

平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果

陈庆江¹,丁 瑞²,赵 海³

(1. 上海城投(集团)有限公司,上海 200020; 2. 南京水利科学研究院水工水力学研究所,江苏 南京 210029;
3. 上海市青浦区河道水闸管理所,上海 201700)

摘要:青浦区青松片为典型感潮平原河网区,水动力弱、水流往复。采用数值模拟和现场试验相结合的方法,诊断了现状“西引东排、南引北排”活水方案存在的问题,西引东排流量仅10~20 m³/s,北排依靠泵排,对河网水动力提升影响范围有限,多数河段为滞留水体。基于吴淞江水位高、拦路港—黄浦江潮差大等水动力特点,提出“北引东排、西南自然引排”活水畅流优化方案。结果表明,优化方案水动力显著提升,主干和中小河道流速分别提升27.5%和18.5%;优化方案引排流量显著提升,西大盈港、东大盈港、油墩港、新通波塘北引吴淞江流量达40 m³/s;水质显著提升,主干河道水质由V至劣V类提升至Ⅳ类。

关键词:平原河网;活水畅流;水动力提升;原型观测;青浦区青松片

中图分类号:TV213.4;X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)03-0008-06

Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area//CHEN Qingjiang¹, DING Rui², ZHAO Hai³ (1. Shanghai Chengtou Group Corporation, Shanghai 200020, China; 2. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Shanghai Qingpu River Sluice Management Bureau, Shanghai 201700, China)

Abstract: Qingsong region in Qingpu District is typical tidal plain river network area. The hydrodynamics of the river network is weak, and the river flow moves back and forth. The problem with the current flowing water scheme of diversion water from the west and the south, drainage to the east and the north was diagnosed based on numerical simulation and field test. The flow rate of water diversion from the west is only 10 to 20 m³/s. The river drainage to north could only depend on pumps and influence very limited river region, leading to rivers with low velocity. Based on the hydrodynamics of high water level in the Wusongjiang River and larger tidal range from the Lanlugang River to the Huangpu River, the optimization flowing water scheme of diversion water from the north, drainage to the east, and naturally diversion and drainage in the southwest was proposed. The result indicates that the hydrodynamics of the optimization flowing water scheme is greatly improved, the flow velocity in the main rivers and in the medium and small rivers increases by 27.5% and 18.5% respectively. The flow rate of water diversion is also greatly improved, and the total diversion flow of the Xidayinggang River, Dongdayinggang River, Youdungang River and Xintongbotang River reaches 40 m³/s from the Wusongjiang River. The water quality of the main rivers is obviously improved from grade V or worse to grade IV.

Key words: plain river network; flowing water; hydrodynamic improvement; field observation; Qingsong region in Qingpu District

长江下游平原河网区是我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域,GDP约占全国20%、城镇化率高达80%、人口密集,水生态环境形势严峻,河网动力弱、连通性差、入河污染负荷强,控源截污治污略显滞后,河网水质提升难。

平原河网区水环境提升在控源截污的基础上,通过活水畅流引入优质水源、合理分配水资源,可有效提升河网水动力,提高水体复氧,加快污染物降解,增加河道水环境容量与水体自净能力,是有效改善水环境质量的治理措施之一^[14]。21世纪以来,

上海^[5-6]、苏州^[7-10]、无锡^[11]、常州^[12]等长江下游平原河网城市陆续开展活水畅流的研究与实践,根据区域水系特点,因地制宜提出活水畅流方案,在河网水动力数值模拟的基础上,开展引水试验并进行现场观测,监测水量、水质变化及改善效果^[13-14],但缺乏对引水效果的长期原型观测与分析。

青浦区青松片为长江下游典型感潮平原河网区,本文以青浦区青松片为例,通过现场调研分析现状问题,充分利用现有水利工程,建立了河网水动力精细化数学模型,分析了不同方案的河网流速变化

