

王长盛, 朱俊江, 赵冬冬, 等. 全球海底峡谷成因及演化研究[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(3): 1-15.

# 全球海底峡谷成因及演化研究

王长盛<sup>1,2</sup>, 朱俊江<sup>1,2\*</sup>, 赵冬冬<sup>3</sup>, 杨国明<sup>1,2</sup>, 熊梓翔<sup>1,2</sup>, 张升升<sup>1,2</sup>, 李三忠<sup>1,2</sup>, 贾永刚<sup>4</sup>

(1 深海圈层与地球系统前沿科学中心, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋高等研究院和海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071; 3 中国冶金地质总局青岛地质勘察院, 青岛 266109; 4 中国海洋大学山东省海洋环境地质工程重点实验室, 青岛 266100)

**摘要:**海底峡谷广泛发育于全球大陆边缘, 在地形上表现为深切于大陆边缘的凹槽, 是海陆边界处最为显著的地貌之一。海底峡谷是陆缘碎屑物质由陆至深海运移的重要通道, 是研究区域源—汇体系、海平面升降、构造演化的重要场所, 也是海底油气资源形成与储集的重要区域, 是国内外在海洋领域研究的热点之一。针对海底峡谷的成因及演化过程, 进行了系统性的研究与划分, 首先介绍了国内外海底峡谷研究的关键成果, 其次概述了两大世界典型峡谷区南海北部海底峡谷区和蒙特利海底峡谷区的区域构造及成因, 最后依据海底峡谷形成演化的主控因素, 将其成因分为 3 种类型: 强侵蚀性、河流侵蚀型、构造作用及溯源侵蚀型。通过对峡谷成因演化的研究, 有助于为海底峡谷的分类提供新的思路, 为海底峡谷区域的资源勘探、古气候与构造演化模式方面提供新的突破点。

**关键词:**海底峡谷; 峡谷类型; 峡谷演化; 南海北部峡谷区; 蒙特利海底峡谷区

中图分类号: P737.2; P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.119

## 0 引言

海底峡谷也称水下峡谷, 是位于海底的一种十分显著的地貌, 其深切于大陆架和大陆坡, 形成了垂直或者斜交于海岸线的线性凹槽<sup>[1-3]</sup>。海底峡谷谷壁陡峭, 谷轴弯曲, 通常与许多支流相连, 类似于陆地上河流切割所形成的峡谷<sup>[4]</sup>。大部分海底峡谷的宽度约为 1~20 km, 绵延几十到数百千米, 规模较大的白令海底峡谷宽度达到了 65 km, 长达 400 km<sup>[5]</sup>, 其垂向高差可达数百甚至上千米, 在峡谷末端常常发育有海底扇。海底峡谷最常见的剖面形态为“U”字型 and “V”字型, 其中前者属于堆积状态, 后者属

于剥蚀状态。海底峡谷广泛发育于世界活动大陆边缘或被动大陆边缘<sup>[6-7]</sup>, 但在倾角 $<1^\circ$ 的平缓陆坡, 以及海台或堡礁、与陆架隔开的陆坡上, 海底峡谷则分布较少。峡谷头部多延伸至陆坡上部或陆架上, 甚至接近海岸线, 多数下部可延伸至大陆坡足部。海底峡谷不仅是一种典型的海底地貌, 还是陆源碎屑物质向深海输送的主要通道<sup>[8-9]</sup>, 水团、沉积物、营养物质, 甚至垃圾和污染物都会通过海底峡谷从海岸运移至深水区<sup>[10]</sup>。在区域源—汇体系中, 海底峡谷被认为是一个重要的形态-动力组成部分, 其不仅是一个沉积物运移的主要通道, 而且是一个临时的沉积区<sup>[11]</sup>。海底峡谷内部粗碎屑沉积物是重要的油气藏储集场所, 如美国加州沿岸、墨西哥湾、北海和中国南海北部的一些知名油气田<sup>[12-13]</sup>, 海底峡谷与天然气水合物的成藏关系紧密, 峡谷的形成演化对天然气水合物的聚集与运移会产生影响<sup>[14-15]</sup>。海底峡谷特殊的地貌特征导致部分海流沿峡谷涌升, 形成上升流, 若峡谷与陆上河流相连, 河水在峡谷中流动会沿谷壁在一定粗粒砂层储集起来, 形成海底淡水库<sup>[16]</sup>。海底峡谷发育丰富的重力流类型, 如: 滑动、滑塌、碎屑流和浊流等<sup>[17-19]</sup>。此外, 海底峡谷中的沉积物质还可以记录所在区域的气候变

收稿日期: 2020-08-03

资助项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2019MD036); 国家自然科学基金重点项目(91958214, 41831280); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室自主课题资助项目(MM-RZZ201802); 中国海洋大学研究生教育质量提升联合培养基地项目(HDYJ18011)

作者简介: 王长盛(1996—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作. E-mail: oucwcs@163.com

\* 通讯作者: 朱俊江(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋地质与地球物理研究. E-mail: zhujunjiang@ouc.edu.cn

化、海平面升降和构造活动等地质过程<sup>[20-21]</sup>。众多海底峡谷在大陆边缘演化过程中扮演了重要的角色。同时,海底峡谷的生态意义已得到生态学家广泛认识,认为海底峡谷与提高初级生产力、底栖生物数量和生物多样性有关<sup>[22]</sup>。因此,海底峡谷受到全球各国海洋学家的关注,并在地形地貌、地震地质、浊流沉积、重力堆积方面做了大量研究工作<sup>[17, 23-24]</sup>。

对海底峡谷的形态描述及分类方法的研究已经较为充分<sup>[6, 25-28]</sup>,但对于海底峡谷的成因及其演化过程则少有系统性的总结归纳。本文通过对海底峡谷的成因及演化类型的研究,对峡谷的分类提供新的参考依据,以期为今后全球海底峡谷的形成演化、海平面变化、区域水动力场、峡谷分布规律之间建立联系。通过总结前人对多个海底峡谷区的研究,针对海底峡谷不同的成因类型及演化模式进行研究,分别对世界上研究较深入的几个峡谷研究进行系统总结,为今后在海底峡谷的成因分类、演化控制因素等领域研究提供详实的科学依据。

## 1 海底峡谷研究现状

有关海底峡谷的测量最早的记载为1885年,美国LINDENKOHL<sup>[29]</sup>借助测深尺对纽约哈德逊河道进行测量时发现了哈德逊海底峡谷,后于19世纪末,地理学家SPENCER<sup>[30]</sup>提出“海底峡谷”这一术语。20世纪初,一些科学家针对海底峡谷进行了几次富有开创性的观测<sup>[1, 31-32]</sup>。VEATCH和SMITH<sup>[33]</sup>绘制的美国东海岸的海道图是有记载的最早明确标注海底峡谷的海道图,海底峡谷才开始得到广泛而深入的科学研究。

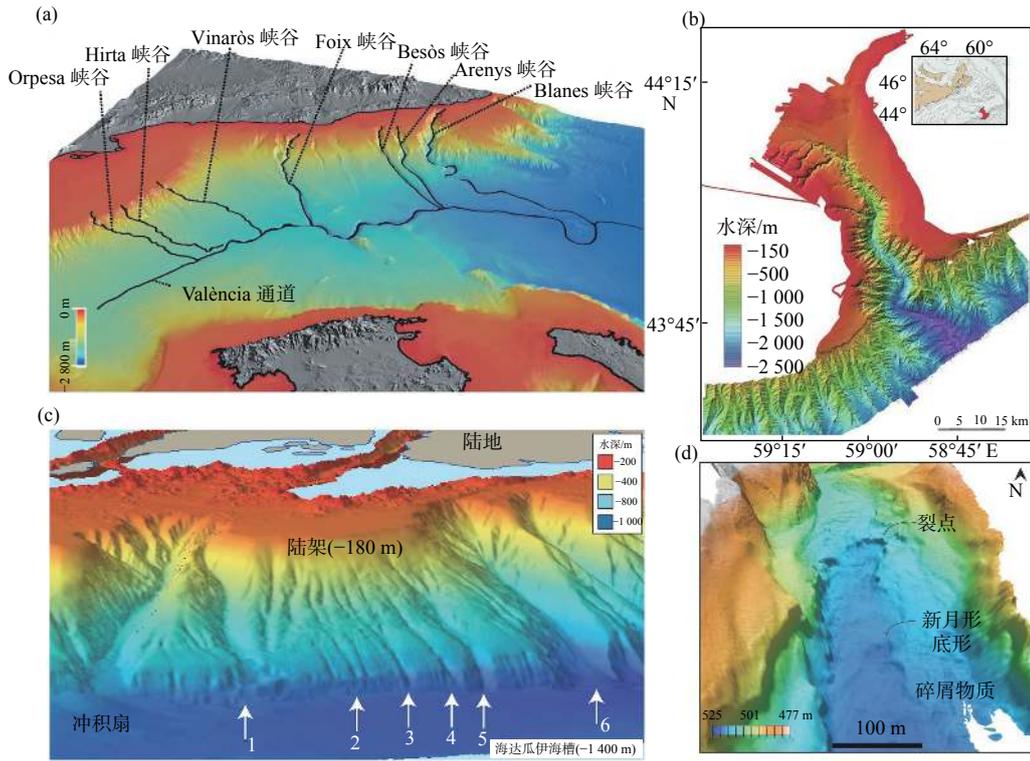
SHEPARD等<sup>[25]</sup>率先尝试借助对海底峡谷进行几何学描述和海底峡谷的形态分类来解释海底峡谷的成因。TWICHELL和ROBERTS<sup>[26]</sup>沿袭这一思路,对美国东海岸哈德逊峡谷至巴尔的摩峡谷之间的区域进行侧扫声呐探测,研究认为海底峡谷的间距与陆坡边缘的坡度呈正相关,并对海底峡谷的演化过程做了初步解释。TAYLOR和SMOOT<sup>[34]</sup>通过对Bonin弧前海底峡谷的研究,从海底峡谷地貌形态方面将其划分为直线型、弯曲型和树枝型3种类型,并对海底峡谷下切深度特征进行了研究。但是较大型峡谷通常具有更为复杂的内部结构,因此不能简单地用海底峡谷的形态来解释其形成机制。

