

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.166>



南海北部珠江口外峡谷体系沉积特征、演化及其控制因素

杜文波^{1,2}, 聂鑫^{1,2*}, 杨楚鹏^{1,2}, 胡小三^{1,2}, 高红芳^{1,2}

1. 中国地质调查局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, 广东广州 511458
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东广州 511458

摘要: 深水海底峡谷内部的粗粒碎屑沉积物不仅可以作为良好的油气储层, 也可以较为完整地记录海洋地质环境变迁的相关信息, 是目前海洋地质领域研究的热点. 为揭示南海北部珠江口外峡谷体系沉积演化过程及其控制因素, 利用多波束测深和高分辨率二维多道地震数据, 对珠江口外峡谷体系地形特征、沉积充填特征、形成发育过程和控制因素进行研究. 研究发现珠江口外峡谷呈三段式发育: 上段为 NW-SE 走向, 宽度超过 30 km, 侵蚀强度不大, 横截面为不规则形态; 中段为 E-W 走向, 宽度开始变窄 (25~30 km), 横截面呈 U 型; 下段为 NW-SE 走向, 宽度达到最大 (25~45 km), 横截面呈 U 型, 中段和下段以沉积作用为主. 珠江口外峡谷体系沉积演化主要分为 3 个阶段: 早期阶段 (23~15.5 Ma), 水道-海底扇阶段 (15.5~11.6 Ma) 和峡谷-海底扇/块体流阶段 (11.6~0 Ma). 揭示了该峡谷珠江口外峡谷体系的发育和演化主要受构造运动、海平面变化和沉积物供给的控制作用, 通过以上分析, 将对南海北部海洋灾害地质、深水沉积体系研究及油气资源勘探有重要的指导意义.

关键词: 珠江口外峡谷; 沉积演化; 控制因素; 构造运动; 演化阶段; 沉积学.

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2022)11-4046-14

收稿日期: 2022-02-16

Sedimentary Characteristics, Evolution and Controlling Factors of the Pearl River Canyon System in the Northern South China Sea

Du Wenbo^{1,2}, Nie Xin^{1,2*}, Yang Chupeng^{1,2}, Hu Xiaosan^{1,2}, Gao Hongfang^{1,2}

1. China Geological Survey, Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Natural Resources, Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou 511458, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China

Abstract: The coarser clastic sediment in deep-water submarine canyons is a hot topic in the field of marine geology, not only because it can be good oil and gas reservoirs, but also because it records the complete information of marine geological environment change. In order to reveal the sedimentary evolution process and controlling factors of the Pearl River Canyon system, in this paper it combined multibeam bathymetric and high resolution 2D multi-channel seismic data to study the topography characteristics, sedimentary filling characteristics, the formation processes and controlling factors of the Pearl River Canyon system. The study shows that Pearl River Canyon system has developed in three sections. The upper section is in NW-SE trend, with a width of more than 30 km, low

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州) 人才团队引进重大专项 (No. GML2019ZD0207); 中国地质调查局项目 (Nos. DD20221712, DD20221719, DD20190627); 国家自然科学基金项目 (No. U1901214).

作者简介: 杜文波 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事沉积学和海洋地质等研究. ORCID: 0000-0002-4221-3261. E-mail: superdwb@outlook.com

* 通讯作者: 聂鑫, E-mail: nie_xin@126.com

引用格式: 杜文波, 聂鑫, 杨楚鹏, 胡小三, 高红芳, 2022. 南海北部珠江口外峡谷体系沉积特征、演化及其控制因素. 地球科学, 47(11): 4046-4059.

Citation: Du Wenbo, Nie Xin, Yang Chupeng, Hu Xiaosan, Gao Hongfang, 2022. Sedimentary Characteristics, Evolution and Controlling Factors of the Pearl River Canyon System in the Northern South China Sea. *Earth Science*, 47(11): 4046-4059.

erosion intensity, and irregular cross section. The middle section is in E-W trend, with narrower width (25–30 km), and U-shaped cross section. The lower sections is in NW-SE trend with the largest width (25–45 km) and U-shaped cross section. The middle and the lower sections are dominated by sedimentation. The evolution of Pearl River Canyon system could be divided into three stages: the early stage (23–15.5 Ma), the channel-submarine fan form stage (15.5–11.6 Ma) and the canyon-submarine fan/block flow stage (11.6–0 Ma). It's revealed that the development and evolution of the Pearl River Canyon system are mainly controlled by tectonic movement, sea level change and sediment supply. The above analysis has practical significance for the study of marine disaster, deep-water depositional system and hydrocarbon resources exploration in the northern South China Sea.

Key words: Pearl River Canyon system; sedimentary evolution; controlling factor; tectonic activity; evolution stage; sedimentology.

0 引言

海底峡谷是大陆边缘常见的海底地貌单元,主要发育在外大陆架中部和坡折带-上陆坡区,具有陡峭的侧壁,横剖面多为V型(剥蚀状态)或U型(堆积状态),在全球各大陆边缘广泛发育(丁巍伟等,2010;Harris and Whiteway, 2011).海底峡谷内部充填的沉积物不仅记录所在区域物源情况、古气候、海平面升降和区域构造演化等历史信息,同时其内部的粗粒碎屑沉积物可作为良好的油气储层(Deptuck *et al.*, 2003).近几十年来,随着深水油气勘探的增加,海底峡谷受到越来越多的关注和重视(刘丛舒等,2019).与此同时海底峡谷发育丰富的重力流沉积,重力流在向下游方向搬运过程中规模变大、流速增强,对峡谷下游的海底设施容易造成巨大破坏.因此深入了解海底峡谷的成因、沉积演化机制和控制因素对有利储层预测和地质灾害预防等具有重要的指导意义.

南海北部陆坡西起西沙海槽东口,东至台湾岛西南端,总体呈NE向展布.北部陆坡从西至东发育一系列海底峡谷,如西北陆缘的中央峡谷,北部陆坡的珠江口外峡谷体系,东北陆坡的东沙海底峡谷、台湾浅滩峡谷、澎湖海底峡谷群和高屏海底峡谷(丁巍伟等,2010;刘丛舒等,2019;王星星等,2021).近年来在白云凹陷油气的重大发现和神狐海域作为我国水合物首次试采区(朱俊江等,2020),已证实深水扇砂体的油气储集能力,而作为南海北部最大的陆源物质运输的主要通道,珠江口外峡谷体系受到越来越多学者的关注.Zhu *et al.*(2010)通过白云凹陷北侧陆坡区峡谷水道随坡度而发生的形态和沉积充填的变化,探讨了海底峡谷中新世以来的迁移性及其与洋流的关系;Han *et al.*(2010)认为珠江海底峡谷的形成主要受深部断裂和浊流作用的影响;Ding *et al.*(2013)认为珠江口外峡谷体系

发育的主要控制因素是构造作用、海平面变化和洋流作用等;高红芳等(2021)认为珠江海谷第四系深水浊积扇的发育和空间展布主要受断裂作用、海平面变化和古地形的控制作用.以上研究促进地质学家对珠江口外海底峡谷的认识,但是以上研究没有考虑到该区域具有珠江三角洲丰富的物源供给能力,而充足的物源供给能切割下伏地层并形成峡谷,而且由于调查手段和资料的限制,缺乏对珠江口外峡谷体系沉积特征、演化和控制因素等作出系统性分析.近年来,广州海洋地质调查局在南海北部陆坡区进行了一系列的综合地质地球物理调查,获取了一批多波束测深和高分辨率二维多道地震数据,本文通过以上数据和前人研究成果,对南海北部珠江口外峡谷体系发育演化过程及控制因素进行综合分析.研究结果对深水峡谷沉积演化机制提供科学依据,同时也对南海北部深水油气勘探具有重要的指导作用.

1 区域地质背景

南海位于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块的交汇地带,是西太平洋最大的边缘海之一,面积为 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ (刘丛舒等,2019;朱荣伟等,2021).南海受到太平洋和特提斯构造域的相互叠加,多种地质活动在此汇交,构造变形格局非常复杂,正是这种独特的构造格局和优越的形成条件,南海北部陆架发育了众多海底峡谷(王长盛等,2021).珠江口盆地位于南海北部大陆边缘,整体呈NE-SW向展布,是在燕山期花岗岩及前第三系褶皱基底上发育起来的中-新生代大型沉积盆地(杜文波等,2015a).前人对珠江口盆地做了大量研究,研究表明珠江口盆地受构造演化的控制,主要受NE向和NWW向断裂的控制,盆地呈现南北分带、东西分块的构造格局(杜文波等,2015b).珠

