

doi: 10.6053/j.issn.1001-1412.2020.02.010

## 浅述深水水道的形态学特征

尚文亮<sup>1,2</sup>, 徐少华<sup>1,2</sup>, 李小刚<sup>1,2</sup>, 秦磊<sup>1,2</sup>,  
杨丽玉<sup>1,2</sup>, 刘家恺<sup>1,2</sup>, 姚雪婷<sup>1,2</sup>

(1. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331;

2. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331)

**摘要:** 目前深水水道的分类方案较多, 本文基于深水水道的形态学特征, 且聚焦于单一型深水水道, 将其划分为顺直型(曲率介于 1~1.25)、低弯度 S 型(曲率介于 1.25~1.5)和高弯度 S 型(曲率 >1.5)。其中, 顺直型水道侵蚀作用最强, 往往不发育天然堤沉积, 无侧向加积; 低弯度 S 型水道发育天然堤, 并具有侧向加积; 高弯度 S 型天然堤及侧向加积最为发育, 决口扇常与之伴生。深水水道的曲率是水道形态的直观表现, 曲率大小主要受深水地貌即深水地形坡度的影响。在上陆坡区域, 地形坡度较大, 沉积物能量强, 深水水道以顺直型为主。中陆坡区域, 随着地形坡度的减缓, 水道的弯曲形态也逐渐增加, 形成低弯度 S 型, 直至下陆坡, 水道演变为高弯度的 S 型。

**关键词:** 深水沉积; 水道类型; 形态学; 曲率

**中图分类号:** TE121 **文献标识码:** A

## 0 引言

20 世纪 40 年代, 在北美大陆边缘首次识别出深水水道, 之后人们发现富含泥岩的陆坡沉积体系的下端发育大量的砂岩, 逐渐意识到水道作为通向盆底的砂体通道的重要性。自此, 深水水道成为许多研究关注的焦点<sup>[1-3]</sup>。深水水道因分布于海底, 易受构造运动、气候、海平面升降等因素的影响而发生后期的改造和破坏。基于上述原因, 目前许多关于深水水道的研究都以接受改造较弱的第四纪深水系统为对象, 如亚马逊深水扇、孟加拉深水扇、刚果海扇、印度海扇、扎伊尔海扇以及珠江口海底扇等<sup>[4-5]</sup>。

国内外学者对上述深水系统做了大量的研究, 并针对深水水道提出了 3 种主要的分类方案。其一是以深水沉积动力学作为分类基础, 以 Mutti 和

Normark<sup>[6]</sup>为代表将水道分为侵蚀型、加积型和侵蚀—加积型; 其二是以深水水道受限制性强弱为分类基础, 以 Campion 等<sup>[7-8]</sup>为代表将水道划分为限制性水道、低限制性水道及非限制性的水道—朵体三种; 其三是以深水水道的形态学为基础, 即以水道曲率为划分依据, 例如林煜<sup>[9]</sup>等将水道曲率低于 1.2 时称为低弯度水道, 曲率大于 1.9 时称为高弯度水道。Posamentier 等<sup>[10]</sup>将曲率低于 1.1 称为低弯度水道, 曲率大于 1.6 时称为中—高弯度水道。谢清惠等<sup>[11]</sup>则将曲率小于 1.5 称为低弯度水道, 曲率介于 1.5~2 称为中弯度水道, 曲率大于 2 称为高弯度水道。当前基于曲率对水道分类的认识尚未一致, 导致不同学者对深水水道形态学特征阐述存在着差异, 使得不同地区的深水水道形态学对比工作开展较难。本文基于前人的研究成果, 聚焦于单一型水道, 根据其曲率差异从形态学的角度将水道分为顺直型、低弯度 S 型和高弯度 S 型三种类型, 同时

**收稿日期:** 2019-10-09; **责任编辑:** 王传泰

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(编号:41902114)、重庆科技学院大学生科技创新训练计划项目(编号:2019008)联合资助。

**作者简介:** 尚文亮(1999—), 男, 本科, 地质学专业。通信地址: 重庆市沙坪坝区大学城东路 20 号, 重庆科技学院石油与天然气工程学院; 邮政编码: 401331; E-mail: 2890628632@qq.com

**通信作者:** 徐少华(1987—), 男, 博士、讲师, 层序地层学与沉积学方向。通信地址: 重庆市沙坪坝区大学城东路 20 号, 重庆科技学院石油与天然气工程学院; 邮政编码: 401331; E-mail: xsh\_xu@163.com

