南海北部陆架陆坡流系研究进展

舒业强*, 王强, 俎婷婷

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

* E-mail: shuyeq@scsio.ac.cn

收稿日期: 2017-05-22; 收修改稿日期: 2017-09-27; 接受日期: 2017-11-29; 网络版发表日期: 2018-02-02

中国科学院前沿科学重点研究计划项目(编号: QYZDJ-SSW-DQC022)、国家自然科学基金项目(批准号: 41476012、41406038和41576003)、广东省自然科学基金项目(编号: 2014A030313777)资助

摘要 受季节性反转的季风强迫、海峡水交换、地形等影响, 南海北部陆架陆坡流系呈现复杂多变的形式. 南海北部陆坡流、南海暖流、沿岸流及其与之相关的上升流(夏季)和下降流(冬季)系统等构成了南海北部典型的流系. 本文回顾了自20世纪90年代以来南海北部陆架陆坡流系的研究进展, 总结了黑潮入侵南海、季风、地形、冲淡水浮力热力效应等因素在南海北部陆架陆坡流系中的作用. 指出南海北部内区海盆与陆架陆坡流的动力联系、南海暖流是否稳定存在、冬季下降流时空特征及其物质能量输运等方面还需要进一步加强研究.

关键词 南海北部, 流系, 研究进展

1 引言

南海北部具有宽阔的陆架以及陡峭狭长的陆坡, 在季风以及黑潮入侵等动力因子的影响下表现出复杂多变的环流形式(苏纪兰, 2005). 南海北部海盆常年被气旋式环流所控制, 冬季为显著的海盆尺度气旋式环流, 而在夏季则会减弱, 但是南海北部仍然表现为气旋式环流特征(Fang等, 1998), 因此南海北部存在一支西南向陆坡流; 在陆坡与陆架之间是一支东北向的南海暖流, 近岸有一支冬夏季反向的沿岸流. 南海北部陆坡流(南海西边界流上游支)、南海暖流、广东沿岸流、夏季南海北部上升流、冬季下降流等构成了南海北部典型的环流特征(图1).

自20世纪90年代以来, 随着观测的积累(Yang等, 2015; Zeng等, 2015)以及海洋数值模式、同化方法的

发展(Hong和Wang, 2008; Gan等, 2009a, 2009b, 2013; Shu等, 2011a, 2011b), 人们对南海北部环流的认识进一步清晰, 本文对南海北部主要流系的研究进展进行介绍.

2 南海北部陆坡陆架流

2.1 黑潮入侵

黑潮被认为是南海东侧的动力边界条件, 黑潮入侵南海对南海环流有重要的意义, 能够显著的影响南海北部的环流结构(Yuan等, 2007, 2009). 而且黑潮入侵能够调制南海北部强迫罗斯贝波的西传速度(如果黑潮入侵缺失, 那么西传速度将会明显增强), 导致南海北部海面高度显著的年际变化(Xu和Oey, 2015). Hong和Wang(2008)采用高分辨率三维海洋环流模式

中文引用格式: 舒业强, 王强, 俎婷婷. 2018. 南海北部陆架陆坡流系研究进展. 中国科学: 地球科学, 48: 276–287, doi: 10.1360/N072017-00162

英文引用格式: Shu Y Q, Wang Q, Zu T T. 2018. Progress on shelf and slope circulation in the northern South China Sea. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9152-y>

图1 南海北部环流示意图

PRP, 珠江冲淡水; GCC, 广东沿岸流; UPW, 夏季上升流; SCSWC, 南海暖流. 广东沿岸流实线表示夏季流向, 虚线表示冬季流态

研究了风应力强迫、黑潮入侵以及东沙地形对南海北部陆坡流的影响, 其结果表明: 黑潮入侵能够形成沿陆坡的海面高度高值带, 进而对陆坡外缘的表层流场有直接的影响; 风应力是南海环流季节变化的主要原因; 如果缺失东沙岛的阻碍作用, 黑潮的西侵会加剧并且黑潮南海分支会加强.

黑潮入侵南海存在不同流径: 黑潮南海分支(Leaking)、黑潮流套(Looping)和黑潮跨越吕宋海峡并不入侵南海(Leaping), 在1993~2010年间三种流径(Looping、Leaping和Leaking)总的发生的概率分别为68.2%、16.4%和15.4%(Nan等, 2011). 由于非线性的滞后作用, 中尺度涡能够引起黑潮路径在吕宋海峡的季节内变化(袁东亮和李瑞祥, 2008; Yuan和Wang, 2010). 黑潮入侵具有显著的季节内变化(60天以及10~30天), 60天的变化周期主要是由于中尺度涡的入侵导致的, 而10~30天变化则是由于局地风应力的高频变化以及背景流的斜压不稳定所导致(Zhang等, 2015). 由于反向的冬夏季季风的作用, 黑潮在冬季入侵南海较强, 夏季较弱(Nan等, 2011). 黑潮入侵南海的年际变化主要受厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的调制, 在厄尔尼诺(El Niño)年, 黑潮入侵南海变强, 而在拉尼娜(La Niña)年则减弱(Qu等, 2004; Liu等, 2006, 2012). 其主要原因是El Niño(La Niña)年北赤道流分叉点北(南)移导致黑潮强度减弱(增强), 进而由于“茶壶效应”加强(减弱)了黑潮入侵南海的强度(Kim等, 2004; Wang等, 2006; Yang等,

2013; Nan等, 2015). 而在更长时间尺度上, 黑潮在太平洋十年涛动(Pacific decadal oscillation, PDO)正相位的时候更容易入侵(Tsui和Wu, 2012). Nan等(2013)通过分析卫星观测和水文历史资料, 发现最近20年来黑潮入侵有减弱趋势.

中尺度涡与黑潮的相互作用可以调制黑潮入侵南海的强度. 一方面, 中尺度涡通过增加或者减小吕宋海峡纬向海面高度坡度进而影响黑潮入侵的强弱(Lien等, 2014). 另一方面, 中尺度涡以黑潮涡脱落形式、甚至直接进入南海(Li等, 1998; Jia和Liu, 2004). 中尺度涡能否进入南海主要与黑潮的强弱以及路径有关: 在秋冬季节, 黑潮向南海弯曲, 其位势涡度小, 中尺度涡容易穿越黑潮进入南海; 在春夏季节, 黑潮直接跨过吕宋海峡向北流动, 其位势涡度很强, 中尺度涡不易穿越黑潮进入南海(Sheu等, 2010; Jia和Chassignet, 2011).

