

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2015.01091

珠江口盆地白云凹陷深水水道内部结构样式

乔博¹, 张昌民¹, 李少华¹, 杜家元², 张忠涛²

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 荆州 434023; 2. 中国海洋石油总公司 深圳分公司, 广州 510240)

摘要:在珠江口盆地白云凹陷中发育有深水水道, 以水道复合体为主, 单一水道较少。在水道复合体的水道单体内识别出侵蚀基底、底部滞留沉积、滑塌体和内侧天然堤等内部结构要素。复合水道间的内部样式分为叠加型和切割型两种, 叠加型反映多期水道的垂向加积, 切割型反映多个水道相互侵蚀切割。水道内部以侧积、加积、侧积和加积3种方式进行充填。水道的演化过程经历了最初的侵蚀和随后的3个充填阶段。不同的水道内部结构样式对应于不同的充填阶段。底部滞留和滑塌体为充填阶段1的产物; 内侧天然堤主要是在充填阶段2形成; 在充填阶段3中复合水道发育, 内部充填以加积方式为主, 侧积也常见。水道内部建筑结构的精细分析有助于推动对水道的整体研究, 对于认识水道储层的建筑结构也有重要意义。

关键词:白云凹陷、深水水道、建筑结构要素、充填阶段

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2015)01-0091-08

深水水道体系是深海环境中的重要地貌要素, 它作为运移通道将沉积物从大陆坡运移到深海盆地中去^[1-3]。对深水水道的研究主要集中在水道外部形态和水道内部结构两个方面。国外学者对水道内部结构进行了深入的研究, 在水道内部识别了多种沉积建筑结构^[4-11]。Deptuck(2003)通过尼日尔三角洲斜坡和印度扇上水道进行研究, 提出水道内包含四大建筑结构要素, 分别为侵蚀通道、河道轴部沉积、外侧天然堤和内侧天然堤。Mayall等(2006)通过地震和露头资料对浊积水道内部结构进行研究, 在水道中包含基底滞留、滑塌和碎屑流、高砂地比堆积河道、低砂地比河道天然堤沉积4种相。Tripsanas等(2006)在对墨西哥湾峡谷进行研究时, 发现在斜坡上发育有峡谷内和溢岸沉积两种。Schwarz和Arnott(2007)在加拿大南部边缘的斜坡水道复合体中也识别了水道复合体充填、碎屑流/滑塌单元和侧向延伸的富含泥质单元3个组成部分。Gee等(2007)在安哥拉大陆边缘水道的地貌进行研究, 识别出河道轴部沉积、内部河道充填沉积、天然堤3个沉积要素。Babonneau等(2010)对刚果浊积水道内部河曲的建筑结构也进行详细的研究, 重点论述了

水道内阶地的发育, 既有单一阶地也有阶梯状阶地。Catterall等(2010)在尼罗河三角洲滨外Noor水道-天然堤复合体中识别出河道轴部、溢岸、废弃和前三三角洲4种环境。

目前, 国内对水道的研究主要集中南海的琼东南盆地、莺歌海盆地和珠江口盆地, 对水道外部形态和演化的刻画是研究的重点^[12-19]。林畅松、袁圣强、付彦辉等对琼东南盆地和莺歌海盆地的水道、峡谷形态和成因机制进行了大量的研究, 琼东南盆地的水道研究在国内的深水沉积研究中最深入^[12-16]。而李磊、刘军和李云等对珠江口盆地白云凹陷的水道形态和演化过程也进行了初步的研究^[17-19]。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于南海北部陆缘, 是受太平洋板块向中国大陆的俯冲挤压作用控制而在加里东、海西和燕山期褶皱基底上发育起来的以新生代沉积为主的张性盆地。白云凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷的深水区(图1), 北接番禺低隆起, 南至南部隆起, 西连云开低凸起, 东邻东沙隆起, 总体上为东西走向, 水深为200~2 000 m, 面积约为 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是珠江口盆地面积最大、沉积最厚的凹陷, 同时也是盆地的沉积和沉降中心。白云凹陷先后沉积了以湖相、三角洲—河流沼泽相为主的文昌组、恩平组陆相地层; 大规模的三角洲和滨岸相的珠海组地层; 珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系的海相地层(图2)。

