

降水量对湖山水库水质变化的影响研究

苗晨阳¹, 王明明², 盖永伟³, 龙玉桥^{1,4}

¹南京水科院瑞迪科技集团有限公司, 江苏 南京

²宿迁市水利局, 江苏 宿迁

³江苏省水资源服务中心, 江苏 南京

⁴水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京

收稿日期: 2023年12月26日; 录用日期: 2024年1月22日; 发布日期: 2024年2月4日

摘要

湖山水库是海南省文昌市重要地表水饮用水源地, 其上游河段的COD和TP有超标现象, 故确定库区污染物的输移扩散规律是提升水库水质的研究基础。以水库监测资料、DEM模型、遥感及GPS实测信息为基础, 采用GIS技术将湖山水库边界和地形进行数字化处理, 通过实测数据进行参数率定与模型验证, 确定湖山水库的水动力模型和水质模型, 将模型进行耦合联用, 选取COD、TP、NH₃-H进行数值模拟。在湖库风生流的基础上分析了降水量对水库水质演化过程的影响, 并探究湖山水库水质演化规律。结果表明: 1) 模型模拟的水动力和水质结果与实测结果较为吻合, 表明模型选取参数合理。2) 水动力模拟方面, 不同降水量条件下库区流场与流速分布规律相似, 库区中部流速分布较均匀且变化较小。3) 水质模拟方面, 各降水量条件下库区中部监测点和出库口监测点COD浓度变化规律相似, 丰水期COD浓度明显高于平水期和枯水期。

关键词

降水量, 中型水库, 数值模拟, 水质演化

Study on the Influence of Precipitation on Water Quality Change in Hushan Reservoir

Chenyang Miao¹, Mingming Wang², Yongwei Gai³, Yuqiao Long^{1,4}

¹Reddy's Technology Group Co., Ltd., Nanjing Academy of Water Sciences, Nanjing Jiangsu

²Suqian Water Conservancy Bureau, Suqian Jiangsu

³Jiangsu Provincial Water Resources Service Center, Nanjing Jiangsu

⁴Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing Jiangsu

Received: Dec. 26th, 2023; accepted: Jan. 22nd, 2024; published: Feb. 4th, 2024

作者简介: 苗晨阳, 男, 出生于1993年8月, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要从事水环境治理咨询设计工作, Email: 379415856@qq.com

文章引用: 苗晨阳, 王明明, 盖永伟, 龙玉桥. 降水量对湖山水库水质变化的影响研究[J]. 水资源研究, 2024, 13(1): 60-68.

DOI: 10.12677/jwrr.2024.131007

Abstract

The Hushan Reservoir is an important drinking water source in Wenchang City, Hainan Province. The COD and TP in its upstream section are above normal, so determining the transport and diffusion laws of pollutants in the reservoir area is the research basis of improving the reservoir water quality. Based on the monitoring data, DEM models, remote sensing and GPS measurement information, GIS technology is used to digitize the boundaries and terrain of the reservoir. Parameter calibration and model validation are carried out through measurement data to determine the hydrodynamic and water quality models. The models are coupled and combined, and COD, TP, NH₃-H are selected for numerical simulation. The influence of precipitation on the evolution of water quality in the reservoir is analyzed on the basis of the wind flow of the lake and reservoir, and the evolution law of water quality of the Hushan reservoir is explored. The results show that: 1) The hydrodynamic results simulated by the model are in good agreement with the measured data, indicating that the parameters selected by the model are appropriate. 2) In terms of hydrodynamic simulation, the distribution of flow field and flow velocity in the reservoir area is similar under different precipitation conditions, and the flow velocity distribution in the central reservoir area is relatively uniform and the change is small. 3) In terms of water quality simulation, the COD concentration of the monitoring points in the middle of the reservoir area and the monitoring point at the outlet of the reservoir area are similar under different precipitation conditions, and the COD concentration in the wet season is significantly higher than that in the flat water season and the dry season.

