

尼日尔三角洲盆地泥收缩构造发育特征 及对沉积的控制

于水¹, 李涛², 胡望水², 成瀚², 赵红岩¹

(1 中海油研究总院; 2 长江大学)

摘要 泥收缩构造是发育在尼日尔三角洲盆地深水区的典型构造样式,属重力滑脱冲断构造,主要构造类型有冲断裂、塑性泥构造及相关褶皱和正断裂。基于地震地质解释,结合构造发育史分析,认为泥收缩构造主要受塑性泥构造控制,在中新世托尔托纳(Tortonian)晚期开始活动,中新世墨西哥期(Messinian)—上新世赞克勒期(Zanclean)达到最强,之后构造活动逐渐减弱,但至今仍在活动。通过古构造恢复,结合沉积展布分析,认为中新世托尔托纳晚期沉积开始受构造活动控制,托尔托纳阶上部及以上地层具有明显的同沉积特征,泥收缩构造相关的冲断裂上升盘厚度明显小于下降盘厚度,褶皱两翼的地层厚度明显厚于中间背斜顶部的地层厚度。

关键词 尼日尔三角洲盆地; 泥收缩构造; 构造特征; 构造演化

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

1 地质概况

大西洋两岸属于典型的被动大陆边缘,是全球主要的油气分布区之一^[1]。重力滑脱构造是西非被动陆缘普遍发育的一种构造样式。西非被动大陆边缘重力滑脱构造体系由陆向海可划分为3大构造区:重力滑脱伸展构造区、重力滑脱底辟构造区和重力滑脱冲断构造区^[2](图1,图2)。根据塑性变形层的岩性差异,重力滑脱构造可分为与盐相关的和与泥相关的两类,大多数盆地(如加蓬、下刚果、安哥拉、里奥穆尼等盆地)的重力滑脱构造中的塑性变形层为盐岩层,仅在尼日尔三角洲盆地中的塑性变形层为泥岩层,所以研究尼日尔三角洲盆地的重力滑脱构造具有特殊意义。

尼日尔三角洲盆地主要受阿尔卑斯晚期构造运动的影响而形成^[3],发育白垩纪陆内裂陷构造旋回,以及白垩纪末期至今的过渡期构造旋回和被动大陆边缘构造旋回(图3),重力滑脱构造体系主要发育于被动大陆边缘构造旋回^[4-7]。盆地的油气主要分布在重力滑脱构造体系内的古近系和新近系,油藏发育的层位由陆向海逐渐变新^[8-13]。

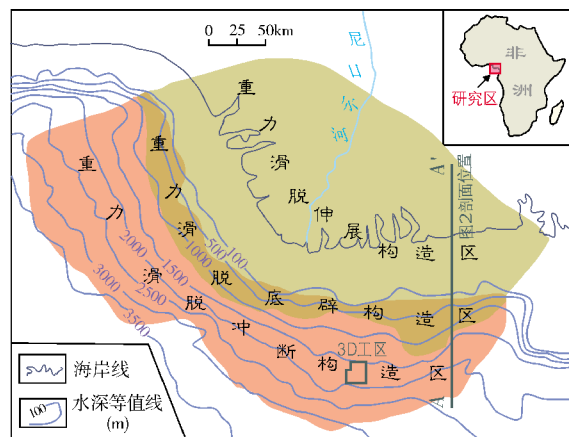


图1 尼日尔三角洲盆地重力滑脱构造体系平面分区

本文采用“泥收缩构造”来特指尼日尔三角洲盆地的重力滑脱冲断构造,以突出其在西非被动陆缘的独特性。以3D工区(位置见图1)为研究区,在地震地质解释基础上明确了构造发育特征,利用平衡剖面技术分析了构造演化过程,阐述了构造演化对沉积展布特征的影响。

