

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.011

珠江河口复杂河网的水资源调度方案评价

许伟,刘培,黄鹏飞,龙晓飞

(珠江水利科学研究院河流海岸研究所,广东广州 510630)

摘要:为评价珠江河口河网的水资源调度方案,以横琴中心沟水系为研究区域,针对原调度方案存在的调水规模问题,结合横琴中心沟水系、外江潮汐和水环境特征优化了调度方案,并提出以水体交换能力为评价指标,对原调度方案和优化方案进行了评价。结果表明:原调度方案水体交换能力不足,优化方案调水幅度增加后,半交换周期普遍缩短,水交换率提高,可以满足规划水质目标。

关键词:珠江河口;复杂河网;水资源调度;水体交换能力;横琴中心沟水系

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0075-05

Evaluation of water resources regulation scheme for complex river network in the Pearl River Estuary//XU Wei, LIU Pei, HUANG Pengfei, LONG Xiaofei(*River and Coastal Department, Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510630, China*)

Abstract: In order to evaluate the water resources regulation scheme for the river network in the Pearl River Estuary, taking the water system of Hengqin central ditch as the research area, aiming at the problem of water transfer scale in the original regulation scheme, combined with the characteristics of Hengqin central ditch water system, the tidal characteristics of the outer river and the characteristics of water environment, the regulation scheme was optimized. The water exchange capacity was proposed as an index to evaluate the original regulation scheme and the optimized scheme. The results show that the water exchange capacity of the original regulation scheme was insufficient. After the water transfer range was increased in the optimized scheme, the half exchange period was generally shortened and the water exchange efficiency was improved, which could meet the planned water quality objectives.

Key words: the Pearl River Estuary; complex river network; water resources regulation; water exchange capacity; water system of Hengqin central ditch

珠江河口地区人口众多、经济发达、河网密布,由于近年来珠江河口围区内河道污染物蓄积,水体负荷不断加重,超出了水体自净能力^[1-3]。河网水环境综合整治,关键在于污染源的有效控制,但污染源全面治理是一项长期工作,在污染源得到有效治理之前,通过水资源调度可以在一定程度上提高水体自净能力和增加水体环境容量,从而缓解区域水环境问题^[4-6],是改善围区内水环境行之有效的措施之一^[7]。

珠江河口外江纵横交错,围区内河流密布,水系结构复杂。珠江河口地区靠近海洋,同时受到潮流和径流的交互影响,水动力条件复杂。围区内河流与外江之间均设置闸、泵等水工建筑物,河流水体的流动性很大程度上受到水工建筑物的调度影响。珠江河口感潮河网地区水量充沛,水闸、泵站等水利设

施众多,为水资源调度提供了有利的基础条件^[8]。

已有对珠江河口河网区水环境问题研究多采用MIKE一维、二维数值模型,通过模拟水动力及水质现状,结合实际的水系、外江潮汐和水环境特征来评价调度方案的优劣^[9]。实际工作中,快速评价水质资料地区调度方案的需求较多,而水质模型的率定需要大量的实测数据和时间。为解决上述问题,无水质资料地区水资源调度方案或可 adopt 水体交换能力作为评价指标,实现快速评价。

水体交换能力作为评价水体环境质量的重要指标,主要反映了水动力的强弱和水体更新的水平^[10]。水体交换实质是研究区内水体与外界水体物质的交换,伴随物质的交换,水的动能或者其他促使水体流动的能量被消耗。Luff等^[11]提出采用半交换周期来评价水体交换的能力,但多用于海域水

环境质量的评价。水体环境质量也可采用水交换率来评价,如罗鹏达等^[12]在梅山港区新建围堤工程预留龙口方案比选中,通过比较不同方案条件下的水交换率,评价了工程方案对水环境的影响。半交换周期与水交换率一般通过 FVCOM、EFDC、MIKE 等数值模型计算的结果统计得到^[13-15]。

本文考虑实际情况,以水体交换能力作为评价指标,采用 MIKE11 中的水动力模块(HD)和对流扩散模块(AD)计算保守物质运移,根据计算结果统计半交换周期和水交换率,对比分析珠江河口复杂河网的不同水资源调度方案,以期为珠江河口复杂河网区水资源调度提供参考。

