中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 11 期: 1591 ~ 1597
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

尼日尔三角洲下陆坡限定性重力流沉积过程及响应

李磊[①*], 王英民[②], 张莲美[③], 黄志超[④]

① 西安石油大学油气资源学院, 西安 710065;
② 中国地质大学地球科学学院, 北京 102249;
③ 中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221008;
④ 中石化上海海洋油气分公司研究院, 上海 200092
* E-mail: lilei002@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-09-15; 接受日期: 2010-05-10
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2009CB219407)和国家自然科学基金(批准号: 40972077)资助

摘要 尼日尔三角洲下陆坡存在极为活跃的重力流沉积作用. 利用尼日尔三角洲下陆坡近海底高分辨率三维地震资料, 研究复杂地貌条件下的重力流沉积过程及其响应. 通过近海底浅层高分辨率地震资料解释发现, 尼日尔三角洲下陆坡受中新世至上新世重力逆冲构造活动的影响具有阶梯状复杂地貌特征, 陆坡存在两种可容空间类型: 孤立闭合池状可容空间和连通弯曲通道状愈合可容空间, 并发育多级次深海扇(朵体)和深水水道沉积. 重力流流体特征和汇聚盆地特征影响重力流沉积过程: 早期重力流在不同池状可容空间内以充填-溢出模式进行沉积充填, 后期重力流活动限制在连通通道内. 尼日尔三角洲下陆坡复杂的地貌特征控制了重力流垂向沉积演化过程和平面分布, 造成下陆坡深水区复杂的重力流沉积格局.

关键词
尼日尔三角洲
限定性重力流
可容空间
沉积过程

深海沉积过程及其产物是当前和今后沉积学研究最受关注的 4 个热点领域之一[1]. 由于缺乏可直接观测描述的露头剖面以及钻探成本高等原因, 深水海域的地下地质条件主要是依靠地震数据进行认识和推测[2~6]. 盐(泥)底辟作用、重力滑动作用和重力扩展作用使被动大陆边缘陆坡区产生大量的底辟构造或逆冲构造, 形成复杂的陆坡地貌[7~11]. 复杂地貌对沉积构型和样式控制的问题已引起国内外学者很大关注[10,12~14]. 沉积物供应、区域盆地构造和相对海平面变化是深水沉积体系主要的、大规模的控制因素[15,16]. 然而, 一旦沉积物到达陆架边缘甚至超过陆架边缘, 沉积物输送体系和汇聚盆地构型就成为控制深水扇外形和岩相分布的主要因素.

尼日尔三角洲盆地深水区是当前和今后深水油气勘探的重要领域之一, 从陆坡到盆地深水区日益增长的勘探活动和成功实例促使学者们对该地区的深水沉积体系进行研究[3,4,8,14]. 尼日尔三角洲盆地下陆坡区存在大量的重力逆冲构造[8,9,11]. 关于坡脚逆冲带的重力逆冲构造对深水水道砂体沉积构型和样式的控制, Heinio和Davies[14]认为, 垂直于水道-堤岸体系的生长褶皱导致膝折点(knickpoint)迁移, 生长褶皱使水道梯度发生变化, 引起浊流载荷能力或侵

引用格式: Li L, Wang Y M, Zhang L M, et al. Confined gravity flow sedimentary process and its impact on the lower continental slope, Niger Delta. Sci China Earth Sci, 2010, 53: 1169–1175, doi: 10.1007/s11430-010-4018-8

蚀能力的改变. 本文着重研究尼日尔三角洲盆地坡脚逆冲带复杂地貌条件下, 汇聚盆地构型(包括整体地形形态、沉积有效可容空间及其均衡剖面)对深水重力流沉积过程及其响应的控制.

1 研究区区域地质背景

尼日尔三角洲位于非洲西部边缘的几内亚湾, 东以喀麦隆火山带为界, 西以 4000 m 等深线和达荷美盆地为界(图 1(a)). 尼日尔三角洲西部陆架宽度 50~70 m, 陆架坡折位于水深 150~200 m 处. 始新世以来, 海平面下降和快速沉积速率所形成的尼日尔三角洲盆地是世界上最大的海退型三角洲盆地之一. 尼日尔三角洲深水区新生界地层主要由阿卡塔组和阿格巴达组岩性地层单元组成.

