

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

刘杰^{1,2} 苏明^{1,2} 乔少华^{1,2} 沙志彬³ 吴能友^{1,2} 杨睿^{1,2}

(1.中国科学院天然气水合物重点实验室 广州 510640;2.中国科学院广州天然气水合物研究中心 广州 510640;
3.广州海洋地质调查局 广州 510760)

摘要 珠江口盆地白云凹陷北部陆坡发育着17条近似NNW—SSE走向的海底峡谷,构成了区域内的陆坡限制型海底峡谷群。基于研究区内高密度覆盖的2D地震资料,通过外部形态、内部结构等反射特征的描述和刻画,建立了第四纪以来的高精度层序地层格架,将沉积充填序列划分为三个体系域,即低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)。根据陆坡进积特征、垂向地层叠加样式、侵蚀特征变化、连续性强振幅同相轴的识别和空间追踪,将高位体系域进一步划分为两个沉积旋回单元,HST-I和HST-II。研究表明,白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群发育在高位体系域晚期沉积旋回(HST-II)中。在此基础上,分别讨论了沉积物供给、沉积物失稳作用、限制型地形和流体渗漏作用对峡谷群形成和演化的影响。第四纪以来珠江水携带的大量沉积物经由陆架进入到陆坡区域,为海底峡谷群的发育和演化提供了充足的沉积物来源。在第四纪高位体系域早期水道形成的限制型“负地形”基础上,大量的沉积物在沿着陆坡坡降方向自北向南的输送过程中发生向下的侵蚀、沉积物失稳,导致了陆坡限制型海底峡谷群的发育。研究区内广泛分布的气烟囱构造,暗示了含气流体的垂向运移和渗漏,可能促进了海底峡谷群的进一步演化。

关键词 陆坡限制型海底峡谷群 沉积物供给 形成机制 白云凹陷 珠江口盆地

第一作者简介 刘杰 男 1986年出生 硕士 助理研究员 层序地层学 E-mail: liujie1@ms.giec.ac.cn

通讯作者 苏明 男 副研究员 沉积学 E-mail: suming@ms.giec.ac.cn

中图分类号 P736.1 **文献标识码** A

0 引言

海底峡谷是大陆边缘常见的海底地貌单元,以窄而深的长条或梳状的负地形为主要特征,具有“V”型或“U”型的横截面形态和两侧陡峭的峡谷谷壁。海底峡谷的宽度约几到十几公里,垂向起伏可达数百米,在末端常发育海底扇^[1]。近几十年来,随着深水/超深水油气^[2]与海域天然气水合物勘探^[3]、深水沉积作用^[4]、“源—汇系统”^[5]等研究的发展,海底峡谷受到越来越多的关注和重视。根据海底峡谷在陆架—陆坡区域的发育位置及其与水系的关联,可将海底峡谷划分为陆架侵蚀型峡谷(shelf-incising canyons)和陆坡限制型峡谷(slope-confined canyons)^[1]。陆架侵蚀型峡谷通常位于陆架区域,与河流或三角洲关系密切,海平面下降导致的陆架下切作用在这类海底峡谷的形成演化过程中起着重要的作用^[6]。陆坡

限制型峡谷,也被称为“无头型”峡谷或“盲峡谷”,峡谷的头部终止于陆坡区域。如澳大利亚东北海域的Noggin峡谷群和Ribbon Reef峡谷群^[7]、卡斯卡底增生楔趾部的峡谷群^[8]、埃布罗河大陆边缘的上新世—更新世峡谷群^[9]等。由于这类海底峡谷发育的位置远离陆架坡折,海平面下降对其影响的可能性较小,陆坡限制型海底峡谷的形成和演化多与浊流或块体搬运事件^[10]、与流体渗漏相关的沉积物失稳^[11-12]、退积型(溯源)滑塌^[13-14]、底流冲刷^[15]等因素相关。

南海北部大陆边缘发育了众多的海底峡谷,它们是陆源碎屑沉积物进入下陆坡和深海平原的主要输送路径,如琼东南盆地中央峡谷^[16-17]、珠江口外海底峡谷^[18]、台湾西南部海底峡谷群(福尔摩沙海底峡谷、澎湖海底峡谷、高坪海底峡谷等)^[19-20]。从现今珠江口盆地白云凹陷海底地形图中,在珠江口外海底峡谷的东北侧600~1 600 m的水深范围内,可以发现

收稿日期:2015-10-08;收修改稿日期:2016-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41576048);油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学)开放基金项目(PLC201402);中科院可再生能源重点实验室开放基金项目(y507j61001);中国科学院青年创新促进会(2016312);中国石油—中国科学院科技合作项目(2015A-4813) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41576048; Open Fund of State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, No. PLC201402; Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, No. y507j61001; Youth Innovation Promotion Association CAS, No.2016312; Scientific Cooperative Project by CNPC and CAS, No.2015A-4813]

17个明显的线状海底负地形,呈NNW—SSE向分布,构成了珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群(图1)。然而目前已有的研究多集中在晚中新世发育的深水水道^[18,21-23]或海底的沉积物失稳^[14,24],直接针对海底峡谷群的研究相对较少,特别是海底峡谷群的成因机制还存在一些争议。如Zhu *et al.*^[21]通过描述深水水道的定向迁移性特征,建立了“低水位时期浊流侵蚀、高水位时期底流改造”的沉积模式,并认为这一模式自中中新世一直持续到现今,即浊流和底流相互作用模式也被用于解释现今海底峡谷群的成因和演化^[22-23,18]。苏明等^[25]通过对晚中新世以来水道下切和冲刷特征的描述,认为晚中新世以来的迁移型水道和现今海底峡谷群之间存在差异,不能用上述模式对峡谷的发育和演化加以解释。基于地震资料的解释,He *et al.*^[14]在研究区识别出了与海底峡谷群相关的沉积物失稳,根据沉积物失稳的发育位置和地形坡度的变化,划分出了不同的失稳类型,并提出溯源的滑塌可能是研究区峡谷群的主要成因。

因此,本次研究通过利用研究区内高密度覆盖的地震资料,在区域构造—沉积背景下建立研究区第四纪地层的等时地层格架,并进行体系域和沉积旋回划分。在等时地层格架的约束下,分析沉积物供给、沉积物失稳作用、限制型地形地貌特征和流体渗漏作用对峡谷群形成和演化的影响,并尝试建立珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群的沉积演化模式。

