

土库曼斯坦阿姆河右岸区块礁滩体 地震地质综合识别方法

张长宝¹, 罗东坤¹, 徐 晟², 魏春光^{3*}

(1. 中国石油大学(北京)工商管理学院, 北京 102249; 2. 国土资源部 中国地质图书馆, 北京 100083;
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:土库曼斯坦阿姆河盆地含气储层以碳酸盐岩礁滩体为主, 由于其上部发育的巨厚膏盐地层对地震信号的屏蔽作用, 导致阿姆河右岸区块礁滩体存在不易识别和难以预测的难题。通过开展地震地质综合识别技术研究, 形成一套包含正演模型辅助解释、古地貌恢复和地层厚度识别、非连续性地震属性提取、波阻抗反演以及等时地层切片等技术的地震地质评价方法。综合多种方法的研究成果进行互相印证和补充, 明确研究区膏盐层下部礁滩体圈闭的形成条件和空间展布特征。在此基础上, 对阿姆河右岸区块礁滩体的发育特征与展布范围进行预测与评价。该研究成果有助于阿姆河右岸区块钻探目标的识别与优选, 使得研究区探井、评价井成功率保持在90%以上。

关键词:礁滩体 正演模型 古地貌 地震属性 波阻抗反演 阿姆河右岸区块

中图分类号: P631.445

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)04-064-06

Integrated seismic and geologic studies of reef-beach body recognition technology in Amu Darya Right Bank, Turkmenistan

Zhang Changbao¹, Luo Dongkun¹, Xu Sheng², Wei Chunguang³

(1. School of Business Administration, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. National Geological Library of China, Ministry of Land and Resources, Beijing City, 100083, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: Reef-beach limestone is the chief gas reservoir of Amu Darya Basin in Turkmenistan beneath the thick gypsum and salt formations. It is greatly difficult to identify and drill the reef. In order to solve the hard technical problems of reef recognition under salt in Amu Darya Right Bank gas field, several seismic and geological researches were carried out, including auxiliary interpretation of forward modeling, reconstruction of palaeo-geomorphology, discontinuous seismic multi-attribute extraction, wave impedance inversion and isochronous stratigraphic slice, etc. A set of effective identification and geological evaluation techniques was established for reef beneath the salt. Conditions of trap formation and the spatial distribution characteristics of reef-beach traps beneath the gypsum were determined after research results of multi-methods were synthesized to be confirmed and supplemented by each other in the area. On that basis, the development characteristics and distribution of reef-beach in Amu Darya Right Bank Block were predicted and evaluated to help identify and optimize drilling targets. As a result, the success drilling rate of exploration wells and appraisal wells remained at more than 90% in the area.

Key words: reef-beach body; forward modeling; palaeo-geomorphology; seismic attribute; wave impedance inversion; Amu Darya Right Bank Block

收稿日期: 2016-04-13。

作者简介: 张长宝(1972—), 男, 黑龙江绥化人, 高级经济师, 博士, 从事油气资源评价、经济评价与区块优选研究。联系电话: 13910988378, E-mail: zhangchangbao@cnpcint.com。

*通讯作者: 魏春光(1979—), 男, 河南驻马店人, 高级工程师, 博士。联系电话: 1352843026, E-mail: maoshandos@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05059)。

礁滩体作为碳酸盐岩储层的重要勘探目标之一,一直受到科研人员的广泛重视,并在中外很多地区开展了深入的研究^[1-5]。土库曼斯坦国的阿姆河盆地是中亚地区面积最大、油气资源最丰富的含油气盆地之一^[6],位于阿姆河东北部的右岸区块是以侏罗系碳酸盐岩礁滩体储层为主要产层的大型气田,也是中国中亚油气管道的主要气源地。近年来,围绕阿姆河盆地展开了大量的石油地质和地球物理方面的研究工作,取得了较全面的地质认识。随着研究的不断深入,由于阿姆河右岸区块发育巨厚的膏盐岩,其对地震信号的屏蔽作用影响礁滩体的识别和预测成为亟待解决的难题之一^[7-9]。笔者在正演模型确定礁滩体储层地震响应特征的基础上,将古地貌恢复与地层厚度识别、非连续性地震属性提取和波阻抗反演等技术取得的研究结果进行互相印证和补充,形成了适用于阿姆河右岸区块的地震地质综合识别方法,以期为研究区下一步的油气勘探提供依据。

