进展

南海深层环流与经向翻转环流的研究进展

王东晓^①, 肖劲根^{①②}, 舒业强^①, 谢强^{①③*}, 陈举^①, 王强^①^① 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;^② 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;^③ 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

* 通讯作者, E-mail: gordonxie@scsio.ac.cn

收稿日期: 2016-01-24; 接受日期: 2016-04-25; 网络版发表日期: 2016-09-18

中国科学院战略性先导专项项目(编号: XDB06020102)、国家自然科学基金项目(批准号: 41276024 和 91228202)、中国科学院三亚深海科学与工程研究所知识创新工程领域前沿项目(编号: SIDSSE-201205)和广东省科技计划项目(编号: 2012A032100004)资助

摘要 吕宋海峡“深水瀑布”一方面驱动了南海深层气旋式环流, 另一方面入侵的北太平洋深层水在南海内区通过混合变性并上升. 这两个过程极大地贡献了南海经向翻转环流. 同时无论是南海深层水平环流, 还是经向翻转环流, 均受到南海内区复杂地形的调制, 而南海经向翻转环流的空间结构又在一定程度上体现了南海深层环流与中、上层环流的联系. 本文回顾了近年来南海深层环流与经向翻转环流的研究, 总结了南海深海环流的驱动机制及其地形的调控、南海经向翻转环流的空间结构及其成因.

关键词 吕宋海峡“深水瀑布”, 南海深海环流, 南海经向翻转环流, 底地形

1 引言

吕宋海峡(水深约为2400m)作为南海深层与太平洋深层沟通的唯一通道, 其通量和环流结构对南海深层环流和经向翻转环流可以产生重大影响. 水团分析显示南海2000m以深的水团性质与吕宋海峡东侧的菲律宾海2000m处的北太平洋深层水的水团性质类似(Nitani, 1972; Broecker等, 1986). 南海深层水由北太平洋深层水的混合变性形成, 其密度明显小于吕宋海峡东侧的北太平洋深层水, 因而吕宋海峡两侧的深层密度差异构成的压力差会驱动北太平洋

深层水入侵南海, 形成吕宋海峡“深水瀑布”(Qu等, 2006a). 吕宋海峡“深水瀑布”入侵南海的流量约为0.7~2.5Sv(Wang, 1986; Liu C T和Liu R J, 1988; Qu等, 2006a; Tian等, 2006; Yang等, 2010, 2011; Chang等, 2010; Zhou等, 2014). 基于最近的水文观测和高分辨率模拟, 吕宋海峡“深水瀑布”的流径如下所述: 吕宋海峡两端的深层压力差驱动大约0.8Sv的北太平洋深层水通过巴士海峡形成吕宋海峡“深水瀑布”, 然后“深水瀑布”沿巴士海峡通道主轴流向吕宋海沟, 最后主要从吕宋海沟的西侧豁口流向南海内区海盆(Tian和Qu, 2012; Zhao等, 2014; Zhou等, 2014).

中文引用格式: 王东晓, 肖劲根, 舒业强, 谢强, 陈举, 王强. 2016. 南海深层环流与经向翻转环流的研究进展. 中国科学: 地球科学, 46: 1317-1323, doi: 10.1360/N072015-00454

英文引用格式: Wang D X, Xiao J G, Shu Y Q, Xie Q, Chen J, Wang Q. 2016. Progress on deep circulation and meridional overturning circulation in the South China Sea. Science China Earth Sciences, 59: 1827-1833, doi: 10.1007/s11430-016-5324-6

