

# 宁波市内河河网再生水补给的水动力分析

范梦歌<sup>1</sup>,刘甲春<sup>1</sup>,毛立娟<sup>2</sup>,范鹏举<sup>2</sup>

(1. 宁波大学土木工程与地理环境学院,浙江 宁波 315211; 2. 宁波市镇海规划勘测设计研究院,浙江 宁波 315202)

**摘要:**针对宁波市内河水流缓慢、需通过再生水补给和泵闸调度来改善流动性能的问题,基于实测地形数据,构建了宁波市某区域内河河网的二维水动力模型,对不同工程措施及不同泵站联合运行工况进行了模拟分析。结果表明:过多管涵和闸板以及水源不足限制了河道水体交换和整体流动,单纯增加再生水补给量无法有效改善水体流动性;增设1号泵站并对关键河段进行物理改造可显著提高原本静止河段的流速,提升整个水系的流动性,但需关注对不同水质河段的环境和水质的潜在影响;提升泵站排水能力显著提高了河段流速和水位,但缩短了高流速的持续时间;同时开启多个泵站并增加补水量,在大量再生水补给条件下,可显著提高整个河网的流速,尤其在高水位条件下,尽管流速相对较低,补水量的增加仍能有效提升水体流动性。

**关键词:**再生水;平原河网;水动力分析;闸泵调度;宁波市

中图分类号:TV131.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)01-0087-07

**Hydrodynamic analysis of reclaimed water replenishment in Ningbo inland river network//FAN Mengge<sup>1</sup>, LIU Jiachun<sup>1</sup>, MAO Lijuan<sup>2</sup>, FAN Pengju<sup>2</sup>(1. School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Zhenhai Urban Planning and Survey Research Institute of Ningbo, Ningbo 315202, China)**

**Abstract:** Aiming at the issue of slow water flow in the inland rivers of Ningbo City, which requires the improvement of hydrodynamic performance through the reclaimed water replenishment and pump gate operation scheduling, a two-dimensional hydrodynamic model of an inland river network in a certain area of Ningbo City was constructed based on measured topographic data. The model was used to simulate and analyze different engineering measures and combined operation conditions of various pump stations. The results show that excessive culverts and sluice gates, as well as insufficient water sources, limit the water exchange and overall flow in the river channels. Increasing the replenishment amount of reclaimed water cannot effectively improve the water mobility. Adding Pump Station No. 1 and physically modifying key river sections can significantly increase the water flow velocity in originally stagnant river sections and improve the mobility of the entire water system, but attention should be paid to potential environmental and water quality impacts on river sections with different water qualities. Increasing the drainage capacity of pump stations significantly increases the river flow velocity and water level, but shortens the duration of high flow velocities. Simultaneously operating multiple pump stations and increasing water supplementation can significantly increase the water velocity of the entire river network. Especially under high water level conditions, although the flow velocities are relatively low, increasing the amount of supplemental water can still effectively improve the water mobility.

**Key words:** reclaimed water; plain river network; hydrodynamic analysis; gate and pump scheduling; Ningbo City

平原河网地区因地势平坦、水网密集且人口与产业高度集中,面临着水质恶化和污染负荷增加的严峻挑战,这已成为制约城市可持续发展的主要问题<sup>[1]</sup>。在这些区域,水体流动性不仅是评价水动力条件的关键指标<sup>[2-3]</sup>,还直接关系着水环境的整体质量<sup>[4]</sup>。提升水体流动性能有效加速水体中污染物

的稀释与混合,缩短水体的滞留时间,从而显著改善水环境质量。

为应对这一挑战,调水引流作为一种快速且经济可行的技术手段,已被广泛认可<sup>[5]</sup>。国内外水动力研究主要采用数学模型和数理统计方法,如环境流体动力学模型(EFDC)<sup>[6]</sup>和MIKE系列模型<sup>[7]</sup>

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2020C03082);宁波市重点研发计划项目(2023Z216)

作者简介:范梦歌(1990—),女,助理实验师,硕士,主要从事城市水文与水环境研究。E-mail:fanmengge@nbu.edu.cn

通信作者:刘甲春(1991—),男,讲师,博士,主要从事城市水力学研究。E-mail:liujiachun@nbu.edu.cn

等,这些模型在区域河网优化和补水调度研究中得到了广泛的应用<sup>[8-13]</sup>,为水系连通性及生态补水提供了科学依据。

再生水是指通过一定的技术处理,使城市污水达到一定水质标准后重新利用的水。再生水的利用是现代城市水资源管理中的一个重要组成部分,有助于提高水资源的利用效率,减少对自然水体的依赖,同时减轻环境污染<sup>[14-15]</sup>。再生水作为内河水体的生态补水源,不仅是污水资源化的重要手段,也是提升水环境质量的有效途径。再生水的补给能显著提高内河的流速并强化其自净能力,从而有效改善水质<sup>[16-17]</sup>。

