

南海海盆演变与深部海流

翦知潜¹, 田军¹, 黄维¹, 马小林², 万随³

1. 同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

3. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 310012

摘要 南海在距今 34 Ma 之前的始新世从陆地变为海洋, 古水深不断加深, 至距今 24 Ma 之前的中新世/渐新世之交, 由于 T60 构造运动, 南海海盆整体进入深海环境。但是, 自中新世以来随着吕宋岛弧向欧亚板块碰撞, 南海海盆的半封闭程度在距今 10.0、6.5、3.0 和 1.2 Ma 之前加剧, 导致南海深部海水只能来自巴士海峡海槛深度 2600 m 以浅的太平洋。此后, 巴士海峡两侧的南海与太平洋深部海水交换, 由于全球海平面变化, 呈现冰期/间冰期模式。

关键词 深水古海洋学; 南海; 海盆演变; 冰期旋回

南海深部是一个半封闭海盆, 仅仅通过台湾岛和菲律宾之间水深大约 2600 m 的巴士海峡与太平洋联通。与常见的表层洋流“波涛汹涌”不一样, 人们对“视而不见”的深部海流知之甚少。南海深海海盆呈近似东北-西南的菱形, 平均深度达 4700 m。由于深部环流受到海盆地形的约束, 追溯南海深部海流的前世今生, 只能从南海海底的古海洋记录和南海海盆的构造演化两方面去认识。1999 年以来南海执行的 4 次大洋钻探和 2010 年起为期 8 年的国家自然科学基金委“南海深海过程演变”重大研究计划, 为重建南海深海海盆的形成和古海流演变提供了高质量的研究材料和大量科学数据。

本文旨在简述南海晚始新世(距今 38—34 Ma)以来, 南海从陆地变为深海过程中古水深的变化; 此后, 随着巴士海峡的海槛隆升, 南海成为半封闭海盆, 进而对南海深部海流的影响。以及距今约 3 Ma 的北半球冰盖形成以来, 南海与太平洋深部海水交换的冰期/间冰期变化。但是, 南海地质历史复杂, 中生代就可能有过古南海, 本文所述仅是今天南海的历史。

1 南溟溯源: 南海从陆地变为海洋

南海什么时候从陆地变为海洋? 几十年来一

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-06-21

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(91428310); 国家重点研发计划项目(2018YFE0202400)

作者简介: 翦知潜, 教授, 研究方向为海洋地质学, 电子信箱: jian@tongji.edu.cn

引用格式: 翦知潜, 田军, 黄维, 等. 南海海盆演变与深部海流[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 52-56; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.008

直是一个谜。20多年前,在南海北部近岸的石油钻井中就已经发现再沉积的始新世超微化石,在深水石油钻井的岩屑样品中亦发现始新世有孔虫和超微化石。然而,直到2017年国际大洋发现计划(IODP)第368航次,首次在南海北部报道了深海和浅海相始新世沉积的确凿直接证据。研究发现,南海北部U1501站(图1(a);北纬 $18^{\circ}53'$,东经 $115^{\circ}46'$,水深2846 m)具有始新世以来从陆相至深海相的连续沉积。无论是Sr同位素测年,还是浮游有孔虫、超微化石的生物地层学证据,都指示井深380 m以下的海洋沉积物属于年龄大于34 Ma的晚始新世^[1];根据其底栖有孔虫组合反映当时是陆架浅海环境。然而,在相隔不远的U1502站(北纬 $18^{\circ}28'$,东经 $116^{\circ}14'$,水深3764 m)的基底蚀变玄武岩顶部,发现一套丰富多样的深水胶结壳底栖有孔

虫;通过世界性对比,确定其地质年代属于晚始新世,且以生活在1000 m至3500~4000 m水深的属种为主。这说明,南海北部大陆边缘在晚始新世的同张裂期就有强烈的岩浆作用,且发生在碳酸盐补偿深度(CCD)以下的深海环境。由于U1502站位于U1501站以南仅约70 km处,可以想象晚始新世南海的陆架相当狭窄(图1(d))。有意思的是,U1502站晚始新世深水胶结壳底栖有孔虫与北大西洋、西特提斯洋报道的同时代组合具有强烈的亲缘关系。另外,在U1504站(北纬 $18^{\circ}51'$,东经 $116^{\circ}15'$,水深2817 m)发现的晚始新世货币虫(*Nummulites*)等大有孔虫,与马尔代夫、菲律宾海发现的热带浅海组合非常相似,再次说明当时南海与特提斯洋之间存在某种联系^[1]。

