

陆坡逆冲-变换构造对重力流水道的控制作用 ——以西非陆坡某区中新统深水沉积体系为例

蔺鹏^{1,2}

1 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院; 2 中国石油大学(北京)地球科学学院

摘要 重力流水道是深水油气勘探的重要目标之一,近年来的勘探实践揭示了陆坡逆冲构造区重力流水道复杂的分布特征。以西非陆坡某研究区为例,综合应用地质和地震资料,阐明逆冲-变换构造微地貌的类型、成因和对重力流水道的控制作用。中新世由重力滑动作用引发的逆冲断层主导了研究区地貌格局。东、西2套逆冲断裂体系沿下伏厚层超压泥岩中不同深度的滑脱面发育,导致位移缩短量不同,这是二者构造样式与活动强度差异的主因。不同逆冲断裂体系间的位移量差异及沿单一逆冲断层走向的位移量变化使研究区内发育多种变换构造。从成因的角度归纳出在逆冲-变换构造的综合作用下发育5种微地貌样式:三角形断背斜、掀断层-底辟背斜、逆断层连接沟谷、掀断层斜坡和走向凹槽。同期重力流水道在逆冲-变换构造微地貌的影响下表现出遇障碍转向、穿越断层相关构造和两侧受限制等3种分布样式:三角形断背斜和掀断层-底辟背斜使顺陆坡方向的重力流水道转向;逆断层连接沟谷和掀断层斜坡边缘使重力流水道容易从此处穿越;走向凹槽将重力流水道限制于其中。该研究为针对重力流水道储层的地震解释提供了一种新的思路。

关键词 重力流水道; 逆冲断层; 变换构造; 微地貌样式; 陆坡; 西非

中图分类号: TE121.3 **文献标识码**: A

0 前言

陆坡重力流水道是深水源-汇系统的重要组成部分,也是当今世界深水油气勘探的目标之一^[1-2]。重力流的搬运-沉积过程受到重力驱动,其几何形态与空间分布受到沉积期地貌特征控制。构造活动是地貌形态学特征的重要影响因素,其与沉积体系分布的耦合关系一直是沉积学研究的热点,也是制约油气高效勘探开发的基础问题之一^[3]。深水陆坡环境下,地貌形态主要受控于构造-沉积演化,通常不会遭受大规模的风化剥蚀改造^[4]。与陆上相比,陆坡深水区构造样式及相关微地貌单元的形态保存相对完整,是开展构造活动-重力流沉积交互作用研究的天然、理想实验室。

得益于三维地震技术的发展,目前人们对深水重力流沉积物的搬运分散过程有了更为深入的认识。近年来的勘探实践揭示出陆坡地貌特征对深水重力流水道的沉积演化具有重要控制作用。在

逆冲构造活动主导下,海底地貌与重力流水道间的交互作用主要包括偏移、转向、阻碍和限制等4种类型^[5-6]。重力流沉积物容易被逆冲断层上盘断背斜阻挡并在背驮式内斜坡盆地内沉积。若物源供给充足,重力流可在多个内斜坡盆地之间以充填-溢出的形式形成多级次沉积^[7]。由于逆冲断层活动强度沿走向存在差异,重力流水道可从局部应变极小值处越过上盘断背斜或从断层两端绕行^[8]。变换构造系指由于主干断层位移沿走向发生变化及多条断层相互作用而发生的构造变形,其对地貌特征和沉积体系分布同样具有一定控制作用^[9]。在逆冲构造区,单一逆冲断层沿走向位移量的变化或相邻逆冲断层间发生的运动学连锁反应可诱导出多种形式的变换构造。因此,逆冲构造背景下的地貌特征同时受控于逆冲断层及逆冲所伴生的变换构造,二者合称为逆冲-变换构造。

前人关于逆冲相关地貌对重力流分布控制作用的研究已经取得了一些进展,明确了逆冲构造区重

收稿日期:2022-02-14; 改回日期:2022-08-08; 网络出版日期:2022-12-13

本文受中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“辽河油田千万吨稳产关键技术研究与应用”(编号:2017E-16)、国家科技重大专项课题“海外大陆边缘盆地勘探开发实用新技术研究”(编号:2011ZX05030-005-02)资助

第一作者: 蔺鹏, 硕士, 工程师, 从事沉积学与层序地层学研究。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: qiuyehanxing@163.com

力流宏观分布规律,但对于逆冲断层组合与变换构造综合作用下形成的复杂微地貌样式类型、成因及特定微地貌样式对重力水道分布起到何种控制作用,目前仍缺少系统的认识。因此,本文以西非陆坡某深水研究区为例,在钻井、测井资料的标定下,利用高品质的浅层三维地震资料,选择形成于逆冲断层活跃期的重力水道和同期古地貌作为研究对象,阐明逆冲-变换构造微地貌的类型与成因特征,明确逆冲构造区不同类型微地貌样式对重力水道分布的控制作用,不仅深化了深水沉积学理论,而且对于深水重力流油气藏勘探具有重要指导意义。

1 研究区基本构造特征

尼日尔三角洲盆地位于西非几内亚湾,是典型的三角洲型被动陆缘盆地,盆地主体部分由新生界大型高建设型三角洲构成^[4,10]。尼日尔三角洲进积引发被动大陆边缘重力滑动,使盆地的构造样式在横向上具有明显的分区性,向深海方向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(图1a)^[10-11]。研究区位于尼日尔三角洲盆地下陆坡深海海域,距北部西非海岸约150 km,水深1 000~2 000 m,处于滑脱褶皱区和外褶皱逆冲区交界处(图1a),主要发育逆冲断层和泥底辟构造^[12](图1b)。研究区新生界由阿卡特组和阿格巴达组2套岩性地层单元组成(图2):下部阿卡特组主要发育富含有机质的海相超压泥岩,是重要的生油层;上部阿格巴达组由深水重力流砂岩及内部泥岩隔夹层组成^[4]。

在大型三角洲引发的陆坡重力滑动作用下,研

究区南部地层向深海方向挤压滑脱形成了一系列近东西向展布的逆冲断层及断背斜(图2)。东、西两侧逆冲断层走向近似一致但不共线(图1b),且在构造活动强度与构造样式等方面亦表现出显著的差异。研究区西南部的逆冲断层F1、F3和F5断面均为向下变缓的铲状,错断下伏阿卡特组中部强反射界面(图2a),估测F1、F3断距分别为900 m、300 m;在铲式断面形态的约束下,F1、F3上盘均形成两翼不对称的断背斜。研究区东南部的逆冲断层F2、F4断面相对平直,未错断下伏阿卡特组中部强反射界面(图2b),断距约为200 m;断背斜两翼对称。

