

深水重力流与底流交互作用研究进展

吴嘉鹏^{1,2)}, 王英民^{1,2)}, 王海荣³⁾, 李华^{1,2)}, 彭学超⁴⁾, 邱燕⁴⁾, 李冬^{5,6,7)}

1) 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京, 102249;

2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249; 3) 中国地质大学(北京)能源学院, 北京, 100083;

4) 国土资源部广州海洋地质调查局, 广州, 510760;

5) 中国石油大学(北京)博士后科研流动站, 北京, 102249;

6) 中海石油研究总院博士后流动站, 北京, 100027; 7) 中海石油研究总院, 北京, 100027

内容提要:重力流和底流是深水环境下的两大基本流动体制,对二者交互作用的研究是当前沉积学研究的前缘和薄弱环节。底流及底流改造沉积物在岩芯上具有上部侵蚀面、双泥层、牵引流成因的各种层理等识别标志;底流成因的漂积体在剖面上呈现透镜状单元、迁移性特征及波状发射等地震反射特征。本文通过综述重力流与底流交互作用的研究成果,认为依据某段地质时期内深水盆地中主导沉积机制的不同,将重力流与底流的交互作用分为以下4种表现形式:①底流对前期重力流沉积进行改造;②重力流对前期底流沉积进行改造;③重力流与底流交互主导同一地区的沉积以及④底流与重力流同时作用于沉积物。相对海平面变化、气候(冰期—间冰期)变化、构造活动、地形地貌等因素,主要通过影响重力流与底流机制的相对强度大小,控制深水重力流与底流交互作用的进行。中国南海具有重力流与底流交互沉积的优越地质条件,发育有单向迁移水道、沉积物波等特色沉积记录。加强现今海流观测,对于南海底流循环格架的建立意义重大。

关键词:深水沉积;重力流;底流;等深流;交互作用;沉积物波;南海

深水环境中的沉积动力学机制及沉积体系与陆相和浅水环境有较大的不同(王英民等,2007),其中沉积物重力作用机制(滑坡、滑塌、碎屑流、颗粒流和浊流)和底流是主导性的沉积机制(Shanmugam,2003)。“底流”的涵义比较宽泛,包含温盐差异底流、风力驱动环流、海湾流、内波内潮汐等多种成因的流体。其中,在水体深部或底部由温盐差异诱发的地球自转底流,流线与海底深度等值线近似平行(即顺斜坡走向),通常称之为“等深流”(Shanmugam,2000),等深流是底流的一种重要类型。数十年来,在海洋石油勘探开发提出的地质问题的推动下,关于深水重力流沉积的研究取得了长足进步,但是关于深水底流沉积及其与重力流交互作用沉积的研究还相对薄弱。本文通过综述重力流、底流交互作用的理论研究现状,旨在加深人们对深水复杂沉积作用过程及其沉积响应的认识。

由于等深流几乎遍布全球深海环境,因此深海

悬浮沉积、重力流沉积物再搬运及再沉积作用经常发生(Faugères and Stow,1993),沿陆坡倾向方向的重力作用与沿陆坡走向方向的等深流作用之间,两种或者多种不同方向的深水作用机制常相互影响,发生交互沉积作用,形成具有复杂成因的底形和构造(王英民等,2007)。研究早期,人们对重力流与底流沉积作用分别进行研究,但深水沉积中两种流动体制的交互作用不容忽视。Kuvaas在1992年意识到二者之间存在重要的内在联系,认为浊流和海流两种不同沉积作用在海平面等背景因素的控制下,形成了具有特色构型的沉积体系。此后若干年内,这方面研究始终不多,原因在于人们首先需要加深对海洋环境的重力流和等深流沉积本身的认识(Massé et al.,1998)。近十年来,关于交互作用的研究逐渐增多,并出现了一些出色成果,交互作用正逐渐成为国际沉积学界的研究热点。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号40972077)、国家基础研究发展规划项目(编号2009CB219407)的成果。

收稿日期:2012-03-21;改回日期:2012-05-14;责任编辑:黄敏。

作者简介:吴嘉鹏,男,1987年生。博士研究生。主要从事深水沉积及油气勘探研究。通讯地址:102249,中国石油大学地质楼904室。

Email:wjp_better@sina.com。通讯作者:王英民。电话:010-89733506。Email:wym3939@vip.sina.com。

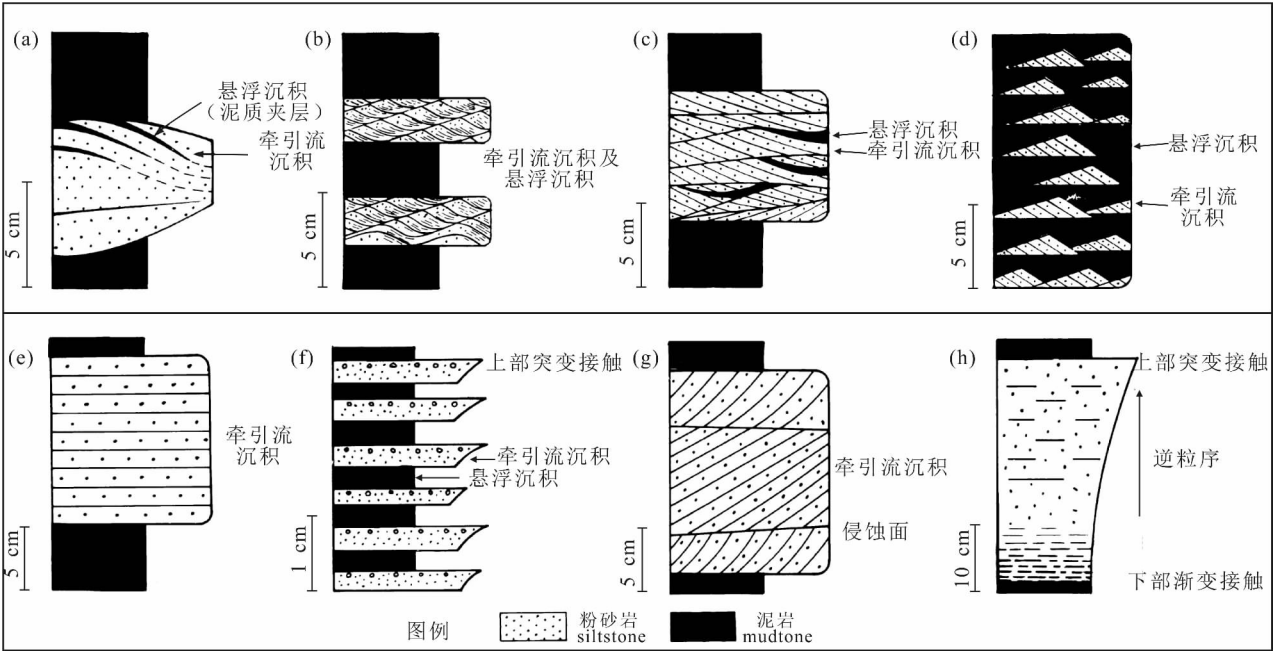


图 1 深水底流砂体的牵引流成因的沉积构造 (Shanmugam et al. , 1993b)

Fig. 1 A summary of traction features interpreted as indicative of deep-water bottom-current-reworked deposits (Shanmugam et al. , 1993b)

- (a) —泥质夹层; (b) —爬升交错层理; (c) —压扁层理; (d) —透镜状层理; (e) —平行层理;
(f) —韵律层理; (g) —交错层理; (h) —上部突变接触
(a) —Mud offshoots; (b) —climbing-ripple; (c) —flaser bedding; (d) —lenticular bedding;
(e) —horizontal bedding; (f) —rhythmic bedding; (g) —cross-bedding; (h) —sharp upper contact

