

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020070202

海盆沉积“源-汇”系统分析:南海北部珠江海谷-西北次海盆第四纪深水浊积扇

高红芳, 聂鑫, 罗伟东

广州海洋地质调查局, 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510760

摘要:运用近年来采集的高分辨率地震资料和多波束测深数据,在珠江海谷及西北次海盆深海平原区发现大规模发育的第四纪重力流沉积体系,该沉积体系沿珠江海谷以北西-南南东方向贯穿整个北部陆坡,进入西北次海盆后呈扇形展开,形成珠江海谷-西北次海盆大型深水浊积扇系统。据沉积体系空间展布特征差异,将珠江海谷划分为北、中、南三段,北段为过路侵蚀和水道下切,中段以水道充填和天然堤沉积为主,南段以水道-天然堤和朵叶体沉积共存为特征,揭示出北部陆坡珠江海谷是珠江口外陆缘物质输送海盆深海平原的主要通道;海盆区总体以朵叶体发育为特色,呈扇形展布。深水扇系统可分为三期次沉积体,其区域结构记录了重力流沉积物从侵蚀-卸载到南海海盆作为限制性盆地接收陆源沉积物的全过程,为“源-渠-汇”的研究构建了一个完美的范例。本文以珠江海谷-西北次海盆第四纪深水浊积扇沉积体系为例,完整地揭示了水道-扇体的组构和特征,清晰呈现了陆坡-海盆砂体展布的规律,可为建立南海北部新近纪早期深水扇形成模式提供参考,有助于指导南海深水油气勘探工作。

关键词:深水浊积扇;“源-渠-汇”;珠江海谷;西北次海盆;南海

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

“Source to sink” analysis of a sea basin: The Quaternary deepwater turbidite fan system in Pearl River Valley-Northwest subbasin, Northern South China Sea

GAO Hongfang, NIE Xin, LUO Weidong

Guangzhou Marine Geological Survey, MLR, Guangzhou 510760, China

Abstract: Using high resolution seismic profiles and multi-beam echo-sounding data acquired in recent years, a large complicated Quaternary deepwater gravity flow depositional system is identified in the Pearl River Valley (PRV) and Northwestern subbasin (NW subbasin) of the northern South China Sea (SCS). It runs through the whole continental slope along a channel in NW-SSE direction, discharged in the NW subbasin to form a deepwater turbidite fan system. Extending from the northern valley to the southern sea basin, it is more than 320 km long longitudinally. From the aerial view, the turbidite fan shows different features on continental slope and in sea basin. In the slope area, it may be divided into three sections, the north, middle and south sections respectively. The north section is mainly an incised channel under erosion. The middle section shows channel filling and natural levee, while the southern section is composed of the channel-levee complexes and lobes. In the NW subbasin, it is characterized by lobes with large scale of fan-shaped sand bodies, extending for 70 km towards the south direction. The Pearl River Valley, which goes through the continental slope of northern South China Sea, is the main passage for sediments to be transported from the continental margin into the abyssal plain. Vertically, the turbidite fan could be subdivided into three phases and the depocenters of the three phases are not consistent. The first phase of the fan or the oldest deposit is the largest in scale comparing to the other two. The three fans migrate along the slope, suggesting a retrogression towards continent owing to the rising of relative sea level during Quaternary. The regional pattern of the PRV-NW subbasin turbidite fan system has recorded a rather completed process for a gravity flow moving from continent erosion to sediment unloading and provided a perfect example for a “source-conduit-sink” system. This paper carefully described the system and has provided a reference for the depositional model of the deepwater fan in early Neogene in the northern South China Sea, which is significant to prospecting of deepwater oil and gas resources.

Key words: deepwater turbidite fan; source-conduit-sink; Pearl River Valley; Northwestern subbasin; South China Sea

资助项目:国家海洋地质保障工程项目“南部海域 1 : 100 万海洋区域地质调查成果集成与应用研究”(DD20160138);国家自然科学基金项目“南海东缘俯冲带岩石圈深反射地震精细结构、动力学过程与资源灾害响应”(U1901214),“花东海盆及其东/西部板块边界的跨圈层综合地震探测”(91958212)

作者简介:高红芳(1971—),女,博士,教授级高工,主要从事海洋区域地质和沉积盆地分析研究, E-mail: promap@163.com

收稿日期:2020-07-02; **改回日期:**2020-10-13. 文凤英编辑

“源-渠-汇”系统的研究是国际地质领域的重大前沿科学问题,强调从物源地貌、搬运通道及沉积体系的分布、耦合及演化规律分析地质历史过程中的沉积作用与机理,为油气生、储、盖及岩性-地层油气藏的分布预测提供重要依据,可有效指导油气勘探^[1-5]。该系统将地球表面的物源-汇聚沉积过程作为整体来研究,成为油气勘探中重要的预测理论与方法技术,在国际多类型沉积盆地及中国渤海湾盆地、珠江口盆地沉积体系研究与勘探工作中应用成效明显,为地质学领域重要的研究方向^[6-8]。海洋是研究“源-渠-汇”沉积过程的最佳实验室^[9],海盆作为陆源沉积物的最终汇聚地,其沉积作用受控于沉积物源、输送体系、相对海平面变化、沉积古地理面貌和沉积过程等^[10]。沉积物输送体系及其变化控制着沉积分布,古地理面貌也必然控制沉积作用和分布^[10],深水沉积的流态形式更使得深水扇的岩石学和储层性质有很大的不同。突破单纯研究汇聚区域扇体沉积形式的分析方法,全面考虑深水沉积的沉积物来源、输送渠道和沉积形式等诸因素,即“源-渠-汇”的综合研究,能更加清楚地认识深水扇系统^[11]。

随着深水油气的不断发展,深水扇及其相关的深水重力流沉积体系一直是国际海洋地质研究的前沿课题^[12-15],是大陆架至深海平原的深水沉积活动扩散系统中重要的一个沉积环节。南海北部陆坡珠江深水扇的研究,目前已经比较成熟,但对于深水扇的研究主要集中在中上陆坡范围,时间层段集中在21~10.5 Ma,以寻找油气储层为目的^[6, 11, 16]。LW3-1-1钻井天然气的重大发现,已证实深水扇砂体的油气储集能力^[17-21],琼东南盆地中央峡谷和西北次海盆西部^[22-28]深水浊积扇的研究,也预测了其巨大储烃潜力。但是对于南海北部深水重力流沉积体系整体性的研究、尤其是下陆坡至海盆区段物质汇聚过程的研究还非常缺乏。因此,为了深入认识陆坡大型峡谷至海盆大区域深水浊积扇的结构及发育特色,探讨其成因,指导南海超深水油气勘探工作,非常有必要对第四纪珠江海谷-西北次海盆深水重力流沉积体系,以“源-渠-汇”耦合研究的方式进行整体性、系统性研究。

近年来,国家海洋保障工程项目在南海北部陆坡区和西北次海盆区进行了系统的地质地球物理调查,获取了一批高精度多道地震、多波束测深数据,综合分析这些数据,发现南海北部陆坡和海盆区(图1)发育复杂的第四纪深水浊积扇沉积体系。本文系统地研究了该沉积体系的几何形态、生长模

式、充填演化,详细分析了沉积物“渠”和“汇”的发育过程,探讨了其形成控制因素和地质意义,为超深水浊积体研究提供思路,以期建立更新型、更完整、更系统、更适用的浊积体类油气藏模型提供基础研究数据。

1 区域地质背景

南海北部陆坡区十分宽阔,地形变化大,水深300~3200 m,峡谷、谷地发育,主要包括一统峡谷群、神狐峡谷群、台湾峡谷、澎湖峡谷群和珠江海谷、东沙海谷等^[29]。珠江海谷是南海现今规模最大的海底水道之一,西北部与陆架相接,东南端融入西北次海盆深海平原区^[29]。从三维地形图上可以清楚地看到(图1),珠江海谷走向大致为北西-南东向,长约258 km,宽10~65 km,贯穿了整个北部陆坡,成为珠江口南缘陆缘物质进入海盆的主要通道。珠江海谷不同区段宽度变化较大,北端和南端较窄,中部较宽,以中下部最宽。海谷东北侧峡谷发育,其中著名的神狐东峡谷群就是其中的一部分,这些峡谷群在陆坡中段与珠江海谷相连,构成了南海北部重力流的次要通道。珠江海谷南端连接西北次海盆深海平原,地形较为平缓,水深3500~3700 m,在海谷入海口外缘可见3700 m水深线呈扇形展布并向南展开,海底扇体的形貌略有体现,展示出现今时期重力流沉积远端扇体的大致地形轮廓。

