

文章编号: 1000-0550(2009) 05-0922-09

南海北部陆坡深水沉积体系研究^①

吴时国 秦蕴珊

(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 山东青岛 266071)

摘 要 陆源碎屑物质是深水地质研究的重要内容,在全球“从源到汇”研究计划中占有重要地位。海底峡谷-水道搬运沉积体系和块体搬运沉积体系(海底滑坡)是大陆坡最重要的两种搬运沉积过程。根据高分辨率 2D、3D 多道反射地震资料、多波束测深法、旁扫声纳、重力与活塞取样等资料研究发现,在南海北部陆坡地层中,广泛发育大型深水块体搬运体系和相应深水水道沉积体系。针对白云凹陷和琼东南盆地深水陆坡区的实例研究,揭示了典型深水块体搬运的平面形态、内部结构和变形过程,进而深入认识这一地质体的形成演化过程。采用 2D/3D 地震资料和多种数值模拟新方法发现了第四系深水高弯曲水道及其沉积相特征、上新世琼东南盆地中央水道及中新世古珠江深水水道体系。深水沉积体系对研究我国深水油气资源的成因机理和分布规律,以及深水工程的地质灾害预测和防护具有十分重要的意义。

关键词 块体搬运沉积体系 深水水道沉积体系 3D 地震属性 大陆坡 南海

第一作者简介 吴时国 男 1963 年出生 研究员 海洋地球物理 E-mail: swu@ms.qdio.ac.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 前言

陆源碎屑物质在全球“源到汇”研究中占有重要地位。随着我国经济的快速发展,对油气资源的需求急剧增加,但现有条件下的油气产量仍不能满足经济发展的需求,因此人们把目光投向深水区及新能源,如深水油气和天然气水合物。中国石油天然气集团公司及中国海洋石油总公司等大型企业纷纷确定了深水油气勘探战略选区。20 世纪 80 年代后期,人们发现富含泥岩的陆坡沉积体系的下端发育大量的砂岩,逐渐意识到水道作为通向盆底的砂体通道的重要性^[1-2]。同样,深水油气勘探面临着巨大的挑战,对现代发生的重力流沉积搬运过程等缺乏足够的重视,这种沉积作用包括滑动(slide)、滑塌(slope)和碎屑流(debris flow)等重力流作用过程。一般来说,单一滑动可以沿着十分平缓的斜坡角($0.5^{\circ} \sim 3^{\circ}$)将沉积物运移至数百千米,并可以持续 1 h 到数天不等,它可将沉积物运移至数百千米。这种沉积过程不仅严重危害深水油气开发平台、油气管线、海底电缆等设施,而且存在许多悬而未解的科学问题^[1-9]。

1 深水沉积体系的类型及其特征

本文使用的“深水沉积体系(deepwater deposit-

tional system)”这一术语是指沉积于深水中的陆源碎屑沉积物,也就是陆架坡折带到盆地底部的重力流沉积物(gravity flow sediment)。它包括滑动、滑塌、液化流、碎屑流、浊流(turbid flow)等沉积作用过程,但其中最重要的两种沉积作用过程就是浊流和碎屑流沉积作用。因此,深水沉积体系也相应地发育了两种重要的深水沉积类型:即水道沉积体系和块体搬运沉积体系^[10-16]。

1.1 深水水道沉积体系

深水水道沉积体系广泛发育在陆坡、陆隆和深海平原等地。本文中所讲的“水道”是指由水流作用产生的细长负地形,或由浊流作用形成的沉积物搬运的长期水流通道。浊流沉积体系内水道的形态和位置受控于沉积作用,亦或是沉积作用和侵蚀作用二者的共同作用^[10]。由于研究尺度所限,当论及到地震剖面上或是露头资料中与水道类似的特征时,这一术语有时会引起争议。

深水水道沉积体系具有以下特征: 1) 深水沉积水道作为粗粒沉积物的通道,联结外陆架、陆坡和深水盆地。2) 在平面图上,水道形态从直流到高曲流变化不一。流体的坡降、体积、粒度和频率都影响水道的形态和发育状况。沉积环境过渡带向席状砂下倾,贯穿于水道-朵叶体过渡带区域。3) 水道具有

①国家自然科学基金项目(批准号: 40876032)及中国科学院重要方向性项目(编号: KZCX2-YW-229)资助。

收稿日期: 2009-02-22 收修修改稿日期: 2009-06-27

较小的宽厚比,其长度与宽度相差很大。水道类型从侵蚀型到侵蚀—加积型,再到完全加积型(水道—天然堤),各不相同。4)在地震反射资料上,水道充填表现为不同的几何形态,包括:叠瓦状(横向迁移组合)、加积充填偏移型和完全加积充填型。5)水道充填沉积的岩相和粒度分布也极其不同,产生许多阻碍压力传递和流体连通性的障碍和隔板。