2.2 陆坡流

陆坡流是南海北部海盆气旋式环流的北翼, 位于水深大致在200~1000m范围的陆坡上(Su, 2004). 早期关于陆坡流的研究认为其冬季流向西南; 夏季流向东北(Dale, 1956). 后来的多次观测结果证明: 即使在西南风盛行的夏季陆坡流仍流向西南, 在南海北部维持一个弱的气旋式环流(许建平和苏纪兰, 1997; Liu等, 2000; Yuan等, 2008). 许建平和苏纪兰(1997)分析8~9月ADCP资料表明, 在19°N以北陆坡处存在西南向的陆坡流, 最大流速约为 0.3 m s^{-1} . 李立(2002)认为南海

北部冬季存在一个次海盆尺度的气旋型闭合环流, 其中心在(112°E, 18°N)附近, 空间尺度在700km左右。Yuan等(2008)研究了1994年夏季南海北部环流, 发现在南海北部的中部区域为气旋性环流占据并且有很强的上升流出现。Chern等(2010)利用年平均风驱动的理想模型研究发现风应力旋度、吕宋海峡入流和出流以及从黑潮左侧反馈的正涡度这三个因素对南海北部陆坡流的贡献大小基本一致。

在季风和黑潮等的驱动下, 南海北部陆坡流并非完全沿着等深线流动, 跨陆坡的输运具有普遍和多发性, 并有其独特的流动结构及动力机制(Wang等, 2011; Wang等, 2013)。Wang等(2015)基于三维海洋模型研究南海北部上层夏季跨陆坡流动, 发现西沙海域以东的陆坡区域以爬坡运动为主。通过动力诊断分析发现, 上层跨陆坡流仍然满足地转平衡的约束, 沿陆坡方向的正压压强梯度力是控制跨陆坡运动的主要动力因子; 进一步通过数值实验发现, 温度是该海区控制密度分布的主要热力因子, 进而成为控制沿陆坡方向压强梯度的主要因子。

Wang等(2013)和Wang等(2015)利用大量南海北部开放航次观测的温盐、流速资料发现南海北部陆坡区域(东沙群岛西侧)存在一支东北向的中层流, 在流经东沙岛时与等深线分离, 向深水区域转向。他们认为地形和斜压联合效应(JEBAR)是该区域流转向的重要原因。JEBAR效应代表海水的斜压场(水平密度梯度场)与陆坡地形的相互作用, 是对涡管伸缩项的修正, 可以引起海水穿越陆坡的运动(Mertz等, 1990)。Wang等(2013)从涡度收支的角度分析发现JEBAR项在东沙以东为较大的负值, 为了平衡JEBAR提供的负涡度, 引起正行星涡度的输运, 即跨等深线的输运产生(图2)。

2.3 南海暖流

管秉贤(1978)通过现场观测资料发现一支起源于海南岛东侧, 并沿陆架逆风东进的南海暖流, 由于其在冬季逆风而行, 因此也被称为“南海冬季逆风流”。此后, 观测和数值模拟研究均证实了南海暖流的存在(Fang等, 1995; Li等, 1993; Li, 1996; 管秉贤, 1998; Wang等, 2001; Guan和Fang, 2006)。南海暖流被发现之后, 海洋学家开展了关于其成因的研究, 目前其成因还存在争议。其主要动力机制归纳为黑潮入侵南海、地形、风应力松弛等因素(曾庆存等, 1989; Hu等, 2000;

图2 东沙中层分离流形成机制示意图

红色箭头表示分离流, 黑色箭头是利用地震反射数据演算的流场分布(邵磊等, 2007), 修改自Wang等(2013)

Su, 2004; Hsueh和Zhong, 2004; Liu等, 2008; Yang等, 2008; Chiang等, 2008)。一种观点认为黑潮入侵南海在陆坡上导致的压强梯度力驱动了南海暖流(Hsueh和Zhong, 2004; Xue等, 2004)。第二种观点认为东北季风条件下海南岛地形导致的水体在西边堆积, 形成沿陆坡的海表高度差, 进而导致南海暖流出现(曾庆存等, 1989; Li等, 1993)。第三种观点认为冬季东北风松弛是导致南海暖流的主要原因(Chao等, 1995; Chiang等, 2008)。第四种观点认为南海暖流是台湾海峡北向输运所诱导的流, 是一种“源-汇”所驱动的流(Yang等, 2008)。Wang等(2010)利用高分辨率模型提出了JEBAR效应产生南海暖流的另一种机制。JEBAR在南海北部陆坡区域导致陆坡流在向岸一侧产生爬坡偏转, 陆坡流偏转后的这部分流体成为南海暖流动量和质量的重要源地, 并且偏转的流体最终其科氏力与压强梯度力相平衡稳定地流向东北, 即为南海暖流(图3)。Wang等(2011)认为风场的Ekman抽吸会在海南岛以东的陆坡区域形成高水位带, 在地转平衡的作用下海水向北运动, 从而形成南海暖流西段。

2.4 广东沿岸流

广东沿岸流位于南海暖流北侧的陆架近岸区域, 存在明显的区域差异以及季节性变化特征。观测研究表明粤西海域无论冬、夏两季均存在一支西向的流(钟欢良, 1990; 伍伯瑜, 1990; 应秩甫, 1999; Bao等, 2005; 谢玲玲等, 2012a)。杨士瑛等(2003)、陈达森等(2006)利用多种观测资料研究认为珠江口以西夏季沿岸流大部分时间是西向流, 在西南风强盛时粤西沿岸

图3 南海北部流系示意图

PG代表压强梯度力。宽断点带代表陆架外缘的海面高度高值带, 陆坡流位于其南侧, 流向西南; 南海暖流位于其北侧, 流向东北, 陆架坡折带的反气旋式箭头代表陆坡流的爬坡运动, 吕宋海峡处的反气旋式箭头代表黑潮流套, 修改自Wang等(2010)

流可暂时转向东北向。冬季粤西沿岸流明显比夏季流速强, 流幅窄(薛惠洁等, 2001)。粤东海域沿岸流主要受季节性反转的风场强迫, 夏季呈现东北向, 冬季为西向流(管秉贤和陈上及, 1964; Fang等, 1998)。与粤东类似, 冬季粤西沿岸流的驱动机制主要受东北季风强迫(薛惠洁等, 2001)。粤西夏季西向沿岸流强迫机制还存在一定的争议, 部分研究认为夏季冲淡水浮力效应和科氏力的作用是粤西西向沿岸流的主要驱动机制(伍伯瑜, 1990; 严金辉和陈达森, 2005); 杨士瑛等(2003)和Bao等, 2005)则认为淡水以及上升流引起的温盐分布差异在正压和斜压联合作用下导致了夏季粤西西向沿岸流; 此外, 雷州半岛东部的气旋式涡旋也被认为是夏季粤西西向沿岸流的重要原因(钟欢良, 1990)。