基金项目: 国家“十二五”重大专项(编号: 2011ZX05023-002)

作者简介: 乔博(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为沉积学与层序地层学。E-mail: qb123124@126.com

通讯作者: 张昌民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学、储集层地质、开发地质的教学和科研。E-mail: zcm@yangtzeu.edu.cn

收稿日期: 2014-04-10; **改回日期:** 2014-05-20 张光威编辑

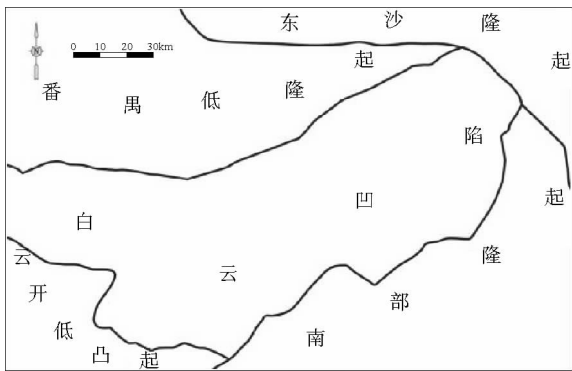


图 1 白云凹陷位置

Fig. 1 Location map of Baiyun Sag



图 2 珠江口盆地地层柱状简图

Fig. 2 Stratigraphic column of Pearl River Mouth Basin

在中新世时期,陆架坡折基本位于白云凹陷的北部,白云凹陷的大部分地区位于陆架坡折之下,在大陆架上发育有古珠江三角洲,它不断提供物源供给,使得在大陆坡上发育有大量的水道。本文对珠江口盆地白云凹陷韩江组和粤海组时期水道的内部结构特征进行详细地描述和刻画,并分析各内部单元的形成过程,以便对水道的整体演化过程有更为精确的认识。

2 深水水道内部结构

典型的深水水道—天然堤体系发育四大建筑结构要素,分别为侵蚀通道、轴部河道、内侧天然堤和外侧天然堤(图 3)。

侵蚀通道是水道中沉积物在搬运过程对下部地层进行侵蚀而形成的,指示了水道的基底。侵蚀通道与下部地层呈切割接触关系。

内侧天然堤类似于河道中的阶地。内侧天然堤的形成可能来自于不对称水道溢岸的内侧天然堤沉积的垂向加积,也可能是沿着河道边缘的内侧天然堤的滑塌和刻蚀。内侧天然堤的形状可能是四边形,也可能是不规则形状。

