

基于SWMM的感潮河网水环境整治方案研究

盛娇樱^{1*}, 顾正华^{1#}, 马 勇¹, 辜樵亚¹, 高 柱²

¹浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州

²南通大学交通与土木工程学院, 江苏 南通

Email: 912144898@qq.com, #WISE@zju.edu.cn

收稿日期: 2020年11月2日; 录用日期: 2020年12月30日; 发布日期: 2021年2月18日

摘 要

为探索水环境调度和水系连通对感潮河网的水环境改善作用, 运用SWMM软件建立了河网水动力数学模型, 选取了枯水期和丰水期两种典型潮汐条件, 通过对沿江水闸的合理调控, 模拟了不同的自流引水和动力提水调度方案对于水体流动性的改善作用, 得出最佳调度方案。在最佳调度方案的基础上进一步建立水系连通整治后的河网水动力-水质模型, 分析了水系连通整治对河网中氨氮浓度的降低效果。数值模拟的结果表明, 通过科学的水环境调度, 并辅助水系连通整治措施, 河网的水动力和水质得到明显改善。研究结果可为南通经济技术开发区的水环境调度和水系连通整治工程提供科学的依据, 也为同类型的感潮河网城市水环境整治提供一定的借鉴作用。

关键词

感潮河网, 水环境调度, 水系连通, SWMM, 数值模拟

Research on Water Environment Improvement Plan of Tidal River Networks Based on SWMM

Jiaoying Sheng^{1*}, Zhenghua Gu^{1#}, Yong Ma¹, Qiaoya Gu¹, Zhu Gao²

¹College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang

²School of Transportation and Civil Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

Email: 912144898@qq.com, #WISE@zju.edu.cn

Received: Nov. 2nd, 2020; accepted: Dec. 30th, 2020; published: Feb. 18th, 2021

Abstract

In order to explore the effect of water environment regulation and water system connection on the im-

作者简介: 盛娇樱(1991-), 女, 助理工程师, 大学本科, 主要从事水资源与水环境方面的研究。

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 盛娇樱, 顾正华, 马勇, 辜樵亚, 高柱. 基于SWMM的感潮河网水环境整治方案研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(1): 88-101. DOI: 10.12677/jwrr.2021.101010

provement of the water environment of the tidal river network, the SWMM was used to establish a river network hydrodynamic model, and two typical tides were selected during the dry season and wet season conditions, through the reasonable adjustment of the sluices along the river. The effect of different artesian water diversion and dynamic water-lifting scheduling schemes on the improvement of water body fluidity was simulated, and the best scheduling scheme was obtained. Based on the optimal dispatching plan, the river network hydrodynamics-water quality model after the water system connection improvement was established to analyze the improvement effect of the water system connection improvement on the ammonia nitrogen concentration in the river network. Numerical simulation results show that through scientific water environment regulation and auxiliary water system connection, the hydrodynamics and water quality of the river network have been significantly improved. The research results can provide a scientific basis for the water environment regulation and water system connection improvement project in Nantong Economic and Technological Development Zone, and provide a certain reference for the same type of tidal river network cities.

Keywords

Tidal River Network, Water Environment Regulation, Water System Connection, SWMM, Numerical Simulation

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入 21 世纪以来,全世界面临着水环境问题的空前挑战。随着我国经济的高速发展,人类社会经济活动的影响使水资源系统受到很大冲击,河湖水污染加剧,水生态环境受到明显损害,严重地制约和威胁着区域经济的可持续发展和社会稳定。尤其是平原河网地区人口密集、工业集中、农业发达,面临着巨大的环境压力。而平原感潮河网地区地势平坦,河道纵横交织,坡降平缓,加上水利工程(水闸、泵站等)的控制,水系连通不畅,影响了河道自净能力,水环境问题严峻。

在感潮河网地区,通过合理调控水利工程,并辅助水系连通整治措施,利用潮差促使水体有序流动,对于改善城市河网水生态环境意义重大,水系连通和水环境调度技术是现阶段平原感潮河网地区改善水环境的研究热点。国内外对水系连通的研究主要集中在河湖水系连通概念内涵、模型构建应用和评价体系等方面。例如 Turnbull 等[1]基于水系连通的机理,提出了动态连通性和静态连通性的概念;Yang 等[2]用时间指标定量地描述了水系连通的变化规律,评估了地形、降雨、坡度对水系连通的影响;Trigg 等[3]研究了遭遇规模极端洪水时,河网连通对生态、泥沙运输、洪水风险的影响;Jencso 等[4]分析了水系连通性与径流动力学之间的关系。国内外学者针对水环境调度也进行了大量的研究;Pingryd 等[5]针对美国高原地区科罗拉多主干河流的水资源和水污染问题,利用水量水质联合调度系统进行了探索;Campbell 等[6]构建了巴西 Klamath 河流的水动力水质耦合模型,评价了河流的调度方式;马超、李晓和龙华等人[7] [8] [9]先后针对平原河网,建立了数学模型,论证了调水对水环境的改善效果。

在水环境调度的实际应用中,应结合河网自身的特点,辅以水系连通的治理措施。日本、美国、荷兰先后实施了引清调水工程,国内如苏州内城河调水、引江济太工程和上海浦东的引清调度工程等,通过实施生态引水,对河网水循环、水系连通进行科学有效的调控,增加水体流动性,提高水体自净能力,改善了城市水环境状况。本文以南通经济技术开发区河网为研究对象,采用 SWMM (Storm Water Manager Model)软件,建立河网

水动力模型和水质模型，选取典型丰、枯潮汐过程，研究不同的水环境调度方案以及水系连通方案对于水体流动性及河网水环境的改善作用，提出了科学的水环境调度方案，也为同类型城市的水环境改善提供了借鉴意义。

