

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.04.16

# 大通湖区水系连通工程改善水环境的效果评估

李悦<sup>1</sup>, 李志威<sup>2</sup>, 胡旭跃<sup>1</sup>, 谭岚<sup>3</sup>, 姜恒<sup>4</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 湖南百舸水利建设股份有限公司, 湖南 长沙 410007; 4. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 大通湖是洞庭湖区的重要组成部分, 近年其水质状况呈现恶化态势, 正通过实施水系连通工程, 以期改善其水环境。基于 MIKE21 构建大通湖区水系连通工程的二维水动力-水质数学模型, 选取总氮和总磷作为水质指标, 模拟不同连通调度方案下大通湖的氮磷浓度变化, 采用滞水区面积比例、浓度变化指数、换水率和水质浓度改善率, 评估 6 个连通方案下大通湖水环境的改善效果。结果表明: 通过实施引水调度方案能够有效改善大通湖水环境, 当引水前期流量取  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , 出口水位控制在 25.48 m 时和引水后期流量保持为  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  不变, 出口水位调整至 25.88 m 时, 大通湖水环境改善效果最佳。本研究可为实施水系连通工程, 改善类似湖泊水环境和提高引水调度效率提供参考。

**关键词:** 水系连通; 水环境改善; 水质模拟; 引水流量; 洞庭湖区

中图分类号: TV213.4; X52 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2021)04-0116-08

## Evaluation of improvement effect of the water system connection project on aquatic environment in the Datong Lake area

LI Yue<sup>1</sup>, LI Zhiwei<sup>2</sup>, HU Xuyue<sup>1</sup>, TAN Lan<sup>3</sup>, JIANG Heng<sup>4</sup>

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Hunan Bestall Water Conservancy Construction Co., Ltd., Changsha 410007, China; 4. Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Datong Lake is an important part of the water system of Dongting Lake area. The water quality of Datong Lake has deteriorated in recent years, so the local government implemented a water system connection project in order to improve its aquatic environment. We established a two-dimensional hydrodynamic-water quality numerical model of the water system connection project in Datong Lake area using MIKE21. Total nitrogen and total phosphorus were selected as the water quality indicators to simulate nitrogen and phosphorus concentration changes under six connecting and scheduling schemes. Then, the ratio of water stagnation area, concentration change index, water exchange rate and improvement rate of water quality were selected to evaluate the improvement effects of the six schemes. Results show that this water system connection project can effectively improve the aquatic environment of this lake through the implementation of the water diversion and dispatching plan. The improvement effect of the Datong Lake is optimal when the flow discharge is  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  and the water level at the outlet of Datongkou is controlled at 25.48 m in the early stage of the diversion, and the flow discharge in the later stage of diversion is main tained at water level at the outlet of the Datongkou is adjusted to 25.88 in the later stage of the diversion. This research can provide a reference for improving aquatic environment of similar shallow lakes and the efficiency of water diversion by implementing a water system connection project.

**Key words:** water system connection; aquatic environment improvement; water quality simulation; diversion flow; Dongting Lake area

收稿日期: 2020-11-01; 修回日期: 2021-02-15

基金项目: 湖南省科技重大专项(2018SK1010); 湖南省教育厅重点项目(19A017); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ3036)

作者简介: 李悦(1996-), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 研究方向为河湖水系连通。

通讯作者: 李志威(1984-), 男, 湖北云梦人, 博士, 副教授, 研究方向为河流动力学。

## 1 研究背景

河湖作为城市与农村水系的重要组成部分,是城市防洪排涝和水域景观及农村灌溉排水的主要载体,在调蓄洪水、水资源配置和维持生态平衡等方面发挥重要作用<sup>[1]</sup>。大通湖位于益阳市南县与沅江市交界处,是洞庭湖重要湿地保护圈核心地带,是湖中之湖,具有防洪、灌溉、生态渔业和旅游等多种服务功能。近年来由于人工渔业养殖、农业面源污染加剧和水体交换艰难使得大通湖水质急剧恶化,于2016年降至劣V类,主要污染指标为总氮(TN)和总磷(TP),已经对当地居民的健康和水源安全产生严重威胁。

