

南海北部珠江口盆地重力流与等深流交互作用 沉积特征、过程及沉积模式

李华^{1, 2)}, 王英民^{1, 2)}, 徐强³⁾, 卓海腾^{1, 2)}, 吴嘉鹏^{1, 2)}, 唐武^{1, 2)}, 李冬³⁾, 徐艳霞⁴⁾

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), 北京, 102249; 3) 中海油研究总院, 北京, 100027; 4) 大庆油田采油三厂, 黑龙江大庆, 163113

内容提要:通过地震及钻孔资料对南海北部珠江口盆地重力流及等深流沉积进行了研究。南海北部重力流及等深流沉积类型多样, 包括峡谷、单向迁移水道、堤岸、朵叶及漂积体。单向迁移水道迁移方向分别为北东向和南西向, 为重力流与等深流交互作用形成。漂积体有大型长条状漂积体、限制型漂积体和陆坡席状漂积体, 岩性为粘土、泥质粉沙。南海北部陆坡水深 200~1200m 范围内发育北东向迁移水道及小规模漂积体, 而水深约 1200~3000m 内则以朵叶及大规模的漂积体为主, 见少量南西向迁移水道。其中, 漂积体多分布于峡谷、水道及朵叶的两侧, 为等深流改造堤岸、朵叶等“细粒”沉积物而成。

关键词:重力流; 等深流沉积; 等深流; 漂积体; 交互作用; 南海; 珠江口盆地

深水沉积环境中沉积动力机制复杂多样, 存在不同性质的流体类型, 包括重力流、等深流及内波、内潮汐等。随着深水沉积的不断深入, 人们普遍认识到重力流与等深流分别在顺陆坡向下和平行陆坡运动及沉积过程中相互作用, 联系密切。近年来, 沉积学家们分别对加迪斯海湾(Gulf of Cadiz)、伊比利亚北部陆坡、阿尔加维陆坡及南海等地开展了重力流与等深流交互作用沉积研究, 其研究内容包括单向迁移水道的成因和等深流对重力流沉积改造现象及规律等(Michels et al., 2001; Sejrup et al., 2004; Hernández-Molina et al., 2006; Mulder et al., 2008; Salles et al., 2010; Van et al., 2010; Zhu M et al., 2010; He Y L et al., 2012; 李华等, 2013a; Li H et al., 2013)。

南海重力流沉积其发育, 包括峡谷、重力流水道、滑塌体及海底扇等(Yuan S Q et al., 2009; Zhu M et al., 2010; 刘军等, 2011; Wang Y M et al., 2011; He Y N et al., 2012; 李冬等, 2012; Zhu M et al., 2012)。同时, 北太平洋深层水经巴士海峡进入南海沿北部陆坡做逆时针方向运动, 并形成一系列的等深流漂积体(Shao L et al., 2001, 2007; Lüdmann et al., 2005; 谢玲玲, 2009; 李华等,

2013b)。但是, 对于南海重力流与等深流交互作用研究工作开展很少, 前人在研究南海北部珠江口盆地和琼东南盆地单向迁移水道成因时对重力流和等深流交互作用特征及形成过程进行了初步的探讨(Zhu M et al., 2010; He Y L et al., 2012; Li H et al., 2013; 李华等, 2013a), 而对于南海北部重力流与等深流沉积分布特征及其交互作用机制认识还不深入。随着南海深水油气勘探的突破, 珠江口盆地地震资料的全区覆盖及钻孔资料的增多为进一步认识南海北部陆坡重力流与等深流交互作用机制研究提供了可行条件。

1 地质概况

1.1 地理位置

南海位于亚洲大陆、中印半岛、加里曼丹岛、菲律宾群岛及台湾岛之中, 为半封闭深水海盆, 其总面积约 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 水深超过 5000 m, 总体为北东走向。吕宋海峡是其与太平洋连通的主要通道, 宽 300 km, 海槛深度约 2500 m (李立, 2002; Zhu M et al., 2010)。从大地构造而言, 南海处于欧亚大陆的东南缘, 邻近欧亚、太平洋、印度洋—澳大利亚三大板块的交汇处, 是西太平洋中最大的边缘海(王

注: 本文为国家重点基础研究发展计划(编号 2009CB219407)和国家自然科学基金项目(编号 40572067)资助成果。

收稿日期: 2013-03-22; 改回日期: 2013-10-13; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 李华, 男, 1984 年生。博士生, 沉积学。通讯地址: 102249, 北京市昌平区中国石油大学(北京)地球科学学院; Email: LH840607@126.com。

宏斌等, 2003)。

南海北部大陆边缘东起台湾岛,西部为越南,南部和南海深水平原相接,大致呈北东向展布,长约 1500 km,宽约 600 km,总面积约 $9 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占整个南海总面积的 1/4 (Luan X W et al., 2011)。本次研究区主要为珠江口盆地及东沙群岛周缘,水深约 200~3000 m(图 1)。

1.2 水团特征

南海表层水受季风的影响明显,在冬季其从北部流向爪哇海,总体呈逆时针方向;而在夏季时恰好相反,呈顺时针方向运动(Shaw, 1994; Hu J Yet al., 2000; Fang G et al., 2009)。同时,其还可能受吕宋海峡进入的黑潮、沿岸流影响(Liang W D et al., 2003)。黑潮是在北太平洋中重要的西边界流之一,其通过吕宋海峡以顺时针方向进入南海(Li L et al., 1989; Xue H et al., 2004),可进一步演变形成北东向的南海暖流。南海暖流主要沿南海陆

架运动,为南海西边界流的主体(Zhu M et al., 2010),其可通过吕宋海峡流入太平洋(Chen T et al., 1996)。

南海中层水研究相对较少,一般认为其可通过吕宋海峡流入西太平洋,可能与台湾东部黑潮中层水最低盐度值相对较高有关(Chu T Y, 1972; Nitani, 1972),也可能与南海海盆中层的反气旋环流有联系(Yuan D L, 2002)。谢玲玲(2009)在吕宋海峡中层约 500~900 m 水深发现反气旋涡,该反气旋涡将一部分中层水带向吕宋海峡南部,回到南海;一部分从海峡北部流出,进入太平洋。尽管在水深约 1000 m 反气旋涡消失,但是在水深 1139.15 m 的水团仍然具有顺时针运动特征(图 1)。

南海深层水主要为北太平洋深层水经吕宋海峡进入南海海盆,沿陆架向西做逆时针运动,其流速在 0.15~0.3 m/s,呈由东向西的逆时针运动(图 1)(Yuan D L, 2002; Lüdmann et al., 2005; Shao L

