科学通报 2013 年 第 58 卷 第 14 期: 1277 ~ 1288
自然科学基金项目进展专栏 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

与南海西边界流有关的区域海洋学进展

王东晓[①], 刘钦燕[①*], 谢强[①②], 贺志刚[③], 庄伟[①], 舒业强[①], 肖贤俊[④], 宏波[⑤], 吴湘玉[⑥], 隋丹丹[①]

① 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境动力学重点实验室, 广州 510301;
② 中国科学院三亚深海科学与工程研究所, 三亚 572028;
③ 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361005;
④ 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;
⑤ Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, Virginia, VA23186, USA;
⑥ 国家海洋局海洋环境预报中心, 北京 100081
* 联系人, E-mail: qyliu66@scsio.ac.cn

2012-09-04 收稿, 2012-11-29 接受, 2013-04-22 网络版发表
国家自然科学基金重点项目(40830851)、国家重点基础研究发展计划(2011CB403504)和中国科学院近海海洋观测研究网络——西沙南沙海洋观测研究站建设项目(KZCX2-EW-Y040)资助

摘要 从动力学角度, 回顾了与南海西部主流系及其涡旋研究有关的南海物理海洋学的进展. 主要内容涉及南海西边界流漂流浮标观测、西边界流源区涡旋遥感观测、西边界流源区跨陆架交换、涡流相互作用、西边界流年际变化、西边界流区海气相互作用、南海贯穿流等方面的进展. 西边界流是一个强流系, 其与季节和年际变化相关的结构特征、变率及跟某些动力过程的关联有待研究. 在西边界流变率、涡旋环流相互作用、海气过程以及南海贯穿流取得了以下成果: (1) 利用漂流浮标观测样本对南海西边界环流进行分析, 指出南海西边界表层环流在到达越南中部沿岸后伴随着流幅变窄的同时流速加强; 探讨了南海北部环流变化机理, 定量诊断南海西边界流北支冬季逆风流产生的动力机制; 利用航次数据对 18°N 断面的经向地转流进行诊断, 表明南海西边界流的经向输送年际变化明显; (2) 结合航次观测数据, 对 2003/2004 年冬季南海北部 2 个反气旋涡旋和 2007 年夏季 18°N 附近的 3 个反气旋涡旋进行研究, 指出冬季 2 个涡旋产生后以罗斯贝(Rossby)波速度(约 0.1 m/s)沿北部陆坡向西南方向传播, 并初步揭示了南海西边界环流与夏季 3 个涡旋的相互作用; 南海北部陆架区涡旋西南向传播最大(最大为 0.09 m/s), 而越南以东海域涡动能(EKE)最大, 这都说明涡旋活动与南海西边界流存在强的相互作用; (3) 发现南海西边界流附近海表面温度(SST)强的季节内振荡特征, 进一步研究表明此区域冬季 SST 季节内变化会使潜热季节内信号减弱 20%; (4) 探讨了南海贯穿流的长期变化特征以及与整个太平洋环流系统的相互关联.

关键词
南海
西边界流
涡流相互作用
季节内变化
南海贯穿流

南海是西太平洋最大的热带陆架边缘海, 它地处亚洲东南部, 是位于热带、亚热带海域的半封闭的边缘海. 它的面积广阔, 约为350万平方千米, 东西跨度为 99°~123°E, 南北跨度为 0°~23°N, 其西北部靠近亚洲大陆, 东北部、东南部、西南部周边环绕着众多岛屿. 北部通过台湾海峡与东海相连, 东北部通过吕宋海峡与太平洋相通; 南部经马六甲海峡和安达曼海与印度洋相通, 经卡里马塔海峡与爪哇海相通; 东部经过巴士海峡与苏禄海相通. 在上述众多的通道中, 吕宋海峡是南海唯一与大洋连通的深水通道, 其海槛的深度

引用格式: 王东晓, 刘钦燕, 谢强, 等. 与南海西边界流有关的区域海洋学进展. 科学通报, 2013, 58: 1277–1288
英文版见: Wang D X, Liu Q Y, Xie Q, et al. Progress of regional oceanography study associated with western boundary current in the South China Sea. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5663-4

达 2500 m, 远深于其他通道的海槛深度. 南海海底地形复杂多样, 水深变化很大, 最大深度约 5400 m, 平均水深 1200 m, 超过 1000 m 的中央东北-西南走向的菱形海盆约占总海域总面积的 1/2, 其余海区大多浅于 100 m, 从浅海到中央海盆存在着陡峭的地形切变. 广阔的海域使得很多动力学特征与大洋的相同, 但是众多的岛屿、浅滩和海湾以及复杂的岸线影响了南海内部环流动力学的特点, 使南海在海洋内部的温盐分布、中小尺度涡旋、经向环流等具有不同于大洋的特色.

南海地处亚热带和热带两个区域, 气候属于典型的亚热带季风气候. 常年盛行季风, 冬季为强大的东亚季风, 夏季为西南季风(又称南海夏季风)[1]. 季风驱动的风生环流是南海总环流中的主要成分[1,2], Wyrtki[1]同时也注意到南海环流同样存在典型的西向强化现象. 南海环流冬季为气旋式环流, 夏季为南部反气旋式环流[3]. 徐锡祯等人[4]利用 1921~1970 年间的南海历史调查资料, 给出了在这种大尺度环流形态具有的次海盆尺度涡旋特征. 多套历史观测资料的分析结果都证实了上述季节性环流结构. 2006 年以前一些南海海洋学研究的基本参照仍然是早期的观测和分析, 之后关于南海环流的定量数值计算和模拟逐步得到了重视[5,6]. 随着新观测资料的增加, 尤其是近年来海洋遥感资料的广泛应用[7], 进而深入细致地研究南海西边界流(the Western Boundary Current in the South China Sea, SCSWBC)-包括南海暖流(the South China Sea Warm Current, SCSWC)[8]以及越南离岸流(Vietnam Coast Current, VCC)[9,10]的垂向结构、输运和变率已经是一个迫在眉睫的课题. 但是, 当前关于 SCSWBC 的观测研究刚刚起步, 现阶段我们综合运用南海遥感资料和锚定浮标观测, 对南海西边界流开展合成研究, 对认识南海这个独特的热带深水边缘海盆西部主流系与越南沿岸涡旋形成、维持和变化与南海冬夏季风驱动、南海大尺度行星波动的关系有重要的科学意义. Fang 等人[11]通过离岸、双涡、上升流以及冷舌对 SCSWBC 的动力特征进行了综述, 但对于 SCSWBC 相关涡旋特征以及与涡旋的相互作用方面涉及不多. 本文主要从结构及变率、伴生涡旋及相互作用特征、区域海气相互作用以及南海贯穿流等 4 个方面对 SCSWBC 相关特征进行了描述.

1 南海西边界流结构及变率

相对于南海环流的演变研究, 其 SCSWBC 的研究相对较少. 1961 年 Wyrtki[1]首次提出了南海存在西部强化过程. 李立等人[7]1999 年利用卫星高度计资料, 指出 SCSWBC 主要是由南海的环流组成; 且最强流区域总是出现在中印半岛的东南沿岸, 此强流的流向在冬季是南向流、夏季是北向流, 流速为 1 m/s. 王卫强等人[12]描述了南海上层海洋环流动力场的年循环特征与热力场之间的关系, 表明 SCSWBC 的强弱与南海季风有关. 刘秦玉等人[13]计算了平底南海内驱海盆尺度的 Sverdrup 平衡, 探讨了风场对南海季节环流的影响. 风应力旋度导致的温跃层变化对海洋形态进行调整, 从而达到准稳态 Sverdrup 平衡并建立季节平均的大尺度环流及相应的 SCSWBC[14]. 翟丽等人[15]针对南海冬夏季风产生的正压环流动力机制进行了数值实验, 结果表明通过吕宋口进入南海的流场对其北部陆坡边界流和 SCSWBC 均有重要贡献; 而且β效应对南海环流的西向强化和吕宋海峡入侵作用也至关重要. 刘秦玉等人[13]也指出, Sverdrup 不能反映越南沿岸上升流, 而且 Sverdrup 只能评估风应力旋度造成的净垂直平均输送对内区环流的贡献, 而 SCSWBC 地区受到的其他影响, 斜压、地形与流、浮力通量影响等作用都被忽略, 所以会导致有些环流特征与“真实”有所不同.