研究区位于尼日尔三角洲西部坡脚逆冲带, 平均水深 1500 m(图 1(a)). 尼日尔三角洲西部褶皱冲断带位于陆坡和深海平原区, 重力滑动作用形成的逆冲构造带具有复杂的逆冲构造样式, 构造样式主要是断层转折褶皱及其组成的逆冲叠瓦系列. 逆冲断层多处错断阿格巴达组, 在阿卡塔组变缓形成拆离面(图 1(b)). 欠压实的陆坡泥岩沿盆地方向上缺乏侧向支撑, 陆坡失稳形成褶皱冲断带. 中新世重力滑动作用开始后, 大量的断层相关褶皱后翼形成背驮式微盆地, 尼日尔三角洲下陆坡和深海盆地具有复杂的海底地貌. 陆架边缘所形成的沉积物重力流经海底峡谷搬运到下陆坡和深海平原区域. 复杂的海底地貌对沉积物重力流的沉积过程和沉积物分布具有重要的影响.

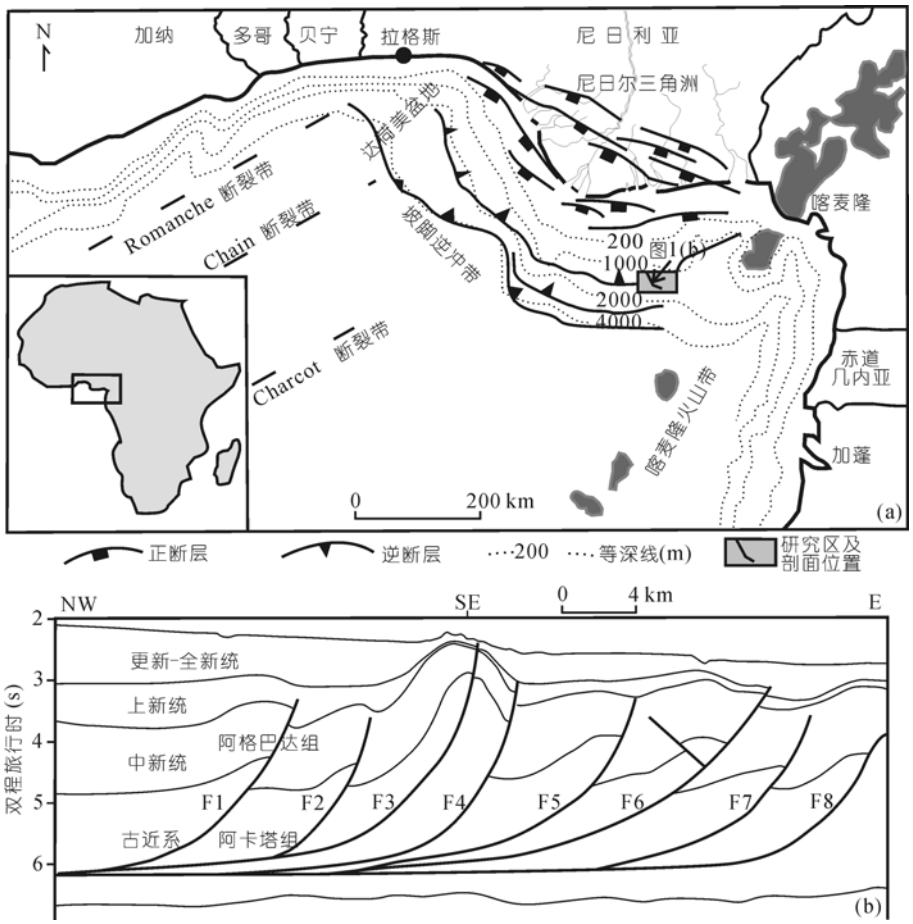

图 1 尼日尔三角洲盆地构造格局和研究区构造格架示意图

(a) 尼日尔三角洲主要构造特征示意图(据文献[9]修改); (b) 研究区构造格架样式

2 限定性重力流理论研究现状

Van Andel和Komar[17]提出“ponding”来描述大量浊流完全被限定在一个封闭地形内的状况. Pickering和Hiscott[18]用“contained turbidite”来形容在很小空间内不能进行全方位流动的浊流所形成的层状沉积体. Mutti和Normark[19]识别出 4 种基本的浊积盆地, 并强调长期稳定的汇聚盆地和沉积物体积控制深海扇的外部形态和亚相. 与海平面升降和构造因素一样, Mutti和Normark[15]强调浊流体积和组分以及盆地的类型和构型是控制浊积体系几何形态和相模式的主要因素. Ross等[20]提出陆坡调整模式, 认为陆坡沉积和侵蚀过程往往使陆坡维持稳定均衡. Kneller和McCaffrey[21,22]利用水槽试验展示束缚地表和盐刺穿地貌对浊流沉积效果的影响. Galloway[23]强调了沉积物供给历史和原有陆坡地貌形态对陆坡和陆坡底部沉积体系中 7 个基本相类型的重要影响. Prather等[13]阐述了墨西哥湾深水盆地充填过程中所呈现的主要地震相单元, 并把这些地震相与不同类型的可容空间联系在一起. Prather[24]进一步用数字正演模型来模拟墨西哥湾陆坡内盆地充填溢出序列. Prather[10]认为陆坡地形强烈影响深水储层的分布和品质. 