

# 利用 Argo 数据计算吕宋海峡以东海域水文特性参数和流场\*

何建玲<sup>1,2</sup>, 蔡树群<sup>1</sup>

1. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要:** 利用 2006 年 Argo 浮标资料分析吕宋海峡以东海域水团季节特性和混合层的月平均变化规律; 并分别利用 Argo 多年季节平均资料与 2006 年资料, 以秋季为例, 基于  $P$  矢量方法计算该区域流场; 同时考虑风生流的影响, 将所得结果分别与利用 Levitus 和高度计资料计算的流场进行比较。结果表明, 水团特性季节变化不明显, 春冬季表层水团与夏秋季比较表现为低温高盐; 次表层、中层和深层季节变化不大; 混合层深度明显表现为冬季最深、夏季最浅的季节性变化。利用 2002—2009 年 Argo 季节平均资料基于  $P$  矢量方法能得到地转流场的基本结构, 与 Levitus 资料的计算结果相比较, 除可以反映黑潮, 还可以反映一些涡旋结构; 利用 2006 年秋季 Argo 资料计算流场与高度计资料计算的地转流场比较, 其流场结构位置吻合得比较好, 但存在流速偏小等不足, 这可能与 Argo 资料较少且分布不均以及插值误差等有关, 但其可以获得流场的三维结构, 而利用高度计资料计算只能得到表层流场结构。

**关键词:** Argo; 水团分析; 混合层深度;  $P$  矢量方法; 吕宋海峡; 流场

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)01-0018-10

## Study on the hydrological characteristic parameters and flow field east of the Luzon Strait using Argo profiling floats

HE Jian-ling<sup>1,2</sup>, CAI Shu-qun<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, CAS), Guangzhou 510301, China;

2. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China

**Abstract:** The seasonal characteristics of water masses and the monthly variation of mixed layer depth are studied using Argo profiling floats in 2006 east of the Luzon Strait. The temperature-salinity relation indicates the seasonal variation of water masses is not obvious. Compare to those in summer and fall, the surface temperature is lower and the surface salinity is higher in spring and winter; they change little in deeper layers. Seasonal variation of the mixed layer depth is obvious; it is the deepest in winter with a value over 160 m, whilst it is the shallowest in summer with a value of 20 m. Based on the  $P$ -vector method, the current field in fall is calculated using Argo seasonal mean data between 2002 and 2009, Levitus data and Argo data in 2006, respectively. The wind-driven Ekman drift current is also computed. The result obtained by Argo seasonal mean data is significantly better than that by the Levitus data; the Argo data can show the structure of Kuroshio and eddies. The coupled current structure obtained by Argo data in 2006 and Ekman drift current is similar to that by the altimeter data, except that the velocity of the former is less, which may be related to the coarse and unevenly distribution of Argo profiling floats and the subsequent interpolation error. However, a three-dimensional structure of flow field could be obtained by the Argo data, whilst only the surface current field can be obtained by the altimeter data.

**Key words:** Argo; water mass analysis; mixed layer depth;  $P$ -vector method; Luzon Strait; current field

收稿日期: 2010-07-22; 修订日期: 2010-10-28. 孙淑杰编辑

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB816003); 国家自然科学基金项目(40976009)

作者简介: 何建玲(1985—), 女, 山东省潍坊市人, 硕士研究生, 主要从事环流、遥感研究。E-mail: sdhjl20@163.com

通信作者: 蔡树群。E-mail: caisq@sesio.ac.cn

\* 感谢各位评审家提出的宝贵意见与建议。

国际 Argo 计划由美国、日本等国提出, 于 2000 年正式启动。截止 2010 年 1 月, 全球共有 29 个国家和地区参与了 Argo 浮标的布放, 共投放浮标 6623 个, 其中目前仍在海上正常工作的浮标 2941 个, 获取了约 50 余万条海洋剖面资料, 建立了全球、区域和国家的三级资料管理中心, 实现 Argo 资料的全球共享<sup>[1]</sup>。Argo 浮标设计的工作流程为: 浮标被投入海后先自动下潜至预先设定的漂流深度(约 1000m), 漂流约 8—10d 后自动潜到 2000m 深度, 然后自动上升至海面, 并进行温度、盐度的剖面测

量, 这大约需要 10h, 到达海面后, 将数据通过 Argos 卫星系统传给用户, 完成一次观测。

该计划可以实现全球海洋(除去北冰洋)2000m 以上表层现场温盐资料的实时时序观测, 并与卫星遥感数据、特别是卫星高度计数据相结合, 可提供高质量、高精度、大范围的温盐剖面资料, 这对全球上层海洋的变化状态及海洋物理状况定量描述、气候和海洋变异研究与预测、数据同化及模式研究、海表面地形测量和解释及海气相互作用研究等问题起重要作用<sup>[2-24]</sup>, 部分研究成果见表 1。

表 1 Argo 资料在海洋研究中的应用

Tab. 1 Application of Argo profile floats data

作者	年份	研究区域	研究问题	Argo 资料用途
Ramesh 等 <sup>[3]</sup>	2005	阿拉伯海	西南季风对混合层和温跃层相互作用的影响	海气相互作用
Bhaskar 等 <sup>[4]</sup>	2007	阿拉伯海北部	混合层的季节演变	
Willis 等 <sup>[5]</sup>	2008	全球海洋	2003—2007 全球海平面升高原因	海表面地形测量
Chang 等 <sup>[6]</sup>	2009	全球海洋	分析 2004—2007 全球海平面变化情况	
Leuliette <sup>[7]</sup>	2009	全球海洋	分析 2004—2007 全球海平面变化收支平衡	
Guinehut 等 <sup>[8]</sup>	2004	北大西洋	结合 SSL, SST 重构大尺度高分辨率的瞬时温度场	海洋物理状况定量描述
杨胜龙等 <sup>[9]</sup>	2008	太平洋	采用 Kriging 方法重构月平均温度场	
王彦磊等 <sup>[10]</sup>	2008	全球海洋	绘制世界大洋四季温度跃层特征分布图	
王桂华等 <sup>[11]</sup>	2006	太平洋	重构三维温盐场与流场	
Roemmich 等 <sup>[12]</sup>	2009	全球海洋	Argo 资料与其他资料观测结果比较	气候与海洋变异研究与预测
Chu 等 <sup>[13]</sup>	2008	北大西洋	识别大尺度的北大西洋中层环流, 两种环流模式可以相互转变	
Chu 等 <sup>[14]</sup>	2007	赤道北大西洋	根据温度及中层流场探测长罗斯贝波	
Menna 等 <sup>[15]</sup>	2009	地中海	估计次表层环流	
ZhouHui 等 <sup>[16]</sup>	2010	南海	分析越南沿岸流三维结构, 观测结果 2007 年 10 月到 12 月在南海南部表层至 1000m 层存在一南向沿岸流	
ZhouHui 等 <sup>[17]</sup>	2010	棉兰老岛以东	分析中层的中尺度环流时空变化	
Freeland 等 <sup>[18]</sup>	2004	阿拉斯加湾	Argo 资料监测海洋生态系统变化	中上层海洋的变化状态
Schiller 等 <sup>[19]</sup>	2004	印度洋	评估 Argo 采样策略	
周慧等 <sup>[20]</sup>	2006	棉兰老岛以东	对反气旋涡的观测	
周慧等 <sup>[21]</sup>	2007	台湾岛以东	分析涡旋垂向结构、运动特征及东海黑潮的变化特征	
Guinehut 等 <sup>[22]</sup>	2002	北大西洋	反演大尺度低频温盐变化	资料同化与模式研究
Acreman 等 <sup>[23]</sup>	2007		一维混合层模型的确定与调整	
Forget 等 <sup>[24]</sup>	2007	北大西洋	GCM	

