

# 棉兰老岛以东反气旋涡的 Argo 观测研究\*

周慧<sup>1,2</sup>, 许建平<sup>2</sup>, 郭佩芳<sup>1</sup>, 侍茂崇<sup>1</sup>, 刘增宏<sup>2</sup>, 李云芳<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛, 266003;

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 报道了2003年1月至10月期间, 由布放于西北太平洋中的 Argo 剖面浮标捕获的位于棉兰老岛以东海域的反气旋涡。该涡中心位于 8.7°N、127.6°E 附近, 距大陆坡不远, 沿等深线走向呈椭圆形分布。其长轴(NW-SE)约 200km, 短轴(NE-SW)长约 120km。Argo 浮标的漂移轨迹及其在表层及 1500db 层的漂移速度场表明, 该反气旋涡位于温跃层以下, 中层海洋特征。在 1500db 层上, 涡的外围平均切向速度为 11.9—14.0 cm·s<sup>-1</sup>, 旋转周期约为 40d。温、盐度断面分布表明, 该反气旋涡内的温盐结构非常复杂, 可能与源自南、北半球的中层水团在涡旋内交汇并发生变性有关。

**关键词:** 西北太平洋; 棉兰老岛; 反气旋涡; 中层流; Argo 剖面浮标

**中图分类号:** P731      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-5470(2006)06-0008-07

## A study on an anticyclonic eddy east of Mindanao observed by an Argo profiling float

ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, XU Jian-ping<sup>2</sup>, GUO Pei-fang<sup>1</sup>, SHI Mao-chong<sup>1</sup>, LIU Zeng-hong<sup>2</sup>, LI Yun-fang<sup>1</sup>

(1. Institute of Marine Environment, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Key Laboratory of Ocean Dynamic Process and Satellite Oceanography,

Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** An anticyclonic eddy was observed by the Argo profiling float 5900224 which was deployed at 8.7°N, 129.9°E in January 2003 by the China real-time Data Center. Both the trajectory and the parking-depth (1500db) velocity field estimated from the Argo float showed that there was an anticyclonic eddy just east of Mindanao coast. The anticyclonic eddy centered at about 8.7°N, 127.6°E off the continental slope. The eddy was elliptic along the slope with a diameter scale about 180km, and it was stronger during April to July and decayed during August to October in 2003. The tangential velocity of the edge at the parking depth was 11.9—14.0 cm·s<sup>-1</sup> and the rotation period was about 40 days. The results of the Simple Ocean Data Assimilation Version 1.4.3 (SODA V1.4.3) well support the observation by the Argo profiling float. The flow pattern derived from float 5900224 and the results of SODA V1.4.3 indicate that the eddy has an intermediate feature. The water masses inside the eddy are very complicated and variable. The velocity field at the parking depth estimated from float 5900224 bears little resemblance to that at surface.

**Key words:** Northwest Pacific Ocean; Mindanao Island; anticyclonic eddy; intermediate current; Argo profiling float

棉兰老岛是菲律宾群岛中最南端的一个大岛, 位于太平洋的西边界。北赤道流(NEC)在菲律宾

收稿日期: 2006-01-20; 修订日期: 2006-06-06。孙淑杰编辑

基金项目: 国家科技部国际科技合作重点项目(2002CB714001); 国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室开放基金项目(2004)

作者简介: 周慧(1978—), 女, 山东省枣庄市人, 博士研究生, 主要从事物理海洋方面的研究工作。E-mail: bestyzhou@163.com

\*感谢中国 ARGO 实时资料中心、日本气象厅以及法国 CLS 为本文研究提供的资料。感谢国家海洋局第二海洋研究所王桂华博士及美国夏威夷大学的虞左俊博士为本文提出的宝贵建议和帮助。感谢中国科学院大气物理研究所的刘娟博士和中国 ARGO 实时资料中心全体会员的帮助和协作。

中部(约 13°N)附近发生分叉, 形成南、北两支西边界流(图 1)<sup>[1]</sup>。向北的一支为黑潮, 向南流动的一支为棉兰老流(Mindanao Current)。由于棉兰老流区域是连接热带和亚热带环流的一个纽带, 该区域的环流及涡旋形态对研究南北半球水团交换有着重要意义<sup>[2]</sup>。许多观测表明<sup>[3-8]</sup>, 在棉兰老岛以南存在着一个气旋式冷涡——棉兰老涡(Mindanao Eddy), 其中心位置大约在 7°N、129°—130°E 之间。另外, 在棉兰老冷涡东南侧还存在一个反气旋式暖涡——哈马黑拉涡(Halmahera Eddy), 该涡有较强的季节变化。

