

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.026

珠江三角洲河网地形和径流条件变化对潮动力格局的影响

钟子悦¹, 余明辉¹, 陈小齐¹, 蔡华阳²

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中山大学海洋工程与技术学院, 广东 广州 510275)

摘要:针对上游建库及航道疏浚等人类干预引发的河床不均匀下切与径流年内分配调整导致珠江三角洲河网内径流、潮汐、河口地形间相互作用随之变化的问题,基于连续小波变换方法,结合实测水文资料与河网一维水动力模型,对比分析了地形与径流变化前后河网潮动力格局的调整,并将一维圣维南方程中的非线性摩擦项分解为径流成分、径潮作用成分、潮汐成分,量化了各成分对于潮动力格局调整的贡献。结果表明:地形与径流变化后,洪季各潮族动力均显著增强,枯季高频潮族动力衰减更迅速,枯季径流量增加对潮汐的调制作用在大部分河道抵消了地形下切造成的潮汐动力增强;河网上游非线性摩擦项中径潮作用成分对于潮动力格局调整的贡献增大,径潮非线性作用增强。

关键词:径潮作用;连续小波变换;一维水动力模型;水安全;珠江三角洲

中图分类号:P231.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0213-09

Effects of changes in river network topography and runoff on tidal dynamic pattern in Pearl River Delta//ZHONG Ziyue¹, YU Minghui¹, CHEN Xiaoqi¹, CAI Huayang² (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The uneven undercutting of the riverbed and the adjustment of the intra-annual runoff distribution caused by human interventions, including upstream reservoir construction and channel dredging, have led to changes in the interactions between runoff, tide, and estuarine topography in the Pearl River Delta river network. Based on the continuous wavelet transform method, measured hydrological data and the one-dimensional hydrodynamic model of the river network were applied to comparatively analyzing the adjustment of tidal dynamic pattern in the river network before and after the changes in topography and runoff, and the nonlinear friction term in the one-dimensional Saint-Venant equation was decomposed into runoff component, runoff-tidal component, and tidal component to further quantify the contribution of each component to the adjustment of tidal dynamic pattern. The results show that, with the changes in runoff and topography, the tidal dynamics of different tidal species significantly increases in the flood season, the tidal dynamics of high-frequency tidal species decays more rapidly in the dry season, and the tidal modulation effect caused by runoff increase in the dry season offsets the tidal dynamic enhancement caused by topographic downcutting in most river channels; the contribution of the runoff-tide interaction component in the nonlinear friction term to the adjustment of tidal dynamic pattern in the upstream river network increases with the changes in runoff and topography, and the runoff-tide nonlinear action is enhanced.

Key words: runoff-tidal interactions; continuous wavelet transform; one-dimensional hydrodynamic model; water security; Pearl River Delta

河口地区的河网是连接大陆和海洋的通道,受径流、潮汐的共同影响^[1]。潮汐、径流、河口形态间的非线性相互作用导致潮波在向陆传播过程中发生

变形^[2-3]。在径潮共同作用的区域,河道水位由平均水位、潮汐水位构成^[4],余水位一定程度上代表了径流作用的强度,而潮波的振幅则代表了潮汐动

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402604)

作者简介:钟子悦(1999—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zzyfromqtow@whu.edu.cn

通信作者:余明辉(1969—),女,教授,博士,主要从事河流动力学研究。E-mail: mhyu@whu.edu.cn

力的强度。在 Cai 等^[5]提出的河口解析模型动量方程中,余水位梯度项与非线性摩擦项相平衡,通过求解余水位梯度,可以间接分析径潮动力在河口的相互作用。也有学者从潮波振幅在河网内的变化过程角度分析了径潮动力的相互作用^[6],潮波从外海传播至河口时,由于径流的调制,潮汐序列变为非平稳潮汐信号,径流与潮汐的相对动力强度影响了潮区界的位置、盐水向陆地方向入侵长度、河口取水口位置。同时,潮汐由外海开边界向河口传播过程中,边界逐渐收缩,潮汐动力随之增强。因此,河网内的水动力受到径流量大小、河口形态、天文潮汐动力强度等多方面影响。

改革开放以来,珠江三角洲河床地貌在空间与时间上都受到人类活动的广泛影响,包括长期河道采砂对河道地形的影响^[7]和河网上游水库建设对河网区来水来沙量的影响^[8]。2000 年后,西北江因水库建设拦沙及航道疏浚等原因导致河床下切^[9],河道地形下切使得潮汐上溯阻力减小,河网内潮汐动力显著增强,口门至上游站点水位及潮差增大^[10-11]。珠江下游 1960—2017 年的径流数据显示,该时段内珠江径流量年际变化较小,径流量年内集中度在水库的调蓄作用下逐渐减小^[12],珠江三角洲河网枯季平均水位有抬升趋势,洪季平均水位有下降趋势^[13]。水库对珠江三角洲径流量的年内调节作用使得磨刀门河口水位坡度缓降,外海潮波所受摩阻减小,咸潮上溯加剧^[14]。

在强人类活动影响下,珠江三角洲径流、潮波、河口形态相互作用体系可能发生了新的变化^[15],咸潮入侵是影响珠江三角洲水安全的主要水环境问题^[16-17],与珠江三角洲河网潮动力有直接关系,有必要对河网内的径潮动力格局的变化进行研究。本文从人类活动驱动的河道地形变化和径流年内分配变化两个角度探讨这些变化与珠江三角洲河口河网潮动力格局变化的关系,研究结果可为珠江三角洲水资源调度以及河道管理提供理论依据。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

珠江发源于云贵高原,珠江的三大支流(西江、北江、东江)在广东省汇合,形成复杂的三角洲河网,最终通过 8 个口门进入南海(图 1)。其中,西江与北江河网是珠江三角洲河网的主要部分^[18]。

1949 年以来,珠江流域已建成 8 900 多座大坝和水库,以满足防洪安全和用水需求^[19]。1997 年天生桥水库和 2006 年龙滩水库建成后,珠江三角洲水库累计库容增加到 753 亿 m^3 ,水库可调节库容占