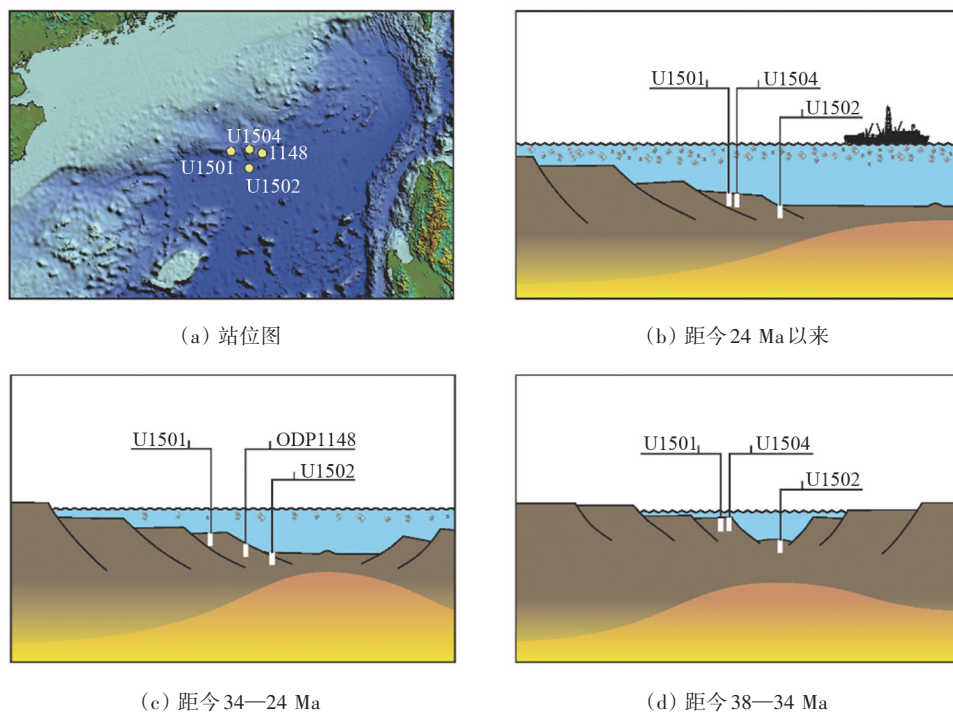


图1 南海北部古地理古水深和大洋钻探钻井位置示意

古水深重建有助于了解南海盆地形成过程中海盆沉降过程和古海流的变化。在U1501站,井深460 m以下没有海相化石,当时还属于陆地。井深460 m至380 m的晚始新世沉积物中,底栖有孔虫占该层段有孔虫总丰度的98%,且主要是浅海底栖

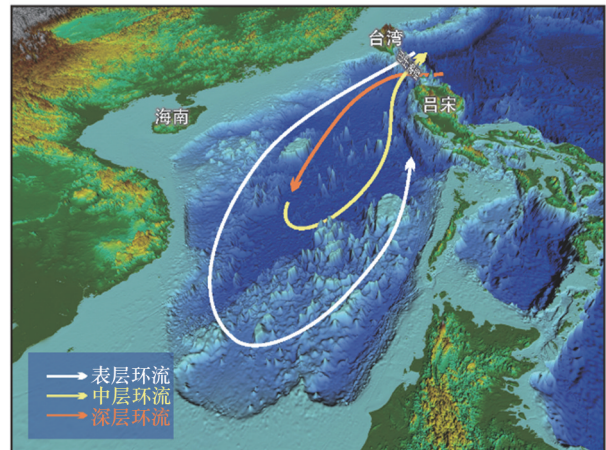
有孔虫,表明当时属于水深很浅的陆架海洋环境。在渐新世/始新世(距今~34 Ma),南海发生沉降,沉积物中浮游有孔虫含量增多,且深水和浅水底栖有孔虫和介形虫壳体共存,指示当时是水深浅于1000 m的外陆架到上陆坡,而且是离岸距离不远

