

# 扬州市中心城区河网闸泵 联合调度优化研究与应用

钱睿智<sup>1</sup>, 陈 静<sup>2</sup>, 李章林<sup>3</sup>, 谈 立<sup>1</sup>, 杨咏梅<sup>1</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局扬州分局, 江苏 扬州 225002;

2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 3. 扬州市水利局, 江苏 扬州 225002)

**摘要:**建立扬州市中心城区河网水动力-水环境模型,模拟换水条件下河网水流运动,根据实测资料并结合模型演算,得出在生态流速控制阈值范围内的适宜年引水量阈值、逐月月引水流量阈值和区域水网的换水周期;针对水功能区水质改善和生态需水满足度提升,优化研究现有闸泵联合调度方式,提出闸泵运行精准调度方案和调控效益分析成果,为区域生态需水保障和水资源配置调度提供可靠的依据。

**关键词:**河网闸泵;水动力;水环境;精准调度

中图分类号:TV212

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)12-0018-05

## Research and application on the joint scheduling optimization of sluice pump of the river network in central city of Yangzhou

QIAN Ruizhi<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>, LI Zhanglin<sup>3</sup>, TAN Li<sup>1</sup>, YANG Yongmei<sup>1</sup>

(1. Yangzhou Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province,  
Yangzhou 225002, Jiangsu, Yangzhou 225002, Jiangsu;

2. Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, Jiangsu;

3. Yangzhou Water Conservancy Bureau, Yangzhou 225002, Jiangsu)

**Abstract:** The hydrodynamic and water environment model of the river network in the central city of Yangzhou was established to simulate the flow movement of the river network under the condition of water exchange. According to the measured data and combined with the model calculation, the appropriate annual water diversion threshold value, the monthly water diversion flow threshold value and the water exchange period of regional water network within the ecological flow control threshold value was obtained. Aiming at the improvement of water quality and the improvement of ecological water demand satisfaction in water functional areas, the existing joint scheduling mode of sluice pump was optimized and studied, and the accurate scheduling scheme of sluice pump operation and the analysis results of regulating and controlling benefits were proposed, so as to provide a reliable basis for regional ecological water demand guarantee and water resource allocation and scheduling.

**Key words:** sluice pump of the river network; hydrodynamic; water environment; precise scheduling

收稿日期:2019-06-13

作者简介:钱睿智(1987—),男,硕士,工程师,研究方向为水文水资源。

## 1 概述

扬州市中心城区以北到沿山河,南临长江,西到润扬河、乌塔沟,东靠京杭大运河,区内河渠纵横交错。穿越中心城区的古运河沟通高邮湖、邵伯湖并与长江连通,高邮湖水位正常 5.8 m,邵伯湖水位正常 4.8 m,长江水位正常在 4.0 m 以下,正常年份下,高邮湖、邵伯湖富余水资源基本保证了古运河与城区水系 6 亿  $\text{m}^3$  左右的生态基流,这为扬州中心城区清水活水、北引南排提供了独特的水资源条件。

## 2 决策支持

### 2.1 现状调度方案

扬州城市河道清水活水通过扬州闸引进扬州城区的源头水源——高邮湖、邵伯湖湖水进入古运河,使市区古运河保持活水长流。中心城区分东部水系、中部水系、西部水系三大区域,通过节点控制工程进行活水调度<sup>[1]</sup>。

东部水系,沙施河、七里河通过开启曲江泵站、通运闸站,抽大运河水,经七里闸自流排入古运河。

中部水系,通过开启黄金坝闸站、便益门泵站,实现瘦西湖及玉带河、北城河、小秦淮河、二道河等河道自流活水。同时,开启象鼻桥泵站,为唐子城水系、双峰云栈提供活水水源。

西部水系,通过平山堂泵站取瘦西湖水进入沿山河,再分别开启新城河闸、四望亭河闸,由沿山河分别向新城河、四望亭河补水,为新城河水系提供活水水源。借助关闭江阳路节制闸,抬升新城河水位,通过开启念泗河闸、杨庄河闸、幸福河闸,实现念泗河、蒿草河、安墩河、杨庄河、幸福河、引潮河等河道自流活水。另外,开启明月湖闸、黄泥沟闸,由沿山河分别向明月湖、揽月河补水,为赵家支沟水系提供活水水源,实现对明月湖、揽月河、赵家支沟等主干河道自流活水。