逆冲断层滑脱面发育在下部阿卡特组厚层超压泥岩中,研究区内存在3个不同深度的滑脱面^[13](图2):浅部滑脱面位于阿卡特组顶部,中、深部滑脱面均为强反射界面,分别位于阿卡特组中部、下部^[13]。在地震反射剖面上,阿卡特组整体为弱振幅反射,故具有强振幅特征的中、深部滑脱面可视为构造标志层,并作为确定断层滑脱面的重要依据^[4]。西侧逆冲断层F1、F3、F5明显错断了具有强振幅反射特征的中部滑脱面(图2a),沿深部滑脱面发育;而东侧逆冲断层F2、F4均断穿阿卡特组顶部的浅部滑脱面而未错断中部滑脱面(图2b),沿中部滑脱面发育。如前所述,西侧逆冲构造无论断距还是隆起幅度均大于东侧,表明西侧构造活动强度较东侧更大。由于位移缩短量是影响逆冲变形强度的最直接因素^[14],而东、西两侧逆冲断裂体系沿不同滑脱面发育可导致不同体系间位移缩短量的差异,故东、西两侧逆冲断层沿不同滑脱面发育是导致构造变形强度差异的根本原因。

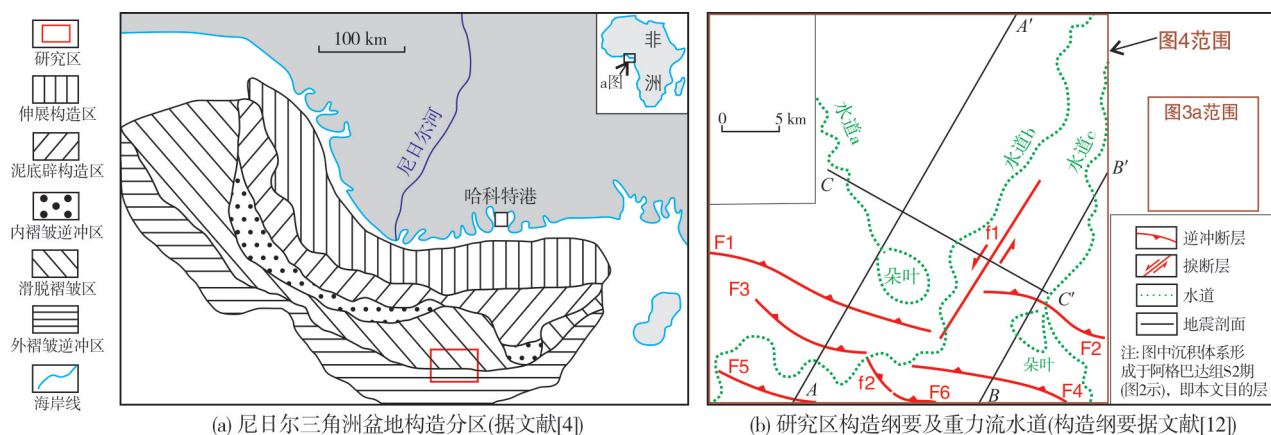
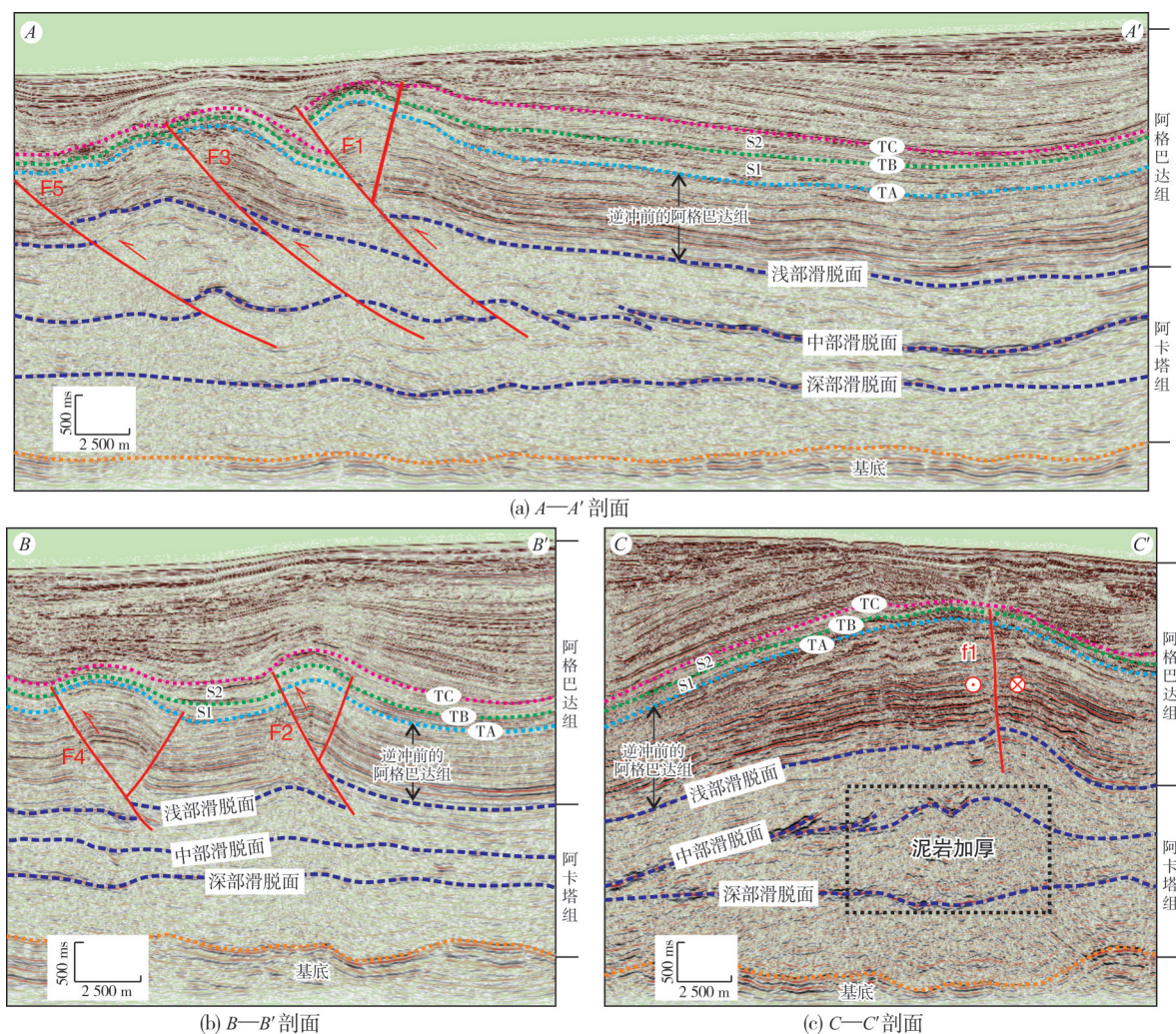


图1 研究区位置及构造纲要图
Fig. 1 Location and tectonic outline of the study area



注: S1、S2, 阿格巴达组内受控于逆冲断层的重力流水道发育期(2个)沉积; TA、TB、TC为S1、S2对应的等时地层界面。

图2 研究区典型地震地质解释剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 2 Typical seismic interpretation profiles of the study area (profile locations are shown in Fig. 1b)