20世纪中期之后,随着探测技术及深海钻探技

术的发展,先进科学探测技术与仪器的不断发明出来,综合利用单/多波束测深技术、浅地层剖面技术、侧扫声呐技术、单/多道地震技术等先进声学探测技术,以及日趋完善的大洋钻探技术和ROV深海观测技术等,极大地促进了对海底峡谷地形地貌结构以及海底峡谷沉积构造的研究,学者们对海底峡谷的研究不仅局限在对其形态进行描述,对于海底峡谷的形成发展与演化也有了更进一步的认识。多波束测深技术在海底地貌的识别中发挥了不可替代的作用,现今对海底峡谷的研究中,借助多波束测深技术对峡谷区域的地形测量往往是开展海底峡谷探测研究的首要工作(图1)。一些学者发现海底峡谷是陆源沉积物和深海区域之间重要的传输通道,同时也是高悬浮物质堆积的场所,峡谷上有若干沉积中心形成并汇集众多现代沉积物质。这些研究提出海底峡谷在深海油气矿藏方面具有重要的意义,在海底峡谷末端常发育有深海扇,这通常是油气资源勘探的关键区域<sup>[35]</sup>。

进入21世纪以来,地质学家尝试对峡谷进行更深层次的研究探索,JOBE等<sup>[27]</sup>通过对位于赤道几内亚里约穆尼海盆的贝尼托海底峡谷系统(Benito canyon system)的研究,利用三维反射地震和岩心资料,对比了该处海底峡谷系统中的多条峡谷,提出了将海底峡谷从峡谷区位方面可以分为2类,I型和II型海底峡谷(图2)<sup>[36-39]</sup>。I型峡谷发源于大陆架并延伸至陆架坡折带,峡谷头部一般与粗粒沉积物高供给区域相连接,其陆源沉积物供应较II型峡谷充足,以重力流侵蚀和富砂沉积为主,常形成富砂充填的侵蚀性峡谷地貌、大型海底扇。在地貌上具有多“V”字型剖面、支流众多、裂点发育、弯曲度较大等特点。II型峡谷仅发育在陆坡上,下切陆坡形成陆坡峡谷,一般缺少陆源沉积物的供应,以富泥质沉积为主,浊流对其地貌的塑造作用要小于I型峡谷,在地貌上具有多“U”字型剖面、支流较少、谷道较为顺直光滑(表1)。HUANG等<sup>[40]</sup>在对澳大利亚陆缘海底峡谷研究时,针对峡谷是否切割大陆架将其分为2类,与Jobe分类法相似。

HARRIS等<sup>[7]</sup>借助ESRI提供的ArcGIS9.3软件,导入ETOPO1水深数据(全球测深网格数据),生成100m间隔等深线水深图,从卫星数据中分离出5849个独立的大型海底峡谷(图3)<sup>[41]</sup>。为了有效识别海底峡谷,HARRIS基于海底峡谷形态制定了4条峡谷识别标准:①峡谷水深范围需>1000m,长度<1000m的峡谷不进行统计;②峡谷宽深比需



(a) 西班牙瓦伦西亚通道沿岸峡谷系统水深图<sup>[30]</sup>; (b) 嘎雷海底峡谷水深图<sup>[37]</sup>;  
 (c) 海达瓜伊海槽处的6条海底峡谷水深图<sup>[38]</sup>; (d) 蒙特利海底峡谷局部底部形图<sup>[39]</sup>

图 1 多波束测深获取的海底峡谷成像图

Fig.1 Submarine canyons mapped with multi-beam echosounding system(MBES)

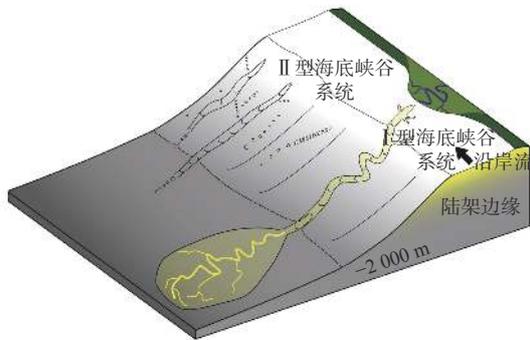


图 2 I型和II型海底峡谷系统<sup>[27]</sup>

Fig.2 Type I and Type II submarine canyon systems<sup>[27]</sup>

< 150:1, 即峡谷 100 m 等深线向陆弯曲部分至少要 15 km 长, 其横向跨距也要至少达到 15 km, 峡谷下切深度需 > 100 m, 下切深度 < 100 m 的不进行统计; ③峡谷头部位于 4 000 m 水深以下的不进行统计; ④只统计位于大陆边缘、岛屿临近斜坡或海底高原斜坡的峡谷, 其中海底高原最大处水深需达到 200 m, 下切大洋中脊翼部、海山和其他海底山脉的峡谷排除在外<sup>[7]</sup>。并将全部峡谷就其是否与河流相连和是否切割陆架等方面划分为 3 类: ① I 型, 陆架侵蚀型, 峡谷头部与河流体系相接 (river-associated, shelf incising canyon), 这类峡谷一般与陆上河流系统联系紧密, 通常是河流-海洋体系中的一部分;

② II 型, 陆架侵蚀型 (shelf incising canyon), 但头部并不与河流相接, 这类峡谷的头部与河流三角洲在空间上相隔较远; ③ III 型, 陆坡限制型峡谷 (slope-confined canyon), 未切入陆架, 仅在陆坡上发育, 这类峡谷远离大陆架, 常发育在大陆坡上。

根据构造变形和海底峡谷间的相互作用, 将海底峡谷划分为构造限制型、构造偏转型、构造转向型、构造阻挡型与横向切穿型 5 种类型<sup>[42]</sup>。罗伟东等<sup>[43]</sup>对南海海盆西峡谷开展了多波束和地震探测, 将峡谷分为 3 部分, 其形成受到侵蚀-沉积、断裂活动和海平面变化的控制, 并将峡谷的演化划分为 3 个阶段。CHIANG 等<sup>[28]</sup>在对台湾西南海底峡谷群的研究中, 将峡谷群中的 5 条峡谷根据峡谷头部所在位置以及峡谷剖面形态等分为 3 种类型: ①与河流连接型峡谷, 如高屏峡谷与台湾岛高屏河相连, 接收陆源沉积; ②陆架侵蚀型峡谷, 如澎湖峡谷、高雄峡谷、枋寮峡谷, 这几条峡谷缺少来自河流的沉积物补给, 峡谷主要接收由陆坡局部坍塌带来的泥沙沉积; ③陆坡限制型峡谷, 如寿山峡谷。

## 2 世界典型海底峡谷

基于 ETOPO1 测深网格数据, HARRIS 等<sup>[7]</sup>识

表1 I型与II型峡谷属性特征<sup>[27]</sup>  
Table 1 Characteristics of Type I and Type II submarine canyon systems<sup>[27]</sup>

属性	I型峡谷	II型峡谷
陆架边缘特征	切于陆架内部	未切于陆架内部
沉积物供给特征	供给充足,通常与一大型河流系统或沿岸流相连	供给贫乏,与河流系统没有直接关联
陆坡形态特征	陆架边缘及陆坡上部较为陡峭	陆架边缘难识别,陆坡上部坡度较缓
弯曲度(总体)	高弯折度(弯折数量>2),形态可预测	低弯折度(弯折数量<2),形态不可预测
横、纵截面几何形态	“V”字型,阶梯状	“U”字型,平坦
地貌复杂度	多支流,羽状发育	支流少,多为单一峡谷
沉积样式	侵蚀型	加积型/建造型
沉积过程	浊流引起的侵蚀/沉积,块体运动	半深海沉积,稀浊流沉积,底流沉积,块体运动
峡谷内地貌特征	阶梯状,扇状边缘,侵蚀特征明显	平滑,上覆沉积层,侧向加积特征显著
沉积物特征	砂砾质为主,泥质碎屑堆积体,区域内部主要以砂质或者泥质为主	半深海黏土为主,牵引结构泥质沉积物,含砂(?),区域内部主要以泥质为主
典型海底峡谷	扎伊尔/刚果,密西西比,蒙特雷,伊尔河,比斯开湾	伊尔河,加利福尼亚,加蓬,法罗群岛

