

基于 Argo 资料和混合层模式的淡水通量产品重构*

王辉赞 张韧†

(解放军理工大学气象学院全军海洋水文环境数值模拟中心, 南京 211101)

(2010 年 12 月 6 日收到; 2011 年 5 月 30 日收到修改稿)

海表淡水通量对于了解和模拟海洋大气过程具有重要作用, 然而不同淡水通量的定量估计差别较大. 基于混合层盐度平衡模式, 利用 Argo 资料和 OSCAR (海洋表面流实时分析场) 流场相结合重构了 2002—2008 年逐周海表淡水通量产品. 通过将重构产品与其他卫星产品和 TAO (热带大气海洋观测网) 观测进行对比分析表明, 重构的淡水通量产品不仅能抓住其季节性信号, 而且能够体现淡水通量的高频特征. 该逐周淡水通量产品对海洋气候变化研究具有重要作用.

关键词: 淡水通量, Argo, 混合层, 盐度平衡方程

PACS: 92.10.-c

1 引言

淡水对于海洋环流模式和气候系统是一个很重要的外强迫条件^[1]. 它能够改变海洋盐度, 而盐度影响密度场, 从而能够影响海洋环流^[2,3]. 由于淡水强迫对于海洋环流的重要性, 科学家对海表淡水通量的变化十分关注.

然而, 在直接测量或估计海表淡水通量时存在困难. Béranger 等^[4]的研究表明目前对降水的估计存在很大的偏差. 对蒸发的估计则依赖于湍流热通量和计算中所应用的假设, 也有很大的偏差. CLIVAR Salinity Working Group^[5]指出, 在估计海洋与大气淡水交换量方面存在不可接受的不确定性范围. 因此, 一直以来对海表淡水通量的了解不多, 即使对于淡水通量的气候性平均特征也了解得还不够, 更不用说其变化情况. 增加对海表淡水通量过程的了解是一项具有较大的挑战性的工作^[3].

当前, 存在一些主要产生于卫星观测和海洋模式的海表淡水通量再分析数据产品. 比如, 卫星遥感反演的来自 HOAPS 的淡水通量产品^[6,7], 基于卫星的 GPCP 降水产品^[8], 来自 NOAA 气候预报中心 (Climate Prediction Center, CPC) 的降水混合分析

产品 (CMAP)^[9], NCEP-R2^[10] 和 ERA-interim 再分析数据^[11]. 然而, 这些淡水通量产品差别很大^[12], 且时间分辨率不高 (大多数时间分辨率为逐月或以上数据).

在海表盐度收支平衡中, 淡水通量起到非常重要的作用^[13]. 但由于以前盐度观测较为稀少等因素, 估算控制盐度收支平衡方程的各项存在一定的不确定性^[14]. 随着 Argo 观测网的成立, 海洋盐度的观测大大增加, 在某些深度和区域甚至超过了历史上所有盐度观测资料的总和^[15]. Foltz 和 McPhaden^[16]指出, Argo 温盐垂直剖面观测将可以帮助减少盐度收支平衡方程估算中混合层深度和盐度的不确定性. 因此, 我们的科学问题是: 是否能够将 Argo 盐度数据与盐度收支平衡模式相结合估算全球淡水通量呢?

2 数据和方法

在计算中, 采用 Argo 网格化温盐数据和 OSCAR 流场数据相结合, 通过混合层盐度平衡方程重构淡水通量项. 其他的蒸发和降水数据用于对淡水通量产品的效果进行验证. 为匹配目标产品, 来自

* 中加国际科技合作 (批准号: 2008DFA22230)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB816005)、国家自然科学基金 (批准号: 40730843) 和解放军理工大学气象学院博士 (后) 科研启动基金资助的课题.

† E-mail: zren63@126.com

不同的时空分辨率的所有数据被插值至 $1^\circ \times 1^\circ \times 7$ 天的网格. 淡水通量产品研究区域为全球热带区域 ($30^\circ \text{S}—40^\circ \text{N}$), 时间分辨率为 7 天, 时间范围从 2002 年 1 月 2 日至 2008 年 9 月 10 日. 时间网格被定义为每周星期三.

