



内伶仃洋水域洪枯季余流及净潮通量 时空变化特征^{*}

方神光¹, 喻丰华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: 基于内伶仃洋水域 4 座观测站洪、枯季半月的连续观测资料, 分析了该水域余流和净通量时空变化特征, 探讨主要动力因子的作用规律。研究显示, 内伶仃洋水域半月水深平均余流流速洪季不超过 10 cm/s, 枯季不超过 5 cm/s, 洪、枯季总体指向外海侧方向。湾顶水域水沙通量洪、枯季均呈自西向东净输运, 且与径流动力呈强正相关。主槽水域接纳东、西两侧浅滩水沙后始终朝西南外海输送。西滩水域洪季水沙朝外海方向净输出, 枯季变为朝西北侧上游方向净输送, 洪、枯季均与径流动力呈强正相关; 淇澳岛北侧西滩水域洪、枯季水沙通量均处于净输入状态, 导致该水域不断淤浅。采用多元线性回归法对主槽水域表层余流与主要动力因子进行拟合分析, 显示潮汐动力始终驱动表层水沙朝上游方向净输运, 径流动力作用方向洪季指向外海、枯季指向上游, 海面风则驱动表层水沙与自身方向保持一致; 拟合公式中的常数反映了地转科氏力等综合作用下的内伶仃洋水域表层水沙西南向输运规律, 且枯季较洪季更为明显。

关键词: 余流; 净潮通量; 潮动力; 海面风; 内伶仃洋水域

中图分类号: U652; P731.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0008-07

Temporal and spatial variation characteristics of residual current and net flux during flood and dry season in inner Lingdingyang estuary

FANG Shenguang¹, YU Fenghua²

(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: Based on field data in half a month during flood and dry seasons by four observation stations deployed in the inner Lingdingyang bay, the temporal and spatial variation characteristics of residual currents and net flux are analyzed, and the action laws of the main dynamic factors are discussed. The study shows that depth-averaged residual velocities in half a month are less than 10 cm/s during flood season and 5 cm/s during dry season with directions generally pointed the offshore. Net flux in the bay head waters is transported from west to east in both flood and dry season, and is strongly positively correlated with runoff dynamics. After receiving the water and sand from the shoals on the east and west sides of the main trough, the water and sand are always transported to the southwest sea. However, the directions of net flux transportation would change from pointing offshore during flood season to upstream during dry season, and both are positively correlated with the runoff dynamics. The north waters of Qi'ao island in the west beach would be in a siltation state all along for continuous input of net flux in both flood and dry season. The multiple linear regression method is used to fit water surface residual currents and main dynamic

收稿日期: 2023-02-22

*基金项目: 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 2021 年开放课题基金项目 (SKLEC-K7-202110); 流域水治理重大关键技术研究项目 (SKR-2022036)

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研究。

factors in the main channel waters. The results show that water and sediment in surface layers would be drove to move upstream by tidal power, and downstream during flood season and upstream during dry season by runoff power, while wind power drive surface water and sand to keep consistent with its own direction. The constants in the fitting formula reflect the southwestward transportation law of surface water and sediment in the inner Lingdingyang bay under the comprehensive action of geostrophic Coriolis force and so on with more obvious in dry season.

Keywords: residual current; net flux; tidal power; surface wind; the inner Lingdingyang estuary waters

内伶仃洋水域受港口航道、围垦造陆、跨海大桥、机场扩建等人类活动影响, 区域水动力、水沙输移、水环境及冲淤演变环境变化显著^[1-4]。余流主要包括风海流、密度流、径流和潮余流等^[5], 其与去除周期性潮汐后的余水位具有一定的对应关系^[6], 总体指示近岸水域物质净输运强度^[7-9]。赵焕庭^[10]较早揭示了伶仃洋水域表层余流流向大多数为偏南, 主要由河口较为强劲的下泄径流所致。韩保新等^[11]构建了整个珠江口河口海区的潮汐动力数学模型, 显示内伶仃洋余流流速值为3~26 cm/s, 虎门处受地形和科氏力影响指向南, 过内伶仃岛后往西偏转。陈子燊^[12]将伶仃洋河口湾及邻近陆架余流分解为净平流作用、潮抽吸与净环流的输运作用, 显示洪季纵向净环流输运是盐分纵向上溯的控制因子, 其余季节以向海净平流输运为主, 悬沙净通量受净平流及潮抽吸输运控制, 两者方向相反。肖志建^[13]揭示珠江河口及近岸区域10 m以浅泥沙向南和西南运移, 与冲淡水受科氏力影响向西南扩散的余流方向一致。林若兰等^[14]分析显示, 北风和东北风能加强伶仃洋水域深槽垂向环流, 浅滩余流也相应增强, 东风总体起到抑制作用。因此, 余流动力机制方面的理论研究和应用成果较为成熟和丰富, 内伶仃洋水域地处大湾区核心地带, 其滩槽演变及水沙环境方面的问题受到高度重视^[15]。