研究区地层以新生界为主,从古新统至第四系都有发育。根据该区域及其周边的天然气水合物钻井和ODP184航次1145、1146等钻井,可以较准确地厘定晚中新世以来的地层层位和厚度分布^[9, 29]。第四系厚度一般为90~250 m,基底以火成岩为主。新生代断裂发育,包括北东向和北西向两组,主要为张性断裂。北东向断裂被北西向断裂错开,显示出北西向断裂发育时间晚于北东向断裂^[30-32]。

2 浊积扇体系结构单元

运用高分辨率地震数据,在研究区识别出大量第四纪重力流沉积,根据沉积特征和内部组构的差异,将这些重力流沉积体分为珠江海谷陆坡水道沉积体和西北次海盆深海平原海底扇沉积体两部分,这两大沉积单元构成一套完整深水浊积扇体系。按照walker等发布的浊积扇体系模式^[33],珠江海谷重力流沉积体构成浊积扇体系的供应水道部分,西

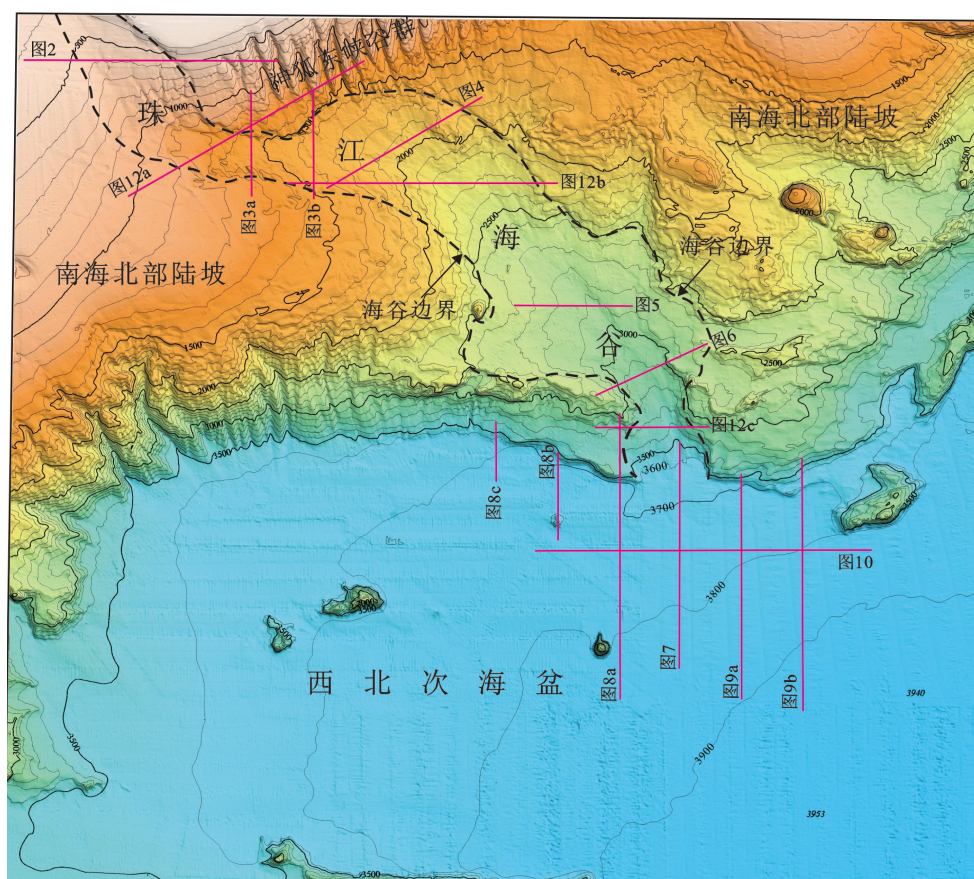


图 1 研究区三维地形图及文中测线位置(紫红线)示意图

Fig.1 Three-dimensional bathymetry map of the study area and location of the survey lines(violet in colour)used in this study.

北次海盆重力流沉积体构成浊积扇体系的朵体体系。由于所处的地质背景、地形地貌单元的差异,两部分沉积组构各具特色,现分述如下:

2.1 珠江海谷供应水道

浊积扇体系的供应水道主要沿珠江海谷发育,总体呈北西方向展布,延伸超过 250 km。根据其沉积体展布形态和侵蚀下切等特征,分为北、中、南三段。

(1) 北段

北段位于 1000 m 水深以浅的上陆坡, NW-SE 走向, 紧接南海北部大陆架, 坡度较陡, 包括珠江海谷冲刷侵蚀水道区和峡谷群侵蚀区(图 2)。珠江海谷主道宽约 24 km, 深约 50~150 m, 以过路侵蚀为主, 第四纪晚期局部区段有少量沉积物充填。珠江海谷东侧峡谷发育, 即神狐东峡谷群, 重力流携带陆架沉积物从峡谷流过, 汇入珠江海谷中段, 并对所经区域进行了强烈的冲刷和下切侵蚀, 致使该区第四系和上新统上部地层出现间断性缺失。

(2) 中段

珠江海谷中段处于 1000~2500 m 水深区, 前

半部近 EW 走向, 后半部转为 NW-SE 走向。中段海底地形坡度从前端到中、后端逐渐变缓, 重力流流速开始降低, 经海谷北段和神狐东峡谷群而来的沉积物物源充足, 部分沉积物逐渐留存下来。该段前端海底地形较陡, 海谷外部形态深而窄, 冲刷剥蚀明显, 底部可见“V”形水道, 沉积薄, 仅为两侧第四系厚度的 1/3(图 3); 海谷中后端地形变缓, 致使海谷中段中部及后部水道砂体十分发育(图 4), 底部主要发育“U”形下切水道。这些重力流沉积砂体可分为 3 个期次, 发育特征各有差异。

中段前端走向近 EW 向, 缺失早期第 1 期和第 2 期重力流沉积, 只有最新的第 3 期重力流沉积保存下来(图 3a)。至中段中部走向转为 NW-SE 向, 地形逐渐变得宽缓, 沉积物厚度加大, 3 期重力流沉积都有保存(图 3b、图 4)。中段中部是神狐东峡谷群的主要物质输出地, 从北部峡谷来的沉积和从西北部珠江海谷输运来的沉积在此汇合, 形成了不同组构水道沉积物的叠置。在地震剖面上显示为近水平滩状和透镜状两种形状的重力流沉积体, 内部充填结构也有明显差异, 印证了沉积物的多物源性和多方向性汇聚的特征(图 4)。

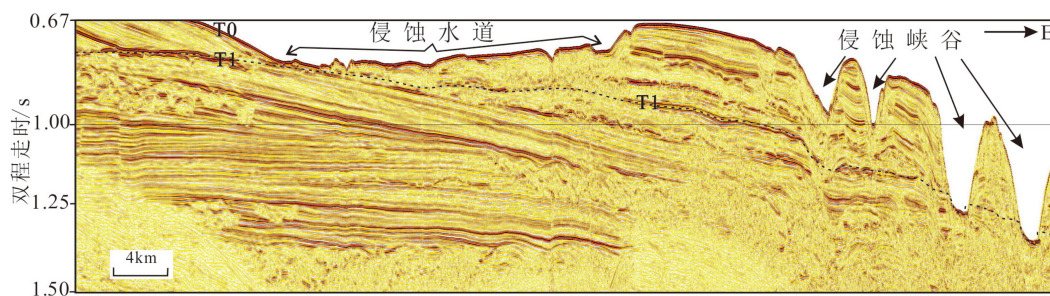


图 2 珠江海谷北段重力流沉积地震反射特征

T0 代表海底, T1 代表第四系底界, 测线位置见图 1, 以下各图同。

Fig.2 Seismic reflecting characteristics of northern Pearl River Valley

T0 represents sea floor, T1 represents Quaternary bottom, locations of profiles (including the following figures) are shown in Fig.1.