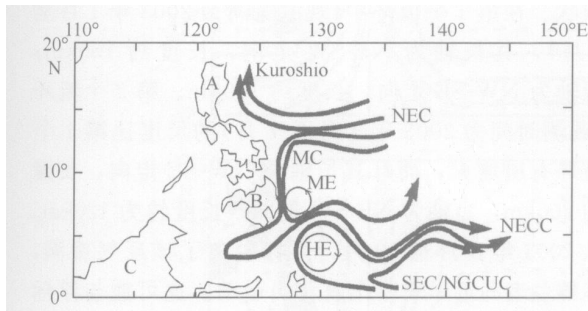


图 1 太平洋低纬度西边界环流分布<sup>[1]</sup>

北赤道流发生分叉形成黑潮(Kuroshio)和棉兰老流(MC)。A 为吕宋岛, B 为棉兰老岛, C 为加里曼丹岛。ME 为棉兰老冷涡, HE 为哈马黑拉暖涡, NECC 为北赤道逆流, SEC 为南赤道流, NGCUC 为新几内亚沿岸潜流

Fig. 1 Schematic circulation diagram for western low-latitude Pacific Ocean<sup>[1]</sup>

Wijffels 等<sup>[9]</sup>在分析了 1987—1990 年期间沿着 8°N 断面的 8 个航次的重复观测资料后认为, 观测期间棉兰老流并不明显, 相反地在温跃层附近存在一个暖核特征。这个暖核位于 8°N、127.5°E, 从温跃层一直延伸到 1 000db 深处, 暖核的中心被一高盐、低氧的水体所占据。另据 ADCP 观测表明, 该暖核是个反气旋式环流。由于该重复观测只在一个断面上进行, 所以无法判断该暖核究竟是个独立流环或者仅仅是 NECC 的一个弯曲。Qu 等<sup>[8]</sup>利用多年历史资料分析发现, 棉兰老岛以东, 即 7°N、127°E 处存在着一个与顺时针环流相对应的加速度势极大值区, 他们认为此反气旋式环流为哈马黑拉涡在深层向西北方向的倾斜部分。但是, 至今尚未对棉兰老岛东侧的反气旋暖涡进行完整观测。由此可见, 棉兰老岛附近海域的涡旋结构及环流形态变化较大, 很难由一次或几次水文观测而得到一个完整的描述, 特别是温跃层之下的环流形态。许多观测和模式研究也都表明, 此交汇区是涡旋异常活跃的地带<sup>[7,9-12]</sup>。

为了进一步研究西北太平洋的环流及其变化,

自 2003 年初中国 ARGO 计划在该海域陆续布放了 22 个浮标, 其中的一个 Argo 剖面浮标于 2003 年 1 月至 10 月期间在棉兰老岛以东海域捕获到一个中层反气旋涡。我们将据此资料对该反气旋涡作初步分析研究。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

本文所用资料来源于中国 Argo 实时资料中心。Argo 浮标是一种新颖的海洋观测设备, 可以自动地每隔 10d 从设定的漂流深度(通常为 2 000 db)自动上浮到海面, 并在上浮过程中观测海水的温度和盐度, 然后在海面上漂移大约 8—19h, 通过卫星将观测数据传送到地面接收站。在表层漂移的过程中, Argos 卫星会对浮标进行定位, 通常在 5—20 次之间, 且间隔不等(从几分钟到几个小时)。完成数据传输后, 浮标开始下潜到预定的漂流深度上, 下潜时间大约为 6—13h, 然后浮标在此深度上随中层流漂移约 10d 后再次上浮, 上浮时间同样为 6—13h。至此, Argo 剖面浮标完成一个观测循环。如果没有特殊情况, 一个 Argo 浮标在海上正常工作的时间可长达 2—3a。

本文分析选取了 5900224 号 Argo 剖面浮标的资料。该浮标是由中国 ARGO 计划于 2003 年 1 月投放的, 位于棉兰老岛以东 8.7°N、129.9°E 处。截止到 2003 年 10 月, 该浮标在海上连续工作了 10 个月, 共观测到 26 个温盐剖面。浮标的最大观测深度为 2 000db, 漂移深度为 1 500db, 其垂向取样间隔为: 从表层至 400db 为 10db, 400—2 000db 深度为 50db。观测的所有温盐剖面资料都采用 Akima<sup>[13]</sup>插值方法, 按照上述的垂向间隔插值到同一个深度上。这些准实时观测资料已由中国 ARGO 实时资料中心进行了实时质量控制, 同时利用 Wong 等<sup>[14]</sup>所提出的方法进行了延时质量控制, 对由于电导率传感器漂移所引起的异常剖面进行了校正处理。

本文还利用了最新的 SODA (Simple Ocean Data Assimilation V1.4.3) 数据集<sup>[15]</sup>。该数据集是一同化结果, 采用了 2000—2004 年的 QuikSCAT 风场资料, 其海洋模式以 POP 模式 (Parallel Ocean Program) 为基础, 垂向分 40 层, 水平分辨率为 0.2°×0.4°。用于该同化模式中的观测资料为可以得到的所有水文剖面资料、海洋测站资料和锚系浮标观测的温、盐度时间序列资料, 还有一些来自卫星观测的 SST 资料以及其它各种观测得到的海

