

# 福山凹陷流二段湖底扇沉积特征及成因机制

林正良<sup>1,2</sup>, 李红敬<sup>1</sup>, 马庆林<sup>3</sup>, 李媛<sup>4</sup>

1. 中国石化石油物探技术研究院, 南京 210014
2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
3. 中石油南方石油勘探开发有限责任公司, 广州 510240
4. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

**摘要** 综合利用钻井、分析化验、岩心等资料, 研究北部湾盆地福山凹陷西部地区流二段(流沙港组二段)湖底扇的沉积特征及成因机制, 通过钻井标定, 结合地震属性分析, 精细刻画湖底扇体的空间分布形态。结果表明, 流二段湖底扇形成于福山凹陷的缓坡带一侧, 其受控于同生断裂所形成的断裂坡折; 流二段湖底扇主要由南部辫状河三角洲前缘滑塌体经过多级断裂控制后进入湖底形成, 具有近物源区、多期叠置发育的特点; 流二段湖底扇形成于低位体系域形成晚期, 主要包括浊积型、滑塌型两种成因类型, 扇体形成的触发机制主要为凹陷内强烈的火山活动; 流二段湖底扇上部及下部发育巨厚的暗色泥岩, 是凹陷内最主要的烃源岩, 对油气勘探具有重要意义。

**关键词** 湖底扇; 沉积特征; 地震属性; 福山凹陷

**中图分类号** TE122.1

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.003

## Sedimentary characteristics and genetic mechanism of sublacustrine fan in the second member of Liushagang formation of the Fushan Sag

LIN Zhengliang<sup>1,2</sup>, LI Hongjing<sup>1</sup>, MA Qinglin<sup>3</sup>, LI Yuan<sup>4</sup>

1. Sinopec Geophysical Research Institute, Nanjing 210014, China
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3. China Southern Petroleum Exploration and Development Corporation, Guangzhou 510240, China
4. Faculty of Earth Resources, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China

**Abstract** By comprehensive use of drilling data, analysis assay, core data, etc., the sedimentary characteristics of sublacustrine fan in the second member of Liushagang formation in the western area of Fushan Sag, Beibuwan Basin are studied. Through drilling calibration and with the seismic attributes analysis, the spatial distribution of sublacustrine fan is described in detail. The research shows that the sublacustrine fan formed along the side of slope belt, and was controlled by the faulted slope break background formed by synsedimentary faults. The slumps of the northern braided delta front were transported via multi-fault-terrace to the lake bottom and the sublacustrine fan was formed. The fan was with the characteristics proximal to source area, and of multi-superimposed development. They were formed during the late of the lowstand period, including the turbidite and slump types. The trigger mechanism of the fan is the intensive volcanic activities within the sag. There are thick dark mudstones in the upper and the lower parts of the fan, which constitute the main source rocks in the sag and are significant for petroleum exploration.

**Keywords** sublacustrine fan; sedimentary characteristic; seismic attributes; Fushan Sag

收稿日期: 2014-10-14; 修回日期: 2015-03-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239201); 国家自然科学基金项目(41272722)

作者简介: 林正良, 高级工程师, 研究方向为矿产普查、矿产勘探及盆地分析, 电子信箱: lzl-lll@163.com

引用格式: 林正良, 李红敬, 马庆林, 等. 福山凹陷流二段湖底扇沉积特征及成因机制[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 23-28.

湖底扇是受重力流或超导体流作用于湖底斜坡时形成的扇形碎屑沉积体,这一概念由海底扇引申而来。在湖泊中一般指带有较长并且比较稳定的供水道的水重力流沉积扇,因此,也称为远岸浊积扇<sup>[1]</sup>,与经典层序地层学低位体系域中的低位扇相同。湖底扇可以形成多种类型的储集体,是形成岩性油气藏的重要领域<sup>[2]</sup>。中国东部断陷湖盆中广泛发育湖底扇,国内学者<sup>[3-8]</sup>对不同盆地、不同沉积时期的湖底扇,从形成机制、沉积模式、储层特征等方面进行了大量研究。近年来湖底扇岩性油气藏勘探也不断取得了重大的突破<sup>[9-11]</sup>,湖底扇砂岩体正成为岩性油气藏勘探的重要目标。

