

引水改善星海湖的水动力-水质特性数值模拟

牛晓瑜¹, 吴梦迪¹, 林玲², 孙秋慧², 徐国宾¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300354; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 针对星海湖存在的湖泊水动力不足与水质恶化等水生态问题, 通过建立二维水动力-水质模型, 选取化学需氧量(COD)为水质指标, 计算了12种不同水文特征与引水量工况, 分析引用不同黄河水量下湖区水动力和水质指标的变化及空间分布情况。结果表明: 引入黄河水能够有效改善星海湖的水动力与水质状况, 减小滞水面积, 降低COD浓度; 在相同水文特征工况中, 水质指标COD浓度随着引水量的增加而逐渐降低, 且其削减率逐渐提高; 在相同引水量工况中, 丰水年水质指标COD削减率普遍高于枯水年和平水年; 枯水年和平水年引水量分别为 1.4×10^4 和 7.0×10^4 m³时能够达到地表水Ⅲ类水质标准。

关键词: 湖泊治理; 引水量; 水动力-水质特性; 水文特征; 数值模拟; 星海湖

中图分类号: X824; TV85 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2023)05-0140-09

Numerical simulation of hydrodynamics – water quality characteristics of Xinghai Lake improved by water diversion

NIU Xiaoyu¹, WU Mengdi¹, LIN Ling², SUN Qiuhui², XU Guobin¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China;

2. China Water Resources Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: In view of water ecological problems such as insufficient hydrodynamic power and deteriorating water quality in Xinghai Lake, a two-dimensional hydrodynamic water quality model was established with chemical oxygen demand (COD) as the water quality indicator. 12 working conditions under different hydrological characteristics and water diversion volumes were calculated to analyze the changes and spatial distribution of hydrodynamics and COD in the lake area under different water quantities from the Yellow River. The results show that the diversion of the Yellow River water can effectively improve the hydrodynamics and water quality of Xinghai Lake, reduce the area of stagnation and COD concentration. Under the same hydrological working condition, COD concentration gradually decreases with the increase of water diversion and its reduction rate gradually increases; under the same water diversion conditions, COD reduction rate in high flow years is generally higher than that in low flow years and normal flow years. In addition, water diversion volumes of 14×10^6 and 7×10^6 m³ are needed to meet the Class III water standard of surface water in low flow years and normal flow years respectively.

Key words: lake governance; water diversion volume; hydrodynamics – water quality characteristics; hydrological characteristics; numerical simulation; Xinghai Lake

1 研究背景

城市湖泊是城市中重要的生态元素^[1], 但在城市现代化发展过程中, 城市湖泊由于水源单一、流动性差和自净能力低等的特点常常导致其水体富营养化、

水质恶化等水环境污染问题。采取水环境改善、引水调度等湖泊综合整治措施对于可持续发展理念下的城市资源规划具有重要作用^[2]。星海湖是古黄河游移过程中形成的自然湖泊, 经过多年建设, 已成为具有防洪和维护贺兰山区域生态平衡^[3]等综合功能的

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-06-14

作者简介: 牛晓瑜(1995—), 女, 新疆昌吉人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及水生态环境。

通讯作者: 徐国宾(1956—), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程水力学。

城市湖泊。随着星海湖周围的开发利用,入湖污染负荷超过了湖体的自净能力,产生了一定程度的水生态环境污染等问题。星海湖仅由黄河水来补充以提升水质,从而造成了大量的黄河优质水资源耗损。因此,提升湖泊水质与明确引调黄河水量,对保护与节约水资源以及城市的规划发展具有重要意义。

为合理配置水资源以加强保护湖泊湿地等自然资源^[4],国内外学者多采用目前较为成熟的 MIKE、EFDC (environmental fluid dynamics code)、WASP (water quality analysis simulation program) 等模型通过数值模拟方法进行研究^[5-11],分析水质恶化的原因,并为实际工程提出相应的治理方案^[12-14]。如:Chen 等^[15]采用 EFDC 模型研究分析了中国丹江口水库的水质富营养化问题,并对该水库的管理提出了相应的解决措施;李大鸣等^[16]建立了 MIKE 模型对洋河水库进行水质模拟,分析了在水动力作用下污染物随时间迁移扩散的质量浓度变化及分布情况;徐存东等^[17]基于 MIKE 21 模型对沈庄漾河网进行水动力模拟,探明了研究区域水动力提升和流场改善的优化调度方法;鄢碧鹏等^[18]采用 EFDC 模型预测了不同流量、不同出水点与流量分配比例下生态补水对蠡湖透明度的改善效果,为确定蠡湖补水工程建设规模和运行方式提供了依据;王亚宁等^[19]以 COD 和氨氮为输出目标构建太湖 EFDC 水质模型,探讨了不同入湖水量与污染来源条件下的水质改善率与水质边界敏感性;唐继张等^[20]基于 MIKE 21 建立了二维水动力-染色剂耦合模型,定量模拟分析了西安昆明池(试验段)的换水能力。

