科 学 通 报
第42卷 第21期 Chinese Science Bulletin 1997年11月

【特邀论文】

南海南部海区的环流观测研究

方文东 郭忠信 黄羽庭
(中国科学院南海海洋研究所,广州 510301)

摘要 以分别代表两个不同季风期考察航次的CTD资料为基础,通过综合分析海水的重力势、温度和盐度等分布,系统地描述了南海南部海区的水平环流结构,提出能概述该海区中、大尺度环流水平结构的上、下二层模式,综合归纳出上层主要流系的分布格局及各自的特征,指出南海南部海区的上层环流主要受季风驱动. 此外,还发现并阐述了该海区的两个重要的局部现象——局地涡旋和海洋锋.

关键词 南海南部 环流结构 涡旋 海洋锋

南海南部海区(以下简称"研究海区")是连结热带西太平洋和印度洋的热带边缘海(图1),地理环境较为复杂. 其东北区点缀着南沙群岛多数岛屿与暗礁;西南区为陡峭的大陆坡区和深海盆;东南区则为深海海槽区. 研究海区北面(12°N)与南海中部海盆区相连;东南和西北分别以加里曼丹岛、巴拉望岛和中南半岛为陆界;南面则以纳土纳群岛为屏障. 研究海区的气候特征主要为季风型. 夏季西南季风占主导地位,冬季则受东北季风控制. 不论是西南季风期还是东北季风期,海面最大风力均位于研究海区的西北部,最大平均风速达7~8m/s.

关于南海南部环流观测研究的文献,由于现场观测资料等的限制,迄今仍不多见. 早期的研究[1,2]以船舶漂移资料和风力资料为基础,从大尺度上粗略地描绘包括研究海区在内的南海表层环流图. 80年代初,徐锡祯等人[3]提出了建立在实测历史资料基础上的首份南海地转流分布图. 通过分析1984~1990年间中国科学院"实验3号"科学考察船采集的6个航次CTD温、盐度等资料,黄企洲[4]比较全面地总结了研究海区各考察区域的海流状况,指出南海

7 姜宗慧,易 颀,廖代正,等. 氮氧自由基桥联的三核配合物的合成、晶体结构和磁性. 中国科学,B辑,1995,25:119
8 Caneschi A, Gatteschi D, Graud A, et al. Moderate ferromagnetic exchange between copper(Ⅱ) and a nitronyl nitroxide in a square-pyramidal adduct. MO interpretation of the mechanism of exchange in copper(Ⅱ)-nitroxide complexes. Inorg Chem, 1988, 27: 1031
9 孙柏旺,姜宗慧,廖代正,等. 具有非正轨自旋态的氮氧自由基桥联双镍配合物的合成、表征和磁性研究. 高等学校化学学报,1995,16: 1672
10 Caneschi A, Gatteschi D, Sessoli R. Structure and magnetic properties of ferrimagnetic chains formed by manganese(Ⅱ) and nitronyl nitroxides. Inorg Chem, 1988, 27: 1756
11 Jiang Z H, Zhang W, Liao D Zh, et al. Synthesis and magnetism of rare earth binuclear complexes with bridging nitronyl nitroxides. Synth React Inorg Met-Org Chem, 1996, 26(8): 1387
12 Caneschi A, Catteschi D, Renard J P, et al. Magnetic phase transition and low-temperature EPR spectra of a one-dimensional ferrimagnet formed by manganese(Ⅱ) and a nitronyl nitroxide. Inorg Chem, 1989, 28: 1976
13 Benelli C, Caneschi A, Gatteschi D, et al. Magnetic interactions and magnetic ordering in rare earth metal nitronyl nitroxide chains. Inorg Chem, 1993, 22: 4797

(1997-06-11收稿,1997-09-09收修改稿)

