

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.04.006

上海蕴南水利控制片河网水动力再造

闫 毓¹,袁赛瑜¹,唐洪武¹,吕升奇¹,雷 燕²,李 瑜³

(1. 河海大学水文水资源及水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学期刊部,江苏 南京 210098; 3. 上海市水利管理处,上海 200002)

摘要:为改善平原河网区水动力不足、水流往复的现象,通过区域闸泵联合调度对河网进行水动力时空再造,促进水体定向有序流动,维持良好的水环境状态。以上海中心城区蕴南水利控制片为研究对象,提出了多种基于水动力重构目标的调控方案,并通过模型计算对各方案的活水效果进行优选。结果表明,通过抬高蕴南片引排水口门控制水位、提升虹口港和杨树浦闸门开启高度以及木渎港和彭越浦泵站引水力度,河网中有 78.6% 断面的流速得到提升,平均流速提升 16.7%;针对走马塘往复流现象,通过调控河网整体引排模式,提出“南引东北排”的应急调度方案,使得模拟时段内河道代表断面平均流速提升 60.4%,定向流动累计时长增加 60%。

关键词:平原河网;闸泵联调;水动力再造;水资源调度;水环境提升;蕴南水利控制片

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)04-0329-06

Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City

YAN Yu¹, YUAN Saiyu¹, TANG Hongwu¹, LYU Shengqi¹, LEI Yan², LI Yu³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Periodical Press of Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Shanghai Water Conservancy Management Office, Shanghai 200002, China)

Abstract: To improve the hydrodynamic power and reciprocating water flow in the plain river network area, the appropriate time-space hydrodynamic reconstruction of river network is carried out through the combined control of regional sluices and pumps to promote the directional and orderly flow of rivers, thereby maintaining a good water environment. Taking the Wennan river network in the central city of Shanghai as the research object, a variety of control plans based on hydrodynamic reconstruction goals are proposed, and the hydrodynamic improvement effect of each plan is compared and analyzed through the model calculation. The results show that by raising the sluice-pump control water level, the opening height of the Hongkougang and Yangshupu gates, and the water diversion intensity of Mudugang and Pengyuepu pump, the average velocity of 78.6% of the cross sections has been increased and the average flow velocity has increased by 16.7%, which indicates that the hydrodynamics of the river network is effectively improved. In response to the phenomenon of reciprocating flow in the Zoumatang river, by regulating the drainage method of the river network, an emergency dispatch plan of “from south to northeast” is proposed. This plan increases the average flow velocity of the representative section by 60.4% during the simulation period, and the cumulative duration of directional flow increases by 60%.

Key words: plain river network; sluice-pump joint control; hydrodynamic reconstruction; water resources dispatch; water environment improvement; Wennan river network

平原区地势低洼,河道常呈网状结构,水体流动性差、流向往复不定,河道水环境容易恶化,制约了区域社会经济的可持续发展。研究^[1]表明,河道水体低溶解氧环境直接影响微生物对有机污染物的降解速率,当溶解氧质量浓度低于 2 mg/L 时,还可能会产生甲烷、硫化氢等有毒物质及刺激性气体,引发水体黑臭问题;当溶解氧质量浓度大于 7.5 mg/L 时,可认为水质良好。水体流动性是溶解氧浓度的重要决定因素,提升河网水动力

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779080,520031011)
作者简介: 闫毓(1995—),女,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:cyndiayy@qq.com
通信作者: 唐洪武,教授。E-mail:hwtang@hhu.edu.cn
引用本文: 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):329-334.
YAN Yu, YUAN Saiyu, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(4):329-334.

