

用最小二乘法分析胶州湾海流特征

王 勇^{1,2,3}, 栾学科^{1,2,3}, 栾 天^{1,2}, 闫鲁雁^{1,2}, 郑 琪^{2,3}

(1. 山东省海岸带调查监测工程技术协同创新中心, 山东 青岛 266032;

2. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266032;

3. 青岛市海陆地理信息集成及应用重点实验室, 山东 青岛 266032)

摘 要:在胶州湾湾口、西侧、中心、东侧、北侧湾顶五个区域布设测站, 利用 2018 年冬季至 2020 年秋季潮位、海流等监测数据, 基于最小二乘法进行调和计算, 并结合垂线平均流速流向、可能最大流速、水质点可能最大运移距离等计算模型, 研究分析了胶州湾海流特征。结果表明, 各区域潮流类型系数均小于 0.5, M_2 分潮椭圆率绝对值均不超过 0.1, 接近于 0, 故胶州湾潮流性质为正规半日潮流, 潮流运动形式以往复型为主。湾口区域余流、可能最大流速、水质点可能最大运移位移均最大。不同季节余流流速和流向的差异没有明显的规律性, 除湾区西侧测站外, 其余位置不同季节余流流向整体上有固定朝向: 湾口处东偏北、中心站西偏北、东侧站南偏东、北侧湾顶站东偏北。靠近岸边的湾口、东侧和北侧湾顶站余流流向与邻近海岸垂直。在垂直方向上, 各测站可能最大流速和水质点可能最大运移距离由表层至底层整体上呈减小趋势, 流向基本一致。

关键词:胶州湾; 最小二乘法; 海流特征; 余流; 可能最大流速; 可能最大运移位移

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)02-0128-08

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20211106001

引用格式:王勇, 栾学科, 栾天, 等. 用最小二乘法分析胶州湾海流特征[J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 128-135. WANG Y, LUAN X K, LUAN T, et al. Study on tidal current characteristics in the Jiaozhou Bay by least squares harmonic analysis[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 128-135.

胶州湾位于黄海中部、胶东半岛南岸(120°06′~120°22′E, 36°15′~36°36′N), 拥有丰富的矿砂、渔业、风能、盐化等自然资源, 是青岛经济社会发展的重要依托。近年来青岛保持着拥湾发展的态势, 建设了胶州湾大桥、海底隧道, 实施了沿岸环境修复治理、填海造陆等工程项目。涉海项目的推进实施需要对海洋环境有充分的了解, 学者们针对海流状况、潮流特征等相关内容进行了大量的研究, 如丘仲锋等应用调和计算, 对台湾浅滩南部二测站海流资料进行分析^[1]; 杜岩等用小波变换分析东海定点观测站海流资料^[2]; 杨景飞等利用调和常数和实测海流数据对高岭电厂附近海域海流状况进行调查分析^[3]; 郑一等对海流流速的误差及修正方法进行了研究^[4]; 王春阳等分析了广东红海湾海流季节性特征^[5]; 林毅辉等分析了高集海堤开口后厦门湾的潮流特征^[6]; 吴頔等研究了台湾海峡 M_2 分潮潮汐潮流特征^[7]; 蔡忠亚等利用 ADCP 观测数据研究胶州湾湾口夏季海流时空分布特征^[8]; 张永强等探讨了典型时刻胶州湾大桥附近海域的海流情况^[9]; 等等。

海流是海洋水文要素的重要组成部分, 影响着海洋地质、物理和化学等环境的分布、演化及过程机制, 对周边气候变化也有一定的影响, 研究海流动态变化及其特征、机理对海洋经济发展、海洋生态环境保护等方面具有重要意义。目前, 针对胶州湾区域海流特征的研究相对较少, 为进一步丰富这一海域的研究成果, 本文利用胶州湾不同季节的海流监测数据, 分析其海流特征, 研究成果可以为胶州湾海流分析、湾区规划建设和环境保护等提供理论支撑。

1 数学模型

调和计算是海流分析的重要方法之一, 以海流的流速流向作为观测数据, 运用调和计算模型, 通过最小

收稿日期: 2021-11-06

作者简介: 王 勇(1992—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事精密工程测量与海洋调查测绘等方面研究. E-mail: 1329830335@qq.com

(陈 靖 编辑)

二乘法计算海流各分潮的调和常数、椭圆要素以及余流等信息^[10-11]。椭圆要素可以用于判断潮流性质、潮流运动形式等信息。

1.1 调和模型

$$\begin{cases} v = v_0 + \sum_i v_{\max,i} \cos(\omega_i t + k_{0i} - \xi_i) \\ u = u_0 + \sum_i u_{\max,i} \sin(\omega_i t + k_{0i} - \eta_i) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: v 和 u 分别为北、东分量流速; v_0 和 u_0 分别为北、东分量余流; $v_{\max,i}$ 和 $u_{\max,i}$ 分别为各分潮北、东分量的最大流速; ξ_i 和 η_i 分别为各分潮北、东分量的迟角; ω_i 为各分潮角速度; k_{0i} 为天文参数,是与时间有关的函数。

