



基于浮标站观测的磨刀门洪枯季径潮 动力作用规律及相关性分析

方神光¹, 崔丽琴²

(1. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510635; 2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 为揭示磨刀门主要动力因子对潮流运动的作用规律, 采用主潮通量算法计算洪枯季半月不同时间尺度下的潮流动力特征值, 采用多元线性回归法对特征值的相关性进行拟合分析。结果表明, 磨刀门水道内平均落潮流速洪季比枯季总体大约 14%, 但涨潮平均流速仅为枯季一半; 水道内洪季余流流速很大, 枯季可忽略不计; 口门外东汊和西汊涨潮流态洪季存在相互顶托, 枯季均为西南向, 洪枯季余流流速西汊均大于东汊, 近底层水深范围存在逆时针半环流结构, 且枯季尤为明显。潮汐动力和海面风对水道内余流影响较小, 径流动力洪季影响显著、枯季影响很小。由于洪季径流动力强劲, 东汊和西汊净潮通量变化规律一致; 枯季磨刀门水道净通量主要输运至东汊水域, 随沿岸流朝西南方向输运进入西汊, 然后随离岸流朝南侧外海方向输出, 符合口门外逆时针半环流结构的输运特征。

关键词: 磨刀门; 径潮动力; 潮周期; 半环流结构; 洪枯季

中图分类号: U612; P731.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0015-08

Action law and correlation analysis of river-tide dynamics during flood and dry season in Modaomen based on buoy stations observation

FANG Shengguang¹, CUI Liqin²

(1. Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China;
2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

Abstract: To reveal the effect on tidal flowing by main dynamic factors in the Modaomen estuary, we use a method of main tidal flux algorithm to calculate characteristics of tidal flowing under different time scales in half month of flood and dry seasons, and apply the method of multiple linear regression to fit their correlation. The results show that vertical averaged velocities during ebb period in Modaomen waterway in flood season is about 14% higher than those in dry season, and only about half of those during flood period. Residual velocities in the waterway during flood season are rather large and can be ignored during dry season. There is mutual collision of rising currents between the east and west branches outside the estuary of the waterway during flood season, while both point to the direction of southwest during dry season, and residual velocities in the west branch are more than those in the east constantly. Regardless of seasons, there is a counterclockwise semi-circular flowing structure close to seabed outside the estuary, more apparently during dry season. The impact of tidal power and wind on residual currents in the waterway are small, while runoff power takes position during flood season and ignored during dry season. The runoff power is strong during flood season, and the tidal fluxes of the east branch and the west branch are consistent. During dry season, net tidal flux from the waterway is mainly transported to the east branch, following southwest coastal current and entering the western branch, and then is exported towards the south of outer sea with offshore tidal current, which is consistent with the structural characteristics of the counterclockwise semi-circulation outside during dry season.

Keywords: Modaomen estuary; river-tide dynamis; tidal cycle; semi-circular flowing structure; flood and dry season

收稿日期: 2023-08-30

作者简介: 方神光 (1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事河口海岸动力学方面的研究。

磨刀门水道及口门随珠江三角洲发育而发展，具有“洪淤枯冲”的季节性冲淤规律，口门径流动力强、潮流动力弱有利于河口淤积^[1]。20世纪90年代末，刘岳峰等^[2]基于历年遥感数据证实了珠江河口泥沙西南输移且河口湾西部淤积大于东部的特征，指出人工围垦速度已经略微超出滩涂的自然淤积速率。21世纪初，大规模采沙、围垦和导堤建设不仅使磨刀门水道由20世纪80年代前的淤积转为冲刷^[3]，磨刀门口门朝海推进，由径流优势型转为河流-波浪型河口，水道内落潮动力增强、涨潮动力减弱，口门外波浪动力增强致使拦门沙侵蚀并淤高^[4]，导致其排洪能力减弱，但洪季强劲的径流动力仍维持了支汊的发育^[5]。2000年后，针对咸潮入侵对供水安全的威胁及航道维护需要，提出了枯季最小压咸流量和最佳时机^[6-8]，揭示了河床和拦门沙演变等与咸潮上溯距离和含氯度等的定性和定量关系^[9-13]，遵循口门水动力和地貌演变趋势提出了口门西汊作为主航道的双导堤治理方案^[14]等。

近年的研究表明，磨刀门口外海域冬季较夏季具有更为稳定的西南向沿岸流，夏季主要影响动力为径流和风，冬季主要是东北季风^[15]；磨刀门水道内春、夏季日均水位下降主要由挖沙引起，秋冬日均水位上升主要原因是围垦和海平面抬

