

DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2010. 04039

南海北部陆坡深水区沉积物输送模式探讨

袁圣强¹, 吴时国², 赵宗举¹, 徐方建³

(1 提高石油采收率国家重点实验室(中国石油勘探开发研究院), 北京 100083;

2 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;

3 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 青岛, 266555)

摘要:南海北部陆坡深水区沉积物输送模式复杂多样, 研究发现主要有碎屑流、浊流、砂质碎屑流、碳酸盐岩重力流、块体搬运、河流搬运、深水水道搬运 7 种类型, 它们共同影响着南海北部陆坡沉积物类型和储层分布。其中(砂质)碎屑流沉积、块体搬运沉积、河流供给、深水水道砂是南海北部深水储层的主要成因, 而纯粹的浊积岩在该地区发育不广泛。珠江口盆地的深水储层受到河流的供给和后期流体改造的影响, 并且存在碳酸盐岩重力流沉积物薄层, 证明该地区水动力条件较强; 琼东南盆地深水储层分布受到了碎屑流控制和深水水道的影响, 相对浅水区来看可能存在分选较好、干净的砂体储层, 具有良好的勘探潜力。

关键词:深水区; 沉积物输送; 模式; 沉积物重力流; 南海北部

中图分类号: P736. 2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2010)04-0039-10

被动陆缘陆坡深水区作为当今深水油气勘探的新区和持续重大油气发现区受到石油工业界和科学界的高度关注^[1]。以巴西 Campos 盆地、西非海岸和墨西哥湾深水盆地为代表, 在深水海域不断发现大型油气田^[1-3]。

“深水区”具有双重含义, 地质上“深水区”是指陆架破折带以外的地区, 主要包括陆坡区和盆地区, 描述的是当时储层形成时的古沉积环境。相应的, “深水沉积体系”是指相对于碎屑岩和碳酸盐岩储层, 难以直接接触及、观察和在现代环境中研究的储层体系; 而“深水系统”是指海洋沉积物的重力流过程、沉积环境和相关沉积物, 包括许多不同的词语来描述深水环境, 比如浊流系统^[4]、浊积复合体^[5]、海底扇^[6]等。目前, “浊流”甚至成了深水区专有的描述名词; 工程上所指的“深水”是指现今的水深环境, 特指水深大于 500 m 水深的区域。是钻探工程师为了描述常规开发钻机设备无法开发的区域, 特指“泥岩线”(mud line)之外的区域, 与储层形成时的沉积环境无关。

深水沉积体系作为深水区沉积重要的体系, 将是 21 世纪科学界和能源工业界研究的热点^[7], 其中沉积物输送机制是深水区储层分布的主控因素, 对

于其研究的深度直接影响到后期陆坡深水油气的勘探工作。本文基于南海北部大量 2D、3D 地震资料和钻井资料, 就南海北部陆坡深水区陆缘沉积物输送模式进行探讨, 讨论其沉积物输送类型以及特征。

1 沉积物输送类型与重力流的产生

1.1 输送类型

之前一直认为大多数被动大陆边缘陆坡体系主要是以泥质充填为主, 直到约 15 年前大规模的砂体在富泥的陆坡下方被发现后, 人们逐渐认识到砂体可以通过多种方式从陆架浅水区输送到盆地深水区^[8]。其中沉积物重力流是最为重要的沉积物输送机制, 总体来说, 向深水环境中输送沉积物的主要过程称为“沉积物重力流”^[9]。但是, 却极少能直接观测到深海环境下的沉积物重力流过程, 目前, 对于沉积物重力流的研究主要是结合露头数据、水下钻井测井和岩心、地震反射剖面、现今海底成像和取样、实验室水槽试验和数值模拟的研究^[8]。本文研究认为南海北部陆坡深水区沉积物输送类型主要包括: 沉积物重力流(碎屑流、浊流、砂质碎屑流)、块体搬运(滑塌)、河流搬运和深水水道搬运(图 1)。

1.2 重力流的产生

陆坡沉积物重力流可能的触发因素:(a)地震诱发的滑坡;(b)由于快速沉积、坡度过陡或空隙压力

基金项目:中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-229); 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB219406)