能够促进复氧过程^[2],从而增强水体自净能力^[3]。水体流动性的增加可以在一定程度上提高含碳、氮、磷污染物的净化能力,特别是对 COD_{Cr} 的去除作用明显^[4]。因此,在保证防汛、用水、生态、景观、通航等前提下,通过水闸、泵站等水利工程群进行水资源合理调度,可以改善河网的水动力条件,达到提升水环境质量的目^[5-8]。

上海市蕴南水利控制片(以下简称“蕴南片”)包括杨浦、虹口、普陀等中心城区,河网已建成由水闸、泵站包围的水资源配置工程体系^[9]。苏州河河口水闸建成后,潮汐对水闸上游水流的影响大大减弱,现状调度方式对水流动力提升作用有限,亟须优化调控方案,再造河网水动力场。水动力模型是研究河网水动力过程及相关规划决策的重要工具^[10]。李慧玲等^[11]以上海青浦区为例,通过数学模型研究了现状闸坝调度下闸宽对河网进水量及氨氮、总磷等物质的影响,提出了一系列优化改进建议;刘贵平等^[12]通过世博会周围河网模型计算分析,提出了应急水环境调控预案;李晓等^[13]利用水动力模型研究西塘河引水量的重新分配,提出了适应枯水期的水资源调度方案。前人对河网数学模型的研究已成熟完善,闸泵调度对水动力及水环境的改善作用也已得到揭示与验证。而对于优化调度方案的提出,现有研究较少从水动力再造的角度出发,也很少考虑多因素、多调控方式对河网的影响。因此,本文建立了上海蕴南片的一维河网模型,探寻复杂水动力条件下河网水环境恶化的成因,针对区域特点提出多种闸泵联合调度方案,并对调度方案的活水效果进行了比选,以期为平原河网水动力再造和水环境提升提供参考。

1 研究区域概况

蕴南片河网由蕴藻浜、苏州河、桃浦河、黄浦江包围(图1),全片总面积173.3 km²,片内河道总长159.51 km,河道总面积3.69 km²,河网密度0.92 km/km²。该区域水系较复杂,基本划分为杨树浦港水系(由虬江、东走马塘和杨树浦港组成)、虹口港水系(由南泗塘、西泗塘、沙泾港、俞泾浦、虹口港组成)、彭越浦-木渎港水系(由东茭泾、彭越浦、桃浦河、木渎港组成)和新江湾城水系。河网内参与调度的主要闸泵工程共12座,苏州河沿线水闸只引不排、蕴藻浜沿线水闸只排不引。河网水动力不足、水流往复现象突出,亟须通过合理的闸泵联合调控盘活片内水体,从而改善水环境状况。

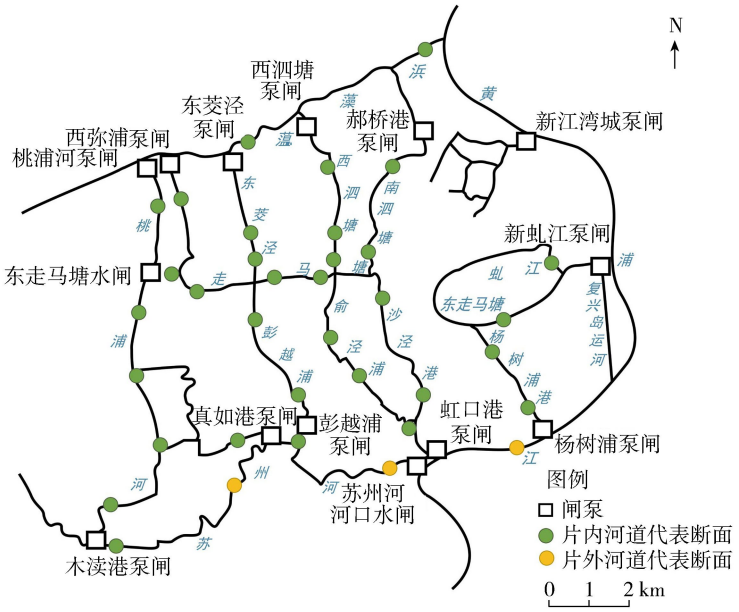


图1 蕴南片河网

Fig.1 River network of the Wennan area

2 水动力模型

2.1 模型建立

MIKE11 具有稳定、快速、可靠的运行特点,它通过 Abbott 六点隐式格式求解河流一维非恒定控制方程组^[14]。模型中对可控建筑物调度方式的设置十分方便灵活,在长江、淮河、太湖流域已有诸多应用研究成果^[15-17]。综合考虑模型适用性、现有资料情况,本文采用 MIKE11 水动力(HD)模块为研究工具,建立蕴南片河网水动力模型。

