

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.01.12

调水引流改善平原河网水环境质量模拟

许益新¹, 王文才¹, 曾伟峰¹, 李一平¹, 赖秋英¹, 殷小海², 章双双³

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 张家港市水资源监测站, 江苏 张家港 215560;
3. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要:为科学定量地评估引调水工程对平原河网地区城市内河水质的改善效果,以张家港市中部水系为例,运用 MIKE11 构建了河网水动力水质耦合模型,模拟了沿江水利枢纽和内河节制闸不同的调度方式对城市内河水质的影响,利用水质浓度改善率探究了水利调度改善城市内河水质的程度。结果表明:增加沿江水利枢纽引水天数对改善城市内河水质有显著作用,但随着引水天数的增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度改善率日均提升幅度逐渐降低;内河节制闸调度工况对改善城市内河水质起到一定的促进作用,实际调水引流工作中可作为一种辅助措施。

关键词:城市内河;河网模型;水利枢纽;内河节制闸;水利调度;浓度改善率

中图分类号:X321 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2018)01-0070-06

Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion

XU Yixin¹, WANG Wencai¹, ZENG Weifeng¹, LI Yiping¹, LAI Qiuying¹,
YIN Xiaohai², ZHANG Shuangshuang³

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Resources
Monitoring Station of Zhangjiagang City, Zhangjiagang 215560, China; 3. Environment

Biotechnology Research Institute, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the effect of the water diversion project on the water quality in the urban inland river of the plain river network, taking zhangjiagang central water system as an example, a water quality coupling model of river network was constructed using MIKE11 to simulate the effects of different scheduling methods on water quality of urban inland river, exploring the degree of water quality improvement under water diversion by means of concentration improvement rate. The results show that increasing the number of water diversion days along the river water conservancy project has a significant effect on improving the water quality of the inner river. But with the increase of water diversion days, the average daily improvement rate of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration decreased gradually; the operation condition of inland river control sluice can promote the improvement of water quality in urban areas, and it can be an auxiliary measure in actual water diversion.

Key words: urban inland river; river network model; water conservancy project; river control sluice; water diversion; concentration improvement rate

基金项目:国家自然科学基金(51579061);2016年度江苏省普通高校专业学位研究生实践创新计划项目(SJZZ16_0089)

作者简介:许益新(1993—),男,硕士研究生,研究方向为湖泊富营养化及水环境数学模型。E-mail: xuyixin0825@163.com

通信作者:李一平,教授。E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

随着中国经济的快速发展,城市化率快速提高,而城镇污水收集处理基础设施的建设却落后于城市建设的步伐,导致大量生活污水及工业废水进入城市河道,水污染问题日趋严重,近年来在东部平原河网地区尤为突出^[1-3]。控源截污是改善城市河流水质的根本措施,但在实际治理过程中存在较大的难度。

科学有效的引调水是实现江河湖库水系连通、改善城市内河水环境的重要举措,目前引水对于城市内河水环境改善效果的研究多集中于引水水量和引水水质^[4-7],陈振涛等^[8]利用水质改善率、类别变化指数和浓度变化指数综合分析了引水水量和水质对河网水质的改善效果,得出引水水质是影响改善效果的关键因素;卢卫等^[9]运用 MIKE11 模型分析了引调水水量、历时及引水模式对水质的改善效果,结果表明阶段性引调水的效率优于连续性引调水;童朝锋等^[10]通过外秦淮河一维河网模型分析了引水方式、引水规模和闸控方式对水质的影响,结果表明不同调水方案条件下,只要满足引水水量,可以显著提高外秦淮河的水质。

对于引水水源为长江的河网地区,来水水质变化幅度较小,引水改善城市内河水环境质量主要受到沿江水利枢纽和内河节制闸调度的影响。笔者通过构建张家港市中部水系河网模型,选取沿江水利枢纽和内河节制闸调度方式为研究对象,探究其对城区主要内河水质改善效果的影响,以期为平原河网地区水系优化调度提供技术支持与建议。

1 研究区域概况

张家港市地处长江三角洲发达地区,属太湖流域澄锡虞水系,境内河网密布,沿江水利枢纽和内河节制闸众多,其中中部水系沿江水利枢纽主要为朝东圩港水利枢纽和一千河水利枢纽,内河节制闸主要为东横河水利枢纽、东横河西节制闸和新沙河南端控制工程,中心城区水系主要为东横河、环城河、新沙河、谷渚港、华塘河等(图1)。从张家港市2014年水质例行监测资料来看,全市V类及劣V类水体达到50%,主要污染物质为NH₃-N,其中城区水质超标河道主要为范港河、纪澄河以及新沙河、华塘河等南部河道。为改善张家港市的水环境状况,从张家港市紧邻长江的优势出发,引长江的清洁水源,经由朝东圩港和一千河至城区水系,通过东横河、谷渚港和新市河对城区水系进行生态补水。

