

Water Quantity and Quality Operation Based on Sluice-Pump Group Control in Tidal River Network

Yunyun Shi^{1,2}, Donghui Wan^{1,2}, Fang Yang^{1,2}

¹The Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou Guangdong

²Key Laboratory of the Pearl River Estuarine Dynamics and Associated Process Regulation, Ministry of Water Resources, Guangzhou Guangdong

Email: yunyun_shi@163.com, wandh2003@126.com

Received: Jan. 9th, 2016; accepted: Jan. 27th, 2016; published: Feb. 5th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In view of the characteristics of the river network, hydraulic and structures, a water quantity and quality operation model based on sluice-pump group control in tidal river network is developed which is coupled with 1D hydrodynamic & water quality model, and sluice-pump control module. The established model is used for regulating the quantity and quality in the typical area of Pearl River Delta. The results suggest that the best operation period is from neap tide to moderate tide with one drainage pump, and a scientific operation will significantly improve water environment and increase water storage in tidal river network which increases the water storage by 2.429 million m³ and reduces the COD concentration from 40mg/l to 29.7mg/l. The coupling of this model, 1D hydrodynamic & water quality & salinity model in the Pearl River Delta, and land water quantity quality model considering the effect of human activity needs further study.

Keywords

Tidal River Network, Hydrodynamic Model, Water Quantity and Quality, Sluice-Pump Group

基于闸泵群调度的感潮河网区水量水质调控

石赟赟^{1,2}, 万东辉^{1,2}, 杨芳^{1,2}

作者简介: 石赟赟(1986-), 女, 江西乐平人, 硕士, 主要从事流域水资源管理与规划、工程调度方面相关研究。

文章引用: 石赟赟, 万东辉, 杨芳. 基于闸泵群调度的感潮河网区水量水质调控[J]. 水资源研究, 2016, 5(1): 40-51.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.51005>

¹珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州

²水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室, 广东 广州

Email: yunyun_shi@163.com, wandh2003@126.com

收稿日期: 2016年1月9日; 录用日期: 2016年1月27日; 发布日期: 2016年2月5日

摘要

针对感潮河网区水系、水动力以及水利工程特点, 以网河区一维水动力数学模型、一维水质数学模型以及闸泵控制模拟模块为基础, 建立了基于闸泵群调度的感潮河网区水量水质调控模型, 开展了珠江三角洲典型研究区的水量水质调控方案研究。结果表明, 调度时段为小潮至中潮、采用单一水闸排水时水量水质调控效果最优; 调度后内河涌蓄水量增加242.9万 m^3 , COD平均浓度由40 mg/l降至29.7 mg/l, 采用科学的闸泵群调度, 有效改善了感潮河网区内河涌水环境、显著增加了淡水资源量; 该模型与珠江三角洲一维潮流模型、水质模型、盐度模型以及人类活动影响下的典型区陆面水量水质模型的耦合有待进一步完善。

关键词

感潮河网, 水动力模型, 水量水质, 闸泵群

1. 引言

水量水质联合调度是通过改变现有水利工程或拟建水利工程的调度运行方式, 发挥水利工程兴利避害的综合功能和综合效益, 达到充分利用各种可利用的水资源, 增加生产、生活的可利用水量, 兼顾改善河道水质, 实现水生态、水环境和水景观的修复、改善和保护, 确保以水资源的可持续利用保障社会经济的可持续发展[1]。目前, 我国水利工作者在水量水质联合调度方面开展了大量研究工作, 并应用于实际工程调度实践。刘玉年等通过建立包含闸坝群联合调度模式的淮河干支流水系水流演进及污染物质对流扩散降解数学模型, 对淮河干支流洪水、污染物迁移进行了实况模拟, 探讨了通过水量水质联合调度减少污染事件风险的途径[2]; 张永勇等以北京市温榆河流域为例, 建立了 SWAT 与闸坝调度模型的耦合模型(SWAT-Qcmode), 从流域尺度上探讨了闸坝的合理调度模式[3]; 宋刚福等从满足城市河流生态需水量出发, 建立了基于生态的城市河流水量水质联合调度模型, 并将该模型应用于郑州市七里河水系的闸坝生态调度[4]; 左其亭等以 MIKE11 的 HD 和 AD 模块为基础, 建立了基于模拟-优化的重污染河流闸坝群防污调控模型, 能够有效的适用于淮河流域所开展的多闸坝水量水质联合调度[5]。在感潮河网区, 以水闸泵站联合调度的方式进行内河涌水量水质调控最早见于上世纪八十年代中期的上海市引清调度[6], 随后众多学者开展了相关研究。徐祖信等针对平原感潮河网复杂的水流特性, 对平原河网进行了合理概化, 并充分考虑泵闸控制、水利调度等因素的影响, 建立了上海市平原感潮河网水动力模型[7]; 王超等开展了平原河网区调水改善水环境实验, 论证了沿江平原河网区通过长江潮差引入优质的长江水, 能有效增加河道的环境容量和水体自净能力[8]; 董增川等在引江济太原型试验引分水控制模式分析的基础上, 建立了区域水量水质模拟与调度耦合模型, 并计算分析了望虞河引水调度对太湖水环境改善的影响[1]; 杜建等建立了潮汐河网水量水质调控模型, 研究通过引水调控措施将内河涌由双向流变为单向流改善河涌水环境, 并模拟分析了引水调控实施效果[9]。

本文针对感潮河网区水系、水动力以及工程特点, 建立基于闸泵群调度的感潮河网区水量水质调控模型, 以珠江流域典型区为例研究水量水质调控方案。该研究对在复杂感潮河网区实施闸泵群科学调度, 有效改善水环境、显著增加淡水资源具有一定的现实意义。

