

基于卫星测高与卫星测温的表层流产品 生成方法应用评估*

刘秀青¹ 张杰^{1,2} 杨俊钢¹ 曹蕾²

(1. 自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 自然资源部海洋遥测技术创新中心 青岛 266061)

摘要 提高海洋表层流的精度与分辨率对于相关应用领域至关重要。研究引入海表面温度(sea surface temperature, SST)信息对高度计导出流场的改进效果, 计算了 2018 年每日无间隔的全球海洋表层流速度。通过增加热量守恒方程约束, 引入卫星测温产品, 在地转流基础上生成表层流产品, 并与现场漂流浮标速度比较, 评估了使用多源卫星遥感获取海流的质量。研究表明, 本文方法在不改变沿等温线的切向流速分量的前提下, 沿等温线的法向流速分量得到了改进, 方法能充分利用海表温度信息提取流场特征信息; 方法不适用于海表面温度梯度较小区域, 在梯度较大区域可获得明显改进; 优化流场能更好地刻画海面海流变化, 证明结合卫星测高与卫星测温可改善海洋表层流动; 存在强烈中尺度活动和热梯度区域, 增加 SST 观测能够弥补测高资料的不足。

关键词 表层流; 卫星测高; 卫星测温; 热量守恒方程

中图分类号 P731.21

doi: 10.11693/hyhz20200600169

表层流对海洋物质输送、气候变化等方面具有重要影响, 提高其精度和分辨率对于相关应用领域至关重要。然而目前尚没有直接获取海洋流场信息的遥感测量任务, 因此, 使用多源卫星遥感是间接获取海流的重要途径。

通过卫星测高数据反演表层流是迄今为止研究海洋表层流变化的最常用手段。因为在大洋内部和赤道以外区域地转平衡占据主导作用, 这意味着表层流可以从海面高度梯度获得, 但高度计观测系统存在不足: 只能在有限时空尺度上重建表层流动的地转分量(Yu *et al.*, 1995, 2013; 邱云等, 2005)。为了获得更加真实的表层流信息, 可以利用风场估算 Ekman 流(Lagerloef *et al.*, 1999), 并添加到地转流中(刘巍等, 2012; 安玉柱等, 2012; Rio *et al.*, 2014; 赵新华, 2016), 结合风场资料和绝对动力地形在当前仍然是计算表层流的主要方法。此外, 一些学者提出了一种基于准线性和稳态物理诊断表层流的算法, 利用不同卫星

数据分别估算地转分量、Ekman 分量和浮力分量, 结果表明该算法能更好地捕获海流(Bonjean *et al.*, 2002; Sikhakolli *et al.*, 2013)。

近年来, 海表面温度数据量大大增加, 其时间变化与表层流的平流有关, 能够为表层流提供重要信息, 因此, 将卫星测高与卫星测温结合起来估算洋流已成为一个全新领域。许多学者已经使用各种方法研究了高度测量和海表面温度数据的组合使用, 且已经取得巨大成果。在过去几十年中, 提出了许多新的表层流反演方法: 最大相关系数(maximum cross correlation, MCC)方法、表面准地转(surface quasigeostrophy, SQG)理论以及反演热量守恒方程。MCC 方法在连续热图像之间计算局部相关性来估计偏移和局部运动(Bowen *et al.*, 2002; 郭洪涛, 2012), 该方法受使用窗口大小的限制, 所得速度场空间分辨率更低; 此外, 当海温空间变异性较弱时, 也无法检索任何信息。基于 MCC 方法的不足, 已经提出了

* 国家重点研发计划, 2016YFA0600102 号; 国家自然科学基金, 41576176 号。刘秀青, 硕士研究生, E-mail: 1204604507@qq.com

