

崔赫, 陈建裕, 曹振轶, 等. 黄海潮波系统下的 GOCI 反演及 OSU 模式海表流场数据适用性研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 1–16, doi:10.12284/hyxb2022108

Cui He, Chen Jianyu, Cao Zhenyi, et al. Study on applicability of GOCI inversion and OSU model sea surface currents field data in the Yellow Sea tidal wave system[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(7): 1–16, doi:10.12284/hyxb2022108

黄海潮波系统下的 GOCI 反演及 OSU 模式 海表流场数据适用性研究

崔赫^{1,2}, 陈建裕^{1,2*}, 曹振轶², 管卫兵², 朱乾坤², 龚芳²

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 黄海呈现独有的地形条件, 且该海域的潮波运动独具特征。本文利用静止海洋水色成像仪 (Geostationary Ocean Color Imager, GOCI) 遥感反演和俄勒冈州立大学 (Oregon State University, OSU) 潮流模式分别获取了黄海海域的海表流场, 基于该海域独特的潮波系统提出并识别潮波干涉区, 进而对 GOCI 反演的流场做潮流提取, 并对两种潮流数据作分区可用性评价, 通过实测的漂流浮标数据验证评估。结果表明: 利用 GOCI 反演和 OSU 潮流模式获取的海表流场具有一定程度的可靠性, GOCI 反演的海表流场的流速平均相对大小误差值为 0.77, OSU 潮流模式获取的海表流场流速平均相对大小误差值为 0.49; 在靠近潮波干涉区的黄海中部海域, GOCI 潮流数据与实测数据在方向上的一致性要优于 OSU 潮流数据, 两者平均角度误差值分别为 48.45° 和 63.10°; 在远离潮波干涉区的黄海近岸海域, OSU 潮流数据与实测数据在速度大小和方向上的一致性要优于 GOCI 潮流数据。

关键词: 静止海洋水色成像仪; OSU 潮流模式; 黄海流场反演; 旋转潮波系统; 最大相关系数算法

中图分类号: P731.21; P722.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)07-0001-16

1 引言

海表流场对于理解海洋的物理和生物地球化学过程至关重要^[1]。近海海域高频次、高空间分辨率的海流观测, 为航运航行、海上救援行动和环境监测 (例如有害藻华、有害物质和沉积物运输) 提供了必不可少的数据支撑^[2]。

近岸海表流场可经由静止水色卫星遥感反演获取。2010 年 6 月 27 日, 韩国发射了世界上第 1 颗搭载了地球同步静止海洋水色成像仪 (Geostationary Ocean Color Imager, GOCI) 的静止海洋水色卫星 (Communication Ocean and Meteorological Satellite,

COMS)^[3], 其连续获取的东北亚地区的卫星光学影像已成功地应用于所观测海域的海表流场反演。Choi 等^[4]使用 GOCI 数据有效估计了韩国西海岸的悬浮沉积物运动; Yang 等^[5]利用 GOCI 数据实现了朝鲜半岛周围高频次海表流场的反演。

海表流场也可通过海洋模式计算得到。俄勒冈州立大学 (Oregon State University, OSU) 开发了中国部分海域潮流模式 TPXO-CS12016 (China Seas & Indonesia 2016)^[6-7], 其覆盖海域包括南海、东海、黄海和渤海以及西北太平洋海域, 且同化了大量卫星遥感数据和验潮站数据, 空间分辨率为 (1/30)°, 主要包含了 4 个主要全日潮 (K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1) 和 4 个主要半日

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-01-11。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1400903); 国家自然科学基金 NSFC—浙江两化融合联合基金重点 (U1609202); 国家自然科学基金 (42076216, 41376184, 40976109); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室资助项目 (SOEDZZ2203)。

作者简介: 崔赫 (1999—), 男, 河南省商丘市人, 研究方向为海表流场的遥感反演。E-mail: 18221617727@163.com

* 通信作者: 陈建裕, 男, 研究员, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: chenjianyu@sio.org.cn

分潮 (M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2)。利用该模式可进行特定区域的潮汐预测或潮流计算, Hu 等^[8]利用 OSU 区域潮流模式计算获取的 M_2 分潮潮流结果在整体上与 GOCI 和现场观测结果之间有较好的一致性;与漂流浮标观测数据相比, OSU 模式模拟的潮流椭圆在半长轴、半短轴、相位与椭圆倾角上的平均绝对误差分别为 0.08 m/s、0.04 m/s、 10° 和 8° ; 赵强等^[9]利用浙江近岸 33 个潮位站的 8 个主要分潮的调和常数 and 潮高对 7 个全球/区域潮汐模式的准确度进行了评估,认为该模式在浙江近海的运用具有较高的准确度。

来自北太平洋的大洋潮波系统,经过台湾岛-琉球群岛-日本九州岛一线传入东海大陆架,由于水深变浅,传播速度变慢,在地转偏向力、海岸线及海底地形的影响下,入射波与反射波相互干扰叠加下,形成了整个渤海、黄海、东海较为复杂的旋转潮波系统^[10-12]。近年来,国内外对于东海潮汐、潮流的数值计算及海表流场的反演有了较深层次的研究,沈育疆^[13]于 1980 年首先提出南黄海中部存在半日分潮的南北向往复流带,并于 20 世纪 90 年代分析了黄海半日潮波系统的形成机制,提出南黄海中部存在一大片半日潮弱流区^[14];金宇豪^[15]根据 GOCI 数据和现场同步观测的潮汐数据及实测的浮标数据,利用最大相关系数 (Maximum Correlation Coefficient, MCC) 算法反演江苏沿海辐射沙脊群的海表流场,验证了遥感反演算法的可行性并且可以达到对流场变化的实时监测;Chen 等^[16]采用 MCC 算法利用 GOCI 数据反演了东海海域的海表流场,进而提出了一种基于角度约束的流场矢量数据处理方法,处理后的流场数据平均角度误差 (Average Angular Error, AAE) 值降低了 28%~38%;Hu 等^[8]利用 GOCI 反演的海表流场提取了黄、东海海域 M_2 分潮的潮流信息,并利用大量的实测数据分别对 OSU 潮流模式与 GOCI 反演的 M_2 潮流进行了对比分析,得出三者之间具有较好的一致性。已发表的相关研究中,缺乏考虑复杂的潮波系统对流场数据可用性及其精度影响的深入探讨。

因此,本文针对黄海复杂的旋转潮波系统,将 GOCI 反演流场的潮流提取结果与 OSU 模式流场作分区对比,并基于多轨实测的漂流浮标数据验证评估,分析两种流场数据在不同旋转潮波区位的差异。

2 研究区域

黄海是太平洋西部的边缘海,位于中国与朝鲜半岛之间,面积约为 $3.8 \times 10^5 \text{ km}^2$,平均水深为 44 m,最大深度为 140 m^[17]。黄海海流微弱,流速通常只有最大

潮流速度的 1/10 左右,潮流是黄海海域最重要的水动力过程之一^[18-20]。黄海海域的潮流主要以半日潮流为主,除烟台近海和渤海海峡等处为不规则半日潮流外,其他区域均为规则半日潮流。黄海东部海域的流速大于西部,强潮流区位于朝鲜半岛西端的一些水道,观测到最大流速为 4.8 m/s;其次为西北部的老铁山水道,最大流速达 2.5 m/s 以上^[21-22]。

3 材料与方法

3.1 数据集

3.1.1 浮标数据

漂流浮标在海面或一定深度随海流漂动,是海洋观测中较为方便、有效的工具之一^[23-24]。漂流浮标在工作时受到风场和海流的影响,其测量海流的原理是利用拉格朗日法描述海水的运动,测量的准确性主要与漂流浮标在海面上下的面积之比有关,本文所使用的漂流浮标海面上部分面积为 0.031 m^2 ,海面下部分面积为 $(0.031+0.7) \text{ m}^2$,上下面积比低至 0.04,其海面以下的帆中心点在水下 3 m 处,因此该浮标受到海流的影响较大,可获得较高精度的海流数据,所用浮标的工作时间范围从 2012 年 6 月 3 日至 8 月 20 日,浮标移动的范围为 $33^\circ \sim 39^\circ \text{ N}$, $121^\circ \sim 125^\circ \text{ E}$ 。图 1 中所示为漂流浮标的运动轨迹,轨迹主要集中在南黄海的西部及朝鲜半岛的西海岸,其位置数据测量间隔约为 0.5 h,在约 77 d 的电池生命周期内获得了 6 505 个站点的信息,图 2 为漂流浮标工作图。

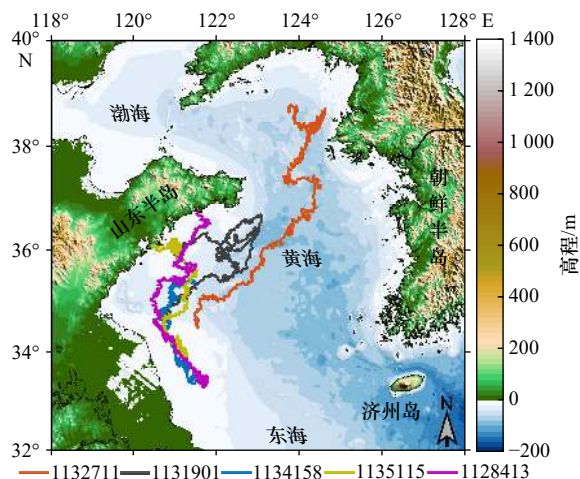


图 1 研究区域及其水深地形

Fig. 1 The study area and its bathymetry topography from light blue to dark blue, the water depth ranges from 10~160 m; multi-color line group is the measured tracks of drifting buoys (numbers are codes)