升^[16]；磨刀门河口整治工程实施后，网河区采沙引起河口段潮汐动力增强^[17-18]，磨刀门水道内由淤积趋势转为冲刷趋势^[19]，波浪动力作用下的拦门沙外坡洪淤枯冲，内坡洪枯季均为冲刷^[20]。因此，磨刀门的滩槽发育是径流、潮汐、波浪和风等动力耦合作用的结果。本文拟从近年洪季和枯季实测半月时段内的分层水文观测数据，阐明磨刀门口内外潮流动力特征及季节差异，揭示磨刀门水道内径潮动力等对潮周期的潮流运动的作用规律。

1 研究区域及数据收集

1.1 研究水域

珠江河口及磨刀门局部形态见图1，西江和北江在思贤滘相汇后注入西、北江三角洲，其中马口站在洪季和枯季的当前分流比分别为77.0%和82.4%^[21]。珠江流域洪水径流经由河口八大口门出海，以磨刀门水沙分配比最大^[22]。20世纪末，磨刀门经整治后形成磨刀门水道为主、洪湾水道为支的一主一支格局，口门向外延伸超过10.0 km，直接面向南海。口外拦门沙呈扇形发育，2005年6月大洪水冲破口门拦门沙，形成东、西两汊^[23]。近10年来，由于口门采沙，磨刀门口门由21世纪初的东、西两汊与中心拦门沙并存格局，演变为拦门沙基本消失，总体呈单一槽道格局^[24]。

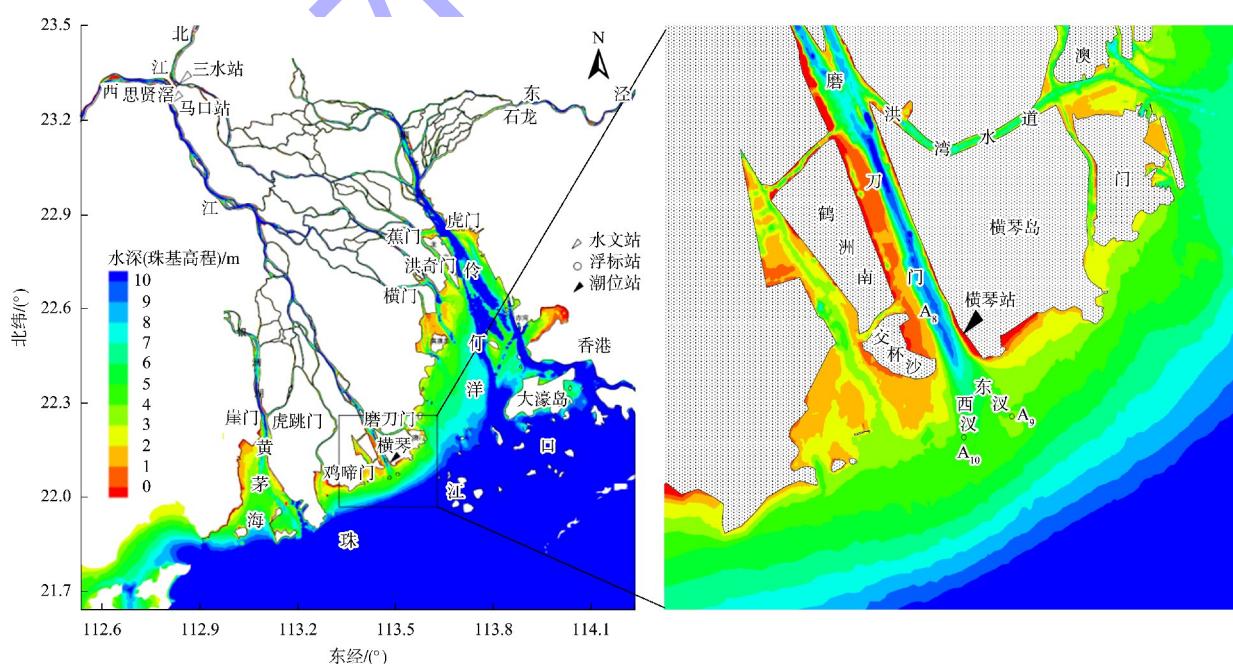


图1 珠江河口及站点分布

1.2 资料来源及水文特征

本文数据来源于珠江水利委员会水文局布置于磨刀门水域3座浮标站, 即A₈~A₁₀站, 3座浮标站分别用于分析口门内磨刀门水道、口门外侧东侧支汊和西侧主航道水域的径潮动力和潮通量变化特征。其中A₈站位于磨刀门水道内, 平均水深约8.0 m; A₉、A₁₀站位于口外水域, A₉站布置在东汊, 平均水深约3.5 m, A₁₀站布置在西汊, 平均水深约4.5 m; 结合近年磨刀门水域整体实测水深(图1), 呈现出磨刀门水道水深显著大于口门外侧、西汊主干水深大于东汊的特征, 近年急剧萎缩的拦门沙由东侧逐渐缓慢恢复并向西南向拓展, 其分布态势和演变与以往观测基本一致。各浮标站均使用声学多普勒流速剖面仪-浪龙1 MHz采集流向、流速、水深等数据, 仪器垂向分辨率为0.3~0.5 m/层, 垂向测量范围为0.41~25.00 m, 采样间隔为20 min。