Keywords

Precipitation, Medium-Sized Reservoirs, Numerical Simulation, Water Quality Evolution

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

当前,我国水环境安全问题面临严峻的形势,根据2019年国家环境保护局公布的数据,全国七大水系地表水监测断面中,I~III类水质占71%,IV~V类占24.9%,劣V类水质占4.1%,有29%的江河湖库无法达到饮用水水源地标准[1]。

海南省位于我国最南端,是中国的经济特区、自由贸易试验区,但近年来海南省地区农业面源污染严重、畜牧水产业发展繁荣,由此引发大量污染物伴随河流、降雨径流等方式进入水库,造成严峻的水库水环境问题,特别是水源地水库的饮水安全问题。因此,水环境治理迫在眉睫,需要寻求有效的水质提升措施,而水库水质分布和变化规律的研究是水质提升的基础。

学者们在大量湖库模型上进行水质分布和变化规律研究,总结出水质分析、评价、模拟研究的方法[2][3][4][5][6]。前人主要在水动力模型基础上对水质进行模拟分析,而基于不同降水量的水动力对中小型水库水质的影响研究较少,因此本文采用水动力模型及对流扩散模型,分析不同降水量下典型年的水质指标COD、NH₃-H、TP在时间和空间上的分布规律,探究不同水文条件对水质指标的影响规律,这对水环境整治具有重要意义,以为水库水环境修复提供决策依据。本文先介绍了研究区概况、数值方程、模型边界,再对不同情景下的湖山水库进行数值模拟,最后将计算分析结果进行分析、对比、总结。

2. 研究方法

2.1. 研究区概况

湖山水库位于中国海南省文昌市，地处阶地平原区，于 1958 年春兴建，是一宗以灌溉为主，兼防洪、发电、养殖等综合利用效益较好的中型水库。湖山水库流域雨季为每年 5~10 月，降雨量约占全年总量 85%；枯季为每年 11 月~翌年 4 月，降雨量仅占全年总量 15% 左右。

2.2. 水质现状

湖山水库大多数情况下都是 IV 类主要超标因子为总磷和高锰酸盐，指数的超标倍数分别为 1.6 倍和 1.8 倍。水体有轻微浑浊，透明度不高，无任何异味。依据 2017~2018 年湖山水库北山村河流环境质量点位的连续监测，采用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)表 1 中的 III 类标准限值作为参考，其检测结果为：2017~2018 年湖山水库北山村断面水质基本为 IV 类。表 1 为 2017~2018 年湖山水库北山村河流环境质量点位的连续监测数据。

表 1. 湖山水库 2017~2018 年监测数据

断面名称	采样日期	指标									
		氨氮 (mg/L)	化学需氧量 (mg/L)	高锰酸盐指数 (mg/L)	石油类 (mg/L)	总磷 (mg/L)	pH 值	溶解氧 (mg/L)	铁 (mg/L)	锰 (mg/L)	水温 (°C)
	2017.01.03	0.436	15	7.8	0.03	0.06	7.20	10.71	0.04465	0.00848	22.8
	2017.03.01	0.536	19	7.9	0.02	0.06	8.50	5.80	0.02748	0.00198	22.5
	2017.05.04	0.5	18	8.6	0.01	0.06	8.08	9.18	0.0226	0.00181	29.9
北山村河 流环境质 量点位	2017.07.06	0.59	16	9.7	0.02	0.06	8.84	6.43	0.020	0.0050	31.9
	2017.09.06	0.49	22	9.6	0.02	0.05	8.45	9.52	0.0705	0.0243	32.7
	2017.11.09	0.44	18	8.6	0.02	0.06	6.81	6.99	0.020	0.0050	25.0
	2018.01.04	0.37	19	7.5	0.02	0.09	7.24	5.61	0.015	0.0020	19.0
	2018.03.07	0.64	15	9.4	0.02	0.09	7.31	6.02	0.005	0.0100	25.8

2.3. 研究数据

本文研究所用水库水位、降雨蒸发数据来源于湖山水库管理站提供的湖山水库主要观测成果日、月报，模型初始水质数据依据湖山水库北山村河流环境质量点位的连续监测数据。

3. 模型建立

水质数学模型是指水体含有物(包括化学物质、热、放射性物质、生物体)因水动力和生物化学作用而发生的物理的、化学的和生物学的各种反应，形成错综复杂的迁移转化过程所做的数学描述和模拟[7]。目前广泛应用于湖库水质模拟的数模软件有 EFDC [8]、ROMS [9]、FVCOM [10]、MIKE21 等。麻荣等[11]建立 MIKE21 水动力模型，在典型降雨情况下模拟了研究区域内的积水过程。冯静[12]利用水动力数值模拟正确给出研究海域全场的水动力状况分布。梁云等[13]基于 MIKE21 水动力模型研究了洪泽湖的水位变化过程。郭凤清等[14]构建了二维水动力模型，得到滬江蓄洪区的洪水演进模拟结果。袁雄燕等[15]在二维数值模拟中，确定模型在桥渡壅水计算中的适用性。根据前人常用水质数值模拟方法，本文选用二维水动力水质模拟方法。