情况,以提高水体流动性为目标,提出青浦区青松片活水畅流方案,通过现场试验的方法,验证活水畅流方案改善水环境的效果。本文的成果可为平原河网城市水资源调度提供理论与技术参考。

1 区域概况

青浦区位于上海市西部,太湖下游,黄浦江上游,是典型的感潮平原河网区,是长三角生态绿色一体化发展示范区。本文以青浦区青松片为研究重点,活水范围扩至青松片,面积约 758 km²。青松片为平原感潮水网地区,属黄浦江水系。境内河港多受黄浦江潮汐和江浙两省的客水下泄影响和入侵,由吴淞江、淀浦河、太浦河、红旗塘、急水港等流经区境内入浦归海,青浦区境内东部主要河流以南北流向为主,西部主要河流多东西走向。

目前青浦区青松片河道水质相对差,控源截污不到位,雨后入河污染物多;水体流动性差,水动力不足;河岸被侵占、过水断面束窄;部分河道存在断头现象等。2017 年 6 月,对淀浦河以北区域全覆盖水质监测结果表明,900 条采样河道中,劣 V 类水体占比 66%,V 类水体占比 17%,Ⅳ类及以下水体占比 17%,总体水质较差。上海市制定了水资源调度细则,活水畅流是其中一项重要措施,对改善区域水环境的提升具有重要意义。

2 水动力数学模型

2.1 模型构建

本文通过构建青松片一维河网水动力模型,分析现状活水方案。采用有限差分法求解一维河网水动力学模型,采用 Preissman 四点隐格式对圣维南方程组进行离散。

一维河网的洪水运动用圣维南方程组描述,其上、下游边界条件一般采用水位、流量、流量-水位关系等^[15]。圣维南方程组由连续方程和动量方程组成:

∂Q/∂x + ∂A/∂t = q (1)

∂Q/∂t + ∂(βQ²/A) / ∂x + gA ∂H/∂x - g ∂(AQ|Q|/K²) / ∂x + q ∂Q/∂A cos α = 0 (2)

式中:x、t 分别为河道纵向坐标及时间;n 为糙率系数;Q、H 分别为断面流量及水位;q 为单位河长的旁侧入流量;A 为过水断面面积;R 为过水断面水力半径;β 为动量修正系数;K 为流量模数;α 为旁侧入流流向与河流流向的夹角;g 为重力加速度。

初始条件:流速场取为静止场,水位则取控制断

面的水位值。

模拟范围为青松片河网,北至吴淞江,东临小涞港、茜浦泾,南到黄浦江、拦路港,西至淀山湖,青松片概化大小河道 947 条,内部河网总长度约 1 745 km。模型中创建的河道断面为实测断面与概化断面相结合,共创建断面 7 593 个、河段 3 518 段、闸门 506 座、泵站 326 座,如图 1 所示。

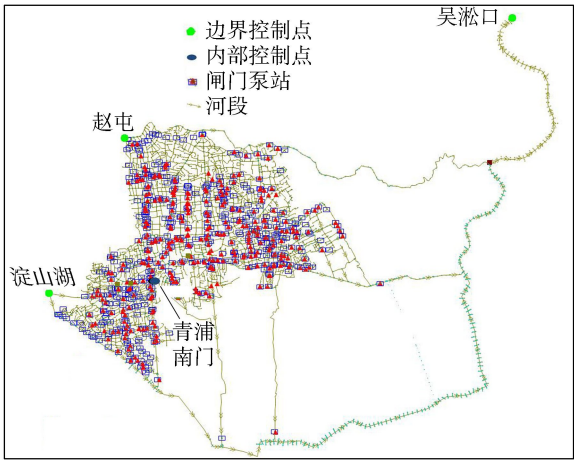


图 1 青松片河网水动力模型

青松片为上海市 14 个水利分片之一,外围都建设了泵闸,形成相对封闭的水力边界,引水口门采用入流边界条件,排水口门根据泵闸运行和水位边界控制,模型水位边界为吴淞江上游赵屯、淀山湖和黄浦江下游吴淞口,水位边界条件如图 2 所示。

