

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.01.009

长江下游典型平原城市感潮河网水动力提升分析

王思如^{1,2}, 顾一成², 杨大文¹, 孙金华², 胡庆芳², 张 熹³

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 启东市住房和城乡建设局, 江苏 启东 226200)

摘要: 通常平原城市河网水动力条件较差, 加快水体更新、增强水体的流动性可改善河网水环境质量。以长江下游典型平原城市启东市为例, 充分利用河道天然潮动力条件, 建立河网水动力学模型, 通过数值模拟试验, 量化分析优化水系格局、工程布局 and 调度方式对河网水体流动性的改善程度。结果表明: 在最不利潮汐条件下, 优化方案可将河网的全历时生态流速达标率由 52.3% 提升至 94.2%, 最大瞬时生态流速达标率由 42.6% 提升至 85.0%, 区域生态流速持续度达 91.8%, 同时还可节约 67.5% 的引调水量; 改善水系格局、优化河网控制工程布局及其调度方案可以减少域外引水, 同时显著增加河网水流更新速率, 降低污染物滞留时间, 从而改善水环境。该方法可为提升平原城市感潮河网水环境质量提供新手段。

关键词: 水动力提升; 感潮河道; 数值模拟; Infoworks ICM; 平原城市

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2022)01-0091-11

洪涝灾害频繁、水资源短缺和水环境恶化是中国快速城镇化过程中面临的三大城市水问题。其中, 城市水环境恶化问题尤为突出, 严重影响城市人居环境和生态系统健康, 引发了广泛的社会关注。长江下游分布着大量沿江城市, 水系发达、河网密布, 但由于人口稠密、产业发达, 入河污染物负荷量大而集中, 加之这些城市河道坡降普遍较小、水动力较弱、水体自净能力不足, 导致水体污染物易长时间累积, 故在快速城镇化进程中, 这些城市河网水环境问题较为突出。在国家实施长江大保护战略背景下, 长江下游城市河网水环境综合治理的任务更加迫切^[1-2]。

大力推进节水减排、强化控源截污、完善城市污水收集处理基础设施是改善城市河网水环境质量的根本途径。从供给侧出发, 适度增加和科学配置河网水量、加快水体更新流动, 提升自净能力和水环境容量, 也是改善河网水环境质量的重要思路之一^[3]。已有关于长江下游平原城市河网水环境提升的相关研究中, 重点分析了人工动力调控措施对水动力或水质的影响, 采用生态流速阈值、水质改善率等标准或指标评价了上述措施的实施效果^[3-5]。然而, 对于如何充分利用自然潮汐规律, 提升引水量的利用效率, 以及实现目标综合评价仍待进一步研究。以往此类城市在河网水环境治理过程中, 从域外大量调引“清水”并过于依赖人工引排动力的方式, 因调水经济成本和外部环境友好性在近年也引发了一些质疑和争议^[6]。长江下游通江河道一般为感潮河道, 此类河道的水环境综合治理应因势利导, 充分利用天然潮动力条件实现良性的水体更新流动。

本文以长江下游典型平原城市启东市城区及其邻近地区为例, 构建河网水动力模型, 通过对比现状和数值模拟试验条件下的河网水位、流速、水量等要素的差异性, 解析潮汐对河网水动力特性的影响, 为河网泵站的调度运用提供判断依据; 提出河道水系连通和工程布局及调度优化的推荐方案, 分析不同潮汐状况下优化方案的活水效果, 实现在减少域外引水的同时充分运用天然潮动力。

收稿日期: 2021-05-06; 网络出版日期: 2021-10-25

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20211022.1626.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0407205); 国家自然科学基金资助项目(7181101209)

作者简介: 王思如(1993—), 女, 黑龙江双鸭山人, 工程师, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: srwang@nhri.cn

1 研究区域及数据资料

1.1 研究区域

启东市位于长江口北支沿岸,属南通市管辖,是江苏省出江入海的重要门户,与崇明岛隔江相望。本文研究区为启东城区所在的水利片区,面积约 97.4 km²(其中城区面积为 36.6 km²)。北临中央河,南至长江,西临红阳河,东至丁仓港河。启东城区以头兴港为界,西侧为开发区,东侧为主城区(图 1)。研究区含 38 条主要河道、1 个湖泊、21 处闸泵和 9 处水闸。根据紫薇西路泵站(P12)处水位监测断面 2018 年 11 月至 2019 年 10 月日平均水位数据,启东城区河网 85% 以上天数的日均水位为 2.95 ~ 3.10 m(吴淞高程)。

