

# 基于 Argo 浮标的西北太平洋环流特征分析

张志春<sup>1,2</sup>, 袁东亮<sup>2</sup>, 李 博<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 基于 2004 年 1 月~2009 年 12 月月平均 Argo(Array for Real-time Geostrophic Oceanography)温盐格点资料, 结合 P-vector 方法重构了西北太平洋绝对地转流, 重点分析了西北太平洋环流时空变化特征。结果表明, 基于 Argo 资料西北太平洋三维结构特征与以前的研究结果是一致的。与 WOA09(World Ocean Atlas 2009)计算的纬向流相比, Argo 资料计算的纬向流要偏大。北赤道逆流(NECC)、北赤道流(NEC)、黑潮再生流(KCC)和黑潮延伸体(KE)都有明显的季节和年际变化。NECC 和 NEC 基本上呈现春强秋弱的季节变化特征, KCC 和 KE 的季节特征与 NECC 和 NEC 存在反相关系。NECC 和 NEC 表现出周期为 1~2 a 的年际信号, KCC 和 KE 为非周期性的年际信号。表层 NEC 流核所在位置以及 NEC 南边界位置都有南移的趋势。另外, NEC、KCC 和 KE 的流量也呈逐渐增大的趋势。

**关键词:** 绝对地转流; P-vector 方法; 北赤道逆流; 北赤道流; 黑潮再生流; 黑潮延伸体

中图分类号: P731.27 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)07-0093-10

doi: 10.11759/hyxx20130319001

中低纬度西北太平洋上层(海表面以下 1~2 km)海洋环流主要是风生环流, 由北太平洋热带环流和副热带环流组成。北太平洋热带环流指由北赤道流、棉兰老流和北赤道逆流组成的位于赤道到 14°N 左右的环流圈, 而副热带环流是由北赤道流、黑潮、黑潮延伸体和加利福尼亚流所组成的位于 14°~40°N 的环流圈。海洋与大气的相互作用主要是由上层海洋水平和垂直运动所控制, 所以清楚地了解此海区的环流特征对于更好地理解海气相互作用就显得十分重要<sup>[1]</sup>。

在 20 世纪 30 年代就有人开始研究西北太平洋环流<sup>[2]</sup>。到 20 世纪 60~70 年代, 黑潮联合调查(Cooperative Study of the Kuroshio, CSK)第一次大规模地调查研究这一海域的环流, 取得了非常有价值的成果<sup>[3-5]</sup>。20 世纪 80~90 年代, 随着社会经济的发展, 西北太平洋环流受到了越来越多的关注。在 TOGA(Tropical Ocean-Global Atmosphere)和 WOCE(World Ocean Circulation Experiment)计划框架下, 先后许多观测项目在此海域实施, 如美-澳西太平洋环流联合研究(US-Australia WEPOCS)<sup>[6-7]</sup>、中-美赤道西太平洋海气相互作用联合调查研究(PRC/US)<sup>[8]</sup>、中国科学院热带西太平洋海气相互作用及年际气候变化调查研究(CAS)以及日本太平洋气候研究(JAPACS)等。通过这些调查研究, 科研工作者取得了许多有价值的学术成果及宝贵的海洋大气资料, 对这一海域的环流

有了进一步的认识, 特别是新几内亚沿岸潜流<sup>[7]</sup>和棉兰老潜流<sup>[9]</sup>就是在此期间被发现的。

以上分析都是基于某一次或某一断面的观测, 它们并不能清晰地描述整个区域的平均环流特征, 更不能分析其季节变化和年际变化。Qiu 等<sup>[10]</sup>利用日本气象厅在 137°E 断面的多年观测资料, 分析了北太平洋环流的年际变化, 结果显示, 在 ENSO 年, 热带太平洋海平面降低, 北赤道流和北赤道逆流输运增加, 而且它们的边界都向南移动。Qu 等<sup>[11]</sup>利用 Levitus 年平均气候资料, 采用动力计算方法分析 130°E 断面的流场特征。在不同季节、不同年份获得的资料并不连续, 因此, 他们只是研究气候态的结果, 而对于季节变化征没能做进一步研究。近年来, 也有不少学者利用卫星高度计资料分析了北太平洋表层流系特征和中尺度涡旋的变化规律及其动力机制<sup>[12-17]</sup>。此外, 很多学者<sup>[18-24]</sup>还利用数值模式研究了

收稿日期: 2013-03-19; 修回日期: 2014-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(40888001); 中国科学院海洋环流与波动重点实验室开放基金(KLOCAW1208)

作者简介: 张志春(1982-), 男, 江西抚州人, 博士, 主要从事大洋环流动力学研究, 电话: 13922773453, E-mail: zczhang@scsio.ac.cn; 袁东亮, 通信作者, 研究员, 主要从事大洋环流动力学与气候动力学研究, 电话: 0532-82898510, E-mail: dyuan@ms.qdio.ac.cn

北太平洋环流的结构特征及其动力机制,并分析了各环流的季节和年际变化与 ENSO 之间的关系。

由上面的分析可见,尽管前人做了许多有价值的研究,但是对西北太平洋环流的了解仍不够全面,还有许多问题尚需解决。由于受观测资料的限制(比如缺乏高时空分辨率和准时间同步的资料观测资料),至今令人信服的北太平洋环流时空结构特征还没有获得<sup>[25]</sup>。而且以往该区域的观测主要集中在 1 000 m 以上,在 1 000 m 下的环流形态多由数值模式结果给出,没有对应的实测数据给予验证。所以获取更多的准同步高分辨率的观测资料对于进一步了解该区域环流形态及研究海洋动力过程具有重要意义。随着全球 Argo(Array for Real-time Geostrophic Oceanography)计划的实施,全球可利用的 Argo 温盐剖面资料不断增多,积累了多年的高分辨率和准同步的观测资料,这有助于我们提高对上层海洋的认识。本文采用 Argo 格点资料,通过 P-vector 方法计算北太平洋绝对地转流速度场,来揭示西北太平洋海域环流的时空结构特征。