西北太平洋海域作为黑潮源地, 也是东亚季风的盛行区和台风的发源地, 是国内外海洋与大气科学领域调查研究的热点海域, 在这里 Argo 浮标投放比较多, 有利于对该海域的研究。近年来国内外学者采用 Argo 资料对该区域进行了众多研究, 如 Centurioni 等<sup>[25]</sup>利用 Argo 资料分析认为季节性海流从菲律宾海通过吕宋海峡进入南海, 而且这仅发生在 10 月至 1 月, 在其他季节只是穿过吕宋海峡发生弯曲、沿台湾岛南部沿海退出; 刘增宏等<sup>[26-27]</sup>采用

Argo 资料分析热带气旋经过前后海洋上层的响应情况, 即混合层温度、盐度和深度等的变化; 孙朝辉等<sup>[28]</sup>对水团结构分析及分类; 王桂华等<sup>[11]</sup>利用 Argo 资料反演流场, 揭示太平洋暖池、赤道流系以及西边界流系的变化特征; 谢基平<sup>[29]</sup>对 NCEP(the National Centers for Environmental Prediction, 美国国家环境预报中心)中层流再分析数据进行比较, 发现两者存在较大差别; 周慧等<sup>[16-17,20-21]</sup>对棉兰老岛、台湾岛以东及南海区域的中层中尺度环流、涡旋和

黑潮及西边界流进行了研究。

Levitus 资料是目前国际上比较常用的气候态温盐资料, 而卫星高度计数据以其特有的全天候、全天时、高精度等优点成为广泛使用的数据资料。刘秦玉等<sup>[30]</sup>利用 Levitus 资料、TOPEX/Poseidon 高度计资料及模式结果计算分析了北太平洋副热带逆流的气候特征。袁耀初等<sup>[31]</sup>将实测流与高度计资料所得地转流结合, 研究 2002 年春季吕宋海峡海流的结构与变化。林丽茹等<sup>[32]</sup>利用多年 TOPEX/Poseidon 卫星高度计资料分析太平洋东南海域表层流场的季节及年际变化特征。

本文基于 2006 年 Argo 资料分析西北太平洋水团性质以及混合层的季节变化。以秋季为例, 基于  $P$  矢量方法, 考虑风生流的影响, 分别利用 2002—2009 年多年季节平均 Argo 资料计算流场, 与利用 Levitus 资料计算得到的流场结果进行比较; 利用

2006 年 Argo 资料计算流场, 并与利用高度计资料所得流场进行比较, 分析其可行性与优越性。

## 1 数据与方法

本文研究资料来源于中国 Argo 实时资料中心 2002—2009 年在台湾岛及吕宋海峡以东海域获取的 Argo 温盐深剖面资料。

绝对地转速度数据由法国空间局 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) 提供, 其根据卫星高度计绝对动力高度资料计算所得, 空间分辨率为  $(1/3)^\circ$ , 时间分辨率为 7d。

此外还有分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的 Levitus 月平均资料<sup>[33]</sup>, 全球海底地形数据 ETOPO5; 由亚太数据研究中心(APDRC)提供的 QSCAT(QuikSCAT, 海风测量快速散射仪)月平均风场数据( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ), 图 1 呈现了研究海域 2006 年风场的季节分布。

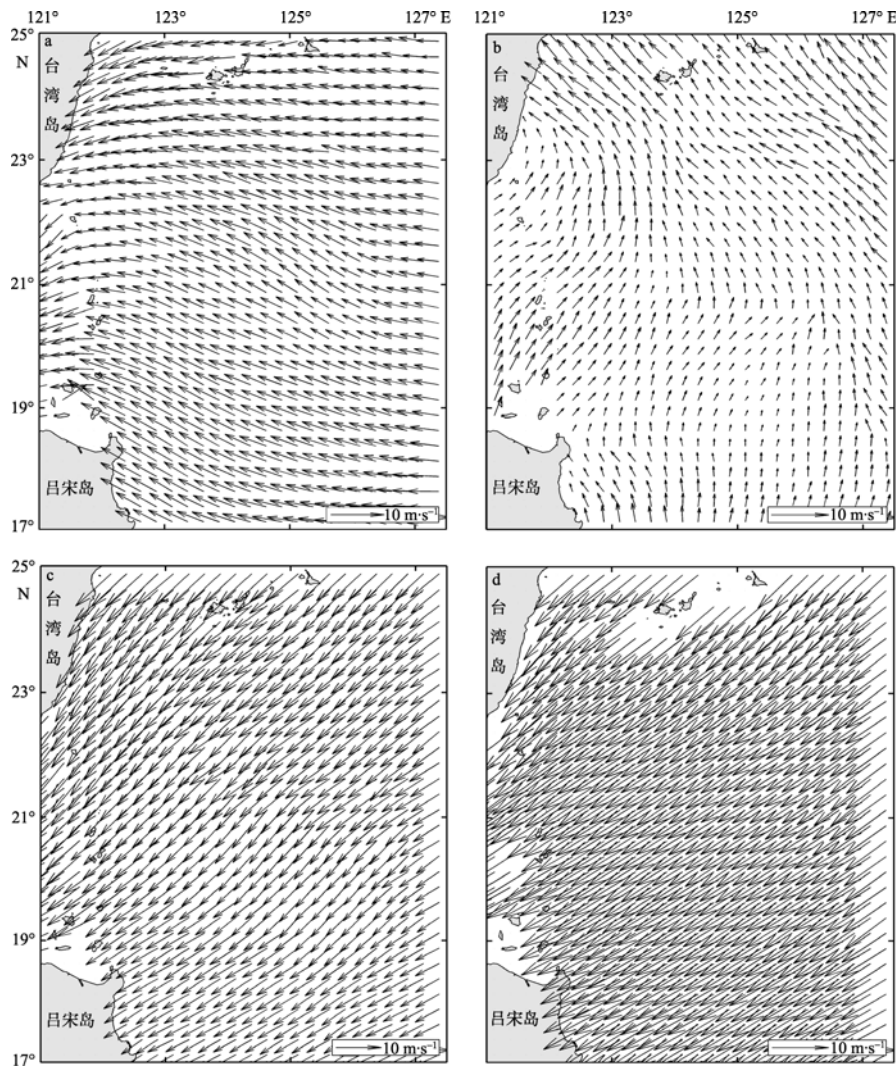


图 1 2006 年季节风场分布

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季

Fig. 1 Season wind field in 2006: (a) spring, (b) summer, (c) fall, and (d) winter