3 南海北部夏季上升流与冬季下降流

3.1 南海北部上升流

南海北部上升流主要包括琼东上升流和粤东上升流, 被广泛认为是风生上升流(Shaw, 1992; Li, 1993; Su, 1998; Hu等, 2001; Jing等, 2009; Hu和Wang, 2016)。南海北部自汕尾西侧开始, 往东是一个加宽的陆架地形。沿岸变化的地形是影响上升流空间分布的一个重要原因(Gan等, 2009b)。除了沿岸风以及地形以外, 潮汐(Lü等, 2008; 潘爱军等, 2012)、冲淡水(Gan等, 2009a; Shu等, 2011b)等过程对南海北部夏季上升流系

统也会产生一定的影响。

3.1.1 南海北部风生上升流

Wyrski(1961)最早报道了在粤东区域夏季存在上升流现象。同一时期, Niino和Emery(1961)也指出汕头外海存在着上升流。管秉贤和陈上及(1964)根据全国海洋普查资料, 指出南海北部夏季西南风驱动了琼东和粤东上升流。考虑底摩擦的近岸风生上升流理论表明, 表Ekman层水体的离岸输送会形成一个垂直于岸的压强梯度, 形成强的沿岸流; 底Ekman动力过程驱动底层向岸的运动, 输运深层冷水的爬坡, 形成上升流(Shaw, 1992; Li, 1993; Wang等, 2014)。夏季沿岸西南风被认为是南海北部上升流产生的主要机制(于文泉, 1987; 曾流明, 1986; 吴日升和李立, 2003; Gan等, 2009a; Jing等, 2011; Gu等, 2012; 谢玲玲等, 2016)。

南海北部上升流表现出强的年际变化特征(洪启明和李立, 1991)。这种年际变化被认为较大程度上取决于局地风场的年际变化(Jing等, 2011; 谢玲玲等, 2016)。Jing等(2011)发现南海北部夏季上升流在1997-1998 El Niño期间异常增强, 西南风导致的离岸Ekman输运是正常年份的2倍; 其进一步分析表明在南海北部和西北太平洋区域的反气旋大气环流异常是导致强上升流的原因。谢玲玲等(2016)指出近30年来全球变暖背景下, 琼东上升流强度呈现减弱的趋势, 并发现局地风应力旋度相比于风应力在琼东上升流年际变化中起着更重要作用。

南海北部夏季西南季风具有较强的时间和空间变化, 西南季风期间往往伴随多个不利于上升流风场的事件。粤东上升流对变化风场的响应得到了进一步的研究(Gan等, 2014; Wang等, 2012)。Wang等(2012)对卫星和航次观测进行分析, 证实了南海北部近岸上升流强度与风场的变化密切相关。他们通过合成分析发现在盛行西南风时, 粤东上升流主要发生在汕尾至福建沿岸区域; 而在不利于上升流发展期间, 冷的海表温度在汕头东南侧同样存在(图4)。Gan等(2014)年研究了南海北部上升流对有利于上升流风场(西南风)及不利于上升流风场(东北风)的反应。其结果表明在有利于上升流风场作用下, 加强的沿等深线西向压强梯度力及底摩擦力是粤东强上升流产生及维持的主要机制; 而在周期性不利于上升流风场强迫期间, 沿等深线方向的压强梯度力和底摩擦力是上升流松弛阶段持续

图4 2000年夏季QuikSCAT粤东风矢量变化(a)、2000年7月10~21日平均的风矢量以及SST分布(b)和2000年7月22日至8月2日平均的风矢量以及SST分布(c)

修改自Wang等(2012)

存在的重要原因。

3.1.2 地形对南海北部上升流的调制

南海北部上升流存在空间分布差异的最主要原因是由于变化地形的影响(韩舞鹰等, 1990; 李立, 1990; Su和Pohlmann, 2009; 谢玲玲等, 2012b)。Gan等(2009b)在理想风的条件下研究了南海北部加宽的陆架地形对于上升流的影响。他们发现在汕尾外海等深线收敛区域, 由于强的西向底部摩擦力, 深层冷水向岸爬升; 在汕尾和汕头加宽陆架地形区域, 由于动量输入导致了一个准正压的西向压强梯度力, 进而由于地转平衡导致了强的向岸输运; 汕尾外海爬升的底层冷水在被平流至粤东近岸区域。在近岸区域, 变化的向岸的上升运动同样受到沿岸压强梯度力的调制, 在岸线和近岸地形的影响下, 在粤东上游区域形成了一个东向压强梯度力, 而在下游区域(汕头)形成了一个西向压强梯度力, 自上游平流而来的冷水在汕头附近上升露头,

因此导致了强的上升流在汕头出现(图5)。相似的动力过程也被用来解释海南岛东北部上升流的空间分布特征(Lin等, 2016)。

Wang等(2014)通过敏感性实验发现即使没有局地有利于上升流风场的强迫, 南海北部东北向沿岸流在加宽陆架地形的作用下也能驱动出上升流(称为地形诱导的上升流)。他们的数值实验表明在表层地形诱导的上升流强度与风生上升流的强度相当, 而在近底层地形诱导的上升流是占主导。利用一个同化模式, Shu等(2011b)认为由于加宽的陆架地形的影响, 在汕尾外海和台湾浅滩西侧加强的底部摩擦力通过底Ekman输运和抽吸作用加强了该区域的上升流强度。Wang等(2014)进一步研究了粤东区域底摩擦力和底摩擦力旋度对地形诱导的上升流的贡献: 在大尺度环流为东北向时, Ekman输运总是输运底层咸、冷水向岸; 在汕尾至汕头区域, Ekman抽吸输运整个水柱离岸, 减小上升流强度; 而在汕尾和汕头区域, Ekman抽吸输运水柱向

图5 南海北部加宽的中间陆架和内陆架区域风驱动上升流及其强迫机制示意图

修改自Gan等(2009b). PGF为压强梯度力, U_{AD} 和 U_{BC} 分别表示AD和BC断面上的平均速度

岸运动, 增加上升流强度(图6). 这是继Gan等(2009b)的研究之后, 对地形导致上升流空间分布特征的另一种动力解释.

