

山东半岛东北部海洋牧场海域冬季海水流动的时空分布特征

胡罗煜¹, 翟方国¹, 刘子洲¹, 李培良², 顾艳镇¹, 孙利元³, 李欣¹, 陈栋², 姜庆岩²

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 3. 山东省水生生物资源养护管理中心, 山东 烟台 264003)

摘要: 为丰富山东半岛近岸海洋牧场海域水动力环境研究, 本文利用 2019 年 12 月 3 日至 2020 年 1 月 1 日在山东半岛东北部 4 个海洋牧场获取的海流资料, 应用功率谱分析、调和分析、余流主轴分析和相关分析, 探讨冬季各海洋牧场的潮流、余流特征及其影响机制。结果表明: (1) 各海洋牧场潮流由 M_2 分潮潮流主导, 受地形边界限制, 各主要分潮潮流均为往复流, 且潮流椭圆主轴平行岸线。(2) 不同海洋牧场呈现不同的余流特征和影响机制。烟台安源海洋牧场余流大致垂直于岸线流向近岸, 平均流速约为 0.9~1.7 cm/s; 日平均流以经向流为主, 与经向风呈显著正相关, 海水受北风强迫在近岸堆积。威海瑜泰海洋牧场余流大致垂直于岸线流向外海, 平均流速约为 1.4~1.7 cm/s; 日平均流亦以经向流为主, 与经向风呈显著负相关, 表层海水受北风强迫在近岸堆积, 在近岸产生下降流, 海面以下存在北向的离岸流。威海西港海洋牧场余流为东南向, 平均流速约为 2.5~3.0 cm/s, 日平均流具有较为显著的正压性。荣成褚岛海洋牧场余流为东北向, 平均流速约为 5.6~9.9 cm/s, 日平均流表明海水沿桑沟湾南岸流出海湾, 推测桑沟湾海水在湾内逆时针流动。研究成果利于进一步研究山东半岛邻近海域动力环境的多尺度时空变化特征及其影响机制。

关键词: 海洋牧场; 潮流; 余流; 山东沿岸

中图分类号: P717 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2021)04-0001-12

DOI: 10.11759/hyxx20200811003

随着海产品市场需求的增长, 传统的掠夺式的沿海水产养殖业过度膨胀, 产生了渔业种群单一化、个体小型化以及沿海海域水质污染等副作用, 这种水产模式无法保证海洋渔业的可持续发展和人们对海产品的需求^[1]。针对这些问题, 海洋科学家们提出建设“海洋牧场”方案。自 1980 年来, 随着人工鱼礁、增殖放流、鱼类驯化等技术的实施, 这种新型海水养殖产业模式, 已经被证实在集鱼, 提高生物多样性, 改善水质、营养盐结构等方面取得成效^[2]。海洋牧场的建设可以提高海域的水产生物养殖容量, 这与海域营养物质含量的调整、碳汇能力的提高有关, 后者的改变源于海域叶绿素、溶解氧等物质分布的变化, 而海域物质分布与水动力环境息息相关。已有大量研究讨论海流和不同海域生态系统的相互调控作用: 在肯尼亚的加兹湾, 潮汐不对称性导致的水体交换促进河口、海湾与外海营养物的交换^[3]; 在日本东北部海岸, 诸多海湾与北太平洋进行水交换, 此处养殖业、近海商业性捕捞业十分繁荣^[4]; 在福建

三沙湾, 箱式养殖设备减少养殖水域的流量并增强养殖水域之间水道的流量, 研究表明一定程度的改变网箱布局可以改善三沙湾水交换能力^[5]; 在山东半岛东部桑沟湾, 樊星等运用 10 d 海流资料, 结合双阻力模型, 讨论了夏季桑沟湾因水产养殖产生的海面边界层现象, 以及边界层对潮流的影响^[6]。山东周边的海洋牧场建设方兴未艾, 因而研究海洋牧场海域的水动力环境能够为了了解区域物质分布特征, 进而解决海洋牧场建设中的设施布放方案、增殖放流

收稿日期: 2020-08-11; 修回日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776012); 国家重点研发计划(2019YFD0901305); 浙江省重点研发计划(2020C03012); 三亚崖州湾科技城管理局重大科技项目(SKJC-KJ-2019KY03)

[Foundation: National Science Foundation of China, No. 41776012; National Key Research & Development Program of China, No. 2019YFD0901305; Key Research & Development Project of Zhejiang Province, No. 2020C03012; Major Science and Technology Project of Sanya YZBSTC, No. SKJC-KJ-2019KY03]

作者简介: 胡罗煜(1998—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向: 物理海洋学, E-mail: huluoyu@stu.ouc.edu.cn; 刘子洲(1987—), 通信作者, 实验师, 主要从事海洋调查及近海海洋环境问题的教学与研究, 电话: 13708954171, E-mail: lzz2013@ouc.edu.cn

的选址与放流数量等难题^[7]提供新思路,可进一步提高海洋牧场之于海上粮仓建设和海洋生态可持续发展的成效。

研究海域位于山东半岛东北部,为北黄海西部陆架浅海,水深浅、岸线宽广且曲折(图 1)。在研究海域,潮波运动是海水运动的主要形式:在山东半岛东北部,烟台、威海附近海域潮流流速较弱,此海域位于流场的辐合、辐散区^[8];涨潮时,海水自北黄海向渤海、南黄海流动,落潮时则相反^[9]。山东半岛东北部不同海域潮流运动特征不同。例如,在山东半岛北部,威海湾湾口与湾内潮流椭圆有较大差异^[10];在山东半岛东部的成山头近海,潮流方向则几乎与岸线平行^[11];潮流与地形相互作用则可能产生潮汐岬角锋等复杂的潮致流^[12]。冬季山东半岛东北部存

在一支较为稳定的流,即鲁北沿岸流。冬季北风作用下,沿岸水在渤南近岸区域堆积,因而在山东半岛北部海域,西侧水位相对较高,驱动沿岸水向东流动,在成山头外海转向南流^[13](图 1a),鲁北沿岸流携带悬浮物质,对沿岸地貌有一定影响^[14]。山东半岛东部海域动力环境受到许多学者的关注,王志勇等运用 2007 年冬季大面积调查资料讨论了山东半岛东部余流特征,余流均为南向,成山头以东外海的断面余流流速接近 5 cm/s,桑沟湾东南处的断面余流流速小于 5 cm/s^[15]。前人对山东周边海域动力机制同样开展了一定研究,宋军等对北黄海区域的潮汐过程进行动量分析和诊断,结果表明在渤海海峡、成山头海域,动量方程中的压强梯度力项与局地变化项最显著^[16]。

