

荣成外海海流特征及影响因素

魏诗晏¹, 杨伟², 赵亮¹

(1. 天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 天津大学 海洋科学与技术学院, 天津 300072)

摘要: 荣成是我国重要的海产养殖城市, 为掌握荣成外海的海流特征, 基于 2016 年 1—10 月于荣成外海楮岛岬角南侧布放的浮标观测数据, 通过谱分析、调和分析等方法, 分析了实测流速时间序列剖面及季节变化, 分离出该观测点的潮流和余流并进行定性定量分析, 探讨了该海域余流的影响因素。结果表明: 1) 荣成外海浮标观测点流速东西分量总体大于南北分量, 实测流速均值为 0.20 m/s, 最大值为 0.87 m/s, 实测流速存在明显的季节差异, 秋季流速最大, 夏季次之, 冬春季较小且冬春季差异小。实测流存在涨落潮不对称现象。2) M_2 分潮绝对占优, 观测海域潮流性质为规则半日潮流, 潮流以往复流形式运动, 各层潮流均为顺时针旋转。浅水分潮十分显著, 该点观测得到的最大潮流流速为 0.38 m/s。3) 余流相对较小, 日平均余流速度均值为冬季<春季<夏季<秋季; 流向上 E 和 ENE 向占优, 余流总体向东。弱风条件下, 余流流向主要集中于 NNE—ESE, 余流流速大于 0.15 m/s 的概率约为 25%; 强风条件下风速和余流流速的互相关系数可达 0.95, 夏秋季较强的风速可能是流速增快的原因。

关键词: 实测流; 调和分析; 潮流; 余流; 荣成外海

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)04-0055-12

DOI: 10.11759/hyxx20210412003

浅海水动力过程是海流、波浪、风和地形等多因素综合作用的结果。狭义的海流定义为海流水平运动分量^[1], 包含周期性潮流、由风和地形等因素引起的余流和随机高频扰动信号, 潮流影响物质短期输运, 而余流则影响物质长期输运过程^[2]。海流的影响因素包括风、径流、海区地形和大小等, 同时养殖活动也是浅海水动力变化的主要原因之一^[3], 大量养殖物会消耗海域营养物质, 同时可能造成水交换不及时, 从而影响海域水质环境和养殖效益^[4]。因此, 掌握养殖海域自然状态的海流特征, 对海区生态环境保护、沿海人民生活生活和海洋工程建设等具有重要意义。

荣成市三面环海, 海岸线总长约 500 km^[5], 有荣成湾、桑沟湾、黑泥湾等多个海湾。荣成是我国重要的海产养殖城市, 其外海水产养殖发达, 贝类、藻类等多种海产品养殖密度高。除了发达的养殖业, 近年来荣成海岛核电工程、临海风力发电项目和滨海旅游业也有所发展^[6]。

为加深对荣成外海海域水文环境的认识, 近年来学者们对该海域开展了诸多研究工作。水动力方面, 以风浪为主^[7], 冬半年波浪大, 夏季减弱^[8]。风向控制的风浪和潮流的相干作用决定了黑泥湾海域悬浮体分布^[9]。Fan 等^[10]在楮岛南侧海域研究发现往复

式潮流导致涨落潮周期内悬浮物质量浓度的不对称, 大量沉积物输运出研究区, 有侵蚀事件发生。此外, 山东多处海岸处于侵蚀状态, 其中, 荣成沿岸属于严重侵蚀型海滩。庄振业等研究表明, 楮岛连岛沙坝形成是多向泥沙纵向运移的结果^[11-12]。黑泥湾海区在风浪较大时, 尤其 10 m 水深以浅的海域泥沙易起动并随海流运移。而 10 m 等深线直逼海岸线, 侵蚀主要发生在岬角处, 侵蚀物堆积在海底或在海湾成为袋状沙滩^[9]。宫立新等^[13]指出楮岛—镆钁岛砂质海岸的侵蚀速率为每年 2~3 m。

关于荣成外海筏式养殖对水动力的影响等方面也有诸多研究。樊星等^[14]通过准调和分析法分析桑沟湾潮流流速垂向特征, 并建立了双阻力模型, 发现养殖区底应力比自然海区高一个量级。严立文等^[9]通过 SWAN 模式分析了该海域海带养殖区域的沉积环境效

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41876018); 天津市自然科学基金项目(19JCZDJC40600)

[Foundation: Project of National Natural Science Foundation of China, No. 41876018; Tianjin Natural Science Foundation project, No. 19JCZDJC40600]

作者简介: 魏诗晏 (1995—), 女, 江苏盐城人, 硕士, 主要从事浅海流体力学研究, E-mail: 1254510293@qq.com; 赵亮(1975—), 通信作者, 教授, 主要从事浅海流体力学、海洋生态动力学研究, E-mail: zhaoliang@tust.edu.cn

应, 结果显示海带架群消浪系数在 0.2~0.4。此外, 荣成外海存在自北向南的沿岸流, 由于该海域有大面积养殖区, 沿岸流主要影响养殖区外围^[15]。综上所述, 该区域水动力是海流、风、波浪、地形、养殖活动等多重因素综合作用的结果。基于前人的研究, 对于该海域的水文背景环境等有了一定认识, 然而至今为止的研究主要基于较短的时间观测序列或模型模拟, 长期观测资料的匮乏导致目前该海域海流季节变化特征和影响因素等尚未得到分析和解释。

长时间高质量的实测海流数据能够在垂向分布和不同时间尺度上多角度反映该海域水动力条件。利用 2016 年 1—10 月在荣成外海楮岛岬角南侧布放的浮标, 基于该长期海洋综合观测资料, 统计分析荣成外海海流特征, 分析潮流和余流特征, 并探究

海流变化特征与影响因素。

1 数据与预处理

1.1 数据来源

本文采用的数据源自 2016 年在荣成外海楮岛岬角南侧(122°33'38"E, 37°01'56"N)布放的 1 套综合观测浮标。图 1(a)中五角星标注处即为观测站点位置。该浮标站点在黑泥湾养殖区的西北侧边缘外, 与北侧楮岛岬角直线距离为 0.8 km, 距离西侧岸线约 2.5 km。该观测点水深在 7 m 左右, 海底沉积物为砂质。为保证数据质量, 进行了 3 次浮标的布放和回收, 以完成对仪器的检修和校准工作。本文数据的 3 个观测阶段分别为 1 月 22 日—2 月 13 日、3 月 17 日—6 月 20 日、7 月 12 日—10 月 17 日。