本文采用 MIKE 模型对星海湖进行模拟研究。虽然已有学者^[3, 21-22]通过 GIS-遥感技术解译影像与水量平衡原理,研究得出了星海湖适宜生态需水总量与在不同水质标准下的生态补水量,并提出了合理的水资源配置方案,但未详细地反映湖泊水动力与水质的时空状况。本研究构建了二维水动力-水质模型,通过模拟计算星海湖不同水文特征、不同引黄河水量的 12 种工况,分析了各工况的流速、流场、滞水面积、污染物时空分布等水动力与水质特性,明确了最佳引黄河水量,以期调度黄河水改善星海湖水环境提供理论依据。

2 研究区域概况与研究方法

2.1 研究区域概况

星海湖位于黄河上游宁蒙河段宁夏回族自治区石嘴山市北部贺兰山前洪冲积倾斜平原的下缘,地

理位置介于东经 105°58' ~ 106°59',北纬 38°22' ~ 39°23'之间,水域面积约为 23.42 km²,分为北域、中域、南域、东域和新月海共 5 个区域,共同承担着大武口沟、归韭沟、大风沟和汝箕沟的来水,星海湖地理位置与湖区分布如图 1 所示^[21]。研究区域属于中温带干旱气候,干旱少雨,日照充足,降雨集中,蒸发强烈,年平均气温为 8.7 ~ 8.9 °C,多年平均降水量为 179.8 mm,多集中在 6—9 月,多年平均水面蒸发量为 1 291 mm^[23]。

星海湖于 2004 年起通过第二农场渠补充黄河水,年均生态补水量为 2 000 × 10⁴ m³。星海湖水质在 2020 年 6 月停止补充黄河水后逐渐恶化,7 月中域水质为 V 类 ~ 劣 V 类^[24],水体富营养化。针对星海湖水环境恶化问题,石嘴山市于 2021 年起对星海湖生态环境进行整治,实施补水、水体内循环、湿地生态修复、污水净化、水资源合理利用、功能区综合治理等多种措施,进一步增强其防洪调蓄和生态安全功能^[3]。

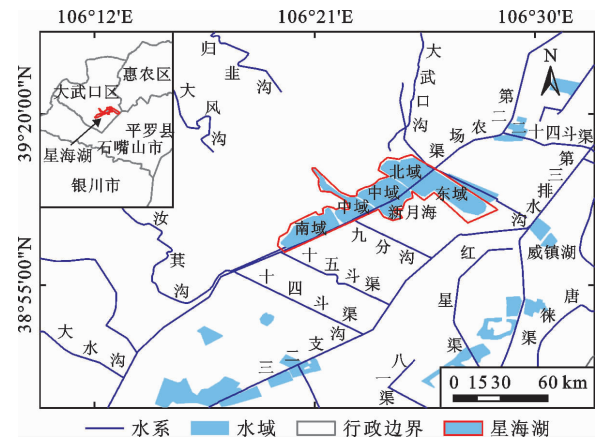


图 1 星海湖地理位置与湖区分布示意图

2.2 研究方法

2.2.1 MIKE 21 FM 模型

(1) 水动力基本方程^[25]

二维非恒定浅水方程组:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = q \quad (1)$$

动量方程:

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

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gq}{f^2 H^2} \sqrt{p^2 + q^2} -$$

$$\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy}) \right] - \Omega p - f_w W W_y + \frac{H}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间, s; x, y 为笛卡尔坐标系坐标, m; H 为总水深, 其值为静止水深 h 与水位 ξ 之和, m; p, q 分别为 x, y 方向坐标上的流通通量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; f_w 为 Chezy 阻力系数, $\text{m}^{1/2}/\text{s}$; P 为当地大气压强, Pa; Ω 为科氏力系数, s^{-1} , $\Omega = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地球自转角速度, rad/s , φ 为当地纬度; g 为重力加速度, m/s^2 ; f_w 为风阻力系数; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; W, W_x, W_y 分别为风速及其 x, y 坐标分量, m/s ; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ 为有效剪切力分量, N/m^2 。

(2) 水质模型方程^[11]

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

式中: C 为污染物浓度, mg/L ; u, v 为速度分量, m/s ; E_x, E_y 分别为 x, y 方向上的扩散系数, m^2/s ; S_i 为源

汇项, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{s})$ 。

(3) 模块调用

选用 MIKE 21 FM 中的水动力模块(HD)与对流扩散模块(AD)。水动力模块为 MIKE 21 的核心基础模块, 主要通过对研究区域的地形进行网格化来处理边界条件, 选择求解格式、干湿网格条件、河床糙率并考虑降雨蒸发及风场因素、输入源汇作用实现水动力模拟, 从而计算得出研究区域的流速和流场。在对流扩散模块(AD)可设定不同类型的扩散系数来反映在不同水动力条件下不同物质的扩散状况。

2.2.2 模型离散求解 模型采用有限体积法将研究区域离散为若干个不规则的三角形和四边形相结合的混合网格, 并且保证研究区域的水量与动量守恒。因新月海较小且相对独立, 本研究对其不做模拟。对星海湖其他域地形离散共计生成 41 258 个网格, 24 390 个节点, 星海湖模型计算区域整体网格划分如图 2(a) 所示, 星海湖南域地形较为复杂, 局部网格划分如图 2(b) 所示。

