

# 辽河口潮能通量与潮能耗散的数值研究

张学庆<sup>1</sup>, 王兴<sup>1</sup>, 刘睿<sup>1</sup>, 赵骞<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**河口的潮能通量和潮能耗散对河口的泥沙输运和地形地貌形成具有重要的参考价值, 本文基于 FVCOM (finite-volume coastal ocean model) 模式研究了辽河口在潮流和径流相互作用下潮能通量和潮能耗散情况。结果表明: 辽河口潮能通量最大的区域集中在盖州滩东南侧以及双台子河河口和大辽河口河道急剧缩窄及拐弯处; 在两个河口随着径流量的增加, 潮能耗散增强, 丰水期耗散能量总体上大于平水期和枯水期; 在大辽河口, 大潮期间的各水期的耗能率约为小潮期间耗能率的两倍; 一个潮周期内潮能通量最大值出现在高潮时刻, 其值为 56.08 KW/m, 河流段最大值发生在河道拐角处, 低潮时潮能通量最小。潮能通量和耗散的分布的研究结果对于了解辽河口海域的动力过程和河口沉积动力过程方面的研究具有重要意义。

**关键词:** 沉潮能通量; 潮能耗散; 辽河口; 数值模拟; FVCOM

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2016)01-0020-07

## Numerical simulation of the tidal energy flux and tidal energy dissipation in Liaohe River Estuary

ZHANG Xue-qing<sup>1</sup>, WANG Xing<sup>1</sup>, LIU Rui<sup>1</sup>, ZHAO Qian<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The tidal energy flux and dissipation in the estuary are valuable references for the researches on sediment transportation and topography formation. In the present study, an FVCOM (finite-volume coastal ocean model) model was established to investigate the tidal energy flux and dissipation in Liaohe estuary under the influence of the interaction between tidal currents and run-off currents. The results showed that the maximum tidal energy flux appeared in the southeast of Gaizhou Beach and the intensely narrowing and turning area of Shuangtaizihe and Daliaohe estuary. The tidal energy dissipation grew as the run-off flow increased, thus it was stronger in wet season than in normal and dry season. In Daliaohe estuary, the energy dissipation rate during spring tide is about two times higher than during neap tide. The largest tidal energy flow appeared at the spring tide during one tidal period and the value is 56.08 KW · m<sup>-1</sup>. These conclusions are important for understanding the hydrodynamic characteristics in Liaohe estuary and the dynamic process of estuarine deposition.

**Key words:** tidal energy flux; tidal energy dissipation; liaohe river estuary; numerical simulation; FVCOM

河口潮能通量是河口地形、地貌演变和发育的重要动力条件, 是研究陆-海相互作用的重要研

究内容。Alan and Simon<sup>[1]</sup>在研究欧洲大陆架的潮能通量时计算了 28 个分潮的潮能通量。AR-

收稿日期: 2014-12-07, 修订日期: 2015-03-19

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07202-007); 海洋公益性行业科研专项项目(201305003)

作者简介: 张学庆(1973-), 男, 山东临沂人, 讲师, 博士, 主要从事海洋环境科学方面研究, E-mail: zqx@ouc.edu.cn

GOT M L<sup>[2]</sup>、CARBAJAL N<sup>[3]</sup>对加利福尼亚湾潮能的研究表明大部分潮能耗散在科罗拉多河的浅水地区。Scott 等<sup>[4]</sup>研究哥伦比亚 彻尔内湾的潮能耗散,发现在潮能耗散影响因素中通过摩擦作用耗散的能量占主要部分。Foreman 等<sup>[5]</sup>研究了 M<sub>2</sub>分潮在温哥华岛周边海域的潮能耗散,结果显示,在湾内峡谷、附近群岛及海峡等地形形态变化较大的区域是主要能量耗散区,说明能量耗散受地形影响很大。Seim. H 等<sup>[6]</sup>分析了萨蒂拉河沿程潮位、潮流及主要分潮 M<sub>2</sub>的变化特征,发现 M<sub>2</sub>分潮占实测潮能的 80%,潮波性质与强辐聚河口的几何形状一致,控制着河口潮汐的特征。国内关于潮能通量和耗散也有较多的研究成果,如渤、黄、东海的潮能通量和潮能耗散的研究<sup>[7-8]</sup>,珠江口磨刀门区域潮能通量与地形响应关系的研究<sup>[9]</sup>。

针对河口,特别是考虑潮流和径流相互作用下的潮能方面的研究较少。本文以辽河口为例,研究潮汐和径流相互作用下的河口潮能通量和耗散。辽河是中国七大江河水系之一,下游分为双台子河和大辽河两股入海。双台子河口与大辽河口皆为三角洲河口,统称辽河口,是我国海洋综合开发利用的重要经济活动区。对辽河口潮能的计算,可以从能量角度认识辽河口的陆海相互作用和交换过程,对研究河口径流对河口环境的影响具有参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 潮能通量与潮能耗散计算方法

