

基于长期定点观测资料的莱州湾人工 鱼礁建设区局地水动力特征*

邹涛¹ 张立斌² 张华¹ 李东¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003; 2. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 为了研究人工鱼礁区基本水动力特征, 本文利用人工鱼礁投放区的座底海床基获取半年以上的水动力观测资料, 通过谱分析、调和分析、滤波等方法分析了该海区潮汐、潮流特征, 并讨论了余流特征。结果表明, 该海域属于不规则半日潮, 具有显著的全日潮周期和半日潮周期, 潮汐性质指数为 0.98, 平均潮差为 0.95m, 最大可能潮差为 2.25m。潮流为典型的往复潮, 潮流主向为 NNE-SSW, 优势分潮为 M_2 分潮。垂向上, 流速大小随深度增加显著降低, 海底 1m 的流速较表层降低约 30%, 流向向沿鱼礁布设方向偏转。该海域余流较小, 欧拉余流与斯托克斯余流大小相当, 分别为 1.35cm/s, 1.41cm/s, 均为向岸输运, 欧拉余流表层受风影响较大, 拉格朗日余流为 2.76cm/s, 方向 SEE。该海域流场垂向结构与人工鱼礁投放后底摩擦增加、鱼礁对近底层水流的阻滞作用有关。底层温度具有显著的季节变化与日变化特征, 短期高频变化存在显著的全日周期与半日周期, 冬春季由于垂向混合加强, 全日信号更为显著。底层浊度的升高主要由大风过程加强垂向混合的引起。

关键词 人工鱼礁; 潮流; 余流; 调和分析

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyh20170900226

海洋牧场是基于海洋生态学原理和现代海洋工程技术, 充分利用自然生产力, 在特定海域科学培育和管理渔业资源而形成的人工渔场(杨红生, 2016)。近几年, 海洋牧场建设已在全国沿海地区蓬勃兴起, 成为新旧动能转换的新推动力。目前已创建了三批 64 个国家级海洋牧场示范区, 农业部也发布了《全国海洋牧场建设规划 2017—2025》, 规划至 2025 年 178 个国家级海洋牧场示范区, 面积 2700 余平方公里。这些海洋牧场中, 人工鱼礁是其重要的建设形式之一。

合理建设人工鱼礁除可带来可观的经济效益外, 还有助于降低富营养化风险、改善海洋生态系统, 对近海底栖生境也有一定的修复作用。然而, 目前对于人工鱼礁投放后的环境效应研究, 还主要集中在浮游动植物(江志兵等, 2012; 刘长东等, 2015)、大型底栖动物(廖一波等, 2014)、渔业资源以及生态系统方

面(佟飞等, 2014; 吴忠鑫等, 2012), 对水文、水动力过程的影响仅限于室内理论模拟实验(李珺等, 2010; 刘彦等, 2010; 郑延璇等, 2014), 缺乏对人工鱼礁投放后的水动力环境变化的关注, 而这恰恰是生态环境的基础, 也与海底沉积冲淤、鱼礁稳定性密切相关(李东等, 2017)。

鉴于此, 本研究选取莱州湾东南侧人工鱼礁型海洋牧场, 利用在该海域座底海床基平台所获取的 6 个月以上连续水位、海流剖面观测资料, 分析该海域潮汐、潮流特征, 并进一步探讨人工鱼礁建设对流场结构的影响。

1 资料来源

本文选取海洋牧场位于莱州湾东南侧, 地势开阔、平坦, 水深变化不大, 约为 9.2m, 人工鱼礁以投石为主, 主体礁高为 1—2m, 最大礁高为 2.8m(李东

* 国家自然科学基金项目, 41406029 号, U1406403 号; 山东半岛近岸海域生态模拟试验项目, 270006-FZLX-2015-00-1 号。

邹涛, 副研究员, E-mail: tzou@yic.ac.cn

收稿日期: 2017-09-05, 收修改稿日期: 2017-11-13

等,2017), 海洋牧场内西北侧人工礁石区部分区域多波束高精度地形如图 1 所示。在该人工鱼礁投放区西北侧(37°20.02'N、119°43.28'E)布放座底海床基一套(图 1), 对水位观测持续了 360 余天, 对海流观测持续了 183 天, 详细观测信息见表 1。观测设备于 2015 年 8 月 15 日进行更新替换, 第一阶段采用 RDI 公司 Workhorse Sentinel 系列 600KHz 声学多普勒流速仪(ADCP), 深度单元为 0.25m, 换能器距海底约为 0.4m, 考虑到换能器高度、底部盲区等因素, 实测最底层海流约为 1.2m, 为补充底部盲区数据, 在此海床基东

北侧 80m 处布放 Alec Electronics 公司的 Infinity-EM 型座底电磁海流计。所用温盐深仪(CTD)为 SeaBird 公司的 SBE37 SMP-ODO 浅水 CTD, 进行温度、盐度、水深和溶解氧观测。第二阶段采用 RDI 公司新一代 Sentinel V50 ADCP, 深度单元为 1.0m, 因电池原因, 有效数据至 2015 年 10 月 20 日, SBE37 SMP 记录温盐深信息。所有设备采样间隔均为 10min, 数据采用地球坐标系的形式记录。仪器回收后, 由于原始资料带有扰动信息, 需对其进行质量控制, 剔除无效数据。

