

不同来水条件下洞庭湖二维水动力水质模拟

盛东^{1*}, 伍佑伦¹, 周天文², 薛联青², 李娜¹

¹湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙

²河海大学水文水资源学院, 江苏 南京

收稿日期: 2023年12月6日; 录用日期: 2024年1月30日; 发布日期: 2024年2月21日

摘要

为研究不同来水条件对洞庭湖水动力水质的影响, 本文构建了洞庭湖二维水动力-水质耦合模型, 通过改变模型水动力边界和水质边界过程, 模拟并分析了江湖水量交换变化和入湖污染负荷变化下洞庭湖水动力水质的响应过程, 研究结果表明: ① 三峡运行后三口入湖水量、江湖连接处的水力特性发生变化, 进而影响湖区水动力水质的时空分布情况, 如10月份三峡进入蓄水期, 入湖水量减少, 湖区TP、TN浓度整体呈上升趋势, 但由于长江干流来水减少, 出湖口水力坡度加大, 东洞庭湖站至出湖口区域的TN、TP浓度有明显的减少趋势; ② 当保持基准年入湖流量过程不变, 使入湖污染负荷量整体减少10%时, 西洞庭湖北部、南洞庭湖南部区域TP、TN浓度下降幅度较明显, 东洞庭湖站6、7月份, 万子湖站5、10月份TP将达到III类水标准, 东洞庭湖站9月份、小河咀站7~10月份TN将达到III类水标准。

关键词

洞庭湖, 水动力模型, 水质标准, 二维耦合模型, 三峡工程

Two-Dimensional Hydrodynamic Water Quality Simulation of Dongting Lake under Different Incoming Water Conditions

Dong Sheng^{1*}, Youlun Wu¹, Tianwen Zhou², Lianqing Xue², Na Li¹

¹Hunan Water Resources and Hydropower Research Institute, Changsha Hunan

²College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Received: Dec. 6th, 2023; accepted: Jan. 30th, 2024; published: Feb. 21st, 2024

作者简介: 盛东(1979.4-), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要从事流域(区域)水资源管理、水文物理规律及流域水文模拟、农田灌溉等研究。
*通讯作者 Email: shengdong1979@163.com

文章引用: 盛东, 伍佑伦, 周天文, 薛联青, 李娜. 不同来水条件下洞庭湖二维水动力水质模拟[J]. 水资源研究, 2024, 13(1): 21-31. DOI: 10.12677/jwrr.2024.131003

Abstract

In order to study the impact of different water inflow conditions on the hydrodynamic and water quality of Dongting Lake, a two-dimensional hydrodynamic water quality coupling model of Dongting Lake was constructed in this paper. By changing the hydrodynamic boundary and water quality boundary process of the model, the response process of hydrodynamic and water quality of Dongting Lake under the change of water exchange and pollution load into the lake was simulated and analyzed. The research results show that: 1) After the Three Gorges Project operation, the water inflow into the lake and the hydraulic characteristics of the junction between rivers and lakes changed, thus affected the temporal and spatial distribution of hydrodynamic water quality in the lake area. When the Three Gorges Project entered the impoundment period in October, the water inflow into the lake decreased, and the concentration of TP and TN in the lake area increased as a whole. However, due to the decrease of water inflow from the main stream of the Yangtze River, the hydraulic gradient of the outlet increased, and the concentration of TN and TP in the area from East Tongjongo station to the outlet decreased significantly. 2) When the flow process of the lake inflow in the base year remains unchanged and the overall pollution load in the lake is reduced by 10%, in the West Dongting Lake, The concentration of TP and TN in the north and south of South Dongting Lake decreased significantly. In June and July at East Dongting Lake Station, and in May and October at Wanzi Lake Station, TP will reach Class III water standards. In September, at East Dongting Lake Station and Xiaohezui Station from July to October, TN will reach Class III water standard.

Keywords

Dongting Lake, Hydrodynamic Model, Water Quality Class, Two-Dimensional Coupling Model, Three Gorges Project

Copyright © 2024 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

洞庭湖北纳荆江松滋口、太平口、藕池口和调弦口四口分流(调弦口于 1958 年建闸封堵, 以下简称三口), 南汇湘江、资水、沅江、澧水四水入流, 经湖泊调蓄后于城陵矶汇入长江, 为典型的吞吐调蓄型湖泊[1]。复杂的水系连通关系使得长江与洞庭湖相互作用, 江湖水沙交换关系复杂多变, 自三峡工程建成运行以来, 洞庭湖水情发生显著变化, 如枯水期提前、退水期水位加速消退、水质恶化等[2] [3] [4]。现有研究大多聚焦于江湖水量交换变化引起的洞庭湖水位的变化[5] [6], 而水量变化对湖泊水质的影响研究还有待深入开展[7] [8]; 根据《湖南省“十四五”生态环境保护规划》, 未来将继续实施洞庭湖污染物控制与削减行动, 因此模拟出入湖河流污染物排放总量持续降低后洞庭湖水水质时空分布有重要意义。本文以率定验证后的洞庭湖水动力水质模型为工具, 通过改变水动力边界和水质边界过程, 模拟并分析了江湖水量交换变化和入湖污染负荷变化下洞庭湖水动力水质的响应过程, 为长江中下游江湖治理和水资源合理开发利用提供理论依据和参考价值。

2. 研究资料与方法

2.1. 研究资料

地形资料选取 30 m 的 DEM 数据(数据来源: <http://www.gscloud.cn/search>), 为保证模型运行效率, 将湖区

散点高程重采样为 300 m；入湖站包括新江口站(松滋河西支)、沙道观站(松滋河东支)、弥陀寺站(虎渡河)、康家岗站(藕池河西支)、管家铺站(藕池河东支)、湘潭站(湘江)、桃江站(资水)、桃源站(沅水)和石门站(澧水)，数据主要为各入出湖站点日流量、水位数据；水质监测站点包括湘资沅澧四水的樟树港、万家咀、坡头和沙河口，藕池东支水质监测站点为藕池河东支入境，藕池西支水质监测站点为管垵，水质站点数据包含各入湖河道监测站日数据；气象数据包含湖区岳阳站(编号 57584)、常德站(编号 57662)和沅江站(编号 57671)日尺度降水量、蒸发量和风场数据(数据来源：<http://data.cma.cn>)。各水文站、水质监测站点位置如图 1 所示。