#### 1.1.1 潮能通量

潮能是指单位面积的水柱体所具有的动能与势能的总和<sup>[10]</sup>。一段时间  $T$  内,自海底到海面单位面积水柱体所包含的能量如下式:

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho D (U^2 + V^2) dt \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho g \eta^2 dt \quad (2)$$

其中: $K(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$ 为水柱体动能; $P(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$ 为水柱体势能; $U、V(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 为垂向平均速度分量; $\eta(\text{m})$ 为潮位; $D(\text{m})$ 为海底自海面的总水深; $g(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 为重力加速度; $\rho(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 为水体密度。

潮能通量,是指在单位时间内通过自海底到

海面单位宽度断面的潮能,也称能通量密度。在有径流输入的边界条件下,潮能通量的计算应包含径流在输运过程中所产生的能量。

潮能通量的大小分解成两正交方向的分量 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ):

$$\begin{cases} \Psi(U) = \rho U D \left[ \frac{U^2 + V^2}{2} + g\eta \right] \\ \Psi(V) = \rho V D \left[ \frac{U^2 + V^2}{2} + g\eta \right] \end{cases} \quad (3)$$

因此,一段时间  $T$  内,能量通过率可以表示为:

$$(E_{fu}, E_{fv}) = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-H}^{\eta} [\Psi(U), \Psi(V)] dz dt \quad (4)$$

其中: $E_{fu}、E_{fv}$ 表示  $U、V$  方向的能通量; $H$  表示水深; $z$  表示垂向坐标; $\Psi(U)、\Psi(V)$  分别表示东西和南北方向的潮能通量。

#### 1.1.2 潮能耗散

把能量方程对自由表面  $S$  所包围的控制体  $V$  积分后,就得到了潮周期平均下河口能量平衡方程<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned} & \iint \left\{ \left( p + \rho_0 \frac{u^2 + v^2}{2} \right) \vec{u} \cdot \vec{n} \right\} dS = \\ & \iiint \rho_0 \left\{ \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( u K_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v K_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - K_v \cdot \right. \\ & \left. \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} dV + Dissh \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $u、v、z$  为三个方向上的流速; $K_v$  是垂直涡动粘滞系数; $\rho_0$  为水的密度; $\{ \}$  代表潮平均, $\vec{n}$  为法向矢量; $dS$  和  $dV$  分别为面积分和体积分; $Dissh$  表示水平扩散引起的消能。

方程左端表示的是进入河口断面的能量通量(与控制体体积表面正交的平均能量通量),其中第二项对流项通常比正压通量小两个数量级,可忽略,所以在此仅考虑正压潮能;方程右端表示平均能耗量,都是消能项,第一项可转化为水体表面和床面摩擦耗能,假设风速为 0,简写如下:

$$\begin{aligned} & \iiint \rho_0 \left\{ \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( u K_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v K_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \right\} dV = \\ & \iint \left\{ \vec{u}_s \cdot \vec{\tau}_s - \vec{u}_b \cdot \vec{\tau}_b \right\} dS = - \iint \rho_0 C_d | \vec{u}_b |^3 dS \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\vec{u}_s、\vec{u}_b$  分别表示表面和近底流速; $\vec{\tau}_s、\vec{\tau}_b$  分别表示水体表面和床面摩擦力; $C_d$  为摩阻系

数。第二项是正压潮能垂向扩散相关耗能项,对整个水体积分,取潮平均得出:

$$\iiint \rho_0 \left\{ K_v \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} dV = \iint \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \rho_0 \int_{-H}^{\eta} K_v \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] dz dt \right\} dS \quad (7)$$

第三项  $Dissh$  是正压潮能水平扩散相关耗能项,其量值一般较小。

公式中的  $u, v, w, k_v$  等参数来自有限体积海岸海洋模型(FVCOM)结果。

### 1.2 河口数值模式

河口数值模式采用非结构有限体积海岸海洋模型(FVCOM)。该模型在水平方向上采用非结构化三角形网格,能更好的拟合实际岸线,适合岸线复杂及水深变化大的地形条件。在垂向上采用  $\sigma$  坐标系,可以方便地处理近海、海湾与河口的底部边界,模式控制方程见参考文献<sup>[11]</sup>。

