

# 南海深层水的来龙去脉

王桂华<sup>1</sup>, 田纪伟<sup>2</sup>

1. 复旦大学大气与海洋科学系/复旦大学大气科学研究院, 上海 200438

2. 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100

**摘要** 中国南海是一个半封闭、深海盆、多岛屿(海山)、多连通的边缘海,南海深层水十分活跃,更新时间快,具有典型的南海深层环流特征。综述了目前海洋学家对南海深层水的认知,厘清了南海深层水的来龙去脉,并阐述了南海深层环流的特色。

**关键词** 南海深层水;强混合;深层环流

南海(South China Sea)是中国近海面积最大、水深最深的海区,面积约350万 km<sup>2</sup>,最大水深可达5559 m。南海地处低纬度地区,南跨赤道,北抵北回归线。南海全年平均海面温度约为28℃,最低为1月的25.9℃,最高为6月的29.5℃。但出乎意料的是,南海1000 m以深水温却非常低,约为2~4℃。这些南海深层水从何而来,如何更新,最后又去了哪里?

要回答这3个根本问题,首先需要了解南海的地形特点。南海是一个半封闭的海盆,在2500 m以深是一个完全封闭的海盆。其形状像个菱形,呈东北—西南走向。吕宋海峡是连接整个南海的唯一深水通道(水深2500 m),与太平洋连通。南海还分别通过台湾海峡、民都洛海峡、卡里马塔海峡、

马六甲海峡分别与东海、苏禄海、爪哇海和印度洋相连,水深大多浅于100 m,民都洛海峡略微深些,最大水深450 m<sup>[1]</sup>。另外,南海岛屿众多,共有超过200个岛屿(礁),分布广泛,海山更是星罗棋布(图1)。南海如何通过这些通道与外界交换?南海深层水的生命历程与这些复杂地形是否有关系?

其次,从物理的角度出发,南海深层水的生消变化与南海的动力和热力过程相连。南海处于东亚季风影响之下,夏季盛行西南风,冬季盛行东北风。受太阳短波辐射的影响,南海南部温度高、北部温度低;此外,受月球引潮力的影响,南海潮汐呈现半日周期和全日周期的变化特征。这些动力和热力过程在南海深层水的生消过程中又起着什么作用?

收稿日期:2020-05-04;修回日期:2020-07-04

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(91428206,91628302);南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)深远海创新团队项目

作者简介:王桂华,教授,研究方向为海洋动力学和海气相互作用,电子信箱:wanggh@fudan.edu.cn

引用格式:王桂华,田纪伟.南海深层水的来龙去脉[J].科技导报,2020,38(18):21-25;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.002

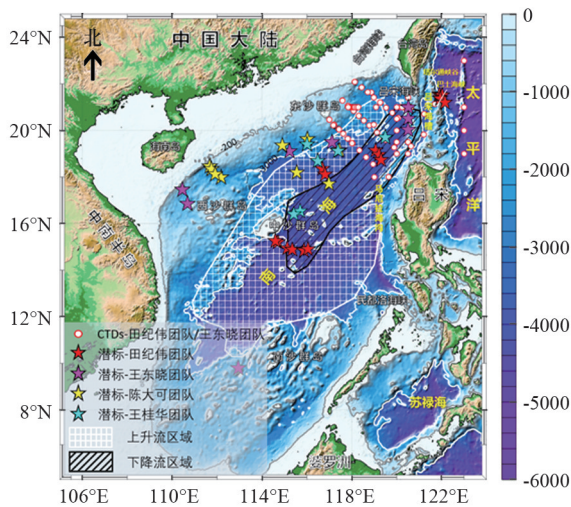


图1 中国南海地理位置和海底地形

在“南海深海过程演变”重大研究计划支持下,4个与南海深层水动力学密切相关的课题共获取了88个CTD剖面 and 41套潜标资料(图1)。这些宝贵资料以及相关理论研究阐明了南海入流方式、内部环流结构以及上升流等重要特征,极大地丰富了人们对南海深层水演变的认识。为此,集成前人以及近些年主要创新研究成果,突显南海深海环流的特色,分3部分回答深海环流的3个根本问题。