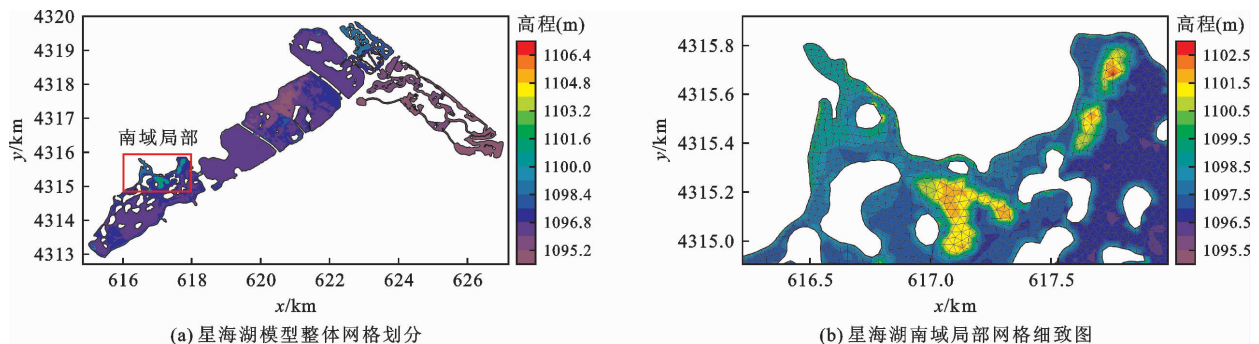


图2 星海湖模型整体网格与南域局部网格划分

2.3 模型边界条件与初始数据

2.3.1 边界条件

(1) 水动力模块(HD): 确定污水厂、北域(2个)、中域(3个)、南域(3个)进、出水口为开边界, 其余为不过流固壁边界, 如图 3 所示。模型计算启用干湿边界, 设置干水深 $h_{\text{dry}} = 0.005 \text{ m}$, 淹没水深 $h_{\text{flood}} = 0.05 \text{ m}$, 湿水深 $h_{\text{wet}} = 0.10 \text{ m}$ 。

(2) 源(汇)项: 根据星海湖生态环境整治工程和水体内部循环状况, 模型中将北域出水点源 4 引水至东域进水点源 1; 将东域出水点源 2 引水至中域进水点源 5; 将东域出水点源 3 引水至南域进水点源 6; 将南域出水点源 7 引水至中域进水点源 8。源汇项与监测点 S_1 (南域) 和 S_2 (中域) 位置设置如图 3 所示。

2.3.2 时间步长与初始数据

考虑到模型计算的

稳定性和计算效率, 库朗数(Courant number)不能大于 1; 模型计算时长为 245 d(2022 年 3 月 1 日—11 月 1 日), 时间步长为 600 s, 循环计算两次, 以保证模型的稳定。

(1) 水动力模块(HD)初始数据: 本文水文数据均来源于《星海湖生态环境问题整治可行性研究报告》。北域初始水位设置为 1 098.33 m, 中域为 1 098.10 m, 南域为 1 097.20 m, 东域为 1 095.35 m, 设定研究区域起始为静止状态。星海湖风场设置为恒定值, 风速 2.45 m/s , 风向 180°。降水量、水面蒸发量数据采用多年平均数据, 详见表 1。

(2) 流扩散模块(AD)初始数据: 根据星海湖水水质检测结果, 选取化学需氧量(COD)为模型水质指标。星海湖北域、中域、南域、东域 COD 初始浓度分别设定为 20、18、18、30 mg/L 。

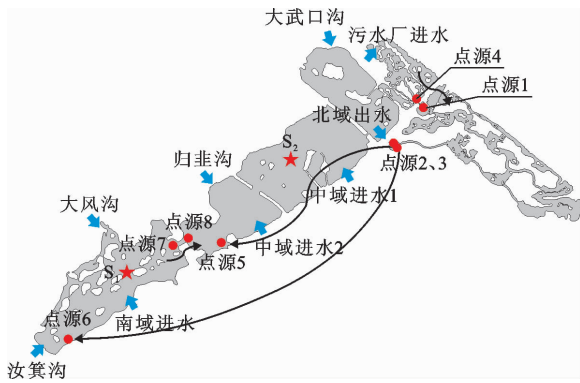


图 3 星海湖模型边界条件与监测点设置

2.4 模型参数率定与验证

2.4.1 参数率定 根据星海湖湖底情况, 涡黏系数选用 Smagorinsky 公式进行估算, 取值为 0.28。计算床底摩擦力选用曼宁糙率系数 n , n 取值为 0.031 25 $s/m^{1/3}$ 。由于水体对污染物有吸附、迁移、沉降与降解等作用, 根据资料与模型率定验证, 确定星海湖研究区域的 COD 降解系数为 0.002 ~ 0.005 d^{-1} 。

2.4.2 水动力与对流扩散模型验证 选取 2022 年 5 月 19 日至 6 月 1 日星海湖实测数据进行水动力与对流扩散模型验证, 验证结果如表 2 所示。验证结果表

明, 模型模拟计算出的水位和水质结果与实测值基本接近; 星海湖水位模拟计算值与实测值的平均绝对误差为 0.02 m, COD 浓度模拟计算值与实测值的平均绝对误差为 0.69 mg/L。说明本次研究所建立的水动力水质模型精度较高, 能够准确模拟星海湖水动力和水质的变化规律, 可以用于模拟计算。