图2 漂流浮标工作图

Fig. 2 Working diagram of drifting buoy

3.1.2 GOCI 数据

GOCI 数据空间分辨率为 500 m, 共 8 个波段, 光谱范围为 402~885 nm, 可从韩国海洋卫星中心下载 (<http://kosc.kiost.ac.kr/>) GOCI level-1B (L1B) 数据。GOCI 数据的成像是格林尼治标准时间的 00:00~07:00 (即北京时间上午 8:30~15:30), 时间间隔为 1 h, 每天可获得 8 组数据。研究表明, 多个 GOCI 遥感产品可用于流场反演, 如总悬浮物 (Total Suspended Matter, TSM) 浓度、叶绿素 *a* (Chlorophyll *a*, Chl *a*) 浓度和归一化离水辐亮度 (Normalized Water-leaving Radiance, LWN), 其中以 TSM 浓度为示踪剂反演的海流能够捕获潮汐相位的变化, 且在中低浊度的水域均有较好的反演效果^[25-26]。本文使用 TSM 浓度作为 GOCI 反演的示踪剂。

3.1.3 OSU 潮流模式数据

运用潮汐模型驱动程序 (Tidal Model Driver, TMD) 运行 OSU 潮流模式, 可获取特定经纬度、特定时间的潮流 *u*、*v* 分量, 进而获取对应的潮流数据^[27]。通过与大量近岸观测潮位和潮流数据 (<http://volkov.oce.orst.edu/tides/YS.html>) 进行比较, 发现该潮流模式模拟的 M_2 半日潮与 K_1 全日潮的均方根误差分别约为 4.5 cm 和 1.3 cm。利用该潮流模式, 本研究提取了与 GOCI 同观测时间的潮流数据 (8 个主要分潮叠加的复合分潮数据), 并将其匹配到与 GOCI 反演结果相同的 $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ 的网格上以便进行比较。

3.2 方法

3.2.1 GOCI 数据处理

在 GOCI 数据处理系统软件 GDPS (GOCI Data

Processing System) 的支持下, 对 GOCI-L1B 原始数据进行大气校正、掩膜等方面的数据预处理。然后, 使用 GDPS 提供的内置 TSM 浓度算法, 将数据处理成 L2 级别的 TSM 产品^[28]。

最大相关系数算法是从卫星图像中反演海面流场的典型算法^[25, 29-30]。基于图像匹配方法的 MCC 算法如图 3 所示, 执行该操作可以从同日两个连续 GOCI 影像中获取该时段的海表流场矢量。前一幅用于估算当前位置的影像称为“模板窗口”, 后一幅影像称为“搜索窗口”。MCC 算法在模板匹配技术的基础上使用相关关系来跟踪示踪物结构的变化。利用式 (1) 计算“模板窗口”与“匹配窗口”之间的相关系数 (ρ)。

$$\rho(S_{\text{window}}^i, T_{\text{window}}^{i+1}) = \frac{\text{cov}(S_{\text{window}}^i - T_{\text{window}}^{i+1})}{\sqrt{\text{var}(S_{\text{window}}^i) \times \text{var}(T_{\text{window}}^{i+1})}}, \quad (1)$$

式中, i 为设置的一个时间标号, 从 0~7 代表着北京时间 8:30~15:30 (时间间隔为 1 h); T_{window}^{i+1} 和 S_{window}^i 分别为“模板窗口”和“搜索窗口”中的二维矩阵数据。使用式 (2) 和式 (3), 可以计算当前流场矢量的大小 (Velocity) 和方向 (Direction)。

$$\text{Velocity} = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{h}, \quad (2)$$

$$\text{Direction} = \arctan\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right), \quad (3)$$

式中, x_i 和 y_i 为“模板窗口”的中心坐标; x_{i+1} 和 y_{i+1} 为“匹配窗口”的中心坐标; h 为 S_{window}^i 和 T_{window}^{i+1} 之间的观察时间, 间隔为 1 h。

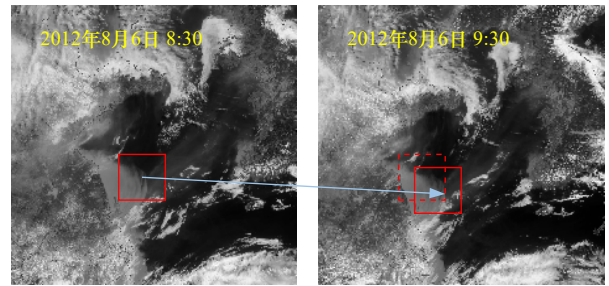


图3 最大相关系数算法估算海表流场的示意图

Fig. 3 A schematic diagram of the maximum correlation coefficient algorithm for estimating the sea surface currents field

以首次可反演的流场为例, 左侧与右侧的图像分别代表在同一海区、同一天 8:30 和 9:30 观测的卫星遥感影像; 左图实框为模板窗口; 右图实框为匹配窗口; 虚框为模板窗口在搜索区域内相同位置的映射

Take the first invertible currents field as an example, the images on the left and right represent satellite remote sensing images observed in the same sea area and on the same day at 8:30 and 9:30, respectively; the solid line box in the left figure is the template window; the solid line box in the right figure is the matching window; the dotted line box is the mapping of the template window at the same position in the search area

为获得更准确的流场矢量,本研究计算所选取的“模板窗口”大小为 20×20 ,“搜索窗口”大小为 36×36 ,拟合阈值设置为 $0.9^{[4,25]}$ 。通过计算模板窗口与搜索窗口之间的最大相关系数来确定合适的匹配窗口,如果计算值大于阈值,则将匹配窗口视为模板窗口移动 1 h 后到达的正确位置。然后,重复上述操作步骤,获得相对完整的海表流场。

3.2.2 浮标数据处理

漂流浮标数据中包含的信息为每个站点的具体时间、纬度和经度。首先,计算漂流浮标时间序列数据中两个连续站点之间的距离;然后结合两站点之间的时差计算出两站点之间的速度;最后,两个连续站点之间的角度(C)通过勾股定理计算。具体公式为

$$C = \arccos[\cos(90 - B_{\text{lat}}) \times \cos(90 - A_{\text{lat}}) + \sin(90 - B_{\text{lat}}) \times \sin(90 - A_{\text{lat}}) \times \cos(B_{\text{lon}} - A_{\text{lon}})], \quad (4)$$

$$L = R \times C \times \pi / 180^\circ, \quad (5)$$

式中, R 是地球半径,计算时将平均半径 6371 km 作为 R 的值; A_{lat} 和 A_{lon} 表示 A 点的纬度和经度; B_{lat} 和 B_{lon} 表示 B 点的纬度和经度; L 为 AB 两点之间的距离。

3.3 评估方法

为了定量地评估卫星反演和模式计算的流场与实测流场在流速大小和方向上的差异性,本文采用了 Chen^[31]提到的角度误差与相对大小误差的定义方法对反演结果进行验证。此处,海表流场的方向和速度默认为二维 $s = (u, v)$,不考虑垂直方向的流动。因此,实测速度 v_{buoy} 与卫星反演(模式计算)流速 v_{inv} 之间的角度误差和相对幅度误差可以写成:

$$(\overline{\Delta\theta}, \overline{\Delta V/V}) = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \left[\arccos \left(\frac{v_{\text{inv}} \cdot v_{\text{buoy}}}{|v_{\text{inv}}| |v_{\text{buoy}}|} \right), \frac{|v_{\text{inv}} - v_{\text{buoy}}|}{|v_{\text{buoy}}|} \right], \quad (6)$$

式中,相对幅度误差是无量纲量。利用 AAE(AAE = $\overline{\Delta\theta}$)和平均相对大小误差(Average Relative Magnitude Error, AME)(AME = $\overline{\Delta V/V}$)来定量评估卫星反演和模式计算的结果。如果 $v_{\text{buoy}} = 0$, $\overline{\Delta V/V}$ 则为 1;如果 $v_{\text{inv}} = v_{\text{buoy}} = 0$, $\overline{\Delta V/V}$ 则为 0。

4 结果与分析

4.1 研究区域内海表流场对比分析

利用 MCC 反演算法或 GOCI 反演算法和 OSU 潮流模式,1 d 内各可获取 7 幅海表流场图。图 4 和图 5 是 2012 年 8 月 5 日 GOCI 反演和 OSU 模式获取的黄海海表流场,从图中可以看出 OSU 模式获取的流场矢量比较规则,GOCI 反演的流场存在杂散矢量,流场中的空白区域是受到了云量或示踪物浓度变化的影响。对比两种方法获取的流场图发现,以 36°N 纬线

为界线,在其附近海域,OSU 模式获取的流场矢量流速变小,界线南北两侧流场矢量的流向有较大的差异,呈现出往复流的特征。在选取的 107 个漂流浮标站点内,GOCI 反演的海表流场的平均流速为 0.53 m/s ,漂流浮标测量的海表流场平均流速为 0.45 m/s ,OSU 模式的海表流场平均流速为 0.42 m/s ;GOCI 流场数据 AME 值为 0.77 ,AAE 值为 75.56° ,OSU 流场数据的 AME 值为 0.49 ,AAE 值为 50.94° 。

4.2 OSU 潮流模式数据评价

为进一步验证分析 OSU 潮流模式的计算结果及黄海中部的流场矢量变化情况,选用实测的漂流浮标数据,将计算得到的潮流值和据实测资料求得的潮流值相比较,同时,在中部区域和近岸区域选取相同数量的流场矢量,比较两区域的矢量值差异,结果见表 1 和表 2。由表 1 可以得出,实测数据求得的平均流速为 0.37 m/s ,OSU 模式计算的平均流速为 0.42 m/s ,两者平均角度偏差值为 39.71° ;由表 2 可以得出,中部区域的实测数据流速和 OSU 模式计算的流速均远小于近岸区域,其角度偏差值远大于近岸区域,再对比表 1 两者的流速平均值,其结果证实了黄海中部弱流区的存在。