通信作者: 杨俊钢, 副研究员, 博士, E-mail: yangjg@fio.org.cn

收稿日期: 2020-06-19, 收修改稿日期: 2020-08-30

从单个海表面温度(sea surface temperature, SST)图像诊断表层流的新方法,即表面准地转(surface quasigeostrophy, SQG)理论(Isern-Fontanet *et al.*, 2006, 2020; González-Haro *et al.*, 2014)。另一种全新的方法是通过反演热量守恒方程来估计表层流速度。Piterbarg(2009)首次通过结合 SST 和模式输出结果(背景速度场)来估算表层流,该方法被证明可有效地改善背景速度场(简称 PIT09)。在 PIT09 工作基础上, Rio 等(2016)研究了应用经典方法从 SST 图像中提取表层流信息的可行性(讨论已知强迫情况),结果表明该方法显著改善了背景流场,改进达到了 30%—35%,并且速度的经向分量获得明显改进, SST 观测能够在短时空尺度上提供重要信息,而这些非地转信息高度计无法提供。在热量守恒方程中,强迫项难以准确测量, Rio 等(2018)进一步考虑了未知强迫的解决方案,计算了全球海洋 6 年表层流速度,结果表明结合两颗卫星高度计导出速度和微波 SST 数据获得的精度等于或高于 4 颗高度计获得的精度,这强调了组合高度测量和海表面温度改善全球表层流的巨大潜力(简称 RIO18)。最近, Ciani 等(2019)进一步将该方法应用于地中海区域,生成了 2012—2016 年每日无间隔高分辨率(1/24°)表层流,通过与其他表层流估算值比较,表明该方法可以改善局部表层流,且经向分量和盆地西部具有更好的改进。由此可知,将卫星测高与卫星测温结合在改善表层流方面具有巨大潜能。在流场实际应用中,不仅需要获取大中尺度分量,在亚中尺度上(涡旋、锋和细丝),流场的表征也至关重要。事实上,在相对较小尺度上也存在活跃的可变信号,而常规方法只能在较大时空尺度上获取流场信息。为了更精确地认识海洋表面运动,本文研究了引入高分辨率海表面温度对高度计导出流场的改进效果。

本文通过增加热量守恒方程约束,引入卫星测温数据,在地转流基础上生成全球海洋表层流产品,并利用漂流浮标数据评估了产品质量;此外,本论文讨论了方法的适用性,给出了在海表面温度梯度较小区域流速计算结果异常问题的解决办法;并通过流速矢量沿等温线切向与法向的分解实验分析了方法改进流速的本质,结果表明本文方法在不改变沿等温线的切向流速分量的前提下沿等温线的法向流速分量得到了改进,方法能充分利用海表面温度信息提取流场特征信息,这对获取高精度海表面流场具有理论研究价值。数据在第 1 节中描述,第 2 节介绍了表层流生成方法,第 3 节给出了方法适用性分析,

实验结果在第 4 节给出,主要结论见第 5 节。

1 数据

本文使用两类数据:用于表层流生成的遥感产品和用于产品质量评估的漂流浮标数据,其中遥感产品包括地转流场产品和海表温度产品。

作为表层流背景速度的地转流场产品来自 AVISO(archiving, validation and interpretation of satellite oceanographic data),其空间分辨率为 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$,时间分辨率为 1 d,使用两种不同产品:仅两个高度计计算的“twosat”产品和所有可用高度计计算的“allsat”产品。海温数据来自遥感系统(remote sensing systems, REMSS)提供的空间分辨率为 25 km 以及时间分辨率为 1 d 的全球 MW SST 产品。

从表面漂流浮标数据装配中心(surface drifter data assembly center, SD - DAC)下载 6 h 时间分辨率的 2018 年浮标数据,获得 15 m 深度海表流速,数据经过滤潮汐、日平均等处理。

2 方法

通过增加热量守恒方程约束,利用卫星测温产品,在地转流($u_{\text{bck}}, v_{\text{bck}}$)基础上生成表层流产品($u_{\text{opt}}, v_{\text{opt}}$)是可行的方法。本文基于 PIT09 方法,考虑到强迫项难以精确计算,故对其进行了简化。

$$\frac{\partial \text{SST}}{\partial t} + u \frac{\partial \text{SST}}{\partial x} + v \frac{\partial \text{SST}}{\partial y} = F, \quad (1)$$

式中, SST 为海表面温度; u 和 v 分别是纬向和经向表层流速度; x 和 y 分别表示纬向和经向方向; F 为强迫项。

强迫项包括热通量、垂直平流、夹带速度和扩散,这些分量难以准确测量,因此,定义背景强迫项 F_{bck} 来粗略近似 F 。优化速度计算公式如下:

$$u_{\text{opt}} = u_{\text{bck}} - \frac{A \times (A \times u_{\text{bck}} + B \times v_{\text{bck}} + E)}{A^2 + B^2}, \quad (2)$$

$$v_{\text{opt}} = v_{\text{bck}} - \frac{B \times (A \times u_{\text{bck}} + B \times v_{\text{bck}} + E)}{A^2 + B^2}, \quad (3)$$