1 底流及底流改造沉积物的识别

“底流沉积”指由底流活动所改造沉积的、或受其重大影响的沉积物。由于重力流沉积与底流沉积在地震剖面上的地震反射特征差别不大,它们可能具有相似的外部形态及地震相特征,因此一直以来等深流沉积在大洋边缘演化及洋盆充填中的地位被严重低估 (Faugères et al. , 1999)。随着对于复杂深水沉积过程的深入认识,人们逐渐意识到底流作用是深水环境中的重要作用机制。因此,确定底流沉积体的识别标志进而能准确地识别底流及底流改造沉积物,是十分必要的。

1.1 岩芯识别标志

多位学者就底流沉积的岩芯识别标志提出了自己的看法 (Shanmugam et al. , 1993a; Stow et al. , 2002), Shanmugam 等 (1993b) 总结了许多学者的观点,并认为“底流改造的砂体可以用主要的原生沉积构造来识别”。牵引构造是唯一可靠的底流再改造砂体的识别标志 (Shanmugam, 2000)。Shanmugam 等 (1993b) 认为,对于底流改造砂体,任

何标准的垂向相模式都有局限性,但是岩芯和露头的如下特征对于识别底流改造的砂体具有一定指导意义 (图 1):① 主要岩性为细砂和粉砂,分选好、杂基少,质地纯净 (图 2a、d);② 深水泥中厚度通常小于 5cm 的薄层至纹层状的砂以及韵律性砂泥互层或者是大量的砂层 (每米岩芯 50 层或更多) (图 2a、b),都可能是牵引流改造的产物;③ 向上突变 (无侵蚀) 接触,底部突变到渐变接触或存在内部侵蚀冲刷面 (图 2a—c);④ 存在不同规模的反粒序层理、交错层理、透镜状层理、脉状层理、“S”形交错层理、双泥层等典型牵引流沉积构造 (图 2a—d);⑤ 在独立单元中出现的具牵引构造的砂层可能为牵引流改造后的砂体。

但是,需要注意的是,上述岩芯标志没有一个是等深流沉积物所特有的。因此需要综合各项沉积特征,并结合对区域沉积环境的认识,增强对底流改造相的识别与认识。

1.2 地震识别标志

由于受地震资料分辨率的限制,可在剖面上识别出的底流沉积物多为规模巨大的等深流漂积体。

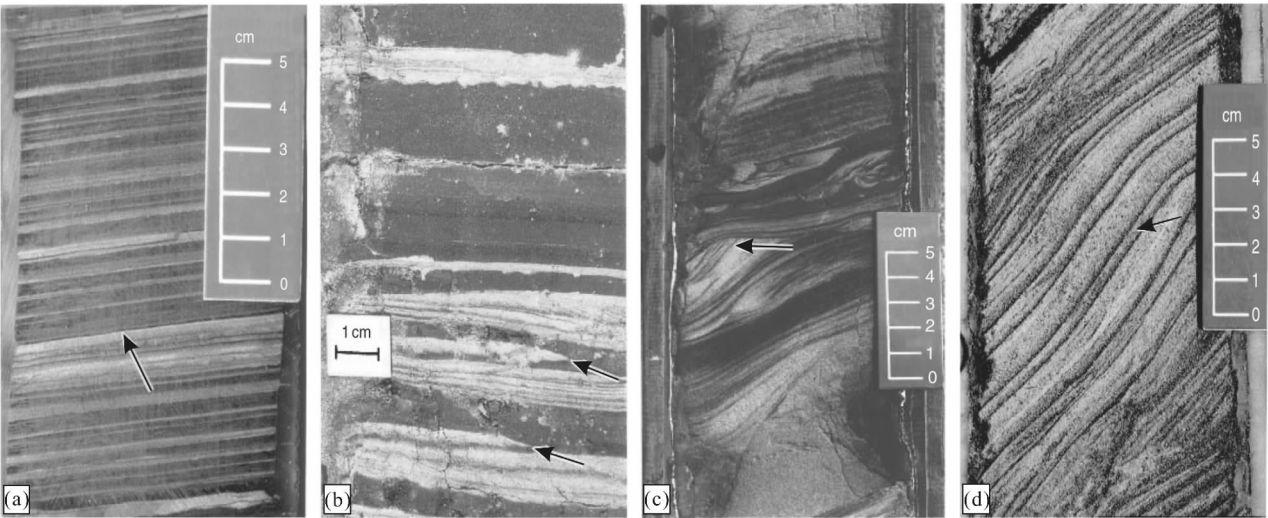


图 2 典型底流沉积物的岩芯照片

Fig. 2 Core photographs of typical bottom current sediments
(a)—北海古新世岩芯中的砂泥互层、逆粒序及上部突变接触(箭头所示)(Mulder et al., 2008); (b)—墨西哥湾中新统岩芯中的砂泥互层、砂层上部突变面现象以及平行层理、饥饿层理(箭头所示)及低角度交错层理等沉积构造(Shanmugam et al., 1993a); (c)—墨西哥湾中新统岩芯中的 S 形交错层理、上部侵蚀面(箭头所示)等(Shanmugam et al., 1993a); (d)—Edop field 上新统砂岩中的双泥层(箭头所示)(Shanmugam, 2003)
(a)—Core photograph showing rhythmic occurrence of sand and mud layers, inverse grading and sharp upper contacts of sand layers (arrow), interpreted as bottom-current-reworked sands, Paleocene, North Sea (Mulder et al., 2008); (b)—core photograph showing rhythmic occurrence of sand and mud layers, sharp upper contacts, traction structures include horizontal laminae, starved ripples (arrows), low-angle crosslaminae, Middle Pleistocene, Gulf of Mexico, after Shanmugam et al. (1993a); (c)—core photograph showing sigmoidal configuration of ripples and truncated tops, Middle Pleistocene, Gulf of Mexico, after Shanmugam et al. (1993a); (d)—core photograph showing double mud layers (arrow) in Pliocene sand, Edop Field, after Shanmugam (2003)

“漂积体”(drift)是一个概括性术语,是指不具备明确界定的或独特外观的、但其沉积过程受海流控制的沉积聚集体(Stow et al., 2002)。“等深流漂积体”(contourite drift)是一个特定术语,指主要由等深流形成的沉积(Stow et al., 2002)。Faugères 等(1999)认为可以利用漂积体的整体几何形态、沉积单元的叠加样式以及特殊的地震相来进行识别,并总结等深流漂积体具有如下地震反射特征(图 3)。

(1)等深流漂积体内部多存在明显的分界面,可在整个聚集体内进行追踪,且以连续的强反射为标志(图 3a、b)。这反映了底流强度增加的侵蚀幕,或者是由于流体体制发生变化而产生明显的组分或沉积物的粒径变化。

(2)等深流漂积体内的沉积(地震)单元多呈上凸的透镜状(图 3b);并且沉积单元的叠加揭示了沉积体总体上的迁移特征(图 3a),对不同类型的漂积体,其迁移指向不同。