清水活水工程覆盖大运河以西中心城区 90  $\text{km}^2$ ,全长 140 km 的 35 条河流,服务沿线近百万市民<sup>[2]</sup>。

### 2.2 决策支持系统

扬州中心城区区域水系密布,河网纵横交错,受京杭大运河、古运河、长江、区域水文情势等多种动力因素交互影响。决策支持系统概化后的河网模型共包含 69 条河道,东起扬州闸站,北至沿山河,南至长江瓜洲闸,西至仪扬河泗源沟闸。

合理布设水位、流量、水质监测站点是模型试验研究的基础。站点布设充分考虑区域河网特性和相应的水利工程调度情况,满足区域供水和改善区域水动力条件的要求,总体上以能够控制区域内水流的运动特征为原则<sup>[3]</sup>,主要出入口门以及重要河流节点布设监测站点。

由于实际调度中,扬州市中心城区排涝和清水活水均涉及到泗源沟闸,因而将中心城区西边界外延至仪扬运河入江口门泗源沟闸,水量水质同步监测共布设站点 23 处。其中,新设水位、流量站点 11 处;新设水质站点 15 处;新设水生态站点 1 处。

河网模型构建中共设置 23 个开边界条件,采用 2015 年度和 2016 年度两次调水试验实测的流量及水位数据作为边界条件,其中大运河上游,龙河,仪扬河等河流出入口为流量边界,乌塔沟、大运河下游,瓜洲闸等为水位边界。选取流量站、水位站、水质站作为模型验证点。决策支持系统构建涉及的水工建筑物类型包括:水闸、泵站和堰等,共创建区域内闸门 22 座,泵站 1 座,堰 1 座。

## 3 调度控制指标

以生态需水控制指标作为清水活水调度控制指标,生态需水的特性表现为时间性、空间性、阈值性和水质水量统一性<sup>[4]</sup>。生态需水控制指标具有多目标性,生态水位体现了生物生境的空间范围;生态流量、流速与换水周期体现了生境所需要的水动力条件<sup>[5]</sup>。

### 3.1 区域概化与计算方法

中心城区总体地势北高南低,沿山河、江平路一线以北为丘陵区,地形高程在 10 ~ 30 m;沿山河以南至江阳路为平原区,地形高程在 6.5 ~ 10 m;江阳路以南为圩区,地形高程在 3.5 ~ 6.5 m。总体排水及活水方向由北向南排至长江。

本区域进出水通道较为明晰,扬州闸为主要入流边界,瓜洲闸与泗源沟闸为主要出流边界。将区域概化为一个相对独立的河网型湖库,基于生态水文学原理,用湖库生态需水量计算进行本区域生态需水量的计算。

### 3.2 引水量阈值与换水周期

#### 3.2.1 年总量

根据实测资料并结合模型演算,在生态流速控制阈值的范围<sup>[4]</sup>内考虑适宜引水流量流区间为  $[18, 26, 40] \text{ m}^3/\text{s}$ ,年引水量阈值区间为  $[5.7, 8.2, 12.6] \text{ 亿 m}^3$ 。

### 3.2.2 逐月水量

根据两闸 2005 ~ 2015 年合并逐日排水量进行分析计算,在水量交换系数控制阈值的范围内结合模型计算得出逐月引水流量的阈值,如表 1 所示。

表 1 逐月引水流量的阈值 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$

月 份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
最小	13.4	17.6	15.2	18.7	10.8	12.1
适宜	16.8	22.1	19.0	23.3	13.5	15.1
最佳	25.1	33.1	28.5	35.0	20.2	22.7
月 份	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
最小	35.8	24.0	20.9	12.5	13.7	15.9
适宜	44.7	30.0	26.2	15.6	17.2	19.9
最佳	67.1	45.1	39.3	23.4	25.7	29.8