1.1 西边界流的观测研究

很多学者通过实际海洋观测资料和卫星观测资料证实了 SCSWBC 存在[7,16~20], 并使用数值模拟技术重现了 SCSWBC[21~24]. 但是前人的这些研究都有很多的局限性, 不能完全再现 SCSWBC 的基本特征. 高度计资料在浅水区的数据不够精确, 使得 SCSWBC 不能使用高度计资料准确地推算出来. 而历史水文资料求得的动力高度场因时空平滑不能较好地反映西边界处的强流特征[25]. 通过数值模拟可以模拟出完整的 SCSWBC 形态, 但是这些模拟结果还是需要通过实际观测资料进行验证. 单一航次观测结果能够较好地显示流场的西向强化现象[26]. 廖光洪等人[17]对 1998 年 3 个南海航次观测的温盐深仪(Conductivity-Temperature-Depth, CTD)和声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP)资料进行诊断分析, 给出了 SCSWBC 在 1998 年春夏冬三季的流场变化特征, 但是值得注意的是 1998 年强厄尔尼诺(El Niño)发生年, 因此引发的流场季节变化与往年典型变化特征有所不同, 地转流

流态和 Ekman 抽吸特征也证明了这一观点[27].

由于实地观测资料稀疏缺乏, 使以往研究的 SCSWBC 路径和形态都不是很明确, 不能准确地反映出 SCSWBC 的变化特征. 在南海海域近年特别是在冬季布放了很多的漂流浮标, 得到了很多的 SCSWBC 的观测数据. 近几年, 漂流浮标已被广泛地应用于海表面流场的拉格朗日测量, 它的速度来源于海表面流场变化的位置, 所以当有足够多的观测样本时就可以计算出海表面的流场变化. He 和 Wang[28]利用 2003~2006 年的卫星跟踪表层漂流浮标数据研究了冬季 SCSWBC 的表层特征, 并给出了 SCSWBC 路径、形态及其变化的形态(图 1). 指出表层 SCSWBC 起源于南海北部并流向西南, 该流到达越南中部沿岸后加强、流辐变窄, 以超过 0.8 m/s 的流速沿越南东海岸向南流动. 在这 3 年的 12 月, 表层 SCSWBC 来源于黑潮入侵(北支)和南海海盆东边界 18°N 的西向流(南支)两部分. 且南支在 12 月或者与北支汇合在北部陆架边缘流向西南, 或者独立于北支穿越海盆流向越南中部沿岸. 涡旋越南沿岸东南部 SCSWBC 的最大流速超过 1.4 m/s, 2004 年 12 月最大流速出现在 10°N, 比 2003 和 2005 年偏南 2°[29].

1.2 西边界流模式研究

南海海区海流变化较频繁, 要直接得到时空同步性的海流测量非常困难, 因此必须利用海洋数值模式来推动南海环流以及机理方面的研究. Yang 等人[30]利用普林斯顿海洋模式(Princeton Ocean Model, POM)探讨了南海环流尤其是 SCSWBC 的变化机理, 结果认为, SCSWBC 的时间变化尤其是 VCC 主要受南海整个海盆的风场变化所控制; 而浮力驱动能够使得夏季/冬季 SCSWBC 加强/减弱; 黑潮对 18°N 以北的环流变化非常重要, 它能最终决定冬季 SCSWBC 的出现与否[30]. VCC 受风场控制的事实进一步被 Cai 等人[31]所证实. 风应力旋度对南海西边界流的产生非常重要[13,14], 相对而言, 海面热通量和海峡水交换对环流季节演变的影响是次要的[30,32]. 同时, SCSWBC 区域非线性效应的涡度输运对双涡结构(越南中部离岸区域向东急流南侧为反气旋式涡旋, 北侧为气旋式涡旋)的产生非常重要[33], 而底地形和风生沿岸流的相互作用是导致西边界急流在冬季和夏季离岸运动的关键因素[34]. SCSWBC 与南海北部环流之间存在密切的联系. 南海北部环流受季风控制, 且受局地风场的驱动使得南海整个海盆内的环流与东海和太平洋水发生交换. 数值模拟结果表明南海北部的地形[35]和局地风驱动对南海北部上升流起到了重要的作用[5,36].

Hong 和 Wang[37]运用 POM 探讨了南海北部的季节平均环流, 探讨了表面风强迫、黑潮入侵和底地形对南海北部环流的影响. 结果显示, 黑潮分支进入南海上层, 对南海北部陆架流有直接影响; 吕宋海峡和台湾海峡的侧向强迫能诱导西南向的陆坡流和东北向的 SCSWC; 而风强迫主要导致南海环流的季节变化. 并且当没有东沙群岛阻隔时黑潮入侵会向西北扩张并影响整个环流体系的变化. Wang 等人[38]进一步分析了南海陆坡流和陆架环流之间的相互作用, 研究了冬季逆风流的动力机制, 结果表明沿陆架方向上风应力在上层海洋的动量平衡中占有重要地位. 环流场涡度收支分析表明 SCSWC 与陆坡流之间的高

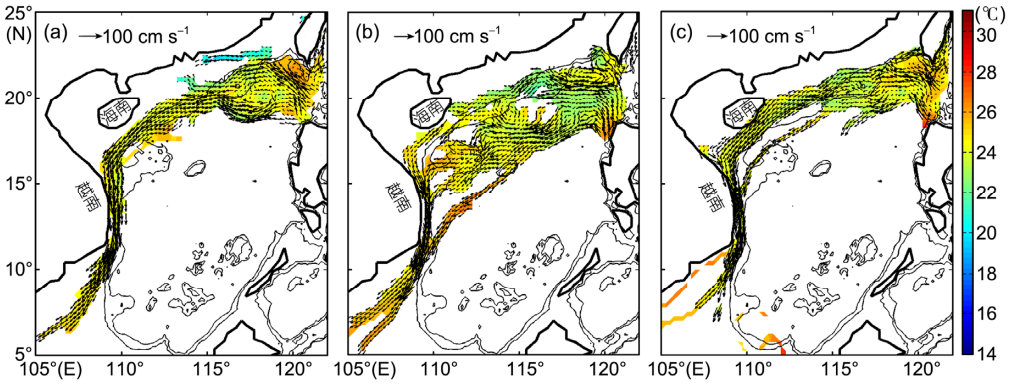


图 1 漂流浮标得到的南海表层环流速度(矢量)和温度(阴影)分布特征

据文献[28]修改. (a) 2003 年 12 月; (b) 2004 年 12 月; (c) 2005 年 12 月. 两条等值线分别为 200 和 1000 m 等深线

压带是黑潮入侵水团导致的陆坡区海水的强层结梯度和陆坡流在向岸一侧的爬坡偏转共同导致的(图 2). 地形斜压联合(Joint Effect of Baroclinicity and Relief, JEBAR)效应——即斜压场和陆坡地形相互作用和位涡守恒原理是导致陆坡流产生爬坡偏转的重要原因.