北部湾盆地是一个在古生代基底上发展起来的新生代拉张盆地,是中国较大的富含油气内陆盆地。在北部湾其他凹陷的古近系地层中也发现大量具有浊积性质的湖底扇<sup>[12-14]</sup>。福山凹陷为北部湾盆地东南部的一个次级凹陷,古近系地层沉积期发育大量的湖底扇沉积<sup>[15,16]</sup>,是该地区主要的储集体类型之一。北部湾盆地福山凹陷西部地区研究程度较低,前人对该地区的湖底扇沉积特征和成因机制尚未研究。因此,本文以北部湾盆地福山凹陷西部地区为研究区域,流二段(流沙港组二段)为目的层,综合岩心、测井、地震等资料,研究该地区湖底扇的沉积特征、形成条件及发育规律,并探讨该层段湖底扇沉积对福山凹陷西部地区油气勘探的意义。

## 1 研究区概况

福山凹陷为北部湾盆地南缘海南隆起区北部斜坡上的一个次级裂谷型凹陷,是一个以古生界地层及中生界中、酸性火成岩为基底,从晚白垩世开始发育的中、新生代断陷盆地,构成现今北部湾盆地南部斜坡上的主要沉积凹陷。以古近系地层分布范围计算,凹陷总面积为2920 km<sup>2</sup>,新生界地层最大厚度约9000 m。如图1所示,福山凹陷在平面上被临高断裂、长流断裂和定安断裂三大边界断裂围限,剖面上东西向呈现被临高断裂、长流断裂所控制的双断裂地堑型断陷,南北向总体表现为北断南超的箕状断陷样式<sup>[17-19]</sup>。福山凹陷构造演化过程经历了古近纪张裂阶段(断陷)和新近纪裂后阶段(坳陷),张裂时期构造沉降中心的空间迁移较大,使得凹陷的结构及构造特征复杂化<sup>[20,21]</sup>。

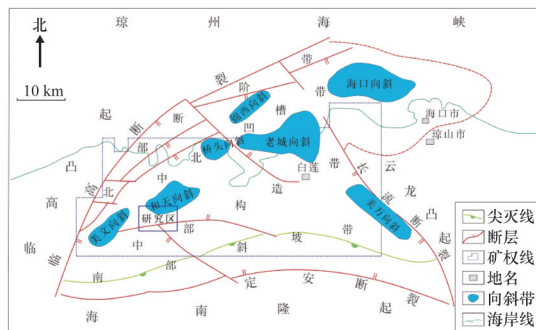


图1 福山凹陷构造纲要

Fig. 1 Schematic structure pattern of the Fushan Sag

研究区位于福山凹陷西部地区的和天向斜以南缓坡带的美台构造带。流沙港组沉积期是福山凹陷的主要成盆期,沉陷幅度较大,地势较陡,导致流沙港组深水湖泊沉积发育。流二段为福山凹陷湖泊发育的鼎盛时期,凹陷中心沉积巨厚的暗色泥岩。根据前人研究,福山凹陷流沙港组主要包括3种不同类型的沉积相单元,即浊流沉积、水下泥石流沉积及滑塌堆积<sup>[15,16]</sup>。

## 2 湖底扇沉积特征

### 2.1 岩石学特征

研究区地处皇桐次凹边缘,与福山凹陷南部缓坡带相邻,整体上水体偏浅,浊积岩发育相对不好。如图2所示,流二段湖底扇在岩心、录井、测井以及地震剖面上具有典型特征。由已钻井可知,流二段湖底扇体属于湍流支撑的浊积岩,碎屑流浊积岩尚未见到。通过录井和岩心资料可知,研究区流二段湖底扇砂体的岩性组合主要为深灰色、灰黑色、黑色泥岩夹灰色、灰白色砂岩、砂砾岩,呈薄层状。湖底扇为富砂型扇体,其孔隙度为16.78%~20.67%,渗透率为(25.12~39.59)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。岩心可见大量递变层理,未见典型的深水环境浊积岩层理,其递变段碎屑颗粒粒级呈均匀向上变细的递变,泥质含量不高,平均3.3%~4.3%。本地区砂岩,碎屑颗粒风化较深,碎屑颗粒混杂,分选差,颗粒形态多具有棱角,且普遍较粗,反映本区砂岩具有靠近物源区的特点。单矿物中石英含量介于46.3%~66.5%,平均为56.3%,较稳定的钾长石平均含量8.2%,斜长石平均含量为0.17%;岩屑含量中,变质岩碎屑占绝对的优势,平均含量为30.1%,反映了物源区母岩以变质岩为主。在测井曲线上具有低自然伽马(*GR*)、高视电阻率(*RT*)的特征。

