

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.04.001

河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响

郑金海¹, 鲍仕昱^{1,2}, 张蔚², 季小梅²

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究珠江三角洲峰值水位对采沙造成的河床下切响应过程, 通过调和分析方法去除水位时间序列中潮汐节点调制波动的影响, 并提出概率密度函数法诊断河网内峰值水位的历史演变趋势。结果表明: 三角洲上游峰值水位随着河床的下切而显著降低; 河网中腹部地区, 峰值水位随着河床的下切出现显著的上升, 从而增加了中腹部地区的防洪风险; 在下游地区, 峰值水位的变化与海平面上升或其他人类活动相关。

关键词: 珠江三角洲; 河床下切; 概率密度函数法; 峰值水位

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)04-0001-06

Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta

ZHENG Jinhai¹, BAO Shiyu^{1,2}, ZHANG Wei², JI Xiaomei²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;
(2. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the response process of peak water level of the Pearl River Delta on the river-bed deepening due to sandmining, the harmonic analysis is used to remove the influence of nodal modulated fluctuation of tide in water level time series, and a method called the probability density function is adopted to explore the evolution trend of water levels in the delta. The results show that the peak water level decreases significantly after the channel deepening in the upstream regions. In the transition regions, the peak water level rises. In the tide-dominated regions or downstream region, changes of peak water level should be related to the sea level rise or other human activities.

Key words: Pearl River Delta; channel deepening; probability density function method; peak water level

河口三角洲是世界上经济最发达、人口最稠密的地区之一^[1]。径流潮汐共同作用产生的非线性效应, 给三角洲河网带来高度动态和复杂的环境^[2]。随着社会和经济的高速发展, 日益频繁的人类活动对河口三角洲地区长期动力环境造成的变化受到国内外学者的广泛关注^[3]。人类活动, 例如航道整治、河道采沙、通航疏浚等活动, 直接改变了河口三角洲地貌形态, 造成了河床下切。

水深的增加是造成河口水动力扰动的主要因素^[4]。河床下切减小了河道底摩擦, 从而可能导致潮汐过程的变化, 并与风暴潮、盐水入侵等灾害有关。同时, 河口地区的水位变化也与河床下切密切相关。已有的研究表明, 河床下切后, 在上游区域会出现同流量下水位下降的现象; Luo 等^[5]分析了珠江挖沙前后的数据资料, 发现在相同流量下三水站 2005 年比 1989 年的水位下降 1.28 m; Ralston 等^[4]通过数值模拟得到了哈德逊河口河床下切后洪水总体风险降低的结论。这一现象也在湄公河、哥伦比亚河^[6]出现过。但珠江三角洲在经历河床下切后, 中腹部地区却出现明显的壅水现象^[7-8]。以往学者对三角洲水位的研究大多采用年极值水位, 但是年极值水位通常包含风暴潮等极端事件^[9], 同时会受潮汐调制周期的影响。因此, 本文通过长时间序列诊断, 剔除极端事件与潮汐调制的影响, 深入分析珠江三角洲河网在河床下切背景下峰值水位的时空演变规律。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3001000)

作者简介: 郑金海(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: jhzheng@hhu.edu.cn

引用本文: 郑金海, 鲍仕昱, 张蔚, 等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 1-6.

ZHENG Jinhai, BAO Shiyu, ZHANG Wei, et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(4): 1-6.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

珠江由3条主要支流组成:北江、东江和西江。这些支流入海,形成了珠江三角洲。该区域位于中国南海岸,北与广州接壤,西南与澳门接壤,东南与香港接壤,在 $21^{\circ}40'N \sim 23^{\circ}N$ 和 $112^{\circ}E \sim 113^{\circ}20'E$ 之间(图1),面积约 $17\,200\text{ km}^2$ 。珠江三角洲潮汐是以半日潮为主的混合型,平均潮差为 $1.0 \sim 1.7\text{ m}^{[10]}$ 。北江、东江和西江通过8个出口流入南海。西面有4个口门,分别为崖门、虎跳门、鸡啼门、磨刀门,其余4个口门(横门、洪奇门、角门、虎门)位于东侧。