1 研究区概况

1.1 水域特征

本文以横琴中心沟水系(图 1)为研究区域,研究珠江河口围区内水利工程调度对水环境改善的影响。横琴岛地处南海之滨,毗邻澳门,西临磨刀门水道,东接十字门水道。横琴中心沟的河网纵横交错,由横贯横琴新区东西的天沐河、北环山河、南环山河及相互连通的排洪渠构成,主要河道参数如表 1 所示。中心沟水系中天沐河东、西两侧设有水闸,水闸常处于关闭状态,以维持横琴中心沟水系的水位。根据现场调研,横琴中心沟水系的水体为封闭水体,存在黑臭现象,水质属于劣 V 类。《珠海市横琴新区市政基础设施工程专项规划》对横琴中心沟水系主要河道宽度的规划宽窄不一,最宽处超过 100 m,最窄处不足 10 m,规划近期水质目标为Ⅳ类,远期水质目标为Ⅲ类。

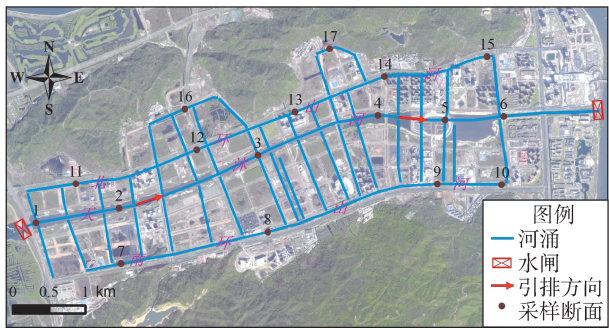


图 1 横琴中心沟水系
Fig.1 Water system of Hengqin central ditch

表 1 横琴中心沟水系主要河道参数

Table 1 Parameters of main channels of water system of Hengqin central ditch

名 称	河道长度/m	规划河道宽度/m	规划比降/%
天 沐 河	8 165	50 ~ 150	0.00
南环山河	5 942	15	0.00
北环山河	6 747	15	0.00

1.2 潮汐特征

横琴中心沟水系外江潮汐都属不规则半日混合潮,潮汐不等现象显著,潮位潮期均不相等。一个日周潮内发生两次高潮、两次低潮,历时约 24.85 h,其中涨潮历时约 13.57 h,落潮历时约 11.28 h。潮型以高高潮—低低潮—低高潮—高低潮的形式出现,大约经过 12 d 或 13 d,潮型变为低高潮—高低潮—高高潮—低低潮。珠江河口是弱潮河口,平均潮差在 1 m 左右,但大潮潮差可达 2 m 左右。一般情况下各年代的平均潮差变化不大,年内变化亦很小,相差不超过 0.20 m。

1.3 水资源调度方案

根据水功能区划,横琴中心沟水系西侧磨刀门水道为珠海市主要饮用水保护区,水质标准达Ⅱ类。东侧十字门水道主要用于泄洪、通航等,水质相对较差。原调度方案拟定了“东引西排”控导路径,结合本区外江 1 m 的平均潮差,通过天沐河两侧水闸,利用天然潮动力,涨潮时西闸引水至 1.50 m,落潮时东闸排水至 1.00 m。

水资源调度关键在于确定合适的调度路径、调度时机、调度规模和调度方式。调度路径需考虑引水水源地的水质、水量和其他相关因素,根据水功能区划确定排水出口位置,实现水体的单向流动。调度的时机和频次要结合潮汐特征、外江水质情况,以及所治理河道的水质目标来确定。河口地区需结合潮差,确定调度规模,潮差越大引排水幅度越大,潮差越小引排水幅度越小。调度方式需结合地区水利工程现状或者地形特征现状,选择合适的水利工程措施,如水闸、泵站、导流堤和柔性拍门等。

原调度方案中调度路径、调度时机、调度方式均适宜,但引排水幅度较小,没有充分利用本区大潮潮差近 2 m 的优势。因此,本文结合潮汐特征提出常规引排水的景观调度方案和突发水污染时的应急调度方案来实现水资源调度。各方案具体调度情况如下:

- a. 原调度方案。外江落潮时,横琴中心沟水系通过东闸排水,使得天沐河水位从 1.50 m 降至 1.00 m;外江涨潮时,横琴中心沟水系通过西闸引水,蓄水至 1.50 m 时停止引水。
- b. 景观调度方案。外江落潮时,横琴中心沟水系通过东闸排水,使得天沐河水位从 1.50 m 降至 1.00 m;外江涨潮时,横琴中心沟水系通过西闸引水,蓄水至 1.97 m 时停止引水。
- c. 应急调度方案。外江落潮时,横琴中心沟水系通过东闸排水,使得天沐河水位从 1.50 m 降至 0.00 m;外江涨潮时,横琴中心沟水系通过西闸引水,蓄水至 1.97 m 时停止引水。

2 评价方法

2.1 模型及参数设置

采用 MIKE11 中的水动力模块 (HD) 和对流扩散模块 (AD) 模拟珠江河口复杂河网引排水调度方案。模型采用的圣维南方程组和对流扩散方程分别为

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2AR} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \frac{\partial Q\rho}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = -AK\rho + \rho_2q \quad (2)$$

式中: x 为距离坐标, m; t 为时间坐标, s; A 为河道过水断面面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s ; h 为河道水位, m; q 为河道旁侧入流量, m^3/s ; C 为谢才系数, m; R 为水力半径, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ 、 ρ_2 分别为保守物质质量浓度和源/汇质量浓度, mg/L ; D 为纵向扩散系数, m^2/s ; K 为线性衰减系数, d^{-1} 。

研究区各河道经整治后均为人工混凝土堤岸, 参考张红艳等^[16]对河道糙率值分析成果, 河道糙率取值为 0.025; 内河涌污染物扩散系数取值为 $10.00 m^2/s$ ^[17]。结合研究区当地的水位情况, 初始水位设为 1.50 m。为了便于半交换周期和水交换率的统计分析, 参考匡翠萍等^[18]的研究, 假定横琴中心沟水系水体保守物质初始质量浓度为 1.00 mg/L, 外江保守物质质量浓度取为 0.00 mg/L。

2.2 评价指标

根据相关研究成果^[13-14], 结合实际工作, 本文以水体交换能力为评价指标评价水资源调度方案, 主要评价的因子为半交换周期和水交换率。半交换周期以 MIKE11 中的水动力模块 (HD) 和对流扩散模块 (AD) 计算保守物质运移, 根据模型计算的结果统计保守物质交换一半的时间来确定。水交换率同样根据模型计算结果统计某个时刻保守物质交换的比例, 计算公式如下:

$$R_t = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_t 为 t 时刻水交换率; ρ_0 为初始保守物质质量浓度, mg/L ; ρ_t 为 t 时刻保守物质质量浓度, mg/L 。

模型中将河道初始保守物质质量浓度设定为 1 mg/L, t 时刻河道某位置瞬时保守物质质量浓度变为 ρ_t , 该位置瞬时水交换率为 $(1 - \rho_t) \times 100\%$, 以此类推整条河道的瞬时水交换率, 将所有位置的水交换率进行加权平均求得河道整体的水交换率, 即 $\frac{1}{L} \int_0^L R_t dL$, 其中 L 为河道长度。

3 结果与分析

3.1 半交换周期对比

根据模型计算结果, 绘制各方案采样断面半交换周期如图 2 所示 (采样断面位置见图 1)。原调度方案条件下, 横琴中心沟水系各河段的半交换周期自西向东不断增大, 其中天沐河西闸半交换周期最小, 仅为 21.3 h。与天沐河相比, 南、北环山河河段半交换周期相对较长。调度方案优化后, 横琴中心沟水系各河段的半交换周期普遍降低, 尤其是应急调度方案条件下, 天沐河各断面半交换周期在 11.3 ~ 30.5 h 之间, 与原调度方案相比, 各河段半交换周期降低了近 50%。

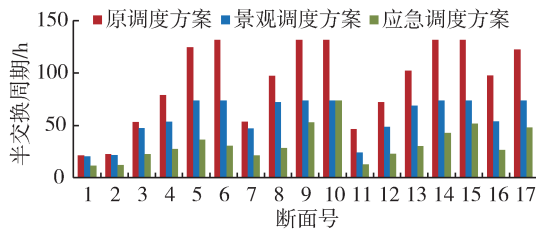


图 2 各方案采样断面半交换周期
Fig. 2 Half exchange period of sampling section of each scheme

原调度方案引排水幅度较小, 南、北环山河地势较高, 西侧引进的清水进入南、北环山河较慢, 尤其是南、北环山河东侧, 水动力不足, 延长了南、北环山河水体交换周期, 导致水体交换能力弱, 容易出现污染蓄积。景观调度方案和应急调度方案均增大了引排水幅度, 应急调度方案引排水位差达 1.97 m, 有效缩短了中心沟局部河段的半交换周期。可见, 在珠江河口区, 围区内利用外江潮汐动力实施水资源调度, 可有效提高水体半交换周期。