2. 研究区域和方法

2.1. 研究区域

研究区位于南通市经济技术开发区，总面积约 181.54 km²，处于长江近河口感潮河段，区内河网密布、水系发达，区内目前共有四级以上河道 176 条(段)，总长度 338.10 km。区域内整体地势平坦，总体上东高西低、北高南低，河流基本靠自流排水。依托流域防洪和区域治理，形成了“两条主干河道、五个排涝分片”的水系格局。两条主干河道为城市的主要引排通道，分别为新江海河和通启运河。根据研究区地面高程及现有水系布局划分为五个相对独立的防洪排涝片区，分别为裤子港片、小海片、天星横河片、新开港片和南通农场片。区内现有水闸 35 座，其中通江河道入江口均有涵闸控制，沿江共有涵闸 7 座，排涝分片之间也有涵闸控制，形成水系分片控制线(图 1)。

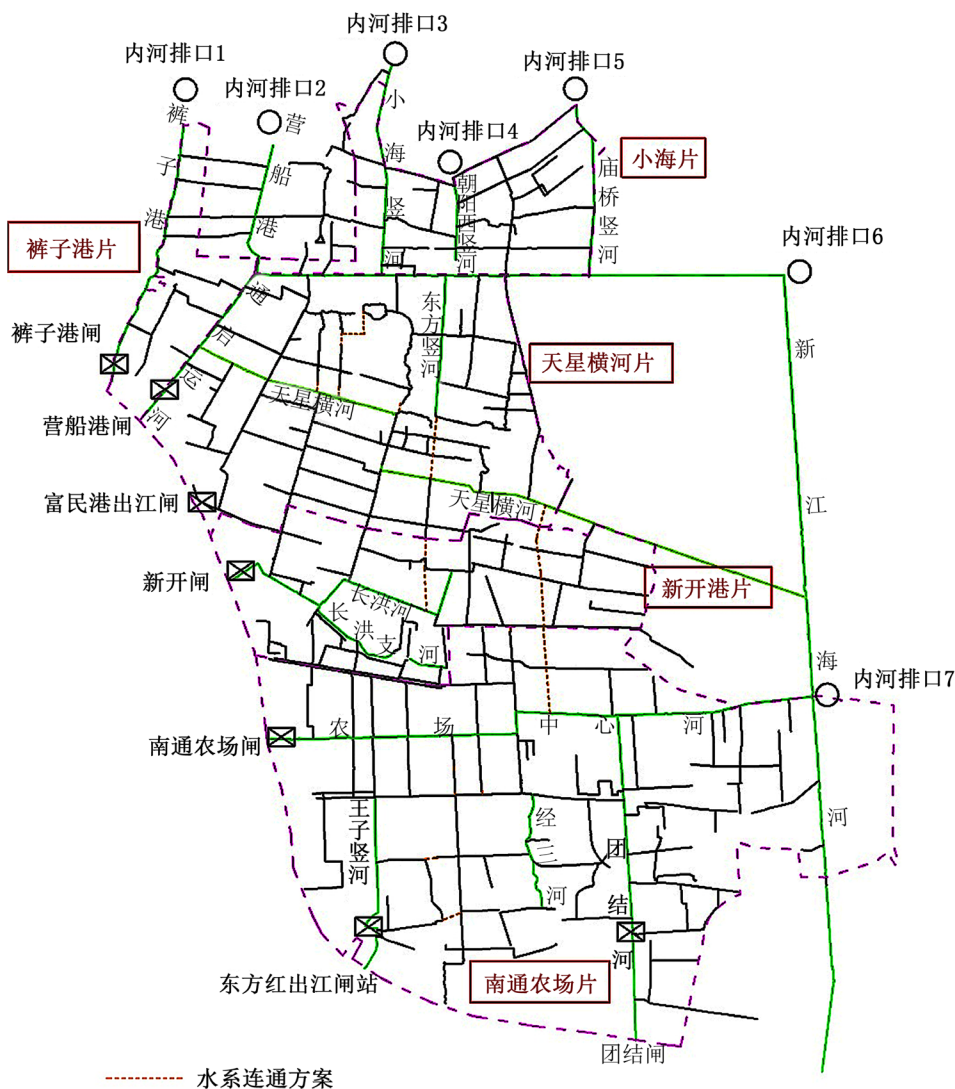


Figure 1. Overview of the study area
图 1. 研究区概况

据 2018 年中国水利水电科学研究院编制的水质监测报告统计, 研究区存在着沿河小区治污不彻底、雨污串流、部分工厂偷排和污水处理厂处理能力不足的问题, 再加上平原河网水动力不足, 自净能力差, 城市河道黑臭现象时有发生, 严重影响河道周边居民的生活质量, 影响城市风貌和投资环境, 水质型缺水制约了研究区社会可持续发展, 亟需对研究区进行水环境整治。

2.2. 方案规划工具

SWMM 是美国环保局为解决日益严重的城市排水问题而推出的暴雨径流管理模型, 该模型可对单场暴雨或连续降雨产生的径流进行动态模拟, 也是目前最完整的降雨 - 径流 - 水质模型。SWMM 模型适用于水文水力条件较复杂的城市区域, 在国外许多地区均得到了广泛应用, 在我国天津、北京等地也进行了试用并获得成功。因此, 结合开发区的水文水力条件, 运用 SWMM 进行模拟, 以满足研究区水环境整治的需求。

SWMM 的模型中提供了三种演算方法: 恒定流演算、运动波演算、动力波演算。而恒定流演算和运动波演算都属于对实际排水系统的一种简化, 对于复杂多变的水流计算, 动力波是最佳的选择。动力波的控制方程为 Saint Venant 方程组:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; H 为水深, m ; g 为重力加速度, $9.8 m/s^2$; S_f 为摩阻比降, 其值可由曼宁公式确定:

$$S_f = \frac{J}{gAR^{4/3}} Q|v| \quad (3)$$

式中: $J = gn^2$, n 为管道或河道的综合糙率; R 为水力半径, m ; v 为断面平均流速, m/s , 取绝对值代表摩阻力的方向与水流方向相反。

