

# 南海深海物理过程与地质过程的关系探讨\*

宋海斌

中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院油气资源研究重点实验室, 北京 100029

**摘要:** 南海东北部沉积物波等特殊的沉积现象与深海物理过程密切相关, 海洋地质研究推断其与上升爬坡流、等深流、浊流作用有关, 而南海东北部海洋遥感观测到的最显著现象则是广泛发育的非线性内波向西传播和涡旋的向西漂移。南海东北部涡旋、内潮-内波的形成演变与地形地貌有密切关系, 重要的地形地貌如海脊(恒春海脊与吕宋水下火山弧)和陆架坡折, 主要受构造过程控制。南海现代深海物理过程的建立及演变涉及到海盆本身的演化, 也涉及到南海北部张裂大陆边缘的演化与东部俯冲大陆边缘的演化。构造过程、沉积过程与深海物理过程密切相关, 对其关系的综合研究必将深化南海深海过程演变的认识。地震海洋学发展迅猛, 但尚处于初级阶段, 新的发现可能会改变人们的传统认识, 可望揭示地球系统流体部分与固体部分相互作用的本质, 为地球系统科学的突破做出贡献。

**关键词:** 南海; 物理过程; 构造过程; 沉积过程; 地震海洋学

中图分类号: P738 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)03-0010-11

## On relationship between physical process and geological process in South China Sea Deep

SONG Hai-bin

Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** Special sedimentary phenomena such as sediment waves in the northeastern South China Sea (SCS) are closely related with physical processes in deep sea. Marine geological studies infer that sediment waves are caused by upward flow, contour current and turbidite current, while westward propagation of nonlinear internal waves and westward movement of meso-scale eddies are main features observed by satellite in the region. The evolutions of eddies and internal tides/internal waves are controlled by seafloor relief, and key features are submarine ridges (Hengchun Ridge and Luzon submarine volcanic arc) and continental shelf edge, which are mainly controlled by tectonic processes. The setup and evolution of modern physical process in SCS Deep are related to the formation and development of deep sea basin, northern rifted margin and eastern subduction margin of the SCS. Comprehensive studies of interactions among tectonic, sedimentary and physical processes will ensure a better understanding of evolution of SCS Deep. Recently, seismic oceanography has developed fast, though still in its preliminary stage. New discoveries may change our traditional knowledge about the deep ocean, grasp the nature of interactions between fluid Earth and solid Earth, and make major contributions to Earth system sciences.

**Key words:** South China Sea; physical process; tectonic process; sedimentary process; seismic oceanography

“南海深部计划”以“构建边缘海的生命史”为主题, 从洋壳深海盆的演化、深海沉积和生物地

收稿日期: 2011-02-08; 修订日期: 2012-03-12。卢冰编辑; 林强校对

基金项目: 国家自然科学基金项目(91028002, 41076024); 国家基础研究发展规划项目(2011CB403503)

作者简介: 宋海斌(1968—), 男, 浙江省绍兴市人, 主要从事海洋地球物理研究。E-mail: hbsong@mail.iggcas.ac.cn

\* 感谢主要合作者 Pinheiro 教授、Ruddick 教授、耿建华教授、王东晓、尚晓东研究员等与作者有益的讨论与帮助。感谢汪品先院士、中海油湛江分公司众多领导、边缘海-南海国家重点基础研究发展计划(“973”)项目首席科学家李家彪研究员等多年来的支持。感谢黄瑞新教授、甘子钧研究员、杨海军教授等对作者物理海洋学方面的指点。

球化学过程 3 个方面开展研究<sup>[1]</sup>。研究涉及了南海深海构造过程、沉积过程与生物地球化学过程,三者与深海物理过程均关系密切。构造过程与沉积过程、沉积过程与生物地球化学过程的密切关系在海洋地质学界有广泛的共识,本文初步探讨图 1 中左边三角形的内容。

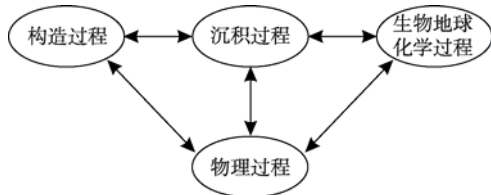


图 1 深海物理过程与地质过程的关系  
Fig.1 Relationship between physical process and geological process in deep sea

本文重点以“南海北部沉积物波”为例来说明构造、沉积与物理三大过程间的关系。第 1 节中介绍南海北部沉积物波的研究;第 2 节介绍南海北部广泛发育的内波与涡旋现象;这些现象的出现与地形地貌有密切关系,地形地貌本身的演变则受构造-沉积过程控制,第 3 节阐述这方面的内容;而要研究海底这个重要边界上、下的过程,反射地震学会起重要作用,因此第 4 节介绍了反射地震学在水柱中应用研究的地震海洋学方法。南海深海物理过程与地质过程的关系研究涉及物理海洋学、海洋地质与地球物理学的联合攻关。在南海深部计划的带领下,加强观测与模拟研究,将进一步深化对南海北部沉积物波等现象的认识。

### 1 南海北部沉积物波

1999 年 ODP184 航次在南海的大洋钻探是我国海洋科学发展过程中的里程碑,获得了众多的研究成果<sup>[2]</sup>。其中东沙海域的 1144 井在南海北部陆坡钻遇高速堆积体(图 2<sup>[3]</sup>),沉积速率之高令人振奋,一方面可借此开展高分辨率的古海洋学研究,另一方面也需要探索其成因。高分辨率反射地震剖面表明,1144 站位附近的高速沉积物堆积体(牵引体)实际上由一系列逆陆坡向上倾方向迁移的深水沉积物波组成<sup>[4]</sup>。1144 站位是根据 SO95 航次的主测线(SO95-10 号测线,测线位置见后文图 12)与联络测线(SO95-20 号测线)确定的。SO95-20 号测线可看到形态更好的沉积物波(图 3<sup>[5]</sup>)。ODP 钻探船上采集的单道地震剖面也可清晰地看到沉积物波在东沙区域发育。此外在南海东北部海盆区也发现了广泛分布的沉积物波区域(图 4<sup>[6]</sup>)。

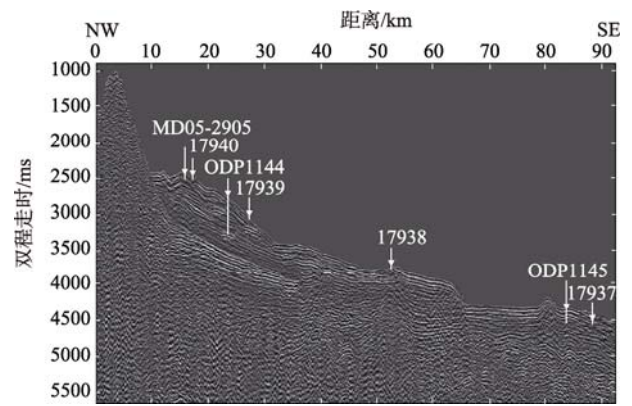


图 2 南海北部东沙区过 ODP1144 井地震剖面显示高速堆积体(SO95-10)<sup>[3]</sup>  
图中箭头指示重力活塞取样站位或井位  
Fig. 2 Seismic section crossing 1144 station of ODP 184 leg, which shows high rate sediments in the Dongsha region of the northern SCS(SO95-20)<sup>[3]</sup>

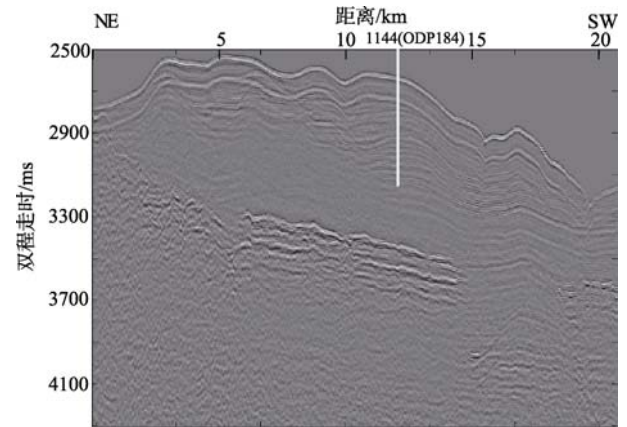


图 3 通过 ODP184 航次 1144 站位投影点的东沙海域地震反射剖面(SO95-20)显示沉积物波<sup>[5]</sup>  
Fig. 3 Seismic reflection section through projected ODP184 Site 1144 of Dongsha region (SO95-20)<sup>[5]</sup>, showing sediment waves