在吕宋海峡垂直通量“三明治”结构以及南海深层强混合的影响下,推测南海经向翻转环流具有如下结构:在吕宋海峡上层,热带太平洋次表层水流入南海,在南海上层形成南海贯穿流(Qu等, 2005, 2006b; Wang等, 2006; Yu等, 2007);而在吕宋海峡深层太平洋深层水流入南海,驱动南海深层翻转环流(Qu等, 2006b; 刘长建等, 2008; Fang等, 2009). 太平洋深层水和次表层水在南海混合,从吕宋海峡中层流出,进而形成南海中层经向翻转环流,如图1所示. 南海经向翻转环流的“三明治”结构与南海上层气旋式环流、中层反气旋环流与深层气旋式环流互相配置,构成了一个相当复杂的环流动力系统. Tian等(2012)对吕宋海峡深层环流与南海深层环流的观测研究进行了综述,但是缺乏对南海底部等深流、南海深层环流的驱动机制以及南海深层经向翻转环流等的回顾. 由于目前这方面的研究进展主要集中在模拟与诊断方面,本文主要对南海深层环流与经向翻转环流的模拟结果和驱动机制进行总结.

2 南海深层环流

南海强混合会驱动南海深层水体强烈涌升(Tian等, 2009),依据Stommel-Arons深海环流理论(Stommel和Arons, 1960a, 1960b),南海深层海盆存在气旋式环流. Chao等(1996)的模拟结果显示南海深层为气旋式环流,同时南海深层水的更新过程主要为台湾西南

侧和越南外海的深层水上翻. Yuan(2002)利用GFDL MOM模式,在只考虑吕宋海峡对南海环流结构的影响下模拟出吕宋海峡和南海环流的垂向“三明治”结构,即在吕宋海峡表层和深层,北太平洋次表层水和深层水流入南海,而在吕宋海峡中层,南海水流出吕宋海峡,与这种出流-入流结构伴随的是在表层和深层南海内部成气旋式环流,而在中层为反气旋式环流. Li等(2006)基于南海深层溶解氧资料提出南海热盐环流的概念图,它包括在吕宋海峡三层跨海峡水交换单元,沿北边陆坡上层和中层的上升单元,深海更新单元和深海内部气旋单元. Wang等(2011)基于美国海军全球数字环境模式数据(GDEM3.0)利用动力诊断方法进一步给出了南海2400m到底部的环流形势,即南海深层中部海山区为气旋式环流,存在较强的深海西边界流,而南部为微弱的气旋式环流.

2.1 南海底部等深流

由于陆坡的变化远大于行星涡度(f)的变化,边缘海的环境涡度(f/H , H 为地形深度)主要由底地形决定. 在零阶近似下,底层流有跟等深线重合的趋势(Holloway, 1992, 2008). 这种流在海洋沉积学研究上称之为等深流. 南海底层等深流实际上指的是南海深层侧边界流,属于南海深层环流的一部分,同时也对南海深层经向翻转环流有一定的贡献. Lüdmann等(2005)利用反射地震资料推测北太平洋深层水通过巴士海峡沿着南海北边陆坡往西北流动上翻,在上翻过程中再悬浮,从而形成东沙沉积体. Shao等(2007)利用南海东北部陆架反射地震资料推测从巴士海峡进来的南海底部等深流沿着南海北部路坡往西北行进,直到转入南海内部. Zhu等(2010)指出南海西北部海域发育的迁移性峡谷与等深流和重力流的增强有关. Zheng等(2012)总结了反射地震方法发现的南海东北部海盆底部等深流水道.

肖劲根等(2013)构造了一个考虑潮汐、中尺度涡和地形影响下的南海底部等深流诊断模型,如图2所示. 该模型结果显示在南海深层吕宋海峡“深水瀑布”和斜压影响最大,潮汐作用和中尺度涡影响次之,风场的影响最小. 在不考虑吕宋海峡“深水瀑布”、潮汐和中尺度涡的影响下,南海底部等深流为反气旋式环流. 而考虑吕宋海峡“深水瀑布”后,南海底层等深流为气旋式环流. 潮汐混合和涡致混合起到加强

图1 南海经向翻转环流概念图

SCSTF 为南海贯穿流

图2 南海底部等深流强迫因子(a)和等深流分布(b)图

引自肖劲根等(2013)

整个气旋式环流的作用. 此外, 该模型还给出了南海底部等深流量级大小与地形坡度之间的密切关系, 即地形坡度较大的地方, 其流速也大.

