

## 尼日尔三角洲盆地陆坡逆冲构造区海底扇分布规律

蔺 鹏<sup>1,2</sup>, 吴胜和<sup>1</sup>, 张佳佳<sup>1</sup>, 胡光义<sup>3</sup>, 夏钦禹<sup>4</sup>, 范洪军<sup>3</sup>, 王南溯<sup>1</sup>[1. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油 辽河油田分公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010;  
3. 中海油研究总院, 北京 100028; 4. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083]

**摘要:**近年来的深水油气勘探揭示了陆坡逆冲构造区复杂的海底扇分布特征。目前,国内外学者重点研究了逆冲相关地貌对海底扇宏观分布的影响,但对于不同逆冲活动阶段的海底扇分布及空间演化规律仍缺乏系统的认识。文章以尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例,综合地震和测井资料,开展陆坡逆冲构造区海底扇分布规律研究。研究表明,研究区目的层段(上中新统一第四系)可依据地层超覆及海平面变化划分为9个三级层序,在其内部共识别出了块体搬运沉积、水道沉积及朵叶沉积3类海底扇沉积单元。垂向上,海底扇主要分布在三级层序的海退域;而在平面上,受控于不同逆冲活动阶段的差异古地貌特征,海底扇可表现出复杂的分布演化规律。综合分析表明,研究区海底扇的沉积演化可分为4个阶段:①均衡陆坡阶段,该阶段逆冲断层未开始活动,陆坡地貌相对平缓,其对海底扇的限制性较弱,此时海底扇体系主要由高弯度条带状水道组成,发育于研究区中部;②逆冲断层阶段,该阶段逆冲断层向深水区强烈挤压,在其上盘处形成微盆地,阻止了重力流的搬运,形成大型连片状的复合朵叶;③泥底辟阶段,该阶段逆冲断层活动减弱,并在核部伴随有向上的泥底辟作用,此时在研究区中部发育泥底辟背斜,而在其东西两侧发育顺陆坡倾向的微盆地,大量的重力流沉积物沿这些纵向微盆地沉积过路,形成东西分异的海底扇水道-朵叶复合体;④沉积填平补齐阶段,该阶段逆冲活动基本停止,陆坡地貌逐渐趋于均衡,此时研究区内均匀发育低弯度条带状的水道沉积。

**关键词:**地貌;逆冲断层;海底扇;沉积演化;尼日尔三角洲盆地;西非

**中图分类号:**TE121.3

**文献标识码:**A

## Distribution of submarine fans in the thrust fault zone of continental slope, Niger Delta Basin

Lin Peng<sup>1,2</sup>, Wu Shenghe<sup>1</sup>, Zhang Jiajia<sup>1</sup>, Hu Guangyi<sup>3</sup>, Xia Qinyu<sup>4</sup>, Fan Hongjun<sup>3</sup>, Wang Nansu<sup>1</sup>

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Exploration and Development of Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China; 3. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

**Abstract:** The recent exploration for oil and gas in deep water has revealed that the distribution of submarine fans is complex in thrust fault zone on continental slope. While the influences of thrusting related topography on macroscopic distribution of submarine fans have been studied both at home and abroad, few researches have been carried out in terms of its distribution and evolution at different stages of thrusting. This paper studied the distribution pattern of submarine fans in the thrust fault zone on continental slope in a deep-water zone of the Niger Delta Basin, utilizing well-logging and seismic data. Results show that the Upper Miocene-Quaternary, the target in the study area, is divided into nine third-order sequences according to stratigraphic overlap and sea level variation, and three types of submarine fan depositional units (massive transport, channel and lobe deposits) are identified. Vertically, the submarine fans are mainly located in the retrogressive system tracts(RST) of each third-order sequence, while laterally, they present complex evolution and distribution patterns due to the control of differential palaeogeomorphology at different stages of thrusting. In the study area, the submarine fans have evolved through four stages. The first one is equilibrium slope stage. As few thrust faults were active and the slope was relatively gentle in geomorphology at this stage, thrusting delivered little control to the submarine fans.

收稿日期:2017-06-30; 修订日期:2018-06-01。

第一作者简介:蔺鹏(1993—),男,硕士研究生,油气田开发地质学和沉积学研究。E-mail:qiuyehanxing@163.com。

通讯作者简介:吴胜和(1963—),男,教授,博士生导师,储层地质学,油藏描述及三维地质建模。E-mail:reser@cup.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05030-005-02)。

And the submarine fan system was developed in the central part of the study area and was dominated by sinuous stripe-shaped channels. The second one is thrusting stage. The vigorous activity of thrust faults into the deep water triggered the formation of minibasins on the hanging walls of thrust faults; thus the transportation of gravity flow was prevented, and large composite lobes, linked with each other, occurred. The third one is mud diapire stage. The thrust fault activity slowed down and upward mud diapirism occurred in its core during this stage. Then the mud diapire anticline developed in the central part of the study area, while minibasins along the direction of continental slope grew on the east and west sides of the anticline. Plenty of gravity flow sediments bypassed these longitudinal minibasins, forming the submarine fan channel-lobe complexes that differentiated in east-west direction. The fourth one is sedimentation-dominant stage. As the thrusting in the study area almost stopped, the continental slope gradually turned to equilibrium and stripe-shaped channel deposits with low sinuosity were developed quite even in the whole area.

**Key words:** geomorphology, thrust fault, submarine fan, sedimentary evolution, Niger Delta Basin, West Africa

海底扇是深水油气田的主要沉积相类型,因其具有巨大的资源潜力而成为当今世界油气勘探开发的热点<sup>[1-4]</sup>。针对海底扇,前人基于非限制性海底地貌建立的沉积模式提出其分布特征受到海平面升降,沉积物类型,物源供给速率,补给体系特征(单源、多源、线源)等多种因素控制<sup>[5-8]</sup>。而近年来的许多研究表明海底扇的空间分布同时受到地貌因素的影响,且不同构造背景下海底地貌特征的差异导致海底扇分布规律有所不同<sup>[9-15]</sup>。

逆冲构造背景下,重力流水道的分布受到逆冲相关地貌的影响,可归纳为偏移,转向,限制和穿越4种不同的作用类型<sup>[9,16-17]</sup>。由水道供源的海底扇朵叶主要分布在因逆冲活动而形成的一系列微盆地中。重力流在微盆地之间重复充填-溢出-充填过程,可形成多级朵叶-水道-朵叶沉积<sup>[18]</sup>。虽然已经取得了一些成果,但现有研究主要针对逆冲相关地貌对海底扇宏观分布的影响,而关于逆冲构造活动不同阶段海底扇分布及空间演化规律仍缺乏系统的认识。

为此,本文以西非尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例,综合利用三维地震资料与测井资料,针对逆冲构造区古地貌演化这一动态过程,分析演化不同阶段的海底扇分布规律,建立逆冲构造区海底扇演化模式,以期深化深水沉积理论,并进一步推动深水油气田的勘探与开发。

## 1 研究区概况

尼日尔三角洲盆地位于非洲西部的几内亚湾,是世界上最大的海退型三角洲盆地之一<sup>[19]</sup>。在大陆边缘重力作用的影响下,尼日尔三角洲盆地自北向南依次发育伸展构造区、泥底辟构造区、内褶皱逆冲区、滑脱褶皱区和外褶皱逆冲区<sup>[20-21]</sup>。研究区位于该盆地南缘下

陆坡坡脚处的深水区,自晚中新世至今一直处于陆坡环境(陆坡倾向为南,现今倾角约为 $0.9^\circ$ ),距离尼日利亚海岸约150~190 km,水深约1 250~1 750 m,处于滑脱褶皱区和外褶皱逆冲区分界处(图1a)。

自始新世开始,受全球海平面下降的影响,尼日尔三角洲盆地进入大规模海退阶段,地层整体呈渐进式向海进积,自下而上根据岩性可划分为Akata组、Agbada组和Benin组(均为穿时地层单元)<sup>[20,22-23]</sup>。其中,Akata组为富含有机质的海相泥岩,厚约3~4 km,由于泥岩的欠压实及烃类的形成而处于超压状态;Agbada组自北向南依次发育河流相砂岩,三角洲砂岩和海底扇砂岩;而Benin组则为陆相河流和岸后沼泽沉积,主要岩性为砂砾岩<sup>[24-27]</sup>。本论文目的层为上中新统一第四系的Agbada组,层序地层学研究认为,研究层段为以SB1界面(10.5 Ma)为底界的二级层序<sup>[19,28]</sup>。研究区自始新世以来一直处于深水环境,在北部尼日尔和贝努埃水系供源下广泛发育海底扇沉积<sup>[29]</sup>。

研究区南部处于外褶皱逆冲区,广泛发育由重力滑脱作用引发的逆冲断层(图1b)。大规模的逆冲断层沿Akata组泥岩中的滑脱面向深海方向逆冲,切穿上覆的Agbada组碎屑岩地层。沿逆冲断层倾向,中中新统近等厚,上中新统和上新统厚度向逆冲伴生褶皱核部明显减薄,而第四系与下伏地层呈上超接触(图1c)。由此判断逆冲断层活动开始于晚中新世,在上新世时可能由于尼日尔河物源供给量的减少导致其活动强度有所减弱<sup>[17,30]</sup>。此外,在区域地应力场的作用下,研究区内还发育了一套走向与逆冲断层近垂直的伸展断裂系统。

研究区拥有良好的三维地震资料(SEG正极性),资料覆盖面积约为1 200 km<sup>2</sup>(图1b),主测线与联络测线间距均为12.5 m,垂向采样率为3 ms,主频为70~40 Hz,近海底处垂向地震分辨率约5 m,整体上能够满足本次研究的需要。来自评价井W1的测井曲