### 1.1 混合层深度计算方法

混合层深度(MLD)的计算有多种定义, 而常见的有两种: 一是  $S-T$  法, 即取低于表层海水温度 0.5 的季节性温跃层所在的深度; 二是垂向梯度法, 根据海洋上层海水密度(或温度)的垂直分布, 取密度(温度)垂直梯度或绝对最大值所在的水层深度<sup>[34-35]</sup>。本文选用第二种定义, 并根据国家技术监督局 1992 年颁布的海洋调查规范中确定的温度梯度判别准则, 在水深大于 200m 条件下, 取温度梯度的阈值为 0.05<sup>[36]</sup>, 将所求的温跃层上界深度作为混合层厚度。

### 1.2 $P$ 矢量方法

Chu<sup>[37-38]</sup>提出的  $P$  矢量方法, 其物理基础在于位势密度与位势涡度守恒。该方法基于地转近似、静力近似和质量守恒条件, 考虑科氏参数随纬度的变化, 得到位势密度守恒方程和位势涡度守恒方程, 从而利用位密和位涡定义可反映速度方向的  $P$  矢量。 $P$  矢量方法还应满足两个必要条件: 一是等位涡面和等位密面不重合; 二是速度水平分量随深度的增加而偏转(即存在螺旋)。 $P$  矢量方法的优点在于可以过滤掉不满足两个必要条件的数据; 缺点在于有一定局限性, 不适用于海域表底层和侧边界区域, 也不适于浅海区域<sup>[39-40]</sup>。由于本文研究区域处于吕宋海峡以东水深在 3000m 以上海域,  $P$  矢量方法可以适用。 $P$  矢量方法是推测流场的一种有效手段, 在大西洋、太平洋、南海和日本海<sup>[11,37,39-43]</sup>都有广泛应用。该方法的动力学控制方程为<sup>[11]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} V \cdot \nabla \rho &= 0 \\ V \cdot \nabla q &= 0 \\ q &= f \frac{\partial \rho}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{g}{f \rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{g}{f \rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ V(x, y, z) &= r(x, y, z) \mathbf{P}(x, y, z) \\ \mathbf{P} &= (\nabla \rho \times \nabla q) / |\nabla q \times \nabla \rho| \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $u$ 、 $v$  分别为是速度场的东向和北向分量;  $\rho$  为密度;  $\rho_0$  为密度特征值;  $f$  是科氏参数, 随纬度变化;  $g$  为重力加速度;  $q$  为中间变量;  $r(x, y, z)$  是比例参数, 可通过热成风关系得到。

### 1.3 风生流计算方法

利用高度计数据所得的绝对地转流速包含了风对海表高度的影响。为了对  $P$  矢量方法所得地转流

与高度计所得地转流进行比较, 利用 Argo 资料得到的地转流需考虑风生流, 最终流场应是两者的合成。因此利用 QSCAT 月平均风场数据来计算 Ekman 漂流:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= f v + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ 0 &= -f u + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

边界条件:

$$\begin{aligned} z=0: \rho A_z \frac{\partial u}{\partial z} &= -\tau_x, \\ \rho A_z \frac{\partial v}{\partial z} &= -\tau_y, (\tau_x, \tau_y) = C_0 \rho_a |V| (V_x, V_y) \\ z \rightarrow \infty: u &= 0, v = 0 \end{aligned}$$

则 Ekman 漂流:

$$\left\{ \begin{aligned} u &= \frac{\sqrt{2}}{2a\rho A_z} e^{-az} \left[ \tau_x \cos\left(\frac{\pi}{4} + az\right) + \tau_y \cos\left(\frac{\pi}{4} - az\right) \right], \\ v &= \frac{\sqrt{2}}{2a\rho A_z} e^{-az} \left[ \tau_y \sin\left(\frac{\pi}{4} - az\right) - \tau_x \sin\left(\frac{\pi}{4} + az\right) \right], \\ a &= \sqrt{\omega \sin \varphi / A_z} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$D = \pi \sqrt{\frac{A_z}{\omega \sin \varphi}} \quad (4)$$

其中  $\omega$  为地球自转角速度, 为  $7.29 \times 10^{-5} \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\varphi$  为纬度;  $A_z$  为垂直湍流运动黏滞系数<sup>[44]</sup>, 取  $0.01 \text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\tau_x$ 、 $\tau_y$  为  $x$ 、 $y$  方向的风应力,  $C_0$  是拖曳系数<sup>[45]</sup>, 取  $1.1 \times 10^{-3}$ ,  $\rho_a$  为空气密度, 为  $1.29 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $w$  为垂向速度分量;  $D$  为 Ekman 深度;  $z$  为垂向坐标, 向下为正, 即深度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水团分析

许建平<sup>[46]</sup>和孙朝辉<sup>[28]</sup>分别对西北太平洋水团进行分析, 许建平等只是根据  $T-S$  关系分析水团结构, 分为 8 类; 而孙朝辉等利用更有效的模糊聚类软化法认为冬夏季水团可分为 8 类, 分别是太平洋热带表层水、北太平洋次表层水、北太平洋中层水、北太平洋副热带模态水、北太平洋深层水和赤道表层水, 以及南太平洋次表层水和南太平洋中层水。而本文所研究区域( $121^\circ$ — $127.5^\circ\text{E}$ ,  $17^\circ$ — $25^\circ\text{N}$ )与之相比较小, 故采用  $T-S$  点聚图方法讨论该区域 2006 年 3 月—2007 年 2 月四季水团结构(图 2)。