3.2 南海北部冬季下降流

由于Ekman效应, 南海北部西南向沿岸流在冬季东北季风的驱动下表层向岸平流输送, 东向的底摩擦力导致底Ekman层海水离岸输送, 上层海水在沿岸堆积下沉, 进而形成南海北部下降流(刘长建等, 2010). 通过分析南海北部2006年冬季航次数据, 刘长建等(2010)观测到了南海北部冬季下降流现象, 其表现为沿岸海域的逆盐跃层. Gan等(2013)通过数值模拟实验研究了粤东加宽陆架地形对冬季下降流的加强作用. 其结果表明: 一方面粤东区域西向收敛的地形导致沿岸流加速, 形成增强的东向沿岸压强梯度力, 进而导致加强的向岸地转运输; 同时西向加强的沿岸流增加了东向的底摩擦力, 增强了底层Ekman离岸输送.

4 珠江冲淡水与南海北部陆架流的相互作用

珠江冲淡水在河口以及陆架海区形成的低盐、低密度水团, 其浮力效应以及风、潮汐、大尺度背景环流等外界强迫共同作用形成近似羽状流. 冲淡水通过其浮力与热力效应与近海环流相互作用, 一方面, 近海环流影响冲淡水的扩展分布和形态(Shu等, 2011b; Zu和Gan, 2015), 另一方面, 冲淡水通过改变海水密度、层结的分布, 影响近海环流的结构和强度(Gan等,

图6 底摩擦力和底摩擦力旋度对南海北部上升流的贡献示意图

修改自Wang等(2014)

2009a; Shu等, 2014).

4.1 珠江冲淡水的不同扩展类型

珠江三角洲河口冲淡水及其环流结构存在显著的冬夏季节变化, Dong等(2004)利用观测资料分析发现河口中心轴底层存在盐度锋面, 锋面东侧流在夏季表层向海, 底层向岸; 冬季表、底层流的方向一致; 锋面西侧冬夏季流均为表层向海, 底层向西, 表现为浮力驱动近岸环流的特征. 动力分析显示在跨河口方向主要表现为地转平衡, 冲淡水在河口内完成了向近海浮力锋面的转变(Dong等, 2004; Zu和Gan, 2015).

珠江淡水羽状流在南海北部的扩展和强度存在明显的季节和年际差异(Su, 2004; Harrison等, 2008). 冬季东北季风盛行, 西南向的沿岸流与珠江冲淡水的自然扩展方向一致, 加速了羽状流向西运动, 阻碍了其向外海的扩展; 夏季受西南季风导致的Ekman离岸输运以及东北向沿岸流的平流输送, 冲淡水呈舌状向东南外海扩展, 可达台湾海峡附近, 且可以在陆架上形成孤立低盐水团(庄伟等, 2003; 曾淦宁等, 2005; Ou等, 2007; 庞海龙等, 2006; 杨阳等, 2014; 张燕等, 2011; Bai等, 2015). 欧素英(2005)通过分析南海北部多年水文观测, 将夏季珠江冲淡水在南海北部陆架的扩展方式归纳为四种形态: 向海扩展型、粤西扩展型、粤东扩展型、似对称扩展型(图7). 其中, 向海扩展型发生在风很小、沿岸流很弱, 径流较大时期; 粤西扩展型出现在弱风或者有利于下降流风时期; 似对称扩展型则出现在有利于上升流的风松弛, 转为下降流风的时期; 粤东扩展型出现在持续西南风和径流较大时期(欧

图7 珠江冲淡水的扩展类型

修改自欧素英(2005)

素英, 2005). 受季风和淡水径流的年际变化影响, 冲淡水的扩展也表现出显著的年际变化特征(Ou等, 2009). 然而受观测资料的限制, 目前尚缺乏更加详细的年际变化特征的研究.

4.2 影响珠江冲淡水扩展的物理因子

风场、潮汐、径流量、沿岸流、中尺度涡旋等是影响冲淡水在陆架扩展的重要因子(Ou等, 2009; Wong等, 2003a; Luo等, 2012; Ji等, 2011a, 2011b; Pan等, 2014). 数值模拟研究表明风对冲淡水的表层形态和扩展起着最重要的作用, 冲淡水面积正比于与径流大小(Wong等, 2003b; Ji等, 2011a, 2011b). 潮汐通过增强水体垂向混合, 改变冲淡水的厚度, 限制冲淡水向外海的扩展, 但是对于陆架上低盐淡水的净输送影响较小(Zu和Gan, 2009; Luo等, 2012). Zu等(2014)通过数值敏感实验指出冲淡水对物理驱动场变化的响应有着显著空间差异: 陆架上冲淡水的表层形态主要受风控制, 近岸环流调制着冲淡水在陆架的扩展与混合; 河口近岸冲

淡水的垂向结构主要受潮致混合所控制. Zu和Gan(2015)认为珠江口东、西两侧陆架近岸上升流对夏季西南季风松弛的不同响应是导致珠江冲淡水出现对称扩展的主要原因. Chen等(2016)利用数值模拟指出夏季季风期间陆架海域出现的低盐水团主要是由于西南季风的风向2~5天的脉动变化导致冲淡水从主体中脱离形成的, 潮汐混合的强度变化仅仅影响孤立低盐水团的位置和大小. He等(2016)的观测研究表明了中尺度气旋涡将冲淡水卷带到寡营养盐的南海海盆, 指出了中尺度涡旋导致冲淡水跨陆架运输的机制.

4.3 珠江冲淡水对陆架流的调制作用

珠江冲淡水羽状流在扩展过程中与南海北部近岸环流相互作用, 调制着沿岸流的变化. 如前所述, 珠江冲淡水的浮力效应和科氏力的作用会加强珠江口以西的冬季西向沿岸流, 并导致夏季粤西西向沿岸流(伍伯瑜, 1990; 严金辉和陈达森, 2005). Shu等(2014)利用2008年珠江口以东的三个潜标观测和数值实验分析了

夏季珠江冲淡水对沿岸流速的调制作用. 结果显示密度小的冲淡水覆盖在密度大的海水上, 加强了表层层结, 减弱了垂向动量和热量交换. 在冲淡水主轴附近, 高的层结加强了局地风对上层海流的动力强迫, 从而有利于形成大的垂向剪切; 另一方面, 东向扩展的珠江冲淡水抬升了海表面高度. 在垂直于岸方向, 由于地转平衡作用, 表层流在近岸的一侧被加强, 而在离岸的一侧减弱.

