

基于高频地波雷达资料的海南中东部近海表层海流特征

周旋^{1,2}, 李自强¹, 安玉柱¹, 张耀文¹, 杨晓峰²

1. 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094;
2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101

摘要: 利用海南中东部近海海域高频地波雷达观测得到的 2019 年 4 月—2020 年 3 月表层海流资料进行潮流调和分析 and 余流分析。结果表明: 海南中东部近海海域以不规则半日潮流为主, 半日分潮 M_2 和 S_2 以往复流为主, 全日分潮 O_1 、 K_1 以顺时针旋转流为主, M_2 、 S_2 、 O_1 、 K_1 分潮最大潮流流速的比为 1 : 0.51 : 0.60 : 0.65, M_2 为最主要分潮。最大可能潮流流速分布从西南方向向东北方向逐步增大, 最大值为 $35\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。余流受东亚季风影响较大, 季节变化特征显著, 呈夏季形态(6 月—8 月)、冬季形态(9 月—次年 2 月)和过渡形态(3 月—5 月)。夏季形态流向东北, 平均流速 $29\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; 冬季形态持续时间最长, 流向西南, 平均流速 $36\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 大于夏季形态; 过渡形态为冬季形态向夏季形态的转变期, 流向分布较复杂, 平均流速 $13\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 明显小于夏季和冬季形态。从全年来看, 西南向流动的时间最长、流速最大, 海南中东部表层海水物质输运自东北向西南。

关键词: 高频地波雷达; 表层海流; 潮流; 余流

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2021)02-0103-9

Surface current characteristics in the central eastern sea area of Hainan Island detected by high-frequency surface wave radar

ZHOU Xuan^{1,2}, LI Ziqiang¹, AN Yuzhu¹, ZHANG Yaowen¹, YANG Xiaofeng²

1. 61741 Troops of PLA, Beijing 100094, China;
2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Based on ocean surface currents observed by the High Frequency Ground Wave Radars (HFSWRs) from April 2019 to May 2020, the characteristics of tidal and residual currents in the central eastern sea area of Hainan Island were studied. The results show that the tide in the central eastern sea area of Hainan Island mainly belongs to the irregular semidiurnal tide. The movements of the semidiurnal tidal currents M_2 and S_2 are mainly in the form of reciprocating current, and the movements of the diurnal tidal currents O_1 and K_1 are mainly the form of clockwise rotary current. The spatially averaged amplitudes of M_2 , S_2 , O_1 , and K_1 have a ratio of 1 : 0.51 : 0.60 : 0.65; and the semidiurnal tidal current M_2 is dominant among the four tidal current constituents. The probable maximum current velocities increase gradually from southwest to northeast, and the maximum is $35\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Due to the influence of the East Asian monsoon, the residual currents have significant seasonal variation, with summer (from June to August), winter (from September to February of the following year) and transitional (from March to May) types. For the summer type, the directions of the residual currents are basically northeast, and the average velocity is $29\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. The residual currents of the winter type flow toward the southwest, and the average velocity is $36\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Note that the residual currents of the winter type are greater than those of the summer type. The residual currents of the transitional type have complex directions, and the average velocity of $13\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Overall, the southwest residual currents have the largest velocity and last the longest time during the year, and therefore the material transport

收稿日期: 2020-05-08; 修订日期: 2020-08-11。殷波编辑

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0502800)

作者简介: 周旋(1980—), 男, 河南省信阳市人, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋遥感应应用研究。email: youme_zx@163.com

通信作者: 周璇。email: zhouxuan@radi.ac.cn

Received date: 2020-05-08; Revised date: 2020-08-11. Editor: YIN Bo

Foundation item: National Key Research and Development Project (2017YFB0502800)

Corresponding author: ZHOU Xuan. email: zhouxuan@radi.ac.cn

in surface sea water is from northeast to southwest in the central eastern sea area of Hainan Island.

Key words: high frequency surface wave radar; surface current; tidal current; residual current

海南中东部近海海域位于南海西北部陆坡处, 海岸线曲折多弯, 港湾众多, 渔业、航运、旅游等经济活动频繁, 受东亚季风、南海环流、海底地形和岸线等诸多因素影响, 其表层海流特征较为复杂。目前, 针对海南中东部海流特性的研究主要集中在上升流和大尺度环流特征(经志友等, 2008; 许金电等, 2013; 刘科峰等, 2014; 卢燕等, 2017), 采用的资料主要来源于声学多普勒流速剖面仪和表层漂流浮标, 时间范围较短、数据点稀疏且空间分布不均, 不能较好地表征海南中东部近海表层海流时空分布特性。

高频地波雷达是一种新兴的表层海流监测技术, 利用高频无线电波与海面作用时产生的布拉格散射和多普勒效应探测视距以外表层海流信息, 与传统测流仪器观测结果的均方差在 $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右(朱大勇等, 2013; Capodici et al, 2019)。高频地波雷达作为能够获得大范围海流观测数据的设备, 能够得到海流计、声学多普勒流速剖面仪等传统测流仪器无法得到的空间分布信息, 受到国内外研究学者的关注。Ullman 等(2004)利用 2000 年 6 月—2001 年 12 月高频地波雷达海流观测资料研究了美国长岛海峡沿岸急流的季节性变化。朱大勇等(2013)利用 2006 年 1 月—2009 年 4 月闽南沿岸高频地波雷达的海流资料分析了中国台湾海峡南部浅滩以西区域表层海流的季节与年际变化特征。沈志奔(2014)利用 2005 年 8 月舟山海域高频地波雷达海流资料进行准调和和分, 研究了舟山外海潮流的空间分布特性。Cosoli 等(2015)利用 2012 年 8 月—2014 年 7 月高频地波雷达海流观测资料研究了马耳他—西西里海峡的表层潮流特征。吉会峰等(2017)和

杨华等(2019)利用江苏如东海域地波雷达获得的长期海流观测资料对烂沙洋海域表层海流特征进行了统计分析、潮流调和和分析以及余流分析。

与传统的测流仪器相比, 高频地波雷达观测资料具有高空间覆盖和高空间分辨率的优点, 能够反映观测海域海流的时空分布特征。本文利用海南中东部的文昌良梅和琼海博鳌 2 个高频地波雷达站获取的 2019 年 4 月—2020 年 5 月表层海流观测资料进行潮流调和和分析余流分析, 研究海南中东部近海潮流、余流分布特征及变化规律, 为该海域的航线规划、海岸工程、水产养殖和环境保护等工作提供基础数据支撑。

