

汪聪, 程树辉, 郭鑫宇, 等. 面向水环境改善的水系调度方案研究——以 A 联围为例[J]. 净水技术, 2023, 42(12):147-153, 161.

WANG C, CHENG S H, GUO X Y, et al. Research on water system scheduling scheme for water environment improvement——Case of polder A[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12):147-153, 161.

## 面向水环境改善的水系调度方案研究——以 A 联围为例

汪聪\*, 程树辉, 郭鑫宇, 王少伦, 沙桐, 杨敬畏, 宋雅阁

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

**摘要** 水环境是生态环境建设的重要一环, 科学合理的水系调度是维持水环境健康发展的长效保障措施。A 联围位于我国南方沿海, 属于平原型感潮密集河网地区, 拟通过水系调度来提升区域水环境。本研究基于 MIKE 11 模型软件建立 A 联围水动力-水质耦合模型, 对现状闸门调度方案进行优化, 以达到改善水动力、提升水质的效果。模拟计算结果表明, 科学合理的水系调度可有效改善区域水环境, 在推荐方案下, 内河涌氨氮平均浓度较现状调度方案下降约 22.11%, 河涌达标率提升至 85.85%, 为实现 A 联围水质全面达标奠定了技术基础。

**关键词** 水环境改善 水系调度 平原型感潮密集河网区 水动力-水质耦合模型 MIKE 11

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)12-0147-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.12.018

## Research on Water System Scheduling Scheme for Water Environment Improvement——Case of Polder A

WANG Cong\*, CHENG Shuhui, GUO Xinyu, WANG Shaolun, SHA Tong, YANG Jingwei, SONG Yage

(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

**Abstract** Water environment is an important part of ecological environment development, scientific water system scheduling is a long-term and effective measure to maintain the healthy development of water environment. Polder A is located in the southern coastal area of our country, which is a typical plain tidal dense river networks area, plans to improve the water environment through water system scheduling. This study established the hydrodynamic-water quality coupling model based on the MIKE 11 model software, and optimized the current gate dispatching scheme to improve the hydrodynamic force and water quality. The optimal simulation results showed that scientific water system regulation could effectively improve the water environment. Under the recommended scheme, the average concentration of ammonia nitrogen was reduced by about 22.11%, the compliance rate of rivers was increased to 85.85%, and a technical foundation was laid for the realization of the water quality compliance rate of the polder A.

**Keywords** water environment improvement water system scheduling plain tidal rivers network hydrodynamic-water quality coupling model MIKE 11

随着《水污染防治行动计划》的实施, 各地日益重视水污染治理, 我国的水生态环境已得到根本性好转。但已“消黑消臭”水体“返黑返臭”现象时有发生, 尤其是在我国南方沿海地区, 地势平坦、水量丰富、水系发达, 往往还受潮汐影响。在潮汐作用下, 水体形成周期性的往复流, 水体流态异常复杂,

水体顶托十分严重。污染物在内河涌长年累积, 使水环境不断恶化<sup>[1-2]</sup>。而充足的水动力是维持水环境健康发展的长效保障<sup>[3-5]</sup>。

为改善这一现状, 通过水系调度将水体的往复流转变为单向流来增强水动力、改善水环境, 不失为一种有效措施<sup>[6-7]</sup>。水系调度一般通过运行水闸、泵站等水利设施来实现, 水利设施在保证水安全的基础上, 会进行换水来改善水环境, 但仅凭经验进行无规律、不成系统的调度, 往往难以达到预期效果。因此, 许多学者通过模型来评估水系调度对水动力、

[收稿日期] 2022-12-05

[通信作者] 汪聪(1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为市政给排水设计和研究工作, E-mail: 1092191206@qq.com.

水质的改善作用。赵也等<sup>[8]</sup>采用 MIKE 11 模型评估黑臭水体治理目标的可达性,验证了 MIKE 11 软件在水质、水动力评估方面的可行性。陈瑶雪等<sup>[9]</sup>应用 MIKE 11 水质-水动力模型,以改善水环境为目标,探索了锡山区水系调度方案。张海军等<sup>[10]</sup>利用 MIKE 11 软件构建了嘉兴市区河网的水动力-水质模型,研究了水闸联合调度对河网水质的影响,研究表明科学合理的水系调度可改善区域水环境。张海丽等<sup>[11]</sup>通过 MIKE 11 模型评估了泵站联控对潮汐河道水质、水动力的影响,为潮汐河网地区的相关研究提供了参考。

综上,通过水系调度来增强水动力、改善水质已成为保障水环境健康发展的重要措施,运用数学模型评估水系调度方案的合理性是科学有效的方法。本研究在区域实施“控源截污、内源治理”工程措施的基础上,针对整个联围 200 多条河涌、30 多个外江水闸、河网密度达  $2.5 \text{ km}/\text{km}^2$  的平原型感潮密集河网地区进行水系调度来改善水动力与水质。