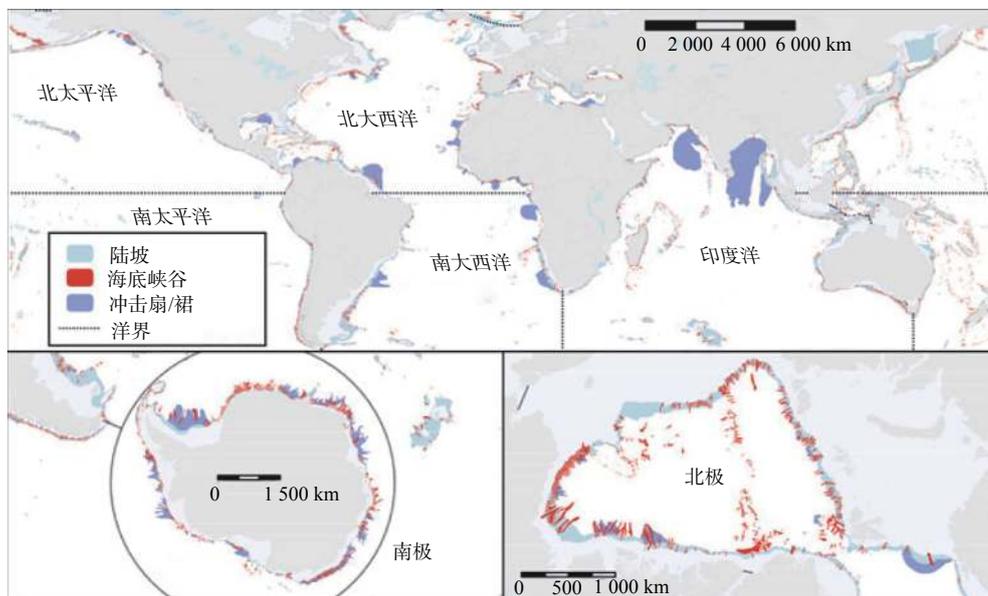


图3 全球海底峡谷分布图<sup>[41]</sup>

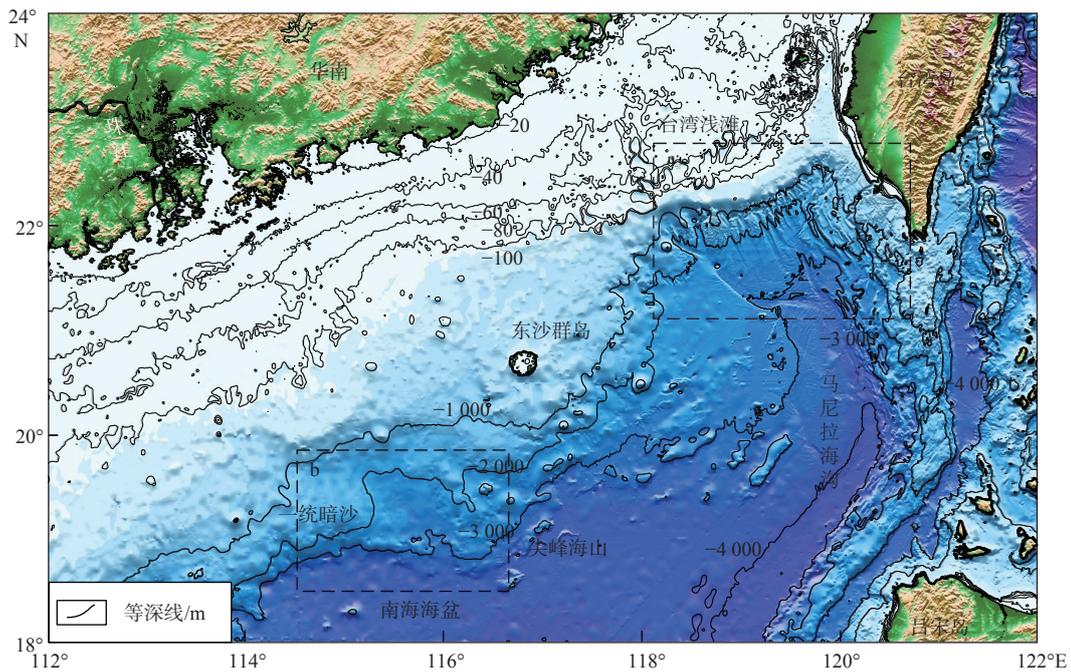
Fig.3 Location map of world submarine canyons<sup>[41]</sup>

别出的 5 849 条海底峡谷,其中多数(3 605 条)分布于主动大陆边缘(包含岛屿),其余(2 244 条)分布在被动大陆边缘。在这些分布于全球陆缘的海底峡谷中,南海北部陆架陆坡区和北美西海岸发育有数量多且密集的海底峡谷群,这些峡谷形态特征丰富,所处区位构造发育且研究成果丰富。因此,本文选取南海北部峡谷区与蒙特利峡谷区作为典型海底峡谷代表,就其所处区位构造特征、构造演化历史、峡谷属性等方面展开论述。

## 2.1 南海北部海底峡谷区

南海位于太平洋、欧亚、印度-澳大利亚板块交界处,受到太平洋构造域和特提斯构造域的构造叠加,多种地质活动在此汇交,大地构造位置独特,构

造变形格局复杂(图 4)。白垩纪晚期,太平洋板块俯冲作用减弱,在地壳-地幔均衡作用调整下,原以挤压为主的华南古陆边缘开始向张裂转化,导致新生代华南陆缘扩张、断裂、解体、沉陷,形成南海北部大陆架和大陆坡<sup>[44-45]</sup>。正是这种独特的构造格局和优越的形成条件,各种海底地貌南海北部陆架发育齐全,最为显著的是位于北部大陆边缘处发育的众多海底峡谷。它们作为陆源碎屑沉积物进入到陆坡和深海平原的重要输送通道,发挥着塑造这一带地形的重要作用。南海北部峡谷群主要由珠江口外海底峡谷、台湾西南部海底峡谷群(包括台湾海底峡谷、高屏海底峡谷、澎湖海底峡谷)、琼东南盆地中央峡谷等组成,由南海北部大陆架、大陆坡上起源发展,延伸至南海海盆中。



(a) 台湾西南海底峡谷群; (b) 珠江口海底峡谷群

图 4 南海北部海底峡谷区位置图

Fig.4 Location map of the submarine canyon groups in the northern South China Sea

### 2.1.1 台湾西南海底峡谷群

台湾岛位于沿菲律宾板块西边界的琉球岛弧与吕宋岛弧两大俯冲体系的结点上<sup>[46]</sup>(图 4)。吕宋岛弧与中国南海东北陆缘的弧陆碰撞始于晚中新世—早上新世,形成了台湾造山带<sup>[47]</sup>,是全球构造活动最强烈的地区之一,复杂的构造环境使得台湾岛以及周边海域海底地形多样化发展,发育数量众多的海底峡谷。台湾峡谷区位于南海海域东北部陆坡,与台湾造山带和东沙隆起带毗邻。其处于被动大陆边缘环境,发育显著,沿台湾岛西南活动带分布有 6 条主要海底峡谷(图 5),下面将分别对峡谷属性、形成演化过程研究进展展开论述。

台湾峡谷(又称台湾浅滩南海底峡谷、东沙东海底峡谷)全长约为 150 km,从台湾浅滩水深 200 m 处开始发育,峡谷上游垂直陆缘切割陆坡以 NW—SE 向延伸,经一海山阻隔,峡谷走向转为近 EW 向,延伸至马尼拉海沟约 3 500 m 处。台湾峡谷可以分成 3 段:上段(1 200~2 500 m),呈现明显的“V”字形下切,最大下切深度可达 1 000 m;中段(2 500~3 000 m)和下段(3 000~3 500 m)地形坡度逐渐减缓,横剖面呈“U”字形,下切深度减小为 200~300 m<sup>[48]</sup>。台湾峡谷最大下切深度为 1 200 m 左右,坡度较陡,至下部逐渐变浅,谷坡坡度也随之变缓。研究区位于韩江三角洲河口附近,陆源碎屑物供应

充足,陆架边缘沉积物不断向深海推进,在陆架前缘出现塌陷,成为峡谷形成的动力<sup>[48]</sup>。吴庐山等<sup>[49]</sup>认为华南大陆韩江断裂向东南海域延伸的 NW 向断裂影响台湾峡谷上段部分,峡谷的上段与中段间发育多条断裂带,导致峡谷出现第 1 次大的转向。下段受海底火山、盐构造或泥底辟的影响,海底峡谷发生转向<sup>[50]</sup>。徐尚等<sup>[51]</sup>认为南海东北部在末次冰期出现海平面大幅下降,导致台湾峡谷直接与陆架上河流相连,台湾峡谷接收大量陆源沉积物的搬运侵蚀作用,对峡谷的演化过程产生影响。也有研究发现台湾峡谷内有浊流发育的痕迹,由于峡谷发生转向,导致浊流溢流,产生沉积物波<sup>[52]</sup>。

澎湖海底峡谷全长约为 200 km,发源于台湾增生楔高屏陆坡和南海北部陆坡之间,向下游斜切入高屏陆坡增生楔,中轴线向南倾斜,与台湾造山带走向平行,沿 SN 向延伸进入马尼拉海沟<sup>[46]</sup>。澎湖峡谷是一多头型峡谷,上段主要由 3 个分支组成,大致沿 SN 向延伸,呈现了典型的海底峡谷地貌,峡谷两边地势相差大,坡度陡(约 8°~12°),峡谷剖面呈“V”字形。在 2 500 m 深度附近处,该峡谷存在一个扭折点,向下汇聚成一个水道并转为 NNW 走向,两边地势差别变小,坡度变缓,呈“U”字型,向南与马尼拉海沟交汇<sup>[46]</sup>。LEE 等<sup>[53]</sup>通过地震勘探,借助地震剖面在现今的澎湖峡谷以东发现了 2 个

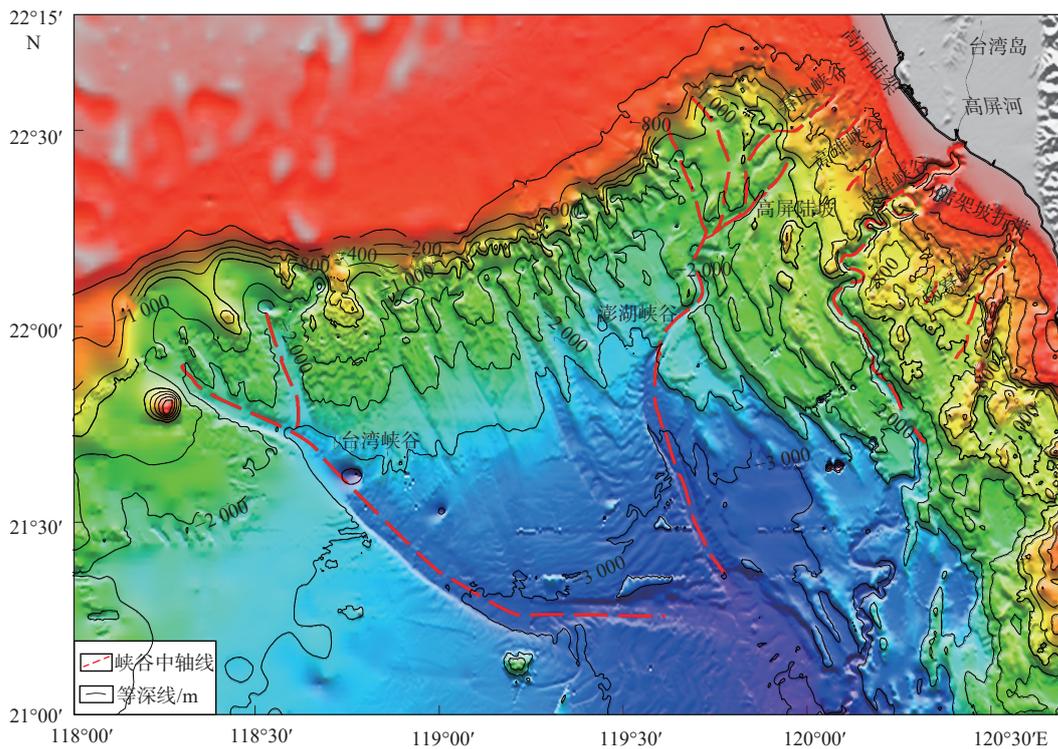


图5 台湾西南海底峡谷群位置图

Fig.5 Location map of the submarine canyon groups in the southwest Taiwan Island

上新世—更新世埋藏古峡谷遗迹,这意味着古峡谷已经向西南方向迁移到现在的澎湖峡谷所在位置。澎湖峡谷的西南迁移可能与台湾南向的弧陆碰撞有关,并伴随着逆冲前缘西向运动,因此,该峡谷被认为是一个构造控制的峡谷,具有独特的区位和走向,而不是陆坡沉降所控制的过程<sup>[28, 53-54]</sup>。丁巍伟等<sup>[55]</sup>认为澎湖海底峡谷的主体部分是马尼拉海沟向北的延伸段,由于弧陆碰撞的造山作用,发生抬升,但仍然保持凹槽状负地形。

