# 莱州湾潮余流及粒子运移特征

姜悦,褚忠信,刘鑫仓,姜瑾斐,孙家高

(中国海洋大学海洋地球科学学院 青岛 266100)

摘要:为掌握莱州湾潮余流特征和粒子运移特征,文章采取平面二维数值模拟的方法,计算得到莱 州湾的潮流场,并分析潮流结构;在潮流场的基础上,计算和分析欧拉余流场;通过在不同位置释 放自由运动的粒子,得到潮流作用下自由运动粒子的运移轨迹。研究结果表明:莱州湾涨潮时的 最大流速约为2.19 m/s,落潮时的最大流速约为2.66 m/s,且均在湾口处出现最大流速;莱州湾欧 拉余流速度较小,且湾口附近较大而湾内较小;莱州湾分布均匀的粒子在自由运移时出现不同程 度的聚集,且整体运移趋势是向岸聚集。

**关键词:**莱州湾;二维数值模拟;潮流;余流;粒子运移 **中图分类号:**P731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-9857(2020)08-0013-06

# Characteristics of Tidal Residual Current and Particle Migration in Laizhou Bay

JIANG Yue, CHU Zhongxin, LIU Xincang, JIANG Jinfei, SUN Jiagao

(College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to study the characteristics of tidal residual current and particle migration in Laizhou Bay, the paper adopted the method of planar two-dimensional numerical simulation, calculated the tidal current field in Laizhou Bay, and analyzed the tidal current structure. The maximum flow velocity in Laizhou Bay was about 2. 19 m/s during high tide and about 2. 66 m/s during low tide, and the maximum flow velocity occurs at the mouth of the bay. Based on the tidal current field, the Euler residual current field was calculated. The Euler residual current velocity in the Laizhou Bay was small, the area near the bay mouth was relatively large, and the bay was relatively small. Freely moving particles were released at different positions in Laizhou Bay, and the movement trajectories of freely moving particles were obtained under the action of tidal current. The uniformly distributed particles in Laizhou Bay gathered at different degrees during free movement, and the overall migration trend was shoreward.

**Key words**: Laizhou Bay, Two-dimensional numerical simulation, Trend, Residual current, Particle migration

0 引言

莱州湾位于山东半岛北侧,西起黄河口,东至 龙口屺姆角,是渤海三大海湾之一<sup>[1]</sup>,有黄河、淄脉 河、小清河、弥河、潍河和胶莱河等河流汇入湾内<sup>[2]</sup>。

许多学者对该海域进行大量研究,研究成果集 中在围填海工程<sup>[3-6]</sup>、水交换<sup>[7-9]</sup>、潮流波浪特 征<sup>[10-11]</sup>和物质输运<sup>[12-16]</sup>等方面。在物质输运方 面,海藻和塑料等重量较轻和易随海流运移的物质会 在潮流作用下自由运移,其运移方向、运移路径和运 移趋势等对海洋生态环境保护和沿岸地区生产生活 具有指导意义。近年来针对莱州湾物质输运的研究 逐渐增多,但对莱州湾粒子运移路径和运移规律的探 讨较少。本研究运用二维数值模拟得到莱州湾潮流 场和余流场,将重量较轻和易随海流运移的物质统一 用自由运动的粒子代表,利用 MIKE 21 HD 模型计算 不同初始位置的粒子在潮流作用下的运移轨迹,并分 析莱州湾粒子运移的基本规律。

1 数据和方法

#### 1.1 数据来源

本研究的岸线数据提取自 2018 年的 Landsat 8 卫星影像,空间分辨率为 15 m,通过下载并配准卫 片解译和提取岸线,并利用 AutoCAD 进行调整<sup>[17]</sup>。 采用海洋潮流发生一般高潮时海水所淹没的平均 界线法提取岸线,研究表明平均高潮线的精度可满 足当前的网格计算要求<sup>[18]</sup>。采用电子海图经水深 插值取得计算水深和 DHI-Cmap 水深数据。采集 2 个观测点(C5 和 C6)于 2014 年 5 月 28 日 12 时至 5 月 29 日 12 时的实测潮流数据<sup>[6]</sup>,并与模拟数据 进行验证(图 1)。



#### 1.2 数值模型

采用丹麦水力学研究所研发的平面二维数值 模拟,对莱州湾的潮流场、余流场和物质输运进行 分析<sup>[19]</sup>。MIKE 21 HD 遵循 Navier-Stokes 方程、 Boussinesq 假定和静水压力的假定<sup>[20]</sup>,以此为基础 建立方程<sup>[21]</sup>:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h_u) + \frac{\partial}{\partial x}(h_v) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_x \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon_x \frac{\partial u}{\partial y}) - f_v + \frac{gu \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z {}^2 H} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (2)$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_x \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_{y} \frac{\partial v}{\partial y}) - f_{u} + \frac{g v \sqrt{u^{2} + v^{2}}}{C_{z}^{2} H} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (3)$$

