基于 Argo 资料的北太平洋绝对地转流计算

张志春[1,2], 袁东亮[1]

(1.中国科学院 海洋研究所 海洋环流与波动重点试验室, 山东 青岛 266071; 2. 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)

摘要: 针对海洋实测流速资料极其匮乏的事实, 利用 2004 年 1 月~2009 年 12 月月平均的 Argo 温盐格点资料, 结合改进的 P-vector 方法重构北太平洋绝对地转流流场。与卫星高度计和实测流速的比较以及相关性分析表明, 重构的绝对地转流是可信的, 可以用来研究不同大尺度环流特征及其动力结构。可以为研究海洋动力过程和气候变化提供一套有用的流场数据。

关键词: 北太平洋; Argo 资料; P-vector 方法; 绝对地转流

中图分类号: P731.27 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)05-0114-06

doi: 10.11759/hykx20130307001

海流是大规模的海水以相对稳定的速度做非周期性的流动, 是物理海洋学最重要的组成部分。因此, 获取大洋环流的结构特征是我们研究了解海水及海洋生物营养盐等分布, 预报全球气候变化的前提。在过去的一个世纪中, 许多海洋学家对海洋环流进行了观测和分析[1-13]。由于观测技术的限制和高昂的观测费用, 使得直接观测的海洋环流数据非常稀少(主要集中在表层和次表层, 鲜有中层和深层的), 而水文资料与化学示踪物的定点观测相比而言容易许多, 因而根据这些资料衍生出推测流场的方法多达十几种。最有代表性要属描述性方法、动力计算方法、Stommel 和 Schott[14]的 β 螺旋方法、Wunsch[15]的逆方法及 Chu[16]的 P-vector 方法。

这些方法的出现对推动物理海洋学的发展起着非常重要的作用。描述性方法是利用化学追踪物分布定性的描述海洋环流的运动轨迹, 但是不能定量地计算。大尺度环流主要是由地转流组成的, 因此地转平衡与静力平衡几乎是定量计算大尺度环流的动力基础。动力计算方法是基于温度、盐度得到的动力高度通过地转平衡关系计算的环流[17], 其算法简单, 而且零参考面的假定使得不能获取绝对地转流, 这就促使 β 螺旋方法[14, 18]、Wunsch[15]逆方法及 P-vector[16]方法的产生。β 螺旋方法在算法上属于过定系统(方程数多于未知数), 需使用最小二乘法求解, 在计算过程中位密使用二阶迭代, 地转流有可能出现较大的噪声使得结果偏离真实值; 逆方法在算法上属于不定系统(方程数少于未知数), 需要假定正压能量最小; P-vector[16]方法基于位密和位涡守恒的假定, 在 Boussinesq 和地转平衡假定下近似于 β 螺旋方法, 它仅通过位密梯度就可以较好地控制绝对地转流的误差。

在以前的研究中, 观测数据稀疏且散乱, 所以如何获取更多的观测资料且根据现有的数据重构绝对地转流流场, 对于进一步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 剖面温盐资料不断增多, 多年积累的高时空分辨率和准时间同步性的观测资料有助于我们提高对上层海洋的认识。目前, Argo 数据在我国很多领域中都得到了应用, 许多科学家都开展了对 Argo 资料的应用研究工作[19-24], 但总体来讲不是很深入。尽管 Argo 资料很多, 但是对 Argo 资料的应用大多是利用温盐剖面资料, 而把 Argo 资料结合各种逆方法重构绝对地转流流场的研究在国内还少见。本文拟采用 Argo 格点资料, 通过 P-vector[16] 方法重构北太平洋绝对地转流流场, 来揭示北太平洋海域环流的时空特征。

收稿日期: 2013-03-07; 修回日期: 2014-03-01

基金项目: 国家基础研究计划(2012CB956000);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: 020-89023486, 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