外侧天然堤是由浊流流经时期细粒为主的沉积物的溢岸而形成的。外侧天然堤的最初外部沉积几何形体是楔形的,从侵蚀通道轴部向外会聚。

轴部河道沉积是外侧天然堤脊之间的水道和水道充填沉积总和。轴部河道沉积在地震剖面上一般为高振幅,不断续。在主水道内也发育一些小水道,有侧积和加积的特征。

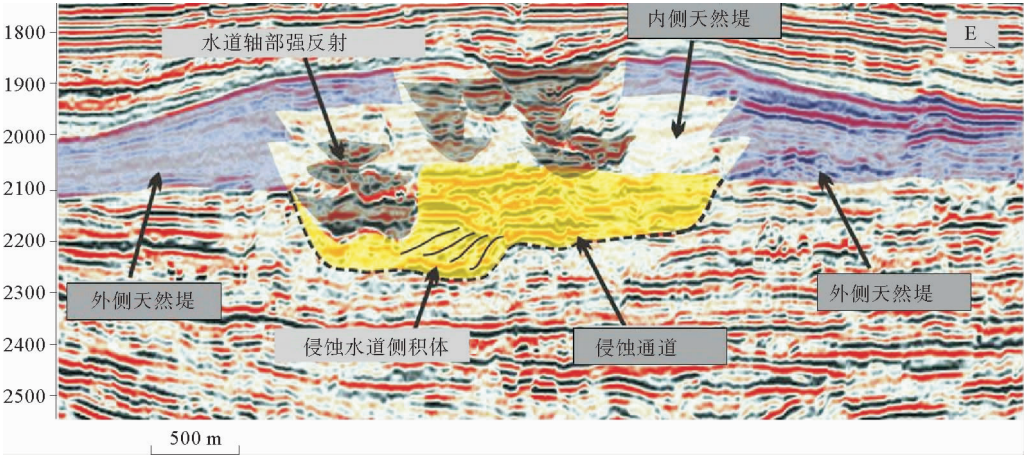


图 3 水道中 4 种主要建筑结构要素

Fig. 3 Four architecture elements in the submarine channel

3 白云凹陷水道内部结构类型

水道分为单一水道和水道复合体两种。在水道复合体中可见多个水道单体。多个水道之间的叠置关系多样^[20-21]。在珠江口盆地白云凹陷的水道体系中水道复合体发育,单一水道较少。在水道复合体中可见多个水道单体。在水道单体内部主要发育有侵蚀基底、底部滞留沉积、滑塌体和内侧天然堤。而复合水道之间表现为多期水道叠置和多个水道切割两种样式。水道的内部充填主要是以加积、侧积、先加积后侧积 3 种方式进行。

3.1 水道单体的内部结构

侵蚀基底指示了水道的底界面。它将水道和下部沉积地层区分开。侵蚀基底形态一般为曲线,有些平坦,有些则比较尖锐。

底部滞留沉积位于水道的基底,和河道中的底部滞留类似。它是在水道被流体切割过程中,流体以路过为主,将大多数沉积物向下游搬运,只在该处留下有限的沉积而形成的。它指示了水道的基底,在地震反射上表现为杂乱强反射(图 4A)。底部滞留沉积的发育反映当时的水动力条件很强,流体以侵蚀路过为主,沉积很少。

滑塌体一般位于水道的侧壁或基底。它是由于流体的侵蚀作用,使得水道侧壁的沉积物滑落下来,并予以搬运而沉积下来。其地震反射形态通常为弱到中等,不整合到杂乱反射。在几何形态上会发生旋转或者扭曲(图 4B)。滑塌体的产生也是水道中

沉积物的一个重要来源,会增强水道中的沉积流体。滑塌体也会造成水道的拓宽,改变水道的几何形态。

在白云凹陷一些水道中发育内侧天然堤(图 4C)。内侧天然堤形态近似于平行四边形,占据了前一期水道的部分河道,使得后一期水道的宽度降低,并迫使水道向东侧迁移。内侧天然堤是水道内部沉积的重要组成部分,它在水道的河曲处更为发育。

在白云凹陷的水道单体中,侵蚀基底、底部滞留沉积、滑塌体和内侧天然堤发育,但是外侧天然堤并不发育。并不是在所有水道中这些沉积要素均发育,不同水道之间也会有差异。

3.2 复合水道之间的内部样式

多期水道叠合是水道的一种特殊叠加方式。在图 5A 中发育有三期水道。在底部为第一期水道,其宽度最大,深度也最大;在第一期水道之上发育有第二期水道,其宽度减小,只占据了第一期水道的部分河道,深度也降低;在第二期水道之上的第三期水道宽度和深度下降最为明显,水道规模很小。这三期水道的轴部位置基本不变,垂向加积作用明显,反映当时的水动力条件稳定,以沉积作用为主。

在复合水道体中,多个水道的相互切割常见,反复的切割-充填是水道的一个重要特征,是水道中最为常见广泛和重要的过程,它使得水道的内部结构复杂化多样化^[6]。在图 5B 中,在主水道内部发育有 3 个次级水道。3 个次级水道之间相互切割,使得每个水道的形态都不够完整。多水道的相互切割反映了该时期水动力动荡,沉积物供给不稳定。