洪季观测时段为2019-07-16—2019-07-31, 枯季观测时段为2018-12-21—2019-01-06, 洪季和枯季观测时间均为16 d, 按珠江河口潮周期约24.8 h, 可分为15个完整潮周期。观测时段内, 上游马口站和磨刀门口门横琴站上游来流量-口门潮差变化过程见图2。可以看出, 横琴站潮周期平均潮差最大值洪季为1.54 m、枯季为1.55 m, 均为大潮期。上游马口站洪季流量总体呈减小趋势, 由第3个潮周期最大的2.67万m³/s减小至第15个潮周期的

1.09万m³/s; 枯季马口站平均流量约4 200 m³/s, 变化幅度不大。

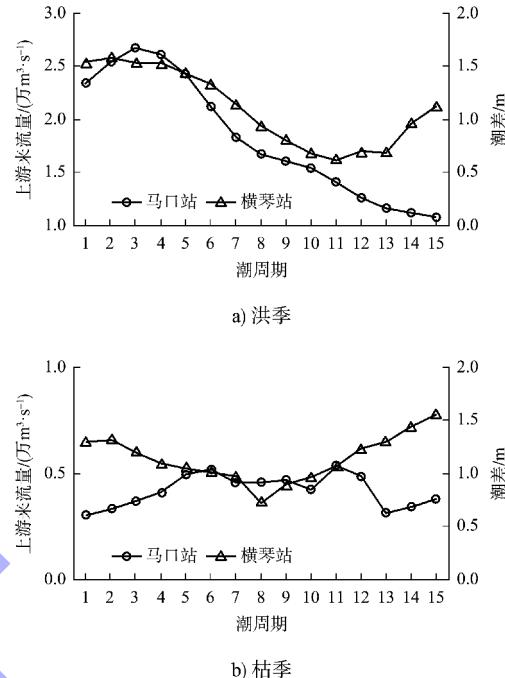


图2 同步观测期间上游来流量-口门潮差变化过程

A₁₀站观测了海面以上2 m的风速、风向数据, 采用的设备型号为GILL GMX500风速风向仪, 观测频次为10 min。观测期间洪、枯季潮周期平均风矢量见图3。可以看出, 洪季以东南风—西南风为主, 最大潮周期平均风速为6.74 m/s, 西南风出现在第15个潮周期; 枯季以北风为主, 最大潮周期平均风速9.68 m/s, 正北风出现在第10个潮周期; 枯季风速显著大于洪季。

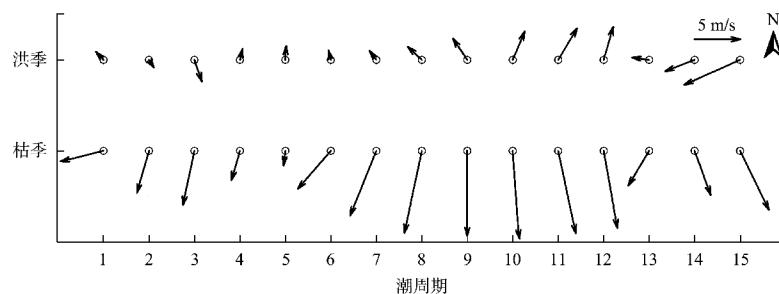


图3 A₁₀站海面潮周期平均风速矢量图

1.3 研究方法

引入主潮通量断面概念^[25]精准计算潮流特征值。主潮通量断面对应潮流椭圆短轴, 通过该断

面的单宽潮通量最大(涨潮通量与落潮通量之和), 断面两侧潮流矢量定义为涨潮流或落潮流。方法是任选1个与N轴正向夹角为θ₁的断面, 在分析

时间 t_m 内, 通过该断面的单宽总潮通量 $F_{n\theta_1}$ 的计算公式为:

$$F_{n\theta_1} = \sum_{j=1}^m F_j = \sum_{j=1}^m \int_{t_{j-1}}^{t_j} Q_i dt = \sum_{j=1}^m \int_{t_{j-1}}^{t_j} |v_i h_i| dt \quad (1)$$

式中: i 为时刻编号; j 为任一涨潮时段或落潮时段编号; θ_1 为任一断面与 N 轴正向夹角, ($^\circ$); F_j 为任一潮段的单宽通量, m^3/m ; m 为涨落潮时段的总次数; Q_i 为 i 时刻的单宽流量, $m^3/(s \cdot m)$; v_i 为 i 时刻的流速, m/s ; h_i 为 i 时刻的水深, m ; t_j 、 t_{j-1} 分别为涨落潮段起、止时刻。在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围按一定方向和角度内选取不同断面, 即可计算出通过不同短轴断面的单宽总潮通量 $F_{n\theta_1}, F_{n\theta_2}, \dots, F_{n\theta_k}, \dots, F_{n(\theta_1+180^\circ)}$, 其中最大值对应的短轴即为主潮通量断面, 将断面两侧潮流矢量分解到 N 轴和 E 轴, 沿时间轴积分求出潮周期内的时段涨(落)平均流速和余流流速。此处余流为沿水深和时间的平均, 其计算模式概化为:

$$\bar{u}_0 = \frac{1}{h} \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h v_{in} dh dt \quad (2)$$

