第 28 卷　第 2 期
2026 年　4 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 28　No. 2
Apr.　2026

文章编号：1671-1505(2026)02-0618-22　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2026.073

泥岩底辟型微盆地朵叶体沉积构型模式：以尼日尔三角洲盆地陆坡区为例*

陈金阳[1,2]　赵晓明[1,2]　齐　昆[1,2]　杨宝泉[3]　卜范青[3]　曹树春[3]

1 西南石油大学地球科学与技术学院，四川成都 610500
2 天然气地质四川省重点实验室，四川成都 610500
3 中国海洋石油国际有限公司，北京 100028

摘　要　陆坡微盆地作为深水海底扇的重要沉积场所，存在着巨大的石油天然气资源。然而，对于微盆地尤其是泥岩底辟型微盆地内部发育的深水朵叶研究相对薄弱。为此，以西非尼日尔三角洲盆地陆坡区一处泥岩底辟型微盆地为研究对象，基于三维高分辨率浅层地震资料与 RGB 分频属性融合技术，分析泥岩底辟型微盆地内部深水沉积体系地层结构和构型特征，揭示相关沉积演化的控制因素与形成过程。研究表明，该微盆地内发育块体搬运沉积、水道沉积和朵叶体沉积，其中朵叶体沉积占据主导地位。通过地震剖面与平面 RGB 分频属性特征分析，将该微盆地内的朵叶划分为复合朵叶与单一朵叶 2 个构型级次单元，复合朵叶由 5 期单一朵叶组成，各期单一朵叶在径向上表现出前积与退积的叠置样式，而在横向上表现为侧向迁移。这些沉积单元分布和叠置样式反映了微盆地的初始地形和前期沉积体起伏对后期沉积物流的影响。此外，微盆地内沉积体系演化主要经历了 4 个阶段：初始沉积物对原始地形的充填、地形地貌对沉积物流的调节限制、不同期次朵叶的补偿叠置、微盆地充填完全后发生的水道侵蚀。不同期次单一朵叶叠置分布样式以及沉积演化阶段对深水朵叶储集层的物性与连通性有很大影响，通过这一研究对高效开发微盆地内朵叶油藏具有一定参考价值。

关键词　深水沉积　泥岩底辟型微盆地　海底朵叶　沉积演化　构型模式　尼日尔三角洲

第一作者简介　陈金阳，男，1999 生，硕士研究生，主要从事油气田开发地质研究。E-mail：1729789179@qq.com。

通讯作者简介　赵晓明，男，1982 生，教授，博士生导师，主要从事油气田开发地质研究。E-mail：zhxim98@163.com。

中图分类号：P512.2　　**文献标志码**：A

Architecture model of lobes in mud diapir microbasin: a case study of slope area of Niger Delta Basin

CHEN Jinyang[1,2]　ZHAO Xiaoming[1,2]　QI Kun[1,2]　YANG Baoquan[3]　PU Fanqing[3]　CAO Shuchun[3]

1 *School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu* 610500, *China*
2 *Sichuan Provincial Key Laboratory of Natural Gas Geology, Chengdu* 610500, *China*
3 *CNOOC International Limited, Beijing* 100028, *China*

*国家自然科学基金项目（编号：42072183）、四川省杰出青年基金项目（编号：2024NSFJQ0065）和中海石油国际能源服务（北京）有限公司科技项目（编号：CBJ-2023-PCPS-0020-RI）联合资助。［Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42072183), Sichuan Provincial Outstanding Youth Fund (No. 2024NSFJQ0065) and CNOOC International Limited Science and Technology Projects (No. CBJ-2023-PCPS-0020-RI)］

收稿日期：2024-10-30　　改回日期：2025-09-22

Abstract　Slope microbasin is an important sedimentary site of deep-sea fan, which has huge oil and gas resources and research value, but the research of deep-water sedimentary system in microbasin is relatively weak. Therefore, this paper takes a mud diapir micro-basin in the continental slope area of Niger Delta basin in West Africa as the research object. Based on shallow 3D seismic data and RGB frequency division attribute fusion technology, this paper analyzes the structural characteristics of the deep-water sedimentary system in the microbasin, and reveals the relevant evolutionary control factors and formation process. The results show that the deep-water sedimentary system in the microbasin develops in the sequence of Mass-transport deposition, submarine channel deposition and submarine lobe deposition, in which the submarine lobe occupies the dominant position in the microbasin deposition. By using seismic section and plane RGB frequency division attribute analysis, the lobes developed in the microbasin were divided into two hierarchical orders: composite lobe and single lobe. At different stages, single lobe exhibits has two stack patterns in radial direction, which are progradation and retrogradation, and lateral migration in transverse direction. The distribution and stack patterns of these sedimentary units reflect the influence of the initial topography of the micro basin and the fluctuation of the early sedimentary bodies on the late sedimentary logistics. In addition, the evolution of the depositional system in the micro basin has mainly gone through four stages: the filling of the original topography by the initial sediments, the regulation and restriction of the topography and geomorphology on the sedimentary flow, the compensation and superposition of secondary lobes in different stages, and the channel erosion after the filling of the micro basin. The single lobe superimposed stack pattern in different stages and sedimentary evolution stages have a great impact on the physical properties and connectivity of deep-water lobe reservoirs. This study has a certain reference value for the efficient development of lobe reservoirs in micro basins.

Key words　deepwater sediments, mud diapir microbasin, submarine lobe, sedimentary evolution, architecture model, Niger Delta Basin

About the first author　CHEN Jinyang, born in 1999, is a master degree candidate. He is mainly engaged in research on oil and gas field development geology. E-mail: 1729789179@qq.com.

About the corresponding author　ZHAO Xiaoming, born in 1982, is a professor and Ph.D. supervisor. He is mainly engaged in research on oil and gas field development geology. E-mail: zhxim98@163.com.

深水海底扇因其巨大的油气资源潜力，长期以来是世界油气勘探开发的热点（Prélat *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2015; Covault *et al.*, 2017; Martinez-doñate *et al.*, 2023）。作为海底扇沉积体系的组成单元，深水朵叶沉积由于其横向连续性强、垂向连通性好以及展布范围大等特征，常被视为高产能与高采收率的储集层（Grundvåg *et al.*, 2013; Howell *et al.*, 2014; 张佳佳和吴胜和, 2019; Alpak and Guangri, 2022; 段瑞凯等, 2022）。近些年来，基于野外露头与地震资料，对深水朵叶研究已取得显著进展。不同因素控制下所发育的朵叶形态、规模、内部结构等具有较大差异。Galloway（1998）根据沉积地形和沉积物的性质将朵叶划分出丘状朵叶和席状朵叶。Wynn 等（2002）依据水道—朵叶沉积体系形态划分出存在水道—朵叶过渡带的砂质朵叶以及直接与水道相连的泥质朵叶（Wynn *et al.*, 2002; Mulder and Etienne, 2010）。Gamberi 和 Rovere（2011）根据所处沉积环境定义了 4 种类型朵叶：池状朵叶、过路朵叶、末端朵叶以及深海平原朵叶。本研究为过路朵叶类型，其通常出现在陆坡微盆地内。陆坡微盆地由于其外部形态，在陆坡环境下提供了重要的可容纳空间，内部可以保存多种沉积单元，包括块体搬运沉积、深水水道沉积、朵叶体沉积等（Adeogba *et al.*, 2005; Damuth and Olson, 2015）。同样地，针对陆坡微盆地，基于野外露头以及地震资料的研究也日益深入（Mi-

chael *et al.*, 2005; Pirmez *et al.*, 2012; Damuth and Olson, 2015), 对陆坡微盆地成因类型 (Jackson and Talbot, 1986; Brown *et al.*, 2004; Mcdonnell *et al.*, 2010; Nyantakyi *et al.*, 2015)、地层结构 (Prather *et al.*, 1998; Pirmez *et al.*, 2012) 以及微盆地对重力流的控制 (Beaubouef and Abreu, 2006; Zhao *et al.*, 2019) 等方面也取得重要研究成果。与其他深水沉积环境相比, 陆坡微盆地内部的层序地层结构不仅受可容空间变化和沉积物供给速率的共同影响, 还受控于微盆地自身的剖面形态 (Pratson and Ryan, 1994)。针对陆坡微盆地沉积模式, Satterfield 和 Behrens (1990) 基于墨西哥湾现代陆坡微盆地首次提出了“充填—溢出”模式, 这种模式主要受控于沉积过程本身, 现已被许多学者应用到现代陆坡微盆地中 (Prather *et al.*, 1998; Beaubouef and Friedmann, 2000; Adeogba *et al.*, 2005; 胡孝林等, 2014)。此外, Prather 等 (2012) 提出一种动态的微盆地充填—溢出模式, 这种模式更侧重于描述沉积物供给与微盆地自身沉降之间的动态平衡。

目前, 针对微盆地内朵叶的研究主要集中在宏观沉积演化和模式分析方面, 而对于微盆地尤其是泥岩底辟型微盆地所发育的朵叶内部沉积结构及其沉积过程的研究仍相对较薄弱。深入分析微盆地内朵叶沉积体系的构型模式特征, 有助于揭示沉积物流与微盆地内地貌动态相互作用下深水朵叶沉积体系的分布与演化过程, 这不仅为现有的深水朵叶沉积研究提供了补充, 也对提高朵叶油藏的高效开发具有重要的意义。

以西非尼日尔三角洲盆地陆坡区一处泥岩底辟型微盆地为解剖对象, 基于高分辨率三维地震资料, 明确了该微盆地内朵叶沉积体系的发育演化过程, 揭示了该微盆地先存的地形地貌对其复合朵叶内部不同期次单一朵叶的三维几何形态与叠置关系的控制作用。具体来说: (1) 定量表征研究区微盆地初始地貌, 阐明其地形地貌特征; (2) 结合三维地震剖面与 RGB 分频属性平面, 精细解剖复合朵叶并进行定量表征, 进而揭示其沉积过程; (3) 阐明先存地貌特征特征与重力流相互作用对微盆地内多期朵叶三维几何形态及发育演化的控制作用。该研究有助于进一步认识西非尼日尔三角洲盆地陆坡区泥岩底辟微盆地内深水沉积过程并为深水油气勘探提供借鉴。

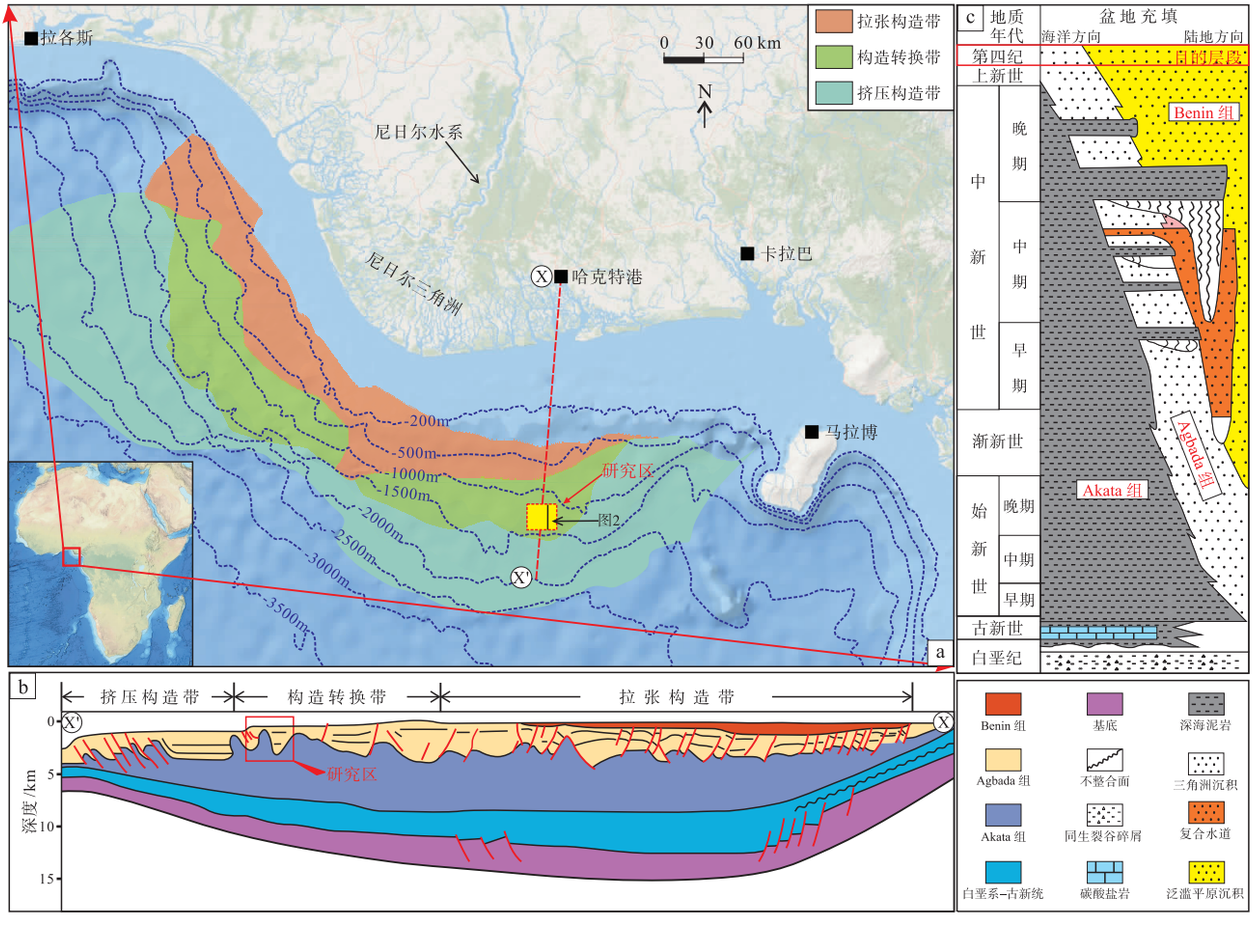
1 区域地质概况

尼日尔三角洲盆地位于西非几内亚湾, 属于被动大陆边缘盆地 (图 1-a)。沉积盆地包含尼日利亚陆上、海岸及陆架海域部分区域, 陆上面积约为 140000 km^2, 最大厚度可达 12 km (Damuth *et al.*, 1994)。

尼日尔三角洲盆地自早白垩世开始发育, 主要经历了裂谷期与漂移期 2 个构造演化阶段, 早始新世以来, 长时期的海退环境形成现今的尼日尔三角洲盆地 (邓荣敬等, 2008; 吕明等, 2008)。

