

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.250>



基于卫星遥感数据南海南部海洋表面流场反演

郑贵洲, 潘子轩, 孟亦菲, 王红平

中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 海表流场可直接影响海表的气候变化, 且对于研究海气相互作用、热通量输送等具有重要意义。通过利用 Jason-2 号与 HY-2 号卫星高度计数据以及 Metop 卫星的 ASCAT 与 HY-2 号卫星散射计数据反演海表流场。利用距离加权平均法生成分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格, 通过数据融合分别得到海表高度场与海面风场, 在此基础上构建地转流和 Ekman 流反演数学模型。利用 Jason-2 与 HY-2 号卫星高程计数据反演地转流, 利用 ASCAT 与 HY-2 号卫星散射计数据得出风应力驱动的 Ekman 流, 合并两者得到海表流场。通过对研究海域海表流速的反演结果与 OSCAR 海流产品的对比分析, 发现越靠近赤道的位置, 其流速误差较大, 最大相对误差达到了 0.6 m/s。实验结果表明利用卫星遥感数据反演海洋表层流场能较为准确地表现实际海表流场的基本特征。

关键词: 卫星高度计; 卫星散射计; 海表流场反演; 地转流; Ekman 流; 遥感。

中图分类号: P237

文章编号: 1000-2383(2021)01-341-09

收稿日期: 2020-08-21

Inversion of Sea Surface Flow Field in Southern South China Sea Based on Satellite Remote Sensing Data

Zheng Guizhou, Pan Zixuan, Meng Yifei, Wang Hongping

School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The sea surface flow field can directly affect the climate change of the sea surface, and is of great significance to the study of air-sea interaction and heat flux transfer. This paper uses altimeter data from Jason-2 and HY-2 satellite, scatterometer data from ASCAT of Metop and HY-2 satellite to estimate the sea surface flow field. The grid with resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ is generated by the method of weighted average distance, the sea surface elevation field and wind field are obtained by data fusing. On this basis, the inversion mathematical models of the geostrophic flow and the Ekman flow are constructed. The geostrophic flow is retrieved from Jason-2 and Hy-2 altimeter data, and the wind-driven Ekman flow is obtained from the ASCAT and Hy-2 scatterometer data, the combination of both date results in the sea surface flow field. By comparing the inversion results of the sea surface flow in the study area with OSCAR current products, it is found that the closer to the equator, the greater the error of the velocity of the sea surface flow. The maximum relative error reached 0.6 m/s. The experimental results show that the sea surface flow field estimated by satellite remote sensing data can exactly describe the basic characters of actual sea surface flow field.

Key words: satellite altimeter; satellite scatterometer; sea surface flow field inversion; geostrophic flow; Ekman flow; remote sensing.

基金项目: 海洋地质保障工程(729)子课题(No.GZH201200508); 天然气水合物资源勘查与试采工程(127工程)(No.GZH201100307)。

作者简介: 郑贵洲(1963—), 男, 教授, 主要从事资源与环境遥感、三维地理信息系统及深度学习与大数据研究。ORCID: 0000-0002-2890-6395. E-mail: zhenggz@cug.edu.cn

引用格式: 郑贵洲, 潘子轩, 孟亦菲, 等, 2021. 基于卫星遥感数据南海南部海洋表面流场反演. 地球科学, 46(1): 341-349.

0 引言

海流参数获取方式除了利用海流计固定于船上来测量外,利用 ARGO(array for real-time geostrophic oceanography)浮标间接推算海水的流动速度和流向也是重要的一种方式.陈奕德等(2006)利用 ARGO 浮标定位信息估算、分析了赤道太平洋中层流场状况,何建玲等(2012)利用 ARGO 数据计算吕宋海峡以东海域水文特性参数和流场.但是浮标测量海流方法可能会受到诸如浮标的定位误差、浮标速度与海水流动速度不一致以及各种采样误差等因素的影响,导致海流观测产生误差.

海流定量理论则是在 20 世纪初由 Ekman 提出(Ekman, 1905),他利用统计学方法分析了漂流浮标数据和模型数据,构建了一个经验模型来估算 Ekman 流速;Pedlosky and Joseph(2013)建立了 Ekman 层与行星群岛相互作用的惯性模型;Shrira and Almelah(2019)建立了上洋 Ekman 动力学模型.地转流研究同样发展迅速,Lukas and Firing(1984)研究太平洋赤道的地转平衡;Picaud *et al.*(1989)指出观测数据的微小噪音会对地转产生很小的偏移,这样会对赤道海域计算得出的地转流速产生很大的影响;van Meurs and Niiler(1997)研究北东太平洋大尺度地转表面速度的实时变化;Lagerloef *et al.*(1999)在 20 世纪末更是提出了多项式拟合方法来进行赤道海域地转流速的估算与反演;王文超等(2019)使用全球海面高模型得到稳态海面地形模型并结合高频信息得到中国东部海域高精度地转流;El-Nabulsi and Rami Ahmad(2019)认为地转流和风驱动的洋流取决于介质的空间维数.海表流场是多种因素相互作用的结果,不同区域、不同时刻的影响因素也不尽相同,单纯使用某种因素估算海表流场会带来误差,只有将相关因素综合考虑才能尽可能地提高反演精度,同时传统测量方式在空间范围和时间效率上已无法满足人们的日常需求.