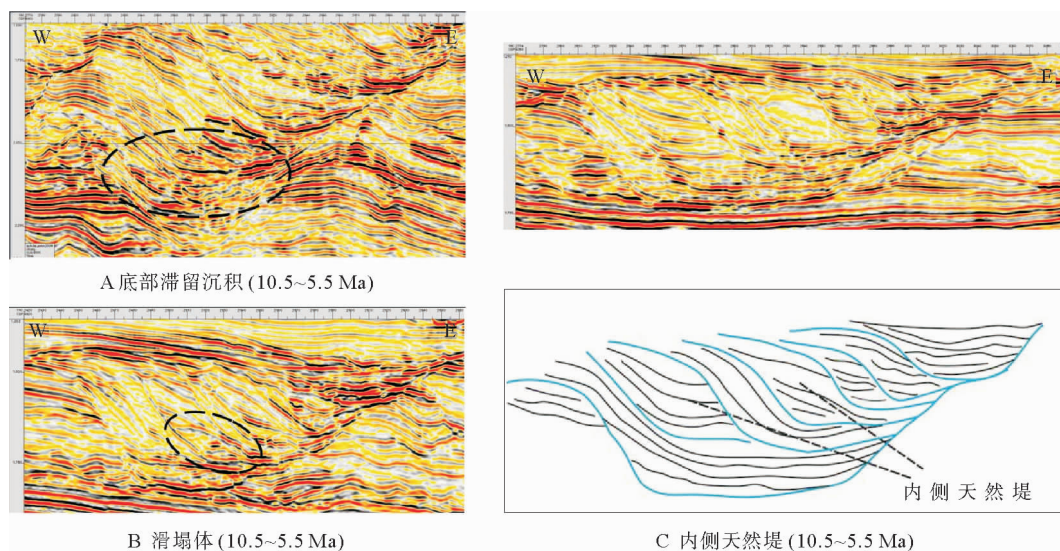


图 4 白云凹陷水道单体的内部结构单元

Fig. 4 Internal structure of a channel

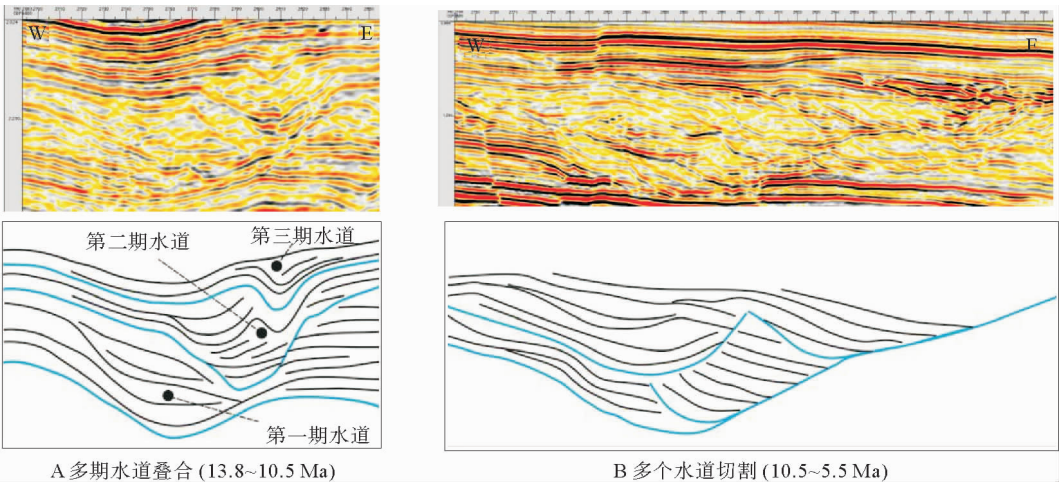


图 5 白云凹陷复合水道内部结构

Fig. 5 Internal structure of the channel complex

在白云凹陷中,垂向加积和相互切割是复合水道的两种重要叠加关系。叠加方式不同,复合水道内部结构差异也很大。

3.3 水道内部充填方式

水道内的充填方式有两种方式,分别为加积和侧积。此外,也会出现加积和侧积的组合,如先侧积

后加积。

加积方式在水道中最为常见,水道中堤岸沉积的发育是加积的最直接结果。在水道内部,加积表现为以垂直方式向上累积,内部反射轴基本平行,在水道横截面表现为同心圆的形式(图 6A)。当水道加积时,水道的位置基本恒定,并没有发生大的改变。

