

尼日尔三角洲盆地深水区逆冲构造演化特征

蔺鹏^{1,2}, 吴胜和¹, 张佳佳¹, 胡光义³, 王南溯¹, 黄梅¹

¹ 中国石油大学(北京)地球科学学院;

² 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院; ³ 中海油研究总院

摘要 关于尼日尔三角洲盆地陆坡深水区的逆冲构造,其逆冲背景下的构造演化阶段及古地貌变迁特征,是一个需要深入研究的问题。以尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例,基于三维地震资料解释,识别了3个关键界面和4种构造样式,将新生界划分为3个超层序,进一步分析了SSQ₁超层序内部的泥岩滑脱面,厘定了中新统逆冲构造的演化阶段,并分析了不同阶段内的地貌特征。形成于构造活动期的超层序(SSQ₃)可进一步划分为3个三级层序,自下而上依次由逆冲断层、泥底辟和披覆沉积所主控,对应3个不同的构造演化阶段:①逆冲断层主控阶段。在重力滑脱作用下,逆冲断层沿不同深度滑脱面发育,所产生的位移差导致构造变换带内地层受到剪切应力而发育撕裂断层,其走向与逆冲断层近垂直;剪切破裂面的存在使地层抗应力强度大幅降低,在地层超压作用下,构造变换带内沿撕裂断层发育泥底辟褶皱;顺陆坡倾向搬运的重力流沉积物受到逆冲相关褶皱阻挡而发生沉积,导致重力流岩性圈闭集中分布于逆冲断层上盘的地貌低部位。②泥底辟主控阶段。在差异负荷作用下,塑性超压泥岩向逆冲相关褶皱与撕裂断层相关褶皱核部集中,形成大型滑脱褶皱;泥岩的塑性变形主要发生在由不同深度滑脱面所限定的地层单元内;滑脱褶皱的存在使其两侧形成了沿陆坡倾向展布的地貌低部位,并成为重力流储层发育的有利场所。③构造平静阶段。构造活动明显减弱,在填平补齐作用下地貌逐渐趋于平缓。

关键词 尼日尔三角洲盆地; 深水; 层序; 构造样式; 构造演化

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

0 引言

尼日尔三角洲盆地具有丰富的油气资源,近年来随着深海钻探技术的不断发展,深水区的油气勘探与开发已逐渐成为广受关注的热点^[1-4]。在重力滑脱作用下,尼日尔三角洲盆地地下陆坡脚处广泛发育逆冲断层、泥底辟成因滑脱褶皱和集中发育于背斜顶部的伸展断层^[5-10]。逆冲断层上盘处发育逆冲相关褶皱,其构造样式受到岩层变形方式、滑脱面数目与深度等多种因素的控制^[11-13]。Bilotti等^[14]认为被动大陆边缘陆坡深水区的地质条件与主动大陆边缘之间存在相似性,故将临界楔模型应用于研究区以解释逆冲断层及其相关褶皱的形成机理。逆冲断层之间常在两侧位移差的诱导下伴生各种变换构造,包括软连接(变换斜坡、背斜)与硬连接(正断层、逆断层和撕裂断层)2大类^[6-8,15]。在逆冲构造变换带的内部,初始差异逆冲作用下形成的斜向伸展变换构

造在后期发生构造反转可形成小型背斜^[8]。针对滑脱褶皱的研究表明,泥岩除塑性流动外,其内部因发生脆性变形而导致的层厚增厚,也是滑脱褶皱形成的重要原因^[16]。谢昭涵等^[7]通过对深水滑脱褶皱演化的研究认为,不同期次的正断层活动与背斜轴面的迁移存在对应关系,并提出了背斜顶部正断层重力滑动的演化机制。

针对尼日尔三角洲盆地深水区的逆冲构造,前人在构造几何学与运动学方面已取得了一些认识,并探讨了各种构造样式的形成机理,但关于逆冲背景下的构造演化阶段分析及古地貌特征的研究成果则相对较少。本文以该盆地陆坡的一个深水研究区为例,基于高分辨率三维地震资料,建立层序地层格架,在前人研究成果的基础上厘定了构造演化阶段,并分析了不同阶段内的古地貌特征。研究成果不仅深化了构造沉积相互作用机理的认识,也为海底扇这一重要储层的空间分布规律研究奠定了基础。

收稿日期: 2017-10-19; 改回日期: 2018-04-28; 网络发表日期: 2019-02-15

本文受国家科技重大专项“西非、亚太及南美典型油气田开发关键技术研究”课题(编号:2011ZX05030-005-02)资助

第一作者: 蔺鹏, 硕士, 主要从事油气田开发地质学研究工作。通信地址: 124010 辽宁省盘锦市中国石油辽河油田公司勘探开发研究院; E-mail: qiuyehanning@163.com

1 地质概况

尼日尔三角洲盆地位于非洲西部几内亚湾(图1)。盆地的形成开始于中侏罗世以来超级大陆的裂解^[17]。在St. Helena地幔柱作用下,西非几内亚湾地区裂解并形成三叉裂谷^[18-20],位于东北部的Benue地槽一臂逐渐衰退夭折,而位于西南和东南的两臂分别演变成今天的赤道大西洋和南大西洋北段^[20-22]。尼日尔三角洲盆地位于该三叉裂谷西南臂和东南臂的叠合部位,在裂谷三联点体系的基础上逐步形成^[17,20]。在大陆边缘重力滑脱作用的影响下,盆地自北向南依次发育伸展构造区、泥底辟构造区和褶皱逆冲区(图1),其中褶皱逆冲区又可细分为内褶皱逆冲区、滑脱褶皱区和外褶皱逆冲区^[11,17,20]。

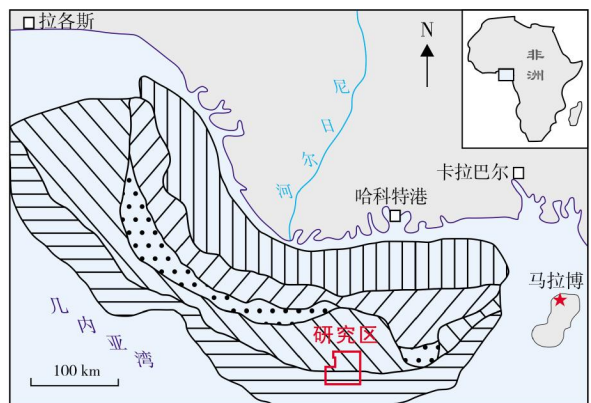


图1 尼日尔三角洲盆地海域构造分区(据文献[11]编绘)

盆地基底主要由西非克拉通的前寒武系一下古生界火成岩和变质岩组成^[17]。盆地经历了裂谷期(中生代早期)和后裂谷漂移期(中生代晚期以来)2个演化阶段,依次发育了裂谷层序和后裂谷漂移层序^[5,17]。盆地垂向上可划分为3套构造层序,即下部的基底,中部的裂谷层序和上部的漂移层序^[15,23],其中,形成于新生代的三角洲沉积构成了盆地的主体^[24-25]。自始新世开始,受全球海平面下降的影响,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3个岩性地层单元^[17,24](图2)。Akata组为富含有机质的海相泥岩,厚约3 000~4 000 m,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组则为河流和岸后沼泽沉积,主要岩性为砂砾岩^[2,26-28]。