为检验南海底部等深流与地形之间的关系, Xie等(2013)利用POM(Princeton Ocean Model)设置了两组试验topo_h(低平滑地形)与topo_l(高平滑地形), 其他设置(开边界和强迫场等)都相同. 低平滑地形和高平滑地形的区别在于地形坡度的差别, 由图3a与3b可见, 低平滑地形试验中地形具有更大的地形坡度. 从低平滑地形试验到高平滑地形试验, 地形坡度减少, 所对应的流速也随之减少(图3c和3d). 因此在数值实验中, 南海底层等深流对地形是很敏感的, 地形的差异可以引起南海底部等深流强度的变化.

2.2 南海深层环流的驱动机制

区别于Stommel-Arons深海环流理论, 假定某海盆有 N 个海峡存在海峡水交换, Yang等(2000)基于位涡收支平衡方程, 提出定常深海环流积分约束:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\bar{Q}_i f_i}{H_i} = -\lambda \oint_c (\bar{u}_h \cdot l) ds, \quad (1)$$

式中, $\bar{Q}_i$ 为海峡的净通量, λ 为瑞利摩擦系数. 式(1)指出海盆环流与海峡通量存在紧密的联系, 即海峡入侵的高位涡平流会驱动海盆气旋式环流, 而负位涡平流会驱动海盆反气旋式环流. Lan等(2013)基于

HYCOM做了两组试验(控制试验为吕宋海峡开启, 而敏感性试验为吕宋海峡关闭). 当吕宋海峡开启时, 吕宋海峡深层存在“深水瀑布”, 导致高位涡平流进入南海, 为保持整个海域的位涡平衡, 南海深层会诱发气旋式环流(图4a); 而当吕宋海峡关闭时, 吕宋海峡深层不存在“深水瀑布”, 因而在南海深层不会形成气旋式环流(图4b). Lan等(2015)进一步指出, 吕宋海峡“深水瀑布”的季节性变化也会驱动南海深层环流的季节性变化. 而Xu等(2014)利用ATOP(Advanced Taiwan Ocean Prediction)系统指出吕宋海峡净输运“三明治”结构对南海环流有着强的动力约束. 对于深层环流而言, 吕宋海峡“深水瀑布”确实可以驱动南海深层海盆气旋式环流.

2.3 南海深层环流对上层环流的影响

观测结果显示南海存在强烈的内潮混合(St Laurent, 2008; Tian等, 2009; Yang等, 2013, 2014), 对南海内的不同水团存在强烈的搅拌作用(Yuan, 2002), 同时这种深层强烈的涌升运动会压缩上层水体, 因而会对南海上层环流产生较大的影响. Wang等(2012)利用一层半约化重力模式探讨了南海深层环流对南海上层环流的影响, 他发现南海深层的强烈涌升可以压缩南海上层环流, 诱发全海盆反气旋式异常环流. 当这个反气旋式异常环流叠加在南海冬季气旋式环流时, 会使得温跃层厚度变浅, 南海冬季西边界

图3 地形指数 $|\nabla H|/H^2$ 与对应的2000m流速分布图

(a) Topo_h 试验地形指数; (b) topo_l 试验地形指数; (c) topo_h 试验所对应的2000m流速; (d) topo_l 试验所对应的2000m流速, 引自 Xie 等 (2013)

图4 吕宋海峡开启(a)或关闭(b)时的南海深层环流图

引自 Lan 等(2013)

流流量减小, 因而会减弱南海冬季环流. 而当反气旋式异常环流叠加在南海夏季环流时, 会使得南海北部气旋式环流减弱, 而使南部反气旋式环流增强.