20世纪80年代中期以后,珠江三角洲的人类活动随着城市的发展逐渐加剧。20世纪90年代初到1995年,河道采沙达到顶峰,西江、北江和东江河床平均下切深度分别为 $0.59 \sim 1.73\text{ m}$ 、 $0.34 \sim 4.43\text{ m}$ 和 $1.77 \sim 6.48\text{ m}$ 。这种不受控制的采沙加速了河床下切,导致整个河网的水动力发生改变。2000年开始,政府开始关注河床下切造成的不良影响,并制定法规和政策控制采沙,使之放缓。

1.2 数据来源

对珠江三角洲西江和北江干流的8个水文站1961—2012年的水文数据进行分析。由于马骝洲站数据长度不足,并且珠江西四口门动力特征相似,本文用黄金站替换马骝洲站,水文站的位置见图1。由于观测技术的限制,原始数据序列的每个全日潮周期(24.84 h)只有2个高水位和2个低水位。用三角插值法对水位数据进行 1 h 间隔的填充,用于小波分解。水位数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》。

1.3 概率密度函数法

人类活动影响的极值水位的演变一直受到学者们的关注。同时估算极值水位的方法也随之发展,包括经典的年极值法、 r 最大值法、蒙特卡罗法、经验模拟法、联合概率法。然而,这些方法都不能分离人类活动对水位趋势的影响。潮汐、径流、风暴潮是影响水位趋势最主要的因素^[11]。风暴潮由于其出现频率较低影响较大,影响了河床下切对极值水位的长周期趋势分析。本文根据 Vellinga 等^[12]提出的概率密度函数法定义峰值水位,以便进行趋势分析。这种方法可以有效地降低风暴潮和热带气旋等极端事件对峰值水位的影响,适用于受强烈人类活动影响的河口三角洲。

概率密度函数的方法是根据连续一年的高低潮位绘制水位的概率密度曲线(图2)。曲线用2个峰值和1个极小值分为4个区间。在每个区间内,将频率与相应的水位乘积积分得到4个质心(从左到右为形心1、形心2、形心3和形心4)。形心1为概率密度函数法确定的峰值低水位(PLWL),形心4为概率密度函数法确定的峰值高水位(PHWL)。

1.4 S-Tide 方法

潮汐是海水在太阳和月球的引力作用下产生的涨落运动,表现为垂直周期性运动。潮汐的涨落周期约为 12 h 或 24 h ,同时潮汐还有半月、月、年以及 18.61 a 的长周期变化。月球绕地轨道与赤道成一定夹角,月球的近地点和远地点的连线每 8.85 a 转一周,上升节点与下降节点位置每 18.61 a 向西绕一周,因此主要的天文潮的振幅和相位在长变化中处于 18.61 a 的节点调制^[13]。

节点调制是潮汐对水位的主要长周期调制。为了避免节点调制对水位趋势分析的影响,本文采用S-Tide方法^[14]。S-Tide方法是一种将经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)引入河流潮汐分解

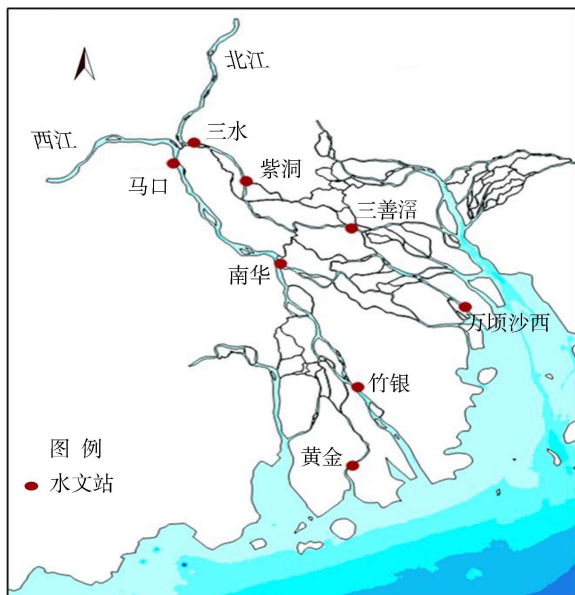


图1 珠江河网和水文站的位置分布

Fig.1 Channel network and locations of hydrologic stations in the Pearl River Delta

