

有限尺度李雅普诺夫指数与海表温度梯度相关性的初步分析

曹 蕾^{1,2}, 张 杰^{1,2}, 杨俊钢^{1*}, 周超杰³, 孙伟富^{1,2}, 崔 伟^{1,4}

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

3. 中国石油大学(华东) 海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580;

4. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 为了探究海表温度和海面高度之间的瞬时相关性, 介绍了一种卫星测高数据的拉格朗日分析指数——有限尺度李雅普诺夫指数(Finite Size Lyapunov Exponent, FSLE), 以黑潮延伸体区域的涡旋和南大西洋的亚南极锋为例, 通过对观测、模式结果和融合产品结果的分析, 探讨了该指数与海表温度梯度(Sea Surface Temperature Gradient, SSTG)之间的相关性。比较 FSLE 图像和 SSTG 图像发现, FSLE 与 SSTG 均呈丝状结构, 对海洋表层水体结构描述具有一致性, 尤其在温度梯度大和地转流强的区域更为一致。二者的一致性要远好于其他常用方式, 比如全流速、OW 参数涡旋识别方法和 Winding-Angle 涡旋识别方法。不同区域 FSLE 与 SSTG 之间的相关性表现不同, 黑潮延伸体区域相关系数存在显著的季节变化, 而南大西洋亚南极锋区域季节内变化突出。

关键词: 有限尺度李雅普诺夫指数; 海表温度梯度; 拉格朗日拟序结构; 相关性

中图分类号: P731.11; O172

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)01-0130-10

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.014

引用格式: CAO L, ZHANG J, YANG J G, et al. Preliminary analysis of the correlation between finite size Lyapunov exponent and sea surface temperature gradient[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 130-139. 曹蕾, 张杰, 杨俊钢, 等. 有限尺度李雅普诺夫指数与海表温度梯度相关性的初步分析[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 130-139.

近几十年来, 随着来自拉格朗日流量计、高频雷达、卫星测量和计算机模型的速度场信息增多, 拉格朗日方法越来越多地被应用于描述海洋混合和运输^[1-4]。其中, 海洋拉格朗日拟序结构(Lagrangian Coherent Structure, LCS)^[5]至关重要, 已被收录到《10000 个科学难题-海洋科学卷》^[6]中。如何利用 LCS 理论与方法, 更有效地识别和分析海洋锋面、中尺度涡等海洋中小尺度过程, 是目前广受关注的科学问题。常用的识别 LCS 的拉格朗日方法包括有限尺度李雅普诺夫指数(Finite Size Lyapunov Exponent, FSLE)^[7-12]和有限时间李雅普诺夫指数(Finite Time Lyapunov Exponent, FTLE)。相比于 FTLE, FSLE 在海洋学领域的应用更有待研究。

FSLE 的直观物理意义表示相邻粒子分开一定距离所需要的时间^[13]。它的脊线可以被视作流体运动的 LCS, 表示输送或涡流边界的障碍。对于给定的速度场, FSLE 能够揭示比速度场分辨率尺度更细的海洋结构。通过与海表温度(Sea Surface Temperature, SST)图像的比较, 该指数对海洋动力学评估的可靠性已得到验证。不论是基于卫星测高产品还是数值模式结果, FSLE 都能有效定位拉格朗日特征, 即使受到速度场缺少非地转成分、时空分辨率不足以及噪声、结构解析不佳等限制, 其对(次)中尺度丝状过程的预测和描述

收稿日期: 2018-09-06

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目——全球高分辨率海洋再分析系统研制与产品研发(2016YFC1401800); “全球变化与海气相互作用”专项——西太平洋 PAC-YGST04 区块海洋环境参数遥感调查 II 期(GASI-02-PAC-YGST₂-04)

作者简介: 曹 蕾(1989-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事遥感产品在海洋模式中的应用方面研究. E-mail: winnycl@163.com

* **通讯作者:** 杨俊钢(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事卫星遥感资料应用方面研究. E-mail: yangjg@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

能力优于欧拉方法^[8,14]。

通过表层海流流速计算的 FSLE,可以应用于速度场对中尺度和次中尺度过程的表述能力研究,并进一步分析二维^[8,15]和三维^[16]的(次)中尺度输运和运动。因为地表速度场的水平混合特性与生物特征吻合得很好,FSLE 也是研究海洋变化对海洋生物影响的重要手段^[15,17]。此外,FSLE 可作为一种新的同化资料,以基于结构相关的图像同化为思路,能有效地利用高分辨率的海表高度信息和图像结构观测中所包含的中尺度和次中尺度信息,进而有效改进对海洋变量的描述^[18-19]。总之,FSLE 在海洋的应用前景广阔。

本文主要介绍 FSLE 及其脊线描述的拉格朗日拟序结构,并通过对观测、模式结果和融合产品结果的分析,对比 FSLE 与海面温度梯度(Sea Surface Temperature Gradient, SSTG)分布,探讨二者在对海洋动力结构描述方面的相关性,以期得到海表温度和海面高度之间的瞬时相关情况。