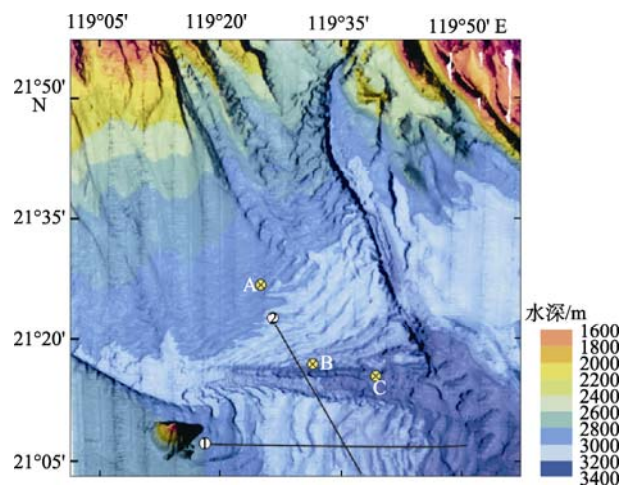


图 4 南海东北部深海平原多波束海底地貌阴影图显示发育的沉积物波<sup>[6]</sup>  
A、B、C 标示取样站位,黑线为地震剖面位置  
Fig. 4 Multi-beam relief shows extensive sediment waves in the northeastern SCS abyssal plain<sup>[6]</sup>

对南海东沙海域与南海东北部海盆区的沉积物波等特殊沉积现象,有多种成因解释。Ludmann 等<sup>[7]</sup>认为东沙的牵引沉积体(drift sediments, 又称漂移沉积体)与北太平洋深层水流经巴士海峡,在东沙群岛东南部形成的上升爬坡流有关(图 5)。邵磊等<sup>[3]</sup>认为是等深流沉积,丁巍伟等<sup>[6]</sup>则认为南海东北部海区的沉积物波是浊流形成的。值得指出的是,近年来南海北部的这些特殊沉积现象引起了广泛的兴趣,成为南海深水沉积研究的一大热点。这些研究表明这一特殊的沉积现象与深海物理过程是密切相关的,但海洋地质学家均用深层流(上升爬坡流、等深流、浊流、底层流)来解释这一现象。

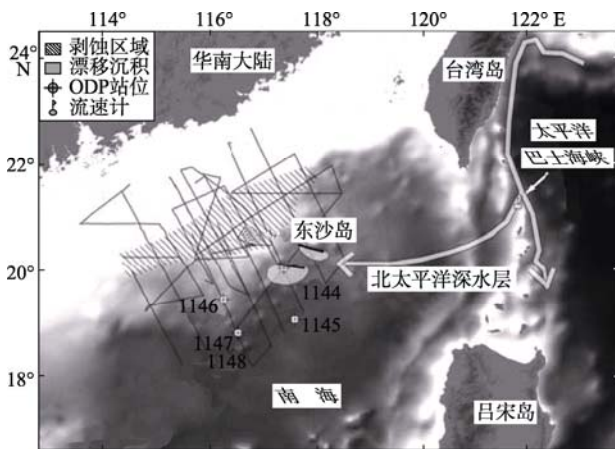


图 5 北太平洋深层水通过巴士海峡进入南海,在东沙群岛东南部上升爬坡流形成东沙海域的牵引沉积体<sup>[7]</sup>

图中折线为测线位置,1144—1148 为 ODP184 航次站位

Fig. 5 Schematic map showing intrusion of the North Pacific Deep Water (NPDW) through the Bashi Channel into the SCS (arrows)<sup>[7]</sup>. It flows upward in the southeastern region of the Dongsha Islands.

其中等深流这一术语起源于北大西洋西部边界流区的研究,1950 年代著名物理海洋学家 Stommel<sup>[8]</sup>指出湾流下方存在深层边界流,后来得到了观测的证实,同期地质学家也发现了布莱克海台这样的大型牵引沉积体,说明深层海洋流速并不是很慢的,足以对海底沉积造成侵蚀,形成沉积间断,沉积物也会被深层海流搬运。另外需要指出的是,严格意义上,等深流在自然界是不存在的。热流环流的另一名称密度环流说明密度差异(即压力差异)是深层洋流的驱动力,地球旋转引起的科里奥利平衡压力的水平梯度,形成物理海洋中最简单的地转流,压力存在水平梯度说明海水不可能沿等深线流动(等压线不等同于等深线)。

## 2 南海东北部深海物理过程

南海东北部特殊的沉积现象与深海物理过程是

密切相关的。地质学的第一原理是“将今论古”,认为“现今是认识过去的钥匙”,说明对现今南海深层海水运动的认识在南海深水沉积过程与机制研究中是非常关键的。遗憾的是,南海深海物理过程的观测资料极少<sup>[9]</sup>。值得庆幸的是,在深海物理过程的观测中,较之常规的物理海洋观测,1970 年代兴起的海洋遥感有其独特的优势。而南海东北部海洋遥感观测到的最显著现象则是广泛发育的内波(基本上是内孤立波)向西的传播和涡旋的西向漂移。

近 10 年来,南海东北部的内波研究形成热点,发表了大量研究论文<sup>[10-22]</sup>。这些研究表明,吕宋海峡的海脊(东部的吕宋水下火山弧、西部的恒春海脊)处的潮汐运动会形成内潮汐,在非线性过程作用下,转变成孤立波群,跨越南海东北部海盆区,向东沙海区传播(图 6、7)。进入浅水区,下凹型的孤立波会转换成上凸型的孤立波<sup>[11]</sup>。这些孤立波在遥感的 SAR 图像上形成明暗条带,长达 200km,非常明显。这些非线性内波主要分布于东沙附近海域和恒春海脊以西的南海东北部海盆区。当然,也有学者指出陆架坡折带的潮汐运动也可形成局地的内波。

Gao 等<sup>[23]</sup>在国际上首先提出存在内潮汐-内波沉积,用于解释水道中具有交叉层理的沉积结构。此后,该研究组一直致力于内潮汐-内波沉积的研究<sup>[24-26]</sup>,在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等地发现了内潮汐-内波沉积,并出版专著<sup>[24]</sup>,给出了概念模式(图 8),值得南海沉积物波研究者思考。

中尺度涡的发现是近几十年对大洋环流认识的一个突破性进展,改变了对洋流的传统看法。中尺度涡的旋转速度一般都很大,并且一面旋转,一面向前移动。大量中尺度涡的发现,使人们认识到,大洋环流的结构要比传统认识的更为复杂。南海海面高度异常的遥感观测揭示了南海中尺度涡旋的广泛发育。Wang 等<sup>[27]</sup>根据海面高度异常资料对南海中尺度涡旋做了很好的研究,表明南海东北部区域有大量涡旋活动,并向西运动(图 9)。图 10 显示 2010 年初期的南海区域海面高度异常图(AVIS0 提供),可看出南海中尺度涡旋的运动特征。

对深层海水运动研究的最著名的工作是 Stommel<sup>[8]</sup>的热盐环流理论和 Brocker<sup>[28-29]</sup>的传送带理论,对物理海洋界及整个海洋科学界、地球科学界产生了重大影响,但当今的物理海洋学发展,对热盐环流与传送带理论提出质疑<sup>[30]</sup>,认识到在能量与质量传递方面,涡旋与潮汐<sup>[31]</sup>(图 11)才起着重要作用。读者可以参考 Lozier 的研究<sup>[30]</sup>,在此不再