表面温、盐度资料等,但是并未同化 ARGO 剖面浮标的资料。

## 1.2 流速估算方法

一般而言,Argo 浮标被投放到海洋中后会随着其周围的水体运动。于是人们可以根据 ARGOS 卫星系统对浮标在海面上的定位信息,估算出浮标在表层和中层的漂移速度<sup>[16,17]</sup>。但是,由于人们无法直接得到 Argo 浮标在下潜、上升和中层漂移时的定位信息,因此在对中层流进行速度估算时会产生误差。许多学者在这方面做了大量工作<sup>[16-18]</sup>。Ichikawa 等<sup>[18]</sup>给出了理想状况下 Argo 浮标中层漂移速度的误差估计为 10%—25%;谢基平<sup>[17]</sup>根据 Argo 剖面浮标的工作原理,详细分析了在估算中层流过程中的主要误差来源,在考虑了表层位置订正后的中层流速估计误差为  $0.4\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; Park 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于最优插值来估算中层流的方法,其计算误差仅为  $0.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本文则采用该方法估算了由 5900224 号浮标的漂移轨迹反演的中层流速场。

## 2 结果分析

### 2.1 浮标的漂移轨迹

图 2 为 5900224 号浮标的运动轨迹。为了更清晰地表示浮标观测到的反气旋涡,我们将其轨迹

(图 2a)分割成 3 个部分:图 2b 为 1—8 号剖面,图 2c 为 8—18 号剖面,图 2d 为 18—26 号剖面。由图 2b 可见,浮标在投放后先向东南方向运动到 2 号剖面处,然后作顺时针旋转一直到 8 号剖面,形成第 1 个封闭流环;在图 2c 中,浮标自 8 号剖面继续沿着顺时针方向旋转一直到第 18 号剖面,形成第 2 个封闭流环;而在图 2d 中,浮标不再沿着顺时针方向旋转,而是自第 18 号剖面先向南运动至 19 号剖面处,继而转向东,后折向北运动至 24 号剖面,随后又转向南运动直至浮标观测的最后一个剖面(26 号剖面)。2 个反气旋式流环均呈椭圆状。在第 1 个流环中(观测时间为 2003 年 1 月至 3 月),其长轴为 NE-SW 走向,长度约 150km;短轴为 NW-SE 走向,长度约 100km。第 2 个流环(观测时间为 2003 年 4 月至 7 月)的尺度比第 1 个流环有所增大,而且其长轴为 NW-SE 走向,长度约 200km,短轴为 NE-SW 走向,长度约为 120km。从 2003 年 8 月至 10 月,浮标脱离了该反气旋涡,在棉兰老岛近岸来回作南北向运动。这可能与浮标运动到棉兰老岛近岸时受强劲的南向棉兰老流的影响有关,即当浮标上浮到海面时被棉兰老流携带向南运动,而当浮标下潜到中层时又随着北向中层流运动,因而其漂移轨迹表现为南北向往复运动。由浮标的漂移轨迹(图 2)来看,两个顺时针方向的流环清晰地表明这里的确存在一个反气旋涡。

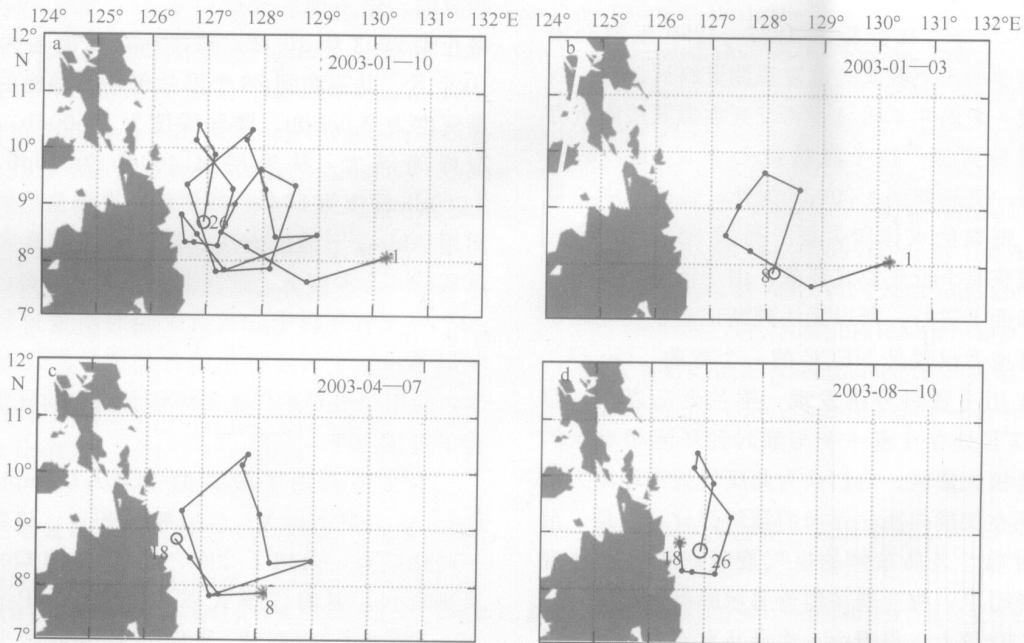


图 2 5900224 号浮标轨迹

a. 1—26 号剖面; b. 1—8 号剖面; c. 8—18 号剖面; d. 18—26 号剖面。黑点代表温、盐剖面观测位置,数字为浮标观测的剖面号,\*为起点,o为终点