的古海洋环境。渐新世时期(距今 34—24 Ma),南海的古水深明显加深。根据高分辨率 Sr 同位素地层学,中新世/渐新世之交的地震反射层 T60 构造运动,其年龄为距今~28—24 Ma 前^[1]。在 U1501 站的 T60 上方,浮游有孔虫丰度突然增大至>95%,表明古水深增加到 2500 m 或更深。因此,根据南海 4 次大洋钻探的古海洋记录,早中新世距今 24 Ma 以来,南海海盆整体进入深海环境(图 1(b))。

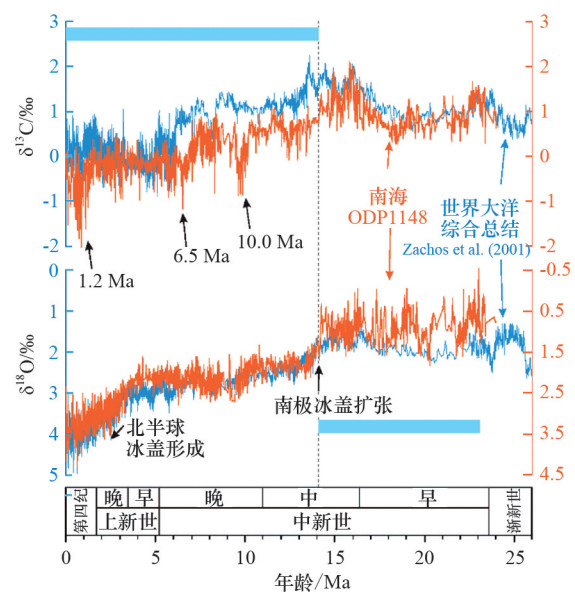
2 海槛隆升:南海半封闭程度的发育

由于巴士海峡海槛的阻隔,南海现代的深部海水只可能来自于水深浅于 2600 m 的太平洋深部海水。太平洋深部海水通过巴士海峡进入南海海盆,在向南流动过程中由于地形影响而上翻,再通过中层水从巴士海峡回到太平洋(图 2(a)),因而南海的古海流演变记录不仅可以反映西太平洋深部海水的变化,而且可以用来重建中新世以来南海与太平洋深部海水交换的历史。早中新世(距今 24—15 Ma)时期,台湾岛与菲律宾之间的巴士海峡还相当宽,海槛尚未隆起,并未影响南海与太平洋深部海水的交换,北太平洋中层水(NPIW)和太平洋深层水可以自由进入南海。因此,早中新世南海深部海水的化学性质(深水底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$)与世界大洋深部海水的基本一致^[2](图 2(b))。

中中新世(距今 15 Ma)开始,南海海盆扩张停止、并向东俯冲,巴士海峡的宽度大幅缩短、海槛不断隆升,使得南海海盆逐步变为半封闭状态。随着南海海盆半封闭程度的发育,南海深部环流减弱,导致底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 与世界大洋的综合值比较明显偏负。晚中新世以来距今 10.0、6.5、1.2 Ma 前的南海深水 $\delta^{13}\text{C}$ 极端负值在时间上与台湾岛的俯冲-碰撞构造事件相吻合^[3],说明巴士海峡的海槛隆升促使南海成为半封闭海盆,不仅阻挡海槛深度以下的太平洋深部海水进入南海,而且也改变了南海海盆内的古海流演变。尤其是,距今 6.5—6.0 Ma 前,南海南部(ODP 1143 站)和北部(ODP 1148 站)之间的深水 $\delta^{13}\text{C}$ 梯度突然增大,可能反映了吕宋岛弧与欧亚板块发生碰撞导致巴士海峡的“就位”对南



