

文章编号: 1000-0550(2008)02-0407-10

# 尼日尔三角洲深水区层序地层及地震相研究<sup>1</sup>

李 磊<sup>1,2</sup> 王英民<sup>1,2</sup> 黄志超<sup>3</sup> 任亚红<sup>1,2</sup> 张莲美<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学资源与信息学院 北京 102249 2 中国石油天然气集团公司物探重点实验室 北京 102249)

3 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司研究院 上海 200120 4 中国矿业大学资源学院 江苏徐州 221008)

**摘 要** 中新世至上新世,研究区发育深海平原和陆坡坡脚沉积。缺少反映海平面变化的上超特征和削截现象,很难利用地震反射终止类型(上超、顶超、削截)进行层序界面识别。文中利用深水沉积旋回的地震相特征差异进行层序界面识别,并建立了研究区层序演化模式:低位体系域发育重力流沉积(块状搬运复合体、浊积扇)——海侵高位体系域深海泥质发育。以层序为格架进行地震相和沉积相在时间和空间分布特征分析。研究区识别出两类叠加地震相样式:杂乱反射块状搬运复合体——丘形水道—堤岸复合体(浊积扇)——平行反射深海泥质沉积;丘形水道—堤岸复合体(浊积扇)——平行反射深海泥质沉积。

**关键词** 尼日尔三角洲深水区 层序地层 地震相

**第一作者简介** 李磊 男 1979 年出生 在读博士 层序地层学和储层预测 E-mail: lilei002@yahoo.com.cn

**中图分类号** P539.1 P512.2 文献标识码 A

## 0 引言

从第 17 届国际沉积学大会可以看出,深海沉积已成为当前和今后沉积学研究最受关注的四个热点领域之一<sup>[1]</sup>。深水海域由于缺乏可直接观测描述的地面露头剖面以及钻探成本高昂等原因,深水海域更多的是依靠地震资料来获得对地下地质条件的认识和推测。地震地层学理论提供了利用地震资料的解释来研究地层和沉积相方法<sup>[2]</sup>。地震地层学以及层序地层学理论主要是基于在陆架等盆地边缘浅水区而发展起来的理论,在深水盆地或下陆坡深水应用这些理论将存在一些困难<sup>[3]</sup>。从陆坡到盆地深水日益增长的勘探活动和成功实例促使学者们对三维地震数据所显示的近地表浊流体系进行研究<sup>[4-14]</sup>。为了降低勘探的风险和成本,大量学者对墨西哥湾的 Brazos-Trinity 浊积体系进行了一系列研究<sup>[4,15-18]</sup>。这些研究对深水、少井的尼日尔三角洲深水沉积特征研究提供了分析基础。

## 1 区域地质背景

尼日尔三角洲位于西部非洲边缘的几内亚湾,是世界上最大的海退型三角洲之一<sup>[19]</sup>。始新世至上新世末期,海平面整体上处于下降期,更新世晚期,由于冰期之后冰川融化,导致了一期短暂海侵。尼日尔三

角洲是一个典型的泥岩构造区<sup>[20]</sup>。尼日尔三角洲东部以喀麦隆火山线为边界,西部以达荷美盆地和 4 000 m 等深线为界。尼日尔三角洲的形状和内部结构由沿洋壳的断裂带(如 Charcot 断裂带)所控制,表示成海槽和洋脊(形成于早侏罗世—白垩纪的南大西洋张开期)(图 1)。该三角洲地区是世界范围内最富含油气的油气区,深水区近年来巨大油气的发现预示该地区仍将是今后油气勘探的焦点。

尼日尔三角洲第三系地层从下到上主要由三套进积型的岩性地层单元组成,阿卡特组、阿格巴达组和贝宁组<sup>[19]</sup>。

前人对尼日尔三角洲的研究多基于岩石地层单元基础之上,既采用了穿时的岩石地层单元的概念,又在地震上标定出各组顶底反射,这与地震反射界面是年代地层界面而非岩石地层单元的界面的基本原理不符合<sup>[19,21]</sup>。据此无法建立沉积相展布和演化历史。而层序地层理论提供建立等时地层格架的方法。

研究区位于尼日尔三角洲陆坡坡脚处,平均水深 1 500 m(图 1)。本区块目前只进行了二维、三维地震勘探,尚无进行钻井勘探。因此,只能利用研究区的地震资料开展层序地层以及沉积相研究。虽然研究区无钻井资料来验证地震解释,但是可以利用其它具有岩性钻井资料地区的地震反射特征来推测研究区的岩性。

<sup>1</sup> 国家自然科学基金(批准号:40572067),国家 863 项目(批准号:20060109A1002-01)资助。

收稿日期:2007-06-05 收修修改稿日期:2007-07-12

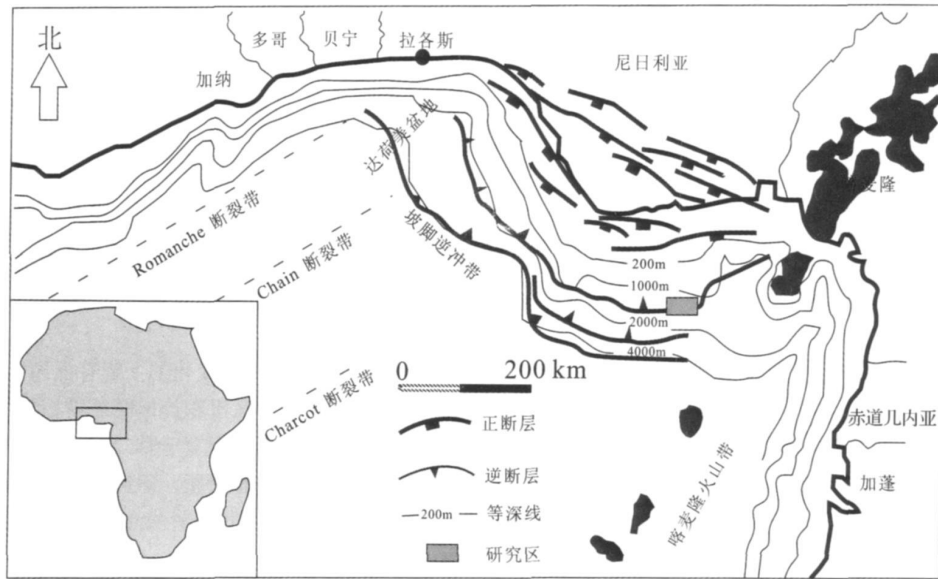


图 1 尼日尔三角洲主要构造特征示意图 (据 Freddy Corredor 等, 2005, 修改)  
 Fig 1 Sketch map of the Niger Delta region showing the main tectonic features  
 (modified from Freddy Corredor *et al.*, 2005)

