

常熟市海洋泾枢纽优化调度运行研究

屈磊飞¹, 王晓刚¹, 徐建中²

(1. 常熟市沙家浜水利管理服务站, 江苏 苏州 215500;
2. 常熟市沿江堤闸管理所, 江苏 苏州 215500)

摘要: 基于一维非恒定流水动力学 Saint-Venant 方程组, 应用水利计算软件 HEC-RAS, 通过现场实测、数值验证, 建立海洋泾枢纽引水数值计算模型。以河道单潮次入城水量为目标, 以河道控制段安全水位为约束条件, 计算分析枢纽节制闸启闭运行方式、闸门开度、河道沿线涵闸调度方式、城区水位等对工程运行的影响, 计算模拟工程在 4 种常见潮型下的运行工况, 比选确立较为合理的调度方式, 为工程调度运行提供参考。

关键词: 感潮河道; 数值计算; 优化调度

中图分类号: TV698

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 07-0049-06

Study on optimal operation of Haiyangjing hub in Changshu City

QU Leifei¹, WANG Xiaogang¹, XU Jianzhong²

(1. Sha Jia Bang Water Conservancy Management Service Station of Changshu City, Suzhou 215500, Jiangsu;
2. The Yangtze River Levee and Lock Project Management Office of Changshu City, Suzhou 215500, Jiangsu)

Abstract: Based on the one-dimensional unsteady hydrodynamic Saint-Venant equations, a hydraulic calculation software HEC-RAS was used to establish the numerical calculation model for the water diversion of Haiyangjing hub through field measurement and numerical verification. Taking the water amount that enters the city in a single stream as an objective, and the safe water level in the river control section as a constraint, the influence of the opening and closing operation mode of the control gate, the opening degree of the gate, the sluice gate scheduling method along the river, and the water level of the city to the project operation were calculated and analyzed. The operating conditions of the simulated project under four common tidal patterns were calculated, and a more reasonable scheduling method was established by comparison, which could provide a reference for the project scheduling operation.

Key words: tidal river; numerical calculation; optimal scheduling

1 概述

完善引流活水工程, 充分发挥沿江涵闸趁潮引江能力, 促进水体有序流动是水系连通的重要手段^[1], 对改善当前城市河道河网水动力条件, 改善水环境具有重要意义, 产生较为显著的经济、社会和生态效益。常熟市海洋泾枢纽由 2×10 m 双

孔节制闸和 2 台流量为 30 m³/s 的泵站组成, 是常熟市城区引江调水的主要枢纽工程, 承担着重要的引流功能。工程管理部门依据上级调度指令, 以“引水为主、排水为辅、自引为主、泵引为辅”的原则对海洋泾闸站枢纽进行调度运行管理。在工程运行管理过程中, 受枢纽下游局部河段地势、河堤高程、城区安全水位等因素影响, 引水常需在控

收稿日期: 2018-02-08

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2013081)

作者简介: 屈磊飞 (1980—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事水利工程建设管理工作。

制水位条件下进行,枢纽节制闸通常需限位控制运行,制约了枢纽引水效率的发挥。为进一步发挥工程综合效益,工程管理部门以海洋泾枢纽工程为研究对象,综合分析影响工程效益发挥的因素,以河道控制段安全水位为约束条件,以单潮次引水入城水量最大化为优化计算目标,通过原型实测,建立水力计算模型,应用水利软件 HEC-RAS 计算确定河道控制段安全水位,比选确立枢纽节制闸与沿线涵闸工程的联合调度运行方式,为工程运行提供指导^[2]。

2 水力计算模型构建

2.1 数学模型

海洋泾枢纽位于长江下游感潮河段,模拟河道水流运动采用一维非恒定流动力学 Saint-Venant 方程组,以水位和流量为变量,在质量守恒和能量守恒基础上建立方程^[3-4]。

连续性方程为:

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

运动学方程为:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial s} + \left[gA - B \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \right] \frac{\partial Z}{\partial s} = \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \frac{\partial A}{\partial s} \Big|_Z - g \frac{Q|Q|}{AC^2R} \quad (2)$$

式中: B 为水面宽度, Z 为水位, Q 为流量, A 为过水断面面积, R 为水力半径, C 为谢才系数, q 为单位长度河道的旁侧入流量, t 和 s 分别为时间和空间坐标, g 为重力加速度。