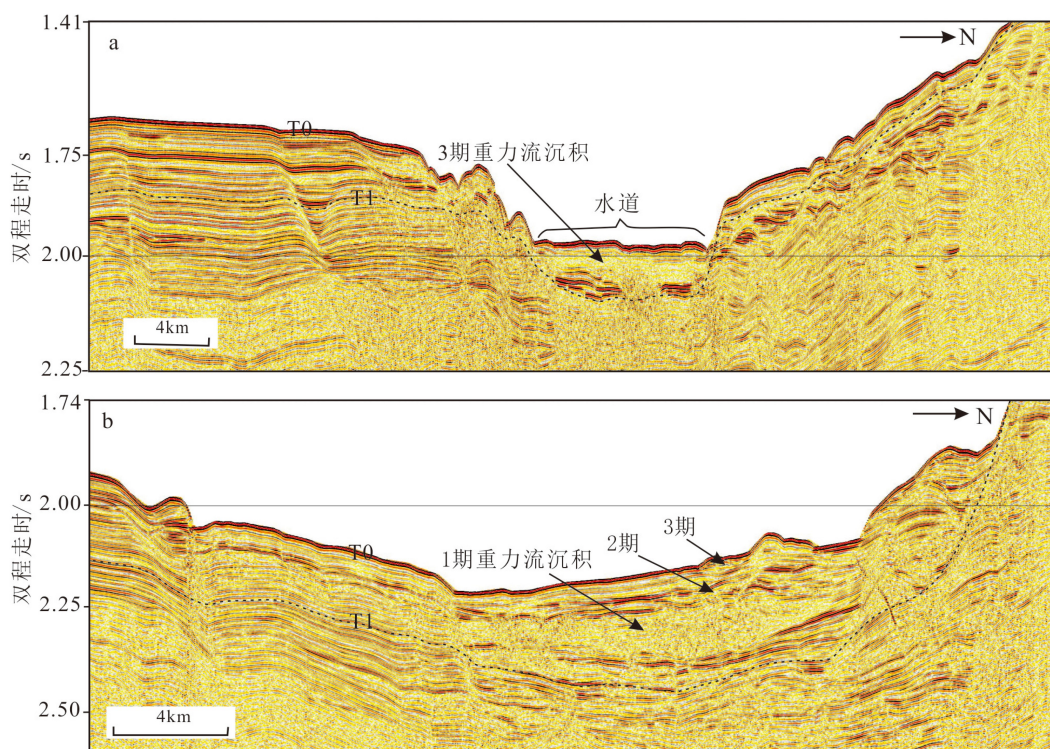


图 3 珠江海谷中段前部分重力流沉积地震反射特征

Fig.3 Seismic reflecting characteristics of gravity flow deposition in forepart of middle Pearl River Valley

中段中部及后部 3 个期次重力流沉积体更加发育, 从老到新特征如下:

第 1 期重力流沉积主要为“U”形下切水道充填而形成的充填沉积复合体, 由侧向加积沉积物和垂向加积沉积物复合叠合构成, 底部发育明显的冲刷侵蚀面。地震剖面上观察, 底部侵蚀面之上可见明显强震幅波组, 为典型的高振幅反射 (high amplitude reflections, 简称 HARs), 相邻琼东南盆地中央峡谷的钻探实践已经证明, 该类型强震幅单元是储集性能良好的砂体^[24-25, 28]。在第 1 期砂体内部可见次一级的侵蚀面, 其上部也可见强震幅波组, 在沉积复合体内部形成多期叠加的强振幅波组组合体, 构成

厚层复合水道充填砂体(图 4)。

第 2 期重力流沉积呈扁平滩状覆盖在第 1 期重力流沉积物之上, 底部下切侵蚀作用弱, 横向分布范围较广, 大部分区域都有分布, 显示出珠江海谷中段中部后部区域是第 2 期重力流沉积物重要的倾卸地。海谷两侧沉积体地震相特征显示以侧向加积为主; 海谷中部内部结构较为杂乱, 揭示出水动力强而急的重力流携带沉积物骤然减速, 沉积物快速堆积致使内部结构紊乱。总体上该区段主要为宽缓水道砂体和天然堤沉积体的复合体。

第 3 期重力流沉积在珠江海谷中段前部分为以垂向加积沉积为主的充填复合体, 几乎覆盖了整个

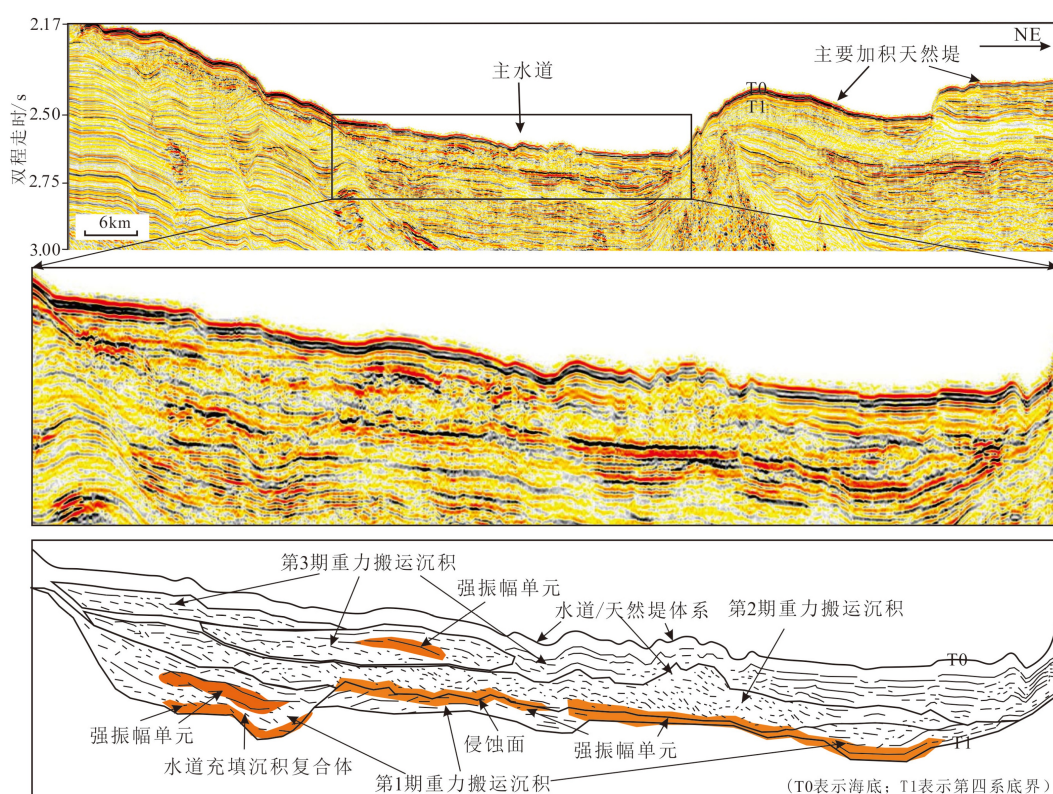


图 4 珠江海谷中段下切水道充填地震相及其解译特征

上图为跨海谷剖面, 中图为上图黑框范围的放大部分, 下图为中图的地质解译。

Fig.4 Seismic facies of channel filling and its interpretation characteristics in middle Pearl River Valley

The upper figure is the cross-valley section; The middle is the enlarged figure of the section in the black frame; The lower figure is the geological interpretation of the middle.