2.2. 水质模型构建

水质模型为 Transport 模块，待设定的参数为模拟污染物(本文为 TP、TN)的扩散系数 D 和降解系数 F 。根据相关研究结果[9] [10]，扩散系数初始值均为 $1.2 \text{ m}^2/\text{s}$ ，降解系数分别为 2.31 e^{-007} (TP)和 2.89 e^{-007} (TN)；本文收集到的洞庭湖 TP、TN 浓度值均为日尺度数据，模型水质边界过程为日浓度变化过程；污染物初始浓度根据水质站观测时间段初始值进行空间插值，得到随空间变化的浓度值。

2.3. 情景方案设置

本文通过改变入湖流量过程，模拟并计算分析三峡运行前后江湖水量交换的变化对洞庭湖水位和水质的时空影响过程，为长江中下游江湖治理和水资源合理开发利用提供理论依据和参考价值。

“十三五”期间湖南省开展了洞庭湖生态环境专项整治、洞庭湖山水林田湖草系统治理等重大工程，严格控

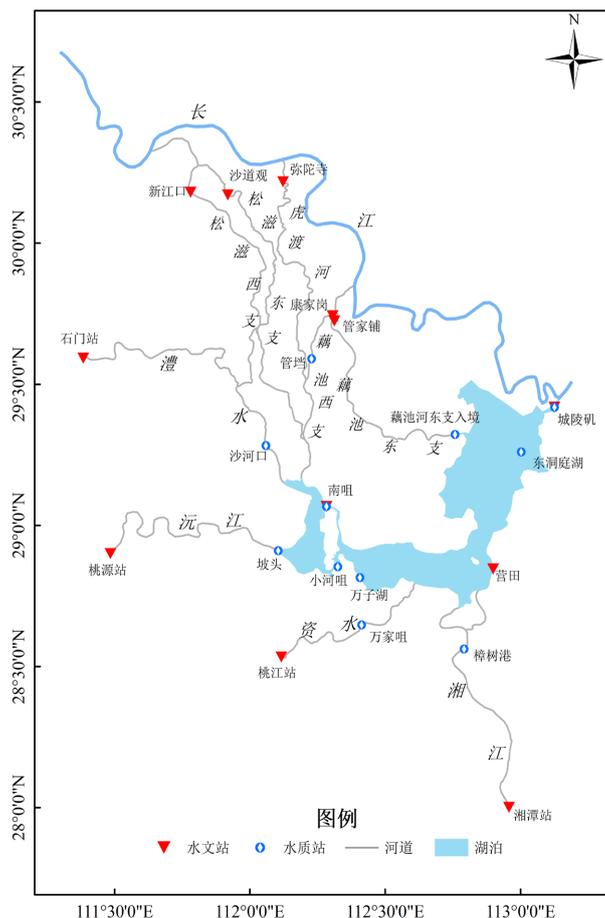


图 1. 湖区站点分布

制城乡生活污染和面源污染，洞庭湖水环境治理工作初现成效，TP、TN 浓度有所改善。根据《湖南省“十四五”生态环境保护规划》，将继续实施洞庭湖总磷控制与削减行动，持续降低环湖区域及入湖河流总磷污染物排放总量，预计 2025 年洞庭湖水质达到国家考核要求，其中 TP、TN 比 2018 年减少 10% 以上，因此本文以 2018 年的水质边界为基准，将入湖河流 TP、TN 指标浓度减小 10%，进一步模拟出洞庭湖未来可能的水质时空分布情况。通过改变模型水动力边界及水质边界设置了两组对照实验，各情景详细设置如表 1 所示。模型网格的划分见图 2。

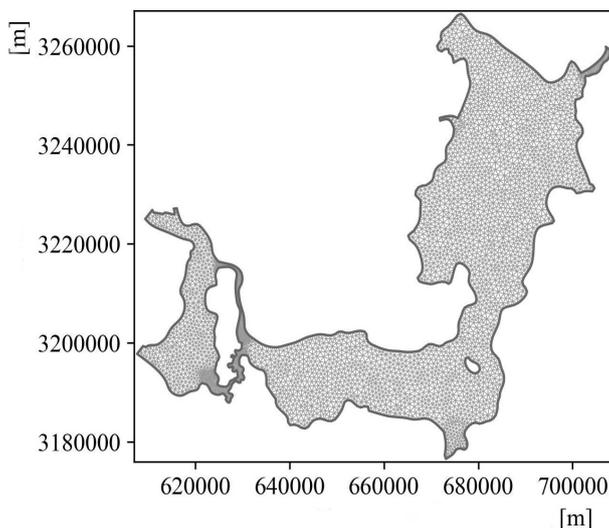


图 2. 洞庭湖网格划分

表 1. 模拟情景设置

对照组	情景	水动力边界	水质边界
江湖水量交换变化组	情景一	1960~2002 多年平均日流量过程	基准年污染负荷总量
	情景二	2003~2019 多年平均日流量过程	基准年污染负荷总量
入湖污染负荷变化组	情景三	基准年日流量过程	基准年水质过程
	情景四	基准年日流量过程	基准年水质指标浓度减少 10%

第一组为江湖水量交换变化组：以三峡运行的 2003 年为断点，分别输入 1960~2002 年和 2003~2019 年的多年平均日流量过程，模拟并探究三峡运行前后因江湖水量交换变化而引起的洞庭湖水位及水质的时空变化；为保持污染负荷总量与基准年相同，情景一和情景二的水质边界也要发生相应变化，计算公式如下：

$$WQ_i = WQ_{\text{基准}} \cdot \frac{Q_{\text{基准}}}{Q_i}$$

式中： $WQ_{\text{基准}}$ 为基准年水质过程， $Q_{\text{基准}}$ 为基准年流量过程。

第二组为入湖污染负荷变化组：情景四与基准年的入湖径流过程保持相同，各水质指标浓度减少 10%，以模拟出水动力现状条件下，入湖河流污染物排放总量进一步削减后洞庭湖水质的时空变化情况。

