐岩交互沉积层序中烃源岩展布稳定,在区内分布广泛;奥陶系主要发育有2套烃源岩密集段(凝速段),下部密集段相当于萨尔干组,上部密集段相当于印干组。

下—中寒武统以强振幅连续反射为特征,可划分为2个地震层序,内部均显示出明显的由南到北的高频前积反射特征,说明该期相对深水相的沉积应位于工区中北部;上寒武统—下奥陶统,主体为杂乱反射,地层仅发育在测线最北部和最南部,可见少量呈明显由南东向北西的前积反射特征,此时碳酸盐岩台地的前积方向仍为由南向北,相对深水

表1 塔里木盆地阿瓦提拗陷寒武—奥陶系层序划分

Table 1 Sequence division from Cambrian to Ordovician in Awati Depression, Tarim Basin

地层系统		层序地层	
系	统	组	
		层序	
奥陶系	上统	桑塔木组(印干组)	Sq25-Sq26
		良里塔格组(其浪组)	Sq23-Sq24
		坎岭组	Sq22
	中下统	萨尔干组	Sq21
		大湾沟组	Sq20
		鹰山组	Sq16-Sq19
	蓬莱坝组	Sq12-Sq15	
上统	下丘里塔格群	Sq10-Sq11	
寒武系	中统	阿瓦塔格组	Sq9
		沙依里克组	Sq7-Sq8
	下统	吾松格组	Sq4-Sq5
		肖尔布拉克组	Sq2-Sq3
		玉尔吐斯组	Sq1

相的沉积应位于工区的中北部;中—上奥陶统在该测线上的极大部分也为杂乱反射,仅在测线的南、北两端有2段具有清晰的内部反射结构。本区北部和西北部中—上奥陶统所发育的下超面,应为烃源岩密集段发育的层段,在研究区北部和西北部,中上奥陶统具有烃源岩密集段发育。

对全区地震资料进行分析,可识别出中—强振幅高频连续地震相、弱振幅低频连续地震相、弱振幅低频连续地震相和杂乱反射地震相。通过岩石组合及钻井标定对地震相进行解释,划分了中寒

武统玉尔吐斯组、中下寒武统、上奥陶统萨尔干组、印干组沉积相;研究区下寒武统玉尔吐斯组主要发育斜坡—盆地相沉积(图1);中下寒武统主要发育潟湖相及斜坡—盆地相沉积(图2);中上奥陶统萨尔干组则发育了斜坡—盆地、开阔台地、混积陆棚相沉积(图3);上奥陶统印干组则主要发育斜坡及混积陆棚相沉积(图4)。

2.2 主力烃源岩特征

2.2.1 下寒武统玉尔吐斯组

柯坪地表露头肖尔布拉克剖面下寒武统玉尔吐斯组(ϵ_{1y})实测地层厚度为9.2 m,岩性为黑色碳质页岩。综合前人分析数据及本次研究测试成果(表3),玉尔吐斯组下部未经风化的黑色碳质页岩具有高有机质丰度,4块样品 TOC 含量分布于13.89%~22.39%,平均 TOC 含量高达17.99%。而风化的灰黄色泥岩 TOC 含量仅为1.97%,夹薄层硅质岩的 TOC 含量仅为0.33%。上部黑色碳质页岩普遍含粉砂,其有机质含量比下部要低,TOC 含量分布于1.87%~3.12%,平均 TOC 含量为2.42%。总体上,柯坪露头下寒武统玉尔吐斯组纵向上 TOC 含量具有下高上低特征,下部与含磷层伴生的烃源岩具特高有机质丰度。

星火1井玉尔吐斯组7件灰黑色碳质页岩的分析测试结果表明,TOC 含量分布于1.00%~9.43%,平均为5.5%。从纵向 TOC 含量分布看,星火1井下寒武统玉尔吐斯组烃源岩也有下高上低的特征,与肖尔布拉克地表剖面玉尔吐斯组烃源岩类似。

玉尔吐斯组烃源岩氯仿沥青“A”含量均不高,

表2 塔里木盆地阿瓦提拗陷寒武—奥陶系层序类型

Table 2 Sequence types from Cambrian to Ordovician in Awati Depression, Tarim Basin

类型	环境背景	结构	主要特征	主控因素	发育部位
I	蒸发台地(炎热干旱潮坪—潟湖)	HST	表现为复合层序的特征,以紫红色—杂色蒸发潟湖云泥岩—膏盐沉积和盐坪沉积为主要特征	海平面升降、气候	ϵ_1 :阿瓦塔格组
II	局限碳酸盐岩台地	HST+TST 或 HST	主要由白云岩、白云质灰岩和灰岩组成加积型副层序组,并组成 HST 特征,TST 发育较差	碳酸盐产率	ϵ_1 :肖尔布拉克组、沙依里克组、下丘里塔格群
III	开阔碳酸盐岩台地	HST TST	主要由白云质灰岩和颗粒灰岩组成加积型副层序组,并组成 HST 特征,TST 发育较差	碳酸盐产率	O:上丘里塔格组
IV	陆棚—斜坡	HST+CS TST	薄层硅质岩、硅质灰岩、黑色页岩组成 TST,白云质瘤状灰岩组成 HST,黑色页岩组成 CS	构造沉降、气候(缺氧事件)	ϵ_1 :玉尔吐斯组 O:萨尔干组、印干组
V	碳酸盐岩陆棚	HST CS TST	瘤状灰岩、颗粒灰岩与灰绿色页岩不等厚组成加积、进积、退积型副层序组,并组成对称性明显的 TST—CS—HST 结构,CS 由页岩和泥晶灰岩组成	海平面升降	ϵ_1 :吾松格组 O:其浪组
VI	碳酸盐岩陆棚—盆地	HST CS TST	由瘤状灰岩、泥晶灰岩与(黑色)页岩组成加积、弱进积、弱退积型副层序组,并组成对称性的 HST—CS—TST 结构,CS 由黑色页岩组成	构造沉降、海平面升降	O:大湾沟组、坎岭组