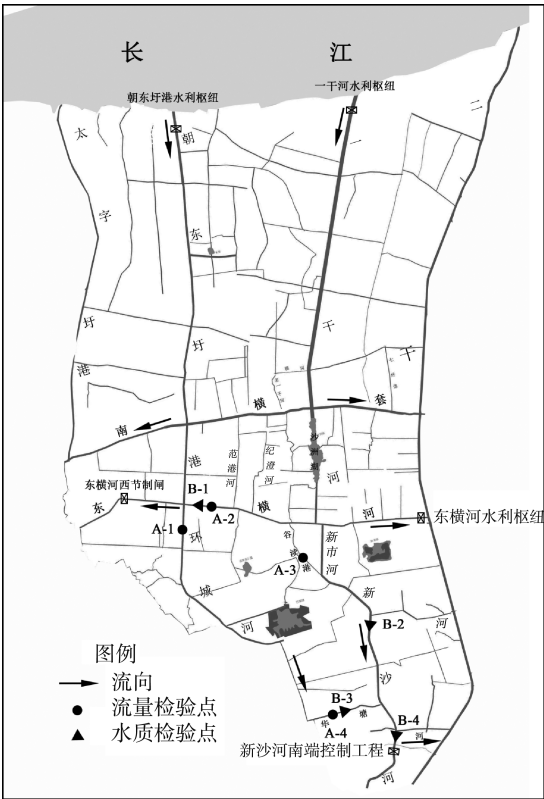


图1 张家港市中部水系、引水流向水质检验点位置

2 模型构建及评价方法

2.1 模型的建立

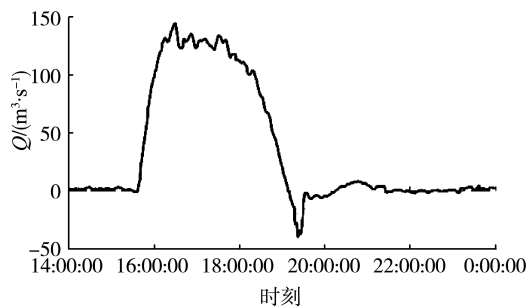
采用 MIKE11 的 HD 和 AD 模块建立张家港市河网水动力和水质耦合数学模型,HD 模块基本原理为圣维南方程^[11],采用“双扫”法进行数值计算,采用六点中心隐式差分格式;AD 模块是以 HD 生成的水动力条件为基础,采用对流扩散方程^[12]进行计算。

根据概化后的河网、湖泊在输水能力和调蓄能力两个方面必须与实际河网、湖泊相近或基本一致的基本原则^[13],根据张家港市河网水文特征,以朝东圩港、一千河、东横河、新市河、新沙河为骨干河道,结合谷渚港、范港河、纪澄河等镇级河道以及沿江水利枢纽、内河节制闸进行概化。

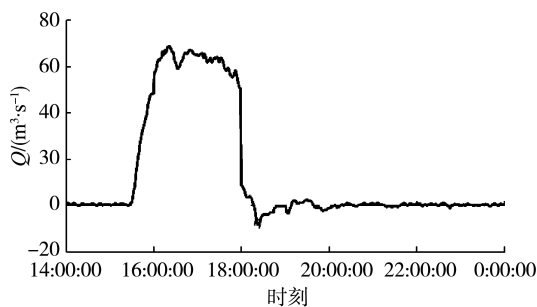
模型上边界为朝东圩港、一千河与长江交汇处,为进水口,采用流量边界,流量资料来自于朝东圩港老闸和一千河老闸自动监测站频率为1min的数据,模型下边界主要为太字圩港、二千河与长江交汇处以及新沙河、二千河南端边界,为出水口,均采用水位边界控制。