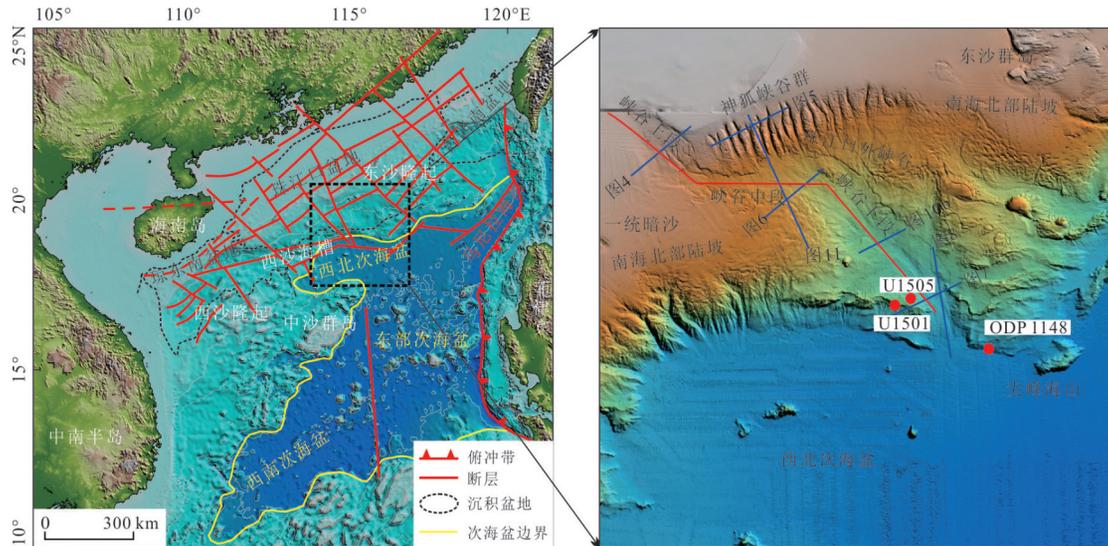


图1 研究区三维地形图和测线位置

Fig.1 Three-dimensional bathymetry map of the study area and the location of the seismic lines

图a据 Gao *et al.*(2019)修改

江口盆地新生代演化自下而上划分为3个主要的构造演化阶段,分别为裂陷阶段、拗陷阶段和区域沉降阶段,自新生代以来主要经历神狐运动(65 Ma)、南海运动(33 Ma)、白云运动(23 Ma)和东沙运动(11.6 Ma)等构造运动(Xie *et al.*, 2019).自23 Ma发生“白云运动”以来,构造条件稳定,断裂发育较少,凹陷的持续沉降使其为稳定的深水环境,是古珠江水系的主要沉积区域.

珠江口外峡谷体系在构造位置上位于珠江口盆地的白云凹陷,主体位于东沙群岛以西,一统暗沙以东,西北部与陆架相接,东南部与西北次海盆深海平原相邻,地形较为平缓,水深为3 500~3 700 m(Ding *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2018; 刘丛舒等, 2019).从图1可以看出珠江口外峡谷长约258 km,宽约为10~65 km,贯穿了整个北部陆坡,成为珠江口陆源碎屑物质进入西北次海盆的主要运输通道.根据高分辨率二维地震资料和钻井资料(U1501、U1505和ODP1148站位),建立了研究区层序地层格架,自下而上共识别出 T_g 、 T_6 、 T_5 、 T_3 、 T_2 、 T_1 和 T_0 共7个主要地震反射界面(图2).

2 地貌形态特征

通过多波束地形测深数据可以明显发现珠江口外峡谷体系整体呈“S”型展布,全长约为258 km(图3),根据其走向可划分为3段.上段位于200~1 000 m水深处的上陆坡,长度为62 km,宽度19~

33 km,最大切割深度为440 m,谷底坡度约为 1° ,为NW-SE走向,向上一直延伸至陆架区,侵蚀强度不大,横截面为不规则形态.中段位于1 000~2 500 m水深处,其中在水深1 000 m处转为近E-W走向,长度为78 km,切割深度为2 500 m,谷底坡度约为 0.7° ,上宽下窄,宽度范围为9~35 km,横截面呈U型,以沉积充填为主.下段位于2 500~3 000 m水深处,长度为118 km,谷底坡度约为 0.5° ,走向重新回到NW-SE走向,切割深度为100~500 m,其中下段是珠江口外峡谷最宽的区域,宽度范围为15~75 km,横截面呈U型,以沉积作用为主(表1).峡谷在3 500 m处汇入西北次海盆,在峡谷出口处由于海山的阻挡,峡谷宽度明显变窄,进入深海平原后峡谷宽度急剧增加(图3).

神狐峡谷群发育于北部陆坡455~1 500 m水深处(图3),位于珠江口外峡谷东侧,由17条近N-S向的峡谷组成(毛凯楠, 2015; 付超等, 2018),长约30~60 km,宽为1~5.7 km,下切深度可达50~300 m,峡谷的谷壁陡峭、光滑,坡度可达 6.8° .西侧的9条峡谷向下直接汇入珠江口外峡谷,而东侧的8条峡谷由于陆坡2个地下隆起的阻挡汇聚成1条水道,最终也汇入珠江口外海谷的主水道.由于坡度的不同,神狐峡谷群的横断面形态也有不同变化,其头部位置为典型的V型结构,内部无沉积,处于剥蚀状态,随着坡度的降低,水道逐渐变宽,下切深度随之变小,峡谷的横断面形态变为U型结构(图3),说明峡谷此时以沉积作用为主.

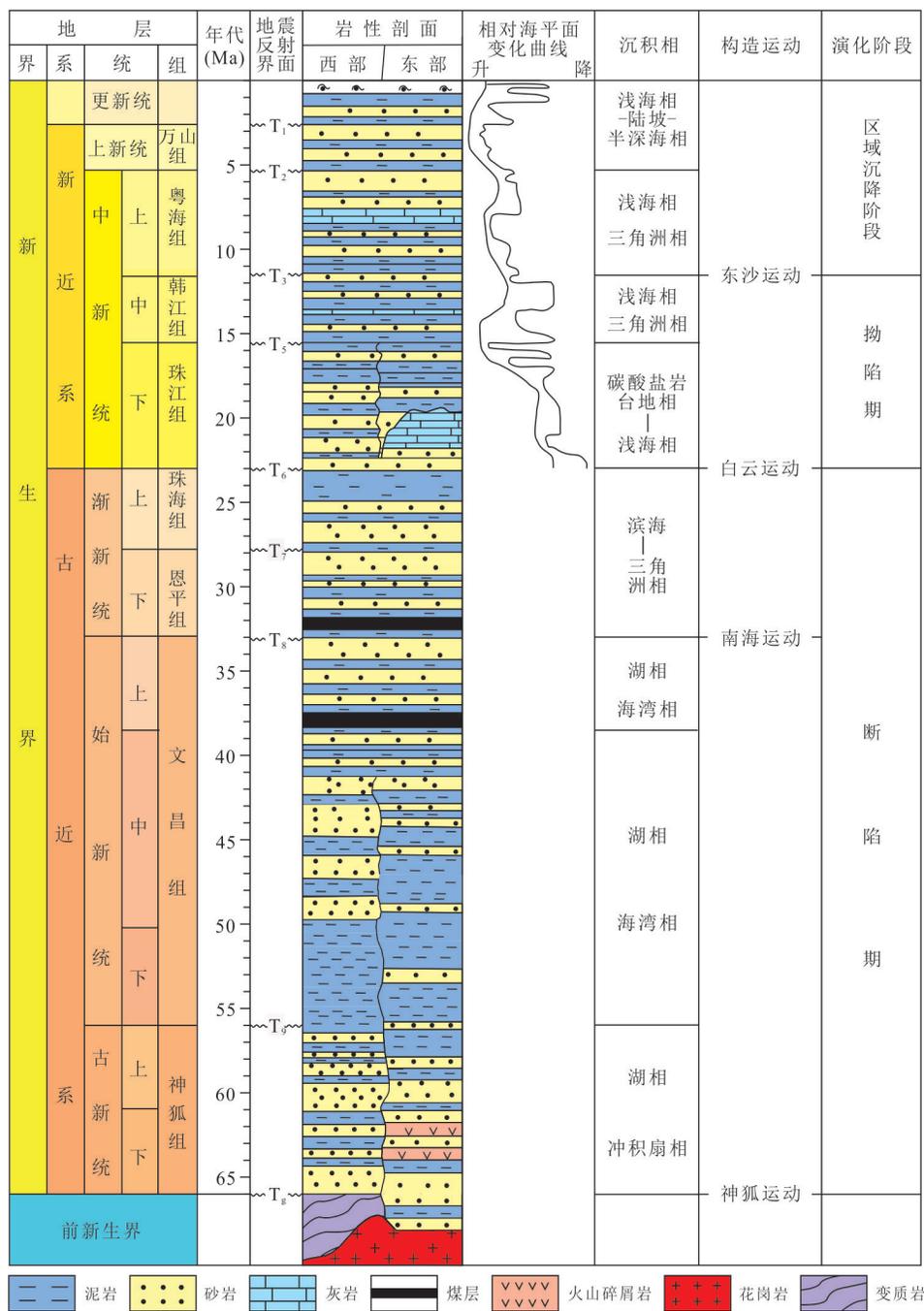


图 2 珠江口盆地地层综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column in the Pearl River Mouth basin

据庞雄等(2007),朱伟林和米立军(2010)修改

3 珠江口外峡谷体系的沉积特征

3.1 峡谷上段的沉积特征

根据地震剖面(图4)显示,珠江口外峡谷上段呈西缓东陡的不规则形态,侵蚀强度不大,峡谷两侧峡谷壁为非对称状态,上段宽度为 32 km. 珠江口外峡谷上段东西两侧的近海沉积特征存在明显差异,西侧主要发育一系列向下倾斜并向东堆积

的强振幅、高连续、平行亚平行反射同相轴,而东侧主要发育一系列中振幅、中连续并向东变厚的沉积特征,指示物源主要来自东侧. 而且下部发现一系列的埋藏水道,但埋藏水道的规模比较小,说明物质搬运的强度不是很大,这些埋藏水道向 NE 向迁移,埋藏水道的下部沉积层识别出一系列的正断层,一直活跃至今,这些断层走向与埋藏水道的分布有很好的对应关系.