对不同水道形态的沉积特征和成因进行对比,为深水水道的分类提供借鉴。

1 深水水道分类

深水水道是被动大陆边缘重要的深水沉积单元,其连同块体搬运复合体沉积和水道远端朵叶体一同构成深水重力流沉积体系。深水水道通常具有较大的规模,宽度大多在 10 km 左右,延升距离可达几百千米甚至几千千米,是重要的深水地貌单元。

深水水道的曲率即水道弯曲度,是指在给定的区域内,水道轴长度与总下行长度的比值(图 1)。不同曲率的水道常表现出不同的外部形态,如曲率接近 1 表现为顺直型,随曲率的增加,水道形态逐渐演化为双凸型、蛇曲型等<sup>[12]</sup>。本文建议以深水水道曲率差异为起点结合水道形态特征,将其划分为顺直型(曲率介于 1~1.25)、低弯度 S 型(曲率介于 1.25~1.5)和高弯度 S 型(曲率>1.5)三种类型,并对其进行对比,具体的对比情况见表 1 所述。

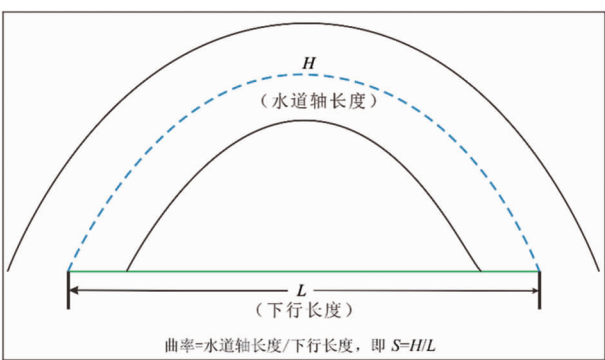


图 1 水道曲率计算图

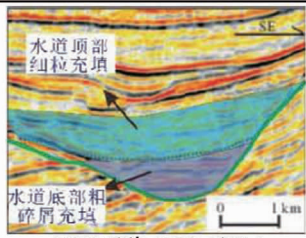
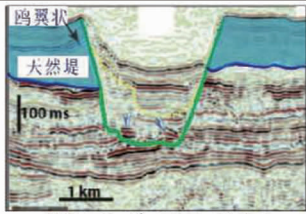
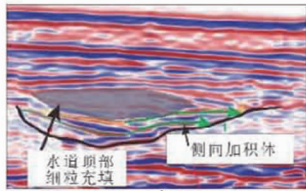
Fig. 1 channel curvature calculation chart

(1)顺直型水道

顺直型水道平均曲率为 1~1.25,该类型水道底部为中—粗砂岩充填,可含泥砾(图 2a)。水道上部常被泥岩覆盖,整体具有下粗上细的正粒序沉积特征。顺直型水道底部常具有侵蚀痕迹,反映其具有较强的侵蚀、下切能力。此外,受环境限制,该类型水道几乎无侧向加积现象,水道两侧很少发育甚至不发育天然堤和决口扇,亦不发生“截弯取直”,剖面上常常呈较窄的“V”型<sup>[13-15]</sup>。

表 1 基于曲率划分的顺直型、低弯度 S 型和高弯度 S 型水道特征对比

Table 1 Comparison of characteristics of straight, low S type and high S type channels based on curvature division