由于蕴南片河道密布、河网复杂,因此有必要对其进行一定的概化。河网概化以反映天然河网的水力特性为原则,保证输水和调蓄能力的相近或一致性^[18]。将收集到的地形资料进行概化处理,设置河道、交汇点、断面、闸泵工程等模型要素。概化处理后,蕴南片

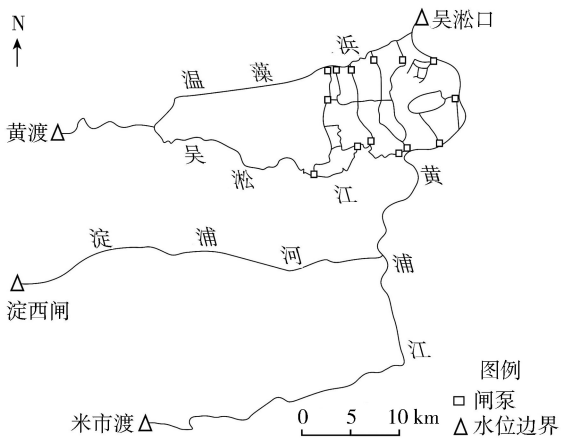


图2 蕴南片河网概化

Fig.2 Sketch map of river network in Wennan area

河网模型河道共 24 条(图 2),全长 327.3 km,包含外围河道(漕藻浜、黄浦江、吴淞江、淀浦河)221.9 km;闸泵共 14 座。模型边界控制点分别是米市渡、吴淞口、黄渡站和淀西闸。

2.2 模型率定及验证

水动力模型需要率定的参数主要是河床糙率,采用 2017 年 1 月 1 日至 4 月 30 日的实测数据对模型参数进行率定,时间步长设为 0.5 min。经现场考察和反复检验,分段给定河床糙率如下:黄浦江 0.018 ~ 0.025,漕藻浜、吴淞江 0.022 ~0.036,河网内其他骨干河道 0.020 ~0.030。采用 2018 年 1 月 1 日至 4 月 30 日的实测数据对率定好的模型进一步验证,水位模拟值误差小于 0.1 m 的合格率达到 84.8% ~88.1%,确定性系数达到 0.87 ~0.94,精度满足模拟要求(图 3、图 4)。