### 3.2.3 换水周期

利用模型计算不同水位下的区域蓄水量计算区域水网的换水周期,成果如表 2 所示。

表 2 不同控制水位下的换水周期

控制水位 (m)	蓄水量 (亿 $\text{m}^3$ )	换水周期 (d)
4.6	0.36	19
4.8	0.38	20
5.0	0.41	21
5.2	0.43	23

### 3.3 区域生态需水保障

从河道地形可知,古运河沿线地势最低,市区河道直接或间接汇入古运河,形成市区河网;在没有外来动力的情况下,除非北部山丘区来水,东片扬州闸引水很难惠及至西部城区。现状扬州城区河道有序流动体系尚未完善,北引南排的正常有序流向首先受长江高潮位和高邮湖、邵伯湖水源限制,在汛期长江高潮位和高邮湖、邵伯湖水源缺乏时,内河活水体系受阻;加之部分内河水系未能有效沟通,城市内部河道桥涵阻水、局部河道断头,活水动力不足,水体流动性差,水生态功能有下降的诸多影响因素。图 1 为扬州闸引水流量为  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  时,区域无水利工程调控情况下的流速分布,由图 1 可见,瘦西湖 ~ 二道河以西片区明显水动力不足,流速缓慢,仪扬河以北沿山河以南水网流速均小于

$0.02 \text{ m/s}$ 。西部城区生态需水在保证源头水量水质的前提下,重点是调节区域内河网的有序流动。

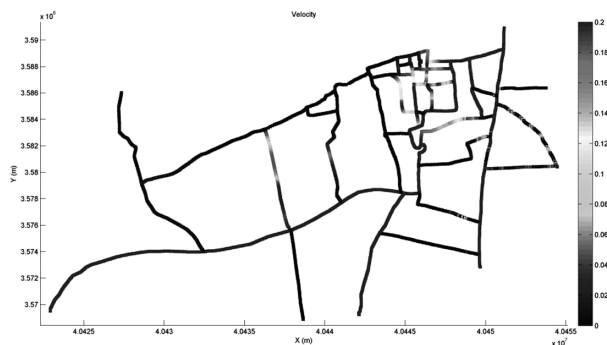


图 1 无水利工程调控情况下的河道流速分布

当模型中考虑西北部水系沟通工程,黄金坝闸至沿山河的活水通道,通过黄金坝闸扩建至  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  抽引古运河水,平山堂站  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  的输水能力,为古运河西侧城市活水提供水源保障。根据模型计算结果显示河网中扬州市城区河道各月最大流速较小,古运河河道最大流速较大,邗沟流速较大。图 2 为水利工程调控情况下的河道流速分布图,由图 2 可见,区域总体流速分布较无工程调控情况优化许多,但部分节点的流速盲点仍然存在,主要体现在黄金坝下游邗沟、新城河与赵家沟等河道:黄金坝闸下游由于邗沟过水能力不足,流速增加至  $0.32 \text{ m/s}$ ,超过适宜流速与景观流速上限,极易产生扰动引起浊度增加影响景观;新城河与赵家沟下游流速较小,低于生态流速阈值  $0.05 \text{ m/s}$ 。

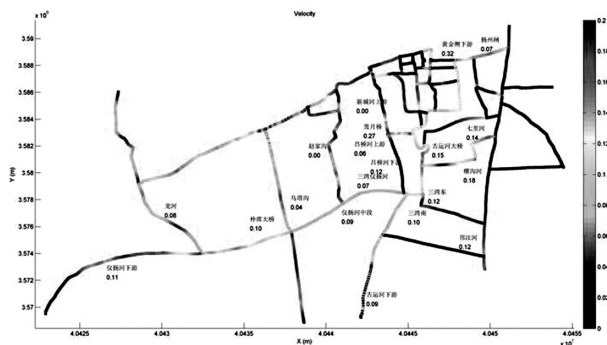


图 2 水利工程调控情况下的河道流速分布

## 4 调控效益分析

### 4.1 水功能区水质改善

城区污水排放及河道内源污染释放是片区内水功能区水质较差的重要原因,在水系沟通不畅的情况下,水体自净能力下降,污染物不易降解,水质状况更加难以好转。利用邵伯湖供水区挹江控淮的有利条件,遵循区域水系特征,串活内部水网进