将 $Q^2/A = v^2A$ 代入式(2), 得:

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + 2Av \frac{\partial v}{\partial x} + v^2 \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (4)$$

将 $Q = Av$ 代入式(1), 并将等式两端同乘以 v , 移项可得:

$$Av \frac{\partial v}{\partial x} = -v \frac{\partial A}{\partial t} - v^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)两式联立可得:

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} - 2v \frac{\partial A}{\partial t} - v^2 \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (6)$$

式(6)的求解还需要联立连续性方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_i}{\omega} \quad (7)$$

式中: H 为节点水位, m ; Q 为进出节点的流量, m^3/s ; ω 为节点自由水面的面积, m^2 。

联立式(6)和式(7), 有限差分后的方程组采用修正的欧拉法求解, 即可求解时段 Δt 内管道、河道流量和每个节点水位。

3. 水环境整治方案分析

3.1. 水环境调度模拟工况及模型设置

本文提出了两种水环境调度方案，一种是利用外河和内河的水位差进行自流引水调度，另外一种是在沿江闸站增设大流量泵站，进行持续性的引排。

1) 水系连通前自流引水调度工况及模型设置

关闭水系分片控制线上的内河水闸，除了水系控制线上的所有内河水闸均处于敞开状态，通过调整沿江闸门的开启高度模拟丰水期和枯水期的调水引流方案。裤子港片独立进行水环境调度，丰水期和枯水期均通过通启运河引水，裤子港闸落潮充分排水；天星横河片与新开港片进行整体调度，丰水期通过营船港闸涨潮与通启运河充分引水，富民港出江闸与新开闸落潮充分排水，枯水期通过通启运河充分引水，营船港闸关闭，富民港出江闸与新开闸落潮充分排水；南通农场片独立进行水环境调度，丰水期和枯水期农场中心套闸关闭，团结闸涨潮充分引水，南通农场闸与东方红出江闸落潮充分排水，具体工况设置见表 1~4。

Table 1. Setting of artesian water diversion scheduling schemes for Kuzigang in wet season

表 1. 丰水期裤子港片自流引水调度工况设置

沿江闸站	开启条件	开启高度(m)			
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
裤子港闸	外河低于内河排水	4	2	1	0.5

Table 2. Setting of artesian water diversion scheduling schemes for Tianxinghenghe and Xinkaigang in wet season

表 2. 丰水期天星横河片和新开港片自流引水调度工况设置

沿江闸站	开启条件	开启高度(m)					
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
营船港闸	外河高于内河引水	4	3	2	1.5	1	0.5
富民港出江闸	外河低于内河排水	4	3	2	1.5	1	0.5
新开闸	外河低于内河排水	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Table 3. Setting of artesian water diversion scheduling schemes for Nantongnongchang in wet season

表 3. 丰水期南通农场片自流引水调度工况设置

沿江闸站	开启条件	开启高度(m)			
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
南通农场闸	外河低于内河排水	2	2	1	0.5
东方红出江闸	外河低于内河排水	2	2.5	1.5	1
团结闸	外河高于内河引水	2.5	2.5	2	1.5

Table 4. Setting of artesian water diversion scheduling scheme in dry season

表 4. 枯水期自流引水调度方案

	裤子港闸	营船港闸	富民港出江闸	新开闸	南通农场闸	东方红出江闸	团结闸
开启条件	外河低于内河排水	关闭	外河低于内河排水	外河低于内河排水	外河低于内河排水，沿江潮位大于-0.7 m 时关闭	外河低于内河排水，沿江潮位大于-0.7 m 时关闭	外河高于内河引水
开启高度(m)	0.3	0	1	0.3	0.3	0.3	完全打开

以 2019 年 6 月绘制的南通开发区水系图为基础,河道断面采用 2011 年水利普查数据。计算模型包括 605 条河段、554 个河道节点、7 个通江排水口和 7 个内河排水口。河道的初始水位均为正常控制水位,内河排口为水位边界,设定为各个片区的正常控制水位,沿江排口处分别设定枯水期和丰水期两种潮位变化过程曲线(图 2),潮位数据来自 2018 年天生港潮汐表。参考近年来南通市河网的引清调水研究成果[10],同时根据经验采用比拟法,水闸流量系数取 0.65,河道糙率为 0.04,径流模型选择动态模型,模型的计算时间为 1 d,计算时间步长为 5 s。

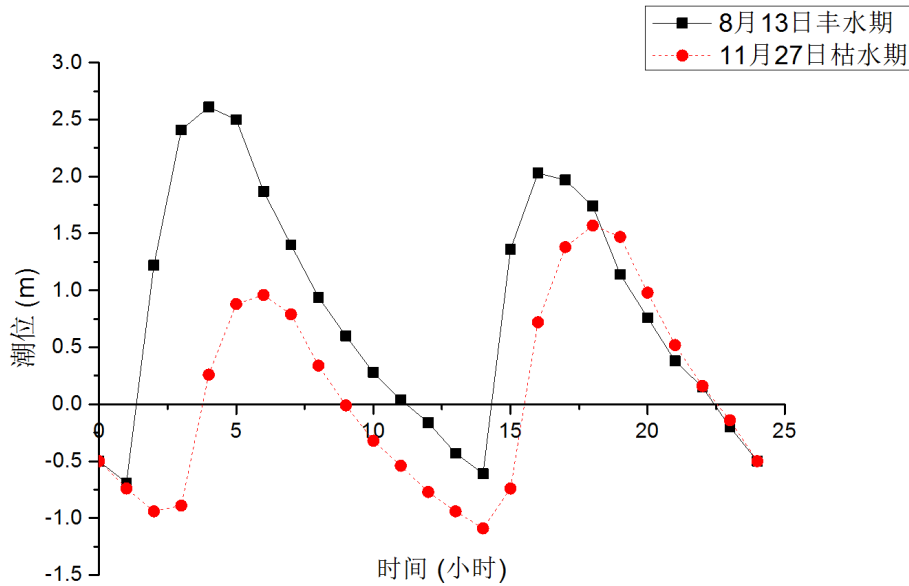


Figure 2. Curve of tidal level change during dry and wet periods of Tianshengang in 2018
图 2. 2018 年天生港枯水期和丰水期潮位变化过程曲线