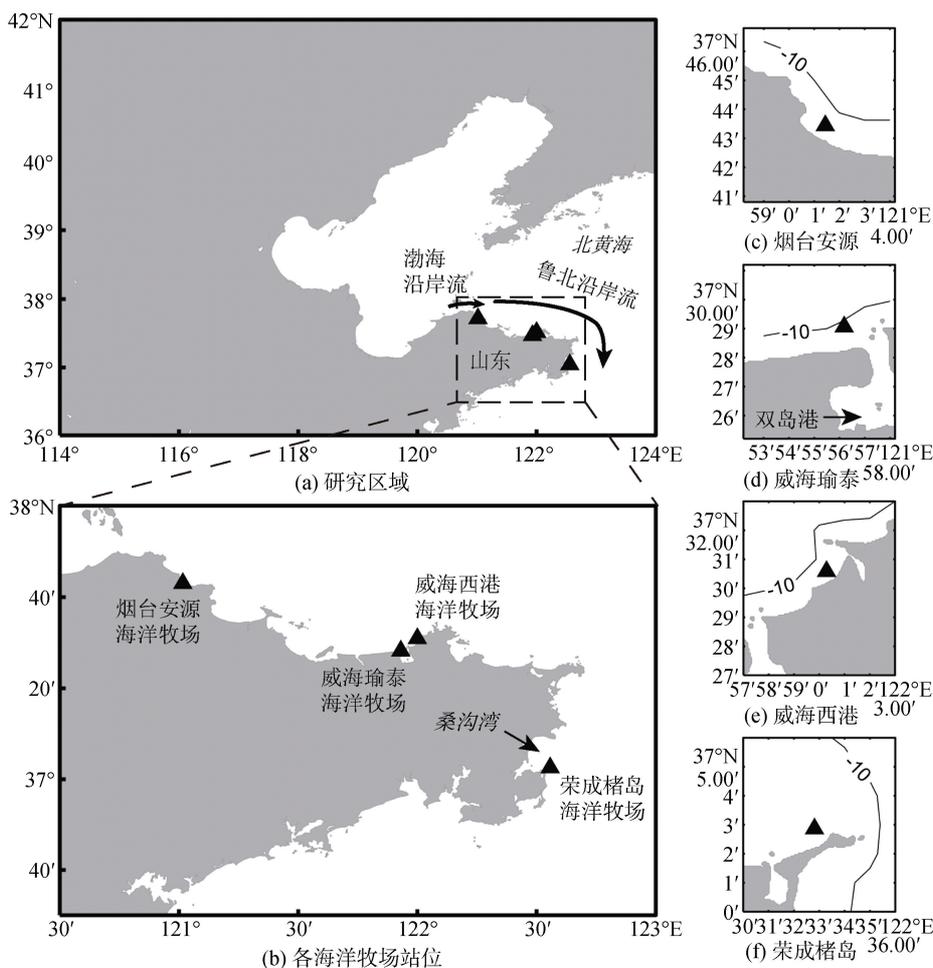


图 1 研究区域与站位分布图

Fig. 1 Study area and survey stations

注: a: 研究区域位于山东半岛东北部,其近海沿岸流为鲁北沿岸流; b: 展示 4 海洋牧场的站位分布,黑色箭头指示桑沟湾地理位置; c—f: 海洋牧场海域岸线与 10 m 等深线分布特征, d 中黑色箭头指示双岛港地理位置,水深数据来自 ETOPO2(<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>),岸线数据为 GSHHG(<http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/gshhg/>)

前人针对北黄海流场特征开展了丰富的研究,但在近岸海域,因船只航行、水产养殖、港口建筑等海事活动频繁,中长期流矢量观测资料获取难度大,流场特征有待进一步研究^[17]。基于此,本文利用山东半岛东北部 4 处海洋牧场的声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)的观测数据,对近岸浅海海水流动进行分析,综合讨论了主要分潮潮流、月平均流、日平均流的特征,初步讨论风、地形对海水流动特征的影响。

1 数据和方法

本文采用自山东省海洋牧场观测网获取的 2019 年 12 月的海流资料。海洋牧场分布如图 1 所示。观测

站位均位于山东半岛东北部离岸 3 km 以内海域,烟台安源海洋牧场位于渤海海峡东部,威海瑜泰海洋牧场位于威海市双岛港外海,威海西港海洋牧场位于威海瑜泰海洋牧场东部、小石岛西南,荣成楮岛海洋牧场位于桑沟湾南岸。海流观测仪器为岸基有缆在线观测系统搭载的坐底式 ADCP,仪器每小时观测 5 个流速剖面,水层采样厚度为 1 m。传感器波束自海底向上发射,底层流矢量数据距离海底 1 m。本文根据观测系统搭载的温盐深剖面仪(conductivity-temperature-depth, CTD)的同时期水深数据,选取海面以下的流矢量数据进行功率谱分析、调和分析和余流主轴分析,探讨海洋牧场海域海水流动特征(表 1)。

表 1 海洋牧场数据信息

Tab. 1 Main information of marine ranch observations

海洋牧场名称	资料时间	观测要素	平均水深/m
烟台安源投礁型海洋牧场	2019.12.03—2020.01.01	流矢量	5.4
威海瑜泰游钓型海洋牧场	2019.12.03—2020.01.01	流矢量	10.1
威海西港游钓型海洋牧场	2019.12.03—2020.01.01	流矢量	4.8
荣成楮岛游钓型海洋牧场	2019.12.03—2020.01.01	流矢量	8.0

本文还采用了两种辅助数据:(1) 欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecast, ECMWF)发布的 10 m 风矢量数据(ERA5),用于探究逐日风矢量和日平均流的相关关系^[18]。风矢量资料时间范围为 2019 年 12 月 3 日至 2020 年 1 月 1 日,时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,经双线性插值得到海洋牧场 10 m 风矢量资料。(2) HYCOM (hybrid coordinate ocean model)再分析流场资料(<https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/reanalysis>),用于讨论鲁北沿岸流对海洋牧场余流的影响机制,时间范围为 2019 年 12 月 3 日至 2020 年 1 月 1 日,时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ 。

2 结果与分析

2.1 功率谱分析

对所选水层的流矢量资料进行垂向平均,并分别对经向流、纬向流分量进行功率谱分析,得到 4 处海洋牧场的流矢量经纬分量的功率谱,如图 2 所示。同一海洋牧场的经向流、纬向流具有较为一致的显著周期,所有海洋牧场均在半日周期和全日周期对应频段处谱峰最大,在 1/3、1/4、1/5、1/6 d 周期对

应的高频频段出现峰值,主要为倍潮波和复合潮波。在烟台安源海洋牧场、威海瑜泰海洋牧场、威海西港海洋牧场,高频处的谱峰远小于半日周期、全日周期谱峰,在荣成楮岛海洋牧场高频处谱峰峰值较高。

2.2 潮流特征

采用 MATLAB 的 T_TIDE 程序包对实测海流资料进行潮流调和分析^[19],得到 M_2 、 S_2 、 O_1 、 K_1 主要分潮的潮流椭圆参数(表 2),图 3 展示了 4 个海洋牧场表层原始流矢量和潮流调和重构表层流矢量时间序列。

