

强风作用下珠江黄茅海河口湾的潮能通量与耗散研究

倪培桐^{1,2,3}, 陈卓英^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510630; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510630; 3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510630)

摘 要: 对于河口营养物质及沉积物输运而言, 潮汐和风提供了大量能量来源。基于 SELFE 模型, 建立了珠江河口湾-河口湾的三维数值模型, 分析了黄茅海河口湾在强风及潮流作用下的能量输运及能量耗散问题。研究表明: 黄茅海河口湾的潮能沿深槽向上游银洲湖及河道传播, 风的作用改变了河口能量通量的振幅和相位, 对各断面多潮平均能量通量影响不大。强东北风条件下, 总能耗较无风状态下增加 0.16 ~ 0.8 倍。垂向涡动耗散项能耗为总能耗的 35% ~ 53%, 增大约 0.5 ~ 1.7 倍, 底摩擦能耗项能耗占总能耗 46% ~ 64%, 较无风状态下减少 5%。强风的作用使河口区域的单位面积能耗增加, 垂向涡动能耗增强, 摩擦能耗降低, 但不会改变总能耗的空间分布性质。

关键词: 能量通量; 能量耗散; 强风作用; 黄茅海河口湾

中图分类号: TV139.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0118-07

Effects of strong wind on the tidal energy flux and dissipation in the Huangmaohai Estuary

NI Peitong^{1,2,3}, CHEN Zhuoying^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510630, China;

2. Hydrodynamic Research Key Lab of Guangdong Province, Guangzhou 510630, China;

3. State-province Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510630, China)

Abstract: The tide and wind provide huge energy for the movements of the estuary nutrients and sediments. In this study, a three-dimensional numerical model of the Pearl River Estuary was established to evaluate the effects of wind on the tidal energy flux and dissipation in the Huangmaohai Estuary. The results showed that the tidal wave can propagate along the deep trough to the estuary and delta, the effects of wind changed the amplitude and phase of the energy flux in the estuary, and it had little effect on the average energy flux of each section. The total energy consumption increased 0.16 ~ 0.8 times than that without wind effect. The vertical eddy kinetic energy was 35% ~ 53% of the total energy consumption, it increased by about 0.5 ~ 1.7 times. The friction energy consumption was 46% ~ 64% of the total energy consumption which decreased about 5%. The effects of strong wind would increase unit energy consumption, vertical eddy dynamic energy consumption, reduce friction energy loss, but did not change the spatial distribution pattern of the energy dissipation produced by morphological resistance.

Key words: tidal energy fluxes; tidal energy dissipation; strong wind; The Huangmahai estuary

潮汐、风、波浪、径流、台风暴潮等动力因子从不同的时间和空间尺度向珠江河口输入大量能量, 这些能量对于河口微生物、营养物质与成分及沉积物的运动有重要作用。以潮汐为例, 南海潮波从陆架传入河口的能量主要消耗在河口湾区, 仅小部分能量通过潮波向上游河口网区传播, 潮汐能量通过床面摩擦、内摩擦等作用耗散, 这一物理过程是维持珠江

河口网水道的重要机制。由于珠江河口湾、河口网水道复杂的边界地形影响着其消能特性及动力机制, 并在宏观上表现为特色鲜明的与动力结构相关的高能耗区域, 这些高能耗区的特点是面积很小, 却消耗了大量的外海传入的能量, 如虎门(崖门)等“门”的射流高能耗区等^[1]。除了潮汐外, 风也是河口重要能量来源, 据 Zhong 等^[2]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。Maccready^[3]比较了风和潮汐作用下 Columbia 河口及河口羽的能量耗散。Weisberg^[4]、Wang^[5]等都观测到河口风作用下的两层流结构,表现出表层顺风流动、底层逆风流动特点。通过实测资料、理论分析和模型计算,刘欢等^[6]研究了东北季风作用下珠江河口环流,发现向海的冬季风对河口垂向环流的形成起着重要的作用。风的作用有助于加强径流效果,加大了表层水体向下游的流动,同时底层水体的上溯,形成了稳定的垂向环流。闻平等^[7]在分析磨刀门风力风向与平岗站含氯度资料的基础上,指出北风-东北风对磨刀门水道咸潮入侵有显著的增强作用。包芸等^[8](2003)建立了珠江河口西南风强迫下潮流场的数值模型,发现风对陆架浅海的水流运动影响十分显著,它可以明显改变水流速度的大小和方向,以及物质的输运路径和强度,从而影响地貌沉积。刘雪峰等^[9](2010)发现偏东风致使咸潮入侵增强,而偏北风则减弱咸潮入侵。

珠江河口目前关于风作用下的能量耗散论述尚不多见,本文基于 SELFE 河口海岸数学模型,研究强风作用下的黄茅海河口湾的能量通量与耗散问题。

1 研究区域

珠江河口三角洲由独特的网河区和河口湾区构成。网河区丘陵台地星罗棋布,河网相连,水道纵横,潮流交会。网河区和河口湾区两者通过八个口门相连(自东向西分别为虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门与崖门)。