1 数据和方法

1.1 数据

本文所用的 2004 年 1 月~2009 年 12 月的 Argo 格点温盐资料从，可从美国 Scripps Institution of Oceanography 网站下载(http://www.argo.ucsd.edu/Gridded_fields.html)，数据水平分辨率为 1° × 1°，垂向为 58 层(0~1975 m)。除了 Argo 数据外，本文还使用了 WOA09(World Ocean Atlas 2009)温度[25]和盐度[26]数据。为了验证数据的有效性，本文还用到卫星高度计、TRITON(Triangle Trans-Ocean Buoy Network)和 TAO (Tropical Atmosphere–Ocean)定点观测海流数据集(下载地址: http://www.pmel.noaa.gov/tao/)。高度计资料来源于 AVISO(Archivings Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data)提供的(1/3º)×(1/3º)网格化数据，该数据融合了 TOPEX/POSEIDON、JASON、ERS1/2 等卫星资料(下载地址为 http:// www.aviso.oceanobs.com/)。

1.2 基于 P-vector 方法绝对地转流计算

本文利用 2004 年 1 月~2009 年 12 月副热带北太平洋(5°~45°N)格点化的 Argo 月平均温度和盐度数据，使用 P-vector 方法来重构绝对地转流。P-vector 方法的基本原理是基于位势密度和位势涡度守恒(公式(1)和公式(2))及两个近似(地转平衡和 Boussinesq 近似)[16]，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(公式(4)和公式(5))可以计算地转流的大小。研究结果显示 P-vector 方法能较好地捕获边缘海和大尺度海洋环流的主要特征[16, 23, 27-29]。P-vector 方法的控制方程如下:

$$\boldsymbol{V}\cdot\nabla\rho=0 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{V}\cdot\nabla q=0 \tag{2}$$

$$q=f\frac{\partial\rho}{\partial z} \tag{3}$$

$$u=u_0+\frac{\mathrm{g}}{f\rho_0}\int_{z_0}^{z}\frac{\partial\rho}{\partial y}\mathrm{d}z \tag{4}$$

$$v=v_0-\frac{\mathrm{g}}{f\rho_0}\int_{z_0}^{z}\frac{\partial\rho}{\partial x}\mathrm{d}z \tag{5}$$

其中，u, v 为速度场，ρ, q 分别为位势密度场和位势涡度场，u_0, v_0 为参考层速度 ρ_0 为平均密度，z_0 参考层深度，f 为科氏力，g 为重力加速度，x、y、z 为直角坐标系坐标轴方向。关于该方法的详细推导见文献[28]。

在以前的研究中[16]，P-vector 计算的绝对地转流是在整个海洋水柱中使用最小二乘法拟合获取的。海洋中位涡的量级非常小，这可能导致位涡梯度的量级与 P-vector 方法的计算误差或者平滑误差引起的误差量级相当。因此，为了减小位涡干扰，在 P-vector 中用积分方法代替了 β 螺旋方法采用的微分方法。而且在大洋上混合层位势密度和位势涡度守恒不能精确地遵守，因此我们仅仅使用 P-vector 方法重构大洋中层的地转流。本文中我们使用 P-vector 方法计算 800~1 975 m 之间的绝对地转流；在 800 m 之上的绝对地转流使用 800 m 层的绝对地转流作为零参考面通过动力计算方法获取。实验发现只要 P-vector 计算范围明显地在混合层以下，绝对地转流的重构对零参考面的选取是不敏感的。另外，由于 P-vector 方法不能应用于低纬度海域，若纬度太低，f 很小，方程变为奇异，计算结果偏差较大，故本文只计算 5°N 以北海域，赤道区域不予考虑。

2 计算结果与分析

2.1 绝对地转流有效性评估

在分析北太平洋绝对地转流的时空特征时，应先对其有效性进行评估。图 1 是 2004~2009 年北太平洋平均的海表动力高度，图 1a 是由 Argo 温盐数据计算得到，相对参考面为 1 400 m，图 1b 是卫星高度计数据。从图中能看出除了在西北太平洋中高纬度

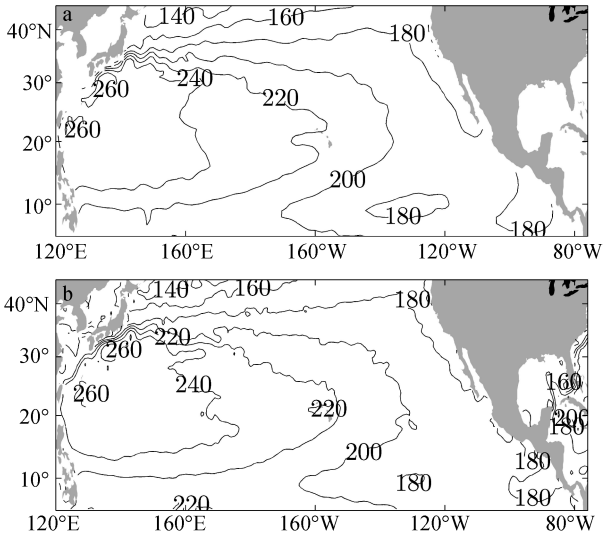

图 1 基于不同资料计算的 2004~2009 年北太平洋平均海表动力高度分布(cm，相对于 1 400 m 高度)