1 区域地质背景

珠江口盆地陆坡限制型海底峡谷群地理上位于南海北部神狐海域,东为东沙群岛,西为西沙海槽,构造上隶属于珠江口盆地白云凹陷(图1a)。与珠江口盆地的构造演化相一致,研究区可以自下而上划分为3个主要的构造演化阶段:早始新世—晚渐新世时期的伸展断陷阶段、晚渐新世—中中新世的坳陷沉降阶段、晚中新世以后的块断升降阶段^[26-27]。发生于渐新世与中新世之间的白云运动,使得23.8 Ma以来白云凹陷深部地幔上隆产生强烈的热沉降,陆架坡折带由之前位于南部隆起带附近,突变式的跳跃到白云凹陷北坡^[26-27]。此后盆地进入相对稳定的时期,陆架坡折带距今21 Ma以来稳定持续至今,迁移特征不明显,白云凹陷也由渐新世晚期的浅海陆架环境转为陆坡深水环境^[28]。约13.8 Ma,南海北部发生大规模海退,处于半深海—深海环境背景下的白云凹陷发育陆架边缘三角洲、陆架—陆坡水道、深水扇等沉积体系。

受沉积物供给和地形地貌等影响,下陆坡广泛发育滑移、滑塌、浊流。据估算,13.8 Ma以来白云凹陷北部陆坡先后共发育了至少5~6期深水水道沉积体系^[18]。

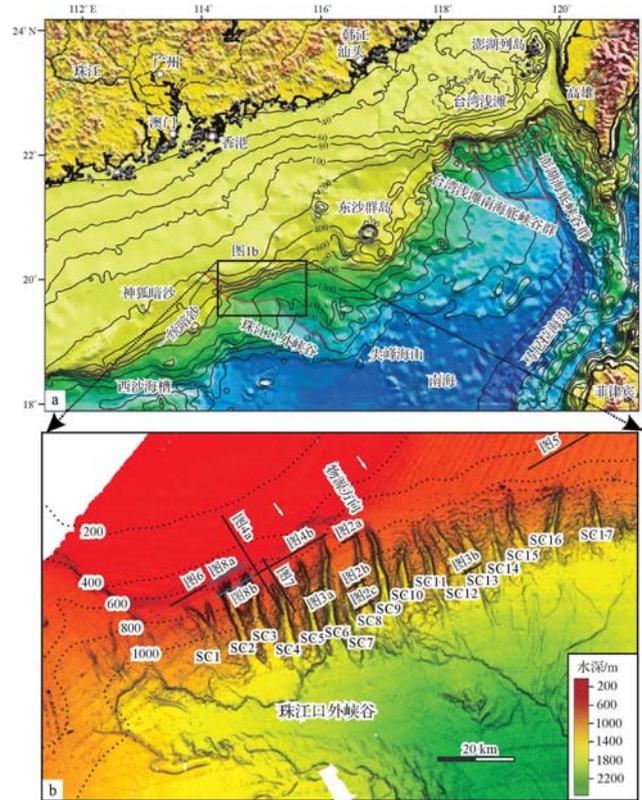


图1 珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群的发育位置图(海底地形地貌底图修改自Ding *et al.*, 2013^[18])

Fig.1 The location map of slope-confined canyons in the Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin (the seabed topography basemap modified from Ding *et al.*, 2013^[18])

2 陆坡限制型海底峡谷群形态—充填特征

平面上,在白云凹陷北部陆坡600~1 600 m水深范围内,17条长约30~50 km的海底峡谷呈NNW—SSE向近等间距线状分布,这些峡谷并没有切穿陆架坡折(约200 m的水深线)(图1b),因此也被称为“无头型”峡谷或“盲峡谷”。剖面上,这些海底峡谷的宽度约1~8 km,峡谷两侧谷壁陡峭,坡度可达6.8°,下切最大深度约为450 m(图2)。

峡谷的形态特征将随着空间位置发生变化,以第8条海底峡谷为例(图1b),自北向南,峡谷的宽度、下切深度、宽深比等形态参数均发生了较为明显的变化^[29],并可以依据这种变化将SC8划分为3个区段:

①上游段,峡谷的剖面为V型形态,宽度较窄,下切深度较浅,宽深比为21.1,峡谷的侵蚀基底与现今海底相重合,暗示这一区段的峡谷以侵蚀作用为主(图2a);②中游段,峡谷的剖面形态仍为V型,宽度和下切深度明显加大,宽深比可达14.8,峡谷的侵蚀基底位于海底之下,说明侵蚀和沉积作用在这一区段均可存在(图2b);③下游段,峡谷的剖面形态呈现为U型,宽度继续增大,而下切深度减小,宽深比为16.8(图2c),至峡谷的末端为喇叭口状指向深海平原(图1b),说明峡谷在该区段以沉积作用为主。

研究区海底峡谷的内部沉积建造主要由3部分构成,即峡谷侧壁的沉积物失稳、峡谷内部的浊流沉积体充填、峡谷内部的侧向沉积体(图3)。在峡谷的两侧谷壁上,常可见透镜状或杂乱的地震反射同相轴,与周缘地层存在截然不同的接触关系,在中游段

的海底峡谷中尤为常见(图3a),这些沉积体被解释为受峡谷侧壁陡峭地形的影响,沉积物发生失稳而形成的。峡谷内部的浊流沉积体充填位于峡谷的谷底,通常表现为中强振幅反射、连续性差的特征,局部可见小型的冲刷特征(图3b),推测是浊流沉积体沿着海底峡谷发生自北向南的输送,在中游段和下游段沉积下来的结果。在下游段峡谷的谷底顶部,常可见一套弱—中等振幅强度、连续性好的地震反射同相轴(图3b),与峡谷内部的浊流沉积体具有不同的反射特征,我们推测这套沉积体可能是峡谷中的谷底水道的侧向迁移形成侧向沉积体。