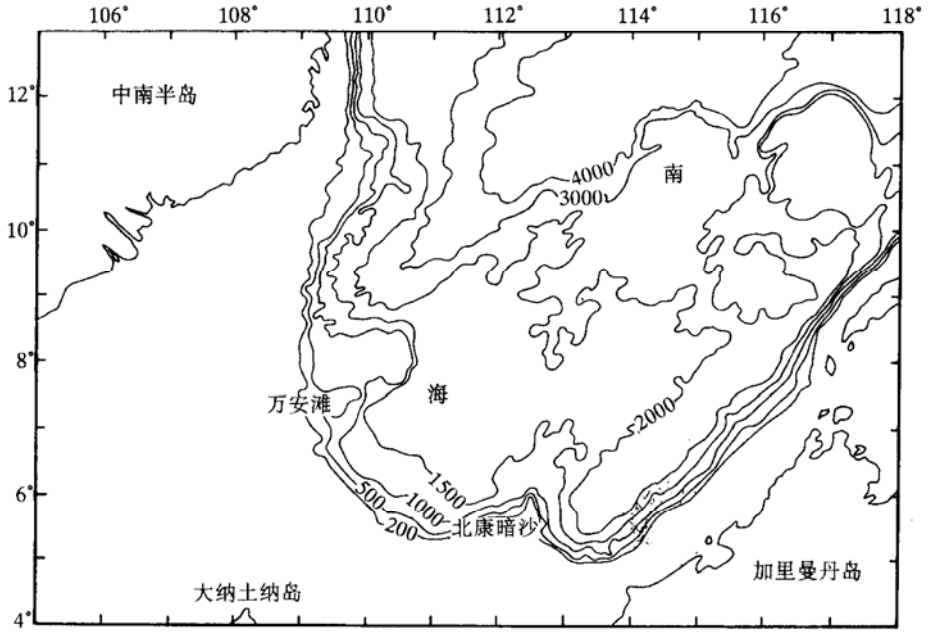


图 1　南海南部海区的地形分布图

南部海流结构多以气旋或反气旋式环流为基本特征. 这些研究从不同程度上有助于提高人们对该海区环流的认识. 但由于以往的海上考察站位仅局限于研究海区的某一部分, 一些重要区域的观测资料尚缺, 尚需要对整个海区的环流结构作系统的观测研究和深入的了解. 为此, 本文以新近的两个海上考察航次的现场实测 CTD 温、盐度资料为基础, 对南海南部海区两个不同季风期的环流结构进行系统的分析和描述, 力求能较清晰地展示该海区的环流配置格局.

1　资料采集和处理

由中国科学院"实验 3 号"科学考察船负责实施的两个考察航次(1993 年 12 月、1994 年 9 月)的现场观测站位如图 2 所示. 这些站位覆盖了研究海区环流最活跃的中西部区域, 观测深度为 1 500 m(水深小于 1 500 m 的站位, 观测深度近似于水深). 本文主要使用"实验 3 号"船上 Mark III 型 CTD 采集的各调查站温、盐度资料. 这些 CTD 温度、盐度资料经该型号仪器设定的常规处理程序处理后, 被校定到各标准深度层上, 从而得到各标准深度层的温度盐度的水平分布. 利用 CTD 观测资料, 选取 1 500 db(注意到 1 db 近似于 1 m 深处海水产生的压强, 故 Y db 面近似地相当于 Ym 深度面)为参考面, 并对观测深度小于 1 500 m 的测站, 采取浅水订正. 通过动力计算, 估算出各观测站不同水层的重力势(动力高度), 得出各标准层的重力势平面分布图.

2　水平环流

主要讨论南海南部海区 0～1 000 m 水层的环流水平结构. 为方便描述, 通过分析各标准深度层的重力势分布, 可把水平环流的结构分为上、下两层. 上层垂直范围从海面至 400 m 深度, 下层则为 400～1 000 m. 注意本文的层划分不同于水团的垂直划分, 但本文的"上层"近似对应于南海表层水、南海北太平洋亚热带次表层水两水层, "下层"与南海北太平洋中层水的

