1998 年夏季南海环流

刘勇刚 袁耀初 苏纪兰 姜景忠

(国家海洋局第二海洋研究所, 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 杭州 310012. Email: yg_liu@21cn.com)

摘要 基于 1998 年夏季的温盐深(CTD)和气象观测资料, 采用改进逆方法计算了南海海流的流速和流量, 并结合声学 Doppler 测流(ADCP)资料分析了南海环流特征. 结果如下: (1) 南海东北部环流最重要的特征是黑潮有一个分支入侵南海, 但流量不大. 该分支作反气旋式弯曲通过巴士海峡流向台湾以南海域, 而没有入侵南海内部; (2) 南海北部海区主要受气旋式环流系统所支配, 并伴随有两个冷涡; (3) 南海中部、西南部海区主要受反气旋式环流系统所支配, 主要包括 3 个反气旋环流系统和 1 个较强的气旋式涡; (4) 南海东南部海区主要存在一个范围较大的自西南至东北伸展的气旋式环流系统; (5) 南海环流存在多涡现象, 且较大尺度涡里含有几个小涡; (6) 南海海流和涡旋存在西向强化现象.

关键词 夏季南海环流 多涡结构 改进逆方法

关于南海海流的计算, 有些学者采用动力计算的方法[1~5]或β螺旋方法[4], 更多的则是采用数值模拟的办法, 如全流模式[6]和分层模式[7~13]. 尚未见到有关用逆方法计算南海环流的报道. 而且, 以往的南海航次观测大多在南海局部海域, 如南海北部、东北部[9]、东部[2]、中部[4]和南部海域[3,5], 在同一航次中对整个南海海域进行的 CTD 和 ADCP 走航观测尚未见报道.

本文基于"向阳红 14" 号调查船自 1998 年 6 月 12 日至 7 月 6 日期间在几乎遍及整个南海的广大范围海域进行的CTD和风场的调查资料("南海季风"项目资料), 采用改进逆方法, 计算南海海流. 并结合船载 ADCP 资料分析南海海流和中尺度涡的分布和演变规律. 本航次观测资料的断面、站位及改进逆方法计算单元如图 1 所示.

1 数值计算及模式参数

袁耀初等人[14,15]的改进逆方法对以往的逆模式做了 4 点重要改进: 在动量方程中考虑了垂直涡动粘滞项, 即流动是非地转的, 在密度方程中考虑了垂直涡动扩散项, 外加一个海面上海洋向大气放热(或吸热)的不等式约束, 以及β效应. 因为缺乏该海区的海气热交换率资料, 在本文的计算中不施加热量不等式约束.

在上述改进逆方法计算中, 每一个计算单元在垂直方向上被分成 5 层, 其中 4 个交界面的 $\sigma_{t,p}$ 值分别为 25.0, 26.5, 27.1 和 27.6. 由于缺乏详细的风场资料, 我们假定风场是均匀的, 取整个航次期间观测风资料的矢量平均值(4.2 m/s, 182°)进行计算. 垂直涡动粘滞系数 A_z 和垂直涡动扩散系数 K_v 分别取为 100 和 10 cm^2/s. 依经验搜寻法[16]确定的最佳参考面深度 Z_r 为 1 800 m. 实际计算中考虑浅水订正, 参考面取法如下: 如果测站水深 H 大于最佳参考面深度 Z_r, 则取 Z_r 为参考面, 否则取该计算点 H 作为参考面.

2 南海环流与涡旋

本文首先分析观测得到的温度水平分布, 再采用改进逆方法计算得到的流速和流量分布的结果, 并结合 ADCP 实测资料, 分海区讨论南海环流和涡旋的某些分布特征.