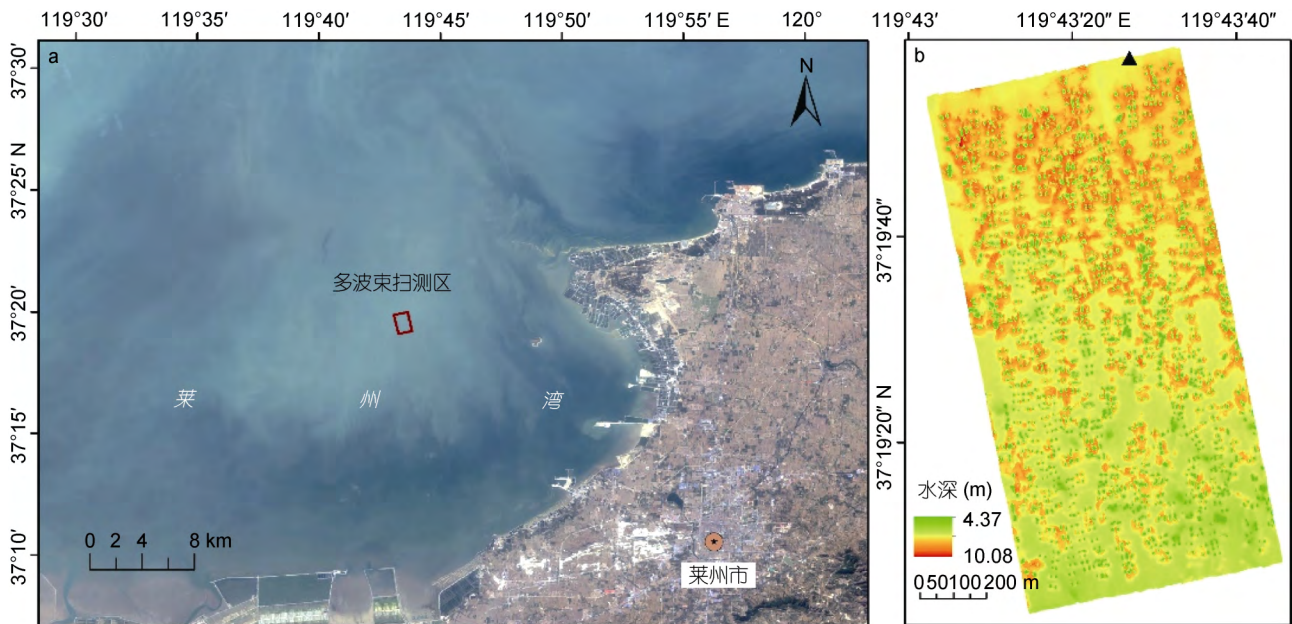


图 1 人工鱼礁投放位置、地形图(李东等, 2017)(其中▲为海床基布放位置)

Fig. 1 Location and topography of Artificial reef construction

表 1 主要观测信息一览

Tab.1 Main measurement parameters

	仪器设备	监测要素	开始时间	回收时间
第一阶段	ADCP 600K、ALEC 海流计、SBE37-ODO	流速剖面、海底流速、温盐深、溶氧	2015.04.18 13:30	2015.8.15 15:00
第二阶段	ADCP V50、SBE37	流速剖面、温盐深	2015.08.15 16:00	2016.05.26 14:50

2 结果与分析

2.1 潮位

图 2 显示了观测期间的潮位曲线。该海域内, 潮位的日不等、月不等现象显著, 潮差较小, 水位起伏基本在海平面±1m 内。以 2015 年 7 月为例, 期间最高潮位 1.14m, 最低潮位-0.79m, 最大潮差 1.61m。对观测资料用二阶 Butterworth 低通滤波(Butterworth, 1929)滤除高频信号, 进而采用 Matlab 工具包 T_tide

v1.3(Pawlowicz *et al.*, 2002) 进行调和分析, 得到 M_2 、 S_2 、 O_1 、 K_1 以及浅水分潮 M_4 、 MS_4 等主要分潮的调和常数(表 2)。显示 M_2 分潮占优, 振幅为 0.43m, 其次为 K_1 , 振幅为 0.21m, 计算潮汐类型 $(H_{K1}+H_{O1})/H_{M2}=0.98$, 为不规则半日潮混合潮。根据潮汐调和常数和不规则半日潮海区平均潮差和最大可能潮差估算方法(方国洪, 1986), 该海域平均潮差与最大潮差分别为 0.95m 和 2.25m。

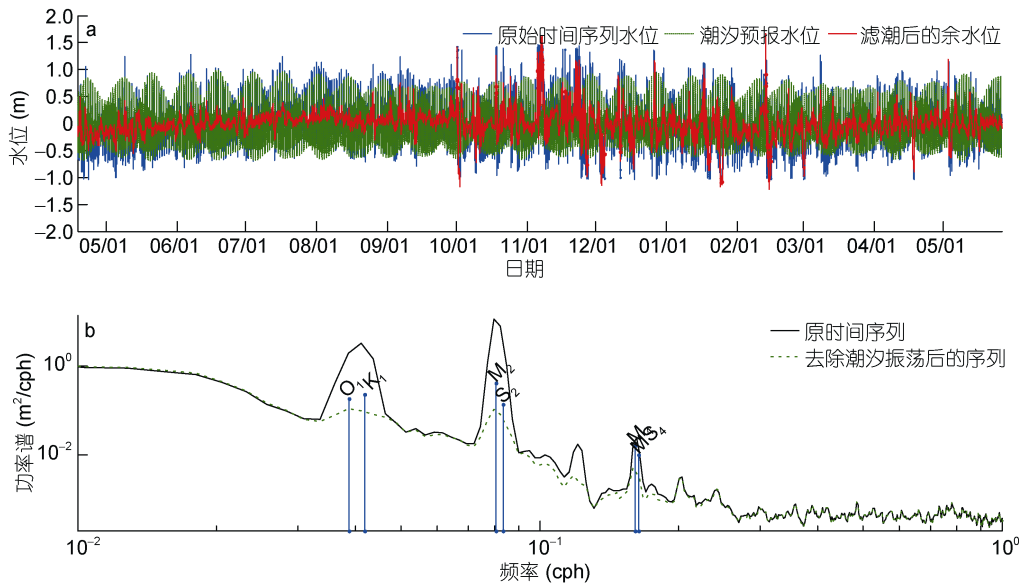


图 2 观测点记录的海表面高度变化(a)及其功率谱(b)

Fig.2 The elevation change (a) and power spectrum (b)

表 2 观测点潮位、潮流调和结果

Tab.2 The result of harmonic analysis

分潮	潮位		潮流			
			东分量 U		北分量 V	
	振幅(m)	迟角(°)	振幅(cm/s)	迟角(°)	振幅(cm/s)	迟角(°)
M_2	0.428	338.8	6.03	69.9	28.62	106.3
S_2	0.139	61.7	1.70	116.4	8.01	145.7
O_1	0.186	130.0	0.82	199.4	2.77	242.2
K_1	0.236	188.4	1.33	176.4	4.55	260.4
M_4	0.016	79.3	0.83	359.0	2.61	290.4
MS_4	0.011	163.6	0.35	80.2	1.23	333.0

水位的 Pwelch 功率谱分析(图 2b)显示, 在半月潮簇(M_2 、 S_2)和全日潮簇(O_1 、 K_1)对应频率区域能量最大, 峰值明显。其次在频率(以每小时周期数计, 即 cycle per hour, 记为 cph)0.12、0.16、0.20、0.24 出现峰值, 分别对应 1/3d、1/4d、1/5d、1/6d 周期, 主要是倍潮与浅水分潮作用, 但其能量相对于全日潮、半月潮小很多。

2.2 潮流

2.2.1 潮流特征 为作图及阅读方便, 选取观测期间 5 月份数据进行分析, 并以平均潮位为参考面。水位起伏清晰显示了不规则半日潮的日不等、月不等现象(图 3)。大小潮期均为显著的往复流, 潮流的北分量(V)显著大于东分量(U), 大潮期流速显著大于小潮期, V 分量最大可达 50.3cm/s。