全球 Argo 温盐网格化数据由法国 CORIOLIS 数据中心 (见网站: http://www.coriolis.eu.org/english/applications_products/coriolis_analysis/coriolis_analysis.htm) 提供, 它是基于统计估计方法 (客观分析) 利用 Argo 和其他资料产生的, 不妨称之为 Argo 网格化资料. 该资料可以在盐度平衡方程各项计算中提供盐度和混合层深度的计算量. 该产品包含从 5 m 至 1950 m 共 59 个垂直标准层, 其时间范围从 2002 年 1 月 2 日至 2008 年 9 月 10 日, 时间分辨率为逐周, 为匹配将其插值至 $1^\circ \times 1^\circ$ 的空间分辨率.

混合层深度 (MLD) 由 Argo 温盐网格化资料进行计算获得. 混合层深度的计算经常采用基于密度或者温度阈值的方法^[17]. 本研究中每一个水平位置点的 MLD 定义如下: 将从参考深度位置的密度开始, 当密度变化幅度为 $\Delta\sigma_t = \sigma_t(T + \Delta T, S, P) - \sigma_t(T, S, P)$ 时所对应位置的深度即为混合层深度. 其中, $P = 0$, $\Delta T = -0.8^\circ \text{C}$, 参考深度为 10 m^[18,19].

海洋混合层表现为具有一定厚度的海水层, 由于混合作用较强, 从混合层顶部 (海气界面) 到底部具有较为均一的性质. 混合层内垂直积分的盐度平衡方程的推导由 Foltz 等^[20] 给出:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \cdot \nabla S + H(w_m) \frac{w_m(S - S_{-h})}{h} - \frac{(E - P)}{h} S - \kappa \nabla^2 S = 0, \quad (1)$$

其中 h 表示 MLD, S 和 v 分别表示混合层内平均盐度和水平速度, E 和 P 分别代表蒸发和降水率, w_m 表示挟卷速度 (entrainment velocity), H 表示 Heaviside 阶梯函数 (其性质为当 $w_m < 0$ 时, $H(w_m) = 0$, 否则 $H(w_m) = 1$), S_{-h} 表示混合层底 $z = -h$ 处的盐度, κ 代表扩散率. 此处 κ 的选择相比其他项不会显著地影响结果, 对应选取一个相对低但合理估计的扩散率 $\kappa = 2000 \text{ ms}^{-2}$ ^[21]. 在方程 (1) 中从左至右各项分别代表垂直方向平均盐度的局地变率、垂直平均流导致的水平平流项、挟卷混合项、表面淡水通量 (蒸发减去降水) 项和水平耗散项.

在盐度收支平衡方程中, 挟卷混合项具有较为重要的作用, 挟卷速度是与质量通量有关

的跨越等密度面的项^[20,22,23]. 许多学者研究表明^[2,14,16,24-26], 挟卷混合项对于混合层内盐度变化影响表现出 Heaviside 阶梯函数的性质, 即当挟卷速度为正 (垂直向上) 时, 表明混合层底下海水的盐度会进入混合层内, 从而影响混合层内平均盐度的变化, 而当挟卷速度为负 (称之为 Detrainment) 时, 混合层内盐度大小不会受影响. 在一维混合层盐度方程中, 挟卷混合项考虑混合层深度随时间的变化^[27]. 而实际上即使混合层深度不变时, 由于混合层底的垂直向上速度也会造成挟卷混合, 从而影响混合层内的盐度变化^[1]. 因此, 挟卷速度可看成由垂直平流速度和混合层垂直变化速度两部分组成, 这样既可考虑了混合层加深造成的挟卷混合, 又考虑了混合层底垂直速度的影响. 根据 Foltz 等^[16,20], Stevenson 和 Niiler^[28] 和 Moisan 和 Niiler^[29] 等的研究结果, 该挟卷速度可以写为如下表达式:

$$w_m = \nabla \cdot (hv) + \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (2)$$

本文即采用该公式. 值得一提的是, Foltz 和 McPhaden^[16] 的研究表明: 方程 (2) 中的垂直平流速度项 $\nabla \cdot (hv)$ 的振幅最多仅占混合层垂直变化速度 $\partial h / \partial t$ 的振幅的 30%, 故挟卷混合项大小主要由混合层深度的增加决定.