根据公式 $F = (W_{O_1} + W_{K_1}) / W_{M_2}$ 判断潮流类型,式中 W_{O_1} 、 W_{K_1} 、 W_{M_2} 分别为 O_1 、 K_1 、 M_2 潮流椭圆的长半轴。烟台安源海洋牧场 F 值为 0.40~0.55,潮流类型介于正规半日潮与不正规半日潮之间,表层潮流类型为正规半日潮,底层为不正规半日潮。威海瑜泰海洋牧场、威海西港海洋牧场站位相近, F 值为 1.21~1.31,为不正规半日潮。荣成楮岛海洋牧场 F 值为 0.45~0.65,潮流类型介于正规半日潮与不正规半日潮之间,表层潮流类型为不正规半日潮,中、底层为正规半日潮。

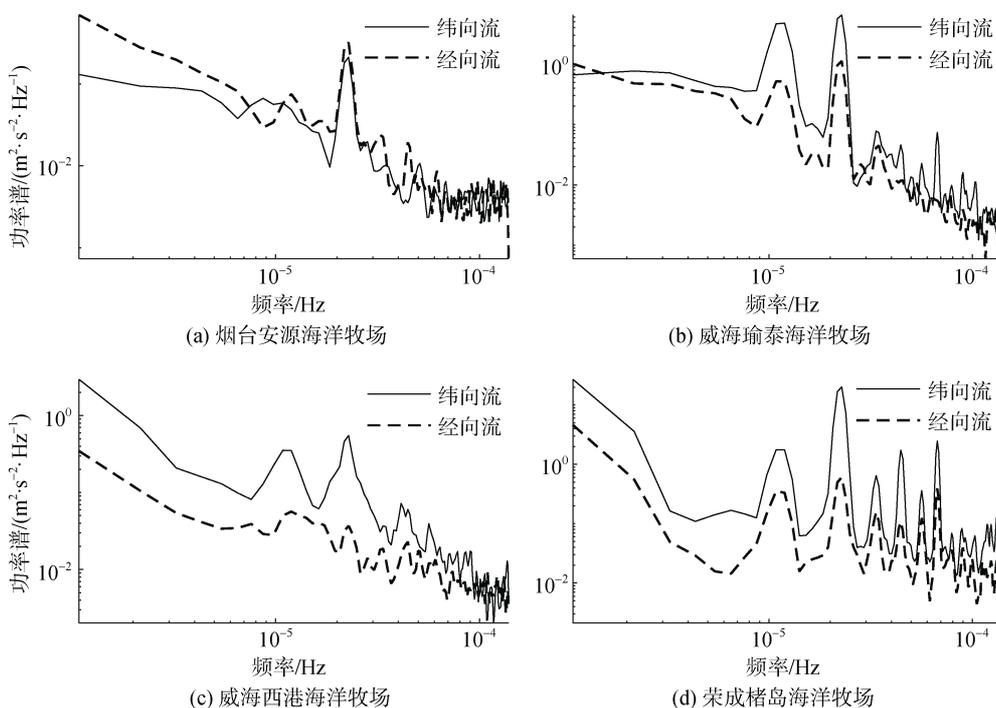


图 2 海流资料功率谱分析
Fig. 2 Power spectral analysis of currents

表 2 潮流调和常数表

Tab. 2 Main tidal current harmonic constituents within marine ranches

海洋牧场	水层	长轴/(cm·s ⁻¹)				短轴/(cm·s ⁻¹)				迟角/(°)				倾角/(°)			
		M ₂	S ₂	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	K ₁	O ₁
烟台安源	表层	1.81	0.56	0.56	0.27	-0.58	-0.01	-0.03	-0.08	307.83	315.11	328.29	269.19	131.49	143.95	131.96	156.41
	底层	1.41	0.37	0.44	0.34	-0.20	-0.09	0.17	-0.02	302.15	320.53	309.59	257.81	120.99	123.99	111.76	129.25
威海瑜泰	表层	7.78	2.04	6.37	4.24	0.98	0.30	0.16	0.43	307.85	350.36	190.94	133.73	20.58	16.12	14.71	17.44
	中层	6.96	1.83	5.84	3.64	0.97	0.37	0.36	0.21	304.50	351.86	194.07	130.23	20.81	23.01	19.02	17.59
	底层	4.12	0.92	3.28	2.01	0.71	0.29	0.38	-0.04	301.54	348.29	195.73	122.51	24.51	29.80	22.31	17.72
威海西港	表层	1.56	0.73	1.01	1.00	-0.42	0.12	-0.11	0.12	138.34	146.10	185.39	122.83	177.22	172.13	26.17	29.86
	底层	1.51	0.53	1.10	0.80	-0.24	-0.07	0.03	0.05	313.10	304.86	179.34	119.83	4.15	2.14	22.47	5.01
荣成楮岛	表层	12.13	3.62	4.11	2.83	-0.98	-0.26	0.60	0.08	245.18	237.54	24.08	330.31	6.13	15.93	21.25	17.62
	中层	11.63	3.18	3.21	2.48	-0.72	-0.53	0.47	0.15	244.95	240.28	17.69	326.40	7.41	13.52	26.29	26.68
	底层	7.11	2.01	1.90	1.39	-0.14	-0.30	0.16	0.13	239.53	239.89	21.38	336.79	12.06	7.28	21.56	34.43

所有牧场表层的 M₂ 分潮潮流椭圆主轴方向基本与岸线平行(图 4)。对比相同海洋牧场、相同水层的不同分潮潮流主轴倾角,发现除威海西港海洋牧场表层 O₁、K₁ 分潮和荣成楮岛海洋牧场底层 O₁ 分潮外, S₂、O₁、K₁ 与 M₂ 潮流椭圆主轴倾角差均不超过 20°, 分潮潮流最大流速方向基本与岸线平行。相同海洋牧场、

相同分潮的潮流椭圆主轴垂向分布显示,烟台安源海洋牧场分潮潮流最大流速方向随深度增加顺时针旋转,威海瑜泰海洋牧场分潮潮流最大流速方向随深度增加逆时针旋转;威海西港海洋牧场、荣成楮岛海洋牧场分潮潮流最大流速方向随深度的变化较为复杂,分潮角频率不同,最大流速方向随深度的变化不同。

