

MIKE11 在梅梁湖调水试验中的应用研究



盛龙寿*, 秦建国, 姚华, 席泽超

江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 江苏无锡 214031

摘要: 为了加强太湖蓝藻治理科技研究工作, 无锡市水利学会申报的“太湖(梅梁湖)调水对控制蓝藻、改善湖体水质的作用研究”项目被市科协批准立项。通过进一步研究泵站调水对控制蓝藻、改善梅梁湖湖体水质的改善作用, 对实施好太湖流域水环境综合治理, 更好发挥太湖生态和社会效益具有重要的现实意义。本项目主要通过泵站调水试验工作, 等时距同步监测风向风力、水位、流量、水质(溶解氧、总磷、总氮、高锰酸盐指数、藻密度等)资料, 结合提前实测的水道断面资料编制了河网文件, 合理确定了模拟计算范围, 确定了边界条件和计算时段, 采用 MIKE11 水动力、水质对流扩散模型进行模拟计算分析并开展了模型验证工作, 取得了较为理想的模拟成果。分析研究表明, 调水试验对污染物浓度影响不大, 梅梁湖水质综合评价类别没有变化, 仍为 V~劣 V 类, 主要超标项目为总磷、总氮。试验期 8 天调水共减少梅梁湖高锰酸盐指数 147 吨、总磷 5 吨、总氮 42 吨, 减少藻密度 245 万个细胞/L。如果试验期 8 天梅梁湖泵站以 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量调水, 大渲河泵站以 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量调水可减少梅梁湖高锰酸盐指数 440 吨、总磷 16 吨、总氮 119 吨, 减少藻密度 428 万个细胞/L。通过调水加大了梅梁湖水体流动速度, 加大了湖体的自净能力, 大幅度地减少了无锡市太湖重点水源保护区和观光游览区的水体污染物, 降低了藻密度。

关键词: MIKE11; 梅梁湖; 调水试验; 应用研究

DOI: [10.57237/j.wjese.2023.02.002](https://doi.org/10.57237/j.wjese.2023.02.002)

Application Study of MIKE11 in Meiliang Lake Water Transfer Experiment

Sheng Long Shou*, Qing Jian Guo, Yao Hua, Xi Ze Chao

Wuxi Branch of Jiangsu Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Wuxi 214031, China

Abstract: In order to strengthen the scientific and technological research work of cyanobacteria control in Taihu Lake, the "Taihu (Meiliang Lake) water transfer on the control of cyanobacteria, improve lake water quality" project declared by Wuxi Hydraulic Society was approved by the municipal Association for Science and Technology. By further studying the effect of pumping station water transfer on controlling cyanobacteria and improving the water quality of Meiliang Lake, it is of great practical significance to implement the comprehensive water environment management of Taihu Lake basin and give full play to the ecological and social benefits of Taihu Lake. This project mainly through the pump station water transfer test work, synchronously monitoring wind direction, water level, flow, water quality (dissolved oxygen, total phosphorus, total nitrogen, permanganate index, algae density, etc.) data, combined with the waterway section data measured in advance to prepare a river network file, reasonably determine the simulation calculation range, determine the boundary conditions and calculation period.

*通信作者: 盛龙寿, 814091687@qq.com

MIKE11 hydrodynamic model and water quality convection and diffusion model were adopted for simulation calculation and analysis, and model verification was carried out, achieving ideal simulation results. The analysis showed that the water transfer test had little effect on pollutant concentration, and the comprehensive evaluation category of Meiliang Lake water quality did not change, still classified as V ~ poor V, and the main items exceeding the standard were total phosphorus and total nitrogen. During the experiment period of 8 days, the water transfer reduced the permanganate index by 147 tons, the total phosphorus by 5 tons, the total nitrogen by 42 tons, and the algal density by 2.45 million cells /L. If the water transfer rate of Meiliang Lake pumping station is $60 \text{ m}^3/\text{s}$ and that of Dashihe Pump station is $30 \text{ m}^3/\text{s}$, the permanganate index of Meiliang Lake can be reduced by 440 tons, total phosphorus by 16 tons and total nitrogen by 119 tons, and the algae density can be reduced by 4.28 million cells /L. The water transfer increased the water flow speed of Meiliang Lake, increased the self-purification capacity of the lake body, greatly reduced the water pollutants in Wuxi Taihu Lake key water source protection area and sightseeing area, and reduced the density of algae.