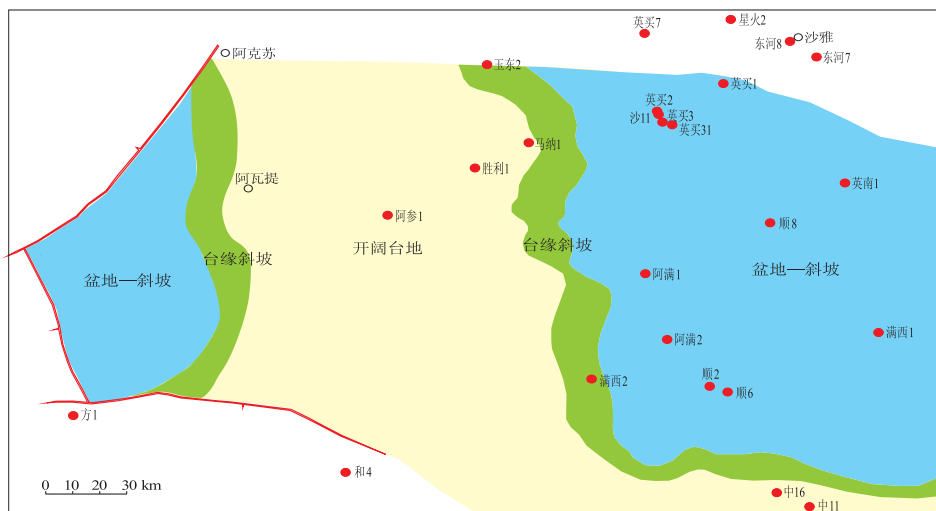


图 1 塔里木盆地阿瓦提坳陷下寒武统玉尔吐斯组烃源岩沉积相

Fig.1 Sedimentary facies of source rocks in Lower Cambrian Yuertusi Formation, Awati Depression, Tarim Basin

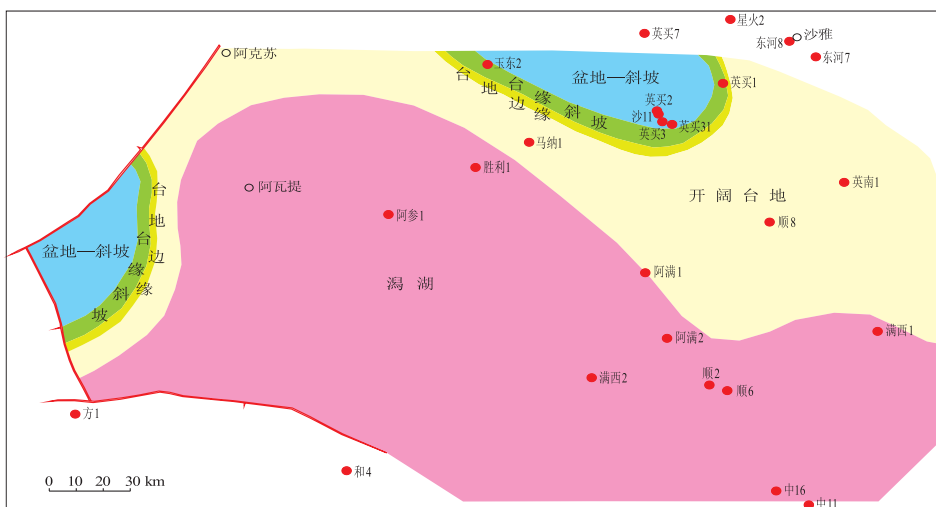


图 2 塔里木盆地阿瓦提坳陷中下寒武统烃源岩沉积相

Fig.2 Sedimentary facies of source rocks in Middle and Lower Cambrian, Awati Depression, Tarim Basin

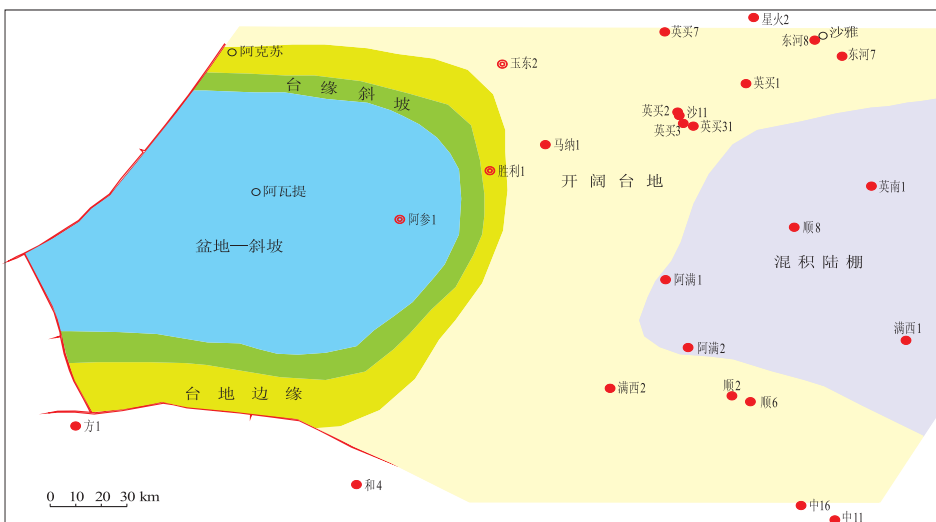


图 3 塔里木盆地阿瓦提坳陷中上奥陶统萨尔干组烃源岩沉积相

Fig.3 Sedimentary facies of source rocks in Middle and Upper Ordovician Saergan Formation, Awati Depression, Tarim Basin