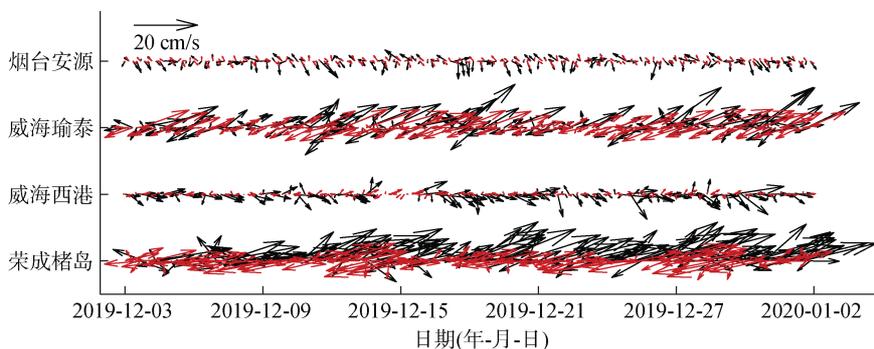


图3 海洋牧场表层流矢量时间序列

Fig. 3 Vector diagrams of surface currents within marine ranches

注: 黑色: 原始流矢量; 红色: 潮流调和分析重构流矢量

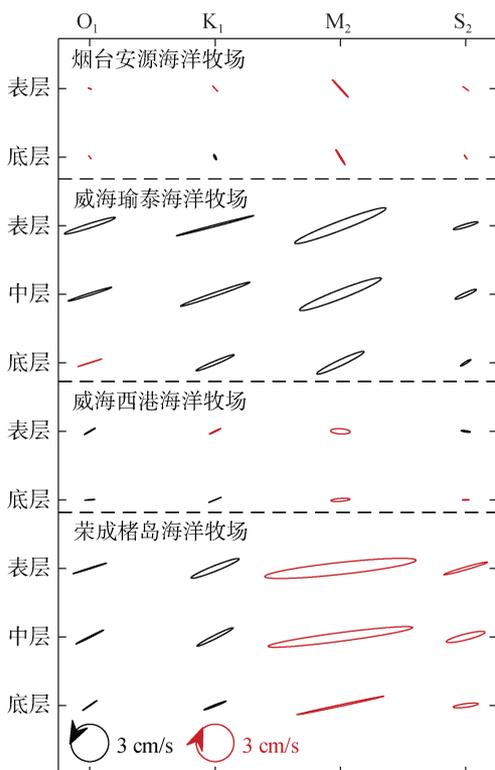


图4 潮流椭圆分布图

Fig. 4 Distributions of tidal current ellipses

潮流调和分析表明, 4处海洋牧场海域均属于半日分潮潮流主导的海区, 且 M_2 分潮潮流最显著, M_2 分潮潮流流速最大。对比4处海洋牧场海域, M_2 、 S_2 分潮潮流在荣成楮岛海洋牧场流速最大, 其中 M_2 分潮流速约为 7~12 cm/s; 威海瑜泰海洋牧场次之, M_2 分潮流速约为 4~8 cm/s; 烟台安源海洋牧场、威海西港海洋牧场 M_2 分潮流速小于 2 cm/s。 O_1 、 K_1 分潮潮流在威海瑜泰海洋牧场流速最大, 其中 K_1 分潮流速约为 3~6 cm/s; 荣成楮岛海洋牧场次之, K_1 分潮潮流

速约为 2~4 cm/s; 烟台安源海洋牧场、威海西港海洋牧场 K_1 分潮流速不超过 1.1 cm/s。各海洋牧场主要分潮潮流流速均随深度增加减小。烟台安源海洋牧场、威海西港海洋牧场 M_2 分潮潮流表层流速相近。威海瑜泰海洋牧场、荣成楮岛海洋牧场 M_2 分潮潮流流速中层较表层约减少 10%, 底层较表层减少 40%~50%, 潮流流速垂向分布表明海底与岸基的摩擦效应使底层潮流流速显著减小。

潮流椭圆旋转性如图 4 所示, 烟台安源海洋牧场潮流椭圆基本顺时针旋转, 威海瑜泰海洋牧场潮流椭圆基本逆时针旋转, 威海西港海洋牧场、荣成楮岛海洋牧场 M_2 、 S_2 半日分潮潮流基本顺时针旋转, O_1 、 K_1 全日分潮潮流椭圆基本逆时针旋转。海洋牧场潮流椭圆椭率均小于 0.4, 潮流以往复运动形式为主。在烟台安源海洋牧场、威海西港海洋牧场表层, M_2 分潮潮流椭圆椭率分别为 -0.32、-0.27, M_2 分潮潮流旋转性相对较强。潮流椭圆主轴平行于岸线, 主要分潮最大流速随深度增加减小, 往复运动的潮流特征表明 4 处海洋牧场海域潮流运动受地形边界影响显著。

2.3 平均流特征

原始流矢量剔除调和重构流矢量后, 首先进行 48 h 低通滤波, 然后进行观测时段平均, 得到 4 处海洋牧场海域观测时段内平均流(图 5)。烟台安源海洋牧场平均流流速约为 0.9~1.7 cm/s, 威海瑜泰海洋牧场平均流流速约为 1.4~1.7 cm/s, 威海西港海洋牧场平均流流速约为 2.5~3.0 cm/s, 荣成楮岛海洋牧场平均流流速约为 5.6~9.9 cm/s。自烟台安源海洋牧场至荣成楮岛海洋牧场平均流流速增大, 即在山东半岛东北部海域, 位于东部的海洋牧场平均流流速较大。

烟台安源海洋牧场平均流流矢量表层为南向，底层为西南向，底层平均流与岸线几乎垂直，表层较底层稍向左偏，且底层流速大于表层，烟台安源海洋牧场平均流流速与前人在相邻海域观测结果较为一致^[20]。威海瑜泰海洋牧场平均流表层为东北向，中层为北向，底层为西北向，平均流呈现海水辐散的离

岸流特征，且流速底层最大，中层最小。在威海西港海洋牧场，平均流流矢量表底层几乎一致，为东南向，体现整层水体向东南岸堆积的特征。荣成楮岛海洋牧场表中底层平均流几乎同为东北向，平均流方向随深度增加稍向湾口中心洼地偏转，表中层流速大小相当，底层流速约为表层 60%。