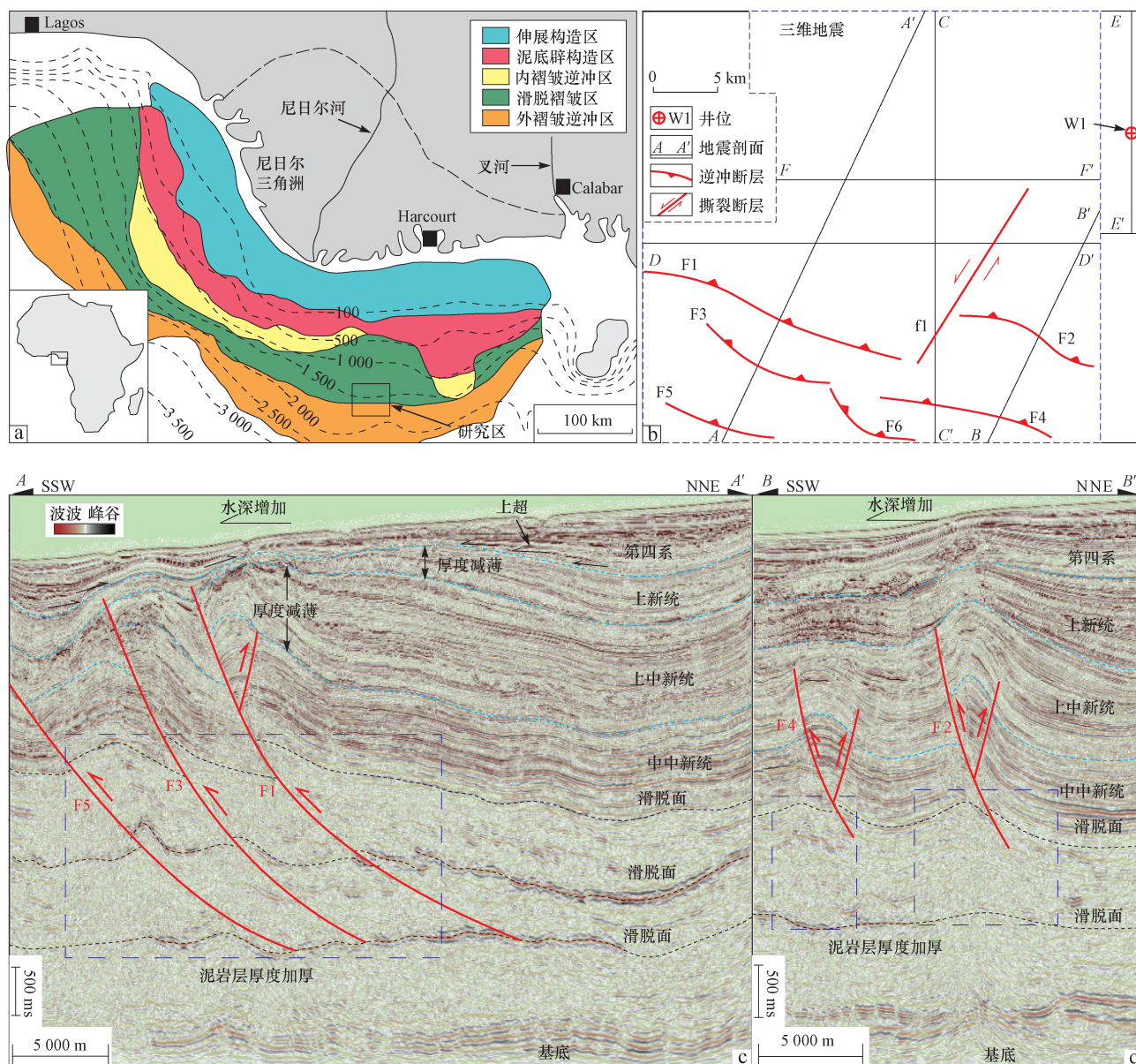


图1 尼日尔三角洲盆地内研究区位置及逆冲断层分布(图1a据 Corredor 等,2005<sup>[20]</sup>修改,图1c和图1d剖面位置见图1b)

Fig. 1 Location of the study area and distribution of thrust faults in the Niger Delta Basin [Fig. 1a was modified from Corredor et al. (2005)<sup>[20]</sup>; see Fig. 1b for the profile locations of Fig. 1c and Fig. 1d]

a. 研究区地理及构造位置; b. 逆冲断层平面分布; c. 西部沿逆冲断层倾向剖面; d. 东部沿逆冲断层倾向剖面

线(声波时差、密度、自然伽马和电阻率)可完成对三维地震资料的标定(图1b)。

## 2 层序地层格架

层序地层格架的建立是沉积学研究的基础与关键。在深水层序地层学理论指导下,利用三维地震资料,根据地震反射同相轴终止关系,在现有的二级层序框架内识别强制海退底面。使用 W1 井的声波时差和密度曲线制作人工合成地震记录建立井震关系,在测井资料和全球海平面升降曲线的标定下确定三级层序界面,通

过全区闭合,追踪对比建立等时三级层序地层格架。

在深水环境下通常将强制海退底面视为三级层序界面。强制海退底面一般以普遍的下部侵蚀,上部底超以及界面两侧地震相特征的突变作为识别依据<sup>[31]</sup>。陆坡背景下,地层的侵蚀被认为是在基准面下降的强制海退期由于重力流冲刷侵蚀下伏半远洋披覆沉积而成,底超(上超和下超的统称)一般与海底扇水道、朵叶的加积有关<sup>[31]</sup>。通过对三维地震资料的综合分析,在研究区内共识别出 SB1—SB9 九个强制海退底面,即三级层序界面(图2)。

井震标定结果表明,在二级层序界面 SB1 至现代



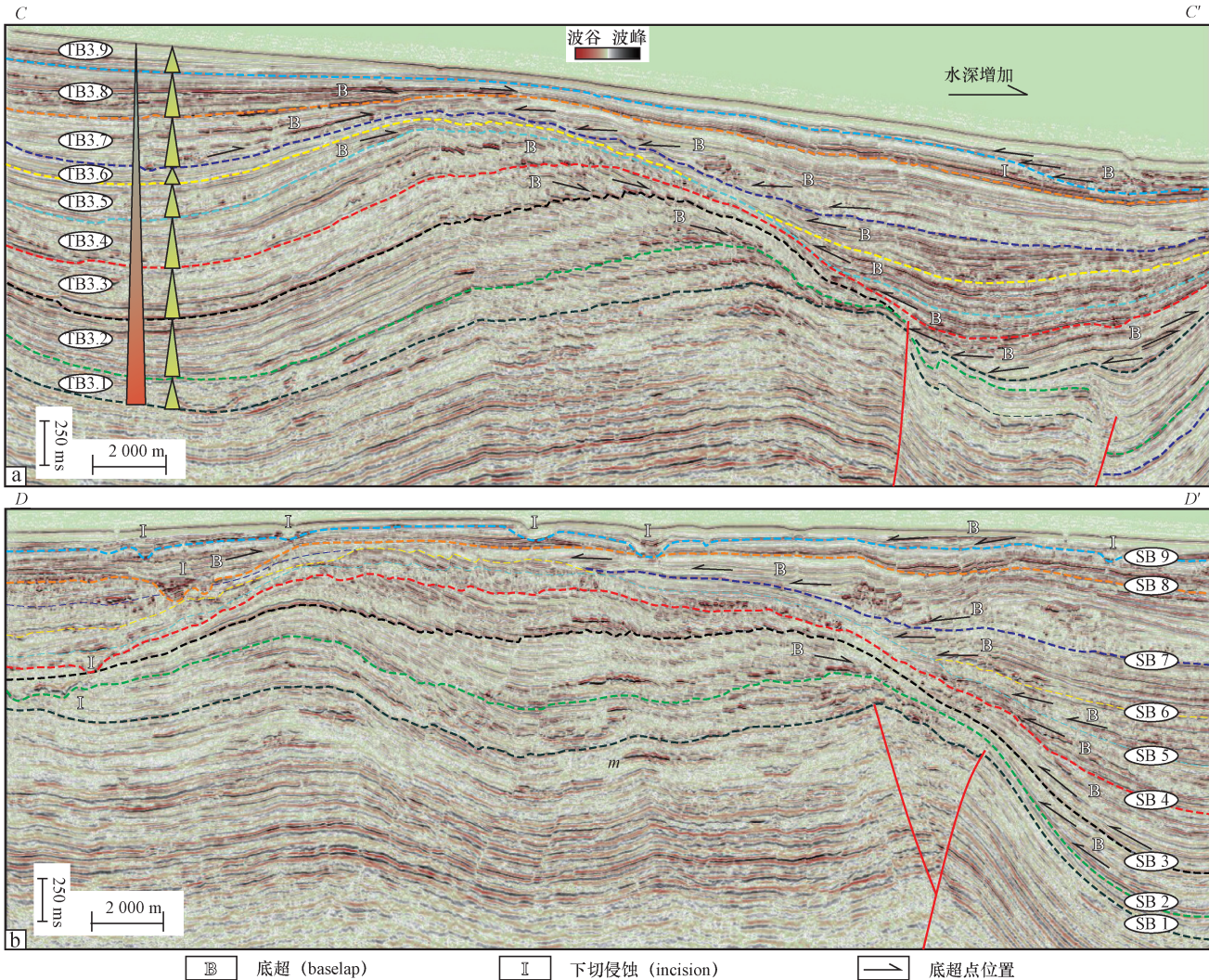


图2 尼日尔三角洲盆地内研究区典型层序地层格架地震剖面(地震剖面位置见图 1b)  
Fig.2 Seismic profile showing typical sequence framework in the study area of the Niger Delta Basin  
(see Fig. 1b for location of the seismic profiles)

海底之间共包括 9 个不同的层段,每个层段均具有自下而上 GR 升高与 RT 降低的特征,解释为粒度向上变细的正旋回。对全球海平面升降曲线的分析表明,界面 SB1—SB9 分别与 9 个三级层序界面 10.5,8.2,6.3,5.5,4.2,3.8,2.9,1.6 和 0.8 Ma 存在近似的对应关系(图 3)。结合全球海平面升降曲线对测井资料与地震资料的综合分析,认为这九个正旋回分别对应 9 个三级层序,这里根据 Haq 等(1987)发表的全球海平面升降曲线图,沿用短周期海平面升降旋回的名称自下而上依次将 9 个三级层序命名为 TB3.1—TB3.9<sup>[32]</sup>。