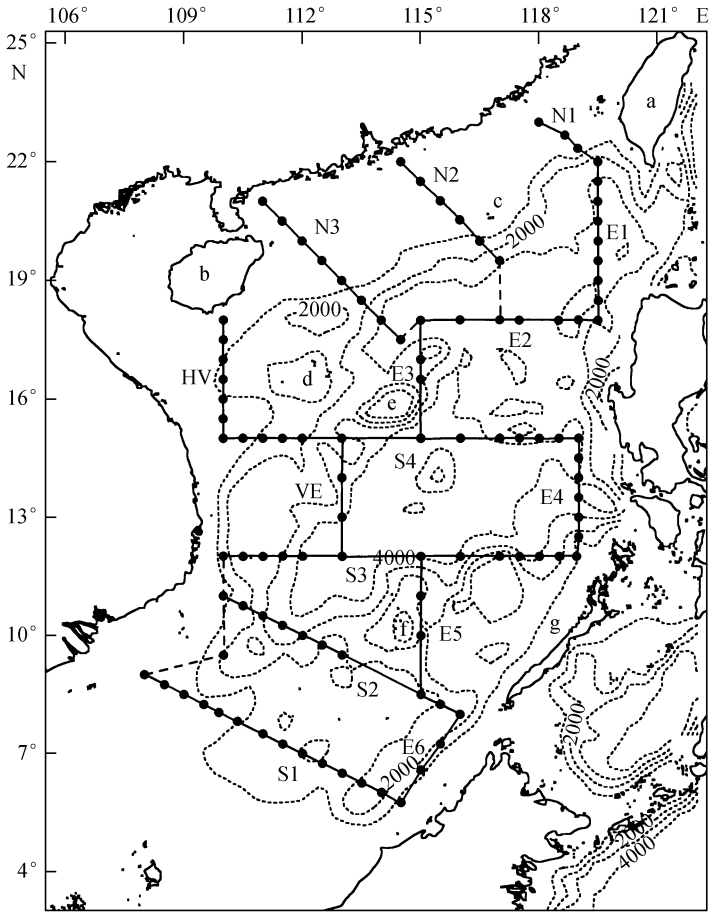


图 1　南海地形、观测断面、站位及计算单元

a. 台湾岛, b. 海南岛, c. 东沙群岛, d. 西沙群岛, e. 中沙群岛, f. 南沙群岛, g. 巴拉望岛

2.1　温度水平分布

图 2 给出了南海 100, 700 和 1 200 m 层次的温度水平分布图. 如图 2 所示, 在南海东北部海区, 100 m 层上台湾岛西南海区出现了暖水区, 而巴士海峡中部是相对冷水区. 在 700 和 1 200 m 层, 东沙群岛以南海区出现了明显的暖涡.

在南海北部海区, 100 m 层上 118°E 以西主要是大块冷水区(南海北部冷槽 C1), 且有若干冷水中心出现. 在 700 m 中层, 冷水范围缩小, 仅在 116°E, 18°N 附近出现一个冷水中心. 在 1 200 m 深层, 南海北部冷水范围进一步缩小, 几乎为两个暖水涡所占据.

在南海中部和西南部海域, 100 m 层上主要被暖水所控制: 在中沙群岛附近出现了暖涡(W1); 越南东南外海也出现一个温度较高的暖涡(W2); 菲律宾西侧还出现了大暖池(W3, 内含两个暖水中心); 在这个暖涡与菲律宾西侧大暖池之间海区则出现一个冷涡(C2). 在 700 m 中层, 菲律宾西侧暖池范围缩小, 并略向西移动; 越南东南外海暖水涡区域扩大, 往南扩展到了断面 S1; 位于该暖涡与菲律宾西侧暖池之间的冷涡依然明显. 而在 1 200 m 深层, 菲律宾西侧外海转为冷水区; 南海中部至西南部海区均为暖水所控制.

