

南海的季节环流

——TOPEX/POSEIDON 卫星测高应用研究*

李 立

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; 海洋环境科学和
数值模拟国家海洋局重点实验室, 青岛 266061)

吴日升 郭小钢

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

摘 要 应用 1992~1996 年的 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计遥感资料, 研究了冬、夏季风强盛期多年平均的南海上层环流结构. 研究表明, 南海上层流结构呈明显的季节变化, 在很大程度上受该海区冬、夏交替的季风支配. 冬季总环流呈气旋型, 并发育有两个次海盆尺度气旋型环流; 夏季总环流大致呈反气旋型, 但在南海东部 18°N 以南海域未见明显流系发育. 研究还表明, 南海环流的西向强化趋势明显, 无论冬、夏在中南半岛沿岸和巽他陆架外缘均存在急流, 其流向冬、夏相反, 是南海上层环流中最强劲的一支. 鉴于该海流的动力特征与海洋动力学中定义的漂流不同, 有相当大的地转成分, 建议称为“南海季风急流(South China Sea Monsoon Jet)”. 冬季南下的季风急流在南海南部受巽他陆架阻挡折向东北, 沿加里曼丹岛和巴拉望岛外海有较强东北向流发育. 夏季北上的季风急流在海南岛东南分为两支: 北支沿陆架北上, 似为传统意义上的南海暖流; 南支沿 18°N 向东横穿南海后折向东北; 二者之间(陆架坡折附近)为弱流区. 两分支在汕头外海汇合后, 南海暖流流速增强. 就多年平均而言, 黑潮只在冬季侵入南海东北部, 并在南海北部诱生一个次海盆尺度的气旋型环流, 这时南海暖流只出现在汕头以东海域. 夏季南海北部完全受东北向流控制, 未见黑潮入侵迹象. 用卫星跟踪海面漂流浮标观测进行的对比验证表明, 以上遥感分析结果与海上观测一致.

本文于 1999-11-25 收到, 修改稿于 2000-05-08 收到.

* 本研究工作得到“国家重点基础研究发展规划”G19990438 项目; “国家科委攀登 A 计划”南海季风试验项目; 国家自然科学基金重点资助项目(编号:49630045); 和国家海洋局的资助.

第一作者简介: 李 立, 男, 54 岁, 研究员, 主要从事物理海洋学和海洋遥感研究.

关键词 南海环流 卫星高度计 季风 黑潮

中图分类号: P722.7; P731.21

1 引言

南海是地球上主要的半封闭海盆之一. 与其他主要半封闭海盆(如地中海和墨西哥湾)相比,人们对南海环流的认识还处于初级阶段. 相对我国其他近海而言,南海环流的研究也薄弱得多.

对南海海流的早期描述来源于航海的需要, 见诸各类航海图册, 主要是根据船舶报编制的表层海流图. 对南海环流的系统海洋学研究最初是由美国学者在 20 世纪 60 年代初完成的^[1]. 此后, 台湾海峡两岸的科学家成为研究主力, 历次海洋调查加深了对南海环流的认识. 然而这些工作多集中在南海东北部、南沙等局部海域, 缺少对南海总环流的整体研究; 同时因缺少时间序列观测, 很少涉及演变过程. 其间, 徐锡祯等曾综合历史水文资料, 给出了南海各季节的地转流场分析^[2]. 除此之外, 未见对南海总环流的观测研究. 20 世纪 80 年代起, 一些学者开始采用数值模拟手段研究南海环流^[3,4], 某些研究并给出了逐月或双月的流场^[4,5]. 但这些模型所依赖的物理基础仍是上述有限的观测认识, 因而受到局限. 最近, 方国洪等^[6]对南海上层环流研究作了详尽的评述, 参考该文及其所列文献可了解更多的研究背景.

南海位于东亚季风区, 冬、夏季风方向完全不同, 季风的更替使南海环流总在不断的演变之中, 而黑潮经吕宋海峡的作用则使这一演变过程更趋复杂. 最近有关南海中尺度涡旋的发现^[7,8]正是南海环流这种复杂性的反映. 越来越多的观测证据表明南海环流呈不断演变的多涡结构, 但现已积累的观测资料还不足以客观地确定其季节环流. 因此, 在新的观测水平上认识南海环流已成为南海研究的当务之急.

近年来海洋观测手段的发展, 特别是星载微波高度计遥感技术的成熟和业务化, 为南海环流及其演变过程的研究提供了十分有效的手段^[9]. 施平等¹⁾率先用 1 a 的 TOPEX/POSEIDON(以下简称 T/P)卫星高度计资料研究南海海面动力高度的季节变化. 本文尝试用 1992~1996 年间 T/P 星载高度计获得的海面高度场时间序列研究冬、夏典型季风期南海上层的多年平均环流, 研究区域覆盖整个南海海盆.

2 卫星轨道参数、资料来源和数据处理

2.1 卫星轨道参数

T/P 是美、法合作用于观测海平面的高度起伏的海面“地形”卫星^[10]. 卫星采用精确重复轨道, 星下点的地面轨迹是固定的, 轨道倾角为 66° , 可覆盖除极区外的所有海洋并实现较均衡的时空采样; 轨道的交点周期为 6 745.8 s(约 112 min 绕地一周), 卫星每绕行一周轨道升交点向东进动 2.08° , 每 127 圈后轨道重复, 其轨道重复周期为 9.915 6 d; 在赤道相临地面轨迹的间距为 316 km, 间距随纬度增高而缩小; 高度计在卫星运行过程中对星下点连续采样, 采样点的沿轨分辨力 6 km^[10,11]. 因而, T/P 每 10 d 左右覆盖南海一次, 可获得连续的海面高度场时间序列.

1) 施平, 毛庆文, 齐义泉. 南海海面动力高度的遥感分析, 1997.

2.2 资料来源

为研究南海海盆尺度的总环流,本文采用 Cheney 等²⁾对 T/P 高度计所做的沿轨海面距平分析资料. 该资料所给出的是卫星地面轨迹与各整数度纬线交点处海面高度距平(相对于同一测点 1993~1995 年星测海面高度的平均值)的时间序列. 序列中各数据点所代表的是每次卫星过境时以该点为中心一个纬距内,沿轨道地面轨迹所有有效测点的海面高度距平的平均值,而且对原始测值已做了各种必要的校正,包括潮汐和气压校正.