3. 模型率定与验证

为保证模型在洞庭湖丰水年、枯水年均有很好的模拟效果，对 1960~2019 年入湖径流量进行了统计，并根据 P-III 曲线[11]进行频率分析，选定 2018 年枯水年为率定年份，2019 年丰水年为验证年份。

3.1. 水动力模型率定与验证

水动力模型主要率定参数为湖底曼宁数, 通过对比东、西、南洞庭湖代表性水位站模拟水位值和实测水位值判断模型模拟结果, 评价指标为纳什系数(NSE) [12]。本文选取率定时间段为 2018 年 5 月 1 日 0 时~11 月 1 日 0 时, 最小时间步长为 180 s, CFL = 0.8, 初始水位为 24.7 m, 初始流速为 $0 \text{ m}^3/\text{s}$, 2018 年各站模拟结果如图 3 所示。从图 3 可看出模型模拟水位能够反映出湖泊实际水位的涨落过程, 率定期城陵矶站、南咀站、营田站纳什效率系数分别为 0.9431、0.9677 和 0.9133, 平均相对误差分别为 -1.44%、-1.53% 和 0.46%, 符合模型精度要求。此时, 湖泊底部浅滩部分曼宁数取值范围为 16~31, 深槽部分为 29~47。

本文选取验证时间段为 2019 年 5 月 1 日 0 时~11 月 1 日 0 时, 初始水位为 25 m, 其余参数与率定期保持一致, 2019 年各站模拟结果如图 4 所示。从图 4 可看出模型模拟水位能够反映出湖泊实际水位的涨落过程, 验证期城陵矶站、南咀站、营田站纳什效率系数分别为 0.9582、0.9054、0.9621, 平均相对误差分别为 -2.04%、-1.25% 和 0.64%, 除南咀站 7.13~8.11 日高水位模拟结果偏小以外, 模型总体较好地适用于洞庭湖的水动力模拟。

3.2. 水质模型率定与验证

水质模型待率定的参数为污染物的扩散系数和降解系数, 通过对比东、西、南洞庭湖代表性水位站模拟水质浓度值和实测水质浓度值判断模型模拟结果, 评价指标为相对误差。

模型率定时期与水动力模型保持一致, 均为 2018 年 5 月 1 日 0 时~11 月 1 日 0 时, 入湖边界为插值后的日尺度水质过程, 出湖口的水质边界为自由边界。2018 年各站模拟结果如图 5 所示。模型验证期为 2019 年 5 月 1 日 0 时~11 月 1 日 0 时, 模拟结果如图 6 所示。

