

浙中沿岸流及其对风和潮汛的响应

胡锋涛, 陶宇

(浙江海测科技有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要: 根据浙江中部近海 2018 年 4 月—2018 年 10 月的近岸锚系流速观测数据和同步的风速风向数据, 结合锚系点周边水域全潮大、中、小潮水文观测资料, 进而分析了该海域水流的变化特征。锚系点余流主要沿着与等深线平行的方向(东北-西南向), 余流散点图的主轴方向为 25.5°(东北偏北向), 沿着主轴方向的余流与垂直于主轴方向的余流标准差分别为 0.12 m/s 和 0.02 m/s。余流北分量和风速北分量具有良好的相关性, 两者月平均时间序列的相关系数达到了 0.96, 逐时整点时间序列的相关系数为 0.69。锚系点余流具有 13.37 d 和 28.49 d 的周期性变化特征, 该周期与大、小潮的更替周期非常接近。小潮期间, 潮流的强度相对较弱, 余流对风的响应较为显著, 余流和风的相关性较好, 两者相关系数为 0.72; 而在大潮期间, 潮差较大且潮流流速较强, 余流和风的相关性相对较差, 两者相关系数为 0.30。本研究, 得到了锚系点及其周边水域的流速分布特征, 初步获悉天文潮和风场等的非线性作用对研究区域潮流和余流的影响, 可以为浙江中部沿岸海洋开发和环境保护提供动力学方面的依据。

关键词: 浙江中部近海; 沿岸流; 风生流; 天文潮; 余流周期变化

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)12-0050-09

DOI: 10.11759/hyxx20190423001

近岸流是近岸泥沙、温度、盐度、污染物和营养盐等物质净运输的主要动力, 而风是近岸流的主要驱动力之一, Smith^[1]、Huyer 等^[2]、Hickey 和 Hamilton^[3]研究指出, 沿岸风对沿岸流有较大影响, 近岸水位也会随之变化。此外, 当潮波从大洋传入近海时, 由于水深变浅, 非线性作用增强, 水深地形的非线性作用增强了潮致余流^[4], 在强潮流海区, 潮流对余流的贡献是不可忽视的。

浙闽沿岸流是中国近海沿岸流的重要组成部分, 浙闽沿岸流在浙南海域和台湾海峡西部海域的时空变化和动力学机制已经有了一定的研究^[5-13]。这些研究中, 有些认为风是浙闽沿岸流的主要影响因素^[6, 8, 11]; 有些认为浙闽沿岸流为风和海岸开尔文陷波共同作用的结果^[5, 7]; 此外, Shen^[13]认为压强梯度力是浙闽沿岸流的主要影响因素, Huang^[9]认为浙闽沿岸流为风和压强梯度力共同作用的结果, Li^[12]则认为浙闽沿岸流受到风应力、压强梯度力、海岸开尔文陷波、地形等要素的综合影响。

相对于浙南海域和台湾海峡西部海域, 浙闽沿岸流在浙中海域的研究还落后甚远, 浙闽沿岸流在浙中海域的时间变化及其动力学机制还不清楚。张慧等^[14]根据浙江近海 8 个浮标监测站四季各连续 40 d

的海流观测资料, 经比较分析后认为, 浙江近海沿岸流主要受到长江冲淡水和浙闽沿岸流的控制。李鹏等^[15]根据浙江近海 3 个锚系点夏季的观测资料, 对锚系点余流特征进行分析后认为, 长江冲淡水主要影响浙江中北部海域, 当长江径流量较小时, 长江冲淡水向南扩散明显, 其影响范围从长江口以南一直至浙江中北部, 使得该海域夏季也存在向南的沿岸流; 在浙江南部海域, 夏季余流主要受到季风的作用, 余流方向为东北向; 夏季浙江沿岸流应该是受到台湾暖流的牵引, 在浙江中部逐渐向东偏转, 进入水深较大的海域。张慧等^[14]和李鹏等^[15]的研究主要是定量统计分析了锚系点平均余流的分布特征, 进而推断余流的影响因素, 并未分析余流的时间变化特征, 同时也没有分析余流与风、压强梯度力等要素的同步变化及相互间的相关关系。

本文研究基于东海西部台州列岛以南 1 个锚系

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-07-25

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ19D060007)

[Foundation: Zhejiang Provincial Natural Science Foundation, No.LQ19D060007]

作者简介: 胡锋涛(1986-), 男, 浙江杭州人, 工程师, 学士, 从事海洋测绘和海洋水文方面的研究, 电话: 0571-86875702, E-mail: 469633751@qq.com

点连续 7 个月的锚系流速观测数据以及 6 个水文站大中小潮的全潮水文观测资料,研究了观测期间该海域流场的时间变化及其垂向分布特征,分析了风和潮汐变化对该海域近岸流的影响,计算了观测期间锚系点余流的周期性变化。