1.3 西边界流年际变化

早在 20 世纪初期, 国外已有大量关于海洋水文断面的相关研究工作. 迄今为止, 对于 SCSWBC 年际年代际变化的研究尚且不多. Fang 等人[39]利用卫星高度计资料对南海上层环流的年际特征进行了探讨, 指出越南南部离岸环流与涡旋的相互作用年际特征显著. 越南离岸区域环流年际变化会影响海盆尺度涡旋强度[40]. 邢延松等人[41]基于中国海洋再分析(China Ocean Re-Analysis, CORA)资料对南海环流的季节特征和其受 El Niño 事件的响应进行了分析. 结果表明, 南海环流的季节特征与 El Niño 事件有紧密联系. El Niño 当年夏季南海北部气旋式环流和南部反气旋环流强度增强, 当年冬季大的气旋式环流系统强度减弱, 次年夏季环流系统减弱. 也就是说, El Niño 发生初年夏季西边界环流增强. Yang 和 Wu [42]研究指出, 冬季气旋式环流有减弱的趋势, 这可能与冬季亚洲季风减弱有关. 夏季环流形态有增强趋势, 或许与吕宋海峡体积输送(Luzon Strait Transport, LST)的增加有一定的联系.

葛黎丽等人[43]以南海北部开放航次所获得的水文观测资料为基础, 结合卫星高度计等遥感资料, 采用动力方法计算了南海 18°N 断面的经向地转流. 其断面温度、盐度和密度特征表明, 18°N 断面上表层和次表层等温线和等密度线均呈现出西高东低的分布特征, 等温线和等密度线的东西倾斜趋势在 2008 年最为明显, 2006 和 2007 年断面上的等温线起伏较为明显, 说明可能存在着活跃的涡旋活动. 2005~2007 年断面上 1000 m 以浅总的经向地转体积、热、盐输运均为南向输运, 并且年际差别较大, 这说明涡旋与 SCSWBC 相互作用在其南向输运年际变化中起着非常重要的作用.

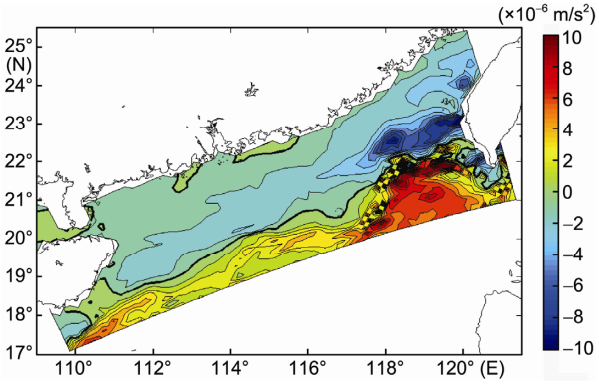


图 2 基于普林斯顿海洋模式模拟结果的跨陆架密度梯度冬季特征

据文献[38]修改. 黑粗线为零线; 等值线间隔为 1×10^{-6} m/s^2

2 南海西边界流伴生涡旋

2.1 南海西边界流源区跨陆架交换

南海海区受季风、黑潮和复杂的地形影响, 在南海整个海区有大量的涡旋产生, 尤其是反气旋暖涡频繁在南海北部出现[44~46], 但是这些涡旋很少能被现场资料直接观测到. 高度计数据表明, 越南外海为南海内部的动力活跃区之一[47], 具有较大的涡动能. 在过去的研究中, 多利用局地定点浮标和卫星高度计等观测手段探讨南海北部观冷涡的结构特征和生消机理. Li 等人[48]基于现场观测的 CTD 资料证明了在南海北部存在反气旋暖涡, 并且 1993 年冬季浮标在离开吕宋岛后仍围绕涡旋旋转 4 周. 南海北部涡旋变化机理方面, 不同学者之间也有不同的说法. 例如: 反气旋涡旋是由黑潮的分支脱离产生, 是黑潮水分支进入南海导致流场变化而形成[48~50]; 黑潮水的不稳定导致反气旋式的中尺度暖涡从中脱离并向西移动进入南海[51,52]; 但有研究指出并非所有观测结果都能支持黑潮水以分支的形式进入到南海这个观点, 因此黑潮水并不是形成中尺度涡旋的主要原因[53]. 反气旋涡从黑潮脱离的现象在冬季发生的最频繁[52], 并且涡旋的脱离和黑潮水体积输送有一定联系[54].

尽管已有研究指出反气旋式涡旋从黑潮水脱离后能向西移动进入南海[55,56], 但进入南海后如何同 SCSWBC 相互作用的研究探讨甚少. Wang 等人[57]研究了 2003/2004 年冬季南海北部 2 个反气旋涡旋的生成和演变过程. 结果显示 22918 号浮标于 2003 年 12 月 4~23 日期间在南海北部追踪到 1 个反气旋式暖涡, 之后 22517 号浮标于 2004 年 1 月 28~4 月 14 日期间在相同区域也追踪到 2 个不同的暖涡(图 3). 2 个涡旋产生之后都沿着南海北部陆坡向西南方向传播, 传播速度与该纬度 Rossby 波的相速度相近. Nan 等人[58]利用 2007 年 8 月份观资料, 揭示了 18°N 附近的 3 个

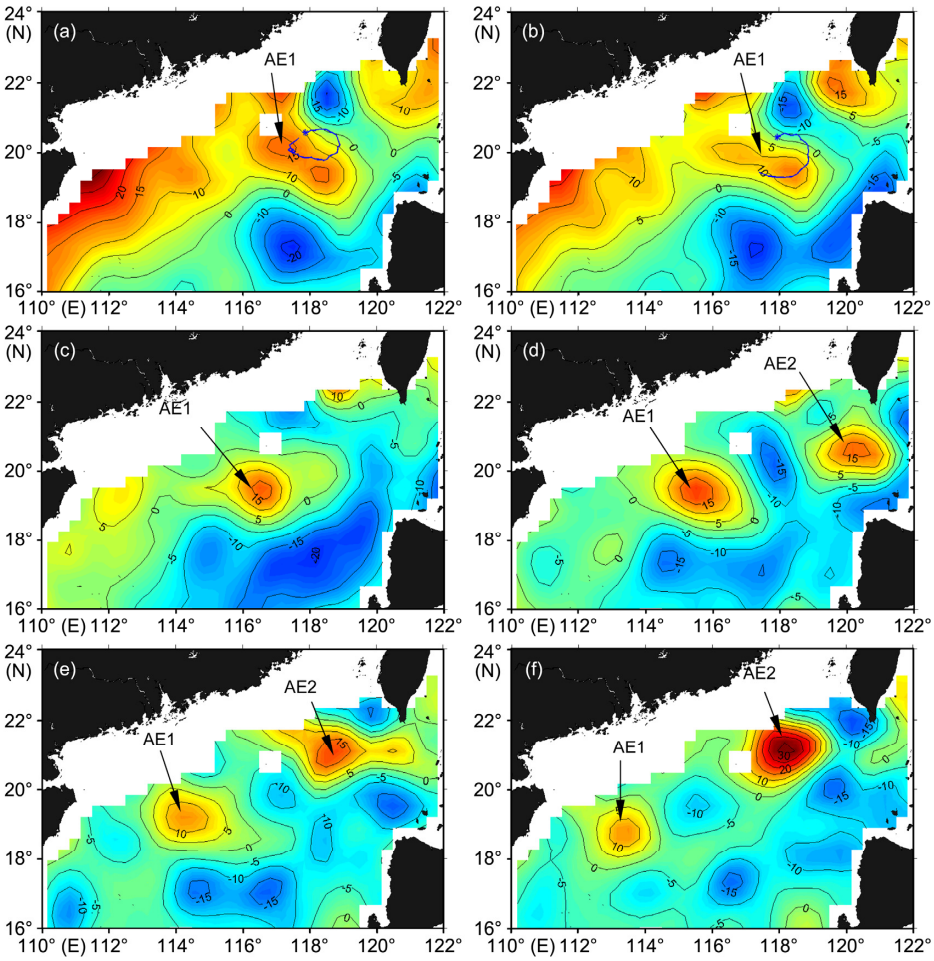


图 3　海面高度异常(SLA，阴影，单位: cm)和浮标 22918 轨迹(蓝线，蓝色星号为浮标初始位置)