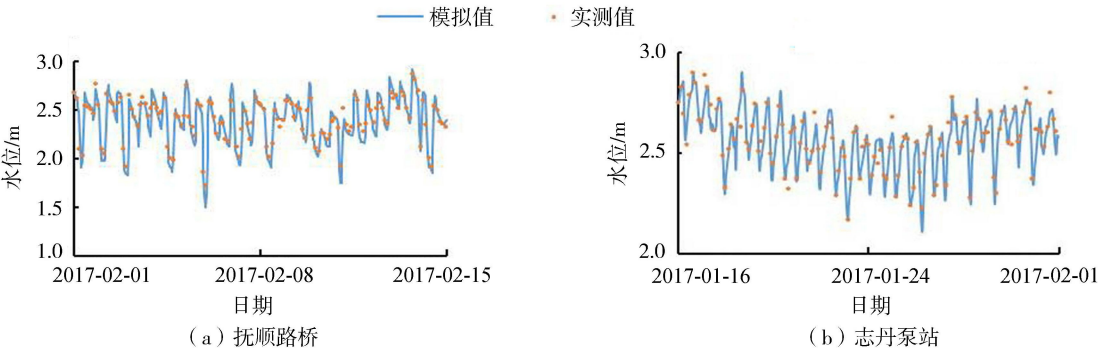


图 3 模型水位率定结果
Fig.3 Calibration results of model water level

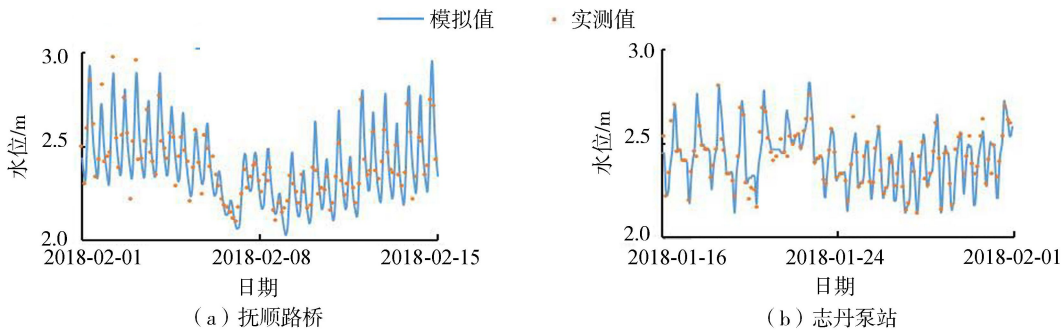


图 4 模型水位验证结果
Fig.4 Verification results of model water level

3 水动力再造调度方案

3.1 日常引排水优化调度

漕南片内水资源调度以南引北排为主,各泵闸均有明确的调度实施细则(表 1)。杨树浦泵闸、虹口港泵闸、彭越浦泵闸、木渎港泵闸作为重要的引水口门,从苏州河、黄浦江引水;桃浦河泵闸、东菱泾泵闸、西弥浦泵闸、郝桥港泵闸、西泗塘泵闸作为重要排水口门,向漕藻浜排水。图 5 给出了漕南片河网现状调度下 2017 年 1—4 月平均流速分布,可见桃浦河、彭越浦、虹口港水系主干河道流向为由南向北,杨树浦水系为南引东排,新江湾城水系的引排均通过新江湾城泵闸,而走马塘河道流向不定,存在往复流。

为提升片内水体流动性、再造河网水动力场,可以从以下几方面考虑:在保证防汛安全的

表 1 现状调度规则
Table 1 Current scheduling rules

编码	泵闸名称	功能	调度方式
A1	桃浦河泵闸	排水	两潮排水,闸内最低控制水位 2.0 m
A2	东菱泾泵闸	排水	两潮排水,闸内最低控制水位 2.0 m
A3	西弥浦泵闸	排水	两潮排水,闸内最低控制水位 2.0 m
A4	西泗塘泵闸	排水	两潮排水,闸内最低控制水位 2.0 m
A5	郝桥港泵闸	排水	两潮排水,闸内最低控制水位 2.0 m
A6	新虬江泵闸	排水	两潮排水,闸内最低控制水位 2.5 m
B7	新江湾城泵闸	引排	两潮引排,闸内最低控制水位 2.0 m,最高控制水位 3.3 m
C8	杨树浦泵闸	引水	两潮引水,闸内最高控制水位 3.5 m,闸外水位控制开启高度
C9	虹口港泵闸	引水	两潮引水,闸内最高控制水位 3.5 m,闸外水位控制开启高度
C10	彭越浦泵闸	引水	两潮引水,闸内最高控制水位 3.2 m,每日单泵(2.5 m³/s)引水 5 h
C11	木渎港泵闸	引水	两潮引水,闸内最高控制水位 3.2 m,每日单泵(5.0 m³/s)引水 16 h
C12	苏州河河口水闸	引水	两潮引水,闸内最高控制水位 3.6 m

