

# 海底峡谷侵蚀 - 沉积作用与天然气水合物成藏

苏明<sup>1,2</sup>, 沙志彬<sup>3,4</sup>, 匡增桂<sup>3</sup>, 乔少华<sup>1,2,5</sup>, 梁金强<sup>3</sup>,  
杨睿<sup>1,2,6</sup>, 吴能友<sup>1,2</sup>, 丛晓荣<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广东广州 510640;  
2. 中国科学院广州天然气水合物研究中心, 广东广州 510640; 3. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510760;  
4. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074; 5. 中国科学院大学, 北京 100049;  
6. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东广州 510301)

**摘要:** 近年来海底峡谷和海域天然气水合物的调查和研究表明, 二者在空间分布上具有一定的相似性, 同时海底峡谷强烈的侵蚀作用和良好的内部建造, 与海域天然气水合物的聚集、分布和成藏具有直接或间接的关联。通过对目前海底峡谷和海域天然气水合物的资料调研和系统分析, 指出海底峡谷和海域天然气水合物的相关性主要表现在3个方面: 侵蚀-沉积作用与有利沉积体的分布、侵蚀-沉积作用与含烃流体渗漏的相互作用、侵蚀-沉积作用与海域天然气水合物的动态成藏。将海底峡谷和水合物的关联性应用到珠江口盆地海底峡谷群, 初步分析了二者的关联。研究认为该区域的海底峡谷将会对有利沉积体进行破坏和改造, 使其表现为“斑状/补丁状”的平面分布特征, 影响了水合物的分布和实际产出; 此外, 峡谷侵蚀-沉积作用导致了先前形成的水合物的分解, 一部分的甲烷等气体将会进入到海水之中, 而受有利沉积体上部细粒均质层的遮挡, 大部分的含气流体将被“继续”限制在有利沉积体之中而形成新的水合物, 这可能是该区域内细粒沉积物中水合物饱和度较高的原因。

**关键词:** 海底峡谷; 侵蚀-沉积作用; 天然气水合物; 成藏机制

**中图分类号:** TE132.2; TE122.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2015)01-0155-08

## Erosion and Sedimentation of the Submarine Canyons and the Relationship with Gas Hydrate Accumulation

SU Ming<sup>1,2</sup>, SHA Zhi-bin<sup>3,4</sup>, KUANG Zeng-gui<sup>3</sup>, QIAO Shao-hua<sup>1,2,5</sup>, LIANG Jin-qiang<sup>3</sup>,  
YANG Rui<sup>1,2,6</sup>, WU Neng-you<sup>1,2</sup>, CONG Xiao-rong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510760, China; 4. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510301, China)

**Abstract:** Recent researches on the submarine canyon and the marine gas hydrate indicated that they had the similar spatial distribution. Moreover, because of the erosion and internal architecture, submarine canyons showed the good relationship with the accumulation and distribution of marine gas hydrates. Based on the integrated analysis of studies in the past decade, the correlations between canyons and hydrates could be summa-

**收稿日期:** 2014-06-20; **改回日期:** 2014-10-20; **责任编辑:** 潘令枝。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41202080); 中国石油科技创新基金项目(2013D-5006-0105); 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(PLC201407); 广东省自然科学基金博士启动项目(S2012040006333); 中国科学院重点部署项目(KGZD-EW-301)。

**作者简介:** 苏明, 男, 博士, 副研究员, 1983年出生, 海洋地质专业, 主要从事深水沉积体系及资源效应、海域天然气水合物成藏地质条件分析等方面的科研工作。Email: suming@ms.giec.ac.cn。

**通信作者:** 沙志彬, 男, 高级工程师, 1971年出生, 石油地质专业, 主要从事海域天然气水合物的研究工作。Email: shazb2008@163.com。

rized as three points, i. e. erosion and sedimentation of canyons controlling the distribution of deposits favorable for hydrate, potential leak mechanism between submarine canyons and hydrocarbon-bearing fluid release, and the dynamic accumulation of gas hydrates influenced by submarine canyons. The correlations were used in the submarine canyons in the Pearl River Mouth Basin. On the one hand, these canyons could erode the favorable deposits and further influence the distribution of gas hydrates, and on the other hand, due to the erosion and sedimentation of canyons, the pre-existing hydrates might be dissociated. Impeded by the fine-grained homogeneous layer, most of the dissociated gases would be restricted in the favorable deposits and form the new hydrates, which could be used to help understanding the relatively high saturation of gas hydrate in the fine-grained sediments in the Shenhu Area, northern South China Sea.