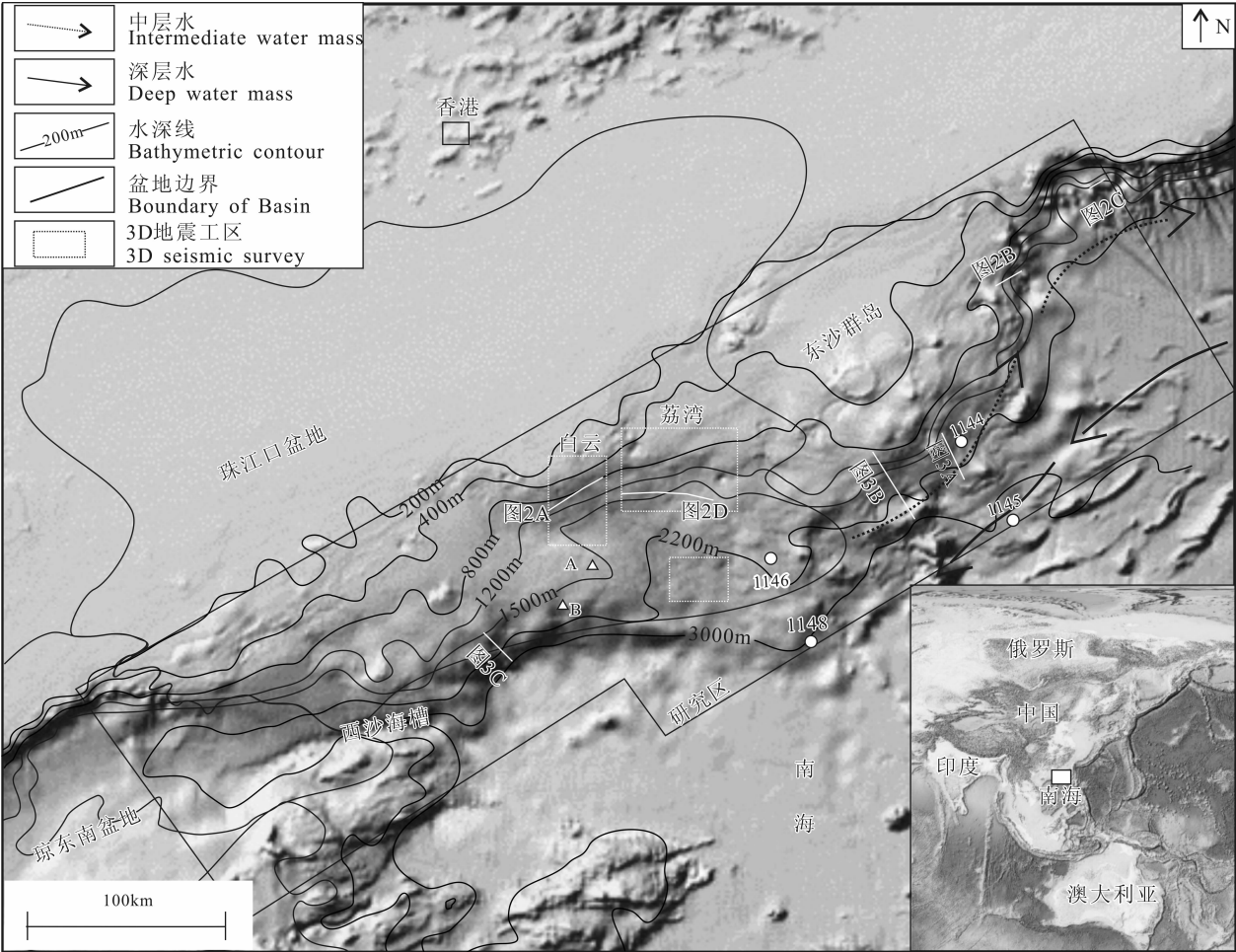


图 1 南海北部地形及中深层水团运动特征(Li H et al,2013)(底图据王海容等,2010)

Fig.1 Geography and motion of intermediate and deep water mass in the northernSouth China Sea (Li H et al,2013)(from Wang Hairong et al. , 2010)

et al. , 2007; 谢玲玲, 2009; Li H et al. , 2013), 并形成了一系列等深流沉积(Lüdmann et al. , 2005; Shao L et al. , 2007; 李华等, 2013b; Li H et al. , 2013)。同时, 刘志飞等(2013)通过 ODP1144 位置水深 1600~2000 m 海流测试, 认为该深度存在西南向运动的流体, 流速平均为 2~5 cm/s, 其可能为等深流^①。

Li H 等(2013)通过南海北部北东及南西西向迁移水道、漂积体及沉积物波等在不同水深范围内的分布, 推断南海北部中层及深层等深流分界大致为 1200 m, 中层等深流为南西至北东方向顺时针运动, 而深层等深流表现为南西向的逆时针运动。其中, 单向迁移水道为等深流与重力流交互作用而成, 其迁移方向与等深流方向相同。

2 典型沉积单元特征

本次在南海北部陆坡发现典型的深水沉积单元包括珠江峡谷、单向迁移水道、朵叶及等深流漂积体, 其特征分别如下。

2.1 峡谷及水道特征

珠江口盆地陆坡北部发育珠江峡谷, 根据二维地震资料刻画, 其宽度约 12.8~39.6 km, 南北向展布, 大致顺陆坡向下, 中部弯度有所增加。西部为西沙海槽, 其大致平行陆坡分布。

另外, 南海北部陆坡还发育两种单向迁移水道, 一种主要分布于水深 200~1200 m 内, 迁移方向大致为北东向; 另一种多发育在水深大于 1200 m 范围内, 迁移方向大致为南西西向。其中, 北东向迁移水道主要分布于琼东南盆地东部, 珠江口盆地北部的白云、荔湾深水区以及东沙群岛东部。水道整体迁移特征明显, 多为“U”或“V”形, 轴部沉积多为强反射地震特征, 迁移特征明显。水道西侧的侧积体为弱地震反射特征, 具有明显的期次性(图 2a)。其中, 白云及荔湾深水区共发育 17 条北东向迁移水道, 侵蚀特征明显, 水道内呈连续性较差、上平下凹的透镜状强反射地震特征, 水道之间大致平行, 总体呈南北向展布, 顺陆坡向下。局部水道还见堤岸沉积, 其外形为“楔状”, 连续性中等一好, 弱反射地震