Fig. 2 Trajectories of Argo profiling float 5900224 for profiles 1 to 26 (a), profiles 1 to 8 (b), profiles 8 to 18 (c) and profiles 18 to 26 (d)

### 2.2 浮标漂移速度

根据 5900224 号浮标的漂移轨迹资料，我们估算了该浮标在表层和中层漂移时的速度。表层流速

估算误差主要由浮标的定位精度决定，最大估算误差为  $3.6\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与浮标的轨迹图一样，我们将得到的流场图也分成了 3 个部分。图 3 呈现了由

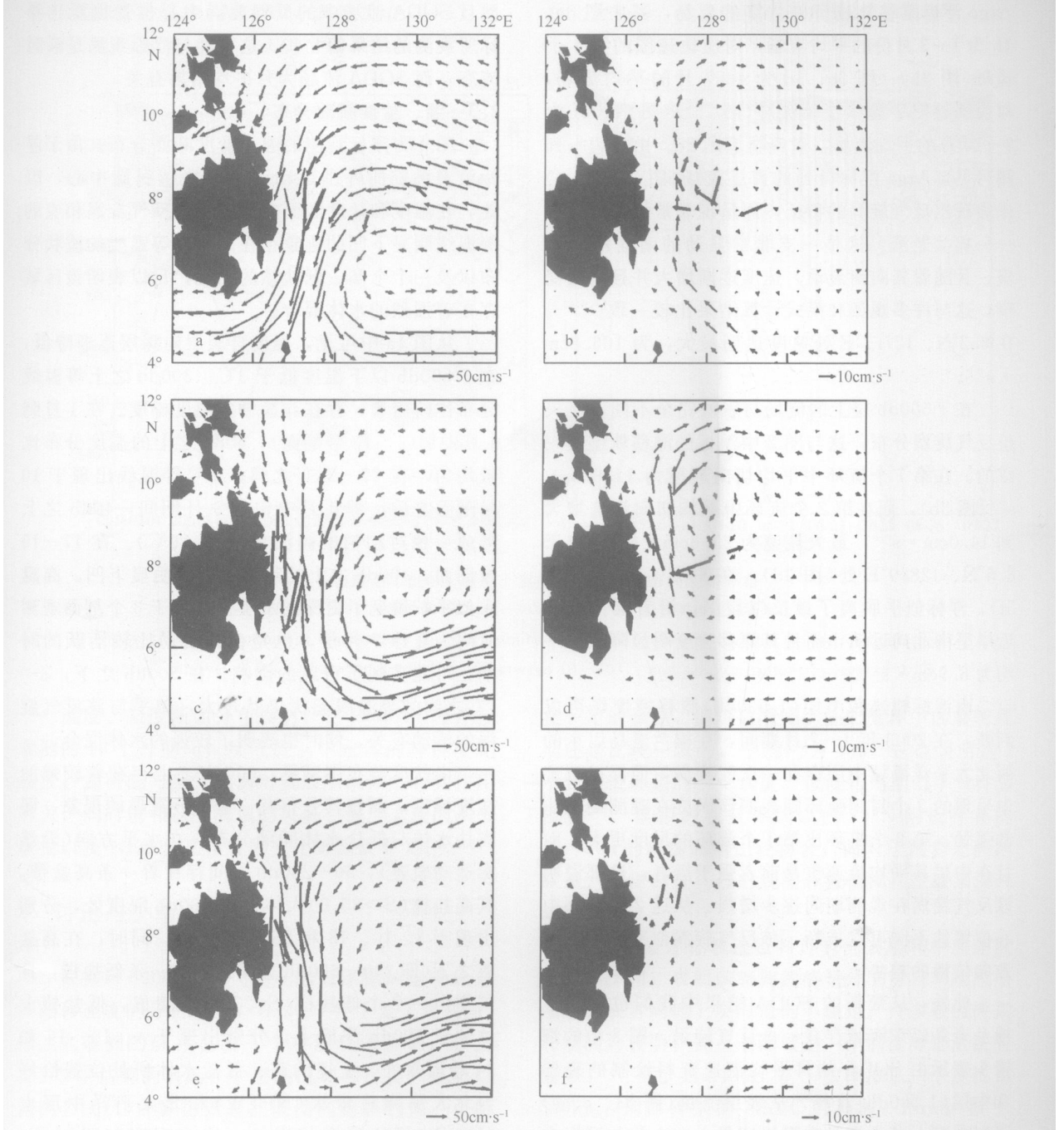


图 3 观测期间的流场分布

左列(a, c, e)为表层，右列(b, d, f)为中层(1 500db)。粗箭头代表 Argo 剖面浮标观测结果，细箭头代表多  
月平均的 SODA V1. 4. 3 的结果。上面 2 个图(a, b)对应时间为 2003 年 1—3 月；  
中间 2 个图(c, d)对应时间为 2003 年 4—7 月；下面 2 个图(e, f)对应时间为 2003 年 8—10 月