3 第四纪高精度层序地层格架

3.1 层序边界及体系域的识别

基于高密度覆盖的地震资料,通过对地震反射属

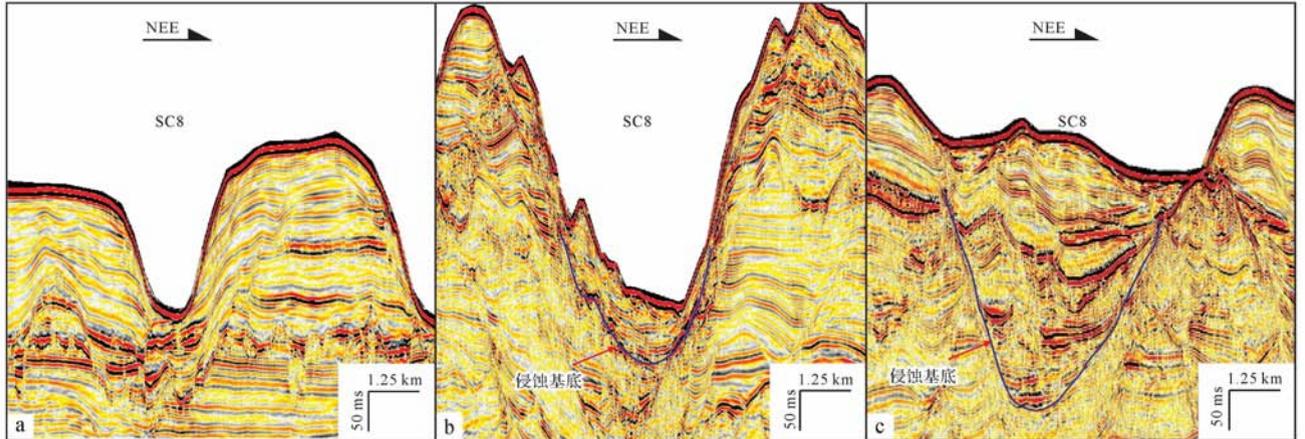


图2 第8条陆坡限制型海底峡谷剖面形态的空间变化特征(剖面位置见图1b)
Fig.2 Profile shape of the 8th slope-confined submarine canyon(position shown in Fig.1b)

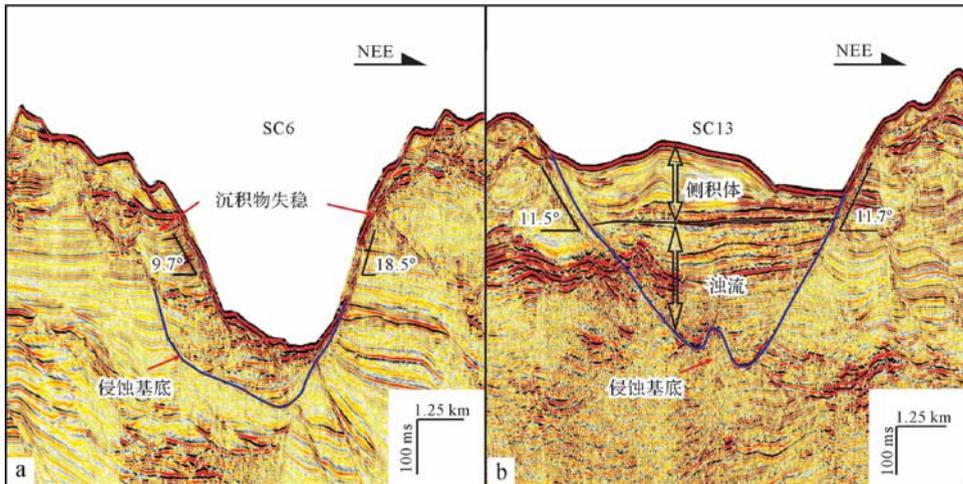


图3 珠江口盆地陆坡限制型海底峡谷群典型的内部沉积建造类型(剖面位置见图1b)
Fig.3 The internal typical sedimentary architecture in slope-confined canyons of the Pearl River Mouth Basin (position shown in Fig.1b)

性(频率、振幅、连续性)的描述,结合前人的区域地层划分方案^[26,30],可以识别出研究区第四纪的底界面,即 T1 界面(图 4)。该界面在地震剖面上表现为中频、中等振幅、连续性好的地震反射同相轴,在研究区的北部具有区域上的可追踪性和可对比性(图 4)。T1 界面往往显示出对下伏地层的冲刷,如 NEE 向地震剖面中显示的 T1 界面附近发育的小型侵蚀性水道,宽 33.5~119 m,侵蚀深度较浅,通常为 40~140 ms TWT (two-way travel time, 双程旅行时间)(图 4b)。T1 界面至现今海底为第四纪沉积充填序列,构成了一个完整的三级层序,根据地震反射特征和同相轴的接触关系(如垂向上由席状平行反射变化为前积反射、下超接触关系等),可自下而上划分为 3 个体系域(图 4),分别是低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)。

(1) 低位—海侵体系域

T1 界面处发育的小型侵蚀性水道,是低位体系域最为明显的特征。特别是在研究区的北部,可以观察到数量众多的小型水道(图 4b、图 5)。此外,从东北部 NEE 向地震剖面中,还可以发现,这些小型水道的形态、规模和内部充填结构均表现出和北部 NEE 向地震剖面中相似的特征,水道的宽度为 25~110 m,

下切深度为 30~110 ms TWT(图 5)。研究区北部水道的广泛发育,且自西向东规模的相似性,暗示这些小型水道为相似背景下的产物,推测为第四纪低位体系域时期海平面下降所导致的结果。

在小型水道的顶部,可以发现一套弱—中等振幅强度、连续性好、平行的地震反射同相轴,整体厚度稳定,在西北部 SSE 向、NNE 向地震剖面(图 4b),东北部 NEE 向地震剖面(图 5)中均可以观察到。SSE 向地震剖面显示,这套平行反射之上为进积特征明显的地震反射同相轴,进积的地震同相轴均下超至高频、强振幅、连续性好的同相轴之上(可视为最大海泛面 mfs)(图 4a)。因此,我们将这套平行特征明显的地震反射解释为披覆沉积,可能与海侵体系域时期海平面的上升具有关联性。

小型侵蚀性水道和披覆沉积体的识别,不仅可用于三级层序内部体系域的识别,也可以为“质疑”晚中新世水道迁移至现今海底峡谷提供证据^[25]:①自下而上,水道的规模、形态和内部充填存在着较为显著的差异;②在晚中新世迁移性水道和现今海底峡谷之间存在着水道的“跃迁”;③上新世和第四纪中平行反射的披覆沉积体说明在海侵阶段,水道处于不发育阶段,主要以细粒泥质沉积为主(图 4b)。因此,从