计算区域为葫芦岛至鲅鱼圈连线以北海域(见图1),共计11047个计算单元,5885个网格节点,河口附近网格步长100 m左右,水文站点及区域地形见图2。

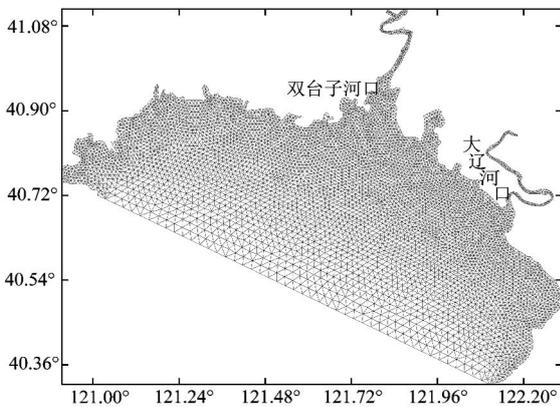


图1 区域网格配置

Fig. 1 Calculation range and grid distribution

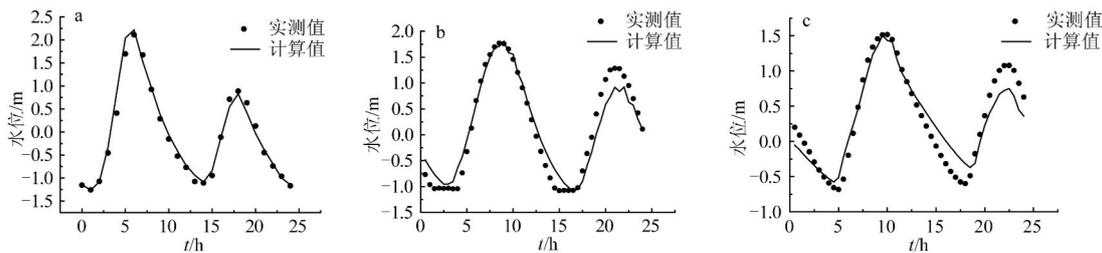


图3 小台子站(a)、西大庙站(b)、田庄台站(c)计算水位与实测水位的比较

Fig. 3 Comparison of computed and observed water levels at Xiaotai(a), Xidamiao(b) and Tianzhuangtai(c) station

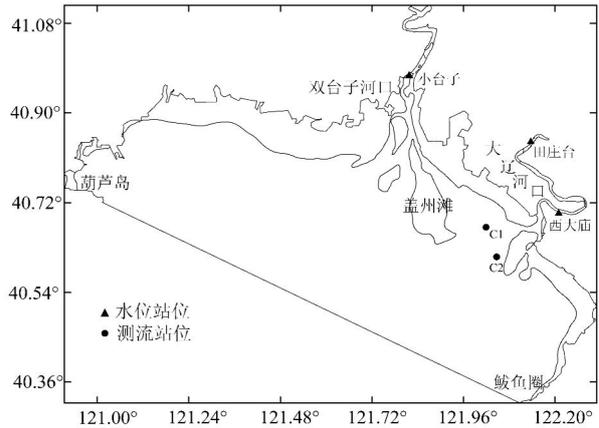


图2 河口地形及潮位潮流观测点

Fig. 2 Schematic of topography and survey stations in Daliaohe River Estuary

模型强迫条件包括外海开边界的水位,河流径流量等。不考虑风、降水、蒸发与地下水注入等因素水动力场的影响。外海开边界采用  $M_2, S_2, K_1$  和  $O_1$  4 个主要分潮,并预报潮位作为驱动,闭边界法向流速为零。径流量参考辽宁省水文信息网上公布的水文站资料 and 海湾志<sup>[12]</sup> 中辽河口多年平均值,双台子河口河流上游边界位于曙光大桥附近,丰水期、平水期和枯水期的上游径流量分别为  $450 \text{ m}^3/\text{s}, 285 \text{ m}^3/\text{s}$  与  $101 \text{ m}^3/\text{s}$ ,大辽河口上游边界位于田庄台辽河大桥附近,丰、平、枯水期的径流分别为  $228 \text{ m}^3/\text{s}, 114 \text{ m}^3/\text{s}$  与  $57 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型验证

#### 2.1.1 水位验证

模型选取了3个站点(小台子、西大庙和田庄台)进行水位验证,位置见图2,小台子站观测时间为2009年5月份(枯水期),西大庙和田庄台站位的观测时间为2011年9月10日~11日。

由验证结果(图 3)得知,该模型准确地模拟了潮高与高低潮时刻,呈现出较好的涨落潮过程。其中,小台子水位平均绝对误差为 0.12 m,西大庙水位平均绝对误差为 0.05 m,田庄台水位平均绝对误差为 0.11 m,实测值与计算值基本吻合,较好地反映了辽河口的潮位变化情况。

### 2.1.2 潮流验证

潮流验证位置见图 2。观测时间 2011 年 9 月

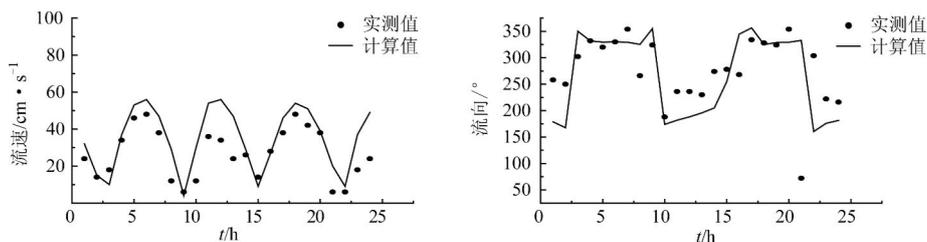


图 4 C1 点流速与流向计算值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison of computed and observed current at C1 station