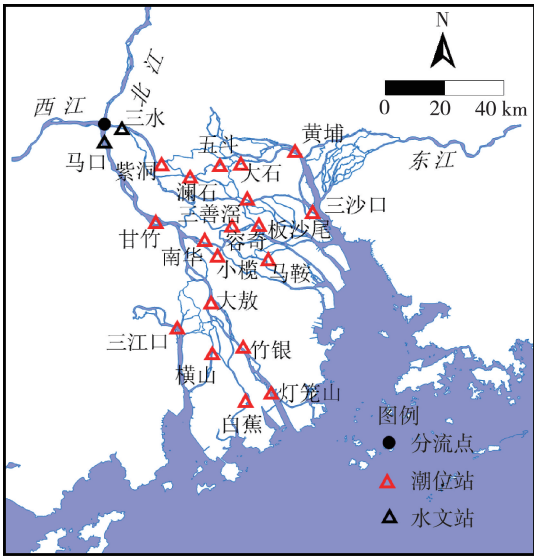


图 1 珠江三角洲河网水系

Fig. 1 Pearl River Delta river network

珠江流域年径流量的 22.4%。水库不仅截留了大量沉积物,也改变了自然径流过程。2000—2016 年珠江三角洲年径流量变化不大,多年平均值在 $8\,222\text{ m}^3/\text{s}$ 附近波动,在水库对径流的调节作用下,枯季径流量占年径流量的比例不断增加,洪季则相应减少。2016 年枯季径流量占年径流量的 36%,比 2002 年增加近 1 倍^[12]。水沙输入的变化、航道疏浚工程、河道采砂共同导致了珠江三角洲河道河床的大幅度下切。如图 2 所示(下切深度大于 0 为冲刷,小于 0 为淤积),珠江三角洲河道除虎门入海处航道外,均已大范围下切;上游河网下切 2 m 以上,西江河网顶部下切 3 m 以上,明显大于下游;干流河道平均下切

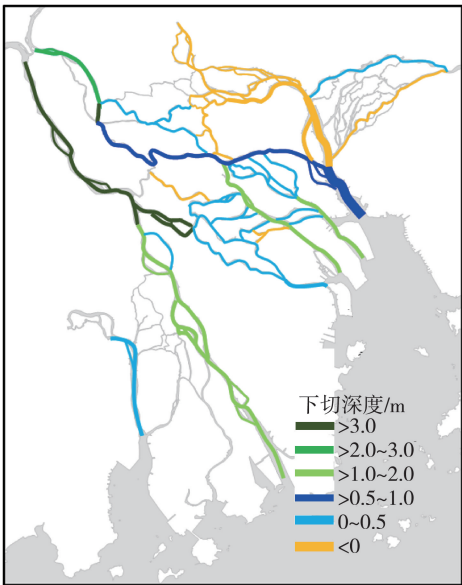


图 2 珠江三角洲河网 1999—2016 年间河床下切深度

Fig. 2 Downcutting depth of riverbed in Pearl River Delta river network from 1999 to 2016

深度远大于支流河道,说明研究时期内珠江三角洲河网的河床下切具有空间不均匀性。综上,进入 21 世纪以来,珠江三角洲河网地形和年内径流条件发生了较大的变化。

本文选择河网内的主要河道研究向陆传播过程中潮汐动力的演变。珠江三角洲最主要的分潮为 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 ,以 M_2 分潮为主。8 个口门年平均潮差为 0.85 ~ 1.62 m, K_1 与 O_1 分潮振幅之和与 M_2 分潮振幅比在 0.94 ~ 1.77 之间,表明珠江三角洲河口潮汐性质属半日潮型。

1.2 数据来源

为了分析珠江三角洲河网潮族动力的时空分布,本文收集了珠江三角洲河网中的 19 个潮位站(图 1)和 2 个水文站(马口和三水)4 场水文过程的逐时同步水位测量数据,包括 1999 年 7 月 15—22 日和 2017 年 7 月 11—18 日发生的两场洪季水文过程(以下分别简称“997”和“177”)和 2001 年 2 月 7—22 日和 2016 年 11 月 30 日—12 月 7 日发生的两场枯季水文过程(以下分别简称“012”和“1612”),并基于 1999 年和 2016 年测量的珠江三角洲河道地形数据构建河网一维水动力模型。以上数据来源于广东省水文局和广东省水利电力勘测设计研究院有限公司。

2 研究方法

2.1 连续小波变换

在感潮河道,潮波与非平稳径流交汇,此区段内的水体包含不同频率成分。潮波按其运动频率可分为全日周期潮族(D_1)、半日周期潮族(D_2)、1/4 日周期潮族(D_4),河流水体运动周期较长,一般在 2 d 以上。受流量调制,这些成分对河道内水位的波动及水体的往复流动有着不同程度的影响,因此在频域上将河网水位区分开来有助于研究径潮动力的变化。

连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)是一种分析非平稳潮汐过程的有效方法,其思路是将小波变换用作潮汐信号时间序列的带通滤波器^[20]。通过带通滤波器,潮汐信号的时间序列可以分解为不同频率的信号,连续小波变换允许任意数量的归一化小波函数用于匹配潮汐频率^[21]。连续小波 W_s 被定义为一个时间序列信号的卷积:

$$W_s = \sqrt{\frac{\delta t}{s}} \sum_{k=1}^M F_k \psi(k - k') \frac{\delta t}{s} \quad (1)$$

式中: s 为尺度(频率); k 为时间序列; k' 为时间序列的平移量; δt 为时间步长; F_k 为数据的时间序列; ψ

为归一化的小波函数,用于保证小波变换在各个尺度上的直接可比性。

Morlet 小波类似于水文变化下的波浪,通常被选为母小波来分析潮位时间序列。小波函数为

$$\psi = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 t'} e^{-\frac{1}{2}t'^2} \quad (2)$$

式中: ω_0 为无量纲频率; t' 为无量纲时间。

利用 Morlet 小波,将潮位信号分解为不同频率的潮族,潮族的振幅为

$$A_i = \sqrt{\int_{s_{1i}}^{s_{2i}} \frac{W_s^2}{2\pi s} ds} \quad (3)$$

式中: A_i 、 s_i ($i=1,2,4$) 分别为 D_1 、 D_2 、 D_4 潮族的振幅和尺度范围; s_{1i} 、 s_{2i} ($i=1,2,4$) 分别为 D_1 、 D_2 、 D_4 潮族尺度范围的下限和上限。