潮不等除了体现在水位起伏外, 同样体现在涨

落潮时间、潮幅、最大流速方面(图 4)。总体上, 涨潮时间大于落潮时间, 小潮期的落潮时更长, 大潮期的涨潮时更长, 最大的潮不等通常发生在大潮, 可达 0.66h, 即约 40min。垂向上, 越靠近底层, 涨落潮时之差越大, 到了 7m 层, 无论大小潮, 涨潮时间均大于落潮时间。潮周期内最大流速(以深度平均的 V 分量计), 与潮幅呈现显著的线性关系(最大流速 = $0.195 \times \text{潮幅} + 0.088$, $R^2 = 0.907$, $n = 457$), 且多发生在大潮期的涨潮流和小潮期的落潮流, 最大可达 42.4cm/s, 最小仅为 12.6cm/s。

无论大小潮期, 最大流速均发生在表层, 流速从表至底逐渐减小, 7m 层较表层减小约 10%, 但底层较之表层减小可达 30%(图 5), 其本质是底摩擦作用、海水黏性在垂向上的反映(Garel *et al*, 2013), 但海底人工鱼礁的存在, 增加了海底粗糙度, 使鱼礁区粗糙

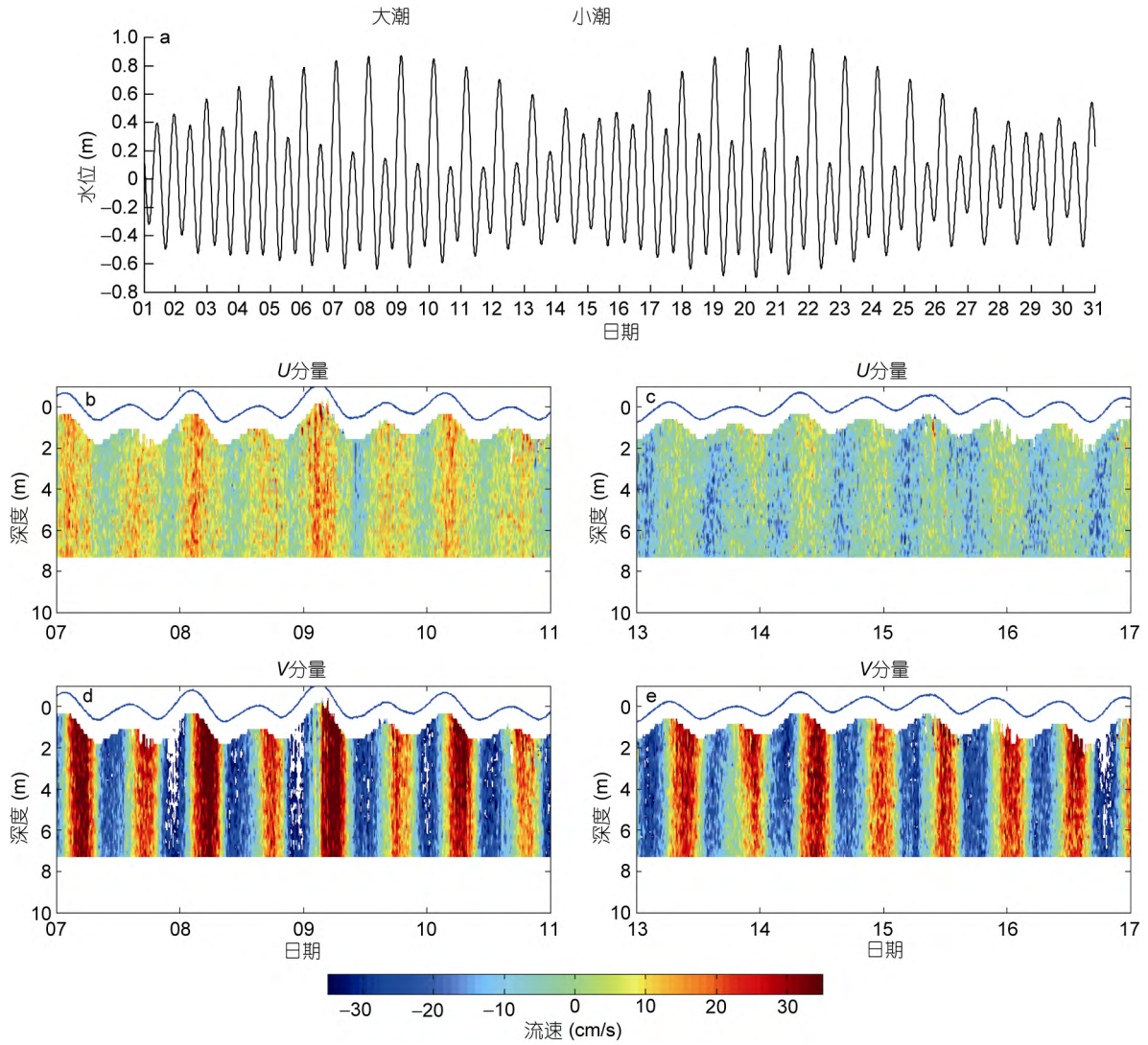


图 3 5 月水位及大潮(7—10 日)、小潮(13—16 日)流速 U 、 V 分量

Fig.3 The elevation at observation station in May and the vertical structure of U , V component in spring (7—10 May) and neap (13—16 May) tide

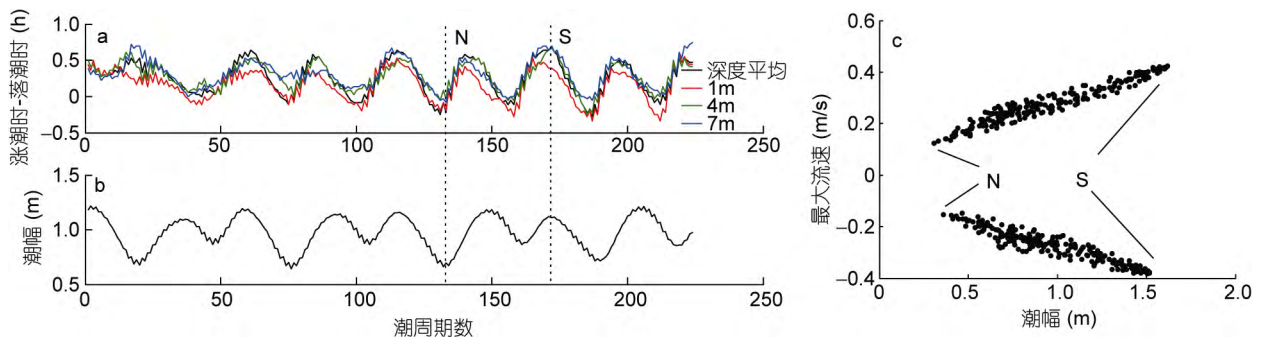


图 4 潮不等现象

Fig.4 The tidal asymmetry of the area

a: difference in duration (h) between flood and ebb of each tidal cycle; b: tidal amplitude; c: peak velocity vs tidal amplitude of a tidal cycle. S: spring tide; N: neap tide