收稿日期: 2015-06-16; 改回日期: 2017-01-18

本文受国家科技重大专项“非洲、中东重点勘探区油气地质评价及关键技术研究”(2011ZX05030-003)资助

于水: 1963年生,教授级高级工程师,1989年毕业于中国地质大学(武汉),获硕士学位,现主要从事海洋与海外石油地质研究工作。

通讯地址: 100028 北京市朝阳区太阳宫南街6号院中海油大厦A座中海油研究总院; E-mail: yushui@cnooc.com.cn

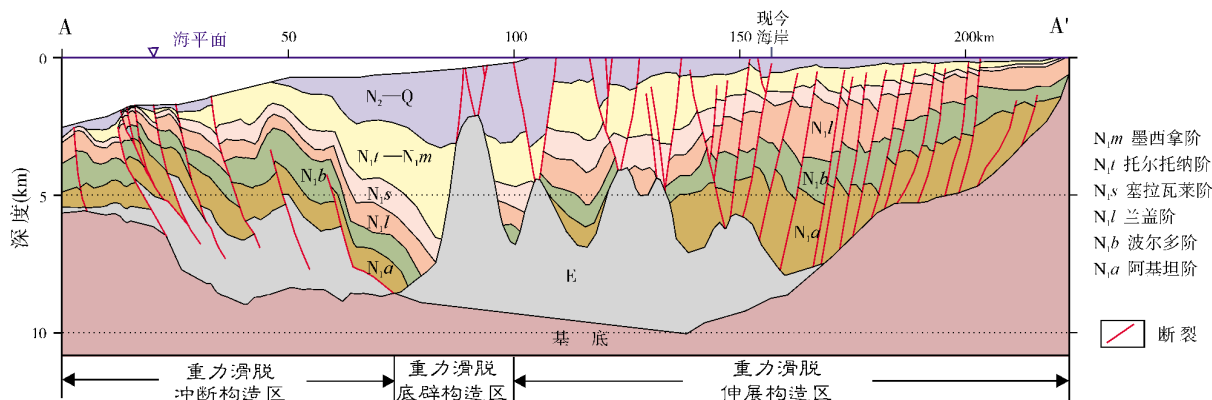


图2 尼日尔三角洲盆地重力滑脱构造体系横剖面图

剖面位置见图1

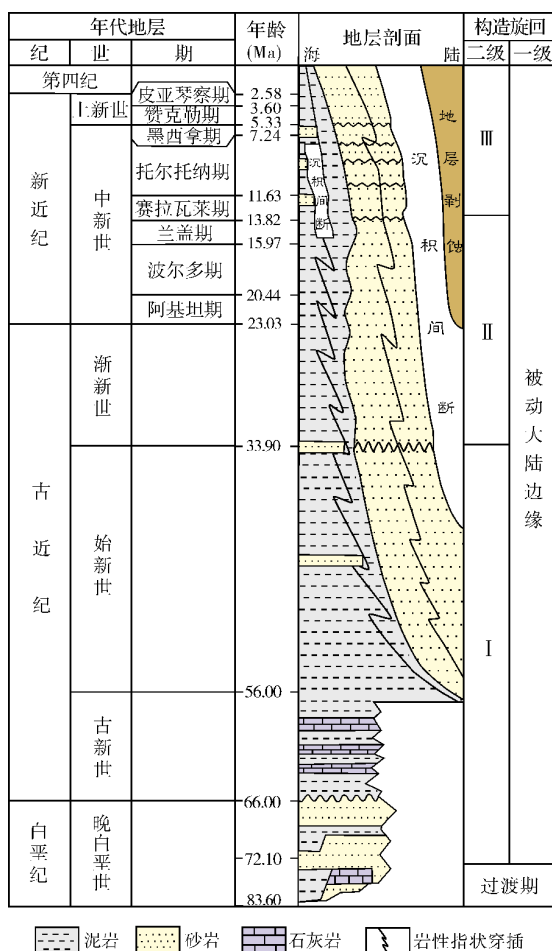


图3 尼日尔三角洲盆地新生代综合柱状图

2 泥收缩构造

重力滑脱冲断构造是指地质体在重力作用下形成的冲断裂及不对称褶皱的组合,一般发育在地质

体动能向重力势能转换的区域^[14]。在西非被动陆缘,重力滑脱冲断构造主要发育在下陆坡至深海平原的转换区。

2.1 冲断裂的提出

对重力滑脱冲断构造的成因,前人多局限于构造发育区开展研究,并未从整个重力滑脱构造体系进行详细分析,故认为研究区的构造是挤压逆冲收缩成因^[11-12,15]。笔者从重力滑脱构造体系发育的大背景出发,认为重力滑脱冲断构造区发育的逆断裂(剖面样式上),实际上是被动重力滑脱背景下由地质体运动的动能向重力势能转换而形成(图4a),属冲断裂,它与一般理解的因区域主动挤压力而使断裂上盘地质体上升所形成的逆断裂(图4b)存在差异,两者形成机制背景不同。

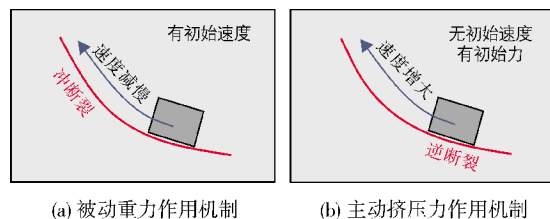


图4 冲断裂与一般逆断裂形成机制示意图

展示断裂初始活动状态

2.2 构造类型

受古近系巨厚塑性泥岩层(4 000~7 000 m)的分隔作用,尼日尔三角洲盆地重力滑脱构造区形成了由塑性泥岩层及其上覆地层变形所构成的泥收缩构造,主要发育塑性泥构造、冲断裂,以及与它们相关

的褶皱和正断裂等构造类型^[15](图5,图6)。泥收缩构造主要受控于塑性泥构造的发育,即冲断裂和褶皱的发育与塑性泥构造发育具有很好的一致性(图6)。这里选择中新统托尔托纳阶底界编制构造图(图5),既能反映上新统褶皱的构造形态,也可代表始新