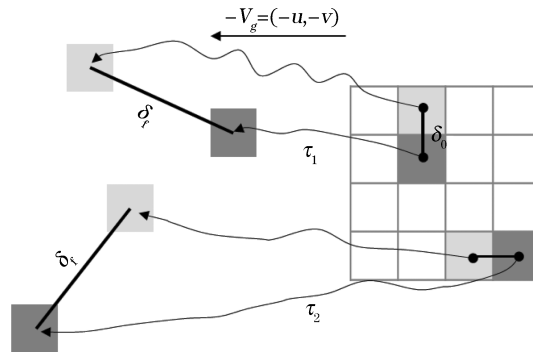
1 方 法

1.1 FSLE 介绍

FSLE 表征相邻粒子分开一定距离所需要的时间^[13](图 1),用于测量平流粒子的相对分散,可作为平流输送的一种被动示踪剂来探测输送结构,因此 FSLE 脊线与示踪因子的梯度结构非常相似。FSLE 场的脊线可以被识别为流动中流体运动的拉格朗日拟序结构,以表征输送或涡流边界的障碍。根据定义,FSLE(用物理量符号 λ 表示)为相邻粒子从初始距离 δ_0 分开到距离 δ_f 的指数型的时间速率,计算公式为

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \ln \frac{\delta_f}{\delta_0}, \quad (1)$$

式中, τ 表示分离到指定长度所需时间。 λ 绝对值越大,说明相邻水质点分离到指定长度的速度越快,反之亦然。



注: τ_1 和 τ_2 表示向后的一段时间($\tau_1 < 0$ 和 $\tau_2 < 0$); δ_0 表示初始距离; δ_f 表示分离长度; $-V_g = (-u, -v)$ 表示时间向后的绝对地转流速; t 时刻相邻两点的初始距离为 δ_0 ; $t + \tau_1$ 和 $t + \tau_2$ 时刻这两点的距离为 δ_f

图 1 时间向后的 FSLE 计算示意图

Fig.1 A schematic diagram of the calculation of backward-in-time FSLE

在 FSLE 网格分辨率下,先将一段时间内的流速插值到对应格点;计算相邻粒子从距离 δ_0 被平流输送到 δ_f 所需要的时间,初始距离 δ_0 一般选用相邻格点之间的距离。时间积分选择为向后积分($\tau < 0$)。一般而言, δ_0 选择适应于 FSLE 分辨率的精细化网格,分离长度 δ_f 一般选取涡旋长度尺度。此外,设定最大平流时间 T 。如果达到了最大平流时间 T 但还没有达到分开距离 δ_f , FSLE 的最小值 $\lambda_{\min}$ 定义为

$$\lambda_{\min} = \frac{1}{T} \ln \frac{\delta_f}{\delta_0}, \quad (2)$$

因此,时间 T 需要足够大,以允许流体质点受到中尺度和亚中尺度动力学平流在速度场中输送。

1.2 海表温度梯度

海表温度梯度能反映 SST 空间分布特征,尤其能够描述水团边界位置。计算 SST 空间梯度的公式:

$$SSTG = \sqrt{\left(\frac{\partial SST}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial SST}{\partial y}\right)^2}, \quad (3)$$

式中, x 和 y 分别表示经度方向和纬度方向。若 SST 网格分辨率与 FSLE 分辨率不一致,则将 SST 插值到 FSLE 网格后计算 SST 梯度。

2 数据来源与处理

法国 CLS(Collecte Localisation Satellite)中心发布了 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)FSLE^[20]。FSLE 产品由绝对动力地形(Absolute Dynamic Topography, ADT)对应的地转流速计算而成,空间分辨率 0.04°、分离距离 0.6°、最大平流时间 200 d,得到向后积分的 FSLE^[7],时间序列为 1994-01-01 至今。

使用 Suomi NPP 可见光红外成像辐射仪(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, VIIRS)的网格化 3 级产品^[21]作为观测产品,因 VIIRS 白天和夜间算法中选择的参考 SST 因子不同造成了 VIIRS 白天获得的范围更大,所以选择白天观测。光学遥感观测受到云影响显著,大面积连续有效的数据有限。融合产品能弥补这一不足,选择 RSS 提供的空间分辨率 9 km 以及时间分辨率为 1 d 的全球 SST 产品(Global High-resolution Sea Surface Temperature, GHRSST)^[22]。

此外,本文还使用模式结果计算了 FSLE,用于比较模式流场对应的 FSLE 与模式温度对应的 SSTG 之间的相关性。模式结果由美国海军分层海洋模式(Navy Layered Ocean Model, NLOM)的(1/32)°模拟实验提供^[23]。利用表层流速和表层温度分别计算 λ 和 SSTG,其中空间分辨率和分离距离与 AVISO 的 FSLE 产品一致,为减小计算代价同时保证脊线结构不受影响,最大平流时间设为 30 d。

3 拉格朗日拟序结构

FSLE 是对卫星测高数据的拉格朗日分析结果之一。FSLE 的脊线将流动分离到具有不同动态行为的区域,能够显示出流场的拉格朗日拟序结构。本文以 2016-01-17 的黑潮延伸体流域为例进行分析(图 2)。由流场分布(图 2a)可以看出,从南至北分别存在 1 个气旋—2 个气旋 1 个反气旋—1 个反气旋,因黑潮主流受多个涡旋影响导致弯曲较大,其中最显著的是中心位于(156°E, 33°N)的气旋式涡旋,该涡旋正在形成尚未脱离黑潮主轴。这些不同水体结构特征在其 FSLE 场(图 2b)中均有所体现。由式(1)可知,FSLE 绝对值越大,相邻水质点分离到中尺度长度越快。FSLE 脊线绝对值 $> 0.5 \text{ d}^{-1}$, 对应分离时间 $< 5.4 \text{ d}$, 整体以 $< 0.1 \text{ d}^{-1}$ 为主,表明绝大部分水体的分离时间 $> 27 \text{ d}$ 。其中,脊线在沿约 35°N 纬线向东至 155°30'E 附近转而向南形成未闭合的环,说明黑潮主流向东流动的过程中在该处转向南流动,与涡旋引起的主流弯曲一致。此外,在 154°E, 35°~36°N 附近存在显著的脊线,显示其左右两个涡旋是独立的,它们之间没有水体输送。