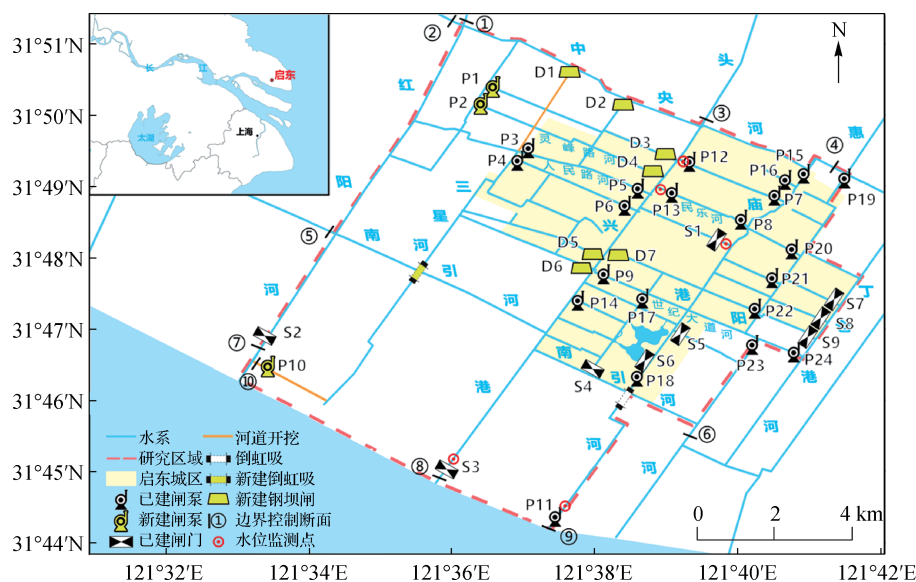


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

启东市紧邻长江,处于长江口枯季盐水入侵界面下游。根据南京水利科学研究院提供的水质采样检测结果,长江启东段典型枯水期(2019 年 11 月)氯离子质量浓度为 6 425 ~ 9 856 mg/L,汛期(2020 年 6 月)氯离子质量浓度为 23 ~ 683 mg/L,除汛期大潮部分时段外,其余时刻氯离子质量浓度均高于《生活饮用水卫生标准:GB 5749—2006》和《农业灌溉水质标准:GB 5084—2005》中的相应阈值(分别为 250 mg/L、350 mg/L)。因此,启东市无法直接取用长江干流水源,区域可利用的水资源主要为当地降雨产流和上游通吕运河来水。启东市 60% 的降水量集中在 6—9 月,正常年(保证率 50%)本地地表水资源量为 8.17 亿 m³,中等干旱年(保证率 75%)为 4.29 亿 m³,干旱年(保证率 95%)为 1.22 亿 m³。上游南通节制闸从长江引水,通过通吕运河输送至启东,平均每年输水量约 6 亿 m³,占当地外来水源的 95%。

启东城区河道水质较差,2018 年 6—7 月各河道 3 次采样数据显示,除头兴港、世纪大道横河、世纪大道北侧河、庙港河等部分主干河道水质达到Ⅳ、Ⅴ类外,其他河道水质多为劣Ⅴ类。现状开发区内头兴港西侧河道与头兴港之间没有闸门控制的河道均堆筑了土坝,以分隔开发区与主城区水系。在控源截污和内源治理基础上,优化河网水动力条件、提高水体自净能力,对改善城区水环境亦十分必要^[7]。研究区河道现状活水主要依靠头兴港闸(S3)、启东港闸站(P11)以及少数内部活水泵站进行调度。在 S3 调度运行过程中发现,潮差过大时闸门启闭困难,潮差过小时潮动力不足致活水效果不佳,所以实际运行时选择潮差适宜的条

件, 每月逢阴历初三、初八、十三、十八、二十三、二十八开闸活水, 具体开闸日的闸门开启条件为: 当长江落潮过程中水位与内河水位平齐时, S3 开闸排水, 在水位回升至内河水位时, 关闭闸门防止咸水倒灌。P11 处闸门每天开启 2 次, 具体启闭条件与 S3 相同。内部活水泵站 P3、P4、P8 每日 7:30—11:30、13:30—17:00 开启, 系局部河道日常活水措施。现状情况下, 各闸泵未经统筹、各自调度, 导致城区水流路径混乱、活水效果不佳。因此, 亟需优化调度城区河网工程, 实现闸泵群联合调控。

1.2 数据资料

本研究采用的基础数据包括河道断面、水利工程及调度、水位和流量等资料, 具体情况如表 1 所示。其中, 启东城区河道断面数据源于现场实测, 其他河道断面采用设计断面数据。现状区域活水的主要动力来自于沿江闸门 S3, 由于其仅在潮差适宜的条件下开闸活水, 本次选择上述典型时段(2019 年 12 月 3 日, 初八)进行现场数据测量。水利工程及调度资料来源于历史档案资料及现场补充测量, 并经过当地水利部门复核, 确保了数据的可靠性。

研究区重要边界控制断面水文数据及基本水情如下: 图 1 中断面 1—断面 6 流量采用走航式流速仪现场实测获取; 因 2019 年工程改造, 红阳河闸(S2)处于关闭状态, 经调查断面 7 长期为零流量状态; 断面 8 和断面 9 水位由启东市城区水位实时在线监测系统获取。该系统还对民乐西路泵站(P13)、团结闸(S1)、紫薇西路泵站(P12)断面的水位数据进行了实时监测。

表 1 采用的数据及其来源
Table 1 Summary of data sources

数据类型	数据属性	来源
河道断面	城区河道每间隔 30 ~ 200 m 取 1 个数据, 其他河道每条河道 1 个数据	现场测量与设计资料
水利工程及调度	尺寸、底高、设计流量; 开关时间、闸门开度、泵站抽排流量	档案、台账与实地调查
水位	2018 年至今, 每 5 min 测 1 次	在线系统实时监测
流量数据	2019 年 12 月 3 日, 每 30 min 测 1 次	现场测量

2 水动力模型与数值试验方案

2.1 水动力模型简介

本文采用 Infoworks ICM (Integrated Catchment Management) 构建研究区一维河网水动力模型。Infoworks ICM 是由英国 Wallingford 软件公司开发的综合流域排水软件, 是世界上最先将城市排水管网、河道一维模型以及流域二维洪涝淹没模型结合在一起的独立模拟引擎的软件^[8]。

河道水动力模拟的控制性方程为 Saint-Venant 方程组^[9], 由连续方程和动量方程组成:

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial Z}{\partial x} - u^2 \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_z + g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{1.33}} = 0 \quad (2)$$

式中: x , t 分别为河道纵向坐标及时间坐标; Q 为断面流量, m^3/s ; Z 为断面水位, m ; B_t 为水面宽度(包括主流断面宽度(B)和附加滩地宽度(B_w)), m ; q 为单位河长旁侧入流量, m^3/s ; u 为过水断面平均流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; A 为过水断面面积, m^2 ; $\frac{\partial A}{\partial x} \Big|_z$ 为水位相同时断面沿程变化率; R 为水力半径, m ; n 为糙率系数。