黄茅海河口湾通过崖门、虎跳门与珠江水系相连,为径流弱、潮流强的河口湾。水下地形单元主要包括三槽三滩和潮沟、岛间深槽和岛间浅滩等次一级的地形单元。三槽即北槽(主槽)、东槽和西槽;三滩即西滩、东滩(大海环浅滩)和拦门浅滩。北槽宽约 300~900 m,深约 5.0~12.4 m。东槽、西槽分布在大忙岛东侧和西侧。拦门沙浅滩:顶部水深 2.4~3.0 m。主槽以东是东滩,主槽以西是西滩,南水岛以北是大海环浅滩(图 1)。

珠江口各口门潮差不大,潮差具有明显的空间差异。八个口门多年平均潮差自中部口门(磨刀门,0.86 m)向东(虎门,1.63 m)、向西(崖门,1.24 m)渐增。黄茅海河口湾的潮汐是不规则半日潮,潮型系数 $F = 1.27 \sim 1.84$ 。上游黄冲站的潮性系数 $F = 1.36$,湾顶西炮台 $F = 1.37$ 。黄茅海河口年均进

潮量为 $4\,608 \times 10^8 \text{ m}^3$,而年径流量近占进潮量的 7%,说明黄茅海是弱径流强潮流为主的河口湾。黄茅海潮流运动的主要形式为往复流。主槽区涨落潮流的轴线几乎近南北走向,三虎以南愈向湾口其流向愈分散。整个海区潮流流速的特征是大潮大于小潮;深槽区大于浅滩区;表层大于底层;落潮流历时大于涨潮流历时,涨潮流速过程线陡峻,落潮平缓。从潮位过程线和流速过程线显示出海区的潮波具有驻波性质。

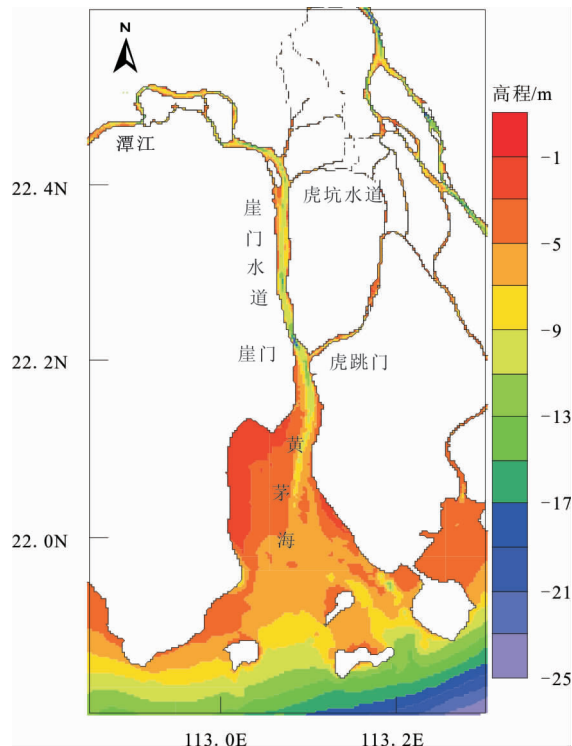


图1 珠江黄茅海河口地形

华南沿海季风气候明显,其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。根据珠江河口气象站统计,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 数据与方法

2.1 珠江河口三维并行数值模型

SELFE 是 M. Baptista 等发展的半隐式欧拉-拉格朗日有限元河口海岸模型^[10]。模型采用三角形或四边形网格离散计算区域,边界适应性好。本文基于 SELFE 建立了珠江河口三维并行数值模型^[11]。模型计算区域范围包括河网区、河口湾区和近海水域,模型计算范围及网格见图 2。模型采用三角形网格,网格数 215232,节点数 124885。垂向采用 S 坐标,采用 10 层变步长垂向网格,表层与底

层相对厚度为 0.05, 层厚向中间过度。

数学模型验证和模拟采用 2001 年 2 月 7 日 14:00–16 日 8:00 实测水文资料, 该时间段内珠江三角洲马口、三水流量为 2 085、667 m³/s, 接近马口、三水进入珠江三角洲的多年平均枯水流量, 是珠江河口典型的枯季时段资料, 模型验证结果参见文献[11–12]。各站点的水位平均绝对误差在 0.03~0.1 m, 不超过 0.1 m。计算与实测的落潮流量相对误差在 0.03%~0.27%, 涨潮流量的相对误差在 0.01%~0.36% 之间。表明模型能较好的反映该区域的水动力特性, 为进一步分析河口地区的能量通量和能量耗散奠定基础。

