



## 南海深水沉积过程之大洋钻探目标

姜涛, 陈慧, 孙启良, 田冬梅, 程聪

### Deep water sedimentary processes in South China Sea and proposed scientific drill targets

JIANG Tao, CHEN Hui, SUN Qiliang, TIAN Dongmei, and CHENG Cong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062802>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姜涛, 陈慧, 孙启良, 等. 南海深水沉积过程之大洋钻探目标 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 33-41.

JIANG Tao, CHEN Hui, SUN Qiliang, et al. Deep water sedimentary processes in South China Sea and proposed scientific drill targets[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 33-41.

# 南海深水沉积过程之大洋钻探目标

姜涛<sup>1</sup>, 陈慧<sup>2</sup>, 孙启良<sup>1</sup>, 田冬梅<sup>1</sup>, 程聪<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)海洋地质资源湖北省重点实验室, 武汉 430074

2. 中山大学海洋学院, 珠海 519082

**摘要:** 多个航次的大洋钻探已经在南海成功实施, 航次科学目标主要聚焦于古海洋、海盆形成过程以及岩石圈破裂过程等, 遭遇了多种类型的深水沉积物, 而且近些年来的物理海洋调查也已证实了其复杂的深水沉积动力环境, 尤其是南海北部陆缘区海底地形地貌复杂, 发育了深水水道、块体流等重力流沉积以及多种类型的等深流沉积。南海独特的构造环境和复杂底流活动所导致的不同深水沉积体系类型和丰富的沉积记录, 使南海北部陆缘区成为研究深海沉积过程的最佳场所。通过对 2—3 个剖面多站位不同地形地貌条件下多类型深水沉积物的钻探对比分析, 将有助于深刻理解重力流-底流相互作用特征, 揭示块体流、浊流和底流形成和发育演化过程, 查明岩石圈破裂和海底扩张的沉积响应等科学问题, 丰富深水沉积动力学理论, 深化对南海大陆边缘沉积格局演变和深层海流演变整体性和全面性认识。

**关键词:** 大洋钻探; 深水沉积过程; 重力流沉积; 底流沉积; 裂解层序; 南海

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062802

## Deep water sedimentary processes in South China Sea and proposed scientific drill targets

JIANG Tao<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>, SUN Qiliang<sup>1</sup>, TIAN Dongmei<sup>1</sup>, CHENG Cong<sup>1</sup>

1. Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

**Abstract:** Several oceanic drilling expeditions in the South China Sea (SCS) have disclosed various types of deep water sediments. The scientific objectives of the expeditions focus mainly on the paleoceanography, the formation of SCS, and the break-up processes. In addition, oceanography surveys have confirmed its complex deep-water sedimentary dynamic environment, especially in the northern continental margin of the SCS with complex submarine topography, submarine canyons, mass-transport deposit (MTDs), and various types of contourites. Its unique tectonic environment and complex current patterns result in the development of many types of deep-water sedimentary systems, making the northern South China Sea the best place to study deep-sea sedimentary processes and their interactions. By comparing and analyzing 2—3 multi-station profiles would help deep understanding of the characteristics of bottom currents and their interaction with gravity flows, processes of MTDs, turbidity currents, and bottom currents, as well as marginal basin break-up and spreading. Proposed ocean drilling programs will promote development of the theory on deep water sedimentary dynamics in terms of the evolution of sedimentary patterns and bottom currents in the northern South China Sea.

**Key words:** ocean drilling; deep-water sedimentary process; gravity flow; bottom current; breakup sequence; South China Sea

深水沉积体系的研究不仅丰富了古海洋、古气候、海洋构造演化和物理海洋的信息, 而且对深水油气勘探开发具有巨大经济意义, 深水沉积体系研究已成为当今国际沉积学界的研究热点<sup>[1]</sup>。深水环境中主导性的沉积机制为重力流和底流作

用, 顺坡的重力驱动形成海底扇等重力流沉积物, 平行陆坡发育的持续底流活动可形成等深流沉积<sup>[2]</sup>。

南海由于其独特的构造环境和复杂海流样式形成了不同深水沉积体系类型和丰富的沉积记录

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“海绵骨针释光年代学探索及其对晚更新世以来南极绕极流演化的制约”(41976073), “Naturaliste 海台基底玄武岩中碳酸盐岩脉特征及其对冈瓦纳大陆裂解过程的制约”(42276073)