对于管涵过流模拟, 采用压力管流模型而非完全求解 Saint-Venant 方程, 如式(3)和式(4)。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{Q |Q|}{K^2} \right) = 0 \quad (4)$$

式中: h 为管内水深, m; S_0 为底坡; K 为满管输送流量, m^3/s 。

根据研究区现状活水期间的河道水位特征, 取 3.10 m 作为河道初始水位, 并对模型进行预热以保证初始状态稳定。现状活水方案模拟时, 模型边界条件采用实测数据, 分别为上游断面 1—断面 6 采用实测流量 (仅断面 3、断面 5 流态明显), 下游断面 7 为零通量, 断面 8、断面 9 采用实测水位; 优化活水方案中, 模型边界条件按照上游断面 1—断面 6 定水位, 断面 7、断面 8 零通量, 下游断面 9、断面 10 为实测长江潮位。考虑关闭断面 8 处闸门、打通断面 10 处口门的主要原因是前者在开闸时主要拉动南引河的水流而非非城区, 此时打通后者以配合断面 9 分别带动主城区和开发区水系流动。

2.2 水动力模型验证

头兴港闸 (S3) 为区域内现状主要活水工程, 每隔 5d 开闸调度 1 次, 本次采用 S3 开闸工况下 (以 2019 年 12 月 3 日为例) 民乐西路泵站 (P13) 和团结闸 (S1) 断面的水位数据进行模型率定与验证 (P12 与 P13 断面位置靠近, 水位及其变化规律类似)。模型的主要敏感参数为糙率, 根据《给水排水设计手册: 第 1 册: 常用资料》(第 2 版) 中关于天然河道和人工管渠粗糙系数取值的参照表, 作为相应河道粗糙系数的合理取值范围依据。得到研究区河道自然护岸、硬质护岸糙率范围分别为 0.030 ~ 0.035、0.025 ~ 0.030。采用水位过程的纳什效率系数 (E_{NS}) 与均方根误差 (E_{RMS}) 评价模拟结果^[10]。

现状方案条件下, P13 与 S1 断面模拟水位与实测水位均拟合较好 (图 2), E_{NS} 大于 0.7、 E_{RMS} 在允许范围 0.04 m 以内, 说明模型精度满足要求, 可进一步利用该模型进行水动力提升分析。

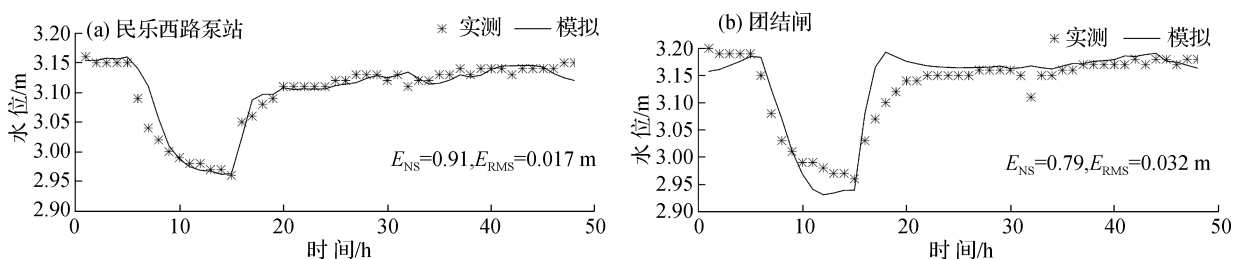


图 2 水位模拟结果验证

Fig. 2 Validation of water level simulation

2.3 水动力优化指标与限制条件

2.3.1 水动力优化指标

河流生态流速阈值是反映河网流速空间与时间分布的变量, 可用于评价活水方案效果。从抑制藻类爆发角度, Escartín 和 Aubrey^[11] 与 Mitrovic 等^[12] 通过水槽试验以及澳大利亚多个河道实地测量分析, 认为河流生态流速宜大于 0.1 m/s; 焦世珺^[13] 通过室内试验与水库大坝室外试验相结合的方法, 确定三峡库区下游低速河道水华爆发的临界流速为 0.05 m/s; 丁一等^[4] 通过研究区域实地考察、现场监测、文献调研等方式, 认为苏州城区河道较为适宜生态流速范围为 0.05 ~ 0.10 m/s。考虑到与本研究区气候、地形与发展条件相似性, 本文采用苏州相关研究成果, 将 0.05 m/s 作为研究区河道生态流速阈值。在生态流速阈值的基础上, 进一步提出“全历时生态流速达标率”、“最大瞬时生态流速达标率”和“区域生态流速持续度”3 个活水效果评价指标。

其中, 全历时生态流速达标率指稳定活水期间能够达到生态流速的河道长度占河道总长度的比值, 该值越大代表更多河道在活水期间能够达到生态流速, 具体计算公式如下:

$$R_v = \frac{L_s}{L} \quad (5)$$

式中: R_v 为全历时生态流速达标率, %; L_s 为稳定活水期间能够达到生态流速阈值的河道长度, m; L 为研究区河道总长度, m。

全历时生态流速达标率能够最为直接地反映优化方案活水效果的覆盖程度, 指标值 80% 代表研究区内大部分河道在活水期间能够达到生态流速, 视作达到全域活水的基本要求, 因此, 本文采用全历时生态流速达标率达到 80% 作为活水目标。

最大瞬时生态流速达标率为某一时刻生态流速达标率达到最大时对应的数值, 能够反映区域活水调控的最大能力, 具体计算公式如下:

$$R_{v, \max} = (R_{v, t})_{\max} = \left(\frac{L_t}{L} \right)_{\max} \quad (6)$$

式中: $R_{v, \max}$ 为最大瞬时生态流速达标率, %; $R_{v, t}$ 为活水期间 t 时刻瞬时生态流速达标率, %; L_t 为活水期间 t 时刻达到生态流速阈值的河道长度总和, m。

