

## 2000 年 8 月南海中部与南部海洋温、盐与环流特征\*

王东晓 陈 举 陈荣裕

朱伯承<sup>†</sup> 郭小刚<sup>††</sup> 许金电<sup>††</sup> 吴日升<sup>††</sup>

(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)

<sup>†</sup>(Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943)<sup>††</sup>(国家海洋局第三海洋研究所 厦门 361005)

**提要** 根据 2000 年 8—9 月份南海中部与南部航次的温、盐资料,采用 P-矢量诊断方法,结合 ADCP 测流资料和同期伪风应力资料以及 TOPEX/Poseidon 高度计资料,研究了 2000 年夏季风持续强迫之后南海大尺度环流与中尺度涡旋的空间结构。结果表明,南海夏季温度和盐度水平分布随深度有显著的变化;中层(250—400m 左右)温、盐水平分布与其它各层的温度和盐度分布相比有很大的差异。用诊断方法计算得到的环流场与用 TOPEX/Poseidon 海面高度计资料计算得到的地转流场比较一致,即流场内部有多个中尺度的涡旋,主要有越南东南外海反气旋涡、中沙群岛东南反气旋涡以及南沙群岛东北角的气旋涡等,这说明南海中部与南部盛夏环流具有较强的地转分量和显著的多涡结构,并且这些中尺度涡在垂向上存在速度场的切变。

**关键词** 盛夏环流, P-矢量方法, 中尺度涡, 越南离岸急流, 南海

**中图分类号** P731.1

南海环流的结构及其演变规律是国内外学者对南海海洋学研究的核心问题之一。Wyrki(1961)根据船舶漂移资料和风资料绘出了南海的表层海流,给出了南海表层环流的季风漂流形态;徐锡祯等(1982)利用多年历史温、盐资料计算了南海 50m 层和 500m 层上的地转流场;仇德忠(1982)根据考察资料给出了南海中部海域的密度流分布;黄企洲(1994)根据 1984—1990 年的 CTD 资料给出了南沙群岛海区的海流图;方文东等(1997)给出了南海南部冬夏季的环流形势图。这些结果揭示南海局部海域环流的不同结构。许建平等(2001)利用 1998 年南海季风试验(South China Sea Monsoon Experiment, 下简称 SCSMEX)期间观测得到的资料,揭示了 1998 年夏季风爆发前后的水文学特征。Yang 等(2002)对南海环流进行了较成功的数值模拟,给出了夏季平均环流场的三维结构。

值得指出的是,目前对夏季风建立后南海夏季稳定的季风性流场的认识还很不充分,对盛夏南海

全区环流的水文定量分析和定性描述的研究还比较少(Fang *et al.*, 1998; Hu *et al.*, 2000)。根据 1998 年 7 月以前的 SCSMEX 水文观测资料不足以获取夏季风稳定后的海流形态,加之南海夏季风的建立在 6 月份(Yan, 1997),而理论研究表明,南海对季风响应的调整时间在两个月左右(Liu *et al.*, 2001b; Liu *et al.*, 2001c; 王卫强等, 2002),所以认识南海夏季环流稳定结构的理想时间一般应该选取 8 月份。

## 1 6—8 月卫星遥感得到的环流演化

为了分析 2000 年盛夏南海环流与涡旋结构,有必要对 6—8 月环流演变进行简要分析。根据由 TOPEX/Poseidon 与 ERS (Earth Resource Satellite) 合成的海面高度距平场(Sea Surface Height Anomaly, 下简称 SSHA)资料,计算了地转流速度,此处以越南中部沿岸的“越南离岸急流”的演化与发展过程为例来说明夏季 6—8 月南海环流的调整。李立等(2002)分析了 TOPEX/Poseidon 南海 SSHA 的平均周年变化,认为夏季(5—7 月)和秋季(8—10 月)海盆内部

\* 国家重点基础研究发展规划项目,1999043806 号;国家高技术研究发展计划项目,2002AA639250 号和国家自然科学基金资助项目,40176006 号。王东晓,研究员, E-mail: dxwang@scsio.ac.cn

收稿日期:2003-07-22,收修改稿日期:2003-12-16

不存在明显封闭的大尺度环流,环流以西南-东北流向的季风急流为主要特征。

图1给出了2000年6—8月中旬(都插值到每月15日)的地转流分布。从6月15日的诊断地转流分布图(图1a)中可以看出,此时正处于夏季风爆发后的调整阶段。在越南东南部沿岸12.5°N有上升流区以及与之对应的气旋式环流的“雏形”,在其东侧紧靠着它的是一个直径约为2个经度的反气旋涡旋;南侧为一个较弱的反气旋涡。在12°N纬度带附近,还存在一支西向的海流。

到7月15日(图1b),越南沿岸12.5°N的气旋涡增强,其东侧的反气旋涡旋北移到14°N附近海

域,而其南侧的反气旋涡旋向东北方向移动。此时,在14°N,海盆西侧已经有离岸的流动在发展。在这个纬度带,由于涡旋的发展,也已经有一支向东的海流“雏形”存在。

8月15日(图1c)的地转流流场上,位于越南近岸12°N附近南、北的两个反气旋涡旋强度进一步发展增强,使得在越南东南部沿岸10°N附近出现一支很强的东北向流动,这支海流在110°E,12°N处转为向东运动;在12°N到13°N纬度带可以看到一支很强的东向离岸海流,一直到116°E都维持比较大的流速。这支海流就是越南离岸急流。该流的出现是南海盛夏环流趋于稳定的一种标志。

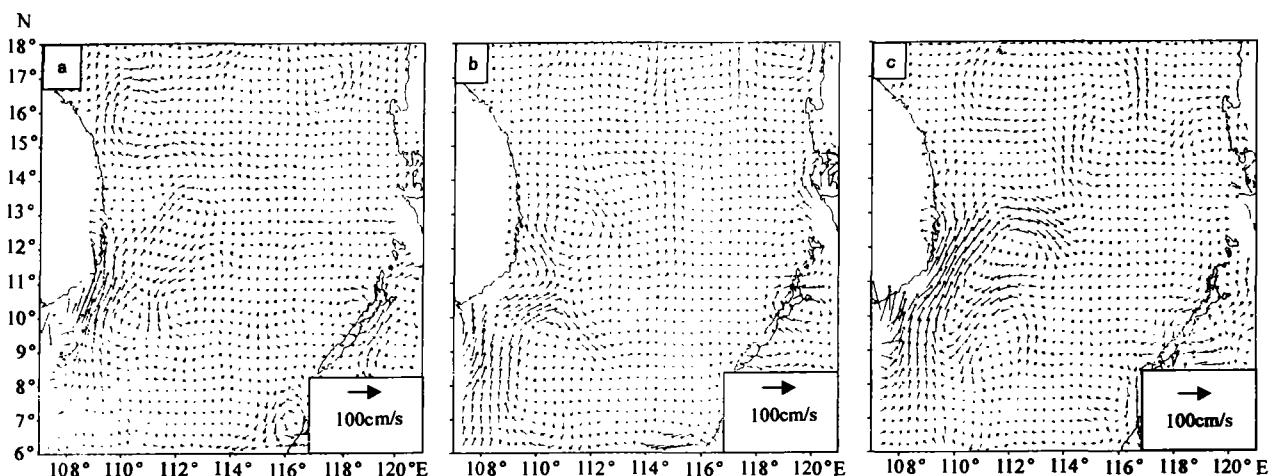


图1 TOPEX/Poseidon 与 ERS 合成遥感海面高度场得到的地转流场

a) 6月15日, b) 7月15日, c) 8月15日

Fig.1 Geostrophic velocity derived from the TOPEX/Poseidon and ERS merged SSHA

a) June 15, b) July 15, c) August 15

## 2 2000年夏季的温度和盐度分布

2000年夏季南海航次调查站位布设的目的在于揭示南海中部与南部环流的特征(图2)。图3为经过预处理<sup>1)</sup>以后的温、盐点聚图(某些站点温、盐CTD仪器盐度观测存在误差,预处理主要在于修正温、盐点聚图中的系统性偏差)。由图3可以看出本次观测的资料是可信的。作者根据相应层次上的资料,采用Kriging方法插值到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率的计算网格点上,获得温度和盐度网格资料。