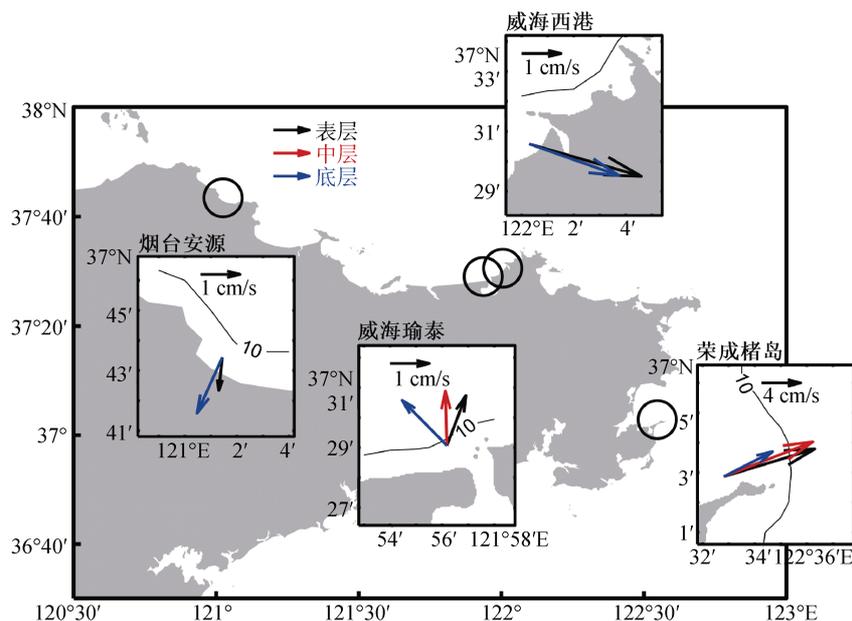


图 5 月平均流矢量图
Fig. 5 Vector diagrams of monthly mean currents

2.4 日平均流特征

剔除实测海流中的调和重构分潮流并进行 24 h 平均，得到日平均流特征(图 6a)。烟台安源海洋牧场日平均流东南、西南向流矢量交替出现；表层流矢量主要为西南向，但东南向流速较大；底层流矢量主要为西南向，且底层日平均流流速强于表层。威海瑜泰海洋牧场日平均流表层主要为东北向，中层东北、西北流矢量交替出现，底层主要为西北向。威海西港海洋牧场表底层日平均流流矢量基本一致，主要为东南向；荣成楮岛海洋牧场日平均流表中底层呈东北向流动，随深度增加流矢量逆时针旋转且流速减小。

原始流矢量剔除调和重构流矢量后，进行 48 h 低通滤波得到逐时余流^[21]，对逐时余流经向、纬向分量进行二维主成分分析得到余流主成分分量，余流主成分方向是余流偏差量方差最大的方向，定义为余流主轴方向^[22-23]，垂直于主轴的方向定义为次轴方向。经统计余流主成分之于逐时余流的贡献率超

过 75%，且逐时余流在余流主轴方向的变化最剧烈。如图 6 所示，除烟台安源海洋牧场底层余流主轴与岸线存在较大夹角外，各海洋牧场余流主轴与岸线方向大致相似，烟台安源海洋牧场表层、威海西港海洋牧场余流主轴为东南-西北方向(图 6b, d)，威海瑜泰海洋牧场、荣成楮岛海洋牧场余流主轴为东北-西南方向(图 6c, e)，说明在 4 处海洋牧场海域，地形是制约余流变化的一个重要因素。

图 6 中，椭圆长轴为主轴方向上逐时余流分量的标准差，椭圆短轴则为逐时余流次轴分量的标准差，余流标准差体现观测时段内余流变化的剧烈程度。烟台安源海洋牧场、威海西港海洋牧场标准差较小，余流变化较小；威海瑜泰海洋牧场、荣成楮岛海洋牧场标准差较大，余流变化较剧烈。余流标准差垂向分布则说明烟台安源海洋牧场底层余流变化较表层剧烈；威海瑜泰海洋牧场、荣成楮岛海洋牧场底层余流变化较表、中层显著减小；威海西港海洋牧场表底层余流变化剧烈程度基本一致。

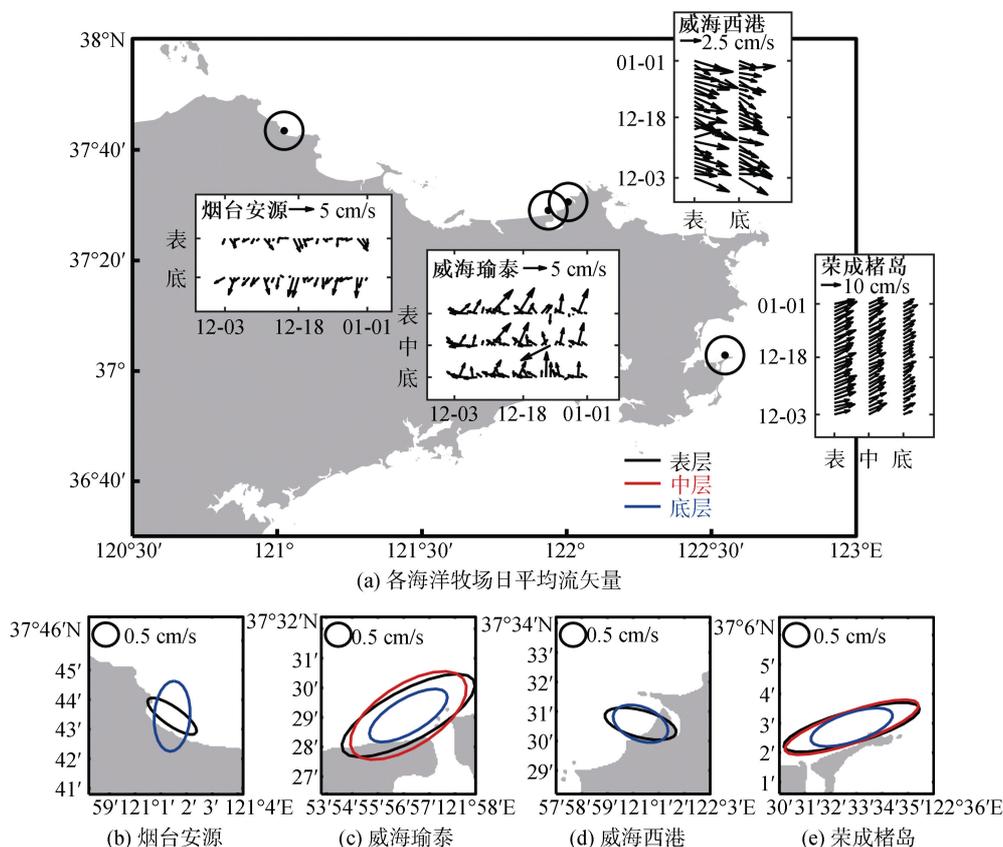


图 6 日平均流矢量和逐时余流标准差分布图

Fig. 6 Vector diagrams of diurnal mean currents and the standard deviation of hourly residual currents

注: 子图 a: 日平均流矢量; b—e: 椭圆长轴方向: 余流主轴方向; 椭圆长轴: 逐时余流主成分分量标准差; 椭圆短轴方向: 余流次轴方向; 椭圆短轴: 逐时余流次轴分量标准差

2.5 影响机制

为进一步探究 4 处海洋牧场的余流结构, 绘制了观测期间平均的 HYCOM 0 m 水深流场与 ERA5 10 m 高度风场。如图 7a 所示, 在西北风背景下, 山东半岛北部海域近岸存在一条自西向东流幅逐渐变窄的流动, 在成山头转为南向, 为鲁北沿岸流^[13, 17]。观测期间, 威海西港海洋牧场平均流与此流动特征较为一致, 烟台安源海洋牧场、威海瑜泰海洋牧场、荣成楮岛海洋牧场平均流与此流动存在显著差异。烟台安源海洋牧场平均流指向相邻海域风场、流场的右侧(图 7a), 推测其平均流与风场有关, 在后文讨论了日平均流与日平均流的特征。威海瑜泰海洋牧场平均流为北向、离岸方向, 相近的威海西港海洋牧场则为东向。前者与威海外海东向的 HYCOM 表层流场存在差异, 后者则相近, 推测威海瑜泰海洋牧场流矢量变化除受鲁北沿岸流影响外, 存在其他影响机制, 在后文讨论日平均流与日平均流的特征。威海西港海洋牧场表、底层余流特征基本一致, 说明表底层余流具有较为显著的