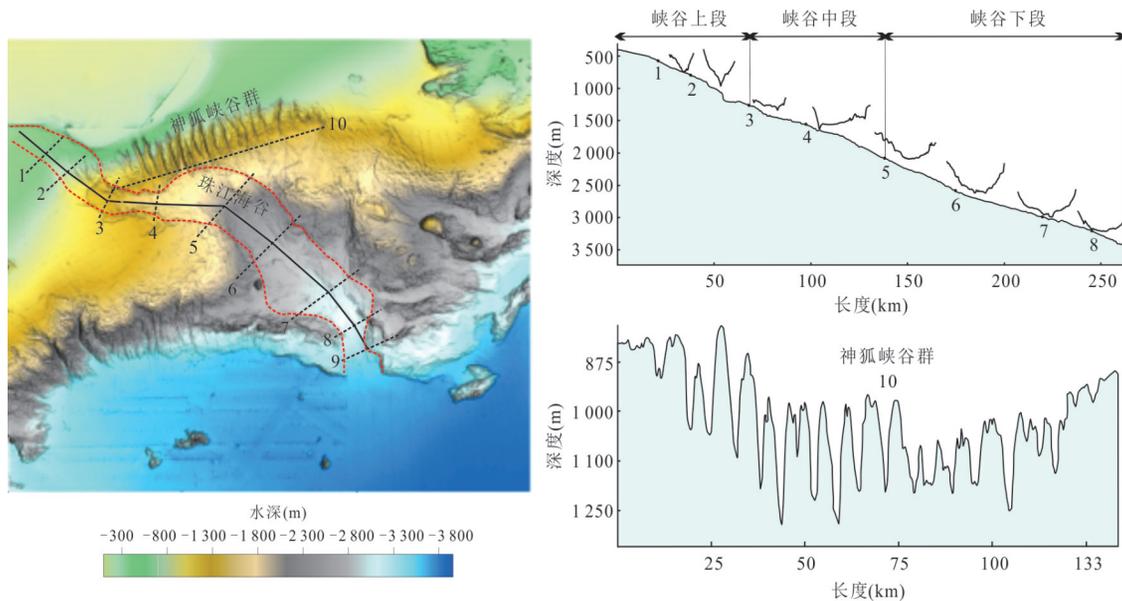


图3 珠江口外峡谷体系三维地形示意图和典型地形剖面图

Fig.3 3D topographic map and typical bathymetric profile of the Pearl River Canyon system

右图剖面位置见左图

表1 珠江口外峡谷体系平面形态特征

Table 1 Morphology parameter statistics of different sections of the Pearl River Canyon system

| 参数 | 上段 | 中段 | 下段 |
|---------|--------|--------|--------|
| 走向 | SE | E | SE |
| 形态 | V型 | U型 | U型 |
| 长度(m) | 62 | 78 | 118 |
| 宽度(m) | 16 000 | 26 000 | 34 000 |
| 切割深度(m) | 120 | 180 | 145 |
| 宽深比 | 133 | 154 | 234 |
| 坡度(°) | 1 | 0.7 | 0.5 |

与珠江口外峡谷上段相比,神狐峡谷群向下切深度更深(可达0.1~0.2 s),沉积结构也更为复杂.根据地震剖面显示(图5),在现代水道的下方,发育多期次、垂向上相互叠置的埋藏水道,自下向上不断向NE向迁移,显示其经历不断重复的剥蚀-充填-剥蚀的沉积过程.神狐峡谷群具有典型的V型结构,内部无沉积,而峡谷群两侧的地震反射特征为强振幅、连续、平行且向两侧谷壁减薄(图5).通过地震剖面的精细解释和区域地质背景,研究表明埋藏的水道主要发育在 T_5 界面以上,本文认为神狐峡谷群最初发育时间为15.5 Ma,地震剖面(图5)显示在 T_5 - T_3 时期(15.5~11.6 Ma),神狐峡谷群发育的规模相对较小,下切的深度比较浅,而到了 T_3 - T_2 时期

(11.6~5.3 Ma)神狐峡谷群下切的宽度和深度明显大于 T_5 - T_3 时期,此时神狐峡谷群发育的规模达到最大,并具有较强的物质运输能力.根据地貌和沉积特征可知,神狐峡谷群实际上是陆源碎屑向西北次海盆运输的主要通道.

3.2 峡谷中段的沉积特征

随着地形坡度的降低陆源碎屑物质进入珠江口外峡谷中段期间,峡谷的冲刷作用减弱,主要以沉积作用为主.根据地震剖面(图6)显示,地层内部出现中强振幅、连续性好、呈透镜状的沉积体,前人研究已表明该区域有大型的深水扇沉积系统(丁巍伟等,2010;刘丛舒等,2019; Su *et al.*, 2020),断定这些透镜状沉积体为低位堆积的深水扇,扇体表现为高振幅、连续、平行/亚平行地震反射特征,外形为丘状或透镜状,主要在 T_5 - T_2 时期(15.5~5.3 Ma)发育,且向上发育范围不断扩大.根据图6可知,该扇体在垂向上出现多期次的叠置关系,与北部陆坡区强烈发育的神狐峡谷群垂向上相互叠置的埋藏古河道(图5)具有良好的对应关系.在海平面下降阶段,水动力条件增强,不断侵蚀着海底,形成侵蚀水道,随着坡度的降低在此区域沉积,周而复始,最后形成垂向上相互叠置的深水扇.同珠江口外峡谷上段相比,中段未见明显的埋藏水道,说明此时主要处于沉积堆积状态.

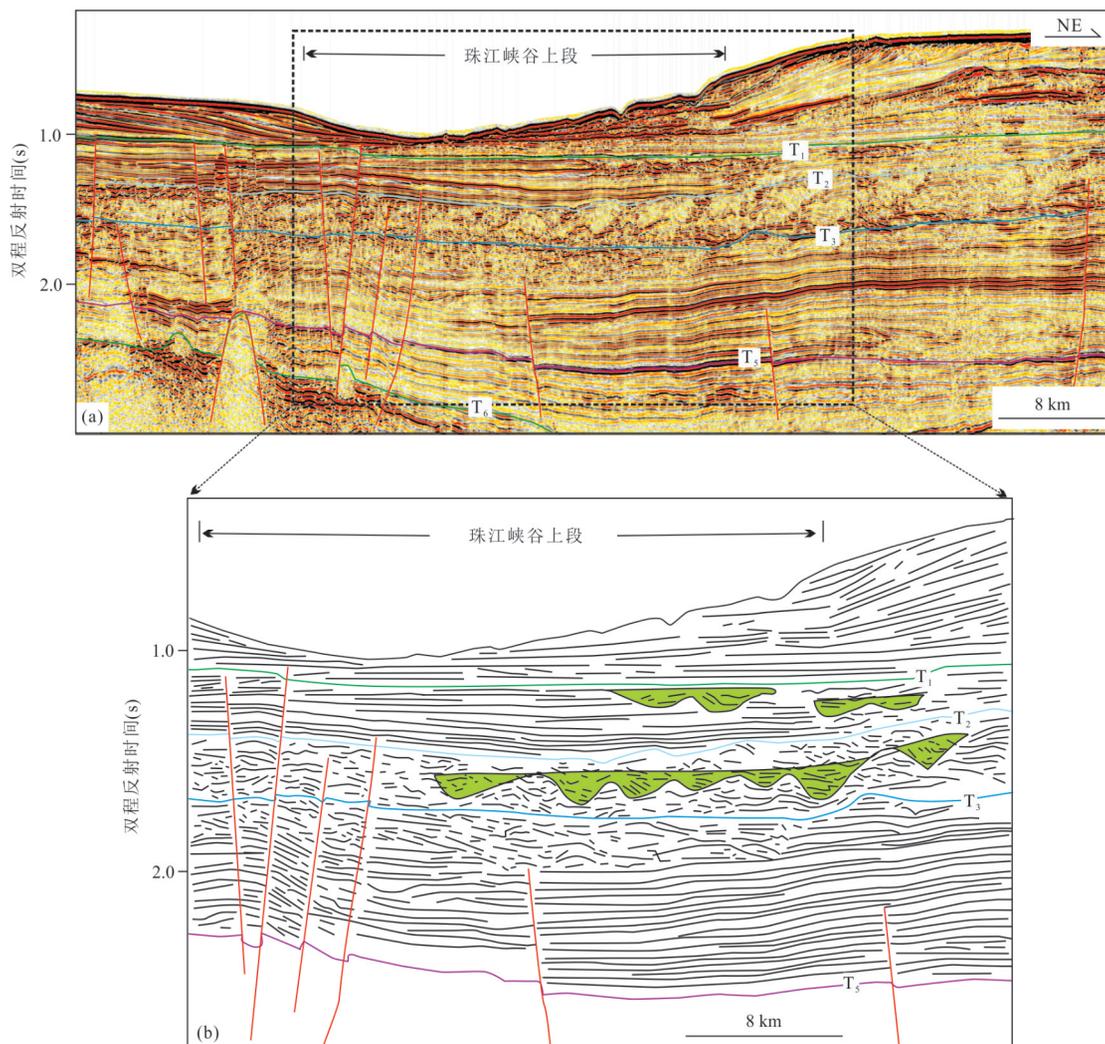


图 4 珠江口外峡谷上段地震反射特征(a)及解释剖面(b)