### 2.1 温度和盐度平面分布

分别选取50m、250m、500m以及800m四个层次的温度和盐度来比较不同层次温、盐分布。结果表明,南海中部和南部的温度和盐度水平分布形态随深度变化比较显著。

50m层的盐度和温度分布显示(图4a和图5a):13°N以北南海中部温度呈东高西低分布,盐度呈西北高西南低的势态,最高温度( $>29^\circ\text{C}$ )和最低盐度( $<33.0$ )出现在越南东南部海域,暗示越南东南外海存在暖性涡旋;最低温度( $<23^\circ\text{C}$ )和最高盐度( $>34.2$ )均出现在西沙群岛及其西南附近海域。在

1) 许金电,李立,郭小刚,2001. 2000年夏季南海《向阳红14》航次CTD数据处理与校正技术报告. 国家海洋局第三海洋研究所,厦门

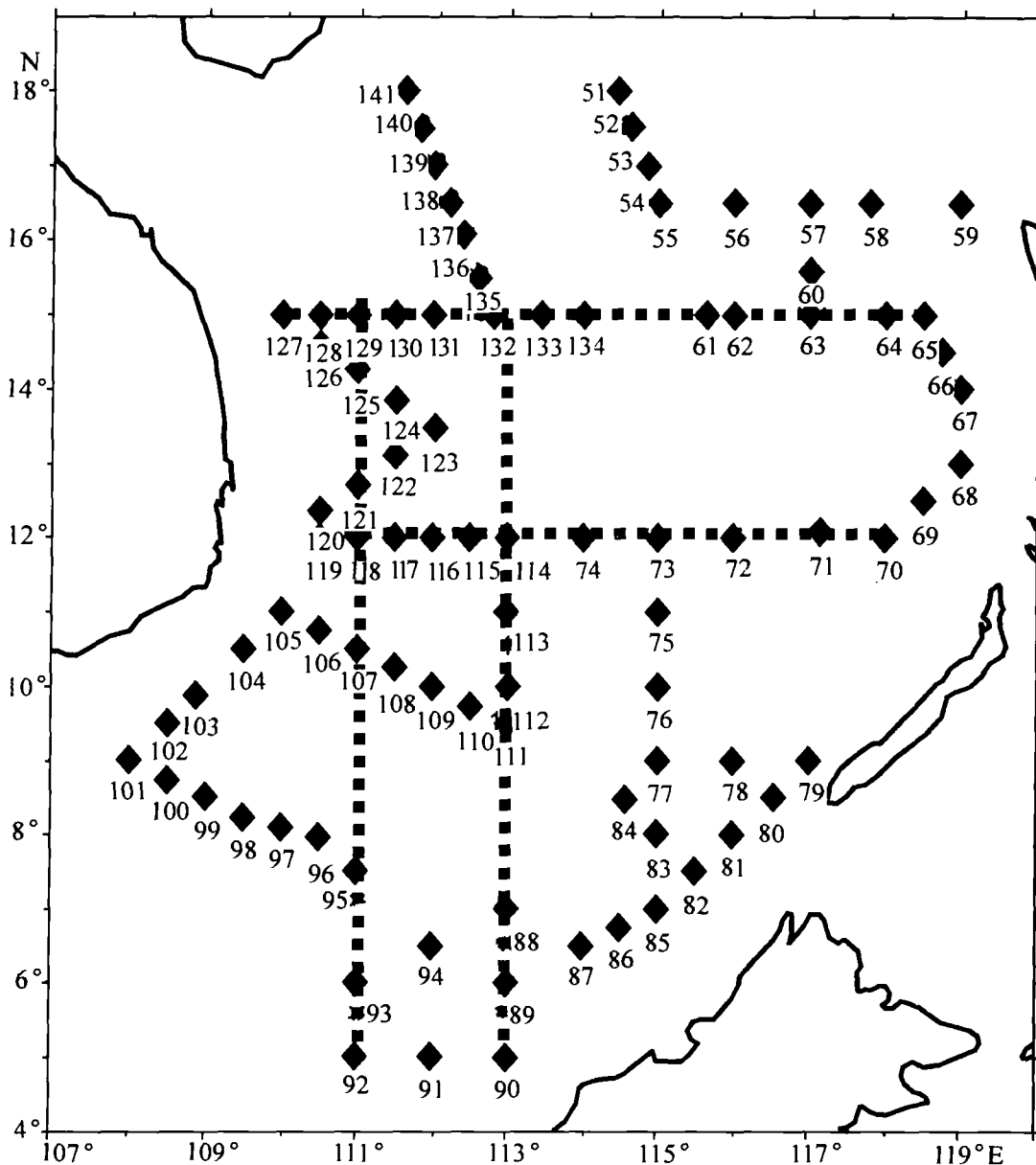


图 2 观测站分布以及断面设置(粗虚线代表分析的主要断面)

Fig.2 CTD-casting stations and location of selected sections (Bold dashed line is for the selected section)

越南东部和东南部外海存在一个东北西南走向的高温 (> 28℃) 低盐 (< 33.4) 区, 中心位于 10°—12°N, 110°—113°E。在越南中部海岸附近, 还可以发现一个低温高盐水体呈楔形向南向东延伸, 与其南侧高温低盐水团形成了明显的温度锋和盐度锋。

与 1998 年 6 月份季风刚爆发时温度场处于瞬变调整状态 (许建平等, 2001) 相比, 2000 年 8 月份南海北部 50m 层冷水 (< 20℃) 覆盖区域明显减小, 菲律宾西侧的暖水区域也显著扩大。在南海东南部和西南部均为 21℃ 暖水控制, 表明夏季风持续强迫

后, 整个南海海盆的海温呈升高趋势, 温、盐分布得到进一步调整。从 50m 层温、盐结构可知, 越南北部与南部沿岸水团并非均匀一致。由平行于岸的风驱动而产生的离岸 Ekman 流及由此而产生的上升流在越南北部及南部沿岸都有存在。12°N 以南的沿岸暖水团的存在预示着强大的西边界流及其外侧的反气旋涡的可能存在, 这两种系统都能够使海表面升温, 从而在 12°N 以南沿岸区域可能克服上升流导致的冷却效应。