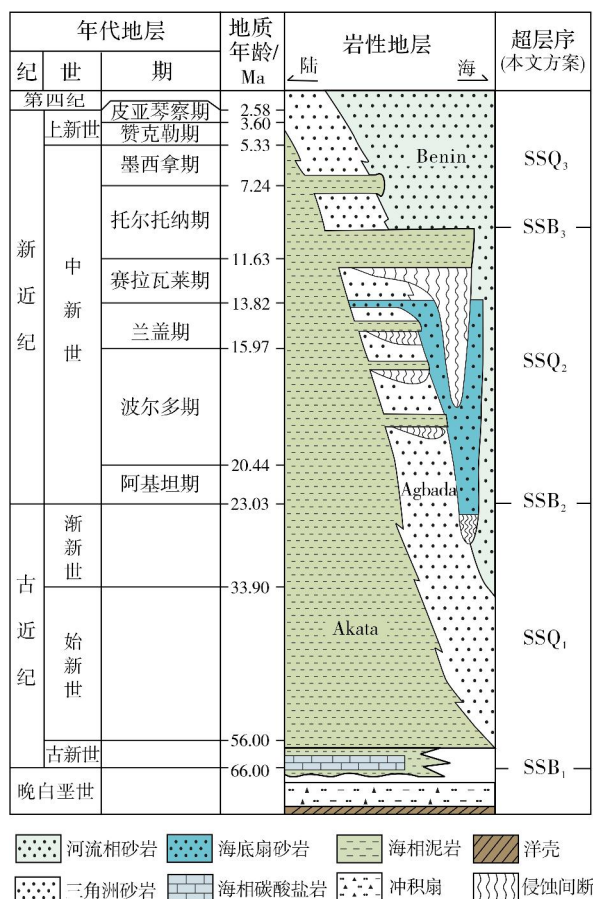


图2 尼日尔三角洲盆地地层柱状图(据文献[6,11]编绘)

研究区位于盆地南缘下陆坡坡脚处,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的分界处(图1),自始新世至今一直处于深水环境(现今陆坡倾向朝南,倾角约为0.9°),由北部尼日尔河等水系供源,主要发育海底扇沉积^[29]。

研究区拥有三维地震资料(SEG正极性),平面覆盖面积约为1 200 km²,主测线与联络测线间距均为12.5 m,垂向采样率为3 ms,浅层近海底处主频接近70 Hz,深层Agbada组底部主频下降至约30 Hz,整体上能够满足本次研究的需要。

2 新生界层序地层特征

对于后裂谷漂移层序,以研究区垂直于逆冲断层体系的A—A'剖面为例(图3a),根据地震反射同相轴的终止关系、地震相类型及地层变形特征的差

异,在地震资料覆盖范围内可识别出3个重要的层序地层界面(图3b,图2),相应地可将新生界划分为3个不同的超层序,自下而上依次为SSQ₁、SSQ₂、SSQ₃。

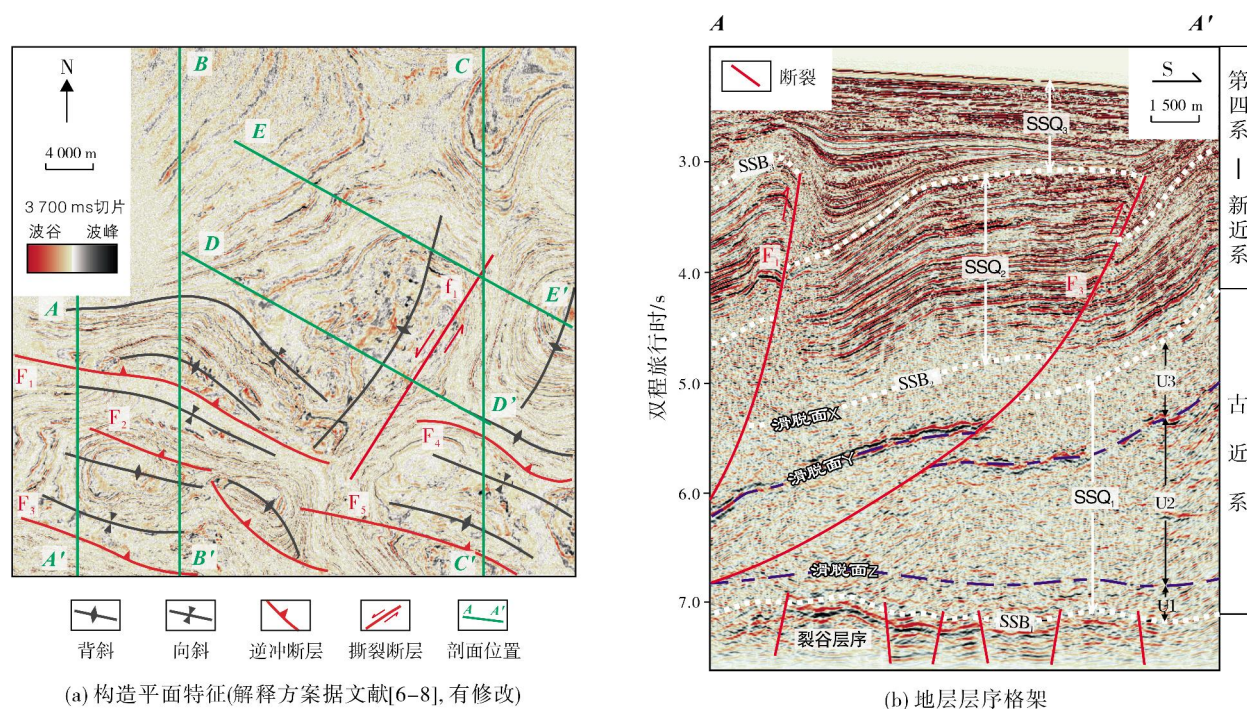
SSB₁界面时间深度变化范围为6.7~7.5 s,为一横向较连续的强反射波峰界面(图3b),在横向上具有波状起伏的特征,被多条正断层错断。界面上下地震相特征的突变表明岩相和沉积环境均发生了改变,由此判断该界面是一个重要的区域不整合面,界面上下的地层接触关系为平行不整合。该不整合面以下的地层在地震反射剖面上为中—强振幅、中等连续波状反射,在正断层作用下表现为地垒—地堊的组合样式(图3b);在盆地西部与南部亦可见与之类似的地震地层单元,该单元通常被解释为白垩系裂谷层序^[12,15]。

SSB₂界面时间深度变化范围为3.9~5.8 s,为一中等连续的中—弱振幅反射界面(图3b)。界面上下地震相的显著变化表明存在明显的岩性差异。根据全球海平面升降曲线^[30],认为该界面是形成于距今约23.03 Ma的大规模海退事件中的超层序界面^[6]。SSB₁与SSB₂界面之间的地层(SSQ₁)整体为弱振幅低连续反射(图3b),通常解释为古近系厚层海相泥岩,其内部异常高压的存在使之容易发生塑性流动^[6,14]。在古近系泥岩内部发育3个主要的区域性滑脱面,由浅至深依次为X、Y、Z(图3b)。滑脱面X位于古近系最顶

部,为弱反射界面;滑脱面Y、Z分别位于古近系中部和底部,二者均为强反射界面^[11,12,15-16],可作为标志层,并为泥岩内部塑性变形特征的研究提供依据。根据滑脱面Y和Z可将古近系进一步划分为3个地层单元,自下而上依次命名为U1、U2、U3。

SSB₃界面时间深度变化范围为2.1~4.3 s,该界面之上的地层普遍表现为上超(图3b),下部均为整合,界面上下地层产状的显著差异表明该界面为一个重要的区域不整合面,根据全球海平面升降曲线将其解释为形成于距今约10.5 Ma的超层序界面^[1,30-31]。位于不整合界面SSB₂与SSB₃之间的地层(SSQ₂),由连续性较好的中—强振幅地震反射组成,并被广泛发育的逆冲断层错断。该地层单元逆冲断层上下盘厚度基本一致,且在研究区范围内近等厚分布(时间地层厚度均为1.5 s左右),可解释为形成于逆冲断层活动前的地层单元,大致对应阿基坦阶—托尔托纳阶下部^[6]。

不整合界面SSB₃与现今海底之间的地层(SSQ₃),由连续性较好的中—强振幅地震反射组成,平均时间厚度约为1.2 s,平面上地层厚度变化较大,在逆冲断层相关背斜处厚度明显减薄(图3b)。地震剖面显示该地层单元内大量发育生长地层并上超于构造高部位,可解释为形成于构造活动期的地层,大致对应托尔托纳阶上部—第四系^[6]。



(a) 构造平面特征(解释方案据文献[6-8],有修改)