2.2 珠江三角洲河网一维水动力模型

珠江三角洲河网一维水动力模型原理、求解方法及模拟范围详见文献[22]。因潮位是分析潮汐动力的关键指标,运用潮位计算值和实测值的均方根误差(root mean square error, RMSE)评估模型精度。1999 年地形条件下珠江三角洲河网自口门到上游顶点的 3 个代表性站点的潮位过程计算值和实测值对比见图 3。统计 21 个测站(图 1)洪季和枯季率定期(洪季为 1999 年 7 月 15—20 日,枯季为 2001 年 2 月 7—18 日)潮位计算值与实测值的 RMSE 分别为 0.04 m 和 0.05 m,洪季和枯季验证期(洪季为 1999 年 7 月 21—22 日,枯季为 2001 年 2 月 19—22 日)潮位计算值与实测值的 RMSE 均为 0.06 m。此外,统计模型 2016 地形条件下 21 个测站(图 1)洪季和枯季率定期(洪季为 2017 年 7 月 11—16 日,枯季为 2016 年 11 月 30 日—12 月 5 日)潮位计算值与实测值的 RMSE 分别为 0.04 m 和 0.05 m,洪季和枯季验证期(洪季为 2017 年 7 月 17—18 日,枯季为 2016 年 12 月 6—7 日)潮位计算值与实测值的 RMSE 均为 0.06 m。根据《水利工程水利计算规范》(SL 104—2015)对感潮河道水动力模型计算的精度要求,模拟值的可接受误差在 0.1 m 以内,本文模型的 RMSE 以及误差变化值均在 0.1 m 以下,表明该模型可应用于模拟珠江三角洲河网的潮汐动力变化。

3 结果与分析

3.1 河网内潮族动力分布

利用 CWT 对 4 场水文过程中潮位站的水位序列进行分解,得到洪季与枯季的潮族平均振幅分布,如图 4 所示。其中,“997”“177”和“012”“1612”的水文过程分别视为人类活动引起河网径流条件和地

。实测值 — 模拟值

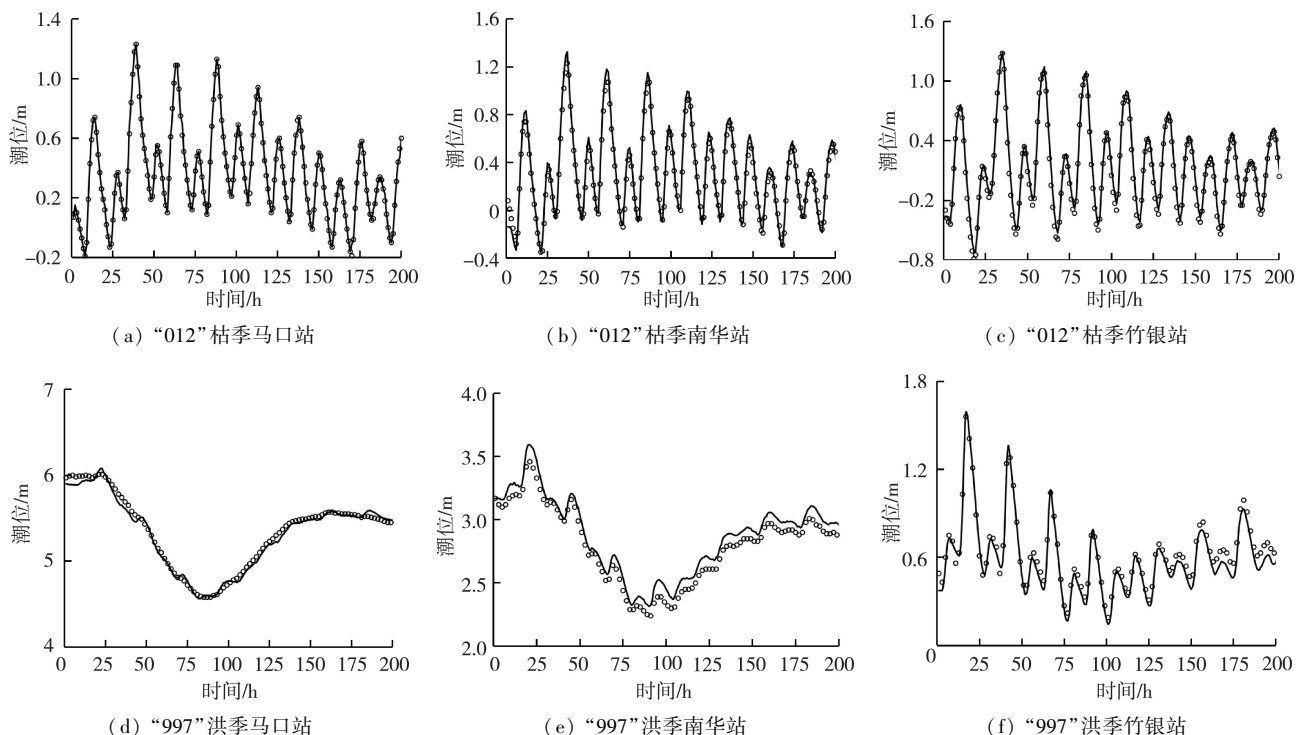


图3 模型潮位计算值与实测值对比

Fig.3 Comparison between model computed and observed tidal levels

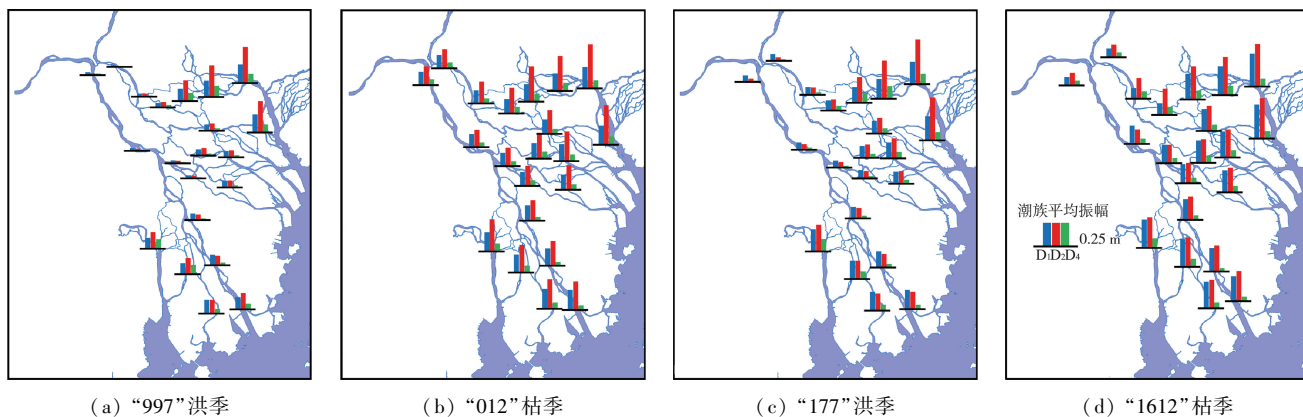


图4 洪季和枯季主要潮族平均振幅分布

Fig.4 Distributions of average amplitude of main tidal species in flood and dry seasons