式中, $u_{\text{opt}}, v_{\text{opt}}$ 分别表示优化速度的纬向和经向分量; $u_{\text{bck}}, v_{\text{bck}}$ 分别表示背景速度的纬向和经向分量;

$$A = \frac{\partial \text{SST}}{\partial x}, B = \frac{\partial \text{SST}}{\partial y}, E = \frac{\partial \text{SST}}{\partial t} - F_{\text{bck}}. \quad (4)$$

假设影响 SST 时间变化的强迫场具有不同时空尺度特征,其中 SST 时间变化的大空间尺度主要是由海气强迫和热通量引起,小尺度变化是受平流影

响。假设可忽略小尺度平流项, 则背景强迫项 F_{bck} 可以通过提取 SST 时间变化的大尺度分量来近似。

$$F_{bck} = \left(\frac{\partial SST}{\partial t} \right)_{scales > L}, \quad (5)$$

式中, scales 为空间尺度; L 为滤波尺度; 这里 L 取 500 km。

由公式(2)—(5)可知, 优化速度的计算主要取决于以下几个方面: 海表面温度的时空变化、背景强迫场 F_{bck} 和背景速度。

3 方法适用性分析

3.1 沿等温线切向与法向的流速分析

根据 RIO18 论文可知, 该方法在温度梯度明显的区域改进效果较好, 因此以某涡旋为例, 给出方法改进流速的详细分析。已知初始流速矢量 (u, v) , 其沿等温线的法向分量为 (u_t, v_t) , 切向分量为 (u_s, v_s) , 然

后对该初始流速进行重构, 将法向分量扩大 5 倍且切向分量扩大 1.5 倍, 获得重构流速矢量 $uv_{new}=(5u_t+1.5u_s, 5v_t+1.5v_s)$ 。重构流速及其沿等温线切向与法向的分解如图 1a 和图 1b 所示。基于本文方法引入海温获得的优化流速如图 1c 所示, 实验结果表明流速的法向分量明显被修正, 而切向分量无变化。根据图 1 可以得出: 该方法对沿等温线的法向流速分量有约束, 但对于切向流速分量无明显改进效果。

3.2 温度梯度阈值设置

基于本文方法, 优化速度在海表面温度梯度(sea surface temperature gradient, SSTG)较小区域存在流速异常的问题。2018 年 1 月 2 日湾流区域流场如图 2 所示, 背景速度存在不合理的流场结构, 流速矢量跨越温度锋面, 优化速度在温度梯度较大区域获得明显改进(白框区域)。因此, 需要分析该方法的适用性。