深水水道沉积体系主要包括四种沉积类型:(1)水道沉积,受侵蚀或沉积作用共同作用的粗粒沉积物;(2)漫溢沉积,指邻近水道、横向分布范围较广的细粒沉积物,通常包括天然堤上部细粒沉积或天然堤外缘平坦地形的细粒沉积物;(3)朵叶体或席状砂,由多个缺失顶底的 Bouma 序列堆积组合而成,呈板状,具有高的砂泥比,进一步可分为复合席状砂和层状复合砂;(4)远端的薄层沉积包括天然堤、水道间沉积或扇端沉积,由极细砂岩或粉砂岩组成,包含大量波纹层理、包卷层理、小型生物扰动构造及递变层理^[11]。深水水道充填沉积物性质变化很大,主要依赖于相对海平面变化和构造运动等,沉积物类型可为砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩以及它们的混合充填。一般来说,深水水道具有两种成因机制:重力流和底流,且以重力流作用(主要是浊流和碎屑流)为主。水道充填沉积可由多种重力流沉积物组成,如浊流、碎屑流和海底滑坡块体等^[12]。通常水道充填为粒度向上减小的正粒序沉积,这与深水水道类型自下而上从多支流型水道到小型具有堤坝的水道沉积体系相一致。

在不同的水道沉积体系中,水道充填沉积的厚度各不相同。从扇根到扇端水道充填厚度减小。单层水道充填可能只有几米厚,而复合水道充填厚度可达几百米以上。水道充填厚度主要受控于水道活动时间、流经水道的水流体积,以及与水道是否决口还是保持主要的加积作用有关。单个水道形成可分为侵蚀期、充填期、溢出期和泥岩充填期,而复合水道的形成则为上个过程多次重复^[13]。

一般来说,水道扇根的宽深比明显较低(30:1到80:1)、砂泥比较高(75%~90%)、具有较好的纵向连通性但横向连通性相对较差;扇中侵蚀接触带很少、水道充填地层的宽深比较高、砂泥比下降到65%~80%、横向上连通性增加而纵向连通性相对较差。在一个沉积层序内,水道体系的垂向变化明显,从区域性的大型侵蚀水道到底部侵蚀—加积型支流水道,到顶部具有堤坝的小型加积水道,主要发育底部为砂岩、顶部为泥岩的正粒序沉积。水道轴部沉积的砂泥

比为50%~70%,而边缘堤坝主要由泥岩组成。通常,人们可预测从水道轴部(高砂泥比,高振幅反射)到水道边缘(低砂泥比,低振幅反射)砂泥比的变化。综上所述,如果数据表现为各井的测井特征不相同且短距离内砂泥比变化很大,则可推测该沉积结构单元很可能是水道充填^[14-15]。

1.2 深水块体搬运沉积体系

块体搬运沉积体系(Mass transport deposits,简称MTDs)是发生在外陆架/大陆坡的一种沉积物搬运机制^[1-5],包括滑动、滑塌和碎屑流等重力流作用过程。块体搬运体系作为大陆边缘沉积物扩散系统的重要组成部分,在世界范围内广泛存在,是深水沉积体系的重要研究内容。

许多沉积学家从沉积学的角度研究深水块体沉积物,提出了块体搬运体系的概念。Weimer最初使用“块体搬运复合体”(Mass transport complexes,简称MTCs)来描述这种深水沉积物搬运机制,指出该沉积体系是位于沉积层序下部的底部发生侵蚀、被水道和天然堤上覆的一种沉积地层单元^[1]。Moscariello进一步将重力流分为两大类型:块体搬运体系和浊流,并明确指出块体搬运体系包括滑动、滑塌和碎屑流,并对各种类型重力流的形成机制、沉积物构造和地球物理特征进行了分析^[17]。随着研究的深入,块体搬运沉积体系渐渐成为一个通用的术语,用来描述各种类型的块体搬运。作者认为,“块体搬运沉积体系”和“块体搬运复合体”是在不同时间、从不同角度研究同一深水沉积现象时,提出的不同术语,具有相同内涵。同样,目前海洋灾害研究热点之一的滑坡也属于块体搬运体系,滑坡是现今海底已形成或正在形成的块体搬运体系。在过去的10年里,大量三维地震解释数据表明:沿着绝大多数的深水区边界,块体沉积物广泛发育,且某些盆地第四纪晚期的沉积层序大半由块体沉积物组成^[18-20]。研究中采用块体搬运体系这一概念,并通过研究区内的三维地震资料分析这一深水沉积作用。

2 南海北部陆坡水道沉积体系的特征与分布

南海北部陆坡不同时代的深水水道沉积体系不断被揭示。其中,中新世古珠江深水水道沉积体系的研究最为详细,并且具有重大的油气发现。上新世和第四系地层中的深水水道沉积体系的研究也取得了很大进展(图1)。