Fig. 1 The distribution of sea surface dynamic height of the North Pacific Ocean based on different data (cm reference level depth: 1 400 m)

a: 由 Argo 温、盐数据计算得到; b: 卫星高度计数据

a: Calculated by the temperature and salinity data of Argo; b: Altimeter sea level

区域有些差异之外，它们的空间变化趋势几乎一致，对于在西北太平洋中高纬度区域出现的差异可能是由黑潮延伸体导致的，由此可以认为我们所使用的Argo格点资料是可靠的。

图2为表层绝对地转流(137°E, 8°N)的年际变化与TRITON/TAO提供的定点(10 m, 137°E, 8°N)实测流场数据的对比结果，另外，作为参照，由卫星高度计绝对海平面计算的地转流年际变化也显示在图2。由于TRITON实测的流场数据包含了非地转流(主要是Ekman流)，为了使对比效果更明显，基于月平均的NCEP/NCAR风场数据计算的Ekman速度从实测流速中抽取出去(此处计算Ekman速度时垂直涡粘性系数假定为0.012 m^2/s，相应的Ekman层厚度大约为91 m)。含有Ekman速度的TRITON实测流速和没有Ekman 速度的实测流速差距不大，可能是由于在137°E, 8°N存在微弱的东向纬向流。从图2能看出，绝对地转流与实测流速有很好的一致性，它们的纬向和经向速度的相关系数分别为0.605和0.669(经过95%置信水平检验)，相比卫星高度计计算的地转流与实测流速相关系数(分别为0.7和0.79，经过95%置信水平检验)偏小，仍然呈现显著的正相关，这也暗示绝对地转流具有一定的真实性。

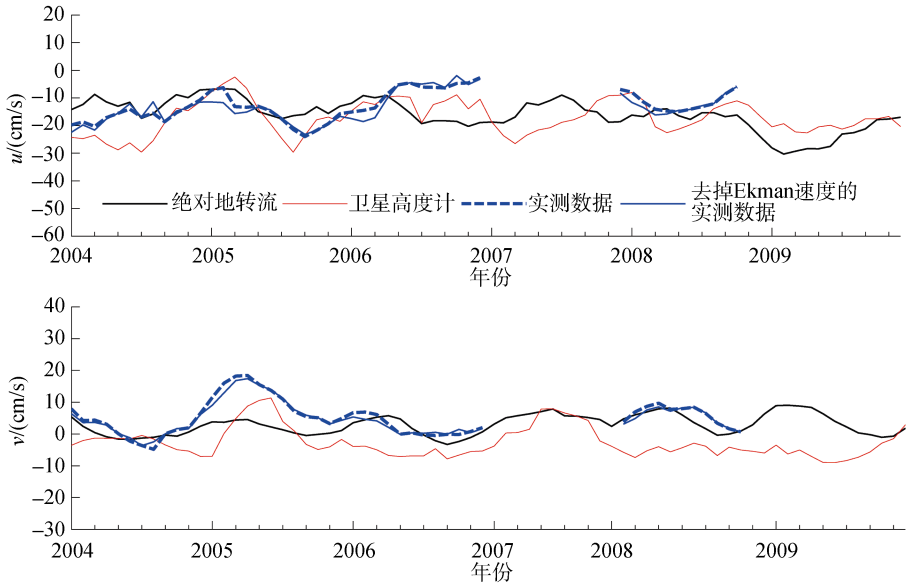

图2　137°E, 8°N表层绝对地转流与TRITON实测流速、减去Ekman速度的TRITON实测流速和卫星高度计得到的地转流比较

Fig.2　Comparisons of currents at a depth of 10 m at 137°E, 8°N between the absolute geostrophic currents reconstructed by the P-vector method, the in-situ TRITON data with the Ekman velocity subtracted, the in-situ TRITON data and the satellite altimeter surface geostrophic currents