**Key words:** submarine canyon; erosion and sedimentation; gas hydrate; accumulation mechanism

## 0 引言

海底峡谷(Submarine Canyon)是发育在陆棚及陆坡上的线状海底负地形,向下陆坡/盆底方向倾斜,具有“U”或“V”型的横截面形态和两侧陡峭的峡谷谷壁<sup>[1-2]</sup>。海底峡谷的宽度为几至十几公里,谷底和峡谷壁的起伏可达数百米,通常在峡谷的下游末端发育海底扇<sup>[3-4]</sup>。作为大陆边缘的重要地貌单元和“源-汇系统”的重要组成部分,海底峡谷控制了沉积物由陆向海的输送和聚集<sup>[5-7]</sup>,记录了相邻区域的海平面升降、气候变化、构造活动等地质历史信息<sup>[8-10]</sup>,同时与海底峡谷相关的沉积建造(如浊积砂体、天然堤等)也可以作为深水油气、海域天然气水合物的良好储层<sup>[11-15]</sup>。根据海底峡谷发育的位置及其与大型水系的关联,可以将其划分为3种类型:与河流相连的陆架侵蚀型峡谷、非与河流相连的陆架侵蚀型峡谷以及陆坡限制型峡谷(也称为盲峡谷或无头型峡谷)<sup>[16-19]</sup>。

从世界范围内已知的海底峡谷和海域天然气水合物的分布来看,目前已识别出的660个主要的海底峡谷<sup>[20]</sup>和预测的海域水合物分布位置<sup>[21-23]</sup>主要位于陆坡和海岛的边缘(图1),均处于100~4 500 m的水深范围。同时,海底峡谷的底界面往往和含水合物沉积体的底界具有可对比性<sup>[24-25]</sup>。一些国家层面的水合物计划也将水合物的钻探站位布置于海底峡谷发育的区域,如由美国能源局资助的墨西哥湾“联合工业计划”(Joint Industry Project, JIP)将水合物的钻探站位布置于Keathley Canyon、Alaminos Canyon、Green Canyon等海底峡谷的周围<sup>[26-29]</sup>;而由日本经济产业省组织在南海海槽开展的“日本甲烷水合物开发计划”(Japan's

Methane Hydrate Exploitation Program, JMHEP)更是将浊积水道砂体直接作为目标层位<sup>[14]</sup>,并称之为“水合物聚集带”,其地质储量约占南海海槽的一半以上<sup>[30-31]</sup>。

本文系统分析了近年来国内外海底峡谷发育区内水合物的相关研究,从3个方面总结和归纳了海底峡谷与海域天然气水合物之间的关联性,即侵蚀-沉积作用与有利沉积体的分布、侵蚀-沉积作用与含烃流体渗漏的相互作用、侵蚀-沉积作用与海域天然气水合物的动态成藏;并分析了目前相关性研究所存在的困难和挑战,初步剖析了南海北部珠江口盆地海底峡谷群与水合物成藏之间的关联。希望为南海北部,特别是海底峡谷发育区域的水合物实际勘探提供借鉴。

## 1 海底峡谷侵蚀-沉积作用与海域天然气水合物的关联性

除了相似的空间分布之外,海底峡谷的侵蚀作用和内部结构,与海域水合物的聚集、分布和成藏有直接或间接的关联,主要表现在静态沉积参数、动态沉积演化和水合物动态成藏等3个方面。

### 1.1 静态沉积参数:侵蚀-沉积作用与有利沉积体的分布

与周缘的海底沉积环境相比,峡谷内部发育孔隙度和渗透率较好的粗粒沉积物,与天然堤沉积体一起,被视为海域天然气水合物的良好储层,其对有机碳的封存效率可提高近30倍<sup>[32]</sup>。如墨西哥湾(图2(a))<sup>[26-29]</sup>、印度的Krishna-Godavari盆地<sup>[33]</sup>、日本的Nankai海槽(图2(b))<sup>[14,30-31]</sup>、新西兰Hikurangi南部大陆边缘<sup>[34]</sup>、台湾西南部<sup>[35]</sup>等区域的含水合物层均与海底峡谷/深水水道的浊