2. 感潮河网区水量水质调控模型

基于闸泵调度联合调度的感潮河网区水量水质调控以网河区一维水动力学数学模型、一维水质数学模型以及闸(泵)控制模拟模块为基础,考虑河网区防洪排涝及调度工程约束,从而建立以增加联围河涌蓄水总量和降低内河涌污染物浓度为主要目标的水闸与泵站联合调度模型。

2.1. 网河区一维水动力学模型

(1) 控制方程采用圣维南方程组[10]

连续方程

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) + u_l q = 0 \quad (2)$$

式中, Z 、 Q 、 A 、 B 分别为断面平均水位、流量、过水面积、水面宽度; q 为旁侧入流, 负值表示流出; β 为动量校正系数; g 为重力加速度; S_f 为摩擦阻坡降; u_l 为单位流程上的侧向出流流速在主流方向的分量。

(2) 汇流汉口连接条件网河区汉口点水流须满足水流连续条件和能量守恒条件[7]:

水流连续条件

$$\sum_{i=1}^m Q_i = 0 \quad (3)$$

水位连接条件

$$Z_{i,j} = Z_{m,n} = \dots = Z_{l,k} \quad (4)$$

式中, Q_i 为汉口节点第 i 条支流流量, 流入为正, 流出为负; $Z_{i,j}$ 等表示汉口节点第 i 条支流第 j 号断面的平均水位。

(3) 计算方法方程离散采用四点加权 Preissmann 固定网格隐式差分格式, 采用已较为成熟的河网三级联解算法求解。

2.2. 一维水质数学模型

(1) 一维水质迁移转化基本方程[11]

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial(AC)}{\partial x} \right) - KC \quad (5)$$

式中, A 、 Q 、 C 分别为断面过水面积、流量、污染物浓度; E_x 为纵向离散系数; K 为污染物降解系数。

(2) 网河区污染物汉口平衡方程

$$\sum(QC) = c\Omega \frac{dZ}{dt} \quad (6)$$

式中, Z 为水位; Ω 为河道汉口节点的过水面积。

2.3. 闸(泵)控制模拟模块

水闸调度以闸门内外设置的两个节点水位为控制参数, 以闸门开度确定调度状态和过流形式, 采用闸孔出

流基本公式计算过流量:

$$Q = \varepsilon \sigma_s \mu b e \sqrt{2g H_0^{3/2}} \quad (7)$$

式中, ε 为侧收缩系数; σ_s 为淹没系数; b 为闸门宽度; e 为闸门开度; μ 为流量系数; $H_0 = H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$ 为全水头, H 为闸门上游水深, v_0 为行近流速, α_0 为动能修正系数。

对于有闸门存在的河段, 圣维南方程组不再适用, 必须根据水力特性作特殊处理, 可采用迭代内边界控制法求解[12]。

2.4. 水量水质调控模型

基于闸泵调度联合调度的感潮河网区水量水质调控是运用三角洲联围各水闸和泵站, 在保证满足联围水利控制片区防洪排涝和基本用水需求的前提下, 引入外江满足水质要求的淡水来置换联围内河涌污水, 实现在尽可能短的时间内使得调度期末内河涌水质最佳、蓄水量最大的目标。

2.4.1. 目标函数

兴利目标函数

$$F_1 = \max \sum_{i=1}^n W_i \quad (8)$$

减污目标函数

$$F_2 = \min \frac{\sum_{i=1}^n C_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (9)$$

式中, C_i 为调度期末感潮河网区内河涌第 i 河段污染物浓度, W_i 为内河涌第 i 河段蓄水量。

2.4.2. 约束条件

(1) 河网区内河涌水位约束。内河涌水位不得超过防洪排涝控制水位, 避免水流漫溢形成内涝; 为保证各片区生活生产用水, 内河涌水位不得低于最低限制水位。

$$\underline{Z}_{k,t} \leq Z_{k,t} \leq \bar{Z}_{k,t} \quad (10)$$

式中, $Z_{k,t}$ 、 $\underline{Z}_{k,t}$ 、 $\bar{Z}_{k,t}$ 分别为 t 时刻内河涌第 k 断面处水位、最低限制水位、最高限制水位。

(2) 调度历时约束。

$$T_r \leq T_{r,\max} \quad (11)$$

式中, T_r 为调度历时; $T_{r,\max}$ 为可接受的最长水量水质调度历时。

(3) 进水闸进水条件约束。枯水期咸潮上溯, 当外江含氯度不超标, 且闸外水位高于闸内水位时, 方可开闸引水。

$$S_{i,t} \leq \bar{S} \quad (12)$$

$$Z_{i,\text{外},t} > Z_{i,\text{内},t} \quad (13)$$

式中, $S_{i,t}$ 、 \bar{S} 分别为 t 时刻第 i 个进水闸(或泵)进水口的含氯度、取水允许的最高含氯度, 一般地, 水厂取水要求 \bar{S} 不高于 250 mg/L; $Z_{i,\text{内},t}$ 、 $Z_{i,\text{外},t}$ 分别为 t 时刻第 i 个进水闸的闸内、闸外水位。

(4) 排水闸排水条件约束。当闸内水位高于闸外水位时, 方可开闸排水。

$$Z_{j,\text{外},t} < Z_{j,\text{内},t} \quad (14)$$

式中, $Z_{j,内,t}$ 、 $Z_{j,外,t}$ 分别为 t 时刻第 j 个排水闸的闸内、闸外水位。

(5) 闸泵运用方式约束。水闸工程在实际运行过程中, 为避免出现不利工作状态, 闸泵的启闭机运行往往存在诸多约束和技术性限制条件。主要有:

①水闸仅存在全关和全开两种状态。

②闸泵运行状态持续时间约束。为避免水闸泵站启闭过于频繁, 闸泵维持某一特定状态必须维持一定时长

$$T_j \geq \underline{T}_j \quad (15)$$

式中, T_j 、 \underline{T}_j 分别为内河涌第 j 座闸(或泵)维持某一特定工作状态(如闸门全开或全关)的时长、允许的最短时长。

③闸泵启闭速度约束。与闸泵特性相关, 对调度模型水动力计算稳定性和对水流方向的控制都有一定影响。

$$\underline{T}_d \leq T_d \leq \bar{T}_d \quad (16)$$

式中, T_d 、 \underline{T}_d 、 \bar{T}_d 分别为闸门启闭单位高度(或泵站增减单位抽排流量)的用时、允许的最小和最大用时。

④闸(或泵)安全运行条件约束。

$$|\Delta Z_{i,t}| \leq \Delta \bar{Z}_i \quad (17)$$

$$|Q_{i,t}| \leq \bar{Q}_i \quad (18)$$

式中, $\Delta Z_{i,t}$ 、 $\Delta \bar{Z}_i$ 分别为 t 时刻第 i 个闸内外水位差、闸门安全运行允许的最大水位差, $Q_{i,t}$ 、 \bar{Q}_i 分别为 t 时刻第 i 个闸(或泵)过流量、设计最大过流量。

根据调度需求的不同, 适当改造调度目标函数, 给定相应的边界条件和调度规则, 上述所建立的感潮河网区水量水质调控模型可应用于研究区防洪、排涝、防咸、供水等。

3. 水量水质调控方案研究

3.1. 研究区概况

以珠江三角洲中顺大围作为典型区(见图 1), 应用闸泵群调度模型开展水量水质调控方案研究。

中顺大围位于珠江三角洲河网区南部, 西濒西江干流磨刀门水道, 东傍东海水道、马宁水道、小榄水道, 总集水面积约 709.36 km², 是珠江三角洲五大重要堤围之一。围内主要河流有岐江河、鳧洲河、横琴海等 140 余条, 绝大多数均受潮汐影响, 为双向流。中顺大围内河网水系密布, 具有一定的调蓄能力, 联围内闸泵众多, 水力调控条件便利。鳧洲河水闸、东河水闸、西河水闸、西河泵站等联围干堤上的大型闸泵工程, 对控导水流、改善水质、调蓄淡水资源, 发挥抑咸保供能力作用显著。

3.2. 计算水文条件

方案研究采用 2005 年 1 月典型枯水条件。联围边界水闸的外江水位过程采用“05.1”实测或该水文条件下珠江三角洲一维水动力模型计算所得序列, 鳧洲河、东河、西河等主要水闸外江潮位过程见图 2。根据各水闸外实测盐度, 或上游流量级查流量 - 咸界关系(见图 3)确定该水闸开启与否。采用 COD 作为污染物指标, 水质边界按照引水河道的现状水质确定, 磨刀门水道、小榄水道等外江按地表 II 类水标准给值, 中顺大围内河涌水质初始浓度按地表 V 类水标准给值, 调度期内假设联围内点面源全部截污。期内无降雨发生, 各片区通过外闸和内部节制闸控制水位, 泵站不参与排涝。

3.3. 模型参数

研究区部分主干河涌河道糙率 n 以已有珠江三角洲一维水动力模型枯水验证成果分段给定, 其他河涌参考水力学手册经验给定。水质模拟中纵向离散系数 E_x 随水流条件而变化, 按 $E_x = 0.011v^2B^2/(hu_*)$ 计算确定, v 为