## 2 研究区构造样式

自始新世开始, 海平面整体上处于下降期<sup>[19]</sup>。因此, 研究区自始新世以来一直处于深海平原和陆坡坡脚处, 推测该地区主要沉积类型应以深海平原泥质沉积和深水浊流沉积为主。研究区主要位于内褶皱带<sup>[21]</sup>。逆冲构造带是下陆坡重力伸展作用所致, 具有复杂的逆冲构造样式。研究区的构造样式主要是断层转折褶皱及其组成的逆冲叠瓦系列 (图 2)。逆冲断层多处错断阿格巴达组, 在阿卡特组顶部附近变缓成为拆离面。尼日尔三角洲深水区重力逆冲构造

活动开始于中新世<sup>[19]</sup>, 构造活动前地形平缓。重力逆冲构造开始后, 在断层相关褶皱后翼形成背驮式微盆地。基于浊流沿低洼充填的特点, 浊流在褶皱后翼微盆地内发生沉积, 褶皱翼部形成生长地层。生长地层是构造变形过程中所沉积的地层, 利用生长地层的年龄来判断变形作用的时间<sup>[22]</sup>。与 2 号、3 号、4 号逆冲断层相比, 1 号断层翼部生长地层开始时间最早 (翼部最先出现上超特征), 结束时间最晚。因此 1 号逆冲断层活动持续时间最长, 控制构造活动后的盆地基本形态。

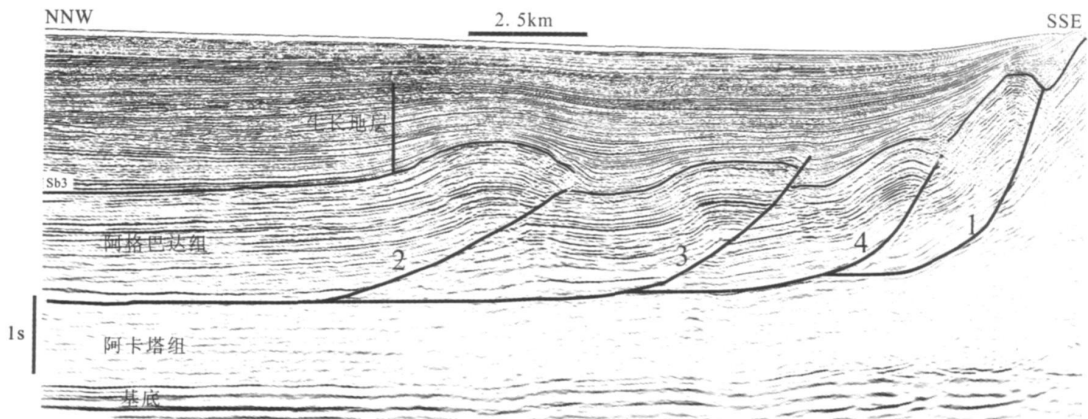


图 2 研究区主要构造样式地震剖面  
 Fig 2 Seismic section showing main structure styles in the study area