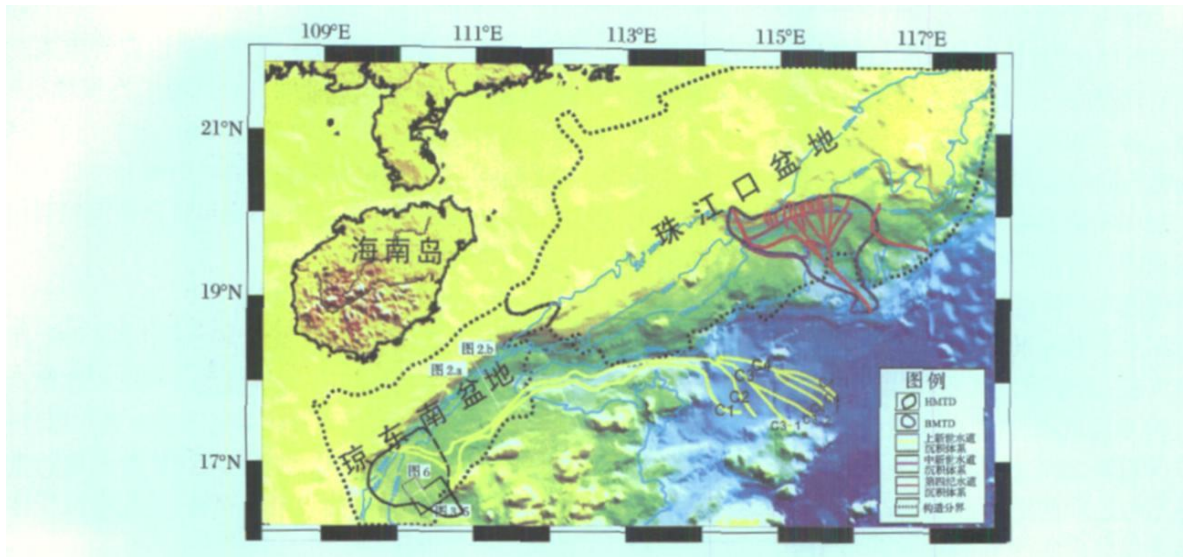


图 1 南海北部陆坡典型深水沉积体系的分布特征

Fig 1 The distribution of typical deepwater depositional system in the northern South China Sea

2.1 白云凹陷中新世(珠江组—韩江组)深水水道沉积体系

中国海洋石油总公司已经对中新世古珠江深水水道沉积体系进行了细致地研究^[21~23]。经过系统的层序地层学研究,在 23.8~10.5 Ma 的地层中,共划分 7 个三级层序^[21]。在白云凹陷识别出各层序的低位体系域海底扇^[22,23],即中新世深水水道沉积体系(图 1)。

该水道沉积体系上倾方向发育峡谷水道,具有强烈下切的特征,主要分布在凹陷的北缘和西部断裂带,两处峡谷水道的侵蚀特征和峡谷充填沉积方式具有明显的差异性:北缘发育的水道具有强烈的削截深切(可达 100~200 m)、侧向迁移、垂向叠加以及从“V”型谷向“U”型谷变化的特点;西部的水道则表现为侵蚀强度不大、峡谷发育宽缓、分布面积广的特点。水道沉积体系的下倾方向发育斜坡扇和盆地扇,在地震剖面上表现为低位体系域沉积时期发育在陆坡部位的上凸和下凹的丘状沉积体,呈中—弱振幅双向下超于层序界面之上,而且在其上部可见轻微的削截现象,分布面积可达 1 000 km²。在峡谷水道发育带和其相连的陆架坡折带发育了具有前积结构的低位楔状体沉积,下超在斜坡扇和盆地扇之上,向物源方向层层上超于层序界面之上,表现为典型的水道沉积充填的特征。

中新世(23.8~10.5 Ma)的水道沉积体系经历了三个阶段:23.8~17.5 Ma 初期水道沉积体系充填在凹陷中心深陷的有限低地貌区内;17.5~16.5 Ma

白云凹陷新的强烈沉降作用产生深水陆坡环境,围堰形成。大量自西北而来的陆源碎屑沉积物,沿着受 NNE 向构造控制的沉积凹槽,在白云凹陷开始发育大规模的深水水道沉积体系;16.5~10.5 Ma 沉降作用最强烈,围堰作用更明显,陆坡内盆地充填空间限制,沉积速率也最大,特别是 13.8 Ma 出现最大的一次大海退,早期断裂也受到快速沉降的影响,沉积中心在 13.8 Ma 以前靠白云凹陷的西侧,但在 13.8~12.5 Ma 沉积中心东移,并在 12.5 Ma 变得离散,最终中新世水道沉积体系形成。

2.2 琼东南盆地上新世中央水道沉积体系

上新世琼东南中央水道体系发育在南海北部陆坡深水区,海底水道起源于莺歌海盆地东缘,穿过琼东南盆地,然后进入西北次海盆,水深 3 000~3 500 m,长约 570 km,宽约 5~11 km,呈 SW—NE 方向延伸(图 1)^[24]。

该水道在地震剖面上整体表现为强振幅,横向上连续或者半连续,纵向上为强振幅叠加,底部呈“V”字形,表明水道侵蚀能力比较强,图 2 中沉积物均有向右侧偏移沉积的特征,这是由于受到科里奥利力的作用。在上新世时期,研究区域沉积环境比较稳定,以大套的泥岩沉积为主,该水道从莺琼陆坡携带大量的砂体,在不断侵蚀与沉积的过程中,形成多套叠置砂体,这些粗粒和细粒沉积物纵向上互相叠置,这些沉积物的转换界面在地震剖面上表现为强振幅的叠加。由于总体岩性的不同,水道的地震反射与周围围岩有明显的差别,周围围岩以弱反射为主,而水道内

