

舟山群岛海域冬季流场特征研究*

闫昌源¹ 陈 栋¹ 吴文凡² 顾艳镇¹ 刘子洲² 翟方国²

(1. 浙江大学海洋学院 浙江舟山 316021; 2. 中国海洋大学海洋与大气学院 山东青岛 266100)

摘要 中街山列岛国家级海洋牧场位于中国浙江省舟山市舟山群岛海域, 其建设有利于促进当地渔业发展, 保护该海域生态环境。基于中街山列岛国家级海洋牧场附近两个站点 2020 年 10 月 21 日至 2021 年 2 月 28 日期间的海流观测资料, 利用调和分析、合成分析等方法, 研究了舟山群岛海域冬季流场的时空变化特征及其影响机制。研究结果表明, 两站点处潮流均为正规半日潮, 以 M_2 和 S_2 占主, 各主要分潮潮流均为往复流; 潮流、余流流向均为西北-东南流向, 与站点所处的狭窄水道主轴方向一致, 说明地形因素影响明显; 同时, 观测站点处水体的垂向平均动量平衡分析表明, 在沿水道主轴方向上, 余流受盛行风场控制, 风场转向会导致余流转向, 而在垂直于水道主轴方向上, 由于受水道两侧岸线的支撑作用, 水体在近岸堆积, 故在该方向上主要为正压梯度力与科氏力的平衡, 反应了地形对流场特征的影响。研究成果揭示了舟山群岛海域冬季的流场特征及其主要影响机制, 对实现此海域内海洋牧场的精细化管理具有指导意义。

关键词 余流; 舟山群岛; 海洋牧场; 合成分析

中图分类号 P717 doi: 10.11693/hyhz20220900238

中国拥有约 1.8 万 km 陆地岸线、1.4 万 km 岛屿岸线, 海洋资源丰富, 是世界第一渔业大国(杨红生等, 2019)。然而, 近些年来的过度捕捞、海水富营养化等问题已严重影响到了中国渔业的可持续发展。在此背景下, 海洋牧场的建设被认为是一种合理的解决方案(阙华勇等, 2016; 杨红生, 2016; 李忠义等, 2019; 孔德晨, 2022)。

中国海岸线漫长, 岛礁众多, 具备建设海洋牧场的优越条件, 而且中国政府也十分重视海洋牧场的建设, 目前辽宁、山东、浙江等省份的海洋牧场建设已取得一定成果(王伟定等, 2016)。舟山市位于浙江省东北部, 坐拥中国最大的舟山渔场, 被誉为“东海渔仓”, 建有中街山列岛、马鞍列岛等国家级海洋牧场示范区(吴伟等, 2020), 因此有必要对舟山群岛海域流场进行深入研究, 了解此海域的水动力环境, 以期提高海洋牧场的渔情预报能力。

东海是西北太平洋的一个边缘海, 西侧有广阔

的大陆架, 东侧有冲绳海槽, 大陆架上方水深浅于 200 m, 自西向东水深增加, 最大深度在 2 000 m 以上(Liu *et al*, 2021a)¹。具体而言, 本文所研究的舟山群岛海域位于东海西北海域, 邻近长江入海口, 此海域具有由许多岛屿、海湾和水道组成的复杂岸线, 存在深度达 100 m 的深水道(Liu *et al*, 2021b)。

总体而言, 东海环流系统是由自北向南的沿岸流系和自南向北的黑潮流系组成的气旋式环流系统(苏育嵩, 1986), 而东海的环流由东海内部因素如长江入海、风应力、潮汐和来自台湾海峡、对马海峡、黑潮的外部因素共同驱动(Gan *et al*, 2016)。

作为东亚最大河流, 长江是该海域浮力强迫的主要来源。长江的流量有着显著的季节性变化, 夏季流量最强, 冬季流量最弱。长江向东海大陆架上方流出大量低密度水, 低密度水浮于东海密度较大的水之上, 形成了一个向东扩张的浮力羽流, 称长江羽流(Mei *et al*, 2015)。

* 舟山科学计划项目, 2022C81010 号; 浙江省重点研发计划, 2020C03012 号; 浙江省科技创新领军人才项目, 2019R52045 号。
闫昌源, 硕士研究生, E-mail: yanchangyuan@zju.edu.cn

通信作者: 陈 栋, 工程师, E-mail: chendong@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-09-17, 收修改稿日期: 2022-12-05

由于受到东亚季风系统的调节,风应力与长江类似,在不同季节有显著区别,其主导了沿岸流系,并影响长江羽流的传播(Wu *et al.*, 2018)。冬季,北风占据主导地位,长江冲淡水在北风的作用下沿岸流向西南方向,形成了冷且低盐的浙闽沿岸流(Pan *et al.*, 2013)。夏季,西南季风导致了沿岸海域东北向的流动,增强了台湾暖流北向及西北向的入侵(Wang *et al.*, 2019)。这些研究着眼于东海上方风场对该海域环流的影响,但是也有研究认为日本东部上方的风场导致了东海陆架环流的东北向流动(Yang *et al.*, 2020)。

影响东海环流的东海内部因素中,除长江、风应力外,潮汐通过其显著的空间不规则性而建立的斜压梯度和其导致的混合在很大程度上主导了东海大陆架上方的水和动量交换(Lin *et al.*, 2020)。前人的研究认为,浙江近海大部分海区潮流属于不正规半日潮流, M_2 分潮潮流椭圆长轴的走向大体为西北-东南或西-东向,余流则冬强夏弱,冬季往南,夏季往北(陈倩等, 2003),且东海不同海域余流的主要影响因素不同,长江冲淡水和浙闽沿岸流对近岸海域的余流影响较大,台湾暖流则对外海海域的余流影响较大(张慧等, 2011)。

除上文提到的东海内部因素外,黑潮、台湾暖流这两种外部因素对东海环流也有着重要影响。黑潮次表层水从台湾岛东侧向东海入侵,入侵的水团向东北方向延伸至浙江沿岸(Yang *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2018)观测资料表明,冬季,台湾暖流与浙闽沿岸流在近岸区域向着反方向流动,台湾暖流向北,浙闽沿岸流向南(Huang *et al.*, 2016)。

前人已对东海海域流场特征做了大量研究,但落脚于舟山群岛海域流场特征的研究较为匮乏,而舟山群岛海域岸线复杂、岛屿众多,海域内建有中街山列岛、马鞍列岛等国家级海洋牧场示范区,因此有必要对舟山群岛海域流场进行深入研究。由于长期观测资料的缺乏,现有的研究大部分基于航测数据或数值模拟结果,前者在持续时间上有所欠缺,后者的结果则有待进一步证实,而本文利用在舟山群岛海域布放的长期定点观测设备,揭示了此海域的冬季流场特征及影响机制,可以对现有的研究进行补充验证,且有利于对此海域内的水动力环境进行更深刻的认知,将进一步推动此海域内的海洋牧场建设。

1 数据介绍

本文采用的海流资料由坐底式声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profilers, ADCP) Nortek“阔龙”在中街山列岛海洋牧场两个站点处(站点1位于 $130^{\circ}11'35.77''N$, $122^{\circ}41'32.60''E$; 站点2位于 $130^{\circ}11'34.77''N$, $122^{\circ}41'29.29''E$)观测获得,站点位置见图1;仪器频率为1 MHz,时间范围为2020年10月21日至2021年2月28日。设置仪器垂直测量层数为20层,每层间隔1 m,传感器自海底向上发射波束,然后返回各层深度处的流速数据。考虑到仪器在表层的观测误差,本文根据站点处实时水深及测得的实时流速数据来确定垂直有效层数,水深数据由同时期观测系统搭载的温盐深剖面仪(conductivity-temperature-depth, CTD)提供。