3 南海经向翻转环流

Wang等(2004)利用一个 z 坐标下刚盖近似的海洋环流模式, 分别在闭边界和开边界两种情况下, 模拟了理想平底海底地形下南海冬季和夏季上层经向翻转环流. 模拟结果显示黑潮影响南海上层经向翻转环流的范围可达到 10°N 左右, 从而驱动南海上层海洋形成一个不闭合的经向翻转环流. 冬季(夏季)海水从 500m (200m)左右自北向南输送, 并且逐步上升, 在表层返回北部. 该经向翻转环流描述了南海中层水和次表层水的运动路径. Zhang等(2014)发现南海 400m 以浅存在一个顺时针翻转环流. 这个翻转环流的结构为南海北部为下沉区, 在次表层向南运动, 在南海南部上升, 然后在表层为北向运动. 其中表层北向运动主要与南海海盆的纬向风有关, 北部下沉区与南海北部的冬季通风过程有关, 而上升区主要与Ekman抽吸引起的夏季越南上升流以及越南海域以外区域的上升运动有关.

Fang等(2009)利用MOM2的模拟结果显示吕宋海峡上层太平洋次表层水入侵南海的西向净通量为 5Sv , 形成南海贯穿流, 而吕宋海峡深层太平洋深层水入侵南海的西向净通量为 0.31Sv . 太平洋次表层与

深层水在南海发生混合, 从吕宋海峡中层流出南海, 其净通量为 0.56Sv . 这种吕宋海峡“三明治”的运输结构会驱动不闭合的南海经向翻转环流. 刘长建等(2008)计算SODA资料多年平均的经向翻转流函数, 发现在南海中上层经向翻转环流与Wang等(2004)的结果类似, 同时南海深层和底层经向翻转环流也存在着不闭合现象: 吕宋深水瀑布沿着南海底部地形南向运动, 在南海南部附近由于地形抬升而向北转向, 一部分从吕宋海峡中层流出, 另一部分从明都洛海峡流入到苏禄海. 而Liu等(2012)进一步利用多年南海温盐观测资料发现相比于20世纪60年代, 20世纪80年代的南海中层水显得更淡, 这与南海深层翻转环流的减弱有关. 基于HYCOM全球 $1/12^{\circ}$ 分辨率的再分析数据(GLBa0.08), Shu等(2014)利用拉格朗日追踪方法研究了南海经向翻转环流(SCSMOC)的结构特征, 并认为吕宋海峡入流是SCSMOC最主要的驱动源. 如图5a, SCSMOC呈现不封闭的“三明治”结构特征, 500m 以浅是一个强的顺时针式结构, $500\sim 1000\text{m}$ 是一个相对弱的逆时针式结构, 1000m 以深经向翻转环流呈现弱的顺时针式结构. 同时南海深层顺时针式MOC被分离成三个子反气旋式单元: 深海南部MOC单元(DSMOC)、深海中部MOC单元(DMMOC)以及深海北部MOC单元(DNMOC). 南海深层的上升区位于海盆边缘和海盆内区的三个上升带(图5b), 并指出海盆边缘的上升区主要与传播较快的地形陷波有关, 而海盆内区的三个上升带主要与

图5 拉格朗日方法计算得到的南海经向翻转环流(a)、集合平均的净的上升(正值)和下降(负值)的粒子个数(b)

三个黑色的方框代表南海深层三个子MOC单元. 三个箭头表示海盆中间三个深层水的上升带, L是中间位置的上升带. 引自 Shu 等(2014)