根据《河道整治规划设计规范》等相关文献对

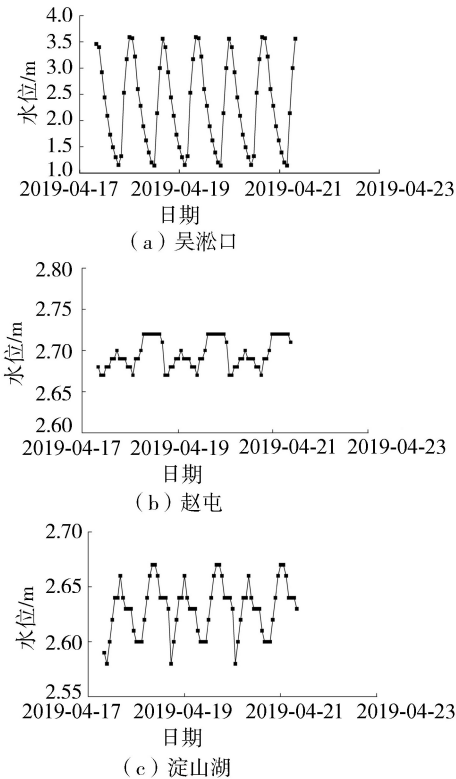


图 2 青松片河网水动力模型水位边界条件

区域内河道赋予不同的糙率初值,一级河道(拦路港、黄浦江、吴淞江) $n=0.025$,二级河道(西大盈港、东大盈港、新通波塘等) $n=0.03$,三级河道(小涑港,东向阳河等) $n=0.035$ 。

2.2 模型率定验证

采用2019年4月18—22日现场原型观测结果进行模型率定验证,以青松片特征水位点青浦南门作为内部控制点,模型经过率定,最终确定一级河道(拦路港、黄浦江、吴淞江) $n=0.0225\sim0.025$,二级河道(西大盈港、东大盈港、新通波塘等) $n=0.025\sim0.0275$,三级河道(小涑港,东向阳河等) $n=0.0325\sim0.035$ 。水位实测与计算对比如图3所示,计算水位和实测水位的变化趋势相似,水位最大误差能控制在5 cm内,流量误差10%以内,能够满足模型计算要求。

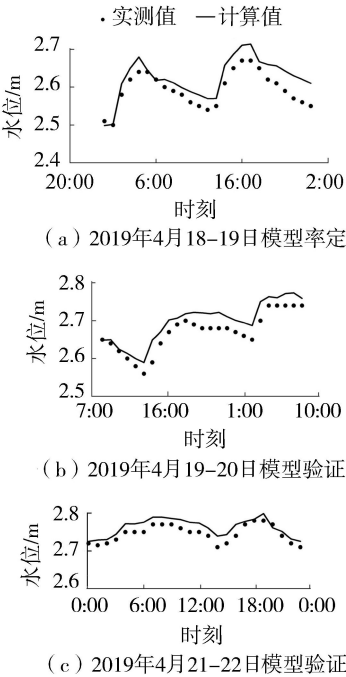


图3 青浦南门站模型水位率定验证过程

3 现状活水方案分析

近年来,青松片实施的水资源调度方案为“西引东排,南引北排”,如图4所示,即以沿黄浦江上游及其斜塘-泖河-拦路港北岸河道水闸和连接淀山湖的淀浦河西闸引水,以淀浦河东泵闸及苏州河南岸沿线水闸排水。现状水资源调度方案对青浦区青松片总体水质改善效果不明显,2017—2018年大部分水体水质为V至劣V类。

3.1 数值计算

模型计算的闸泵调度包括:青浦区淀山湖、拦路港沿线水闸只引不排,其中张马泵站、朱泖河泵站闸引不能实施时,各开泵两台引水6 h;淀浦河西闸打开。吴淞江、江苏界、虬江、小涑港沿线水闸只排不