1.2 垂线平均流速计算方法

为了更直观地分析海流性质及运动形式等特征,需要得到监测断面代表性的流速值,且数值唯一,利用测流传感器获取不同水深位置的流速和流向,采用“六点法”和“三点法”计算监测点位垂线平均流速(对于水深较深的位置采用“六点法”,对于水深较浅的位置采用“三点法”)^[12],其中,“六点法”计算公式为:

$$\begin{cases} v_m = 1/10(v_s + 2v_{0.2H} + 2v_{0.4H} + 2v_{0.6H} + 2v_{0.8H} + v_b) \\ u_m = 1/10(u_s + 2u_{0.2H} + 2u_{0.4H} + 2u_{0.6H} + 2u_{0.8H} + u_b) \end{cases}, \quad (2)$$

“三点法”计算公式为:

$$\begin{cases} v_m = 1/3(v_{0.2H} + v_{0.6H} + v_{0.8H}) \\ u_m = 1/3(u_{0.2H} + u_{0.6H} + u_{0.8H}) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: v_m 和 u_m 分别为北、东分量的垂线平均流速; v_s 和 u_s 分别为表层北、东分量的流速; v_{iH} 和 u_{iH} 分别为各水深层北、东分量的流速, H 为水深; v_b 和 u_b 分别为表底层北、东分量的流速。

1.3 潮流可能最大流速、潮流水质点可能最大运移位移

潮流可能最大速度和水质点可能最大运移位移对水动力机制研究、冲淤变化分析等具有重要参考价值。具体计算公式如下:

$$\begin{cases} \bar{V}_{\max} = 1.295\bar{W}_{M_2} + 1.245\bar{W}_{S_2} + \bar{W}_{K_1} + \bar{W}_{O_1} + \bar{W}_{M_4} + \bar{W}_{MS_4} \\ \bar{L}_{\max} = 184.3\bar{W}_{M_2} + 171.2\bar{W}_{S_2} + 274.3\bar{W}_{K_1} + 295.9\bar{W}_{O_1} + 71.2\bar{W}_{M_4} + 69.9\bar{W}_{MS_4} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: \bar{V}_{\max} 和 \bar{L}_{\max} 分别为潮流可能最大流速和水质点可能最大运移位移; \bar{W}_{M_2} 、 \bar{W}_{S_2} 、 \bar{W}_{K_1} 、 \bar{W}_{O_1} 、 \bar{W}_{M_4} 和 \bar{W}_{MS_4} 分别为 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 M_4 和 MS_4 分潮流的最大流速^[13]。

2 海流特征分析

为了研究分析胶州湾海流特征,在胶州湾代表性区域(湾口、海湾西侧、海湾中心、海湾东侧、北侧湾顶)共布设5个监测站,站位分布如图1所示,各站地理位置及水深统计见表1。2019—2020年,大潮期共进行7次水文监测,各站同步监测时间见表2,内容包括海流的流速、流向和潮位变化等,海流流速、流向利用挪威NORTEK公司生产的Aquadopp“小阔龙”声学多普勒剖面流速仪进行监测,采用分层观测法,深水区L1站、L2站和L3站分6层(表层、0.2H层、0.4H层、0.6H层、0.8H层、底层),浅水区L4站和L5站分3层(表层、0.6H层、底层);潮位变化利用加拿大RBR公司生产的TGR-2050潮位仪进行监测。监测涵盖春、夏、秋、冬四个季节,且每次监测均不少于26h,采样间隔为1h。本文通过对潮位、海流监测资料的处理分析,对胶州

湾潮汐性质,潮流运动形式等方面展开研究。

2.1 潮流性质分析

将实测海流数据进行磁差修订,并计算各站点垂线平均流速、流向作为观测数据,通过调和模型,利用最小二乘平差计算椭圆参数,进一步计算潮流类型系数 $(W_{O_1} + W_{K_1})/W_{M_2}$,其中 W_{O_1} 、 W_{K_1} 、 W_{M_2} 分别为主太阴日分潮流、太阴太阳赤纬日分潮流、主太阴半日分潮流的最大流速。L1站、L2站、L3站大潮期水深最小值均超过6m,采用“六点法”计算垂线平均流速,L4站、L5站大潮期水深最小值均约为3m,垂线平均流速利用“三点法”计算。为了研究分析胶州湾潮流性质,将各测站7次监测水深数据减去平均值后绘制潮位变化曲线图(图2),将各测站潮流类型系数绘制成柱状图(图3)。