1 区域地质概况

阿姆河盆地是中亚面积最大、油气资源最丰富的含油气盆地,总面积约为 $42.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。沉积地层可分为前古生界基底、三叠系一二叠系过渡层和中生界—新生界沉积盖层3大构造层。从下侏罗统到第四系,盆地大部分地区表现为连续沉积。其中,上侏罗统的卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩沉积是研究区的主力目的层^[10-11]。阿姆河右岸区块位于阿姆河盆地的中东部,土库曼斯坦国的东北部(图1)。从构造分区来看,区块可分为查尔朱隆起、坚基兹库尔隆起、桑迪克雷隆起、别什肯特拗陷和西南基萨

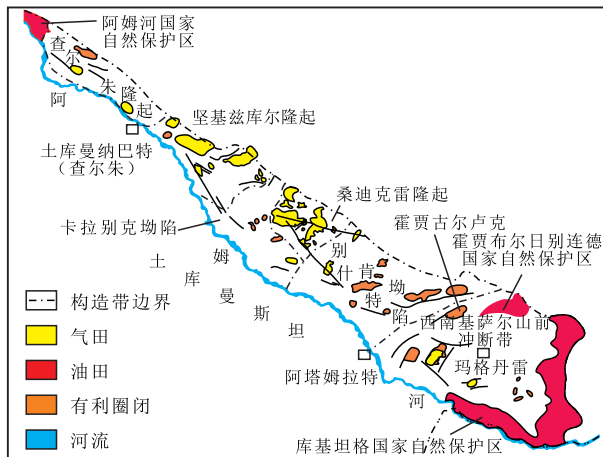


图1 阿姆河右岸区块区域构造位置

Fig.1 Overlay map of structural division, reservoirs and traps in Amu Darya Right Bank Block

尔山前冲断带等5个构造单元。阿姆河右岸区块在中、晚侏罗世的沉积环境以浅海碳酸盐岩台地为主,下部发育碳酸盐岩,而上部高尔达克组发育巨厚的膏盐岩沉积,根据其在高尔达克组的不同发育位置分为上、中及下石膏层和上、下盐层。其中碳酸盐岩礁滩体的礁灰岩或亮晶鲕粒灰岩,为研究区卡洛夫—牛津阶最好的储层。

2 地震响应特征

2.1 正演模型特征

利用研究区高分辨率的三维地震资料与测井数据及VSP资料相结合,建立与实际资料吻合的速度模型^[12],并利用波动方程有限差分法进行模型正演获得模拟地震剖面。通过与实际地震资料进行对比,分析礁滩体在叠后地震资料上的地震响应特征,为礁滩体的地震预测提供理论支持^[13-15]。选择研究区过C-21井主测线的叠前偏移剖面作为对比地震剖面(图2a),根据地震、测井等数据建立了该地震测线的速度模型,C-21井钻遇的礁滩体位于膏岩层 T_1 反射层位的下方,其顶界为一套薄层的泥岩盖层。储层发育于礁滩体的上部,模拟速度为 $5\ 300 \text{ m/s}$,礁滩体内部模拟速度为 $5\ 550 \text{ m/s}$ 。采用波动方程数值模拟方法得到礁滩体正演模型的左、右边界的调谐点,正演模拟结果表明,礁滩体内部的层状反射以及顶部的隆起反射特征与实际地

