

南海深海环流研究进展

田纪伟^①, 曲堂栋^②^① 中国海洋大学物理海洋实验室, 青岛 266003;^② International Pacific Research Center, SOEST, University of Hawaii, Honolulu, 96822, USA

E-mail: tianjw@ouc.edu.cn

2011-11-06 收稿, 2012-04-18 接受

国家自然科学基金重大研究计划(91028008)、国家自然科学基金(40890153)和国家高技术研究发展计划(2008AA09A402)资助

摘要 深海科学是全球气候变化研究的重要组成部分, 孕育着科学上的重大突破和发现, 是海洋科学研究的重要领域. 近些年来, 随着我国对深海科学研究的逐步深入, 南海深海环流研究越来越引起海洋科学家的关注, 并已取得若干研究成果. 本文将从南海深海环流观测出发, 首先总结近年来南海深海环流观测方面研究工作, 然后介绍南海深海环流未来研究初步设想.

关键词南海深海环流
巴士海峡
水体通量
能量通量
地形
湍流混合

南海是西太平洋最大的边缘海, 其边缘特征对其深层环流、沉积搬运及深海碳循环具有显著影响, 是开展海洋动力、沉积动力及生物地球化学等多学科综合研究的天然试验场. 南海深海环流是南海深海大尺度、中尺度、小尺度和微尺度等多尺度动力过程以及复杂突变地形相互作用的宏观表征, 是实现沉积搬运和深海碳循环等过程的基本载体. 而维持南海深海环流运转的物质溯源和能量源泉恰是巴士海峡的深水“瀑布”和巴士海峡的内潮能通量. 因此, 量化巴士海峡水体通量和能量通量是描述南海深海环流基本构形的前提, 阐明南海深海地形对运输路径的约束是解释深海环流空间结构的基础, 探明深海湍流混合过程机理是解译深海环流变异的关键.

巴士海峡是连接太平洋与南海的唯一深水通道. 跨越巴士海峡的太平洋深层水(巴士海峡深水“瀑布”), 经吕宋海槽和马尼拉海沟汇入南海, 视为吕宋/马尼拉深层环流. 南海深层环流是指海盆内约 2000 m 以深的环流(这个水体的上曲面是以通过巴士海峡进入南海的北太平洋深层水的位势密度来定义的). 吕宋/马尼拉深层环流是联接西太平洋与南海深层环流的重要纽带, 是维持南海热量和淡水平衡、支撑南海贯

通流^[1]、影响南海海盆沉积过程及深海碳循环的关键因子^[2-11].

巴士海峡又是实现太平洋与南海能量交换的重要通道. 大量的内潮(10 GW)在巴士海峡生成并传入南海, 为南海深层混合提供了丰富的能量, 使得南海深层混合比太平洋高 2 个数量级. 强烈的跨越等密度面混合诱发出南海深层垂直对流, 驱动着南海深层气旋式环流, 调控着南海深层水团更新周期^[7,12].

西北太平洋菲律宾海盆西边界流、吕宋/马尼拉深层环流和南海深层环流, 视为一个深层环流系统, 其结构与变异是环流间相互作用、海底复杂突变地貌约束、深层湍流强混合调控等因素的联合效应. 因此, 对这一深层环流系统的现代过程的深入认识, 将有助于实现古海流再造和边缘海生命史解译, 也将有助于开展南海气候变化和深层碳循环研究.

1 菲律宾海盆深层西边界流观测

菲律宾海盆, 作为巴士海峡深水通道的上游, 其海盆内的环流结构、变异及调控机制对巴士海峡深水通量乃至南海深层环流具有重要作用. 自全球大洋环流实验(World Ocean Circulation Experiment, WOCE)

等大洋环流观测计划实施以来,全球大洋环流的研究取得了重大发展,深化了人们对大洋环流,尤其对太平洋深层环流的理解.南太平洋深层西边界流经过克马德克海脊后,首先要跨越萨摩亚深水通道进入中太平洋海盆(萨摩亚深水通道向北输送的深层水通量为6~8 Sv)^[13-17].进入中太平洋海盆后继续北上,在吉尔伯特群岛南端产生分岔,形成东深层流分支(较深的深层水团)和西深层流分支(较浅的深层水团).东深层流分支在中太平洋海盆沿图瓦卢群岛和吉尔伯特群岛东边北上,跨越赤道,并作为一支东边界流沿马绍尔群岛东边继续北上.其主流通过威克岛水道(通量4 Sv)^[18]进入西北太平洋海盆,沿着日本海沟^[19]、千岛海沟^[20]和阿留申海沟^[21]最后进入东北太平洋海盆,视为太平洋大尺度反气旋环流的主要分量.西深层流分支进入美拉尼西亚海盆后朝西北方向流动,跨越赤道,携带4 Sv的深层水进入东马里亚纳海盆并在南端分叉为两支:一支进入西北太平洋海盆,一支进入西马里亚纳海盆,最后流入菲律宾海盆(图1).