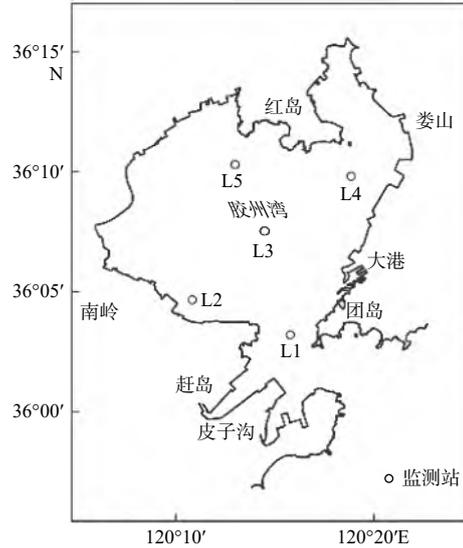


图1 监测站位分布

Fig. 1 Distribution of hydrological monitoring stations

表1 各监测站地理位置及水深

Table 1 Geographical location and water depth of each station

测站	区域	位置	水深/m
L1	湾口	120°15'24"E, 36°03'36"N	30
L2	海湾西侧	120°11'24"E, 36°05'36"N	6
L3	海湾中心	120°14'54"E, 36°07'24"N	9
L4	海湾东侧	120°19'18"E, 36°09'54"N	3
L5	北侧湾顶	120°14'12"E, 36°09'63"N	3

表2 各监测站同步监测时间

Table 2 Synchronous monitoring time at the stations

序号	季节	时间
1	2018年冬季	2019年1月22日11:00—23日13:00
2	2019年春季	2019年4月07日11:00—08日13:00
3	2019年夏季	2019年8月02日10:00—03日12:00
4	2019年冬季	2020年1月12日14:00—13日16:00
5	2020年春季	2020年4月26日10:00—27日12:00
6	2020年夏季	2020年7月06日15:00—07日17:00
7	2020年秋季	2020年9月18日10:00—19日12:00

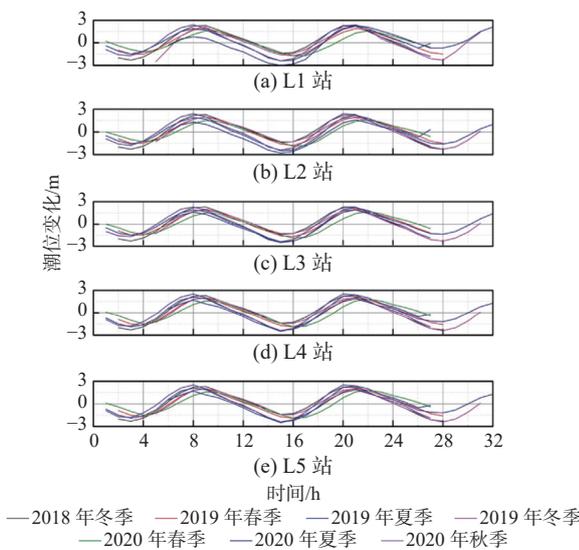


图2 各站潮位变化曲线

Fig. 2 Curves of tidal level change at the stations

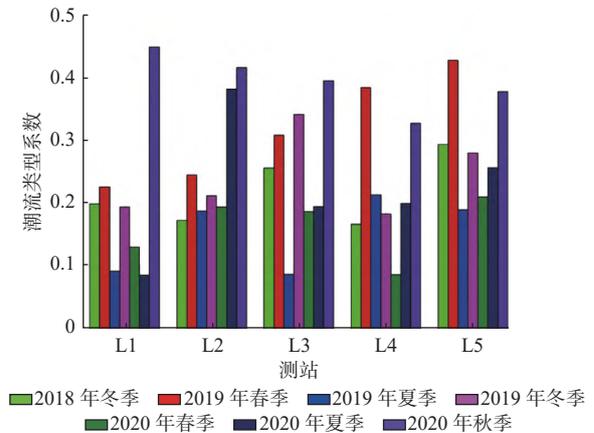


图3 各站潮流类型系数柱状图

Fig. 3 Histogram of the tidal current type coefficients at the stations

L1 站位于湾口区域, 水深值最大, L3 站位于湾区中心区域, 水深值仅次于湾口区域。由图 2 可知, 各站的长落潮最大幅度约为 5 m, 随季节变化不大, 涨落潮周期约为 12 h, 不同季节之间最高潮、最低潮时差小于 2 h。由图 3 可知潮流类型系数均小于 0.5, 最大值约为 0.45, 超过 70% 的潮流类型系数小于 0.3, 按《海港水文规范》中潮流性质判别标准, 潮流类型为规则半日潮流^[13]。