(b) 地层层序格架

图3 尼日尔三角洲盆地深水区逆冲断层活动期构造平面图及典型层序地层格架地震剖面(A—A')

3 构造样式及特征

构造样式是指在剖面形态、平面展布和应变机制上有着密切联系的特定的构造组合^[32]。根据地震反射剖面上断层面产状及断层面两侧同相轴的相对位移,在研究区内共识别出 F_1 — F_5 共5条主要的逆冲断层(图3a)^[6-7]。各逆冲断层均沿NNW—SEE走向展布,并在重力滑脱作用下,沿下伏塑性泥岩内部滑脱面向SSW方向挤压逆冲滑脱,可能为同期构造活动的产物。在逆冲构造背景下,研究区内主要发育了4种不同的构造样式。

3.1 逆冲断层

位于研究区西部的逆冲断层 F_1 — F_3 组成了叠瓦式

逆冲断层组合(图4),断层面倾向均为NNE,在剖面上呈上陡下缓的铲状,向上在 SSQ_3 超层序中逐渐消失,向下断穿 SSQ_2 超层序,在 SSQ_1 超层序中明显错断强反射滑脱面Y,并于古近系泥岩底部收敛于滑脱面Z,断层下盘地层厚度明显大于上盘。位移量沿滑脱面Z向上传递到 SSQ_3 超层序中,并在逆冲断层上盘处发生褶皱作用,形成了后翼宽而缓、前翼窄而陡的断层相关褶皱,且后翼地层倾角远小于断层断坡的倾角(图4)。单一断层相关褶皱波长约为10km,波幅约1500ms(图4)。古近系泥岩集中于断层相关褶皱的下方,垂向厚度约为2.5~3.0s。沿断层倾向的剖面显示(图4),U1和U3单元泥岩厚度非常稳定,而U2单元则明显集中于逆冲相关褶皱的核部,且在远离逆冲断层处厚度有所减薄,表明U2单元的泥岩可能发生了侧向上的迁移。

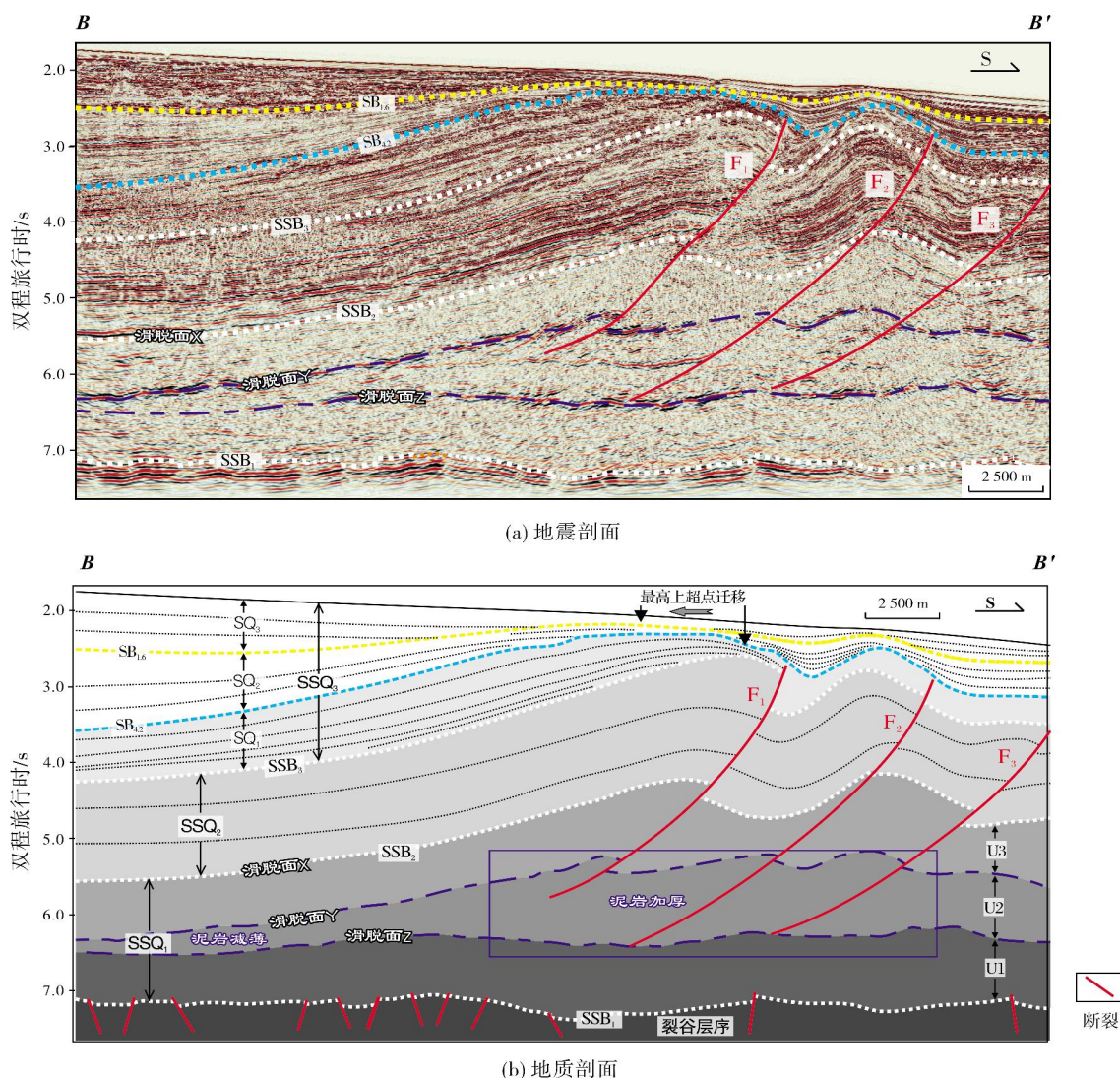


图4 尼日尔三角洲盆地深水地震地质解释剖面(B—B')及西部逆冲断层地震反射特征剖面位置见图3a

与西部断层相比,位于研究区东部的逆冲断层 F_4 、 F_5 规模与位移量均相对较小。地震反射剖面显示(图5),逆冲断层 F_4 、 F_5 断层面相对平直,倾向为NNE,主要错断 SSQ_2 超层序,向上断穿 SSB_3 不整合界面,并很快终止于 SSQ_3 超层序内,向下错断滑脱面 X ,并逐渐消失于泥岩地层中,并未错断强反射滑脱

面 Y 。这表明研究区东部的逆冲断层沿古近系中部滑脱面 Y 发育。各逆冲断层下盘的地层时间厚度约为2 100 ms,略大于上盘处的1 900 ms。在逆冲断层 F_4 、 F_5 上盘均发育了倾向与主逆冲断层相反的反冲断层,于上盘处形成了两翼对称的冲起构造。逆冲相关褶皱波长约8 km,波幅约2 000 ms(图5)。