赘述。

总的来说, 海洋地质学界在推断沉积搬运过程

中强调了流的作用, 而现今的物理海洋过程的观测最明显的却是中尺度涡旋与潮汐作用引发的内波,

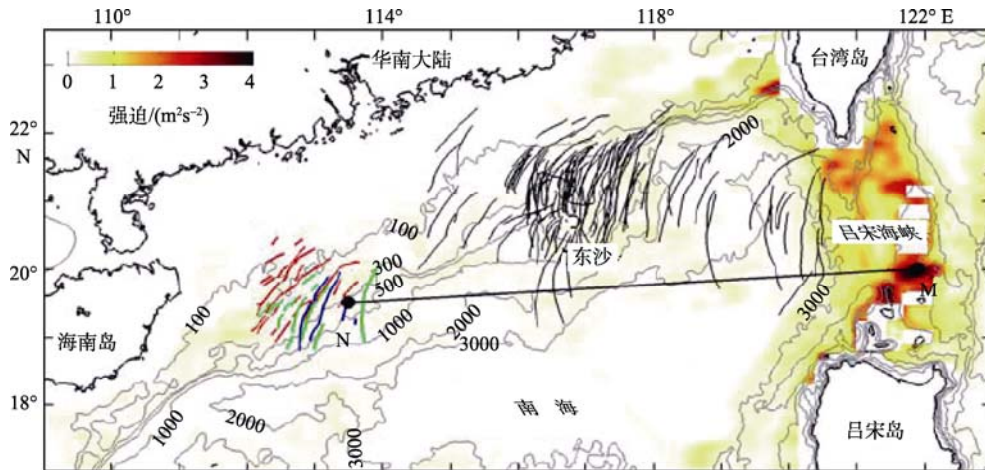


图 6 南海北部内孤立波群的传播<sup>[19]</sup>

黑色曲线根据 1995—2001 年卫星图像观测结果<sup>[12]</sup>, 蓝色、红色和绿色曲线指示海南岛东部海域也存在孤立内波群, 推测来自吕宋海峡。黄色-红色标尺表示 M2 正压潮汐强迫。黑色直线表示海南岛东部的内孤立波来自吕宋海峡。

Fig. 6 Propagation of internal solitons in the northern SCS<sup>[19]</sup>. The black curves represent the internal solitons seen in the satellite images from 1995 to 2001<sup>[12]</sup>. The blue, red, and green curves indicate internal solitons seen in the ASAR images. The yellow-red scale shows the M2 barotropic tidal forcing. The black line shows the internal solitons from the Luzon Strait in the eastern part of Hainan Island.

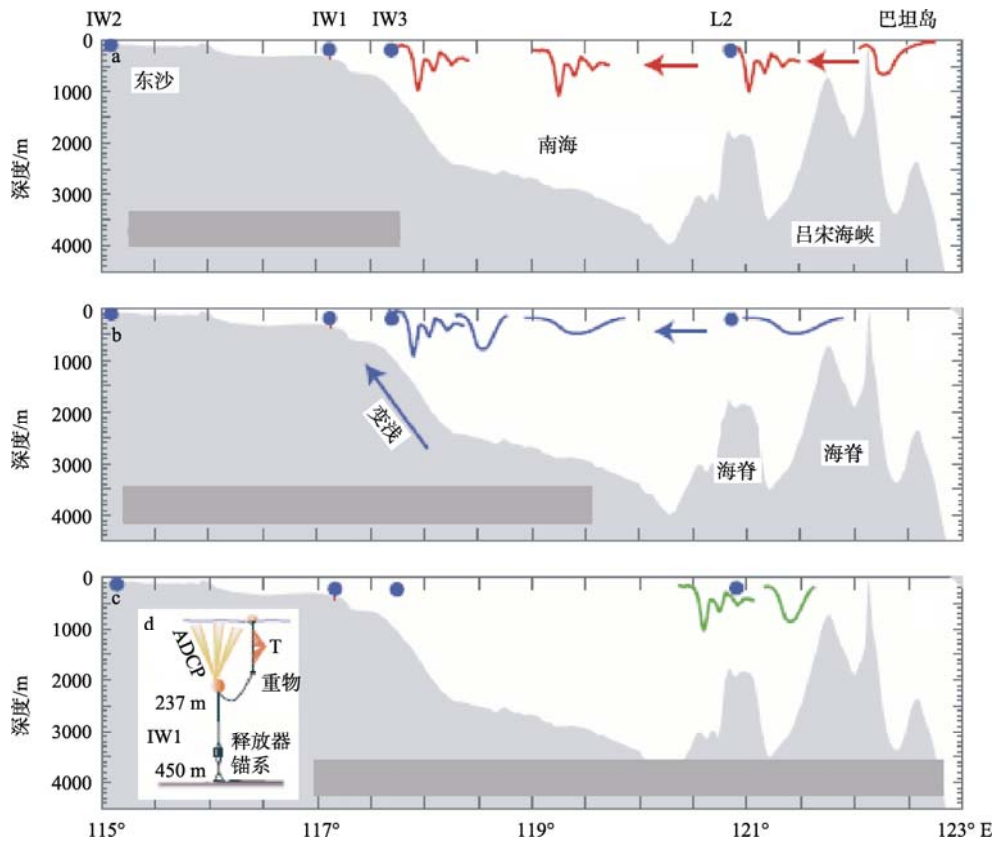


图 7 南海非线性内波形成机制<sup>[15]</sup>

a.背风波模型; b. 非线性内潮模型; c. 强非线性内潮模型, 阴影区顶部为南海东北部地形; d. ADCP 锚系装置示意图。蓝点表示 ADCP 测量站位; IW1、IW2、IW3 指示锚系站位, ADCP 指声学多普勒流速仪, T 指温度链。

Fig. 7 Sketch of generation mechanisms for nonlinear internal waves in the SCS. (a) Lee wave model, (b) nonlinear internal tide model, and (c) very strong nonlinear tide model. The shading is the bathymetry across the SCS. The inset (d) shows the configuration of mooring ADCP. Blue dots indicate locations of ADCP measurements.

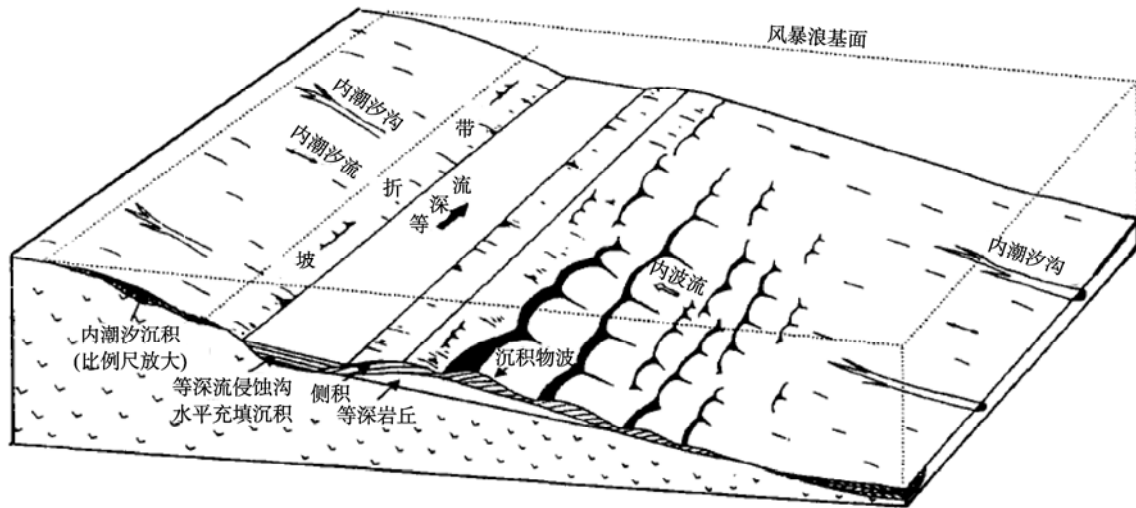


图 8 塔中地区中上奥陶统深水牵引流沉积组合模式图<sup>[26]</sup>

Fig. 8 Synthetic model of deep-water drift deposits of Upper-Lower Ordovician in the Center Tarim Basin