注: a: 典型层次涨潮时间与落潮时间之差。b: 潮汐振幅大小。c: 潮汐振幅大小与最大流速的关系。S: 大潮。N: 小潮

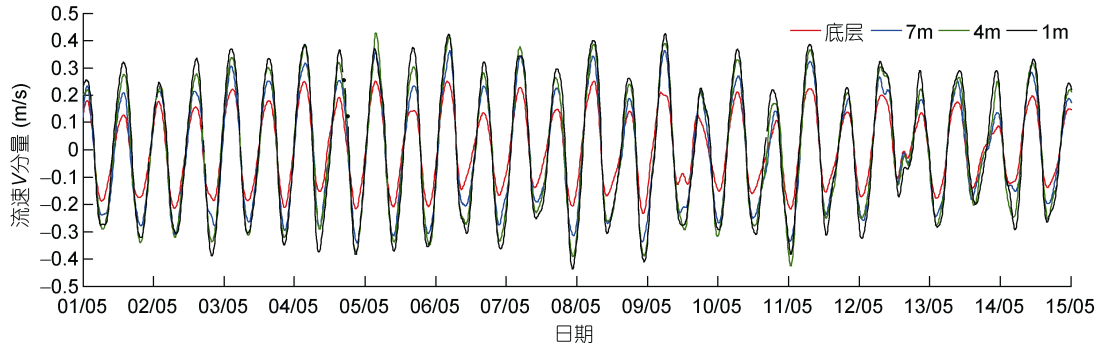


图 5 5月上旬各典型层次流速大小比较

Fig. 5 Comparison in vertical current magnitude from May 1 to 15

度达到 1.4—1.8 左右(李东等, 2017), 大大增加的底摩擦将底层流速显著降低, 同时人工鱼礁礁体高度可达 1—2m, 在近底层对海水流动也起到一定的阻滞作用。

2.2.2 旋转谱分析 将潮流矢量分解为东西、南北向两个正交分量单独估计功率谱有一定的缺陷(Gonella, 1972; Mooers, 1973), 潮流旋转谱能较好的确定顺时针和逆时针的海流能量, 并能清晰的显示海流信号的显著频率(张丛等, 2017)。利用矢量旋转谱估计方法(Lilly, 2017), 计算了深度 1m、4m、7m 和底层的旋转谱(图 6, 置信区间为 95%), 结果显示,

各层旋转谱分布基本一致, 且顺时针谱与逆时针谱没有明显差异, 半日潮与全日潮成分的谱峰显著, 半日潮谱峰值大于全日潮峰值。全日潮流与半日潮流基本表现为逆时针比顺时针旋转的能量分量强; 而浅水分潮, 除 1m 层外, 顺时针比逆时针旋转的能量分量强。垂向上, 从表层到底层旋转谱的能量呈现逐渐减小的趋势。总体上, 该海域各层均为全日潮与半日潮占优, 且主要为逆时针旋转。该海域的局地惯性频率约为 0.316cph, 对应图中虚线位置, 由于该区域水深较浅, 谱分析结果在惯性频率位置并没有明显峰值。

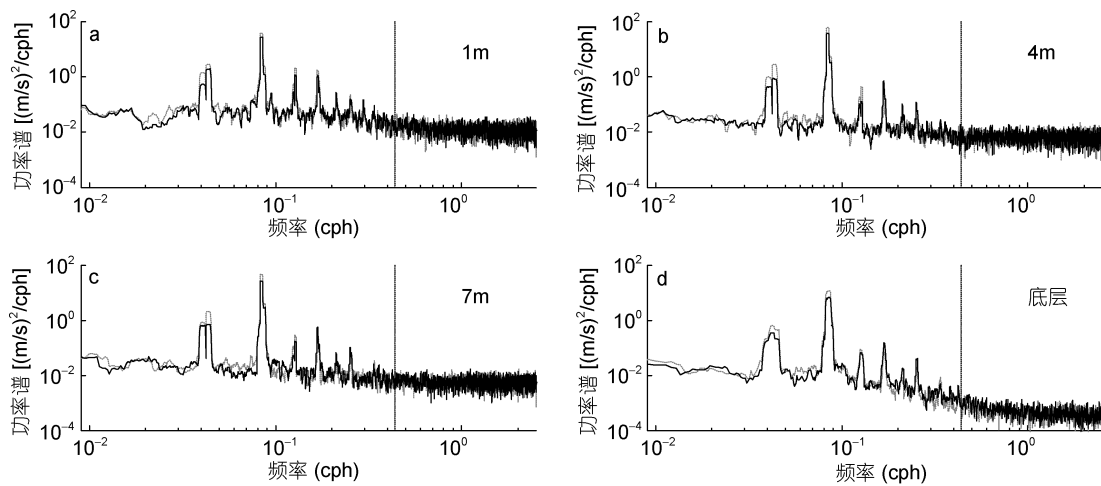


图 6 潮流矢量旋转谱

Fig. 6 Comparison in vertical current magnitude from May 1 to 15
注: 红色为顺时针, 蓝色为逆时针, 黑色虚线为局地惯性频率

2.2.3 潮流调和分析与潮流椭圆 同样对海流观测资料进行二阶 Butterworth 低通滤波(Butterworth, 1929)后, 进行潮流调和分析(Pawlowicz *et al.*, 2002), 取 95% 的置信区间, 得到 M_2 、 S_2 、 O_1 、 K_1 以及浅水分潮 M_4 、 MS_4 等主要分潮的潮流调和常数(表 2)、潮

流椭圆(图 7)。根据潮流性质公式 $K=(W_{O1}+W_{K1})/W_{M2}$ 得到各层的 K 值介于 0.25—0.30, 均小于 0.5, 故而各层的潮流性质均为正规半日潮, 其中, M_2 分潮是该海域优势潮流, 其 1m 层最大流速可达 31.64cm/s, S_2 、 O_1 、 K_1 等其分潮流速相对较小, 最大流速分别为