2.2 河道概化与边界处理

海洋泾枢纽数值计算的上边界为枢纽长江侧潮位,采用常熟市长江防汛决策信息系统实测潮

位数据,下边界为河道与城区水网交汇段,以水位边界条件处理。河道全长 15.2 km,沿程共有枢纽节制闸 1 座、跨河桥梁 16 座、分流闸 6 座、立交涵洞 1 座,采用软件自带内边界程序编辑处理,为尽可能真实地模拟海洋泾河道,概化时尽可能保留河道上的跨河桥梁、涵洞、水闸等建筑物(图 1),通过已知河底高程、底宽、边坡等概化处理,整个河道模型计算断面间距 50 ~ 200 m 不等,河道弯曲段断面适度增加^[5-6]。

2.3 模型率定

海洋泾河道为新开河道,河道断面较为规则,糙率变化不大,各河道的糙率初值取 0.025 ~ 0.035 之间^[7],数值计算采用试错法进行率定,根据断面实测的水位资料,调试各河段的糙率,使得计算的水位充分接近实测的水位过程。通过 7 种工况下原型观测值(表 1)与模型计算值的比较分析,相应地调整各个参数,使模拟值和观测值尽可能吻合。河道 15 个观测断面的计算水位与实测水位值相对误差基本在 $\pm 2\%$ 以内,最大相对误差为 2.64%,相对误差大小的平均值为 1.32%(图 2);枢纽闸下流量计算值与实测值相对误差最大值为 -4.75% ,平均误差在 $\pm 3\%$ 以内(表 2)。因此可以得出结论:常熟市海洋泾枢纽调度数学模型在理论上和算法上是正确可靠的,可用于海洋泾枢纽调度优化模拟。

3 海洋泾枢纽调度优化目标

根据运行实际需要,海洋泾枢纽的优化调度是指河道在安全水位下运行,通过枢纽口门节制闸的调度及沿线涵闸工程的配合调度,使河道入城断面水力要素达到(流速、流量)最优化,即单潮次引水水量(水资源总量)达到最大,同时兼顾沿线区域水量需求,以最大限度发挥海洋泾枢纽综合效益。