卫星遥感技术的发展为研究人员使用卫星海面测高数据估算与反演海表流场提供了足够的数据支撑(毛庆文等,1999;姜祝辉等,2011).NASA 发射的 Jason-1、Jason-2 气候卫星为海面测高提供了更加精确的数据基础.高度计数据资料可以反演海表地转流,其长时间序列的优点能够更有效地研究海表环流的时相变化.刘巍等(2012)利用 Jason-2

高度计数据和 Sea Winds 散射计数据,对全球海表地转流和风应力 Ekman 流进行了反演;王慧鹏等(2014)利用 Quik SCAT 卫星散射计数据开展南海月平均风场特征分析. HY-2 卫星搭载了微波散射计、辐射计以及雷达高度计,也能够提供精确的海面风场和高度数据.兰友国等(2018)使用 HY-2 卫星微波散射计数据对西北太平洋的台风进行监测.近年来,合成孔径雷达由于其全天候、高分辨率、宽幅成像等优势逐渐成为海表流场测量的新手段(宋晓霞等,2019). Zhang *et al.*(2020)使用 RADAR-SAT-2 卫星的交叉极化合成孔径雷达观察了近十年来热带气旋表面风场.利用卫星资料结合动力学方法反演估算海表流场是获取海洋流场信息的重要途径,但不同的海域动力学模型及其参数有很大差别,近赤道和远赤道海域地转流和 Ekman 流的计算参数、方法也不同,并由此带来的赤道附近海洋流场数据不连续性问题值得重视.本文以南海南部海域为例开展特定海域海洋流场实验研究,通过与 OSCAR 海流产品的对比分析,证明本研究取得了较好的效果.

1 研究区及数据处理

1.1 研究区概况

本文研究区地理位置为北纬 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$,东经 $114^{\circ}\sim 120^{\circ}$,位于我国南海的南部,整个海域环绕众多岛屿,如图 1 所示.该研究区被巴拉望岛分为东西两部分,其中巴拉望岛西部为南海海域范畴,东部为苏禄海范畴,占据整个南海面积的 40%.研究海域岛礁、滩涂、沙洲众多,广泛散布着大量的珊瑚礁群,只有 20% 的面积是日常露出海面的,海域地形复杂,水深波动较大(郑贵洲等,2017).研究海域地理位置十分重要,拥有着极其特殊的战略意义,位于东南亚两国的海军基地附近,毗邻太平洋以及印度洋之间的交通要道,航海吞吐量巨大,是我国开展海外贸易的重要通道,在航道安全、海难通报、南海气象监测、国际飞航情报等方面都有重要价值.研究海域位于赤道附近,气候特征是典型的热带季风气候,冬季东北季风控制,夏季西南季风控制,同时具有很强的海洋性气候特征,终年保持雨量充沛,保持高温、高湿、高盐.

1.2 卫星高度计数据

本文使用 HY-2 号和 Jason-2 号高度计数据. Jason 卫星是法国空间中心以及 NASA 提出的系列海



图1 研究海域地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

地图取自自然资源部网站《中国地图1:4 200万 32开》,审图号:GS(2016)1545号

海洋观测卫星计划,是为了建立加速发展海洋观测以及海洋动力参数卫星的监测体系. HY-2号卫星是中国首颗海洋动力卫星, HY-2号卫星所搭载的高度计能够获取海面动力高度参数,对海洋表面的动力高度的观测精度能够达到5~10 cm. Jason-2号与HY-2号卫星的高度计二级产品主要包括临时地球物理数据集 IGDR (interim geophysical data records)、遥感地球物理数据集 SGDR (sensor geophysical data records) 以及地球物理数据集 GDR (geophysical data records) 3种产品数据. 本文采用的是通过精密定轨的二级产品 GDR 数据集. Jason-2 高度计 GDR 产品拥有很高的数据精度,测高误差可控制在 3.4 cm 以内,经过了精确的轨道校正,能够适用于海洋气候的研究. HY-2 高度计的 GDR 产品校正完整,进行了精密定轨,包含了海面动力参数. 为了保证所提取出的数据质量,要对这些数据以数据标记值和阈值作为标准进行筛选,消除测量噪声、大气各层产生的误差、海洋运动状态产生的误差以及卫星轨道运动产生的误差对计算海洋表面高度的影响. 最后对离散数据进行网格化处理,网格大小为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 由于海域范围为东经 $114^{\circ} \sim 120^{\circ}$, 北纬 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$, 相当于 24×16 网格矩阵. 网格化过程中需要对数据进行插值处理,指标因子权重的确定会对模型计算结果产生重要影响(郭子正等, 2019), 本文以离散数据间的距离为权值,采用

距离加权平均插值法生成海表高度网格.