作者简介:袁圣强(1982—), 男, 博士后, 主要从事沉积储层研究, E-mail: swu@ms. qdio. ac. cn

收稿日期: 2010-07-10; **改回日期:** 2010-07-20. 张光威编辑

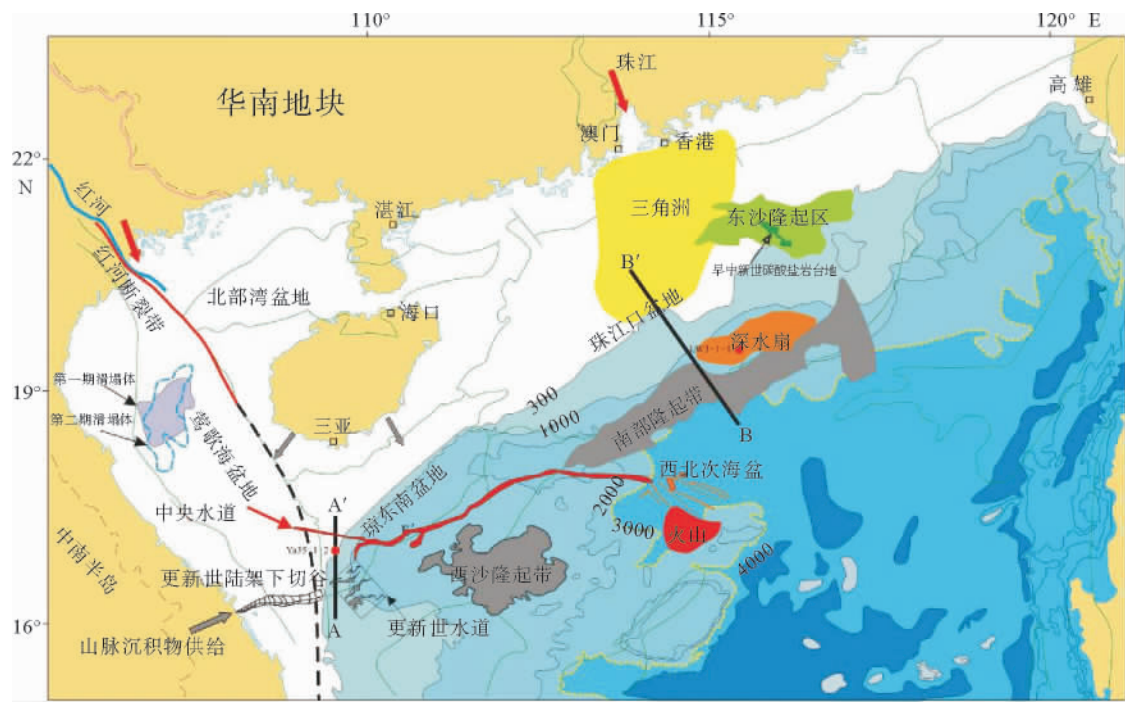


图 1 南海北部海底地形
(底图为现今的海底地形图,上面覆盖的扇体、水道、滑塌体属于不同地质时期,不属于现今海底,其中更新世陆架下切谷和水道图上规模有所夸大,具体见文中详述。其中深水扇位置据文献[39]等;莺歌海盆地滑塌体位置据文献[28];东沙隆起(台地)位置据文献[10])
Fig.1 The sea-floor map of northern South China Sea

的改变造成的不稳定和陆坡滑塌;(c)高浓度沉积物随河流入海产生的高密度流;(d)沿陆坡向下的砂质流(浅水流);(e)构造活动诱发的沉积物坍塌^[11-13]。过程(a)、(b)和(e)总的称为“触发流”,而(c)和(d)被命名为“非触发流”。天然气水合物向海底的突然释放,刺穿陆坡沉积物也可以在海底陆坡上产生触发流。

一旦沉积物重力流产生,沉积物将通过一系列不同的过程输送到深海区域。许多研究表明流体的性质取决于重力、流体时空上速度和流体压力分布、流体内部沉积物支撑机制、粒径的分布、组成和颗粒浓度、海底地形、流体和海底之间的摩擦力^[8]。Lowe(1982)根据流体行为和沉积物支撑机制对沉积物重力流进行了分类,主要包括浊流、流化流、液化流、颗粒流、碎屑流、滑塌—滑块、蠕动以及岩崩^[14]。

2 主要沉积物搬运类型

2.1 碎屑流

由于其充填物浓度高,碎屑流常以塑性、线性和黏性状态移动。它们的性质被认为与湿混凝土类

似^[15]。碎屑流规模可大可小,可以沿着陆坡长距离的向下搬运到盆地。

碎屑流是否具有强侵蚀能力一直是个争论的焦点。Posamentier(2003)通过浅水区 3D 地震数据记录了其垂向高差有 40~500 m 的槽,与重力搬运复合体有关,长 25~30 km,指示重力搬运的侵蚀可以在海底发生^[16]。另外,Mohrig 等(1998)的实验室试验^[13]和数值模拟^[15]指出碎屑流不可能侵蚀它们流动下伏的基底。在这些试验中,流体中沉积物的体积从开始到结束没有明显的增加。稠密的泥质流同样阻止沉积物从流体上部丢失。当流体速度减慢,流体厚度增加,内部沉积物浓度会减少。当流体速度增加,流体厚度变薄,流体内部沉积物浓度增加。流体受到其自身重力的驱使向下运动,受到底部摩擦力的影响而减慢。流体内部的压力在流体的行程中造成其散射。流体会继续沿陆坡向下进入相对较缓的海底,在那里流体曾放射性散开,流体压力减小到流体能够开始运动的摩擦力门限以下,向前的流动停止^[8]。

碎屑流沉积在琼东南陆坡广泛发育,在地震上多表现为杂乱、强弱振幅交替、局部成似扇体的透镜状特征(图 2),这与其线性的、大规模移动有关,陆架破折带附近钻井 Ya35-1-2 井揭示该地区多为杂

乱、分选较差的沉积特征为主(井位见图 1),这与可能与琼东南盆地陆架较窄、物源搬运距离短有关,在琼东南盆地典型的浊流沉积特征并不多见。珠江口盆地也广泛发育了碎屑流沉积(图 3),LW3-1 井取心显示碎屑流的沉积特征比较普遍,表现为薄层泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、中细粒砂岩夹杂小砾及粗砂等特征,被半深海泥岩相所覆盖(图 4a)。

2.2 浊流

湍流(牛顿流)是流态物质在流体内随机的运动,主要是以相对较低的沉积物浓度为主,浊流就是全部湍流化的流体。只有沉积物浓度足够低,使得朝上的湍流支撑颗粒在输送中处于悬浮状态^[11]。