碎屑岩的粒度分布及分选性是搬运营力和搬运能力的衡量尺度,是判别水动力条件的标志。W1井流二段所取的13块砂岩样品粒度资料分析结果如图3所示,流二段碎屑岩杂基含量高,碎屑颗粒分选中等。在粒度概率图上表现为两段式类型,跳跃式和悬浮式。其中跳跃式总体占80%~90%,斜率65°~75°;悬浮总体占10%~20%,斜率6°~15°。W1井流二段粒度概率曲线最突出特点是,可以分出粗、中、细段,但是各段之间的截点不清晰,粒度区间跨度较大,粒径中等,一般大于0.9 mm,主要集中于0.9~2.5 mm。标准偏差为1.99~2.27 mm,说明其分选较差;偏态为0.27~0.47,属于极正偏态,碎屑颗粒多在粗端部分;峰态为1.68~1.90,表明频率曲线尖峰为尖窄和很尖窄型。

如图4所示,在C-M图上除具有平行C-M线分布的递变悬浮搬运总体外,还有大量点平行C值分布,反映出存在滚动(或跳跃)总体搬运的特征,具有浊积水道的沉积特征,与该段粒度概率累积曲线反映的特点一致。总之,通过W1井流二段砂岩粒度概率累积曲线和C-M特征分析可知,流二段砂岩整体上具有不正常牵引流搬运碎屑颗粒的特点,水动力较强,颗粒分选差并带有浊流沉积的性质。

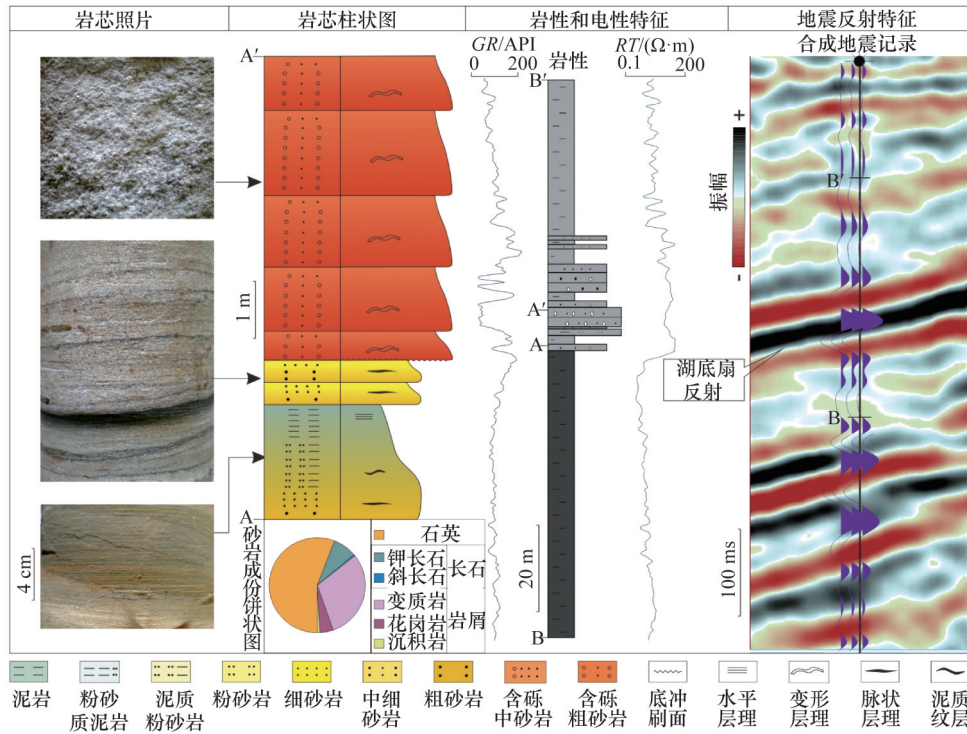


图2 湖底扇重力流水道综合分析

Fig. 2 Comprehensive analysis of gravity flow channel of sublacustrine fan

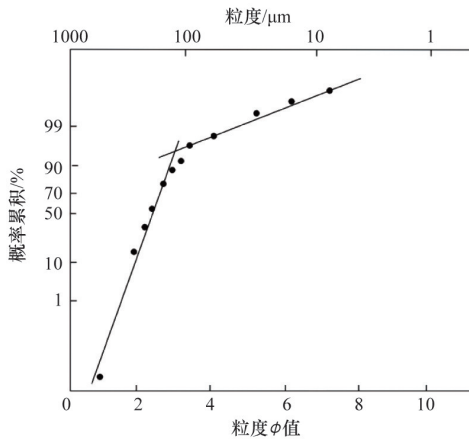


图3 W1井流二段碎屑岩粒度概率曲线

Fig. 3 Cumulative granularity curves of the second member of Liushagang formation

