



## 大凌河口水动力数值模拟分析

郭常来<sup>1</sup>, 崔健<sup>1</sup>, 孙秀波<sup>1</sup>, 马玉祥<sup>2</sup>, 艾丛芳<sup>2</sup>

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034,
2. 大连理工大学/海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024

**摘要:** 采用大凌河实测长系列河道径流及水下地形等数据, 通过建立水动力数值模型, 综合考虑潮流和河道径流的影响, 对大凌河口的潮流进行模拟, 探讨大凌河口及辽东湾北部海域水动力过程的主要特征。结果表明: 大凌河口附近海域的海流以潮流为主, 具有明显的往复性质。潮流总的运动趋势是, 涨潮主流向为北东, 落潮主流向为南西。大潮流速大于小潮流速, 涨潮流历时与落潮流历时几乎相当。最大涨潮流速约为 0.52 m/s, 最大落潮流速约为 0.4 m/s, 潮流涨落平均潮流强度的分布大体和该海域等深线相适应。

**关键词:** 水动力; 数值模拟; 潮流; 大凌河; 辽东湾

## NUMERICAL SIMULATION ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC FORCE IN DALINGHE RIVER ESTUARY

GUO Chang-lai<sup>1</sup>, CUI Jian<sup>1</sup>, SUN Xiu-bo<sup>1</sup>, MA Yu-xiang<sup>2</sup>, AI Cong-fang<sup>2</sup>

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Dalian University of Technology/State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian 116024, Liaoning Province, China

**Abstract:** Based on the long series of measured data about Dalinghe River runoff and underwater terrain, the hydrodynamic numerical model is established to simulate the tidal current of Dalinghe River estuary and the main characteristics of hydrodynamic process in the estuary and northern sea area of Liaodong Bay are discussed considering the influence of tidal current and river runoff. The results show that the ocean current in waters around the estuary is mainly tidal current with obvious reciprocating nature. The general movement trend of tidal current is northeastward at high tide and southwestward at low tide. The speed of spring tide is larger than that of neap tide and the duration of flood current is almost equal to that of ebb current, with the maximum flood speed of 0.52 m/s and maximum ebb speed of 0.4 m/s. The distribution of average tidal current intensity during flood and ebb is roughly consistent with the sea depth contour.

**Key words:** hydrodynamic force; numerical simulation; tidal current; Dalinghe River; Liaodong Bay

### 0 引言

大凌河发源于辽宁省凌源市, 于锦州凌海市注入

渤海辽东湾。大凌河全长 447 km, 流域面积达 2.33×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 是辽西地区最大的河流<sup>[1]</sup>, 其下游及河口三

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-11-11. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“东北地区自然资源综合调查”(编号 DD20211383).

作者简介: 郭常来(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水工环地质调查与研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//151211463@qq.com

通信作者: 孙秀波(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水工环地质调查与研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//hjsunxb@126.com

角洲地区的大凌河口湿地,是我国重要的芦苇滨海湿地,具有不可替代的社会经济价值和自然生态价值<sup>[2]</sup>.近年来,由于大凌河流域内人口增多和工农业飞速发展,以及气候变化等原因,大凌河径流有所减少<sup>[3-4]</sup>.而在河口地区,由于河流断面扩大,水流速度骤减,因径流减小而产生的问题更为明显<sup>[5]</sup>.目前,对于河道径流和潮汐的数学模型主要是基于一维、二维水动力数学模型;周跃华等<sup>[6]</sup>基于GIS与一维水动力模型对陶乐防洪保护区漫溢洪水进行了风险分析;孙玲玲<sup>[7]</sup>通过建立二维非恒定流数学模型模拟了黄壁庄水库洪水演进过程;锁晓南等<sup>[8]</sup>基于二维水动力数学模型对黄河四排口河段进行洪水演进模拟分析水动力场变化状况.基于二维水动力数学模型目前广泛应用于河床变形与泥沙运移中,对复杂地形的计算精度高、可靠性强.本研究基于MIKE 21中的水动力模块,考虑大凌河的河道径流和潮汐的影响,对辽东湾北部海域潮汐进行模拟,重点分析大凌河口附近海域的水动力特征,为进一步研究大凌河口海域的污染物输运及泥沙运动提供准确的水动力基础条件(图1).