1 地波雷达观测资料

海南中东部的文昌良梅和琼海博鳌 2 个高频地波雷达站采用的是武汉大学电波传播实验室研发的 OSMAR-S100 便携式雷达系统(吴雄斌等, 2003; 陈江等, 2005; Zhou et al, 2015)。该系统采用了调频中断连续波体制和单极子交叉环紧凑型天线阵, 实现 100km 范围内海洋表层海流、海浪和风场等信息的探测。文昌良梅和琼海博鳌 2 个高频地波雷达站的工作波长 λ 分别为 18.6m 和 22.4m, 波束覆盖扇角 120° , 运行状态良好, 其探测的是 $\lambda/8\pi$ 深度(约为 0.8m)处的海流流速, 时间分辨率为 20min, 空间分辨率为 0.05° 。地波雷达站的位置、观测海域及水深分布如图 1 所示。地波雷达探测范围内的海底地形从西北向东南倾斜, 西北和中间部分为大陆架, 较为平缓, 等深线与海岸线大致平行, 东南部分为大

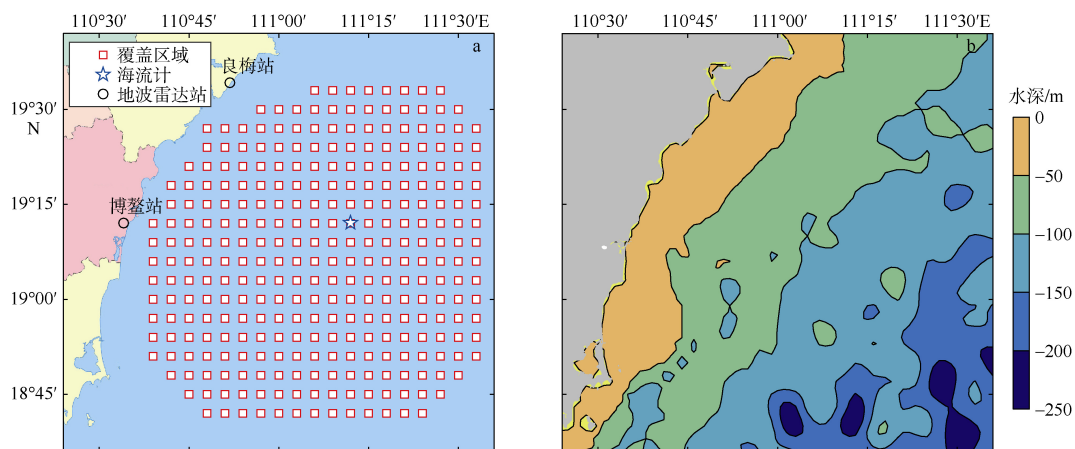


图 1 地波雷达站和海流计的位置(a)以及观测海域水深分布(b)

图 a 中五角星为连续观测位置。审稿号: 琼 S(2019)054

Fig. 1 Locations of the HFSWR stations and current meters (a), superimposed with topography of the observation area (b)

陆架向大陆坡过渡处, 等深线密集, 坡度较大。

本文使用的高频地波雷达表层海流数据时间范围为 2019 年 4 月 1 日—2020 年 3 月 31 日, 其中由于停电、设备故障等因素导致 41d 观测数据缺失。观测区域为(110°39′—110°33′E, 18°42′—19°36′N), 按照 0.05°空间分辨率可分为 19×19 的网格, 如图 1a 所示。由于电离层干扰、射频干扰、停电、设备故障等因素影响, 高频地波雷达表层海流资料存在异常值或缺失值。为了保证研究结果的准确性, 需进行有效的质量控制(沈志奔, 2014), 步骤如下:

1) 将表层海流数据分解为北分量 U 和东分量 V , 以每个网格点为中心分别计算 3×3 范围内 U 和 V 分量标准差, 剔除超过 2 倍标准差的异常数据;

2) 计算以缺失点网格为中心 3×3 范围内其他 8 个网格点的数据缺失率, 若数据缺失率小于 50%, 即 8 个网格点中至少有 4 个有效数据点, 则通过反距离加权平均法填补缺失点网格的海流数据。

经质量控制后, 高频地波雷达表层海流数据获取率如图 2 所示。本文选取数据获取率大于 76% 的表层海流数据研究潮流、余流分布特征及变化规律。

为了检验高频地波雷达的数据精度, 2019 年 6 月 1 日—2 日国家海洋局海口海洋环境监测中心站

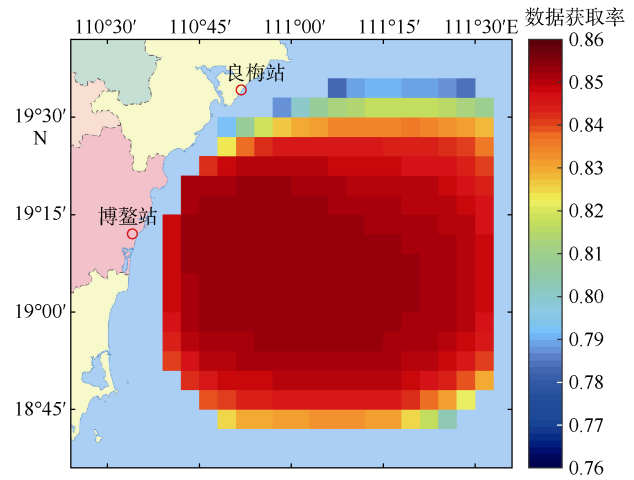


图 2 高频地波雷达表层海流的数据获取率

审图号: 琼 S(2019)054

Fig. 2 Data acquisition rate of ocean surface currents from HF-SWRS

利用 2 台船载海流计对图 1 五角星处(111°11′58″E、19°12′5″N)的海流进行了连续观测。2 台船载海流计采用的是亚力克自容式电磁海流计, 固定在船体外 3m 处, 深度分别为 2.2m 和 2.7m, 观测时间间隔为 5min, 对 2 台海流计 20min 的海流数据进行平均, 然后与高频地波雷达表层海流进行匹配, 比对结果如图 3 所示。二者的匹配数据点为 76 个, U 分量均