为了进一步验证绝对地转流的有效性，北太平洋表层绝对地转流与卫星高度计地转流的相关系数(经过95%置信水平检验)如图3所示。纬向和经向速度的相关系数都成正相关，在热带太平洋区域和西北太平洋区域的相关系数都在0.4以上，有的高达0.8，而东北太平洋区域纬向和经向速度相关系数都相对较低，这可能与在这些区域Argo浮标布放的数量较少有关(图4)。图4是2009年2月、5月、8月和11月Argo浮标在北太平洋的有效剖面数分布，从中可看出，4个月的Argo剖面数在东北太平洋都相对较少。

综合以上分析可认为，P-vector方法重构的三维绝对地转流是有效的，可以用来描述大尺度环流的结构特征及动力特征的。

2.2　北太平洋流场分析

图5给出了2004~2009年北太平洋不同深度绝对地转流平均流场分布，从中可以看出北太平洋表层环流主要流系的分布特征：(1)表层北赤道流贯穿于整个北太平洋海盆，主要位于7°~18°N，随深度增加，北赤道流逐渐往北移动；(2)北赤道逆流也贯穿于整个海盆，主要位于7°N以南；(3)黑潮沿菲律宾沿海向北经吕宋海峡进入东中国海，在日本东南海域形成黑潮延伸体，北赤道流-黑潮-黑潮延伸体在副热带太平洋构成一个封闭的反气旋环流；(4)副热带

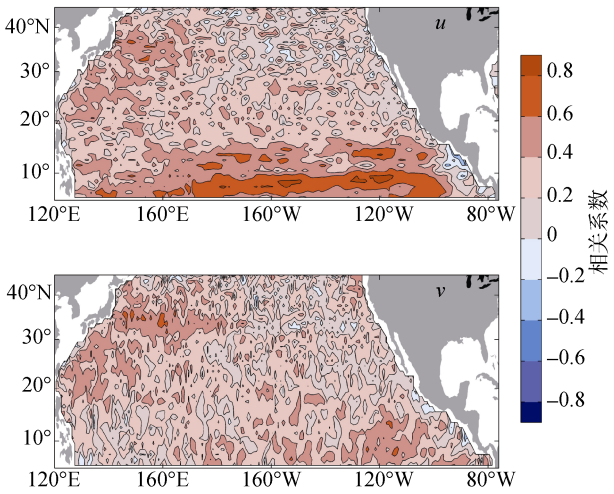

图 3　北太平洋表层绝对地转流与卫星高度计海平面高度计算的地转流相关系数分布

Fig. 3　The distribution of the correlation coefficient between the absolute geostrophic velocity reconstructed by the P-vector method and the satellite altimeter surface geostrophic velocity in the North Pacific Ocean

逆流流速很弱，主要位于上表层副热带海区。P-vector 方法重构的绝对地转流捕捉的北太平洋大尺度环流特征与前人的研究是一致的。菲律宾海和东中国海西边界流在图 5 中不能很好地体现，有可能是使用的资料水平分辨率(1°×1°)不足所致。由此可见，P-vector 方法重构的北太平大尺度环流是可信的。

3　结论

本文利用 Argo 资料结合 P-vector 方法重构了 2004~2009 年逐月的北太平洋绝对地转流速度场。将重构的流场与卫星高度计资料、实测流速等进行有效性分析，取得了令人信服的结果。重构的多年平均绝对地转流所揭示的北太平洋环流结构特征与以前的研究结果一致，表明 P-vector 方法重构的北太平洋大尺度环流是可靠的。由于本文使用的 Argo 资料时间比较短(只有 6 a)，而北太平洋区域环流的年际和年代际特征比较显著，因此，仅仅用 6 a 的资料去分析北太平洋环流的年际及年代际变化就显得有些