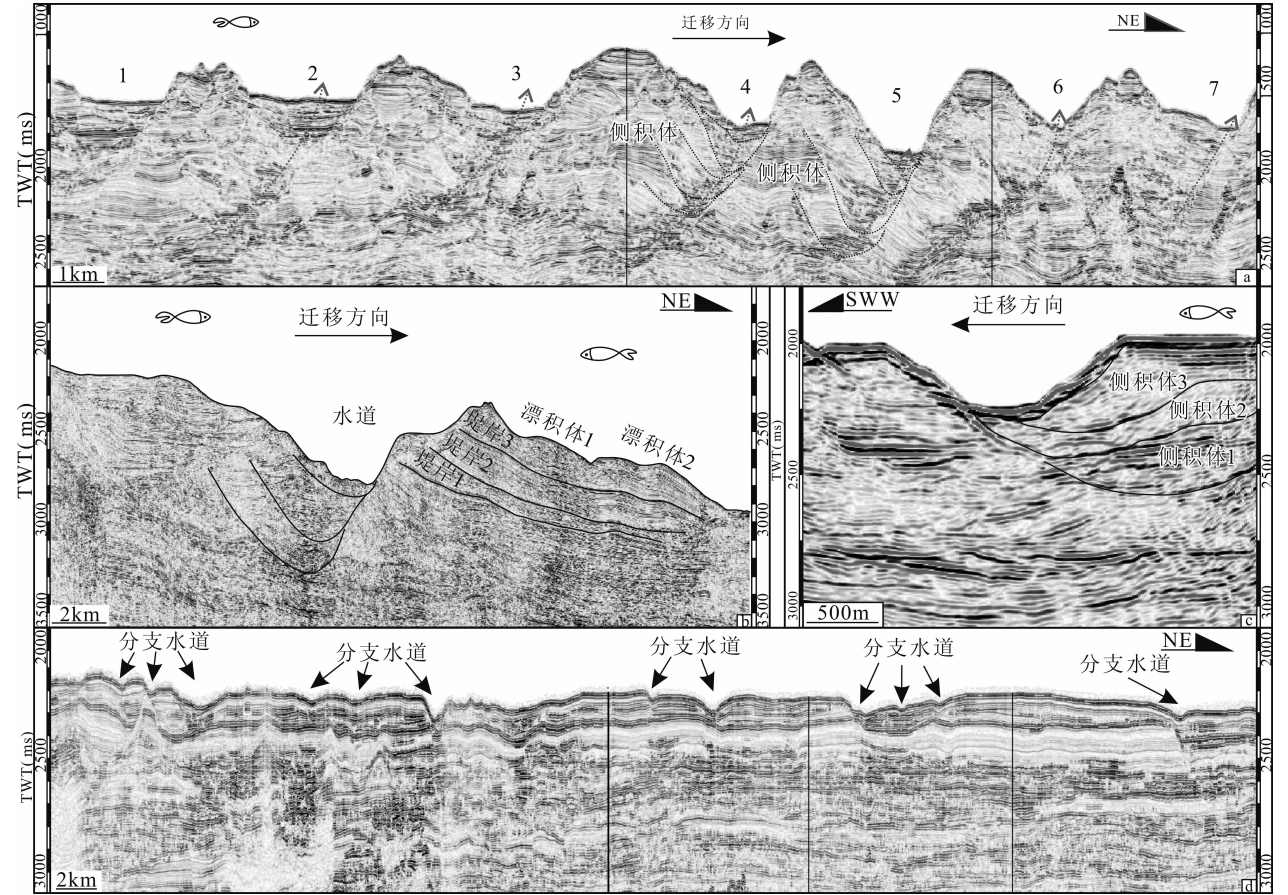


图 2 南海北部重力流沉积特征, 剖面位置见图 1

Fig. 2 Characteristics of gravity flow deposits in the northern South China Sea, see fig. 1 for profile location

特征,局部见丘状等深流沉积(漂积体)(图 2b)。南西西向迁移水道见于东沙群岛东北部的台西南盆地,水深大致为 1500 m,侧积体发育,可大致分为 3 期。水道迁移特征相对北东向迁移水道较弱,外形多为“U”形,连续性较差,上平下凹透镜状中等地震反射特征(图 2c)。

2.2 朵叶特征

白云及荔湾深水区迁移水道顺陆坡向下,水道规模逐渐减小,数量增加,水道之间大致平行。水道为平行—亚平行,强地震反射特征,地层厚度变化趋势不大,为多个似“丘状”沉积。该“丘状”沉积体可能为水道末端的朵叶,因该区水道数量多(17 条),水道相互平行,间距较小,因此,其末端朵叶相互叠

置堆积,而使得典型的“丘状”外形不明显(图 2d)。

2.3 漂积体特征

本次研究以地震资料为手段,仅对地震反射特征明显的等深流沉积进行刻画,其包括丘状漂积体及席状漂积体两大类,可细分为大型长条状漂积体、限制型漂积体及陆坡席状漂积体,其特征分布如下。

大型长条状漂积体是典型的等深流沉积类型,其横剖面形态为丘状,平面上呈长条状,大致平行于陆架分布,水道与其伴生。其底部边界明显,顶部上凸,多平滑,水道处见侵蚀特征,内部多为平行—亚平行,中等—弱,连续性较差,局部为杂乱地震反射特征,多在高能的水道部位收敛,并具明显的上坡迁移特征,部分漂积体内沉积期次明显(图 2b, 3a)。