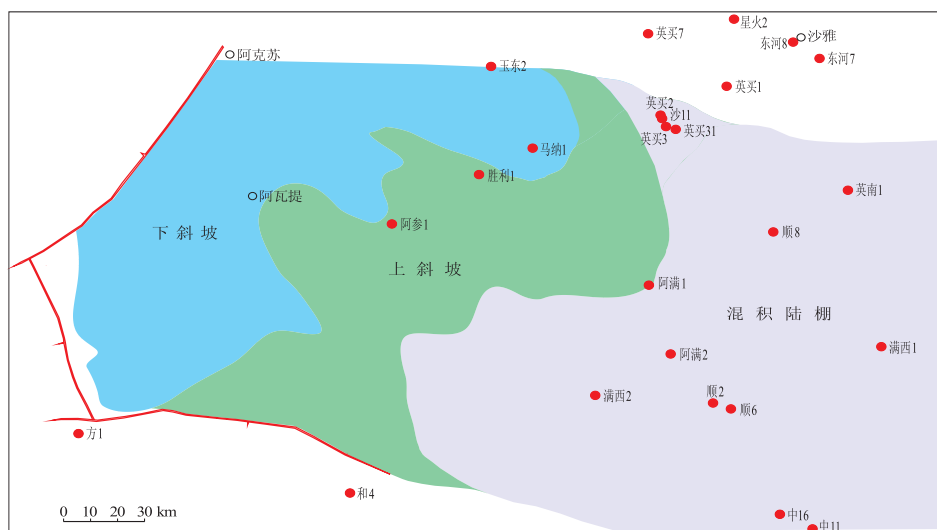


图4 塔里木盆地阿瓦提坳陷上奥陶统印干组烃源岩沉积相

Fig.4 Sedimentary facies of source rocks in Upper Ordovician Yinggan Formation, Awati Depression, Tarim Basin

表3 塔里木盆地柯坪隆起地表露头下寒武统玉尔吐斯组烃源岩有机质丰度参数

Table 3 Organic abundance parameters of source rocks in Lower Cambrian Yuertusi Formation, based on outcrops in Keping Uplift, Tarim Basin

样品号	距 ϵ_{1y} 底深度/m	岩性	$\omega(\text{TOC})/\%$	沥青“A”/ 10^{-6}	(“A”/C)/%
TX-04-8	5.88	黑色碳质页岩	2.59		
Xr- ϵ_{1y} (东2沟)-2	5	黑色碳质页岩	3.12	21.66	0.07
TX-04-7	4.8	黑色碳质页岩	1.87		
TX-04-5	4.1	黑色碳质页岩	2.15		
Xr- ϵ_{1y} (东2沟)-1	4	黑色碳质页岩	2.51	158.55	0.63
TX-04-4	3.8	黑色碳质页岩	2.27		
Xr- ϵ_{1y} (东1沟)-1	0.9	黑色碳质页岩	16.18	36.53	0.02
ϵ_{1y} -井下-2	0.85	灰黄色泥岩(风化)	1.97	10.06	0.05
ϵ_{1y} -8-1	0.8	黑色碳质泥岩	13.89	185.97	0.13
Xr- ϵ_{1y} (东1沟)-2	0.6	黑色碳质泥岩(含磷)	19.49	1 457.15	0.75
ϵ_{1y} -井下-1	0.5	黑色碳质泥岩	22.39	1 255.38	0.56

这是由于演化程度相对较高所致,实测等效镜质体反射率分布于1.48%~1.53%,目前已没有生烃潜力。

2.2.2 中下寒武统潟湖相沉积

塔里木盆地西部中下寒武统发育广泛分布的潟湖相沉积,为比较典型的被动边缘蒸发沉积建造。夹于蒸发膏盐岩中的高有机质丰度烃源岩的形成原因,主要与干热气候条件下高温、高盐海水对营养盐的富集作用有关,由此导致短的生物链、特别是适应高盐环境的菌、藻类繁盛,并沉降于盐层之下的强还原水底,得以完好保存。

巴楚隆起方1、和4井在中下寒武统钻遇的潟湖相高丰度烃源岩^[1],岩性为泥质白云岩、泥灰岩、泥晶云岩、云质泥灰岩。方1井中下寒武统烃源岩TOC含量为0.49%~2.43%,平均为0.91%,其中TOC含量大于0.5%的烃源岩厚度为195 m;和4井

中寒武统烃源岩TOC含量为0.21%~2.14%,平均为0.81%,其中TOC含量大于0.5%的烃源岩厚度为173 m。TOC含量大于1.0%的烃源岩厚度为108.5 m,约占中下寒武统地层厚度的30%。

中下寒武统潟湖相源岩的生烃母质以藻—球状甲藻生物相为特征。典型代表为和4井,其钻遇的岩屑和岩心样品中都发现了丰富的球状甲藻,该井5 722~5 846 m井段,TOC含量为0.44%~1.54%,其中5 778 m代表性样品中盐藻占30%、球状甲藻占10%左右。目前仅在巴楚隆起和4、方1、康2井和卡塔克隆起的塔参1井钻揭该套烃源岩。

2.2.3 中上奥陶统

大湾沟中上奥陶统标准剖面萨尔干组观测厚度13.8 m,大湾沟(南)剖面实测地层厚18.8 m。岩性为黑色页岩夹薄层灰岩及灰岩透镜体,厚度横

向变化不大,分布稳定。综合本次研究及前人分析成果认为,柯坪地表露头萨尔干组烃源岩以黑色泥岩为主,有机质丰度较高,泥质类 TOC 含量分布于 0.55%~4.65%,平均为 1.92%;碳酸盐岩类均为结核或薄夹层,TOC 含量为 0.25%~0.55%,达标率 50%。大湾沟剖面烃源岩氯仿沥青“A”含量较高,最低 340.80×10^{-6} ,最高 1788.35×10^{-6} ,均达好烃源岩标准。

