

# 强风作用下珠江伶仃洋河口湾能量耗散分析

倪培桐<sup>1</sup>, 韦 惺<sup>2</sup>

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510630; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

**摘要:**基于珠江河口-河口湾的三维数值模型,通过区域能量耗散项积分方法分析了风作用下的伶仃洋河口湾能量耗散。结果表明,潮能沿深槽向河口与三角洲传播,风的作用改变了伶仃洋河口湾能量通量的振幅和相位,但对各断面多潮平均能量通量影响不大;强风的作用使伶仃洋河口湾区域的单位面积能耗增加,垂向涡动能耗增强 1~2 倍,摩擦能耗变幅不大,且不会改变地貌形态阻力作用下的能耗空间分布性质。

**关键词:**珠江河口;能量通量;能量耗散;风;小尺度;动力结构;高能耗区

**中图分类号:**TV139.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2017)03-0035-07

**Effects of strong wind on tidal energy flux and dissipation in Lingdingyang Bay of Pearl River//NI Peitong<sup>1</sup>, WEI Xing<sup>2</sup>**(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510630, China; 2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** Based on the three-dimensional numerical model for Lingdingyang Bay of the Pearl River network, the tidal energy flux and dissipation in Lingdingyang Bay under effects of strong wind were analyzed with the method of integration of regional energy dissipation. Results show that the tidal energy transfers into Lingdingyang Bay and the Pearl River Delta through the deep channel. The effects of wind lead to the changes in the amplitude and phase of the tidal energy flux in Lingdingyang Bay, while have insignificant influence on the average energy flux of multiple tides through each cross-section. Strong wind increases the tidal energy dissipation per unit area in Lingdingyang Bay, and the vertical eddy turbulence energy dissipation increases by 1~2 times; however, it does not produce a great change in friction-induced energy dissipation and does not change the spatial distribution of energy dissipation under the effects of landform's resistances.

**Key words:** Pearl River Estuary; tidal energy flux; tidal energy dissipation; wind; small scale; dynamic structure; high energy dissipation region

潮汐是珠江河口的重要能量来源,这些能量最终在河口湾、网河区水道中传输、并耗散。除了潮汐外,风、径流等也是河口重要能量来源,据 Zhong 等<sup>[1]</sup>对切萨皮克湾(Chesapeake Bay)的研究发现,风能的输入与耗散在该河口湾的动力过程中有重要作用。风对河口环流有重要的影响,根据混合河口在简化条件下的理论解,当风吹向海时,风的作用加强了河口的两层流结构,形成表层向海流、底层向陆的垂向环流;风向河口上游吹时,则抑制了环流的发育<sup>[2]</sup>。Weisberg 等<sup>[3-4]</sup>观测到河口风作用下的两层流结构,表层顺风流动、底层逆风流动。刘欢等<sup>[5]</sup>研究了冬季风对河口垂向环流形成的影响。包芸等<sup>[6]</sup>研究了珠江河口西南风对珠江河口的动力及对地貌沉积的影响。叶荣辉等<sup>[7]</sup>开发了珠江河口风暴潮模型,并研究了河口风暴潮对水流的影响。

目前珠江河口动力过程研究文献中,风作用下的能量耗散论述尚不多见。本文基于珠江河口湾的 SELFE 三维数学模型,探讨了风作用下的河口能量通量与耗散问题。

## 1 研究区域

珠江主要由西江、北江和东江三大河流组成,珠江河口三角洲由独特的网河区和河口湾区构成。伶仃洋河口湾是珠江河口面积最大的组成部分,平面上为西北走向的喇叭型河口湾,虎门位于伶仃洋湾顶,由虎门口门往南,水深和水面宽度都发生变化。沿深槽从湾顶到淇澳岛、内伶仃岛一线长约 40 km,湾顶最窄仅为 3.2 km,湾口水面最宽处在淇澳岛南,宽约 32 km;由伶仃洋湾口一直到黄埔,水面宽度基本上呈指数递减。如图 1 所示,伶仃洋为弱潮河口

基金项目:广东水利科技创新项目(2016-12);广东省科技计划(2010B03080004)

作者简介:倪培桐(1971—),男,高级工程师,博士,主要从事河口海岸动力学数值模拟研究。E-mail:nipeitong@163.com

湾,水下地形呈三滩两槽的格局。东、西滩水深普遍小于5 m,中滩稍深,在5~10 m之间。

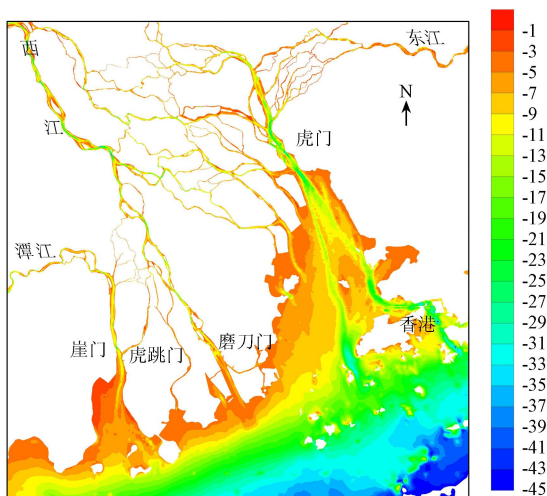


图1 伶仃洋河口地形(单位:m)