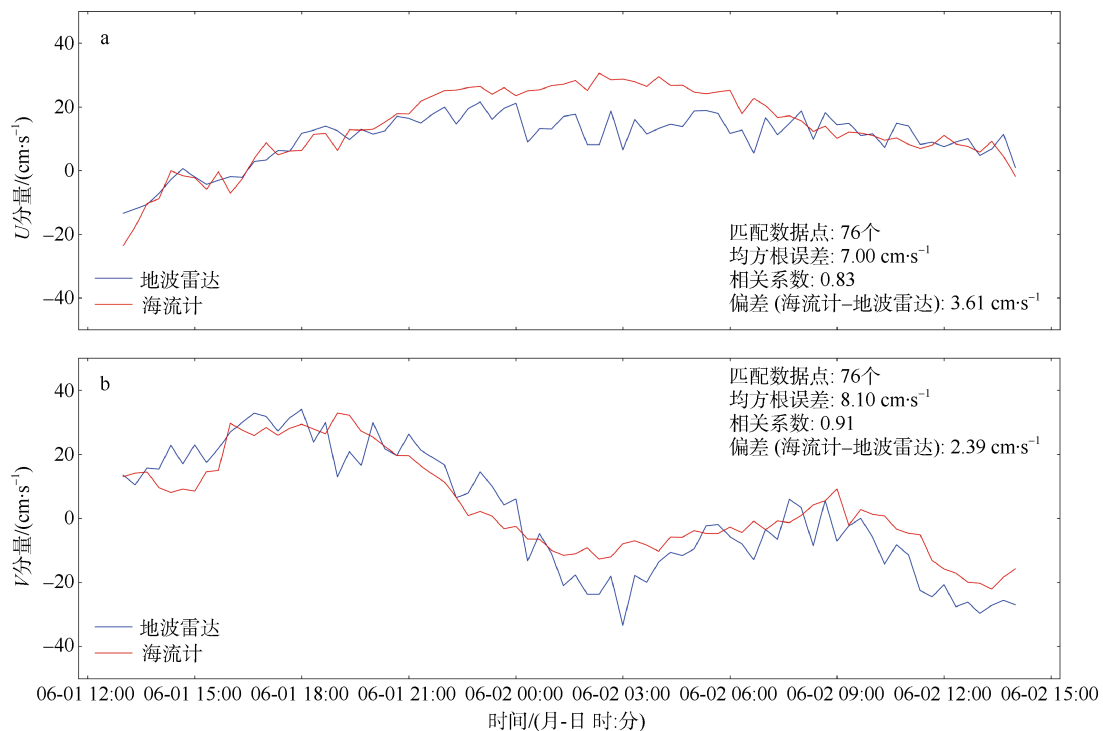


图 3 2019 年 6 月 1 日—2 日高频地波雷达和海流计观测表层海流 U 分量(a)和 V 分量(b)对比时间序列图

Fig. 3 Comparison of ocean surface currents observed by the HF-SWRS and the current meters for meridional (a) and zonal (b) components from June 1 to 2, 2019

方差 $7\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、相关系数 0.83, V 分量均方差 $8.1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、相关系数 0.91, 这说明高频地波雷达与海流计观测的表层海流具有较好的一致性。值得注意的是, 在高频地波雷达观测区域的边缘, 由于回波信号减弱、观测几何条件差等因素影响, 高频地波雷达的海流观测精度下降。

2 潮流调和与分析

潮流调和与分析是将海流分解成不同频率的天文分潮流, 然后根据海流观测数据计算各分潮流的调和常数。本文采用 Pawlowicz 等(2002)提供的潮流调和与分析程序对海南中东部高频地波雷达表层海流数据进行调和与分析。

2.1 潮流类型

根据《港口工程技术规范》(中华人民共和国交通部, 1988)的规定, 潮流类型采用全日分潮 O_1 和 K_1 的最大潮流流速之和与半日分潮 M_2 的最大潮流流速的比值来划分。定义潮流类型系数 (F), $F = (W_{O_1} + W_{K_1}) / W_{M_2}$, 式中 W_{O_1} 、 W_{K_1} 和 W_{M_2} 分别为 O_1 、 K_1 和 M_2 的最大潮流流速即潮流椭圆的半长轴。 $F < 0.5$ 为规则半日潮流; $0.5 < F < 2.0$ 为不规则半日潮流; $2.0 < F < 4.0$ 为不规则全日潮流; $F > 4.0$ 为规则全日潮流。图 4 为潮流类型系数 F 分布图。由图 4 可知, 海南中东部近海海域的潮流类型系数 F 在 0.8~2.8 之间, 平均数为 1.5。该海域的潮流类型以不规则半日潮流为主, 在东南方向小范围海域出现不规则全日潮流, 这与已有文献结果一致(孙湘平, 2006)。对比图 4 的潮流类型系数与图 1 的水深分布发现, 等深线越密集、坡度越大, 全日分潮的影响越大, 潮