上奥陶统印干组在大湾沟剖面实测地层厚 39.70 m。岩性为灰黑色泥岩夹泥灰岩,岩性及厚度横向变化均不大,分布稳定。有机质丰度较萨尔干组黑色泥页岩低得多,综合本次研究及前人成果^[2],印干组烃源岩 TOC 含量分布于 0.41%~1.06%,平均为 0.60%,属较差烃源岩。

2.3 寒武系—奥陶系生烃母质与沉积环境

2.3.1 寒武系—奥陶系生烃母质

前寒武纪—寒武纪的交替时期是地质史和生命史的重要转折期。从隐生宙向显生宙过渡,大陆、大气、大洋发生了显著不同的变化,是一个具有重大质变和特殊意义的时期。该期发生的生物带壳演化,基本上奠定了显生宙以来生物界的基本面貌^[3]。在全球范围的中国、印度、巴基斯坦北部、伊朗、法国南部、英格兰、阿曼北部、前苏联、哈萨克斯坦南部、蒙古、澳大利亚南部、加拿大等国家和地区,下寒武统底部广泛发育有黑色页岩夹薄层硅质岩的岩石组合。这些黑色页岩系中含有丰富的有机质,并发现大量的藻类化石。在贵州瓮安—开阳地区陡山沱期含磷岩系中发现大型球形绿藻化石^[4],并与大量大型疑源类、红藻碎屑及少量骨骼化石共存^[5]。东野脉兴^[6]在中国南方各主要工业磷矿床的矿石中发现了大量多种形态的磷质微生物(化石),不仅生物特征明显,而且残留有氨基酸和核酸等生命组织的有机化合物^[7]。

中国晚元古代—早古生代烃源岩的生烃生物的组成存在多种类型。例如以单一红藻为生烃母质的下花园型^[8],以蓝藻、绿藻和疑源类为生烃母质的京西下马岭型,以粘球形藻为生烃母质的奥陶系 Kukersite 型^[9],以疑源类为生烃母质的萨尔干型。和 4 井中寒武统和田河组(ϵ_3h)、柯坪露头下寒武统玉尔吐斯组($\epsilon_3\gamma$)、牙哈 5 井上寒武统岩心中发现丰富的球状甲藻化石,为寒武系烃源岩富含甲藻甾烷提供了生源依据^[10-11]。此外,塔中 43 井 5 595.57 m 上寒武统井段发现了少量可能为粘球形藻类的分子。

赵孟军等^[12-13]则发现塔里木盆地奥陶系地层

中存在一种以生成轻质油和天然气为主的烃源岩,其主要生物构成为底栖褐藻类,其显微组分构成、组成结构及地球化学特征都具有类似于腐殖型生烃母质的特点,主要分布在浅水陆棚、丘间洼地沉积微相中,其岩性主要为泥灰岩或灰质泥岩。王飞宇等^[14]、张宝民等^[9]对塔里木盆地奥陶系海相源岩中 2 类生烃母质进行了描述,一类富氢,主要为结构藻类体、层状藻类体、碎屑类脂体,主要来源于浮游藻类和疑源类;另一类相对贫氢,来源于底栖叶状体植物(如较贫氢的褐藻类)。

因此,从寒武纪—奥陶纪生物结构来看,藻类、菌类是主要的生烃物质,而藻类则无疑最为重要。简单地来看,塔里木盆地寒武系—奥陶系烃源岩生烃母质主要有浮游藻类+疑源类和宏观底栖藻类两大类。

2.3.2 早寒武世含磷沉积的沉积环境

磷在海洋中的循环与沉积主要是靠生物作用进行的^[6]。海洋表层水中的溶解磷几乎全部被海洋植物摄取,海洋植物及动物死亡后最终以生物碎屑的形式沉入海底,并被上升洋流带到表层后又又被生物吸收,重复循环。当上升洋流抵达大陆边缘时,磷等营养物质滞留,导致磷质生物大量繁衍,死亡后沉积,经成岩作用形成大规模的工业磷块岩矿床。现代海相沉积磷质岩主要产于中、低纬度区的大陆边缘体系的浅水环境中,一般从开放的大陆架到潮上带。磷质岩大多分布于纬度低于 40° 且一侧为深水大洋盆地的温暖气候带。经过古地磁校正后,寒武纪库鲁克塔格地区的古纬度处于 20° 左右^[15],与现代磷质岩的形成、分布规律完全一致。对库鲁克塔格地区早寒武世磷质岩的形成条件的研究表明^[16],从磷质岩在沉积序列中的位置可以断定它们形成于台地边缘—陆棚—斜坡。由于具粒屑结构的磷质岩发育,说明水动力作用明显,形成在浪基面以上。库鲁克塔格地区磷质岩多为暗紫色,如暗紫色钙质胶结砾屑磷质岩和紫红色含黄灰色黑色鲕粒磷质岩,说明其形成于氧化界面之上。沉积层序中发育的黑色灰色磷质岩与黑色硅质岩共生,说明其可能形成于氧化界面之下,或者有二次搬运发生。因此认为库鲁克塔格地区的磷质岩形成在从浪基面上、下至氧化界面上、下的一个较宽的环境带中。结合通常磷质岩形成环境的古水深为 $50 \sim 1000 \text{ m}$ ^[17],判定库鲁克塔格地区磷质岩形成环境的古水深为 $200 \sim 500 \text{ m}$ 。