为研究菲律宾海盆西边界流,我们自2010年8月以来,在菲律宾海盆西侧巴坦岛东侧开展了深层海流长期连续观测(图2(a)),观测深度为2950 m.2010年8月至2011年4月观测结果显示:在巴坦岛东侧,受海底地形限制,南北向背景流速较东西向更

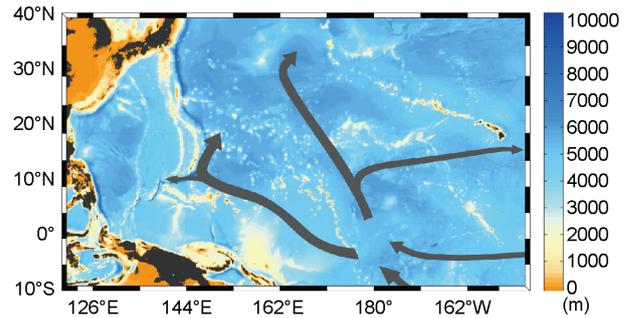


图1 南极绕极深层水(LCPW)在西太平洋的路径示意图
据文献[13,14]修改

为显著,最大可达 8 cm s^{-1} (图2(b));而且南北向背景流存在显著的季节变化特征,夏季以南向为主,冬季以北向为主.这一结果表明自菲律宾海盆西面跨越巴士海峡进入南海的太平洋深层水(或部分)可能在冬季来自南边,在夏季来自北边,这与目前从沉积物运输推测的深层流路径(来自北边)有所不同.为进一步确定跨越巴士海峡进入南海的太平洋深层水的上游路径和水体通量需在台湾和巴坦东部开展深层流连续观测.

2 巴士海峡、吕宋/马尼拉深层流场和通量

20世纪70年代,人们通过对南海与菲律宾海深层温度/盐度特征对比分析,推断南海深层水始于跨

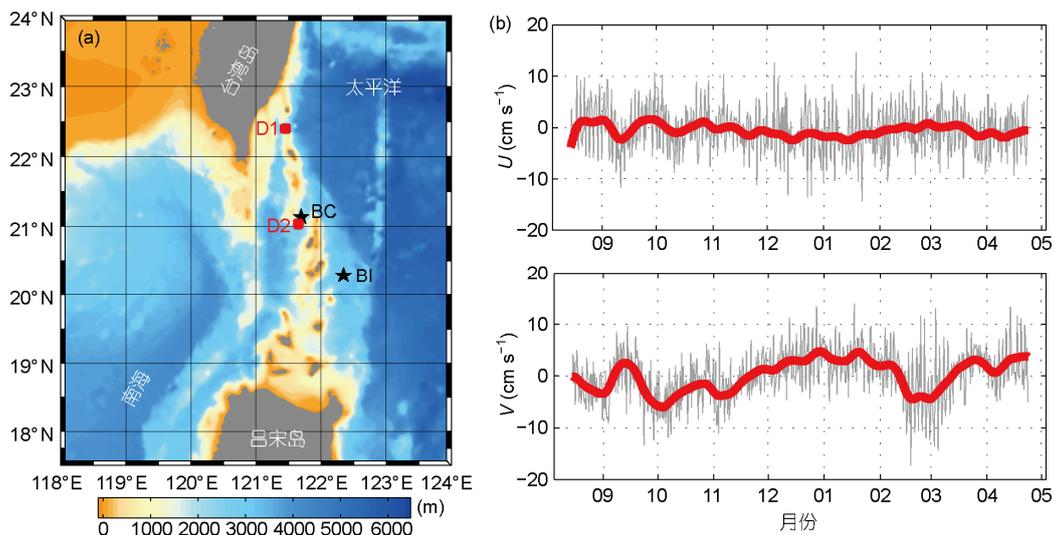


图2 巴士海峡(BC)、巴坦岛东侧(BI)潜标站位及Chang等人^[22]在Taltung Canyon(D1)和巴士海峡(D2)的潜标站位(a)以及巴坦岛东侧潜标观测的流速(b)