尼日尔三角洲盆地地层从下至上由 3 套地层单元组成, 分别是阿卡塔组 (Akata)、阿格巴达组 (Agbada) 和贝宁组 (Benin) (图 1-c) (Short and Stäuble, 1967)。其中阿卡塔组沉积岩性为前三角洲相泥岩, 沉积厚度较大; 阿格巴达组沉积岩性为三角洲前缘相砂岩和泥岩, 是盆地内主要的油藏储集层; 顶部为三角洲平原和冲积环境下沉积的砂岩 (Bilotti and Shaw, 2005)。尼日尔三角洲发育过程中, 前期多形成前三角洲泥岩沉积体, 后期为三角洲前缘及三角洲平原沉积物上覆于泥岩体之上, 当上覆沉积物超过泥岩承受限度时, 泥岩沉积体发生塑性变形并向远离陆架方向流动, 形成泥岩底辟体。底辟体的存在一定程度上阻碍了三角洲向深海平原进积, 底辟体间形成的一系列微盆地为陆源碎屑物质提供了沉积场所。随着沉积作用不断进行, 下覆泥岩沉积体在压实成岩作用下流动性减弱, 底辟作用停止, 三角洲将继续向远处进积, 进而形成新的底辟体与沉积 (Gordon and Knox, 1989; 谢清惠等, 2013)。

在尼日尔三角洲前积过程中, 受到大陆边缘重力作用影响, 自北向南分别形成北缘拉张构造带、中部构造转换带和南缘构造挤压带 (图 1-b) (Doust and Omatsola, 1989; Zhang *et al.*, 2016)。研究区位于尼日尔三角洲盆地南缘 (图 1-a), 处于构造挤压和拉张转换带上, 主要受逆冲构造和泥岩底辟活动影响。逆冲断层活动开始于晚中新世, 但至上新世, 随着尼日尔河沉积物供给减少, 其活动性逐渐减弱。晚中新世到上新世期间, 研究区主要表现为大规模持续的泥岩底辟拱升活动 (蔺鹏等, 2018)。研究层位埋深较浅, 基于其地理位



a—地理位置；b—构造背景示意图；c—地层柱状图

图 1　尼日尔三角洲盆地地理位置与地质概况图

Fig. 1　Geographical location and geological setting map in Niger Delta Basin

置、埋藏深度与 Deptuck 等（2008）和 Zhao 等（2019）研究对象的相似性，推断目的层位发育在第四纪的阿格巴达组（图 1-c）。该时期构造活动明显减弱，逆冲构造基本停止，泥岩底辟作用也相对较弱，盆地以充填沉积作用为主（张佳佳，2019；蔺鹏等，2022）。

2　资料与方法

2.1　地震数据

采用高精度三维地震资料，数据采样间隔 3 ms，处理面元 12.5 m×12.5 m，地震频带带宽 5~80 Hz，地震数据处理为零相位。研究目的层位于浅层，地震资料品质较高，成像效果较好，主频 50 Hz，目的层速度约 1900 m/s，垂向分辨率达 10 m。

2.2　研究方法

RGB 属性融合技术通过对地震数据体提取不同频率的属性体，将提取的 3 个均方根振幅属性体生成地层切片，进行三色（红—绿—蓝）融合显示，从而揭示沉积体的细微特征，并通过颜色差异刻画各地质体的形态和规模（Henderson *et al.*，2007；Mcardle and Ackers，2012；刘伟新等，2022，杨民鑫等，2024）。针对研究区目的层（主频为 50 Hz，频宽约为 100 Hz），采用短时傅里叶变换的分频方法，将频带等分出 25 Hz、50 Hz、75 Hz 共 3 个频率分别代表红、绿、蓝三色，融合图像中色调反映切片位置的平均频率，而融合的亮度则主要反映该切片位置的地震振幅的强弱。该方法可以突出沉积单元尺度低于地震平均分辨率时的细微频率变化。由于缺乏钻井资料的约束，本研究

通过对地震同相轴的振幅强度、连续性、反射结构、外部形态特征与对 RGB 分频属性地层切片平面特征进行描述，结合前人对深水构型要素的地震相描述，对所研究的深水朵叶沉积体系进行剖面与平面地震相分析与解释。

3 地震地层学与地貌特征

3.1 地震地层学

通过地震剖面反射终止关系、反射层叠加样式以及反射层内部结构，识别出 H1～H4 共 4 个地震层位(图 2)。其中，H4 为研究区底界面，具有中—高振幅、连续性较好的反射特征。目的层 H1～H3 中，H2 为研究区顶界面，其特征为强振幅中等连续反射。H1 位于地震剖面识别最浅部，表现为强振幅、连续性极好的反射特征，对应于当今海底面。H3 为内部深水沉积体系界面。H4 至 H3 界面之间的地震同相轴，两端表现为弱振幅、连续性好的反射，中部则转变为中—强振幅，连续性差的杂乱反射；H3 至 H2 界面间的地震同相轴则呈现强振幅、中等连续性，并具有上超特征。剖面上，层位界面从北向南整体地势降低，但因北部与南部的泥岩底辟拱升改造地形，研究区域呈现中心下凹特征，形成一个局部的地形洼陷。该洼陷构成深水体系的主要沉积中心，捕获后期的重力流沉积物，形成本文研究的微盆地。

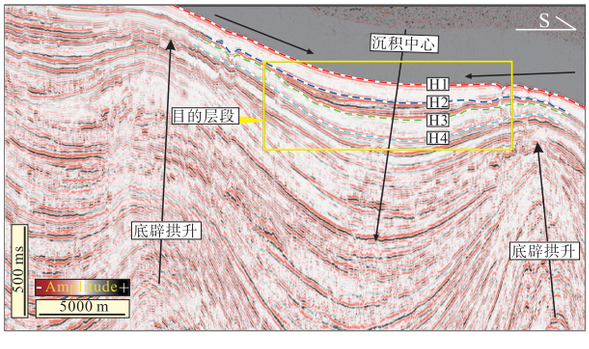


图 2 尼日尔三角洲微盆地内研究目的层段地震剖面

Fig. 2 Seismic profile of the study interval in Niger Delta microbasin

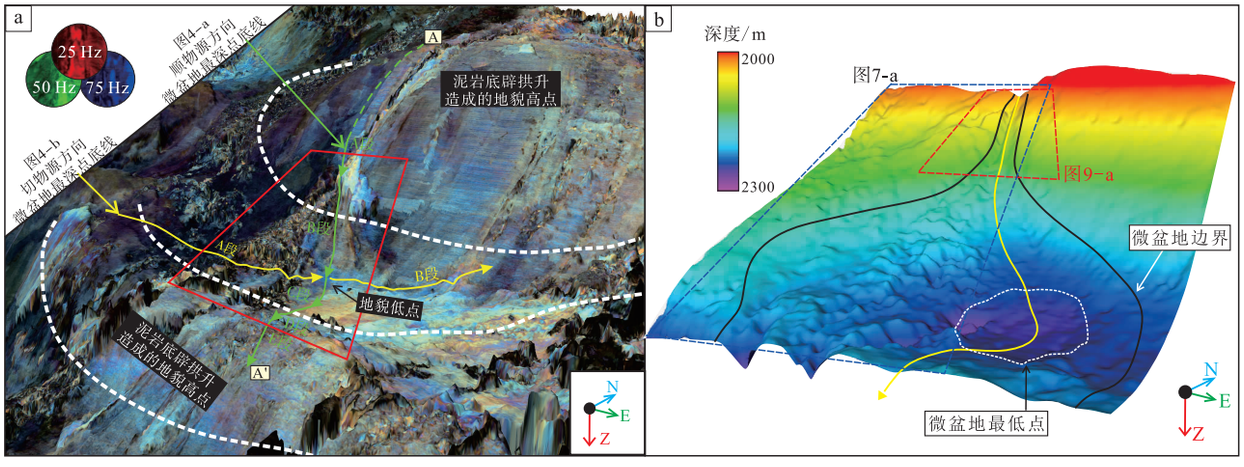
3.2 微盆地地貌特征

为研究微盆地地形地貌对目的层段重力流沉积物充填的控制作用，对目的层段底界面 H3 进行了详细追踪。研究区北、南两侧发育泥岩底辟，H3 界面向两端泥岩底辟上超，上覆地层厚度显著减薄，表明在 H3 沉积前泥岩底辟已充分活动，其对 H3 上覆地层的构造影响很小，此外，目的层段处于极浅层，上覆地层及构造对其地形地貌微弱。因此，认为 H3 界面可有效反映初始地貌。

利用 H3 界面构造图刻画研究区深水沉积体系发育前的微盆地地貌特征，并沿顺物源与切物源方向的主要地貌低点对微盆地进行定量表征。泥岩底辟发育于微盆地北部和南部(图 2；图 3-a)，形成了地貌高点；其中北部泥岩底辟拱升幅度大于南部。在三维构造图上，微盆地整体呈规则扇形，向西北—东南方向延伸(图 3-b)。

根据地形坡度的测量分析结果，沉积物顺物源沿微盆地最深底线方向，深度范围约 1866～2216 m。微盆地地形坡度划分为 5 段（A～E）（图 4-a)。A、B、C 3 段坡向为东南向，其中 A 段位于北部泥岩底辟与微盆地过渡段，统计长度约 2 km，深度范围为 1866～1947 m，A 段为地形最陡部分，平均坡度为 2.8°；B 段为微盆地近端斜坡段，延伸长度约 6 km，深度范围为 1954～2180 m，平均坡度较 A 段缓和，为 2.3°；C 段为微盆地底部平坦段，延伸长度约 4 km，深度范围 2187～2216 m，平均坡度降至最低，为 0.5°；D 段坡向转变为西北，位于微盆地远端斜坡段，延伸长度约 6 km，深度范围 2140～2214 m，平均坡度 0.7°；E 段为南部泥岩底辟与微盆地远端过渡段，坡向转变回东南，延伸长度约 2 km，深度范围 2149～2196 m，平均坡度 1.8°。在沿切物源并经过微盆地最深点的方向上，深度范围约 2108～2200 m，地形划分为 A、B 两段(图 4-b)。其中 A 段延伸约 10 km，坡向为东北，A 段记录了坡度变化呈现先增加后减小的趋势，分别为 0.28°、0.65° 和 0.48°，平均坡度为 0.47°；B 段延伸约 6 km，坡向转变为西南，B 段记录两段坡度逐渐增加的趋势，分别为 1.03°和 1.25°，平均坡度为 1.14°。

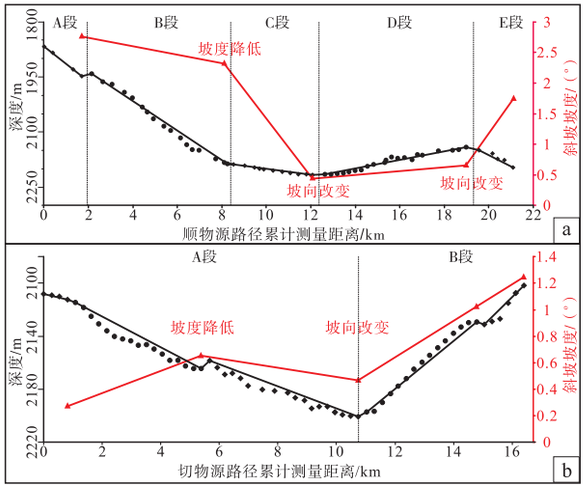
通过顺物源与切物源两个方向的定量结果表明，微盆地最大宽度约 16 km，最大长度约 15 km。顺物源方向上，坡度自北向南递减（北部最陡)，坡向由东南渐变为西北；切物源方向上，西侧的坡度缓于东侧，且西侧的侧向限制程度更低。微盆地内部的深度自西北向东南递增，最深点位于东南侧，距离微盆地入口约 12 km，最大深度达 90 m。



a—三维构造图，由分频 RGB 属性效果展示；b—微盆地界面 H3 等 T0 三维图

图 3　尼日尔三角洲微盆地三维构造图

Fig. 3　The topographic map in Niger Delta microbasin



a—顺物源方向沿微盆地最深底线坡度统计；b—切物源方向过微盆地最深底线坡度统计

图 4　尼日尔三角洲微盆地地貌低点斜坡坡度统计

Fig. 4　Statistical results about the slope gradients of the main topographic low in Niger Delta microbasin

4　地震相特征以及沉积解释

4.1　地震相描述

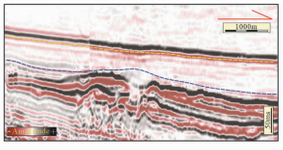
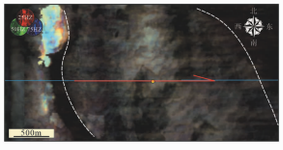
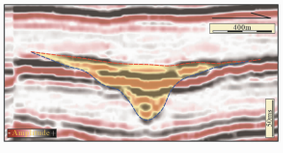
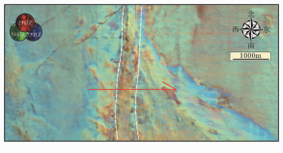
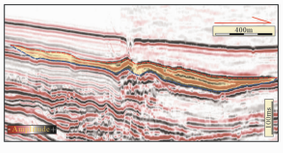
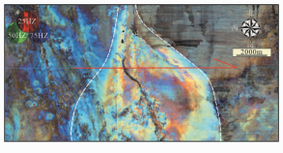
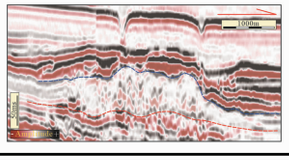
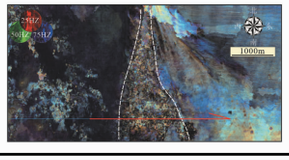
基于尼日尔三角洲盆地研究目的层段的平面地震属性与地震相分析，识别出 4 种地震相(表 1)。地震相 1：剖面上地震同相轴振幅极弱，但连续性较好，同相轴之间为平行结构，外部形态呈披覆状或席状，平面上呈现深黑色不规则状。地震相 2：剖面上地震同相轴具有中—强振幅，连续性一般，底部具有侵蚀下切面，外部形态呈现 V/U 形，平面上呈现亮黄色条带状。地震相 3：在剖面上地震同相轴振幅较强，侧向连续性好，具有亚平行—平行层状结构，外部形态呈现为楔状与透镜状，平面上表现亮黄或亮红色扇状或长舌状。地震相 4：在剖面上地震同相轴振幅变化不定，连续性极差，同相轴错断明显，具有杂乱反射结构，外部形态为丘状，平面上表现为暗淡夹亮色斑点不规则状。