Fig 3 Velocity fields (bold arrows) at surface (left panels) and parking depth (1 500db, right panels) for profiles 1 to 8 from Jan. to Mar. , 2003 (upper panels) , profiles 8 to 18 from Apr. to Jul. , 2003 (middle panels) , and profiles 18 to 26 from Aug. to Oct. , 2003 (bottom panels) obtained from ARGO profiling float 5900224. Superimposed is multi-monthly-mean SODA V1. 4. 3 (thin arrows) interpolated on the 1 500db depth during the same period as the ARGO data

Argo 剖面浮标和 SODA 月平均流速资料得到的表层和上层(1 500db)深度上的流场。左边一列图为表层流场,右边一列为上层流场。粗箭头代表由 Argo 浮标漂移轨迹资料估算的流场,其中图 3a、3b 为 1—3 月份的平均流场,对应轨迹图的第 1 个流环(图 2b);图 3c、3d 为 4—7 月的平均流场,对应轨迹图中的第 2 个流环(图 2c);图 3e、3f 为 8—10 月的平均流场,对应轨迹图 2d。由左边一列图可见,Argo 浮标得到的表层流场(图 3a、c、e)未表现出反气旋涡的特征,而呈现非常强的南向流——棉兰老流。这是一支非常强劲的南向沿岸射流,且随着其向南流动,速度逐渐增大并且流幅变窄,这与许多观测和模式计算结果比较一致<sup>[7,9,12]</sup>。在 8.2°N、127.7°E 处速度达到最大,为 106.8 cm·s<sup>-1</sup>。

在 1 500db 层上的流场与表层完全不同,流矢呈反气旋型分布,这与图 2 中浮标的漂移轨迹是一致的。在第 1 个流环中平均切向速度为 11.9 cm·s<sup>-1</sup>(图 3b),而在第 2 个流环中平均切向流速增大到 14.0 cm·s<sup>-1</sup>,最大流速为 23.8 cm·s<sup>-1</sup>,位于 8.5°N、128.9°E 处(图 3d)。在 8—10 月期间(图 3f),浮标似乎脱离了该反气旋涡,沿着棉兰老岛近岸呈南北向运动,而且其漂移速度明显降低,平均为 8.9 cm·s<sup>-1</sup>。

由浮标轨迹和上层(1 500db)漂移速度场可以判断,在 2003 年 1—7 月期间,在棉兰老岛以东的西北太平洋海域上层存在一反气旋涡,而浮标轨迹中呈现的 2 个封闭流环则表明该涡旋在观测期间非常强劲。第 2 个流环比第 1 个流环的尺度更大,而且在上层其平均流速也是前者强于后者,这都说明该反气旋涡在观测期间逐步增强。从这 2 个流环中心位置的不同可以推断,该反气旋涡似乎有朝西北方向传播的趋势。

此外,从最新的 SODA 结果中我们也发现了棉兰老岛以东海域存在一个反气旋涡。图 3 中的细箭头表示由 SODA 的月平均流速资料绘制的表层和上层(1 500db)流场。从表层流场(图 3a、c、e)可以看到,其无论是在量级还是方向上均与浮标在表层的漂移速度场非常一致,这也反映了棉兰老流是一支相对稳定而且强劲的南向流这一特征。图 3b、d 中,在 10°N、128°E 附近,SODA 上层流场也呈现反气旋涡特征,而且该涡旋在 4—7 月(图 3d)的流速增大,其水平尺度也比 1—3 月(图 3d)时更大,表明该涡旋在 4—7 月间明显增强。在 8—10 月(图 3f),该反气旋涡似乎消失了,取而代之的是沿着棉兰老流近岸较弱的北向流,在 10°N

附近,该北向流折向东南。SODA 流场中表现出来的这些特征与浮标观测结果非常一致。只是在 1 500db 处 SODA 流速明显弱于浮标的漂移速度,而且 SODA 流场中的反气旋涡中心位置也要比浮标所观测的结果偏北些。这可能与浮标观测是瞬时流态,而 SODA 流场为月平均结果有关。

### 2.3 温、盐度断面分布

图 4 为浮标观测的温、盐度断面分布。由于浮标沿着涡旋的外围运动而非穿越涡旋中心,因此,在温度和盐度断面上看不出与反气旋涡相应的等温线明显下凹的迹象存在。但是等温线的波状分布以及一个个高、低盐核的出现,足以表明该区域存在着强烈的水体混合。