表 1 星海湖各月多年平均降水量及蒸发量

月份	降水量/mm	蒸发量/mm
1	1.0	29.44
2	0	38.61
3	0.1	90.49
4	4.2	151.87
5	12.6	172.92
6	51.6	152.72
7	16.6	190.87
8	14.0	169.95
9	28.2	110.88
10	12.2	91.34
11	2.8	43.75
12	0	38.68

表 2 星海湖监测点实测数据与模拟计算数据误差统计

日期	实测值		模拟计算值		绝对误差	
	水位/m	COD 浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	水位/m	COD 浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	水位/m	COD 浓度/($mg \cdot L^{-1}$)
05-19	1097.44	25.0	1097.44	25.00	0	0
05-20	1097.46	22.4	1097.46	22.75	0	0.35
05-21	1097.46	19.5	1097.46	21.21	0	1.71
05-22	1097.46	20.0	1097.45	21.75	-0.01	1.75
05-23	1097.46	20.7	1097.45	20.54	-0.01	-0.16
05-24	1097.42	20.7	1097.44	20.70	0.02	0
05-25	1097.40	20.7	1097.42	21.36	0.02	0.66
05-26	1097.40	22.7	1097.42	22.35	0.02	-0.35
05-27	1097.39	24.2	1097.41	23.01	0.02	-1.19
05-28	1097.39	22.0	1097.42	21.25	0.03	-0.75
05-29	1097.37	20.7	1097.41	20.84	0.04	0.14
05-30	1097.40	20.7	1097.38	21.06	-0.02	0.36
05-31	1097.31	22.6	1097.35	21.87	0.04	-0.73
06-01	1097.24	24.0	1097.32	22.45	0.08	-1.55

3 结果与分析

3.1 模拟计算工况

星海湖需水量整体呈逐年增长势态, 为维持周

边生态环境, 改善星海湖水环境恶化问题, 对星海湖进行模拟研究。根据 2021 年起实施的生态环境整治工程, 并结合往年向星海湖引黄河水量的实际情况, 在丰水年、平水年、枯水年 3 种不同水文特征年

份下分别设计不引黄河水(引水量为0)和引黄河水水量分别为 700×10^4 、 $1\ 400 \times 10^4$ 、 $2\ 100 \times 10^4$ m^3/a 共12种组合工况,如表3所示。

工况1、5、9模拟星海湖未实施黄河补水工程的水动力水质情况;工况2、6、10模拟向南域进水口引黄河水 100×10^4 m^3/a ,向中域两个进水口各引黄河水 300×10^4 m^3/a ,再由北域出水口排出 700×10^4 m^3/a 水量;工况3、7、11模拟向南域进水口引黄河水 200×10^4 m^3/a ,向中域两个进水口各引黄河水 600×10^4 m^3/a ,再由北域出水口排出 $1\ 400 \times 10^4$ m^3/a 水量;工况4、8、12模拟向南域进水口引黄河水 300×10^4 m^3/a ,向中域两个进水口各引黄河水 900×10^4 m^3/a ,再由北域出水口排出 $2\ 100 \times 10^4$ m^3/a 水量。

3.2 模拟计算结果分析

3.2.1 水动力分析 各个工况下星海湖水动力模拟计算结果如表4所示。

表3 星海湖不同水文特征下引黄河水量模拟计算工况

工况 编号	水文特 征年份	$10^4 \text{ m}^3/\text{a}$		
		南域 引水量	中域 引水量	总引 水量
1		0	0	0
2	枯水年	100	300×2	700
3		200	600×2	1400
4		300	900×2	2100
5		0	0	0
6	平水年	100	300×2	700
7		200	600×2	1400
8		300	900×2	2100
9		0	0	0
10	丰水年	100	300×2	700
11		200	600×2	1400
12		300	900×2	2100

表4 不同工况星海湖水动力模拟计算结果

工况 编号	南域			中域		
	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	滞水区面 积比例/%	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	滞水区面 积比例/%
1	0.007	0.072	56.32	0.008	0.117	12.20
2	0.007	0.071	52.93	0.008	0.118	12.10
3	0.007	0.069	51.99	0.008	0.117	11.98
4	0.007	0.070	51.21	0.008	0.118	11.96
5	0.006	0.068	51.35	0.008	0.114	11.77
6	0.006	0.069	50.24	0.008	0.114	11.72
7	0.006	0.068	49.02	0.008	0.114	11.70
8	0.006	0.069	48.48	0.008	0.115	11.68
9	0.006	0.067	50.43	0.008	0.114	11.92
10	0.006	0.066	49.03	0.008	0.118	11.86
11	0.006	0.065	48.24	0.008	0.114	11.75
12	0.006	0.067	47.41	0.008	0.114	11.66