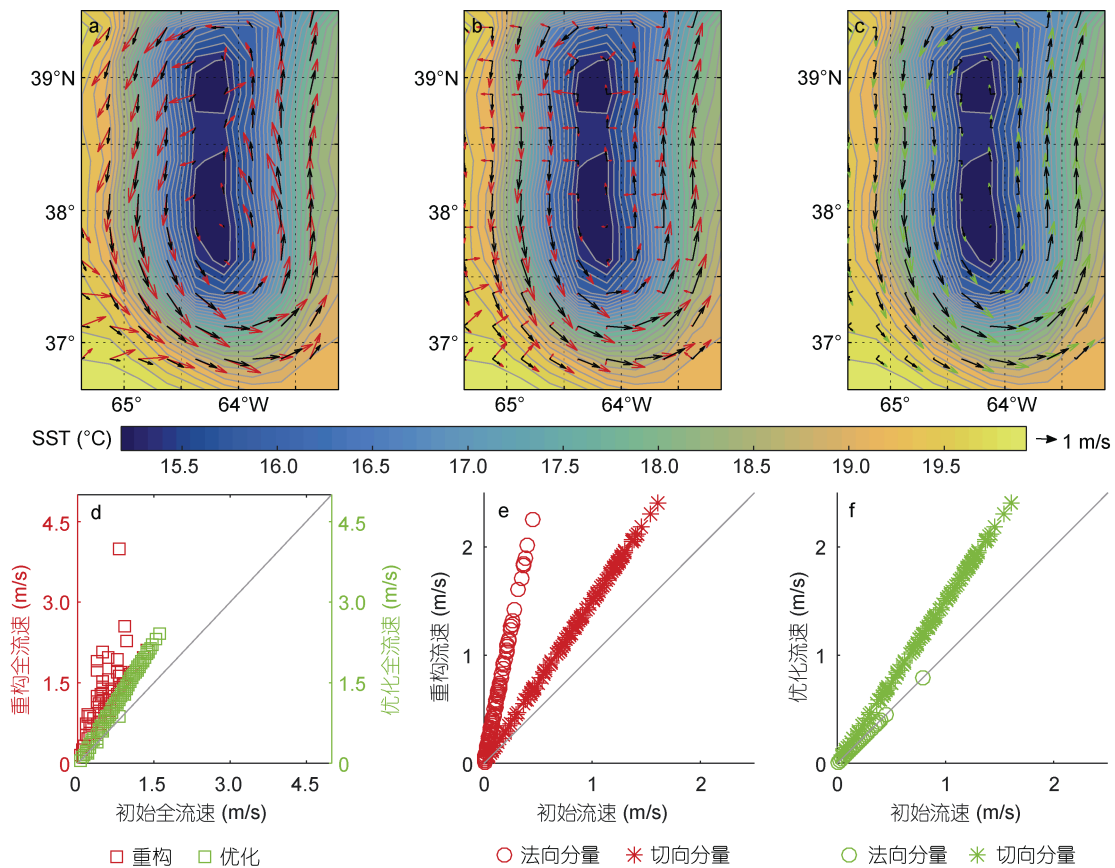


图 1 流速矢量沿等温线切向与法向的分解

Fig.1 Decomposition of velocity vector along tangent and normal directions along isotherms

注: a: 初始流速(黑色)与重构流速(红色); b: 初始流速(黑色)与重构流速(红色)沿等温线切向与法向的分解; c: 初始流速(黑色)与优化流速(绿色)沿等温线切向与法向的分解; 三种颜色的矢量箭头共用一个比例尺; SST: 海表面温度

根据优化速度计算公式可知, 优化场是否能够获得改进在一定程度上取决于 SSTG, 因此, 期望通过约束 SSTG 的取值范围进一步修正优化场。首先将背景速度、优化速度、SSTG 与浮标数据进行时空匹配。然后设置 SSTG 阈值, 当 SSTG 小于该阈值时, 则去除相应的匹配数据点。最后针对剩余数据对分别计算背景速度、优化速度与浮标速度的均方根误差 (root mean square error, RMSE), 得到 RMSE 随 SSTG 最小阈值变化的图像 (图 3)。针对全球统计结果得出该方法的适用条件: 对于速度的纬向分量, 当 $SSTG < 2.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 时, 优化场不做修改, 保持背景场状态; 对于速度的经向分量, 当 $SSTG < 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 时, 优化场不做修改, 保持背景场状态。

4 结果

基于“twosat”产品和 MW SST 产品, 根据以上方法, 生成 2018 年每日无间隔 $1/4^\circ$ 的全球海洋表层流产品。

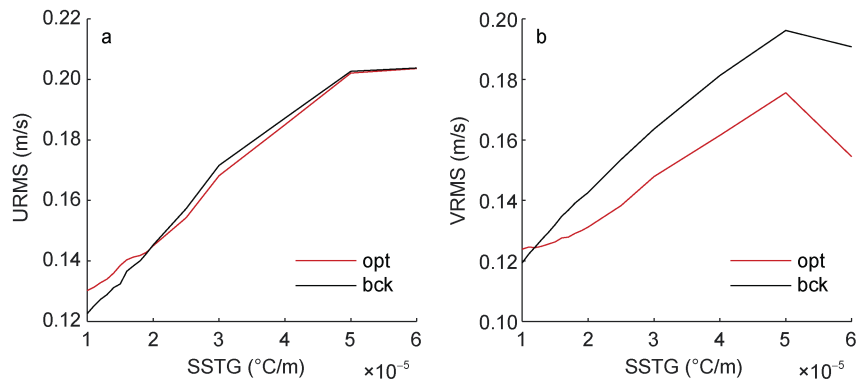


图 3 “twosat”背景速度、优化速度与浮标速度的均方根随 SSTG 最小阈值的变化

Fig.3 The root mean square of “twosat” background velocities, optimized velocities, and buoy velocities changes with the minimum threshold of SSTG

注: a: 纬向分量; b: 经向分量; bck: 背景速度; opt: 优化速度; SSTG: 海表面温度梯度; URMS: 纬向速度分量的均方根; VRMS: 经向速度分量的均方根