(a) 巴士海峡两侧的现代海洋环流



(b) 南海北部 1148 站中新世以来的底栖有孔虫氧碳同位素与世界大洋综合曲线^[2]的比较

图 2 南海半封闭程度的发育

海深部海水的影响^[4]。此外,中中新世南海北部 ODP 1148 站和 1146 站均发现距今 16—15 Ma 和 11—10 Ma 的太平洋深海碳酸盐溶解事件,推测中中新世的南海与北太平洋一样,底盆海水主要来自南大洋的下层南极绕极流(LCDW),因而呈现相同的碳酸盐化学演变。然而,晚中新世以来,南海晚中新世和早上新世的碳酸盐含量相对高,而太平洋的深海碳酸盐含量变化趋势相反,可能指示了由于巴士海峡的形成与阻碍,南海的深水来源发生重大变化,晚中新世以来南海深部海水由来自南大洋的上

层南极绕极流(UCDW)和来自北太平洋的深层水(NPDW)混合而成,因而呈现不同的碳酸盐化学演变。总之,南海本身的构造活动和全球的冰盖演化,是影响南海古海流及其性质的两个重要因素。

3 沧海巨变:冰期旋回的深海环流

晚上新世北半球冰盖形成(距今约3 Ma)以来,地球气候环境进入典型的冰期/间冰期旋回。冰期来临时,由于极地冰盖增大、海平面下降,现在被海水淹没的全球陆架区出露成为陆地,发生沧海巨变。当时,全球海平面下降可达120 m,南海南部与印度洋、爪哇海的通道完全关闭,成为一个口袋状的半封闭海洋,海洋环流随之改变。

南海现代海洋观测表明,在巴士海峡的两侧,中层海水流出南海,而深层海水从西太平洋进入南海,逆时针方向运行,发生强烈的垂向混合。通过对南海海底表层沉积物样品中底栖和浮游有孔虫壳体进行AMS ^{14}C 测年^[5],得到南海深部海水的年龄分布,发现沿着深部海水的流动方向、流动距离越长,深部海水的年龄反而“变年轻”,说明南海深部海水在流动过程中确实发生了强烈的垂向通风,展示出与开放大洋不一致的变化趋势。南海现代深部海水的强烈通风,将深部海水过量的溶解无机碳(DIC)输送至上层,使得现代南海成为大气 CO_2 弱源(图3(a))。

采用南海北部和南部的晚第四纪柱状样中底栖和浮游有孔虫壳体的AMS ^{14}C 测年,发现全新世(距今1万年以来)南海沿着深部海水的运动方向、从北到南的深层水年龄变年轻,与现代的一致。但是,末次盛冰期(LGM;距今约2万年前)时期,由于海平面下降,南海海盆变成一个“茶壶”,在南海南部河流带来的淡水形成一个盐度偏低的表层“淡水”盖子,使得南海海盆“茶壶”里的深部环流垂向分层加剧、通风减弱。因此,沿着深部海水的运动方向、从北到南的深层水年龄显著变老^[6],与现代和全新世的状况完全相反,从而导致LGM时期底层海水的溶解氧含量降低、 CO_2 增多,南海的弱碳“源”效应减弱、甚至失效,而可能成为大气 CO_2 的

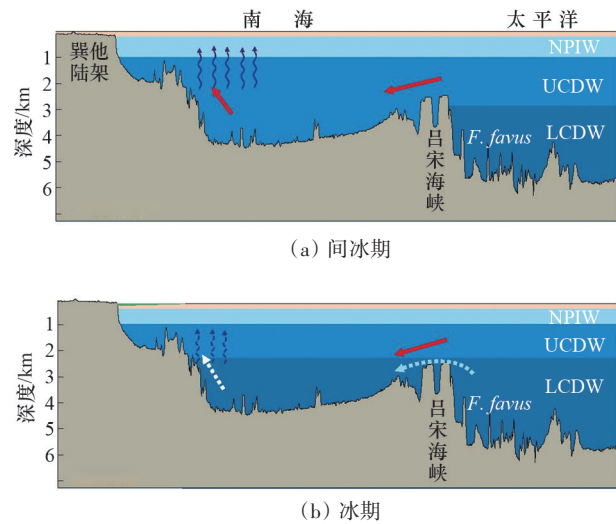


图3 晚第四纪冰期旋回中南海与太平洋深部环流与碳循环演变的概念模式

“汇”(图3(b))。采用浮游有孔虫壳体B/Ca比值重建晚第四纪南海表层海水的 $p\text{CO}_2$,结果发现总体上间冰期时南海是大气 CO_2 的源、冰期时是汇,存在 CO_2 源汇格局的冰期/间冰期转换。由此可见,南海深部环流的变化可能是影响冰期/间冰期时间尺度上 CO_2 源汇格局转换的重要因素之一。