由表4可知:(1)星海湖引水稳定后,12种工况中流速波动幅度较小,南域和中域平均流速在 $0.006 \sim 0.008$ m/s 之间,南域、中域最大流速分别在 $0.065 \sim 0.072$ 、 $0.114 \sim 0.118$ m/s 之间。(2)在相同水文特征年份中,丰水年工况9、10、11、12的南域滞水区面积比例较枯水年工况1、2、3、4相应削减了5.89、3.90、3.75、3.80个百分点,较平水年工况5、6、7、8相应削减了0.92、1.21、0.78、1.07个百分点。在相同引水量工况下,不引黄河水工况1、5、9

的南域滞水区面积比例较引黄河水 700×10^4 m^3/a 工况2、6、10相应增大了3.39、1.11、1.40个百分点,较引黄河水 $1\ 400 \times 10^4$ m^3/a 工况3、7、11相应增大了4.33、2.33、2.19个百分点,较引黄河水 $2\ 100 \times 10^4$ m^3/a 工况4、8、12相应增大了5.11、2.87、3.02个百分点。(3)各个工况中域滞水面积比例在11.70%~12.20%之间,相差较小。中域滞水面积比例比南域小36.49~44.12个百分点。上述结果表明,不同水文特征对星海湖南域滞水面积

比例的影响大于引不同黄河水量对其的影响,但两者对中域滞水区面积比例的影响均较小。星海湖水域面积大,湖内整体流速较低,不同工况下星海湖整

体及星海湖中域局部流场均呈现相同趋势,故以工况 3(枯水年引黄河水 $1\ 400 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{a}$)为例进行流场模拟,结果见图 4。

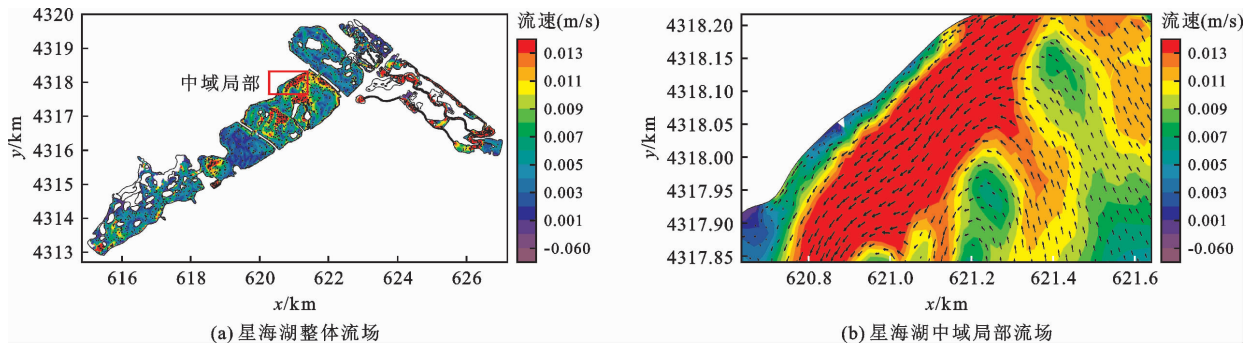


图 4 星海湖整体流场及中域局部流场模拟结果(工况 3)

由图 4(a)可知,星海湖水体由南向北流动,由于湖中岛屿众多,在引水稳定后出现了复杂的水流流态,最大流速仅出现在入水口与边壁位置。图 4(b)显示,星海湖中域北部沿边壁形成了较大的逆时针环流,流速呈由内向外增大的趋势,环流中心流速基本低于 $0.002\ \text{m/s}$,沿岸流速最大为 $0.021\ \text{m/s}$ 。中域南部远离引水主路线区域流速较低,同时因地形影响出现多个逆时针小环流,建议在类似区域增设曝气机以增大流速,改善局部水动力,提高水体循环能力。

3.2.2 水质分析 以星海湖实测结果为模型的初始条件,模拟得到不同水文特征年份与不同引黄河水量工况下星海湖水质指标 COD 浓度随引水历时的变化趋势,如图 5 所示。由图 5 可以看出,不同模拟工况中星海湖水质指标 COD 浓度变化趋势相同,虽然水质改善效果略有差别,但均能够满足对星海

湖水质在 IV 类及以上的要求^[26]。星海湖南域 COD 浓度在 $0 \sim 50\ \text{d}$ 内先小幅度下降后再升高, $50 \sim 170\ \text{d}$ 内再急速下降后又缓慢升高, $170\ \text{d}$ 后缓慢下降,总体而言处于小幅波动变化状态。对比不同工况下星海湖南域水质随引水历时的变化,工况 2、3 在引水 $170\ \text{d}$ 后,COD 浓度达到最高,分别为 20.52 、 $20.04\ \text{mg/L}$,分别有 87.35% 、 96.56% 的时段能够达到地表水 III 类水质标准。其他工况下水质均能达到地表水 III 类水质标准,工况 3、6、9 分别在枯水年、平水年、丰水年中为最优方案。建议根据 COD 浓度变化规律分时段引黄河水。星海湖中域 COD 浓度在 $0 \sim 50\ \text{d}$ 内小幅度波动, $50\ \text{d}$ 后急速下降再缓慢升高,总体变幅较小。由于中域来水量大,能够提高水体流动速度,从而加快了污染物 COD 的降解。星海湖中域在 12 种工况下水质均能达到地表水 III 类水质标准 $20\ \text{mg/L}$ 。