8.15cm/s、3.34cm/s、6.22cm/s, 各出现在 4m 层、1m 层、1m 层。垂向上, 总体上 4 个主要分潮的最大流速从表到底逐渐递减, 且越靠近海底减小趋势越明显, 这可能与海底摩擦、海底周边鱼礁阻滞作用有关。

从图 7 可以看出, 各层 M_2 潮流椭圆均呈逆时针旋转, 且椭圆主轴方向较为一致, 基本上呈现出南北方向分布特点, 这与以前该区域附近的观测结果基本一致(陈明波, 2012)。在垂向上, 除 S_2 分潮外, 各分潮最大流速方向在 1m 至 7m 层均向左偏转, 这与已有的研究结果(Fang *et al*, 1983; 赵骞等, 2016)基本一致, 分潮流速最大方向的垂向变化取决于分潮角频率 σ 与科氏参量 f 的大小, $\sigma < f$ 时, 越接近海底越向左偏转, 反之则向右偏转。但在 7m 至底层表现为向右偏转, 从图 1 看, 这种现象可能与海床基东南侧鱼礁区有关。由于缺乏鱼礁投放前的观测资料, 尚无法确定是否为鱼礁影响以及量化其影响。

潮流椭圆旋转率 k , 表示潮流椭圆短轴与长轴之比, 是潮流运动形式的反映。椭圆率为正表示潮流逆时针旋转, 为负表示顺时针旋转, 并且将 $|k| < 0.22$ 认为是往复流, $|k| > 0.22$ 为旋转流。从图 8 可以看出, 各分潮的椭圆率在各个层次均为正值, 即潮流逆时针旋转。半日潮 M_2 、 S_2 的 k 值均小于 0.2, 表现出典型的往复流性质。全日潮 O_1 椭圆率从表到底逐渐降低, 从旋转流向往往复流过渡, K_1 分潮除表底层外, 主体呈现旋转流特征。

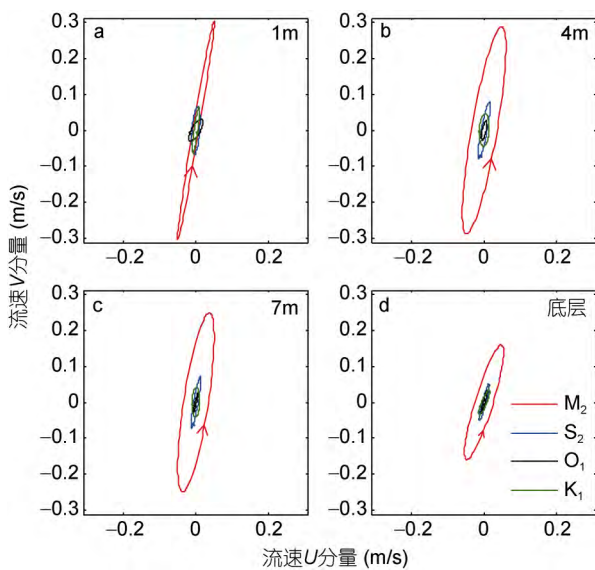


图 7 不同水深潮流椭圆
Fig.7 Vertical distributions of tidal current ellipse

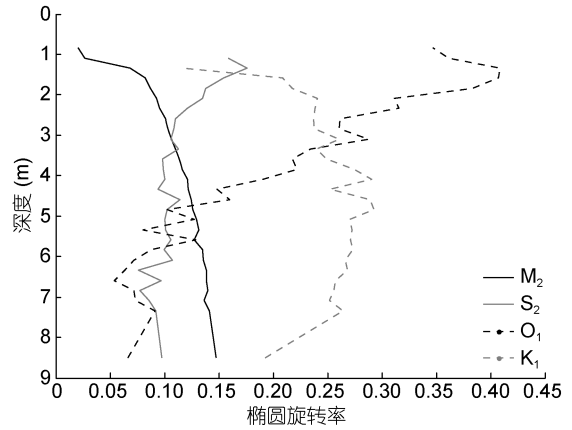


图 8 各分潮潮流椭圆率随深度变化
Fig.8 Vertical variation of tidal current ellipse ratio of major tidal component

本次观测海床基布放位置东南侧约 150m 左右存在大量人工鱼礁, 礁高约 1—2m, 约占全水深的 1/6—1/5。尽管海床基未在人工鱼礁核心区, 尚无法完全定量确定人工鱼礁投放对局地流场的影响, 但从分析结果看, 可以确定其改变底层流向、削弱瞬时潮流。流速的减小会进一步引起底部混合减弱、再悬浮作用减弱、沉积加速、交换不畅等一系列环境问题。而在小尺度上, 人工鱼礁礁体周围由于岬角效应, 又会增大流速, 对礁体周边造成冲刷, 并形成新的淤积, 从而对礁体稳定性构成威胁。

2.2.4 余流 定点实测海流资料可以分解为三部分

$$V(z, t) = \bar{V}(z) + \tilde{V}(z, t) + V'(z, t). \quad (1)$$

式中, $\tilde{V}(z, t)$ 为周期性的潮致海流, 是调和分析得到的各分潮潮流的叠加; $V'(z, t)$ 为各种随机高频过程, 主要是瞬时外界强迫或其他原因造成的高频成分, 具有湍动的性质; $\bar{V}(z)$ 为定常流, 是观测时期内较为稳定运动的海流, 即剔除了周期性变化的潮流和随机高频信号后得到的余流, 通常称之为欧拉余流, 包含风生流、潮致余流及密度流(刘天然等, 2010), 本文采用低通滤波滤除周期小于 2d 的信号后得到该余流。

图 9 列出了观测点附近海上测风塔的风矢量时间序列, 以及观测点水深 1m、4m、7m、底层和深度平均余流变化的时间序列, 其中, 风矢量取观测期内整点风速的 3 小时平均。可以看出, 该海区余流较小, 各层余流大小表现出一定随机性, 观测期间深度平均余流仅为 1.35cm/s, 为 SEE 方向, 深度平均最大余流也不过 5.11cm/s, 表层余流最大, 可

达 9.12cm/s。该结果与已有文献(陈明波, 2012)在该点附近 25h 连续观测得到的结果(余流流速 2.6cm/s, 流向 227°)在方向上有差异, 但均为涨潮流方向, 其差异可能主要是由于其观测时间的长短引起的, 25h 的观测有一定的偶然性。其中表层余流大小、方向与风速、风向较为一致, 5 月至 6 月上旬、7 月下旬至 8 月上旬以偏西南风为主, 表层余流主要偏

向东北, 其余各层余流以东南向为主, 显示该海域欧拉余流为东南方向。余流随深度的增加逐渐减小, 但因该点余流本身就较小, 因而这种减小从绝对值上来看并不明显。总体而言, 该点欧拉余流较小, 仅为 M_2 分潮流的 1/10 左右, 余流方向为东南方向, 表层受风影响较大, 垂向上随深度逐渐减小, 但其绝对值减小并不明显。