50m 层的盐度和温度分布 (图 4b 和图 5b) 与

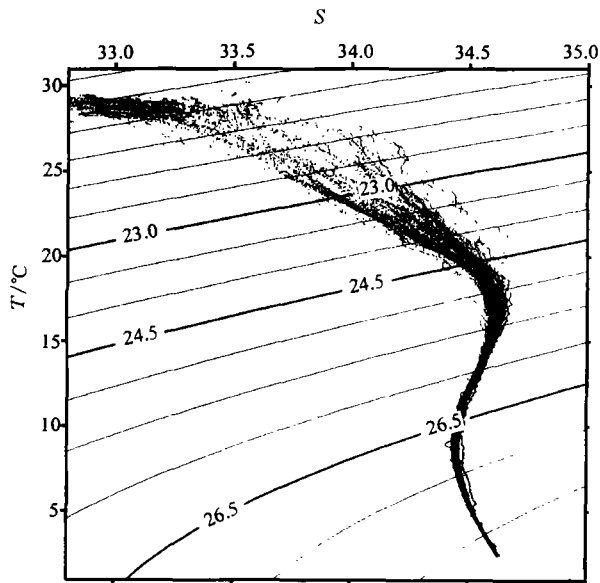


图3 温、盐点聚图

Fig.3 T-S scatter diagram superposed with isopycnic values

图中等值线为位势密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

250m层存在明显的区别。该层的高温区域和高盐区域大致重合,低温区域和低盐区域的分布也比较一致,这种温、盐特征分布一直延续到接近400m深度层附近(图略)。在越南东部以及东南部海域存在一个延伸到中沙群岛以东海域的东北西南走向的具有双中心结构的高温( $> 13.8^\circ\text{C}$ )高盐( $> 34.56$ )水团。

500m层的温度分布(图5c)与250m层的温度分布相比有所变化,越南东南外海的高温区仍然得以维持,但强度明显减弱,中心向越南近岸偏移。但是盐度分布(图4c)则有很大的变化,整层盐度分布呈现出南高北低的特征,南、北两部分的盐度分布有一条比较明显的分界线,其位置在越南急流偏南一侧。

除中沙群岛东北部宪法暗沙邻近海域以外,800m层上的盐度和温度分布(图4d和图5d)总体呈现出相反分布的特性(即高温区与低盐区分布比较一致,反之亦然)。整层温、盐分布比较均一;水团特性单一,主要是南海深层水。温度分布与季风刚刚爆发时的6月的温度整体分布特征相近,由此可以推断,由于夏季风的转换而导致的温、盐结构调整在南海的影响主要集中在南海中上层,对深层海洋的影响比较有限。

温、盐分布特征表明,夏季风盛行期间南海温度和盐度水平分布形态随深度变化比较显著,反映了南海上层海洋季节性调整比较显著。

## 2.2 温度和盐度断面分布

800m以浅的温、盐断面分布(图6和图7)表明,温度和盐度沿剖面的分布趋势比较一致。总体而言,温、盐等值线在海盆的西侧较海盆东侧浅约15—20m,海盆的北部比南部浅约20—30m。但是这种分布趋势在整个海盆内也是不同的,南海北部的温、盐等值线东西向倾斜远较南部的明显,西侧的较东侧的明显。这一分布趋势与在夏季风驱动下,南海表层高温低盐海水向东运输和向北运动的趋势是比较一致的,也与气候场的分布特征是一致的(王东晓等,2001)。

在季节性温跃层下部(150m以下),温、盐等值线有明显的下凸区(图6和图7),这种由于表层Ekman抽吸导致的下凸作用与次表层盐度极值所处的特定层次(150—250m),使得南海内区季节性温跃层以下250—400m附近水层内出现高温区域与高盐区域相互重叠的现象。

从盐度剖面(图6)上可以看出,中层水结构(400—700m)在经向剖面上呈楔形状,这主要是由于南海海盆内不能生成中层水,因为南海北部冬季最低温度也仍高于中层水的温度值(由图7可知小于 $15^\circ\text{C}$ ),南海的中层水只能由西北太平洋的中层水经由巴士海峡入侵而来,图6暗示了这股入侵中层水自北向南推进的势态。考虑到本航次500m以下深层的盐度资料校正所带来的不确定性,上述现象需要有其它航次资料加以佐证。

从同期伪风应力场(图8)可以看出,在南海海盆区存在一个东北西南走向的大风轴线,同时还可以发现在 $14^\circ\text{N}$ 以南的风应力较北部海域强。由上述分析可知作者观测的温、盐跃层的特征与受季风影响下的Ekman输运和上层辐合有很大的关系(Liu *et al.*, 2001a, b)。

## 3 水平环流场的温、盐诊断

P-矢量方法是对 $\beta$ -螺旋法的改进,该方法能够求出各层的绝对速度(具体方法请参考Chu, 1995)。本文的反演诊断计算在垂直方向上分30层(表1),水平网格分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,计算区域是此次大面调查的实际采样区域。

以往的研究结果表明,南海夏季环流大致可以分成南北两个相对独立的环流子系统,在南海中部和北部主要受到一个弱的气旋式涡旋控制,在南部主要受到一个反气旋涡旋控制(黄企洲, 1994; 方文东等, 1997; 郭忠信等, 2000)。