**作者简介:** 姜涛(1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋地质与资源和海洋沉积物释光测年的教学和科研工作, E-mail: taojiang@cug.edu.cn

**收稿日期:** 2022-06-28; **改回日期:** 2022-08-21. 文凤英编辑

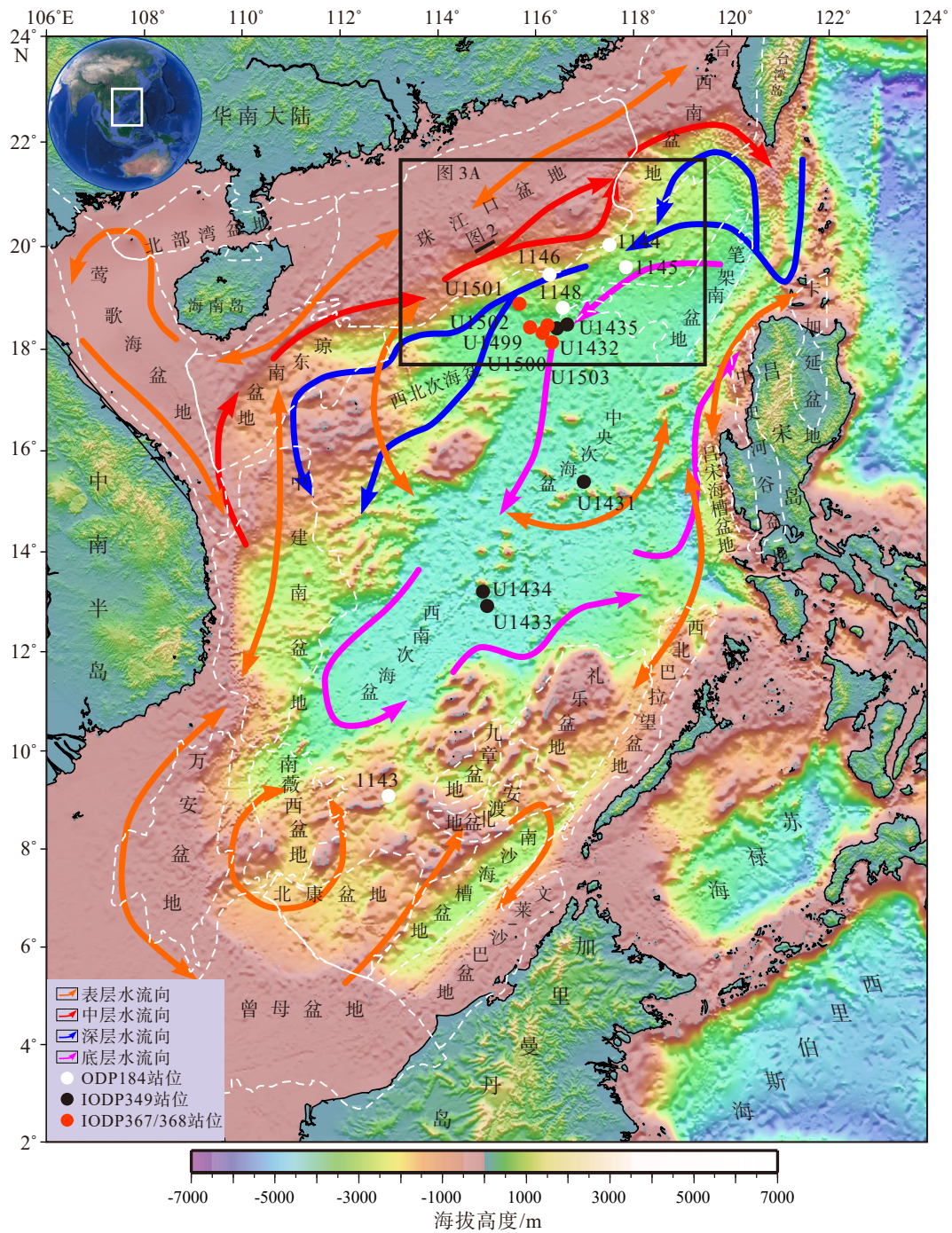


图1 南海环流特征及已有大洋钻探的站位分布图<sup>[3-4,6]</sup>

Fig.1 Ocean circulation and IODP sites in the SCS<sup>[3-4,6]</sup>

(图1)。重力流(滑移、滑塌、碎屑流、浊流及深水水道)和底流等多种深水沉积发育,这已被在南海实施的多个大洋钻探航次所证实<sup>[3-4]</sup>。近十多年来油气勘探及南海地质调查积累了南海北部陆缘丰富的构造演化及其相关沉积响应的地质地球物理资料,同时也积累了一些有关深水沉积特征及物理海洋观测数据,使得南海北部陆缘区成为研究深海沉积过程及其交互作用的最佳场所。

以我国科学家为主导的南海大洋钻探航次

(ODP184 航次、IODP349 航次、IODP367/368/368X 航次)的实施以及近年来我国各相关单位开展的对南海的频繁科考和地震数据采集,为南海深水沉积研究提供了宝贵的第一手材料<sup>[5-6]</sup>(图1),极大地促进了对相关科学问题的深入认识和重要科学假设的验证。本文在深入分析凝练南海区域关键的深水沉积科学问题基础上,提出未来的科学钻探目标建议,为今后实现中国主导的全球大洋钻探工作提供参考。

# 1 深水沉积过程研究现状及存在的科学问题

## 1.1 重力流沉积过程

重力流最初由 Middleton 和 Hampton (1973) 引入地质学界, 用于描述沉积物再次搬运过程中由于浮力不平衡产生的流体作用<sup>[7]</sup>, 这种浮力的不平衡性是由于化学组分、盐度和温度造成的密度差导致的。在重力流对深水沉积物的搬运、侵蚀和沉积过程中发育了多种深水沉积体系, 主要包括碎屑流沉积体系和浊流沉积体系。当层状碎屑流中的流体含量增加到一定程度, 碎屑流将转变为浊流。自然界中某些浊流也可能由沉积物崩塌直接导致, 而非所有的浊流都是由碎屑流转变而来的。

### 1.1.1 块体流沉积过程

块体流是一种沉积物密度流事件沉积, 又称块状搬运沉积体 (mass-transport deposit, MTD), 它可能涉及一种以上的流态。海底滑坡形成的高密度碎屑流在运动过程中, 由于颗粒沉积和卷吸海水作用逐渐被稀释, 进而转变为浊流。高密度块体流的流动表现为非牛顿流体, 颗粒间的碰撞在整个流动中占主导地位。由于其稠密的性质, 湍流运动将被抑制。块体流一般规模较大, 对海底地貌具有较强的重塑作用, 进而影响后期浊流的搬运路径及其沉积体的展布<sup>[8]</sup>。由于块体流沉积的诱发需要长期的地质准备, 如天然气水合物分解和地震活动等<sup>[9]</sup>, 其触发机制需要结合区域地质背景进行分析。浊流是一种非粘性流体, 其中的沉积物颗粒主要通过流体湍流保持悬浮状态。目前, 由于实验测量技术的限制, 其具体稀释过程还不是很清楚。Felix 和 Peakall<sup>[10]</sup>对碎屑流向浊流演变过程进行了定量研究, 进一步将碎屑流到浊流的转换过程分成了 6 种类型, 并发现当碎屑流密度和粘性都较大时, 只有极少的沉积物颗粒可以形成浊流, 且随着碎屑流的密度和粘性逐渐降低, 碎屑流稳定性逐渐降低, 更容易形成浊流。另外, Felix 等<sup>[11]</sup>基于其 2006 年的实验结论, 进行了现场观测, 观察描述了相应的沉积过程和沉积产物。