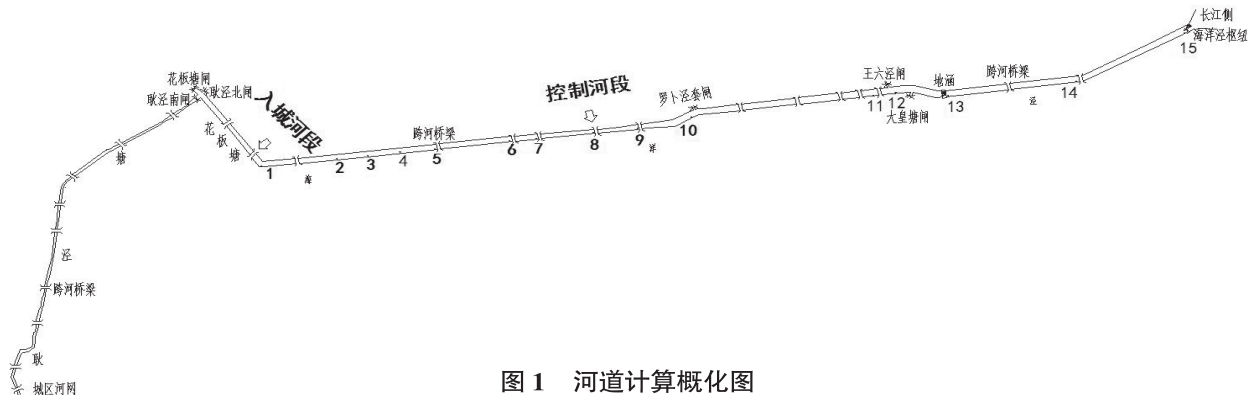


图 1 河道计算概化图

表 1 原型观测工况表

工况	日期	枢纽引水 节制闸 开度 (m)	观测项目	沿线水闸开度 (m)					
				王六 泾闸	大皇 塘闸	罗卜泾 套闸	耿泾 北闸	耿泾 南闸	花板 塘闸
1	2013.11.4	2.0	沿程水位测量	0.5	0.5	0.5	1.0	全开	全开
2	2013.11.5	1.5	沿程水位测量	0.5	0.5	0.8	1.0	全开	全开
3	2013.11.8	2.5	沿程水位测量	0.5	0.5	0.8	1.0	全开	全开
4	2014.1.15	3.5	沿程水位测量	0.8	0.8	0.5	0.5	全开	全开
5	2014.1.16	3.0	沿程水位测量	0.8	0.8	1.0	0.5	全开	全开
6	2014.9.30	不同开度 组合引水	流量测量	0.5	0.5	0.8	1.0	全开	全开
7	2014.11.8	不同开度 组合引水	流量测量	0.5	0.5	0.8	1.0	全开	全开

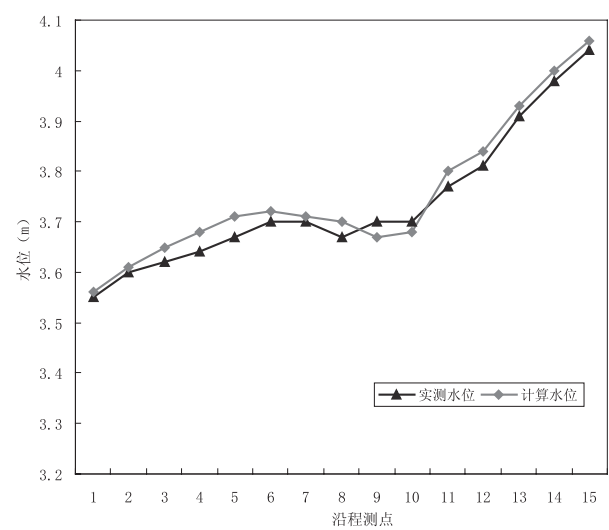


图 2 工况 1 沿程实测与计算水位对比图

3.1 长江典型潮型推求

海洋泾枢纽位于长江下游, 引水受潮汐作用的影响显著, 河段(即长江)水位变化剧烈, 不同季节呈现不同的潮型, 汛期为每年的 6 ~ 9 月, 年内其余月份为非汛期, 同时每月农历的初一至初五, 十五至十九为大潮, 月内其余时间为小潮段。通过常熟市长江防汛信息监控系统 2011 ~ 2014 年间海洋泾枢纽口实测长江潮位资料的水文统计分析, 根据季节、潮位特点及水利工程运行需求, 综合推求了 4 种不同典型潮型, 从潮位图分析(图 3), 潮型 1 长江高潮水位高、涨速快、高潮位历时长、节制闸有效引水时间长, 是汛期大潮时间段内常见潮型; 潮型 2 是非汛期大潮期间常见潮型; 潮型 3 长江最高潮水位相对较低、潮型平缓、高潮位历时

表 2 工况 6 实测流量与计算流量对比表

测次	枢纽节制闸 开度 (m)	实测流量 (m ³ /s)	计算流量 (m ³ /s)	相对 误差
1	全开	77.47	79.12	2.13%
2	3.0	62.15	62.19	0.06%
3	2.0	60.62	59.37	-2.06%
4	2.0	61.52	61.31	-0.34%
5	2.0	67.94	66.2	-2.56%
6	2.0	68.93	68.75	-0.26%
7	2.0	69.92	69.78	-0.20%
8	1.5	59.87	60.82	1.59%
9	1.5	56.98	59.44	4.32%
10	1.5	59.74	61.83	3.50%
11	1.5	60.69	63.05	3.89%
12	1.5	62.295	64.45	3.34%
13	1.5	63.90	65.54	2.57%
14	1.0	61.83	58.89	-4.75%
15	1.0	53.78	53.29	-0.91%
16	1.0	43.07	45.07	4.64%
17	0.8	43.03	44.72	3.93%
18	0.8	43.85	45.08	2.73%
19	0.8	44.67	45.20	1.19%