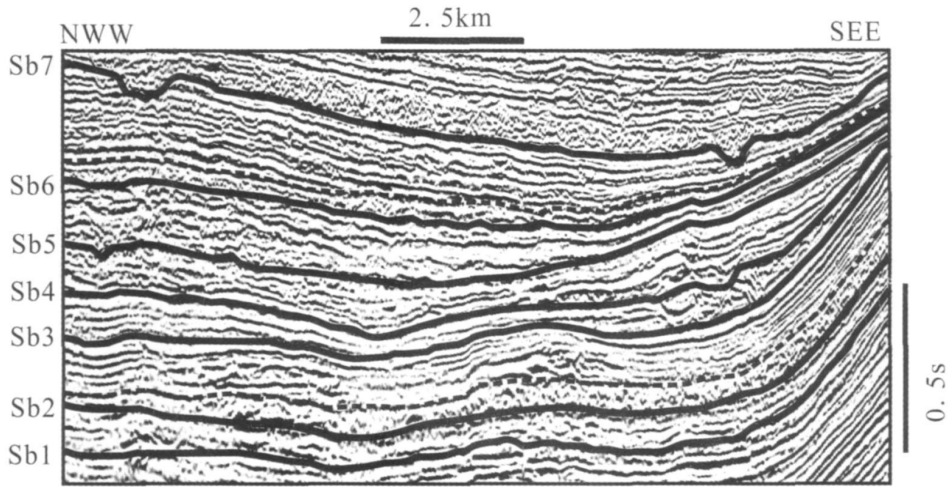
### 3 层序格架及层序演化模式的建立

#### 3.1 层序格架建立

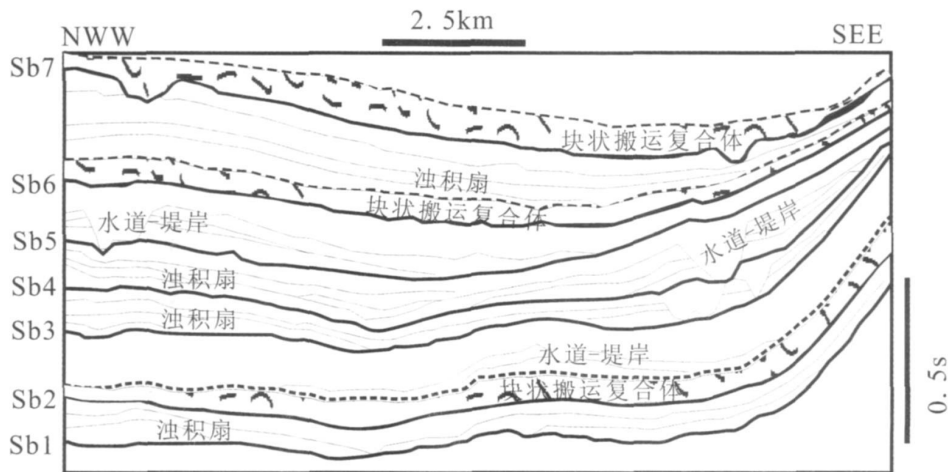
地震地层学以及层序地层学理论主要是基于在陆架等盆地边缘浅水区而发展起来的理论, 在深水盆地或下陆坡深水区长序地层学应用这些理论将存在一些困难<sup>[3]</sup>。层序界面是不整合面或与不整合面对应的整合面。在陆棚区域和上陆坡区域, 不整合面在地震剖面上多为上超、削截特征, 层序界面容易识别。而在下陆坡和深海平原区域, 与上陆坡的不整合面对应的层序界面往往是整合面, 仅靠地震反射接触关系很难确定层序界面。但层序界面上下的地震相类型有明显差异, 可以利用地震相特征来识别层序界

面<sup>[23]</sup>。

研究区主要位于深海盆地和陆坡坡脚处, 缺少明显具有反映海平面变化特征的界面, 层序的顶底界面往往是整合面。层序界面的局部在地震上可见水道下切特征(图 3-Sb3, Sb4, Sb5)和块状搬运复合体对下伏地层的侵蚀特征(图 3-Sb2, Sb6, Sb7)。层序界面 Sb3 发育时期(中中新世)是研究区的关键时期, 界面之下——基本未发生重力滑动作用, 地形简单, 浊流或滑塌体活动受地形影响小。从 Sb3 开始, 研究区块进入构造活动活跃期, 重力滑动作用导致陆坡形成大量的逆冲断层相关褶皱, 形成一系列微盆地。持续的构造活动和浊流活动共同作用, 在褶皱翼部形成大量的生长地层<sup>[22]</sup>。在沉积速率小于构造隆升速率



a. 典型层序格架地震剖面



b. 地震剖面解释结果

图 3 典型层序格架地震剖面及地震剖面解释结果

Fig 3 Seismic profile showing typical sequence framework and the explanation

表 1 研究区层序地层划分

Table 1 The division result of sequence stratigraphy in the study area

地层	地貌特征	三级层序	层序界面	界面特征	沉积环境
上新统			Sb7	杂乱反射底, 局部见削蚀	
上中新统	构造变动后逆冲构造 形成一系列微盆地	SQ 6	Sb6	杂乱反射底, 局部见削蚀	块状滑塌体、浊积扇、深海披覆泥 浊积扇、深海披覆泥 浊积扇、深海披覆泥 浊积扇、深海披覆泥
		SQ 5	Sb5	丘形反射底, 局部见削蚀, 盆地边缘见上超	
		SQ 4	Sb4	丘形反射底, 局部见削蚀, 盆地边缘见上超	
中中新统	构造变动前地形平缓	SQ 3	Sb3	丘形反射底, 局部见削蚀, 盆地边缘见上超	
		SQ 2	Sb2	杂乱反射底, 局部见削蚀	
		SQ 1	Sb1	丘形反射底	

时, 生长地层与褶皱表现为超覆关系, 这些超覆关系与海平面升降没有直接关系, 但上超面仍具有等时性, 上超面与构造活动的时期相对应<sup>[22]</sup>。构造活动静止期的层序界面主要根据地震相进行识别——层序界面往往是丘状反射的底界面或杂乱反射的底界面(图 3-Sb1, Sb2)。构造活动活跃期的层序界面主要根据微盆地边缘地震反射上超关系、局部削蚀特征与地震相特征综合分析进行识别(图 3a-Sb3, Sb4, Sb5, Sb6)。

### 3.2 层序演化模式的建立

自从 Kuenen 提出粒序层理由浊流形成以来, 许多学者致力于深水沉积作用的研究, 建立了多个深水沉积的扇模式, 其中最为经典的是 Walker 的综合扇模式和 Reading 基于供源形式和沉积物粒度把深水扇划分为 12 种模式<sup>[24-26]</sup>。

研究区处于西非大陆陆坡的坡脚处, 沉积中心自始新世以来一直远离物源区, 主要是深海平原、深海浊积扇、块状滑塌体沉积。重力滑动作用在陆坡坡脚形成一系列断层转折褶皱, 褶皱的隆升在其翼部形成微盆地, 微盆地构成了重力流可容空间(图 4-1)。褶皱隆升的同时, 发生一期重力流沉积活动。同一期重力流活动, 若重力流活动强且持续时间长, 块状搬运

可在下陆坡和深海平原发育, 早期的块状搬运复合体沉积往往为后期的浊流沉积所覆盖, 重力流沉积垂向上以块状搬运复合体—浊积扇叠加样式为特征; 若重力流活动相对较弱且持续时间较短, 重力流在陆坡上倾方向为块状搬运, 陆坡下倾方向则演化为浊流搬运, 此时, 陆坡坡脚和深海平原块状搬运复合体不发育, 浊积扇沉积发育。褶皱迅速隆升, 重力流在其翼部微盆地内发生沉积, 沉积速率小于或等于褶皱隆升时, 重力流沉积物超覆在褶皱的翼部(图 4-2)。重力流活动间歇期间发生深海披覆沉积(图 4-3)。深海披覆泥披盖沉积同期地形, 地层的厚度与地面起伏无直接关系。正常情况下, 地层与顶底面呈整合接触。有时也会表现为对底部的同沉积地形的轻微上超。褶皱活动持续隆升, 新一期重力流活动在褶皱翼部微盆地内形成新的沉积(图 4-4)。重力流沉积(块状搬运复合体、浊积扇)与深海披覆沉积构成一套完整的层序。重力流沉积在盆地边界所形成的上超不整合面或块状搬运复合体所形成的局部削蚀不整合面构成了层序界面(图 4-4)。研究区沉积层序在垂向上的存在两种叠加样式: 块状搬运复合体—浊积扇—深海披覆泥与浊积扇—深海披覆泥(图 3)。