## 1 研究区域概况

A 联围位于我国南方沿海地区,降雨雨型主要是锋面雨、台风雨,多年平均降雨量为  $1\ 875.3 \text{ mm}$ ,实测最大年降雨量为  $2\ 745 \text{ mm}$ ,最小年降雨量为  $999 \text{ mm}$ ,降雨主要集中在汛期,4 月—9 月的降雨量占全年降雨量约 83%。围内包括 3 个镇,总流域面积约为  $118 \text{ km}^2$ ,围内共有河涌 205 条,河涌总长约为  $290 \text{ km}$ ,河网密度达  $2.5 \text{ km}/\text{km}^2$ 。外江水闸 35 个,均为上提式防洪挡潮闸。围内地势平坦,自然地面几乎无高差,总体呈北高南低态势。整个联围被外江所包围,北面为鸡鸭水道,南面为小榄水道,东面为容桂水道,受西江潮流影响,24 h 50 min 内两涨两落。所有河涌均为潮汐河道,内河涌水流为往复流,没有固定流向,该区域属于典型的密集平原型感潮河网地区。外江水质优良,常年保持在 II ~ III 类水,A 联围具有良好的外部水质条件。

根据镇区划分以及水系调度现状,研究区域共分为 D1、D2、D3、D4 4 个分区,如图 1 所示。围内河涌总体呈南北走向,4 个分区中央均有东西走向的骨干河涌贯穿整个分区,D1、D2、D3、D4 分区中心河涌分别为中心排灌渠 1、新开涌、鸦雀尾涌、中心排灌渠 2。D1、D4 分区控制内河涌最高水位为  $1.0 \text{ m}$  (珠基,下同),D2、D3 分区控制内河涌最高水位为

$0.8 \text{ m}$ 。现状水闸的主要作用是保障水安全,同时也会利用外江潮位差进行换水,换水时水闸的调度均为“两边引两边排”,即同一水闸既是进水闸也是出水闸,涨潮时引水,落潮时排水,导致河涌均为往复流,换水效率低下。

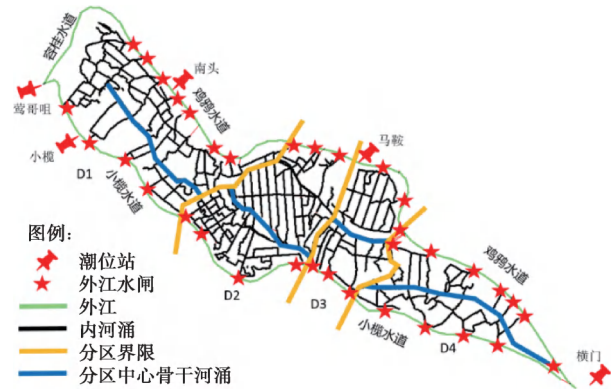


图 1 A 联围分区划分

Fig. 1 Partitioning of Polder A

## 2 研究方法

### 2.1 计算模型简介

本研究水动力-水质模型基于通用模型软件 MIKE 11 构建,水动力计算采用 HD 模块,控制方程是描述明渠一维非恒定流的圣维南方程组,并补充考虑了漫滩和旁侧入流,包括连续性方程和动量方程。水质模型基于水动力模型,采用 AD 对流-扩散模型模拟污染物在河流中的迁移、扩散和降解规律,它根据 HD 模块产生的水动力条件,应用对流-扩散方程进行计算,采用一维河流水质模型。

水动力模型的连续性方程和动量方程如式(1)~式(2)。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \quad (2)$$

其中: $Q$ ——流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$x$ ——沿水流方向空间坐标,  $\text{m}$ ;

$t$ ——时间坐标,  $\text{s}$ ;

$b$ ——蓄存宽度,  $\text{m}$ ;

$h$ ——水位,  $\text{m}$ ;

$q$ ——单宽流量,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$\alpha$ ——动量校正系数;

$A$ ——主槽过水断面面积,  $m^2$ ;

$g$ ——重力加速度,  $m/s^2$ ;

$C$ ——谢才系数,  $m^{1/2}/s$ ;

$R$ ——水力半径,  $m$ 。

一维河流水质模型基本方程如式(3)。

$$\frac{\partial C_x}{\partial t} + u \frac{\partial C_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial C_x}{\partial x} \right) - KC_x \quad (3)$$

其中:  $E_x$ ——对流扩散系数,  $m^2/s$ ;

$K$ ——线性衰减系数,  $s^{-1}$ ;

$u$ ——河流平均流速,  $m/s$ ;