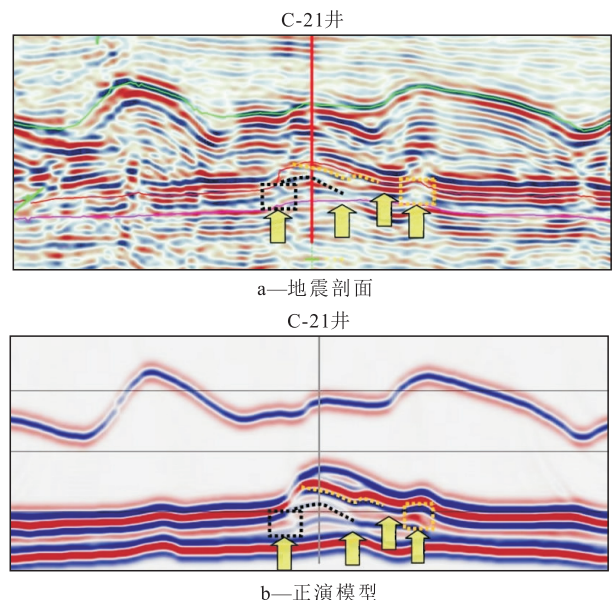


图2 阿姆河右岸区块礁滩体地震剖面与波动方程正演模型对比

Fig.2 Comparison between seismic profile and forward modeling of wave equation of reef-beach in Amu Darya Right Bank Block

震剖面具有较好的一致性(图2b),验证了正演模型反映礁滩体地震响应特征的可靠性。

2.2 地震反射结构特征

根据正演模拟结果,研究区礁滩体具有以下地震响应特征:反射体整体为丘状隆起外形,两侧存在调谐点;顶部储层为中弱反射,弱成层性;礁滩体内部存在层状反射。礁滩体顶界表现为中弱反射的原因是储层含气后导致速度降低,与上部泥岩盖层速度接近,波阻抗差减小。储层下部的生物礁灰岩存在物性差异,形成了礁滩体内部层状反射。

由于礁滩体的沉积建造及分布特征主要受沉积环境的影响,其沉积作用和成岩过程与一般的碳酸盐岩不同。这些特征在地震资料上反映为礁滩体的反射波振幅、频率、连续性与围岩不同。因此,可以通过礁滩体外形特征、礁体内部结构以及其与周围岩石的接触关系将研究区的礁滩体地震反射结构特征划分为4种类型:①反射类型I。外形为丘状反射特征,礁滩体内部为断续杂乱反射(图3a)。②反射类型II。外形为丘状反射特征,礁滩体

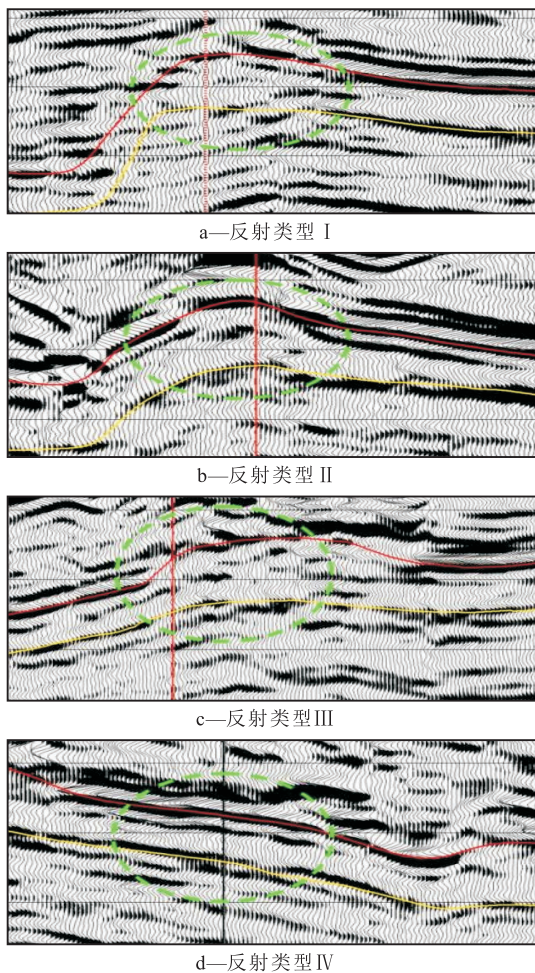


图3 阿姆河右岸区块礁滩体地震反射结构特征

Fig.3 Seismic reflection configuration of abnormal body of reef-beach in Amu Darya Right Bank Block