### 1.1.2 浊流沉积过程

Daly 提出了海底峡谷可能是由于类似浊流所导致的, 但“浊流”这个术语是 Johnson 在 1939 年才正式提出的<sup>[12]</sup>。Kuenen 和 Migliorini<sup>[13]</sup>对浊流进行了第一次实验模拟, 揭示了浊流的性质及其向深海

搬运沉积物的作用。现代海底地形复杂多样的原因之一就是浊流的侵蚀和沉积作用所造成的。侵蚀作用从陆架坡折处几十米深和几百米宽的下切谷, 到几百米深及几千米宽的深水峡谷普遍存在<sup>[14-15]</sup>。其沉积特征包括侧向迁移深水水道和深海平原上发育的海底扇沉积体。深水水道长度可达数千到数万公里, 而且还经常发育有天然堤。深水水道和天然堤沉积往往导致水道-天然堤沉积体高于周围海底<sup>[16]</sup>。深水水道终端发育典型海底扇沉积, 其分布范围可达几平方公里到几百平方公里<sup>[17-19]</sup>。在浊流发育演化过程中, 还可能导致大规模沉积物波的发育, 特别是在浊流经过地形变化的区域, 如天然堤顶部或大陆坡角等部位<sup>[20]</sup>, 沉积物波的波高可达几十米, 波长数公里, 并且波峰走向垂直于流体流动方向。

深海中的浊流活动, 即便规模很小, 也可能对海底设备和仪器以及海底电缆等造成损坏<sup>[14,21-22]</sup>。只要海底的地形梯度足够大, 流体向前运动产生的湍流就足以维持沉积物的自悬浮, 这种海底沉积物的自悬浮作用就会对海底床进行侵蚀并对海底设施造成破坏<sup>[23-24]</sup>。浊流中沉积物颗粒浓度通常很低 (按体积计算为 0.1%~7%), 因此颗粒间相互作用在维持悬浮体方面的作用很小或可以忽略不计<sup>[24]</sup>。

## 1.2 底流沉积过程

相对于已经日渐成熟的重力流沉积研究体系而言, 底流沉积体系研究仍有待进一步完善。尤其近年来“底流活动及其沉积响应”正得到越来越多的关注与重视, 在太平洋、地中海和大西洋地区已有大量有关底流沉积体系的实例报道<sup>[25-26]</sup>。过去十多年以来, 人们不仅关注了深水底流沉积特征, 而且关注了产生底流的各种物理海洋过程, 且越来越多地强调了海洋沉积学与物理海洋学的交叉融合<sup>[26]</sup>。底流在特殊的海洋学条件或海底地形环境下形成了特征迥异的沉积体<sup>[25]</sup>, 尤其是深层涡旋对其沉积过程产生了重要影响<sup>[27]</sup>, 局部海底地形变化也对底流产生了重要的影响<sup>[28]</sup>, 区域性内波或涡旋活动与复杂海底地形交互作用也能使底流得到区域性增强<sup>[29]</sup>, 但对于底流的具体沉积过程和动力机制的研究还有待深入。

“等深流沉积” (contourite) 由 Hollister 和 Heezen 在 20 世纪 60 年代初首次提出, 用以描述美国东部大陆边缘在西边界潜流影响下形成的深海沉积物。20 世纪 70 年代, 人们在大西洋地区开展了大量识别和描述大型等深流沉积体的工作, 80 年代进

入了等深流沉积研究的重要发展阶段,在全球各大洋等深流沉积展开了全面调查,对等深流沉积过程、沉积环境、海底地形地貌及等深流漂积体发育和展布等方面都取得了重要进展。20世纪90年代至今是等深流沉积的综合发展阶段,人们一方面对过去调研资料重新审视,进行系统分析,提出“等深流沉积体系”(contourite depositional system, CDS),并建立其相关理论体系,包括术语、判别标准、分类系统、动力机制、成分结构及成岩作用等<sup>[30-31]</sup>,另一方面重视探讨有关沿岸流(底流)和垂岸流(重力流)相互作用下的沉积过程<sup>[1,32]</sup>,这些底流沉积体系研究成果大大加深了深水沉积记录对洋流活动的响应过程的理解。

南海实测海洋水文资料、海流观测结果发现,在南海不同深度发育多个水团,存在多样的水体交换,并发育了三层环流结构<sup>[33]</sup>:上层环流、中层环流和深层环流。受季节性变化的季风控制,夏季南海北部上层环流为弱的气旋式环流,南部上层环流表现为反气旋环流;冬季是气旋式环流<sup>[5]</sup>。吕宋海峡的水交换对南海上层海洋的水平环流结构和经向翻转有重要作用<sup>[34]</sup>。南海中层环流主要呈反气旋方向(图1),其在秋季自西向东经过东沙群岛附近时出现偏离等深线而向更深层偏转的行为。该偏转行为主要由东沙群岛以东沿等深线存在的密度梯度差异导致,可能与黑潮的入侵有关<sup>[35]</sup>。海水温盐特性分析及数值模拟均表明南海唯一的深水来源是北太平洋深层水经吕宋海峡入侵的“深水瀑布”<sup>[35]</sup>。吕宋海峡“深水瀑布”和南海内复杂地形环境下强混合被认为是南海深海气旋式环流的主要驱动机制<sup>[35]</sup>。南海深层环流自东向西流经南海北部陆缘(图1),物理海洋观测资料和海洋动力模型显示其本身整体流速较低( $<5\text{ cm/s}$ ),水深范围约为1000 m以下<sup>[36]</sup>。谢强等<sup>[37]</sup>分析对比了8个模型,均证实了南海深海气旋式环流的存在。然而,

除吕宋海峡处,南海北部绝大部分海域有关中层和深层环流水团交互界面水流动力机制的研究极少。受到巴士海峡强烈水团交互作用影响,南海北部东沙及以东海域,频繁发生涡旋和上层内波活动<sup>[38]</sup>。在深层,由于复杂地形的影响,南海深海有着强的内潮和频发的高能量地形罗斯贝波,调制着南海深海环流在局部范围高频变化并显著加强深海混合过程<sup>[38]</sup>。总之,南海北部陆缘既发育丰富的等深流沉积体,又具有大量的物理海洋观测及地质和地球物理资料,是研究深水底流活动及其沉积响应这一科学问题的最佳场所,有望揭示南海北部陆缘半封闭海盆复杂海底地形环境下底流活动是如何影响沉积物搬运过程的。