(b)中灰色实线表示观测流速,红色实线为提取相应的平均背景流

越巴士海峡深水通道的西北太平洋深层水^[23~25]. 自20世纪80年代以来, 巴士海峡深层水交换研究得到了较为广泛的关注, 并就深水瀑布结构和通量估计取得了新的认识^[6,8,9,26~34], 例如, 根据 World Ocean Database 历史资料, Qu 等人^[9]发现在大约 1500 m 以深, 南海与太平洋水之间存在明显的密度差. 这个密度差驱动深层海水由太平洋流向南海, 是产生巴士深水“瀑布”(deep water overflow)的主因. Qu 等人^[9]估计了巴士深水“瀑布”的输运量为 1~2.5 Sv. Tian 等人^[6]和 Yang 等人^[8]根据最新海流和水文观测资料, 量化了巴士海峡各层流场结构和水体通量. 水团分析进一步表明: 低温高盐的太平洋深层水进入南海后下沉, 可能会形成一个气旋式深层环流.

Chang 等人^[22]于 2007 年 4 和 7 月分别在巴士海峡和 Taltung Canyon 布放了 2 个潜标(均于 2008 年 1 月回收)研究吕宋海峡深层流入对南海水交换的影响(图 2(a)). 该研究认为巴士海峡是太平洋深层水进入南海的主要通道, 其流量为 1.06 ± 0.44 Sv, 并且存在季节内变化特征(图 3).

从 2009 年 10 月开始, 田纪伟等人开展了对巴士海峡深水“瀑布”的长期连续观测(图 2(a) BC 站), 研

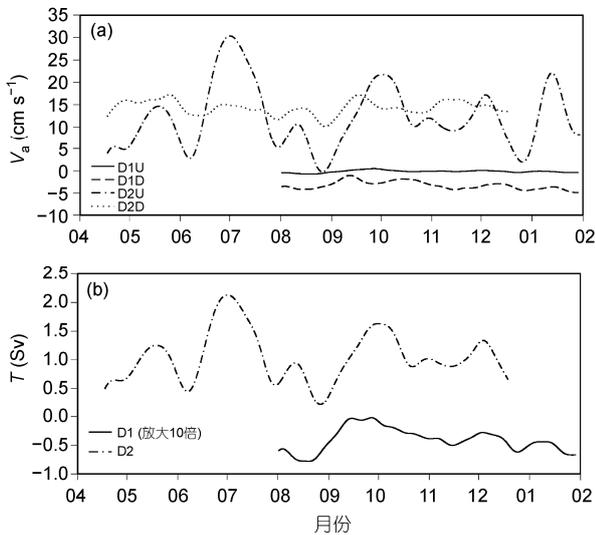


图 3 巴士海峡(D2)和 Taltung Canyon (D1)沿海峡方向的流速(V_a)和水体通量(T)

据文献[22]修改. (a) 15 d 低通滤波后巴士海峡(D2)和 Taltung Canyon (D1)沿海峡方向的流速, 方向分别为北向顺时针旋转 135° 和 100° (D1U, D1D 分别代表 D1 潜标 2714 和 2960 m 水深处的流速; D2U, D2D 分别代表 D2 潜标 2262 和 2695 m 水深处的流速); (b) 巴士海峡(D2)和 Taltung Canyon (D1)相应沿海峡方向的水体通量

究其空间结构及时间变异特征. BC 站观测结果显示了太平洋深层水越过巴士海峡常年流入南海, 背景流最大流速达 40 cm s^{-1} , 远大于开阔大洋的深海背景流速($\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$).

3 南海深层环流组网观测

由于缺乏直接海流观测数据, 目前我们对南海深层环流的认知还相当肤浅, 仍然处于定性或半定量描述阶段.

赵玮等人利用在吕宋海峡进行的流速、水文及化学等多方面结合观测, 对太平洋深层水跨越巴士海峡经吕宋海槽进入南海的流量进行了研究(图 5, 内部交流). 结果证实大量太平洋深层水经过吕宋海峡(~ 1.5 Sv)进入南海, 巴士海峡作为深层水进入吕宋海峡的主要通道, 其流量约为 1.2 Sv; 深层水进入吕宋海峡后通过西侧恒春海脊的 3 个缺口进入南海, 其中中间 2 个缺口为深层水流出吕宋海峡进入南海的主要出口. 赵玮等人对各个出口的流量进行了初步估计, 自南向北分别为 0.1, 0.7, 0.4 Sv, 而太平洋深层水进入吕宋海峡后的路径及其他各个海槛的流量将在进一步工作中详细分析并给出.