席状砂经常出现在池状可容空间(ponded accommodation)内, 而周期循环出现的水道、席状砂和块体搬运复合体主要出现在愈合陆坡可容空间(healed slope accommodation)内; 弯曲带状水道砂常常出现在阶梯状剖面内. Smith[25]把复杂地貌陆坡沉积体系分成串状孤立闭合次盆地和未有效闭合、连通的弯曲通道, 认为充填样式和储层结构由沉积物供给的体积和流体性质、汇聚盆地空间的相对规模、盆地沉降的相对速率以及充填的沉积过程所控制.

3 尼日尔三角洲下陆坡汇聚盆地构型特征

3.1 汇聚盆地地形特征

高分辨率地震资料已成为恢复和研究沉积砂体形成期古地貌的工具之一[12]. 中新世至上新世末期, 由于重力滑动作用在下陆坡和深海平原产生一系列褶皱冲断带[8,9,26]. 上新世末期, 研究区内重力逆冲断层F1, F3 和F6 的持续活动形成复杂的海底地貌形态, 断层相关褶皱的后翼形成微盆地. 更新世至今, 重力滑动作用相对较弱, 但陆坡地形仍受早期重力逆冲构造活动的影响, 维持了早期微盆地地形特征(B1, B2 和B3)(图 1(b)和 2(a)). 研究区存在北西向和北东向两组隆起带, 隆起带之间的微盆地由通道所连接, 形成具有侧向逃逸路径的局部闭合微盆地(图 2(a)和(b)).

3.2 陆坡均衡面及有效可容空间类型

根据形态, 陆坡分为均衡陆坡和非均衡陆坡[10,20]. 重力构造活动改变陆坡地貌形态使陆坡处于非均衡状态, 与此同时, 深水沉积和侵蚀活动使陆坡地形趋于平缓, 达到均衡. 陆坡均衡面是沉积与侵蚀作用相平衡的一个趋势面, 其下为可容空间, 接受沉积充填, 其上为潜在侵蚀区, 侵蚀强度由重力流强度决定. 陆坡均衡面可看作是过陆架坡折与坡脚的趋势面[27], 局部地形位于陆坡均衡面之上, 为潜在剥蚀区, 相反, 位于陆坡均衡面之下的区域为潜在沉积区(图 2(c)). 非均衡陆坡具有发育良好的池状可容空间和大量的愈合陆坡可容空间, 二者构成了总陆坡可容空间(图 2(c)). 总陆坡可容空间由陆坡均衡面和海底所控制, 池状可容空间是陆坡内三维闭合地形低(最大负曲率点)所控制的空间[24,27]. 有效池状可容空间即最低溢出点所控制的三维闭合区域空间, 愈合陆坡可容空间是总陆坡可容空间与池状可容空间之间的空间(图 2(c)).