河湖水系连通作为我国近期一种治水新策略,已经在全国各地得到广泛运用<sup>[2]</sup>。河湖水系连通是指采取一系列人工或自然措施连通水系,在河道之间实现水力联系,通过以动制静、以清释污,使得水流畅通、水质改善,从而增强湖泊自循环更新能力和水生态自我修复能力,提高水资源承载能力与水环境容量,是维持人水关系和谐、构建健康河湖关系和提高水生态文明水平的有效举措<sup>[3]</sup>。对于河湖水系连通目前主要在连通类型与模式<sup>[4]</sup>、连通性优化与评价<sup>[5-7]</sup>、连通方案的分析比选<sup>[8-9]</sup>和对水环境的改善<sup>[10-11]</sup>等方面展开研究。诸多研究表明,利用水系连通调控水资源是改善水环境的一种重要措施。唐继张等<sup>[12]</sup>通过建立 MIKE21 水动力-染色剂耦合模型模拟研究换水能力,表明了提高水体换水能力是维护水生态系统健康的关键;陈叶华等<sup>[13]</sup>通过 MIKE21 模拟岳阳城区王家河连通芭蕉湖和南湖的情况,表明了水系连通使得湖泊水体自循环能力提高,水体自净化速度加快,水动力条件改善。柴朝晖等<sup>[14]</sup>通过对长江中下游通江湖泊进行数值模拟,表明了利用涵闸进行水资源调度可有效改善湖泊水质;李添雨等<sup>[15]</sup>对沙河水库水质进行了模拟,结果显示调控水位及截流污染源对于水质改善较为有效;李大鸣等<sup>[16]</sup>基于对流扩散理论,研究分析了水体中各水质指标质量浓度的迁移扩散过程。湖南澧县通过构建河湖水网连通生态水利工程<sup>[17]</sup>,使得水体交换自如、水流动态连续,极大改善了地区水质和水生态。也有不少外国学者通过对河湖进行水系连通模拟<sup>[18-19]</sup>,并利用换水率<sup>[20]</sup>和湖体水龄<sup>[21]</sup>等指标来对连通后的水质改善效果进行评估。

本研究以洞庭湖区内部的大通湖为研究对象,基于 MIKE21 建立大通湖区水系连通的水动力-水质数值模型,结合总氮和总磷的实测数据,采用滞水区

面积比例、水质浓度改善率、浓度变化指数和换水率来综合评估河湖连通调度方案,为浅水湖泊实施合理有效的河湖连通调度工程提供科学的决策与借鉴。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区域概况

大通湖是位于湖南省益阳市北部的一处湖中湖,地处洞庭湖区腹地,处于北纬 29°04' ~ 29°22', 东经 112°17' ~ 112°42' 之间,湖泊面积为 82.7 km<sup>2</sup>, 平均水深为 2.5 m,具有调节径流、提供水源、农业灌溉及交通水运等多种功能。2013年,大通湖被列入国家水质良好湖泊保护范围,2015年12月监测湖泊水质为劣V类,2016年1月-2017年8月,大通湖国控断面水质 TP、TN 及石油类指标均超标,其中以 TP 指标超标最为严重,湖内水质恶化为劣V类,水体富营养化,水生态系统退化。

针对大通湖的水环境污染问题,益阳市于2017年提出实施河湖水系连通工程以改善大通湖水质恶化状况,在结合五七河治理的情况下,在五七河与草尾河相接位置新建五七闸,从草尾河引水经五七河、大通湖、塞阳运河和金盆河后从大东口闸排入东洞庭湖,使大通湖垸水系与外河水系自然连通,大通湖区主要连通水系图见图1。

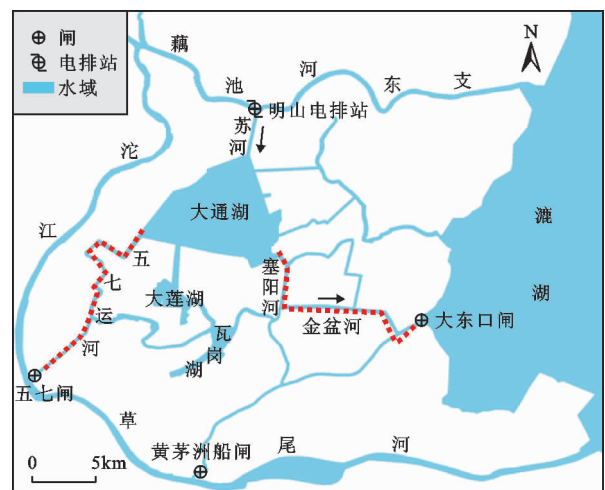


图1 大通湖区主要连通水系图

### 2.2 数据来源

本文所采用的水位流量数据均来自于《湖南省五七河一期治理工程初步设计报告》;风速取大通湖区年平均值 2.75 m/s,风向取全年频率最高为 29% 的北风;降水数据采用南嘴水文站及小河嘴水文站从 2017 年 10 月 - 2018 年 3 月的平均实测数

据;地形数据根据现有的实测地形和遥感影像资料,利用 MIKE 工具进行插值得到大通湖地形数据。

### 2.3 研究方法

2.3.1 基于 MIKE21 水系连通的二维水动力-水质模型 由于大通湖面积较大、水深较浅(平均为 2.5 m),因此选用 MIKE21 的水动力学模块(HD)和对流扩散模块(AD)模拟了不同方案下大通湖的水动力及水质变化情况。其中,水动力学模块(HD)利用 ADI 二阶精度的有限差分法求解模拟平面流体的水位及水流变化。其二维浅水方程组为:

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

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{f^2 \cdot H^2} - \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right] - \Omega q - f_w WW_x + \frac{H}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{f^2 \cdot H^2} - \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy}) \right] - \Omega p - f_w WW_y + \frac{H}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中:总水深  $H$  为静止水深  $h$  和水位  $\xi$  之和,m;将  $p$ 、 $q$  分别设定为  $x$ 、 $y$  方向坐标上的流通通量, $m^3/(s \cdot m)$ ;  $f$

为 Chezy 阻力系数,  $m^{1/2}/s$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\rho$  为水密度,  $kg/m^3$ ;  $\Omega$  为 Coriolis 系数,  $s^{-1}$  可用  $2\omega \sin \varphi$  来进行表示,  $s^{-1}$ ;  $\omega$  为地球自转角速度,  $rad/s$ ;  $\varphi$  为当地纬度,  $(^\circ)$ ; 设定风速  $W$  及风速的  $x$  坐标分量  $W_x$  和  $y$  坐标分量  $W_y$ ,  $m/s$ ;  $f_w$  为风阻力系数;  $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yy}$  为有效剪切力分量, Pa;  $P$  为大气压强, Pa。具体计算原理详见文献[22]。

对流扩散模块(AD)利用三阶精度有限差分法模拟污染物在水体中由于对流扩散作用的迁移过程。其控制方程组为:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + u \frac{\partial hC}{\partial x} + v \frac{\partial hC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial hC}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y \frac{\partial hC}{\partial y} \right) + h \sum S_i \quad (4)$$

式中: $C$  为污染物浓度,  $mg/L$ ;  $h$  为水深,  $m$ ;  $u$ 、 $v$  为速度分量,  $m/s$ ;  $E_x$ 、 $E_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向坐标上的扩散系数,  $m^2/s$ ;  $S_i$  为源汇项,  $mg/(L \cdot s)$ 。

利用 Google Earth 遥感影像画出大通湖边界并利用 ArcGIS 进行边界矢量化, 转成 .xyz 文件, 通过 MIKE ZERO 生成大通湖边界, 再利用网格生成器生成大通湖区域内部地形的非结构化网格, 能较好地拟合大通湖的边界(图 2(a))。采用自然单元法中的自然邻接点插值方法(natural neighbour interpolation)进行地形插值, 得到大通湖区的地形数据文件(图 2(b))。

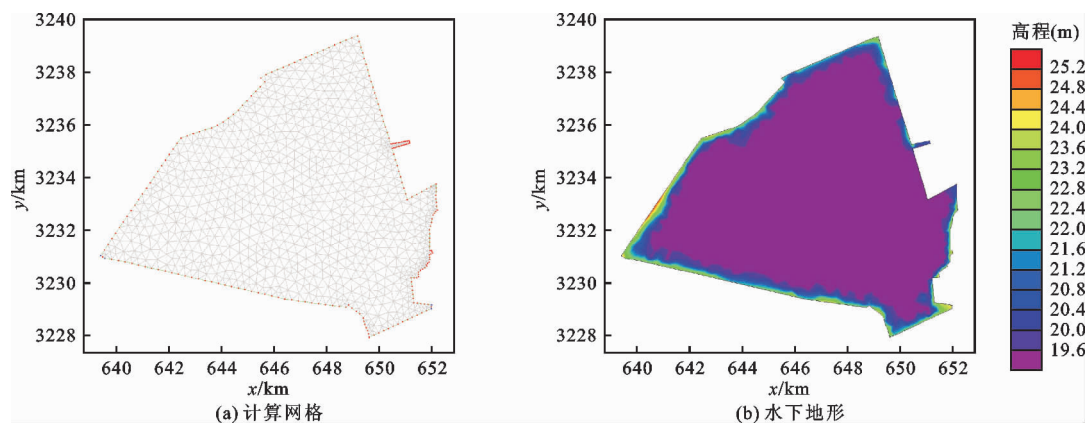


图 2 大通湖水动力和水质模型构建

大通湖是典型的宽浅型湖泊,其水流运动受湖面风场影响。总氮 TN 和总磷 TP 的初始浓度取 2018 年实测年均值,如表 1 所示。边界条件包括出入口以及面源污染物的输入。进口边界为五七闸引水处,采用流量条件控制,出口边界为大东口闸控制大通湖水位,故采用水位条件控制。从草尾河引水水质定为 III 类水,按照《地表水环境质量标准》

(GB/T 3838—2002) 的标准进行, TN 和 TP 浓度分别为 1.0、0.05  $mg/L$ 。

大通湖面源污染主要来自农业面源污染, TN 和 TP 面源污染物平均年入湖总量分别为 725.7 和 65.9 t/a。结合大通湖流域地势情况及降雨径流的汇流路径,将大通湖流域概化成 12 个汇水口(图 3)。因面源污染实测数据不足,故将各汇水口面源污染根据大