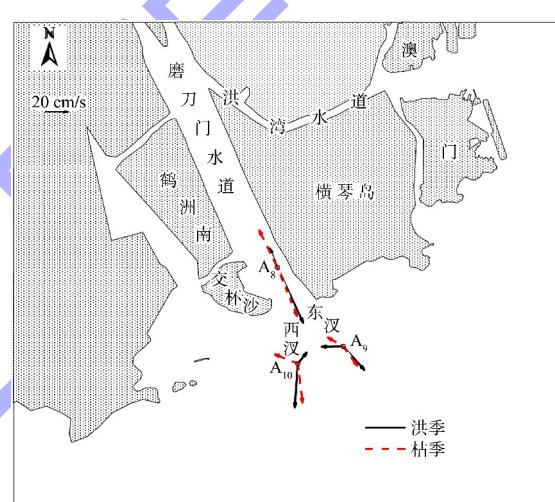
式中: \bar{u}_0 为欧拉余流流速, m/s , 反映观测点位置的净输运; v_{in} 为各时刻观测的潮流矢量, m/s ; T 为计算时间, s ; h 为计算时间的平均水深, m ^[26]。

2 磨刀门洪枯季半月整体潮流特征

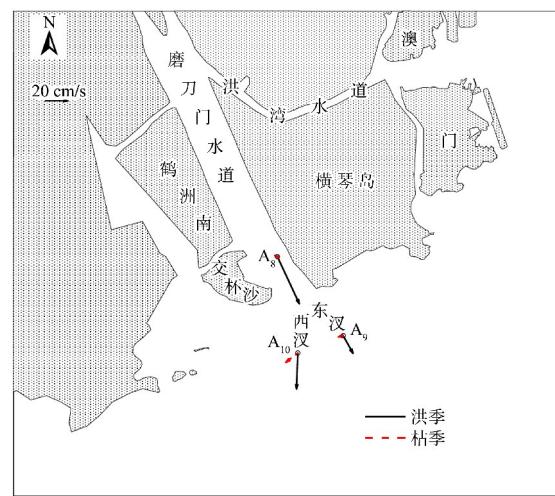
2.1 半月整体潮流特征

磨刀门口内外浮标站洪季和枯季半月垂向平均下的时空特征值见表 1, 其中 A_8 站(磨刀门水道)、 A_{10} 站(西汊)和 A_9 站(东汊)半月垂向平均涨落潮流和余流矢量图见图 4。洪季和枯季, 磨刀门海域总体呈涨潮流朝北、落潮流朝南且磨刀门水道内流速大于口门外海的特征。洪季的上游洪水径流下泄动力显著增强, 磨刀门水道内洪季涨潮流速仅为枯季一半; 洪季落潮平均流速比枯季大约 14.0%; 洪季余流流速达 45.8 cm/s, 指向口外,

枯季很小可忽略不计; 受水道岸线约束, 涨、落潮主流向不随季节变化。口门外海涨潮流向洪季呈东汊西偏、西汊东偏, 东汊和西汊呈相互顶托态势; 枯季口门外海受潮汐作用控制, 东汊和西汊涨潮流态均为 WSW 向; 口门外落潮流态主要受制于潮汐动力和槽沟走向, 洪、枯季差异不大。口门外余流受洪水径流影响明显, 东汊和西汊洪季余流流速分别为 17.7 和 31.7 cm/s, 显著大于枯季, 洪季余流以 S 向为主, 枯季为 WSW 向; 显然, 磨刀门口门外海余流洪季受控于洪水径流作用, 枯季则主要受西南向沿岸流影响。



a) 涨落潮矢量图



b) 余流矢量图

图 4 磨刀门洪枯季流速及流态特征

表1 浮标站洪枯季半月垂向平均潮流特征值

时段	站点	涨潮流		落潮流		余流		历时占比/%		潮通量占比/%	
		流速/(cm·s⁻¹)	流向/(°)	流速/(cm·s⁻¹)	流向/(°)	流速/(cm·s⁻¹)	流向/(°)	涨潮流	落潮流	涨潮	落潮
洪季	A ₈	18.0	338	53.8	155	45.8	155	11.2	88.8	4.4	95.6
	A ₉	18.9	269	28.0	138	17.7	151	26.5	73.5	17.7	82.3
	A ₁₀	12.6	39	38.7	184	31.7	182	14.3	85.7	5.0	95.0
枯季	A ₈	36.4	334	46.3	158	2.4	297	58.2	41.8	55.2	44.8
	A ₉	15.6	300	21.1	144	4.4	256	64.2	35.8	61.9	38.1
	A ₁₀	21.7	292	34.7	173	13.4	232	61.4	38.6	49.4	50.6