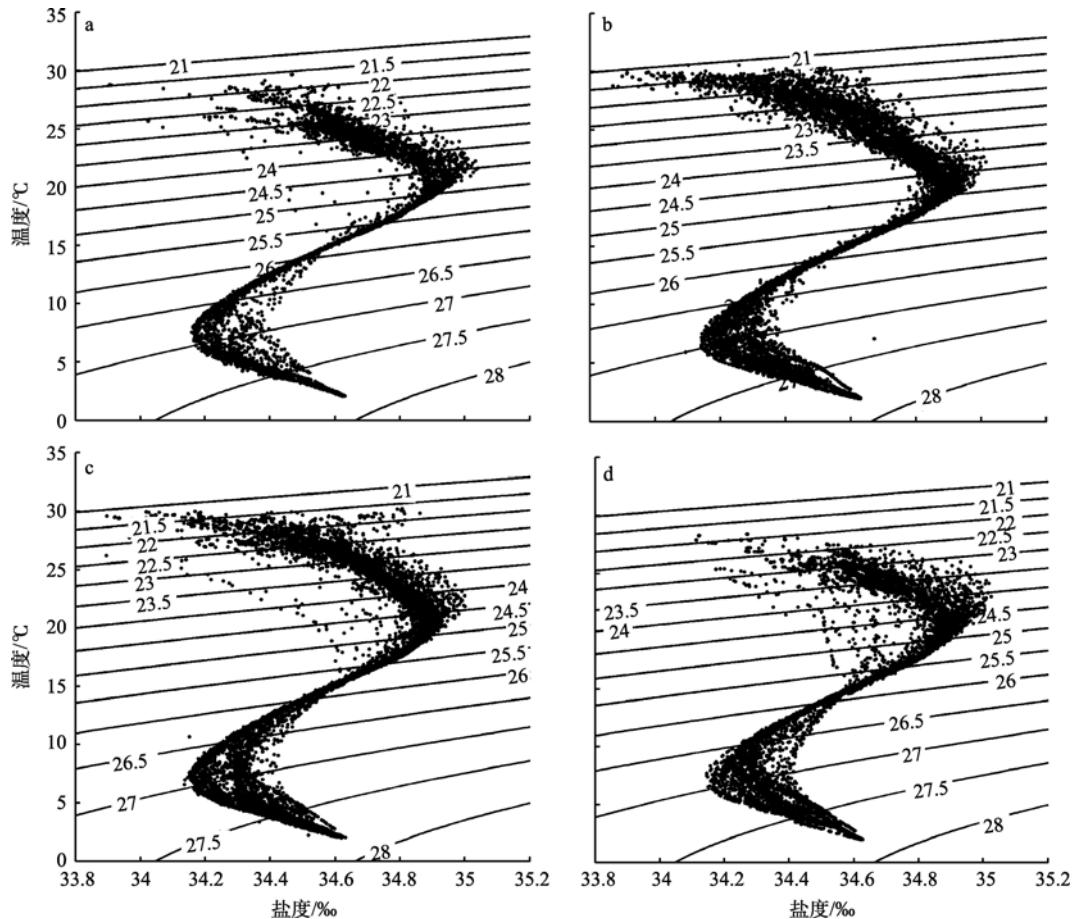


图 2 西北太平洋 2006 年 Argo 观测剖面  $T$ - $S$  点聚图

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季

Fig. 2  $T$ - $S$  diagram of Argo profile data in Northwest Pacific in 2006: (a) spring, (b) summer, (c) fall, and (d) winter

从图 2 可以看到, 2006 年该区域四季  $T$ - $S$  点聚图呈反“S”型, 表明该区域水体结构可分为表层高温低盐、次表层高温高盐、中层次低温低盐和深层低温次高盐, 这与许建平<sup>[46]</sup>所得  $T$ - $S$  图基本一致, 但两者略有不同: 图 2 中次表层高温高盐拐点温度约为  $21^{\circ}$ , 盐度低于  $35\text{‰}$ ; 而后者拐点温度约为  $24^{\circ}$ , 盐度高于  $35\text{‰}$ , 可能与所用资料不同有关。另外, 深层低温次高盐水拐点温度约为  $7^{\circ}$ , 盐度高于  $34.1\text{‰}$ 。表层、次表层和中层水体的温、盐点聚离散情况反映该层水体混合的强度<sup>[28]</sup>。从图中可以看到, 总体上, 中层与深层水体温盐没有明显的季节变化; 而表层春、冬季节温度和盐度分别约为  $26^{\circ}$ 、 $34.5\text{‰}$ , 相比于夏、秋季节的  $29^{\circ}$ 、 $34.1\text{‰}$  表现为低

温高盐, 可能与日照强度及降水量有关。次表层, 春季次表层最高盐度要高于夏季; 另外, 春季表层、次表层、中层点聚离散程度也高, 表明混合强度高于夏季; 秋冬季情况与春夏类似, 但次表层最高盐度相近。

## 2.2 混合层深度变化

根据 Argo 浮标观测剖面的分布, 文中用以  $23^{\circ}\text{N}$ 、 $125^{\circ}\text{E}$  为中心, 半径为  $0.6^{\circ}$  范围内, 且分别为 2006 年 3 月至 2007 年 2 月共 12 个月份的 Argo 浮标观测剖面(图略)资料分析混合层深度的变化。Argo 浮标在 200m 层之内, 各层间隔约为 5m 或 10m。由 12 个浮标统计计算所得的混合层深度(MLD)见表 2。

表 2 各月份混合层深度

Tab. 2 Monthly-mean mixed layer depth in 2006

	月 份											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
混合层深度/m	159.2	29.5	29.7	29.7	19.7	39.6	59.6	49.8	89.4	69.7	119.1	159.3

从表 2 可以看出混合层深度变化存在明显的季节性变化。夏季(6—8 月)混合层深度达到最小, 接近 20m 左右, 根据季节风矢量图(图 1), 此时区域受湿热的西南风和东南风影响, 风力较小, 平均风速只约  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 这由于海水失热减少、降水增多以及海洋上层吸收太阳辐射达到最大等原因造成。进入秋季(9—11 月)后夏季风转变为东北季风, 风力增大, 平均风速约为  $5.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 海水失热增强, 降水及太阳辐射均减少, 混合层深度开始增大。冬季(12 月—次年 2 月)持续的东北季风控制研究区域, 东北季风风力达到最大, 平均风速超过  $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 干冷, 上层失热加剧, 引起的混合加强, 混合层深度持续加深从而达到最大(160m)。春季(3—5 月)上层获取的太阳辐射开始增加, 风力由东北季风转变为东南风, 风应力强度减小, 平均风速约为  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 致使混合层厚度变小, 从表中还可看到春季混合层深度变化十分剧烈<sup>[47]</sup>。该趋势与孙成学等<sup>[48]</sup>对南海混合层深度季节性变化的研究结果基本一致, 混合层深度存在季节性变化。另外, 表中 2 月与 7 月分别为混合层达到最大与最小值的月份, 这与 Yuko Ohno 等<sup>[49]</sup>所得西北太平洋混合层厚度分布特征近似, 由于研究区域不同, 数值上存在一些差异。