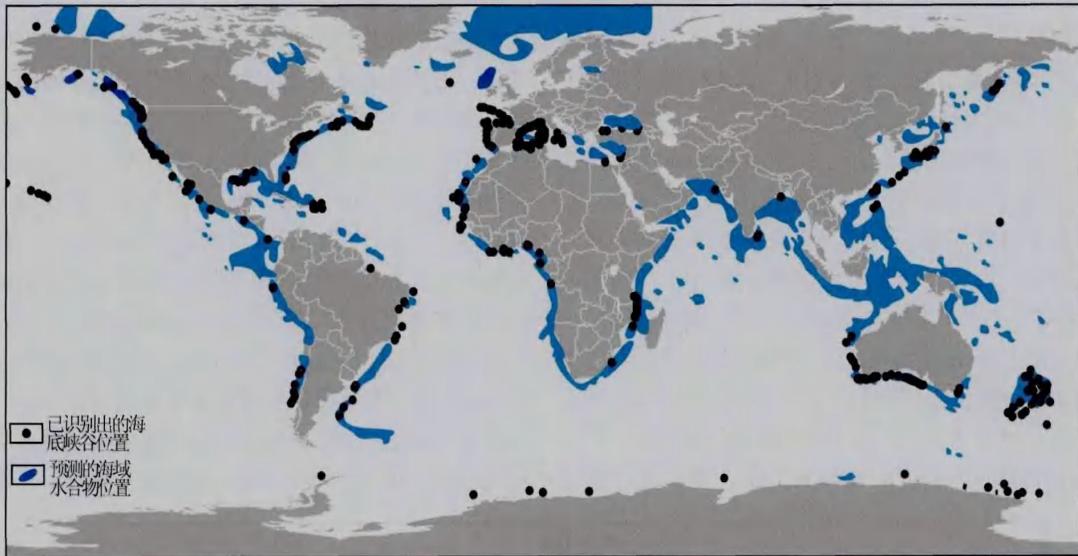


图1 已识别出的海底峡谷和预测的海域水合物位置图(据 Davies 等<sup>[25]</sup>)

Fig. 1 Known locations of submarine canyons and predicted locations of gas hydrates (after Davies et al. <sup>[25]</sup>)

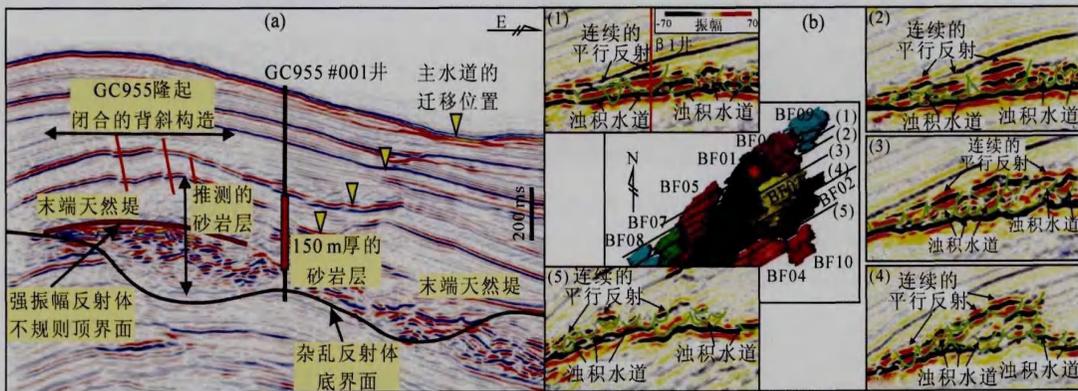


图2 墨西哥湾(a)(据 Boswell 等<sup>[29]</sup>)和日本 Nankai 海槽(b)(据 Noguchi 等<sup>[14]</sup>)含水合物沉积体的特征及其指示的深水峡谷/水道及伴生的沉积体影响和控制水合物的形成与分布

Fig. 2 Characteristics of gas hydrate-bearing sediments in the Gulf of Mexico (a) (after Boswell et al. <sup>[29]</sup>) and Nankai Trough (b) (after Noguchi et al. <sup>[14]</sup>), implying that the submarine canyons and deep-water channels would influence and control the accumulation and distribution of gas hydrates

积砂体和天然堤沉积体相关。这些研究成果说明，在适于水合物形成的区域(即具有适宜的温度和压力条件)，在有良好气体来源的前提下，深水峡谷/水道及其伴生的沉积体可以为水合物的形成提供空间，进而影响和控制水合物的成藏和分布。因此，基于高分辨率地震资料，将精细的地震解释与地球物理技术(如属性分析、切片技术、反演技术、AVO 技术等)相结合来刻画沉积体的平面分布和空间演化，进而分析远景区内水合物分布的控制因素，是目前海域天然气水合物勘探的热点之一。

### 1.2 动态沉积演化：侵蚀—沉积作用与含烃流体渗漏的相互作用

海底峡谷显著的侵蚀作用及峡谷侧壁沉积物的失稳，会导致含水合物沉积层遭受侵蚀，使得原先的水合物层发生分解(图3(a))，分解产生的气体会从峡谷边缘的缺口渗漏至海底<sup>[25,36]</sup>；海底峡谷的下切和侵蚀也会对峡谷周缘的地层产生冷却效应(Cooling Effects)，使得水合物稳定带基底深度发生变化<sup>[37-38]</sup>，即甲烷的渗漏和海底峡谷通常具有密切的关联<sup>[39-40]</sup>。另一方面，烃类气体的逃逸和渗漏也会反过来诱发沉积物失稳(图3

(b)), 从而导致海底峡谷、滑坡和麻坑的发育<sup>[41-43]</sup>。

1.3 水合物动态成藏: 侵蚀-沉积作用与海域天然气水合物的动态成藏

海底摄像仪器在墨西哥湾、Cascadia 大陆边缘水合物脊和挪威外海等地记录的海底特征表明, 赋存于海底浅表层的水合物处于不断的生长和分解之中, 说明天然气水合物的成藏处于不断的变动状态<sup>[44-47]</sup>。地质历史时期, 受全球性因素(如海平面升降和气候变化等)和区域沉积作用的控制, 水合物将经历“稳定-不稳定-稳定”的动态过程, 可称为天然气水合物的“动态成藏”<sup>[48-49]</sup>。海底峡谷的内部沉积充填将为水合物的赋存提供