高屏海底峡谷全长约 240 km,走向 NE—SW 向,正对东港、深切于高屏陆坡(下切深度超过 400 m),与台湾岛上河流高屏河相接,大约在 120°E、21°N 处汇入马尼拉海沟<sup>[56]</sup>。峡谷在离岸 3 km 处即达到 200 m 深度,在离岸 25 km 处,水深激增至 1 000 m 以上,峡谷蜿蜒曲折,谷壁较陡。基于高屏峡谷的走向及其与陆地间距,认为高屏峡谷头部是由陆源侵蚀作用而成的,它在更新世晚期被淹没,之后海底发生大规模运动致使其重新显露出来<sup>[57]</sup>。CHIANG 和 YU<sup>[58]</sup>提出,在洪水期,河流沉积物源附近的头部区域高密度流发生频率增加,这大幅度提高了侵蚀的频率与强度,塑造了具有高地势差的曲折峡谷谷道,曲折段受侵蚀作用影响明显,形成“V”字形的峡谷剖面。此外,河流与海底峡谷相连接,外加极端的气候条件和活跃的构造作用,有利于在峡谷

顶部形成浊流<sup>[58-59]</sup>。HSU 等<sup>[60]</sup>提出高屏海底峡谷属于海底峡谷的一种特殊类型,高屏峡谷头部与高屏河出海口十分接近,地表沉积物可以通过峡谷直接输送至大洋盆地中。高屏峡谷谷壁两侧附有大量由泥底辟带来的沉积物质,此处多发地震引发这些泥沙崩塌,从而导致浊流的发生<sup>[61]</sup>。例如,高屏峡谷头部附近的沉积物崩塌就与 2006 年台湾西南近海的屏东地震( $M_s=7.0$ )有关<sup>[62]</sup>,重力流因此形成,向下侵蚀谷道,并逐渐向上游溯源侵蚀,海底地下水排放、液化和气体逸出可能推动了这一作用<sup>[46]</sup>。

#### 2.1.2 珠江口海底峡谷群

珠江口海底峡谷群(图 4)主体位于东沙群岛以西,一统暗沙以东的区域,从构造位置上位于珠江口盆地的白云凹陷,主要包括珠江口外海底峡谷、位于一统暗沙的一统峡谷群以及位于神狐陆坡区的神狐峡谷群。珠江口盆地白云凹陷为华南大陆的水下延伸部分,是属于南部坳陷带(珠江二坳陷)的一个三级构造单元,位于南海北部陆坡中下部,是南海北部陆坡面积最大、沉积最厚的新生代构造单元,其整体上呈 NEE 向展布,水深主要介于 1 000~3 000 m 范围内<sup>[63-65]</sup>。对于珠江口盆地白云凹陷的构造演化,前人已经做过大量研究,特别是近年来研究成果发现,自始新世以来,白云凹陷区发生了大规模断陷和张裂迁移活动,形成了密集的 NWW

向白云凹陷断裂, 渐新世与中新世之间的白云运动, 使得该区域产生强烈的热沉降, 并伴随着高沉积速率的滑塌变形, 这进一步改造了断裂等负地形单元的形态, 此后, 随着南海大规模海退现象的发生, 原本处于半深海沉积环境的白云凹陷逐步发展为浅水陆架-陆坡环境, 在陆源物质不断向海运输的过程中, 浊流、滑塌等重力沉积物流对断裂等负地形不断磨蚀改造, 在南海北部陆坡发育了多个切割较深的海底峡谷群<sup>[64, 66]</sup>。

珠江口外海底峡谷又称珠江海底峡谷或珠江口外陆坡海谷, 位于东沙群岛西南部, 西沙海槽东部, 双峰海山和一统暗沙之间, 在构造上看应属于珠江口盆地白云凹陷, 是中国南海北部陆缘最大的峡谷系统(图 6)。该峡谷整体呈“S”型形态展布, 全长约 340 km, 峡谷按照其走向可划分为 3 段: 峡谷上段表现为 NW-SE 走向, 峡谷切割深度为 440 m, 谷坡坡度为 0°50', 水深 200~1 000 m, 这一段峡谷横截面为不规则形状; 中段表现为近 EW 向, 切割深度为 530 m, 谷坡坡度为 1°04', 水深 1 000~2 000 m; 下段接近深海平原处, 走向又重回 NW-SE 走向, 切割深度为 770 m, 谷坡坡度为 1°10', 水深 <2 100 m, 峡谷在水深 3 500 m 处汇入至南海海盆中<sup>[55]</sup>。峡谷中下段主要呈堆积状态, 横截面为明显的“U”字型。该峡谷谷道呈喇叭状, 在陆坡段谷道较窄, 进入深海平原后峡谷宽度急剧增加。

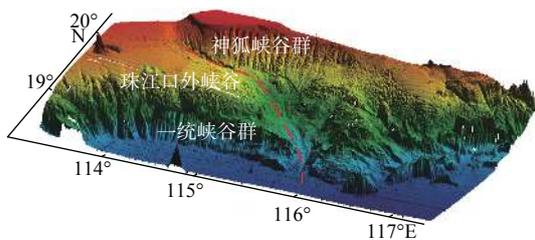


图 6 珠江口海底峡谷群位置图<sup>[67]</sup>

Fig.6 Location map of the submarine canyon groups in the Pearl River Mouth<sup>[67]</sup>

金庆焕<sup>[68]</sup>最早对珠江口外峡谷开展了研究, 主要是对峡谷的形态进行描述, 包括峡谷源头, 长度, 延伸方向, 形状变化等。柳保军等<sup>[69]</sup>将白云凹陷区域上多处峡谷的侵蚀和沉积特征进行对比, 认为珠江口外峡谷所在的区域形成的主要控制因素为盆地的古地貌背景、构造沉降、海平面变化、物源和气候变化等。ZHU 等<sup>[70]</sup>记录了白云凹陷北部陆架上的几条峡谷的形态、沉积作用和坡度的变化, 认为该峡谷的形成及沉积过程与古洋流之间存在一定的关系。郑晓东等<sup>[71]</sup>认为在 13.8 Ma 前, 珠江

口盆地曾发生大规模的海退, 使珠江口盆地白云凹陷发育了大型的海底峡谷-断裂破折型深水扇, 浊流沿谷道将碎屑物向凹陷内搬运, 在海底峡谷内充填形成浊积水道砂体, 在断裂坡折带之下快速卸载形成前积砂体。丁巍伟等<sup>[72]</sup>通过对白云凹陷区域多波束及多道地震数据的处理和分析, 得到该区域高分辨率海底地形图像和地层信息资料, 他认为珠江口外峡谷的形成主要受到海平面变化及新生代以来构造作用的控制, 白云凹陷的强烈沉降作用使该区域成为显著的负地形, 且 21 Ma 以来海平面下降至陆坡坡折带处, 古珠江不断输送物质至下陆坡及更深的盆地区域, 珠江口外峡谷得以发育。毛凯楠<sup>[73]</sup>将珠江口外峡谷体系划分了 3 个沉积模式演化阶段, 早期(23~21 Ma)峡谷水道不发育, 仅有小规模水道存在, 在白云运动(21 Ma)中, 陆架破折向北迁移使得水道被沉积体覆盖; 中期(21~11.6 Ma)水道-海底扇发育, 主干峡谷下切水道再次出现, 形成了珠江口峡谷体系的雏形; 晚期(11.6~0 Ma)海平面下降, 陆架处于暴露环境, 陆源沉积物供给充足, 最终导致了峡谷的形成。

## 2.2 蒙特利海底峡谷区

蒙特利海底峡谷区位于美国西海岸加利福尼亚州, 在板块构造上属于太平洋板块与北美板块交界处的活动构造边缘<sup>[74-75]</sup>。该区域主要受圣安德烈斯(San Andreas)和圣格雷戈里奥(San Gregorio)断层系统的右旋走滑运动控制<sup>[72]</sup>。蒙特利海底峡谷区主要切入以圣安德烈斯(San Andreas)和圣格雷戈里奥(San Gregorio)断层为界外源萨利尼安白垩纪花岗岩块体(Salinian block)<sup>[74, 76]</sup>, 构造十分复杂。蒙特利峡谷区内共发育有 6 条主要峡谷, 这些峡谷共有 16 处峡谷头部, 沿海岸线延伸 153 km, 峡谷最深可达到海平面以下 3 600 m<sup>[77-78]</sup>。GREENE 等<sup>[77]</sup>提出蒙特利峡谷区最初发育于渐新世至中新世早期(33.9~15.97 Ma), 最初形成的古峡谷经过多次沉积填充、侵蚀挖掘, 才形成了现今蒙特利峡谷区。蒙特利和卡梅尔峡谷是蒙特利峡谷区目前仅有的 2 条延伸至海岸线的峡谷, 至今仍在接收来自河流的陆缘沉积物的侵蚀。除了河流沉积物外, 蒙特利峡谷区还截留了由沿岸流和海崖局部侵蚀带来的沉积物<sup>[75, 78-79]</sup>。浊流不时携带被截留的沉积物冲刷峡谷, 并造成进一步的峡谷切口<sup>[77, 80-81]</sup>。

蒙特利海底峡谷(Monterey Canyon)位于蒙特

利海湾中央,是北美最大的海底峡谷之一,峡谷发源于加州莫斯兰丁码头(Moss Landing Wharf)附近,自东向西深切于蒙特利湾平坦的大陆架( $<1.0^{\circ}\sim 2.0^{\circ}$ )约30 km,直至水深100~140 m的大陆架边缘<sup>[82]</sup>,并最终延伸至3 km深的海底扇,全长达470 km,峡谷宽度变化很大,从峡谷头部2 km到深海扇12 km不等,最大切割深度为1 700 m<sup>[78]</sup>(图7)。蒙特利峡谷头部与陆上萨利纳斯河(Salinas River)、帕扎罗(Pajaro River)、圣洛伦佐河(San Lorenzo River)河口相接,这3条河流共同构成蒙特利海底峡谷最主要的沉积物来源<sup>[83-84]</sup>。因此,在地质历史中,蒙特利峡谷记录了沿岸构造、河流沉积物输送和深海沉积之间的关系。美国蒙特利湾海洋生物研究所(Monterey Bay Aquarium Research Institute)利用Tiburon等ROV在蒙特利湾开展生物调查已有20多年的历史,累计执行超过4 000个潜次,获得大量海底地貌、底质资料。PAULL等<sup>[39]</sup>利用这些ROV深潜资料,结合多波束数据,对发育蒙特