模型分析考虑夏季、冬季两种风速类型, 根据上川岛多年统计资料, 主要考虑西南季风、东北季风两种类型, 其中西南季风风速取值为上川岛夏季 6、7、8 月平均风速(3.9 m/s, 相当于三级风)。东北季风风速取值为上川岛冬季 12、1、2 月平均风速(4.9 m/s, 相当于三级风)。本文分别取上川岛夏季、冬季风速的 2 倍作为强风风速值, 即模型“强西南风”风速取值为 7.8 m/s(相当于四级风)、模型“强东北风”风速设计为 9.8 m/s(相当于五级风)。

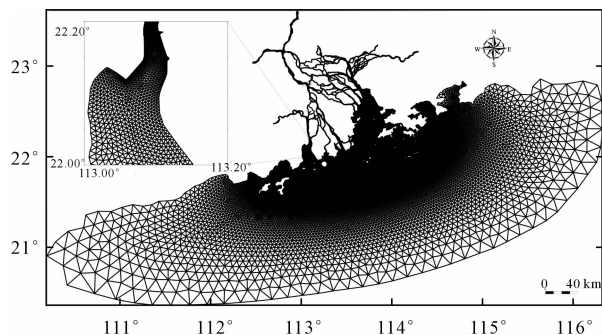


图2 模型计算网格

2.2 潮能通量与能量耗散

潮能通量, 又称能通量密度, 是单位时间通过自海底至海面单位宽度断面的潮能^[11–12]。潮能通量与流速、水深、水位有关。表示为:

$$\rho \vec{U} D (\vec{U}^2 / 2 + g \eta) \quad (1)$$

式中: ρ 为水体密度, kg/m³; D 为海底自海面的总水深, m; $\vec{U}$ 为速度, m/s; η 为水面围绕静止水面的波动值, m; g 为重力加速度, m/s²。

将能量方程对自由表面 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^[2], 分别为:

(1) 水体表面和床面底摩擦耗散:

$$\iint \langle \vec{u}_s \cdot \vec{\tau}_s - \vec{u}_b \cdot \vec{\tau}_b \rangle dS \quad (2)$$

(2) 垂向涡动扩散有关的能耗:

$$\iint \left\{ \frac{1}{T} \int_{-H}^{\eta} K_v \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] dz dt \right\} dS \quad (3)$$

(3) 正压潮能水平扩散:

$$- \iiint \rho \langle K_H \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \rangle dV \quad (4)$$

式中: $u(x, y, z)$ 、 $v(x, y, z)$ 为水流速度, m/s; $\vec{\tau}_s$ 和 $\vec{\tau}_b$ 分别表示表面和床面摩擦力, N; K_H 是水平涡动黏滞系数, m³/s; K_v 垂向涡动黏性系数, m²/s; 角括号代表潮平均。 $\eta(x, y, t)$ 为自由水面高程, m; $h(x, y)$ 为地形深度, m; $\rho(x, y)$ 为水流密度, kg/m³。

3 结果与讨论

3.1 风对河口潮能通量的影响

通过式(1)计算了黄茅海河口湾枯季 7 个潮平均的潮能通量。黄茅海–潭江水域能量通量都是从黄茅海河口湾向上游传播, 潮汐是维持黄茅海–潭江水域的主要能量。图 3 为能量通量与耗散分析断面。“2001.2”枯季(无风条件下)通过断面 H01 传入河口湾的能量通量约为 47.49 MW, 至断面 H02(虎山)减小到 31.56 MW(占断面 H01 的 66%)。到断面 H06(崖门口)能量通量为 15.75 MW, 约占传入能量的 33%。经过江门水道、虎坑水道汉口到断面 H10 断面能量通量变为 5.13 MW, 占传入能量的 11%, 经过断面 H10、H11 的分叉弯曲河道能量通量 1.56 MW(3%), 到长沙站仅有 0.09 MW 的能量通量从断面 12 传出(表 1)。“2001.2”枯季黄茅海–潭江水域通过虎跳门、江门水道汉口传入网河区能量分别为 2.74 MW、0.88 MW。

枯季潮能通量平面分布表明, 无论有风或无风条件下, 沿黄茅海河口湾主槽往北传播, 在崖门汇聚后, 进入银洲湖, 在崖门射流口门处潮能通量最大, 往北潮能通量缓慢回落, 滩地能量通量小(图 4)。能量通量沿程变化显示(图 5), 黄茅海河口湾水面宽度从湾口到湾顶逐渐束窄, 沿程过水面积逐渐减小, 导致能量集聚。能量通量从三角山向崖门逐渐增大, 在崖门附近由于边界突然缩窄, 能量通量出现明显峰值。在进入银洲湖后能量通量逐渐降低。由于纵剖面地形形成波动变化, 能量通量沿程变化也非常复杂。黄茅海河口湾局部地形影响潮能通量的空间分布。