2) 水系连通前动力提水调度工况及模型设置

动力提水方案只针对裤子港片、天星横河片和新开港片。关闭所有的沿江闸站,裤子港片通过通启运河持续引水,裤子港闸泵站以 4 m³/s 的速度持续排水。天星横河片与新开港片进行整体调度,营船港闸泵站以 20 m³/s 的速度从长江引水,同时也通过通启运河持续引水。富民港出江闸泵站与新开闸泵站以 8 m³/s 的速度持续排水,具体见表 5。沿江闸站全部关闭,模型其余设置与自流引水方案一致。

Table 5. Setting of water-lifting scheduling scheme for Kuzigang, Tianxinghenghe and Xinkaigang
表 5. 裤子港片、天星横河片与新开港动力提水调度方案

泵站	引排方式	泵站设计流量(m ³ /s)
裤子港闸泵站	排水	4
营船港闸泵站	引水	20
富民港出江闸泵站	排水	8
新开闸泵站	排水	8

3.2. 水环境调度方案分析

1) 水系连通前自流引水调度方案分析

裤子港片的八卦中横河监测断面丰水期向西最大流速大于 0.1 m/s, 工况 3 裤子港闸开启度为 1 m 时保持流

速 0.05 m/s 以上的时间最长, 水动力效果最好, 为最佳调度方案。枯水期向西的稳定流速可达 0.05 m/s 左右。

天星横河片与新开港片的东方竖河监测断面丰水期工况 1~工况 6 基本上保持向南流动, 工况 1 流速最大可达 0.08 m/s, 工况 2、3 最大流速可达 0.07 m/s, 工况 4 最大流速可达 0.06 m/s, 工况 5 最大流速可达 0.05 m/s, 工况 6 最大流速可达 0.04 m/s, 其中工况 4 保持流速 0.01 m/s 以上的时间最长, 水动力效果最好。长洪支河监测断面丰水期工况 1~工况 6 都存在东西向的往复流动, 向东最大流速可达 0.1 m/s, 向西最大流速可达 0.15 m/s, 其中工况 1、2、4 保持向东流动的时间最长, 水动力效果最好。综合分析, 丰水期工况 4 为最佳调度方案, 工况 4 监测断面的流速见图 3 和图 4。枯水期东方竖河监测断面基本上保持向东流动, 最大流速可达 0.02 m/s (图 5), 长洪支河向西和向东的最大流速均可达 0.1 m/s (图 6)。

南通农场片王子竖河监测断面丰水期基本保持向南流动, 最大流速在 0.16 m/s 左右, 其中工况 2 保持向南的流速最大, 水动力效果最好。经三河监测断面基本保持向北流动, 最大流速在 0.04 m/s 左右, 其中工况 2 流速最大, 水动力效果最好。综合分析, 丰水期工况 2 为最佳调度方案, 工况 2 监测断面的流速见图 7 和图 8。枯水期王子竖河监测断面基本保持向南流动, 最大流速在 0.08 m/s 左右(图 9), 经三河基本保持向北流动, 稳定流速在 0.02 m/s 左右(图 10)。

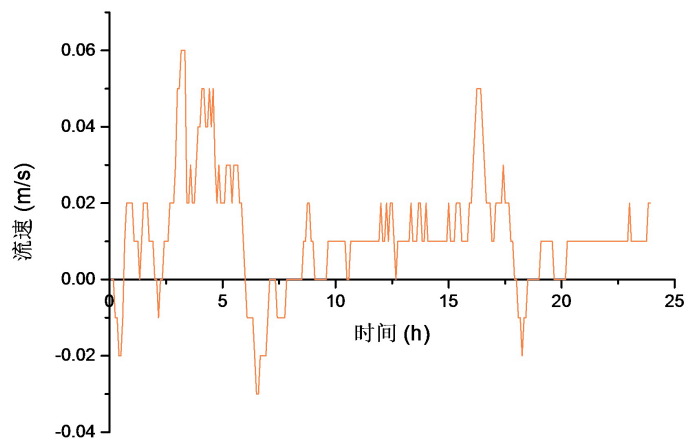


Figure 3. Velocity variation of Dongfangshu River monitoring section in wet season (scheme 4)

图 3. 丰水期东方竖河监测断面流速变化(工况 4)

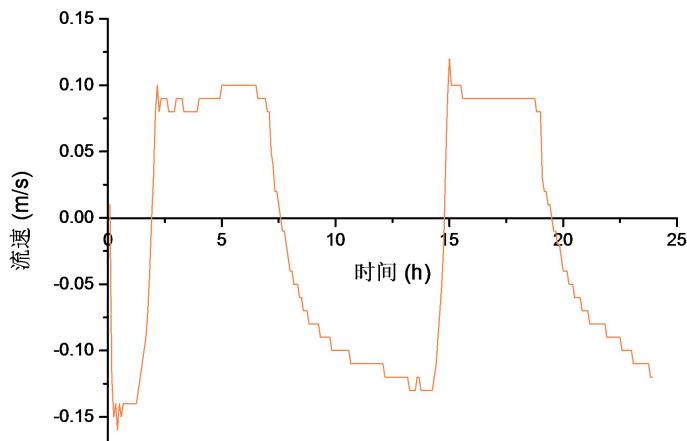


Figure 4. Velocity variation of Changhongzhi River monitoring section in wet season (scheme 4)

图 4. 丰水期长洪支河监测断面流速变化(工况 4)