## 1 数据

本文所用 Argo 格点温盐资料来自美国 Scripps Institution of Oceanography(下载地址为: [http://www.argo.ucsd.edu/Gridded\\_fields.html](http://www.argo.ucsd.edu/Gridded_fields.html)),时间范围是 2004 年 1 月~2009 年 12 月,水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,垂向分为 58 层(0~1 975 dbar)。在本文中,除了 Argo 数据外,WOA09(World Ocean Atlas 2009)温盐数据<sup>[26-27]</sup>用来作为比较,数据水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。

本文利用 2004 年 1 月~2009 年 12 月北太平洋格点化的 Argo 月平均温度和盐度数据,使用 P-vector 方法来计算绝对地转流。P-vector<sup>[28]</sup>方法的基本原理是基于位势密度和位势涡度守恒及两个近似:地转平衡和 Boussinesq 近似,等位势面与等面密度面交叉的方向决定地转流的方向,也称之为 P-vector;任意两层之间的热成风关系可以计算地转流的大小。关于该方法的详细推导见文献<sup>[28]</sup>。有关本文所用绝对地转流的有效性评估可以参考文献<sup>[29-31]</sup>。研究结果显示 P-vector 方法能较好的捕获边缘海和大尺度海洋环流的主要特征<sup>[29-33]</sup>。

## 2 平均结构特征

2004~2009 年平均的不同经向断面的温度、盐度随深度变化如图 1 所示。沿  $137^\circ\text{E}$  断面(图 1a)的主温

跃层主要集中在  $5^\circ\sim 9^\circ\text{N}$ ,等温线逐渐向南北方向延伸,其温跃层顶位于  $8^\circ\text{N}$  左右,恰好在北赤道流和北赤道逆流的南北边界处。基于  $20^\circ\text{C}$  等温线的深度分布, Kessler<sup>[34]</sup> 的研究显示,主温跃层顶位于  $7.5^\circ\sim 10^\circ\text{N}$ 。在  $20^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ ,  $150\sim 400\text{ m}$  区域,存在一个垂向位势密度梯度最小值的水团,即副热带模态水(Subtropical Model Water)<sup>[35-37]</sup>。我们注意到,在  $150^\circ\text{E}$ (图 1b)和  $170^\circ\text{E}$ (图 1c)两个断面,可以看到几乎同样的结构特征,这暗示西北太平洋温度经向变化几乎是一致的。在赤道区域( $5^\circ\text{N}$  以南),等温线几乎呈水平的分布(图 1a~图 1c),表明在平均状态下赤道西太平洋没有赤道潜流,这与 Qiu 等<sup>[10]</sup>利用 JAMSTEC(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)提供的水文数据分析的结果是一致的,然而 Toole 等<sup>[38]</sup>利用历史平均的温盐数据在中太平洋区域得出不一样的经向分布结果,在 200 m 的等深线垂直向上抬升,暗示在赤道中太平洋赤道潜流是存在的。在  $30^\circ\text{N}$  以北区域(既日本东南沿海),由于西边界流(黑潮, Kuroshio)存在,温跃层迅速的上升(图 1b 和图 1c)。

从图 1d~图 1f 中可以看出,3 个断面的盐度也呈现一致的垂向分布特征,在中层和次表层海域存在 3 个分布均匀的极值盐度区域,在赤道附近位于 150 m 处,有一个盐度最大值核( $>35.2$ ),这个高盐水可能受新几内亚沿岸潜流影响,为赤道西太平洋提供高盐、高氧水<sup>[39]</sup>。第二个盐度最大值( $>35$ )位于  $10^\circ\sim 20^\circ\text{N}$ , 150 m 附近,而且越往东盐度呈逐渐增大的趋势。有研究显示在中太平洋( $150^\circ\sim 170^\circ\text{W}$ )也出现类似的高盐水<sup>[40-41]</sup>,这可能是由于此海区海水蒸发超过降水造成的。另外一个明显的盐度极小值区域位于副热带环流海域,最小值大概位于  $25^\circ\sim 27^\circ\text{N}$ , 700 m 深,我们称之为北太平洋中层水(North Pacific Intermediate Water, NPIW)<sup>[41-42]</sup>。

基于 Argo 和 WOA09 资料计算的多年平均的绝对地转流纬向速度沿不同经向断面分布如图 2 所示。从图 2a~图 2c 可以看出,西北太平洋主要流系如北赤道逆流(NECC)、北赤道流(NEC)、副热带逆流(STCC)、黑潮再生流(Kuroshio Counter Current, KCC)和黑潮延伸体(Kuroshio Extension, KE)等都较好的体现。由于赤道附近地转流不适用,因此赤道区域环流特征在本文不讨论,不过由于 NECC 范围主要位于  $2^\circ\sim 7^\circ\text{N}$ ,而本文的绝对地转流只从  $3^\circ\text{N}$  以北开始计算,故赤道海域环流的缺少对北赤道逆流的纬向