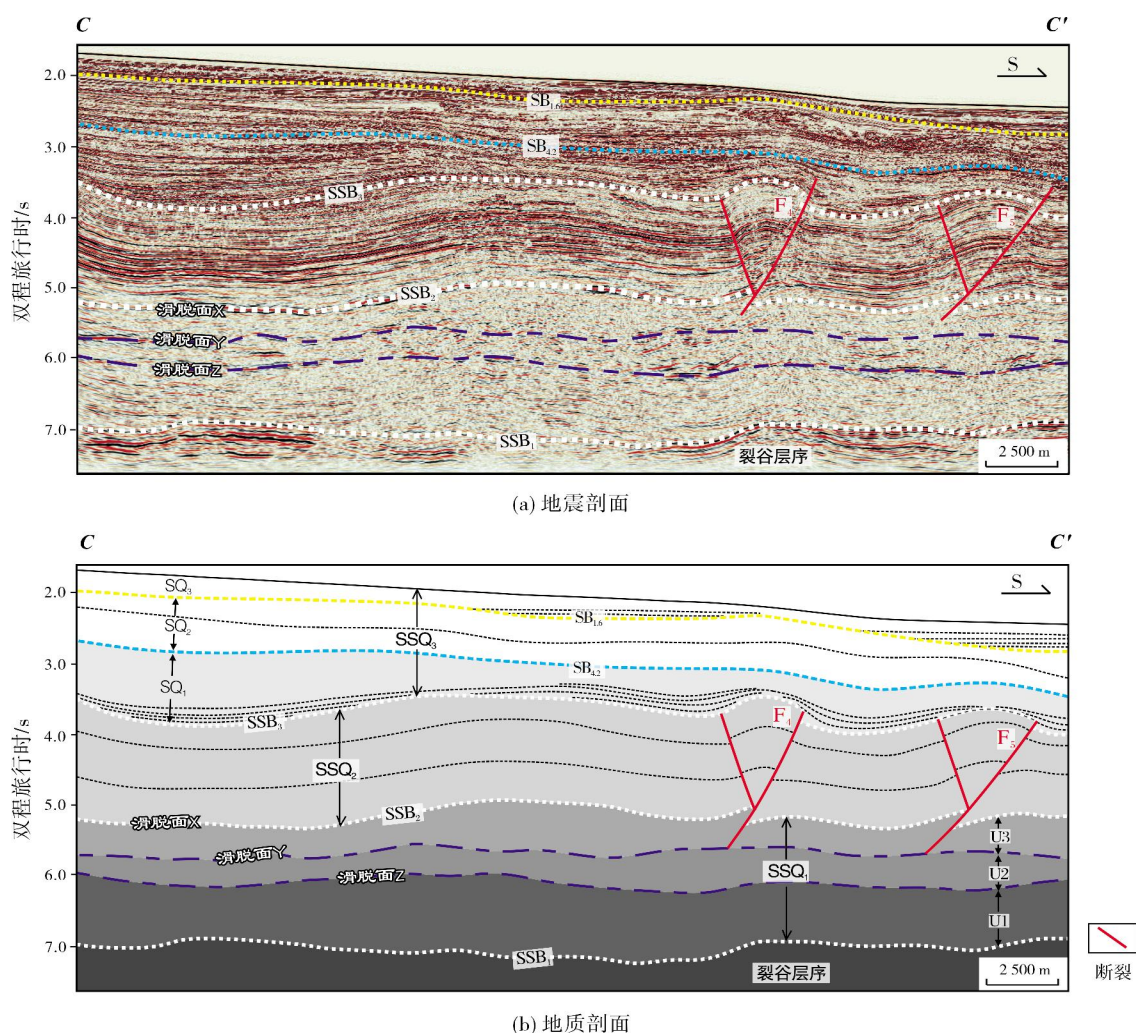


图5 尼日尔三角洲盆地深水区地震地质解释剖面(C—C')及东部逆冲断层地震反射特征
剖面位置见图3a

3.2 撕裂断层

撕裂断层为调节沉积盖层位移量差异的走滑断层,是一种由于逆冲断层活动而伴生的变换断层^[33-34]。为调节逆冲断层作用下东西两侧位移量的差异,研究区中部发育了撕裂断层 f_1 (图3a)。平面上,撕裂断层 f_1 沿SSW—NNE方向展布(图3a),走向与其东西两侧的逆冲断层近垂直,平面延伸距离约为17 km,主要发生左旋走滑运动。地震反射剖面显示(图6),断

层两侧地震反射同相轴被错断,表现为“视正断层”。 f_1 断面轻微扭曲且呈高角度近直立,主要错断 SSQ_2 超层序,向上断穿 SSQ_3 超层序底界,向下消失于泥岩中。地震反射剖面显示(图6),撕裂断层下部存在明显的泥岩局部集中增厚现象。 $U1$ 和 $U3$ 单元泥岩厚度在不同部位变化不大,而 $U2$ 单元在撕裂断层下部的厚度明显有所增大,随着与撕裂断层距离的增加,其厚度大幅减薄(图6)。这表明泥岩的减薄与增厚主要发生在由滑脱面 Y 、 Z 所限定的地层单元内。

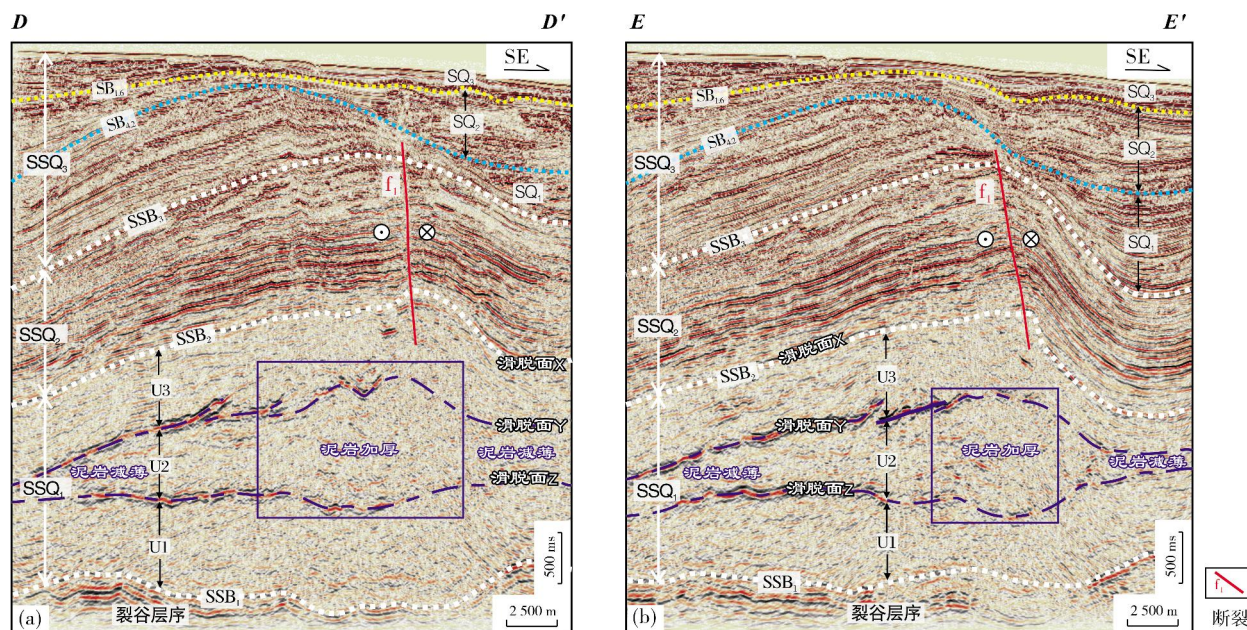


图6 尼日尔三角洲盆地深水地震地质解释剖面(D—D'和E—E')及东部撕裂断层地震反射特征
剖面位置见图3a

3.3 伸展断层

在研究区中部发育一系列NW倾向的正断层, 主要集中于滑脱褶皱隆起平面范围内。地震反射剖面显示(图7), 正断层的断面相对平直, 断距较小, 组

成阶梯状伸展断层组合, 局部亦可见“Y”字形正断层组合。正断层主要发育于SSQ₃超层序中下部, 向上并未延伸至现今海底, 向下错断SSB₃不整合界面, 逐渐消失于SSQ₂超层序内。正断层上下两盘地层厚度相差不大(图7)。