2.2 模型的率定

以2016年1月11—12日张家港市野外原型调水试验数据为实测值对模型参数进行率定。原型调水从长江开闸放水,经朝东圩港和一千河进入中心

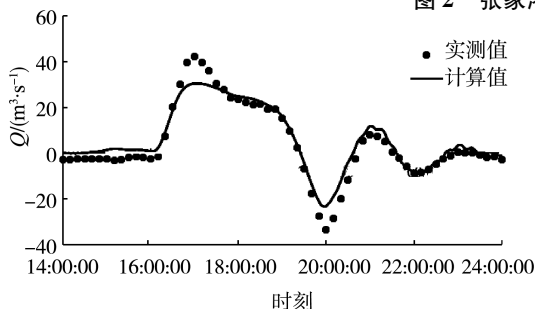


(a) 朝东圩港水利枢纽

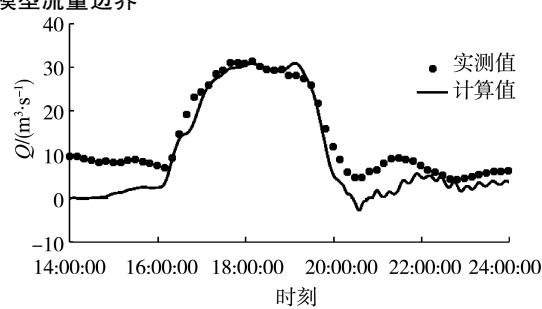


(b) 一干河水利枢纽

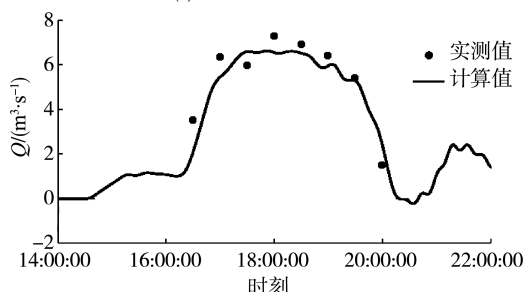
图2 张家港市河网模型流量边界



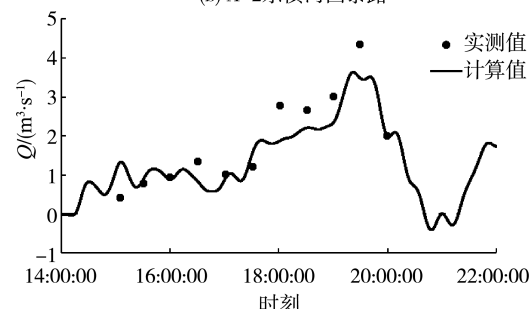
(a) A-1朝东圩港泗阳路



(b) A-2东横河国泰路



(c) A-3谷淞港



(d) A-4华塘河

图3 重点监测断面流量率定结果

城区水系,共设有 16 个水文监测断面和 17 个水质监测断面,其中水文自动监测站点 11 个,水文手动监测站点 5 个,水质监测断面均为手动监测。结果表明:计算值与实测值拟合较好,监测点流量相对误差平均为 20.3%,水质相对误差均在 30% 以内,符合计算要求;张家港市现状河道糙率在 0.01 ~ 0.04 之间, $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解系数为 0.03 ~ 0.08 d^{-1} 。通过模型率定,建立的张家港市河网模型能较好地反映中部水系日常引水工况下水动力水质变化情况,可作为方案计算的有效工具。模型边界条件见图 2,重点监测断面流量、水质率定结果分别见图 3 和图 4。

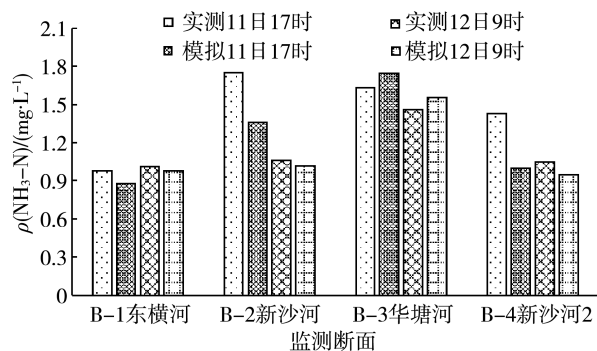


图4 重点监测断面水质率定结果

2.3 调水引流改善水环境质量评价方法

为了定量分析调水引流对城市内河水环境质量的改善效果,根据张家港市中部水系现状水质超标因子,选取 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为评价因子,根据水质浓度改善率评价河道水质改善程度,水质浓度改善率计算公式如下:

$$R = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

式中: R 为水质浓度改善率; C_0 为引水前水质浓度; C_i 为引水后第 i 时刻的水质浓度。 R 值反映引水前后水质浓度改善的程度,正值表示水质浓度下降,负值表示水质浓度上升。