本文通过实测地形数据构建宁波市某区域二维水动力模型,结合实测再生水流量及闸门参数进行模拟分析,明确合理的再生水补给及泵闸调度方案,以为水环境治理提供有效的技术支持。

## 1 研究区概况

研究区位于宁波市某街道,地势西低东高,区域内多年平均降水量约为 1 500 mm。河网和水利工程结构呈现出独特的区域性和复杂性。西侧低洼地区集中了大部分的降水,导致内河水网水量增多。为了有效管理水位和水质,区域内配备了多个翻水泵站、箱涵、管涵、溢流板和闸门,形成了一套完善的水流调控系统。该区域通过设置泵站和闸门调节流速和水量,旨在优化水质和控制水量,防止污染物回流,保持水体的景观。此外,通过日常的水动力调控措施,如再生水的补给和分流处理,进一步提升了水系统的效能。

如图 1 所示,为便于水动力分析,将河网细分为 12 个区段( $R_1 \sim R_{12}$ )。现有设施包括 3 个泵站( $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$ )、2 个闸门( $S_1$  和  $S_2$ )、2 个溢流板( $W_1$  和  $W_2$ )以及多个箱涵/管涵。再生水在 A 点补充,水流

通过溢流板  $W_1$  时分为两条路径,一条沿  $R_3$  方向,另一条继续沿  $R_8$  向下游流动,最终在 B 点汇合并通过泵站  $P_3$  排入江中。 $R_2$  河段的河床高于  $R_4$  和  $R_5$  公园水系,为维持公园水系的水位和水质,特设溢流板  $W_1$ ;而为了避免  $R_6$  的水体回流至  $R_4$  和  $R_5$ ,设置了闸门  $S_1$ 。当前,污水处理厂每天输送约 6 000 t 再生水至内河河网,经  $W_1$  分流后在 B 点汇流,但补水效果仍待提升。河道与水工结构的合理配置,可以实现对特定水文与地形条件的精细管理及精准调控。

## 2 研究方法

### 2.1 水动力模型

本文构建了内河河道的二维水动力模型,能够模拟各种作用力引起的水位和流速变化,同时模拟任何忽略分层的二维表面流。在水平尺度远大于垂直尺度的情况下,由于水深、流速等水力参数在垂直方向的变化相对于水平方向变化较小,因此对三维流动的控制方程进行水深积分,并取水深平均,从而得到沿水深平均的二维浅水流动的质量和动量守恒控制方程组,其连续性方程以及  $x$  和  $y$  方向动量方程可分别表示为

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} - \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right] - fq - f_w |w| w_x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} - \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy}) \right] - fq - f_w |w| w_y = 0 \quad (3)$$

式中: $\zeta$ 、 $h$  分别为水位和静水水深; $H$  为总水深, $H =$

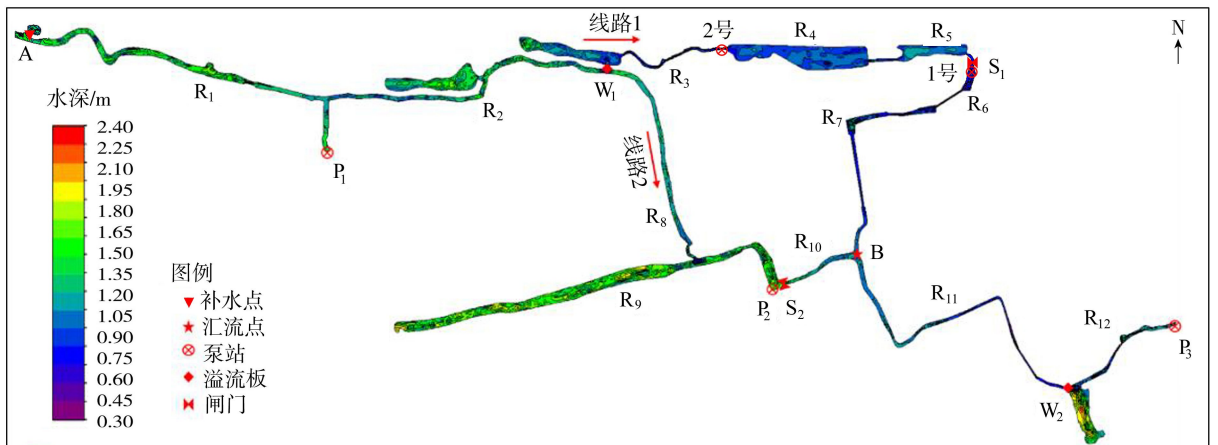


图 1 研究区河网水系及特征点位置示意图

$h + \zeta$ ;  $p, q$  分别为  $x, y$  方向上的流通通量;  $C$  为谢才系数;  $g$  为重力加速度;  $f$  为科氏力系数;  $\rho$  为水的密度;  $w, w_x, w_y$  为风速及在  $x, y$  方向上的分量;  $f_w$  为风阻力系数;  $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  为有效剪切力分量。