(3)等深流沉积地震相多样。多为低至中等振幅,连续性变化较大(图 3a、b),在某些时候具有波状反射和规则的迁移型沉积物波(图 3c)。

2 交互作用的表现形式

狭义的底流与重力流之间的交互作用是指在同一时间同一地点两种流体同时存在并且二者能量相近时所发生的交互沉积作用(Mulder et al., 2008)。本文所指的重力流和底流之间的交互作用涵义比较宽泛,可以是不同流体机制交替主导某段地质历史时期的沉积作用,也可以是在同一地质时期内,两种沉积作用同时作用形成沉积物。另外,被重力流搬运至深海的沉积物,会在底流作用下重新搬运、沉积;等深流沉积物也会在一定的诱发机制下发生滑动、滑塌作用,或者是被搬运中的重力流侵蚀、改造等。因此,按照某段地质时期内深水中主导沉积机制的不同,可将重力流与底流交互沉积作用分为以下 4 种表现形式。

2.1 底流对前期重力流沉积进行改造

当在重力流间歇期或者底流活动十分强烈时,深水中的底流沉积机制占主导。重力流沉积物在较强的底流作用改造下,沉积物重新遭受簸选、搬运、再沉积,形成席状砂、沉积物波或顺陆坡走向的沉积

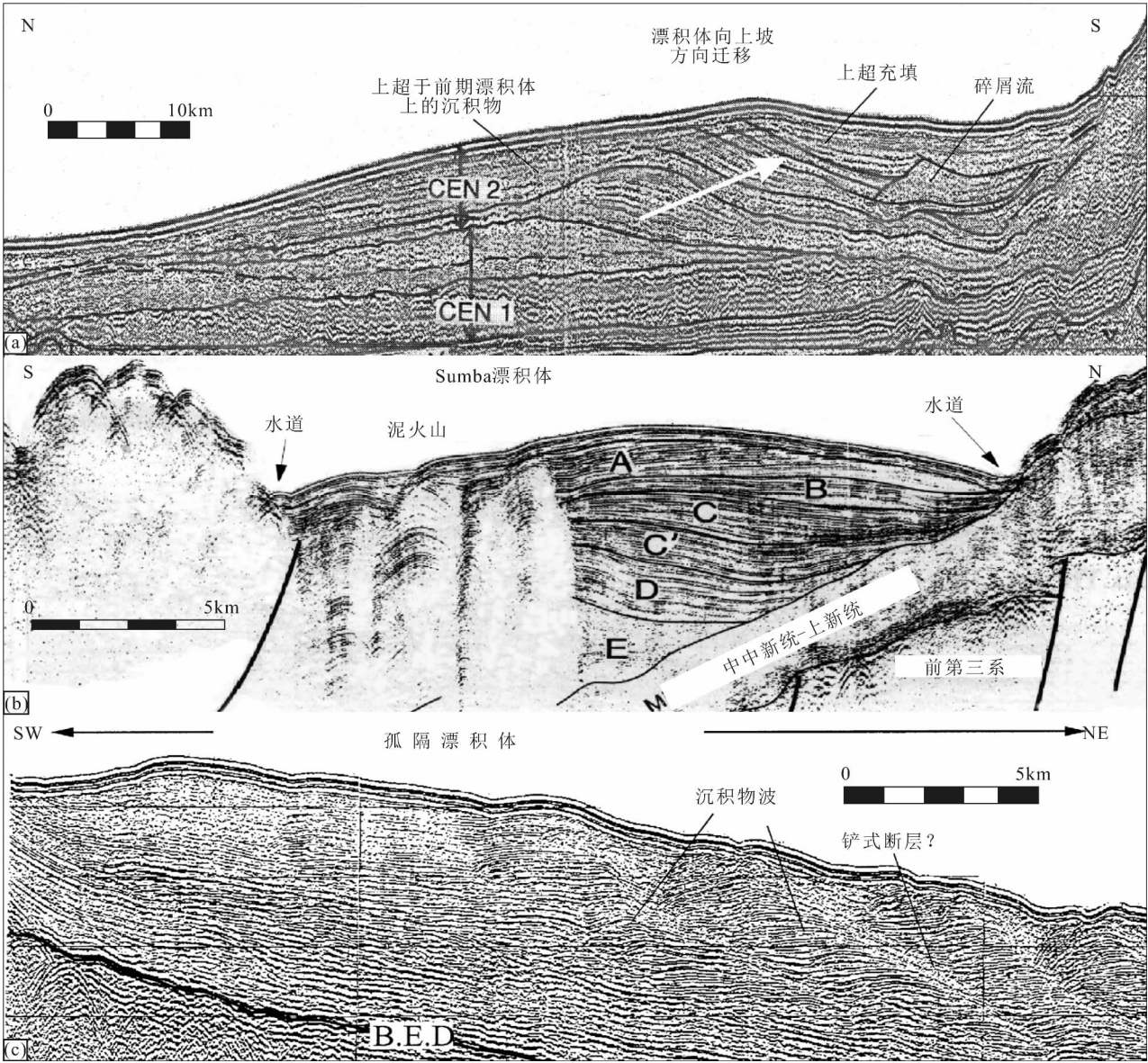


图 3 等深流漂积体典型剖面

Fig. 3 Typical seismic profiles of contourite drifts

(a)—新西兰东部边缘 Chatham 漂积体,整体向上坡方向迁移,内部具有明显分界面(Wood and Davy, 1994); (b)—印尼南部边缘 Sumba 漂积体,由多个上凸透镜状地震单元组成(Reed et al., 1987); (c)—印度洋中的 Davie 孤隔漂积体,具有明显的波状外形(转引自 Faugères et al., 1999)

(a)—Northeastern Chatham drift on the eastern New Zealand margin, after Wood and Davy (1994), notice the upslope migrating drift and the separated units; (b)—the Sumba drift on the southern Indonesian margin, after Reed et al. (1987), notice the presence of the lenticular geometry of the deposit units; (c)—the Davie drift, Indian Ocean, after Faugères et al. (1999), the upper part of the drift is mainly built by sediment waves due to contour current activity

体。同一沉积体系,在不同时期,由于重力流与底流相对强度的变化,在同一位置处也会形成不同的沉积产物。在格陵兰岛东南部,早上新世至中上新世沉积物供应充足,重力流作用活跃,仅有远端在等深流作用下形成近于平行海岸的漂积体;从中上新世至今,重力流减弱、等深流作用加强,在近端及远端重力流沉积物均被改造为延陆坡走向延伸的等深流

漂积体(Rasmussen et al., 2003)。即便是在水道等重力流活跃的区域,在活跃的底流作用下,也会将沉积物搬运改造。李云等(2012)在白云凹陷珠江组典型的深水扇沉积(李云等,2011)取心中,观察到了双泥岩纹层、双向交错层理、波状层理及脉状层理等典型的牵引流沉积,据此可推测存在活跃的深水牵引流活动改造早期重力流沉积体(李云等,