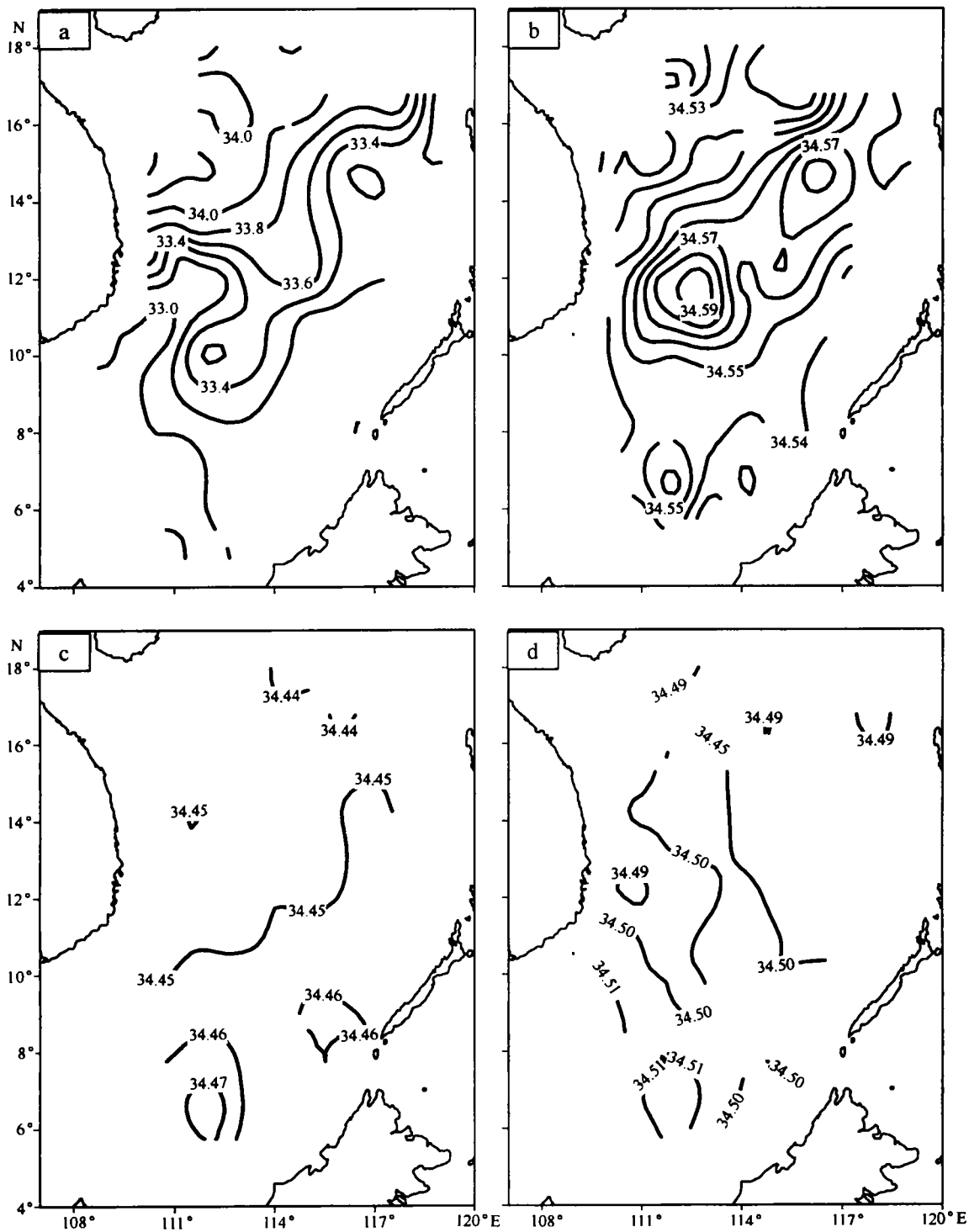


图 4 盐度水平分布

a) 50m 层; b) 250m 层; c) 500m 层; d) 800m 层

Fig.4 Horizontal distribution of salinity

a) 50m; b) 250m; c) 500m; d) 800m

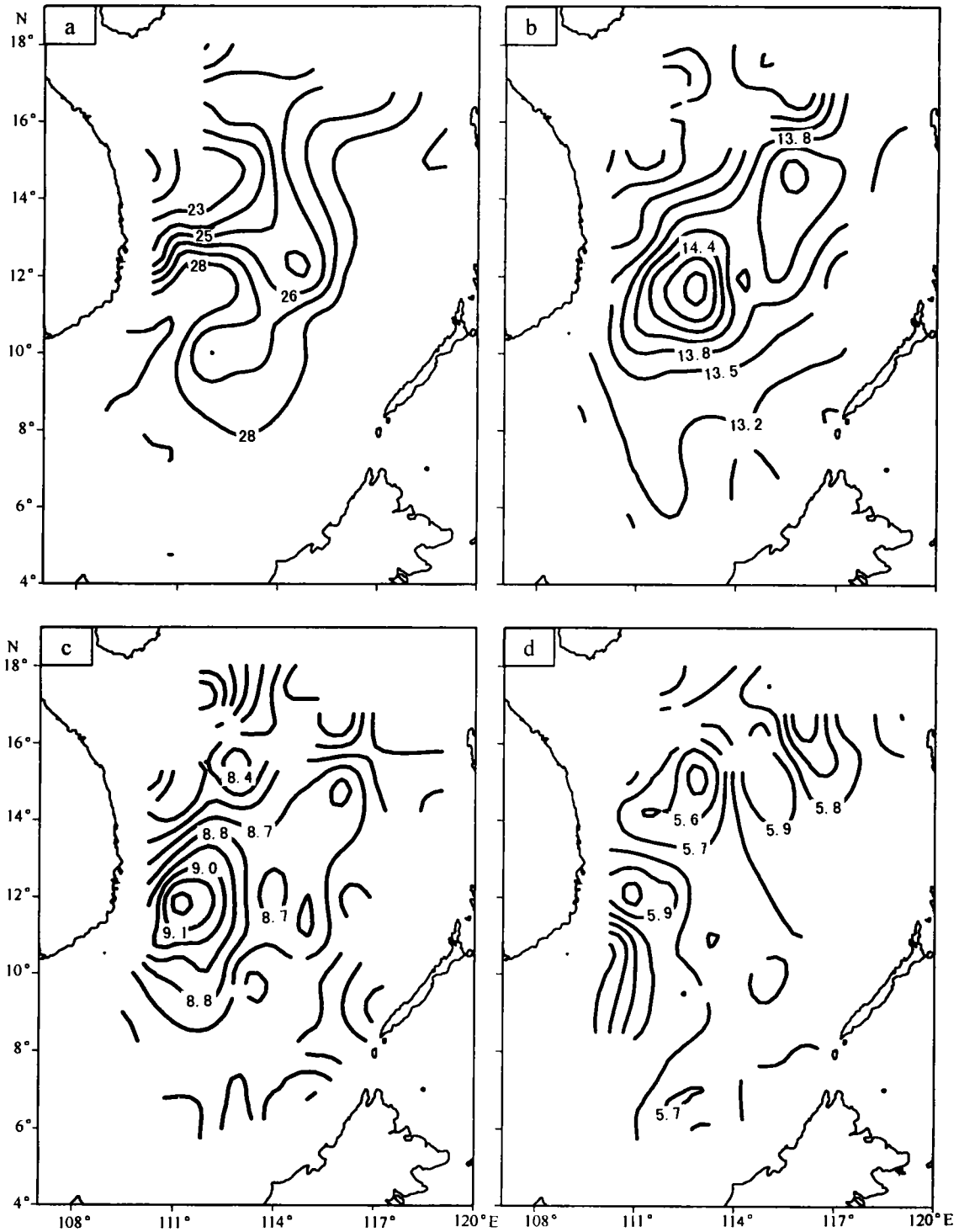


图5 温度(°C)水平分布

a) 50m层;b) 250m层;c) 500m层;d) 800m层

Fig.5 Horizontal distribution of temperature (°C)