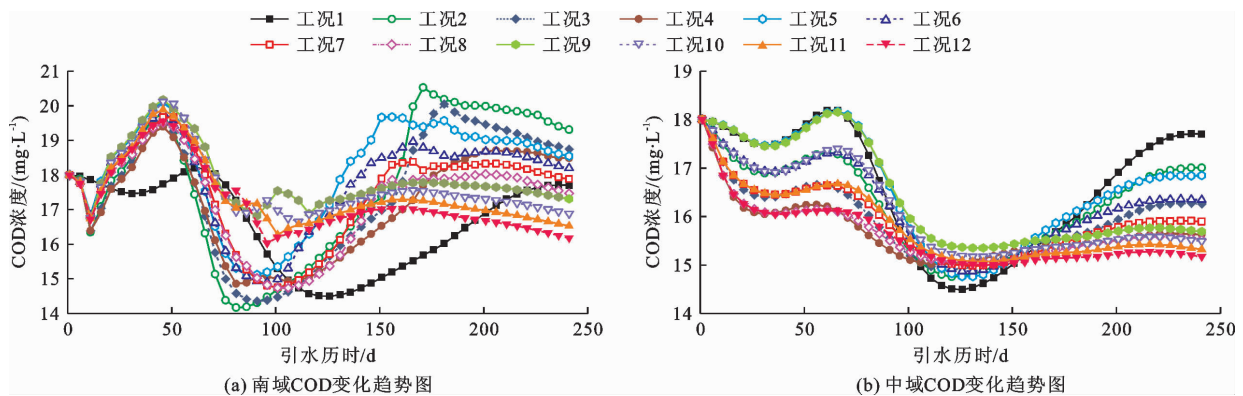


图 5 星海湖南域和中域 COD 浓度随引水历时变化趋势

星海湖引水稳定后南域和中域的 COD 浓度及其削减率计算结果如表 5 所示。由表 5 可知,星海湖南域 COD 削减率在枯水年工况 1~4 和平水年工

况 5~6 为负,分析其原因,虽然引黄河水能够有效降低星海湖 COD 浓度,但因其南域整体流速低,地形变化大,且枯水年与平水年来水较少,导致该区域

滞水面积比例较大,水体降解能力不足。整体结果表明,星海湖南域丰水年各工况 COD 平均浓度比枯水年、平水年各工况 COD 平均浓度分别降低了 12.73%、7.36%,相应的 COD 削减率平均分别提高了 13.79 和 7.63 个百分点。星海湖中域丰水年各工况 COD 平均浓度比枯水年、平水年各工况 COD 平均浓度分别降低了 4.95%、2.72%,相应的 COD 削减率平均分别提高了 4.80 和 2.64 个百分点。在同一水文特征年各工况中,随着引水量的增加,南域和中域的 COD 浓度逐渐降低,削减率逐渐提高;在相同引水量工况中,丰水年的 COD 削减率普遍高于枯水年与平水年,丰水年引水对星海湖水质的改善效果优于枯水年与平水年。

引水稳定后,在 12 种工况下星海湖水水质空间分布情况相似,故以工况 2 为例进行分析。不同引水天数星海湖 COD 浓度空间分布如图 6 所示。

表 5 不同工况引水稳定后星海湖南域和中域的 COD 浓度及其削减率

工况	南域		中域	
	浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	削减 率/%	浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	削减 率/%
1	19.96	-10.87	17.69	1.70
2	19.25	-6.96	16.86	6.32
3	18.71	-3.96	15.66	12.98
4	18.43	-2.31	15.61	15.31
5	18.51	-2.83	17.01	5.52
6	18.16	-0.91	16.33	9.30
7	17.85	0.86	15.46	14.09
8	17.41	3.41	15.51	16.04
9	17.25	4.15	16.24	9.79
10	16.82	6.55	15.89	11.74
11	16.46	8.58	15.29	15.06
12	16.10	11.78	15.14	18.90