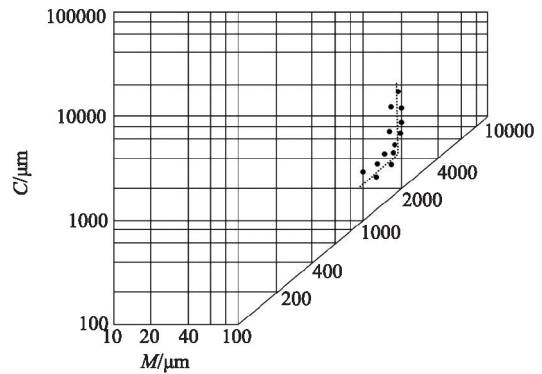


图4 W1井流二段碎屑岩C-M图

Fig. 4 C-M diagram of the second member of Liushagang formation

### 2.2 湖底扇分布特征

研究区内流二段湖底扇扇体有多口探井钻遇, 钻井揭示该地区湖底扇体具有沉积厚度薄、横向变化快的特点。单井钻遇最大累积厚度 37 m(W3 井), 由南向北厚度减薄消失。

近年来, 地震属性广泛应用于油气勘探开发中, 并在构造解释、储层预测等方面发挥了重要作用<sup>[22,23]</sup>。湖底扇体的顶部和底部与流二段厚层湖相泥岩呈突变接触。这类砂体与厚层泥岩的空间配置关系具有明显的波阻抗差, 在地震剖

面上表现为一个强的反射同相轴, 其能量在横向上有较大的变化, 整体上具有强振幅、连续性好、低频率的地震响应特征(图2)。

通过多种地震属性综合分析, 结合已有的钻井资料标定, 均方根振幅属性可以很好地反映研究区湖底扇体的分布特征, 可用于精细刻画该湖底扇体的空间分布形态。从均方根振幅属性图上可以看出, 研究区内湖底扇空间分布整体上受控于凹陷缓坡带的同生断层(F1), 主体分布于断层的下降

盘一侧。

如图5所示,研究区流二段湖底扇体可分为两种类型。一种扇体分布相对集中,平面上呈长轴状分布,并且具有明显的补给水道,属于浊积型湖底扇体(图5A区);另一种分布

与生长断层下降盘,沿断裂走向呈不规则的片状分布,属于滑塌型湖底扇体(图5B区)。目前,该区钻井主要钻遇的扇体类型主要为浊积型湖底扇体。

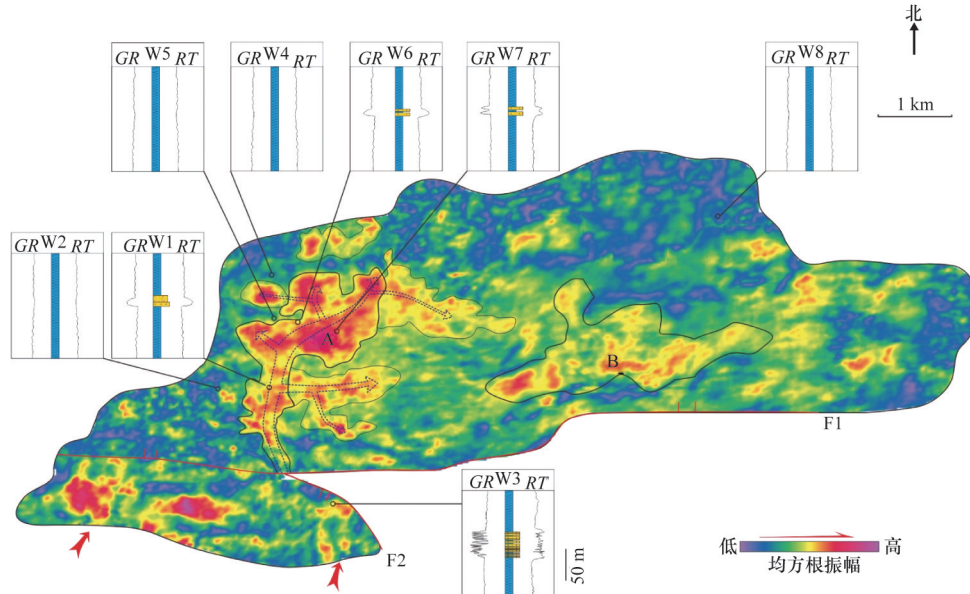


图5 流二段湖底扇地震属性分析

Fig. 5 Seismic attribute analysis of sublacustrine fan in the second member of Liushagang formation