a) 50m;b) 250m;c) 500m;d) 800m

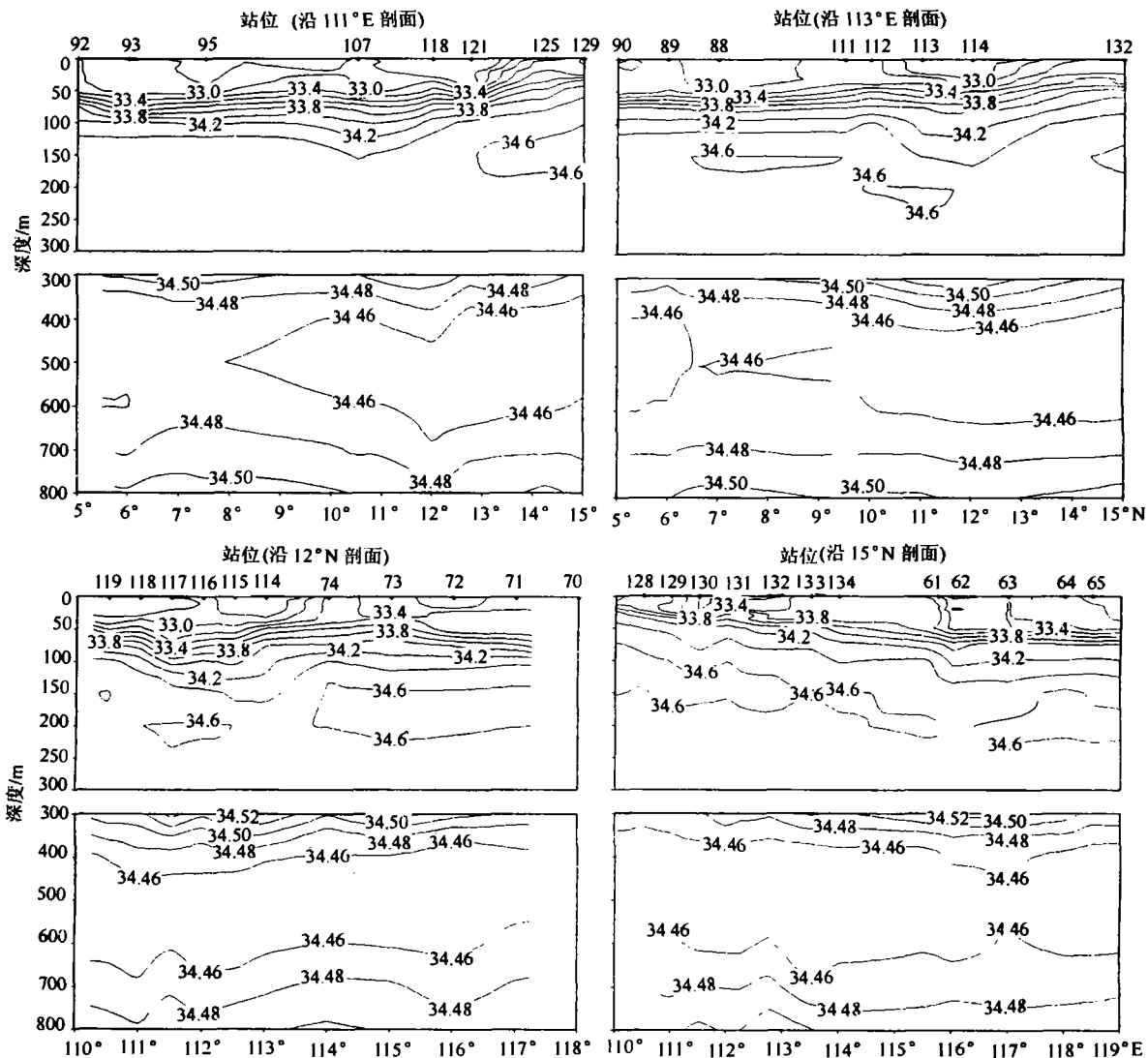


图 6 盐度沿断面 800m 以浅的分布(等值线间隔: < 300m, S 0.2; > 300m, S 0.02)

a) 111°E 剖面; b) 113°E 剖面; c) 12°N 剖面; d) 15°N 剖面

Fig.6 Salinity profiles at different vertical sections above 800m level

(contour interval: < 300m, S 0.2; > 300m, S 0.02)

a) 111°E section; b) 113°E section; c) 12°N section; d) 15°N section

表 1 诊断计算的垂直分层(单位: m)

Tab.1 The vertical computed discrete(unit: meter)

层次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
深度 (m)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	75
层次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
深度 (m)	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600
层次	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
深度 (m)	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1550

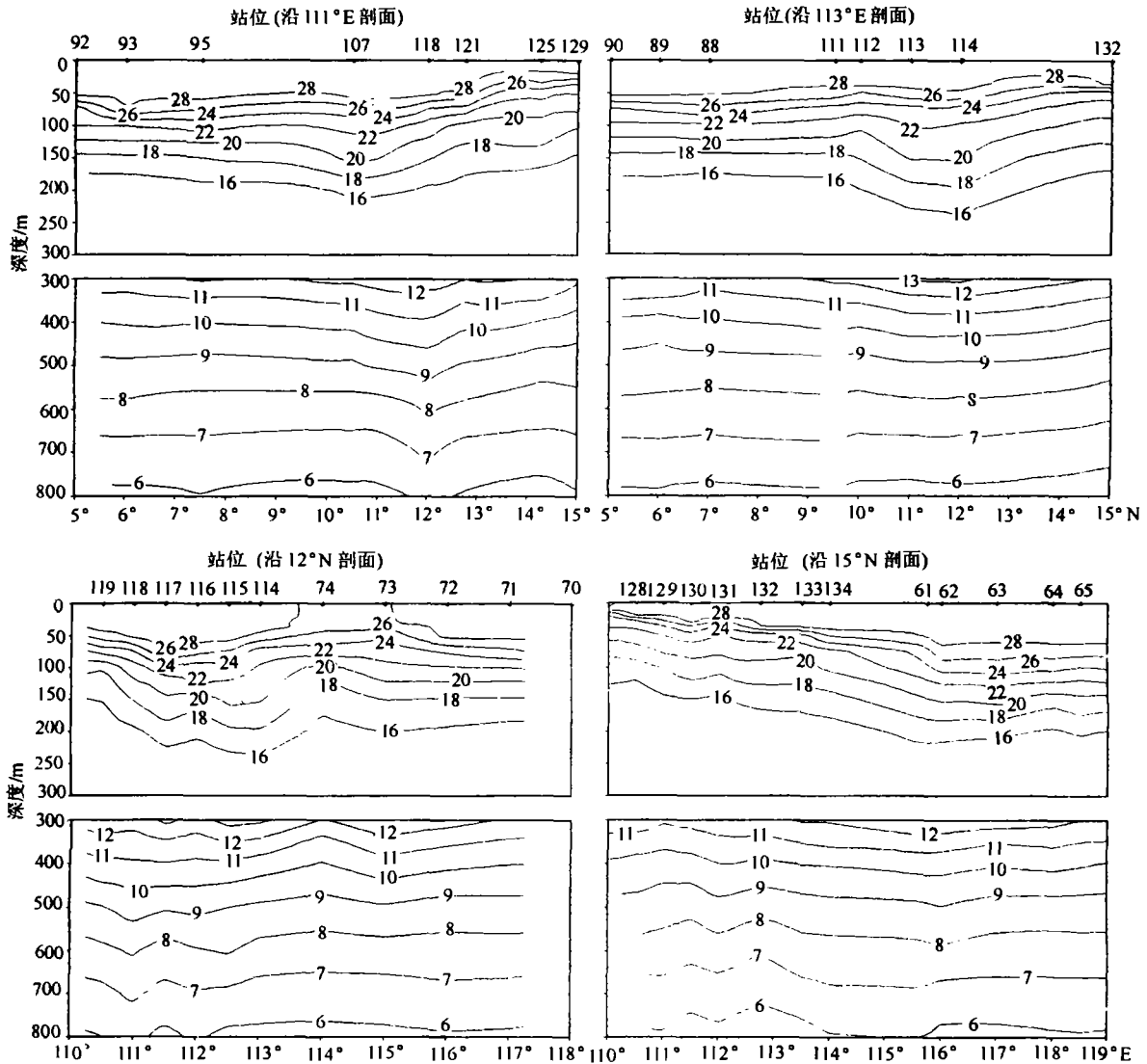


图7 温度(°C)沿断面800m以浅的分布(等值线间隔: < 300m 2°C, > 300m 1°C)

Fig.7 Temperature (°C) profiles at different vertical sections above 800m level  
(contour interval 2°C below the level of 300m, 1°C above 300m)