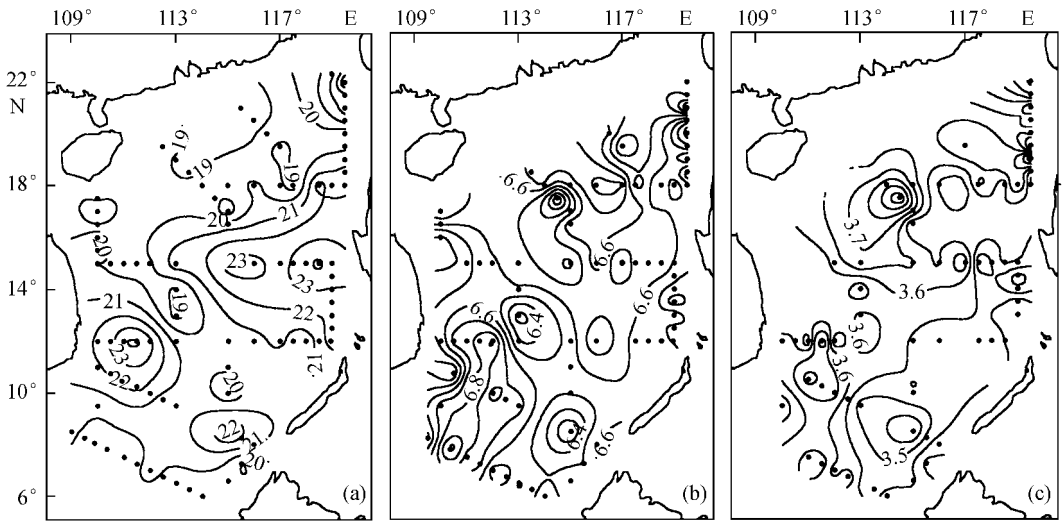


图 2 不同层次上南海水温水平分布

(a) 100 m, (b) 700 m, (c) 1 200 m

在南海东南部海区, 100 m 层南沙海槽上方出现了小范围的暖涡; 而在 700 m 层, 南海东南部海区从菲律宾西南侧外海以南为相对冷水区, 南沙海槽处转为明显的冷涡; 在 1 200 m 层, 南海东南部出现了大范围的南西-北东走向的冷水区, 并在南沙海槽处出现冷涡中心(C3).

我们还计算了相对于 1 500 db 层的重力位势偏差, 得到的南海环流形势与温度分布(图 2)的极为相似. 限于篇幅, 不再讨论.

总之, 在调查期间, 南海在不同的深度层次上出现多个强度不等的中小尺度冷、暖涡旋, 即存在所谓的"南海的多涡现象". 从温度水平分布图上看, 在南海海域自表层至 300 m 层与 500 m 以深的环流系统十分不同: 在上层, 南海北部海区被大块冷水区所控制, 并伴随几个冷涡; 南海中部和西南部海区则以暖水系统占优势, 包括两个暖水系统和一个冷涡; 南沙海槽上层出现暖涡. 而在 500 m 以下深层, 南海北部冷水区范围及强度随深度增加而缩小、减弱, 甚至被暖水涡系统所代替; 南海中部菲律宾以西暖池范围也缩小, 南海西南部, 越南东南外海暖涡范围扩大; 南海东南部海区转为冷水区, 且在南沙海槽处出现冷涡.

2.2 流速分布

改进逆方法可计算出垂直于每个断面的流速分布. 受篇幅所限, 仅以巴士海峡附近断面 E1 和南海中部 12°N 断面 S3 为例, 讨论其流速分布.

在南-北走向断面 E1(见图 1)上, 从北到南流速方向呈东西向交替分布(图 3). 在断面 E1 的北部, 即靠近台湾岛的一端, 计算点 1 和 2 处从表层到底层都是偏东向流, V_{max} 为 20 cm/s,