4 沉积类型和沉积相平面特征

沿低洼充填的重力流, 其沉积分布和厚度明显受海底地形的控制(图 3(a)和(b)): 重力流沉积分布在连通通道上, 通道内具有有效池状可容空间的 3 个微盆地(B1, B2 和B3)内沉积厚度相对较厚. 近海底沉积具有典型地震反射特征, 主要表现为: 弱振幅平行亚平行反射; 强振幅丘状充填特征——内部同相轴超覆在微盆地边缘, 局部见典型侵蚀特征(图 2(b)和 3(c)~(f)). 弱振幅平行亚平行地震相被解释为深海披覆泥, 丘状地震相在其他地区被解释为深水扇、分支水道朵叶复合体和深水扇的水道堤岸复合体[2,4,6,13]. 这种具有强振幅丘状地震相的重力流沉积被弱振幅、高连续反射的深海披覆泥所分割, 深海披覆泥往往在重力流活动静止期间堆积而成.

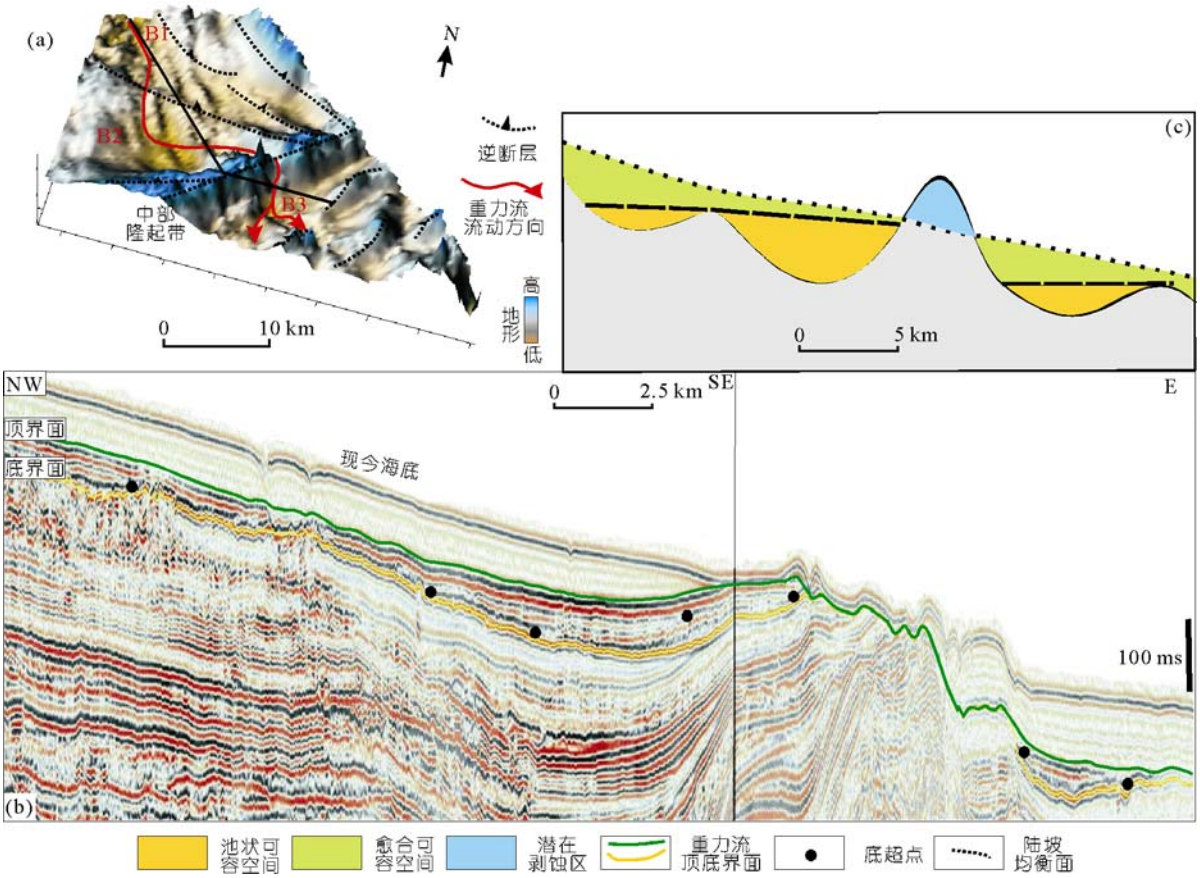

图 2　研究区更新世陆坡地形和过陆坡典型地震剖面

(a) 研究区更新世陆坡地形; (b) 过陆坡典型地震剖面; (c) 研究区非均衡陆坡可容空间类型

5　限定性重力流沉积充填过程

5.1　限定性重力流垂向演化特征

重力流沉积在盆地边缘常呈收敛底超相和收敛减薄相, 不同的地震几何形态指示沉积过程并且记录各种可容空间充填过程[13]. 