“2001.2” 枯季 (无风条件下) 外海自断面 H01 输入黄茅海 - 潭江水域的能量通量为 47.49 MW; 西南、东北季风条件下, 外海输入黄茅海 - 潭江水域的能量通量分别为 47.6 MW、47.19 MW; 在强西南风、强东北风条件下, 来自外海的能量通量分别为 48.23 MW、47.20 MW; 与“2001.2 枯水” 无风条件比, 能量通量变化最大不超过 2% (表 1)。

3.2 风对河口潮能耗散的影响

结合黄茅海 - 潭江水域动力特征差异及采样断面分布, 把研究区域分成不同分区 (图 3、表 2), 其中 H1 - 1、H1 - 2 为河口湾区; H2 - 1、H2 - 2 分区组成了崖门河口双向射流区域; H3、H4、H5、H6 为

含有多个岛屿、汉道的潮汐河道区。

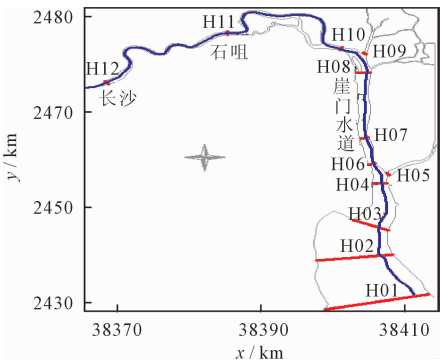


图 3 “黄茅海 - 潭江” 水域能量通量与耗散计算分析断面

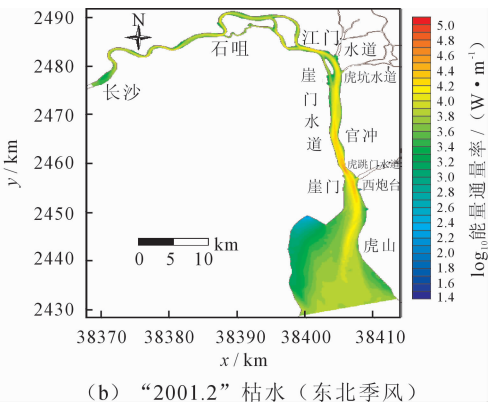
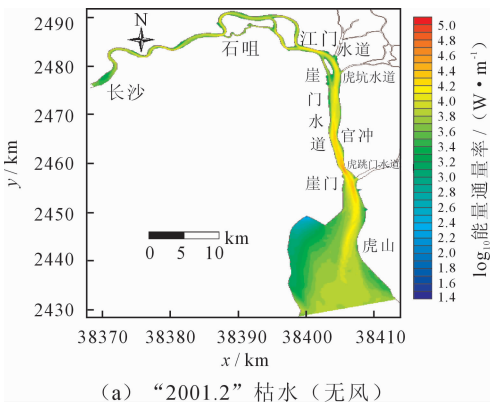


图 4 黄茅海 - 潭江水域单位面积能量通量的多潮平均分布图

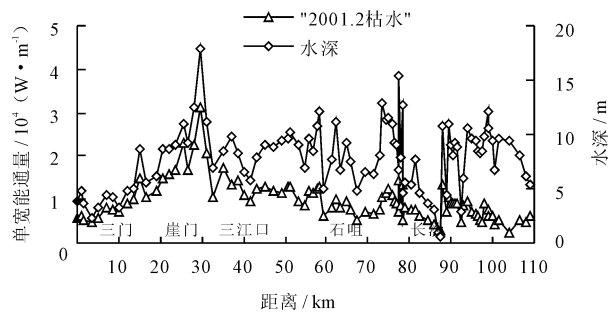


图 5 黄茅海 - 潭江水域深槽单宽能量通量及水深变化图 (三角山 - 长沙)

无风条件及强风条件下, 黄茅海 - 潭江水域能耗分布总体表现出崖门以南的主槽能耗大, 浅滩能耗相对小等特征 (见图 6)。三角山附近的河口湾区单位面积耗散率较低 (约 0.1 MW/km²), 单位面积总能耗散到崖门口附近达到最大值 (约 0.26 MW/km²), 向崖门水道变小, 进入石咀上游弯曲水道的能耗率变大 (约为 0.09 MW/km²), 然后向上游减小。

东北季风、西南季风作用对珠江河口各分区的单位面积总能耗影响不大。以 H1 - 2 为例, 总能耗

增加的量值不到 1%。强西南风、强东北风 (风速为季风风速的 2 倍) 对各分区总能耗影响相对较大, 总能耗增加分别为 8%、24% (表 2)。

表 1 黄茅海河口沿程能量通量统计 (向上游为正) 10⁶W

断面	无风	西南季风	东北季风	强西南风	强东北风
H01	47.49	47.60	47.19	48.23	47.20
H02	31.56	31.40	31.52	31.36	30.50
H03	25.31	25.16	25.42	25.08	24.80
H04	19.68	19.48	19.77	19.36	19.02
H05	2.74	2.73	2.68	2.90	2.25
H06	15.75	15.57	15.89	15.28	15.49
H07	12.35	12.19	12.48	11.91	12.01
H08	8.22	8.07	8.32	7.75	7.75
H09	0.88	0.90	0.83	1.04	0.63
H10	5.13	4.95	5.38	4.29	5.38
H11	1.56	1.40	1.73	0.96	1.78
H12	0.09	-0.06	0.22	0.33	0.55