从图 4a 中可见,温度自表层向深层逐渐降低,在 1 500db 以下温度低于 3℃。300db 之上等温线分布比较密集,存在着显著的温度梯度。在 1 月到 4 月中旬(1—10 号剖面),50db 之上的温度分布比较均匀,在 27—28℃ 之间;29℃ 等温线出现于 10 号剖面之后,即 4 月中旬至 9 月期间,40db 之上形成一相对均匀的高温水体(>29℃)。在 17—19 号剖面,400db 之上的等温线呈现明显下凹,高温水似乎扩展到了更深的水层上。由于 3 个剖面观测时间为夏季 7 月份,也是台风活动比较活跃的时期,可能受到了台风的影响。在 300db 之下,3—7℃ 之间的等温线起伏仍然较大,似乎与该反气旋涡的活动有关,同时也表明了较强的水体混合。

由盐度分布图可见,600db 之上存在着较强的盐度梯度,而且其分布有一个十分有趣的现象,即高盐水体与低盐水体间隔分布。在水平方向(沿浮标运动轨迹),50—200db 之间存在着一条高盐带,其高盐核( $S > 35.0$ )大体位于 100db 深度处,分别出现于 3、10、18 和 25 号剖面处。同时,在高盐核之下(即 200—600db 之间)存在一条低盐带,且同样由一个个低盐核( $S < 34.35$ )组成,低盐核大体位于 300db 深度上,分别出现于 4、10、16 和 24 号剖面处。上述的高、低盐水体所处位置恰好与北太平洋热带水(NPTW)和北太平洋中层水(NPIW)所处深度相当<sup>[19]</sup>。许多观测表明<sup>[7,8,20]</sup>,NPTW 和 NPIW 由北赤道流输运到菲律宾沿岸后,由于北赤道流发生分叉,部分水体被其南分支——棉兰老流携带南下,一直可以到达棉兰老岛以南。而且在 10 号和 24 号剖面处,低盐水(NPIW)扩展到了更深的水层上(600db)。对照轨迹图(图 2)可见,出现高、低盐核的剖面均在 128°E 以西,且 10 号和 24 号剖面均在 9°N 以北,而且离岸较近(127°E 以西)。这说明 NPTW 和 NPIW 主要通过

棉兰老岛近岸向南输运，这一分布与 Bingham 等<sup>[21]</sup>所讨论的沿着棉兰老海岸存在淡水舌是一致的。在 800db 附近(约 27.2 )，34.55 等盐度线似乎对应南极中层水(AAIW)，其温度在 5—6 之

间，该水团沿棉兰老海岸向北运动甚至可以到达 12°N<sup>[2,8,21-23]</sup>。在其进入北太平洋过程中，由于西边界流区较强的上升流和垂向混合使其逐渐变性，在北太平洋，其盐度极小值升至 34.55<sup>[18,24,25]</sup>。