3 优化调控方案

影响平原河网地区城市内河生态引水效果的主要因素有:沿江水利枢纽调度方式、内河节制闸调度方式、引水水质、引水水量、引水布局和工程实施难度等。本文结合研究区域实际情况,从沿江水利枢纽和内河节制闸调度方式两方面展开分析,制定相应的计算方案评估引水对城市内河水质的改善效果。

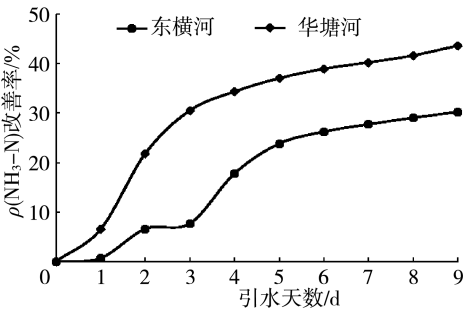
3.1 不同沿江水利枢纽调度方式效果评估

根据张家港市自动监测站频率为 1 min 的数据,分析得到现状引水情况为:朝东圩港水利枢纽一天引水两潮,其中一潮引水平均时长为 2.79 h,引水时段平均流量为 55.72 m³/s,二潮引水平均时长为 3.35 h,引水时段平均流量为 75.33 m³/s;一干河水利枢纽一天引水一潮,引水平均时长为 2.45 h,引水时段平均流量为 40.04 m³/s。沿江水利枢纽不同的调度方式主要体现在引水天数和水利枢纽组合方案不同两个方面。

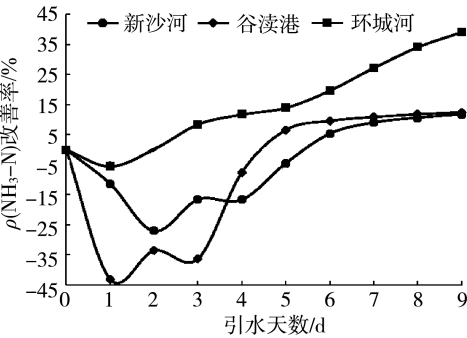
3.1.1 沿江水利枢纽不同引水天数效果评估

为研究引水天数对城市内河水质的改善效果,采用朝东圩港水利枢纽单独引水工况,分别计算引水天数为 1~9 d 过程中城市内河 NH₃-N 浓度改善率的变化情况,结果表明:增加引水天数对改善河道水质有显著作用,河道水质的改善程度与河道现状浓度和引水时段内通过的流量密切相关,河道现状浓度较高且引水时段内通过流量大的河道水质改善最为明显,河道现状浓度低且引水时段内通过流量小的河道水质改善程度较弱(图 5)。以东横河与环城河的 NH₃-N 质量浓度改善率为例,二者现状浓度和引水时段内通过的流量基本相近,故两者的浓度改善率也基本相近;同样以谷渎港和华塘河的 NH₃-N 质量浓度改善率为例,两者引水时段内通过的流量基本相近,但华塘河的 NH₃-N 现状质量浓度高于谷渎港,使得华塘河的 NH₃-N 质量浓度改善率明显高于谷渎港。

朝东圩港单独引水工况下,东横河与华塘河的 NH₃-N 质量浓度改善率随引水天数的增加而增大,当引水天数从 1 d 增加至 5 d 时,东横河与华塘河的 NH₃-N 质量浓度改善率分别从 0.7% 和 6.5% 提升至 23.8% 和 37.0%,日均提升幅度分别达到 5.8% 和 7.6%,而当引水天数从 5 d 增加至 9 d 时,东横河与华塘河的 NH₃-N 质量浓度改善率分别从 23.8% 和 37.0% 提升至 30.2% 和 43.6%,日均提升幅度仅为 1.6% 和 1.7%,表明引水初期来自长江的清洁水源对东横河和华塘河的 NH₃-N 质量浓度改善程度较强,但随着引水天数的增加,河道 NH₃-N 质量浓度逐渐降低,使得引水对其 NH₃-N 质量浓度改善作用逐渐减弱。与东横河与华塘河不同,新沙河、谷渎港与环城河的 NH₃-N 质量浓度随着引水天数的增加则呈现先上升后下降的趋势,当引水天数达到 6 d 时,来自长江的清洁水源才对其 NH₃-N 质量浓度产生改善效果,即朝东圩港单独引水工况下,引水天数至少达到 6 d,城区主要河道的 NH₃-N 质量浓度才都有改善效果,具体见图 5。