通湖年入湖面源总量进行平均分配。根据大通湖水水质超标情况选取 TN 和 TP 作为水质模拟指标。根据实际情况参考《湖南省五七河一期治理工程初步设计报告》引水流量数据及出口水位设置,故设置以下 6 种不同的引水调度方案,如表 2 所示。

表 1 2018 年大通湖不同月份总氮和总磷浓度的实测数据

测量时间/ (年-月)	总氮 TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	总磷 TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
2018-02	2.05	0.20
2018-04	1.95	0.22
2018-06	1.89	0.32
2018-08	1.14	0.31
2018-10	0.58	0.33
2018-12	0.98	0.24

表 2 大通湖区水系连通的引水调度方案

工况	五七闸引水流量 $Q$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	大东口出口 水位/m
1	20	25.48
2	25	25.48
3	30	25.48
4	20	25.88
5	25	25.88
6	30	25.88

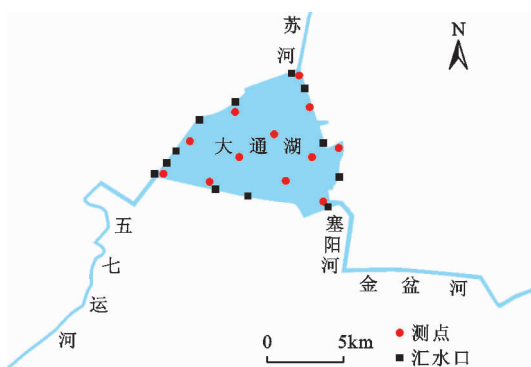


图 3 大通湖流域监测点及面源汇水口分布

2.3.2 模型参数选取 大通湖湖底地势平缓,无杂草孤石,故糙率取值为 0.03,涡粘系数  $C_s$  通过 Smagorin-sky 公式计算得 0.28。为避免在计算时模型因干湿边交替区溢出而出现不稳定性,设定干水深为 0.01 m,湿水深为 0.1 m。TN 和 TP 的降解系数取模型默认选项值。根据文献[8]、[14]将扩散系数取为  $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$ 。风阻力系数按照文献[23]中经验公式计算:

$$C_a = 10^{-3}(1.1 + 0.0536W_a) \quad (5)$$

式中:  $W_a$  为湖面以上 10 m 处的平均风速,取值为  $W_a = 2.75 \text{ m/s}$ 。

2.3.3 水环境改善的评价指标 大通湖水环境改善效果评估主要基于对水动力改善效果和水质改善效果两方面进行研究评价,本研究提出将湖泊水体流速、滞水区域面积比例和流场分布作为评价水动力状况的主要参数。通过水质浓度改善率、浓度变化指数和换水率评价水质改善效果,具体如下所示。

(1) 滞水区面积比例

$$\alpha = \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $S_1$  为滞水区(流速  $v < 0.002 \text{ m/s}$ ) 区域面积,  $\text{m}^2$ ;  $S_2$  为整体水域面积,  $\text{m}^2$ 。  $\alpha$  用来反映滞水区占全部水体面积的比例,%,  $\alpha$  越小表明水体流动性越强,整体置换程度越好。

(2) 水质浓度改善率

$$R_i = \frac{C_{bi} - C_{ai}}{C_{bi}} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $R_i$  为第  $i$  种污染物的浓度改善率,%;  $C_{bi}$  为引水前第  $i$  种污染物的平均浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $C_{ai}$  为引水后第  $i$  种污染物的平均浓度,  $\text{mg/L}$ 。

(3) 浓度变化指数

$$P = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{bi} - C_{ai}}{C_{bi} + C_{ai}} \quad (8)$$

式中:  $P$  为浓度变化指数;  $n$  为参加评估的水质指标数目。

(4) 换水率

$$\gamma_i = \frac{C_{0i} - C_{ti}}{C_{0i} - C_{di}} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $\gamma_i$  为第  $i$  种水质指标换水率,%;  $C_{0i}$  为第  $i$  种污染物的初始浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $C_{ti}$  为第  $i$  种污染物在某时刻  $t$  的浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $C_{di}$  为第  $i$  种污染物的引水浓度,  $\text{mg/L}$ 。  $\gamma$  越大,说明水体流动情况越好,水体循环程度越高,水质改善程度越大。

## 3 结果与分析

### 3.1 水动力流场分析

通过上述选取的数值模型模拟大通湖水系连通后的流场和水质变化情况。各工况引水后大通湖水动力情况如表 3 所示。在引水流量相同的情况下,当大东口出口水位处于较低的 25.48 m 时,引水稳定后对于湖内最大流速工况 1、2、3 比工况 4、5、6 分别增大了 25.15%、23.80%、23.63%,对于滞水区面积比例两者分别相差 3.29%、2.40%、3.00%。