柯坪隆起地表露头玉尔吐斯组下部为一套含磷沉积。磷块岩主要为暗紫红色,呈层状,泥质含

量较高,风化后呈结核状。其上为层状灰黄色泥岩夹黑色硅质岩条带,从井下所采未经风化的样品为黑色碳质泥页岩看,外部层状灰黄色泥岩实际就是黑色页岩长期风化所造成。在柯坪肖尔布拉克剖面实测含磷层 0.95 m。与含磷层相邻的黑色页岩底部有机碳含量高达 20%,并有由下向上有机质丰度逐渐减少的趋势。扫描电镜分析(样号 Xr- ϵ_{1y} (东 1 沟)-1)见黄铁矿结核,表明其水深相对较大,处于硫酸盐还原带以下,但从其他矿物组成、页岩中粉砂质含量较高等,仍属于受陆源有一定影响的陆棚—斜坡环境,推测沉积古水深约 200 ~ 500 m。

2.4 主力烃源岩沉积发育模式与烃源岩展布

2.4.1 主力烃源岩沉积发育模式

海洋中的光合作用一般发生在约 200 m 内的深度范围。在碳酸盐沉积的台地环境,表层海的光合作用基本上不受氧最低含量带的影响。但是在外陆架和近陆架的斜坡环境,不仅光合作用可以直接发生在上部氧最低含量带;而且由于 OMZ 带富轻碳同位素(^{12}C)的 CO_2 向上扩散和运移,表层海洋无机碳库较之台地环境具有明显偏低的 $\delta^{13}C$ 值。显然在外陆架和邻近陆架的斜坡环境光合作用形成的有机质较之台地环境应该具有明显偏负的 $\delta^{13}C$ 数值,并在早寒武世的岩石中保留下沉积记录,即碳酸盐台地环境沉积岩,如遵义地区 $\delta^{13}C_{org}$ 约为 -28‰;但是在外陆架和邻近陆架的斜坡区,如秀山、沅陵和桃江地区沉积的黑色页岩,其 $\delta^{13}C_{org}$ 值则低达 -34‰^[18]。

从表 4 柯坪露头烃源岩干酪根碳同位素组成看,虽然随着地质时代变新,干酪根碳同位素有变重的趋势,但肖尔布拉克剖面震旦系微晶灰岩样品其干酪根碳同位素重达 -25.7‰,则很难用时代变化来解释。当然仅一个样品的代表性或许不强。中上奥陶统烃源岩干酪根中,萨尔干组比印干组更轻,或许也可以解释为更近陆架或位于陆棚上斜坡所致。从岩性观察,中上奥陶统烃源岩中萨尔干组沉积环境应比印干组水更深,印干组普遍含粉砂质亦可说明。

有机质碳同位素可以很好地反映古环境,高有机产率的上升洋流环境形成的碳同位素组成具分层结构的海洋特征,氧最低含量带由于大量有机质在还原条件下遭受细菌微生物的降解释放出 CO_2 , 成为一个远较表层海洋富轻碳同位素的无机碳库,因此,轻的碳同位素可以解释为远离台地,重的碳同位素则靠近台地或位于台地上。因此,不难解释台地相烃源岩的重碳同位素特征,如塔深 1 井寒武

表 4 塔里木盆地柯坪隆起地表露头寒武系—奥陶系烃源岩干酪根碳同位素组成

Table 3 Kerogen carbon isotopes of source rocks in Cambrian and Ordovician, based on outcrops in Keping Uplift, Tarim Basin

剖面	样号	样品类型	地质年代	干酪根 $\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	
肖尔布拉克	Xr-Z _{2q} -1	微晶灰岩	Z _{2q}	-25.7	
	Xr- ϵ_{1y} (东 1 沟)-1	黑色泥岩	ϵ_{1y}	-34.17	
	Xr- ϵ_{1y} (东 1 沟)-2	黑色泥岩	ϵ_{1y}	-34.6	
	Xr- ϵ_{1y} (东 2 沟)-1	黑色泥岩	ϵ_{1y}	-34.18	
	Xr- ϵ_{1y} (东 2 沟)-2	黑色泥岩	ϵ_{1y}	-33.97	
	Tx-04-7	黑色泥岩	ϵ_{1y}	-34.63	
	Tdn-04-5	黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.05	
	Tdn-04-4	黑色泥岩	O _{2-3s}	-29.81	
	大湾沟	Dwg-O _{2s} -1	黑色泥岩	O _{2-3s}	-29.89
		Dwg-O _{2s} -2	黑色泥岩	O _{2-3s}	-29.67
Dwg-O _{2s} -4		黑色泥岩	O _{2-3s}	-29.45	
Dwg-O _{2s} -5		黑色泥岩	O _{2-3s}	-29.91	
Dwg-O _{2s} -6		黑色泥岩	O _{2-3s}	-29.55	
Dwg-O _{2s} -7		黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.09	
Dwg-O _{2s} -8		黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.06	
Dwg-O _{2s} -10		黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.2	
Dwg-O _{2s} -11		黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.1	
Dwg-O _{2s} -12		黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.32	
四石厂	Tdn04-6	黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.29	
	Tx-04-5	黑色泥岩	ϵ_{1y}	-34.05	
	Tx-04-4	黑色泥岩	ϵ_{1y}	-33.83	
	大湾沟	Ssc-O _{2s} -1	黑色泥岩	O _{2-3s}	-29.76
Ssc-O _{2s} -2		黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.02	
Ssc-O _{2s} -3		黑色泥岩	O _{2-3s}	-30.24	
大湾沟	Dwg-O _{3y} -1	灰绿色泥灰岩	O _{3y}	-29.43	
	Dwg-O _{3y} -2	灰绿色泥灰岩	O _{3y}	-29.68	
	Tdn-04-24	灰绿色泥灰岩	O _{3y}	-29.47	
	Tdn-04-23	灰绿色泥灰岩	O _{3y}	-29.35	
	Tdn-04-21	灰绿色泥灰岩	O _{3y}	-29.77	