本文基于内伶仃洋水域布设的4座河口浮标观测站观测数据, 探讨该水域半个月内的余流特征及主要动力因子作用规律, 旨在为河口湾治理和保护提供基础支撑。

1 研究概况

1.1 研究水域

伶仃洋河口湾呈北北西—南南东走向喇叭形(图1), 自东向西依次为虎门、蕉门、洪奇门、横门, 其中内伶仃洋为上边界至东四口门、下边界至金星门—内伶仃岛—赤湾断面的半封闭水域, 该水域水下地形存在“三滩两槽”格局, 东槽为矾石水道, 平均水深9 m。主槽(西槽)为伶仃水道, 平均水深18 m, 是广州港主要出海航道。21世纪以来, 中滩在大规模采砂下, 东、西槽有贯通之势。

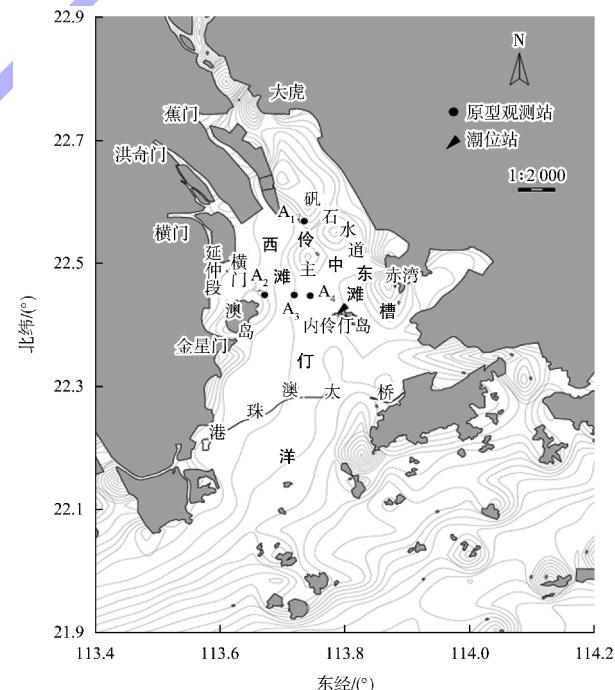


图1 伶仃洋及口门水域

收集了内伶仃洋水域4座浮标观测站2018年8月26日—9月10日洪季和2018年11月23日—12月8日枯季各16 d的同步观测数据, 可划分为15个完整潮周期, 站点位置见图1。观测站使用

声学多普勒流速剖面仪——浪龙 1 MHz 采集潮流和水深等数据, 垂向分辨率 0.3~0.5 m。内伶仃岛站最大潮差洪季出现在农历八月初一, 大潮期为 1.93 m(图 2); 枯季出现在农历十月十七, 大潮期为 1.69 m; 半个月内伶仃岛站平均潮差洪、枯季分别为 1.35 m 和 1.38 m。洪季上游两站(马口+三水)来流量在 10 000~18 000 m³/s 之间(图 2); 枯季上游两站来流量在 10 000 m³/s 左右, 变化幅度很小。A₄ 站设备型号为 GILL GMX500 风速风向仪, 观测海面以上 2 m 的气象数据, 观测频次为 10 min。潮周期平均风速矢量如图 3 所示, 洪季以东南—西南风为主, 最大潮周期平均风速 6.85 m/s, 正南风出现在第 5 个潮周期; 枯季东北风和东风平均各占 1/2, 最大潮周期平均风速 7.85 m/s, 正北风出现在第 15 个潮周期。