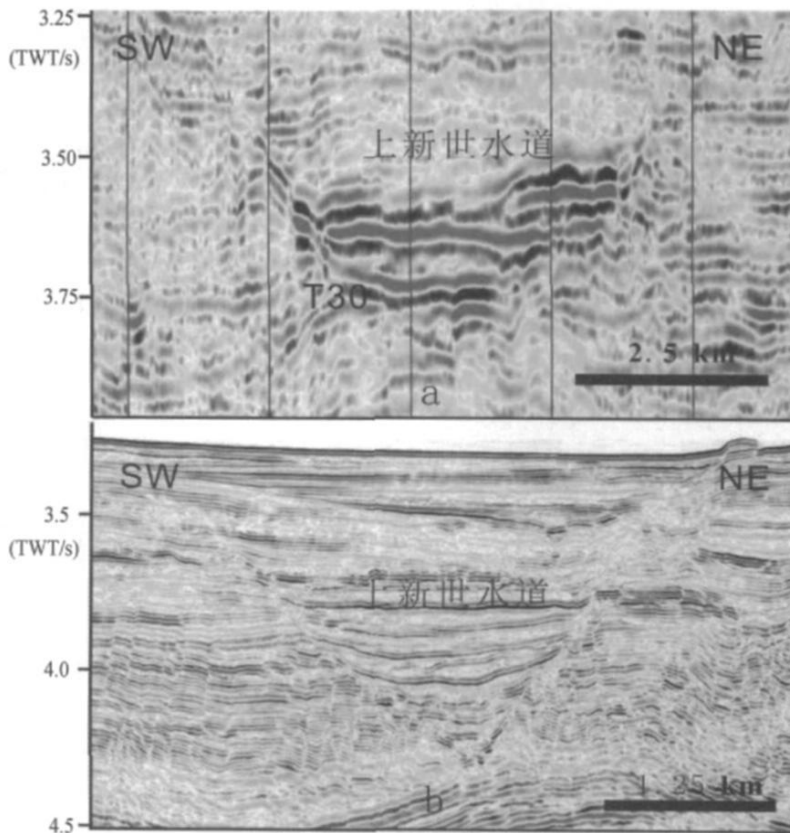


图 2 上新世水道沉积体系的地震横剖面

a) 琼东南盆地陵水凹陷; b) 琼东南盆地长昌凹陷

Fig 2 The cross section of the Pliocene paleochannel depositional system

a) seismic line shows the channel in the Lingshui depression of Qiongdongnan Basin;

b) seismic line shows the channel in the Changchang depression of Qiongdongnan Basin

部以强反射为主。中海石油总公司在浅水区有 Ya35-1-2 钻井钻遇该水道, 沉积主要由细砂和粉砂组成。

2.3 琼东南盆地第四系高弯曲水道沉积体系

在琼东南盆地南部陆坡区, 利用最新采集的 3D 地震资料, 在第四系中发现四条浊积水道。水道的识别以精细的 3D 地震资料做基础, 能够清晰得观察到水道的侵蚀谷、侧向加积体、堤坝和垂向二次侵蚀等特征(图 3)。通过分析, 发现了多套水道沉积, 尤其是高弯曲水道沉积体系^[25]。该体系发育四条主水道, 自北向南依次编号为 C1、C2、C3 和 C4 而在延伸方向上, 水道 C3 和 C4 出现分流特征, 分别演化为分支水道 C3-1、C3-2 和 C4-1、C4-2、C4-3。这些水道呈 W—SE 到 NWW—SEE 方向展布, 其在不同位置, 水道的形态、宽度、长度和地震相不同。C1 下切特征明显中等—高振幅、连续性差杂乱反射, 且在左侧发育沉积物波; C2 下切特征明显, 中间为低—中等振幅连续相, 上部为中等—高振幅连续相; C3 下切特征明

显, 低振幅连续复合地震相; C4 由 3 个支流水道组成, 且它们都是低振幅连续相, 通过这些水道下切形态、深度、地震反射特征和沉积厚度, 可推测其形成于同一时期, 且物源均来自于 NW 方向。

3 南海北部陆坡深水块体搬运沉积体系的特征与分布

南海北部陆坡深水块体搬运体系主要受火山、地震、海啸、天然气水合物分解、沿岸流等影响, 沿着大陆斜坡、峡谷水道、隆起翼部、水道侧壁发育, 从沉积特征可划分为滑动、滑塌和碎屑流^[26]。这几种重力流沉积之间可相互转化, 形成多种类型的沉积复合体。随着研究的不断深入, 发现南海北部 E113°~E117°之间的外陆架/陆坡存在多个块体搬运体系。目前, 研究比较深入的包括白云深水块体搬运沉积体系(BMTDs)和华光块体搬运沉积体系(HMTDs)。