4.2　地震相解释

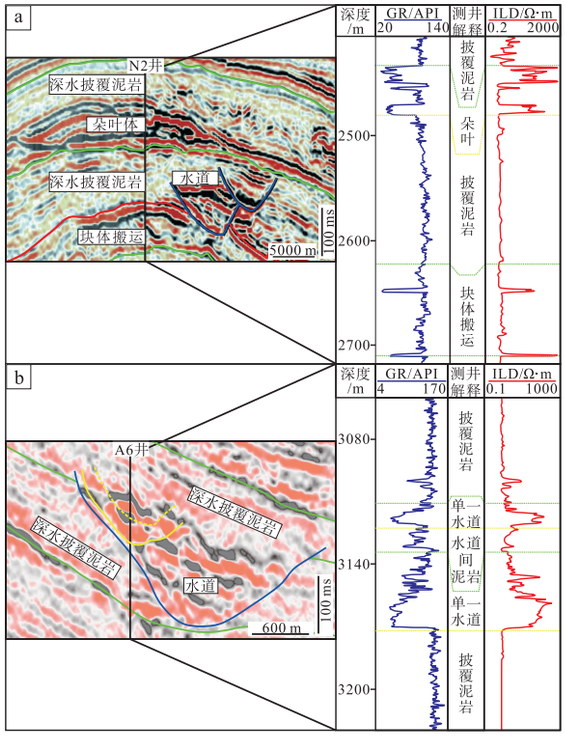
结合先前学者对深水沉积地震相的解释，并参考尼日尔三角洲深水区相似地震相的测井响应，确定本研究区不同地震相特征所代表的沉积类型(表 1)。地震相 1 在测井曲线上，GR 曲线为高值(图 5)，该相被解释为深水披覆泥岩（Cross *et al.*, 2009；Zhang *et al.*, 2015），是由低密度浊流以及悬浮沉积物的细粒沉积物在极低的沉积速率下形成。地震相 2 具有 V/U 形反射底界面，在测井曲线上，表现为高 GR、高电阻率特征(图 5)，整体形态呈“钟型”，该相解释为水道沉积(Abreu *et al.*, 2003；Deptuck *et al.*, 2003)。地震相 3 测井曲线上具有较大幅度的 GR 曲线和电阻率曲线(图 5)，整体主要表现为锯齿状的“箱型”或“钟型”，该相解释为朵叶体沉积(Saller *et al.*, 2008；Posamentier and Kolla, 2003)，是由于水道流体能量减弱至一定程度后，沿流动方向的侵蚀能力减弱，沉积物沿物源方向扩散沉积产物。地震相 4 具有杂乱反射特征，测井曲线上，主要表现为高

表 1 尼日尔三角洲微盆地目的层段 4 种主要地震相

Table 1 Four main seismic facies documented in Niger Delta microbasin

地震相及其解释	特征描述	地震剖面	RGB 分频属性平面
地震相 1：深水披覆沉积	剖面：弱振幅，连续性好，平行层状反射；披覆状或席状 平面：深黑色不规则状		
地震相 2：水道沉积	剖面：中-强振幅，连续性一般，V形反射结构； 平面：亮黄色细直状或条带状		
地震相 3：朵叶体沉积	剖面：强振幅，连续性好，平行-亚平行层状反射结构；楔状或透镜状； 平面：亮黄或亮红色扇状		
地震相 4：块体搬运沉积	剖面：振幅变化，连续性差，杂乱反射结构，外部形态呈丘状； 平面：暗色夹亮色斑点舌状		

GR 曲线和低电阻率曲线特征，整体呈指状形态（图 5），该相被解释为块体搬运沉积（Posamentier and Kolla，2003；Zhao *et al.*，2019；Chima *et al.*，2020），是由于沉积体沿斜坡向下发生滑动垮塌而形成。



a—地震相 1、地震相 3、地震相 4 测井响应（据李磊等，2010，有修改）；b—地震相 1、地震相 2 测井响应

图 5 尼日尔三角洲深水区地震相测井响应特征

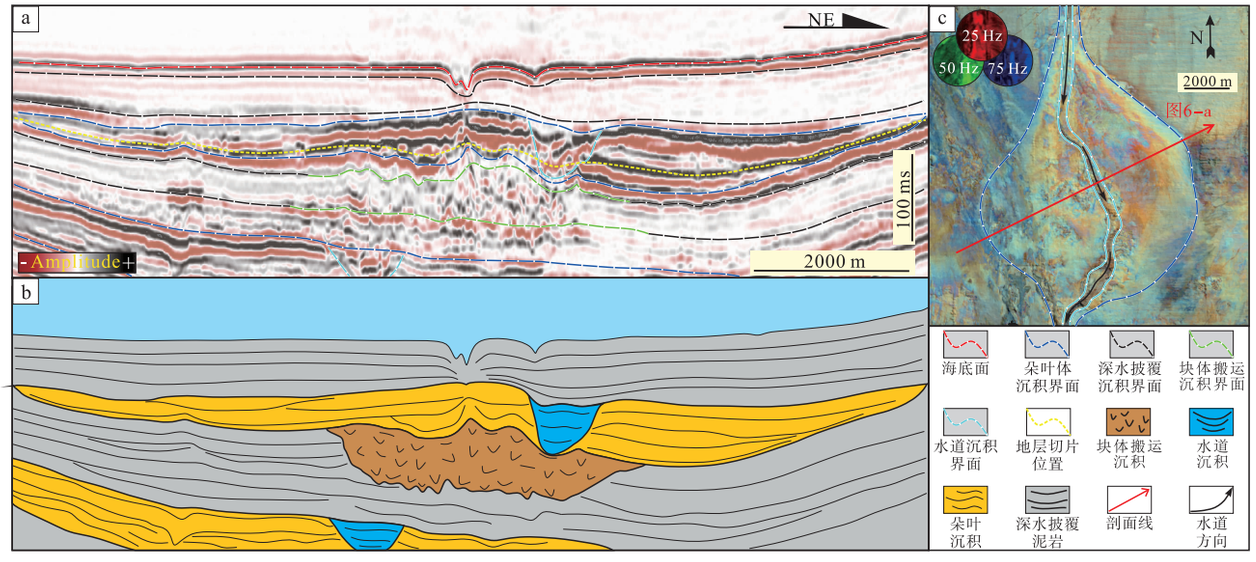
Fig. 5 Well log response characteristics of seismic facies in Niger Delta deepwater area

5 结果

5.1 深水沉积体系类型表征

基于地震剖面解释及地震相识别结果，尼日尔三角洲微盆地内深水沉积体系垂向上按照时间依次发育块体搬运沉积、水道沉积、朵叶体沉积、深水披覆泥岩沉积（图 6-a，6-b）。

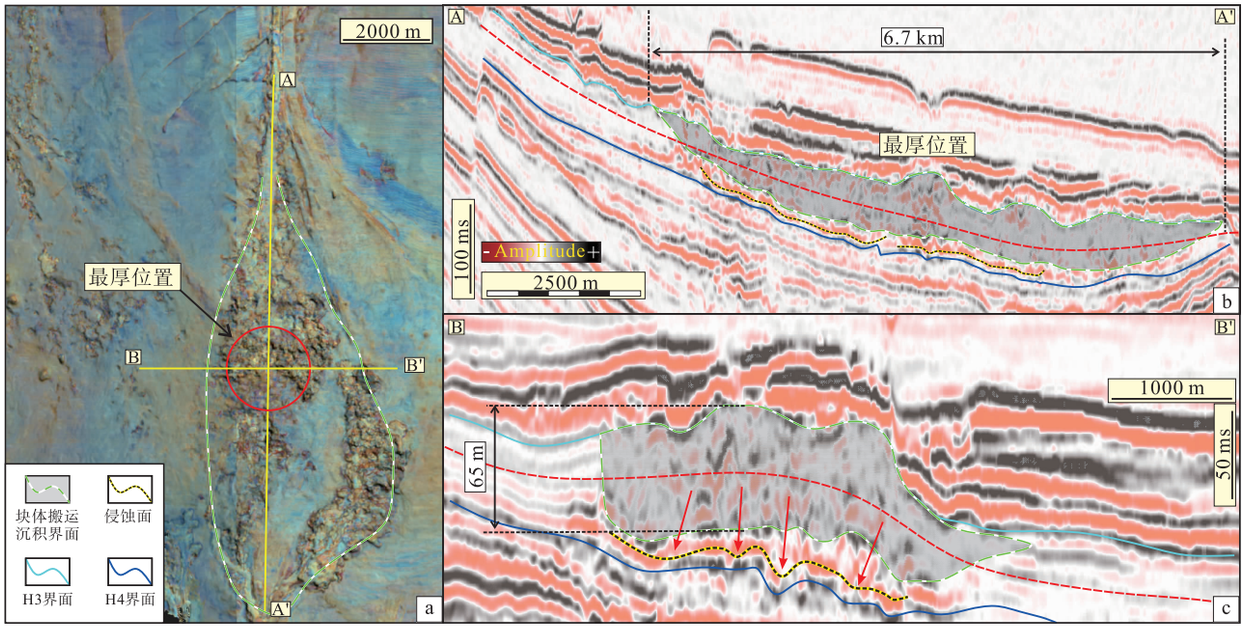
块体搬运沉积是深水朵叶沉积体系中最早形成的沉积单元，发育在 H3 与 H4 界面之间。这类块体流对基底侵蚀作用强烈，剖面上可见下伏地层明显的侵蚀面（图 7-b）。沿流向方向，其对目的层底界面侵蚀程度增大，厚度逐渐增加，在微盆地中部平缓处具有最大厚度，以地层速度 1900 m/s 换算，最大厚度约为 65 m，顶面呈丘状突起且具有不规则的上表面。平面上呈现舌状（图 7-a），碎屑物质堆积处表现为杂色亮斑，整体延伸长度为 6.7 km。



a—未解释原始地震剖面；b—解释后剖面；c—分频 RGB 属性图

图 6　尼日尔三角洲微盆地目的层主要地震相典型剖面

Fig. 6　Typical profile of the main seismic facies in the study interval in Niger Delta microbasin

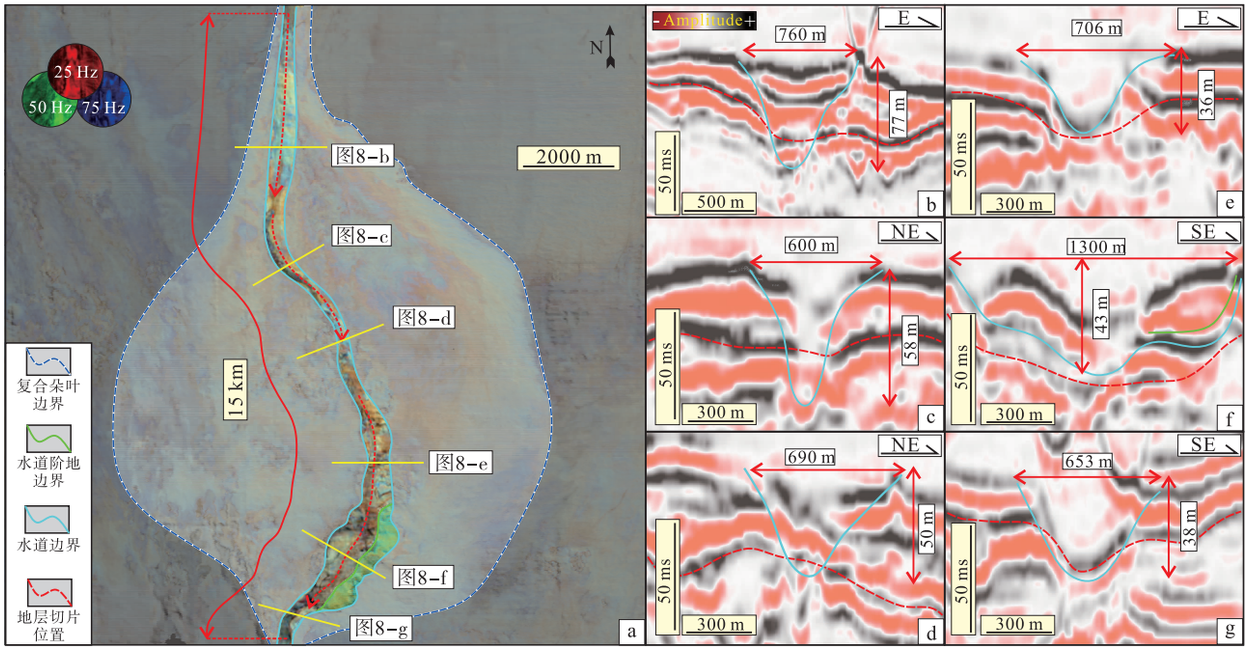


a—块体搬运沉积 RGB 分频属性；b—块体搬运沉积顺向地震剖面；c—块体搬运沉积切向地震剖面

图 7　尼日尔三角洲微盆地块体搬运沉积分频 RGB 属性平图以及地震剖面

Fig. 7　Spectral decomposition RGB attributes map of MTDs and seismic sections in Niger Delta microbasin

水道沉积作为体系中持续发育的沉积单元，剖面上可见水道沉积单元叠置在块体搬运沉积上方，表明其形成于块体搬运沉积完全之后，并在顶界面 H2 仍可见有水道发育特征(图 6-a)。水道形态与流向受地形控制。在微盆地近端处，地形坡度较大(图 4-a)，导致水道内沉积物流速较大，对下伏地层侵蚀能力较强，剖面上主要以深度较大的“V”型下切(图 8-b，8-c，8-d)；在平面上则表现为弯曲度较低的顺直长条状(图 8-a)。随着地形坡度的降低(图 4-a，4-b)，进入微盆地的中部，水道内沉积物流速逐渐降低，侵蚀能力也随之下降，此时，剖面上呈现出“U”型特征(图 8-e，



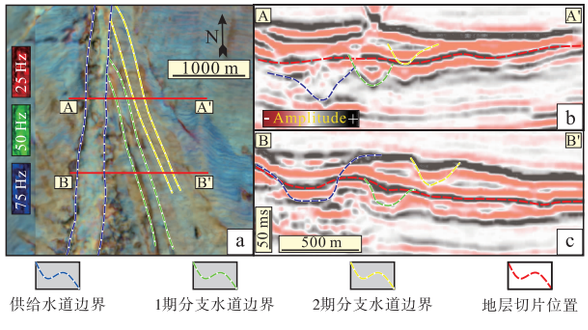
a—深水水道 RGB 分频属性平面图；b，c，d，e，f，g—一系列垂直水道流向地震剖面图（厚度以地层速度 1900 m/s 换算）

图 8 尼日尔三角洲微盆地水道沉积分频 RGB 属性平图以及一系列地震剖面

Fig. 8 Spectral decomposition RGB attributes map of channel and a series of seismic sections in Niger Delta microbasin

8-f，8-g），在弯曲段还可见阶地的产生（图 8-f）；平面上呈现条带状，弯曲度与宽度都增大。由于地形坡度与地貌的变化，水道在微盆地内易发生改向，其流向与顺物源最深底线方向一致，水道沿着流向方向延伸距离为 15 km。