3.2 水交换率对比

根据模型计算结果, 各方案横琴中心沟水系的水交换率如表 2 所示, 各方案中心沟水系的保守物质质量浓度分布见图 3。

表 2 横琴中心沟水系的水交换率
Table 2 Water exchange rate of water system of Hengqin central ditch

调度次数	水交换率/%		
	原调度方案	景观调度方案	应急调度方案
1	14.55	22.17	48.55
2	28.90	44.10	83.54
3	43.41	65.09	94.19

景观调度和应急调度方案引排水幅度均大于原调度方案, 且应急调度方案引排水幅度大于景观调度方案, 中心沟水体置换量随着引排水幅度增大而

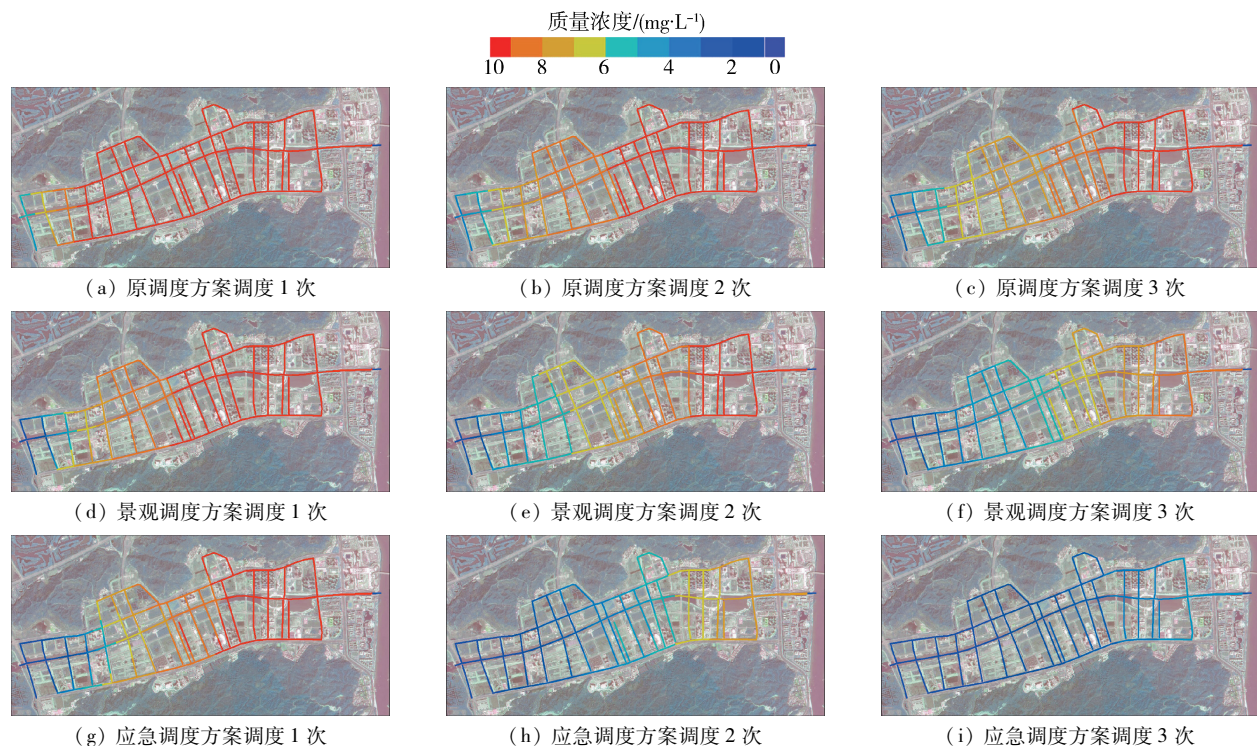


图3 各方案横琴中心沟水系保守物质质量浓度分布

Fig.3 Distribution of mass concentration of conservative materials of Hengqin central ditch of each scheme