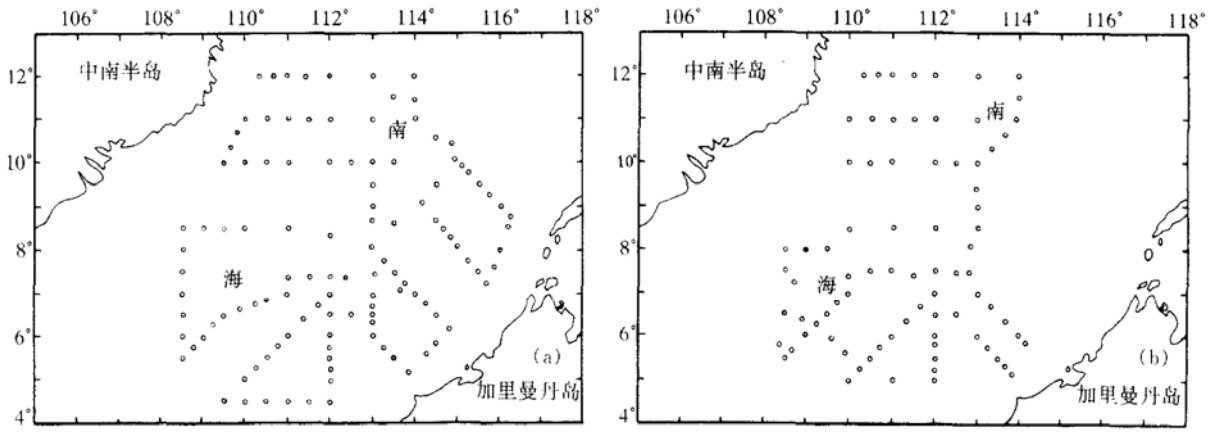


图2 “实验3”号科学考察船南海南部海区观测站位图

(a)西南季风期(1994年9月); (b)东北季风期(1993年12月)

位置和厚度相近. 以下利用被选出的代表层的重力势水平分布,对研究海区的环流结构进行描述.

2.1 上层(0～400 m)环流

(1)西南季风期. 西南季风期,上层环流虽在强度上随深度逐渐减弱,但环流的水平结构基本保持不变. 研究海区为一水平尺度约400 km的反气旋式环流(简称“南沙上层反气旋”)所控制,并伴随着两个较小尺度的局部涡旋,即位于万安滩东南侧的中尺度气旋式涡和南沙海槽西北侧较弱的小气旋式涡(图3). 此外,在11°N以北,存在着气旋式环流的趋势.

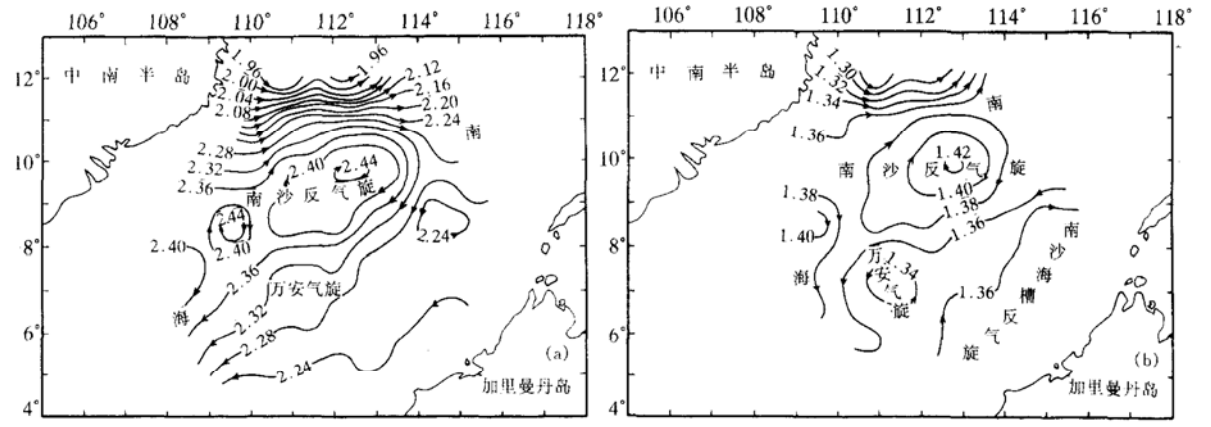


图3 西南季风期南海南部海区上层重力势($\times 10\ m^2\cdot s^{-2}$,参考面:1 500 db)水平分布

(a)0 db; (b)200 db

南沙上层反气旋中心位于9°N,112°E附近,形似椭圆,其长轴为NE～SW走向,近似与中南半岛东南海岸线平行. 其西北翼,流线密集,海流强化;东翼则流线变疏,海流变弱. 从流态与海面风场分布的相似性看,其主要外部驱动力为西南季风,而陆界形状、大陆坡地形只对这一大尺度环流产生影响. 海面风场的现场观测表明,在此反气旋式环流的中西翼处,海面风应力强度最大,于研究海区东南部则较弱(图略). 由Geosat卫星的风速遥感资料得到的海面风场的季节平均分布[5]也得到与之类似的结果. 由此可见,海面风应力的不对称性引致的风场反气旋式切变效应可能对这一大尺度反气旋式环流的生成起主导作用. 比较上层不同深度处