正压性, 平均流与临近海域 HYCOM 表层流矢量方向基本一致, 为东—东南向, 推测此海域余流与鲁北沿岸流密切相关。荣成楮岛海洋牧场位于桑沟湾南岸湾口处(图 1f), 桑沟湾外流矢量为南向^[15], 但荣成楮岛海洋牧场平均流由表至底均为东北向, 与湾外流场对流, 说明海水自湾南流出, 仅考虑湾口的水交换, 则海水自湾北流入, 在湾内逆时针旋转。推论与以往数值模拟研究结果较为一致^[24]。

逐日风矢量如图 7b 所示。所有牧场逐日风矢量分布基本一致, 西北风与西南风交替出现。对比图 7b 与图 6, 发现北风增强时烟台安源海洋牧场日平均流流速明显增大。为进一步讨论风速对日平均流的影响, 将同一站位风速和不同水层余流做相关分析。结果显示, 在烟台安源海洋牧场, 表底层经向余流流速与同站经向风速相关系数大于 0.6, 表层纬向余流流速与同站经向风速相关系数小于 -0.4, 在威海瑜泰海洋牧场, 整层水体经向余流流速与同站经向风速相关系数小于 -0.6。图 8 展示了烟台安源海洋

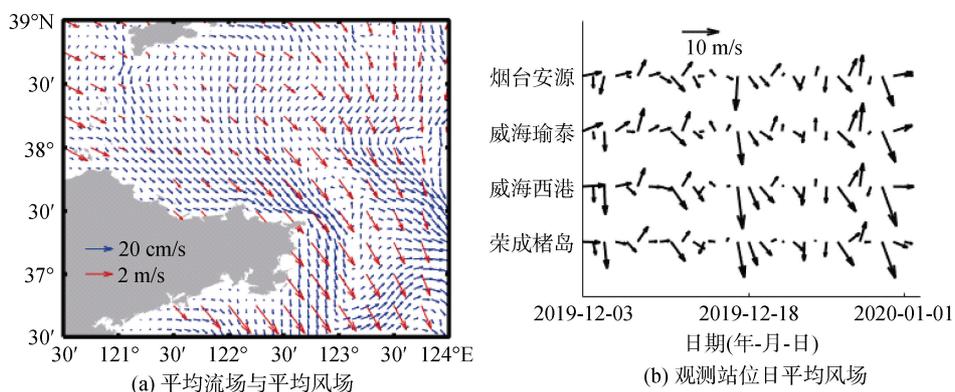


图 7 观测期间 0 m 平均流场与 10 m 平均风场

Fig. 7 Average current field and 10-m average wind field during the observation period

注: 子图 a: 蓝色箭头: HYCOM 再分析资料 0 m 流场; 红色箭头: ERA5 10 m 风场

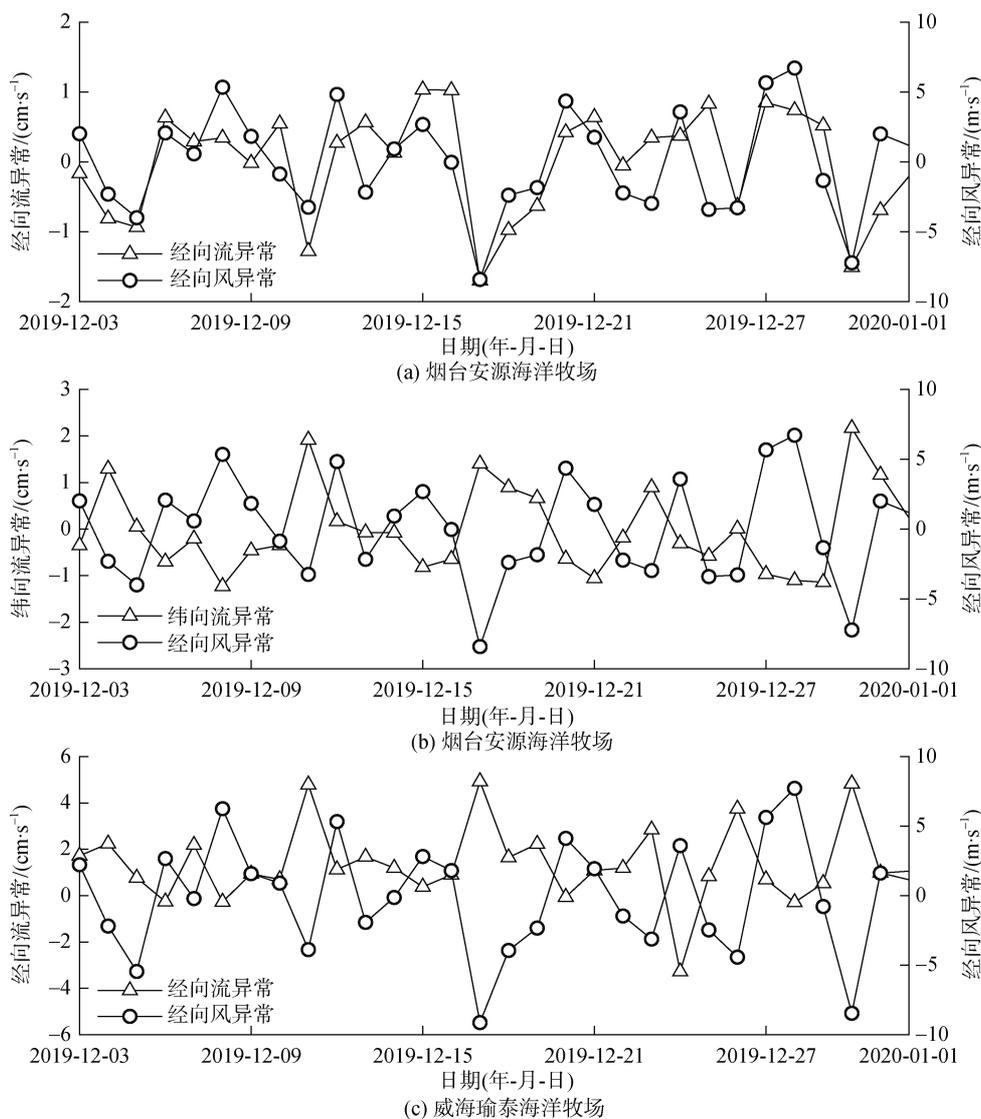


图 8 烟台安源海洋牧场、威海瑜泰海洋牧场表层日平均流异常与 10 m 高度经向风速异常时间序列图

Fig. 8 Time sequences of the surface residual current anomalies and meridional wind anomalies of Anyuan and Weihai Yutai Marine Ranches