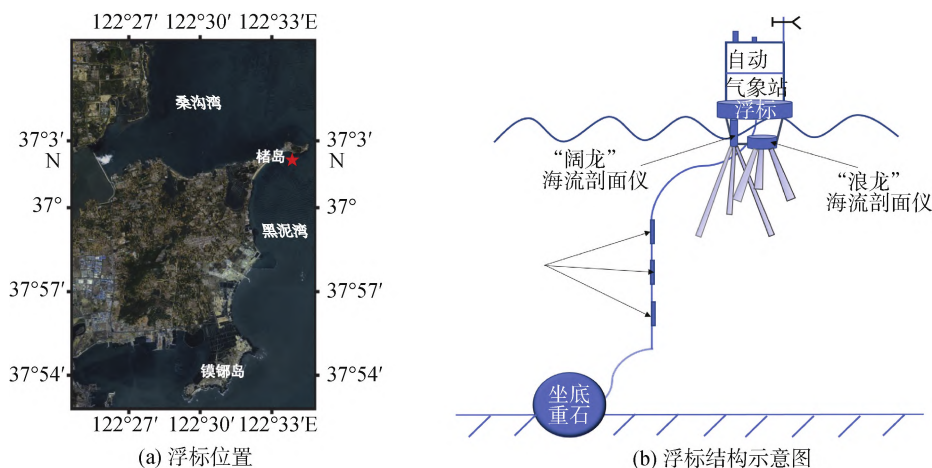


图 1 荣成外海(a)浮标位置和(b)浮标结构示意图

Fig. 1 (a) Location of the buoy station. (b) Schematic of the buoy structure in the Rongcheng offshore region

如图 1(b)所示, 浮标观测系统上部为总高度 3.5 m 的不锈钢支架, 在高度 3.2 m 处装载了 Young 公司的风向风速仪, 其测量范围为 0~100 m/s, 风速精度为读数 1%, 方向精度为±3°。风数据实时回传至 CR1000 数据采集器中并传回地面基站。在浮标中部, 装载了 2 款 Nortek 公司的声学多普勒海流剖面仪: 观测阶段 1 为采样频率 2 MHz 的“阔龙”流速剖面仪(Aquapro Profiler)和观测阶段 2、3 为采样频

率 600 kHz 的“浪龙”流速剖面仪(AWAC), 2 款测流仪器的采样分辨率均为 1 mm/s, 精确度均是海流流速测量值的 1%。两个仪器均采用下视工作方式, 换能器位置分别距水面 1.5 m 和 1.2 m。除上述测量仪器, 浮标配置了太阳能供电板用于实时供电, 支架上放置了 GPS16X-HVS 用于对浮标位置进行实时监控, 浮标系统底部有坐底重石以固定浮标位置。具体参数如表 1 所示。

表 1 2016 年观测起止时间和声学多普勒海流剖面仪参数设置

Tab. 1 Start and end times of the observations and settings of profiler in 2016

	起止时间	仪器	盲区/m	层厚/m	层数
观测阶段 1	1 月 22 日—2 月 13 日	“阔龙”	0.2	0.2	25
观测阶段 2	3 月 17 日—6 月 20 日	“浪龙”	0.5	0.5	20
观测阶段 3	7 月 12 日—10 月 17 日	“浪龙”	0.5	0.5	20

1.2 数据预处理

观测使用的测流仪器在输出实测数据文件时会进行移动校准, 仪器的俯仰角(pitch)和横滚角(roll)均在 $\pm 15^\circ$ 以内。以同一站点同一浮标相同测流仪器观测到的底层流速数据, 与楮岛岬角南侧相邻海床基观测点 S6 站($122^\circ 33' 54'' E$, $37^\circ 01' 59'' N$)同时期使用 ADV 观测的流速数据进行对比和相关性分析, 计算得到浮标数据的底层流速与海床基测得的流速东西分量之间的相关系数 R 值为 0.91, 证实了浮标系统与数据的可靠性。

观测使用的声学多普勒海流剖面仪采取下视工作方式, 可以通过回声强度特征实现对流速剖面数据的判断和预处理^[16]。由于 2016 年 1—2 月数据未全部测量到海底, 因此以回声强度小于 50 为判断阈值; 2016 年 3 月之后剖面数据则通过对 6 m 以深的相邻层回声强度差进行统计, 最终对每月流速剖面数据以相应的第 $n+1$ 层回声强度减去第 n 层回声强度大于 25 或 30 来对数据进行筛选。

由于观测过程中可能存在的不稳定性和信号噪声扰动, 在计算分析前, 基于统计理论的 Grubbs 准则^[17], 对海流、风速等实测数据进行了质量控制,

并对异常值进行去除和线性插值。本文将浮标原位观测的风速换算至 10 m 高度风速并进行 6 h 平均, 随后与 ERA-Interim 10 m 风速再分析数据(ERA, 即 ECMWF Re-Analysis, 来源于 European Center for Medium-Range Weather Forecasts^[18])离浮标点经纬度最近的网格进行对比验证, 经计算, 二者 10 m 风速相关系数为 0.73。浮标数据采集器未能采集到的第三观测阶段 9 月、10 月部分风速数据, 通过 ERA-Interim 风速再分析数据进行插值补齐。

2 海流特征分析

2.1 海流特征

观测期间内, 该浮标观测点流速东西分量变化范围为 $-0.72 \sim 0.79$ m/s(东向为正, 西向为负, 下文同), 流速南北分量的变化范围为 $-0.62 \sim 0.64$ m/s(北向为正, 南向为负, 下文同), 平均流速大小为 0.20 m/s, 最大值出现在 10 月 13 日, 最大值为 0.87 m/s。从图 2(a) 和图 2(b) 可以看出, 流速东西分量总体大于流速南北分量, 从图 2(c) 中可以看出流速大小存在明显季节变化, 夏秋季节的流速较大。