$C_x$ ——污染物质量浓度,  $mg/L$ 。

其他变量含义如前文所述。

## 2.2 模型构建与边界条件设置

在进行相关资料收集的基础上,围内所有河涌在模型中共概化为 221 条河涌(段),河道断面采用 100 m 一个的实测断面。结合潮涨潮落的时间序列和水位来控制水闸的调度。污染源分为生活污染、工业污染、内源污染、径流污染、农田污染以及鱼塘排水污染,对各河涌对应的污染物总量进行测算,并概化到对应的河涌中。现状污染物解析用于模型率定,远期污染物解析用于模拟方案计算。入河排水量携污染负荷作为边界条件以沿程汇入的形式加入到模型中。

外江水道边界,上游小榄水道与东江水道交汇处,以莺歌咀实测潮位为边界;容桂水道与鸡鸦水道交汇处,以南头实测潮位为边界,下游横门水道以横门实测潮位为边界。典型潮位站潮位数据如图 2 所示(以 2016 年 8 月中旬为例)。

## 2.3 模型率定与验证

本研究采用实测数据对水动力-水质模型进行率定。先根据经验数据进行参数设置,再对比模拟结果和实测结果反复调试,使河网各站点的模拟值与实测值吻合。各参数率定结果如下,河道糙率取  $0.0330 s/m^{1/3}$ ,扩散系数取  $10.0000 m^2/s$ ,  $COD_{Cr}$  衰减系数取  $0.0720 d^{-1}$ ,氨氮衰减系数取  $0.0132 d^{-1}$ , TP 衰减系数取  $0.0288 d^{-1}$ 。

水动力率定时段选取 2016 年全年,通过全年水位过程定量分析、统计模型的计算精度,结果如表 1 所示。从结果来看,两个站点在模拟时段内的水位平均误差在 3~10 cm,确定性系数在 0.98 以上。水动力模拟表明外江水道区间的计算潮位基

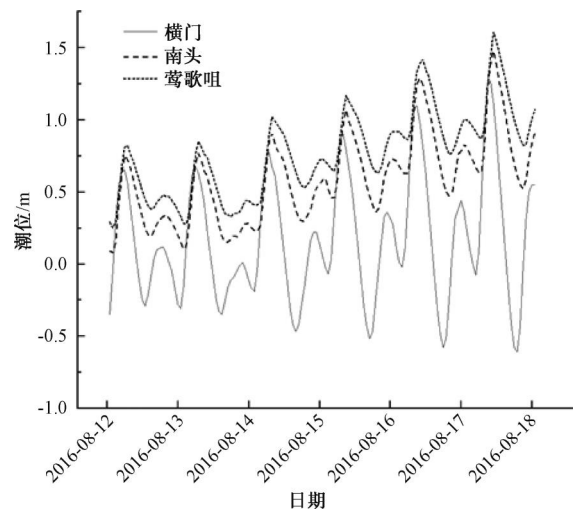


图 2 典型潮位站潮位变化

Fig. 2 Tide Level Changes of Typical Tide Monitoring Station. 本合理,能够为围内进水和出水提供可靠的边界条件。

表 1 水动力模型率定结果分析

站点	实测均值/m	模拟均值/m	绝对误差/m	确定性系数
小榄	0.84	0.87	0.03	0.99
马鞍	0.56	0.46	-0.1	0.98

在水动力模型率定的基础上,依据现状污染负荷测算对内河涌的水质浓度进行率定,模型计算时段为 2019 年全年,按季度对计算结果和实测结果对比分析,如表 2 所示。表中目标值为地方环保部门提供的分季度实测水质数据,取样位置为每条河涌的上、中、下游 3 个点位,取样时间为 3、5、8 月和 11 月,3 个点位的水质平均值对应代表此河涌该季度的平均水质。模拟值为每条河涌上、中、下游 3 个断面在对应时间上的模型计算平均水质浓度。 $COD_{Cr}$  误差最大出现在第四季度,相对误差为 12.50%;氨氮误差最大出现在第一季度,相对误差为 16.33%;TP 误差最大出现在第一季度,相对误差为 17.65%。分析结果认为模拟值与实测值较接近,水质模型能较准确地反映河涌水质情况。通过对水动力-水质模型率定结果分析,构建的水质-水动力模型可运用于研究该区域的水动力、水质变化情况。

## 2.4 水系调度方案及计算工况设置

根据 A 联围的地形及水系特点,按照水系形成单向流、水体置换效率高、水质改善的基本思路进行水系调度。水系调度时控制 D1、D4 分区最高水

表 2 水质模型率定结果分析

Tab. 2 Analysis of Calibration Results for Water Quality Model

水质指标	平均值	第一季度	第二季度	第三季度	第四季度
COD <sub>Cr</sub>	目标值/(mg·L <sup>-1</sup> )	28.00	26.00	29.00	24.00
	模拟值/(mg·L <sup>-1</sup> )	30.50	27.38	27.10	27.00
	相对误差	8.93%	5.31%	6.55%	12.50%
氨氮	目标值/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.00	3.40	2.80	3.30
	模拟值/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.49	3.00	2.76	2.90
	相对误差	16.33%	11.76%	1.43%	12.12%
TP	目标值/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.51	0.46	0.43	0.52
	模拟值/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.60	0.52	0.46	0.48
	相对误差	17.65%	13.04%	6.98%	7.69%