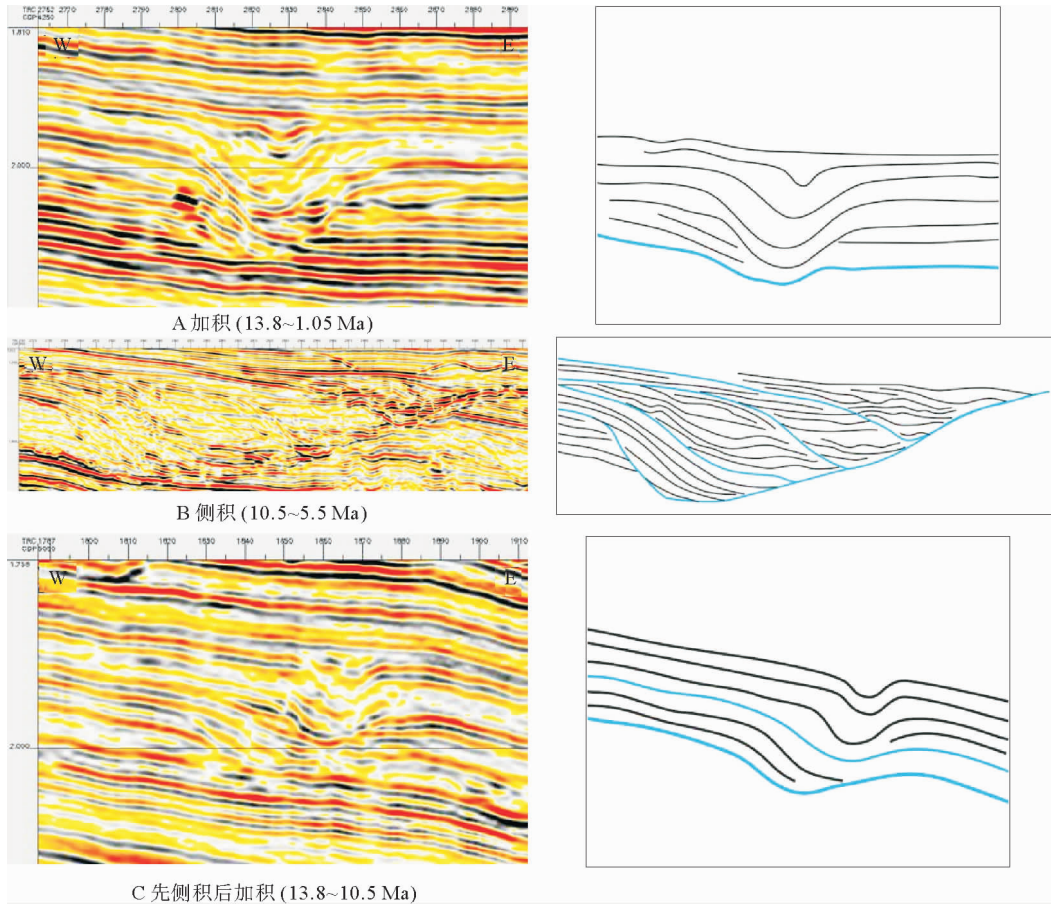


图 6 白云凹陷水道的内部充填方式

Fig. 6 Internal fill pattern of a channel

侧积在水道中也发育,会形成侧积体,类似于河流中的点坝沉积指示了河曲的侧向迁移^[22-23]。在图 6B 中可以看出该水道从西向东迁移,侧向迁移幅度很大,共经历了三期大的侧向迁移,最终在东侧形成了一个小水道。水道在侧积过程中,水道的位置也在逐渐迁移。

加积和侧积两种充填方式不仅仅会单独发育,也会形成加积和侧积的组合,如先侧积后加积。在图 6C 中可以看出该水道先向东侧向迁移再垂向加积。该水道整体规模不大,侧向迁移幅度较小,随后就直接加积。

加积、侧积以及加积和侧积的组合是水道内部充填的 3 种方式。在水道中,加积为主要的充填方式,发育最为广泛也最为显著。侧积在水道中也发育,但是和河道中的侧积相比其重要性大幅降低。水道主要就是通过加积和侧积进行内部充填,不断发育演化的。