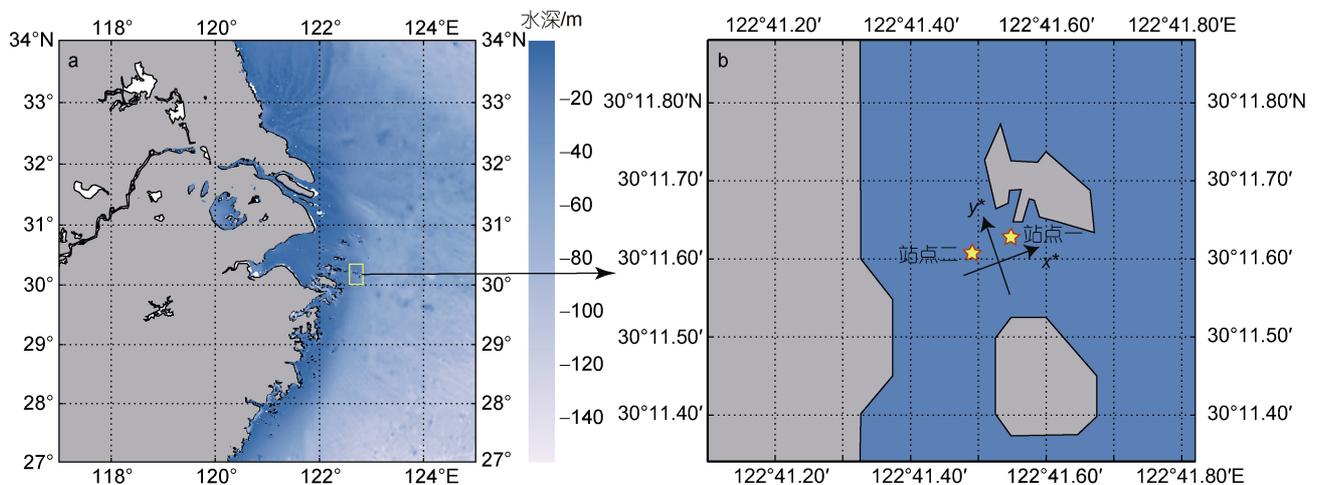


图1 站点位置分布图

Fig.1 Locations of the sites

注: a 为中国东部海域水深分布; b 为站点所在海域岛屿分布; 坐标系 (x^*, y^*) 为重构后用于下文动量诊断的新坐标系

本文采用的辅助数据分别来自: (1) 欧洲中期天气预报中心(European center for medium-range weather forecast, ECMWF)发布的海上 10 m 风矢量数据[ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present (copernicus.eu)](Hersbach *et al.*, 2016), 数据时间范围为 2020 年 10 月 21 日至 2021 年 2 月 28 日, 时间分辨率 1 h, 空间分辨率 0.25° (经度) $\times 0.25^{\circ}$ (纬度)(<http://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>)。 (2) 混合坐标海洋模式(the hybrid coordinate ocean model, HYCOM)流场分析数据(GOFS 3.1: 41-layer HYCOM + NCODAGlobal 1/12° Analysis), 数据时间范围为 2020 年 10 月 21 日至 2021 年 2 月 28 日, 时间分辨率 3 h, 空间分辨率 0.08° (经度) $\times 0.04^{\circ}$ (纬度) (<https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis>)。 (3) 航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)水深数据(SRTM15+: GLOBAL BATHYMETRY AND TOPOGRAPHY AT 15 ARCSECONDS)(Tozer *et al.*, 2019), 空间分辨率 0.004° (经度) $\times 0.004^{\circ}$ (纬度) (https://topex.ucsd.edu/WWW_html/stsrtm15_plus.html)。

2 结果分析

2.1 潮流特征

原始海流中包括了潮流、余流两个部分, 潮流具有显著周期, 而余流主导着水交换过程, 对海水中悬浮物质输运及扩散有直接影响, 所以对两者的研究缺一不可。站点 1 处平均水深为 10 m, 站点 2 处平均水深为 11.5 m, 由于观测仪器的盲区为 0.2 m, 结

合考虑涨落潮导致的水位变化, 故在站点 1 处将水下 0~1 m、5~6 m、8~9 m 三个水层的垂向平均流速作为表层、中层、底层流速, 在站点 2 处将水下 0~1 m、5~6 m、9~10 m 三个水层的垂向平均流速作为表层、中层、底层流速。本文通过 S_TIDE 调和和分析程序包(Pan *et al.*, 2018), 计算得到不同水层处五个主要分潮(M_2, S_2, N_2, O_1, K_1)的潮流椭圆。

如图 2 所示, 两站点处 M_2, S_2, N_2, O_1, K_1 分潮对应的潮流椭圆大小依次递减(潮流椭圆参数见表 1、表 2)。从表层至底层, 各分潮潮流椭圆递减, 但由于站点 1 处水深更浅, 所以相比之下, 站点 1 处潮流椭圆随深度增加而衰减的程度大于站点 2 处潮流椭圆的衰减。两站处潮流椭圆均呈西北-东南走向, 而站点 1 处的北侧岛屿也呈西北-东南走向(图 1b), 潮流椭圆长轴与两站点北侧岛屿岸线平行, 由此说明地形边界对两站点处潮流有潜在影响。随深度增加, 两站点处的潮流椭圆基本不发生偏转且长轴远大于短轴, 前者体现了潮流具有很强的正压性, 后者说明此处潮流是往复流。

2.2 功率谱分析

上文研究表明两站点处潮流变化特征在垂向上具有一致性, 为更好地了解流场的变化规律, 本文对两站点处的流场进行垂向平均, 并对垂向平均后的流场进行功率谱分析。

如图 3 所示, 同一站点处经向和纬向两个方向的流动具有一致的变化趋势, 两站点处均为半日周期

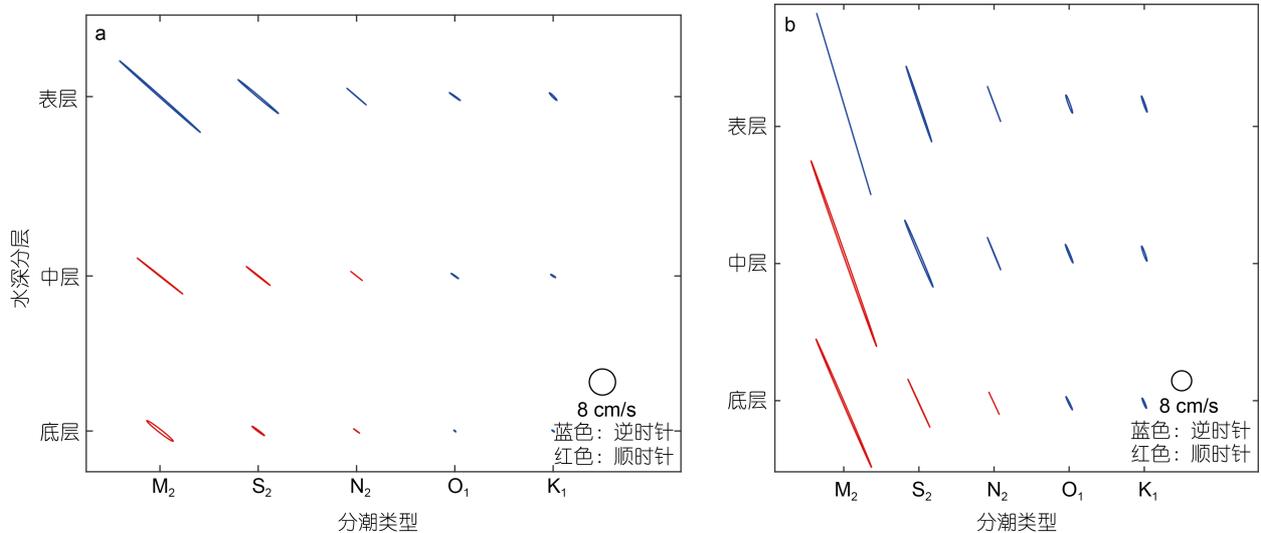


图 2 潮流椭圆图

Fig.2 The tidal current ellipses
注: a、b 分别为站点 1 处、站点 2 处潮流椭圆

表 1 站点 1 潮流椭圆主要参数
Tab.1 Main parameters of tidal current ellipses in Station 1

水层	分潮类型	长轴长度/(cm/s)	短轴长度/(cm/s)	倾角/(°)	旋转率	潮流类型
表层	M ₂	32.9	0.4	138	0.01	正规半日潮
	S ₂	16.1	0.5	139	0.03	
	N ₂	7.7	0.0	139	0.01	
	O ₁	4.1	0.2	144	0.07	
	K ₁	3.2	0.4	134	0.14	
中层	M ₂	17.7	0.2	141	-0.01	正规半日潮
	S ₂	9.3	0.2	141	-0.02	
	N ₂	4.5	0.0	141	0.00	
	O ₁	2.7	0.2	144	0.09	
	K ₁	1.7	0.3	147	0.17	
底层	M ₂	13.1	0.8	142	-0.06	正规半日潮
	S ₂	6.3	0.4	144	-0.07	
	N ₂	2.9	0.0	144	-0.02	
	O ₁	1.2	0.2	144	0.23	
	K ₁	1.2	0.2	147	0.17	