Keywords: MIKE11; Meiliang Lake; Water Transfer Test; Applied Research

1 引言

根据无锡市委、市政府决策部署,无锡市水利局组织开展了市太湖蓝藻专项基金项目“太湖(梅梁湖)调水对控制蓝藻、改善湖体水质的作用研究”[1]。项目分析评价了太湖(梅梁湖)水环境、水体流动性现状,模拟计算了不同工况条件下调水对梅梁湖水质的影响,计算分析了梅梁湖污染物通量,分析研究成果基本揭示了太湖(梅梁湖)调水对控制蓝藻、改善湖体水质的作用,提高了人们对调水必要性和有效性的认识。

项目第一承担单位为无锡市水利学会,江苏省水文水资源无锡分局参与了此项研究,开展了调水试验分析研究,建立 MIKE11 一维水动力、水质对流扩散模型,着重模拟分析研究梅梁湖、大渲河泵站不同工况调水对湖流及水质的影响,模拟计算梅梁湖高锰酸盐指数、总磷、总氮等主要污染物排出量和蓝藻减少量,为进一步开展梅梁湖、大渲河泵站调度运行方案的优化研究提供了科学依据。

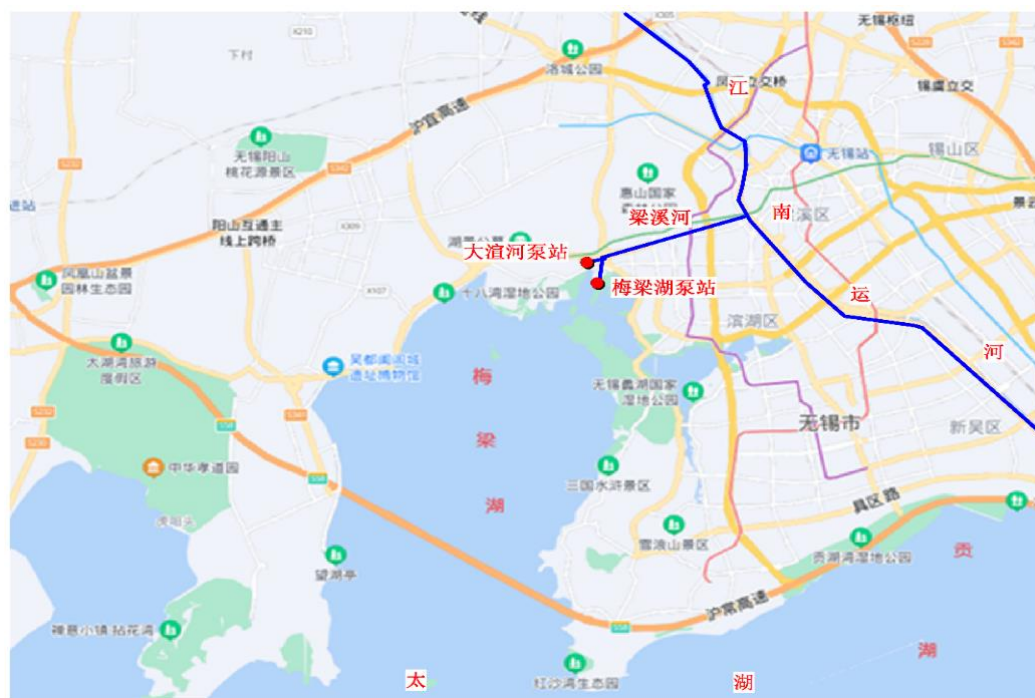


图 1 研究区域位置图

2 研究区域基本概况

梅梁湖位于无锡市西南部，是太湖北部的一个海湾，东、西、北三面环山，西与竺山湖相邻，南面开敞与大太湖水体相通。湖中有小岛数个，其中北有三山岛，南有拖山岛。梅梁湖南北长约 12~17km，东西宽约 7~10km，以马山的钮头和拖山岛一线为界，面积约 123.8km²，平均水深 1.95m，容积 2.41 亿 m³。

梅梁湖调水路线是指通过梅梁湖、大渲河泵站引太湖（梅梁湖）水经过梁溪河排入江南运河。梅梁湖泵站枢纽工程位于梅梁湖、梁溪河与五里湖的交界处，西侧紧靠犊山水利枢纽梁溪河节制闸和船闸，南侧为五里湖节制闸，北侧为环湖公路。工程是无锡市水环境综合整治的骨干工程，承担梅梁湖、五里湖与内河的动力换水任务。大渲河泵站位于环湖路，大渲河和梁溪河交汇处的大渲河内工程主要作用为防洪、排涝、调水引流和改善城市水环境。研究区域内犊山闸节制闸、船闸为防止污水进入梅梁湖，常年基本关闸控制。