4.1 定性区域评估

为了评估方法的性能, 以黑潮区域涡旋为案例分析优化速度的改进效果。黑潮区域涡旋丰富, 在 2018 年 3 月 24 日黑潮附近发现了一个气旋涡。在“twosat”背景速度场中 (图 4a), 由于受到高度计轨道距离和数量的限制, 获得的中尺度信号存在较大误差, 流速矢量跨越温度锋面 (白框区域), 这与环流规律不符。在“allsat”速度场中 (图 4c), 受益于高度计数量的增加, 解决了这种问题。通过将 MW SST 信息引入“twosat”背景速度, 获得的优化速度与“allsat”速度场相一致并且与温度锋面方向更加一致 (图 4b)。

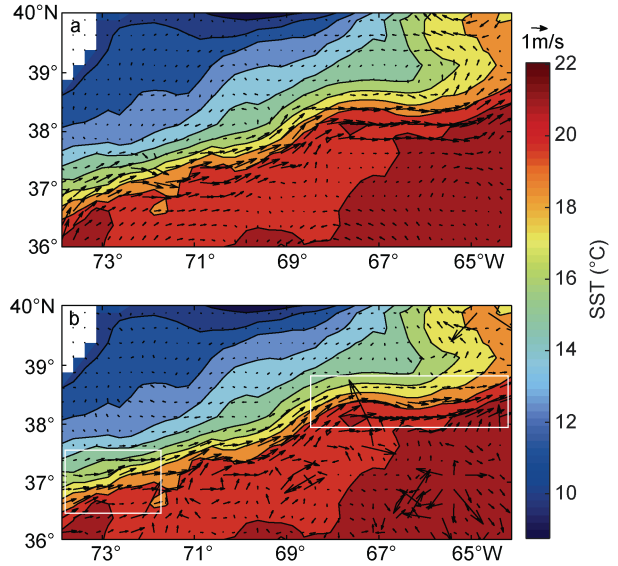


图 2 2018 年 1 月 2 日湾流区域流场

Fig.2 The current field in the gulfstream region on January 2, 2018
注: a: “twosat”背景速度; b: 优化速度; SST 表示来自 MW SST 产品的海表面温度; 白色方框: 优化速度获得明显改善的区域

4.2 定量验证

在本节中, 针对生成的 2018 年优化速度进行质量评估, 验证数据集采用对应时段的现场浮标测量数据 (MW SST 产品使用了日模型进行校正, 所有海温值相当于 10 m 左右深度的基础海温, 我们期望优化速度代表 10 m 深度的速度, 因此漂流浮标 15 m 深度速度可作为参考数据集)。首先, 以浮标数据为基准, 背景速度与优化速度与之进行时空匹配。然后, 统计均方根误差 (E_{RMS})、偏差 (S_b) 和相关系数 (R_{COR})。最后, 绘制均方根、相关系数和改进百分比随 SSTG 变化的图像 (图 5)。改进百分比 R_i 采用下式计算:

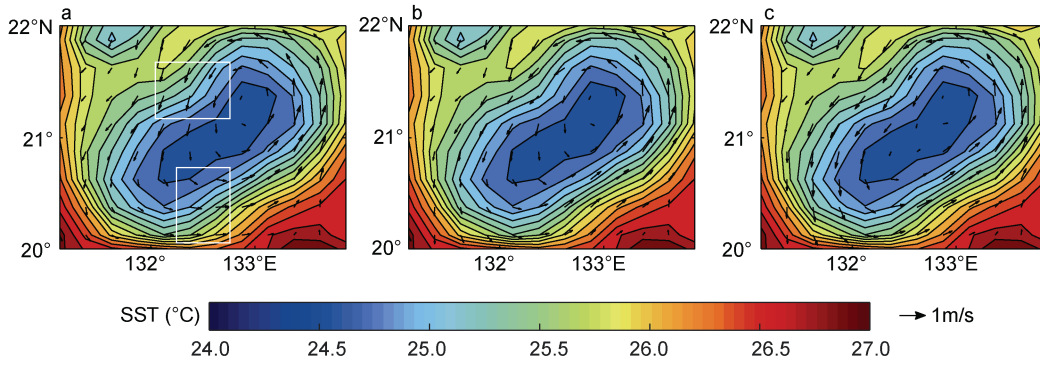


图 4 2018 年 3 月 24 日黑潮区域气旋涡

Fig.4 The eddy in the Kuroshio region on March 24, 2018

注: a: “twosat”背景速度; b: “twosat”背景速度和 MW SST 组合的优化速度; c: “allsat”速度场; SST 来自 MW SST 产品; 白色方框: “twosat”背景速度误差较大区域

$$R_1 = 100 \left[1 - \left(\frac{E_{RMS-opt}}{E_{RMS-bck}} \right)^2 \right], \quad (6)$$