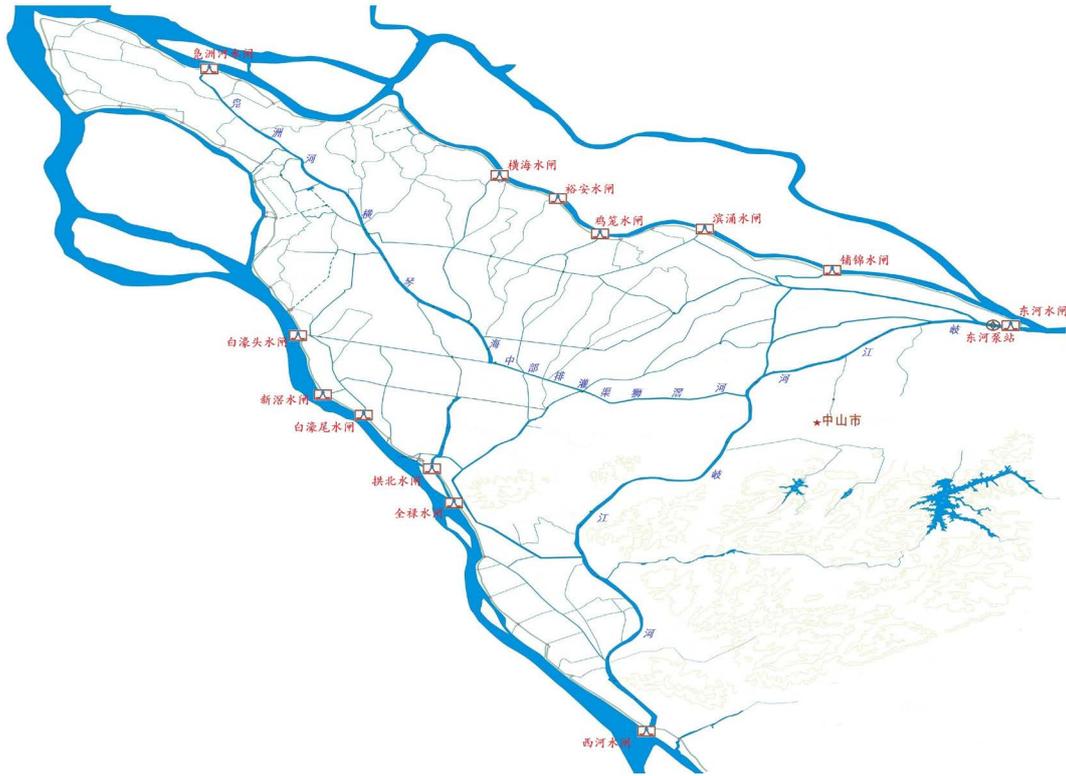


Figure 1. River network and sluice-pump group in research area

图 1. 研究区主要水系和闸泵工程

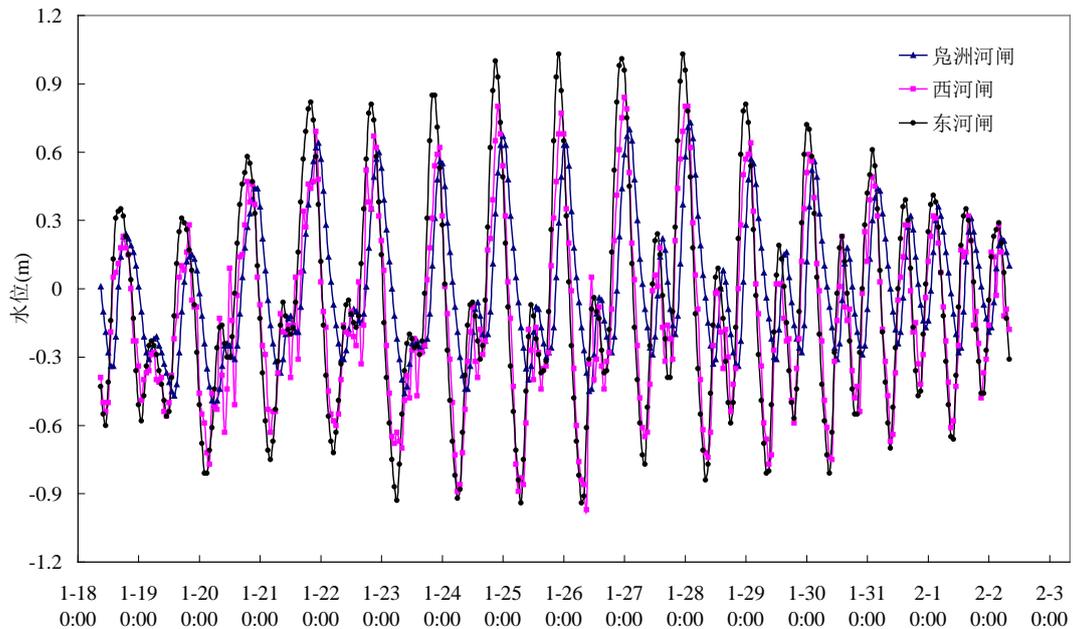


Figure 2. Tide curve outside the sluices

图 2. 主要水闸外江潮位过程

断面平均流速, B 为断面过水宽度, h 为断面平均水深, $u_* = \sqrt{ghJ}$ 为摩阻流速, J 为水力坡度; COD 降解系数参考现有成果取为 0.13 (1/d)。