东、西两侧逆冲构造位移缩短量的差异使研究区中部形成了多种变换构造。逆冲断层F1与F2的边界端点连线与逆冲断层走向近似垂直(图1b)。两断层相对位置关系与位移缩短量差异使F1上盘相对于F2下盘具有SSW方向的相对位移。位于二者间的地层因此受到左旋剪切应力,进而形成了以走滑位移为主、走向与逆冲断层近垂直的硬连接断层f1,其在地震剖面上表现为高陡断裂(图2c)^[15-16]。在研究区南部,东侧逆冲断层F6上盘相对于西侧断层F3下盘存在SSW向位移,而逆冲断层F3、F6相邻端点连线与逆冲断层走向的夹角约为45°,形成斜断坡。两侧逆冲位移量的差异使斜断坡处形成了兼具倾向和走向位移的压扭性变换断层f2,为硬连接逆断层(图1b)。此外,为调节不同断层间和单一

断层不同部位位移量的差异,地层可在未发生明显错断的情况下扭曲变形,形成软连接变换斜坡,如各逆冲断层上盘断背斜隆起与逆冲构造未波及区之间的过渡斜坡。

2 重力流水道识别及古地貌恢复

2.1 重力流水道识别

自始新世以来,研究区一直处于深水环境,在北部尼日尔三角洲的供源下广泛发育重力流沉积^[17-19]。本文目的层为形成于逆冲断层活动早期的中新统阿格巴达组。研究区全区覆盖三维地震资料,主测线与联络测线间距均为12.5 m,垂向采样率为3 ms,目的层段主频近40 Hz,按照地震波速2 500 m/s进行估算,垂向分辨率约为16 m,资料品质

能够满足对重力流水道沉积体系的识别。此外,研究区内的测井资料能够实现对地震资料的详细标定。

参照位于研究区东北部的典型重力流水道体系明确本区重力流水道的地震识别特征(图3)。该水道体系经过测井资料的详细标定且在层位上与本文目的层一致。具体特征如下:①在地震反射剖面上具有U/V形下切-充填地震反射外形,内部为中一强振幅、中等连续性反射或断续杂乱反射^[20](图3b);②在振幅属性平面图上对应强振幅弯曲条带^[19,21](图3a),而且统计分析表明研究区内均方根振幅属性与GR曲线相关性最好,可用于富砂质沉积单元的识别;③测井岩性信息标定结果表明,与此类地震属性相对应的GR与RT曲线均具有较高的幅度,具有齿化钟形/箱形特征,为富砂质沉积^[22-23](图

3b);④取心结果表明,研究区重力流水道内部充填物多为富砂质岩心相,常表现出由下部砂岩向上逐渐过渡为泥岩的正韵律特征^[24-25]。

以测井岩性标定结果为基础,在研究区西南部逆冲断层广泛发育区中新统阿格巴达组中,根据剖面地震相与平面地震属性识别出两期垂向相互叠加的重力水道沉积,依次命名为S1和S2,其界面自下而上分别为TA、TB、TC(图2)。S2沉积期研究区内顺陆坡发育3条重力水道(图4)。这3条水道在地震剖面上均具有典型下切-充填特征,内部充填物为中一强振幅、中等连续性反射/断续杂乱反射;在均方根振幅属性平面图上均对应弯曲的强振幅条带(图4a)。这些重力流水道的发育与S2沉积前古地貌条件具有较好的呼应(图4b)。

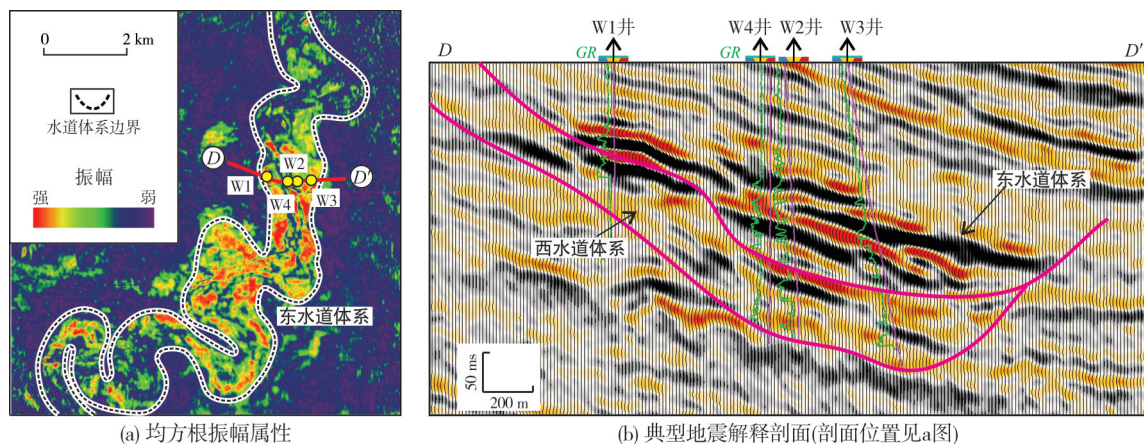


图3 研究区重力流水道识别特征(据文献[26];图3a位置见图1b)

Fig. 3 Identification characteristics of gravity flow channels in the study area (cited from reference[26]; location of Fig. 3a is shown in Fig. 1b)

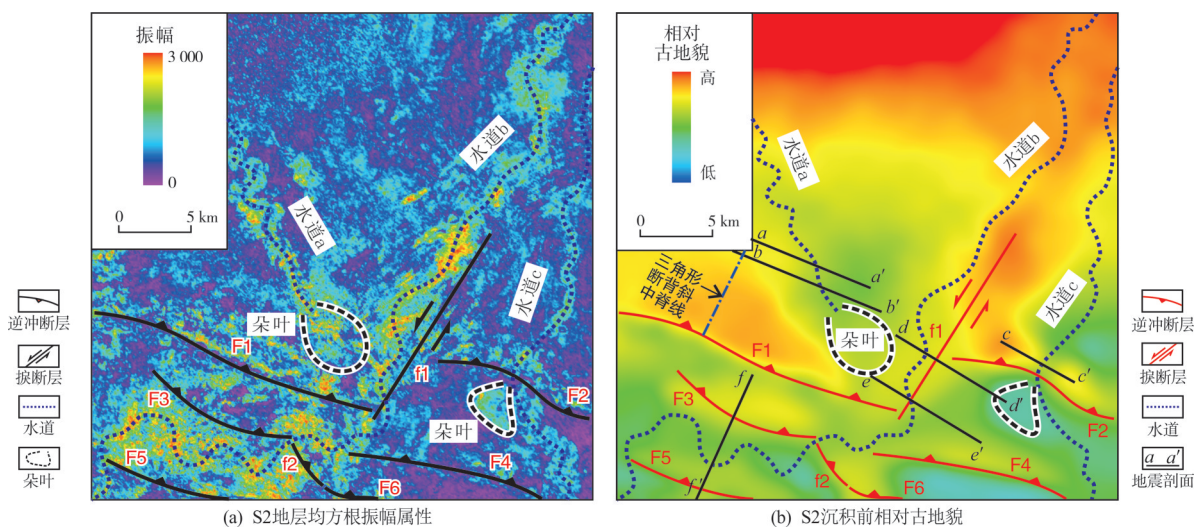


图4 研究区S2地层均方根振幅属性及沉积前古地貌(位置见图1b)