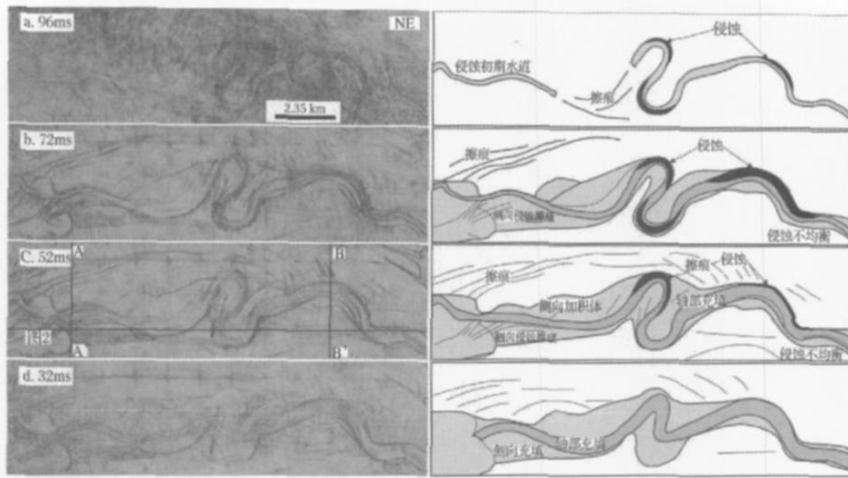


图 3 3D 水道相干切片

(a,b,c,d 分别为 96 ms,72 ms,52 ms 和 32 ms 的层拉平相干时间切片)

Fig. 3 3D seismic coherency time slice

(a,b,c,d is the time slice of 96 ms, 72 ms, 52 ms and 32 ms separately from the Qiongdongnan Basin after horizon flattening.)

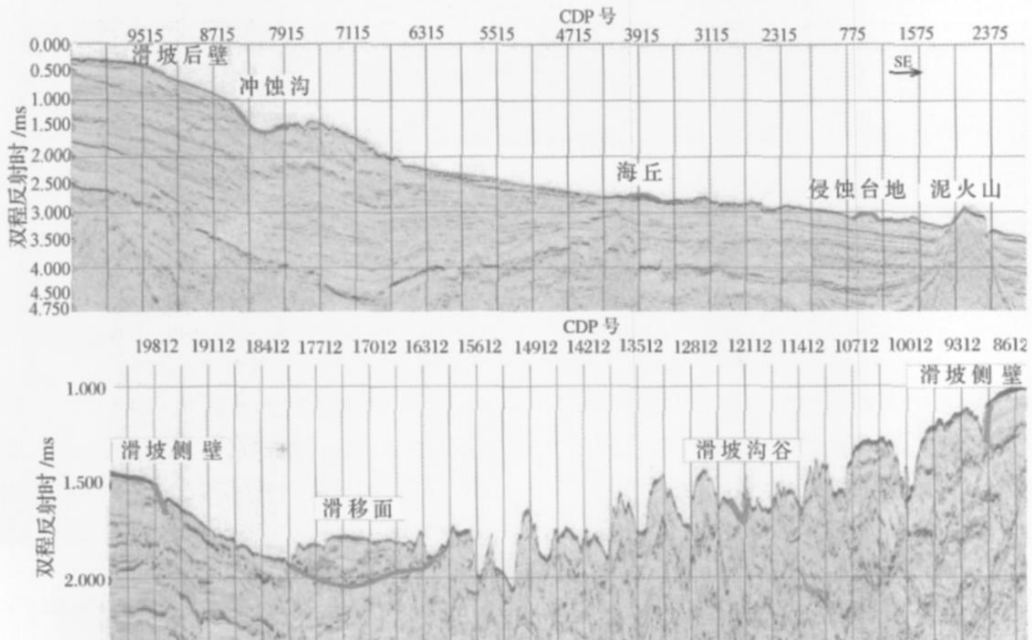


图 4 海底滑坡的地貌形态

a) 沿滑坡走向地震纵剖面; b) 垂直滑坡走向地震纵剖面

Fig. 4 The main geomorphological elements that characterize the submarine landslide.

a) seismic inline; b) seismic crossline

3 1 白云深水块体搬运沉积体系

在神狐海域天然气水合物调查中,我们发现了第四纪深水块体搬运沉积体系(或白云海底滑坡),据最新估算该沉积体系面积达 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ [27]。结合多波束精密测深、高品质的地震资料和地质采样进一步研究海底滑坡的地形地貌特征、滑体的几何形态

(图 1)。

滑坡根部是滑坡开始形成的部位,为地质薄弱带,当遭受地震或高沉积速率等因素影响时,地质体便开始沿着断裂面或滑坡面下滑。地震资料显示,滑坡根部的海底表层几何特征与其地貌相对应,主要有陡崖、海台、陡坡、海底断块台地、冲刷沟槽、海谷、海

丘、海山等微地貌(图 4)。三维地震资料显示滑坡具有极为复杂的内部构造。主要有以下四种地震相:(1)楔状弱振幅杂乱地震相,位于斜坡下部,外形成丘状,以杂乱反射结构为重要特征,反映不稳定杂乱堆积的产物;(2)块状平行或波状弱振幅中连续地震相,与滑坡体内部滑脱断层发育有关,受滑脱断层的切割沿斜坡呈明显的阶梯状下滑,外形呈块状或丘状,内部以平行、波状或丘状反射结构为特征,反映不稳定块体的滑动;(3)丘状/透镜体状前积地震相,大型前积反射结构特征,透镜状或丘状外形,出现于早期的滑坡体;(4)谷状水平充填中振幅中连续地震相,剖面上以顶平底凸的谷状外形为特征,内部为水平充填反射结构,平面上呈带状分布。