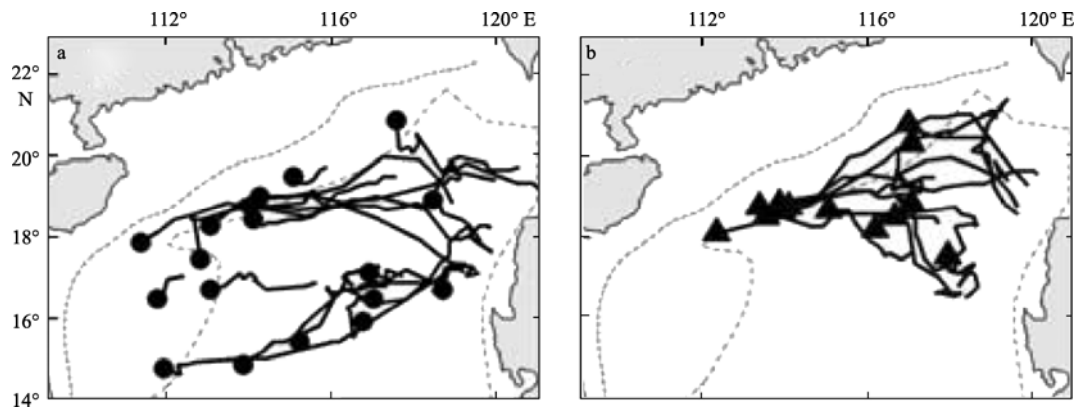


图 9 南海北部涡旋的西向运动<sup>[27]</sup>

黑色圆点为气旋涡旋, 黑色三角形为反气旋涡旋

Fig. 9 Westward movement of eddies in the northern SCS<sup>[27]</sup>

两者很不协调。南海深海演变大计划的实施可望在这方面给出创新的认识。

### 3 地形地貌对涡旋、内波演变的作用及构造对地形地貌演变的作用

每个涡旋都是有生命的, 北大西洋中的地中海涡旋的寿命较长, 有的长达 5 年<sup>[32]</sup>, 一个被称为 Sharon 的涡旋, 物理海洋学家追踪了整整两年, 研究其随时间的变化特征<sup>[33-35]</sup>。南海的涡旋的寿命较短, 才几个月。关于涡旋的产生及其衰亡, 虽然已有不少研究, 但尚没有共识。一些研究认为除了不稳定(正压、斜压不稳定)因素外, 地形地貌起了重要作用。研究表明地中海涡旋大多在伊比利亚半岛的西南角外形成, 与当地的海底峡谷有关。有研究发现, 一些涡旋的死亡是非正常的, 与海山相撞是它们的

共同命运<sup>[32]</sup>。南海的涡旋产生及其衰亡是不是受地形地貌控制呢? 这一问题值得提出并加以研究。如图 2 沉积物波的位置刚好在海山的南部, 有没有可能这里是南海一些涡旋的墓地呢?

如上节所阐述的, 南海内波的产生与演变与南海的地形地貌有很大关系。关于南海内孤立波的产生, 两个海脊(东部的吕宋火山弧、西部的恒春海脊)的并排产出是重要因素, 已有遥感 SAR 图像只在恒春海脊西部发现内孤立波, 但究竟哪个海脊是最重要的, 目前仍处于争论中, 主要原因是两个海脊及其中间部位水体的观测资料较少。而南海北部陆坡区, 是内波西传向上爬升的区域, 这时内孤立波从下凹转变为上凸, 如果内孤立波携带沉积物, 是不是可能倾倒在北部陆坡区呢?

南海东北部涡旋、内潮-内波的形成演变与地形

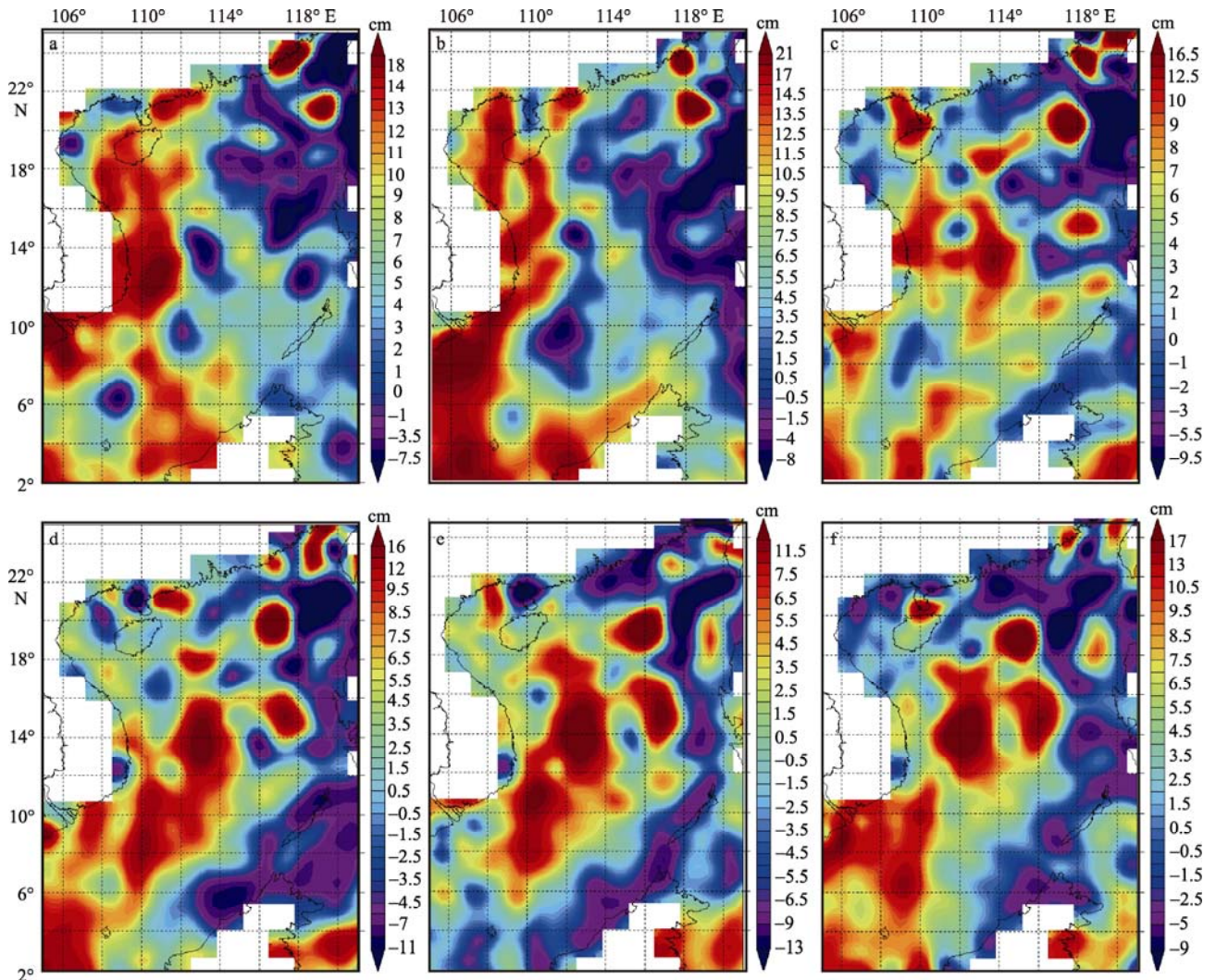


图 10 南海海面高度异常图

a. 2010-01-06; b. 2010-01-20; c. 2010-02-03; d. 2010-02-17; e. 2010-03-04; f. 2010-03-17

Fig. 10 Maps of merged sea level anomalies

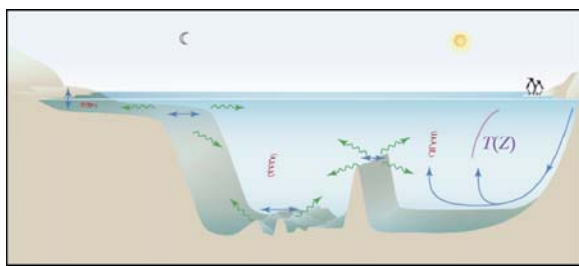


图 11 海洋中的潮汐<sup>[31]</sup>

左侧表示潮流运动在陆架边缘和深海中浅地形(海脊)处激发内波, 这些内波导致湍流与混合; 右侧表示混合在维系太阳温暖的表层海洋和高纬度形成的较冷、密度较大的海水层(上升中)之间的渐变带的重要作用。T(Z)表示随深度变化的温度剖面

Fig. 11 Tides in the ocean<sup>[31]</sup>. Left: The to and fro of tidal currents generate internal waves at the edge of the continental shelf and over topographic features in the deep ocean. These internal waves can lead to turbulence and mixing. Right: This mixing plays a role in maintaining a gradual transition between the sun-warmed surface layer of the ocean and the upwelling cold, dense water formed at high latitudes. T(Z) denotes the temperature profile as a function of depth (Z).