图 6 为 OSU 潮流模式模拟的 M_2 潮流椭圆变化分布情况。在黄海中部海域、黄海北部大部分海域,潮流椭圆的旋转方向为逆时针,在莱州湾、山东半岛的成山头附近及南黄海呈顺时针方向转动,其分布情况

表 1 OSU 模式计算结果与实测值的比较

Table 1 Comparison of OSU mode calculation results and actual measured values

浮标编号	站点数目	实测平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	OSU平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均角度偏差/ ($^\circ$)
1132711	1 759	0.43	0.41	44.16
1134158	663	0.45	0.52	22.43
1128413	1 366	0.39	0.46	42.85
1135115	930	0.31	0.39	39.19
1131901	1 787	0.28	0.34	49.90
平均	1 301	0.37	0.42	39.71

表 2 中部区域与近岸区域矢量值的比较

Table 2 Comparison of vector values between the central region and the nearshore region

所在区域	矢量数目	实测平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	OSU平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均角度偏差/ ($^\circ$)
中部区域	300	0.21	0.31	59.29
近岸区域	300	0.69	0.65	25.41

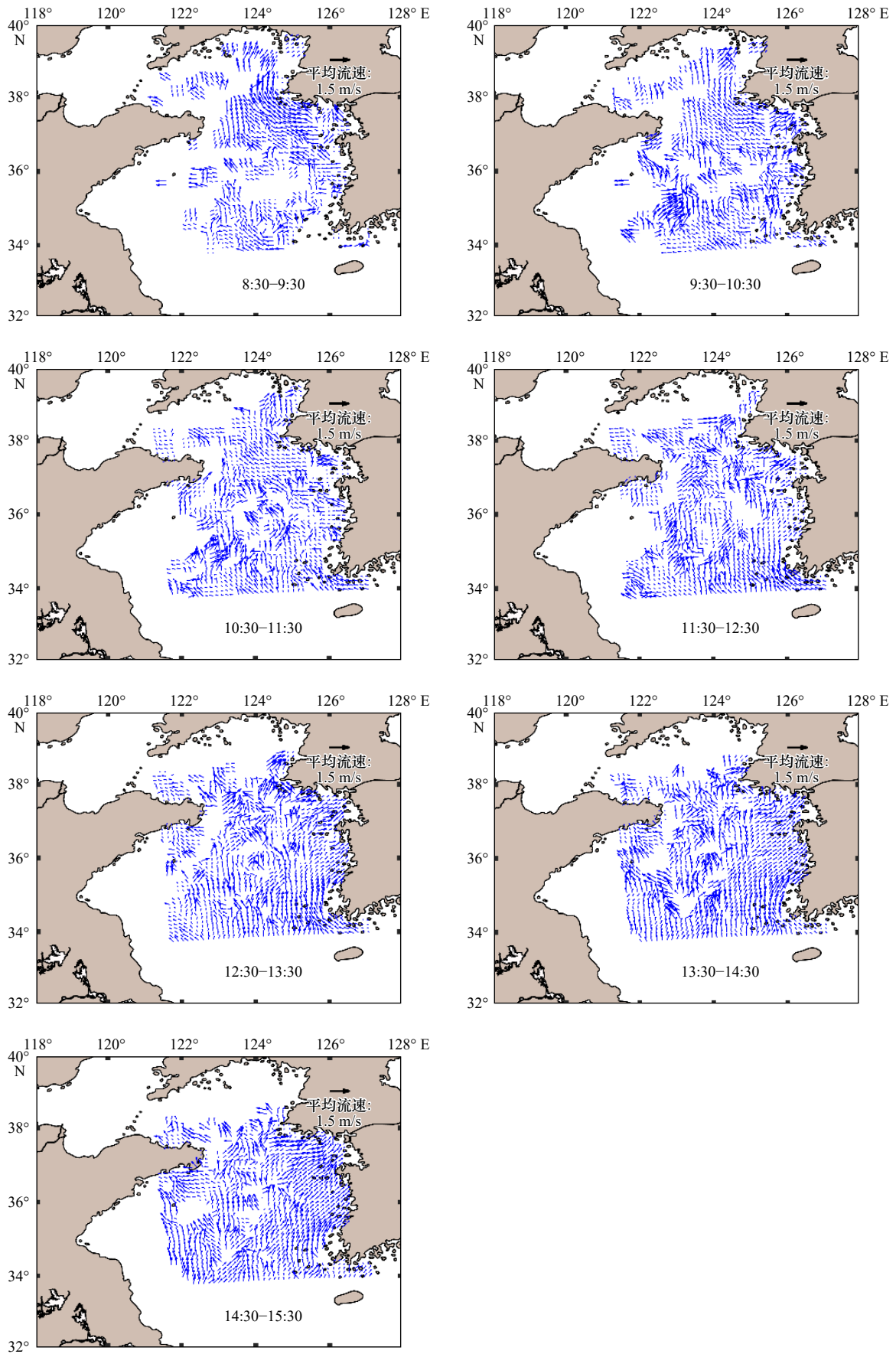


图4 2012年8月5日7个时段GOCI反演的海表流场分布
Fig. 4 GOCI-derived sea surface currents field at seven intervals on August 5, 2012

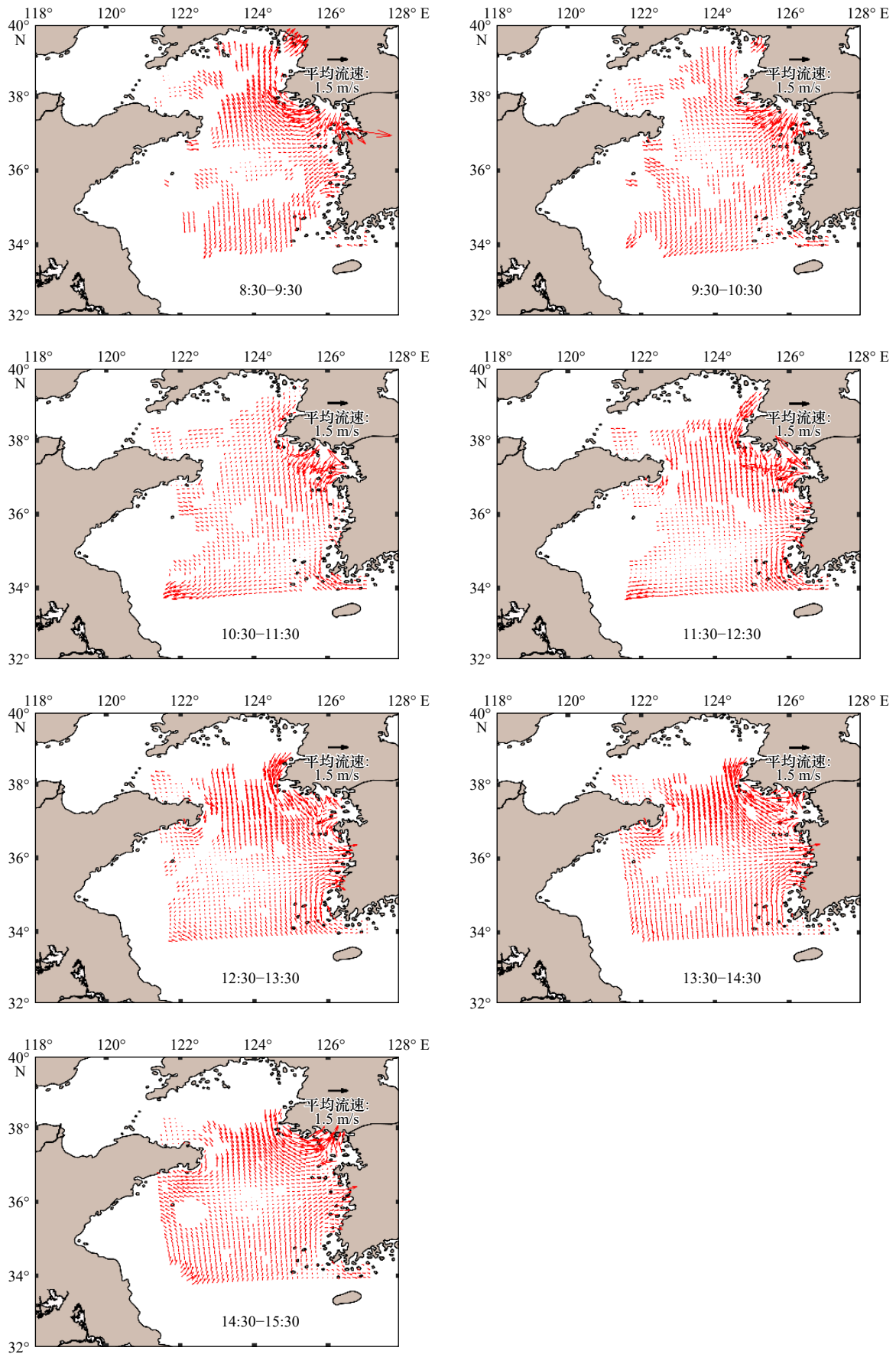
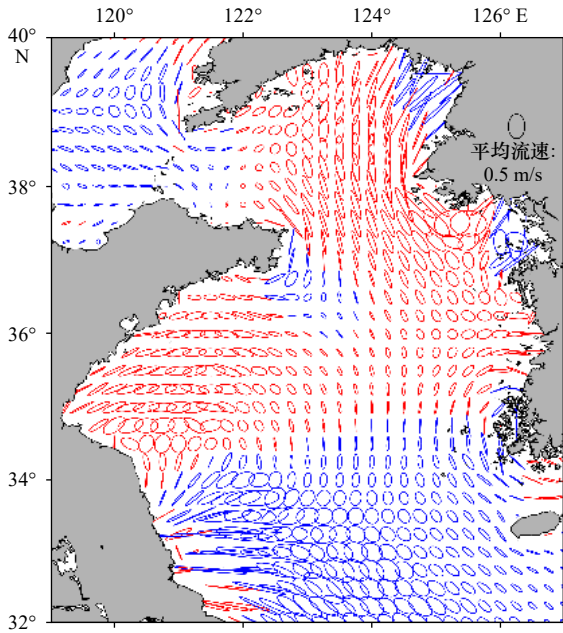