式中: $\zeta$  为水位;h 为静水深;H 为总水深, 且  $H = h + \zeta$ ;u 和v 分别为x 和y 方向上的平均流速;g 为 重力加速度;f 为科氏力系数; $C_Z$ 为谢才系数; $\epsilon_x$ 和  $\epsilon_y$ 分别为x 和y 方向上的水平涡动黏滞系数<sup>[22]</sup>。

# 1.3 计算区域和开边界

利用非等距网格技术对研究区域进行空间离 散,并利用非等距三角形网格对重点研究区域进行 加密<sup>[23]</sup>,研究区域的计算网格分布如图2所示。



水动力模型的闭边界为渤海湾岸线,开边界为 水位边界。开边界考虑4个主要分潮即 M2、S2、O1 和 K1,经调和常数计算进行预报获得,由图2中的 A、B二点连线组成,水位表达式<sup>[24]</sup>为:

$$\eta = \sum_{i=1}^{m} f_i R_i \cos(\sigma_i t + \theta_{i0} - \theta_i)$$
(4)

式中: $f_i$ 为各分潮的交点因子; $R_i$ 为各分潮的振幅;  $\sigma_i$ 为第i个分潮; $\theta_{i0}$ 为各分潮的初相位; $\theta_i$ 为各分潮 的滞后相位;m为分潮个数。

开边界的调和常数由 MIKE 21 HD 全球模式 中获得<sup>[25]</sup>,并根据模型的具体情况进行调整。模型 共有 10 002 个节点和 18 522 个三角网格,其中渤海 的最小空间步长约为 2 000 m,莱州湾的最小空间 步长约为 700 m。模型计算时间步长根据 CFL 条 件进行动态调整,以确保模型计算的稳定性,最小 和最大计算时间步长分别为 0.01 s 和 30 s。

#### 1.4 欧拉余流和粒子运动

在研究动力理论时,通常采用欧拉速度计算余 流。海洋中的欧拉余流可简单定义为欧拉平均速 度,具体计算方法是构造 *x*、o、y 右手直角坐标系, 并对流速沿 *x* 轴和 *y* 轴分解,分解后的欧拉余流的 计算形式<sup>[26]</sup>为:

$$U_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} u_i \tag{5}$$

$$V_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} v_i \tag{6}$$

式中: $U_E$ 和 $V_E$ 分别为x和y方向上的欧拉平均速 度;N=nT/dT,其中n为所取计算周期的个数,T为潮周期,dT为数值模拟的时间步长; $u_i$ 和 $v_i$ 为模 型计算的每个时步在x和y方向上的速度。通过 合成 $U_E$ 和 $V_E$ 得到欧拉余流场。

在进行粒子追踪时,在莱州湾内的一定位置释 放自由粒子,并追踪粒子在1440h内的运移路径。 考虑平流和水平扩散等因素,计算公式<sup>[27]</sup>为:

$$dx(t) = U(x, y, t)dt + dx'(t)$$
(7)

$$dy(t) = V(x, y, t)dt + dy'(t)$$
(8)

式中:dx'(t)和 dy'(t)为水平湍流扩散引起的自由 位移;U(x,y,t)和 V(x,y,t)为 x 和 y 方向上的分 速度;x(t)和 y(t)为跟踪粒子的坐标<sup>[28]</sup>。

粒子的初始和结束位置如图 3 所示。



## 1.5 模型验证

潮流流向和流速的验证结果如图4所示。



图 4 流向和流速实测值与模拟值的对比

从流速和流向<sup>[29]</sup>的验证结果来看,2个观测点 的模拟值与实测值基本吻合,相位偏差较小。总体 来看,流速和流向的验证结果良好,表明模型配置 合理,能较准确地反映莱州湾的水动力特征以及满 足当前研究需求<sup>[30]</sup>。

# 2 结果和分析

## 2.1 涨急、落急流场

莱州湾附近海域涨急时和落急时的潮流场如 图 5 所示。



莱州湾是半日潮为主的海湾,潮流运动形式以 往复流为主,潮流方向与海湾的走向基本一致。 ①涨急时,潮流流向基本呈向岸方向,整体近 SW 向,在黄河口南侧海域呈 NE 向;渤海入湾区的流速 最大,约为2.19 m/s,并向湾内逐渐减小。②落急 时,潮流流向与涨急时相反,即基本呈离岸方向,整 体近 NE 向,在黄河口南侧海域呈 SE 向,这与徐唯 强<sup>[1]</sup>和刘建强等<sup>[5]</sup>的研究结果相似;流速的变化规 律与涨急时相似,即由内向外逐渐增大,亦在湾口 处获最大流速,约为2.66 m/s。