3 基于 Argo 网格化资料和 OSCAR 流场反演淡水通量研究

从上节的方程 (1) 和 (2), 逐周的海表淡水通量 $E-P$ 项可以通过从温盐和流场数据估算盐度收支平衡方程中的其他项来进行反演. 由 OSCAR 流场和 Argo 网格化温盐数据可以求解出除了淡水通量 ($E-P$) 以外的方程各项, 于是通过该方程反演得到逐周淡水通量.

图 1 显示了重构的淡水通量与 $E(\text{OAFflux})-P(\text{GPCP})$ 融合计算的淡水通量的年平均场的对比. 负值表明降水盈余 (即降水量大于蒸发量). 从图 1(a)—(c) 可知, 两种淡水通量的空间模态具有如下的相似特征: 1) 主要的强降水盈余区域主要包括包括热带辐合带 (ITCZ)、赤道印度洋、赤道大西洋和南太平洋的向东南方向延伸的南太平洋辐合带 (SPCZ); 2) 相反地, 南北半球的副热带海盆主要表现为蒸发盈余. 这种相似性显示出利用 Argo 盐度和盐度方程构建淡水通量具有一定的可行性. 但两者在量上的差别也是显而易见的: 构建场相对于

遥感淡水通量比较场强度较弱 (如图 1(c)). 这种差别也进一步验证了以前关于不同淡水通量产品之间存在较大的误差 (约 40%左右) 的说法 [16,30].

除平均场外, 我们还比较了淡水通量的季节性变化特征. 图 2 是太平洋、大西洋和印度洋淡水通量的纬向平均的季节性变化特征. 从图中可以看出, 在三大洋中重构的产品都能够反映淡水通量很重

要的季节变化信号: 淡水通量负中心在夏天向北移动而在冬天向南移动. 这和我们所熟知的三大洋的降水带夏季向北移动而冬季降水则向南移动的规律相符合. 构建的淡水通量季节性变化和遥感反演的淡水通量季节性变化基本特征一致. 这种相似性进一步表明利用 Argo 盐度和盐度方程构建淡水通量的季节性变化也是可行的.

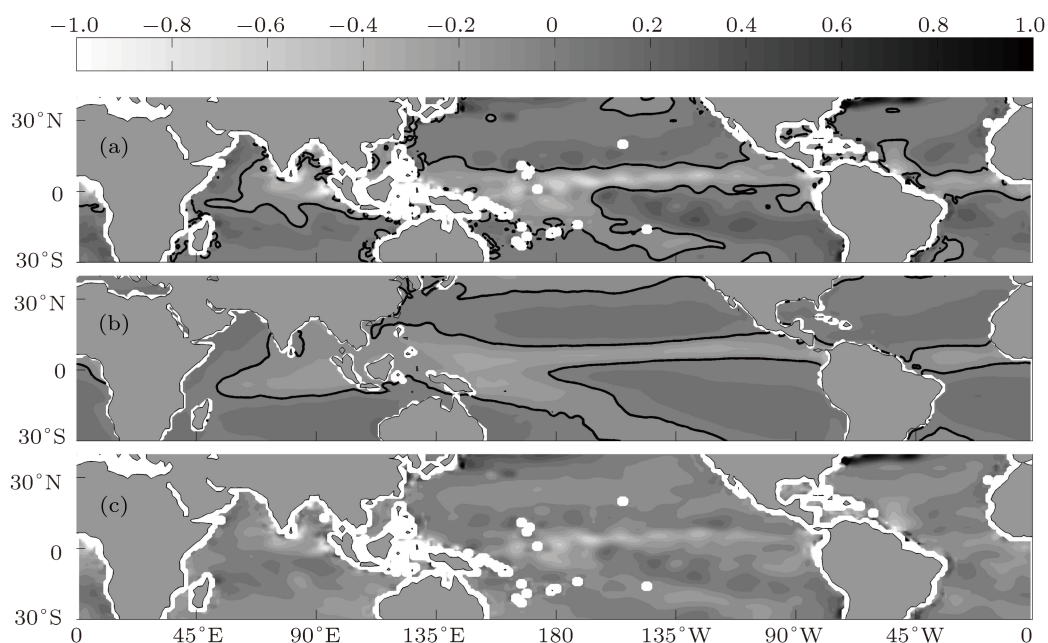


图 1 2002—2007 年平均海表淡水通量分布图 (a) 重构淡水通量; (b) 基于 OAFflux 蒸发和 GPCP 降水的混合淡水通量 $E(OAFflux)-P(GPCP)$; (c) 重构的淡水通量与融合的淡水通量之差. 淡水通量单位为 mm/h. 图 (a) 和 (b) 中的实线表示淡水通量为 0