3.1. 研究区域网格划分

本文以湖山水库为研究对象,根据库区在卫星图上的实际水面形状,以现有水面边界资料、地形资料、DEM数据为基础,采用GIS技术对湖山水库边界和地形进行处理,得到水面边界和地形点坐标(北京1954坐标系),确定研究区域模拟范围及水库地形状况。

湖山水库现状水面面积 4.937 km^2 ,数字化水面边界轮廓导入后进行网格剖分,划分为非结构化三角形网格,模型共概化了558个网格节点,834个网格。计算网格布置示意图和地形高程示意图见图1,其中,point 1为入库口监测点,point 2~point 4为水库中部监测点,point 5为出库口监测点。

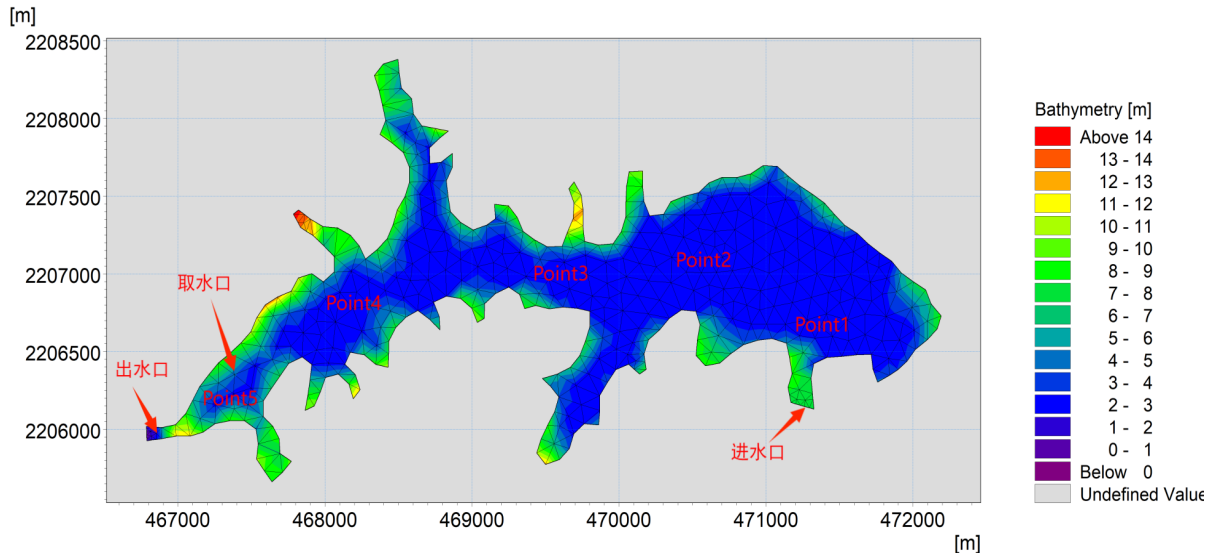


图1. 湖山水库模型网格划分和地形高程示意图

3.2. 模型边界定解条件

COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP初始质量浓度采用湖山水库取水口实测值,分别为 19 mg/L 、 0.37 mg/L 、 0.09 mg/L ,由于入库河流白芒溪水质较差,常年监测水质指标超出地表V类水,本次计算进水水质假设为地表V类水,其中COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP浓度分别为 40 mg/L 、 2 mg/L 、 0.2 mg/L 。

3.3. 成果合理性分析

为保证湖山水库水动力和水质模型模拟的精确性和可行性,需要对二维水动力和水质模型选取的参数进行率定和验证。数值模拟计算2018年1月~2018年12月的水库率定点水位值时间序列,与湖山水库逐日库水位相比可得验证结果如图2所示。率定点模拟水位与实测水位绝对误差最大值小于0.6,相对误差小于4.7%,模拟水位与实测水位整体上拟合较好且水位的升降走势保持一致。