增大。根据模型计算结果,景观调度方案调度1次的水交换率是原调度方案的1.52倍,而应急调度方案调度1次的水交换率分别是原调度方案、景观调度方案的3.34和2.19倍。相对于原调度方案,水体置换总量增加,景观调度和应急调度方案水交换率明显提高。

横琴中心沟水系水体属于劣V类水,规划近期水质目标为Ⅳ类,远期水质目标为Ⅲ类,而磨刀门水道水质标准达Ⅱ类。横琴中心沟水系水体主要受到生活污水污染,因而本文以COD作为水质模拟指标,通过模型计算各方案在调度4次后水体中COD质量浓度。结合实际水质情况,横琴中心沟水系水体COD初始质量浓度设为50.00 mg/L,磨刀门水道水体COD质量浓度设为15.00 mg/L。按原调度方案调度4次后,横琴中心沟水系水体COD质量浓度均值为37.96 mg/L,可达V类水质标准;按景观调度方案调度4次后,横琴中心沟水系水体COD质量浓度均值为29.56 mg/L,可达规划近期Ⅳ类水水质目标;按应急调度方案调度4次后,横琴中心沟水系水体COD质量浓度均值为16.87 mg/L,可达规划远期Ⅲ类水水质目标。

4 结 语

横琴中心沟水系属于珠江河口围区内典型的河网区,水系结构复杂,水体自净能力受弱水动力条件的限制,通过水资源调度改善横琴中心沟水系的水环境具有重要的意义。横琴中心沟水系的东、西两

侧磨刀门水道和十字门水道均受到潮汐的影响,在水资源调度时,需要充分利用潮汐特征制定调度方案。原调度方案中调度路径、调度时机、调度方式均适宜,但引排水幅度较小,未充分利用本区潮动力。本文根据潮汐特征,调整了水资源调度的规模,优化了调度方案,并提出以水体交换能力为评价指标,评价了不同调度方案水体交换能力。优化方案中心沟水系调水幅度增加后,整体水交换能力得到提升,半交换周期普遍缩短,水交换率提高。结合实际水质情况,设定河网COD质量浓度,模拟了不同调度方案对水质改善程度,结果表明原调度方案难以满足规划水质目标,而优化调度方案可以满足规划水质目标。可见本文提出的以水体交换能力为评价指标评价水资源调度方案,可以在实际工作中快速评价无水质资料地区调度方案的优劣。

参考文献:

- [1] 贺新春,黄芬芬,汝向文,等. 珠江三角洲典型河网区水资源调度策略与技术研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(6):55-60. (HE Xinchun, HUANG Fenfen, RU Xiangwen, et al. Study on water resources regulation strategy and technology in typical river network area of Pearl River Delta[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2016,37(6):55-60. (in Chinese))
- [2] 胡嘉铿,李适宇,耿兵绪,等. 珠江三角洲河网与河口区