较短、有效引水时间相对短些,是汛期小潮期间常见潮型;潮型4为非汛期小潮潮型,通常若引水期间最高潮低于潮型4的最高潮位时,城区引水常需通过启动泵站来补充水量。

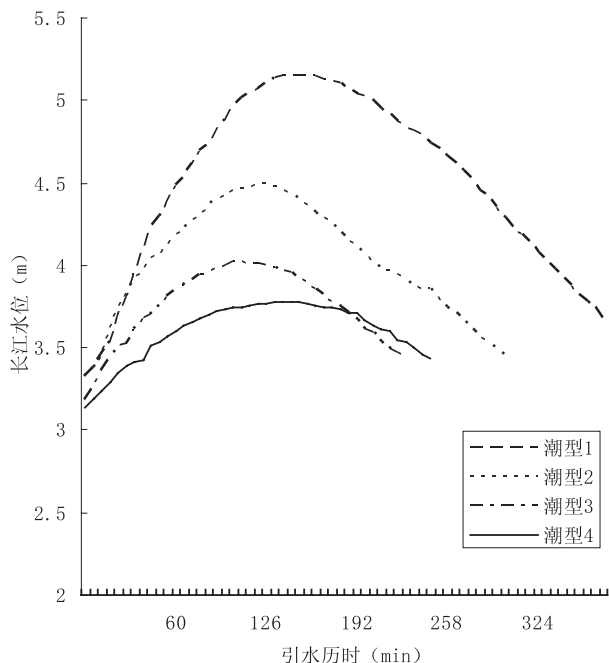


图3 4种典型潮型图

3.2 海洋泾河道控制水位

根据工程运行实际情况分析,海洋泾枢纽启动引江入城,主河道受途径区域地势高程、城区安全水位、城区河道承载能力综合影响,河道需确定2处安全控制水位,即海洋泾周行段安全水位控制在3.80 m(吴淞高程),河道入城段安全水位控制在3.70 m以内。

3.3 常熟城区常水位

根据常熟城区小东门水位站多年水文资料,常熟城区非汛期常水位为3.10 ~ 3.40 m,汛期常水位为3.20 ~ 3.50 m。

3.4 海洋泾沿线涵闸调度

海洋泾枢纽沿线建有多处涵闸,引水时在保证引水入城功效的前提下,沿线部分涵闸适度开启,满足沿线区域水量需求。海洋泾引水期沿线配合开启的涵闸主要有:王六泾闸、大皇塘闸、罗卜泾套闸、耿泾塘北闸等。从近年工程运行实际出发,分析沿线涵闸引水调度运行记录资料,结合涵闸下游河道承载能力及海洋泾主河道入城水量保障,工程管理部门以闸门开高1.50 m为沿线涵闸闸门的控制最高开度。花板塘闸和耿泾塘南

闸作为海洋泾河道入城控制闸,引水期间通常闸门全部开启。

3.5 海洋泾枢纽调度优化目标

将海洋泾枢纽相应的引水时段内使引水量最大化作为优化目标。设引水时段某时刻(t_j)的引水流量为 Q_j ,则在 $\Delta t_j(t_{j+1}-t_j)$ 时段内的引水量为 $W_j=Q_j-\Delta t_j$,设某潮次的总引水量为 W ,目标函数为:

$$W=\max \sum_{j=1}^m Q_j-\Delta t_j \quad (3)$$

约束条件为:

$$Z_i(t_j) \leq Z_{i \max} \quad (4)$$

其中 $Z_i(t_j)$ 为计算段内某 i 节点处在 t_j 时刻的水位, $Z_{i \max}$ 为 i 节点处在引水期间所允许的最高水位。

根据计算河道范围内河岸的具体高程,整个计算河段范围内有两节点处水位起控制作用,即海洋泾周行段水位不能超过3.80 m和入城段不能超过3.70 m,则约束条件可改为:

$$Z_{\text{出}}(t_j) \leq 3.8 \text{ m 和 } Z_{\text{入}}(t_j) \leq 3.7 \text{ m} \quad (5)$$

式中: Q_j 与闸门开度 e 、闸宽 B 、闸上水位 $Z_{\text{上}}(t_j)$ 、闸下水位 $Z_{\text{下}}(t_j)$ 以及流量系数 μ 和淹没系数 σ_s 等有关,闸上水位 $Z_{\text{上}}(t_j)$ 由长江潮位确定。

4 计算与优化分析

海洋泾枢纽自引的影响因素主要有:枢纽节制闸开度、长江潮型、城区水位和沿线涵闸的调度,为综合分析并最终确定合理的调度方案,针对4种典型潮型,沿线涵闸调度方案及城区水位,对海洋泾河道不同运行方案调度进行了计算模拟,综合分析各影响因素下河道的运行状况。