有利沉积体, 强烈的侵蚀作用和沉积演化将对含水合物层造成破坏并引起周围沉积物地温梯度的变化, 表明海底峡谷会对海域天然气水合物的动态成藏演化产生强烈的影响<sup>[25]</sup>。根据海底峡谷的形成演化, 可以将海底峡谷发育区的水合物成藏演化划分为4个阶段(图4): I. 海底峡谷初始发育阶段, 水合物层位于水合物稳定带之内, 气体可能在水合物稳定带基底下部的游离气带和粗粒的砂层中富集; II. 水合物稳定带基底迁移阶段, 受海底峡谷“冷却效应”的影响, 水合物稳定带基底向下迁移, 气体将从游离气带中逃逸, 进一步向上运移, 原先的水合物层会发生小规模的分解和再形成过程; III. 水合物分解-沉积物失稳阶段, 随

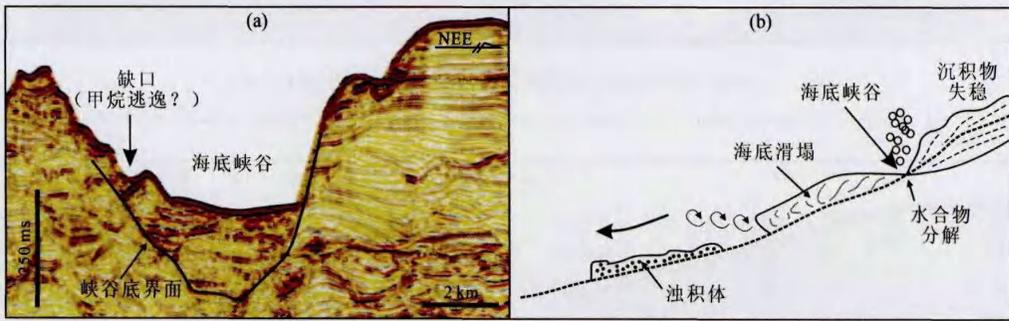


图3 海底峡谷侵蚀作用造成的甲烷逃逸(a)和(b)含烃流体的渗漏与沉积物失稳

Fig. 3 Methane escape associated with the erosion of submarine canyons (a) and sediment failures triggered by the leakage of hydrocarbon-bearing fluids (b)

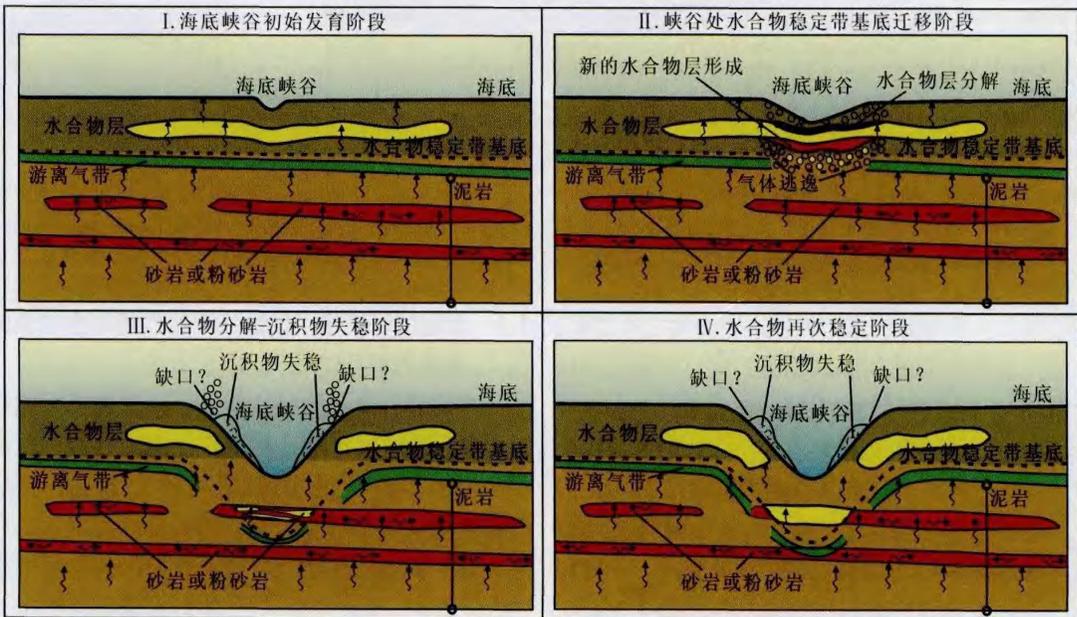


图4 海底峡谷与水合物动态成藏示意图(修改自 Davies 等<sup>[25]</sup>)