(a) 东横河、华塘河



(b) 新沙河、谷渎港、环城河

图 5 引水天数与主要河道 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 改善率关系

3.1.2 沿江水利枢纽不同组合方式效果评估

沿江水利枢纽组合方案主要考虑朝东圩港水利枢纽单独运行、一干河水利枢纽单独运行以及朝东圩港和一干河水利枢纽联合运行 3 种工况,结果表明:朝东圩港单独引水主要对东横河、环城河和华塘河的 NH₃-N 质量浓度产生明显的改善作用,而一干河单独引水主要对东横河和谷渎港的 NH₃-N 质量浓度改善率有较大的提升(图 6),主要是由于来自朝东圩港的长江清洁水源以补给东横河、环城河等西部河流为主,而来自一干河的长江清洁水源则以补给东横河、新市河、谷渎港等东部河流为主。所以,当同时开启朝东圩港老闸与一干河老闸进行引水时,张家港市城区河道 NH₃-N 质量浓度改善率较单独运行工况均有较大的提升,其中东横河、新沙河和谷渎港的 NH₃-N 质量浓度改善率分别从朝东圩港单独引水工况的 30.2%、11.7% 和 12.5% 提高至 45.0%、20.3% 和 24.6%,水质改善效果显著。此外,朝东圩港与一干河联合引水工况下,当引水天数达到 5 d 时,城区主要河道的 NH₃-N 质量浓度均有改善(表 1)。

3.2 不同内河节制闸调度方式效果评估

由于张家港市内河处于朝东圩港和一干河的下流,引水期间城市内河水质改善效果受到上游河道本底浓度和沿线排污口的影响,故决定引水初期开启内河节制闸将上游污水排出,而后关闭内河节制闸以更好地改善城市内河水质。

表 1 联合引水工况下主要河道 NH₃-N 质量浓度改善率

河道	现状 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	不同引水天数下 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 改善率/%								
			1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d	9 d
东横河	1.29	25	11.2	16.6	18.4	23.6	29.2	33.4	38.1	41.6	45.0
新沙河	1.28	18	-27.2	-9.5	-7.1	-5.2	4.1	10.9	14.7	17.8	20.3
华塘河	3.22	4	9.2	29.8	36.9	40.1	42.9	44.2	44.8	46.2	48.6
环城河	1.30	20	-5.9	2.5	10.6	12.0	12.9	18.7	26.8	33.4	38.0
谷淩港	1.19	6	-41.0	-9.8	-15.1	-7.4	9.0	16.6	20.3	22.5	24.6

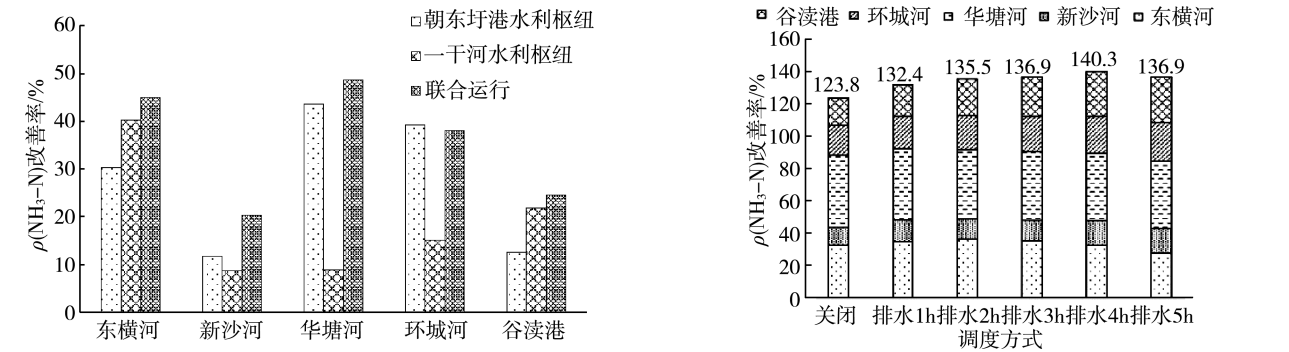


图 6 水利枢纽不同组合方案与主要河道 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 改善率关系

在上述研究的基础上,研究东横河水利枢纽与东横河西节制闸不同调度方式对城区主要河道水质的改善效果,引水工况采用上述推荐的朝东圩港与一干河水利枢纽联合引水方案,引水天数为 5 d,模拟东横河水利枢纽与东横河西节制闸在不同排水时长方案下对城区主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率的影响,结果表明:内河节制闸不同的调度方式对城区主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率的影响有一定的差异(图 7)。东横河水利枢纽单独调度工况下,随着排水时长的增加,主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度总改善率基本呈现逐渐增大的趋势,当排水时长达到 4 h,主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度总改善率达到峰值;而东横河西节制闸单独调度工况下,随着排水时长的增加,主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度总改善率呈现波动的状态,当排水时长为 1 h,主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度总改善率达到峰值。当东横河水利枢纽与东横河西节制闸联合调度时,各排水时长下主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度总改善率较单独运行工况均有一定的提升,且当排水时长达到 5 h,主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度总改善率达到峰值。