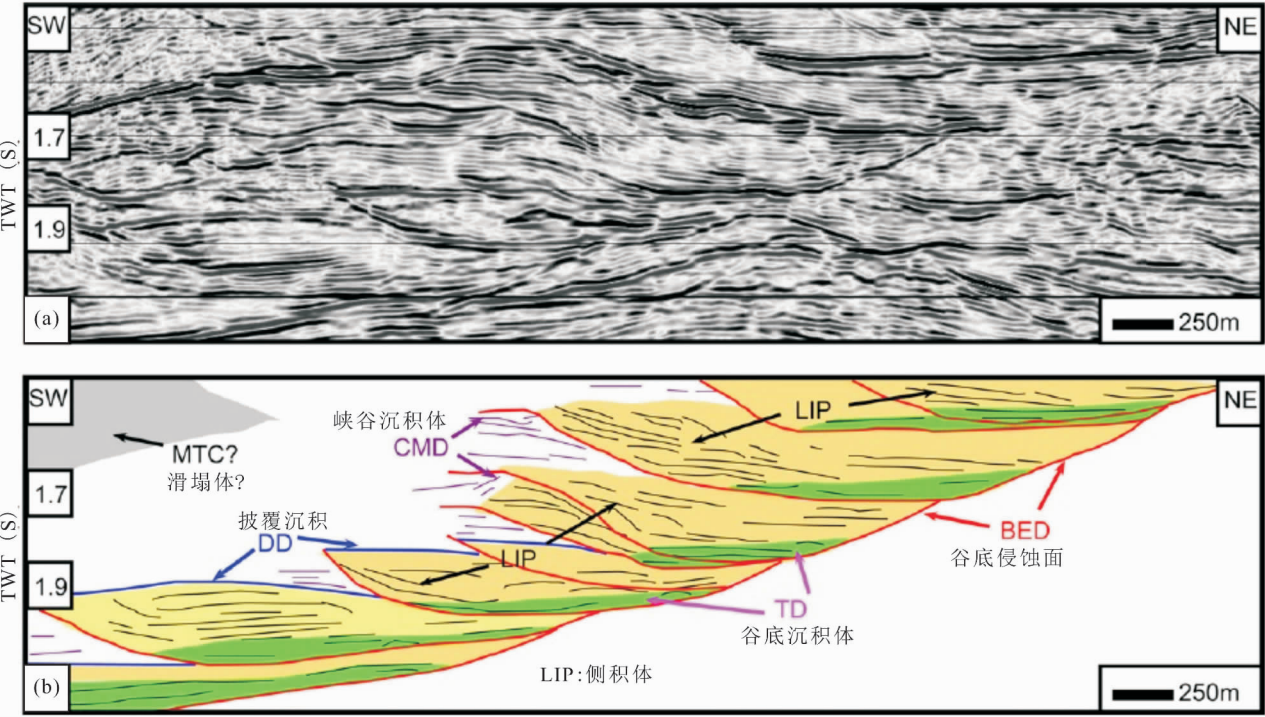


图4 南海北部白云凹陷单向迁移峡谷地震相单元

Fig. 4 Seismic architecture elements of migrating canyons, Baiyun Sag, northern South Sea
(a) —未解释剖面;(b) —解释后剖面上的地震相单元,其中 LIP 为底流成因的侧积体(Zhu Mangzheng et al. , 2010)
(a) —Uninterpreted seismic line; (b) —interpreted seismic architectural elements, and LIP is the bottom-current-induced lateral inclined packages(Zhu Mangzheng et al. , 2010)

2012)。另外,海底的一些粗粒滞留沉积物也是底流改造的产物。利用海底摄像技术,发现 Barra 扇所处的外陆架及上陆坡区域的海底被许多粗粒的卵石、砾石等覆盖,这是由于细粒成分被底流改造并搬运,只滞留下粗粒沉积物;另外,研究区内发育的沉积物波,其脊线走向垂直于等深线方向,进一步证明了底流改造作用的存在(Armishaw et al. , 1998)。

2.2 重力流对前期底流沉积进行改造

在一定触发机制下,事件性的重力流沉积作用,往往会在短时间内搬运、再沉积陆架及陆坡上的大规模沉积物,因此,当发生重力流活动时,由于其与底流沉积作用较大的能量悬殊,此时以重力流沉积机制为主导。之前沉积于深海环境中的底流及悬浮沉积难以避免地遭受重力滑动、滑塌的侵蚀作用,侵蚀而来的碎屑呈重力流方式发生搬运及再沉积。重力流在再搬运沉积物时,由于海水的掺混,会发生流体性质的转换,之前底流沉积物的原生沉积构造、外部形态等会遭受很大程度的破坏。重力流改造底流沉积物的情况虽然经常发生,但是在底流沉积物中往往以侵蚀特征保存下来,因此在地层记录中难以

再辨别(Mulder et al. , 2008)。

2.3 重力流与底流交互主导同一地区的沉积

在地质历史时期内,由于物源供应以及区域构造运动等原因,同一沉积区的主导沉积体制也会发生转变。如果重力流与底流交互主导同一地区不同时期的沉积作用,可以形成重力流—底流互层沉积。Kuvaas 等(2005)通过对南极洲东部 Cosmonaut 海地区地震资料的分析得知,该地区沉积物分为 3 套,分别为中部的沉积物透镜体、上陆隆及下陆隆沉积体,其中,中部透镜体是等深流漂积体,而陆隆沉积体是沉积物大量供应时形成的,并被重力流水道分割,二者的垂向叠置,反映了不同时期两种沉积作用的相对强弱变化。Armishaw 等(2000)通过对 Barra 扇岩芯的研究,认为全新统均为等深流沉积,而其下伏地层则为冰期时期的重力流沉积地层。由于海平面变化影响了碳酸盐岩的生产力,Anselmetti 等(2000)发现大巴哈马滩至毗邻的佛罗里达海峡地区的两种沉积体系在坡麓部位呈指状交互沉积,分别是位于台地下坡方向的西倾重力流成因地层及盆地内的东倾或北倾的漂积体沉积体系。实际在整个交替沉积

作用过程中,底流作用多是持续存在的,但决定某一时期沉积产物的因素是重力流作用的强弱。因为重力流活动能量相对较强,一方面容易发生沉积记录,另一方面也经常将前期的底流沉积搬运改造,使其难以辨别。

2.4 底流与重力流共同作用于沉积物

在同一地点、同一地质时期内,当底流与重力流二者能量差异不大时,二者均可发生沉积作用,从而在交互作用下形成特殊的沉积构造、沉积现象等极具特色的沉积记录。李华等(2010)和李向东等(2010)认为宁夏香山群徐家圈组深水沉积中的准平行层理、不对称小型丘状交错层理和小型波痕等沉积构造为复合流成因,并根据徐家圈组存在内波、内潮汐沉积的事实,推测为深水短周期内波与浊流形成的复合流沉积。峡谷等大规模的沉积体中,也会发生两种沉积机制的交互作用。Zhu Mangzheng等(2010)分析了南海北部白云凹陷单向迁移峡谷充填过程,认为峡谷中充填的谷底沉积(TD)、MTD等为重力成因,而峡谷中的侧向沉积体(LIP)则是由于同时期向东北方向流动的底流作用形成的,在重力流与底流的共同作用下峡谷发生东北向的单向迁移(图4)。类似的单向迁移峡谷沉积现象,在琼东南盆地也存在(He Yunlong et al., 2012)。另外在巴西南部陆缘峡谷中,Viana等(1999)认为其主要有两类充填物:一类是由流向垂直于峡谷延伸方向的底流作用形成的向峡谷底部前积的斜积层;另一类则是披覆峡谷底部的强反射加积体,他们将其解释为顺坡流动的重力流沉积。在重力流与底流的共同作用下,峡谷发生沉积充填作用。

3 交互作用的控制因素

重力流与底流的交互作用是一个此进彼退的过程,二者随时空变化而发生的能量相对变化决定了交互作用的产物(图5)。一般来说,当两者的能量差异过大时,能量相对较小的沉积作用难以有沉积记录或是在沉积记录中难以再辨别,之所以沉积岩石中所记录并保存下的重力流沉积物居多,是由于事件性的重力流沉积的流速很大,能量往往远远超过同期的底流沉积作用(Mulder et al., 2008)。因此,对于重力流沉积和底流沉积有影响的因素,往往都会影响到其交互作用的进行与沉积记录的保存。