形变化前后洪季与枯季的水文过程。由于洪季径流量较大,洪季潮波振幅明显小于枯季。河网两侧崖门和虎门潮汐动力较强, D_1 和 D_2 潮族平均振幅分布呈现从两侧向中部递减趋势。 D_4 潮族的最大平均振幅并未出现在口门,而是出现在河口上游河道,表明产生 D_4 潮族的非线性效应在传播路径上先增大后减小。在河网的大部分地区, D_2 潮族平均振幅最大,占主导地位,其次是 D_1 和 D_4 潮族。随着潮汐上行, D_2 与 D_1 潮族平均振幅变小,在河网顶部部分地区, D_1 潮族平均振幅甚至大于 D_2 潮族。这是因为来自河口的 D_2 潮族平均振幅更大,频率更高,其衰减也更迅速。对比近期人类活动引起河网径流条件及地形变化前后的潮波振幅分布发现,河网径流条件

及地形变化后,洪季 D_1 、 D_2 、 D_4 潮族的平均振幅最大增加0.22 m、0.24 m和0.06 m;枯季 D_1 潮族平均振幅最大增加0.20 m, D_2 潮族平均振幅最大减少0.06 m, D_4 潮族平均振幅变化不大。

3.2 主要河道潮差衰减过程

使用潮汐摩阻系数 d 量化潮汐在传播过程中的衰减,其计算公式^[2]为

$$d = \frac{2}{H_1 + H_2} \frac{H_2 - H_1}{\Delta x} \quad (4)$$

式中: H_1 为口门处的潮差; H_2 为向陆距离口门 Δx 处的潮差。 d 的绝对值越大(d 一般小于0),潮差在空间尺度上衰减得越快。

图5为洪季与枯季从口门到分流点的潮汐摩阻

系数变化值(洪季为“177”潮汐摩阻系数减去“997”潮汐摩阻系数,枯季为“1612”潮汐摩阻系数减去“012”潮汐摩阻系数),对比“177”与“997”洪季水文过程,由于地形下切,河床阻力减小,各潮族摩阻系数均有增加(图 5(a)),而枯季潮汐摩阻系数在一些路径(如万顷沙—三水和南沙—三水)略有减小(图 5(b))。图 6 统计了灯笼山—马口、万顷沙—三水、大虎—三水、大虎—黄埔等河道中不同潮族的潮汐摩阻系数分布。从图 6 中可以看出,上游河网的潮汐摩阻系数绝对值多数大于下游河网,表明上游河网中的潮波遇到了更大阻力。此外, D_2 潮族的潮汐摩阻系数绝对值普遍大于 D_1 潮族,表明 D_2 潮族由于频率较高而更容易被径流削弱。由于潮能的辐聚效应,在伶仃洋附近的大虎—黄埔河道潮汐摩阻系数大于 0。如图 6(a)~(c)和 6(g)~(i)所示,人类活动引起河网径流条件及地形变化

后,几乎所有河道的潮汐摩阻系数绝对值在洪季均呈现减小趋势,且 D_2 潮族的潮汐摩阻系数绝对值减小趋势比 D_1 潮族更显著。结果表明,对于洪季的潮波,河床下切和洪季径流量减少导致向陆传播过程中潮波受到的阻力减小,而 D_2 潮族对这种变化相对敏感,变化幅度最大。对于枯季的潮波,枯季径流量增加导致潮波受到的阻力增加,在部分河道(如官冲—马口、西炮台—马口、横门—马口、万顷沙—三水、南沙—三水)抵消甚至超过了河床下切对潮波传播所受阻力的减小作用,导致潮差减小和摩阻系数绝对值的增大;而在由径流动力主导的黄金—马口与灯笼山—马口河道,由于地形下切幅度远大于其他河道(图 2),河道的潮汐摩阻系数绝对值减小,潮汐摩阻总体表现为减小的趋势,潮动力最强的大虎—三水河道潮汐摩阻亦表现为减小的趋势。

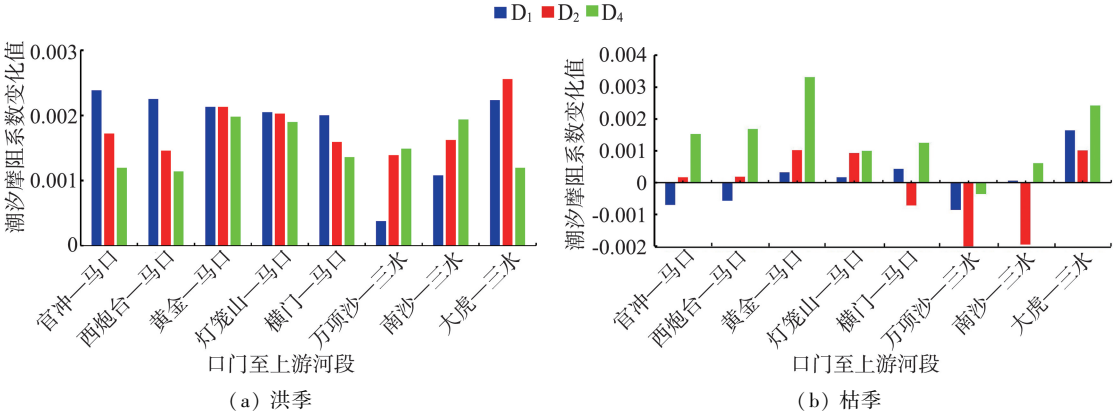


图 5 洪季与枯季从出口到顶点的潮汐摩阻系数变化值

Fig. 5 Tidal damping coefficient differences from outlet to apex during flood and dry seasons