- CBOD 及 TN 和 TP 通量的模拟[J]. 水利学报,2012,43(1):51-59. (HU Jiatang, LI Shiyu, GENG Bingxu, et al. Simulation of CBOD, TN and TP fluxes in river network and estuary of Pearl River Delta[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(1):51-59. (in Chinese))
- [3] 陈庆江,丁瑞,赵海. 平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3):8-13. (in Chinese))
- [4] 潘泓哲,李一平,唐春燕,等. 多目标优化下平原河网引调水改善水环境效果评估[J]. 湖泊科学,2021,33(4):1138-1152. (PAN Hongzhe, LI Yiping, TANG Chunyan, et al. Effect evaluation of water diversion and transfer to improve water environment in plain river network under multi-objective optimization[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(4):1138-1152. (in Chinese))
- [5] 张伊佳,陈星,许钦,等. 太湖下游河网区水质变化特征与引水调控效果[J]. 水资源保护,2020,36(5):79-86. (ZHANG Yijia, CHEN Xing, XU Qin, et al. Characteristics of water quality change in the downstream river network area of Taihu Lake and effect of water diversion control[J]. Water Resources Protection,2020,36(5):79-86. (in Chinese))
- [6] 高成,顾春旭. 考虑初期雨水污染的平原河网地区活水效果分析[J]. 水资源保护,2019,35(3):69-75. (GAO Cheng, GU Chunxu. Analysis of live water effect in plain river network area considering initial rainwater pollution[J]. Water Resources Protection,2019,35(3):69-75. (in Chinese))
- [7] 张海丽,贺新春,邓家泉. 基于闸泵联控的感潮河网区水动力水质调控[J]. 长江科学院院报,2019,36(8):36-41. (ZHANG Haili, HE Xinchun, DENG Jiaquan. Hydrodynamic and water quality control of tidal river network based on gate pump joint control[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2019,36(8):36-41. (in Chinese))
- [8] 杜建,陈晓宏,陈志和,等. 珠江三角洲感潮河网区水环境引水调控研究[J]. 水文,2012,32(4):16-21. (DU Jian, CHEN Xiaohong, CHEN Zhihe, et al. Study on regulation of water environment diversion in tidal river network of Pearl River Delta[J]. Journal of China Hydrology,2012,32(4):16-21. (in Chinese))
- [9] 汤立群,卢单,赵慧明,等. 河口滩涂围垦对水动力环境影响研究综述[J]. 水利水电科技进展,2020,40(6):78-84. (TANG Liqun, LU Dan, ZHAO Huiming, et al. Review of impacts of tideland reclamation on hydrodynamic environment near estuarine area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(6):78-84. (in Chinese))
- [10] 陈妍宇,宋德海,鲍献文,等. 胶州湾跨海大桥对海湾水体交换的影响[J]. 海洋与湖沼,2019,50(4):707-718. (CHEN Yanyu, SONG Dehai, BAO Xianwen, et al. Influence of Jiaozhou Bay Bridge on water exchange in the bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2019,50(4):707-718. (in Chinese))
- [11] LUFF R, POHLMANN T. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a eulerian dispersion model using a half-life time approach [J]. Deutsche Hydrografische Zeitschrift,1995,47(4):287-299.
- [12] 罗鹏达,吴拓,孙鹏. 水交换率理论在梅山港区新建围堤工程预留龙口方案比选中的应用[J]. 水资源开发与管理,2018(10):66-71. (LUO Pengda, WU Tuo, SUN Peng. Application of water exchange rate theory in comparison and selection of reserved Longkou scheme for new dike project in Meishan port area[J]. Water Resources Development and Management,2018(10):66-71. (in Chinese))
- [13] GAO Guandong, WANG Xiaohua, BAO Xianwen, et al. The impacts of land reclamation on suspended-sediment dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science,2018,206:61-75.
- [14] 朱晓琳,李一平,许益新,等. 时间尺度对平原感潮河网水动力水质模拟精度的影响[J]. 水资源保护,2020,36(3):67-75. (ZHU Xiaolin, LI Yiping, XU Yixin, et al. Effects of time scale on simulation accuracy of hydrodynamic water quality of plain tidal river network[J]. Water Resources Protection,2020,36(3):67-75. (in Chinese))
- [15] 李一平,施媛媛,姜龙,等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. 水资源保护,2019,35(4):1-8. (LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, et al. Advances in surface water environment numerical models[J]. Water Resources Protection,2019,35(4):1-8. (in Chinese))
- [16] 张红艳,许晓红. 河道糙率值的选用分析[J]. 吉林水利,2012(1):42. (ZHANG Hongyan, XU Xiaohong. Analysis on selection of channel roughness value[J]. Jilin Water Conservancy,2012(1):42. (in Chinese))
- [17] 潘蓉,邓东升. 基于 MIKE11 的佛山市南海区罗村良安片内涌水质计算研究[J]. 广东水利水电,2015(5):6-9. (PAN Rong, DENG Dongsheng. Water quality calculation of inland river based on MIKE11 at Liang'an Area of Luocun Town in Nanhai District of Foshan[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2015(5):6-9. (in Chinese))
- [18] 匡萃萍,俞露露,顾杰,等. 人工岛对金梦海湾水体交换的影响[J]. 中国环境科学,2019,39(2):311-321. (KUANG Cuiping, YU Lulu, GU Jie, et al. Influences of artificial island on water exchange of Jinmeng Bay[J]. China Environmental Science,2019,39(2):311-321. (in Chinese))

(收稿日期:2021-07-02 编辑:熊水斌)