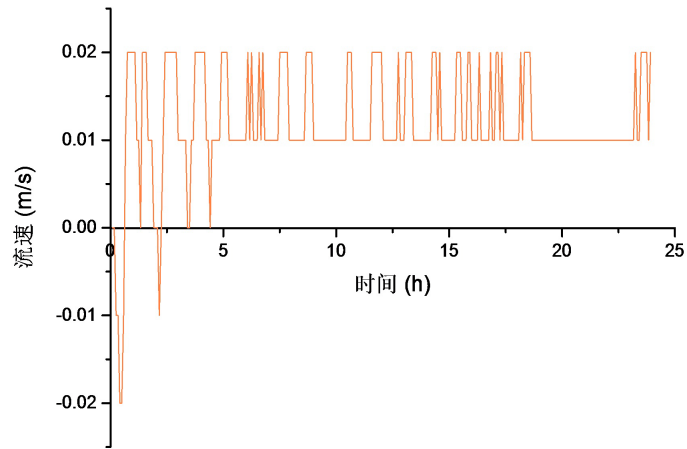


Figure 5. Velocity variation of Dongfangshu River monitoring section in dry season

图 5. 枯水期东方竖河监测断面流速变化

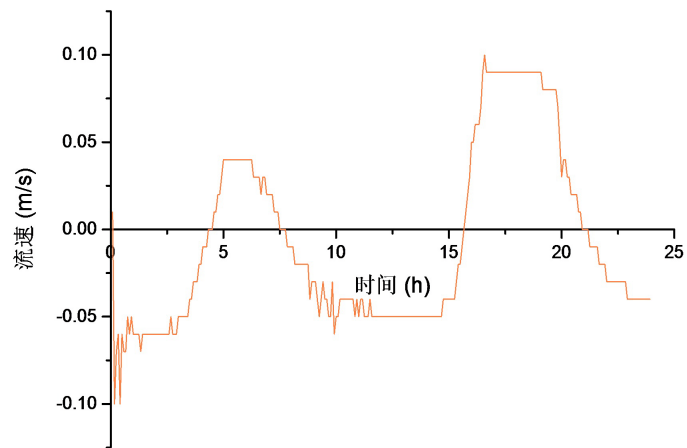


Figure 6. Velocity variation of Changhongzhi River monitoring section in dry season

图 6. 枯水期长洪支河监测断面流速变化

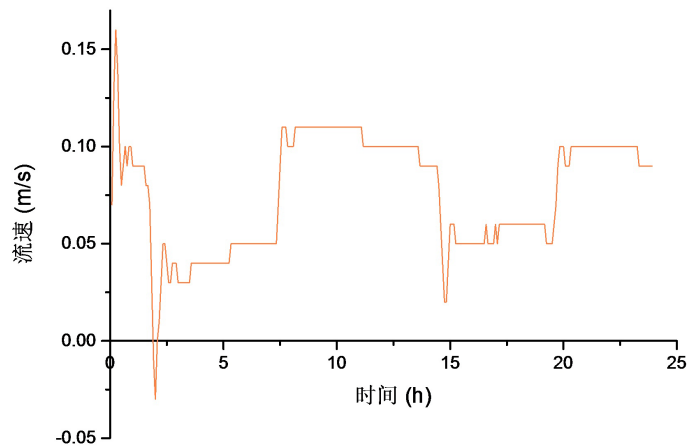


Figure 7. Velocity variation of Wangzishu River monitoring section in wet season (scheme 2)

图 7. 丰水期王子竖河监测断面流速变化(工况 2)

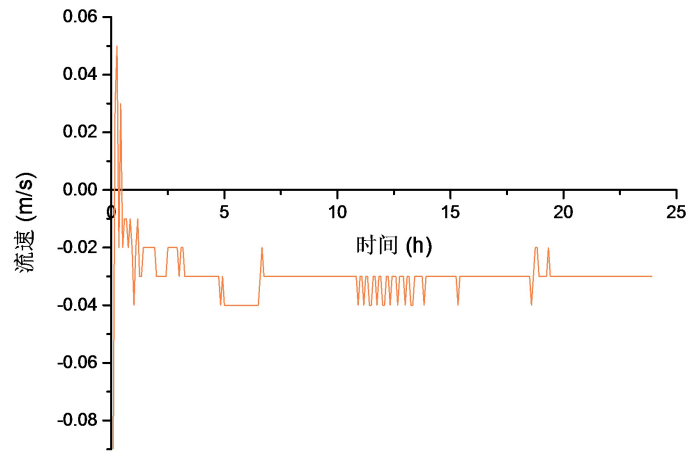


Figure 8. Velocity variation of Jingsan River monitoring section in wet season (scheme 2)

图 8. 丰水期经三河监测断面流速变化(工况 2)