Fig. 4 Schematic diagrams showing relationship between submarine canyon and gas hydrate accumulation

(modified from Davies et al. <sup>[25]</sup>)

着海底峡谷的侵蚀作用越来越明显,将会对原先的水合物层造成明显的侵蚀,从而造成水合物中的气体发生逃逸,在峡谷的侧壁处形成缺口,并会导致峡谷侧壁处沉积物发生失稳,新的游离气带将会位于新的水合物稳定带基底下;IV.水合物再次稳定阶段,在海底峡谷演化的晚期阶段,位于水合物稳定带之内的粗粒沉积物可以被视为有利的沉积体,水合物将会优先在砂层中聚集。

因此,海底峡谷与海域天然气水合物的关联性研究,其重要性不仅体现在资源分布的圈定和矿体的描述上(含水合物沉积体的精细刻画),侵蚀—沉积作用造成的含烃流体释放对于环境效应和工程地质灾害的评价也有重要的指示;此外,对于进一步了解海域天然气水合物的动态成藏过程,揭示其成藏机制方面也有重要的意义。二者关联性的研究,需要将垂向分辨率高的岩心—测井数据与空间连续性强的地震数据结合在一起,将钻前预测和钻探结果结合在一起,将地质模式和数值模拟结合在一起,将静态沉积参数、动态沉积演化和水合物的动态成藏结合在一起,通过对海底峡谷侵蚀—沉积作用的描述和精细刻画,讨论峡谷侵蚀—沉积作用对有利沉积体、含烃流体释放、水合物动态成藏等方面的影响,从“静态”特征和“动态”演化两个方面分析海底峡谷和海域天然气水合物的相关性,从而揭示海域水合物的动态成藏过程和成藏机制。

## 2 南海北部珠江口盆地海底峡谷群与水合物成藏

在珠江口外 500~1 600 m 的水深范围内,发育大量的海底峡谷(图 5(a))。这些海底峡谷位于珠江口峡谷<sup>[50]</sup>的东北侧,垂直于陆坡,峡谷的深泓线没有发生大的弯曲,呈 NNW—SSE 向线状平行展布(图 5(a)),构成了珠江口盆地海底峡谷群。这些峡谷宽 1~8 km,长 30~50 km,显示出对下伏地层强烈的侵蚀和冲刷,地形起伏最大约为 450 m。峡谷两侧陡峭的侧壁上,受重力势作用,沉积物易发生失稳形成滑移或滑塌体,同时在峡谷侧壁上还存在一些类似“缺口”的特征(图 3(a)),可能与含烃流体的逃逸相关<sup>[36]</sup>。地震剖面上,海底峡谷群的内部充填由两部分构成,一部分表现为强振幅、连续性差的反射特征,为峡谷轴向的沉积物充填,垂向上发育多个侵蚀不整合界面,可划分为不同的侵蚀—充填旋回(图 5

(b));另一部分表现为连续性较好的中等振幅反射结构,推测为峡谷两侧失稳的沉积物充填至峡谷的底部(图 5(c))。这种多期次的内部结构和多方向的沉积物来源说明珠江口盆地海底峡谷群经历了复杂的演化历史。

2007 年 6 月,在海底峡谷群发育的区域(即神狐海域),由广州海洋地质调查局组织实施了我国首个海域天然气水合物钻探航次(图 5(a)),完成钻探站位 8 个,取心站位 5 个,在其中的 3 个站位中获取了水合物的实物样品<sup>[51-52]</sup>。通过对含水合物层的年代归属、有利沉积体成因和分布、与海底峡谷的空间匹配关系、水合物成藏地质条件等综合分析,可以发现该区域的水合物在形成、聚集和分布上具有如下特征:(1)水合物主要赋存于更新世以来的地层中,虽然更新世以来的地层在岩性和粒度上的变化较小,但是从地震反射特征上来看可以识别出 2 个沉积单元(图 6(a))。受北部侵蚀水道的影响,下伏地层会遭受剥蚀并发生再次搬运,在水合物钻探区内再次沉积下来,再沉积的沉积体可能具有相对较好的储层物性和相对较大的沉积速率,因此被视为水合物的有利储层(即沉积单元 I)(图 6(a)),为水合物的形成和聚集提供储集空间;(2)这套再沉积的沉积单元在研究区内呈 NNW—SSE 向带状分布(图 6(b)),也就是说,水合物主要赋存在这套沉积之中,最初的分布特征也表现为带状。海底峡谷群的存在将会破坏有利沉积体的空间分布,并导致其从“带状”分布变化为“斑状/补丁状”,造成了现今水合物分布的“不均匀性”特征(图 6(b))。现今有利沉积体的分布特征与水合物站位的钻探结果相对应,即靠近南部的站位均位于有利的沉积区带之外,如 SH4、SH5、SH6 和 SH9 站位,而这些站位均未获取水合物的实物样品<sup>[51-52]</sup>。