朵叶体沉积覆盖在块体搬运沉积之上，并被后期水道所侵蚀。朵叶体分布范围基本覆盖整个微盆地，在 RGB 分频属性平面图上呈现扇状，表面可见供给水道。朵叶主体呈亮黄色，侧缘至边缘颜色由亮蓝色逐渐过渡到暗蓝色（图 6-c）。地震剖面



a—分支水道 RGB 分频属性平面特征；b，c—切分支水道地震剖面图

图 9 尼日尔三角洲微盆地分支水道分频 RGB 属性平面与地震剖面

Fig. 9 Spectral decomposition RGB attributes map and seismic sections of the small channel in Niger Delta microbasin

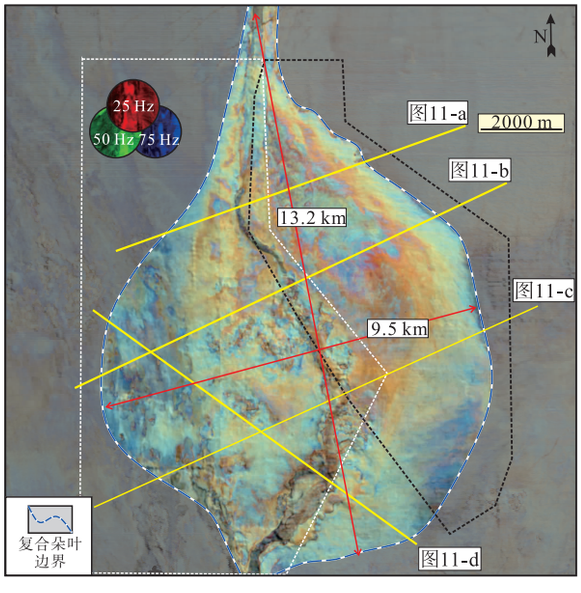


图 10 尼日尔三角洲微盆地复合朵叶分频 RGB 属性平面

Fig. 10 Spectral decomposition RGB attributes map of the composite lobe in Niger Delta microbasin

上，朵叶近到中端外部形态呈楔形，由多根中到强连续性、强振幅波谷同相轴组成，逐渐过渡到朵叶远端，由单根强连续强振幅波谷同相轴构成。在复合朵叶边界，可见上下同相轴合并，振幅变弱以及

上超特征(图 6-a)。此外，在复合朵叶近端处，表面发育有分支水道(图 9-a)，分支水道剖面与平面特征较深水水道沉积相似，但深度更浅，延伸长度也更短(图 9-b，9-c)。

复合朵叶规模较大，从供给水道口至朵叶末端长度约 13.2 km，最宽处约 9.5 km，面积约 70 km^2，以地层速度为 1900 m/s 换算，厚度分布在 14～67 m 之间，厚度分布较不均匀，复合朵叶东侧厚度较西侧更大(图 10)。

复合朵叶是该微盆地内部最主要的充填沉积单元，占据了大部分的可容空间。因此，将针对微盆地内发育的复合朵叶进行内部构型精细解剖研究。

5.2　朵叶构型解剖

对于朵叶沉积体系的构型级次划分，国内外许多学者利用野外露头以及地下高分辨率地震资料进行了深入的研究，并产生了一系列的构型划分方案(Deptuck *et al.*，2008；Straub and Pyles，2012；林煜等，2014；Terlaky *et al.*，2015；Zhang and Li，2020)。不同的研究方法与资料类型（地震资料与露头资料）会影响级次划分方案的结果（Cullis *et al.*，2018)。对于朵叶构型级次划分，对比了不同学者所划分的构型方案并结合本次所采用数据方法，采用 Deptuck 等（2008）的划分方案，将朵叶划分为复合朵叶与单一朵叶 2 个级次。

复合朵叶是本次研究中的最大级次，其主要是多个单一朵叶通过纵向上叠置堆积形成的。对复合朵叶平面与剖面内部单一朵叶进行构型解剖，确定不同期次单一朵叶的平面形态、定量规模、复合样式以及演化模式。

5.2.1　复合朵叶内部单一朵叶识别

单一朵叶是海底扇朵叶体系的基本构型单元，其形态、规模及内部构成受沉积过程、古地形限制程度等因素的影响而存在差异性。

平面上，单一朵叶主要呈舌状或扇状结构。基于 H2 与 H3 界面约束，结合地层切片、平面分频属性图与剖面地震反射特征，对复合朵叶内部不同期次的单一朵叶进行了精确划分。地震剖面揭示了不同期次单一朵叶的叠置关系，其间以 1 个中到强振幅、中等连续性的波峰同相轴分隔。

剖面上，单一朵叶近到中端形态呈楔形，具有一定的倾角，同相轴上可见分支水道导致的侵蚀下凹面。远端则表现为单一水平同相轴。在单一朵叶主体内部为多根连续性好、强振幅同相轴，呈平行亚平行结构；在单一朵叶边缘处表现为底部同相轴上超，上下同相轴逐渐合并，并伴有同相轴振幅减弱与中断现象(图 11)。平面 RGB 分频属性图上，强振幅单根波峰地震同相轴表现为明亮蓝色；相对应地，强振幅低到中地震同相轴则表现为明亮红黄色。当地震同相轴振幅减弱时，平面图上表现为亮度逐渐降低(图 12)。因此，平面 RGB 分频属性图上颜色突变处，指示了不同期次单一朵叶的叠置边界，而平面 RGB 色彩由亮色转为暗色，则标志着单一朵叶的边界。

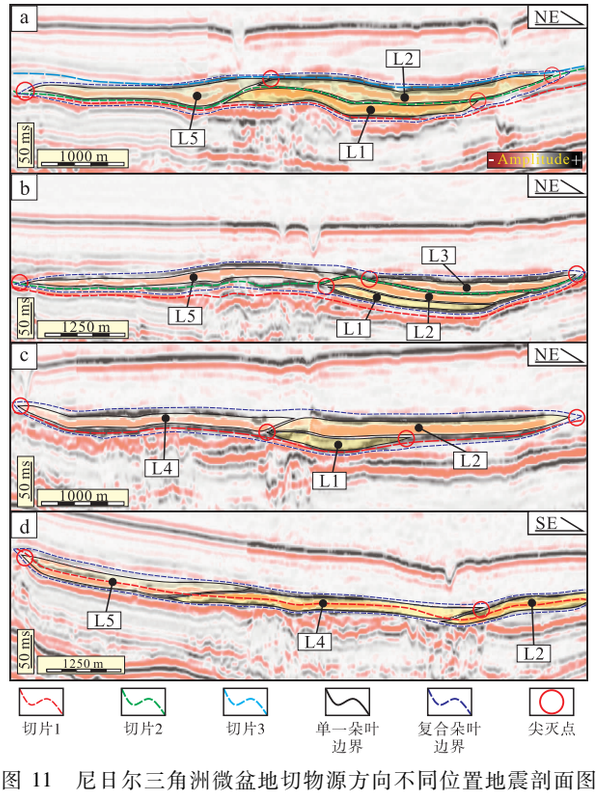
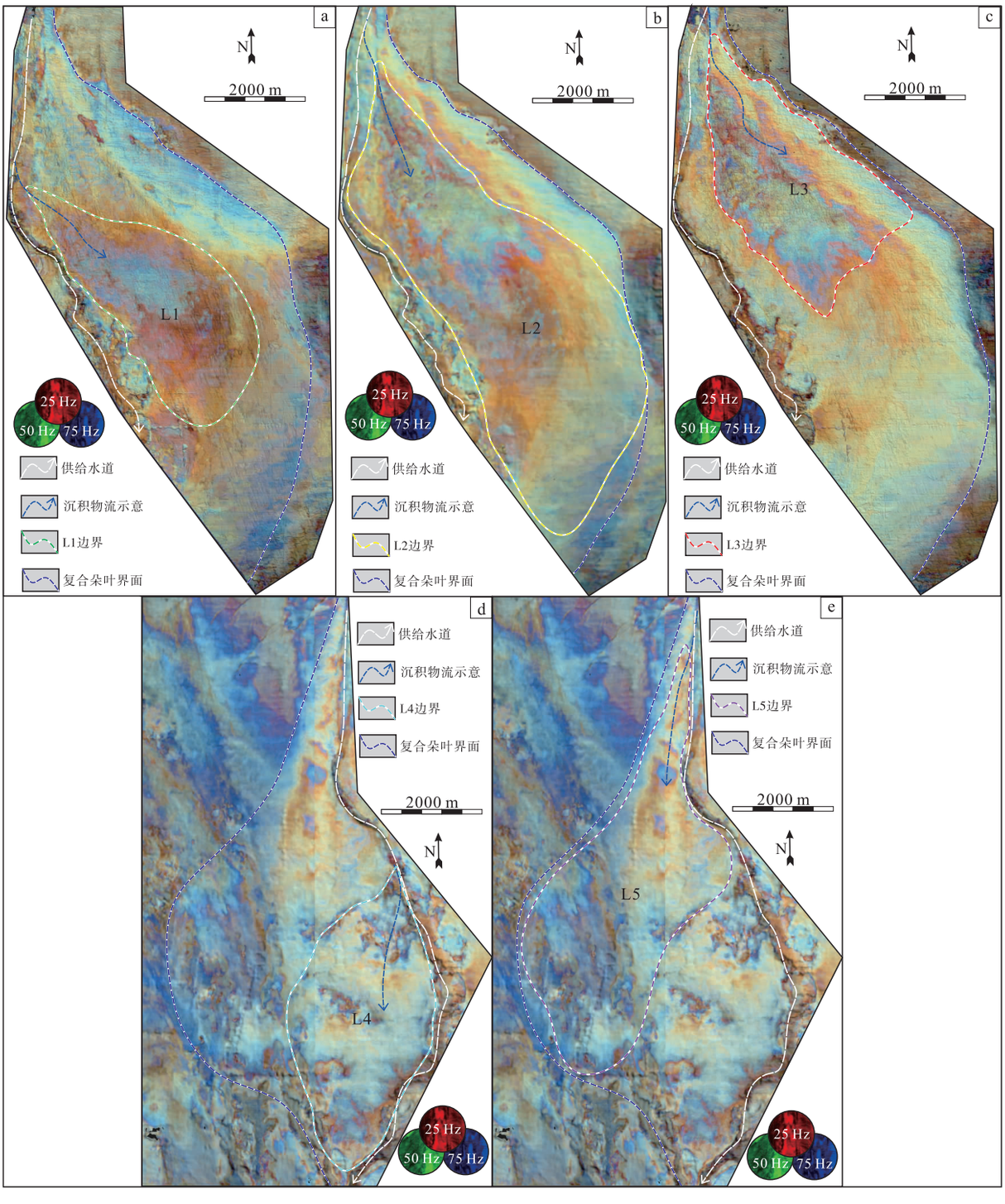


图 11　尼日尔三角洲微盆地切物源方向不同位置地震剖面图

Fig. 11　A series of seismic profiles different segments of across provenance in Niger Delta microbasin

地震剖面与地层切片的构型解剖表明，该复合朵叶由 5 期单一朵叶复合而成(图 12)。根据单一朵叶在剖面上的切割和叠置关系，确定位于深水水道东侧的 3 期单一朵叶形成时间早于西侧发育的 2 期(图 11)。东侧 3 期单一朵叶依次向东北向迁移，规模呈现先增大后减小趋势(图 13-a，13-b，13-c)，长度分布在 5～10 km 之间，宽度分布在 2～

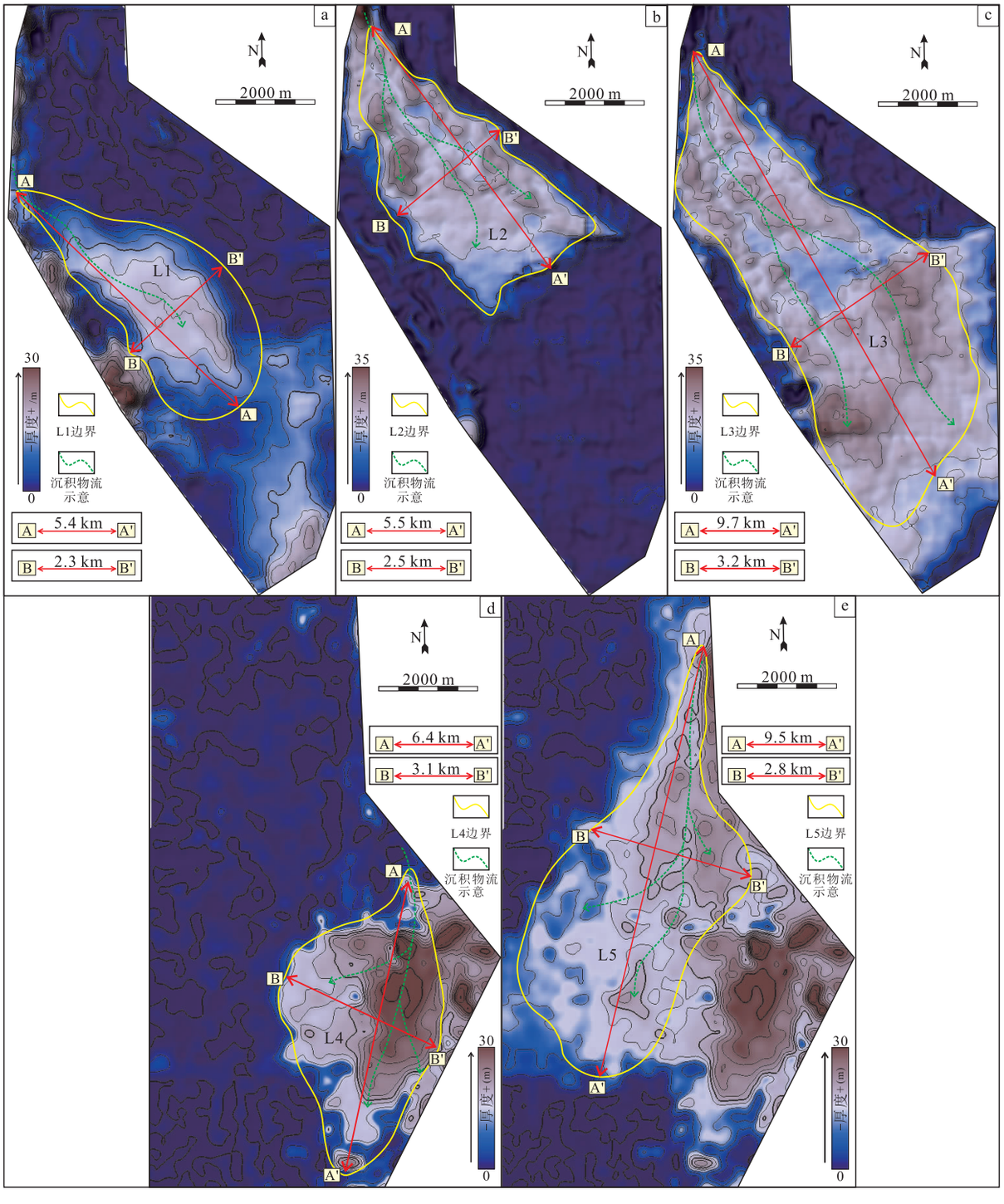


a—单一朵叶 L1；b—单一朵叶 L2；c—单一朵叶 L3；d—单一朵叶 L4；e—单一朵叶 L5

图 12 尼日尔三角洲微盆地不同期次单一朵叶 RGB 分频属性平面分布

Fig. 12 Spectral decomposition RGB attributes map of the single lobe in different stages in Niger Delta microbasin