图9各层一致表明,在2000年8月,南海南部的环流在各层都未能在整个区域体现出海盆尺度反气旋涡旋这一气候平均的夏季环流特征。这一环流结构类似于仇德忠(1982)在南海中西部海域的结果,即西南季风期间,在南海中部,西侧为反气旋环流(SSHA高值区)。但是在南海中部海域的中央与东侧,环流形态与仇德忠所给出的结果有差异:在2000年8月,该区域为一个弱的反气旋环流控制,而在仇德忠的结果中为一气旋式环流结构。在12°—13°N之间的越南沿岸,有一支很强的海流向东运动,与徐锡祯等(1982)中所描述的越南离岸急流比较一致。与许建平等人(2001)的结果相比,可以

发现越南离岸急流在1998年六七月份并不明显或者说还没有发展起来,因此可以将越南离岸急流是否形成作为判断南海夏季环流是否充分发展的重要参考标准。南海南部环流形势与方文东等(1997)的工作基本类似,但也有一定差异——加里曼丹岛西侧的北向流在方文东等人的结果中未涉及,因此可以估计南海南部环流除了有很强的季节变化以外,还有很强的年际变化特征。由图9还可以发现,在海盆西侧的流速比海盆东侧的流速强,说明存在西向强化现象。

从图9a可以看出,在越南东南部外海海域(9°—13°N, 113.5°E以西)存在一个很强的反气旋涡



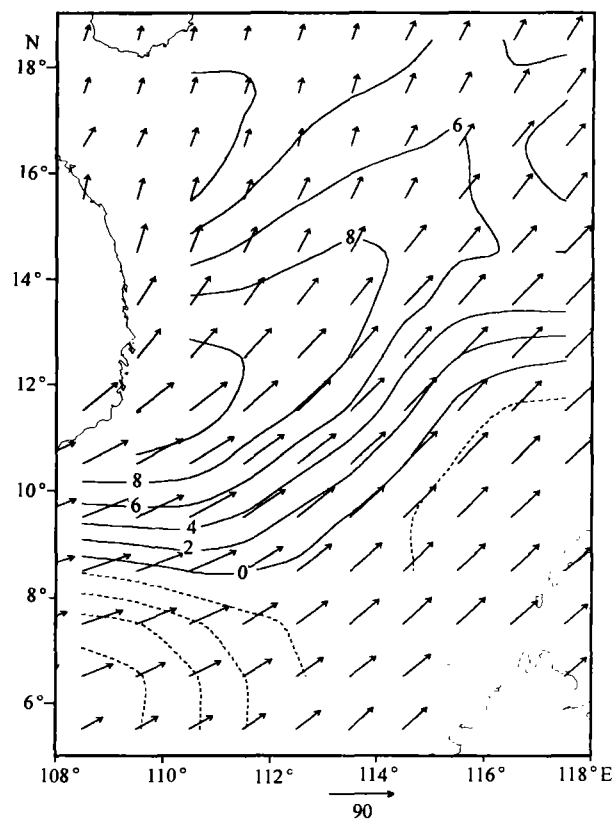


图8 2000年8月南海FSU伪风应力场及风应力旋度场分布  
伪风应力单位:  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ; 等值线的值为旋度  $\times 10^5$ , 虚线为负

Fig.8 Pseudo-wind stress (vector) and wind stress curl (contours)

(Unit of the pseudo-wind stress:  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ; the vorticity:  $\times E + 05$ , with negative is dashed)

旋,其流速达到  $50\text{cm/s}$ 。在反气旋涡旋的东侧 ( $114^\circ\text{E}, 12^\circ\text{N}$ )附近海域海有一个中尺度的气旋型涡旋,对应的温度和盐度场分布有越南东南外海海域的高温低盐区及其东侧伴随的低温高盐区,这都能在温、盐场得到很好的体现。在南海南部的中央海盆有一支流速约为  $10\text{cm/s}$ 的南向流动,这一支流动与方文东等(1997)提出的南沙逆风流比较接近,同时在徐锡祯等(1982)、Fang等(1998)以及 Wyrki (1961)的工作中也有报道。在加里曼丹岛西侧有一支北向的流动,该海流在徐锡祯(1982)、Wyrki (1961)的工作中也有体现。ADCP的实测海流场也有比较一致的环流特征:例如越南东南外海海域的反气旋涡、中沙群岛东南海域的反气旋涡以及加里曼丹岛西侧海槽区上的东北向流都有很好的体现(图10给出了100m层上ADCP观测流场分布)。

从250m层流场图(图9b)可以看出,  $8^\circ-15^\circ\text{N}$

之间的海域被一个大的反气旋涡旋系统控制,该反气旋涡旋内部又包含两个中尺度涡旋,其中越南东南外海海域的反气旋涡依然还相当强,其流速仍可达  $10\text{cm/s}$ ,而中沙群岛南部及东南部海域的反气旋涡旋流速约为  $5\text{cm/s}$ 。此外,在南沙群岛西南角的陆坡区还有一个双涡结构;在巴拉巴克海峡以西的海槽区还存在一气旋式的流场结构。而在中沙群岛东北部海域的气旋式流场结构,由于受到观测区域的限制未能得到完整的体现。南海中部和北部的环流形态与仇德忠(1982)所提出的密度流环流形态有很大的差异,其中越南反气旋涡比较偏南,而中部和东部的则同样为一个反气旋式涡旋所控制,且其主轴方向大致沿南北走向。

500m层(图9c)的环流场比较复杂,越南离岸急流已经消失不见。在海盆的南部以及加里曼丹岛西侧出现东北向的海流,这对应了Chu等(2000)根据历史资料计算的南海  $26.2\sigma_{\theta}$  等位势密度面上气候态的地转流流场。越南东南外海的反气旋涡旋覆盖范围大大缩小,结构也比较松散,表明该反气旋涡旋结构是比较“浅薄”的,其影响深度比较有限,这可能是由于处于上、下层环流切变带的原因,整层中尺度涡旋发育,具有典型的多涡结构,但是强度较250m层弱,流速除越南东南部海域达到  $7-8\text{cm/s}$ 外,其余海区均在  $2-3\text{cm/s}$ 左右,具体表现为:  $12^\circ\text{N}$ 附近纬度带从西到东存在一个由两个反气旋涡和一个气旋涡组成的多涡结构;中沙群岛以北和以东海域以及西沙群岛与中沙群岛之间偏南的海域各有一个范围较小的气旋式涡旋。图9c在  $15^\circ\text{N}$ 以南区域的流场结构与徐锡祯等(1982)的比较一致,但在  $15^\circ\text{N}$ 以北则有一定差异,估计与所使用的资料有关。

从800m层(图9d)上的流场分布图可以发现,越南东南部海域中上层的反气旋涡在本层已经消失,取而代之的是一个气旋式涡旋。由此可见,越南外海的反气旋涡旋,是一个典型的斜压性涡旋。中沙群岛东南海域原500m层上的反气旋涡旋在本层也已转化成为弱气旋式涡旋,其东北部500m以上出现气旋式涡旋的强度也大大减弱。在巴拉巴克海峡西侧的南海海槽区存在一个弱的反气旋趋势环流。由此可以看出各主要涡旋的旋转方向与中上层海洋相比强度大大减弱,甚至其旋转方向也发生逆转(值得注意的是,由于盐度深层资料校正误差在一定程度上会影响深层涡旋的位置和范围)。总体而言,整个海域流场表现为一弱的具有气旋式趋势的环流。