滑坡中部坡度明显降低,丘状滑坡体(slide body)指滑坡的主体,在外部形态上主要表现为冲蚀沟、反坡向台坎、海谷、海丘、海山等微地貌。内部结构上继承发育了滑坡根部的楔状弱振幅杂乱地震相、谷状水平充填中振幅中连续地震相、丘状/透镜体状前积地震相地震相特征,席状亚平行/波状弱振幅连续地震相发育,以波状—亚平行反射结构为特征,外形呈丘状—席状,这与滑坡体逐渐向深水盆地区推进相关。

沉积物流舌状体(sediment flow lobe)指由滑坡体滑动至平坦的海区,转变至沉积物流后产生的沉积物,Shanmugam认为该类沉积物属于碎屑流沉积^[2]。滑坡前缘深入到深海盆地,外部形态最为简单,主要

为滑坡前积形成的海丘及海底台地,地震剖面显示,其内部主要为席状亚平行弱振幅连续地震相,表征了滑坡体的逐渐消亡过程。另外在贯穿整条地震剖面,可以发现滑坡下部还存在一明显杂乱地震带将滑坡体与下部未变形底层分开,该层即是滑坡面,是一套沉积物液化和饱含流体活动的地层。

3.2 琼东南盆地南部斜坡深水块体搬运沉积体系

在琼东南盆地南部斜坡,我们发现华光块体搬运体系。HMTD是西北陆坡诸多块体搬运体系中的一个规模比较大的体系,面积约 5 000 km²(图 1)。由于缺乏钻井资料,无法对起发育的地质年代做出精确估算,根据地震层序的识别判断出该套地层属于第四系地层^[26]。

HMTD的外部形态与侧面地层具有明显的不同,该差异不是陡壁,而是沿着地形呈现侧向上超形态,说明 HMTD在流动过程中对侧向地层的侵蚀能力较弱,是沿着地势流动,物源主要来自上陆坡的地势较高地区,不是来自侧翼的沉积物,初步判断研究区内 HMTD的流动方向可能是北西—南东向(图 5)。研究发现,沉积地层的崎岖不平、起伏很大,显示地层沉积中存在普遍的蠕变现象,并且在局部出现了滑动及滑塌现象。这些现象说明侧面地层由于受到地形坡度的影响,形成了一个蠕变变形区,但这种蠕变仅仅造成了局部小规模滑动和滑塌现象,并且这些重力流(滑动或滑塌)仅仅是在原地堆积,未进一步发展形成碎屑流。