水质模拟方面,选取2018年3月份水库监测点Point 1与Point 4的COD、TP浓度实测值作为率定与验证资料,经过模型参数调整,确定最终计算参数。Point 1点位COD浓度的实测值和模拟值分别为 22.0 和 19.5 mg/L ,相对误差为2.5;TP浓度的实测值和模拟值分别为 0.09 和 0.12 mg/L ,相对误差为0.03;Point 4点位COD浓度的实测值和模拟值分别为 21.5 和 19.9 mg/L ,相对误差为1.6;Point 4点位TP浓度的实测值和模拟值分别为 0.08 和 0.11 mg/L ,相对误差为0.03。以COD为例,模拟值接近实测值,拟合程度较好。最大绝对值偏差为 2.5 mg/L ,相对误差为11.36%,因此,应用本文所构建的水动力-水质耦合模型对湖山水库的水动力和水质模拟是可行的。

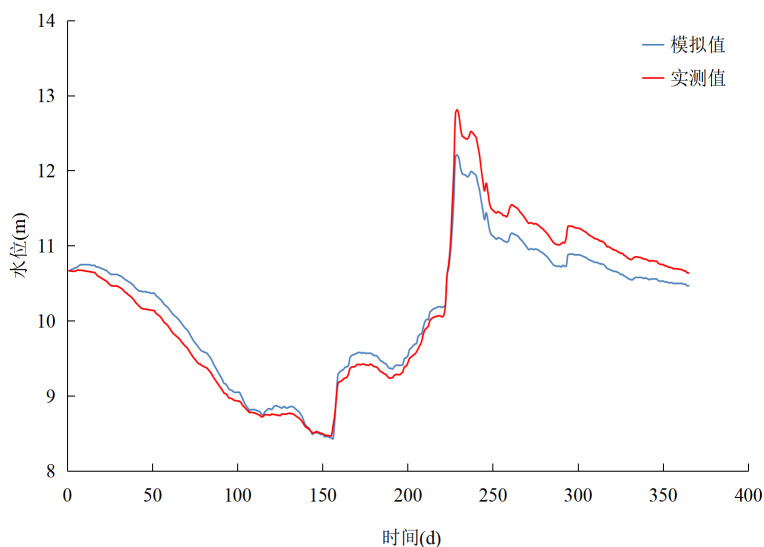


图 2. 取水口率定点水位验证图

4. 计算方案与结果分析

4.1. 计算方案

主要依据所求的河网地区的降水量资料进行选取，考虑该河网流域内的雨量站现存的所有的年降水量资料，数据来源于湖山水库管理站日观测记录，再采用 P-III 型水文频率分析法对数据进行整理归纳，求出不同降水量条件下的典型年份，根据湖山水库 1989 年~2018 年降雨资料分析可得，丰水期典型年份为 1997 年，平水期典型年份为 1992 年，枯水期典型年份为 2003 年，图 3 为不同降水量条件下典型年降水过程柱状图。

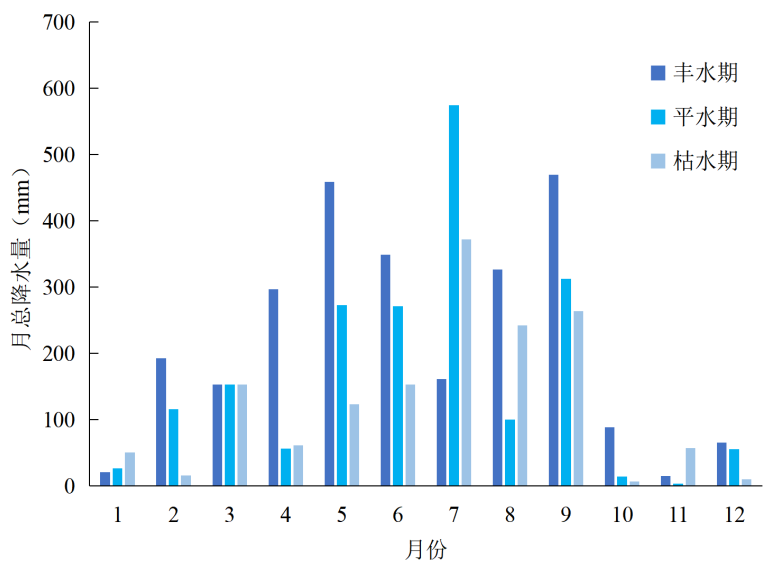


图 3. 湖山水库不同降水量条件下典型年降水过程图

本次计算方案主要研究不同降水量条件对湖山水库取水口水质的影响，共分为 3 个方案，其中方案一采用丰水期降水量条件，对应典型年为 1997 年；方案二采用平水期降水量条件，对应典型年为 1992 年；方案三采用枯水期降水量条件，对应典型年为 2003 年。