位为 1.0 m, D2、D3 分区最高水位为 0.8 m, 最低水位均控制在 0。通过引水闸与排水闸的错开调度, 使河涌形成单向流; 通过各分区进水闸、排水闸位置的选取使内河涌水体在最短时间内被置换。联围整体地势北高南低, 北侧闸门不宜作为排水闸, 总体调度方案考虑“北引南排”或“两边引中间排”, 通过各分区方案组合来探索最优的水闸调度方案。调度方案设置如表 3 所示。

表 3 水系调度方案

Tab. 3 Dispatching Plans of Water System

分区	方案 0 (现状方案)	方案 1	方案 2	方案 3
D1	两边引两边排	北引南排	两边引中间排	北引南排
D2	两边引两边排	北引南排	两边引中间排	两边引中间排
D3	两边引两边排	北引南排	两边引中间排	两边引中间排
D4	两边引两边排	北引南排	两边引中间排	北引南排

注:“两边引两边排”即该分区闸门既作为引水闸又作为排水闸;“北引南排”即北侧闸门作为引水闸, 南侧闸门作为排水闸;“两边引中间排”即南、北两侧闸门均作为引水闸, 从分区中间的骨干河涌排出。

计算工况分为示踪器工况和水质分析工况, 两种工况的计算时间均为典型旱季 12 月。两种计算工况下水动力模型参数完全一致, 计算结果均可用于水动力分析。示踪器工况下将内河涌水质概化为 1, 外江水质概化为 0, 零时刻如图 3 所示, 用于分析不同水系调度方案下的内河涌换水效率和甄别整体水动力较差区域。水质分析工况采用远期污染物测算数据, 并赋予“控源截污、内源治理”工程对污染物削减率(截污率为 75%、内源治理控制率为 60%), 用于分析不同水系调度方案下的内河涌水质

改善情况。每个分区流速分析断面选取东西走向的骨干河涌及一条南北走向贯通河涌的中心位置进行断面数据展示, 其中, D2、D3 区无南北直接贯通的河涌, 在分区中心河涌南北两侧各选取一条河涌。如图 3 所示, 共 10 个点位。

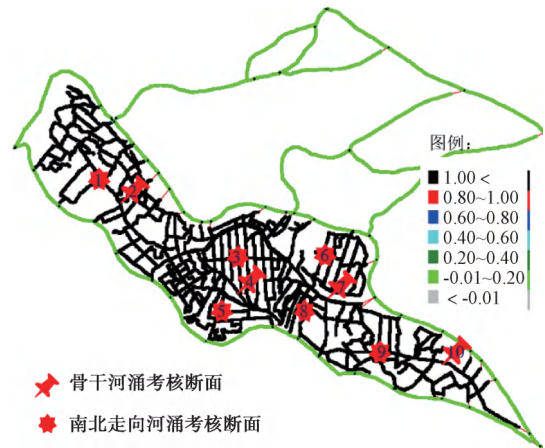


图 3 示踪器工况零时刻及分析断面

Fig. 3 Zero Time and Analysis Section

of the Tracer Working Condition

### 3 结果与讨论

根据表 3 设置的水系调度方案在示踪器工况下的模拟计算结果, 得出各工况下的换水效率和整体水动力较差的区域。如图 4 所示, 两个潮周期后, 除断头河涌外, 大部分河涌的水体已得到不同程度的置换。方案 0 的调度规则下, 内河涌南北两侧靠近外江水闸的部分已基本已换水完成, 离水闸较远的分区中心河道换水较差。方案 1 的调度规则下, 靠近北侧的内河涌水体已基本已得到置换, 但是南侧河涌换水较差。方案 2 的调度规则下, 各分区的换水效