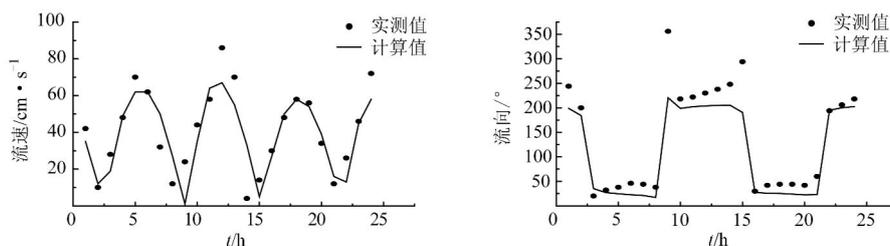


图 5 C2 点流速与流向计算值与实测值的比较

Fig. 5 Comparison of computed and observed current at C2 station

## 2.2 典型径流条件下辽河口的潮能通量

根据辽河流域上游水文站的水文统计资料,选取  $101 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $285 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  作为双台子河枯、平、丰水期的径流量,选取  $57 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $114 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $228 \text{ m}^3/\text{s}$  作为大辽河枯、平、丰水期的径流量,外海潮汐选择大潮和小潮潮况,各典型径流条件下,辽河口大、小潮期间的潮能通量空间分布情况见图 6。

潮能自外海向河口传播的过程中,由于受到盖州滩地形的影响,在盖州滩东南侧区域和两个河口河道急剧缩窄处,潮能通量变大,且在河口断面缩窄处,潮能发生辐聚,出现了潮能通量最大值。河口上游受潮流影响较小,主要是径流作用产生的能通量。

在河口是潮和径流相互作用强烈的区域,不同的径流和大小潮将对潮流通量产生影响。大潮期间,外海及口门附近枯、平、丰水期潮能通量最大值分别为  $34.17 \text{ KW}/\text{m}$ 、 $33.70 \text{ KW}/\text{m}$ 、 $32.66$

$10 \text{ 日} \sim 11 \text{ 日}$ 。测流站位 C1 的流速计算值和实测值的平均绝对误差为  $9.9 \text{ cm}/\text{s}$ ,流向的平均绝对误差为  $26^\circ$ ;测流站位 C2 的流速计算值和实测值的平均绝对误差为  $8.9 \text{ cm}/\text{s}$ ,流向的平均绝对误差为  $18^\circ$ 。模型的计算结果与实测值吻合度良好,能够较好地反映辽河口的潮流变化情况。

$\text{KW}/\text{m}$ ,小潮期间潮能通量最大值分别为  $18.86 \text{ KW}/\text{m}$ 、 $18.53 \text{ KW}/\text{m}$ 、 $17.83 \text{ KW}/\text{m}$ 。大潮期间潮能通量将近小潮期间潮能通量的两倍,枯水期的潮能通量最大值较平水期和丰水期大,这主要是由于枯水期上游径流较小,外海潮波在传播过程中除了受到河口地形的非线性作用外,上游径流的顶冲作用显著减弱,总体的非线性摩擦作用不及径流量较大的平水期和丰水期,故潮能通量在枯水期有所增强。

## 2.3 径流变化下辽河口潮能耗散

潮波在变截面的河口传播,沿着传播方向也必然会伴随着能量的耗散。为研究辽河口区域的潮能耗散,结合该区域沿程地形,在双台子河口和大辽河口各设置 4 个横向断面,一共为 6 个分区。见图 7。