地貌有密切关系, 重要的地形地貌有海脊(如恒春海脊与吕宋水下火山弧)和陆架坡折(图 12)。陆架坡折带的形成与南海地区大陆岩石圈的张裂及随后的海底扩张有关, 基本问题是陆架陆坡陆隆海盆系统的形成演化; 而恒春海脊与吕宋火山弧的形成演化对南海深海物理过程非常关键, 涉及到马尼拉海沟俯冲大陆边缘的形成伴随的增生楔的演化与火山弧的发育, 更深层的问题则涉及到菲律宾岛弧块体的形成与旋转。因此南海现代深海物理过程的建立及演变涉及到海盆本身的演化, 也涉及到南海北部张裂大陆边缘的演化, 及东部俯冲大陆边缘的演化<sup>[35]</sup>, 此外, 构造控制的沉积-剥蚀过程也影响了地形地貌, 如海底峡谷的发育, 浊流过程, 扇体的堆积-形成陆隆等问题; 因此构造过程, 沉积过程与深海物理过程是非常相关的。对它们关系的综合研究必将深化对南海深海过程演变的认识。

图 13 为 Hall<sup>[36]</sup>关于南海的构造演化的模式图,



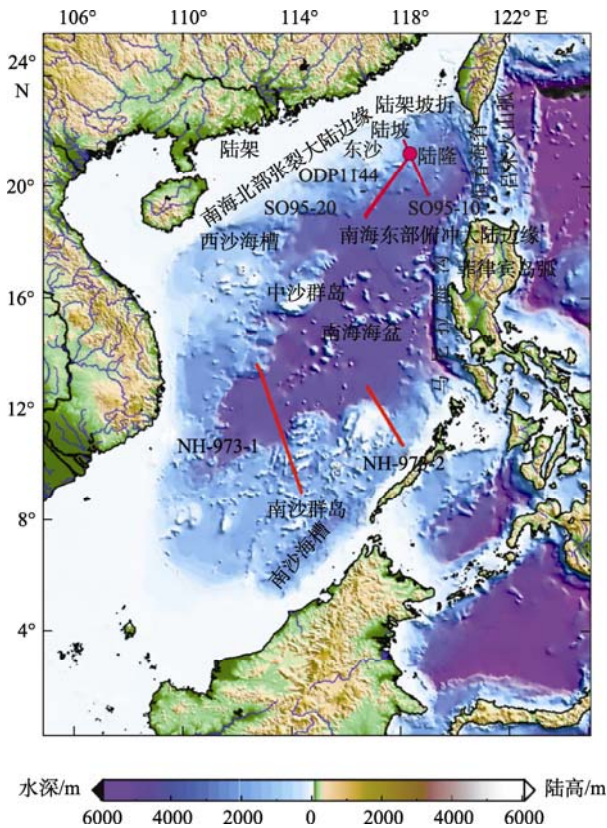


图 12 南海北部重要的地形地貌有海脊(如恒春海脊与吕宋水下火山弧)和陆架坡折  
 Fig. 12 Key topography features in the northern SCS, including submarine ridges (Hengchun Ridge and Luzon submarine volcanic arc) and the edge of continental shelf.

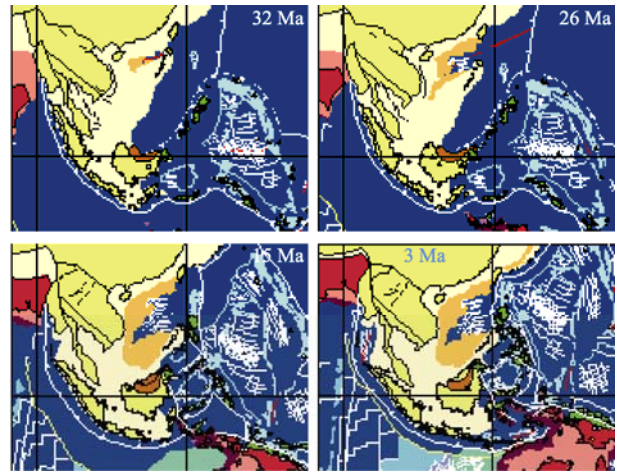


图 13 南海构造演化图(文献[36]的平面演化图版本)  
 Fig. 13 Sketch maps of tectonic evolution of the SCS (plane version of reference [36])

在古地形地貌的恢复研究中应考虑南海深海盆的形成与演变, 当然, 对南海深海盆演化的认识会随着新的观测资料(深拖磁力探测、洋壳钻探等)有所变化。另外, 观测和定量模拟是认识过程、揭示机制的两大重要手段。对大陆岩石圈裂解、海底扩张, 张裂大陆边缘的形成演化, 正在进行定量的模拟工作<sup>[37]</sup>。以南海海底地形地貌(图 14a)、南海莫霍面深度(图 14b)<sup>[38]</sup>为约束的离散上涌地幔流的模拟结果如图 15、图 16<sup>[39]</sup>, 简单的模拟表明, 快速扩张能拟合现