牧场表层日平均经向流异常、纬向流异常与 10 m 日平均经向风异常, 以及威海瑜泰海洋牧场表层日平均经向流异常与 10 m 日平均经向风异常的时间序列。烟台安源海洋牧场经向流与经向风正相关, 纬向流与经向风负相关, 在 12 月 6 日至 12 月 9 日、12 月 15 日、12 月 27 日日平均经向风正异常时, 日平均经向流正异常, 日平均纬向流负异常, 12 月 5 日、12 月 11 日、12 月 17 日、12 月 26 日、12 月 30 日经向风异常为极小值时, 日平均经向流异常为极小值, 日平均纬向流异常为极大值, 即北风增强时, 烟台安源海洋牧场南向流、东向流增强。威海瑜泰海洋牧场经向余流与经向风速负相关, 如图 8c 所示, 12 月 5 日、12 月 11 日、12 月 17 日、12 月 26 日、12 月 30 日经向风异常为极小值时, 日平均经向流异常为极大值, 经向风异常为极大值时, 日平均经向流异常为极小值, 即北风增强时, 威海瑜泰海洋牧场北向流增强。

烟台安源海洋牧场平均水深 5.4 m, 水深浅, 经向风推动表底层海水向岸流动, 因而烟台安源海洋牧场经向余流与经向风正相关; 经向风与岸线有夹角, 北风推动表层海水沿岸向东流动, 因而在表层, 烟台安源海洋牧场纬向余流与经向风负相关(图 9a)。威海瑜泰海洋牧场平均水深 10.1 m, 水深较烟台安源海洋牧场深, 地形相对陡峭。推测北风时, 海面有南向流, 因经向风几乎与岸线垂直, 海水向岸堆积并在岸边产生下降流, 在海面以下产生离岸流, 即北向流; 南风时, 海面为离岸流, 海面以下则产生上升流, 威海瑜泰海洋牧场表面以下为南向的补偿流, 因而威海瑜泰海洋牧场经向流与经向风负相关(图 9b)。

3 结论

通过对山东半岛东北部 4 处海洋牧场 2019 年 12 月观测的海流数据进行分析, 得到以下结论:

1) 威海瑜泰海洋牧场、威海西港海洋牧场海域潮流类型为不正规半日潮, 烟台安源海洋牧场、荣成楮岛海洋牧场海域潮流类型介于正规半日潮和不正规半日潮之间。 M_2 、 S_2 半日分潮潮流在荣成楮岛海洋牧场流速最大, M_2 分潮流速约为 7~12 cm/s; O_1 、 K_1 全日分潮潮流在威海瑜泰海洋牧场流速最大, K_1 分潮流速约为 3~6 cm/s。各海洋牧场海域的主要分潮潮流具有最大流速平行岸线, 最大流速的大小随深度减小的往复运动特征, 表明各海洋牧场海域潮

流运动受地形边界影响显著。

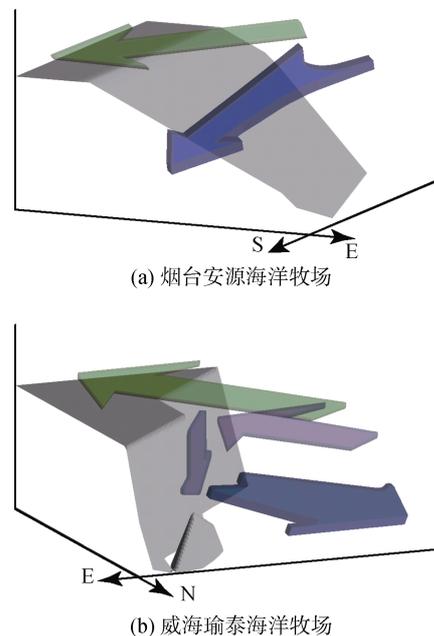


图 9 烟台安源海洋牧场、威海瑜泰海洋牧场流场与经向风场相关关系

Fig. 9 Schematic views of the relationship between the flow field and meridional wind field in Anyuan and Weihai Yutai Marine Ranches

注: 绿色箭头: 风场; 蓝色箭头: 流场

2) 烟台安源海洋牧场平均流大致垂直于岸线流向近岸, 流速约为 0.9~1.7 cm/s, 威海瑜泰海洋牧场平均流大致垂直于岸线流向外海, 流速约为 1.4~1.7 cm/s, 威海西港海洋牧场平均流为东南方向, 流速约为 2.5~3.0 cm/s, 荣成楮岛海洋牧场平均流为东北方向, 流速约为 5.6~9.9 cm/s。

3) 烟台安源海洋牧场表底层日平均流经向流与当地经向风正相关, 海水受北风强迫在近岸堆积。威海瑜泰海洋牧场日平均流以经向分量为主, 经向分量主要为北向, 经向分量与当地经向风负相关, 北风强迫下, 威海瑜泰海洋牧场海面为南向流, 海水向岸堆积并在近岸产生下降流, 在海面下为北向的离岸流。威海西港海洋牧场表底层日平均流为东南向, 余流变化较为一致, 具有较为显著的正压性。荣成楮岛海洋牧场日平均流为东北向, 表明海水沿桑沟湾南岸流出海湾, 在桑沟湾内逆时针流动。

参考文献:

[1] 王恩辰. 海洋牧场建设及其升级问题研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.