### 2.3 流场

利用 Argo 资料来获得海洋流场情况, 可以根据 Argo 浮标轨迹计算表层与次表层流场<sup>[50]</sup>。本文采用  $P$  矢量方法计算地转流。首先检查 2002 年至 2009 年 9—11 月的 Argo 资料是否有异常值, 根据 ETOPO5 地形数据, 判断 Argo 浮标观测深度是否缺测, 缺测情况利用对应的 Levitus 资料给予补充; 由于缺测一般发生在深层, 温盐不会发生太大变化而影响计算结果。然后对数据进行插值, 在垂直方向考虑压力与深度的不一致性, 插值计算取若干层(10、20、30、50、70、100、120、160、200、250、275、300、350、400、450、500、550、600、675、750、825、900 和 1000m); 而在水平方向进行网格插值, 经试验网格大小最宜为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 每层数据采用距离权重方法内插到网格点上, 考虑到海底地形的影响, 参考层选为 1500m。

为了使利用 Argo 资料计算的流场分别与利用 Levitus 资料、高度计资料所得流场时间尺度相匹配, 进行两种处理: 1)对 2002—2009 年的 Argo 资料进行多年季节平均, 与 Levitus 资料相匹配; 2)直接采用 2006 年秋季的 Argo 资料, 与高度计资料相匹配。

由于高度计的计算结果包含了各种因素对海面

高度的影响, 因此, 为了使  $P$  矢量方法计算的地转流与高度计结果进行比较, 在结果中考虑风因子的影响。根据公式(4)估算得该海域 Ekman 层的深度在 70m 以内, 因此风生流影响深度为上述分层的 10、20、30、50 和 70m 层, 各层得到的流场计算结果叠加到由 Argo 资料和 Levitus 资料计算得到的地转流结果中。另外, 利用高度计资料所得的地转流只是反映表层流场的结构, 因此选取 50m 层的结果来比较分别由高度计资料、Argo 资料和 Levitus 资料计算得到的地转流结果, 并选取 200m 层的结果来比较分别由 Argo 资料和 Levitus 资料计算得到的地转流结果。

#### 2.3.1 Argo 资料与 Levitus 资料所得秋季流场结果比较

通过图 3a、b 可以看到, 利用 Argo 资料计算的流场与利用 Levitus 资料计算的流场都可以反映出黑潮结构, 但存在差异: 在吕宋海峡, 两者流速相当; 而在台湾岛以东及吕宋岛东部, 利用 Levitus 资料所得流场流速明显小于利用 Argo 资料所得流场, 基本无法反映黑潮。此外, 图 3a 显示台湾岛以东存在一反气旋, 其中心约在  $23^\circ\text{N}$ 、 $124^\circ12'\text{E}$ , 半径约为 2 个纬度, 但强度比较小, 深度约为 120m, 在深层它退化为反气旋弯曲(图略); 在吕宋岛东北部也有一反气旋涡, 但其影响范围比较小, 深度也只有 150m。而利用 Levitus 资料计算的流场(图 3b、d)则只在台湾东部表现为反气旋弯曲, 且没能反映吕宋岛东北部的涡旋。

#### 2.3.2 Argo 资料与高度计资料所得秋季流场结果比较

从 50m 层的 Argo 资料计算流场结果(图 4a)中可以看到, 该层清晰地反映了 3 个涡旋: 在台湾岛东部存在一个较大尺度的反气旋涡, 其中心位于  $23^\circ\text{N}$ 、 $124^\circ30'\text{E}$ , 影响范围大约为  $21^\circ\text{—}25^\circ\text{N}$ 、 $123^\circ\text{—}125^\circ30'\text{E}$ , 强度比较大; 而在该反气旋南部有一对由气旋与反气旋组成的偶极子, 其中心分别为  $19^\circ30'\text{N}$ 、 $125^\circ\text{E}$  和  $18^\circ30'\text{N}$ 、 $125^\circ30'\text{E}$ , 其强度与半径都要小一些, 在气旋与反气旋相接位置出现一较强的东向流, 最大流速约为  $55\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着深度的增加, 涡结构的强度和半径都逐渐在减小。到了 200m 层, 对应的流场结构仍比较稳定(图 4c), 但较强东向流消失, 而至 500m 层涡结构则完全消失(图略)。而靠近吕宋海峡及台湾岛各存在一个反气旋弯曲和气旋弯曲。另外, 黑潮西边界流最大流速约为  $41\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而在吕宋岛附近流速较弱, 这可能是由于