内部为弱反射特征,两翼非对称,周缘具有上超现象(图3b)。③反射类型III。外形为丘状反射特征,礁滩体内部为断续杂乱反射,顶部有超覆现象(图3c)。④反射类型IV。外形为平行反射特征,内部礁滩体不发育(图3d)。因此,礁滩体所特有的地震反射结构特征,成为进行地震资料识别和预测的基本依据。

3 地震地质综合识别方法

3.1 古地貌恢复和地层厚度识别方法

阿姆河右岸区块在中、晚侏罗世的沉积环境以浅海碳酸盐岩台地为主,礁滩体的发育常受到古地貌控制,研究区水下的古地貌高部位是礁滩体生长发育的有利位置。除此之外,研究区礁滩体上覆近千千米厚的塑性较强的盐膏层,由于相对于盐膏层而言,礁滩体是刚性体,在区域应力或重力作用下,上覆的盐膏层会发生由高部位向低部位的塑性流动,礁滩体成为盐膏层塑性流动中的阻碍,因此,礁滩体发育区常表现为上覆的盐膏层地层厚度的减薄,礁滩体两侧盐膏层变形加厚,同时中石膏层和下石膏层在流动作用下拉断后,形成类似“眼球”状的地震反射特征(图2a)。由于生物礁滩体的发育厚度大多与上覆的下盐层厚度存在相关性,碳酸盐岩厚度越大,下盐层厚度越薄,反之亦然。而地震剖面上的反射时差和相位数的变化能够反映地层厚度的变化,因此,通过恢复古地貌和研究地层厚度变化,可以预测生物礁滩体的有利发育区。礁滩体下盐层厚度大的侧翼可形成对礁体的侧向遮挡,有利于天然气的富集成藏。

3.2 非连续性地震属性识别方法

地震属性能够比较直观地反映地质特征,在各种类型储层的识别预测过程中都发挥了重要作用^[16],从不同种类的属性中优选能够反映礁滩体等地质异常体的地震属性,进而从平面上定性地预测礁滩体分布范围^[17-18]。以研究区的卡洛夫—牛津阶顶界为参考层,结合钻井地层厚度统计结果,对非连续性地震属性进行提取。通过地震属性敏感度分析,结合钻井资料,选取能够显示地震相分布的波形分类属性、指示岩性变化的均方根振幅属性和反映礁滩体与围岩关系的相干体属性进行分析,进而预测研究区礁滩体的展布规律。

波形分类属性 由于生物礁滩体具有特殊的地震反射结构,其地震波形特征与围岩存在差异。通过研究地震波形变化信息,可以较为准确地在地

震资料中识别出礁滩体。依据波形分类属性分析结果(图4a),结合地震剖面 and 已钻井资料进行分析可以看出,研究区的礁滩体发育区域大致可分为2种类型,一种是条带状分布的礁滩体发育区,另一种则是团块状分布的礁滩体发育区。条带状分布的礁滩体发育区主要集中在研究区的北部和东北部;团块状分布的礁滩体发育区主要集中于研究区南部和西南部。二者应分属不同类型的沉积环境,与其上覆的盐层厚度呈较好的对应关系。

均方根振幅属性 研究区碳酸盐岩层顶均方根振幅属性结果(图4b)显示,礁滩体储层发育区的振幅值显示为低异常。且低振幅异常区在研究区北部和东北部地区呈有规律的条带状分布,在南部和西南部则呈团块状分布。通过与地震剖面进行