从分项能耗组成看 (表 3、图 7、图 8), 在无风、季风条件下, 本水域所有分区的底摩擦能耗都是主要能耗项, 占总能耗的 73% ~ 77%。其次是垂向涡

表 2 黄茅海－谭江区域分区及总能耗统计							MW
分区	组成断面	分区面积/km ²	无风	东北季风	西南季风	强西南风	强东北风
H1-1	H01、H02	111.24	12.88	12.86	13.01	13.78	15.96
H1-2	H02、H03	60.51	5.19	5.22	5.23	5.48	6.70
H1-3	H03、H04	31.89	4.39	4.46	4.37	4.47	5.59
H2-1	H04、H05、H06	6.87	1.35	1.37	1.34	1.36	1.64
H2-2	H06、H07	6.67	1.74	1.76	1.73	1.74	2.02
H3	H07、H08	21.52	2.79	2.84	2.78	2.91	3.61
H4	H08、H09、H10	9.40	0.78	0.81	0.78	0.83	1.13
H5	H10、H11	23.24	2.06	2.15	2.05	2.13	2.94
H6	H11、H12	16.94	0.92	1.00	0.93	1.03	1.67

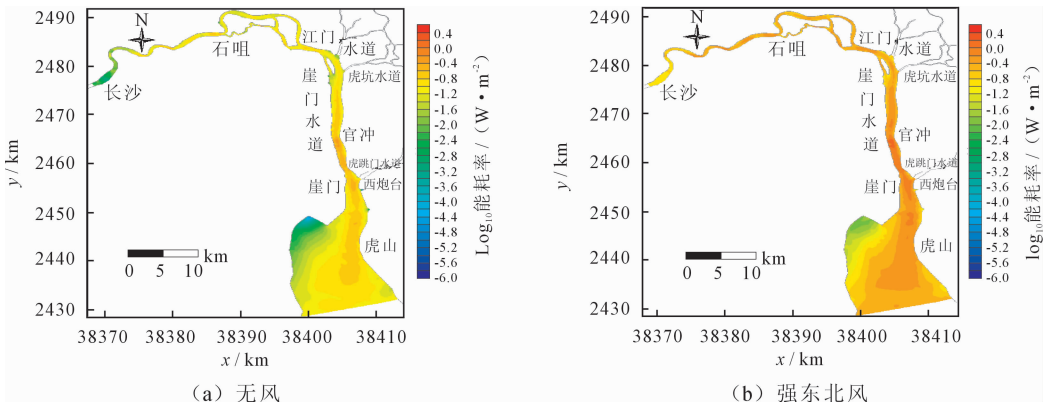


图 6 黄茅海－谭江水域单位面积能量耗散多潮平均分布图

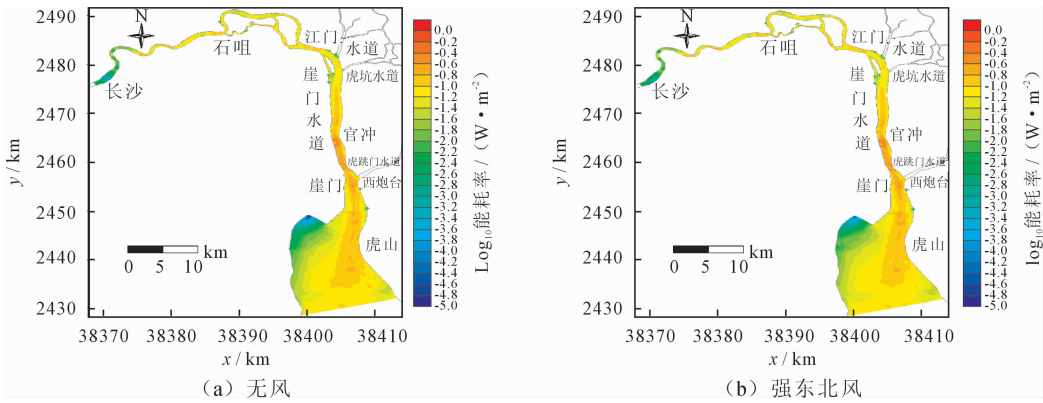


图 7 黄茅海－谭江水域底摩擦能耗多潮平均分布图

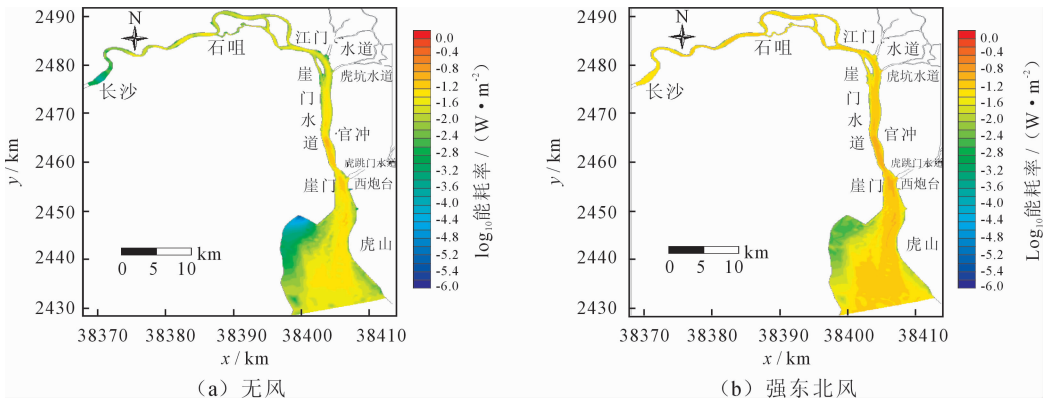


图 8 黄茅海－谭江水域垂向涡粘性能耗多潮平均分布图

表 3 黄茅海 – 谭江区域各分项能耗统计

水文 组合	分区	各项能耗/10 ⁶ W			风能输入 W	总能耗 $S = F + V + H$	各项能耗量占总能耗的百分比 /%		
		底摩擦 能耗 F	垂向涡动 能耗 V	水平涡动 能耗 H			底摩擦 能耗 F/S	垂向涡动 能耗 V/S	水平涡动 能耗 H/S
无风	H1 – 1	9.425	3.451	0.002		12.880	73.180	26.800	0.020
	H1 – 2	3.954	1.236	0.002		5.190	76.150	23.810	0.040
	H1 – 3	3.306	1.076	0.005		4.390	75.370	24.520	0.110
	H2 – 1	1.026	0.312	0.007		1.350	76.280	23.230	0.490
	H2 – 2	1.319	0.415	0.004		1.740	75.900	23.880	0.220
	H3	2.096	0.688	0.005		2.790	75.140	24.670	0.190
	H4	0.601	0.177	0.004		0.780	76.860	22.650	0.490