3 模型原理

采用丹麦 DHI 软件中平面一维数学模型 MIKE11 [2]进行梅梁湖、大渲河泵站调水河段水动力和水质对流扩散模拟计算，水质指标主要包括高锰酸盐指数、总氮、总磷和藻密度。根据试验期实测水位、流量、水质及断面资料建立模型，可用模型推算出试验期所有断面的水位、流量和水质情况，也可通过改变边界流量（梅梁湖、大渲河泵站）控制条件推算出非试验期所有断面的水位、流量和水质情况。

3.1 水动力数学模型（MIKE11 HD）

模型基于以下几个假定：

- 不可压缩、均质流体
- 基本是一维流态
- 坡降小、纵向断面变化幅度小
- 静水压力分布

及以下两个基本方程：

- 连续性方程(质量守恒定律)
- 动量方程(牛顿第二定律)

所得到的圣维南方程就是模型反映有关物理定律的微分方程[3]：

$$\frac{\delta Q}{\delta x} + b \frac{\delta h}{\delta t} = 0, \quad \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta \left[\alpha \frac{Q^2}{A} \right]}{\delta x} + g A \frac{\delta h}{\delta x} = 0$$

而所用的有限差分格式就是 6 点 Abbott-Ionescu 格式。

6 点 Abbott 格式的计算网格点布置方式如下：

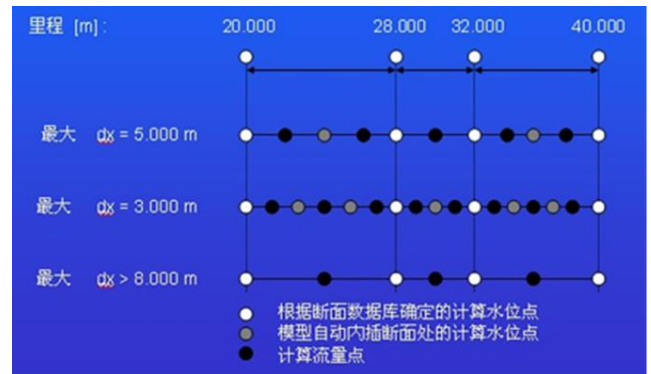


图 2 6 点 Abbott 格式的计算网格点布置示意图

计算网格点的分布遵循以下规则：

- 河段上下游端点为计算水位点
- 支流入流点为计算水位点
- 实测断面资料点为计算水位点
- 模型根据 maxΔx 值自动插入计算水位点
- 水工建筑物点为计算流量点
- 两个水位点之间只存在一个计算流量点

3.2 水质数学模型（MIKE 11 AD）

MIKE 11 AD 模拟物质在水体中的对流何扩散过程，可以设定一个恒定的衰减常数模拟非保守物质。所以可以把 MIKE 11 AD 作为简单的水质模型。当然真正的水质模型和生态模型是 EcoLab。

MIKE 11 AD 是在 MIKE 11 HD 基础上建立的。

水质计算基本方程：

由于太湖流域的水质污染主要为有机污染，因此计算水质指标选用总磷、总氮、高锰酸盐指数和藻密度。以对流扩散方程为基础的基本方程如下[4]：

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) + \frac{\partial}{\partial x}(QC) - \frac{\partial}{\partial y} \left(E_x A \frac{\partial C}{\partial x} \right) - WC = -K_c AC$$

式中：

Kc 为的衰减系数 (1/d)，Wc 为的污染源项。

本次调水试验 Kc 取值 0.1。

4 计算方法

建模的工作主要包括软件的安装调试, 计算范围的确定, 计算条件、参数的选择, 时间序列文件的准备, 启动方式的选择等。在准备时间序列文件时, 边界控制条件的选用最为重要, 对模型质量的影响较大[5-7]。

4.1 计算范围

梅梁湖水质计算主要应反映泵站引水对梅梁湖周边水质的影响, 计算范围不必过大。计算的范围为无锡太湖中犊山以北、大渲河以南、管社山庄以东、渤公岛以西受梅梁湖、大渲河泵站调水直接影响的水域。