1 观测与研究方法

1.1 资料获取

在浙江台州列岛南部水域布设了一个锚系流速观测点(图 1),锚系点水深约为 15 m,西面距离温岭海岸约为 20 km,北面距离下大陈岛约为 15 km,锚系观测时间为 2018 年 3 月 31 日—2018 年 11 月 7 日。观测仪器采用 Nortek 公司生产的声学波浪流速剖面仪(acoustic wave and current, 简称 AWAC),型号为 Nortek AWAC 600 kHz,流速测量精度为测量值的 $1\% \pm 0.5 \text{ cm/s}$ 。观测期间,流速剖面采样间隔为 10 min,水层采样厚度为 0.5 m,采样层数为 50 层。为了按整月开展余流分析,本文所选取的数据从 2018 年 4 月 1 日 0 时 0 分开始,截至 2018 年 10 月 31 日 23 时 50 分,在这期间的有效数据获取率为 88.15%(表 1)。缺失的数据主要发生在 7 月 9 日—7 月 11 日、7 月 31 日—8 月 4 日和 9 月 17 日—10 月 8 日,均为仪器发生倾斜所致;另有 2 个时间段的数据缺失发生在仪器更换维护期间,但都不超过 4 h。缺失的数据采用 Pawlowicz 等^[16]提供的 T_TIDE 程序进行潮流预报补充完整:由于 9 月 17 日之前缺测数据较少,共缺测了 926 组数据,约 6.43 d,因此,首先根据 4 月 1 日至 9 月 16 日的流速时间序列进行潮流调和,得到潮流调和常数,然后,根据计算的潮流调和常数进行潮流预报,得到观测期间各缺测时间段的潮流。

于 2018 年 8 月下旬至 9 月中旬期间,在台州列岛西南水域开展了一次全潮水文观测,共布设了 6 个定点流速观测站(图 1)。由于观测水域潮流为规则半日潮流,分别在大、中、小潮期间各进行连续 26 h(前后合计 27 次整点)的流速流向观测,保证每个潮流观测两个完整的涨、落潮流周期。观测仪器采用 Nortek 公司生产的声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler, 简称 ADCP),型号为 Aquadopp Profiler 1 MHz,流速测量精度为测量值的 $1\% \pm 0.5 \text{ cm/s}$ 。流速剖面采样间隔为 10 min,水层采样厚度为 0.5 m,采样层数为 50 层。大、中、小潮期间的有效数据获取率均为 100%。

此外,收集了锚系观测期间的大陈岛气象站 10 min 平均的逐时风速风向观测资料。为比较分析风向和流向的同步变化过程,本文对风向的定义采用跟流向同样的定义方法,即正南风为 0° ,沿着顺时针方向旋转,正西风为 90° ,正北风为 180° ,正东风为 270° ,等等。

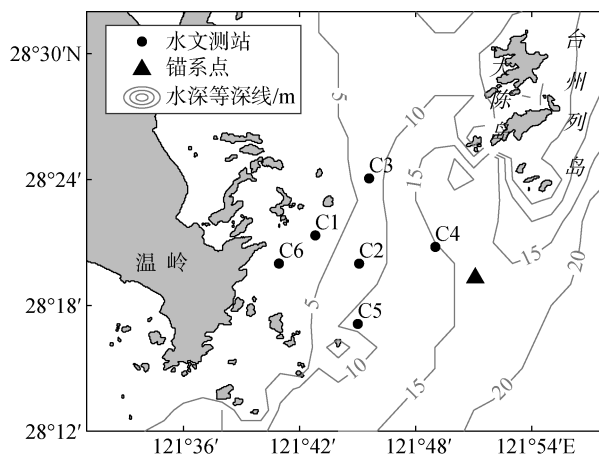


图 1 研究区域与站、点位布置图
Fig. 1 Study area and survey stations

表 1 观测时间和观测要素

Tab. 1 Observation time and elements

观测项目	资料时间/(年-月-日 T时:分)	观测要素	采样频率/min	数据完整率/%
锚系观测	2018-04-01 T00:00—2018-10-31 T23:00	流速、流向	10	88.15
大陈岛气象收集	2018-04-01 T00:00—2018-10-31 T23:00	风速、风向	60	100
小潮水文观测	2018-08-20 T09:00—2018-08-21 T11:00	流速、流向	10	100
中潮水文观测	2018-08-23 T09:00—2018-08-24 T11:00	流速、流向	10	100
大潮水文观测	2018-09-12 T15:00—2018-09-13 T17:00	流速、流向	10	100

1.2 坐标系转换

由于潮汐的作用,海平面高度是随时间变化的。锚系观测期间,锚系点位置的平均水深约为 15.2 m,平均潮差为 3.47 m,海面波动的部分超过水深的 1/5,

说明海面高度变化对水深的影响非常显著。在 z 坐标系(绝对水深坐标系)下,最低海平面以下水层的观测数据是连续完整的,而最低海平面以上水层的数据则是断断续续的,所以在 z 坐标系下分析上层海水

的流动特征较为困难。

σ 坐标系(相对水深坐标系)的优点是表层随着海面自由变化,因而更适用于潮差大的近岸水域。本文通过垂向坐标系的转换,把流速剖面观测数据从 z 坐标系转换到 σ 坐标系,不仅可以充分利用近海面的剖面观测数据,而且有利于对观测数据的处理分析,特别是数据插值和数据平滑等。

垂向上选取 σ 层数为 11 层,即表层、 $0.1H$ 层、 $0.2H$ 层、 $0.3H$ 层、 \dots 、 $0.8H$ 层、 $0.9H$ 层、底层,其中 H 为各流速剖面采样时的水深。由于锚系点位置的平均水深只有 15.2 m,因而 11 个 σ 层可以得到较好的垂向分辨率。此外,需要说明的是,由于采用海床底座观测方式,底层距离海底约 1.1 m(其中波浪流速剖面仪探头离海底约 0.6 m,仪器观测的盲区 0.25 m,半层厚度为 0.25 m);另外,由于旁瓣作用,表层流速并非海面流速,而是近海面的流速。