该海域附近的 Argo 资料比较稀疏, 经插值后难以反映黑潮这一西边界流结构。

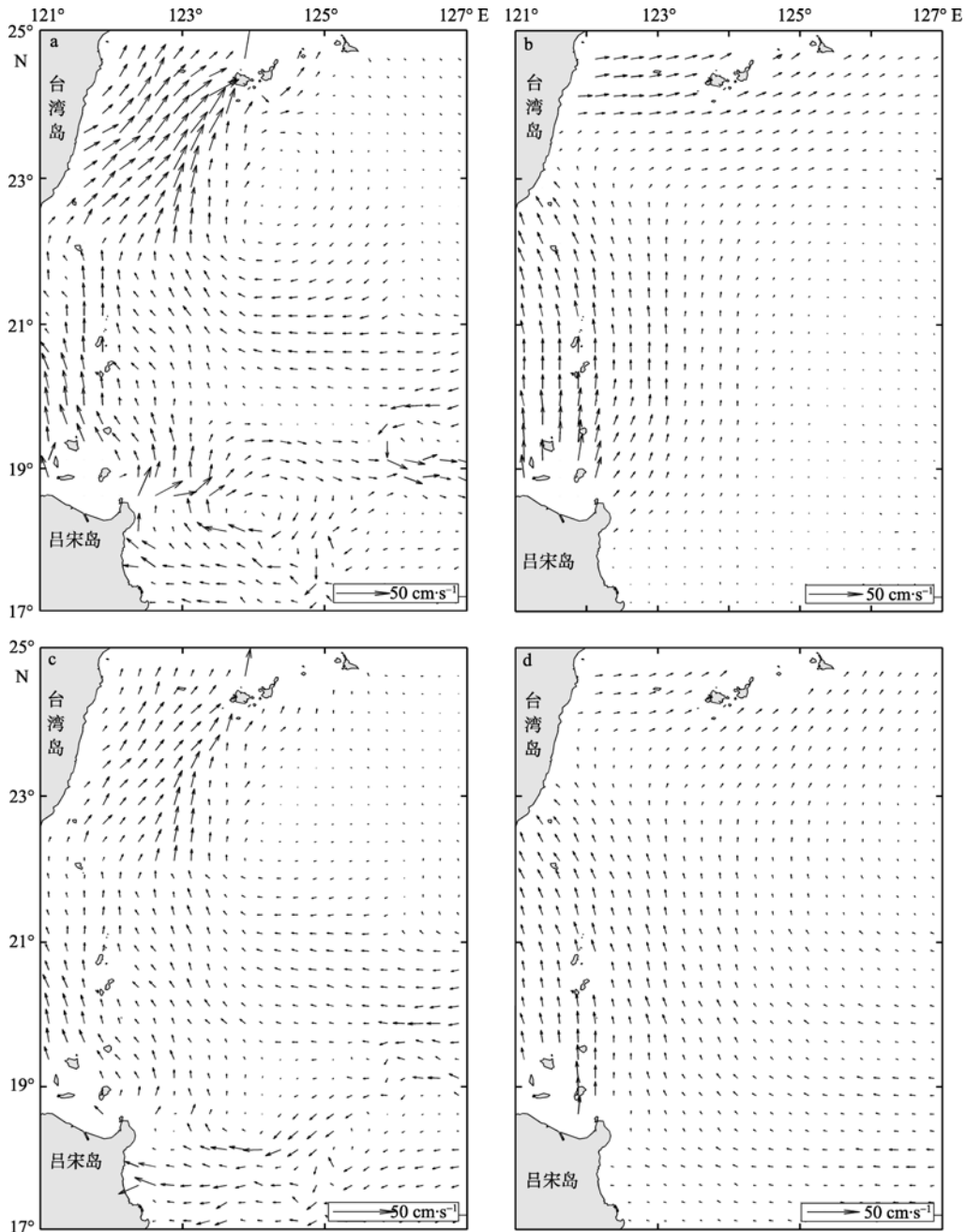


图 3 多年季节平均流场计算结果(秋季)

a. Argo 资料计算结果与 Ekman 漂流的叠加结果(50m 层); b. Levitus 资料计算结果与 Ekman 漂流的叠加结果(50m); c. Argo 资料计算结果(200m 层); d. Levitus 资料计算结果矢量(200m 层)

Fig. 3 Computed seasonal mean current fields in fall: (a) computed with Argo profiling data and wind (50 m); (b) computed with the Levitus data and wind (50 m), (c) computed with Argo profiling data (200 m), and (d) computed with the Levitus data (200 m)

分析 50m 层温度场(图 4c), 可以看到吕宋海峡东部 21°12'N、122°E 存在一暖中心; 海区的南部为一向北部延伸的局地暖水舌; 北部区域温度场比较复杂, 但整体上是一暖涡。靠近台湾岛东部存在一冷涡。温度场的结构一直维持到 200m 层, 比较稳定。对照图 5a, 可以发现, 反气旋涡与气旋涡位置分别对应着暖

涡与冷涡, 符合传统意义上的地转调整关系。

从利用高度计资料计算的流场图(图 4b)上可以清晰地看到气旋涡、反气旋涡以及黑潮结构。图中有一强反气旋涡, 中心位于 23°N、124°30'E, 影响半径约为 3 个经纬度, 深度达 400m 水层; 而在吕宋岛东部存在一反气旋涡, 其中心为 18°N、125°30'E,

强度也比较大; 在两个反气旋涡之间, 有一比较弱的气旋涡, 中心位置在 20°N、124°42'E。同样的, 靠

近吕宋海峡处存在一反气旋弯曲。由高度计资料计算的地转流最大流速约为  $44\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

