

洪枯季内伶仃洋河口湾径潮动力作用 规律解析及冲淤响应

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:基于内伶仃洋水域4座浮标站洪、枯季半月时长实测水文气象数据,应用主潮通量断面算法和二元线性回归法探讨了内伶仃洋河口湾潮汐动力、径流动力及其他动力对潮周期平均流速的作用规律。研究显示,内伶仃洋水域半月洪、枯季水深平均流速在25~45 cm/s之间,除西滩水域水深平均流速洪季显著大于枯季,其他水域洪、枯季相差不大。潮汐动力作用系数 a 始终为正显示其是伶仃洋河口湾潮流往复运动的主要驱动力;径流动力作用系数 b 在洪季涨潮阶段为负、落潮阶段为正显示洪季东四口门进入伶仃洋河口湾的洪水具有较大初始动量,枯季涨潮和落潮阶段 b 均为负值,显示枯季径流动力弱并以随潮运动为主;其他动力因子作用系数 c 在洪、枯季的差异主要与季风和咸潮入侵引起的密度斜压梯度力等有关,与径流动力作用系数 b 存在较好的线性负相关,且洪季较枯季更明显。应用伶仃洋河口湾泥沙启动流速,结合二元线性回归法得到的潮周期平均流速拟合公式,提出了临界径流量的概念,揭示了当前伶仃洋水域存在的“滩冲槽淤”现象;枯季,伶仃洋水域整体处于淤积状态,涨潮阶段更显著。

关键词:内伶仃洋;潮汐;径流;泥沙;冲淤

中图分类号:TV148

文献标识码:A

DOI:10.12396/znsd.231341

方神光, 崔丽琴. 洪枯季内伶仃洋河口湾径潮动力作用规律解析及冲淤响应[J]. 中国农村水利水电, 2024(5): 87-93. DOI: 10.12396/znsd.231341.

FANG S G, CUI L Q. Mechanism of main dynamics and its action on sedimentation during flood and dry season in the inner lingdingyang estuary[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(5): 87-93. DOI: 10.12396/znsd.231341.

Mechanism of Main Dynamics and its Action on Sedimentation During Flood and Dry Season in The Inner Lingdingyang Estuary

FANG Shen-guang¹, CUI Li-qin²

(1. Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, Guangdong Province, China;

2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, Guangdong Province, China)

Abstract: Based on the hydrometeorological data in half a month during the flood and dry seasons at four buoy stations in the inner Lingdingyang estuary, the tidal dynamics, runoff dynamics and other powers on average velocity during a tidal cycle had been discussed by introducing the algorithm of main tidal flux section and the binary linear regression method. It showed that average water depth velocity in half a month during the flood and dry seasons in the inner Lingdingyang waters is between 25~45 cm/s, with little difference between flood and dry seasons except at the West beach waters, where the average water depth velocity in the flood season is significantly greater than that in the dry season.. The coefficient a , which represented the contribution on velocities by tidal dynamic, was always positive, indicating that it is the main driving force for the reciprocating movement of the Lingdingyang estuary. The coefficient b representing runoff dynamic was negative

收稿日期: 2023-09-04

接受日期: 2023-01-16

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)。

作者简介: 方神光(1978-), 男, 正高级工程师, 主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: 836590118@qq.com。

at rising the tide stage and positive at the ebb tide stage during the flood season, showed that freshwater discharged into the Lingdingyang estuary by the east four mouths possessed a large initial momentum which strengthened the power of ebb current; while was negative irrespective of rising or falling current during dry season, showing that runoff dynamic was weak and diluted flux mainly moved with tidal current. The coefficient c by other dynamics during the flood and dry seasons was mainly related to density baroclinic gradient force caused by monsoon and salt water intrusion, and there was a good linear negative correlation with the coefficient b by flux of freshwater, more obvious during flood season. Applying incipient velocity of suspended sediment in the Lingdingyang estuary, combined with the fitting formula of average velocity at a tidal cycle obtained by the binary linear regression method, the concept of critical runoff was put forward, and the reason of the phenomenon of "beach scour channel siltation" existed in the Lingdingyang estuary was explained. The Lingdingyang estuary was in the state of sedimentation as a whole during the dry season with more significant during the rising tidal phase.

Key words: the inner Lingdingyang estuary; tide; runoff; sediment; erosion and deposition

0 引言

河口湾潮流运动是径潮动力等综合动力因子与河口独特的地形地貌相互作用的呈现,是开展河口水生态环境治理与改善的基础。伶仃洋河口湾“三滩两槽”格局从19世纪末开始逐步演变成型^[1],20世纪80-90年代,李春初^[2,3]对潮汐作用为主的珠江河口三角洲动力特征开展了分析,阐释了河流优势型、潮汐优势型、波浪优势型三大类型河口动力自动调整特征及其与地形地貌特征形成机制。同期人类开始了大面积围垦、联围筑闸、航道整治及采砂等,造成伶仃洋河口水域水沙情势、河床地形及岸线边界等发生了显著改变^[4],水域面积较历史减少约35%,中滩从2008年以来形成了容积7亿 m^3 左右的巨大采砂坑^[5]。由此带来伶仃洋河口湾动力环境的巨大变化,伶仃洋河口断面纳潮量较1981年累积最大减少6.0%^[6],围填海导致潮位在落潮时最大减少约0.3 m,涨潮时最大增加约0.26 m^[7]。近年伶仃洋河口湾口门建成的港珠澳大桥进一步削弱了潮汐动力^[8]。与20世纪80年代相比,由东四口门汇入伶仃洋的径流量呈先增大后减小的变化趋势,且虎门、蕉门径流动力减弱,洪奇沥、横门径流动力持续增大,来沙量总体呈减小趋势^[9]。伶仃洋河口湾动力变化最直观反映到潮流流速特征变化,以往研究大多数采用数学模型和物理模型等手段直接开展其现状特征或演变规律研究^[10-14]。本文则基于伶仃洋水域近年实测水文气象数据,从潮周期潮流运动特征的角度探讨潮汐动力、径流动力及其他动力因子的作用规律,以此揭示伶仃洋水域近些年滩槽冲淤变化的原因和机制。