4.2 计算条件

①水文条件

研究区域内的犊山闸水文站为国家基本站, 观测项目有水位、流量、降水量。以太湖犊山闸调水期平均水位(3.20m)作为初始水位进行水动力计算分析; 河床糙率根据模型模拟试算率定, 采用模拟水位与实测水位误差最小时(由最小二乘法确定)的假定河床

糙率, 取值 0.030; 由于研究区域犊山闸关闸控制, 试验期无区间入流, 计算时不考虑区间进出水量; 为了简化模拟计算流程, 选择天气晴好无降雨的时期开展调水试验, 不考虑降雨与水面蒸发对水量变化的作用, 没有开展与降雨产流模型的耦合计算。

河网文件主要根据百度地图确定河道走向和各河段长度, 断面文件根据调水前实测断面成果。断面测量自 2022 年 6 月 10 日开始, 至 6 月 14 日结束。一般河段采用南方测绘 SU12 型遥控水下地形测量船施测, 水面较宽时采用蓝藻打捞船配合遥控水下地形测量船施测。测量成果采用水利部长江委水文局编制的水文资料整编系统 SHDP 整编, 测验河段最大水面宽度为 449m (D8), 最低河底高程为 -0.93m (D5)。调水试验时间序列文件主要有太湖犊山口水位、水质资料, 梅梁湖、大渲河泵站流量、藻密度资料。时间轴类型 Axis Type 选等时间间隔 (Equidistance Calendar Axis), 开始时间输入调水试验开始时间 2022 年 7 月 20 日 0:00:00, 结束时间为时间 7 月 28 日 0:00:00, 步长为 2 小时, 水质、流量、藻密度等实测资料时间步长不足 2 小时的由人工进行插补[8-9]。



图3 梅梁湖、大渲河调水试验断面位置示意图

②污染源条件

计算时不考虑区间污染源。

③边界控制条件

一般情况下上边界选用有水文站控制的上游断面，以流量作为控制条件之一；下边界选用有水文站或水位站控制的下游断面，以水位作为控制条件之一。本项目上游处于靠近太湖侧河段，河面宽阔，无合适的水文站及流量测验资料。故上边界、下边界控制条件调整如下：

上边界（南方靠太湖侧）太湖水位、水质，下边界（北方梁溪河侧）梅梁湖、大渲河泵站流量、水质等。上边界位置距离犊山闸基本水尺断面(D6)约 0.5km，水位根据试验期犊山闸水位及太湖平均水位内插，水质条件选用试验期犊山口水质。

③初始条件和计算时段

计算时初始条件采用“冷启动”方法，即初始流量取梅梁湖泵站、犊山闸泵站常态调水流量-15.0m³/s，水位、

水质取太湖犊山口调水期平均值 3.20m（吴淞基面）。模拟时间步长选取 1s [10-11]。最终成果采用“热启动”方法，有关参数调用“冷启动”成果，模拟时间步长选取 0.1s。

5 模型验证

为了验证模型的质量和可靠性，我们开展了模型验证工作。实测水位采用经整理的国家基本站犊山闸（闸上游）水位，通过调水试验期犊山闸（闸下游）实测水位与 D6 断面模拟水位比较，实测最高水位 3.53m，模拟最高水位 3.48m，相差 0.06m；实测最低水位 3.06m，模拟最低水位 3.06m，完全一致；实测平均水位 3.19m，模拟平均水位 3.19m，完全一致。模型模拟质量较高，调水期间犊山闸实测水位与模拟水位过程比较情况见图 4 [12-13]。