Gan等(2009a)应用ROMS模型, 借助数值试验详细探讨了珠江冲淡水与南海北部夏季陆架上升流的相互作用过程. 一方面, 受陆架环流影响, 珠江冲淡水在季风和陆架上升流的水平输送作用下向东部扩展, 在运动过程中同时受到表层Ekman漂流的影响, 宽度逐渐增加. 另一方面, 冲淡水的热力浮力效应使得夏季受冲淡水所影响的陆架表层沿岸流(20m以浅)沿岸分量在近河口处增加了30%, 在距河口远一些的陆架海区增加约10%; 使得沿岸表层南向跨陆架分量在近河口处增加了2倍, 对于冲淡水覆盖的其他区域也增加了50~100%. Gan等(2009a)指出其冲淡水影响沿岸流的动力机制是其浮力输入增强了上层水体的层结和风应力做功的效率, 从而增强了表层的Ekman离岸输送.

5 结论与展望

黑潮入侵是南海北部陆坡陆架流的外在驱动, 是沟通南海与大洋之间动力联系的主要载体. 黑潮入侵南海北部具有显著的季节内、季节和年际年代际变化特征, 其季节内变化主要受中尺度涡入侵、风场的高频变化以及背景流的斜压不稳定导致(Zhang等, 2015); 季节性变化特征主要由冬夏季反转的季风系统控制, 冬季入侵强, 夏季较弱; 在年际年代际尺度上, 受ENSO、PDO等因素的调制. 南海陆坡流是南海北部深水海盆气旋式环流的北翼, 上层常年表现为西南向流(许建平和苏纪兰, 1997). 其同时受到黑潮入侵和季风驱动的海盆尺度环流的影响, 陆坡流在冬季强于夏季. 在中层, 北部陆坡东沙群岛以西区域存在一支东北向的中层流, 其在东沙群岛附近由于JEBAR作用导致了强的离岸输送(Wang等, 2015). 在陆坡流的北部, 是东北向的南海暖流. 冬季南海暖流可能的驱动机制包括黑潮入侵导致的沿岸压强梯度(Hsueh和Zhong, 2004)、西沙岛屿地形导致水体堆积进而形成东西向

压力差(Li等, 1993)、台湾海峡净北向输运相关的“源-汇”驱动(Yang等, 2008)、JEBAR效应导致的陆坡流北向输运(Wang等, 2010)等. 在南海暖流北侧近岸区域是广东沿岸流. 受东北季风的强迫, 冬季沿岸流流向西南, 流幅较窄(薛惠洁等, 2001). 夏季粤东区域受西南季风驱动沿岸流为东北向; 但粤西区域沿岸流仍多表现为西向(陈达森等, 2006), 且存在几种动力解释: 冲淡水浮力效应驱动(严金辉和陈达森, 2005)、淡水以及上升流导致的温盐分布差异驱动(Bao等, 2005)、西部气旋式涡旋作用(钟欢良, 1990)等.

与沿岸流密切相关的是南海北部夏季上升流以及冬季下降流. 琼东和粤东是南海北部夏季上升流的典型区域(Hu和Wang, 2016), 夏季西南风是导致南海北部上升流的主要驱动机制(吴日升和李立, 2003), 地形决定了上升流空间分布特征(Gan等, 2009b); 即使在没有有利于上升流风场作用下, 东北向沿岸流在沿岸地形的作用下也能驱动出粤东上升流(Wang等, 2014).

珠江冲淡水通过浮力与热力效应与陆架流系相互作用. 沿岸流以及上升流影响冲淡水的扩展分布和形态(Shu等, 2011b), 同时, 冲淡水通过改变海水密度、层结的分布, 影响近海环流的结构和强度(Gan等, 2009a; Shu等, 2014).

尽管南海北部环流结构特征及动力机制的研究取得了一些显著的进展, 但仍有一些问题尚待商榷和深入研究.

(1) 南海北部陆坡环流的研究多注重于沿陆坡环流结构, 多讨论黑潮入侵、季节性反转风场以及地形等因素对陆坡流的动力影响. 针对海盆环流与陆架环流之间的动力联系、南海北部跨陆坡输运及其对南海陆架-深海海盆间物质能量交换研究较少.

(2) 南海暖流在冬季作为一支逆风流, 在观测和数值模拟方面取得了一系列研究进展, 但针对冬季南海暖流是否是稳定存在、源地是否具有显著的变异特征等问题还需要进一步的观测研究.

(3) 针对南海北部近岸冬季沿岸流虽在环流形态上已有共识, 但冬季沿岸流所导致的下降流及其在陆源物质输运等方面的研究还相对较少.