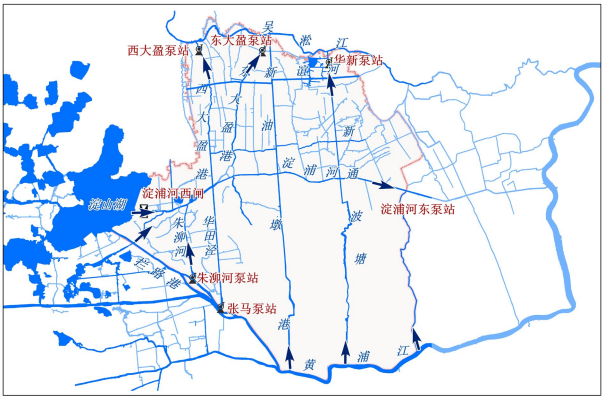


图4 青松片水资源调度方案

引;苏州河南岸沿线水闸能排则排,不能自排时西大盈、东大盈、华新泵闸动力北排。淀浦河东闸保证全天2潮排水,控制闸内水位不低于2.2 m,夜间控制闸内水位不低于2.0 m;白天不能自排时,单泵3~5 h排水。

数值计算结果表明,流速大于5 cm/s的河道主要为西大盈港、东大盈港、油墩港、新通波塘、淀浦河、淀山港、朱泖河、华田泾、上达河等主干河道,其他中小河道流速基本小于5 cm/s,现状活水方案下,水体流动性较弱。

3.2 试验观测

2018年对现状调度方案进行了现场原型观测,采用声学多普勒流速剖面仪ADCP进行流量观测,对骨干河道及主要引排口门进行持续3 d的流量观测,观测涨落潮时的流量变化。

试验结果表明,西引东排流量较小,主要体现在西引淀山湖流量较小,平均约10 m³/s,淀东泵闸东排流量平均约20 m³/s。北排吴淞江效果较差,吴淞江水位较高,依靠闸门无法自排,主要依靠西大盈、东大盈、华新三座泵站北排,但泵站北排可带动西大盈港、东大盈港、新通波塘等南北骨干河道水体向北流动的影响范围约3~4 km,其余河段基本为滞留区。南引黄浦江沿线水闸高潮位时引水量大,但引水时间短,每天约2~3 h,南引水量难以进入淀浦河以北区域。因此,现状“西引东排、南引北排”水资源调度方案下,青浦区青松片水动力较弱。

4 活水方案优化

4.1 活水畅流优化方案制定

2018年吴淞江赵屯与青浦南门水位如图5所示,吴淞江水位一直高于青浦南门10 cm左右。此外,2019年吴淞江水质比2018年同期水质有很大改善,由V至劣V类提升至Ⅳ类,如图6所示。因此,充分利用吴淞江高水位的自然条件,打开吴淞江沿线闸门,自流北引吴淞江水到青浦区;拦路港、黄浦江沿线潮差大,打开沿线闸门自然引排,恢复河网

自然流动状态。因此,制定“北引东排,西南自然引排”活水畅流优化方案,如图 7 所示,当拦路港、黄浦江低潮位时,主要引水路径为北引吴淞江,淀浦河东泵闸东排,南排拦路港与黄浦江;当拦路港、黄浦江高潮位时,主要引水路径为北引吴淞江,南引拦路港、黄浦江,淀浦河东泵闸向东排水。