### 1 研究方法

MIKE 21 是一款用于模拟河流、湖泊、河口、海湾、

海岸及海洋的水流、波浪、泥沙及环境的工程软件包.本研究采用 MIKE 21 的水动力模块建立水动力数值模型.该模块基于 Boussinesq<sup>[9]</sup>假定的二维不可压缩的 Navier-Stokes 方程<sup>[10]</sup>,其控制方程组如下:

1)连续性方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \tag{1}$$

2)运动方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \\ \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{lx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{ly}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \tag{3}$$

式中:  $t$  表示时间;  $\eta$  表示自由水面水位 (m);  $h$  表示总水深(m);  $\rho$  表示水体密度;  $\rho_0$  表示水体相对密度;  $g$  为重力加速度;  $S$  表示源汇项的流量值;  $p_a$  表示大气压力;  $u_s, v_s$  表示源汇项的流速值;  $f=2\omega\sin\varphi$ , 其中  $\omega$  是地球自转角速度,  $\varphi$  是地理纬度;  $(\tau_{sx}, \tau_{lx}), (\tau_{sy}, \tau_{ly})$

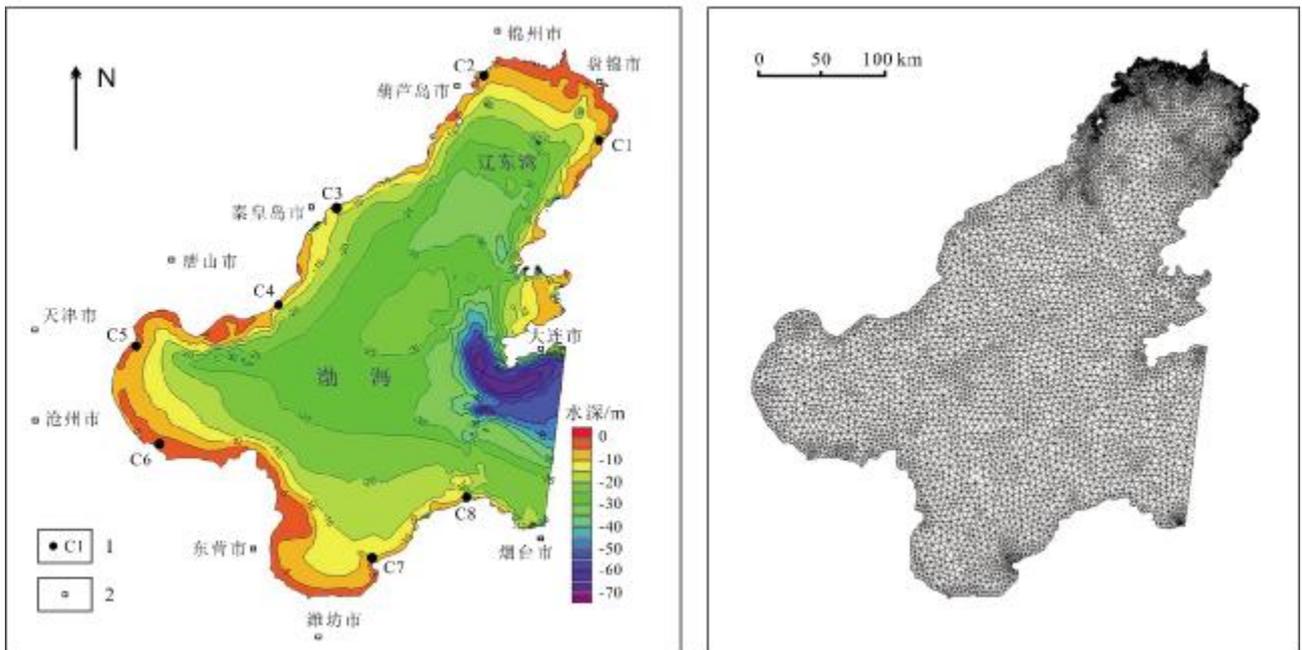


图1 大模型计算域地形分布、测站位置及网格划分

Fig. 1 Terrain distribution, station location and grid division in large-sized model calculation domain

1—潮汐测站(tide station); 2—地名(place name)

是  $x, y$  方向表面风和海底剪切应力的分量;  $T_{xx}, T_{yy}, T_{yx}, T_{xy}$  是横向应力, 包括黏性应力、湍流摩擦、平流摩擦;  $\bar{u}, \bar{v}$  分别表示  $x, y$  方向垂线平均速度, 采用(4)式计算.

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (4)$$

在该模块中采用基于单元中心的有限体积法进行离散<sup>[11]</sup>, 空间上采用不可重叠的非结构网格划分, 能够较好地拟合河口地区复杂的岸线边界, 满足对复杂地形模拟计算的需要<sup>[12]</sup>.

## 2 研究区域

### 2.1 模型建立及设置

为了更准确地得到辽东湾北部海域潮流开边界条件, 本研究采用大、小嵌套模拟的方法, 建立水动力数值模型<sup>[13-14]</sup>. 其中大模型计算域为渤海海域及部分黄海海域, 范围大致为  $117.3^{\circ}\text{E}—122.4^{\circ}\text{E}, 36.5^{\circ}\text{N}—41.2^{\circ}\text{N}$ ; 小模型计算域为辽东湾北部部分海域, 范围大致为  $121.1^{\circ}\text{E}—122.3^{\circ}\text{E}, 40.2^{\circ}\text{N}—41^{\circ}\text{N}$ . 采用非结构网格对计算域划分, 对近岸及地形复杂处进行了网格加密, 以更好地拟合复杂的地形条件. 在本文中, 水深和岸线根据海图确定, 同时参考研究地区最新岸线情况进行修正, 大、小模型计算域地形分布及网格划分见图 1、图 2.