因此,笔者认为珠江口盆地海底峡谷群与水合物成藏的关联主要体现在以下两个方面:

(1)海底峡谷群对有利沉积体的侵蚀作用,一方面会使有利沉积体呈孤立分布,导致含水合物层仅分布于海底峡谷群的脊部;另一方面含水合物层的破坏,也会诱发含烃流体的逃逸和渗漏;

(2)受海底峡谷侵蚀—沉积作用的影响,水合物会经历动态成藏的过程,即受海底峡谷的侵蚀,被破坏的有利沉积体中,水合物可能会发生分解,其所产生的分解气体一部分会进入到海水之中,但是受沉积单元 II(图 6(a))的遮挡作用,大部分

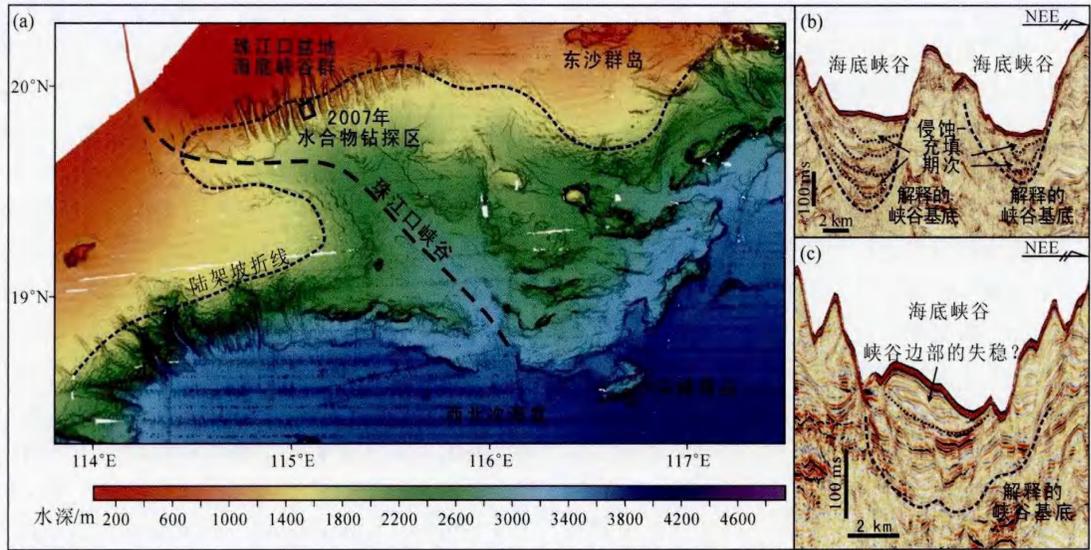


图5 珠江口盆地海底峡谷群平面形态(海底地形图据 Ding 等<sup>[50]</sup>)及内部构成特征

Fig. 5 Morphology (Ding et al. <sup>[50]</sup>) and internal architecture of the submarine canyons in the Pearl River Mouth Basin

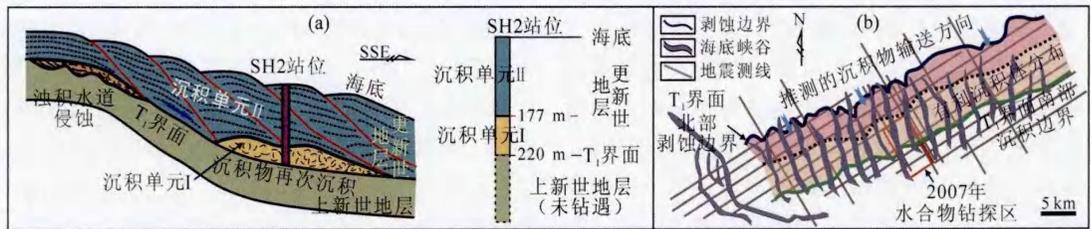


图6 神狐海域含水合物沉积层成因机制(a)及分布特征(b)

Fig. 6 Forming mechanism and distribution characteristics of gas hydrate-bearing sediments in the Shenhu Area

的分解气体仍然会被限制在有利储层之中(即沉积单元 I)(图 6(a)),从而在有利沉积体中再次富集并形成水合物,这可能是导致该区域细粒沉积物中水合物饱和度较高的主要原因。

### 3 结论

海底峡谷和海域天然气水合物具有相似的空间分布,峡谷的侵蚀-沉积作用与水合物的聚集、分布和成藏具有直接或间接的关联,主要表现在静态沉积参数、动态沉积演化和水合物动态成藏等 3 个方面,即侵蚀-沉积作用与有利沉积体的分布、侵蚀-沉积作用与含烃流体渗漏的相互作用、侵蚀-沉积作用与海域天然气水合物的动态成藏。二者的关联性研究,对于资源分布的圈定和矿体的描述、环境效应和工程地质灾害以及水合物的成藏机制都有重要的指示意义,是今后海域水合物研究的重点和难点问题之一。