据文献[57]修改. SLA 时间: (a) 2003 年 12 月 10 日, (b) 2003 年 12 月 17 日, (c) 2004 年 1 月 7 日, (d) 2004 年 1 月 21 日, (e) 2004 年 2 月 4 日, (f) 2004 年 2 月 18 日. 浮标时间: (a) 2003 年 12 月 4~15 日, (b) 2003 年 12 月 16~23 日

反气旋涡旋的活动特征和生消过程(图 4). 结果表明: 3 个涡旋的生命史分别达到 147, 168 和 210 d(图 4(a)), 并且 3 个涡旋的背景环流为反气旋式(图 4(b)). SCSWBC 与 3 个涡旋的相互作用研究表明, SCSWBC 在 4~8 月为向北流动, 当 SCSWBC 及其东支变强时, ACE1 和 ACE2 同时变强. 3 个涡旋的产生与发展与 SCSWBC 的不稳定性有着一定的联系. 南海西北部不断出现的暖涡, 通过影响大气边界层会对降雨产生影响[59].

2.2　南海西边界流-涡旋相互作用

南海上层海盆尺度存在一个明显季节差异的环流, 其中最为突出的是冬季的气旋性环流和夏季的反气旋性环流[1,2], 在这两个大的环流中包含了大量中尺度涡旋. 西边界流的非线性涡度输送对于南海夏季环流偶极子模态的产生至关重要[33]. 季风强迫通过海洋斜压 Rossby 调整影响南海海表面高度变化[14,60], 通过海表面高度异常变化从而可以识别海洋中尺度涡旋的变化特征[61,62]. 南海存在两个明显有带状变化的中尺度涡旋, 一条位于西边界流处, 另一条由西南向东北方向跨越整个南海中部[58]. 而南海北部环流主要受黑潮入侵影响[63,64], 并且其北部的中尺度涡多数是由黑潮入侵所形成的[48~52]. 北部次表层温度受吕宋海峡附近西传中尺度涡的影响, 表现出明显的季节内变化[65]. 并且台湾岛南部附近流场也存在显著的季节内变化特征[66]. 南海南部越南沿岸海域存在典型的夏季上升流, 并且其上升流的变化特征也存在明显的季节内和年际变化[67,68].

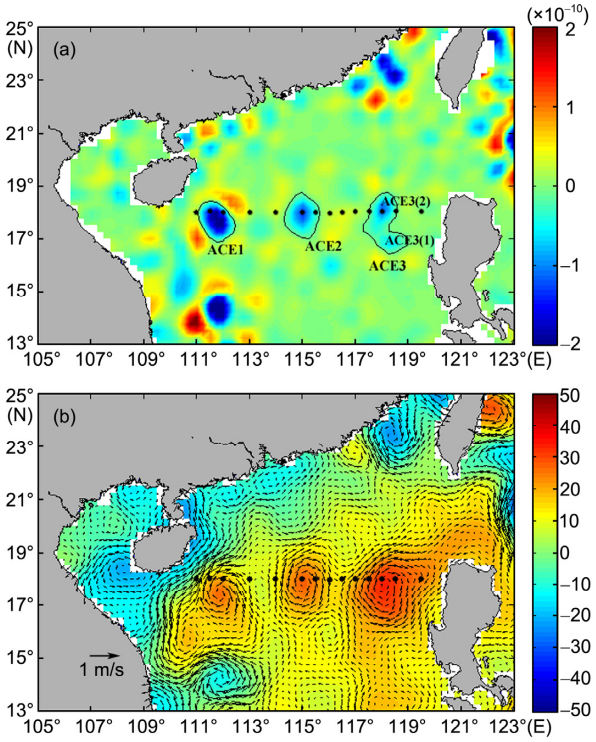


图 4 2007 年 8 月 22 日 3 个反气旋式涡旋对应的 Okubo-Weiss 参数(单位: s^{-2}) (a), SLA(单位: cm)以及海表面地转流(单位: m/s) (b)

据文献[58]修改

7~8 月份与上升流伴随产生的反气旋式海洋涡旋向东南发展, 将冷的沿岸水体向南海内区输送[67]. 伴随上升流发生的水华现象向越南南部扩张发展的时间具有 30~60 d 季节内振荡[69]. 南海中部海域温跃层深度的变化受中尺度涡影响显著, 且与海表面高度的变化成反位相关系[70]. 通过航次观测资料分析上层环流发现, 南海纳土纳群岛附近离陆坡环流也存在很强的中尺度变化特征[71]. 能量强的中尺度涡通常比弱的涡旋维持更长时间, 并且穿透的水层会更深[72].

Wang 等人[73]利用美国海军的广义数字环境模型(generalized digital environment model, GDEM)温盐数据诊断分析了南海深层环流特征, 指出南海深层底部气旋式环流主要受吕宋地形影响形成. Hu 等人[74]利用站点流场和水温观测数据对南海西边界流区域 2007 年 9 月份的涡旋三维特征进行了分析, 指出越南离岸急流北侧的气旋式冷涡的形成与离岸急流斜压不稳定导致的回流有关, 并且此气旋式冷涡的发展与离岸急流南侧共存的反气旋式暖涡的发展密切相关.

Chen 等人[75]提出气旋涡和反气旋涡有不同的季节性变化特征, 指出更多的气旋涡产生在冬季, 而更多的反气旋涡产生在夏季. 最小平均半径和生命的气旋涡出现在夏季, 最大的出现在冬季, 并且反气旋涡的生命较气旋涡更长. 且涡旋的涡动能(eddy kinetic energy, EKE)在 Z1 和 Z4 区域远大于 Z2 和 Z3 区域, 并且 Z1 和 Z4 区域最大 EKE 分别出现在冬季和夏季(图 5). 南海北部陆架区域, 涡旋呈西南向传播, 且传播速度居南海涡旋传播速度之最[75]. 这和涡旋在低纬区域传播速度较大的普遍特征相异, 应该归因于南海西边界流的影响. 越南以东区域, 涡旋众多, 且近局地运动, 它们会同南海西边界流发生强烈的相互作用, 导致该区域涡旋的 EKE 居南海最大[76], 研究表明西边界流通过斜压不稳定与涡旋进行着能量的转换[77]. 西沙区域是涡旋消亡的“集中地”, 且由于西沙区域地形复杂, 势必存在涡旋-西边界流-地形之间的相互作用, 其相关研究正在进行当中.

3 海气相互作用

海表面温度变化(SST)是探讨海气相互作用最重

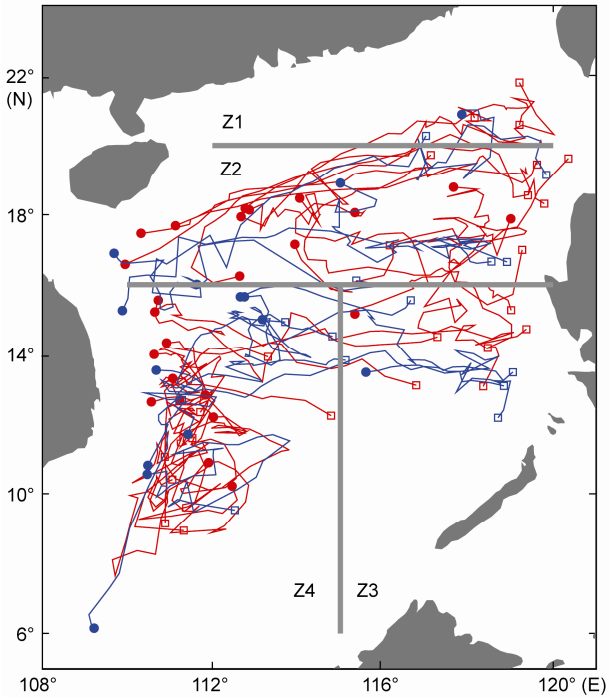


图 5 涡旋的传播轨迹

据文献[75]修改. 方块和圆点分别代表这些涡旋的产生和消散位置, 红线和蓝线分别代表反气旋和气旋涡的传播路径

要的一个因素, 已有研究表明: 尽管南海是气候态暖池结构[78,79], 但南海 SST 具有明显的年际变化特征[80], 并且整个海盆 SST 冬夏季年际变化特征是不同的[81]. 通过大气环流[82]以及海洋环流[83]等因素, 太平洋厄尔尼诺和南方涛动(El Niño and Southern Oscillation, ENSO)信号可以影响南海的海洋变化. 海洋中的混合层变化(MLD)对于 SST 也是一个重要的影响因素[84], MLD 通过影响 SST 从而影响大气环流. 南海 SST 的年际变化存在明显的双峰结构: 即 El Niño 次年 2 月和 8 月两次增暖; 南海的平均地转流输送是导致第二次增暖的主要因素[85].