本模型中设置闭边界处法向速度为零, 大模型开边界采用烟台至大连之间的实测连续潮位数据. 在大尺度水动力模型验证良好的基础上, 导出小模型所需要的潮位边界资料. 径流边界主要考虑辽东湾北部沿

岸的大凌河、小凌河、辽河和大辽河 4 条河流的淡水输入, 其中小凌河、辽河和大辽河径流采用月平均数据, 大凌河径流采用实测日均径流数据<sup>[15]</sup>.

### 2.2 模型验证

利用模型对研究海域进行潮位的数值模拟, 选取 2005 年 10 月大潮期间的模拟值与环渤海 8 个代表性潮位测站的潮汐表值进行对比, 以验证模型的有效性, 潮位站点见表 1, 对比结果如图 3 所示. 可以看出, 本模型潮位模拟结果与实测潮汐资料吻合较好, 在一个周期内潮位变化基本一致. 总体来看, 模型能准确地反映渤海海域的水动力变化特性<sup>[16-18]</sup>.

表 1 环渤海代表潮位站一览表

Table 1 Representative tide stations around Bohai Sea

点号	代码	测站
1#	C1	鲅鱼圈潮位站
2#	C2	锦州潮位站
3#	C3	秦皇岛潮位站
4#	C4	京唐港潮位站
5#	C5	塘沽潮位站
6#	C6	黄骅港潮位站
7#	C7	莱州港潮位站
8#	C8	蓬莱潮位站

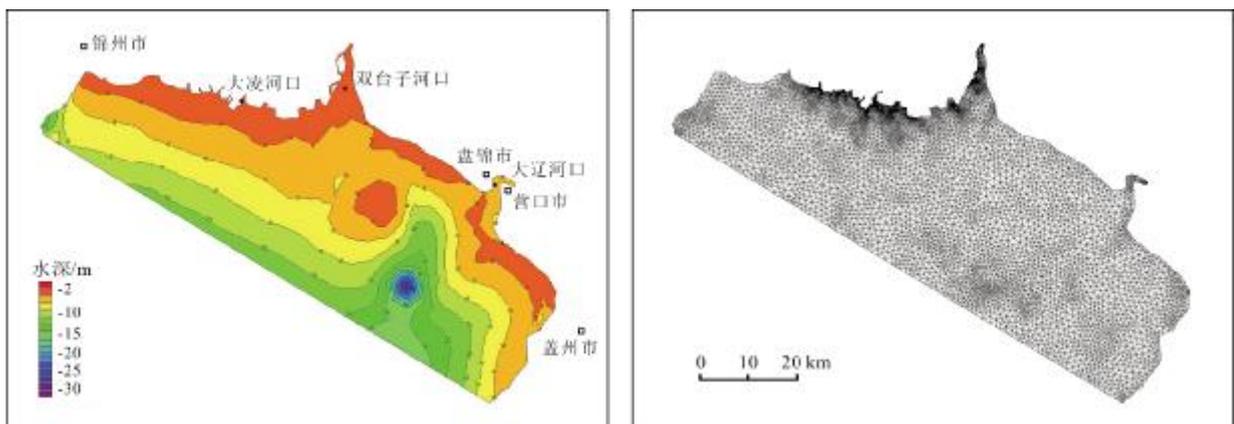


图 2 小模型计算域地形分布及网格划分

Fig. 2 Terrain distribution and grid division in small-sized model calculation domain