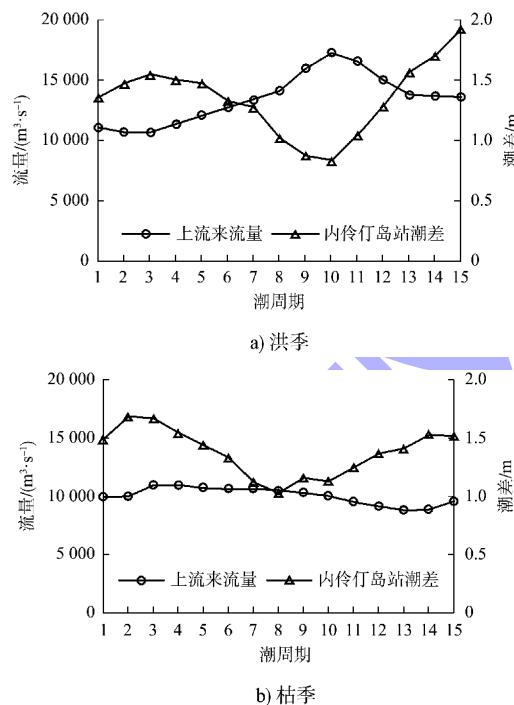


图 2 4 站同步观测期间上游来流量和下游潮差

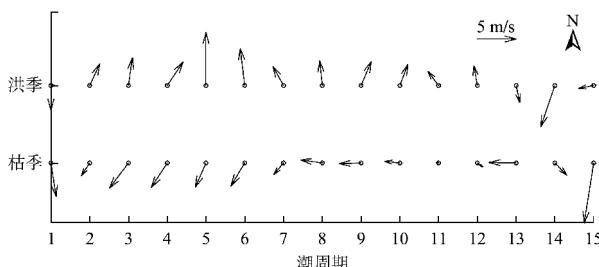


图 3 A₄ 站海面潮周期平均风速矢量

1.2 余流及通量计算方法

基于物质通量法^[16], 余流可分为欧拉余流、斯托克斯余流和拉格朗日余流, 计算公式为:

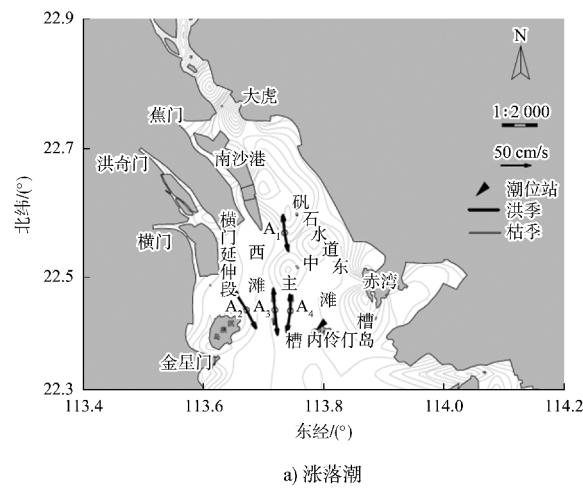
$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u dz dt = h_0 (\bar{u}_E + \bar{u}_S) = h_0 \bar{u}_L \quad (1)$$

式中: Q 为单宽潮通量, m³/s; T 为潮周期, min; z 为垂向坐标, m; t 为时间, min; u 为任一时刻垂向坐标 z 位置的实测流速, m/s; \bar{u}_E 为欧拉余流, m/s; \bar{u}_S 为斯托克斯余流, m/s; \bar{u}_L 为拉格朗日余流, m/s; h_0 为潮周期(或分析时段)平均水深, m; h 为任一时刻实测水深, m。欧拉余流为空间固定地点的平流净输移, 主要由长周期内的径流、潮流与地形的非线性作用及科氏力等相对固定作用力形成; 斯托克斯余流则是潮流变化项与水深变化项的潮周期相关值。因此, 欧拉余流和斯托克斯余流的区分与分析时段长度及水域位置关系较为密切。拉格朗日余流包含欧拉余流以及斯托克斯余流, 完整地给出一个流体元的物质净输移。