在多个涡旋同时生消的过程中,即使只考虑水平方向,水体结构也非常复杂。2016-01-29 南部涡旋已经脱离黑潮主流,黑潮主流受到涡旋影响呈“S”形和“反 S”形结合,其余结构在绝对地转流速图上并不显著(图 2a)。而在 FSLE 场中,不仅突出了主要的涡旋结构,还显示了 35°N 以北的近 6 个次中尺度结构。此外,FSLE 区分了水体的来源。在 156°E, 35°~36°N 附近存在向北的流动,FSLE 场显示了显著的脊线,表明这是由 2 支流动平行构成的,分别是向北的黑潮主流和向西移动的中尺度过程的北向流。

综上,FSLE 的脊线代表了流场的拉格朗日拟序结构,描述了海面流场的主要结构,甚至可以分辨出速度网格无法分辨的次中尺度过程。当有涡旋融入或脱离黑潮主流时,也能够用于识别黑潮主流水体范围。

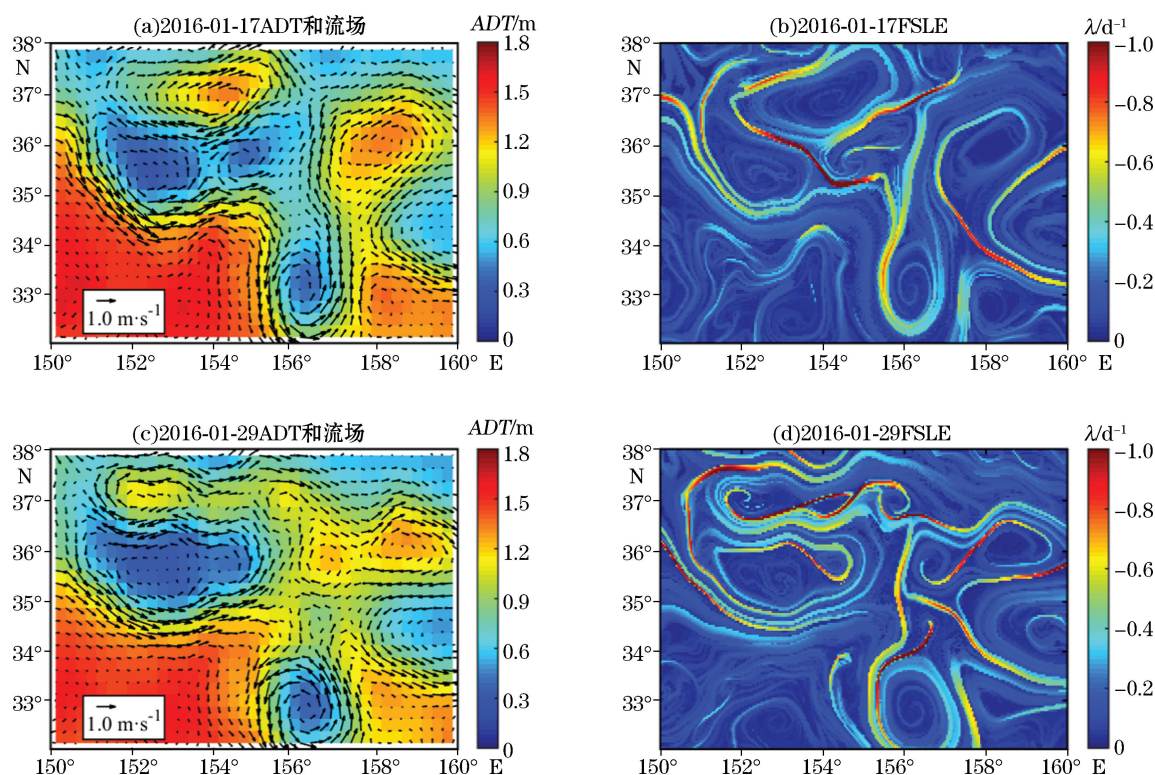


图2 不同日期的 ADT 和流场以及 FSLE 的空间分布

Fig.2 Maps of ADT with geostrophic currents and FSLE in different days

4 结果与分析

与通过海面高度和海面温度长时间序列数据求相关性^[24]的方法不同,本文分析 FSLE 与 SSTG 对流场结构描述的瞬时空间相关性,比较 FSLE 描述的拉格朗日拟序结构与 SSTG 图像结构以及模式输出结果计算的 FLSE 和 SSTG,并分析二者对海洋表层水体水平结构描述的空间相关性,然后比较时间序列的 FSLE 与融合产品的 SSTG,进一步分析该空间相关性是否存在时空变化。考虑到温度梯度的显著性,同时减少非地转分量缺失对 FSLE 产品的影响,本文以温度梯度大和地转流速强的区域为例进行分析,包括黑潮延伸体区域涡旋和南大西洋的亚南极锋。