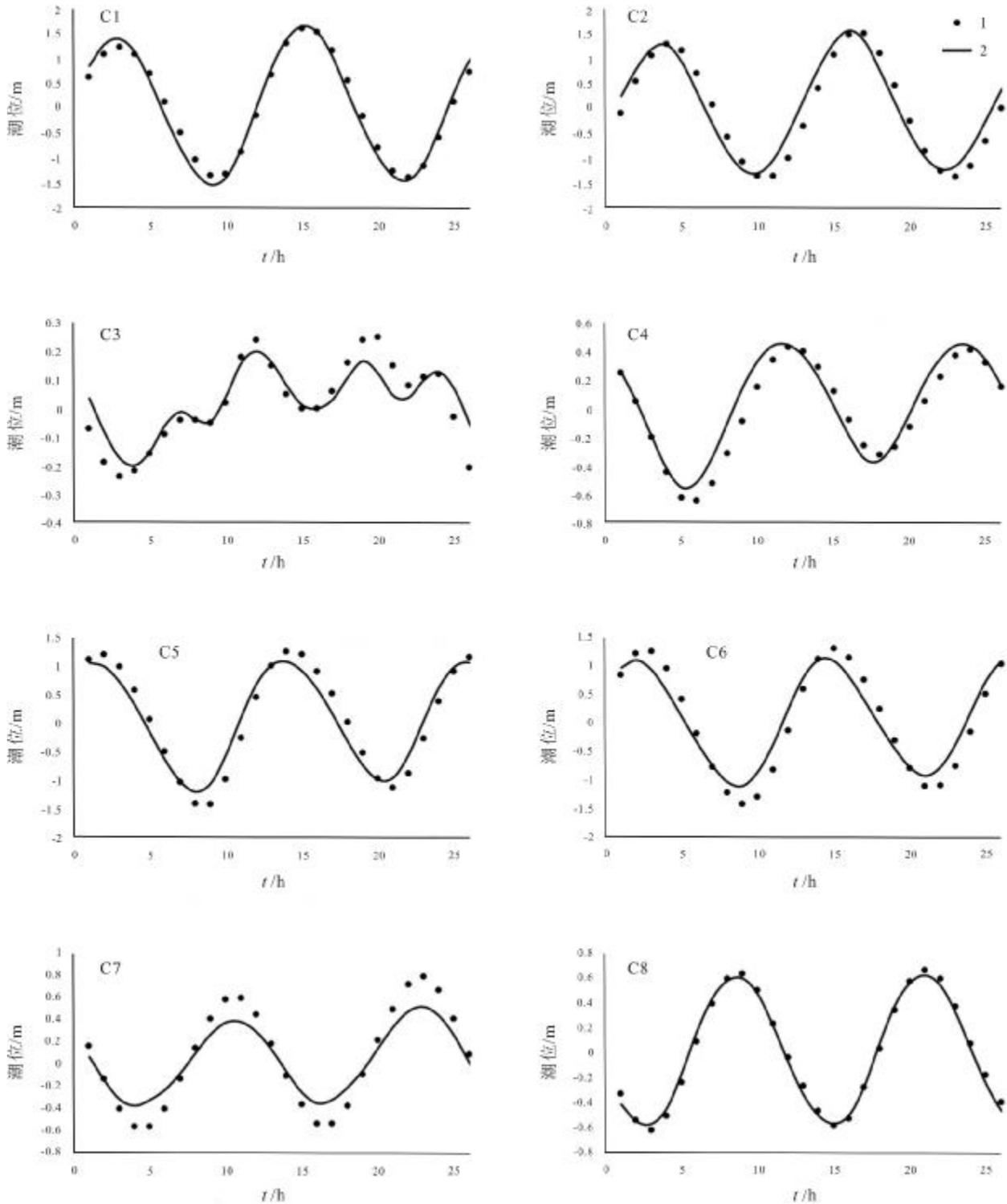


图3 环渤海代表测点潮位对比图

Fig. 3 Comparison of tide levels at representative stations around Bohai Sea

1—实测值(measured value); 2—模拟值(simulated value)

### 3 讨论与分析

#### 3.1 整体流场特征分析

模型由“冷态”启动,即在数值模型进行模拟计算

时,初始时刻计算域范围内水位均设置为0<sup>[19-20]</sup>,如图4所示.经模拟发现,t=2 h时水位降低的落潮过程已传播至渤海范围,t=6 h时落潮过程传播至大凌河河