4.2. 水动力模型计算结果

对水动力模型进行求解，得水动力模型总水深和流速变化(见图 4)。各个降水量条件下不同监测点总水深变化规律相同，水库总水深由入库口到出库口呈现出先升高后降低的趋势，水库中部总水深最高。丰水期监测点总水深明显高于平水期、枯水期，且波动幅度较大。枯水期由于降雨量小，总水深变化较小，基本稳定在固定值。

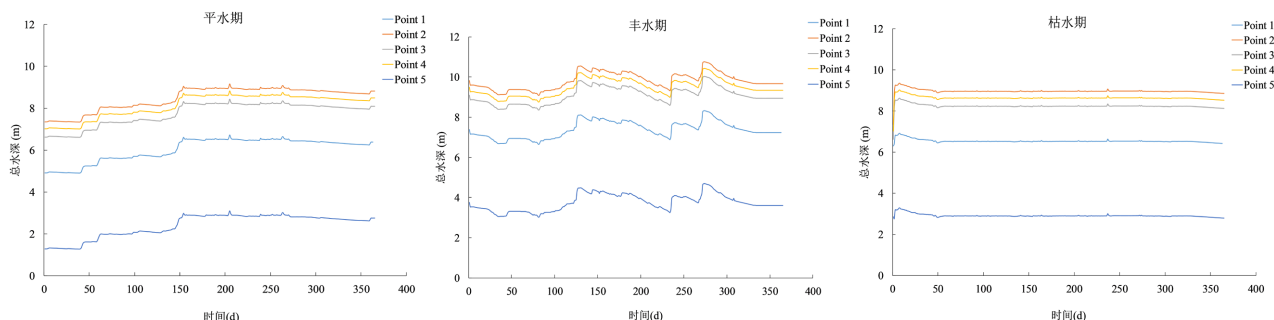


图 4. 水动力模型监测点总水深变化图

水库四周地势高，中间地势低，水库水深由中部向四周呈逐渐变浅的趋势，死角区域水深最小，东部区域水深最大。丰水期、平水期及枯水期湖山水库水深分布规律相似，丰水期总水深较其他两个时期明显增高(见图 5)。