4 水道内部建筑结构要素

Deptuck(2003)对印度扇和尼日尔三角洲斜坡

上的水道进行研究时,根据每个时期水道的平面河道形态、河道充填样式和溢岸沉积特征,将水道的演化分为一个侵蚀阶段和随后的 3 个充填阶段^[5](图 7)。其充填过程分为 3 个阶段。第 1 阶段主要是基底不连续杂乱反射分布广泛。第 2 阶段主要是显著的内侧天然堤加积超过河道底的加积。第 3 阶段是河道底加积速率增加,水道弯曲度不断增大。

不同的发育阶段会形成不同的内部结构形态,产生不同的沉积体和沉积现象。结合水道的演化过程,对白云凹陷水道的内部结构特征进行分析。

底部滞留沉积和滑塌体为充填阶段 1 的产物。在充填阶段 1 时期,水道中流体能量最强,会对水道基底和侧壁的沉积物产生强烈的侵蚀作用,造成了基底和侧壁的不稳定性,就易于在水道底部形成底部滞留沉积,而在水道的侧壁会出现滑塌体。

内侧天然堤主要是在充填阶段 2 形成的。充填阶段 2 最为显著的特征是内侧天然堤的加积速率超过河道底。内侧天然堤在该阶段最为发育。内侧天然堤的来源复杂,既有滑塌的天然堤沉积物,也有侵蚀阶地或水道堤岸沉积。最为典型的形成过程是,当轴部河道溢出时溢出流体在靠近水道侧壁的水道

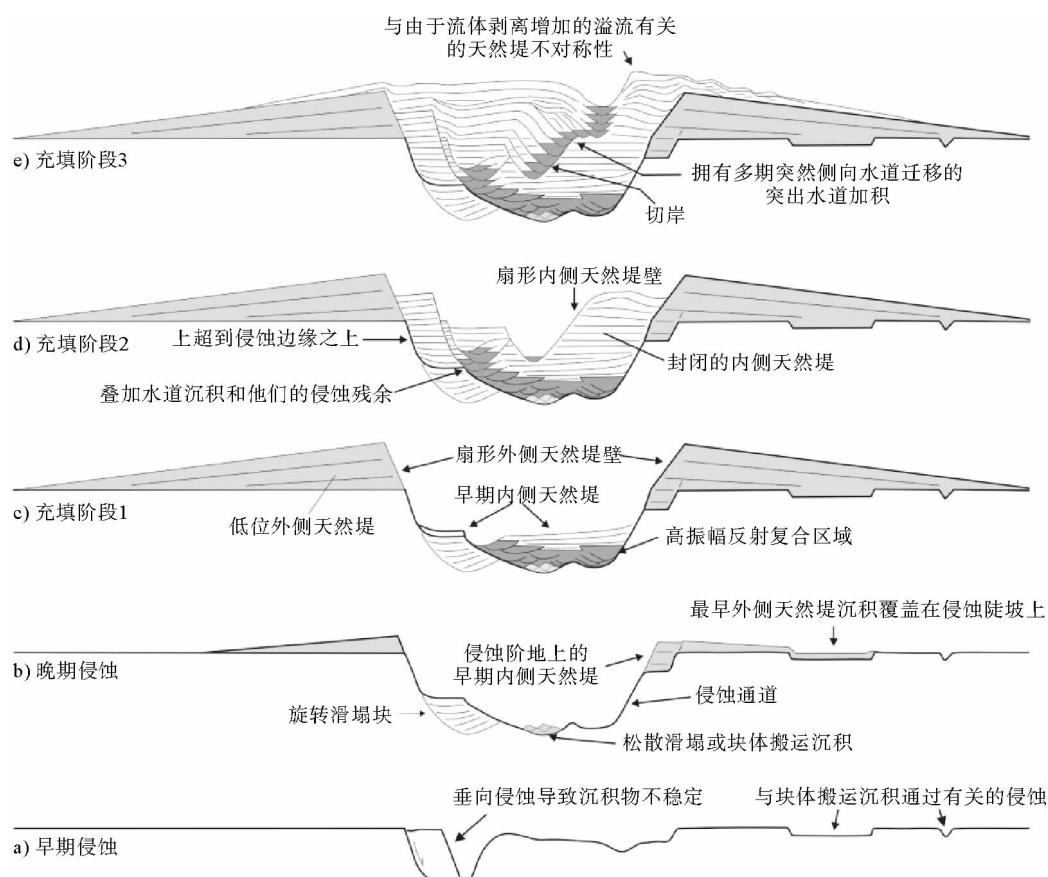


图 7 水道演化过程(据 Deptuck,2003)