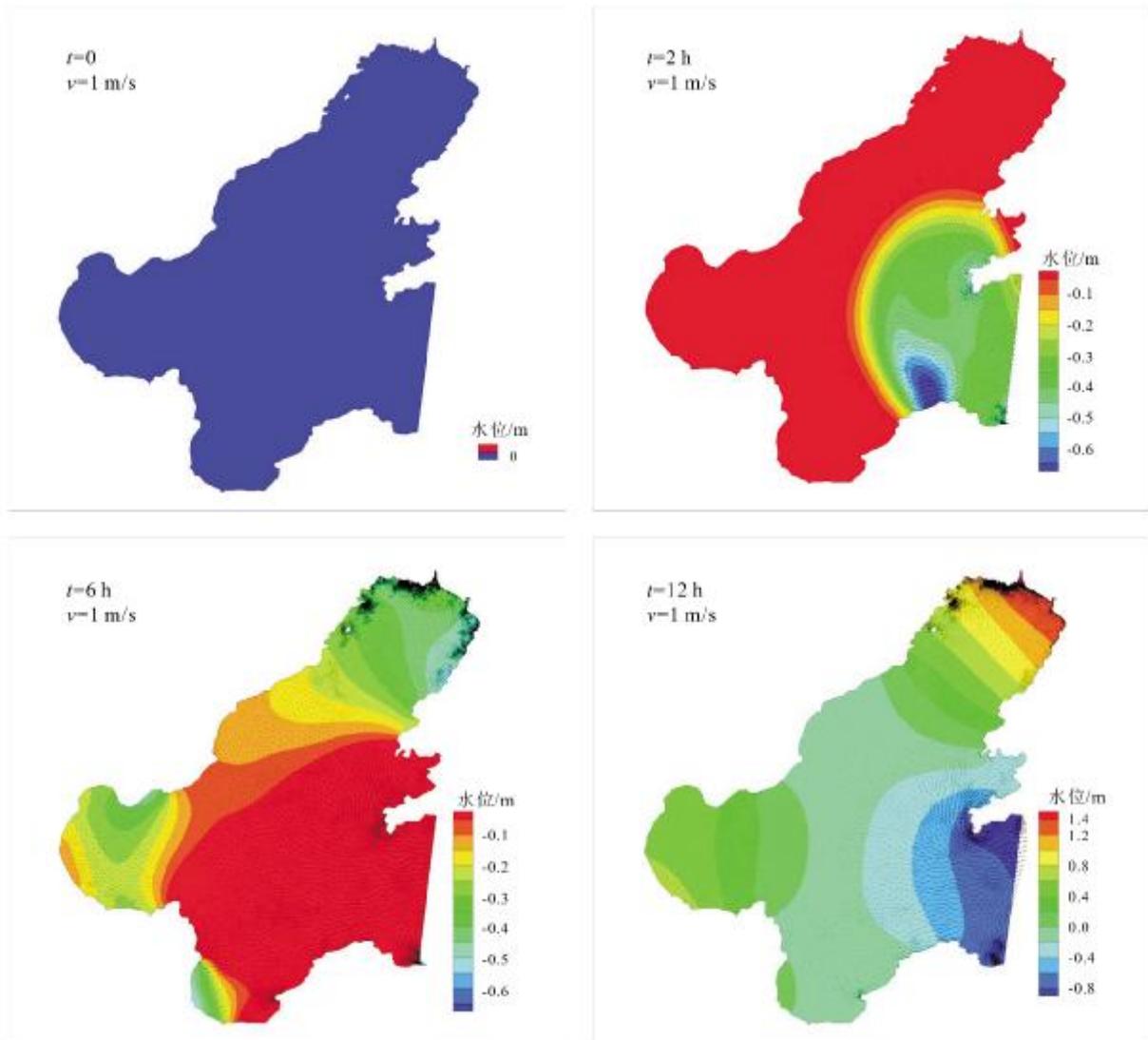


图 4 不同时刻流场状态

Fig. 4 Flow field states at different times

口地区,  $t=12\text{ h}$  时落潮后的涨潮过程完全传播至大凌河河口地区. 潮位过程每隔 6 h 涨潮与落潮交替变化, 约 12 h 为一个完整潮位变化周期, 每天两次潮起潮落, 与实际潮位变化规律一致.

图 5 给出了模拟期间辽东湾北部海域最低潮位时刻和最高潮位时刻的流场分布结果. 可知, 辽东湾北部海区最低潮位为  $-0.82\text{ m}$ , 最高潮位为  $2.13\text{ m}$ . 经模拟计算, 辽东湾平均潮差为  $2.4\text{ m}$ . 该海区涨潮历时要略短于落潮历时, 并且由于河口河道变窄, 由外海传入的潮波由于摩擦等作用潮能发生衰减, 潮差沿径流向上游逐渐减小.

### 3.2 大凌河口潮流分布

通过校验较好的水动力数值模型, 模拟了 2018 年

10 月辽东湾北部海域的潮流场的分布. 模拟结果显示, 小潮期海域潮流场分布与大潮期基本一致, 小潮期流速较大潮期流速稍小. 图 6 给出了大潮期模拟海域的低潮时、涨急时、高潮时、落急时潮流场分布.

大潮期间低潮时潮流场数值模拟结果表明, 大凌河河口附近海域潮流整体流向为南西向, 流速普遍低于  $0.3\text{ m/s}$ , 由外海至岸边潮流流速逐渐减小. 近岸处表现为沿岸流, 流速普遍低于  $0.1\text{ m/s}$ . 此时, 在潮流的作用下, 大凌河河道径流朝外海加速涌出.

大潮期间涨急时潮流场数值模拟结果表明, 大凌河河口附近海域潮流整体由南西向北东流动, 速度普遍介于  $0.3\sim 0.5\text{ m/s}$  之间; 小凌河河口至大凌河河口近岸潮流表现为由西至东向的沿岸流, 速度普遍低于