| 水道类型                | 水道动力条件                                                      | 位置及受限性                         | 发育结构                                              | 沉积特征                                       | 典型案例识别标志                                                                                                         | 类似文献报道                                                                                                       |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 顺直型<br>1~1.25       | 具整个体系中 <strong>最强</strong> 的侵蚀性                             | 陆坡上端、受限性 <strong>较强</strong>   | 几乎不发育天然堤、侧积体、无侧向迁移趋势                              | 由底至顶依次为泥砾、粗砂、中砂岩、泥岩整体具正粒序沉积特征              | <br>(据姚悦等, 2018; 修改)         | 南海西北缘 <sup>[14]</sup><br>西非 Rio Muni 盆地 <sup>[18]</sup><br>西沙海槽盆地 <sup>[20]</sup><br>白云深水区中部 <sup>[21]</sup> |
| 低弯度 S 型<br>1.25~1.5 | 具整个体系中 <strong>较强</strong> 的侵蚀及加积性                          | 陆坡中部、受限性 <strong>相对较强</strong> | 发育天然堤、侧积体、具中等侧向迁移趋势,少见废弃水道及决口扇                    | 由底至顶依次为泥砾、粗-细砂岩、粉砂岩及泥岩,局部含泥砂质滑塌岩、整体具深水二元结构 | <br>(据 Jolly 等, 2017; 修改)    | 刚果海扇 <sup>[23]</sup><br>密西西比扇 <sup>[24]</sup>                                                                |
| 高弯度 S 型<br>>1.5     | 具整个体系中 <strong>相对弱</strong> 的侵蚀性和 <strong>相对强</strong> 的加积性 | 陆坡下部受限性 <strong>相对较弱</strong>  | 很发育天然堤、侧积体,具 <strong>强</strong> 侧向迁移趋势,多见废弃水道及决口扇 | 由低至顶依次发育粗-细砂岩、粉砂岩及泥岩,局部含泥砂质滑塌岩,整体具深水二元结构   | <br>(据 Nakajima 等, 2009; 修改) | 亚马逊海扇 <sup>[26]</sup><br>孟加拉海扇 <sup>[27]</sup><br>印度海扇 <sup>[28]</sup>                                       |

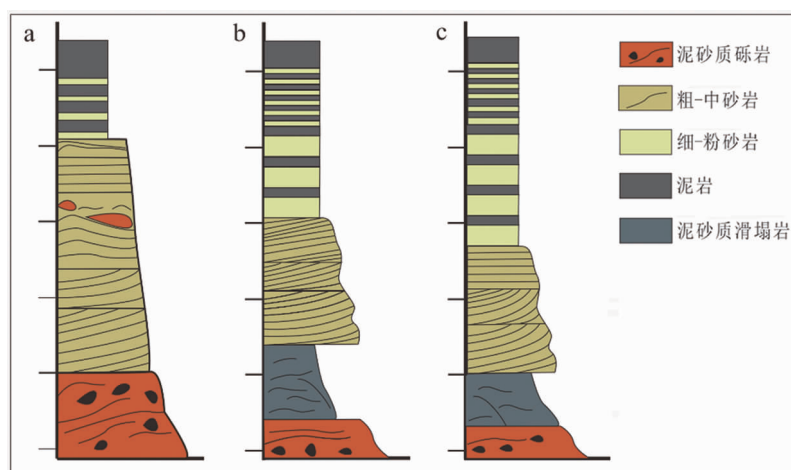


图2 深水水道充填模式图

Fig. 2 The deep-water channel filling model

a. 顺直型水道充填模式图; b. 低弯度 S 型水道充填模式图;  
c. 高弯度 S 型水道充填模式图

### (2) 低弯度 S 型水道

低弯度 S 型水道平均曲率为 1.25~1.5, 该类水道从底至顶依次发育底部滞留沉积、侧向加积体沉积及天然堤沉积<sup>[16]</sup>。岩性从下至上为泥砾岩、粗—中粒砂岩、粉砂岩及泥岩(图 2b), 整体构成深水二元结构, 并发育有泄水构造、滑塌变型构造等重力流典型构造<sup>[17]</sup>。此外, 低弯度 S 型水道受围岩环境的限制, 保留了水道内部相对较强的侵蚀性, 因此其剖面常常呈“U”型<sup>[13]</sup>。

### (3) 高弯度 S 型水道

高弯度 S 型水道平均曲率 $>1.5$ , 是整个水道体系中弯曲度最高的部分。水道充填类型同低弯度 S 型水道相似(图 2c), 但粒度整体相对较细且漫溢沉积更为发育。水道内部从底至顶依次发育底部滞留沉积、侧向加积及天然堤—漫溢沉积。岩性从下至上为粗—细砂岩, 粉砂岩及泥岩, 局部发育滑塌成因的泥砾岩并发育鲍马序列<sup>[18-19]</sup>。该类型水道为低弯度 S 型水道演化而来, 水道宽深比相较于前者更大, 因此剖面常呈宽广的“U”型。此外, 高弯度 S 型水道继承了低弯度 S 型水道较强的侧积能力, 促使水道曲率进一步增大, 故“截弯取直”较为常见。