表 2 站点 2 潮流椭圆主要参数
Tab.2 Main parameters of tidal current ellipses in Station 2

水层	分潮类型	长轴长度/(cm/s)	短轴长度/(cm/s)	倾角/(°)	旋转率	潮流类型
表层	M ₂	75.7	0.4	106	-0.00	正规半日潮
	S ₂	31.9	0.5	108	0.01	
	N ₂	15.0	0.0	110	0.00	
	O ₁	7.7	0.7	110	0.10	
	K ₁	6.8	0.5	109	0.08	
中层	M ₂	78.9	1.0	109	-0.01	正规半日潮
	S ₂	29.1	0.7	112	0.02	
	N ₂	13.9	0.1	112	0.01	
	O ₁	8.0	0.5	112	0.07	
	K ₁	8.0	0.6	109	0.10	
底层	M ₂	56.0	0.6	113	-0.01	正规半日潮
	S ₂	21.1	0.1	114	-0.00	
	N ₂	9.7	0.0	114	-0.00	
	O ₁	5.8	0.4	116	0.08	
	K ₁	4.4	0.5	112	0.13	

频段对应的谱峰值最高,但站点 2 处的谱峰值整体大于站点 1,前者说明两站点处可能存在强烈的半日潮,后者说明站点 2 处流速变化更剧烈。站点 1 处 1/4 日周期和半日周期频段处对应谱值较大,相比之下,站点 2 处只有半日周期频段处存在一个较为显著的谱峰,但 1/4 日周期波动不是本文研究重点,故不做进一步研究。站点 1 处纬向流动谱值大于经向流动,说明站点 1 处流动变化主要表现在纬向方向,站点 2 处

情况则与之相反,经向流动谱值大于纬向流动,结合两站点处地形考虑,站点 1 处北侧存在岛屿,阻碍站点 1 处的经向流动,所以经向流动的谱值较小,站点 2 则远离北侧岛屿,经向流动受到的阻碍小,所以经向流动的谱值较大。

2.3 余流变化特征

经验模态分解(empirical model decomposition, EMD)方法可对非平稳信号进行处理,已被证实可以

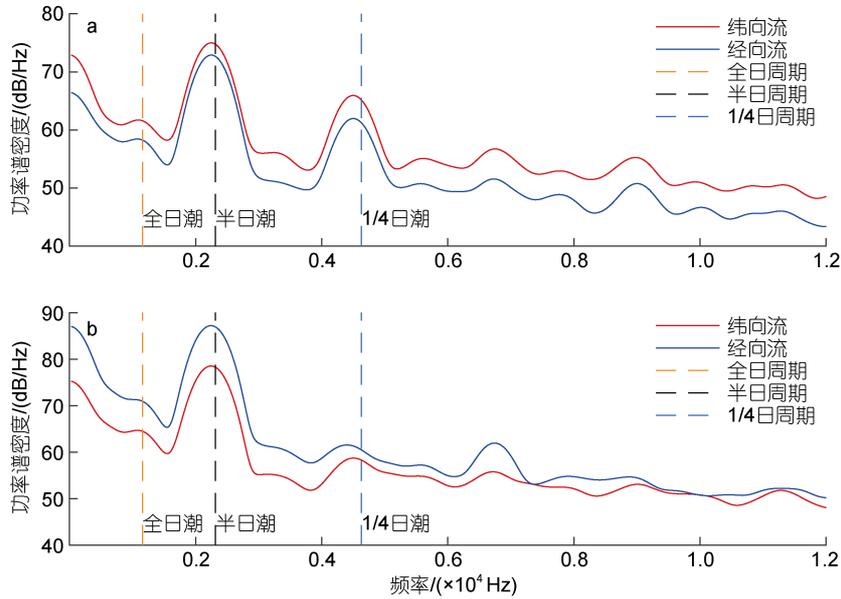


图 3 海流资料功率谱分析图

Fig.3 Power spectrum analysis of ocean current data

注: a、b 是分别对站点 1、站点 2 海流数据进行功率谱分析的结果, 为使结果对比更清晰, 本文使用 dB/Hz 作为功率谱密度单位

实现从实测资料中分离得到余流(王国龙等, 2010)。本文首先对实测海流数据进行调和与分析得到周期性流动, 然后从实测海流数据中剔除周期性流动以得到重构后的流矢量, 在此基础上, 对重构后的流矢量进行 48 h 低通滤波即得到余流。本文在明确各站点处潮流特征的基础上, 对站点所处海域的余流进行深入探讨。

2.3.1 余流时间变化特征 图 4 为两站点处各水层观测时间段内日平均余流。与潮流一致, 两站点处余流从表层至底层方向保持一致且大小衰减, 但站

点 1 处余流衰减的程度更为剧烈。站点 1 处日平均纬向余流、经向余流的最大值分别为 23、38 cm/s, 站点 2 处日平均纬向余流、经向余流的最大值分别为 21、61 cm/s, 站点 2 处经向余流明显强于其余流动。两站点处余流流向主要为西北或东南方向, 结合上文中两站点处潮流流向也以西北-东南向为主, 说明两站点处西北-东南走向的地形边界对潮流、余流流向有显著影响。此外, 站点 1 处北侧的岸线限制了站点 1 处的经向流动, 而站点 2 距离北侧岸线更远, 所以站点 2 处余流流速更大, 且更偏向于南北方向。

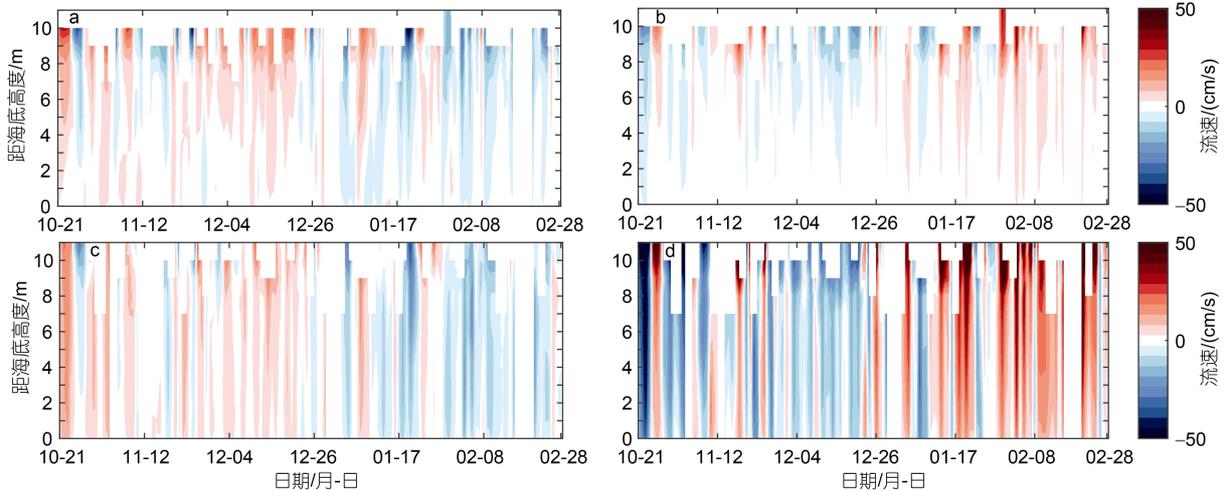


图 4 日平均余流时间序列图

Fig.4 Time series of daily mean residual flow

注: a-d 分别为站点 1 处纬向、经向, 站点 2 处纬向、经向日平均余流

从图 4 可以看出, 观测时段内两站点处余流方向发生了一次明显转向。具体而言, 在 2021 年 1 月份之前, 两站点处东南向流动多于西北向流动, 1 月份之后转变为西北向流动占优, 且直至观测结束, 西北向流动一直得以维持, 后文将研究余流转向的影响机制。