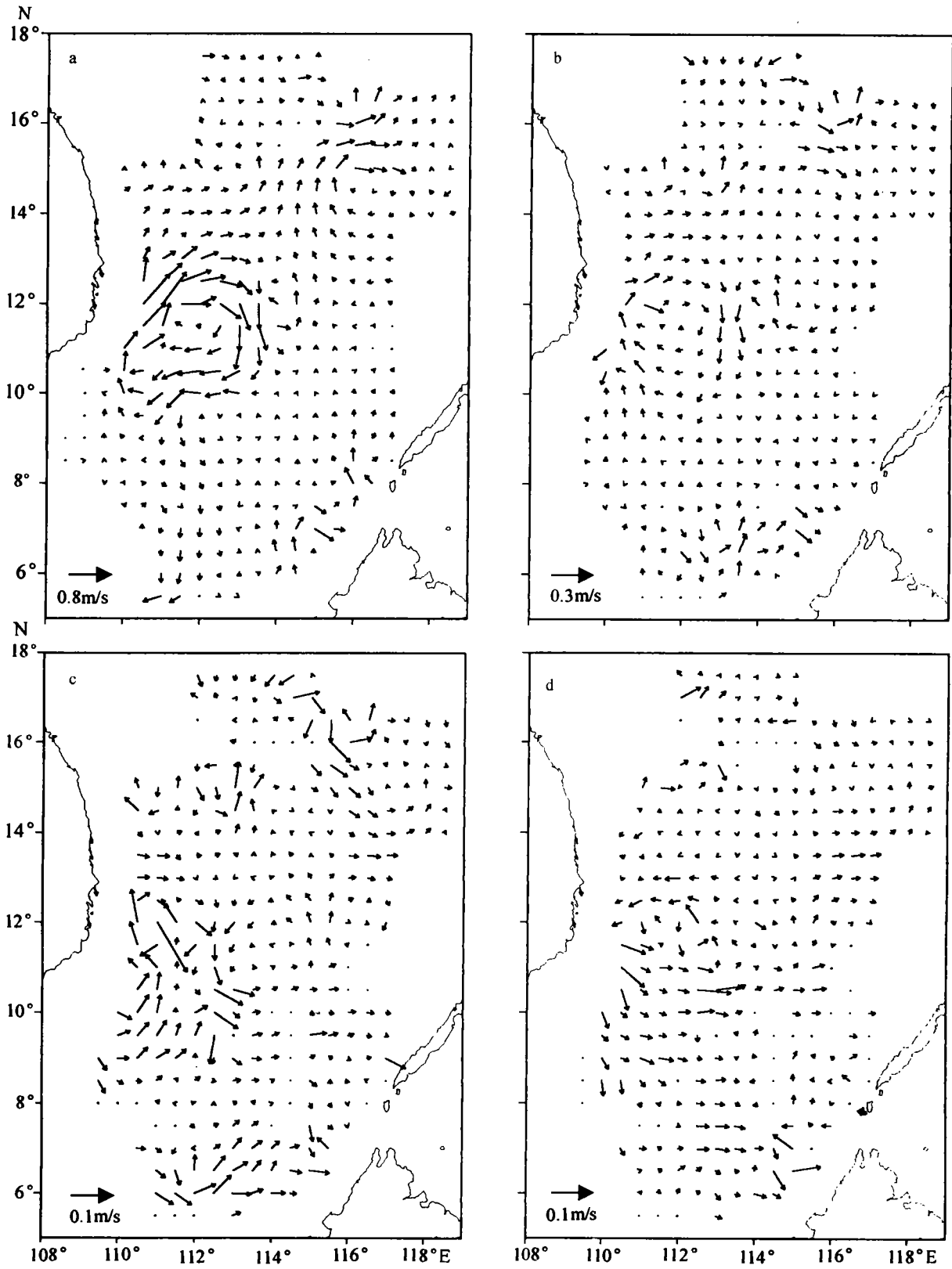


图9 P-矢量诊断的水平速度(单位:m/s)

a) 50m层;b) 250m层;c) 500m层;d) 800m层

Fig.9 Horizontal velocity computed by P-vector method (unit:m/s)