Fig.4 Seismic-reflection feature (a) and corresponding interpretation (b) of the upper segment crossing the Pearl River Canyon
剖面位置见图 1

3.3 峡谷下段的沉积特征

随着坡度的不断降低,根据地震剖面(图 7)显示地层整体呈宽缓的 U 型状态。 T_6 界面(21 Ma)受海平面下降的影响(Ding *et al.*, 2013; 毛凯楠, 2015; 王长盛等, 2021),表现为很强的侵蚀界面,其上发育一套地层呈中-强振幅、高连续,平行/亚平行的地震相特征,外部形态为透镜状,为典型的深海扇沉积,其厚度向海方向逐渐减薄。由于珠江口外峡谷下段的地层主要为高连续,平行-亚平行的地震反射特征,指示其为深水沉积环境,以沉积作用为主,同时峡谷下段附近的海山也能阻挡上游的沉积物向西北次海盆运输。

地震剖面(图 8)显示在进入西北次海盆的地层主要为中振幅、高连续和平行/亚平行的地震反

射特征,厚度在 0.1~0.2 s,表明此时处于相对稳定的深水沉积环境。从珠江口外峡谷下段到西北次海盆间坡度逐渐变缓,大量从峡谷下段运输过来的沉积物开始堆积,而珠江口外峡谷尾部两端埋藏的海山将沉积物的发育限制在它们之间,从而使沉积物的发育范围更远。在水深大约 3 400 m 处,峡谷下段进入西北次海盆后,深海扇的发育范围逐渐向海尖灭,沉积体长度约为 22~50 km,厚度为 0.1~0.7 s。在 T_1 - T_0 时期,下部主要发育块体流沉积,具有不规则块体外形,主要为杂乱、低振幅、不连续的地震反射特征,上部(近海底)部分未受到块体流沉积的影响,发育具有席状外形,内部反射特征为中-高连续、中-强振幅、平行的深海沉积。

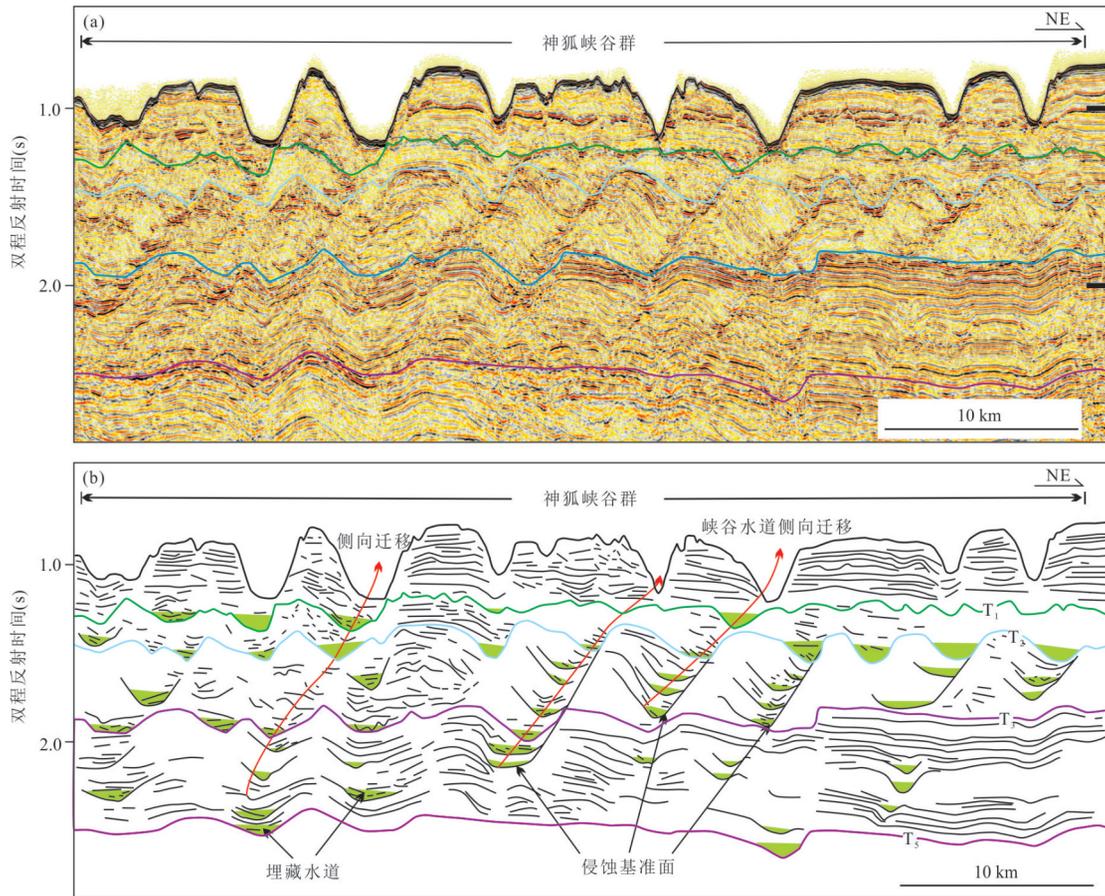


图5 神狐峡谷群地震反射特征(a)及解释剖面(b)

Fig.5 Seismic-reflection feature (a) and corresponding interpretation (b) of the Shenhu Canyon system

剖面位置见图1,地震剖面据Chen *et al.*(2020)修改

4 珠江口外峡谷体系沉积演化特征

根据以上分析,可将珠江口外峡谷体系的演化划分为3个阶段:早期阶段(23~15.5 Ma),水道-海底扇阶段(15.5~11.6 Ma)和峡谷-海底扇/块体流阶段(11.6~0 Ma)。

(1)早期阶段(23~15.5 Ma):该时期峡谷水道不发育,仅有小规模水道存在,该区域主要发育陆架边缘三角洲,在珠江口外峡谷体系下段出现规模很小的侵蚀水道,但是发育的规模比较小,持续的时间较短。21 Ma时发生的白云运动造成白云凹陷的快速沉降,陆架坡折带从白云凹陷南部向北迁移(神狐陆坡区),此时从古珠江流入的陆源碎屑物质直接越过陆架,向陆坡区输送沉积物,此时发育的水道被沉积物所覆盖(图9)。

(2)水道-海底扇阶段(15.5~11.6 Ma):在15.5 Ma时出现大规模的区域性海平面下降事件造成陆架破折带继续向北迁移,此时神狐峡

谷群开始形成,但是发育的规模较小,沉积物在流向珠江口外峡谷中段时,在珠江口外峡谷中段侵蚀形成水道沉积,最后少量沉积物在西北次海盆形成海底扇(图9),此阶段发育的峡谷体系是现今珠江口外峡谷体系的雏形。

(3)峡谷-海底扇/块体流阶段(11.6~0 Ma):根据上文分析可知,该阶段在 T_3 界面(11.6 Ma)出现大规模的区域性海平面下降事件,古珠江提供的碎屑物质供应量增加,根据地震剖面(图5)显示可知,神狐峡谷群的下切侵蚀能力和沉积物运输能力达到了最大规模,相比珠江口外峡谷上段,神狐峡谷群是主要的运输通道。沉积物沿着珠江口外峡谷上段和神狐峡谷群向下运移时,高密度重力流向下侵蚀形成水道沉积,最终在西北次海盆形成大规模的深海扇沉积。随着海平面的上升,珠江口外峡谷体系大部分被后期流入的沉积物所覆盖。在 T_2 - T_1 (5.3~2.6 Ma)时期,由于海平面的持续下降和充足的沉积物供给,珠江口外峡谷体系又开始发育,但是发育