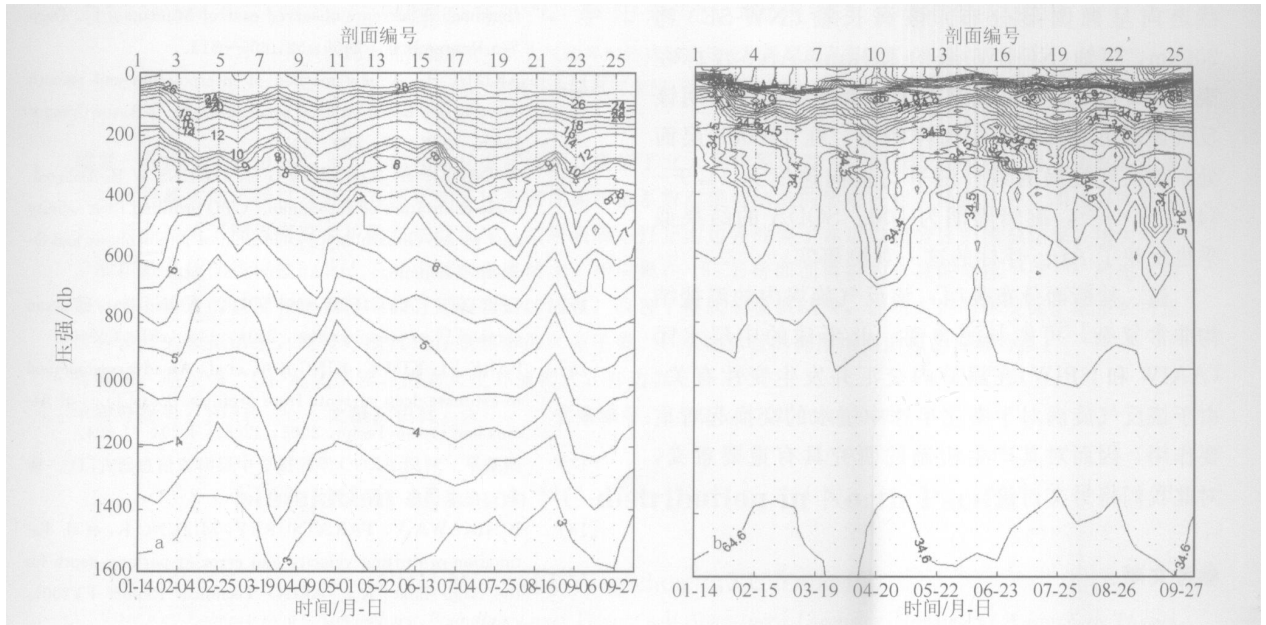


图 4 表层至 1 600db 深度上温度(a)和盐度(b)的断面分布  
等值线间隔 1—10 之间为 0.5 ， 10—30 之间为 2 ，盐度等值线间隔为 0.05

Fig. 4 Vertical sections of temperature (a) and salinity (b) against pressure (in dbar), with temperature contour interval of 0.5 between 1—10 , 2 between 10—30 , and salinity contour interval of 0.05

温度、盐度断面分布表明，在 5900224 号浮标观测的 10 个月期间，反气旋涡中水体的特性变化很大。这可能与反气旋涡对其周围水体的卷夹作用有关，同时也和这一海域的风场、棉兰老流的季节演变以及 NEC 分叉位置的变化等因素有关。

### 3 讨论与小结

根据对 5900224 号 Argo 剖面浮标的运动轨迹和漂移速度的分析可见，在 2003 年 1 至 7 月期间，棉兰老东侧的确存在着一个中层反气旋涡。根据 2.1 节中估算的涡旋在中层的流速和尺度，还可以利用公式(1)计算得到表征该反气旋涡的另一个特征参数——旋转周期：

$$T = L / V \tag{1}$$

其中  $L$  为涡的周长， $L = \pi d$ ； $V$  为涡的外围切向速度； $d$  为涡的直径。这里我们假定涡为圆形的，其直径为长轴、短轴的平均值。对于第 1 个流环，其平均流速为  $11.9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，平均直径为 125km，由此得到旋转周期为 38d；对于第 2 个流环，其平均流速为  $14.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，平均直径为 150km，旋转周期为 41d。尽管在对涡旋的直径和速度估算中均存

在一定的误差，但可以看出，2 个流环中的旋转周期还是比较一致的，平均约为 40d，这也表明这两个封闭流环是同一个涡旋。该旋转周期似乎与许多模式<sup>[26,27]</sup>模拟的在日界线以西 10°N 附近存在的 40—60d 的震荡周期比较吻合，而对于两者之间的联系，尚需做进一步的观测和数值模拟试验来深入研究。

由 Argo 浮标轨迹资料计算的表层和中层速度场截然不同，表明该涡旋的能量并非源自局地风场强迫，或者局地上层海流的不稳定。许多数值模式和观测均表明，棉兰老海域是一个涡旋异常活跃的地带<sup>[7,9,10-12]</sup>。Hurlburt 等<sup>[26]</sup>曾模拟了一个波长为 500km、向西传播的 NECC 的弯曲。Firing 等<sup>[12]</sup>利用 ADCP 及 LADCP 观测到棉兰老岛东侧海域次表层环流异常复杂，似乎存在着一系列沿岸传播的涡旋。

该中层反气旋涡的发现为颇有争议的棉兰老潜流(MUC)<sup>[7,27,28]</sup>的存在性提供了一种解释，即靠近大陆坡的北向海流可能是该反气旋涡在单一离岸断面上的反映，由于该涡旋本身的位置及其大小会随时间变化，因此有时利用船只断面观测可以观测到其靠近大陆坡的北向流，即棉兰老潜流，而当其

远离大陆坡或者消衰时则观测不到棉兰老潜流。

由此可见, 在 2003 年 1 月至 7 月期间, 在棉兰老岛以东海域的确存在一个反气旋涡。其中心位于 8.7°N、127.6°E 附近, 距大陆坡不远, 沿等深线走向呈椭圆形分布。该涡长轴 (NW-SE) 约 200km, 短轴 (NE-SW) 长约 120km。Argo 浮标在表层和 1500db 层的漂移速度场截然不同, 表明该反气旋涡可能具有中层海洋特征。在 1500db 层面处, 该反气旋涡的最外围平均切向速度为 11.9—14.0 cm·s<sup>-1</sup>, 旋转周期为 40d。SODA 的结果似乎也反映了 Argo 浮标的这一观测事实。

温、盐断面分布表明, 该反气旋涡内的温盐结构非常复杂, 可能与源自南、北半球的中层水团 (AAIW 和 NPIW) 在涡旋内交汇并发生变性有关。由于该反气旋涡对于南北半球中层水的交换起着重要作用, 因而对其产生机制的研究具有重要意义, 对此我们将另文讨论。