2.3.2 余流空间变化特征 上文已对站点处余流的时间变化特征进行了研究, 并指出站点处余流于 2021 年 1 月份发生转向。为进一步探究两站点处余流转向的现象是否为一种局地现象, 下文将利用 HYCOM 流场数据, 从余流的空间分布出发, 进一步研究观测站点处余流转向现象。

两站点位于狭长水道, HYCOM 没有很好地刻画出这一地形特征, 所以 HYCOM 纬向流数据与观测数据差距较大, 但也正是因为两站点位于狭长水道, 所以其流速主要体现在经向方向, 而 HYCOM 经向

流数据与观测数据的契合程度很高, 模拟出了余流转向现象, 也能体现出两站点之间的差异, 故认为 HYCOM 流场数据可以用于本文的研究。

将 HYCOM 各深度经向余流数据进行双线性插值, 得到两站点位置处不同深度余流, 插值结果与观测结果对比如图 5。两种数据在两站点水下 1 m 深度处都表现出很好的一致性, 相关系数分别为 0.80 和 0.82, 但由于两站点处水深及地形的差异(站点 1 更靠近岸线, 水深更浅), 随着深度增加, 站点 1 处的余流观测数据迅速衰减, 站点 2 处的余流观测数据衰减较慢, 而 HYCOM 数据中的余流衰减也较慢, 所以在较深水深处, HYCOM 数据与站点 1 处观测数据差距较大, 与站点 2 处数据更加契合。考虑到站点 1 水深较浅、过于靠近岸线, 余流具有局地特殊性, 所以站点 2 处观测数据与 HYCOM 数据的对比说明利用 HYCOM 数据进行下一步研究是可行的。

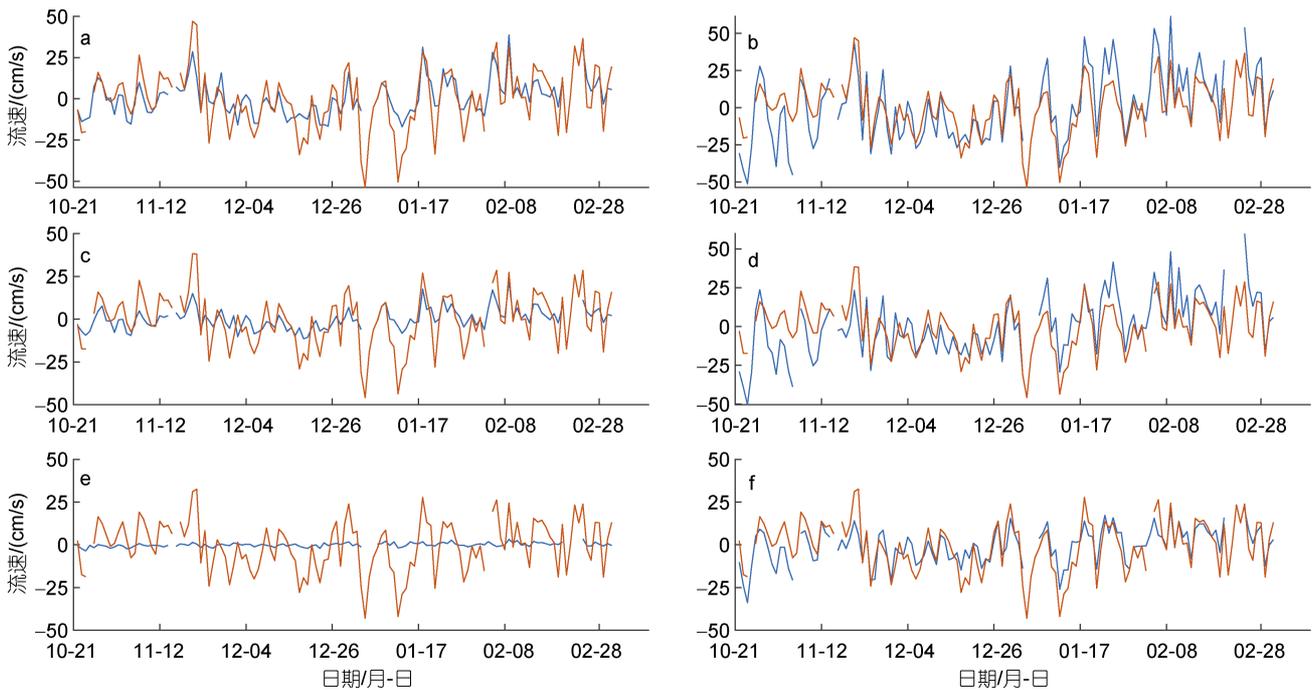


图 5 混合坐标海洋模式(HYCOM)数据与观测数据对比图

Fig.5 Comparison between HYCOM (the hybrid coordinate ocean model) data and observed data

注: 蓝色曲线是观测数据, 红色曲线是 HYCOM 数据; a、b 为水下 1 m 深度站点 1、站点 2 处两种数据对比; c、d 为水下 6 m 深度站点 1、站点 2 处两种数据对比; e、f 为水下 9 m 深度站点 1、站点 2 处两种数据对比

在 HYCOM 流场数据可信的背景下, 利用合成分析, 探究站点处余流与大面流场的关系, 以期对余流 1 月份转向情况做出解释。本文采用的合成分析方法是在两站点处 2020 年 10 月 21 日至 2021 年 2 月 28 日共 131 d 的余流数据中, 选出东南向余流与西北