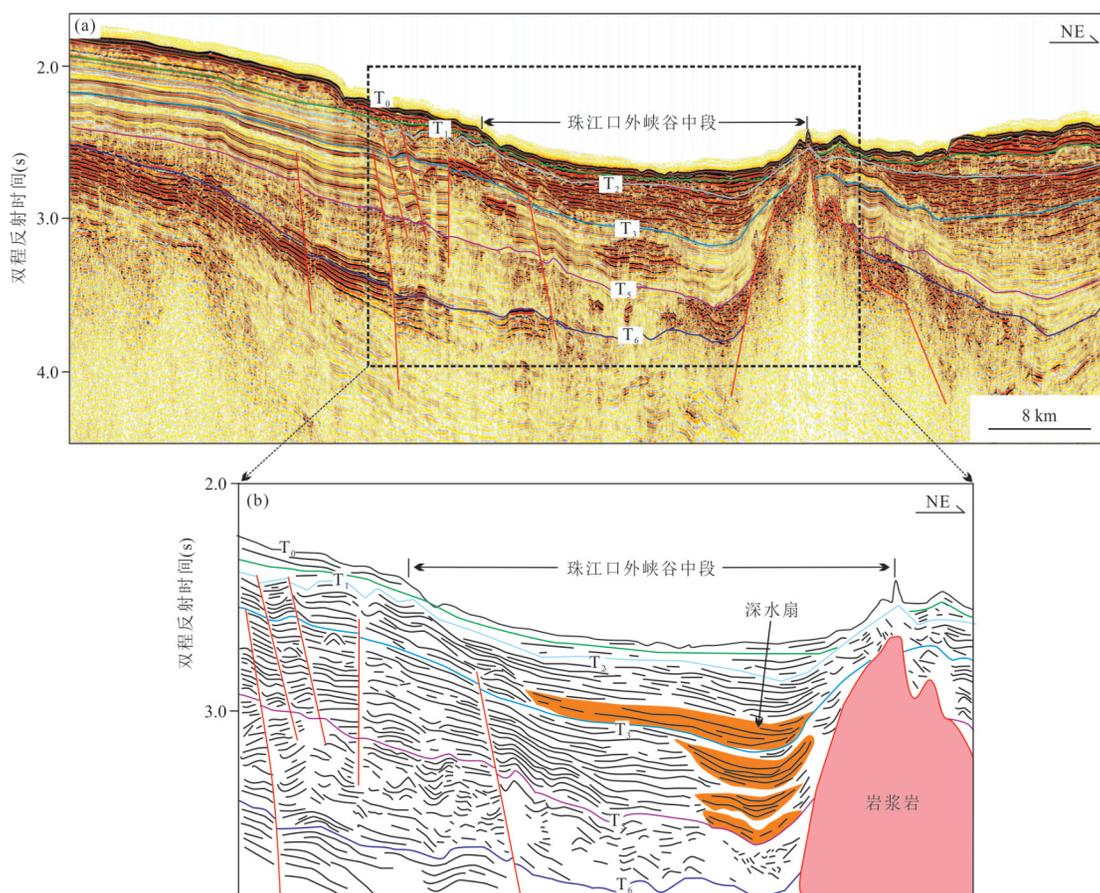


图6 珠江口外峡谷中段地震反射特征(a)及解释剖面(b)

Fig.6 Seismic-reflection feature (a) and corresponding interpretation (b) of the middle segment crossing the Pearl River Canyon
剖面位置见图1

的规模比 T_3 - T_2 时期小。珠江口外峡谷上段停止发育, 神狐峡谷群继续发育, 而中段和下段发育峡谷水道和块体流沉积, 由于侵蚀能力的下降, 在西北次海盆形成规模较小的深海扇; T_1 - T_0 (2.6~0 Ma) 时期峡谷下切侵蚀能力较弱和侵蚀范围减少, 珠江口外峡谷上段主要发育浊积水道, 中段和下段则主要发育分布范围广泛的块体流沉积, 一直延伸到西北次海盆(图9)。

5 珠江口外峡谷体系发育和演化的主控因素

通过总结前人对全球范围内海底峡谷的研究, 海底峡谷的发育和演化主要受到以下因素的控制: 构造活动、沉积物供给、地形变化、海平面变化和底流作用等(丁巍伟等, 2010; 伊善堂等, 2020; 王长盛等, 2021)。通过前文对珠江口外峡谷体系的地形地貌特征、沉积结构和演化分析的详细分析, 本文认为构造运动、海平面变化和沉积物供给是珠

江口外峡谷体系发育和演化的主控因素。

5.1 构造运动

南海北部珠江口盆地新生代构造活动对珠江口外峡谷体系发育的位置、形态特征和扩展方向都具有很重要的控制作用。21 Ma 时发生的白云运动造成白云凹陷的快速沉降(Ding *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2020), 陆架坡折带由白云凹陷南部向北迁移至神狐陆坡区, 此时从古珠江流入的陆源碎屑物质直接越过陆架向陆坡区输送沉积物。研究区由于南海北部新生代受多期拉张事件的影响, 形成了一系列 NW-SE 向断层, 先存断裂使得这些地方形成了一定范围的断裂破碎带, 该破碎带地层相对松软, 陆源碎屑物质优先沿着薄弱带搬运, 从而容易侵蚀形成水道。地震剖面(图5)也可以看出北部陆坡区发育的神狐峡谷群垂向上相互叠置的埋藏古河道向 NE 向逐渐迁移, 这也是珠江口外峡谷主要呈 NW-SE 展布的原因。珠江口外峡谷体系中段和下段地层中深海扇在垂向上出现多期次的叠置关系

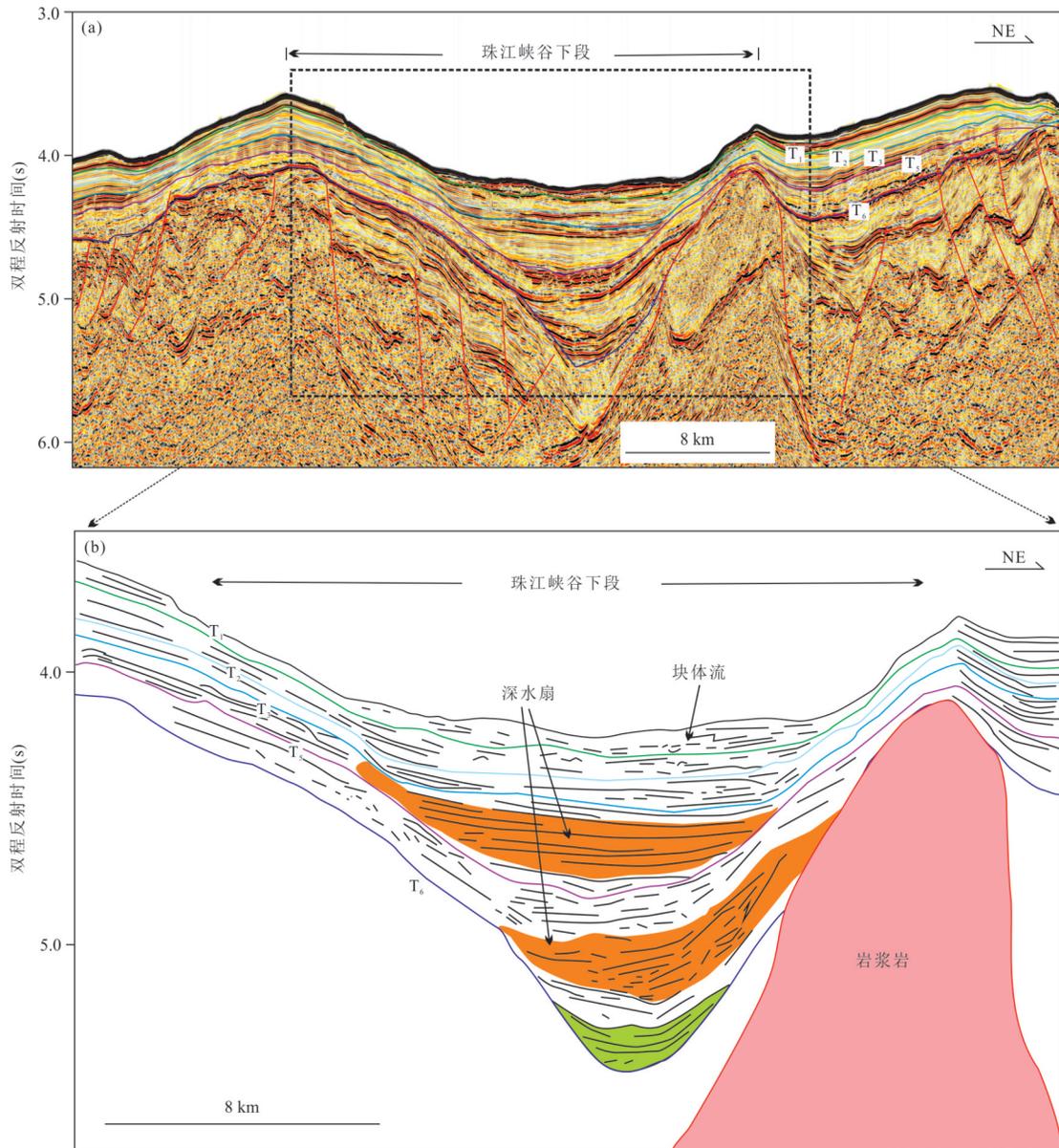


图7 珠江口外峡谷下段地震反射特征(a)及解释剖面(b)

Fig.7 Seismic-reflection feature (a) and corresponding interpretation (b) of the lower segment of the Pearl River Canyon
剖面位置见图1

正好与珠江口外峡谷上段和神狐峡谷群垂向上相互叠置的古河道相对应。构造运动还能引发地震、海啸和滑坡等地质灾害形成不稳定的滑塌体,造成大规模的溯源侵蚀作用,最终形成海底峡谷。由构造运动造成珠江口外峡谷体系的地形总体呈北高南低,这奠定了珠江口外峡谷体系发育的动力基础(刘杰等,2016),自中中新世以来,南海海底扩张停止后构造活动减弱,但仍保持活动状态(毛凯楠,2015;罗伟东等,2018),陆架坡折带和沉降中心的位置处于稳定状态,该区域的持续沉降导致陆源碎屑物质不断沿着珠江口外