的重力势水平分布特征可推测，于该层的上半部分(0～50 m)，此环流的西南部分可能超出调查海区的范围，向较平坦的西南浅水陆架区延伸；而于该层的下半部，研究海区西南大陆坡对此环流的“约束作用”较明显，由于大陆架地形的阻挡，反气旋式环流沿大陆坡闭合.

(2)东北季风期.　东北季风期，研究海区上层引发了 3 个尺度不一的环流，即位于中西部的大尺度气旋式环流、东南部的反气旋式环流、北部的北南沙反气旋式环流(图 4). 其中，位于研究海区中西部的气旋式环流(以下简称“南沙气旋”)，水平尺度最大，占据主导地位，其中心位于研究海区南半部分的西南大陆坡附近. 东南部的反气旋式环流，在观测海区仅是部分反映. 这两个环流均为沿岸流系受海底地形和侧边界等因素作用所致，只是水源不同而已. 图 4 表明，由研究海区西部沿岸流与东部的加里曼丹沿岸流这两支水团性质不同的海流，在北康暗沙南面陆架区汇合形成了离开陆架的北向逆风流动，最大地转流速可达 80 cm/s. 这支北向逆风流是其西侧气旋式环流的主要驱动力之一，也是东北季风期西南陆架坡折锋在南部陆架坡折处中断的主要原因[1]. 研究海区的北部存在着一个向北开口的反气旋式环流. 可以推测，研究海区的北面可能存在着该反气旋式环流的另一部分，二者组成南海中西部东北季风期的反气旋式环流.

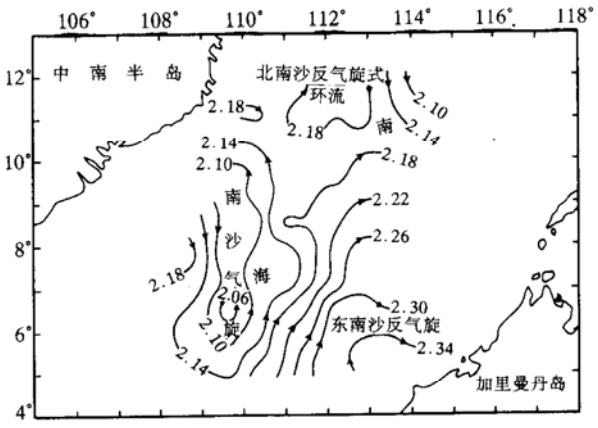


图 4　东北季风期南海南部海区 0db 的重力势
($\times 10 m^2 s^{-2}$，参考面：1 500 db)水平分布

2.2　下层(400～1 000 m)环流

(1) 西南季风期.　西南季风期，研究海区下层的环流水平结构可归结为：分别位于北部、西南部和东南部的 3 个环流，即北部的气旋式环流，西南部万安滩东南的气旋式涡旋，以及东南部的南沙海槽反气旋式环流(图 5). 不同于上层，控制上层的大尺度反气旋式环流在下层