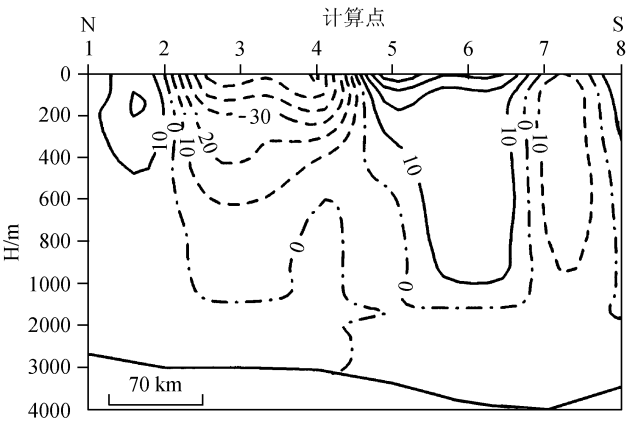


图 3 断面 E1 上的流速分布

单位为 cm/s, 正值为东向流, 负值为西向流

在次表层；而计算点 3～4 处为较强的西向流，其 V_{max} 为 61 cm/s，在计算点 4 的 30 m 层；结合 ADCP 流速分布图(图 4)来看，似乎是来自吕宋岛以东黑潮有一个分支西北向穿过巴士海峡后在台湾西南海域作反气旋式回转，而且，计算点 1 和 2 处的偏东向流与计算点 3 处的西向流可能组成台湾岛西南反气旋涡的一部分(图 2(a)和(b))．在断面 E1 的中部，计算点 5 处的东向流与计算点 4 处的西向流在 400 m 以浅的上层组成一气旋式环流的一部分．东向 V_{max} 达 45 cm/s，位于计算点 5 的表层．在断面 E1 南部，计算点 6 处的东向流与计算点 7 处的西向流组成一个较为深厚的反气旋式环流的一部分．该反气旋式环流的中心位于东沙群岛以南、菲律宾西北外海约 18°~19°N 处；这在 700 m 以深的温度分布图中最明显(图 2(b)和(c))．在 1 000 m 深的层次上，计算点 6 处的东向流和计算点 7 处的西向流的流速值均大于 10 cm/s．计算点 7 处的西向 V_{max} 为 20 cm/s，位于次表层．在断面 E1 的最南端，即靠近菲律宾的计算点 8 处，又是东向流，V_{max} 为 21 cm/s，在表层．由图 4 可以看出，所计算流速与 ADCP 实测流在定性上是一致的，在定量上有些差别，可能与局地潮流、风的影响有关．

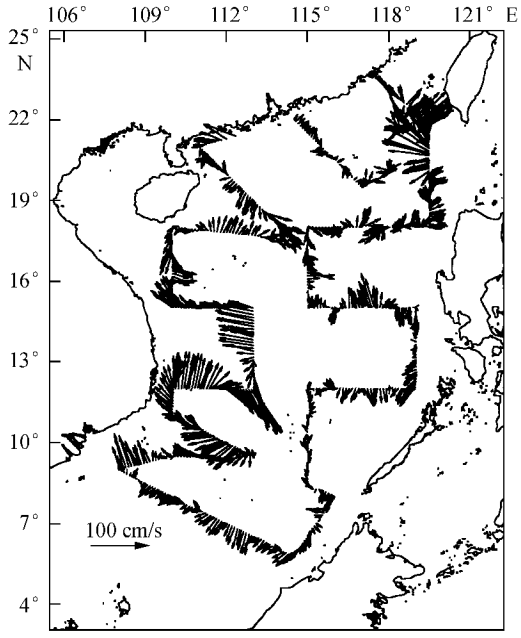


图 4　25～75 m 层平均 ADCP 实测流矢量

断面 S3 位于 12°N 附近，呈东-西走向．如图 5 所示，断面 S3 西端计算点 3 以西出现较强的北向流，其 V_{max} 值可达 56 cm/s，位于计算点 2 的表层；计算点 4 和 5 之间则是较强的南向流，其 V_{max} 值也有 56 cm/s，位于计算点 5 的表层．这两支流组成越南东南外海较强的反气旋涡 W2 的一部分．该反气旋涡在 ADCP 实测海流图中表现明显(图 4)，在温度分布图中其暖中心从上层到深层都存在(图 2(a), (b)和(c))．其南北向的流速在 400 m 层上仍可达 10 cm/s．在断面 S3 的中部计算点 7 处从表层到底层都存在较弱的北向流，其 V_{max} 值只有 13 cm/s，位于