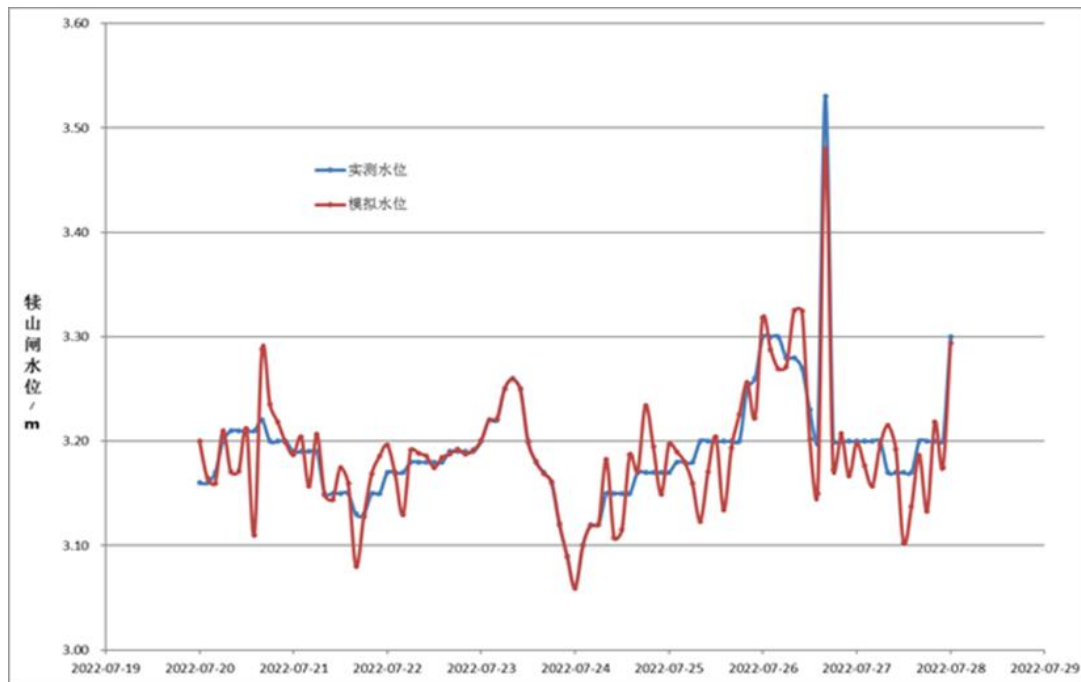


图 4 调水期间犊山闸实测水位与模拟水位过程线图

6 污染物排出情况

梅梁湖泵站、大渲河泵站选取了调水试验期、不调水、梅梁湖调水、大渲河调水和大流量调水 5 种工况。调水试验期工况比较接近常态调水，可基本反映正常调水期间的水质变化情况；不调水工况模拟的是

梅梁湖泵站、大渲河泵站均停运的情况；梅梁湖调水工况假设梅梁湖泵站以 30m³/s 流量调水，大渲河泵站停运；大渲河调水工况假设大渲河泵站以 30m³/s 流量调水，梅梁湖泵站停运；大流量调水工况假设梅梁湖泵站以 60m³/s 流量调水，大渲河泵站以 30m³/s 流量调水情况。模拟试验计算成果见表 1。

模拟结果表明，大流量调水工况效果显著，藻密

度 774 万个细胞，比调水试验期减少了 36%，减少高锰酸盐指数 440 吨、总磷 16 吨、总氮 119 吨。藻密度监测的随机偶然误差较大，大渲河泵站调水时藻密度模拟结果不理想[14-15]。

表 1 污染物排出量模拟计算成果表

污染物指标	调水 试验期	污染物 排出量	梅梁湖 泵站调水	污染物 排出量	大渲河 泵站调水	污染物 排出量	大流量 调水	污染物 排出量
高锰酸盐指数 (mg/L)	5.10	147	5.11	106	5.32	110	5.09	440
总磷 (mg/L)	0.183	5	0.180	4	0.192	4	0.186	16
总氮 (mg/L)	1.44	42	1.48	31	1.28	27	1.37	119
藻密度 (万个细胞/L)	1202		1369		472		774	

7 结论和建议

7.1 结论

- (1) 通过建立梅梁湖泵站、大渲河泵站入太湖河段（犊山口内）的一维水动力模型和水质对流扩散模型，以调水试验期间犊山闸实测水位过程做验证，模拟结果基本符合水位变化趋势，模拟质量较高。
- (2) 调水试验对污染物浓度影响不大，梅梁湖水质综合评价类别没有变化，仍为 V~劣 V 类，主要超标项目为总磷、总氮。
- (3) 试验期 8 天调水共减少梅梁湖高锰酸盐指数 147 吨、总磷 5 吨、总氮 42 吨，减少藻密度 245 万个细胞/L。如果试验期 8 天梅梁湖泵站以 60 m³/s 流量调水，大渲河泵站以 30 m³/s 流量调水可减少梅梁湖高锰酸盐指数 440 吨、总磷 16 吨、总氮 119 吨，减少藻密度 428 万个细胞/L。
- (4) 通过调水加大了梅梁湖水体流动速度，加大了污染物的自净能力，大幅度地减少了无锡市太湖重点水源保护区和观光游览区的水体污染物，降低了藻密度。