4.1 FSLE 与观测的 SST 梯度比较

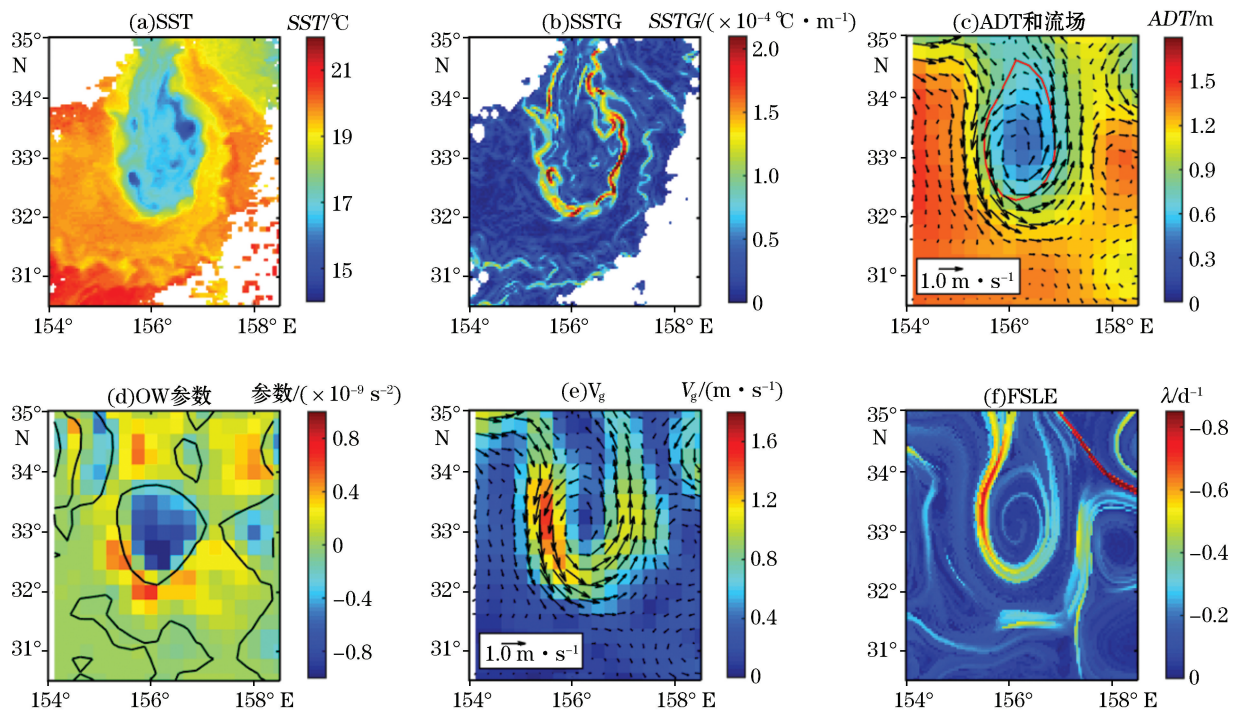
4.1.1 黑潮延伸体区域涡旋

通常,因黑潮流域的海表温度光学遥感观测受到上空云覆盖的强烈影响导致空间连续的有效观测情况较少,然而,我们很幸运地于 2016-01-17 完整观测到了中心位于(156°E,33°N)的气旋式涡旋的海表面温度(图 3a)。海表面温度图像显示了涡旋中由涡旋中心向外温度递增的三重水体结构,每层水体的温度相对均匀。同时,温度梯度(图 3b)清晰显示了三重水体的交界位置。海面高度梯度,即地转流速大小(图 3e)并不能描绘出涡旋水体的边界。与之相比,FSLE 脊线所描述的拉格朗日结构(图 3f)与 SST 梯度图像(图 3b)结构相似,从涡旋中心向外,2 条显著的脊线将水体主要分成 3 个区域。第一条显著的脊线勾勒了涡旋边界,形成了涡旋内部区域,内部为黑潮主流卷挟的冷水;第二条脊线由 31°00′~31°30′N 之间的细丝和 157°30′E 附近的细丝组成,与第一条脊线形成了包围黑潮主流和黑潮外缘水体的中间区域,但根据 SST 图像,这两者

在温度上没有显著差别;第二条脊线以南的外部区域为向北流动的热带水。FSLE 和 SST 梯度图像的东北方向均存在自西北向东南倾斜的细丝,对流体结构的描述较为一致。然而,两者的结构虽然相似,却存在约 0.2° 的空间偏移,这可能是由地转流速产品融合误差所致,也可能由变量本身物理过程所致。

与其他海洋动力过程识别方法进行比较,发现地转流速大小并非呈丝状结构;Winding-Angle 涡旋识别方法^[25-26]仅识别出涡旋边界(图 3c 中红线),未识别出其他结构;OW 涡旋识别方法^[27]的识别情况(图 3d 中等值线)与温度梯度分布不一致。与这些方法相比,由 FSLE 脊线体现的拉格朗日拟序结构与 SST 梯度结构最为相似,这与 D'Ovidio 等在地中海西南部分析得到的 FSLE 优于欧拉诊断方法的结论^[8]一致。

由于 FSLE 与 SSTG 主要为丝状结构,加之结构位置偏差影响,导致两者的相关系数并不高,仅为 0.2。如果进行 0.12° 的二维空间平滑,则相关系数略增加,至 0.26。