1 研究区域及方法

1.1 水域概况及测站数据

伶仃洋河口湾呈北北西—南南东走向的喇叭形(图1),自东向西依次为虎门、蕉门、洪奇沥、横门,水下地形为“三滩两槽”格局。本世纪以来,西槽由于航道整治导致槽宽向两侧扩展,东槽中下段水深加大,大规模采砂导致中滩被分割成上部伶仃拦江沙和下部矾石浅滩,东槽和西槽在中滩中部有贯通之势^[5]。因此,为探讨近年伶仃洋河口湾径潮动力特征及对冲淤演变的影响,收集伶仃洋水域编号为A1~A4共4座浮标站(图1)在2018年8月26日-9月10日(农历7月16日-8月初一)洪季和2018年11月23日-12月8日(农历10月16日-11月初二)枯

季各16天时长的同步观测数据,洪季和枯季均为15个完整潮周期(珠江河口平均潮周期24.8 h)。浮标站主要观测设备为声学多普勒流速剖面仪-浪龙1 MHz,垂向上采集流向、流速、水深等数据,分辨率0.3~0.5 m/层。同时统计洪季和枯季每个潮周期的上游马口站和三水站来流量之和及内伶仃岛站平均潮差;其中,内伶仃岛站潮差随天文潮变化,最大潮差洪季出现在农历8月初一大潮为1.93 m,枯季最大出现在农历10月17大潮为1.69 m。上游马口站和三水站来流量洪季在10 000~18 000 m^3/s 之间,枯季在10 000 m^3/s 左右,枯季变化幅度很小。浮标站A4站采用GILL GMX500风速风向仪记录了海面以上2 m的风速风向数据,观测频次为10 min,统计洪、枯季潮周期平均风矢量见图3,洪季以东南风~西南风为主,以第5个潮周期平均风速最大,为正南风6.85 m/s;枯季在第15个潮周期出现最大平均风速7.85 m/s,为正北风。

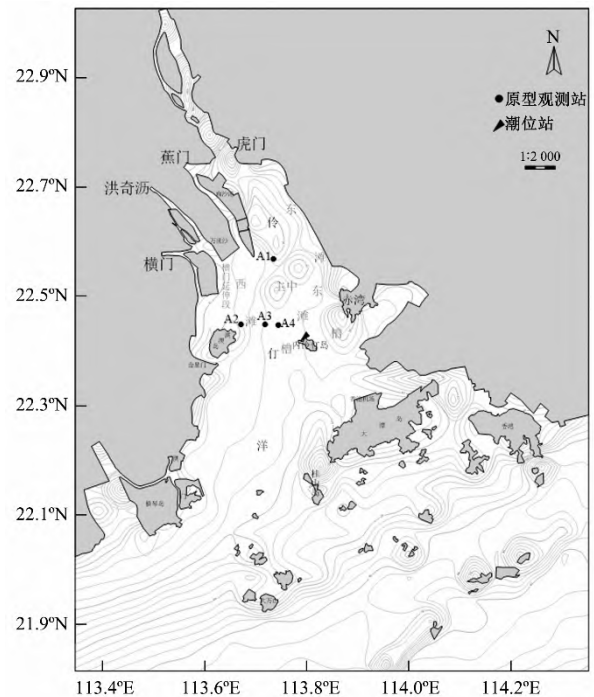


图1 伶仃洋水域及浮标站布置

Fig.1 The Lingdingyang estuary and arrangement of buoy stations

1.2 研究方法

采用主潮通量断面概念来计算潮周期动力特征值,其主要思路是找到主潮通量断面并将该断面两侧潮流矢量分别定义

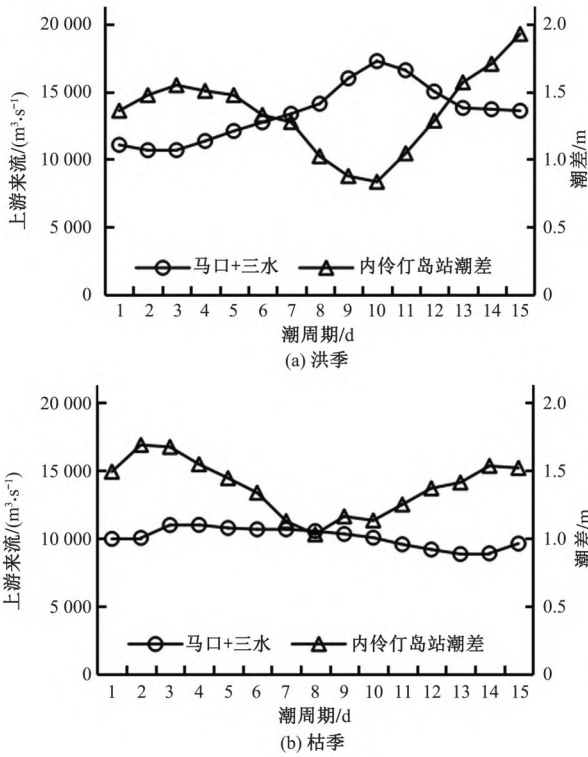


图2 A1~A4站同步观测期间上游来流和下游潮差
Fig.2 Flux upstream and tidal range downstream during synchronous observation at stations of A1~A4