前面多数研究认为南海 SST 的年际变化与风场的变化密切相关, 很少人关注 SCSWBC 对 SST 的影响. Xie 等人[67]研究指出, 与越南沿岸夏季上升流伴随的冷舌向东南发展, 阻断了南海夏季的增暖从而导致 SST 的半年变化. 而安南山脉对西南季风的阻断和山脉南侧风加速导致的风急流所诱发的风应力旋度是导致南海越南沿岸夏季上升流形成并阻断夏季 SST 增暖的主要因子, 其地形作用机制对南海夏季气候特征产生的影响机理也进一步得到了模式的验证[86]. SCSWBC 区域海温结构除存在夏季冷舌, 还存在明显的冬季冷舌, 此冬季冷舌的产生与南海西边界流南向冷平流输送作用有关[87]. Xie 等人[88]研究发现南海西边界流区域的 SST 的 30~60 d 季节内振荡因受到越南沿岸上升流的影响[67,68], 其季节内振荡变化幅度要比其他区域明显很多. 锚定潜标数据分析发现, 南海西部近西边界环流区域次表层季节内振荡也存在明显的 40~70 d 周期[89]. Zhuang 等人[90]指出, 在南海西边界 100~200 m 等深线间, 存在一条弱的季节内变化(Intraseasonal Variability, ISV)信号带, 把浅水区和深水区强的季节内振荡信号隔开. 西边界流本身为相对较稳定的一支强流系, 所以其 ISV 不明显, 而西边界流的吕宋源区和越南急流带区, 因受不同动力因素影响而产生涡旋, 从而导致这些区域受涡旋活动过程影响因而 ISV 信号较强. 越南南部河流冲淡水会影响南海西边界流区域的障碍层分布, 冬季 SST 季节内变化会使潜热季节内信号减弱 20%, 从而对海气相互作用过程产生一定的影响[91].

4 南海贯穿流及其与西边界流的关系

印尼贯穿流(Indonesian Throughflow, ITF)是太平洋与印度洋之间主要的水体输运和热输运通道, 是维持全球海洋热量平衡和净水平衡状态的关键因子之一. 随着区域海洋模式的发展, 近几年有不少学者开始关注起南海在 ITF 中所扮演的角色. 传统意义的 ITF 仅仅认为是从太平洋的水体经望加锡和马鲁古海峡进入印度洋的水体, 通常忽略了南海吕宋海峡入流-卡里马塔出流路径对 ITF 所起到的作用. 南海在连接热带太平洋和印度洋方面还起着重要作用, 研究结果表明: 西北太平洋通过吕宋海峡进入南海的水温较低, 而从南海南部几个海峡输出南海的水温较高, 这部分热含量的差异主要来自大气对南海的加热作用. 太平洋水体进入南海后, 多数沿南海西边界向南流动, 经卡里马塔海峡流出后, 在望加锡海峡作为表层流流出, 对 ITF 热输送的年际变化起着重要的作用[92]. 太平洋-印度洋南海环流分支, 水体从菲律宾西部南海地区, 经卡里马塔和民都洛海峡进入印尼, 被命名为南海贯穿流(South China Sea Throughflow, SCSTF)[93].

巽他陆架和爪哇海可能是南海水穿越赤道参与太平洋与印度洋水体交换的一支主要通道, 气候态南海环流对 ITF 起着非常重要的作用[94]. 北赤道流北支水体进入南海后通过南海南部水道流入印度尼西亚海[95], 而浮标结果进一步证实冬季盛期太平洋-印度洋水体南海分支的存在[96], 其观测结果进一步被数值模拟所证实[24,97]. 南海出流对 ITF 的净输运起着重要的作用[98], 太平洋向印度洋的热输送当中有 1/4 是通过南海进行的, 南海贯穿流的动力作用也通过次表层盐度分布特征得到了验证[97,99]. 由于进入南海的水团偏冷而流出南海的水团偏暖, 从而标明南海是一个热汇, 从大气得到净向下的热量通量, 从而对北太平洋的经向环流有一定贡献[100,101]. 数值试验结果表明, 南海贯穿流除对望加锡海峡的热含量输送起着重要的调节作用外, 也会对西太平洋边界环流系统产生影响[102,103]. 南海贯穿流通过调节热含量, 会对气候变化产生重要影响[104].

赤道太平洋风场变化是调整吕宋海峡体积输送年际变化的重要因素[104]. 1976/1977 气候突变发生后, 南海贯穿流有增加趋势, 而印尼贯穿流有减少趋势[105], 两者其反位相特征与年际变化相类似[106]. 气候突变发生后, 对应着北赤道流减少, 吕宋海峡东侧的黑潮输送增强, 棉兰老流减弱; 北赤道逆流和南赤道流也在 1975 年以后减弱, 这在印尼贯穿流源地区域形成一个异常气旋式环流, 这个异常气旋式环流

不利于太平洋水体直接进入印度洋[105](图 6). 伴随强南海贯穿流发生时, 南海内区环流北部为气旋式环流, 南海南部越南上升流南侧为反气旋式环流. 热收支分析表明由南海贯穿流的平流效应在 1982~1983 和 1997~1998 两个典型事件中仍然起着重要的作用[101], 这与前人研究认为 1982~1983 和 1997~1998 的厄尔尼诺的冷平流作用不明显[100]不同. 不同的数据分析认识不同, 这需要进一步分析验证南海贯穿流的热力影响和动力作用.

南海贯穿流质量输运虽弱, 但能改变热盐输送, 从而对气候变化产生影响, 并且会对热带东南印度洋的主要流系产生影响. 假若南海是印尼海域水团盐度的提供者, 那么南海贯穿流在联系太平洋与印度洋之间的作用将大大增强, 研究三者之间的联系对此海域与气候系统之间的海气反馈过程起着非常重要的作用. Du 和 Qu[107]对印尼贯穿流的 3 条主要通道进行了详细分析, 也阐述了南海作为非封闭系统在大尺度环流动力过程中的作用. ITF 是从太平洋汇入印度洋的一支重要环流, 进入印度洋之后成为印度洋环流的重要组成部分. 14°S 与爪哇岛之间的南赤道流可以通过 ITF 从太平洋获取暖水, 将东印度洋的热力变化特征与环流结构紧密相连. 这种环流形态的变化会进一步影响东印度洋的上升流, 并且通过局地海气耦合过程传递给大尺度大气环流. 尽管对于南海贯穿流的研究已经取得了一定的成果, 但南海贯穿流与周边环流系统(太平洋西边界环流-南海西边界环流-ITF)的相互联系以及与之相关的海洋动热力调整能否对东南亚季风系统有所作用等问题仍需进一步探讨.