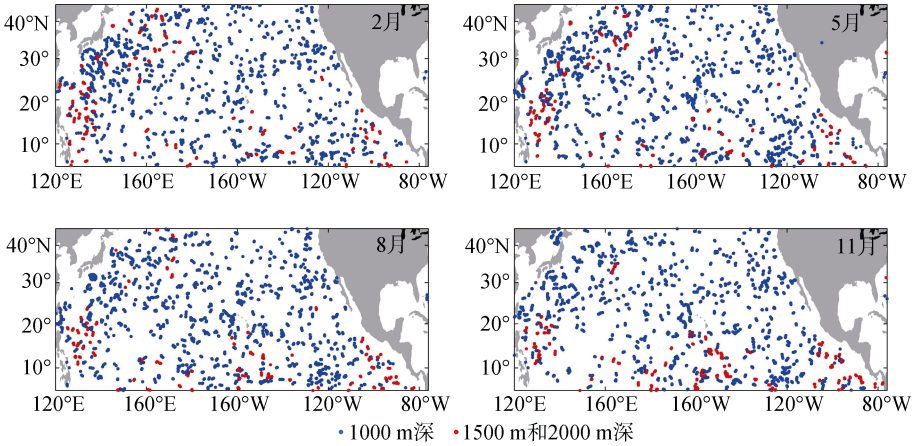

图 4　2009 年 Argo 浮标在不同月份的有效剖面数

Fig. 4　The number of Argo profiles in different months in 2009

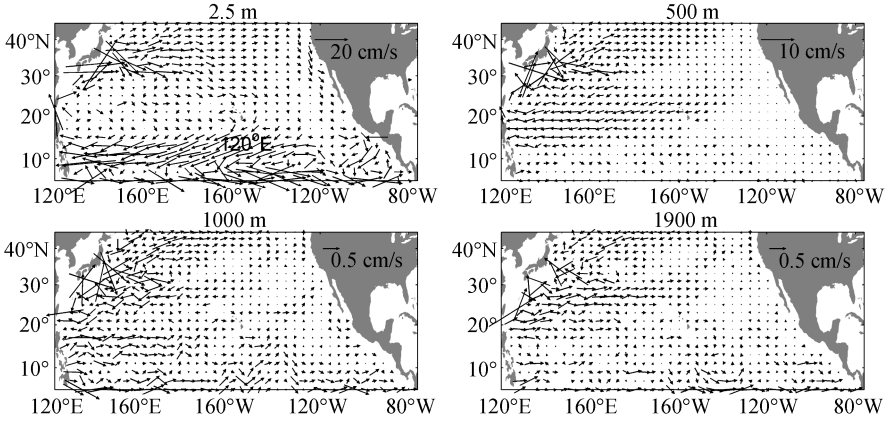

图 5　2004~2009 年北太平洋不同深度平均绝对地转流

Fig.5　Distribution of mean surface absolute geostrophic currents of the North Pacific Ocean from 2004 to 2009

不足。然而，随着全球海洋 Argo 浮标资料以及可以利用的卫星遥感资料和一些较好的同化产品的不断增多，结合 P-vector 重构的绝对地转流将更好地揭示北太平洋时空变化特征及其动力结构。

致谢：感谢美国海军研究院的 Peter Chu 博士提供的 P-vector 方法计算程序代码；感谢 cripps Institution of Oceanography 提供的 Argo 格点数据；本文还要感谢 TAO/TRITON 提供的实测海流数据集以及 AVISO 提供的 1/3º×1/3º网格化卫星高度计数据。

参考文献：

[1] Ekman V W. On the influence of the earth's rotation on ocean currents [J]. Ark Mat Astron Fys, 1905, 2: 1-52.

[2] Schott G. 1943. Nachtrag zu dem Aufsatz "Die Grundlagen einer Weltkarte der Meeresströmungen" [J]. Ann Hydrogr Marit Meteorol, 1943, 71: 281-282.

[3] Swallow J C. A neutral-buoyancy float for measuring deep currents [J]. Deep-Sea Res, 1955, 3: 74-81.

[4] Reid J L. On the geostrophic flow at the surface of the Pacific Ocean with respect on the 1000-decibar surface [J]. Tellus, 1961, 13: 489-496.

[5] Stommel H. Summary charts of the mean dynamic topography and current field at the surface of the ocean and related functions of the mean wind stress[C]// Yoshida K. Studies on oceanography. Tokyo: University of Tokyo Press, 1964: 53-58.

