

文章编号:1000-0550(2011)04-0689-06

# 琼东南盆地中央峡谷深水天然堤—溢岸沉积<sup>①</sup>

李冬<sup>1,2</sup> 王英民<sup>1,2</sup> 王永凤<sup>1,2</sup> 徐强<sup>3</sup> 王杰平<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学地球科学学院 北京 102249; 2. 油气探测国家重点实验室 北京 102249;

3. 中国海洋石油总公司油气研究中心 北京 100027; 4. 大庆油田有限责任公司采油一厂一矿 黑龙江大庆 163163)

**摘要** 中央峡谷位于琼东南盆地深水区,发育面积较广,内部天然堤—溢岸沉积发育。深水天然堤—溢岸可作为良好的油气储集体,深受油气工业界的关注。为了指导中央峡谷的油气勘探,利用三维地震资料,结合地震剖面以及均方根振幅属性对中央峡谷内部天然堤—溢岸沉积的形态和控制因素进行了分析,总结了天然堤—溢岸的沉积模式,并对其油气勘探前景进行了分析。研究表明:天然堤—溢岸沉积在剖面上呈“海鸥翼”状,平面上位于水道充填的两侧并平行于水道的延伸方向;古地貌低位置控制了天然堤—溢岸沉积在峡谷中的位置,并在古地貌起伏变化区提供了池状可容纳空间,为天然堤—溢岸沉积提供了沉积场所,而在以倾斜为主的地区没有可容纳空间,天然堤—溢岸沉积不发育;天然堤—溢岸沉积可形成岩性圈,如闭配合断层、“气烟囱”等可形成油气聚集,具有良好的勘探前景。

**关键词** 天然堤—溢岸 古地貌 琼东南盆地 中央峡谷

**第一作者简介** 李冬 男 1982年出生 沉积学和地震沉积学 E-mail: lidong\_03@163.com

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

在我国随着陆地和浅水区油气的发现频率和发现量的逐渐降低,深水油气勘探越来越受到了重视。深水天然堤—溢岸作为深水区典型的特殊地质体,因其可以作为良好的油气储集体并且具有良好的油气勘探价值,使得水道—堤坝体系成为油气工业界关注的热点<sup>[1~3]</sup>。我国经过近些年的研究发现,在琼东南盆地晚更新世以来发育东西向展布的中央海底峡谷,整体呈“S”型NE向展布,分布面积达50 000 km<sup>2</sup>,西起莺歌海盆地,经琼东南盆地中央拗陷带,向东进入西沙海槽<sup>[4~6]</sup>。2009年于中央峡谷区中部的近1 600 km<sup>2</sup>的高分辨率三维地震的采集和处理为认识中央峡谷内部沉积特征奠定了基础;但由于深水钻探风险大投资高,目前在该工区还没有钻井资料,仅在莺歌海—琼东南盆地结合部有少量钻井(YC35、LD30),但无岩芯,见图1。故本文以三维地震资料为基础,通过对峡谷内部层位的精细解释以及地震属性的提取对中央峡谷内部作为主要储集体的天然堤—溢岸沉积进行了研究,并对其勘探前景进行了分析,为琼东南盆地中央峡谷区油气勘探提供了基础。

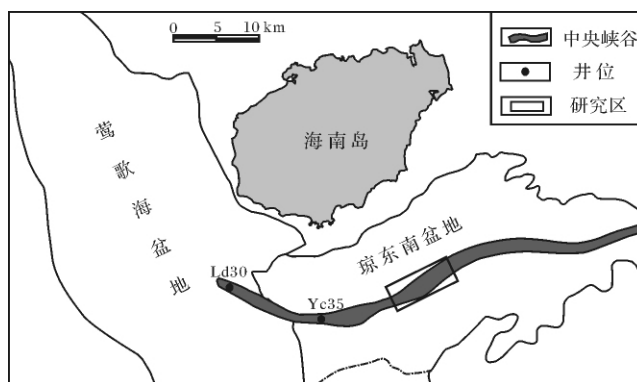


图1 研究区位置图

Fig. 1 The position of the studied area

## 1 地质背景与研究现状

### 1.1 地质背景

琼东南盆地发育地层具有典型的双层结构,可划分为拗陷期和断陷期上、下2个巨层序。下部构造层(断陷期沉积):包括始新统(距今53.3~32 Ma)、崖城组(距今32~29.3 Ma)和陵水组(距今29.3~23.3 Ma)。上部构造层(拗陷期沉积):包括三亚组(距今23.3~15.5 Ma)、梅山组(距今15.5~10.5 Ma)、黄流组(距今10.5~5.5 Ma)和莺歌海组(距今5.5~