大小潮期间,辽河口不同径流条件下的能量变化见表 1 和表 2,其中负值表示径流下泄方向,正值表示潮流上溯方向。

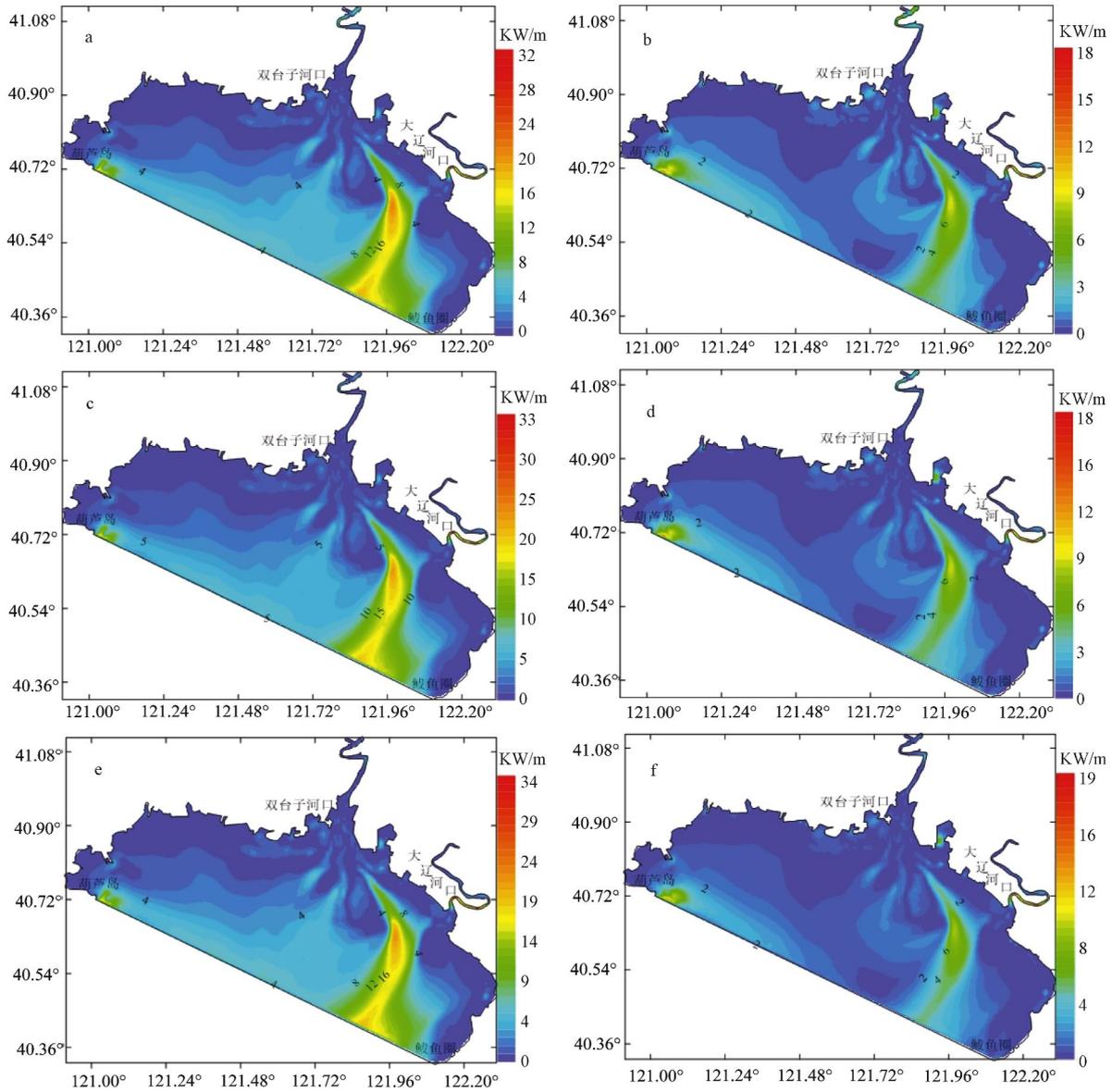


图6 丰水期(a,b),平水期(c,d)和枯水期(e,f)大、小潮期间潮能通量分布(大潮 a、c、e;小潮 b、d、f)

Fig. 6 tidal energy flux distribution during spring tide and neap tide in flood season(a,b), flat season(c,d) and dry season (e,f) separately

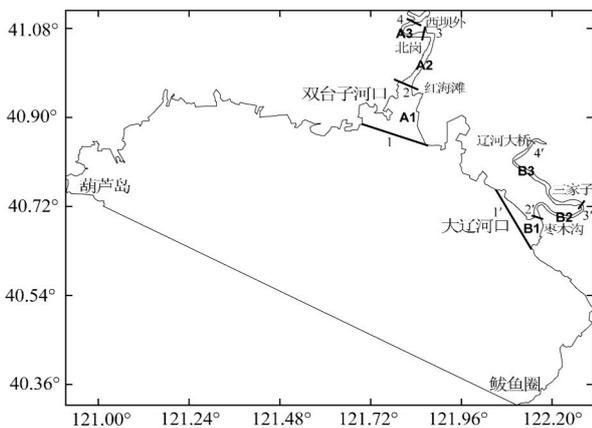


图7 计算断面与分区

Fig. 7 Sketch of cross section and distribute

由表可以看出,双台子河口 A1 分区,大辽河口 B1 分区在两河口耗能量最多。两河口的单位面积耗能率趋势都是随着径流量的增加,潮能耗散增强,丰水期各分区耗能量总体上大于平水期、枯水期。其中, A3 分区以径流作用为主,由于径流量的注入不同,该区能量的耗散在丰水期增加最多,大小潮期间分别达到 0.20 MW/km<sup>2</sup>和 0.27 MW/km<sup>2</sup>。大辽河口各分区大潮期间的各水期的耗能率约为小潮期间耗能率的两倍。由于潮流的上溯作用,辽河大桥附近至断面 2' 主要受到潮-径的相互作用,分区 B2、B3 在各水期的能量变化不

明显,耗能率相近。

对两河口耗电量的统计得出:由于湾口地形

的作用,使得 A1, B1 区的耗能率在所有分区中是最高的。

表 1 大、小潮期间双台子河口分区耗散统计

Tab. 1 tidal energy dissipation of Shuangtaizi Estuary during spring and neap tide