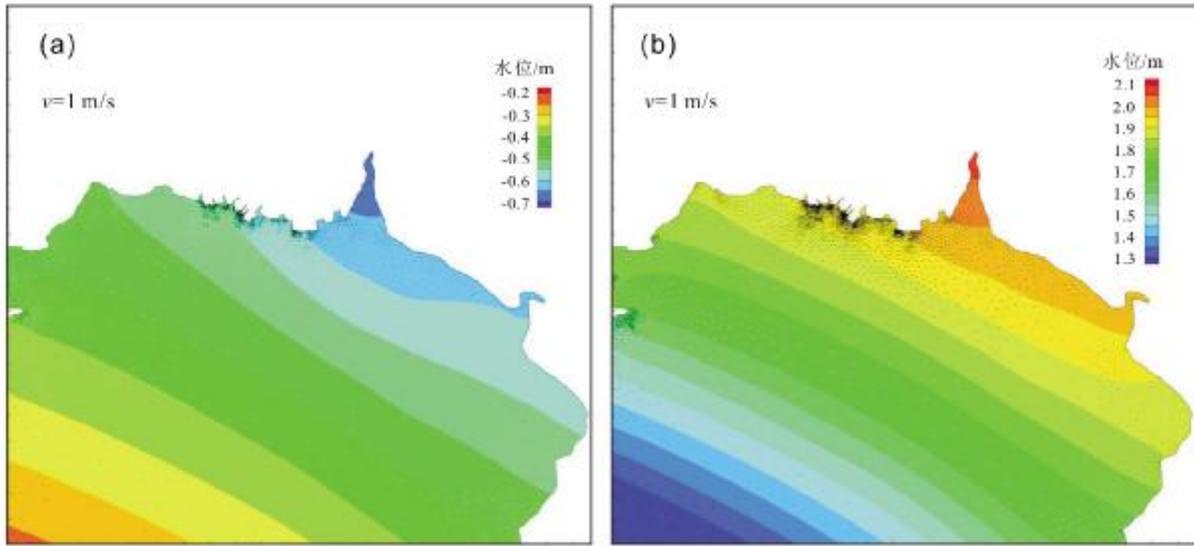


图 5 辽东湾北部海域流场分布

Fig. 5 Distribution of flow fields in northern Liaodong Bay

a—最低潮位时刻(lowest tide level); b—最高潮位时刻(highest tide level)

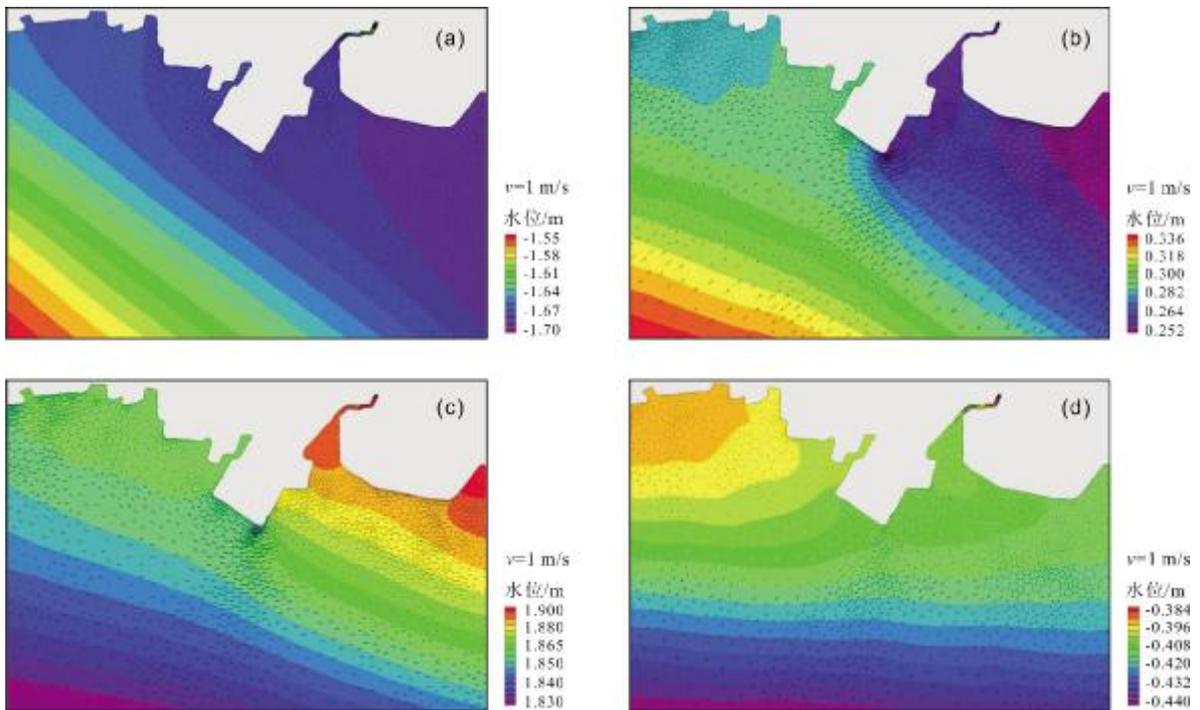


图 6 大凌河口海域不同时刻流场分布状态

Fig. 6 Flow field distribution at different times in the sea area of Dalinghe River estuary

a—低潮时模拟潮流场(simulated flow field during low tide); b—涨急时模拟潮流场(simulated flow field during tide surge); c—高潮时模拟潮流场(simulated flow field during high tide); d—落急时模拟潮流场(simulated flow field during tide ebb)

0.2 m/s. 在涨潮的作用下,潮流涌向大凌河河道,大凌河口口门处流速较小.