图 5 2012 年 8 月 5 日 7 个时段的 OSU 模式计算的海表流场分布
 Fig. 5 OSU-derived sea surface currents field at seven intervals on August 5, 2012

图6 OSU 模式模拟的黄海 M_2 潮流椭圆分布Fig. 6 Ellipse distribution of the Yellow Sea M_2 tidal current simulated by OSU model

蓝色(红色)表示顺(逆)时针旋转

Blue (red) means clockwise (counter-clockwise) rotation

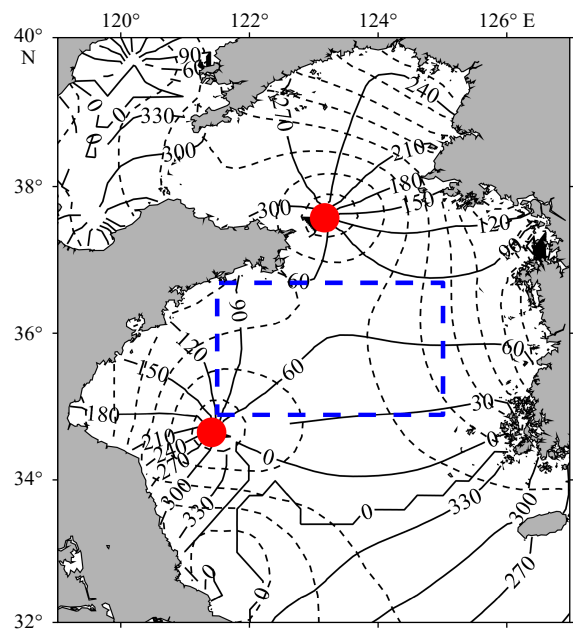
与丁文兰^[32]和Hu等^[8]所得结论一致。在黄海中部海域,潮流的流速明显变小,部分潮流矢量的旋转方向也发生了变化,与图5中流场矢量的变化情况相似。

东海的潮波系统以半日潮波为主,其中 M_2 分潮占优^[12,33],在黄海海区,复合分潮无潮点的位置分布与 M_2 分潮较为相似。图7是OSU模式模拟的 M_2 分潮的同潮图,红色标记点为黄海海区的两个无潮点,周围是以无潮点为中心的逆时针向的半日旋转潮波系统,结合图5的OSU流场矢量分布情况和图6的 M_2 潮流椭圆分布情况,研究表明,在黄海海区以两个无潮点为中心的逆时针旋转潮波系统相互作用,在中部弱流区存在1个潮波干涉区(图7中蓝色框线部分),对该位置海域的潮流矢量产生影响。

4.3 卫星反演流场的潮流提取

卫星反演的海流主要包含了潮流(周期性)和余流(非周期性),将OSU模式结果与GOCI反演的流场直接比较可能会产生较大的误差。因此,本文提取了GOCI反演流场中的潮流部分与OSU模式结果进行比较,并对漂流浮标获取的海流做潮流提取,消除了余流带来的误差。

由4.2节可知,OSU潮流模式能对潮流进行比较准确地估算。对于GOCI反演流场的潮流提取,利用卫星反演的海表流场,扣除OSU模式结果中包含所有潮流分量的潮流数据得到余流,再将每天7个时次的

图7 OSU 模式模拟的黄海 M_2 分潮同潮Fig. 7 The Yellow Sea M_2 with the same tide simulated by OSU model

实线为迟角,单位:(°);虚线为振幅,单位:cm;红点为无潮点位置分布

The solid lines are the delay angle, unit is (°); the dashed lines are the amplitude, unit is cm; the red dots are the distribution of no-tide points

小时级余流场进行平均,获取日平均余流场。为了去除一些异常值,本文采用最优插值方法对平均余流场进行平滑去噪,最终将GOCI反演流场数据减去相应的余流数据即得所需的潮流数据。Hu等^[8]也利用此方法对长江口毗邻海域和黄、东海海域的GOCI反演流场做了相应的余流计算,其结果与空间加权最小二乘法获取的余流数据具有较好的一致性,能够很好地反映研究海域季节性流场特征。

对于漂流浮标的潮流提取,利用浮标计算的海流,扣除OSU模式结果中包含所有潮流分量的潮流数据得到余流,再将漂流浮标所在1个潮周期内的小时级余流进行平均,获取平均余流,最终将浮标计算的海流数据减去相应的余流数据即得所需的潮流数据。图8显示的是漂流浮标的海流(蓝色点)和提取的潮流(红色点),两者的 u 、 v 分量具有相同的变化趋势,在同一时刻的差值即为余流的 u 、 v 分量。

4.4 潮流数据分区对比

由于旋转潮波系统的存在,使得黄海海区的潮流场特征变得复杂,对流场数据进行整体评估可能会产生较大的误差。本文针对OSU潮流模式的评价结果对GOCI反演后提取的和OSU模式获取的潮流数据进行分区对比,即靠近潮波干涉区的黄海中部海域(图9b区域)和远离潮波干涉区的黄海近岸海域(图9a

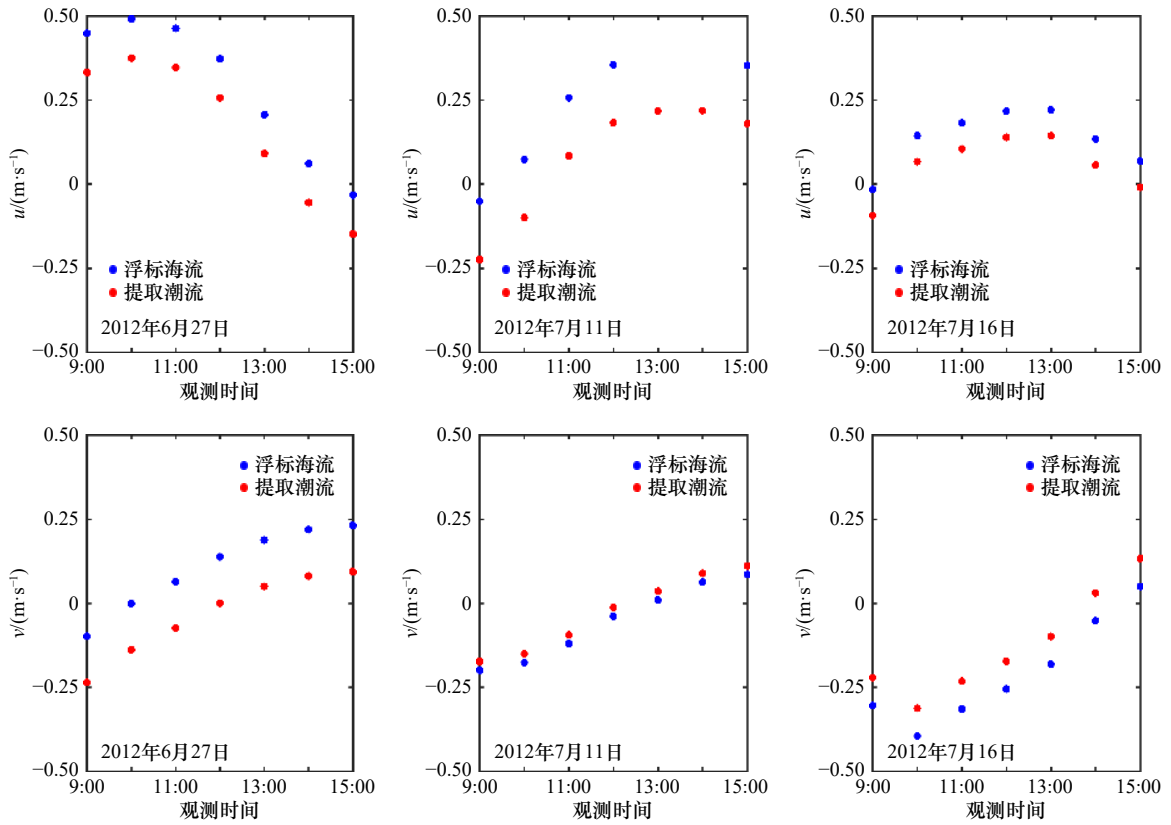


图 8 漂流浮标海流与提取潮流的比较

Fig. 8 Comparison between the following currents of drifting buoys and the extracted tidal currents

u 分量正负分别代表东向和西向; v 分量正负分别代表南向和北向

The positive and negative of u component represent east and west respectively; the positive and negative of v component represent south and north respectively