1.3 余流计算

对于锚系点观测数据,首先把矢量流速分解为东分量和北分量,然后采用 Godin-type 滑动平均滤波器^[17]滤掉高频的混淆信号^[18]:

$$\frac{A_n^2 A_{n+1}}{n^2 (n+1)}, \quad (1)$$

其中 A_n 和 A_{n+1} 分别为 n 个和 $n+1$ 个连续采样数据的平均值。由于流速剖面采样间隔为 10 min,即每小时获取 6 组剖面数据,取值 $n=6$ 可以较好地滤掉高频的混淆信号,即对流速东分量和北分量分别进行两次 6 个连续采样数据的滑动平均和一次 7 个连续采样数据的滑动平均。滤波后,提取整点的东分量和北分量剖面流速数据。

滤波后的整点数据中,包含全日的、半日的以及周期更短的潮流信号。通过再次使用 Godin-type 滑动平均滤波器,取 $n=24$ 可以较好地滤掉这些周期的潮流信号,即对流速东分量和北分量分别进行两次 24 个连续采样数据的滑动平均和一次 25 个连续采样数据的滑动平均。

对于全潮水文站观测的流速数据,则采用准调和分析方法^[19]计算大、中、小潮期间的余流。

2 结果与分析

2.1 锚系点余流

至此,通过采用 Godin-type 滑动平均滤波器,已计算得到了 2018 年 4 月—2018 年 10 月整点余流剖

面的时间序列,垂向上分为 11 个 σ 层。接着,根据式(2)一式(5)可计算得到整点垂向平均余流的时间序列。

$$v_{ave} = (v_{sur} + 2v_{0.2H} + 2v_{0.4H} + 2v_{0.6H} + 2v_{0.8H} + v_{bot}) / 10, \quad (2)$$

$$u_{ave} = (u_{sur} + 2u_{0.2H} + 2u_{0.4H} + 2u_{0.6H} + 2u_{0.8H} + u_{bot}) / 10, \quad (3)$$

$$U_{ave} = (u_{ave}^2 + v_{ave}^2)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\theta_{ave} = \begin{cases} 90 - \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{v_{ave}}{u_{ave}}\right), & u_{ave} > 0 \\ 270 - \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{v_{ave}}{u_{ave}}\right), & u_{ave} < 0, \\ 0, & v_{ave} > 0, u_{ave} = 0 \\ 180, & v_{ave} < 0, u_{ave} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, H 为水深, v_{sur} 、 $v_{0.2H}$ 、 $v_{0.4H}$ 、 $v_{0.6H}$ 、 $v_{0.8H}$ 、 v_{bot} 分别表示表层、 $0.2H$ 层、 $0.4H$ 层、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 层、底层的北分量余流流速; u_{sur} 、 $u_{0.2H}$ 、 $u_{0.4H}$ 、 $u_{0.6H}$ 、 $u_{0.8H}$ 、 u_{bot} 分别表示表层、 $0.2H$ 层、 $0.4H$ 层、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 层、底层的东分量余流流速, U_{ave} 为垂向平均余流流速, θ_{ave} 为垂向平均余流流向。

通过余流散点分布图(图 2a)可以看出垂向平均余流的主要分布规律。从图中可以看出,余流方向主要为东北-西南向。利用主成分分析的方法^[20-21],计算了余流散点图的主轴方向,即图 2a 中椭圆(红色)的长轴方向,该主轴方向约为 25.5° (正北为 0° ,沿顺时针向旋转,正东为 90°)。椭圆长轴长表示余流沿着主轴方向分量的标准差,短轴长表示垂直于主轴方向余流分量的标准差,长轴长和短轴长分别为 0.12 m/s 和 0.02 m/s。余流主轴方向与 15 m 等深线的走向基本一致,说明沿着等深线方向的余流变化是主要的,垂直于等深线方向的余流变化量只有主轴方向变化量的 1/6。

根据整点垂向平均余流的时间序列,余流玫瑰分布图(图 2b)显示了余流流速和流向的分布特征。余流流速的统计结果表明(表 2),62.0%的垂向平均余流流速在 0.10 m/s 以下,流速在 0.30 m/s 以上的垂向平均余流占比为 2.1%,流速在 0.10~0.20 m/s 的垂向平均余流占比为 23.4%,流速在 0.20~0.30 m/s 的垂向平均余流占比为 12.5%。