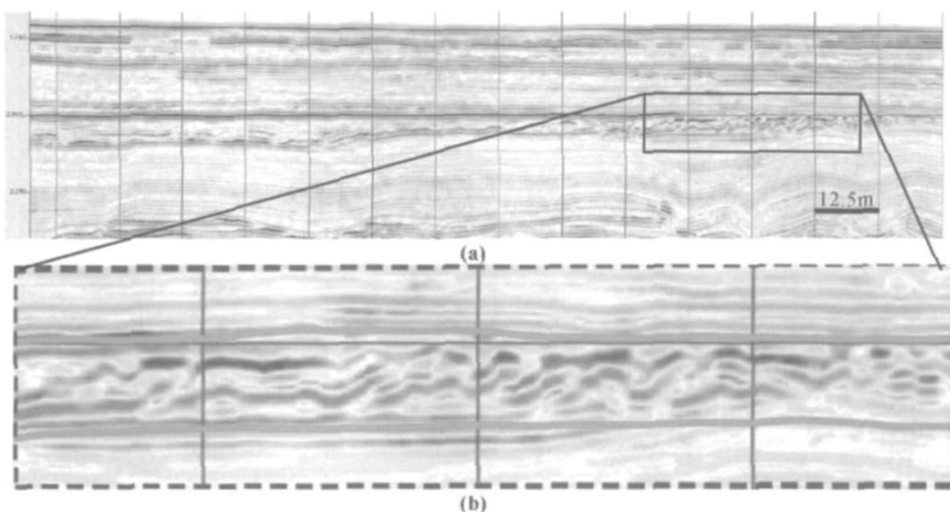


图 5 过 HMTD 的 3D 地震剖面

(a) MTD 趾部区域 (b) 局部放大的叠瓦状逆冲构造

Fig 5 3D seismic profile crossing the HMTD

a) the toe of the MTD; b) the localized exaggerated

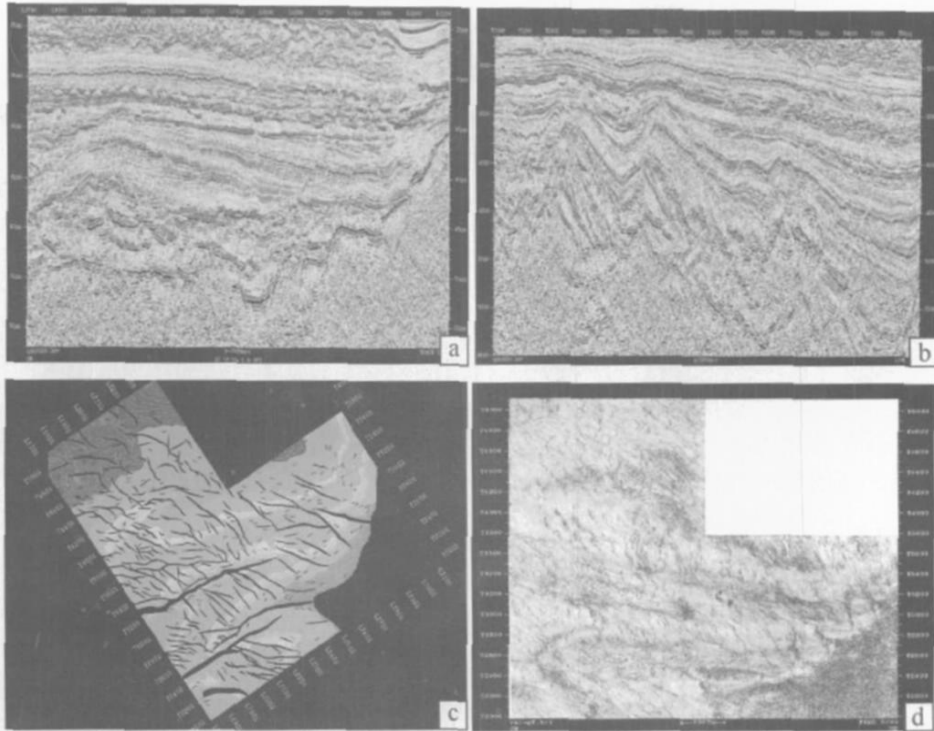


图 6 HMTD 内部结构图

(a) 测线 A 地震剖面; (b) 测线 B 地震剖面; (c) 测线相对位置图; (d) 三维相干时间切片

Fig. 6 structural diagram of HMTD.

a) seismic profile of Trace A; b) seismic profile of Line B; c) the location of seismic profile; d) time slice of HMTD

块体滑移区具有独特的内部反射特征。在地震识别尺度内块体搬运体系表现为丘状外形、波状反射结构、弱振幅(局部中一强振幅)、连续性差的地震特征。内部整体比较杂乱,局部发育正断层、褶皱及逆冲断层构造(图 5)。构造低部位内部反射特征杂乱,发育逆冲断层,地层呈现叠瓦状。

为了展现 HMTD 内部的地震特征,将 HMTD 的底界面进行层拉平处理,在此基础上提取 HMTD 内部的振幅和相干属性特征。HMTD 的振幅剖面和相干时间切片显示 HMTD 的内部整体比较杂乱、局部发育褶皱及逆冲构造^[26](图 6a b)。对 3D 数据体做时间切片(图 6d),展现逆冲断层的走向、发育规模等信息,时间切片中清晰识别出北东走向的构造,分析认为是 HMTD 内部发育的同沉积逆冲断层,同相轴的分布显示断层断距小、分布密集,剖面中呈叠瓦状分布(图 5),符合塑性流体的沉积特征。相似性差的白色条带呈现北东向分布,具有密集分布、垂直距离小的特点,代表了北东向分布的逆冲断层断面的分布规律和发育规模。振幅剖面中整体杂乱反映了重力流内部物质分选差、杂乱无章的构成,局部发育褶皱

和逆冲断层表明研究区的位于整个 HMTD 的中间及头部位置,处于挤压应力环境,也说明 HMTD 在研究区内已经演变为碎屑流。

一个完整的块体搬运沉积体系中,同沉积逆冲断层发育在整个体的主体和头部,并且逆冲断层的走向与流体的流动方向垂直、断层的倾向与流体流动方向相反,据此可以判断流体的流动方向。HMTD 的时间切片显示 HMTD 中的同沉积逆冲断层为北东向,可以判断出 HMTD 的流动方向为北西—南东向,进一步根据剖面中逆冲断层的倾向判断,HMTD 的重力流是从南海西北陆坡沿坡度最大方向(北西—南东)流入研究区域^[26]。

4 结论

南海北部陆坡深水沉积体系主要包括水道沉积体系和块体搬运沉积体系。水道沉积体系广泛发育于中新世、上新世及第四纪等不同时期,古珠江白云凹陷深水水道沉积体系形成于中新世,上倾方向发育具有强烈下切、削截特征的峡谷水道,下倾方向发育斜坡扇和盆地扇;琼东南北部陆坡中央水道深水水道

沉积体系形成于上新世早期, 总体具有明显下切特征, 多为加积型高振幅、富砂水道充填; 琼东南盆地南部斜坡第四系高弯曲水道沉积体系形成于更新世末期, 发育了一期水道—堤坝复合体, 该复合体呈 SW—NE 方向展布, 曲流特征明显。水道沉积体系在深水盆地表现复杂的充填特征, 是深水油气的重要储层。块体搬运沉积体系广泛发育于第四纪, 白云深水块体搬运沉积体系表现为第四纪海底滑坡, 具有完整的滑坡形态, 包括滑坡根部、滑坡中部及沉积物流舌状体, 体现了沉积物由滑动、滑塌向碎屑流转变直至消亡的完整过程; 琼东南盆地南部斜坡深水块体搬运体系揭示了体系内部具有中—强振幅、反射杂乱、局部发育褶皱及逆冲断层等地震特征。块体搬运沉积体系是大陆边缘沉积物质扩散系统中的一种物质搬运方式, 对海底的稳定性及天然气水合物的形成和富集具有重要的控制作用。

参考文献 (References)