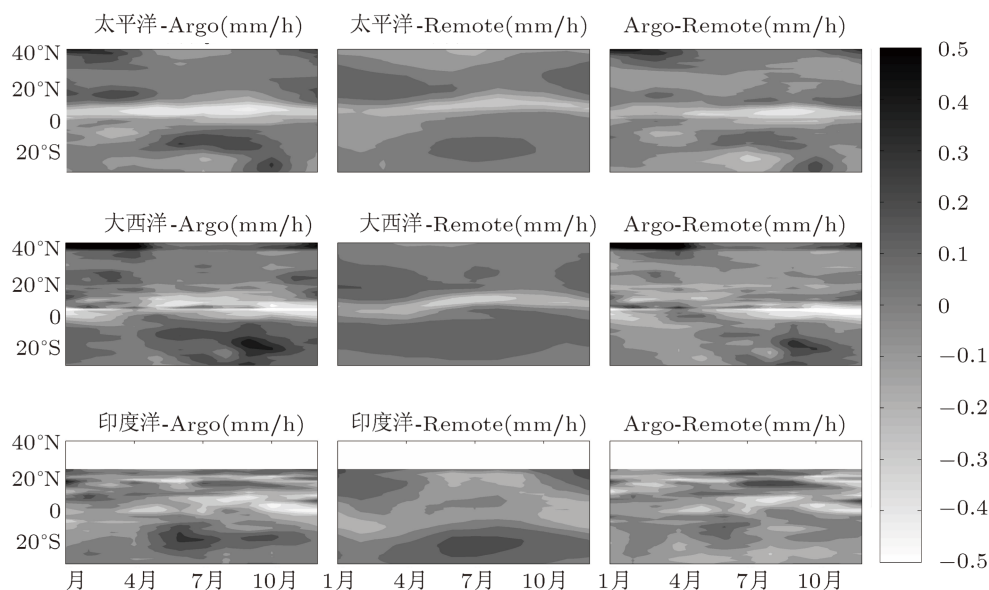


图 2 纬向平均的纬度 - 月份淡水通量图 上图, 太平洋; 中图, 大西洋; 下图, 印度洋; 左侧, 重构的淡水通量; 中间列, 混合的淡水通量 $E(OAflux)-P(GPCP)$; 右侧为两种通量产品的差异. 淡水通量单位为 mm/h