洪季和枯季磨刀门水道及口外水域半月垂向平均涨潮流和落潮流历时占比和潮通量占比见表1, 两者之差见表2, 均为涨潮流特征值减去落潮流特征值。可以看出, 磨刀门水道及口外水域洪季绝大部分时间处于落潮流状态; 枯季, 口内外水域反转为涨潮流占优, 磨刀门水道和东汉水域潮流通量净上溯, 西汉水域涨、落潮通量相当。枯季时段内, 上游马口站平均下泄径流达4 200 m³/s, 显著大于压咸流量, 但磨刀门水道内潮流通量仍呈上溯趋势, 原因与磨刀门水道河床下切和口门拦门沙消失密切相关; 另外, 枯季西汉涨、落潮通量基本平衡, 磨刀门水道内潮通量净上溯主要来自东汉, 因此东侧浅滩的冲刷加深将增强磨刀门水道内潮流的上溯动力。

表2 珠江河口浮标站历时及单宽潮量特征

时段	站点	涨落潮历时占比之差/%	单宽涨落潮量占比之差/%
洪季	A ₈	-77.6	-91.2
	A ₉	-47.0	-64.5
	A ₁₀	-71.4	-90.1
枯季	A ₈	16.5	10.3
	A ₉	28.5	23.7
	A ₁₀	22.7	-1.3

2.2 洪枯季水深分层余流特征

浮标站半月时段平均分层余流矢量分布见图5。可以看出, 洪季洪水径流动力增强, 驱使磨刀门水道和西汉全水深(用H表示, 为站点半月时段的平均水深)范围的水沙朝外海方向净输出, 如A₈站分层余流矢量均为SSE向, A₁₀站分层余流矢量均为S向。枯季磨刀门水道内近表层水深范围(0~0.4H)净通量指向口外, 中、底层(0.4H~1.0H)净通量以上溯为主; 口外西汉表层和中层

(0~0.7H)净通量朝西侧净输出, 近底层范围(0.7H~1.0H)呈离岸流特征。口门外东汉(A₉站)余流矢量洪季和枯季均呈表层指向口外、底层指向口内的反向输运特征, 径流动力增强使朝口外净输运的水深层范围显著扩大。因此不论洪季或枯季, 磨刀门口门外水域近底层净通量方向始终呈东汉指向西北侧上游、西汉指向南侧外海的逆时针半环流特征。

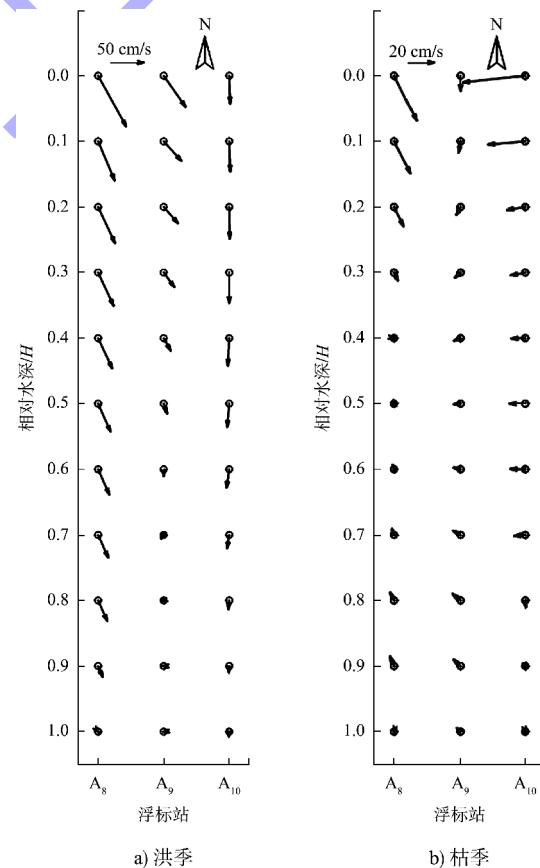


图5 磨刀门浮标站半月平均垂向余流矢量图

垂向分层落潮流历时占比见图6。可以看出, 洪季磨刀门水道和西汉全水深均为落潮优势流(落

潮流历时占比大于 50%），东汉仅表、中层为落潮优势流；枯季磨刀门水道表层仍为落潮优势流，中、底层水深为涨潮优势流（涨潮流历时大于 50%），东汉全水深都为涨潮优势流；西汉近底层为落潮优势流，表、中层为涨潮优势流。因此不论洪枯季，东汉近底层水域均为涨潮优势流、西汉均为落潮优势流；尤其在枯季，东汉和西汉近底层水域落潮流历时占比分别为 20% 和 77%，该逆时针半环流结构尤为明显。