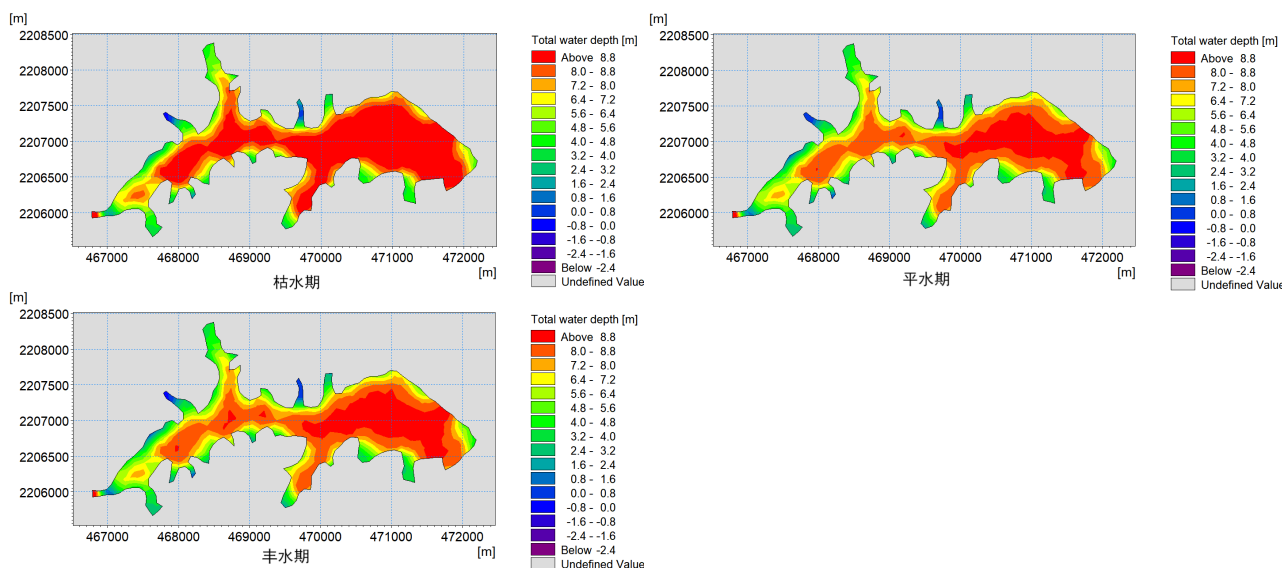


图 5. 水动力模型等水深线图

不同降水量条件下下库区流场与流速分布规律相似，库区中部流速分布较均匀且变化较小，一般在 10^{-3} m/s 数量级左右，暴雨降临时流速可达到 10^{-2} m/s 数量级。只有在入库口和出库口，水流流速较高且变化较大(见图 6)。丰水期和平水期流速波动频率明显大于枯水期，入库口最高流速达 0.06 m/s，出库口最高可达 0.35 m/s。

4.3. 水质模型计算结果

对湖山水库水质模型进行模拟，得到不同降水量条件下典型年的水库水质主要污染物浓度场分布图(见图 7)。在水质模型运行期，开始入流后，在入流附近污染物质量浓度较大，并且在流速梯度的作用下，污染物质量浓度从入库口到达水库后逐级递减，迅速向库区中央扩散，而在距离入流口较远的区域，COD 质量浓度几乎

与初始值相同，表明该时段污染物以扩散为主，降解作用很小。丰水期水库整体 COD 浓度明显大于平水期、枯水期，说明丰水期降雨量大，雨水汇入水库上游后进入水库，导致入库水流流量增大，入库污染物总量增大，从而使水质 COD 浓度升高。