图 1 给出本文所采用的 T/P 数据点的空间分布. 在剔除少数缺测较多或离岸过近的不良测点后,实际用于本分析的测点数计 288 个(含少数图 1 以外的测点). 测点的空间分布相当均匀,可充分揭示南海海盆尺度的主要特征. 另一方面,本工作所引用的高度计

时间序列长 4 a(1992 年 10 月至 1996 年 11 月),可获得多年平均的季节环流分析结果. 不足的是,由于测点间距较大(沿轨约 150 km,相邻地面轨迹间距约 300 km),尺度较小的中尺度现象可能因分辨不足而无法反映.

2.3 潮致高频混淆的补充校正

潮汐是影响高度计观测结果的重要因素之一. 浅海区潮差大,其影响尤为明显. 根据采样理论, T/P 的采样周期(即轨道重复周期)远大于潮周期,其相应的折叠频率($0.050\ 426\ \text{d}^{-1}$)远低于主要潮汐频率($>0.5\ \text{d}^{-1}$),这种采样方式必然使潮汐的高频能量向低频方向折叠,产生潮致高频混淆^[12]. 南海包含相当一部分陆架海域,对 T/P 资料的分析表明,南海浅海区潮汐引起的虚假的混淆谱峰可在水位功率谱上占支配地位,以至掩盖我们感兴趣的环流信息^[13]. 因此,如何排除陆架区潮汐混淆造成的干扰是应用高度计研究南海环流的关键.

我们所引用的 T/P 资料,虽然已含标准潮汐校正,但采用的是 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球潮汐模型给出的校正. 由于网格较粗,在南海周边潮差变化大的浅海区不能有效除去潮汐误差,校正后仍存在很强的潮致混淆. 因此,我们采用 FFT/IFFT 法^[14]对资料中各点的海面高度时间序列做进一步滤波以消除潮汐混淆的影响. 在滤波处理中我们低通滤除了原时序中周期大于 90.6 d 的波动,同时带通滤除了 K_1 分潮混淆的影响. 有关验证^[13]业已表明该方法可有效除去潮致混淆,但保留了

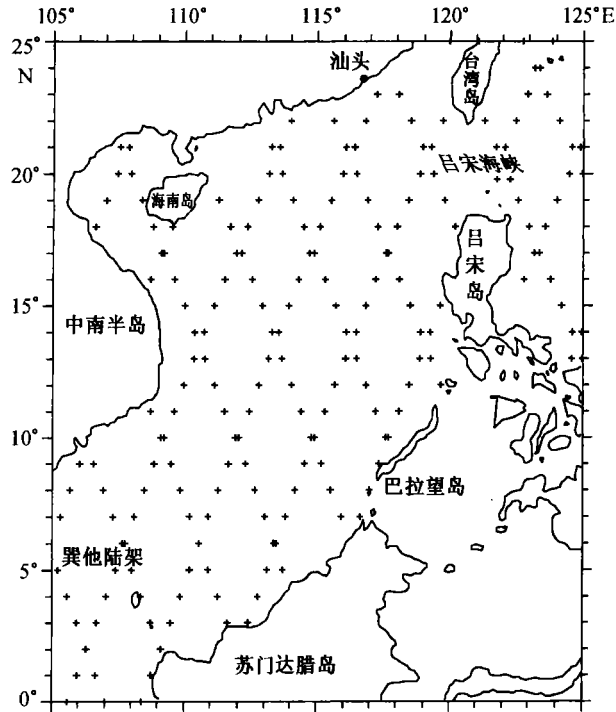


图 1 研究海域 TOPEX/POSEIDON 高度计沿轨海面距平分析资料²⁾数据点的空间分布(不良数据点已剔除)

2) Cheney B, et al. TOPEX/POSEIDON altimeter along-track sea level deviation analysis, 1996.

季节内、周年和年度间的变化信号;经处理后的海面高度与相临沿岸测站月平均水位的对比表明二者一致性良好;上、下行轨道在交点处各自得到的时间序列的标准差约 3 cm.

2.4 对卫星高度计分析的若干说明

根据卫星高度计的测量原理,某一点 x 的海面高度

$$\eta = H_0(x) - H_a(x) - H_g(x),$$

式中, $H_0(x)$ 为轨道相对参考椭球的高度; $H_a(x)$ 为高度计测得的卫星相对海面的高度; $H_g(x)$ 为大地水准面相对参考椭球的高度^[9]. 因此,为求出 η 必须精确知道卫星轨道高度和大地水准面,或者说必须设法校正其误差. 由于海洋中许多地方缺少精确的大地水准测量,在应用中通常采用共线性法^[9]反演出海面高度距平,从而避开海面绝对高程的确定这一难点. 我们所引用的资料也采用此方法,解决了大地水准和卫星轨道误差的时变分量的校正问题. 因此,在以下的分析中将首先从南海海面高度的距平场着手. 距平分析结果只包含其周期大于 90.6 d 的变异(季节、季节内、年度间等)部分,诸如吕宋海峡黑潮主轴两侧因海水密度差异导致的平均海面高差并不反映在此类分析之中.

图 2 举例对比了 1994 年 9 月初南海东北部船测海面动力的地形(相对 $1\ 000 \times 10^4$ Pa, 即旧制 1 000 db)和同期卫星遥感海面高度距平分析结果,图中并标出所引用的高度计测点的位置供参考. 由于 CTD 测点比引用的高度计测点密得多^[8],船测海面动力高度显然比高度计分析揭示了更多细节. 虽然如此,考虑到高度计导出的距平分析结果不含黑潮两侧的高差这一事实,两图所反映的海面高度的大尺度分布趋于一致:(1) 在吕宋海峡以西(图的中部)有一高水位区,广东沿岸和图西南角则呈低水位,围绕该高水位区环流呈反气旋状;(2) 在 22.5°N , 123°E 附近有一高水位;(3) 在 20.5°N , 122°E 水位相对较低. 但是从图 2 也可看到,位于研究海区中部的一个中尺度流环(ring)^[8]正好落在 T/P 地面轨迹的空挡里,高度计无从揭示. 因此,在试图用高度计的分析结果解释尺度较小的现象时应十分注意因空间采样间距偏大而造成的失真(即所谓空间混淆).