分区信息	大潮			小潮		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
分区面积/km <sup>2</sup>	103.21	16.54	8.56	103.21	16.54	8.56
分区面积比例/(%)	80.44	12.89	6.67	80.44	12.89	6.67
枯水期 分区耗能/MW	12.80	1.56	-0.70	5.28	0.74	0.04
分区耗能比例/(%)	84.97	10.35	4.68	87.08	12.22	0.70
耗能率/MW·km <sup>-2</sup>	0.12	0.09	0.08	0.05	0.04	0.005
平水期 分区耗能/MW	12.95	0.88	-0.18	5.41	0.11	0.54
分区耗能比例/(%)	92.44	6.30	1.25	89.22	1.84	8.94
耗能率/MW·km <sup>-2</sup>	0.13	0.05	0.02	0.05	0.01	0.06
丰水期 分区耗能/MW	13.10	-1.19	1.74	5.56	-1.80	2.33
分区耗能比例/(%)	81.70	7.45	10.85	57.38	18.60	24.02
耗能率/MW·km <sup>-2</sup>	0.13	0.07	0.20	0.05	0.11	0.27

表 2 大、小潮期间大辽河口分区耗散统计

Tab. 2 tidal energy dissipation of Daliaohe Estuary during spring and neap tide

分区信息	大潮			小潮		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
分区面积/km <sup>2</sup>	38.96	10.80	21.08	38.96	10.80	21.08
分区面积比例/(%)	55.00	15.25	29.75	55.00	15.25	29.75
枯水期 分区耗能/MW	8.99	1.89	0.66	4.65	1.00	0.35
分区耗能比例/(%)	77.90	16.36	5.74	77.55	16.60	5.85
耗能率/MW·km <sup>-2</sup>	0.23	0.17	0.03	0.12	0.09	0.02
平水期 分区耗能/MW	8.95	1.89	0.64	4.66	1.00	0.34
分区耗能比例/(%)	77.98	16.45	5.57	77.75	16.64	5.61
耗能率/MW·km <sup>-2</sup>	0.23	0.17	0.03	0.12	0.09	0.02
丰水期 分区耗能/MW	8.86	1.90	0.56	4.93	0.69	0.28
分区耗能比例/(%)	78.33	16.76	4.91	83.53	11.75	4.72
耗能率/MW·km <sup>-2</sup>	0.22	0.18	0.03	0.13	0.06	0.01

2.4 潮内潮能通量的变化

辽河口区域受径流及河口地形的影响,存在着明显的潮汐不等的现象,大部分属于不正规半日潮,为了解潮内潮能通量的变化,以 M<sub>2</sub>分潮为例,采用平水期的径流条件,选取涨急、高潮、落急和低潮 4 个时刻,其潮能通量空间分布如图 8 所示。

河口中的潮波既非单独的前进波,也非单纯的驻波,一般兼有此两者的特征。由计算结果得出,涨急、高潮、落急和低潮潮能通量最大值分别

为 27.12 KW/m、56.08 KW/m、30.56 KW/m 和 41.69 KW/m。一个潮周期的平均潮能通量最大值为 22.93 KW/m。比较可知,在高潮时刻的潮能通量值最大,这是由于此时的潮位达到最大,势能比重较大。在落急时刻潮流与径流作用均指向外海,所以比涨急时刻的潮能通量大。双台子河口入海喇叭口相对大辽河口较宽,河槽宽深比较大,弯曲程度较小,在河流段最大值一般发生在大辽河口的第一个河道拐角处。