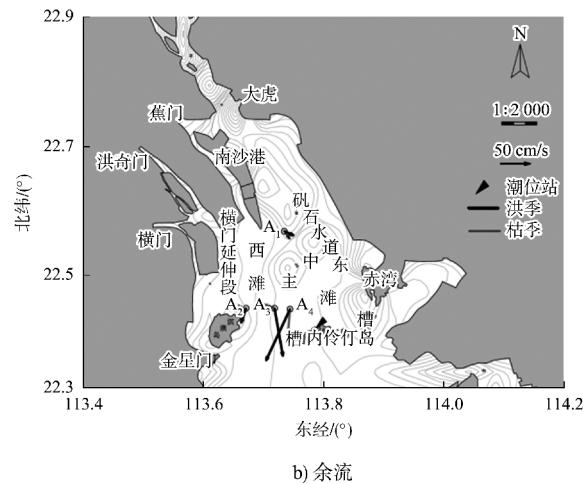
2 水深平均余流特征

2.1 半月水深平均余流整体特征

洪季半个月内的水深平均流速和欧拉余流如图 4 所示。洪、枯季涨落潮流速在 25~45 cm/s 之间, 流态与以往观测一致^[17], 主槽(A₄)和内伶仃洋湾顶水域(A₁)呈落潮大于涨潮, 横门出口延伸段(A₂)呈涨潮大于落潮, 西滩水域(A₃)涨、落潮流速基本相当。半月水深平均余流流速洪季不超过 10 cm/s, 枯季不超过 5 cm/s, 受洪季洪水下泄影响显著, 余流总体指向外海侧方向。湾顶水域余流流速最小, 洪、枯季相差不大, 流向为 SE—ESE 向, 洪季较枯季更偏东。主槽水域洪、枯季余流流向为 S—SSW。西滩水域洪季余流流速大于枯季, 洪季流向为 S 向, 枯季为 WNW 向, 洪、枯季差异明显。横门延伸段水域洪、枯季余流流速不超过 3 cm/s, 流态为 WSW—SSW, 洪季水沙沿淇澳岛东侧朝外海方向输移, 枯季余流方向则更有利于淇澳岛东北侧水域的淤积。



a) 涨落潮



b) 余流

图 4 半个月水深平均涨落潮和余流流速矢量

2.2 潮周期水深平均余流变化特征

图 5 为连续潮周期水深平均欧拉余流、拉格朗日余流和斯托克斯余流矢量变化。不论洪季或枯季, 潮周期水深平均欧拉余流和拉格朗日余流矢量相差不大, 差别主要体现在非线性项的斯托克斯漂移作用影响。洪季, 内伶仃洋主槽和西滩水域是东四口门洪水向口外输送的主要通道, 余流流速相对其他水域更大, 主槽最大余流值达 18.6 cm/s, 出现在中、小潮期间; 湾顶水域和横门延伸段水域余流流速较小, 呈大潮期间指向上游、小潮期间指向下游外海方向。枯季, 内伶仃洋水域各测站余流均不超过 10.0 cm/s, 湾顶水域净输运方向指向东侧, 主槽水域仍朝口外净输运, 西滩水域净输运指向西北侧上游方向, 横门延伸段水域以指向西侧近岸方向为主。不论洪、枯季, 横门延伸段水域斯托克斯漂移作用很小, 其他水域斯托克