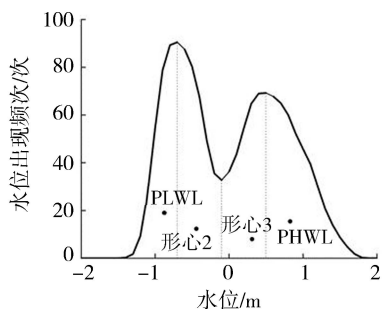


图2 水位概率密度曲线

Fig.2 Probability density function curve of water level

的非稳态潮汐分析方法。该方法无须预先设定基函数,而是根据自身的时间尺度进行信号分解。这种特征使经验模态分解方法在理论上可以应用于所有类型信号的分解。

S-Tide 方法与 NS-Tide 方法类似,均假定分潮的振幅和迟角随时间而变化:

$$Z(t) = S(t) + \sum_{j=1}^J (a_j(t) \cos \sigma_j t + b_j(t) \sin \sigma_j t)$$

(1)

式中: $Z(t)$ 为 t 时刻观测到的水位; $S(t)$ 为 t 时刻的平均水位; J 为分析的分潮总个数; a_j 和 b_j 的平方和是第 j 个分潮对应振幅的平方; σ_j 是第 j 个分潮的角速度。

S-Tide 通过基于样条函数方法的独立点方案求解式(1)。独立点的个数和使用的分潮是 S-Tide 最核心的 2 个输入参数。独立点个数越多,S-Tide 得到的分潮振幅和迟角的变化就越复杂;独立点越少,得到的振幅和迟角的变化就越简单。当独立点个数为 1 时,S-Tide 得到的分潮振幅和迟角都是不随时间变化的。基于此将 S-Tide 用于水位和潮汐振幅数据中 18.61 a 节点调制的提取,并去除峰值水位时间序列中 18.61 a 节点调制的影响。

2 结果与讨论

2.1 18.61 a 节点调制对峰值水位的影响

图 3 展示了从水位及分潮簇振幅时间序列中提取 18.61 a 的节点调制。周期为全日的分潮簇(D1)和周期为半日的分潮簇(D2)潮汐振幅通过连续小波分解(CWT)得到。结果表明,越靠近上游的站点受到潮汐节点调制越小,越靠近海洋的站点潮汐节点调制越大。这是因为潮汐在三角洲河道网中向上游传播的过程中受到河流流量、浅水地形等多种混杂因素的影响,节点调制逐渐减小。总体来看,D1 和 D2 分潮簇都存在

