

阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩储层沉积学特征

崔 瑾¹, 郑荣才¹, 王 强², 宋海强³, 吴 蕾⁴, 费怀义², 文 雯⁵

(1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国石油 川庆钻探工程公司 地质勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 3. 陕西延长石油国际勘探开发工程有限公司, 陕西 西安 710075; 4. 中国石油 阿姆河天然气公司, 北京 100101; 5. 中国石油 青海油田分公司 采油一厂, 甘肃 敦煌 736200)

摘要:土库曼斯坦东北部的阿姆河盆地,是中亚地区最重要的含油气盆地之一。根据钻井岩心、测井、地震和分析化验资料,识别出3个三级层序,均由海侵和高位两个体系域构成。总体表现为水体向上变浅序列。通过应用层序地层学和地震沉积学研究方法,对阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐台地储层沉积学特征进行了研究,划分出蒸发台地、局限台地、开阔台地、台地边缘礁滩、前缘缓斜坡和盆地6个相带。确定台地边缘生物礁、滩及前缘缓斜坡的坡内礁、滩相沉积最有利储层发育。储层岩性主要为厚壳蛤礁灰岩和各类颗粒灰岩,以发育保存良好的原生孔隙型与裂缝-孔隙型储层为主,认为台地边缘和斜坡内的储层分布明显受沉积期的有利礁、滩相带和埋藏期成岩作用等复合因素控制,这一特点可作为油气勘探潜力分析的依据。

关键词:层序地层学;地震沉积学;礁、滩相带;卡洛夫-牛津阶;阿姆河盆地;土库曼斯坦

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

A sedimentology study of carbonate reservoirs in Callovian-Oxfordian Stage, Amu Darya Basin, Turkmenistan

Cui Cui¹, Zheng Rongcai¹, Wang Qiang², Song Haiqiang³, Wu Lei⁴, Fei Huaiyi², Wen Wen⁵

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Geological Exploration and Development Research Institute, CNPC Chuankong Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan 610051, China; 3. Shaanxi Yanchang Petroleum and Development Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China; 4. CNPC Amu Darya Gas Corporation, Beijing 100101, China; 5. No. 1 Oil Production Plant, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736200, China)

Abstract: The Amu Darya basin, located in northeastern Turkmenistan, is one of the most important petroliferous basins in central Asia. Three third-order shallowing-upward stratigraphic sequences, each of which is composed of two system tracts (transgressive system tract and highstand system tract), were recognized in the basin based on analyses of core observation, logging and seismic data. A sedimentology study of the Calov-Oxfordian carbonate platform reservoirs in the area reveals that there are six facies: evaporate platform, restricted platform, open platform, platform margin reef, gentle slope and basin. Among them, the platform margin reef and gentle slope reef flat are considered potential reservoirs for play fairways. The reservoirs are mostly rudist bivalve reef limestone and all sorts of grain limestones. Primary pores are well preserved and fracture-pore networks are common in the reservoirs. It is suggested that the distribution of reservoirs in the platform margin and the slope is obviously affected by controlling factors such as reef presence, distribution of shoal facies belts favorable for oil and gas accumulations, burial diagenesis. An understanding of these factors could be useful for oil and gas exploration activities in the future.

Key words: sequence stratigraphy, seismic sedimentology, reef flat facies belt, Callovian-Oxfordian, Amu Darya Basin, Turkmenistan

收稿日期:2016-07-05;修订日期:2017-02-20。

第一作者简介:崔瑾(1985—),博士研究生,沉积学。E-mail:1021177086@qq.com。

通讯作者简介:郑荣才(1950—),教授、博士生导师,沉积学和石油地质学。E-mail:zhengrc@cdut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41172120);国家科技重大专项(2008ZX05030-003)。

位于图兰地台东部的阿姆河盆地,是中亚地区面积和油气储量都是最大的沉积盆地^[1]。该盆地含有极其丰富的石油和天然气资源^[2],而中-上侏罗统卡洛夫-牛津阶具备非常优越的油气生、储、盖组合和成藏条件。近年来,众多石油地质学家通过钻井岩心描述和测井、地震资料分析,以及地质建模等技术方法,对该盆地卡洛夫-牛津阶盆地沉积相特征、储层特征^[3-7]、生物礁和滩相储层的识别,及孔隙和裂缝演化与分布规律等方面^[7-12]进行了详细研究,比如郑荣才等、张兵等和董霞等认为牛津阶碳酸盐岩发育有孔洞缝复合型、裂缝-孔隙型、孔隙型和裂缝型等多种储层类型,沉积微相和岩性对储层类型及物性有直接控制作用,胶结和新生变形作用对储层的破坏作用较大,溶蚀和破裂作用对储层的物性改善较大。曾忠玉等依据阿姆河右岸 AS 区块上侏罗统卡洛夫-牛津组不同岩性段的地质特征和电性特征,建立了生物礁的地质模型,用波动方程正演模拟生物礁的正演地震响应特征为丘形和透镜状反射,反射波有向上穹隆冲顶现象,礁的顶部反射波振幅变弱、波形不连续,生物礁岩隆顶波组为波谷弱反射等特征。依据岩心描述和薄片鉴定成果,可确定研究区卡洛夫-牛津阶主要礁灰岩类型为生物骨架岩和生物粘结两类,通过分析过 Sam53-1 井的近东西向和南北向发育礁滩相沉积的地震剖面,得知地震相整体表现为中强振幅平行-亚平行反射特征,局部出现透镜状反射,并预测过 Sam53-1 井的一个上部透镜体的顶、底面为强振幅,下部透镜体顶面为强反射,底面为断续弱反射的异常体,具备典型的台地边缘生物礁-滩复合体的地震相特征。

就目前的勘探和研究程度而言,对阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩的基础地质研究仍然缺乏更细致的了解。笔者通过结合该地区卡洛夫-牛津阶层序地层特征,生物礁、滩沉积的地震相与微相特征,以及

成岩作用于储层发育关系进行深入研究,并进行有利储集相带的油气勘探潜力分析,对拓宽阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶勘探领域和对油气资源的合理开发具有一定意义。

1 区域地质概况

研究区位于土库曼斯坦境内的阿姆河盆地右岸,该盆地被划分为基底、过渡层和地台盖层三个构造层系。盆地的沉积盖层构造格局和区域分布受北西向和北东向两组断裂控制。区域构造属于阿姆河盆地众多大型构造单元^[1,8,13-14]中的查尔朱阶地(图1)。中-上侏罗统卡洛夫-牛津阶碳酸岩盐是油气储层的主要发育层位^[10,15-17],与下伏中侏罗统海岸平原-泻湖沼泽相的含煤碎屑岩系呈超覆不整合接触关系,与上覆上侏罗统基末利阶高尔达克组的高伽玛泥岩层或厚层膏盐岩层为连续沉积^[18]。其本身为一套较深水碳酸盐岩缓斜坡-浅水碳酸盐岩台地相的沉积组合(图2)^[8],自上而下被划分为8个岩性段:XV_{ac}层、XV_p层、XV_m层、XV_{hp}层、XV_{a1}层、Z层、XV_{a2}层和XVI层(图3)。储层主要发育于XV_p层、XV_m层、XV_{hp}层和XV_{a1}层等台地边缘和前缘上斜坡内礁、滩相的生物灰岩和颗粒灰岩中,储层物性普遍较好,尤其是台地边缘生物礁、滩相沉积往往具备优越的储、盖组合条件^[3,7,10,13-18]。

2 层序地层

2.1 层序地层特征

中-晚侏罗世沉积期,阿姆河盆地发育有3个区域性海侵-海退沉积旋回(图3)。根据钻井岩心、测井曲线和地震剖面的综合分析结果,可从中-上侏罗统卡洛夫-牛津阶碳酸盐地层中识别出4个Ⅱ型层序



图1 阿姆河右岸地区区域构造略图(据文献[14],有修改)

Fig.1 Regional structural map of the right bank of Amu Darya River^[14]



图2 土库曼斯坦阿姆河盆地 XVm 层古地理与沉积微相平面展布

Fig.2 Paleogeography and distribution of sedimentary facies associations of the XVm layer in Amu Darya Basin, Turkmenistan