对比发现,根据振幅属性所预测的储层范围与地震剖面上所表现的振幅异常范围基本一致。

相干体属性 研究区相干体属性沿层切片分析结果表明,钻遇礁滩体的井均分布在相干性较弱的区域,钻遇礁滩体不发育且储层物性较差的井主要分布在相干性较强的区域。相干体属性与地震剖面结合,可以在平面上预测出生物礁滩体的分布范围。

3.3 波阻抗反演技术

地震反演技术是利用已有的地层、钻井以及测井等资料作为约束条件,在高精度三维地震资料的基础上,对地层的空间结构和岩石的物理性质进行成像,由此预测未知区域的地层信息。该技术被广泛应用于含油气储层分布的预测,尤其针对较难识别的储层^[19-21]。目前常用的地震反演方法主要分为基于地震数据的波阻抗反演、基于模型的测井属性反演和基于地质统计的随机模拟与随机反演3大类。采用多子波地震道分解后的数据体,通过对自然伽马、声波以及密度曲线的分析结果表明,研究区致密灰岩的速度和密度值均较高,而孔隙性碳酸盐岩的速度和密度值相对较低,适合采用波阻抗反演方法。

鉴于研究区勘探地质目标和资料特点,主要采用测井约束稀疏脉冲反演方法。选取研究区某区块作为反演的目标区,面积为410 km²。在精细标定的基础上,提取了研究区9口典型井的平均子波用于测井约束稀疏脉冲反演;在构造解释框架的约束下,通过井曲线的内插外推生成初始地质模型,将频率小于6 Hz的低频部分与稀疏脉冲反演得到的相对波阻抗合并进而得到最终的反演结果。通过统计波阻抗曲线和储层之间的关系可知,波阻抗小于 1.43×10^7 g/cm³·m/s的区域为储层发育区(图5)。从研究区T₂地震反射层时窗向下16 ms(图5a)的波阻抗切片来看,T₂地震反射层上部储层在研究区北部呈条带状分布,在中南部呈团块状分布,与地震属性预测结果相吻合。从T₂地震反射层时窗向下36 ms(图5b)的波阻抗切片来看,T₂地震反射层下部储层在研究区南部的发育程度要好于北部,且纵向上由浅至深储层逐渐变差。

利用上述地震地质综合识别技术,针对阿姆河右岸区块累积发现和评价了约120个礁滩体圈闭,对总面积近2 000 km²的研究区的储层分布进行了预测。从实际钻探结果来看,地震地质综合识别方法的预测结果与研究区已钻的高产气井的试气成果以及电测解释成果吻合度较高,探井、评价井成