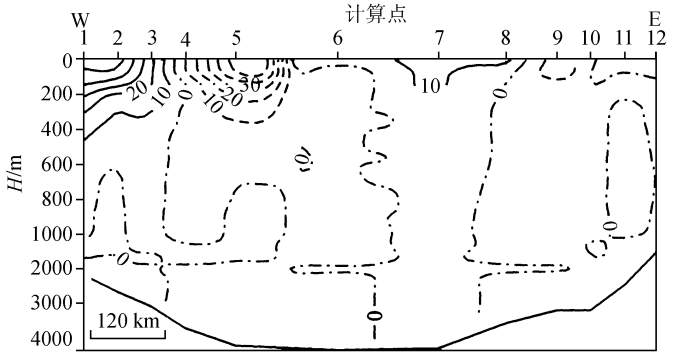


图 5　断面 S3 上的流速分布

单位为 cm/s，正值为北向流，负值为南向流

表层; 在断面 S3 的东部计算点 9 处从表层到深层都出现南向流, 其 V_{max} 值为 18 cm/s, 也位于表层. 计算点 7 处的弱北向流与计算点 6 处的弱南向流组成南海中部冷涡 C2 的南部, 又与计算点 9 处的南向流组成菲律宾西侧暖涡 W3 的一部分(图 2(a)和(b)). 靠近菲律宾, 计算点 10 以东流速都很小. 断面 S3 上的计算结果与 ADCP 实测流相比较, 除了断面最东端稍有差异之外, 符合得很好.

从图 4 和 5 中都不难发现, 南海西部海流流速比东部的大, 即存在“西向强化”现象. 一些学者(例如 Takano 等人[11])通过数值模拟也得到了西部强化现象, 但究其原因, 有不同的观点, 例如曾庆存等人[6]认为是由于β效应引起的西岸海流的强化. 而 Chu 等人[10]则认为侧边界的强迫作用才是南海强西边界流形成的主要原因.

2.3 流函数及流量

在改进逆方法计算中, 不仅要求每一个计算单元内流量达到平衡, 而且要求在整个计算海区流量是平衡的. 用改进逆方法计算出的积分流函数如图 6 所示. 以下将根据图 6 中所显示出的环流特点, 分如下 4 个方面进行讨论.

(1) 南海东北部环流. 关于南海东北部环流最重要的一个问题是黑潮是否能入侵南海.