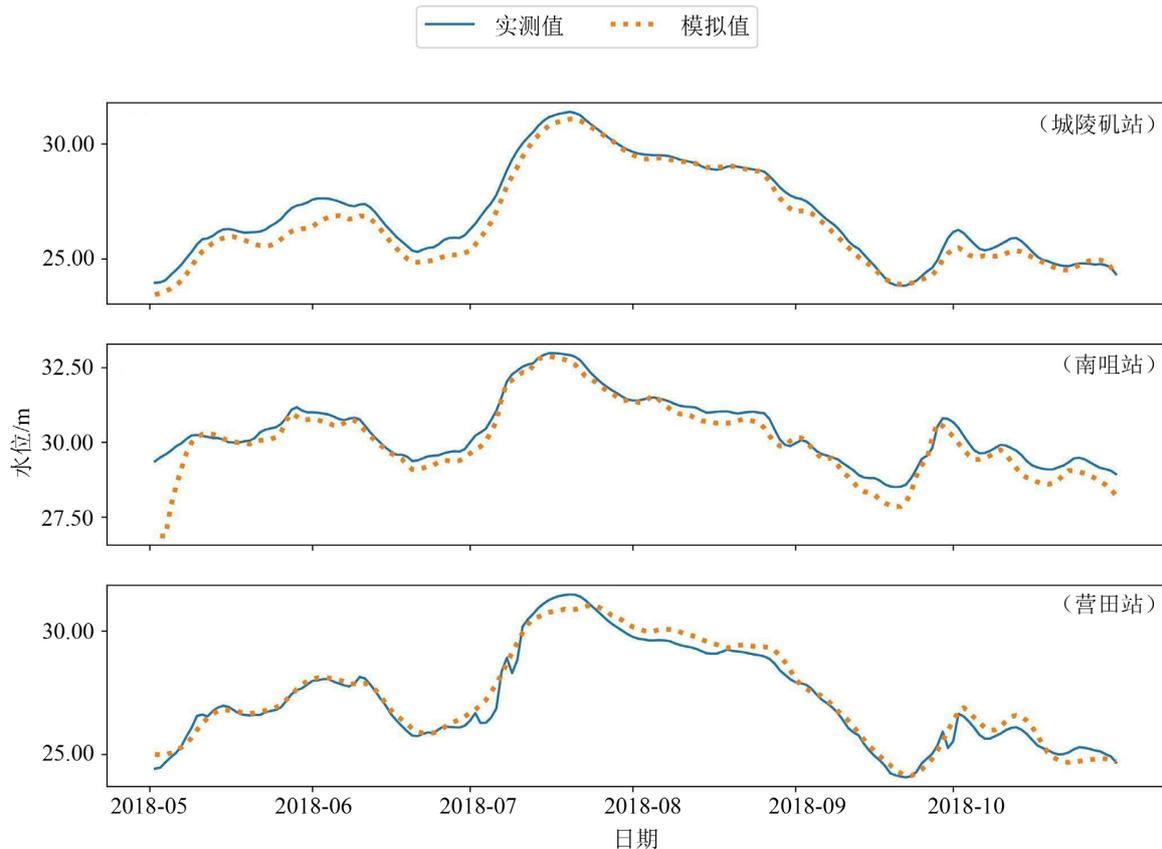


图 3. 模型率定期各验证站水位对比图

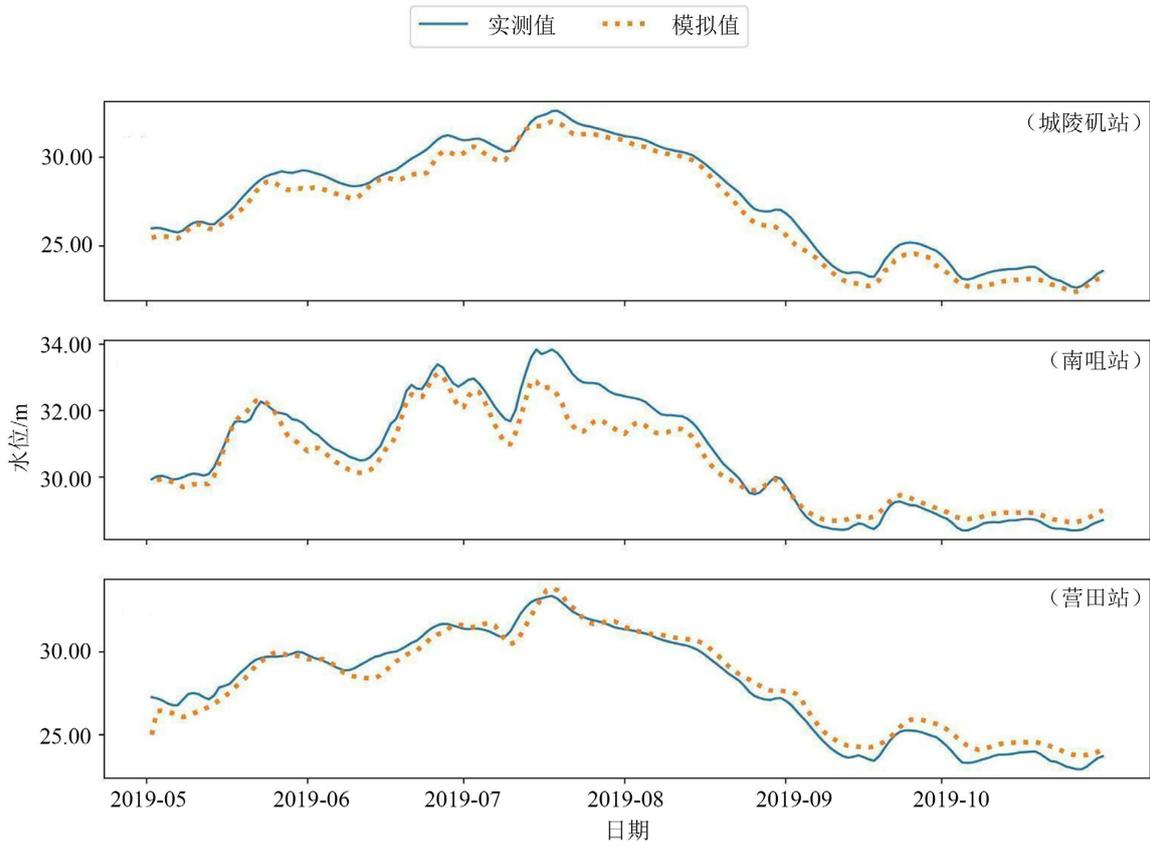


图 4. 模型验证期各验证站水位对比图

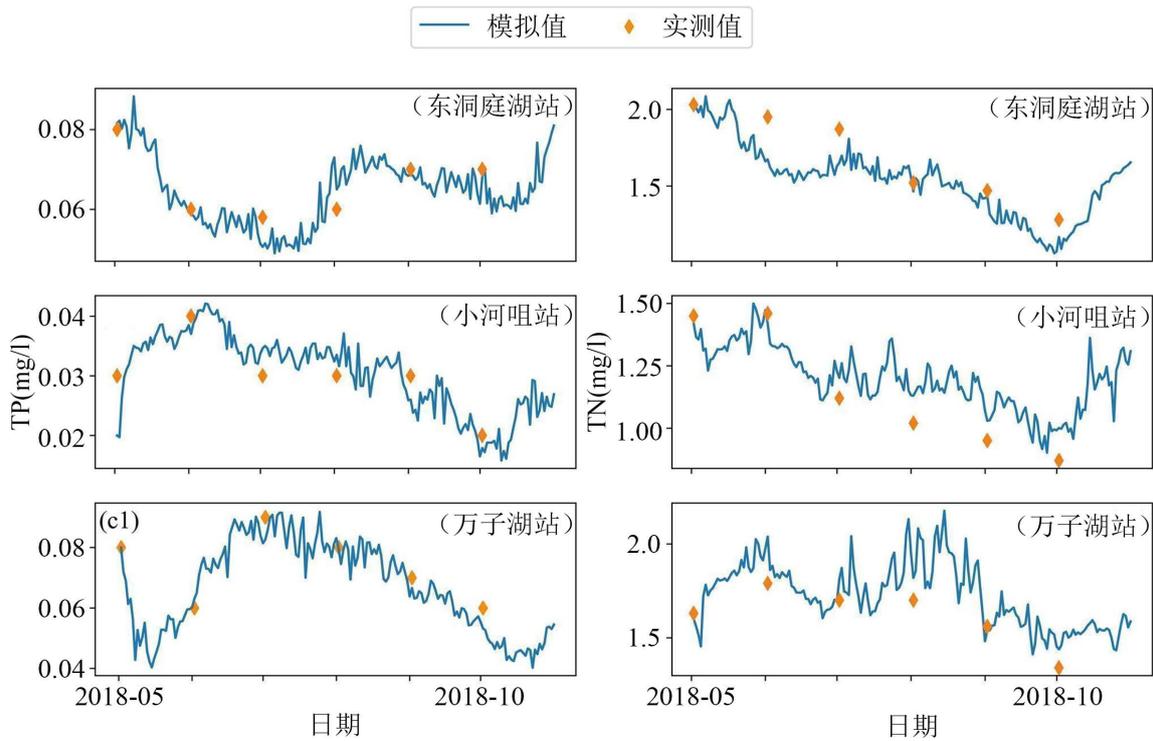


图 5. 水质模型率定期 TP、TN 模拟结果

从模拟结果可看出对于 TP 模拟结果, 除小河咀站 9 月初模型模拟结果的相对误差超过 15% 外, 其余模拟结果相对误差均在 15% 以内, 三个站点平均误差为 7.37%, 污染物负荷相对误差平均值为 8.47%, 模型模拟结果较好; 对于 TN 模拟结果, 东洞庭湖、小河咀、万子湖三站模拟结果相对误差均不超过 15%, 三个站点平均误差为 6.98%, 污染物负荷相对误差平均值为 7.45%, 模型模拟结果较好。此时模型 TP、TN 的扩散系数均为 $1.51\text{m}^2/\text{s}$, 降解系数分别为 $1.68\text{e}^{-007}/\text{s}$ 和 $2.89\text{e}^{-007}/\text{s}$ 。