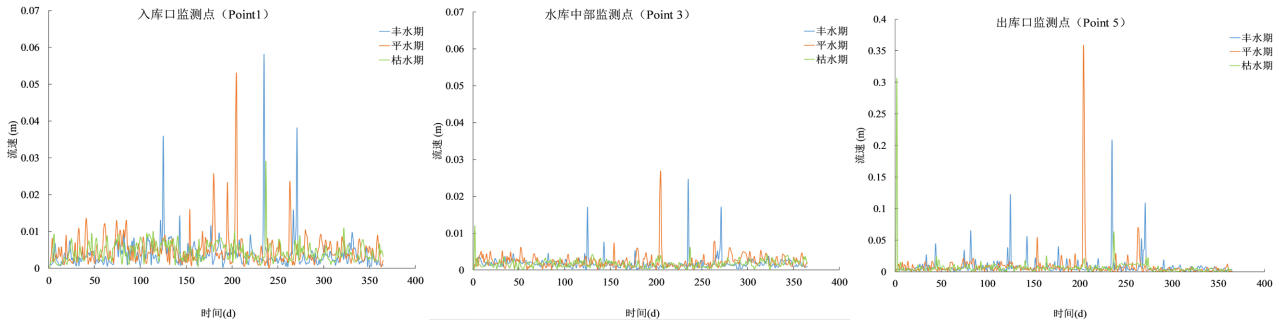


图 6. 水动力模型监测点流速变化图

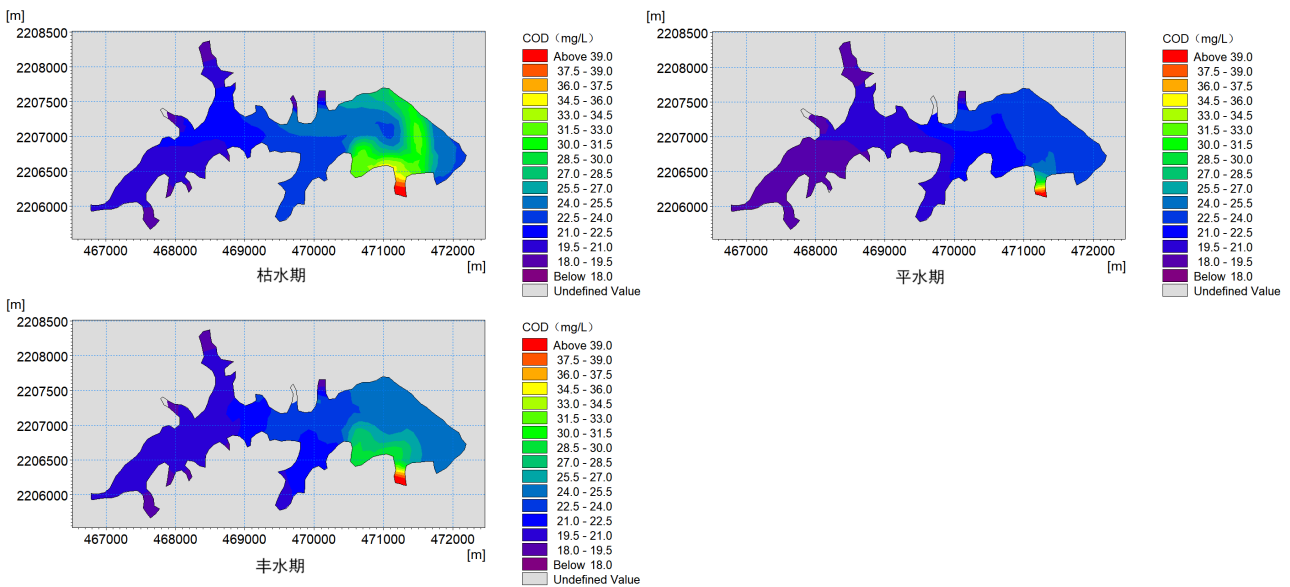


图 7. 不同典型年下 COD 浓度场分布图

湖山水库入库口监测点各降水量条件下 COD 浓度波动幅度较大，当暴雨来临时，COD 浓度急剧上升，暴雨褪去时，COD 浓度明显下降。各降水量条件下库区中部监测点和出库口监测点 COD 浓度变化规律相似，丰水期 COD 浓度明显高于平水期和枯水期(见图 8)。

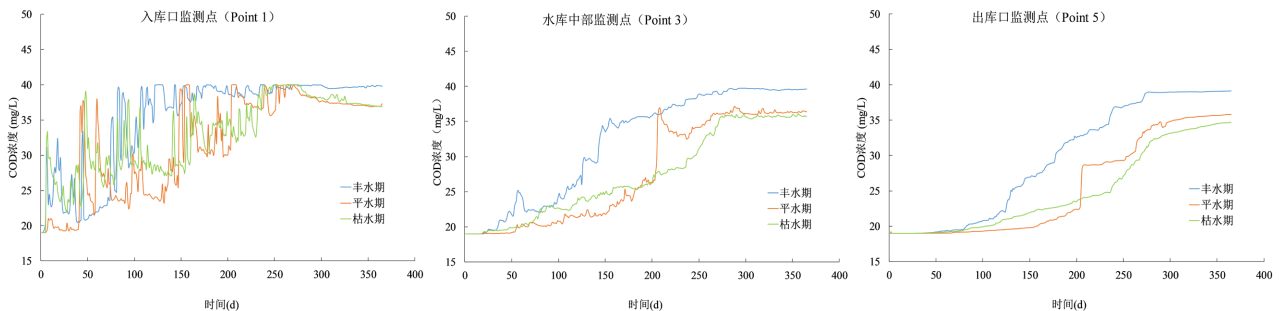


图 8. 不同降水量条件下模型监测点 COD 浓度变化图

4.4. 库区取水口污染物指标变化规律

本节分析湖山水库取水口在不同降水量条件下水质指标变化规律，图9分别为水库取水口COD、NH₃-N、TP浓度变化曲线图。水库取水口COD、NH₃-N、TP浓度随时间变化规律相似，说明影响水库水质指标的主要影响因素为扩散作用，而不同污染物的降解系数对取水口各水质指标的影响较小。不同时期水库取水口各水质指标在第一季度基本保持不变，在第二、第三季度上升速度很快，在第四季度趋于稳定，这可能与当地降水规律有关，第二和第三季度为雨季，导致污染物入库速率加快，从而使取水口水质指标升高。丰水期、平水期、枯水期三者相比，丰水期库区取水口各污染物浓度最高，其次是平水期，最后是枯水期，这主要与不同降水量条件下典型年的降雨总量有关。