1.3 卫星散射计数据

本文采用 ASCAT 产品的 NetCDF 格式数据及 HY-2 号卫星散射计数据. ESA (欧洲航天局) 发射的一颗用于观测极地气象的卫星 Metop, 搭载着 ASCAT (The advanced SCA terometer) 散射计, ASCAT 散射计所观测到的风速数据具有很高的精度, 控制在了 0.5 m/s 的风速偏差. 产品有 0 级产品、1B 级产品和 2 级产品 3 种类型. 1B 级产品包括雷达后向散射产品和海面风速产品, 2 级产品数据则包括了区域短期时效产品以及土壤表层水分产品. 本文主要使用 1B 级产品 (全球近海面风速) 和 2 级产品 (区域短期时效风). HY-2 号卫星搭载的散射计也是通过直接观测获得的海洋表面雷达后向散射能量值间接地获得海面风场矢量的 (王东良等, 2014). HY-2 号卫星散射计的 0 级初始数据经过地理定位、内定标、面元匹配、数据反演以及统计平均等预处理, 生成了 3 种级别的产品数据, 本文使用的是二级产品. HY-2 号卫星散射计数据需要提取出观测日期、经纬度、风速与风向等. 采集的数据均为离散数据, 需要进行网格化处理, 网格大小同上, 网格化采用距离平均加权法插值. 在风场数据网格化的实际操作过程中, 密集的风场数据值会产生较大的距离加权计算量, 为了解决这个问题, 本文选用 Zeng 和 Levy 的一种解决方案, 直接用经纬度信息作为权重的参考值, 而非距离值, 目的是为了剔除散射计数据中的混频数据以更好地计算出月平均值. 这样的做法会使获取的风场数据具有高斯特性, 在零值附近同样会产生峰值, 权重大小与距离峰值的远近成负相关, 使得网格点不受远处数据值过大权重的影响, 导致插值结果过于平滑.

1.4 数据融合

单独使用一种产品的高度计或者散射计所获得的数据, 对研究海域可能会在某个时相出现盲区, 或多或少存在着局限性. 同时, 当研究区内的各项异性特征明显时, 同一位置的方位、速度可能存在较大差异 (李列等, 2019), 要想获得更加充足以及精确的有效数据, 对多种数据进行融合显得尤为必要. 本文分别使用两种卫星获得的高度计与散射计数据进行融合处理. 融合 Jason-2 与 HY-2 号卫星高度计数据获得研究区海面动力高度场, 融合 ASCAT 与 HY-2 号卫星散射计数据获取研究区海面风场.

表 1 高程计数据融合				
Table 1 Altimeter data fusion				
Jason-2	Value1	Value1	Nan	Nan
HY-2	Value2	Nan	Value2	Nan
融合处理	加权平均	Value1	Value2	Nan

表 2 散射计数据融合				
Table 2 Scatterometer data fusion				
ASCAT	Value1	Value1	Nan	Nan
HY-2	Value2	Nan	Value2	Nan
融合处理	加权平均	Value1	Value2	Nan

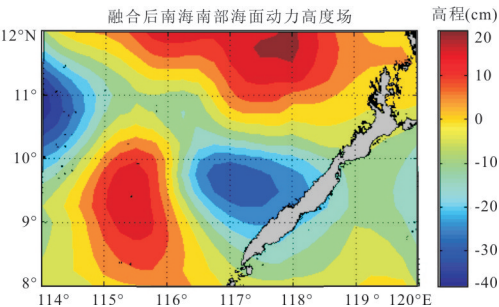


图 2 HY-2+Jason-2 融合高度场
Fig.2 HY-2+Jason-2 fusion elevation field

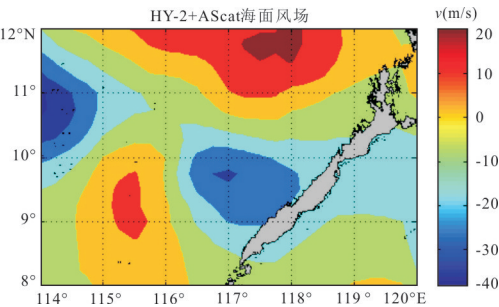


图 3 HY-2+ASCAT 融合风场
Fig.3 HY-2+ASCAT fusion wind field

由于研究区不同海域两种卫星数据存在全有、仅有一种数据和全无这 3 种情况,在融合时将有效数据设置为 Value,不存在的或者无效值标记为 Nan,如果两种数据都存在,则采用加权平均法进行融合,否则以存在的某种数据为值或规定值为 Nan,如表 1、2 所示.通过融合使得不同卫星平台在相同位置的产品数据得到相互补充.图 2、3 分别为数据融合后获取的研究区 2012 年 9 月下旬海面动力高度场和海面风场绘图结果.

通过对研究区海面动力高度场和风场图的对比,发现两者在空间分布上具有较高一致性,两者深红色最高值区域均出现在研究区高纬度的中部

区域,深蓝色低值中心区域分布基本吻合.已有研究表明海表高度场与风场存在相关性.毛庆文等(1999)利用 GEOSAT 卫星遥感数据和海上调查资料分析了南海海面动力高度场的季节分布,认为南海是个季风盛行的半封闭型海域,海面的动力高度场和地转流场的季节变化明显;丁荣荣等(2007)通过对南海 1993 年 2 月到 2002 年 8 月非比容高度与经向风应力进行分析发现两者的同步相关系数高达 0.7;王坚红等(2016)分析黄东海域近 20 年海平面异常数据与风场资料,认为近海面季节性风场会影响海面倾斜度,风场短期活动影响更为明显.

2 海表流场反演算法模型

经验算法模型利用地球物理机制以及数学统计模型构建了一个假定的由地转流和 Ekman 流主导的模拟层面,在该层面上对数据进行拟合,解出模型中的各个参数.该算法将海洋表面流场(V)分解为 Ekman 流(V_E)和地转流(V_K)两部分.利用卫星高度计资料和相应的海面高度平均场资料计算出研究海域的地转流,利用卫星散射计资料计算出风应力驱动的 Ekman 流.融合地转流以及 Ekman 流以后,就可以获得海表流场(V).