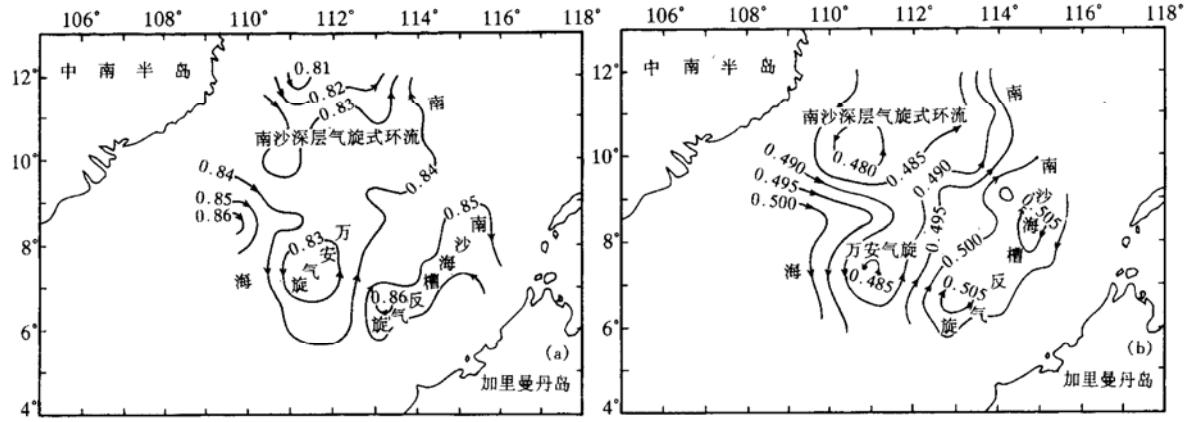


图 5　西南季风期南海南部海区下层重力势($\times 10 m^2 \cdot s^{-2}$，参考面：1 500 db)水平分布
(a) 500 db；(b)800 db

1) 方文东，郭忠信. 冬季南海南部的陆架坡折锋. 见：南沙群岛海区物理海洋学研究论文集Ⅱ. 北京：科学出版社(出版中)

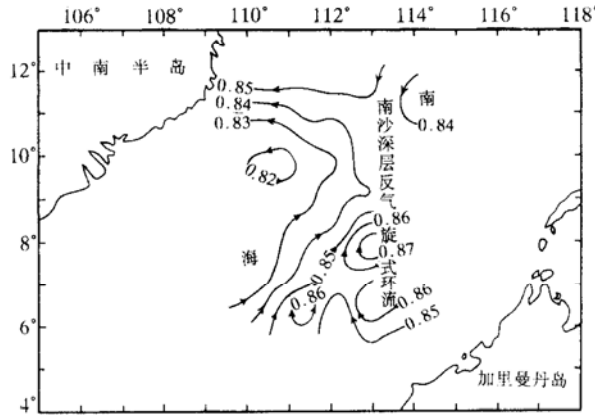


图6 东北季风期南海南部海区500 db重力势($\times 10 m^2 \cdot s^{-2}$,参考面:1 500 db)水平分布

中消失了. 从重力势水平分布看,下层的这3个主要环流对该层流动具有同等重要的作用. 研究海区北部的气旋式环流,开口向北,是毗邻的南海中西部气旋式环流的一部分. 由于研究海区西北侧海底地形形成一个开口向北的U状深海盆,向南海中部海区延拓,下层的这一气旋式环流,在研究海区内,其形态上往往具有半封闭性,这显然为海底地形形状约束的结果. 位于南沙海槽区的反气旋式环流,呈椭圆状,且垂直尺度贯穿整层. 其上界面在上层的下半部(200 m以下)已开始出现. 与上层南沙海槽区的流动较弱不同,下层南沙海槽区的反气旋式环流在该层的流动结构中显得强而又重要. 此外,位于万安滩东南的气旋式涡旋,是上层相应气旋式涡的延续,即从上层至下层,万安滩东南的气旋式涡均表征出清晰的结构.

(2)东北季风期. 东北季风期,下层的环流结构较为简单,主要由西部的大尺度气旋式环流和东部的大尺度反气旋式环流所控制(图6). 由于调查区域的限制(未能向东延伸),观测到的这两个大尺度环流结构仍欠完整性. 为更具体地了解这些环流结构,进一步的观测研究尚待进行.

3 海洋锋与西南大陆坡附近的气旋式涡

3.1 海洋锋

西南季风期,研究海区北部上层存在着由两个不同水系形成的E～W向海洋锋带(图3(a)). 0～400 m层的温、盐度的水平分布均于11°N和12°N间存在着强的海洋锋,温度、盐度的跨锋区经向变幅分别达7～8℃和1(图略),最强锋带出现于200 m深处. 关于此锋的形成,一种可能的解释是:夏季西南季风吹割整个研究海区,尤其以中南半岛东南外海的风力最强,从而驱动了西南浅水区的相对高温、低盐水沿岸线向东北输送. 由于中南半岛金兰湾附近侧边界外凸,以及科氏效应随纬度增高逐渐增大等因素的影响,这支沿岸的NE向流(高温、低盐)与南下的南海中西部的大陆架流(低温、高盐)相遇,演变为11°N至12°N间的东向流动,从而形成强的锋带.