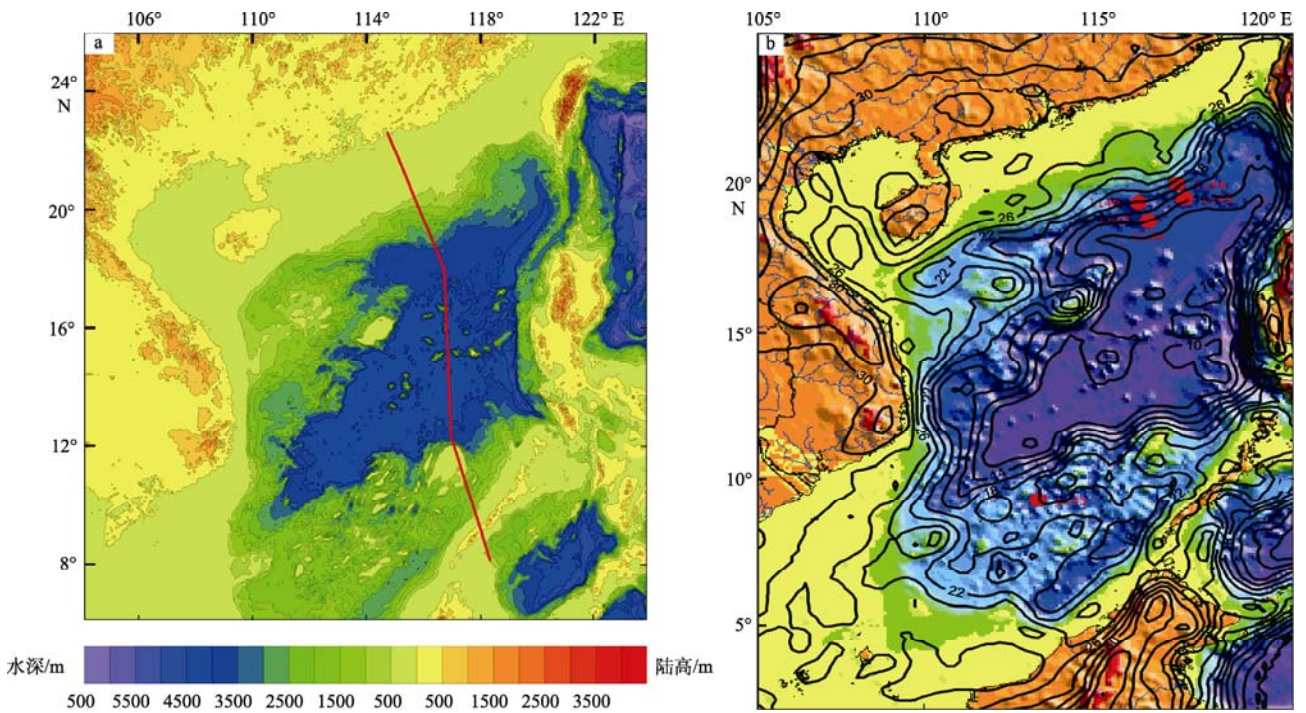


图 14 海盆扩张、张裂边缘形成演化模拟剖面位置(a)与南海莫霍面深度<sup>[38]</sup>(b)  
 a. 红色线为图 15、图 16 数值模拟的剖面位置; b. 红圆点为 ODP184 航次站位  
 Fig. 14 Section location for modeling seafloor spreading and rifted margin formation (a) and Moho depth of the SCS<sup>[38]</sup> (b).

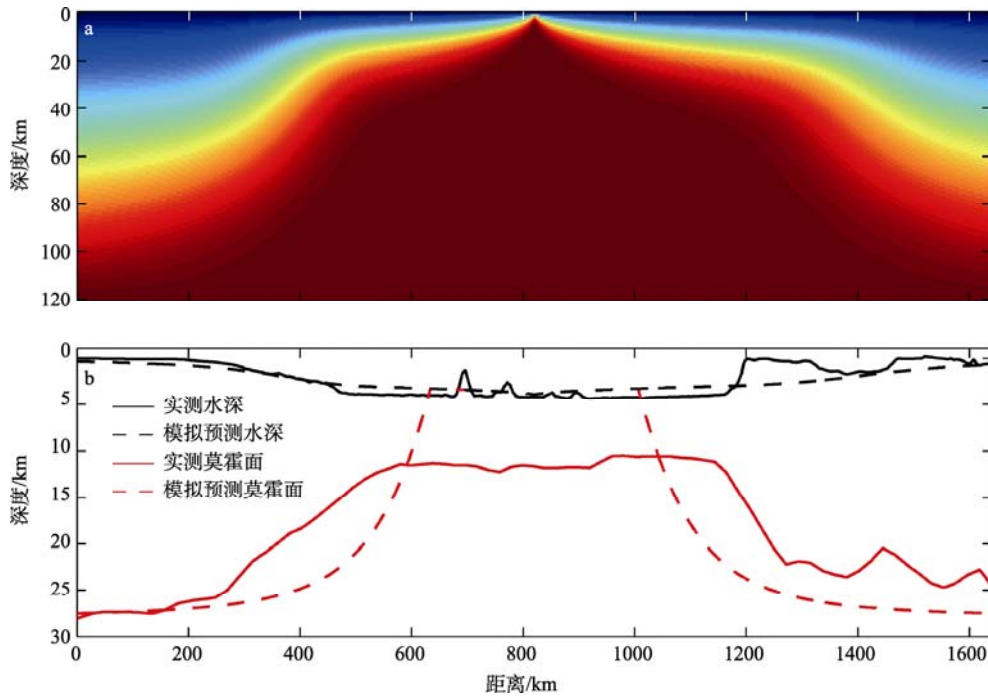


图 15 快速离散上升地幔流模型预测的水深和莫霍面埋深与观测的水深和莫霍面埋深对比<sup>[39]</sup>

a. 岩石圈温度结构; b. 地壳结构与水深对比,  $V_0=2\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $U_0=5\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $t_c=28\text{km}$ ,  $t=5\text{Ma}$

Fig. 15 Comparison between modeled and actual water depth and Moho depth by fast diverse upwelling mantle flow model<sup>[39]</sup>. a) Lithosphere temperature structure; b) comparison of crust structure and water depth,  $V_0=2\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $U_0=5\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $t_c=28\text{km}$ , and  $t=5\text{Ma}$

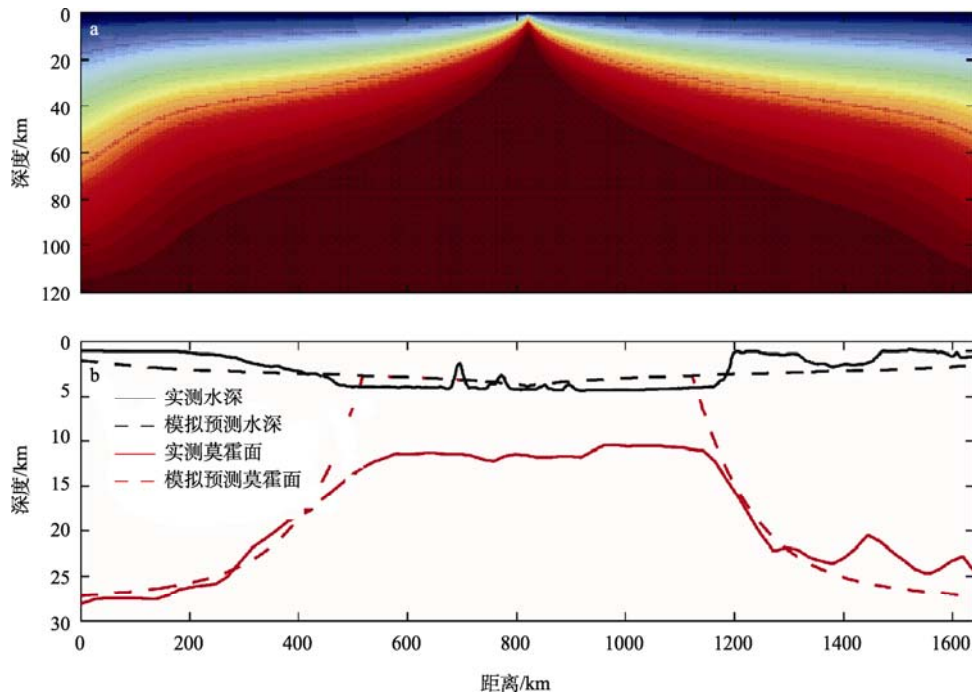


图 16 慢速离散上升地幔流模型预测的水深和莫霍面埋深与观测的水深和莫霍面埋深对比<sup>[39]</sup>

a. 岩石圈温度结构; b. 地壳结构与水深对比,  $V_0=1\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $U_0=2.5\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $t_c=28\text{km}$ ,  $t=15\text{Ma}$

Fig. 16 Comparison between modeled and actual water depth and Moho depth by slow diverse upwelling mantle flow model<sup>[39]</sup>. a) Lithosphere temperature structure; b) comparison of crust structure and water depth.  $V_0=1\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $U_0=2.5\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $t_c=28\text{km}$ , and  $t=15\text{Ma}$ .