研究区高分辨率三维地震资料地震反射特征不仅反映深水沉积类型(多级次深海扇或朵体、小型水道和下切水道), 同时也揭示了深水沉积在各种可容空间之间的沉积演化特征. B1, B2 和B3 三个微盆地底部地震反射同相轴向盆地边缘减薄, 且超覆在盆地边缘, 具有典型的收敛底超反射特征(图 2(b)), 反映了微盆地的大小和形状对重力流沉积进行捕获和阻塞. 微盆地上部地震反射同相轴向褶皱脊减薄但无明显的超覆特征, 具有收敛减薄反射特征, 反映了高重力流沉积速率.

更新世以来, 重力滑动作用减弱, 研究区下陆坡地貌受中新世至上新世重力逆冲作用的影响, 仍存在一系列微盆地(B1, B2 和 B3). 第 1 期重力流活动(图 4(a)): 该时期重力流主要发生在 B1 微盆地, B1 微盆地最低溢出点控制了该盆地池状可容空间大小并捕获了深水扇. 沉积物超覆在盆地边缘, 地震上表现为底超特征(图 2(b)). 重力流体积小于 B1 微盆地有效池状可容空间时, B2 和 B3 两个盆地未接受重力流沉积, 处于饥饿状态. 第 2 期重力流活动(图 4(b)): 随重力流活动持续增加, 重力流体积大于 B1 微盆地的有效池状可容空间时, 重力流通过 B1 微盆地的最低溢出点向 B2 微盆地漫溢、充填, 在 B2 微盆地内形成前积沉积特征, 盆地边缘见底超地震反射特征(图 2(b)). 向深海盆地方向, B2 微盆地底部重力流沉积比 B1 微盆地底部重力流沉积要新, 沉积物粒度也逐渐变细, 下陆坡盆地的底超面较上陆坡的底超面明显要新. 第 3 期重力流活动(图 4(c)): 重力流沉积充填