考虑活水实施效果, 采用区域生态流速持续度来表征一定瞬时生态流速达标率下能够持续活水的时间。瞬时生态流速达标率一般低于全历时生态流速达标率, 在制定前者目标时应适当降低标准阈值, 考虑至少有一半以上河道在活水期间某一时刻应达到生态流速要求, 本文选取 50% 作为瞬时生态流速达标率参考值。同时, 利用区域内瞬时生态流速达标率超过该达标率参考值能够持续的时间占总活水流长的百分比, 计算区域生态流速持续度, 该值越大代表区域理想活水效果持续时间更长。

$$T_v = \frac{t_v}{t_{\text{all}}} \quad (7)$$

式中: T_v 为区域生态流速持续度, %; t_v 为区域内瞬时生态流速达标率超过 50% 所持续的时间, h; t_{all} 为总活水流长, h。本文采用区域生态流速持续度达到 50% 作为活水目标。

此外, 全历时生态流速达标率能直接反映活水期间各河道达到生态流速阈值的情况, 因此选取全历时生态流速达标率作为主要指标, 最大瞬时生态流速达标率和区域生态流速持续度作为备选指标, 对各潮汐条件下活水效果进行定量评价。

2.3.2 活水限制条件

在活水方案优化前, 首先需考虑城市水系的自然与社会经济服务功能, 明确活水限制条件。本文综合防洪排涝安全、水环境改善与水资源节约利用需求, 分别提出河道最高水位、最低水深和最大水量 3 个限制因子。活水期间区域水位不宜超过防洪控制水位, 最高水位控制值取为 3.2 m。南引河具备景观、生态及航运功能, 区域内其他河道仅具有景观与生态功能, 活水期间水深据其功能有特定要求。考虑景观功能, 城市渠化河流最低水深控制在 0.2 ~ 0.5 m^[14]; 考虑鱼类等水生生物对河流水力形态指标基本要求, 《水电工程生态流量计算规范: NB/T35091—2016》规定水深不低于 0.3 m, 鱼类产卵时期水深不低于 0.4 m; 根据《南通市内河航道网规划(2010 年)》, 南引河以头兴港为界, 西、东侧分别为 V、VI 级航道, 《内河通航标准: GB 50139—2014》规定 V、VI 级航道最小水深分别在 1.3 ~ 1.6 m、1.0 ~ 1.2 m。综上考虑, 取南引河断面平均水深不低于 1.6 m、其他河道断面平均水深不低于 0.5 m 作为限制条件。为节约水资源, 保证优化利用潮动力排水前后区域总用水量不增加, 据 2019 年 12 月 3 日 1 次完整排水过程中头兴港上下游实测流量分析测算, 表明利用潮汐排水期间排入长江的总水量为 262 万 m³。

2.4 数值试验方案

2.4.1 最不利潮汐条件确定

通过分析研究区 2019 年水位数据, 发现区域内水位全年保持稳定, 而研究区下游出口处各场次潮汐特征值差异明显。因此, 对长江潮位/潮差(S3 处)进行方差检验分析。统计可知(表 2), 2019 年各场次潮汐的平均潮位与潮差在 6—10 月与 11 月一翌年 5 月 2 个时期存在明显差异, 两者在各时期内差异不显著。

表 2 头兴港闸(S3)处 2019 年长江潮位单因素方差分析和显著性检验
Table 2 One-way ANOVA and significance test of tides at Touxinggang Sluice

时间	日均潮位				各场次潮差			
	P_1	是否通过方差 齐性检验	P_2	数据组间是否 存在显著差异	P_1	是否通过方差 齐性检验	P_2	数据组间是否 存在显著差异
全年各月	0.311	是	0	是	0.062	是	0.002	是
6—10 月	0.184	是	0.023	否	0.099	是	0.631	否
11 月—翌年 5 月	0.715	是	0.037	否	0.234	是	0.289	否

注：方差齐性检验 $P_1 \geq 0.01$ ，表示各组数据通过方差齐性检验，可进行单因素方差分析； $P_1 < 0.01$ ，表示各组数据未通过方差齐性检验。单因素方差分析显著性 $P_2 \geq 0.01$ ，表示数据组间无显著性差异；单因素方差分析显著性 $P_2 < 0.01$ ，表示各组数据中至少有 2 组存在显著差异。

在 2 段时期内分别选取长江潮汐数据完备、内河水位监测数据连续的典型月(6 月、12 月)日水位数据，对现状活水方案进行模拟分析。分析结果发现(图 3)，典型月共计 117 场潮汐全历时生态流速达标率为 52.3% ~ 60.8%，其中 6 月第 50 次潮汐的全历时生态流速达标率最低，确定为最不利潮汐条件并进行现状活水方案模拟，发现整个活水期间研究区向长江排水量(即区域上游引调水量)为 226.1 万 m^3 ，稳定排水期间全历时生态流速达标率为 52.3%，最大瞬时生态流速达标率为 42.6%，区域生态流速持续度为 0，未达到预期活水目标，因此，需要对研究区进行活水工程及调度规则优化。

2.4.2 水动力提升方法

根据现状潮汐作用下长江排水与上游自流补水特征以及不同河道分水规律，分析活水期间水流空间分布，并通过设置不同的工程调控，经人工比选提出水系连通优化方案。最不利潮汐条件下，分析稳定排水期间典型时刻瞬时流量数据(图 4，负值为河道蓄水量减少)可知，潮汐作用下区域水量呈现“排大于补”的特征，上游瞬时补水流量($54.0 \text{ m}^3/\text{s}$)相当于瞬时排江流量($72.1 \text{ m}^3/\text{s}$)的 74.9%。S3 瞬时排江总流量为 $66.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，总流量的 39.5% 源自头兴港西侧南引河($26.3 \text{ m}^3/\text{s}$)，其中 11.8% 源自南引河河道蓄水($3.1 \text{ m}^3/\text{s}$)，81.4% 源自区域上游水源($21.4 \text{ m}^3/\text{s}$)，仅 6.8% 为带动开发区河道排入头兴港的水量($1.8 \text{ m}^3/\text{s}$)。庙港河瞬时排江流量为 $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，其中 42.9% 为经主城区河道排入头兴港的水量($2.4 \text{ m}^3/\text{s}$)。可见，利用潮汐排水时，区域上游河道与城区外围河道大量水源排入长江，而大幅削弱了带动城区活水的潮动力，严重影响了城区水体的更新流动。因此，活水优化方案需考虑完善水系格局、配套工程布局、优化工程调度。