海谷主水道区域; 在珠江海谷中段后部分为以侧向加积沉积为主的水道复合体, 主要分布在珠江海谷的西部, 呈楔形体展布; 局部区域发育泛滥漫滩沉积。

(3) 南段

南段为珠江海谷的 2500~3200 m 水深区, NW-SE 走向为主, 在西北次海盆入口处转为近南北向。其北部地形较为宽缓, 是珠江海谷最宽的区域, 致使重力流在该区流域变大, 流速降低, 重力流沉积物厚度不大, 但分布的范围变宽。水道侵蚀大部分区域不太发育, 仅在海谷中心区域局部发育, 沉积体以沉积朵叶体为主, 局部发育水道-天然堤和泛滥漫滩沉积 (图 5)。该段南端为深海平原的入海口, 珠江海谷在此忽然变窄, 两侧发育低隆起, 形成“咽喉状”谷口地形, 重力流到此流速加快, 形成大量下切水道 (图 6), 沉积以水道-天然堤沉积体为主。重力流沉积 3 期次发育特征依旧明显:

第 1 期重力流沉积作用由北向南强度逐渐增大, 水道下切深度由浅变深。在北部主要为朵叶体沉积, 呈扁平楔状体, 底部仅见弱侵蚀现象, 内部反射结构以弱叠瓦状—弱杂乱状为主, 振幅总体

较弱 (图 5)。南部主要为水道-天然堤沉积, 水道下切现象十分显著 (图 6), 最深可至 150 m, 内部反射振幅较弱, 以杂乱结构为主, 显示出沉积物的快速堆积。

第 2 期重力流沉积作用在南段南北部表现出更大的差异, 沉积体分布范围比第 1 期宽。在北部表现为泛滥漫滩沉积 (图 5)。南部水道下切现象较第 1 期减弱, 总体为叠合透镜体, 透镜体振幅底部较强, 内部较弱, 连续性中等, 频率低, 以迭瓦状结构为主 (图 6)。

第 3 期重力流沉积作用明显变弱, 沉积物主要集中在海谷中部, 沉积体分布范围再度变窄。沉积体以楔形为主。在北部表现为近水平状水道充填, 连续性好 (图 5)。南部西侧以侧向加积的水道-天然堤为主, 内部为低角度叠瓦状结构 (图 6), 东侧水道不太发育。

2.2 西北次海盆深水浊积扇朵体

第四纪重力流沉积物沿珠江海谷进入西北次海盆深海平原后, 以舌状体向前推进, 呈扇形展布,

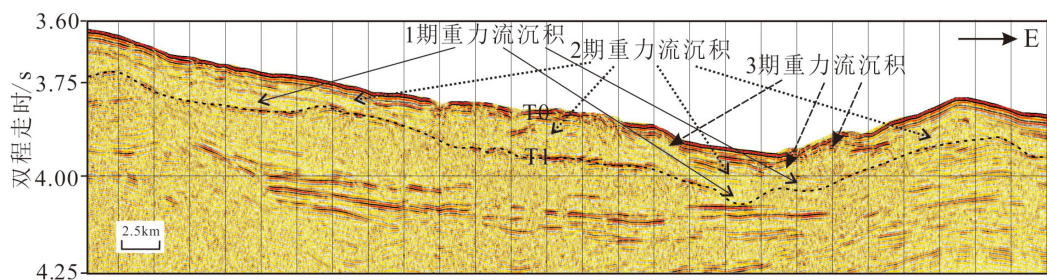


图 5 珠江海谷南段中部重力流沉积地震特征

Fig.5 Seismic reflecting characteristics of gravity flow deposits in the middle part of south section of PRV

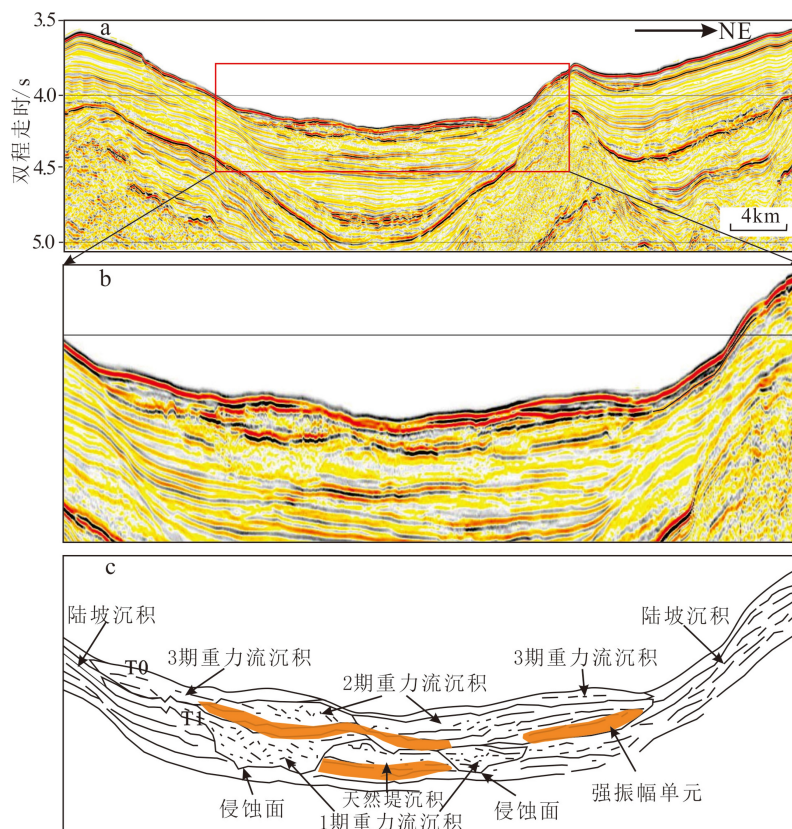


图 6 珠江海谷南段 3 期沉积地质解译

a 图为跨海谷剖面, b 图为 a 图红框范围的放大部分, c 图为 b 图的地质解译。

Fig.6 Geological interpretations of three stages of deposition in southern Pearl River Valley

Figure 6a is the cross-valley section, figure 6b is the enlarged in red frame; figure 6c is the geological interpretation of figure 6a.

形成海盆深水浊积扇朵体。通过对不同方向地震剖面的地震反射特征进行分析,揭示出供应水道沉积物进入西北次海盆深海平原后,平面和垂面上的结构及演化特征。

图 7 是南北纵向切过朵体正中部的地震剖面及其解译图,主要分为 3 期,可以和供应水道的 3 期次重力流沉积作用相对应,以第 1 期规模最大,发育时间最早。从剖面上分析,扇体第 1 期,舌状体向外延伸可达 70 km,厚度最大约 120 m;底部有几处较明显的宽缓下切侵蚀,以近陆坡处下切侵蚀最深;地震相以中—低频、弱振幅、中—低连续为主,

内部结构以混杂结构和斜交结构为主,外形呈楔形,远离陆坡扇体振幅变强,连续性变好。扇体第 2 期,规模较第 1 期小,向南蔓延最远约 50 km,最大厚度约 40 m,由靠近陆坡和远离陆坡的两个透镜体组成,靠近陆坡的透镜体地震反射特征以中频、中—弱振幅、中—低连续为主,内部结构为混杂结构和斜交结构,底部下切侵蚀现象不明显;远离陆坡的透镜体为中—高频、中—强振幅、中连续为主,内部结构以斜交结构为主,可见小规模“V”形下切。第 3 期重力流沉积扇体在海盆中规模最小,向南延伸最远约 25 km,最大厚度约 40 m,下切