Fig. 7 Channel evolution process

边缘沉积下来,沉积物逐渐累积,最终形成了内侧天然堤。内侧天然堤一般占据了水道横截面的 45%~60%,在水道河曲内侧更为发育,当水道侧向迁移时,占据了前一期水道的位置。

在充填阶段 3 中复合水道发育,内部充填以加积方式为主,侧积也可见。河底的加积速率超过内侧天然堤的加积速率,水道内部逐渐被充填,水道地势逐渐降低,最终消失。水道内部充填主要在该阶段发育,沉积作用的增强使得水道内部以加积为主,侧积现象也存在。

5 结论

(1)在珠江口盆地白云凹陷中的水道体系中水道复合体发育。水道复合体内部有多个水道单体,在水道单体中发育有侵蚀基底、底部滞留沉积、滑塌体和内侧天然堤。而在多个水道之间既有多期水道的叠置,也有多个水道的相互切割。水道内部的充填主要是通过加积和侧积两种方式,也有先侧积后加积。加积在水道中更为重要。

(2)水道的演化经历了一期侵蚀和三期充填阶段。水道发育阶段不同,其内部结构也不同。底部滞留沉积和滑塌体是充填阶段 1 的产物;内侧天然堤是充填阶段 2 的产物;在充填阶段 3 复合水道发育,以加积为主,侧积常见。

(3)对水道内部结构的认识,是水道整体研究的重要组成部分,对于水道内的相、非均质性和储层结构认识具有重要意义,为今后深水油气藏储层的勘探打好基础。

参考文献 (References)

- [1] Wynn R B, Cronin B T, Peakall J. Sinuous deep-water channels: Genesis, geometry and architecture[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24:341-387.
- [2] Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. Deep-water and fluvial sinuous channels-Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24:388-405.
- [3] Henry W, Posamentier and Venkatarathnan Kolla. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73:367-388.
- [4] Babonneau N, Savoye B, Cremer M, et al. Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19:455-467.
- [5] 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.
- [6] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs-key elements in facies prediction and effective development[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23:821-841.
- [7] Efthymios K Tripsanas, William R Bryant, Niall C Slowey, et al. Marine isotope stage 6 canyon and spillover deposits of the bryant and eastern canyon systems, northwest gulf of Mexico: importance of fine-grained turbidites on a delta-fed prograding slope[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76:1012-1034.
- [8] Ernesto Schwarz and William C Arnott. Anatomy and evolution of a slope channel-complex set (Neoproterozoic Isaac Formation, Windermere Supergroup, Southern Canadian Cordillera): implications for reservoir characterization[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77:89-109.
- [9] Gee M J R, Gawthorpe R L, Bakke K, et al. Seismic geomorphology and evolution of submarine channels from the Angolan continental margin [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77:433-446.
- [10] Babonneau N, Savoye B, Cremer M, et al. Sedimentary architecture in meanders of a submarine channel: detailed study of the present Congo turbidite channel (Zaiango project) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80:852-866.
- [11] Vicky Catterall, Jonathan Redfern, Rob Gawthorpe, et al. Architectural style and quantification of a submarine channel-levee system located in a structurally complex area: offshore Nile delta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80:991-1017.
- [12] 林杨松, 刘景彦, 蔡世祥, 等. 莺一琼盆地大型下切谷和海底重力流体系的沉积构成和发育背景[J]. *科学通报*, 2001, 46(1):69-72. [LIN Changsong, LIU Jingyan, CAI Shixiang, et al. Deposition composition and development background of the incised-valley and seafloor gravity flow system in Ying-Qiong Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(1):69-72.]
- [13] 袁圣强. 南海北部陆坡区深水水道沉积体系研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2009. 9-27. [YUAN Shengqiang. Sedimentary system of deepwater channel, the slope area of northern South China Sea[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy Of Sciences, 2009. 9-27.]
- [14] 付彦辉. 琼东南盆地南部深水水道沉积体系及其油气意义[D]. 北京: 中国石油大学, 2009. 37-47. [FU Yanhui. Depositional systems and hydrocarbon significance of deep-water channel systems in the Southern Qiongdongnan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009. 37-47.]
- [15] 吕彩丽, 吴时国, 袁圣强. 深水水道沉积体系及地震识别特征研究[J]. *海洋科学集刊*, 2010, 50:40-49. [LU Caili, WU Shiguo, YUAN Shengqiang. Deepwater channel complex sedimentary system and its seismic reflection in Qiongdongnan Basin[J]. *Studia Marina Sinica*, 2010, 50:40-49.]