珠江河口三角洲位于亚热带海洋季风气候区,季风气候主要取决于蒙古高压、太平洋副热带高压、印度洋低压等气团的相对强弱进退的变化。根据华南沿海多年资料统计,珠江口附近海域季风主要为西南季风、东北季风两种类型。

## 2 研究方法

### 2.1 数学模型

基于半隐式欧拉-拉格朗日有限元河口数学模型 SELFE 建立珠江河口三维并行数学模型,计算区域包括珠江河口区及河网区,模型采用三角形网格,网格约21万个,节点约12万个(图2)。采用2001年2月枯季资料对模型进行了验证,模拟的水位过程、流量过程与实测数据较为吻合,其中水位平均误差在0.03~0.1 m之间,落潮流量相对误差在0.03%~0.27%之间,涨潮流量相对误差在0.01%~0.36%之间。模型详细介绍及验证结果参见文献[8-10]。

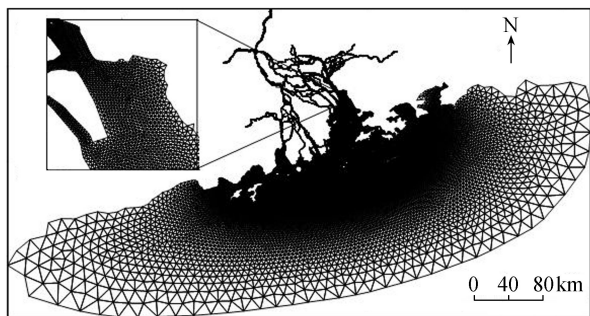


图2 模型计算网格

枯季水动力边界条件采用2001年2月实测值。风动力条件考虑西南季风、东北季风两种类型,根据上川岛气象资料,夏季6—8月西南季风的平均风速为3.9 m/s(相当于3级风),冬季12月至次年2月

东北季风的平均风速为4.9 m/s(相当于3级风),分别取上述风速的2倍作为强风风速,即模型中强西南风风速为7.8 m/s(相当于4级风)、强东北风风速为9.8 m/s(相当于5级风)。需要说明的是强风是相对于珠江口夏季、冬季平均风速而言,出现的频率也较高,如冬季强风在冬季出现的频率可达50%。

### 2.2 潮能通量与能量耗散

潮能通量,又称潮能通量密度,是单位时间通过自海底至海面单位宽度断面的潮能<sup>[9-10]</sup>:

$$E = \rho U D (U^2/2 + g\eta) \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为水体密度; $D$ 为总水深; $U$ 为水流速度; $\eta$ 为水面围绕静止水面的波动值; $g$ 为重力加速度。

对自由表面 $S$ (其法线方向为 $\mathbf{n}$ )包围的控制体 $V$ ,有河口能量平衡计算方程<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} & \iint \left\langle \left( p + \rho \frac{u^2 + v^2}{2} \right) \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} \right\rangle dS = \\ & \iiint \rho \left\langle \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( u K_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v K_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \right. \\ & \left. K_V \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \right\rangle dV + D_i \quad (2) \end{aligned}$$

式中: $p$ 为压强; $u$ 、 $v$ 为 $x$ 、 $y$ 方向流速; $K_V$ 为垂向涡动黏性系数;角括号 $\langle \rangle$ 表示潮平均; $D_i$ 为水平扩散引起的消能。方程(2)表示与控制体积表面正交的平均能量通量与平均能耗的平衡,仅考虑潮汐运动中正压力做功所导致的能量通量,对流项(左边第二项)通常比正压通量小两个数量级,可以忽略。

将能量方程(2)对自由表面 $S$ 包围的控制体积 $V$ 积分,可以分析潮平均条件下控制体的能量耗散构成<sup>[1]</sup>,包括水体表面能量耗散、床面底摩擦耗散、垂向涡动扩散有关的能耗和正压潮能水平扩散:

$$\iint \langle \mathbf{u}_s \cdot \boldsymbol{\tau}_s \rangle dS \quad (3)$$

$$\iint \langle -\mathbf{u}_b \cdot \boldsymbol{\tau}_b \rangle dS \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \iint \left\{ \frac{1}{T} \int_{-H}^{\eta} \rho K_V \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] dz dt \right\} dS \quad (5) \\ & - \iiint \rho \left\langle K_H \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right\rangle dV \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{u}_s$ 、 $\mathbf{u}_b$ 分别为表面和床面流速; $\boldsymbol{\tau}_s$ 、 $\boldsymbol{\tau}_b$ 分别为表面和床面摩擦力; $K_H$ 为水平涡动黏滞系数; $H$ 为水深。