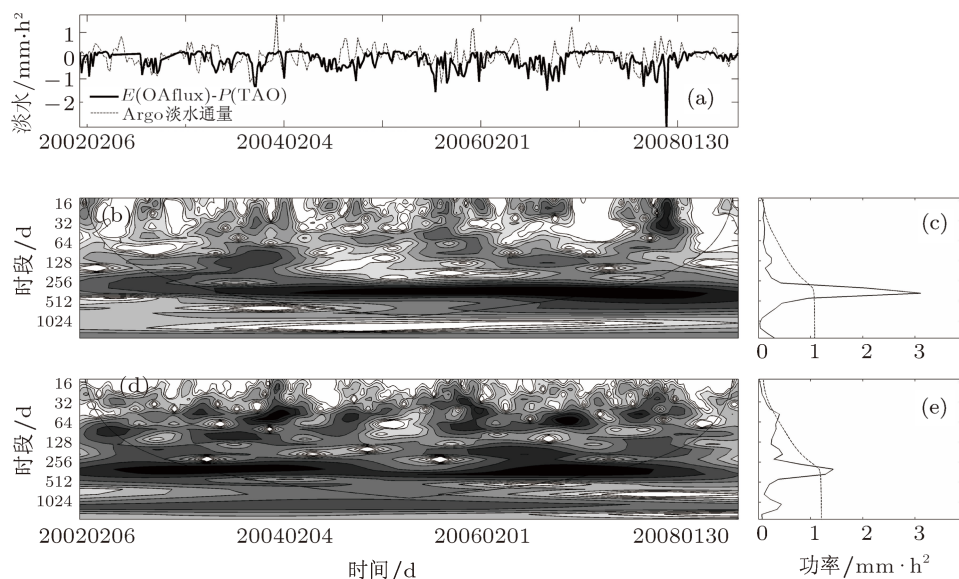


图3 (a) 重构的淡水通量和混合的淡水通量 $E(OAflux)-P(TAO)$ 在位置 $(140^\circ W, 9^\circ N)$ 的时间序列比较, 其中深色为 $E(OAflux)-P(TAO)$, 浅色为重构的淡水通量, 单位为 mm/h ; (b) $E(OAflux)-P(TAO)$ 时间序列的小波功率谱分析及其相应的置信水平检验, 弧线以下的区域为小波影响锥, 等值线分别表示通过红噪声作为背景谱的 95% 和 90% 的显著性水平检验, 周期单位 (y 轴) 为天; (c) 总体小波功率谱 (实线) 及其显著性 (虚线), 功率单位为 $(mm/h)^2$; (d) 和 (e) 对应重构的淡水通量时间序列, 与 (b) 和 (c) 表示内容相似

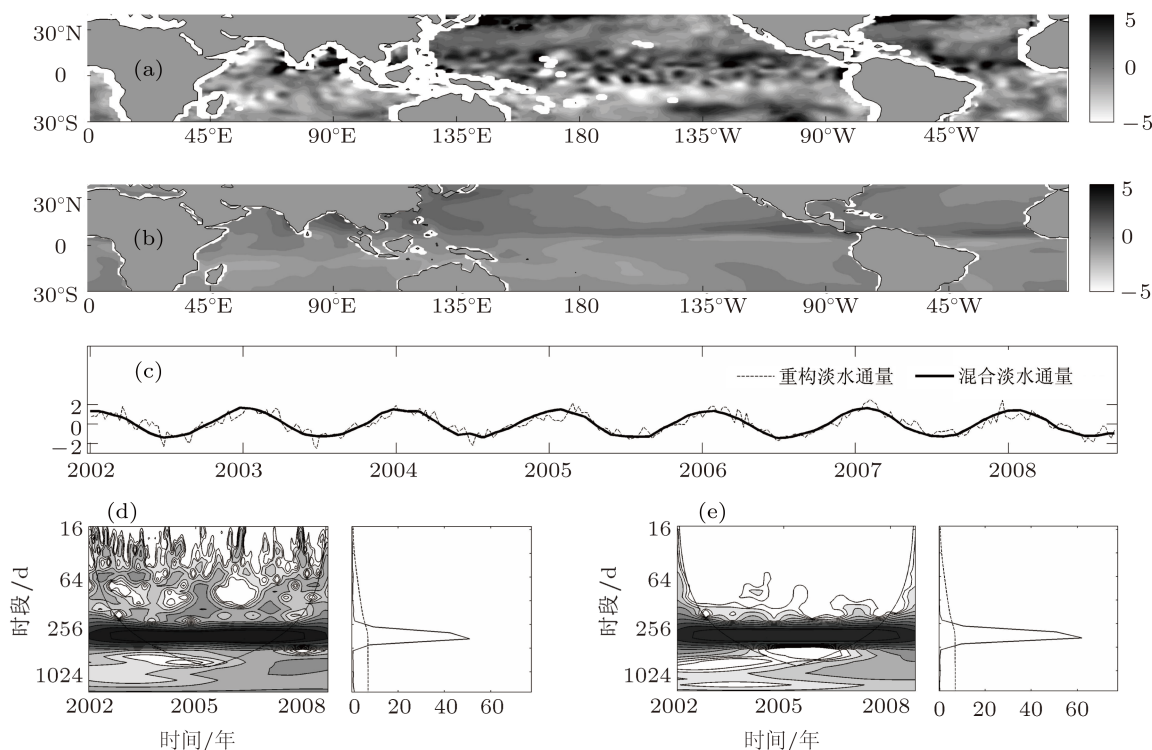


图4 (a) 和 (b) 分别代表重构的淡水通量和混合的淡水通量 $E(OAflux)-P(GPCP)$ 最主要的 EOF 模式, 单位为 mm/h ; (c) 为两种淡水通量产品最主要模式对应的归一化时间主成分变化曲线; (d) 重构的淡水通量的小波功率谱分析及其相应的置信水平检验; (e) 混合的淡水通量的小波功率谱分析及其相应的置信水平检验