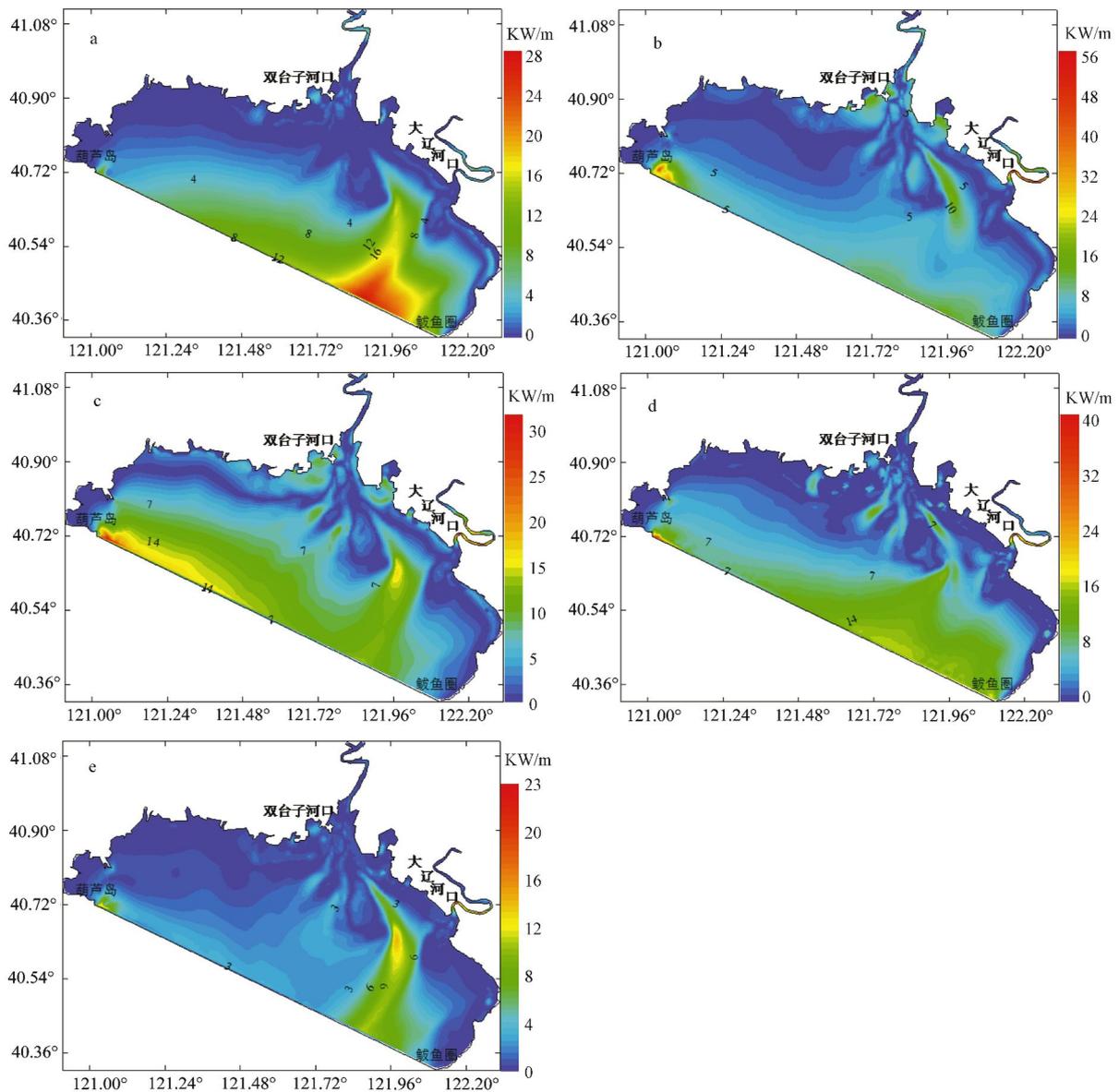


图8 涨急(a)、高潮(b)、落急(c)、低潮(d)和一个潮周期平均(e)的潮能通量分布

Fig. 8 tidal energy flux distribution during flood peak (a), spring tide (b), ebb peak (c), ebb (d) and an average tidal cycle (e)

### 3 结论

本文基于 FVCOM 海洋数值模型,详细分析了辽河口的潮能通量的空间分布和其感潮河段沿程变化特征以及辽河口的潮能耗散情况,主要结论如下:

1) 辽河口大潮期间一个潮周期的潮能通量约为小潮期间的两倍;枯水期的潮能通量最大值较平水期和丰水期大。辽河口口门附近及河流段受到潮流和径流的相互作用导致潮能通量分布不同,潮能通量受河口地形的影响,最大的区域主要

集中在盖州滩东南侧区域和两个河口河道急剧缩窄及拐弯处。

2) 在双台子河口和大辽河口,随着径流量的增加,潮能耗散增强,丰水期各分区耗能量总体上大于平水期和枯水期。各水期各分区单位面积耗能率有随着径流量的增加,潮能耗散增强的趋势。枯水期耗能率最高值为  $0.12 \text{ MW}/\text{km}^2$ , 丰水期耗能率最高值为  $0.13 \text{ MW}/\text{km}^2$ 。在大辽河口,大潮期间,各水期的耗能率约为小潮期间的两倍,其中湾口区耗能率在所有分区中是最高的。

(下转第 67 页)