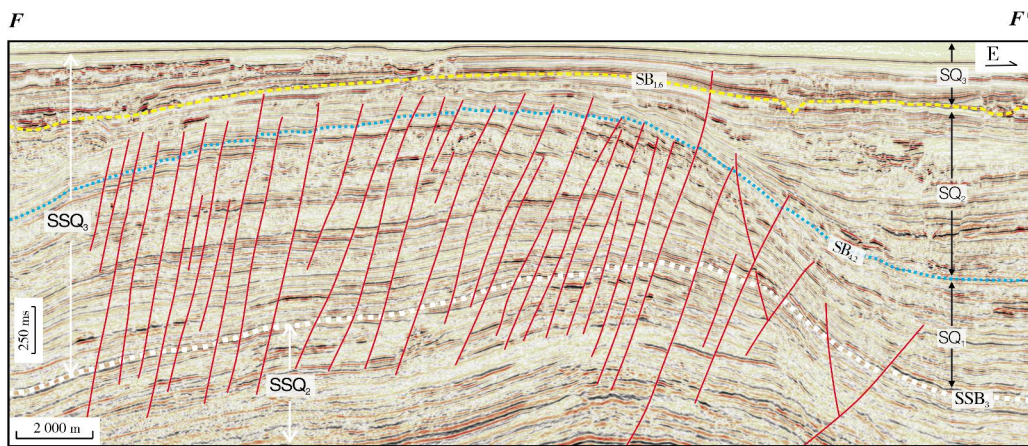


图7 尼日尔三角洲盆地深水地震地质解释剖面(F—F')及正断层地震反射特征
剖面位置见图9

3.4 滑脱褶皱

三维地震资料显示(图8), 在研究区中部发育NE—SW走向的大型穹窿状滑脱褶皱, 其东南翼地层倾角明显大于西北翼。滑脱褶皱沿走向延伸约27.5 km, 其平面展布面积约为393 km²(图9), 由古

近泥岩的局部增厚而形成, 且附近并无与之对应的向斜(图8), 表明该褶皱属于泥底辟作用下形成的横弯褶皱。由于泥岩并未刺穿上覆地层(图8), 故该背斜为隐刺穿底辟构造。核部泥岩的垂向时间厚度约为3 000 ms, 向四周逐渐减薄至约1 700 ms(图9)。东西向剖面显示(图8), 位于研究区东、西

两侧的泥岩地层时间厚度较薄,约为2 500 ms,而在研究区中部该单元厚度很大,可达3 000 ms。U1和U3单元泥岩厚度相对稳定,而U2单元在滑脱褶皱

下部存在明显的局部增厚现象,这表明泥岩的塑性变形主要发生在由滑脱面Y、Z所限定的地层单元内(图8)。

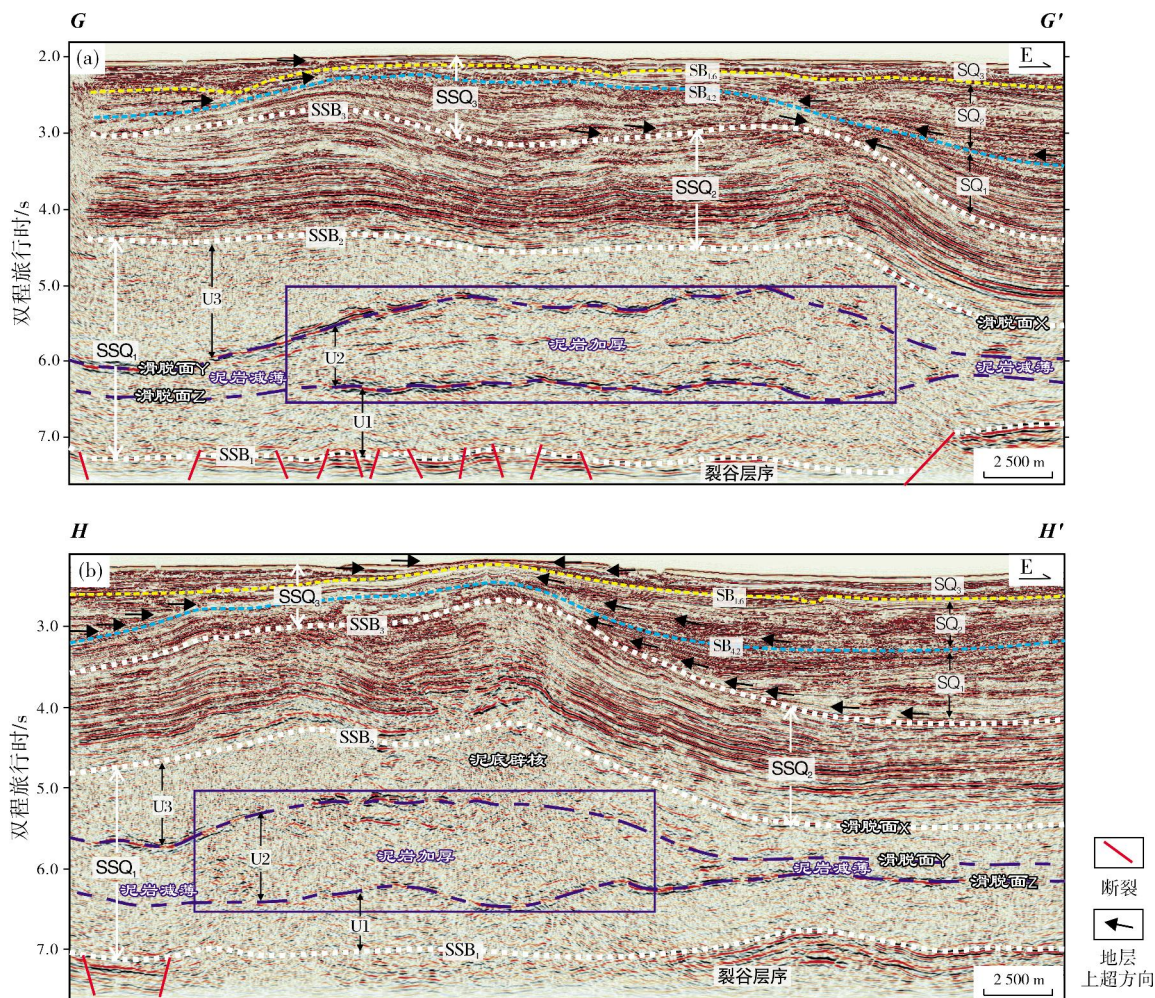


图8 尼日尔三角洲盆地深水区地震地质解释剖面(G—G'和H—H')及滑脱褶皱地震反射特征
剖面位置见图9

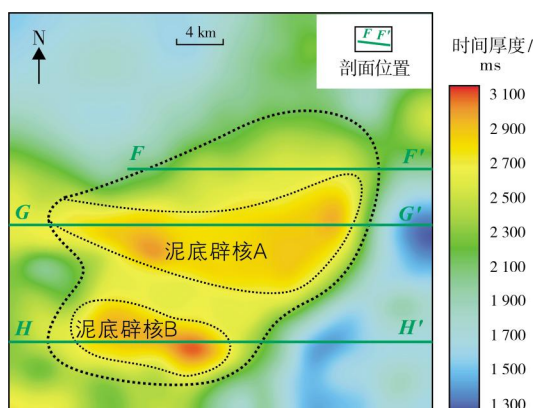


图9 尼日尔三角洲盆地深水区SSQ₃超层序
时间厚度平面图

古近系的地层时间厚度图(图9)揭示了滑脱褶皱泥底辟核的内部结构。泥岩厚度的平面分布具有“南北双峰”特征,表明该滑脱褶皱是在北部、南部2个相对独立的泥底辟核A、B共同作用下形成的。

4 构造运动学特征

4.1 SSQ₃超层序生长地层结构

生长地层是指构造变形过程中所沉积的地层,其内部结构记录了构造活动信息^[13,35]。根据背斜翼部的生长地层结构,可在研究区内的超层序SSQ₃内识别出2个次级不整合界面SB4.2和SB1.6,进而将

超层序 SSQ_3 进一步划分为 3 个次级层序地层单元(图 4—图 8)。 $SB_{4.2}$ 为一强反射界面,其时间深度变化范围为 2.1~3.5 s。该界面之上普遍存在地震反射同相轴上超现象,表明其上下地层为不整合接触,根据全球海平面升降曲线将其解释为形成于距今约 4.2 Ma 的三级层序界面^[30]。 $SB_{1.6}$ 也为强反射界面,时间深度变化范围约为 1.9~2.5 s,该界面之上见同相轴向构造高部位上超,表明其上下地层产状存在显著差异,根据全球海平面升降曲线将其解释为形成于距今约 1.6 Ma 的三级层序界面^[30]。