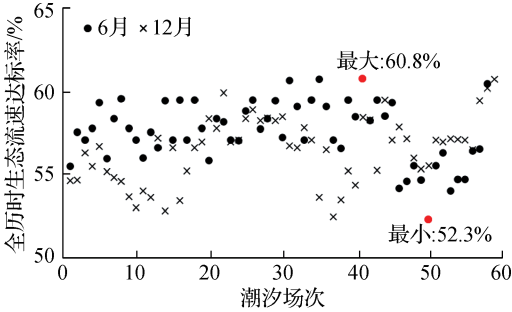


图 3 典型月各潮汐场次全历时生态流速达标率
Fig. 3 Simulation results of the ecological velocity compliance rate in typical months

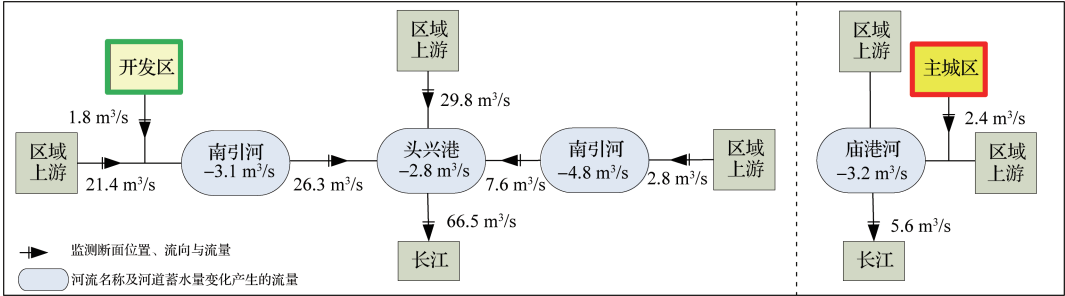


图 4 研究区最不利潮汐条件下稳定排水期间瞬时流量空间分析

Fig. 4 Spatial analysis of measured instantaneous flow rate during steady flow period under the worst condition in the study area

为避免活水期间水流从点位1、点位2通过南引河经点位3流入长江(图5),向北延伸三星河,使其与中央河连通,同时在三星河与南引河交汇处布置倒虹吸工程,三星河向南延伸后,向西打通其通江口门4,同时将沿江潮动力运用口门由点位3调至点位4,打造开发区活水独立水系,使得三星河、庙港河分别成为开发区与主城区的活水轴线;将点位5的补水功能调整至点位6与点位7,实现空间均衡补水。为了改变现有活水方案中各闸泵缺乏统筹调度、活水路径混乱、活水效率低下的现状,优化方案将活水调度分为初始、活水、结束3个状态(图6)。由于头兴港东侧部分横向支流无法在同一时期达到理想流速,为集中局部活动力,活水状态分为2个批次。沿江闸门根据潮汐与内河水位关系控制闸门启闭(即长江潮位低于内河水位时开启沿江闸门,否则关闭),部分内部闸门控制补水时序,局部泵站辅助增强水流,其他未在图5中出现的闸泵工程,均保持关闭状态。

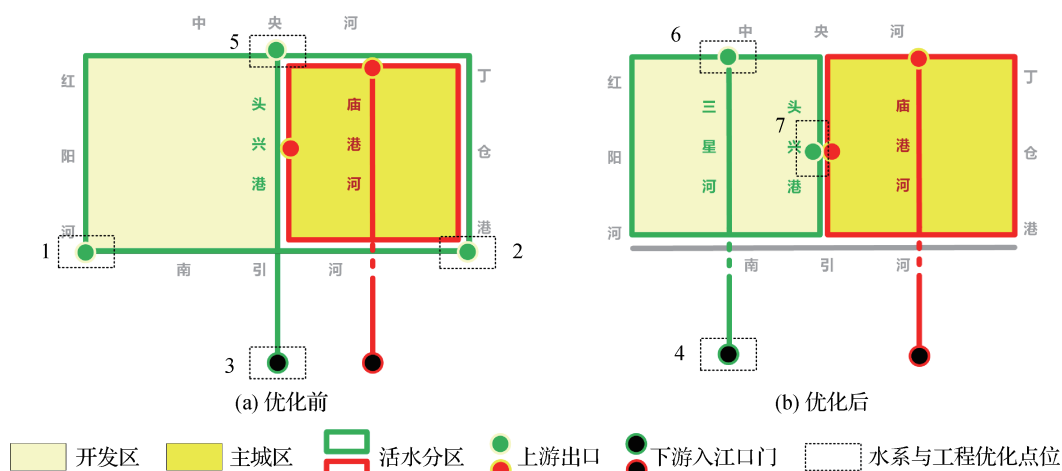


图5 水系格局与工程布局优化前后示意

Fig. 5 Schematic diagram of water system pattern and engineering layout before and after optimization