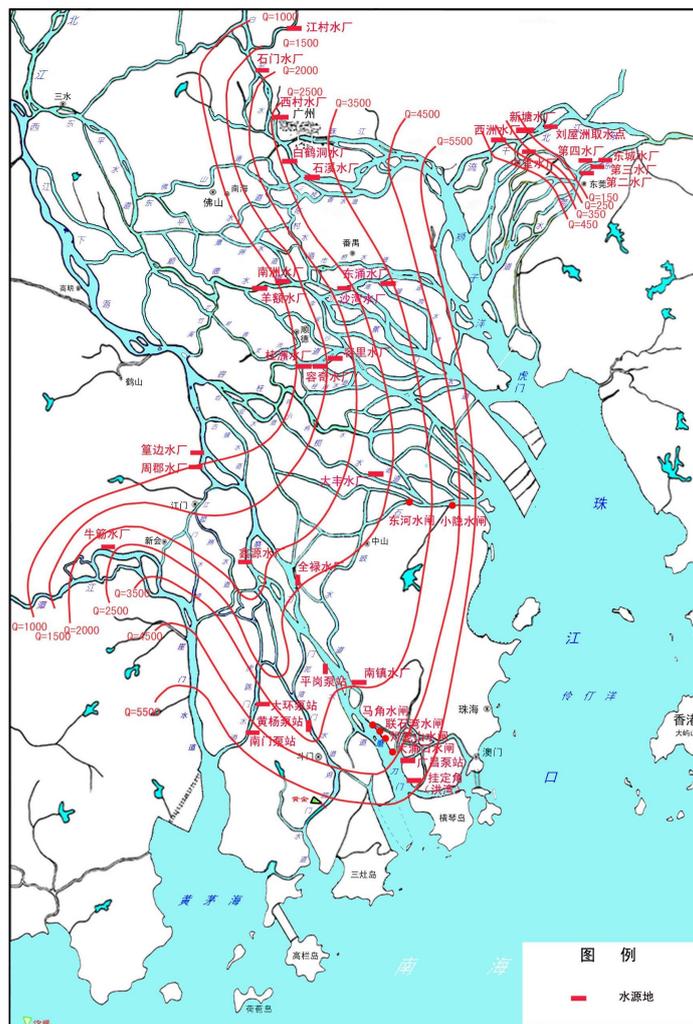


Figure 3. Relation between saltwater border and discharge
图 3. 珠江三角洲流量 - 咸界关系图

3.4. 方案比选思路

根据外江潮汐变化规律，调度时段可拟定为小潮至中潮(L2M)、中潮至大潮(M2H)、大潮至中潮(H2M)、中潮至小潮(M2L)四个典型时段。根据珠江三角洲三水、马口流量和流量 - 咸界关系，受含氯度影响较小的鳧洲河闸、白濠头闸、新滘闸、白濠尾闸、横海闸、裕安闸、鸡笼闸等可作为进水闸，控制水流“只进不出”，即闸外水位高于闸内水位时，闸门全开进水，反之闸门全关；受含氯度影响较大的滨涌闸、铺锦闸、东河闸等可作为排水闸，拟定“三闸排水”、“铺锦闸、东河闸两闸排水”、“东河闸单闸排水”三种情况，控制水流“只出不进”。方案比选时，先按“三闸排水”确定最优的调度时段，而后比较该时段内不同排水闸方案优劣。

3.5. 方案计算分析

方案设置如表 1 所示。

模型计算表明，随着调度换水过程的不断推进，中顺大围内河涌 COD 平均浓度呈平缓均匀下降变化趋势，起伏不明显；而内河涌蓄水量受外江潮位变化十分显著，呈峰谷交替变化过程。从各方案 3~5 d 河涌蓄水量较大时刻总蓄水量及 COD 平均浓度值统计(表 2)可知：在较短的调度历时要求下，调度后 COD 削减较为显著，平

Table 1. Settings of operation schemes
表 1. 调度方案设置

排水闸	方案	调度时段	开始时刻	调度规则
滨涌闸 铺锦闸 东河闸 三闸排水	S-H2M	小潮至中潮	1-18 16:00	①当 $Z_{外} > Z_{内}$ 且 $Z_{内} \leq \bar{Z}$ 时, 鬼洲河闸、白濠头闸、新 滔闸、白濠尾闸、横海闸、裕安闸、鸡笼闸全开, 否 则全关; ②拱北闸、全禄闸、西河闸全关; ③当 $Z_{外} \leq Z_{内}$ 且 $Z_{内} > \bar{Z}$ 时, 滨涌闸、铺锦闸、东河闸 全开, 否则全关。
	S-M2L	中潮至大潮	1-22 18:00	
	S-H2M	大潮至中潮	1-25 21:00	
	S-M2L	中潮至小潮	1-29 0:00	

Table 2. Water storage and COD concentration for different period
表 2. 各方案河涌总蓄水量、COD 平均浓度统计(不同调度时段)

方案	时刻	总蓄水量(万 m ³)	COD 平均浓度(mg/l)	调度历时	蓄水量增量(万 m ³)
S-H2M	*2005-1-18 16:00	3955.2	40.0	-	-
	2005-1-21 0:00	3876.5	33.4	2d8h	-78.7
	2005-1-22 1:00	4064.7	30.2	3d9h	109.5
	2005-1-23 1:00	4073.6	27.8	4d9h	118.4
	2005-1-24 1:00	3943.4	25.9	5d9h	-11.8
S-M2L	*2005-1-22 18:00	3955.2	40	-	-
	2005-1-25 2:00	4017.1	32.3	2d8h	61.9
	2005-1-26 3:00	3942.1	29.6	3d9h	-13.1
	2005-1-27 4:00	4017.3	27.0	4d10h	62.1
	2005-1-28 4:00	4089.5	24.7	5d10h	134.3
S-H2M	*2005-1-25 21:00	3955.2	40.0	-	-
	2005-1-28 4:00	4092.6	31.5	2d7h	137.4
	2005-1-29 5:00	3871.9	28.9	3d8h	-83.3
	2005-1-30 5:00	3850.1	26.5	4d8h	-105.1
	2005-1-31 6:00	3822.0	24.4	5d9h	-133.2
S-M2L	*2005-1-29 0:00	3955.2	40.0	-	-
	2005-1-30 5:00	3864.5	35.2	1d5h	-90.7
	2005-1-31 6:00	3835.9	32.2	2d6h	-119.3
	2005-2-1 6:00	3900.1	29.3	3d6h	-55.1
	2005-2-2 7:00	3817.0	27.1	4d7h	-138.2

*为该方案调度开始时刻。

均浓度下降较大, 且内河涌总蓄水量较大的调度时段为小潮至中潮, 即方案 S-H2M 最优, 取该方案结束时刻为 2005-1-22 1:00, 调度历时 3d9h, 调度期末河涌蓄水总量为 4064.7 万 m³, COD 平均浓度为 30.2 mg/l, 分别较调度前增加 109.5 万 m³、降低 9.8 mg/l。

以确定的小潮至中潮为最优调度时段, 拟定滨涌闸、铺锦闸、东河闸不同闸门组合排水条件下的水量水质调度方案, 确定最优的排水闸方案, 各方案计算成果见表 3 和图 4。

结果表明, 不同闸门排水方案的调度历时基本一致, 至调度期末西河闸单闸排水总蓄水量较两闸、三闸

Table 3. Water storage and COD concentration for different sluices
表 3. 各方案河涌总蓄水量、COD 平均浓度统计(不同排水闸)