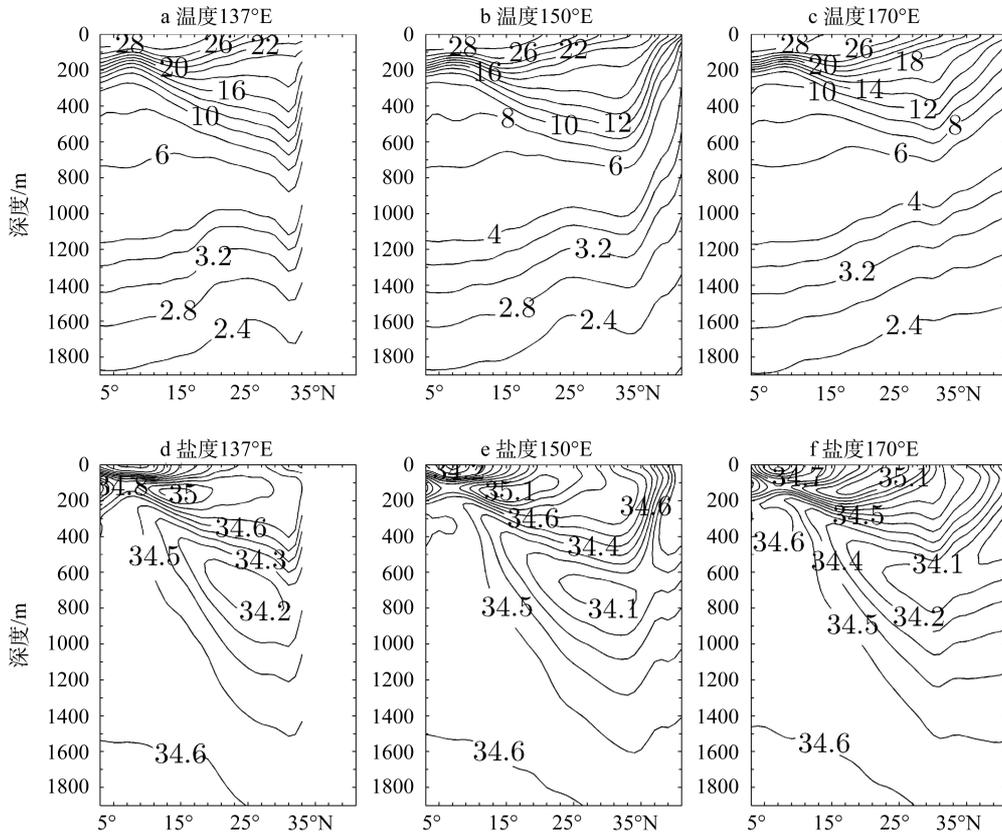


图 1 不同经向断面的温度(°C)、盐度随深度分布

Fig. 1 Meridional distribution of temperature (°C) and salinity

运输的估计会有较大的影响,如本文在 137°E 计算的 NECC 的平均运输为 25.4 Sv(表 1),而 Qiu 等<sup>[10]</sup>利用 JAMSTEC 的水文数据计算的结果为 42.1 Sv,相差将近 17 Sv,造成这些差距的原因除了估算方法和资料不同,NECC 缺少的部分可能占很大比重。NEC 向西传时其运输逐渐增大(表 1),在 137°E 断面 NEC 最大速度超过 28 cm/s,流核(最大速度)随深度加深向北移动。

表层 NEC 的南面是向东的 NECC,主要位于 200 m

以上;其北面是速度较小的东向 STCC,主要集中在 200 m 水层以上;再北面就是 KCC,向西流动。黑潮及其延伸体在所有纬向流断面分布,30°N 以北几乎都能看到。在 NEC 下面是极弱的东向流,图 2 显示,在 137°E 断面能看到一个流核,137°E 以东没有发现任何向东的流核,Wang 等<sup>[43]</sup>沿菲律宾海在 NEC 下面发现 2 个东向潜流核,他们把这个流称之为北赤道潜流。

Argo 和 WOA09 数据比较结果表明,两种数据计算的纬向流空间结构总体上是一样的(图 2d~图 2f),

表 1 西北太平洋主要环流在不同经向断面的纬向流量

Tab.1 Zonal transport of major currents at different meridional sections in the Northwest Pacific Ocean

| 环流   | 计算区域                                | 流量(Sv) |       |       |       |        |       |       |
|------|-------------------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|      |                                     | 137°E  | 140°E | 145°E | 150°E | 160°E  | 170°E | 180°E |
| NECC | 3°~7°N, 0~500 m, $u > 0.02$ m/s     | 25.4   | 22.8  | 23.6  | 16.6  | 17     | 19.2  | 22.4  |
| NEC  | 7°~21°N, 0~1 200 m, $u < -0.02$ m/s | -61    | -58.9 | -53.6 | -51.8 | -43.84 | 37.9  | -37.7 |
| STCC | 18°~25°N, 0~150 m, $u > 0$          | 2.7    | 2.4   | 2.05  | 2.7   | 2.0    | 2.2   | 2.3   |
| KCC  | 26°~35°N, 0~1 200 m, $u < 0$        | 27     | -15   | -22.1 | -20.4 | -16.3  | -14.3 | -6.3  |
| KE   | 31°~40°N, 0~1 200 m, $u > 0.02$ m/s | 58     | 42.6  | 57.8  | 55.6  | 41     | 26.8  | 17.6  |