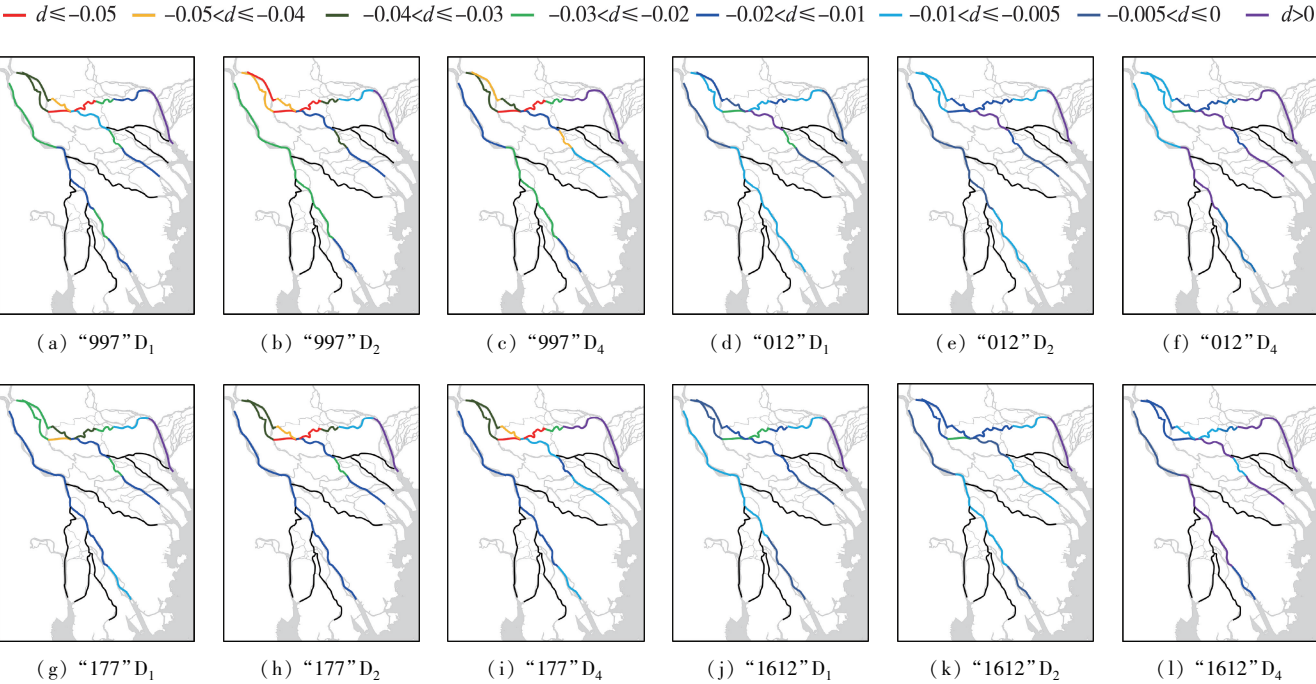


图 6 不同潮族潮汐摩阻系数在 3 个主要河道中的分布

Fig. 6 Distributions of tidal damping coefficient of different tidal species in three main channels

3.3 潮汐、径流、河口形态非线性相互作用沿程演化

潮汐、径流、河口形态之间的相互作用对潮汐向陆传播有重大影响,这种非线性相互作用难以量化。 M_2 分潮为珠江三角洲河口的主要分潮,潮波在进入浅水区后,由于径流及摩阻影响,潮波演化成不同的频率成分,其中 D_4 潮族便是这种作用的代表, D_4 潮族与 D_2 潮族振幅的相对大小代表了径流动力与潮汐动力的相对强弱。本文使用 A_4/A_2 (D_4 与 D_2 潮族的平均振幅比) 定量估计非线性相互作用的强度^[3],图 7 为河网内 A_4/A_2 沿不同河道纵向剖面的变化。2 个河道的 A_4/A_2 均先增大后减小,峰值出现在河道中间,说明潮波变形在潮汐传播路径上逐渐增大,直至在上游出现强变形点,反映出主要潮族从天文潮转变为浅水潮,河口向感潮河网过渡。此外,灯笼山—马口河道 A_4/A_2 在洪季和枯季的峰值位置相对较近,而大虎—三水河道 A_4/A_2 枯季峰值出现在比洪季更靠上游的位置。这表明由于径流作用弱,过渡点在枯季向上游移动,这与枯季上游潮波变形强而洪季下游潮波变形强的现象是一致的。河网来水

来涉及地形变化后,上游河道的 A_4/A_2 显著增加,表明河网地形及径流条件变化后,河网上游的非线性相互作用增强。

4 讨论

4.1 地形与年内径流条件变化对河网潮动力格局的影响

设置 6 个工况如表 1 所示。下游边界条件设置为“997”和“012”潮汐序列,上游边界条件设置为相应的“997”和“012”流量序列增加或减少 $1\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 。如前所述,年内径流条件变化后,在年均流量变化不大的前提下,枯季流量占年径流量比例增加了近一倍,故本文数值模型将“012”枯季平均流量 ($1\,300\text{ m}^3/\text{s}$) 作为变化指标。与原始情况 (“997”和“012”) 相比,工况 A1 和 A2 只改变了上游径流,采用了原始下边界潮位和地形,研究径流变化的影响;工况 A3 和 A4 只改变了地形,采用了原始下边界潮位和上游径流,研究地形变化的影响;工况 A5 和 A6 改变了上游径流和地形,旨在揭示上游径流和地形变化带来的综合影响。

图 8 给出了各工况下计算值与变化前实测值之间的潮汐振幅变化值。径流变化使潮汐振幅在洪季 (A1) 增大,在枯季 (A2) 减小;地形下切增大了洪季和枯季 (A3 和 A4) 的潮汐振幅;洪季径流量减小和地形下切的共同作用使潮汐振幅显著增加 (A5),枯季径流量增大和地形下切的共同作用使潮汐振幅小幅度增加,甚至使河网顶部的潮汐振幅减小 (图 8 (a) ~ (f) 的 A6)。总体来看,径流变化对潮汐振幅的影响从上游向下游递减。A4 工况下,灯笼山—马口河道 D_2 潮族振幅变化最大值为 0.1 m ,出现在河网顶部;万顷沙—三水河道 D_2 潮族振幅变化最大值为 0.05 m ,出现在河网中部,因此对于灯笼山—马口河道,其枯季潮动力受地形影响程度大于万顷沙—三水与大虎—三水河道,受地形变化影响较大的是西江河网上部 (图 8 (h) ~ (j) 的 A4) 和北江河网中部 (图 8 (a) ~ (f) 的 A4)。洪季地形变化对潮汐振幅的影响大于径流变化对潮汐振幅的影响,不同河道 A3 工况下 D_2 潮族振幅变化均值比 A1 工