在单一三级层序内部,地震相由下部丘状强振幅高连续性反射和 U 型中-强振幅中连续性反射向上逐渐过渡为半透明杂乱反射或弱振幅高频高连续性反射。根据垂向上地震相的差异,三级层序可进一步划分为位于下部的海退体系域和位于上部的海侵体系域

两部分,在时间上对应一次完整的海平面升降旋回(图 2,图 3)<sup>[33]</sup>。Catuneanu (2006) 指出:在短周期海平面旋回的海退期,大量富砂沉积物在重力流作用下被搬运至陆坡处发生沉积;随着相对海平面的上升,被搬运至陆坡处的砂质沉积物含量由于陆架新增可容空间对碎屑沉积物的捕集而明显有所减少,故在海侵体系域中主要发育半远洋披覆沉积<sup>[31]</sup>。井震结合分析表明高振幅地震反射很可能是富砂质沉积物的地震响应,例如 SB3 层序界面附近的强振幅地震相与低 GR 值相对应(图 3a)。

3 沉积单元类型及特征

本次研究在 W1 井测井岩性信息的标定下开展地震相分析,共识别出块体搬运沉积、水道、朵叶和半远



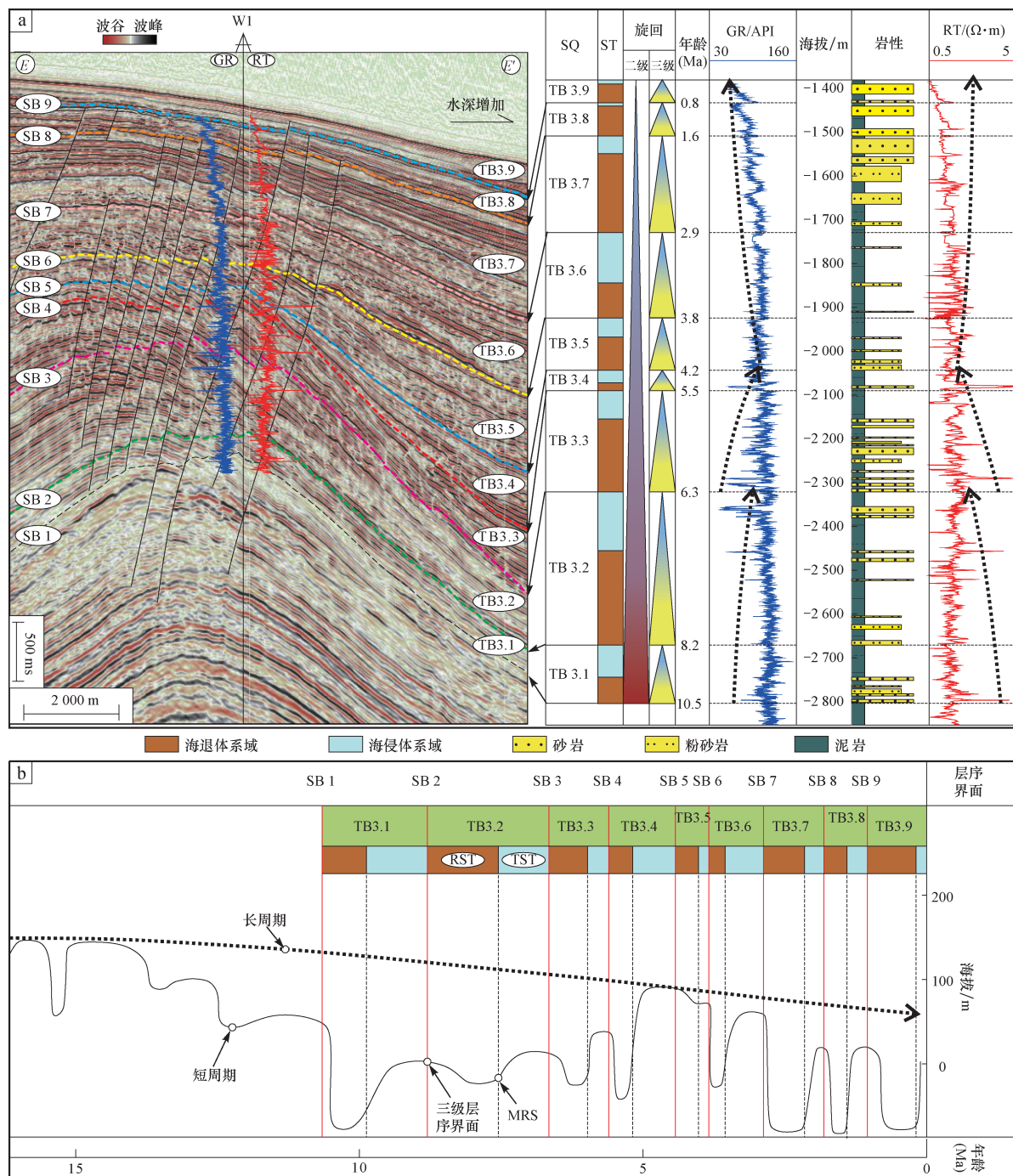


图3 尼日尔三角洲盆地内研究区井震结合层序界面标定(a)与全球海平面升降曲线(b)  
(W1井及地震剖面位置见图1b,图3b 据文献[32])

Fig. 3 Seismic-well tie sequence boundaries(a)and global eustatic curve(b)in the study area of the Niger Delta Basin  
( see Fig. 1b for location of W1 and the seismic profile;Fig. 3b was modified from reference [32])

洋披覆沉积4类不同的沉积单元。

3.1 块体搬运沉积

块体搬运沉积(MTD)是指由滑动、滑塌和碎屑流等重力流作用所形成的沉积体<sup>[34]</sup>,由于包含较多的细粒沉积物,通常不能作为储层。块体搬运沉积在平面上为席状连片分布,在地震反射剖面上为低振幅、杂

乱、半透明丘状反射,内部中-低连续性(图4)。

根据在三级层序中所处的位置及与下伏地层的接触关系,将研究区内的块体搬运沉积划分为两种不同的类型。发育于三级层序底部,与下伏地层呈侵蚀接触,底界面可见侵蚀擦痕的MTD,解释为由强制海退早期的碎屑流高速运动侵蚀下伏地层而形成<sup>[35-36]</sup>。位于三级层序中上部,与下伏地层呈整合接

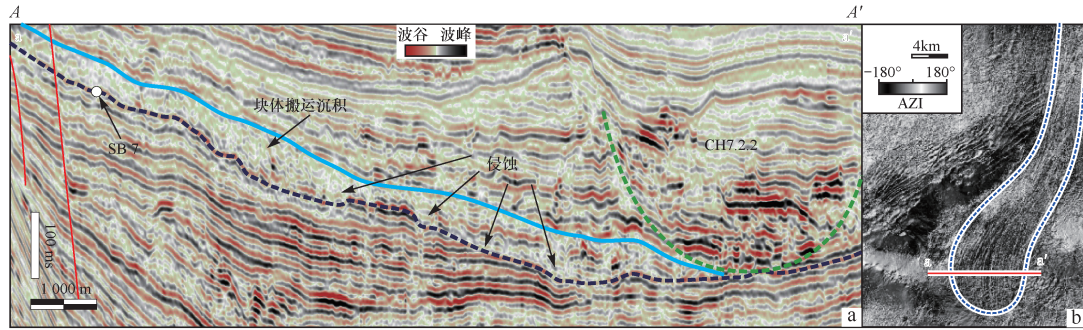


图4 尼日尔三角洲盆地内研究区块体搬运沉积剖面(a)及平面(b)特征(方位角属性切片位置:SB7 界面)

4 Profile(a) and planar(b) characteristics of massive transport deposits (MTD) in the study area of the Niger Delta Basin  
(azimuth map was taken along SB7)

触的 MTD,可解释为由具有塑性流体性质的碎屑流在动能较小时边流动边沉积而成<sup>[35-36]</sup>,一般被认为是由于海平面的快速上升使大陆边缘坡折处沉积物失稳形成的富泥质碎屑流在陆坡处堆积而形成<sup>[31]</sup>。

### 3.2 海底扇水道

深水环境下的水道由重力流下切侵蚀大陆斜坡而成,主要形成于海退期。水道既可作为重力流沉积物搬运的通道,亦是重力流沉积的重要场所。水道沉积通常具有较高的砂质含量,是重要的富砂质沉积单元,存在形成良好储层的潜力。海底扇水道平面上为相对顺直或高弯度的条带(图5c,d)<sup>[37-38]</sup>,在相干属性切片上具有低相干边界,在均方根振幅属性图上常表现为高值。在地震反射剖面上,水道具有“U”形或“V”形下切充填地震反射外形,底部呈侵蚀接触,内部为“亚平行,高振幅,中-弱连续性”地震反射(图5b)。水道两侧有时发育中-弱振幅楔状天然堤,水道-天然堤复合体整体上海鸥翼状(图5a)。规模较大的水道内部常出现具有复杂扭曲地震反射外形的弱振幅低连续性杂乱透明反射,解释为沿水道侧壁的滑动或

滑塌沉积<sup>[39,40]</sup>。

### 3.3 海底扇朵叶

重力流朵叶通常是由于流体能量的降低导致被搬运的沉积物堆积而形成,其主体为相对富砂质的沉积物,内部由半远洋披覆泥岩夹层分隔,通常在海退背景下发育。朵叶常被认为是深水环境中的高产能和高采收率储层。

朵叶在平面上为席状或扇状,均方根振幅属性平面图上对应扇形连片高振幅区(图6b),剖面上具有丘状地震反射外形,内部为平行,高连续性,强振幅反射(图6a)。根据其与水道在空间上的相对位置,可分为发育于水道末端的朵叶和在重力流水道侧缘因局部决口而形成的朵叶。