率均不高。方案3的调度规则下,D1、D4分区情况与方案1类似,北侧区域换水情况较好,南侧较差,D2、D3换水效率均不高。

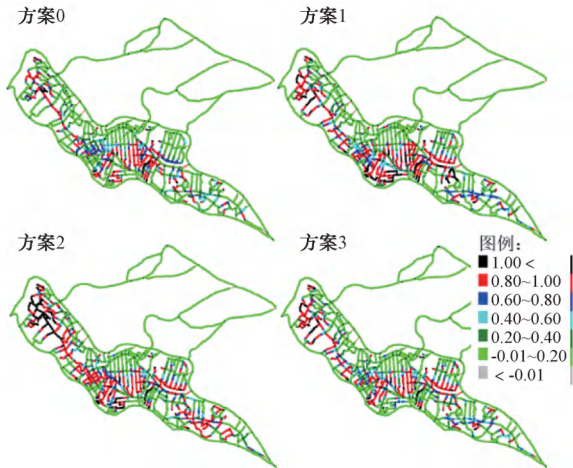


图4 2个潮周期换水情况空间分布

Fig. 4 Spatial Distribution of Water Exchange during Two Tidal Cycles

4个潮周期后换水继续进行,内河涌水体置换率进一步提升,但总体空间分布与两个潮周期时类似。对比分析4个潮周期和6个潮周期,如图5、图6所示,在6个潮周期时,D3、D4分区水体置换基本完成;D1分区在方案0和方案2调度方案下的换水率较差,尤其是方案2;D2分区新开涌以北区域在方案1调度下,换水效率不及其余3个方案;D2分区新开涌以南区域在4个调度方案下换水效果均不佳,甚至部分非断头河段水体完全未被置换。如图

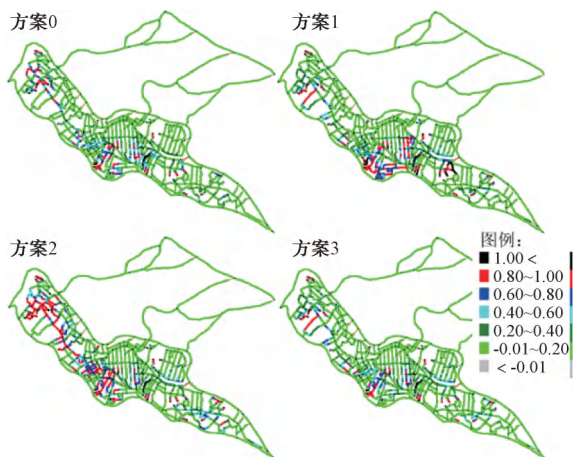


图5 4个潮周期换水情况空间分布

Fig. 5 Spatial Distribution of Water Exchange during Four Tidal Cycles

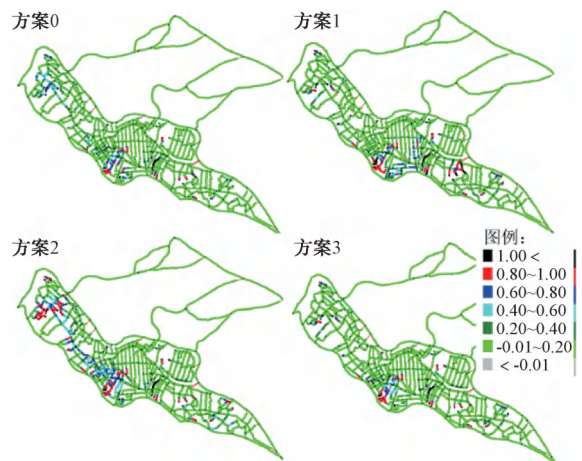


图6 6个潮周期换水情况空间分布

Fig. 6 Spatial Distribution of Water Exchange during Six Tidal Cycles

7所示,8个潮周期时,方案3水体基本已置换完成,换水速度上,方案3要优于其余3个方案。根据模拟计算结果100 m一个断面的水质数据计算围内河涌的平均水体置换率,相较于现状调度方案,方案1、3的平均水体置换率均有提升,其中方案3的提升率最高,对比方案0,内河涌水质平均值从0.129下降至0.106,下降约17.83%,水体置换率从87.10%提升至89.40%。但在方案3下,D2区域南侧靠近外江的部分河段水体置换率仍较低。分析认为,在D2区南侧仅有2个水闸与外江相连,水闸分布密度远低于其他分区,内河涌水体与外江水体置换困难。应在外江闸口增强引水,同时在内河涌采取节制措施,增大水体置换率低河涌流量。

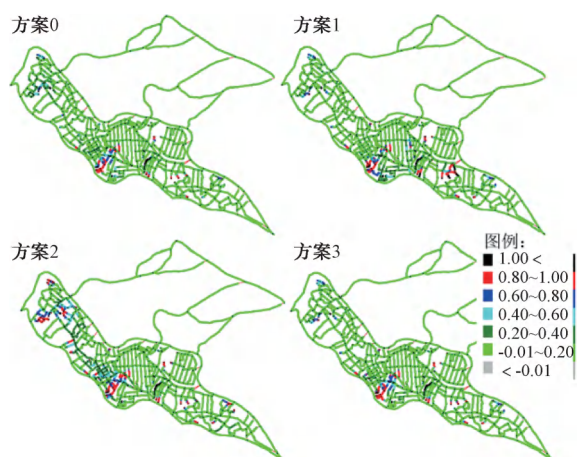


图7 8个潮周期换水情况空间分布

Fig. 7 Spatial Distribution of Water Exchange during Eight Tidal Cycles

根据表 3 设置的水系调度方案模拟计算结果,得出各工况下分析断面月平均流速,如表 4 所示。在方案 0 的调度规则下,考核断面月平均流速仅为 0.028 m/s,平均流速流向与月平均流速流向相同的时间占比为 55%,即 45%的时间下河涌的流向与平均流速的流向是相反的,这也就导致了河涌的平均流速较低,河涌水体置换率低。相较于方案 0,方案