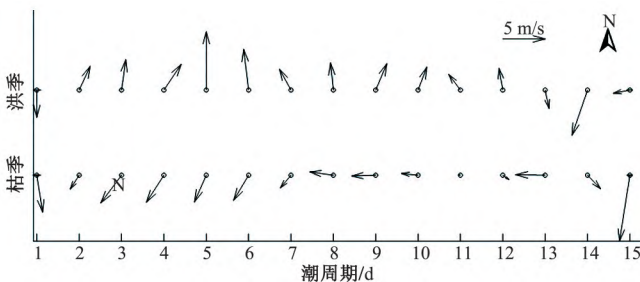


图3 A4站海面潮周期平均风速矢量图
Fig.3 Average wind vectors in tidal cycles on water surface at the station of A4

为涨潮流和落潮流,在此基础上采用积分法精确计算不同时间尺度的动力特征值。主槽通量断面位置与最大单宽涨潮通量和落潮通量之和对应,其探寻方法为在0~180°范围(与N轴夹角)内按顺(逆)时针旋转,计算不同位置断面的总潮通量,其中潮通量最大值对应的断面即为主槽通量,其详细做法可参见相关文献^[15]。另外,为定量分析伶仃洋水域潮汐、径流和其他动力对河口湾水流运动的作用规律,本文应用二元线性回归法拟合流速与主要动力因子的相关关系。采用的线性回归方程:

$$DF = a\Delta z + bQ + c \quad (3)$$

式中:DF为潮周期垂向平均流速,m/s; Δz 为潮周期平均潮差,m;Q表示上游径流量,m³/s;a、b、c代表主要动力因子对DF值的贡献权重,其单位分别是s⁻¹,m²和m/s,可用来定量剥离动力因子的贡献。代表潮汐动力作用的 Δz 采用内伶仃岛站实测值计算,代表径流动力Q应用马口站和三水站当天与前一天的日平均流量的平均值。应用实测数据和二元线性回归方法,可获

得代表不同动力作用的系数a、b、c值。

2 洪枯季潮周期动力作用回归分析

2.1 洪枯季潮周期平均流速回归分析方法验证

洪、枯季半月时段垂向平均流速和余流见图4所示。内伶仃洋水域流态总体呈涨潮流朝北、落潮流朝南,洪、枯季流态变化不大,其中西滩水域枯季涨、落潮流向较洪季都略朝西偏。洪、枯季涨落潮流速在25~45 cm/s之间,相较历年该水域滩槽定点实测流速有减小趋势^[12],但伶仃洋整体水域流速变化还有待深入研究。主槽水域(A1和A4)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。除西滩水域洪季半月平均涨、落潮流速显著大于枯季,其他水域洪、枯季流速相差不大。

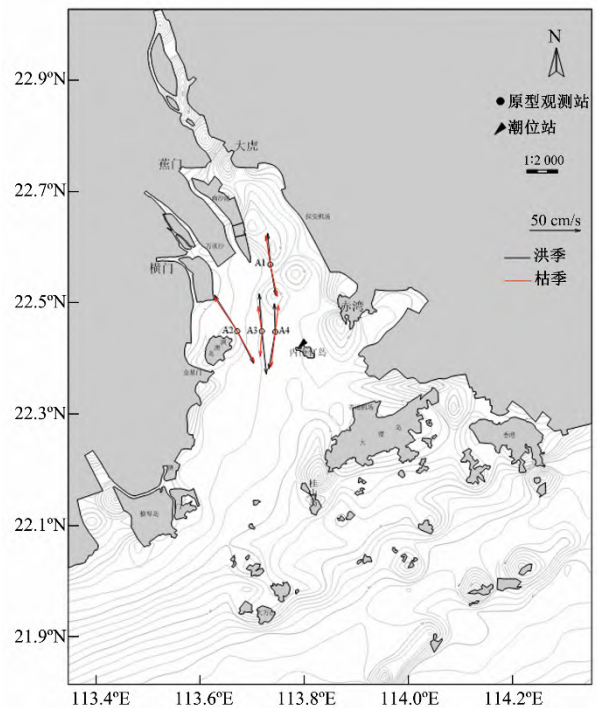


图4 洪枯季半月时段垂向平均潮流矢量图
Fig.4 Depth-averaged vectors of tidal current in half a month during flood and dry season

基于主槽动力算法统计A1~A4浮标站本次洪、枯季各15个完整潮周期的平均涨潮流速和平均落潮流速,与采用二元线性回归分析法得到的拟合公式(3)的计算值进行了比较,结果如图6和图7所示,显示拟合值与实测统计值跟随性很好,洪季误差大多数在5%以内,枯季大多在10%以内。总体来看,洪枯季潮周期涨、落潮平均流速均不超过60 cm/s,除西滩水域A3站洪季受径流增强导致涨、落潮流速较枯季迅速增大外,其他浮标站洪、枯季潮周期平均流速相差较小。平面上,洪季潮周期涨潮平均流速最大出现在横门延伸段水域,落潮出现在西滩水域;枯季最大潮周期涨、落潮平均流速均出现在横门延伸段水域。采用Pearson法分析了洪枯季各浮标站涨、落潮拟合值与实测统计值的相关系数值R²,如表1所示,相关系数值均在0.6以上,总体能反映河口主要作用力对潮流运动的物理规律,其中洪季相关性好于枯季,与枯季径流动力影响减弱导致其他非线