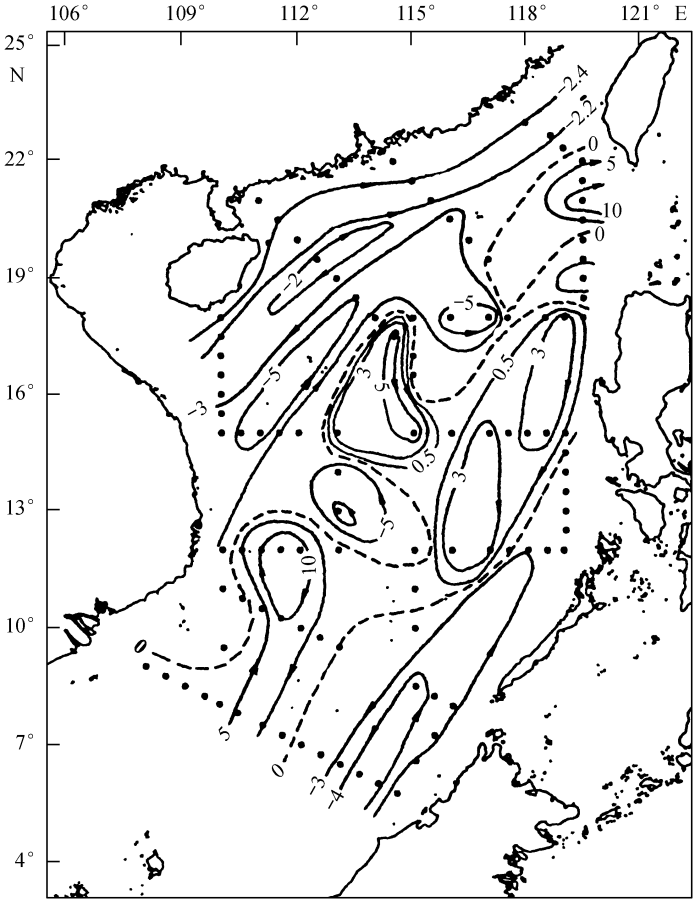


图 6 流函数(10^6 m^3/s)分布

如果它入侵南海，环流状况又如何？本航次计算结果(图 6)表明，黑潮有一个分支在台湾岛西南反气旋式涡的南侧通过断面 E1 北部进入南海，该分支伴随该涡作反气旋式弯曲后，通过断面 E1 北部和断面 N1 东北向流出南海．通过断面 E1 计算点 3 和 4 进入南海的西向流量为 16.9 $\times 10^6$ m^3/s，流速较大，如上节所述，V_{max} 为 61 cm/s．而通过断面 E1 计算点 1 和 2 及断面 N1 偏东方向的流量为 15.7×10^6 m^3/s．此偏东向流量主要包含黑潮分支及伴随反气旋涡的总流量．这表明黑潮分支西向通过巴士海峡后，绝大部分在台湾岛西南海区作反气旋式弯曲流出南海．图 6 显示，黑潮分支的流量只有少于 5×10^6 m^3/s 能入侵南海 118°30′E 以西区域，但对南海环流的影响最西可至 117°E，最南达 18°N．从以下可知，这是由于南海北部形成气旋式的环流系统，限制黑潮分支的继续入侵．特别指出，上述黑潮分支对南海影响仅是一个流型，事实上，在 1997 年 12 月强 El Niño 期间黑潮并没有一个分支入侵南海[17]．

(2) 南海北部环流系统． 南海北部 117°E 以西海区主要受东沙群岛西南气旋式环流系统(C1)所支配(图 6)．该气旋式环流系统包含两个气旋涡，其中心分别位于 116°E，18°N 和西沙群岛(112°E, 17°N)附近．苏纪兰等人[8]的数值模拟表明，南海北半部以波动的气旋环流占优势，黑潮西侧的正涡度不断地被平流输送进入南海．当气旋涡增强时，正涡度开始向西移动，并同时不断增强，气旋涡周期性地向西南脱落．本航次，气旋涡在南海北部以气旋波的形式自东至西出现，似乎与苏纪兰等人[8]数值模拟的结果一致．如图 6 所示，在广东沿岸出现较弱的东北向流动，似乎是南海暖流的表现[18]．

通过断面 N2 总的东北向和西南向流量分别为 5.6×10^6 和 2.4×10^6 m^3/s，净流量为东北向 3.2×10^6 m^3/s．通过断面 N3 总的东北向和西南向流量分别为 12.3×10^6 和 3.7×10^6 m^3/s，净流量为东北向 8.6×10^6 m^3/s．通过海南岛以南断面 HV 总的东向和西向流量分别为 4.2×10^6 和 5.7×10^6 m^3/s，净流量为西向 1.5×10^6 m^3/s．

(3) 南海中部和西南部环流系统． 南海中部和西南部主要受反气旋环流系统所支配，如图 6 中流函数为零的虚线所包围的呈南西-北东型区域．该反气旋环流系统主要包括中沙群岛反气旋环流(W1)、越南东南外海较强反气旋环流(W2)、以及菲律宾西侧外海反气旋环流系统(W3)．而在反气旋环流 W1 与 W2 之间存在一个较强的气旋式涡(C2)．这就是南海中部、西南部环流的基本结构．流速分布、ADCP 测流(图 4)以及从表层至深层的温度分布(图 2)都反映了上述环流的基本结构．以下将分别进行讨论：(ⅰ) 反气旋式环流 W2，扩展范围较大，包括断面 S1, S2, S3 的西侧部分以及断面 S3 以北的海区(图 6)．该反气旋涡的核心流速大，如上所述，最大流速为 56 cm/s；流量也较大，约为 16×10^6 m^3/s；其中心位于 111°30′E, 11°N 附近．在温度水平分布图中，自表层至深层都出现了暖中心(图 2(a), (b)和(c))．(ⅱ) 气旋式涡 C2，位于反气旋式涡 W2 东北以及反气旋式涡 W1 以南，其流速较大，断面 VE 上 V_{max} 为 52 cm/s，流量约为 12×10^6 m^3/s，中心位于 113°E, 13°N 附近．夏季在越南东侧外海，气旋和反气旋相伴出现的环流结构在 Takano 等人[11]的数值模拟的结果中已有体现，只是其位置整体向南偏移，涡旋的强度也较弱．蔡树群等人[13]用三维 HAMSOM 模式在南海西部上层也得到了相似的环流结构[13]．(ⅲ) 中沙群岛反气旋式涡 W1，相对上述两个涡，该涡强度不大，其流量约为 6×10^6 m^3/s，其中心位于中沙群岛附近．(ⅳ) 菲律宾以西反气旋环流系统 W3，它包含两个反气旋式涡 W3-1 及 W3-2，其位置分别位于该环流系统的东北部和西南部(图 6)，强度较弱，其流量分别约为 6×10^6 和 5×10^6 m^3/s．