从验证期模拟结果可看出对于 TP 模拟结果, 除小河咀站 5 月初、万子湖站 10 月初模型模拟结果的相对误差超过 15% 外, 其余模拟结果相对误差均在 15% 以内, 三个站点平均误差为 8.29%, 污染物负荷相对误差平均值为 9.85%, 模型模拟结果较好; 对于 TN 模拟结果, 东洞庭湖、小河咀、万子湖三站模拟结果相对误差均不超过 15%, 三个站点平均误差为 6.34%, 污染物负荷相对误差平均值为 5.98%。

与水位模拟结果相比, 水质模拟结果仍存在一定误差, 误差来源主要可分为以下三个方面: 1) 水质模型未考虑光合作用、区间污染排放、底泥释放等对水质的影响; 2) 水质模型参数设为单一值, 未考虑时间和空间的变化, 与实际情况存在偏差。

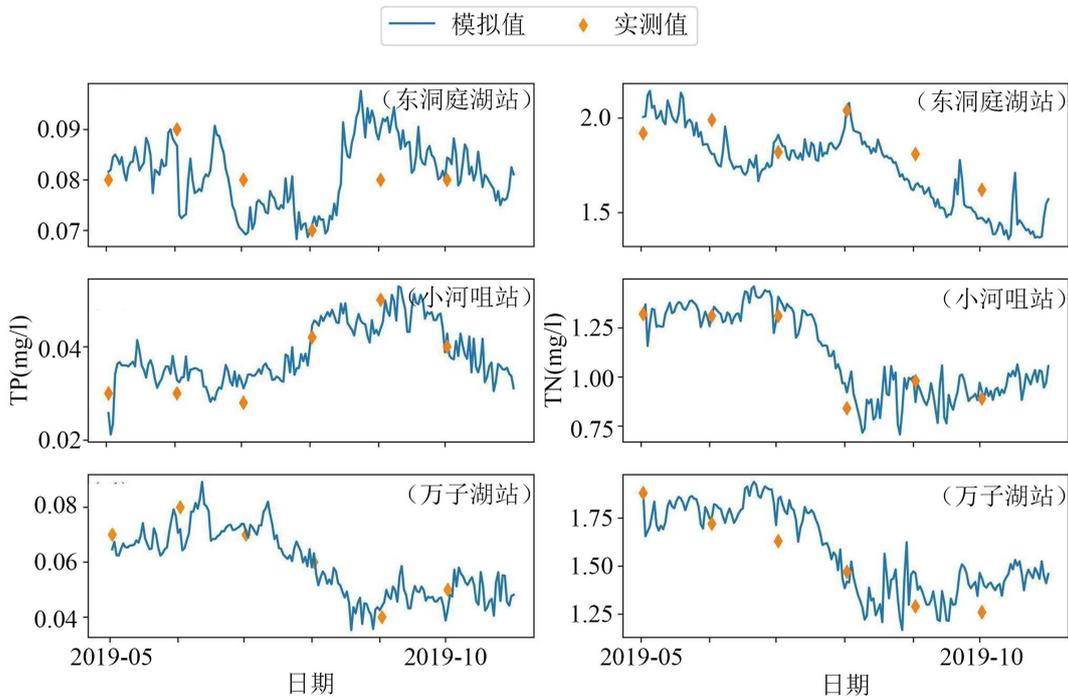


图 6. 水质模型验证期 TP、TN 模拟结果

4. 结果与分析

4.1. 水位时空变化规律

三峡运行前后洞庭湖各月平均水位空间分布如图 7 所示(因情景三和情景四水动力边界相同, 得到的水动力模拟结果相同, 故未对其水位变化进行分析), 洞庭湖水位在三峡运行前后均表现出西高东低的空间分布情况, 三峡运行期洞庭湖最高水位为 30.89 m, 较运行前降幅 0.29 m, 占比 0.93%, 分湖区而言, 三峡运行前后东、西、南洞庭湖最高水位均出现在 7 月, 其中情景一东、西、南洞庭湖最高水位分别为 30.78 m、32.14 m 和 30.94 m, 情景二东、西、南洞庭湖最高水位分别为 30.57 m、31.59 m 和 30.75 m, 分别降幅 0.21 m、0.55 m 和 0.19 m, 占比 0.68%、1.71% 和 0.61%, 西洞庭湖最高水位下降幅度较大。