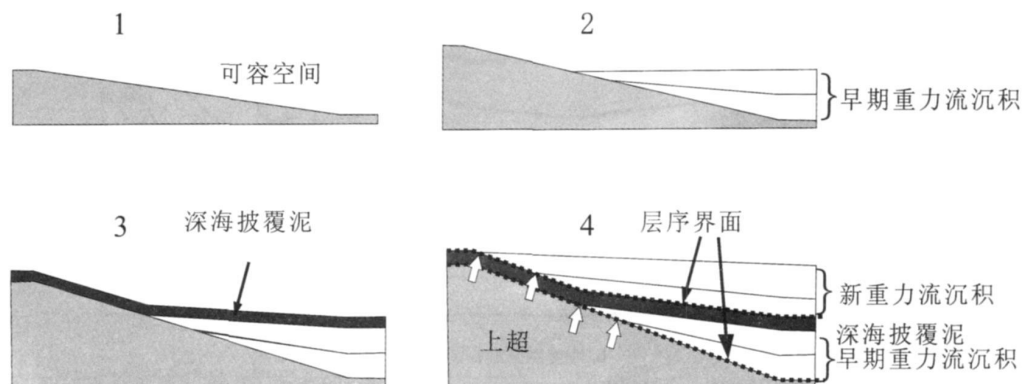
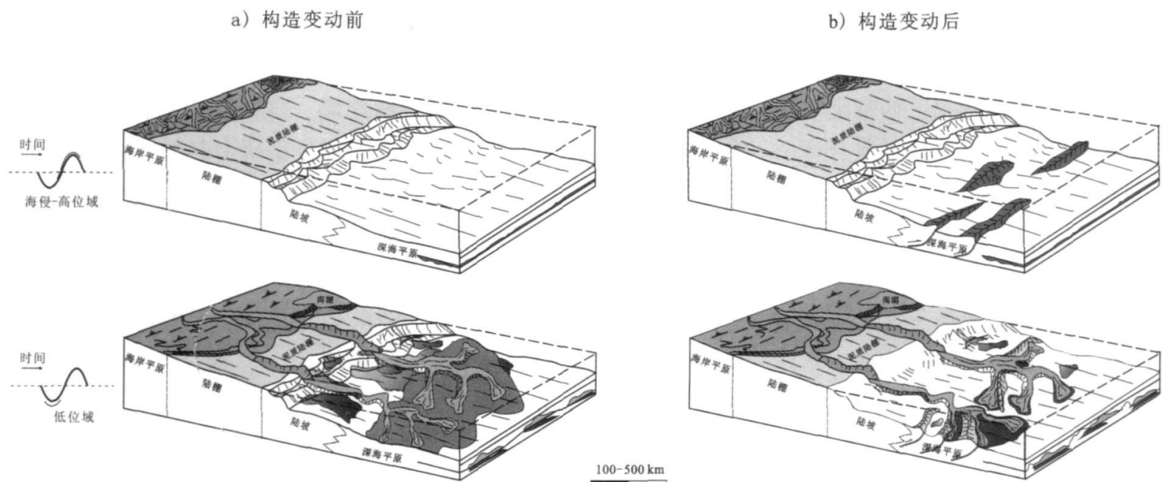


图 4 沉积垂向演化模式

Fig 4 Sketch model showing vertical evolution of sediment



a) 构造变动前 (Sb3以下) 浊积扇和块状滑塌体分布广泛  
b) 构造变动后 (Sb3以上) 浊积扇和块状滑塌体往往在向斜中分布

图 5 研究区层序演化模式图

Fig 5 The model of sequence evolution in the study area

参考 Walker 深水扇模式和 Reading 的砂泥混合体系的深水浊积扇模式, 建立研究区层序演化模式 (图 5)。研究区沉积层序为二分体系: 低位域发育重力流沉积 (块状搬运复合体、浊积扇) 体系, 海侵—高位域主要为深海披覆泥岩。低位域是重力流沉积优先发育时期。在低位域时期, 峡谷被切割, 沉积物绕过陆架区, 在峡谷出口或在下陆坡或盆地平原上形成深海扇沉积。由于三维地震资料的分辨率的限制, 海侵体系域和高位体系域在地震上很难区分, 又将二者合称为海侵—高位体系域。海侵—高位体系域, 主要为深海泥质沉积, 峡谷被泥质充填。

浊积扇的形态取决于海底地形的形态。在构造平静期, 地形平缓, 侧向几乎没有限制, 形成典型的对称扇沉积 (图 5a)。而在构造活动期, 由于重力滑动作用在陆坡坡脚处形成一系列逆冲断层相关褶皱, 在逆冲断层相关褶皱的翼部形成一系列微盆地。这些盆地构成了可供沉积物沉积的可容空间或沉积物运移通道。深水沉积的外部形态和规模受微盆地的形态影响, 浊积扇的外部形态呈水道状 (图 5b)。

## 4 地震相研究

### 4.1 地震相剖面特征分析

Mutti 在古代和现代的浊积体系中识别出五中沉积类型: 块状滑塌体、水道、溢岸沉积、沉积朵叶、水道—朵叶复合体沉积<sup>[27]</sup>。Galloway 概括了陆坡沉积的 7 种主要沉积相类型: 浊积水道充填相; 浊积朵叶