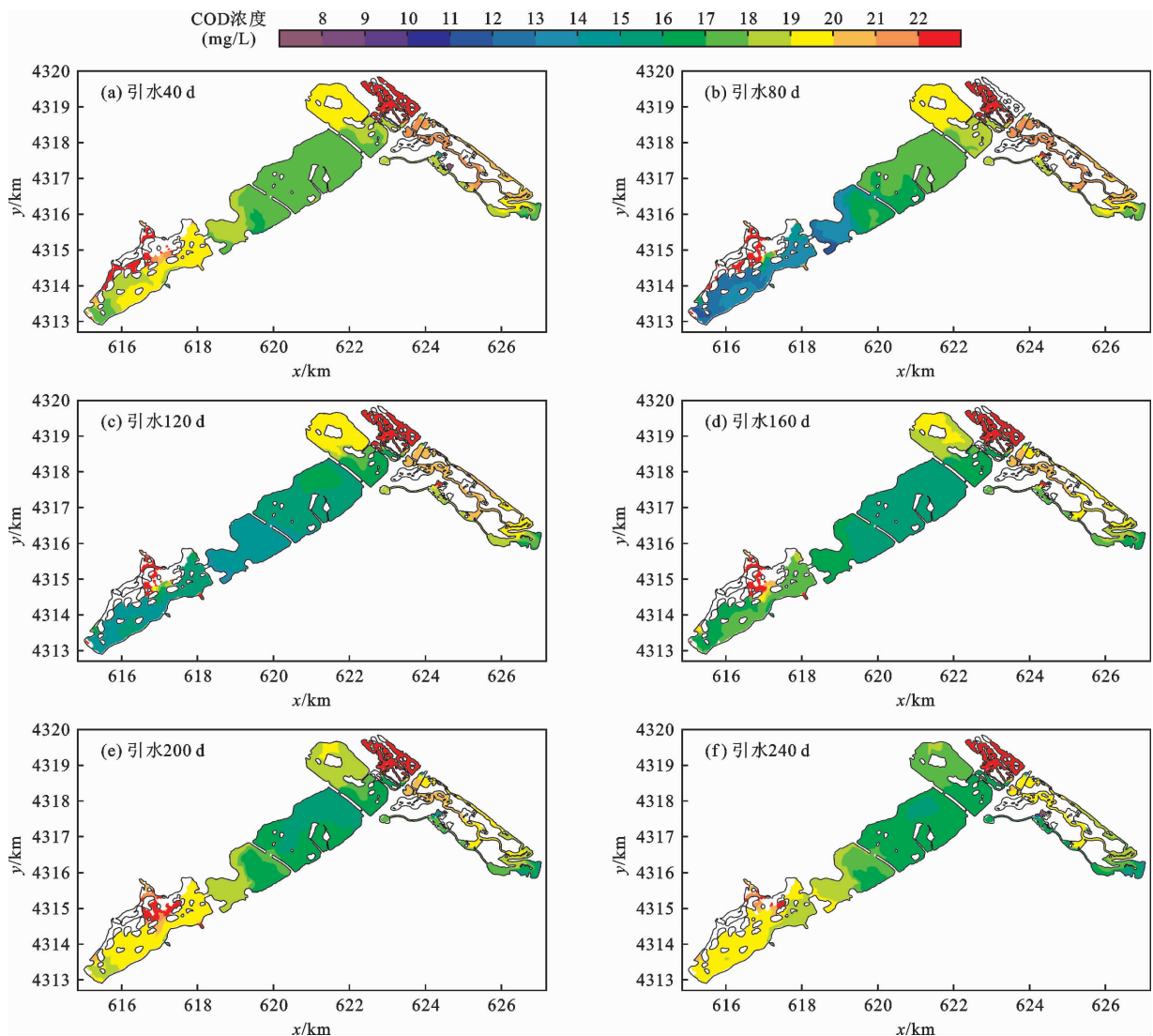


图 6 不同引水天数星海湖 COD 浓度空间分布(工况 2)

由图 6 可知,由于大风沟、大武口沟和污水厂等来水导致污染物 COD 主要聚集在星海湖南域和北域的西北部。南域岛屿众多,水体流速低,污染物容易积累于岛屿周围,COD 平均浓度为 19.87 mg/L;中域因地形与流场因素,环流中心处 COD 浓度较高,平均为 16.64 mg/L,边界 COD 浓度较低,平均为 13.58 mg/L;北域水道崎岖且流速低,导致 COD 容易积累,建议增设人工湿地以降解污染物。

4 讨 论

本研究所构建的星海湖水动力水质耦合模型能够较为全面地反映星海湖水动力特性与水质指标 COD 的时空分布,确定了在不同水文特征年星海湖最优的引黄河水量。李添雨等^[14]同样采用此类模型量化分析了沙河水库水量水质变化情况,也取得了良好的模拟效果。

4.1 水动力时空变化特征分析

本研究结果表明,由于引水口分布的影响,星海湖在入水口、边壁位置与靠近引水主路线区域流速较高,远离引水主路线区域流速较低,环流流速由外向内逐渐降低,这会造成星海湖水动力不均衡,水体得不到充分流动,难以达到全湖水体流通的效果。这与李悦等^[13]对大通湖采用 MIKE 21 模型进行研究时得出的结论相同。此外星海湖南域因岛屿众多,水体流通不畅,流速较低,导致滞水面积增大,建议设置多个补水口或增设曝气机以改善星海湖水动力情况。

4.2 水质时空变化特征分析

本研究结果表明,星海湖水质总体呈现上升—下降—上升—缓慢下降的变化趋势。由于星海湖承接汝箕沟、大风沟、归韭沟、大武口沟等沟道洪水,春季冰雪消融导致来水较多,并且水中大量藻类及附近水产养殖生物开始大量繁殖,导致水体污染加重。夏季降雨集中且洪水同步形成,同时气温升高导致蒸发量增大进一步使得水环境恶化,污染物浓度升高。本文研究结果与王世强等^[21]对星海湖需要加大补水的月份的结论相吻合,但本次模拟结果能够更加直观地反映污染物的时空分布情况。因此建议在春、夏季加大对星海湖的水环境治理,合理调控黄河水资源的分配。

5 结 论

本研究建立了星海湖水动力水质耦合模型,模拟计算了星海湖在不同水文特征年、不同引黄河水

量的 12 种工况,以流速、滞水区面积比例和 COD 浓度削减率等作为评价指标对星海湖水动力与水质改善效果进行了分析,得到以下结论:

(1)星海湖水动力与水质改善效果与不同水文特征及不同引黄河水量相关:在相同水文特征工况中,增加引黄河水量能够进一步减少滞水面积比例,增加污染物削减率,水质指标 COD 浓度逐渐降低,星海湖水动力与水质改善明显;在相同引黄河水量工况中,由于丰水年来水量多于枯水年与平水年,星海湖水动力状况改善明显,从而使得丰水年水质指标 COD 削减率与滞水面积削减比例普遍高于枯水年与平水年。

(2)考虑经济性与水质改善效果,建议在枯水年、平水年、丰水年分别选择工况 3、6、9 引水方案。由于春季和夏秋季来水量大,COD 浓度增高,建议考虑分时段引黄河水。

(3)星海湖水域面积大,流场复杂且流速较低,滞水面积占比较高,水体难以自循环,可考虑局部增设进水口与曝气机,加强水体流动性。星海湖水体中 COD 主要来源于污水厂、大风沟、大武口沟等来水,建议在入湖口采取污染物削减措施,以降低其入湖浓度,并考虑增设生态岛、人工湿地等设施增强水体降解能力。

参考文献:

- [1] 谢季遥,陈星,许钦,等.城市湖泊生态修复的水质响应研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):53-59.
- [2] 陆文泽,任仁,饶骁,等.太湖流域城市湖泊大型底栖动物群落结构及影响因素研究[J].水生生态学杂志,2022,43(4):8-15.
- [3] 魏琪琪,钟艳霞,贺婧,等.星海湖湿地土地利用变化及其生态需水研究[J].水生生态学杂志,2022,43(3):27-34.
- [4] MIAO Yuaojingjing, LI Jianzhu, FENG Ping, et al. Effects of land use changes on the ecological operation of the Panjiakou - Daheiting Reservoir system, China [J]. Ecological Engineering, 2020, 152: 105851.
- [5] ZHENG Lei, WANG Huipeng, LIU Cao, et al. Prediction of harmful algal blooms in large water bodies using the combined EFDC and LSTM models [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113060.
- [6] 张世宝,李胜东,冯健,等.基于 HEC - RAS 的鹿溪河流域水质治理效果研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(4):67-73.
- [7] 马亚丽,白祖晖,敖天其.基于 SWAT 模型的龙溪河泸县境内面源污染特征分析[J].中国农村水利水电,2019(7):103-109.
- [8] 谷新晨,肖森元,杨广,等.基于 CMADS 和 SWAT 模型

- 的玛纳斯河流域水文过程模拟 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(2): 116 - 123.
- [9] 周颖, 高成, 聂斌杰, 等. 基于 Mike21 的水库联调水质预测及影响分析 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 43 - 46.
- [10] SU Han, ZOU Rui, ZHANG Xiaoling, et al. Exploring the type and strength of nonlinearity in water quality responses to nutrient loading reduction in shallow eutrophic water bodies: insights from a large number of numerical simulations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 313: 115000.
- [11] LIANG Zhongyao, ZOU Rui, CHEN Xing, et al. Simulate the forecast capacity of a complicated water quality model using the long short-term memory approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124432.
- [12] 颜鹏东, 陈义忠, 张佳锋, 等. 基于多层规划的武汉城市圈水量-水质耦合配置研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 72 - 81.
- [13] 李悦, 李志威, 胡旭跃, 等. 大通湖区水系连通工程改善水环境的效果评估 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 116 - 23.
- [14] 李添雨, 李振华, 黄炳彬, 等. 基于 MIKE 21 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.
- [15] CHEN Libin, YANG Zhifeng, LIU Haifei. Assessing the eutrophication risk of the Danjiangkou Reservoir based on the EFDC model [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 96: 117 - 127.
- [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] 徐存东, 訾亚辉, 黄嵩, 等. 基于 Mike21 的圩区河网水动力调控方法研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 54(7): 161 - 170.
- [18] 鄢碧鹏, 柳自强, 王磊, 等. 基于环境流体动力学模型的蠡湖补水方案数值模拟 [J]. 环境污染与防治, 2022, 44(5): 607 - 611 + 686.
- [19] 王亚宁, 李一平, 程月, 等. 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 [J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2778 - 2786.
- [20] 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.
- [21] 王世强, 石伟, 欧阳虹, 等. 基于水量-水质模型的星海湖生态补水量研究 [J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(5): 180 - 186.
- [22] 雷兴碧, 吴岳玲, 邱小琮, 等. 星海湖水环境容量研究 [J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3): 34 - 38.
- [23] 杨海江, 钟艳霞, 罗玲玲, 等. 基于贝叶斯的星海湖湿地水质评价及特征分析 [J]. 节水灌溉, 2018(4): 92 - 95 + 104.
- [24] 国家环境保护局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [25] 徐国宾, 段宇. 淮河与洪泽湖演变及水沙互馈关系 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [26] 石嘴山市人民政府. 石嘴山市生态文明建设规划(2020—2025年) [EB/OL]. (2020-12-29) [2023-08-23]. http://www.shizuishan.gov.cn/zwgk/zc/szfwj/zzf/202111/t20211112_3125848.html.