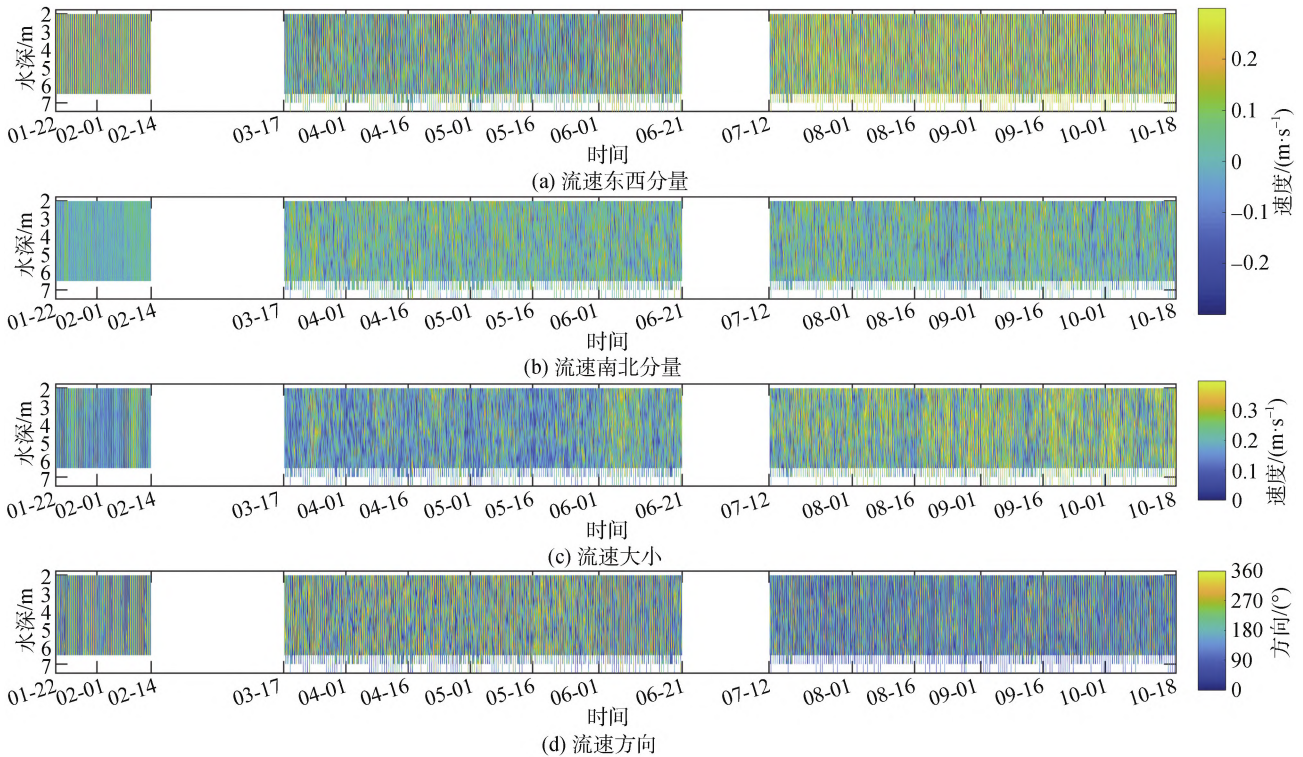


图 2 荣成外海流速时间序列剖面图

Fig. 2 Time-depth maps of (a) zonal velocity ($m \cdot s^{-1}$), (b) meridional velocity ($m \cdot s^{-1}$), (c) current magnitude ($m \cdot s^{-1}$), and (d) current direction ($^\circ$) in the Rongcheng offshore region

以 1、4、7、10 月为代表月(具体时间以 1 月 22 日—2 月 13 日代表冬季,以 4 月 1 日—4 月 30 日代表春季,以 7 月 17 日—8 月 15 日代表夏季,以 9 月 18 日—10 月 17 日代表秋季),对四季实测流速 C_{raw} 进行分级分向统计。结果如图 3 所示,可以看出,该浮标观测点流向以 E 向、W 向和 WNW 方向为主导,流速主要集中在 0~0.3 m/s,流速流向存在明显季节变化,冬季以东西向往复流为主;春季流速偏小,流向较分散,夏秋季涨落潮不对称现象比

较显著,东向流速增大。Fan 等^[10]通过观测流速和悬浮颗粒物浓度等数据分析研究得到,荣成近海潮流呈东西向往复运动,且涨落潮不对称,近岸泥沙、海底沉积物被带出近海区域,从而导致侵蚀事件的发生,该观测点涨落潮不对称特性与 Fan 等^[10]在邻近站位的研究结果一致。统计得到,冬季、春季、夏季、秋季的流速的平均值分别为 0.18 m/s、0.18 m/s、0.22 m/s、0.24 m/s,实测流速均值冬春季<夏季<秋季。

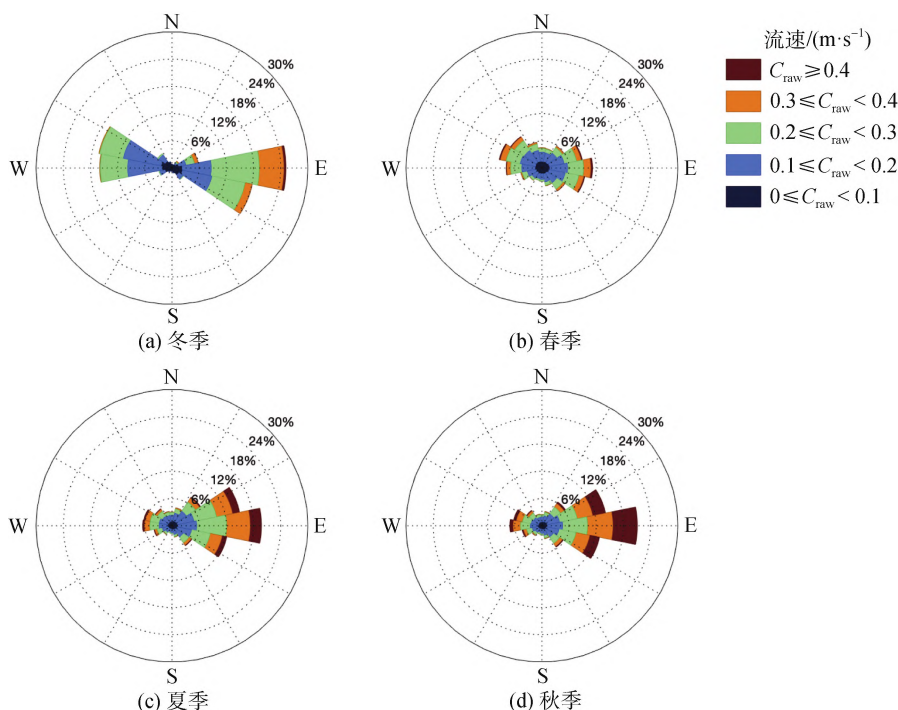


图 3 荣成外海实测流速玫瑰图

Fig. 3 Rose diagrams of measured currents in the Rongcheng offshore region

2.2 频谱分析

为分析海流时间序列的周期特征,对三个观测阶段实测流速的东西分量、南北分量分别作垂向平均,其后对三个观测阶段垂向平均流分别作功率谱分析,谱分析结果如图 4 所示,纵坐标频谱幅值 $\log_{10}C/(m^2 \cdot s^{-2} \cdot d)$ 指示着海流在不同的频率上的能量。图 4(a)中的谱线相对于图 4(b)、图 4(c)较稀疏,这是由于观测阶段 1 仅有 23 d,而观测阶段 2 和 3 时间长度近 100 d,因此阶段一的谱图在频域上的分辨率较低。从图 4 可以看出,流速存在多个显著周期。浮标观测站的垂向平均流能量在主要半日分潮 M_2 对应的频率处最大,具有较强的半日潮信号,图 4(b)、图 4(c)中主要半日分潮 S_2 存在谱峰。全日潮信号相对

较弱,全日分潮 K_1 存在谱峰,全日分潮 O_1 相对不显著。浅水分潮 M_4 能量值相比全日分潮高 2 个量级,浅水分潮 MS_4 和 M_6 能量也十分显著。浮标观测点的近惯性振荡频率为 $1.2045 d^{-1}$,所对应能量没有出现明显谱峰,说明该点近惯性振荡不显著。总的来说,三个观测时间段的谱线趋势较为一致,该观测点以半日潮为主,浅水分潮也有显著贡献。

3 潮流、余流特征分析

海流是多时间尺度信号共同作用的结果,通过调和分析、滤波等方法可以将海流分解成潮流和余流等部分。潮流是潮波现象在水平方向的表现形式,主要影响海域物质在潮周期内的运输,长时间序列