最近, Wang 等人^[12]利用最新的美国海军广义数值环境模式(Generalized Digital Environment Model, GDEM)逐月气候态温盐资料, 计算了南海深层地转流(图 6). 从图中可以看出南海深层地转流是一个气旋式环流, 与 Qu 等人^[9]根据水团分析所推算的相吻合. 南海深层环流沿着 116°E 断面有一强西边界流, 该流态可以从 2000 m 一直持续到海底. 他们的研究

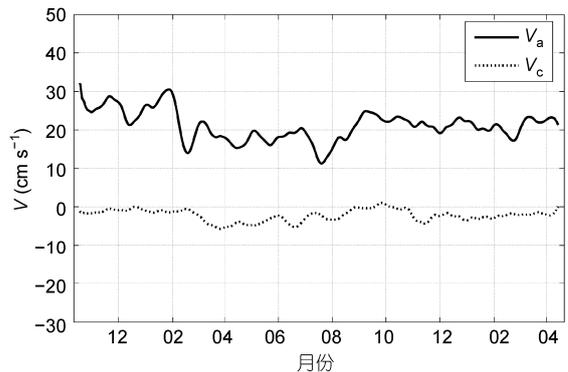


图 4 从巴士海峡潜标(BC)测得的 2009 年 10 月~2011 年 4 月的深层流中提取的背景流

实线 V_a 表示沿海峡指向南海一侧的背景流; 虚线 V_c 表示垂直于海峡方向的背景流

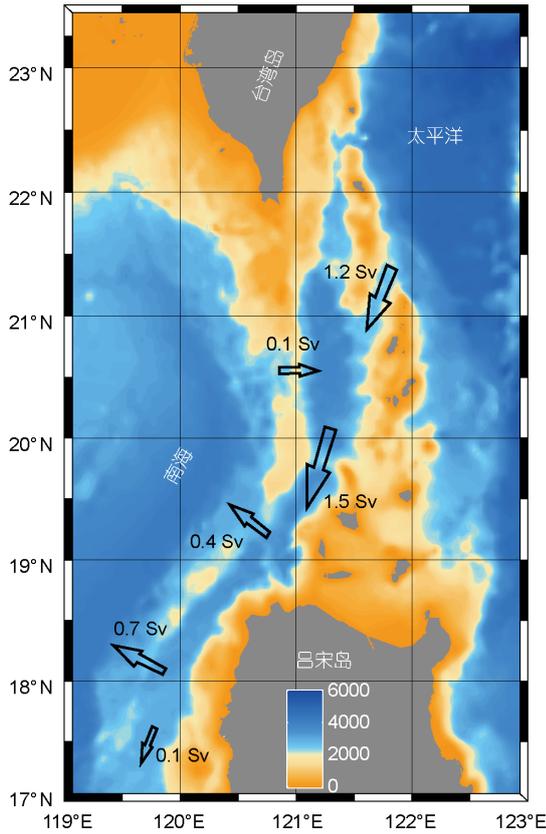


图5 吕宋海峡各海槛 36.83 等位密线(σ_2)以深的水体通量

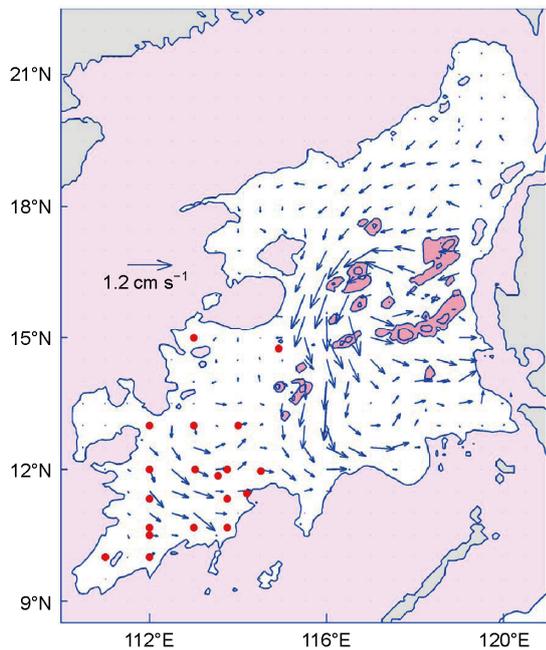


图6 从 2400 m(参考面)到海底的垂直平均地转流(cm s^{-1})
据文献[12]修改. 浅粉红色阴影区表示水深浅于 2400 m. 深粉红色阴影区表示水深浅于 3600 m 的海山. 红色实心圆表示在 3000 m 水层溶解氧超过 2.15 mL L^{-1} 点