浊流有侵蚀基底的能力。因此,当身体和尾部沉积物开始沉积的时候,浊流头仍可以持续的捕获沉积物,这是保持浊流持续搬运的原因所在。如果新捕获的侵蚀沉积物量小于沉积量,那么浊流最终将停止;如果新捕获的新沉积物量大于沉积中减少的量,流体获得更多的动量,继续沿陆坡向下侵蚀。然而,如果沉积物浓度变得太高,浊流可能被抑制,可能转化为其他沉积物输送类型。

浊流搬运形成的沉积特征与碎屑流不同,其地

震剖面上显示的崎岖海底地形、下切特征和强振幅连续反射特征大多数与浊流有关,在珠江口盆地比较显著发育(图 3)。从我国第一口水深超过 1 000 m 的深水钻井岩心上也可以看到典型的浊流沉积层(图 4b),表现为相对纯净的、分选较好的细砂层,单层厚度较小,局部单层厚度约 0.3 m。

2.3 砂质碎屑流

砂质碎屑流是由 Shanmugam 倡导和推崇的一种沉积物重力流类型^[18-19],实际上该流体类型就是目前主流学派所提出的高密度浊流,其底部是富含粗粒的砂或砾石的层状流体,上部是细粒的完全湍流化的流体^[20]。目前,主流观点认为深水区可做良好储层的粗粒砂体主要是与高密度浊流的搬运沉积有关。而 Shanmugam 认为从浊流的定义(完全湍流化得流体)来看,显然“高密度浊流”并不属于浊流,他称这种流体为砂质碎屑流。目前这是学术界争论的焦点,主流观点认为深水区可做储层的块状砂体主要是浊流形成的浊积砂体,而 Shanmugam 认为根据他所观察的近万米深水岩心认为深水区真正的浊流砂体几乎不存在,而主要是由于块体搬运和砂质碎屑流形成的砂质储层。基于本文对于

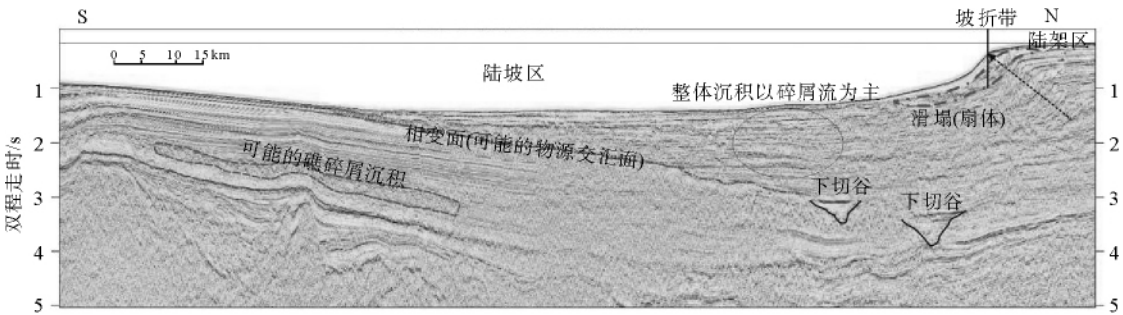


图 2 琼东南盆地陆架-陆坡地质大剖面(位置见图 1 中 A-A')

Fig. 2 The shelf-slope geologic seismic profile of Qiongdongnan Basin(Location see A-A' in Fig. 1)

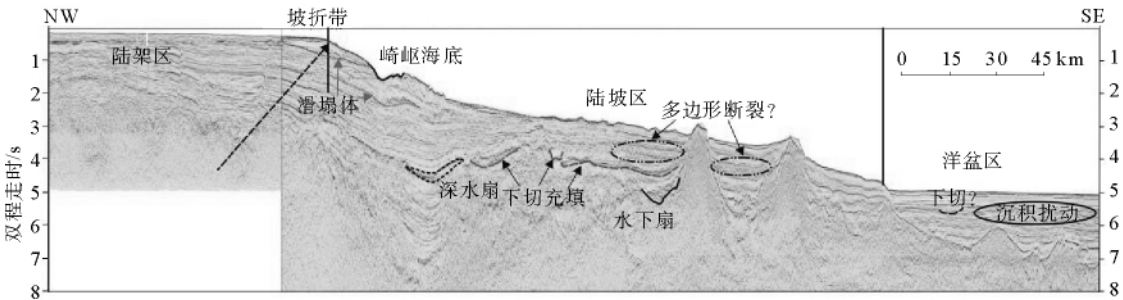


图 3 珠江口盆地陆架区至西北次海盆地地质大剖面(位置见图 1 中 B-B')

Fig. 3 The geologic seismic profile from Pear River Mouth Basin shelf to Southwest sub-basin of South China Sea(Location see B-B' in Fig. 1)

LW-1-1 井岩心的观察,发现完全淘洗干净的浊积岩发育并不普遍,主要还是参杂泥质和其他杂质的碎屑流沉积岩为主,这可能与珠江口盆地古珠江的供给有关。



图 4 珠江口盆地荔湾 3-1-1 井岩心

(a、b、c 分别代表碎屑流沉积、浊流沉积和钙质浊流沉积)