斯漂移方向均以指向上游为主, 呈潮差越大、漂移作用越显著, 并以主槽水域和西滩水域最为显著。

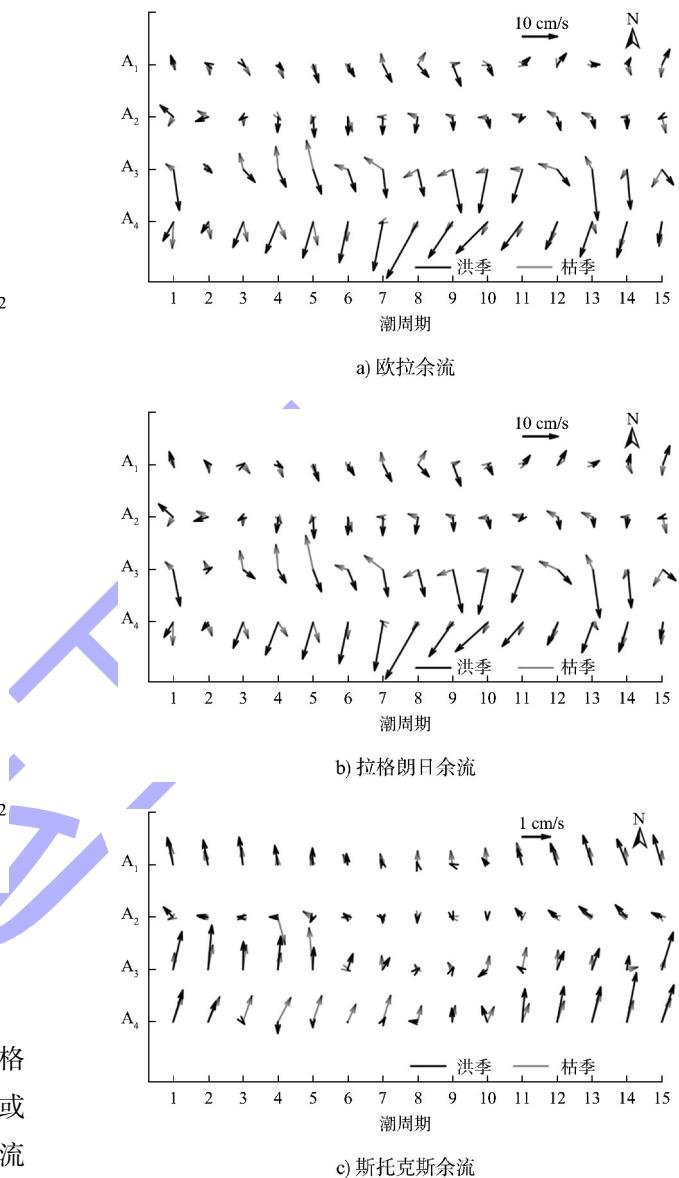


图 5 连续潮周期水深平均余流流速矢量

3 净通量变化特征

3.1 半月平均净通量变化特征

图 6 为各站半月单宽净通量矢量。洪季各站单宽净通量值呈 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 依次增大, 最大值 A_4 站为 14223 m^3 , A_1 站最小为 1715 m^3 。枯季径流动力转弱, 各站单宽净通量值整体减小, 但排序不变, 仍以 A_4 站最大为 6358 m^3 , A_1 站最小为 1378 m^3 。洪季内伶仃洋湾顶西滩部分水沙会进入中滩, 主槽沿程汇集西滩和中滩水沙后朝伶仃洋口外输出。枯季湾顶水沙仍呈西滩指向中

滩, 但虎门下泄净通量较洪季有所增强, 主槽沿深槽走向朝口外输出, 西滩承接横门、洪奇门和蕉门水沙, 还接纳外海水沙净输入, 最后仍汇入主槽后随潮流输出到外海。洪、枯季淇澳岛北侧水域水沙通量均处于净输入状态是导致该水域不断淤积的主要原因。

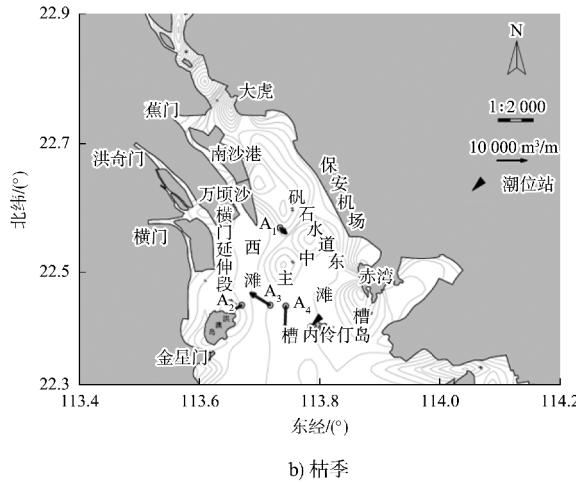
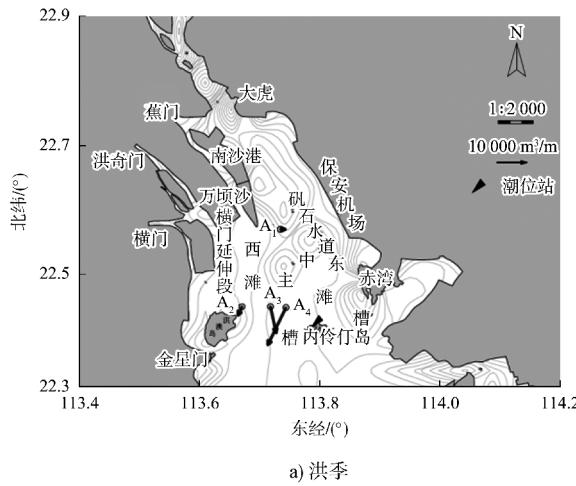


图 6 内伶仃洋半个月净潮通量矢量

3.2 主槽水域潮周期净通量变化特征

内伶仃洋主槽是伶仃洋水沙朝口外输出的重要通道, 图 7 为主槽上游湾顶水域(A₁ 站)潮周期平均净通量在 E 轴和 N 轴的分量值。E 轴上, 不论洪、枯季, 绝大多数潮周期净通量方向都为自西向东。N 轴上, 洪季呈大潮指向上游、小潮指向外海方向; 枯季净通量方向与洪季相反, 呈大、中潮指向外海、小潮期间指向上游。图 8 为主槽中段水域(A₄ 站)潮周期净通量, 洪季, E 轴和 N 轴分量始终分别指向西侧和南侧, 净通量值均