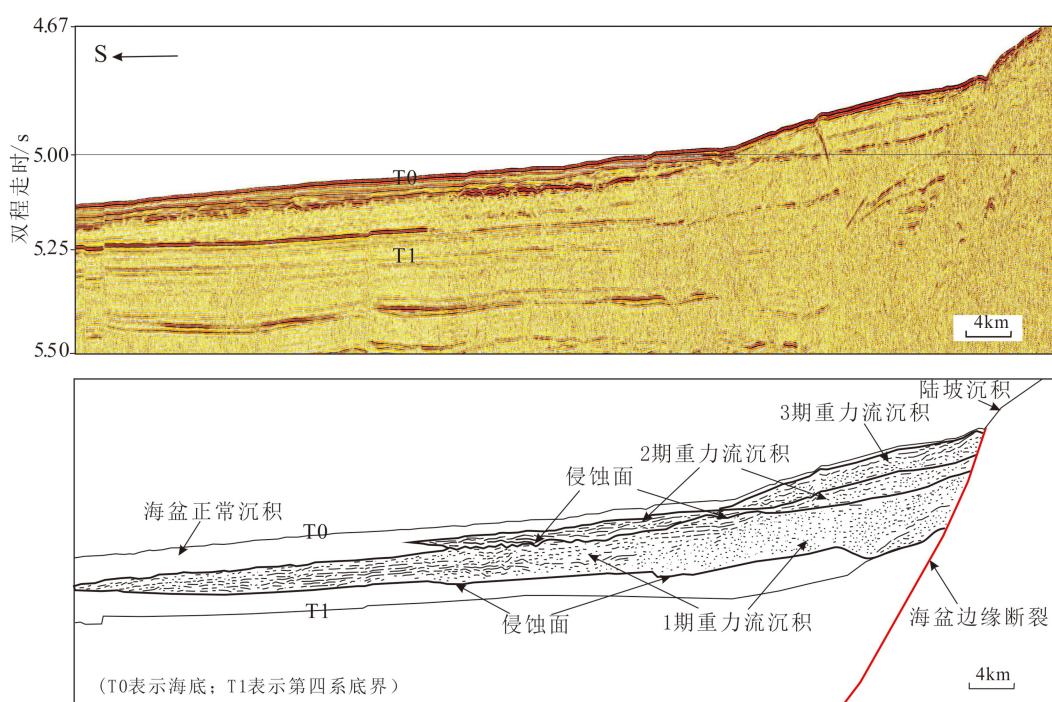


图 7 西北次海盆浊积扇体南北向剖面解译

Fig.7 Interpretation of deepwater turbidite fan in N-S direction in Northwestern Subbasin

侵蚀基本不发育, 呈楔形, 地震相以中频、弱振幅、中连续为主, 内部结构以斜交结构为主。

从中部向东西两侧方向, 扇体规模呈现逐渐变小的趋势(图 8、图 9)。

以图 7 所示剖面为中心, 向西 40 km 处(图 8a), 扇体第 1 期向南延伸约为 35 km, 其他两期也都相应略有变小; 再向西 40 km, 扇体规模急剧变小(图 8b), 舌状体延伸最远不足 4 km, 每期厚度最大不超过 20 m; 再向西 40 km 至扇体西端, 舌状体略有变大(图 8c), 延伸最远可至 5 km, 该舌状体延伸变化的原因从地形图上已有显示, 为珠江海谷的分支水道携带沉积物进入海盆所致。地震相反映出从扇体中心向边部振幅增强, 连续性变好。

图 7 所示剖面往东距离约 40 km 处(图 9a), 扇体向南延伸幅度 3 期都略有变小, 以第 1 期最远, 约 38 km; 再向东 40 km, 扇体规模逐渐变小(图 9b), 舌状体延伸最远约 16 km, 厚度从中部向两侧逐渐变薄; 东边受到海山的阻隔未再向东发育(图 1)。

在东西方向横截面上(图 10), 扇体为透镜状, 以第 1 期沉积体规模最大, 透镜体横切面宽度可超过 90 km, 厚度最大处约为 100 m。地震反射特征以杂乱反射结构为主, 揭示出在该剖面所示区段, 扇体以快速堆积为主。扇体底部可见“U”型和“V”型的小规模冲刷槽, 显示出第 1 期重力沉积流能量非常大, 冲出海谷 30 km 后, 依然对下部基底有侵蚀

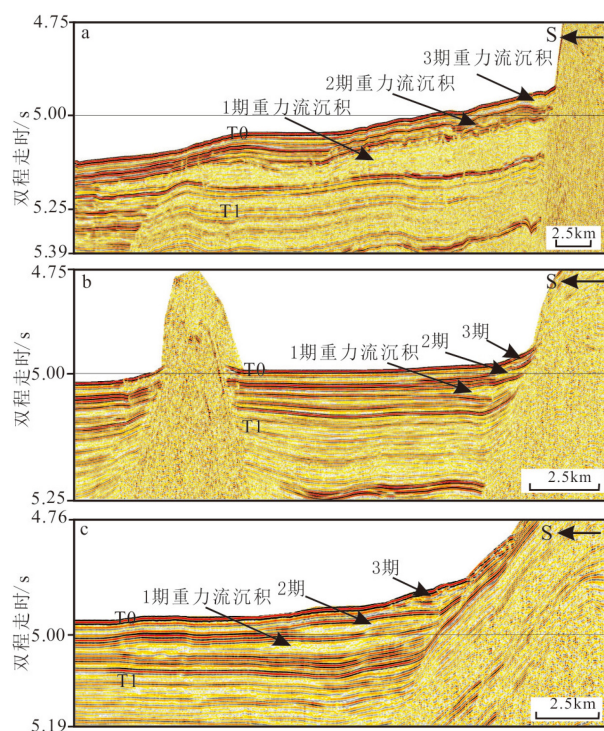


图 8 西北海盆西侧舌状体变化特征

Fig.8 Different characteristics of the lobes of western deepwater fan in NW

作用。第 2 期沉积规模变小, 宽度不超过 10 km, 厚度最大不超过 30 m, 底部见轻微侵蚀现象, 显示出第 2 期重力沉积流能量已经变弱。第 3 期沉积体呈扁平滩状, 宽度约 20 km, 厚度不足 10 m, 底部基本

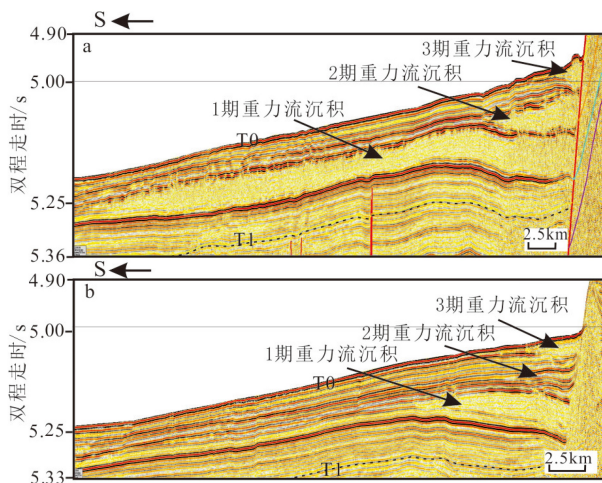


图9 西北次海盆东侧舌状体变化特征

Fig.9 Lobes characteristics of eastern deepwater fan in NW subbasin

无侵蚀现象,显示重力流能量更弱。扇体两侧地震剖面显示为连续性好、高频、平行结构的地震相,揭示出扇体周缘为稳定的深海沉积。

2.3 珠江海谷-西北次海盆深水浊积扇体系区域结构剖析

根据以上典型剖面的剖析和第四纪重力流沉积物的充填轨迹,勾画了珠江海谷-西北次海盆深水浊积扇区域结构图(图11),该重力流沉积构建了一个完整的深水扇沉积体系,位于陆坡的珠江海谷沉积体构成了深水扇的水道部分,西北次海盆深海平原的沉积体构成了深水扇的扇体部分,形成了珠江海谷-西北次海盆深水浊积扇体系。

按照 Walker 等建立的深水扇经典沉积模式分析^[33-35],珠江海谷-西北次海盆深水浊积扇沉积体系的上扇部分为珠江海谷水道重力流沉积体系的北段和中段近东西走向狭窄海谷的区段,以发育限制

性水道为主,早期和中期为侵蚀区,晚期部分区域发育限制性水道砂体;中扇部分为珠江海谷陆坡水道重力流沉积体系变宽的中段和南段区域,主要发育水道-堤坝复合体和河道-朵叶复合体;下扇为西北次海盆沉积体,主要以大型朵叶体为主。