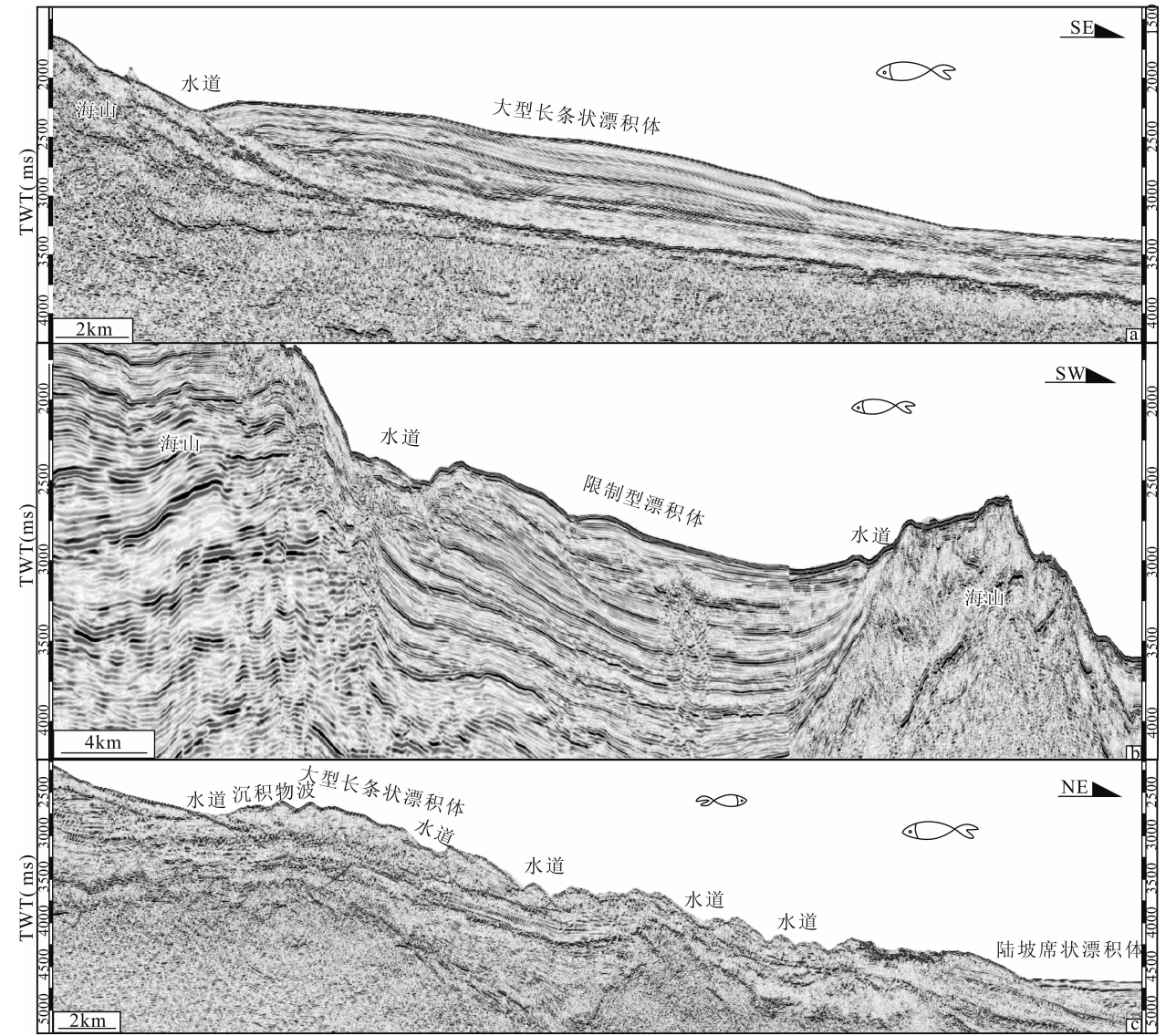


图 3 等深流沉积特征,剖面位置见图 1

Fig. 3 Characteristics of deposits, see fig. 1 for profile location

部分漂积体上发育沉积物波(图 3c)。

限制型漂积体主要受地形影响,在持续等深流作用下,沉积物主要在地形相对低洼及限制型环境处沉积。其底部边界明显,顶部平滑、平坦,水道与之伴生,内部多为平行或亚平行,中等一弱,连续性中等一好,部分连续性差地震反射特征,在水道处见收敛及侵蚀现象(图 3b)。另外,部分限制型漂积体上发育沉积物波。

陆坡席状漂积体外形为席状,漂积体底部边界明显,顶部光滑、平坦,局部见埋藏水道,漂积体内部为连续性中等一好,中等一弱,部分为杂乱平行或亚平行地震反射特征,底部沉积边界清晰(图 3c)。

2.3 典型沉积单元分布特征

水道、朵叶及漂积体等在不同水深区域有所不同。水深约 200~1200 m 范围内发育大规模的北东向迁移水道及大型长条状漂积体、小规模的限制型漂积体。而水深大于 1200 m 范围内大量发育朵叶、大型长条状漂积体、限制型漂积体、陆坡席状漂积体,另见少量的南西西向迁移水道(图 4)。

漂积体规模在不同水深发育规模及位置有所不同(图 4)。水深约 200~1200 m 范围内漂积体规模较小,主要发育在东沙群岛的西部。而水深 1200~3000 m 范围内漂积体发育面积大,分布广。大型长

条状漂积体分布广泛,限制型漂积体在东沙群岛南部及西部发育,而陆坡席状漂积体则发育在斜坡脚。

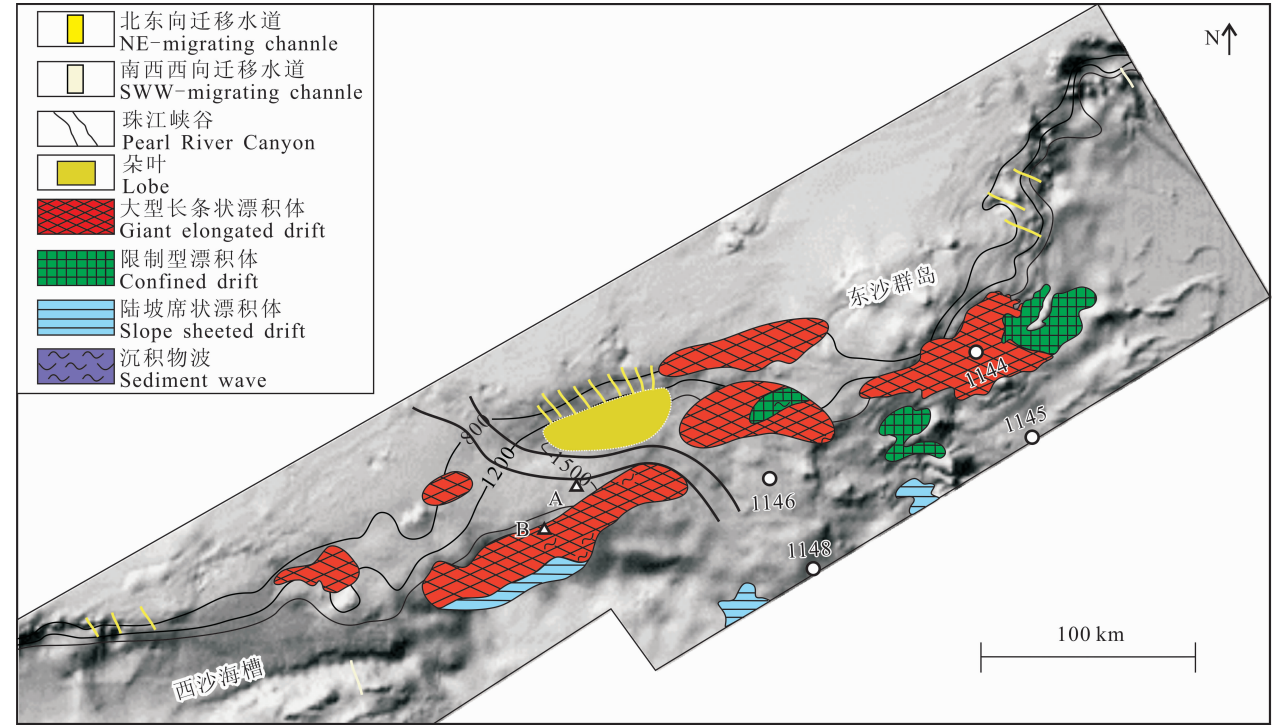
峡谷、水道与等深流漂积体在平面上分布具有明显的相关性。水深 200~1200 m 范围内,漂积体主要发育在珠江峡谷及单向迁移水道的东侧;而水深大于 1200 m 区域内,漂积体多分布于单向迁移水道的末端,珠江峡谷的西侧及西沙海槽的尾部(图 4)。