1、2、3 的河涌流速与流向时间占比均大大提升,在“北引南排”或“两边进中间排”的调度下,河涌流向与平均流向的时间占比均达到 80%左右,河涌基本形成单向流的状态。从流向时间占比看,方案 1 的单向流状态最好,相较于方案 0 提升了 27.87%;从平均流速看,方案 3 的流速最快,相较于方案 0 提升了 146.43%。

表 4 分析断面月平均流速统计

Tab. 4 Statistics of Monthly Average Velocity for Section Analysis

分区	断面	方案 0		方案 1		方案 2v		方案 3	
		平均流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	占比	平均流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	占比	平均流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	占比	平均流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	占比
D1	1	0.005	48.10%	0.072	85.37%	0.021	91.82%	0.073	85.51%
	2	0.005	51.36%	0.002	60.98%	0.017	73.46%	0.003	57.96%
D2	3	0.010	38.02%	0.009	54.58%	0.015	60.46%	0.015	59.40%
	4	0.042	58.54%	0.102	90.10%	0.111	75.18%	0.107	72.17%
	5	0.018	54.85%	0.081	99.28%	0.042	83.64%	0.039	76.90%
D3	6	0.069	64.22%	0.109	96.27%	0.104	87.09%	0.106	87.94%
	7	0.002	41.89%	0.030	82.07%	0.053	84.22%	0.051	83.36%
	8	0.061	51.59%	0.081	100.00%	0.154	100.00%	0.205	100.00%
D4	9	0.042	85.37%	0.054	94.40%	0.020	59.54%	0.057	97.27%
	10	0.023	65.28%	0.034	74.89%	0.048	78.19%	0.031	71.88%

注:表中“占比”为流向与月平均流速流向相同的时间占比。

根据表 3 设置的水系调度方案在水质分析工况下的模拟计算结果,以氨氮作为代表指标,分析水系调度对水质的影响,氨氮月平均浓度云图如图 8 所示。图 8 中黑色为氨氮质量浓度大于 8 mg/L 的河涌(段),为黑臭水体,洋红色是氨氮质量浓度为 2~8 mg/L 的河涌(段),为劣 V 类水体。整体来看,各方案下的水质平均浓度云图与示踪器工况下河涌换水效率时空分布相吻合,D3、D4 分区水质情况较好,黑臭、劣 V 类河涌(段)主要集中在 D1、D2 分区。方案 0、2 下的水质明显不及方案 1、3,主要体现在 D1 分区;方案 1、3 下的 D1、D3、D4 结果类似,差异主要体现在 D2 分区新开涌以北,从分布云图来看,方案 3 下的水质要优于方案 1。

根据模拟计算结果 100 m 一个断面的水质数据计算每条河涌的平均氨氮浓度,统计结果如表 5 所示。从围内平均氨氮浓度和达标河涌的比例来看,方案 0、2 的结果较为类似,均不及方案 1、3。从 V 类水的达标率和平均氨氮浓度来看,方案 3 下的水系调度对水质的改善作用最为明显,相较于方案 0,

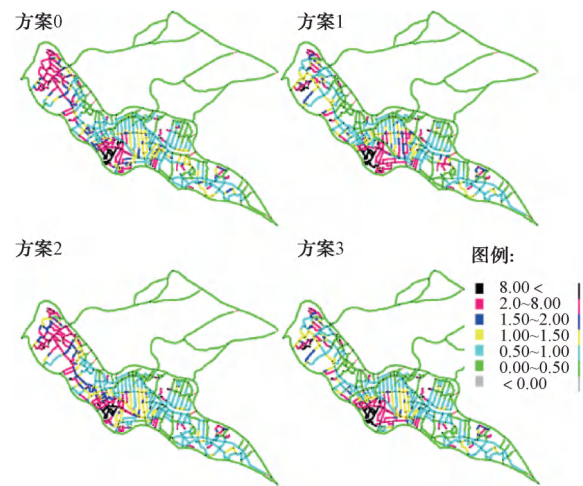


图 8 水质分析工况氨氮月平均浓度云图

Fig. 8 Cloud Map of Monthly Average Concentration of Ammonia Nitrogen

河涌达标比例从 73.66% 提高至 85.85%,围内氨氮平均质量浓度从 1.99 mg/L 降低至 1.55 mg/L,下降幅度达 22.11%。

值得注意的是,虽然在方案 3 下河涌整体达标

率以及围内河涌的平均氨氮浓度要明显优于其他方案,但黑臭河涌(氨氮质量浓度>8 mg/L)的占比要高于其余方案。与河涌水体置换率结果类似,黑臭河涌主要集中在 D2 分区的南侧,分析认为一方面原因是该区域河涌整体水动力较差,从南侧外江引水的条件下,整体引水量较少,而北侧河涌