还表明: 南海中部有一低盐中心, 盐度是决定南海深层密度进而决定南海深层环流的重要因子, 而海底地形对深层盐度的时空特征分布的形成起着十分关键的作用.

基于全球简单海洋资料同化分析系统(Simple Ocean Data Assimilation, SODA) 的结果, Wang 等人^[35]给出了南海经向翻转流函数(图 7). 图 7 表示海水从深层自北向南输送, 并且逐步上升, 在表层返回南海北部(注意其上还有一个浅层经向翻转). 该经向翻转环流修正了基于南海 1000 m 平底假设下经向翻转结果, 描述了南海深、中、上层水的平均运动路径, 为研究南海风生、热盐环流动力学提供了理想化的参考依据.

4 南海深海环流研究展望

南海深层环流研究正在逐步深入, 在呈现出可喜的科学成果的同时, 更加显现出更多的科学问题, 尤为凸显出深海观测和技术手段的不足. 它们值得我们认真思考和深刻探索, 并努力寻求解决的途径.

4.1 努力实现从南海深海宏观运动到微观机制的协同观测

海洋大尺度运动是多尺度运动相互作用结果的宏观表征: 它们涉及了湍流理论的核心问题——串级理论, 也关系到海洋模式急需解决的问题——合理参数化过程方案. 南海大/中尺度正压等运动与吕宋海峡相互作用产生中小尺度内波, 即将大/中尺度运动能量向中小尺度运动迁移, 内波非线性相互作用及内波与海底地形相互作用将诱发内波失稳, 从而触

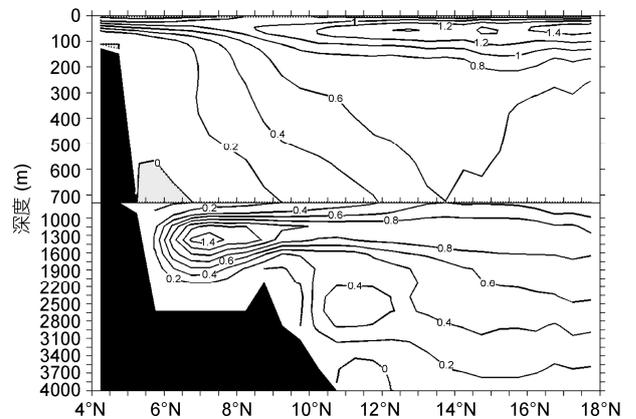


图7 由 SODA 得到的气候年平均经向翻转环流流函数(Sv)

发海洋湍流混合,这是一个正串级过程;混合将调节密度场,增加系统势能,进而调控大尺度环流,这是一个负串级过程。随着对海洋大尺度环流研究的不断深入,海洋中尺度涡、内波及混合等多尺度动力过程逐渐得到重视,极大地推动了海洋观测技术从大尺度现象的孤立观测向多尺度过程机制的协同观测发展。最近,美国已开展了海洋上层多尺度过程的同步观测^[36,37],深化了内波演变和湍流混合过程的机制研究。南海深层动力过程是多尺度运动相互作用和相互共存的结果。因此,如何围绕深海环流调控机制、深海环流变异及深海环流的气候效应等科学问题,实现深海多尺度过程相互作用和微观机理的同步观测将是未来深海观测的发展方向之一。

4.2 持续推进和有效扩延南海深层环流长期连续观测

巴士海峡深水通量和南海深层混合是影响或调控南海深层环流的关键因子。巴士海峡深水环流的上游(即视为菲律宾海盆深层环流的分支)和吕宋海峡内潮能通量及它们的变异将直接影响着南海深层环流的空间结构和时间演变。目前研究表明巴士海峡深水通量存在显著变化(0.2~1.2 Sv)以及西北太平洋深层水温存在增暖趋势等因素^[38]。这些因素将调控着南海深层环流,并进而影响着南海气候变化。因此,在目前巴士海峡深水通量和吕宋海沟等长期连续观测基础上,针对南海深层环流的变异等科学问题,构建巴士海峡毗邻海区菲律宾海盆深层西边界流和南海主要深水通道等方面的长期连续观测网,形成南海深层环流系统演变过程的长期连续气候观