#### 参考文献:

- [1] NITANI H. Beginning of the Kuroshio [C]// Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current. Washington: University of Washington Press, 1972: 129—163.
- [2] FINE R A, LUKAS R B, BINGHAM F M, et al. The western equatorial Pacific: A water mass crossroads[J]. J Geophys Res, 1994, 99: 25 063—25 080.
- [3] TAKAHASHI T. Hydrographical researches in the western equatorial Pacific[J]. Mem Fac Fish Kagoshima Univ, 1959, 7: 141—147.
- [4] WYRTKI K. Physical oceanography of the southeast Asian waters. NAGA Report 2[R]. San Diego: Scripps Inst of Oceanogr, University of California, 1961: 195.
- [5] MASUZAWA J. Second cruise for CSK, Ryofu Maru, January to March 1968[J]. Oceanogr Mag, 1968, 20: 173—185.
- [6] 管秉贤. 苏澳-与那国岛断面上黑潮流速结构的特征及其季节变化[C]//海洋科学集刊(第 18 集). 北京: 科学出版社, 1981: 1—18.
- [7] LUKAS R B, FIRING E, HACKER P, et al. Observations of the Mindanao Current during the Western Equatorial Pacific Ocean circulation study[J]. J Geophys Res, 1991, 96: 7 089—7 104.
- [8] QU T D, MITSUDERA H, YAMAGATA T. A climatology of the circulation and water mass distribution near the Philippine coast[J]. J Phys Oceanogr, 1999, 29: 1 488—1505.
- [9] WIJFFELS S, FIRING E, TOOLE J. The mean structure and variability of the Mindanao Current at 8°N[J]. J Geophys Res, 1995, 100: 18 421—18 435.
- [10] SEMTNER A J, CHERVIR M. Ocean general circulation from a global eddy-resolving model[J]. J Geophys Res, 1994, 99: 5 081—5 093.
- [11] QIU B, LUKAS R. Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Current, the Mindanao Current and the Kuroshio along the Pacific western boundary[J]. J Geophys Res, 1996, 101: 12 315—12 330.
- [12] FIRING E, KASHINO Y, HACKER P. Energetic sub-thermocline currents observed east of Mindanao[J]. Deep Sea Research, 2005, 52: 605—613.
- [13] AKIMA H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures[J]. J Assoc Comput Meth, 1970, 17: 589—603.
- [14] WONG A P S, JOHNSON G C, OWENS W B. Delayed-mode calibration of autonomous CTD profiling float salinity data by  $\sigma$ -S climatology[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20: 308—318.
- [15] CARTON J A, GIESE B S. SODA: A reanalysis of ocean climate[J]. J Geophys Res, 2005, 110 (c9): C09006.
- [16] PARK J J, KIM K, KING B A, et al. An advanced method to estimate deep currents from profiling floats[J]. J of Atmos and Ocean Techn, 2005, 22(8): 1 294—1 304.
- [17] 谢基平. 利用 ARGO 浮标提取中层海流信息研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [18] ICHIKAWA Y, TAKATSUKI Y, MIZUNO K, et al. Estimation of drifting velocity and error at parking depth for the Argo float [R]. ARGO Technical Report FY2001, JAMSTEC, 68—77.
- [19] 孙朝辉, 刘增宏, 许建平, 等. Argo 资料在西北太平洋水团分析中的应用[J]. 海洋学研究, 2006(待刊).
- [20] QU T D, MITSUDERA H, YAMAGATA T. On the western boundary current in the Philippines Sea[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 7 537—7 548.
- [21] BINGHAM F M, LUKAS R B. The southward intrusion of North Pacific intermediate water along the Mindanao coast[J]. J Phys Oceanogr, 1994, 24: 141—154.
- [22] TSUCHIYA M. Flow path of the Antarctic Intermediate Water in the western equatorial South Pacific Ocean[J]. Deep Sea Res, Part A, 1991, 38: 273—279.
- [23] MASUZAWA J. Water characteristics of the North Pacific central region[C]// Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current. Washington: University of Washington Press, 1972: 95—127.
- [24] REID J L. Intermediate waters of the Pacific Ocean [M]. Johns Hopkins University Press, 1965: 85.
- [25] QU T D, LINDSTROM E J. Northward intrusion of Antarctic Intermediate Water in the Western Pacific[J]. J Phys Oceanogr, 2004, 34(9): 2 104—2 118.
- [26] HURLBURT H, KINDLE, METZGER E J, et al. The western boundary current in the far-western Pacific Ocean [R]// New Caledonia: Institut Francais de Recherche Scientifique pour le developpement en cooperation and Center ORSTOM de Noumea, 1989, 343—354.
- [27] HU D, CUI M, QU T, et al. A subsurface northward current off Mindanao identified by dynamic calculation[C]// Oceanography of Asian Marginal Seas. Oceanography. New York: Elsevier, 1991, 54: 359—365.
- [28] WANG F, HU D X. Dynamic and thermohaline properties of the Mindanao Undercurrent: Part I. Dynamic structure [J]. China J Oceanol Limnol, 1998, 16(2): 122—127.