Fig. 4 The core pictures of well LW3-1-1

2.4 碳酸盐岩重力流

无论是现代沉积,还是地质记录中,在与碳酸盐台地毗邻的深水地区,都广泛发育有碳酸盐重力流沉积,这已为人们所熟知,这是由于台地的暴露剥蚀再搬运造成的。南海北部最典型的碳酸盐岩台地包括东沙隆起发育的碳酸盐岩台地和西沙隆起区碳酸盐岩台地(图 1)。著名的流花 11-1 生物礁油田就发育在东沙隆起,地质储量 1.64 亿 t^[10],西沙隆起区从中新世至今还有大量的生物礁发育,且规模巨大,波浪撞击、抬升(或海平面下降)造成的剥蚀都会产生碳酸盐岩沉积物重力流,具体表现在琼东南盆地南部发育的似礁体碎屑地震反射特征,呈层状杂乱、不连续反射特征,推测是其东南方向的西沙隆起区提供的物源(图 2)。珠江口盆地的荔湾 3-1-1 井的岩心显示有钙质灰岩薄夹层沉积,代表来自东沙隆起的碳酸盐岩沉积,这与来自东部的底流(或上升流)搬运有关^[21-22](图 1,图 4c)。

2.5 块体搬运

陆坡深水区大型海底滑坡是大陆边缘沉积物向深海盆地搬运的重要类型之一^[23-25],其形成与陆坡坡度、地质诱发事件有关^[26]。本文在南海北部琼东南盆地陆坡区发现了一个规模巨大的滑塌变形体,根据变形特征我们将滑塌体分为上部和下部两部分,图 5 中淡蓝色的线所圈的范围为滑塌体下部的范围,面积约 3 800 km²,红色线所圈的范围为上部变形体范围,面积约 7 000 km²(图 5)。总的来看其下部滑塌体范围要远小于其上部发育的变形体范围。从地震反射上来看其下部以线状的强弱杂乱反射特征为主,其上部存在众多规模较小的断层、地震反射比较连续(图 6,7)。本文认为该变形体可能为重力作用所致的残留滑塌体和重力流体,是重力搬运沉积的结果。

2.6 河流注入

大江大河的注入为被动陆缘提供了数量巨大的沉积物,从世界范围来看亚马孙扇、扎伊尔扇、印度扇、孟加拉扇,都位于被动陆缘,都由主要的河流供给,并在水下发育了复杂的水道体系^[27]。对南海北部陆缘进行供给的河流主要包括红河和珠江(图 1),渐新世以来莺歌海盆地接受了来自红河大规模的沉积物供给,中新世以来莺歌海盆地最大沉积厚度可以达到 10 700 m^[28],可以佐证红河物源之巨。珠江口盆地浅水区发育的大规模三角洲以及白云深水扇都反映了珠江对该地区沉积物输送的贡献(图 1)。

2.7 深水水道

中新世末以来,琼东南盆地西部地区发育了许多下切谷和水道,主要是发育在陆坡地区,陆架区也有下切特征,比如更新世深水水道^[29](图 1),其中最为著名、规模最大的是上新世琼东南中央水道(图 1),许多学者对该水道进行过研究^[13,28,30-32]。林畅松等(2001)提出琼东南盆地盆底轴向大型下切谷和重力流体系,认为由泥石流沉积、浊积水道—天然堤复合体及海相泥岩等组成,是典型的侵蚀型水道,是在海平面明显下降期侵蚀下切,随后在海进时期被充填形成的,它们沿陆架斜坡前缘带平行于岸线发育,形成壮观的环带状下切谷和重力流体系。陶维祥等(2006)认为该水道延伸长度 180~420 km,宽度 2~8 km,在不同地段切割形态和发育时代不同,大型水道携带大量粗碎屑物质进入中央坳陷带,形

成独特的、规模巨大的水下河道沉积体系,改善了中央坳陷带的储层物性。晚期河道“面状化”形成大量块状砂岩,顶面由于差异压实形成低幅构造,构成典型的构造—岩性复合圈闭,对于其成因没有太多探讨。朱伟林等(2007)分析该水道的形成机制时认为当时因南部隆起区范围较大,乐东凹陷南部与广海不连通,只能通过琼东南盆地东部与广海相连,使琼东南盆地成为莺歌海盆地的“纳潮口”。因莺歌海面积较大,通过琼东南盆地的水流量也很大,强烈的冲刷产生了大型的中央水道。第四纪以来,南部隆起区减小,莺歌海盆地的入海口扩大,中央水道不再发育。Yuan 等(2009)提出“中央水道”是“物源供给—构造诱发—海平面下降耦合—重力流中央汇聚”成因模式。苏明等(2009)认为该水道东段的主控因素为构造作用,西段的主控因素为重力流沉积作用。

该水道的发育使得沉积物在陆坡上长距离搬运成为可能,水道从莺歌海盆地西缘开始发育,终结于南海西北次海盆,地震剖面显示在南海西北次海盆发育了显著的侵蚀,发育分支水道(图 1,3)。推测

红河、海南岛供给莺歌海盆地的沉积物可能被部分的搬运到南海西北次海盆。本文对琼东南中央水道的再次研究发现,在莺歌海盆地中部上新世早期发育了两期滑塌体,第 2 期滑塌体比第 1 期范围有所增加(图 1),本文认为滑塌体与中央水道存在某种关系,都是 5.5 Ma 红河断裂反转的地质响应。从钻遇该水道的岩心镜下特征来看,其沉积类型比较复杂,分选性差,碎屑磨圆度也较差,胶结严重,属于非储层相重力流沉积,而不是典型的浊流沉积(图 7)。而更新世陆坡水道的形成与中南半岛陆架更新世的下切谷有直接关系,反映了当时沉积物对南海北部西缘的供给(图 1)。

3 重力流沉积物的再改造

许多洋底深海砂受到各种各样流体的改造都被很好的记录下来^[18,33-36]。等深流,单方向的平行陆坡等值线流动(地转的流),已经引起重力流沉积大规模的再搬运,在南海北部表现为大规模的沉积物波,以及珠江口盆地深水区的崎岖海底^[21-22,37]。