3.1 相对海平面变化

等深流沉积主要发育于海平面上升时期,即浊流活动为中等至较弱的时候(Faugères et al.,

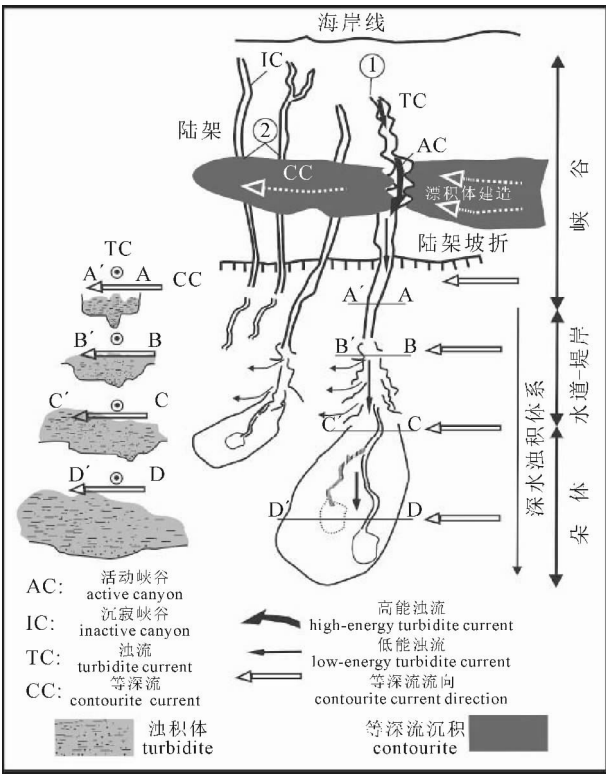


图5 顺坡浊流与沿坡等深流之间交互作用的模式图(Mulder et al., 2008)

Fig. 5 Schematic examples of the interaction between down-slope turbidity currents and along-slope currents (Mulder et al., 2008)

1993),此时物源区逐渐远离沉积盆地,粗碎屑物质注入减少,重力流活动减弱,等深流沉积得以发育(许文彬等,2004)。此外,相对海平面的变化,也会对碳酸盐岩的生产力等产生影响,这也直接影响深水中重力流活动的强度与频率,从而控制交互作用的进行。Anselmetti等(2000)研究发现由于海平面的波动,反复的将大巴哈马台地的顶部暴露,影响了碳酸盐岩生产速率,进而控制了整个区域的沉积作用的岩性交替。

3.2 气候(冰期—间冰期)变化

气候的冷暖变化,会影响到物源区碎屑物质的风化作用以及向深水盆地的搬运过程,进而影响到深水中的交互作用。在Cadiz湾西部,冰期时,重力流作用活跃,从而侵蚀下切形成水道、峡谷等,而在间冰期时,地中海外溢水团(MOW)占主导作用,峡谷遭受底流沉积物充填(Mulder et al., 2006)。更新世Nordic海东南边缘的沉积演化与气候的变化密切相关(Sejrup et al., 2004)。冰期时由于沉积物的大量供应,易于发生滑塌作用,所形成的碎屑流对于北海扇(North Sea Fan)具有重要影响;相反,在间

冰期时,挪威大西洋海流(NwAC)的作用凸显,由于底流的搬运作用,在上陆坡的冰期滑塌区域,发生快速沉积作用(Sejrup et al., 2004)。

3.3 构造活动

区域性的构造活动甚至是全球性的板块运动等,会使得底流通道打开或者关闭,从而直接影响底流作用的强弱变化。由于板块构造运动,自中新世开始,印度尼西亚与巴拿马海道变浅,阻断了赤道流与印度洋的联系,黑潮进入南海的作用加强,从而驱动南海中部环流加强,与白云凹陷峡谷中南北向流动的重力流发生交互作用,使得峡谷发生东北向的单向迁移(Zhu Mangzheng et al., 2010)。某一地区的构造活动,也会改变其物源供应状况以及地形地貌特征,这对于重力流、底流的活动都有极其显著的影响。响应早一中始新世时 Kyrenia Range 的隆升,塞浦路斯南部第三系 Lefkara 组下部主要以重力流沉积作用为主;而发生于早渐新世塞浦路斯南部地区的沉降及 Troodos 地带的隆升,使得地形坡度变陡,底流流速增加,底流沉积作用及其与之前重力流沉积物的交互作用得以凸显(Kähler and Stow, 1998)。

3.4 地形地貌

最常见的等深流沉积物主要是粘土及细粉砂,但是在深水海槛或者地貌辐聚区等特殊的地貌环境中,则经常会发现相对罕见的砂质等深流,这是由于地貌的影响,底流作用加强,可对原有沉积物进行强烈的簸选或改造(刘健,1993)。Scheuer 等(2006)指出 Bellingshausen 海西部区域受冰期重力流以及西向底流的共同作用,研究区南部为等深流漂积体,同时在最北端存在一个大规模的水道—天然堤复合体,水道西侧的天然堤迁移方向与漂积体的迁移方向相反,这是由于越往北部,底流作用越弱。重力流主要受科氏力作用而向西侧迁移,之所以会产生这种不同地区的沉积差异,主要是由于地形隆起的 Peter I 岛阻挡了底流的流动(Scheuer et al., 2006)。葡萄牙南部 Cadiz 湾内南北走向的 Portimão 峡谷两侧沉积了两种特点迥异的等深流漂积体, Marchès 等(2007)发现在峡谷东岸为一个厚且大的孤隔漂积体,沉积速率很高并且由于地中海外溢水团(MOW)流速较快,侵蚀陆坡形成了一个壕堑;峡谷的西侧仅有一些平坦且很薄的席状漂积体发育,沉积速率很慢,也不存在壕堑。通过在峡谷中进行温盐测量,发现峡谷部分捕获了西向流动的深水底流 MOW,使得峡谷西侧遭受的底流作用明显减弱,

进而造成了峡谷两侧沉积特征的差异,这说明先期重力流下切形成的峡谷地貌对后来等深流的沉积作用产生了重要影响(Marchès et al., 2007)。

控制重力流与底流交互作用的影响因素多为相互影响、密切互动的关系,最终沉积物的沉积样式是各个因素的共同效应。Barra 扇在海平面上升时期,仍沉积了大量的重力流物质,这是由于强的物源输入作用压制了海平面变化对其的影响(Armishaw et al., 2000)。

4 南海北部的重力流与底流交互作用

南海北部深水区存在着重力流和底流两种流动体制(于兴河等,2004;Lüdmann et al., 2005;邵磊等,2007),珠江、红河等大河注入及台湾造山带的存在,保证了深水区具有丰沛的陆源碎屑物质的供给,拥有活跃的重力流机制。同时,南海通过吕宋海峡与西菲律宾海进行着活跃的水团交换,具有活跃的底流作用。因此,南海具有发育重力流与底流交互作用的优越地质条件。

4.1 单向迁移水道

前已叙及,Zhu Mangzheng 等(2010)发现南海北部珠江口盆地白云凹陷深水陆坡上的多条峡谷均朝东北方向迁移,并且在横向剖面上峡谷的形态具有不对称性,西侧缓、东侧陡。利用地震相分析,将峡谷充填物分为谷底沉积(TD)、深海披覆沉积(DD)、侧向沉积体(LIP)、滑塌体沉积(MTD)等多种类型(图4),其中侧向沉积体(LIP)是沿陆坡走向流动的底流所携带的陆坡及外陆架泥质沉积物越过峡谷边缘发生沉积而形成(Zhu Mangzheng et al., 2010)。这些单一方向迁移的峡谷中底流沉积物的存在,表明从中中新世至今一直存在东北流向的底流作用,这可能进一步表明南海中的中部温盐循环从中新世至今一直都是顺时针的,这些迁移型峡谷的产生可能就是在中中新世时,南海中较强动力的底流作用开始产生的标志,可能表明从中中新世开始,印度尼西亚以及巴拿马海洋通道变的足够浅从而使得黑潮作用加强(Zhu Mangzheng et al., 2010)。