在潍坊港附近,涨急时的潮流流向为 SW 向,落 急时的潮流流向为 NE 向,堤坝两侧的潮流方向顺 堤坝流明显<sup>[31-32]</sup>。潍坊港改变附近海域的潮流流 向,涨急、落急时的流速均出现不同程度的减小<sup>[33]</sup>。 因此整体而言,堤坝的建造对莱州湾潮流造成的影 响不容忽视,这与吕婷等<sup>[3]</sup>和田艳等<sup>[4]</sup>的研究结果 一致。

#### 2.2 欧拉余流场

根据莱州湾潮流场的情况以及式(5)和式(6),

获得莱州湾欧拉余流场(图 6)。



欧拉余流表示流速垂线平均的潮平均项<sup>[34]</sup>。 莱州湾的欧拉余流整体较小,平均值为1.95 cm/s。 余环流在莱州湾的分布特征为:①黄河口南侧海域 出现2个方向相反且流速较大的环流;②芙蓉岛和 刁龙嘴附近海域即莱州湾东南部出现2个较大环 流,其中左侧为逆时针环流,右侧为顺时针环流,流 速较其他区域稍大;③潍坊港附近出现1个流速较 小且范围半径较小的顺时针环流。上述结论与迟 万清等<sup>[7]</sup>的研究结果相似。

从分布规律来看,欧拉余流与潮流的相同之处 在于均为湾口附近较大而湾内较小,不同之处在于 欧拉余流在近岸区域明显大于中央区域。

#### 2.3 粒子运移轨迹

在利用模型获得潮流场的基础上,本研究在莱 州湾的不同位置释放自由运动的粒子,得到潮流作 用下自由运动的粒子运移轨迹(图 7)。

粒子运移轨迹可大致分为6种类型:①由初始位置经短距离运移后抵达海岸或在附近停留,如 S02、S03、S11、S16、S25和 S30;②由初始位置向SW 向长距离运移,如 S01、S04、S05、S06和 S10;③由初始位置向E向长距离运移,如S12、S19、S20、S21、S26和 S27;④由初始位置向SE向长距离运移,如S07、S08、S09、S13、S14、S15、S18和 S29;⑤由初始位置向NE向长距离运移,如S17、S22和 S28;⑥由初始位置向NW向长距离运移,如S23和 S24。

整体而言,分布均匀的粒子在潮流作用下出现 不同程度和不同方向的聚集,但不同初始位置的自 由粒子均呈现向岸运移的趋势。



图 7 粒子运移轨迹

#### 3 结语

本研究采用 MIKE 21 HD 模型得到莱州湾的 潮流场和余流场,并在不同初始位置释放自由运动 的粒子,获得在潮流作用下自由运动的粒子运移轨 迹。以此为依据,分析莱州湾潮余流的时空分布特 征以及具有相同特征粒子的运移特征,主要得到 3 项结论。

(1) 涨急、落急时的潮流变化规律表明:莱州湾 的潮流运动方向涨急时以湾外向湾内流动为主,落 急时与涨急时相反;涨急、落急时的流速变化规律 相似,即均在湾口处获得最大流速;潍坊港的建造 改变附近海域的潮流流向,并不同程度地减小潮流 流速。 (2)莱州湾的欧拉余流场表明:莱州湾的欧拉 余流整体较小,平均值为1.95 cm/s;湾内出现4个 半径和流速较大的环流,潍坊港附近出现1个半径 和流速较小的环流。

(3)在潮流作用下,莱州湾分布均匀的粒子在 自由运移时出现不同程度的聚集,且整体运移趋势 是向岸聚集;具有相同性质粒子的运移距离出现较 大差异,主要与其初始位置有关,即初始位置靠近 海岸的粒子运移距离较短,而初始位置在湾内的粒 子运移距离较长。

# 参考文献

[1] 徐唯强.莱州湾围填海工程对区域水沙动力环境的影响[D].大连:大连理工大学,2016.