注:  $u > 0$  为指东向;  $u < 0$  为指西向; 流量  $> 0$ : 指东向; 流量  $< 0$  指西向

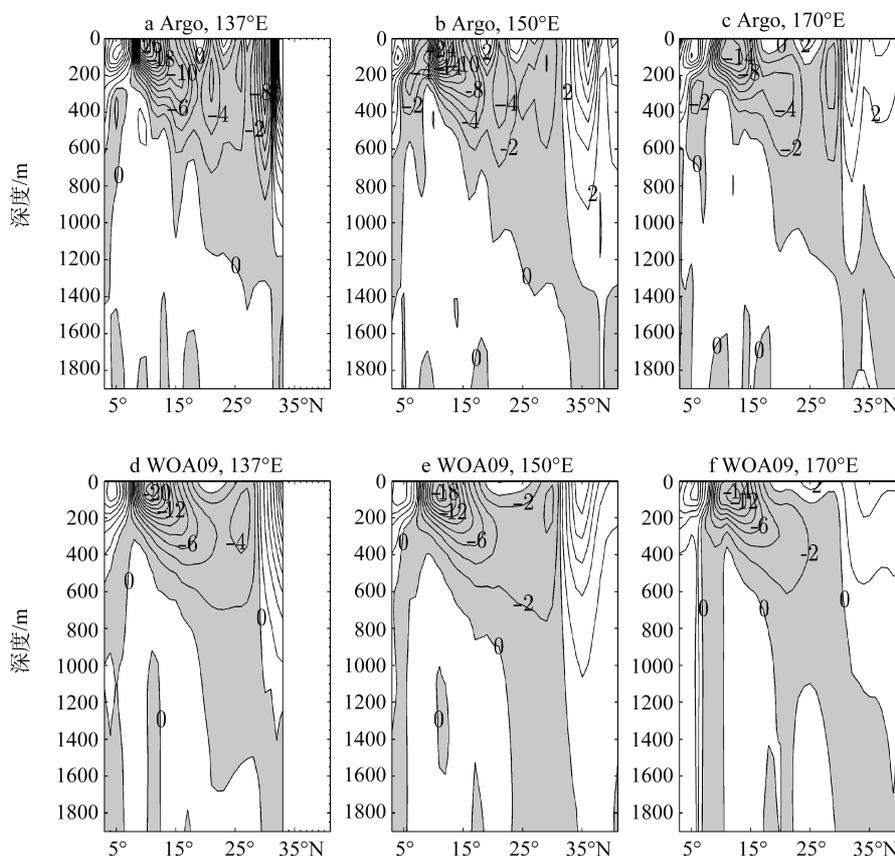


图 2 基于不同数据多年(2004~2009年)平均的绝对地转流纬向速度沿不同经向断面分布(cm/s)

Fig.2 Mean zonal absolute geostrophic velocity along different meridional sections based on different data of Argo (a-c) and WOA09 (d-f) (unit: cm/s)

阴影部分: 西向流(图 3 同)

The shade areas: westward flow (Also applied in figure 3)

NEC 和 NECC 流速都在靠近菲律宾海域明显增大, 但是相比 Argo 的结果, WOA09 计算的 NEC 和 NECC 流速明显被低估了, 对于这种现象, 我们认为有可能是使用的 WOA09 数据经过空间平滑消除了次网格的影响所致。另外, Argo 计算结果表明, 北赤道潜流在 137°E 以西菲律宾海域存在, 而 WOA09 的结果没有发现北赤道潜流核存在的迹象。

### 3 季节变化

为了说明西北太平洋环流的季节变化, 沿 137°E 断面纬向速度在不同月份的分布如图 3。从图 3 看出, NECC 在冬春季流速增大、幅度变宽, 而到了秋季均变小。同样的变化趋势在 NEC 最大速度变化中也呈现, 为了进一步证实 NEC 的这种变化, 137°E 断面表层 NEC 最大流速及其流核位置季节变化如图 4 所示, NEC 最大流速变化范围为 21~36 cm/s, 3 月份流速最大(36 cm/s), 10 月份最小(21 cm/s)。表

层 NEC 最大流速呈现冬春季变强, 夏秋季变弱的季节特征, 而北赤道流最大流速所在的位置季节变化特征不是很明显。另外, 图 4a 中表层 NEC 出现两个极大值和极小值, 暗示着 NEC 除了有年信号外还有半年信号。

对 KCC 和 KC 来说, 其流速变化呈现与 NECC 和 NEC 相反的位相关系, 为了证实这个特征, 我们也对 NECC、NEC、KCC 和 KE 的纬向输运做了计算(其计算方法见表 1), 如图 5 所示, 各流系均有明显的年季变化。NECC 流量在 3 月最大(39 Sv), 9 月最小(13 Sv); NEC 流量在 7 月最大(68 Sv), 9 月最小(53 Sv)。总体上看 NECC 和 NEC 都呈现了春季流量增大而秋季流量变小的特征, 而且出现了两个极大值(NECC: 1 月和 3 月; NEC: 6 月和 9 月)和极小值(NECC: 5 月和 9 月; NEC: 5 月和 9 月), 这也进一步证实了 NECC 和 NEC 都可能包含半年信号。KCC 流量最大值在 10 月(32 Sv), 最小值在 3 月(20 Sv); 而 KE