### 1.3 重力流-底流相互作用过程

顺陆坡方向的重力流与平行陆坡方向的底流之间发生交互沉积作用,形成具有复杂成因的地形和构造<sup>[25]</sup>。许多研究表明,在大陆边缘发育了大量重力流与底流相互作用形成的单向迁移深水水道<sup>[39-40]</sup>(图2)。虽然深水沉积作用之间的交互作用得到了初步的探讨,但主要集中在底流对重力流沉积的改造作用,然而陆缘深水重力流与底流交互作用的响应过程和动力学机制研究仍较薄弱。例如, Fonnesu等<sup>[41]</sup>认为,在底流的上游,水道迁移是由于天然堤在底流的下游方向增长。Gong等<sup>[42]</sup>则认为水道在底流的下游方向迁移,而天然堤主要在底流的上游生长。重力流与底流的先后次序也存在争议<sup>[42]</sup>,如重力流与底流同时发生、还是重力流与底流间互发生<sup>[1]</sup>。南海北部发育多个持续地向同一方向迁移的深水水道,顺坡发育的重力流和平行陆坡发育的底流同时同地存在,是重力流与底流交互作用研究的有利场所<sup>[39,42-43]</sup>。深化重力流与底流交互作用过程的研究,对更好地理解复杂深水环境下的沉积作用意义重大。

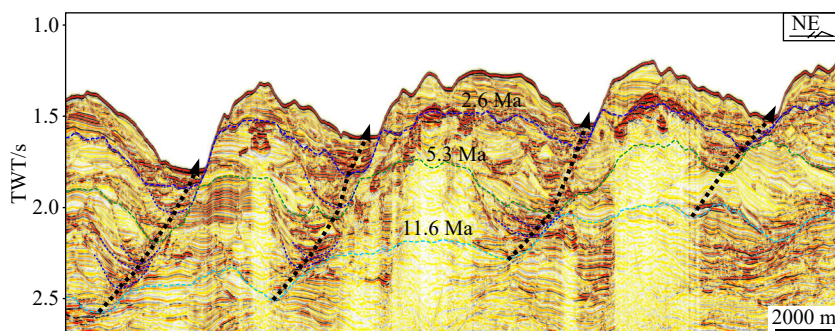


图2 南海北部珠江口盆地白云凹陷单向迁移峡谷地震反射特征

Fig.2 Seismic profile showing major unidirectionally-migrated submarine canyons in the Baiyun Depression, northern SCS

## 1.4 岩石圈破裂过程的沉积响应

Mckenzie 纯剪切模式是经典的板块构造模型, 即认为大陆的伸展和破裂是一个独立的、瞬时的、深度均匀的伸展过程<sup>[44]</sup>。该模式中, “破裂不整合”(breakup unconformity) 被认为是盆地范围内分隔同裂陷地层和裂后期地层的不整合界面, 其发育时间与地壳的破裂和洋壳扩张开始的时间一致<sup>[45]</sup>, 大陆边缘的裂后不整合界面应该是等时的, 即其发育时间在整个被动陆缘是一致的。但是在 Iberia-Newfoundland 边缘的研究中发现, 首先是裂谷作用和地壳岩石圈的破裂, 之后是上地幔的剥露、伸展、岩石圈的裂解和洋盆扩张开始, 因此, 裂谷作用与岩石圈的裂解是两个阶段, 很多盆地中从同裂陷到裂后的转变都存在一个过渡阶段。Moore 和 Shannon<sup>[46]</sup> 在位于大西洋近端边缘陆侧的 Porcupine 盆地中厘定出一个清晰的以不整合为界的层序, 该层序处于同裂陷和裂后阶段之间, 发育于 Iberia 边缘和 Newfoundland 边缘裂解之前(即 Aptian/Albian), 且分布范围小, 局限于盆地范围内, 这说明在整个被动大陆边缘, 尤其是存在多期裂陷作用幕的边缘, 不同区域的破裂不整合不是同一个不整合界面, “破裂不整合”识别标准只在较小的区域尺度上具有一致性<sup>[47]</sup>。在南海也存在这种现象, 由于南海的扩张过程由东到西, 南海裂后不整合界面时间从东至西逐渐变新: 台湾(38 Ma)、珠江口盆地(32 Ma)、琼东南盆地(23.8 Ma)、南海南部盆地和万安盆地(15.5 Ma)<sup>[48]</sup>。南海被动大陆边缘在破裂不整合界面之上也发现了一套主要以前积反射为特征的地层, 说明岩石圈破裂后并没有立刻进入热沉降阶段, 而是发生了挠曲回弹。总之, 南海岩石圈破裂过程的详细信息在裂解层序中都有所记录和反映, 通过对裂解层序的钻探取芯有望揭示详细的岩石圈破裂过程。

Soares 等<sup>[49]</sup> 详细研究了 Iberia-Newfoundland 边缘 112 Ma 的破裂不整合界面, 将其重新命名为“岩石圈裂解界面”, 认为该界面在近端带表现为时间间隔较长的复合式不整合特征, 而向陆架边缘过渡逐渐转变为时间间隔较短的沉积间断。在岩石圈裂解界面之上发育了记录岩石圈裂解开始到热松弛作用主控离散边缘沉降为止这一阶段内岩石圈的均衡调整过程的“裂解层序”。将破裂不整合进行简单的全陆缘盆地对比已不合适, 通过盆地沉降和沉积记录来展开裂解层序的识别和对比分析, 有利于阐明岩石圈伸展破裂过程。