4.1 节制闸开度影响分析

数值计算表明在其他控制条件不变的情况下,枢纽节制闸开度对河道水位线、流量影响较大。潮型1、潮型2下闸门全开及部分开度下,河道控制段、入城段水位已超过安全水位,必须对枢纽节制闸进行控制运行;潮型3、潮型4最高潮位相对较低,节制闸闸门全开状态河道沿程水位已在安全水位之下,故不需对口门节制闸进行控制运行;不同潮型、同一节制闸开度下,入城水量差异较大,以枢纽节制闸开度2 m为例,4种潮型下入城水量分别为:121.26万 m^3 、71.97万 m^3 、47.03万 m^3 、44.96

万 m³, 故应分别对 4 种潮型计算确定调度方案。

4.2 节制闸启闭方式影响分析

以控制段安全水位为计算控制条件, 节制闸开度直接影响河道流量及沿程水位, 节制闸的启闭方式同样对水位及流量影响较大。工程运行中节制闸有 3 种闸门启闭方式: 多段式调节为闸门开启后适时不断调节开度以控制沿程水位; 二段式调节为引水过程中闸门调节 2 次, 先全开后降至安全开度, 再拉至全开状态至引水结束; 一段式为闸门开启后保持在安全开度至引水结束。3 种启闭方式均以控制段水位不超安全水位为前提。从引水功效分析, 多段式调节下潮型 1 较后 2 种调节方式入城引单次水量可分别增加 3.25% 和 19.29%, 潮型 2 较后 2 种调节方式引水量提高 1.6% 和 11.41%; 从沿线区域补水效果分析, 多段式调节下潮型 1 下大皇塘水量可分别增加 5.99%、26.0%, 潮型 2 下大皇塘水量可分别提高 3.94%、15.76%; 从工程运行角度分析, 一段式调节操作简单安全, 全程闸门启动 1 次即可, 二段式需启动 2 次, 多段式需多次调节闸门。综合工程管理运行和引水效果, 枢纽节制闸采用二段式调节方式更为科学合理。潮型 3、潮型 4 下, 闸门全开状态下河道控制段水位均在安全水位下, 故无需对口门闸门进行控制运行。

4.3 沿线涵闸运行影响分析

海洋泾枢纽在引水过程中, 通常开启沿线部分涵闸引水, 以满足沿线部分区域引水需求。工程运行中沿线涵闸的调度常以经验判断, 缺乏合理依据。数值计算结果表明: 其他条件不变, 潮型 1、潮型 2 下沿线涵闸运行对枢纽节制闸的调节、控制段安全水位、入城水量有着重要影响, 沿线涵闸的启动能改善引流条件、降低河道沿程水位,

同时也对河道入城水量起到分流作用。枢纽节制闸同一开度下, 随着位于入城河段上游的王六泾闸、大皇塘闸、罗卜泾套闸开度的增加, 分流作用愈加明显, 入城流量及沿程水位均下降; 随着位于入城河段下游的耿泾塘北闸闸门开度的增加, 由于降低水位提高入流条件较分流影响更加明显, 入城流量反而有所增加。潮型 3、4 中, 沿线涵闸的开启, 主要起到分流作用, 故沿线涵闸的调度应视城区水量需求而进行。

4.4 城区水位影响分析

计算表明, 同一潮型、同一节制闸开度条件下, 随着城区水位的抬高, 海洋泾河道沿程水位逐渐抬高, 单次引水时间缩短, 入城段流速下降, 入城平均流量减小, 入城水量减少; 不同城区水位下, 潮型 1、2 有不同的安全开高, 需确定不同组合条件下枢纽及沿线涵闸的调度方案; 潮型 1 下, 城区水位平均每上升 10 cm, 入城水量平均减少 10 万 m³; 潮型 2 下, 城区水位平均每上升 10 cm, 入城水量平均减少 9 万 m³; 潮型 3、4 下, 枢纽闸门全开状态下, 随着城区水位的抬高, 河道控制段水位亦同步升高并均处于安全水位之下。