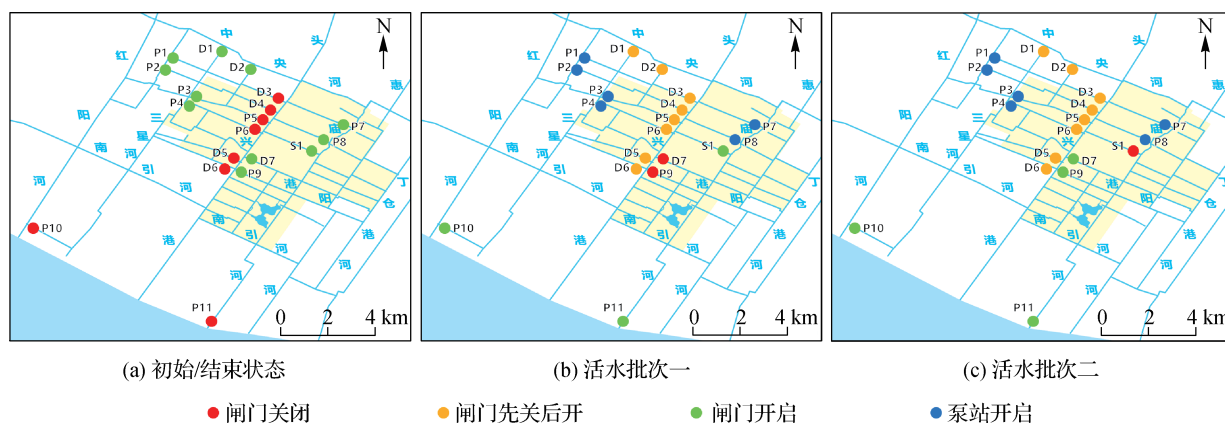


图6 优化后水利工程调度规则示意

Fig. 6 Schematic diagram of optimized water conservancy project operating rules

3 优化方案与结果分析

3.1 水动力条件改善效果分析

以 2019 年 6 月第 50 场潮过程(最不利潮汐条件)的潮动力作为驱动条件,针对活水优化方案进行模拟。结果发现,优化方案条件下整个活水期间研究区向长江排水量(即区域上游引调水量)由现状条件下的 226.1 万 m^3 降低至 73.4 万 m^3 ,节约了 67.5% 的水资源利用量,城区水动力情况较现状方案有明显改善。活水方案优化后,稳定排水期间全历时生态流速达标率由 52.3% 提升至 94.2%,最大瞬时生态流速达标率由 42.6% 提升至 85.0%,区域生态流速持续度达 91.8%。可见,优化方案在减少外界引调水量的同时,总体上提高了水循环速率,缩短了污染物累积时间,显著改善了水动力条件。

从流速的空间分布来看(图 7),现状方案全域流速最大的河段为南引河(头兴港西侧)以及头兴港(南引河以南),城区内与头兴港相交的河道水动力总体较差;在优化方案条件下,头兴港两侧水动力均得到较好改善,且离三星河和庙港河下游段越近,改善效果越明显。整个活水期间区域河流流速变化过程(图 7(c))可以看出,优化方案下流速大于 5 cm/s 河道的瞬时生态流速达标率显著高于现状方案,且优化方案较现状方案能在同一潮动力下实现更高的区域生态流速持续度。

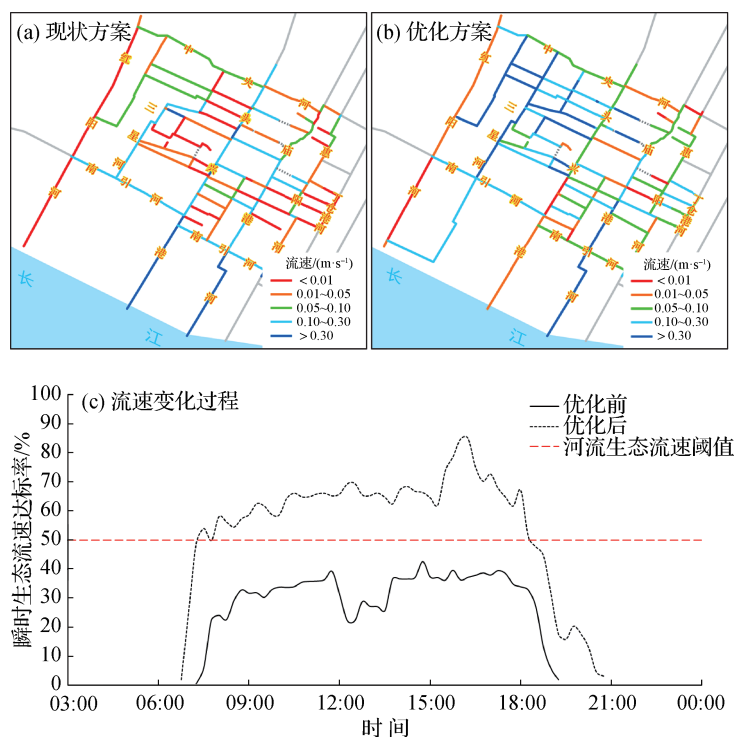


图 7 现状与优化方案下稳定排水期间流速空间分布及城区河流瞬时生态流速达标率变化过程

Fig. 7 Flow velocity distribution during the stable drainage period under the current and optimized scheme, temporal variations of the instantaneous ecological velocity compliance rate in the city rivers under the current and optimized scheme

对比优化前后区域河道流速可知,多数河道在活水方案优化后流速显著提升,图 8 展示了现状流动缓慢的典型河道(如灵峰路河、人民路河以及世纪大道河等)流速变化情况,均从 1 cm/s 流速提升至 5 cm/s 以上,各河道达到生态流速的时长也明显增加,如民乐河河道流速达到 5 cm/s 的时长由 4.5 h 提升至 12 h。优化后的工程布局及调度作用明显,研究区各河道流动性增强、水体更新速度加快,有利于水环境的改善。