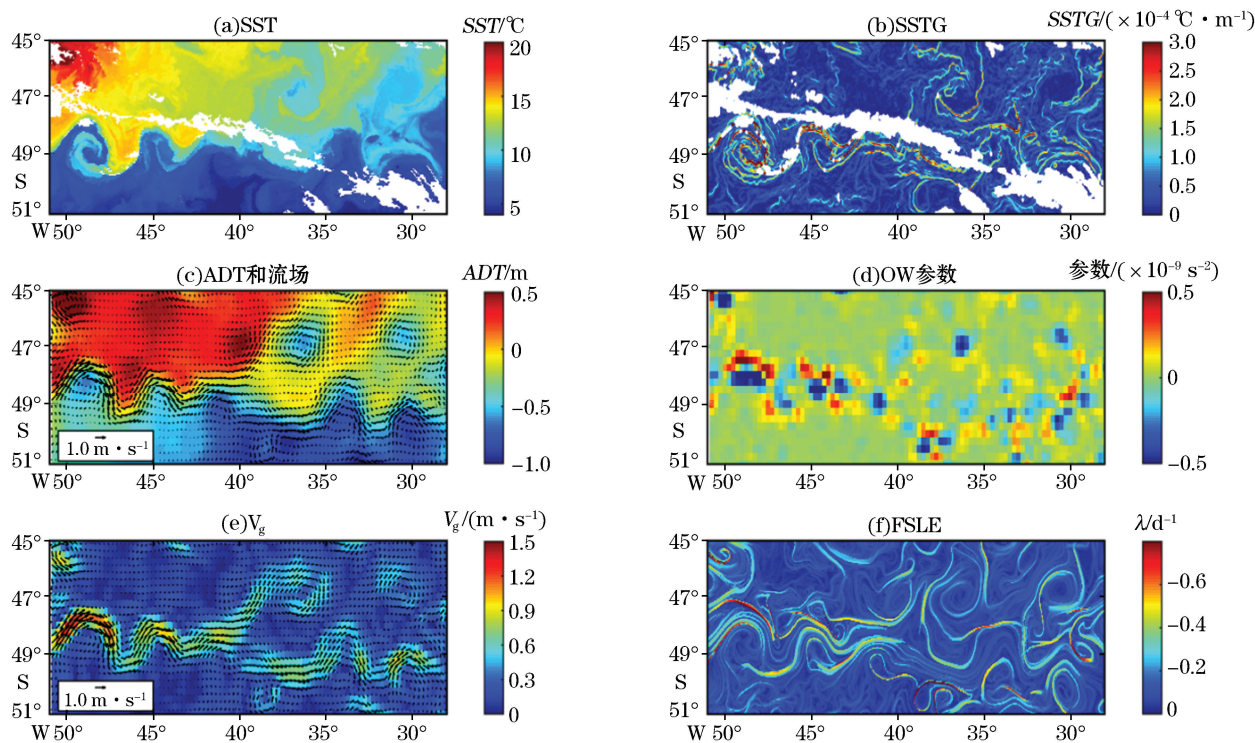
注:图 a 和图 b 中白斑表示受云遮挡区域;图 c 中红色椭圆实线表示 WA 方法识别的涡旋边界;图 d 中黑线表示 0 s^{-2} 等值线

图 3 2016-01-17 黑潮延伸区域 SST 观测、SSTG、ADT、OW 参数、绝对地转流速和 FSLE 的空间分布

Fig.3 Maps of observed SST, SSTG, ADT, OW parameters, geostrophic velocity and FSLE in the area of Kuroshio extension on January 17, 2016

4.1.2 南大西洋亚南极锋

对于较大范围的海洋状态,2016-04-02 南美洲东南海域附近($28^\circ \sim 51^\circ \text{W}$, $45^\circ \sim 51^\circ \text{S}$)的观测 SST 清晰显示了亚南极锋(图 4a),地转流场显示了亚南极锋对应的强烈流动,该支流动是南极绕极流的北侧分支(图 4c)。在其北侧还存在 2 个半径约 100 km 的涡旋,涡旋中心分别位于($37^\circ 30' \text{W}$, $46^\circ 48' \text{S}$)和($30^\circ 45' \text{W}$, $46^\circ 42' \text{S}$)。与 SSTG 对比,在中尺度和更大尺度上,FSLE 脊线很好地再现了亚南极锋及其北侧涡旋结构;然而,次中尺度结构上却存在不一致情况,比如观测温度时发现在($48^\circ 00' \text{W}$, $49^\circ 00' \text{S}$)附近存在明显的多层次卷挟,而这在 FSLE 中并不明显。另外,经统计分析,SSTG 与 FSLE 之间的相关系数为 0.15。考虑到 FSLE 丝状结构与 SSTG 丝状结构之间会存在位置偏移,对 SSTG 和 FSLE 均进行 0.12° 的二维空间平滑,之后,相关系数略有增高,增高至 0.22。对比 FSLE 描述的拉格朗日拟序结构与 SSTG 图像,虽然二者并没有很高的相关系数,但是,它们对海洋表层水体水平结构的描述总体相近。我们的结论与 García-Olivares 等^[9]和 Lehahn 等^[15]的研究结果一致。



注: 图 a 和图 b 中白斑表示受云遮挡区域

图 4 2016-04-02 南大西洋亚南极锋区域的 SST 观测、SSTG、ADT、OW 参数、绝对地转流速和 FSLE 的空间分布

Fig.4 Maps of observed SST, SSTG, ADT, OW parameters, geostrophic velocity and

FSLE in the south Atlantic Ocean on April 2, 2016

4.2 模式结果中 FSLE 与 SSTG 的比较

高分辨率模式的结果能够弥补观测的空间不足,尤其是受到云影响的高分辨率海表温度观测。2010-08-28 在南大西洋亚南极锋附近,模式输出结果计算的 FSLE 与 SST 梯度比较结果如图 5 所示。二者的丝状结构均集中在亚南极锋处,对北侧的涡旋描述也较为一致。在 0.12° 的二维空间平滑后,FSLE 与 SSTG 的相关系数为 0.28。就整幅图像而言,二者对主要结构的描述相似。