Fig. 4 RMS amplitude attribute of S2 and pre-S2 paleogeomorphology in the study area (location of Fig. 4 is shown in Fig. 1b)

2.2 古地貌恢复

古地貌恢复是含油气盆地分析的重要研究内容之一^[27]。应用基于高分辨率三维地震资料的地层厚度法,针对等时地层单元S2进行古地貌恢复,并根据基于下伏S1地层厚度的沿逆冲断层走向的生长指数剖面验证S2沉积前相对古地貌恢复结果的合理性。

如图2a、2b所示,在垂直逆冲断层的剖面上,TA界面之下的阿格巴达组在不同部位的厚度相近,表明其较少受到构造活动的影响,而覆于TA界面之上的S1、S2地层厚度则明显分布不均且在逆冲断层处较薄,显然受控于逆冲断层活动。根据沉积补偿原理,等时地层在构造低部位沉积厚度大于高部位,因此通过S2地层厚度可推测沉积前的相对古地

貌。基于下伏S1地层厚度计算出的生长指数剖面,反映同期逆冲断层沿走向不同部位的活动强度的差异,对S2沉积前相对古地貌特征具有重要指示意义。因此,以形成于逆冲断层活动初期的等时地层S1为目标,根据F1、F2、F3、F4和f2等5条被地震资料覆盖的逆冲断层上盘、下盘地层厚度计算生长指数,明确S1期逆冲断层活动强度的平面趋势,以验证S2沉积前相对古地貌恢复的结果。

受控于南倾的陆坡背景,研究区S2期整体上具有北高南低的宏观地貌趋势。构造活动所引发的地层扭曲、变形对地貌特征无疑具有重要控制作用。在逆冲-变换构造的综合作用下,研究区南部具有复杂多变的构造古地貌,根据形态学特征与构造成因可总结归纳出以下几种微地貌样式(图5)。

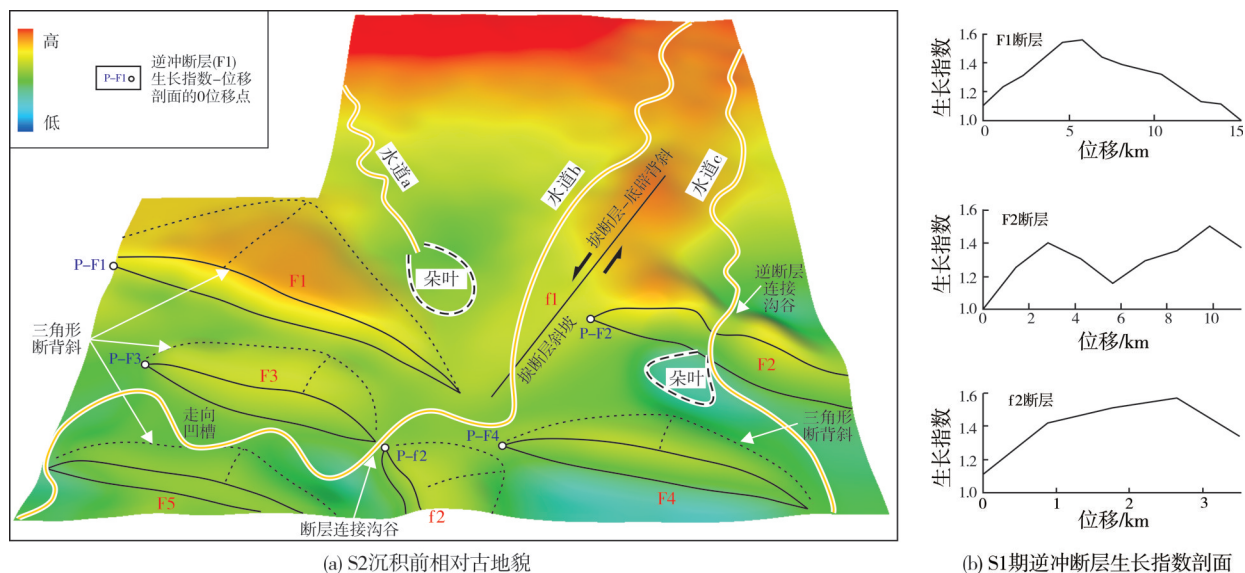


图5 研究区S2地层沉积前三维相对古地貌特征

Fig. 5 The pre S2 3D geomorphology in the study area

2.2.1 三角形断背斜

三角形断背斜系指由于沿逆冲断层走向构造活动强度差异而形成于上盘处的不规则三角形局部隆起(图5a)。形成于重力滑动体系中的逆冲断层通常横向展布范围有限,沿走向在断层两侧均存在零位移端点,即由逆冲断层中部某一位置向两侧,位移缩短量存在不断减小的趋势。逆冲变形强度主要受控于位移缩短量,故逆冲断层上盘断背斜的隆起幅度也存在向两侧降低的整体趋势(图5a)。生长指数测量剖面显示,S1沉积期研究区内逆冲断层活动强度沿走向普遍具有钟形变化特征(图5b),

即中间某一部位活动强度最大,向两端逐渐减小转变为韧性变形,符合断层生长模式^[28]。

沿逆冲断层F1走向的地震反射剖面显示:从中部三角形断背斜中脊线向断层东南端,由界面TB、TC所限定的S2地层厚度单调递增(图4b,图6a);在沿走向构造变形强度为极大值的三角形断背斜中脊处,靠近断层处的S2地层厚度 h_2 小于远离断层处的厚度 h_1 (图6a);重力流水道a向东南方向迁移(图6a)。剖面上地层厚度的分布特征揭示了逆冲断层F1上盘断背斜的几何形态;基于地层厚度的S2期相对古地貌恢复结果,直观展示出F1断背斜具有指向断层上盘方向的三角形隆起形态(图5a)。