统一渐新统塑性泥构造的大致形态。不同构造类型的平面分布具有明显的分区特点(图5):研究区南部主要发育塑性泥构造及上覆层系的冲断裂相关褶皱,中部—东北部主要发育塑性泥构造及上覆层系的不对称褶皱与伴生的正断裂。

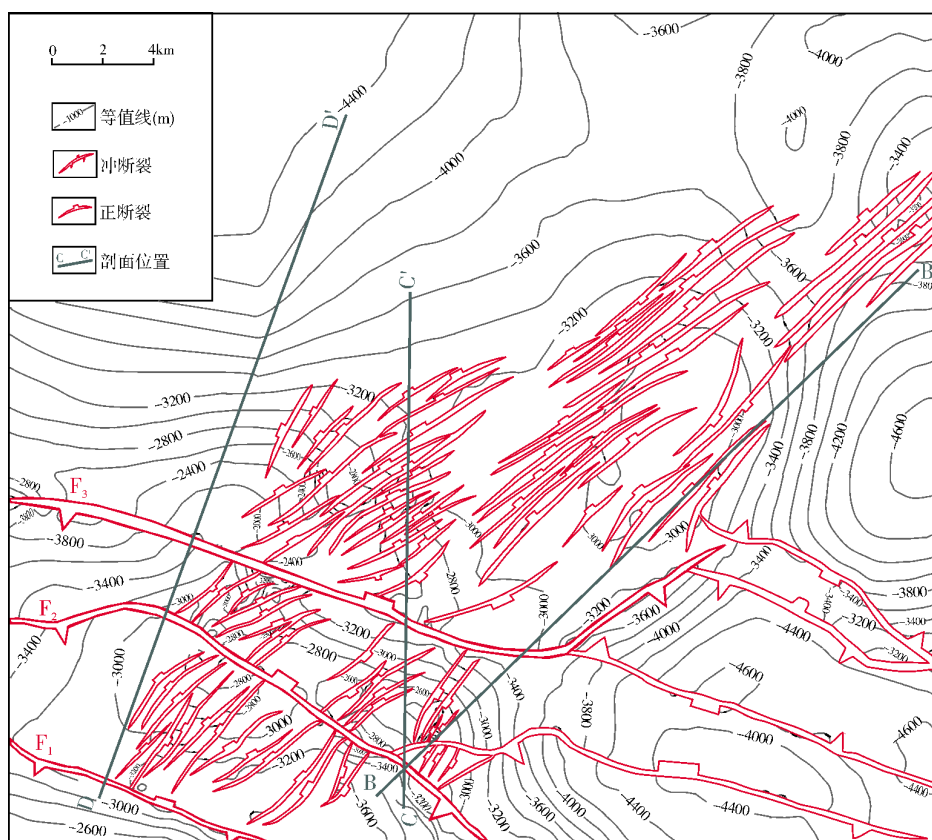


图5 典型泥收缩构造区中新统托尔托纳阶底界构造图

3D工区位置见图1

塑性泥构造 发育在古近系塑性泥岩层内,主要为塑性泥岩上拱所形成,它对上覆构造的发育起到一定的控制作用(图6)。古近系塑性泥岩层现今的厚度在4 000~7 000 m之间,其中塑性泥构造的上拱幅度最大达到3 000 m,为原始泥岩厚度(按5 000 m计)的60%,可以看出,塑性泥岩活动强烈。研究区南部发育北西西—南东东向的塑性泥构造,中部—东北部主要发育东北—南西向的塑性泥构造。

冲断裂 发育在研究区的南部,呈北西西—南东东向延伸(最大延伸长度达30 km),倾向北北东(图5,图6)。冲断裂断开了古新统一上新统,断面上陡下缓(图6),断裂上部(上新统赞克勒阶(Zanclean,图中的N₂z)—中新统部分)的倾角在25°~42°之间,向下倾角

逐渐减小,最终滑脱在下伏始新统塑性泥岩层内,垂直断距在400~1 000 m之间。冲断裂控制着泥收缩构造的结构。

褶皱 发育于中新统一上新统,与塑性泥构造的分布具有明显的一致性(图6),这很好地说明了褶皱的发育受到塑性泥构造的控制。研究区南部冲断裂上盘发育北西西—南东东走向的牵引背斜(图5),中部—东北部发育受塑性泥构造控制的东北—南西走向的背斜。

冲断裂及其相关的褶皱集中发育在中部构造带(图6a),该类构造变形强烈,造成塑性泥岩叠置增厚,在冲断裂上盘形成不对称牵引背斜,靠近冲断裂上部为背斜核部,其下部为背斜延伸较长的缓翼。褶