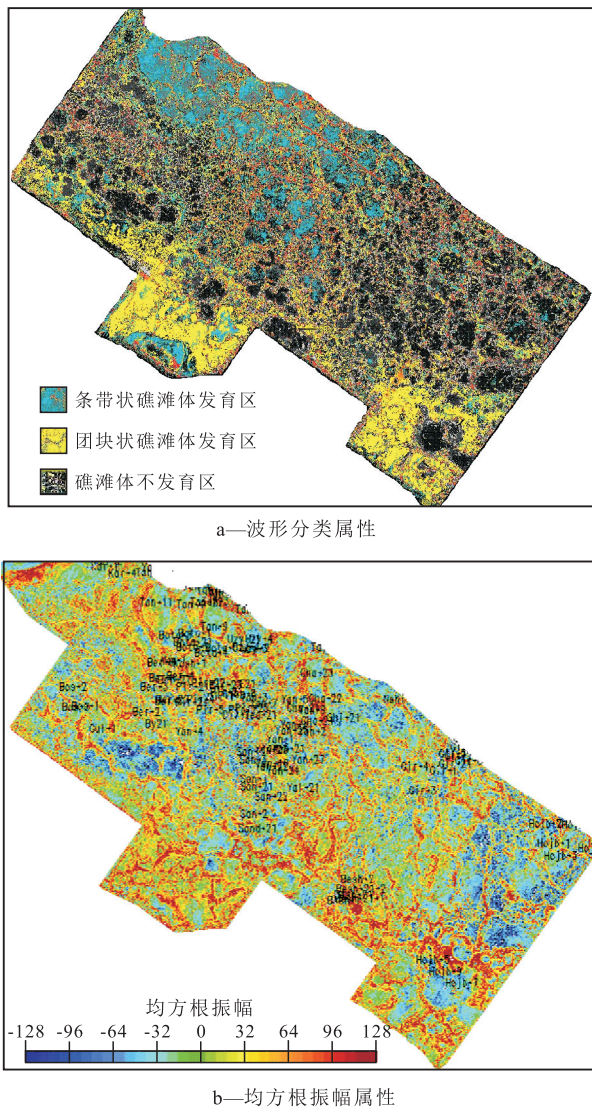
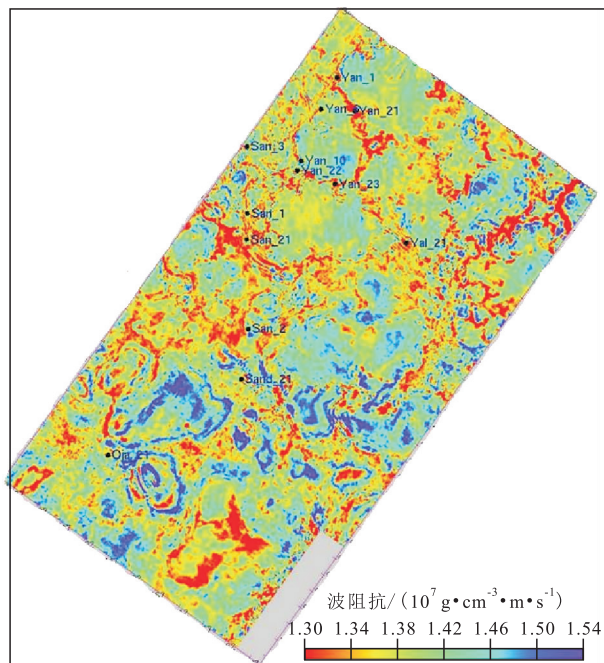
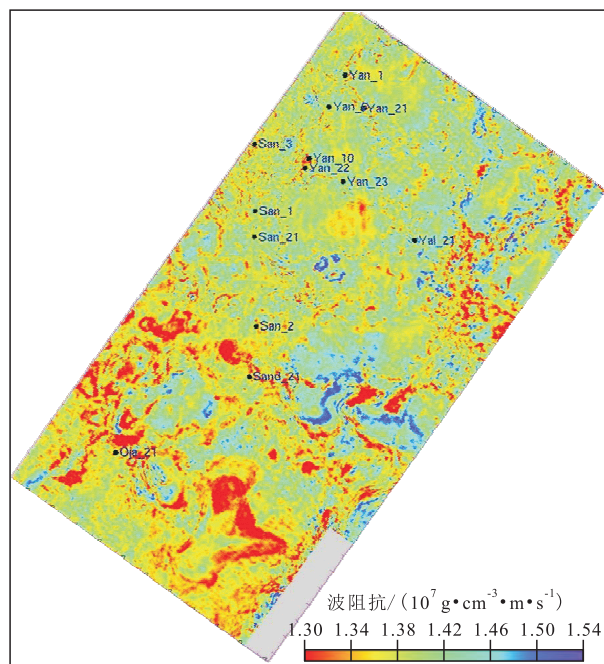