4 km 之间，面积分别约为 11 km^2，24 km^2 和 18.3 km^2，厚度范围为 14～34 m。西侧发育的 2 期单一朵叶依次沿西北向迁移，其中，L4 长度为 6.4 km，宽度为 3.1 km，面积约为 12.2 km^2，厚度分布在 14～38 m 之间（图 13-d）。L5 长度为 9.5 km，宽度为 3 km，面积约为 17.7 km^2，厚度分



a—单一朵叶 L1；b—单一朵叶 L2；c—单一朵叶 L3；d—单一朵叶 L4；e—单一朵叶 L5

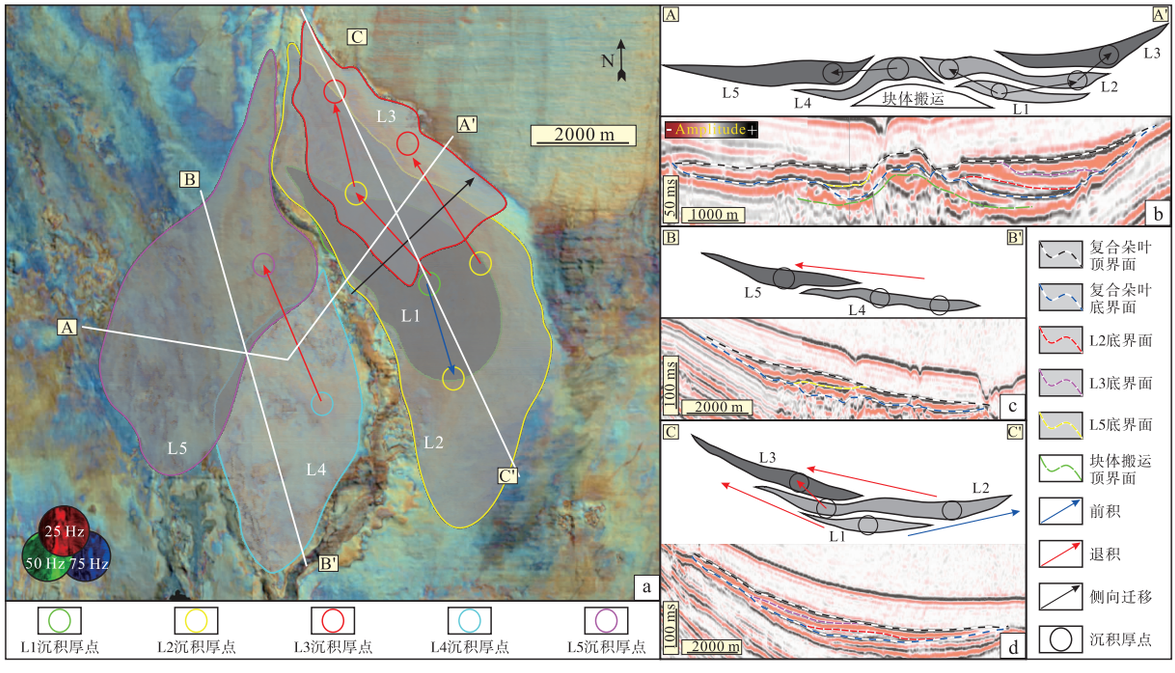
图 13　尼日尔三角洲微盆地内不同期次单一朵叶规模厚度分布

Fig. 13　The size and thickness of a single lobe at different stages in Niger Delta microbasin

布在 28~30 m 之间(图 13-e)。

5.2.2　单一朵叶叠置样式

综合平面、剖面以及不同期次单一朵叶的厚度分布，分析了本次复合朵叶的叠置样式。平面上，东侧发育的单一朵叶表现出显著的朵叶主体叠置特征，不同期次的单一朵叶相互叠置程度较大



a—不同期次单一朵叶位置以及最厚点分布样式与迁移方向，不同单一朵叶最厚点；b，c，d—单一朵叶剖面叠置样式剖面图

图 14 尼日尔三角洲微盆地内不同期次单一朵叶平面叠置样式

Fig. 14 Different stages of single lobe plane stack and migration style in Niger Delta microbasin

（图 14-a）；而西侧的单一朵叶为则以朵叶边缘叠置为主，不同期次的单一朵叶叠置部分很小。在横切复合朵叶剖面上，东侧 3 期单一朵叶沿东北向呈斜上方垂向迁移的发育样式（图 14-b），西侧 2 期单一朵叶则沿西北向呈水平迁移。顺物源剖面表明东侧 3 期单一朵叶呈先前积后退积的样式（图 14-d），而西侧 2 期单一朵叶仅表现为退积样式（图 14-c）。厚度图反映不同期次单一朵叶的分布变化以及最厚处的迁移路径与方向。东侧 3 期单一朵叶的沉积原点均覆盖于下伏单一朵叶的较薄部位（图 13-a，13-b，13-c；图 14-a）。例如在单一朵叶 L2 存在 3 个较厚点，其分别分布在 L1 的东北与东南边缘处；L3 最厚处则位于 L2 的东北边缘处。相比之下，西侧 2 期单一朵叶的最厚点有明显的西北向迁移特征。上述平面、剖面及厚度特征共同表明，该复合朵叶内部主要以退积型补偿叠置模式为主，并具有一定的前积型补偿叠置样式。

6 讨论

6.1 微盆地朵叶沉积演化主控因素

6.1.1 微盆地初始地貌

微盆地地形及其可容纳空间对内部发育的深水朵叶的几何形态、规模大小及演化过程具有显著的控制作用（Kneller，1995；Al ja'aidi *et al.*，2004；Gamberi and Rovere，2011；Botziolis *et al.*，2023）。一方面，随着微盆地内部逐渐被充填，可沉积空间不断减小，后续重力流沉积物将会越过当前微盆地，搬运至下一个微盆地或深海平原并卸载沉积（Beaubouef and Friedmann，2000；李磊等，2010；Sylvester *et al.*，2015）。因此，微盆地的最大可容纳空间决定其内部充填朵叶沉积体系的最大沉降规模。这种“充填—溢出”的沉积过程使得内部朵叶体的形态和分布面积在一定程度上继承微盆地的平面形态（Shultz and Hubbard，2005；Botziolis *et al.*，2023），并在剖面上表现为复合朵叶地震同相轴上超尖灭。另一方面，复合朵叶内部不同期次单一朵叶的分布与叠置样式也受到微盆地地形环境的控制。单一朵叶往往优先沉积于微盆地内地势最低点，其流动与沉积过程受微盆地地形的调节与限制。当地势最低点被早期 L1 充填后（图 12-a；图 14-d；图 15），由于微盆地初始地形侧向限制程度较强，后续单一朵叶难以沉积于早期朵叶的侧方，而多倾向于堆积在早期朵叶后方或前方新地势低点（图 14-d）。当微盆地初始低点的可容空间被完全

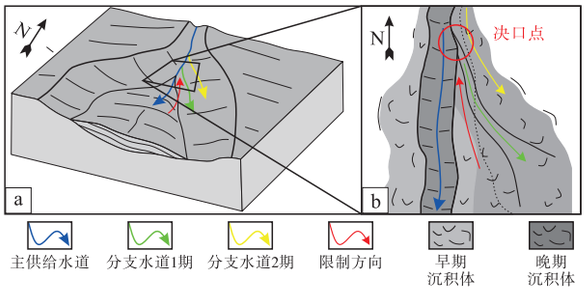


图 15　分支水道形成模式图(据 Gervais *et al.*, 2006, 有修改)

Fig. 15　Map of the formation pattern of ramified channels (modified from Gervais *et al.*, 2006)

充填后，供给水道受阻并发生决口，形成新的分支水道(图 9-a；图 15)。这些分支水道对下伏沉积体具有一定侵蚀作用，在地震剖面上表现为“V”型侵蚀界面，水道内所携带的重力流沉积物到达下一个地势最低点，由于环境限制程度减弱，这些重力流沉积物得以发散开并沉积为新一期单一朵叶。

6.1.2　早期沉积体的影响

早期沉积体主要包括最初的块体搬运沉积物及复合朵叶内部形成的单一朵叶。这些沉积体的形成过程对微盆地的地形地貌产生了动态变化，进而影响了微盆地内的地形坡度变化和可容空间分布。此外，早期沉积体表面的坡度与起伏程度对后续单一朵叶的沉积物流动路径和速率具有控制作用，从而影响其径向和侧向迁移方式(Martinez-doñate, 2023)。

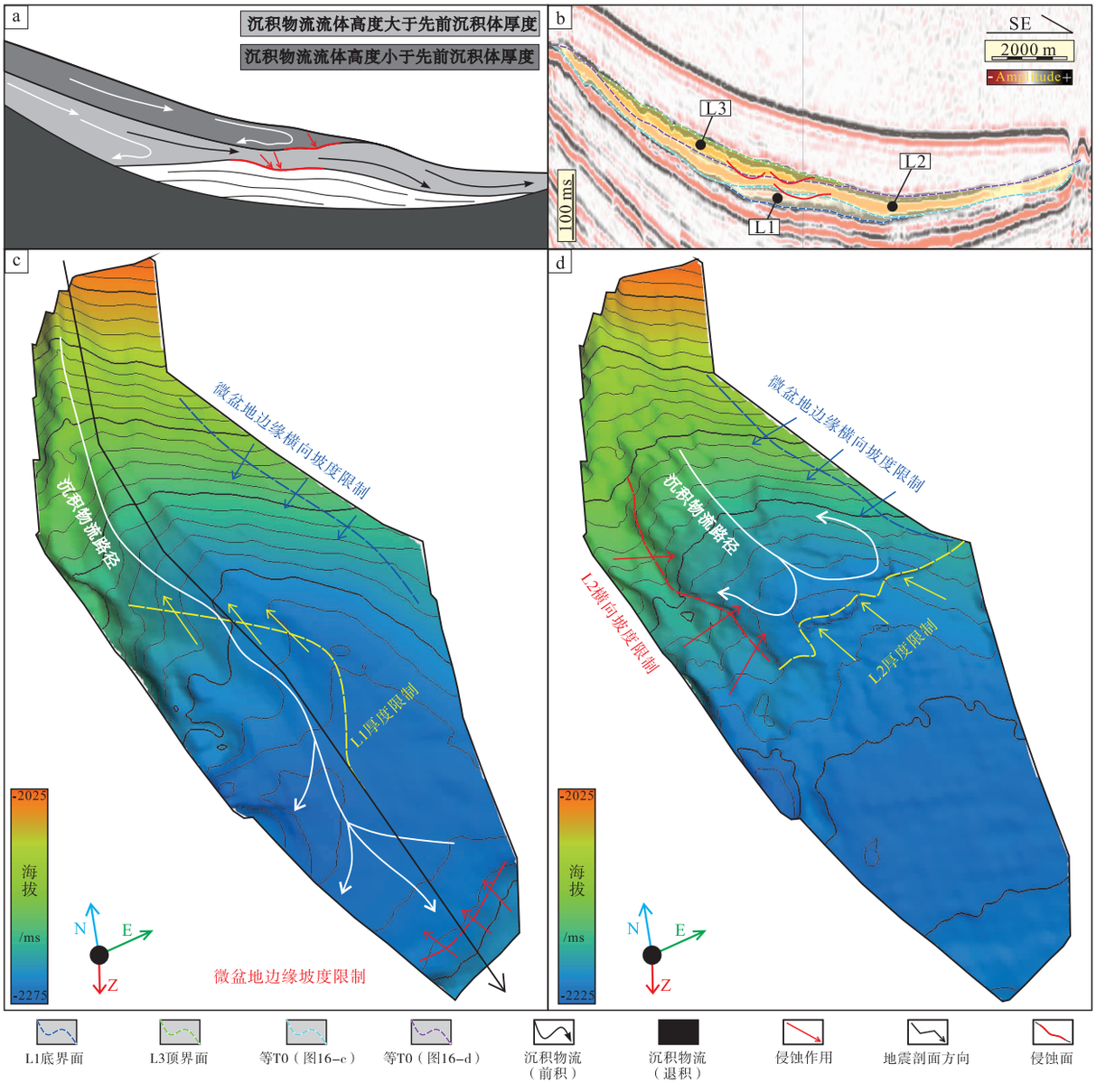
在径向迁移过程中可以识别出 2 种沉积模式：前积和退积。Kneller (1995) 与 Al-ja'aidi 等(2004) 通过物理模拟，以及 Gervais (2006) 通过高分辨率地震资料对科西嘉东部边缘的 Golo 浊积体系中朵叶研究指出，沉积模式差异主要是受早期沉积体起伏程度与后续沉积物流厚度之间的相对关系控制。当后续沉积物流体流经早期沉积体时，早期沉积体沉积形成的“微凸起”对沉积物流动路径产生正面阻碍。若此时沉积物流体厚度大于早期沉积体的起伏高度，沉积物流体下部受地形阻挡导致流速降低，发生反射并在早期沉积体的后缘方斜坡发生沉积，而流体上部则不受阻碍，可越过早期沉积物继续向前运移，在更远端的低洼区发生沉积，此时整体表现为前积模式(图 16-a)。例如，在 L2 沉积过程中，受下伏 L1 厚度的影响(图 16-b, 16-c)，由于沉积物流体厚度较大，一部分越过 L1，依照 L1 表面坡度梯度向前方流动，在其前部低洼区域散开沉积(图 13-b；图 16-c)，另一部分因流体后期厚度逐渐减小，不足以越过 L1 而在其后方沉积下来(图 13-b；图 14-d；图 16-b)。此外，当沉积物流体越过早期沉积体时，因流动截面收缩导致流速增大，对早期沉积体顶部产生侵蚀(图 16-b)。若早期沉积体起伏较大，对后续沉积物流形成显著地形阻挡，且在侧向上受初始地形或早期形成的沉积物表面横向坡度限制，流体无法发生侧向转向，最终在早期沉积体后方发生沉积，表现为退积模式。例如，在微盆地东侧中部因 L1、L2 沉积加积而形成较高地形凸起(图 16-d)，当携带 L3 的沉积物流体流经此处时，因流体厚度小于地形凸起，向下流动受到限制；在侧向上受到微盆地边界(图 5-b；图 16-d) 及 L2 沉积表面(图 13-b) 共同的横向坡度限制，最终沉积物流体被限制沉积在 L2 后方斜坡上(图 16-a, 16-d)。