参考文献

陈达森, 陈波, 严金辉, 徐辉奋. 2006. 琼州海峡余流场季节性变化特征. 海洋湖沼通报, 2: 12-17

- 管秉贤. 1978. 南海暖流——广东外海一支冬季逆风流动的海流. 海洋与湖沼, 9: 117–127
- 管秉贤. 1998. 南海暖流研究回顾. 海洋与湖沼, 29: 323–329
- 管秉贤, 陈上及. 1964. 中国近海的海流系统. 青岛: 中国科学院海洋研究所
- 韩舞鹰, 王明彪, 马克美. 1990. 我国夏季最低表层水温海区——琼东沿岸上升流区的研究. 海洋与湖沼, 21: 167–275
- 洪启明, 李立. 1991. 粤东陆架区夏季的上升流. 台湾海峡, 10: 272–277
- 李立. 1990. 珠江口以西陆架上升流的研究. 台湾海峡, 9: 338–346
- 李立. 2002. 南海上层环流观测研究进展. 台湾海峡, 21: 114–125
- 刘长建, 夏华永, 王东晓. 2010. 2006年冬季粤东沿岸下降流观测分析. 海洋学报, 32: 1–9
- 庞海龙, 高会旺, 宋萍萍, 游大伟, 陈举. 2006. 夏季珠江冲淡水扩散路径分析. 海洋预报, 23: 58–63
- 欧素英. 2005. 珠江口冲淡水扩展变化及动力机制研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院
- 潘爱军, 李立, 郭小钢, 许金电. 2012. 2002年夏季广东陆架边缘上升流海域的内潮现象及其局地反馈初探. 台湾海峡, 31: 151–157
- 邵磊, 李学杰, 耿建华, 庞雄, 雷永昌, 乔培军, 王嘹亮, 王宏斌. 2007. 南海北部深水底流沉积作用. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 771–777
- 苏纪兰. 2005. 南海环流动力机制研究综述. 海洋学报, 27: 1–8
- 伍伯瑜. 1990. 珠江口以西陆架海域环流研究III. 台湾海峡, 9: 118–126
- 吴日升, 李立. 2003. 南海上升流研究概述. 台湾海峡, 22: 269–277
- 谢玲玲, 曹瑞雪, 尚庆通. 2012a. 粤西近岸环流研究进展. 广东海洋大学学报, 32: 94–98
- 谢玲玲, 张书文, 赵辉. 2012b. 琼东上升流研究概述. 热带海洋学报, 314: 35–41
- 谢玲玲, 宗晓龙, 伊小飞, 李敏. 2016. 琼东上升流的年际变化及长期变化趋势. 海洋与湖沼, 47: 43–51
- 许建平, 苏纪兰. 1997. 黑潮水入侵南海的水文分析II: 1994年8–9月期间的观测结果. 热带海洋, 16: 1–23
- 薛惠洁, 柴扉, 徐丹亚, 侍茂崇. 2001. 南海沿岸流特征及其季节变化. 中国海洋学文集, 13: 64–75
- 严金辉, 陈达森. 2005. 粤西水东单点系泊海域潮流和低频流特征. 海洋湖沼通报, 3: 8–15
- 应秩甫. 1999. 粤西沿岸流及其沉积. 中山大学学报, 38: 85–89
- 袁东亮, 李瑞祥. 2008. 中尺度涡旋影响吕宋海峡黑潮变异的动力机制. 热带海洋学报, 27: 1–9
- 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 陈菲. 2003. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制. 海洋学报, 25: 1–8
- 杨阳, 李锐祥, 朱鹏利, 任品德. 2014. 珠江冲淡水季节变化及动力成因. 海洋通报, 33: 36–44
- 于文泉. 1987. 南海北部上升流的初步探讨. 海洋科学, 6: 7–10
- 曾流明. 1986. 粤东沿岸上升流迹象的初步分析. 热带海洋学报, 5: 68–73
- 曾庆存, 李荣凤, 季仲贞, 甘子钧, 柯佩辉. 1989. 南海月平均流的计算. 大气科学, 13: 127–138
- 钟欢良. 1990. 密度流结构. 北京: 海洋出版社. 218–221
- 庄伟, 胡建宇, 贺志刚, 曾淦宁, 陈照章. 2003. 2000年7–8月台湾海峡南部至珠江口附近海域表层温、盐度分析. 热带海洋学报, 22: 68–76
- 曾淦宁, 胡建宇, 洪华生, 陈照章. 2005. 西南季风不同阶段南海北部珠江口外断面水文调查分析. 热带海洋学报, 24: 10–17
- 张燕, 夏华永, 钱立兵, 朱鹏利. 2011. 2006年夏、冬季珠江口附近海域水文特征调查分析. 热带海洋学报, 30: 20–28
- Bai Y, Huang T H, He X, Wang S L, Hsin Y C, Wu C R, Zhai W, Lui H K, Chen C T A. 2015. Intrusion of the Pearl River plume into the main channel of the Taiwan Strait in summer. *J Sea Res*, 95: 1–15
- Bao X, Hou Y, Chen C, Chen F, Shi M. 2005. Analysis of characteristics and mechanism of current system on the west coast of Guangdong of China in summer. *Acta Oceanol Sin*, 24: 1–9
- Chao S Y, Shaw P T, Wang J. 1995. Wind relaxation as possible cause of the South China Sea Warm Current. *J Oceanogr*, 51: 111–132
- Chen Z, Pan J, Jiang Y. 2016. Role of pulsed winds on detachment of low salinity water from the Pearl River Plume: Upwelling and mixing processes. *J Geophys Res*, 121: 2769–2788
- Chern C S, Jan S, Wang J. 2010. Numerical study of mean flow patterns in the South China Sea and the Luzon Strait. *Ocean Dyn*, 60: 1047–1059
- Chiang T L, Wu C R, Chao S Y. 2008. Physical and geographical origins of the South China Sea Warm Current. *J Geophys Res*, 113: C08028
- Dale W L. 1956. Wind and drift current in the South China Sea. *Malayan J Trop Geogr*, 8: 1–31
- Dong L, Su J, Ah Wong L, Cao Z, Chen J C. 2004. Seasonal variation and dynamics of the Pearl River plume. *Cont Shelf Res*, 24: 1761–1777
- Fang G H, Zhao J P, Bole J, Mathisen J P, Schjolberg P, Pan H. 1995. Circulation, internal tides and solitons at the shelf break of the Northern South China Sea—An analysis of measured currents. In: *Marine Science Conference in Taiwan Adjacent Seas—Program and Abstracts*. Taipei. 50–51
- Fang G H, Fang W, Fang Y, Wang K. 1998. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation. *Acta Oceanogr Taiwan*, 37: 1–16
- Gan J, Li L, Wang D, Guo X. 2009a. Interaction of a river plume with coastal upwelling in the northeastern South China Sea. *Cont Shelf Res*, 29: 728–740
- Gan J, Cheung A, Guo X, Li L. 2009b. Intensified upwelling over a