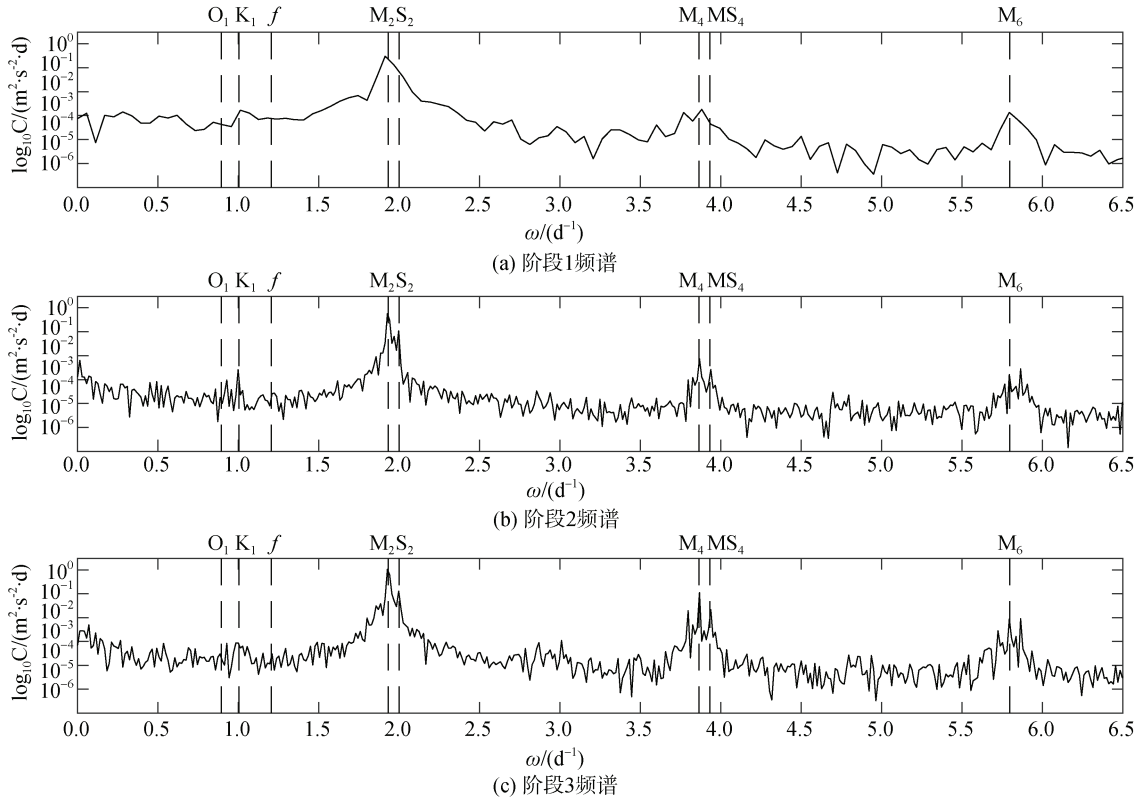


图4 实测流垂向平均流速频谱分析

Fig. 4 Calculated frequency spectra based on the depth-averaged current during (a) stage 1, (b) stage 2, and (c) stage 3

流速数据能够得到更准确的回报潮流值。余流是指实测海流中去掉周期性天文分潮后的部分，余流主要由海面风场、外海环流、河流径流等驱动。

3.1 潮流特征

采用 MATLAB 的 T_TIDE 工具包^[19]对 2016 年 1—10 月 2~6 m 水深中各层流速进行调和分析。结果显示，通过信噪比检验的分潮共 39 个。统计得到整个观测期间的潮流东西分量范围为-0.38~0.35 m/s(以东向为正)，潮流南北分量的范围为-0.06~0.08 m/s(以北向为正)，潮流速度平均值为 0.15 m/s，潮流速度最大值为 0.38 m/s。将四大分潮 M₂、S₂、O₁、K₁和浅水分潮 M₄、MS₄的潮流椭圆垂向分布绘制于图 5 中，图中右上角的图例正圆代表振幅单位大小 0.01 m/s，绘图程序中预设黑色代表潮流椭圆顺时针旋转，红色代表椭圆逆时针旋转，由图中可见，均为顺时针旋转。从图 5 中可以看出，M₂分潮绝对占优，对潮流起主导作用。S₂分潮为次显著分潮，浅水分潮 M₄、MS₄比全日分潮 O₁、K₁更为显著。椭圆长轴从海水上层到下层逐渐减小，潮流会出现越来越扁的情况。潮流在垂向上越接近海底，通常长半轴越小；上层

椭圆为右旋时，下层椭圆将逐渐变扁^[20]，本文结果与前人观测到的潮流垂向变化的一般结果相符。

各深度的分潮的长轴、短轴分别列于表 2 中。如表中所示，M₂分潮的最大流速的最大值出现在水深 2 m 处，大小为 0.220 m/s，随深度增加 M₂分潮最大流速逐渐减小，垂向上 M₂分潮最大流速变化量为 0.02 m/s。S₂分潮最大流速随深度增加而单调减小，最大流速约为 0.05 m/s。浅水分潮 M₄最大流速出现在中层，但整体上差异微小。浅水分潮 MS₄和全日分潮 K₁、O₁的最大流速相对较小。各分潮短轴垂向上整体差异较小。M₂分潮短轴垂向差异小，计算得到 M₂分潮椭圆率在-0.064 至-0.05。各主要分潮椭圆短轴均为负值，因此该海域各主要分潮的旋转方向一致，均为顺时针右旋。方国洪^[20]研究认为，分潮流最大流流向的垂向变化取决于分潮角频率 σ 和科式参量 f ， $\sigma > f$ 时，变动较小， $\sigma < f$ 时，随着接近海底而向左偏转。M₂分潮角频率大于该观测点科式参量，因此分潮流流向的垂向变化较小。近底层水深 5.5 m 处半日分潮和浅水分潮的调和常数倾角均大于上层水深 5 m 处和下层水深 6 m 处的调和常数倾角，这可能是由于下边界层底摩擦影响产生。但总体来说，主要分潮倾角垂向变动很小。