### 3.4 半远洋披覆沉积

半远洋披覆沉积主要由平面分布范围较广的暗色泥岩组成,内部可能存在少量的砂泥薄互层,不能形成有效的储层,但由于其低渗透率特征可作为垂向渗流格挡体。在测井曲线上,GR 曲线为高值位于基线处;

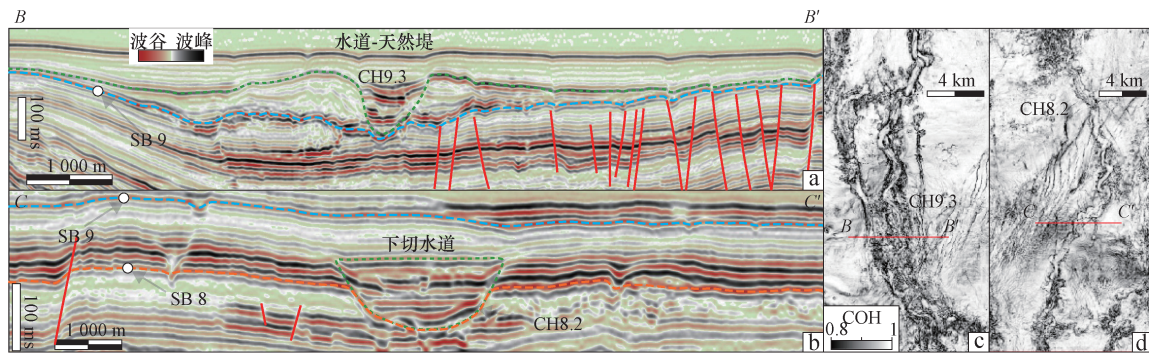


图5 尼日尔三角洲盆地内研究区的海底扇水道剖面(a,b)及平面(c,d)特征  
[相干属性切片位置:SB9 之上 10 ms(c),SB8 之上 10 ms(d)]

Fig. 5 Profile(a,b) and planar(c,d) characteristics of submarine fan channels in the study area of the Niger Delta Basin  
[coherence maps were taken along two surfaces:10 ms above SB9(c) and 10 ms above SB8(d)]



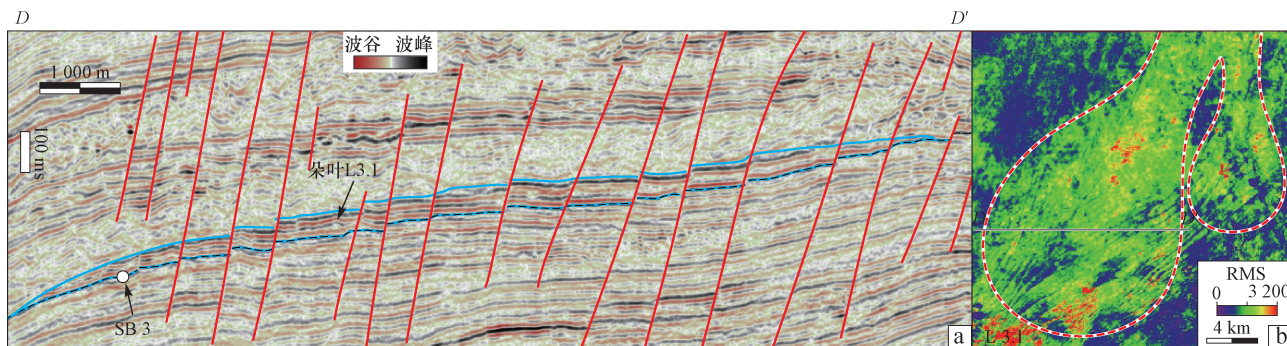


图6 尼日尔三角洲盆地内研究区海底扇朵叶剖面(a)及平面(b)特征(图6b均方根振幅属性时窗:SB3界面之上50 ms)

Fig. 6 Profile(a) and planar(b) characteristics of submarine fan lobes in the study area of the Niger Delta Basin  
(time window used for RMS amplitude extraction in Fig. 6B:50 ms above SB3)

均方根振幅属性平面图上对应低值背景,在地震反射剖面上为席状,平行,高连续性,低振幅反射,与下伏地层为整合接触<sup>[12]</sup>。

#### 4 层序内部海底扇空间分布特征

在识别海底扇沉积单元的基础上,采用地震沉积学方法,以各个三级层序的顶底界面作为约束,提取均方根振幅属性(RMS)和瞬时相干属性(COH)切片,采用平剖结合的方式明确层序内部海底扇的空间分布特征。

剖面地震相分析表明:海底扇体系主要发育于三级层序底部的海退体系域,且在不同三级层序内其分布特征存在着明显的差异。TB3.1层序地层厚度相对均匀,沉积相类型主要为重力流水道。TB3.2—TB3.4层序沉积物均主要集中于研究区中部,内部多发育海底扇朵叶,朵叶之上有时覆盖富泥质的块体搬运沉积。TB3.5—TB3.7层序地层厚度向研究区中部明显减薄,在研究区东西两侧分别发育由水道、朵叶沉积组成的海底扇体系。TB3.8—TB3.9层序地层厚度横向上差异不大,其主要沉积相类型为重力流水道(图7)。进一步结合平面地震属性特征,将研究区目的层段海底扇的沉积演化过程分为4个不同的阶段。

##### 4.1 TB3.1层序海底扇分布特征

TB3.1层序内海底扇沉积体系主要由高弯度条带状水道组成,该层序地层平均时间厚度约为200 ms,平面分布较稳定(图8b)。海退体系域均方根振幅属性图以存在高振幅条带为特征,代表高弯度曲流窄条带状的富砂质重力流水道。两条水道流向均为自NE向SW方向,分布于研究区中部(图8a)。

##### 4.2 TB3.2—TB3.4层序海底扇分布特征

TB3.2—TB3.4层序内的海底扇沉积体系主要由富砂质的连片状复合朵叶组成,位于研究区北部和东部。朵叶体系连片分布且平面分布范围很广,并可根据内部的低振幅边界将其进一步细分为多个扇形单元,即次一级的构型单元朵叶复合体组合。

TB3.2层序平均时间厚度约为350 ms,地层在研究区中部、南部厚度相对较薄(图9f)。海底扇体系主要发育于研究区东北部,三个朵叶L2.1—L2.3呈复合连片状分布,水道CH2流向自北向南顺陆坡倾向,在研究区中部向西侧转向并演化为小型朵叶L2.4(图9e)。TB3.3层序地层主要发育在研究区北部和东南部,平均时间厚度约为250 ms(图9d)。该层序内复合海底扇朵叶沉积广泛发育于研究区北部,并可进一步细分为L3.1—L3.4四个朵叶(图9c)。TB3.4层序平均时间厚度约为250 ms(图9b),地层向研究区中部、南部厚度明显减薄。在研究区的北部和东部分别发育了海底扇朵叶沉积体系。北部沉积体系由多个朵叶复合而成,而东侧体系则包括位于水道末端的大型朵叶和在水道两侧发育的决口朵叶(图9a)。

##### 4.3 TB3.5—TB3.7层序海底扇分布特征

TB3.5—TB3.7层序内的海底扇沉积体系由水道—朵叶复合体组成,相互独立的海底扇体系分别发育于研究区东西两侧。其中,水道在平面上为弯曲的窄条带,朵叶为扇状发育于水道末端或以决口朵叶的形式发育于水道侧缘。

TB3.5层序地层主要分布于研究区东西两侧,平均时间厚度约为200 ms(图10f)。研究区西部发育弯曲条带状的砂质水道CH5.1,并在其末端形成朵叶L5.1;东部发育流向自北向南的水道CH5.2,其末端发