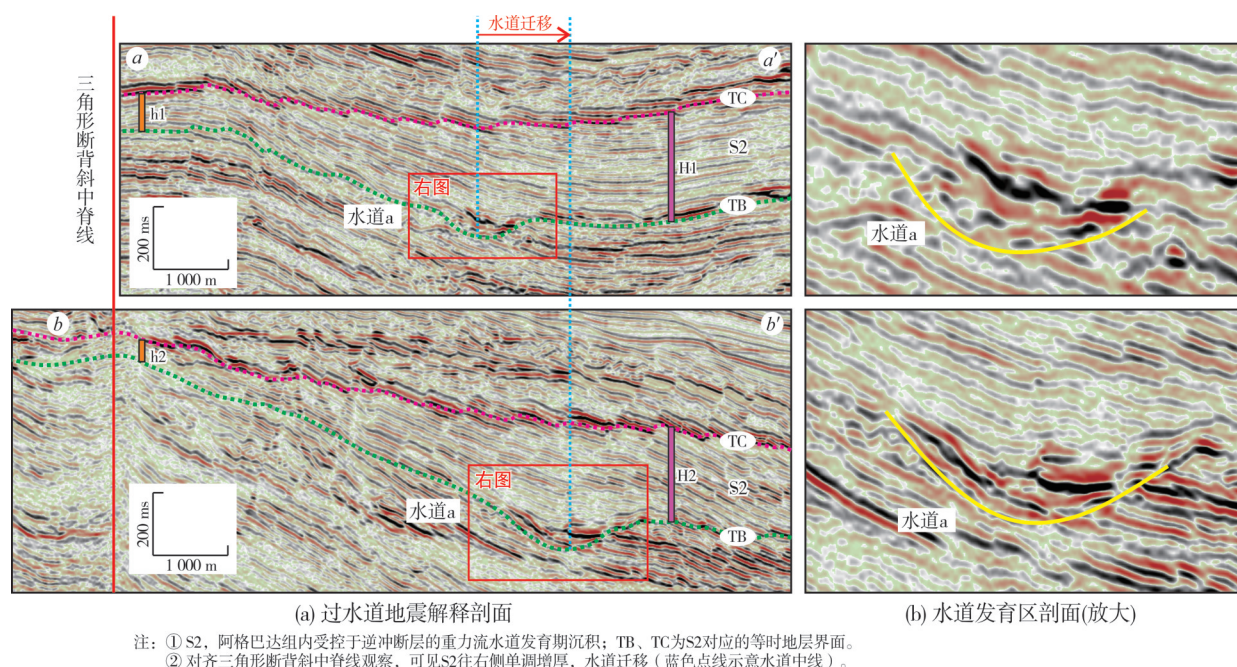


图6 三角形断背斜对重力流水道的控制作用(剖面位置见图4b)

Fig. 6 Control of triangular faulted anticline on gravity flow channel (profile locations are shown in Fig. 4b)

2.2.2 挟断层-底辟背斜

挟断层-泥底辟背斜是在逆冲断层、挟断层和泥底辟综合作用下形成的横弯褶皱。前已述及, 逆冲断层F1、F2的相对位置关系与位移缩短量差异使二者之间形成挟断层f1。挟断层f1的存在使地层抗应力强度大幅降低, 下伏超压塑性泥岩沿挟断层f1剪切破裂面底辟, 使上覆地层隆起变形, 形成与逆冲断层走向近垂直的挟断层-泥底辟背斜^[29](图2c, 图5a)。此挟断层-泥底辟背斜在先存构造(挟断层剪切破裂面)的基础上发育而成, 故平面展布形态主要受控于挟断层f1。

2.2.3 逆断层连接沟谷

逆断层连接沟谷是存在于不同逆断层连接部位的局部地貌低部位。逆冲断层的发育是一个持续的动态过程, 在逆冲断层活动初期, 破裂长度往往小于后期观测到的断层长度, 即多个长度较短、位移较小的逆冲断层随着变形程度的增加, 将逐渐连接而形成长度、位移量较大的大型逆冲断层^[30]。沿逆冲断层走向的活动强度剖面如具有双峰/多峰特征, 则表明其正在由相对独立发育的次级断层拼合。逆冲断层活动初期, 不同的次级断层处于连接过程中, 接口处两侧断层位移量均较小, 局部构造活动

强度较弱, 表现为夹持于不同断背斜间的沟谷。

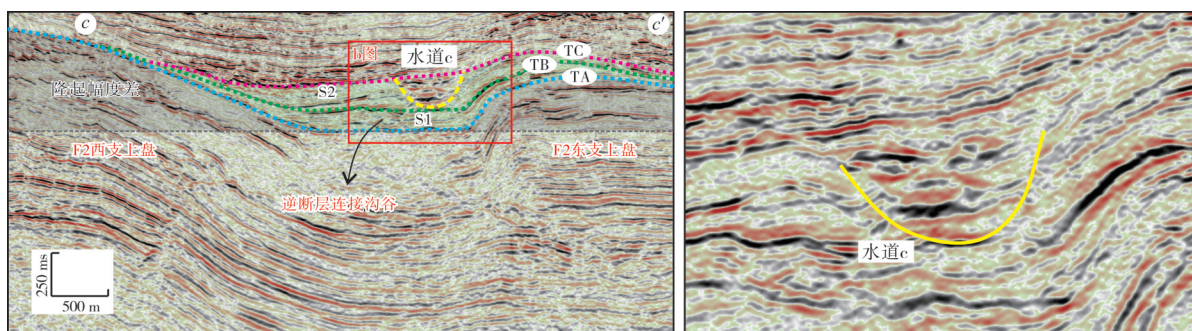
S1期逆冲断层F2在走向活动指数剖面上具有双峰特征(图5b), 表明其由东、西两条次级断层组合而成, 接合处存在逆断层连接沟谷(图5a, 图7)。与此类似, 逆冲断层F3与变换逆断层f2连接处, 由于断层活动强度相对较弱同样形成了局部连接沟谷(图5a)。

2.2.4 挟断层斜坡

挟断层斜坡由两条走向近似平行但不共线的逆冲断层及位于二者间的伴生挟断层组成。在研究区中部, 由于挟断层f1的东、西两侧分别为逆冲断层F2下盘与F1上盘, 两侧地层构造变形强度与隆起程度的差异使挟断层f1处形成了西高东低的斜坡, 即挟断层斜坡(图5a, 图8)。

2.2.5 走向凹槽

走向凹槽是由两条走向近似平行的逆冲断层上盘断背斜所夹持的狭长负向微地貌单元。其几何形态与陆上峡谷类似, 沿逆冲断层倾向具有典型的“凸—凹—凸”地貌特征。在研究区西南部, 走向近似平行的逆冲断层F3和F5上盘均发育断背斜, 在两者之间形成了沿NWW—SEE向展布的走向凹槽(图5a, 图9)。