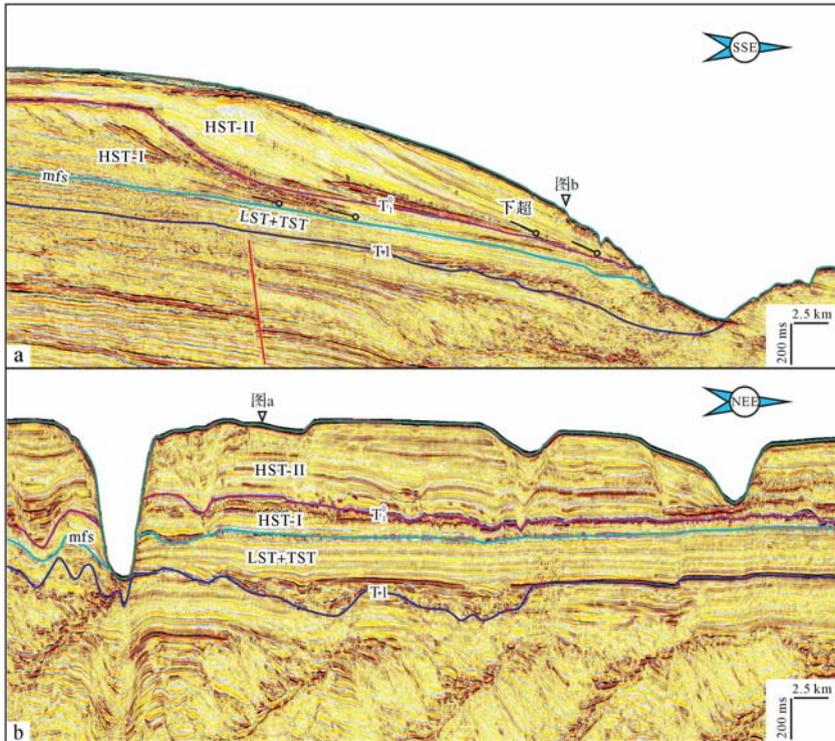


图 4 研究区第四纪层序边界、体系域识别及高位体系域内沉积旋回单元的划分(剖面位置见图 1b)
 Fig.4 Identification and division of sequence boundary, system domain, and sedimentary cycles in the HST for the Quaternary Formation in the study area (position shown in Fig.1b)

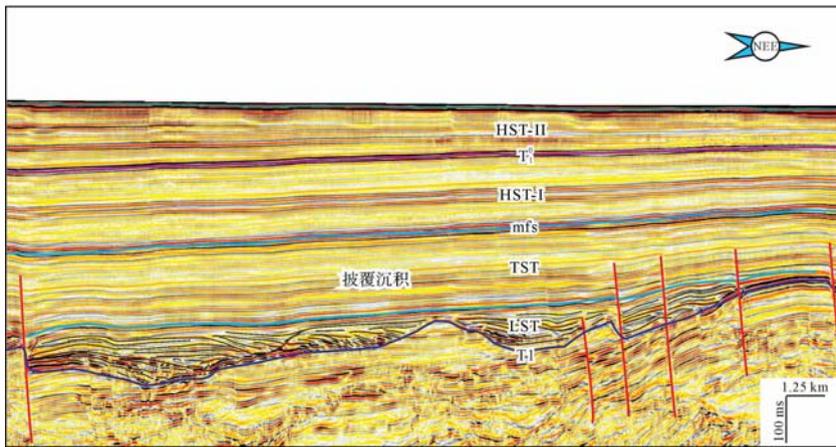


图5 研究区东北部 T1 界面附近小型侵蚀性水道及披覆沉积体特征(剖面位置见图 1b)

Fig.5 The characteristics of small erosion channel and drape sedimentary on the T1 interface in the northeast of the study area(position shown in Fig.1b)

NEE 向地震剖面中,可以发现,晚中新世以来迁移性的水道可能并不能“直接”追踪至现今海底峡谷(图 4b)。

(2) 高位体系域

最大海泛面(mfs)至海底为高位体系域,SSE 向地震剖面中,中等—强振幅强度、中等连续性的地震反射同相轴表现出显著的前积特征,向下陆坡方向,同相轴发生收敛,下超特征明显(图 4a),这些地震反射被解释为高位体系域时期发育的陆架边缘三角洲,说明这一时期来源北部的大量沉积物可以注入到陆坡区域。进积背景下,沉积物的不断叠加、堆积往往在重力势的诱发下发生失稳,形成滑移、滑塌、块体流等沉积类型^[31],如图 4a 中的空白—杂乱地震相等。在 NEE 向地震剖面中,高位体系域常表现为中等振幅强度、中等连续性的地震反射特征,但地层的形态多为楔状,丘状,甚至波状(图 4b、图 5),这可能是地震剖面延伸方向与陆架边缘三角洲延伸方向具有一定夹角所导致的结果。

3.2 高位体系域沉积旋回单元的划分

在高位体系域中,我们还可以识别出一个强振幅、连续性好的地震反射同相轴。SSE 向地震剖面中,该地震反射同相轴上下的进积形态和结构存在着差异:之下,主要表现为斜交前积结构,同相轴下超至 mfs 界面;之上,主要表现为透镜状的 S 型前积结构,同相轴下超至该界面,上部可见顶超现象(图 4a)。因此,我们将该界面命名为 T_1^0 界面,并根据该界面将高位体系域划分为 2 个沉积旋回单元(HST-I 和 HST-II),代表了两期陆架边缘三角洲的进积事件。

从两期陆架边缘三角洲和海底峡谷群的头部发育位置来看,HST-II 单元进积影响的范围靠近峡谷的头部(图 4a),且 HST-II 单元的厚度要远大于 HST-I(图 4b),指示出晚期的进积单元与海底峡谷群形成演化密切的关联性,即陆坡限制型海底峡谷群主要发育在 HST-II 沉积单元之中。

T_1^0 界面在研究区北部可进行区域性的追踪和对比,在 NEE 向地震剖面中均可识别出强振幅、连续性好的地震反射界面,界面上下的厚度均存在显著的差异(HST-I 厚度为 50~180 ms TWT,而 HST-II 厚度为 75~300 ms TWT)(图 4b),说明在剖面位置处,主要记录了高位体系域晚期的进积单元(HST-II 单元)。除了现今海底峡谷,在高位体系域中还发育了一些小型的古水道,水道发育的位置分别对应于 mfs 和 T_1^0 界面(图 4b、图 6),暗示了伴随着两期陆架边缘三角洲的进积,沿陆坡坡降自北向南的沉积输送,会冲刷和侵蚀下伏地层。

4 控制因素分析

4.1 源自北部充足的沉积物供给

作为珠江口盆地最为主要的沉积物来源,北部的珠江水系自 30 Ma 以来就作为陆架—陆坡区主要的沉积物来源^[32],并形成了大量的海底扇沉积体^[26]。Ding *et al.*^[21] 也指出古珠江水系带来的大量陆源沉积物会经由陆坡峡谷群进入到位于深水区域的珠江口外海底峡谷之中。特别是在第四纪,由于气候变化的原因^[33],南海北部大陆边缘具有较大的沉积速率,珠江口盆地内第四纪的沉积速率可达 10~30