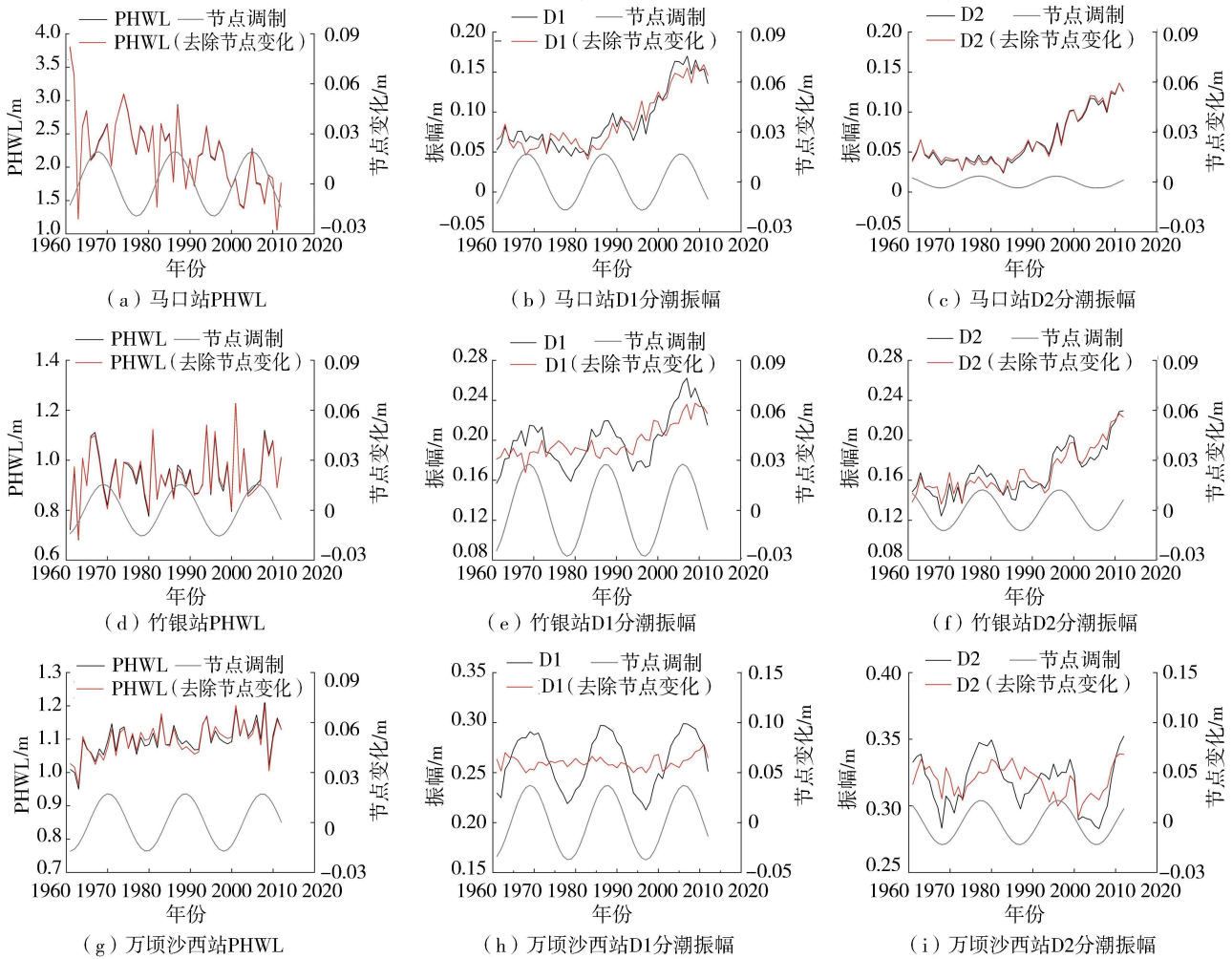


图 3 PHWL 和潮汐振幅移除 18.61 a 节点调制的影响过程

Fig. 3 Comparison of PHWL and tidal amplitudes before and after removing the nodal cycle of 18.61 a

18.61a 的节点调制,这是由天文潮引起的。由于高频率的潮汐对径流等造成的阻尼更加敏感,在传递过程中衰减更快,因此 D1 分潮簇的节点调制比 D2 分潮簇更加明显。分潮簇振幅的节点变化要比水位中大得多,这是因为每个分潮簇都有不同的相位^[15]。当不同分潮簇叠加时,会削弱整体节点调制的变化。因此,虽然节点调制对潮汐振幅的变化有明显影响,但对基于概率密度函数方法的水位指标变化的趋势影响有限,且这种影响越向上游越小。

2.2 峰值水位趋势

Zhang 等^[16] 基于 Pettitt 检验,指出在河床下切影响下,珠江三角洲西江与北江水位趋势的突变点主要集中于 20 世纪 80 年代中期。这表明河床下切对水位的影响大约始于 1985 年。本文将以此为分界点,将数据年限分为采砂前期(1961—1985 年)和采砂期(1986—2012 年),并比较采砂前和采砂期的水位变化趋势。基于概率密度函数法定义峰值水位,并将该峰值水位应用于西江与北江干流的 8 个主要水文站。对采砂前后各站点的年峰值水位进行线性趋势分析(图 4),图 4 中细线表示 95% 的置信区间,MWL(mean water level)表示平均水位。