界面,分别为:位于 XVI 层底部,由区域性构造先隆升后沉降形成,以平行不整合为标志的层序底界面;位于 XVhp 层底部和 XVp 层底部,以大型冲刷间断为标志的层序底界面;位于 XVac 层顶部,与基末利阶大套膏盐岩连续沉积分界的岩性和岩相结构转变面为标志的层序顶界面。以 Vail^[19-20] 的层序划分和命名为原则,根据层序界面特征、性质和结构,在沉积相分析基础上,以 4 个界面为层序划分依据,将卡洛夫-牛津阶划分为 SQ1, SQ2 和 SQ3 三个 II 型层序,各层序发育有 3 个共同的特点:①仅发育海侵和高位体系域;②发育在台内和台地边缘礁滩相带的 3 个层序都具备海侵体系域沉积厚度远小于高位体系域的快速海侵缓慢海退层序结构(表 1;图 2),而在 Ber-22 井和 Akk-7 井发育在缓斜坡相带的 SQ2 层序,出现海侵体系域沉积厚度大于高位体系域的缓慢海侵加速海退层序结构(表 1);③缓慢海退的高位体系域是礁、滩相沉积和储层发育的有利时期。

2.1.1 海侵体系域(TST)

由于海平面快速上升、水体迅速侵入陆棚,导致缺乏初始海侵期的低位或陆架边缘体系域^[8],仅有海侵体系域发育于 SQ1, SQ2 和 SQ3 三个层序下部(图 3)。由于此期间海侵速度快而沉积物供给量少,沉积速率低,因此,海侵体系域主要由较薄的、连续退积的准层序叠加组成,随着海侵期水动力由强到弱,都以沉积能量较高的台内或台地边缘浅滩相的颗粒灰岩,和以沉积低能的开阔台地潮下或较深水相的台地前缘缓斜坡相的颗粒微晶灰岩、微晶灰岩和暗色泥质灰岩为主(图 3)。

2.1.2 高位体系域(HST)

发育于 SQ1, SQ2 和 SQ3 三个层序的中、上部,与

海侵体系域相反,台内和台地边缘礁滩相带高位体系域的沉积作用发生在海平面缓慢下降过程中,因此,高位体系域主要由较厚的、连续加积—弱进积—进积的准层序叠加组成(图 3),但 3 个层序高位体系域的发育状况和进积强度有明显差异。SQ1 层序高位体系域的纵向剖面为加积→弱进积序列,向海方向下超于海侵体系域顶面。随着海平面由上升折向下降,水体逐渐变浅,波浪和潮汐作用增强,前缘缓斜坡逐渐演化为台地边缘生物礁和颗粒滩,但厚度仍较薄,与薄层的前缘缓斜坡静水泥沉积交替发育,岩石类型以微—亮晶颗粒灰岩、礁灰岩、含颗粒微晶灰岩和微晶灰岩的韵律交替的互层组合为主,反映该层序高位体系域属于台地边缘与前缘缓斜坡过渡带沉积环境;SQ2 层序高位体系域的纵向剖面为连续向前缘缓斜坡方向强烈进积序列,并以台地边缘生物礁和颗粒滩沉积最发育为显著特征,造礁生物多为厚壳蛤和珊瑚等,且厚壳蛤起主要作用。岩石类型以厚层块状礁灰岩、微—亮晶颗粒灰岩夹薄层状含颗粒微晶灰岩和微晶灰岩为主,是优质储层的主要发育层位;SQ3 层序高位体系域的纵向剖面为连续加积与弱进积交替发育的序列,随海平面大幅度下降,沉积环境转化为水体很浅的局限—蒸发台地,岩石类型主要为微晶白云岩—微晶灰岩和膏盐岩薄互层组合,是卡洛夫-牛津阶油气藏直接的致密盖层主要沉积期。

2.2 沉积相的地震反射特征

2.2.1 台地边缘生物礁、滩相地震反射特征

生物礁、滩是重要的油气储集体,特别是台地边缘的生物礁、滩体往往具有很好的储集性。生物礁、滩体外型常呈透镜状,内部具块状或厚层状构造,岩性为多

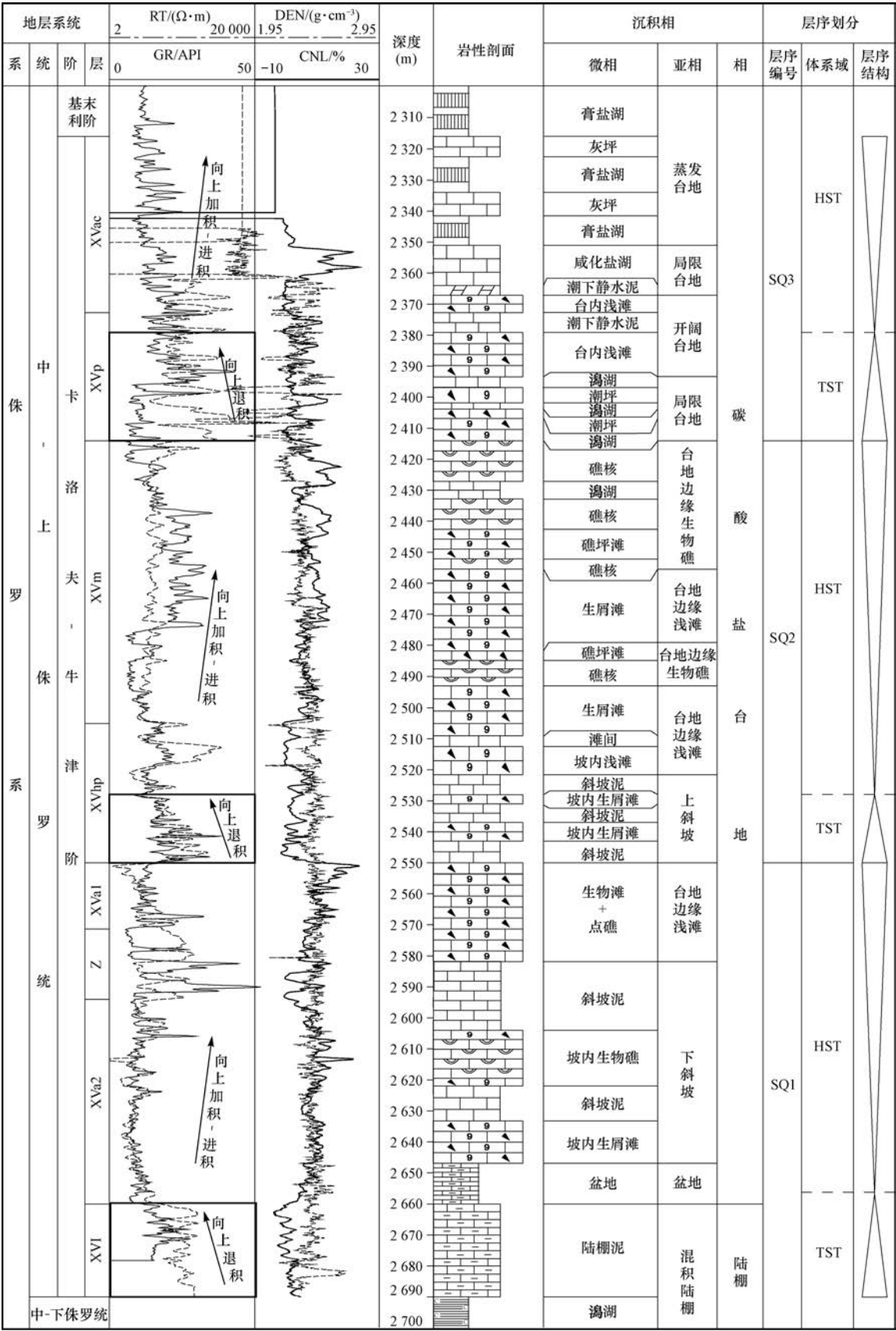


图3 阿姆河盆地卡洛夫 - 牛津阶沉积相 - 层序综合柱状图(S53 - 1 井)
Fig.3 Callovian-Oxfordian stratigraphic Column of Amu Darya Basin(Well S53 - 1)

表 1 阿姆河右岸卡洛夫 - 牛津阶各井层序划分厚度

Table1 Sequence division of the Callovian-Oxfordian sediments at the right bank of Amu Darya river

层序划分		厚度/m								
		Sam53 - 1	Sam - 10	Sam44 - 1	Met - 21	Cha - 22	Aga - 21	Hojb - 8	Ber - 22	Akk - 7
SQ1	HST	106	66	58	70	92	84	27	64	53
	TST	30	25	26	24	13	22	17	10	28
SQ2	HST	114	53	89	80	46	45	43	29	25
	TST	22	27	50	32	38	27	14	44	53
SQ3	HST	63	80	72	80	41	45	62	32	30
	TST	35	57	34	70	28	38	58	20	23