2.1 地转流计算

地转流的流速是通过假定海风与海水的摩擦力为零且海流的加速度为零情况下的地转流平衡方程计算获得,地转流速分量的计算方程如下:

$$\begin{cases} u_f = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ v_f = \frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \end{cases}, \tag{1}$$

其中: u_f 、 v_f 分别表示经向流速(东向)和纬向流速(北向). ζ 是海面高度, f 为科氏力参数,其大小为 $2\omega \sin\varphi$, ω 代表的是地球自转的角速度,而且 $\omega = 7.272 \times 10^{-5} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, φ 是格点所在的地理纬度. g 为海洋中的重力加速度,它是一个随着纬度而变化的值,在研究海域中,变化微小,将 g 视为常量, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

对于近赤道海域,可以使用赤道 β -平面 ($f = \beta y$, $\beta = 2.3 \times 10^{-1} \text{ m/s}$) 地转流近似方案,该方案通过对 ζ 求 y 的二阶偏导数可以计算出与近赤道海域实测流速相当匹配的地转流流速.

$$\begin{cases} u_{\beta}\beta y = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ v_{\beta}\beta y = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: u_{β} 与 v_{β} 分别表示了近赤道海域的地转流经向和纬向流速分量,对 y 求二阶偏导数可得:

$$\begin{cases} u_{\beta} = -\frac{g}{\beta} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \\ v_{\beta} = \frac{g}{\beta} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \end{cases}. \quad (3)$$

二阶偏导的求取虽然能够获取近赤道海域的地转流信息,但也会导致误差扩大,使计算结果平滑程度不够.研究学者为了降低这种情况的影响度,做了许多的尝试.Lagerloef *et al.* (1999)等人在 20 世纪末提出了多项式拟合方法来进行赤道海域地转流速的估算.本文采用多项式拟合方法,重新定义了 $\vec{Z} = (\frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \zeta}{\partial y})$ 和 y ,根据 1 纬度大约可以记为 111 km,将 y 单位转换为纬度.对精度 Z 所在的经线上的所有数值点进行三阶多项式回归,就可以满足近赤道地区地转流流速(max、min)的反演.

由于研究区域包括近赤道海域与远赤道海域,两者的计算方式有所差别,为了保证地转流在研究区域的连续性,这里使用权重系数为近赤道地转流速度(U_{β})和远赤道地转流速度(U_f)分配不同的权重,最后在综合两种模型的基础上得到研究区的地转流速度(U).

$$\begin{cases} U = \omega_{\beta} U_{\beta} + \omega_f U_f \\ \omega_{\beta} = e^{-(\theta/\theta_s)^2} \\ \omega_f = 1 - e^{-(\theta/\theta_s)^2} \end{cases}, \quad (4)$$

其中: ω_{β} 、 ω_f 分别为近、远赤道海域地转流速度权重系数, θ 为研究区纬度值, θ_s 由拟合后得到,值约为 2.2° .当纬度越低时,近赤道地转流速度获得的权重就越高,远赤道地转流速度获取的权重就越低,纬度越高则相反.

如图 4、5 所示分别是通过上述公式计算得到的地转流 u 、 v 速度分量. u 、 v 分别是经向流速和纬向流速.经向流速以北向为正,南向为负;纬向流速以向东为正,西向为负.在近赤道海域,经向流速与纬向流速的速度分量值都比较大.

2.2 Ekman 流计算

海洋表面的风应力对于海表的动力驱动是 Ekman 流生成的主要驱动力,要获得 Ekman 流的流

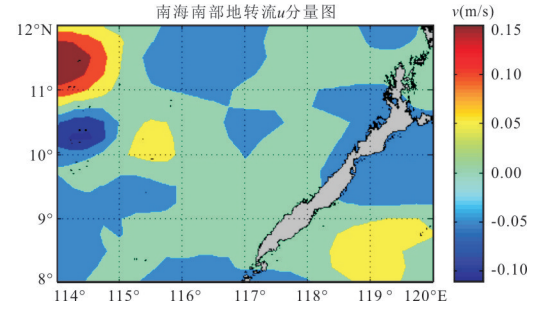


图 4 地转流 u 分量

Fig.4 u component of geostrophic flow

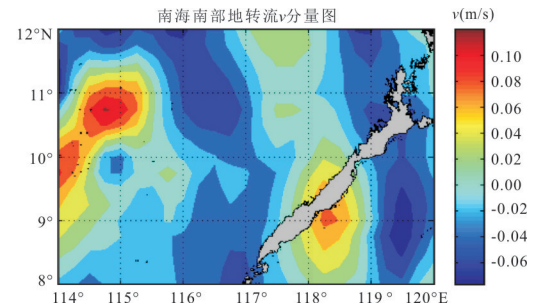


图 5 地转流 v 分量

Fig.5 v component of geostrophic flow

速,首先要对海面风应力进行计算.风应力是当风力带动的气流与海流相对运动时,由于两层流体之间的分子有粘滞效应,会在海洋表面上产生一种作用力.这种切向力与两层流体切面法线方向上的速度梯度成正比关系.风应力矢量的块体计算公式是:

$$\vec{\tau} = [\tau_x, \tau_y] = \rho_a C_D V_{10} [u_{10}, v_{10}], \quad (5)$$