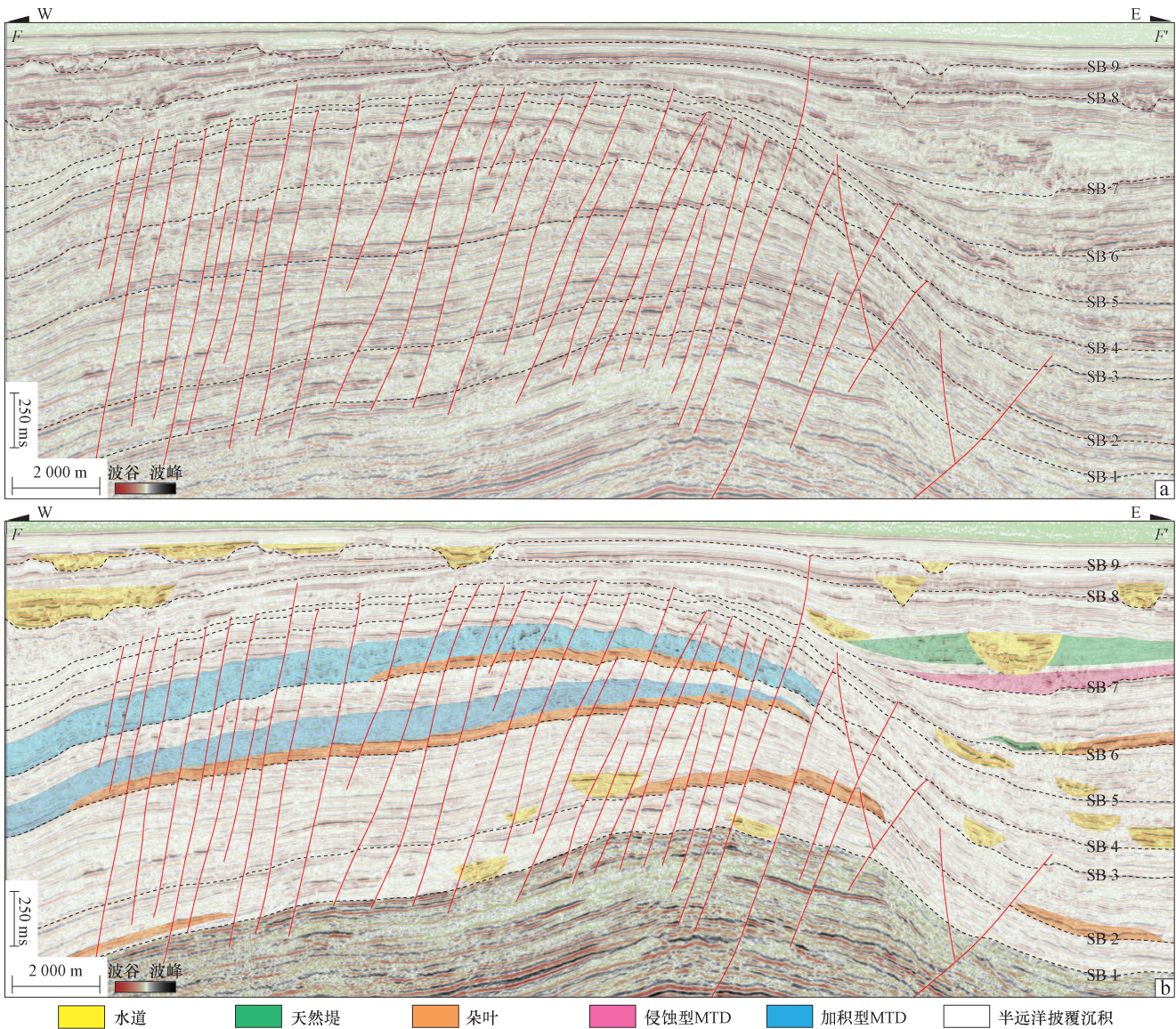


图 7 尼日尔三角洲盆地内研究区地震反射特征(a)及其沉积单元解释(b)(地震剖面位置见图 1b)  
Fig. 7 Seismic reflection characteristics and interpretation of sedimentary units in the study area of the Niger Delta Basin  
(see Fig. 1b for the location of the seismic profile)

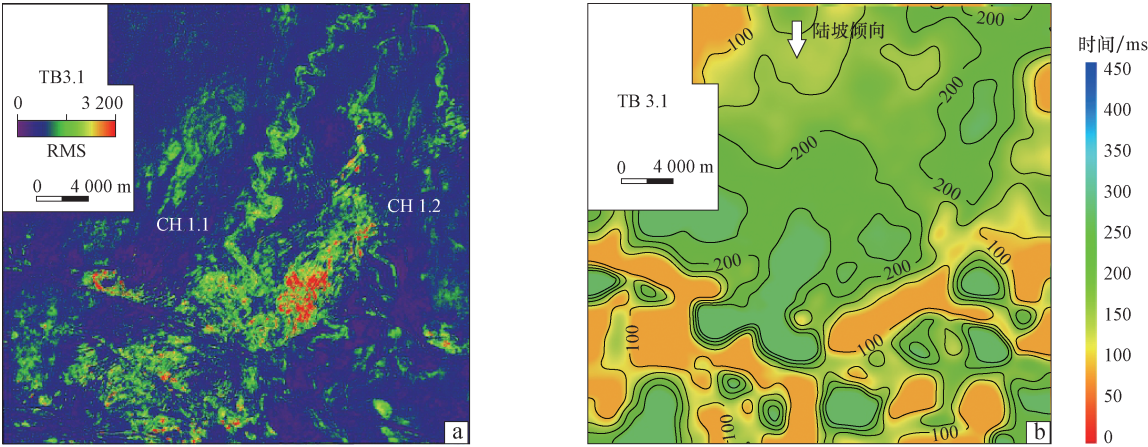


图 8 尼日尔三角洲盆地 TB3. 1 海退体系域均方根振幅属性与时间地层厚度  
Fig. 8 RMS amplitude map in the RST and stratigraphic thickness on time section of TB3. 1 in the study area of the Niger Delta Basin  
a. TB3. 1 层序海退体系域均方根振幅属性(时窗位置:SB1 界面之上 50 ms);b. TB3. 1 层序时间地层厚度等值线



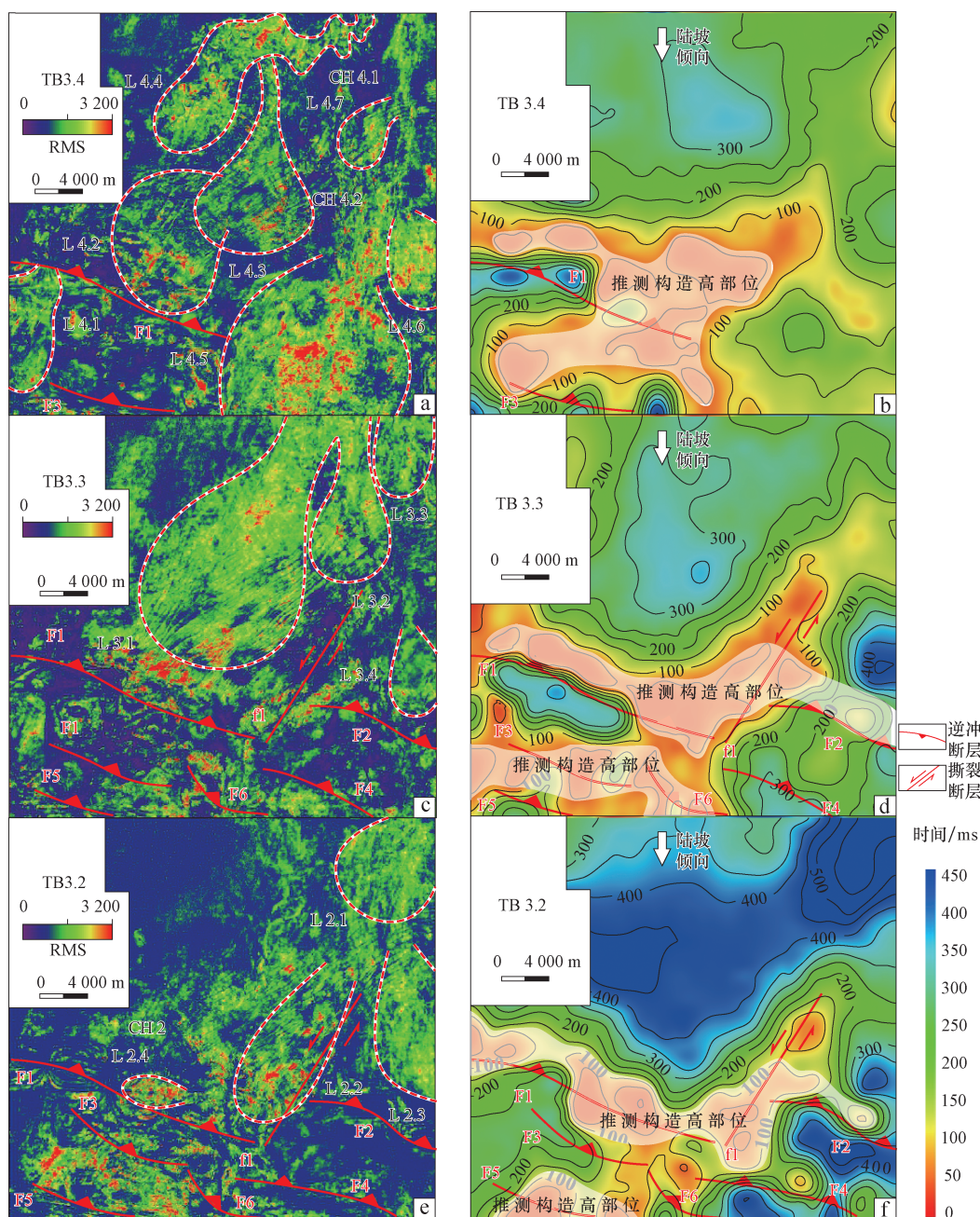


图9 尼日尔三角洲盆地 TB3. 2—TB3. 4 层序海退体系域均方根振幅属性与时间地层厚度

Fig. 9 RMS amplitude map in the RST and stratigraphic thickness on time section of

TB3. 2 - TB3. 4 in the study area of the Niger Delta Basin

a, c, e. TB3. 2—TB3. 4 层序海退体系域均方根振幅属性(时窗位置分别为: a. SB1 界面之上 50 ms, c. SB3 界面之上 50 ms, e. SB2 界面之上 50 ms); b, d, f. TB3. 2—TB3. 4 层序时间地层厚度等值线

育朵叶 L5. 2 和 L5. 3, 并在东北部决口形成朵叶 L5. 4 (图 10e)。TB3. 6 层序平均时间地层厚度约为 200 ms (图 10d), 在研究区东西两侧发育条带状的泥质充填水道 CH6. 1 和 CH6. 2。西部水道 CH6. 1 末端发育朵叶 L6. 1, 东部水道 CH6. 2 在水道东侧形成了富砂质的决口朵叶 L6. 2 (图 10c)。TB3. 7 层序时间地层厚度约为 350 ms (图 10b)。该层序内, 研究区西部发育大型侵蚀型水道 CH7. 1, 其搬运的沉积物在水道末端堆积