在平面上,早、中、晚3期扇体的分布略有差异,沉积中心并未完全吻合。第1期沉积体在上扇区域基本无沉积,主要分布在中扇和下扇区;水道沉积部分较为狭长,供应水道南段分岔为左右两个水道沉积体;进入西北次海盆后,向正南方向和东向延伸,东南向和西南向不太发育。第2期沉积体也是主要分布在中扇和下扇区,在供应水道区的分布较第1期宽,在南段水道沉积体没有分叉;进入西北次海盆后,扇体中间部分略向南延伸,大部分扇体主要沿海谷出口附近的海盆北缘分布。晚期第3期重力流沉积体在上扇、中扇、下扇都有分布,在供应水道中段北部区域沉积体较宽,其他区域明显变窄,不足该段第2期砂体的1/3;进入海盆后,沿海盆北缘呈东西向线形展布,东侧延伸宽度大于西侧。

因此,珠江海谷-西北次海盆重力流沉积体系形成的深水浊积扇体系的供应水道和朵体两部分沉积特征差异较大,上扇以侵蚀作用为主;中扇为重力流沉积物的临时卸载区,基本上为边路侵蚀、中央卸载沉积;下扇为沉积物的最终汇集区。

3 控制因素

目前,对深水浊积扇体系的发育及空间展布控制因素的研究较多^[36-38],除了物源沉积物质本身的属性外,一般主要有地形和构造两种控制因素,对于南海北部陆坡-海盆区域,相对海平面变化也是重要的控制因素之一。

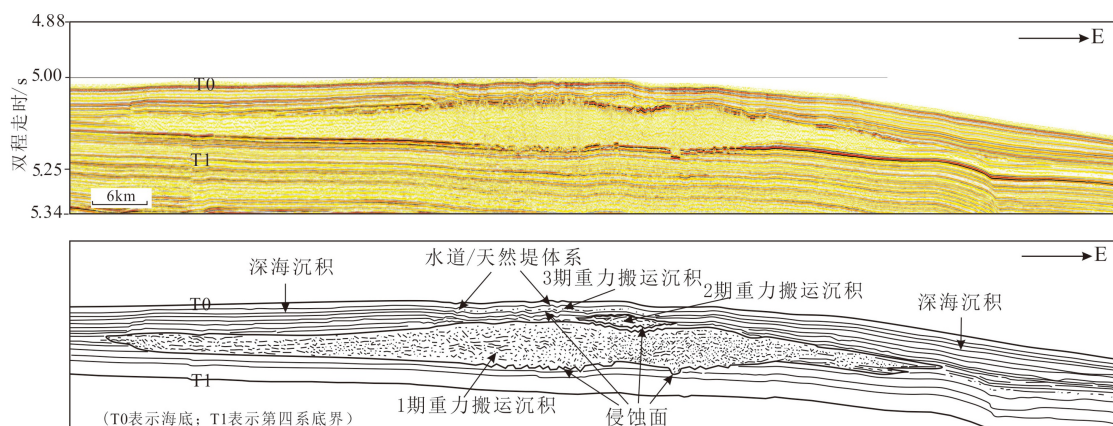


图10 西北次海盆浊积扇体横剖面及解译图

Fig.10 Cross section and its interpretation of deepwater turbidite fan in NW Subbasin

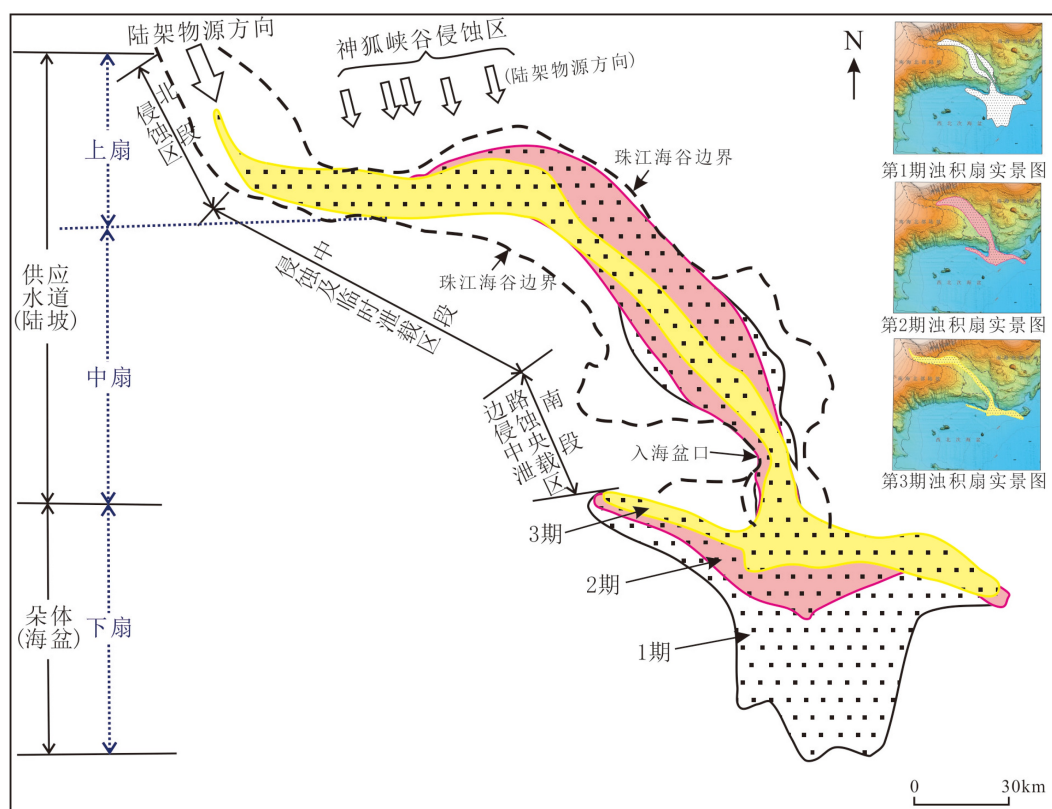


图 11 珠江海谷-西北次海盆深水扇体系区域结构组成示意图

Fig.11 A sketch map of deep-water fan system in PRV-NW Subbasin.

3.1 地形的控制作用

地形对珠江海谷-西北次海盆深水扇体各部分的控制作用十分明显。总体地形北高南低,因此重力流沉积体系由北向南发育。上扇区域处于陆架和陆坡转折带下方,地形坡度大,重力流动力强劲,水道大面积冲刷,主要以侵蚀为主,沉积物较难赋存。中扇区地形坡度由陡变缓,流体动能逐渐减弱,重力流沉积物沉积规模逐渐变大,从水道-天然堤沉积体逐渐变化为水道-朵叶体复合沉积体。下扇区位于海盆中,为深海平原地貌,地形非常平缓,从狭窄的珠江海谷奔涌而出的高动能流体受地形骤然变缓的影响,流速下降,沉积物大量赋存下来,形成以朵叶体发育为主的深水浊积扇下扇。

3.2 断裂的控制作用

构造活动对珠江海谷-西北次海盆深水扇发育的影响,主要表现在断裂对珠江海谷发育的控制(图 12)。珠江海谷为什么没有依照陆坡的地形由北至南直接贯穿进入海盆,而是呈北西方向数次弯转才转而向南进入海盆呢? 根据地震剖面解译分析,晚中新世以来南海北部陆坡大量发育的北西向断裂^[31-32] 有重要的控制作用。

阶梯状正断裂或相向发育的正断裂组合形成构造洼地,重力流体沿低洼地由高向低顺流而下。

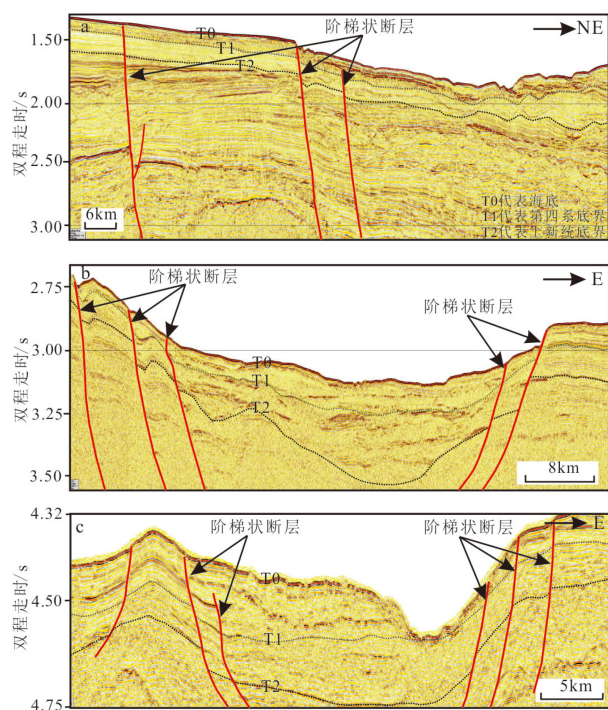


图 12 珠江海谷两侧断裂分布特征

Fig.12 Distribution characteristics of faults in both sides of Pearl River Valley