行调水,通过优化调度控制,加强了城市水系沟通,改善了河流水质。

4.1.1 污染物浓度变化分析

调水提高了水体的稀释和自净能力,对降低河道内污染物浓度起到一定的促进作用。以区域重点控制断面为例,针对近几年中心城区供水区重点问题河道的主要超标因子,通过邵伯湖调水,分析不同调水工况下(即扬州闸流量为 20 m<sup>3</sup>/s、30 m<sup>3</sup>/s、40 m<sup>3</sup>/s 和 50 m<sup>3</sup>/s 的情况下)主要超标污染物浓度削减情况。

总体来看,调水对区域内河道污染物的稀释降解起到了一定的促进作用,尤其对古运河、七里河、新城河的水质改善效果较为显著。

4.1.2 水质改善效益分析

不同工况条件下,区域河道主要污染物的浓度在调水 72 h 后均基本趋于稳定。区域主要超标因子氨氮为例,对比不同工况下调水对氨氮影响分析,对比结果见表 3。由表 3 可知,古运河、七里河、新城河等水质状况受调水影响大的河道,不同工况对氨氮浓度的削减影响也较大,而乌塔沟、仪扬河下游及邗江河的氨氮浓度变化受调水流量影响不明显。

故以古运河为例,分析邵伯湖调水对水质改善的优选方案。调水流量从 20 m<sup>3</sup>/s 升至 30 m<sup>3</sup>/s 时,古运河 72 h 后氨氮的浓度削减有较大的提升;

但调水流量从 30 m<sup>3</sup>/s 升至 40 m<sup>3</sup>/s、50 m<sup>3</sup>/s 时,古运河 72h 后氨氮的浓度削减基本变化较小。

所以邵伯湖调水期间,扬州闸流量 30 m<sup>3</sup>/s 可作为一种适宜优选入流工况,调水 72h 后对区域水质将会产生积极地改善作用。

4.2 生态需水满足度提升

城市河网水环境污染是经济社会发展到一定阶段的必然产物。随着人口增加,城市规模扩大和现代工农业体系的发展,城市生产、生活垃圾和污染物排放量急剧增加,这必将影响甚至危及城市河网水环境和水质;同时又受到特定经济发展阶段经济实力、管理能力、技术水平的限制,无法对城市河网水环境进行有效保护和改善。

平原型河网河道比降小,古城区河网平均比降仅约为 0.1‰,水体流动性极差,流动无序,统筹调控难度大,这更加剧了城市河网水环境改善的难度。

表 4 为工程控制下生态流速满足度统计,分别为扬州闸 20 m<sup>3</sup>/s、30 m<sup>3</sup>/s 和 40 m<sup>3</sup>/s,黄金坝 9 m<sup>3</sup>/s,平山堂泵站 5 m<sup>3</sup>/s 情况下,城区重要节点的流速在适宜生态流速阈值和最低生态流速阈值范围内的满足比率,由表可见工程控制条件下扬州闸引水流量为 30 m<sup>3</sup>/s 时,生态流速阈值满足度最佳。