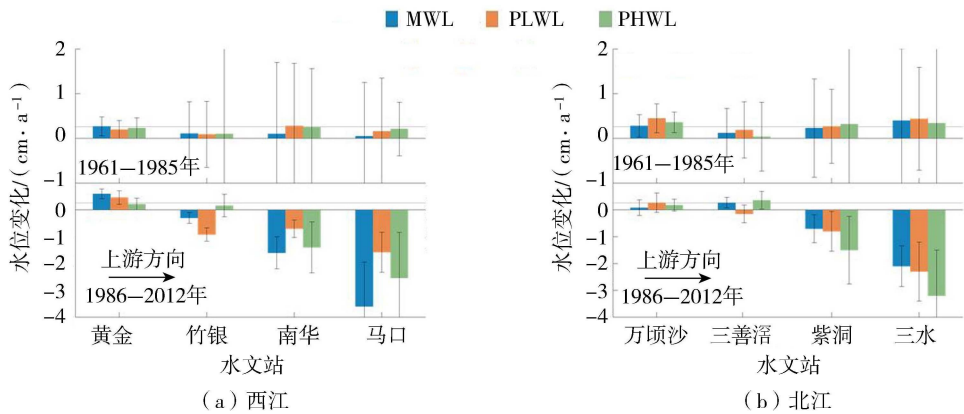


图 4 西北江干流去除节点调制的水位参数的变化

Fig. 4 Variation of modulated water level metrics by removing nodal influence at the main channel of the West River and the North River

图 4 比较了 1961—1985 年(采砂前)和 1986—2012 年(采砂期)的去掉节点变化的水位变化趋势,结果表明由概率密度函数计算得到的质心参数的变化趋势因地区而异。对靠海水文站而言,采砂前北江入海口门(万顷沙西站)PHWL 的增加趋势比西江入海口门(黄金站)明显,这可能与伶仃湾向陆方向的宽度收敛有关。对于内陆站,潮差的减小将双峰概率密度曲线转化为单峰概率密度曲线,概率密度函数可以仅用 2 个质心(PLWL 和 PHWL)作为参数描述。

珠江三角洲水位趋势呈现时间和空间上的变化(图 4)。采砂前,由于联围筑闸的影响,三角洲上游的 MWL 呈逐渐上升趋势^[17]。其他水位参数也会随着 MWL 的增加而增加。MWL 在靠海的水文站以每年大约 0.24 cm 的速度上升,与南海平均海平面上升速率(0.27 cm/a)相似^[18]。

在河床下切的影响下,不同区域的峰值水位趋势变化不同。在 1980 年后的一段时间内,由于频繁的河床采砂与航道疏浚,珠江三角洲上游站的 MWL、PLWL 和 PHWL 呈显著下降趋势,尤其是三水站和马口站水位下降最为明显。值得注意的是,PHWL 在三角洲中腹部仍然显示出上升的趋势,这意味着不仅高水位在上升,而且极端水位也在上升。竹银站 MWL 和 PLWL 呈下降趋势,三善渚站 MWL 呈上升趋势,PLWL 呈下降趋势,表明 MWL 的变化并没有直接转化为高水位和低水位的变化。在河床下切后,下游站点的水位参数均呈现上升趋势,这与三角洲口门处的土地围垦等人类活

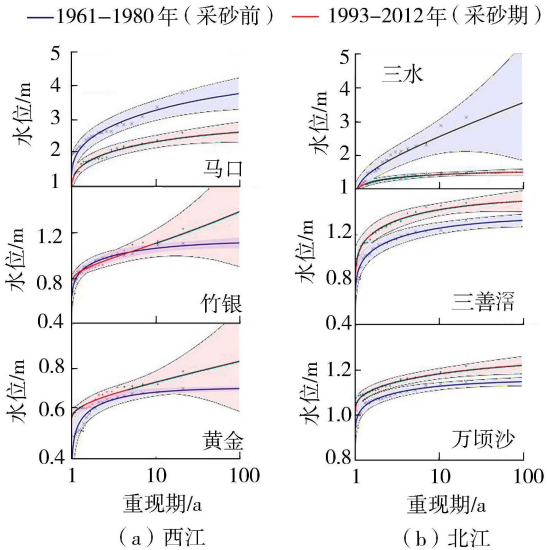


图 5 西江和北江水文站峰值水位累计频率曲线
Fig. 5 Cumulative frequency curves of peak water level in the West River and the North River