而在出口水位相同的情况下,引水流量增大,对比工况1和2、2和3、1和3,湖内最大流速分别增大了20%、17.41%、40.89%,滞水区面积比例分别减少了1.63%、1.44%、3.04%。

由上述分析可知,降低出口水位对水动力改善的影响比增大引水流量对水动力改善的影响大,但引水流量高可以降低出口水位对水动力改善的影响。对于滞水区面积比例,增大引水流量和降低出口水位的改善效果均不大,可考虑增设出入水口来减少滞水区面积。最大流速出现在出水口处,这是由于出口水位降低,水位差增大,加速了湖泊水体的流动,改善其流动性。

表3 大通湖引水后各工况水动力模拟情况

工况	五七闸引水流量 $Q / (m^3 \cdot s^{-1})$	大东口出口水位/m	平均流速/ $(m \cdot s^{-1})$	最大流速/ $(m \cdot s^{-1})$	滞水区面积比例/%
1	20		0.0063	0.1010	27.60
2	25	25.48	0.0065	0.1212	27.15
3	30		0.0066	0.1423	26.76
4	20		0.0061	0.0807	28.54
5	25	25.88	0.0062	0.0979	27.82
6	30		0.0063	0.1151	27.59

大通湖是典型的宽浅型湖泊,风场是其流体运动的主要驱动力。大通湖补水来源主要来自降雨径流,在非汛期及无人工补水的情况下,水体仅在风场的作用下流动,湖内流速整体较低。由于各工况出入水口及风场不变,仅引水流量大小和出口水位不同,故在此选取流量最大  $30 m^3/s$  和出口水位较低  $25.48 m$  的工况3进行流场分析,结果见图4。

由图4可见,引水稳定后,受地形要素影响在大通湖北部区域沿湖岸线形成了顺时针的环流,流速由外向内减小,靠近岸边的流速最大为  $0.023 m/s$ ,环流中心的流速基本低于  $0.002 m/s$ 。这是由于北

部区域远离引水主路线,引水水流难以到达,故北部区域流场的主要影响因素仍然是风场,在北风的影响下形成顺时针的环流。引水入大通湖后,水流分为两股(图4(c)),一股往出水口方向流动,呈定向运动;一股往湖中心流动,水流流到湖中心后,流速逐渐减小,故在风场作用下形成逆时针的环流(图4(a))。在东部区域有个单独的局部小环流(图4(b)),这是由于边界地形为圆弧形,且在径流汇水口周围。整体流场由引水口至出水口的东南向水流以及北部西部两个大环流和东部一个小环流形成,结合以上水动力和流场分析,出入水口处和径流汇水口处的流速较大,远离引水主路线的区域流速仍然较小,故可考虑结合实际情况适当增加引水口和出水口,加强水体循环,改善换水效果。

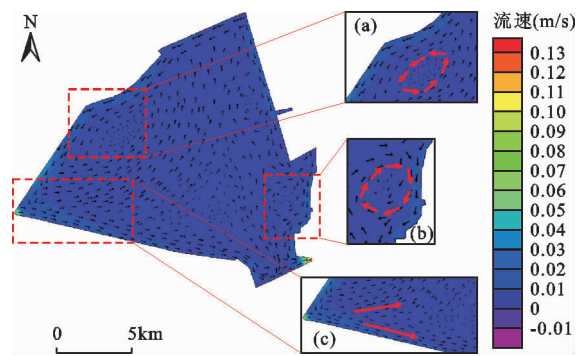


图4 大通湖引水后流场分布图

### 3.2 水质改善效果分析

图5、6分别为TN、TP浓度随引水历时的变化趋势。由图5、6可知,在进行水系连通引水调度后,6种工况都能有效地降低TN和TP的浓度,但不同的工况改善水质的效果也略有差别。对各方案引水稳定后的TN及TP浓度空间分布进行分析,各工况引水后的TN和TP浓度随着引水时间的增长逐渐下降,在0~120d水质浓度显著下降,120d后下降幅度逐渐减小,TN浓度和TP浓度在270d后处于基本稳定状态。