## 2 未来钻探目标分析

南海的物理海洋调查已发现了复杂的深水沉积动力环境, 而且已有的多个大洋钻探航次也已发现了多种类型的深水沉积物, 已初步揭示了其复杂的深水沉积过程。南海北部大陆边缘盆地是我国重要的油气产地, 该地区近半个世纪的石油勘探工作已经积累了大量二维、三维地震剖面、钻井岩心以及海量地质资料, 同时也积累了丰富的物理海洋观测数据, 但受站位的分布位置所限, 为深入理解重力流和底流的形成演化过程及其相互作用关系, 需要在不同地形地貌背景进行钻探并对比分析各类型的深水沉积物, 进而有望更好地理解其深水沉积过程。

虽然南海已执行的多个大洋钻探航次和深潜航次中已钻遇了数千米的沉积物岩心, 证实了各类型深水沉积体的存在, 但由于钻探位置的不连贯性, 无法分析对比各类型沉积体系的沉积过程和动力学机制, 因此, 拟通过对多剖面多站位不同地形地貌条件下多类型深水沉积物的钻探对比分析, 深入剖析重力流-底流相互作用特征, 揭示块体流、浊流和底流形成和发育演化过程, 查明岩石圈破裂和海底扩张的沉积响应等科学问题, 丰富深水沉积动力学理论, 深化对南海大陆边缘沉积格局演变和深层海流演变整体性和全面性认识。由于深水沉积体的分布与其沉积环境和古地貌特征有关, 其沉积分布范围有限, 因此, 针对不同的科学问题, 建议沿着多个钻探剖面进行系统钻探取芯(图 3), 通过连续取芯的沉积特征对比分析, 揭示其沉积触发机制、沉积过程与各类型沉积体之间的转化过程以及沉积产物的分布特征等。

### 2.1 底流沉积过程剖面

人们虽然已认识到底流的存在, 但对于其沉积特征的直接观察描述则较少, 一般认为其具有牵引流沉积构造、双向递变层理、生物扰动强烈等特征<sup>[50]</sup>, 但关于其不同流速条件下的具体沉积特征及其时空变化等有待通过钻探获取沉积物岩芯进行深入分析和总结。由于南海海底复杂地形, 缺少钻井岩性及有关底流形成演化的相关资料, 使得深水底流活动及其沉积响应成为当前研究的难点问题, 通过深水沉积体系与海底地形及底流样式的成因联系分析, 可以系统揭示整个环流格局对深水沉积的影响, 相应地利用深水沉积演化分析, 可推断古环流

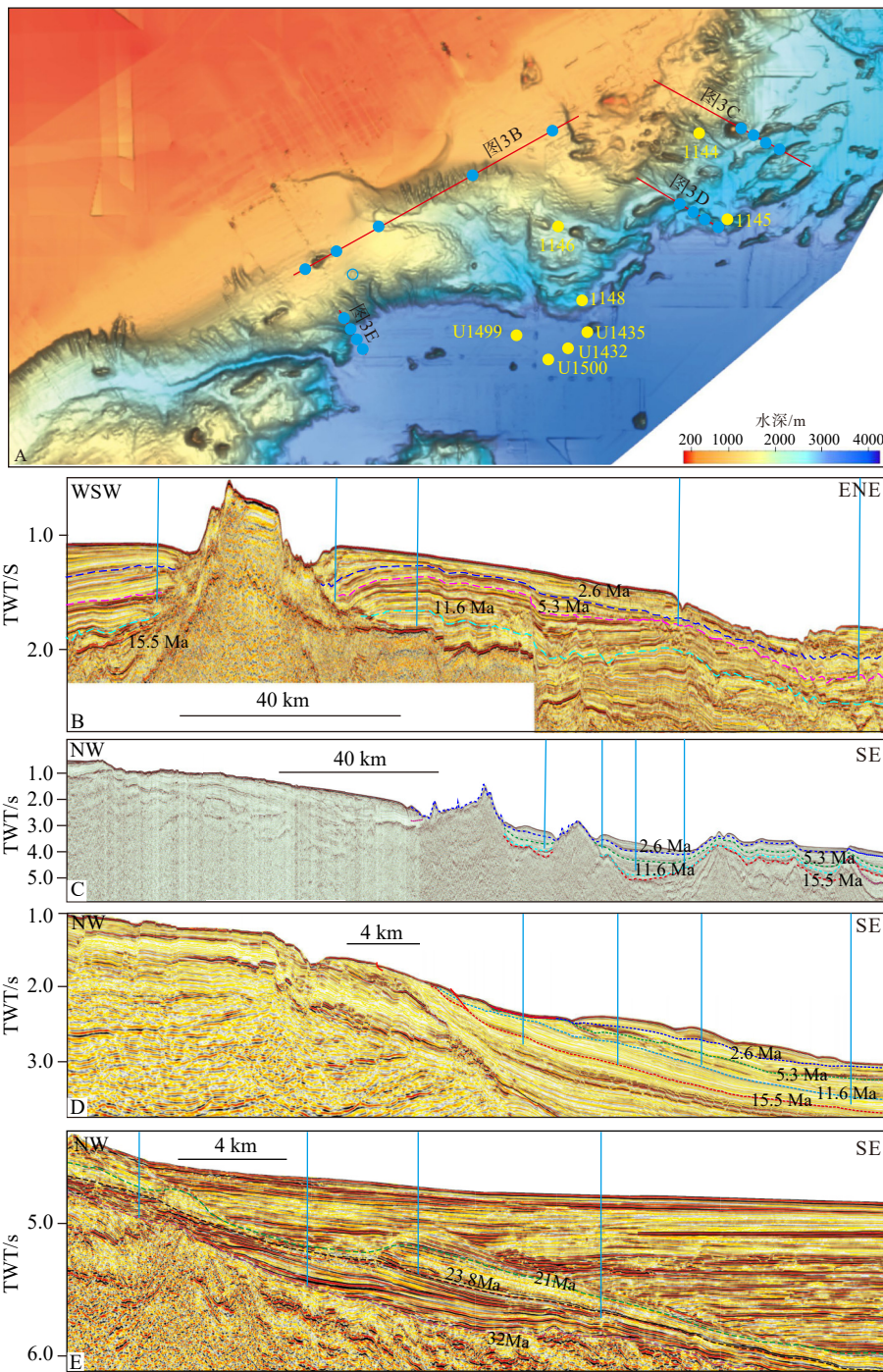


图3 南海深水沉积过程钻探建议站位分布图

A. 已有大洋钻探站位及建议钻探剖面位置, B. 底流沉积过程建议钻探站位分布, C. 重力流沉积过程建议钻探站位分布, D. 重力流-底流交互作用建议钻探站位分布, E. 裂解层序建议钻探站位。

Fig.3 Proposed drill targets for deep water sedimentary processes in the SCS

A. Locations of drilled sites and proposed drilling sections, B. Drill targets at bottom current processes, C. drill targets at deep-water sedimentary processes, D. Drill targets at gravity-flow – bottom-current interaction, E. drill targets at lithosphere break-up.