东北季风期,研究海区的西南大陆架与大陆坡间存在着一陆架坡折锋. 该海洋锋位于水下50 m至陆架坡折处,温度水平变幅达7℃,盐度变幅0.8,是南下的陆架流、海水层化、陆架坡折处地形剧变以及跨陆架垂向混合(或层化)不均一等因素共同作用而产生的. 关于此锋区的温度、盐度和地转流结构、产生机制,详见另文[1)].

3.2 西南大陆坡附近的气旋式涡

图3和图5表明,西南季风期,于万安滩东南侧(中心约为7°N,111.5°E),存在一中尺度气旋式涡,垂直尺度超过800 m. 在以往的观测中,由于调查资料等的限制,该时期的这一气

1) 见2267页脚注

旋式涡在以前有关文献中未见提及. 在混合层(约 0～50 m),该气旋式涡虽嵌夹于大尺度反气旋式环流东南翼的西南向流中,但其结构特征仍可辨认(图 3(a)). 显然,该涡旋并非由海面风场直接驱动而产生,可能是当地海水斜压不稳定、大陆坡地形以及大陆坡边界流驱动下的结果. 在表层部分出现的扰动状结构,是由大尺度反气旋式环流东南翼的西南向流动作用所致.

东北季风期,于研究海区的西南部陆架坡折上方,存在着一水平尺度与西南季风期相当的气旋式涡,其中心位于 6.5°N,109.5°E 附近. 此气旋式涡嵌套于大尺度气旋式环流的南半部(图 4),其垂直尺度约为 200 m,即从表层至陆架坡折底部附近. 此气旋式涡在以前的有关文献已有报道[1,3,4,6]. 关于此气旋式涡的产生机制,除了受陆架坡折侧边界地形等影响外,东北季风期位于北康暗沙西侧离开陆架的北向逆风流(即下述的"南沙逆风流")对其产生驱动作用. 大陆架、大陆坡地形的非线性作用也是这一气旋式涡产生的主要原因[1)]. 涡度平衡理论已表明,地形变化限制了强的离陆架流动向大陆架内区扩展,且在大陆架内区产生气旋式回流,并在离陆架流附近产生流动辐合[7]. 这些理论结果与本研究的观测结果一致.

值得指出的是,西南季风期和东北季风期南海西南部的气旋式涡,均位于研究海区西南部的大陆架坡附近,只是西南季风期的靠近外侧,即位于大陆坡外缘,东北季风期的则靠近大陆架一侧.

4 南海南部海区的上层主要流系

为简明起见,可把南海南部海区上层(0～400m)的主要流系归结为:(ⅰ)西部沿岸流;(ⅱ)东部沿岸流;(ⅲ)北南沙海流;(ⅳ)南沙逆(风)流. 这 4 支主要海流及其相关的涡旋构成了研究海区的环流格局(图 7). 除研究海区东部的沿岸流外,其他 3 支主要流系随季风逆转而倒转.