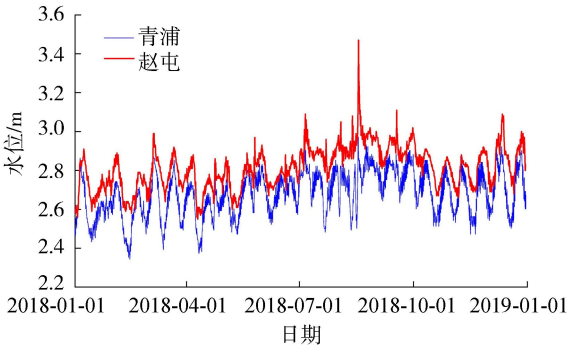


图 5 2018 年吴淞江与青浦南门水位对比

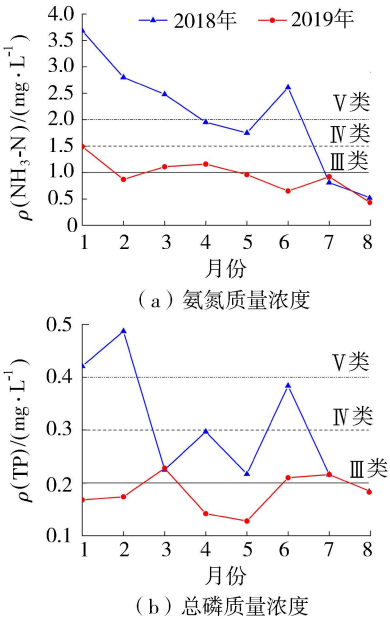


图 6 2018—2019 年吴淞江赵屯断面水质变化

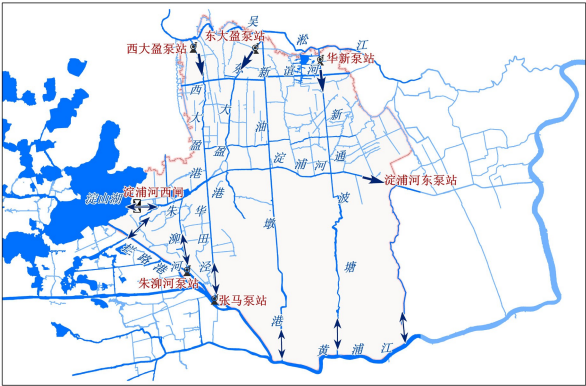


图 7 青松片活水优化方案引排格局

4.2 优化方案效果模拟

河网流速分布计算结果表明,西大盈港、东大盈港、油墩港、新通波塘等主干河道流速基本大于

10 cm/s,不少中小河道流速大于 5 cm/s,相比现状活水方案,水体流动性显著提升。现状活水方案与优化方案的主干河道流速如图 8 所示,可以看出,优化方案的几条主干河道流速明显增大。青松片河道流速总体提升 20.4%,主干河道流速提升 27.5%,中小河道流速提升 18.5%。现状调度与优化方案的河道流速大小占总河道长度的占比如表 1 所示,可以看出,优化方案水动力明显提升。

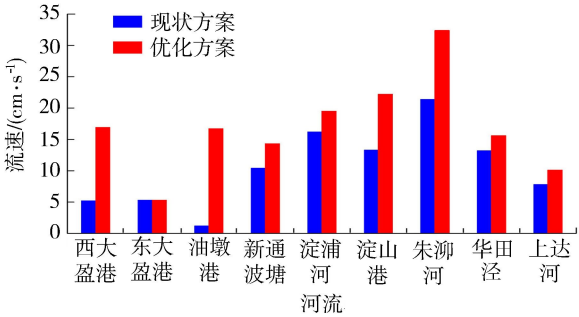


图 8 青松片主干河道流速变化

表 1 不同流速 u 的河道长度占比 %			
方案	$u < 5 \text{ cm/s}$	$u = 5 \sim 10 \text{ cm/s}$	$u > 10 \text{ cm/s}$
现状活水方案	81.26	13.30	5.44
优化活水方案	63.65	20.17	16.18