为进一步验证所构建的淡水通量的可靠性, 我们选择 $(140^\circ W, 9^\circ N)$ 点进行淡水通量的比较. 图 3 为重构的淡水通量产品与 $E(OAflux)-$

$P(TAO)$ 的时间曲线图. 如图所示, 重构的淡水通量与 $E(OAflux)-P(TAO)$ 的时间序列总体上比较一致, 且这两个时间序列的方差值非常接近, 分别

为 0.17216 和 0.15396. 需要指出的是, $E(\text{OAFlux})-P(\text{TAO})$ 的时间序列曲线相对较为平坦, 这可能是由于重构产品为周平均, 而 OAFlux 蒸发产品是从月平均值插值至周平均.

重构的淡水通量产品比淡水通量 $E(\text{OAFlux})-P(\text{TAO})$ 表现出更高频的时间变化. 分别对重构的淡水通量和 $E(\text{OAFlux})-P(\text{TAO})$ 时间序列进行小波功率谱分析^[31]. 小波功率谱清晰地表现出年周期信号. 除了年周期信号, 重构的淡水通量产品相比混合的淡水通量 $E(\text{OAFlux})-P(\text{TAO})$ 时间序列还能够逮住更小尺度的信息.

为进一步比较确认淡水通量的时空变化特征, 分别对重构的淡水通量和混合的淡水通量 $E(\text{OAFlux})-P(\text{GPCP})$ 进行经验正交函数 (empirical orthogonal function, EOF) 分析. 在进行 EOF 分析之前淡水通量产品已减去各自对应的气候平均场. 图 4 为两种淡水通量的最主要的 EOF 空间模态和对应的时间主成分. 由图可见, 两者的空间模态和时间主成分比较相似: 在冬季, 西北太平洋和赤道辐合带位置的淡水通量空间模态表现出蒸发盈余的特征, 夏季相反 (即淡水增多). 该模态也反映了典型的季节性变化特征. 对主成分的时间曲线进行小波分析也进一步表明了这种季节性变

化, 但和 $E(\text{OAFlux})-P(\text{GPCP})$ 相比, 重构的淡水通量包含更多的高频成分. 重构产品不但包含和观测相同的低频信息, 而且包含时间频率更高的尺度信息 (见图 4 周期 - 时间小图).

4 讨论与小结

1) 利用 Argo 盐度和盐度方程构建了 2002 年 1 月 2008 年 9 月周平均的淡水通量产品. 通过与遥感资料、站点资料的比较, 发现构建的产品能较好地反映气候性平均场、季节性变化及其他一些高频信号. 这些结果表明, 所构建的淡水通量产品是可信的, 具有较大的应用前景.

2) 虽然 Argo 浮标大大地增加了盐度观测, 但它在某些关键海区 (如墨西哥湾和加勒比海区) 仍不足以提供足够的观测数量. 另外, OSCAR 流也不能完全刻画混合层的平均流场, 这些都对重构产品的精度造成了一定的影响. 但重要的是, 此项研究结果表明: 利用 Argo 盐度和盐度方程来构建淡水通量产品的想法是可行的, 为建立淡水通量产品提供了一个新途径.

感谢卫星海洋环境动力学国家重点实验室王桂华研究员对本文的宝贵指导和帮助.