- thorium-series nuclides as tracers of submarine groundwater discharge [C]// U-Th series nuclides in aquatic systems. Oxford: Linacre House, 2008: 155-191.
- [3] SWARZENSKI P W, PORCELLI D, ANDERSSON P S, et al. The behavior of U- and Th-series nuclides in the estuarine environment [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 52 (1): 577-606.
- [4] CHARETTE M A, BUESSELER K O, ANDREWS J E. Utility of radium isotopes for evaluating the input and transport of groundwater-derived nitrogen to a Cape Cod estuary [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46 (2): 465-470.
- [5] MOORE W S. Ages of continental shelf waters determined from  $^{223}\text{Ra}$  and  $^{224}\text{Ra}$  [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (C9): 22117-22122.
- [6] MOORE W S, SARMIENTO J L, KEY R M. Submarine groundwater discharge revealed by  $^{228}\text{Ra}$  distribution in the upper Atlantic Ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1 (5): 309-311.
- [7] 区自清. 土壤渗滤装置及其在污染物迁移实验研究中的应用 [J]. *资源生态环境网络研究动态*, 1993, 4 (1): 1-9.
- [8] WEBSTER I T, HANCOCK G J, MURRAY A S. Modelling the effect of salinity on radium desorption from sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (12): 2469-2476.
- [9] GONNEEA M E, MORRIS P J, DULAIIOVA H, et al. New perspectives on radium behavior within a subterranean estuary [J]. *Marine Chemistry*, 2008, 109 (3/4): 250-267.
- [10] BECK A J, COCHRAN M A. Controls on solid-solution partitioning of radium in saturated marine sands [J]. *Marine Chemistry*, 2013, 156: 38-48.
- [11] HUCK P M, ANDERSON W B. Deposition of  $^{226}\text{Ra}$  on surfaces during precipitation and leaching of (Ba, Ra)  $\text{SO}_4$  [J]. *Water Research*, 1983, 17 (10): 1403-1406.
- [12] 马安丽. 利用充电法测定地下水的流速流向 [J]. *地下水*, 2012, 33 (5): 5.
- [13] CABLE J E, MARTIN J B. In situ evaluation of nearshore marine and fresh pore water transport into Flamengo Bay, Brazil [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 76 (3): 473-483.
- [14] 张洪亮, 杨建强, 崔文林. 莱州湾盐度变化现状及其对海洋环境与生态的影响 [J]. *海洋环境科学*, 2006 (S1): 11-14.
- [15] 江雪艳. 黄河干流、河口及莱州湾南岸铀的分布及成因研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 32-36.
- [16] 刘广山, 杨伟锋, 贾成霞, 等. 大体积海水镭同位素现场快速富集与  $\gamma$  谱直接测定 [J]. *核技术*, 2004, 27 (2): 116-121.
- [17] MOORE W S, ARNOLD R. Measurement of  $^{223}\text{Ra}$  and  $^{224}\text{Ra}$  in coastal waters using a delayed coincidence counter [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101 (C1): 1321-1329.
- [18] WASKA H, KIM S, KIM G, et al. An efficient and simple method for measuring  $^{226}\text{Ra}$  using the scintillation cell in a delayed coincidence counting system (RaDeCC) [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99 (12): 1859-1862.
- [19] GARCIA-SOLSONA E, GARCIA-ORELLANA J, MASQUÉ P, et al. Uncertainties associated with  $^{223}\text{Ra}$  and  $^{224}\text{Ra}$  measurements in water via a Delayed Coincidence Counter (RaDeCC) [J]. *Marine Chemistry*, 2008, 109 (3/4): 198-219.
- [20] PETERSON R N, BURNETT W C, TANIGUCHI M, et al. Radon and radium isotope assessment of submarine groundwater discharge in the Yellow River delta, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (C9): C09021, doi: 10.1029/2008JC004776.

(上接第 26 页)

3) 辽河口潮周期平均的潮能通量最大值为 22.93 KW/m, 一个潮周期内高潮时刻潮能通量值最大, 由于受地形的影响, 河流段最大值发生在河道拐角处。

#### 参考文献:

- [1] DAVIESA M, KWONG S C M. Tidal energy fluxes and dissipation on the European continental shelf [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (C9): 21969-21989.
- [2] ARGOTE M L, AMADOR A, LAVIN M F. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, 100 (C8): 16103-16118.
- [3] CARBAJAL N, BACKHAUS J O. Simulation of tides residual flow and energy budget in the Gulf of California [J]. *Oceanologica Acta*, 1998, 21 (3): 429-446.
- [4] SCOTT W T, STEPHEN P. Tidal energy dissipation at the sill of Sechart Inlet, British Columbia [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31 (12): 3365-3373.
- [5] FOREMAN M G G, SUTHERLAND G, CUMMINS P F.  $M_2$  tidal dissipation around Vancouver Island: an inverse approach [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24 (18): 2167-2185.
- [6] SEIM H, BLANTON J, ELSTON S. Tidal circulation and energy dissipation in a shallow, sinuous estuary [J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56 (3/4): 360-375.
- [7] 方国洪. 黄海潮能的消耗 [J]. *海洋与湖沼*, 1979, 10 (3): 200-213.
- [8] 李培良, 李磊, 左军成, 等. 渤海东海潮能通量与潮能耗散 [J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2005, 35 (5): 713-718.
- [9] 吕海滨, 吴超羽, 任杰, 等. 四十年来磨刀门河口水动力对地形的响应 [J]. *海洋通报*, 2007, 26 (1): 20-27.
- [10] HARARIA J, DE CAMARGO R. Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24°S 46°W) [J]. *Continental Shelf Research*, 2003, 23 (16): 1597-1613.
- [11] Chen, C. H. Liu, R. C. Beardsley, 2003a. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 20 (1), 159-186.
- [12] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志-第十四分册-重要河口 [M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 432-447.