## 2.2 模型验证

基于河道二维水动力模型,结合区域的水文、地形特征等边界条件情况,对研究区的河网水动力现状进行了模拟。模拟初始河道水位为 1.350m,河床糙率选为 0.03,再生水补给流量为 6000 m<sup>3</sup>/d,24h 持续均衡补给,泵站 P<sub>2</sub> 持续排水。为验证模型的准确性,选取 A、B、W<sub>1</sub>、R<sub>3</sub>、R<sub>6</sub>、R<sub>9</sub> 和 R<sub>11</sub> 点位的流速和水位进行对比。河道水动力的数值模拟结果及多个点位的现场实测数据如表 1 和图 2 所示。可以看出,内河河网的流速均较小,只有下游 R<sub>11</sub> 较窄河段的流速相对较大。R<sub>3</sub>~R<sub>6</sub> 河段的流速约为 0 m/s,此处水流几乎处于静止状态。W<sub>1</sub> 附近水体未通过 W<sub>1</sub> 溢流板直接流向下游 R<sub>8</sub> 河段,如图 2(a) 所示。汇流点 B 的水流大部分来自路线 2 方向,路线 1 方向几乎没有水流流入,如图 2(b) 所示。经现场查

表 1 实测与模拟结果对比

特征点位	流速/(m/s)		水位/m	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值
A	0.006	0.005	1.351	1.350
B	0.005	0.005	1.353	1.352
W <sub>1</sub>	0.009	0.008	1.352	1.350
R <sub>3</sub>	0.001	0.000	1.349	1.350
R <sub>6</sub>	0.000	0.000	1.353	1.351
R <sub>9</sub>	0.003	0.003	1.349	1.349
R <sub>11</sub>	0.017	0.016	1.352	1.352

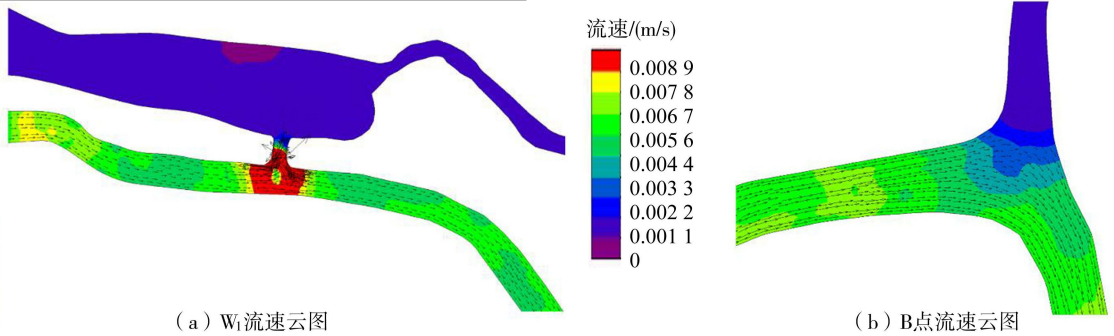


图 2 河道流场模拟结果

表 2 模拟工况与工程措施

工况	再生水流量/(m <sup>3</sup> /d)	初始水位/m	泵站流量/(m <sup>3</sup> /d)				工程措施
			P <sub>2</sub>	1号	2号	P <sub>3</sub>	
A1	6000	1.35	6000	0	0	6000	水动力现状模拟
A2	20000	1.35	14400	0	0	20000	增加再生水流量
A3	6000	1.35	0	0	0	6000	开启闸门 S <sub>1</sub>
A4	8640	1.35	2640	6000	0	6000	增设 1 号泵站
A5	8640	1.35	2640	6000	6000	6000	增设 1 号和 2 号泵站
A6	8640	1.35	2640	6000	0	6000	增设 1 号泵站, R <sub>3</sub> 河段拓宽至 8.0 m
A7	6000	1.35	0	0	0	6000	增设 1 号泵站, R <sub>5</sub> 末端河道拓宽至 6.0 m

注:所有工况补给站及泵站均为 24h 不间断运行。

看,此处水动力情况亦属于整个河网最差的点位,河道水体处于“死水”状态。实测数据与模拟数据的水位差别不大,流速最大误差约为 10%,主要原因在于河道本身流速较小,因而误差可以满足计算要求。

## 3 工程措施模拟分析

### 3.1 模拟工况

结合现场实际地形条件,发现路线 1 河段的水动力较弱,在河网中存在限制水流的位置:①R<sub>2</sub> 河段末端的溢流板 W<sub>1</sub> 限制了水体向路线 1 方向流动;②R<sub>3</sub> 河段的宽度较为狭窄,仅为 1.5 m 左右,且底高程较高,岸边水草较多,降低了河道的排水能力;③R<sub>5</sub> 河段末端有一段横截面积为 0.50 m × 0.75 m 的涵洞,且底高程较高,末端闸板 S<sub>1</sub> 长时间处于关闭状态,限制了 R<sub>5</sub> 河段向 R<sub>6</sub> 河段方向的水体流动。针对上述 3 种情况,拟定了如表 2 所示的模拟工况及工程措施,其中工况 A1 主要对河道现状水体流动情况进行分析,工况 A2 主要研究增加再生水总量下河道内水体流动情况,工况 A3 主要研究开放闸门对河道水体流动的提升效果,工况 A4 主要研究增设 1 台 1 号泵站对河道流速的提升效果,工况 A5 主要针对两个关键节点增设泵站研究其水体流动情况,工况 A6 研究增设泵站和拓宽河道两种措施对水体流动的影响,工况 A7 研究拓宽河道工程措施对河道水体流动的影响。