- Weimer P, Slatt R. Introduction to the petroleum geology of deepwater settings [J]. AAPG Studies in Geology 57, SEPM Special Publication 2007: 419
- Shamugan G. 50 years of turbidite paradigm (1950s-1990s) deep-water processes and facies model: a critical perspective [J]. Marine & Petroleum Geology, 2000, 17: 285-342
- Wu S, Wong H K, Linnann T. Gravity driven sedimentation on the northwest continental slope of the south China Sea: results from high-resolution seismic data and piston cores [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1999, 17(2): 155-169
- Masson D G, Huggett Q J, Brundsen D. The surface texture of the Saharan debris flow deposit and some speculations on submarine debris flow processes [J]. Sedimentology, 1993, 40: 583-598
- Vogt P R, Jung W Y. Holocene mass wasting on upper non-polar continental slopes due to post-glacial ocean warming and hydrate dissociation [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(9): 551-554
- Masson D G, Canals M, Alonso B, et al. The canary debris flow: source area morphology and failure mechanisms [J]. Sedimentology, 1998, 45: 411-432
- 吴时国, 姚伯初, 等著. 天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 307
- Hafliðason H, Sejrup H P, Nygaard A, et al. The stregga slide architecture: geometry and slide development [J]. Marine Geology, 2004, 213: 201-234
- Hampson M, Lee H. Submarine landslides [J]. Reviews of Geophysics, 1996, 34(1): 33-59
- Mutti E, Nomark W R. An integrated approach to the study of turbidite systems [C] // Weimer P, Link M H. eds. Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems. New York: Springer-Verlag, 1991: 75-106
- Morris W R, Nomark W R. Scaling sedimentologic and geometric criteria for comparing modern and ancient sandy turbidite elements [C] // Weimer P, Slatt R M, Colman J L, et al. eds. Global deep-water reservoirs. Gulf Coast Section-SEPM Foundation 20th Annual Bob F. Perkins Research Conference, 2000: 606-628
- García-Rodríguez M J, Malpica J A, Benito B, et al. Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in EL Salvador using logistic regression [J]. Geomorphology, 2008, 95(3-4): 172-191
- Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78: 792-822
- Richards M, Bowman M. Submarine fans and related depositional systems II: variability in reservoir architecture and wireline log character [J]. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15: 821-839
- Gee M J R, Uy H S, Warren J, et al. The Borneo slide: a giant submarine landslide on the northwest Borneo margin revealed by 3D seismic data [J]. Marine Geology, 2007, 246: 9-23
- Richards M, Bowman M, Reading H. Submarine fan systems I: characterization and stratigraphic prediction [J]. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15: 687-717
- Moscandelli L, Wood L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad [J]. Basin Research, 2008, 20: 73-98
- Nisbet E G, Piper D J W. Giant submarine landslides [J]. Nature, 1998, 392: 329-330
- Newton S, Mosher D, Shipp C, et al. Importance of mass transport complexes in the Quaternary development of the Nile Fan, Egypt [J]. OTC Conference proceedings 16742, 2004: 10
- Shipp C, Nott J, Newlin J. Variations in jetting performance in deep-water environments: geotechnical characteristics and effects of mass transport complexes [J]. OTC Conference 16751, 2004: 11
- 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地东部第三系油气藏形成条件 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-266
- 庞雄, 申俊, 袁立忠, 等. 南海珠江深水扇系统及其油气勘探前景 [J]. 石油学报, 2006, 27(3): 11-16
- 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统的层序地层学研究 [J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 220-229
- Yuan Shengqiang, Lv Fuliang, Wu Shiguang, et al. Seismic stratigraphy of the Qiongdongnan deep sea channel, Northwestem South China Sea [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 54(2) (in press)
- Yuan Shengqiang, Wu Shiguang, Thomas Linnann, et al. Fine-grained Pleistocene deepwater turbidite channel system on the slope of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. Marine & Petroleum Geology, 2009 (in press)
- 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分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 9(3) (印刷中)
- 孙运宝, 吴时国, 王志君, 等. 南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 69-77

The Research of Deepwater Depositional System in the Northern South China Sea

WU Shi-guo QIN Yun-shan

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Qingdao Shandong 266071)

Abstract Detrital material of terrigenous origin is the main deep-water geological research aim and it is very important to the world research program of “from source to sink”. Submarine canyon-channel system mass transport deposition (submarine slide) the main transportation and deposition system of the continental slope. Based on the studies of 2D multi-channel seismic data, 3D multi-channel seismic data, multi-beam depth measurement data, side sonar data, gravity and piston coring data, we find that the large scale block body transportation system and deep-water channel system widely develop in the northern South China Sea. The examples of Baiyun sag and Qiongdongnan Basin reveal the platform, internal structure and deformation process of representative block body transportation, and further discover the formation and evolution processes of block body transportation. Using 2D/3D seismic data and various numerical model methods, deep-water high sinuosity channels of Quaternary and its depositional facies characteristics, Pliocene central channel in Qiongdongnan Basin and the paleo-pearl river deep-water channels of Miocene are discovered. Deep-water depositional system is very important for the study of formation mechanism and distribution of hydrocarbon, as well as prediction and protection of geohazards of deep-water projects.

Key words deep-water block body transportation system, deep-water channel system, 3D seismic attribute, continental slope, South China Sea