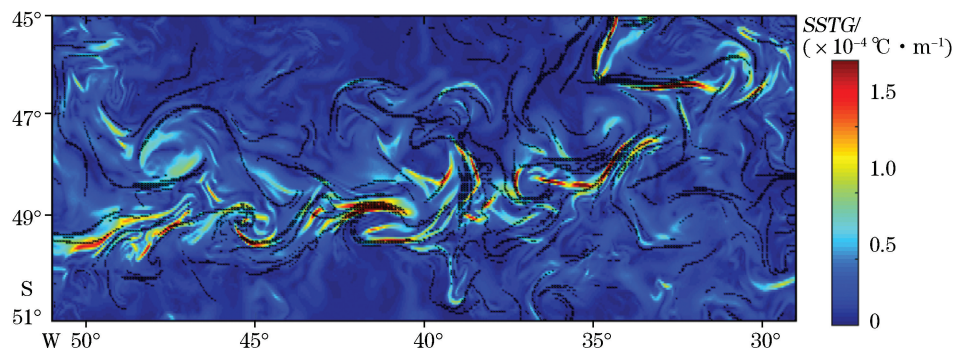


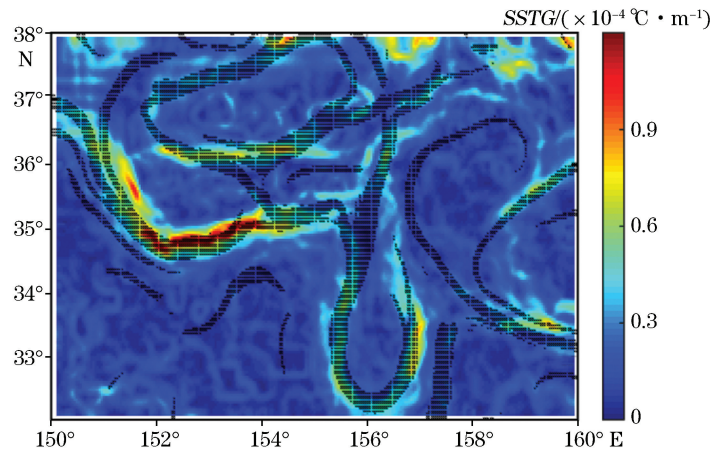
图 5 2010-08-28 模式结果计算的 SSTG(填色, $\times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$) 和 FSLE 脊线(阴影)的空间分布

Fig.5 Spatial distributions of SSTG (shading, $\times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$) and FSLE ridge (shadow) calculated

by NCOM outputs on August 28, 2010

4.3 FSLE 与融合产品的 SSTG 比较

由于有限的有效海面温度观测不足以用于连续的时间序列分析,本文选择融合 SST 产品作为替代产品,用于分析 FSLE 和 SSTG 的长时序相关性,分析二者相关性的时空分布特征。考虑到融合 SST 产品空间分辨率低于 FSLE,且融合过程部分温度梯度信息损失,融合产品对海洋动力结构的描述逊色于观测结果,但对较为显著的温度梯度结构仍可以有效描述(图 6)。此外,虽然 FSLE 与 SSTG 的相关系数值并不高,但是相关系数的时间变化仍可以体现二者之间相关程度的时间变化。FSLE 与 SSTG 均进行 0.12° 的二维空间平滑。



注: SSTG 由 GHRSSST 产品计算得到, FSLE 由 AVISO 提供

图 6 2016-01-17 融合产品计算的 SSTG(填色, $\times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$) 和 AVISO 的 FSLE 脊线(阴影)的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of SSTG (shading, $\times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$) and ridges of FSLE fields (shadow) on January 17, 2016