SQ_1 层序为不整合界面 SSB_3 与 $SB_{4.2}$ 所限定的地层,平均时间地层厚度约为 900 ms(图 10a),在地震反射剖面上表现为连续性较好的中—强振幅地震反射,并于研究区南部被逆冲断层错断(图 4,图 5)。在研究区西部,逆冲断层下盘 SQ_1 层序厚度接近 500 ms,明显大于上盘处的 200 ms(图 4);而在东部,逆冲断层下盘该层序厚度为 800 ms,大于上盘的 400 ms(图 5)。 SQ_1 层序的较大地层厚度区集中分布于研究区北部(图 10a),时间厚度约为 1 000 ms,向南于逆冲

断层上盘伴生背斜处的厚度大幅减薄,并上超于逆冲不整合界面之上,且地层倾角向上逐渐变小。地层厚度减薄区在平面上主要表现为沿 NWW—SEE 方向展布的条带(图 10a),在逆冲断层 F_1 与 F_4 相邻处可见垂直断层走向展布的厚度减薄区。结合前人研究成果判断, SQ_1 层序大致对应托尔托纳阶上部—赞克勒阶下部^[6]。

SQ_2 层序为不整合面 $SB_{4.2}$ 和 $SB_{1.6}$ 所限定的地层,由高连续的中—强振幅地震反射组成(图 4—图 8)。该层序的较大地层厚度区集中分布于研究区北部与东部(图 10b),向研究区中部方向,地层厚度由 600 ms 左右减薄至不足 100 ms,且地层厚度减薄区平面投影的长轴为 NE—SW 走向,其平面投影面积约为 315 km²。发育于 SQ_2 层序底部的生长地层从各个方向向研究区中部上超(图 4—图 8),同相轴均终止于 $SB_{4.2}$ 界面之上,且地层倾角向上逐渐变小,作为该层序底界的 $SB_{4.2}$ 界面并未被逆冲断层断穿(图 4,图 5)。 SQ_2 层序大致与赞克勒阶上部—第四系下部对应^[6]。

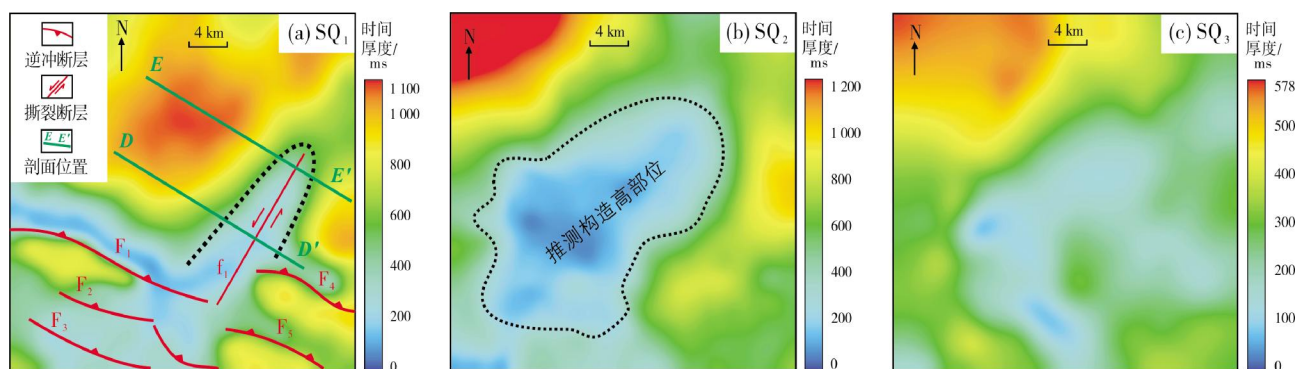


图 10 尼日尔三角洲盆地深水区 SSQ_3 超层序内部各三级层序时间厚度平面图
(图 10a 断层解释方案据文献[6-8],有修改)

SQ_3 层序为不整合面 $SB_{1.6}$ 至现今海底之间的地层(图 4—图 8),为高连续的中—强振幅地震反射。该层序地层时间厚度约为 700 ms,向研究区中部大幅减薄,并以低角度上超于 $SB_{1.6}$ 界面之上。 SQ_3 层序地层平面分布特征与其下伏的 SQ_2 层序相似,均向研究区中部厚度大幅减薄(图 10c),表明该单元沉积期研究区继承了前一阶段的地貌格局。该层序底部同相轴向研究区中部以低角度上超于 $SB_{1.6}$ 之上(图 4—图 8),且生长地层倾角不随深度而变化,表明此时构造活动已明显减弱,地层被动上超于研究区中部的构造高部位。 SQ_3 层序大致对应第四系上部^[6]。

4.2 构造运动学分析

沿逆冲断层倾向的地震反射剖面显示(图 4),在研究区西部, SQ_1 层序中的生长地层在逆冲相关褶皱两翼处上超减薄,且地层倾角向上逐渐变小,表明在 SQ_1 层序沉积过程中构造隆升的速率大于沉积速率。同时,在逆冲断层下盘该单元厚度明显大于上盘,表明其沉积过程受到逆冲断层活动的影响。逆冲断层 F_1 、 F_2 、 F_3 均未断穿 SQ_2 层序地层单元底界 $SB_{4.2}$ 界面(图 4),表明至 SQ_2 层序沉积时逆冲断层活动已明显减弱。 SQ_1 层序地层厚度平面分布图显

示(图10a),在研究区西南部存在沿NWW—SEE走向展布、厚薄相间的条带,而地层厚度减薄区的存在表明此处在该单元沉积过程中存在相对高的条带状构造。另外,相对高的条带状构造的分布位置与平面范围均与逆冲断层相关褶皱一致(图3a,图10a)。综合分析表明,研究区西部的逆冲断层(F_1 — F_3)的活动开始于 SQ_1 层序沉积期,至 SQ_2 层序沉积时活动强度已明显减弱。

在研究区东部,逆冲断层错断 SQ_1 层序底界不整合界面 SSB_3 ,向上消失于 SQ_1 层序中(图5)。该单元底部的生长地层向逆冲断层上盘冲起构造处减薄,并上超于不整合界面 SSB_3 之上,向上地层倾角逐渐变小(图5)。另一方面, SQ_1 层序平面厚度图(图10a)反映在东南部存在NWW—SEE走向展布、厚薄相间的条带,该厚度减薄条带的平面展布特征与逆冲断层 F_4 、 F_5 上盘相关褶皱一致(图3a),表明 SQ_1 层序的沉积过程受到逆冲相关褶皱的影响,在相对构造高部位处沉积厚度较薄。这些特征一致表明,研究区东南部逆冲断层在 SQ_1 层序沉积早期具有较强的活动性。

在研究区中部, SQ_2 层序的地层厚度快速减薄,位于该单元底部的生长地层上超于构造高部位,同相轴终止于 $SB4.2$ 界面之上,且地层倾角向上逐渐变小(图7)。这些现象一致表明,在 SQ_2 层序沉积过程中研究区中部发生了大规模持续的构造抬升。前已述及,逆冲断层活动主要集中于 SQ_1 层序沉积期,故该期构造抬升为逆冲断层活动强度减弱后的另一期构造活动所致。发育于古近系内部的泥底辟核为NE—SW走向,其平面展布面积为 393 km^2 (图9),而 SQ_2 层序地层厚度减薄区平面投影的长轴亦为NE—SW走向,面积约 315 km^2 (图10b),二者在平面位置与几何形态上的高度一致性表明,古近系内泥底辟核的形成导致了 SQ_2 层序沉积期研究区中部的大规模构造抬升,即研究区内的泥底辟构造活动主要发生在 SQ_2 层序沉积期。

研究区内的正断层集中发育于中部的滑脱褶皱顶部,主要错断 SQ_1 层序和 SSQ_2 超层序的中上部,向上断穿 SQ_2 层序底界面 $SB4.2$,并消失于该地层单元内,同时断层两盘地层厚度相近(图7),这些特征一致表明正断层主要形成于 SQ_2 层序沉积期。正断层走向与滑脱褶皱主体一致,这进一步印证了该组正断层可能为泥底辟过程中垂向应力作用下的产物^[6]。