利峡谷谷底的小型尼克点(small knickpoints, SKP)反向弯曲底形(Reverse Curvature Bedforms, RCB),新月形底形(Crescent-Shaped Bedforms, CSB)及出露于谷底的露头进行了研究,揭示了蒙特利峡谷谷道的精细特征(图1d)。在1993—2011年近20年的时间里,美国地质调查局(USGS)与相关领域科学家在蒙特利峡谷针对现代浊流过程开展了一系列基础性研究,为解释海底峡谷内沉积物和其他颗粒物质输送的机制及浊流在维持深水峡谷中的生态系统平衡起到的作用提供了依据<sup>[85]</sup>。

CONRAD等<sup>[86]</sup>学者通过对蒙特利峡谷附近水生富含铁和锰的岩石(铁锰结壳)进行采样,并对其中的铁、钕、铅等元素的同位素采样分析,确定了蒙特利海底峡谷形成于距今约10~6.80 Ma,认为峡谷可能是由一条或多条从河流携带大量陆源沉积物留入海洋对峡谷进行不断侵蚀而成,在大约5 Ma前加利福尼亚海岸山脉的隆盛期,蒙特利峡谷基本成型。MAIER等<sup>[87]</sup>借助蒙特利湾高分辨率地震反

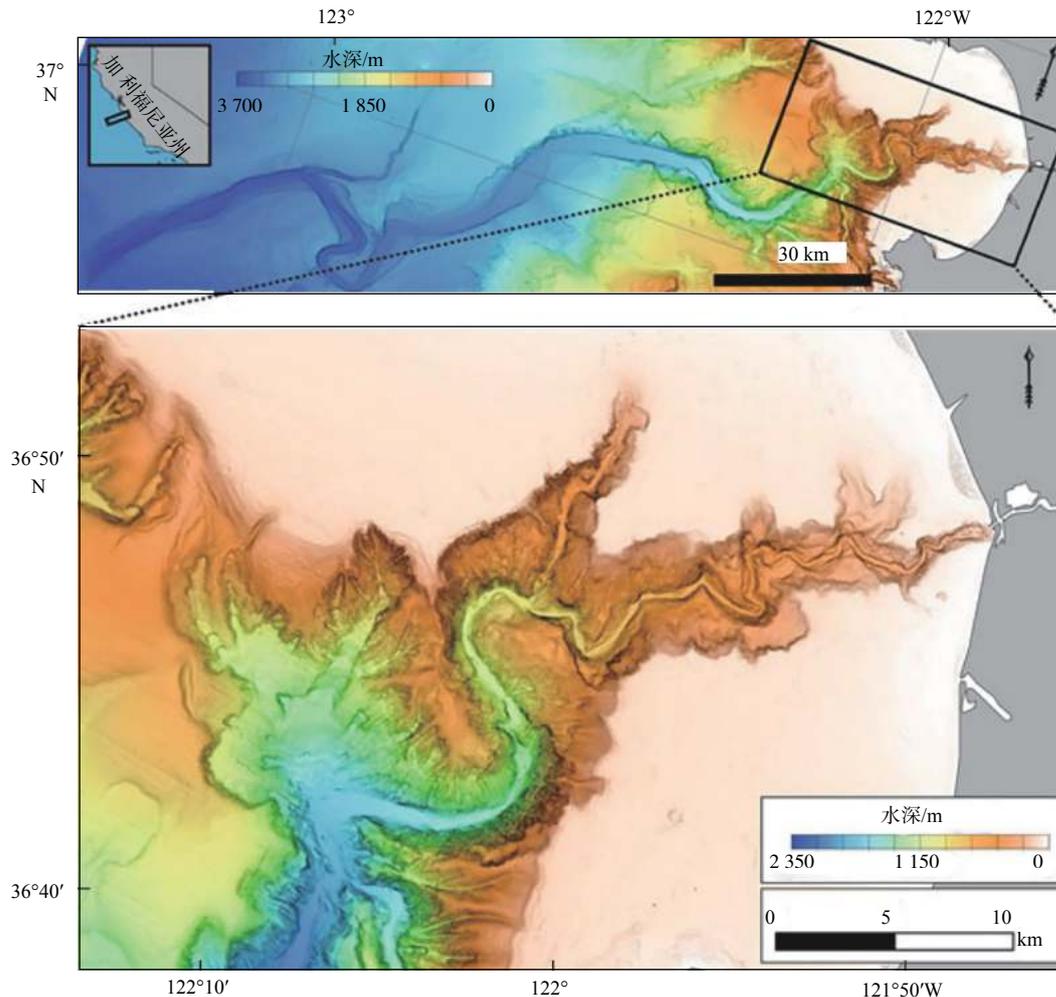


图7 美国西海岸蒙特利海底峡谷区地形图<sup>[41]</sup>

Fig.7 Topographic images of the Monterey submarine canyons along the west coast of the U.S.<sup>[41]</sup>

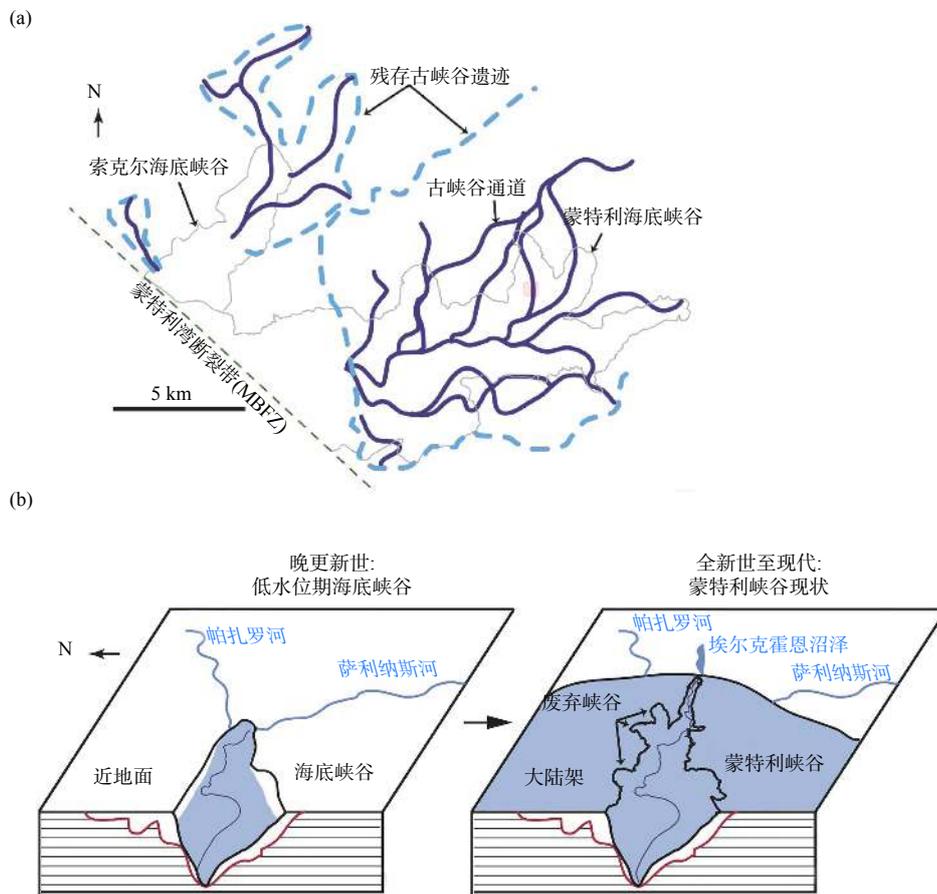
射图像, 发现在蒙特利海底峡谷头部周围的大陆架下埋藏着古峡谷遗迹, 认为更新世海平面和气候变化频度大, 峡谷头部的构造随着海平面的变化而改变, 在蒙特利陆架上发生多次迁移, 形成了分布广泛的古海底峡谷相, 伴随海岸线的变化, 峡谷遭受来自陆相沉积的侵蚀作用加剧, 逐渐塑造出当今峡谷的形态(图 8)。

通过对南海北部陆缘珠江口外海底峡谷群、台湾海底峡谷群和蒙特利海底峡谷区的分析, 对各峡谷的地貌特征、沉积结构以及形成控制因素进行了总结(表 2)。这些海底峡谷的形成、发育和演化是

一个复杂的过程, 通常是受以构造运动为特征的内营力以及河流侵蚀、重力流侵蚀、海平面变化等外营力共同作用的结果。

### 3 海底峡谷成因及演化讨论

早期主要针对海底峡谷的形态开展描述性的科学研究, 同时对海底峡谷的成因进行初步探索。SPENCER 等<sup>[30]</sup>学者提出海底峡谷的形成是地壳运动的结果。就当时对海洋演化过程的认知, 人们还不能对诸如海底峡谷这种大型海底地貌的成因



(a) 蒙特利峡谷头部演化迁移图; (b) 末次冰期后 (Post-LGM) 蒙特利峡谷演化图

图 8 蒙特利峡谷演化模式图<sup>[87]</sup>

Fig.8 Schematic evolution model of Monterey submarine canyon<sup>[87]</sup>

表 2 典型海底峡谷物理属性与演化控制因素对比<sup>[46-55, 78]</sup>

Table 2 Comparison of the physical properties and control factors among submarine canyons<sup>[46-55, 78]</sup>

海底峡谷	峡谷长度/km	弯曲度	峡谷头数量/个	剖面形态			陆缘性质	控制因素
				上段	中段	下段		
台湾峡谷	150	低, 平直	2	V型	U型	U型	被动	构造运动, 海平面升降, 河流侵蚀, 重力流侵蚀
澎湖峡谷	200	较高	3	V型	/	U型	活动	构造运动, 海平面升降, 古峡谷迁移
高屏峡谷	240	高, 蛇曲状	1	V型	V型	U型	活动	海平面升降, 河流侵蚀, 重力流侵蚀, 地震
珠江口外峡谷	340	低, 平直	1	U型	U型	U型	被动	构造运动, 海平面升降, 河流侵蚀
蒙特利峡谷	470	高, 蛇曲状	1	V型	V型	U型	活动	河流侵蚀, 古峡谷迁移, 海平面升降