- WANG Enchen. Research on the construction and upgrade of marine ranching[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [2] 李忠义, 林群, 李娇, 等. 中国海洋牧场研究现状与发展[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1870-1880.
LI Zhongyi, LIN Qun, LI Jiao, et al. Present situation and future development of marine ranching construction in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1870-1880.
- [3] KITHEKA J U, OHOWA B O, MWASHOTE B M, et al. Water circulation dynamics, water column nutrients and plankton productivity in a well-flushed tropical bay in Kenya[J]. Journal of Sea Research, 1996, 35(4): 257-268.
- [4] TANAKA K, KOMATSU K, ITOH S, et al. Baroclinic circulation and its high frequency variability in Otsuchi Bay on the Sanriku ria coast, Japan[J]. Journal of Oceanography, 2017, 73: 25-38.
- [5] LIN H Y, CHEN Z Z, HU J Y, et al. Impact of cage aquaculture on water exchange in Sansha Bay[J]. Continental Shelf Research, 2019, 188: 1-15.
- [6] 樊星, 魏皓, 原野, 等. 近岸典型养殖海区的潮流垂直结构特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 181-186, 192.
FAN Xing, WEI Hao, YUAN Ye, et al. The features of vertical structures of tidal current in a typical coastal mariculture area of China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(2): 181-186, 192.
- [7] 颜慧慧, 王凤霞. 中国海洋牧场研究文献综述[J]. 科技广场, 2016(6): 162-167.
YAN Huihui, WANG Fengxia. Literature review on marine ranching in China[J]. Science Mosaic, 2016(6): 162-167.
- [8] 修日晨, 李繁华, 孔祥德. 渤海及北黄海潮流场的基本特征[J]. 海洋科学, 1989, 13(5): 1-7.
XIU Richen, LI Fanhua, KONG Xiangde. The basic characteristic of tidal flow field in Bohai Sea and North Huanghai Sea[J]. Marine Sciences, 1989, 13(5): 1-7.
- [9] 孙长青, 王学昌, 赵可胜. 烟台北部近岸海域潮流数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 1994(S1): 42-49.
SUN Changqing, WANG Xuechang, ZHAO Kesheng. Numerical computation of tidal current in the offshore area of northern Yantai[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1994(S1): 42-49.
- [10] 姚兰芳. 威海湾潮流的分布特征[J]. 海岸工程, 1990(Z1): 61-65.
YAO Lanfang. Distributional features of the tidal current in the Weihai Bay[J]. Coastal Engineering, 1990(Z1): 61-65.
- [11] 李庆杰. 成山头海域波浪能和潮流能时空分布特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
LI Qingjie. Space-time distributional Characteristics of wave energy and tidal current energy in Chengshantou Sea Area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [12] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 209-238.
HUANG Zuke, HUANG Lei. Tidal Theory and Calculation[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005: 209-238.
- [13] 张志欣. 中国近海沿岸流及毗邻流系的观测与分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
ZHANG Zhixin. Observation and analysis of the coastal current and its adjacent current system in the China offshore waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [14] LU J, QIAO F L, WANG X H, et al. A numerical study of transport dynamics and seasonal variability of the Yellow River sediment in the Bohai and Yellow seas[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 95(1): 39-51.
- [15] 王勇智, 张永强, 孙惠凤. 山东半岛东部海域悬浮体分布季节变化及其冬季输送通量研究[J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 541-549.
WANG Yongzhi, ZHANG Yongqiang, SUN Huifeng. Seasonal variation of suspended matter distribution and flux in coastal waters of eastern Shandong Peninsula[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 541-549.
- [16] 宋军, 姚志刚, 郭俊如, 等. 基于潮汐逆模型技术对渤海正压 M_2 分潮开边界条件的优化研究: II. 潮汐特征、潮汐动力学及潮余流[J]. 海洋通报, 2016, 35(5): 545-553.
SONG Jun, YAO Zhigang, GUO Junru, et al. Refining barotropic tide simulations for the Bohai and Yellow Seas using a hybrid data assimilation approach[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(5): 545-553.
- [17] 韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨, 等. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质运输的影响[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 145-156.
WEI Qinsheng, YU Zhigang, RAN Xiangbin, et al. Characteristics of the Western Coastal Current of the Yellow Sea and Its Impacts on Material Transportation[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 145-156.
- [18] HERBACH H, BELL W, BERRISFORD P, et al. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5[J]. ECMWF Newsletter, 2019, 159: 17-24.
- [19] PAWLOWIEZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S, et al. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [20] 皇甫雪睿, 李毅, 胡日军, 等. 烟台西部近岸海域冬季悬浮泥沙浓度时空变化及其输运特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(5): 22-33.

- HUANGFU Xuerui, LI Yi, HU Rijun, et al. Temporal and spatial variation of suspended sediment concentration in the nearshore waters of western Yantai and its transport characteristics in winter[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(5): 22-33.
- [21] 费岳军, 史军强, 堵盘军, 等. 冬季舟山外海定点实测海流资料分析[J]. *海洋通报*, 2013, 32(6): 648-656.
FEI Yuejun, SHI Junqiang, DU Panjun, et al. Analysis of the mooring current data near Zhoushan Islands[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(6): 648-656.
- [22] KUNDU P K, ALLEN J S. Some Three-dimensional characteristics of low-frequency current fluctuations near the Oregon coast[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1976, 6(2): 181-199.
- [23] TANIGUCHI N, HUANG C F, ARAI M, et al. Variation of residual current in the Seto Inland Sea driven by sea level difference between the Bungo and Kii Channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(4): 2921-2933.
- [24] 王丽霞, 石磊, 孙长青. 桑沟湾海域的潮流数值计算[J]. *青岛海洋大学学报*, 1994(S1): 77-83.
WANG Lixia, SHI Lei, SUN Changqing. Tidal current computation for Sanggou Bay[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1994(S1): 77-83.

Spatial and temporal characteristics of sea current within the marine ranches in the northeast of Shandong Peninsula

HU Luo-yu¹, ZHAI Fang-guo¹, LIU Zi-zhou¹, LI Pei-liang², GU Yan-zhen¹, SUN Li-yuan³, LI Xin¹, CHEN Dong², JIANG Qing-yan²

(1. College of Ocean and Atmosphere Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 3. Shandong Hydrobios Resources Conservation and Management Center, Yantai 264003, China)

Received: Aug. 11, 2020

Key words: marine ranch; tidal currents; residual currents; coastal area of Shandong Province

Abstract: To enrich the study of the hydrodynamic environment around the near-shore area of the Shandong Peninsula in winter, the structure of currents, such as the tidal and residual components, is investigated based on current observations within four marine ranches from December 3, 2019 to January 1, 2020, employing the methods of harmonic analysis, power spectra analysis, principal component analysis, and correlation analysis. Within four marine ranches, with the M_2 constituent that was significant and reciprocating, the directions of the maximum velocity vector of the main tidal constituents were basically parallel to the shoreline. The characteristics and influence mechanisms of the residual current varied with the area of marine ranches. The average current within the Anyuan Marine Ranch was southeastward and shoreward, with a velocity range of 0.9–1.7 cm/s. The main component of the daily mean current was the meridional current, which had a significant positive correlation with the wind in the same direction. While the northerly wind was driving, the residual current accumulated towards the southwest bank of the Anyuan Marine Ranch synchronously. The average current within the Yutai Marine Ranch was northward and offshore, with a velocity of 1.4–1.7 cm/s. The main component of the daily mean current was the meridional current, which had a significant negative correlation with the meridional wind. The daily average current showed that the northerly wind forced the seawater to accumulate to the south bank of the Yutai Marine Ranch and produced down-flow near the coast. In addition, the offshore current flowed northward below the sea surface. The average current within the Xigang Marine Ranch was southeastward, with a velocity of 2.5–3.0 cm/s. The daily average current was barotropic at both the surface and bottom layers. The average current within the Chudao Marine Ranch was northeast, with a velocity of 5.6–9.9 cm/s. The daily average current was also northeast along the south bank of Sanggou Bay, indicating that the seawater flowed counterclockwise in the bay. The research results provided a basis for the further study of multi-scale temporal and spatial characteristics and influence mechanism of the dynamic environment in the near-shore area of the Shandong Peninsula.

(本文编辑: 丛培秀)