峡谷体系中段和下段所处的负地形沉积。

5.2 海平面变化

庞雄等(2007)通过对珠江口盆地60多口油气探井进行了微生物定量分析,建立了相对海平面变化曲线,该变化曲线表明自23 Ma以来南海海平面共经历了16期明显的海平面升降旋回,其中21 Ma、16.0 Ma和11.6 Ma期间出现了明显的海平面大幅下降(图2),这与珠江口外峡谷埋藏古河道发育的时间完全对应,只是每一次的侵蚀程度会有所差异,这也是珠江口外峡谷体系形成和发育的重要因素之一。在海平面下降阶段,陆架大部分暴露并遭受剥蚀,

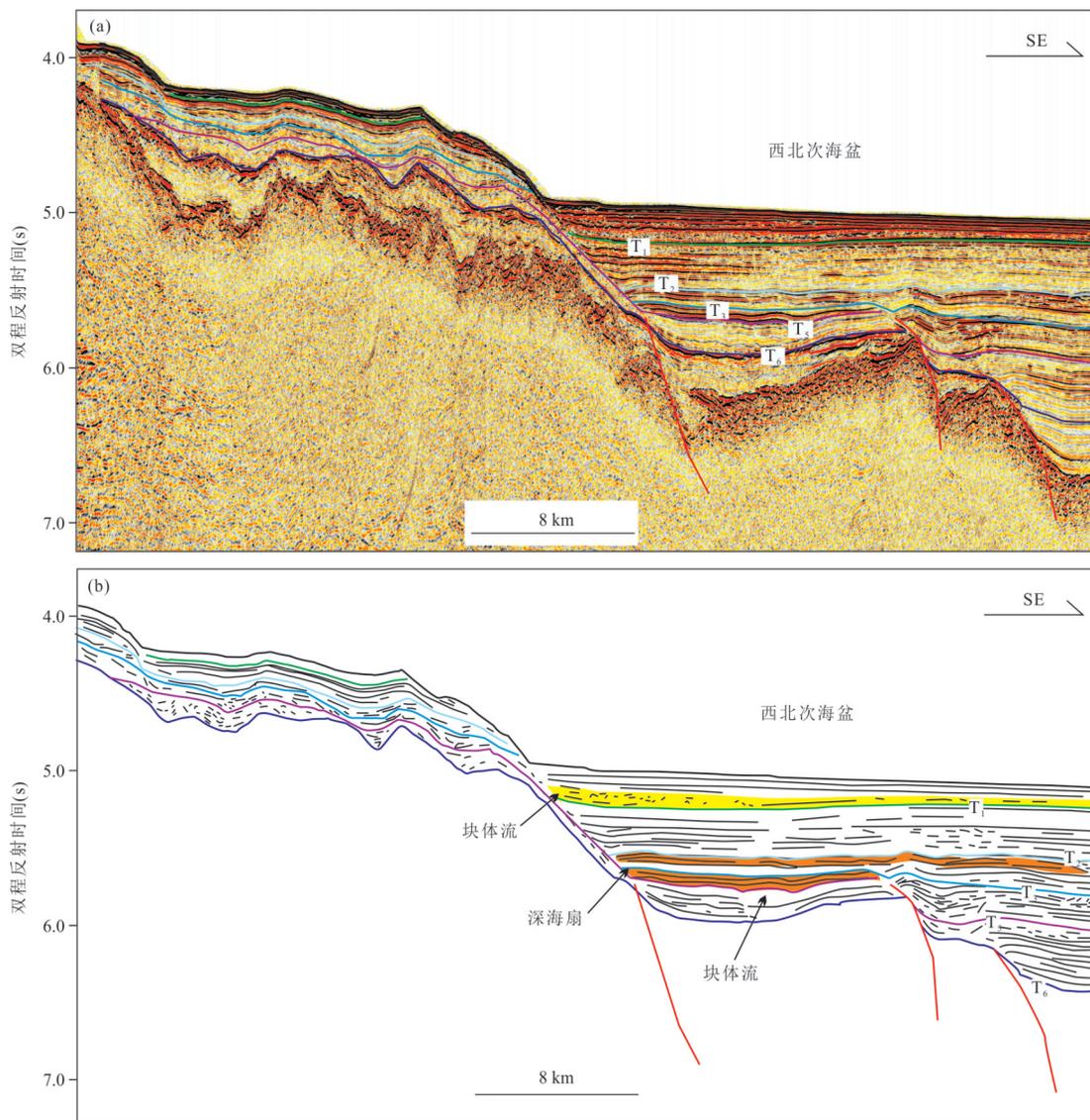


图 8 过珠江口外峡谷下段至西北次海盆地震反射特征(a)及解释剖面(b)

Fig.8 Seismic-reflection feature (a) and corresponding interpretation (b) of the lower segment crossing the Pearl River Canyon to northwest sub-basin

剖面位置见图 1

古珠江携带的大量碎屑物质,直接越过大陆架到达陆坡区,在海流的作用下形成高密度流并结合伴随的重力流活动具有很强的侵蚀作用,促进海底峡谷的发育;在海平面上升阶段,峡谷作为运输通道,可以向深海区搬运沉积物,同时也是峡谷的充填阶段(罗伟东等,2018;田洁等,2021).相对海平面交替升降,会导致珠江口外峡谷经历不断重复的剥蚀-充填-剥蚀的沉积过程.但是每一次的相对海平面下降都对应了珠江口外峡谷体系最为强烈的侵蚀阶段(图 10),只不过每一次的侵蚀能力有所差异,这也是珠江口外峡谷体系发育的重要控制条件之一.

5.3 沉积物供给

深水峡谷体系的发育和演化与沉积物供给密切相关,大体量的沉积物运移可以大幅加剧海底峡谷的发育规模(伊善堂等,2020).南海北部陆坡发育一系列海底峡谷,而珠江口外峡谷体系是中国南海北部陆缘最大的峡谷系统,本文认为其形成发育的主要因素是充足的沉积物供给.根据南海北部陆坡 ODP184 航次 1148 站位岩心样品中钨同位素测试分析,发现其含量特征与珠江三角洲沉积物相似,指示其物源来自珠江,而珠江是华南大陆最大的河流,年输沙量约为 7×10^7 t,带来大量陆源碎屑搬运到西北次海盆(丁巍伟等,2010;毛凯楠,2015;刘丛

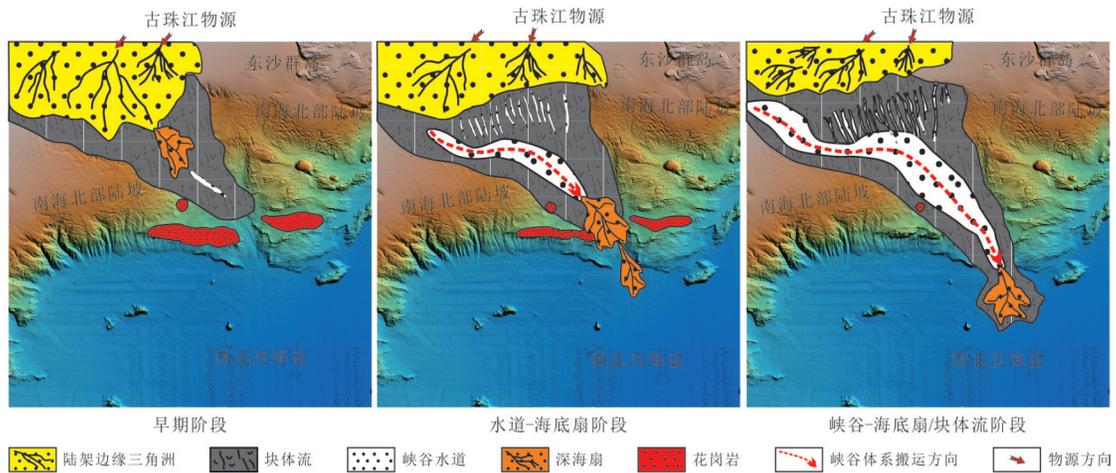


图9 珠江口外峡谷体系早中新世以来沉积演化模式(底图为地形图)

Fig.9 Sedimentary evolution model since the Early Miocene of the Pearl River Canyon system