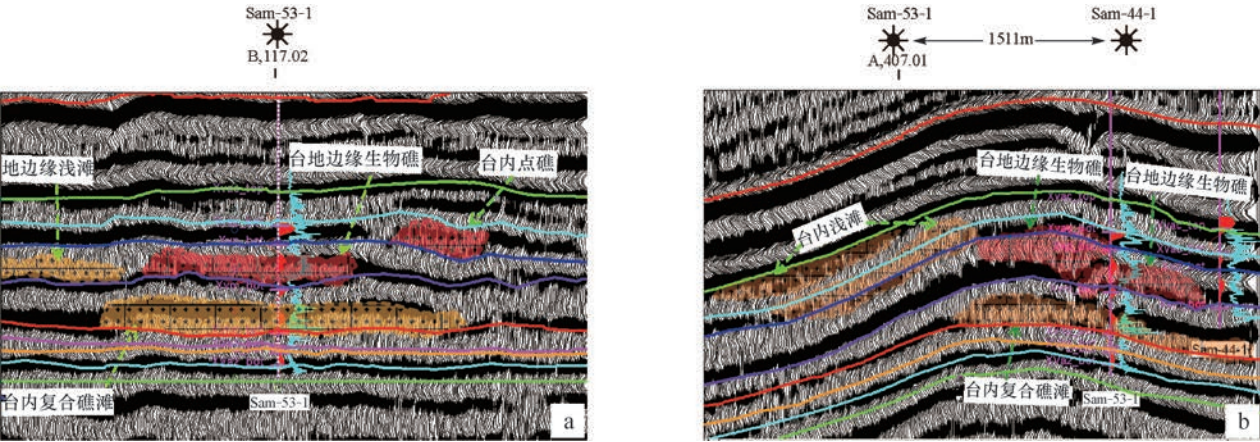


图 4 阿姆河盆地过 Sam53 - 1 井的近东西向(a)和北西 - 南东向(b)地震剖面

Fig. 4 Seismic sections crossing well Sam 53 - 1,EW direction (a) and NW-SE direction (b),Amu Darya Basin

孔的礁灰岩夹生屑灰岩组合。研究区最主要礁灰岩为生物骨架岩和生物粘结岩,由于两类礁灰岩沉积速度快,厚度大,往往形成与周围地层有明显区别的隆起地貌。单井沉积相分析结果表明,Sam53 - 1 井, Met - 22 井, Met - 21 井, Oja21 井等钻井的卡洛夫 - 牛津阶都发育有台地边缘生物礁、滩相沉积。图 4a 和 4b 分别为过 Sam53 - 1 井的近东西向和南北地震剖面,地震相整体表现为中强振幅平行 - 亚平行反射特征,局部出现透镜状反射,其中近于平行台地边缘的图 4a 线穿过两个透镜状反射体,内部都为空白反射,透镜体顶、底界面都为强振幅,钻井资料揭示上部透镜状反射体为生物礁体,下部透镜状反射体为生屑滩体。近于正交台地边缘的图 4b 线穿过多个透镜状异常体,异常体内部无反射或为杂乱反射,外形为弱反射,上部透镜状异常体的顶、底界面为强振幅,下部透镜状异常体的顶部为强反射,底部为弱反射,波形不连续。相比于图 4a 线剖面,图 4b 线剖面上异常体规模小一些。依据钻井岩心和测井资料解释,Sam53 - 1 井相当下部透镜体的 XVhp 层被解释为向缓斜坡进积的台地边缘生物滩,相

当上部透镜体的 XVm 层为向缓斜坡进积和交替发育的台地边缘生物礁 - 滩复合体。此外,在上部异常体西侧另有一个不规则丘状外形的异常体,Sam53 - 1 井刚好从其边缘穿过,异常体内部为杂乱反射,外形为弱反射,顶、底面为强振幅,可被预测为台地边缘生物礁 - 滩复合体。

2. 2. 2 前缘斜坡的坡内礁、滩相地震反射特征

勘探实践证明,阿姆河盆地卡洛夫 - 牛津阶碳酸盐台地前缘斜坡具有很缓的坡度,坡内的礁、滩相沉积不仅较发育,而且具有很好的油气储集性^[7]。图 5a,b 分别为过 Uzy - 21 井的东西向和南北向地震剖面,此两过井剖面总体特征表现为中强振幅、断续、杂乱反射,但于交汇处都穿过了一个丘状反射异常体,异常体内部为中振幅波状 - 杂乱反射,顶部中振幅,底部弱反射。在东西向剖面上,该异常体与两侧地层顶界相比较,在时间厚度上高出 50ms 左右,反映两侧地层具有上超增厚特征。由 Uzy - 21 井揭示,该异常体包含 XV m 层, XV hp 层, XV a1 层, Z 层和 XV a2 层,

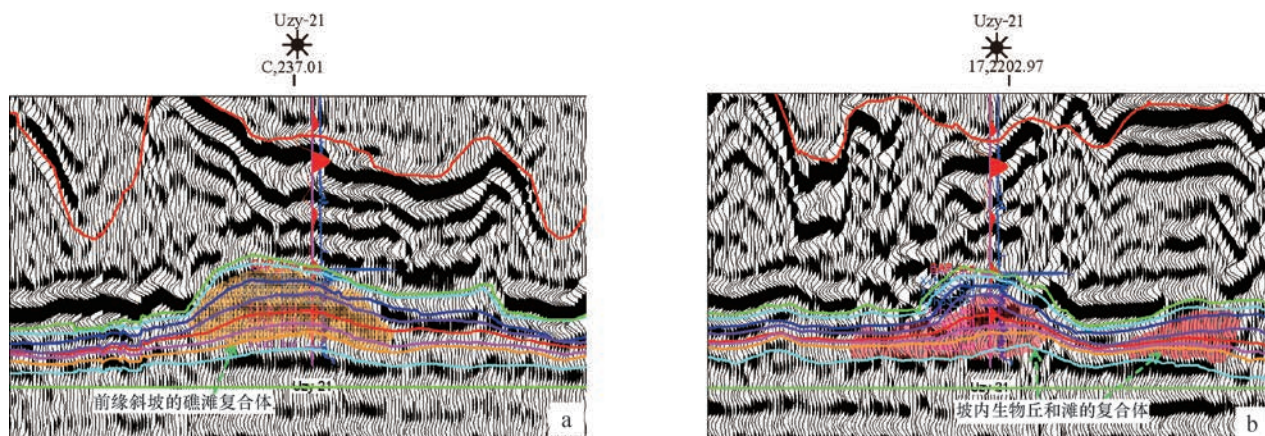


图5 阿姆河盆地过 Uzy-21 井的东西向(a)和南北向(b)地震剖面

Fig. 5 Seismic sections crossing well Uzy-21 EW direction (a) and SN direction (b), Amu Darya Basin

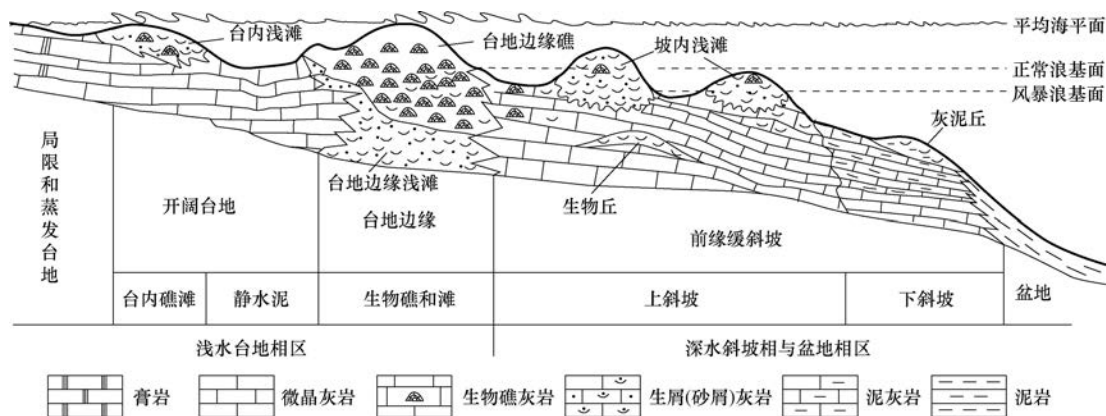


图6 阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶缓斜坡台地沉积相模式

Fig. 6 Depositional model of the Callovian - Oxfordian sediments in the platform and gentle slope of Amu Darya Basin