综上所述,研究区逆冲断层在 SQ_1 层序沉积期具有较高的活动强度,泥底辟背斜主要形成于 SQ_2 层序沉积期,至 SQ_3 层序沉积时构造活动已明显减弱。故 SQ_1 、 SQ_2 、 SQ_3 可依次解释为逆冲断层主控层序、泥底辟主控层序和披覆沉积层序,分别对应3个不同的构造演化阶段。总体上看,研究区在托尔托纳期至今经历了一次完整的构造活动强度由弱至强再减弱的构造旋回。

5 构造演化阶段及古地貌特征

尼日尔三角洲盆地陆坡深水区中新世托尔托纳期至今的构造演化过程分为3个不同的阶段。基于各三级层序地层厚度的平面分布特征(图10),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。

5.1 逆冲断层主控阶段

在逆冲断层主控阶段中,研究区处于下陆坡环境,在重力滑脱作用下坡脚处产生水平挤压应力,形成逆冲断层。如前所述,东西两侧逆冲断层分别沿不同深度滑脱面Y、Z发育,两侧位移量的差异导致地层沿垂直逆冲断层方向被错断,形成具有走滑性质的撕裂断层 f_1 。逆冲断层主控的层序(SQ_1)地层厚度图显示(图10a),在 F_1 与 F_4 相邻处可见垂直断层走向展布的厚度减薄区,表明在该层序沉积期此处存在NNE—SSW走向的背斜,其方位、形态均与撕裂断层一致。撕裂断层处的破裂使岩层抗应力强度大幅度降低,岩层在下伏厚层超压塑性泥岩作用下发生隆起变形,泥岩沿撕裂断层形成的剪切破裂面发生底辟作用,形成走向与逆冲断层垂直的泥底辟背斜(图6)。

在陆坡背景下,研究区地貌整体上具有北高南低的特征。北部地层变形小,而南部地层由于受到水平挤压而形成逆冲断层,并于逆冲断层上盘处形成了沿NWW—SEE走向展布的断层相关褶皱,使南部地貌具有“凹凸相间”的特征(图10a,图11a)。这种地貌特征造成了可容空间在平面上的差异分布,导致顺陆坡倾向由重力流搬运至陆坡深水区的陆源碎屑沉积物,被逆冲相关褶皱阻挡,并在上盘的古地貌低部位内发生沉积。可见,在逆冲断层主控阶段中,重力流岩性圈闭集中分布于逆冲断层上盘的古地貌低部位。

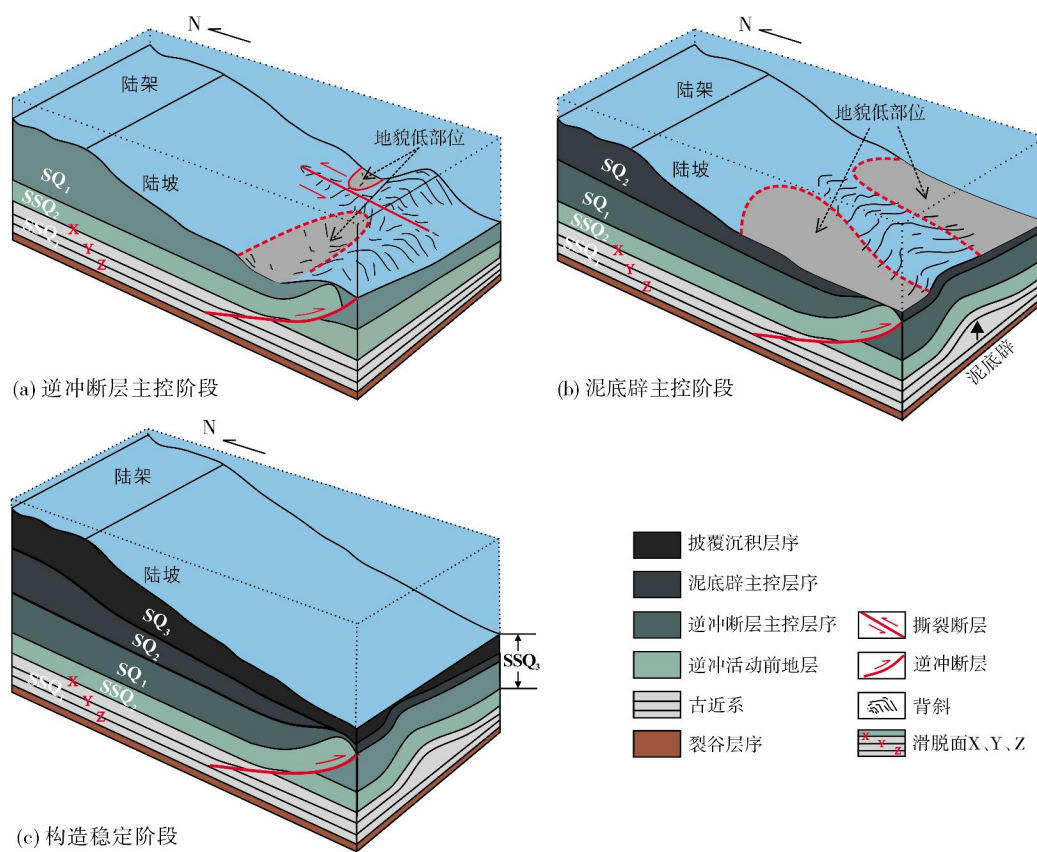


图 11 尼日尔三角洲盆地陆坡深水区逆冲构造演化模式

5.2 泥底辟主控阶段

前已述及,研究区中部由于古近系泥岩的局部增厚而形成了大型滑脱褶皱。前人研究表明,未发生后期变形的泥岩地层平均厚度约为2.3 km,双程旅行时约2000 ms^[16]。位于研究区东西两侧的泥岩厚度均明显减薄(图9),在研究区中部泥岩大幅增厚。这一现象表明,原位于东西两侧的泥岩在上覆沉积负载影响下发生了塑性变形并向研究区中部集中。由于西部逆冲断层的断距与规模均较大(图4),相应地,上盘断层相关褶皱及中部的撕裂断层(f_1)相关褶皱隆升幅度较大,在构造高部位上覆地层厚度较薄,由此在平面上产生了差异负荷^[7,16]。在差异负荷作用下,塑性超压泥岩向位于研究区中部的相对构造高部位处集中^[36-37],周边地区因泥岩厚度减薄导致可容空间有所增加,随着沉积作用不断进行,沉积负荷差异继续增大,泥岩不断向研究区中部集中,从而形成了大型滑脱褶皱。

另外,上覆地层 SQ_2 层序中生长地层上超点的最高位置,与 SQ_1 的相比,发生了明显的向北侧迁移

(图4),这表明在该阶段中逆冲断层 F_1 上盘伴生背斜后翼处发生了相对隆升。相对隆升处正下方的塑性泥岩厚度明显增大,向北泥岩厚度则大幅度减薄(图4)。这些证据表明,由于沉积物的不断向南进积,研究区北部的塑性泥岩在上覆地层压力下发生塑性变形而导致厚度减薄,并沿滑脱面Y、Z整体向南侧迁移,而泥岩地层发生局部的减薄与增厚,导致逆冲断层 F_1 伴生褶皱后翼地层发生相对隆升,这在一定程度上促成了研究区中部的隆起。

在泥底辟主控阶段,大型滑脱褶皱的存在使其两侧形成了沿陆坡倾向展布的地貌低部位(图10b,图11b)。顺陆坡搬运的重力流沉积物因受到滑脱褶皱的阻挡而转向其两侧发生沉积,并向中部减薄上超于滑脱褶皱之上,相应地,滑脱褶皱两侧的狭长地貌低部位成为重力流储层发育的有利场所。