5 结论与展望

通过建立扬州市中心城区河网水动力水环境

表 3 不同工况下调水对氨氮浓度的影响对比

重点河道	监测断面	氨氮浓度削减( % )											
		24h				48h				72h			
	调水流量(m <sup>3</sup> /s)	50	40	30	20	50	40	30	20	50	40	30	20
古运河	扬州闸	94.2	90.1	79.9	56.5	98.0	97.6	97.0	94.7	98.0	98.0	98.0	97.8
	三湾	7.7	7.6	6.9	7.7	80.2	71.4	36.0	15.0	86.0	83.0	76.2	41.7
	瓜洲闸	8.0	8.0	8.0	8.0	71.0	40.4	16.4	16.9	83.1	78.0	65.1	24.0
七里河	三里桥	12.3	10.9	10.0	9.6	54.2	52.0	48.1	41.0	77.0	76.1	74.2	71.2
新城河	赏月桥	11.3	11.3	11.3	11.3	33.5	31.7	30.9	29.4	71.3	67.0	65.1	58.1
乌塔沟	蒋王西	9.4	9.4	9.4	9.4	18.4	18.4	18.4	18.4	28.3	28.3	28.3	28.3
仪扬河	朴席大桥	9.4	9.4	9.4	9.4	17.6	17.6	17.6	17.6	59.2	32.5	25.2	25.2
仪扬河	泗源沟闸	9.4	9.4	9.4	9.4	18.3	18.3	18.3	18.3	26.1	26.1	25.2	26.1
邗江河	邗江河桥	9.4	9.4	9.4	9.4	18.3	18.3	18.3	18.3	26.3	26.3	26.2	26.2

表 4 工程控制下生态流速满足度统计

控制目标	扬州闸 20 m <sup>3</sup> /s	扬州闸 30 m <sup>3</sup> /s	扬州闸 40 m <sup>3</sup> /s
生态流速阈值[0.1,0.2]满足(%)	12.5	88.5	75.3
生态流速阈值[0.05,0.25]满足(%)	78.1	100	91.5

数学模型,在实测资料的基础上,从中心城区河网地区的河道健康出发,考虑区域水质模式和生态模式两种工况进行模型计算,分析河网各河道的水位、流量、流速,各关键断面的水位、流量、流速、总磷、总氮、氨氮、高锰酸钾指数的变化过程,进而比选优化方案,限于篇幅,本文中水质指标采用区域主要超标因子氨氮为例。

根据实测资料并结合模型演算,得出在生态流速控制阈值的范围内的适宜年引水量阈值、逐月月引水流量阈值和不同水位下的区域蓄水量计算区域水网的换水周期;当模型中考虑西北部水系沟通工程,黄金坝闸至沿山河的活水通道,通过黄金坝闸扩建至 18 m<sup>3</sup>/s 抽引古运河水,平山堂站 10 m<sup>3</sup>/s 的输水能力,为古运河西侧城市活水提供水源保障;对于水功能区水质改善而言,扬州闸流量 30 m<sup>3</sup>/s 可作为一种适宜优选入流工况,调水 72 h 后对区域水质将会产生积极地改善作用。

为更好地实现扬州市中心城区闸泵运行的科学管理,需要加强区域水文、水环境和水生态系统

的精细化监测与分析,需要进一步完善区域水文、生态环境与引排工程控制因素监测系统,在区域开展长期的监测与调查研究,为区域防洪排涝、生态需水保障和水资源配置调度提供可靠的依据,从而全面提升城市防洪排涝能力和清水活水能力,最终实现“不淹不涝”和“活水润城、清水绕城”的总体目标。

#### 参考文献:

- [1] 缪成晨, 邓勇. 扬州市水生态文明城市试点建设模式应用与推广[J]. 水利发展研究, 2017, 17(08):41 - 44.
- [2] 马栋. 基于边连通度的平原河网生态连通性研究[D]. 济南大学, 2017.
- [3] 丁志强. 河网多闸联合调度水动力及水质数学模型的研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
- [4] 江苏省水利厅. 江苏省生态需水量研究[R]. 南京:江苏省水利厅, 2006.
- [5] 江苏省水文水资源勘测局扬州分局. 江苏省淮河流域典型区生态需水控制方法与目标研究[R]. 扬州:江苏省水文水资源勘测局扬州分局, 2016.