4.3 效果现场验证

为验证活水畅流优化方案效果,2019 年 1—8 月开展了青松片水资源调度优化方案现场试验,期间对水动力与水质进行原型观测。采用 ADCP 对主干河道水动力进行多次测量,测量结果如表 2 所示,西大盈港、东大盈港、油墩港、新通波塘 4 条主干河道北引吴淞江流量约 40 m³/s,水动力极大提升,与水动力数学模型计算结果基本吻合。淀浦河东排流量约 20 m³/s,部分断面流向往复,受淀东水闸调度影响很大。

表 2 青松片淀浦河以北主干河道流量		
河流	时间	流量/(m³ · s⁻¹)
西大盈港	2019-04-18T13:25	8.10
	2019-04-28T15:00	7.25
东大盈港	2019-04-18T11:25	8.20
	2019-04-28T14:22	4.32
油墩港	2019-04-18T14:44	17.00
	2019-04-28T15:40	8.24
新通波塘	2019-04-18T9:37	9.10
	2019-04-28T14:09	11.99
淀浦河	2019-04-18T9:00	22.00
	2019-04-28T13:42	20.24

2018 年青松片主要采用“西引东排、南引北排”现状活水方案,2019 年青松片开展优化活水方案试验。两种活水方案调度模式下,对青松片水质进行逐月采样测量分析,如图 9 和图 10 所示,结果表明,采用优化活水方案以来,西大盈港、东大盈港、油墩