2.2 潮流的运动形式

潮流的运动形式通常以椭圆要素椭圆率 K 的绝对值来判断, $|K|$ 通常为 0~1, 值越大, 表示旋转流的形式越显著, 值越小, 表示往复流的形式越显著。椭圆率 K 为正数表示潮流逆时针旋转, 负数表示潮流顺时针旋转。由于观测海域为正规浅海半日潮流类型, 主要以 M_2 分潮流的椭圆率来对潮流运动形式作近似分析。各测站 2020 年夏季大潮期涨、落潮垂线平均的平均流速和最大流速值见表 3, 将各测站 2020 年夏季大潮期流速、流向监测数据绘制成极坐标图(图 4), 将各测站椭圆率绘制成折线图(图 5)。

表 3 各站涨、落潮垂线平均的平均流速和最大流速 (cm/s)

Table 3 The average flow velocity and the maximum flow velocity during the rising and falling tides averaged in the vertical direction at the stations (cm/s)

测 站	落潮流 平均流速	涨潮流 平均流速	落潮流 最大流速	涨潮流 最大流速
L1	53	81	80	114
L2	26	28	38	48
L3	22	30	41	54
L4	27	27	45	53
L5	17	21	31	39

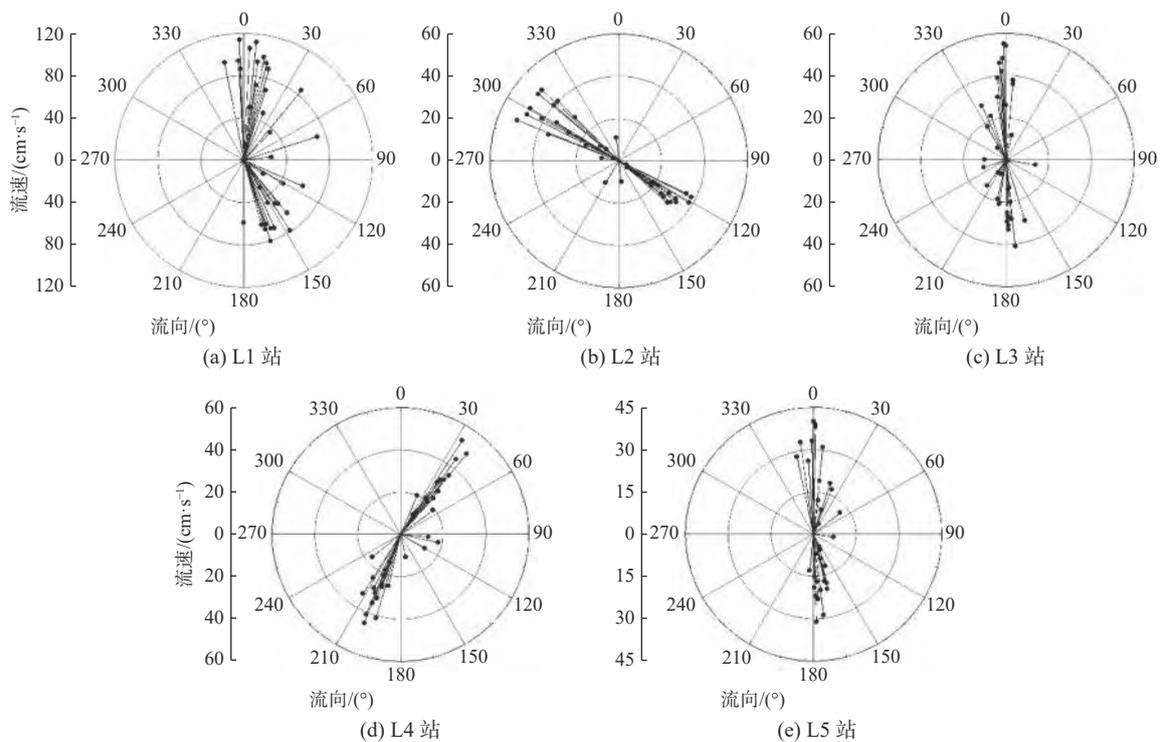


图 4 各站大潮期流速、流向极坐标分布

Fig. 4 Polar coordinate diagram of the tidal current velocity and direction at the stations

由图 4 和表 3 可知, 各站涨潮流最大流速大于落潮流最大流速, 涨潮流平均流速不小于落潮流平均流速, 除 L1 站以外, 其他测站涨落潮流向变化整体上倾向于一条直线, L1 站、L3 站、L5 站涨潮主要流向均接近正北向, L1 站落潮流向整体上指南偏东方向, 由湾口指向外海, L3 站、L5 站落潮主要流向接近正南向, 指向湾口处, L2 站、L4 站落潮流向指向湾口, 整体上与涨潮流向相反。大潮期各站涨、落潮平均流速和最大流速最大值均位于湾口区域 L1 站, 且与其他各站差值较大, 其他各站流速相对接近。图 5 中各测站不同季节 M_2