### 3 湖底扇发育背景及形成机制

在断陷湖盆中,湖底扇多发于盆地深陷期的缓坡一侧,古地形及同生断裂对湖底扇体的形成和分布具有重要的控制作用。坡折带制约着盆地充填的可容空间的变化,对沉积体系的发育和砂体分布起着重要的控制作用<sup>[24]</sup>。流二段湖底扇形成于福山凹陷的缓坡带一侧,其受控于同生断裂所形成的断裂坡折。福山凹陷自古新世以来经历了强烈的裂陷作用,为北断南超的箕状断陷。南部斜坡带主要发育北倾的顺向断层(F1),与工区内发育少量的次级反向断层(F2)构成复杂的坡折带。流二段沉积时期,斜坡上部的平台区遭受少量剥蚀,碎屑体系供给明显减弱,反映该时期为区域上的湖扩期的特征。辫状河三角洲体系主要分布于低位和湖扩体系域,空间上分布在斜坡区中部;受同沉积断裂、物源供给、相对湖平面变化等因素的控制,在研究区辫状河三角洲前缘的外侧的生成断层之下发育一套湖底扇沉积体,具有多期叠置发育的特点,如图6所示。

流二段湖底扇发育于低位体系域(LST)沉积晚期,凹陷南部斜坡发育的呈裙带状分布的辫状河三角洲沉积为湖底扇的形成提供了物源。福山凹陷流二段在低位体系域沉积早期,三角洲分布范围相对较小,湖底扇不发育;低位体系域沉积晚期,随着进积作用的增强,辫状河三角洲前缘推进范围达到最大,为湖底扇体的发育提供物源,在断裂坡折带下

部发育扇体;进入湖扩体系域(EST)沉积期,随着湖平面上升,沉积物源区逐渐后退,物源供给量随之减少,浊积水道逐渐失去运送沉积物的能力,湖底扇也逐渐停止发育;高位体系域(HST)沉积期,福山凹陷发育大套的暗色泥岩,并成为优质烃源岩以及下覆地层的区域性盖层。

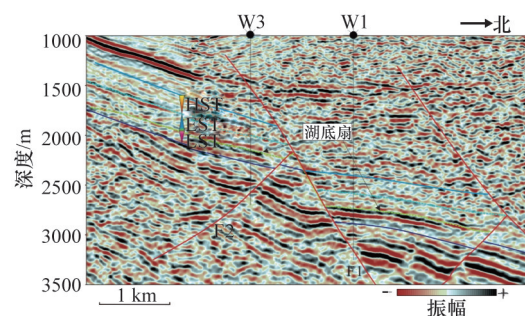


图6 流二段湖底扇地震反射特征及层序解释

Fig. 6 Seismic reflection characteristics and sequence interpretation of sublacustrine fan in the second member of Liushagang formation