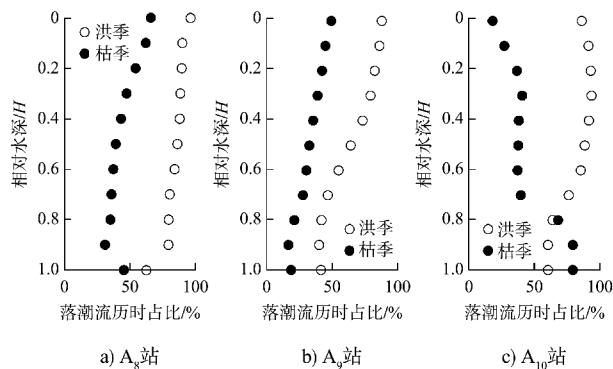


图 6 磨刀门口门测站水深分层落潮流历时占比分布

3 磨刀门水道径潮动力因子作用规律分析

3.1 径潮动力作用的线性回归定量分析方法

磨刀门水道内潮流运动受岸线走向约束，涨落潮流主方向和余流方向基本稳定，但水道内流速大小受径流动力和外海潮汐动力影响显著。为探讨潮汐动力、径流动力、海面风和其他动力因子对磨刀门口门水道内潮流流速的作用规律，结合马口站流量和横琴水文站潮差数据，采用线性回归法拟合潮流运动特征值与主要动力因子的关系，线性回归方程为：

$$v_{ave} = a\Delta z + bQ + cv_{wind} + d \quad (3)$$

式中： v_{ave} 为潮周期垂向平均流速或余流流速，m/s； Δz 为潮周期平均潮差，m； Q 为径流量， m^3/s ； v_{wind} 为潮周期平均风速，m/s； a 、 b 、 c 、 d 为对应动力因子对 v_{ave} 值的贡献权重。潮周期垂向平均涨潮流速、落潮流速和余流流速采用 1.3 节的方法计算得到，潮动力采用横琴岛站潮周期平均潮差 Δz 代表，径流动力采用马口站当天与前一天流量的平均值，风作用力采用潮周期海面平均风速值，采用线性回归方法对系列数据进行拟合，得

到 a 、 b 、 c 、 d 的值。对洪季和枯季分析时段内 3 个测站共 15 个潮周期涨潮垂向平均流速、落潮垂向平均流速和垂向平均余流流速进行拟合，拟合值与统计值比较见图 7。可以看出，两者基本吻合且变化规律一致，拟合结果能较好反映磨刀门水道内主要动力因子的作用规律。洪季拟合度总体好于枯季，余流拟合度好于潮周期平均流速，显示径流动力增强有利于抑制其他非线性动力因素的干扰。

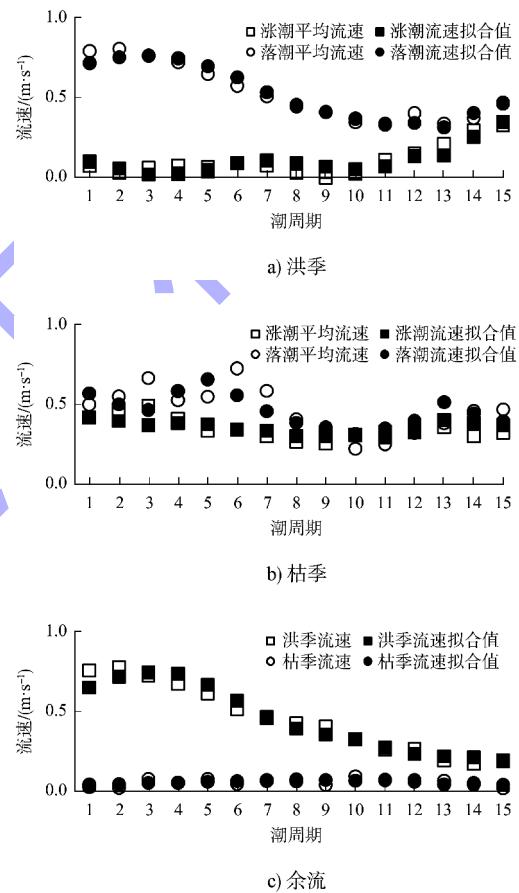


图 7 磨刀门水道 A₈ 站潮周期平均流速统计值与拟合值比较

3.2 磨刀门水道动力因子对潮流运动的作用规律

磨刀门水道洪季和枯季潮流动力因子作用系数值见表 3。影响潮周期涨潮平均流速和落潮平均流速的动力因子中，潮汐动力作用对水道内潮流往复运动的驱动作用洪季相对较强、枯季较弱；不论洪枯季，径流动力始终对磨刀门水道内潮流运动作用较强，且指向外海方向的径流动力加强了落潮流且抑制了涨潮流；代表海面风作用的系数 c 值在涨潮期和落潮期均很小，几乎可忽略不