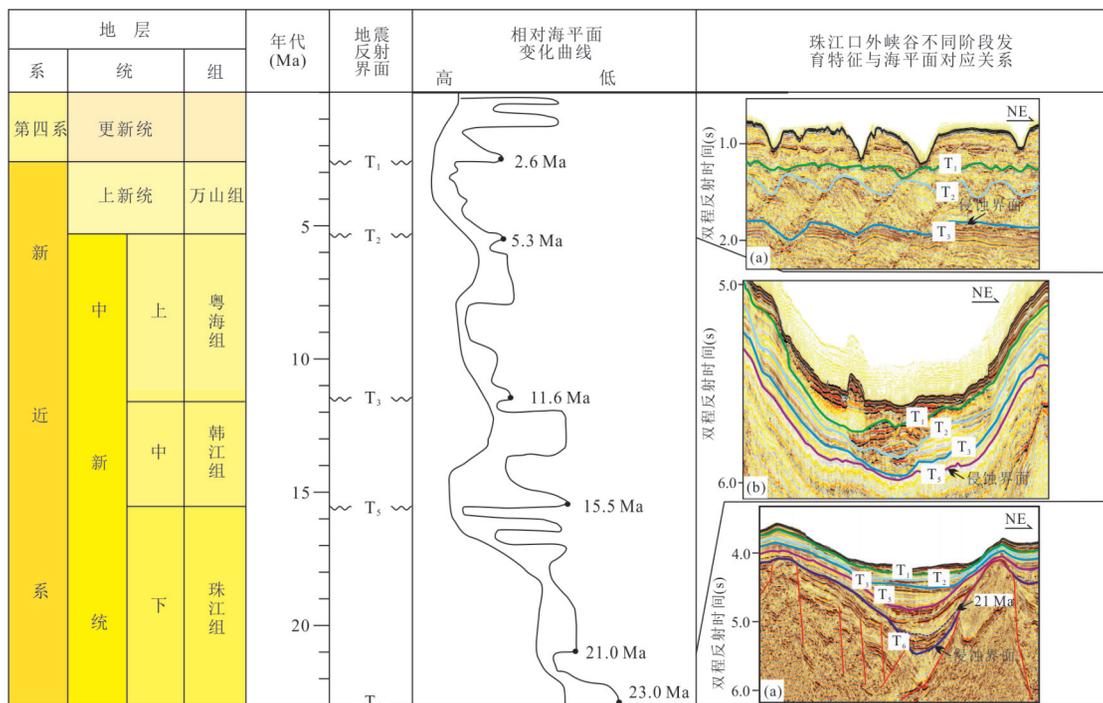


图10 珠江口外峡谷体系强侵蚀界面与海平面变化曲线的对应关系

Fig.10 The correspondence relationship between strong erosion interface and sea level change curve of the Pearl River Canyon system

剖面位置见图1

舒等, 2019). 顺物源方向的地震剖面(图11)可明显观察到多期的前积反射特征, 向海方向逐渐减薄, 说明了南海北部提供了充足的沉积物供应(杜文波等, 2020). 中新世以来南海北部陆架坡折带向海迁移, 使得古珠江有机会直接越过陆架到达陆坡附近, 陆架边缘形成具有“S”型前积反射特征的陆架边缘三角洲(图11), 带来的大量沉积物不断堆积, 当其重力达到或超过堆积阻力时, 碎屑物质向陆坡

方向形成高密度的重力流切割下伏地层, 一旦“侵蚀型”地形出现, 持续的充足沉积物供给会导致峡谷地貌进一步的凸显, 从而有利于峡谷的发育. 特别是第四纪时期, 由于气候变化的原因, 南海北部大陆边缘沉积速率明显提高, 高速率的沉积物供给也增加了陆坡发育的不稳定性, 会造成沉积物失稳并引起大规模的溯源侵蚀作用, 最终形成的高密度重力流对下伏地层的侵蚀是珠江口外海底峡谷形

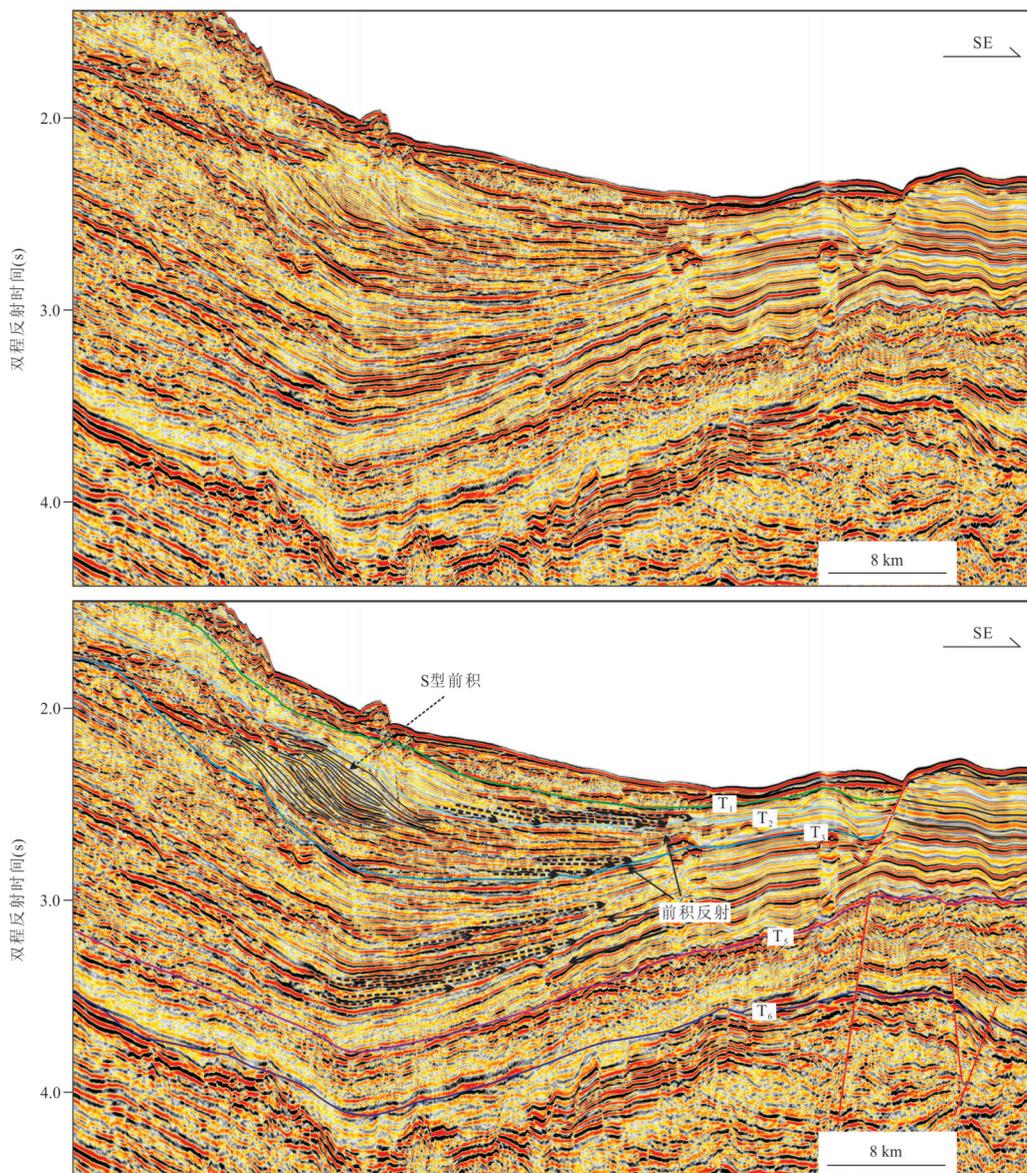


图 11 珠江口外峡谷体系北部沉积物源供给特征

Fig.11 The north sediment supply characteristics of the Pearl River Canyon system

剖面位置见图 1

成和发育的主要控制因素.

6 结论

(1) 珠江口外峡谷体系是南海北部陆源物质进入西北次海盆的主要通道. 通过对其剖面几何形态和结构特征的分析, 珠江口外峡谷体系整体呈“S”型展布, 呈三段式发育. 上段为 NW-SE 走向, 宽度超过 30 km, 横截面为不规则形态, 侵蚀强度不大, 中段为 E-W 走向, 宽度开始变窄 (25~30 km), 横截面呈 U 型, 下段为 NW-SE 走向, 宽度达到最大 (25~45 km), 横截

面呈 U 型, 中段和下段以沉积作用为主.

(2) 珠江口外峡谷体系的演化划分为 3 个阶段: ① 早期阶段 (23~15.5 Ma), 该时期峡谷水道不发育, 仅有小规模水道存在; ② 水道-海底扇阶段 (15.5~11.6 Ma) 由于海平面下降的影响, 神狐峡谷群开始形成, 但是发育的规模比较小, 在珠江口外峡谷中段侵蚀形成水道沉积, 最后少量沉积物在西北次海盆形成海底扇; ③ 峡谷-海底扇/块体流阶段 (11.6~0 Ma), 由于该时期出现大规模的区域性海平面下降事件, 珠江口外峡谷体系发育规模达到最大, 在西北次海盆发育大规模的深海扇, 到了 2.6 Ma 时期峡谷下切侵蚀能力较弱、侵蚀

范围减少,珠江口外峡谷上段主要发育浊积水道,中段和下段则主要发育分布范围广泛的块体流沉积,一直延伸到西北次海盆。

(3)构造运动、沉积物供给和海平面变化是珠江口外峡谷体系发育和演化的主要控制因素。21 Ma时发生的白云运动,造成白云凹陷的快速沉降,从古珠江流入的充足陆源碎屑物质直接越过陆架向陆坡区输送沉积物,陆源物质沿着NW-SE向先存断裂的破碎带侵蚀形成水道,持续的充足沉积物供给会导致峡谷地貌进一步的凸显。当海平面下降时,陆架大部分暴露并遭受剥蚀,古珠江携带的大量碎屑物质,最终形成高密度重力流侵蚀下伏地层,促进海底峡谷的发育。

致谢:非常感谢两位专家提出的宝贵意见,使我对本文有了更深的理解,在此表示感谢!