南海深层西传的行星Rossby波有关。Xiao等(2016)指出吕宋海峡附近海域风场的高频变率对南海经向翻转环流的近惯性变化有着重要的作用。

4 结论与展望

综上所述, 基于数值模式和诊断分析, 目前关于南海深层环流与经向翻转环流已经取得了一些可喜的进展, 但有一些问题仍尚待商榷和深入研究。

(1) 南海深层经向翻转环流主要的驱动源包括两个部分: 第一, 南海内区复杂地形导致的潮地强混合驱动深层水上涌是南海深层经向翻转环流的主要驱动源, 同时也是北太平洋深层水的主要“汇”; 第二, 通过吕宋海峡的“深水瀑布”(Overflow)进入南海的北太平洋深层水, 具有比南海内部水体更低的温度和更大的盐度, 为南海深层经向翻转环流提供了另外一个驱动源, 同时也是南海深层水的“源”。其上升分支和下沉分支可以通过抓住经向翻转环流两个主要驱动源的观测进行确定, 但是其深层水的南向输运和上层水的北向输运并没有实际的海流对应, 它所反映的是水平环流在海盆尺度纬向积分的总体输运效果。目前关于南海经向翻转环流的研究结果几乎都是基于数值模式或者诊断模型, 除了吕宋海峡深层环流目前有一定的观测研究, 南海内区尚无直接针对南海中深层翻转环流的观测, 因而亟需开展相应的深层水文观测。

(2) 南海地形复杂, 以往研究均认为南海强混合主要由与复杂地形有关的内潮破碎导致的, 而地形Rossby陷波对南海深层混合以及深海环流的影响还有待研究(Shu等, 2016)。在复杂地形区域, 特别是南沙区域对南海深层经向翻转环流和南海南部区域深层水上升的贡献尚不清楚, 这需要进一步开展相应的观测与模拟研究。

(3) 利用反射地震法推测南海底层流(等深流)水道, 海洋地质学者取得了丰硕的研究结果。Chen等(2013, 2014)利用高分辨率2D地震资料研究了南海西北次海盆陆坡区以及海山处的沉积特征, 并推测了相应的底层等深流格局。结合更多的高精度反射地震资料, 借助更精细的深水沉积体系, 可以推测出以往年代的大尺度南海底层环流格局以及小尺度南海内区海槽和海山环流, 可以进一步增进对现代南海

深层环流以及经向翻转环流的认识。

参考文献

- 刘长建, 杜岩, 张庆荣, 王东晓. 2008. 南海次表层和中层水团年平均和季节变化特征. 海洋与湖沼, 39: 55–64
- 肖劲根, 谢强, 刘长建, 陈举, 王东晓, 陈美榕. 2013. 一个考虑潮汐, 中尺度涡和地形影响的南海底部环流诊断模型. 海洋学报, 35: 1–13
- Broecker W S, Patzert W C, Toggweiler J R, Stuiver M. 1986. Hydrography, chemistry, and radioisotopes in the southeast Asian basin. *J Geophys Res*, 91: 14345–14354
- Chang Y T, Hsu W L, Tai J H, Tang T Y, Chang M H, Chao S Y. 2010. Cold deep water in the South China Sea. *J Oceanogr*, 66: 183–190
- Chao S Y, Shaw P T, Wu S Y. 1996. Deep water ventilation in the South China Sea. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 43: 445–466
- Chen H, Xie X, Van R, Vadorpe T, Huang L, Guo L Y, Su M. 2013. Depositional characteristics and spacial distribution of deep-water sedimentary systems on the northwestern middle-lower slope of the Northwest Sub-Basin, South China Sea. *Mar Geophys Res*, 34: 239–257
- Chen H, Xie X, Van R, Vadorpe T, Su M, Wang D X. 2014. Depositional characteristics and processes of alongslope currents related to a seamount on the northwestern margin of the Northwest Sub-Basin, South China Sea. *Mar Geol*, 355: 36–53
- Fang G, Wang Y, Wei Z, Fang Y, Qiao F, Hu X. 2009. Inter-ocean circulation and heat and freshwater budgets of the South China Sea based on a numerical model. *Dyn Atmos Oceans*, 47: 55–72
- Holloway G. 1992. Representing topographic stress for large-scale ocean models. *J Phys Oceanogr*, 22: 1033–1046
- Holloway G. 2008. Observing global ocean topography. *J Geophys Res*, 113: C07054, doi: 10.1029/2007JC004635
- Lan J, Zhang N, Wang Y. 2013. On the dynamics of the South China Sea deep circulation. *J Geophys Res*, 118: 1206–1210
- Lan J, Wang Y, Cui F, Zhang N. 2015. Seasonal variation in the South China Sea deep circulation. *J Geophys Res*, 120: 1682–1690
- Li L, Qu T. 2006. Thermohaline circulation in the deep South China Sea basin inferred from oxygen distributions. *J Geophys Res*, 111: C05017, doi: 10.1029/2005JC003164
- Liu C T, Liu R J. 1988. The deep current in the Bashi Channel. *Acta Oceanogr Taiwan*, 20: 107–116
- Liu C, Wang D, Chen J, Du Y, Xie Q. 2012. Freshening of the intermediate water of the South China Sea between the 1960s and the 1980s. *Chin J Oceanol Limnol*, 30: 1010–1015
- Lüdmann T, Wong H K, Berglar K. 2005. Upward flow of North Pacific Deep Water in the northern South China Sea as deduced from the occurrence of drift sediments. *Geophys Res Lett*, 32: L05614, doi: 10.1029/2004GL021967