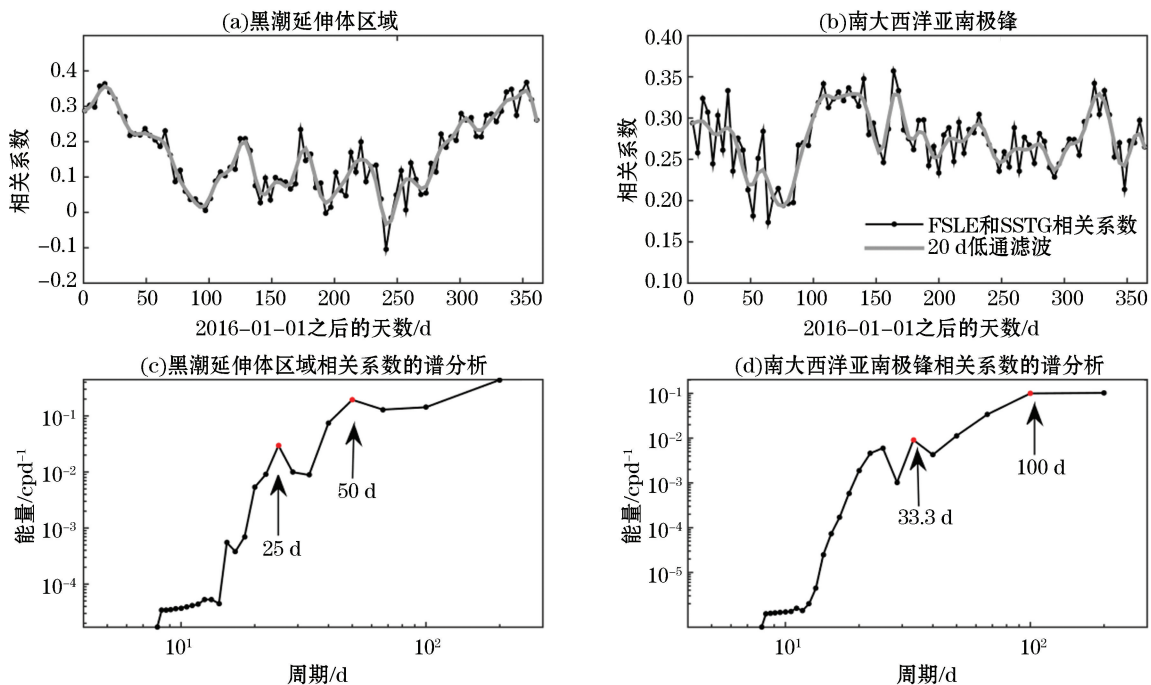


图 7 不同海区的 FSLE 和 SSTG 相关系数的时间变化,以及相关系数的谱分析结果

Fig.7 The temporal variation of correlation coefficients of FSLE and SSTG in different areas, and spectral analysis results of correlation coefficients

不同区域 FSLE 与 SSTG 的相关性表现不同。在黑潮延伸体区域,相关系数具有显著的季节变化,冬季相关系数最高,而夏季相关系数很小(<0.2)。另外,相关系数有弱的季节内变化,周期约 25 d 和 50 d(图 7a 和图 7c)。在南大西洋的亚南极锋区域,FSLE 与 SSTG 的相关系数没有显著季节变化,反而在夏、秋、冬三季有较明显的季节内变化,周期约 33.3 d 和 100 d(图 7b 和图 7d)。不同区域相关系数的时间变化特征可能与区域海洋动力特征有关,比如黑潮延伸体区域相关性明显的季节变化可能与黑潮的流轴季节性摆动有关。此外,SST 只是反映海洋表面的温度结构,受到局地天气过程^[28]、stokes 漂流^[29]以及海洋动力过程垂向分布变化等因素的影响,海洋表面的锋面结构与地转流场结构本身可能存在差异,这是导致 FSLE 与 SSTG 的相关系数不高的原因之一。

5 结 论

首先介绍了基于卫星测高获得的地转流场计算的有限尺度李雅普诺夫指数(FSLE)以及该指数脊线描述的拉格朗日拟序结构,之后,以黑潮延伸体区域的涡旋和南大西洋的亚南极锋为例,通过分析观测、模式结果和融合产品结果,探讨了 FSLE 和 SSTG 之间的相关性。研究发现,FSLE 与 SSTG 均呈丝状结构,对海洋表层水体结构描述具有一致性,尤其在温度梯度大和地转流强的区域更为一致。二者的一致性要远好于其他常用方式,比如全流速、OW 参数涡旋识别方法和 Winding-Angle 涡旋识别方法。不同区域 FSLE 与 SSTG 之间的相关性表现不同,比如黑潮延伸体区域相关系数存在显著的季节变化,而在南大西洋亚南极锋区域,相关系数的季节内变化突出。

综上,本文验证了 FSLE 能够有效描述真实海洋流动情况,并且与 SSTG 所描述的水体结构具有相似性。考虑到 FSLE 是对卫星测高数据的拉格朗日分析结果,这表明 SSH 与 SST 可能存在一定的瞬时相关性,这对于将来进一步研究图像同化是非常重要的前提。

参考文献(References):

- [1] BERON-VERA F J, OLASCOAGA M J, GONI G J. Oceanic mesoscale eddies as revealed by Lagrangian coherent structures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 35(12): 86-109.
- [2] LACASCE J H. Statistics from Lagrangian observations[J]. *Progress in Oceanography*, 2008, 77(1): 1-29.
- [3] HUANG G L, WEI X, ZHAN H G. Lagrangian analysis of drifter trajectories near the Luzon Strait[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(1): 15-22. 黄高龙, 韦惺, 詹海刚. 吕宋海峡浮标轨迹的拉格朗日拟序结构分析[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(1): 15-22.
- [4] LÜ M K. Preliminary study mesoscale eddies in the Tropical Western Pacific[D]. Qingdao: Insitute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2017. 律明坤. 热带西太平洋中尺度涡旋初步研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2017.
- [5] HALLER G. Lagrangian coherent structures from approximate velocity data[J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(6): 1851-1861.
- [6] Editorial board of Marine science in "10000 Selected Problems in Sciences". 10000 Selected Problems in Sciences, Ocean Science[M]. Beijing: Science Press, 2018. "10000 个科学难题"海洋科学编委会. 10000 个科学难题-海洋科学卷[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [7] DOVIDIO F, FERNÁNDEZ V, HERNÁNDEZ-GARCÍA E, et al. Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite-size Lyapunov exponents[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(17): 345-359.
- [8] D'OVIDIO F, ISERN-FONTANET J, LÓPEZ C, et al. Comparison between Eulerian diagnostics and finite-size Lyapunov exponents computed from altimetry in the Algerian basin[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(1): 15-31.
- [9] GARCÍA-OLIVARES A, ISERN-FONTANET J, GARCÍA-LADONA E. Dispersion of passive tracers and finite-scale Lyapunov exponents in the Western Mediterranean Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54(2): 253-268.
- [10] CENCINI M, VULPIANI A. Finite size Lyapunov exponent: review on applications[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2013, 46(25): 254019.
- [11] PRANTS S V, BUDYANSKY M V, ULEYSKY M Y. Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2017, 24(1): 1-17.
- [12] PENNA A D, KOUBBI P, COTTÉC, et al. Lagrangian analysis of multi-satellite data in support of open ocean Marine Protected Area