形成朵叶 L7; 研究区东部发育大型复合重力流水道沉积体系 CH7. 2, 该水道在平面上多次分叉, 解释为由于多期水道的垂向叠加所致 (图 10a)。

#### 4.4 TB3. 8—TB3. 9 层序海底扇分布特征

TB3. 8—TB3. 9 层序内的海底扇沉积体系主要由低弯度条带状水道组成, 各水道均具有相对低的弯曲度, 且在研究区范围内均匀分布。



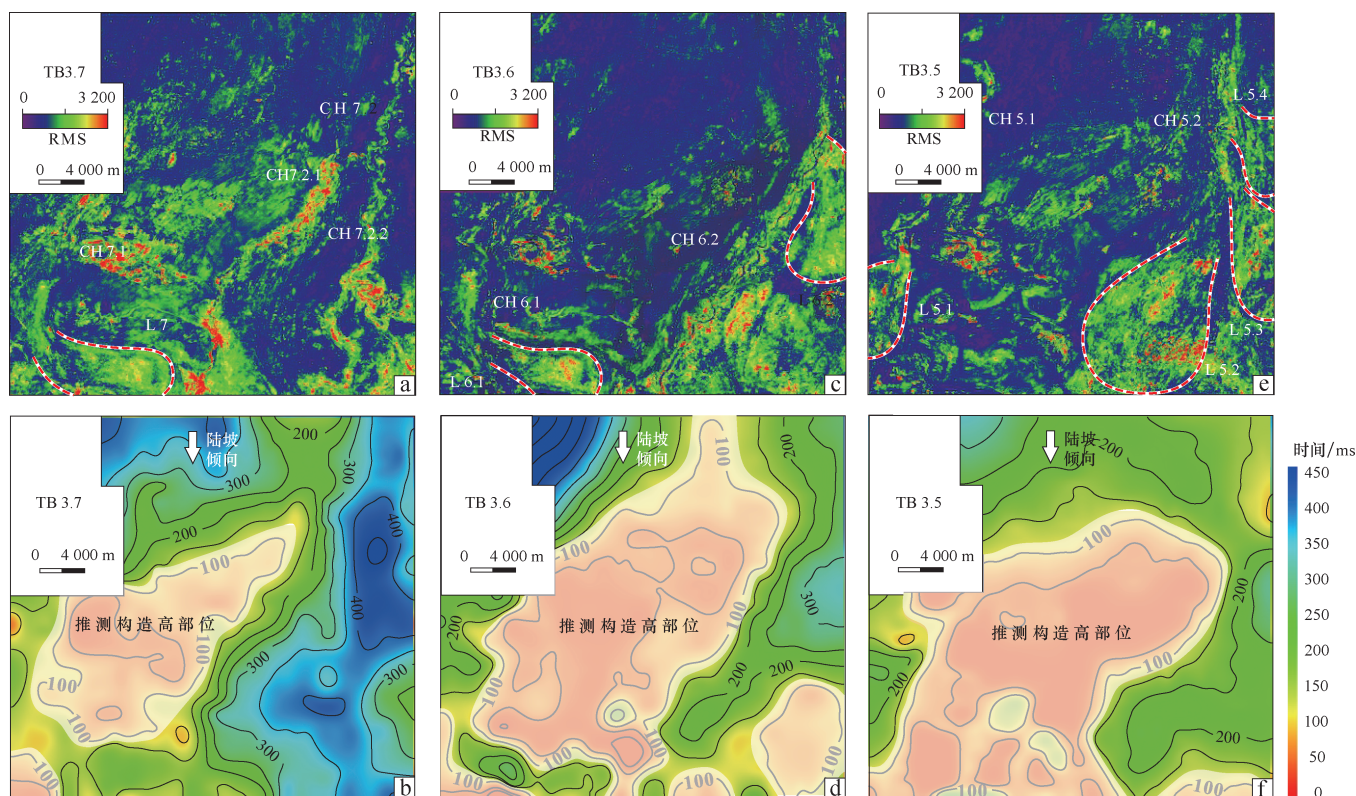


图10 尼日尔三角洲盆地 TB3.5—TB3.7 层序海退体系域均方根振幅属性与时间地层厚度

Fig. 10 RMS amplitude map in the RST and stratigraphic thickness on time section of

TB3.5 – TB3.7 in the study area of the Niger Delta Basin

a, c, e. TB3.5—TB3.7 层序海退体系域均方根振幅属性(时窗位置分别为:a. SB7 界面之上 100 ms, c. SB6 界面之上 50 ms, e. SB5 界面之上 50 ms); b, d, f. TB3.5—TB3.7 层序时间地层厚度等值线

TB3.8 层序平均时间地层厚度约为 250 ms (图 11d)。该层序内,研究区西部发育下切侵蚀现象明显的大型低弯度水道 CH8.1,东部发育了侵蚀下伏泥岩且在平面上为低弯度窄条带状的水道 CH8.2 和 CH8.3 (图 11c)。TB3.9 层序平均时间地层厚度约为 100 ms,地层在平面上的分布相对均匀 (图 11b)。该层序海退体系域内发育低弯度窄条带状水道 CH9.1—CH9.4,在研究区范围内均匀分布的四条水道流向均为自北向南顺陆坡倾向,其中水道 CH9.3 可见改道与水道废弃现象 (图 11a)。

## 5 逆冲构造区海底扇沉积演化模式

深水沉积过程受到多种因素的综合控制。海底扇体系的物源供给受到海平面升降、海啸、飓风、地震等多种因素的影响<sup>[41-42]</sup>,而其分布与演化则主要受到古地貌因素的控制。

基于三级层序地层厚度的平面分布特征,将厚度显著减薄处视为构造高部位,据此推测各层序沉积前的相对古地貌平面变化趋势。TB3.1 层序沉积前

地貌相对平缓,平面上起伏不大 (图 8b); TB3.2—TB3.4 层序沉积时在研究区中部、南部均发育不同程度的隆起,且隆起区的平面分布范围大体与逆冲断层走向平行 (图 9b, d, f); TB3.5—TB3.7 层序沉积时研究区中部进一步隆起,隆起区平面分布范围较前一阶段有所扩大 (图 10b, d, f); TB3.8—TB3.9 层序沉积时,地貌逐渐趋于平缓,平面上的高程差逐渐减小 (图 11b, d)。

结合区域地质背景,推测研究区南部的逆冲断层在 TB3.1 层序沉积时开始活动,在 TB3.1—TB3.3 层序沉积过程中处于活动状态。从 TB3.4 层序开始,由于水平挤压作用下产生的逆冲伴生褶皱核部相对空虚,同时尼日尔三角洲的不断向海进积产生负载<sup>[43]</sup>,使下伏阿卡塔组厚层超压塑性泥岩向深海方向迁移并在逆冲伴生褶皱核部聚集<sup>[44]</sup>,导致 TB3.4—TB3.6 层序沉积过程中研究区中部不断隆升。至 TB3.7—TB3.9 层序沉积时,构造活动明显减弱。

陆坡调整模式强调地貌演化对沉积的控制作用,提出构造活动使陆坡地貌的非均衡性增强,而沉积作用则使陆坡向均衡型转化,并据此将陆坡划分为均衡



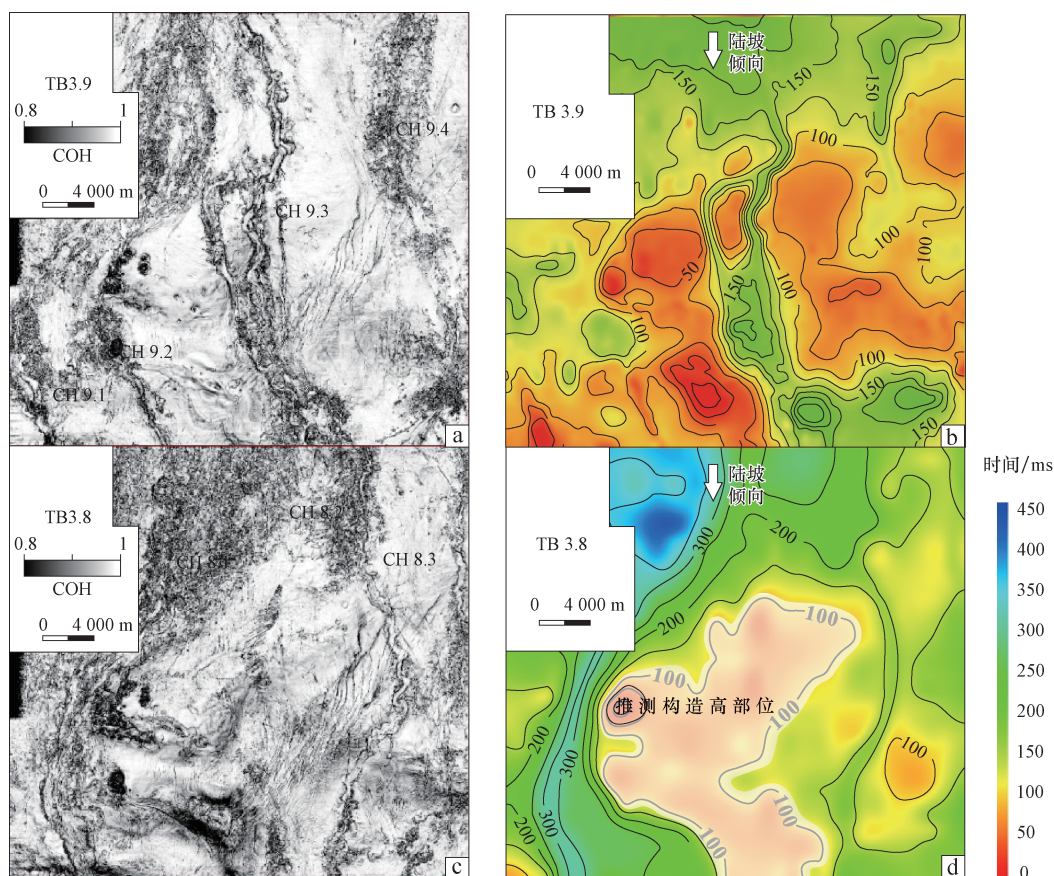


图 11 尼日尔三角洲盆地 TB3.7—TB3.8 层序海退体系域相干属性和时间地层厚度

Fig. 11 RMS amplitude map in the RST and stratigraphic thickness on time section of TB3.7-TB3.8 in the study area of the Niger Delta Basin

a, c. TB3.7 和 TB3.8 层序海退体系域相干属性(切片位置分别为: a. SB9 界面之上 10 ms, b. SB8 界面之上 10 ms);  
b, d. TB3.7 和 TB3.8 层序时间地层厚度等值线

型与非均衡型两类<sup>[45]</sup>。在 TB3.1 层序沉积期,研究区陆坡为均衡型,随后的逆冲断层与泥底辟构造活动使陆坡的非均衡性不断加强,至 TB3.8 和 TB3.9 层序沉积时,由于构造活动强度的明显减弱,陆坡在沉积填平补齐作用下再次演变为均衡型。因此,根据研究区内的古地貌演化特征将逆冲构造区海底扇体系的沉积演化过程划分为以下 4 个不同的阶段。