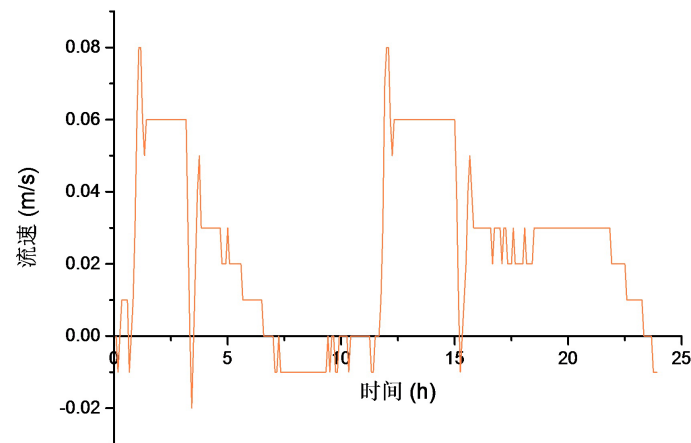


Figure 9. Velocity variation of Wangzishu River monitoring section in dry season

图 9. 枯水期王子竖河监测断面流速变化

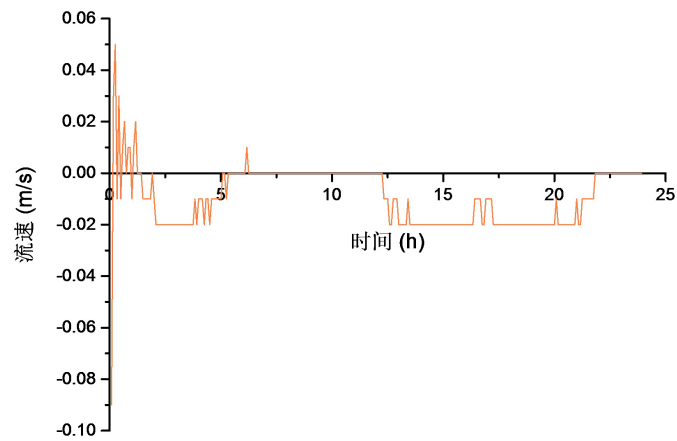


Figure 10. Velocity variation of Jingsan River monitoring section in dry season

图 10. 枯水期经三河监测断面流速变化

2) 水系连通前动力提水调度方案分析

采用动力提水方案时,裤子港片的八卦中横河监测断面向西的稳定流速可达 0.05 m/s,天星横河片与新开港片的东方竖河监测断面向南的稳定流速在 0.02 m/s 左右(图 11)。

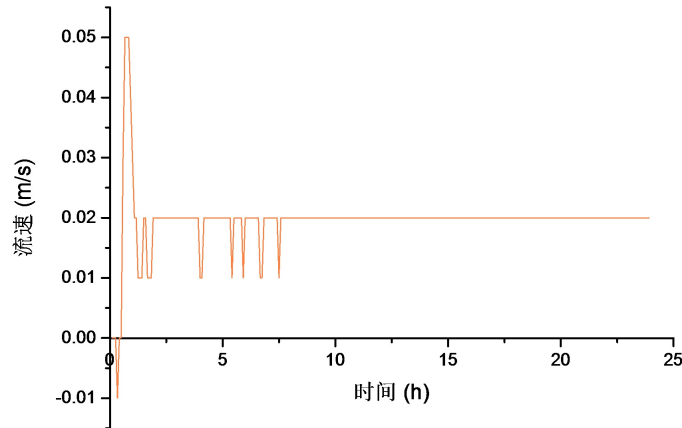


Figure 11. Velocity variation of Dongfangshu River monitoring section
图 11. 东方竖河监测断面流速变化

3.3. 水系连通后模拟工况及模型设置

结合研究区的水环境现状,对水动力比较薄弱的河道进行了连通整治,见图 1。在 3.2 节的基础上得到了最佳水环境调度方案,把这个方案应用于水系连通后的水环境模拟。选取裤子港片、天星横河片和新开港片为研究对象,对开发区水系连通整治之后的河网水环境调度效果从水质方面进行了模拟分析。

1) 水系连通后自流水调度

丰水期和枯水期的调度方案见表 6 和表 7,计算模型包括 647 条河段、568 个河道节点、7 个通江排水口和 7 个内河排水口,选择氨氮作为水环境指标,河网氨氮初始浓度设置为 10 mg/L,计算时间为 18 d,其余模型设置与水系连通前一致。

Table 6. Setting of artesian water diversion scheduling scheme in wet season
表 6. 丰水期调水引流方案

	裤子港	营船港闸	富民港出江闸	新开闸	南通农场闸	东方红出江闸	团结闸
开启条件	外河低于内河排水	外河高于内河引水	外河低于内河排水	外河低于内河排水	关闭	关闭	关闭
开启高度(m)	1	1.5	1.5	0.6	关闭	关闭	关闭

Table 7. Setting of artesian water diversion scheduling scheme in dry season
表 7. 枯水期调水引流方案

	裤子港	营船港闸	富民港出江闸	新开闸	南通农场闸	东方红出江闸	团结闸
开启条件	外河低于内河排水	关闭	外河低于内河排水	外河低于内河排水	关闭	关闭	关闭
开启高度(m)	0.3	0	1	0.3	关闭	关闭	关闭

2) 水系连通后动力提水调度

动力提水调度工况设计与水系连通前一致,见表 5。沿江闸站全部关闭,模型其余的设置与水系连通后自流水调度设置一致。

3.4. 水系连通方案分析

1) 水系连通后自流引水调度方案分析

以恢复到 IV 类水质标准氨氮浓度 1.5 mg/L 为目标，丰水期整治前东方竖河监测断面氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 5 d 5 h，整治后氨氮浓度恢复 IV 类水标准只需 2 d 15 h。整治前长洪河监测断面氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 5 d 19 h，整治后氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 4 d 6 h，稀释的时间大大缩短，见图 12 和图 13。枯水期整治前东方竖河监测断面氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 3 d 10 h，整治后氨氮浓度恢复 IV 类水标准只需 1 d 4 h。整治前长洪河监测断面氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 5 d 21 h，整治后氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 3 d 16 h，稀释的时间也大大缩短，见图 14 和图 15。

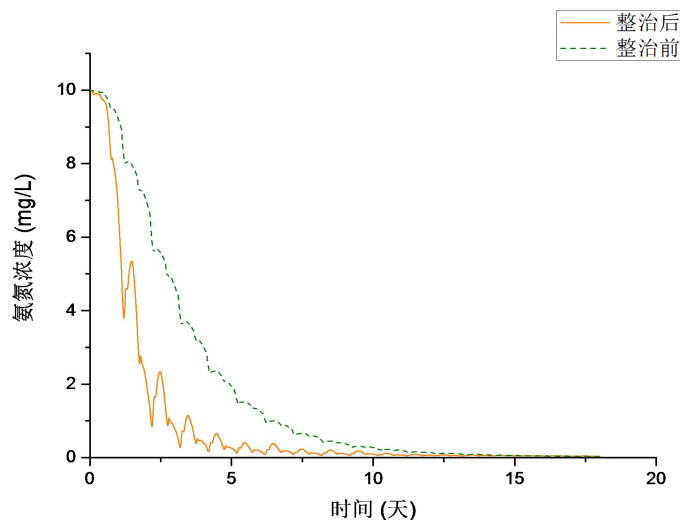


Figure 12. Variation of ammonia nitrogen concentration in Dongfangshu River monitoring section before and after water system connection in wet season