计; 其他动力作用系数 d 代表斜压密度梯度力、波浪辐射应力、岸线及地形阻力影响等共同作用的结果, 枯季对磨刀门水道内潮流运动占主导作用。影响余流的动力因子中, 不论洪枯季, 潮动力驱动的潮流往复运动对水道内余流影响很小;

径流动力增强有利于径潮量朝外海净输出, 但主要体现在洪季, 枯季影响很小; 海面风作用系数 c 值不超过 0.01, 对水道内净通量影响很小; 其他作用力对磨刀门水道内径潮通量净输运的综合作用呈洪季抑制、枯季增强的特征。

表 3 磨刀门水道 $A_8 \sim A_{10}$ 站潮周期平均流速的动力因子作用系数

时段	浮标站	涨潮平均流速			落潮平均流速			余流		
		a	$b/10^{-5}$	c	a	$b/10^{-5}$	c	a	$b/10^{-5}$	c
洪季	A_8	0.34	-2.91	0.26	0.32	1.04	-0.02	0.06	3.10	-0.18
	A_9	0.27	-2.29	0.26	0.41	-1.91	0.20	0.21	-0.11	0.01
	A_{10}	-0.13	0.21	0.21	0.54	-2.42	0.22	0.62	-2.65	0.13
枯季	A_8	0.06	-2.75	0.42	0.03	-1.62	0.50	-0.03	0.54	0.07
	A_9	-0.13	-1.97	0.40	-0.24	-2.22	0.59	-0.20	-1.04	0.34
	A_{10}	0.01	-3.23	0.33	-0.35	0.00	0.73	-0.26	-4.66	0.67

3.3 磨刀门东西汊动力相关性讨论

沿时间轴积分求出洪季和枯季 3 个测站共 15 个潮周期沿 E 轴和 N 轴的平均潮通量, 平均通量与坐标轴方向一致为正、相反为负。采用 Pearson 法分析洪季和枯季 3 个测站潮周期平均潮通量之间的相关性见表 4 (A_8E-A_9E 表示 A_8 站 E 轴- A_9 站 E 轴)。洪季磨刀门水道 A_8 站和东汊 A_9 站在 E 轴和 N 轴的净通量之间均呈显著相关; 枯季 A_8 站 N 轴上的净通量与 A_9 站 E 轴净通量显著相关; 显示洪季磨刀门水道下泄洪水径流动力强劲, 以口门射流形态进入东汊水域, 枯季流量小、动力弱, 径潮流出口门后进入东汊水域以漂流形态随西南

向沿岸流运动。磨刀门水道与西汊在 E 轴和 N 轴上的净通量仅在洪季存在较强相关性, 枯季相关性不明显, 显示枯季淡水径流对西汊影响很小。洪季口门外东汊 A_9 站和西汊 A_{10} 站在相同轴向之间的净通量存在强相关, 枯季东汊在 E 轴和西汊在 N 轴的净通量之间存在强正相关, 说明洪季受磨刀门水道下泄洪水径流动力强劲影响, 东汊和西汊的潮通量变化规律一致, 而枯季磨刀门水道径流进入东汊水域后, 随沿岸流朝西南方向输出并进入西汊水域, 并随离岸流朝南侧外海方向输出, 与枯季磨刀门口门外侧逆时针半环流结构特征相符。

表 4 磨刀门口门浮标站半月轴向平均净通量相关系数

时段	平均净通量相关系数											
	A_8E-A_9E	A_8E-A_9N	$A_8E-A_{10}E$	$A_8E-A_{10}N$	A_8N-A_9E	A_8N-A_9N	$A_8N-A_{10}E$	$A_8N-A_{10}N$	$A_9E-A_{10}E$	$A_9E-A_{10}N$	$A_9N-A_{10}E$	$A_9N-A_{10}N$
洪季	0.86	-0.83	0.54	-0.35	-0.84	0.91	-0.43	0.47	0.79	0.04	-0.07	0.73
枯季	0.67	0.34	0.29	0.23	-0.72	-0.28	-0.09	-0.40	-0.01	0.63	0.24	0.36

4 结论

1) 磨刀门水道内, 落潮平均流速洪季比枯季大约 14%, 涨潮平均流速洪季仅约为枯季的一半; 洪季余流流速较大, 枯季可忽略不计。口门外东汊和西汊涨潮流态洪季相互顶托, 枯季均为 WSW 向, 落潮流主要沿汊道走向指向南侧外海; 洪季口外余流流速较大且均指向南侧外海方向, 枯季

余流流速较小且均为 WSW 向; 不论洪枯季, 西汊余流流速均显著大于东汊。近表层水深范围余流在洪枯季始终与落潮流向基本一致, 近底层呈逆时针半环流结构特征, 且枯季最为明显。