### 3.2 模拟结果分析

为了量化不同方案对河网水动力的提升效果,

对不同工况下  $R_3$ 、 $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_{11}$  和汇流点 B 的水流流速进行了对比,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同工况下河道特征点位流速对比 单位:m/s

特征点位	工况 A1	工况 A2	工况 A3	工况 A4	工况 A5	工况 A6	工况 A7
$R_3$	0.000	0.000	0.000	0.031	0.031	0.007	0.034
$R_6$	0.000	0.000	0.000	0.009	0.009	0.007	0.009
$R_9$	0.000	0.000	0.000	0.006	0.006	0.007	0.007
$R_{11}$	0.016	0.054	0.016	0.016	0.016	0.018	0.026
B	0.005	0.018	0.005	0.005	0.005	0.006	0.005

由表 3 可知,对于现状条件下每天补给  $6000\text{ m}^3$  再生水(工况 A1),由于大部分再生水流经泵站  $P_2$  输送至下游(路线 2),路线 1 方向河道的水体基本不流动, $R_6$ 、 $R_9$  河段流速基本上为  $0\text{ m/s}$ ,水体流动能力较弱。即使打开闸门  $S_1$ (工况 A3), $R_6$  河段的流速变化也不大。这主要是因为闸门  $S_1$  前端的箱涵底部高程较高,使得即使闸门开启,对增强河段水体流动的效果也十分有限。

当再生水的补给流量增加至  $20000\text{ m}^3/\text{d}$  时(工况 A2),汇流点 B 处的最大流速由  $0.005\text{ m/s}$  提高到  $0.018\text{ m/s}$ ,下游河网  $R_{11}$  河段的最大流速更是达到了  $0.054\text{ m/s}$ ,对路线 2 和下游河网的水动力效果提升明显。但是对于路线 1 方向的流速改变不明显, $R_6$  河段的流速仍接近于  $0\text{ m/s}$ ,表明单纯依靠增加再生水补给量对该支流河道水动力改善的效果有限,对特定河段进行水动力管理时需要综合考虑地形和水流输送路线的影响。

通过在闸门  $S_1$  的位置增设 1 号泵站(工况 A4),将  $R_5$  河段水流直接提升至  $R_6$  河段, $R_3$  河段的流速提高至  $0.031\text{ m/s}$ , $R_6$  河段的最大流速由原来的  $0\text{ m/s}$  提高至  $0.009\text{ m/s}$ ,提升了河道水体流动状态。可见,增设 1 号泵站可以有效提高路线 1 方向的流速,将原河道的静水状态提升至流动状态,达到提升水动力的目的。

进一步的变化在工况 A6 中观察到,当增设 1 号泵站同时将  $R_3$  河段从  $1.5\text{ m}$  拓宽至  $8.0\text{ m}$  时, $R_3$  河段的流速由  $0.031\text{ m/s}$  降至  $0.007\text{ m/s}$ 。这一结果表明,虽然河段宽度的增加理论上可以提高河

道运输能力,但它并非限制路线 1 水体流动的决定性因素,因为流速实际上有所下降。

此外,在工况 A7 中, $R_5$  河段末端的河道被拓宽至  $6.0\text{ m}$ ,这是为了进一步提高该路线的流速。虽然  $R_6$  河段的流速维持在  $0.009\text{ m/s}$ ,但这一措施有效地促进了河道水体的流动。然而,由于  $R_5$  河段位于景观公园,而  $R_6$  河段为城市内河,水质较差,增设泵站并拓宽河道虽有助于水动力提升,但当泵站停止运行时,两河段间的水体交换可能会导致较好水质的  $R_5$  河段受到污染,从而降低其水质状况。虽然 1 号泵站的增设提升河道水体流动性方面具有显著效果,但同时也需要考虑对环境和水质可能产生的负面影响,特别是在不同河段水质差异显著时。

经过对不同工程措施的模拟分析,发现限制河道水体流动的瓶颈位置为闸门  $S_1$  及前端的涵管。此处涵管位置较高,且有闸门限制  $R_5$  河段与  $R_6$  河段的水体交换。因此,通过在此处增设 1 号泵站,可增强整个水系的水体流动性,达到改善河道水环境的目的。