	H5	1.597	0.449	0.017		2.060	77.420	21.760	0.820
	H6	0.706	0.211	0.004		0.920	76.620	22.950	0.430
东北季风	H1 – 1	9.282	3.572	0.002	0.875	12.860	72.200	27.790	0.020
	H1 – 2	3.928	1.289	0.002	0.409	5.220	75.270	24.700	0.040
	H1 – 3	3.330	1.124	0.005	0.269	4.460	74.690	25.210	0.110
	H2 – 1	1.036	0.324	0.007	0.068	1.370	75.800	23.710	0.490
	H2 – 2	1.328	0.426	0.004	0.073	1.760	75.570	24.220	0.210
	H3	2.112	0.725	0.005	0.185	2.840	74.320	25.500	0.180
	H4	0.610	0.192	0.004	0.068	0.810	75.660	23.850	0.490
	H5	1.634	0.495	0.017	0.166	2.150	76.140	23.050	0.810
	H6	0.731	0.261	0.004	0.089	1.000	73.340	26.230	0.430
强东北风	H1 – 1	9.099	6.860	0.002	4.789	15.960	57.010	42.980	0.010
	H1 – 2	4.098	2.602	0.002	2.378	6.700	61.150	38.820	0.030
	H1 – 3	3.518	2.064	0.005	1.484	5.590	62.960	36.940	0.090
	H2 – 1	1.087	0.550	0.007	0.371	1.640	66.120	33.450	0.440
	H2 – 2	1.378	0.633	0.004	0.401	2.020	68.380	31.420	0.190
	H3	2.190	1.418	0.006	1.020	3.610	60.590	39.230	0.170
	H4	0.641	0.488	0.005	0.380	1.130	56.520	43.030	0.450
	H5	1.700	1.225	0.019	0.886	2.940	57.750	41.600	0.640
	H6	0.758	0.910	0.006	0.553	1.670	45.270	54.400	0.330

动耗散项,占总能耗的 21% ~ 26%。水平涡动能耗最小,多数情况下在总能耗中的比重小于 1%。在强风条件下,风通过水面输入能量,水体流速的垂向梯度变大,垂向涡动能耗散项能耗增强(图 9)。其中强东北风条件下,垂向涡动能耗为总能耗的 35% ~ 54%,底摩擦能耗占总能耗 45% ~ 66%。