相; 席状浊积体; 滑动、滑塌、碎屑流席状体、朵叶、舌状体; 细粒浊积充填和席状体; 等深流漂积体; 深海披覆沉积和充填相<sup>[28]</sup>。Weimer 等从地震反射结构 (振幅、频率、连续性) 和地震反射构型两个方面对墨西哥湾上新世和更新世浊流沉积体系开展地震相研究<sup>[29]</sup>。Mitchum 等讨论过地震相的研究内容 (地震分反射的构型、振幅、频率、连续性和层速度) 和地震相分析的步骤——地震层序分析 (识别、对比、时代确定)、地震相分析 (识别、作图、解释)、海平面分析 (年代地层曲线, 海平面相对变化的区域性和全球性曲线)<sup>[2]</sup>。Sangree 等认为控制盆地斜坡和盆底的地震相单元主要是: 席状披盖地震相; 斜坡前缘充填地震相; 上超式充填地震相; 丘形扇地震相; 丘形等高环流地震相; 丘形上超式充填地震相; 杂乱充填相<sup>[2]</sup>。

尼日尔三角洲是一个大型进积型三角洲, 物源供给充分。研究区自始新世以来一直处于深海平原和陆坡坡脚处, 推测该地区主要沉积类型应以深海平原泥质沉积和深水重力流沉积为主。重力流体系一般推测由杂乱或透明反射地震相的块状搬运复合体和丘状地震相的浊流沉积组成。丘状地震相在研究区可以广泛看到, 这些地震相在其它地区被解释为浊积扇、分支水道朵叶复合体、深水扇的水道堤岸复合体<sup>[4]</sup>。这两种地震相被披覆、高连续反射复合体的深海披覆沉积所分割, 深海披覆沉积往往在浊流沉积静止期间堆积而成。

这三类地震相基于其外部形态、振幅特征、地层

层位以及间接与其它深水陆坡区浅层地震研究成果对比几方面转化为沉积相。例如在墨西哥湾、千里达和委内瑞拉、尼日尔深水区西部陆坡识别出重复出现的地震相叠加样式: 块状搬运复合体——分支水道杂叶复合体、水道堤岸复合体——深海披覆复合体<sup>[4 12 13 17]</sup>。

利用三维地震资料在研究区第三系地层识别出块状滑塌体、水道、水道—堤岸复合体这三种主要的沉积体系, 这三种沉积体系构成了本区的主要相类型(图 3)并总结了研究区内主要沉积单元的地震剖面特征(表 2)。

#### 杂乱或透明地震相

在世界范围内的古代和现代深水盆地地层中, 块状搬运复合体是组成地层的重要一部分。块状搬运复合体呈杂乱、丘状地震相和扇状几何形态。海底地形强烈地影响块状搬运复合体的面积和厚度。块状搬运复合体通常由于相对海平面下降造成的陆坡失稳所引起的<sup>[30~33]</sup>。海平面的相对下降也会导致峡谷壁的失稳, 产生块状搬运复合体。

杂乱、丘状或透明的地震反射体同碎屑流沉积、滑塌或其它的块状搬运沉积反射特征相似<sup>[4 7 13]</sup>。其中一部分有可能来自局部隆起, 其它部分大概由于较大规模的事件, 如陆架边缘和上陆坡的垮塌, 可以根据它们的厚度和面积来判断。Sb2 Sb6 Sb7 界面之

上所发育的块状搬运复合体厚度大且分布整个微盆地(图 3), 推测这些块状搬运复合体来自尼日尔陆架边缘和上陆坡的垮塌。这些垮塌是由于低位域相对海平面下降造成陆坡失稳所引起的。在搬运过程中, 块状搬运复合体对底部地层发生侵蚀(图 3 表 2)。大多数杂乱反射体以暗或透明反射为特征, 造成这些反射特征有以下三种原因: 碎屑流沉积中的块体和碎屑物; 泥质占主体, 砂岩含量变化大; 差异压实导致相对围岩较高的阻抗值。


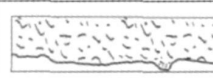

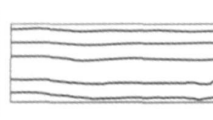

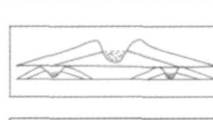

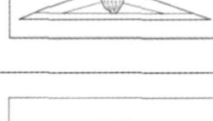


#### 水道及水道—堤岸复合体充填相

水道作为沉积物搬运通道具有长期侵蚀特征。水道不再作为传输沉积物通道时, 它们开始充填。在古代浊流体系中通常可以看到三类水道充填沉积类型: 1) 侵蚀型水道充填沉积; 2) 沉积型水道充填沉积; 3) 混合型水道沉积<sup>[27]</sup>。

水道作为沉积物搬运通道具有长期侵蚀特征。水道不再作为传输沉积物通道时, 它们开始充填。水道带以侵蚀通道为基底, 边缘为楔型的外堤岸(表 2)。水道体系的地震相特征为: 侵蚀通道, 通常为杂乱的强振幅反射, 解释为水道形成早在侵蚀通道内的半限定流沉积; 外堤岸, 楔型外形, 溢出的细粒浊积物与深海沉积互层; 内堤岸, 地震反射特征表现为弱—强振幅连续性反射或弱—强振幅杂乱反射。水道内的强振幅反射解释为粗粒沉积<sup>[5 7]</sup>。

表 2 研究区典型地震相特征

Table 2 The typical features of seismic facies in the study area

深水沉积	地震反射构型		地震反射结构		典型地震相剖面	典型地震相样式
			振幅	连续性		
块状滑塌体	A	杂乱反射	中弱	差		
深海披覆沉积	B	平行亚平行	强	好		
水道	C1	U型水道	强	差		
水道堤岸	C2	丘形反射	强弱	好中		
浊积扇或浊积杂叶	D	丘状反射	强	好		

深海披覆相

披覆地震相的平行反射以只有厚度或反射特征的逐渐变化的方式, 披盖了沉积同期地形, 从而提示了与地面起伏无关的均一沉积作用。这种地震相形成了比较薄的、分布广泛的席状平行反射, 正常情况下在顶底面呈整一关系(表 2)。有时也会表现为对底部的同沉积地形的轻微上超。反射连续性很高, 周期宽度通常一致地变窄。这种平行席状披盖相的半远海粘土和软泥, 常常发现它和浊积岩以及块状搬运复合体互层。