向余流最强烈的天数(各选 5 d), 分别求这两种情况下大面流场的时间平均, 最终得到当站点处余流处于不同流向时, 大面流场的对应情况。

不同深度处的大面合成流场以及合成流场差异显著性检验通过 95% 的区域如图 6 所示, 由于流场是

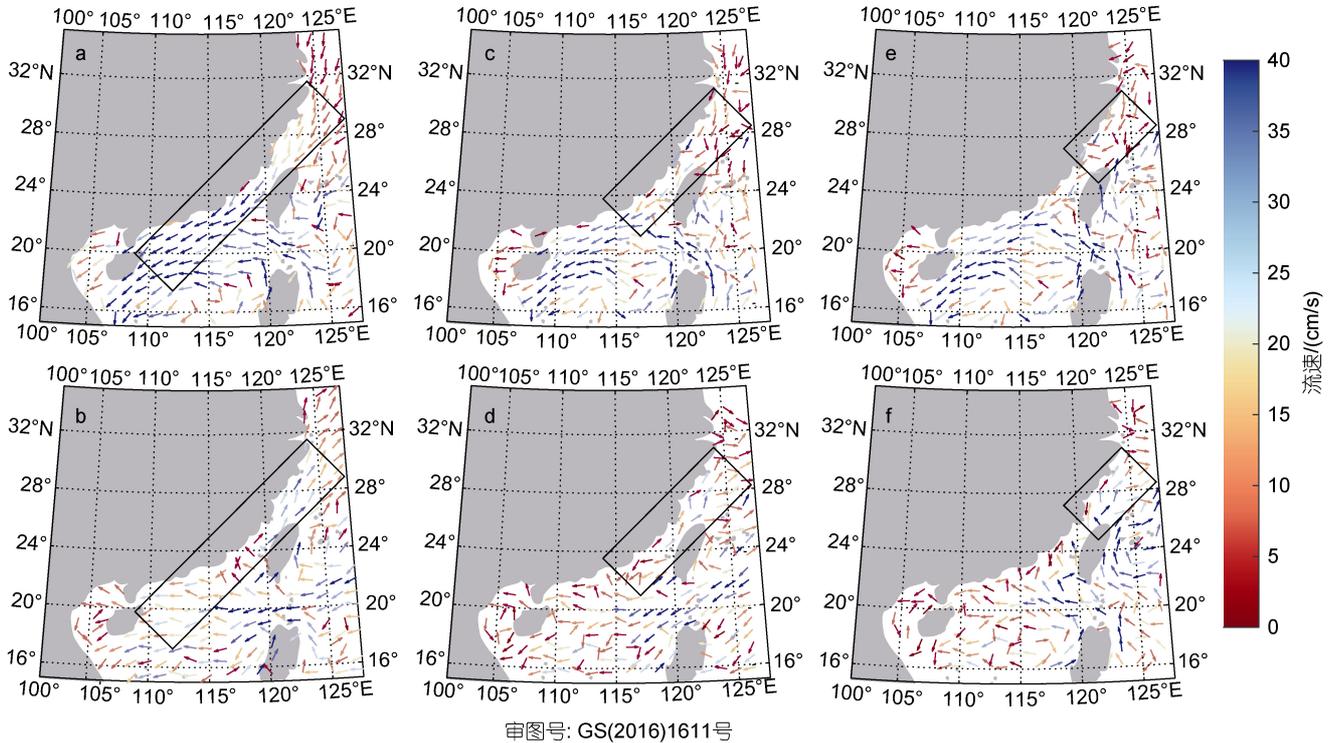


图6 不同深度处合成流场情况图

Fig.6 Composite flow field at different depths

注: a、b 分别为站点处东南流占优、西北流占优情况下, 水下 1 m 深度处大面流场合成结果; c、d 分别为站点处东南流占优、西北流占优情况下, 水下 6 m 深度处大面流场合成结果; e、f 分别为站点处东南流占优、西北流占优情况下, 水下 9 m 深度处大面流场合成结果; 矩形框出的区域是合成流场差异显著性检验通过 95% 区域

二维矢量, 故本文使用二维统计检验方法进行检验(施能等, 2004)。在水下 1 m 深度处, 合成流场差异显著性检验通过 95% 的区域自长江入海口, 沿着中国东南岸线延伸, 穿过台湾海峡直至海南岛。这说明在水下 1 m 深度处, 当站点处余流处于不同流向时, 该海域处的流场变化显著, 与站点处余流表现出一致性。在水下 1 m 深度处, 当站点处余流为东南流向时, 长江入海口至台湾海峡海域流场为沿着岸线向南, 台湾海峡至海南岛海域流场为沿着岸线向西南方向流动。当站点处余流为西北流向时, 长江入海口至台湾海峡海域流场变为沿着岸线向北, 台湾海峡至海南岛海域的西南向流场也明显减弱。

相比于水下 1 m 深度处的大面流场合成结果, 水下 6 m 深度处和水下 9 m 深度处, 合成流场中差异显著性检验通过 95% 的区域范围明显减小。

综上所述, 当站点较浅水深处的余流转向时, 从长江入海口至海南岛处的沿岸表层余流也发生转向, 即与站点处余流具有一致的变化趋势, 而随着深度增加, 与站点处余流具有一致变化趋势的区域缩小

为长江入海口至台湾海峡海域。

3 讨论

基于上文对站点处余流特征进行的分析, 本节将结合 ERA5 海上 10 m 风场数据, 研究站点处余流的影响机制。

3.1 驱动站点处余流的动力机制

上文对余流的研究表明, 站点处余流主要表现为西北或东南方向, 故下文根据余流的主要流向重新构建了一个坐标系, 以北偏西 24° 为 y^* 轴, 以指向偏北的方向为 y^* 轴正方向, 以与 y^* 轴垂直且指向偏东的方向为 x^* 轴正方向(图 1b), 并将余流及风矢量重新投影至新坐标系下。

将动量方程从海底至海面积分(Zhu *et al*, 2015), 得到新坐标系下沿 y^* 轴及沿 x^* 轴方向深度平均的动量方程, 如公式(1)和公式(2)所示。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{\tau_{wy}}{\rho h} + A_h \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + f v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{\tau_{wx}}{\rho h} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

其中, v 为新坐标系下沿 y^* 轴方向深度平均余流, u 为新坐标系下沿 x^* 轴方向深度平均余流; f 为科氏参数; h 为水深; P 为深度平均压强; ρ 为深度平均海水密度; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为 x^* 轴方向、 y^* 轴方向上的底摩擦力; τ_{wx} 、 τ_{wy} 分别为 x^* 轴方向、 y^* 轴方向上的风应力; A_h 为水平湍黏性系数。计算中, f 取 $5.0 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$, $\tau_{bx} = \rho C_d \sqrt{u^2 + v^2} u$, $\tau_{by} = \rho C_d \sqrt{u^2 + v^2} v$, $A_h = 0.0025$ 为底摩擦系数, $\tau_{wx} = C_w \rho_a \sqrt{u_{wind}^2 + v_{wind}^2} u_{wind}$, $\tau_{wy} = C_w \rho_a \sqrt{u_{wind}^2 + v_{wind}^2} v_{wind}$, 其中 u_{wind} 、 v_{wind} 为新坐标系下 x^* 轴、 y^* 轴方向上的风速, $C_w = 10^{-3} \times (0.75 + 0.067 \times \sqrt{u_{wind}^2 + v_{wind}^2})$ 为中性拖曳系数(底摩擦系数、拖曳系数的值均与 HYCOM 的参数化方案一致), $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度(Smith *et al.*, 1975), A_h 取 $90 \text{ m}^2/\text{s}$ (Cáceres *et al.*, 2003)。

公式 1 及公式 2 中等号左侧第一项 $\left(\frac{\partial v}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial t}\right)$ 代表速度随时间的变化项, 等号左侧第二项及第三项 $\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}, u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ 代表平流项, 等号右侧第一项 $(-fu, +fv)$ 代表科氏力项, 等号右侧第二项 $\left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}\right)$ 代表压强梯度力项, 进一步, 压强梯度力项可以分解为海面倾斜导致的正压梯度力项和海水密度在水平方向上存在差异导致的斜压梯度力项 $\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_p}{\partial y}\right)$, 其中 η 为海面高度, p_p 为由密度差异导致的压强, 等号右侧第三项 $\left(-\frac{\tau_{by}}{\rho h}, -\frac{\tau_{bx}}{\rho h}\right)$ 代表底摩擦力项, 等号右侧第四项 $\left(\frac{\tau_{wy}}{\rho h}, \frac{\tau_{wx}}{\rho h}\right)$ 代表风应力项, 等号右侧第五项及第六项 $\left(A_h \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, A_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$ 代表水平湍黏性项。由于部分时段内 HYCOM 流速数据存在缺测, 故图 7、图 8 中曲线在部分时间点处断裂。

从图 7a 可以看出, y^* 轴方向上主要是风应力项、

压强梯度力项及底摩擦力项三项平衡, 加速度项、平流项、科氏力项及水平湍黏性项可以忽略。在 y^* 轴方向上风应力项较强的时段内, 底摩擦力项数值也明显增大, 且在 2021 年 1 月份之前, 风应力项表现为 y^* 轴负方向(东南向), 此时段内西北向的底摩擦力项表明了余流方向为东南向, 结合余流时间序列及风场数据, 可认为 y^* 轴方向上主要是风对余流的直接驱动, 较大风速导致此方向上存在较强余流, 所以较强余流受到的底摩擦力也较大。此方向上, 压强梯度力项与底摩擦力项共同平衡风应力项, 而此方向的压强梯度力主要是由于海水密度在水平方向上存在差异导致的斜压梯度力, 但是在风应力项明显增强的时段内, 如 2020 年 11 月 20 日、2021 年 1 月 1 日、2021 年 1 月 8 日附近, 与风应力项反向的正压梯度力项明显增强, 说明显著增强的风应力会导致站点所处海域的海面在沿着风应力的方向上倾斜升高。