在侧向迁移的过程中，早期沉积多发生于微盆地最低点。当后续重力流沿主水道运移至该区域时，受早期沉积体表面坡度所形成的局部地形梯度变化影响，迫使其沿着早期沉积体侧坡改变流动方向，从而发生侧向迁移(图 17-a)。最终，这些沉积物流至微盆地边缘时，受边缘的限制作用而停止迁移。侧向限制的强弱控制着单一朵叶之间的叠置程度：若侧向限制较弱，例如在 L4 沉积完毕后，由于西侧微盆地坡度梯度较小(图 5-b)，横向边缘梯度对下一期沉积物重力流的限制较弱，使得下一期单一朵叶 (单一朵叶 5) 能够在侧向开阔区域沉积，导致 2 期单一朵叶之间的叠置程度较小，表现为朵叶间边缘与边缘的叠置(图 14-a, 14-c)。相反，若侧向限制程度较强，如在微盆地东侧坡度较陡(图 5-b)，L3 受到早期沉积体影响虽有向东侧向迁移的趋势，但当迁移至东侧微盆地边缘时，其边缘会限制这种趋势，使得 L3 侧向迁移范围有限，导致与下伏 L2 叠置程度较大，表现为朵叶间主体与主体的叠置(图 14-b；图 17-b, 17-d)。

6.2　与其他深水沉积环境相比较

6.2.1　与盐岩底辟型微盆地比较

不同的底辟构造 (如泥岩底辟和盐岩底辟) 可形成不同样式的陆坡地貌(图 18-a, 18-b)，进而控制深水沉积体系的沉积模式 (Mayall and Stew-



a—单一朵叶前积与退积示意图；b—前积与退积的典型地震剖面；c—单一朵叶 1 顶面等 T0 图；d—单一朵叶 2 顶面等 T0 图（图 b 剖面平面位置见图 c 中黑色实线，图 c 与图 d 以三维效果展示）

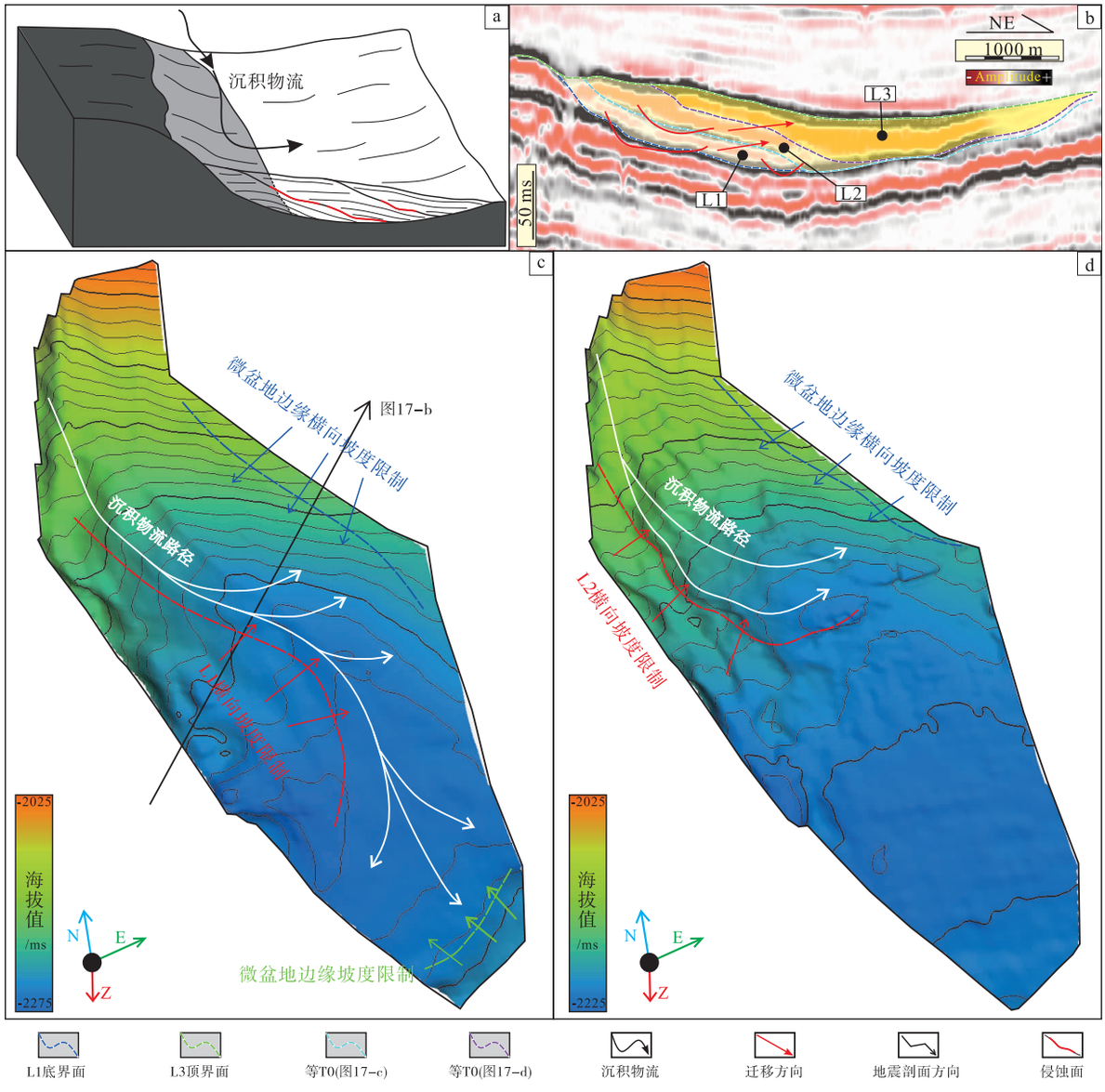
图 16 单一朵叶前积模式与退积模式

Fig. 16 Prograding pattern and retrograding pattern of single lobe

art，2001；尚文亮等，2020）。以墨西哥湾深水陆坡为代表的典型盐岩底辟区域，具有构造复杂、坡度变化显著的不规则陆坡地貌，直接影响沉积物重力流的搬运与沉积过程（Pirmez *et al.*，2000；Prather，2003；葛智渊和许鸿翔，2023）。Prather 等（1998）基于此定义了 3 类陆坡可容纳空间：（1）局限盆地的可容纳空间、（2）陆坡均衡面与阶梯状均衡面之间的愈合可容纳空间以及（3）陆坡可容纳空间（图 18-a，18-b）。

相比之下，泥岩因塑性能力较弱、底辟拱升幅度较低，其所形成的陆坡地貌通常更为平缓，多发育以愈合可容纳空间为主的半封闭微盆地（图 18-a，18-e）。因此，泥岩底辟型微盆地所捕获的重力流沉积物，其地层结构和构型模式明显不同于盐岩底辟型常见的池状微盆地。

盐岩底辟池状微盆地具有侧向封闭程度强、底



a—单一朵叶侧向迁移示意图；b—侧向迁移典型地震剖面；c—单一朵叶 1 顶面等 T0 图；d—单一朵叶 2 顶面等 T0 图

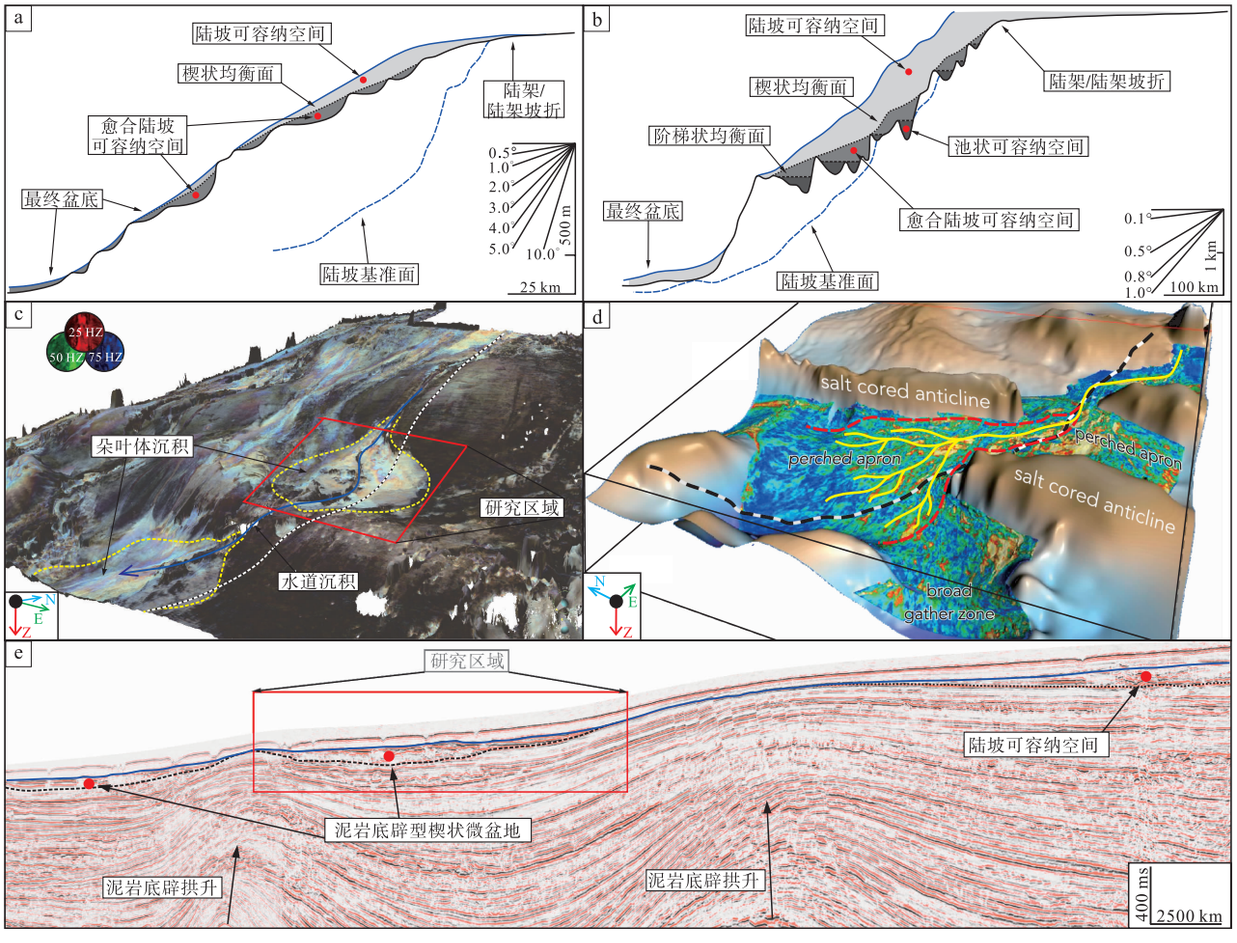
图 17　单一朵叶侧向迁移模式

Fig. 17　Lateral migrations pattern of single lobe

辟拱升幅度大(图 18-d)，可容纳空间较大，故重力流沉积体厚度较大，垂向上常发育多套由 MTDS-复合朵叶沉积—复合水道组成的沉积序列。本研究区微盆地内虽发育类似的沉积体系，但由于其封闭性不完全且底辟拱升程度低，仅发育 1 期该套沉积体系，且单期厚度规模较盐岩底辟环境下发育的沉积体系小。

在沉积过程中，泥岩与盐岩底辟型微盆地均表现为“充填—溢出”模式（Steffens *et al.*，2003；Adeogba *et al.*，2005；李磊等，2010；胡孝林等，2014）。两者的区别在于，在强局限性的盐岩底辟型微盆地中，沉积过程主要受控于局部地形坡度的变化，而泥岩底辟型微盆地由于中到低幅度微盆地构造形态，区域陆坡坡度对重力流的搬运与沉积更为显著，例如在本次研究中的微盆地内，当微盆地被充填完全，在区域陆坡的控制下，水道仍持续发育搬运重力流沉积物越过该微盆地，并在下一陆坡微盆地卸载沉积新的朵叶沉积体(图 18-c，18-e)。

此外，泥岩底辟型微盆地在平面上通常比盐岩



a—尼日尔三角洲盆地阶梯状陆坡剖面（据 Prather，2020，有修改）；b—墨西哥湾东部海底陆坡剖面（据 Prather，2020，有修改）；c—尼日尔三角洲盆地泥岩底辟陆坡局部三维构造图（研究区位置见红色框线）；d—安哥拉 Kwanza 盆地盐岩底辟陆坡局部三维构造图（据 Hay *et al.*，2012，有修改）；e—尼日尔三角洲盆地泥岩底辟陆坡典型剖面

图 18 不同底辟构造形成不同的陆坡类型

Fig. 18 Different slope types formed by different diapir structures

底辟型微盆地展布更广（图 18-c，18-d），这种规模差异直接影响内部发育朵叶的平面分布与叠置程度。例如 Booth 等（2003）研究的墨西哥湾一处盐岩底辟型微盆地长约 10 km，宽约 2.5 km；Gemma 等（2017）研究的下刚果盆地一处盐岩底辟型微盆地长约 15 km，宽约 10 km，其内部发育的朵叶复合体外部形态均呈现长条形，内部复合样式多以垂向加积堆叠为主。相比之下，本研究微盆地长约 15 km，宽约 16 km，因此朵叶沉积体具有更广泛的平面展布，不同期次的单一朵叶侧向迁移程度也更高。

6.2.2 与其他非底辟微盆地比较

微盆地的形成机制除常见的底辟作用外，还包括断层作用及沉积相关作用等。例如，张佳佳（2019）在尼日尔三角洲陆坡区逆冲断层相关微盆地的研究中指出，该类型微盆地内复合朵叶体的沉积过程中明显受控于沉积前及沉积过程中的地貌变化，表现出与本次研究类似的前积和退积迁移叠置样式。但由于逆冲断层活动在时空上具有较强的差异性，相关微盆地地貌也具有更加复杂的动态变化特征，导致其内部朵叶沉积过程与迁移叠置模式相比泥岩底辟型微盆地更为复杂和多变。