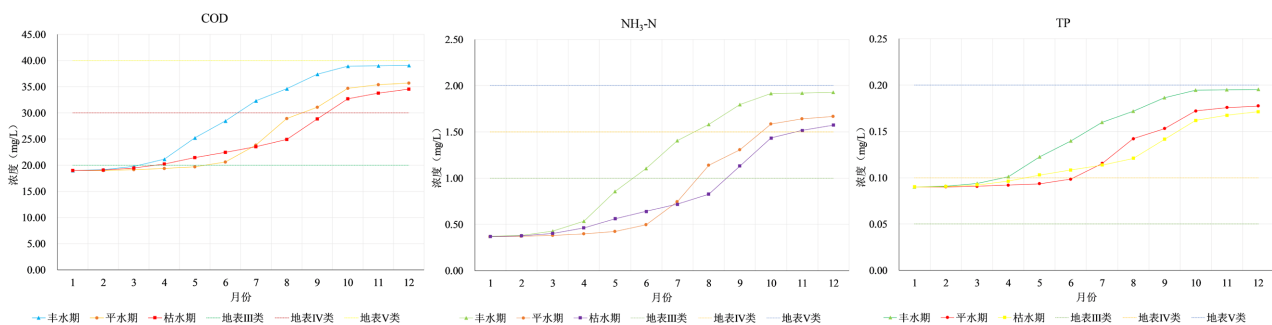


图9. 水库取水口COD、NH₃-N、TP浓度变化曲线图

5. 结语

1) 模型模拟的水动力和水质结果与实测结果较为吻合，表明模型选取参数合理，模型能够用于湖山水库水动力和水质模拟。

2) 水动力模拟方面，模拟结果较好地呈现了湖山水库的水位、水流流速分布。不同降水量条件下库区流场与流速分布规律相似，库区中部流速分布较均匀且变化较小，只有在入库口和出库口，水流流速较高且变化较大。丰水期有风模型监测点流速明显高于无风模型，两者流速极值点基本相同，考虑暴雨来临时库区各区域流速瞬间增大，此时流速受风影响较小。

3) 水质模拟方面，入库口监测点各降水量条件下COD浓度波动幅度较大。各降水量条件下库区中部监测点和出库口监测点COD浓度变化规律相似，丰水期COD浓度明显高于平水期和枯水期。库区取水口各水质指标在第一季度基本保持不变，在第二、第三季度上升速度很快，在第四季度趋于稳定。丰水期库区取水口各污染物浓度最高，其次是平水期，最后是枯水期。

基金项目

本文受到江苏省水利科技项目(2021076)资助。

参考文献

- [1] 秦昌波, 李新, 容冰, 等. 我国水环境安全形势与战略对策研究[J]. 环境保护, 2019(8): 20-23.
- [2] 马太玲. 湖库水质评价及水质模拟预测方法研究[D]: [博士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [3] 徐小明. 大型河网水力水质数值模拟方法[D]: [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 2001.
- [4] 谷照升. 水库湖泊水质分析、模拟与预测的综合数学方法及其应用[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [5] 王丹丹. 河流总体水质评价方法研究及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [6] 魏文龙. 稀疏水质数据条件下流域模型模拟效果改进方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2014.

- [7] 逢勇, 等. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [8] 黄轶康, 李一平, 邱利, 等. 基于 EFDC 模型的长江下游码头溢油风险预测[J]. 水资源保护, 2015(1): 91-98.
- [9] 崔可夫. 基于 ROMS 的渤海湾水动力学模型及其应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] 陈波昌, 魏皓. FVCOM 模型在渤海湾潮流潮汐模拟中的应用[J]. 天津科技大学学报, 2013(4): 40-43.
- [11] 麻蓉, 白涛, 黄强, 等. MIKE21 模型及其在城市内涝模拟中的应用[J]. 自然灾害学报, 2017(4): 172-179.
- [12] 冯静. MIKE21FM 数值模型在海洋工程环境影响评价中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [13] 梁云, 殷峻暹, 祝雪萍, 等. MIKE21 水动力学模型在洪泽湖水位模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2013(1): 135-137.
- [14] 郭凤清, 屈寒飞, 曾辉, 等. 基于 MIKE21FM 模型的蓄洪区洪水演进数值模拟[J]. 水电能源科学, 2013(5): 34-37.
- [15] 袁雄燕, 徐德龙. 丹麦 MIKE21 模型在桥渡壅水计算中的应用研究[J]. 人民长江, 2006(4): 31-32.