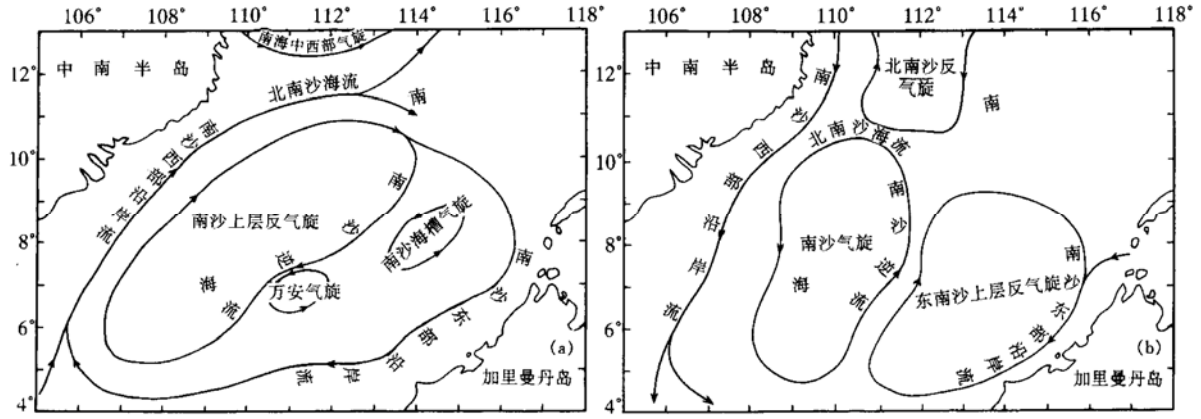


图 7　南海南部上层(0～400m)海区的主要流系与环流格局示意图

(a) 西南季风期; (b)东北季风期

图 7(a)表示西南季风期研究海区上层主要流系的分布. 西部沿岸流系沿中南半岛向东

1) 方文东. 冬季南海西南陆架外缘气旋式环流动力机制的初步解释(待刊)

北方向流动，构成研究海区中西部上层反气旋式环流(即南沙上层反气旋)的西翼；东部沿岸流系沿北加里曼丹岛沿岸向西南流动，组成该大尺度反气旋的东南翼．前者流速强，后者流速弱．西南季风期的东向北南沙海流形成于中南半岛东南近海，是西南季风盛行期研究海区最强的流动之一，其流域短，流势强，流幅宽(跨两个纬度)，垂直尺度约 400 m，表层最大流速可达 110 cm/s．它事实上位于研究海区中西部南沙上层反气旋与南海中西部气旋式环流的结合部(约于 11°～12°N 间)，对应于上节述及的西南季风期该海区的海洋锋．当这支海流流至研究海区东北部礁群附近时分为两支，一分支向东北汇入南海中部的西南季风漂流中，另一分支急剧右旋，逆西南风而流，演化为海区中部的南沙逆(风)流．如 3.1 节所述，这支强的东向流动为研究海区西部的东北向沿岸流受中南半岛金兰湾附近陆界东凸的作用，并与来自南海中西部的南下大陆架流动汇合演变而成．

东北季风期研究海区上层主要流系的分布如图 7(b)所示．在东北季风驱动下，研究海区的西部沿岸流在南下过程中分为两分支，一小分支直接南下，最后流入爪圭海；另一大分支沿西南大陆架向东流并左旋向北，形成南沙气旋；而沿加里曼丹岛向西南的东部沿岸流，在北康暗沙附近右旋向北，构成了研究海区东南部上层反气旋．很明显，北上的南沙逆(风)流，位于东西两侧 气旋式和反气旋式环流的结合部，为研究海区的西部沿岸流与东部沿岸流在南部陆架区汇合所致．与西南季风期相比，北南沙海流位置南移，强度较弱，它是南沙气旋的北翼和南海中西部反气旋环流的南翼的合成流动，在靠近中南半岛东南岛一侧，分成两股，一股南下汇入南沙气旋的西翼，另一股北上加入南海中西部反气旋式环流中．

5 与以前的观测结果比较

南海南部环流的观测，以前曾经就局部区域进行过多次．虽然黄企洲[4]的研究结果难免受每一航次考察海区范围小且不同等因素限制，但仍值得与本文的某些结果作比较分析．

本文的结果表明，在研究海区的中西部，西南季风期的南沙上层反气旋为一充分成长的大尺度反气旋式流涡．令人感兴趣的是，在相同海区，黄企洲[4]也指出，春季(4～5 月)、初夏(5～6 月)均存在一反气旋式环流．春季的反气旋式环流位于 112.5°E 以西，初夏的反气旋式环流的中心位置则与本文的西南季风期南沙上层反气旋的(9°N, 112°E)相近，但两者的空间尺度较小，强度较弱．由此可推断，从晚春至夏季，研究海区的中西部可能存在一反气旋式环流．在春末季风转换期和初夏季风爆发期，这一反气旋式环流处于发育阶段，形态不明显，位置欠稳定．至西南季风盛行期，该反气旋式环流则已充分成长，且较为稳定，形成南沙上层反气旋．