在南海中部，通过东西向断面S4总的北向和南向流量分别为 22.7×10^6 和 18.7×10^6 m^3/s，净流量为北向 4.0×10^6 m^3/s. 在菲律宾西南外海，通过南北向断面 E4 的净流量为西向 3.2×10^6 m^3/s.

(4) 南海东南部环流系统. 在南海东南部海区主要有一个气旋式环流系统(C3)，其范围较大，自西南至东北扩展(断面 S1，S2 和 S3 的东部，断面 E6 以及断面 E4 的南部)，其核心位于 115°E，8°N 附近，强度也不大. 图 6 的积分流函数显示出的是垂直方向上总的环流，但其流速垂直结构在上、下层流动方向是不同的. 断面 S2 上的流速分布(图略)显示，在南沙海槽上方，150 m 以浅呈反气旋式流动，而在 200 m 以深的层次则是气旋式流动，虽然它们的流速均很小. 温度的水平分布图也有明显反映，如前所述，在 100 m 层温度水平分布图中在该海域存在一个高温中心(图 2(a))，而在 700 和 1 200 m 水层该处呈现低温中心(图 2(b)和(c)). 方文东等人[3]报道了 1994 年 9 月南沙上层反气旋、下层气旋式的环流结构，但出现的位置在南沙群岛稍偏北的海域，而在南沙海槽处上、下层都呈现反气旋式流动.

如上所述，涡旋 W2 及 C3 分别通过断面 S1, S2 和 S3，冷涡 C2 也部分通过断面 S3. 以下分别讨论通过断面 S1, S2 和 S3 的流量. 通过东西向断面 S3 总的北向和南向流量分别为 31.3×10^6 和 30.5×10^6 m^3/s，净流量为北向 0.8×10^6 m^3/s，即通过断面 S3 的南北向流量几乎平衡，也就是说，南海南部和北部的水循环交换过程中流量是近乎平衡的. 而且，通过断面 S3 的流量主要集中在越南东南外海暖涡 W2 处. 在南海南部，通过断面 S2 总的东北向和西南向流量分别为 24.4×10^6 和 23.9×10^6 m^3/s，净流量为东北向 0.5×10^6 m^3/s，即通过断面 S2 的东北向和西南向流量也几乎平衡. 通过断面 S1 总的东北向和西南向流量分别为 16.6×10^6 和 19.2×10^6 m^3/s，净流量为西南向 2.6×10^6 m^3/s. 流量分布再次表明，除南海东北部黑潮入侵流速较强以外，从总体上看，南海西部的海流及涡的强度都比东部的要强，即出现西部强化现象.

总之，流函数分布(图 6)、温度水平分布(图 2)和 ADCP 测流(图 4)都表明，南海环流具有多涡结构的特性：气旋式涡 C1，C2 和 C3，反气旋式涡 W1，W2 和 W3，且尺度较大的涡包含几个尺度相对较小的涡，例如反气旋式涡 W3 包含两个涡 W3-1 和 W3-2. 从温度场变化可知，这些结构与斜压场变化有密切关系.

3 结论

基于 1998 年夏季“向阳红 14”号在南海调查获得的水文和气象观测资料，采用改进逆方法计算了南海海流的流速和流量. 并结合温度水平分布和 ADCP 实测流图分析了夏季南海环流状况，特别对南海环流及中小尺度的冷暖涡旋的特征进行了讨论，得到以下几点：

(1) 南海东北部环流最重要特征是黑潮有一个分支入侵南海，但流量不大，其影响最西可至 117°E，最南可达 18°N. 这个分支作反气旋式弯曲通过巴士海峡流向台湾以南海域，这表明黑潮分支没有入侵南海内部.