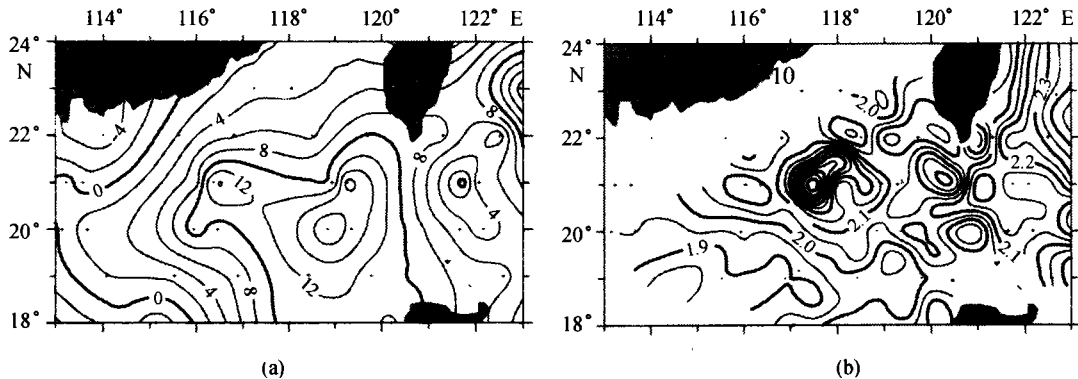


图 2 1994 年 9 月初南海东北部 T/P 卫星遥感海面高度距平分析(a)和同期船测海面动力地形(b)的对比

3 季风强盛期南海多年平均海面高度距平分析

图 3 给出冬、夏季季风强盛期南海多年平均海面高度距平分析结果. 参加平均的时段分别

为1992~1995年冬季(当年11月底至翌年3月初)和1993~1996年夏季(5月底至9月初)各40个T/P周期(表1)的平均结果。

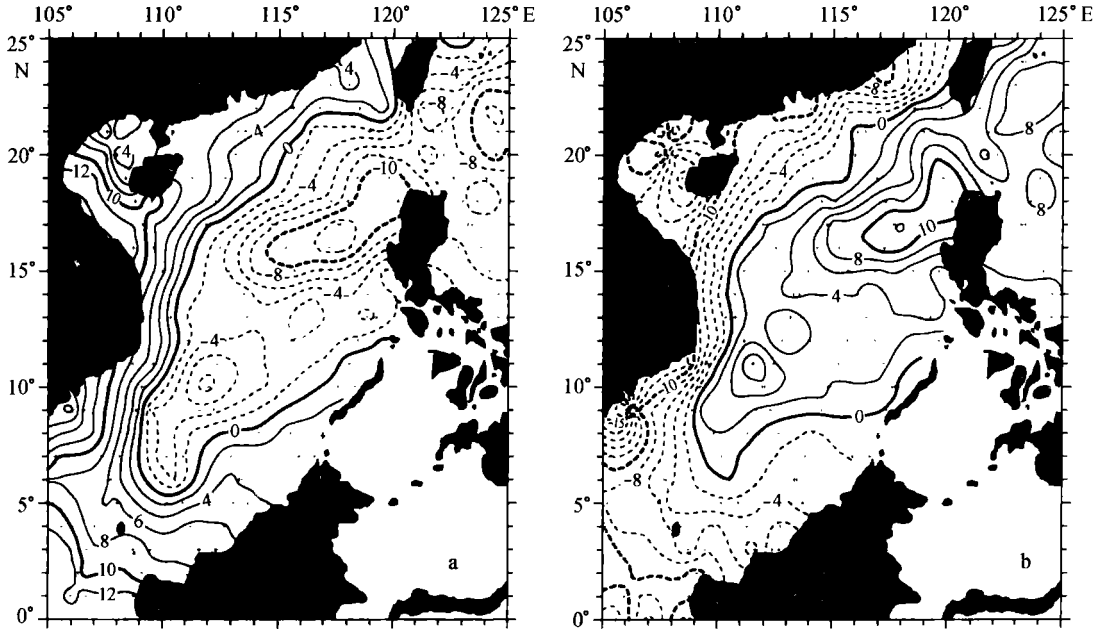


图3 季风强盛期南海多年平均卫星遥感海面高度距平(cm)分析
a. 冬季 b. 夏季

表1 多年平均分析所采用的 TOPEX/POSEIDON 观测样本

典型季风期	采用时段	周期序号	周期数	样本数
冬季	1992-11-21~1993-02-27	7~16	10	40
(东北季风期)	1993-11-23~1994-03-01	44~53	10	40
	1994-11-25~1995-03-03	81~90	10	40
	1995-11-27~1996-03-04	118~127	10	40
夏季	1993-05-29~1993-09-04	26~35	10	40
(西南季风期)	1994-05-30~1994-09-06	63~72	10	40
	1995-06-01~1995-09-07	100~109	10	40
	1996-06-02~1996-09-08	137~146	10	40

如图3所示,冬、夏季风强盛期南海高度距平场呈完全相反的趋势。冬季除吕宋岛西岸外,南海周边陆架区均为正距平;南海海盆本身、吕宋海峡及黑潮源地一带则为负距平。高水位分布在中印半岛东岸,尤其在湄公河口附近距平值达16 cm以上;南海海盆中水位有两个低中心,分别位于海盆北部吕宋岛西侧和海盆南部南沙群岛西侧,中心距平分别低于-12 cm和-8 cm。与此相反,夏季除吕宋岛西岸外南海周边陆架区均为负距平;而南海海盆本身、吕宋海峡和黑潮源地一带均为正距平。低水位分布在华南沿海和中印半岛东岸,在湄公河口附近距平值低于-20 cm;南海海盆中水位有两个高中心,其位置与冬季低中心相近,中心距平分

别高于 12 cm 和 6 cm. 上述格局相似, 相位却完全相反的分布模式表明: 南海海面高度场呈显著的季节振荡, 明显受季风控制.

Wyrski^[1]曾指出夏季南海的海面相对 800×10^4 Pa 的动力地形是倾斜的, 西北部海平面低, 东部菲律宾沿岸高; 对南海周边沿岸水位观测的比较也显示: 冬季华南海平面高于菲律宾沿岸, 新加坡高于台湾, 而夏季则相反. 李坤平等^[15]对我国近海月平均海面的分析也支持 Wyrski 的观点. 在这一点上, 高度计分析结果和以往的研究结果是完全一致的. 所不同的是, 以往的分析主要依赖岸站, 无从揭示开阔海域海面高度变化, 而高度计分析则详尽地给出全海域的海面地形.