## 3 结果与讨论

### 3.1 风对河口湾潮能通量的影响

本文涉及各采样断面位置如图3所示。地形的局部变化对潮能通量的空间分布影响很大。伶仃

洋-虎门水域潮能通量在东槽、西槽较大,西部滩地、中部、东部滩地潮能通量较小,潮能通量传播方向沿伶仃洋河口的主槽传播(图4、图5)。以2001年2月枯季无风条件为例,来自外海的潮能沿着伶仃洋的东槽和西槽往上传播,在虎门附近的川鼻水道汇聚,传入狮子洋。潮能通量值在虎门位置处最大,往上游潮能通量开始缓慢降低(图4)。

无论是能量通量的分布图还是能量通量纵向剖面图及断面能量通量统计数据都显示,珠江河口的能量通量在有风或无风等条件下变化很小(图5、图

6)。来自外海能量通量为219.7 MW,西南、东北季风条件下,来自外海的能量通量分别为219.63 MW和218.42 MW(L01断面);在强西南风、强东北风条件下,来自外海的能量通量分别为218.12 MW和205.77 MW,与无风条件比,河口湾能量通量变化不超过2%。因此无风、西南季风、东北季风作用条件下,各断面能量通量变化不大;即使在强西南风、强东北风条件下,各断面能量通量变化也不大。图7为断面能量通量随潮变化,风的作用改变了河口湾能量通量的振幅和相位。从多潮平均的角度看,各

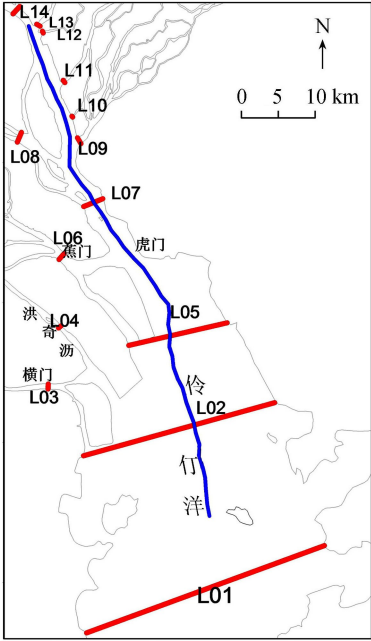


图3 水域采样断面

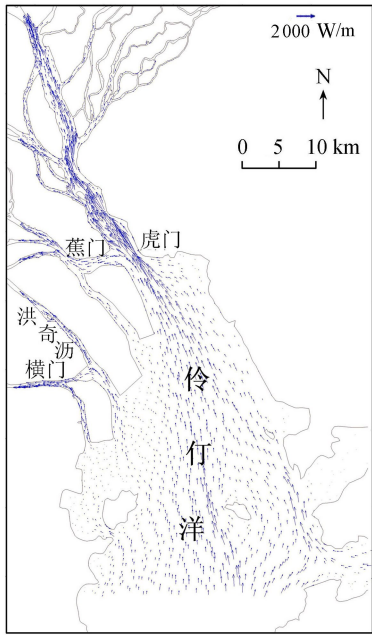
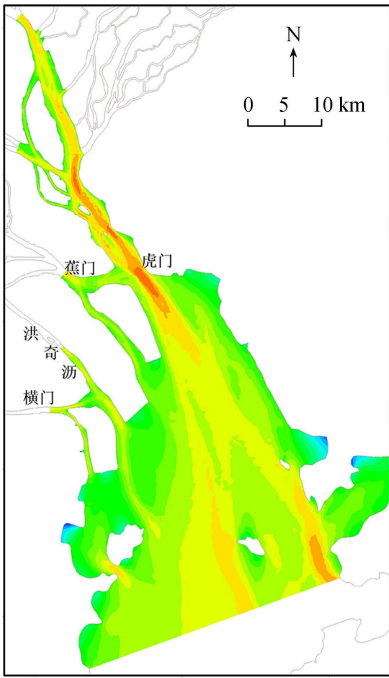
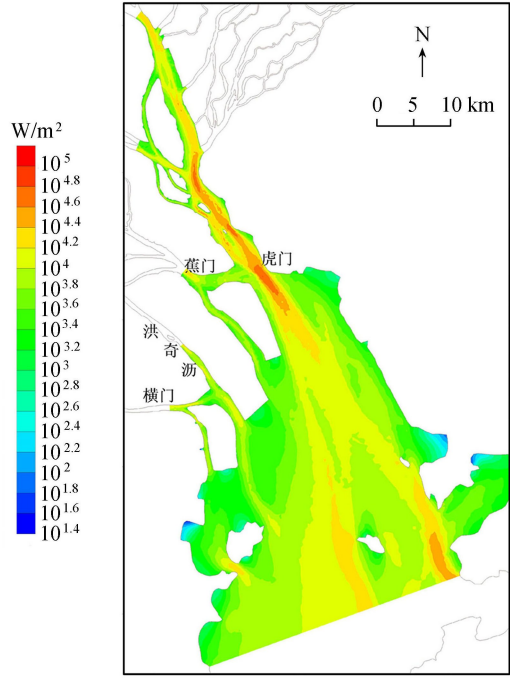