## 1 南海深层水形成与深海瀑布

海水具有记忆的禀赋,它可以根据温度、盐度、溶解氧或泥沙等特性来追根溯源。通过对比,人们发现南海深层(3000 m以下)的温度和盐度性质(也称为水团特性)与西太平洋2000 m左右的温盐性质十分相近,都呈现出低温、高盐特性(图2),根据这个特征,很容易推测出南海深层水来自于太平洋2000 m左右,而太平洋2000 m左右水的源地最终可以追踪到南极。所以,南极看上去遥远,其实“远在天边,近在眼前”。

这些冷而重的太平洋深层水如何通过吕宋海峡进入南海深层?太平洋与南海之间有一海槛,物理隔绝导致该海槛以下太平洋与南海之间没有直接的水交换,但在1500 m到海槛的深度太平洋的位势密度比南海高,形成自东向西穿越吕宋海峡的

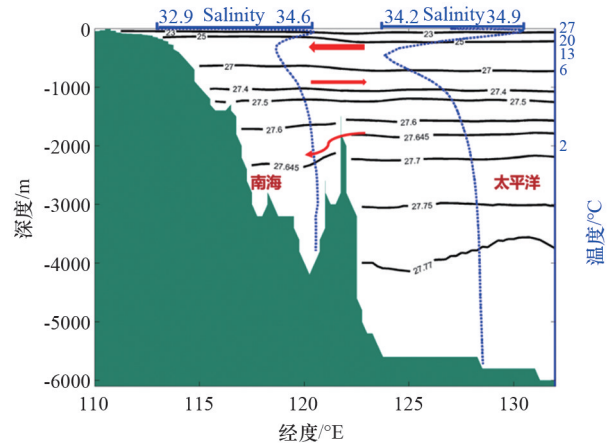


图2 南海和太平洋20°N断面水文  
(等值线为位势密度,蓝色虚线为T-S点聚线)

压力梯度,驱动着太平洋深层水通过吕宋海峡进入南海<sup>[2]</sup>。

海槛的深度约为2500 m,而南海水深为5000 m,因此,太平洋的水进入南海就以“深海瀑布”的形式进行的,瀑布的高度可达几千米,作为对比,黄果树瀑布的高度小于100 m,因此,深海瀑布是相当壮观的。通过多种方式估算,深海瀑布的水量约为1.5 Sv(1 Sv=10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s),约为长江径流量的50倍,与全球所有河口径流量总和相当(约1.2 Sv)。

除此之外,吕宋海峡内部的地形诱导也十分重要。一般来说,海沟(海槽)地形能够诱导海水由地势高一侧向地势低的一侧流动,并对海水流动进行约束。西北太平洋深层水通过塔尔通峡谷(Tal-tung Canyon)以及巴士海峡进入吕宋海峡深层,并沿着吕宋海槽向南流动,最后沿着吕宋海峡西侧两个豁口和马尼拉海沟进入南海内区<sup>[3]</sup>。

## 2 南海深层环流与强混合

西北太平洋深层水进入南海后又是如何流动的?根据收集的历史温盐资料,发现南海深层低温高盐水舌向西伸展,从而推测太平洋深层水进入南海后呈现出向西运动趋势;进一步发现溶解氧也呈东北西南走向,而且浓度不断降低,也暗示海水向西南运动。此外,泥沙和沉积物分布结果也显示南海深层北部海水有向西运动的趋势。这些示踪物

定性表明,南海深层北部海水应该是向西运动的,并猜测南海深层环流可能呈逆时针旋转。

利用美国海军广义数值环境模式(Generalized Digital Environment Model)气候态温盐场,发现南海深层有一低盐中心<sup>[4]</sup>。经过进一步计算 2400 m 以下南海的深层环流,确实得到了一个逆时针旋转的环流(气旋性环流)。同时,研究还表明,沿着深层的岸线,该环流有显著的西边界流体系。该深层西边界流始于吕宋海峡入流口附近,沿着北边界向西运动,到达西边界后转向南流动。也有其他海流观测证实了这支南海深层西边界流(Deep Western Boundary Current),整体表现为流速大、流幅窄、流层厚,这些环流特征与经典的深层环流理论十分吻合。值得注意的是,南海深层的密度空间分布主要由盐度的空间分布决定的,因此,南海深层环流主要是由盐度的空间分布特征决定。

毫无疑问的是,太平洋的低温高盐水源源不断地流入南海。如果没有其他机制驱动,整个南海水将与太平洋的水完全一样,即在吕宋海峡的东西两侧,最终南海与太平洋的密度会一致,吕宋海峡深海瀑布终会消失。但中国南海海水仍然生机勃勃,每隔几十年整个南海海水就会更新一次。因此,为了维系南海深层环流系统,必然有一个机制来保证南海深层低盐中心的存在,并不停地维系这个中心。现在已经知道太平洋水团和南海水团都为倒S型(图2),在 500 m 左右盐度最小,是否有可能有一种机制把这一层的低盐拉到深层,而把南海深层的海水拉到上面呢?