本次调水试验期间由于时间较短，水量、水质资料系列长度不够，实测资料存在一定的偶然误差，犊山水位受太湖水位和风力风向影响较大，控制条件较差，模拟成果存在一定的误差，仅供决策参考。

7.2 建议

- (1) 适当增加梅梁湖、大渲河泵站年度调水总量。
- (2) 合理分配月度调水量。
 - a) 每年 1~4 月、11~12 月共 6 个月每月调水量控制在 0.4 亿方以内。建议每天开启 1 台机组以 13.0 m³/s 流量连续进行常态化调水。

- b) 每年 5~10 月共 6 个月每月调水量控制在 0.6 亿方以内。建议一日开启 1 台机组以 13.0 m³/s 流量、隔天开启 2 台机组以 26.0 m³/s 流量连续进行常态化调水。
- c) 蓝藻集中爆发期采用大流量方式调水，每天开启 2~3 台机组以 26.0~39.0 m³/s 流量进行应急调水。
- (3) 优化泵站机组运行
合理安排各机组运行时长，确保设备安全运行。
- (4) 加强与新沟河工程联合调度

当梅梁湖水体受到严重污染的紧急情况下，通过新沟河工程调水引流，使优质长江水经过闾江口进入梅梁湖西北部。通过梅梁湖、大渲河泵站调水，使进入梅梁湖西北部的优质水体进入梅梁湖东北部，使梅梁湖北部的水质得到更好的改善。

参考文献

[1] 无锡市水利学会. 太湖（梅梁湖）调水对控制蓝藻、改善湖体水质的作用研究 [R]. 江苏省无锡市：无锡市水利局，2022.

[2] Danish Hydraulic institute (DHI). MIKE11: A Modeling System for rivers and Channele Reference Manual [J]. DHI. 2015.

[3] 刘强, 吴国芳. 基于 MIKE11 HD 水动力模型的复杂河道水利设计 [J]. 水利规划与设计, 2014 (7): 68-70.

[4] 朱茂森, 基于 MIKE11 的辽河流域一维水质模型[J]. 水资源保护, 2013, 29 (3): 6-9.

[5] 黄丽娇, 王川涛. MIKE11 在湖泊水量水质保障中的应用研究 [J]. 水利规划与设计, 2021.04.009.

[6] 周宏, 刘俊, 刘鑫, 等. MIKE 11 模型在望虞河西控工程排涝计算中的应用 [J]. 中国农村水利水电. 2016, (1). DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2016.01.009.

- [7] 张雪, 余胜男. 基于 MIKE 11 HD 河道水质补水调度方案的应用研究 [J]. 水利技术监督. 2018, (4). DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2018.04.018.
- [8] 王晨婉, 李笑竟, 张会, 高丹. 基于 MIKE11 的城市河网雨水径流污染模拟的研究 [J]. 科学观察. 2013 年第 2 期.
- [9] 黄志龙. 河道防洪规划中 MIKE11 水动力模型的应用 [J]. 陕西水利. 2021 (04): 21-23.
- [10] 高超, 白涛, 杨旺旺, 畅建霞, 张飒. 基于 MIKE11 的汉江上游洪水演进规律研究 [J]. 水资源研究, 2017, 6 (2): 156-165.
- [11] 黄琳煜, 聂秋月, 周全, 等. 基于 MIKE11 的白莲泾区域水量水质模型研究 [J]. 水电能源科学, 2011, 29 (8): 21-24.
- [12] 孙映宏, 姬战生, 周蔚. 基于 MIKE11 HD 和 NAM 耦合模型在河流施工围堰对防洪安全影响分析中的应用与研究 [J]. 浙江水利科技, 2009 (2): 30-34.
- [13] 杨洵, 梁国华, 周惠成. 基于 MIKE11 的太子河观-菱河段水文水动力模型研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28 (11): 84-87.
- [14] 王庆改, 赵晓宏, 吴文军, 等. 汉江中下游突发性水污染事故污染物转移扩散模型 [J]. 水科学进展, 1998, 19 (4): 500-504.
- [15] 初祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 基于 MIKE11 和 MIKE21 的城市暴雨洪涝灾害风险分析 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2014, 50 (5): 446-451.

作者简介

盛龙寿

1964 年生, 高级工程师, 研究方向为水文水资源.

E-mail: 814091687@qq.com