黄企洲[4]的研究结果也表明，春季(4～5 月)、初夏(5～6 月)和冬季(12 月)，万安滩与纳土纳群岛间出现一中尺度气旋式涡．该气旋式涡旋的位置在冬季偏向较浅的大陆架区，春夏两季则位于较深的大陆坡区附近，与本文的结果类似．但本文却提供了该气旋式涡在两个不同季风期更清晰和完整的结构．结合本文和黄企洲[4]的结果得出，万安滩和纳土纳群岛间，可能存在着一永久性中尺度气旋式涡，该涡旋的位置、强度随季节而变化．

本文的结果显示，西南季风期，在研究海区北侧的南海中西部存在着一气旋式环流，其南翼与南沙上层反气旋的北翼相连．在相同海域，黄企洲指出，1987 年 4～5 月和 1990 年 5～6 月间也存在一气旋式环流，而且垂直尺度与本文的相当．因此，春季季风转换期至夏季西南季风盛行期，南海中西部海区可能存在一反气旋式环流．这一气旋式环流的出现期似乎与研究海区中西部的南沙上层反气旋的出现期相同．此外，东北季风期，在相近海区，本文得到一反

气旋式环流，与仇德忠[8]利用南海中部海区的观测资料进行分析得到的结果相同，但与黄企洲[4]得到的一气旋式环流的结果相反.

6 结语与讨论

根据以上研究，其主要结论：

(ⅰ)南海南部海区水平环流呈现为多环结构，即尺度较大的主环流嵌套着两个以上的局地性小环流；

(ⅱ)南海南部海区上层主要流系共 4 支：西部沿岸流、东南部沿岸流、北南沙海流和南沙逆(风)流. 除海区东南部沿岸流外，它们均随季风期变换而逆向；

(ⅲ)西南季风期的东向北南沙海流、东北季风期的北向南沙逆风流均为南海南部海区的两支强流，它们均位于两个方向相反的大尺度涡旋的结合部；

(ⅳ)西南季风期，南海南部海区的北部存在着强的 E～W 向海洋锋；东北季风期，西南陆架坡折处，可观测到陆架坡折锋，其上界位于 50m 深处. 此外，在研究海区西南部大陆坡附近，两个季风期均发现局地气旋式涡.

为了更系统地了解整个南海南部海区的环流结构及其变化，春、秋两个季风转换期的环流整体结构、环流的季节演变过程，以及深层(1 000 m 以下)环流等，应该是今后南海南部环流观测研究的主要内容.

致谢　中国科学院“实验 3 号”科学考察船船长、科调队水文分队全体成员对海上观测工作给予大力的支持，罗晖同志协助绘制部分图件，作者表示感谢. 本工作为国家科技专项南沙项目环流专题(批准号：85-927-05-01)资助项目.

参　考　文　献

1　Dale W L. Wind and drift current in the South China sea. The Malayian Journal of Tropical Geography, 1956, 8: 1～31

2　Wyrtki K. Physical oceanography of the Southeast Asian waters. NAGA Report, Vol.2. Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and Gulf of Thailand. La Jolla, California: Scripps Institution of Oceanography, 1961. 195

3　徐锡祯，邱章，陈惠昌. 南海水平环流的概述. 见：中国海洋湖沼学会水文气象学会学术(1980)论文集. 北京：科学出版社，1982. 127～145

4　黄企洲. 南沙群岛海区的海流. 见：南沙群岛海区物理海洋学研究论文集Ⅰ. 中国科学院南沙综合科学考察队. 北京：海洋出版社，1994. 10～27

5　齐义泉，施平，毛庆文. 南海海面风速季节特征的卫星遥感分析. 热带海洋，1996，15(1)：68～72

6　何有海，关翠华，甘子钧. 南海南部海洋上层的热振荡. 海洋学报，1992，14(3)：19～28

7　Ou H W. Flow near a continental boundary driven by an oceanic jet. Journal of Physical Oceanography, 1994, 24: 966～978

8　仇德忠. 南海中部海区的密度流. 见：南海中部海区综合调查研究报告(一). 北京：科学出版社，1982. 129～139

(1997-03-14 收稿，1997-07-08 收修改稿)