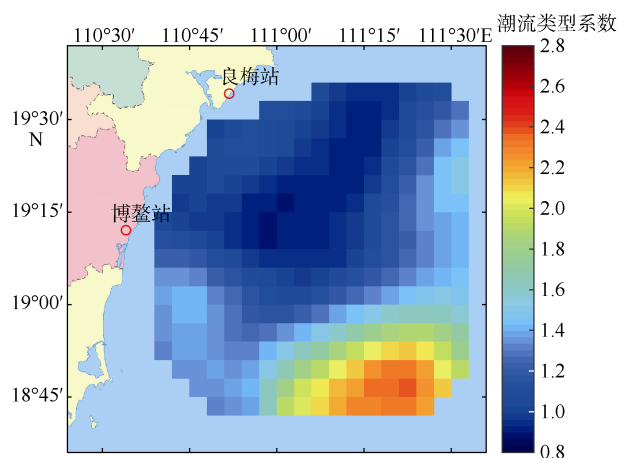


图 4 潮流类型系数分布图

审图号: 琼 S(2019)054

Fig. 4 Spatial distribution of tidal current type factor

流类型趋向于全日潮流, 说明海底地形对潮流性质产生一定的影响。

2.2 潮流椭圆及运动形式

海南中东部近海海域潮流类型比较复杂, 包括不规则半日潮流和不规则全日潮流。本文利用 T-tide 潮流调和与分析程序计算了 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_4 、 M_{S4} 、 M_6 11 个分潮, 信噪比大于 2 的分潮为 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 Q_1 、 M_{S4} 。根据观测海域最大潮流流速的平均值排序, 半日分潮 M_2 、 S_2 和全日分潮 O_1 、 K_1 为最大的 4 个分潮, 占比为 71%。 M_2 、 S_2 、 O_1 、 K_1 分潮最大潮流流速的比为 1 : 0.51 : 0.60 : 0.65, 潮流椭圆如图 5 和图 6 所示。为了显示方便, 每 3 个网格点给出一个潮流椭圆, 其半长轴和半短轴分别代表该分潮最大流速和最小流速, 长轴方向代表该分潮最大流速方向。

由图 5a 和 5b 可知, M_2 分潮的潮流椭圆扁平, 旋转率的绝对值较小, 潮流运动形式以往复流为主, 椭圆长轴在近海岸呈西南—东北走向, 与海岸线基本平行, 随着距海岸线距离的增加, 逐渐变为南北走向。对比图 5 各分图可知, S_2 分潮的椭圆长轴平均值为 $2.6\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、明显小于 M_2 分潮, 但其潮流运动形式和椭圆长轴走向与 M_2 分潮类似, 以往复流为主, 椭圆长轴由近海岸的西南—东北走向逐步向远海岸的南北走向过渡。对比图 5 和图 1 可知, 随着等深线密度的增大, 半日分潮 M_2 和 S_2 的潮流椭圆旋转率绝对值增大、运动形式趋向于旋转流。

由图 6a 和 6b 可知, O_1 分潮的潮流椭圆长轴平均值为 $3.1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、小于 M_2 分潮, 旋转率的绝对值较大、平均值为 0.36, 运动形式以顺时针旋转流为主, 在中间区域出现小范围的西南—东北走向往复流。由图 6c 和 6d 可知, K_1 分潮的潮流椭圆长轴平均值与 O_1 分潮一致、均小于 M_2 分潮, 旋转率的绝对值大于 O_1 分潮、平均值为 0.45, 运动形式以顺时针旋转流为主, 在近海岸出现小范围的西南—东北走向往复流。另外, 在高频地波雷达观测区域东侧和南侧, O_1 和 K_1 的潮流椭圆变化较大, 这可能是由于海底地形变化较大, 或者是高频地波雷达观测边缘海流误差较大造成的。对比图 6 和图 1 可知, 等深线密度增大, O_1 分潮潮流运动形式趋向于旋转流, K_1 分潮潮流运动形式趋向于往复流。