分潮流椭圆率 $|K|$ 接近 0, 只有 L4 站 2019 年春季大于 0.1, 但小于 0.15, 其他数值均不超过 0.1, 因此大潮期各站潮流运动形式以往复流为主。

2.3 余流分析

余流的流向常是泥沙运动和污染物扩散的方向, 余流分析是研究海岸带泥沙来源和环境保护的一种有效手段。通过调和析, 从海流总矢量中分离出各分潮流, 剩下的部分即为余流, 将 5 个测站各水深层 7 次监测数据计算的余流绘制成极坐标图(图 6)。可以看出, 相较于其他测站, 位于湾口处的 L1 站余流流速明显较大, 最大值约为 35 cm/s, 其余各站最大值均不超过 15 cm/s。不同季节余流流速和流向的差异没有明显的规律性, L1 站、L3 站、L4 站、L5 站不同季节余流整体上流向较为固定, L1 站朝向东偏北、L3 站朝向西偏北、L4 站朝向南偏东、L5 站朝向东偏北, 靠近岸边的 L1 站、L4 站、L5 站余流流向偏向于邻近海岸, 与海岸垂直, 其中 L1 站偏向于湾口处东侧海岸, L4 站偏向于湾区东侧娄山与大港之间的海岸, L5 站偏向于湾区北侧红岛附近的海岸, L2 站不同季节余流没有明显固定朝向。

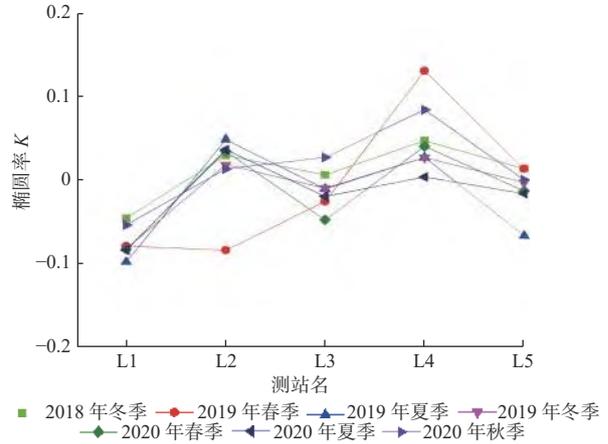


图 5 各站 M₂ 分潮流椭圆率
Fig. 5 Line chart of ellipticity at the stations

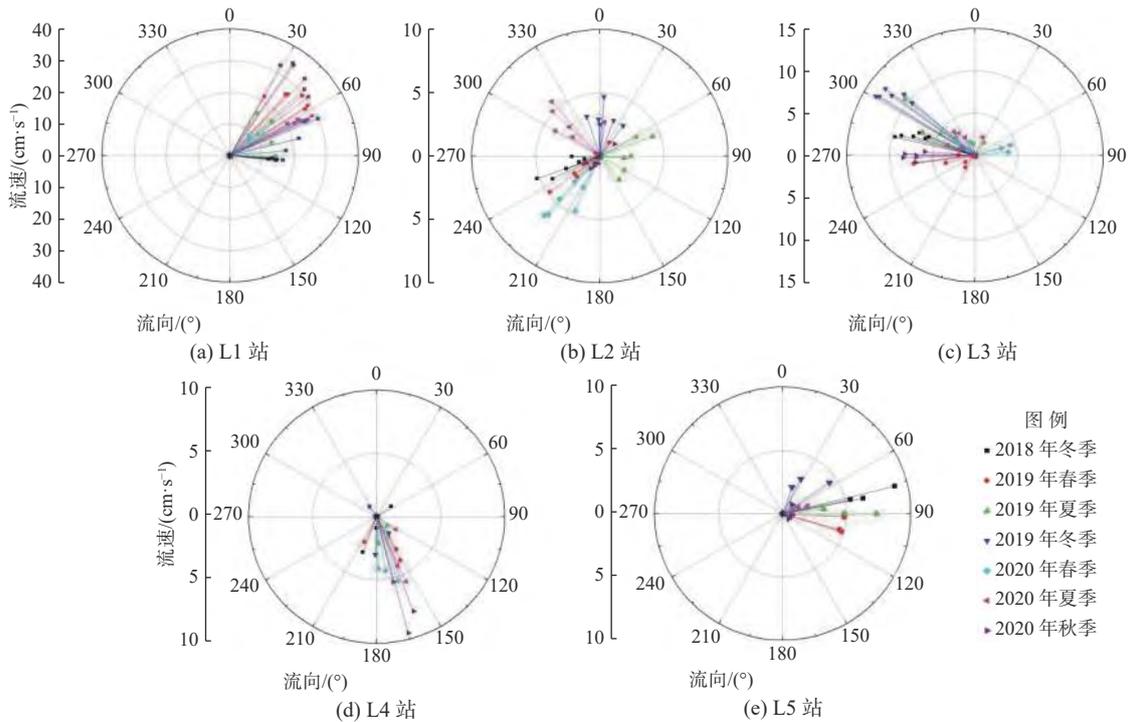


图 6 各站余流流速、流向极坐标分布
Fig. 6 Polar coordinate diagram of residual current at the stations