沉积作用相关的微盆地主要包括由地层差异压实作用形成的地形洼陷，以及陆坡区块体滑塌废弃后形成的侵蚀凹坑。与泥岩底辟型微盆地相比，此类微盆地通常规模较小，受控于短期地质作用，内部地层层序和沉积充填结构也相对简单。Spychala 等（2015）在南非卡鲁盆地 Laingsburg 沉积中心陆

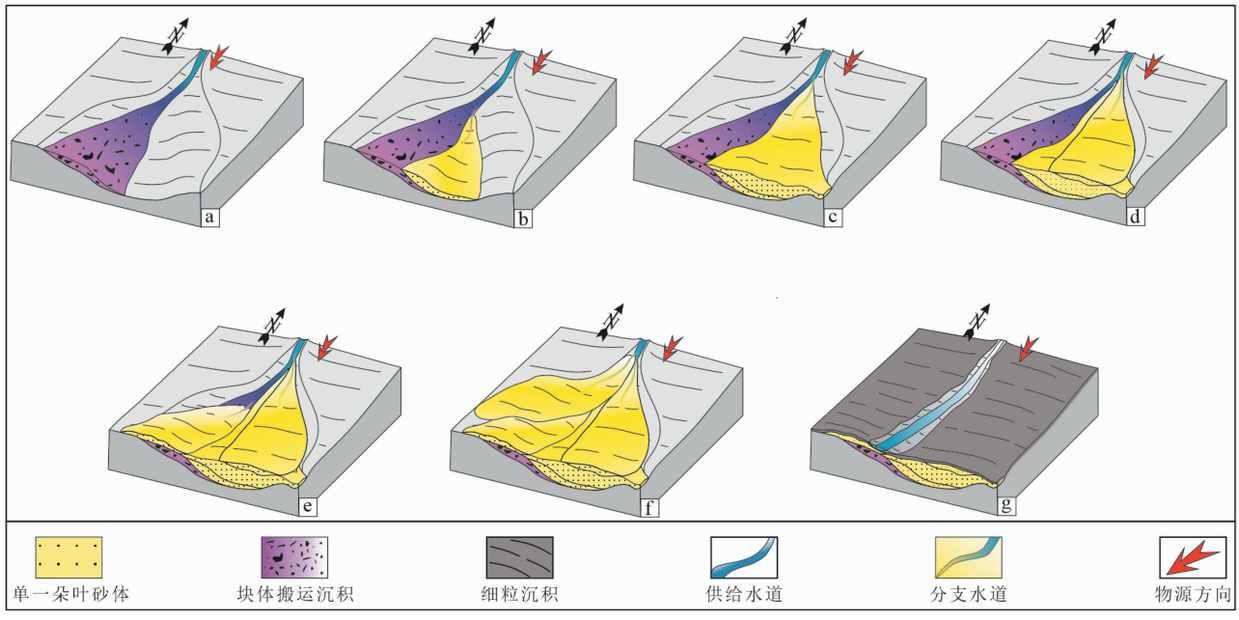


图 19　微盆朵叶沉积体系充填模式图

Fig. 19　Filling pattern diagram of microbasin lobe sedimentary system

坡区所研究的微盆地即属该类型，其基于约 2.8 km 厚的露头剖面详细描述了微盆地内朵叶的地层和沉积特征。与本研究中的微盆地相比，两者都具有较低的长宽比，不同期次沉积物流均表现出受地形限制而发生流向调节与反射的现象。然而，Spychala 等（2015）研究的微盆地内朵叶规模较小，一般在 6～10 km 之间，朵叶间叠置表现为垂向加积或极其轻微的补偿叠置。此外，在 Spychala 等（2015）描述的微盆地中，同样记录了因陆坡基准面降低而导致朵叶被末期水道侵蚀的现象。

6.3　微盆地复合朵叶充填模式

自北部泥岩底辟到微盆地的地貌坡度变化形成了显著的地形梯度。在此地形梯度驱动下，深水水道将重力流沉积物运输过来并在该处微盆地的低洼地形将沉积物卸载。在该微盆地内，朵叶沉积体系形成初期，微盆地西侧的地形坡度的突然变缓以及侧向限制性的突然降低（图 5-b），导致水道内部的沉积物流速下降，不同粒径级次的沉积物开始堆积，形成了块体搬运沉积。这些沉积物不仅对微盆地底部形成强烈的侵蚀，另一方面沉积下来的大量泥砾形成丘状地形，改变了西侧微盆地地貌（图 7；图 19-a）。

随着底部块体搬运沉积完全，深水水道内重力流逐渐由碎屑流向浊流转变。微盆地地势最低点位于块体搬运沉积东侧，使得沉积物更易向微盆地东侧散开。同时，先前沉积下来的块体搬运沉积物改变了地形，使得水道流动路径受阻，导致沉积物流动方向发生改变。这些因素使得单一朵叶 L1 沉积在微盆地中心低洼区域（图 11；图 12-a；图 19-b）。

L1 的充填使微盆地最初的地势低点抬升，限制了上游水道的流动，而水道流动路径又受到先前沉积物形成的东侧斜坡的影响，发生流向的转变。此时微盆地可容空间仍较充足，加之 L1 的沉积平缓了微盆地底部地形坡度，沉积物流体受限程度较低，使 L2 得以向东南方向迁移，形成较大规模的前积朵叶体（图 12-b；图 19-c）。随着微盆地东侧远端逐渐被充填，L2 对后续的沉积物流体形成了地形阻碍，导致 L3 发生退积，直至填满微盆地东侧区域（图 12-c；图 19-d）。

东侧可容纳空间被填满后，上游水道发生决口改道，转向微盆地西侧未充填区域，L4 随之沉积于微盆地西侧的远端（图 19-e）。西侧远端空间被 L4 充填完全，后期的 L5 的沉积受其地形限制，表现为退积的特征（图 19-f）。

这种多期单一朵叶迁移与叠置构成内部结构复杂的复合朵叶，导致储集层物性与连通性在空间上

具有显著差异。侧向限制较强时，单一朵叶之间叠置程度较高，表现为朵叶主体之间叠置，此时储集层厚度较大，连通性较好。相反，若侧向限制程度不足，导致不同期次单一朵叶发生大规模的侧向迁移，形成朵叶间主体与边缘的叠置或边缘与边缘的叠置，储集层内连通性分布不均。因此，精细刻画复合朵叶内部结构及单一朵叶的迁移叠置模式，对储集层预测以及井位部署具有重要帮助。

该微盆地完全充填后，水道继续输送重力流沉积物，对该微盆地内已充填的深水朵叶沉积体系产生侵蚀作用(图 19-g)。此类侵蚀性水道对储集层侧向连通性具有重要影响：若侵蚀水道内充填为砂质沉积物，相较于朵叶储集层，水道砂质储集层一般具有更高的孔隙度和渗透率，可构成油气运移的优势通道；然而，侵蚀水道内充填为泥质沉积物时，则会形成渗流屏障，隔离水道两侧的朵叶砂体储集层，阻碍内部流体的流动。因此，需综合其他静动态资料，对此类水道沉积特征进行系统分析，以准确刻画储集层结构并制定有效的开发策略。

随着海平面上升，最终深水披覆泥岩覆盖了整个微盆地，标志着该朵叶沉积体系沉积完全。

7 结论

1）尼日尔三角洲泥岩底辟型微盆地内发育的复合朵叶由 5 期单一朵叶构成，东西两侧具有显著形态与叠置模式的差异。微盆地东侧发育 3 期单一朵叶（长度 5~9 km，宽度 2~3 km，面积 11 km^2~18.3 km^2，厚度 14~34 m），西侧发育 2 期单一朵叶（长度为 6.4 km 和 9.5 km，宽度为 3.1 km 和 3 km，面积为 12.2 km^2 和 17.7 km^2，厚度 14~38 m），东西两侧被深水水道分隔。东侧以朵叶主体叠置为主，表现为先前积后退积的迁移模式；西侧则以边缘叠置为主，呈退积模式。这种差异反映了微盆地内地貌差异与可容纳空间分布的非对称性。

2）朵叶沉积受初始地貌与早期沉积体共同控制，其迁移模式受地形与流体之间的动态调节作用控制。朵叶优先沉积于微盆地初始低点，随着早期地势低点被充填，后续朵叶迁移受早期沉积体自身厚度与边缘地形控制。具体而言，流体厚度与地形起伏的相对关系决定了前积或退积模式：当前者大于后者时发生前积，反之为退积。同时，早期沉积体侧坡引导流体转向，导致朵叶发生侧向迁移。地形侧向限制的强弱进一步控制朵叶间的叠置程度：强限制下朵叶主体相互叠置，储集层连通性好；弱限制下朵叶边缘叠置，储集层非均质性强。这种地貌—沉积—流体的动态调节机制是朵叶内部构型差异的主控因素。

3）泥岩底辟型微盆地朵叶具有独特构型模式，对储集层预测具指导意义。与盐岩底辟或其他成因类型的微盆地相比，泥岩底辟型微盆地地形更缓、规模更大，使其内部发育的朵叶展布更广、侧向迁移更显著，叠置样式也以补偿式为主。对该微盆地朵叶沉积体系内部完整的解剖，研究建立其从块体搬运沉积→多期朵叶叠置沉积→末期水道侵蚀→披覆泥岩覆盖的完整演化模式，表明了微盆地内重力流“充填—溢出”过程中的储集层非均质性特征。该模式为深水油气储集层构型建模与井位部署提供了重要地质依据。

参考文献(References)

邓荣敬，邓运华，于水，侯读杰. 2008. 尼日尔三角洲盆地油气地质与成藏特征. 石油勘探与开发，35(6)：755-762. [Deng R J，Deng Y H，Yu S，Hou D J. 2008. Hydrocarbon geology and reservoir formation characteristics of Niger Delta Basin. Petroleum Exploration and Development，35(6)：755-762]

段瑞凯，张旭，郭富欣，陈国宁，胡光义，邹婧芸. 2022. 深水复合朵叶体内部沉积结构及其叠置模式：以尼日尔三角洲盆地 Akpo 油田中新统 D 油组为例. 岩性油气藏，34(5)：110-120. [Duan R K，Zhang X，Guo F X，Chen G N，Hu G Y，Zou J Y. 2022. Internal sedimentary structure and stacking patterns of deep-water lobe complex：a case study of Miocene zone D in Akpo oilfield，Niger Delta Basin. Lithologic Reservoirs，34(5)：110-120]

葛智渊，许鸿翔. 2023. 浊流对复杂构造地貌的水动力和沉积响应. 古地理学报，25(5)：1090-1117. [Ge Z Y，Xu H X. 2023. Hydraulic and sedimentary responses of turbidity current to structurally-controlled topography. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)，25(5)：1090-1117]

胡孝林，于水，刘新颖. 2014. 尼日尔三角洲盆地过路朵叶体特征及发育模式. 东北石油大学学报，38(5)：31-39. [Hu X L，Yu S，Liu X Y. 2014. Characteristics and development model of transient lobe body in Niger Delta Basin. Journal of Northeast Petroleum University，38(5)：31-39]

李磊，王英民，张莲美，黄志超. 2010. 尼日尔三角洲下陆坡限定性重力流沉积过程及响应. 中国科学：地球科学，40(11)：1591-1597. [Li L，Wang Y M，Zhang L M，Huang Z C. 2010. Sedimentary process and response of restricted gravity flow on the lower slope of Niger Delta. Scientia Sinica(Terrae)，40(11)：1591-1597]

林煜，吴胜和，王星，赵晓明，凌云，路瑶，张佳佳. 2014. 深水浊积朵叶储层构型模式研究. 天然气地球科学，25(8)：1197－1204. [Lin Y，Wu S H，Wang X，Zhao X M，Ling Y，Lu Y，Zhang J J. 2014. Research on reservoir architecture models of deep-water turbidite lobes. Natural Gas Geoscience，25(8)：1197－1204]

蔺鹏，吴胜和，张佳佳，胡光义，夏钦禹，范洪军，王南溯. 2018. 尼日尔三角洲盆地陆坡逆冲构造区海底扇分布规律. 石油与天然气地质，39(5)：1073－1086. [Lin P，Wu S H，Zhang J J，Hu G Y，Xia Q Y，Fan H J，Wang N S. 2018. Distribution of submarine fans in the thrust fault zone of continental slope，Niger Delta Basin. Oil & Gas Geology，39(5)：1073－1086]

蔺鹏，吴胜和，胡光义. 2022. 被动陆缘盆地逆冲、底辟构造对深水层序结构的控制：以尼日尔三角洲盆地某深水区为例. 天然气工业，42(9)：21－34. [Lin P，Wu S H，Hu G Y. 2022. Control of thrust and diapir structures on deep-water sequence architectures in passive continental margin basins：a case study on a deep-water zone in the Niger Delta Basin. Natural Gas Industry，42(9)：21－34]

刘伟新，王华，万琼华，衡立群，尹楠鑫，潘石坚. 2022. 基于分频 RGB 融合技术的辫状河三角洲储层构型精细解剖. 地球科学与环境学报，44(5)：765－774. [Liu W X，Wang H，Wan Q H，Heng L Q，Yin N X，Pan S J. 2022. Fine analysis of braided river delta reservoir architecture based on frequency division RGB fusion technology. Journal of Earth Sciences and Environment，44(5)：765－774]

吕明，王颖，陈莹. 2008. 尼日利亚深水区海底扇沉积模式成因探讨及勘探意义. 中国海上油气，(4)：275－282. [Lü M，Wang Y，Chen Y. 2008. A discussion on origins of submarine fan deposition model and its exploration significance in Nigeria deep-water area. China Offshore Oil and Gas，(4)：275－282]

尚文亮，徐少华，蔡默仑，高红灿，李小刚，陈岑，蔡长娥，秦磊. 2020. 沉积过路现象的地震识别特征及控制因素探讨. 岩性油气藏，32(6)：85－96. [Shang W L，Xu S H，Cai M L，Gao H C，Li X G，Chen C，Cai C E，Qin L. 2020. Discussion on seismic identification characteristics and controlling factors of sediment bypas. Lithologic Reservoirs，32(6)：85－96]

谢清惠，邓宏文，郭佳. 2013. 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. 石油物探，52(6)：655－661. [Xie Q H，Deng H W，Guo J. 2013. Seismic response characteristics and evolution models of deepwater meandering channels in Lower Congo Basin，West Africa. Geophysical Prospecting for Petroleum，52(6)：655－661]

杨民鑫，赵晓明，梁岳立，阴国峰，王健伟，葛家旺，胡成军，严曙梅，潘潞. 2024. 基于分频 RGB 融合技术的储层构型精细解剖：以东海盆地西湖凹陷渐新统花港组为例. 天然气地球科学，35(7)：1323－1338. [Yang M X，Zhao X M，Liang Y L，Yin G F，Wang J W，Ge J W，Hu C J，Yan S M，Pan L. 2024. Fine anatomy of reservoir architecture based on frequency division RGB fusion technology：a case study of the Oligocene Huagang Formation in Xihu Depression，East Sea Basin. Natural Gas Geoscience，35(7)：1323－1338]

张佳佳. 2019. 西非陆坡区逆冲相关微盆地内层序地层及海底扇构型研究. 中国石油大学(北京)博士学位论文. [Zhang J J. 2019. Research on the sequence stratigraphy and submarine fan architecture within the thrust-related intraslope minibasins offshore West Africa. Beijing. Doctoral dissortation China University of Petroleum (Beijing)]

张佳佳，吴胜和. 2019. 海底扇朵叶沉积构型研究进展. 中国海上油气，31(5)：88－106. [Zhang J J，Wu S H. 2019. Research progress on the depositional architecture of submarine-fan lobes. China Offshore Oil and Gas，31(5)：88－106]

Abreu V，Sullivan M，Pirmez C，Mohrig D. 2003. Lateral accretion packages(LAPs)：an important reservoir element in deep water sinuous channels. Marine and Petroleum Geology，20(6－8)：631－648.