大潮期间高潮时潮流场数值模拟结果表明,大凌

河河口附近海域潮流整体发生倒转,潮流由东向西流动,流速约 0.3 m/s. 近岸处表现为沿岸流,流速普遍低于 0.1 m/s.

大潮期间落急时潮流场数值模拟结果表明,大凌河口附近海域潮流整体发生转流,整体潮流流向为南西向,流速普遍介于0.1~0.4 m/s之间;在落潮的作用下,大凌河径流加速涌出河道,大凌河口口门处流速约为0.25 m/s.

### 3.3 潮流动力特性分析

#### (1) 涨潮动力

辽东湾北部海域在涨潮期间潮流流向基本与辽东湾东、西岸线平行,呈现为北东向.由数值模拟的结果可知,在涨潮初期,由于受到大凌河口浅滩地形的影响,涨潮流主要在大凌河口浅滩外侧及西侧近海海域活动.在涨急时刻及涨潮后期阶段,随着涨潮动力的增强,潮流流向主要是北东和北北东向,受河口浅滩地形的影响,潮流流速较弱,形成大范围的缓流区.

#### (2) 落潮动力

在落潮阶段,河口水动力过程主要来自潮水的进退.在落潮初期,河口内浅滩被水淹没,但受地形影响,水深较浅,流速较小,在河口附近形成了大范围的缓流区.到了落潮后期,落潮动力增强,潮间浅滩露出,水流主要经潮沟流出,从而加大了潮沟的落潮水流动力.大凌河的径流量较小,径流出口门后,河道断面突然展宽,水动力快速消减,难以形成明显的出海主流.

## 4 结论

基于大凌河口水动力数值模型模拟结果,分析了大凌河口附近海域的水动力变化特征.由于大凌河口紧邻辽河口、大辽河口,该海域属于入海河流冲淡水的交汇混合区,潮流同冲淡水水流相互作用,加之受潮沟密布和潮滩复杂地形影响,形成了该地区独特的流场结构.

大凌河口附近海域潮流属于辽东湾海流系统的一部分,其主流方向呈北东-南西向,与辽东湾轴向基本一致.涨潮流(北东向)流速略大于落潮流(南西向)流速,最大涨潮流约为0.52 m/s,最大落潮流速约为0.4 m/s,潮流涨落平均潮流强度的分布大体与该海域等深线相适应.

### 参考文献(References):

[1]王佳琦,贾燕锋.近60年大凌河中上游水沙变化特征[J].水土保持

研究,2018,25(3):35-40.

Wang J Q, Jia Y F. Variation of runoff and sediment in the middle and upper reaches of Daling River during the past 60 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 35-40.

[2]成遣,周林飞,谭艳芳.辽宁省凌河口湿地生态服务效应货币价值评估[J].人民黄河,2012,34(7):64-67.

Cheng Q, Zhou L F, Tan Y F. Evaluation of monetary value for ecosystem service function of Linghe River estuarine wetland [J]. Yellow River, 2012, 34(7): 64-67.

[3]张娜.基于SWAT模型的大凌河流域径流演变规律分析[J].黑龙江水利科技,2020,48(1):7-10.

Zhang N. Analysis of runoff evolution law in Daling River Basin based on SWAT model [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2020, 48(1): 7-10.

[4]赵垠.大凌河湿地生态环境现状及保护对策[J].黑龙江水利科技,2017,45(3):183-185.

Zhao Y. Ecological environment and protection strategy of Daling River wetland [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2017, 45(3): 183-185. (in Chinese)

[5]Belde J, Reuning L, Back S. Bottom currents and sediment waves on a shallow carbonate shelf, Northern Carnarvon Basin, Australia [J]. Continental Shelf Research, 2017, 138: 142-153.

[6]周跃华,岳志春,潘汀超,等.基于GIS与水动力模型的陶乐防洪保护区漫溢洪水风险分析[J].水力发电,2020,46(10):22-27.

Zhou Y H, Yue Z C, Pan T C, et al. Risk analysis of overflow flood in Taole flood protection area based on GIS and hydrodynamic model [J]. Water Power, 2020, 46(10): 22-27.

[7]孙玲玲.基于MIKE21的水库洪水期洪水演进数值模拟[J].工程技术研究,2020,5(11):246-248.

Sun L L. Numerical simulation of flood evolution in reservoir flood period based on MIKE 21 [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(11): 246-248.

[8]锁晓南,李春光,尚彦祥,等.基于MIKE21模型的黄河四排口河段洪水演进数值模拟[J].科技视界,2021(4):104-107.