格局。通过深水沉积差异还可以分析古海洋深海环流的演变特征,从而揭示南海大陆边缘沉积格局演变和深层海流演变的耦合关系。陈慧等<sup>[51]</sup>通过二维地震剖面解释,结合海底地形特征,在南海北缘一统暗沙附近识别出了与海山相关的底流沉积,

并进一步划分出环槽、伸长状-丘状漂积体、边缘槽沟、黏附型漂积体和海山背侧补丁型漂积体等沉积单元,认为洋流活动、科氏力和海山地形限制作用导致环流左侧以侵蚀作用为主、环流右侧以沉积作用为主(图3B)。基于以上研究,建议在一统海山两

侧平行陆坡方向开展系列取样, 有望在厘定沉积物年龄与火山演化序列基础上, 系统揭示南海不同深度底流沉积特征、时空分布及其成因机制。

## 2.2 重力流沉积过程剖面

虽然重力流的沉积特征和鉴别标志相对较成熟, 但根据流体支撑性质, 重力流还可进一步划分为碎屑流、颗粒流、液化流和浊流等, 近年来还有学者提出了异重流、临界流和超临界流等, 更重要的是在一次重力流事件过程中, 这些类型之前可以相互转化, 因此, 通过连续剖面钻探取芯有望系统阐明同一重力流事件的时空演化过程。东沙区域发育多种沉积体类型, 是深水沉积过程研究的天然场所。邵磊等<sup>[52]</sup>通过 ODP 岩芯资料和地震资料研究表明东沙隆起南部斜坡发育等深流漂积体沉积; 江宁等<sup>[53]</sup>通过 ODP 岩芯资料和地震资料别出 5 种成因的底流沉积和分布于陆坡的沉积物波; 王星星等<sup>[54]</sup>借助二维地震和多波束测深数据阐明了东沙海底峡谷的沉积演化, 认为峡谷的形成与重力流侵蚀有关, 发育过程中受到底流的持续影响(图 3C)。基于以上研究, 建议在东沙隆起东部顺着陆坡方向开展系列钻探, 一方面拟揭示不同构造体系下沉积响应的差异, 另一方面也可阐明不同类型重力流的沉积作用差异。

## 2.3 重力流-底流交互作用剖面

重力流是事件沉积, 通常能量相对较强, 但持续时间较短, 而底流则相反, 其流速和能量相对较低, 但持续稳定时间长, 而且由于重力流需要重力驱动, 经常是顺陆坡发育, 而底流则经常平行于陆坡发育, 因此, 关于重力流与底流的相互作用方式也复杂多样, 至少包括重力流与底流间互发生、底流改造重力流沉积以及底流与重力流同时沉积等<sup>[55]</sup>, 具体作用过程和方式有待于通过钻探获取的沉积物岩芯进行详细研究。南海北部普遍存在重力流与底流交互作用, 在珠江口盆地白云凹陷陆坡的单向迁移峡谷群研究中已有所体现<sup>[42]</sup>, 且也有学者关注到浊流、底流和沉积变形综合成因的沉积物波<sup>[56]</sup>, 但对于从滑塌、滑移、碎屑流到浊流的具体沉积过程及其与底流的交互作用研究则较少。对于在南海发育的重力流与底流交互作用沉积体的成因的解释, 大多基于对地震资料的解释, 缺乏现今海底的底流观测和钻探样品研究<sup>[57]</sup>。东沙区域西侧, 发育有滑塌、漂积体和沉积物波等沉积体类型, 通过顺着陆坡方向开展系列钻探取芯, 将有助于更好地

阐明重力流与底流相互作用关系以及确定两种机制的相对强度(图 3D)。

## 2.4 裂解层序剖面

破裂不整合在不同区域界面并不完全一致, 不能简单地对全盆地进行对比分析<sup>[45]</sup>。通过盆地沉降和沉积记录来开展裂解层序的识别和对比分析, 有利于阐明岩石伸展破裂过程。关于南海陆缘张裂过程的研究, 近几年已取得了重要进展, 认为南海陆缘盆地中不整合面由陆向洋方向逐渐变新, 具有穿时现象, 但关于具体张裂模式尚有争议<sup>[47]</sup>, 而裂解层序则记录了具体张裂过程, 因此, 对不同部位的完整裂解层序的钻探取芯将有望更详细地揭示南海陆缘张裂过程。西北次海盆西侧可识别出裂解层序, 同时还存在底流沉积, 因此, 沿着陆坡方向开展系列钻探取芯, 通过精确的年代学分析无疑将有助于明确“破裂不整合”的时空演化过程(图 3E)。

## 3 结论

南海北部陆缘区海底地形地貌复杂, 发育重力流(滑移、滑塌、碎屑流、浊流及深水水道)和底流等多种深水沉积体系, 已被在南海多个大洋钻探航次所证实。多种类型深水沉积体系的发育是由其独特的构造环境和复杂海流样式所导致的, 这使得南海北部陆缘区成为研究深水沉积过程的最佳场所。复杂的沉积环境对南海北部普遍存在的重力流沉积触发机制和沉积过程的影响仍有待深入研究, 尤其是对于滑移-滑塌-碎屑流-浊流沉积转化过程缺乏直接证据。底流对地形的侵蚀改造作用和沉积物的搬运作用缺乏详细证据, 导致洋流对沉积物的搬运机制存在争议。重力流与底流的交互作用的基本控制因素以及主要沉积产物的时空展布特征有待深入研究。南海边缘盆地岩石圈破裂和扩张早期的沉积特征、南海扩张对沉积物的控制作用等研究较薄弱, 因此, 建议就以上 4 个关键科学问题开展大洋钻探, 详细揭示深水沉积过程, 不但对丰富深水沉积动力学理论具有重要意义, 而且对指导深水油气储层预测、满足国家需求具有重要现实意义。