图 4 是同一组资料给出的冬、夏季风强盛期南海海面高度的标准差分析. 冬季标准差的高值主要出现在沿岸区, 但在海南岛附近有一高值区呈带状向东伸展. 此外, 在台湾岛和吕宋岛以东各有一个高值区, 中心值分别高于 13 cm 和 9 cm. 夏季南海标准差的高值沿湄公河口—台湾一线分布, 在湄公河口和越南东岸各有一个高值区, 中心值均高于 15 cm. 此外, 在吕宋海峡以东也有一高值区, 中心值高于 17 cm. 这些高值区应是海面高度波动最为激烈的区域. 由于分析中已滤除了高频波动, 而且仅考虑为期 3 个月的典型季风期, 上述标准差分析所揭示的是海面高度的年度间差异和季节内波动的强度及分布.

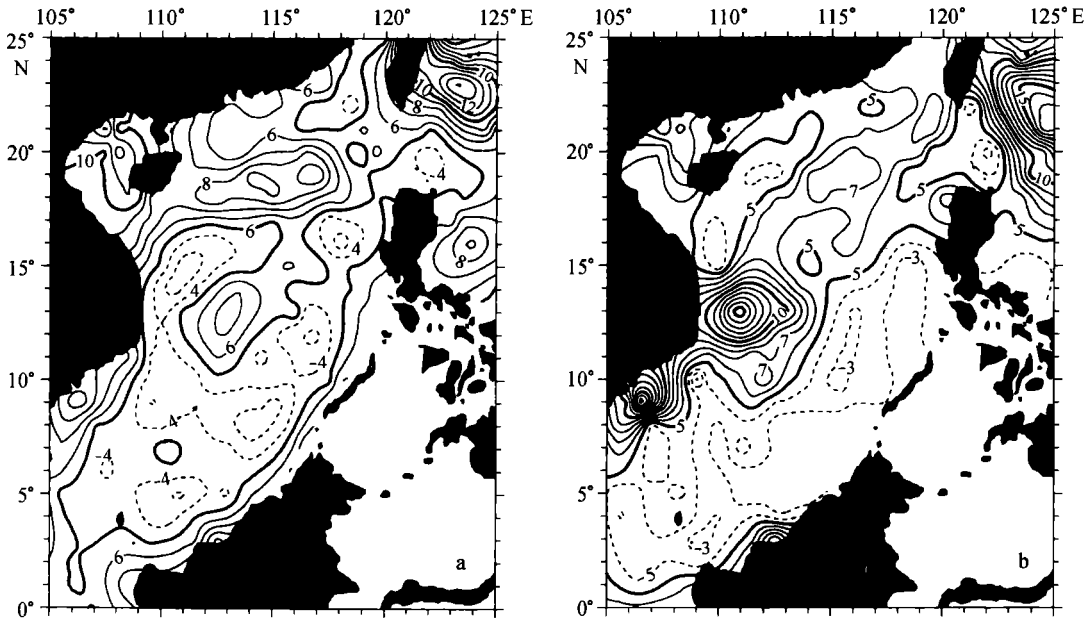


图 4 季风强盛期南海海面高度的标准差(cm)分析

a. 冬季 b. 夏季

4 季风强盛期南海合成海面动力地形分析

虽然卫星高度计海面高度距平分析本身不含平均场, 但可以根据历史水文观测建立南海的海面平均重力位势场, 并通过二者的叠加求得某一时段的合成海面动力地形, 从而进一步推算表层地转流^[9]. 根据 World Ocean Atlas 1994^[16]所提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 温、盐度平均场(客观分析

结果),我们计算了相对 1 000 m 零面的南海海面平均重力位势场(图 5),然后根据典型季风期的海面高度距平导出相应的动力高度距平后叠加上去,从而得到冬、夏季风强盛期的动力地形分析(图 6).在计算海面平均重力位势场时,对水深小于 1 000 m 的海域采用通常使用的沿海底积分的方法.由于图 5 中北部湾的计算结果存疑,在图 6 中略去.

对比图 3 与图 6 可以看到:冬季在南海内部海面高度分布形势基本相似,但由于引入了平均场,吕宋海峡内外两侧出现明显高差,反映了黑潮的存在;另外在台湾西南有一高位水舌自吕宋海峡向西北延伸,侵入南海,反映了冬季黑潮对南海的影响.夏季两图的差异较为明显,图 3 中的反气旋型结构在图 6 巴拉望岛沿岸已不明显,吕宋岛以西的封闭式高中心已与黑潮融为一体.这些不同显然是海面重力位势的平均场,特别是黑潮的平均场影响所致.

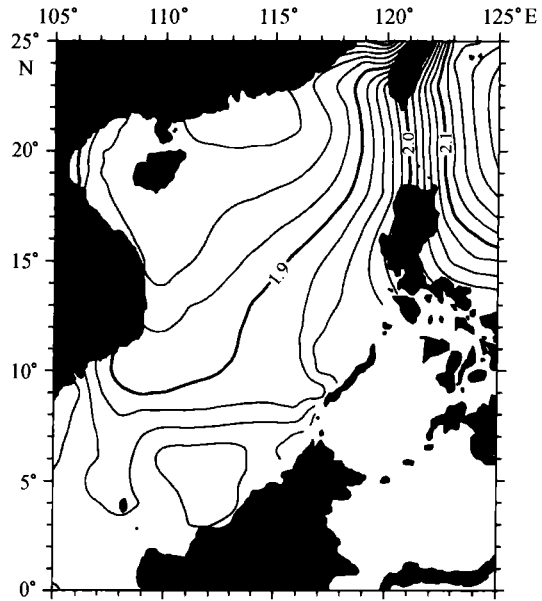


图 5 根据温、盐度平均场^[16]计算的相对于 1 000 m 零面的海面重力位势场($\times 10\text{m}^2/\text{s}^2$)