测,是提升我国深海科学研究能力的当务之急。

4.3 快速开展南海海底地形等基础数据集成和补充观测

海底地形包含陆架区和海盆等缓变的大尺度地形,陆坡、峡谷、海沟及海脊等变化的中尺度地形,以及复杂突变的小尺度地形。这些不同尺度的海底地形分别制约着深层环流路径,诱发/散射着中小尺度内波,触发着小尺度湍流混合、进而调控着深海环流结构。南海的陆架、陆坡、巴士海峡、吕宋海槽、马尼拉海沟、火山链和海底峡谷等突变复杂的海底地形孕育和调控了丰富的海洋多尺度过程。然而由于目前缺少南海高分辨率海底地形基础数据集,造成目前仅能基于网上 ETOPO 数据开展南海深海环流初步研究,极大地制约了南海深层海洋动力过程研究的深入开展。因此,在整理南海海底地形观测数据基础上,开展盲区地形数据的补充观测,最终构建南海高分辨率海底地形基础数据集,无疑对我国开展南海深海海洋科学研究具有重大意义。

5 结语

深海科学是全球气候变化研究的重要组成部分,孕育着科学上的重大突破和发现,是海洋科学研究的重要领域。南海呈现出丰富的海洋现象与过程,是开展深海科学研究的天然试验场,也是拓展深远海科学研究的先导区。因此,以南海为研究海区,以深海观测为主导,推动我国深海研究的纵深发展和有机交叉,实现深海观测技术与深海科学研究协调并进,将是推进我国深远海事业发展的必由之路。

致谢

感谢中国科学院南海海洋研究所王东晓教授等提供的有关南海经向翻转流最新研究成果,国家海洋局第二海洋研究所王桂华教授等提供的南海深层环流最新研究成果,台湾大学唐存勇教授、博士生张雅婷等提供的吕宋海峡深层环流最新研究成果,“南海深海过程演变”重大研究计划办公室和指导专家组,同济大学刘志飞教授;感谢广东海洋大学谢玲玲博士,中国海洋大学赵玮教授、杨庆轩博士和硕士生周春在文章完成过程中提供的帮助和建议;感谢中国海洋大学东方红 2 号科学考察船船长及全体船员,以及有关单位和专家。

参考文献

- 1 Qu T D, Du Y, Meyers G, et al. Connecting the tropical Pacific with Indian Ocean through South China Sea. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L24609, doi: 10.1029/2005GL024698
- 2 Wang P X, Li Q Y. *The South China Sea: Paleoceanography and Sedimentology*. Netherlands: Springer, 2009. 515
- 3 邵磊, 李学杰, 耿建华, 等. 南海北部深水底流沉积作用. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 50: 1060-1066