3.3 讨 论

珠江河口的潮能主要来自南海潮波的传播,进入珠江河口的潮汐能量不断向上游河道传递,能量通量包括由动能和势能两通量部分,多潮平均的潮

能通量与流速、水深、水位有关。南海潮波进入黄茅海河口湾后,在地形作用下,潮能逐渐福聚,在湾顶达到最大。由于主槽水深、流速都较大,潮能通量较大;由于滩地流速较小、水体浅,潮能通量较小。潮流与河口不同尺度的地貌形态相互作用,形成多尺度的与地貌形态相关的动力结构^[11-13]。

黄茅海河口典型的地貌单元包括(1)崖门、虎跳门等峡口地貌单元;(2)岛屿地貌单元,如黄茅岛、三角山、大襟岛等岛屿地形;(3)腰鼓岬角、铜鼓岬角等;(4)弧形海岸,岬角之间形成弧形海岸。相

应于黄茅海河口的地貌特征,黄茅海河口形成一系列河口小尺度(相对于大洋环流和中尺度涡旋)动力结构包括密度环流、峡口射流、由河口开尔文波或涡度变化引起的河口水平环流以及河口大尺度涡旋^[13]。

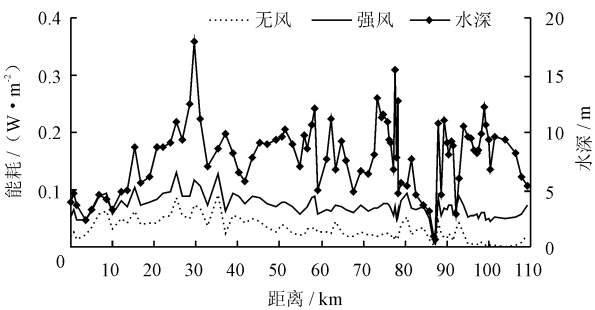


图9 黄茅海-潭江水域深槽单位面积垂向
涡动黏性能量耗散纵向分布

与明渠水流相比,黄茅海河口湾-潭江水域存在的地形突变引起的动力结构,这种动力结构在流速分布上表现出流速平面分布差异,该分布差异出现高流速区和高流速梯度特征。由于底摩擦能耗表示为 $C_D |\vec{u}_b|^3$ 或 $\vec{u}_b \cdot \vec{\tau}_b$, 流速的微小变化将导致底摩擦能耗较大甚至是数量级的变化。而流速梯度增大,流速的不均性变大,会进一步导致涡动湍流能耗增大。由于能量耗散以底摩擦和垂向涡动耗散为主,河口深槽和浅滩流速分布的不均匀,将导致深槽和浅滩能耗的巨大差异。图7显示黄茅海河口湾-潭江水域深槽能耗与周边浅滩差值为1~2个数量级。从空间分布上看,形成了崖门双向射流高流速区域等典型的高能耗区。对于珠江三角洲而言,峡口等高能耗区的意义在于潮流与地形相互作用产生强湍流,伴随能量消耗与转化,从宏观上表现出潮波的变形及动能与势能的转换。

对于黄茅海河口湾-潭江水域而言,即使在强东北风条件下,风输入的能量占总耗散能不到16%~26%,强风作用改变了垂向能耗的量值(可达0.5~1.7倍),其中河口区能耗增大最明显,其中H1-1分区(湾口区)增加23%。水体对风能对河口能量输入的响应包括2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。风能输入估算计算^[2]:

$$P_{wind} = \frac{1}{T_{year}} \int_0^{T_{year}} dt \iint (0.02 - 0.1) \vec{\tau}_w \cdot \vec{U}_w dx dy$$

(5)

其中: $\vec{\tau} = C_D \rho_a (U_{wx}^2 \vec{i} + U_{wy}^2 \vec{j})$; U_{wx} 、 U_{wy} 、 ρ_a 分别为东

西、南北向风速、空气密度; D_D 为拖曳系数。

用式(5)及本文数学模型两种方法对风能输入的估计都表明(表4),虽然强风条件风速是季风风速的2倍,但对水面能量的输入却高出1个数量级。不同计算条件下水域的能量通量结果表明,即使是强风条件,但黄茅海河口湾-潭江水域通量变化最大不超过2%,表明风输入的能量绝大部分耗散在河口区,风的作用增大了流速垂向梯度,从而增大水域垂向涡动粘性能耗。但对比无风与强风条件下总能耗空间分布图,可以看出崖门双向射流等高能耗区仍然存在,表明大区域均匀风能输入不会改变地貌单元形态阻力形成的能耗空间分布格局。

表4 风对黄茅海河口湾能量输入统计 10^6 W

方法	东北季风	西南季风	强东北风	强西南风
公式(5)	0.7~3.4	0.3~1.7	6.7~33.3	3.0~15.1
本模型计算	2.2	1.16	12.26	5.21

4 结 论

本文基于SELFE模型,建立了珠江河网-河口湾的三维数值模型,分析了风作用下的黄茅海河口湾的能量通量与耗散。

(1)研究表明南海潮波进入黄茅海河口湾后,在地形作用下,潮能逐渐富聚,在湾顶达到最大。由于主槽水深、流速都较大,潮能通量较大;由于滩地流速较小、水体浅,潮能通量较小。从多潮平均的角度,风的作用对黄茅海河口湾各断面能量通量变化不大。