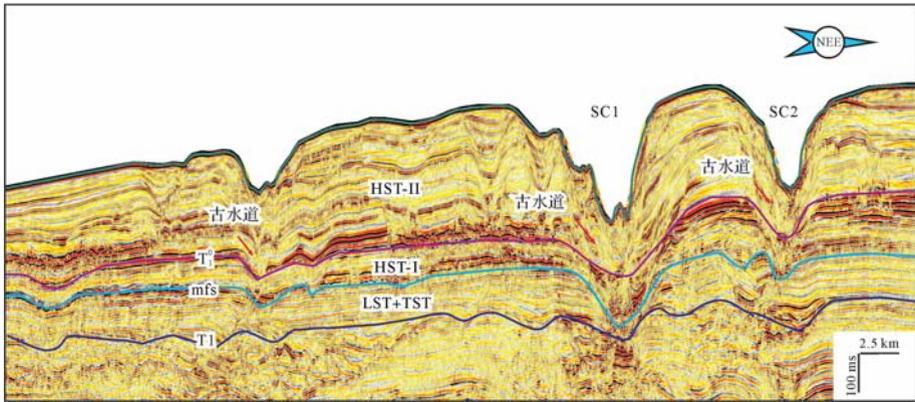


图6 研究区西北部第四纪高位体系域中古水道与现今海底峡谷的垂向叠置关系(剖面位置见图1b)

Fig.6 Vertically stacked relationship between submarine canyons and the ancient channels in the HST, in the northwest of the study area(position shown in Fig.1b)

cm/kr^[34]。另一方面,该时期内珠江口海岸线发生了大幅的向海迁移,迁移幅度可达 200 km^[35]。上述原因均会导致第四纪时期,北部的珠江水系为陆坡区提供非常充足的沉积物来源,SSE 向地震剖面中明显的进积特征可能是大量沉积物输送和搬运的证据(图 4a)。

当大量的沉积物沿着陆坡坡降方向发生输送和搬运时,会形成向下的侵蚀性沉积物流^[36],从而对下伏地层造成冲刷,地震剖面中记录的 HST 中发育的小型古水道(图 4b、图 6)也证实了侵蚀作用的存在。高位体系域时期,陆架边缘三角洲强烈的进积带来的大量沉积物必然会进一步加剧侵蚀作用的发生,从而导致海底峡谷的形成。一旦“侵蚀型”地形出现,强烈的沉积物供给会导致峡谷地貌进一步的凸显。一方面,充足的沉积物会导致峡谷侵蚀能力的不断增强,峡谷进一步下切,其宽度也会增加,如 SC8 在头部的 V 型形态,均指示了上游段峡谷以侵蚀作用为主(图 2a),沉积物将沿着海底峡谷被输送至下陆坡甚至盆地区域;另一方面,峡谷脊部将接受大量沉积物的堆积,如 NEE 向地震剖面中揭示的 SC3 两侧厚层沉积物主要为陆架边缘三角洲而非天然堤沉积(图 4b),这将加剧峡谷侧壁的陡峭程度。

4.2 沉积物失稳作用

源自北部充足的沉积物供给导致在陆架—上陆坡区域堆积了较厚的进积型沉积体,随着沉积物的垂向叠置,也易发生蠕动解离,导致沉积物失稳作用频发。同时,地形坡度的大小对沉积物失稳的发育、规模和类型也具有重要的影响^[37]。海底多波束资料显示(图 1b),峡谷脊部自北向南的地形坡度为 1.6°~

2°左右,峡谷头部地形坡度可达 5.8°,有利于沉积物失稳的形成。

在过海底峡谷 SC4 脊部的 SSE 向地震剖面中,我们可以发现一套中等反射强度、中等—好连续性的地震反射同相轴,局部表现为杂乱的反射特征,海底地形则表现为粗糙不平的特征(图 7),我们将上述滑移或滑塌沉积体统称为沉积物失稳。这些沉积物失稳由 2 部分构成,即沿陆坡坡降方向自北向南的沉积物失稳(图 7)和从峡谷脊部朝向峡谷谷底的沉积物失稳。虽然在 NEE 向地震剖面中很容易识别出峡谷侧壁发育的沉积物失稳,但 SSE 向剖面中揭示的粗糙不平的海底地形(图 7)很可能是两者共同作用的结果。

大量沉积物失稳的存在暗示着受沉积物供给和地形地貌影响,研究区内沉积物的不稳定性特征,为海底峡谷的形成提供前提条件,如 He *et al.*^[14]认为研究区内的沉积物失稳可能是海底峡谷的起始阶段(initial)。另一方面,海底峡谷所形成的地形地貌也会促进沉积物失稳的发育,如峡谷侧壁处存在的沉积物失稳(图 3b)、峡谷头部导致沉积物形成多期滑移体。

4.3 高位体系域早期古水道形成的限制型负地形

研究区北部第四纪高位体系域中发育着多个小型的埋藏水道,其发育位置与现今海底峡谷的位置在垂向上具有明显的“继承性”特征,也就是说现今海底峡谷头部区域的地震剖面显示,HST-II 单元中的现今海底峡谷多发育在 HST 已形成的埋藏型水道之上(图 4b、图 6)。在巴西 Goitaca 峡谷、西非加蓬海岸峡谷、澳大利亚 Otway 盆地中的峡谷均可以发现垂向

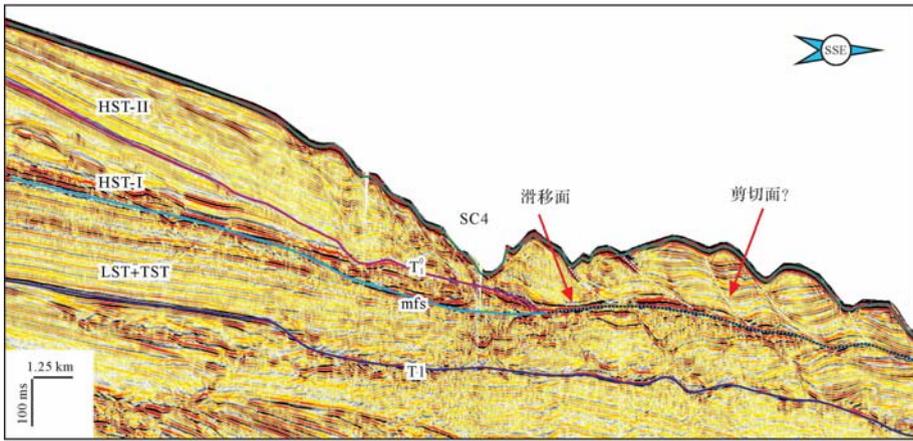


图7 过第4条陆坡限制型海底峡谷脊部发育的沉积物失稳特征(剖面位置见图1b)