## 参考文献 (References)

- [1] Mulder T, Zaragosi S, Garlan T, et al. Present deep-submarine canyons activity in the Bay of Biscay (NE Atlantic) [J]. *Marine Geology*, 2012,



- 295-298: 113-127.
- [2] Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 125-135.
- [3] Li C F, Lin J, Kulhanek D K. South China Sea tectonics: opening of the South China Sea and its implications for southeast Asian tectonics, climates, and deep mantle processes since the late Mesozoic [J]. *International Ocean Discovery Program Preliminary Report*, 2014, 349: 1-111.
- [4] Sun Z, Jian Z, Stock J M, et al. Expedition 367 preliminary report: South China Sea rifted margin [C]//*Proceedings of the International Ocean Discovery Program*. College Station, 2018.
- [5] Wang P X, Li Q Y. Oceanographical and geological background [M]// Wang P X, Li Q Y. *The South China Sea*. Dordrecht: Springer, 2009, 13: 25-73.
- [6] Liu S, Hernández-Molina F J, Lei Z Y, et al. Fault-controlled contourite drifts in the southern South China Sea: Tectonic, oceanographic, and conceptual implications [J]. *Marine Geology*, 2021, 433: 106420.
- [7] Middleton G V, Hampton M A. Part I. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition [J]. 1973.
- [8] Kneller B, Nasr-Azadani M M, Radhakrishnan S, et al. Long-range sediment transport in the world's oceans by stably stratified turbidity currents [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(12): 8608-8620.
- [9] Sun Q L, Cartwright J, Xie X N, et al. Reconstruction of repeated Quaternary slope failures in the northern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2018, 401: 17-35.
- [10] Felix M, Peakall J. Transformation of debris flows into turbidity currents: mechanisms inferred from laboratory experiments [J]. *Sedimentology*, 2006, 53(1): 107-123.
- [11] Daly R A. Origin of submarine canyons [J]. *American Journal of Science*, 1936, S5-31(186): 401-420.
- [12] Kuenen P H. Density currents in connection with the problem of submarine canyons [J]. *Geological Magazine*, 1938, 75(6): 241-249.
- [13] Kuenen P H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. *The Journal of Geology*, 1950, 58(2): 91-127.
- [14] Inman D L, Nordstrom C E, Flick R E. Currents in submarine canyons: an air-sea-land interaction [J]. *Annual review of fluid mechanics*, 1976, 8: 275-310.
- [15] Weimer P, Slatt R M, Bouroullac R, et al. *Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Setting* [M]. Tulsa: AAPG, 2006.
- [16] Normark W R. Growth patterns of Deep-Sea fans [J]. *AAPG Bulletin*, 1970, 54(11): 2170-2195.
- [17] Deptuck M E, Sylvester Z, Pirmez C, et al. Migration-aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6-9): 406-433.
- [18] Twichell D C, Schwab W C, Kenyon N H. Geometry of sandy deposits at the distal edge of the Mississippi Fan, Gulf of Mexico [M]//Picking K T, Hiscott R N, Kenyon N H, et al. *Atlas of Deep Water Environments*. Dordrecht: Springer, 1995: 282-286.
- [19] Gervais A, Savoye B, Mulder T, et al. Sandy modern turbidite lobes: A new insight from high resolution seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(4): 485-502.
- [20] Lee H J, Syvitski J P M, Parker G, et al. Distinguishing sediment waves from slope failure deposits: field examples, including the 'Humboldt slide' and modelling results [J]. *Marine Geology*, 2002, 192(1-3): 79-104.
- [21] Khripounoff A, Vangriesheim A, Babonneau N, et al. Direct observation of intense turbidity current activity in the Zaire submarine valley at 4000 m water depth [J]. *Marine Geology*, 2003, 194(3-4): 151-158.
- [22] Heezen B C, Ewing W M. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake [J]. *American Journal of Science*, 1952, 250(12): 849-873.
- [23] Pantin H M. Interaction between velocity and effective density in turbidity flow: phase-plane analysis, with criteria for autosuspension [J]. *Marine Geology*, 1979, 31(1-2): 59-99.
- [24] Bagnold R A. Auto-suspension of transported sediment; Turbidity currents [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1962, 265(1322): 315-319.
- [25] Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 111-154.
- [26] Hernández-Molina F J, Wählin A, Bruno M, et al. Oceanographic processes and morphosedimentary products along the Iberian margins: A new multidisciplinary approach [J]. *Marine Geology*, 2016, 378: 127-156.
- [27] Thran A C, Dutkiewicz A, Spence P, et al. Controls on the global distribution of contourite drifts: Insights from an eddy-resolving ocean model [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 489: 228-240.
- [28] Vadorpe T, Van Rooij D, De Haas H. Stratigraphy and paleoceanography of a topography-controlled contourite drift in the Pen Duick area, southern Gulf of Cádiz [J]. *Marine Geology*, 2014, 349: 136-151.
- [29] Ribó M, Puig P, Muñoz A, et al. Morphobathymetric analysis of the large fine-grained sediment waves over the Gulf of Valencia continental slope (NW Mediterranean) [J]. *Geomorphology*, 2016, 253: 22-37.
- [30] Faugères J C, Stow D A V, Imbert P, et al. Seismic features diagnostic of contourite drifts [J]. *Marine Geology*, 1999, 162(1): 1-38.
- [31] Stow D A V, Faugères J, Howe J A, et al. Bottom currents, contourites and deep-sea sediment drifts: current state-of-the-art [J]. *Geological Society, London, Memoirs*, 2002, 22: 7-20.
- [32] Marchès E, Mulder T, Cremer M, et al. Contourite drift construction influenced by capture of Mediterranean Outflow Water deep-sea current by the Portimão submarine canyon (Gulf of Cadiz, South Portugal) [J]. *Marine Geology*, 2007, 242(4): 247-260.
- [33] Gan J P, Li H, Curchitser E N, et al. Modeling South China Sea circulation: Response to seasonal forcing regimes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C6): C06034.
- [34] 王东晓, 刘雄斌, 王文质, 等. 理想海底地形的南海海洋经向翻转数值模拟 [J]. *科学通报*, 2004, 49(7): 740-746. [WANG Dongxiao, LIU Xiongbin, WANG Wenzhi, et al. Simulation of meridional overturning in the upper layer of the South China Sea with an idealized bot-