2.4 潮流可能最大流速和水质点可能最大运移位移计算分析

按式(4)计算各水深层潮流可能最大流速和流向、潮流水质点可能最大运移位移, 不同季节可能最大流速和水质点可能最大运移距离最大值均出现在 L1 站。绘制各测站可能最大流速流向(图 7)和可能最大运移距离折线图(图 8)。

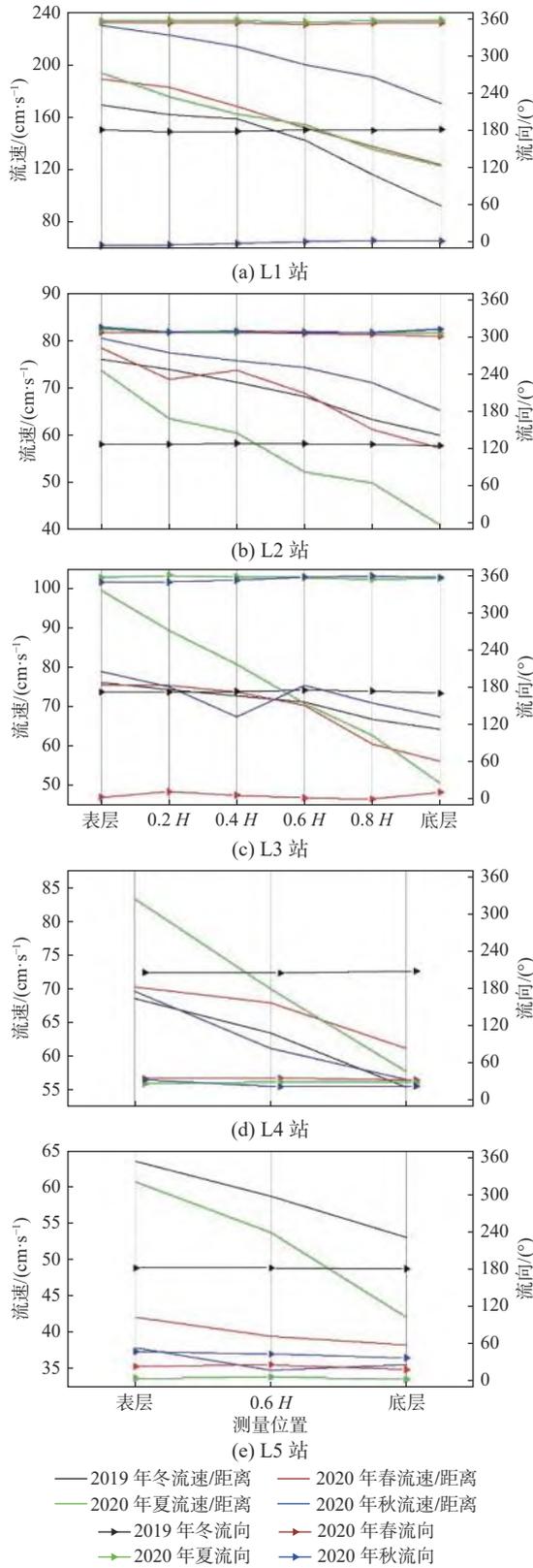


图 7 各测站可能最大流速流向
 Fig. 7 Line chart of the maximum possible flow velocity at the stations