图 12. 东方竖河监测断面丰水期整治前后氨氮浓度变化

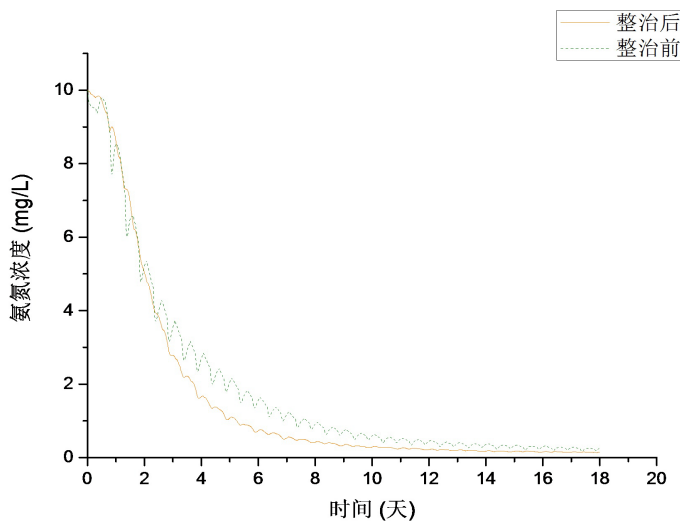


Figure 13. Variation of ammonia nitrogen concentration in Changhongzhi River monitoring section before and after water system connection in wet season

图 13. 长洪支河监测断面丰水期整治前后氨氮浓度变化

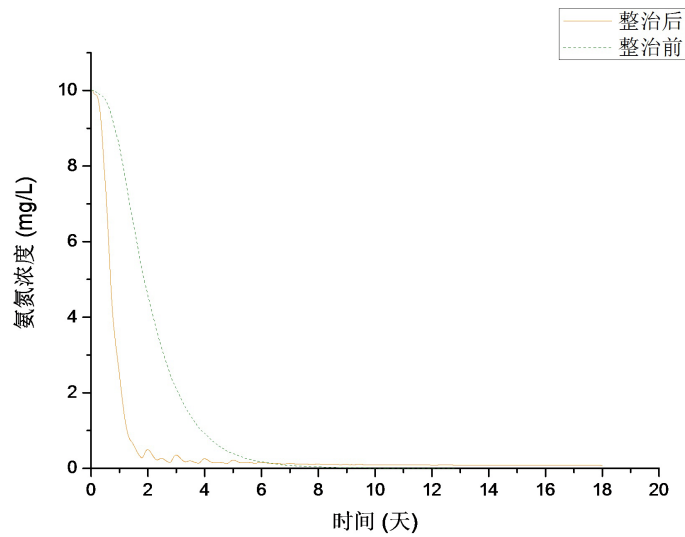


Figure 14. Variation of ammonia nitrogen concentration in Dongfangshu River monitoring section before and after water system connection in dry season

图 14. 东方竖河监测断面枯水期整治前后氨氮浓度变化

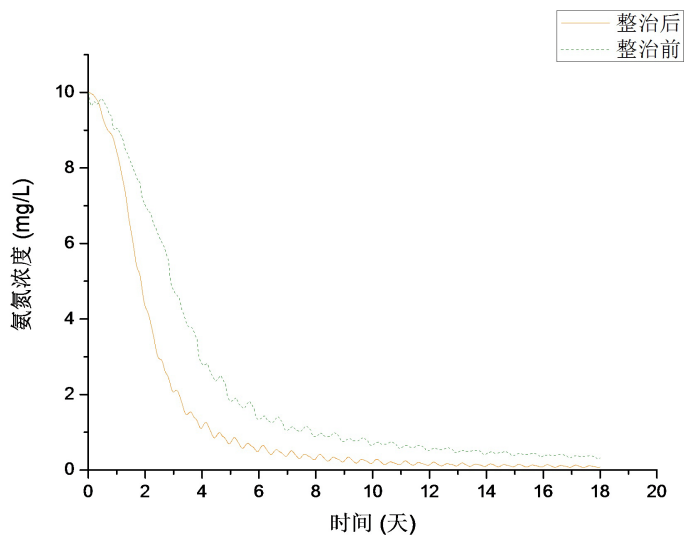


Figure 15. Variation of ammonia nitrogen concentration in Changhongzhi River monitoring section before and after water system connection in dry season

图 15. 长洪支河监测断面枯水期整治前后氨氮浓度变化

2) 水系连通后动力提水调度方案分析

整治前东方竖河监测断面氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 4 d 3 h, 整治后氨氮浓度恢复 IV 类水标准只需 3 d 3 h (图 16)。整治前长洪河监测断面氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 5 d 12 h, 整治后氨氮浓度恢复 IV 类水标准需要 3 d 15 h (图 17), 稀释的时间大大缩短。

4. 结语

利用 SWMM 软件建立了南通经济技术开发区的河网水环境调度数学模型, 对比各种调度方案对河网水动力和水质情况的改善效果, 得出以下结论:

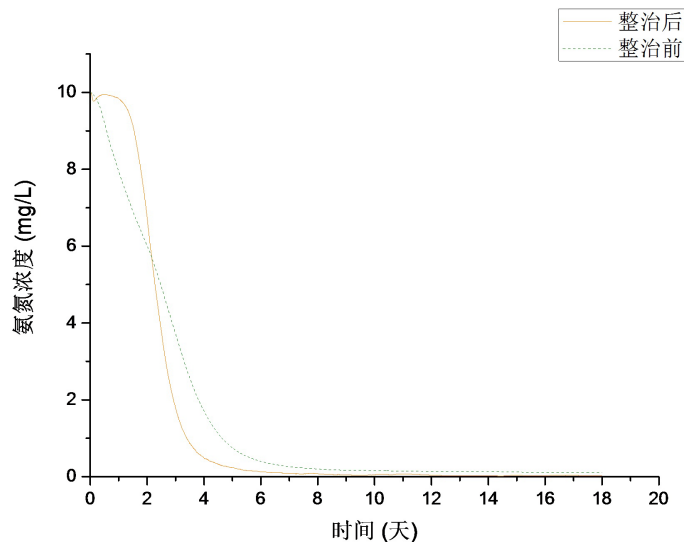


Figure 16. Variation of ammonia nitrogen concentration in Dongfangshu River monitoring section before and after water system connection

图 16. 东方竖河监测断面整治前后氨氮浓度变化

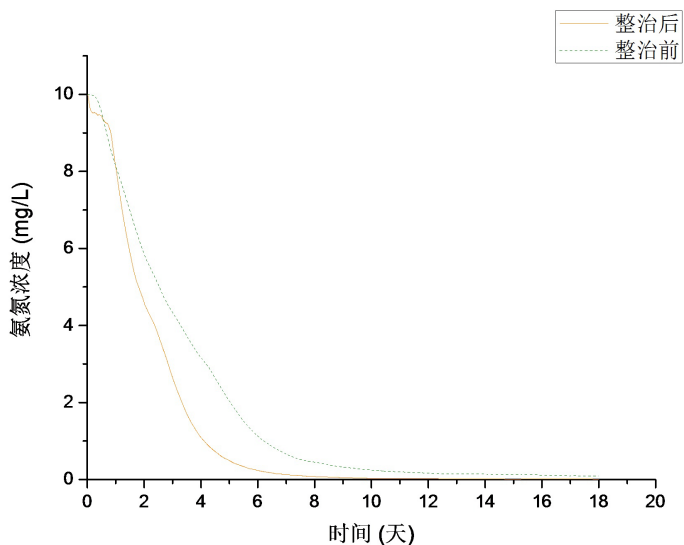


Figure 17. Variation of ammonia nitrogen concentration in Changhongzhi River monitoring section before and after water system connection

图 17. 长洪支河监测断面整治前后氨氮浓度变化

1) 采用自流引水调度方案时，最佳调度模式为：裤子港闸作为排水闸；丰水期营船港闸作为引水闸，富民港出江闸和新开闸作为排水闸，枯水期营船港闸关闭，富民港出江闸和新开闸作为排水闸；丰水期和枯水期团结闸都作为引水闸，南通农场闸和东方红出江闸均作为排水闸。

2) 采用动力提水方案时，裤子港闸泵站以 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 的速度持续向外河排水，营船港闸泵站以 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 的速度持续从长江向通启运河引水，富民港出江闸泵站和新开闸泵站以设计流量为 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 的速度持续向外河排水，能够显著改善研究区的水动力薄弱现状。

3) 针对水动力薄弱的河网进行水系连通整治之后，断面的流速加快，污染物的稀释时间也大大缩短，对于改善河网水动力和水质有明显的作用。

基金项目

国家重点研发计划(2018YFC1508104-3); 浙江省自然科学基金(LY20D010009); 南通市第五期“226 工程”科研项目; 南通市科技计划项目(MS12019056, JC2018143)。

参考文献

- [1] TURNBUL, L., WAINWRIGHT, J. and BRAZIER, R. E. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: Ecohydrological interactions across multiple-space and time scales. *Ecohydrology*, 2008, 1(1): 23-34.
<https://doi.org/10.1002/eco.4>
- [2] YANG, J., CHU, X. F. Quantification of the spatial-temporal variations in hydrologic connectivity of small-scale topographic surfaces under various rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, 2013, 505(15): 65-77.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.013>
- [3] TRIGG, M. A., MICHAELIDES, K., NEAL, J. C., *et al.* Surface water connectivity dynamics of a large scale extreme flood. *Journal of Hydrology*, 2013, 505(15): 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.035>
- [4] JENCISO, K. G., MCGIYNN, B. L. Hierarchical controls on runoff generation: Topographically driven hydrologic connectivity, geology, and vegetation. *Water Resources Research*, 2011, 47(11): W11527. <https://doi.org/10.1029/2011WR010666>
- [5] PINGRY, D. E., SHAFTEL, T. L., and BOLES, K. E. Role for decision-support systems in water-delivery design. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1990, 116(6): 629-644.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1991\)117:6\(629\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1991)117:6(629))
- [6] CAMPBELL, S. G., HANNA, R. B., FLUG, R. B., *et al.* Modeling Klamath river system operations for quantity and quality. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2001, 127(5): 284-294.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:5\(284\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:5(284))
- [7] 马超, 唐志波, 徐奎, 等. 平原地区城市河网水环境改善的补水调度策略研究——以天津市中心城区河网为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6): 81-87.
MA Chao, TANG Zhibo, XU Kui, *et al.* Study on water replenishment scheduling strategies for water quality improvement of urban river network in plain area: A case study of urban central river network in Tianjin. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(6): 81-87. (in Chinese)
- [8] 李晓, 唐洪武, 王玲玲, 等. 平原河网地区闸泵群联合调度水环境模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(5): 393-399.
LI Xiao, TANG Hongwu, WANG Lingling, *et al.* Simulation of water environment under joint operation of gates and pumps in plain river network are. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(5): 393-399. (in Chinese)
- [9] 龙华, 黄绪臣, 江浩. 通顺河水环境修复调度研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(S2): 30-34+79.
LONG Hua, HUANG Xuchen and JIANG Hao. Study on the regulation of Tongshun River environment restoration. *Yangtze River*, 2019, 50(S2): 30-34+79. (in Chinese)
- [10] 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+94.
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. *Water Resources Protection*, 2014, 30(1): 38-42+94. (in Chinese)