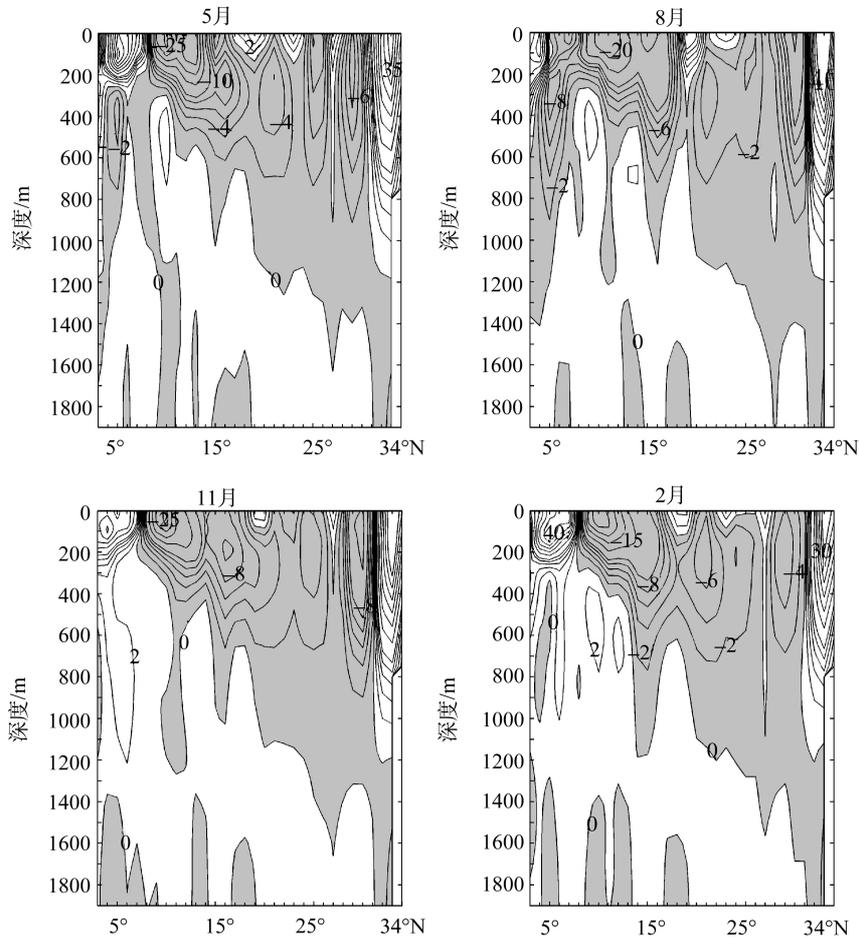


图3 西北太平洋纬向流沿 137°E 断面在不同季节随深度的分布(cm/s)

Fig. 3 Distribution of mean zonal absolute geostrophic velocity along 137°E section in different seasons (unit: cm/s)

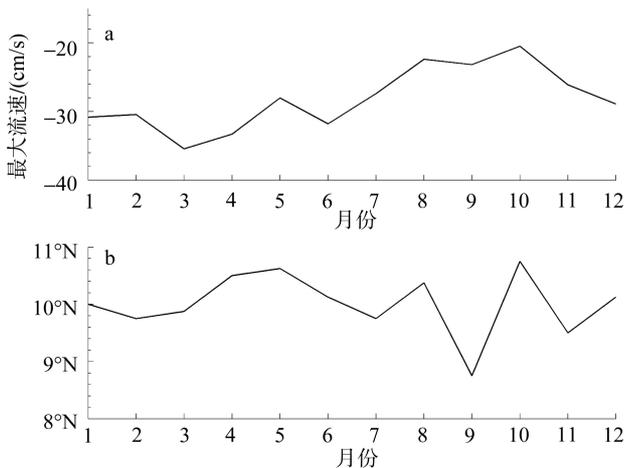


图4 表层北赤道流最大速度及其所在纬度季节变化

Fig. 4 Mean seasonal cycle of surface NEC and its position along 137°E section

流量最大值在9月(64 Sv), 最小值在3月(51 Sv), 它们都呈现了秋季变大而春季变小的季节特征, 这正好与 NECC 和 NEC 的季节变化反相位。而且从图 5c

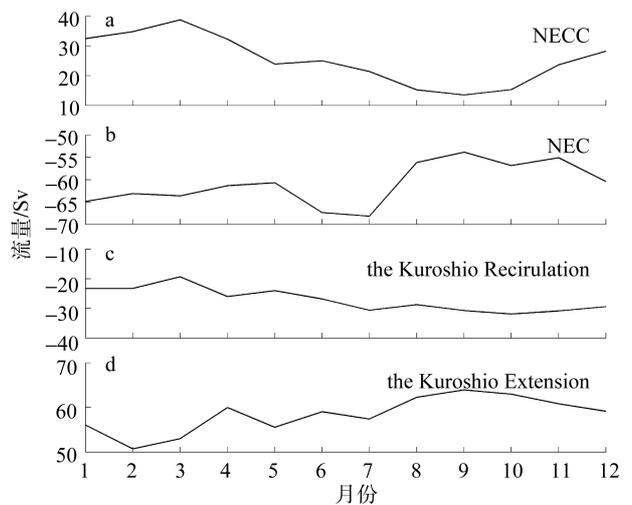


图5 137°E 断面西北太平洋环流纬向运输的季节变化

Fig. 5 Zonal transport seasonal cycle of main circulation in the Northwest Pacific Ocean along 137°E section

和图 5d 没有发现 KCC 和 KE 有两个极大值和极小值现象, 这暗示着 KCC 和 KE 可能没有半年信号。

## 4 年际变化

为了分析西北太平洋环流年际变化,我们首先利用 Argo 数据计算了西北太平洋海表动力高度异常(去掉季节信号)。图 6 是沿 145°E 断面海表动力高度异常(相对 1 500 dbar)随时间变化。从图 6 可以看出,在中纬度海域(25°N 以北),主要的年际信号出现在 KE 区域,虽然其振幅很大,但其波动是非周期性

的。而在低纬度海域(主要是 NECC, NEC 所在海域),整个区域都可以看到明显的年际信号,虽然振幅较小,但是波动是周期性的(1~2 a),这里我们把 6°~12°N 平均的海表高度异常经过 1~5 a 的带通滤波后发现,其主要的波动仍然是以 1~2 a 为主。从图 6 还可以看出中纬度海域与低纬度海域年际信号呈反相位变化。

图 7 是 Niño-3.4 指数、137°E 断面表层 NEC 最

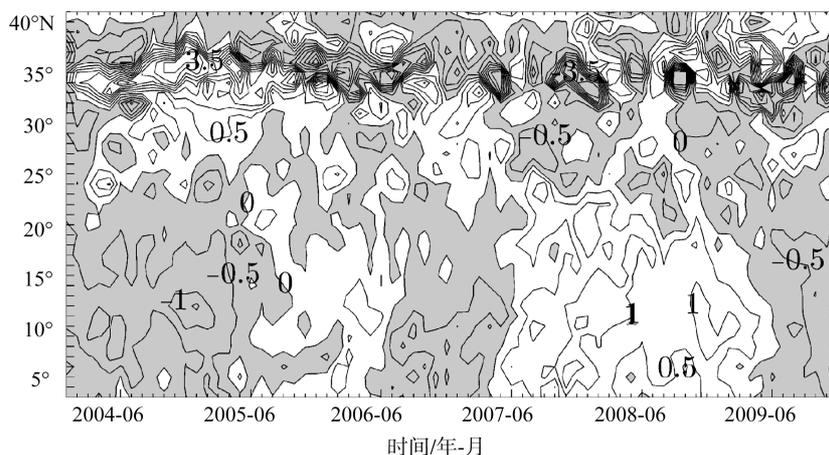


图 6 145°E 断面不同纬度的海表动力高度异常(相对 1 500 dbar)随时间变化分布( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