- [16] 袁圣强,吴时国,赵宗举,等. 南海北部陆坡深水区沉积物输送模式探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 39-48. [YUAN Shengqiang, WU Shiguo, ZHAO Zongju, et al. Deep-water sediment transportation models for northern South China Sea slopes[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(4): 39-48.]
- [17] 李磊,王英民,张莲美,等. 南海北部白云深水区水道与朵体沉积序列及演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 71-76. [LI Lei, WANG Yingmin, ZHANG Lianmei, et al. Sedimentary sequence and evolution of submarine channel-lobe in Baiyun deepwater area, northern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(4): 71-76.]
- [18] 刘军,庞雄,颜承志,等. 南海北部陆坡白云深水区浅层深水水道沉积[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 255-300. [LIU Jun, PANG Xiong, YAN Chengzhi, et al. Shallow deepwater channels in Baiyun deepwater region of northern continental slope, South China Sea[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(3): 255-259.]
- [19] 李云. 珠江口盆地白云凹陷中新统珠江组深水沉积学[D]. 成都:成都理工大学. 2012. 54-66. [LI Yun. Deep-water Sedimentology of the Miocene Zhujiang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. 54-66.]
- [20] 赵晓明,吴胜和,刘丽. 西非陆坡区深水复合水道沉积构型模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 1-5. [ZHAO Xiaoming, WU Shenghe, LIU Li. Sedimentary architecture model of deep-water channel complexes in slope area of West Africa[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(6): 1-5.]
- [21] Claudio N Di Celma, Rufus L Brunt, and David M. Hodgson, et al. Spatial and temporal evolution of a Permian submarine slope channel-levee system, Karoo Basin, South Africa[J]. Journal of Sedimentary Research, 2011, 81: 579-599.
- [22] Abreu V, Sullivan M, Pirmez C, et al. 2003, Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deep water sinuous channels[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 631-648.
- [23] Arnott R W C. Stratal architecture and origin of lateral accretion deposits (LADs) and conterminous inner-bank levee deposits in a base of slope sinuous channel, lower Isaac Formation (Neoproterozoic), East-central British Columbia, Canada; Marine and Petroleum Geology, 2007, 24: 515-528.

THE INTERNAL ARCHITECTURE OF DEEPWATER CHANNELS IN BAIYUN SAG, PEARL RIVER MOUTH BASIN

QIAO Bo¹, ZHANG Changmin¹, LI Shaohua¹, DU Jiayuan², ZHANG Zhongtao²

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of the Ministry of Education,
Yangtze University, Hubei Jingzhou, 434023; 2. Shenzhen Branch, CNOOC, Guangzhou, 510240)

Abstract: Complex deepwater channels are well developed in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. There are erosional base, basal lags, slump and inner levees in an individual channel. The channel complexes, however, are rather complicated and may be divided into the superposition type and the incision type. The former reflects the aggradation of multi-phase channels and the latter the mutual incision of several channels. The internal channel fill are mainly in forms of lateral accretion, aggradation and the combination of lateral accretion and aggradation. The channel evolution is usually started from incision followed by a three-phase fill history. Different internal architecture of a channel corresponds to different fill phases. Basal lags and slumps are the product of the fill phase 1, whereas the inner levees are formed in the fill phase 2. In the fill phase 3, channel complexes are developed, the internal channel fill is mainly the product of aggradation, and the lateral accretion is also common. The precise analysis of the internal architecture is helpful not only to the research of the channel itself, but also to the study of reservoir architectures.

Key words: the Baiyun Sag; deepwater channel; architecture element; fill phase