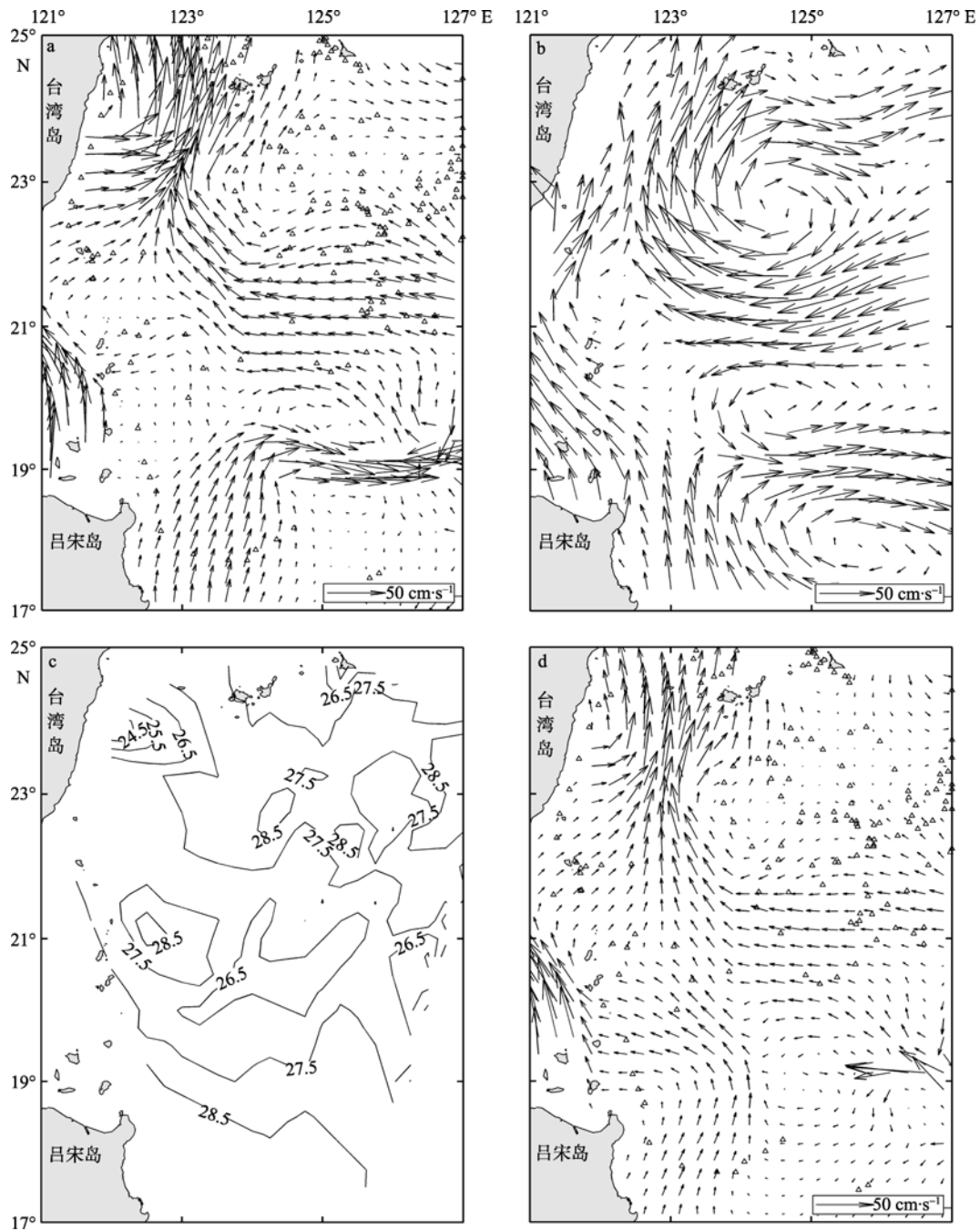


图 4 2006 年秋季流场计算结果

a. Argo 资料计算结果与 Ekman 漂流的叠加结果(50m 层); b. 高度计资料计算的地转流; c. 温度场(50m); d. Argo 资料计算结果(200m 层)。代表 2006 年秋季 Argo 浮标位置

Fig. 4 Computed current field in fall 2006: (a) current field computed with Argo and wind data (50 m), (b) geostrophic current from the altimeter data, (c) distribution of temperature (50 m), and (d) current field computed with Argo profiling data (200 m). denotes the Argo location in fall 2006

王东晓等<sup>[42]</sup>将  $P$  矢量方法计算所得南海中南部环流场与 TOPEX/Poseidon 高度计所得地转流场比较, 二者比较一致。通过比较图 5a 和图 5b, 可以看到两流场结构吻合得也相当好, 利用 Argo 资料可以

很好地反映流场结构。但两者还是存在差异, 如 Argo 资料所得流场流速相比利用高度计资料所得流场偏小; 而后者没有反映出靠近台湾岛东部的气旋弯曲。



对 Argo 资料做多年季节平均计算所得流场, 与利用 Levitus 资料计算的流场相比, 不仅可以反映基本流场结构, 还可以反映一些涡旋结构; 而利用 Argo 短时间资料所得流场与利用高度计资料所得流场及涡旋结构比较一致。但由于利用 Argo 资料并通过  $P$  矢量方法计算可以得到大洋流场的三维结构, 并且越来越多的剖面资料可以提高计算精度, 而高度计资料只能反映表层的流场情况, 因此 Argo 资料更具有优势。

### 3 结论与讨论

本文主要分为两部分: 一是利用 2006 年 Argo 浮标资料分析西北太平洋水团特性的季节变化和混合层的月平均变化规律; 二是分别利用 2002—2009 年 Argo 多年季节平均资料和 2006 年 Argo 资料, 以秋季为例, 采用  $P$  矢量方法计算该区域流场, 并各自与利用 Levitus 和高度计资料分别计算所得流场进行比较。所得结果如下。

1) 吕宋海峡东部海域 2006 年水团性质季节变化不大, 尤其是中层与深层, 而表层与次表层温盐变

化较小, 春季表层相较于夏季表现为低温高盐, 表层、次表层和深层混合强度春季高于夏季, 秋冬季与春夏类似; 而混合层深度存在季节性变化, 夏季深度最小, 冬季达到最大值, 这与该海区盛行季风和太阳辐射等因素有关。

2) 与 Levitus 资料所得流场相比较, 利用多年季节平均 Argo 资料并基于  $P$  矢量方法对流场进行计算, 结果基本能反映流场结构, 如黑潮、涡旋、弯曲结构, 而 Levitus 资料计算的流场基本无法反映流场结构; 与高度计资料计算的流场相比, 两者基本一致。此外, 利用 Argo 资料可以计算得到大洋流场的三维结构, 并且越来越多的剖面资料可以提高计算精度, 而高度计资料只能反映表层流场情况。但是, 还存在流速偏小等问题, 这可能与资料较少且分布不均、插值误差等因素有关。

随着全球海洋 Argo 浮标资料的不断增多, 结合利用其他卫星遥感资料或现场水文资料, 通过多源资料的综合同化利用, 可以更好地揭示大洋温度、盐度场和流场的时空变化特征, 更好地体现 Argo 资料的应用价值。

### 参考文献

- [1] 薛慧芬, 苗春葆, 董明媚, 等. 全球 ARGO 浮标及其观测资料状况分析[J]. 海洋技术, 2005, 24(4): 23-28.
- [2] 朱光文. 发展剖面探测浮标技术, 支持我国参与 ARGO 计划[J]. 海洋技术, 2001, 20(2): 18-23.
- [3] RAMESH K V, KRISHNAN R. Coupling of mixed layer processes and thermocline variations in the Arabian Sea[J]. *J Geophys Res*, 2005, 11, C05005, doi: 10.1029/2004JC002515.
- [4] BHASKAR T V S U, SWAIN D, RAVICHANDRAN M. Mixed layer variability in Northern Arabian Sea as detected by an Argo float[J]. *Ocean Science Journal*, 2007, 42(4): 241-246.
- [5] WILLIS J K, CHAMBERS D P, NEREM R S. Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual timescales[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, C06015. doi: 10.1029/2007JC004517.
- [6] CHANG Y S, ROSATI A J, VECCHI G A. Basin patterns of global sea level changes for 2004-2007[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 80: 115-124.
- [7] LEULIETTE E W, MILLER L. Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo and GRACE[J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L04608, doi: 10.1029/2008GL036010.
- [8] GUINEHUT S, TRAON P Y LE, LARNICOL G, et al. Combining Argo and remote-sensing data to estimate the ocean three-dimensional temperature fields — A first approach based on simulated observations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 46: 85-98.
- [9] 杨胜龙, 马军杰, 伍玉梅, 等. 基于 Kriging 方法 Argo 数据重构太平洋温度场研究[J]. 海洋渔业, 2008, 30(1): 13-18.
- [10] 王彦磊, 黄兵, 张韧, 等. 基于 Argo 资料的世界大洋温度跃层的分布特征[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(4): 428-435.
- [11] 王桂华, 刘增宏, 许建平. 利用 Argo 资料重构太平洋三维温盐场和流场[C]// Argo 应用研究论文集. 北京: 海洋出版社, 2006: 26-34.
- [12] ROEMMICH D, GILSON J. The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity and steric height in the global ocean from the Argo Program[J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 82: 81-100.
- [13] CHU P C, IVANOV L M, MELNICHENKO O V, et al. Argo floats revealing bimodality of large-scale mid-depth circulation in the North Atlantic[J]. *Acta Oceanologica Sinica* 2008, 27(2): 1-10.
- [14] CHU P C, IVANOV L M, MELNICHENKO O V, et al. On long baroclinic Rossby waves in the tropical North Atlantic observed from profiling floats[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112, C05032, doi: 10.1029/2006JC003698.
- [15] MENNA M, POULAIN P M. Mediterranean subsurface circulation estimated from Argo data in 2003-2009[J]. *Ocean Science Discussions*, 2009, 6: 2717-2753.