式中, $E_{RMS-opt}$ 表示优化速度与浮标速度的均方根; $E_{RMS-bck}$ 表示背景速度与浮标速度的均方根。

本文分别针对全球、南极绕极流区域(35°—65°S, 0°—360°E) 和黑潮延伸体区域 (30°—40°N, 140°—180°E)给出了定量比较结果, 这三个区域的数据匹配个数分别为 24843、10134 和 1344。就全球而言, 获得了“twosat”背景场、优化场、“allsat”速度场与浮标匹配的数据对, 保留 SSTG 满足适用条件的数据对, 不论经向分量还是纬向分量, 优化流较“twosat”地转流在各项指标均有所改进, 尤其是 BIAS, 甚至优于“allsat”地转流(表 1)。由表 2 和表 3 可知, 在南极绕极流和黑潮延伸体这类强温度梯度区域, 优化场改进效果更加明显。

表 1 全球区域的“twosat”背景场、优化场、“allsat”背景场与浮标数据的平均统计结果

Tab.1 Average statistical results of “twosat” background field, optimized field, “allsat” background field and buoy data in the global region

变量类型	统计量	“twosat”背景场	“twosat”+MW SST	“allsat”背景场
纬向分量	均方根误差(m/s)	0.145	0.144	0.132
	偏差(m/s)	0.021	0.019	0.020
	相关系数	0.845	0.846	0.877
经向分量	均方根误差(m/s)	0.132	0.124	0.120
	偏差(m/s)	0.008	0.007	0.009
	相关系数	0.821	0.831	0.857

由图 5 可知, 与“twosat”背景速度相比, 引入 MW SST 生成的优化速度获得明显改善。以 $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 为间隔, 针对不同 SSTG 区间, 统计“twosat”背景速度、优化速度和“allsat”背景速度与浮标速度的均方根、相关系数和改进百分比。对于经向分量, 当

SSTG $>2.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 时, 优化速度的均方根小于背景速度, 相关系数大于背景速度, 并且可获得 15%—24%的改善, 表明该方法在强 SSTG 区域可有效地改善经向分量。对于纬向分量, 当 SSTG $>2.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 时, 获得较小改进。在 SSTG 不明显的区域, 因优化速度保持背景速度, 因此没有改进。与经向分量相比, 纬向分量的校正效果不好, 可能因为等温线在全球大洋呈纬向分布, 经向温度梯度的量值与精度显著于纬向梯度, 因此对经向流速的改进效果更加明显。

表 2 南极绕极流区域的“twosat”背景场、优化场、“allsat”背景场与浮标数据的平均统计结果

Tab.2 Average statistical results of “twosat” background field, optimized field, “allsat” background field and buoy data in the Antarctic Circumpolar Current region

变量类型	统计量	“twosat”背景场	“twosat”+MW SST	“allsat”背景场
纬向分量	均方根误差(m/s)	0.148	0.145	0.132
	偏差(m/s)	0.037	0.040	0.033
	相关系数	0.852	0.858	0.881
经向分量	均方根误差(m/s)	0.134	0.121	0.120
	偏差(m/s)	0.022	0.018	0.022
	相关系数	0.866	0.885	0.893

表 3 黑潮延伸体区域的“twosat”背景场、优化场、“allsat”背景场与浮标数据的平均统计结果

Tab.3 Average statistical results of “twosat” background field, optimized field, “allsat” background field and buoy data in the Kuroshio Extension region

变量类型	统计量	“twosat”背景场	“twosat”+MW SST	“allsat”背景场
纬向分量	均方根误差(m/s)	0.181	0.178	0.158
	偏差(m/s)	-0.006	0.002	0.001
	相关系数	0.816	0.821	0.852
经向分量	均方根误差(m/s)	0.152	0.141	0.137
	偏差(m/s)	-0.002	-0.002	0.001
	相关系数	0.774	0.786	0.818

与“twosat”背景速度相比,在所有 SSTG 区间,“allsat”背景速度精度更高(随着高度计数量增加,流场空间分辨率提高,这为使用“allsat”产品检验优化场提供了理论依据)。对于速度的经向分量,当