前提下,抬高引排水口门的控制水位指标,可以增加河网水环境容量,同时减少对底泥的扰动,降低二次污染。虹口港、杨树浦口门以开闸自引为主,提高闸门开启高度可以增加引水量,提升南泗塘、西泗塘、杨树浦水系的调水效果。苏州河水位偏低导致木渎港-彭越浦水系无法实现闸引(图6),可以适当增强泵引力度,同时调控苏州河河口水闸,抬高苏州河水位以利于沿线口门引水。基于以上现状分析,给出日常优化调度方案见表2。

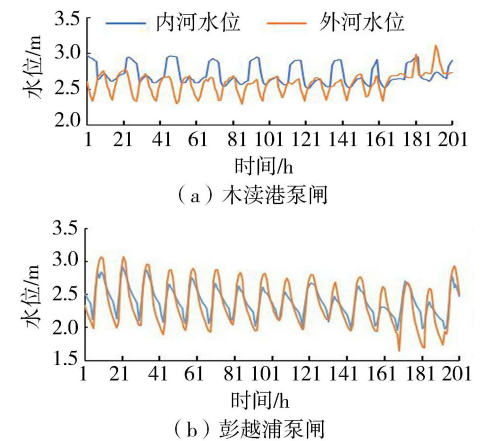


图6 代表时段内河水位与外河水位对比

Fig.6 Water level comparison between inland river and outer river in representative period

3.2 局部区域优化调度

依据模型模拟结果分析感潮河网的水动力过程发现:崑崙片内走马塘为东西走向河道,在南引北排的调度方式下往复流现象突出,水体反复震荡,无法及时排出,容易造成水质恶化现象。图7给出了2017年4月1日24h内走马塘河道流向及共和新路桥断面的时均流速。可以看出,受半日潮及引排调度影响,走马塘河道水流也以一定的频率来回震荡。为了促进该局部区域水体的定向流动,提出走马塘优化调度方案,见表3。

表3 走马塘水流优化调度方案

Table 3 Optimized dispatching plan of Zoumatang river

编号	调度方案
0	现状调度(往复流):按《上海市水利控制片水资源调度细则》[2012]
6	南引西北排(东—西):仅桃浦河、西弥浦泵闸两潮排水,最低控制水位2.0 m,同时增加泵排
7	南引东北排(西—东):仅郝桥港、西泗塘泵闸两潮排水,最低控制水位2.0 m,同时增加泵排