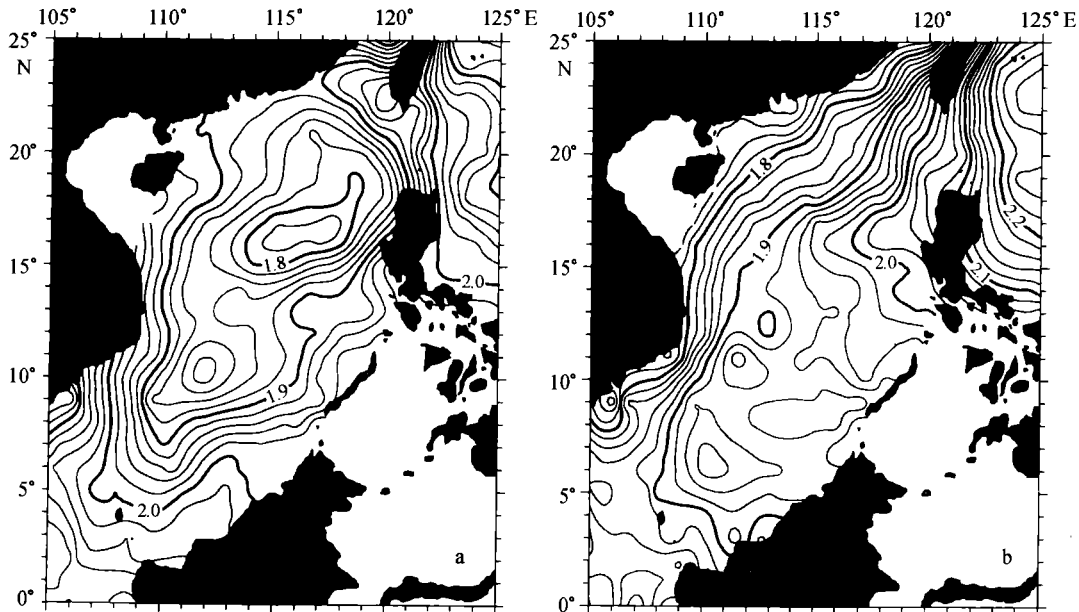


图 6 季风强盛期南海相对于 1 000 m 零面的合成海面动力地形($\times 10\text{m}^2/\text{s}^2$)

a. 冬季 b. 夏季

通过对徐锡祯等^[2]之图 1 和本文图 6 的比较可以看到,二者给出的海面重力位势场分布趋势总体上是一致的(冬季相似程度更好一些),但也存在局部的差异(夏季较为明显).20 世

纪 80 年代之前南海的水文观测数量有限,时空分布也很不均匀,所分析的季节性重力位势场易受个别航次支配,统计置信度较低,出现偏差是很自然的. 由于卫星高度计观测在空间和时间上都有良好覆盖,相比之下图 6 显然具有较高的统计置信度,可有效地改进我们对南海环流的认识.

5 季风强盛期南海的表层地转流场分析

根据上述海面重力位势分析结果,我们计算了研究海区的表层地转流场(图 7). 必须说明,计算所得表层地转流场实际上只是环流的地转分量(包括其正压和斜压部分),不含其他动力机制(如风海流、底摩擦等)的影响. 此外,在赤道附近科氏力趋于零,计算误差大,故略去. 当解读计算结果时,对低纬度地区也应注意这一点.

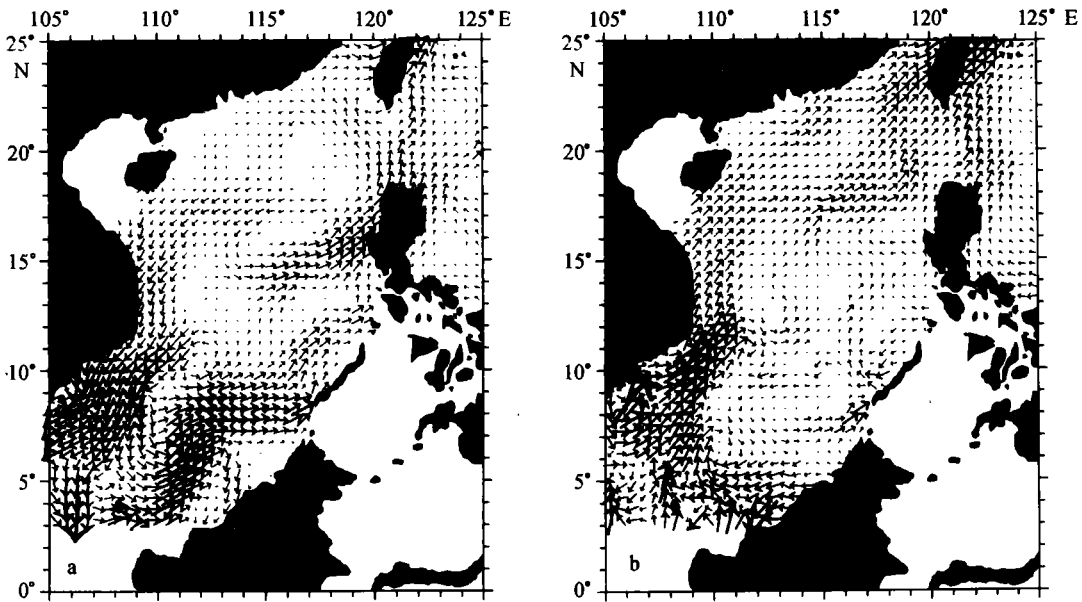


图 7 南海表层地转流场
a 冬季 b 夏季

冬季(图 7a)南海总环流呈气旋型,可大致分为南北两个次海盆尺度的局部环流. 南部的次级环流明显强于北部,沿中南半岛有南向急流发育,在加里曼丹岛和巴拉望岛沿岸则有相当强的东北向流发育,形成西南—东北走向的长椭圆形气旋型次级环流结构. 该次级环流的中心位于 8°N , 111°E 附近,除东北侧较弱外表层地转流速多在 $0.2\sim 0.4\text{ m/s}$ 间,最大值超过 0.5 m/s . 北部气旋型环流的中心位置在 18°N , 112°E 附近,尺度较大但流速较小,除东南段吕宋岛西侧较强(约 0.2 m/s)外,流速约为 0.1 m/s . 在吕宋海峡北部可见黑潮侵入南海. 总体而言,冬季南部环流比北部强得多,整体环流虽有西部强化趋势但不甚明显,南海与外界水体交换的总格局为北进(经吕宋海峡)南出(经爪哇海).

夏季(图 7b)南海环流的西部强化十分明显,沿巽他陆架外缘有一支西向流,它与爪哇海的越赤道流在中南半岛东南汇合,形成一支沿中南半岛北上的急流,流速在 $0.3\sim 0.5\text{ m/s}$ 间.

这支海流在 12°N 以北减弱,在海南岛东南分为两支,南支沿 18°N 向东横穿南海后折向东北,北支贴华南海岸向东北运动,二者在台湾海峡南部重新汇合,南支并有一部分经吕宋海峡汇入黑潮.与冬季不同,在吕宋海峡未见黑潮侵入南海.南海总环流大致呈反气旋型,但在南海东部并无明显的南向补偿流系发育.整体而言,夏季南海与外界水体交换的格局为南进(经爪哇海)北出(经吕宋海峡和台湾海峡).