<sup>①</sup>国家重点基础研究发展计划项目(编号:2009CB219407)和国家自然科学基金项目(批准号:40572067)资助。  
收稿日期:2010-11-05;收修稿日期:2011-01-15

1.9 Ma)。其中发育四个意义重大的不整合面: Tg 为基底与沉积层的分界; S60(21 Ma), 为断陷期与拗陷期的分界; S40(10.5 Ma), 此后陆架陆坡体系开始发育, 出现深水沉积; S30(5.5 Ma), 此后陆坡坡度明显增加, 陆坡迅速向南前积, 同时 5.5 Ma 印度板块的整体北移, 使哀牢山—红河-1 号断裂转变为右旋走滑, 造成了滇西高原抬升, 并阻止了部分河流的南流, 使大渡河、金沙江等先后转向东流, 汇入长江, 红河发生袭夺。中央峡谷自黄流组开始发育, 位于陆坡区, 为深水重力流沉积。研究区内具三期下切侵蚀, 分别对应 S40(10.5 Ma)、S30(5.5 Ma)、S29(4.2 Ma)。

## 1.2 深水天然堤—溢岸沉积

深水天然堤与溢岸沉积是沉积物重力流侧向延伸越过水道(channel)边缘, 并沉积于水道堤岸之上形成的, 由沉积物重力流中细粒的沉积物组成, 包括: 泥、粉砂、薄层砂和砂岩。当沉积物重力流溢出堤岸时, 由于流速骤减, 大量的粗粒沉积物在天然堤近端发生卸载、沉积较厚, 而较细的沉积物在远端沉积并且较薄, 于是形成了楔形(wedge-shaped)沉积体。

天然堤—溢岸体系(levee-overbank)主要包括天然堤近端(proximal)与远端(distal)、滑块(slide)、决口扇(crevasse splays)和沉积物波(sediment waves)<sup>[7-11]</sup>。其中还发育一种与决口扇沉积很类似的溢岸扇(overbank splays), 其与决口扇的区别主要在于发育的规模和是否与天然堤沉积相伴生, 溢岸扇不与天然堤沉积相伴生。在深水体系中, 天然堤与溢岸区虽然由泥、粉砂、薄层砂和砂岩(薄层 thin beds)组成, 但这些沉积是由薄层状的平行—波状层理的砂岩组成, 可具有极好的孔隙度和渗透率, 是深水环境中良好的储集体。在上述的天然堤与溢岸体系中, 天然堤近端和扇体(包括决口扇和溢岸扇)沉积均可形成良好的储层<sup>[12]</sup>。

在圈闭类型研究方面, 由于薄层的侧向楔形减薄尖灭以及和泥岩构成薄互层, 容易形成理想的岩性圈闭, 这种圈闭在砂泥混合以及泥岩为主的沉积体系中是比较常见的(Richards and Bowman, 1998)。当上覆地层的差异压实产生局部背斜时也可形成背斜圈闭, 或构造—岩性复合圈闭, 但这种圈闭的规模一般较小<sup>[12]</sup>。

## 2 中央峡谷内深水天然堤—溢岸沉积特征

利用 2009 年于中央峡谷中部采集处理的三维地

震资料, 通过地震层位的精细解释和属性分析, 对中央峡谷天然堤—溢岸沉积的沉积特征进行了研究, 并总结了天然堤—溢岸沉积的沉积模式及控制因素。

### 2.1 地震相特征

图 2 所示剖面为垂直峡谷走向的地震剖面, 剖面中水道表现为下切侵蚀地震相, 内部充填物表现为连续性差、振幅能量低变化快的特点; 天然堤—溢岸沉积由于沉积物溢出水道, 流体能量变为稳定, 粗粒物质在近端堆积, 细粒物质沉积于远端, 形成连续性较好、振幅能量强、具楔状外形的地震反射特征, 与水道构成“海鸥翼”(gull-wing)的外形, 其分布范围受控于水道规模、沉积物重力流的体积和载荷能力以及可容纳空间的大小。地震反射振幅强弱主要反映了波阻抗差异的大小, 波阻抗差越大, 地震反射越强, 因此在砂泥互层时容易产生强反射, 而在单一的岩性时地震反射表现为无反射或弱反射的特征, 据此在深水环境泥质沉积为主的背景下, 强振幅反射往往代表砂岩沉积。中央峡谷区位于深水区, 其内部的充填应该以泥质沉积物为主, 在这种条件下, 包含粗粒沉积物的天然堤—溢岸夹杂其中, 便会在水道充填两侧形成强反射。