以珠江海谷中段北部近东西向水道为例(图 12a),海谷西南侧的北西西向阶梯状正断裂从晚中新世到第四纪期间多次活动,断层上盘下降,下降盘地层发生倾斜,北东方向为陆坡高地地形区,由此在断裂和高地间形成了北西西向带状低地。受此构造影响,沿海谷北段北北西方向而来的重力沉积流并未直接向南奔流,而是转而向西,沿北西西向带状构造低洼地流动。珠江海谷其他区域的沉积发育受到断裂活动的控制作用也十分明显。以珠江海谷中段南部(图 12b)和珠江海谷南段南端(图 12c)为例,相向发育的阶梯状正断裂组合从晚中新世开始继承性活动,控制了珠江海谷的发育。到上新世,构造对海谷沉积活动的控制作用更加明显,多期发育的透镜状砂体层层叠置在海谷中,致使断层下降盘地层厚度大,海谷外面两侧的断层上升盘地层薄。第四纪时期重力流活动更加显著,下切侵蚀现象明显,在海谷南端向海盆出口处,东侧阶梯状正断层上盘可见明显的冲刷沟槽,第四纪早期地层遭到了侵蚀。

3.3 相对海平面变化的控制作用

相对海平面的变化对浊积扇发育的控制作用比较显著。根据图 11 珠江海谷-西北次海盆深水重力流沉积体系的整体区域结构和早、中、晚 3 期沉积体的分布可以看出:该深水扇体进入海盆后的扇体规模由老到新逐渐变小,第 1 期扇体规模明显偏大,第 2 期和第 3 期扇体规模变小,展示出明显向陆方向后退的趋势;在珠江海谷北段和中段前端,第 2 期砂体和第 3 期砂体都有向陆架方向迁移的趋势,尤其以第 3 期砂体最为明显,较第 2 期砂体向陆方向迁移近 60 km。从以上深水扇多期砂体的沉积变化趋势,揭示出沉积体系随海平面变化而变化的地质演化历程。第四纪时期相对海平面总体呈现上升趋势,是导致珠江海谷-西北次海盆深水扇沉积体系早、中、晚多期沉积体不断向陆迁移的主要原因。

4 讨论

4.1 “源-渠-汇”沉积中“渠-汇”的完整过程诠释

珠江海谷北端接南海北部陆架中部区域,是珠江三角洲发育区。珠江是中国第三大河流,是南海北部最大的河流,物质输运量很大。这些沉积物首先在陆架区以三角洲形式堆集,之后继续向前延伸,为研究区输送了丰富的沉积物。而珠江海谷则

构成了大陆架-深海平原深水沉积扩散系统的汇聚性通道。从三级次“源-渠-汇”体系的角度来看,在南海北部“陆架-陆坡-海盆”这个特定的区域内,陆架物质为物源,构成体系中的“源”单元结构;珠江海谷为主要物源通道,构成体系中“渠”结构单元;海盆为沉积物质的最终汇集之所^[39],深水扇下扇的大规模发育证明了物质在海盆中的汇集,因此西北次海盆构成了体系的“汇”结构单元。由此,珠江海谷-西北次海盆深水重力流沉积作用完美地诠释了南海“源-渠-汇”过程中从渠到汇的沉积过程,形成了局部区域三级次“源-渠-汇”的完整体系,其 3 期区域结构记录了南海海盆作为限制性盆地接收陆源沉积物的全过程。珠江海谷-西北次海盆第四纪浊积扇的发育过程及沉积物组构,记录了重力流沉积物从侵蚀区到侵蚀及临时卸载区再到朵体状卸载的沉积活动和充填演化历史,为“源-渠-汇”的研究构建了一个可供参考的范例。

4.2 有助于深水油气勘探中深水扇砂体预测

珠江海谷-西北次海盆第四纪深水扇沉积体系区域结构的分析,完整呈现了砂体展布的平面和空间结构,揭示出砂体陆坡三段式三期发育、海盆扇形三期演化以及随相对海平面变化而迁移的独特特征。这种现今深水扇发育演化的剖析,可为南海北部新生代较早期深水扇的研究提供生成发育模式,有助于深水油气勘探中深水扇砂体的预测和成藏规律的认识。

根据南海形成演化过程,随着 32 Ma 左右海底扩张开始,南海限制性海盆开始发育,南海北部“源-渠-汇”体系发育的地质背景条件即开始形成;至今约 23.8 Ma,在白云运动的作用下,南海陆坡步入深水沉积环境,至此三级次“源-渠-汇”的结构更趋成熟;到晚中新世及第四纪时期,“源-渠-汇”更加完善,为深水扇的发育奠定了基础。渐新世到第四纪期间多次大幅度的相对海平面变化为深水扇多旋回发育创造了条件,使得深水扇多时期多旋回砂体叠置发育成为可能,为南海北部深水-超深水油气勘探中储层预测提供支撑。

5 结论

(1)该沉积体系以北西-南南东方向贯穿整个北部陆坡后进入海盆,进入海盆后呈扇形大规模展开。供应水道部分为北、中、南 3 段式展布,北段主要以水道下切和过路侵蚀为主,中段以水道充填和

天然堤沉积为主,南段以水道-天然堤沉积和朵叶体沉积共存为特征。扇叶部分总体以朵叶体发育为特色,呈扇形展布,大规模水道下切基本不发育。

(2)从早到晚可分为3期沉积体,第1期扇体规模明显偏大,第2期和第3期扇体规模变小,展示出向陆方向后退的趋势,揭示出第四纪相对海平面上升控制了该深水重力流沉积体系的分布和演变。

(3)晚中新世以来发育的大量北西走向断裂对重力流沉积作用有重要的控制作用。从晚中新世到第四纪期间多次活动的北西走向单向阶梯状正断裂或相向发育的正断裂组合形成带状构造洼地,控制了深水扇上扇和中扇的展布。

(4)珠江海谷-西北次海盆深水重力流沉积作用完美地诠释了南海“源-渠-汇”过程中从渠到汇的沉积过程,形成了局部区域三级次“源-渠-汇”的完整体系,记录了南海海盆作为限制性盆地接收陆源沉积物的全过程,为“源-渠-汇”的研究构建了一个典型范例。

参考文献 (References)