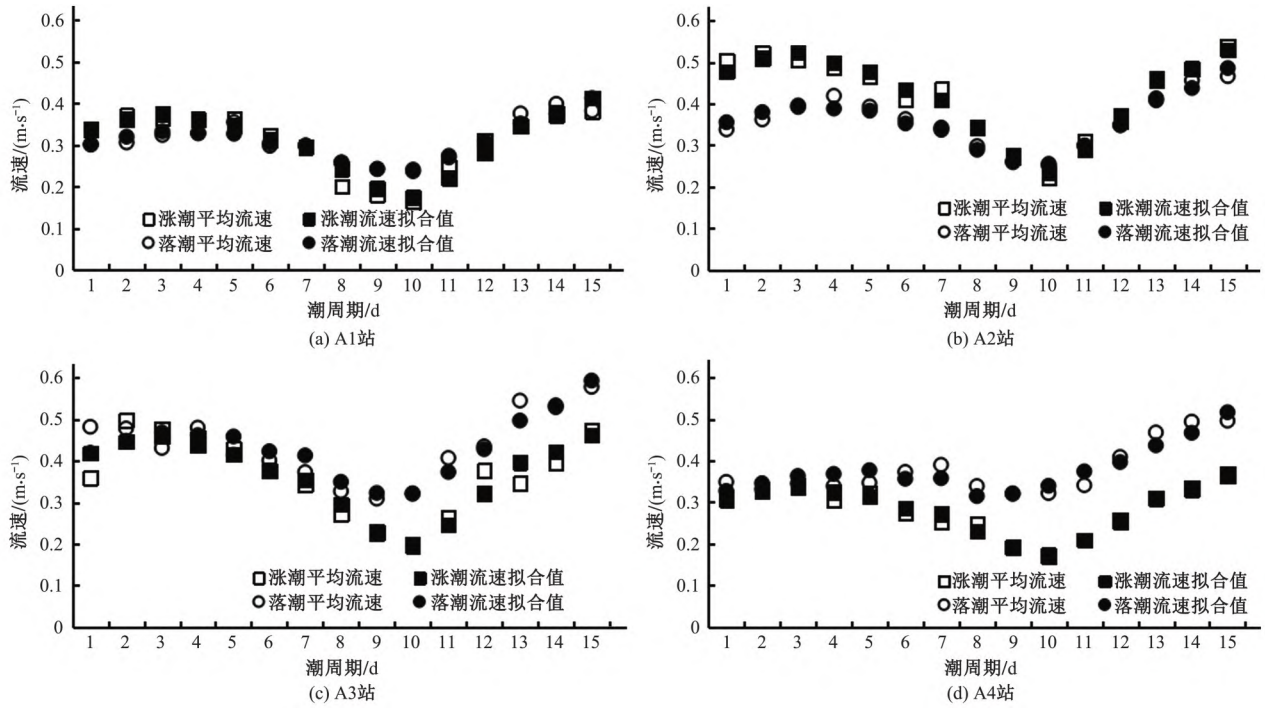


图5 洪季潮周期平均流速统计值与拟合值比较

Fig.5 Comparison of velocities fitted and calculated in tidal cycles during flood season

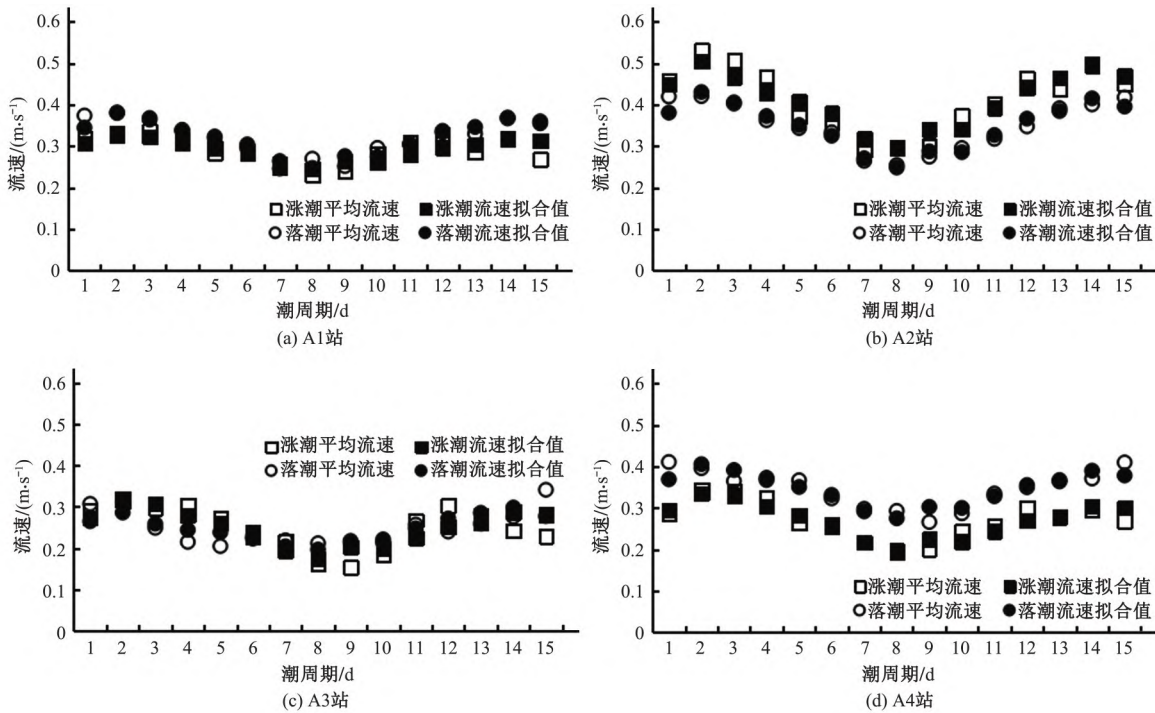


图6 枯季潮周期平均流速统计值与拟合值比较

Fig.6 Comparison of velocities fitted and calculated in tidal cycles during dry season