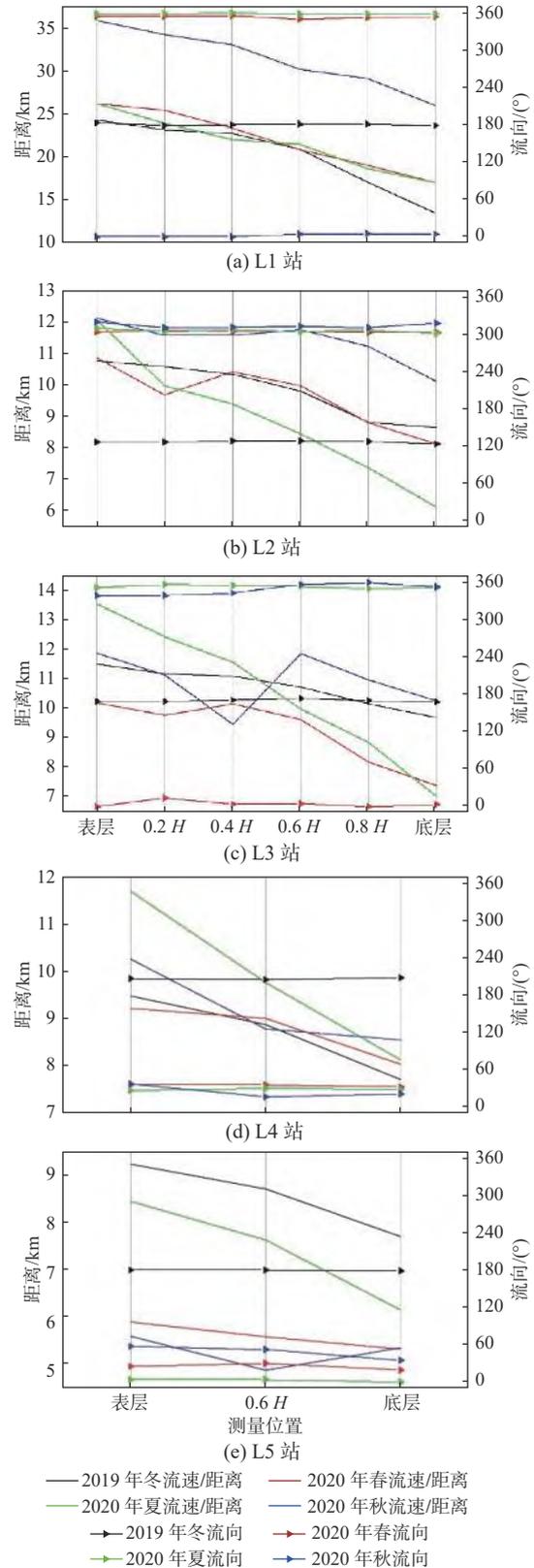


图 8 各测站可能最大运移位移
 Fig. 8 The maximum possible migration displacement at the stations

不难看出,潮流可能最大流速和水质点可能最大运移位移存在明显的相关性,同一季节同一测站各水深层可能最大流速和水质点可能最大运移位移对应的海流流向基本一致,流速和距离由表层至底层呈现减小趋势;2020年春、夏、秋季流向基本一致,整体指向偏北,与2019年冬季流向相反。流速和运移距离,L1、L2站秋季最大,L5站冬季最大,夏季次之,整体上与季节无明显相关性。

3 结 语

利用2018年冬季至2020年秋季胶州湾潮位及多个测站海流监测数据,研究验证胶州湾潮流性质特征,研究结果可以为胶州湾生态保护修复、湾区发展建设、水动力研究等方面提供科学参考。主要研究结论如下:

1)胶州湾潮流性质为规则半日潮流,潮流运动形式以往复流为主,涨落潮最大幅度受季节影响不大,大潮期涨潮流最大流速大于落潮流最大流速,各测站涨落潮平均流速和最大流速最大值均位于湾口区域L1站,且与其他各站差值较大,其他各站流速相对接近。

2)位于湾口区域的L1测站余流流速及可能最大流速、水质点可能最大运移距离均最大。不同季节余流流速和流向的差异没有明显的规律性,除湾区西侧L2测站以外,其余测站不同季节余流流向整体上有固定方向,与邻近海岸垂直。

3)在垂直方向上,各测站可能最大流速和水质点可能最大运移距离由表层至底层整体上呈减小趋势,流向基本一致。

参考文献 (References):