## 2 深水水道形态的控制因素

深水水道的形成受多种因素的控制, 其中沉积物供给量及海平面升降变化是大型水道体系形成的基础因素, 构造运动则是其触发因素。一般来说, 海

平面的升降及沉积物供给量决定了三角洲是否可推进至陆架边缘, 成为形成水道体系的先决条件。而构造运动如断层、海底火山等决定沉积物是否可沿陆坡向下运输, 成为形成深水水道的必要条件。此外, 各类型深水水道的发育情况在不同的海平面变化背景具有不同的响应<sup>[29-31]</sup>。例如, 在强制海退体系域时期(FSST), 海平面会快速下降, 三角洲沉积物较大幅度向前进积, 同时该时期沉积物稳定性较差易发生失稳滑塌, 此时顺直型水道发育情况相对较好。在强制海退体系域(FSST)末期及低位体系域时期(LST), 海平面变化速率稳定, 沉积物稳定性有所增加<sup>[32]</sup>。该时期低弯度 S 型水道相对发育<sup>[23,33]</sup>。在海侵体系域时期(TST)沉积物稳定性开始增大, 该时期主要发育高弯度 S 型水道(图 3)。

深水水道的形态是水道曲率的直观表现, 而水道曲率又是海底地貌即坡度差异的反映。在较高的坡度控制下, 沉积物表现出较强的侵蚀能力, 因此具有相对顺直的流动轨迹。坡度变缓时, 沉积物能量相对减小, 水道以弯曲的形态向前推进, 同时细粒沉积物漫溢在水道外侧形成天然堤—漫溢沉积。在坡度最低的深海盆地, 沉积物因不受水道两侧约束, 迅速在水道尾端以朵状形态沉积下来, 形成朵体沉积体系(图 4)。

## 3 结语

(1) 利用曲率结合其形态的方法将深水水道划

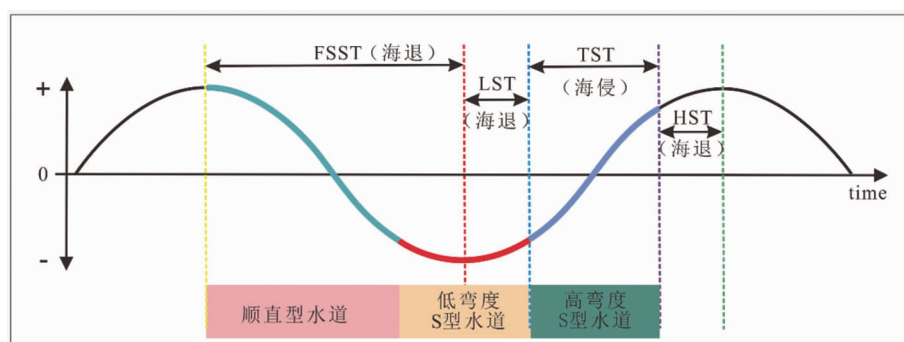


图 3 各类型水道发育“优势时期”

(基准面变化曲线据 Catuneanu, 2006)

Fig. 3 The dominant development period of different types of deep water channel

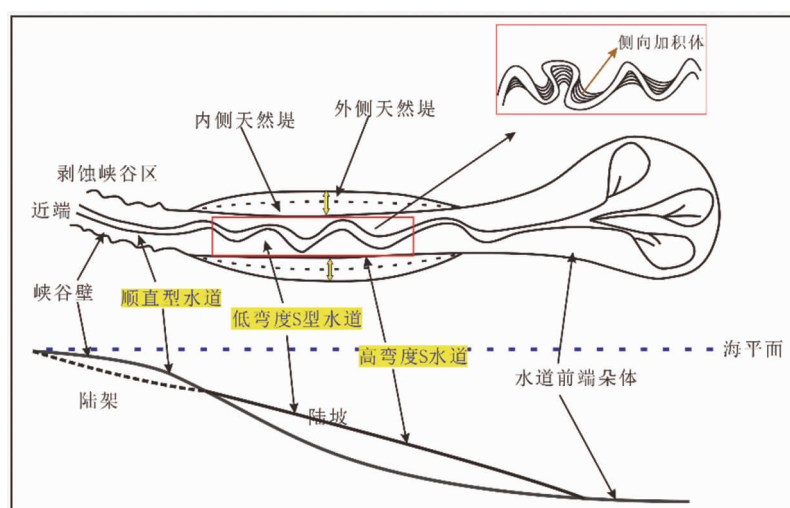


图 4 深水水道体系平面图(据 Kane 等,2007,修改)