结合区域地质背景与地震反射特征, 可将中央峡谷中部划分为三个三级层序, 层序底界分别为 10.5 Ma、5.5 Ma、4.2 Ma。3.6 Ma 之后转变为峡谷充填沉积。层序一(10.5~5.5 Ma): 10.5 Ma 时期最大海退, 滨线靠近莺歌海盆地南部, 同时青藏高原东南部遭受强烈的剥蚀, 通过红河水系向莺歌海盆地提供巨量的沉积物, 此时沉积物可穿越莺歌海盆地, 在琼东南盆地深水区形成强烈的下切侵蚀不整合面(S40), 下切厚度可达 400 m 左右, 层序内部充填以水道—堤岸沉积为主, 至少发育六期。层序二(5.5~4.2 Ma): 5.5 Ma 达到最大海侵, 滨线迁移莺歌海盆地北部, 同时红河断裂带发生右旋走滑运动, 虽然青藏高原东南部发生强烈的剥蚀, 但红河发生袭夺, 红河向莺歌海盆地的供给能力有所下降, 沉积物经过长距离搬运后在琼东南盆地深水区形成下切侵蚀不整合面(S30), 下切能力有所下降, 下切厚度可达 200 m 左右; 层序内部以弱振幅、连续性好、中频率地震反射充填为主, 反映了泥质沉积占优势, 仅在层序底部发育一期以砂质为主的水道—堤岸沉积, 整体上为正旋回特征。层序三(4.2~3.6 Ma): 4.2 Ma 海平面开始下降, 滨线向莺歌海盆地南部迁移, 沉积物在琼东南盆地深水区形成不整合面(S29), 下切厚度可达 200 m 左右, 内部地震反射特征为: 层序底部发育两期水道

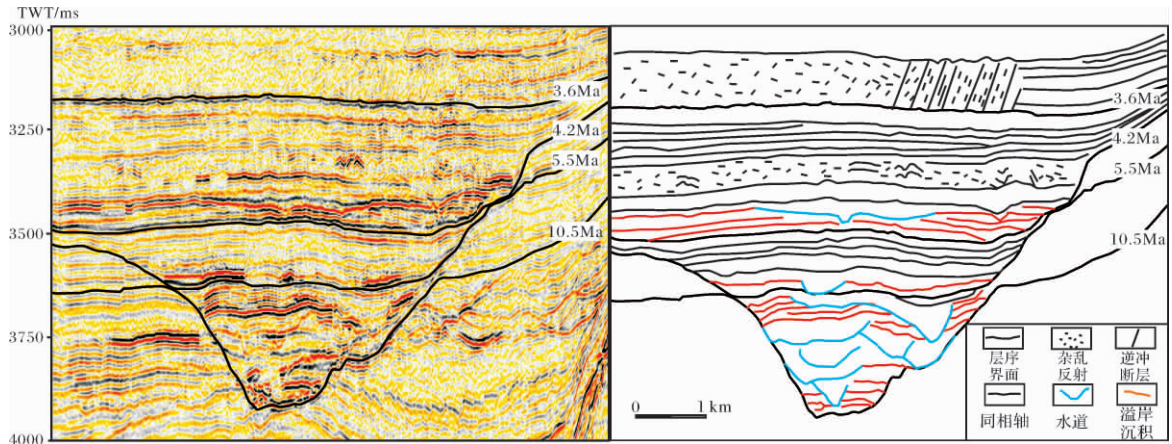


图 2 天然堤—溢岸沉积剖面特征

Fig. 2 The profile characteristics of levee-overbank

—堤岸沉积,以强振幅、连续性好、中频率反射砂质沉积为主,向上演变为中—弱振幅、连续性中、中频率反射砂泥岩—泥岩沉积为主,整体上为正旋回特征。3.6 Ma之后转变为弱振幅、杂乱反射的 MTDS 泥质充填。