从图 2b 同样可以看出,垂向平均余流流向主要为东北向和西南向,余流流向较为集中。在 16 个方位中,SSW 向的垂向平均余流占比为 31.0%(表 3),

NNE 向的垂向平均余流占比为 20.0%, SW 向的垂向平均余流占比为 15.8%, NE 向的垂向平均余流占比

为 7.3%, 其余方位的垂向平均余流占比合计为 25.9%。

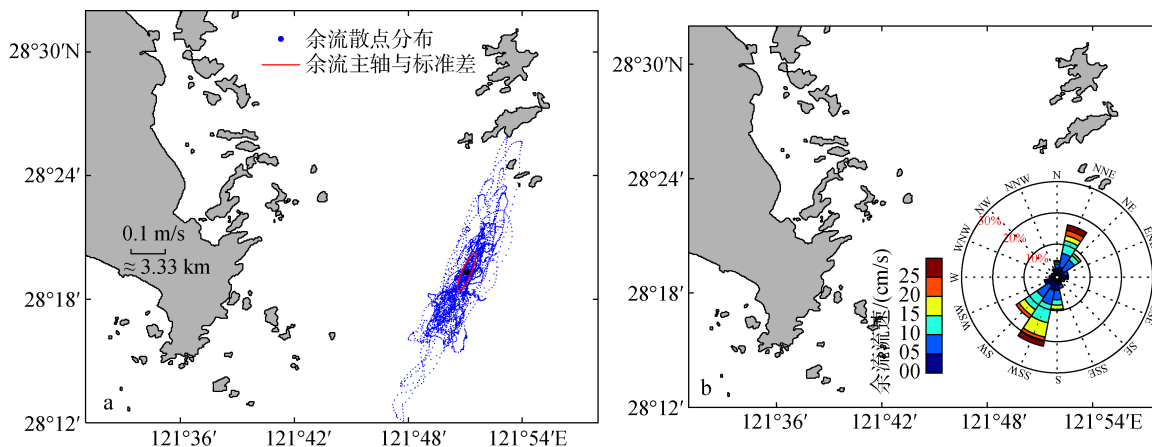


图 2 垂向平均余流

Fig. 2 Series of vertical average residual currents

a: 余流散点图; b: 余流玫瑰图

表 2 垂向平均余流在各流速区间出现的频率统计

Tab. 2 Frequency statistics of the vertical average residual currents for each velocity range

流速区间	频率/%	流速区间	频率/%
[0 0.05]	35.9	[0.15 0.20]	9.0
[0.05 0.10]	26.1	[0.20 0.25]	8.1
[0.10 0.15]	14.4	[0.25 0.30]	4.4

表 3 垂向平均余流在 16 个方位上出现的频率统计

Tab. 3 Frequency statistics of the vertical average residual currents in 16 azimuths

方位	频率/%	方位	频率/%
N	3.0	S	4.9
NNE	20.0	SSW	31.0
NE	7.3	SW	15.8
ENE	3.1	WSW	2.4
E	2.0	W	1.2
ESE	3.0	WNW	0.8
SE	1.6	NW	0.7
SSE	2.0	NNW	1.2

2.2 锚系点余流对风的响应

2018 年 10 月平均风速最大(表 4, 图 3), 其次为 2018 年 9 月, 垂向平均余流流速月极大值也是同样的分布规律, 即 10 月最大, 其次为 9 月; 2018 年 5 月平均风速相对最小, 垂向平均余流最小值则出现在 6 月和 8 月, 最小风速和最小流速出现月份不同步的

主要原因是: 6 月和 8 月表、底层余流方向相反, 造成垂向平均余流最小, 而 5 月份各层余流均为偏西南向。

表 4 月平均风和月垂向平均余流

Tab. 4 Month-mean winds and vertical average residual currents

月份	风速/(m/s)	风向/(°)	流速/(m/s)	流向/(°)
4 月	0.18	158	0.02	234
5 月	0.09	253	0.02	206
6 月	0.80	199	0.01	170
7 月	2.03	329	0.03	30
8 月	2.94	308	0.01	347
9 月	4.59	195	0.05	213
10 月	6.88	186	0.11	199

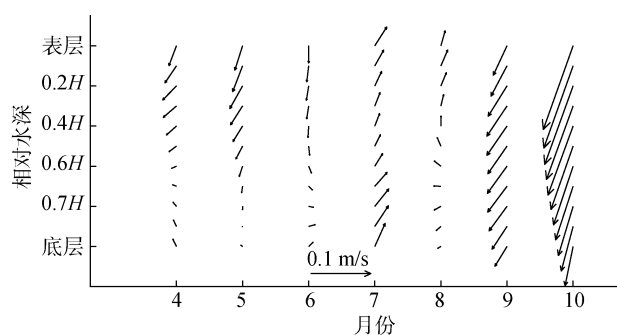


图 3 2018 年锚系观测期间月平均余流及其垂向分布特征
Fig. 3 Monthly average residual currents and its vertical distribution characteristics during the mooring observation period in 2018

月平均北分量风和月垂向平均北分量余流具有良好的相关性(图 4), 相关系数达到了 0.96, 月平均东分量风和月垂向平均余流东分量则没有明显的相关性, 相关系数为-0.11。

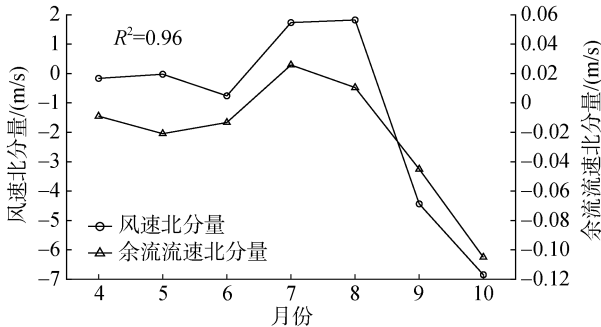


图 4 2018 年锚系观测期间月平均风速北分量和垂向平均余流流速北分量

Fig. 4 The month-mean north component winds and vertical average residual currents of the north component during the mooring observation period in 2018