Fig. 6 The surface dynamic height anomalies (related to 1 500 dbar) calculated from Argo along 145°E section ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )  
阴影部分: 负异常

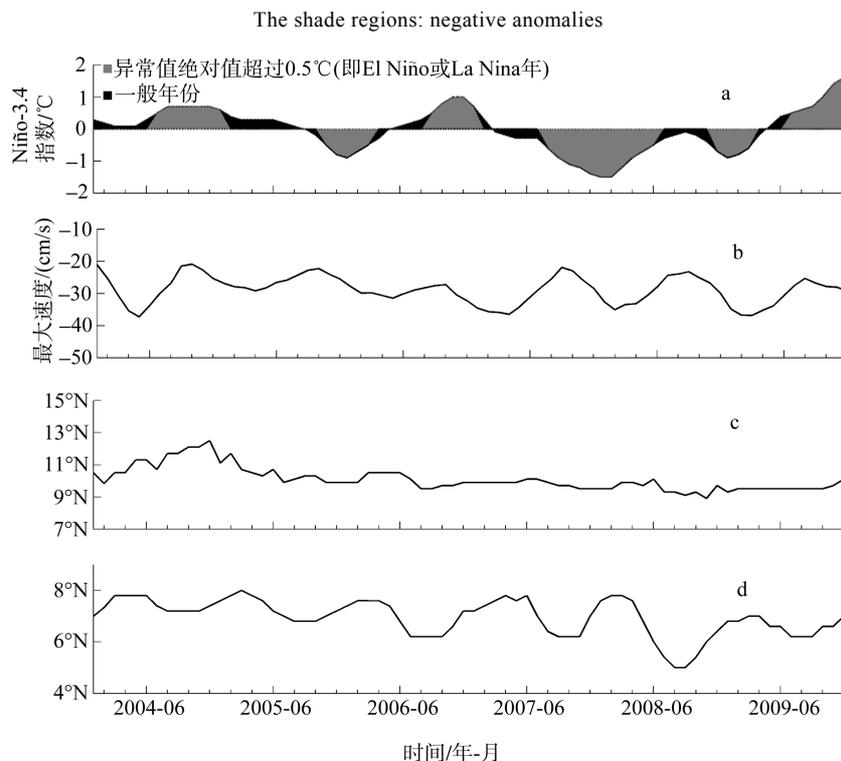


图 7 Niño-3.4 指数(a)、表层 NEC 最大流速(b)、流核所在位置(c)和表层 NEC 最南面位置(d)随时间变化

Fig. 7 Time series of Niño-3.4 index (a), surface NEC max velocity (b), the position of max velocity (c) and the south boundary of the NEC (d)

大速度、流核位置以及 NEC 南边界位置随时间变化图,可以看出,NEC 最大速度和 NEC 南边界都有明显的年际变化,而流核位置的年际变化不是很明显。在 2004~2009 年的 3 次(2004~2005 年、2006~2007 年、2009 年)El Niño 发生期间,NEC 最大流速逐渐增大,而在 La Nina(2007~2008 年)发生期间,最大流速明显减小。这是因为在 El Niño 期间,西风异常在热带西太平洋发展并向东移动,同时  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$  为气旋式风应力旋度异常,西风异常和气旋式风应力旋度异常导致向上的 Ekman 抽吸异常,在海洋中激发第一斜压模上升流 Rossby 波;上升流 Rossby 波向西传播并使密跃层变浅,西传的上升流斜压 Rossby 波的累积效应使得热带西太平洋海表面高度降低<sup>[44]</sup>。海表面高度的降低在海洋上层引起气旋式环流异常,从而

导致 NEC 速度增加。

另外值得注意的是,NEC 流核以及 NEC 南边界都有向南移动的趋势(图 7c 和图 7d),Qiu 等<sup>[45]</sup>分析卫星高度计资料也发现同样的现象,他们认为是由近年来沃克环流(Walker circulation)的加强导致上层水团的重新分布引起的。北太平洋主要流系的纬向输运随时间变化如图 8 所示,从图 8 可以看出,NECC、NEC、KCC 和 KE 流量都有明显的年际变化,其中 NECC、NEC 都呈现准 1 a 的波动周期,而 KCC 和 KE 的波动则无明显周期性。另外,从图 8 还可以得出,NECC 和 NEC 的流量变化与 KCC 和 KE 的变化呈现相反的趋势,而且除 NECC 外,NEC、KCC 和 KE 流量都有随时间逐渐增大的趋势,而具体原因还有待进一步分析。