内河节制闸调度工况对不同河道的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率也不同,以新沙河和华塘河为例(图 8),新沙河的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率随着内河节制闸排水时长的增加而增大,表明东横河水利枢纽与东横河西节制闸的开启有助于排出上游污水,对河

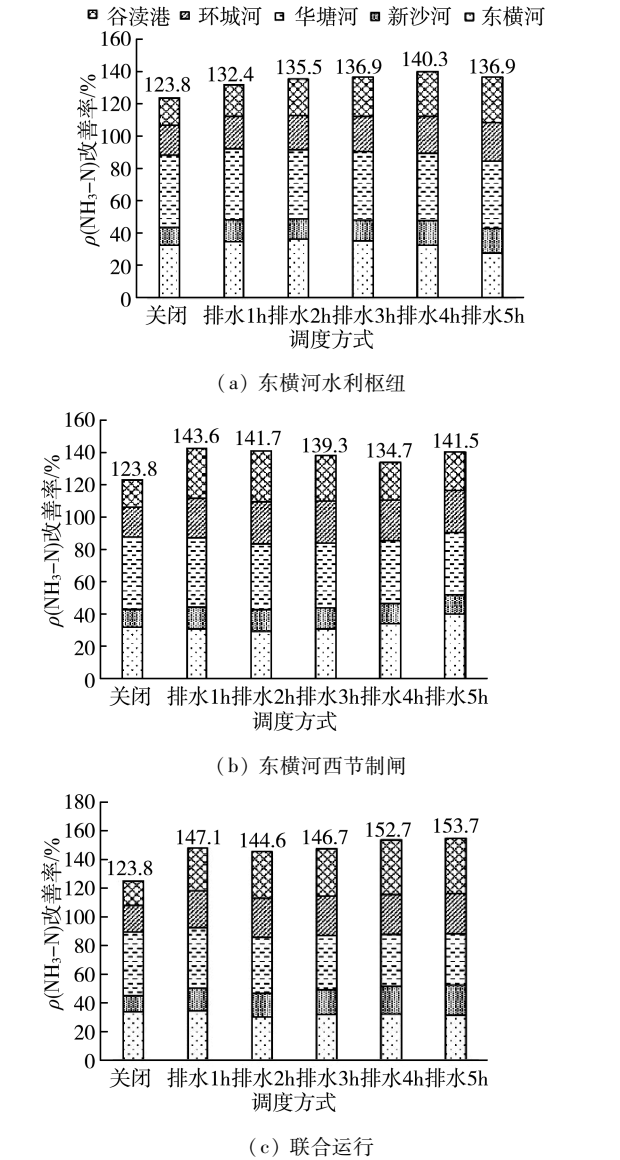
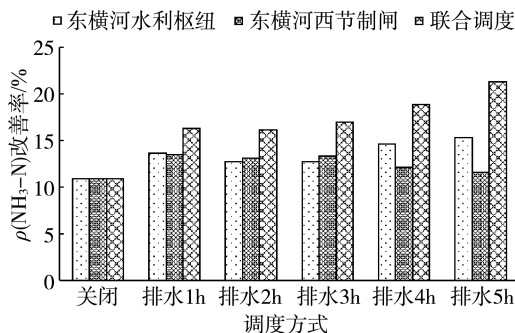
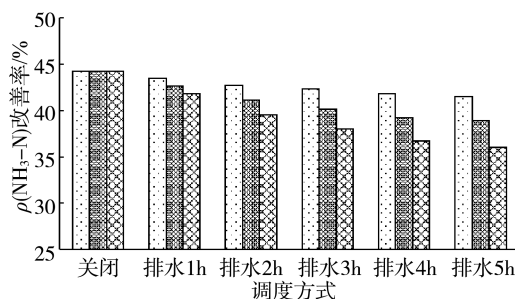