随潮动力减小而增大; 枯季, N 轴分量朝南且随潮动力增强而增大, E 轴分量很小。因此, 伶仃洋湾顶水域净通量洪、枯季差异明显, 且随潮汐动力呈规律性变化; 主槽中段净通量始终朝外海方向输出, 不随季节和潮汐动力变化。

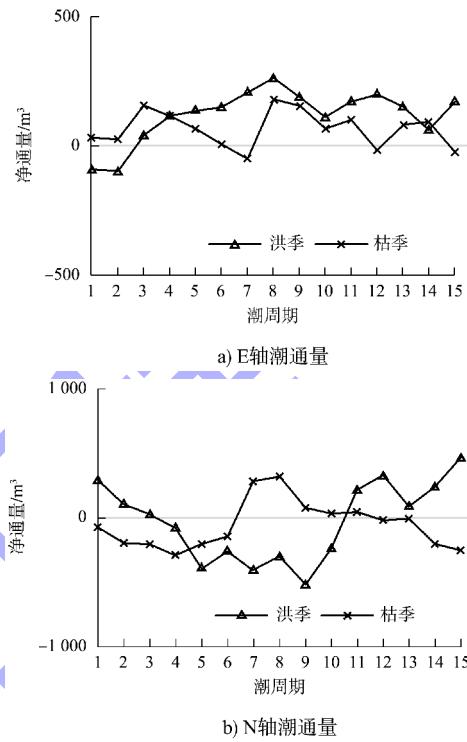


图 7 砾石水道 E 轴和 N 轴潮周期净通量

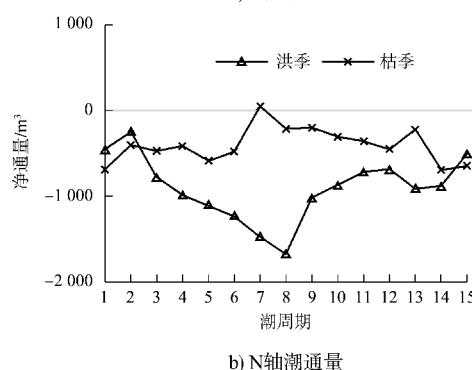
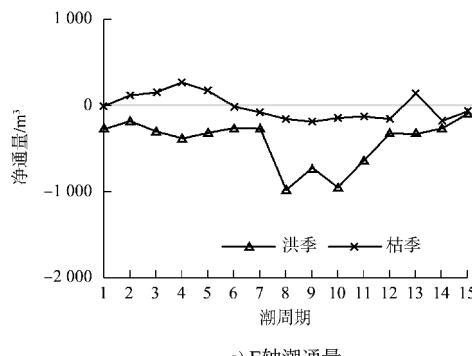


图 8 主槽中段 E 轴和 N 轴潮周期净通量

3.3 净通量与径潮动力因子的相关性分析

采用 Pearson 法分析潮周期净通量与潮汐动力和径流动力的相关性, 结果如图 9 所示, 相关系数 R 绝对值在 0.5~1.0 为强相关, 0.3~0.5 为中等相关。湾顶水域(A_1 站)净通量洪、枯季均与径流动力强正相关, 与潮汐动力相关性不明显, 净通量均指向东侧或东南侧中滩, 径流动力增强有利于西滩水沙进入中滩。横门延伸段水域(A_2 站)净通量洪、枯季均与径流动力为中等负相关; 该水域净通量矢量在洪、枯季均指向西南侧淇澳岛近岸, 径流动力增强抑制了该水域水沙西南输移。西滩水域(A_3 站)净通量洪、枯季均与径流动力强正相关, 洪季还与潮汐动力呈中等负相关; 该水域洪、枯季净通量矢量差异较大, 洪季为东南向、枯季为西北向, 径流量增大会增大该水域净通量, 潮汐动力在洪季对其具有抑制作用, 枯季不明显。主槽中段水域(A_4 站)净通量洪、枯季与潮汐动力分别为强负相关和强正相关, 洪季还与径流动力呈中等正相关; 该水域水沙输移方向洪季为 WSW 向、枯季近乎正 S 向, 均指向外海, 但洪季潮汐动力对水沙朝外海输移具有抑制作用, 枯季正好相反。