(2) 南海北部海区主要受气旋式环流系统所支配，并包含两个气旋涡的核心. 温度分布表明，上层是大范围冷水区，下层冷水区范围缩小，几乎为两个暖水涡所占据.

(3) 南海中部、西南部海区主要受反气旋式环流系统所支配. 主要包括越南东南外海较强反气旋环流(W2)、中沙群岛反气旋环流(W1)、以及菲律宾西侧外海反气旋环流系统(W3). 而

在反气旋环流 W1 与 W2 之间存在一个较强的气旋式涡(C2).

(4) 南海东南部海区主要存在一个范围较大的自西南至东北伸展的气旋式环流系统.

(5) 南海环流存在复杂的多涡结构特征, 且尺度较大的涡含有几个尺度较小的涡. 其上下层环流特征也有些不同.

(6) 除巴士海峡附近外, 总体上南海西部海流和涡旋比东部的强, 即存在西向强化现象.

致谢 本工作为国家重点基础研究发展规划(编号: G1999043802)资助项目.

参 考 文 献

1 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会议(1980)论文集. 北京: 科学出版社, 1982. 117 ~ 145

2 Villanoy C L, Udarbe M J B. The circulation in the eastern South China Sea during May 1993. The Philippine Scientist, 1995, Special Issue: 128 ~ 142

3 方文东, 郭忠信, 黄羽庭. 南海南部海区的环流观测研究. 科学通报, 1997, 42(21): 2264 ~ 2271

4 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

5 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. 北京: 海洋出版社, 1994. 10 ~ 27

6 曾庆存, 李荣凤, 季仲贞, 等. 南海月平均流的计算. 大气科学, 1989, 13(2): 127 ~ 138

7 刘先炳, 苏纪兰. 南海环流的一个约化模式. 海洋与湖沼, 1989, 23(2): 167 ~ 174

8 苏纪兰, 许建平, 蔡树群, 等. 南海的环流和涡旋. 见: 李崇银, 丁一汇主编. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 66 ~ 72

9 Chern C S, Wang J. A numerical study of the summertime flow around the Luzon Strait. J Oceanogr, 1998, 54: 53 ~ 64

10 Chu P C, Chen Y, Lu S. Wind driven South China Sea deep basin warm-core/cold core eddies. J Oceanogr, 1998, 54: 347 ~ 360

11 Takano K, Harashima A, Namba T. A numerical simulation of the circulation in the South China Sea —— Preliminary results. Acta Oceanographica Taiwan, 1998, 37(2): 165 ~ 185

12 Wu C R, Shaw P T, Chao S Y. Seasonal and interannual variations in the velocity field of the South China Sea. J Oceanogr, 1998, 54: 361 ~ 372

13 蔡树群, 王文质. 南海冬、夏季环流的三维数值模拟. 海洋学报, 1999, 21(2): 27 ~ 33

14 Yuan Y, Su J, Pan Z. Volume and heat transports of the Kuroshio in the East China Sea in 1989. La Mer, 1992, 30: 251 ~ 262

15 Yuan Y, Kaneko A, Su J, et al. The Kuroshio east of Taiwan and in the East China Sea and the currents east of Ryukyu Islands during early summer of 1996. J Oceanogr, 1998, 54: 217 ~ 226.

16 Fiadeiro M E, Veronis G. On the determination of absolute velocities in the ocean. Journal of Marine Research, 1982, 40(Suppl): 159 ~ 182

17 袁耀初, 刘勇刚, 苏纪兰, 等. 1997 年冬季台湾岛以东与东海黑潮. 见: 中国海洋学文集(12). 北京: 海洋出版社, 2000. 11 ~ 20

18 管秉贤. 南海暖流研究回顾. 海洋与湖沼, 1998, 29(3): 322 ~ 329

(1999-09-22 收稿, 2000-02-23 收修改稿)