5.3 构造稳定阶段

SQ_3 层序沉积期,构造活动已明显减弱,研究区基本继承了前一阶段的古地貌格局(图10c)。在大型三角洲体系发育的背景下,被搬运至深水区的沉积

物在隆起东西两侧的可容空间处被捕获并发生沉积,以低角度被动上超于研究区中部的构造高部位之上。该阶段,研究区地貌逐渐趋于平缓,对沉积物的限制性较弱。被重力流搬运至陆坡处的沉积物主要发生沉积过路,地层厚度相对较薄(图10c)。在沉积填平补齐作用下,研究区地貌逐渐趋于均衡,最终演化为现今所见的平缓大陆斜坡(图11c)。

6 结 论

(1)基于三维地震资料解释,尼日尔三角洲盆地深水区的新生界可划分为3个超层序。

(2)SSQ₃超层序(约10.5 Ma至今),可细分为3个三级层序,自下而上依次被逆冲断层、泥底辟和披覆沉积所主控,对应3个不同的构造演化阶段。逆冲断层主控阶段:在重力滑脱作用下,逆冲断层沿不同深度滑脱面发育,由此产生的位移差导致构造变换带内发育走向与逆冲断层近垂直的撕裂断层;在下伏超压泥岩的底辟作用下,构造变换带内沿撕裂断层发育泥底辟褶皱。泥底辟主控阶段:在差异负荷作用下,塑性超压泥岩不断向逆冲相关褶皱与撕裂断层相关褶皱核部集中,形成大型滑脱褶皱;泥岩的塑性变形主要发生在由不同深度滑脱面所限定的地层单元内。构造平静阶段:构造活动已明显减弱。

(3)顺陆坡搬运的重力流沉积物,在逆冲断层主控阶段,受到逆冲相关褶皱阻挡而在逆冲断层上盘地貌低部位沉积;在泥底辟主控阶段,受到滑脱褶皱的阻挡而在褶皱两侧的狭长地貌低部位发育;在构造稳定阶段,地貌因填平补齐作用而趋于均衡,最终演化为现今的平缓大陆斜坡。

致谢:论文的完成得到了中国石油大学(北京)地球科学学院陈书平教授的悉心指导,在此致以最诚挚的谢意。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] COBBOLD P R, CLARKE B J, LØSETH H, et al. 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.
- [3] 吕福亮,贺训云,武金云,等. 全球深水油气勘探简论[J]. 海相油气地质,2006,11(4): 22-28.
- [4] 王力,屈红军,张功成,等. 世界主要被动大陆边缘深水含油气盆地生储盖组合发育规律[J]. 海相油气地质,2011,16(4): 22-31.
- [5] 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.
- [6] 于水,李涛,胡望水,等. 尼日尔三角洲盆地泥收缩构造发育特征及对沉积的控制[J]. 海相油气地质,2017,22(4): 53-60.
- [7] 谢昭涵,孙永河,闫玉民,等. 尼日尔三角洲E背斜顶部断裂演化机制及封闭性[J]. 石油与天然气地质,2017,38(5): 973-982.
- [8] 孙永河,李雪松,刘志达,等. 尼日尔三角洲东部斜向背斜形成演化特征[J]. 石油勘探与开发,2018,45(1): 51-61.
- [9] 韩文明,邓运华,于水,等. 尼日尔三角洲深水勘探研究面临的挑战及其对策[J]. 地质学报,2012,86(4): 671-678.
- [10] 高印军,杨磊,韩文明,等. 尼日尔三角洲泥底辟和泥火山的形成机理[J]. 新疆石油地质,2010,31(3): 332-334.
- [11] 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.
- [12] BRIGGS S E, DAVIES R J, CARTWRIGHT J A, et al. Multiple detachment levels and their control on fold styles in the compressional domain of the deepwater west Niger Delta[J]. Basin research, 2006, 18(4): 435-450.
- [13] SHAW H J, CONNORS C, SUPPE J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds: an AAPG seismic atlas [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2005: 11-46.
- [14] BILOTTI F, SHAW J H. Deep-water Niger Delta fold and thrust belt modeled as a critical-taper wedge: the influence of elevated basal fluid pressure on structural styles[J]. AAPG bulletin, 2005, 89(11): 1475-1491.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 朱伟林,陈书平,王春修,等. 非洲含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社,2013: 141-162.
- [18] GOLONKA J, BOCHAROVA N Y. Hot spot activity and the break-up of Pangea[J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2000, 161(1): 49-69.
- [19] BONATTI E. Anomalous opening of the Equatorial Atlantic due to an equatorial mantle thermal minimum[J]. Earth and planetary science letters, 1996, 143(1/4): 147-160.
- [20] 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.
- [21] FAIRHEAD J D, BINKS R M. Differential opening of the Central and South Atlantic Oceans and the opening of the West African rift system[J]. Tectonophysics, 1991, 187(1): 191-203.

- [22] NÜRNBERG D, MÜLLER R D. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present[J]. *Tectonophysics*, 1991, 191(1/2): 27-53.
- [23] 温志新, 徐洪, 王兆明, 等. 被动大陆边缘盆地分类及其油气分布规律[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 678-688.
- [24] 李国玉, 金之均, 李俊, 等. 世界含油气盆地[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 320-321.
- [25] 冯国良, 徐志诚, 靳久强, 等. 西非海岸盆地群形成演化及深水油气田发育特征[J]. *海相油气地质*, 2012, 17(1): 23-28.
- [26] SHORT K C, STÄUBLE A J. Outline of geology of Niger Delta[J]. *AAPG bulletin*, 1967, 51(5): 761-779.
- [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] 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.
- [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.
- [30] HAQ B U, HARDENBOL J, VAIL P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [31] 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.
- [32] 姚超, 焦贵浩, 王同和, 等. 中国含油气构造样式[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 1-15.
- [33] 刘和甫, 夏义平, 殷进垠, 等. 走滑造山带与盆地耦合机制[J]. *地学前缘*, 1999, 6(3): 121-132.
- [34] 漆家福, 夏义平, 杨桥. 油区构造解析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 74-75.
- [35] 李磊, 王英民, 张莲美, 等. 尼日尔三角洲坡脚逆冲带沉积样式及构造控制[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2008, 33(5): 71-78.
- [36] 李涛, 胡望水, 于水, 等. 西非被动大陆边缘重力滑脱构造体系下的塑性构造[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(3): 69-76.
- [37] 胡望水, 薛天庆. 底辟构造成因类型[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 1997, 19(4): 1-7.

编辑:董庸

Characteristics and evolution of compressional structure in deep-water, Niger Delta Basin

LIN Peng, WU Shenghe, ZHANG Jiajia, HU Guangyi,
WANG Nansu, HUANG Mei

Abstract: The structural evolution and topography controlled by thrust faults in continental slope of Niger Delta Basin deserve further study. Based on 3D seismic data in one deep water zone, three super sequence boundaries are identified, by which the Cenozoic is divided into three super sequences(SSQ₁, SSQ₂, SSQ₃), and three detachment levels are analyzed. As about the SSQ₃, it is divided into three sequences from bottom to top, representing three stages controlled by thrust fault, mud-diapir, and sedimentation respectively. In the first stage, thrust faults developed along detachment level in different depth under the control of gravity slide, and due to the translocation difference, tear fault perpendicular to the strike of thrust faults developed in transfer zone. Along the tear fault, mud-diapir fold formed under the control of overpressure mud. The gravity flow transported along the structural lows in the hanging walls of thrust faults, thus lithologic traps concentrated in minibasins. In the second stage, huge detachment fold formed due to the concentrating of overpressure mud at the core of thrust-related fold and tear-related fold under the control of load difference, in which the deformation of mud is confined by the detachment levels. The gravity flow and lithologic traps developed along the structural lows on both sides of the mud-diapir anticline. In the third stage, the structural activity weakened obviously, and the topography tended to be flat under the control of sedimentation.

Key words: sequence; structural style; structural evolution; deep-water; Niger Delta Basin

LIN Peng: MSc. Add: Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning 124010, China