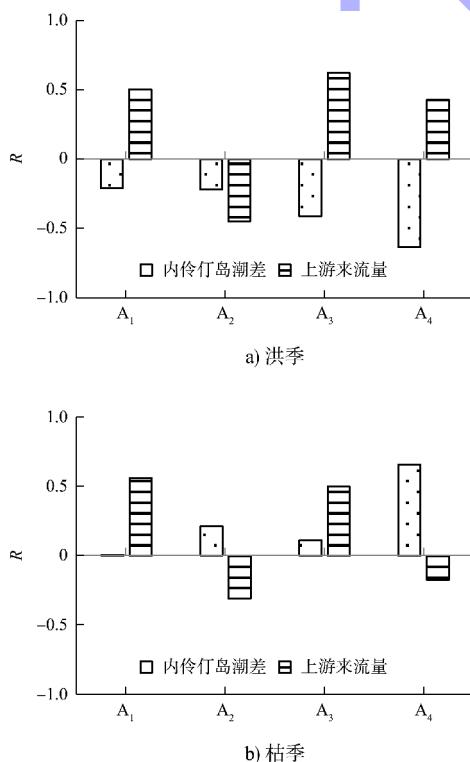


图 9 洪枯季潮周期净通量与动力因子的相关系数

4 表层余流与动力因子的线性回归分析

4.1 线性回归方法验证

河口水域表层是冲淡水以余流形态朝外海漂移的主要通道, 基于 A_4 站同步水文气象观测, 采用线性回归法定量拟合表层潮周期拉格朗日余流分量与主要动力因子的关系, 线性回归方程为:

$$v_R = a\Delta z + bQ + cv_{wE} + dv_{wN} + e \quad (2)$$

式中: v_R 为潮周期拉格朗日余流流速 E 轴或 N 轴分量, m/s ; Δz 为潮周期平均潮差, m ; Q 为上游径流量, $\text{万 m}^3/\text{s}$; v_{wE} 、 v_{wN} 分别是海面风风速 E 轴和 N 轴分量, m/s ; a 、 b 、 c 、 d 、 e 为动力作用系数, 即主要动力因子对 v_R 值的贡献权重, 基于潮流、来流量、潮差及海面风实测数据, 采用二元线性回归方法进行拟合得到。图 10、11 给出了枯季和洪季表层余流流速实测值和拟合值的比较, 两者相关性较好, 反映了表层余流流速变化规律。该水域洪、枯季表层 E 轴余流分量在 10 cm/s 以内, 枯季呈大潮朝东、小潮朝西的特征; N 轴余流流速分量洪、枯季均指向南, 且洪季大于枯季。

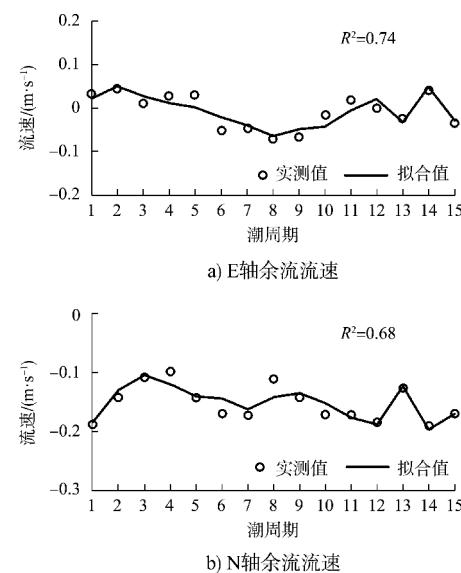
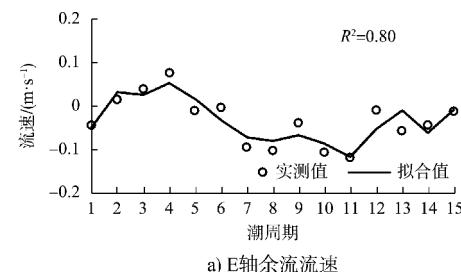
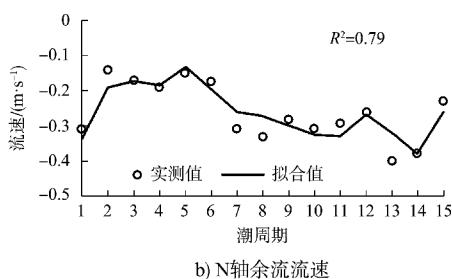