4.2 地震相平面展布特征分析

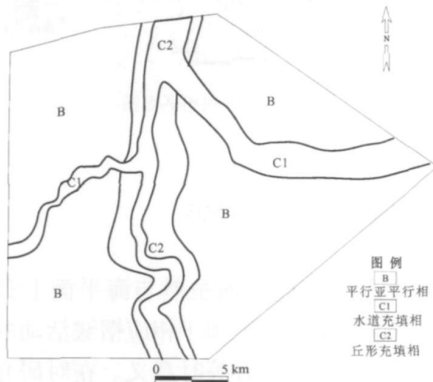
以层序或体系域为单元, 根据典型地震相特征在地震剖面上对地震相进行识别。然后绘制地震相平面图。参照其它地震属性(振幅属性和分频切片)所反应的地质信息和研究区深水沉积发育模式, 将地震相转化为沉积相(图 6 图 7)。

通过对不同地震属性分析、筛选得知, 均方根振幅属性(图 6b 图 7b)和 20 Hz 振幅切片(图 6c 图 7c)在研究区对深水浊积水道有很好的指示。强均方

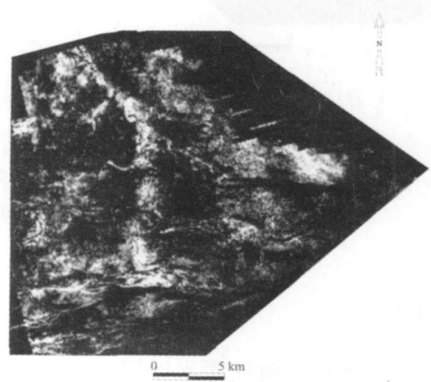
根振幅和 20 Hz 振幅切片反映了水道充填相强振幅反射结构特征, 均方根振幅属性和 20 Hz 振幅切片在平面上所展示的水道分布特征与地震反射构型所反映的水道分布特征吻合良好(图 6 图 7)。

SQ2 的地震相以水道充填相、丘形水道—堤岸充填相以及平行反射相为主(图 6a)。综合分析 SQ2 地震反射构型和地震反射结构的平面特征可知, SQ2 时期尚未发生重力滑动作用, 逆冲构造尚未形成, 地形平缓。此时的浊流沉积活动基本不受地形控制, 水道、分支水道发育, 浊积扇在平面呈对称扇型分布(图 6d)。

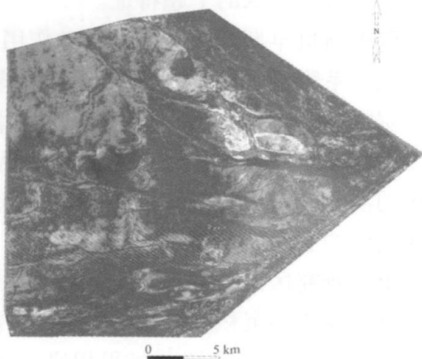
SQ3 的地震相以丘形水道—堤岸充填相以及平行反射相为主(图 7a)。SQ3 初期重力滑动作用在陆坡脚处形成一系列逆冲构造, 研究区形成一系列微盆地(图 2)。因此, 该时期的地震相和沉积相特征也发生了变化。水道特征受地形控制, 分支水道不发育。浊积扇不具有扇形分布特征而是水道状分布(图 7)。