其中: $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 是空气的密度值; V_{10} 是位于海平面上空 10 m 处的风速大小; u_{10} 、 v_{10} 分别是经向与纬向的风速大小,经向风速,北向为正,南向为负;纬向风速,东向为正,西向为负, C_D 为拖曳系数,采用了 Lagerloef *et al.* (1999)提出的拖曳系数方案:

$$C_D = \begin{cases} 0.49 + 0.065 V_{10}, & V_{10} > 10 \text{ ms}^{-1} \\ 1.14, & 3 < V_{10} \leq 10 \text{ ms}^{-1} \\ 0.62 + 1.560 V_{10}^{-1}, & V_{10} \leq 3 \text{ ms}^{-1} \end{cases}. \quad (6)$$

在 20 世纪末, van Meurs *et al.* (1997)发现了海洋表面风应力数值与海表下 15 m 处的 Ekman 流流速有着一定的关联,构建了一个无奇点的包含两个参数的回归模型:

$$(u_e + i v_e) = B e^{i\theta} (\tau_x + i \tau_y), \quad (7)$$

其中: B 约等于 0.3 m/s/pa , θ 为海水流力方向的夹角,在赤道两侧,这个夹角分别偏向与风向相反方向;在北半球向右偏 55° ,在南半球向左偏 55° .这种

情况就造成了赤道处 Ekman 流的不连续甚至偏移的情况. 为了克服这种不连续与偏移, Lagerloef *et al.* (1999) 以上式为基础, 提出了对近赤道的太平洋海域的 B 与 θ 的值进行重新拟合, 在不同的纬度区域动态调整两种参数来反演 Ekman 流. 本文研究区域位于 $25^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间, 所以用以下参数计算:

$$\begin{cases} B = \frac{1}{\rho \sqrt{r^2 + f^2 h_{\text{md}}^2}}, \\ \theta = \arctan\left(\frac{f h_{\text{md}}}{r}\right) \end{cases} \quad (8)$$

其中: ρ 为海水密度, $\rho = 1.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; r 为混合系数, $r = 2.15 \times 10^{-4} \text{ /s}$; h_{md} 的值为 32.5 m, 是混合层的深度; f 为科氏力参数.

从式 8 可以看出参数 B 和参数 θ 随着纬度的变化, 科氏力不断改变, 进而实现各自的动态变化. 随着纬度的升高科氏力参数逐渐增加, 参数 B 不断减小, 参数 θ 不断增大.

Ekman 流: $\vec{V}_E = u_e \vec{i} + v_e \vec{j}$, $\vec{i}$, $\vec{j}$ 分别为经向单位矢量与纬向单位矢量. 图 6、图 7 是通过风应力与两个参数模型计算得到的 Ekman 流, 其中 u 、 v 分别代表经向流速分量和纬向流速分量.