## 4 运行方案模拟分析

### 4.1 运行方案

通过工程措施分析,确定在闸门  $S_1$  的位置增设 1 号泵站,将  $R_5$  河段水流直接提升至  $R_6$  河段,可提升整个河网的水动力,同时避免  $R_6$  河段的水流与  $R_5$  河段发生水体互换,保证  $R_5$  河段景观用水的水质。以下针对 1 号、 $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  泵站联合运行的方案进行模拟分析,以确定最优的运行方案。经对再生水补给方案及泵站实际排水能力评估,拟设定新增的 1 号泵站单台水泵设计流量为  $600\text{ m}^3/\text{h}$ ,泵站内设置 3 台水泵(两用一备),拟设定的水泵联合运行工况如表 4 所示,其中工况 B1、B2 和 B3 的再生水补给流量分别为  $6000$ 、 $6000$ 、 $8640\text{ m}^3/\text{d}$ ,用于分析不同排水方式对水动力的影响;工况 B4、B5 和 B6 再生水补给流量为  $6000\text{ m}^3/\text{d}$ , $P_1$  泵站补给河道水  $9000\text{ m}^3/\text{d}$ ,用于分析更多补水条件下不同排水方式对水动力的影响。

表 4 不同水泵联合运行模拟工况

工况	再生水流量 /( $\text{m}^3/\text{d}$ )	初始 水位/m	每天排水量/ $\text{m}^3$				排水方式
			1 号	$P_1$	$P_2$	$P_3$	
B1	6000	1.15	$600 \times 10$	0	0	$600 \times 10$	再生水经 1 号泵站集中排放 10h,由 $P_3$ 泵站排江
B2	6000	1.15	$1200 \times 5$	0	0	$1200 \times 5$	再生水经 1 号泵站集中排放 5h,由 $P_3$ 泵站排江
B3	8640	1.15	$600 \times 10$	0	$264 \times 10$	$864 \times 10$	再生水经 1 号和 $P_2$ 泵站集中排放 10h,由 $P_3$ 泵站排江
B4	6000	1.15	$1200 \times 10$	$1500 \times 6$	$600 \times 5$	$1200 \times 12.5$	再生水和河道水经 1 号和 $P_2$ 泵站集中排放 10、5h,由 $P_3$ 泵站排江
B5	6000	1.15	$1800 \times 8.33$	$1500 \times 6$	0	$1200 \times 12.5$	再生水和河道水经 1 号泵站集中排放 8.33h,由 $P_3$ 泵站排江
B6	6000	1.35	$1200 \times 10$	$1500 \times 6$	$600 \times 5$	$1200 \times 12.5$	提高河道的初始水位

## 4.2 模拟结果分析

为了量化不同工况对河道水动力的提升效果,对不同方案下  $R_6$  河段和汇流点 B 的河道流速与水位进行了对比,工况 B1、B2 和 B3 的计算结果如图 3 所示。

由图 3 可见,当再生水的补给流量为  $6000\text{ m}^3/\text{d}$  时,1 号泵站以  $600\text{ m}^3/\text{h}$  输水能力(工况 B1)运行 10 h,  $R_6$  河段达到的最大流速约为  $0.020\text{ m/s}$ ,最高水位约为  $1.250\text{ m}$ ,高流速运行的持续时间约为 8 h;  $R_{11}$  河段汇流点 B 的最大流速约为  $0.015\text{ m/s}$ ,最高水位约为  $1.205\text{ m}$ 。当 1 号泵站的排水能力提高至  $1200\text{ m}^3/\text{h}$ (工况 B2)集中运行 5 h 后(再生水的补给流量为  $6000\text{ m}^3/\text{d}$ ),  $R_6$  河段达到的最大流速约为  $0.035\text{ m/s}$ ,最高水位约为  $1.350\text{ m}$ ;  $R_{11}$  河段汇流点 B 最大流速约为  $0.026\text{ m/s}$ ,最高水位约为  $1.300\text{ m}$ 。当 1 号泵站的排水能力由  $600\text{ m}^3/\text{h}$  提高至  $1200\text{ m}^3/\text{h}$  时,最大流速可提高 75%,但持续时间缩减了一半。这一变化表明,泵站排水能力的提高可以显著提高流速,显示出泵站排水能力是影响河段水动力的关键因素。

工况 B3 对再生水的补给流量为  $8640\text{ m}^3/\text{d}$  并同时开启 1 号泵站和  $P_2$  泵站时河道内的水动力情况进行了模拟分析,其运行机制为:前 10 h 内 1 号泵站和  $P_2$  泵站将再生水排放至下游河道,补水结束