主要由坡内生物礁和浅滩微相与斜坡泥微相沉积韵律交替组成。在南北向剖面上,丘状异常体宽度比东西向剖面上的异常体小,幅度更小,与南北向剖面恰好穿过该异常体东侧,而没有从异常体最高部位穿过有关。有意义的是,异常体两侧地层具有明显上超趋势,超覆丘状异常体的基末利阶膏盐岩层比丘状异常体两侧相对低洼部位膏盐层厚度要薄的多。

2.3 沉积相展布和演化特征

依据已有资料综合分析,研究区卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩地层可划分为浅水台地与深水前缘缓斜坡-盆地2个沉积相区(图2,图6),两相区沉积特征符合里德的碳酸盐台地概念^[21],前人已有深入研究^[3,5,8,22],本文不再赘述,以下仅简要介绍沉积相展布规律和演化特征。

位于西部的浅水台地相区从东向西和自下而上由交替发育的台地前缘缓斜坡与台地边缘礁、滩—开阔

台地—局限台地—蒸发台地相沉积组成;位于中、东部的深水斜坡—盆地相区从南东向北西和自下而上由交替发育的台地前缘缓斜坡与深水盆地—台地前缘缓斜坡—闭塞海湾盆地相沉积组成。

以 Sam53-1 井为例,卡洛夫早期的沉积地层,主要为深水盆地相和较深水的前缘缓斜坡相,表明该时期处于快速海侵过程;卡洛夫中-晚期,常见台地前缘缓斜坡及台地边缘礁、滩相带频繁交替发育的沉积环境,表明该时期处在海平面升降幅度变化不大但很频繁的海退的沉积环境中,并构成整个卡洛夫期区域性快速海侵-缓慢海退旋回过程;牛津阶早期受全球大规模海侵影响,沉积环境由台地边缘向台地前缘缓斜坡过渡,局部进入深水盆地环境,区域上整体表现为海平面大幅度上升和快速海侵,形成向上变深的相序列;至牛津阶中期时海平面缓慢下降,其升降幅度同样不大但很频繁,因此非常有利于旋回交替的台地边缘礁、滩和开阔台地台内浅滩的广泛发育期,成为阿姆

河盆地最重要的礁、滩相储层发育层位;牛津阶晚期进一步受干旱炎热气候和水体持续变浅影响,水循环受限和强烈咸化,致使较深水前缘缓斜坡和深水盆地相区转化为具深泻湖性质的闭塞海湾盆地而进入强烈欠补偿状态,以沉积黑色泥岩为主^[8];浅水台地沉积相区则迅速向蒸发台地转化,广泛出现膏化、准同生白云岩化和块状膏盐岩沉积,形成封隔性极好的直接盖层。

3 储层特征

3.1 储层岩石学特征

3.1.1 储层岩石类型

卡洛夫-牛津阶储层岩性主要为颗粒灰岩类、(含)颗粒微晶灰岩类、礁灰岩类、粘结藻灰岩等类型,见微晶灰岩和颗粒灰岩局部发生轻微白云岩化和硬石膏化现象(图7a,b),而礁灰岩和颗粒灰岩类储层物性最好,为最有利储层岩性^[3](图7c,d)。生物礁灰岩的造礁生物以厚壳蛤生物居多,其次为珊瑚。主要发育于XV m层,属于台地边缘生物礁相带,颗粒灰岩在各层均有分布,而高能环境的台地边缘的颗粒灰岩是构成浅滩的主体部分,具有厚度较大、颗粒类型丰富的特点,砾屑、砂屑和生屑灰岩类为颗粒灰岩的主要岩石类型,生物碎屑类型复杂,主要分布在浅滩的主体部分,包括腕足、厚壳蛤、苔藓虫、有孔虫、珊瑚、棘屑、红绿藻和蓝绿藻等,少量层孔虫、腕足类和钙球(图7e,f),局部亮晶胶结,灰泥基质含量低。

3.1.2 储层成岩作用

研究区卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩储层有丰富的成岩作用类型^[4,7,23],分别为以白云岩化作用、溶蚀作用和破裂作用为主的建设性成岩作用和以压实、压溶作用及胶结作用为主的破坏性成岩作用。此外,还有众多与储层发育关系不甚密切的重结晶和膏化、天青石化、硅化、黄铁矿化等成岩作用。

1) 胶结作用

胶结物为方解石,含量为3%~5%,孔隙式胶结类型,按胶结物形态和生成次序可划分为4个期次。

① 准同生成岩阶段:第一世代等厚环边栉壳状胶结作用(图7g),形成于海水潜流带,环边胶结物厚度0.03~0.05 mm,主要分布在骨架礁灰岩的粒间孔中,其次为生屑颗粒的粒间孔。由于该期胶结的支撑结构起到了抗压实作用,对储层中原生孔隙的保存较有利。

② 稍晚的早成岩阶段早期:第二世代等轴粒状方

解石,形成于大气淡水渗流带^[21,24],晶粒干净透明,粒径为0.05~0.1 mm,也具有环边生长的特点,充填在礁骨架或生屑颗粒间的孔隙内,或在一世代胶结物之外的孔隙中构成不完全充填的二世代胶结结构(图7g),此类胶结作用一般不利于储层发育,但仍可见少量的剩余原生孔隙在礁、滩相灰岩中得以保存。

③ 早成岩阶段中、晚期:粗晶方解石胶结作用,形成于大气淡水潜流带^[21,24],多数呈不规则斑块状分布,方解石晶体干净明亮,大小为0.5~2.0 mm,充填胶结于部分剩余孔隙空间中(图7h),造成斑块内的储层孔、喉被强烈封堵,不利于储层发育。

④ 早成岩阶段晚期-中成岩阶段:连晶方解石胶结作用和海百合共轴生长,形成于中-深埋藏成岩环境,呈不规则斑块状分布,晶体大小为2.0~5.0 mm,完全充填剩余孔隙(图7i),对局部的储层孔、渗性造成很大的破坏性。

2) 压实和压溶作用

研究区机械压实和化学压溶两种作用都较发育,强度中等,是造成储层原生孔隙缩减的重要原因之一,主要表现为:①片状或长条状生屑或颗粒发生塑性变形、定向排列或破裂(图7j)等现象;②颗粒间接触关系由以点接触为主部分逐渐变为以线接触和凹凸接触为主;③不规则的压裂缝;④压溶作用形成的缝合线和叠锥构造,缝合线主要被压溶残留粘土或有机质充填而呈暗色(图7k)。

3) 白云岩化作用

白云岩较为少见,主要有两种类型:①泥-微晶白云岩,为准同生白云岩化产物,具泥-微晶结构和与硬石膏共生,或被硬石膏化的特征,一般不具储集性;②残余灰质粉-细晶白云岩(图7l),成岩期热液交代的产物^[9,24-25],晶体大小为0.03~0.15 mm,以半自形-自形晶为主,此类型含有较多原岩残余的微晶方解石或杂质,晶体呈浅棕色,通常具暗红色-暗橙红色阴极发光性^[21](图7m,n),反映其较富 Fe^{2+} 离子,常与粗晶和巨晶天青石和硬石膏共生,或以充填裂缝的方式出现。结合白云石 CaCO_3 和 MgCO_3 比值0.76接近化学计量、微量元素Fe,Mn,Sr的含量变化,以及碳、氧、锶同位素地球化学特征等研究成果^[9,24-25],证明了此类白云石是埋藏成岩过程中富镁、铁热液交代方解石的产物。虽然受白云石改造的礁、滩相储层晶间孔发育,连通性好(图7l,o),孔渗性大幅度改善,面孔率达3%~8%,但由于此类型白云岩的分布范围很有限,因而仅对局部储层发育有利。