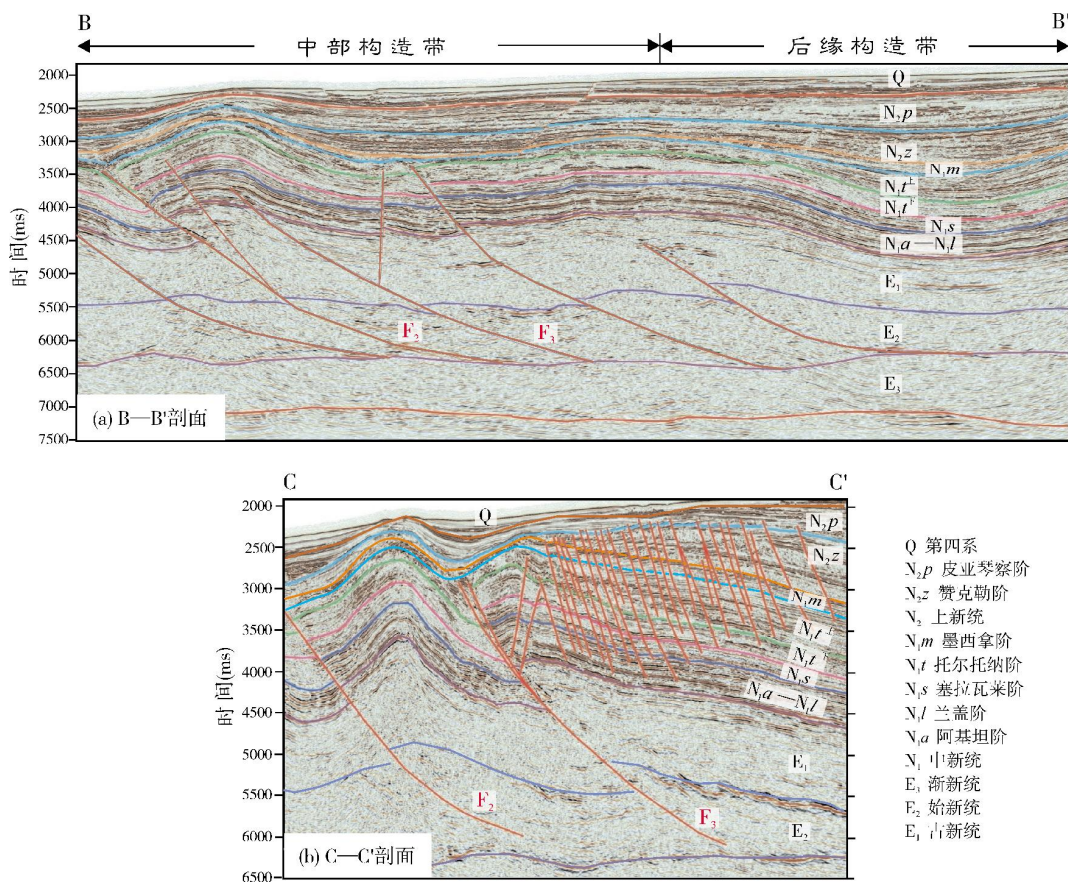


图6 泥收缩构造典型地震地质剖面图

剖面位置见图5。塑性泥构造发育于古近系泥岩层

皱使得上覆沉积层较薄,并形成一些次级正断裂。

在后缘构造带,受塑性泥构造控制,发育不对称背斜、不对称向斜及伴生的正断裂,越靠近中部构造带的冲断裂,褶皱幅度越大。

正断裂 主要分布在研究区中部—东北部的中新统及以上地层中(图5,图6b),走向为东北—南西向,倾向以北西向为主,延伸长度在3~10 km之间,垂直断距较小,在30~60 m之间,主要断开中新统—上新统,倾角较大,在65°~75°之间。正断裂是构造发育过程中伴生的次级断裂,受下伏塑性泥构造上拱影响,上覆地层因横弯褶皱作用,外侧地层发生拉张。正断裂的发育演化特征受到下伏塑性泥构造的控制,断裂走向与该位置的褶皱及下伏塑性泥构造走向一致。

横向上,根据不同构造类型的发育位置和特征,一般将重力滑脱冲断构造区划分为后缘构造带、中部构造带和前缘构造带。后缘构造带(图6a),以向陆

倾斜的不对称褶皱为主,下伏层发育中—低幅的塑性泥构造。中部构造带(图6a),以向陆倾斜的冲断裂及相关褶皱为主,还发育有中—高幅的塑性泥构造及其上部的正断裂等;该带断裂活动强烈,发育规模大,断裂底部消失于塑性泥岩层内;受拖曳作用的控制,在冲断裂上盘发育牵引背斜,它们可成为重要的圈闭。前缘构造带,以向陆倾斜的低幅不对称褶皱为主,构造活动强度明显减弱、构造规模较小。