Fig.7 The characteristics of sediment instability through the 4th slope-confined canyons ridges(position shown in Fig. 1b)

叠置型的水道/峡谷^[21,24,38]。这些峡谷系统中,早期形成的水道/峡谷可以提供限制型的“负地形”,导致后期峡谷将优先在“负地形”位置处发育起来。

高位体系域早期形成的小型水道,提供了“限制性”的轴向负地形,为后续沉积物的注入提供了潜在路径。高位体系域晚期大量源自北部的沉积物进一步向南推进,进入到这一区域时,受“限制型”地形的影响,将优先在这些部位形成侵蚀性的沉积物流,导致早期水道不断加深加宽,最终形成海底峡谷。因此,在研究区的北部能够从NEE向地震剖面中观察到HST早期埋藏水道和现今海底峡谷的垂向叠置关系(图6)。随着峡谷的向南演化,侵蚀能力增强,谷底不断下切下伏地层,甚至切穿第四纪底界面(T1界面),在研究区南部,即中游段和下游段的峡谷中,这种叠置性的特征就不能被保存下来了(图3b)。

4.4 流体渗漏作用

水合物分解形成的含烃流体渗漏和逃逸将可能诱发沉积物的失稳,导致海底滑坡、海底峡谷的发育^[39]。如日本海东部边缘Joetsu Knoll地区,水合物的分解造成麻坑和滑塌体的形成,沉积物沿着麻坑形成的负地形发生搬运演化为浊流,最终导致了海底峡谷的形成^[12]。珠江口盆地陆坡限制型海底峡谷发育的区域,是我国2007年首个海域水合物的钻探区域。从NEE向地震剖面中可以发现,在海底峡谷的下部存在多个狭窄而陡直的地震杂乱反射带,被解释为气烟囱构造,并认为是含气流体垂向运移的主要通道,且与峡谷的发育位置存在一定的对应关系(图8)。这种垂向上的对应关系暗示,当含烃流体经由气烟囱构造发生垂向上的渗漏和逃逸时,可能会对上覆沉积

物造成影响,使其更容易发生沉积物失稳作用,进一步凸显了海底峡谷的地貌特征。

5 陆坡限制型海底峡谷群的沉积演化

通过上述分析,我们将研究区内海底峡谷群的沉积演化划分为2个阶段(图9):

(1) 高位体系域早期(HST-I)埋藏古水道形成阶段

高位体系域早期(HST-I),进积特征明显的陆架边缘三角洲带来的大量沉积物,在随着地形坡降发生自北向南输送的过程中,易于发生沉积物失稳,并对下伏地层造成冲刷,形成数量众多的小型水道,这些水道的延伸方向垂直陆坡走向,形成了一系列的轴向“负地形”。源自北部充足的沉积物供给,导致这些小型水道被覆盖,垂向上形成明显的“负地形”叠置关系。

(2) 高位体系域早期(HST-II)海底峡谷群形成阶段

随着陆架边缘三角洲不断向海盆方向的进积,大量的沉积物将会进入到陆坡区域,并沿着陆坡坡降的方向发生自北向南的输送。一方面,进入到高位体系域早期轴向“负地形”的沉积物,沉积动力得到增强,产生对下伏地层明显的冲刷和侵蚀;另一方面,大量的沉积物会以沉积物失稳的形式在陆坡区堆积下来,这两个过程共同导致了现今海底峡谷的发育。随着峡谷向南的沉积演化,不断侵蚀高位体系域早期的沉积地层,在中游段和下游段,垂向叠置的关系无法被观察到。在峡谷的演化过程中,由于较陡的峡谷侧壁,沉积物易于从两侧向谷底发生失稳。此外,含烃

流体沿着气烟囱构造发生的渗漏和逃逸,也会进一步凸显海底峡谷的地貌特征。

6 结论

(1) 珠江口盆地白云凹陷北部陆坡发育着 17 条长约 30~50 km 的海底峡谷,呈 NNW—SSE 向线状分

布,构成了陆坡限制型海底峡谷群;自北向南,根据峡谷的剖面形态参数,可以划分为 3 个不同的区段,即上游段、中游段和下游段。自北向南峡谷的侵蚀作用先增强后减弱,沉积作用逐渐增强。峡谷的内部沉积建造由浊流沉积体、滑移/滑塌块体和侧向沉积体构成。

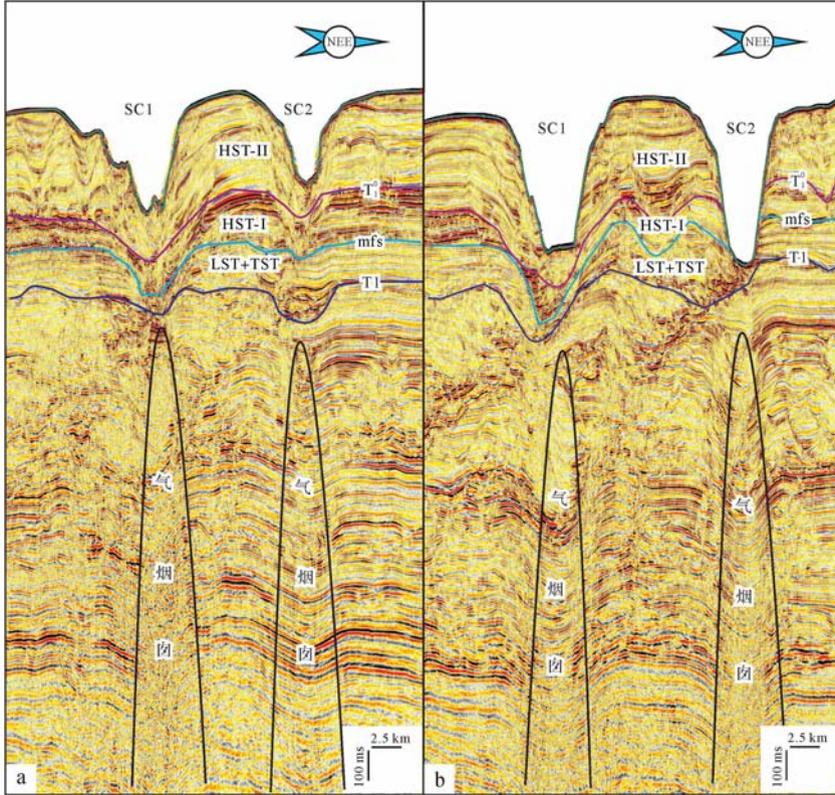


图 8 研究区气烟囱构造与海底峡谷的垂向对应关系(剖面位置见图 1b)