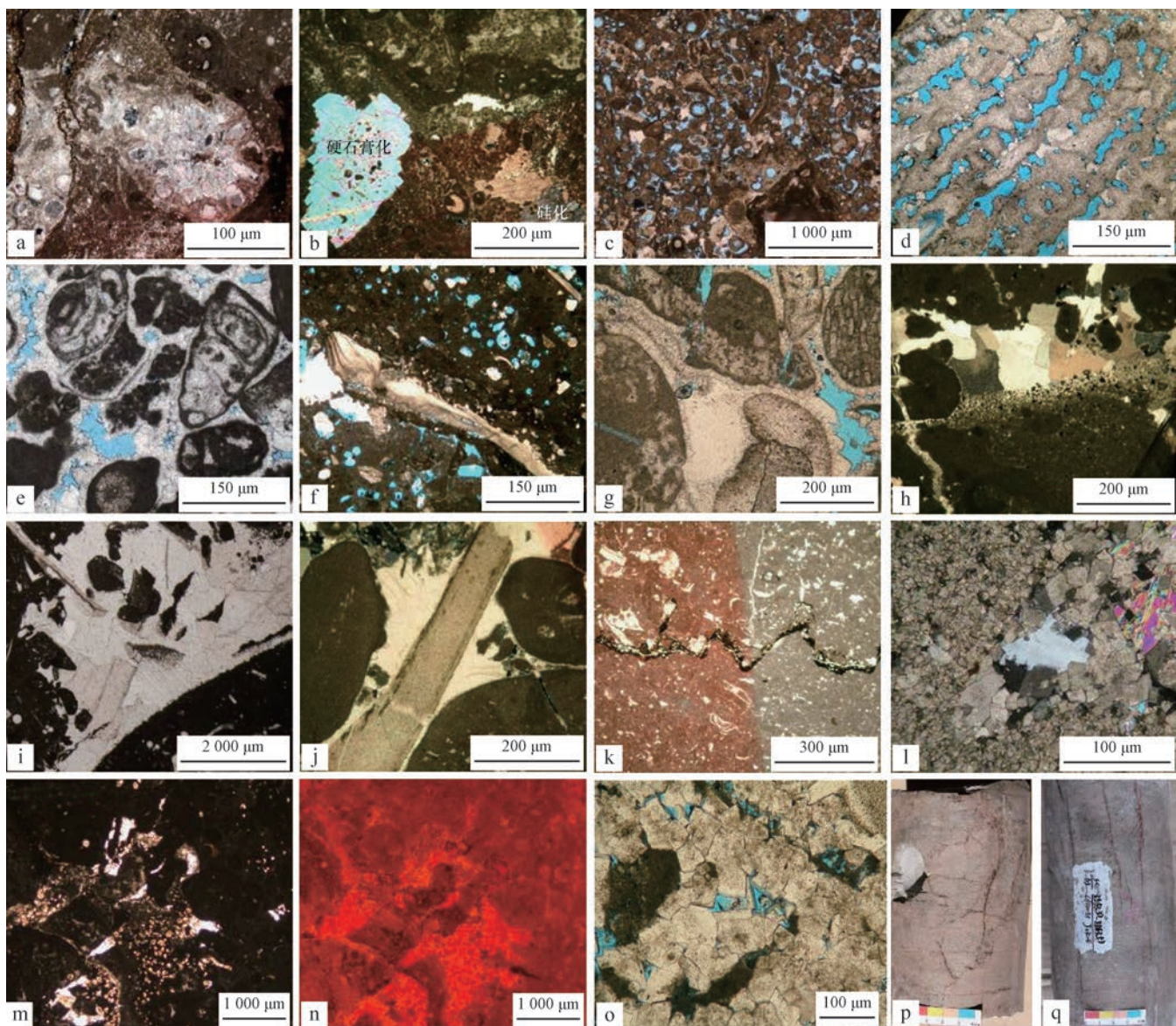


图7 土库曼斯坦阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶成岩作用

Fig. 7 Diagenesis of the Callovian-Oxfordian sediments in Amu Darya Basin, Turkmenistan

a. 弱白云岩化生物屑微晶灰岩,见少量生物屑,苔藓虫,放射虫,海绵骨针和腕足碎片等,Cha-22井,埋深3 562.6 m, XVhp层;b. 硅化硬石膏化微晶生物屑砂屑灰岩,硬石膏化,生物屑主要为大型胶结的有孔虫,腕足和床板珊瑚,少量海绵骨针,海百合和苔藓虫,Pir-2井,埋深3 182.35 m, XVal层;c. 亮-微晶含生屑鲕粒灰岩,鲕粒分选磨圆好,呈次圆-圆状,以真鲕为主,少数表鲕和复鲕,鲕粒核心多位粪球粒,主要为海百合和厚壳蛤,并见少量有孔虫和腕足,Oja-2井,埋深3 791.0 m, XVhp层;d. 层孔虫礁灰岩,层孔虫的生物体腔孔和溶孔非常发育,Sam53-1井,埋深2 454.445 m, XVm层;e. 亮晶生屑藻砂屑灰岩,含藻、有孔虫及腹足类动物,颗粒呈线接触,Met-2井,埋深2 666.55 m, XVm层;f. 生物屑微晶灰岩,生物屑为棘屑,腕足等碎屑,Sam53-1井,埋深2 472.6 m, XVm层;g. 亮晶生物屑灰岩,二世代胶结结构,一世代为等厚环边栉壳状方解石,二世代为等轴粒状或连生方解石,Met-2井,埋深2 414.58 m, VIPs层;h. 含生物屑微晶灰岩,生物屑为苔藓虫,海绵骨针,有孔虫,海百合,腕足,介壳和钙球,Pir-2井,埋深3 171.44 m, XVal层;i. 亮晶生屑灰岩,二世代胶结结构,一世代为等厚环边栉壳状方解石,二世代为连生方解石,Aga-21井,埋深3 591.2 m, XVp层;j. 亮晶生物屑砂屑砾屑灰岩,长条状生屑在压实过程中发生断裂,Sam44-1井,埋深2 530.88 m, XVm层;k. 生物屑微晶灰岩,缝合线,充填碳泥质,生物屑屑主为海百合,海绵骨针和腕足,苔藓虫和硅质放射虫,海百合个体巨大,Cha21井,埋深3 490.25 m, XVhp层;l. 天青石化硬石膏化粉晶白云岩,局部硬石膏化的斑块附近,微晶白云石重结晶为粉晶,晶间孔较发育,Sam53-1井,埋深2 521.64 m, XVhp层;m. 含生屑藻团块砂屑灰岩,局部白云岩化,Yan-23井,埋深3 662.3 m, XVa2层;n. 照片同一位置的阴极发光照片,显示白云石发暗红色光,亮晶方解石胶结物在早期发橘黄色光,在晚期发橙红色;o. 白云石化泥晶砂屑生物屑灰岩,白云石晶间孔发育,部分充填灰泥,Sam53-1井,埋深2 472.6 m, XVm层;p. 岩心为浅灰色生物屑球粒微晶灰岩,发育不规则网状分布的成岩裂缝,沿裂缝发育针状溶蚀孔,Cha21井,埋深3 536.05~3 536.21 m, XVal层;q. 岩心为浅灰色砂屑微晶灰岩,发育数条平行分布的高角度构造裂缝,贯穿岩心,缝宽0.1~0.2 mm,沿裂缝发育针状溶蚀孔,Cha21井,埋深3 563.37~3 563.57 m, XVal层

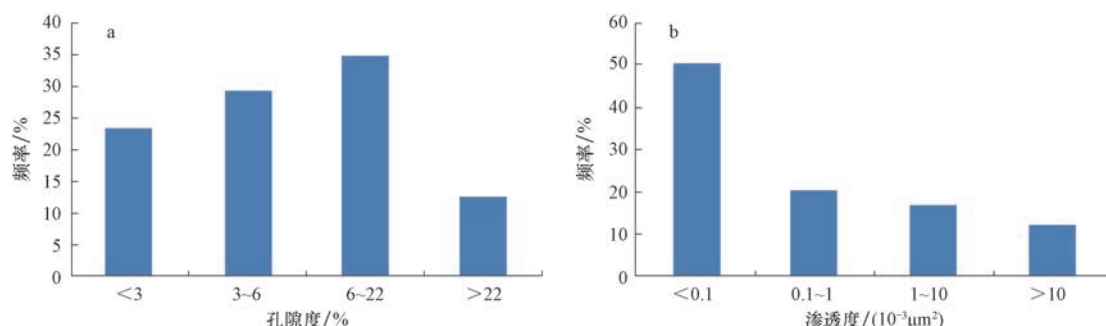


图8 土库曼斯坦阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶孔隙度和渗透率

Fig. 8 Porosity and permeability of the Callovian-Oxfordian sediments, Amu Darya Basin, Turkmenistan

4) 溶蚀作用

溶蚀作用发育于礁灰岩和生物屑灰岩中,具有明显的选择性,更易溶蚀珊瑚、有孔虫、厚壳蛤、苔藓虫和红藻等生物,棘屑和腕足等生物耐溶能力较强,保存较为完好。粒间、粒内溶孔及铸模孔等较发育(图7c, d);面孔率较高,普遍在2%~5%,甚至高达17%,溶蚀作用很大程度上改善了孔渗性,成为储层发育最有利的成岩作用方式之一。