图4 阿姆河右岸区块碳酸盐岩层顶波形分类与均方根振幅属性

Fig.4 Waveform classification attribution and RMS amplitude attribution of the top of the carbonate rock layer in Amu Darya Right Bank Block



a—T₂地震反射层向下16 ms波阻抗切片



b—T₂地震反射层向下36 ms波阻抗切片

图5 阿姆河右岸区块波阻抗反演预测储层平面分布

Fig.5 Reservoir distribution predicted by wave impedance inversion in Amu Darya Right Bank Block

功率保持在90%以上。

4 结束语

针对阿姆河右岸区块礁滩体的识别和预测的难题,开展地震地质综合识别方法研究,形成一套包含正演模型辅助解释、古地貌恢复和地层厚度识别、非连续性地震属性识别、波阻抗反演以及等时

地层切片等技术的地震地质综合评价方法。通过综合这些方法的研究成果进行互相印证和补充,明确了研究区盐下礁滩体圈闭形成条件和空间展布特征。在此基础上,结合烃类检测、礁滩体气藏评价等研究成果,对阿姆河右岸区块礁滩体的发育特征与展布范围进行预测与评价。研究成果为阿姆河右岸区块钻探目标的识别与优选提供了重要技术支持,使得研究区探井、评价井成功率保持在90%以上,成为阿姆河右岸区块能够长期稳定向中亚管线供气的有力技术保障。

参考文献:

[1] 范秋海,张丽娟,朱永峰,等.塔里木盆地HD23井区中奥陶统生物礁滩体的识别与研究[J].地质前缘,2012,19(4):247-254.
 Fan Qiu hai, Zhang Lijuan, Zhu Yongfeng, et al. The identification and study of reef-banks complex in Middle Ordovician in Well-block HD23 in Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(4):247-254.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 冯冲,邹华耀,郭彤楼,等.川东北地区二叠系-三叠系礁滩相储层发育机理[J].特种油气藏,2015,22(6):1-4.
 Feng Chong, Zou Huayao, Guo Tonglou, et al. Development mechanism of Permian-Triassic reef shoal reservoir in Northeastern Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6):1-4.

[5] 闫建平,司马立强,谭学群,等.伊朗Zagros盆地西南部白垩系Sarak组碳酸盐岩储层特征[J].石油与天然气地质,2015,36(3):409-415.
 Yan Jianping, Sima Liqiang, Tan Xuequn, et al. Carbonate reservoir characteristics of the Cretaceous Sarvak Formation in southwestern Zagros Basin, Iran[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3):409-415.

[6] 何雨丹,魏春光.中亚阿姆河盆地构造演化及其对油气藏的控制作用[J].地球物理学进展,2014,29(3):1143-1147.
 He Yudan, Wei Chunguang. Tectonic evolution and its vital role for oil and gas reservoir in Amu Darya basin[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3):1143-1147.

[7] 王玲,张研,马晓宇,等.膏盐岩变形下的礁体识别与有效储层预测技术——以阿姆河盆地为例[J].岩性油气藏,2010,22(7):127-130.