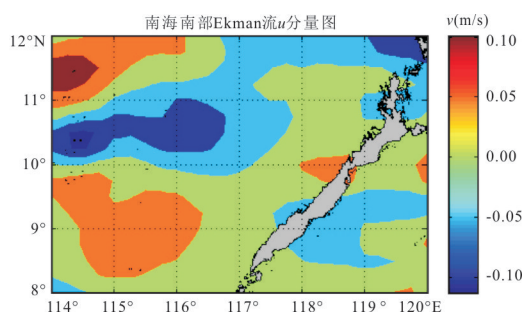


图 6 Ekman 流 u 分量

Fig.6 u component of Ekman flow

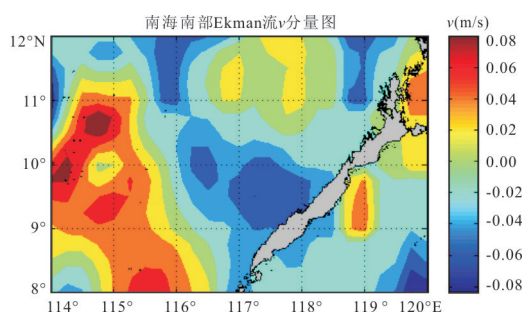


图 7 Ekman 流 v 分量

Fig.7 v component of Ekman flow

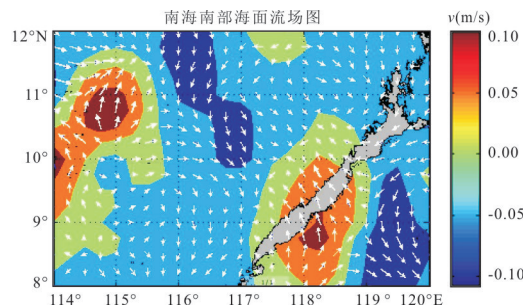


图 8 经验模型算法海流图

Fig.8 Empirical model algorithm sea flow chart

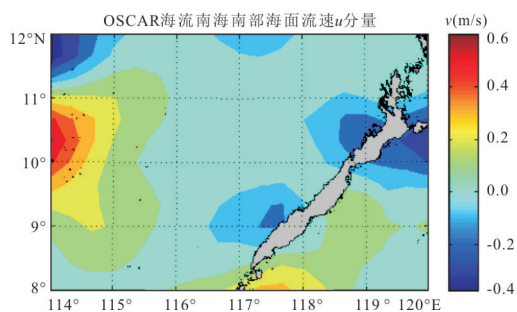
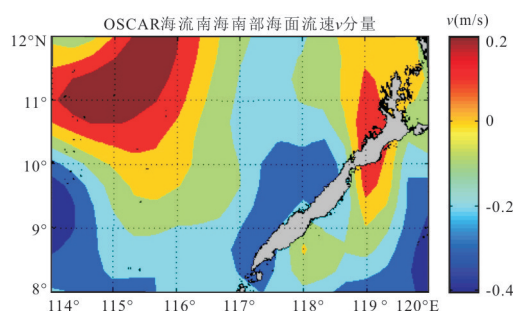
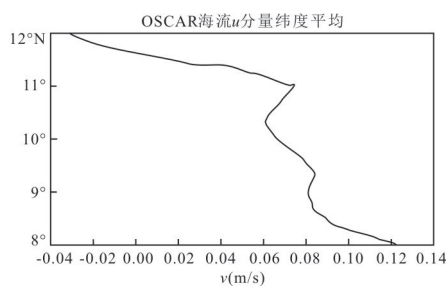
经验模型算法反演海表流场的核心理论是海流可以分为 Ekman 流和地转流两部分, 所需要考虑的外力为地转效应力、风应力以及科氏力. 当地转效应力与科氏力之间取得大小以及方向上的平衡以后, 就会产生一种稳定状态的地转流; 风应力对海洋表面产生的影响, 生成了 Ekman 流. Ekman 流的计算是根据海洋无限深度漂流理论, 消除水平气压梯度力以及边界条件的影响, 只有风应力对海面的作用产生的垂直切应力, 导致了海水的流动.

根据上述原理可以将地转流和 Ekman 流合成, 最终得到研究海域 9 月下旬的海表流场图, 如图 8 所示. 图中白色箭头表示洋流流速和流向, 其中箭头方向指示洋流流向, 箭头长短指示洋流流速大小.

需要注意的是, 当空间尺度大于几千米, 时间尺度是几天或者以上的时候, 地转流来描述海表流场的可靠性比较高. 但地转流也忽略了一些参数, 如海水流动的加速度以及水体摩擦力, 如果在时空尺度更加小的情况下, 就需要考虑加速度的影响了.

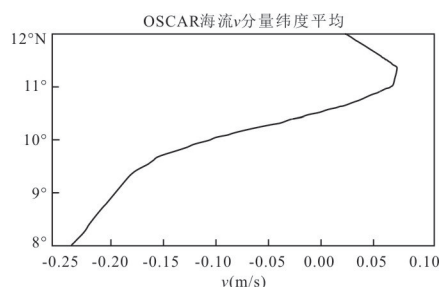
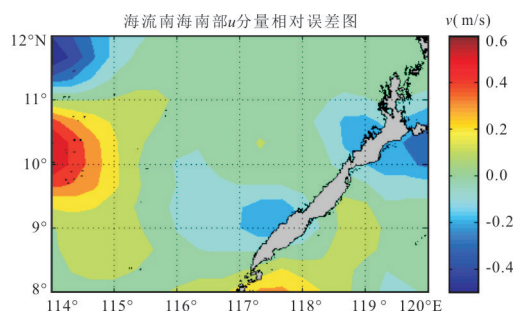
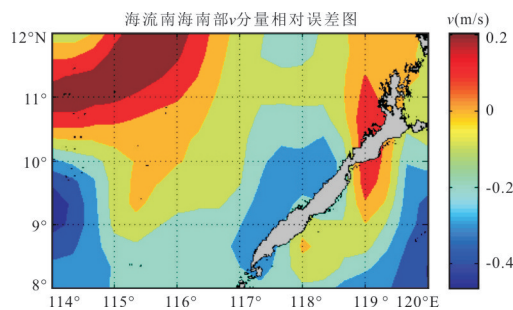
3 反演估算及验证分析

本文对反演结果与 OSCAR 海流产品进行了对比分析. OSCAR 海流产品数据主要是从 NOAA 网站 (www.oscar.noaa.gov) 的 OSCAR 海流网站部分下载获取 (Johnson *et al.*, 2007). 因工作区位于南海南部海域, 故下载区经纬度范围设置为: $8^{\circ}\text{N} \sim 12^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$, 时间从 2012 年 9 月 20 日到 2012 年 9 月 25 日. 下载可得到 OSCAR 海流流速的 u 分量图与 v 分量图. u 分量图向东为正, 向西为负, 正值时表示从西指向东, 负值时表示从东指向西; v 分量图向北为正, 向南为负, 正值时表示从南指向北, 负值时表示从北指向南. 二者分布并不遵循一定的规律, 但 u 分量相比 v 分量会出现比较大的值, 如图 9、图 10 所示.

图 9 海流 u 分量Fig.9 u component of sea flow图 10 海流 v 分量Fig.10 v component of sea flow图 11 u 分量纬度平均分布Fig.11 Latitudinal average distribution of u component

将 OSCAR 海流 u 分量和 v 分量分别按照纬度和经度求平均值,做纬度平均值分布图. 总体来看,在研究海域,纬度较低位置的 u 分量流速大于纬度较高位置的 u 分量流速,纬度较高位置的 v 分量流速大于纬度较低位置的 v 分量流速. 通过对比 u 、 v 分量分布图可以发现, u 分量流速总体上是大于 v 分量流速的,且 u 分量的变化更为复杂,如图 11、12 所示.