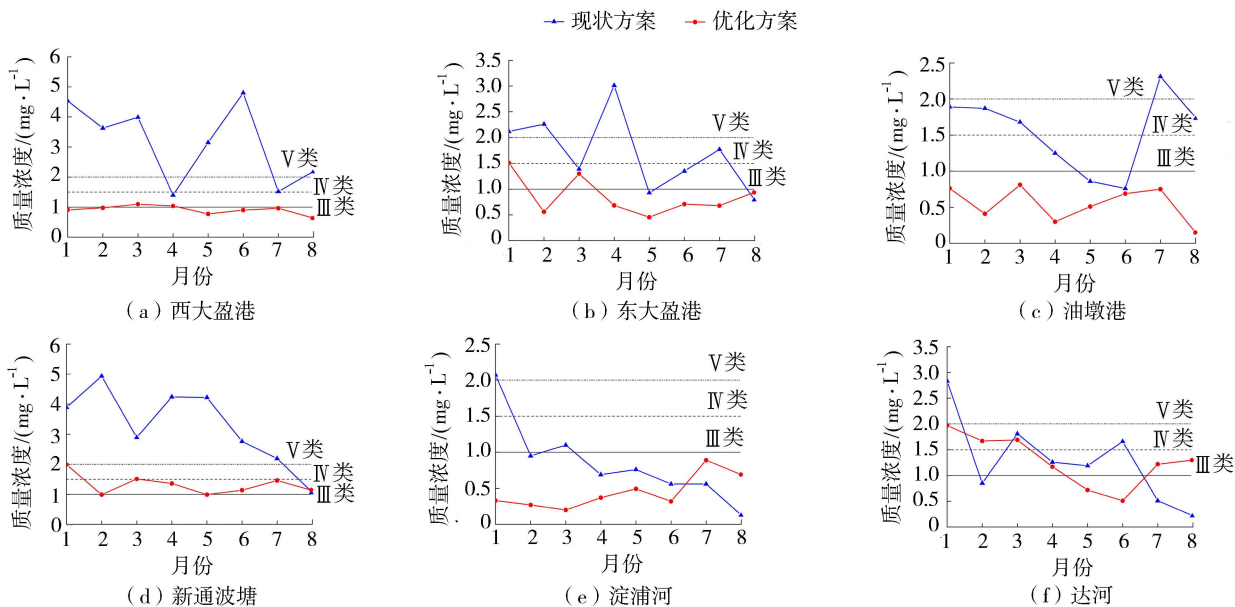


图9 现状方案与优化方案氨氮质量浓度对比

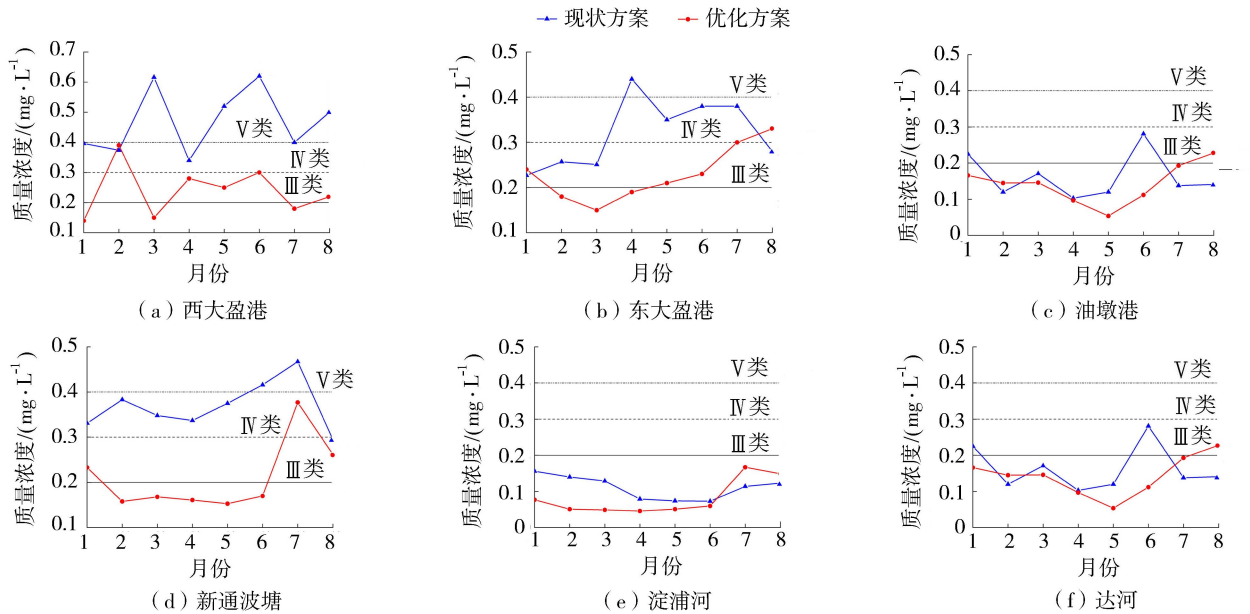


图10 各关注点现状方案与优化方案总磷质量浓度对比

港、新通波塘、淀浦河、上达河等主干河道水质整体得到很大改善,总体水质由V至劣V类提升至IV类。

5 结论

a. 构建了青松片河网水动力数学模型,对现状调度方案进行了数值模拟与现场原型观测,结果表明,西引东排流量较小,为 $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$;北排吴淞江无法自排只能泵排,且对河道流动性影响范围只有泵站南侧 $3 \sim 4 \text{ km}$,其余河段多为滞留水体;南引黄浦江水难以进入淀浦河以北区域,青浦区青松片现状活水方案下水动力较弱。

b. 基于吴淞江水质逐年好转,根据吴淞江水位高、拦路港—黄浦江潮差大等水动力特点,提出“北

引东排、西南自然引排”活水畅流优化方案,数值计算结果表明,优化方案水动力显著提升,主干和中小河道流速分别提升 27.5% 和 18.5% 。

c. 对活水优化方案开展现场试验,观测结果表明,引排流量显著提升,西大盈港、东大盈港、油墩港、新通波塘北引吴淞江流量约 $40 \text{ m}^3/\text{s}$,试验期间水质显著提升,主干河道水质由V至劣V类提升至IV类。

参考文献:

[1] XIA J, ZHAI X, ZENG S, et al. Systematic solutions and modeling on eco-water and Its allocation applied to urban river restoration: case study in Beijing, China [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2014, 14(1):39-54.