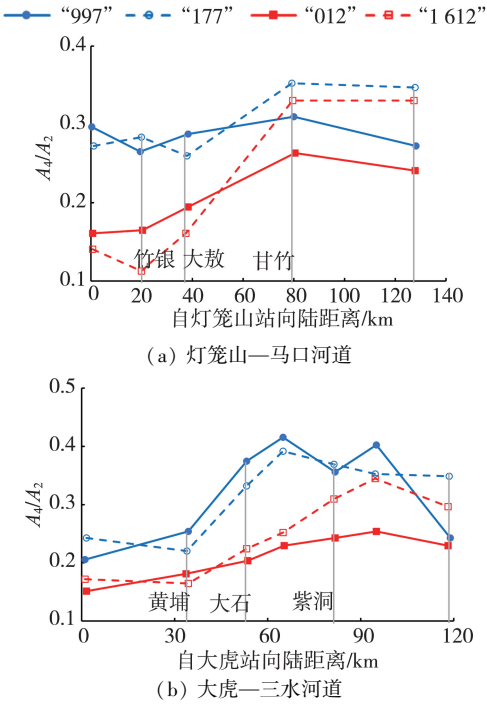


图 7 A_4/A_2 沿不同河道纵向剖面变化

Fig. 7 A_4/A_2 in longitudinal profiles along different channels

表 1 模型工况

Table 1 Model scenarios

工况	变化	下游边界条件	上游边界条件	河网地形
A1	只改变上游径流	“997”潮位序列	“997”流量减少 $1\,300\text{ m}^3/\text{s}$	1999 年
A2		“012”潮位序列	“012”流量增加 $1\,300\text{ m}^3/\text{s}$	1999 年
A3	只改变地形	“997”潮位序列	“997”流量	2016 年
A4		“012”潮位序列	“012”流量	2016 年
A5	上游径流和地形均改变	“997”潮位序列	“997”流量减少 $1\,300\text{ m}^3/\text{s}$	2016 年
A6		“012”潮位序列	“012”流量增加 $1\,300\text{ m}^3/\text{s}$	2016 年

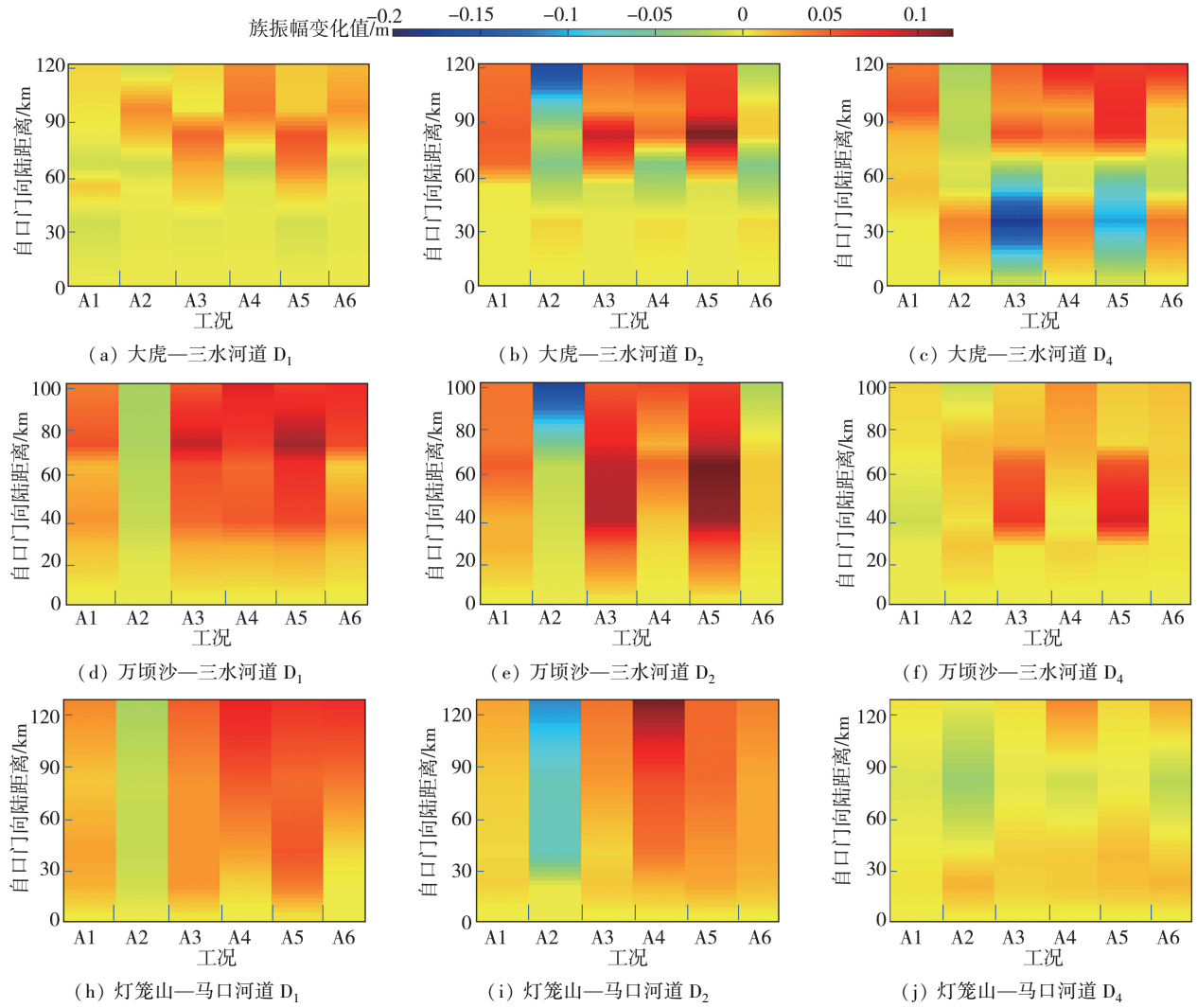


图8 各工况下河网径流及地形变化前后河网潮汐振幅的差异

Fig.8 Differences of tidal amplitudes before and after runoff and topographic changes in river network in different scenarios

况下的均值大 0.02 ~ 0.04 m。然而,这两种变化对潮汐振幅的影响在枯季几乎是相互抵消的,A6 工况下不同潮族振幅变化均值均在 0.01 m 以下。径流和地形变化对 D₂潮族的影响大于对 D₁潮族的影响,由于频率更高,D₂潮族对径流量增大和地形下切产生的影响更敏感。