2) 采用线性回归法可较好拟合洪季和枯季磨刀门水道内潮周期平均流速和余流与主要动力因子的相关关系, 并以余流拟合度最好。影响磨刀

门水道余流的动力因子中，潮汐动力影响很小，径流动力影响主要在洪季，海面风洪枯季影响均较小，其他动力因子的综合影响洪季较大、枯季很小。

3) 净潮通量相关性分析表明，磨刀门水道净通量与口外东汊明显相关，与西汊相关性主要出现在洪季。洪季洪水径流动力强劲，东汊和西汊潮潮通量相关性明显且变化规律一致；枯季磨刀门水道潮流主要进入东汊水域，随沿岸流进入西汊水域，并随离岸流朝南侧外海方向输出，符合枯季磨刀门口门外侧逆时针半环流形态的结构特征。

参考文献：

- [1] 乔彭年.珠江三角洲西江干流河床演变的近代过程[J].地理科学, 1983, 3(2): 141-150.
- [2] 刘岳峰, 韩慕康, 邬伦, 等.珠江三角洲口门区近期演变与围垦远景分析[J].地理学报, 1998, 53(6): 492-500.
- [3] 刘锋, 田向平, 韩志远, 等.近四十年西江磨刀门水道河床演变分析[J].泥沙研究, 2011(1): 45-50.
- [4] 胡达, 李春初, 王世俊.磨刀门河口拦门沙演变规律的研究[J].泥沙研究, 2005(4): 71-75.
- [5] 王世俊, 胡达, 李春初.磨刀门河口近期演变及其排洪效应[J].海洋通报, 2006, 25(2): 21-26.
- [6] 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.
- [7] 路剑飞, 陈子燊.珠江口磨刀门水道盐度多步预测研究[J].水文, 2010, 30(5): 69-74.
- [8] 陈荣力, 刘诚, 高时友.磨刀门水道枯季咸潮上溯规律分析[J].水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26 (3): 312-317.
- [9] 韩志远, 田向平, 刘峰.珠江磨刀门水道咸潮上溯加剧的原因[J].海洋学研究, 2010, 28(2): 52-59.
- [10] 方神光.珠江河口磨刀门水道咸潮上溯主要影响因素探讨[J].人民长江, 2013, 44(5): 23-26.
- [11] 方神光.珠江河口磨刀门水道枯季盐水入侵特性分析[J].海洋科学, 2014, 38(11): 90-99.
- [12] 邹华志, 杨芳, 张亮亮.河床下切对磨刀门水道咸潮上溯的影响[J].水电能源科学, 2019, 37(6): 36-39, 94.
- [13] 朱泽文, 刘丙军.珠江河口拦门沙演变对咸潮上溯的影响[J].水电能源科学, 2021, 39(11): 48-51, 101.
- [14] 贾良文, 任杰, 徐治中, 等.磨刀门拦门沙区域近期地貌演变和航道整治研究[J].海洋工程, 2009, 27(3): 76-84.
- [15] 高时友, 何用, 卢陈, 等.磨刀门口夏冬季沿岸流特征及成因分析[J].海洋学报, 2017, 39(5): 1-9.
- [16] 杨昊, 欧素英, 傅林曦, 等.珠江磨刀门河口日均水位变化及影响因子辨识[J].水利学报, 2020, 50 (7): 869-881.
- [17] 蒋陈娟, 周佳楠, 杨清书.珠江磨刀门河口潮汐动力变化对人类活动的响应[J].热带海洋学报, 2020, 39(6): 66-76.
- [18] 洪鹏锋, 杜文印.强人类活动驱动下珠江磨刀门河口潮汐动力增强原因初探[J].人民珠江, 2019, 40(9): 28-32.
- [19] 马玉婷, 蔡华阳, 杨昊, 等.珠江磨刀门河口水位分布演变特征及其对人类活动的响应[J].热带海洋学报, 2022, 41(2): 52-64.
- [20] 贾良文, 吕晓莹, 程聪, 等.珠江口磨刀门月际尺度地貌演变研究[J].海洋学报, 2018, 40(9): 65-77.
- [21] 黄畅, 王永红, 杨清书, 等.珠江三角洲河网流量的时空变化及影响因素[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(5): 97-106.
- [22] 陈文彪, 陈上群.珠江河口治理开发研究[M].北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [23] 吴门伍, 严黎, 杨留柱, 等.珠江河口磨刀门口外拦门沙近期演变分析[J].长江科学院院报, 2018, 35(6): 141-145, 153.
- [24] 刘培, 苏波.珠江河口综合治理规划实施评估及修编建议[J].中国水利, 2023(13): 9-13.
- [25] 方神光, 刘晋高.河口主潮动力断面的界定方法及其在伶仃洋河口湾中的应用[J].武汉大学学报(工学版), 2020, 53(11): 950-957.
- [26] 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.

(本文编辑 王璁)