动有关^[19]。

图 5 为西江和北江水文站的峰值水位累计频率曲线。为了确定河床下切后的峰值水位变化,基于概率密度函数法计算了采沙前和采沙期 PHWL 的重现期。为了消除潮汐节点调制对峰值水位的影响,本次分析取采沙前 1961—1980 年和采沙期 1993—2012 年的水位序列。结果表明,在上游(马口和三水站),河床下切后 10 a 重现期和 50 a 重现期的峰值水位比河床下切前减少了 1~2 m,说明河床下切导致三角洲上游峰值水位降低。与上游相反,河床下切后中腹部区域 10 a 和 50 a 重现期的峰值水位比河床下切前高 0.1~0.2 m,表明河床下切增加了中腹部区域的洪水风险。该区域峰值水位上升可能是潮汐顶托径流,阻碍了径流下泄。虽然挖沙活动造成了河道河床下切,但同时也增大了河道体积,使得纳潮量增加。增大的纳潮量不仅可以防止中腹部地区的水位随河床降低而下降,还可以减缓径流速度,而导致了峰值水位的升高^[20]。在内陆河交汇口,由于干、支流的交汇存在水体间的相互顶托作用,造成局部水流壅塞^[21]。在下游,峰值水位上升,这是由于河床下切导致潮汐振幅增大,增大的潮汐振幅和海平面上升的综合效应导致了潮控区峰值水位的增加。

3 结 论

- a. 三角洲上游的峰值水位显著降低。是由于频繁的河道采沙扩充了河床容积,造成了同流量下水位下降,从而降低了洪水风险。
- b. 在中腹部地区,峰值水位上升。这种现象可归结于河床下切后潮流顶托作用的增大使径流下泄不畅,从而壅高水位。表明河床下切增加了中腹部地区的洪水风险。
- c. 下游峰值水位的上升应该与海平面上升和围垦等人类活动有关。

参考文献:

[1] SYVITSKI J, SAITO Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans[J]. Global & Planetary Change, 2007, 57 (3/4):261-282.

[2] BUSCHMAN F A, HOITINK A, VEGT M, et al. Subtidal water level variation controlled by river flow and tides[J]. Water Resources Research, 2009, 45(10):5803-5804.

[3] 牛明香, 王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4):26-33. (NIU Mingxiang, WANG Jun. Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River Delta based on Landsat remote sensing image[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4):26-33. (in Chinese))

[4] RALSTON D K, TALKE S, GEYER W R, et al. Bigger tides, less flooding: effects of dredging on barotropic dynamics in a highly modified estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(1):196-211.

[5] LUO X L, ZENG E Y, JI R Y, et al. Effects of in-channel sand excavation on the hydrology of the Pearl River Delta, China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 343(3/4):230-239.

[6] DAVID A J, KRITH L, SEBASTIAN D, et al. Long-term evolution of Columbia River tides[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2011, 137(4):182-191.

[7] 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))

[8] 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))

[9] 徐福敏, 苗琪, 姜静. Mackenzie 三角洲风暴相关的海岸水动力现象[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2):177-182. (XU Fumin, MIAO Qi, JIANG Jing. Coastal hydrodynamic phenomena generated by the storm in waters off Mackenzie Delta [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2):177-182. (in Chinese))

[10] MAO Q, PING S, YIN K, et al. Tides and tidal currents in the Pearl River Estuary[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24 (16):1797-1808.

[11] 叶荣辉, 宋志尧, 沈正, 等. 珠江口风暴潮数值模拟系统的设计与实现[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3):260-264. (YE Ronghui, SONG Zhiyao, SHEN Zheng, et al. A visualization system for numerical simulation of storm surges in Pearl River Estuary[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(3):260-264. (in Chinese))

[12] VELLINGA N E,HOITINK A,VEGT M,et al. Human impacts on tides overwhelm the effect of sea level rise on extreme water levels in the Rhine-Meuse delta[J]. Coastal Engineering,2014,90:40-50.

[13] FENG X,TSIMPLIS M N. Sea level extremes at the coasts of China[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans,2014,119(3):1593-1608.

[14] PAN H D,LYU X Q,WANG Y Y,et al. Exploration of tidal-fluvial interaction in the Columbia River Estuary using S_TIDE[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans,2018,123(9):6598-6619.

[15] PUGH D,WOODWORTH P. Sea-level science: understanding tides,surges,tsunamis and mean sea-level changes[M]. New York: Cambridge University Press,2014.

[16] ZHANG W,YAN Y,ZHENG J,et al. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region,China[J]. Global and Planetary Change,2009,69(1/2):35-47.