- [1] 丘仲锋, 胡建宇, 陈照章. 台湾浅滩南部二测站多周日海流观测资料的调和分析[J]. 海洋科学, 2002, 26(7): 50-53. QIU Z F, HU J Y, CHEN Z Z. Harmonic analysis of multi-week current observation data at the second station in southern Taiwan Shoal[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(7): 50-53.
- [2] 杜岩, 齐义泉, 陈举, 等. 东海定点连续观测站海流资料分析[J]. 海洋工程, 2003(1): 94-100. DU Y, QI Y Q, CHEN J, et al. Current analysis at a continuous observation station in the East China Sea[J]. *The Ocean Engineering*, 2003(1): 94-100.
- [3] 杨景飞, 巴兰春, 杜荣华. 高岭电厂附近海域海流状况调查分析[J]. 海洋湖沼通报, 1990(2): 26-36. YANG J F, BA L C, DU R H. Investigation and analysis of current conditions in the sea area near Gaoling power plant[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1990(2): 26-36.
- [4] 郑一, 岳军, 纪乃华, 等. 基于PAADCP的海流流速的误差分析及校正方法[J]. 海洋科学, 2013, 37(5): 81-86. ZHENG Y, YUE J, JI N H, et al. Error analysis and correction method of ocean current velocity based on PAADCP[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(5): 81-86.
- [5] 王春阳, 张永强, 王恩康, 等. 广东红海湾海流季节性特征分析[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(4): 32-41. WANG C Y, ZHANG Y Q, WANG E K, et al. Analysis of the seasonal characteristics of ocean currents in the Red Bay[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2020, 39(4): 32-41.
- [6] 林毅辉, 潘伟然, 肖征, 等. 高集海堤开口后厦门湾潮流特征分析[J]. 海洋湖沼通报, 2020, 177(6): 12-20. LIN Y H, PAN W R, XIAO Z, et al. Analysis of tidal current characteristics of Xiamen Bay after the opening of Gaoji seawall[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020, 177(6): 12-20.
- [7] 吴岷, 王勇智, 孙永根. 台湾海峡M₂分潮潮汐潮流特征分布及机制研究[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(4): 12-20. WU D, WANG Y Z, SUN Y G. Research on the distribution and mechanism of tidal and tidal current characteristics of M₂ in the Taiwan Strait[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2020, 39(4): 12-20.
- [8] 蔡忠亚, 刘哲, 陈子煜, 等. 胶州湾湾口夏季海流时空分布特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 86-92. CAI Z Y, LIU Z, CHEN Z Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of ocean currents at the Mouth of Jiaozhou Bay in summer[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(4): 86-92.
- [9] 张永强, 张蕊君, 迟万清, 等. 胶州湾大桥建设前后湾内泥沙冲淤数值模拟[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(3): 368-377. ZHANG Y Q, ZHANG W J, CHI W Q, et al. Numerical simulation of sediment erosion and deposition in the bay before and after the construction of Jiaozhou Bay Bridge[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2020, 39(3): 368-377.
- [10] 王如云, 李慧娟, 蒋风芝. 一个简化的潮汐预报准调和分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009(5): 121-124. WANG R Y, LI H J, JIANG F Z. A simplified quasi-harmonic analysis method for tide forecast[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009(5): 121-124.
- [11] 赵骞, 郭威, 陈元, 等. 红沿河核电站邻近海域海流特征观测与分析[J]. 海洋工程, 2018, 36(6): 134-140. ZHAO Q, GUO W, CHEN Y,

- et al. Observation and analysis on the current characteristics in adjacent sea area of Hongyanhe nuclear power station[J]. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(6): 134-140.
- [12] 范东华. 垂线平均流速流向计算方法探讨[J]. *水道港口*, 2014(4): 463-468. FAN D H. Discussion on calculation method of average velocity and flow direction of vertical line[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2014(4): 463-468.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 海港水文规范: JTS 145-2-2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 97-99. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of Hydrology for Sea Harbour: JTS 145-2-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013: 97-99.

Study on Tidal Current Characteristics in the Jiaozhou Bay by Least Squares Harmonic Analysis

WANG Yong^{1,2,3}, LUAN Xue-ke^{1,2,3}, LUAN Tian^{1,2}, YAN Lu-yan^{1,2}, ZHENG Qi^{2,3}

(1. *Shandong Coastal Zone Survey and Monitoring Engineering Technology Collaborative Innovation Center*, Qingdao 266032, China;

2. *Qingdao Surveying & Mapping Institute*, Qingdao 266032, China;

3. *Qingdao Marine and Land Geographic Information Integration and Application Key Laboratory*, Qingdao 266032, China)

Abstract: Five observation stations are set up at the mouth, west side, center, east side and north top of the bay. Based on the tidal level and current data observed by many times from winter 2018 to autumn 2020, the harmonic analysis and calculation of tidal current are carried out by means of least square method. The variations of the tidal current characteristics in the Jiaozhou Bay are analyzed by using the calculation models of vertical mean flow velocity and direction, maximum possible flow velocity and water particle maximum possible migration displacement. The results show that the tidal current type coefficient at each station is less than 0.5 and the absolute value of ellipticity of tidal component M_2 is less than 0.1, being close to 0, indicating that the tidal current in the Jiaozhou Bay belongs to a normal semi-diurnal tidal current and the tidal current movement is dominated by a type of reciprocating motion. The residual current, the maximum possible flow velocity and the water particle maximum possible migration distance at the stations in the bay mouth area all are the maximum. In different seasons the velocity and direction of the residual flow have no obvious regularity. Except for the stations at the west side of the bay, at all other stations the flow direction of the residual current has overall a fixed orientation in different seasons: that is, east by north at the bay mouth, west by north at the central station, south by east at the eastern station and east by north at the northern bay top. The flow directions of the residual current are perpendicular to the adjacent coast at the bay mouth close to the shore, the eastern station and the northern bay top. In the vertical direction, the maximum possible flow velocity and the water particle maximum possible migration distance tend overall to decrease from the surface to the bottom at all stations, but the flow direction keeps basically the same.

Key words: the Jiaozhou Bay; least squares method; tidal current characteristics; residual current; maximum possible flow velocity; maximum possible migration displacement

Received: November 6, 2021