图 10 枯季 A_4 站表层潮周期余流流速分量实测值与拟合值比较



图 11 洪季 A₄ 站表层潮周期余流流速分量实测值与拟合值比较

4.2 动力因子对表层余流影响规律分析

表 1 为二元线性拟合系数值。潮汐动力系数 a 洪、枯季的 E 轴和 N 轴分量拟合值均为正, E 轴向 a 值大于 N 轴向, 显示潮汐动力对主槽表层冲淡水朝口外输运具有抑制或反向输运作用。径流动力系数 b 的 E 轴向和 N 轴向拟合值洪季均为负、枯季均为正, 显示径流动力洪季作用方向指向西南外海、枯季指向东北上游。海面风系数 c 值 E 轴分量和 N 轴分量洪、枯季均为正, 主要驱使表层水体与自身相同方向运动。其他系数 e 在洪、枯季 E 轴和 N 轴均为负值, 且相对其他值较大, 决定了内伶仃洋主槽中段水域表层水沙朝西南侧外海方向输移的基本趋势。因此, 伶仃洋主槽水域动力因子作用规律显示: 潮汐动力始终会驱使表层水沙朝上游方向输运; 径流动力对表层水沙的输移作用在洪季指向西南侧外海、枯季指向东北侧上游; 海面风对表层水体作用主要为驱使其与自己方向保持一致, 且洪季影响大于枯季; 内伶仃洋河口水域受地转科氏力影响, 水域表层水沙基本运动方向为西南向, 且该趋势枯季较洪季更显著。

表 1 二元线性回归拟合系数

季节	分轴	a	b	c	d	e
洪季	E	0.141	-0.029	0.024	0.005	-0.191
	N	0.098	-0.102	0.006	0.020	-0.290
枯季	E	0.167	0.108	0.014	0.007	-0.313
	N	0.079	0.128	-0.015	0.004	-0.400

5 结论

1) 内伶仃洋半个月水深平均余流流速洪季不超过 10 cm/s, 枯季不超过 5 cm/s, 洪、枯季总体指向外海侧方向, 枯季西滩水域指向西北侧上游。

潮周期水深平均余流流向洪季均指向外海侧, 枯季变化复杂, 由潮汐和潮流不均匀作用引起的斯托克斯漂移主要指向上游方向。

2) 内伶仃洋湾顶水域洪、枯季均呈现水沙通量自西向东净输运, 且径流动力越强, 净通量也越大。主槽水域汇聚东滩和西滩水沙后洪、枯季均朝西南侧外海方向输出。西滩水域洪季承泄西侧口门水沙后由主槽和南侧边界朝外海方向输出, 枯季还承接外海水沙的净输入。淇澳岛北侧水域水沙通量始终处于净输入状态, 造成该水域不断淤浅。

3) 采用线性回归法较好拟合了内伶仃洋主槽水域表层余流与动力因子的相关关系。分析显示, 该水域潮汐动力始终驱使表层水沙朝上游方向输运; 径流动力输移作用洪季指向西南外海、枯季指向东北侧上游; 海面风始终驱使表层水沙运动与自己方向一致; 受地转科氏力影响, 内伶仃洋河口水域表层水沙基本运动方向为西南向, 该趋势枯季较洪季更显著。

参考文献:

- [1] 黎志均, 李英杰. 澳门海域潮流现场观测与数值分析[J]. 水运工程, 2005(9): 30-33.
- [2] 宫清华, 周晴, 李平日, 等. 珠江口伶仃洋地貌特征演变与纳潮能力变化研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(1): 98-107.
- [3] 应强, 何杰, 辛文杰. 巨型人工采砂坑对伶仃洋自然演变的影响[J]. 水科学进展, 2019, 30(6): 915-922.
- [4] 赵荻能. 珠江河口三角洲近 165 年演变及对人类活动响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [5] PRANDLE D. Estuaries: Dynamics, mixing, sedimentation, and morphology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [6] 杨正东, 朱建荣, 宋云平, 等. 长江口余水位时空变化及其成因[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021(2): 12-20.
- [7] CAO D F, SHEN Y M, SU M R, etc. Numerical simulation of hydrodynamic environment effects of the reclamation project of Nanhui tidal flat in Yangtze Estuary[J]. Journal of hydrodynamics, 2019, 31(3): 603-613.