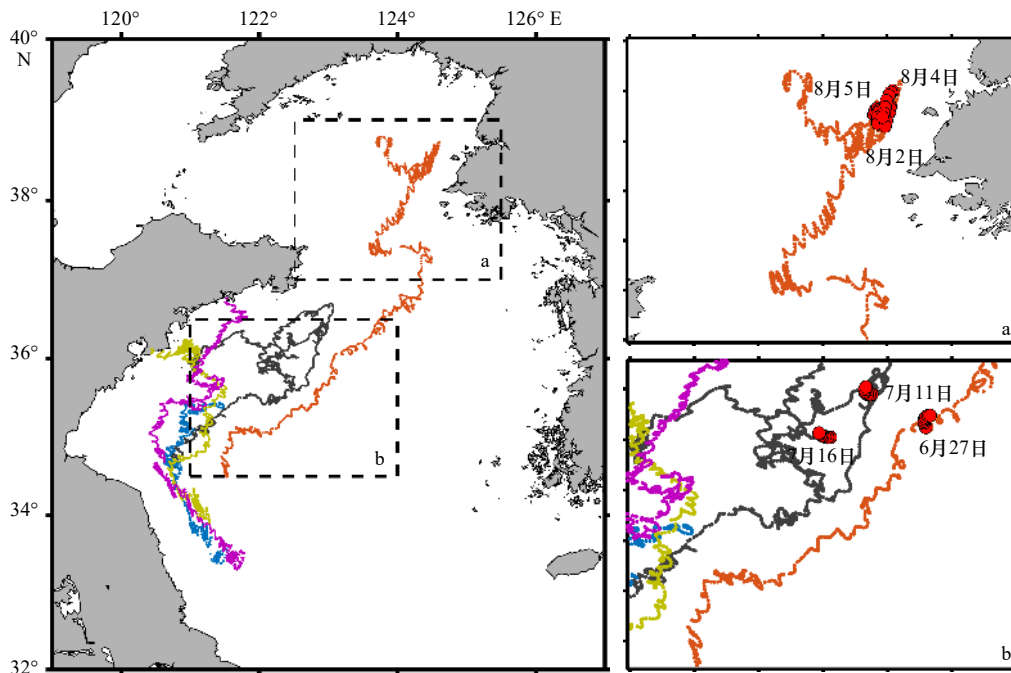


图 9 2012 年潮流数据分区对比

Fig. 9 Zonal comparison of tidal current data in 2012

红点表示选取案例的浮标点位

The red dots represent the buoy points of the selected cases

区域)对比。图 9b 对应的案例日期为 2012 年 6 月 27 日、2012 年 7 月 11 日和 2012 年 7 月 16 日, 图 9a 对应的案例日期为 2012 年 8 月 2 日、2012 年 8 月 4 日和 2012 年 8 月 5 日, 所选案例在 GOCI 反演流场 1 d 的 7 个时段内均可获取流场数据。其中, GOCI 和 OSU 潮流数据的选取原则都是以对应时段的漂流浮标数据为中心, 选取其 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 范围内的潮流数据, 图 10 和图 11 分别为黄海中部海域和黄海近岸海域的潮流数据对比图。

图 12 是黄海中部海域潮流数据平均流速和流向图, 从图中可以看出, 流速方面, 在 1 d 的 7 个时段内, 3 种潮流数据(GOCI 潮流数据、OSU 潮流数据和漂流浮标实测数据)的流速变化曲线较为接近, OSU 潮流数据和实测数据在流速上更接近一些, GOCI 流速值偏大; 流向方面, GOCI 潮流数据的旋转方向及各个时段的流向更接近实测数据。图 13 是黄海近岸海域潮流数据平均流速和流向图, 从图中可以看出, 流速方面, OSU 潮流数据流速与实测的流速曲线较为接近, 且都稍大于 GOCI 流速值; 流向方面, OSU 潮流数据的旋转方向及各个时段的流向更接近实测数据。

表 3 是黄海中部海域与近岸海域 GOCI 与 OSU

表 3 黄海中部与近岸海域 GOCI 与 OSU 潮流数据的 AME 值和 AAE 值

Table 3 The AME value and AAE value of GOCI and OSU tidal current data in the central and coastal waters of the Yellow Sea

	日期	GOCI		OSU	
		AME值	AAE值/(°)	AME值	AAE值/(°)
黄海中部海域	6月27日	0.85	49.65	0.55	38.07
	7月11日	0.91	57.20	0.34	95.76
	7月16日	1.06	38.50	0.48	55.48
	平均	0.94	48.45	0.46	63.10
黄海近岸海域	8月2日	1.87	33.38	0.42	31.62
	8月4日	0.61	63.12	0.31	23.02
	8月5日	0.72	76.89	0.16	9.40
	平均	1.07	57.79	0.30	21.34

潮流数据的 AME 值和 AAE 值。从表中可以得知, 对于 OSU 潮流数据的计算结果, 整体上与实测数据具有较好的一致性, 在速度的大小和方向上, 近岸海域的结果都优于中部海域, 两者 AME 值分别为 0.30 和

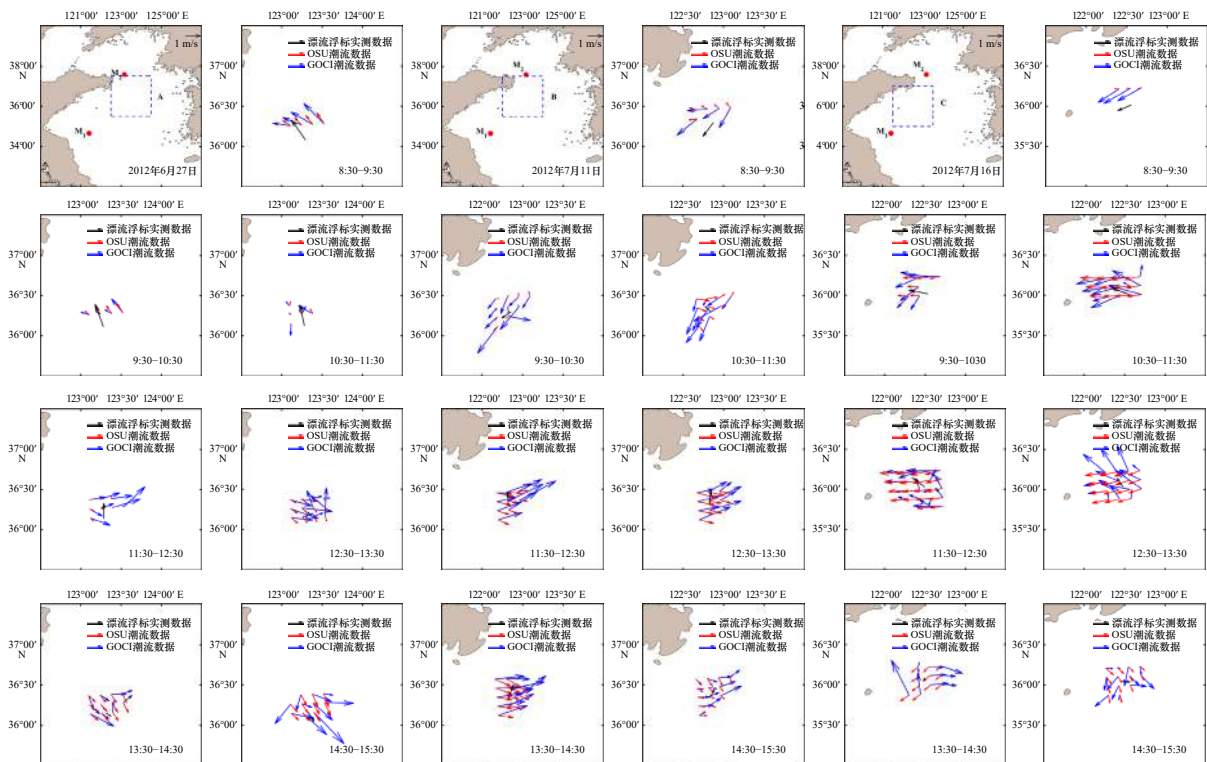


图 10 黄海中部海域潮流数据对比

Fig. 10 Comparison of tidal currents data in the central Yellow Sea

红点 M_1 和 M_2 分别为两个无潮点的位置; 蓝色虚框为选取的数据范围

The red points M_1 and M_2 are the positions of two moisture-free points; the blue virtual box is the selected data range