冰期旋回中,南海与太平洋的深部海水交换也会随着深部海水强弱的变化而发生改变。现代生活在西太平洋水深2600 m以下的底栖有孔虫*Favocassidulina favus*是太平洋深层水下部(来自LCDW)的标志种,但由于巴士海峡的阻隔进不了南海。然而,末次冰期*F. favus*在南海北部和南部的深海岩芯中都有出现,指示了来自南大洋的LCDW增强。因此,综合微体化石、同位素等古海洋学证据,我们建立了晚第四纪冰期旋回中南海与西太平洋深部海水交换的两种模式——间冰期模式和冰期模式(图3),及其对南海碳循环的影响。

4 结论

南海古洋流演变既有全球和区域因素的影响,也有边缘海本身的特色,记录了南海早期(距今约40—24 Ma)从陆地变为深海过程中古水深的变化、中新世(距今24 Ma)以来巴士海峡形成过程中南海海盆半封闭程度的发育以及晚上新世(距今3

Ma)以来冰期旋回中南海与太平洋的深部海水交换,从而为“南海深海过程演变”重大研究计划重建边缘海“生命史”提供了重要的依据,有助于研究大洋深部环流和碳循环等全球变化的机制。

参考文献(References)

- [1] Jian Z M, Jin H Y, Kaminski M A, et al. Discovery of the marine Eocene in the northern South China Sea[J]. *National Science Review*, 2019, 6(5): 881-886.
- [2] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. *Science*, 2001, 292: 686-693.
- [3] Chen W, Huang C Y, Lin Y J, et al. Depleted deep South China Sea $\delta^{13}\text{C}$ paleoceanographic events in response to tectonic evolution in Taiwan - Luzon Strait since Middle Miocene[J]. *Deep-Sea Research II*, 2015, 122: 195-225.
- [4] Tian J, Ma X L, Zhou J H, et al. Subsidence of the northern South China Sea and formation of the Bashi Strait in the latest Miocene: Paleocceanographic evidences from 9-Myr high resolution benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2017, 466: 382-391.
- [5] Jin H Y, Jian Z M, Wan S. Recent deep water ventilation in the South China Sea and its paleoceanographic implications[J]. *Deep-Sea Research Part I*, 2018, 139: 88-94.
- [6] Wan S, Jian Z M. Deep water exchanges between the South China Sea and the Pacific since the last glacial stage[J]. *Paleoceanography*, 2014, 29: 1162-1178.

Evolution of the South China Sea basin and the deep circulation

JIAN Zhimin¹, TIAN Jun¹, HUANG Wei¹, MA Xiaolin², WAN Sui³

1. State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
3. South China Sea Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 310012, China

Abstract The present-day South China Sea (SCS) was evolved from land to sea in the Eocene 34 million years ago, and its paleo-water was very deep. At the turn of the Miocene/Oligocene, 24 million years ago, due to the T60 tectonic movement, the entire SCS basin became a deep-sea environment. Since the Miocene, 10.0, 6.5 and 1.2 million years ago, along with the collision of the Luzon island arc with the Eurasian plate, the semi-closed degree of the SCS basin increased, so that the SCS deep-water could only come from the Pacific above the sill depth (~2600 m) of the Bashi Strait. After that, due to the global sea level change, the deep-water exchange between the SCS and the Pacific on both sides of the Bashi Strait displayed the glacial/interglacial mode.

Keywords deep-water paleoceanography; South China Sea; basin evolution; glacial cycle ●



(责任编辑 祝叶华)