[17] 黎子浩. 珠江三角洲联围筑闸对水流及河床演变的影响[J]. 热带地理,1985,5(2):99-107. (LI Zihao. Effects of expanding dikesd area and gating branches on the hydrological situation and changes of riverbed in the Pearl River Delta,China [J]. Tropic Geography,1985,15(2):99-107. (in Chinese))

[18] 彭云. 中国沿海海平面上升增速[J]. 科学新闻,2010(3):66. (PENG Yun. The increase in sea level rise off China's coast [J]. Science News,2010(3):66. (in Chinese))

[19] 徐林春,林美兰,黄东,等. 西北江三角洲网河区洪潮水位与口门延伸的响应关系[J]. 广东水利水电,2018(11):35-38. (XU Linchun,LIN Meilan,HUANG Dong,et al. Response relationship between flood tide level and estuary extension in the river network in Pearl River Delta[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2018(11):35-38. (in Chinese))

[20] 刘佑华,陈晓宏,陈永勤,等. 珠江三角洲腹地洪水特征变异因素的关联分析[J]. 热带地理,2003,23(3):204-207. (LIU Youhua,CHEN Xiaohong,CHEN Yongqin,et al. Correlation analysis of abnormal change of flood level in the central area in the Pearl River Delta[J]. Tropical Geography,2003,23(3):204-207. (in Chinese))

[21] 何保,燕亚东,余苇,等. 河流交汇口河床地貌演变研究进展[J]. 水资源保护,2018,34(6):17-23. (HE Bao,YAN Yadong,YU Wei,et al. Research progress of riverbed landform evolution in river junctions[J]. Water Resources Protection,2018,34(6):17-23. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-12 编辑:刘晓艳)

“南水北调后续工程建设与高质量发展”专题征稿启事

南水北调是缓解中国北方水资源严重短缺局面的重大战略性工程,是世界上最大的跨流域调水工程,是“中华民族的世纪创举”。南水北调工程事关战略全局,事关长远发展,事关人民福祉。2021年5月,习近平总书记视察了南水北调中线陶岔渠首枢纽工程和丹江口库区,并在南阳市主持召开了推进南水北调后续工程高质量发展座谈会。习近平总书记强调,要深入分析南水北调工程面临的新形势、新任务,科学推进工程规划建设,提高水资源集约节约利用水平。2022年5月13日,《人民日报》发表专栏文章“扎实推进南水北调后续工程高质量发展,加快构建国家水网”。习近平总书记指出:“水网建设起来,会是中华民族在治水历程中又一个世纪画卷,会载入千秋史册。”

为推动南水北调后续工程的高质量发展,实现“一库清水永续北送”的宏伟目标,《河海大学学报(自然科学版)》围绕南水北调后续工程建设的设计、维护、保障,长距离调水工程的智能化监测平台和孪生水网建设等方向开展专题征稿活动,由《河海大学学报(自然科学版)》主编唐洪武院士领衔,特邀中国水利水电科学研究院雷晓辉教授级高级工程师、长江水资源保护科学研究所尹炜教授级高级工程师、中国科学院水生生物研究所毕永红研究员、北京大学孙卫玲教授、清华大学徐梦珍教授、郑州大学左其亭教授、华北水利水电大学韩宇平教授、河南工程学院付景保教授、南阳师范学院李玉英教授担任专题主持人,欢迎各位专家学者不吝赐稿,录用文章将在2022—2023年《河海大学学报(自然科学版)》正刊专栏或专刊发表。

征稿范围:水源区水质生态安全智能信息平台建设;南水北调水生态健康评价研究;长距离调水工程的自动化监测;调水干渠藻贝类监测、清理技术与设备;消落带生态脆弱区生态环境保护技术研究;农村面源污染监测与治理技术;水体氮磷、污染物的时空格局、溯源与治理技术;水体新型污染物的检测与污染物数据库构建;水体突发污染应对措施研究;新时代水网生态建设与调控;基于南水北调工程的孪生水域建设;水质水量联合调度技术;长距离调水工程水量调度与水力调控技术;人工智能技术在长距离调水工程中的应用(包括但不限于以上内容)。

征稿时间:2022年6月2日至2022年12月31日。

《河海大学学报(自然科学版)》编辑部