4.2 河网径潮非线性作用机制的变化

一维河网水动力模型的动量控制方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \left(2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + gA \frac{U |U|}{C^2 R} = 0 \quad (5)$$

式中: Q 为流量; A 为断面面积; R 为水力半径; U 为断面流速; C 为谢才系数; g 为重力加速度; η 为潮位; x 、 t 分别为一维空间与时间坐标。

式(5)中 $\frac{gA}{C^2 R} U |U|$ 为主要的非线性项,利用切

比雪夫多项式将 $U |U|$ 乘积项分解为 $aU + bU^3$ ^[23], 其中 a 、 b 为多项式系数。在一个全日周期内,断面流速主要受河流流速及全日、半日、1/4 日潮流流速

影响,因此断面平均流速可近似分解为

$$U \approx U_0 + U_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + U_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + U_4 \cos(4\omega t + \varphi_4) \quad (6)$$

式中: U_0 、 U_1 、 U_2 、 U_4 分别为河流流速和全日、半日、1/4 日潮流平均流速; φ_1 、 φ_2 、 φ_4 分别为全日、半日、1/4 日潮流相位差; ω 为频率。

由式(6)可得:

$$aU + bU^3 = aU_0 + bU_0^3 + \frac{3b}{2}(U_0 U_1^2 + U_0 U_2^2 + U_0 U_4^2) + \frac{3b}{4}[U_1^2 U_2 \cos(2\varphi_1 - \varphi_2) + U_2^2 U_4 \cos(2\varphi_2 - \varphi_4)] \quad (7)$$

非线性摩擦项可分解为代表径流作用的 S_r 、代表径潮作用的 S_n 和代表潮流作用的 S_l ^[24]:

$$S_r = aU_0 + bU_0^3 \quad (8)$$

$$S_n = \frac{3b}{2}(U_0 U_1^2 + U_0 U_2^2 + U_0 U_4^2) \quad (9)$$

$$S_l = \frac{3b}{4}[U_1^2 U_2 \cos(2\varphi_1 - \varphi_2) + U_2^2 U_4 \cos(2\varphi_2 - \varphi_4)] \quad (10)$$

由于枯季潮汐动力相较于径流动力更强,容易诱发咸潮入侵等灾害,因此,枯季的径潮动力相互作用更受关注。基于“012”枯季实测值和一维河网水动力模型对 A2、A4 工况的计算结果,利用小波分析将断面平均流速模拟值分解为 U_0 、 U_1 、 U_2 、 U_4 ,根据式(7)计算出 S_r 、 S_n 、 S_t 。灯笼山—马口河道不同工况下 S_r 、 S_n 、 S_t 沿河道的变化结果如图 9 所示,图中“基准”代表实测值分析结果。枯季流量增大后,河网上游 S_r 与 S_n 增大,导致上游潮波变形增强;地形下切后,河网上游 S_n 增大,上游潮波变形增强,河网上游的非线性作用增强。

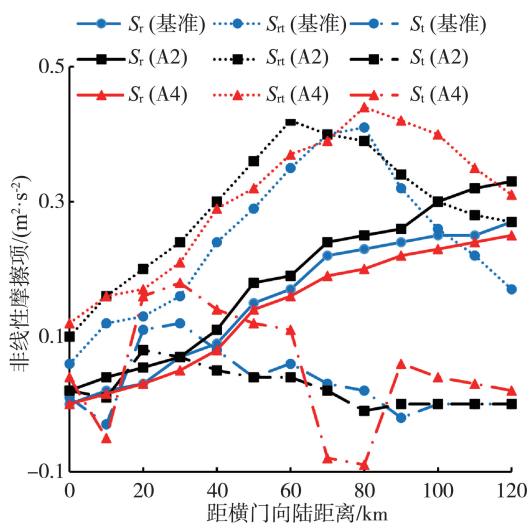


图 9 不同工况下 S_r 、 S_n 、 S_t 沿河道的变化

Fig. 9 Changes of S_r , S_n , and S_t along river channel in different scenarios

5 结 论

a. 径流减小和地形下切的综合影响使得洪季 D_1 、 D_2 、 D_4 潮族振幅最大增幅分别为 0.22 m、0.24 m 和 0.06 m,潮族的摩阻显著减小。枯季大部分河道因径流增大,其潮汐摩阻总体表现为增大,而灯笼山—马口河道潮汐摩阻在剧烈地形下切驱使下呈现减小趋势。

b. 洪季地形变化对潮差的影响大于径流变化对潮差的影响;“012”枯季径流若增加至变化前平均流量的两倍,径流变化将几乎抵消河道地形下切对下游河网潮动力的影响。

c. 河网径流条件及地形变化后,河网上游径潮非线性作用增强,促使潮波变形增强。此外,由于频率更高, D_2 潮族相比于 D_1 潮族对径流量增大和地形下切产生的影响更敏感。

参考文献:

[1] TEJEDOR A, LONGJAS A, ZALIAPIN I, et al. Delta channel networks: 1. a graph-theoretic approach for

studying connectivity and steady state transport on deltaic surfaces[J]. Water Resources Research, 2015, 51(6): 3998-4018.

[2] CAI Huayang, TOFFOLON M, SAVENIJE H H G, et al. Frictional interactions between tidal constituents in tide-dominated estuaries[J]. Ocean Science, 2018, 14(4): 769-782.

[3] GUO Leicheng, VAN DER WEGEN M, JAY D A, et al. River-tide dynamics: exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(5): 3499-3521.

[4] 欧素英,杨清书. 珠江三角洲网河区径流潮流相互作用分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 125-131. (OU Suying, YANG Qingshu. Interaction of fluctuating river flow with a barotropic tide in river network of the Zhujiang Delta[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(1): 125-131. (in Chinese))

[5] CAI Huayang, SAVENIJE H H G, JIANG Chenjuan, et al. Analytical approach for determining the mean water level profile in an estuary with substantial fresh water discharge[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2015, 12(8): 8381-8417.