后再由  $P_3$  泵站排放入江。如图 3(b) 所示,当两个路线方向的水泵同时开启时,  $R_6$  和  $R_{11}$  河段的水位出现了明显提升,这是因为  $P_3$  泵站处于关闭状态。汇流点 B 北侧来流的流速约为  $0.022\text{ m/s}$ ,西侧来流的流速约为  $0.007\text{ m/s}$ ,汇流点 B 的最大流速约为  $0.020\text{ m/s}$ 。可见,同时开启 1 号泵站和  $P_2$  泵站时,整个河网水系水动力均得到了提升,且高流速持续时间也得到增加,但依赖于更高的再生水补给流量来维持所需的水量。此外,当  $P_2$  泵站关闭时,  $R_{11}$  河段汇流点 B 西侧支流的流速显著下降至  $0.001\text{ m/s}$ ,说明在没有  $P_2$  泵站辅助的情况下,该区域的水动力大大减弱。这一现象表明在水动力管理中,泵站操作的选择对于维持和调节河段流速和水位的重要性。

由于再生水的补给流量受多个因素制约,因此再生水的补给流量为  $6000\text{ m}^3/\text{d}$  时,可由  $P_1$  泵站增加  $9000\text{ m}^3/\text{d}$  的河道补给流量作为补充。由于增加了整个河网的水源补给量,因此 1 号泵站的排水能力需要同步提升。工况 B4 中,1 号泵站以  $1200\text{ m}^3/\text{h}$  的排水能力集中运行 10 h 后,  $R_6$  河段达到的最大流速约为  $0.034\text{ m/s}$ ,排水时间为 10 h。图 4 为水泵开启后河网的流速云图,可以看出,随着 1 号泵站的排水能力提升,  $R_6$  河段的最大流速明显增大,流速增大比较快的区域主要集中在  $R_{11}$  河段。