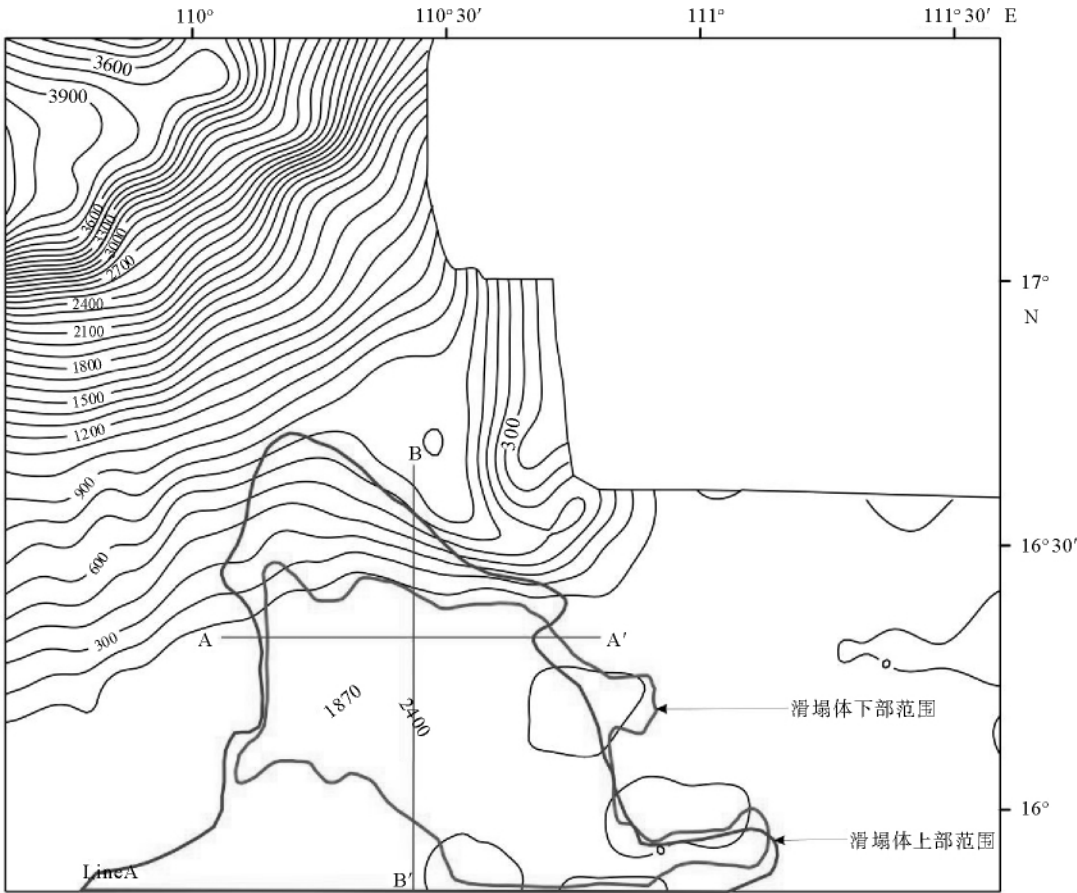


图 5 琼东南盆地上新世大型变形滑塌体范围平面图

Fig. 5 A plane map of Qiongdongnan Basin showing the Pliocene large deformed slide area

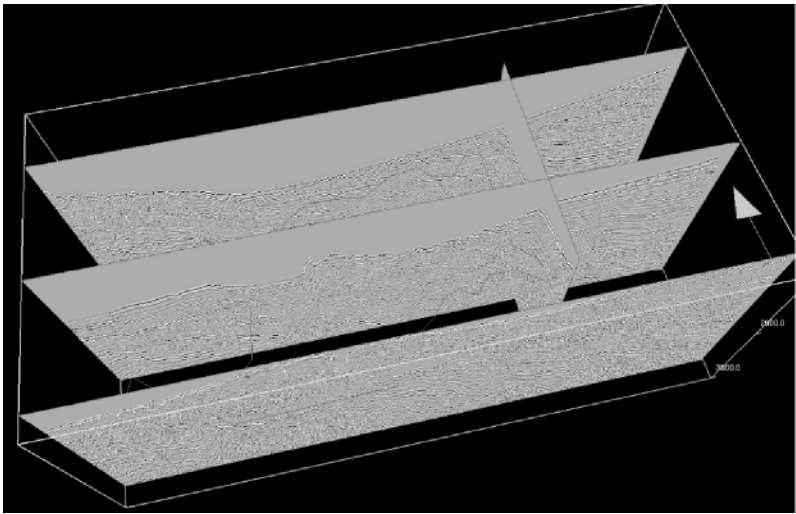


图 6 琼东南盆地上新世滑塌体地震剖面(位置见图 5 中 A-A',B-B')

Fig. 6 The seismic profile of Pliocene slide in Qiongdongnan Basin(Locations see A-A' and B-B' in Fig. 5)

除了单方向的流体,在封闭地区的内波内潮汐流,比如在海底峡谷里^[34,38]也可以再改造沉积物,在砂岩上形成双向的擦痕。复杂的擦痕在现今深海海底已经被记录,和深海砂岩中的一样^[39]。从目前的研究来看,这种等深流(或上升流)改造在珠江口盆地东沙隆起附近较明显,而峡谷里的内波改造在琼东南上新世中央水道内部有所反映,在琼东南其他地区改造作用不明显。