今的海底地形(图 15), 慢速扩张则能拟合现今的莫霍面的埋深(图 16)。南海海盆的演化、南海张裂边缘的形成演化、陆坡陆隆-海盆体系的形

成演变尚需观测与模拟的协同研究, 也需要深入考虑构造-沉积-地形地貌-海水运动之间的关系。



### 4 地震海洋学可能的作用

地震海洋学在近期快速发展<sup>[40-44]</sup>，一方面目前已给出了锋面<sup>[40,45]</sup>、涡旋<sup>[46-47]</sup>、内波<sup>[46,48]</sup>等的高分辨率图像，另一方面在内波波数谱<sup>[48-52]</sup>，温盐结构反演<sup>[53-56]</sup>，湍流耗散率的估算<sup>[57]</sup>，流速估算<sup>[58]</sup>等定量研究方面取得重要进展。其发展潜力一方面是深化深海物理过程的认识，另一方面还可望直接对深海地质过程成像<sup>[56]</sup>，提升深海海水层与海底的相互作用的认识。图 17、图 18 显示南海东北部的 4 段地震剖面，一方面给出了南海海水层内部内波的广泛发育及其复杂特征，另一方面也给出了海底上、下清晰的空间结构(水层的与沉积层的)。图 19 为南海西北部的一段地震剖面，可看出海水运动与海底地形的关系是如此密切，海底局部隆起附近的海水层相当复杂，暗示地震海洋学可弥补一系列单点(锚系、CTD、XBT 等)观测技术，从而对深入认识深层海水运动、海底界面处发生的各种过程。

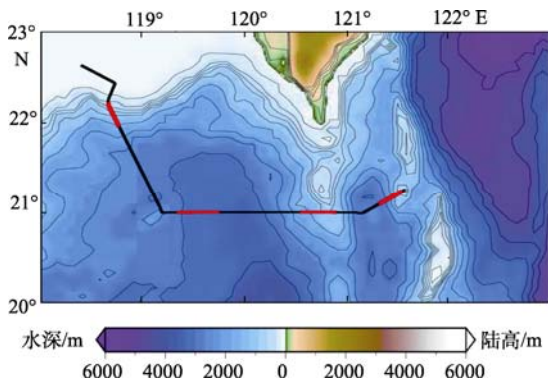


图 17 南海东北部 4 段地震剖面位置  
图中黑色线为 973-1 地震剖面的位置, 4 段红色线指示图 18 显示的 4 段地震剖面的位置。  
Fig. 17 Seismic sections' locations in the northeastern SCS

地震海洋学可望在捕捉沉积搬运过程(如浊流、迷雾层)，海底喷泉(冷泉、热液)<sup>[59]</sup>等方面也做出相应贡献。已有的大量地震数据需要大家去重新处理、分析，以获得令人意外、令人惊喜的发现<sup>[60-63]</sup>，地震海洋学尚处于初级阶段，新的发现可能会改

变人们的传统认识，可望揭示地球系统流体部分与固体部分相互作用的本质，为地球系统科学的突破做出贡献。

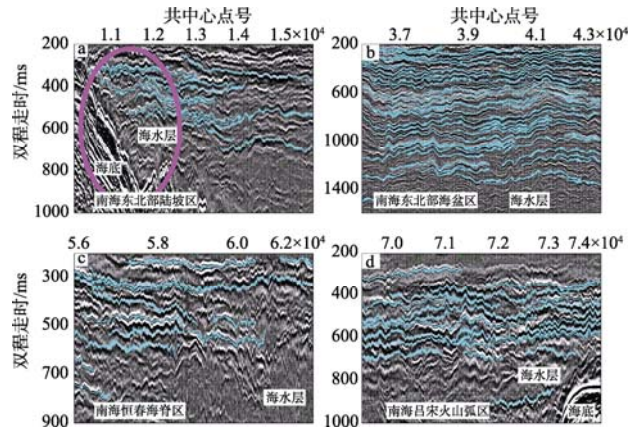


图 18 南海东北部陆坡(a)、深海盆地(b)、恒春海脊(c)和吕宋火山弧(d)的地震剖面(修改自董宗志<sup>[51]</sup>)  
蓝线代表拾取的反射层; 双程走时(TWT)乘以 0.75 可转换成深度坐标; 共中心点标号(CMP)间距 6.25m, 1000 个 CMP 间距为 6.25km。  
Fig. 18 Seismic sections along the seismic profile in the northeastern SCS shown in Figure 17 and digitized undulate seismic reflectors (blue curves)(revised from Dong<sup>[51]</sup>). Panels a, b, c and d show sections of continental slope, abyssal basin, Hengchun Ridge and Luzon volcanic arc respectively. Vertical scale in Two Way Traveling Time (ms), and the CMP interval is 6.25m.

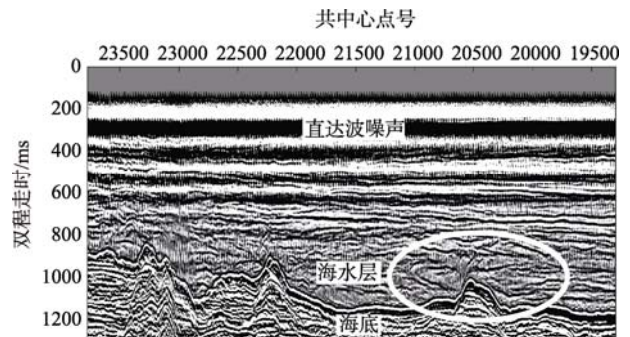


图 19 南海西北部地震剖面  
中海油资料, 2005 年初重新处理, 双程走时乘以 0.75 可转换成深度坐标, 共中心点标号间距 6.67m, 1000 个 CMP 间距为 6.67km  
Fig. 19 Seismic section in the western SCS (data from CNOOC, reprocessed in early 2005). Vertical scale in Two Way Traveling Time (ms), and the CMP interval is 6.67m.

### 参考文献

[1] 汪品先. 南海——我国深海研究的突破口[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(3): 1-4.  
 [2] WANG P, PRELL W L, BLUM P. Proc ODP, Init Repts [R/CD]. USA: Ocean Drilling Program. College Station: Texas A & M Univ, 2000, 184: 1-77.  
 [3] 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: 37.  
 [4] 钟广法, 李前裕, 郝沪军, 等. 深水沉积物波及其在南海研究之现状[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 907-913.  
 [5] 宋海斌, 耿建华, WONG H K, 等. 南海北部东沙海域天然气水合物的初步研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 687-695.