进行解释,因此认为海底峡谷的出现是由于海平面的变化,使陆架暴露于海平面之上,经过一定时间的河流侵蚀作用形成峡谷后,海平面再次发生变化,使其没于海平面之下,成为海底峡谷<sup>[33]</sup>,或者发生灾难性的海底事件是海底峡谷必不可少的成因,如海啸波侵蚀作用<sup>[32]</sup>。但是,尽管有证据表明,在更新世海平面较低的时期,一些海底峡谷的头部露出海平面,但在始终低于海平面的峡谷中下游,是如何遭受到河流侵蚀的却不得而知。直到 DALY<sup>[1]</sup>和 KUENEN<sup>[88]</sup>提出富含沉积物的重力流是海底峡谷形成的重要原因,后经近一个世纪的深海地层学、沉积学和地貌学的研究,浊流成因是目前海底峡谷形成演化的主要模型。

在对全球海底峡谷识别分类的过程中, HARRIS 等<sup>[7]</sup>对海底峡谷的演化进行了初步的解释,他认为峡谷的演化主要受2个独立的过程驱动:①滑坡、斜坡失稳及其他块体搬运事件;②发端于河流、陆架或上陆坡的侵蚀型浊流。这2种过程或者独立发挥作用或者联合起来共同影响峡谷的形成演化。但在成因研究方面,学者更多的是对单条或一处峡谷群进行成因解释。

随着科学技术的进步,众多学者开始借助先进的声学设备对全球众多海底峡谷开展峡谷成因演化研究。LASTRAS 等<sup>[89]</sup>借助多波束测深系统和侧扫声呐对葡萄牙中央峡谷的地貌及侵蚀特征研究发现,峡谷间形态差异主要是由沉积运输驱动机制控制,将峡谷分为3种类型:①低海平面时期,海底峡谷与陆上河流直接连接,沉积物直接由陆向海沿峡谷搬运并不断侵蚀增大;②高海平面时,峡谷顶部汇聚沿岸高密度沉积物形成密度流并向深海侵蚀移动;③陆坡上形成的早期不稳定滑塌体,不断向上游方向溯源侵蚀,逐步达到陆架坡折之上,并进一步向陆架上延伸。MOUNTJOY 等<sup>[90]</sup>通过天然地震及探测数据对位于新西兰北岛希库兰古俯冲带上的峡谷、通道进行研究,认为虽然大陆边缘的重力流的侵蚀可以塑造海底峡谷,但在活动大陆边缘,由地震引发的峡谷冲蚀作用是驱动沉积物和有机质从陆地运移至海洋的主要方式,是漫长地质时间尺度上峡谷地貌变化及其长期发展的重要驱动力。

此外,周家乐<sup>[91]</sup>就海底峡谷成因提出了不同的观点,他认为河流和浊流等因素仅对海底峡谷的外貌产生影响,但并不是峡谷的主要成因。他认为不同类型特征的海底峡谷是由不同形式的板块运

动造成的。根据不同板块运动的形式,他将海底峡谷分为3类:地槽型海底峡谷,错位型海底峡谷,张裂型海底峡谷。

通过总结前人对全球范围内海底峡谷的研究,本文将海底峡谷的主控成因及其演化类型分为以下3大类:

(1)强侵蚀型 在冰期期间,海平面下降,海浪将河流三角洲、陆架或上陆坡上的大量的泥沙卷入海水中,近岸海水密度增大,在海流的作用下形成高密度流,它沿陆坡顺势而下,势能不断减小,动能逐渐增加,不断侵蚀着陆坡及海底面,切割出如今海底峡谷的形态。另外,潮汐控制的底流、沿岸流也是塑造这一类型峡谷的主要力量。自1936年 DALY<sup>[1]</sup>通过现场观测提出富含沉积物的重力流是海底峡谷形成的重要原因的假想,后 KUENEN<sup>[88]</sup>于1937年通过室内模拟证明了 DALY<sup>[1]</sup>假想的正确性。经过近一个世纪科学家不断的现场考察与室内模拟验证,证明了这种方式的存在及普遍性。这类海底峡谷主要分布于侵蚀流多发的大陆架上,陆坡上的峡谷则较少由此成因发育而来。

(2)河流侵蚀型 在地质历史时期,由河流侵蚀切割形成的陆上峡谷,随着海平面上升或者地壳沉降,峡谷被海水覆盖,成为海底峡谷。随着河流改道或者河流断流,河流对这类海底峡谷的塑造作用逐渐减弱,重力流与沿岸流等海底侵蚀流开始取代河流的作用,对海底峡谷的演化发挥作用。此外,这类海底峡谷中有一部分现今仍与河流相连,河流在海底峡谷的塑造演化过程中仍发挥有作用,但这类峡谷在数量上较少,据 HARRIS 等<sup>[7]</sup>统计,与陆上河流系统相接且属于陆架切割型的峡谷数量占全球峡谷总数仅2.62%。位于北美西海岸的 Eel 海底峡谷与陆上 Eel 河流相连<sup>[92]</sup>、西班牙 Guadiaro 峡谷与陆上 Guadiaro 河流相连<sup>[93]</sup>、智利 Biobio 峡谷与陆上 Biobio 河流相连<sup>[94]</sup>,这些峡谷被认为是在低海平面时期陆上河流在陆架上的延伸,后海平面上升将其淹没所形成的。

(3)构造作用及溯源侵蚀型 新生代以来的各种构造活动作用如海底的扩张活动、海山侵蚀、断层、褶皱或底辟等,以及由大的构造运动所引发的地震、海啸、滑坡、斜坡失稳等地质灾害,这些构造活动会在陆坡上形成不稳定滑塌体,并引起大规模的溯源侵蚀作用,最终成为海底峡谷。除构造作用外,陆坡沉积物的物理力学性质、所处地形条件、是否存在软弱层等陆坡内在条件及水动力条件、全球气候

变化、人为因素等外在触发因素同样可以导致海底滑塌的形成<sup>[95]</sup>, 当这种滑塌达到一定规模并出现溯源侵蚀的现象时, 海底峡谷的形成条件便趋于完整。这类峡谷主要出现在受重力流影响较小的陆坡上(图 9)。如在 Diepgat 峡谷头部有明显的下切峡谷和突出的半圆形滑塌结构, 被认为是在滑塌作用下形成的<sup>[96]</sup>; 海山俯冲下形成的智利前弧 San Antonio 峡谷<sup>[97]</sup>; 新生代构造作用及海平面变化的控制, 再加上中新世以来白云凹陷强烈的沉降作用, 多重作用下形成的珠江口外海底峡谷<sup>[72]</sup>; 位于意大利卡拉布里亚 Cirò 港外的 Cirò 峡谷被认为是海底滑塌事件经溯源侵蚀所形成的<sup>[98]</sup>。

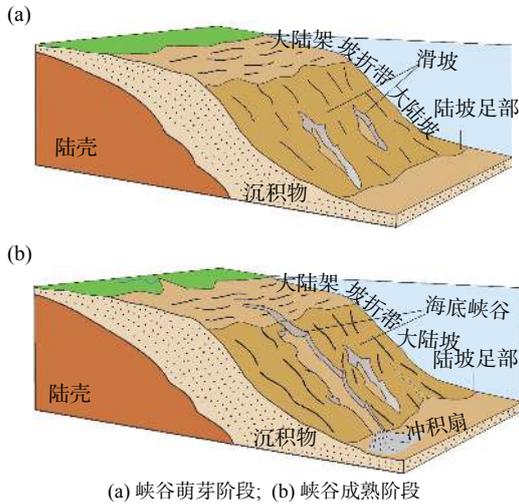


图 9 构造作用及溯源侵蚀型海底峡谷演化模式图  
Fig.9 Evolution models of the submarine canyon of tectonic-headward erosional type

上述分类方法是依据峡谷的主要成因, 但一条海底峡谷的形成绝非是单一成因, 而是在多方因素共同作用下形成的。例如位于印度洋东北部的印度海底峡谷与陆上印度河相连, 自全新世以来, 该区域海平面发生多次升降, 峡谷的沉积过程与沉积物随之发生变化, 表现出明显的对应关系: ①海平面下降导致海岸侵蚀加剧, 在波浪作用下形成的浊流顺地势向海侵蚀, 形成陆上侵蚀谷地, 陆缘沉积物在陆架边缘斜坡、谷道内、冲积扇沉积, 这一阶段峡谷演化控制因素主要为强侵蚀型, 同时在低海平面阶段, 峡谷内沉积物被不断侵蚀切割, 谷道内阶地发育, 冲积扇继续沉积发育; ②高海平面期, 重力流侵蚀作用变弱, 陆架斜坡、冲积扇沉积随之衰减, 与陆上印度河相连接, 此阶段主要受陆上河流的侵蚀作用影响。同时周期性的洪水暴发会带来短时间内的强侵蚀流, 在峡谷的演化中发挥作用<sup>[99]</sup>

(图 10)。此外, 关于海底峡谷的多重成因精细化耦合还有待进一步探索。

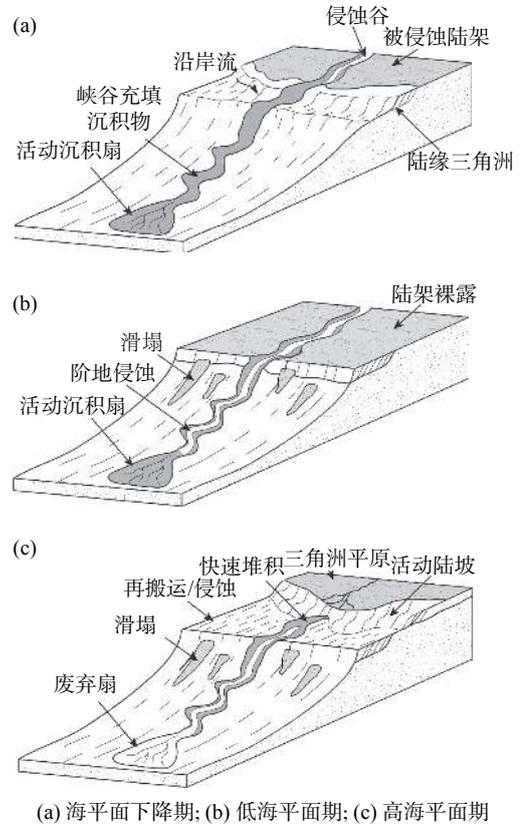


图 10 印度峡谷对海平面变化的响应模式图<sup>[91]</sup>  
Fig.10 Schematic response models of the Indus Canyon to sea level changes<sup>[91]</sup>