- tom topography [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(7): 740-746.]
- [35] Wang G H, Xie S P, Qu T D, et al. Deep South China Sea circulation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(5): L05601.
- [36] Wang D X, Xiao J G, Shu Y Q, et al. Progress on deep circulation and meridional overturning circulation in the South China Sea [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(9): 1827-1833.
- [37] 谢强, 肖劲根, 王东晓, 等. 基于8个准全球模式模拟的南海深层与底层环流特征分析[J]. *科学通报*, 2013, 58(32): 4000-4011. [XIE Qiang, XIAO Jin'gen, WANG Dongxiao, et al. Analysis of deep-layer and bottom circulations in the South China Sea based on eight quasi-global ocean model outputs [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(32): 4000-4011.]
- [38] Chen G X, Wang D X, Dong C M, et al. Observed deep energetic eddies by seamount wake [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17416.
- [39] Gong C L, Wang Y M, Zhu W L, 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.
- [40] 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.
- [41] Fonesu M, Palermo D, Galbiati M, et al. A new world-class deep-water play-type, deposited by the syndepositional interaction of turbidity flows and bottom currents: The giant Eocene Coral Field in northern Mozambique [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 179-201.
- [42] Gong C L, Wang Y M, Rebesco M, et al. How do turbidity flows interact with contour currents in unidirectionally migrating deep-water channels? [J]. *Geology*, 2018, 46(6): 551-554.
- [43] Wang X X, Zhuo H T, Wang Y M, et al. Controls of contour currents on intra-canyon mixed sedimentary processes: Insights from the Pearl River Canyon, northern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2018, 406: 193-213.
- [44] Mckenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basins [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40(1): 25-32.
- [45] Falvey D A. The development of continental margins in plate tectonic theory [J]. *The APPEA Journal*, 1974, 14(1): 95-106.
- [46] Moore J G, Shannon P M. Slump structures in the late Tertiary of the Porcupine Basin, offshore Ireland [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1991, 8(2): 184-197.
- [47] 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 102-114. [REN Jianye, PANG Xiong, LEI Chao, et al. Ocean and continent transition in passive continental margins and analysis of lithospheric extension and breakup process: Implication for research of the deepwater basins in the continental margins of South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 102-114.]
- [48] 黄奇瑜, 闫义, 赵泉鸿, 等. 台湾新生代层序: 反映南海张裂, 层序和古海洋变化机制[J]. *科学通报*, 2012, 57(24): 3130-3149. [HUANG Q Y, YEN Y, ZHAO Quanhong, et al. Cenozoic stratigraphy of Taiwan: Window into rifting, stratigraphy and paleoceanography of South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24): 3130-3149.]
- [49] Soares D M, Alves T M, Terrinha P. The breakup sequence and associated lithospheric breakup surface: Their significance in the context of rifted continental margins (West Iberia and Newfoundland margins, North Atlantic) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 355-356: 311-326.
- [50] Stow D, Smillie Z. Distinguishing between deep-water sediment facies: Turbidites, contourites and hemipelagites [J]. *Geosciences*, 2020, 10(2): 68.
- [51] 陈慧, 解习农, 毛凯楠. 南海北缘一统暗沙附近深水等深流沉积体系特征[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2015, 40(4): 733-743. [CHEN Hui, XIE Xinong, MAO Kainan. Deep-water contourite depositional system in vicinity of Yi'tong Shoal on northern margin of the South China Sea [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(4): 733-743.]
- [52] 邵磊, 李学杰, 耿建华, 等. 南海北部深水底流沉积作用[J]. *中国科学D辑*, 2007, 50(7): 1060-1066. [SHAO Lei, LI Xuejie, GENG Jianhua, et al. Deep water bottom current deposition in the northern South China Sea [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2007, 50(7): 1060-1066.]
- [53] 江宁, 何敏, 刘军, 等. 东沙隆起南缘第四系等深流沉积特征及成因机制[J]. *沉积学报*, 2018, 36(1): 120-131. [JIANG Ning, HE Min, LIU Jun, et al. Depositional characteristics and formation mechanisms of contour current in South Dongsha uplift during the quaternary [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 120-131.]
- [54] 王星星, 蔡峰, 孙治雷, 等. 南海北部东沙海底峡谷沉积演化过程及其地质意义[J]. *地球科学*, 2021, 46(3): 1023-1037. [WANG Xingxing, CAI Feng, SUN Zhilei, et al. Sedimentary evolution and geological significance of the Dongsha submarine canyon in the northern South China Sea [J]. *Earth Science*, 2021, 46(3): 1023-1037.]
- [55] Mulder T, Faugères J C, Gonthier E. Mixed turbidite-contourite systems [J]. *Developments in Sedimentology*, 2008, 60: 435-456.
- [56] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海东北部台湾浅滩陆坡的浊流沉积物波的发育及其成因的构造控制[J]. *沉积学报*, 2008, 26(1): 39-45. [WANG Hairong, WANG Yingmin, QIU Yan, et al. Development and its tectonic activity's origin of turbidity current sediment wave in Manila Trench, the South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(1): 39-45.]
- [57] 吴嘉鹏, 王英民, 王海荣, 等. 深水重力流与底流交互作用研究进展[J]. *地质论评*, 2012, 58(6): 1110-1120. [WU Jiapeng, WANG Yingmin, WANG Hairong, et al. The interaction between deep-water turbidity and bottom currents: A review [J]. *Geological Review*, 2012, 58(6): 1110-1120.]