6 环流分析结果的验证

有关南海海流的欧拉观测十分稀少.水文观测虽可用来推算地转流,但多数业已包含在 World Ocean Atlas 1994^[16]的分析中,并在本文中用于平均重力位势场的计算.幸而近年来在南海有一些卫星跟踪 ARGOS 海面漂流浮标的观测结果,我们以此对上述分析做一验证.观测资料主要来自 WOCE 数据库^[17],此外并包括 1995 年国家海洋局海洋技术研究所南海北部投放的一枚试验浮标,以及 1998 年台湾海洋大学和国家海洋局第二、第三海洋研究所在南海南部合作投放的 3 组浮标.因资料较少,冬、夏季分别选用从 10 月到翌年 3 月(东北季风期)和从 5 月 15 日到 9 月 15 日(西南季风期)的观测结果.这比所用 T/P 资料的时段略长些,但仍处同一季风期内.

图 8 给出卫星跟踪浮标的漂流轨迹.冬季(图 8a)从西太平洋流经吕宋海峡的浮标有相当部分进入南海.其中一部分在台湾西南呈反气旋绕行返回黑潮,其余大都沿华南和中南半岛大陆坡向西南方向运动,直达湄公河口一带,甚至向南越过赤道.整体看来,在南海西北侧漂流轨迹十分集中,方向西南,在南海东侧轨迹则指向东北,总环流呈气旋型.以 16°N 为界,南北均有局部气旋型环流存在的迹象.这些结果与图 7a 完全一致.夏季(图 8b)虽有不少浮标

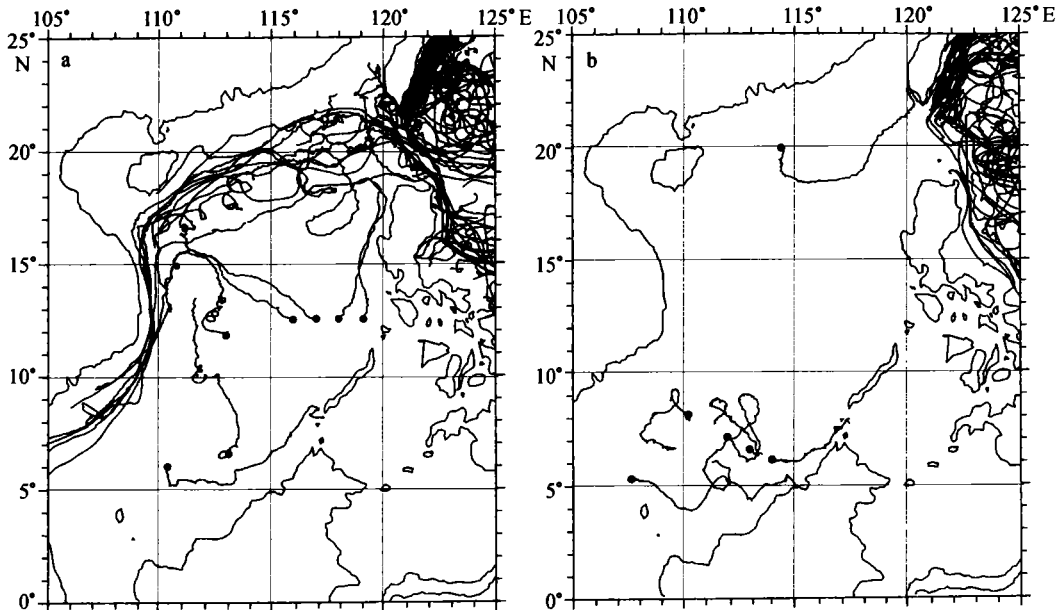


图 8 卫星跟踪海面漂流浮标轨迹

a. 冬季(10月到翌年3月) b. 夏季(5月中旬到9月中旬)

从赤道西太平洋流经吕宋海峡,但没有一枚进入南海,说明在近表层黑潮水进入南海的机会很少.相反,夏季在南海北部投放的唯一一枚浮标却流向东北,经巴士海峡进入黑潮.1998年在南海南部投放的5枚浮标轨迹显示,当年夏季在 5°N 附近加里曼丹岛沿岸有东向流发展,除此之外流向复杂多变.夏季位于南海内部的浮标轨迹虽然十分有限,却也与图7b基本一致.上述良好的一致性证明卫星高度计遥感分析结果是可靠的.

7 讨论

7.1 南海海平面的季节振荡特征

以往有关南海海平面的季节振荡的研究主要依赖沿岸潮位观测^[1,15],对海盆内部的海平面波动不甚了解.卫星高度计弥补了这一不足.从分析结果(见图3)看来,南海海平面的季节振荡主要包括两个分量:南海本地的径向季节振荡和由西太平洋传入的季节波动.前一种波动的主要特征表现为南海海盆中部和周边沿岸水位的反相振动,冬季周边高中间低,夏季周边低中间高,最大振动幅度接近30 cm.该波动主要是季风作用的结果^[15].后一种波动源自西太平洋,在吕宋海峡外海平面冬低夏高,季节振动幅度约20 cm(见图3).受其影响南海海盆东北部及吕宋岛西岸一带呈现同样的波动.和前一种波动比较,前者沿径向相位相反,后者沿径向(从南海海盆中部到吕宋海峡方向)相位相同.

7.2 关于吕宋海峡黑潮

图7虽显示了吕宋海峡黑潮的存在,但其流速仅0.2 m/s左右,明显偏低.这是本分析的一个缺点.这一偏差主要因构建平均海面重力位势场(见图5)的温、盐度资料格点间距过大所致.一般认为黑潮的主轴流速约1 m/s,流幅宽约100 km.我们用于构建平均海面重力位势场的资料系格点间距为 1° (约110 km)的客观分析结果^[16],其分辨力难以反映黑潮的横向特征.因此,构建更为精细的平均海面重力位势场是我们今后努力的目标.此外,T/P地面轨迹间距较大,在吕宋海峡与黑潮并不正交,也是造成黑潮失真的可能原因.