2.4 岩性特征

在南海北部珠江口盆地有两个重力流活塞样 A,B。A 含沙率 0.48 %~6.37 %,平均为 2.18 %;Mz(口)为 7.84~7.08,平均为 7.41;CaCO₃ 含量为 13.42 %~30.97 %,平均 22.89 %。B 中含沙率为 0.91 %~19.64 %,平均为 4.97 %。Mz(口)为 7.91~6.22,平均为 7.28;CaCO₃ 含量为 13.25 %~31.67 %,平均为 20.58 %(图 5)(王海荣等,2007)。

同时,从 ODP1144、1145、1146、1148 钻孔资料来看,岩性主要为粘土及粉沙质粘土,生物扰动明显,化石含量较多,主要有有孔虫、放射虫、海绵骨针及介壳生物等^②。

从钻孔及活塞样样品中反映研究区岩性主要为粘土、粉沙质粘土及泥质粉沙。因此,可推测南海北部珠江口盆地等深流沉积主要为“细粒”沉积。



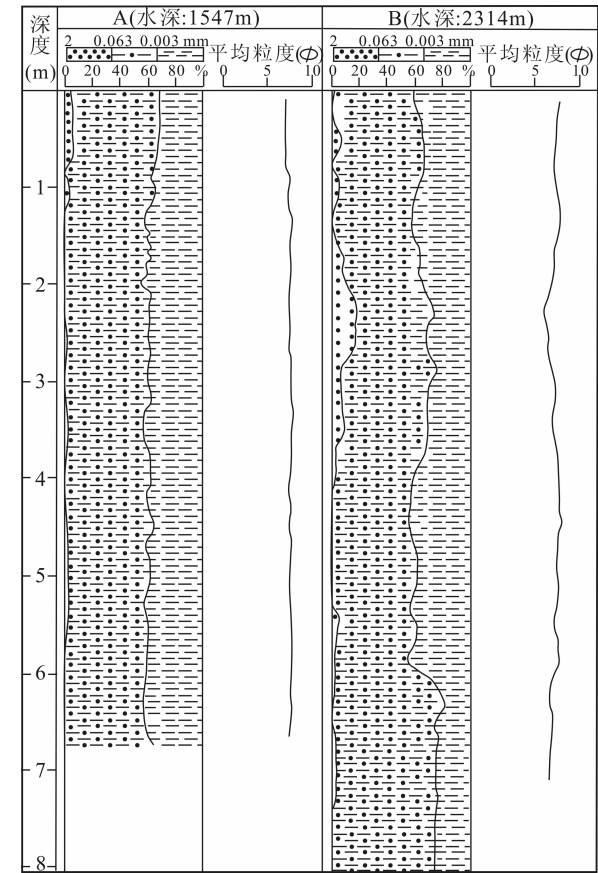


图 5 南海北部陆坡岩性特征(王海荣等, 2007),位置见图 4
Fig. 5 Lithology of piston cores A, B(Wang et al. , 2007) ,
see fig. 4 for profile location

3 讨论

3.1 峡谷、水道及朵叶形成过程

峡谷、水道是连接陆架与深水区的重要通道,在为重力流沉积提供物源过程中扮演着重要角色,其发育位置广泛,不同环境的峡谷,形态、特征、沉积过程各不相同(Shepard, 1981)。典型的峡谷、水道具有“U”或“V”形的外形特征(图 2a,2b,2c),并伴随有轴部沉积、水道沉积及滑塌沉积,其影响因素包括物源、地形、坡度、构造运动等(Shepard, 1981;Jobe et al. , 2011)。就其成因而言,多认为其与浊流及碎屑流的侵蚀、沉积过程有关(Shepard, 1981)。朵叶多分布于峡谷、水道末端,为海底扇典型沉积单元(图 2d)(Walker, 1978)。其形成主要有两个方面的因素。一是在限制作用较强的峡谷及水道末端,因限制性环境消失,可能导致大量沉积物被卸载于谷口或水道口形成朵叶;另外,水道在不断延伸过程中,随着能量的不断减小,自身有分支的趋势,最后在水道末端形成朵叶(李华等, 2011)。

3.2 漂积体形成过程

漂积体是等深流沉积的典型沉积体(Faugères et al. , 1999, 2008)。而等深流沉积主要包含三个方面,一是垂直降落的原地沉积,主要为悬浮型泥质及粉砂质沉积;二是重力流沉积经等深流改造堆积而成;三是早期等深流沉积、火山碎屑等在后期经等深流改造而成。一般而言,深水区垂直降落的原地沉积厚度相对小,因此,改造、搬运洋底沉积物为等深流沉积主要途径。南海北部陆坡重力流沉积丰富,其可为等深流沉积提供物质基础。

ODP 钻孔及重力流活塞样 A、B 的岩性表现为粘土、泥质粉沙,因其粒度细,而南海北部深层等深流速度平均为 2~5 cm/s^①,这使得等深流搬运细粒沉积物成为可能。

北东向迁移水道两侧堤岸发育不对称,水道北东侧堤岸相对南西侧更为发育,并且北东侧堤岸发育多期大型长条状漂积体(图 2b),其说明水道南西侧(迎等深流一侧)堤岸受中层等深流破坏、改造而规模相对较小,而顺流一侧堤岸较为发育,并且发育漂积体。

西沙海槽、珠江峡谷、重力流水道与等深流沉积平面分布具有密切联系(图 4)。水深 200~1200 m 范围内,琼东南盆地西部及珠江口盆地白云和荔湾深水区北东向迁移水道的东部发育大规模的漂积体。重力流水道在北东向运动的中层水作用下,堤岸沉积和稀释性浊流被改造、搬运,进而在水道东部发育等深流沉积,特别是因东沙群岛的阻碍作用导致中层水运动路径发生变化,能量减弱,使得其发生卸载,最终在东沙群岛西部发育大量的等深流漂积体。