(2)风输入的能量绝大部分耗散在河口区,风的作用增大了流速垂向梯度,从而增大水域垂向涡动粘性能耗。强东北风条件下,总能耗较无风状态下增加0.16~0.8倍。垂向涡动耗散项能耗为总能耗的35%~53%,增大约0.5~1.7倍,底摩擦能耗项能耗占总能耗46%~64%,较无风状态下减少5%。强风的作用使河口区域的单位面积能耗增加,垂向涡动能耗增强,摩擦能耗降低,大区域均匀风能输入不会改变地貌单元形态阻力形成的能耗空间分布格局。本文的研究有助于理解珠江河口宏观动力现象,提高我们对珠江河口动力过程的认识。

参考文献:

[1] 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.

大或减少的规律仍然明显存在。

(4)为保持渭河综合整治后下游防御洪水条件有所改善的治理成果,建议进一步采取综合措施将潼关高程控制在 325.60 ~ 325.69 m 以下^[13],继续减少渭河下游泥沙淤积,改善河道行洪条件,部分恢复渭河下游河道生态功能,在一定程度上降低沿岸区域洪水灾害风险,进一步提高渭河下游综合防洪能力,为关中-天水经济区发展提供安全环境。

参考文献:

- [1] 钱意颖,叶青超,曾庆华,等. 黄河干流水沙变化与河床演变[M]. 北京:中国建材工业出版社,1993.
- [2] 曹如轩,雷福州,冯普林,等. 三门峡水库淤积上延机理的研究[J]. 泥沙研究,2001,(2):37-40.
- [3] 张金良,王育杰,韦春侠,等. 非汛期潼关高程与三门峡水库运用关系分析[J]. 水利水电技术,2002,33(6),54-58.
- [4] 胡一三,张金良. 三门峡水库运用方式原型试验研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.
- [5] 王平,姜乃迁,侯素珍,等. 三门峡水库原型试验冲淤效果分析[J]. 人民黄河,2007,29(7):22-24.

- [6] 姜乃迁,李文学,张翠萍,等. 黄河潼关河段清淤关键技术研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2004. 6.
- [7] 林秀芝,姜乃迁,田勇. 黄河三门峡库区东垆湾裁弯对潼关高程影响的分析[J]. 水利水电技术,2004,35(8):14-16.
- [8] 武彩萍,李远发. 黄河小北干流放淤模型试验研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2007.
- [9] 石长伟,张英,毕银霞. 2009年桃汛期调水调沙对潼关高程的影响[J]. 人民黄河,2012,32(12):66-67+70.
- [10] 潼关高程控制及三门峡水库运用方式研究项目组. 潼关高程控制及三门峡水库运用方式研究[R]. 郑州:黄河水利科学研究院,2005. 9.
- [11] 袁铮,赵海镜,梁林江,等. 渭河下游河道泥沙淤积现状及趋势分析[J]. 人民黄河,2016,38(1):19-21.
- [12] 石长伟,张英,马晓华. 三门峡水库运用方式对陕州区的影响及治理对策[C]//. 第八届全国泥沙基本理论学术讨论会论文集,南京:河海大学出版社,2011:458-463.
- [13] 冯普林,石长伟,张广林. 渭河“2003”洪水灾害及其减灾措施的分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2004,2(1):44-49.

(上接第124页)

- [2] Zhong L, Li M. Tidal energy fluxes and dissipation in the Chesapeake Bay[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(6):752-770.
- [3] Maccready P, Banas N S, Hickey B M, et al. A model study of tide- and wind-induced mixing in the Columbia River Estuary and plume[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(1):278-291.
- [4] Weisberg R H. The nontidal flow in the Providence River of narragansett bay: A stochastic approach to estuarine circulation[J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 6(5):721-734.
- [5] Wang D P. Wind driven circulation in the chesapeake bay, winter, 1975[J]. Journal of Physical Oceanography, 1979,9(3):564-572.
- [6] 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.

- [7] 闻平,陈晓宏,刘斌,等. 磨刀门水道咸潮入侵及其变异分析[J]. 水文,2007,27(3):65-67.
- [8] 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.
- [9] 刘雪峰,魏晓宇,蔡兵,等. 2009年秋季珠江口咸潮与风场变化的关系[J]. 广东气象,2010,32(2):11-13.
- [10] Zhang Y, 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(18):2187-2214.
- [11] 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.
- [12] 倪培桐,韦惺,刘欢. 珠江河口潮能及其耗散的空间分布[J]. 中山大学学报(自然科学版),2012,51(1):128-132.
- [13] 吴超羽. 黄茅海河口小尺度动力结构及其沉积作用[J]. 中山大学学报(自然科学版),1995,34(2):86-94.