### 5.1 均衡陆坡阶段

该阶段逆冲断层尚未开始活动,陆坡地貌相对平缓,平面上起伏不大,导致可容空间在全区范围内均匀分布。随着相对海平面的下降,大量的高能碎屑沉积物被重力流搬运至下陆坡坡脚处形成海底扇水道沉积。该阶段的海底扇体系主要由高弯度条带状水道组成,发育于研究区中部。由于地貌因素对海底扇的限制性较弱,重力流水道在平面上容易发生横向摆动、迁移,并因此具有较高的弯曲度(图 12a)。在随后的海侵期,被搬运至深水的沉积物数量有所减少且粒度变细,

形成的半远洋披覆沉积覆盖于早期重力流水道之上。

### 5.2 逆冲断层阶段

TB3.2—TB3.4 层序沉积过程中,研究区西南部在逆冲断层作用下伴生了沿 NWW-SEE 走向展布的断层相关褶皱,受地貌因素控制可容空间主要集中于研究区北部。与前一阶段相比地貌对沉积作用的限制性明显有所增强。大量的重力流沉积物被限制在位于研究区北部与东南部的逆冲断层上盘微盆地中,其内部主要发育由连片状复合朵叶组成的海底扇体系。随着相对海平面的下降,在重力作用下顺陆坡向下被搬运的沉积物由于受到逆冲断层伴生褶皱的阻挡,被逆冲断层上盘处的可容空间捕获形成朵叶,超覆在逆冲断层上盘微盆地的边缘。由于海平面的快速上升使大陆架边缘沉积物失稳发生滑塌<sup>[31]</sup>,所形成的富泥质块体搬运沉积因受到逆冲断层伴生褶皱的阻挡被断层上盘微盆地捕获并覆盖于海退体系域的重力流朵叶之上(图 7,图 12b)。

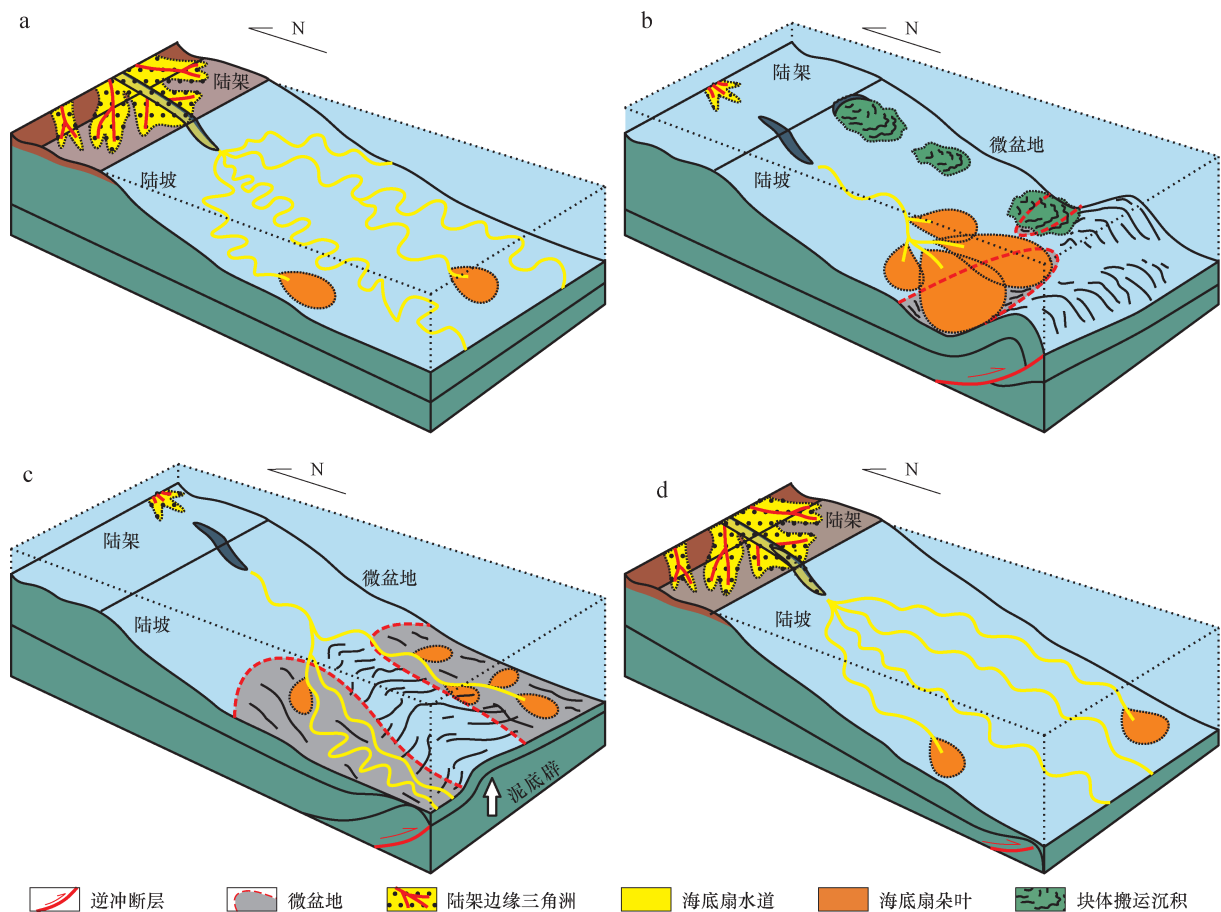


图 12 尼日尔三角洲盆地内研究区的逆冲构造区海底扇沉积演化模式  
Fig. 12 Sedimentary evolution patterns of submarine fans in thrust fault zone in the study area of the Niger Delta Basin  
a. 均衡陆坡阶段; b. 逆冲断层阶段; c. 泥底辟阶段; d. 沉积填平补齐阶段

5.3 泥底辟阶段

TB3. 5—TB3. 7 层序沉积期, 逆冲断层活动减弱, 研究区中部在泥底辟构造活动的影响下发生了持续的隆升。与前一阶段相比, 古地貌对海底扇的限制性进一步加强。位于研究区中部的泥底辟背斜在其东西两侧形成了顺陆坡倾向的狭长微盆地, 大量的重力流沉积物沿这些纵向微盆地发生沉积过路, 形成东西分异的海底扇水道—朵叶复合体(图 12c)。在三级层序海退期, 沿陆坡倾向被搬运的重力流沉积物受到泥底辟背斜的影响, 其搬运方向转向东西两侧, 被局部的小型池状可容空间捕获形成朵叶。形成于该阶段的海底扇朵叶平面形态形态受控于可容空间形状, 故与前一阶段相比规模相对较小。

5.4 沉积填平补齐阶段

TB3. 8—TB3. 9 层序沉积期, 逆冲断层活动基本停止, 在沉积填平补齐作用下, 研究区陆坡逐渐转化为均衡型。地貌逐渐趋于平缓, 对海底扇的限制作用大幅

度减弱, 可容空间在平面上逐渐趋于均匀分布。该阶段主要发育由在全区范围内均匀分布的低弯度条带状水道组成的海底扇体系(图 12d)。阶段 4 与阶段 1 中的陆坡在类型上均属于均衡型陆坡, 地貌对海底扇的限制作用均较弱, 海底扇体系亦均由重力流水道组成; 但两阶段中海底扇水道的形态明显有所不同, 这可能是由于在长期海退背景下, 尼日尔三角洲的不断进积使陆坡持续向深海推进, 导致阶段 4 中研究区地形坡度大于阶段 1, 而相对高的坡度使沉积物在顺陆坡向下的重力分量作用下形成了相对顺直的海底扇水道。

6 结论

- 1) 研究区目的层段(上中新统一第四系)可依据地层超覆及海平面变化划分为 9 个三级层序, 在其内部共识别出了块体搬运沉积 (MTD), 海底扇水道沉积, 海底扇朵叶沉积和半远洋披覆沉积 4 类不同的深水沉积单元。
- 2) 在构造活动的控制下, 研究区古地貌演化先后



经历了均衡陆坡阶段,逆冲断层阶段,泥底辟阶段和沉积填平补齐阶段4个不同的阶段。

3) 垂向上,海底扇主要分布在三级层序的低位域;而在平面上,受控于不同逆冲活动阶段的差异古地貌特征,海底扇可表现出复杂的分布演化规律。综合分析表明,研究区海底扇的沉积演化可分为4个阶段。均衡陆坡阶段(TB3.1):该阶段逆冲断层尚未开始活动,陆坡地貌相对平缓,对海底扇的限制性较弱。此时海底扇体系主要由高弯度条带状水道组成,发育于研究区中部。逆冲断层阶段(TB3.2—TB3.4):该阶段逆冲断层向深水区强烈挤压,在其上盘处形成与断层走向平行的微盆地,阻止了重力流的搬运,并在其内部形成大型连片状的复合朵叶。泥底辟阶段(TB3.5—TB3.7):该阶段逆冲断层活动减弱,并在核部伴随有向上的泥底辟作用。此时在研究区中部发育泥底辟背斜,而在其东西两侧发育顺陆坡倾向的微盆地。大量的重力流沉积物沿这些纵向微盆地沉积过路,形成东西分异的海底扇水道—朵叶复合体。沉积填平补齐阶段(TB3.8—TB3.9):该阶段逆冲活动基本停止,陆坡地貌逐渐趋于均衡,此时在研究区均匀发育低弯度条带状的水道沉积。