3 泥收缩构造发育演化特征

泥收缩构造在中新世托尔托纳(Tortonian)中期才开始发育(图7)。下面结合冲断裂、塑性泥构造、褶皱等不同类型构造的相关参数来论述泥收缩构造的发育演化规律。

古新世—渐新世 该时期构造基本不活动,古近纪沉积了巨厚的塑性泥岩层,这为后期泥收缩构造的形成提供了物质基础。

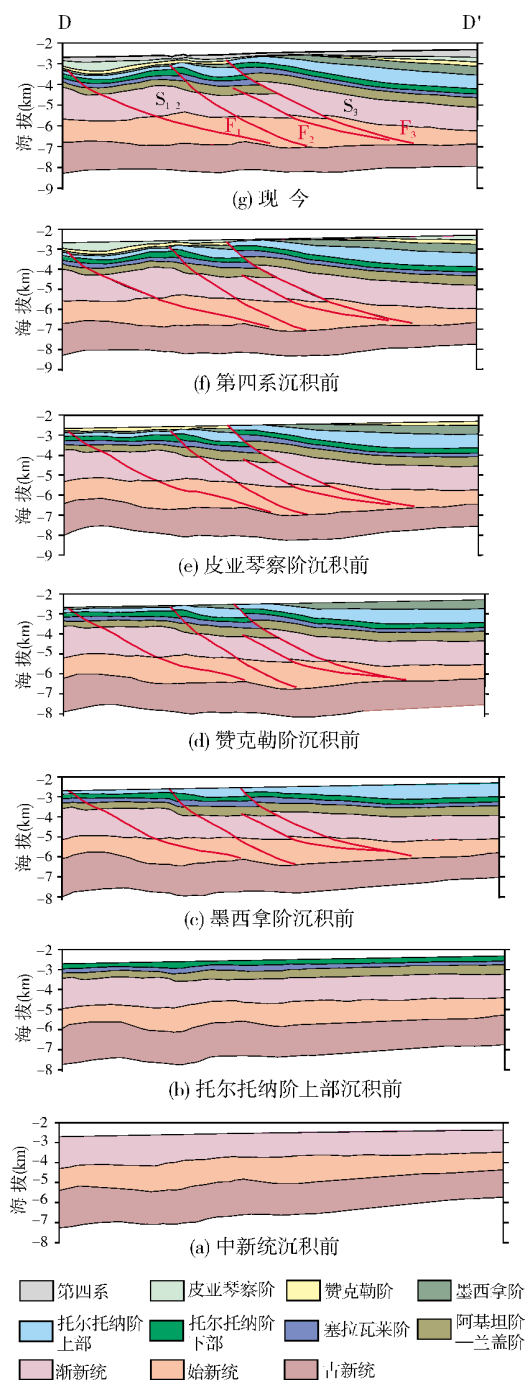


图7 泥收缩构造发育史剖面图

D—D'剖面位置见图5

 S_{1-2} 、 S_3 为塑性泥构造及上覆褶皱编号

中新世早期 该时期仍处于稳定沉积阶段,通过对中新统下部的阿基坦阶(Aquitainian)—托尔托纳阶下部的厚度分析,该套地层呈现近似等厚的特征,这说明中新世早期构造基本不活动。根据图7的

构造演化剖面,对不同类型构造的生长指数进行统计,从冲断裂的生长指数(同一地层上盘厚度/下盘厚度)(图8a)、塑性泥构造的生长指数(各时期塑性泥构造厚度/上一时期塑性泥构造厚度)(图8b)、冲断裂上盘褶皱生长指数(同一地层褶皱两翼厚度/顶部厚度)(图8c)可以看出,中新世阿基坦期—托尔托纳早期冲断裂、塑性泥构造、冲断裂上盘褶皱的生长指数均在1左右,说明该时期冲断裂、塑性泥构造和褶皱均未发育。