图4 能量通量矢量多潮平均分布



(a) 东北季风



(b) 无风

图5 能量通量多潮平均分布

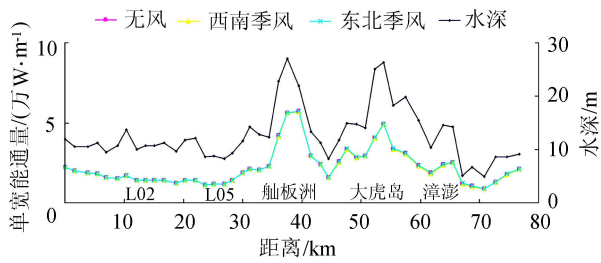


图6 深槽单宽能量通量沿程变化

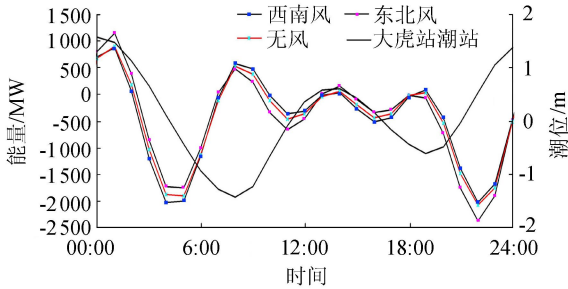


图7 2001年2月10日伶仃洋湾口L01断面能量通量随潮变化

断面能量通量的多潮平均的统计量值变化不大。

### 3.2 风对河口潮能耗散的影响

为便于分析,把水域分为4个子区域(图3、表1),分别代表伶仃洋河口湾区(A1)、河口湾顶区(A2)、虎门射流区(A3)、狮子洋区(A4)。无论有无风的作用,总能耗分布总体上与潮能通量的分布一致,东槽、西槽能耗大,西滩、中部浅滩能耗相对小。高能耗区主要分布在地形变化较大区域,其中A4分区的高能耗区主要分布在东江三角洲北干流、倒运海水道与狮子洋交汇的汉口、西北江三角洲与

狮子洋交汇的汉口(三江口);A3分区中高能耗区为虎门射流体;A2分区中高能耗区为蕉门、洪奇沥、横门等位置(图8)。

表1 伶仃洋-虎门水域分区

分区	断面	分区面积/km <sup>2</sup>	名称
A1	L01、L02	817.30	河口湾区
A2	L02、L03、L04、L05	282.97	湾顶区
A3	L05、L06、L07	182.45	射流区
A4	L07~12、L	90.82	狮子洋区

与无风作用相比,在较低风速(如季风)作用下,总能耗变化不明显;强西南风、强东北风作用下能耗变大,其中河口区能耗增大最明显(图8)。以A1分区为例,上述3种水文条件下分区能耗分别为86.73 MW、87.64 MW和87.15 MW(表2)。与无风条件相比,东北季风、西南季风对分区总能耗量值变化作用小于1%。A1分区在无风、强西南风、强东北风条件下总能耗分别为86.73 MW、92.72 MW和112.60 MW,强西南风、强东北风条件下总能耗增加分别为7%和30%。

表2 能耗分区统计

分区	不同条件下的能耗/MW				
	无风	东北季风	西南季风	强西南风	强东北风
A1	86.73	87.64	87.15	92.72	112.60
A2	18.51	19.00	18.64	21.26	28.53
A3	21.09	21.32	21.11	22.69	26.51
A4	13.10	13.22	13.07	13.58	15.74