- [16] ZHOUHUI, YUAN DONGLIANG, LI RUIXIANG, et al. The western South China Sea currents from measurements by Argo profiling floats during October to December 2007[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(2): 398-406.
- [17] ZHOUHUI, YUAN DONGLIANG, LI RUIXIANG, et al. The western South China Sea currents from measurements by Argo profiling floats during October to December 2007[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(2): 398-406.
- [18] FREELAND H J, CUMMINS P F. Argo: A new tool for environmental monitoring and assessment of the world ' s ocean, an example from the N. E. Pacific[J]. Progress in Oceanography, 2005, 64: 31-44.
- [19] SCHILLER A, WIJFFELS S E, MEYERS G A. Design requirements for an Argo float array in the Indian Ocean inferred from observing system simulation experiments[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic technology, 2004, 21: 1598-1620.
- [20] 周慧, 许建平, 郭佩芳, 等. 棉兰老岛以东反气旋涡的 Argo 观测研究[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(6): 8-14.
- [21] 周慧, 郭佩芳, 许建平, 等. 台湾岛以东涡旋及东海黑潮的变化特征[J]. 中国海洋大学学报, 2007: 37(2): 181-190.
- [22] GUINEHUT S, LARNICOL G, LE TRAON P Y. Design of an array of profiling floats in the North Atlantic from model simulations[J]. J Mar Syst, 2002, 35: 1-9.
- [23] ACREMAN D M, JEFFERY C D. The use of Argo for validation and tuning of mixed layer models[J]. Ocean Modeling, 2007, 19: 53-69.
- [24] FORGET G, MERCIER H, FERRON B. Combining ARGO profiles with a general circulation model in the North Atlantic. Part 2: Realistic transports and improved hydrography, between spring 2002 and spring 2003[J]. Ocean Modeling, 2008, 20: 17-34.
- [25] CENTURIONI L R, NIILER P P, LEE D K. Observations of inflow of Philippine Sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait[J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34(1): 113-121.
- [26] 刘增宏, 许建平, 朱伯康, 等. 利用 Argo 资料研究 2001-2004 年期间西北太平洋海洋上层对热带气旋的响应[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(1): 1-8.
- [27] LIU Z H, XU J P, ZHU B K, et al. The upper ocean response to tropical cyclones in the northwestern Pacific analyzed with Argo data[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2007, 25(2): 123-131.
- [28] 孙朝辉, 刘增宏, 董明荣, 等. 应用 Argo 资料分析西北太平洋冬、夏季水团[J]. 海洋学研究, 2007, 25(2): 1-12.
- [29] XIE J P, ZHU J, XU L, et al. Evaluation of Mid-Depth Currents of NCEP reanalysis data in the Tropical Pacific using ARGO float position information[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2005, 22(5): 677-684.
- [30] 刘秦玉, 杨海军, 鲍洪彤. 北太平洋副热带逆流的气候特征[J]. 大气科学, 2000, 24(3): 363-372.
- [31] 袁耀初, 廖光洪, 王惠群, 等. 采用观测与卫星资料得到的地转流和谱分析研究 2002 年春季吕宋海峡海流的变化[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2009, 39(3): 370-381.
- [32] 林丽茹, 胡建宇. 太平洋东南海域表层地转流场的季节及年际变化特征[J]. 海洋科学, 2006, 30(6): 51-58.
- [33] CORKRIGHT M E, LORCANINI R A, GARCIA H E, et al. World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation[G]. Silver Spring, MD: National Oceanographic Data Center, 2002: 1-17.
- [34] 蔡树群, 甘子钧. 三维斜压陆架海模式的应用: 南海上混合层的季节变化[J]. 海洋学报, 2000, 22(3): 7-14.
- [35] 张媛, 吴德星, 林霄沛. 东海夏季跃层深度计算方法的比较[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(增刊): 1-7.
- [36] 国家技术监督局. GB12763.7-1991 海洋调查规范 海洋调查资料处理[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 67-70.
- [37] CHU P C. P-vector method for determining absolute velocity from hydrographic data[J]. MTS Journal, 1995, 29(2): 3-14.
- [38] CHU P C, LI R F. South China Sea isopycnal-surface circulation[J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 30: 2419-2438.
- [39] 卜献卫, 袁耀初, 刘勇刚. P 矢量方法在南海夏季环流诊断计算中的应用[J]. 海洋学报, 2001, 23(3): 8-17.
- [40] 王桂华, 许建平. 等密度面 P 矢量方法在南海环流诊断研究中的作用[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 124-128.
- [41] CHU P C, LAN J, FAN C W. Japan Sea thermohaline structure and circulation. Part 1: Climatology[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31: 244-271.
- [42] 王东晓, 陈举, 陈荣裕. 2000 年 8 月南海中部与南部海洋温、盐与环流特征[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(2): 97-109.
- [43] 蔡树群, 龙小敏, 陈荣裕, 等. 春季南沙群岛海区环流结构的探讨[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(2): 37-44.
- [44] 叶安乐, 李凤岐. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992: 684.
- [45] Gill A E. Atmosphere-Ocean Dynamics[M]. New York: Academic Press, 1982: 662.
- [46] 许建平, 刘增宏, 孙朝辉, 等. 利用 Argo 剖面浮标研究西北太平洋环流和水团[C] // Argo 应用研究论文集. 北京: 海洋出版社, 2006: 14-25.
- [47] PAN A J, LIU Q Y. Subtropical Mode Water in the Northwestern Pacific[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 2(2): 134-140.
- [48] 孙成学, 刘秦玉, 贾英来. 南海混合层深度的季节变化及年际变化特征[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(2): 197-203.
- [49] YUKO OHNO, YOHICO SATO, NAOTO LWASAKA. The mixed layer depth in the North Pacific as detected by the Argo floats[J]. Geophys Res Lett, 31, L11306, doi: 10.1029/2004GL019576.
- [50] XIE J P, ZHU J. Estimation of the surface and mid-depth currents from Argo floats in the Pacific and error analysis[J]. Journal of Marine Systems, 2008, 73: 61-75.