### 2.2 属性分析及平面展布

天然堤—溢岸沉积平面上往往位于水道两侧平行于水道发育<sup>[13~16]</sup>。图 3 为 5.5 Ma 时期沿层均方

根振幅属性的提取结果:在平面上,弱反射背景为深海或半深海泥质沉积,在峡谷中间存在一条低弯度的水道充填沉积,表现为弱振幅反射;天然堤—溢岸沉积位于水道充填两侧平行于水道发育,为强振幅反射,并存在振幅强度由近岸向远岸变低的趋势,说明了天然堤—溢岸沉积由近岸向远岸沉积物粒度逐渐变细;位于天然堤外侧呈扇状展布的为决口扇沉积,其往往集中发育在水道弯曲处,表现为中—强振幅,

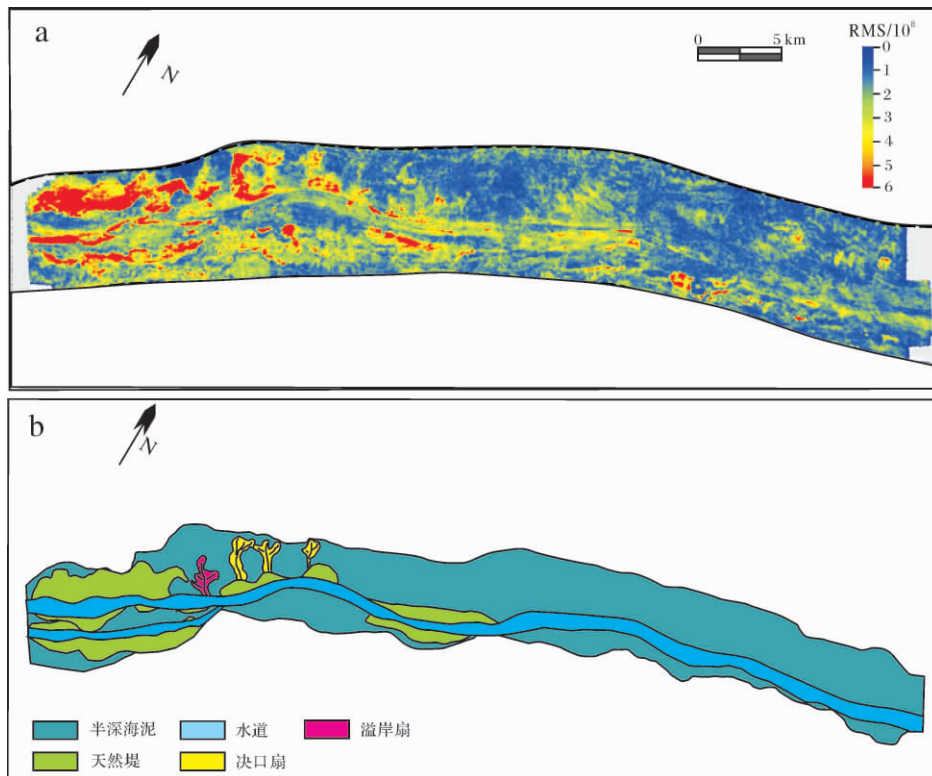


图 3 5.5 Ma 均方根振幅属性图(a)与沉积相图(b)

Fig. 3 RMS attribute map and sedimentary facies of 5.5 Ma

可成为很好的储集层;另外,在水道充填一侧还存在一个扇形强振幅反射,不与天然堤相邻,将其定为溢岸扇。通过上述分析可见天然堤—溢岸沉积均表现为强振幅、中—强振幅反射,应以砂为主,通过计算单砂体面积可达 17 km<sup>2</sup>。

### 2.3 沉积模式及控制因素分析

从图 3 可以看出:强振幅的天然堤—溢岸沉积具有明显的分带性,即在工区西部较发育,在东部不发育,总结其控制因素和分布规律有助于预测中央峡谷内砂体的分布,指导油气勘探。层序地层学强调,控制沉积物沉积的因素主要有海平面变化、沉积物供给、构造和气候四种因素。本文对天然堤—溢岸沉积研究后认为,控制天然堤—溢岸沉积的主要因素有物源和古地貌。具体表现为:

物源控制了天然堤—溢岸沉积的粒度:位于莺歌海—琼东南盆地结合部的 LD30 与 YC35 两口钻井已经证实了该中央峡谷形成于富砂的背景,可断定天然堤—溢岸沉积形成于富砂背景。