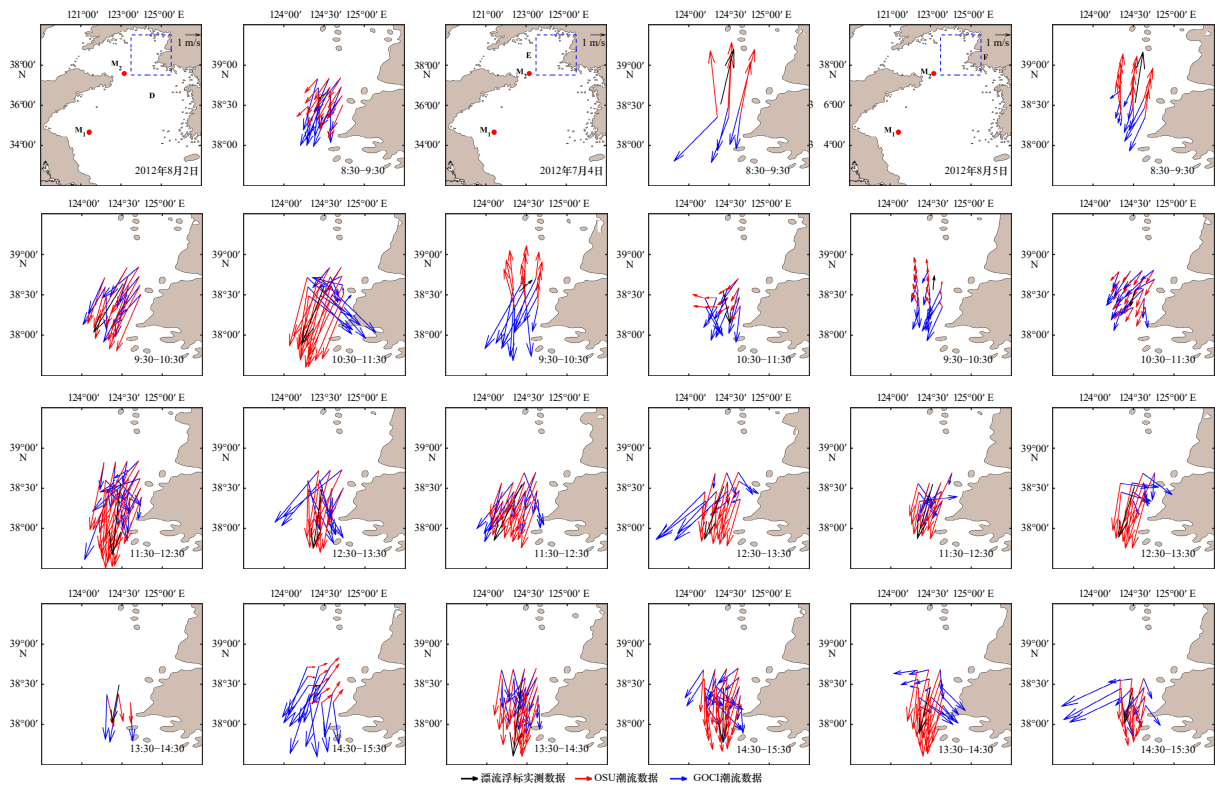


图 11 黄海近岸海域潮流数据对比

Fig. 11 Comparison of tidal currents data in the coastal Yellow Sea

红点 M_1 和 M_2 分别为两个无潮点的位置; 蓝色虚框为选取的数据范围

The red points M_1 and M_2 are the positions of two moisture-free points; the blue virtual box is the selected data range

0.46, AAE 值分别为 21.34° 和 63.10° 。其原因之一可能是受到了黄海中部海域潮波干涉区的影响, 由图 5 可知, OSU 潮流矢量在以 36°N 为界线的黄海中部海域流速变小, 流向在界线南北两侧产生较大差异, 且该位置海域存在半日潮弱流区和南北往复带; 另外, 还可能受到模式本身同化数据站点数量的影响, 边缘海域相比于中部海域设有更多的验潮站等数据站点, 输出结果的准确性也相对较高。

对于 GOCI 反演后提取的潮流结果, 在方向上与实测数据具有较好的一致性, 其 AME 值和 AAE 值在中部海域略小于边缘海域, 其原因可能是受到了悬浮物浓度的影响。Hu 等^[25] 提出, MCC 算法在高浑浊水体的适用性以及反演流场的准确性整体上没有在中、低浑浊海域表现那么好, 主要原因可能是高浑浊水域悬浮物的快速沉降与再悬浮导致了 MCC 图像的错误匹配。边缘海域的水体浊度相较于中部水域更高, 导致了 MCC 图像的错误匹配, 产生了反演误差。相较于 OSU 模式, GOCI 的 AME 值偏大, 原因可能是 GOCI 反演的流速值偏大, 导致提取的潮流值偏大。

5 讨论

针对黄海复杂的潮波系统, 利用实测数据对

GOCI 的反演结果和 OSU 模式的计算结果进行了分区评估, 得出不同潮流数据之间流速和流向存在差异的结果。GOCI 反演的流场包含了潮流和余流信息, 潮流有较强的周期性, 余流有明显的季节性特征。图 14 是 2012 年 8 月 5 日 GOCI 流场 1 d 的 7 个时段的日平均余流图, 平均流速约为 0.5 m/s 。从图中可以看出, 该天的平均余流方向总体为北向(流向 A), 符合漂流浮标的运动轨迹方向。在朝鲜半岛的西海岸存在较强的沿岸流(流向 D 和流向 E), 山东半岛南部存在一支西向流(流向 B), 可能会导致南向的沿岸流产生(流向 C), 该天的日平均余流分布情况与苏纪兰^[34] 和 Yuan 等^[35] 得出的结论一致, 符合黄海夏季的流场分布特征。

GOCI 反演流场的效果会受到云量、示踪物等条件的影响。图 15 是 GOCI 反演效果较好的黄海中部海域 3 d 各个时段的 AAE 值和 AME 的值, 从统计结果中发现, 中间 3 个时段的数据整体评估值小于前后两个时段, 存在这种情况的原因可能是中午的太阳天顶角小、云量较少, 可获得的水色信息较多^[36], 数据质量更好, 因而反演的效果更好。

另外, 对于海流有效探测的条件分析^[37], 本文尝试改变示踪物的种类, 对比不同示踪物反演 GOCI 流

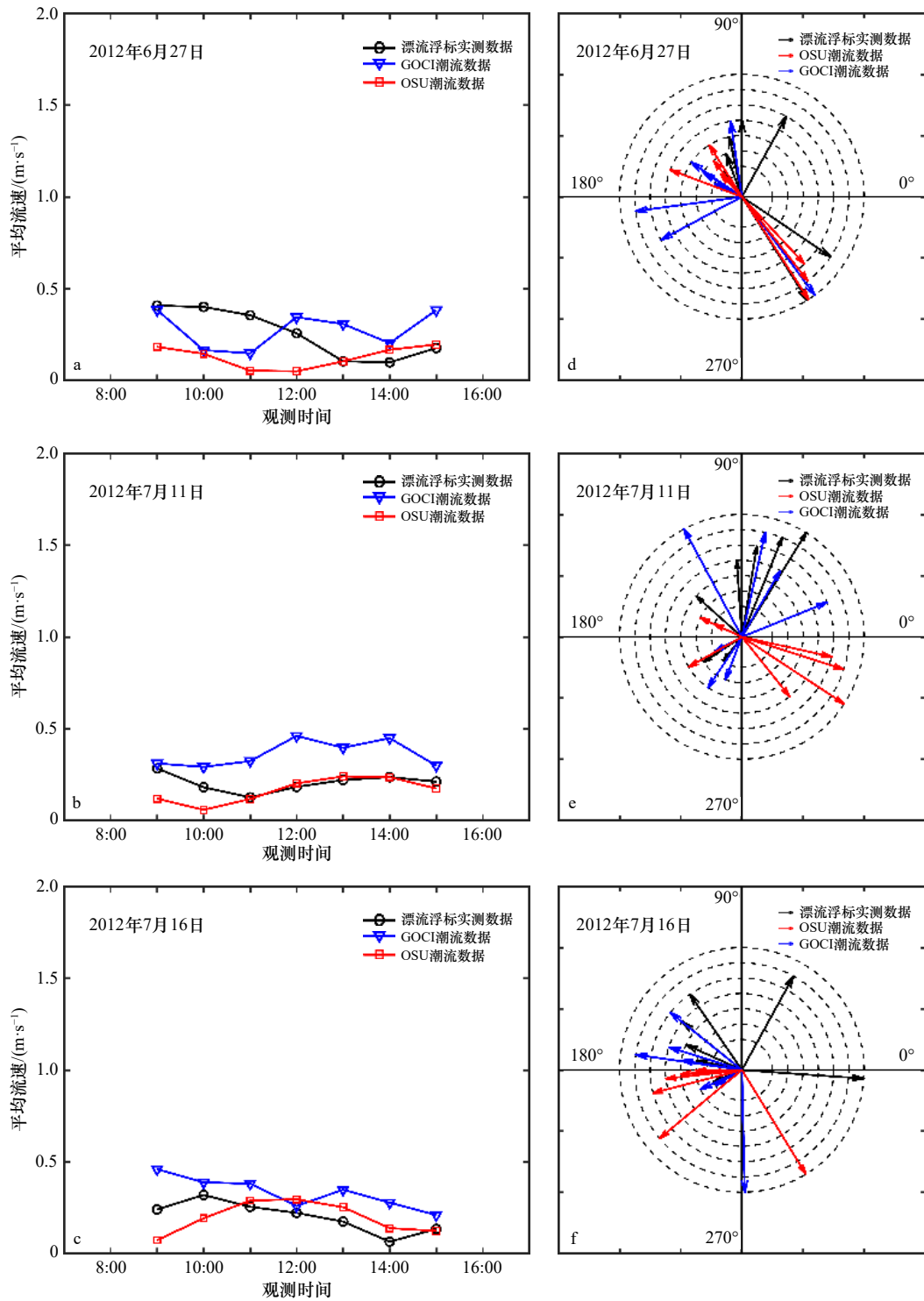


图 12 黄海中部海域潮流数据平均流速(a-c)和流向(d-f)

Fig. 12 The average currents velocity (a-c) and currents direction (d-f) of the tidal currents data in the central Yellow Sea

流向图中半径从小到大的虚线圆代表 8:30-15:30 7 个时段 (获得流速值的时间取自每个时间段的中间, 如 8:30-9:30 的值由 9:00 的值表示)

The dotted circles with the radius from small to large in the flow graph represent the seven time periods from 8:30-15:30 (the time to obtain the currents velocity value is taken from the middle of each time period, such as the value of 8:30-9:30 is represented by the value of 9:00)

场的差异。表 4 和图 16 是选取反演效果较好的黄海中部海域正午 2 个时段, 以 TSM 浓度、Chl *a* 浓度和 555 nm 波段的遥感反射率 (Remote Sensing Reflectance, R_{rs}) 作为浓度物的 GOCI 流场反演结果统计和对

比图。从图中可以看出, 不同示踪物反演的海流相互之间存在差异, 从表中可以得出, 在选取的案例中, TSM 浓度反演的效果最好, 且获取的流场矢量数目也相对最多。