4.5 综合分析

在综合模拟计算分析海洋泾河道入城流量、沿程水位的基础上, 为充分发挥枢纽单次引水效果, 同时确保沿线河道在安全水位下运行, 以入城水量最大化为目标, 对沿线涵闸多种调度方式、城区不同水位组合条件下, 枢纽节制闸调度方案优化计算(表 3)。计算结果表明, 在受控制段水位条件限制下, 通过节制闸和沿线涵闸的配合调度, 可最大限度发挥枢纽单次引水效率; 受沿线涵闸的分流影响, 枢纽节制闸开度与入城水量并非成正向关系。不同运行调度方案下, 入城段上游王

表 3 不同潮型下工程优化运行方案(城区水位 3.3 m)

沿线涵闸开度 (m)						海洋泾节制闸		枢纽闸下平均流量 (m ³ /s)	最大入城水量 (万 m ³)	潮型
王六泾闸	大皇塘闸	罗卜泾套闸	耿泾北闸	耿泾南闸	花板塘闸	调节方式	安全开度 (m)			
0.5	0.5	1	1.2	全	全	二段式	1.6	80.24	120.34	1
0.5	0.5	1	1.2	全	全	二段式	2.8	75.02	92.48	2
0.5	0.5	1	1.5	全	全	一段式	全开	59.93	56.15	3
0.5	0.5	1	1.5	全	全	一段式	全开	49.27	45.94	4

六泾闸、大皇塘闸、罗卜泾套闸等开启而下游耿泾北闸关闭是最不利方案,入城水量最小,运行过程中应避免采用;沿线涵闸全部关闭是多种调度方案中较为不合理的方案,沿线区域不能有效换水,同时城区水量也未能达到优化。

根据 2012、2013 年枢纽节制闸实际调度工况,选择采用优化调度方案逐潮次进行引水量的计算(见表 4),计算结果表明,采用优化调度方案后,引水总量有较为明显的提高。2012 年枢纽引水总量可增加 5832.01 万 m³,引水量可提高 25.8%;2013 年枢纽引水总量可增加 6012.6 万 m³,引水量可提高 27.3%。提高了对沿程区域的补水效果,加快了城区河网的换水效率,较为合理地发挥了枢纽综合效益。

目标的计算方案,提出枢纽节制闸二段式启闭方式,同时对工程运行中常见的调度方式进行了计算,比选确立了较为合理的枢纽调度方式,为工程运行提供了科学指导。在今后的研究中,可将计算区域进一步扩大,研究确定合理的计算模型,整体分析海洋泾枢纽的优化调度运行在整个河网中的作用与效果。

参考文献:

[1] 江苏省人民政府.省生态河湖行动计划(2017~2020 年)[Z].2017.

[2] 常熟市长江河道管理处,扬州大学水利科学与能源动力学院.常熟市海洋泾枢纽优化调度运行研究与实践技术报告[R].2015.

表 4 2012、2013 年枢纽节制闸引流总量对比表

类别	2012 年原引水量 (万 m ³)	优化方案 引水量(万 m ³)	2013 年原引水量 (万 m ³)	优化方案 引水量(万 m ³)
汛期引水	10170.11	12876.30	11315.25	12455.30
非汛期引水	12388.46	15712.28	10653.85	15526.40
合计	22558.57	28390.58	21969.10	27981.70

5 小结

采用调查研究、理论分析、现场实测、数值计算、方案比选相结合的研究方法,在对相关已有研究成果与海洋泾枢纽近年运行资料收集分析的基础上,结合枢纽现有运行调度方式及河道监测数据,建立河道计算数学模型,应用 HEC-RAS 专业软件计算不同方案下海洋泾各断面的水力特性,并通过实测数值与数值计算值进行对比分析,对数值计算模型进行修正和完善。对影响工程效益发挥的主要因素枢纽调度方式、沿线涵闸调度方式、城区水位分别进行了计算分析,明确了河道控制安全水位,确立了以入城水量最大化为优化

[3] 郑邦民.计算水动力学[M].武汉:武汉大学出版社,2001.

[4] 张行南,彭顺风.原区河段洪水演进模拟系统研究与应用[J].水利学报,2010(07):803-809.

[5] 戴文鸿,张云,高嵩,等.尾閤段河网一维水流数学模型应用研究[J].水利水运工程学报,2011(04):97-101.

[6] 薛联青,张红举,吕锡武.感潮河道引江工程综合调度应用研究[J].东南大学学报(自然科学版),2003,33(5):668-672.

[7] 张文佳,逢勇.引清调度对常熟地区水环境的影响[J].东北水利水电,2009(04):56-59.