- [1] Moore G T. Interaction of rivers and oceans: Pleistocene petroleum potential [J]. AAPG Bulletin, 1969, 53 (12): 2421-2430.
- [2] Anthony E J, Julian M. Source-to-sink sediment transfers, environmental engineering and hazard mitigation in the steep Var River catchment, French Riviera, southeastern France [J]. Geomorphology, 1999, 31 (1-3): 337-354.
- [3] Sømme T O, Jackson C A L, Vaksdal M. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Mør-Trøndelag area of southern Norway: Part 1-depositional setting and fan evolution [J]. Basin Research, 2013, 25 (5): 489-511.
- [4] Sømme T O, Jackson C A L. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Mør-Trøndelag area of southern Norway: Part 2-sediment dispersal and forcing mechanisms [J]. Basin Research, 2013, 25 (5): 512-531.
- [5] Sømme T O, Helland-Hansen W, Martinsen O J, et al. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: A basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems [J]. Basin Research, 2009, 21 (4): 361-387.
- [6] 庞雄, 彭大钧, 陈长民, 等. 三级“源-渠-汇”耦合研究珠江深水扇系统[J]. 地质学报, 2007, 81 (6): 857-864. [PANG Xiong, PENG Dajun, CHEN Changmin, et al. Three hierarchies “Source-Conduit-Sink” coupling analysis of the Pearl River deep-water fan system [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (6): 857-864.]
- [7] 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析[J]. 地学前缘, 2015, 22 (1): 9-20. [LIN Changsong, XIA Qinglong, SHI Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22 (1): 9-20.]
- [8] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38 (1): 1-11. [XU Changgui, DU Xiaofeng, XU Wei, et al. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38 (1): 1-11.]
- [9] 汪品先. 深海沉积与地球系统[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29 (4): 1-11. [WANG Pinxian. Deep sea sediments and earth system [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29 (4): 1-11.]
- [10] M. Richards, M. Bowman, H Reading. Submarine-fan systems i: characterization and stratigraphic prediction [J]. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15 (7): 689-717.
- [11] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-303. [PANG Xiong, CHEN Changmin, PENG Dajun, et al. The Pearl River deepwater fan systems & petroleum in South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2007:1-303.]
- [12] Stow D A V, Johansson M. Deep-water massive sands: nature, origin and hydrocarbon implications [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17 (2): 145-174.
- [13] Shanmugam G. Deep-water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs[M]. Amsterdam:Elsevier, 2006.
- [14] Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. Deep-water and fluvial sinuous channels-Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24 (6-9): 388-405.
- [15] Bourget J, Zaragosi S, Mulder T, et al. Hyperpycnal-fed turbidite lobe architecture and recent sedimentary processes: A case study from the Al Batha turbidite system, Oman margin [J]. Sedimentary Geology, 2010, 229 (3): 144-159.
- [16] 彭大钧, 庞雄, 陈长民, 等. 南海珠江深水扇系统的形成特征与控制因素[J]. 沉积学报, 2006, 24 (1): 10-19. [PENG Dajun, PANG Xiong, CHEN Changmin, et al. The characteristics and controlling factors for the formation of deep-water fan system in South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24 (1): 10-19.]
- [17] 王昌勇, 杨宝泉, 高博禹, 等. 荔湾3-1井区珠江组深水扇高分辨率层序分析及应用[J]. 沉积学报, 2011, 29 (6): 1122-1129. [WANG Changyong, YANG Baoquan, GAO Boyu, et al. High-Resolution Sequence Stratigraphy Analysis and Application in Deepwater Fan of Zhujiang Formation, Liwan3-1 Area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29 (6): 1122-1129.]
- [18] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水区油气成藏与勘探[J]. 科学通报, 2012, 57 (20): 1833-1841. [ZHU Weilin, ZHONG Kai, LI Youchuan, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea Deep-water Basins [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (20): 1833-1841.]
- [19] 施和生, 柳保军, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云-荔湾深水区油气成藏条件与勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2010, 22 (6): 369-374. [SHI Hesheng, LIU Baojun, YAN Chengzhi, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in Baiyun-Liwan deepwater Area, Pearl River Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22 (6): 369-374.]
- [20] 李云, 郑荣才, 高博禹, 等. 深水扇沉积研究现状和展望——以珠江口盆地白云凹陷珠江深水扇系统为例[J]. 地质论评, 2010, 56 (4): 549-560. [LI Yun, ZHENG Rongcai, GAO Boyu, et al. Reviews and prospects on submarine fan deposition: A case study of Zhujiang

- submarine fan system in Baiyun depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *Geological Review*, 2010, 56(4): 549-560.]
- [21] 李胜利, 于兴河, 刘玉梅, 等. 水道加朵体型深水扇形成机制与模式: 以白云凹陷荔湾3-1地区珠江组为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 32-40. [LI Shengli, YU Xinghe, LIU Yumei, et al. Formation mechanism and pattern of deep-water fan with channel and lobe: A case study of the ZhuJiang Formation in Liwan 3-1 area, Baiyun Depression [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 32-40.]
- [22] 王大伟, 吴时国, 王英民, 等. 琼东南盆地深水重力流沉积旋回[J]. *科学通报*, 2015, 60(10): 933-943. [WANG Dawei, Wu Shiguo, Wang Yingmin, et al. Deep-water sediment cycles in the Qiongdongnan Basin (in Chinese) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(10): 933-943.]
- [23] 何小胡, 钟泽红, 董贵能, 等. 莺琼盆地新近纪海流的研究新进展及深水油气勘探的启示[J]. *天然气勘探与开发*, 2015, 38(1): 5-8. [HE Xiaohu, ZHONG Zehong, DONG Guineng, et al. Neogene ocean current in YingQiong basin: implication of deepwater oil and gas exploration [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2015, 38(1): 5-8.]
- [24] 王亚辉, 张道军, 赵鹏肖, 等. 南海北部琼东南盆地中央峡谷成因新认识[J]. *海洋学报*, 2016, 38(11): 97-124. [WANG Yahui, ZHANG Daojun, ZHAO Pengxiao, et al. A new consideration on the genetic mechanism of the central canyon in the Qiongdongnan Basin, the northern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(11): 97-124.]
- [25] 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. sedimentation and evolution background of old large incised channel and submarine gravity flow system in Ying-Qiong basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(1): 69-72.]
- [26] 苏明, 张成, 解习农, 等. 深水峡谷体系控制因素分析——以南海北部琼东南盆地中央峡谷体系为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(8): 1807-1820. [SU Ming, ZHANG Cheng, XIE Xinong, et al. Controlling factors on the submarine canyon system: a case study of the Central Canyon System in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(8): 1807-1820.]
- [27] 王振峰, 孙志鹏, 张迎朝, 等. 南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 54-64. [WANG Zhenfeng, SUN Zhipeng, ZHANG Yingzhao, etc al. Distribution and hydrocarbon accumulation mechanism of the giant deepwater Central Canyon gas field in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(4): 54-64.]
- [28] 刘睿, 周江羽, 张莉, 等. 南海西北次海盆深水扇系统沉积演化特征[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 706-716. [LIU Rui, ZHOU Jiangyu, ZHANG Li, etc. Depositional Architecture and Evolution of Deep water Fan System in the Northwestern Sub-Basin, South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 706-716.]
- [29] 杨胜雄, 邱燕, 朱本铎. 南海地质地球物理图系(1:200万)[M]. 天津: 中国航海图书出版社出版发行, 2015年5月第一版. [YANG Shengxiong, QIU Yan, ZHU Benduo. Atlas of Geology and geophysics of South China Sea(1:2000000)[M]. Tianjin:China Navigation Publication Press, 2015.]
- [30] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海北部白云深水区之基础地质[J]. *中国海上油气*, 2007, 20(4): 215-222. [PANG Xiong, CHEN Changmin, PENG Dajun, et al. Basic geology of Baiyun deep-water area in the northern South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2007, 20(4): 215-222.]
- [31] 张远泽, 漆家福, 吴景富. 南海北部新生代盆地断裂系统及构造动力学影响因素[J]. *地球科学*, 2019, 44(2): 603-625. [ZHANG Yuanze, QI Jiafu, WU Jingfu. Cenozoic faults systems and its geodynamics of the continental margin basins in the northern of South China Sea [J]. *Earth Science*, 2019, 44(2): 603-625.]
- [32] 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成等. 南海区域断裂特征及其基底构造格局[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(4): 1544-1553. [LU Baoliang, WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, et al. Characteristic of regional fractures in South China Sea and its basement tectonic framework [J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1544-1553.]
- [33] Walker R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62(6): 932-966.
- [34] Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models: a critical perspective [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.
- [35] Lopez M. Architecture and depositional pattern of the Quaternary deep sea fan of the Amazon [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 479-486.
- [36] Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain-size and feeder system [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(5): 792-822.
- [37] Gervais A, Savoye B, Mulder T, et al. Sandy modern turbidite lobes: A new insight from high resolution seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(4): 485-502.
- [38] Deptuck M E, Sylvester Z, Pirmez C, et al. Migration-aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6-9): 406-433.
- [39] Sun Q L, Alves T M, Lu X Y, et al. True volumes of slope failure estimated from a Quaternary mass-transport deposit in the northern South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(6): 2642-2651, doi: 10.1002/2017GL076484.