珠江口盆地海底峡谷群对该区域内水合物的分布和聚集起到明显的控制作用,一方面峡谷的

强烈侵蚀会破坏原先的水合物层,使其仅在峡谷的脊部发育;另一方面峡谷的演化过程和细粒的均质层(沉积单元 II)一起,将大部分的分解气体限制在有利沉积体之中(沉积单元 I),使其发生富集,从而在这一区域的细粒沉积物中形成高饱和度的水合物。

### 参考文献:

- [1] Daly R A. Origin of submarine canyons [J]. American Journal of Science, 1936, 16: 401-420.
- [2] Shepard F P. Submarine canyons [J]. Earth-Science Reviews, 1972, 8(1): 1-12.
- [3] Shepard F P, Emery K O. Congo submarine canyon and fan valley [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1973, 57(9): 1679-1691.
- [4] Shepard F P. Submarine canyons: multiple causes and long-time persistence [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1981, 65(6): 1062-1077.
- [5] Babonneau N, Savoye B, Cremer M, et al. Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan [J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19

- (4): 445–467.
- [6] Laursen J, Normark W R. Late Quaternary evolution of the San Antonio submarine canyon in the central Chile forearc (~33°S) [J]. *Marine Geology*, 2002, 188(3/4): 365–390.
- [7] Popescua I, Lericolais G, Paninc N, et al. The Danube submarine canyon (Black Sea): morphology and sedimentary processes [J]. *Marine Geology*, 2004, 206(1/4): 249–265.
- [8] McHugh C M G, Damuth J E, Mountain G S. Cenozoic mass transport facies and their correlation with relative sea level change, New Jersey continental margin [J]. *Marine Geology*, 2002, 184(3/4): 295–334.
- [9] Gingele F X, Deckker P D, Hillenbrand C D. Late Quaternary terrigenous sediments from the Murray Canyons area, offshore South Australia and their implications for sea level change, palaeoclimate and palaeodrainage of the Murray-Darling Basin [J]. *Marine Geology*, 2004, 212(1/4): 183–197.
- [10] Antobreh A A, Krastel S. Morphology seismic characteristics and development of Cap Timiris Canyon, offshore Mauritania; a newly discovered canyon preserved-off a major arid climatic region [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(1): 37–59.
- [11] Clark J D, Pickering K T. Architectural elements and growth pattern of submarine channels: application to hydrocarbon exploration [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1996, 80(2): 194–220.
- [12] Wonham J P, Jayr S, Mougamba R, et al. 3D sedimentary evolution of a canyon fill (Lower Miocene-age) from the Mandorove Formation, offshore Gabon [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 175–197.
- [13] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs; key elements in facies prediction and effective development [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(8): 821–841.
- [14] Noguchi S, Shimoda N, Takano O, et al. 3-D internal architecture of methane hydrate-bearing turbidite channels in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1817–1828.
- [15] Boswell R, Frye M, Shelander D, et al. Architecture of gas-hydrate-bearing sands from Walker Ridge 313, Green Canyon 955, and Alaminos Canyon 21; Northern deepwater Gulf of Mexico [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 134–149.
- [16] Twichell D C, Roberts D G. Morphology, distribution, and development of submarine canyons on the United States Atlantic continental slope between Hudson and Baltimore Canyons [J]. *Geology*, 1982, 10(8): 408–412.
- [17] Farre J A, McGregor B A, Ryan W B F, et al. Breaching the shelf break: passage from youthful to mature phase in submarine canyon evolution [M] // Stanley D J, Moore T G. *The Shelf Break: Critical Interface on Continental Margins*. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1983: 25–39.
- [18] 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(6): 9277–9295.
- [19] Harris P T, Whiteway T. Global distribution of large submarine canyons: geomorphic differences between active and passive continental margins [J]. *Marine Geology*, 2011, 285(1/4): 69–86.
- [20] De Leo F C, Smith C R, Rowden A A, et al. Submarine canyons: hotspots of benthic biomass and productivity in the deep sea [J]. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, 2010, 277: 2783–2792.
- [21] Dickens G R. The potential volume of oceanic methane hydrates with variable external conditions [J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(10): 1179–1193.
- [22] Milkov A V, Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(1): 1–11.
- [23] Davies R J, Clarke A L. Methane recycling between hydrate and critically pressured stratigraphic traps, offshore Mauritania [J]. *Geology*, 2010, 38(11): 963–966.
- [24] Lüdmann T, Wong H K, Konerding P, et al. Heat flow and quantity of methane deduced from a gas hydrate field in the vicinity of the Dnieper Canyon, northwestern Black Sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 2004, 24(3): 182–193.
- [25] 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*, 2011, 323/324: 72–78.
- [26] Hutchinson D R, Hart P E, Collett T S, et al. Geologic framework of the 2005 Keathley Canyon gas hydrate research well, northern Gulf of Mexico [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 906–918.
- [27] Ruppel C, Boswell R, Jones E. Scientific results from Gulf of Mexico Gas Hydrates Joint Industry Project Leg 1 drilling: Introduction and overview [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 819–829.
- [28] Boswell R, Shelander D, Lee M, et al. Occurrence of gas hydrate in Oligocene Frio sand: Alaminos Canyon Block 818, Northern Gulf of Mexico [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1499–1512.
- [29] Boswell R, Collett T S, Frye M, et al. Subsurface gas hydrates in the northern Gulf of Mexico [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 4–30.
- [30] Colwell F, Matsumoto R, Reed D. A review of the gas hydrates, geology, and biology of the Nankai Trough [J]. *Chemical Geology*, 2004, 205(3/4): 391–404.
- [31] Tsuji Y, Ishida H, Nakamizu M, et al. Overview of the MITI Nankai Trough wells: A milestone in the evaluation of methane hydrate resources [J]. *Resource Geology*, 2004, 54(1): 3–10.
- [32] Masson D G, Huvenne V A I, de Stigter H C, et al. Efficient burial of carbon in a submarine canyon [J]. *Geology*, 2010, 38(9): 831–834.
- [33] Riedel M, Collett T S, Shankar U. Documenting channel features associated with gas hydrates in the Krishna-Godavari Basin, offshore India [J]. *Marine Geology*, 2011, 279(1/4): 1–11.