Fig.8 Vertical combination between gas chimneys and submarine canyons(position shown in Fig.1b)

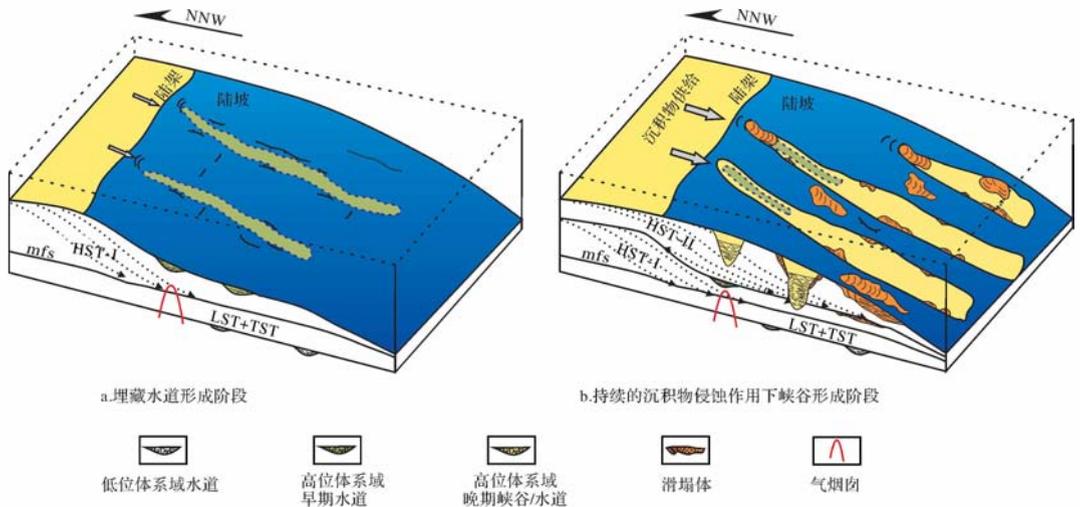


图 9 珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群的沉积演化模式

Fig.9 Sedimentary evolution model of slope-confined canyons in the Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin

(2) 通过外部形态、内部结构等反射特征的描述和刻画,将海底峡谷群发育区域第四纪沉积充填序列划分为三个体系域,即低位体系域、海侵体系域和高位体系域。基于陆坡进积特征、垂向地层叠加样式、侵蚀特征变化、连续性强振幅同相轴的识别和空间追踪,将高位体系域进一步划分为两个沉积旋回单元。白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群发育在高位体系域晚期沉积旋回(HST-II)中。

(3) 陆坡限制型海底峡谷群的形成演化受沉积物供给、沉积物失稳作用、地貌地貌特征和流体渗漏的影响。源自北部充足的沉积物以陆架边缘三角洲的形式进入到陆坡区域,为侵蚀性沉积物流的形成提供了物质来源。受沉积物供给和陆坡坡降的影响,沉积物失稳在研究区内广泛发育,导致了峡谷的雏形并促进了峡谷的沉积演化。高位体系域早期(HST-I)形成的一系列小型埋藏水道,为后期沉积物的注入提供了限制型的“负地形”,埋藏水道和峡谷在垂向上表现为叠置关系。区域内含烃流体沿着气烟囱构造的渗漏和逃逸可能会更加凸显海底峡谷的地形地貌特征。

参考文献 (References)

- Harris P T, Whiteway T. Global distribution of large submarine canyons: geomorphic differences between active and passive continental margins[J]. *Marine Geology*, 2011, 285(1/2/3/4): 69-86.
- McDonnell A, Loucks R G, Galloway W E. Paleocene to Eocene deep-water slope canyons, western Gulf of Mexico: further insights for the provenance of deep-water offshore Wilcox Group plays[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(9): 1169-1189.
- Davies R J, Thatcher K E, Mathias S A, et al. Deepwater canyons: an escape route for methane sealed by methane hydrate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 323-324: 72-78.
- Micallef A, Ribó M, Canals M, et al. Space-for-time substitution and the evolution of a submarine canyon-channel system in a passive progradational margin[J]. *Geomorphology*, 2014, 221: 34-50.
- Popescu I, Lericolais G, Panin N, et al. The Danube submarine canyon (Black Sea): morphology and sedimentary processes[J]. *Marine Geology*, 2004, 206(1/2/3/4): 249-265.
- Lofi J, Gorini C, Berné S, et al. Erosional processes and paleo-environmental changes in the Western Gulf of Lions (SW France) during the Messinian Salinity Crisis[J]. *Marine Geology*, 2005, 217(1/2): 1-30.
- Puga-Bernabéu A, Webster J M, Beaman R J. Variation in canyon morphology on the Great Barrier Reef margin, north-eastern Australia: the influence of slope and barrier reefs[J]. *Geomorphology*, 2013, 191: 35-50.
- McAdoo B G, Orange D L, Sreaton E, et al. Slope basins, headless canyons, and submarine palaeoseismology of the Cascadia accretionary complex[J]. *Basin Research*, 1997, 9(4): 313-324.
- Bertoni C, Cartwright J. 3D seismic analysis of slope-confined canyons from the Plio-Pleistocene of the Ebro Continental Margin (Western Mediterranean) [J]. *Basin Research*, 2005, 17(1): 43-62.
- Wynn R B, Cronin B T, Peakall J. Sinuous deep-water channels: genesis, geometry and architecture[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/7/8/9): 341-387.
- Orange D L, Breen N A. The effects of fluid escape on accretionary wedges 2: seepage force, slope failure, headless submarine canyons, and vents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B6): 9277-9295.
- Nakajima T, Kakuwa Y, Yasudomi Y, et al. Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 90: 228-242.
- Pratson L F, Coakley B J. A model for the headward erosion of submarine canyons induced by downslope-eroding sediment flows[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108(2): 225-234.
- He Ye, Zhong Guangfa, Wang Liaoliang, et al. Characteristics and occurrence of submarine canyon-associated landslides in the middle of the northern continental slope, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 546-560.
- Shanmugam G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(5): 471-491.
- Su Ming, Xie Xinong, Xie Yuhong, et al. The segmentations and the significances of the Central Canyon System in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79(Part A): 552-563.
- Su Ming, Zhang Cheng, Xie Xinong, et al. The 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, 57(10): 2457-2468.
- Ding Weiwei, Li Jiabiao, Li Jun, et al. Morphotectonics and evolutionary controls on the Pearl River Canyon system, South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2013, 34(3/4): 221-238.
- Yu H S, Hong E. Shifting submarine canyons and development of a foreland basin in SW Taiwan: controls of foreland sedimentation and longitudinal sediment transport[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(6): 922-932.
- Hsiung K H, Yu H S. Morpho-sedimentary evidence for a canyon-channel-trench interconnection along the Taiwan-Luzon plate margin, South China Sea[J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(4): 215-226.
- Zhu Mangzheng, Graham S, Pang Xiong, et al. Characteristics of migrating submarine canyons from the middle Miocene to present: implications for paleoceanographic circulation, northern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 307-319.
- Lü Caili, Yao Yongjian, Gong Yuehua, et al. Deepwater canyons reworked by bottom currents: sedimentary evolution and genetic model [J]. *Journal of Earth Science*, 2012, 23(5): 731-743.