虽然如此,分析仍反映了吕宋海峡黑潮的主要行为特征:黑潮对南海的影响在冬、夏季风期有明显差异.冬季在台湾岛西南海域有一不大的反气旋型环流,尺度约300 km,黑潮在流经吕宋海峡时有一部分进入南海,或向西汇入气旋型总环流,或反气旋绕行返回黑潮或进入台湾海峡.夏季吕宋海峡一带流向均指向太平洋,黑潮没有进入南海的迹象.无论冬季或夏季,漂流浮标观测(见图8)与高度计分析结果(见图7)都呈现良好的一致性.这充分证明:就多年季节平均而言,黑潮浅层只在冬季经吕宋海峡侵入南海;夏季海水则由南海流向太平洋.

7.3 关于南海北部的气旋型环流

20世纪80年代中国科学院南海海洋研究所发现,“在南海北部陆坡附近几乎终年存在一支自东向西的海流”,并认为它源自黑潮,称之为“黑潮南海分支”^[18,19].苏纪兰等对南海环流的数值模拟研究则认为“黑潮在南海盆地内诱发了一个气旋式环流,其范围遍及整个盆地,位于陆坡400 m以外海区”,所谓“黑潮南海分支”即该环流的东北段,其上游并非黑潮的直接分支,而是“流速小的南海水自南海东侧北上后的再循环水”,并建议改称“巴士海流”^[20,21].上述认识得到了1992年3月南海东北部环流调查结果的支持.该次调查还在黑潮诱导的气旋型环流的东南侧发现了一支沿吕宋岛西岸北上的暖水,并称之为“吕宋沿岸流”^[22].

本文的结果显示,就多年平均而言冬季除总环流呈气旋型外,在南海北部确实存在一个气

旋型闭合环流. 其中心在 $18^{\circ}\text{N}, 112^{\circ}\text{E}$ 附近, 尺度约 700 km. 该闭合环流的东南段最强, 其位置及运动方向与“吕宋沿岸流”^[22]一致. 它将南海中部的暖水向北输运, 应是冬、春季卫星红外图像经常在吕宋岛西岸观测到北上暖水舌的原因. 在吕宋岛以北流向折向西北, 气旋型环流的这一段相当于“巴士海流”^[20, 21]. 因此, 对冬季南海环流的分析结果支持苏纪兰等的观点, “巴士海流”和“吕宋沿岸流”都是南海北部气旋型局部环流的一部分. 只是图 7a 中“吕宋沿岸流”主要来自南海中部, 而且流速较强, 称为“吕宋海流”可能更为合适. 夏季的分析结果(见图 7b)并未显示黑潮诱发的气旋式环流. 由于苏纪兰等^[20, 21]的模式主要研究黑潮对南海环流的影响, 并未考虑风生环流, 这一差异可能说明: 即便在黑潮影响显著的南海东北部海区季风对环流的影响也不可忽视, 夏季在南海东北部风生反气旋环流可能掩盖了黑潮诱发的气旋型环流.

7.4 关于南海暖流

20 世纪 60 年代全国海洋普查发现了冬季广东外海陆架上有一支沿等深线流动的东北向海流, 称之为南海暖流³⁾. 调查认为这支海流具有相当显著的密度流性质, 其流速较黄海、东海大, 但趋势较不稳定, 在强劲的东北风影响下, 流向可能发生变化. 后来的研究将南海暖流向南推进到陆架坡折外的深水区^[23], 认为南海暖流的主干在此, 在冬季逆风而动, 终年自西南流向东北, 并被广泛接受. 管秉贤³⁾曾指出: “……南海暖流随风系而变的复杂性, 有待于将来进行整个南中国海的深海调查时, 彻底摸清南海暖流的来龙去脉, 才能得到解决”. 本分析表明, 这一观点是很有预见性的.

根据本分析之结果, 夏季来自中南半岛的季风流在海南岛东南分为两支, 北支沿华南陆架向东北运动, 南支沿 18°N 向东横穿南海后折向东北, 二者在汕头外海汇合. 从图 7b 看来, 北侧近岸的一支, 特别是汕头以东汇合后的一段, 与传统意义上的南海暖流吻合, 可认为是南海暖流的北分支. 似乎可以认为, 夏季南海暖流的主干位于更南面的 18°N 线附近, 流向东, 在 118°E 才折向北, 与北分支在汕头外海汇合. 在汕头以东海域, 南海暖流显然因汇合而加强. 在海南岛和汕头间流向虽指向东北, 但陆架坡折附近属弱流区, 未见沿陆坡流动的强流.

冬季除汕头以东海域之外, 广东外海未见逆风的东北向海流(见图 7a). 看来可能如最初的调查报告所指出的, 南海暖流在冬季是相当不稳定的³⁾, 除汕头以东海域外, 在平均意义上并不显现. 此外, 在 116°E 以西南海暖流的流幅狭窄, 常呈带状分布, 并间以西南向流^[22], 在分析中被平滑掉也是可能的. 就冬季而言, 南海暖流仅存在于汕头以东外海, 似乎不是南海总环流的主要分量.

7.5 南海季风急流

无论冬季或夏季, 南海最强的海流都出现在南海西部和南部(中南半岛东部和南部沿岸). 流速最强可达 1 m/s ^[1], 流向随季风转换而变换方向, 冬季呈气旋状, 夏季呈反气旋状. 这支海流是南海总环流的最主要部分, 在以往的研究中常笼统地归入“南海季风漂流”. 鉴于该海流的动力特征与海洋动力学中定义的漂流不同, 有相当大的地转成分, 建议改称“南海季风急流(South China Sea Monsoon Jet)”.

3) 管秉贤, 陈上及. 中国近海的海流系统. 全国海洋综合调查报告, 第五册, 1964.

冬季沿中南半岛南下的季风急流在南海南部受巽他陆架阻滞折向东北,沿加里曼丹岛和巴拉望岛外海有一支较强东北向流;夏季除巽他陆架北侧之外,加里曼丹岛至马拉望岛一线并无明显流系发育.无论冬夏,南海季风急流都经巽他陆架与爪哇海发生水体交换,但交换方向冬夏相反.在 10°N 以南这支海流进入浅海陆架区,虽然表层地转流速在此加强,但因水深较浅,体积输运量并不见得比深水区大.若平均流速取 0.3 m/s ,平均水深 100 m ,流幅宽 250 km ,在中南半岛东南方陆架上这支海流的输运量约 $7.5\times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$.有关南海季风急流的研究还很少见,应是今后南海环流研究的主要努力方向之一.