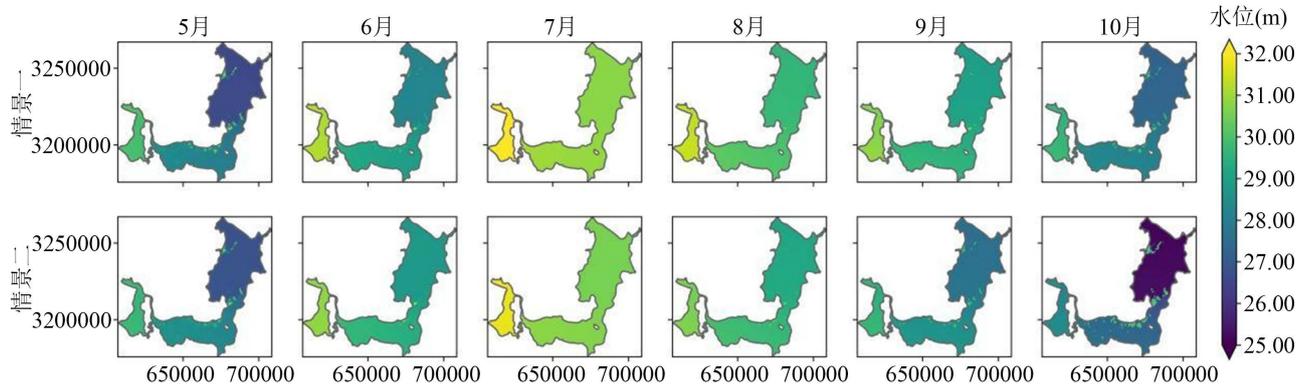


图 7. 三峡运行前后洞庭湖水水位空间变化

为进一步比较三峡运行前后湖区水位变化情况，将情景一和情景二模拟结果作差，得出三峡运行前后洞庭湖月均水位的空间差异，如图 8 所示(情景二减去情景一)，由图 8 可知三峡运行后洞庭湖 5、6 月份水位有所提升，整个湖区水位上升幅度分别为 0.10 m 和 0.31 m，7~10 月水位呈下降趋势，整个湖区水位下降幅度分别为 0.29 m、0.49 m、1.14 m 和 1.34 m，分别占比 0.93%、1.61%、3.86% 和 4.74%，可见退水期水位下降幅度较大。

分湖区而言，东、南洞庭湖 5、6 月水位有所抬升，7~10 月水位有所下降，其中东洞庭湖 5、6 月份分别抬升 0.19 m 和 0.55 m，南洞庭湖分别抬升 0.10 m 和 0.31 m，7~10 月东洞庭湖水位分别下降 0.21 m、0.44 m、1.29 m 和 1.87 m，南洞庭湖水位分别下降 0.19 m、0.36 m、0.95 m 和 0.72 m；西洞庭湖 5~10 月水位均呈下降趋势，降幅依次为 0.19 m、0.23 m、0.54 m、0.72 m、1.14 m 和 1.21 m；从以上数据可进一步得出三峡运行后洞庭湖涨水期水位有所上升，且东洞庭湖上升更为显著，西洞庭湖呈下降趋势；丰水期和退水期洞庭湖水位有所下降，丰水期下降幅度为西洞庭湖 > 东洞庭湖 > 南洞庭湖，其中西洞庭湖丰水期平均下降 0.8 m，水位下降最为显著，退水期下降幅度为东洞庭湖 > 西洞庭湖 > 南洞庭湖，其中东洞庭湖 10 月份下降 1.87 m，水位下降最为显著。

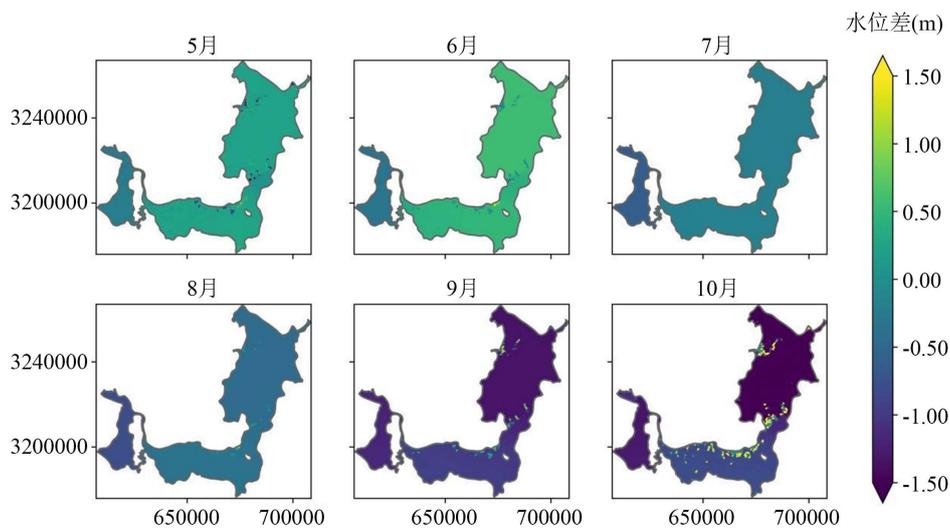


图 8. 水位空间差异图

4.2. 水质时空变化规律

不同情景下洞庭湖各月月平均 TP 浓度空间分布如图 9 所示，根据计算结果得出不同情景下洞庭湖 TP

浓度年内变化均有相同的规律，具体体现在丰水期 TP 浓度较高，在退水期呈下降趋势；不同情景下西洞庭湖北部、南洞庭湖东南部 TP 浓度较高(0.060~0.106 mg/l)，变化幅度较大，这与三口、湘江来流中 TP 浓度较大有关。

对比图 9 中情景一和情景二模拟结果可得出三峡运行后洞庭湖 5 月份 TP 浓度下降，平均降幅 0.002 mg/l，7~9 月份 TP 浓度有所提升，增幅依次为 0.004 mg/l、0.006 mg/l 和 0.005 mg/l，可见三峡运行后洞庭湖 TP 浓度在丰水期有所上升，该时期入湖水量减少，污染负荷总量不变，故 TP 浓度呈上升趋势；10 月份 TP 浓度整体有所上升，但东洞庭湖呈下降趋势；东洞庭湖西部(藕池河入湖口附近)、西洞庭湖北部(松滋河、虎渡河入湖口附近)TP 浓度增幅较大，介于 0.008~0.020 mg/l；分湖区而言，丰水期 TP 浓度上升幅度排序为东洞庭湖 > 西洞庭湖 > 南洞庭湖，其中东洞庭湖平均上升 0.006 mg/l，西洞庭湖平均上升 0.005 mg/l，南洞庭湖平均上升 0.003 mg/l。