从外江引水量大,在中间主干河涌形成顶托,污染物扩散效果差。另一方面是因为该区域养殖企业较多,污染物排放明显高于其他区域。根据水体置换率以及污染物浓度模拟结果,应增强该区域的整体引水,同时提高区域的截污比例,减少污染物的入河量。

表 5 内河涌氨氮浓度统计

Tab. 5 Statistics of Ammonia Nitrogen Concentration

方案	围内平均氨氮质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	河涌占比 (氨氮质量浓度<2.0 mg/L)	河涌占比 (氨氮质量浓度为 2.0~8.0 mg/L)	河涌占比 (氨氮质量浓度>8 mg/L)
0	1.99	73.66%	24.88%	1.46%
1	1.64	84.88%	12.68%	2.44%
2	1.91	74.63%	23.90%	1.47%
3	1.55	85.85%	11.22%	2.93%

#### 4 结论

(1)应用 MIKE 11 模型软件构建了 A 联围水动力-水质模型,水位率定结果确定性系数在 0.98 以上,水质率定结果最大误差为 17.65%,模型精确度较高,可为 A 联围水系调度方案研究提供支撑。

(2)推荐方案 3 作为 A 联围水系调度方案,相较于现状调度方案,内河涌换水效率有一定提升;水体流向可基本实现单向流,分析断面平均流速提高至 0.069 m/s,较现状调度方案提升约 146.43%;围内河涌氨氮平均质量浓度从 1.99 mg/L 降至 1.55 mg/L,较现状调度方案下降约 22.11%,河涌达标率提升至 85.85%。

(3)本文主要针对水系调度进行研究,但仅通过水系调度并不能实现围内所有河涌水质达标,需进一步分析研究断头河水系连通、水动力较差的区域增强引水、部分区域加大截污比例,以减少污染物入河量等措施对区域水环境的改善作用,以实现联围内河涌水质全面达标。

#### 参考文献

[ 1 ] 何雄,方铭锋,陈新河,等.江新联围水系联合调度的回顾与优化探索[J].黑龙江水利科技,2019,47(7):101-104.  
HE X, FANG M F, CHEN X H, et al. Review and optimal discussion on combined dispatching of Jiangxin water system[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2019, 47(7): 101-104.

[ 2 ] 蒋雪莲.基于 MIKE 11 模型的感潮河网水环境治理研究与应用[J].广东水利水电,2021(7):54-57.  
JIANG X L. Research and application of water environment

management of tide-sensing river network based on MIKE 11 model[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021 (7): 54-57.

[ 3 ] 孟庆魁,胡耀华,廖卫红,等.面向水环境治理的晋安河流域“水多水动”调度方案研究[J].中国农村水利水电,2021(7):87-93.  
MENG Q K, HU Y H, LIAO W H, et al. Research on the multi-hydraulic dispatching scheme of Jinan River Basin based on water environment treatment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7): 87-93.

[ 4 ] 郑义团,肖合顺,陈东鹏,等.基于 MIKE 11 的内河水动力调控方案研究[J].市政技术,2021,39(7):121-126.  
ZHENG Y T, XIAO H S, CHEN D P, et al. Research on hydrodynamic regulation scheme of inland rivers based on MIKE 11[J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(7):121-126.

[ 5 ] 熊鸿斌,陈雪.基于 MIKE 11 的污染河流水质改善最佳方案研究[J].中国给水排水,2019,35(3):61-65.  
XIONG H B, CHEN X. Exploration of the optimal scheme for improving water quality of a polluted river based on MIKE 11 [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(3): 61-65.

[ 6 ] 梁志宏,金腊华,徐峰俊,等.网河水系水闸群联合水质调度方法与数值分析[J].环境科学与技术,2005(28):23-24.  
LIANG Z H, JIN L H, XU J F, et al. Numerical analysis and integrated dispatching of water quality of water gates on network river[J]. Environmental Science & Technology, 2005(28): 23-24.

[ 7 ] 徐贵泉,陈长太,唐迎洲.上海市分片水资源调度方案优化[J].水资源保护,2013,29(6):80-84.  
XU G Q, CHEN C T, TANG Y Z. Scheme optimization of water resources regionalization scheduling in Shanghai City[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(6): 80-84.