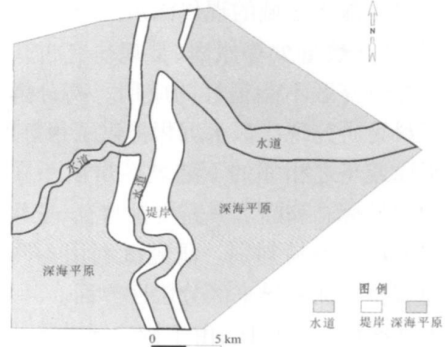
a. SQ2 地震相平面图



b. SQ2 层间均方根振幅属性



c. SQ2 20hz 振幅切片



d. SQ2 沉积相平面图

图 6 SQ2地震相与沉积相综合图

Fig 6 Composite map showing seismic facies and sedimentary facies of SQ2

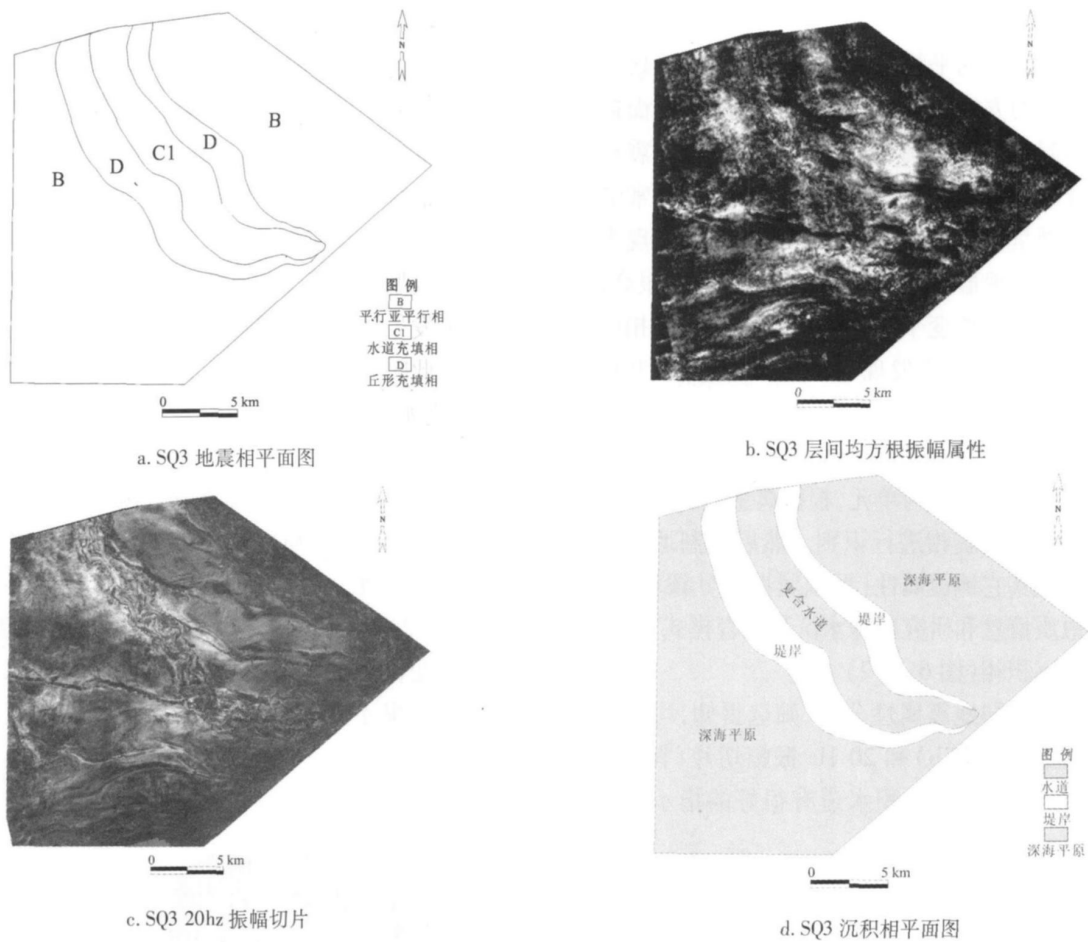


图 7 SQ3地震相与沉积相综合图

Fig 7 Composite map showing seismic facies and sedimentary facies of SQ3

## 5 结论

通过对尼日尔三角洲深水区层序地层及地震相研究, 可得出如下五点结论:

(1) 对于深水区域的现代深水沉积研究, 由于勘探程度低、钻井数量少等原因, 常规研究古代深水沉积的手段在研究区不能很好的应用。高分辨率的三维地震资料为研究现代深水沉积提供了很好的手段。在深海平原或与之相邻的下陆坡区域由于缺少海面变化的明显标志和陆上暴露侵蚀特征, 三级层序界面在地震资料上不易判别。研究区利用不同沉积旋回之间地震相特征差异来区分层序界面。

(2) 在深海平原地区, 由于构造活动形成了一些微盆地, 盆地边缘的上超反射与海平面的上升没有直接关系。研究区内中中新世之后在微盆地内所形成的地震反射上超特征, 往往是由于沉积速率小于构造隆升速率时所造成。这些上超地层在褶皱的翼部构

造了生长地层。上超界面虽然与海平面上升没有直接关系, 但这些反射特征却于相应褶皱活动的期次联系在一起, 上超面仍具有等时意义。在对研究区构造活动后地层进行层序界面识别时, 即利用地震相特征差异又参考了盆地边缘的上超特征。

(3) 晚中新世早期开始的重力滑动作用, 在陆坡脚处形成一系列逆冲构造。研究区地形特征也由早期的平缓特征变为地貌复杂的一系列微盆地。微盆地特征影响深水浊流沉积的平面分布。为了分析深水沉积的演化和空间分布特征, 建立了构造变动前和构造变动后的层序演化模式。

(4) 由于研究区勘探程度低、尚无钻井资料, 对本地区进行地震相和沉积相分析时, 充分利用其它地区的现代深水沉积的地震相和沉积相研究成果。在研究区识别出两类典型的地震相和沉积相旋回: 杂乱反射块状搬运复合体——丘形水道—堤岸复合体(浊积扇)——平行反射深海泥质沉积; 丘形水道—



堤岸复合体(浊积扇)——平行反射深海泥质沉积。

(5) 地震地层学以及层序地层学理论是基于在陆架等盆地边缘浅水区而发展起来的理论。在盆地边缘得到很好的应用而在深水盆地或下陆坡深水区应用这些理论将存在一些困难。因此,需要新的层序地层理论或进一步完善现有层序地层理论,以满足当前或今后深水油气勘探的需要。