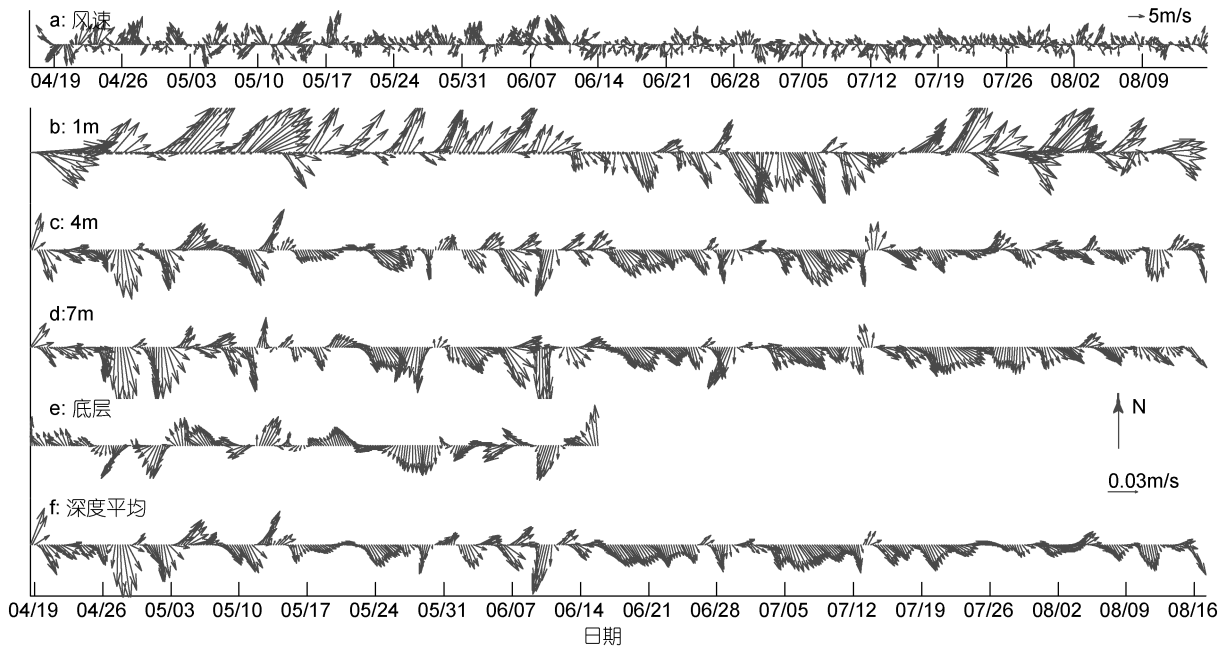


图 9 风矢量与水深 1m、4m、7m、底层及深度平均余流时间序列

Fig.9 Time series of residual current of wind and the depth-average current at 1, 4, and 7m layers, and at the bottom

然而在近岸和河口区域, 水质点经过一个潮周期后并不能回到初始位置, 而会形成一个位移, 即长期物质运输, 通常用拉格朗日(Lagrange)余流表示(Feng *et al*, 1986), 在弱非线性系统下, 拉格朗日余流近似为长期物质运输速度, 可表达为欧拉(Euler)余流与斯托克斯(Stokes)余流的矢量和(Wei *et al*, 2004)。斯托克斯余流表征的是水流输移量, 是潮流变化量与潮汐变化量乘积的潮周期平均, 体现了潮周期内二者的相关程度, 其在浅海物质运输中与潮致欧拉余流量级相当(冯士筰等, 1992)。

在弱非线性系统中, 引入平均算子 $\langle \rangle = \frac{1}{nT} \int_{t_0}^{t_0+nT} dt$, 其中 T 为潮周期, n 为周期数。以 U 为三维瞬时流速, ζ 为瞬时水位, h 为静置水深, 则欧拉余流与斯托克斯余流分别定义为(Garel *et al*, 2013; Jiang *et al*, 2014; 吴德安等, 2007)

$$U_E = \langle U \rangle, \quad (2)$$

$$U_S = \left\langle \int U dt \cdot \nabla U \right\rangle = \langle \zeta \cdot \nabla U \rangle = \langle \zeta U \rangle / \langle h \rangle. \quad (3)$$

拉格朗日余流的一阶近似, 即物质输运速度, 为 $U_L = U_E + U_S$ 。据此计算得到观测点斯托克斯余流、拉格朗日余流(表 3), 结果显示该点斯托克斯余流与欧拉余流大小、方向相近, 均为 SEE 向, 为向岸运输。这与文献中对渤海风驱-潮致拉格朗日余流的模拟(李国胜等, 2005)略有差异。

表 3 欧拉余流、斯托克斯余流、拉格朗日余流比较
Tab.3 Comparison among the Euler, Stokes and Lagrangian residual current

	欧拉	斯托克斯	拉格朗日
大小(cm/s)	1.35	1.41	2.76
方向(°)	126	120	123

2.2.5 底层温度 底层温度清晰显示了年内季节变化与日变化特征, 春、夏、秋、冬四季底层温度平均值分别为 10.5、25.4、18.1、1.4°C。底层温度功率谱

显示温度变化的谱峰与水位变化基本一致, 呈现明显的全日潮、半日潮谱峰; 对比潮位功率谱, 温度功率谱在全日潮处谱峰能量更强, 这一方面是全日潮的作用, 另一方面也有太阳辐射周日变化的叠加影响。春季的谱峰最强, 秋季次之, 冬季最弱。春冬季的全日潮谱峰

更强, 夏秋季半日潮谱峰更强, 其主要原因是: 春冬季, 海水上下混合更强, 更容易将太阳辐射引起的表层海水温度变化信号传递至底层, 而太阳辐射的周日变化的频率与全日潮接近; 夏秋季, 混合减弱, 太阳辐射的周日变化引起的信号不易传至底层。