系液态烃、乌鲁桥油苗及塔东 2 井寒武系稠油。也可以用来解释巴楚巴什托原油、柯坪下寒武统玉尔吐斯组烃源岩的轻碳同位素特征。和 4 井寒武系主要为潟湖相沉积,烃源岩的碳同位素值为 -31.76‰^[1],也可表明主体为台地相的沉积。

图 5 为阿瓦提及周缘优质烃源岩发育模式示意图。总体认为是一个由上升洋流所造成的、在碳同位素组成上具有分层结构的古海洋高丰度有机质沉积模式。可能分为陆棚—斜坡相的特高有机质丰度烃源岩和潟湖相的较高丰度烃源岩 2 种类型。

2.4.2 主力烃源岩展布

阿瓦提坳陷发育以下寒武统玉尔吐斯组为代表的中下寒武统陆棚—斜坡相、中下寒武统潟湖相及中上奥陶统萨尔干组、上奥陶统印干组斜坡相烃

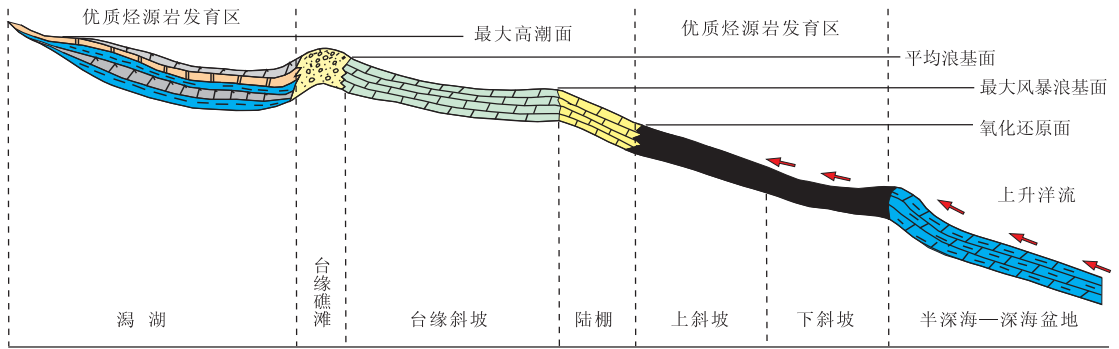


图 5 塔里木盆地阿瓦提坳陷及周缘优质烃源岩发育模式

Fig. 5 Generation model of favorable source rocks in and around Awati Depression, Tarim Basin

源岩。下寒武统玉尔吐斯组烃源岩具有特高有机质丰度,厚度不大,主要分布于陆棚—斜坡相,是一套与含磷沉积伴生,与上升洋流有关的优质烃源岩。根据地震反射波组特征、地震相及露头、井下资料对比,推测分布于震旦纪拉张背景下的陆棚—斜坡相区,烃源岩厚度 10 ~ 50 m。以方 1、和 4 井为代表的潟湖相烃源岩则具较高丰度,具有厚度较大、分布广泛的特点,推测烃源岩分布于阿瓦提中西部潟湖相,厚度 50 ~ 200 m。中上奥陶统斜坡相烃源岩也是在全球缺氧事件下沉积的优质烃源岩,具较高有机质丰度特征,认为也属于与上升洋流有关的富有机质沉积,与玉尔吐斯组相比,沉积水深要大,推测烃源岩主要发育于阿瓦提坳陷西部斜坡相区,中上奥陶统萨尔干组烃源岩厚度 10 ~ 40 m,上奥陶统印干组烃源岩厚度 10 ~ 30 m。

3 油气勘探方向

3.1 油气系统分析

如前所述,阿瓦提坳陷主要发育有中下寒武统陆棚—斜坡相、潟湖相和中上奥陶统斜坡相烃源岩,其总体丰度、类型、成熟度及其演化特征见表 5。根据烃源岩特征、油气成因特点、储层特征及储盖组合,结合油气运移及保存条件,阿瓦提坳陷可以划分为 2 个油气系统,即:中下寒武统油气系统

和中上奥陶统油气系统。

3.1.1 中下寒武统油气系统

烃源岩:以中下寒武统陆棚—斜坡相泥页岩、潟湖相泥质岩、泥灰岩及微泥晶碳酸盐岩为主力烃源岩。潟湖相烃源岩厚度大、分布广,主要发育与潟湖有关的藻类有机相烃源岩,有机质类型为 I 型,有机质丰度中等,平均为 0.9%。在阿瓦提坳陷中南部该套烃源岩最厚可达 200 m,一般为 100 ~ 150 m,最大厚度位于巴楚隆起西部,方 1 井揭示中下寒武统烃源岩 195 m,和 4 井揭示中下寒武统烃源岩 177 m。陆棚—斜坡相烃源岩主要发育于阿瓦提东北部地区,玉尔吐斯组厚度 10 ~ 50 m,具有有机质丰度特高、厚度不大、分布稳定的特征。

从中下寒武统烃源岩的油气生成演化史看,加里东晚期—早海西期有效生烃区主要位于阿瓦提坳陷中南部,北部成熟度相对较低,部分地区仍未进入生烃门限。至海西晚期,阿瓦提坳陷中下寒武统烃源岩全线进入生烃高峰期,南部部分地区已达高一过熟阶段。燕山期除北部部分地区仍为高峰—高熟阶段以外,其他地区均以过熟阶段为主,至喜马拉雅晚期,中下寒武统烃源岩已近生烃枯竭期,仅在部分地区可能提供少量的天然气资源。因此,中下寒武统油气系统其主要供烃时期为海西晚期—燕山期,供烃范围为巴楚隆起、顺托果勒低隆