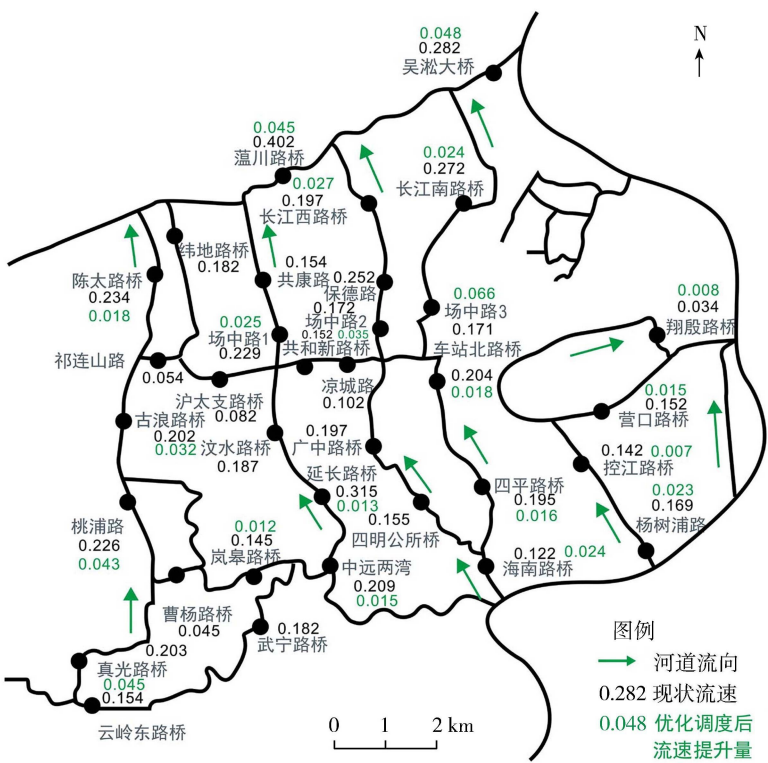


图5 现状河网平均流速和优化调度流速提升量分布(单位:m/s)

Fig.5 Distributions of average flow velocity of current river network and flow velocity increase after optimization scheduling(unit:m/s)

表2 日常优化调度方案

Table 2 Daily optimization scheduling plan

编号	调度方案
0	现状调度,按《上海市水利控制片水资源调度细则》[2012]
1	提升最低控制水位 A1 ~ A6:2.5 m; B7:2.5 m 提升最高控制水位 B7:3.5 m, C8、C9:3.6 m, C10、C11:3.3 m, C12:4.2 m
2	提高虹口港、杨树浦闸门开启高度(0.2 m),闸外水位小于闸内最高控制水位时保持全开
3	增加木渎港泵站(4 h)、彭越浦泵站(5 h)引水时长
4	结合调度方案0~2,优化闸引,进行联合调控
5	结合调度方案0~3,优化闸引、泵引,进行联合调控

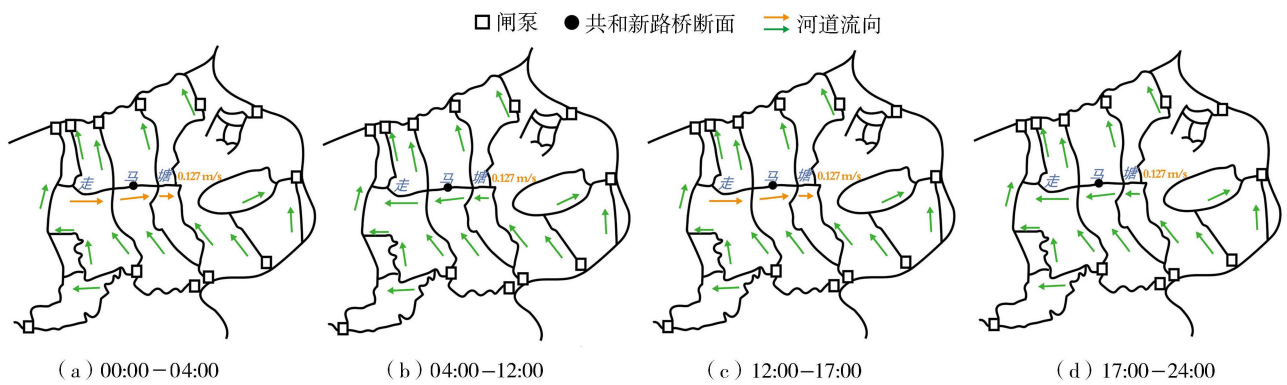


图 7 走马塘流向及代表断面时均流速示意图

Fig. 7 Schematic maps of flow direction and hourly average velocity of representative sections in Zoumatang River