Fig. 4 Planar view of deep-water channel system

分为顺直型(曲率 1~1.25)、低弯度 S 型(曲率 1.25~1.5)和高弯度 S 型(曲率>1.5)。其中顺直型水道侵蚀性较强,内部具下粗上细的正粒序沉积特征,很少发育甚至不发育天然堤沉积。S 型水道包括低弯度 S 型及高弯度 S 型,二者均发育天然堤、侧向加积体和废弃河道,但高弯度 S 型水道曲率更大,天然堤、侧向加积体更为发育。

(2)深水水道的形成受多种因素的控制,其中下降的海平面及强烈的沉积物供给是形成大型深水水道的基础因素,剧烈的构造运动是深水水道的触发因素。同时,不同的海平面变化时期,深水水道总体来说又具有不同的形态学特征。在强制海退体系域时期,顺直型水道较为发育。在低位体系域时期,低弯度 S 型水道较为发育。而在海侵体系域时期,高弯度 S 型水道较为发育。

(3)深水水道的形态及充填特征皆为深海地貌(坡度)变化的直接响应,在陡坡降区域,水道内部沉积物能量较强,深水水道常发育顺直型,内部以粗碎屑充填为主。随着海底坡降变缓,水道由顺直型演变为 S 型,水道内沉积物能量相应减弱。

**致谢:**论文受国家自然科学基金资助项目(编号:41902114)、重庆科技学院大学生科技创新训练计划项目(编号:2019008)共同支持。论文的完成离不开科创小组成员间的相互鼓励与支持,更离不开徐少华博士、蔡长城博士以及李小刚博士的悉心指导与关心。此外,贾子策、倪凤玲等多位学长、学姐在资料搜集、文献调研等方面提供了多方面的帮助,各位室友及同学也给予了很大的支持与帮助,在此一并表示由衷的感谢!