- 4 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. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L05614, doi: 10.1029/2004GL021967
- 5 Alford M H, Lien R C, Simmons H, et al. Speed and evolution of nonlinear internal waves transiting the South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 2010, 40: 1338–1355
- 6 Tian J W, Yang Q X, Liang X F, et al. Observation of Luzon Strait transport. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L19607, doi: 10.1029/2006GL026272
- 7 Tian J W, Yang Q X, Zhao W. Enhanced diapycnal mixing in the South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 2009, 39: 3191–3203
- 8 Yang Q X, Tian J W, Zhao W. Observation of Luzon Strait transport in summer 2007. *Deep-Sea Res*, 2010, 57: 670–676
- 9 Qu T D, Garton J B, Whitehead J A. Deepwater overflow through Luzon Strait. *J Geophys Res*, 2006, 111, doi: 10.1029/2005JC003139
- 10 Lueck R G, Mudge T D. Topographically-induced mixing around a shallow seamount. *Science*, 1997, 276: 1831–1833
- 11 Thurnherr A M, Laurent L C, Speer K G, et al. Mixing associated with sills in canyons on the mid-ocean ridge flank. *J Phys Oceanogr*, 2005, 35: 1370–1381
- 12 Wang G H, Xie S P, Qu T D, et al. Deep South China Sea circulation. *Geophys Res Lett*, 2011, doi: 10.1029/2010GL046626
- 13 Johnson G C, Toole J M. Flow of deep and bottom waters in the Pacific at 10°N. *Deep-Sea Res*, 1993, 40: 371–394
- 14 Wijffels S E, Toole J M, Bryden H L, et al. The water masses and circulation at 10°N in the Pacific. *Deep-Sea Res*, 1996, 43: 501–544
- 15 Johnson G C, Rudnick D L, Taft B A. Bottom water variability in the Samoa Passage. *J Mar Res*, 1994, 52: 177–196
- 16 Rudnick D L. Direct velocity measurements in the Samoan Passage. *J Geophys Res*, 1997, 102: 3293–3302
- 17 Freeland H. Observations of the flow of abyssal water through the Samoa Passage. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31: 2273–2279
- 18 Kawabe M, Yanagimoto D, Kitagawa S, et al. Variations of the deep western boundary current in Wake Island Passage. *Deep-Sea Res I*, 2005, 52: 1121–1137
- 19 Hallock Z R, Teague W J. Evidence for a North Pacific deep western boundary current. *J Geophys Res*, 1996, 101: 6617–6624
- 20 Owens W B, Warren B A. Deep circulation in the northwest corner of the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res I*, 2001, 48: 959–993
- 21 Warren B A, Owens W B. Deep currents in the central subarctic Pacific Ocean. *J Phys Oceanogr*, 1988, 18: 529–551
- 22 Chang Y T, Hsu W L, Tai J H, et al. Cold deep water in the South China Sea. *J Oceanogr*, 2010, 66: 183–190
- 23 Nitani H. Oceanographic conditions in the sea east of the Philippines and Luzon Strait in the summer of 1965 and 1966. In: Marr J, ed. *The Kuroshio—A Symposium on the Japan Current*. Honolulu: East West Center Press, 1970. 213–232
- 24 Nitani H. Beginning of the Kuroshio, in Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K, eds. *Physical Aspects of the Japan Current*. Seattle: University of Washington Press, 1972. 129–163
- 25 Broecker W S, Patzert W C, Toggweiler J R, et al. Hydrography, chemistry, and radioisotopes in the southeast Asian basins. *J Geophys Res*, 1986, 91: 14345–14354
- 26 Wang J. Observation of abyssal flows in the Northern South China Sea. *Acta Oceanogr Taiwan*, 1986, 16: 36–45
- 27 Liu C T, Liu R J. The deep current in the Bashi Channel. *Acta Oceanogr Taiwan*, 1988, 20: 107–116
- 28 Shaw P T. The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan. *J Geophys Res*, 1989, 94: 18213–18226
- 29 Gong G C, Liu K K, Liu C T, et al. The chemical hydrography of the South Chin Sea west of Luzon and a comparison with the west Philippine Sea. *Acta Oceanogr Taiwan*, 1992, 3: 587–602
- 30 Chen C T, Wang S L. Influence of the intermediate water in the western Okinawa Trough by the outflow from the South China Sea. *J Geophys Res*, 1998, 103: 12683–12688
- 31 Qu T D, Mitsudera H, Yamagata T. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea. *J Geophys Res*, 2000, 105: 6415–6424
- 32 Qu T D. Evidence of water exchange between the South China Sea and the Pacific through the Luzon Strait. *Acta Oceanol Sin*, 2002, 21: 175–185
- 33 Qu T D, Lindstrom E J. Northward intrusion of Antarctic Inter-mediate Water in the western North Pacific. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 2104–2118
- 34 Xie L L, Tian J W, Hu D X, et al. A quasi-synoptic interpretation of water mass distribution and circulation in the western North Pacific: II circulation. *Chin J Oceanol Limnol*, 2009, 27: 955–965
- 35 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. *科学通报*, 2004, 49: 480–486
- 36 Moum J N, Lien R C, Perlin A, et al. Sea surface cooling at the equator by subsurface mixing in tropical instability waves. *Nat Geosci*, 2009, 2: 761–765
- 37 Zhang Y W, Moum J N. Inertial-convective subrange estimates of thermal variance dissipation rate from moored temperature measurements. *J Atmos Ocean Technol*, 2010, 27: 1950–1959
- 38 Masuda S, Awaji T, Sugiura N, et al. Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters. *Science*, 2010, 329: 319–322