#### 4 结论与展望

海底峡谷作为一种常见又具有特殊沉积动力背景的海底地貌, 其形成演化记录着丰富的海平面变化、古气候变迁及区域构造演变信息, 是未来深海矿产油气资源极具潜力的勘探区域, 受到海洋学界广泛的关注。本文主要总结了全球范围内海底峡谷的分类方法及构造特征, 并对全球多个较大型峡谷区进行分析和对比, 总结了 5 条典型的海底峡谷(台湾海底峡谷、澎湖海底峡谷、高屏海底峡谷、珠江口外海底峡谷、蒙特利海底峡谷)的区位构造及控制因素, 并提出了对海底峡谷主控成因演化的通用分类方法: ①强侵蚀型海底峡谷, 不同时期的重力流是塑造峡谷的主体力量, 主要分布在陆架上; ②河流侵蚀型海底峡谷, 过去或现今与河流连接, 直接接受陆源侵蚀所形成, 主要分布在陆架或陆架陆坡上; ③构造作用及溯源侵蚀型海底峡谷, 不同活动构造直接或间接对海底产生破坏, 再加上溯源

侵蚀作用,沟槽逐渐演变成海底峡谷,主要分布于陆坡上。

近年来国际海底峡谷体系研究具有以下发展趋势:①提高声学探测技术手段分辨率。目前了解海底峡谷地形及结构主要探测手段有多波束测深技术及地震探测技术,提高声学资料的分辨率可以为准确识别地貌及特征和海底面下构造提供坚实技术保障。②针对海底峡谷多种成因机制耦合的研究。峡谷的成因和演化无法使用单一控制因素进行合理的解释,可以借助当今数值模拟等手段将峡谷起源到现今状态的演化全过程“还原”出来,同时对海底峡谷所处区位的地质历史也要有充分的认识和理解。③在海底峡谷形成过程重建方面进行新的探索。目前针对海底峡谷的研究大部分是对一条或数条峡谷开展,对于不同种类峡谷的形成过程重建是一项新的领域,可以更精准直观的将峡谷的形成及演化模拟出来。对海底峡谷系统的研究不仅可以提供古气候演变、海平面变化和区域构造演化信息,提升对大陆边缘源—汇系统演变过程的认识,还能对远洋深水区富藏储层预测及油气勘探提供有力的支持。

#### 参考文献:

- [1] DALY R A. Origin of submarine “canyons” [J]. *American Journal of Science*, 1936, 31(186): 401-420.
- [2] SHEPARD F P. *Submarine geology*[M]. New York: Harper and Row, 1963.
- [3] NORMARK W R, CARLSON P R. Giant submarine canyons: is size any clue to their importance in the rock record?[M]/CHAN M A, ARCHER A W. *Extreme depositional environments: mega end members in geologic time: Boulder, Colorado*, Geological Society of America Special Paper 370, 2003: 175-190.
- [4] NEUENDORF K K E, MEHL J P Jr, JACKSON J A. *Glossary of geology*[M]. Virginia: American Geological Institute, 2005.
- [5] CARLSON P R, KARL H A. Development of large submarine canyons in the Bering Sea, indicated by morphologic, seismic, and sedimentological characteristics[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(10): 1594-1615.
- [6] 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.
- [7] HARRIS P T, MACMILLAN-LAWLER M, RUPP J, et al. Geomorphology of the oceans[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 4-24.
- [8] KHRIPOUNOFF A, VANGRIESHEIM A, CRASSOUS P, et al. High frequency of sediment gravity flow events in the Var submarine canyon (Mediterranean Sea)[J]. *Marine Geology*, 2009, 263(1/4): 1-6.
- [9] DE STIGTER H C D, JESUS C C, BOER W, et al. Recent sediment transport and deposition in the Lisbon-Setúbal and Cascais submarine canyons. Portuguese Continental Margin[J]. *Deep Sea Research II: Topical Studies Oceanography*, 2011, 58(23/24): 2321-2344.
- [10] PIERDOMENICO M, CASALBORE D, CHIOCCI F L. The key role of canyons in funnelling litter to the deep sea: a study of the Gioia Canyon (Southern Tyrrhenian Sea)[J]. *Anthropocene*, 2020, 30: 100237.
- [11] 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.
- [12] ZHU W L, ZHONG K, LI Y C, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea deepwater basins[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57: 3121-3129.
- [13] WEIMER P, SLATT R M, Bouroulllec R. *Introduction to the petroleum geology of deepwater settings*[M]. Tulsa: AAPG and Datapages, 2007.
- [14] 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.
- [15] 苏明, 沙志彬, 匡增桂, 等. 海底峡谷侵蚀-沉积作用与天然气水合物成藏[J]. *现代地质*, 2015, 29(1): 155-162.
- [16] 刘海龄, 吴世敏, 魏常兴, 等. 论河口海底淡水资源的形成[J]. *自然资源学报*, 1998, 13(4): 364-367.
- [17] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s): deep-water processes and facies model: a critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.
- [18] HASIOTIS T, PAPTAEODOROU G, FERENTIONS G. A high resolution approach in the recent sedimentation processes at the head of Zakynthos Canyon, western Greece[J]. *Marine Geology*, 2005, 214(1/3): 49-73.
- [19] LI G, PIPER D J W, CAMPBELL D C, et al. Turbidity deposition and the development of canyons through time on an intermittently glaciated continental margin: the Bonanza Canyon system, offshore eastern Canada[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 29(1): 90-103.
- [20] MASLIN M, OWEN M, DAY S, et al. Linking continental slope failures and climate change: testing the clathrate gun hypothesis[J]. *Geology*, 2004, 32(1): 53-56.
- [21] MOSHER D C, PIPER D J. Analysis of multibeam seafloor imagery of the Laurentian Fan and the 1929 Grand Banks landslide area, submarine mass movements and their consequences[M]/LYKOUSIS V, SAKELLARIOU D, LOCAT J. *Submarine mass movements and their consequences*. Dordrecht: Springer, 2007: 77-88.
- [22] HUVENNE V A I, DAVIES, J S. Towards a new integrated ap-

- proach to submarine canyon research[J]. *Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 104: 1-5.
- [23] HE Y L, XIE X N, KNELLER B C, et al. Architecture and controlling factors of canyon fills on the shelf margin in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 41: 264-276.
- [24] ARZOLA R G, WYNN R B, LASTRAS G, et al. Sedimentary features and processes in the Nazare and Setubal submarine canyons, west Iberian margin[J]. *Marine Geology*, 2008, 250(1/2): 64-88.
- [25] SHEPARD F P, DILL R F. Submarine canyons and other sea valleys[M]. Chicago: Rand McNally, 1966: 381.
- [26] 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.
- [27] JOBE Z R, LOWE D R, UCHYTI S J. Two fundamentally different types of submarine canyons along the continental margin of Equatorial Guinea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 28(3): 843-860.
- [28] CHIANG C, HSIUNG K, YU H, et al. Three types of modern submarine canyons on the tectonically active continental margin offshore southwestern Taiwan[J]. *Marine Geophysical Research*, 2020, 41(1): 4.
- [29] LINDENKOHL A. Geology of the sea-bottom in the approaches to New York Bay[J]. *American Journal of Science*, 1885, 29: 475-480.
- [30] SPENCER J W. The submarine great canyon of the Hudson River[J]. *American Journal of Science*, 1905, 19(109): 1-15.
- [31] SHEPARD F P. Landslide modifications in submarine valleys[J]. *EOS, Transaction American Geophysical Union*, 1932, 13(1): 226-230.
- [32] BUCHER W H. Submarine valleys and the related geologic problems of the North Atlantic[J]. *Geological Society America Bulletin*, 1940, 51: 489-512.
- [33] VEATCH A C, SMITH P A. Atlantic submarine valleys of the United States and the Congo submarine valley[J]. *Geological Society of America special papers*, 1939, 7: 106.
- [34] TAYLOR B, SMOOT N C. Morphology of Bonin fore-arc submarine canyons[J]. *Geology*, 1984, 12: 724-727.
- [35] 彭大钧, 陈长民, 庞雄, 等. 南海珠江口盆地深水扇系统的发现[J]. *石油学报*, 2004(5): 17-23.
- [36] AMBLAS D, CANALS M, GERBER T P. The long-term evolution of submarine canyons: insights from the NW Mediterranean[M]//CERAMICOLA S, AMARO T, AMBLAS D, et al. Submarine canyon dynamics in the Mediterranean and tributary seas: an integrated geological, oceanographic and biological perspective. Monaco: CIESM Publisher, 2015: 171-181.
- [37] WILLE P C. Sound Images of the Ocean in Research and Monitoring[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [38] HARRIS P T, BARRIE J V, CONWAY K W, et al. Hanging canyons of Haida Gwaii, British Columbia, Canada: fault-control on submarine canyon geomorphology along active continental margins[J]. *Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 2014, 104(1): 83-92.
- [39] PAULL C K, CARESS D W, WILLIAM USSLER I, et al. High-resolution bathymetry of the axial channels within Monterey and Soquel submarine canyons, offshore central California[J]. *Geosphere*, 2011, 7(5): 1077-1101.
- [40] HUANG Z, NICHOL S L, HARRIS P T, et al. Classification of submarine canyons of the Australian continental margin[J]. *Marine Geology*, 2014, 357: 362-383.
- [41] AMBLAS D, CERAMICOLA S, GERBER T P, et al. Submarine Canyons and Gullies[M]//MICALLEF A, KRASTEL S, SAVINI A. Submarine Geomorphology. Switzerland: Springer Geology, 2018: 251-272.
- [42] 赵家斌, 钟广法. 构造活动对海底峡谷地貌形态的影响[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(12): 1-13.
- [43] 罗伟东, 周娇, 李学杰, 等. 南海海盆盆地西峡谷的形态与结构及形成演化[J]. *地球科学*, 2018, 43(6): 2172-2183.
- [44] TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 10(12): 611-616.
- [45] BRIAIS A, PATRIAT P, TAPPONNIER P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the south China Sea: implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [46] CHUANG C Y, YU H S. Morphology and canyon forming processes of upper reach of the Penghu submarine canyon off southwestern Taiwan[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2002, 13(1): 91-108.
- [47] SUPPE J. Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan[J]. *Geological Society of China Memoir*, 1981, 4: 67-89.
- [48] 徐尚, 王英民, 彭学超, 等. 台湾峡谷的成因及其对沉积的控制[J]. *中国科学(地球科学)*, 2014, 44: 1913-1924.
- [49] 吴庐山, 鲍才旺. 南海东北部海底潜在地质灾害类型及其特征[J]. *南海地质研究*, 2000, 12: 87-101.
- [50] CHIANG C S, YU H S. Morphotectonics and incision of the Kaoping submarine canyon, SW Taiwan orogenic wedge[J]. *Geomorphology*, 2006, 80: 199-213.
- [51] 徐尚, 王英民, 彭学超, 等. 台湾峡谷HD133和HD77柱状样的沉积构成和发育背景[J]. *沉积学报*, 2013, 31(2): 325-330.
- [52] 蔡庆辉. 南海北部地壳构造与深海沉积物波之研究[D]. 台北: 国立中央大学, 2006.
- [53] LEE T Y, HSU Y Y, TANG C H. Structural geology of the deformed front between 22° N and 23° N and migration of the Penghu canyon, offshore southwestern Taiwan arc-continent collision zone[R]. International Conference and Third Sino-French Symposium on Active Collision in Taiwan (extended abstract), 1995, 219-227.
- [54] YU H S, HONG E. Shifting submarine canyons and development of a foreland basin in SW Taiwan: controls of foreland