方案	调度结束时刻	总蓄水量(万 m ³)	COD 平均浓度(mg/l)	排水闸
S-H2M-3out	2005-1-22 1:00	4064.7	30.2	滨涌闸、铺锦闸、东河闸
S-M2L-2out	2005-1-22 0:00	4162.1	29.8	铺锦闸、东河闸
S-H2M-1out	2005-1-22 0:00	4198.1	29.7	东河闸

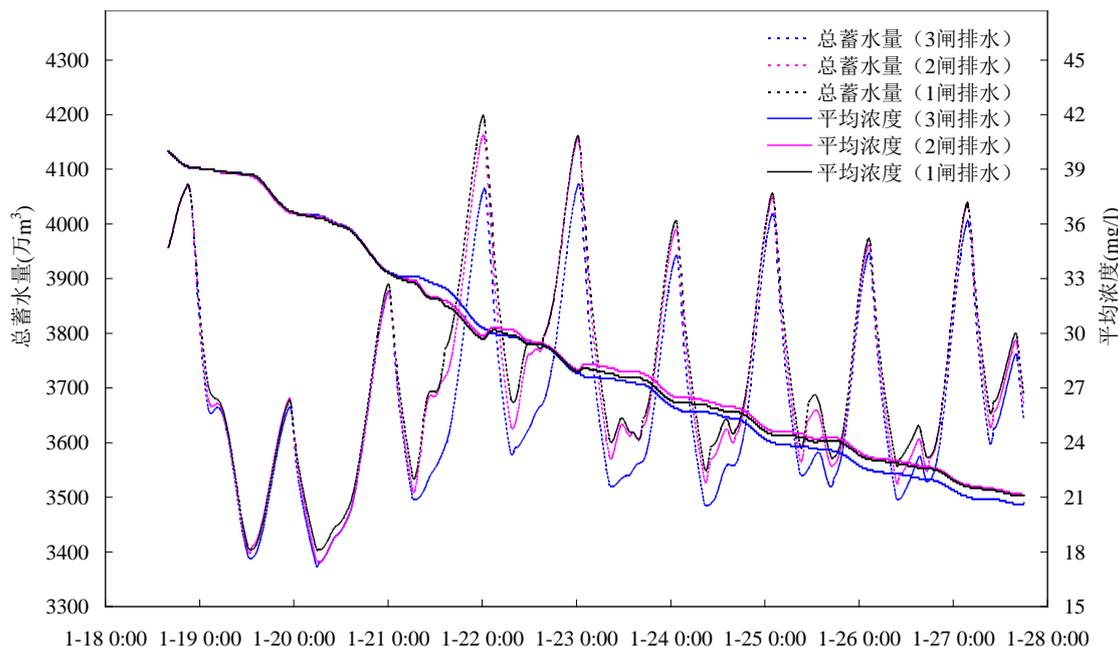


Figure 4. Curves of water storage and COD concentration for three schemes
图 4. 各方案下的中顺大围内河涌总蓄水量、COD 平均浓度过程

排水时要略大，而 COD 平均浓度略小，表明东河水闸单闸排水方案比其他方案要优。该方案下内河涌蓄水总量由调度初始时刻的 3955.2 万 m³ 增至调度结束时刻的 4198.1 万 m³，蓄水量增量为 242.9 万 m³；内河涌 COD 平均浓度由调度初始时刻的 40 mg/l 降至调度结束时刻的 29.7 mg/l，水质由 V 类提高至 IV 类(仅以 COD 为指标)；调度历时 3d8h，在较短的调度历时内，取得了水量水质目标改善最佳效果。

调度前后研究区不同时刻 COD 浓度分布见图 5。调度实施前，各水闸开启，水流受外界潮位周期变化自由往复运动，东干堤水动力较强，靠近水闸部分内河涌水质有一定改善，但其他大部分河涌水体交换缓慢，COD 浓度下降不明显(图 5(a))。调度后由于研究区东西干堤上游段水闸均能开闸引水，西北片内河涌水动力条件明显加强，水体交换迅速，水质改善较为明显，同时调度一定程度上实现了河网区水流“北进南出、西进东出”的有序格局，总体上西部比东部河涌水质改善效果好；但由于磨刀门水道靠近河口处受咸潮影响严重，外江水体含氯度超标，西河水闸等不能开闸引水，水体交换缓慢，中顺大围西南部河涌，特别是岐江河大部分河段水质改善效果有限(图 5(c))。调度前后岐江河沿程各断面最大、最小及平均流速见图 6。调度前，岐江河往复流明显，平均流速表明以由东往西流向水流为主；调度后，西河水闸无法开闸引水，岐江河流速总体减小，但流向转变为由西往东为主，水量水质调控主要依靠片区上部水闸进水和东河水闸排水进行，岐江河水动力没能有效增强，污染物运移和稀释过程缓慢，调度效果不佳。为进一步改善中顺大围水量水质调度效果，可加长调度历时(图 5(b)、图 5(d))，或开启东河泵站抽排增强水动力条件。