Suo X N, Li C G, Shang Y X, et al. Numerical simulation of flood evolution in the Fourth Outlet reach of the Yellow River based on MIKE 21 model [J]. Science & Technology Vision, 2021(4): 104-107. (in Chinese)

[9]Ferziger J H, Perić M. Computational methods for fluid dynamics [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 1999.

[10]DHI Water & Environment. MIKE 21 & MIKE 3 flow model FM hydrodynamic and transport module scientific documentation [M]. Hørsholm, Denmark: DHI Water & Environment, 2017.

[11]Lin G F, Lai J S, Guo W D. Finite-volume component-wise TVD schemes for 2D shallow water equations [J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(8): 861-873.

[12]Abbott M B, Ionescu F. On the numerical computation of nearly

- horizontal flows[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1967, 5(2): 97-117.
- [13]周哲睿, 刘姣, 吴浩力, 等. 基于 MIKE21 模型的水交换数值模拟研究[J]. *陕西水利*, 2021, 17(4): 17-20.  
Zhou Z R, Liu J, Wu H L, et al. Numerical simulation of water exchange based on MIKE 21 model[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2021, 17(4): 17-20. (in Chinese)
- [14]秦成栋, 钱鞠, 李明都, 等. 基于 MIKE21 模型的宋家湾水库水环境影响数值模拟[J]. *甘肃水利水电技术*, 2021, 57(2): 1-10, 19.  
Qin C D, Qian J, Li M D, et al. Numerical simulation of water environmental impact of Songjiawan Reservoir based on MIKE 21 model[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2021, 57(2): 1-10, 19. (in Chinese)
- [15]Wang Q, Guo X Y, Takeoka H. Seasonal variations of the Yellow River plume in the Bohai Sea: A model study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C8): C08046.
- [16]袁本坤, 黄蕊, 商杰, 等. 基于岸基观测数据的渤海沿岸海域表层温盐特征分析[J]. *海洋开发与管理*, 2015, 32(12): 31-34.  
Yuan B K, Huang R, Shang J, et al. Analysis of surface thermohaline characteristics in Bohai Sea based on shore-based observation data[J]. *Ocean Development and Management*, 2015, 32(12): 31-34. (in Chinese)
- [17]朱亮, 刘景涛, 杨明楠, 等. 1998 年以来兰州市地下水环境变化及驱动因素[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1677-1687.  
Zhu L, Liu J T, Yang M N, et al. Changes and driving factors of groundwater environment in Lanzhou since 1998 [J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1677-1687.
- [18]宫兴梅. 辽宁省铁甲水库入库口水动力场特征数值模拟研究[J]. *中国水能及电气化*, 2020(12): 18-20, 17.  
Gong X M. Numerical simulation study of inlet hydrodynamic field characteristics of Tiejia Reservoir in Liaoning Province [J]. *China Water Power & Electrification*, 2020(12): 18-20, 17.
- [19]王俊琿, 侯精明, 王峰, 等. 洪涝过程模拟及三维实景展示方法研究[J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(4): 149-160.  
Wang J H, Hou J M, Wang F, et al. Study on flood process simulation and 3D scene display method[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(4): 149-160.
- [20]王晓文. 水质数值模型在浑河流域水量水质模拟中的应用[J]. *地下水*, 2021, 43(1): 69-72.  
Wang X W. Application of water quality numerical model in simulation of water quantity and quality in Hunhe River Basin[J]. *Ground Water*, 2021, 43(1): 69-72. (in Chinese)

(上接第 652 页/Continued from Page 652)

- [42]林敏. 福建寿山火山喷发盆地火山作用特征及与叶蜡石成矿关系探讨[J]. *福建地质*, 2017, 36(4): 251-261.  
Lin M. Study on the characteristics of volcanism of volcanic eruptive basins and the relation to pyrophyllite ore in Shoushan area, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 2017, 36(4): 251-261.
- [43]林敏, 卢清地, 李玉娟, 等. 陆相火山岩三重填图方法研究进展及应用示例[J]. *福建地质*, 2018, 37(2): 165-180.  
Lin M, Lu Q D, Li Y J, et al. Research progress and application examples of ternary mapping of continental volcanic rocks[J]. *Geology of Fujian*, 2018, 37(2): 165-180.
- [44]马雨轩, 李江海, 陈耀华. 大兴安岭中段阿尔山地区第四纪火山地貌特征及其构造意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 289-298.  
Ma Y X, Li J H, Chen Y H. Geomorphological characteristics of the Quaternary volcanoes and their tectonic implications in Aershan region, central Greater Khingan Range [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(2): 289-298.
- [45]Lin M, Yu S Y, Ma C Q, et al. Characteristics of the Hailesitai volcanic province, Inner Mongolia, and inferred magma source and tectonic setting[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(10): 6841-6859.