SSTG $>2.0\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,基于“twosat”和 MW SST 的优化速度更接近“allsat”背景速度,这表明该方法在强 SSTG 区域可弥补测高资料的不足。对于速度的纬向分量,优化速度的精度小于“allsat”背景速度。

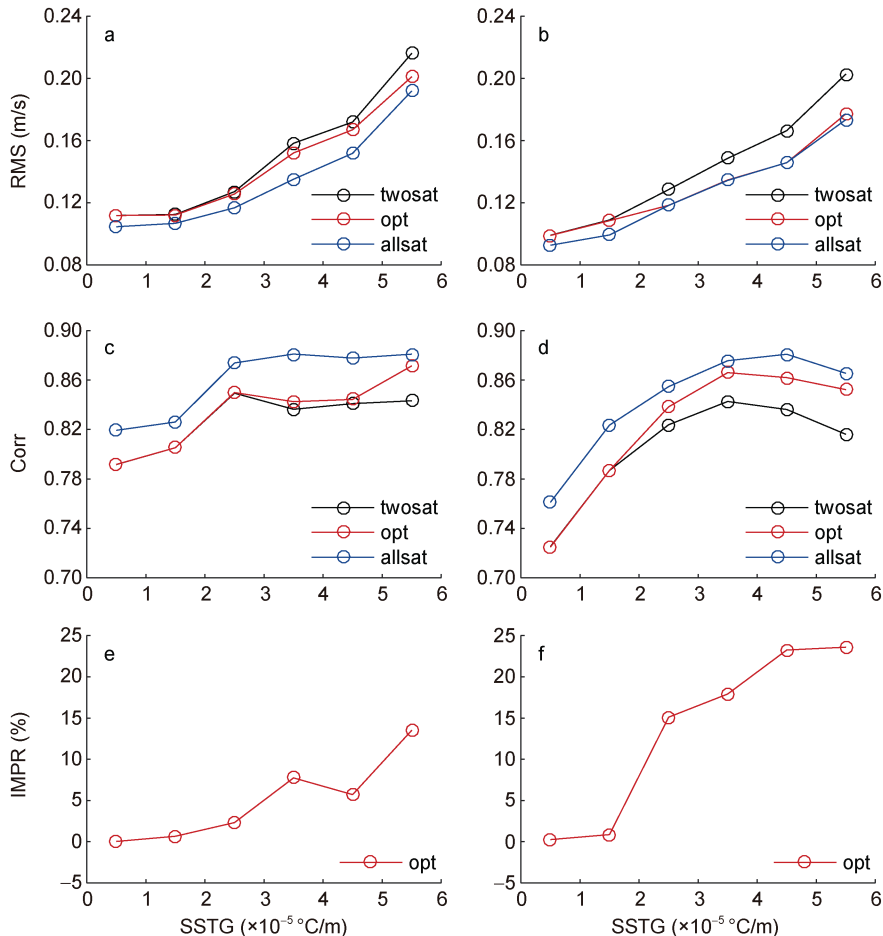


图5 “twosat”背景速度、优化(opt)速度、“allsat”背景速度与浮标速度的均方根(RMS)、相关系数(Corr)和改进百分比(IMPR)随不同 SSTG 区间的变化

Fig.5 The root mean square(RMS), correlation coefficient(Corr), and improvement percentage(IMPR) of “twosat” background velocities, optimized velocities, “allsat” background velocities, and buoy velocities change with different SSTG intervals

注: a、c、e: 纬向分量; b、d、f: 经向分量

5 结论

本文以卫星测高反演的地转流为背景数据,利用可逐日覆盖全球的卫星测温数据,评估了表层流生成方法。流速获得改进主要是由于相比背景速度 SST 具有更高的时空分辨率,然而,受制于 SST 输入数据集的时空分辨率和强迫项的粗略估算,方法的改进主要是地转分量。主要结论如下:

(1)本文方法在不改变沿等温线的切向流速分量的前提下,沿等温线的法向流速分量得到了改进,方法能充分利用海表温度信息提取流场特征信息。

(2)方法不适用于海表面温度梯度较小区域,在梯度较大区域可获得明显改进。

(3)在该项研究中,优化流场能更好地刻画海面海流变化,证明结合卫星测高与卫星测温可改善海洋表层流动。

(4)在海表面温度梯度较大区域,增加 SST 观测能够弥补测高资料的不足。

参 考 文 献

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
- 安玉柱, 张 韧, 王辉赞等, 2012. 基于卫星遥感数据的全球表层流场反演重构. *海洋通报*, 31(1): 1—8
- 邱 云, 胡建宇, 2005. 利用卫星高度计资料分析热带大西洋表层环流的季节性变化. *海洋通报*, 24(4): 8—16, 72
- 赵新华, 2016. 基于卫星测高数据的全球海洋流场产品研究与黑潮监测应用. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 13
- 郭洪涛, 2012. 利用卫星资料反演表面海流的研究. 南京: 南京师范大学博士学位论文, 58
- Bonjean F, Lagerloef G S E, 2002. Diagnostic model and analysis of the surface currents in the Tropical Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 32(10): 2938—2954
- Bowen M M, Emery W J, Wilkin J L *et al*, 2002. Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross-correlation technique. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(10): 1665—1676
- Ciani D, Rio M H, Menna M *et al*, 2019. A synergetic approach for the space-based sea surface currents retrieval in the Mediterranean Sea. *Remote Sensing*, 11(11): 1285
- González-Haro C, Isern-Fontanet J, 2014. Global ocean current reconstruction from altimetric and microwave SST measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(6): 3378—3391
- Isern-Fontanet J, Chapron B, Lapeyre G *et al*, 2006. Potential use of microwave sea surface temperatures for the estimation of ocean currents. *Geophysical Research Letters*, 33(24): L24608, doi: 10.1029/2006GL027801
- Isern-Fontanet J, García-Ladona E, Jiménez-Madrid J A *et al*, 2020. Real-time reconstruction of surface velocities from satellite observations in the Alboran Sea. *Remote Sensing*, 12(4): 724
- 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
- Piterbarg L I, 2009. A simple method for computing velocities from tracer observations and a model output. *Applied Mathematical Modelling*, 33(9): 3693—3704
- Rio M H, Mulet S, Picot N, 2014. Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents. *Geophysical Research Letters*, 41(24): 8918—8925
- Rio M H, Santoleri R, Bourdalle-Badie R *et al*, 2016. Improving the altimeter-derived surface currents using high-resolution sea surface temperature data: a feasibility study based on model outputs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(12): 2769—2784
- Rio M H, Santoleri R, 2018. Improved global surface currents from the merging of altimetry and Sea Surface Temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 216: 770—785
- Sikhakolli R, Sharma R, Kumar R *et al*, 2013. Improved determination of Indian Ocean surface currents using satellite data. *Remote Sensing Letters*, 4(4): 335—343
- Yu Y Y, Emery W J, Leben R R, 1995. Satellite altimeter derived geostrophic currents in the western tropical Pacific during 1992-1993 and their validation with drifting buoy trajectories. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12): 25069—25085
- Yu Y, Wang L F, Li Z W *et al*, 2013. Geostrophic current estimation using altimeter data at ground track crossovers in the northwest Pacific Ocean. *Frontiers of Earth Science*, 7(4): 447—455

APPLICATION EVALUATION OF SURFACE CURRENTS PRODUCT GENERATION METHOD BASED ON SATELLITE ALTIMETRY AND SATELLITE TEMPERATURE MEASUREMENT

LIU Xiu-Qing¹, ZHANG Jie^{1,2}, YANG Jun-Gang¹, CAO Lei²

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Ocean Telemetry Technology Innovation Center, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract Improving the accuracy and resolution of ocean surface currents is crucial for related applications. By introducing sea surface temperature (SST) data, the calculation of current field derived from altimeter data could be improved, which was validated by the calculation of the daily gapless global ocean surface current velocities in 2018. By adding constraints of the heat conservation equation, introducing satellite temperature measurement products, generating surface current products on the basis of geostrophic current, and comparing with the in-situ drifting buoy velocities, the quality of currents obtained by multi-source satellite remote sensing was evaluated. The method does not change the tangential velocity component along the isotherm, and the normal velocity component along the isotherm can be improved. The method makes full use of the sea surface temperature information to extract the flow field characteristic information. In addition, the method worked well with significant improvement for regions in strong SST gradient, but not for those in low SST gradient. The optimized current field can better describe the change of sea surface current, proving that the combination of satellite altimetry and satellite temperature measurement can improve the surface flow of the ocean. In the areas with strong mesoscale activities and thermal gradients, increasing SST observations is the ideal way to compensate the lack of altimetry data.

Key words surface currents; satellite altimetry; satellite temperature measurement; heat conservation equation