- Wang Ling, Zhang Yan, Ma Xiaoyu, et al. Identification of reefs and prediction of effective reservoirs in deformed gypsum rocks—A case study in Amu-Darya Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(7): 127–130.
- [8] 黄兴文, 阳怀忠, 刘新颖, 等. 加蓬盆地深水盐下构造—沉积演化及其对油气成藏的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4): 14–19.
- Huang Xingwen, Yang Huaizhong, Liu Xinying, et al. Tecto-sedimentary evolution of deep-water pre-salt and its effect on hydrocarbon accumulation in Gabon basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 14–19.
- [9] 杨淑雯, 陈波, 蔡德洋, 等. 江陵凹陷古近系新下段膏盐岩地球物理响应特征及分布预测[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(2): 33–38.
- Yang Shuwen, Chen Bo, Cai Deyang, et al. Geophysical responses characteristics and distribution prediction of gypsum-salt rock in the lower member of Xingouzui Formation of Paleogene in Jiangling sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(2): 33–38.
- [10] 李浩武, 童晓光, 王素花, 等. 阿姆河盆地侏罗系成藏组合地质特征及勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2010, 30(5): 6–12.
- Li Haowu, Tong Xiaoguang, Wang Suhua, et al. An analysis of geological characteristics and exploration potential of the Jurassic play, Amu Darya Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(5): 6–12.
- [11] 郑荣才, 陈浩如, 王强, 等. 土库曼斯坦阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶储层特征及控制因素分析[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 779–788.
- Zheng Rongcai, Chen Haoru, Wang Qiang, et al. The reservoir characteristics and their controlling factors of Callovian-Oxfordian carbonates in Amu Darya Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 779–788.
- [12] 刘勇, 杨洪志, 刘义成, 等. 阿姆河右岸基尔桑地区牛津阶生物礁储层特征及控制因素[J]. *天然气工业*, 2013, 33(3): 10–14.
- Liu Yong, Yang Hongzhi, Liu Yicheng, et al. Characteristics and main controlling factors of the Oxfordian biohermal reservoirs in Girsan of Amu Darya Right Bank, Turkmenistan [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(3): 10–14.
- [13] 张兵, 郑荣才, 史建南, 等. 四川盆地东部长兴组礁滩相储层测井地质特征[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2012, 42(增刊1): 17–25.
- Zhang Bing, Zheng Rongcai, Shi Jiannan, et al. Well logging geological characteristics of reef and shoal facies reservoir of Changxing Formation in eastern Sichuan basin [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(Supplement1): 17–25.
- [14] 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.
- [15] 徐敏. 数值模拟技术在生物礁储层研究中的应用——以阿姆河右岸卡洛夫-牛津阶组碳酸盐岩生物礁储层为例[J]. *天然气技术与经济*, 2011, 5(4): 23–25.
- Xu Min. Application of numerical simulation to bioreef reservoir: An example from Callovian-Oxfordian carbonate bioreef in Amu Darya Right Bank [J]. *Natural Gas Technology and Economy*, 2011, 5(4): 23–25.
- [16] 魏春光, 谢寅符, 何雨丹. 厄瓜多尔奥连特盆地斜坡带地震多属性储层预测[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(增刊1): 374–379.
- Wei Chunguang, Xie Yinfu, He Yudan. Reservoir prediction using seismic multi-attributes method in slope of Oriente basin, Ecuador [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(Supplement1): 374–379.
- [17] 曾凡平, 李建英, 陈洪涛, 等. 三阶累积量属性在生物礁滩体识别中的应用[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(4): 62–65.
- Zeng Fanping, Li Jianying, Chen Hongtao, et al. Application of third-order cumulant attribute in reef-beach body recognition [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(4): 62–65.
- [18] 肖玲, 魏钦廉. 川西孝新合地区雷口坡组礁滩储集层地震预测[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(3): 324–326.
- Xiao Ling, Wei Qinlian. Seismic prediction of Leikoupo reef-bank reservoirs of Middle Triassic in XXH area in western Sichuan basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(3): 324–326.
- [19] 吴媚, 符力耘, 李维新. 高分辨率非线性储层物性参数反演方法和应用[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 546–557.
- Wu Mei, Fu Liyun, Li Weixin. A high-resolution nonlinear inversion method of reservoir parameters and its application to oil/gas exploration [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(2): 546–557.
- [20] 魏友华, 郭科, 陈聆, 等. 信息融合在复杂油气储层物性参数综合研究中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(1): 153–156.
- Wei Youhua, Guo Ke, Chen Ling, et al. The application of data fusion in the research of physic parameters of complicated oil-gas reservoir [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(1): 153–156.
- [21] 苗永康. 叠前地震反演技术的应用条件及难点分析[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(6): 61–64.
- Miao Yongkang. Analysis on application conditions and difficulties in pre-stack seismic inversion [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 61–64.

编辑 裴磊