4 结果分析

4.1 日常优化调度

- a. 方案 1 对片内引排口门的控制水位进行了调控。考虑防洪控制需要,并结合现场调研与以往调水试验情况,将引水口门最高控制水位提升 0.1 m,排水口门最低控制水位提升 0.5 m,同时将苏州河河口闸的引水控制水位提升至 4.2 m。该措施使得整体河网 64.2% 的代表断面流速得到提升,平均流速增加 0.5 cm/s。
- b. 方案 2 对两大引水口门-虹口港水闸、杨树浦水闸的闸门开启高度进行了优化。为增加引水量,同时考虑节水因素,在现状开启方式的基础上提高 0.2 m,当外河水位低于闸内最高控制水位时保持全开。方案使得整体河网 36% 的代表断面流速得到了提升,平均流速增加 0.1 cm/s。
- c. 方案 3 综合考虑调水效果与动力消耗情况,将木淞港每日引水时长增加 4 h、彭越浦每日引水时长增加 5 h。方案使得整体河网 32% 的代表断面流速得到提升,平均流速增加 0.1 cm/s。
- d. 方案 4 结合了调度方案 1 和方案 2,同时对漕南片各引排水闸的控制水位、开启高度进行优化。相对于加强泵站引水的方式,该方案的调水成本较低,使得整体河网 71.4% 的代表断面流速得到提升,平均流速增加 1.9 cm/s。

e. 方案 5 结合方案 1~3 进行河网闸泵联合调控,对引排口门的各项调度参数同时进行优化。模拟结果表明,该调度方案下河网水动力的提升效果最好,整体河网流速提升的断面占比 78.6%,平均流速提升 3.1 cm/s,增幅为 16.7%。漕南片西部、北部水动力提升明显(图 5)。片内走马塘依旧存在往复流(图 8),水质容易恶化,有待进一步优化。

调度方案针对区域现状特点选择了控制水位、闸门开度及泵引时长 3 项优化调控措施,具有较强的可操作性,能够适用于日常的水资源调度工作。可以看出,方案 1 有效地改善了片内控制水位偏低的现状,河网水动力条件得到初步改善。而方案 2、方案 3 仅针对两个引水口门的闸泵进行调控,对河网整体的流速提升效果不明显。方案 5 在方案 4 的基础上增加了对引水泵站的调控,断面平均流速提升由 1.9 cm/s 增加为 3.1 cm/s,优化效果进一步增强。河网闸泵的联合调控使得水利设施在水资源调度中发挥了最大效益,综合考虑了漕南片河网的水系格局、水源要求、防洪控制等因素,与单一的调控方式相比,水动力的提升效果得到了质的提升。

4.2 走马塘优化调度

针对走马塘往复流进行优化调度,选取 2017 年 4 月 1—3 日为计算时段分析调度效果。方案 6 以桃浦河、西弥浦泵闸为片内排水口门,促进走马塘水体由东向西定向流动。经过模型试算,当桃浦河、西弥浦泵闸

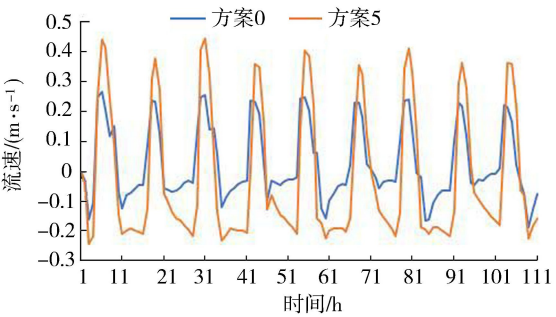


图 8 代表时段方案 0 和方案 5 下走马塘代表断面流速变化

Fig. 8 Flow velocity variations of typical sections of Zoumatang under scheduling 0 and scheduling 5 in representative period

分别以 $15\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 开启泵排时,走马塘的往复流现象改善效果较好,代表断面共和新路桥平均流速为 0.097 m/s ,定向流动累计时长由 45 h 增加到 66 h ,增加 46% ;方案7以郝桥港、西泗塘泵闸为片内排水口门,促进走马塘水体由西向东定向流动。经过模型试算,当郝桥港泵闸、西泗塘泵闸分别以 $12\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 开启泵排时,走马塘的往复流现象可以得到更加明显的改善,代表断面平均流速可达 0.215 m/s ,提升了 8.1 cm/s ,增幅为 60.4% ,定向流动累计时长由 45 h 增加到 72 h ,增加 60% 。