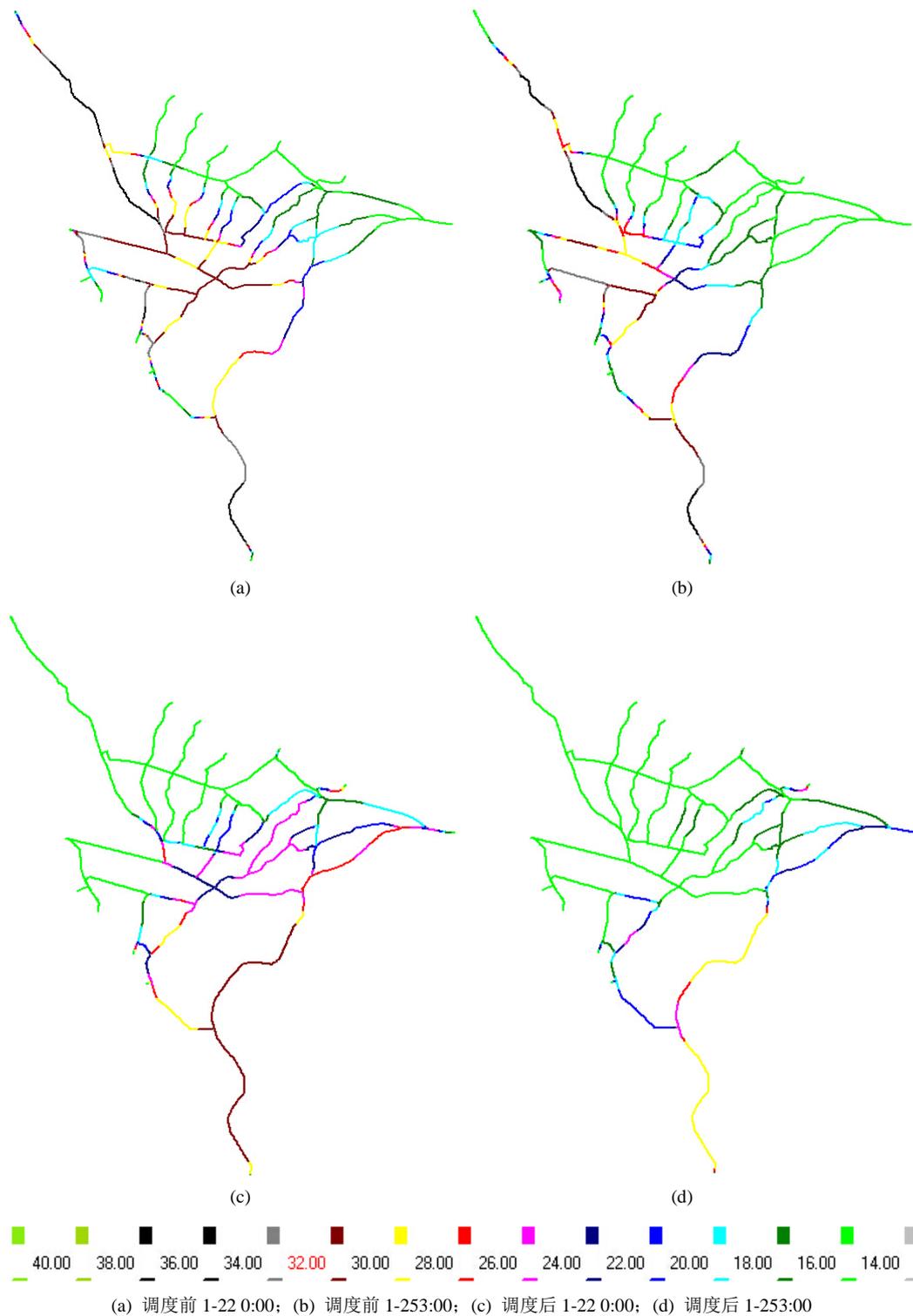


Figure 5. Distribution of COD concentration before and after operations

图 5. 研究区调度前后不同时刻 COD 浓度分布

本研究中，所建立的典型感潮河网区水量水质调控模型的水位边界条件由珠江三角洲一维水动力模型获取，两模型未实现耦合，且水质边界和含氯度约束均按静态恒定给定，无法评估典型区水量水质调控对外江水动力

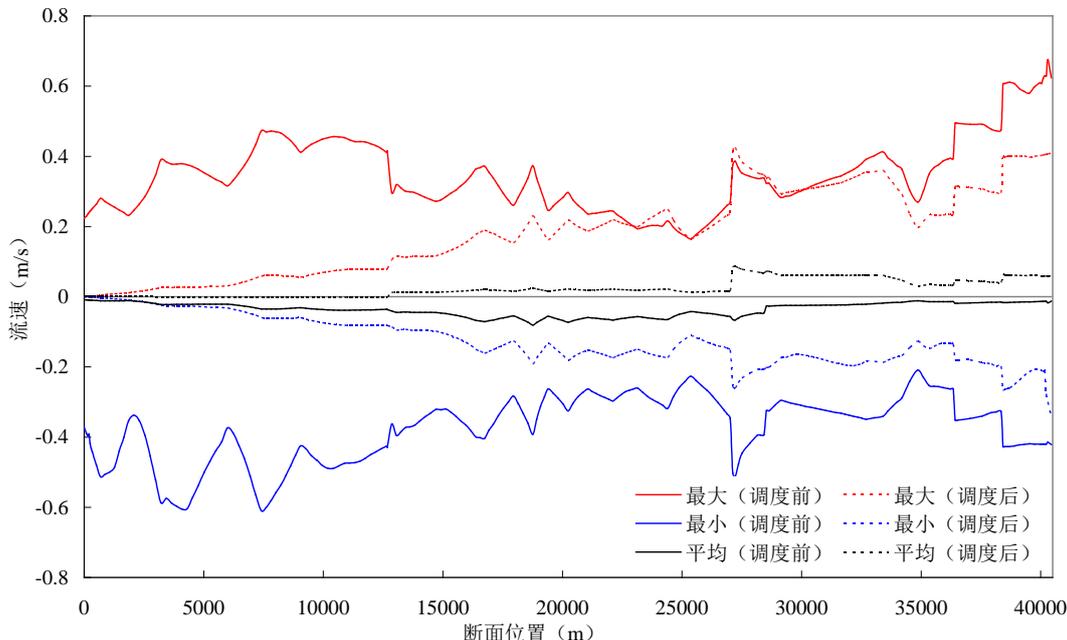


Figure 6. Distribution of COD concentration before and after operations
图 6. 调度前后岐江河沿程最大、最小、平均流速(流速为负表示由东往西流向)