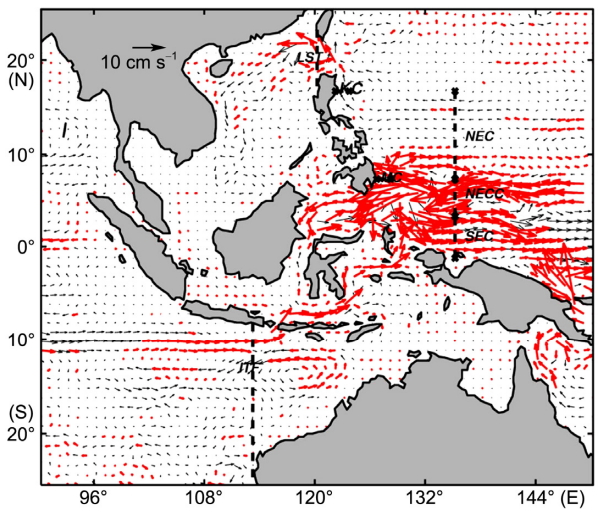


图 6 上 465 m 平均的海洋环流差异(1976~2001 年减 1958~1975 年)

红色代表其差异超过 95%的信度检验

5 总结

本文从西边界流变率、涡旋环流相互作用、海气过程以及南海贯穿流等几个方面对南海西边界流的研究进展进行了综述, 并取得了一些成果(图 7). 尽管从物理海洋环流的角度, 我们已经对南海环流以及西边界流的一些特征有了一定的认识, 但我们的认知还远远不够, 并且存在以下一些问题.

(1) 观测调查. 自 2004 年开始, 中国科学院南海海洋研究所在国内率先实施了 1 年 1 次的南海北部开放航次, 平均每航次布设站位约 60 个; 2010 年在国家自然科学基金委员会资助下, 以船时共享机制开始进行多学科南海开放航次考察; 通过本项目的开展, 由本团队主导的南海 18°N 长期观测断面被纳入气候变率及可预报性计划(Climate Variability and Predictability Programme, CLIVAR)国际气候与海洋

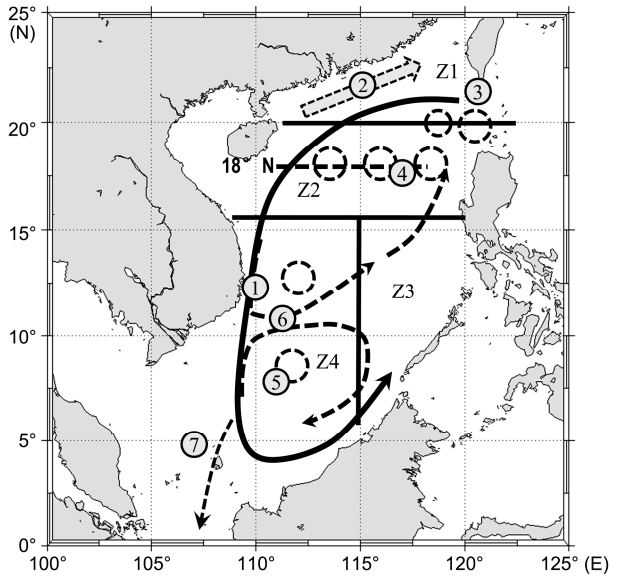


图 7 主要成果示意图

1, Argos 观测: 越南沿岸流速最大, 流幅变窄, 最大流速位置 12°N; 2, 冬季逆风流产生机制: JEBAR 和位涡守恒是导致陆坡流爬坡偏转的重要原因; 3, 暖涡传播速度与 Rossby 波相速相近; 4, 暖涡活动与 SCSWBC 紧密联系; 5, Z1 区涡旋传播速度最快, Z4 区涡旋 EKE 最大, 与 SCSWBC 通过斜压不稳定进行着能量交换有关; 6, SCSWBC 附近区域 SST 强季节内振荡, 冬季 SST 季节内变化会使潜热季节内信号减弱 20%; 7, 南海贯穿流与大洋环流系统的关联

计划框架(www.wcrp-amy.org 和 http://eprints.soton.ac.uk/41826/), 推动了印太暖池和南海成为“亚洲季风年”的重点研究区域之一; 自 2007 年陆续在西沙与海南之间的南海西边界流区布放深水锚定潜标; 2008 在西沙永兴岛安装礁缘水文和岛上气象监测单元, 实现了海洋水文和气象要素远程实时接收. 目前, 南海现有的观测体系虽然覆盖了大面观测和定点连续观测, 但是仅一部分海-气界面的浮标依托岛屿和近海通用分组无线业务(General Packet Radio Service, GPRS)信号具有实时通讯能力, 其余深远海潜标系统都不具备实时数据传输功能, 数据获取滞后, 不能实时服务于环境预测预报. 西边界流区目前已经在南海北部西沙群岛海域组建了数套潜标系统组成的观测阵列, 但是在其上游和下游缺少类似观测阵列, 需要针对越南离岸流、东沙群岛以东西边界流可能存在的分支进一步完善观测体系.

(2) 数值模拟. 区域海洋模式如果不加入同化手段, 很难对黑潮水甩出的暖涡结构进行模拟, 模式模拟结果很难跟高度计观测数据进行比较; 目前国内能用的高分辨率海洋模式为混合坐标海洋模式(Hybrid Coordinate Ocean Model, HYCOM)数据, 未同化前黑潮甩出的涡旋也很难模拟得到. 而南海内部以及西边界伴生中尺度的涡旋, 例如吕宋冷涡、万安涡旋等季节性变化特征相对比较稳定的, 基本上数值模式都可以大致再现, 但量级、强度等细微结构与卫星数据(Topex/Poseidon, T/P)会有所差异. 同时, 涡旋的垂直结构到底如何, 目前还缺乏实质性对比观测进行比较.

(3) 亟待展开的科学问题. 除南海西边界流的体积输送以及来源外, 其他问题例如, 南海西边界流与中尺度涡旋的相互作用过程, 到底是一种什么样的机理? 南海西边界流的深层环流结构到底如何? 南海环流可预报性是否能够真正做到, 具体尺度和预报时效如何等等, 仍然是一个很大的挑战. “走向深海”是世界趋势也是中国战略, 我们物理海洋工作者在这种大战略背景下更应该把研究的眼光放得更远, 让科研道路走得更深. 同时西部边界流与中尺度涡旋今后应在多学科交叉研究领域加深发展, 如: 流体力学在海洋研究中的应用、声学与海洋热力学和生物地球化学等学科的交叉应用.

参考文献

1 Wyrki K. Physical oceanography of the Southeast Asian waters. NAGA Report, 1961, 2: 195
2 Dale W. Wind and drift current in the South China Sea. Malays J Trop Geogr, 1956, 8: 1–31
3 Hu J Y, Kawamura H, Hong H S, et al. A review on the currents in the South China Sea: Seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio intrusion. J Oceanogr, 2000, 56: 607–624
4 徐锡祯, 邱章, 陈慧昌. 南海水平环流的概述. 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1982. 137–145
5 薛惠洁, 柴扉, 徐丹亚, 等. 南海沿岸流特征及其季节变化. 见: 薛惠洁, 柴扉, 许建平, 编. 中国海洋学文集-南海海流数值计算及中尺度特征研究. 北京: 海洋出版社, 2001, 13: 64–75
6 方国洪, 魏泽勋, 黄企洲, 等. 南海南部与外海间的体积和热、盐输运及其对印尼贯穿流的贡献. 海洋与湖沼, 2002, 33: 296–302
7 李立, 吴日升, 郭小刚. 南海的季节环流-TOPEX/POSEIDON 卫星测高应用研究. 海洋学报, 2000, 6: 13–26
8 管秉贤. 中国东南近海冬季逆风海流. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2002. 41–133
9 Shaw P T, Chao S Y. Surface circulation in the South China Sea. Deep-Sea Res I, 1994, 41: 1663–1683
10 Chu P C, Chen Y, Lu S. Wind-driven South China Sea deep basin warm-core/cool-core eddies. J Oceanogr, 1998, 54: 347–360
11 Fang G H, Wang G, Fang Y. A review on the South China Sea western boundary current. Acta Oceanol Sin, 2012, 31: 1–10
12 王卫强, 王东晓, 施平. 南海大尺度动力场年循环和年际变化. 热带海洋学报, 2006, 20: 61–68
13 刘秦玉, 杨海军, 刘征宇. 南海 Sverdrup 环流的季节变化特征. 自然科学进展, 2000, 10: 1035–1039
14 Liu Z Y, Yang H J, Liu Q Y. Regional dynamics of seasonal variability in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 2001, 31: 272–284
15 翟丽, 方国洪, 王凯. 南海风生正压环流动力机制的数值研究. 海洋与湖沼, 2004, 35: 289–298
16 Hwang C W, Chen S A. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry. J Geophys Res, 2000, 105: 23943–23965
17 廖光洪, 袁耀初, 徐晓华. 1998 年冬季南海环流的三维结构. 海洋学报, 2005, 27: 8–17
18 刘勇刚, 袁耀初, 苏纪兰, 等. 1998 年夏季南海环境. 科学通报, 2000, 45: 1252–1259