利用高分辨率地震以及钻井资料,He Yunlong 等(2012)分析南海北部琼东南盆地7条南北向延伸的单向迁移海底峡谷的充填物,认为其主要由侵蚀界面(ES)、谷底沉积体(BL)、滑塌体(MTDs)以及侧积体(LAPs)等4种结构单元组成,其中,侧积体是由于外陆架处东西向流动的南海暖流携带的沉

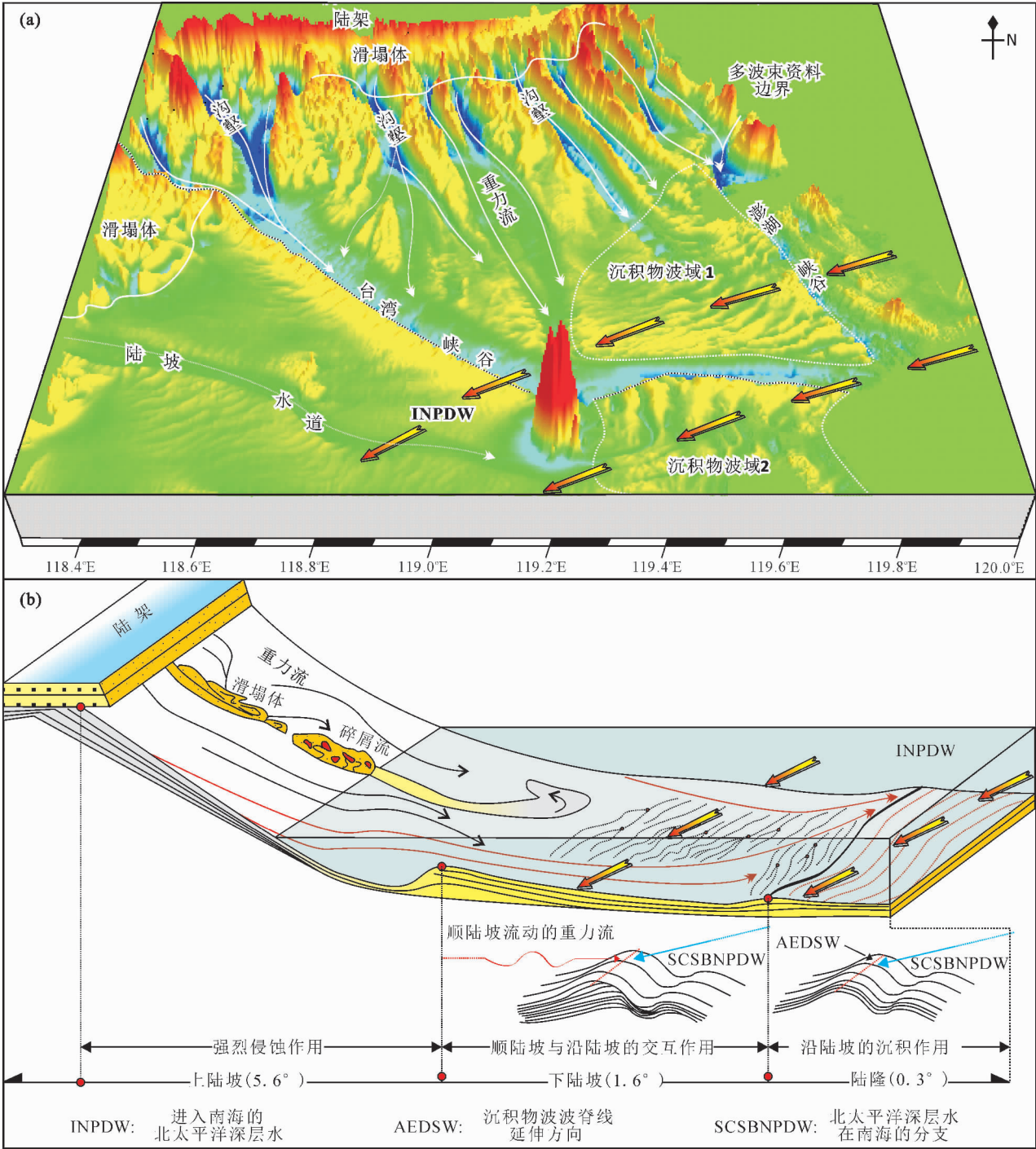


图 6 南海东北部台湾浅滩陆坡附近(a)地形及主要沉积单元分布图和(b)不同区域沉积过程模式图(Gong Chenglin et al. , 2012)

Fig. 6 Three-dimensional bathymetric image (a) showing the morphology and major depositional elements and schematic diagram (b) summarizing the major depositional processes in different regions of the Taiwan shoal slope, northeastern South China Sea(Gong Chenglin et al. , 2012)

积物在峡谷中卸载沉积形成的。与白云峡谷类似,琼东南盆地海底峡谷的沉积充填及东北向的单向迁移,是在沿峡谷的重力流与侧向流动的底流的交互作用下形成的(He Yunlong et al. , 2012)。

4.2 台湾浅滩陆坡沉积物波

沉积物波是大洋深水环境常见地形,具有多种成因机制,并且蕴含着古海流、古气候等重要信息。Damuth(1979)利用 17 条 3.5 kHz 的回声深度剖面,

在南海东北部勾勒出了面积约为 20000 ~ 25000 km² 的沉积物波波域,并认为其为浊流成因。王海荣等(2007)在南海北部发现浊流、等深流(底流)、沉积变形等 3 种单一成因的沉积物波以及复合成因的沉积物波。在南海东北部识别出的浊流沉积物波与 Damuth 的浊流沉积物波波域有约 2890 km² 的重叠,二者共同构成了面积约为 35000 km² 的宽广波域。王海荣等(2008)、丁巍伟等(2010)进一步分析了该沉积物波的形态特征、粒度特征、物源以及形成机制,认为该波域的沉积物波为浊流成因并受控于台湾造山运动,沉积物波的发育与台湾造山运动构成了完美的构造活动和沉积响应关系。

同样利用该地区的多波束地形资料、高分辨率地震资料、柱状样以及 ¹⁴C 测年等资料, Gong Chenglin 等(2012)对南海东北部台湾浅滩陆坡附近的沉积物波成因做出了不同的解释。共识别出波域 1 与 2 两个沉积物波波域,其中波域 1 位于下陆坡,其沉积物波波脊线延伸方向与峡谷轴线及沉积重力流流动方向垂直,并且在地震剖面上呈明显的上坡方向的迁移;波域 2 位于陆隆,波形对称,主要以加积作用为主(Gong Chenglin et al., 2012)(图 6a)。由于上陆坡的强烈的侵蚀作用,当大量的沉积物被搬运至下陆坡时,浊流与进入南海的北太平洋深层水(NPDW)发生交互作用,在波域 1 内形成了向上坡方向迁移的沉积物波;在向水深更深的陆隆位置搬运时,浊流不断被海水稀释,此时在活跃的底流(NPDW)作用下,以底流沉积为主,因此在波域 2 内沉积了以加积作用为主的沉积物波(Gong Chenglin et al., 2012)(图 6b)。