8 小结

应用1992~1996年的TOPEX/POSEIDON卫星高度计遥感资料,对冬、夏季风强盛期南海上层总环流的多年平均结构进行了初次探讨,并用卫星跟踪海面漂浮标观测加以验证.研究表明遥感分析结果与海上观测一致,说明卫星高度计是研究南海大尺度环流的有效遥感手段.

分析结果表明南海上层环流在很大程度上受该海区冬、夏交替的南海季风支配,其结构呈明显的季节变化.冬季总环流呈气旋型,有南、北两个次海盆尺度气旋型环流发育;夏季总环流大致呈反气旋型,但在南海东侧 18°N 以南大片海域未见明显流系发育.

南海环流的西向强化趋势十分明显.无论冬、夏在中南半岛沿岸和巽他陆架外缘均存在急流,其流向与季风方向一致,冬季向北、夏季向南,是南海上层环流中最强劲的一支.鉴于该海流的动力特征与海洋动力学中定义的漂流不同,有相当大的地转成分,建议称为“南海季风急流”.冬季沿中南半岛南下的季风急流在南海南部受巽他陆架阻滞折向东北,沿加里曼丹岛和巴拉望岛外海有一支较强东北向流发育;夏季这一带则无明显流系发育.

就多年平均而言,黑潮只在冬季经吕宋海峡侵入南海东北部,并在南海北部诱生一个次海盆尺度的气旋型环流.入侵黑潮(气旋型环流的东北段)在遭遇陆坡后折向东北,在汕头以东海域可见南海暖流逆风而动,但汕头以西外海未见逆风海流.夏季未见黑潮入侵迹象,南海北部完全受东北向流控制.沿中南半岛北上的季风急流在海南岛东南分为两支:北支沿陆架北上似为传统意义上的南海暖流;南支沿 18°N 向东横穿南海后折向东北;二者之间(陆架坡折附近)为弱流区.两分支在汕头外海汇合后,南海暖流流速增强.

目前卫星高度计只能测量星下点的高度,而相邻TOPEX/POSEIDON卫星轨道的地面轨迹间距($200\sim 300\text{ km}$)以我们所引用T/P资料数据点的沿轨间距(约 150 km)均较大.在数据处理过程中我们还采用数值滤波技术消除潮汐混淆的干扰.这些因素都使得时空尺度较小的中尺度信号受到抑制.因此,文中分析结果主要反映南海环流的大尺度特征,对其中尺度细节的描述不尽准确.此外,文中反演合成海面动力高度场时所采用的多年平均温、盐度场的空间分辨率也影响了黑潮的准确描绘.克服这些不足将是我们今后努力的方向.

致谢:胡健铎(台湾海洋大学)、甘子钧(中国科学院南海海洋研究所)、许建平(国家海洋局第二海洋研究所)诸教授为1998年南海ARGOS海面漂流浮标观测做出重要贡献;余立中高级工程师(国家海洋局海洋技术研究所)提供其观测资料.在此一并致谢.

参考文献

- 1 Wyrtki K. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959~1961—physical

- oceanography of the Southeast Asia waters. NAGA Report 2. Calif; Scripps Inst of Oceanogr, La Jolla, 1961. 195
- 2 徐锡桢,邱章,陈惠昌.南海水平环流概述.见:中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议论文集(1980).北京:科学出版社,1982.137~145
 - 3 Pohlmann T A. Three dimensional circulation model of the South China Sea. In: Nihoul J C J, Jamart B M, ed. Three-Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics. New York: Elsevier, 1987. 245~268
 - 4 Shaw P T, Chao S Y. Surface circulation in the South China Sea. Deep-Sea Res (Part 1), 1994, 41(11/12): 1 663~1 683
 - 5 李荣凤,曾庆存.冬季中国海及其临近海域海流系统的数值模拟.中国科学(B辑),1993,23(12):1 329~1 338
 - 6 Fang G, Fang W, Fang Y, Wang K. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation. Acta Oceanographica Taiwannica, 1998, 37(1): 1~6
 - 7 Soong Y S, Hu J H, Ho C R, et al. Cold core eddy detected in South China Sea. EOS Trans AGU, 1995, 76: 345, 347
 - 8 Li L, Nowlin W D, Su J. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. Deep-Sea Res (Part 1), 1998, 45: 1 469~1 482
 - 9 Calman J. Introduction to sea-surface topography from satellite altimetry. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1987, 8(2): 206~211
 - 10 Fu L L, Christensen E J, Yamarone C A Jr. TOPEX/POSEIDON mission overview. J Geophys Res, 1994, 99: 24 369~24 382
 - 11 Parke M E, Stewart R H, Farless D L. On the choice of orbits for an altimetric satellite to study ocean circulation and tides. J Geophys Res, 1987, 92: 11 693~11 707
 - 12 Schlax M G, Chelton D B. Aliased tidal errors in TOPEX/POSEIDON sea surface height data. J Geophys Res, 1994, 99: 24 761 ~24 775
 - 13 李立,吴日升,李燕初,等. TOPEX/POSEIDON 高度计浅海潮汐混淆的初步分析.海洋学报,1999,21(3): 7~14
 - 14 Bendat J S, Piersel A G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. New York: Jonh Wiley and Sons, 1971. 407
 - 15 李坤平,周天华,陈宗镛.中国近海月平均海平面的变化及其原因的初步分析.海洋学报,1982,4(5):529~536
 - 16 NODC/NOAA. World Ocean Atlas CD-ROM Series 1994. NOAA/NODC, 1994
 - 17 WOCE Data Products Committee. WOCE Global Data, Version 1.0. WOCE Report, No. 158/98. WOCE International Project Office, Southampton, U K, 1998
 - 18 仇德忠,杨天鸿,郭忠信.夏季南海北部一支向西流动的海流.热带海洋,1984,3(4): 65~73
 - 19 郭忠信,杨天鸿,仇德忠.冬季南海暖流及其右侧的西南向海流.热带海洋,1985,4(1): 1~9
 - 20 苏纪兰,刘先炳.南海环流的数值模拟.海洋环流研讨会论文集.北京:海洋出版社,1992. 206~215
 - 21 蔡树群,苏纪兰.南海环流的一个两层模式.海洋学报,1995,17(2): 12~20
 - 22 许建平,苏纪兰.黑潮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,1997,16(2):1~23
 - 23 管秉贤.南海暖流——广东外海一支冬季逆风流动的海流.海洋与湖沼,1978,9(2): 117~127