- widened shelf in the northeastern South China Sea. *J Geophys Res*, 114: C09019
- Gan J, San Ho H, Liang L. 2013. Dynamics of Intensified downwelling circulation over a widened shelf in the Northeastern South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 43: 80–94
- Gan J, Wang J, Liang L, Li L, Guo X. 2014. A modeling study of the formation, maintenance, and relaxation of upwelling circulation on the Northeastern South China Sea shelf. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 117: 41–52
- Gu Y, Pan J, Lin H. 2012. Remote sensing observation and numerical modeling of an upwelling jet in Guangdong coastal water. *J Geophys Res*, 117: C08019
- Guan B X, Fang G H. 2006. Winter counter-wind currents off the southeastern China coast: A review. *J Oceanogr*, 62: 1–24
- Harrison P J, Yin K, Lee J H W, Gan J, Liu H. 2008. Physical-biological coupling in the Pearl River Estuary. *Cont Shelf Res*, 28: 1405–1415
- He X, Xu D, Bai Y, Pan D, Chen C T A, Chen X, Gong F. 2016. Eddy-entrained Pearl River plume into the oligotrophic basin of the South China Sea. *Cont Shelf Res*, 124: 117–124
- Hong B, Wang D. 2008. Sensitivity study of the seasonal mean circulation in the northern South China Sea. *Adv Atmos Sci*, 25: 824–840
- Hu J, Kawamura H, Hong H, Qi Y. 2000. A review on the currents in the South China Sea: Seasonal circulation, South China Sea Warm Current and Kuroshio intrusion. *J Oceanogr*, 56: 607–624
- Hu J, Kawamura H, Hong H, Suetsugu M, Lin M S. 2001. Hydrographic and satellite observations of summertime upwelling in the Taiwan Strait, A preliminary description. *Terr Atmos Ocean Sci*, 12: 415–430
- Hu J, Wang X H. 2016. Progress on upwelling studies in the China seas. *Rev Geophys*, 54: 653–673
- Hsueh Y, Zhong L. 2004. A pressure-driven South China Sea Warm Current. *J Geophys Res*, 109: C09014
- Ji X, Sheng J, Tang L, Liu D, Yang X. 2011a. Process study of circulation in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters in the wet season using a triply-nested circulation model. *Ocean Model*, 38: 138–160
- Ji X, Sheng J, Tang L, Liu D, Yang X. 2011b. Process study of dry-season circulation in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters using a triple-nested coastal circulation model. *Atmos Ocean*, 49: 138–162
- Jia Y, Chassignet E P. 2011. Seasonal variation of eddy shedding from the Kuroshio intrusion in the Luzon Strait. *J Oceanogr*, 67: 601–611
- Jia Y, Liu Q. 2004. Eddy shedding from the Kuroshio Bend at Luzon Strait. *J Oceanogr*, 60: 1063–1069
- Jing Z Y, Qi Y Q, Hua Z, Zhang H. 2009. Numerical study on the summer upwelling system in the northern continental shelf of the South China Sea. *Cont Shelf Res*, 29: 467–478
- Jing Z Y, Qi Y Q, Du Y. 2011. Upwelling in the continental shelf of northern South China Sea associated with 1997–1998 El Niño. *J Geophys Res*, 116: C02033
- Kim Y Y, Qu T, Jensen T, Miyama T, Mitsudera H, Kang H W, Ishida A. 2004. Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM. *J Geophys Res*, 109: C03040
- Li L. 1993. Summer upwelling system over the northern continental shelf of the South China Sea—A physical description. In: Su J, Chuang W S, Hsueh R Y, eds. *Proceedings of the Symposium on the Physical and Chemical Oceanography of the China Seas*. Beijing: China Ocean Press. 58–68
- Li L. 1996. An oceanic front at the shelf-slope region of the northeastern South China Sea, March 1992. In: *Oceanography in China*. Beijing: China Ocean Press. 6: 33–41
- Li L, Nowlin Jr. W D, Su J L. 1998. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 45: 1469–1482
- Li R F, Zeng Q C, Gan Z J, Wang W Z. 1993. Numerical simulation of the South China Sea Warm Current and the Taiwan Strait flow in winter. *Progr Nat Sci*, 3: 123–129
- Lien R C, Ma B, Cheng Y H, Ho C R, Qiu B, Lee C M, Chang M H. 2014. Modulation of Kuroshio transport by mesoscale eddies at the Luzon Strait entrance. *J Geophys Res-Oceans*, 119: 2129–2142
- Lin P, Cheng P, Gan J, Hu J. 2016. Dynamics of wind-driven upwelling off the northeastern coast of Hainan Island. *J Geophys Res-Oceans*, 121: 1160–1173
- Liu Q Y, Kaneko A, Su J L. 2008. Recent progress in studies of the South China Sea circulation. *J Oceanogr*, 64: 753–762
- Liu Q Y, Huang R X, Wang D, Xie Q, Huang Q Z. 2006. Interplay between the Indonesian throughflow and the South China Sea throughflow. *Chin Sci Bull*, 51: 50–58
- Liu Q Y, Huang R X, Wang D. 2012. Implication of the South China Sea throughflow for the interannual variability of the regional upper-ocean heat content. *Adv Atmos Sci*, 29: 54–62
- Liu Y, Yuan Y, Su J, Jiang J. 2000. Circulation in the South China Sea in summer of 1998. *Chin Sci Bull*, 45: 1648–1655
- Lü X, Qiao F, Wang G, Xia C, Yuan Y. 2008. Upwelling off the west coast of Hainan Island in summer: Its detection and mechanisms. *Geophys Res Lett*, 35: L02604
- Luo L, Zhou W, Wang D. 2012. Responses of the river plume to the external forcing in Pearl River Estuary. *Aquatic Ecosyst Health Manage*, 15: 62–69