古地貌控制了天然堤—溢岸沉积的发育位置:如图 4a 所示,5.5 Ma 时期峡谷在西部存在两个池状洼地,提供了两个池状可容纳空间,东部以倾斜为主,整体为西高东低;将沉积相图与古地貌图相叠合,见图 4b,可发现天然堤—溢岸沉积集中发育于西部的两个池状可容纳空间内,而位于东部的倾斜背景下,主要为水道充填沉积。

当流体沿着斜坡流动时,往往随着流动的距离的增加,流体速度逐渐增加、侵蚀能力与负载能力增强;当坡度突然变缓时,流体流速骤减,沉积物被卸载,发生沉积。根据这一原理可推断中央峡谷内部沉积过

程如下,见图 4c:

沉积物重力流在沿着中央峡谷自西向东流动的过程中,在工区西部存在两个池状可容纳空间,地形起伏变化复杂,在池状可容纳空间内部坡度发生明显的降低,流体流速骤减,沉积物在该处被卸载,形成天然堤—溢岸沉积;当沉积物重力流进入工区东部时,地形以倾斜为主,水道内流体速度不但无明显的骤减,反而随着流体的向东前进速度不断增加,流体的侵蚀能力增强,水道以下切侵蚀为主,沉积物发生过路现象,不利于天然堤—溢岸沉积的发育;最终形成西部天然堤—溢岸沉积发育,东部不发育的格局。

## 3 勘探前景分析

薄层的天然堤油藏在世界上已有很多成功钻探的例子,并越来越受到世界深水油气勘探的重视<sup>[14-16]</sup>。中央峡谷位于琼东南盆地深水区,发育面积近 50 000 km<sup>2</sup>,从三维地震剖面上看至少发育 8 期天然堤—溢岸沉积充填,天然堤—溢岸沉积单砂体面积可达 17 km<sup>2</sup>,与深海或半深海泥质充填相互叠至,易于形成各种岩性圈闭,如配合适当的低幅背斜或断层也可形成构造或构造—岩性圈闭。但是,中央峡谷发育时期相对较晚,层位相对较浅,烃源岩主要下部的崖城组和陵水组烃源岩,层位较深,故油气运移问题便成为了中央峡谷内成藏的关键,而琼东南盆地大量发育的气烟囱、断层和底辟可作为油气运移通道<sup>[6]</sup>。综上所述,在中央峡谷内部,构造起伏变化复杂并与断层、气烟囱或底辟构造相配合的部位为有利的勘探区域,其中强振幅的天然堤—溢岸沉积为有利的目标,中央峡谷具有良好的勘探前景。

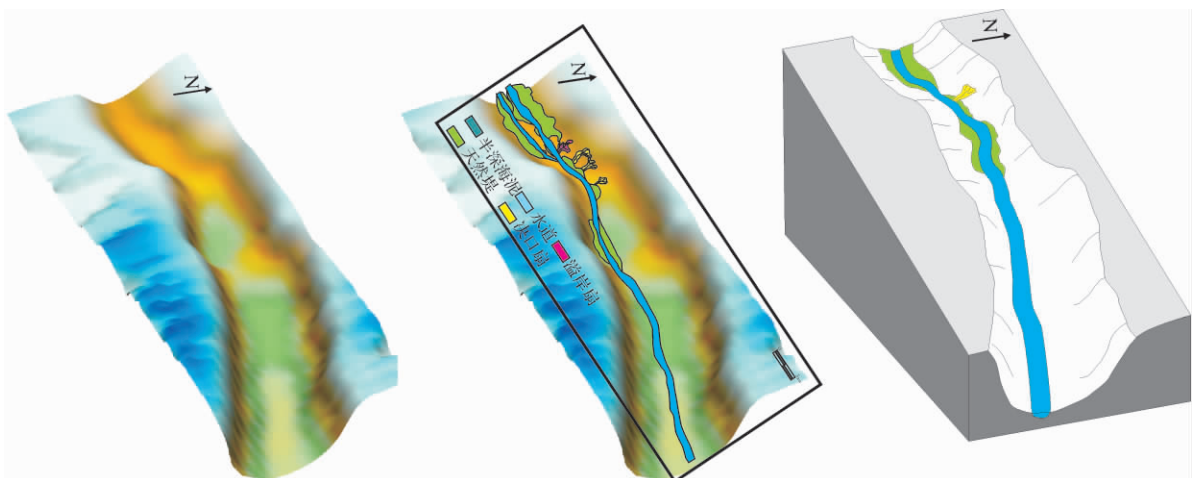


图 4 天然堤—溢岸沉积模式  
a. 5.5 Ma 时期古地貌 b. 5.5 Ma 古地貌与沉积相叠合图 c. 沉积模式图  
Fig. 4 Sedimentary model of levee-overbank