References

- Chen, H., Xie, X. N., Mao, K. N., et al., 2020. Depositional Characteristics and Formation Mechanisms of Deep-Water Canyon Systems along the Northern South China Sea Margin. *Journal of Earth Science*, 31(4): 808–819. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1284-z>
- Deptuck, M. E., Steffens, G. S., Barton, M., et al., 2003. Architecture and Evolution of Upper Fan Channel-Belts on the Niger Delta Slope and in the Arabian Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6–8): 649–676.
- Ding, W. W., Li, J. B., Li, J., 2010. Forming Mechanism of the Submarine Canyon on the North Slope of the South China Sea. *Journal of Marine Sciences*, 28(1): 26–31 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W. W., Li, J. B., Li, J., et al., 2013. Morphotectonics and Evolutionary Controls on the Pearl River Canyon System, South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 34(3–4): 221–238. <https://doi.org/10.1007/s11001-013-9173-9>
- Du, W. B., Huang, W. K., Zhu, H. T., et al., 2020. Sedimentary System, Stratigraphic Architecture and Petroleum Exploration Prospect in the Western Taiwan Strait. *Geology in China*, 47(5): 1542–1553 (in Chinese with English abstract).
- Du, W. B., Sun, G. H., Huang, Y. J., et al., 2015a. Reservoir Prediction Based on Seismic Multi-Attributes Analysis: An Example from Paleogene Enping Formation of Enping Sag in the Pearl River Mouth Basin. *Marine Geology Frontiers*, 31(8): 62–70 (in Chinese with English abstract).
- Du, W. B., Sun, G. H., Shu, Y., 2015b. Seismic Sedimentology of Paleogene Enping Formation in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Geological Science and Technology Information*, 34(3): 220–229 (in Chinese with English abstract).
- Fu, C., Yu, X. H., He, Y. L., et al., 2018. Stratigraphic and Structural Differences and Their Controls in the Shenhu Submarine Canyon, Northern South China Sea. *Geoscience*, 32(4): 807–818 (in Chinese with English abstract).
- Gao, H. F., Nie, X., Luo, W. D., 2021. “Source to Sink” Analysis of a Sea Basin: The Quaternary Deepwater Turbidite Fan System in Pearl River Valley Northwest Subbasin, Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 41(2): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. W., Bangs, N., Wu, S. G., et al., 2019. Post-Seafloor Spreading Magmatism and Associated Magmatic Hydrothermal Systems in the Xisha Uplift Region, Northwestern South China Sea. *Basin Research*, 31(4): 688–708.
- Han, X. B., Li, J. B., Chu, F. Y., et al., 2010. Geomorphology and Tectonic Interpretation of Zhujiang Submarine Canyon in the Northern South China Sea. *Oceans 10 IEEE Sydney, Sydney*, 1–4.
- Harris, P. T., Whiteway, T., 2011. Global Distribution of Large Submarine Canyons: Geomorphic Differences between Active and Passive Continental Margins. *Marine Geology*, 285(1–4): 69–86.
- Liu, C. S., Ding, W. W., Yin, S. R., et al., 2019. Geomorphology, Sedimentary Characteristics and Controlling Factors of Submarine Canyons in the Northern Continental Slope of the South China Sea. *Journal of Marine Sciences*, 37(2): 28–43 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Su, M., Qiao, S. H., et al., 2016. Forming Mechanism of the Slope-Confined Submarine Canyons in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(5): 940–950 (in Chinese with English abstract).
- Luo, W. D., Zhou, J., Li, X. J., et al., 2018. Morphology and Structure and Evolution of West Basin Canyon, South China Sea. *Earth Science*, 43(6): 2172–2183 (in Chinese with English abstract).
- Mao, K. N., 2015. Internal Architectures and Depositional Model of the Pearl River Submarine Canyon System (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Pang, X., Peng, D. J., Chen, C. M., et al., 2007. Three Hierarchies “Source-Conduit-Sink” Coupling Analysis of the Pearl River Deep-Water Fan System. *Acta*

- Geologica Sinica*, 81(6): 857–864 (in Chinese with English abstract).
- Su, M., Lin, Z.X., Wang, C., et al., 2020. Geomorphologic and Infilling Characteristics of the Slope-Confined Submarine Canyons in the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *Marine Geology*, 424: 106166.
- Sun, Q., Alves, T., Lu, X., et al., 2018. True Volumes of Slope Failure Estimated from a Quaternary Mass-Transport Deposit in the Northern South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 45(6): 2642–2651.
- Tian, J., Song, J., Ma, B.J., et al., 2021. Segmentation Features of Geomorphology and Sedimentary Structure of Zhongjian Canyon. *Earth Science*, 46(2): 708–718 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C.S., Zhu, J.J., Zhao, D.D., et al., 2021. Origin and Evolution of Submarine Canyons. *Marine Geology Frontiers*, 37(3): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.X., Cai, F., Sun, Z.L., et al., 2021. Sedimentary Evolution and Geological Significance of the Dongsha Submarine Canyon in the Northern South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 1023–1037 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X.N., Ren, J.Y., Pang, X., et al., 2019. Stratigraphic Architectures and Associated Unconformities of Pearl River Mouth Basin during Rifting and Lithospheric Breakup of the South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 40(2): 129–144. <https://doi.org/10.1007/s11001-019-09378-6>
- Yi, S.T., Hu, X.S., Luo, Z.J., et al., 2020. Geomorphological Characteristics and Controlling Factors of the Yitong Canyon Group on the Northern Slope of the South China Sea. *Marine Geology Frontiers*, 36(4): 18–26 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J.J., Li, S.Z., Lu, J.A., et al., 2020. Scientific Implications and Preliminary Surveying Results of Geological and Physical Oceanography Environment in the Shenhu Area of the Northern South China Sea. *Earth Science*, 45(4): 1416–1426 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M.Z., Graham, S., Pang, X., et al., 2010. Characteristics of Migrating Submarine Canyons from the Middle Miocene to Present: Implications for Paleooceanographic. *Marine Petroleum Geology*, 27(1): 307–319.
- Zhu, R.W., Yao, Y.J., Liu, H.L., et al., 2021. Tectonic Contact Relationship of Continental Margins of the Southwest Sub-Basin, South China Sea in Late Mesozoic. *Earth Science*, 46(3): 885–898 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W.L., Mi, L.J., 2010. Atlas of Oil and Gas Basin, China Sea. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 丁巍伟, 李家彪, 李军, 2010. 南海北部陆坡海底峡谷形成机制探讨. *海洋学研究*, 28(1): 26–31.
- 杜文波, 黄文凯, 朱红涛, 等, 2020. 台湾海峡西部海域沉积体系、地层架构与油气勘探前景. *中国地质*, 47(5): 1542–1553.
- 杜文波, 孙桂华, 黄永健, 等, 2015a. 基于地震多属性的储层预测: 以珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组为例. *海洋地质前沿*, 31(8): 62–70.
- 杜文波, 孙桂华, 舒誉, 2015b. 珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组地震沉积学研究. *地质科技情报*, 34(3): 220–229.
- 付超, 于兴河, 何玉林, 等, 2018. 南海北部神狐海域峡谷层序结构差异与控制因素. *现代地质*, 32(4): 807–818.
- 高红芳, 聂鑫, 罗伟东, 2021. 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. *海洋地质与第四纪地质*, 41(2): 1–12.
- 刘丛舒, 丁巍伟, 殷绍如, 等, 2019. 南海北部陆坡区海底峡谷地貌、沉积特征及控制因素. *海洋学研究*, 37(2): 28–43.
- 刘杰, 苏明, 乔少华, 等, 2016. 珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群成因机制探讨. *沉积学报*, 34(5): 940–950.
- 罗伟东, 周娇, 李学杰, 等, 2018. 南海海盆西峡谷的形态与结构及形成演化. *地球科学*, 43(6): 2172–2183.
- 毛凯楠, 2015. 珠江口外峡谷体系内部构成特征及沉积模式 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 庞雄, 彭大钧, 陈长民, 等, 2007. 三级“源-渠-汇”耦合研究珠江深水扇系统. *地质学报*, 81(6): 857–864.
- 田洁, 宋军, 马本俊, 等, 2021. 中建海底峡谷地貌及沉积特征的分段性. *地球科学*, 46(2): 708–718.
- 王长盛, 朱俊江, 赵冬冬, 等, 2021. 全球海底峡谷成因及演化研究. *海洋地质前沿*, 37(3): 1–15.
- 王星星, 蔡峰, 孙治雷, 等, 2021. 南海北部东沙海底峡谷沉积演化过程及其地质意义. *地球科学*, 46(3): 1023–1037.
- 伊善堂, 胡小三, 罗宗杰, 等, 2020. 南海北部陆坡一统峡谷群地貌特征及控制因素分析. *海洋地质前沿*, 36(4): 18–26.
- 朱俊江, 李三忠, 陆敬安, 等, 2020. 南海北部神狐海域地质环境综合调查及科学意义. *地球科学*, 45(4): 1416–1426.
- 朱荣伟, 姚永坚, 刘海龄, 等, 2021. 南海西南次海盆两侧陆缘中生代晚期构造接触关系. *地球科学*, 46(3): 885–898.
- 朱伟林, 米立军, 2010. 中国海域含油气盆地图集. 北京: 石油工业出版社.