从图 8a 可以看出, 相比于 y^* 轴方向, x^* 轴方向上风应力项减小, 底摩擦力项减小, 科氏力项增大, 压强梯度力项增大, 科氏力项与压强梯度力项是主要平衡项, 表现出明显的地转流特征。造成 y^* 轴方向和 x^* 轴方向存在显著差异的主要原因是风应力项在 x^* 轴方向上分量较小, 由风驱动生成的余流较小, 所以较弱余流受到的底摩擦力也较小, 而 x^* 轴方向上较强的科氏力是由 y^* 轴方向上较强余流所导致的。 x^* 轴方向上正压梯度力项占比明显增加, 这是因为 y^* 轴方向上余流速度较大, 在科氏力的作用下, x^* 轴方向产生一定余流, 但站点东北、西南方向均存在海岛, 阻碍水体流动, 进而导致水体堆积, 引起海面倾斜, 产生了较强的正压梯度力。以 2020 年 11 月 23 日至 2020 年 12 月 26 日为例分析, 西北向的底摩擦力项说明此时段内余流为东南向(图 7a), 东南向的余流在科氏力的作用下向西南方向偏转, 但是两站点西南方向处的岛屿阻碍了余流向西南方向流动, 水体在岛屿附近堆积, 导致海面由东北至西南方向倾斜升高, 从而产生东北向的正压梯度力(图 8b), 与科氏力平衡。

综上所述, 站点所在海域内, y^* 方向上主要为底摩擦力与压强梯度力共同平衡风应力, 而 x^* 方向上主要为压强梯度力平衡科氏力, 表现出明显的地转流特征。 y^* 方向上, 较强的风应力直接驱动此方向上产生较强余流, 较强余流受到的底摩擦力也强, 而此方向上因海水密度在水平方向上存在差异产生了与风应力反向的较强的斜压梯度力, 故底摩擦力与斜压梯度力为主的压强梯度力共同平衡风应力。由

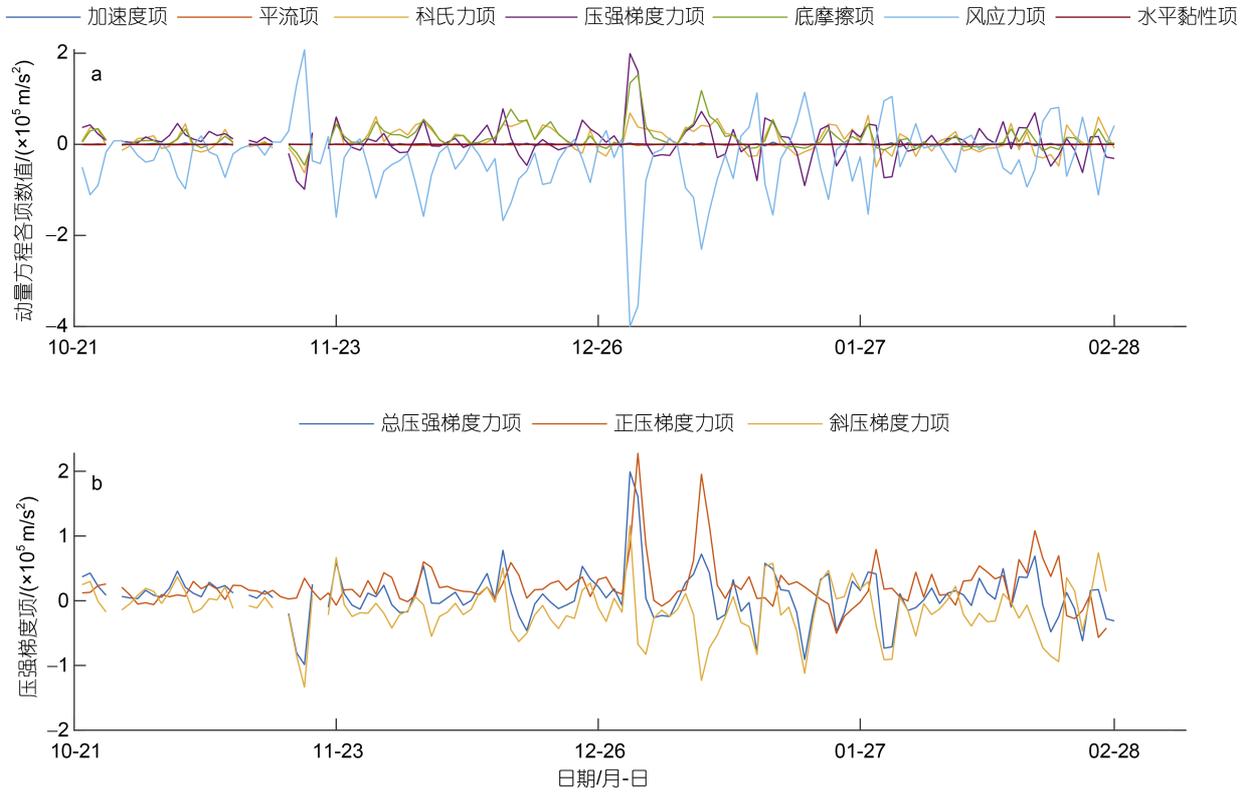


图 7 y^* 轴方向上动量方程各项贡献及压力梯度分解图

Fig.7 The terms in the momentum equation along the y^* axis and the decomposition of the pressure gradient

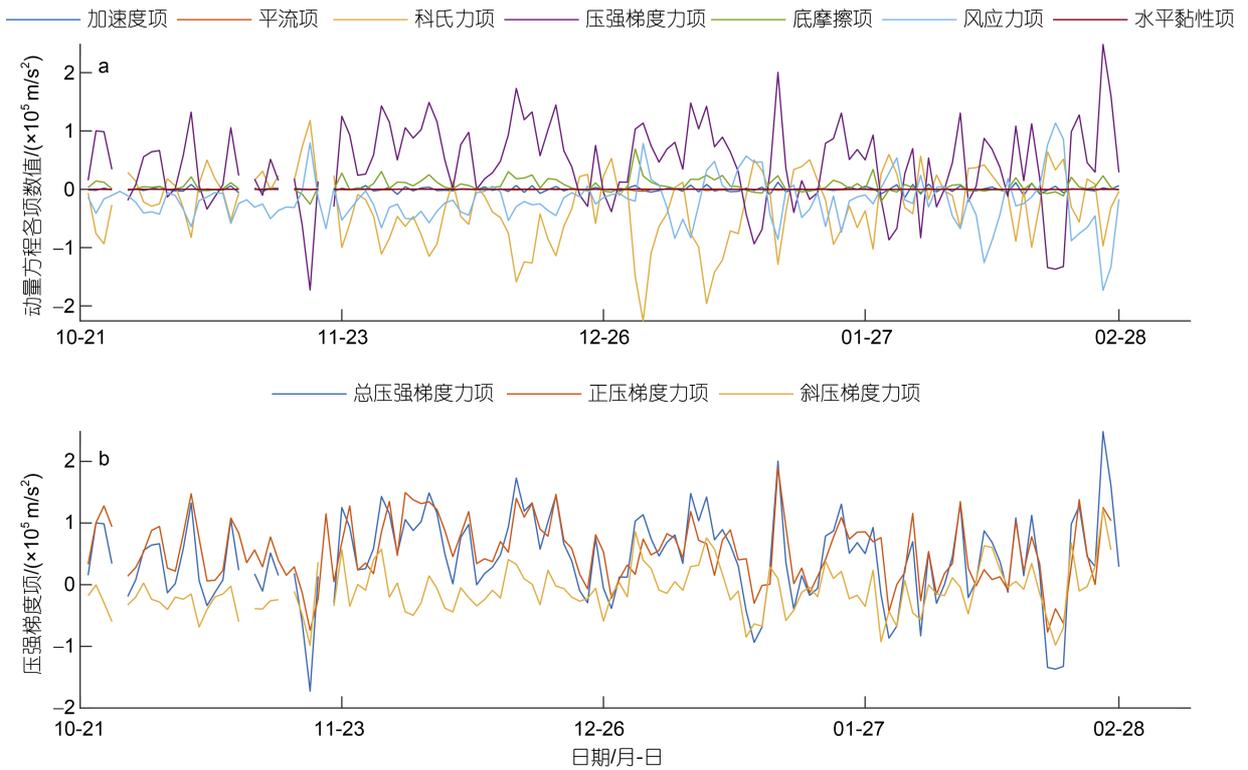


图 8 x^* 轴方向上动量方程各项贡献及压力梯度分解图

Fig.8 The terms in the momentum equation along the x^* axis and the decomposition of the pressure gradient