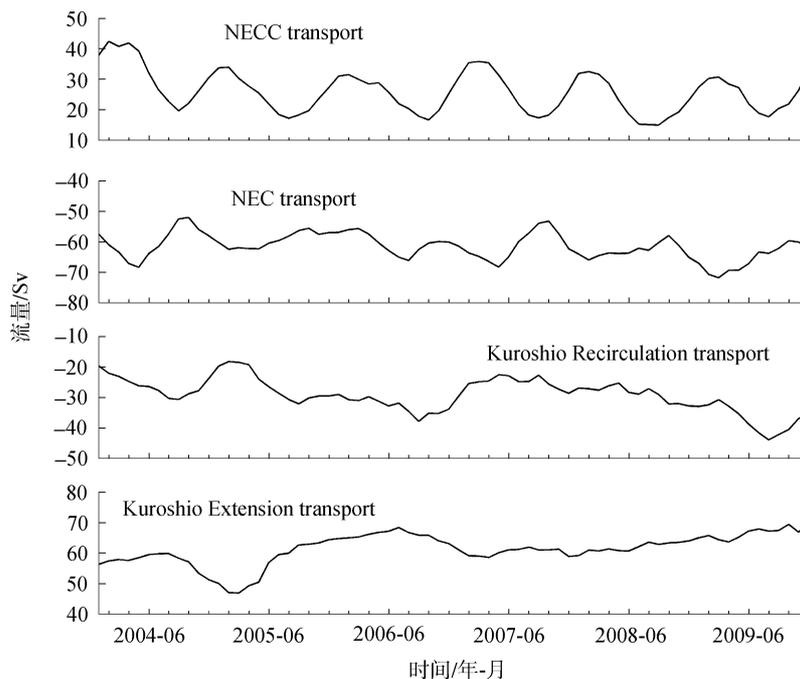


图 8 北太平洋主要流系的纬向输运随时间变化

Fig. 8 Time series of zonal transport of main circulation in the Northwest Pacific Ocean along 137°E section

## 5 结论

本文利用 2004~2009 年 Argo 资料,基于 P-vector 方法计算了西北太平洋绝对地转流,并分析了西北太平洋主要环流的时空特征,主要结论如下。

1) 2004~2006 年平均的 Argo 温、盐结构和基于 Argo 资料计算的西北太平洋环流结构与已知的研究结果非常吻合。与由 WOA09 计算的纬向流相比,Argo 资料计算的纬向流流速要偏大。

2) Argo 数据计算的 NECC、NEC、KCC 和 KE 都有明显的季节变化。NECC 和 NEC 基本上呈现春强秋弱的季节变化特征,而 KCC 和 KE 的季节特征与 NECC 和 NEC 存在反相位关系。另外,NECC 和 NEC 也可能存在半年振荡信号。

3) Argo 数据计算的 NECC、NEC、KCC 和 KE 也存在明显的年际变化。NECC 和 NEC 表现为周期 1~2 a 的年际变化,而 KCC 和 KE 则为非周期性的年际信号。表层 NEC 最大速度以及流核所在位置存在

年际变化特征, 其流核所在位置以及 NEC 南边界位置都有往南移的趋势。另外, NEC、KCC 和 KE 的流量也呈现逐渐增大趋势。至于为什么 NEC 往南移, 出现 NEC、KCC 和 KE 流量增大现象, 目前还没有定论, 则有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Huang R X, Qiu B. Three dimensional structure of the wind-driven circulation in the Subtropical North Pacific[J]. *Journal of Physical Oceanology*, 1994, 24: 1608-1622.
- [2] Schott G. Die aquatorialen strommungen des westlichen Stillen Ozeans[J]. *Ann Hydrogr Mar Meteorol*, 1939, 67: 247-257.
- [3] Stommel H, Yoshida K. Bathymetry of the Kuroshio Region[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972: 517.
- [4] Masuzawa J. Second cruise for CSK, Ryofu Maru, January to March[J]. *Oceanographical Magazine*, 1968, 20: 173-185.
- [5] Nitani H. Beginning of the Kuroshio[M].Tokyo: Univ of Tokyo Press, 1972: 129-163.
- [6] 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: 7089-7104.
- [7] Lindstrom E, Lukas R, Fine E, et al. The western Equatorial Pacific Ocean Circulation Study[J]. *Nature*, 1987, 330: 533-537.
- [8] Toole J M, Millard R C, Zongshan, et al. Observations of the Pacific North Equatorial Current bifurcation at Philippine coast[J]. *J Phys Oceanogr*, 1990, 20: 307-318.
- [9] Hu D X, Cui M, Qu T D, et al. A subsurface northward current off Mindanao identified by dynamic calculation[C] // Takanao K. *Oceanography of Asian Marginal Seas*. New York: Elsevier, 1991: 359-365.
- [10] Qiu B, Joyce J M. Interannual variability in the mid- and low-latitude western North Pacific[J]. *J Phys Oceanogr*, 1992, 22: 1062-1079.
- [11] Qu T D, Mitsudera H, Yamagata T. On the western boundary currents in the Philippine Sea[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 7537-7548.
- [12] Qiu B. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory[J]. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 2471-2486.
- [13] Qiu B, Chen S. Decadal variability in the large-scale sea surface height field of the South Pacific Ocean: Observations and causes[J]. *J Phys Oceanogr*, 2006, 36: 1751-1762.
- [14] Lee T, Hakkinen S, Kelly K, et al. Satellite observations of ocean circulation changes associated with climate variability[J]. *Oceanography*, 2010, 23: 70-81.
- [15] Chen S, Qiu B. Mesoscale eddies northeast of the Hawaiian archipelago from satellite altimeter observations[J]. *J Geophys Res*, 2010, 115: C3.
- [16] Qiu B, Chen S. Interannual variability of the North Pacific Subtropical Countercurrent and its associated mesoscale eddy field[J]. *J Phys Oceanogr*, 2010, 40: 213-225.
- [17] Oka E, Qiu B, Kouketsu S, et al. Decadal seesaw of the Central and Subtropical Mode Water formation associated with the Kuroshio Extension variability[J]. *J Oceanogr*, 2012, 68: 355-360.
- [18] Lukas R, Yamagata T, McCreary P. Pacific low-latitude western boundary currents and the Indonesian throughflow[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12209-12216.
- [19] Qu T D, Lukas R. The bifurcation of the North Equatorial Current in the Pacific[J]. *J Phys Oceanogr*, 2003, 33: 5-18.
- [20] Yaremchuk M, Qu T D. Seasonal Variability of the Large Scale Curenets near the Coast of the Philippines[J]. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34(4): 844-855.
- [21] Qiu B, Lukas R. Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Curent, the Mindanao Current and the Kuroshio along the Pacific western boundary[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12315-12330.
- [22] Kim Y Y, Qu T D, Jensen T, et al. Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: C03040.
- [23] Yign N, Yim B Y, You S H, et al. Seasonal variation of