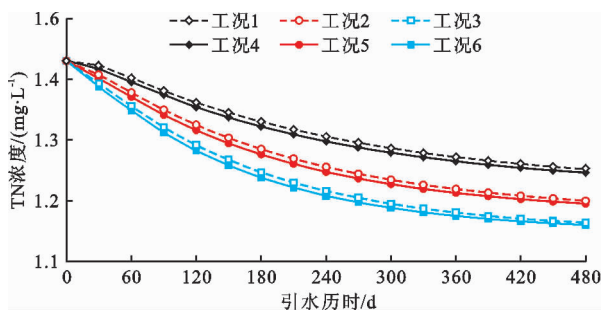


图5 TN浓度随引水历时的变化趋势

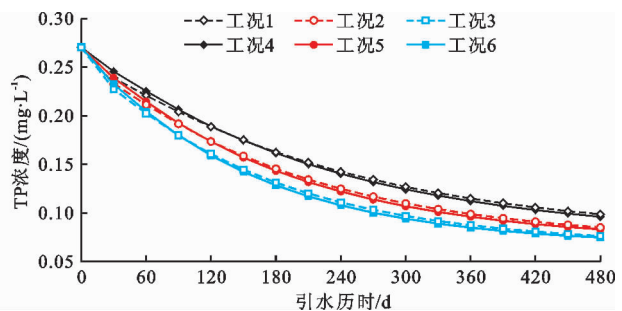


图6 TP浓度随引水历时的变化趋势

各工况引水后不同历时水质改善情况见表 4。结合表 4 和图 8、9,对比工况 1、2、3 和 4、5、6 中 TN 和 TP 的浓度可看出,当出口水位相同时,引水流量越大,则同一时间污染物浓度越低,水质浓度改善率越高。这是由于在引水过程中,引水流量越大,则流速越快,污染物迁移速度越快,污染物越容易扩散,故水质浓度改善率随流量的增大而增大。

对比工况 1 和 4、2 和 5、3 和 6,当引水流量相同、在 0~90 d 之间、大东口出口水位处于较低的 25.48 m 时,同一时间污染物浓度越低,则水质浓度改善率越高。从 90 d 开始至引水稳定时间,大东口水位处于较高的 25.88 m 时,同一时间污染物浓度越低,则水质浓度改善率越高。这是由于在引水前期,出口水位降低增大了水位差,从而增加了湖内水

表 4 各工况引水不同历时 TN 和 TP 浓度改善率 %

工况	水质指标	引水历时/d						
		30	60	90	120	150	180	210
1	TN	0.51	1.95	3.45	4.78	5.96	7.00	7.92
	TP	11.53	18.23	24.48	30.19	35.30	39.81	43.78
2	TN	1.56	3.62	5.65	7.39	8.89	10.17	11.27
	TP	13.67	21.70	29.11	35.63	41.27	46.11	50.24
3	TN	2.59	5.20	7.66	9.70	11.41	12.83	14.01
	TP	15.78	25.02	33.38	40.48	46.45	51.41	55.53
4	TN	0.91	2.41	3.95	5.32	6.52	7.57	8.48
	TP	9.07	16.54	23.67	29.94	35.44	40.24	44.42
5	TN	1.98	4.13	6.21	7.99	9.50	10.77	11.85
	TP	11.57	20.50	28.80	35.85	41.84	46.91	51.18
6	TN	3.02	5.74	8.25	10.33	12.04	13.44	14.58
	TP	13.99	24.24	33.48	41.0	47.32	52.45	56.64