## 4 结论

(1) 琼东南盆地中央峡谷内部至少发育8期天然堤—溢岸沉积,地震反射表现为强振幅、中频率、中—好连续性反射,在横向剖面上呈楔状外形,与下切侵蚀水道地震相构成“海鸥翼”外形,在平面上沿着水道发育,与水道延伸方向平行,单砂体面积可达17 km<sup>2</sup>。

(2) 天然堤—溢岸沉积在中央峡谷内的发育主要受物源和古地貌的控制。物源决定了天然堤—溢岸沉积的粒度是富砂还是富泥;古地貌控制了水道在峡谷中的发育位置,在古地貌起伏变化复杂地区存在池状可容纳空间,有利于天然堤—溢岸发育;在古地貌以倾斜为主的地区,不存在可容纳空间,水道以下切侵蚀为主,沉积物发生过路,天然堤—溢岸沉积不发育。

(3) 琼东南盆地中央峡谷内部天然堤—溢岸沉积期次多(至少8期),单砂体面积大(可达17 km<sup>2</sup>),可形成良好的岩性圈闭,并配合断层和油烟窗等油气输导通道可形成油气聚集,具有良好的油气勘探前景。

### 参考文献(References)

- 1 Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, *et al.* Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 649-676
- 2 Kolla V, Bourges P, Urrity J M, *et al.* Evolution of deepwater Tertiary sinuous channels offshore, Angola ( West Africa) and implications to reservoir architecture [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85: 1373-1405
- 3 Chapin M A, Davies P, Gibson J L, *et al.* Reservoir architecture of turbidite sheet sandstones in laterally extensive outcrops, Ross Formation, western Ireland [C] // Weimer P, Bouma A H, Perkins B F, eds. *Submarine Fans and Turbidite Systems*. Gulf Coast Section SEPM Foundation 15th. Annual Research Conference, 1994: 53-68
- 4 袁圣强. 南海北部陆坡区深水水道沉积体系研究[D]. 博士学位论文. 中国科学院海洋研究所, 2009: 46-65 [Yuan Shengqiang. Sedimentry system of deepwater channel, the slope area of Northern South China Sea [D]. Doctoral dissertation. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2009: 46-65]
- 5 苏明, 李俊良, 姜涛, 等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 85-93 [Su Ming; Li Junliang; Jiang Tao, *et al.* Morphological features and formation mechanism of central canyon in the Qiongdongnan Basin, northern south China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 85-93]
- 6 林畅松, 刘景彦, 蔡世祥, 等. 莺—琼盆地大型下切谷和海底重力流体体系的沉积构成和发育背景 [J]. *科学通报*, 2001, 46(1): 69-72 [Lin Chansong, Liu Jingyan, Cai Shixiang, *et al.* Sedimentation and evolution background old large incised channel and submarine gravity flow system in Ying-Qiong basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(1): 69-72]
- 7 DeVries M B, Lindholm R M. Internal architecture of a channel-levee complex, Cerro Toro Formation, southern Chile [C] // Weimer A H Bouma, Perkins B F, eds. *Submarine Fans and Turbidite Systems*. Gulf Coast Section SEPM Foundation 15th Annual Research Conference, 1994: 105-114
- 8 Beaubouef R T. Deep-water leveed-channel complexes of the Cerro Toro formation, Upper Cretaceous, southern Chile [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88: 1471-1500
- 9 Arnott R W C. Stratigraphic architecture and depositional evolution of a levee to proximal crevasse splay ( HARP) to channel-fill succession, Neoproterozoic Windemere Supergroup, British Columbia, Canada [C] // Nilsen T, Shew R D, Steffens G S, *et al.*, eds. *Atlas of Deepwater Outcrops*. AAPG Studies in Geology, 2006
- 10 Abdulah K, Doud K, Cook M, *et al.* Reservoir facies within the deepwater sandstones of the Falcon field—western Gulf of Mexico [C]. AAPG Annual Convention with abstracts, 2004: 4
- 11 Normark W R, Damuth J E. Sedimentary facies and associated elements of the Amazon Fan [C] // Flood R D, Piper D J W, Klaus A, *et al.*, eds. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*. Scientific Results, 1997, 155: 611-651
- 12 Weimer P, Slatt R M. *Petroleum Geology of Deepwater Settings* [M]. AAPG Memoir, 2006
- 13 Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. Deep-water and fluvial sinuous channels—characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation [J]. *Petroleum Geology*, 2007, 24(6-9): 388-405
- 14 Kendrick J. Turbidite reservoir architecture in the Gulf of Mexico—insights from field development [C] // Weimer P, Slatt R M, Coleman J L, *et al.*, eds. *Global deep-water reservoirs: Gulf Coast Section – SEPM Foundation 20th Annual Bob F. Perkins Research Conference*, 2000: 450-468
- 15 Craig P A, Bourgeois T J, Malik Z A, *et al.* Planning, evaluation, and performance of horizontal wells at Ram Powell field, deep-water Gulf of Mexico [C] // Carr T R, Mason E P, Feazel C T., eds. *Horizontal wells: Focus on the Eeservoir*. AAPG Methods in Exploration Series, 2003, 14: 95-112
- 16 Clemenceau G R, Colbert J, Edens D. Production results from levee-overbank turbidite sands at Ram/Powell Field, deepwater Gulf of Mexico [C] // Weimer P, Slatt R M, Coleman J L, *et al.*, eds. *Global Deep-Water Reservoirs*. Gulf Coast Section-SEPM Foundation 20th Annual Bob F. Perkins Research Conference, 2000: 241-251