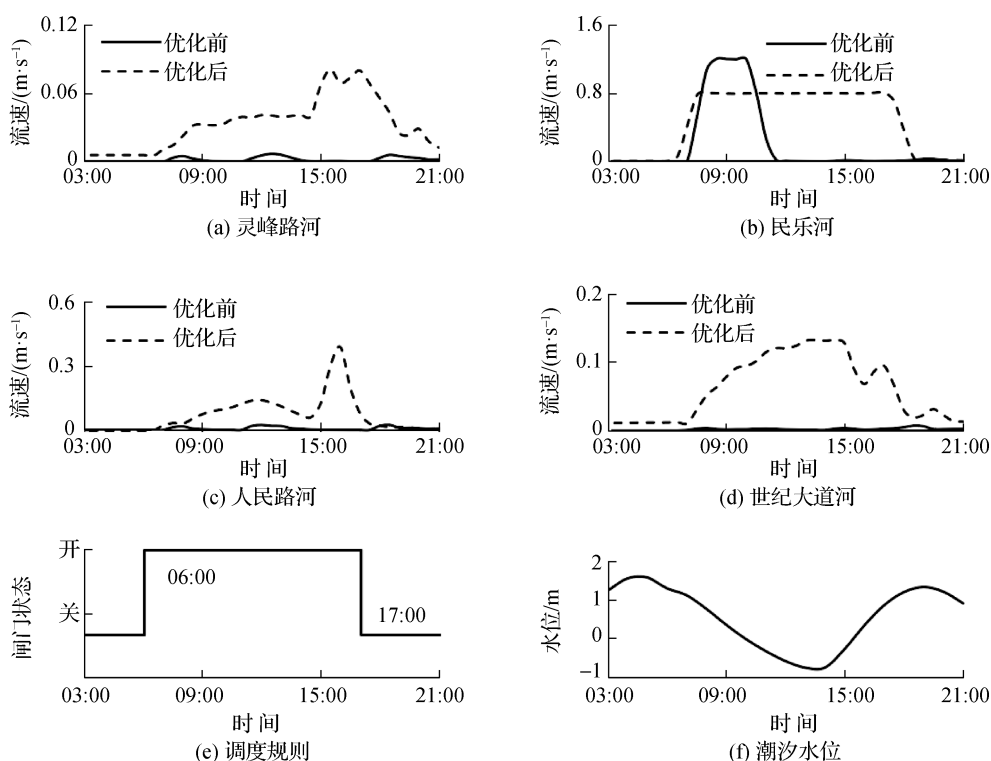


图 8 现状与优化方案下活水期间典型点位流速过程、调度规则和潮汐水位

Fig. 8 Flow velocity process, dispatching plan and tidal level of the typical sites under the current and optimized scheme

3.2 不同潮汐过程下优化活水方案分析

为了探讨活水优化方案在不同潮汐过程下的有效性, 进一步模拟 6 月及 12 月共 117 场完整潮汐过程, 对比各场次潮汐下现状方案和优化方案的全历时生态流速达标率、最大瞬时生态流速达标率和区域生态流速持续度, 如图 9 所示。其中, 现状方案的全历时生态流速达标率为 52.3% ~ 60.8%, 最大瞬时生态流速达标率为 36.6% ~ 51.1%, 区域生态流速持续度除 6 月仅有 2 次潮过程达到约 2% 外, 其余潮过程区域生态流速持续度均为 0; 引入优化方案后全历时生态流速达标率为 86.7% ~ 94.6%, 最大瞬时生态流速达标率为 74.7% ~ 85.3%, 区域生态流速持续度为 76.3% ~ 95.8%。

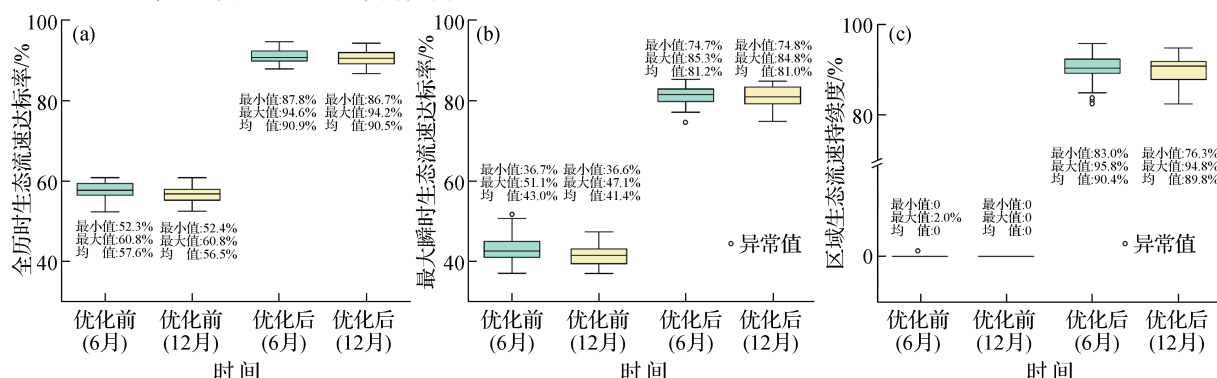


图 9 6 月及 12 月各场次潮汐过程下现状方案和优化方案的水动力条件

Fig. 9 Hydrodynamic conditions of the current and optimized scheme during the tidal period in June and December

在 6 月与 12 月多场潮汐条件下, 活水方案优化后较优化前的河网水动力条件均有明显改善。以全历时生态流速达标率为例, 6 月均值由 57.6% 提升至 90.9%, 中位数由 57.7% 提升至 90.7%; 12 月均值由

56.5% 提升至 90.5%，中位数由 56.7% 提升至 90.5%。考虑最大瞬时流速达标率，优化前后该指标的统计特征值也有显著提高，表明活水优化方案在不同的自然条件下均能利用潮汐过程有效改善河网水动力条件。

4 结 论

本文以长江下游沿江典型平原城市启东市为例，综合考虑确保防洪排涝安全、满足水功能需求与节约利用水资源，提出了活水方案优化的限制条件；基于水系格局、工程布局、水系连通与闸泵调度存在问题，提出了基于良性水循环构建的水动力优化方法；建立了平原城市感潮河网水动力模型，开展了不同情景方案数值模拟试验，基于河流生态流速阈值指标体系评价了优化方案相对现状方案的改善效果。主要结论如下：