将经验模型算法获取的海流 u 分量和 v 分量与 OSCAR 海流 u 分量和 v 分量做相对误差处理,获得相对误差图,如图 13、图 14 所示,从中可以看出 u 分量相对误差最高达到了 0.6 m/s,在接近北纬 10° 的位置,误差达到最大. 而 v 分量的相对误差明显比 u 分量的相对误差要小,最大只达到了 0.4 m/s,且在

图 12 v 分量纬度平均分布Fig.12 Latitudinal average distribution of v component图 13 经验模型与 OSCAR 海流 u 相对误差Fig.13 u relative error of sea flow between empirical model and OSCAR图 14 经验模型与 OSCAR 海流 v 相对误差Fig.14 v relative error of sea flow between empirical model and OSCAR

距离赤道越近的位置,误差越大.

4 结论

相较于传统的研究人员利用海流计走航观测海流以及漂流浮标的技术通过距离与观测时间的数值求得的海流获取方法,卫星遥感资料数据具有大范围和全天候观测的优点. 根据海洋动力学原理,利用卫星高度计数据计算海流地转流,利用卫星散射计数据计算 Ekman 流,然后对地转流和 Ekman 流进行合成生成海表流场,并与 OSCAR 产品海流进行误差对比分析,实验表明通过卫星遥感资

料可以有效地反演海表流场,同时可以大大节省海流观测的人力、物力以及时间,对于研究开阔海域的海流规律特征,具有重要的意义。但由于时间以及数据源的原因,本文考虑的数据源的时间尺度还不够完整,可以收集更细粒度的数据反演出不同时相的海表流场,对研究海域开展不同季节的海流反演,分析海流变化规律。为了提高反演的精度,在经验模型算法的基础上,必须加入海面温度场的影响,在赤道内外不同的研究海域,采用不同的拟合方法来计算海流速度。

References

- Chen, Y.D., Zhang, R., Jiang, G.R., 2006. Evaluation and Analysis of Mid-Depth Currents of the Equatorial Pacific Using ARGO Float Position Information. *Marine Forecasts*, 3(4):37–46 (in Chinese with English abstract).
- Ding, R.R., Zuo, J.C., Du, L., et al., 2007. Sea Level Change in the South China Sea and Its Relations to the Steric Height Variation and Wind. *Periodical of Ocean University of China*, 37(S2): 23–30 (in Chinese with English abstract).
- Ekman, V.W., 1905. On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean Currents. *Arch. Math. Astron. Phys.*, 2:1–52.
- El-Nabulsi, R. A., 2019. Geostrophic Flow and Wind-Driven Ocean Currents Depending on the Spatial Dimensionality of the Medium. *Pure and Applied Geophysics*, 176(6): 2739–2750. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2080-x>
- Guo, Z.Z., Yin, K.L., Fu, S., et al., 2019. Evaluation of Landslide Susceptibility Based on GIS and WOE-BP Model. *Earth Science*, 44(12):4299–4312 (in Chinese with English abstract).
- He, J.L., Cai, S.Q., 2012. Study on the Hydrological Characteristic Parameters and Flow Field East of the Luzon Strait Using ARGO Profiling Floats. *Journal of Tropical Oceanography*, 31(1): 18–27 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.H., Huang, S.X., Liu, G., et al., 2011. Research on the Development of Surface Wind Speed Retrieval from Satellite Radar Altimeter. *Marine Science Bulletin*, 30(5):88–594 (in Chinese with English abstract).
- Johnson, E. S., Bonjean, F., Lagerloef, G. S. E., et al., 2007. Validation and Error Analysis of OSCAR Sea Surface Currents. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(4): 688–701. <https://doi.org/10.1175/jtech1971.1>
- Lagerloef, G. S. E., Mitchum, G. T., Lukas, R. B., et al., 1999. Tropical Pacific Near-Surface Currents Estimated from Altimeter, Wind, and Drifter Data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C10): 23313–23326. <https://doi.org/10.1029/1999jc900197>
- Lan, Y.G., Lang, S.Y., Lin, M.S., et al., 2018. Application of Microwave Scatter Meter Onboard HY-2A Satellite in Typhoon Remote Sensing Monitoring. *Satellite Application*, (5): 40–42 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Gai, Y.H., Ouyang, M., et al., 2019. Technologies with Two Azimuths in West Area of South China Sea: A Case Study of Zhushan Sag. *Earth Science*, 44(8): 2590–2596 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Zhang, R., Wang, H.Z., et al., 2012. Sea Surface Flow Field Retrieval and Estimation Based on Satellite Remote Sensing Data. *Progress in Geophysics*, 27(5): 1989–1994 (in Chinese).
- Lukas, R., Firing, E., 1984. The Geostrophic Balance of the Pacific Equatorial Undercurrent. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 31(1): 61–66. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(84\)90072-4](https://doi.org/10.1016/0198-0149(84)90072-4)
- Mao, Q.W., Shi, P., Qi, Y.Q., 1999. Sea Surface Dynamic Topography and Geostrophic Current over the South China Sea from Geosat Altimeter Observation. *Acta Oceanologica Sinica*, 21(1): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Pedlosky, J., 2013. An Inertial Model of the Interaction of Ekman Layers and Planetary Islands. *Journal of Physical Oceanography*, 43(7): 1398–1406. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-13-028.1>
- Picaut, J., Hayes, S. P., McPhaden, M. J., 1989. Use of the Geostrophic Approximation to Estimate Time-Varying Zonal Currents at the Equator. *Journal of Geophysical Research*, 94(C3): 3228. <https://doi.org/10.1029/jc094ic03p03228>
- Shrira, V. I., Almelah, R. B., 2019. Upper-Ocean Ekman Current Dynamics: A New Perspective. *Journal of Fluid Mechanics*, 887: 1–23. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.1059>
- Song, X.X., Wang, J., Chu, X.Q., et al., 2019. Estimation of Sea Surface Velocities from SAR Images Using the Doppler Shift. *Remote Sensing Technology and Application*, 34(2):293–302 (in Chinese with English abstract).
- van Meurs, P., Niiler, P. P., 1997. Temporal Variability of the Large-Scale Geostrophic Surface Velocity in the Northeast Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 27(10): 2288–2297. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<2288:tvotls>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<2288:tvotls>2.0.co;2)