- eddy kinetic energy of the North Pacific Subtropical Countercurrent simulated by an eddy-resolving OGCM[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(7): L07601.
- [24] Taguchi B, Qiu B, Nonaka M, et al. Decadal variability of the Kuroshio Extension: mesoscale eddies and recirculations[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60: 673-691.
- [25] 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.
- [26] Antonov J I, Seidov D, Boyer T P, et al. *World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity*[C] // Levitus S. NOAA Atlas NESDIS 69. Washington, D C: US Government Printing Office, 2010: 184.
- [27] Locarnini R A, Mishonov A V, Antonov J I, et al. *World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature*[C] // Levitus S. NOAA Atlas NESDIS 68. Washington, D C: US Government Printing Office, 2010: 184.
- [28] Chu P C, Fan C, Lozano C J, et al. An airborne expendable bathythermograph survey of the South China Sea, May 1995[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(10): 21637-21652.
- [29] Chu P C. P-vector method for determining absolute velocity from hydrographic data[J]. *Marine Tech Soc J*, 1995, 29(2): 3-14.
- [30] Zhang Z C, Yuan D L. Geostrophic Meridional Transport in the Tropical Northwest Pacific Based on Argo Profiles[J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 2013, 31(3): 656-664.
- [31] Yuan D L, Zhang Z C, Chu C P, et al. Geostrophic circulation in the Tropical North Pacific Ocean based on Argo profiles[J]. *J Phys Oceanogr*, 2014, 44: 558-575.
- [32] Chu P C. P-vector spiral and determination of absolute velocities[J]. *J Oceanogr*, 2000, 56: 591-599.
- [33] Chu P C, Lan J, Fan C W. Japan Sea circulation and thermohaline structure Part , *Climatology*[J]. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31: 244-271.
- [34] Kessler W S. Observations of long Rossby waves in the northern tropical Pacific[J]. *J Geophys Res*, 1990, 95: 5183-5217.
- [35] Masuzawa J. *Water characteristics of the North Pacific central region. Kuroshio: Its Physical Aspects*[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972 : 95-127.
- [36] Masuzawa J. Subtropical mode water [J]. *Deep-Sea Res*, 1969, 16: 463-472.
- [37] Hanawa K. Interannual variations in the winter-time outcrop area of Subtropical Mode Water in the western North Pacific Ocean[J]. *Atmos Ocean*, 1987, 25: 258-274.
- [38] Toole J M, Zou E, Millard R E. On the circulation of the upper waters in the western equatorial Pacific Ocean[J]. *Deep-Sea Res*, 1998, 35: 1451-1482.
- [39] Tsuchiya M, Lukas R, Fine A, et al. Source waters of the Pacific Equatorial Undercurrent [J]. *Progress in Oceanography*, 1989, 23: 101-147.
- [40] Tsuchiya M, Kilonsky B. Mean water and current structure during the Hawaii-to-Tahiti Shuttle Experiment[J]. *J Phys Oceanogr*, 1984, 14: 242-254.
- [41] Reid J L. *Intermediate water of the Pacific Ocean*[M]. Baltimore: Johns Hopkins Oceanogr Stud, 1965: 85.
- [42] Yoshinari H, Yasuda I, Ikeda M. Meridional transport of North Pacific Intermediate Water across 37N based on an objective analysis of lowered acoustic Doppler current profiler data[J]. *J of Geophys Res*, 2004, 109: C2.
- [43] Wang F, Hu D X. Dynamic and thermohaline properties of the Mindanao Undercurrent II thermohaline structure[J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 1998, 16(3): 206-213.
- [44] Wang C, Weisberg R, Virmani J. Western Pacific interannual variability associated with the El Niño-Southern Oscillation[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104: 5131-5149.
- [45] Qiu B, Chen S M. Multidecadal Sea Level and Gyre Circulation Variability in the Northwestern Tropical Pacific Ocean[J]. *J Phys Oceanogr*, 2011: 1-14.

# Analysis of circulation structure in the Northwest Pacific Ocean based on Argo profiles

ZHANG Zhi-chun<sup>1, 2</sup>, YUAN Dong-liang<sup>2</sup>, LI Bo<sup>2, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Received:** Mar., 19, 2013

**Key words:** absolute geostrophic velocity; P-vector method; the north equatorial countercurrent; the north equatorial current; the Kuroshio countercurrent; the Kuroshio extension

**Abstract:** Absolute geostrophic velocity reconstructed by using P-vector method based on gridded Argo profiling float data during 2004-2009 was analyzed to study the temporal and spatial structure in the Northwest Pacific Ocean. The results show that the 3-D structure based on the Argo data in the Northwest Pacific Ocean is basically consistent with previous studies. The zonal geostrophic currents based on the Argo profile data were found to be stronger than those based on the traditional WOA09 data. Obvious seasonal and interannual signals were found in the North equatorial counter current (NECC), the north equatorial current (NEC), the Kuroshio countercurrent (KCC) and the Kuroshio extension (KE). The NECC and the NEC (the KCC and the KE) have a seasonal maximum (minimum) value in spring and minimum (maximum) in fall. The NECC and the NEC also have a periodic interannual signal from a period of 1-2 years. In contrast, the KCC and the KE show an aperiodic interannual signal. The position of the surface NEC maximum velocity and the south boundary of the surface NEC show a southward migrating trend and the zonal transports of the NEC, KCC and KE are increasing gradually.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)