综上所述, M_2 分潮的潮流椭圆长轴最大, 其次是 K_1 和 O_1 分潮, 最小是 S_2 分潮, 但 4 个分潮的椭

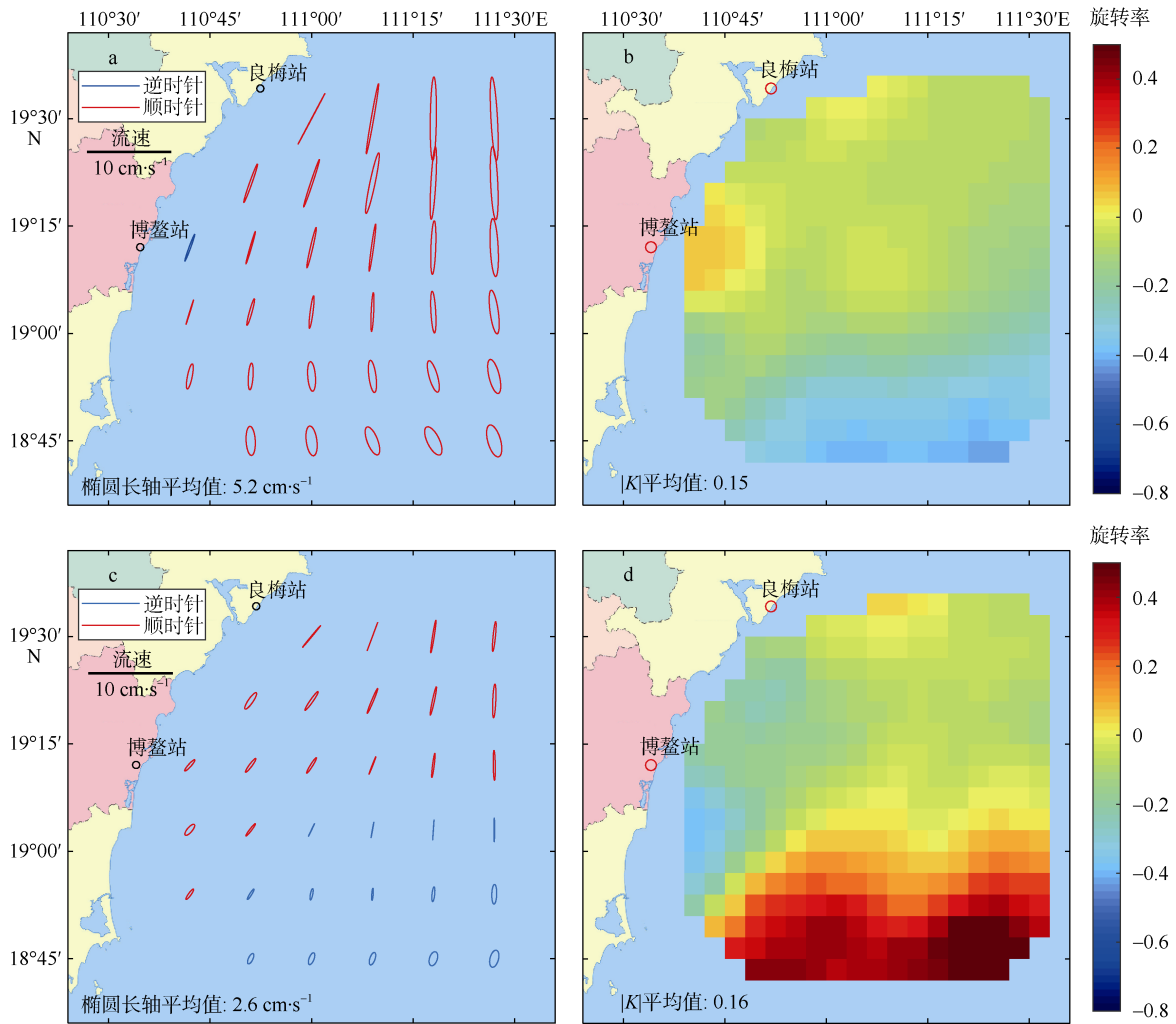


图 5 半日分潮 M_2 、 S_2 的潮流椭圆及运动形式

a. M_2 分潮潮流椭圆; b. M_2 分潮旋转率; c. S_2 分潮潮流椭圆; d. S_2 分潮旋转率。审图号: 琼 S(2019)054

Fig. 5 Spatial distributions of tidal current ellipses and rotating rates for the semidiurnal tidal currents M_2 and S_2

圆长轴相差不大。半日分潮 M_2 、 S_2 的运动形式以往复流为主, 近海岸为西南—东北走向、远海岸为南北走向; 全日分潮 O_1 、 K_1 的运动形式以顺时针旋转流为主, 这是因为海南中东部海域地处北半球, 由于地球自转效应, 引潮力水平分量和地转偏向力共同作用致使潮流顺时针旋转。

2.3 最大可能潮流流速

最大可能潮流流速可通过 M_2 、 S_2 半日分潮和 K_1 、 O_1 全日分潮的最大潮流流速计算。根据《港口工程技术规范》(中华人民共和国交通部, 1988) 的规定, 规则半日潮流区的最大可能潮流流速按照公式(1)计算, 规则全日潮流区的最大可能潮流流速按照公式(2)计算:

$$\bar{V}_{\max} = 1.29\bar{W}_{M_2} + 1.23\bar{W}_{S_2} + \bar{W}_{K_1} + \bar{W}_{O_1} \quad (1)$$

$$\bar{V}_{\max} = \bar{W}_{M_2} + \bar{W}_{S_2} + 1.68\bar{W}_{K_1} + 1.46\bar{W}_{O_1} \quad (2)$$

式中: \bar{W}_{M_2} 、 \bar{W}_{S_2} 、 \bar{W}_{K_1} 和 \bar{W}_{O_1} 分别为 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 4 个主要分潮的椭圆长半轴矢量。本文研究的海南中东部近海包括不规则半日潮流和不规则全日潮流, 最大可能潮流流速按照公式(1)和公式(2)中的最大值计算。图 7 为海南中东部近海的最大可能潮流流速分布图, 最大可能潮流流速范围为 7~35 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均值为 15 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 从西南向东北方向逐步增大, 最大值出现在观测海域的东北方向, 位于不规则半日潮流区。

3 余流特征分析

余流是指从实测海流中扣除天文引潮力作用引起的周期性潮流后的非周期性海流, 包括风生流、密度流、径流和潮汐余流等。余流对海水中物质的运输、稀释及扩散等起着重要的作用(杨华等, 2019)。