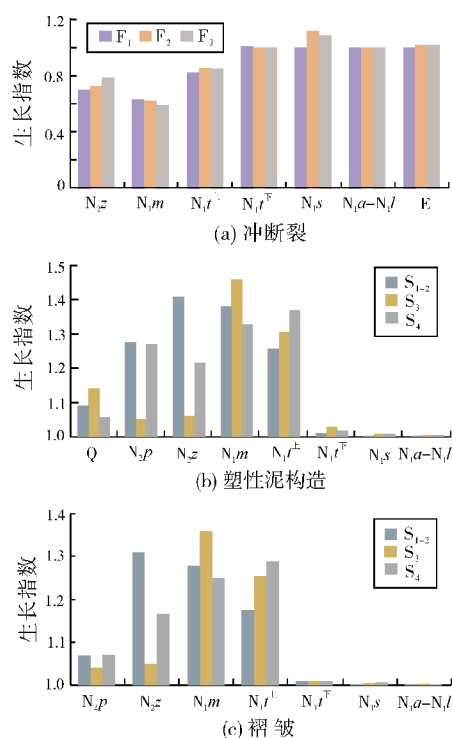


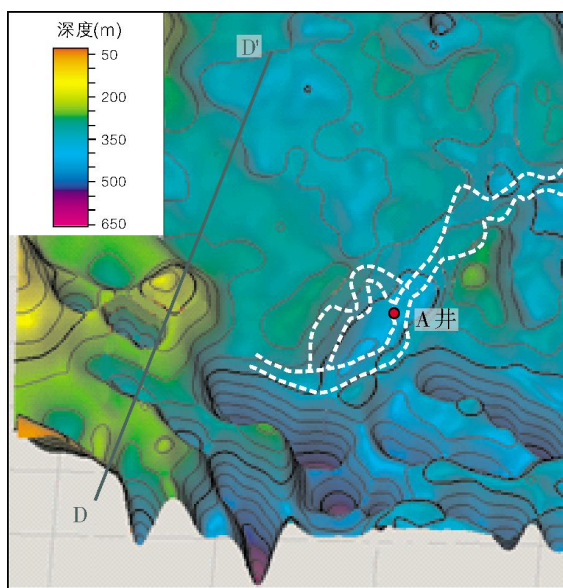
图8 泥收缩构造生长指数直方图

冲断裂 F_1 、 F_2 、 F_3 参见图7。泥收缩构造 S_{1-2} 、 S_3 、 S_4 参见图7、图10Q 第四系; N_{2p} 皮亚琴察阶; N_{2z} 赞克勒阶; N_{2m} 墨西哥阶; N_{1t+} 托尔托纳阶上部; N_{1t-} 托尔托纳阶下部; N_{1s} 塞拉瓦莱阶; N_{1a} — N_{1l} 阿基坦阶—兰盖阶; E 古近系

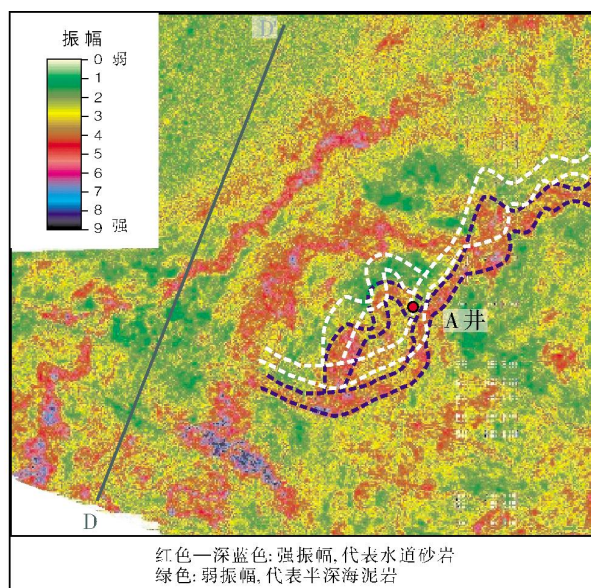
中新世晚期 托尔托纳晚期—墨西哥阶(Messinian)构造开始强烈活动,古近系塑性泥岩开始发生强烈的塑性流动,中新统开始发育冲断裂、褶皱等。托尔托纳晚期冲断裂生长指数开始减小至1以下(图8a),塑性泥构造生长指数开始增大至1.3左右(图8b),褶皱生长指数达到1.2左右(图8c),这说明冲断裂、塑性泥构造及褶皱均在此时期开始活动。墨西哥阶冲断裂生长指数达到最小(0.6),塑性泥构造生长指数达到最大(1.37左右),褶皱生长指数也达

到最大(1.27左右),这表明墨西哥期冲断裂、塑性泥构造及其相关褶皱活动达到最强。

上新世至今 自上新世赞克勒期开始,盆地构造活动整体减弱,具体表现在:泥收缩构造中的冲断裂仅断至赞克勒阶,并没断开赞克勒阶以上地层,这说明冲断裂在赞克勒期之后停止了活动;与此相关,赞克勒期冲断裂生长指数为0.7~0.8(图8),塑性泥构造生长指数减小至1.07~1.25,这说明冲断裂和塑性泥构造活动开始减弱。赞克勒期之后,构造活动进一步减弱,表现在上覆的褶皱两翼地层与顶部地层厚度差开始减小,塑性泥构造和褶皱的生长指数逐渐减小并趋近于1。从图7g的第四系分布来看,构造高部位地层仍薄于构造低部位地层,并且上超现象不明显,说明泥收缩构造现今仍在活动,只是活动较弱而已。



(a) 中新统托尔托纳阶沉积前塞拉瓦莱阶底界埋深



(b) 塞拉瓦莱阶均方根属性

图9 典型泥收缩构造区中新统塞拉瓦莱阶古地貌及沉积体地震预测

白色、蓝色虚线范围,分别表示古、今下切水道位置

4.1 古近纪—中新世托尔托纳早期

托尔托纳早期研究区整体呈平缓地形(图9),没有明显的断裂、褶皱发育(图7),在研究区中部—东北部(图9A井区)较低部位发育一条北东—南西走向的下切水道,沉积主要受海底水道控制。在塞拉瓦莱阶(Serravallian)沿层均方根振幅属性上(图9b),现今下切水道的位置,较之图9a托尔托纳阶沉积前

整体来看,泥收缩构造中的冲断裂、塑性泥构造、褶皱自中新世托尔托纳中期开始活动,墨西哥期活动达到最强,上新世赞克勒期之后冲断裂停止活动,塑性泥构造和褶皱活动逐渐减弱。泥收缩构造中的冲断裂、塑性泥构造及冲断裂上盘褶皱等不同构造之间具有良好的耦合性。至于泥收缩构造中的正断裂,系受下伏塑性泥构造上拱而形成:正断裂在托尔托纳早期之前不发育,直到上新世,当下伏塑性泥构造上拱到一定程度,上覆地层褶皱达到破裂极限发生垮塌而形成。