- design[J]. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2017, 140: 212-221.
- [13] LACORATA G, AURELL E, VULPIANI A. Drifter dispersion in the Adriatic Sea: Lagrangian data and chaotic model[J]. Annales Geophysicae, 2001, 19(1): 121-129.
- [14] HERNÁNDEZ-CARRASCO I, LÓPEZ C, HERNÁNDEZ-GARCÍA E, et al. How reliable are finite-size Lyapunov exponents for the assessment of ocean dynamics? [J]. Ocean Modelling, 2011, 36(3): 208-218.
- [15] LEHAHN Y, DOVIDIO F, LÉVY M, et al. Stirring of the northeast Atlantic spring bloom: a Lagrangian analysis based on multisatellite data[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2007, 112(C8): C08005.
- [16] BETTENCOURT J H, LÓPEZ C, HERNÁNDEZ-GARCÍA E. Oceanic three-dimensional Lagrangian coherent structures: a study of a mesoscale eddy in the Benguela upwelling region[J]. Ocean Modelling, 2012, 51(3): 73-83.
- [17] ROSSI V, LÓPEZ C, SUDRE J, et al. Comparative study of mixing and biological activity of the Benguela and Canary upwelling systems[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(11): L11602.
- [18] GAULTIER L, VERRON J, BRANKART J M, et al. On the inversion of submesoscale tracer fields to estimate the surface ocean circulation[J]. Journal of Marine Systems, 2013, 126(5): 33-42.
- [19] MORO M D, BRANKART J M, BRASSEUR P, et al. Exploring image data assimilation in the prospect of high-resolution satellite oceanic observations[J]. Ocean Dynamics, 2017, 67(7): 875-895.
- [20] CNES, CLS, LOCEAN, CTOH. FSLE-Maps of Finite Size Lyapunov Exponents and orientations of the associated eigenvectors[EB/OL]. [2018-08-20]. <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/fsle-finite-size-lyapunov-exponents.html>.
- [21] JACKSON S, SIEBELS P D. Operational algorithm description document for VIIRS sea surface temperature (SST) EDR.[EB/OL]. [2018-08-20]. https://jointmission.gsfc.nasa.gov/sciencedocs/2017-06/474-00061_OAD-VIIRS-SST-EDR_E.pdf.
- [22] GHRST Project office. Group for high resolution sea surface temperature[EB/OL]. [2018-08-20]. <http://www.ghrsst.org>.
- [23] Asia-Pacific Data-Research Centers. NRL NLOM 1/32°[EB/OL]. [2018-08-20]. <http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/nlom32.php>.
- [24] WANG J Y, FANG G H, WANG Y G. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height and surface temperature in the recent decade[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(2): 160-175. 王佳莹, 方国洪, 王永刚. 南海海面风场、高度场和温度场近十年的变化趋势及年际变化特征[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(2): 160-175.
- [25] CHAIGNEAU A, GIZOLME A, GRADOS C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns[J]. Progress in Oceanography, 2008, 79(2/4): 106-119.
- [26] DOND C M, JIANG X L, XU G J, et al. Automated eddy detection using geometric approach, eddy datasets and their application[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(4): 439-453. 董昌明, 蒋星亮, 徐广珺, 等. 海洋涡旋自动探测几何方法、涡旋数据库及其应用[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 439-453.
- [27] JEONG J, HUSSAIN F. On the identification of a vortex[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 285: 69-94.
- [28] XIE L L, HE C F, LI M M, et al. Response of sea surface temperature to typhoon passages over the upwelling zone east of Hainan Island[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(1): 8-19. 谢玲玲, 何超凤, 李明明, 等. 琼东上升流区海表温度对台风过境的响应[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(1): 8-19.
- [29] XIAO L, SHI J, JIANG G R, et al. The influence of Stokes drift on the North Pacific SST[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(4): 462-472. 肖林, 史剑, 蒋国荣, 等. Stokes 漂流对北太平洋海表温度的影响研究[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 462-472.

Preliminary Analysis of the Correlation Between Finite Size Lyapunov Exponent and Sea Surface Temperature Gradient

CAO Lei^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, YANG Jun-gang¹, ZHOU Chao-jie³, SUN Wei-fu^{1,2}, CUI Wei^{1,4}

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

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

3. *College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;*

4. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)*

Abstract: In order to explore the instantaneous correlation between Sea Surface Temperature (SST) and Sea Surface height (SSH), this paper introduces a Lagrangian analysis index for satellite altimetry, the finite-scale Lyapunov exponent (FSLE), and explores the correlation between this exponent and the sea surface temperature gradient (SSTG) using observations, model results and merged products, with the areas of Kuroshio extension and the south Atlantic subantarctic front as examples. By comparing the FSLE image and SSTG image, it is found that both FSLE and SSTG are typically in the form of filaments, and their description of ocean surface structure is consistent, especially in regions with large SSTG and strong geostrophic velocity. Their consistency is far superior to common methods, such as total velocity, OW parameter vortex detection method and Winding-Angle vortex detection method. The correlation between FSLE and SSTG depends on the region. The correlation coefficient in the Kuroshio extension region has significant seasonal variation, while the intra-seasonal changes are prominent in the south Atlantic subantarctic front region.

Key words: finite size Lyapunov exponent; sea surface temperature gradient; Lagrangian coherent structure; correlation analysis

Received: September 6, 2018