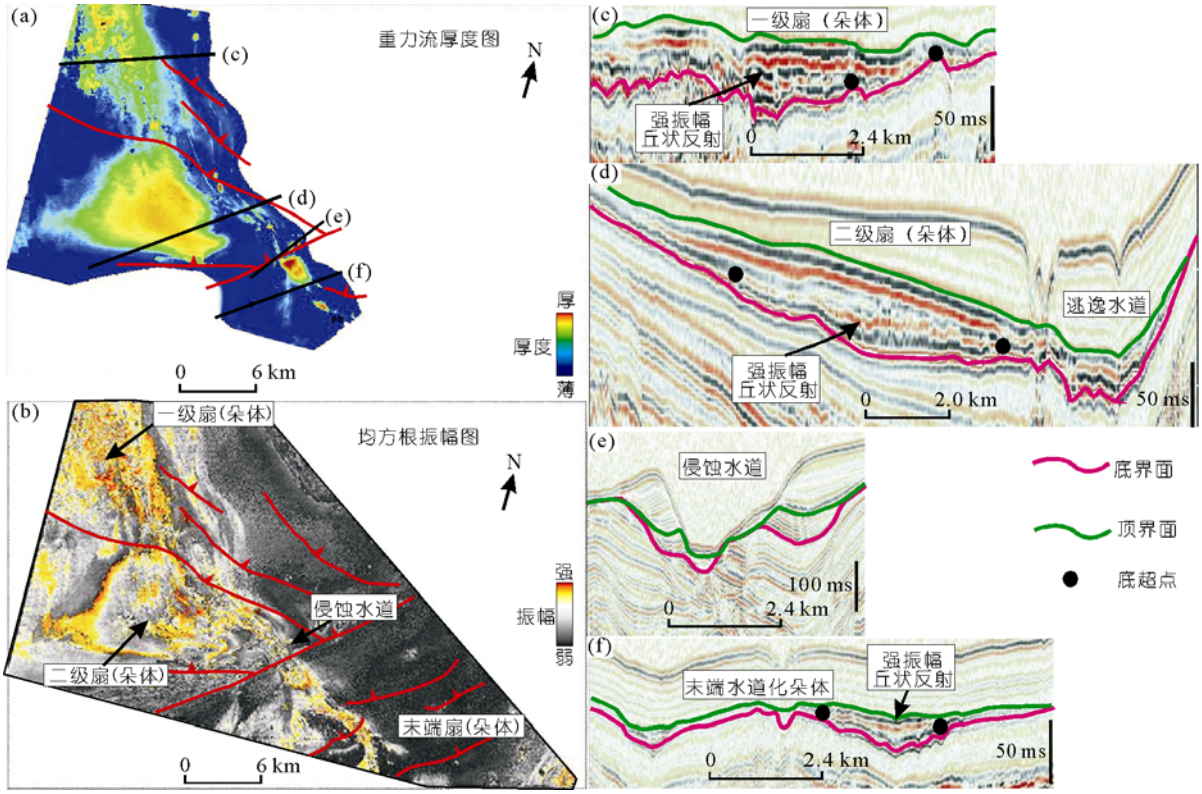

图 3　深海扇平面分布特征

(a) 深海扇厚度图; (b) 底界面上沿 60 ms 均方根振幅图; (c)~(f) 典型地震剖面

B1 和 B2 两个微盆地所形成的池状盆地后，由于重力流与周围海水具有较大的密度差，在陆坡地形的控制下形成愈合可容空间，形成重力流沉积. 愈合可容空间内的重力流沉积与第 1 和 2 期两个微盆地充填-溢出模式不同，重力流沉积活动沿两个微盆地所形成的连通通道发生沉积. 愈合可容空间内重力流沉积体在隆起顶部具有收敛减薄地震相特征(图 2(b)). 第 4 期重力流沉积(图 4(d)): 由于均衡剖面位于中部隆起带之下，发生局部侵蚀，形成 V 型侵蚀水道(图 3(e)). 重力流通过侵蚀水道在 B3 微盆地充填.

5.2　限定性重力流平面演化特征

受早期北西和北东向两组重力逆冲构造带的影响，研究区下陆坡地形表现为具有连通通道的阶梯状陆坡(图 5). 通道内 3 个微盆地(B1，B2 和 B3)的最低溢出点形成三维闭合空间，构成池状可容空间. 研究区下陆坡发育池状可容空间和愈合可容空间. 若不同微盆地之间不能形成有效闭合空间时，只能形成连通通道陆坡均衡面与池状可容空间的顶部界面所控制的连通通道状陆坡愈合可容空间.

当重力流体积小于 B1 微盆地所形成的有效池状可容空间时，重力流沉积限定在 B1 微盆地内，形成深海扇或朵体沉积(图 5(a)); 随着重力流体积持续的增加，当重力流体积大于最低溢出点所控制的有效可容空间时，重力流漫过最低溢出点在下一个有效池状可容空间内沉积充填，形成次一级深海扇或朵体(图 5(b)). 在池状可容空间之上，受陆坡地形和重力流水动力条件控制，发育陆坡愈合可容空间，其平面特征受连通通道形状影响，重力流沉积往往具有水道特征或水道-堤岸特征(图 5(c)). 位于陆坡均衡面之上的中部隆起带处于潜在侵蚀状态，重力流在中部隆起带的薄弱带(岩性密度低、最低溢出点处)发生侵蚀，形成侵蚀水道，重力流经由中部隆起带内的侵蚀水道传输在 B3 微盆地内发生沉积，形成远端朵体或末端朵体沉积(图 5(d)).