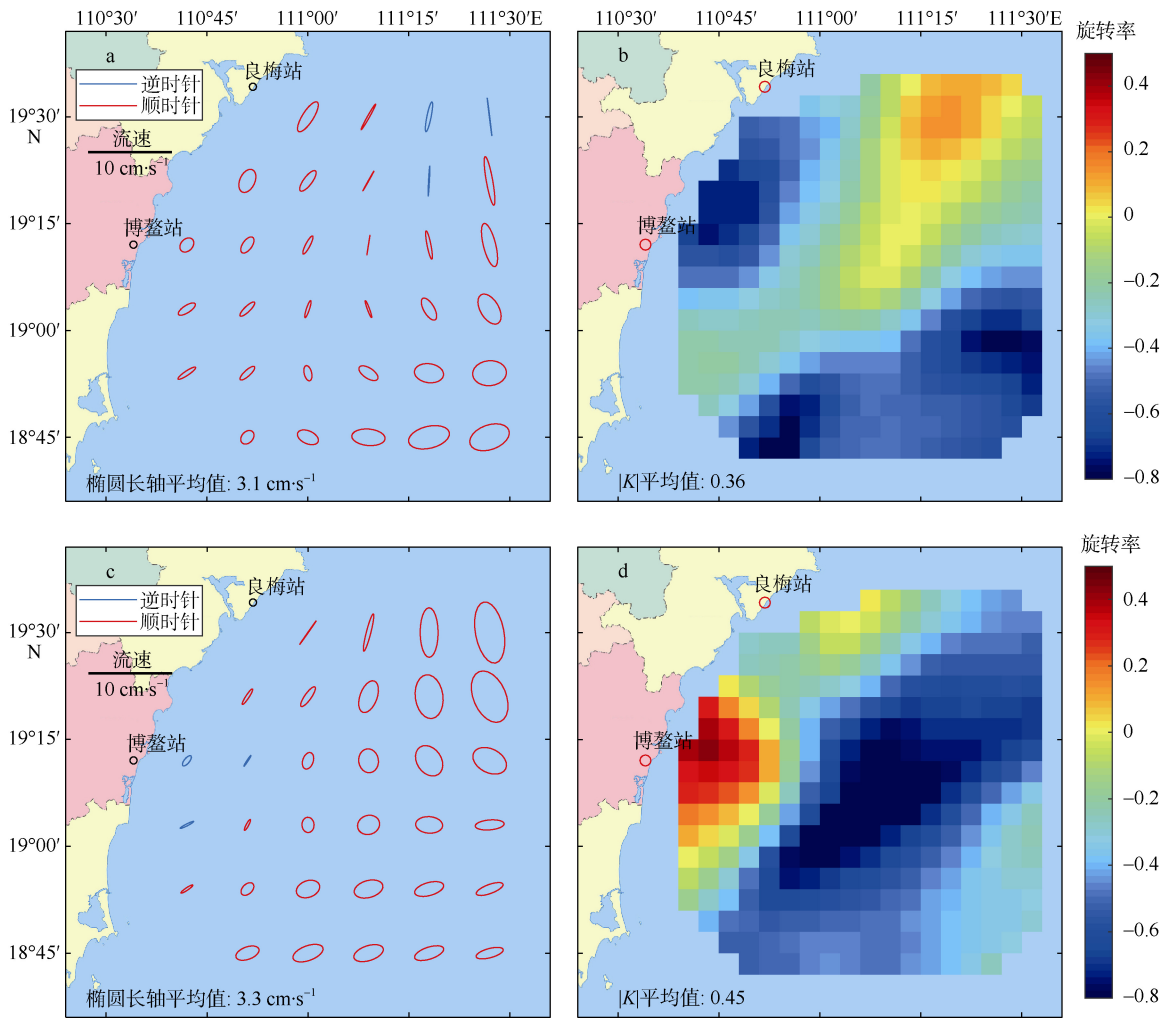


图 6 全日分潮 O_1 、 K_1 的潮流椭圆及运动形式

a. O_1 分潮潮流椭圆; b. O_1 分潮旋转率; c. K_1 分潮潮流椭圆; d. K_1 分潮旋转率。审图号: 琼 S(2019)054

Fig. 6 Spatial distributions of tidal current ellipses and rotating rates for the semidiurnal tidal currents O_1 and K_1

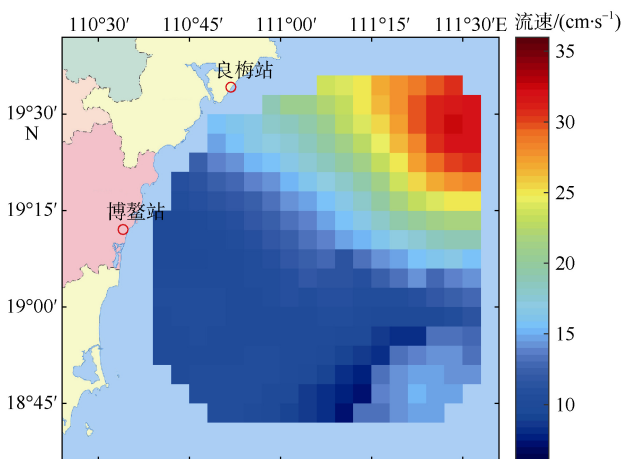


图 7 海南中东部近海最大可能潮流流速分布图

审图号: 琼 S(2019)054

Fig.7 Spatial distribution of probable maximum current velocity

本文对高频地波雷达测得的表层海流数据剔除潮流因素后,对剩余部分进行月平均,获取月平均

余流(胡冬 等, 2015), 如图 8 所示。为了分析海面风场与月平均余流的关系, 本文收集了遥感系统 (Remote Sensing System, RSS)处理发布月平均先进散射计 (Advanced Scatterometer, ASCAT)风矢量产品, 空间分辨率为 0.25° , 在地波雷达观测海域内进行空间平均, 图 9 为观测海域月平均 ASCAT 风矢量随时间变化情况。对比图 8 和图 9 可知, 月平均余流受东亚季风影响较大, 季节变化特征显著。2020 年 3 月、2019 年 4 月—5 月为季风过渡期, 观测海域由东南风向西南风转换, 月平均余流的流速较小, 流向较复杂, 3 月、4 月平均流速为 $12\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 近海岸流向偏北, 远海岸流向西南, 5 月平均流速为 $16\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 近海岸流向西北, 远海岸流向西南。2019 年 6 月—8 月为西南季风期, 风向为南偏西, 观测海域呈现一致的东北向流, 导致上层海水的离岸输送, 中、深层海水向岸涌升与补偿, 形成上升流, 7 月余流的平均流速最大, 达到 $42\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 海水离岸输送最强, 上升

流也是全年最强, 这与已有文献结果是一致的(谢玲玲等, 2012)。2019年9月—2020年2月, 在强劲

的东北风影响下, 观测海域呈现一致的西南向流, 11月平均流速最大, 达到 $52\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