19 Morimoto A, Yoshimoto K, Yanagi T. Characteristics of sea surface circulation and eddy field in the South China Sea revealed by satellite altimetric Data. J Oceanogr, 2000, 56: 331–344
20 许金电, 李立, 郭小钢, 等. 1998 年夏季季风爆发前后南海环流的多涡特征. 热带海洋学报, 2001, 20: 44–51
21 Chern C S, Wang J. Numerical study of the upper-layer circulation in the South China Sea. J Oceanogr, 2003, 59: 11–24
22 Fang G H, Susanto D, Qiao F L, et al. A note on the South China Sea shallow interocean circulation. Adv Atmos Sci, 2005, 22: 946–954
23 杨波, 赵进平, 曹勇, 等. 区域性海洋环流数值模式研究及对南海环流与海峡流量的模拟. 海洋科学进展, 2004, 22: 405–416
24 Yu Z J, Shen S, McCreary J, et al. South China Sea throughflow as evidenced by satellite images and numerical experiments. Geophys Res Lett, 2007, 34: L01601
25 苏纪兰. 南海环流动力机制研究综述. 海洋学报, 2005, 27: 1–8
26 刘勇刚, 袁耀初, 苏纪兰, 等. 1998 年夏季南海环流. 科学通报, 2000, 45: 1252–1259
27 李立. 南海上层环流观测研究进展. 台湾海峡, 2002, 21: 114–125
28 He Z G, Wang D X. Surface pattern of the South China Sea western boundary current in winter. Adv Geosci, 2007, 12: 1–8
29 He Z G, Sui D D. Remote sensing and validation of the South China Sea western boundary current in December 2003, 2004 and 2005. In: Proceeding of Second IITA International Conference on Geoscience and Remote sensing, IEEE, 2010. 515–518
30 Yang H J, Liu Q Y, Liu Z Y, et al. A general circulation model study of the dynamics of the upper ocean circulation of the South China Sea. J Geophys Res, 2002, 107: 14
31 Cai S Q, Long X M, Wang S A. A model study of the summer southeast Vietnam offshore current in the southern South China Sea. Cont Shelf Res, 2007, 27: 2357–2372
32 Chu P C, Edmons N L, Fan C. Dynamical mechanisms for the South China Sea seasonal circulation and thermohaline variabilities. J Phys Oceanogr, 1999, 29: 2971–2989
33 Wang G H, Chen D J, Su J L. Generation and life cycle of the dipole in the South China Sea summer circulation. J Geophys Res, 2006, 111: C06002
34 Gan J P, Qu T D. Coastal jet separation and associated flow variability in the southwest South China Sea. Deep-Sea Res I, 2008, 55: 1–19
35 Gan J P, Li L, Wang D X, et al. Interaction of a river plume with coastal upwelling in the northeastern South China Sea. Cont Shelf Res, 2009, 29: 728–740
36 Jing Z, Qi Y, Hua Z, et al. Numerical study on the summer upwelling system in the northern continental shelf of the South China Sea. Cont Shelf Res, 2009, 29: 467–478
37 Hong B, Wang D X. Sensitivity study of the seasonal mean circulation in the northern South China Sea. Adv Atmos Sci, 2008, 25: 824–840
38 Wang D X, Hong B, Gan J P, et al. Numerical investigation on propulsion of the counter-wind current in the northern South China Sea in winter. Deep-Sea Res I, 2010, 57: 1206–1221
39 Fang W D, Guo J J, Shi P, et al. Low frequency variability of South China Sea surface circulation from 11 years of satellite altimeter data. Geophys Res Lett, 2006, 33: L22612
40 Wu C, Chang C W J. Interannual variability of the South China Sea in a data assimilation model. Geophys Res Lett, 2005, 32: L17611
41 邢延松, 程国胜, 舒业强, 等. El Niño 事件期间南海环流的异常特征. 海洋与湖沼, 2012, 43: 201–210
42 Yang H Y, Wu L X. Trends of upper-layer circulation in the South China Sea during 1959–2008. J Geophys Res, 2012, 117: C08037
43 葛黎丽, 程旭华, 齐义泉, 等. 南海 18°N 断面上的体积和热盐输运. 热带海洋学报, 2012, 31: 10–17
44 He Z G, Wang D X, Hu J Y. Features of eddy kinetic energy and variations of upper circulation in the South China Sea. Acta Oceanol Sin, 2002, 21: 305–314
45 Wang L, Koblinsky C J, Howden S. Mesoscale variability in the South China Sea from the TOPEX/Poseidon altimetry data. Deep-Sea Res I, 2000, 47: 681–708
46 Wang G H, Su J L, Chu C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data. Geophys Res Lett, 2003, 30: 2121
47 Shaw P T, Chao S Y, Fu L L. Sea surface height variations in the South China Sea from satellite altimetry. Oceanol Acta, 1999, 22: 1–17
48 Li L, Nowlin W D, Su J L. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. Deep-Sea Res I, 1998, 45: 1469–1482
49 李燕初, 李立, 林明森, 等. 用 TOPEX/Poseidon 高度计识别台湾西南海域中尺度强涡. 海洋学报, 2002, 24: 163–170
50 苏京志, 卢筠, 侯一筠, 等. 南海表层流场的卫星跟踪浮标观测结果分析. 海洋与湖沼, 2002, 33: 121–127
51 Yuan D L, Han W Q, Hu D X. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data. J Geophys Res, 2006, 111: C11007
52 Yuan D L, Han W Q, Hu D X. Anti-cyclonic eddies northwest of Luzon in summer–fall observed by satellite altimeters. Geophys Res Lett, 2007, 34: L13610
53 Su J L. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary. Deep-Sea Res I, 2004, 24: 1745–1760