性影响因子作用增强有关。因此,综合分析来看,潮周期平均流速可以较好的采用径流动力、潮汐动力及其他动力因子综合作用系数进行多元线性表达,并以此分解各动力因子的作用机制。

2.2 洪枯季径潮动力作用规律

A1~A4 浮标站拟合得到公式(3)中洪、枯季下涨潮和落潮阶段的潮汐动力、径流动力和其他动力影响因子系数 a 、 b 、 c 值

统计如表2所示,各动力作用规律有:

(1)潮汐动力作用系数 a 在洪、枯季都为正,显示潮汐动力始终是伶仃洋河口湾潮流往复运动的主要驱动力。洪季,受径流动力增强顶托影响,潮汐动力影响主要局限在口门以外的伶仃洋河口湾水域, a 值总体呈涨潮阶段小于落潮阶段;枯季,潮汐动力延伸到口门以内,受伶仃洋喇叭型河口影响, a 值总体表现涨潮阶段大于落潮阶段。

表1 基于Pearson法的拟合值与实测值相关系数 R^2 统计表

Tab.1 Correlation coefficient between fitted and calculated based on the method of Pearson

浮标站	洪季		枯季	
	涨潮期	落潮期	涨潮期	落潮期
A1	0.93	0.90	0.61	0.88
A2	0.97	0.96	0.60	0.93
A3	0.88	0.84	0.65	0.61
A4	0.97	0.84	0.83	0.79

(2)径流动力作用系数 b 直观反映了洪、枯季进入伶仃洋水域径流动力作用的差异。洪季,口门以内网河区以洪水动力作

表2 基于二元线性回归法的动力因子系数值统计表

Tab.2 Coefficients for dynamic factors based on binary linear regression method

浮标站	潮流 流态	洪季			枯季		
		a	b	c	a	b	c
A1	涨潮	0.18	-10.68×10^{-6}	0.21	0.13	-6.67×10^{-6}	0.19
	落潮	0.17	4.92×10^{-6}	0.01	0.19	-15.18×10^{-6}	0.21
A2	涨潮	0.19	-22.81×10^{-6}	0.47	0.29	-35.05×10^{-6}	0.36
	落潮	0.22	2.42×10^{-6}	0.03	0.26	-21.90×10^{-6}	0.21
A3	涨潮	0.17	-21.23×10^{-6}	0.42	0.21	-4.84×10^{-6}	0.01
	落潮	0.27	7.26×10^{-6}	-0.03	0.12	-26.39×10^{-6}	0.36
A4	涨潮	0.14	-9.54×10^{-6}	0.22	0.21	-1.90×10^{-6}	0
	落潮	0.24	22.01×10^{-6}	-0.24	0.19	-11.91×10^{-6}	0.21

2.3 洪枯季动力作用系数差异及相关性分析

基于获得的 a 、 b 、 c 动力影响系数值,采用公式(3)比较洪、枯季浮标站流速的差异。根据本次洪、枯季实测情况,上游来流量和内伶仃岛潮差分别选取 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和 1.35 m ,潮周期平均流速的洪季和枯季比值结果如图7所示。可见,相同潮汐动力与径流动力作用下,除西滩水域A3站外,内伶仃洋水域其他浮标站潮周期涨潮平均流速呈洪季略大于枯季、落潮平均流速呈枯季略大于洪季;而西滩水域A3站潮周期涨潮平均流速和落潮平均流速均为洪季大于枯季。根据图3,洪季盛行东南风~西南风,有利于加强伶仃洋水域涨潮流;枯季盛行东北风~东风,有利于加强落潮流;洪、枯季海面季风的差异可能是导致洪、枯季潮周期平均流速差异的主要原因;A3站所在西滩水域开阔、水深浅,因此海面风对潮流影响较其他水域更显著。

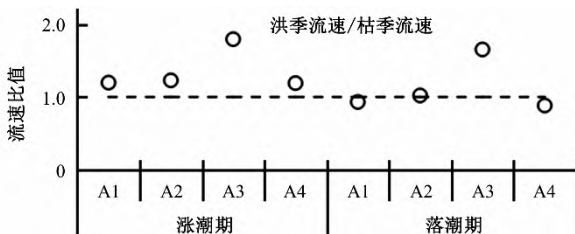


图7 洪枯季潮周期平均流速比较

Fig.7 Comparison of average velocities in tidal cycles during flood and dry season

将内伶仃洋水域作为一个整体,浮标站A1~A4作为该水域取样点,基于动力系数分析该水域各动力之间的相关关系,结果详见图8。不论洪、枯季,其他动力作用系数 c 与潮汐动力作用系数 a 之间点位分散,两者相关性不明显。但 c 与径流动力

作用为主并具有较大的水面比降,进入伶仃洋水域洪水径流具有较大的初始动量,其作用方向总体与涨潮流方向相反、落潮方向相同。因此,洪季 b 值总体表现为涨潮阶段为负、落潮阶段为正;枯季,网河区水面比降很小甚至出现负比降,以潮控为主,上游来流量小且动力弱,呈现随潮汐涨落运动,根据动量守恒原理,会导致潮流运动流速减小,因此涨、落阶段 b 值均为负值。