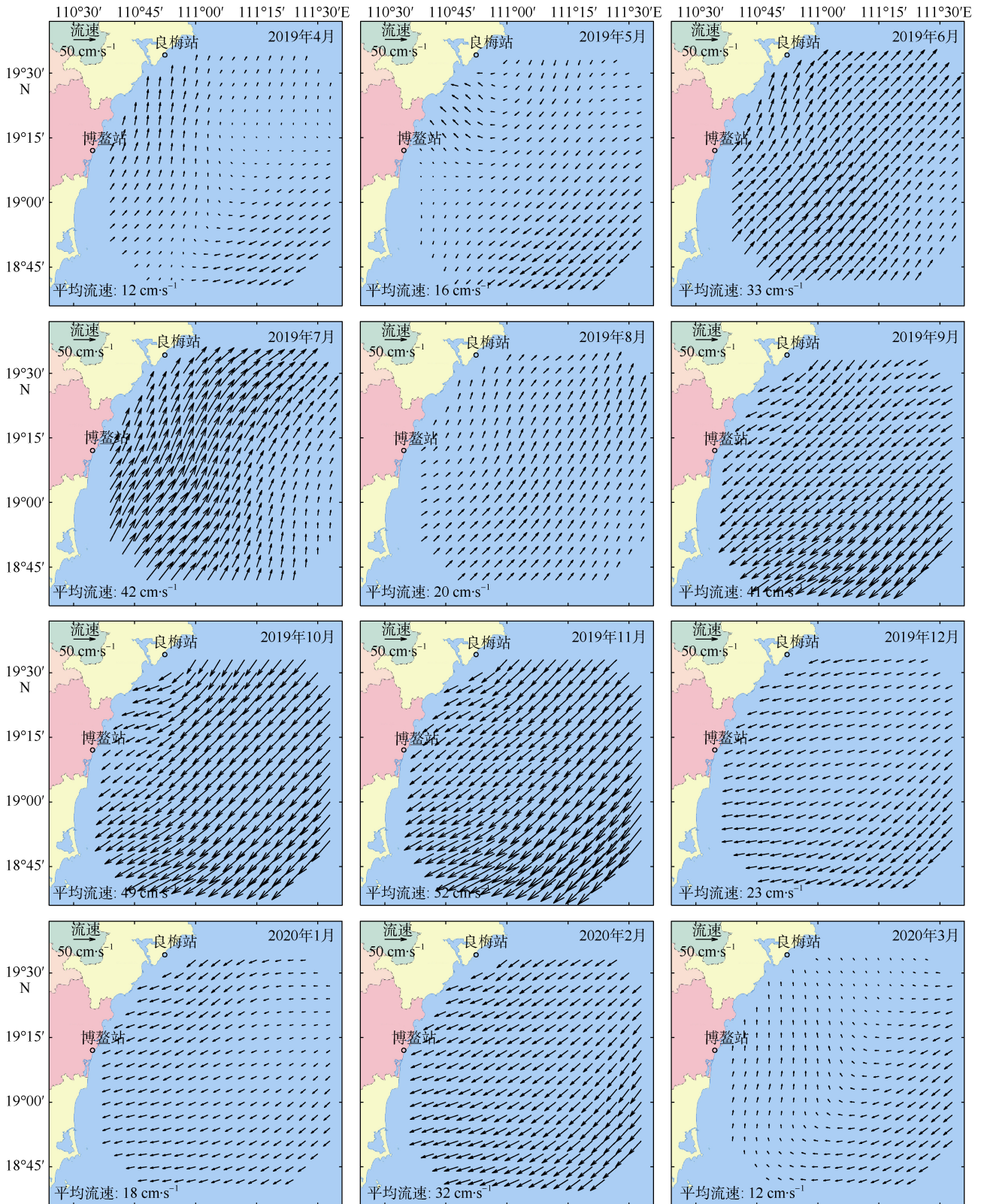


图8 2019年4月—2020年3月月定常余流图

审图号: 琼S(2019)054

Fig. 8 Residual currents from April 2019 to March 2020

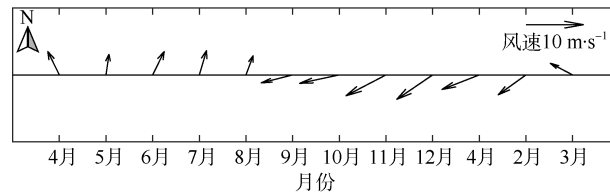


图9 2019年4月—2020年3月观测海域 ASCAT 海面风场随时间变化图

Fig. 9 The variation of ASCAT wind vectors in the observation area from April 2019 to March 2020

通过高频地波雷达连续观测表明,海南中东部海域余流主要呈夏季形态、冬季形态和过渡形态,与季风的变化过程基本一致。6月—8月为夏季形态,流向东北,7月平均流速最大;9月夏季形态迅速转变为冬季形态,持续到次年2月,流向西南,11月平均流速最大;3月和5月为过渡形态,是冬季形态向夏季形态的转变期,流速较小,流向时空变化特征比较复杂。

4 结论

本文通过对2019年4月—2020年3月海南中东部近海高频地波雷达表层海流观测资料进行潮流调和分析和余流分析,得到以下结论:

1) 从潮流调和结果,半日分潮 M_2 、 S_2 和全日分潮 O_1 、 K_1 为最大的4个分潮,占比为71%。 M_2 、 S_2 、 O_1 、 K_1 分潮最大潮流流速的比为1:0.51:0.60:0.65, M_2 为最主要分潮。海南中东部近海海域的潮流类型系数在0.8~2.8之间,平均数为1.5,以不规则半日潮流为主,在东南方向小范围海域出现不规则全日潮流;等深线越密集、坡度越大,全日分潮的影响越大,潮流类型趋向于全日潮流。

2) 从潮流运动形式和椭圆分布来看,半日分

潮 M_2 和 S_2 的潮流以往复流为主,近海岸为西南—东北走向,远海岸为南北走向, M_2 分潮的椭圆长轴明显大于 S_2 分潮;随着等深线密度的增大,半日分潮 M_2 和 S_2 的潮流运动形式趋向于旋转流;全日分潮 O_1 、 K_1 的椭圆长轴相等,其值在 M_2 和 S_2 分潮椭圆长轴之间,运动形式以顺时针旋转流为主;随着等深线密度增大, O_1 分潮潮流运动形式趋向于旋转流, K_1 分潮潮流运动形式趋向于往复流。

3) 最大可能潮流流速分布从西南向东北方向逐步增大,最大值为 $35\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现在观测海域的东北方向。

4) 余流分析结果表明,该海域的余流受东亚季风影响较大,季节变化特征显著,主要呈夏季形态(6月—8月)、冬季形态(9月—次年2月)和过渡形态(3月—5月)。夏季形态持续时间较短、仅为3个月,流向东北,平均流速 $29\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; 冬季形态持续时间最长、达到6个月,流向西南,流速大于夏季形态,平均流速 $36\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; 过渡形态持续3个月,为冬季形态向夏季形态的转变期,风生流影响小,平均流速 $13\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 明显小于夏季和冬季形态,流向分布较复杂。从全年来看,西南向流动的时间最长,海南中东部表层海水物质输运自东北向西南。

参考文献 References

陈江, 吴雄斌, 文必洋, 等, 2005. 采用便携式天线的近海海洋表面流探测[J]. 武汉大学学报(理学版), 51(1): 105–108.
CHEN JIANG, WU XIONGBIN, WEN BIYANG, et al, 2005. Ocean surface current detection by HF Ground Wave Radar With Portable Antenna System[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 51(1): 105–108 (in Chinese with English abstract).
胡冬, 陈希, 张守业, 等, 2015. 南海东沙群岛南侧海域的潮流余流特征[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 16(4): 368–373. HU DONG, CHEN XI, ZHANG SHOUYE, et al, 2015. Characteristics of tide and residual current south of Dongsha island in South China Sea[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 16(4): 368–373 (in Chinese with English abstract).
吉会峰, 李用留, 高清清, 等, 2017. 基于地波雷达观测资料的烂沙洋海域表层海流特征研究[J]. 海洋预报, 34(5): 64–73.