a) 50m;b) 250m;c) 500m;d) 800m

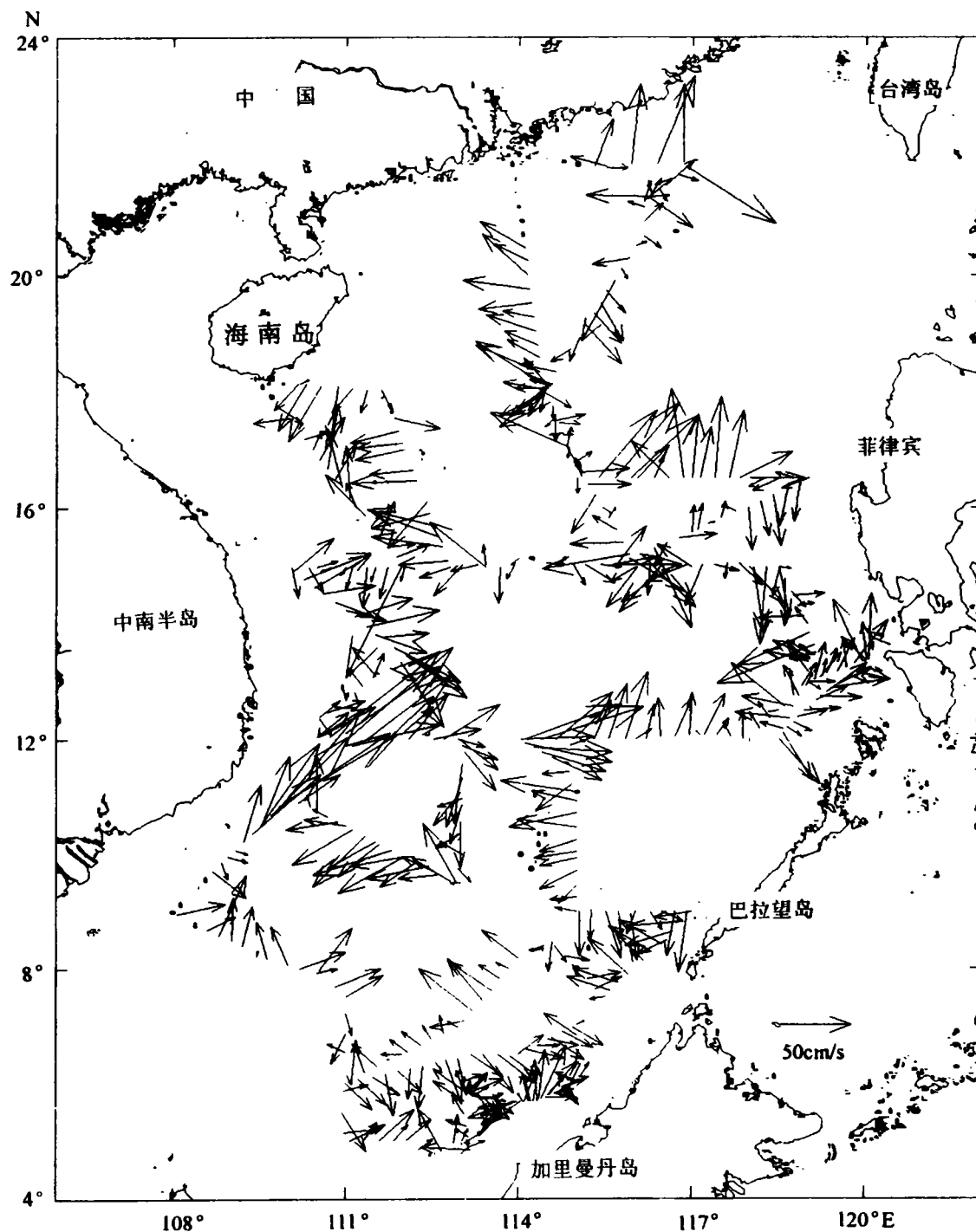


图 10 100m 层的 ADCP 流速分布

Fig.10 ADCP-measured velocity at the level of 100meter

由此可见,南海稳定的夏季环流应以越南离岸急流以及越南东南反气旋涡的建立为基本标志。同时本研究中还发现,越南反气旋涡旋是比较“浅薄”的,其下层相应的旋转方向发生逆转,为一个典型的斜压性涡旋。

#### 4 讨论与结论

在夏季风持续强迫下,南海上层环流体现出显著的季风性海洋环流特征,经充分调整后的温度和盐度水平分布形态随深度变化比较显著,表层(以50m为代表)、次表层(250m)和深层水的温度和盐度

水平分布型态有明显差异。在 250—400m 深度范围内,研究海域中部存在高温、高盐水体,明显有别于其余各层的高温低盐或低温高盐分布特征。南海夏季温、盐分布特征表明南海夏季风及其所具有的风应力旋度对南海上层海洋的温、盐结构的形成具有重要的影响。

越南离岸急流、越南东南外海的反气旋涡旋结构是夏季南海流场的主要标志。P-矢量方法诊断得到的 2000 年盛夏南海地转流与 TOPEX/Poseidon 海面高度导出的地转流场比较表明,南海上层环流中地转流分量占有很大的比重。南海上、下层环流形态差异显著,上层环流在整个海盆内没有明显的封闭性趋势。由于受地形以及风应力驱动等因素的影响,2000 年南海盛夏环流具有显著的多涡结构。

**致谢** 高度计资料来自法国 AVISO(Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data);风应力资料由佛罗里达州立大学(Florida State University)提供。

### 参 考 文 献

- 方文东,郭忠信,黄羽庭,1997. 南海南部海区的环流观测研究. 科学通报,42(21):2264—2271
- 仇德忠,1982. 南海中部海区的密度流. 南海海区综合调查报告(一). 北京:科学出版社,129—139
- 王东晓,杜 岩,施 平,2001. 冬季南海温跃层通风的证据. 科学通报,46(9):758—762
- 王卫强,王东晓,施 平等,2002. 南海季风性海流的建立与调整. 中国科学(D辑), 32(12): 995—1002
- 李 立,许金电,靖春生等,2002. 南海海面高度、动力地形和环流的周年变化——TOPEX/Poseidon 卫星测高应用研究. 中国科学(D辑),32(12):978—986
- 许建平,李金洪,刘增宏等,2001. 1998 年夏季风爆发前后南海海洋水文特征及其变异. 见:薛惠洁,柴扉,许建平等编. 中国海洋学文集. 北京:海洋出版社, 13,197—210
- 郭忠信,方文东,陈福培等,2000. 南沙群岛海域的环流及主要海流——1993—1994 南沙综合科学考察的一个结果. 南海海洋科学集刊(13). 北京:科学出版社,1—25
- 徐锡祯,邱 章,陈惠昌,1982. 南海水平环流概述. 见:中国海洋湖沼学会编. 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,117—145
- 黄企洲,1994. 南沙群岛海区的海流. 见:中国科学院南沙群岛综合科学考察队编. 南沙群岛海区物理海洋学研究论文集 I. 北京:海洋出版社,10—27
- Chu P-C, 1995. P-vector method for determining absolute velocity from hydrographic data. Marine Tech Soc J, 29(3), 3—14
- Chu P-C, Li R-F, 2000. South China Sea isopycnal-surface circulation. J Phys Oceanogr, 30: 2419—2438
- Fang G H, Fang W, Fang Y *et al*, 1998. A survey of studies on the South China Sea Upper Ocean Circulation. Acta Oceanogr Taiwanica, 37(1): 1—16
- Hu J, Kawamura H, Hong H *et al*, 2000. A Review on the Currents in the South China Sea: Seasonal Circulation, South China Sea Warm Current and Kuroshio Intrusion. J Oceanography, 56(6): 607—624
- Liu Q, Jia Y, Wang X *et al*, 2001a. On the annual cycle characteristics of the sea surface height in South China Sea. Advances Atmosphere Science, 18:613—622
- Liu Q, Jia Y, Liu P *et al*, 2001b. Seasonal and intra seasonal thermocline variability in the central South China Sea. Geophys Res Lett, 28(23): 4467—4470
- Liu Z, Yang H, Liu Q, 2001c. Regional dynamics of seasonal variability in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 31: 272—284
- Wyrtki K, 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian waters. NAGA Rep 2. Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, CA, USA, 195
- Yan J, 1997. Observational study on the onset of the South China Sea southwest monsoon. Advances in Atmospheric Sciences, 14(2): 277—287
- Yang H, Liu Q, Liu Z *et al*, 2002. A general circulation model study of the dynamics of the upper ocean circulation of the South China Sea. J Geophys Res, 107(c7):1029—1043

## HYDROGRAPHIC AND CIRCULATION CHARACTERISTICS IN MIDDLE AND SOUTHERN SOUTH CHINA SEA IN SUMMER, 2000

WANG Dong-Xiao, CHEN Ju, CHEN Rong-Yu, ZHU Bo-Cheng<sup>†</sup>, GUO Xiao-Gang<sup>\*\*</sup>, XU Jin-Dian<sup>\*\*</sup>, WU Ri-Sheng<sup>\*\*</sup>

(*Key Laboratory of Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology,*

*Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301*)

<sup>†</sup>(*Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943*)

<sup>\*\*</sup>(*Third Institute of Oceanology, State Oceanic Administration, Xiamen, 361005*)

**Abstract** This paper analyzed hydrological data in the South China Sea (SCS) collected in marine investigation cruises during mid-summer 2000. Data from in-situ observations showed remarkable thermohaline characteristics that varied with depth. In the intermediate layer. High salinity and high temperature were observed, while at the other lower and upper layers salinity and temperature were found to compensate each other.

In order to calculate the circulations in different levels. P-vector method was applied to the observed temperature and salinity. The results calculated based on sea surface height coincided with those obtained from the TOPEX/Poseidon satellite. During the survey period in the southern SCS, a cyclonic circulatory pattern presented at the lower layer, while an anti-cyclonic circulatory pattern showed in the upper layer. In detail, a multi-eddy structure was found comprising of several meso-scale eddies including anti-cyclonic eddies off the Vietnam coast, near Zhongsha islands and in the NE part of Nansha islands. Vertical shear of velocity occurs in these eddies, especially those off the coast of Vietnam, which are typical examples of baroclinic eddies. The circulation and eddy patterns well reflected the geostrophic effort in the areas.

**Key words** Summer circulation, The South China Sea, P-vector method, Meso-scale eddy, Vietnam offshore jet current