- Mertz G, Narayanan S, Webster I. 1990. A discussion of JEBAR/pycnoclastic forcing. *Cont Shelf Res*, 10: 1171–1178
- Nan F, Xue H, Chai F, Shi L, Shi M, Guo P. 2011. Identification of different types of Kuroshio intrusion into the South China Sea. *Ocean Dyn*, 61: 1291–1304
- Nan F, Xue H, Chai F, Wang D, Yu F, Shi M, Guo P, Xiu P. 2013. Weakening of the Kuroshio intrusion into the South China Sea over the past two decades. *J Clim*, 26: 8097–8110
- Nan F, Xue H, Yu F. 2015. Kuroshio intrusion into the South China Sea: A review. *Prog Oceanogr*, 137: 314–333
- Niino H, Emery K O. 1961. Sediments of shallow portions of East China Sea and South China Sea. *Geol Soc Am Bull*, 72: 731
- Ou S, Zhang H, Wang D. 2007. Horizontal characteristics of buoyant plume off the Pearl River Estuary during summer. *J Coast Res*, SI: 652–657
- Ou S, Zhang H, Wang D. 2009. Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River Estuary in summer. *Environ Fluid Mech*, 9: 471–492
- Pan J, Gu Y, Wang D. 2014. Observations and numerical modeling of the Pearl River plume in summer season. *J Geophys Res-Oceans*, 119: 2480–2500
- Qu T D, Kim Y Y, Yaremchuk M, Tozuka T, Ishida A, Yamagata T. 2004. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the Impact of ENSO to the South China Sea? *J Clim*, 17: 3644–3657
- Shaw P. 1992. Shelf circulation off the southeast coast of China. *Rev Aquat Sci*, 6: 1–28
- Sheu W J, Wu C R, Oey L Y. 2010. Blocking and westward passage of eddies in the Luzon Strait. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 57: 1783–1791
- Shu Y, Zhu J, Wang D, Xiao X. 2011a. Assimilating remote sensing and in situ observations into a coastal model of northern South China Sea using ensemble Kalman filter. *Cont Shelf Res*, 31: S24–S36
- Shu Y, Wang D, Zhu J, Peng S. 2011b. The 4-D structure of upwelling and Pearl River plume in the northern South China Sea during summer 2008 revealed by a data assimilation model. *Ocean Model*, 36: 228–241
- Shu Y, Chen J, Yao J, Pan J, Wang W, Mao H, Wang D. 2014. Effects of the Pearl River plume on the vertical structure of coastal currents in the Northern South China Sea during summer 2008. *Ocean Dyn*, 64: 1743–1752
- Su J. 1998. Circulation dynamics of the China seas north of 18°N. In: Allan R, Kenneth R, Brink H, eds. *The Sea. Vol 11 The Global Coastal Ocean: Regional Studies and Syntheses*. New York: Wiley. 483–505
- Su J. 2004. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary. *Cont Shelf Res*, 24: 1745–1760
- Su J, Pohlmann T. 2009. Wind and topography influence on an upwelling system at the eastern Hainan coast. *J Geophys Res*, 114: C06017
- Tsui I F, Wu C R. 2012. Variability analysis of Kuroshio intrusion through Luzon Strait using growing hierarchical self-organizing map. *Ocean Dyn*, 62: 1187–1194
- Wang D, Hong B, Gan J, Xu H. 2010. Numerical investigation on propulsion of the counter-wind current in the northern South China Sea in winter. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 57: 1206–1221
- Wang D, Liu Q, 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
- Wang D, Zhuang W, Xie S P, Hu J, Shu Y, Wu R. 2012. Coastal upwelling in summer 2000 in the northeastern South China Sea. *J Geophys Res*, 117: C04009
- Wang D, Wang Q, Zhou W, Cai S, Li L, Hong B. 2013. An analysis of the current deflection around Dongsha Islands in the northern South China Sea. *J Geophys Res-Oceans*, 118: 490–501
- Wang D, Shu Y, Xue H, Hu J, Chen J, Zhuang W, Zu T T, Xu J. 2014. Relative contributions of local wind and topography to the coastal upwelling intensity in the northern South China Sea. *J Geophys Res-Oceans*, 119: 2550–2567
- Wang K, Fang Y, Shi X H. 2001. Numerical study on the formation of the South China Sea Warm Current I. Barotropic case. *Chin J Ocean Limnol*, 19: 1–9
- Wang Q, Wang Y, Hong B, Zhou W D, Wang D X. 2011. Different roles of Ekman pumping in the west and east segments of the South China Sea Warm Current. *Acta Oceanol Sin*, 30: 1–13
- Wang Q, Wang Y X, Zhou W D, Wang D X, Sui D D, Chen J. 2015. Dynamic of the upper cross isobaths flow on the North South China Sea in summer. *Aquat Ecosyst Health*, 18: 357–366
- Wong L A, Chen J C, Xue H, Dong L X, Su J L, Heinke G. 2003a. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters: 1. Simulations and comparison with observations. *J Geophys Res*, 108: 3156
- Wong L A, Chen J C, Xue H, Dong L X, Guan W B, Su J L. 2003b. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters: 2. Sensitivity experiments. *J Geophys Res*, 108: 3157
- Wyrtki K. 1961. Physical oceanography of the Southeast Asia waters. *NAGA Report*, 2: 1–195
- Xu F H, Oey L Y. 2015. Seasonal SSH variability of the Northern South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 45: 1595–1609
- Xue H, Chai F, Pettigrew N, Xu D, Shi M, Xu J. 2004. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea. *J Geophys Res*,

- 109: C02017
- Yang J Y, Wu D X, Lin X P. 2008. On the dynamics of the South China Sea Warm Current. *J Geophys Res*, 113: C08003
- Yang J, Lin X, Wu D. 2013. On the dynamics of the seasonal variation in the South China Sea throughflow transport. *J Geophys Res-Oceans*, 118: 6854–6866
- Yang L, Wang D, Huang J, Wang X, Zeng L, Shi R, He Y, Xie Q, Wang S, Chen R, Yuan J, Wang Q, Chen J, Zu T, Li J, Sui D, Peng S. 2015. Toward a mesoscale hydrological and marine meteorological observation network in the South China Sea. *Bull Amer Meteorol Soc*, 96: 1117–1135
- Yuan D, Wang Z. 2010. Hysteresis and dynamics of a western boundary current flowing by a gap forced by impingement of mesoscale eddies. *J Phys Oceanogr*, 41: 878–888
- Yuan Y, Liao G, Yang C. 2008. The Kuroshio near the Luzon Strait and circulation in the northern South China Sea during August and September 1994. *J Oceanogr*, 64: 777–788
- Yuan Y, Liao G, Yang C. 2009. A diagnostic calculation of the circulation in the upper and middle layers of the Luzon Strait and the northern South China Sea during March 1992. *Dyn Atmos Oceans*, 47: 86–113
- Yuan Y, Liao G, Xu X. 2007. Three dimensional diagnostic modeling study of the South China Sea circulation before onset of summer monsoon in 1998. *J Oceanogr*, 63: 77–100
- Zeng L, Wang Q, Xie Q, Shi P, Yang L, Shu Y, Chen J, Sui D, He Y, Chen R, Wang D. 2015. Hydrographic field investigations in the Northern South China Sea by open cruises during 2004–2013. *Chin Sci Bull*, 60: 607–615
- Zhang Z, Zhao W, Tian J, Yang Q, Qu T. 2015. Spatial structure and temporal variability of the zonal flow in the Luzon Strait. *J Geophys Res-Oceans*, 120: 759–776
- Zu T, Gan J. 2009. Process-oriented study of the circulation and river plume in the Pearl River Estuary: Response to the wind and tidal forcing. *Advances in Geosciences. Ocean Sci*, 12: 213–230
- Zu T, Gan J. 2015. A numerical study of coupled estuary-shelf circulation around the Pearl River Estuary during summer: Responses to variable winds, tides and river discharge. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 117: 53–64
- Zu T, Wang D, Gan J, Guan W. 2014. On the role of wind and tide in generating variability of Pearl River plume during summer in a coupled wide estuary and shelf system. *J Mar Syst*, 136: 65–79

(责任编辑: 吴立新)