于科氏力的作用, y^* 方向上的余流在与其正交的方向上出现水体输运, 而站点东北、西南方向的海岛阻碍了水体流动, 所以 x^* 方向上出现海面倾斜, 引起较强的正压梯度力, 正压梯度力、斜压梯度力共同与科氏力平衡。

3.2 影响余流转向的动力机制

上文的研究明确了驱动站点处余流的动力机制, 在此基础上, 下文将进一步探究导致站点处余流于 2021 年 1 月份由东南向转为西北向的原因。上文指出水下 1 m 深度处, 长江入海口至海南岛处流场与站点处余流具有一致的变化趋势, 而且风应力对于站点处余流有直接影响, 所以考虑站点处余流及大面流场发生转向可能是对应海域的大面风场发生变化所致。

采用与上文一致的合成方法, 对海上 10 m 风场进行合成, 结果如图 9。当站点处余流为东南向时, 整个东海及南海上方均为北风, 但是当站点处余流为

西北向时, 台湾海峡以北海域上方风场转为南风, 台湾海峡以南海域上方的北向风强度也明显减弱, 故可初步认为影响站点处余流转向的主要因素是风。从图 7a 可以看出, 2021 年 1 月份之前, 风场只有一次明显地表现为 y^* 轴正方向(偏北向), 1 月份之后, 风场表现为 y^* 轴正方向的次数增加, 而这一时段内底摩擦力与风应力反向, 说明此时段内余流与风同向(上文指出站点处余流在各深度方向保持一致), 这进一步证明了风是影响余流方向的主导因素。此外, 前人的研究中也提及了风场变化会导致东海流场转向的这种情况。观测站点所处海域海流情况复杂, 但众多海流中对站点处余流影响明显的一支为台湾暖流, 而台湾暖流在冬季存在沿着东海大陆架逆北风流动的现象。这一逆流系统随着风应力的变化而变化, 当东北风减弱或转为南风时, 台湾暖流会随之增强(Huang *et al.*, 2016)。在高精度数值模拟中, 这一结论被进一步证实(Xuan *et al.*, 2017)。

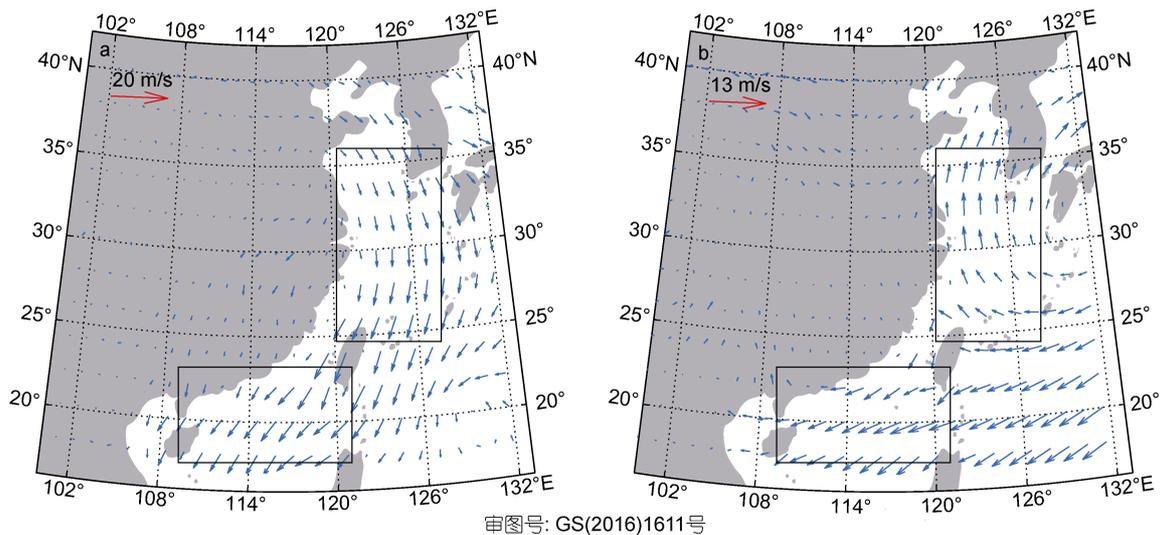


图 9 东南流占优及西北流占优情况下合成风场图

Fig.9 Composite wind field under the condition that southeast current dominates and northwest current dominates
注: a、b 为东南流占优、西北流占优时段内的合成风场; 矩形框出的区域是合成风场差异显著性检验通过 95% 区域

综上所述, 可认为风场转向是驱动站点处余流及长江入海口至台湾海峡海域余流转向的主要原因, 而且风场的变化也可以解释大面流场的合成分析中通过差异显著性检验的区域随深度增加而减小的现象。台湾海峡以北海域上方的风场(经向分量)强, 变化剧烈, 影响深度深, 所以至较深深度处此海域流场均与站点处余流具有一致变化趋势, 而台湾海峡以南海域上方的风场(经向分量)弱, 变化较小, 影响深度浅, 所以只有在较浅深度处与站点处余流具有一

致变化趋势。

4 结论

通过对舟山群岛海域两站点 2020 年 10 月 21 日至 2021 年 2 月 28 日观测海流数据的研究, 结合 HYCOM 流场数据、ERA5 海上 10 m 风场数据, 得到以下结论:

(1) 同一站点处经纬向流动具有一致的变化趋势, 两站点处潮流类型均为正规半日潮, M_2 和 S_2 是其主要

分潮, 所以功率谱分析中, 两站点处均是半日周期频段对应谱值最大, 但是站点 2 处流动变化更加剧烈。

(2) 站点 1 处日平均纬向余流、经向余流的最大值分别为 23、38 cm/s, 站点 2 处日平均纬向余流、经向余流的最大值分别为 21、61 cm/s, 两站处经向余流均强于其纬向余流, 这是因两站点位于一狭长水道内, 但站点 1 更靠近其北侧岛屿, 岛屿阻碍了站点 1 处的经向流动, 所以站点 1 处经向余流弱于站点 2 处经向余流。随着深度增加, 两站点处余流大小递减, 且站点 1 处余流衰减更为明显, 但衰减过程中两站点处各深度余流方向保持一致, 体现出明显正压性。两站点处潮流椭圆主轴和余流走向均与水道主轴方向一致, 说明地形对潮流、余流走向有明显影响。

(3) 西北-东南方向上, 站点所处狭窄水道内的余流受盛行风场控制, 形成了较大速度, 受到的底摩擦阻力也较大。而东北-西南方向上, 科氏力导致了水体运输, 但由于水道两侧岸线的支撑作用水体在近岸堆积, 从而引起较强的正压梯度力, 正压梯度力、斜压梯度力共同与科氏力平衡, 表现出明显的地转流特征。

(4) 当站点上方的北风减弱或转为南风时, 站点处余流由东南向转为西北向, 而且从长江入海口至海南岛海域的较浅水深处余流均与站点处余流具有一致的变化趋势, 但随着深度增加, 与站点处余流具有一致变化趋势的区域缩小为长江入海口至台湾海峡海域。