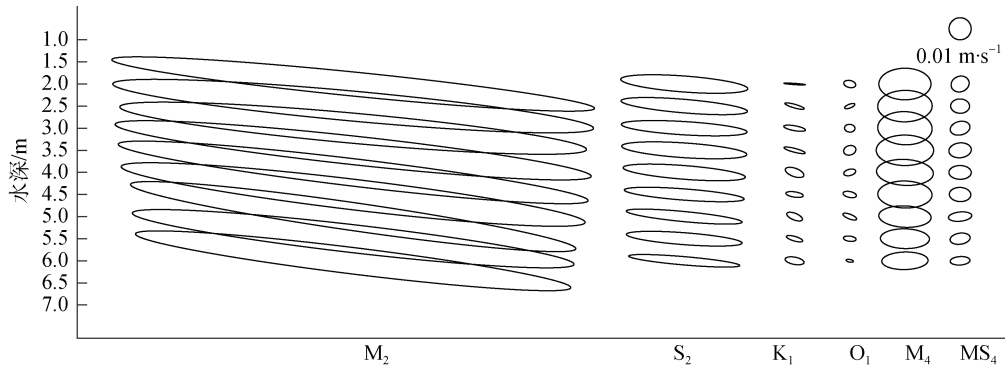


图 5 分潮潮流椭圆垂向分布图

Fig. 5 Vertical distribution of the tidal current ellipses

表 2 分潮椭圆长轴、短轴

Tab. 2 Major and minor axes of the tidal currents

水深/m	长轴/(m·s ⁻¹)						短轴/(m·s ⁻¹)					
	O ₁	K ₁	M ₂	S ₂	M ₄	MS ₄	O ₁	K ₁	M ₂	S ₂	M ₄	MS ₄
2.0	0.006	0.010	0.220	0.058	0.024	0.008	-0.003	-0.001	-0.011	-0.007	-0.014	-0.007
2.5	0.005	0.009	0.219	0.057	0.025	0.009	-0.002	-0.002	-0.014	-0.006	-0.014	-0.006
3.0	0.005	0.010	0.212	0.057	0.025	0.009	-0.004	-0.002	-0.014	-0.006	-0.015	-0.006
3.5	0.006	0.010	0.217	0.057	0.026	0.010	-0.004	-0.002	-0.013	-0.007	-0.014	-0.007
4.0	0.006	0.009	0.214	0.056	0.026	0.010	-0.003	-0.004	-0.012	-0.006	-0.012	-0.006
4.5	0.006	0.008	0.212	0.054	0.025	0.010	-0.003	-0.002	-0.014	-0.005	-0.012	-0.006
5.0	0.007	0.008	0.204	0.053	0.024	0.011	-0.002	-0.003	-0.013	-0.005	-0.010	-0.004
5.5	0.006	0.008	0.201	0.053	0.022	0.009	-0.002	-0.002	-0.013	-0.005	-0.009	-0.005
6.0	0.003	0.009	0.199	0.050	0.021	0.009	-0.001	-0.003	-0.012	-0.004	-0.008	-0.004

从图 5 可以看出, 主要分潮特征垂向变化较小, 因此可以根据垂向平均流调和结果对潮流特征进行定性定量描述^[21]。潮流性质的判别可根据式(1)确定, 式中 W 值为各分潮的潮流椭圆长半轴长度。当 $F \leq 0.5$ 时, 海域潮流性质为规则半日潮流。

$$F = (W_{O_1} + W_{K_1}) / W_{M_2} \quad (1)$$

根据得到的潮流调和常数计算得到本海域 F 值为 0.06, 因此观测海域潮流性质为规则半日潮流。这一结果与海洋图集结果相同^[22]。根据运动形式, 潮流可以分为往复流和旋转流, 一般以椭圆率 K 值判断, 具体公式如式(2)所示, 其中 ω 为潮流椭圆短半轴长度, W 为潮流椭圆长半轴长度。 K 的正负, 即椭圆短轴的正负, K 值为负时表示潮流椭圆顺时针旋转, K 值为正时表示潮流椭圆逆时针旋转^[20]。 K 的绝对值越大, 旋转流性质越显著, 若 K 的绝对值在 0~0.2 时, 则判定为往复流。

$$K = \pm(\omega / W) \quad (2)$$

通过计算得到 M_2 分潮 K 值为 -0.06, 即该海域

表现为往复流特征。原因可能是观测站点离海岸和北侧楮岛岬角近, 受岸线和地形约束。由于观测站点海域水深较浅, 因此浅水分潮的效应不可忽视。一般以 G 值[公式(3)]来判断浅水分潮是否显著, 当 G 值 > 0.04 时, 表明浅水效应显著。

$$G = (W_{M_4} + W_{MS_4}) / W_{M_2} \quad (3)$$

通过计算得到 G 值为 0.15, 大于判别标准近 4 倍, 即该海域浅水分潮效应显著。

3.2 余流特征

在余流的计算方面, 前人主要通过实测流速减去调和分析回报潮流, 或进行不同截止频率的低通滤波。本文实测流速数据为 300 s 高频采样, 在调和分析后去潮余流结果中, 可能存在对风瞬时响应的信号, 而低通滤波则会过滤掉高频组分。为下一步分析余流的影响因素和对大气强迫的响应, 选择实测流经调和去潮后得到的余流 C_{res} 结果进行分析。统计得到整个观测时间段内, 荣成外海浮标观测点天平余流东西分量变化范围为 -0.05~0.16 m/s,

天平均余流南北分量变化范围为-0.06~0.09 m/s, 最大值为 0.16 m/s, 均值为 0.05 m/s, 平均速度对应方向为 69°, 呈现往东运移的特征对泥沙物质的长期向外输运作用不容忽视。

进一步分级分向统计, 得到了该观测站点的日平均余流季节变化特征, 四季余流玫瑰图如图 6 所示,

四季均使用同一个区间分级分向。从图中可以看出, 余流流速流向季节变化均十分明显, 四季余流流向均以东向或东北向为主, 较大的速度值也出现在落潮流方向。计算得到余流冬季、春季、夏季、秋季的季节平均值分别为 0.03 m/s、0.04 m/s、0.07 m/s、0.10 m/s。

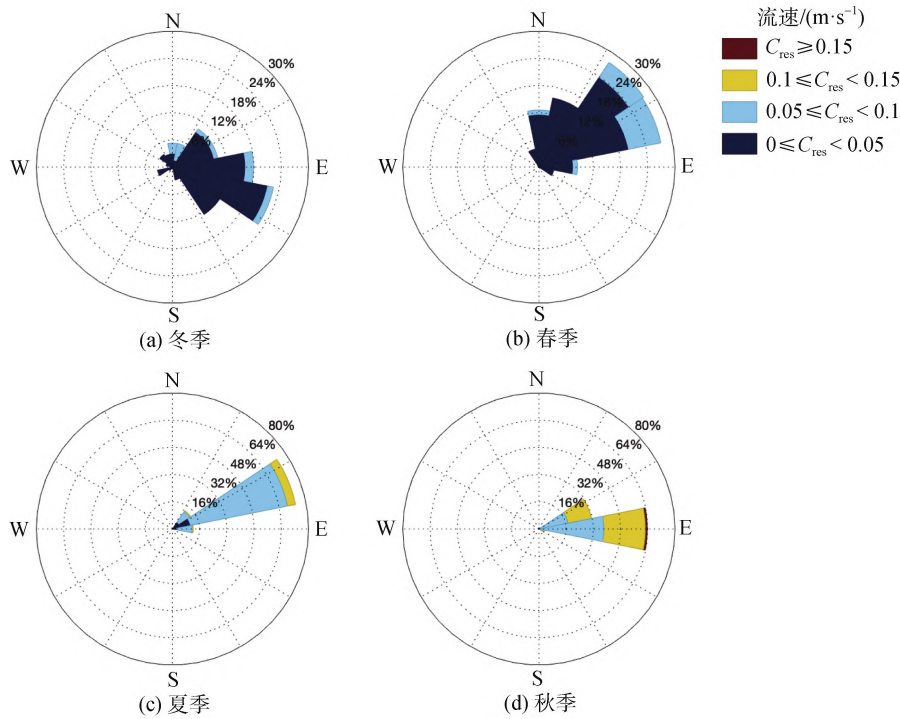


图 6 荣成外海余流玫瑰图

Fig. 6 Rose diagrams of the residual currents in the Rongcheng offshore region

3.3 风对余流的影响

余流特征往往是风场、陆源输入、地形、人类养殖活动、海岸工程建设等多种因素综合作用的结果。在浅海区域, 局地风对海流影响显著^[23]。风场的非线性作用对余流有一定影响, 如在潮流相对较弱时, 余流对风响应较为显著, 余流和风的相关性较好^[24]。本文涉及的研究站位水深约 7 m, 余流对风的响应更快, 且风的影响可以直至海底。为具体分析风 S_w 对余流的影响大小, 首先统计了与流速对应的四季风速风向概率, 结果如图 7 所示。从图 7 中可以发现, 荣成外海实测风速风向季风特征显著。通过统计得到, 冬季盛行 W、WNW、NW、NNW、N 向风, 春季风向分散于 16 个分方向, 夏季集中于 WSW、W、WNW 3 个方向内, 秋季主要集中于 NNE、SSE、S、SSW、NNW 方向内。结合风向与余流流向(图 6), 可以发现, 冬、夏季风向和余流流向的主要方向有较好