气田以后,深水区相关领域研究迅速升温^[40]。沉积物重力流是深水区物质输送的主要机制,对于深水区储层的发育和分布有控制作用,是研究的热点问题。在全球“从源到汇”研究计划中,块体搬运沉积体系和海底峡谷-水道搬运沉积体系是大陆坡-深海平原最重要的两种搬运沉积过程^[24]。

我国大规模的深水勘探始于本世纪初,主要针对南海北部深水区,南海北部陆坡区面积约 240 000 km²(不包括西沙隆起区)。2006 年中海石油公司在珠江口盆地白云深水区发现了一个地质储量近千亿立方米的大气田——荔湾 3-1 气田,水深在 1 500 m 左右,是我国深水勘探的里程碑^[28]。据报道,2010 年初当今世界最先进的第六代 3 000 m 深水半潜式钻井平台,在上海外高桥造船有限公司顺利出坞,成为中国深水工程装备造史上的一座新的里程碑。目前,中国石油、中国石化在南海深水区也有多个区块进行勘探,并进行了大规模的二维地震采集和三维地震采集,预计其第一口深水钻井将在琼东南盆地华光凹陷进行钻探。除了国内区块,3 大公司都在开拓海外深水市场,深水区将成为我国油气增储的另一个重要领域。

南海北部陆缘盆地与典型的大西洋型被动陆缘盆地类似,属于准被动大陆边缘。受重力控制的沉积物过程在大陆边缘陆坡地区普遍发育,对陆坡沉积非常重要,是南海北部深水区储层分布的具有重要控制因素。南海北部陆缘存在的沉积物搬运方式主要包括碎屑流、浊流、砂质碎屑流、碳酸盐岩重力流、块体搬运、河流搬运、深水水道搬运 7 种类型(图 8),部分沉积物经过了后期底流和内波的再改造,但

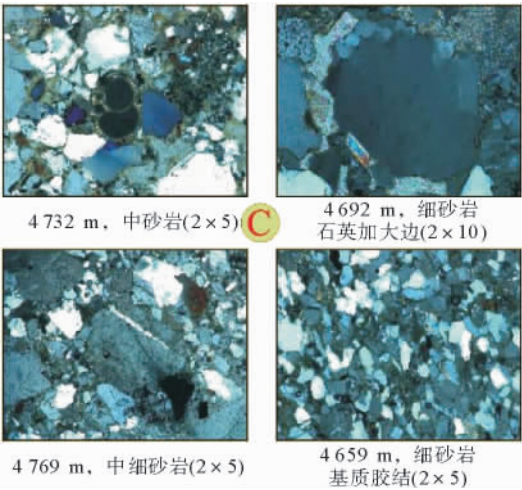


图 7 琼东南中央水道岩心镜下特征
(Ya35-1-2 井,据文献[32])

Fig. 7 The lithology under microscope for the sample from mid-Qiongdongnan Channel
(Well Ya35-1-2, from lit[32])

4 讨论

随着 20 世纪 80 年代中期以来在巴西 Campos 盆地、西非以及墨西哥湾深水区发现了许多大型油

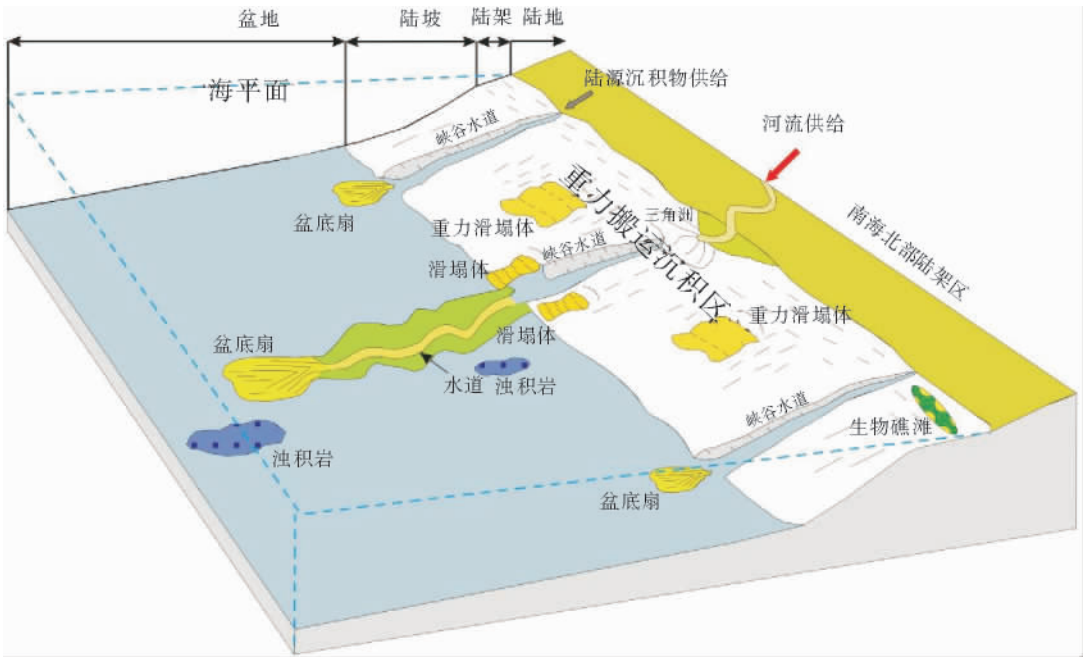


图 8 南海北部物源供给输送模式

Fig.8 The sediment supply model map of northern South China Sea

是改造规模有限。现今研究认为深水区的储层 80% 以上都是浊积岩^[1], 其中相当部分与深水水道砂有关。从南海北部目前深水勘探的资料来看,(砂质)碎屑流沉积、块体搬运沉积和深水水道砂可能是深水储层的主要类型,是下步勘探的重点。目前,钻井的揭示很少见典型、纯粹的浊流沉积,而碳酸盐岩重力流只能起到物源和沉积类型指示作用,厚度很小,无法作为有效储层。通过河道搬运到深水区的砂体(或扇体)在珠江口盆地可能具有较大的储集潜力。琼东南盆地陆架区近物源,钻井揭示浅水区储层分选性较差,那么,搬运距离相对较远的深水区可能存在分选较好、干净的砂体储层。