JI HUIFENG, LI YONGLIU, GAO QINGQING, et al, 2017. Surface current characteristics analyzed by HF Surface Wave Radar data in Lanshyang sea area[J]. Marine Forecasts, 34(5): 64–73 (in Chinese with English abstract).
经志友, 齐义泉, 华祖林, 2008. 南海北部陆架区夏季上升流数值研究[J]. 热带海洋学报, 27(3): 1–8. JING ZHIYOU, QI YIQUAN, HUA ZULIN, 2008. Numerical study on summer upwelling over northern continental shelf of South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 27(3): 1–8 (in Chinese with English abstract).
刘科峰, 蒋国荣, 陈奕德, 等, 2014. 基于卫星漂流浮标的南海表层海流观测分析[J]. 热带海洋学报, 33(5): 13–21. LIU KEFENG, JIANG GUORONG, CHEN YIDE, et al, 2014. Analysis of upper-ocean surface currents of the South China Sea derived from satellite-tracked drifter data[J]. Journal of Tropical Oceanography, 33(5): 13–21 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- 卢燕, 李泽文, 李淑江, 等, 2017. 海南万宁近岸余流特征分析[J]. 海洋科学进展, 35(1): 53–61. LU YAN, LI ZEWEN, LI SHUJIANG, et al, 2017. Subtidal current in the southeast offshore area of Hainan[J]. Advances in Marine Science, 35(1): 53–61 (in Chinese with English abstract).
- 沈志奔, 2014. 高频地波雷达海流应用研究[D]. 武汉: 武汉大学. SHEN ZHIBEN, 2014. Applications of surface ocean currents measured by high frequency surface wave radar[D]. Wuhan: Wuhan University (in Chinese with English abstract).
- 孙湘平, 2006. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社 (in Chinese).
- 吴雄斌, 杨绍麟, 程丰, 等, 2003. 高频地波雷达东海海洋表面矢量流探测试验[J]. 地球物理学报, 46(3): 340–346. WU XIONGBIN, YANG SHAOLIN, CHENG FENG, et al, 2003. Ocean surface currents detection at the eastern china sea by HF surface wave radar[J]. Chinese Journal of Geophysics, 46(3): 340–346 (in Chinese with English abstract).
- 谢玲玲, 张书文, 赵辉, 2012. 琼东上升流研究概述[J]. 热带海洋学报, 31(4): 35–41. XIE LINGLING, ZHANG SHUWEN, ZHAO HUI, 2012. Overview of studies on Qiongdong upwelling[J]. Journal of Tropical Oceanography, 31(4): 35–41 (in Chinese with English abstract).
- 许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 等, 2013. 2006 年夏季琼东、粤西沿岸上升流研究[J]. 海洋学报, 35(4): 11–18. XU JINDIAN, CAI SHANGZHAN, XUAN LILI, et al, 2013. Study on coastal upwelling in eastern Hainan Island and western Guangdong in summer, 2006[J]. Acta Oceanologica Sinica, 35(4): 11–18 (in Chinese with English abstract).
- 杨华, 吉会峰, 高清清, 等, 2019. 高频地波雷达观测的苏北辐射沙洲南部海域夏季表层海流特征[J]. 海洋学报, 41(5): 1–11. YANG HUA, JI HUIFENG, GAO QINGQING, et al, 2019. Summer time surface current characteristics in the southern region of Subei radial sand ridges detected by HF surface wave radar[J]. Acta Oceanologica Sinica, 41(5): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- 中华人民共和国交通部, 1988. 港口工程技术规范(1987)上卷[M]. 北京: 人民交通出版社: 393–399 (in Chinese).
- 朱大勇, 李立, 郭小钢, 2013. 台湾海峡南部浅滩以西表层流场的季节与年际变化[J]. 科学通报, 58(26): 2737–2744. ZHU DAYONG, LI LI, GUO XIAOGANG. Seasonal and interannual variations of surface current in the southern Taiwan Strait to the west of Taiwan Shoals[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(033): 4171–4178 (in Chinese with English abstract).
- 朱大勇, 李炎, 郭小钢, 等, 2013. 高频地波雷达海流验证研究述评[J]. 热带海洋学报, 32(4): 1–7. ZHU DAYONG, LI YAN, GUO XIAOGANG, et al, 2013. Review of studies on the validation of surface currents measured by high-frequency radar[J]. Journal of Tropical Oceanography, 32(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- 朱怀鑫, 俎婷婷, 李健, 等, 2018. 基于高频地波雷达观测的粤西近海潮流潮能分析[J]. 热带海洋学报, 37(5): 25–32. ZHU HUAIXIN, ZU TINGTING, LI JIAN, et al, 2018. Analysis of tidal current and tidal energy on the west coast of Guangdong Province based on High Frequency Ground Wave Radar observation[J]. Journal of Tropical Oceanography, 37(5): 25–32 (in Chinese with English abstract).
- CAPODICI F, COSOLI S, CIRAIOLO G, et al, 2019. Validation of HF radar sea surface currents in the Malta-Sicily Channel[J]. Remote Sensing of Environment, 225: 65–76.
- COSOLIZ S, DRAGO A, CIRAIOLO G, et al, 2015. Tidal currents in the Malta-Sicily Channel from high-frequency radar observations[J]. Continental Shelf Research, 109: 10–23.
- PAWLOWICZ R, BEARDSLEY R, LENTZ S, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 28(8): 929–937.
- SHEN ZHIBEN, WU XIONGBIN, FEI YUEJUN, et al, 2013. Surface tidal currents in the open sea area to the east of the Zhoushan Islands measured with high frequency surface wave radar[J]. Acta Oceanologica Sinica, 32(10): 5–10.
- ULLMAN D S, CODIGA D L, 2004. Seasonal variation of a coastal jet in the Long Island Sound outflow region based on HF radar and Doppler current observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 109(C7): C07S06, doi: 10.1029/2002JC001660.
- ZHOU HAO, WEN BIYANG, 2015. Portable high frequency surface wave radar OSMAR-S[M]//INTELLIGENT ENVIRONMENTAL SENSING. Switzerland: Springer International Publishing: 79–110.