- sedimentation and longitudinal transport[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(6): 922-932.
- [55] 丁巍伟,李家彪,李军. 南海北部陆坡海底峡谷形成机制探讨[J]. *海洋学研究*, 2010, 28(1): 26-31.
- [56] 戚筱俊. 台湾海峡地形、地质及地震概述[J]. *西部探矿工程*, 1999, 11(4): 6-8.
- [57] YU H S, HUANG C S, KU J W. Morphology and possible origin of the Kaoping submarine canyon head of southwest Taiwan[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1991, 27: 40-50.
- [58] CHIANG C S, YU H S. Sedimentary erosive processes and sediment dispersal in Kaoping submarine canyon[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(2): 259-271.
- [59] YU H S, CHANG T Y. Links among slope morphology, canyon types and tectonics on passive and active margins in the northernmost South China Sea[J]. *Journal of Earth Sciences*, 2009, 20: 77-84.
- [60] HSU H H, LIU C S, YU H S, et al. Sediment dispersal and accumulation in tectonic accommodation across the Gaoping Slope, offshore Southwestern Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69: 26-38.
- [61] CHEN S C, TSAI C H, HSU S K, et al. Fangliao Slide: a large slope failure in the upper Kaoping Slope of southwest Taiwan[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2018, 29: 17-30.
- [62] HSU S K, KUO J, LO C L, et al. Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung earthquake of SW Taiwan[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19: 767-772.
- [63] 孙珍, 庞雄, 钟志洪, 等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J]. *地质前缘*, 2005, 12(4): 489-498.
- [64] 苏明, 解习农, 王振峰, 等. 南海北部琼东南盆地中央峡谷体系沉积演化[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 467-478.
- [65] ZHU J, LI J, SUN Z, et al. Crustal thinning and extension in the northwestern continental margin of the South China Sea[J]. *Geological Journal*, 2016, 51: 286-303.
- [66] 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.
- [67] HAN X B, LI J B, CHU F Y, et al. Geomorphology and tectonic interpretation of Zhujiang Submarine Canyon, in the northern South China Sea[C]//OCEANS'10 IEEE. Sydney: 2010: 1-4.
- [68] 金庆煊. 南海地质与油气资源[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 84-111.
- [69] 柳保军, 袁立忠, 申俊, 等. 南海北部陆坡古地貌特征与13.8 Ma以来珠江深水扇[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 476-482.
- [70] ZHU M, GRAHAM S, PANG X, 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: 307-319.
- [71] 郑晓东, 朱明, 何敏, 等. 珠江口盆地白云凹陷荔湾深水扇砂体分布预测[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(5): 529-533.
- [72] 丁巍伟, 李家彪, 李军, 等. 南海珠江口外海底峡谷形成的控制因素及过程[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(6): 63-72.
- [73] 毛凯楠. 珠江口外峡谷体系内部构成特征及沉积模式[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2015.
- [74] ANIMA R J, EITREIM S L, EDWARDS B D, et al. Nearshore morphology and late Quaternary geologic framework of the northern Monterey Bay Marine Sanctuary[J]. *California Marine Geology*, 2002, 181(1/3): 35-54.
- [75] EITREIM S L, ANIMA R J, STEVENSON A J. Seafloor geology of the Monterey Bay area continental shelf[J]. *Marine Geology*, 2002, 181(1): 3-34.
- [76] BARBEAU D L, DUCEA M N, GEHRELS G E, et al. U-Pb detrital-zircon geochronology of northern Salinian basement and cover rocks[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(3/4): 466-481.
- [77] GREENE H G, HICKS K R. Ascension-Monterey Canyon system: history and development[M]//GARRISON R E. *Geology and tectonics of the central California coast region: San Francisco to Monterey*. California, College Station: Pacific Section AAPG, 1990: 229-250.
- [78] GREENE H G, MAHER N M, PAULL C K. Physiography of the Monterey Bay National Marine Sanctuary and implications about continental margin development[J]. *Marine Geology*, 2002, 181(1): 55-82.
- [79] BEST T C, GRIGGS G B. A sediment budget for the Santa Cruz littoral cell[M]. California: Society for Sedimentary Geology Special Publication, 1991.
- [80] COVAULT J A, NORMARK W R, ROMANS B W, et al. Highstand fans in the California borderland: the overlooked deep-water depositional system[J]. *Geology*, 2007, 35: 783-786.
- [81] PAULL C K, USSLER W, GREENE H G, et al. Caught in the act: the 20 December 2001 gravity flow event in Monterey Canyon[J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 22(4): 227-232.
- [82] DARTNELL P, MAIER K L, ERDEY M D, et al. California State Waters Map Series-Monterey Canyon and Vicinity[R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2016-1072, 2016.
- [83] INMAN D L, JENKINS S A. Climate change and the episodicity of sediment flux of small California rivers[J]. *The Journal of Geology*, 1999, 107(3): 251-270.
- [84] FARNSWORTH K L, WARRICK J A. Sources, dispersal, and fate of fine sediment supplied to coastal California[R]. U. S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2007-5157, 2007.
- [85] 徐景平. 科学与技术并进: 近20年来海底峡谷浊流观测的成就和挑战[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(5): 552-558.
- [86] CONRAD T A, NIELSEN S G, PEUCKER-EHRENBRINK B, et al. Reconstructing the evolution of the submarine Monterey Canyon System from Os, Nd, and Pb isotopes in hydrogenetic Fe-Mn crusts[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2017, 18(11): 3946-3963.
- [87] MAIER K L, JOHNSON S Y, PATRICK H. Controls on submarine canyon head evolution: Monterey Canyon, offshore cent-

- ral California[J]. *Marine Geology*, 2018, 404: 24-40.
- [88] KUENEN P H. Experiments in connection with Daly's hypothesis on the formation of submarine canyons[J]. *Leidse Geologische Mededelingen*, 1937, 8: 327-335.
- [89] LASTRAS G, ARZOLA R G, MASSON D G, et al. Geomorphology and sedimentary features in the central portuguese submarine canyons, Western Iberian Margin[J]. *Geomorphology*, 2009, 103(3): 310-329.
- [90] MOUNTJOY J J, HOWARTH J D, ORPIN A R, et al. Earthquakes drive large-scale submarine canyon development and sediment supply to deep-ocean basins[J]. *Science Advances*, 2018, 4: 3748.
- [91] 周家乐. 海底峡谷成因新探[J]. *海洋湖沼通报*, 1991(4): 53-56.
- [92] MULLENBACH B L, NITTROUER C A, PUIG P, et al. Sediment deposition in a modern submarine canyon: Eel Canyon, northern California[J]. *Marine Geology*, 2004, 211(1): 101-119.
- [93] PALANQUES A, EL KHATAB M, PUIG P, et al. Downward particle fluxes in the Guadiarosubmarine canyon depositional system (north-western Alboran Sea), a river flood dominated system[J]. *Marine Geology*, 2005, 220(1/4): 23-40.
- [94] SOBARZO M, FIGUEROA M, DJURFCLDT L. Upwelling of subsurface water into the rim of the Biobio submarine canyon as a response to surface winds[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(3): 279-299.
- [95] 朱超祁, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 海底滑坡分类及成因机制研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 153-163.
- [96] GREEN A, UKEN R. Submarine landsliding and canyon evolution on the northern KwaZulu-Natal continental shelf, South Africa, SW Indian Ocean[J]. *Marine Geology*, 2008, 254(3/4): 152-170.
- [97] 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.
- [98] CERAMICOLA S, PRAEG D, COSTE M, et al. Submarine Mass-Movements Along the Slopes of the Active Ionian Continental Margins and Their Consequences for Marine Geohazards (Mediterranean Sea)[M]//KRSTEL S, BEHRMANN J H, VÖLKER D, et al. Submarine mass movements and their consequences. Heidelberg: Springer, Cham, 2014, 37: 295-306.
- [99] CLIFT P D, GIOSAN L, HENSTOCK T J, et al. Sediment storage and reworking on the shelf and in the Canyon of the Indus River-Fan System since the last glacial maximum[J]. *Basin Research*, 2014, 26(1): 183-202.

## ORIGIN AND EVOLUTION OF SUBMARINE CANYONS

WANG Changsheng<sup>1,2</sup>, ZHU Junjiang<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Dongdong<sup>3</sup>, YANG Guoming<sup>1,2</sup>, XIONG Zixiang<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Shengsheng<sup>1,2</sup>, LI Sanzhong<sup>1,2</sup>, JIA Yonggang<sup>4</sup>

(1 Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE and College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3 Qingdao Geological Exploration Institute, China Metallurgical Geology Bureau, Qingdao 266109, China; 4 Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Submarine canyons, the most remarkable landforms around the sea-land boundaries characterized by deep grooves, are globally distributed on continental margins. As the major vehicles for transportation of terrigenous clastic materials from land to deep sea, they are the key sites to study the regional source-sink systems, sea level fluctuations, tectonic evolution, and formation and accumulation of submarine oil and gas resources. This paper is devoted to the origin and evolution of submarine canyons on a global scale. Firstly, we briefly introduced the key research results of submarine canyons on the earth. Secondly, we summarized the regional structural background and origin of submarine canyon group in the northern South China Sea and Monterey Gulf. Thirdly, based on the major control factors, we described three types of submarine canyons: the strong-erosional type, the river-related erosional type, and the tectonic-headward-erosional type. Some new ideas are included for the classification of submarine canyons, exploration of deep water resources, and further study of paleoclimatic and tectonic evolutionary models.

**Key words:** submarine canyons; types of canyons; evolution of canyons; canyon group in the northern South China Sea; Monterey submarine canyons