水环境的影响以及由此导致的边界条件变化对典型区调度的反馈，同时未考虑研究区内产汇流、点面源污染物产输和人类取水过程，因此，开展典型感潮河网区水量水质调控模型与珠江三角洲一维潮流模型、水质模型、盐度模型以及人类活动影响下的典型区陆面水量水质模型的耦合是完善本研究的一个重要方向。此外，采用更翔实的实测资料对模型参数进行率定验证也有待加强。

4. 结论

1) 针对感潮河网区水系、水动力以及工程特点，以网河区一维水动力数学模型、一维水质数学模型以及闸泵控制模拟模块为基础，考虑河网区水文及工程相关约束，建立了基于闸泵群调度的感潮河网区水量水质调控模型，该模型能够拓展应用于防洪、排涝、防咸、供水等其他目标调度。

2) 以珠江三角洲典型研究区为例，开展了水量水质调控方案研究，结果表明调度时段为小潮至中潮、采用单一水闸排水时水量水质调控效果最优。

3) 在控制污染源前提下，采用科学的闸泵群调度，能优化河网区水流流路，实现水体有序流动，加快水体循环，在提高内河涌水量的同时有效改善水质。

4) 受外江咸潮影响，部分水闸无法引水，中顺大围西南部河涌水动力、水环境改善不佳，可加长调度历时或开启东河泵站抽排，提升水量水质调控效果。

5) 典型感潮河网区水量水质调控模型与珠江三角洲一维潮流模型、水质模型、盐度模型以及人类活动影响下的典型区陆面水量水质模型的耦合，以及模型参数进行率定验证有待进一步完善。

基金项目

水利部公益性行业科研专项经费项目(201401013, 201501010)。

参考文献 (References)

[1] 董增川, 卞戈亚, 王船海, 李大勇. 基于数值模拟的区域水量水质联合调度研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 184-189.

- DONG Zengchuan, BIAN Geya, WANG Chuanhai and LI Dayong. Joint operation of water quantity and quality based on numerical model. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 184-189. (in Chinese)
- [2] 刘玉年, 施勇, 程绪水, 栾震宇. 淮河中游水量水质联合调度模型研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 177-183.
LIU Yunian, SHI Yong, CHEN Xushui and LUAN Zhenyu. Union dispatch model for water quantity and quality in the middle reaches in Huaihe river. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 177-183. (in Chinese)
- [3] 张永勇, 夏军, 陈军锋, 孟德娟. 基于 SWAT 模型的闸坝水量水质优化调度模式研究[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(5): 159-164.
ZHANG Yongyong, XIA Jun, CHEN Junfeng and MENG Dejuan. Study on optimal dam operation of water quantity and quality based on a distributed SWAT model. *Engineering Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(5): 159-164. (in Chinese)
- [4] 宋刚福, 沈冰. 基于生态的城市河流水质联合调度模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(3): 258-263.
SONG Gangfu, SHEN Bing. An ecology-based water quantity and quality combined operation model for urban rivers. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(3): 258-263. (in Chinese)
- [5] 左其亭, 李冬锋. 基于模拟 - 优化的重污染河流闸坝群防污调控研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(8): 979-986.
ZUO Qiting, LI Dongfeng. Research on regulation for pollution-control of dams on heavily polluted river base on the model of simulation and optimization. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(8): 979-986. (in Chinese)
- [6] 阮仁良. 平原河网区水资源调度改善水质的机理和实践研究——以上海市水资源引清调度为例[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2003.
RUAN Renliang. Study on mechanism and practice of improving water quality by water resources diversion in plain river-net areas—A case study of the clean water diversion in Shanghai. Shanghai: East China Normal University, 2003. (in Chinese)
- [7] 徐祖信, 卢士强. 平原感潮河网水动力模型研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(2): 176-181.
XU Zuxin, LU Shiqiang. Hydrodynamic model for tidal river network. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(2): 176-181. (in Chinese)
- [8] 王超, 卫臻, 张磊, 等. 平原河网区调水改善水环境实验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(2): 136-138.
WANG Chao, WEI Zhen, ZHANG Lei, et al. Experimental study on improvement of water environment by water diversion in plain river networks. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2005, 33(2): 136-138. (in Chinese)
- [9] 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. Water diversion and control for water environment in tidal network of Pearl River Delta. *Journal of Hydrology*, 2012, 32(4): 16-21. (in Chinese)
- [10] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
WANG Deguan. *Computational hydraulics: Theory and application*. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [11] 雒文生, 宋星原. 水环境分析及预测[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
LUO Wensheng, SONG Xingyuan. *Water environment analysis and prediction*. Wuhan: Wuhan University Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 李大鸣, 林毅, 刘雄, 周志华. 具有闸、堰的一维河网非恒定流数学模型及其在多闸联合调度中的应用[J]. *水利水电技术*, 2010, 41(9): 47-51.
LI Daming, LIN Yi, LIU Xiong and ZHOU Zhihua. Numerical model of one-dimensional unsteady flow for river networks with sluices and weirs and its application to combined-regulation of multi-sluices. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2010, 41(9): 47-51. (in Chinese)