Adeogba A A，Mchargue T R，Graham S A. 2005. Transient fan architecture and depositional controls from near-surface 3－D seismic data，Niger Delta continental slope. AAPG Bulletin，89(5)：627－643.

Al ja'aidi O S，Mccaffrey W D，Kneller B C. 2004. Factors influencing the deposit geometry of experimental turbidity currents：implications for sand-body architecture in confined basins. Geological Society，London. Special Publications，222(1)：45－58.

Alpak F O，Guangri X. 2022. Effects of fine-scale turbidite lobe stratigraphic architecture on dynamic reservoir performance. Marine and Petroleum Geology，139(2)：0264－8172.

Beaubouef R T，Abreu V. 2006. Basin 4 of the Brazos-Trinity slope system：anatomy of the terminal portion of an intra-slope lowstand systems tract. GCAGS Transactions，56：39－49.

Beaubouef R T，Friedmann S J. 2000. High-resolution seismic sequence stratigraphic framework for the evolution of Pleistocene intra slope basins，western Gulf of Mexico：depositional models and reservoir analogs. Deep-water Reservoirs of the World. SEPM Society for Sedimentary Geology，40－60.

Bilotti F，Shaw J H. 2005. Deep-water Niger Delta fold and thrust belt modeled as a critical-taper wedge：the influence of elevated basal fluid pressure on structural styles. AAPG Bulletin，89(11)：1475－1491.

Booth J R，Dean M C，Duvernay A E，Styzen M J. 2003. Paleo-bathymetric controls on the stratigraphic architecture and reservoir development of confined fans in the Auger Basin：central Gulf of Mexico slope. Marine and Petroleum Geology，20(6－8)：563－586.

Botziolis C，Maravelis A G，Catuneanu O，Zelilidis A. 2023. Controls on sedimentation in a deep-water foredeep：Central Pindos foreland basin，western Greece. Basin Research，36(1)：e12804.

Brown J L F，Loucks R G，Trevio R H，Hammes U. 2004. Understanding growth-faulted，intraslope subbasins by applying sequence-stratigraphic principles：examples from the south Texas Oligocene Frio Formation. AAPG Bulletin，88(11)：1501－1522.

Chima K I，Gorini C，Rabineau M，Granjeon D，Couto D D，Leroux E，Hoggmascall N. 2020. Pliocene and Pleistocene stratigraphic evolution of the western Niger Delta intraslope basins：a record of glacio-eustatic sea-level and basin tectonic forcings. Global Planet，195：

103355.

Covault J A, Kostic S, Paull C K, Sylvester Z, Fildani A. 2017. Cyclic steps and related supercritical bedforms: building blocks of deep-water depositional systems, western North America. Marine Geology, 393(2): 4-20.

Cross N E, Cunningham A, Cook R J, Taha A, Esmaie E, Swidan N E. 2009. Three-dimensional seismic geomorphohgy of a deep-water slope-channel system: the Sequoia field, offshore west Nile Delta, Egypt. AAPG Bulletin, 93(8): 1063-1086.

Cullis S, Colombera L, Patacci M, McCaffrey W D. 2018. Hierarchical classifications of the sedimentary architecture of deep-marine depositional systems. Earth-Science Reviews, 179: 38-71.

Damuth J E. 1994. Neogene gravity tectonics and depositional processes on the deep Niger Delta continental margin. Marine and petroleum Geology, 11(1): 320-346.

Damuth J E, Olson H C. 2015. Latest Quaternary sedimentation in the northern Gulf of Mexico Intraslope Basin Province: I. sediment facies and depositional processes. Geosphere, 11(6): 1689-1718.

Deptuck M, Steffens G S, Barton M, Pirmez C. 2003. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian sea. Marine and Petroleum Geology, 20(6-8): 649-676.

Deptuck M E, Piper D J W, Savoye B, Gervais A. 2008. Dimensions and architecture of late Pleistocene submarine lobes off the northern margin of East Corsica. Sedimentology, 55(4): 869-898.

Doust H, Omatsola E. 1989. Niger delta. In: Edwards J O, Santogross P A (eds). Divergent Passive Margin Basins Tulsa. AAPG Memoir, 48: 201-238.

Galloway W E. 1998. Siliciclastic slope and base-of-slope depositional systems: component facies, stratigraphic architecture and classification. AAPG Bulletin, 82(4): 569-595.

Gamberi F, Rovere M. 2011. Architecture of a modern transient slope fan (Villafranca fan, Gioia basin-Southeastern Tyrrhenian Sea). Sedimentary Geology, 236(3-4): 211-225.

Gemma D J, Mike M, Lidia L. 2017. Stratigraphy, facies, and evolution of deep-water lobe complexes within a salt-controlled intraslope minibasin. AAPG Bulletin, 101(11): 1879-1904.

Gervais A, Savoye B, Mulder T, Gonthier E. 2006. Sandy modern turbidite lobes: a new insight from high resolution seismic data. Marine and Petroleum Geology, 23(4): 485-502.

Gordon J, Knox E M O. 1989. Development of the Cenozoic Niger Delta in terms of the, Escalator Regression mode l and impact on hydrocarbon distribution. Geology and Geotechnology, 17(5): 133-138.

Grundvåg S, Johannessen E P, Helland H W, Plink B P. 2013. Depositional architecture and evolution of progradationally stacked lobe complexes in the Eocene Central Basin of Spitsbergen. Sedimentology, 61(2): 535-569.

Hay D C. 2012. Stratigraphic Evolution of a Tortuous Corridor from the Stepped Slope of Angola. Application of the Principles of Seismic Geomorphology to Continental Slope and Base-of-Slope Systems: Case Studies from SeaFloor and Near-Sea Floor Analogu. SEPM Society for Sedimentary Geology, 163-180.

Henderson J, Purves S J, Leppard C. 2007. Automated delineation of geological elements from 3D seismic data through analysis of multichannel, volumetric spectral decomposition data. First Break, 25(3): 87-93.

Howell J A, Martinius A W, Good T R. 2014. The application of outcrop analogues in geological modelling: a review, present status and future outlook. Sediment-Body Geometry and Heterogeneity: Analogue Studies for Modelling the Subsurface. Geological Society of London, 1-25.

Jackson M P A, Talbot C J. 1986. External shapes, strain rates, and dynamics of salt structures. Geological Society of America Bulletin, 97(3): 305-323.

Kneller B C. 1995. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. Geological Society, London, Special Publications, 94(1): 31-49.

Martinez-doñate A, Kane I A, Hodgson D M, Schwarz E, Flint S S. 2023. Stratigraphic change in flow transformation processes recorded in early post-rift deep-marine intraslope lobe complexes. Sedimentology, 70(5): 1379-1412.

Mayall M, Stewart I. 2001. The Architecture of Turbidite Slope Channels. Deep-Water Reservoirs of the World. SEPM Society for Sedimentary Geology, 22-24.

Mcardle N J, Ackers M A. 2012. Understanding seismic thin-bed responses using frequency decomposition and RGB blending. First Break, 30(12): 51-65.

Mcdonnell A, Jackson M P, Hudec M R. 2010. Origin of transverse folds in an extensional growth-fault setting: evidence from an extensive seismic volume in the western Gulf of Mexico. Marine and Petroleum Geology, 27(7): 1494-1507.

Michael R, Shultz M R, Hubbard S M. 2005. Sedimentology, stratigraphic architecture, and ichnology of gravity-flow deposits partially ponded in a growth-fault-controlled slope minibasin, Tres Pasos Formation (Cretaceous), southern Chile. Journal of Sedimentary Research, 75: 440-453.

Mulder T, Etienne S. 2010. Lobes in deep-sea turbidite systems: state of the art. Sedimentary Geology, 229(3): 75-80.

Nyantakyi E K, Li T, Hu W S, Borkloe J K, Li Songze, Chen M H. 2015. Structural and stratigraphic characteristics on distal parts of the outer fold and thrust belt of southern Niger Delta, Nigeria. Arabian Journal of Geosciences, 8(9): 6677-6695.

Pirmez C, Prather B E, Mallarino G, O'hayer W W, Droxler A W, Winker C D. 2012. Chronostratigraphy of the Brazos-Trinity depositional system, western Gulf of Mexico: Implications for deepwater depositional models. Application of the Principles of Seismic Geomorphology to Continental Slope and Base-of-Slope Systems: Case Studies from SeaFloor and Near-Sea Floor Analogues. SEPM Society for Sedimentary Geology, 111-143.

Pirmez C, Beaubouef R T, Friedmann, S J, Mohrig D C. 2000. Equilibri-

um Profile and Baselevel in Submarine Channels: Examples from Late Pleistocene Systems and Implications for the Architecture of Deepwater Reservoirs. Deep-Water Reservoirs of the World. SEPM Society for Sedimentary Geology, 782-805.

Posamentier H W, Kolla V. 2003. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. Journal of Sedimentary Research, 73(3): 367-388.

Prather B E, Booth J R, Steffens G S, Craig P A. 1998. Classification, lithologic calibration, and stratigraphic succession of seismic facies of intraslope basins, deep-water Gulf of Mexico. AAPG Bulletin, 82(5): 701-728.

Prather B E, Pirmez C, Winker C D. 2012. Stratigraphy of linked intraslope basins: Brazos-Trinity System Western Gulf of Mexico. In: Application of the Principles of Seismic Geomorphology to Continental Slope and Base-of-Slope Systems: Case Studies from SeaFloor and Near-Sea Floor Analogues. SEPM Society for Sedimentary Geology, 83-109.

Prather B E. 2003. Controls on reservoir distribution, architecture and stratigraphic trapping in slope settings. Marine and Petroleum Geology, 20(6-8): 529-545.

Prather B E. 2020. Controls on Reservoir Distribution, Architecture, and Stratigraphic Trapping in Slope Settings. Regional Geology and Tectonics, Elsevier. 481-515.

Pratson L F, Ryan W B. 1994. Pliocene to recent infilling and subsidence of intraslope basins offshore Louisiana. AAPG Bulletin, 78(10): 1483-1506.

Prélat A, Hodgson D M, Flint S S. 2009. Evolution, architecture and hierarchy of distributary deep-water deposits: a high-resolution outcrop investigation from the Permian Karoo Basin, South Africa. Sedimentology, 56(7): 2132-2154.

Saller A, Werner K, Sugiaman F, Cebastiant A, May R, Glenn D, Barker C. 2008. Characteristics of Pleistocene deep-water fan lobes and their application to an upper Miocene reservoir model, offshore East Kalimantan, Indonesia. AAPG Bulletin, 92(7): 919-949.

Satterfield W M, Behrens E W. 1990. A Late Quaternary canyon/channel system, northwest Gulf of Mexico continental slope. Marine Geology, 92(1-2): 51-67.

Short K C, Stäuble A J. 1967. Outline of geology of Niger Delta. AAPG Bulletin, 51(5): 761-779.

Shultz M R, Hubbard S M. 2005. Sedimentology, stratigraphic architecture, and ichnology of gravity-flow deposits partially ponded in a growth-fault-controlled slope minibasin, Tres Pasos Formation (Cretaceous), Southern Chile. Journal of Sedimentary Research, 75(3): 440-453.

Spychala Y T, Hodgson D M, Flint S S, Mountney N P. 2015. Constraining the sedimentology and stratigraphy of submarine intraslope lobe deposits using exhumed examples from the Karoo Basin, South Africa. Sedimentary Geology, 322: 67-81.

Steffens G S, Biegert E K, Sumner H S, Bird D. 2003. Quantitative bathymetric analyses of selected deepwater siliciclastic margins: receiving basin configurations for deepwater fan systems. Marine and Petroleum Geology, 20(6-8): 547-561.

Straub K M, Pyles D R. 2012. Quantifying the hierarchical organization of compensation in submarine fans using surface statistics. Journal of Sedimentary Research, 82(11): 889-898.

Sylvester Z, Cantelli A, Pirmez C. 2015. Stratigraphic evolution of intraslope minibasins: insights from surface-based model. AAPG Bulletin, 99(6): 1099-1129.

Terlaky V, RocheleauJ, Arnott R W C. 2015. Stratal composition and stratigraphic organization of stratal elements in an ancient deep-marine basin-floor succession, Neoproterozoic Windermere Supergroup, British Columbia, Canada. Sedimentology, 63(1): 136-175.

Wynn R B, Kenyon N H, Masson D G, Stow Dorrik A V. 2022. Characterization and recognition of deep-water channel-lobe transition zones. AAPG Bulletin, 86(8): 1441-1446.

Zhang J J, Wu S H, Wang X, Lin Y, Fan H J, Jiang L, Wan Q H, Yin H, Lu Y. 2015. Reservoir quality variations within a sinuous deep water channel system in the Niger Delta Basin, offshore West Africa. Marine and Petroleum Geology, 63: 166-188.

Zhang J J, Wu S H, Fan T E, Fan H J, Jiang L, Chen C, Wu Q Y, Lin P. 2016. Research on the architecture of submarine-fan lobes in the Niger Delta Basin, offshore West Africa. Journal of Palaeogeography, 5: 185-204.

Zhang L F, Li Y L. 2020. Architecture of deepwater turbidite lobes: a case study of Carboniferous turbidite outcrop in the Clare Basin, Ireland. Petroleum Exploration and Development, 47: 990-1000.

Zhao X M, Qi K, Patacci M, Tan C P, Xie T. 2019. Submarine channel network evolution above an extensive mass-transport complex: a 3D seismic case study from the Niger delta continental slope. Marine and Petroleum Geology, 104: 231-248.

（责任编辑　王绍华）