2.3 全潮水文观测站流速分布及其对风的响应

大潮期间(图 5), 潮流的作用较为明显, 涨潮流为西北向, 落潮流为东南向, 只有少数时刻为偏南向流; 中潮期间(图 6), 各测站余流大多为偏南向, 只有离岸的 C4 测站出现 3 个小时的西北向涨潮流; 小潮期间(图 7), 各测站余流均为偏北向, 没有出现东南向的落潮流。

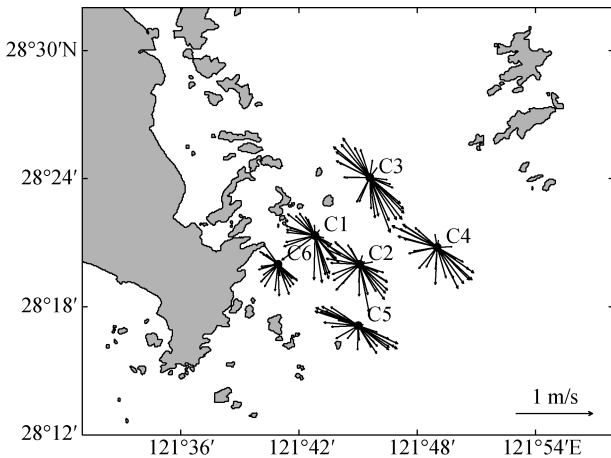


图 5 大潮期间垂向平均流速矢量图

Fig. 5 Vertical average current vectors during spring tide

准调和分析结果显示(表 5, 图 8), 中、小潮期间平均余流流速相对较大, 大潮期间平均余流流速相对较小。而根据平均风速的统计结果, 中潮期间平均

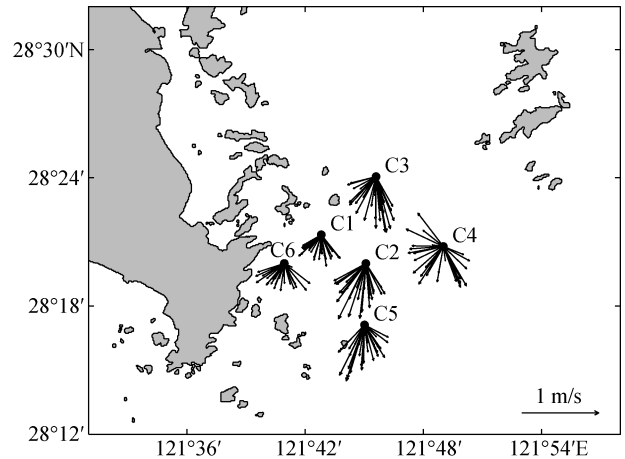


图 6 中潮期间垂向平均流速矢量图

Fig. 6 Vertical average current vectors during middle tide

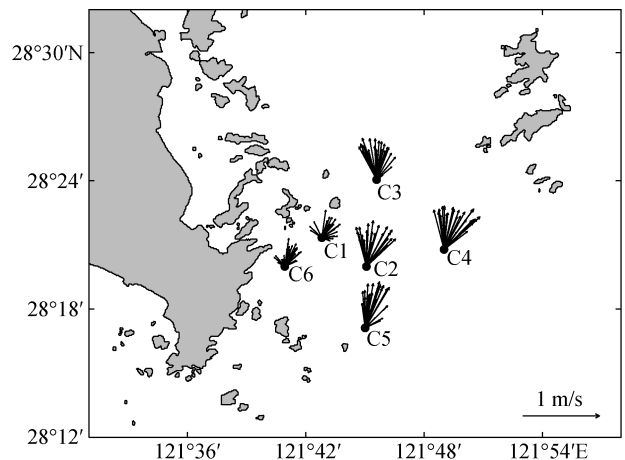


图 7 小潮期间垂向平均流速矢量图

Fig. 7 Vertical average current vectors during neap tide

风速最大, 小潮期间平均风速最小(图 9)。此外, 小潮期间最大潮差为 2.16 m, 中潮期间最大潮差为 3.45 m, 大潮期间最大潮差为 4.85 m。从大中小潮余流、风、潮差的同步变化可以看到, 随着风速风向和潮流的变化, 余流流速和流向也随之变化: 小潮期间, 由于潮流的作用最弱, 虽然小潮期间平均风速最小, 余流对风的响应仍然明显, 小潮期间余流仍然较大; 大潮期间, 风速介于中潮和小潮之间, 但是由于潮流较强且潮差较大, 余流对风的响应相对最弱; 中潮期间, 虽然风速大于小潮期间, 然而潮流和潮差也强于小潮期间, 近岸测站(C1—C3 测站、C6 测站)余流流速大于小潮期间, 离岸测站(C4、C5 测站)余流流速小于小潮期间。

全潮水文测验期间, 余流方向与风向具有较好的相关性(图 8、图 9)。大潮期间, 各测站余流均为

西南偏南向,同期的风向也是西南偏南向;中潮期间,各测站余流均为西南偏南向,同期风向为西南

向;小潮期间,C3测站余流为北向,其余测站余流为东北偏北向,同期风向为偏北向。

表 5 大、中、小潮期间平均风和垂向平均余流

Tab. 5 Average winds and vertical average residual currents during spring, middle, and neap tides