### 参考文献 (References)

- 李忠. “从最高到最深”——从第 17 届国际沉积学大会看沉积学研究前沿 [J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 928-933 [Li Zhong. From the highest to the deepest—a review on research frontiers of sedimentology reflected from 17th International Sedimentological Congress [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 928-933]
- 佩顿编, 等译. 地震地层学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1980: 97-106 [Translated by Ni Yuquan, Xu Huaida, Chen Junsheng *et al*. Seismic Stratigraphy [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1980: 97-106]
- Shannon PM, Stoker M S, Praeg D, *et al*. Sequence stratigraphic analysis in deep-water underfilled NW European passive margin basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22: 1185-1200
- Beaubouef R T, Friedman S J. High-resolution seismic/sequence stratigraphic framework for the evolution of Pleistocene intra-slope basins western Gulf of Mexico: Depositional models and reservoir analogs [C] // Weimer P, Slatt R M, Coleman J *et al* eds. Deep-water reservoirs of the world: Gulf Coast Section SEPM 20th Annual Research Conference, 2000: 40-60
- Deptuck M E, Steffans 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
- Fonnesu E. 3-D seismic images of a low-sinuosity slope channel and related depositional lobe (West Africa deep offshore) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 615-629
- Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73: 367-388
- Davies R J. Kilometer-scale fluidization structures formed during early burial of a deep-water slope channel on the Niger Delta [J]. Geology, 2003, 31(11): 949-952
- Abreu V, Sullivan M, Pim ez C, *et al*. Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deepwater sinuous channels [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 631-648
- Dalhoff F. Mapping and facies analysis of Paleocene-Mid-Eocene seismic sequences offshore southern West Greenland [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 935-986
- Gervais A, *et al*. Sandy modern turbidite lobes: A new insight from high resolution seismic data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005(23): 485-502
- Adego ba A A, McHargue T R, Graham S A. Transient fan architecture and depositional controls from near-surface 3-D seismic data: Niger Delta continental slope [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(5): 627-643
- Moscaredelli 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
- Mayalla 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
- Satterfield W M, Behrens E W. A later Quaternary canyon/channel systems north-west Gulf of Mexico continental slope [J]. Marine Geology, 1990(92): 51-67
- Winker C D. High-resolution seismic stratigraphy of a late Pleistocene submarine fan ponded by salt withdrawal in basins on the Gulf of Mexico continental slope: 28th Annual Offshore Technology Conference Proceedings, Offshore Technology Conference, Richardson, Texas, 1996(1) [C]. OTC 8024: 619-662
- Prather B E, Booth J R, Steffens G S, *et al*. Classification, lithologic calibration, and stratigraphic succession of seismic facies of intra-slope basins deep-water Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(5A): 701-728
- Badalini G, Kneiler B, Winker C D. Architecture and processes in the late Pleistocene Brazos-Trinity turbidite system, Gulf of Mexico continental slope [C] // Weimer P, Slatt R M, Coleman J *et al* eds. Deep-water reservoirs of the world: Gulf Coast Section SEPM 20th Annual Research Conference, 2000: 16-34
- Doust H, Omatsola E. Niger Delta in divergent/passive margin basins [C] // Edwards J D, Santogrossi P A. eds. AAPG Memoir, 1990(48): 201-238
- Wu S, Bally A W. Slope tectonics: Comparisons and contrasts of structural styles of salt and shale tectonics of the northern Gulf of Mexico with shale tectonics of offshore Nigeria in Gulf of Guinea [C] // Mohriak W, Talwani M. eds. Atlantic rifts and continental margins. Washington D C, American Geophysical Union, 2000: 151-172
- Corredor F, Shaw J H, Bilotti F. Structural styles in the deepwater fold-and-thrust belts of the Niger Delta [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(6): 753-780
- Shaw J H, Connors C, Suppe J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds [J]. An AAPG seismic atlas: Studies in Geology # 53, 2005
- 纪友亮, 杜金虎, 赵贤正, 等. 饶阳凹陷下第三系层序地层类型及发育模式 [J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 1-9 [Ji Youliang, Du Jinhui, Zhao Xianzheng *et al*. Sequence stratigraphic models and controlling factors of Eocene in Ruyang Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(1): 1-9]
- Kuenen Ph H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. Journal of Geology, 1950, (58): 97-127
- Walker R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps [J]. AAPG Bulletin, 1978(62): 932-966
- Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deepwater basin mar-

- gins classified by grain size and feeder system [ J ]. AAPG Bulletin 1994, 78 (5): 792-822
- 27 Mutti E, Normark W R. An integrated approach to the study of turbidite system [ C ] // Weimer P, Link M H. eds. Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems. New York: Springer-Verlag, 1991: 75-106
- 28 Galloway W E. Siliciclastic slope and base-of-slope depositional systems: component facies, stratigraphic architecture, and classification [ J ]. AAPG Bulletin, 1998, 82 (4): 569-595
- 29 Weimer P, Varnai P, Budhianto FM, *et al*. Sequence stratigraphy of Pliocene and Pleistocene Turbidite Systems, Northern Green Canyon and Ewing Bank (Offshore Louisiana), Northern Gulf of Mexico [ J ]. AAPG Bulletin, 1998, 82 (5B): 918-960
- 30 Colman JM, Prior D B, Lindsay J F. Deltaic influences on shelf-edge instability processes [ C ] // Stanley D J, Moore G T. eds. The shelfbreak: critical interface on continental margins. SEPM Special Publication, 1983 (33): 121-137
- 31 Kolla V, Macurda D B, Jr. Sea-level changes and timing of turbidite-current events in deep-sea fan systems [ C ] // Wiggins C K, Hastings B S, Kendall C G St C, *et al*. eds. Sea level change: An integrated approach. SEPM Special Publication, 1988 (42): 381-392
- 32 Dan G, Sonderhojn M. Lowstand slope channels of the Itilli succession (Maastriichtian-lower Paleocene), Nuussuaq west Greenland [ J ]. Sedimentary Geology, 1994, (94): 49-71
- 33 Cronin B, Owen D, Hartley A, *et al*. Slumps, debris flows and sandy deep-water channel systems: implications for the application of sequence stratigraphy to deepwater clastic sediments [ J ]. Journal of the Geological Society, 1998, (155): 42-432

## Study on Sequence Stratigraphy and Seismic Facies in Deep-water Niger Delta

LI Lei<sup>1,2</sup> WANG Ying-min<sup>1,2</sup> HUANG Zhichao<sup>3</sup> REN Ya-hong<sup>1,2</sup> ZHANG Lian-mei<sup>4</sup>

(1. Faculty of Natural Resource & Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. Key Laboratory for Geophysical Prospecting, CNPC, Beijing 102249;

3. Institute of Shanghai Offshore Oil & Gas Company, SINOPEC, Shanghai 200120;

4. China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu 221008)

**Abstract** The strata of Miocene and Pliocene in the study area deposit in the deep-sea plain and toe of slope. Characters of the onlap and truncation which represent eustasy cannot be recognized in seismic data. It is difficult to recognize the sequence boundary with seismic termination such as onlap, toplap and truncation. In this paper, the sequence boundary can be identified by characters in seismic facies of sedimentary cycle. Model of sequence evolution, LST developing gravity flow deposition (mass-transport complex and turbidite fan), T-HST developing deep-sea mud has been built up. Characters of seismic facies and sedimentary facies are analyzed in sequences. Two seismic facies stacking pattern have been recognized in the study area: chaotic mass-transport complexes overlain by hummocky channel-levee complexes (turbidite fan) and capped by parallel to subparallel hemipelagic drape complexes; hummocky channel-levee complexes (turbidite fan) and capped by parallel to subparallel hemipelagic drape complexes.

**Key words** Deep-water Niger Delta, sequence stratigraphy, seismic facies