- Nitani H. 1972. Beginning of the Kuroshio, in Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K, eds. *Physical Aspects of the Japan Current*. Seattle: University of Washington Press. 129–163
- Qu T, Du Y, Meyers G, Ishida A, Wang D. 2005. Connecting the tropical Pacific with Indian Ocean through South China Sea. *Geophys Res Lett*, 32: L24609, doi: 10.1029/2005GL024698
- Qu T, Girtan J, Whitehead J A. 2006a. Deepwater overflow through Luzon Strait. *J Geophys Res*, 111: C01002, doi: 10.1029/2005JC-003139
- Qu T, Du Y, Sasaki H. 2006b. South China Sea throughflow: A heat and freshwater conveyor. *Geophys Res Lett*, 33: L23617, doi: 10.1029/2006GL028350
- Shao L, Li X, Geng J, Pang X, Lei Y, Qiao P, Wang L, Wang H. 2007. Deep water bottom current deposition in the northern South China Sea. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 50: 1060–1066
- Shu Y, Xue H, Wang D, Chai F, Xie Q, Yao J, Xiao J. 2014. Meridional overturning circulation in the South China Sea envisioned from the high-resolution global reanalysis data GLBa0.08. *J Geophys Res*, 119: 3012–3028
- Shu Y, Xue H, Wang D, Chai F, Xie Q, Cai S, Chen R, Chen J, Li J, He Y. 2016. Persistent and energetic bottom-trapped topographic Rossby waves observed in the southern South China Sea. *Sci Rep*, 6: 24338, doi: 10.1038/srep24338
- St Laurent L. 2008. Turbulent dissipation on the margins of the South China Sea. *Geophys Res Lett*, 35: L23615, doi: 10.1029/2008GL035520
- Stommel H, Arons A B. 1960a. On the abyssal circulation of the world ocean—I. Stationary flow patterns on a sphere. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 6: 140–154
- Stommel H, Arons A B. 1960b. On the abyssal circulation of the world ocean—II. An idealized model of the circulation pattern and amplitude in oceanic basins. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 6: 217–233
- Tian J, Yang Q, Liang X, Xie L, Hu D, Wang F, Qu T. 2006. Observation of Luzon Strait transport. *Geophys Res Lett*, 33: L19607, doi: 10.1029/2006GL026272
- Tian J, Yang Q, Zhao W. 2009. Enhanced diapycnal mixing in the South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 39: 3191–3203
- Tian J, Qu T. 2012. Advances in research on the deep South China Sea circulation. *Chin Sci Bull*, 57: 3155–3120
- Wang G, Xie S P, Qu T, Huang R. 2011. Deep South China Sea circulation. *Geophys Res Lett*, 38: L05601, doi: 10.1029/2010GL046626
- Wang G, Huang R X, Su J, Chen D. 2012. The effects of thermohaline circulation on wind-driven circulation in the South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 42: 2283–2296
- Wang J. 1986. Observation of abyssal flows in the Northern South China Sea. *Acta Oceanogr Taiwan*, 16: 36–45
- Wang D, Liu X, Wang W, Du Y, Zhou W. 2004. Simulation of meridional overturning in the upper layer of the South China Sea with an idealized bottom topography. *Chin Sci Bull*, 49: 740–747