(3)其他动力综合作用系数 c 在洪、枯季的差异主要与季风和咸潮入侵引起的密度斜压梯度力等有关。洪季西南季风更有利于涨潮流,枯季东北风更利于落潮流,与系数 c 值均在0.2以上相对应。盐度密度差引起的斜压梯度力总体指向上游方向,其大小因滩、槽水深不同有所差异。

作用系数 b 存在很好的线性负相关,洪、枯季相关系数 R^2 分别达到0.99和0.81,线性斜率分别为 -0.015 和 -0.01 。因此,伶仃洋河口湾径流动力影响增强同时会引起除潮汐动力以外的其他作用力影响增强,两者对潮周期平均流速的影响为相互抵消,且该变化规律洪季较枯季更明显。代表其他动力因子中的河口垂向盐度密度差形成的斜压梯度力与径流动力密切相关,是 c ~ b 之间存在较好相关性的主要原因之一,也是洪季径流动力增强后两者相关性更好的主要原因。

3 洪枯季内伶仃洋水域冲淤规律探讨

3.1 潮周期平均流速中的径潮动力贡献之比分析

径、潮动力是伶仃洋河口湾潮流泥沙运动最为重要的作用力,基于公式(3),同样选取上游来流为 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和内伶仃岛站潮差 1.35 m 时,采用径、潮动力贡献之比 $bQ/(a\Delta z)$ 探讨其影响规律,结果如图9。径流系数 b 在枯季涨、落潮阶段及洪季涨潮阶段均为负,因此径流动力对潮流运动起着抑制作用。涨潮阶段,洪、枯季的径潮动力贡献之比 $bQ/(a\Delta z)$ 值均未小于 -1 ,显示潮汐动力能克服径流阻力并驱动伶仃洋的涨潮流运动;但横门延伸段水域A2站洪、枯季 $bQ/(a\Delta z)$ 值均接近 -0.9 , c 值是4个浮标站中最大,分别为0.47和0.36,显示该水域在径、潮动力基本相当且相互抵消的情况下,其他作用力主导涨潮流运动,洪季西滩水域涨潮阶段也存在该现象。枯季落潮阶段,除西滩水域径潮动力贡献之比小于 -1 ,其他水域也均未小于 -0.65 ,显示该阶段西滩水域仅依靠潮动力无法驱动落潮流运动,但其 c 值是枯季内伶仃洋水域涨、落潮阶段各浮标站中最大,为0.356,说明海面风或浅滩潮汐捕获等其他动力影响因子对枯季西滩

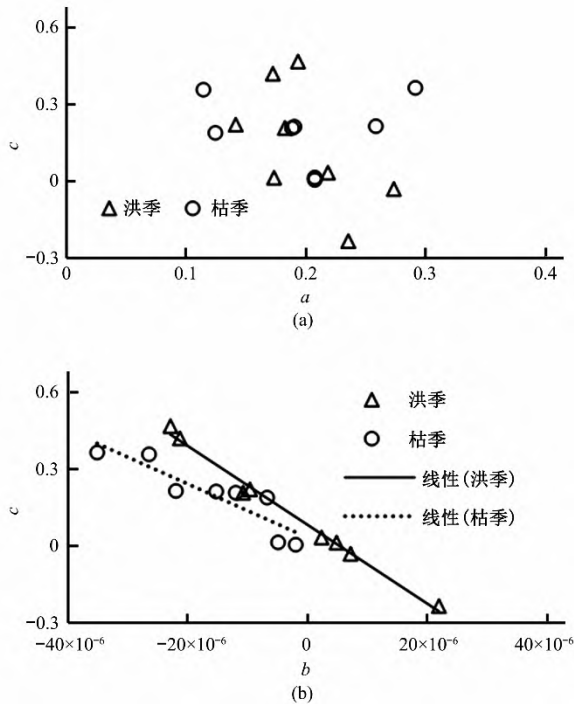


图8 洪枯季动力作用系数相关性分析图

Fig.8 Correlation analysis on coefficients of dynamic factors during flood and dry season

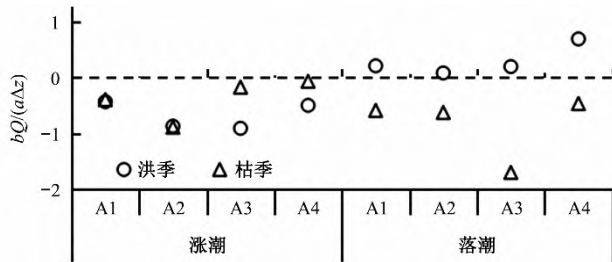


图9 洪枯季径潮动力对潮周期平均流速贡献之比

Fig.9 The ratios of the contribution by runoff to tidal power on average velocities in tidal cycles during flood and dry season

落潮流起主导作用。

3.2 洪枯季内伶仃洋水域冲淤变化规律讨论

伶仃洋河口湾输沙以悬移质为主^[16],年平均含沙量为0.1~0.2 kg/m³,平均中值粒径约6 μm左右^[17],干容重约686 kg/m³^[12]。径流动力在洪季涨潮阶段及枯季涨潮和落潮阶段均表现为削弱伶仃洋河口湾潮流流速,流速减小容易导致悬移质泥沙在河口湾落淤。采用罗肇森和罗勇^[18]适应浮泥起动公式,结合A1~A4站洪、枯季平均水深约5~7 m,计算平均水深下的泥沙起动流速 V_c 为0.36 m/s。采用泥沙起动流速作为悬移质泥沙冲淤的临界值,潮差给定时,采用公式(3)可以反推伶仃洋水域各站来流量临界值 Q_c ,公式如下:

$$Q_c = \frac{V_c - a\Delta z - c}{b} \quad (4)$$

潮差仍采用内伶仃岛站平均值1.35 m,基于洪枯季拟合动力作用系数 a 、 b 、 c 值,得到各站临界值 Q_c 如表3所示,计算中若 Q_c 小于0,表中全部以0代替。公式(4)中,当 $b>0$,上游来流量增大导致径流动力增强时有利于提升内伶仃水域的潮流流速,即 $Q>Q_c$ 时,悬沙不易落淤,若 $Q_c\leq 0$,则表示该水域不会出现淤