[6] 谢梅芳,张萍,杨昊,等. 珠江“伶仃洋河口湾—虎门—潮汕通道”的潮波传播特征[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(4): 1-13. (XIE Meifang, ZHANG Ping, YANG Hao, et al. Tidal wave propagation dynamics in Lingdingyang Bay-Humen outlet-tidal channel of the Pearl River[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40(4): 1-13. (in Chinese))

[7] 余明辉,王睿璞,陈小齐,等. 地形和径潮条件变化对东江三角洲洪季连通性影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 759-769. (YU Minghui, WANG Ruipu, CHEN Xiaoqi, et al. Effects of riverbed evolution and fluvial-tidal dynamics change on river connectivity during flood season in the Dongjiang River Delta[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(5): 759-769. (in Chinese))

[8] 谢凌峰,申其国,徐治中. 20 世纪 80 年代以来珠江三角洲网河区河性演变[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 10-13. (XIE Lingfeng, SHEN Qiguo, XU Zhizhong. Evolution of river characteristics in river network of Pearl River Delta since 1980s[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 10-13. (in Chinese))

[9] 袁菲,何用,许劭婧. 近期珠江三角洲地形演变特征及趋势[J]. 泥沙研究, 2022, 47(1): 59-64. (YUAN Fei, HE Yong, XU Jiejing, et al. Recent topographical evolution characteristics and trend of the Pearl River Delta[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(1): 59-64. (in Chinese))

[10] 韩志远,田向平,欧素英. 人类活动对磨刀门水道河床地形和潮汐动力的影响[J]. 地理科学, 2010, 30(4):

- 582-587. (HAN Zhiyuan, TIAN Xiangping, OU Suying. Impacts of large-scale human activities on riverbed morphology and tidal dynamics at Modaomen Estuary [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30 (4): 582-587. (in Chinese))
 - [11] 肖洋,王艳,徐辉荣,等.珠江三角洲洪水就近入海防洪治理方案[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):257-264. (XIAO Yang, WANG Yan, XU Huirong, et al. Analysis on flood control scheme for flood discharge from nearer route in the Pearl River Delta[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 257-264. (in Chinese))
 - [12] 杨远东,王永红,蔡斯龙,等.1960—2017年珠江流域下游径流年际与年内变化特征[J].水土保持通报,2019,39(5):23-31. (YANG Yuandong, WANG Yonghong, CAI Silong, et al. Interannual and intra-annual variation characteristics of runoff in downstream areas of Pearl River Basin during 1960-2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 23-31. (in Chinese))
 - [13] 杭宜铖,范敏韬,刘智勇.基于REOF的珠江三角洲河网区水位时空变异特征分析[J].水资源保护,2022,38(2):139-146. (HANG Yicheng, FAN Mintao, LIU Zhiyong. Spatiotemporal variation of water level in Pearl River Delta network area based on REOF[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 139-146. (in Chinese))
 - [14] 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,2020,51(7):869-881. (YANG Hao, OU Suying, FU Linxi, et al. Quantifying the impacts of external forcing on daily averaged water levels in the Modaomen Estuary of the Pearl River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 869-881. (in Chinese))
 - [15] 张先毅,杨昊,黄竞争,等.强人类活动驱动下珠江磨刀门河口径潮动力的季节性异变特征[J].海洋与湖沼,2020,51(5):1043-1054. (ZHANG Xianyi, YANG Hao, HUANG Jingzheng, et al. Impact of intensive human activity on seasonal variation in river-tide dynamics in the Modaomen Estuary of Zhujiang (Pearl) River[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(5): 1043-1054. (in Chinese))
 - [16] 彭静,王浩.珠江三角洲的水文环境变化与经济可持续发展[J].水资源保护,2004,20(4):11-14. (PENG Jing, WANG Hao. Variation of water environment and sustainable development of economy in Pearl River Delta[J]. Water Resources Protection, 2004, 20(4): 11-14. (in Chinese))
 - [17] 林若兰,卓文珊,曾珂,等.不同风向对珠江东四口门盐水平入的影响[J].水资源保护,2020,36(1):66-75. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, ZENG Ke, et al. Influence of different wind direction on saltwater intrusion in east four portals of Pearl River[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 66-75. (in Chinese))
 - [18] ZHANG Wei, WANG Weiguang, ZHENG Jinhai, et al. Reconstruction of stage-discharge relationships and analysis of hydraulic geometry variations: the case study of the Pearl River Delta, China[J]. Global and Planetary Change, 2015, 125: 60-70.
 - [19] LIU Feng, YUAN Lirong, YANG Qingshu, et al. Hydrological responses to the combined influence of diverse human activities in the Pearl River Delta, China[J]. CATENA, 2014, 113: 41-55.
 - [20] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
 - [21] FLINCHER E P, JAY D A. An introduction to wavelet transform tidal analysis methods[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 51(2): 177-200.
 - [22] 陈小齐,余明辉,刘长杰,等.珠江三角洲近年地形不均匀变化对洪季水动力特征的影响[J].水科学进展,2020,31(1):81-90. (CHEN Xiaoqi, YU Minghui, LIU Changjie, et al. Impact of recent uneven channel evolution on hydrodynamic characteristics during flood season in the Pearl River Delta[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 81-90. (in Chinese))
 - [23] DRONKERS J J. Tidal computations in rivers and coastal waters[M]. Amsterdam: North-Holland, 1964: 219-304.
 - [24] BUSCHMAN F A, HOITINK A J F, VAN DER VEGT M, et al. Subtidal water level variation controlled by river flow and tides[J]. Water Resources Research, 2009, 45(10): W10420.

(收稿日期:2022-04-17 编辑:施业)

+++++

(上接第161页)

- [15] 王丽,朱远生,杨晓灵,等.大藤峡水利枢纽工程设计中的水生态优化措施[J].水资源保护,2016,32(3):74-78. (WANG Li, ZHU Yuansheng, YANG Xiaoling, et al. Measures for aquatic ecological optimization in design of Datengxia Water Project[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 74-78. (in Chinese))
- [16] 陈华鑫,陆沈钧,何建兵,等.长三角一体化示范区水资源保护协作机制创新研究[J].水资源保护,2021,37(5):56-61. (CHEN Huaxin, LU Shenjun, HE Jianbing, et al. Research on innovation of water resources protection cooperation mechanism in Yangtze River Delta integration demonstration area[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 56-61. (in Chinese))

(上接第 161 页)

- [16] 陈华鑫,陆沈钧,何建兵,等.长三角一体化示范区水资源保护协作机制创新研究[J].水资源保护,2021,37(5):56-61. (CHEN Huaxin, LU Shenjun, HE Jianbing, et al. Research on innovation of water resources protection cooperation mechanism in Yangtze River Delta integration demonstration area[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5):56-61. (in Chinese))