5) 破裂作用

破裂作用也是研究区卡洛夫-牛津阶广泛发育的成岩作用之一,依据裂缝规模^[7,9],将裂缝划分为两类:①主要因沉积物在沉积后到固结成岩过程中,受到差异压实作用而形成的小型裂缝——骨屑破裂和错位等,裂缝形态呈不定向的平直、弯曲、网格或分叉状(图7p),宽度变化区间最小0.01 mm以下,最宽可超越5 mm,部分成岩压裂缝被方解石充填,多在礁、滩相碳酸盐岩复合体中发育;②与构造活动有关的较大型破裂缝——断面平整,倾角40°~70°的高角度裂缝(图7q)以及少量倾角小于10°的水平缝。高角度裂缝成因上可分为两种情况:张性破裂缝,成组出现,缝面粗糙,多被次生方解石半充填;剪切破裂缝,缝面发育有扭性擦痕和阶步。密度约为2.5条/m,宽度多在0.05~2 mm。水平裂缝密度较大,为4.0条/m,宽度多在0.05~1 mm,缝内充填少量的次生方解石和沥青。沿破裂缝易发生溶蚀作用,形成一套相沟通的溶蚀孔、洞、缝系统,因此对改善储层渗透性有重要意义^[26],非常有利于优质储层发育。

影响阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩储层中裂缝发育程度的因素较多,主要与岩性密切相关,礁滩相的礁灰岩、含生物屑(或颗粒)微-粉晶灰岩裂缝密度较高,其次依次为微晶颗粒灰岩、微晶生物屑灰岩、生物屑微晶灰岩和泥-微晶灰岩等,尤其是构造裂缝较为发育,而微晶灰岩构造裂缝很少发育,主要以压溶缝为主。

从总体上看,破坏性成岩作用,如胶结和压实、压溶作用对阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶储层质量的影响相对较小,而建设性成岩作用,如白云岩化、溶蚀与破裂作用于礁、滩体中广泛发育,因此,礁、滩体的发育规模可为储层预测的主要目标。

3.2 储层物性特征

1) 孔、渗特征

据16口井1460件样品孔隙度和渗透率分析数据统计,研究区卡洛夫-牛津阶储层孔隙度范围为0.30%~24.91%,平均为6.80%;渗透率区间为 $0.0001 \times 10^{-3} \sim 470 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $11.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,从物性分布区间来看(图8),孔隙度大于12%的样品分布频率为12.59%,孔隙度为6%~12%的样品的分布频率为34.81%;渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品分布频率为12.30%,渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品分布频率为16.80%。由图9可知,A区孔隙型储层具有很好的孔渗相关性,相关系数为0.73,说明其渗透率变化主要受基质孔隙度控制,主要为礁、滩相储层;而B区裂缝型储层孔渗相关性差,相关系数为0.03,说明

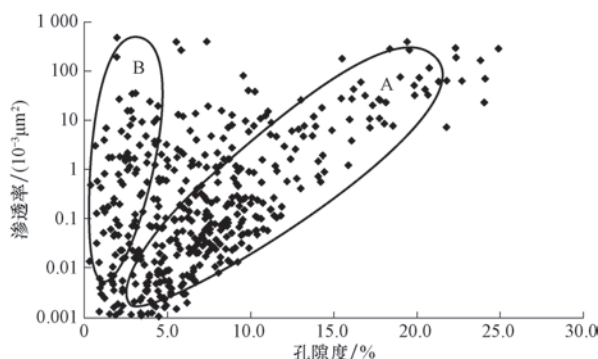


图9 阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶储层孔-渗关系

Fig. 9 Porosity-permeability correlation of the Callovian-Oxfordian sediments, Amu Darya Basin

表2 阿姆河右岸卡洛夫-牛津阶不同沉积微相孔隙度和渗透率统计

Table. 2 Statistics of porosity and permeability of different sedimentary facies associations in the Callovian-Oxfordian sediments of Amu Darya basin

沉积相	孔隙度/%				渗透率/(10 ⁻³ μm ²)				储层类型	储层评价
	样品个数	最小值	最大值	平均值	样品个数	最小值	最大值	平均值		
台地边缘生物礁相带	496	0.20	24.20	11.30	366	0.0006	3155.30	130.01	孔隙型	好
台地边缘浅滩相带	385	0.50	19.60	10.30	373	0	1043.00	22.10	孔隙型	较好
开阔台地台内浅滩相带	136	0.60	21.50	8.40	127	0	320.30	13.80	裂缝-孔隙型	较好
开阔台地潮下静水泥相带	160	0.10	8.80	2.30	122	0	51.00	2.42	裂缝型	极差
前缘斜坡坡内点礁和滩相带	210	0.20	16.70	4.50	198	0	21.30	0.49	孔隙型	差
泻湖相带	39	0.20	7.30	2.41	34	0	18.10	1.06	裂缝型	极差
潮坪相带	34	0.60	20.36	3.30	34	0	32.00	2.23	裂缝型	极差

渗透率变化受裂缝发育程度控制,主要分布在台地潮下静水泥和潟湖相;另一部分样品因受裂缝影响,处在过渡区,为孔隙-裂缝型储层。

研究表明,阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶储层发育受多种因素控制,其中沉积相与储层关系极为密切,明显制约了储层的储集物性和空间分布,是最重要的控制因素。

2) 各沉积相物性特征

根据 1 460 个样品物性分析资料(表 2), 高能环境下的台地边缘生物礁沉积微相最有利于储层发育, 低能环境下的台地内潟湖 - 滩间潮下微相储集性最差。台地边缘浅滩和台内浅滩沉积微相则属于较好的储集性。

3.3 成岩作用与孔隙演化关系

阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶成岩作用与储层发育有如下演化关系(图 10)。

1) 同生期及准同生成岩阶段储层发育特征

高能环境下的生物礁、滩相沉积环境中发育形成于海水潜流带的等厚环边栉壳状胶结作用,据薄片中的负胶结孔隙度统计,局部缩减 5%~8%,但孔隙度多数保存在 40%左右。有粒间孔、粒内孔、生物体腔孔和生物礁骨架孔等剩余原生孔隙。

2) 早成岩阶段储层发育特征

该阶段原生孔隙大量缩减,是发育压实和压溶作用、等轴粒状方解石胶结、埋藏白云岩化等成岩作用的主要时期。压实强度达到一级—二级,孔隙平均缩减量达到23%,以原生孔隙度为40%计算,剩余的原生孔隙度范围为15%~20%。储层以剩余原生孔隙为主。

3) 中成岩阶段储层发育特征

该阶段成岩作用较复杂,局部连晶方解石胶结和海百合共轴生长,压实作用进一步加强至二级,并有

压溶作用和成岩流体从外部带入现象发生,据薄片中部胶结孔隙度统计,总孔隙度缩减至 8%~10%,但局部较强烈的成岩压裂、溶蚀和埋藏白云岩化作用又改善了储层的孔、渗性,包括溶蚀缝、铸模孔、粒间和粒内溶孔、晶间孔等,可提高 5%~8% 的孔隙度,即便溶蚀过程中产生了少量的方解石、白云石、硬石膏等次生充填矿物,该阶段孔隙型储层仍可保存 12%~17% 的孔隙度。储集空间仍然以剩余原生孔隙为主,少量次生孔隙。

4) 晚成岩阶段储层发育特征

这一时期起主要作用的是溶蚀作用和破裂作用,广泛发育沿裂缝溶扩作用形成的粒间和粒内溶孔、铸模孔、晶间溶孔、溶洞及裂溶缝等次生孔隙,可增加5%~8%的孔隙度,但同时伴随硬石膏化、天青石化、硅化等成岩蚀变作用和各类次生矿物沉淀增多,包括晚期的沥青对各类次生孔隙的充填,又使孔隙度缩减了3%~5%,因此总的孔隙度范围仅分布在15%~18%。局部如台地边缘礁、滩相带和台内浅滩相带中的优质孔隙型和少量的裂缝-孔隙型储层的孔隙度较好,最高可达20%~25%。

由上分析可知:①礁、滩沉积微相带有较高的孔隙度,以剩余原生孔隙为主,少量次生孔隙或孔隙-裂缝型和裂缝-孔隙型二类储层;②非礁、滩沉积微相带的岩性较致密,原生孔隙不发育,经构造破裂作用改造后,常形成广泛分布孔隙-裂缝型或单一裂缝型低产储层。