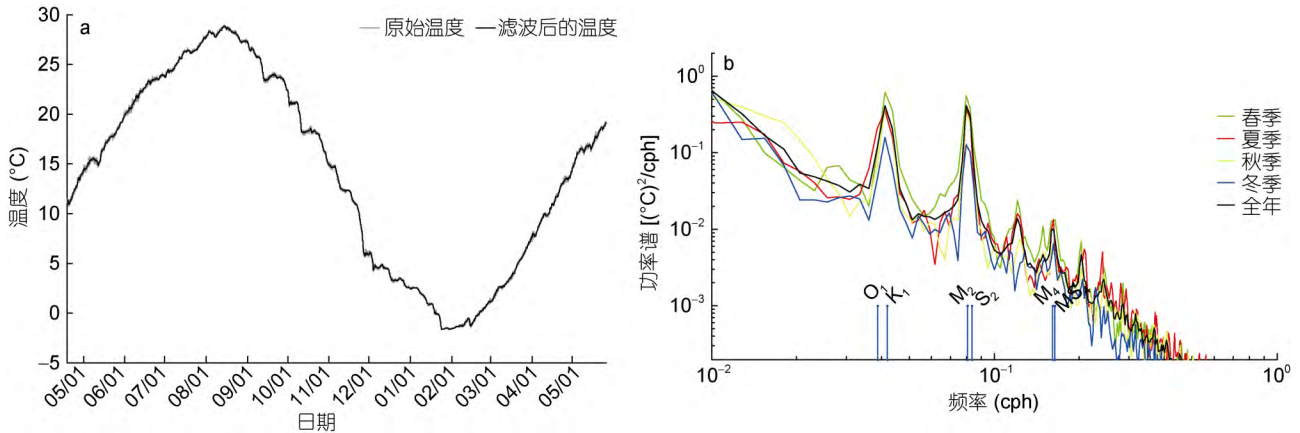


图 10 底层温度全年变化(左图)与各季节平均温度功率谱(右图)

Fig.10 Annual variation (left) and power spectrum (right) of bottom temperature in different seasons

2.2.6 底层浊度 固定在海床基上的 OBS 3A 红外测沙仪记录了 4 月下旬该海域浊度变化, 结果清晰显示自 4 月 19 日 0 时浊度由 3NTU 迅速逐渐升高, 并在 20 日 0 时达到最大值约 230NTU 左右, 至 4 月 20 日 16 时回落稳定在 10NTU 左右, 在 22 日逐步回落至 3NTU 左右; 23 日 0 时由继续上升达到 13NTU, 后逐渐回落。如图 11 所示, 时间段 A、B 内, 浊度升高, 对应垂向流速升高以及持续的大风过程, 这说明该

海域浊度受因大风过程加强的垂向混合影响显著, 进而加强底部沉积物的再悬浮作用, 使浊度增大。需要注意的是, 同样风速下(约 7m/s), 北风较南风引起的垂向混合与再悬浮作用更强, 这主要是由于风区的不同引起的, 该海域南风约为 30 公里风区, 而北风风区最大可达 400 公里, 因此时间段 A 内, 北风的风区更长, 引起的垂向混合与再悬浮作用也更强, 对于风区、风时与垂向混合的关系在此不做定量分析。

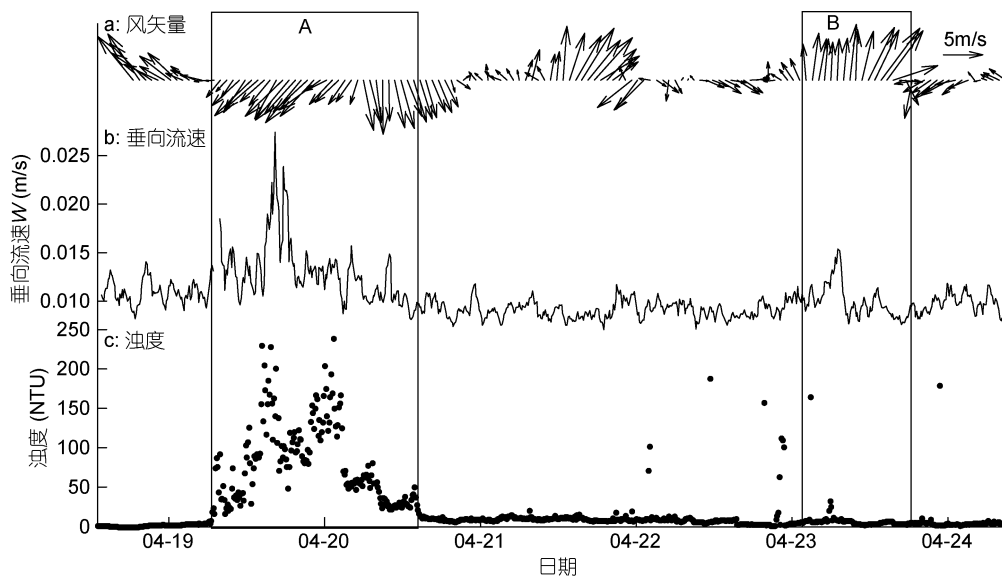


图 11 4 月 18—25 日该海域风速、平均垂向流速、浊度变化

Fig.11 Time series of wind, average vertical velocity, and turbidity on April 18-25

3 结论

本文通过对莱州湾东南侧人工鱼礁布放区海床基一年的连续水位和半年的连续海流观测,对该海区潮汐、潮流及物质输运特征进行了分析,主要结论如下:

(1) 莱州湾东南侧海域潮汐性质指数为 0.98,属于不规则半日潮,具有显著的全日潮周期和半日潮周期,平均潮差为 0.95m,最大可能潮差为 2.25m;潮不等显著,最大流速与潮幅呈现显著线性关系。

(2) 该海域潮流为典型的往复潮,潮流主向为 NNE-SSW,优势分潮为 M_2 分潮, K_1 分潮次之。各分潮主要呈逆时针旋转,旋转率随深度增加各不相同, M_2 逐渐增大, O_1 逐渐减小,向旋转流过渡;而 K_1 、 S_2 变化不大。

(3) 尽管该海域平均水深只有 9m,但潮流在垂向上的显著变化明显,流速随深度增加显著减小,海底 1m 的流速较表层减小约 30%,流向朝顺时针方向偏转。其原因除与底摩擦相关外,更大的可能是人工鱼礁投放对海底摩擦度的增加、人工鱼礁堆积对近底层水流的阻滞作用。

(4) 该海域余流较小,欧拉余流与斯托克斯余流大小相当,分别为 1.35cm/s、1.41cm/s,流向均为 SEE,显示为向岸输运,欧拉余流表层受风影响较大,拉格朗日余流为 2.76cm/s,方向 SEE。

(5) 底层温度存在显著的年内季节变化与日变化特征,短期高频变化存在显著的全日与半日周期,冬春季由于垂向混合加强,全日信号更为显著。底层浊度的升高主要是由大风过程对垂向混合加强引起的。