表 5 塔里木盆地阿瓦提坳陷及周缘烃源岩综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of favorable source rocks in and around Awati Depression, Tarim Basin

层位	烃源岩		有机质丰度		有机质类型	油气生成演化					主生油期	备注
	沉积相	厚度/m	$\omega(\text{TOC})/\%$	烃源岩级别		加里东晚期	海西早期	海西晚期	燕山期	喜马拉雅晚期		
O ₂₋₃	斜坡	50 ~ 200	0.5 ~ 4.65/1.92	好	I	未熟	未熟	低熟—成熟	成熟—高峰	高熟—过熟	海西—燕山期	主要分布于西北部
			0.4 ~ 1.06/0.60	差	I			成熟—高峰	高熟—过熟			
Є ₁₋₂	陆棚—斜坡	10 ~ 50	1.87 ~ 22.39/4.80	好	I	门限—低熟	成熟—高峰	高峰—高熟	高熟—过熟	过熟	海西期	主要分布于中南部
	潟湖	50 ~ 200	0.50 ~ 2.43/0.90	较好	I			高熟—过熟				

注:表中算式含义为:最小值 ~ 最大值/平均值。

及沙西凸起。

储集层:寒武系白云岩为主要的储集层。主要岩石类型包括粉—细晶云岩、藻云岩,主要储集空间为晶间孔、晶间溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔、溶洞和裂缝等。

储盖组合:其主要储盖组合为寒武系白云岩与膏盐岩。

圈闭类型:加里东—海西早期形成了一批古构造圈闭,如乌山构造在该期已形成寒武—奥陶系潜山。此外,由于海西晚期运动前,巴楚隆起整体断裂不发育,主要发育的圈闭以寒武系内幕圈闭为主,海西晚期运动发育的巴什托断裂、玛北断裂、吐木休克断裂(中段)形成相应的构造圈闭,如巴什托断背斜。

油气输导条件:由于早期断裂活动不活跃,海西晚期运动前,其油气输导主要依靠不整合面及寒武系内部输导。

油气资源类型:早期以原油、凝析油气为主,晚期以气为主。

油气保存条件:盖层主要为中寒武统巨厚的盐膏岩层系、中志留统依木干他乌组泥岩及石炭系卡拉沙依组、巴楚组泥膏岩等,保存条件相对较好。

3.1.2 中上奥陶统油气系统

烃源岩:以中上奥陶统斜坡相泥质岩为主力烃源岩,主要分布于阿瓦提坳陷西部地区。中奥陶统萨尔干组黑色页岩有机质丰度较高(TOC 含量介于 0.5% ~ 4.65%, 平均为 1.92%), $\omega(\text{TOC}) \geq 0.5\%$ 的源岩厚度为 13.6 m; 生烃母质构成主要为浮游藻类, 有机质类型主要为 I 型。上奥陶统印干组烃源岩 TOC 含量分布于 0.4% ~ 1.06%, 平均为 0.6%, 属较差烃源岩, $\omega(\text{TOC}) \geq 0.4\%$ 的源岩厚度为 97 m。推测在阿瓦提坳陷内斜坡相部分烃源岩更好。

从中上奥陶统烃源岩的油气生成演化史看,海西晚期时中上奥陶统仅部分地区进入生烃门限,燕山期是中上奥陶统大量生烃的主要时期,在阿瓦提坳陷西部已达生烃高峰—高成熟阶段,大部地区均为成熟—生烃高峰期阶段;喜马拉雅晚期中上奥陶统烃源岩进入主要生气阶段,资源类型以天然气为主,并有部分凝析油。因此,中上奥陶统油气系统主要供油期为燕山期,供气期为喜马拉雅期,其供烃方向由坳陷向周缘。

储集层:从柯坪隆起地表志留系中发现多处油苗和油气显示表明,中上奥陶统油气系统的主要储集层可能为奥陶系岩溶储层和上覆志留系—泥盆系。在巴楚隆起南部中上奥陶统缺失区,下奥陶统

亦可成为有利储集层。

储盖组合:其主要储盖组合为志留—泥盆系内部储盖组合。依木干他乌组以红色、棕红色泥岩为主,泥岩厚 150 ~ 270 余 m, 占地层厚度的 65% ~ 92%, 单层厚度一般为 2 ~ 10 m, 最厚达 61 m, 该层厚度稳定, 全区分布, 为区域性泥岩盖层。

圈闭类型:与海西晚期—燕山期有关的构造圈闭。

油气输导条件:油气主要生成期为燕山期, 断裂不发育, 因此, 其油气输导主要依靠不整合面输导。喜马拉雅期, 油气主要沿断裂调整。

油气资源类型:燕山期以原油为主, 喜马拉雅晚期以气为主。

油气保存条件:由于主要供烃期相对较晚, 保存条件要好于中下寒武统油气系统。但由于喜马拉雅期强烈的构造运动, 在巴楚地区油气的运移调整仍将是控制中上奥陶统油气成藏的重要因素。

3.2 主要勘探领域

阿瓦提坳陷周缘巴楚隆起、沙雅隆起沙西凸起已经发现工业油气藏, 东南部卡塔克隆起、东部顺托果勒低隆钻井也均见良好油气显示。围绕阿瓦提坳陷, 在巴楚隆起、沙西凸起、卡塔克隆起均发育广布的志留系沥青砂岩, 特别是塔北地区多井钻遇, 沥青砂岩面积 7 580 km², 平均厚度 31 m, 无不表明加里东晚期—海西早期是塔里木盆地一期重要的油气成藏期。