4 有利储集相带的勘探潜力

根据已有勘探开发成果^[23,26-29],结合对储层发育起主控作用的沉积相研究和成藏地质条件分析,可确定最有利储层发育和油气聚集成藏的相带为台地边缘

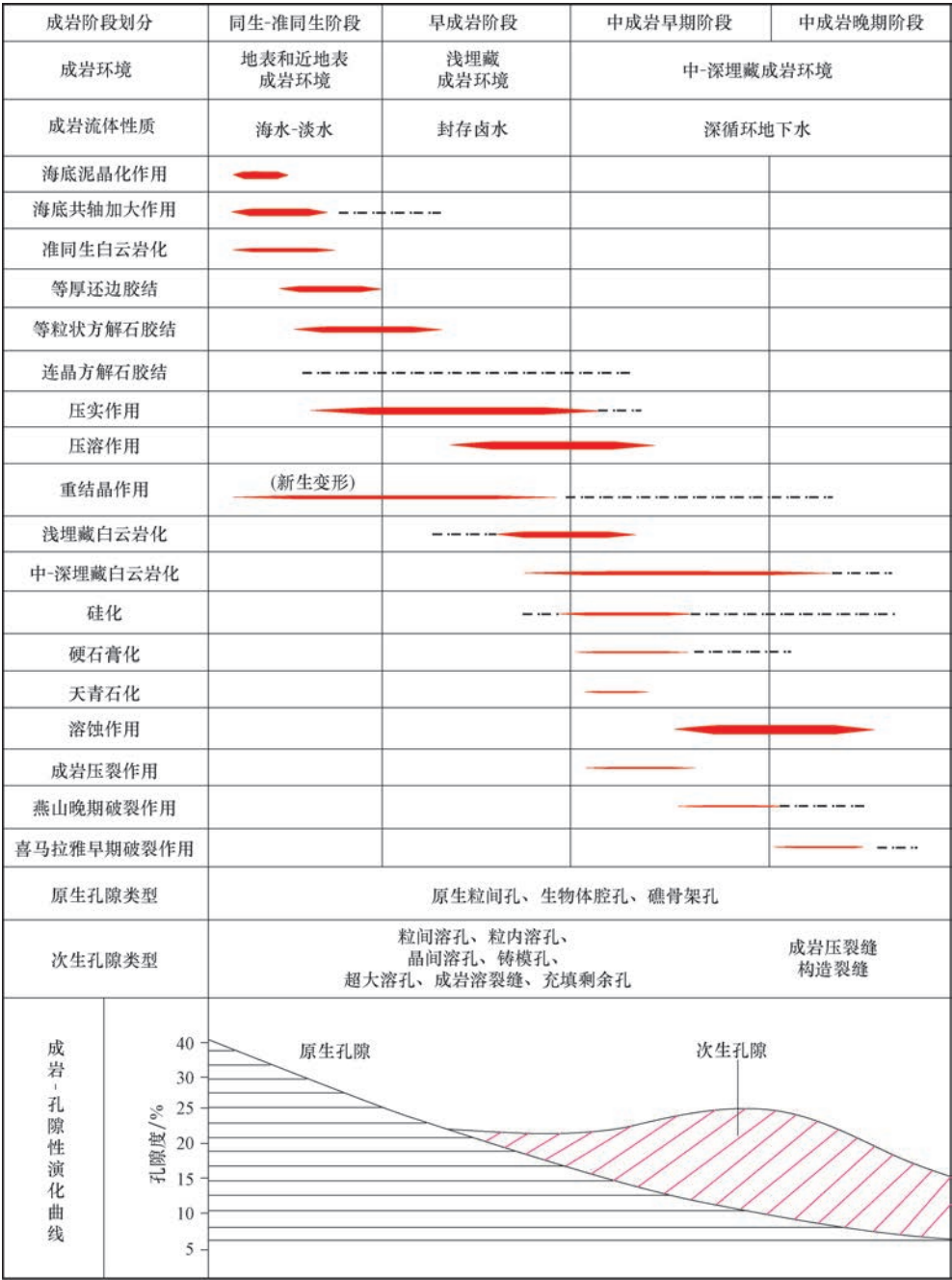


图 10 阿姆河盆地卡洛夫 - 牛津阶碳酸盐岩成岩作用序列与孔隙演化模式
Fig. 10 Diagenesis sequences and porosity evolution of carbonate rocks in the Callovian-Oxfordian sediments, Amu Darya Basin

生物礁和浅滩, 次为台内浅滩和坡内点礁与浅滩, 而台内潟湖 - 潮坪、潮下及前缘斜坡泥微相不利储层发育 (表 2)。以块状灰岩层 (XVm 层) 为例 (图 3), 作为最有利储层发育微相的台地边缘生物礁和生屑滩分布面积在整个研究区目标层最大, 不仅出现在麦捷让 - 卡拉别克 2 井一带和霍贾姆巴兹 5 井区等地区的范围内, 而且于整个萨曼杰佩和根基别克气田均广泛发育有台地边缘礁、滩相带, 已知钻井几乎无一例外地钻获

中 - 高产商业气流; 相对台地边缘礁、滩相带, 前缘斜坡带内的坡内点礁和浅滩面积明显要小的多, 但其中个别坡内浅滩面积较大, 如古尔切什麦 1 井区、鲍桑 1 井区和恰什古伊、基尔桑和霍贾姆巴兹气田等地区都发育有面积较大的坡内点礁和浅滩, 已有多口井钻获中 - 高产气流; 台内浅滩微相仅在伊利吉克和西基什图凡 21 井区发育, 发育规模相对坡内浅滩的面积要大的多, 已钻井多数钻获中产商业气流。综合已有勘探

开发成果,不难确定台地边缘相带和礁、滩相沉积复合体是阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶油气勘探的首选目标。

5 结论

1) 阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩划分为3个完整的三级层序,且均仅发育海侵和高位2个体系域。SQ1和SQ2高位体系域由于是水动力变化的频繁区域,所以礁、滩相灰岩较为发育,成为优质储层的有利发育层位,而SQ3高位体系域为浅水蒸发沉积环境,因此为封闭性极好的区域性致密盖层。

2) 卡洛夫-牛津阶储层主要分布在台地边缘礁滩相和前缘上斜坡坡内浅滩相等沉积环境,储层岩性有4种灰岩类型:颗粒灰岩类、礁灰岩类、粘结藻灰岩和(含)颗粒微晶灰岩类等,而储层主要发育在颗粒灰岩和礁灰岩中。

3) 成岩作用类型多样,不同成岩作用类型虽然对储层发育可造成不同的影响,但从总体上看,胶结和压实、压溶作用对卡洛夫-牛津阶储层质量的影响相对较小,而白云岩化、溶蚀与破裂作用于礁、滩体中广泛发育,因此礁、滩体的发育规模可成为储层预测主要目标。

4) 综合对储层发育起主控作用的沉积相研究和成藏地质条件分析,以及已有勘探开发成果可知,阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐最有利储层发育和油气聚集成藏的相带为台地边缘生物礁和浅滩,是阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶油气勘探的首选目标;次为台内浅滩和坡内点礁与浅滩,而台内潟湖-潮坪、潮下及前缘斜坡泥微相不利储层发育。