为引导走马塘河道水体定向流动,优化方案设置中减少了片内部分排水口门,对河道流速的影响存在不确定性。其中,方案6虽然增加了水流定向流动的时长,但没有提高代表断面的平均流速。对比两种优化调度方案的水动力改善效果,并综合考虑开泵排水动力消耗情况,推荐方案7为走马塘往复流优化调度方案。该方案对河网的整体引排方向进行了调控,操作方式较为复杂,仅适用于短时间内改善局部河道水质的应急调度方案。建议配合日常引调水,以一定频率定期开展,可促进走马塘河道定向流动,加快水体交换速率、提高水体自净能力。

5 结 语

本文综合考虑蕰南片水系格局及其自然地理优势,针对现状调度下河网水动力不足的问题,提出了多种基于水动力再造的闸泵联合调度方案,并通过模型计算对不同方案的水动力提升效果进行了分析。结果表明,通过调控引排口门处闸泵的控制水位、开启高度、泵引力度等调度参数,可有效提升河网水动力,提高水体自净能力。闸泵联控优化方案使得整体河网流速提升的代表断面占比 78.6% ,平均流速提升 3.1 m/s ,增幅 16.7% ,较单一调控下的活水效果显著提升,更大地发挥了区域水利工程群调水的综合效益。针对东西方向走马塘的往复流问题,提出相应的优化调度方案。通过调控区域整体引排方式促进水体定向有序流动,优化调度方案使得水体定向流动累计时长增加 60% ,河道代表断面平均流速提升 8.10 m/s ,增幅 60.4% ,为解决局部区域水质恶化的问题提供了新思路。以上研究成果可为平原河网区水动力再造、水环境提升提供技术支撑,同时为复杂工程运行管理方案的制定提供科学依据。

参考文献:

[1] 阮仁良.平原河网地区水资源调度改善水质的机理和实践研究[D].上海:华东师范大学,2003.

[2] 许益新,李一平,罗育池,等.引水改善平原感潮河网水质效果评估[J].水资源保护,2019,35(6):124-130. (XU Yixin,LI Yiping,LUO Yuchi,et al. Effect evaluation of water diversion to water quality improve in plain tidal river network[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):124-130. (in Chinese))

[3] MULHOLLAND P J, HOUSER J N, MALONEY K O, et al. Stream diurnal dissolved oxygen profiles as indicators of istream metabolism and disturbance effects: Fort Benning as a case study[J]. Ecological Indicators, 2005, 5(3): 4-16.

[4] 王雅钰.城市河道水质影响因素的研究[D].苏州:苏州科技学院,2013.

[5] 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))

[6] 陈偲丹,高成,陈妍清,等.考虑水质及水动力条件的滨江圩区最优活水方案[J].水电能源科学,2021,39(3):16-19. (CHEN Lidan, GAO Cheng, CHEN Yanqing, et al. Optimal living water scheme of polder area along the Changjiang River considering water quality and hydrodynamic conditions[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 16-19. (in Chinese))

[7] 潘小保,范子武,柳杨,等.闸泵堰联合调度下水质改善试验研究[J].水利规划与设计,2020(3):125-129. (PAN Xiaobao, FAN Ziwu, LIU Yang, et al. Experimental study on water quality improvement under joint dispatch of sluice pump and weir[J]. Water Resources Planning and Dsign, 2020(3): 125-129. (in Chinese))

[8] 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. Regulation of hydrodynamics and water quality in tidal river network based on gate-pump joint operation[J]. 2019, 36(8): 36-41. (in Chinese))

[9] 何斌,金鹏飞,羊丹.上海市水资源调度现状与思考[J].中国水利,2015(3):25-26. (HE Bin, JIN Pengfei, YANG Dan. Thoughts on the current situation of water resources dispatch in Shanghai[J]. China Water Resources, 2015(3): 25-26. (in Chinese))