完成这一过程的动力机制是“混合”<sup>[5]</sup>。研究表明,南海深层存在强烈的混合,其强度比太平洋高 1~2 个数量级<sup>[6]</sup>。为什么南海混合会强这么多呢?这和南海的地形特点紧密相关,主要有 2 个原因:一是吕宋海峡地形独特,太平洋产生的内潮和内波在此聚集,而且此处还激发大量的内潮和内波,二者叠加并不断向南海输入,大大加强了南海的混合强度。二是南海深海有大量的海山链,这些海山链的作用主要有 3 个:1) 深层环流与地形的相互作用,可以通过惯性重力波等形式增强局部的混合;2) 复杂的海山地形可以诱发产生局地内潮

和涡旋,内潮和涡旋耗散也会引起混合的增强;3) 在海山作用下,潮汐混合也会得到加强。可以说,南海深层环流的形成和维系很大程度上都依赖于南海的强混合特性,因此,南海强混合深层环流既和经典大洋深层海洋环流有一致之处,但又具有鲜明的特色。

### 3 南海深层水去向与连通的世界

经典的大洋深海环流理论有一假设,海水内部是均一上涌的,即假如吕宋海峡深海瀑布的流量为 1.5 Sv,海水内部的上涌速度约为  $1.5 \times 10^{-7}$  m/s。这是一个非常理想化的假设模型,实际比这复杂得多。那么,南海深层水最后究竟去了哪里呢?

图3是根据现有知识给出的南海环流概念图,可以看出,南海环流十分独特。海盆尺度环流呈现三层环流结构:南海上层为气旋式环流,中层为反气旋式环流,深层则为气旋式环流。这与太平洋水和南海水交换在垂向上呈现的“三明治”结构相对应:上层太平洋水进入南海,中层南海水流出入太平洋,底层又是太平洋水进入南海。太平洋水源源不断地进入南海深层,这样南海深层不断堆积必然要向中上层输送以保持水体平衡。深层水向中上层输送主要是通过“推拉”的方式向中层输入,“推”是指太平洋和南海之间的压力差以及次生环流等形式,“拉”主要是指强混合等形式。

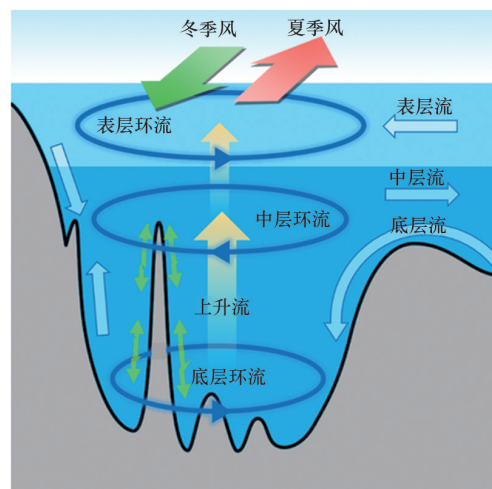


图3 南海三维环流概念图

目前认为南海深层水进入中层主要通过3种形式:一是吕宋海峡东西两侧的压力差导致太平洋深层水注入南海并下沉,在下沉过程中不停地和周边海水卷夹混合,水团发生变性密度变轻,从而逐渐上升;二是太平洋水进入南海后会形成西边界流,伴随着强西边界流,为了保证边界零通量的条件,动力学上要求靠近底部的等密度线必须垂直于局地的陆坡海底,因此,靠近边界的等密度线发生倾斜,在水平方向上产生压力梯度力,驱动一支沿着陆坡向上的爬坡流。作者团队的研究表明,整个南海深层的四周大体都表现为上升流。可以把南海比做一个茶壶,太平洋水从茶壶口源源不断地流入,在茶壶内部沿着壁面向上爬,可以形象地把它比喻成“逆茶壶”效应(图3);三是南海分布着大量的海山或岛屿,具有典型的地貌特征。当水平流动撞击海山时会产生上升运动,同时,可以通过内潮、涡旋等耗散方式增强混合,进而把深层水往中层甚至上层输送<sup>[7]</sup>,还可以通过海山捕获波、海山背风波以及由海山诱发的深海涡旋等方式产生垂向运动<sup>[8]</sup>。