4 古构造对沉积的控制

通过印模法对不同时期的古构造进行了恢复(图9,图10),结合沉积展布的预测,可以较好地反映构造演化对沉积的控制作用。

的位置靠南,说明下切水道向南发生迁移。结合研究区由东北向西南发生冲断的特点,可知下切水道的迁移是受构造运动所致。

4.2 中新世托尔托纳晚期至今

中新世托尔托纳晚期构造开始强烈活动,在研究区南部及中部—东北部,下伏的塑性泥岩开始发生塑性流动和上拱,使得中新统下部地层开始弯曲,

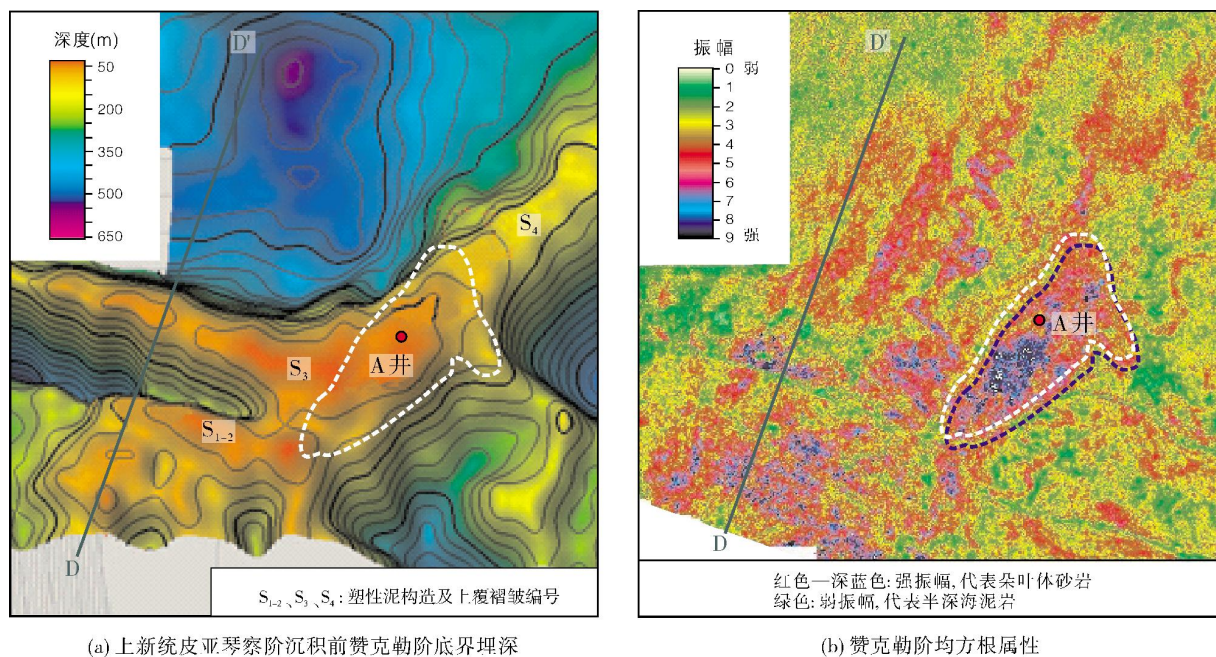


图10 典型泥收缩构造区上新统赞克勒阶古地貌及沉积体地震预测

白色、蓝色虚线范围,分别表示古、今朵叶体位置

形成褶皱(图10a,图7),并且南部的冲断裂开始发育。与图9a对比分析,中新世早期研究区南部和中部—东北部的低洼区,托尔托纳晚期开始转变为褶皱的高部位。受古地貌的控制,自托尔托纳晚期开始,在研究区南部和中部—东北部海底高部位,开始发育砂岩朵叶体(图10b),在其他低部位则发育半深海—深海泥岩沉积。在赞克勒阶沿层均方根振幅属性图上(图10b),现今朵叶体位置,较之图10a皮亚琴察阶(Piacenzian)沉积前的位置靠南。纵向上比较,该朵叶体向南移动的距离较之塞拉瓦莱阶下切水道移动的距离明显减小,这反映了老地层(塞拉瓦莱阶)的构造位移量大于新地层(托尔托纳阶)的构造位移量,也说明泥收缩构造具有同生性,古构造对沉积的控制具有一定继承性。

结合研究区水深演化特点^[16](古近纪时水体较深,中新世早期水体较浅,中新世晚期水体又变深)来分析,中新世早期水体较浅时(强水动力条件下),在研究区南部和中部—东北部低洼区以水道砂岩沉积为主,中新世晚期水体变深时(海底漫流弱水动力条件下),在研究区南部和中部—东北部褶皱顶部则以砂岩朵叶体沉积为主。整体上看,研究区南部和中部—东北部褶皱的顶部,圈闭条件好,储层发育,是有利的油气储集部位。