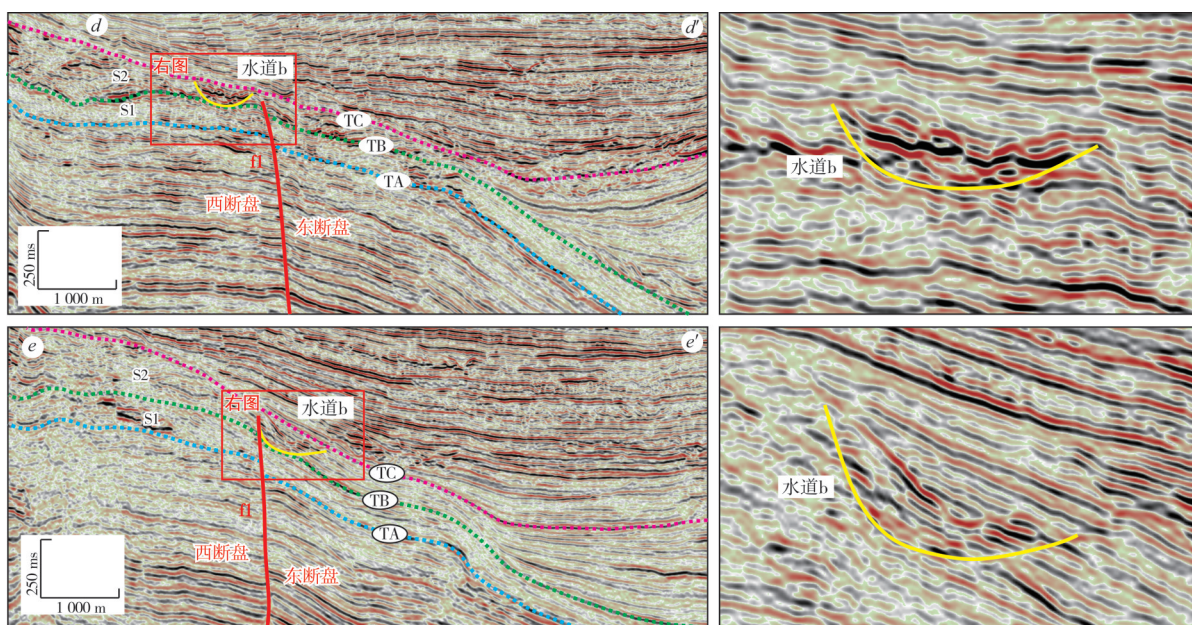
(a) 过水道地震解释剖面

(b) 水道发育区剖面(放大)

注: S1、S2, 阿格巴达组内受控于逆冲断层的重力流水道发育期沉积; TA、TB、TC为S1、S2对应的等时地层界面。

图7 逆断层连接沟谷对重力流水道的控制作用(剖面位置见图4b)

Fig. 7 Control of reverse fault connection valley on gravity flow channel (profile location is shown in Fig. 4b)



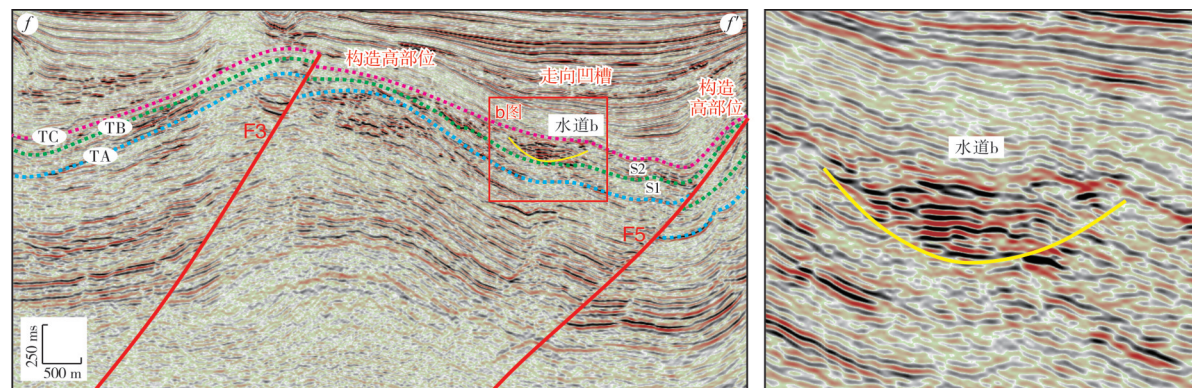
(a) 过水道地震解释剖面

(b) 水道发育区剖面(放大)

注: S1、S2, 阿格巴达组内受控于逆冲断层的重力流水道发育期沉积; TA、TB、TC为S1、S2对应的等时地层界面。

图8 掀断层斜坡对重力流水道的控制作用(剖面位置见图4b)

Fig. 8 Control of tear fault slope on gravity flow channel (profile locations are shown in Fig. 4b)



(a) 过水道地震解释剖面

(b) 水道发育区剖面(放大)

注: S1、S2, 阿格巴达组内受控于逆冲断层的重力流水道发育期沉积; TA、TB、TC为S1、S2对应的等时地层界面。

图9 走向凹槽对重力流水道的控制作用(剖面位置见图4b)

Fig. 9 Control of strike trough on gravity flow channel (profile location is shown in Fig. 4b)

3 逆冲-变换构造对重力流水道的控制作用

如前所述, S2地层中横切陆坡的逆冲断层组合及变换构造的空间配置关系使研究区南部形成了一系列微地貌单元。在这些逆冲-变换构造成因微地貌单元的影响下, 3条水道表现出复杂多变的分布特征, 可归纳为遇障碍转向、穿越断层相关构造和两侧受限制等3种分布样式。

3.1 遇障碍转向

沿陆坡倾向发育的重力流水道在遇到障碍时会被迫向侧方改道绕行, 水道流向发生显著改变。位于水道延伸方向的三角形断背斜和掀断层-底辟背斜均可迫使水道转向。

沿走向横切逆冲断层F1上盘三角形断背斜的系列剖面显示, 随着搬运距离的增加(从 $a-a'$ 到 $b-b'$), 水道a与三角形断背斜中脊线间的距离明显增加(图6), 表明水道a在三角形断背斜的影响下向远离断背斜中脊的方向迁移。结合均方根振幅属性与古地貌平面图分析(图4), 水道a形态相对顺直, 沿三角形断背斜等高线展布, 并于F1断层边缘构造变换带处因能量衰减形成具有朵状、强均方根振幅特征的小型朵叶。这些证据一致表明其分布特征受到三角形断背斜特殊形态的影响。水道a在F1三角形断背斜处的平面展布方向与陆坡倾向以大角度斜交, 很可能是由于受到逆冲断层F1上盘三角形断背斜的阻挡而发生向东侧的转向。研究区范围内实测水道a的侧向最大偏移量约为8.5 km(图4)。

与此类似, 研究区东南部水道c受逆冲断层F4上盘三角形断背斜的阻挡发生了向东侧的转向, 实测最大偏移量约为7.5 km, 其运移路径与F4上盘三角形断背斜边缘等高线一致(图4)。在研究区东北部, 水道b受到掀断层-底辟背斜阻挡发生向西侧的迁移, 从而进入研究区中部地貌相对低洼的构造变换带中, 掀断层-底辟背斜的平面形态导致水道侧向迁移程度较弱, 最大偏移量约为3 km(图4)。

综上所述, 伴生于逆冲断层上盘的三角形断背斜和掀断层-底辟背斜均可阻碍重力流水道并迫使之转向、绕行, 具体偏移量受到微地貌单元形态和规模的影响。

3.2 穿越断层相关构造

断层相关构造的存在往往导致两盘间存在一定的地貌高程差, 通常对沉积体系的分布具有一定限制作用。但在满足一定条件的前提下, 重力流水道可表现出穿越断层及相关伴生构造的分布样式。根据被穿越断层类型的不同可进一步细分为以下两种类型:

(1) 穿越逆断层连接沟谷

沿逆冲断层F2走向的地震剖面显示, 逆冲断层F2东、西两支连接处的逆断层连接沟谷与两侧分支断层的断背斜间存在明显的隆起幅度差, 为变形强度相对较弱的局部地貌低部位(图7)。水道c发育于沟谷内部, 具有典型的U型下切-充填地震反射外形, 内部为中—强振幅、中等连续性反射, 其两侧伴生弱振幅楔状天然堤并上超于断背斜隆起, 表明水道c的沉积过程受到逆断层连接沟谷这种微地貌的强烈限制。结合振幅属性平面图分析, 水道c从两个次级断层连接沟谷处穿越了逆冲断层F2(图4a)。这些证据一致表明, 逆冲断层F2在S2沉积期正在经历由两条次级断层的拼接、连合, F2上盘断背斜整体上对重力流水道c具有阻挡作用, 但次级断层连接沟谷的存在使得重力流水道相对容易从此处越过逆冲断层。

与之相似, 在研究区南部, 逆冲断层F3与发育于构造变换带的逆冲断层f2侧向拼接, 在二者连接处同样形成局部地貌低部位沟谷(图5)。重力流水道b被F4、f2上盘断背斜阻挡转而向西迁移, 从f2、F3间的沟谷处得以通过(图4)。

(2) 穿越掀断层斜坡

掀断层f1的存在以及其东、西两侧F2下盘与F1上盘的高程差使掀断层处形成西高东低的斜坡。横切掀断层的系列地震反射剖面显示(图8), 水道b在其沉积演化过程中发生了从f1西断盘向东断盘的迁移, 表明重力流水道于某一部位穿越了掀断层f1。结合振幅属性与古地貌分析, 在陆坡地形整体存在北高南低趋势的条件下, 水道b在研究区中部发育于掀断层f1西侧, 于f1西南端点附近两盘地形落差较小处向东越过f1断层(图4, 图5)。

3.3 两侧受限制

两侧受限制系指重力流水道被限制于某一负

向微地貌单元中,水道走向受到一定程度的制约。碎屑沉积物虽能够继续搬运却难以突破负向微地貌单元两侧的边界。

沿逆冲断层F3、F5倾向的地震剖面,揭示了走向凹槽内部的地层分布特征(图9)。水道b具有典型的V形反射外形,以内部充填物为中—强振幅反射明显区别于两侧地层。S2地层在水道b发育处厚度较大,向南上超于逆冲断层F5上盘隆起处,向北于挤压背斜顶部大幅度减薄,表明沉积过程受到走向凹槽微地貌的控制。结合振幅属性与古地貌平面图分析(图4),研究区西南部重力流水道b在位于断层F3与F5之间平行断层展布的走向凹槽中自东向西发育。水道b受到两侧逆冲隆起带的阻挡,在地势相对平缓的内斜坡盆地内侧向摆动、蛇曲前进,但始终被限制在走向凹槽内部。

4 结 论

(1)西非下陆坡深水区在中新世发育多个由构造变换带连接的逆冲断裂体系。相邻的逆冲断裂体系沿下伏厚层超压泥岩(阿卡塔组)中不同深度的滑脱面发育,导致位移缩短量有所不同,这是不同断裂体系间构造样式与活动强度差异的主要原因。逆冲断层活动早期(S2期),研究区在陆坡背景下整体具有北高南低的地貌趋势。南部在逆冲断层改造下形成一系列断背斜和内斜坡盆地,并表现出洼隆相间的地貌特征。不同逆冲断裂体系间的位移量差异及沿单一逆冲断层走向的位移量变化使研究区内发育多种变换构造。在逆冲-变换构造的综合作用下,可从成因的角度归纳出5种不同的微地貌样式:三角形断背斜、掀断层-底辟背斜、逆断层连接沟谷、掀断层斜坡和走向凹槽。

(2)逆冲断层活动早期(S2期),研究区内发育3条重力流水道,在逆冲-变换构造相关微地貌的影响下表现出复杂多变的平面分布特征,包括遇障碍转向、穿越断层相关构造和两侧受限制等3种样式。三角形断背斜和掀断层-底辟背斜使顺陆坡发育的重力流水道因受到阻碍而向侧方转向。逆断层连接沟谷和掀断层斜坡能够形成局部通道并使重力流水道容易从此处穿越。走向凹槽侧缘的条带状局部隆起能够将重力流水道限制于其中。

(3)基于三维地震资料的构造解析与地震地貌学研究,阐明了逆冲-变换构造相关微地貌样式的类型、成因及对重力流水道分布的控制作用。这项

研究不仅有利于降低地震解释的多解性,同时为深水重力流储层的地震预测提供了一种新的思路,在类似构造背景地区的油气勘探中具有一定的推广应用价值。

参 考 文 献

- [1] 龚承林, 齐昆, 徐杰, 等. 深水源-汇系统对多尺度气候变化的过程响应与反馈机制[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 231-252.
GONG Chenglin, QI Kun, XU Jie, et al. Process-product linkages and feedback mechanisms of deepwater source-to-sink responses to multi-scale climate changes[J]. Acta sedimentologica sinica, 2021, 39(1): 231-252.
- [2] 李全, 吴伟, 康洪全, 等. 西非下刚果盆地深水水道沉积特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 917-929.
LI Quan, WU Wei, KANG Hongquan, et al. Characteristics and controlling factors of deep-water channel sedimentation in Lower Congo Basin, West Africa[J]. Oil & gas geology, 2019, 40(4): 917-929.
- [3] 葛家旺, 朱筱敏, 张向涛, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷文昌组构造-沉积演化模式[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(2): 308-322.
GE Jiawang, ZHU Xiaomin, ZHANG Xiangtao, et al. Tectono-sedimentation model of the Eocene Wenchang Formation in the Lufeng depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 308-322.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] CLARK I R, CARTWRIGHT J A. Key controls on submarine channel development in structurally active settings[J]. Marine and petroleum geology, 2011, 28(7): 1333-1349.
- [7] 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(地球科学), 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]. Scientia sinica (terrae), 2010, 40(11): 1591-1597.
- [8] 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: 58-76.
- [9] 漆家福. 裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义[J]. 海相油气地质, 2007, 12(4): 43-50.
QI Jiafu. Structural transfer zones and significance for hydro-