## The Sedimentary and Foreground of Prospect for Levee-Overbank in Central Canyon , Qiongdongnan Basin

LI Dong<sup>1 2</sup> WANG Ying-min<sup>1 2</sup> WANG Yong-feng<sup>1 2</sup> XU Qiang<sup>3</sup> WANG Jie-ping<sup>4</sup>

(1. College of Geosciences , China University of Petroleum , Beijing 102249;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting , Beijing 102249;

3. The Research Center of CNOOC , Beijing 100027;

4. Daqing Oil Field Ltd. First Oil Production Factory , Daqing , Heilongjiang 163162)

**Abstract** In our country as the lower frequency of land and shallow water exploration for oil and gas , deep water oil and gas exploration is playing more important role. Big reservoir body becomes the target of deepwater oil and gas exploration , because the deepwater oil and gas exploration has some characteristics , such as greater risks and higher investment. Central canyon , which comes from Yinggehai basin and pass through Qiongdongnan basin and enter into the xisha trough , lies in the deepwater area of Qiongdongnan basin and is mainly formed at 10.5 Ma , 5.5 Ma and 4.2 Ma. With an area of more than 50 000 km<sup>2</sup> , central canyon can be a target of deepwater oil and gas exploration.

In the central canyon , levee-overbank sediments are abundant. Deepwater levee-overbank has received considerable attention in the petroleum industry because of having good reservoirs. In order to conduct the prospect for central canyon , this article has analyzed the shape and control factors of levee-overbank deposited in the central canyon by using 3D seismic profile and RMS attribute. After that , the sediment model is summed up and the foreground of prospect is analyzed. The result has shown below:

1. levee-overbank sediments in the central canyon developed at least eight times , and have many micro facies such as crevasse splay , overflow splay and levee. In the cross seismic profiles , levee-overbank sediments represent wedge shape with strong amplitude , intermediate frequency and mid-good continuity , and combining with channel has shown "gull-wing" shape. In the plane , the overall shape of levee-overbank sediments is elongate and trends roughly parallel to the channel. Its area of single sand body could reach 17 km<sup>2</sup>.

2. In the central canyon , levee-overbank sediments is mainly controlled by province and ancient physiognomy. The grain size whether sand-rich or mud-rich is mainly decided by province. The position is mainly decided by ancient physiognomy. The pond accommodate space is afforded for levee-overbank to be deposited in the area where has fluctuation variation. On the opposite , in the incline area , there is no accommodation and levee-overbank cannot deposit.

3. Levee-overbank sediments which has many deposition time and large single sand body can be ideal stratigraphic traps and it could accumulate oil and gas if it cooperate with fault or "gas chimney". Levee-overbank sediments have well foreground for prospect.

**Key words** levee-overbank; ancient physiognomy; Qiongdongnan Basin; central canyon