水深大于 1200 m 的范围内,西沙海槽、白云和荔湾深水区的单向迁移水道末端、珠江峡谷的西侧及东沙群岛南部漂积体发育。该水深区域中,北东向南西运动的深层水占主导作用,白云、荔湾深水区朵叶及珠江峡谷具有丰富的重力流沉积物,其经深层水改造、搬运,进而在水道、峡谷及朵叶西部形成大量的漂积体。另外,西沙海槽受北部海南岛及北西向红河物源供给作用,发育大规模的重力流沉积(Yuan S Q et al. , 2009; 何云龙等, 2011; Wang Y M et al. , 2011; Zhu M et al. , 2012),其也可能为珠江口盆地西部的深层等深流沉积提供一定的物质基础。

前人通过 ODP1144 等钻孔资料分析认为,东沙群岛南部的大型长条状漂积体与台湾西南部的物质

具有密切的亲缘关系,从而推测南海北部深层等深流沉积可能来自台湾的河流沉积经澎湖水道搬运至深水区,进而受深层水向西搬运而成(Shao L et al., 2001, 2007; Wan S M et al., 2010)。但是,东沙群岛仍发育小规模的重力流水道,其仍可能为深层等深流沉积提供物源。

3.3 深水单向迁移水道形成过程

目前,全球范围内深水单向迁移水道—堤岸沉积体系共有 5 处,而对于其形成机制主要有两种观点,即重力流和等深流交互作用和上升流受科氏力作用成因(Séranne et al., 1999; Viana et al., 1999; Rasmussen et al., 2003; Biscara et al., 2010; Zhu M et al., 2010; He Y et al., 2012; 李华等, 2013a)。5 处研究成果中,4 处认为其为重力流和等深流交互作用而成,仅有 Séranne 等(1999)认为西非加蓬盆地单向迁移水道为底流(上升流)受科氏力作用而具有向“左”偏的趋势,可能增加重力流侵蚀“左”侧水道能力,进而在“右”侧形成侧积体沉积,最终形成向“左”迁移的水道(Séranne et al., 1999)。但是,上升流在赤道附近的科氏力作用很小,并且上升流是否有足够的能量形成大规模的侧

积体还需要证实,因此其观点是否科学、合理有待商榷。重力流和等深流交互作用观点认为,当重力流爆发初期,能量高,以侵蚀作用为主,形成水道雏形。因重力流能量远大于等深流能量,等深流沉积不明显,侧积体基本不发育,水道以垂向加积为主。随后,重力流能量相对减弱,在水道中表现为侵蚀及沉积特征。此时,等深流可将一部分沉积物搬运至水道中沉积并保存下来,侧积体开始发育。重力流末期或间歇期,能量微弱,在水道中以沉积为主。等深流占主导作用,其可搬运大量沉积物至水道中沉积,并得以保存,此阶段侧积体大量发育(Zhu M et al., 2010; He Y L et al., 2012; 李华等, 2013a)。因此,当一期重力流沉积作用完成后水道中将发育侧积体沉积。而重力流再次爆发时,因侧积体的充填作用,可能导致重力流在前期水道中被迫迁移,从而使得水道改道。如此多期的重力流及等深流共同作用最终形成单向迁移水道,迁移方向与等深流方向大致相同。

南海北部北东向迁移水道极其发育,并且部分地方还发育南西西向迁移水道,同一地区上升流作用仅能形成同一方向迁移的水道,并且南海北部陆

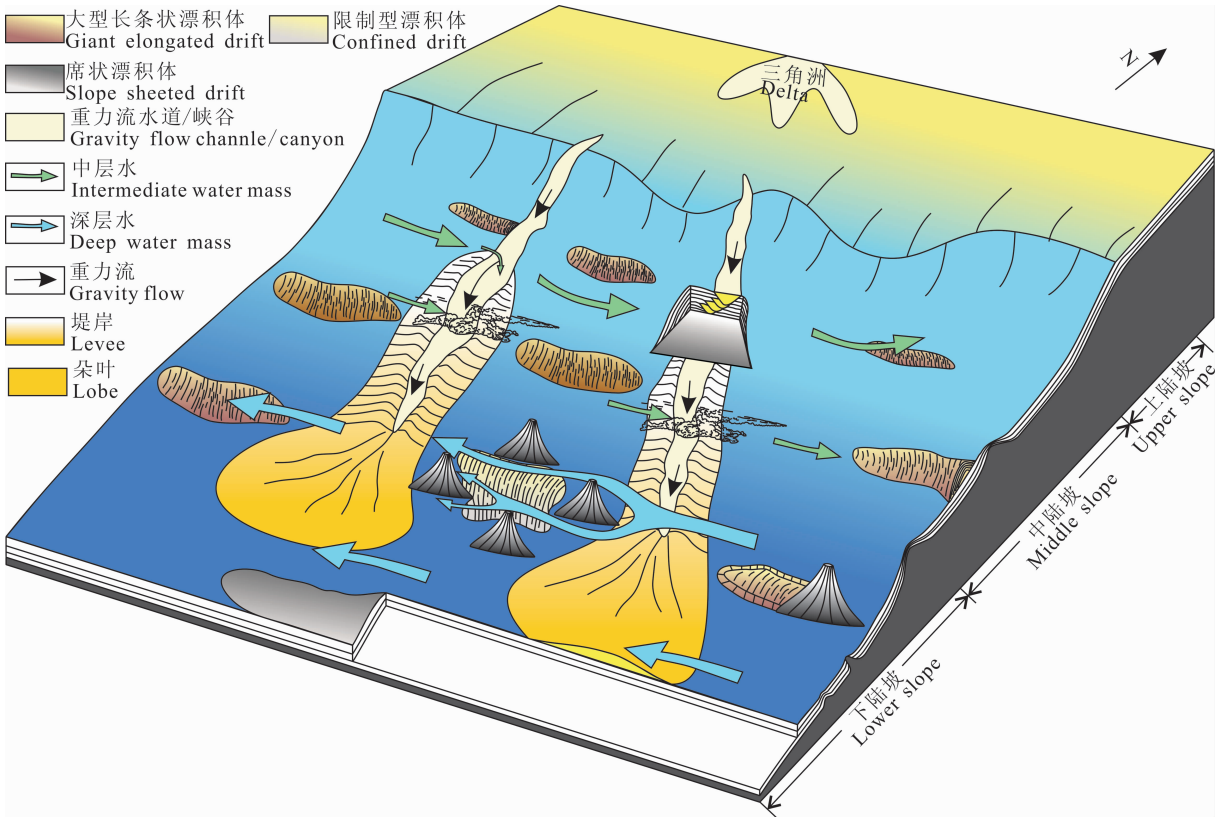


图 6 南海北部重力流与等深流交互作用模式图

Fig. 6 Depositional model of interaction between gravity flow and contour current in northern South China Sea