南海虽然具有发育重力流、底流交互作用的优越地质条件,也拥有丰富多彩的地质现象,但是对于其成因的解释,多依靠于对地震资料的分析、推测,因此对于现今海底的底流观测等工作亟待开展。虽然对于现今南海的底流循环,前人也已经做了很多的工作(于兴河等,2004;Lüdmann et al., 2005;邵磊等,2007;Liu Zhifei et al., 2010),但是至今仍没有一个完整的南海底流循环格架。现今海流的观测对南海底流循环格架的建立意义重大。另外,目前对于南海交互作用的研究多集中于浅层,虽然李云等(2012)在古代沉积体中识别出了深水牵引流沉积,但是距离重建南海古大洋洋流循环的目标还有相当的一段路要走。目前,以汪品先院士为带头人的“南海深部计划”正在如火如荼地开展着;东海海底联网观测小衢山试验站也已经建成并于 2009 年 4

月开始正常运行,这是我国海底观测网建设迈出的第一步(许惠平等,2011),也为未来大洋深水海底观测积累了经验。在未来的几年内,南海的底流循环及其与重力流的交互作用有望得到更深刻的认识。

5 结论

底流沉积作为深水两大主要沉积体制之一,具有长期性、广泛性的特点,既可形成壮阔的底流沉积物,也可对重力流沉积物进行改造,二者经常发生交互作用。通过岩芯中的上部削蚀面、双泥层以及各种牵引流性质的层理构造等,可对底流改造的沉积物进行识别。在地震剖面上,大规模的底流成因漂积体往往内部存在明显界面,由具有迁移性质的透镜状地震单元组成,而且往往呈波状反射特征。不同地质时期内,深水盆地中主导沉积机制也不尽相同,据此可将重力流与底流的交互作用分为 4 种:①底流对前期重力流沉积进行改造;②重力流对前期底流沉积进行改造;③重力流与底流交互主导同一地区的沉积以及④底流与重力流同时作用于沉积物。一切影响到重力流、底流机制相对强度大小的因素,都与二者的交互作用的进行紧密相关。因此相对海平面变化、气候(冰期—间冰期)变化、构造活动、地形地貌等因素控制或影响着交互作用的进行。单向迁移水道、沉积物波等特色沉积记录的存在,证明中国南海是研究重力流与底流交互作用的绝佳场所。加强现今海流观测,对于南海底流循环格架的建立意义重大。

由于重力流与底流沉积作用能量差异较大,在地层记录中主要凸显出能量较大的重力流沉积作用(图 5),因此在古代地质记录中发现的底流沉积物少之又少,关于重力流与底流交互作用的沉积物更是寥寥无几。因此我们需要一方面加强对重力流、底流及其交互作用本身特点及控制因素方面的认识;另一方面在以后的研究中,脑海中应存在交互作用意识,有时甚至需要重新审视之前的研究,以期最终能建立不同沉积作用可靠的识别标志,明确不同沉积过程及产物。正如 Shanmugam(2000)所说“我们目前对于深水沉积的认识还处于很幼稚阶段”,加强对交互作用的研究,对于加深人们对复杂的深水环境下的沉积作用的认识,具有积极的推动作用。

致谢:论文在资料及文献收集、整理过程中,得到了中国石油大学(北京)何永垚博士、唐武博士、

韩自亮硕士及中石化胜利油田测井公司李继亭工程师、华东分公司石油勘探开发研究院马军工程师等的大力支持和帮助;审稿专家提出了许多的宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献 / References

- 丁巍伟,李家彪,韩喜球,黎明碧, Suess E. 2010. 南海东北部海底沉积物波的形态、粒度特征及物源、成因分析. 海洋学报, 32(2): 96 ~ 105.
- 李华, 何幼斌, 李向东, 罗进雄, 郑昭昌. 2010. 宁夏香山群徐家圈组波痕特征及成因分析. 沉积与特提斯地质, 30(1): 18 ~ 24.
- 李向东, 何幼斌, 郑昭昌, 刘娜, 王丹, 罗进雄, 李华. 2010. 宁夏香山群徐家圈组发现深水复合流沉积构造. 地质学报, 84(2): 221 ~ 232.
- 李云, 郑荣才, 朱国金, 高博禹, 胡晓庆. 2011. 珠江口盆地荔湾3-1 气田珠江组深水扇沉积相分析. 沉积学报, 29(4): 665 ~ 676.
- 李云, 郑荣才, 朱国金, 胡晓庆. 2012. 珠江口盆地白云凹陷珠江组深水牵引流沉积特征及其地质意义. 海洋学报, 34(1): 127 ~ 135.
- 刘健. 1993. 等深流与等深流沉积. 地质科技情报, 12(3): 45 ~ 50.
- 邵磊, 李学杰, 耿建华, 庞雄, 雷永昌, 乔培军, 王嘹亮, 王宏斌. 2007. 南海北部深水底流沉积作用. 中国科学(D 辑), 37(6): 771 ~ 777.
- 王海荣, 王英民, 邱燕, 彭学超, 李文成. 2007. 南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波. 自然科学进展, 17(9): 1235 ~ 1243.
- 王海荣, 王英民, 邱燕, 彭学超, 黄奇志. 2008. 南海东北部台湾浅滩陆坡的浊流沉积物波的发育及其成因的构造控制. 沉积学报, 26(1): 39 ~ 45.
- 王英民, 王海荣, 邱燕, 彭学超, 张文明, 李文成. 2007. 深水沉积的动力学机制和响应. 沉积学报, 25(4): 495 ~ 504.
- 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 李建如, 刘丁, 覃如府, 罗胜卿, 范代读. 2011. 东海海底小衢山试验站. 科学通报, 56(22): 1839 ~ 1845.
- 许文彬, 徐茂泉, 孙美琴. 2004. 等深流沉积研究现状与展望. 台湾海峡, 23(3): 394 ~ 402.
- 于兴河, 张志杰, 苏新, 陈芳, 李杨. 2004. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布. 地学前缘, 11(1): 311 ~ 315.
- Anselmetti F S, Eberli G P, Ding Z D. 2000. From the Great Bahama Bank into the Straits of Florida: A margin architecture controlled by sea-level fluctuations and ocean currents. GSA Bulletin, 112(6): 829 ~ 844.
- Armishaw J E, Holmes R, Stow D A V. 1998. Hebrides slope apron and Barra fan, NW UK continental margin sedimentation. In: Stoker M S, Evans D, Cramp A. eds. Geological Processes on Continental Margins. London: Geological Society Special Publications, 129: 81 ~ 104.
- Armishaw J E, Holmes R W, Stow D A V. 2000. The Barra Fan: a bottom-current reworked, glacially-fed submarine fan system. Marine and Petroleum Geology, 17: 219 ~ 238.
- Damuth J E. 1979. Migrating sediment waves created by turbidity currents in the northern South China Basin. Geology, 7: 520 ~ 523.
- Faugères J C, Mwazerai M L, Stow D A V. 1993. Contourite drift types and their distribution in the North and South Atlantic Ocean Basins. Sedimentary Geology, 82: 189 ~ 205.
- Faugères J C, Stow D A V. 1993. Bottom-currents-controlled sedimentation: a synthesis of the contourite problem. Sedimentary Geology, 82: 287 ~ 297.
- Faugères J C, Stow D A V, Imbert P, Viana A. 1999. Seismic features diagnostic of contourite drifts. Marine Geology, 162: 1 ~ 38.
- Gong Chenglin, Wang Yingmin, Peng Xuechao, Li Weiguo, Qiu Yan, Xu Shang. 2012. Sediment waves on the South China Sea Slope off southwestern Taiwan: Implications for the intrusion of the Northern Pacific Deep Water into the South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 32: 95 ~ 109.
- He Yunlong, Xie Xinong, Benjamin C, Kneller, Wang Zhenfeng, Li Xushen. 2012. Architecture and controlling factors of canyon fills on the shelf margin in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. Marine and Petroleum Geology, doi: 10.1016/j. marpetgeo. 2012.03.002.
- Kähler G, Stow D A V. 1998. Turbidites and contourites of the Palaeogene Lefkara Formation, southern Cyprus. Sedimentary Geology, 115: 215 ~ 231.
- Kuvaas B, Leitchenkov G. 1992. Glaciomarine turbidite and current controlled deposits in Prydz Bay, Antarctica. Marine Geology, 108(3 ~ 4): 365 ~ 381.
- Kuvaas B, Kristoffersen Y, Guseva J, Leitchenkov G, Gandjukhin V, Løvås O, Sand M, Brekke H. 2005. Interplay of turbidite and contourite deposition along the Cosmonaut Sea/Enderby Land margin, East Antarctica. Marine Geology, 217: 143 ~ 159.
- Liu Zhifei, Colin C, Li Xiajing, Zhao Yulong, Tuo Shouting, Chen Zhong, Siringan F P, Liu J T, Huang Chiyue, You Chenfeng, Huang Kuofang. 2010. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport. Marine Geology, 277(1 ~ 4): 48 ~ 60.
- Lüdmann T, Wong H K, Berglar K. 2005. Upward flow of North Pacific Deep Water in the northern South China Sea as deduced from the occurrence of drift sediments. Geophysics Research Letters, 32: L05614.
- Marchès E, Mulder T, Cremer M, Bonnel C, Hanquiez V, Gonthier E, Lecroart P. 2007. Contourite drift construction influenced by capture of Mediterranean Outflow Water deep-sea current by the Portimão submarine canyon (Gulf of Cadiz, South Portugal). Marine Geology, 242: 247 ~ 260.
- Massé L, Faugères J C, Hrovatin V. 1998. The interplay between turbidity and contour processes on the Columbia Channel fan drift, Southern Brazil Basin. Sedimentary Geology, 115: 111 ~ 132.
- Mulder T, Lecroart P, Hanquiez V, Marches E, Gonthier E, Guedes J C, Thiébot E, Jaaidi B, Kenyon N, Voisset M, Perez C, Sayago M, Fuchey Y, Bujan S. 2006. The western part of the Gulf of Cadiz: contour currents and turbidity currents interactions. Geo-Marine Letters, 26: 31 ~ 41.
- Mulder T, Faugères J C, Gonthier E. 2008. Mixed turbidite—contourite Systems. In: Rebesco M, Camerlenghi A. eds. Contourites, Developments in Sedimentology, 60. London: Elsevier Science, 435 ~ 456.
- Rasmussen S, Lykke-Andersen H, Kuijpers A. 2003. Post-Miocene sedimentation at the continental rise of Southeast Greenland: the interplay between turbidity and contour currents. Marine Geology, 196: 37 ~ 52.
- Reed D L, Meyer A W, Silver E A, Prasetyo H. 1987. Contourite sedimentation in an intraoceanic forearc system: eastern Sunda Arc, Indonesia. Marine Geology, 76(3 ~ 4): 223 ~ 242.
- Scheuer C, Gohl K, Udintsev G. 2006. Bottom-current control on sedimentation in the western Bellingshausen Sea, West Antarctica. Geo-Marine Letters, 26: 90 ~ 101.
- Sejrup H P, Haflidason H, Hjelstuen B O, Nygård A, Bryn P, Lien R.