从能耗组成看,无风情况下,所有分区的底摩擦能耗项都是主要能耗项,底摩擦能耗占总能耗的

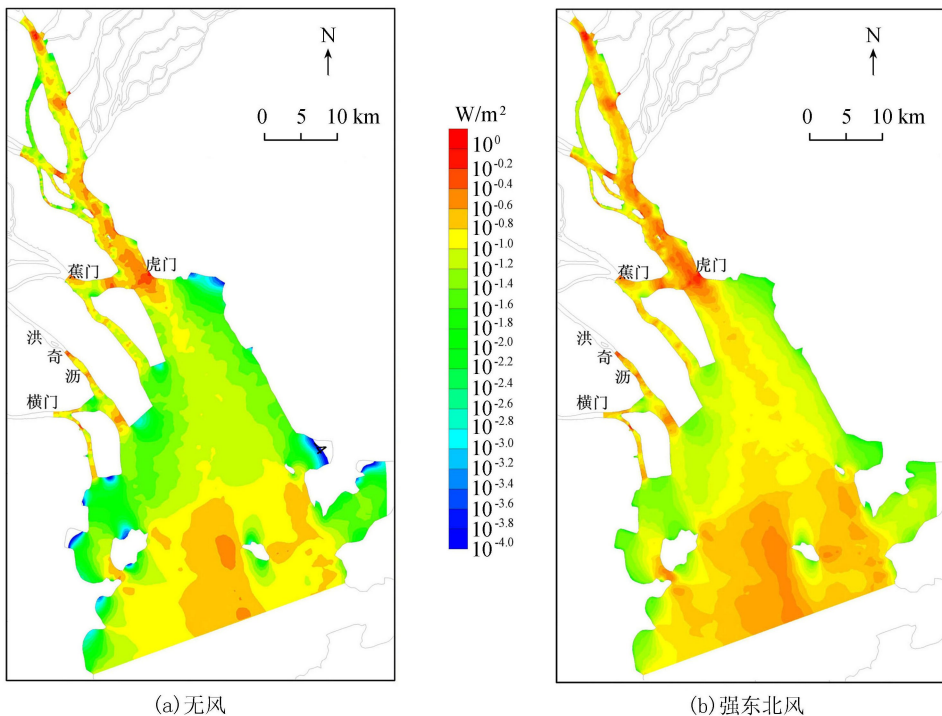


图8 单位面积能耗散多潮平均分布

70% ~ 80%。垂向涡动耗散项是第二能耗散项, 占总能耗的 20% ~ 30%。水平涡动能项与底摩擦、垂向涡动耗散项相比是小量, 在总能耗中的比重小于 1% (表 3、图 9 ~ 11)。

在强风条件下, 风通过水面输入水体中的能量增大, 水体流速的垂向梯度变大, 垂向涡动能项增强, 其中强东北风条件下, 垂向涡动能项为总能耗的 35% ~ 53%, 底摩擦能耗占总能耗 46% ~ 64%。

东北季风条件下, 风能输入的能量占总能耗的

6% ~ 10%, 西南季风条件下风能输入量在总能耗中占 3% ~ 5%, 强风条件下可达 20% ~ 30%, 风能输入增加了水体紊动强度。在风向与水流方向相同时, 表层水体向下游的流动得到加强; 在风向与水流方向相反时, 风将减弱表层水体的流动速度。风的作用增大了流速垂向梯度, 从而增大水域垂向涡动黏性能耗。

### 3.3 讨论

珠江河口是一个大尺度的地貌系统, 河口地貌

表 3 分区各项能耗统计

计算条件	分区	各项能耗/MW				总能耗	各项能耗量占比/%			
		底摩擦能耗	垂向涡动能耗	水平涡动能耗	风能		底摩擦能耗	垂向涡动能耗	水平涡动能耗	风能
无风	A1	62.91	23.71	0.12		86.73	72.53	27.34	0.13	
	A2	13.77	4.72	0.02		18.51	74.40	25.48	0.13	
	A3	16.37	4.66	0.06		21.09	77.60	22.11	0.29	
	A4	10.35	2.67	0.08		13.10	79.01	20.41	0.59	
东北季风	A1	62.44	25.08	0.12	5.98	87.64	71.25	28.62	0.13	6.82
	A2	13.71	5.26	0.02	1.84	19.00	72.17	27.71	0.12	9.66
	A3	16.32	4.94	0.06	1.38	21.32	76.56	23.16	0.29	6.48
	A4	10.34	2.80	0.08	0.79	13.22	78.21	21.21	0.58	6.00
西南季风	A1	63.00	24.03	0.12	3.15	87.15	72.30	27.57	0.13	3.61
	A2	13.78	4.84	0.02	0.97	18.64	73.92	25.96	0.13	5.18
	A3	16.33	4.72	0.06	0.73	21.11	77.36	22.35	0.29	3.45
	A4	10.32	2.67	0.08	0.42	13.07	78.95	20.46	0.59	3.19
强东北风	A1	59.95	52.54	0.11	32.86	112.60	53.24	46.66	0.10	29.18
	A2	13.35	15.15	0.02	10.28	28.53	46.81	53.11	0.08	36.02
	A3	15.86	10.60	0.06	7.48	26.51	59.81	39.97	0.22	28.20
	A4	10.14	5.53	0.08	4.25	15.74	64.41	35.11	0.49	27.00
强西南风	A1	62.28	30.33	0.11	14.30	92.72	67.17	32.71	0.12	15.42
	A2	13.94	7.30	0.03	4.46	21.26	65.57	34.31	0.12	20.98
	A3	16.45	6.18	0.06	3.34	22.69	72.48	27.25	0.28	14.70
	A4	10.24	3.26	0.08	1.88	13.58	75.42	24.00	0.57	13.83