### 参 考 文 献

- [1] 吴时国,袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J]. 天然气地球科学,2005,16(6):693—699.  
Wu Shiguo, Yuan Shengqiang. Advance of exploration and petroleum geological features of deep-water hydrocarbon in the world[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 693—699.
- [2] 林煜,吴胜和,王星,等. 尼日尔三角洲盆地深水油田A海底扇储层质量差异[J]. 石油与天然气地质,2014(4):494—502.  
Lin Yu, Wu Shenghe, Wang Xing, et al. Reservoir quality differences of submarine fans in deep-water oilfield A in Niger Delta Basin, West Africa[J]. Oil & Gas Geology, 2014(4): 494—502.
- [3] 万琼华,吴胜和,陈亮,等. 基于深水浊积水道构型的流动单元分布规律[J]. 石油与天然气地质,2015(2):306—313.  
Wan Qionghua, Wu Shenghe, Chen Liang, et al. Analysis of flow unit distribution based on architecture of deep-water turbidite channel systems[J]. Oil & Gas Geology, 2015(2): 306—313.
- [4] 张佳佳,吴胜和,范廷恩,等. 海底扇水道储层参数建模新思路—以西非A油田为例[J]. 石油与天然气地质,2017(2):407—418.  
Zhang Jiajia, Wu Shenghe, Fan Tingen, et al. New method for reservoir petrophysical modeling of submarine fan channels: A case from Oilfield A in West Africa[J]. Oil & Gas Geology, 2017(2): 407—418.
- [5] Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(5): 792—822.
- [6] Walker R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(6): 932—966.
- [7] Posamentier H W, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition II—sequence and systems tract models[J]. Sea-Level Changes: An Integrated Approach; SEPM, Special Publication, 1988, 42: 125—154.
- [8] 王琳霖,王振奇,肖鹏. 下刚果盆地A区块中新统深水沉积体系特征[J]. 石油与天然气地质,2015(6):963—974.  
Wang Linlin, Wang Zhenqi, Xiao Peng. Characterization of deep water sedimentary system in the Miocene of Block A in Lower Congo Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015(6): 963—974.
- [9] Clark I R, Cartwright J A. Interactions between submarine channel systems and deformation in deepwater fold belts: Examples from the Levant Basin, Eastern Mediterranean sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1465—1482.
- [10] Morley C K. Growth of folds in a deep-water setting[J]. Geosphere, 2009, 5(2): 59—89.
- [11] Kneller B, McCaffrey W. Depositional effects of flow nonuniformity and stratification within turbidity currents approaching a bounding slope: deflection, reflection, and facies variation[J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(5): 980—991.
- [12] Prather B E, Booth J R, Steffens G S, et al. Classification, lithologic calibration, and stratigraphic succession of seismic facies of intraslope basins, deep-water Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(5): 701—728.
- [13] 何幼斌,李向东,罗进雄,等. 宁夏香山群深水沉积类型及其研究意义[J]. 石油天然气学报,2009,31(6):11—17.  
He Youbin, Li Xiangdong, Luo Jinxiong, et al. Sedimentary type of deep-water deposits and its research significance[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(6): 11—17 + 180.
- [14] 裴羽,何幼斌,李华,等. 高密度浊流和砂质屑屑流关系的探讨[J]. 地质论评,2015,61(6):1281—1292.  
Pei Yu, He Youbin, Li Hua, et al. Discuss about relationship between high-density turbidity current and sandy debris flow[J]. Geological Review, 2015, 61(6): 1281—1292.
- [15] 吴时国,秦蕴珊. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. 沉积学报,2009,27(5):922—930.  
Wu Shiguo, Qin Yunshan. The research of deepwater depositional system in the northern South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 922—930.
- [16] Nyantakyi E K, Li T, Hu W S, et al. Structural and stratigraphic characteristics on distal parts of the outer fold and thrust belt of southern Niger Delta, Nigeria[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(9): 6677—6695.
- [17] Jolly B A, Lonergan L, Whittaker A C. Growth history of fault-related folds and interaction with seabed channels in the toe-thrust region of the deep-water Niger delta[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 70(5): 58—76.
- [18] 李磊,王英民,张莲美,等. 尼日尔三角洲下陆坡限定性重力流沉积过程及响应[J]. 中国科学(D辑),2010,40(11):1591—1597.  
Li Lei, Wang Yingmin, Zhang Lianmei, et al. Confined gravity flow sedimentary process and its impact on the lower continental slope, Niger Delta[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 40(11): 1591—1597.
- [19] 于水,程涛,陈莹. 尼日尔三角洲盆地深水沉积体系特征[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2012,37(4):763—770.  
Yu Shui, Cheng Tao, Chen Ying. Depositional characteristics of deep-water systems in the Niger Delta basin[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2012, 37(4): 763—770.

- [20] Corredor F, Shaw J H, Bilotti F. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(6): 753–780.
- [21] 邓荣敬, 邓运华, 于水, 等. 尼日尔三角洲盆地油气地质与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 755–762.  
Deng Rongjing, Deng Yunhua, Yu Shui, et al. Hydrocarbon geology and reservoir formation characteristics of Niger Delta basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 755–762.
- [22] Lonergan L, Jamin N H, Jackson A L, et al. U-shaped slope gully systems and sediment waves on the passive margin of Gabon (West Africa) [J]. Marine Geology, 2013, 337(3): 80–97.
- [23] 李国玉, 金之均. 新编世界含油气盆地图集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 320–321.  
Li Guoyu, Jin Zhijun. World atlas of oil and gas basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 320–321.
- [24] Cobbold P R, Clarke B J, Løseth H. Structural consequences of fluid overpressure and seepage forces in the outer thrust belt of the Niger Delta [J]. Petroleum Geoscience, 2009, 15(1): 3–15.
- [25] Short K C, Stäuble A J. Outline of geology of Niger Delta [J]. AAPG Bulletin, 1967, 51(5): 761–779.
- [26] 张兴. 尼日尔三角洲盆地油气地质特征及潜力分析 [J]. 石油学报, 2000, 21(1): 40–43.  
Zhang Xing. Petroleum geological characteristics and potential analysis in the Niger Delta basin [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2000, 21(1): 40–43.
- [27] Damuth J E. Neogene gravity tectonics and depositional processes on the deep Niger Delta continental margin [J]. Marine and Petroleum Geology, 1994, 11(3): 320–346.
- [28] 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.  
Wang Zhenqi, Li Shitao, Yu Shui, et al. Characters of two-component constitution of deep-water deposit and classification of sequence stratigraphy in the Niger Delta basin [J]. ACTA Geologica Sinica, 2013, 87(8): 1149–1157.
- [29] 吕明, 王颖, 陈莹. 尼日利亚深水海底扇沉积模式成因探讨及勘探意义 [J]. 中国海上油气, 2008, 20(4): 275–282.  
Lv Ming, Wang Ying, Chen Ying. A discussion on origins of submarine fan deposition model and its exploration significance in Nigeria deep-water area [J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(4): 275–282.
- [30] 侯高文, 刘和甫, 左胜杰. 尼日尔三角洲盆地油气分布特征及控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 2005(3): 374–378.  
Hou Gaowen, Liu Hefu, Zuo Shengjie. A study of distribution characteristics of petroleum in Niger delta basin and their controlling factors [J]. Oil & Gas Geology, 2005(3): 374–378.
- [31] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier Press, 2006: 17–332.
- [32] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the triassic [J]. Science, 1987, 235(4793): 1156–1167.
- [33] 秦雁群, 计智锋, 万仑坤, 等. 海相深水碎屑岩层序地层学理论进展及关键问题 [J]. 石油与天然气地质, 2017(1): 12–21.  
Qin Yanqun, Ji Zhifeng, Wan Lunkun, et al. Theory progress and key issues of deep water marine clastic sequence stratigraphy [J]. Oil & Gas Geology, 2017(1): 12–21.
- [34] Moscardelli L, Wood L, Mann P. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela [J]. AAPG bulletin, 2006, 90(7): 1059–1088.
- [35] 王大伟, 吴时国, 吕福亮, 等. 南海深水块体搬运沉积体系及其油气勘探意义 [J]. 中国石油大学学报自然科学版, 2011, 35(5): 14–19.  
Wang Dawei, Wu Shiguo, Lv Fuliang, et al. Mass transport deposits and its significance for oil & gas exploration in deep-water regions of South China Sea [J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(5): 14–19.
- [36] 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3184–3195.  
Wu Shiguo, Qin Zhiliang, Wang Dawei, et al. Seismic characteristics and triggering mechanism analysis of mass transport deposits in the north continental slope of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3184–3195.
- [37] Weimer P, Slatt R M. 深水油气地质导论 [M]. 姚根顺, 吕福亮, 范国章, 等, 译. 北京: 石油工业出版社, 2012.  
Weimer P, Slatt R M. Introduction to the petroleum geology of deep-water settings [M]. Yao Genshun, Lv Fuliang, Fan Guozhang, et al. Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [38] 李华, 何幼斌, 王振奇. 深水高弯度水道—堤岸沉积体系形态及特征 [J]. 古地理学报, 2011, 13(2): 139–149.  
Li Hua, He Youbin, Wang Zhenqi. Morphology and characteristics of deep water high sinuous channel-levee system [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(2): 139–149.
- [39] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs—Key elements in facies prediction and effective development [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(8): 821–841.
- [40] Wynn R B, Cronin B T, Peakall J. Sinuous deep-water channels: Genesis, geometry and architecture [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(6): 341–387.
- [41] Shanmugam G. The constructive functions of tropical cyclones and tsunamis on deep-water sand deposition during sea level highstand: Implications for petroleum exploration [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(4): 443–471.
- [42] Shanmugam G. Submarine fans: a critical retrospective (1950–2015) [J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 5(2): 110–184.
- [43] 陈书平, 王春修, 肖华, 等. 尼日尔三角洲新生代褶皱作用及相关的油气圈闭 [J]. 高校地质学报, 2013, 19(2): 355–363.  
Chen Shuping, Wang Chunxiu, Xiao Hua, et al. Folding of the Niger Delta in the Cenozoic and its related traps [J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(2): 355–363.
- [44] Maloney D, Davies R, Imber J, et al. New insights into deformation mechanisms in the gravitationally driven Niger Delta deep-water fold and thrust belt [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(9): 1401–1424.
- [45] Ross W C, Halliwell B A, May J A, et al. Slope readjustment: a new model for the development of submarine fans and aprons [J]. Geology, 1994, 22(6): 511–514.