据前文所述的阿瓦提坳陷寒武系—奥陶系烃源岩演化特征, 中下寒武统在加里东晚期进入生烃门限, 在海西早期大部分地区已达成熟—生烃高峰阶段, 海西晚期已全线进入生烃高峰—过成熟阶段。从油气资源量来看, 海西早期中下寒武统陆棚—斜坡相烃源岩可以形成油气资源量 0.317 × 10⁸ t, 潟湖相烃源岩可以形成油气资源量 0.166 × 10⁸ t, 已经具备油气成藏的资源条件。海西晚期中下寒武统陆棚—斜坡相达到生烃最大量, 形成油气资源量 1.317 × 10⁸ t, 潟湖相烃源岩可以形成油气资源量 0.590 × 10⁸ t。

从烃源岩形成演化历史看, 海西晚期无疑是阿瓦提坳陷最重要的油气成藏期。中下寒武统烃源岩大部分进入生烃高峰期, 形成的油气资源量为 1.907 × 10⁸ t。中上奥陶统烃源岩也进入生烃门限, 烃源岩主要发育在西部地区, 在燕山期进入生烃高峰期, 形成的油气资源量约为 0.4 × 10⁸ t。到燕山期, 中下寒武统主体已进入过成熟阶段, 仅南部地区为高成熟阶段, 油气资源量 1.254 × 10⁸ t, 小于海西晚期。

因此,中下寒武统主要供烃期在海西晚期,中下寒武统盐下储盖组合无疑是最优选择。中上奥陶统主要供烃期在海西晚期—喜山期,油气主要运移方向由阿瓦提坳陷深凹部位向周缘。巴楚隆起寒武系盐下白云岩、沙西凸起及巴楚隆起奥陶系古岩溶发育区、古生界碎屑岩是下步有利的勘探领域。

参考文献:

[1] 张水昌,梁狄刚,张宝民,等.塔里木盆地海相油气的生成[M].北京:石油工业出版社,2004:101-102,376.
 [2] 王飞宇,杜治利,张宝民,等.柯坪剖面中上奥陶统萨尔干组黑色页岩地球化学特征[J].新疆石油地质,2008,29(6):687-689.
 [3] 吴朝东.湘西震旦—寒武纪交替时期古海洋环境的恢复[J].地质学前沿,2000,7(S):45-55.
 [4] 薛耀松,唐天福,俞从流,等.贵州瓮安—开阳地区陡山沱期含磷岩系的大型球形绿藻化石[J].古生物学报,1995,34(6):688-706.
 [5] 薛耀松,唐天福,俞从流,等.贵州晚震旦世陡山沱期具骨骼动物化石的发现及其意义[J].古生物学报,1992,31(5):530-539.
 [6] 东野脉兴.海洋中磷的循环与沉积作用[J].化工矿产地质,1996,18(3):191-195.
 [7] 东野脉兴.上升洋流与陆缘坳[J].化工矿产地质,1996,18(3):156-161.
 [8] 张水昌,张宝民,边立曾,等.8 亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩[J].中国科学:D 辑 地球科学,2007,37(5):636-643.
 [9] 张宝民,张水昌,尹磊明,等.塔里木盆地晚奥陶世良里塔格型生

烃母质生物[J].微体古生物学报,2005,22(3):243-250.
 [10] 边立曾,张水昌,张宝民,等.似球状沟鞭藻化石重新解释早、中寒武世甲藻甾烷的来源[J].科学通报,2000,45(23):2554-2558.
 [11] 张水昌, Moldowan J M,边立曾,等.晚震旦世—寒武纪沟鞭藻存在的生物和分子地球化学证据[J].地质学报,2000,74(4):378-379.
 [12] 赵孟军,张宝民,肖中尧,等.塔里木盆地奥陶系偏腐殖型生源岩的发现[J].天然气工业,1998,18(5):32-35.
 [13] 赵孟军,张宝民,边立曾,等.奥陶系类Ⅲ型烃源岩及其生成天然气的特征[J].科学通报,1999,44(21):2333-2336.
 [14] 王飞宇,边立曾,张水昌,等.塔里木盆地奥陶系海相源岩中两类生烃母质[J].中国科学:D 辑 地球科学,2001,31(2):96-102.
 [15] 李永安,李强,张慧,等.塔里木及其周边古地磁研究与盆地形成演化[J].新疆地质,1995,13(4):293-378.
 [16] 崔坤宁,程日辉,刘万洙,等.新疆库鲁克塔格地区早寒武世磷质岩的形成条件[J].世界地质,2006,25(3):254-258.
 [17] 刘宝珺.岩相古地理基础和工作方法[M].北京:地质出版社,1985.
 [18] 李任伟,卢家烂,张淑坤,等.震旦纪和早寒武世黑色页岩有机碳同位素组成[J].中国科学:D 辑 地球科学,1999,29(4):351-357.
 [19] 翟晓先.塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J].石油实验地质,2011,33(4):323-331.
 [20] 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.

(编辑 韩 彧)

《石油实验地质》在中文核心期刊中排名跃居第 4 位

据北京大学出版社 2011 年底出版的《中文核心期刊要目总览》显示,《石油实验地质》期刊在石油、天然气工业类核心期刊中排名跃居为第 4 位。

由北京大学图书馆牵头,国家教委、科委立项并组织各学科专家成立的中国中文核心期刊研制与评定组,是国内最具权威的学术评价机构。自 1992 年开始,每隔 4 年,对中国中文期刊进行遴选、评定。《石油实验地质》2004 年在 26 种石油、天然气工业类核心期刊中位居第 20 位;2008 年升至第 6 位;2011 年,在 29 种石油、天然气工业类核心期刊中跃为第 4 位。

《石油实验地质》编辑部一贯坚持正确的办刊宗旨,努力提高期刊的学术质量和编校质量,使期刊所载论文保持较高的学术水平,在我国石油、天然气领域具有较高的学术影响力,为指导我国石油天然气的勘探开发作出了积极的贡献,受到决策部门的好评和广大读者的青睐。

(杨建超 韩 彧)