图 7 内河节制闸不同调度方式对 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 总改善率的影响

道水质改善起到促进作用;而华塘河的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率则随着排水时长的增加而逐渐减小,主要是由于华塘河本底浓度值较大,其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率主要与上游来水水量有关,与上游来水水质关系较小,闸门的开启使得通过华塘河的水量减少,故其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率随着闸门排水时长的增加而降低。



(a) 新沙河



(b) 华塘河

图8 不同河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率与内河节制闸调度方式的关系

4 结 论

a. 张家港市中部水系水质的改善程度与河道现状浓度和引水时段内通过的水量密切相关,河道现状浓度高且引水时段内通过的水量大的河道水质改善最为明显。整体而言增加引水天数对改善城市内河水质有显著作用,但随着引水天数的增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率日均提升幅度逐渐降低。

b. 比较3种沿江水利枢纽调度工况,由于水利枢纽的位置关系,朝东圩港单独引水主要对东横河、环城河和华塘河等靠西的河道的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度产生明显的改善作用,而一干河单独引水主要对东横河和谷渎港等靠东的河道的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率有较大的提升。此外,沿江水利枢纽联合运行工况下城市内河 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度改善率较单独运行工况有较大的提升。城市内河调水引流工作应注重多水源联合调度,且调度天数不宜过长。

c. 引水初期研究区域内主要内河节制闸排水有利于提高内河水质的改善效果。东横河水利枢纽单独调度工况下,随着排水时长的增加,主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度总改善率基本呈现逐渐增大的趋势,排水4h为其改善效果最佳工况,而东横河西节制闸单独调度工况下,随着排水时长的增加,主要河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度总改善率呈现波动的状

态,排水1h为其改善效果最佳工况。两内河节制闸联合排水时,河道水质改善效果比单一节制闸排水更好,排水5h为其改善效果最佳工况。内河节制闸调度工况对改善城市内河水质起到一定的促进作用,实际调水引流工作中可作为一种辅助措施。

参考文献:

- [1] 黄显峰,郑延科,方国华,等.平原河网地区河流生态修复技术研究与实践[J].水资源保护,2017,33(5):170-176. (HUANG Xianfeng, ZHENG Yanke, FANG Guohua, et al. Research and practices of river ecological restoration technology applied in plain river network area[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 170-176. (in Chinese))
- [2] 魏志远,王婷,徐凯,等.平原河网水体氮污染对氮循环细菌的影响[J].湖泊科学,2016,28(4):812-817. (WEI Zhiyuan, WANG Ting, XU Kai, et al. Effects of aquatic nitrogen pollution on the nitrogen cycling bacteria in plain river network[J]. Lake Sciences, 2016, 28(4): 812-817. (in Chinese))
- [3] 周琦,逢勇,罗慧萍.镇江长江征润州水源地综合风险评价[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(2):108-114. (ZHOU Qi, PANG Yong, LUO Huiping. Comprehensive risk assessment of Zhengrunzhou water source area in Zhenjiang City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(2): 108-114. (in Chinese))
- [4] 高程程,陈长太,唐迎洲.上海市青松水利片引清调水方案研究[J].水电能源科学,2012,30(2):115-119. (GAO Chengcheng, CHEN Changtai, TANG Yingzhou. Research on water scheduling program of Qingsong water conservancy zone in Shanghai City[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(2): 115-119. (in Chinese))
- [5] 贾海峰,杨聪,张玉虎,等.城镇河网水环境模拟及水质改善情景方案[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(5):665-672. (JIA Haifeng, YANG Cong, ZHANG Yuhu, et al. Simulation of a water quality improvement for urban river networks[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(05): 665-672. (in Chinese))
- [6] 陈昌军,张卫飞.平原河网区城市引水工程水质改善预测研究[J].人民长江,2012,43(13):88-90. (CHEN Changjun, ZHANG Weifei. Prediction research on water quality improvement through water diversion project for a city in plain river network area[J]. Yangtze River, 2012, 43(13): 88-90. (in Chinese))

(下转第82页)

waters [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25 (9): 1508-1514. (in Chinese))

[42] YAN Z, YANG X, LU G, et al. Potential environmental implications of emerging organic contaminants in Taihu Lake, China: comparison of two ecotoxicological assessment approaches [J]. Science of the Total Environment, 2014, 470/471: 171-179.

[43] LIU J, LU G, XIE Z, et al. Occurrence, bioaccumulation and risk assessment of lipophilic pharmaceutically active compounds in the downstream rivers of sewage treatment plants [J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 54-62.