积。反之,当 $b<0$,上游来流量增大导致径流动力增强会削弱内伶仃洋水域流速,反而容易造成内伶仃洋河口湾泥沙的落淤,即 $Q>Q_c$ 容易造成悬沙落淤,当 $Q_c\leq 0$ 时表示该水域任何情况下都会形成淤积。讨论伶仃洋水域的冲淤变化规律有:

(1)洪季落潮阶段, $b>0$,显示进入伶仃洋河口湾的径流量越大,落潮流速也越大。临界流量 Q_c 显示,湾顶水域A1站最大,西滩水域A3站水域最小,显示该阶段湾顶水域容易形成悬沙落淤,西滩水域容易造成泥沙起动而出现冲刷。本次洪季日平均径流量约1.35万m³/s,与该阶段临界流量比较可知,悬沙将主要在湾顶水域和横门出口延伸段水域淤积。

(2)洪季涨潮阶段, $b<0$,显示上游径流量越大,涨潮流速越小。 Q_c 计算结果显示横门延伸段水域A2站最大、西滩水域A3次之,湾顶水域A1站和主槽水域A4站均不超过1.0万m³/s。因此,洪季涨潮阶段,悬沙容易在内伶仃洋湾顶和主槽水域淤积。

(3)枯季涨潮和落潮阶段, $b<0$,径流增大会减小伶仃洋河口湾潮流流速。本次枯季上游日平均来流量约1.0万m³/s,比较来看,枯季涨、落潮阶段,内伶仃洋河口湾水域基本都处于泥沙落淤状态,且涨潮阶段较落潮阶段更容易形成淤积。

表3 临界流量 Q_c 计算成果表万m³/sTab.3 Results of critical fluxes of Q_c calculated

浮标站		A1	A2	A3	A4
洪季落潮	$b>0$	2.32	1.38	0.32	1.26
洪季涨潮	$b<0$	0.87	1.61	1.37	0.53
枯季涨潮	$b<0$	0	1.13	0	0
枯季落潮	$b<0$	0.72	0.93	0.57	0.85

研究显示,洪季,珠江河口东四口门输入伶仃洋水域的径流和泥沙约占全年输入总量的80%和90%^[19],约60%的泥沙淤积在伶仃洋湾内^[20]。因此,洪季悬沙冲淤较枯季对伶仃洋水域滩槽演变更显著。进入珠江河口的洪水主要来自上游马口站和三水站,两站多年平均洪水流量为8 800 m³/s,多年平均洪峰流量为37 240 m³/s^[21]。与表3洪季临界流量比较,多年平均洪水流量下,落潮阶段除西滩A3站不易落淤外,其他水域都会形成悬沙淤积;涨潮阶段淤积主要出现在主槽水域A4站。洪峰流量下,伶仃洋水域泥沙落淤出现在涨潮阶段、冲刷出现在落潮阶段;从动力作用规律上揭示了近年伶仃洋水域出现的“滩冲槽淤”现象。

4 结论

基于近年内伶仃洋水域洪、枯季半月时段的实测水文数据,应用线性回归法很好的拟合了潮周期涨、落潮平均流速与上游来流量和平均潮差之间的线性关系。分析当前内伶仃洋水域洪、枯季潮流动力特征及其差异,初步讨论了内伶仃洋水域滩槽冲淤演变规律,主要结论有:

(1)潮周期平均流速中,潮汐动力作用系数 a 始终为正,显示潮汐动力始终是伶仃洋河口湾潮流往复运动的主要驱动力。洪季,径流动力作用系数 b 呈涨潮阶段为负、落潮阶段为正,与东四口门进入伶仃洋水域的洪水径流具有较大初速度和动量密切相关;枯季, b 值在涨、落潮阶段均为负,径流动力弱并以随潮流运动为主。其他动力综合作用系数 c 在洪、枯季的差异主

要与季风和咸潮入侵引起的密度斜压梯度力等有关,季风方向在洪季更有利于涨潮流,枯季更有利于落潮流,也是相同潮汐动力与径流动力作用下内伶仃洋水域洪、枯季流速呈现差异的重要原因。

(2)其他动力作用系数 c 与潮汐动力作用系数 a 之间不相关,与径流动力作用系数 b 存在很好的线性负相关。伶仃洋河口湾径流动力影响增强同时会引起除潮汐动力以外的其他作用力影响增强,两者对潮周期平均流速的影响为相互抵消的关系,洪季该现象较枯季更明显。

(3)基于伶仃洋河口湾泥沙启动流速引入临界径流量概念,洪季,落潮阶段除西滩水域不易落淤外,其他水域都容易形成悬沙淤积;涨潮阶段悬沙落淤出现在主槽水域A4站;揭示了近年伶仃洋水域“滩冲槽淤”现象对应的动力作用机制。枯季,伶仃洋水域整体处于泥沙落淤状态,且涨潮阶段更明显。

参考文献:

- [1] 赵焕庭. 珠江河口湾伶仃洋的地形[J]. 海洋学报, 1981, 3(2): 255-274. (ZHAO H T. Bottom relief of Ling Ding Yang of the Zhujiang River estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1981, 3(2): 255-274.)
- [2] 李春初. 潮汐作用为主的河口三角洲特征[J]. 海洋科学, 1982: 39-43. (LI C C. Characteristics of estuarine deltas dominated by tidal power[J]. Marine Sciences, 1982:39-43.)
- [3] 李春初. 论河口体系及其自动调整作用[J]. 地理学报, 1997, 52(4):353-360. (LI C C. On the estuarine system and its automatic adjustment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 52(4):353-360.)
- [4] 赵获能. 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. (ZHAO D N. Morphological evolution of the Pearl River Delta in the past 165 years and its response to human activities[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.)
- [5] 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. (YING Q, HE J, XIN W J. Influence of giant artificial sand pits on the natural evolution of Lingding Bay [J]. Advances in water science, 2019, 30(6): 915-922.)
- [6] 侯庆志, 陆永军, 王志力, 等. 河口湾水动力环境对滩涂利用的累积响应: 以珠江口伶仃洋为例[J]. 水科学进展, 2019, 30(6): 789-799. (HOU Q Z, LU Y J, WANG Z L, et al. Cumulative response of estuarine bay hydrodynamic environment to human activities: example of Lingding Bay of the Pearl River Estuary [J]. Advances in water science, 2019, 30(6):789-799.)
- [7] 刘晋涛, 胡嘉镗, 李适宇, 等. 围填海对伶仃洋水流动力的短期影响模拟研究[J]. 海洋通报, 2020, 39(2):178-190. (LIU J T, HU J T, LI S Y, et al. A model study on the short-term impact of reclamation on the hydrodynamic processes in the Lingdingyang Bay [J]. Marine Science Bulletin, 2020, 39(2): 178-190.)
- [8] 方神光, 陈文龙. 港珠澳大桥对伶仃洋河口水域纳潮影响分析[J]. 人民珠江, 2011(1): 18-22+72. (FANG S G, CHEN W L. Analysis of effect on tidal prism in the Lingdingyang estuary by Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Pearl River, 2011(1):18-22+72.)
- [9] 谢丽莉, 刘霞, 杨清书, 等. 人类驱动下伶仃洋洪季大潮水沙异变[J]. 泥沙研究, 2015(3):56-62. (XIE L L, LIU X, YANG Q S, et al. Variations of current and sediment transport in Lingding Bay during spring tide in flood season driven by human activities[J]. Journal of sediment research, 2015(3):56-62.)
- [10] 陈子桑. 珠江伶仃河口湾及邻近内陆架的纵向环流与物质输运分析[J]. 热带海洋, 1993, 12(4):47-54. (CHEN Z S. Analysis on longitudinal net circulations and material fluxes in Lingding estuary, Pearl River and adjacent inner shelf waters[J]. Tropic Oceanology, 1993, 12(4):47-54.)
- [11] 包芸, 任杰. 伶仃洋盐度高度层化现象及盐度锋面的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(6):689-693. (BAO Y, REN J. Numerical simulation of high resolution on the phenomenon of saline stratification in LinDinYang [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(6):689-693.)
- [12] 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.
- [13] 倪培桐, 韦愷. 强风作用下珠江伶仃河口湾能量耗散分析[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 35-41. (NI P T, WEI X. Effects of strong wind on tidal energy flux and dissipation in Lingdingyang Bay of Pearl River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3):35-41.)
- [14] 王宗旭, 乔煜, 季小梅, 等. 珠江河口岸线变化对潮动力的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3):1171-1180. (WANG Z X, QIAO Y, JI X M, et al. The influence of coastline changes on tidal dynamics in the Pearl River Estuary [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(3):1171-1180.)
- [15] 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. (FANG S G, LIU J G. A method of defining main tidal dynamic section and its applications in the Lingdingyang Estuary [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(11):950-957.)
- [16] 吴门伍, 严黎, 周家俞, 等. 港珠澳大桥对伶仃洋滩地演变影响试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(1):49-56. (WU M W, YAN L, ZHOU J Y, et al. Experimental study on evolution of Lingdingyang beach after completion of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(1):49-56.)
- [17] 李孟国, 韩志远, 许婷, 等. 伶仃洋港口航道泥沙问题研究[J]. 水运工程, 2021(9):1-8. (LI M G, HAN Z Y, XU T, et al. Study on sediment problems of harbors and channels in Lingdingyang Bay [J]. Port & Waterway Engineering, 2021(9):1-8.)
- [18] 罗肇森, 罗勇. 浮泥挟沙力和输沙规律的研究和应用[J]. 泥沙研究, 1997(4):42-46. (LUO Z S, LUO Y. Study on fluid mud-carrying capacity, sediment transport and their application [J]. Journal of Sediment Research, 1997(4): 42-46.)
- [19] 韩西军, 杨树森. 珠江口鸡抱沙附近地形冲淤演变研究[J]. 水道港口, 2008, 29(5):328-332. (HAN X J, YANG S S. Scour and silting evolution of topography around Jibaosha in the Zhujiang estuary [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 29(5):328-332.)
- [20] 陈文彪, 王琳, 邓家泉, 等. 珠江口伶仃洋的治理研究[J]. 水利学报, 1999(3):75-81. (CHEN W B, WANG L, DENG J Q, et al. Study on the harness of Lingdingyang Bay in Pearl River estuary [J]. Shuili Xuebao, 1999(3):75-81.)
- [21] 欧素英, 田枫, 郭晓娟, 等. 珠江三角洲径潮相互作用下潮能的传播和衰减[J]. 海洋学报, 2016, 38(12):1-10. (OU S Y, TIAN F, GUO X J, et al. Propagation and damping of tidal energy in the Pearl River Delta [J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(12): 1-10.)