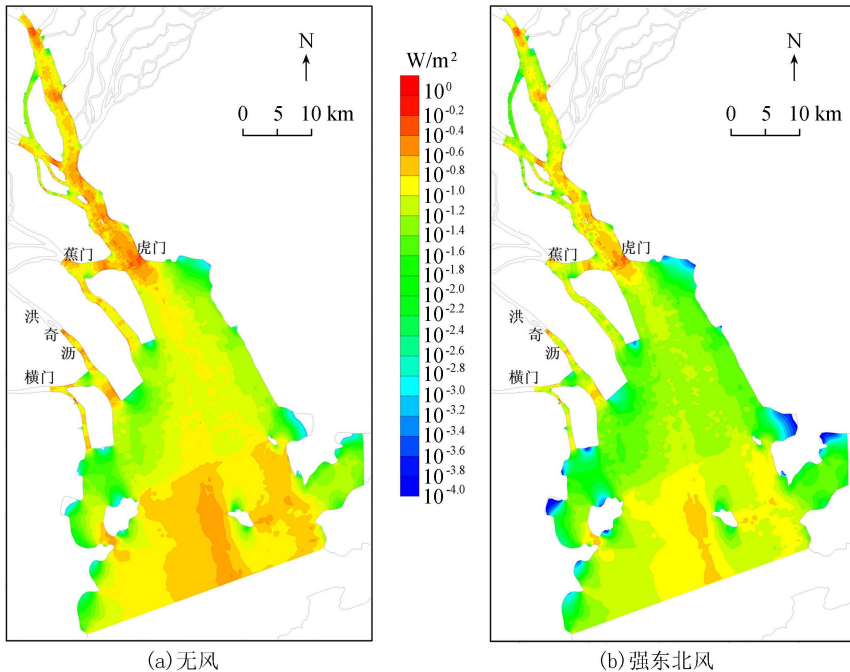


图 9 伶仃洋-虎门-狮子洋水域底摩擦能耗多潮平均分布

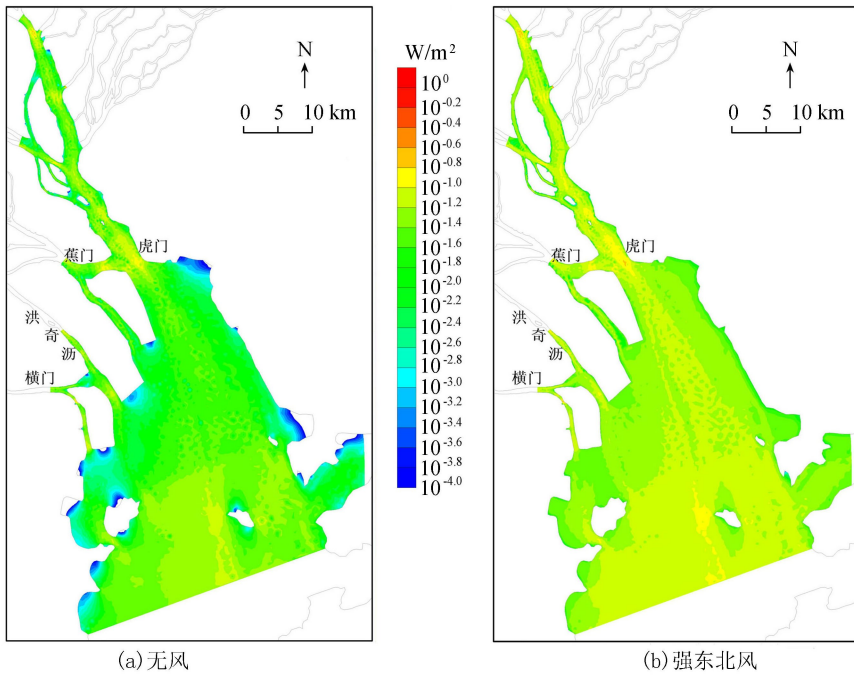


图 10 垂向涡动黏性能耗多潮平均分布

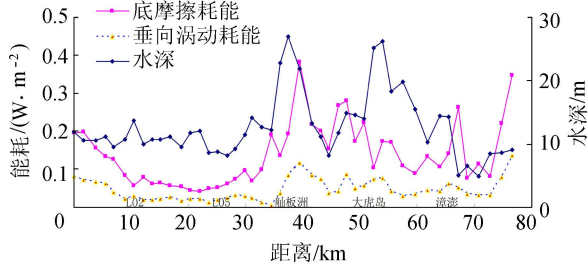


图 11 伶仃洋-虎门水域深槽分项能耗纵向分布(无风)