的对应关系。秋季风向和余流流向关系不明显, 可能受多种因素影响。并且由于秋季原位观测的风数据缺测而使用 ERA 数据代替, 尽管 ERA 数据与原位风速变化趋势相符, 但仍然不能排除 ERA 数据在近岸的不确定性。将四季风速分级的概率统计列于表 3 中, 从表中可以看出, 冬季各级风速概率大致相当, 春、夏季主要集中在 0~6 m/s, 秋季大于 8 m/s 的风速概率显著增高。

统计荣成外海 2016 年 1—10 月浮标观测站的所有风速风向情况, 以风速大于等于 13.9 m/s(风级大于等于 7)为强风天气情况, 风速小于等于 3.4 m/s(风级小于等于 2)为弱风天气情况, 得到强风和弱风天气下 10 min 平均的风和余流的对比, 如图 8 所示。弱风条件下, 余流信号以潮致余流为主, 余流的特征变化较小。共统计弱风天气累计时长为 97 d。弱风风向较为分散, 概率高于 10% 的风向有 WSW、W、

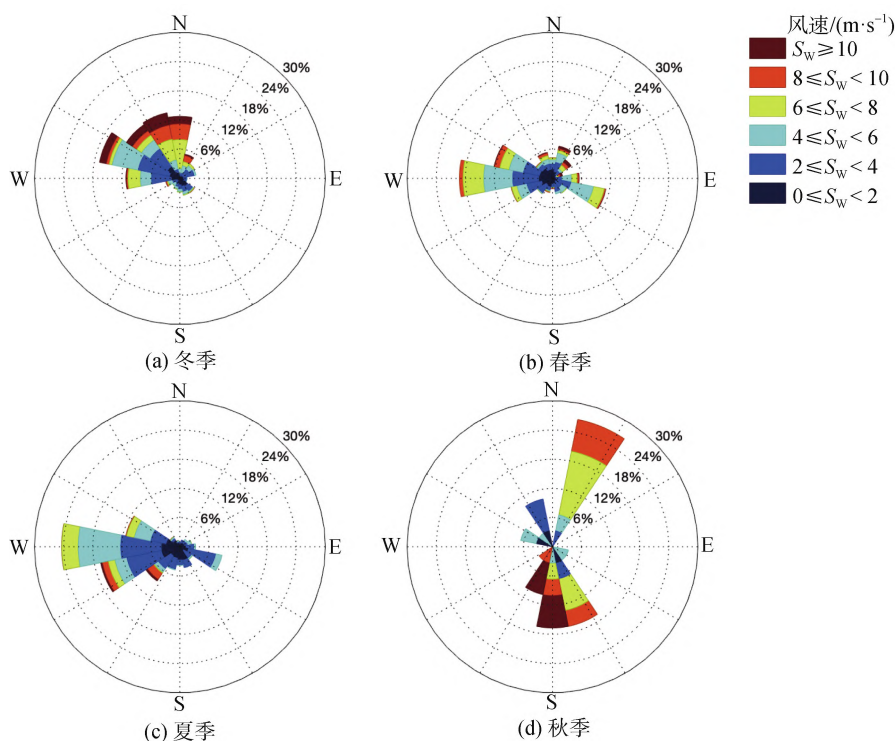


图 7 荣成外海风玫瑰图
Fig. 7 Rose diagrams of the wind in the Rongcheng offshore region

表 3 荣成外海四季风速分级概率统计对比表
Tab. 3 Statistical comparison of the wind speeds in four seasons in the Rongcheng offshore region

概率/%	风速/(m·s ⁻¹)					
	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	>10
冬季	17.7	28.6	19.1	17.3	9.8	7.5
春季	23.6	29.9	24.7	14.8	5.1	2.0
夏季	29.1	40.0	19.9	7.0	3.1	0.8
秋季	10.0	13.3	20.0	23.3	20.0	13.3

WNW。从图 8(c)中可以看出,在弱风条件下,余流流向主要集中于 NNE—ESE,余流流速大于 0.15 m/s 的概率为 25%。风速大于 13.9 m/s 属于少发天气事件,从图 8(d)中可以看出,余流流向在 7 级以上的强风事件中,余流流向发生明显的变化。

风速实测数据中,2 月 13 日强风持续时间最长。如图 9 所示,在 2 月 9 日到 2 月 10 日风速较小时,余流基本稳定地向北流动,在 2 月 10 日至 2 月 11 日北风增强的过程中,北向余流有相应的小幅增大。值得注意的是,2 月 13 日风往南吹且风速逐渐增大,在 2 月 13 日 18 时之后,持续保持在风力 7 级以上,此时的余流由之前的稳定向北流动转而向南流动,但

由于和弱风条件下的背景余流方向相反,因此 2 月 13 日的余流速度值并未明显增大。进一步使用 N-CCF 函数(the normalised cross-correlation function)^[25]计算得到 2 月 9 日至 2 月 13 日的风速和余流流速的互相关系数,图 9(c)的 x 轴代表风速和余流流速的超前滞后时间,当 x 轴值为正时,代表风速变化超前于余流流速变化。如图 9(c)所示,两者的互相关系数最大值为 0.68。而仅计算 2 月 13 日 18 时之后的强风事件时间段,风速和余流流速的互相关系数可达到 0.95,风速和实测流速的相关系数达-0.49,和余流流速的相关系数为-0.35。从中可以发现,强风事件对该海域的余流有着显著的影响,甚至使余流转向。

4 结论

基于 2016 年荣成外海的浮标观测数据,本文分析了荣成外海海流特征和影响因素,得到结论如下:

1) 荣成外海浮标观测点流速东西分量总体大于南北分量,实测流速平均流速大小为 0.20 m/s,最大值为 0.87 m/s,实测流速存在明显的季节差异,流速均值冬季<夏季<秋季。该海域存在涨落潮不对称现象,指征侵蚀事件。