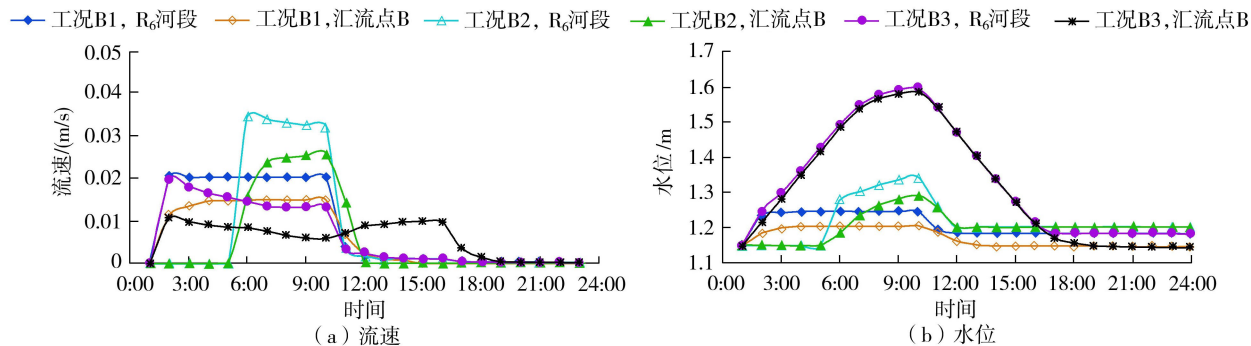


图 3 河道流速与水位变化

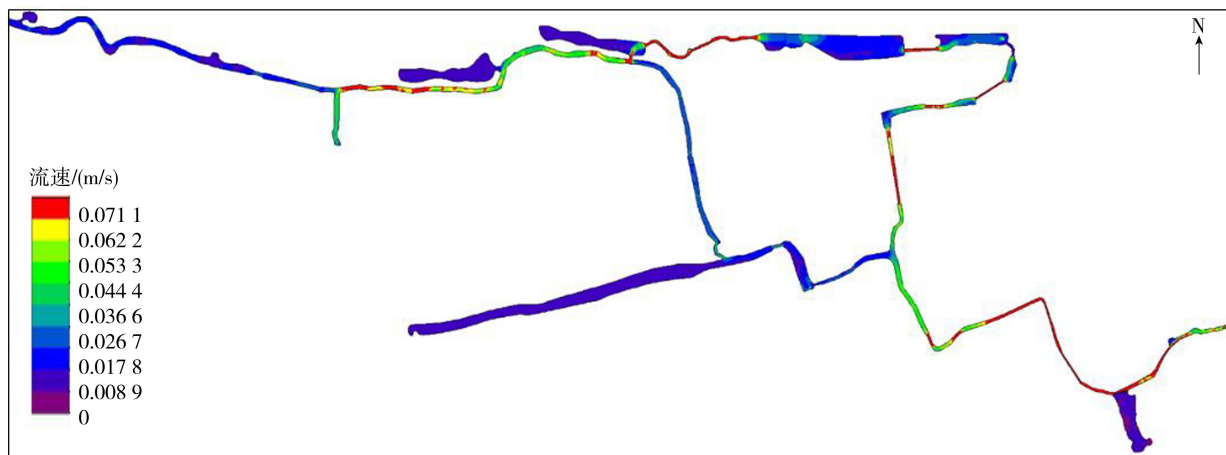


图 4 增加补给水量条件下河网流速云图

而一些与河道垂直的湖泊,整体与河网之间的水体交换效果较差,水动力较弱。

在再生水补给流量为  $6000\text{ m}^3/\text{d}$ 、河道补给流量为  $9000\text{ m}^3/\text{d}$  条件下,不同排水能力的水泵模拟结果如图 5 所示。同时 1 号泵站以  $1200\text{ m}^3/\text{h}$  的排水能力(工况 B4)运行时,对下游河道水动力的提升效果明显, $R_6$  河段达到的最大流速约为  $0.034\text{ m/s}$ ,相比于  $600\text{ m}^3/\text{h}$  的排水能力下最大流速提高了 75%,且水动力提升时间也增长至 10 h,效果更加明显。当 1 号泵站进一步提高排水能力(工况 B5,  $1800\text{ m}^3/\text{h}$ )运行 8.33 h, $R_6$  河段达到的最大流速约为  $0.046\text{ m/s}$ ,相比于  $600\text{ m}^3/\text{h}$  的排水能力下最大流速提高了 130%,水体流速进一步加快。这一现象表明,泵站的排水能力与河段的流速成正比,排水能力在控制和提升河道水动力中起到关键作用。 $R_6$  河段的最大流速与 1 号泵站的排水能力密切相关。工况 B6 对初始水位为  $1.350\text{ m}$  条件下的水动力进行了模拟分析,得到  $R_6$  河段达到的最大流速约为  $0.032\text{ m/s}$ ,相比于初始水位为  $1.150\text{ m}$  情况下流速降低了 9.4%。河道水位越高,断面面积越大,流速相对越小,表明水位越高,虽然流量可能增大,但因断面面积的增大,实际流速可能不会显著提高。

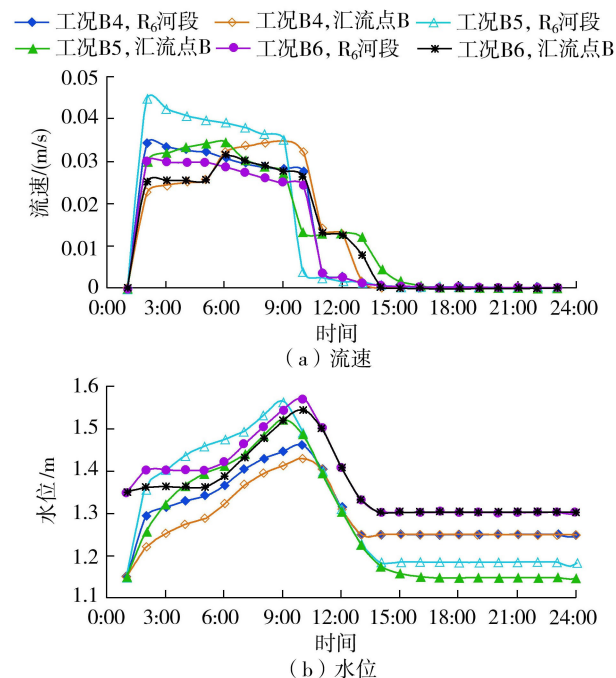


图 5 增加补给水量条件下河道流速与水位变化

图 6 给出了不同模拟运行机制条件下河道不同特征点位的流速对比,可以看出,随着水泵排水能力的提高,河道最大流速增大越明显。 $R_6$  河段的流速变化情况与 1 号泵站的流量密切相关,补给流量越大,水泵开启时间越长,水流流动持续时间也越长。 $R_{11}$  河段汇流点 B 的流速与整体补给流量相关,补

给流量越大,汇流点 B 的流速就越大,对整体水动力的提升效果越明显。在河道水动力系统调控中,补给流量能维持河道的基本水动力特性,这一作用在需要协调水泵排水能力和调节水位时尤为重要,因为这两个因素会相互影响,共同作用于整个水系统。

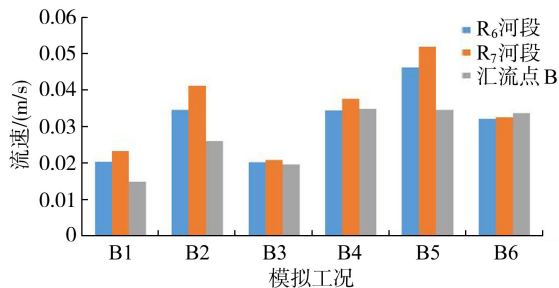


图 6 不同运行方案下河道特征点流速对比

## 5 结语

本文构建了宁波市某区域内河道网络的二维水动力模型,结合实测地形数据,系统识别了现有河道流速较慢的主要限制因素。这些因素影响了支流与主河道间的水体交换,进而制约了河道整体的水动力性能。为解决这一问题,本文提出在关键节点增设并优化提升泵站排水能力的运行方案,通过在关键闸门位置新增泵站并对关键河段进行物理改造,能有效提高原本流动缓慢的水体流速,提升了整个水系的流动性。运行方案模拟结果表明,提升泵站的排水能力可使关键河段的最大流速提高 75%,通过多泵站联合运行,在大量再生水补给条件下,可以显著提升整个河网的水体流动性和水位。