5 结论

(1)尼日尔三角洲盆地的泥收缩构造,由塑性泥构造、冲断裂及相关褶皱和正断裂组成,主要受控于塑性泥构造的发育。

(2)泥收缩构造活动自中新世托尔托纳晚期开始,墨西哥期达到最强,上新世开始减弱,但至今仍在微弱活动。其中,冲断裂主要在中新世托尔托纳晚期—上新世赞克勒期活动,塑性泥构造及相关褶皱自中新世托尔托纳晚期开始活动至今,正断裂主要在上新世活动。

(3)中新世托尔托纳晚期构造活动逐渐对沉积起控制作用,托尔托纳阶上部及以上地层具有明显的同沉积特征。

参考文献

- [1] Brownfield M E, Charpentier R R. Geology and total petroleum systems of the West-Central Coastal Province(7203), West Africa [J]. U.S. Geological Survey Bulletin, 2006, 2207(B): 1-52.
- [2] 胡望水,李涛,于水,等. 西非被动大陆边缘重力滑脱构造发育演化及成因机制[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(2): 186-196.
- [3] Lehner P, de Ruiter P A C. Structural history of Atlantic margin of Africa[J]. AAPG Bulletin, 1977, 61(7): 961-981.

- [4] Doust H, Omatsola E. Niger Delta[M]// Edwards J D, Santogrossi P A. Divergent/passive margin basins. AAPG Memoir 48, 1990: 201-238.
- [5] 马君, 刘剑平, 潘校华, 等. 西非被动大陆边缘构造演化特征及动力学背景[J]. 中国石油勘探, 2008, 13(3): 60-64.
- [6] Fairhead J D, Binks R M. Differential opening of the Central and South Atlantic Oceans and the opening of the West African rift systems[J]. Tectonophysics, 1991, 187(1/3): 191-203.
- [7] Nwachukwu S O. The tectonic evolution of the southern portion of the Benue Trough, Nigeria[J]. Geological Magazine, 1972, 109(5): 411-419.
- [8] Nwachukwu J I, Chukwurah P I. Organic matter of Agbada Formation, Niger Delta, Nigeria[J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(1): 48-55.
- [9] Nwachukwu J I, Oluwole A F, Asubiojo O I. A geochemical evaluation of Niger Delta crude oils[M]// Oti M N, Postma G. Geology of Deltas. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 287-300.
- [10] Whiteman A. Nigeria: Its petroleum geology, resources, and potential[M]. Springer Netherlands, 1982: 11-165.
- [11] Cohen H A, McClay K. Sedimentation and shale tectonics of the northwestern Niger Delta front[J]. Marine and Petroleum Geology, 1996, 13(3): 313-328.
- [12] Storti F, Poblet J. Growth stratal architectures associated to decollement folds and fault-propagation folds. Inferences on fold kinematics[J]. Tectonophysics, 1997, 282(1): 353-373.
- [13] Rowan M G, Peel F J, Vendeville B C. Gravity-driven fold belts on passive margins[M]// McClay K R. Thrust tectonics and hydrocarbon systems. AAPG Memoir 82, 2004: 157-182.
- [14] Nigro F, Renda P. Growth pattern of underlithified strata during thrust-related folding[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(10): 1913-1930.
- [15] Higgins S, Davies R J, Benjamin C. Antithetic fault linkages in a deep water fold and thrust belt[J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29(12): 1900-1914.
- [16] Mitchum R M, Hoffman M W, Connors C D. Tectonic controls on regional sequence stratigraphy in the Niger Delta, offshore Nigeria[C]// AAPG Annual Convention. New Orleans, Louisiana, 2000: 99.

编辑:董庸

Contractional Structure in Muds: Pattern, Evolution, and the Control on the Deposition of Niger Delta Basin

Yu Shui, Li Tao, Hu Wangshui, Cheng Han, Zhao Hongyan

Abstract: The contractional structure in muds, which is a typical tectonic pattern of the gravitational decollement thrust structure in the deepwater area of Niger Delta Basin, is mainly composed of thrust faults, plastic mud structures and associated folds and normal faults. Based on the interpretation of seismic data, it is considered that the contractional structure is mainly controlled by plastic mud structure. On the tectonic history, the contractional structure began to form in the late Tortonian of the Miocene, and in the Messinian-Zanclean reached the strongest, then the tectonic activity gradually weakened, but still active. Based on the analysis of paleo-structure restoration and sedimentary system, it is believed that the late Tertonian tectonic activity begin to control the sediments. The upper part of the Tertonian and its overlying strata are of obvious syn-deposition. As to the thrust fault, the thickness of hanging wall is clearly smaller than that of footwall, and as to the associated fold, the thickness of the strata of wings is larger than that of the top of anticline.

Key words: Contractional structure in muds; Structural feature; Structural evolution; Niger Delta Basin

Yu Shui; PhD, Professorate Senior Engineer. Add: CNOOC Research Institute, 6 Taiyanggong Nan Jie, Beijing, 100028, China