潮汛	流速/(m/s)						流向/(°)						风速/(m/s)	风向/(°)
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C1	C2	C3	C4	C5	C6		
大潮	0.11	0.09	0.06	0.10	0.07	0.09	207	205	194	210	209	199	4.42	192
中潮	0.23	0.41	0.38	0.23	0.37	0.22	195	199	189	210	186	200	8.07	234
小潮	0.15	0.40	0.36	0.45	0.38	0.17	40	13	359	22	21	21	2.95	352

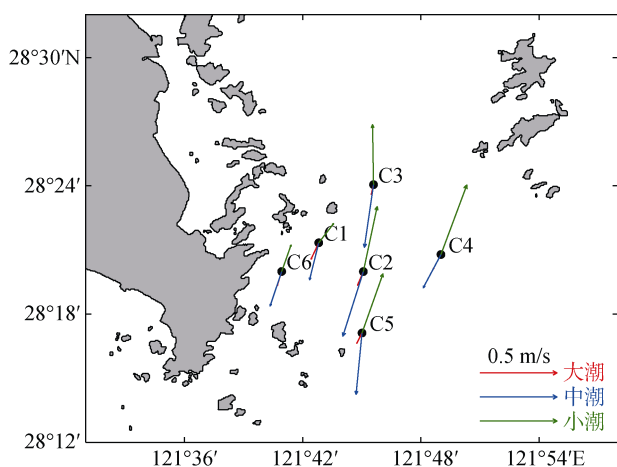


图 8 各水文测站大、中、小潮垂向平均余流

Fig. 8 Vertical average residual currents during spring, middle, and neap tides at each hydrological station

2.4 锚系点余流的周期变化

从整点北分量余流剖面 and 北分量风的时间序列同样可以看到,北分量余流和北分量风具有良好的相关性(图 10),南风期间余流主要为北向,北风期间余流主要为南向。只有 9 月中下旬至 10 月初是个例外,在这个期间内,南风并没有带来北向的余流,9 月底的北风是锚系观测期间最强的,然而也没有产生南向的余流,这应该是因为这段时间由于仪器倾斜导致观测数据缺失,这期间的数据是采用潮流预报的方法补全的,这部分的流速数据只有潮流,没有风生流,这也从侧面印证了风生流对余流的影响非常显著。

为了解不同潮汛期对余流的影响,选取了锚系观测期间所有大、小潮时刻的风速北分量和垂向平均

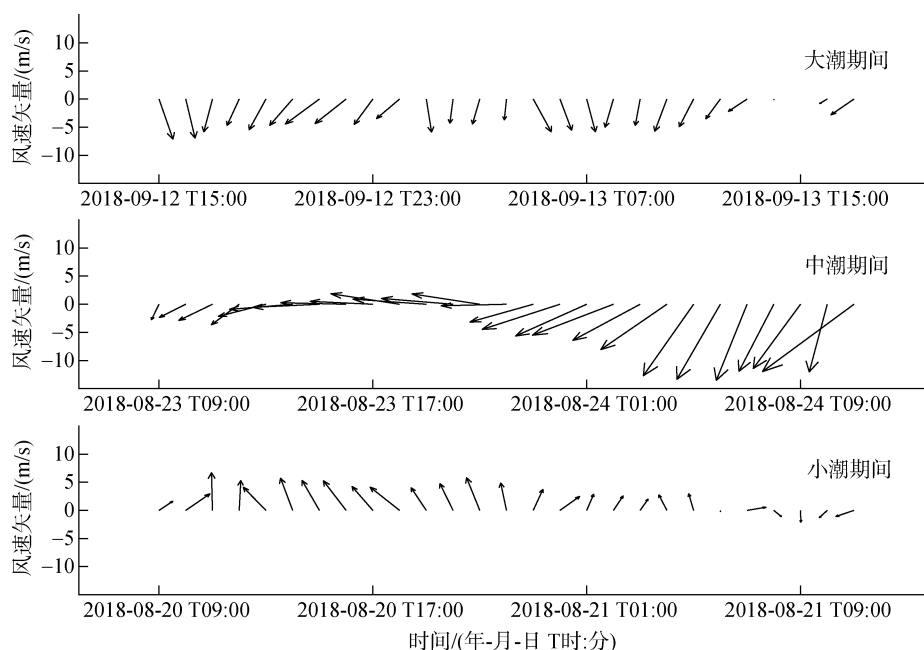


图 9 大、中、小潮期间 10 min 平均的逐时风速矢量时间序列

Fig. 9 Hourly wind vectors during spring, middle and neap tides

余流流速北分量进行相关分析。本文选取农历初三零时和农历十七零时为大潮时刻,选取农历初十零时和农历廿五零时为零时,则锚系观测期间分别有 15 次大潮时刻和 14 次小潮时刻(图 10)。在 15 次大潮时刻组成的时间序列中,风速北分量和垂向平均余流流速北分量的相关系数为 0.30;在 14 次小潮时刻组成的时间序列中,风速北分量和垂向平均余流流速北分量的相关系数为 0.72。结合全潮水文观测的分析结果表明:

小潮期间,余流对风的响应更为显著;而在大潮期间,潮流较强且潮差较大,风对余流的影响相对较弱。

对垂向平均北分量余流流速的时间序列进行谱分析(图 11),可以看到余流具有明显的周期性变化规律。主要周期约为 13.37 d 和 28.49 d,该周期与大、小潮的更替周期非常接近。从而也进一步印证了前面的推断,即研究海域余流与潮汐密切相关,具有近似半月和整月的周期性变化规律。

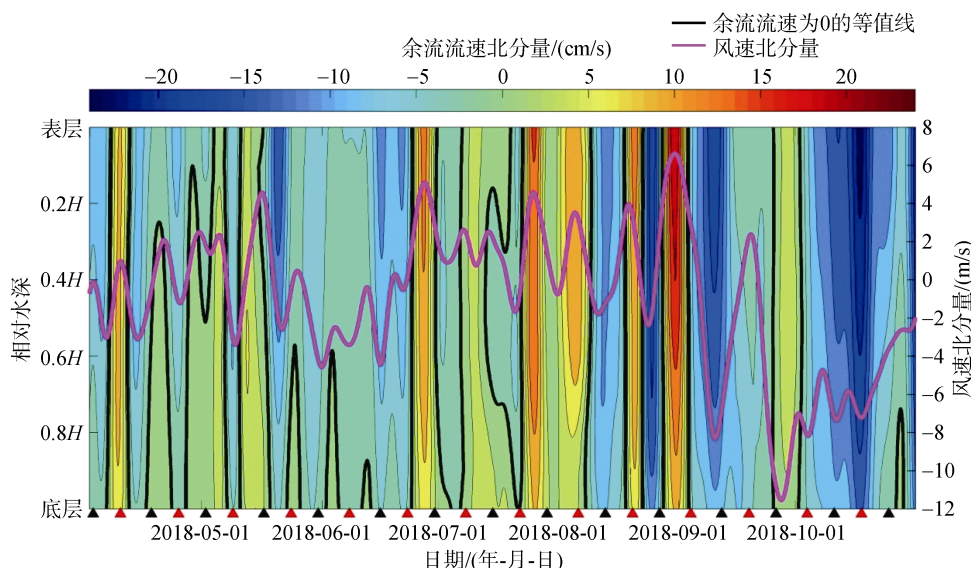


图 10 锚系观测期间逐时整点余流流速北分量剖面和风速北分量的时间序列

Fig. 10 Time series of the hourly north-component residual current profile and north-component winds during mooring observation

注:图底部的黑色三角形表示大潮时刻,红色三角形表示小潮时刻

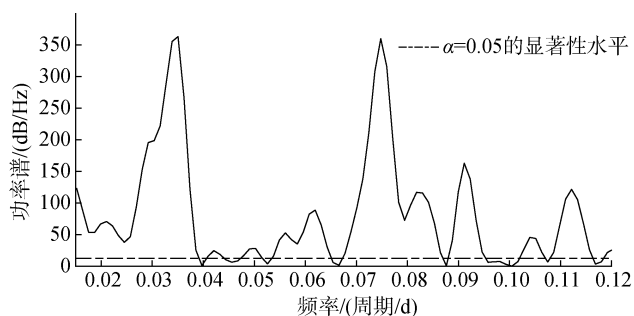


图 11 垂向平均余流北分量的功率谱分析

Fig. 11 Power spectrum analysis of the north-component vertical average residual currents

3 总结和结论

本研究旨在探讨浙江中部近海沿岸流的特征及其影响因素。该水域是中国东海近岸水域中长期物理过程知之甚少的区域,近年来,由于商业用途(海水养殖、风电开发、核电开发等)对该区域的开发利

用,需要对该区域水流结构及其影响因素有更好的认识。

本研究结合锚系观测、全潮水文观测和同步风速风向资料,研究资料包括台州列岛南部 15 m 等深线上锚系点连续 7 个月的流速剖面时间序列,以及锚系点周边水域 6 个全潮水文站大、中、小潮的流速资料。虽然时间序列的长度还不足以确定该水域水流的季节性变化特征,然而超过半年的时间序列使得本研究能够分析流速对季节风的响应,以及潮汐的周期变化对水流的影响。

不论是从逐时整点时间序列,还是从月平均序列的同步变化,风速北分量和余流流速北分量都具有良好的相关性,月平均序列的相关系数达到了 0.96,逐时整点时间序列的相关系数也达到了 0.69。

对垂向平均北分量余流流速时间序列的谱分析结果表明,锚系点余流具有 13.37 d 和 28.49 d 的周期性变化特征,该周期与大、小潮的更替周期非常接

近。小潮期间,潮流的强度较弱,余流对风的响应更为显著,余流和风的相关性更好,两者相关系数为0.72;而在大潮期间,潮流较强且潮差较大,余流和风的相关性一般,两者相关系数为0.30。

参考文献:

- [1] Smith R L. A description of current, wind, and sea level variations during coastal upwelling off the Oregon coast, July-August 1972[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(3): 435-443.
- [2] Huyer A, Smith R L, Sobey E J C. Seasonal differences in low-frequency current fluctuations over the Oregon continental shelf[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1978, 83(C10): 5077-5089.
- [3] Hickey B M, Hamilton P. A spin-up model as a diagnostic tool for interpretation of current and density measurements on the continental shelf of the Pacific Northwest[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(1): 12-24.
- [4] Zimmerman J T F. Dynamics, diffusion and geomorphological significance of tidal residual eddies[J]. *Nature*, 1981, 290(5807): 549-555.
- [5] Ko D S, Preller R H, Jacobs G A. Transport reversals at Taiwan Strait during October and November 1999[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C11): 3370.
- [6] 张彩云, 商少凌, 陈德文, 等. 冬季浙闽沿岸水分布的短期变动与风的关系初探[J]. *遥感学报*, 2005, 9(4): 452-458.
Zhang Caiyun, Shang Shaoling, Chen Dewen, et al. Short-term variability of the distribution of Zhe-Min coastal water and wind forcing during winter monsoon in the Taiwan Strait[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(4): 452-458.
- [7] Pan Aijun, Wan Xiaofang, Guo Xiaogang, et al. 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*, 2013, 56(3): 386-396.
- [8] 曾定勇, 倪晓波, 黄大吉. 冬季浙闽沿岸流与台湾暖流在浙南海域的时空变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(7): 1123-1134.
Zeng Dingyong, Ni Xiaobo, Huang Daji. Temporal and spatial variability of the Zhe-Min coastal current and the Taiwan warm current in winter in the southern Zhejiang coastal sea[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(7): 1123-1134.
- [9] Huang Daji, Zeng Dingyong, Ni Xiaobo, et al. Alongshore and cross-shore circulations and their response to winter monsoon in the western East China Sea[J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2016, 124: 6-18.
- [10] He Shuangyan, Huang Daji, Zeng Dingyong. Double SST fronts observed from modis data in the East China Sea off the Zhejiang-Fujian coast, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 154: 93-102.
- [11] Shen Junqiang, Qiu Yun, Guo Xiaogang, et al. The spatio-temporal variation of wintertime subtidal currents in the western Taiwan Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(11): 4-13.
- [12] Li Li, Guo Xinyu, Liao Enhui, et al. Subtidal variability in the Taiwan Strait induced by combined forcing of winter monsoon and topography[J]. *Science China Earth Science*, 2018, 61(4): 483-493.
- [13] Shen Junqiang, Zhang Junpeng, Qiu Yun, et al. Winter counter-wind current in western Taiwan Strait: Characteristics and mechanisms[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 172: 1-11.
- [14] 张慧, 堵盘军, 郑晓琴. 浙闽海域余流特征分析[J]. *海洋通报*, 2011, 30(2): 152-158.
Zhang Hui, Du Panjun, Zheng Xiaoqin. Characteristics analysis of residual current of Zhejiang-Fujian water[J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(2): 152-158.
- [15] 李鹏, 王思荐, 李延刚, 等. 浙江近海夏季流场特征分析[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(3): 16-25.
Li Peng, Wang Sijian, Li Yangang, et al. Current conditions in summer in the Zhejiang offshore[J]. *Journal of Marine Science*, 2014, 32(3): 16-25.
- [16] 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.
- [17] Godin G. *The Analysis of Tides*[M]. Liverpool: Liverpool University Press, 1972.
- [18] Emery W J, Thomson R E. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*[M]. 2nd ed. Boulder, Colorado and Sidney, BC: Elsevier Science, 2001.
- [19] 方国洪. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
Fang Guohong. *The Analysis and Prediction of Tide and Tidal Current*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.
- [20] Grifoll M, Aretxabaleta L A, Espino M, et al. Along-shelf current variability on the Catalan inner-shelf (NW Mediterranean)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117 (C9): C09027.
- [21] Grifoll M, Aretxabaleta L A, Pelegrí L J, et al. Seasonal circulation over the Catalan inner-shelf (northwest Mediterranean Sea)[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2013, 118(10): 5844-5857.

Coastal current and its response to wind and spring—Neap cycles in the middle Zhejiang coastal area

HU Feng-tao, TAO Yu

(Zhejiang Ocean Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

Received: Apr. 23, 2019

Key words: middle Zhejiang coastal area; coastal current; wind-driven current; astronomical tide; periodic variation of residual current

Abstract: The flow characteristics of the western part of the East China Sea were examined using the velocity data obtained from a mooring site on the 15 m isobath and wind vector data, both of which were recorded over a seven-month period (April–October, 2018), and hydrological measurements from the spring, middle, and neap tides in the waters around the mooring site. Subtidal currents at the mooring site flowed mainly along the northeast–southwest direction and were parallel to the isobath; the major axis of the current variance ellipse was along the NNE direction at an angle of 25.5°; and the major and minor axes of the current variance ellipse were 0.12 and 0.02 m/s, respectively. The northerly flow and wind components were well correlated, and the correlation coefficients of their monthly means and hourly values reached 0.96 and 0.69, respectively. The subtidal flow at the mooring site varied periodically at 13.37 and 28.49 days, which were very close to the length of the spring–neap cycle. The tidal ranges of the neap tides were smaller than those of the spring tides. The subtidal flow and the winds were positively correlated, with a coefficient of 0.72. During the spring tides, the tidal ranges and currents were larger and stronger, respectively; however, a weaker relationship existed between the subtidal flow and wind, with a correlation coefficient of 0.30. In this paper, the velocity distribution characteristics of the anchoring point and its surrounding waters are determined and the influence of the nonlinear effects of astronomical tide and wind field on the tidal and residual currents is preliminarily discussed. The results can provide a dynamic basis for marine development and environmental protection in the middle Zhejiang coastal area.

(本文编辑: 刘珊珊)