与动力过程密切相关,根据地貌特征、动力过程,可以分为伶仃洋-虎门-狮子洋水域、黄茅海-谭江水域、磨刀门河口水域、网河区水域<sup>[7]</sup>。伶仃洋-虎门-狮子洋水域是珠江河口最为重要的部分,仍然可以细分为小尺度的子区域<sup>[12]</sup>。基岩岛屿众多、地形边界复杂是珠江河口有别于世界其他河口的重要特征。从平面形态上看,伶仃洋由很多典型的地貌形态组成,包括:①峡口地貌单元,当地称为“门”,这些门的地形是由基岩岛屿组成,如虎门、横门等;②基岩岛屿或半岛地形,如内伶仃岛、横门岛、大虎岛等;③半岛或岬角,不同尺度的岬角地形遍布伶仃洋河口湾,大型的如深圳的南山、珠海的唐家等,小尺度如铜鼓角、银坑角等;④弧形海岸,如唐家湾、泗东海滩等。这些地貌单元形成相应的平均流动力结构,如虎门双向射流,横门、蕉门的单向射流,岛屿分流与汇流,岬角分离流,大尺度环流等。

从计算的能量通量与耗散空间分布看,由于这些突变地貌单元往往伴随形成小尺度动力结构,其典型特点是流速梯度大,出现局部高流速现象。由于底摩擦能耗量值是流速的立方,流速量值的较小

变化可能导致底摩擦能耗出现几个量级的变化。另外流速梯度变大会加大水流的掺混现象,水流的涡动黏性系数会增大<sup>[13-14]</sup>,并进一步使涡动能耗增加。由于能量耗散以底摩擦和垂向涡动耗散为主,表现出能耗空间分布异常,即出现典型的高能耗区<sup>[9]</sup>。如虎门峡口射流高能耗区。高能耗区的典型特点是单位面积能耗高出附近水域数倍甚至数个量级,因此伶仃洋河口区的峡口等高能耗区消耗大量的传入能量,在能量消耗过程中呈强湍流现象,促使能量消耗与转化。

对珠江河口而言,即使在强风条件下,风的能量占总耗散能不到 10%,但是强风作用下,改变了垂向能耗的量值(可达 1~2 倍),其中河口区能耗增大最明显,如 A1 分区(湾口区)增加了 30%。风能对河口能量输入的响应包括两部分:表面漂移、表面压力做功。输入珠江河口水域的风能是利用模型计算的风剪切力和水面速度计算风能输入量。风能输入可采用下式估算<sup>[1]</sup>:

$$P_w = \frac{1}{T_{\text{year}}} \int_0^{T_{\text{year}}} dt \iint (0.02 - 0.1) \tau_w \cdot U_w dx dy \quad (7)$$

其中  $\tau_w = C_D \rho_a (U_{wx}^2 \mathbf{i} + U_{wy}^2 \mathbf{j})$  式中:  $T_{\text{year}}$  为时间;  $C_D$  为拖曳系数;  $U_w$  为风速;  $U_{wx}$ 、 $U_{wy}$  分别为东西、南北向风速;  $\rho_a$  为空气密度;  $\tau_w$  为风切应力;  $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$  为单位矢量。

用式(7)估算的珠江河口风能量输入量如表 4 所示,同时在表中列出了基于本文模型得到的风剪切力与水面速度计算的风能输入。两种方法对风能输入的估计都表明,虽然强风条件下的风速只是季

风风速的 2 倍,但对水面能量的输入却高出 1 个数量级。表 3 比较了不同计算水域的能量通量,可以看出,即使是强风条件伶仃洋-虎门水域通量变化最大不超过 2%,表明风输入的能量全部耗散在河口区。强风作用改变了水体的垂向结构,增大了流速垂向梯度,从而增大水域垂向涡动黏性能耗。另一方面,强风作用下水体表层掺混剧烈,水体紊动强度,能量耗散加大。以 A1 分区为例,强东北风条件下底摩擦能耗为 59.95 MW,较无风条件下能耗值降低 2.96 MW,降幅为 5%;垂向涡动能耗增加 28.83 MW,消耗绝大部分风能输入能量。

表 4 不同条件下能量输入统计 MW

计算方法	东北季风	西南季风	强东北风	强西南风
理论计算	3.2~16.0	1.6~8.0	31.7~158.7	14.4~71.8
本文模型	5.99	5.26	54.9	23.97