2004. Pleistocene development of the SE Nordic Seas margin. *Marine Geology*, 213: 169 ~ 200.
- Shanmugam G, Spalding T D, Rofheart D H. 1993a. Process sedimentology and reservoir quality of deep-marine bottom-current reworked sands (sandy contourites): an example from the Gulf of Mexico. *AAPG Bulletin*, 77, 1241 ~ 1259.
- Shanmugam G, Spalding T D, Rofheart D H. 1993b. Traction structures in deep-marine bottom-current reworked sands in the Pliocene and Pleistocene, Gulf of Mexico. *Geology*, 21: 929 ~ 932.
- Shanmugam G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s ~ 1990s) deep-water processes and facies models — a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17: 285 ~ 342.
- Shanmugam G. 2003. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 471 ~ 491.
- Stow D A V, Faugères J C, Howe J A, Pudsey C J, Viana A R. 2002. Bottom currents, contourites and deep-sea sediment drifts: current state-of-the-art. In: Stow D A V, Pudsey C J, Howe J A, Faugères J C, Viana A R. eds. *Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Seires, Seismic and Sedimentary Characteristics*. London: Geological Society, *Memoirs*, 22: 7 ~ 20.
- Viana A R, Almeida J W, Machado L C. 1999. Different styles of canyon infill related to gravity and bottom current processes: Example from the upper slope of the SE Brazilian margin. *Publica ao Sexto Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGF* 014, 4.
- Wood R, Davy B. 1994. The Hikurangi Plateau. *Marine Geology*, 118: 153 ~ 173.
- Zhu Mangzheng, Graham S, Pang Xiong, McHargue T. 2010. Characteristics of migrating submarine canyons from the middle Miocene to present: Implications for paleoceanographic circulation, northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 27: 307 ~ 319.

The Interaction between Deep-Water Turbidity and Bottom Currents: a Review

WU Jiapeng^{1,2)}, WANG Yingmin^{1,2)}, WANG Hairong³⁾, LI Hua^{1,2)},
PENG Xuechao⁴⁾, QIU Yan⁴⁾, LI Dong^{5,6,7)}

1) *State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Beijing*, 102249;

2) *College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing*, 102249;

3) *School of Energy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing*, 100083;

4) *Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, Guangzhou*, 510760;

5) *China University of Petroleum (Beijing) post-doctoral research station, Beijing*, 102249;

6) *CNOOC Research Institute working stations for post doctors, Beijing*, 100027;

7) *CNOOC Research Institute, Beijing*, 100027

Abstract: The turbidity and bottom currents are two basic flowing mechanisms in deep-water basins, and the study about interaction between them is the leading edge and weak point of present sedimentology. Bottom current and bottom-current-reworked deposits have special sedimentary structures such as truncated tops, double mud layers and traction origin beddings, and lenticular units, migrating sediment waves are typical characteristics of the drifts in seismic profiles. According to the research about the interplay of gravity and bottom currents, and the leading sedimentation mechanism in different geological periods, there are four different patterns of the interaction between the two currents: ① bottom current reforms prophase gravity flow deposits; ② the turbidite reworks the prophase bottom current sediment; ③ gravity flow and the bottom current dominate the sedimentation respectively in the same area, and ④ the turbidite and bottom current affect the sediments together. The relative sea level change, climate (glacial—interglacial) change, tectonic activity, topography and other factors control the interplay between the gravity flow and bottom current by means of affecting the relative strength of the two sedimentation mechanisms. The South China Sea has favorable geological conditions for the development of interaction between gravity flow and bottom current, and the one-way migrating canyons and sediment waves are excellent interaction geological products. Intensifying the observation of the present bottom currents means a lot to the bottom current framework construction in South China Sea.

Key words: deep-water deposition; turbidity; bottom current; contour current; interaction; sediment wave; South China Sea