[6] Kundu P K. An analysis of inertial oscillations observed near Oregon Coast [J]. J Phys Oceanogr, 1976, 6: 879-892.

[7] Meehl G A. Characteristics of surface current flow inferred from a global ocean current data set[J]. J Phys Oceanogr, 1982, 12: 538-555.

[8] Davis R E. Preliminary results from directly measuring mid-depth circulation in the tropical and South Pacific [J]. J Geophys Res, 1998, 103(11): 24619-24639.

[9] Qu T, Lukas R. The bifurcation of the North equatorial current in the Pacific[J]. J Phys Oceanogr, 2003, 33: 5-18.

[10] Pazan S E, Niiler P P. Recovery of near-surface velocity from undrogued drifters [J]. J Atmos Ocean Technol, 1981, 18: 476-489.

[11] Qu T, Mitsudera H, Yamagata T. On the western boundary currents in the Philipe Sea [J]. J Geophys Res, 1998, 103: 7537-7548.

[12] 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.

[13] Qiu B, Chen S. Multi-decadal sea level and gyre circulation variability in the northwestern tropical Pacific Ocean [J]. J Phys Oceanogr, 2012, 42: 193-206.

[14] Stommel H, Schott F, The beta spiral and the determination of the absolute velocity field from hydrographic station data [J]. Deep Sea Res, 1977, 24: 325-329.

[15] Wunsch C. The general circulation of the North Atlantic west of 50°W determined from inverse method [J]. Rev Geophys, 1978, 16: 583-620.

[16] Chu P C. P-vector method for determining absolute velocity from hydrographic data [J]. Marine Tech Soc J, 1995, 29(2): 3-14.

[17] Stewart R H. Introduction To Physical Oceanography [M]. Texas: A & M University, 2008: 158-163.

[18] Schott F, Stommel H. Beta spirals and absolute velocities in different oceans [J]. Deep Sea Res, 1978, 25: 961-1010.

[19] 王桂华，李荣凤. 利用水文资料推测海洋流场的研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 100-106.

[20] 许建平，刘增宏，孙朝辉，等. 利用 Argo 资料研究西北太平洋环流和水团 Argo 应用研究论文集[M]. 北京：海洋出版社, 2006: 1-15.

[21] Zhou H, Yuan D L, Guo P F, et al. Meso-scale circulation at the intermediate-depth east of Mindanao observed by Argo profiling floats[J]. Sci China Earth Sci, 2010, 5(3): 432-440.

[22] 刘增宏，许建平，孙朝辉，等. 吕宋海峡附近海域水团分布及季节变化特征[J]. 热带海洋学报，2011, 30(1): 11-19.

[23] Zhang Z C, Yuan D L. Geostrophic Meridional Transport in the Tropical Northwest Pacific Based on Argo Profiles [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(3): 187-195.

[24] Zhang Q L, Liu H W, Zhou H, et al. Variation Features of the Mindanao Eddy from Argo Data[J]. Atmosphere-

Ocean, 2012, 50: 103-115.

[25] 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.

[26] 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.

[27] Chu P C. P-vector spiral and determination of absolute velocities[J]. J Oceanogr, 2000, 56: 591-599.

[28] Chu P C, Fan C W, 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, Lan J, Fan C W. Japan Sea circulation and thermohaline structure Part Ⅰ, Climatology [J]. J Phys Oceanogr, 2001, 31: 244-271.

Calculation of absolute geostrophic velocity of the North Pacific Ocean based on Argo profiles

ZHANG Zhi-chun[1, 2], YUAN Dong-liang[1]

(1. Key Laboratory of Ocecn Circulation and Wave, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceano logy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Received: Mar., 7, 2013
Key words: the North Pacific Ocean; Argo data; P-vector method; absolute geostrophic velocity

Abstract: Materials of measured velocity in the ocean are quite few. In this paper, the absolute geostrophic currents in the North Pacific Ocean were reconstructed with newly gridded Argo profiling float data from 2004 to 2009 based on improved P-vector method. The comparison analysis with the altimeter geostrophic currents and the TRITON(Triangle Trans-Ocean Buoy Network) moored current data and the relevance analysis suggest that the reconstructed absolute geostrophic velocity is reliable and can be used to study the large-scale circulation characteristic and its dynamic structure.

(本文编辑: 刘珊珊　李晓燕)