(下转第 161 页)

TN 质量浓度  $\leq 10$  mg/L。

(3)RPIR 高效脱氮优势明显,在冬季不外加碳源情况下,仍然能保证 TN 质量浓度最高不超过 9.89 mg/L。

(4)AA/RPIR 具有良好的生物除磷效果,生化除磷占 75.0%~90.2%,剩余部分基本由磁混凝加药脱除直至达标排放。

### 参考文献

[ 1 ] 林佩斌,李小江,李辉,等.快速污水处理技术(RPIR)用于深圳水环境治理[J].中国给水排水,2020,36(12):117-120,137.  
LIN P B, LI X J, LI H, et al. Application of rapid wastewater treatment technology(RPIR) in water environment improvement in Shenzhen[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 117-120, 137.

[ 2 ] 韩小波,姚立三,范翊,等.RPIR 技术及反吊膜封闭除臭用于水质净化厂提标改造[J].给水排水,2022,48(s1):202-205.  
HAN X B, YAO L S, FAN Y, et al. The utilize of RPIR technology and anti-hanging membrane sealing and deodorizing for upgrading a water purification plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 202-205.

[ 3 ] LÜ M, ZHANG Z H, ZENG J Y, et al. Roles of magnetic particles in magnetic seeding coagulation-flocculation process for surface water treatment [ J ]. Separation and Purification Technology, 2019, 212: 337-343. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.11.011.

[ 4 ] LI Z W, CHEN H, ZHANG J J, et al. Combined application analysis of MBBR and magnetic coagulation process in a full-scale project[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 49:

102955. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102955.

[ 5 ] 高翔,于水利.某污水厂用地紧张情况下“RPIR+磁混凝澄清池”的应用[J].环境生态学,2021,3(9):70-78.  
GAO X, YU S L. Application of “RPIR+magnetic coagulation clarifier” in a wastewater treatment plant under land shortage [J]. Environmental Ecology, 2021, 3(9): 70-78.

[ 6 ] 吴明明,熊珍,徐海飞,等.A/RPIR+磁混凝工艺调试及能耗分析[J].净水技术,2021,40(6):158-162.  
WU M M, XIONG Z, XU H F, et al. Process commissioning and energy consumption analysis of A/RPIR + magnetic coagulation [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 158-162.

[ 7 ] 彭冠平,邹静,石稳民,等.A/RPIR+磁混凝沉淀用于临时分散式污水处理工程[J].中国给水排水,2022,38(6):93-98.  
PENG G P, ZOU J, SHI W M, et al. Application of A/RPIR and magnetic coagulation sedimentation in a temporary decentralized sewage treatment project [ J ]. China Water & Wastewater, 2022, 38(6): 93-98.

[ 8 ] 彭东升,许洋,李方源,等.RPIR+磁混凝工艺在污水处理厂提标改造中的应用[J].净水技术,2023,42(3):158-163.  
PENG D S, XU Y, LI F Y, et al. Application of RPIR + magnetic coagulation process in upgrading and reconstruction of WWTP [ J ]. Water Purification Technology, 2023, 42 ( 3 ): 158-163.

[ 9 ] 黄志伟,石雷,隋军,等.3AMBR 工艺处理城市污水节能降耗的中试实验[J].环境工程学报,2017,11(5):2692-2698.  
HUANG Z W, SHI L, SUI J, et al. Pilot test of 3AMBR in municipal sewage treatment based on energy consumption and energy saving [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017, 11(5): 2692-2698.

(上接第 153 页)

[ 8 ] 赵也,汤钟,曾胜.基于模型评估的黑臭水体综合治理方案目标可达性分析[J].中国给水排水,2020,36(13):73-82.  
ZHAO Y, TANG Z, ZENG S. Objective reachability analysis of comprehensive treatment scheme of black and odorous water body based on model evaluation [ J ]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 73-82.

[ 9 ] 陈瑶雪,曾磊,石永杰,等.水系调度对锡山区水环境改善效果分析[J].水电能源科学,2021,39(1):59-62.  
CHEN Y X, ZENG L, SHI Y J, et al. Effect analysis of water transfer on water environment improvement in Xishan Region [ J ]. Water Resources and Power, 2021, 39(1): 59-62.

[ 10 ] 张海军,马永法,叶萍,等.基于数值模拟的嘉兴市区河道水质优化调度方案[J].净水技术,2020,39(5):64-68.  
ZHANG H J, MA Y F, YE P, et al. Optimal regulation of river water quality based on numerical modeling in Jiaying City [ J ]. Water Purification Technology, 2020, 39(5): 64-68.

[ 11 ] 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 H L, HE X C, DENG J Q. Regulation of hydrodynamics and water quality in tidal river network based on gate-pump joint operation [ J ]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 36-41.