[44] HOYETT Z, OWENS M A, CLARK C J, et al. A comparative evaluation of environmental risk assessment strategies for pharmaceuticals and personal care products [J]. Ocean & Coastal Management, 2016, 127: 74-80.

[45] GHEORGHE S, PETRE J, LUCACIU I, et al. Risk screening of pharmaceutical compounds in Romanian aquatic environment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(6): 1-16.

[46] PAPAGEORGIOU M, KOSMA C, LAMBROPOULOU D. Seasonal occurrence, removal, mass loading and environmental risk assessment of 55 pharmaceuticals and personal care products in a municipal wastewater treatment plant in Central Greece [J]. Science of the Total Environment, 2016, 543(Pt A): 547-569.

[47] GUO J, SELBY K, BOXALL A B A. Assessment of the risks of mixtures of major use veterinary antibiotics in european surface waters [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(15): 8282-8289.

[48] DAOUK S, CHÈVRE N, VERNAZ N, et al. Dynamics of active pharmaceutical ingredients loads in a Swiss university hospital wastewaters and prediction of the related environmental risk for the aquatic ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2016, 547: 244-253.

[49] MINGUEZ L, PEDELUCQ J, FARCY E, et al. Toxicities of 48 pharmaceuticals and their freshwater and marine environmental assessment in northwestern France [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(6): 4992-5001.

[50] 程斌, 王菲凤, 张江山. 改进决策树模型支持下的饮用水水源地健康风险评价 [J]. 水资源保护, 2013, 29(1): 27-31. (CHENG Bin, WANG Feifeng, ZHANG Jingshan. An improved decision tree model for health risk assessment of drinking water source [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(1): 27-31. (in Chinese))

[51] 罗慧萍, 逢勇, 罗缙, 等. 泰州市第三自来水厂饮用水水源地水环境风险评价 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 114-120. (LUO Huiping, PANG Yong, LUO Jing, et al. Water environment risk assessment of Taizhou Three Waterworks drinking water source area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(2): 114-120. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-05-04 编辑: 徐 娟)

(上接第 75 页)

[7] 陈建标, 钱小娟, 朱友银, 等. 南通市引江调水对河网水环境改善效果的模拟 [J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 38-42. (CHEN Jianbiao, QIAN Xiaojuan, ZHU Youyin, et al. Simulation of improvement of water environment in river network of Nantong City by water diversion from Yangtze River [J]. Water Resource Protection, 2014, 30(1): 38-42. (in Chinese))

[8] 陈振涛, 滑磊, 金倩楠. 引水改善城市河网水质效果评估研究 [J]. 长江科学院院报, 2015, 32(7): 45-51. (CHEN Zhentao, HUA Lei, JIN Qiannan. Assessing the efficacy of water diversion to improve water quality in city river network [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(7): 45-51. (in Chinese))

[9] 卢卫, 应聪惠. 引调水改善河流水质的效果分析 [J]. 人民长江, 2014(18): 37-39. (LU Wei, YING Conghui. Effects analysis of river water quality improvement by water diversion [J]. Yangtze River, 2014(18): 37-39. (in Chinese))

[10] 童朝锋, 岳亮亮, 郝嘉凌, 等. 南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果 [J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 49-54. (TONG Chaofeng, YUE Liangliang, HAO Jialing, et al. Water quality simulation and water diversion effect analysis of external Qinhuai River in Nanjing [J]. Water Resource Protection, 2012, 28(6): 49-54. (in Chinese))

[11] 赵凤伟. MIKE11HD 模型在下辽河平原河网模拟计算中的应用 [J]. 水利科技与经济, 2014(8): 33-35. (ZHAO Fengwei. Application of Mike11 HD on hydrodynamic modeling of waterways in Xialiaohu River Plain [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014(8): 33-35. (in Chinese))

[12] 逢勇, 王瑶瑶, 胡绮玉. 浙江温黄平原典型河流水质改善方案研究 [J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 100-105. (PANG Yong, WANG Yaoyao, HU Qiyu. Research on water quality improvement scheme for a typical river in Wenhuang Plain in Zhejiang Province [J]. Water Resource Protection, 2016, 32(2): 100-105. (in Chinese))

[13] 杨松彬, 董志勇. 河网概化密度对平原河网水动力模型的影响研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2007, 35(5): 567-570. (YANG Songbin, DONG Zhiyong. Study on the influence of river network generalized density to hydrodynamic model for plain river system [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(5): 567-570. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-05-02 编辑: 徐 娟)