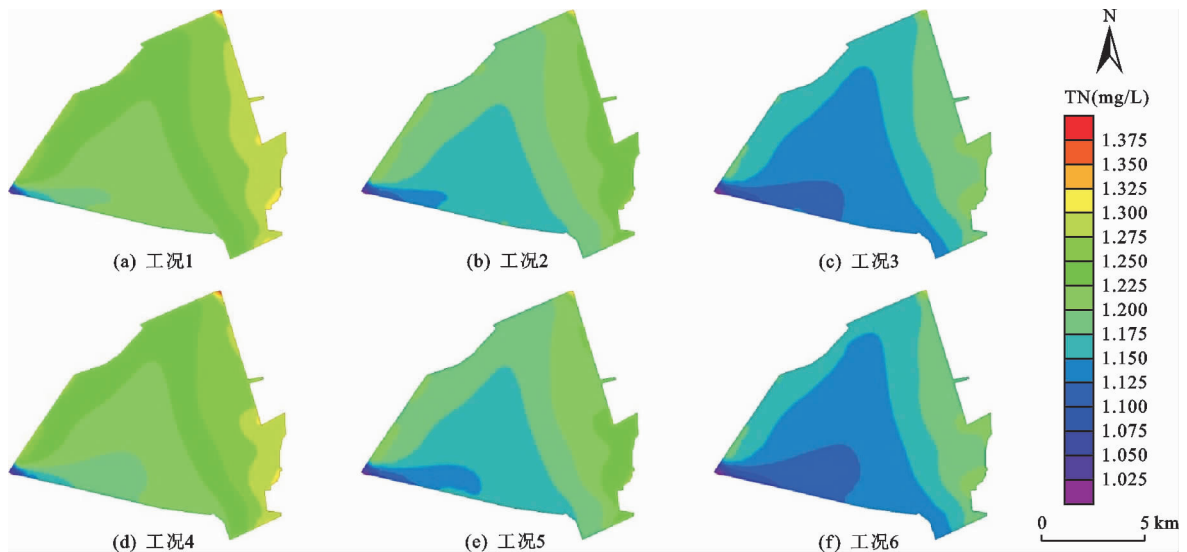


图 7 引水稳定后各工况 TN 浓度空间分布

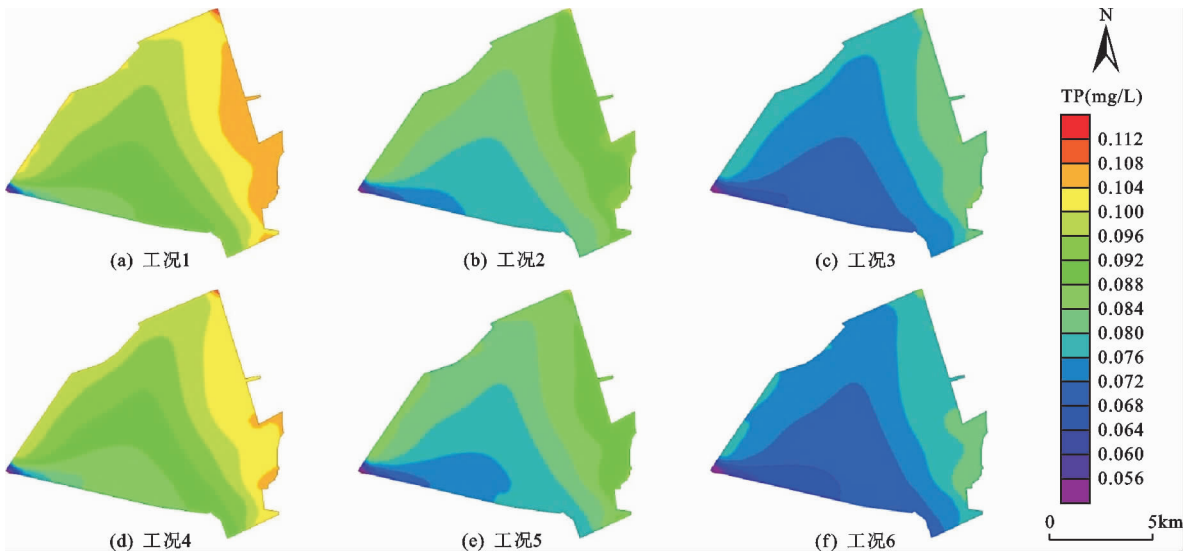


图 8 引水稳定后各工况 TP 浓度空间分布

流运动的速度,也加快了污染物扩散速度,而在引水后期,当引水逐渐稳定,引水流量相同即携带的污染物总量相同,出口水位越高说明湖内水量越大,污染物被稀释得越多,故在出口水位较高时同一时间水质浓度改善率越高。

对于换水率(图9),对比工况1和4、2和5、3和6,各工况之间的差异并不大,最小差值仅为

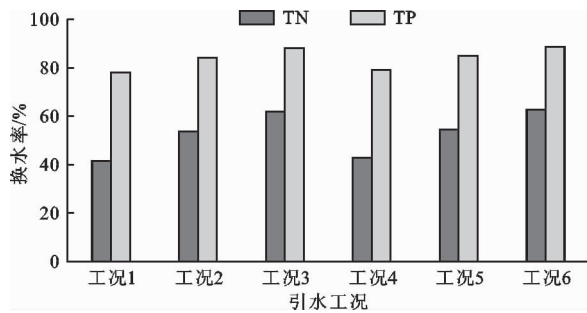


图9 引水稳定后各工况下TN和TP的换水率

3.19%,说明引水流量和出口水位并非其主要影响因素,与滞水区面积比例相同,可考虑适当增加引水通道来提高换水率。图10中浓度变化指数随时间的变化趋势与水质浓度改善率随时间的变化趋势相似,合理有效地调度水资源不仅能增强水体流动性,稀释污染物,改善水环境,还能有效地节省引水成本,从而实现引水综合效益最大化。

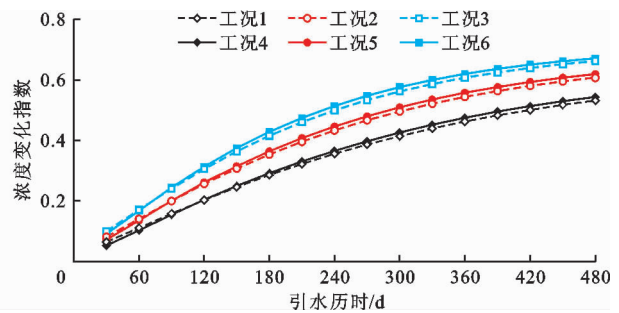


图10 浓度变化指数随引水历时的变化趋势

## 4 结论与讨论

本研究基于MIKE21构建大通湖区二维水动力-水质模型,对6种不同水系连通的调度方案下大通湖的水动力和水质进行数值模拟,并且采用滞水区面积比例、浓度变化指数、换水率和水质浓度改善率4个评价指标,对引水调度前后大通湖水质改善情况进行分析与评估,得到如下主要结论:

(1)实施河湖连通引水调度后,大通湖水体流动性明显增强,水动力条件得到改善,水体自循环能力增强,从而可有效降低TN和TP的浓度。引水前期,湖泊水环境污染情况得到显著改善,随着引水历时的增加,改善程度逐渐减小并趋于稳定。

(2)大通湖水环境改善效果最佳的调度方案是,在引水前期0~90d之间控制引水流量在 $30\text{ m}^3/\text{s}$ ,大东口出口水位控制在25.48m。在90d至引水稳定期间,引水流量保持 $30\text{ m}^3/\text{s}$ ,大东口出口水位调整至25.88m。

(3)大通湖为半封闭湖泊,湖泊面积大,水体流动性差,根据上述模拟大通湖西南角的五七河一侧补水结果表明,仅湖泊南部的水体交换较为快速有效,北部水体交换较慢,效果不理想,故难以实现全湖水体置换,其滞水区面积比例和换水率与引水流量和出口水位的关系不密切,故建议在大通湖北部区域新增补水通道,实现水体快速整体置换。

由于本研究主要针对大通湖区河湖水系连通工程,具有一定的地域性,但对类似浅水湖泊实施有效

的连通调度方案具有一定的借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 赵军凯,蒋陈娟,祝明霞,等. 河湖关系与河湖水系连通研究[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(6):1212-1217.
- [2] 李原园,黄火键,李宗礼,等. 河湖水系连通实践经验与发展趋势[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(4):81-85.
- [3] 王中根,李宗礼,刘昌明,等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(3):523-529.
- [4] 陈吟,王延贵,陈康. 水系连通的类型及连通模式[J]. 泥沙研究,2020,45(3):53-60.
- [5] 黄草,陈叶华,李志威,等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. 水科学进展,2019,30(5):661-672.
- [6] 高玉琴,肖璇,丁鸣鸣,等. 基于改进图论法的平原河网水系连通性评价[J]. 水资源保护,2018,34(1):18-23.
- [7] 马栋,张晶,赵进勇,等. 扬州市主城区水系连通性定量评价及改善措施[J]. 水资源保护,2018,34(5):34-40.
- [8] 孙静月,肖宜,张利平,等. 武汉市梁子湖-汤逊湖水系连通工程效果分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(2):125-131.
- [9] 窦明,石亚欣,于璐,等. 基于图论的城市河网水系连通方案优选——以清溪河许昌段为例[J]. 水利学报,2020,51(6):664-674.
- [10] 杨卫,张利平,李宗礼,等. 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究[J]. 地理学报,2018,73(1):115-128.
- [11] 练继建,杨阳,马超. 面向水环境改善的城市河网综合调控研究进展与前沿[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(8):781-787.
- [12] 唐继张,周维博,安宝军,等. 基于MIKE21的西安昆明

- 池(试验段)换水能力特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):58-63.
- [13] 陈叶华,李志威,沈小雄. 芭蕉湖-南湖连通工程的连通性评价[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(3):731-738.
- [14] 柴朝晖,姚仕明,刘同宦,等. 人工通江湖泊非汛期生态调度方案研究[J]. 长江科学院院报,2020,37(6):28-33.
- [15] 李添雨,李振华,黄炳彬,等. 基于 MIKE21 模型的沙河水库水量水质响应模拟研究[J]. 环境科学学报,2021,41(1):293-300.
- [16] 李大鸣,卜世龙,顾利军,等. 基于 MIKE 21 模型的洋河水库水质模拟[J]. 安全与环境学报,2018,18(3):1094-1100.
- [17] 万杰,王丽静. 湖南澧县河湖水网连通生态水利工程建设实践探讨[J]. 中国水利,2018(13):10-12.
- [18] KAZMI A A, HANSEN I S. Numerical models in water quality management: A case study for the Yamuna River (India) [J]. Water Science & Technology, 1997, 36(5): 193-200.
- [19] CHUBARENKO I, TCHEPIKOVA I. Modelling of man-made contribution to salinity increase into the Vistula Lagoon (Baltic Sea) [J]. Ecological Modelling, 2001, 138(1-3): 87-100.
- [20] 冯丹,田淳,吴月勇. 引水方案对人工湖内换水率影响的数值模拟[J]. 人民黄河,2019,41(5):71-76.
- [21] LI Yiping, TANG Chunyan, WANG Chao, et al. Assessing and modeling impacts of different inter-basin water transfer routes on Taihu Lake and the Yangtze River, China [J]. Ecological Engineering, 2013, 60: 399-413.
- [22] 许婷. MIKE21 HD 计算原理及应用实例 [J]. 港工技术,2010,47(5):1-5.
- [23] 李畅游,史小红. 干旱半干旱地区湖泊二维水动力学模型[J]. 水利学报,2007,38(12):1482-1488.