坡区整体是否发育上升流还有待研究。因此,结合单向迁移水道的形成机制及研究区实际资料分析,南海北部北东向迁移水道主要为重力流和中等深流交互作用而成,而南西西向迁移水道为重力流与深层等深流交互作用成因。

3.4 等深流与重力流交互作用沉积模式

南海北部中上陆坡发育北东向迁移水道及等深流漂积体,存在重力流及中等深流交互作用机制,但峡谷及水道中重力流以侵蚀作用为主,堤岸相对不发育。等深流对重力流沉积的改造作用主要体现在3个方面。首先,等深流可对水道及峡谷两侧堤岸沉积物进行改造、再搬运,进而导致顺流侧的堤岸较为发育,并发育等深流沉积。其次,重力流在水道内运动过程中,其能量不断减小、沉积物不断稀释,其顶部的稀释性浊流及溢流沉积在悬浮状态下因等深流作用而改变方向,最终在顺等深流方向形成等深流沉积。第三,等深流运动经过水道时,因地形影响导致部分支流进入水道,对水道内的重力流沉积进行淘洗进而改造其结构及组分,其有利于储积性的提高(图6)。

中下陆坡以小型水道及朵叶沉积为主,该范围中存在重力流及深层等深流交互作用机制。深层水在运动过程中受海山等地形的影响出现分支,并对水道和朵叶进行改造,进而在地形突变处形成大型长条状漂积体,海山区发育限制型漂积体,陆坡脚则发育席状漂积体(图6)。

因中上陆坡重力流在水道中以侵蚀作用为主,水道堤岸相对不发育,稀释型重力流相对较少,进而使得中上陆坡(中层水作用区域)以单向迁移水道为主,发育小规模漂积体。而中下陆坡小型重力流水道和朵叶发育,沉积物在沿陆坡向下运动过程中,粒度变细,溢流及稀释型浊流增多,深层水可以对细粒沉积物进行高程度的改造、搬运,进而发育大规模的漂积体(图6)。

4 结论

南海北部珠江口盆地陆坡重力流及等深流沉积底形丰富,包括峡谷、水道、堤岸、朵叶及漂积体等,并且重力流与等深流交互作用特征明显。中上陆坡发育北东向迁移水道及漂积体,为重力流与中层水交互作用成因。中下陆坡发育南西西向迁移水道、朵叶及漂积体,为重力流与深层水交互作用形成。其中,等深流沉积主要为等深流对堤岸、朵叶及稀释性浊流等“细粒”沉积物进行改造、搬运、再沉积

而成。

致谢:审稿专家及编辑为论文提供了一系列意见和建议,在此表示衷心的感谢!

注 释

①刘志飞,赵玉龙,李建如,王文广,张艳伟,徐景平,拓守廷,王宇辰,陈忠. 2013. 南海东北部底层海流和深水雾状层的观测结果. 2013年学术研讨会“南海深海过程演变”摘要集,上海,29.

②<http://www-odp.tamu.edu>.

参 考 文 献

- 何云龙,解习农,陆永潮,李俊良,张成,姜涛,苏明. 2011. 琼东南盆地深水块体流构成及其沉积特征. 地球科学——中国地质大学学报, 36(5): 905~913.
- 李冬,徐强,王永凤,王英民. 2012. 南海珠江 21Ma 深水扇特征及控制因素. 中国石油大学学报(自然科学版), 36(4): 7~12.
- 李立. 2002. 南海上层环流观测研究进展. 台湾海峡, 21(1): 114~125.
- 李华,何幼斌,王振奇. 2011. 深水高弯度水道一堤岸沉积体系形态及特征. 古地理学报, 13(2): 139~149.
- 李华,王英民,徐强,韩自亮,徐艳霞. 2013a. 深水单向迁移水道一堤岸沉积体系特征及形成过程. 现代地质, 27(3): 653~661.
- 李华,王英民,徐强,唐武,李冬. 2013b. 南海北部第四系深层等深流沉积特征及类型. 古地理学报, 15(5): 741~750.
- 刘军,庞雄,颜承志,柳保军,胡琰,李元平,韩晋阳. 2011. 南海北部陆坡白云深水区深水沉积结构要素. 吉林大学学报, 41(4): 255~259.
- 王宏斌,张光学,杨木壮,梁金强,梁劲,钟广见. 2003. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境. 海洋地质与第四纪地质, 23(2): 81~86.
- 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. 自然科学进展, 17(9): 1235~1243.
- 谢玲玲. 2009. 西北太平洋环流及其南海水交换研究. 青岛: 中国海洋大学博士论文, 65~88.
- Biscara L, Mulder T, Gonthier E, Cremer M, Faugères J C, Garlan T. 2010. Migrating submarine furrows on Gabonese margin (West Africa) from Miocene to present: Influence of bottom currents? Geo-Temas, 11: 21~22.
- Chen T, Huang M H. 1996. A Mid-depth front separating the South China Sea Water and the Philippine Sea Water. Journal of Oceanography, 52: 17~25.
- Chu T Y. 1972. A study of the water exchange between Pacific Ocean and the South China Sea. Acta Oceanography Taiwanica, 2: 11~24.
- Fang G, Wang Y G, Wei Z X, Fang Y, Qiao F L, Hu X M. 2009. Interocean circulation and heat and freshwater budgets of the South China Sea based on a numerical model. Dynam Atmos Oceans, 47: 55~72.
- Faugères J C, Stow D A V. 2008. Contourite Drifts: Nature, Evolution and Controls. In: Rebesco M and Camerlenghi A (Eds), Contourites, developments in sedimentology 60.