参 考 文 献

- 王伟定, 梁君, 毕远新, 等, 2016. 浙江省海洋牧场建设现状与展望[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 35(3): 181-185.
- 王国龙, 吴中鼎, 袁延茂, 等, 2010. 经验模态分解方法在潮流余流分离中的应用[J]. 海洋测绘, 30(2): 42-45.
- 孔德晨, 2022. 保障蓝色粮仓 海洋牧场作用大[J]. 中国食品工业(11): 52-55.
- 苏育嵩, 1986. 黄东海地理环境概况, 环流系统与中心渔场[J]. 山东海洋学院学报(S1): 12-27, doi: 10.16441/j.cnki.hdx.1986.s1.003.
- 李忠义, 林群, 李娇, 等, 2019. 中国海洋牧场研究现状与发展[J]. 水产学报, 43(9): 1870-1880, doi: 10.11964/jfc.20190311699.
- 杨红生, 2016. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 40(7): 1133-1140, doi: 10.11964/jfc.20160510386.
- 杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等, 2019. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报, 43(4): 1255-1262, doi: 10.11964/jfc.20190211670.
- 吴伟, 傅宇, 郭远明, 2020. 绿色渔业视角下推动舟山海洋牧场建设的研究[J]. 农村经济与科技, 31(23): 94-95.
- 张慧, 堵盘军, 郑晓琴, 2011. 浙闽海域余流特征分析[J]. 海洋通报, 30(2): 151-157.
- 陈倩, 黄大吉, 章本照, 等, 2003. 浙江近海潮流和余流的特征[J]. 东海海洋, 21(4): 1-14.
- 施能, 顾骏强, 黄先香, 等, 2004. 合成风场的统计检验和蒙特卡洛检验[J]. 大气科学, 28(6): 950-956.
- 阙华勇, 陈勇, 张秀梅, 等, 2016. 现代海洋牧场建设的现状与发展对策[J]. 中国工程科学, 18(3): 79-84.
- CÁCERES M, VALLE-LEVINSON A, ATKINSON L, 2003. Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 108(C4): 3114, doi: 10.1029/2001JC000968.
- GAN J P, LIU Z Q, LIANG L L, 2016. Numerical modeling of intrinsically and extrinsically forced seasonal circulation in the China Seas: a kinematic study [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 121(7): 4697-4715, doi: 10.1002/2016JC011800.
- HERSBACH H, DEE D, 2016. ERA5 reanalysis is in production [R]. Bracknell: ECMWF: 5-6.
- HUANG D J, ZENG D Y, NI X B, *et al*, 2016. Alongshore and cross-shore circulations and their response to winter monsoon in the western East China Sea [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 124: 6-18, doi: 10.1016/j.dsr2.2015.01.001.
- LIN L, LIU D Y, GUO X Y, *et al*, 2020. Tidal effect on water export rate in the eastern shelf seas of China [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125(5): e2019JC015863, doi: 10.1029/2019JC015863.
- LIU Z Q, GAN J P, HU J Y, *et al*, 2021a. Progress on circulation dynamics in the East China Sea and southern Yellow Sea: Origination, pathways, and destinations of shelf currents [J]. Progress in Oceanography, 193: 102553, doi: 10.1016/j.pocean.2021.102553.
- LIU Z Q, GAN J P, WU H, *et al*, 2021b. Advances on coastal and estuarine circulations around the Changjiang estuary in the recent decades (2000–2020) [J]. Frontiers in Marine Science, 8: 615929, doi: 10.3389/fmars.2021.615929.
- MEI X F, DAI Z J, VAN GELDER P H A J M, *et al*, 2015. Linking three gorges dam and downstream hydrological regimes along the Yangtze River, China [J]. Earth and Space Science, 2(4): 94-106, doi: 10.1002/2014EA000052.
- PAN H D, LV X Q, WANG Y Y, *et al*, 2018. Exploration of tidal-fluvial interaction in the Columbia river estuary using S_TIDE [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 123(9): 6598-6619, doi: 10.1029/2018JC014146.
- PAN A J, WAN X F, GUO X G, *et al*, 2013. Responses of the Zhe-Min coastal current adjacent to Pingtan Island to the wintertime monsoon relaxation in 2006 and its mechanism [J]. Science China Earth Sciences, 56(3): 386-396, doi: 10.1007/s11430-012-4429-9.
- SMITH S D, BANKE E G, 1975. Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101(429): 665-673, doi: 10.1002/qj.49710142920.
- TOZER B, SANDWELL D T, SMITH W H F, *et al*, 2019. Global

- bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+ [J]. *Earth and Space Science*, 6(10): 1847-1864, doi: 10.1029/2019EA000658.
- WANG J F, YU F, REN Q, *et al*, 2019. The observed variations of the north intrusion of the bottom Taiwan warm current inshore branch and its response to wind [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 30: 100690, doi: 10.1016/j.rsma.2019.100690.
- WU H, WU T N, SHEN J, *et al*, 2018. Dynamics of the Changjiang river plume [M] // LIANG X S, ZHANG Y Z. *Coastal Environment, Disaster, and Infrastructure - A Case Study of China's Coastline*. London: IntechOpen, doi: 10.5772/intechopen.80734.
- XUAN J L, HUANG D J, POHLMANN T, *et al*, 2017. Synoptic fluctuation of the Taiwan warm current in winter on the East China Sea shelf [J]. *Ocean Science*, 13(1): 105-122, doi: 10.5194/os-13-105-2017.
- YANG D Z, HUANG R X, FENG X R, *et al*, 2020. Wind stress over the Pacific Ocean east of Japan drives the shelf circulation east of China [J]. *Continental Shelf Research*, 201: 104122, doi: 10.1016/j.csr.2020.104122.
- YANG D Z, YIN B S, SUN J C, *et al*, 2013. Numerical study on the origins and the forcing mechanism of the phosphate in upwelling areas off the coast of Zhejiang Province, China in summer [J]. *Journal of Marine Systems*, 123/124: 1-18, doi: 10.1016/j.jmarsys.2013.04.002.
- ZHOU P, SONG X X, YUAN Y Q, *et al*, 2018. Water mass analysis of the East China Sea and interannual variation of Kuroshio subsurface water intrusion through an optimum multiparameter method [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(5): 3723-3738, doi: 10.1029/2018JC013882.
- ZHU X H, ZHU Z N, GUO X Y, *et al*, 2015. Measurement of tidal and residual currents and volume transport through the Qiongzhou strait using coastal acoustic tomography [J]. *Continental Shelf Research*, 108: 65-75, doi: 10.1016/j.csr.2015.08.016.

CHARACTERISTICS OF WINTER FLOW FIELD IN ZHOUSHAN ISLANDS

YAN Chang-Yuan¹, CHEN Dong¹, WU Wen-Fan², GU Yan-Zhen¹, LIU Zi-Zhou², ZHAI Fang-Guo²
(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. College of Ocean and Atmosphere Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract Zhongjieshan Island Marine Ranch is located in the waters of Zhoushan Islands, Zhoushan, Zhejiang, China. The construction of the marine ranch is conducive to promoting the development of fishery and protecting the ecological environment. To deeply understand the temporal and spatial variation characteristics of winter flow field in the Zhoushan Islands and its dynamic mechanism, we studied the existing data from October 21, 2020 to February 28, 2021, obtained from two stations near the marine ranch. Result show that the tidal currents at the two stations were regular semidiurnal tides, and M_2 and S_2 constituents were significant, and all the main tidal constituents were reciprocating. The tidal and residual flow directions were all in the northwest-southeast direction, which is consistent with the direction of the main axis of the narrow channel where the stations were located, indicating the obvious influence of topographic factors. The analysis based on the vertical mean momentum equation showed that in the direction along the main axis of the channel, the residual flow was controlled by the prevailing wind field, and the wind field turning will cause the residual flow to turn. In the direction perpendicular to the main axis of the channel, water mass accumulated near the shore due to the support of the shoreline on both sides of the channel, so that the positive pressure gradient force and Coriolis force was balanced largely in this direction, which reflected the influence of topography on the characteristics of the flow field. The research results of this study reveal the flow field characteristics and its main influence mechanism in the Zhoushan Islands sea area in winter, which is of guidance to realize the fine management of marine pasture in this sea area.

Key words residual current; Zhoushan Islands; marine ranch; composite analysis