- carbon accumulation in rift basins[J]. Marine origin petroleum geology, 2007, 12(4): 43-50.
- [10] 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.
- WEN Zhixin, XU Hong, WANG Zhaoming, et al. Classification and hydrocarbon distribution of passive continental margin basins[J]. Petroleum exploration and development, 2016, 43(5): 678-688.
- [11] 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.
- [12] 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.
- YU Shui, LI Tao, HU Wangshui, et al. Contractional structure in muds: pattern, evolution, and the control on the deposition of Niger Delta Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2017, 22(4): 53-60.
- [13] 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.
- [14] TIKOFF B, WOJTAL S F. Displacement control of geologic structures[J]. Journal of structural geology, 1999, 21(8/9): 959-967.
- [15] 孟庆芬, 徐朝晖, 徐怀民, 等. 准噶尔盆地西北缘百口泉区前陆冲断带撕裂断层特征及控藏作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(5): 18-21, 27.
- MENG Qingfen, XU Zhaohui, XU Huaimin, et al. Characteristics and controlling over reservoir accumulation of tear fault in foreland thrust belt of Baikouquan area in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2008, 32(5): 18-21, 27.
- [16] 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: 70-75.
- QI Jiafu, XIA Yiping, YANG Qiao. Structural analysis of petroleum province[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 70-75.
- [17] 苏玉山, 王桐, 李程, 等. 尼日尔三角洲的沉积-构造特征[J]. 岩石学报, 2019, 35(4): 1238-1256.
- SU Yushan, WANG Tong, LI Cheng, et al. The sedimentary and tectonic features of the Niger Delta[J]. Acta petrologica sinica, 2019, 35(4): 1238-1256.
- [18] 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.
- [19] 蔺鹏, 吴胜和, 张佳佳, 等. 尼日尔三角洲盆地陆坡逆冲构造区海底扇分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 1073-1086.
- LIN Peng, WU Shenghe, ZHANG Jiajia, et al. Distribution of submarine fans in the thrust fault zone of continental slope, Niger Delta Basin[J]. Oil & gas geology, 2018, 39(5): 1073-1086.
- [20] GONG Chenglin, WANG Yingmin, PYLES D R, et al. Shelf-edge trajectories and stratal stacking patterns: their sequence-stratigraphic significance and relation to styles of deep-water sedimentation and amount of deep-water sandstone[J]. AAPG bulletin, 2015, 99(7): 1211-1243.
- [21] 蔺鹏. 基于深水沉积学原理的地震属性分析新思路[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 30-35, 73.
- LIN Peng. A new seismic attribute analysis with deep-water sedimentation[J]. Special oil & gas reservoirs, 2019, 26(3): 30-35, 73.
- [22] 赵晓明, 刘丽, 谭程鹏, 等. 海底水道体系沉积构型样式及控制因素: 以尼日尔三角洲盆地陆坡区为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 825-840.
- ZHAO Xiaoming, LIU Li, TAN Chengpeng, et al. Styles of submarine-channel architecture and its controlling factors: a case study from the Niger Delta Basin slope[J]. Journal of palaeogeography, 2018, 20(5): 825-840.
- [23] ZHANG Jiajia, WU Shenghe, HU Guangyi, et al. Application of four-dimensional monitoring to understand reservoir heterogeneity controls on fluid flow during the development of a submarine channel system[J]. AAPG bulletin, 2018, 102(10): 2017-2044.
- [24] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 深水浊积水道体系构型模式研究: 以西非尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 510-520.
- LIN Yu, WU Shenghe, WANG Xing, et al. Research on architecture model of deepwater turbidity channel system: a case study of a deepwater research area in Niger Delta Basin, West Africa[J]. Geological review, 2013, 59(3): 510-520.
- [25] ZHANG Jiajia, WU Shenghe, HU Guangyi, et al. Sea-level control on the submarine fan architecture in a deepwater sequence of the Niger Delta Basin[J]. Marine and petroleum geology, 2018, 94: 179-197.
- [26] 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, 38(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, 38(2): 407-418.
- [27] 漆家福, 杨桥, 王子煜. 编制盆地复原古构造图的若干问题的讨论[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 413-424.
- QI Jiafu, YANG Qiao, WANG Ziyu. Some problems about compiling a restored paleo-structural map of basin[J]. Scientia geologica sinica, 2003, 38(3): 413-424.
- [28] COWIE P A, SCHOLZ C H. Physical explanation for the displacement-length relationship of faults using a post-yield fracture mechanics model[J]. Journal of structural geology, 1992, 14(10): 1133-1148.

- [29] 蔺鹏, 吴胜和, 张佳佳, 等. 尼日尔三角洲盆地深水区逆冲构造演化特征[J]. 海相油气地质, 2019, 24(1): 85–96.
LIN Peng, WU Shenghe, ZHANG Jiajia, et al. Characteristics and evolution of compressional structure in deep-water, Niger Delta Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(1): 85–96.
- [30] 董进, 张世红, 姜勇彪. 正断层位移-长度关系及其研究意义[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 575–584.
DONG Jin, ZHANG Shihong, JIANG Yongbiao. The displacement-length relationship of faults and its significance [J]. Earth science frontiers, 2004, 11(4): 575–584.

编辑:董庸

Control of thrust-transfer structures on gravity flow channels in continental slope: a case study of Miocene deep-water depositional systems in a continental slope, West Africa

LIN Peng

Abstract: Continental slope gravity flow channel is an important part of deep-water source-sink system, and it is also a critical target of international deep-water oil and gas exploration. The recent exploration of oil and gas has revealed that the distribution of gravity flow channels is complex in thrust fault zone of continental slope. While the influences of thrust faults on gravity flow channels have been studied all over the world, few researches have been carried out in terms of microtopography styles formed under the comprehensive action of thrust-transfer structures and their control on gravity flow channels. Taking a deep-water study area in West Africa continental slope as an example, this paper applies core, logging and seismic data comprehensively to clarify the types and genesis of thrust-transfer microtopography and the control of microtopography on distribution of gravity flow channels.

High-resolution 3D seismic data was employed to investigate the thrust faults and distribution of gravity flow channel. Thrust fault traces were tracked in seismic profiles based on reflection terminations and offsets. Two stratigraphic units (S1, S2) were interpreted according to the characteristics of seismic facies and the geometric relationship between strata and stratigraphic surface. Both S1 and S2 were interpreted to represent the growth strata that was active synchronously with the thrust faults. Application of RMS amplitude attribute within time windows was done for clearer images to envisage the location and form of gravity flow channels. Paleogeomorphology maps were made from stratigraphic thickness and indicated the distribution of gravity flow channels in the study area. Results and conclusions were as follows: In Miocene, topography of the study area was dominated by arcuate thrust faults and fault-related folds oriented perpendicular to the continental slope, and the thrust faults were connected by transfer structures. Thrust faults, which were formed as a result of the gravity sliding, were developed toward the deep water. Two different thrust fault systems in study area were developed along two detachment surfaces at different depths in the overpressure mudstone, resulting in different thrust displacements, which was the main reason for the difference in structural style and activity intensity between the two thrust fault systems. Displacements of two thrust fault systems and difference of the displacement along the strike of a single thrust fault led to a variety of transfer structures. Controlled by thrust-transfer structures, five different microtopography styles were summarized from the perspective of genesis: triangular faulted anticline, tear fault-diapir anticline, reverse fault connection valley, tear fault slope and strike trough. Under the influence of thrust-transfer microtopography, contemporaneous gravity flow channels showed three plane distribution styles: diversion, crossing and confinement. Triangular faulted anticline and tear-diapir anticline deflected gravity flow channels that were developed along continental slope. Reverse fault connection valley and the edge of tear fault slope enabled gravity flow channels to cross the faults. Strike trough confined gravity flow channels. This study could provide a new analytical approach for seismic interpretation of gravity flow channel reservoir.

Key words: gravity flow channel; thrust fault; transfer structure; microtopography style; continental slope; West Africa

LIN Peng, MSc, Engineer, mainly engaged in sedimentology and sequence stratigraphy. Add: Research Institute of Exploration and Development of Liaohe Oilfield Company, PetroChina, No. 95 Petroleum Street, Xinglongtai District, Panjin, Liaoning 124010, China