5 结论

- (1)南海北部深水区主要发育碎屑流、浊流、砂质碎屑流、碳酸盐岩重力流、块体搬运、河流搬运、深水水道搬运 7 种类型。
- (2)砂质碎屑流沉积可能是南海北部陆坡深水区广泛发育的一种沉积物搬运机制,其对于深水储层的分布具有重要的意义。
- (3)从各盆地来看,珠江口盆地深水储层受到河流的供给和后期流体改造影响明显,整体水动力条件较强。相对于陆架区,琼东南盆地深水区可能存在分选较好、干净的砂体储层,是勘探的有利区。

参考文献 (References)

[1] Pettingill H S and Weimer P. World wide deep water exploration and production: Past, present, and future[J]. The Leading Edge, 2002, 21: 371-376.

[2] Paulo J. Reservoir geophysics in deep and ultradeep water in the Campos Basin[J]. The Leading Edge, 1999, 18(7): 819-822.

[3] Khain V E, Polakova I D. Oil and gas potential of deep and ultra-deep water zones of Continental Margins[J]. Lithology and Mineral Resources, 2004, 39: 610-621.

[4] Mutti E and Normark W R. An integrated approach to the study of turbidite systems[M]. in P. Weimer, and M. H. Link, eds., Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems: New York, Springer-Verlag, 1991: 75-106.

[5] Stelling C E, Bouma A H and Stone C G. Fine-grained turbidite systems: overview, Fine-grained Turbidite Systems[M]. AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication, 2000, 68:1-8.

[6] Bouma A H, Normark W R, and Barnes N E. COMFAN: Needs and initial results, Submarine Fans and Related Turbidite Systems[M]: New York, Springer-Verlag, 1985: 7-12.

[7] Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary system: New models for the 21st century[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17:125-135.

[8] Weimer P, Slatt R M. Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Settings[M]. AAPG Studies in Geology 57, AAPG/Datapages Discovery Series 8, 2007, 111-112.

[9] Middleton G V and Hampton M A. Sediment gravity flows;

- mechanics of flow and deposition[M]. Turbidites and Deep-Water Sedimentation, Pacific Section SEPM publication, 1973;1-38.
- [10] Sattler U, Zampetti V, Schlager W, Immenhauser A. Late leaching under deep burial conditions: a case study from the Miocene Zhujiang Carbonate Reservoir, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology. 2004(21):977-992.
- [11] Kneller B and Buckee C. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological applications[J]. Sedimentology, 2000, 47 (Supplement 1):62-94.
- [12] Mulder T, Migeon S, Savoye B, et al. Twentieth century floods recorded in the deep Mediterranean sediments[J]. Geological Society America, 2001, 113: 1011-1014.
- [13] Yuan S Q, Lv F L, Wu S G, et al. Seismic stratigraphy of the Qiongdongnan deep sea channel, Northwestern South China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(2):250-259.
- [14] Lowe D R. Sediment gravity flows II: Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents[J]. Journal Sedimentary Petrology, 1982, 52: 279-297.
- [15] Pratson L F, Imran J, Parker G, et al. Debris flows vs. turbidity currents: a modeling comparison of their dynamics and deposits, in A. H. Bouma, and C. G. Stone, eds., Fine-grained Turbidite Systems[M]. AAPG Memoir 72; SEPM Special Publication 68, 2000: 57-71.
- [16] Posamentier H W. Depositional elements associated with a basin floor channel-levee system: case study from the Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 677-690.
- [17] Mohrig D, Whipple K X, Hondzo M, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows[J]. Geological Society America Bulletin, 1998, 110: 387-394.
- [18] Shanmugam G. The Bouma Sequence and the turbidite mind set[J]. Earth-Science Reviews, 1997, 42: 201-229.
- [19] Sattler U, Zampetti V, Schlager W, Immenhauser A. Late leaching under deep burial conditions: a case study from the Miocene Zhujiang Carbonate Reservoir, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology. 2004(21):977-992.
- [20] Postma G, Nemec W and Kleinspehn K L. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement[J]. Sedimentary Geology, 1988, 58: 47-61.
- [21] 邵磊,李学杰,耿建华,等. 南海北部深海底流沉积作用[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(6):771-777. [SHAO Lei, LI Xuejie, GENG, Jianhua, et al. The deepwater bottom sedimentation effect of northern South China Sea[J]. Science in China Series D, 2007, 37(6): 771-777.]
- [22] Wang H R, Yuan S Q and Gao H F. The contourite system and the framework of contour current circulation in the South China Sea[J]. Geo-Temas, 2010, 7:179-180.
- [23] Haflidason H, Sejrup H, Nygard A, et al. The Storegga Slide: architecture, geometry and slide development[J]. Marine Geology, 2004, 213(1-4):201-234.
- [24] 王大伟,吴时国,董冬冬,等. 琼东南盆地第四纪块体搬运体系的地震特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2009,29(3):69-74. [WANG Dawei, WU Shiguo, DONG Dongdong, et al. Seismic characteristics of Quaternary mass transport deposits in Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(3): 69-74.]
- [25] 姚根顺,袁圣强,马玉波,等. 琼东南盆地华光凹陷深水重力搬运沉积体系及其油气勘探意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2009, 34(3): 471-476. [YAO Genshun, YUAN Shengqiang, MA Yubo, et al. Deepwater Mass Transport Deposition System of Huaguang Depression, Qiongdongnan Basin and its Significance for Hydrocarbon Exploration[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(3): 471-476.]
- [26] Brown H E, Holbrook W S, Hornbach M J, et al. Slide structure and role of gas hydrate at the northern boundary of the Storegga Slide, offshore Norway[J]. Marine Geology, 2006, 229: 179-186.
- [27] Kolla V. A review of sinuous channel avulsion patterns in some major deep-sea fans and factors controlling them[J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24: 450-469.
- [28] 朱伟林. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京:石油工业出版社, 2007: 8-52. [ZHU Weilin. The Gas Geology of Northern Margin of South China Sea[M]. Beijing: Oil press, 2007: 8-52.]
- [29] Yuan S Q, Wu S G, Thomas L, et al. Fine-grained Pleistocene deepwater turbidite channel system on the slope of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009a, 26:1441-1451.
- [30] 林畅松,刘景彦,蔡世祥,等. 莺-琼盆地大型下切谷和海底重力流体体系的沉积构成和发育背景[J]. 科学通报,2001,46(1): 69-72. [LIN Changsong, LIU Jingyan, CAI Shixiang, et al. The large scale incision valley, seafloor gravity flow system and its develop setting in Yinggehai and Qiongdongnan Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(1): 69-72.]
- [31] 陶维祥,何仕斌,赵志刚,等. 琼东南盆地深水区域储层分布规律[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 554-559. [TAO Weixiang, HE Shibin, ZHAO Zhigang, et al. Reservoir distribution in deepwater area of the Qiongdongnan Basin. Petroleum Geology & Experiment. 2006, 28(6):554-559.]
- [32] 苏明,李俊良,姜涛,等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因[J]. 海洋地质与第四纪地质,2009,29(4):85-93. [SU Ming, LI Junliang, JIANG Tao, et al. Morphological features and formation mechanism of central canyon in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(4): 85-93.]
- [33] Brown H E, Holbrook W S, Hornbach M J, et al. Slide structure and role of gas hydrate at the northern boundary of the Storegga Slide, offshore Norway[J]. Marine Geology, 2006, 229: 179-186.
- [34] Bouma A H, Hollister C D. Deep ocean sedimentation, in G. V. Middleton. and A. H. Bouma, eds, Turbidites and Deep-