风能输入增大了水体垂向能量耗散,从能耗空间分布看,虽然强风作用加大了珠江伶仃洋河口的垂向涡动扩散,虎门射流等高能耗区仍然存在,表明地貌单元形态阻力形成的能耗空间分布格局不会改变。

## 4 结论

潮汐、风、径流是珠江河口重要的能量来源,这些能量最终都在河口、河网地区传输、消耗。本文基于三维河口海岸水动力学模型计算了珠江河口不同风况下的能量传输与耗散过程。结果表明,对珠江河口而言,潮汐是最重要能量来源,虽然季风作用对河口的能量通量耗散影响相对较小,但是强季风作用下的能量耗散不能忽略。潮汐输入珠江河口巨大的能量沿伶仃洋东、西深槽向珠江河口与三角洲传播,风能输入改变了河口能量通量的振幅和相位,但对各断面能量通量影响不大。风的作用使区域的单位面积能耗增加,而不会改变上述高能耗区的性质。强东北风作用可使河口区垂向涡动耗散项能耗增大 1~2 倍,底摩擦能耗项变幅不大。虽然强季风作用改变了能量耗散组成比例,但不会改变能量耗散的空间分布特征。

## 参考文献:

[ 1 ] ZHONG L, LI M. Tidal energy fluxes and dissipation in the Chesapeake Bay [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26 (6): 752-770.

[ 2 ] HANSEN D V, RATTRAY J M. Gravitational circulation in straits and estuaries [J]. *Journal of Marine Research*, 1965, 23: 104-122.

[ 3 ] WEISBERG R H. The nontidal flow in the Providence River of Narragansett Bay: a stochastic approach to estuarine circulation [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1976 (6): 721-734.

[ 4 ] WANG D P. Wind driven circulation in the Chesapeake Bay, winter, 1975 [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1979 (9): 564-572.

[ 5 ] 刘欢, 吴超羽, 包芸, 等. 一次东北季风过程下珠江口磨刀门河口环流研究 [J]. *海洋工程*, 2008, 26 (2): 102-111. (LIU Huan, WU Chaoyu, BAO Yun, et al. Research on the Modaomen estuarine circulation under a winter monsoon [J]. *The Ocean Engineering*, 2008, 26 (2): 102-111. (in Chinese))

[ 6 ] 包芸, 任杰. 珠江河口西南风强迫下潮流场的数值模拟 [J]. *海洋通报*, 2003, 22 (4): 8-14. (BAO Yun, REN Jie. Numerical simulation of tidal current field under the forcing of southwest wind in the Pearl River Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22 (4): 8-14. (in Chinese))

[ 7 ] 叶荣辉, 宋志尧, 沈正, 等. 珠江口风暴潮数值模拟系统的设计与实现 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2013, 41 (3): 260-264. (YE RongHui, SONG Zhirao, SHEN Zheng, et al. A visualization system for numerical simulation of storm surges in Pearl River Estuary [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2013, 41 (3): 260-264. (in Chinese))

[ 8 ] ZHANG Y L, BAPTISTA A M, MYERS E P. A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. formulation and skill assessment [J]. *Continental Shelf Research*. 2004 (24): 2187-2214.

[ 9 ] 倪培桐. 地形致动力场对珠江河口能量耗散及其作用机制 [D]. 广州: 中山大学, 2010.

[ 10 ] 倪培桐, 韦惺, 吴超羽, 等. 珠江河口潮能通量与耗散 [J]. *海洋工程*, 2011, 29 (3): 67-75. (NI Peitong, WEI Xing, WU Chaoyu, et al. Tidal energy flux and dissipation in the Pearl River Estuary [J]. *The Ocean Engineering*, 2011, 29 (3): 67-75. (in Chinese))

[ 11 ] 方国洪, 曹德明, 黄企洲. 南海潮汐潮流的数值模拟 [J]. *海洋学报*, 1994, 16 (4): 1-12. (FANG Guohong, CAO Deming, HUANG Qizhou. Numerical model of the tidal and current of the South Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16 (4): 1-12. (in Chinese))

[ 12 ] LARSON M, KRAUS N C. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales [J]. *Marine Geology*, 1995, 126: 111-127.

[ 13 ] 倪培桐, 吴超羽, 刘欢. “门”地貌单元的能量耗散和过程机制 [J]. *热带海洋学报*, 2012, 31 (2): 34-41. (NI Peitong, WU Chaoyu, LIU Huan. Energy dissipation and its mechanism induced by “gate” topography [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31 (2): 34-41. (in Chinese))

[ 14 ] 倪培桐, 陈卓英. 基于惯性耗散法的峡口岬角地形能耗分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27 (2): 128-134. (NI Peitong, CHEN Zhuoying. Research on turbulent kinetic energy dissipation induced by throat topography based on inertial dissipation method [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016, 27 (2): 128-134. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-06-26 编辑: 郑孝宇)