参 考 文 献

- [1] Ulmishek G F. Petroleum geology and resources of the Amu—Darya Basin, Turkmenistan, Uzbekistan, Afghanistan, and Iran [R]. USGS, 2004: 1—38.
- [2] 徐树宝,王素花,孙晓军. 土库曼斯坦油气地质和资源潜力[J]. 石油科技论坛, 2007, 6: 31—38.
Xu Shubao, Wang Suhua, Sun Xiaojun. petroleum geology and resource potential[J]. Oil Forum, 2007, 6: 31—38.
- [3] 张兵,郑荣才,刘合年,等. 土库曼斯坦萨曼杰佩气田卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩储层特征[J]. 地质学报, 2010, 84(1): 117—125.
Zhang Bing, Zheng Rongcai, Liu Henian, et al. Characteristics of Carbonate Reservoir in Callovian-Oxfordian of Samandepe Gasfield, Turkmenistan[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(1): 117—125.
- [4] 郑荣才,刘合年,吴蕾,等. 阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩储层地球化学特征和成岩流体分析[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 961—970.
Zheng Rongcai, Liu Henian, Wu Lei, et al. Geochemical characteristics and diagenetic fluid of the Callovian-Oxfordian carbonate reservoirs in Amu Darya basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 961—970.
- [5] 文华国,宫博识,郑荣才,等. 土库曼斯坦萨曼杰佩气田卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩沉积—成岩系统[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4): 991—1002.
Wen Huaguo, Gong Boshu, Zheng Rongcai, et al. Deposition and Diagenetic System of Carbonate in Callovian-Oxfordian of Samandepe Gasfield, Turkmenistan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(4): 991—1002.
- [6] 刘石磊,郑荣才,颜文全,等. 阿姆河盆地阿盖雷地区牛津阶碳酸盐岩储层特征[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(1): 57—63.
Liu Shilei, Zheng Rongcai, Yan Wenquan, et al. Characteristics of Oxfordian carbonate reservoir in Agayry area, Amu Darya Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(1): 57—63.
- [7] 董霞,郑荣才,吴蕾,等. 土库曼斯坦萨曼杰佩气田储层成岩作用与孔隙演化[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(2): 54—61.
Dong Xia, Zheng Rongcai, Wu Lei, et al. Diagenesis and porosity evolution of carbonate reservoirs in Samandepe Gas Field, Turkmenistan[J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(2): 54—61.
- [8] 徐文礼,郑荣才,费怀义,等. 土库曼斯坦阿姆河盆地卡洛夫—牛津阶沉积相特征[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 954—964.
Xu Wenli, Zheng Rongcai, Fei Huaiyi, et al. The sedimentary facies of Callovian-Oxfordian Stage in Amu Darya basin, Turkmenistan[J]. Geology in China, 2012, 39(4): 954—964.
- [9] 徐文礼,郑荣才,费怀义,等. 土库曼斯坦阿姆河右岸卡洛夫—牛津阶裂缝特征及形成期次[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 33—38.
Xu Wenli, Zheng Rongcai, Fei Huaiyi, et al. Characteristics and timing of fractures in the Callovian-Oxfordian boundary of the right bank of the Amu Darya River, Turkmenistan[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 33—38.
- [10] 王玲,张研,吴蕾,等. 阿姆河右岸区块生物礁特征与识别方法[J]. 天然气工业, 2010, 30(5): 30—33.
Wang Ling, Zhang Yan, Wu Lei, et al. Characteristics and identification of bioherms in the Amu Darya Right Bank Block, Turkmenistan[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5): 30—33.
- [11] 曾忠玉,陈发景,陈昭年,等. 阿姆河右岸AS区块卡洛夫—牛津组生物礁层正演模拟[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(2): 201—203.
Zeng Zhongyu, Chen fajing, Chen Zhaonian, et al. Forward Modeling of Callovian-Oxfordian Reefs of Upper Jurassic in AS Block of Amu Darya Right Bank in Turkmenistan[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(2): 201—203.
- [12] 张文起,刘学清,张铭,等. 土库曼斯坦阿姆河地区点礁储层地震正演模拟及响应[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(1): 72—75.
Zhang Wenqi, Liu Xueqing, Zhang Ming, et al. Forward Seismic Modeling and Its Response of Point reef Reservoir in Amudarya Area of Turkmenistan[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(1): 72—75.
- [13] 徐文世,刘秀联,余志清,等. 中亚阿姆河含油气盆地构造特征

- [J]. 天然气地球科学, 2009, 20(5): 744-748.
- Xu Wenshi, Liu Xiulian, Yu Zhiqing, et al. Geological Structure of Amu-Darya Basin in Central Asia [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(5): 744-748.
- [14] Thomas Meisel, Urs Krahenbuhl, Michael A. Nazarov. 1995. Combined osmium and strontium isotopic study of the Cretaceous-Tertiary boundary at Sumbar, Turkmenistan: A test for an impact vs. volcanic hypothesis [J]. Geology, (5): 313-316.
- [15] 郭永强, 刘洛夫, 朱胜利, 等. 阿姆达林盆地含油气系统划分与评价[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(4): 515-520.
- Guo Yongqiang, Liu luofu, Zhu Shengli, et al. Classification and assessment of petroleum system in Amu-Darya Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(4): 515-520.
- [16] 李洪玺, 程绪彬, 刘合年, 等. 麦捷让气田古构造对油气成藏的控制作用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(4): 44-49.
- Li Hongxi, Cheng Xubin, Liu Henian, et al. Controlling effect of Metajan paleostructure on the formation of gas reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(4): 44-49.
- [17] 徐明华, 李瑞, 张世荣, 等. 阿姆河右岸区块碳酸盐岩岩性气藏勘探实践—以麦捷让构造区为例[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 24-27.
- Xu Minghua, Li Rui, Zhang Shirong, et al. An exploration practice of lithologic carbonate gas reservoirs: The Metajan Structure in the Right Bank Block of the Amu Darya River [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 24-27.
- [18] Meisel T, Urs Krhenb L, Nazarov M A. Combined osmium and strontium isotopic study of the Cretaceous-Tertiary boundary at Sumbar, Turkmenistan: a test for an impact vs. a volcanic hypothesis [J]. Geology, 1995, 23(4): 313-316.
- [19] Vail, P. R., 1988, Sequence stratigraphy workbook, fundamentals of sequence stratigraphy, 1988, AAPG, Annual Convention Short Course.
- [20] Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap, in C. E. Clayton, ed, Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration [J]. Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists Memoir, 26: 63-81.
- [21] 郑荣才, 赵灿, 刘合年, 等. 阿姆河盆地卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩阴极发光性及其研究意义 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2010, 37(4): 377-385.
- Zheng Rongcai, Zhao Can, Liu Henian, et al. Cathodoluminescence and its significance of the Callovian-Oxfordian carbonate rocks in Amu Darya basin, Turkmenistan [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology), 2010, 37(4): 377-385.
- [22] 姜在兴. 沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-540.
- Jiang Zaixing. Sedimentology [M]. Beijing: House of Oil Industry, 2003: 1-540.
- [23] 龙一慧, 杨斌, 朱冉, 等. BP 神经网络在碳酸盐岩储层参数测井解释中的应用 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2015, 34(6): 32-39.
- Long Yihui, Yang Bin, Zhu Ran, et al. Logging interpretation of carbonate reservoir parameters by using BP neural network [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(6): 32-39.
- [24] 文华国, 宫博识, 郑荣才. 土库曼斯坦萨曼杰佩气田卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩沉积—成岩系统 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(4): 991-1002.
- Wen HuaGuo, Gong Boshi, Zheng Rongcai. Deposition and Diagenetic System of Carbonate in Callovian-Oxfordian of Samandep Gasfield, Turkmenistan [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(4): 991-1002.
- [25] 郑荣才, 刘合年, 吴蕾, 等. 阿姆河盆地卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩储层地球化学特征和成岩流体分析 [J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 961-970.
- Zheng RC, Liu HN, Wu L, et al. Geochemical characteristics and diagenetic fluid of the Callovian-Oxfordian carbonate reservoirs in Amu Darya basin. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 961-970 (in Chinese with English abstract)
- [26] 孟庆强, 朱东亚, 解启来, 等. 塔中和巴楚地区深部流体活动控制因素及有利区域预测 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(6): 597-611.
- Meng Qingqiang, Zhu Dongya, Xie Qilai, et al. Controlling factors for deep fluid activity and prediction of positive effect area in middle Tarim and Bachu regions [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(6): 597-611.
- [27] 朱东亚, 孟庆强, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地塔北和塔中地区流体作用环境差异性分析 [J]. 地球化学, 2013, 42(1): 82-94.
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Hu Wenxuan, et al. Difference between fluid activities in the Central and North Tarim Basin [J]. Geochimica, 2013, 42(1): 82-94.
- [28] 金之钧, 朱东亚, 孟庆强, 等. 塔里木盆地热液流体活动及其对油气运移的影响 [J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 1048-1058.
- Jin Zhi-jun, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, et al. Hydrothermal activities and influences on migration of oil and gas in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 1048-1058.
- [29] 曹均, 徐敏, 贺振华, 等. 礁灰岩储层孔隙流体敏感性参数分析—以阿姆河右岸区块生物礁储层为例 [J]. 天然气工业, 2010, 30(5): 37-40.
- Cao Jun, Xu Min, He Zhenhua, et al. An analysis of pore fluid sensitivity parameters in reef limestone reservoirs: An example from Callovian-Oxfordian carbonate reef reservoirs in the Amu Darya Right Bank Block, Turkmenistan [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5): 37-40.

(编辑 董立)