(1) 采用 Infoworks ICM 水动力数值模型模拟了现状活水期间河网水位/流量的时空分布。结果显示天然潮汐作用下大量城市外围河道水源直接排入长江，其稳定活水期间瞬时流量占到总入江流量的 74.9%，与此同时削弱了带动城区活水的潮动力，影响研究区河道的水动力提升。

(2) 基于河道生态需水理论，建立了以生态流速为核心的平原河网水动力评价指标体系。基于已有研究，分析确定研究区河流适宜生态流速阈值为 0.05 m/s，并据此衍生了反映活水覆盖程度、调控能力与持续时间的水动力评价指标体系，包括全历时生态流速达标率、最大瞬时生态流速达标率以及区域生态流速持续度，为量化分析活水优化前后河道改善程度提供基础。

(3) 定量分析了活水优化措施对研究区河网水体流动性的改善程度。在最不利活水的潮汐条件下，研究区优化前后全历时生态流速达标率由 52.3% 提升至 94.2%，最大瞬时生态流速达标率由 42.6% 提升至 85.0%，区域生态流速持续度达由 0 提升至 91.8%，优化效果显著。代表全年潮汐特征的 2 个典型月份的所有潮汐过程下该优化方案均能实现既定水动力提升目标。

参考文献：

- [1] 李云, 周杰, 范子武. 长三角地区水安全保障技术集成与应用[J]. 中国环境管理, 2017, 9(4): 115-116. (LI Y, ZHOU J, FAN Z W. Integration and application of water security technology in Yangtze River Area[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9(4): 115-116. (in Chinese))
- [2] 林兰. 长三角地区水污染现状评价及治理思路[J]. 环境保护, 2016, 44(17): 41-45. (LIN L. Assessment and treatment of water pollution in Yangtze River Delta[J]. Environmental Protection, 2016, 44(17): 41-45. (in Chinese))
- [3] 崔广柏, 陈星, 向龙, 等. 平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1429-1437. (CUI G B, CHEN X, XIANG L, et al. Evaluation of water environment improvement by interconnected river network in plain area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1429-1437. (in Chinese))
- [4] 丁一, 贾海峰, 丁永伟, 等. 基于 EFDC 模型的水乡城镇水网水动力优化调控研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1440-1446. (DING Y, JIA H F, DING Y W, et al. Hydrodynamic optimization of urban river network of water towns based on EFDC model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1440-1446. (in Chinese))
- [5] SONG W W, XU Q, FU X Q, et al. Research on the relationship between water diversion and water quality of Xuanwu Lake, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(6): 1262.
- [6] 吴时强, 戴江玉, 石莎. 引水工程湖泊水生态效应评估研究进展[J]. 南昌工程学院学报, 2018, 37(6): 14-26. (WU S Q, DAI J Y, SHI S. Progress in assessment of hydro-ecological effects in lakes induced by water diversion[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2018, 37(6): 14-26. (in Chinese))
- [7] 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 Q J, DING R, ZHAO H. 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))
- [8] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG G R, LUO H W, CHEN W J, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))

- [9] MAHMOOD K, YEVJEVICH V. Unsteady flow in open channels; vol. 1[M]. Fort Collins: Water Resources Publications, 1975.
- [10] DUAN Q, SCHAAKE J, ANDRÉASSIAN V, et al. Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): an overview of science strategy and major results from the second and third workshops[J]. Journal of Hydrology, 2006, 320(1/2): 3-17.
- [11] ESCARTÍN J, AUBREY D G. Flow structure and dispersion within algal mats[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40(4): 451-472.
- [12] MITROVIC S M, OLIVER R L, REES C, et al. Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers[J]. Freshwater Biology, 2003, 48(1): 164-174.
- [13] 焦世珺. 三峡库区低流速河段流速对藻类生长的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2007. (JIAO S J. The effects of velocity of flow to the growth of algae in low current area of the Three Gorges[D]. Chongqing: Southwest University, 2007. (in Chinese))
- [14] JIA H F, MA H T, WEI M J. Calculation of the minimum ecological water requirement of an urban river system and its deployment: a case study in Beijing central region[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(17): 3271-3276.

Study on hydrodynamic improvement of urban tidal river for a typical plain cities in the lower reaches of Yangtze River*

WANG Siru^{1,2}, GU Yicheng², YANG Dawen¹, SUN Jinhua², HU Qingfang², ZHANG Xi³

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Qidong housing and Urban Rural Development Bureau, Qidong 226200, China)

Abstract: The hydrodynamic of river channels in plain cities are generally of poor conditions. Accelerating water renewal and strengthening orderly flow is one of the most important ways to improve the water environment quality of river network. In this paper, a typical plain city in the lower reaches of the Yangtze River, Qidong, was studied as an example. Making full use of the natural tidal dynamic conditions, a hydrodynamic model of the river network was established. Numerical simulation experiment was carried out to quantify the improvement of hydrodynamic characteristics of the river network through water system pattern and overall arrangement optimization and water conservancy project operation. The results show that, the optimized scheme increases the ecological velocity compliance rate of the river network from 52.3% to 94.2% for the whole period under the worst tidal condition; the maximum instantaneous ecological velocity compliance rate is raised from 42.6% to 85.0%; the regional ecological velocity continuity increases to 91.8%. Meanwhile, the urban ecological water consumption reduces 67.5%. Under the optimized scheme, the diversion water volume from external regions can be reduced, and the renewal rate of urban river network significantly increases which shrinks the accumulation time of pollutants. This study provides a novel perspective and method for improving the water environment of tidal river channels in plain cities.

Key words: hydrodynamic optimization; tidal river; numerical simulation; infoworks ICM; plain cities

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2018YFC0407205) and the National Natural Science Foundation of China(No. 7181101209).