-
- [1] Huang R X 2009 *Ocean Circulation Wind-Driven and Thermohaline Processes* (1st Ed.) (New York: Cambridge University Press)
- [2] Schmitt R W 2008 *Oceanography* **21** 12
- [3] Romanova V, Köhl A, Stammer D, Klepp C, Andersson A, Bakan S 2010 *Tellus A* **62** 435
- [4] Béranger K, Barnier B, Gulev S, Crépon M 2006 *Ocean Dyn.* **56** 104
- [5] CLIVAR Salinity Working Group 2008 *Oceanography* **21** 82
- [6] Andersson A, Bakan S, Fennig K, Graßl H, Klepp C, Schulz J 2007 *Electronic Publication World Data Center for Climate*
- [7] Andersson A 2009 *Ph. D. Dissertation* (Hamburg: Universität Hamburg)
- [8] Adler R F, Huffman G J, Chang A, Ferraro R, Xie P, Janowiak J, Rudolf B, Schneider U, Curtis S, Bolvin D, Gruber A, Susskind J, Arkin P 2003 *J. Hydrometeorol.* **4** 1147
- [9] Xie P, Arkin P 1997 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **78** 2539
- [10] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang S K, Hnilo J J, Fiorino M, Potter G L 2002 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **83** 1631
- [11] Simmons A, Uppala S, Dee D, Kobayashi S 2007 *ECMWF Newsllett.* **110** 25
- [12] Zhou T 2003 *Progress in Natural Science* **13** 626
- [13] Cronin M, McPhaden M 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 27567
- [14] Mignot J, Frankignoul C 2003 *Climate Dyn.* **20** 555
- [15] Wang H Z, Zhang R, An Y Z, Chen Y D 2011 *Marine Sci. Bull.* **30** 127 (in Chinese) [王辉赞, 张韧, 安玉柱, 陈奕德 2011 海洋通报 **30** 127]
- [16] Foltz G R, McPhaden M J 2008 *J. Geophys. Res.* **113** C02013
- [17] de Boyer Montégut C, Madec G, Fischer A S, Lazar A, Iudicone D 2004 *J. Geophys. Res.* **109** C12003
- [18] Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 16803
- [19] Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 3079
- [20] Foltz G R, Grodsky S A, Carton J A, McPhaden M J 2004 *J. Geophys. Res.* **109** C03052
- [21] Michel S, Chapron B, Tournadre J, Reul N 2007 *Ocean Sci. Discuss* **4** 41
- [22] Cui H, Zhang S W, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6509 (in Chinese) [崔红, 张书文, 王庆业 2009 物理学报 **58** 6509]
- [23] Zhang S W, Cao R X, Zhu F Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 119201 (in Chinese) [张书文, 曹瑞雪, 朱凤芹 2011 物理学报 **60** 119201]
- [24] Mignot J, Frankignoul C 2004 *J. Geophys. Res.* **109** C04005
- [25] Delcroix T, Cravatte S, McPhaden M J 2007 *J. Geophys. Res.* **112** C03012
- [26] Zhang R H, Busalacchi A J, Murtugudde R G, Arkin P A, Ballabrera-Poy J 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L02605

[27] Miller J 1976 *J. Phys. Oceanogr.* **6** 29

[28] Stevenson J W, Niiler P P 1983 *J. Phys. Oceanogr.* **13** 1894

[29] Moisan J R, Niiler P P 1998 *J. Phys. Oceanogr.* **28** 401

[30] Romanova V, Kohl A, Stammer D, Klepp C, Andersson A, Bakan S 2010 *Tellus A* **1**

[31] Torrence C, Compo G P 1998 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79** 61

Freshwater flux product reconstruction based on Argo data and mixed layer model*

Wang Hui-Zan Zhang Ren[†]

(PLA Research Center of Ocean Environment Numerical Simulation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 6 December 2010; revised manuscript received 30 May 2011)

Abstract

Sea surface freshwater flux (FWF, evaporation minus precipitation) plays an important role in understanding and modeling atmosphere and ocean processes, but there exists strong disagreement between different freshwater flux estimates. In this study, a weekly sea surface FWF product is reconstructed for the period from 2002 through 2008 based on the mixed layer salinity balance model for the first time, by combining the Argo data with OSCAR current data. Compared with the other precipitation and evaporation data from satellite product and TAO observations, the reconstructed FWF can capture not only the seasonal cycle of freshwater flux, but also some high-frequency features of freshwater flux. The FWF product provides a useful tool for studying the climate variation over the ocean.

Keywords: freshwater flux, Argo, mixed layer, salinity balance equation

PACS: 92.10.-c

* Project supported by the International Cooperation Program (Grant No. 2008DFA22230), the National Basic Research Program (Grant No. 2007CB816005), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40730843), and the Doctoral (Postdoctoral) Scientific Research Starting Foundation of Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, China.

[†] E-mail: zren63@126.com