- Wang D, Liu Q Y, Huang R X, Du Y, Qu T. 2006. Interannual variability of the South China Sea throughflow inferred from wind data and an ocean data assimilation product. *Geophys Res Lett*, 33: L14605, doi: 10.1029/2006GL026316
- Xiao J, Xie Q, Wang D, Yang L, Shu Y, Liu C, Chen J, Yao J, Chen G. 2016. On the near-inertial variations of meridional overturning circulation in the South China Sea. *Ocean Sci*, 12: 335–344
- Xie Q, Xiao J, Wang D, Yu Y. 2013. Analysis of deep-layer and bottom circulations in the South China Sea based on eight quasiglobal ocean model outputs. *Chin Sci Bull*, 58: 4000–4011
- Xu F H, Oey L Y. 2014. State analysis using the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) and the three-layer circulation structure of the Luzon Strait and the South China Sea. *Ocean Dyn*, 64: 905–923
- Yang J, Price J F. 2000. Water-mass formation and potential vorticity balance in an abyssal ocean circulation. *J Mar Res*, 58: 789–808
- Yang Q, Tian J, Zhao W. 2010. Observation of Luzon Strait transport in summer 2007. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 57: 670–676
- Yang Q, Tian J, Zhao W. 2011. Observation of material fluxes through the Luzon Strait. *Chin J Oceanol Limnol*, 29: 26–32
- Yang Q, Zhou L, Tian J, Zhao W. 2013. The roles of Kuroshio intrusion and mesoscale eddy in upper mixing in the northern South China Sea. *J Coastal Res*, 30: 192–198
- Yang Q, Tian J, Zhao W, Liang X, Zhou L. 2014. Observations of turbulence on the shelf and slope of northern South China Sea. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 87: 43–52
- Yu Z, Shen S, McCreary J P, Yaremchuk M, Furue R. 2007. South China Sea throughflow as evidenced by satellite images and numerical experiments. *Geophys Res Lett*, 34: L01601, doi: 10.1029/2006GL028103
- Yuan D. 2002. A numerical study of the South China Sea deep circulation and its relation to the Luzon Strait transport. *Acta Oceanol Sin*, 21: 187–202
- Zhang N, Lan J, Cui F. 2014. The shallow meridional overturning circulation of the South China Sea. *Ocean Sci Discuss*, 11: 1191–1212
- Zhao W, Zhou C, Tian J, Yang Q, Wang B, Xie L, Qu T. 2014. Deep water circulation in the Luzon Strait. *J Geophys Res*, 119: 790–804
- Zheng H B, Yan P. 2012. Deep-water bottom current research in the northern South China Sea. *Mar Georesour Geotec*, 30: 122–129
- Zhou C, Zhao W, Tian J, Yang Q, Qu T. 2014. Variability of the deep-water overflow in the Luzon Strait. *J Phys Oceanogr*, 44: 2972–2986
- Zhu M, Graham S, Pang X, McHargue T. 2010. Characteristics of migrating submarine canyons from the middle Miocene to present: Implications for paleoceanographic circulation, northern South China Sea. *Mar Pet Geol*, 27: 307–319