## 参考文献:

- [1] Menard Jr H W. Deep-sea channels, topography, and sedimentation [J]. AAPG Bulletin, 1955, 39(2): 236-255.
- [2] Weimer P, Slatt R M, Bouroullec R. Introduction to the petroleum geology of deepwater settings [M]. Tulsa: AAPG and Datapages, 2007.
- [3] Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. Marine and petroleum Geology, 2000, 17(2): 285-342.
- [4] 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(1): 40-49.
- [5] Babonneau N, Savoye B, Cremer M, et al. Multiple terraces within the deep incised Zaire Valley (ZaiAngo Project): are they confined levees? [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 222(1): 91-114.
- [6] Mutti E, Normark W R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: problems and concepts [M]// Marine clastic sedimentology. Springer, Dordrecht, 1987: 1-38.
- [7] Murat Gül, Cronin B T, Kemal Gürbüz. Confined deep water system development on the accretionary wedge (Miocene, Kahramanmara Foreland Basin, S turkey) [J]. Earth-Science Reviews, 2012, 114(s3-4): 195-217.
- [8] Moody J D. Quantitative outcrop characterization of an analog to weakly confined submarine channel system: Morillo 1 member, Ainsa Basin, Spain [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(10): 1813-1841.
- [9] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 深水浊积水道体系构型模式研究以西非尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 510-520.
- [10] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. Journal of sedimentary research, 2003, 73(3): 367-388.
- [11] 谢清惠, 邓宏文, 郭佳. 西非下刚果盆地深水曲流水道的地震响应特征与演化模式分析[J]. 石油物探, 2013, 52(6): 655-661.
- [12] 程岳宏, 于兴河, 刘玉梅, 等. 正常曲流河道与深水弯曲水道的特征及异同点[J]. 地质科技情报, 2012, 31(1): 72-81.
- [13] Wynn R B, Cronin B T, Peakall J. Sinuous deep-water channels: Genesis, geometry and architecture [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(6-9): 341-387.
- [14] 陈昱瑶, 周江羽, 钟佳, 等. 南海西北缘深水水道体系的地震响应及其演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 32(2): 69-77.
- [15] 吴时国. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 922-930.
- [16] Abreu V, Sullivan M, Pirmez C, et al. Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deep water sinuous channels [J]. Marine & Petroleum Geology, 2003, 20(6-8): 0-648.
- [17] 王振奇, 李士涛, 于水, 等. 尼日尔三角洲盆地深水沉积的二元结构特征及层序划分[J]. 地质学报, 2013, 87(8): 1149-1157.
- [18] 李磊, 闫瑞, 李宁涛, 等. 西非 Rio Muni 盆地深水水道特征与成因[J]. 现代地质, 2015(1): 80-88.
- [19] 赵晓明, 吴胜和, 刘丽. 尼日尔三角洲盆地 Akpo 油田新近系深水浊积水道储层构型表征[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1049-1058.
- [20] 姚悦, 周江羽, 雷振宇, 等. 西沙海槽盆地强限制性中央峡谷水道地震相与内部结构的分段特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 787-795.
- [21] 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): 255-259.
- [22] Jolly B A, Anyiam O A, Omeru T. Structural controls on channel-related seismic facies distribution in the toe-thrust of deepwater Niger Delta [J]. Journal of African Earth Sciences, 2017, 125: 151-165.
- [23] 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(10): 852-866.
- [24] Kastens K A, Shor A N. Evolution of a channel meander on the Mississippi Fan [J]. Marine Geology, 1986, 71(1-2): 165-175.
- [25] Nakajima T, Peakall J, Mccaffrey W D, et al. Outer-Bank Bars: A New Intra-Channel Architectural Element within Sinuous Submarine Slope Channels [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 872-886.
- [26] Flood R D. Side echoes from a sinuous fan channel obscure the structure of submarine fan channel/levee systems, Amazon Fan [J]. Geo-Marine Letters, 1987, 7(1): 15-22.
- [27] Schwenk T, Spie V, Breitzke M, et al. The architecture and evolution of the Middle Bengal Fan in vicinity of the active channel-levee system imaged by high-resolution seismic data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22(5): 637-656.
- [28] Kenyon N H, Amir A, Cramp A. Geometry of the younger sediment bodies of the Indus Fan [M]// Atlas of Deep Water Environments: Architectural style in turbidite systems. Springer Netherlands, 1995.
- [29] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1): 1-9.
- [30] 袁圣强. 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): 39-47.
- [31] 庞雄, 陈长民, 施和生, 等. 相对海平面变化与南海珠江深水扇系统的响应[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 167-177.
- [32] 王大伟, 吴时国, 王英民, 等. 琼东南盆地深水重力流沉积旋回[J]. 科学通报, 2015(10): 933-943.
- [33] 刘新颖. 西非第三系深水扇沉积特征及发育演化规律[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(3): 24-31.



- [34] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Elsevier, 2006. marine channel-levee; an example from Upper Cretaceous slope sediments, Rosario Formation, Baja California, Mexico
- [35] Kane I A, Kneller B C, Dykstra M, et al. Anatomy of a sub-[J]. Marine & Petroleum Geology, 2007, 24(6): 540-563.

## Brief introduction to morphological characteristics of deep-water channels

SHANG Wenliang<sup>1,2</sup>, XU Shaohua<sup>1,2</sup>, LI Xiaogang<sup>1,2</sup>, QIN Lei<sup>1,2</sup>,  
YANG Liyu<sup>1,2</sup>, LIU Jiakai<sup>1,2</sup>, YAO Xueting<sup>1,2</sup>

(1. Chongqing Key Laboratory of Complex Oil & Gas Exploration and Development, Chongqing 401331, China;

2. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** At present, there are many classification schemes for deep water channels. This paper is based on morphological characteristics of deep water channels and focuses on a single type of deep water channel which is furtherly divided into straight-type (curvature between 1-1.25), low-s-type (curvature between 1.25-1.5) and high-s-type (curvature > 1.5). The straight-type channel has the strongest erosion characteristics without natural levee deposition and lateral accretion. Low-s-type channel is developed with the levee deposition and lateral accretion. And high-s-type channels are mostly developed with levees and lateral accretion and often accompanied by crevasse fan. The curvature of the channel is the direct manifestation of the shape of channel is mainly affected by the deep-water topographic feature. In the upper continental slope area, the slope is steep with strong sediment energy the channel is mainly straight type, in the middle area, the slope become gentle, the low-s-type dominant, in the lower slope, and the channel evolves into a high-curvature s-type.

**Key Words:** deep water channel; channel type; shape; curvature