- [6] 丁巍伟, 李家彪, 韩喜球, 等. 南海东北部海底沉积物波的形态、粒度特征及物源、成因分析[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 1–10.
- [7] LÜDMANN T, WONG H K, BERGLAR K. Upward flow of North Pacific deep water in the northern South China Sea as deduced from the occurrence of drift sediments [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L05614. doi: 10.1029/2004GL021967.
- [8] STOMMEL H. The abyssal circulation [J]. *Deep-Sea Research*, 1958, 5(1): 80–82.
- [9] 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 1–367.
- [10] HSU M K, LIU A K. Nonlinear internal waves in the South China Sea [J]. *Can J Remote Sens*, 2000, 26(2): 72–81.
- [11] ORR M H, MIGNEREY P C. Nonlinear internal waves in the South China Sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(C3): 3064. doi: 10.1029/2001JC001163.
- [12] ZHAO ZHONGXIANG, KLEMAS V, ZHENG QUANAN, et al. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L06302. doi: 10.1029/2003GL019077.
- [13] RAMP S R, TANG T Y, DUDA T F, et al. Internal solitons in the northeastern South China Sea. Part I: Sources and deep water propagation [J]. *IEEE J Oceanic Eng*, 2004, 29: 1157–1181. doi: 10.1109/JOE.2004.840839.
- [14] DUDA T F, LYNCH J F, IRISH J D, et al. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea [J]. *IEEE J. Oceanic Eng*, 2004, 29 (4): 1105–1130.
- [15] LIEN R C, TANG T Y, CHANG M H, et al. Energy of nonlinear internal waves in the South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L05615. doi: 10.1029/2004GL022012.
- [16] ZHAO Z, ALFORD M H. Source and propagation of internal solitary waves in the northern South China Sea [J]. *J Geophys Res*, 111, 2006: C11012. doi: 10.1029/2006JC003644.
- [17] KLYMAK J M, PINKEL R, LIU C T, et al. Prototypical solitons in the South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L11607. doi: 10.1029/2006GL025932.
- [18] ZHENG QUANAN, SUSANTO R D, HO C R, et al. Statistical and dynamical analysis of generation mechanisms of solitary internal waves in the northern South China Sea [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: C03021. doi: 10.1029/2006JC003551.
- [19] LI XIAOFENG, ZHAO ZHONGXIANG, PICHEL W G. Internal solitary waves in the northwestern South China Sea inferred from satellite images [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L13605. doi: 10.1029/2008GL034272.
- [20] 蔡树群, 甘子钧, 龙小敏. 南海北部孤立子内波的一些特征和演变[J]. 科学通报, 2001, 46(15): 1245–1250.
- [21] FARMER D, LI QIANG, PARK J H. Internal wave observations in the South China Sea: The role of rotation and non-linearity [J]. *Atmos Ocean*, 2009, 47(4): 267–280.
- [22] BUIJSMAN M C, KANARSKA Y, McWilliams J C. On the generation and evolution of nonlinear internal waves in the South China Sea [J]. *J Geophys Res*, 2010: C02012. doi: 10.1029/2009JC005275.
- [23] GAO ZHENZHONG, ERIKSSON K A. Internal tide deposits in an Ordovician submarine channel: Previously unrecognized facies? [J]. *Geology*, 1991, 19: 734–737.
- [24] 高振中, 何幼斌, 罗顺社, 等. 深水牵引流沉积——内潮汐、内波和等深流沉积研究[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1–22.
- [25] 高振中, 何幼斌, 刘成鑫, 等. 深水牵引流沉积的研究历程、现状与前景[J]. 古地理学报, 2006, 8(3): 332–338.
- [26] 张兴阳. 深水牵引流形成的床形单元组合[J]. 古地理学报, 2000, 2(2): 28–36.
- [27] WANG GUIHUA, SU JILAN, CHU P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data [J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(21): 2121. doi: 10.1029/2003GL018532.
- [28] BROECKER W S. The biggest chill [J]. *Nat Hist Mag*, 1987, 97: 74–82.
- [29] BROECKER W S. The great ocean conveyor [J]. *Oceanography*, 1991, 4: 79–89.
- [30] LOZIER M S. Deconstructing the Conveyor Belt [J]. *Science*, 2010, 328: 1507–1511. doi: 10.1126/science.1189250
- [31] GARRETT C. Internal tides and ocean mixing [J]. *Science*, 2003, 301: 1858–1859.
- [32] RICHARDSON P L, BOWER A S, ZENK W. A census of Meddies tracked by floats [J]. *Prog Oceanogr* 2000, 45(2): 209–250.
- [33] ARMI L, HEBERT D, OAKEY N, et al. The history and decay of a Mediterranean salt lens [J]. *Nature*, 1988, 333: 649–651.
- [34] ARMI L, HEBERT D, OAKEY N, et al. Two years in the life of a Mediterranean salt lens [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19: 354–370.
- [35] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 1–509.
- [36] HALL R. Cenozoic reconstructions of SE Asia and the SW Pacific: changing patterns of land and sea [M]//METCALFE I, SMITH J M B, MORWOOD M, et al. *Faunal and Floral Migrations and Evolutions in SE Asia-Australasia*. Lisse: A A. Balkema: Swets & Zeitlinger Publishers, 2001: 35–56.
- [37] 陈林, 宋海斌, 许鹤华, 等. 张裂大陆边缘形成演化的动



- 力学模拟[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2781–2787. doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.012
- [38] 宋海斌. 南海基底构造格架及张裂大陆边缘的综合地球物理研究[R]. 北京: 中国科学院地球物理研究所博士后报告, 1998: 1–141.
- [39] 陈林. 南海张裂大陆边缘数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所博士论文, 2009: 1–165.
- [40] HOLBROOK W S, PÁRAMO P, PEARSE S, et al. Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling [J]. *Science*, 2003, 301: 821–824.
- [41] RUDDICK B. Sounding out ocean fine structure [J]. *Science*, 2003, 301: 772–773.
- [42] RUDDICK B, SONG HAIBIN, DONG CHONGZHI, et al. Water column seismic images as maps of temperature gradient [J]. *Oceanography*, 2009, 22(1): 192–205.
- [43] 宋海斌, 董崇志, 陈林, 等. 用反射地震方法研究物理海洋-地震海洋学简介[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1156–1164.
- [44] 董崇志, 宋海斌, 拜阳, 等. 地震海洋学研究进展[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(1): 109–123. doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.01.017
- [45] NAKAMURA Y, NOGUCHI T, TSUJI T, et al. Simultaneous seismic reflection and physical oceanographic observations of oceanic fine structure in the Kuroshio extension front [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L23605. doi: 10.1029/2006GL027437
- [46] 宋海斌, PINHEIRO L M, 王东晓, 等. 海洋中尺度涡与内波的地震图像[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2775–2780.
- [47] PINHEIRO L M, SONG HAIBIN, RUDDICK B, et al. Detailed 2-D imaging of the Mediterranean outflow and meddies off W Iberia from multichannel seismic data [J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 79: 89–100.
- [48] HOLBROOK W S, FER I. Ocean internal wave spectra inferred from seismic reflection transects [J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L15604. doi: 10.1029/2005GL023733.
- [49] KRAHMANN G, BRANDT P, KLAESCHEN D, et al. Mid-depth internal wave energy off the Iberian Peninsula estimated from seismic reflection data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, C12016. doi: 10.1029/2007JC004678.
- [50] SONG H B, DONG C Z, RUDDICK B, et al. Researches on internal wave spectra of northeastern South China Sea from one reflection seismic profile: Seismic Oceanography - ESF Expl. Workshop, Conf Proc [C]. Barcelona: Seismic Oceanography Conf. proc, 2008.
- [51] 董崇志, 宋海斌, 郝天珧, 等. 南海东北部海洋内波的反射地震研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(8): 2050–2055.
- [52] 宋海斌, 拜阳, 董崇志, 等. 南海东北部内波特征——经验模态分解方法应用初探[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 393–400.
- [53] WOOD W T, HOLBROOK W S, SEN M K, et al. Full waveform inversion of reflection seismic data for ocean temperature profiles [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L04608. doi: 10.1029/2007GL032359.
- [54] PAPPENBERG C, KLAESCHEN D, KRAHMANN G, et al. Ocean temperature and salinity inverted from combined hydrographic and seismic data [J]. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L04601. doi: 10.1029/2009GL042115.
- [55] 董崇志. 海水温盐结构反演与南海内波的地震海洋学研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所博士论文, 2010: 1–128.
- [56] 宋洋, 宋海斌, 陈林, 等. 利用地震数据反演海水温盐结构 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2696–2702. doi: 10.3969/j.issn.001-5733.2010.11.017.
- [57] SHEEN K L, WHITE N J, HOBBS R W. Estimating mixing rates from seismic images of oceanic structure [J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L00D04. doi: 10.1029/2009GL040106.
- [58] KLAESCHEN D, HOBBS R W, KRAHMANN G, et al. Estimating movement of reflectors in the water column using seismic oceanography [J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L00D03. doi: 10.1029/2009GL038973.
- [59] SONG HAIBIN, PINHEIRO L M, TONG C H. Seismic imaging of submarine springs (OS21B-04): AGU Western Pacific Meeting, Taiwan, June, 2010 [C]. Taipei: AGU, 2010.
- [60] VSEMIROVA E A, HOBBS R W, HOSEGOOD P. Mapping turbidity layers using seismic oceanography methods [J]. *Ocean Sci*, 2012, 8: 11–18.
- [61] SONG HAIBIN, PINHEIRO L M, RUDDICK B, et al. Seismic Oceanography: a new geophysical tool to investigate the thermohaline structure of the oceans [C]/MARCELLI M. Oceanography. Croatia: InTech Press, 2012: 113–128.
- [62] SONG HAIBIN, PINHEIRO L M, RUDDICK B, et al. Meddy, spiral arms, and mixing mechanisms viewed by seismic imaging in the Tagus Abyssal Plain (SW Iberia) [J]. *Journal of Marine Research*, 2011, 69(4-6): 827–842.
- [63] SONG HAIBIN, BAI YANG, PINHEIRO L, et al. Analysis of ocean internal waves imaged by multichannel reflection seismics, using Ensemble Empirical Mode Decomposition [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2012, 9(3): 302–311.