- 23 Gong Chenglin, Wang Yingmin, Zhu Weilin, et al. Upper Miocene to Quaternary unidirectionally migrating deep-water channels in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 285-308.
- 24 Wang Lei, Wu Shiguo, Li Qingping, et al. Architecture and development of a multi-stage Baiyun submarine slide complex in the Pearl River Canyon, northern South China Sea[J]. Geo-Marine Letters, 2014, 34(4): 327-343.
- 25 苏明,刘杰,乔少华,等. 珠江口盆地陆坡限制型海底峡谷群成因机制探讨[C]//“南海深海过程演变”重大研究计划-2015年度学术研讨会. 上海,中国,2015. [Su Ming, Liu Jie, Qiao Shaohua, et al. South China Sea deep sea process evolution, major research plan [C]//2015 Annual Symposium. Shanghai, China, 2015.]
- 26 庞雄,陈长民,邵磊,等. 白云运动:南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义[J]. 地质论评,2007,53(2):145-151. [Pang Xiong, Chen Changmin, Shao Lei, et al. Baiyun Movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications[J]. Geological Review, 2007, 53(2), 145-151.]
- 27 柳保军,庞雄,颜承志,等. 珠江口盆地白云深水区渐新世—中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J]. 石油学报,2011,32(2): 234-242. [Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. Evolution of the Oligocene-Miocene shelf slope-break zone in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin and its significance in oil-gas exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 234-242.]
- 28 Pang Xiong, Yang Shaokun, Zhu Ming, et al. The deep water fan systems and petroleum resources on the northern slope of South China Sea [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(3): 626- 631.
- 29 Su Ming, Wu N Y, Sha Z B, et al. Morpho-sedimentary features of the slope-confined submarine canyons in the Shenhu Area, northern continental slope of the South China Sea; the sediment routing system from north to south [C]//19th International Sedimentological Congress. Geneva, Switzerland: University of Geneva, 2014.
- 30 Zhou Di, Sun Zhen, Liao Jie, et al. Filling history and post-breakup acceleration of sedimentation in Baiyun Sag, deepwater northern South China Sea[J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(1): 160-171.
- 31 何云龙,解习农,李俊良,等. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素[J]. 地质科技情报,2010,29(2):118-122. [He Yunlong, Xie Xinong, Li Junliang, et al. Depositional characteristics and controlling factors of continental slope system in the Qiongdongnan Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29 (2): 118-122.]
- 32 Li Xianhua, Wei Gangjian, Shao Lei, et al. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: a response to Cenozoic tectonism in SE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211(3/4): 207-220.
- 33 Zhang P Z, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates. Nature, 2001, 410(6831): 891-897.
- 34 Huang Wei, Wang Pinxian. Sediment mass and distribution in the South China Sea since the Oligocene[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(11): 1147-1155.
- 35 贾国东,谢宏琴. 南海北部海水氧同位素剩余值在冰期—间冰期气候旋回中的变化及其古气候意义[J]. 地学前缘,2006,13(1): 199-204. [Jia Guodong, Xie Hongqin. Surface water oxygen isotope residuals in northern South China Sea: variations during glacial-interglacial cycles and their paleoclimatic implications[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 199-204.]
- 36 Sanchez C M, Fulthorpe C S, Steel R J. Miocene shelf-edge deltas and their impact on deepwater slope progradation and morphology, Northwest Shelf of Australia [J]. Basin Research, 2012, 24(6): 683-698.
- 37 吴嘉鹏,王英民,邱燕,等. 南海北部神狐陆坡限制型滑塌体特征及成因机理[J]. 沉积学报,2012,30(4):639-645. [Wu Jiapeng, Wang Yingmin, Qiu Yan, et al. Characteristic and formation mechanism of the frontally confined landslide in Shenhu Slope, northern South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 639-645.]
- 38 Rasmussen E S. The relationship between submarine canyon fill and sea-level change: An example from Middle Miocene offshore Gabon, West Africa[J]. Sedimentary Geology, 1994, 90(1/2): 61-75.
- 39 Bangs N L, Hornbach M J, Moore G F, et al. Massive methane release triggered by seafloor erosion offshore southwestern Japan [J]. Geology, 2010, 38(11): 1019-1022.

Forming Mechanism of the Slope-confined Submarine Canyons in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

LIU Jie^{1,2} SU Ming^{1,2} QIAO ShaoHua^{1,2} SHA ZhiBin³
WU NengYou^{1,2} YANG Rui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: The bathymetric map shows that there are 17 NNW-SSE trending submarine canyons in the northern slope of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin, with the heads terminated on the slope, composing the slope-confined submarine canyons. Based on the high resolution 2D seismic profiles, the Quaternary sequence stratigraphic framework was established by external morphology, internal structure and other reflection characters. The depositional fillings can be divided into three systems tracts, including LST (lowstand systems tract, LST), TST (transgressive systems tract, TST) and HST (highstand systems tract, HST). The HST could be further divided into two sedimentary units, HST-I and HST-II, according to the prograding styles of the slope, the vertical stacking patterns, the change of erosion features, and the continuity of high-amplitude seismic reflectors. The results illustrated that, the slope-confined submarine canyons were developed in the later HST sedimentary unit (HST-II). Besides, some factors controlling the formation and development of canyons were also discussed, such as sediment supply, sedimentary failures, seafloor topographic features, and fluids leakage. Since Quaternary, abundant sediments from the Pearl River in the north would be transported via shelf to slope and basin floor, supplying the sufficient sediments for slope-confined submarine canyons. Controlled by some negative paleo-topographic features formed in the earlier HST sedimentary unit (HST-I), during the northward transportation of these sediments, erosions and sedimentary failures were developed, inducing the formations of slope-confined submarine canyons. In the study area, the widely distributed gas chimneys, implied the vertical migrations and leakages of gas-bearing fluids, which might contribute to the evolution of submarine canyons.

Key words: slope-confined canyons; sediment supply; forming mechanism; Baiyun sag; Pearl River Mouth Basin