- [2] 赵博.莱州三山岛-刁龙嘴近岸海域冲淤特征及影响因素研究 [D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [3] 吕婷,苏博,王佳莹,等.海洋工程影响下莱州湾海域水动力环 境变化特征[J].海洋环境科学,2017(4):571-577.
- [4] 田艳,于定勇,李云路.莱州湾围填海工程对海洋环境的累积影响研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2018,48(1): 117-124.
- [5] 刘建强,马林娜,张永强,等.港口工程建设对莱州湾水动力环 境影响的数值研究[J].海洋开发与管理,2013,30(4):77-81.
- [6] 姜胜辉,朱龙海,胡日军,等.围填海工程对莱州湾水动力条件的影响[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(10): 74-80.
- [7] 迟万清,刘艳玲,刘建强,等.不同风向作用下莱州湾水交换规 律数模研究[J].海洋科学进展,2018,36(3):384-393.
- [8] 张存勇.岸线变化对连云港港口海域水交换的影响研究[J].海 洋科学进展,2015,33(1):31-37.
- [9] 王兴刚,董敏,熊伟.连云港港主体港区水交换三维数值模拟 [J].水运工程,2015(4):92-99.
- [10] 陈明波.莱州浅滩对莱州湾东部沉积动力格局的控制作用研 究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [11] 刘潇,冯秀丽,刘杰.港口工程影响下莱州湾西南侧海域水动 力演化特征[J].海洋科学,2016,40(3):138-145.
- [12] 张连杰,赵博,王鹏,等.大连湾海域沉积动力环境与物质输运[J].海洋地质前沿,2019,35(6):12-19.
- [13] 张敬.海岸、河口区三维近岸环流与物质输运数值研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.
- [14] 黄伟建,周伟,蔡忠亚,等.海洋物质输运模拟中并行计算的应用比较研究[J].计算机工程与设计,2013,34(8):2929-2933.
- [15] 张琴,杨洁,陶建峰,等.河口海岸物质输运时间尺度研究进展[J].水利水电科技进展,2017(6):92-98.
- [16] 吴柳.近岸物质输运数值模拟研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [17] 孙伟富.1978-2009 年莱州湾海岸线变迁研究[D].北京:中国海洋学会,2010.
- [18] 常军,刘高焕,刘庆生.黄河三角洲海岸线遥感动态监测[J]. 地球信息科学学报,2004,6(1):94-98.
- [19] CHANG Y, HU B X, XU Z, et al. Numerical simulation of seawater intrusion to coastal aquifers and brine water/freshwater interaction in south coast of Laizhou Bay, China[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2018, 215:1-10.
- [20] 周广镇.莱州湾东岸近岸海域规划用海实施后冲淤演变预测

[D].青岛:中国海洋大学,2012.

- [21] MING H E, QIU D H.Practical calculation method of cnoidal wave shoaling ( II ) : a supplement to code of hydrology for sea harbor[J].Port & Waterway Engineering, 2015, 4(2015): 1-7.
- [22] ZHANG J,GAO X.Nutrient distribution and structure affect the acidification of eutrophic ocean margins: a case study in southwestern coast of the Laizhou Bay,China[J].Marine Pollution Bulletin,2016,111(2016):295-304.
- KONG L S, DING-MAN Q I, WAN Y Y, et al. Numerical simulation of wave field in the Yangtze Estuary[J].Port &.
   Waterway Engineering, 2010, 2010(2):46-49.
- [24] RODRÍGUEZ P A, CARBAJAL N, RODRÍGUEZ J H G.Lagrangian trajectories, residual currents and rectification process in the Northern Gulf of California [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 194(2017); 263-275.
- [25] 张传奇.莱州湾东岸海水入侵数值模拟及风险评价[D].北京: 中国科学院大学,2014.
- [26] 李斐.渤海海域潮流及潮余流的数值模拟[D].天津:天津大学,2009.
- [27] LIUBARTSEVA S, COPPINI G, LECCI R, et al. Regional approach to modeling the transport of floating plastic debris in the Adriatic Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 103 (2016):115-127.
- [28] WANG Y,LING M,LIU R H, et al. Distribution and source identification of trace metals in the sediment of Yellow River Estuary and the adjacent Laizhou Bay[J].Physics and Chemistry of the Earth,Parts A/B/C,2017,97:62-70.
- [29] 孟云,娄安刚,刘亚飞,等.渤海岸线地形变化对潮波系统和潮流性质的影响[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45 (12):1-7.
- [30] 张永强,迟万清,胡泽建,等.黄河清水沟流路大嘴的形成对莱 州湾潮流场影响的数值研究[J].海洋科学进展,2010,28(2): 149-157.
- [31] 董祥科,王智峰,董胜,等.潍坊港海域波浪数值模拟[J].水运 工程,2016(6):18-24.
- [32] 崔丹,娄安刚,孟云.潍坊海化工业园区污水排海海洋水质影 响预测[J].海洋湖沼通报,2017(1):38-43.
- [33] 刘建强.莱州湾海洋工程建设对小清河口环境影响数值研究 [D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [34] 陈斌,刘健,高飞.莱州湾悬沙输运机制研究[J].水科学进展, 2015,26(6):857-866.