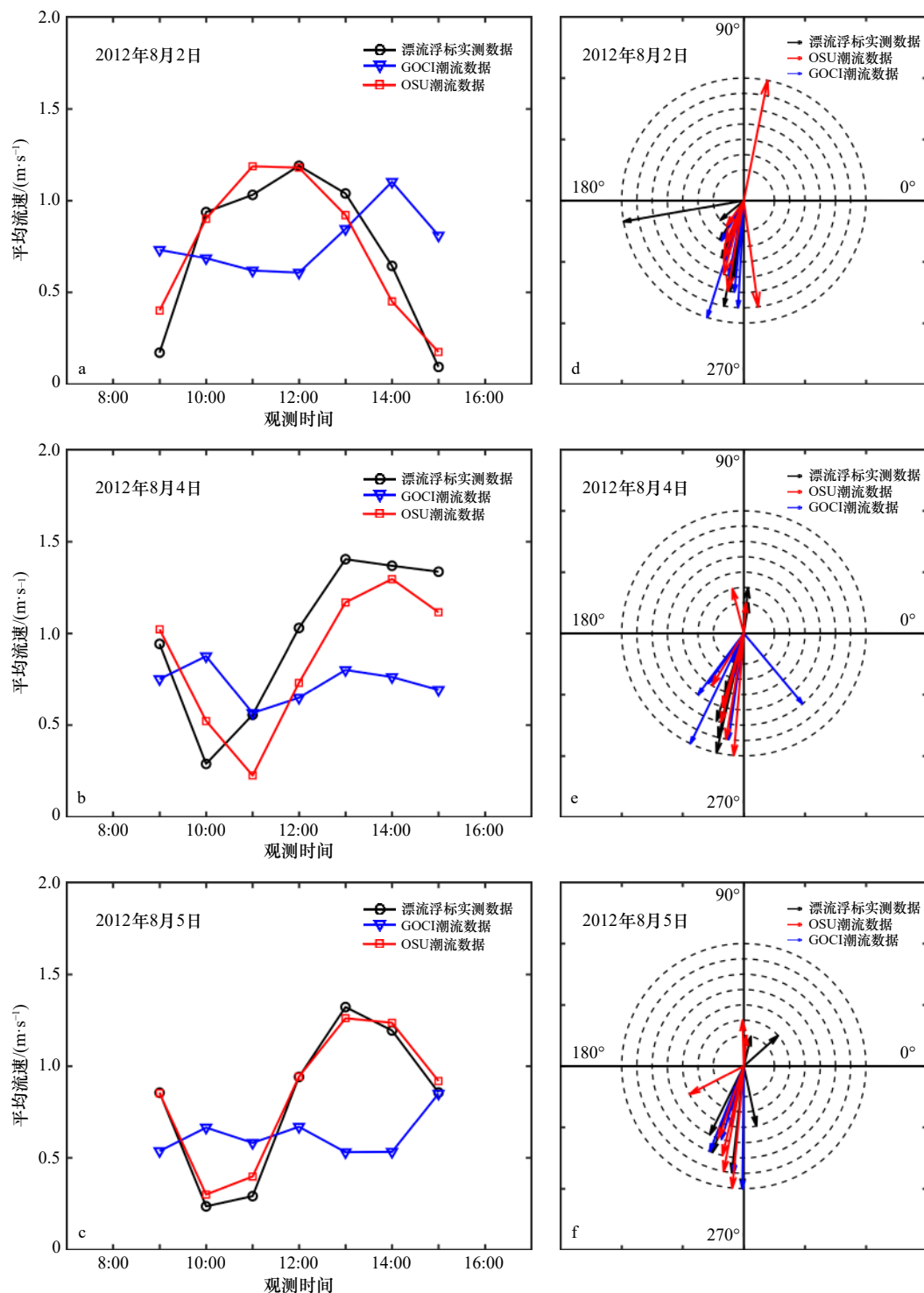


图 13 黄海近岸海域潮流数据平均流速(a-c)和流向(d-f)

Fig. 13 The average currents velocity (a-c) and currents direction (d-f) of the tidal currents data in the coastal Yellow Sea

流向图中半径从小到大的虚线圆代表 8:30–15:30 7 个时段 (获得流速值的时间取自每个时间段的中间, 如 8:30–9:30 的值由 9:00 的值表示)

The dotted circles with the radius from small to large in the flow graph represent the seven time periods from 8:30–15:30 (the time to obtain the currents velocity value is taken from the middle of each time period, such as the value of 8:30–9:30 is represented by the value of 9:00)

6 结论

本研究针对 MCC 算法, 以 GOCI 遥感反演的 TSM 浓度数据为示踪物, 获取了黄海海域的海表流场。通

过与实测漂流浮标数据的对比, 得到 GOCI 反演的海表流场的平均流速为 0.53 m/s, 漂流浮标测量的海表流场的平均流速为 0.45 m/s, 考虑到反演误差, 得出 MCC 算法适用于黄海海域的 GOCI 流场反演。

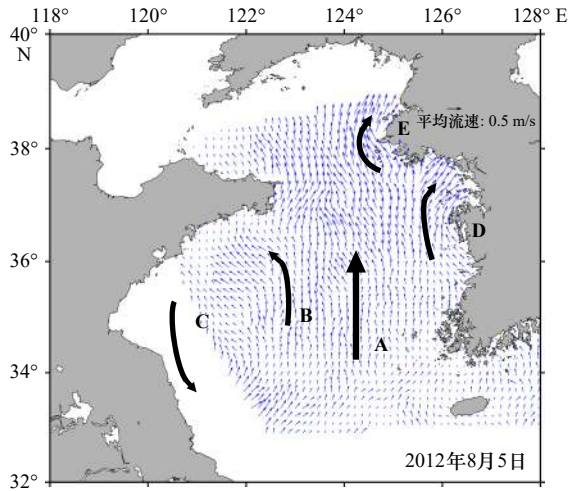


图 14 GOCI 反演流场 1 d 的 7 个时段
日平均余流

Fig. 14 Daily average residual currents in seven periods of the day of GOCI inversion current field

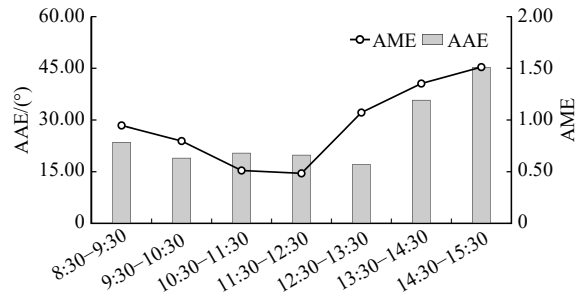


图 15 GOCI 反演流场 3 d 数据 AAE 和 AME 的平均值
Fig. 15 Average of AAE and AME of three-day data in GOCI inversion current field

根据 OSU 模式流场矢量和 M_2 潮流椭圆的分布情况, 得出 OSU 潮流模式获取的流场数据符合真实的黄海潮流特征; 并针对黄海海域无潮点的分布情况, 提出并识别潮波干涉区, 即以两个无潮点为中心的逆时针旋转潮波系统相互作用, 在黄海中部弱流区产生 1 个潮波干涉区, 对该位置海域的潮流矢量产生影响。

表 4 3 种不同示踪物的 GOCI 流场反演结果统计

Table 4 Statistics of GOCI currents field inversion results of three different tracers

日期	时段	Chl a 浓度			R_{rs}			TSM 浓度		
		流场矢量数目	AME 值	AAE 值/(°)	流场矢量数目	AME 值	AAE 值/(°)	流场矢量数目	AME 值	AAE 值/(°)
6月27日	11:30-12:30	1 010	1.13	21.83	955	1.22	27.04	1 005	0.67	13.62
	12:30-13:30	976	1.90	27.15	952	0.54	16.17	981	1.59	18.31
7月11日	11:30-12:30	472	0.30	13.99	448	0.62	13.51	476	0.53	15.34
	12:30-13:30	580	0.25	6.44	487	0.50	16.10	553	0.52	12.54
7月16日	11:30-12:30	467	0.32	24.74	464	0.76	39.16	484	0.32	29.59
	12:30-13:30	534	0.73	15.95	503	1.42	24.14	541	0.99	12.34
平均		673	0.77	18.35	634	0.84	22.69	673	0.77	16.96

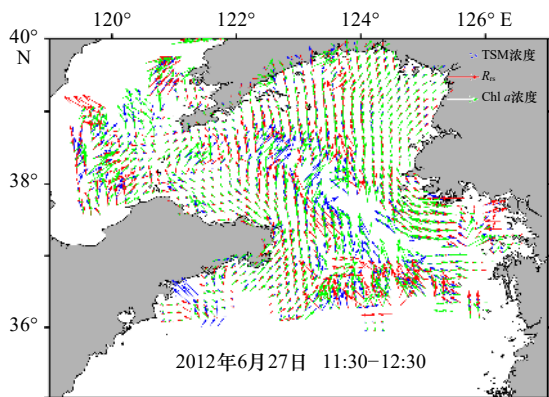


图 16 3 种不同示踪物的 GOCI 流场
反演结果对比

Fig. 16 Comparison of GOCI flow field inversion results of three different tracers

在此基础上, 对 GOCI 反演的流场做潮流提取, 对比其与 OSU 模式流场在不同海域的差异。对于本研究中选取的潮流数据, 在靠近潮波干涉区的黄海中部海域, GOCI 潮流数据与实测数据在方向上的一致性要优于 OSU 潮流数据, 两者 AAE 值分别为 48.45° 和 63.10° ; 在远离潮波干涉区的黄海近岸海域, OSU 潮流数据要优于 GOCI 潮流数据, 在速度大小和方向上, OSU 潮流数据与实测数据的一致性都要优于 GOCI; 由于 GOCI 反演的流速值偏大, 近岸海域和中部海域的 GOCI 潮流 AME 值都偏大。