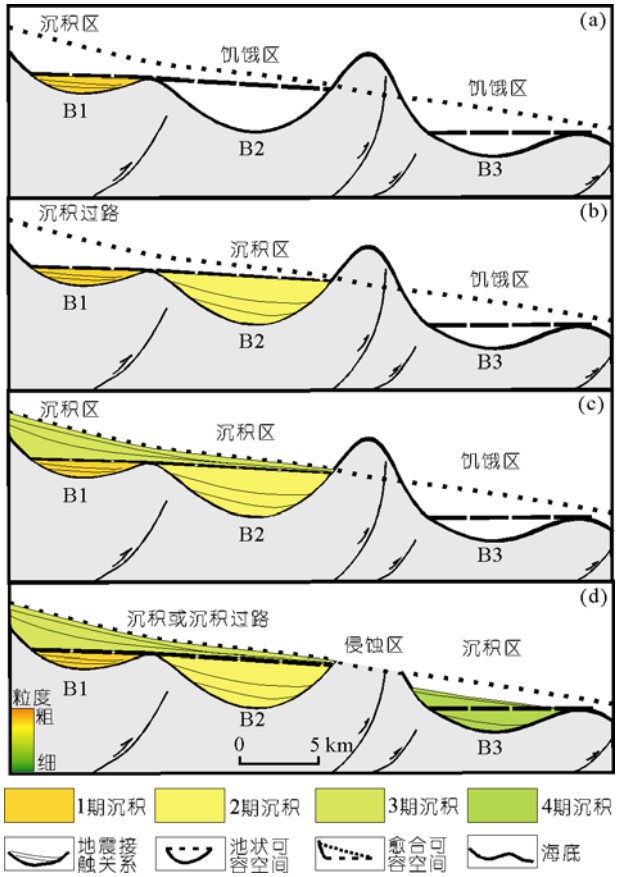

图 4　限定性重力流垂向演化特征

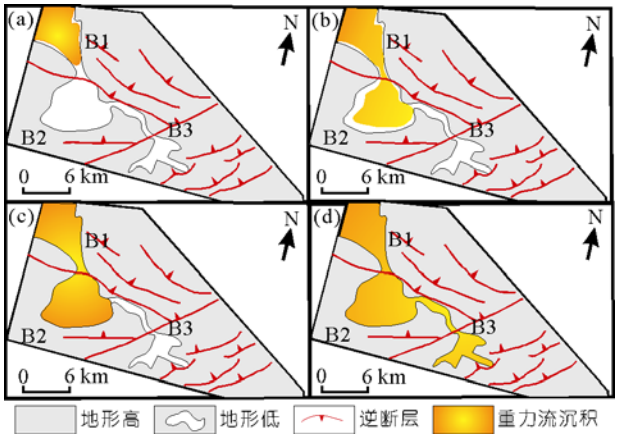

图 5　限定性重力流沉积平面演化特征

6　结论

利用高分辨率三维地震资料对尼日尔三角洲西部下陆坡复杂地貌条件下的限定性重力流沉积体系进行研究, 揭示了限定性重力流沉积过程及其沉积体系空间展布规律.

(1) 受中新世至上新世所形成的重力逆冲构造的影响, 尼日尔三角洲下陆坡具有阶梯状地貌特征. 复杂地貌内连通的通道以及通道内三维闭合的微盆地构成重力流流动的通道和沉积的场所, 形成多级次深海扇(朵体)和深水水道沉积. 重力流在三维闭合池状可容空间之间进行充填-溢出沉积充填过程, 在陆坡愈合可容空间内, 重力流活动受陆坡连通通道空间所限制.

(2) 高分辨率三维地震资料地震反射特征所揭示的重力流沉积演化过程研究对预测重力流沉积分布和沉积物品质变化具有重要意义. 在钻井资料丰富的地区, 应进一步加强对重力流沉积体系的成因类型以及不同时期沉积体系次级微相的空间展布规律的研究.

(3) 陆坡和深海平原复杂的地貌特征使深水重力流沉积过程和分布更加复杂化, 一种或几种简单的扇模式很难对深水陆坡重力流沉积进行准确的概括和预测.

致谢　林畅松和刘豪老师、李羊羊博士和匿名评审人给予热心帮助, 并对本文提出宝贵意见, 在此一并致谢.

参考文献

1　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. 沉积学报, 2006, 24: 928—933

2　Saller A, Werner K, Sugiaman F, et al. Characteristics of Pleistocene deep-water fan lobes and their application to an upper Miocene reservoir model, offshore East Kalimantan, Indonesia. Am Assoc Petrol Geol Bull, 2008, 92: 919—949

3　Fonnesu F. 3-D seismic images of a low-sinuosity slope channel and related depositional lobe (west Africa deep offshore). Mar Petrol Geol, 2003, 20: 615—629