对比图 9 中情景三和情景四模拟结果可得出 TP 污染负荷下降后洞庭湖 5~10 月份 TP 浓度均呈下降趋势，各月依次下降 13.82%，10.90%、16.13%、15.65%、8.91%和 8.65%，可见丰水期下降幅度较大，与该时期入流流量较大有关；由于西洞庭湖北部、南洞庭湖南部流量较大，该区域 TP 浓度下降幅度也较大(0.08~0.15 mg/l)；分湖区而言，丰水期 TP 浓度下降幅度排序为西洞庭湖 > 南洞庭湖 > 东洞庭湖，其中西洞庭湖平均降幅为 0.006 mg/l，南洞庭湖平均降幅为 0.004 mg/l，东洞庭湖平均降幅为 0.002 mg/l。

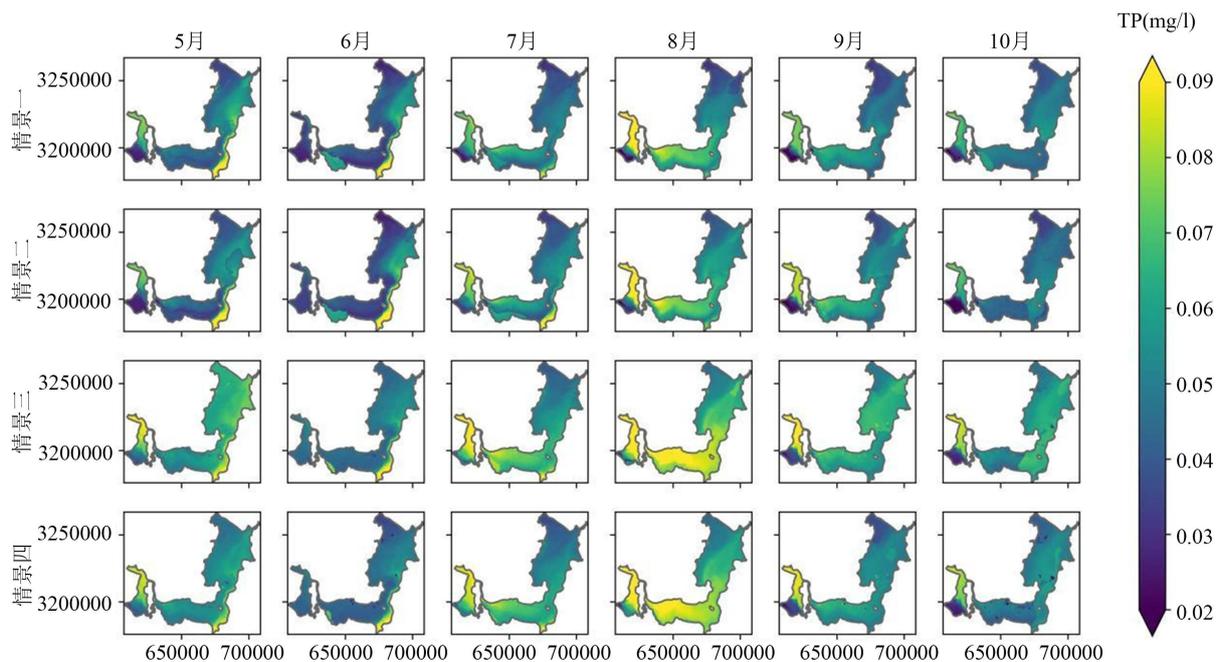


图 9. 不同情景下洞庭湖 TP 浓度空间变化

不同情景下洞庭湖各月月平均 TN 浓度空间分布如图 10 所示，根据计算结果得出不同情景下洞庭湖 TN 浓度年内变化与 TP 年内变化规律相似，均在涨水期呈上升趋势，丰水期 TN 浓度较高，在退水期呈下降趋势，而东洞庭湖在 5~10 月 TN 浓度整体呈下降趋势；同样由于三口、湘江来水 TN 浓度较大，使得西洞庭湖北部、南洞庭湖东南部 TN 浓度较高(1.90~2.40 mg/l)，变化幅度较大。

对比图 10 中情景一和情景二模拟结果可得出三峡运行后洞庭湖 5、6 月份 TN 浓度分别降低了 0.09 mg/l 和 0.10 mg/l，在 7~10 月 TN 浓度均有所提升，增幅依次为 0.16 mg/l、0.18 mg/l、0.17 mg/l 和 0.05 mg/l，可见三峡运行后洞庭湖站 TN 浓度在丰水期上升幅度较大，该时期入湖水量减少，污染负荷总量不变，故 TP 浓度呈上升