南海深层水到了南海中层后,它的去向主要分成3部分:一部分加入到中层的反气旋性环流系统;一部分通过吕宋海峡流出南海进入太平洋,加入太平洋中层水或黑潮系统,进而成为北太平洋环流的重要组成部分;还有一部分通过中小尺度混合等方式更上一层楼,进入南海上层,在季风环流带动下流出卡里马塔海峡,进一步调节印度尼西亚贯穿流并参与到全球热传输带。

因此,南海的深层环流并不是孤立存在的,而是通过一系列多尺度海洋动力过程与中上层海洋相互联系、相互影响。同时,南海深层水来自太平洋,最终又回到太平洋或印度洋,它们互相连通、互相成就、互相制约,正所谓“万物相连、生生不息”。

## 4 结论

由于南海独特的半封闭、深海盆、多岛屿(海山)、多连通等特性,使得南海深层水十分活跃,南海深层环流既有经典大洋环流的一面,也存在有别

于大洋环流的许多特征。根据现有知识和物理推理深入理解南海深层水的来龙去脉,特别提出了南海深海强混合环流的概念。

强调了南海地形结构对南海深层环流3个方面的显著影响。首先,吕宋海峡海槛和海沟约束了太平洋水进入南海的方式,且形成了巍巍壮观的“深海瀑布”;其次,海山和岛屿地形通过多种方式使得南海具有强混合特征,是维系南海深层环流可持续的根本;三是南海地形也是南海深层水向上爬升的主要推动力之一。因此,南海复杂地形在南海深层水生命历程中的作用是不可或缺的,具有鲜明特色。

由于南海海盆小,海水更新时间快,深海环流具有清晰的时空结构,是进行大洋深层环流研究的理想试验场。南海深层环流与大洋深层环流有许多相同与不同之处,值得进一步深入研究。总之,通过研究南海深层水,不仅对南海深层研究有重要的科学意义,而且对认识全球大洋深层环流研究也具有重要的借鉴意义。

**致谢:**陈大可院士和王东晓教授提供站点位置;自然资源部第二海洋研究所闫运伟副研究员、复旦大学刘文虎博士生、厦门大学周木平和倪钦彪博士生提供帮助。

## 参考文献(References)

- [1] 苏纪兰. 南海环流动力机制研究综述[J]. 海洋学报, 2005, 27(6): 1-8.
- [2] Qu T, Giron J B, Whitehead J, et al. Deepwater overflow through Luzon Strait[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: C01002.
- [3] 田纪伟, 曲堂栋. 南海深海环流研究进展[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 25-30.
- [4] Wang G, Xie S P, Qu T, et al. Deep South China Sea circulation[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38: L05601.
- [5] Ferrari R, Mashayek A, McDougall T J, et al. Turning ocean mixing upside down[J]. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(7): 2239-2261.
- [6] Tian J, Yang Q, Zhao W, et al. Enhanced diapycnal mix-

- ing in the South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(12): 3191–3203.
- [7] Wang D, Wang Q, Cai S, et al. Advances in research of the mid-deep South China Sea circulation[J]. Science China Earth Sciences, 2019, doi: 10.1007/s11430-019-9546-3.
- [8] Lavelle J W, Mohn C. Motion, commotion, and biophysical connections at deep ocean seamounts[J]. Oceanography, 2010, 23(1): 90–103.

## Origin and development of the deep water in South China Sea

WANG Guihua<sup>1</sup>, TIAN Jiwei<sup>2</sup>

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China
2. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

**Abstract** The South China Sea (SCS) is a semi-enclosed and multi-connected marginal deep sea with a large number of islands (seamounts). The deep SCS circulation is very robust with active deep water renewed. This paper reviews the current understanding of the deep water in the SCS, focusing on its origin and development, as well as the unique features of the SCS deep circulation.

**Keywords** South China Sea deep water; strong mixing; deep circulation ●



(责任编辑 祝叶华)