本次海床基投放位置刚好位于人工鱼礁投放区外西北侧,尽管已经可以看到人工鱼礁投放对流速、流向的改变,尚不能完全定量确定人工鱼礁核心区水动力结构特征及人工鱼礁投放对局地水动力环境的影响,尤其是对底边界层动力结构的影响。今后这一问题以及礁区周边沉积物再悬浮、冲淤等动力过程的研究还有待于加强。此外,人工鱼礁建设正在整个中国沿海兴起,显著改变海底粗糙度与底摩擦,对东中国海环流模式的底边界层参数化提出了新的要求,其对东中国海沿岸流系统的影响也值得思考。

参 考 文 献

万国洪, 1986. 潮汐和潮流的分析和预报. 北京: 海洋出版社

- 冯士筌, 孙文心, 1992. 物理海洋数值计算. 郑州: 河南科学技术出版社
- 刘彦, 关长涛, 赵云鹏等, 2010. 水流作用下星体型人工鱼礁二维流场 PIV 试验研究. 水动力学研究与进展 A 辑, (6): 777—783
- 刘天然, 魏皓, 赵亮等, 2010. 北部湾春季季风转换时期两潜标站余流分析. 热带海洋学报, 29(3): 10—16
- 刘长东, 郭晓峰, 唐衍力等, 2015. 海州湾前三岛人工鱼礁区浮游植物群落组成及与环境因子的关系. 中国水产科学, 22(3): 545—555
- 江志兵, 陈全震, 寿鹿等, 2012. 象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系. 生态学报, 32(18): 5813—5824
- 佟飞, 张秀梅, 吴忠鑫等, 2014. 荣成俚岛人工鱼礁区生态系统健康的评价. 中国海洋大学学报(自然科学版), 44(4): 29—36
- 吴忠鑫, 张秀梅, 张磊等, 2012. 基于 Ecopath 模型的荣成俚岛人工鱼礁区生态系统结构和功能评价. 应用生态学报, 23(10): 2878—2886
- 吴德安, 张忍顺, 沈永明, 2007. 江苏辐射沙洲水道垂线平均余流的计算与分析. 海洋与湖沼, 38(4): 289—295
- 张丛, 鲍献文, 丁扬等, 2017. 南海北部陆架坡折带潮流和低频流特征分析. 海洋与湖沼, 48(2): 221—231
- 李东, 唐诚, 邹涛等, 2017. 基于多波束声呐的人工鱼礁区地形特征分析. 海洋科学, 41(5): 127—133
- 李国胜, 王海龙, 李柏良, 2005. 渤海风驱-潮致拉格朗日余流的数值模拟与季相时空变异. 地理研究, 24(3): 359—370
- 李珺, 章宇宇, 2010. 米字型人工鱼礁流场数值模拟与水槽实验的比较. 水产学报, 34(10): 1587—1594
- 杨红生, 2016. 我国海洋牧场建设回顾与展望. 水产学报, 40(7): 1133—1140
- 陈明波, 2012. 莱州浅滩对莱州湾东部沉积动力格局的控制作用研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 郑延璇, 梁振林, 关长涛等, 2014. 三种叠放形式的圆管型人工鱼礁流场效应数值模拟与 PIV 试验研究. 海洋与湖沼, 45(1): 11—19
- 赵骞, 王梦佳, 丁德文等, 2016. 基于长期观测的辽东湾口东部海域水动力特征研究. 海洋学报, 38(1): 20—30
- 廖一波, 曾江宁, 寿鹿等, 2014. 象山港人工鱼礁投放对大型底栖动物群落结构的影响. 海洋与湖沼, 45(3): 487—495
- Butterworth S, 1929. On the theory of filter amplifiers. *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*, 7: 536—541
- Fang G H, Ichiye T, 1983. On the vertical structure of tidal currents in a homogeneous sea. *Geophysical Journal International*, 73(1): 65—82
- Feng S Z, Cheng R T, Xi P G, 1986. On tide induced Lagrangian residual current and residual transport: 2. Residual transport with application in south San Francisco Bay, California. *Water Resources Research*, 22(12): 1635—1646
- Garel E, Ferreira Ó, 2013. Fortnightly changes in water transport

- direction across the mouth of a narrow estuary. *Estuaries and Coasts*, 36(2): 286—299
- Gonella J, 1972. A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 19(12): 833—846
- Jiang W S, Feng S Z, 2014. 3D analytical solution to the tidally induced Lagrangian residual current equations in a narrow bay. *Ocean Dynamics*, 64(8): 1073—1091
- Lilly J M, 2017. jLab: A data analysis package for Matlab. <http://www.jmlilly.net/jmlsoft.html>
- Mooers C N K, 1973. A technique for the cross spectrum analysis of pairs of complex-valued time series, with emphasis on properties of polarized components and rotational invariants. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 20(12): 1129—1141
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8): 929—937
- Wei H, Hainbucher D, Pohlmann T *et al*, 2004. Tidal-induced Lagrangian and Eulerian mean circulation in the Bohai Sea. *Journal of Marine Systems*, 44(3—4): 141—151

HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS IN THE ARTIFICIAL REEFING CONSTRUCTION AREA IN LAIZHOU BAY: BASED ON: A CONTINUOUS LONG-TERM OBSERVATION

ZOU Tao¹, ZHANG Li-Bin², ZHANG Hua¹, LI Dong¹

(1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;*
2. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)

Abstract Artificial reefing (AR) is important for restoring coastal fishery resources with the better ecological environment of the coastal water. However, little is known of the local hydrodynamic characteristics. Based on an over-6-month in-situ observation with mooring in a seabed platform, we studied the tidal spectra, tidal current, and tidal residual current using low-pass filtering and harmonic analysis. The results show that the tide was an irregular semi-diurnal tide with a tidal form of 0.98, the mean tidal range of 0.95m, and the maximum possible tidal range of 2.25m. The tidal current signal was also irregular semi-diurnal dominated by M_2 component. The motion type of the principal tidal current was inclined to reciprocate with a maximum tidal velocity in direction of NNE-SSW. The magnitude of velocity significantly reduced 30% from the surface to bottom. Meanwhile, the tidal flow tended to clockwise. The residual current was very weak and the Euler and the Stokes residual current was 1.35cm/s and 1.41cm/s, respectively, in direction of SEE, showing a landward transport. The Lagrangian residual current was 2.76cm/s, in direction of SEE. The hydrodynamic characteristics were closely related to bottom friction increase and retardation effects due to artificial reefs. The bottom temperature varied frequently in the semi-diurnal and diurnal period. In addition, seasonal variation was notable. In winter, the signal of the diurnal period was dominant due to the strong vertical mixing. The vertical mixing affected by spring wind, resulting in bottom turbidity variation. Therefore, we shall study AR on a small scale to understand the bottom boundary layer dynamics and on a large scale the coastal current system.

Key words artificial reef; tidal current; residual current; harmonic analysis