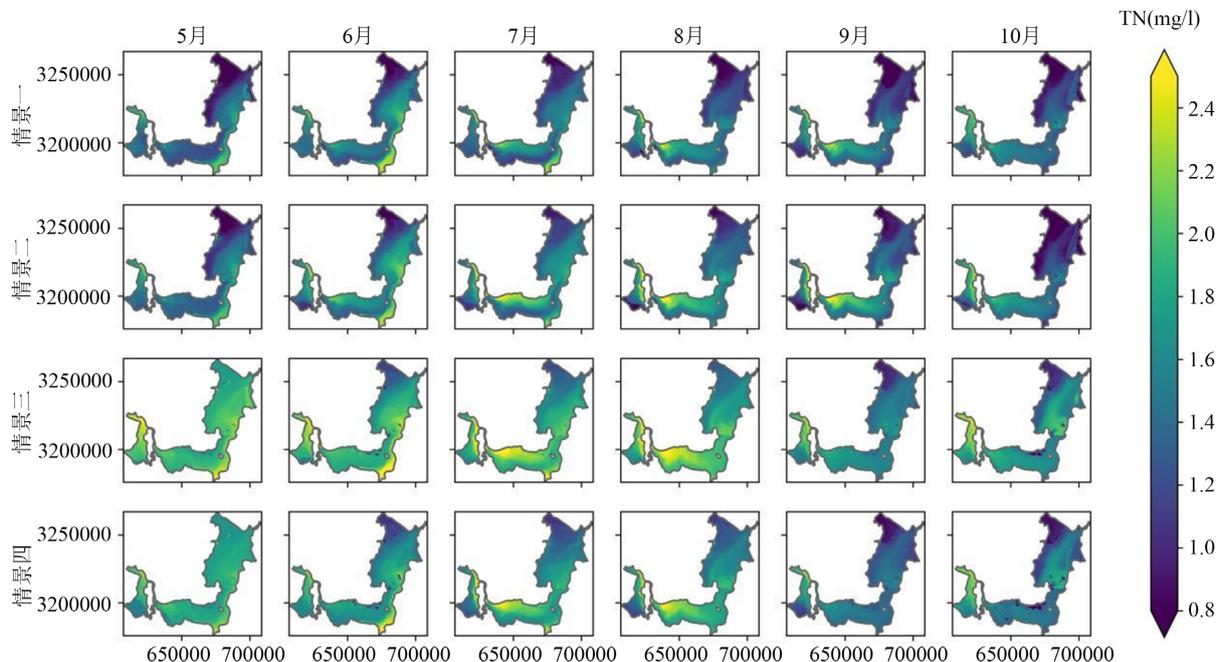


图 10. 不同情景下洞庭湖 TN 浓度空间变化

趋势；东洞庭湖站至城陵矶出口区域在 10 月份 TN 浓度有所下降，降幅在 0.15~0.30 mg/l，这与该时期三峡蓄水，长江干流水位较低，加快湖水注入长江有关；东洞庭湖西部(藕池河入湖口附近)、西洞庭湖北部(松滋河、虎渡河入湖口附近)TN 浓度增幅较大，达 0.30 mg/l 以上；分湖区而言，丰水期 TN 浓度上升幅度排序为西洞庭湖 > 南洞庭湖 ≈ 东洞庭湖，其中西洞庭湖平均上升 0.19 mg/l，东、南洞庭湖平均上升 0.17 mg/l。

对比图 10 中情景三和情景四模拟结果可得出 TN 污染负荷下降后洞庭湖 5~10 月份 TN 浓度均呈下降趋势，各月降幅依次为 0.17 mg/l、0.19 mg/l、0.20 mg/l、0.22 mg/l、0.17 mg/l 和 0.15 mg/l，可见丰水期下降幅度较大，与该时期入流流量较大有关；由于西洞庭湖北部、南洞庭湖南部流量较大，该区域 TN 浓度下降幅度也较大(0.20~0.35 mg/l)；分湖区而言，丰水期 TN 浓度下降幅度排序为西洞庭湖 > 南洞庭湖 > 东洞庭湖，其中西洞庭湖平均下降 0.23 mg/l，南洞庭湖平均下降 0.18 mg/l，东洞庭湖平均下降 0.16 mg/l。

5. 结论

1) 三峡运行后洞庭湖 5、6 月份的多年月均水位有所提升，7~10 月月均水位呈下降趋势；分湖区而言，5、6 月份东、南洞庭湖水位均有所抬升，东洞庭湖上升更为显著，西洞庭湖呈下降趋势，7~9 月水位下降幅度为西洞庭湖(2.57%) > 东洞庭湖(2.21%) > 南洞庭湖(2.13%)，10 月下降幅度为东洞庭湖(6.84%) > 西洞庭湖(4.11%) > 南洞庭湖(2.54%)；

2) 洞庭湖在丰水期 TP、TN 浓度较高，退水期呈下降趋势；不同情景下西洞庭湖北部、南洞庭湖东南部 TP、TN 浓度较高(TP: 0.060~0.106 mg/l, TN: 1.90~2.40 mg/l)，变化幅度较大，这与三口、湘江来流中 TP、TN 浓度较大有关；

3) 当保持 2018 年入湖流量过程不变，当入湖污染负荷量整体减少 10% 时，洞庭湖 5~10 月份 TP、TN 浓度均呈下降趋势，东洞庭湖站 6、7 月份，万子湖站 5、10 月份 TP 均将达到 III 类水标准，东洞庭湖站 9 月份、小河咀站 7~10 月 TN 均将达到 III 类水标准；对于 TP 而言，7~9 月三站平均下降 18.08%，且下降幅度为小河咀站 > 万子湖站 > 东洞庭湖站，对于 TN 而言，7~9 月三站平均下降 16.86%，且下降幅度为万子湖站 > 东洞庭湖站 > 小河咀站。

基金项目

湖南省水利科技重大项目(XSKJ2021000-10); 湖南省重大水利科技项(XSKJ2019081-08); 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设专项(2022sfq50)。

参考文献

- [1] 黄兵, 姜恒, 廖小红, 等. 水文变异条件下的洞庭湖生态水位研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(3): 88-91, 96.
- [2] YUAN, Y. J., ZENG, G. M., LIANG, J., et al. Variation of water level in Dongting Lake over a 50-year period: Implications for the impacts of anthropogenic and climatic factors. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 450-456. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.010>
- [3] 肖潇, 毛北平, 吴时强. 近 100 年来长江与洞庭湖汇流河段水文特征演变[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 266-276.
- [4] 帅红, 李辉艳, 李赛, 等. 三峡工程对洞庭湖水环境质量的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1315-1323.
- [5] GAO, Y., XIE, Y. H. and ZOU, D. S. Hydrological regime change and its ecological responses in East Dongting Lake, China. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2020, 20(1): 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.07.003>
- [6] 戴雪, 何征, 万荣荣, 等. 近 35a 长江中游大型通江湖泊季节性水情变化规律研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 118-125.
- [7] 薛联青, 成诚, 汪露, 等. 洪泽湖中低水位下泄流能力数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 32-38.
- [8] 张冬冬, 戴明龙, 陈玺, 等. 荆江河段地形变化对洞庭湖水文情势的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 71-80.
- [9] 易雨君, 郭玉明, 刘泓汐. 不同典型年“引江济巢”工程对巢湖水质的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(6): 1901-1911.
- [10] 陆锦. 基于 MIKE 模型的鄱阳湖水动力水质模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [11] 雷冠军, 王文川, 殷峻暹, 等. P-III型曲线参数估计方法研究综述[J]. 人民黄河, 2017, 39(10): 1-7.
- [12] 刘新宇, 薛联青, 刘远洪, 等. 洪泽湖退圩还湖前后调蓄能力模拟及对比分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 88-91, 180.