water Sedimentation [M]. SEPM Pacific Section Short Course, 1973; 79-118.

[35] Stow D A V, Lovell J P B. Contourites: Their recognition in modern and ancient sediments[J]. Earth-Science Reviews, 1979,14:251-291.

[36] Stow D A V, Holbrook J A. North Atlantic contourites: an overview. Fine grained Sediments: Processes and Facies [M]. The Geological Society Special Publication 15, 1984; 245-256.

[37] 王海荣,王英民,邱燕,等. 南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波[J]. 自然科学进展,2007,17(9):1235-1243. [WANG Hairong, WANG Yingmin, QIU Yan, et al. The deepwater sediment waves in the northern margin of northern South China Sea[J]. Progress in natural science,2007,17(9):1235-1243.]

[38] Shepard F P, Dill R F and Von Rad U. Physiography and sedimentary processes of La Jolla Submarine Fan and Fan-Valley, California[J]. AAPG Bulletin, 1969, 53: 39-420.

[39] 彭大钧,庞雄,陈长民,等. 从浅水陆架走向深水陆坡—南海深水扇系统的研究[J]. 沉积学报, 2005, 23(01): 1-11. [PENG Dajun,PANG Xiong, CHEN Changmin, et al. From shallow-water shelf to deep-water slope-the study on deep-water fan systems in South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005,23(01):1-11.]

[40] 吴时国,袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J]. 天然气地球科学,2005,16(6):693-699. [WU Shiguo, YUAN Shengqiang. Advance of exploration and petroleum geological features of deepwater hydrocarbon in the world[J]. Natural Gas Geoscience, 2005,16(6):693-699.]

DEEPWATER SEDIMENT TRANSPORTATION MODELS FOR
NORTHERN SOUTH CHINA SEA SLOPES

YUAN Shengqiang¹, WU Shiguo², ZHAO Zongju¹, XU Fangjian³

(1 State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071;

3 Faculty of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: There are 7 types of transportation in the northern South China Sea, including debris flow, turbidity flow, sandy debris flow, carbonate gravity flow, mass transport, river-influx, and deepwater channels. All of them play important role in the formation of sediment types and distribution of reservoirs. Sandy debris flow deposits, mass transport complex and deepwater channel sands are the main types of reservoirs, and the turbidite sand are less common in the study area. The deepwater reservoir in the Pearl River Mouth Basin was influenced by river supply reworked by bottom current, and carbonate gravity flow existed, which proved the strong hydraulic condition in this basin; the deepwater reservoir distribution in Qiongdongnan Basin was controlled by debris flow and influenced by deepwater channels, there may exist good sorted clean sand body in the deepwater area of Qiongdongnan Basin compared to the shallow water area, which could have good exploration prospective.

Key words: deepwater area; sediment transport; model; sediment gravity flow; northern South China Sea