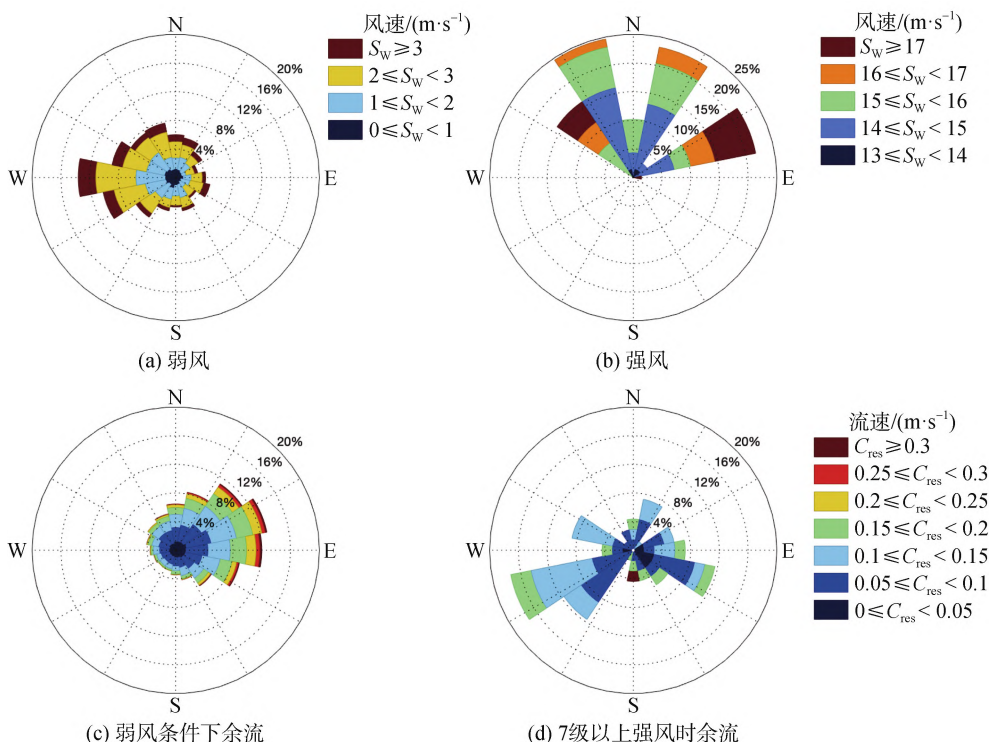


图 8 (a)弱风, (b)强风, (c)弱风时余流和(d)强风时余流对比玫瑰图(风向为来向, 流向为去向)

Fig. 8 Rose diagrams of the comparison of (a) weak wind, (b) strong wind, (c) residual currents under weak wind, and (d) residual currents under strong wind (wind directions are the directions from which the winds come from, and current directions are the directions to which the currents are going)

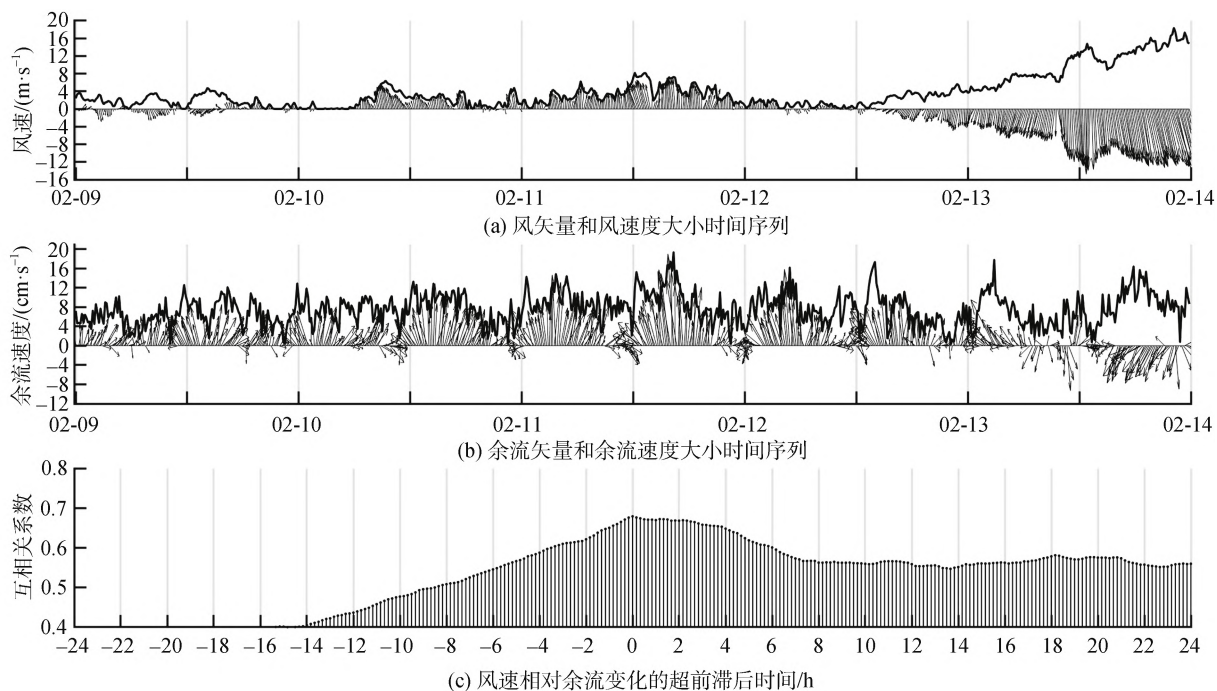


图 9 荣成外海 2 月 9 日—13 日(a)风、(b)余流及(c)风速和余流速度的互相关系数

Fig. 9 Temporal variations of the (a) wind, (b) calculated residual current, and (c) correlation between the wind speed and residual current during 9–13 February

注: (a)(b)中黑色加粗线为速度值, 黑色箭头为速度矢量; (c)中 x 轴代表风速和余流速度的超前滞后时间, 值为正时, 代表风速变化超前于余流流速变化。风矢量和流矢量均为去向

2) M_2 分潮绝对占优, 观测海域潮流性质为规则半日潮流, 潮流以往复流形式运动, 各层潮流均为顺时针旋转, 浅水分潮十分显著。该点观测得到的最大潮流流速为 0.38 m/s。

3) 余流显著弱于潮流, 天平均余流均值为冬季<春季<夏季<秋季; 流向上 E 和 ENE 向占优。天平均余流均值为 0.05 m/s, 相对潮流流速较小; 余流平均速度对应方向为 69° , 由此看来, 该海域总体呈现往东运移的特征。

4) 弱风条件下, 余流流向主要集中于 NNE—ESE, 余流流速大于 0.15 m/s 的概率为 25%。强风条件下风速和流速的互相关系数可达 0.95。

参考文献:

- [1] 冯士筌, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
FENG Shizuo, LI Fengqi, LI Shaojing. Introduction to ocean science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [2] 曹慧慧, 陈元, 赵骞, 等. 辽东湾东部秋季海流特征的同步观测研究[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(4): 615-620.
CAO Huihui, CHEN Yuan, ZHAO Qian, et al. Study on the current characteristics in the eastern area of Liaodong bay in autumn based on synchronous observations[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38(4): 615-620.
- [3] JACKSON G A, WINANT C D. Effect of a kelp forest on coastal currents[J]. Continental Shelf Research, 1983, 2(1): 75-80.
- [4] 蔡继晗, 李凯, 郑向勇, 等. 水产养殖对环境的影响及其防治对策分析[J]. 水产养殖, 2010, 31(5): 32-38.
CAI Jihan, LI Kai, ZHENG Xiangyong, et al. The influences of aquaculture on environment and the prevention strategy analysis[J]. Journal of Aquaculture, 2010, 31(5): 32-38.
- [5] 徐宗军, 张绪良, 张朝晖. 山东半岛和黄河三角洲的海岸侵蚀与防治对策[J]. 科技导报, 2010, 28(10): 90-95.
XU Zongjun, ZHANG Xuliang, ZHANG Zhaohui, et al. Coastal erosion in Shandong Peninsula and Yellow River Delta and related countermeasures[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(10): 90-95.
- [6] 马立杰, 崔迎春, 王海荣. 运用因子分析评价山东黑泥湾沉积物重金属污染来源[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(4): 57-61.
MA Lijie, CUI Yingchun, WANG Hairong. Source of heavy metal contamination in Heini Bay sediments: A case study using factor analysis[J]. Marine Geology
- Frontiers, 2012, 28(4): 57-61.
- [7] 陈吉余. 中国海岸带地貌[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
CHEN Jiyu. China's coastal landscape[M]. Beijing: China Ocean Press, 1996.
- [8] 刘艳霞, 黄海军, 樊建勇, 等. 黑泥湾近岸悬沙分布与扩散变化监测[J]. 海洋科学, 2009, 33(1): 25-29.
LIU Yanxia, HUANG Haijun, FAN Jianyong, et al. Detection of distribution change and diffusion of suspended sediment concentration around Heini Bay[J]. Marine Sciences, 2009, 33(1): 25-29.
- [9] 严立文. 浅海区海带养殖的沉积环境效应及动力机制[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008.
YAN Liwen. Sedimentary environment evolution in representative kelp (*laminaria japonica*)-cultured region (Harny Bay) and inner hydrodynamic mechanism[D]. Qingdao: Institute of oceanology, Chinese academy of science, 2008.
- [10] FAN R F, WEI H, ZHAO L, et al. Identify the impacts of waves and tides to coastal suspended sediment concentration based on high-frequency acoustic observations[J]. Marine Geology, 2019, 408: 154-164.
- [11] 庄振业, 刘冬雁, 刘承德, 等. 海岸带地貌调查与制图[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(9): 25-32.
ZHUANG Zhenye, LIU Dongyan, LIU Chengde, et al. Geomorphological survey and mapping of coastal zone[J]. Marine Geology Letters, 2008, 24(9): 25-32.
- [12] 庄振业, 曹立华, 李兵, 等. 我国海滩养护现状[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 133-139.
ZHUANG Zhenye, CAO Lihua, LI Bing, et al. The current state of beach maintenance in our country[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(3): 133-139.
- [13] 宫立新. 山东半岛东部海滩侵蚀现状与保护研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
GONG Lixin. erosion situation and protection of beach in eastern part of shangdong peninsula[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [14] 樊星. 典型养殖海区潮动力结构特征的初步研究——观测与数值模拟[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
FAN Xing. Preliminary studies on the features of tidal-dynamic structure in a typically high density mariculture coastal bay-observation and simulations[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [15] 朱述龙, 张占睦. 遥感图像获取与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
ZHU Shulong, ZHANG Zhanmu. Remote sensing image acquisition and analysis[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [16] 任少华, 周冲, 叶小凡. 海流测量数据的后处理探究[J]. 海洋技术, 2013, 32(4): 63-66.
REN Shaohua, ZHOU Chong, YE Xiaofan. Research on the post-processing of current velocity data[J]. Journal

- of Ocean Technology, 2013, 32(4): 63-66.
- [17] 刘首华, 陈满春, 董明媚, 等. 一种实用海洋浮标数据异常值质控方法[J]. 海洋通报, 2016, 35(3): 264-270.
LIU Shouhua, CHEN Manchun, DONG Mingmei, et al. Research on the Post-Processing of Current Velocity Data[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(3): 264-270.
- [18] SONG L N, LIU Z L, WANG F. Comparison of wind data from ERA-Interim and buoys in the Yellow and East China Seas[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(1): 282-288.
- [19] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [20] 方国洪. 潮流垂直结构的基本特征——理论和观测的比较[J]. 海洋科学, 1984, 8(3): 1-11.
FANG Guohong. Basic characteristics of vertical structure of tidal current-comparison between theory and observation[J]. Marine Sciences, 1984, 8(3): 1-11.
- [21] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. JTS 145—2015, 港口与航道水文规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 107-112.
- CCC First Harboar Consultants Co Ltd (FDINE). JTS 145—2015, Code of Hydrology for Harbour and Waterway[S]. Beijing: China Communications Press, 2015: 107-112.
- [22] 海洋水文图集编辑委员会. 渤海黄海东海海洋图集: 水文[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
Editorial Board for Marine Atlas of Bohai Sea Yellow Sea East China Sea. Marine Atlas of Bohai Sea Yellow Sea East China Sea: Hydrology[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [23] 赵保仁. 局地风对黄海和东海近岸浅海海流影响的研究[J]. 海洋与湖沼, 1982(6): 479-490.
ZHAO Baoren. A study of the effects of local wind on currents in the off-store areas of the east China sea and huanghai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1982(6): 479-490.
- [24] 胡锋涛, 陶宇. 浙中沿岸流及其对风和潮汐的响应[J]. 海洋科学, 2019, 43(12): 50-58.
HU Fengtao, TAO Yu. Coastal current and its response to wind and spring—Neap cycles in the middle Zhejiang coastal area[J]. Marine Sciences, 2019, 43(12): 50-58.
- [25] TSAI D M, LIN C T, CHEN J F. The evaluation of normalized cross correlations for defect detection[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(15): 2525-2535.

Characteristics and influencing factors of the currents in the Rongcheng offshore region

WEI Shi-yan¹, YANG Wei², ZHAO Liang¹

(1. College of Marine and Environmental Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Received: Apr. 12, 2021

Key words: observed current; tidal harmonic analysis; tidal current; residual current; Rongcheng offshore region

Abstract: Rongcheng is an important mariculture city in China. To determine the characteristics of ocean currents in the Rongcheng offshore region, we investigated the features of the measured currents using spectral and harmonic analysis methods based on the in situ observations obtained from a moored buoy south of the Chudao Island from January to October 2016. The tidal and residual currents are analyzed separately. The influencing factors of the residual currents are highlighted. The main conclusions are as follows. (1) The zonal component of the velocity generally has larger amplitudes than the meridional component. The average and maximum values of the measured velocity are 0.20 and 0.87 m/s, respectively. In addition, the velocity of the currents shows strong seasonal variation; the velocity is the strongest in autumn, followed by summer and weakest in winter and spring. Significant asymmetries between flood and ebb flow are observed. (2) The observed currents are dominated by the M_2 tidal component and the shallow water tide is significant. Further analysis shows that the dominant tide belongs to a type of regular semidiurnal tidal current that rotates clockwise in all layers. The observed tidal current velocity is 0.38 m/s. (3) The residual current is relatively small compared to the tidal component. The daily averaged residual flow is the largest and smallest in autumn and winter, respectively. E and ENE are dominant, and the residual current generally exhibits the characteristics of eastward migration. Under the condition of weak wind, the residual current is primarily in the NNE–ESE direction. Approximately 25% of residual flow velocity is greater than 0.15 m/s. The correlation coefficient between the wind speed and velocity under strong wind conditions can reach 0.95. The strong wind speeds in summer and autumn may account for the increase of the residual velocity during that time.

(本文编辑: 丛培秀)