采用了 OSU 潮流模式输出的潮流结果, 去除了 GOCI 反演的小时级海表流场中的潮流部分而获得平均海表流场(余流), 结果表明, 其流场分布情况符合黄海夏季流场的分布特征; 对于 GOCI 海流反演的有

效条件分析可知,在研究区域内,中午时段的反演效果较好,对于示踪物的选取,TSM浓度相较于Chl a 浓度和 R_{rs} (555 nm)的流场反演精度更高且流场矢量数目更多。

由于受到观测资料有限性和有效性的影响,本文没有尽可能多的对黄海其他海域进行案例选取分析,未来可针对更多区域、不同季节进行流场评估分析,并进一步开展有关反演流场精度提升的相关工作。

参考文献:

- [1] Paduan J D, Washburn L. High-frequency radar observations of ocean surface currents[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5: 115–136.
- [2] Klemas V. Remote sensing of coastal and ocean currents: An overview[J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(3): 576–586.
- [3] Amin R, Lewis M D, Lawson A, et al. Comparative analysis of GOCI ocean color products[J]. *Sensors*, 2015, 15(10): 25703–25715.
- [4] Choi J K, Yang H, Han H J, et al. Quantitative estimation of suspended sediment movements in coastal region using GOCI[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65(10065): 1367–1372.
- [5] Yang H, Choi J K, Park Y J, et al. Application of the geostationary ocean color imager (GOCI) to estimates of ocean surface currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(6): 3988–4000.
- [6] Egbert G D, Bennett A F, Foreman M G G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24821–24852.
- [7] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183–204.
- [8] Hu Zifeng, Wang Dongping, Pan Delu, et al. Mapping surface tidal currents and Changjiang plume in the East China Sea from geostationary ocean color imager[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(3): 1563–1572.
- [9] 赵强,侯国锋,汤志华,等.七个海洋潮汐模式在浙江海域的准确度评估[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(2): 310–320.
Zhao Qiang, Hou Guofeng, Tang Zhihua, et al. Accuracy assessment of seven numerical models on simulating tides in the coastal area of Zhejiang[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(2): 310–320.
- [10] Su Min, Yao Peng, Wang Z B, et al. Tidal wave propagation in the Yellow Sea[J]. *Coastal Engineering Journal*, 2015, 57(3): 150008.
- [11] 侍茂崇.物理海洋学[M].济南:山东教育出版社,2004.
Shi Maochong. *Physical Oceanography*[M]. Ji'nan: Shandong Education Press, 2004.
- [12] 章卫胜,宋志尧,张金善,等.中国近海潮波运动特征分析[M]//第十二届中国海岸工程学术研讨会论文集.北京:中国海洋工程学会,2005.
Zhang Weisheng, Song Zhiyao, Zhang Jinshan, et al. Analysis on the characteristics of tide wave movement in China's Offshore Sea[C]//Proceedings of the 12th China Coastal Engineering Symposium. Beijing: Chinese Society of Ocean Engineering, 2005.
- [13] 沈育疆.东中国海潮汐数值计算[J]. *山东海洋学院学报*, 1980, 10(3): 26–35.
Shen Yujiang. Numerical computation of tides in the East China Sea[J]. *Journal of Shandong College of Oceanology*, 1980, 10(3): 26–35.
- [14] 沈育疆,黄岱岩.试释黄海半日潮波系统形成机制[J]. *海洋学报*, 1993, 15(6): 16–24.
Shen Yujiang, Huang Daiyan. A tentative interpretation of the formation mechanism of the semidiurnal tidal wave system in the Yellow Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 1993, 15(6): 16–24.
- [15] 金宇豪.基于GOCI的辐射沙脊群海表流场遥感分析[J]. *地理空间信息*, 2017, 15(9): 37–40.
Jin Yuhao. Remote sensing analysis of sea surface flow field of radiation sand ridge group based on GOCI[J]. *Geospatial Information*, 2017, 15(9): 37–40.
- [16] Chen Jian, Chen Jianyu, Cao Zhengyi, et al. Improving surface current estimation from geostationary ocean color imager using tidal ellipse and angular limitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(6): 4322–4333.
- [17] 熊学军.中国近海海洋[M].北京:海洋出版社,2012.
Xiong Xuejun. *China Offshore Ocean*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [18] Hsueh Y. Recent current observations in the eastern Yellow Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988, 93(C6): 6875–6884.
- [19] Teague W J, Perkins H T, Hallock Z R, et al. Current and tide observations in the southern Yellow Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C12): 27783–27793.
- [20] 于华明,鲍献文,朱学明,等.夏季北黄海南部定点高分辨率实测海流分析[J]. *海洋学报*, 2008, 30(4): 12–20.
Yu Huaming, Bao Xianwen, Zhu Xueming, et al. Analysis of the high-resolution observed current data in the southern area of the North Huanghai Sea in summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2008, 30(4): 12–20.
- [21] Zang J, Tang Yuxiang, Zou Emei, et al. Analysis of Yellow Sea circulation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(S1): 12–20.
- [22] 郭炳火.黄海物理海洋学的主要特征[J]. *黄渤海海洋*, 1993, 11(3): 7–18.
Guo Binghuo. Major features of the physical oceanography in the Yellow Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1993, 11(3): 7–18.
- [23] 王波,李民,刘世萱,等.海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2401–2414.
Wang Bo, Li Min, Liu Shixuan, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications[J]. *Chinese Journal of Instrumentation*, 2014, 35(11): 2401–2414.

- al of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2401–2414.
- [24] 王军成. 海洋资料浮标原理与工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
Wang Juncheng. Principle and Engineering of Ocean Data Buoy[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013.
- [25] Hu Zifeng, Pan Delu, He Xianqiang, et al. Assessment of the MCC method to estimate sea surface currents in highly turbid coastal waters from GOCI[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(2): 572–597.
- [26] Lou Xiulin, Shi Aiqin, Zhang Huaguo. Coastal sea surface current observation with GOCI imagery[C]//Proceedings of SPIE 8921, MIP-PR 2013: Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications. Wuhan: SPIE, 2013.
- [27] Padman L, Erofeeva S. Tide model driver (TMD) manual[Z/OL]. [2021-11-20]. www.esr.org/polar_tide_models/README_TMD.pdf.
- [28] Ryu J H, Han H J, Cho S, et al. Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS)[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 223–233.
- [29] Barton I J. Ocean currents from successive satellite images: The reciprocal filtering technique[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(10): 1677–1689.
- [30] Sun Hequan, Song Qingtao, Shao Ruoli, et al. Estimation of sea surface currents based on ocean colour remote-sensing image analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(21): 5105–5121.
- [31] Chen Wei. Surface velocity estimation from satellite imagery using displaced frame central difference equation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2791–2801.
- [32] 丁文兰. 渤海和黄海潮汐潮流分布的基本特征[M]//中国科学海洋研究所. 海洋科学集刊: 第 25 集. 北京: 科学出版社, 1985: 27–40.
Ding Wenlan. Basic characteristics of tidal current distribution in Bohai Sea and Yellow Sea[M]//China Institute of Oceanography. Anthology of Marine Science: Episode 25. Beijing: Science Press, 1985: 27–40.
- [33] 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
Chen Zongyong. Tidal Science[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [34] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 1–16.
Su Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2001, 23(4): 1–16.
- [35] Yuan Dongliang, Li Yao, Wang Bin, et al. Coastal circulation in the southwestern Yellow Sea in the summers of 2008 and 2009[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 143: 101–117.
- [36] 李豪, 何贤强, 陶邦一, 等. 大太阳天顶角下水色卫星叶绿素遥感探测能力研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(11): 128–140.
Li Hao, He Xianqiang, Tao Bangyi, et al. Research on chlorophyll detection ability under high solar zenith angle[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(11): 128–140.
- [37] Yang Haoping, Arnone R, Jolliff J. Estimating advective near-surface currents from ocean color satellite images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 1–14.

Study on applicability of GOCI inversion and OSU model sea surface currents field data in the Yellow Sea tidal wave system

Cui He^{1,2}, Chen Jianyu^{1,2}, Cao Zhenyi², Guan Weibing², Zhu Qiankun², Gong Fang²

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Second Institute of Oceanology, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The Yellow Sea presents unique topographic conditions, and the tidal wave movement in this area has unique characteristics. In this paper, Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) inversion and Oregon State University (OSU) tidal current model are used to obtain the sea surface currents field in the Yellow Sea. Based on the unique tidal wave system in the sea area, the tidal wave interference area is proposed and identified, and then the currents field of GOCI inversion is extracted. And partition of two kinds of trend data usability evaluation, through the validation of the drifting buoy data evaluation. The results show that the sea surface currents field obtained by GOCI inversion and OSU tidal current model has a certain degree of reliability. The AME value of sea surface currents field velocity obtained by GOCI inversion is 0.77, and that obtained by OSU tidal model is 0.49. On the whole, the currents field data obtained by GOCI inversion and OSU tide model are reliable to a certain extent. In the central area of the Yellow Sea near the tidal wave interference area, the consistency between GOCI tidal currents

data and OSU tidal currents data is better than that of OSU tidal currents data, and their AAE values are 48.45° and 63.10° , respectively. In the coastal area of the Yellow Sea far from the tidal wave interference area, the consistency between the OSU tidal currents data and the measured data is better than that of the GOCI tidal currents data in terms of velocity magnitude and direction.

Key words: Geostationary Ocean Color Imager (GOCI); Oregon State University tide current model; Yellow Sea flow field inversion; rotating tidal wave system; maximum correlation coefficient method