在滨海城市,由于这些河网普遍存在水动力不足和水质较差的问题,单纯通过补水的方法难以有效改善河道流动性。基于本文提出的技术路线,通过构建二维水动力模型并识别限制水动力的关键瓶颈位置,结合再生水补给与泵站运行优化,可为河网水动力及水环境治理提供有效的方案。

## 参考文献:

[ 1 ] 冯强,易境,刘书敏,等.城市黑臭水体污染现状、治理技术与对策[J].环境工程,2020,38(8):82-88. (FENG Qiang, YI Jing, LIU Shumin, et al. The pollution situation, treatment techniques and countermeasures of urban black and odors water in China[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(8): 82-88. (in Chinese))

[ 2 ] 彭兴意.基于 MIKE21 的城市小型河流水环境模拟及水质提升研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.

[ 3 ] 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, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 329-334. (in Chinese))
- [4] 张质明, 王晓燕, 马文林, 等. 未来气候变暖对北运河通州段自净过程的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 730-739. (ZHANG Zhiming, WANG Xiaoyan, MA Wenlin, et al. The effects of global warming on purification processes of Tongzhou section of Beiyun River [J]. China Environmental Science, 2017, 37(2): 730-739. (in Chinese))
- [5] 董亮, 俞芳琴, 刘俊, 等. 太湖流域锡澄片主城区畅流活水方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 48-51. (DONG Liang, YU Fangqin, LIU Jun, et al. Research on the scheme of water transfer in the main district of Xicheng area in Taihu Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(1): 48-51. (in Chinese))
- [6] 龚然, 徐进, 徐力刚, 等. 基于 EFDC 城市景观湖泊水动力模拟研究[J]. 环境工程, 2015, 33(4): 58-62. (GONG Ran, XU Jin, XU Ligang, et al. Study on hydrodynamics in urban landscape lake based on EFDC [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(4): 58-62. (in Chinese))
- [7] 李智睿. 基于 Mike21 的平原河网水质水动力模拟研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- [8] 田传冲, 魏婧, 黄冬菁. 基于水动力水质联合调控的温州市主城区平原河网引水规模研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 44-47. (TIAN Chuanchong, WEI Jing, HUANG Dongjing. Study on the scale of water diversion of plain river network in the main urban area of Wenzhou City based on the hydrodynamic and water quality united-control model [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4): 44-47. (in Chinese))
- [9] 张炜, 胡乐, 钱启蒙, 等. 基于 Delft3D 的苏州市渭塘镇河道水动力水质模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 96-102. (ZHANG Wei, HU Le, QIAN Qimeng, et al. Simulation of hydrodynamics and water quality for Weitang Town river network in Suzhou based on Delft3D [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 96-102. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 张晓峰, 石永杰, 刘俊, 等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 80-87. (ZHANG Xiaofeng, SHI Yongjie, LIU Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 80-87. (in Chinese))
- [12] 顾正华, 周统, 翁晓丹, 等. 城市原水系统调度研究与应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 10-17. (GU Zhenghua, ZHOU Tong, WENG Xiaodan, et al. Review of research and application on urban raw water system scheduling [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 10-17. (in Chinese))
- [13] 陈晓静, 李昆朋, 李萍, 等. 秦淮区北部水系引补水方案模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 6-10. (CHEN Xiaojing, LI kunpeng, LI Ping, et al. Simulation study on water diversion scheme in northern river network of Qinhuai District [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 6-10. (in Chinese))
- [14] 王永刚, 王旭, 孙长虹, 等. 再生水补给型城市河流水质改善效果模拟[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(6): 54-60. (WANG Yonggang, WANG Xu, SUN Changhong, et al. Assessment of water environmental control on reclaimed water supply-type river [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(6): 54-60. (in Chinese))
- [15] 薛祥山, 张鸿涛, 袁国清, 等. 太原市汾河公园再生水补水方案优化模拟[J]. 环境工程学报, 2013, 7(10): 4021-4026. (XUE Xiangshan, ZHANG Hongshou, YUAN Guoqing, et al. Simulation and optimization of recycled water replenishment program on Fen River Park in Taiyuan [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(10): 4021-4026. (in Chinese))
- [16] 夏高原, 葛军, 柯正辰, 等. 城市内河综合水质对再生水补水的响应[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 136-142. (XIA Gaoyuan, GE Jun, KE Zhengchen, et al. Comprehensive water quality of urban river in response to reclaimed water recharge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 136-142. (in Chinese))
- [17] 李晋, 辛克刚, 王磊, 等. 基于 MIKE11 的城市雨源型河流再生水补水方案研究[J]. 给水排水, 2020, 46(增刊1): 681-686. (LI Jin, XIN Kegang, WANG Lei, et al. Research on the scheme of reclaimed water supplement for urban ephemeral river based by MIKE11 [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(Sup1): 681-686. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-01-02 编辑: 熊水斌)