4　Adeogba 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. Am Assoc Petrol Geol Bull, 2005, 89: 627—643

5 Gervais A, Savoye B, Mulder T, et al. Sandy modern turbidite lobes: A new insight from high resolution seismic data. Mar Petrol Geol, 2006, 23: 485—502

6 Jackson C A L, Barber G P, Martinsen O G. Submarine slope morphology as a control on the development of sand-rich turbidite depositional systems: 3D seismic analysis of the Kyrre Fm (Upper Cretaceous), Maloy slope, offshore Norway. Mar Petrol Geol, 2008, 25: 663—680

7 McDonnell A, Loucks R G, Galloway W E. Paleocene to Eocene deep-water slope canyons, western Gulf of Mexico: Further insights for the provenance of deep-water offshore Wilcox Group plays. Am Assoc Petrol Geol Bull, 2008, 92: 1169—1189

8 Kostenko O V, Naruk S J, Hack W, et al. Structural evaluation of column-height controls at a toe-thrust discovery, deep-water Niger Delta. Am Assoc Petrol Geol Bull, 2008, 92: 1615—1638

9 Corredor F, Shaw J H, Bilotti F. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta. Am Assoc Petrol Geol Bull, 2005, 89: 753—780

10 Prather B E. Controls on reservoir distribution, architecture and stratigraphic trapping in slope settings. Mar Petrol Geol, 2003, 20: 527—543

11 Rowan M G, Peel F J, Vendeville B C. Gravity-driven fold belts on passive margins. In: McClay K R, ed. Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems. Tulsa: AAPG and Datapages, 2004. 157—182

12 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育发布的制约. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 306—316

13 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. Am Assoc Petrol Geol Bull, 1998, 82: 701—728

14 Heinio P, Davies R J. Knickpoint migration in submarine channels in response to fold growth, western Niger Delta. Mar Petrol Geol, 2007, 24: 434—449

15 Mutti E, Normark W R. An integrated approach to the study of turbidite systems. In: Weimer P, Link M I, eds. Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems. New York: Springer, 1991. 75—106

16 Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. Am Assoc Petrol Geol Bull, 1994, 78: 792—822

17 Van Andel T H, Komar P D. Ponded sediments of the Mid-Atlantic ridge between 22° and 23° north latitude. Geol Soc Am Bull, 1969, 80: 1163—1190

18 Pickering K T, Hiscott R N. Contained (reflected) turbidity currents from the middle Ordovician Cloridorme Formation, Quebec, Canada: An alternative to the antidune hypothesis. Sedimentology, 1985, 32: 373—394

19 Mutti E, Normark W R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: Problems and concepts. In: Legget J K, Zuffa G G, eds. Marine Clastic Sedimentology. London: Graham and Trotman, 1987. 1—38

20 Ross W C, Halliwell B A, May J A, et al. Slope readjustment: A new model for the development of submarine fans and aprons. Geology, 1994, 22: 511—514

21 Kneller B C, McCaffrey D W. Modeling the effects of salt induced topography on deposition from turbidity currents. Houston: SEPM Gulf Coast Section, 1995. 137—145

22 Kneller B C, McCaffrey D W. Depositional effects of flow nonuniformity and stratification within turbidity currents approaching a bounding slope: Deflection, reflection and facies variation. J Sediment Res, 1999, 69: 980—991

23 Galloway W E. Siliciclastic slope and base-of-slope depositional systems: Component facies, stratigraphic architecture, and classification. Am Assoc Petrol Geol Bull, 1998, 82: 569—595

24 Prather B E. Calibration and visualization of depositional process models for above-grade slopes: A case study from the Gulf of Mexico. Mar Petrol Geol, 2000, 17: 619—638

25 Smith R. Silled sub-basins to connected tortuous corridors: Sediment distribution systems on topographically complex sub-aqueous slopes. In: Lomas S A, Joseph P, eds. Confined Turbidite Systems. London: Geological Society, 2004. 23—43

26 Doust H, Omatsola E. Niger Delta. In: Edwards J D, Santogrossi P A, eds. Divergent/Passive Margins Basins. Tulsa: AAPG and Datapages, 1990. 201—238

27 Steffens G S, Biegert E K, Sumner H S, et al. Quantitative bathymetric analyses of selected deepwater siliciclastic margins: Receiving basin configurations for deepwater fan systems. Mar Petrol Geol, 2003, 20: 547—561