54 Jia Y L, Liu Q Y, Liu W T. Primary studies of the mechanism of eddy shedding from the Kuroshio bend in Luzon Strait. J Oceanogr, 2005, 61: 1017–1027
55 Metzger E J, Hurlburt H E. The nondeterministic nature of Kuroshio penetration and eddy shedding in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 2001, 31: 1712–1732
56 Jia Y L, Liu Q Y. Eddy shedding from the Kuroshio bend at Luzon Strait. J Oceanogr, 2004, 60: 1063–1069
57 Wang D X, Xu H Z, Lin J, et al. Anticyclonic eddies in the northeastern South China Sea during winter 2003/2004. J Oceanogr, 2008, 64: 925–935
58 Nan F, He Z G, Zhou H, et al. Three long-lived anticyclonic eddies in the northern South China Sea. J Geophys Res, 2011, 116: C05002
59 张燕. 春季南海西部暖涡及南部暖水的初步观测研究. 硕士学位论文. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2011
60 Gan J, Li H, Curchitser E N, et al. Modeling South China Sea circulation: Response to seasonal forcing regimes. J Geophys Res, 2006, 111: C06034
61 Shaw P T, Chao S Y, Fu L. Sea surface height variations in the South China Sea from satellite altimetry. Oceanol Acta, 1999, 22: 1–17
62 Ho C R, Zheng Q, Soong Y S, et al. Seasonal variability of sea surface height in the South China Sea observed with TOPEX/Poseidon altimeter data. J Geophys Res, 2000, 105: 13981–13990
63 Shaw P T. Seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea water into the South China Sea. J Geophys Res, 1991, 96: 821–827
64 Qu T D. Upper-layer circulation in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 2000, 30: 1450–1460
65 Wu C R, Chiang T L. Mesoscale eddies in the northern South China Sea. Deep Sea Res II, 2007, 54: 1575–1588
66 Wu C R, Chang C W J. Interannual variability of the South China Sea in a data assimilation model. Geophys Res Lett, 2005, 32: L17611
67 Xie S P, Xie Q, Wang D X, et al. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations. J Geophys Res, 2003, 108: 3261
68 Xie S P, Chang C H, Xie Q, et al. Intraseasonal variability in the summer South China Sea: Wind jet, cold filament, and recirculations. J Geophys Res, 2007, 112: C10008
69 Isoguchi O, Kawamura H. MJO-related summer cooling and phytoplankton blooms in the South China Sea in recent years. Geophys Res Lett, 2006, 33: L16615
70 Liu Q Y, Jia Y L, Liu P, et al. Seasonal and intraseasonal thermocline variability in the central South China Sea. Geophys Res Lett, 2001, 28: 4467–4470
71 Fang W D, Fang G H, Shi P, et al. Seasonal structures of upper layer circulation in the southern South China Sea from *in situ* observations. J Geophys Res, 2002, 107: 3202
72 Xiu P, Chai F, Shi L, et al. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993–2007. J Geophys Res, 2010, 115: C03012
73 Wang G H, Xie S P, Qu T D, et al. Deep South China Sea circulation. Geophys Res lett, 2011, 38: L05601
74 Hu J Y, Gan J P, Sun Z Y, et al. Observed three-dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea. J Geophys Res, 2011, 116: C05016
75 Chen G X, Hou Y J, Chu X Q. Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatio-temporal variability and impact on thermohaline structure. J Geophys Res, 2011, 116: C06018
76 Chen G X, Hou Y J, Chu X Q, et al. The variability of eddy kinetic energy in the South China Sea deduced from satellite altimeter data. Chin J Oceanol Limnol, 2009, 27: 943-954
77 Chen G X, Gan J P, Xie Q, et al. Eddy heat and salt transports in the South China Sea and their seasonal modulation. J Geophys Res, 2012, 117: C05021
78 Chu P C, Chang C P. South China Sea warm pool in boreal spring. Adv Atmos Sci, 1997, 14: 195–206
79 王卫强, 朱秀华, 侯一筠. 气候态意义下的南海春季暖池. 大气科学, 2005, 29: 565–572
80 王东晓, 谢强, 杜岩. 1997–1998 年南海暖事件. 科学通报, 2002, 47: 711–716
81 Gao R Z, Zhou F X. Monsoonal characteristics revealed by intraseasonal variability of sea surface temperature in the South China Sea. Geophys Res Lett, 2001, doi: 10.1029/2001GL014225
82 Alexander M A, Blade I, Newman M, et al. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. J Clim, 15: 2205–2231
83 Qu T D, Kim Y Y, Yaremchuk M. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea? J Clim, 2004, 17: 3644–3657
84 Qu T D, Du Y, Gan J P, et al. Mean seasonal cycle of isothermal depth in the South China Sea. J Geophys Res, 2007, 112: C02020
85 Wang C Z, Wang W Q, Wang D X, et al. Interannual variability of the South China Sea associated with El Niño. J Geophys Res, 2006, 111: C03023
86 Xu H M, Xie S P, Wang Y Q, et al. Orographic effects on South China Sea summer climate. Meteorol Atmos Phys, 2008, 100: 275–289

87 Liu Q Y, Jiang X, Xie S P, et al. A gap in the Indo-Pacific warm pool over the South China Sea in boreal winter. J Geophys Res, 2004, 109: C07012
88 Xie Q, Wu X Y, Yuan W Y, et al. Life cycle of intraseasonal oscillation of summer SST in the western South China Sea. Acta Oceanol Sin, 2007, 26: 1–8
89 Wu X Y, Xie Q, He Z, et al. Free and forced Rossby waves in the western South China Sea inferred from Jason-1 satellite altimetry data. Sensors, 2008, 8: 3633–3642
90 Zhuang W, Xie S P, Wang D X, et al. Intraseasonal variability in sea surface height over the South China Sea. J Geophys Res, 2010, 115: C04010
91 Zeng L L, Wang D X. Intraseasonal variability of latent-heat flux in the South China Sea. Theor Appl Climatol, 2009, 97: 53–64
92 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
93 Wang D X, Liu Q Y, Huang R X, et al. Interannual variability of the South China Sea throughflow inferred from wind data and an ocean data assimilation product. Geophys Res Lett, 2006, 33: L14605
94 Meyres G. Variation of Indonesian throughflow and the El Niño-Southern Osciallation. J Geophys Res, 1996, 101: 12255–12263
95 魏泽勋, 乔方利, 方国洪, 等. 全球大洋环流诊断模式研究——流场及流函数. 海洋科学进展, 2004, 22: 1–14
96 Fang G, Suisanto D, Soesilo I, et al. A note on the South China Sea interocean circulateon. Adv Atmos Sci, 2005, 22: 946–954
97 Yu Z, McCreary J, Yaremchuk M, et al. Subsurface salinity balance in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 2008, 38: 527–539
98 Lebedev K V, Yaremchuk M. A diagnostic study of the Indonesian throughflow. J Geophys Res, 2000, 105: 11243–11258
99 Yaremchuk M, McCreary J, Yu Z, et al. The South China Sea throughflow retrieved from climatological data. J Phys Oceanogr, 2009, 39: 753–767
100 Qu T, Du Y, Sasaki H. South China Sea throughflow: A heat and freshwater conveyor. Geophys Res Lett, 2006, 33: L23617
101 Liu Q Y, Huang R X, Wang D X. Implication of the South China Sea throughflow in the interannual variability of the regional upper-ocean heat content. Adv Atmos Sci, 2012, 29: 54–61
102 Tozuka T, Qu T, Yamagata T. Dramatic impact of the South China Sea on the Indonesian throughflow. Geophys Res Lett, 2007, 34: L12612
103 Wang W W, Wang D X, Zhou W, et al. Impact of the South China Sea throughflow on the Pacific low-latitude western boundary current: A numerical study for seasonal and interannual time scales. Adv Atmos Sci, 2011, 28: 1367–1376
104 Qu T, Song Y T, Yamagata T. An introduction to the South China Sea throughflow: Its dynamics, variability, and application for climate. Dyn Atmos Oceans, 2009, 47: 3–14
105 Liu Q Y, Wang D X, Zhou W, et al. Covariation of the Indonesian throughflow and South China Sea throughflow associated with the 1976/77 Regime Shift. Adv Atmos Sci, 2010, 27: 87–94
106 刘钦燕, 黄瑞新, 王东晓, 等. 印尼贯穿流与南海贯穿流的相互调制. 科学通报, 2006, 51: 44–50
107 Du Y, Qu T D. Three inflow pathways of the Indonesian throughflow as seen from the simple ocean data assimilation. Dyn Atmos Oceans, 2010, 50: 233–256