- [2] 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 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(2):136-138. (in Chinese))
- [3] CHEN Xie, YANG Fan, LIU Guoqing, et al. Sustainable improvement of urban river network water quality and flood control capacity by a hydrodynamic control approach: case study of Changshu City [C]// IOP conference series: earth and environmental science, volume 51. Sanya: IOP Publishing, 2016:9-11.
- [4] 陈传友,沈镭,胡长顺,等. 我国大西线“江河连通”调水新格局的设想与评析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 1-8. (CHEN Chuanyou, SHEN Lei, HU Changshun, et al. Analysis of and preliminary comments on new pattern of rivers-connected water transfer along Great Western Line of China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 1-8. (in Chinese))
- [5] 徐贵泉,褚君达. 上海市引清调水改善水环境探讨[J]. 水资源保护, 2001, 17(3):26-30. (XU Guiquan, CHU Junda. Water environment improvement by clean water diversion in Shanghai City [J]. Water Resources Protection, 2001, 17(3):26-30. (in Chinese))
- [6] 蔡浚,王春树,王卫. 开展水资源引清调度对改善河道水环境的探讨[J]. 中国水利, 2011(7):39-41. (CAI Jun, WANG Chunshu, WANG Wei. Discussion on improving the water environment in the river course by diverting clean water and conducting better management [J]. China Water, 2011(7):39-41. (in Chinese))
- [7] 陆勤. 苏州河水质现状及引清调水试验[J]. 上海农学院学报, 1999, 17(1):62-67. (LU Qin. Current situation of water quality in Suzhou Creek and the experiment of using water division from conservancy works on it [J]. Journal of Shanghai Agricultural College, 1999, 17(1): 62-67. (in Chinese))
- [8] 乌景秀,范子武,费香波,等. 活动溢流堰在苏州古城區自流活水工程中的应用[C]//2013 年水资源生态保护与水污染控制研讨会. 哈尔滨:中国环境科学学会, 2013:702-709.
- [9] 尚钊钊,张亚洲,戴晶晶,等. 昆山主城及周边区域活水畅流改善水环境方案研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(6):129-136. (SHANG Zhaoyi, ZHANG Yazhou, DAI Jingjing, et al. Study on water environment improvement scheme by living water flow in Kunshan main city and its surrounding areas [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6):129-136. (in Chinese))
- [10] 李大勇,刘凌,董增川,等. 改善张家港地区水环境引水方案的对比研究[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 17-20. (LI Dayong, LIU Ling, DONG Zengchuan, et al. A comparative study of water diversion schemes to improve water environment in Zhangjiagang area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(6):17-20. (in Chinese))
- [11] 刘国庆,范子武,王波,等. 基于同步原型观测的水质改善效果敏感性分析与应用[J]. 水利水运工程学报, 2019(5):1-9. (LIU Guoqing, FAN Ziwu, WANG Bo, et al. Sensitivity analysis and application research of water quality improvement effect based on synchronous prototype observation [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5):1-9. (in Chinese))
- [12] 杨柳,范子武,谢忱,等. 常州市运北主城区畅流活水方案设计与现场验证[J]. 水利水运工程学报, 2019(5):10-17. (LIU Yang, FAN Ziwu, XIE Chen, et al. Study on clean water diversion schemes to improve the water environment of Yunbei main urban area in Changzhou City [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5):10-17. (in Chinese))
- [13] 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 Guangbo, CHEN Xing, XIANG Long, 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))
- [14] 许益新,王文才,曾伟峰,等. 调水引流改善平原河网水环境质量模拟[J]. 水资源保护, 2018, 34(1):70-82. (XU Yixin, WANG Wencai, ZENG Weifeng, et al. Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1):70-82. (in Chinese))
- [15] 陈鸣,范子武,李云,等. 河流模拟系统软件及应用[M]. 南京:河海大学出版社,2010.

(收稿日期:2020-02-26 编辑:郑孝宇)