- [34] Fohrmann M, Pecher I A. Analyzing sand-dominated channel systems for potential gas-hydrate-reservoirs using an AVO seismic inversion technique on the Southern Hikurangi Margin, New Zealand [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 38(1): 19-34.
- [35] Lin C C, Lin A T S, Liu C S, et al. Canyon-infilling and gas hydrate occurrences in the frontal fold of the offshore accretionary wedge of southern Taiwan [J]. *Marine Geophysical Research*, 2014, 35(1): 21-35.
- [36] 徐华宁, 邢涛, 王家生, 等. 利用多道地震反射数据探测神狐海域渗漏型水合物 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(增刊): 195-202.
- [37] Gay A, Lopez M, Berndt C, et al. Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin [J]. *Marine Geology*, 2007, 244(1/4): 68-92.
- [38] Bangs N L, Hombach M J, Moore G F, et al. Massive methane release triggered by seafloor erosion offshore southwest Japan [J]. *Geology*, 2010, 38(11): 1019-1022.
- [39] Paull C K, Schlining B, Ussler III W, et al. Distribution of chemosynthetic biological communities in Monterey Bay, California [J]. *Geology*, 2005, 33(2): 85-88.
- [40] Naudts L, Greinert J, Artemov Y, et al. Geological and morphological setting of 2778 methane seeps in the Dnepr paleo-delta, northwestern Black Sea [J]. *Marine Geology*, 2006, 227(3/4): 177-199.
- [41] 陈泓君, 蔡观强, 罗伟东, 等. 南海北部陆坡神狐海域峡谷地貌形态特征与成因 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(5): 19-26.
- [42] 陈泓君, 黄磊, 彭学超, 等. 南海西北陆坡天然气水合物调查区滑坡带特征及成因探讨 [J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 18-25.
- [43] 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.
- [44] Kastner M, Bartlett D, MacDonald I, et al. CH<sub>4</sub> fluxes across the seafloor at the three distinct gas hydrate fields: Impacts on ocean and atmosphere chemistry [M] //Torstein Austvik. *Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates*. Trondheim: ICGH, 2005: 3.
- [45] Solomon E A, Kastner M, Robertson G, et al. Insights into the dynamics of in situ gas hydrate formation and dissociation at the Bush Hill gas hydrate field, Gull of Mexico [M] //Torstein Austvik. *Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates*. Trondheim: ICGH, 2005: 3.
- [46] Liu X L, Flemings P B. Passing gas through the hydrate stability zone at southern Hydrate Ridge, offshore Oregon [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(1/2): 211-226.
- [47] Sauter E J, Muyakshin S I, Charlou J L, et al. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243(3/4): 354-365.
- [48] 张岭, 宋海滨. 天然气水合物体系动态演化研究(III): 水合物的产生、聚集和分解 [J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(4): 592-597.
- [49] 樊栓狮, 关进安, 梁德青, 等. 天然气水合物动态成藏理论 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(6): 819-826.
- [50] Ding W W, Li J B, Li J, 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.
- [51] Wu N Y, Yang S X, Zhang H Q, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate reservoir system of Shenhu area, North Slope of South China Sea [M] //ICGH. *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates*. Worldoils: ICGH, 2008: 1-7.
- [52] Yang S X, Zhang H Q, Wu N Y, et al. High concentration hydrate in disseminated forms obtained in Shenhu area, North Slope of South China Sea [M] //ICGH. *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates*. Worldoils: ICGH, 2008: 1-10.