- Elsevier, Great Britain, 271~283.
- He Y L, Xie X N, Benjamin C. 2012. Architecture and controlling factors of canyon fills on the shelf margin in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 41: 264~276.
- Hernández-Molina F J, Llave E, Stow D A V, Garcíad M, Somoza L, Vázquez J T, Lobo F J, Maestro A, del Río V D, León R, Medialdeab T, Gardner J. 2006. The contourite depositional system of the Gulf of Cadiz: A sedimentary model related to the bottom current activity of the Mediterranean outflow water and its interaction with the continental margin. *Deep-sea research II*, 53: 1420~1463.
- Hu J Y, Kawamura H, Hong H S, Qi Y Q. 2000. A review on the currents in the South China Sea: Seasonal circulation, South China Sea Warm Current and Kuroshio intrusion. *Journal of Oceanography*, 56: 607~624.
- Jobe Z R, Lowe D R and Uchytel S J. 2011. Two fundamentally different types of submarine canyons along the continental margin of Equatorial Guinea. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 843~860.
- Liang W D, Tang T Y, Yang Y J, Ko M T, Chuang W S. 2003. Upper-ocean currents around Taiwan. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50: 1085~1105.
- Li L, Wu B Y. 1989. Kuroshio's loop in the South China Sea. *Taiwan Strait*, 8: 89~95.
- Li H, Wang Y M, Zhu W L, Xu Q, He Y B, Tang W, Zhuo H T, Wang D, Wu J P, Li D. 2013. Seismic characteristics and processes of the Plio-Quaternary unidirectionally migrating channels and contourites in the northern slope of the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 43: 370~380.
- Luan X W, Zhang L, Peng X C. 2011. Dongsha erosive channel on northern South China Sea Shelf and its induced Kuroshio South China Sea Branch. *Science in China Series D: Earth Science*, 55: 149~158.
- Lüdmann T, Wong H K, Berglar K. 2005. Upward flow of Northern Pacific Deep Water in the northern South China Sea as deduced from the occurrence of drift sediments. *Geophysical Research Letters* 32, L05614.
- Michels K H, Røgenhagen J, Kuhn G. 2001. Recognition of contour-current influence in mixed contourite-turbidite sequences of the western Weddell Sea, Antarctica. *Marine Geophysical Researches*, 22: 465~485.
- Mulder T, Faugères J C, Gonthier E. 2008. Mixed turbidite-contourite Systems. In: Rebesco M., Camerlenghi A (Eds). *Contourites. Developments in Sedimentology*, 60. Great Britain, Elsevier Science, 435~456.
- Nitani H. 1972. Beginning of Kuroshio. In: Stommel H and Yoshida K (Eds). *Kuroshio: Physical Aspects of Japan Current*. University of Washington Press, 129~163.
- Salles T, Marchès E, Dyt C, Griffiths C, Hanquiez V, Mulder T. 2010. Simulation of the interactions between gravity processes and contour currents on the Algarve Margin (South Portugal) using the stratigraphic forward model Sedsim. *Sedimentary Geology*, 229: 95~109.
- Sejrup H P, Haflidason H, Hjelstuena B O, Nygard A, Bryn P, Lien P. 2004. Pleistocene development of the SE Nordic Seas margin. *Marine Geology*, 213: 169~200.
- Shao L, Li X H, Wei G J, Liu Y, Fang D Y. 2001. Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea. *Science in China Series D: Earth Science*, 44: 919~925.
- Shao L, Li X J, Geng J H, Pang X, Lei Y C, Qiao P J, Wang L L, Wang H B. 2007. Deep water bottom current deposition in the northern South China Sea. *Science in China Series D: Earth Science*, 50: 1060~1066.
- Shaw P T, Chao S Y. 1994. Surface circulation in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 41: 1663~1683.
- Shepard F P. 1981. Submarine canyons: multiple causes and long-time persistence. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 65 (6): 1062~1077.
- Rasmussen E S, Lykke-Andersen H, Kuijpers A, Troelstra S R. 2003. Post-Miocene sedimentation at the continental rise of Southeast Greenland: The interplay between turbidity and contour currents. *Marine Geology*, 196: 37~52.
- Séranne M, Abeign C R. 1999. Oligocene to Holocene sediment drifts and bottom currents on the slope of Gabon continental margin (west Africa) Consequences for sedimentation and southeast Atlantic upwelling. *Sedimentary Geology*, 128: 179~199.
- Van Rooij D, Iglesias J, Hernández-Molina F J, Ercilla G, Gomez-Ballesteros M, Casas D, Llave E, De Hauwere A, Garcia-Gil S, Acosta J, Henriot J P. 2010. The Le Danois Contourite Depositional System: Interactions between the Mediterranean Outflow Water and the upper Cantabrian slope (North Iberian margin). *Marine Geology*, 274: 1~20.
- 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. *Publicações do Sexto Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica SBGF*, 014: 4.
- Walker R G. 1978. Deep-Water Sandstone Facies and Ancient Submarine Fans: Models for Exploration for Stratigraphic Traps. *The American Association of Petroleum Geologists V*, 62(6): 932~966.
- Wan S M, Li A C, Clift P, Wu S G, Xu K H, Li T G. 2010. Increased contribution of terrigenous supply from Taiwan to the northern South China Sea since 3Ma. *Marine Geology*, 278: 115~121.
- Wang Y M, Xu Q, Li D, Han J H, Lü M, Wang Y F, Li W G, Wang H R. 2011. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 56: 1488~1494.
- Xue H, Chai F, Pettigrew N, Xu D Y. 2004. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea. *Journal of*

Geophysical Research, 109. doi: 10.1029/2002JC001724.

Yuan D L. 2002. A numerical study of the South China Sea deep circulation and its relation to the Luzon Strait transport. *Acta Oceanologica Sinica*, 21: 187~202.

Yuan S Q, Wu S G, Lüdmann T, Yao G S, Lv F L, Cao F, Wang H R, Li L. 2009. Fine-grained Pleistocene deepwater turbidite channel system on the slope of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 1441~1451.

Zhu M, Graham S, Pang X, 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.

Interactions between Down-Slope and Along-Slope Processes on the Northern Slope of South China Sea: Products, Processes, and Depositional Model

LI Hua^{1,2)}, WANG Yingmin^{1,2)}, XU Qiang³⁾, ZHUO Haiteng^{1,2)},
WU Jiapeng^{1,2)}, TANG Wu^{1,2)}, LI Dong³⁾, XU Yanxia⁴⁾

1) *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting (China University of Petroleum, Beijing)*,
Beijing, 102249; 2) *College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, 102249*;
3) *China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing, 100027*;
4) *NO. 3 Oil Production Company, Daqing Oilfield Limited Company, Daqing, Heilongjiang, 163113*

Abstract

Using integrations of seismic data and core data, interactions between down-slope and along-slope processes had been studied. Gravity flow deposits and contourites are well developed in northern South China Sea, including canyon, unidirectionally migrational channels, levees, lobes, drifts and so on. Unidirectionally migrating channels result from interactions between gravity flow and contour current with migrating directions are northeast (NE) and west-southwest (WSW), respectively. Drifts consisted of clay and muddy silt could be divided into giant elongated, confined and slope sheeted drifts. NE-migrating channels and drifts are widespread at water depths of 200 m to 1 200 m. By contrast, lobes, drifts and few WSW-migrating are developed at depths of 1 200 m to 3 000 m. Contourites distribute on the both sides of canyon, channel and lobe, which result from reworking the fine-grained deposits of gravity flow.

Key words: gravity flow; contourites; contour current; drift; interaction between gravity flow and contour current; South China Sea; Pearl River Mouth Basin