湖底扇体形成过程中,为保持持续的紊流,需要有比较稳定的能量补给,即要有适当的坡度。足够的坡度是造成沉积物不稳定和易触发而发生运动的必要条件。一般认为,这



- lake of Songliao Depressive Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(5): 6-10.
- [11] 张鹏飞, 陈世悦, 张明军, 等. 沾化凹陷东营组三段储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(3): 323-327.  
Zhang Pengfei, Chen Shiyue, Zhang Mingjun, et al. Reservoir characteristics of member 3 of Dongying formation in Zhanhua Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(3): 323-327.
- [12] 吕炳全, 全松青. 北部湾下第三系中的浊积岩[J]. *地质科学*, 1982, 7(3): 333-336.  
Lü Bingquan, Quan Songqing. A discovery of Paleogene turbidites in the Beibu gulf[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1982, 7(3): 333-336
- [13] 刘震, 谭卓, 蔡东升, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组岩性圈闭形成条件[J]. *现代地质*, 2008, 22(2): 238-246.  
Liu Zhen, Tan Zhuo, Cai Dongsheng, et al. Analysis on forming conditions of lithologic trap in Liushagang formation, Weixinan Depression of BBW Basin[J]. *Geoscience*, 2008, 22(2): 238-246.
- [14] 刘志峰, 赵志刚, 李建红. 北部湾盆地海中凹陷流三段沉积相研究及其意义[J]. *海洋石油*, 2009, 29(3): 14-18.  
Liu Zhifeng, Zhao Zhigang, Li Jianhong. The sedimentary facies analysis and its significance in Haizhong Ssag, Beibuwan Basin, the South China Sea[J]. *Offshore Oil*, 2009, 29(3): 14-18.
- [15] 刘丽军, 佟彦明, 纪云龙, 等. 北部湾盆地福山凹陷流沙港组湖底扇沉积特征及发育背景[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(2): 110-115.  
Liu Lijun, Tong Yanming, Ji Yunlong, et al. Sedimentary characteristics and developing background of the sublacustrine fan in the Liushagang formation of the Fushan Depression, the Beibuwan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(2): 110-115.
- [16] 刘丽军, 莫申国, 佟彦明. 北部湾盆地福山凹陷古近纪湖底扇沉积演化及模式探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(2): 138-142.  
Liu Lijun, Mo Shenguo, Tong Yanming. A discussion on the Palaeogene sublacustrine fan of Fushan depression in Beibuwan Basin, northern South China Sea[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2003, 22(2): 138-142.
- [17] 康西栋, 赵文翠, 潘治贵, 等. 北部湾盆地层序地层格架及其内部构成[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 1994(4): 493-502.  
Kang Xidong, Zhao Wencui, Pan Zhigui, et al. Study on architecture of sequence stratigraphic framework of Beibuwan Basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1994(4): 493-502.
- [18] 石彦民, 刘菊, 张梅珠, 等. 海南福山凹陷油气勘探实践与认识[J]. *华南地震*, 2007, 27(3): 57-67.  
Shi Yanmin, Liu Ju, Zhang Meizhu, et al. Experience and understand in oil and gas exploration in Fushan Sag, Hainan province[J]. *South China Journal of Seismology*, 2007, 27(3): 57-67.
- [19] 罗群, 庞雄奇. 海南福山凹陷顺向和反向断裂控藏机理及油气聚集模式[J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 363-367.  
Luo Qun, Pang Xiongqi. Reservoir controlling mechanism and petroleum accumulation model for consequent fault and antithetic fault in Fushan depression of Hainan area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 363-367.
- [20] 于俊吉, 罗群, 张多军, 等. 北部湾盆地海南福山凹陷断裂特征及其对油气成藏的控制作用[J]. *石油实验地质*, 2004, 26(3): 241-248.  
Yu Junji, Luo Qun, Zhang Duoju, et al. Characteristics of faults in the Fushan depression of Hainan, the Beibuwan basin and their controlling roles to hydrocarbon pool-formation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26(3): 241-248.
- [21] 林正良, 王华, 李红敬, 等. 北部湾盆地福山凹陷古近系双层结构形成机制[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2015, 40(1): 169-178.  
Lin Zhengliang, Wang Hua, Li Hongjing, et al. Genetic mechanism of double-layer structure in Paleogene of Fushan Sag, Beibu Gulf Basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(1): 169-178.
- [22] 袁野, 刘洋. 地震属性优化与预测新进展[J]. *勘探地球物理进展*, 2010, 33(4): 229-238.  
Yuan Ye, Liu Yang. New progress in seismic attribute optimizing and predicting[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2010, 33(4): 229-238.
- [23] 刘力辉, 李建海, 刘玉霞. 地震物相分析方法与“甜点”预测[J]. *石油物探*, 2013, 52(4): 432-437.  
Liu Lihui, Li Jianhai, Liu Yuxia. Seismic reservoir property facies analysis and sweet spot prediction[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(4): 432-437.
- [24] 冯有良. 断陷湖盆沟谷及构造坡折对砂体的控制作用[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 13-16.  
Feng Youliang. Control of valley and tectonic slopebreak zone on sand bodies in rift-subsidence basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(1): 13-16.
- [25] 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术—高精度地震探测基础上的层序地层学研究[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2002, 27(5): 592-598.  
Li Sitian, Pan Yuanlin, Lu Yongchao, et al. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: Sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(5): 592-598.
- [26] Watts A B, Ryan W B F. Flexure of the lithosphere and continental margin basins[J]. *Tectonophysics*, 1976, 36(24): 25-44.

(责任编辑 韩星明)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。