- Wang, D.L., Yao, X.H., Meng, L., et al., 2014. Validation and Analysis of Wind Field Products of HY-2. *Marine Forecasts*, 31(4): 47–53 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.P., Wang, C.M., Xiang, J., et al., 2014. Validation of Quik SCAT Satellite Scatterometer Winds and Characteristics of Monthly Mean Wind Speed in South China Sea. *Journal of the Meteorological Sciences*, 34(1):54–59 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.H., Yu, H., Miao, C.S., et al., 2016. Analysis and Simulation of the Wind Fields Impact on Sea Level Features of Yellow Sea and East China Sea. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 39(1):90–101 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W.C., Wen, H.J., Liu, H.L., et al., 2019. The Determination Method of High Precision Geostrophic Currents in East China Sea. *Science of Surveying and Mapping*, 44(8):37–43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.S., Perrie, W., Zhang, B., et al., 2020. Monitoring of Tropical Cyclone Structures in Ten Years of RADAR-SAT-2 SAR Images. *Remote Sensing of Environment*, 236: 111449. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111449>
- Zheng, G.Z., Le, X.D., Wang, H.P., et al., 2017. Inversion of Water Depth from WorldView-02 Satellite Imagery Based on BP and RBF Neural Network. *Earth Science*, 42(12):2345–2353 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈奕德, 张初, 蒋国荣, 2006. 利用 ARGO 浮标定位信息估算分析赤道太平洋中层流场状况. *海洋预报*, 23(4): 37–46.
- 丁荣荣, 左军成, 杜凌, 等, 2007. 南海海平面变化及其比容高度和风场间的关系. *中国海洋大学学报*, 37(S2):23–30.
- 郭子正, 殷坤龙, 付圣, 等, 2019. 基于 GIS 与 WOE-BP 模型的滑坡易发性评价. *地球科学*, 44(12):4299–4312.
- 何建玲, 蔡树群, 2012. 利用 ARGO 数据计算吕宋海峡以东海域水文特性参数和流场. *热带海洋学报*, 31(1): 18–27.
- 姜祝辉, 黄思训, 刘刚, 等, 2011. 星载雷达高度计反演海面风速进展. *海洋通报*, 30(5):588–594.
- 李列, 盖永浩, 欧阳敏, 等, 2019. 南海西部双方位地震资料处理关键技术实践: 以珠三凹陷为例. *地球科学*, 44(8): 2590–2596.
- 兰友国, 郎姝燕, 林明森, 等, 2018. 海洋二号卫星 A 星微波散射计在台风遥感监测中的应用. *卫星应用*, (5):40–42.
- 刘巍, 张韧, 王辉赞, 等, 2012. 基于卫星遥感资料的海洋表层流场反演与估算. *地球物理学进展*, 27(5):1989–1994.
- 毛庆文, 施平, 1999. GEOSAT 卫星遥感资料研究南海海面动力高度场和地转流场. *海洋学报*, 21(1):11–16.
- 宋晓霞, 王静, 储小青, 等, 2019. 基于多普勒频移的 SAR 海表流场反演. *遥感技术与应用*, 34(2):293–302.
- 王东良, 姚小海, 孟雷, 等, 2014. 海洋二号卫星散射计风场产品真实性检验及分析. *海洋预报*, 31(4):47–53.
- 王坚红, 于华, 苗春生, 等, 2016. 近海面风场对黄东海域海平面特征影响的分析与模拟. *大气科学学报*, 39(1): 90–101.
- 王文超, 文汉江, 刘焕玲, 等, 2019. 我国东部海域高精度地转流的确定方法. *测绘科学*, 44(8):37–43.
- 王慧鹏, 王春明, 项杰, 等, 2014. QuikSCAT 卫星散射计矢量风检验及南海月平均风场特征分析. *气象科学*, 34(1): 54–59.
- 郑贵洲, 乐校东, 王红平, 等, 2017. 基于 WorldView-02 高分影像的 BP 和 RBF 神经网络遥感水深反演. *地球科学*, 42(12):2345–2353.