

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.05-13

# 九江市两湖水环境综合治理工程目标可达性研究

闫旭辉, 应碧茜, 崔冉昕

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

**摘要:**为了响应习近平总书记“长江大保护”的号召,九江市两湖(甘棠湖和南门湖)拟开展岸上截污、水生态修复和活水畅流工程等一系列水环境综合治理工程,以期使湖区内主要水质评价指标达到Ⅳ类水质目标.利用 MIKE 11、MIKE 21 及 MIKE FLOOD 建立了水动力水质耦合数学模型,对两湖的流场及污染物浓度场进行模拟分析,预测上述水环境综合治理工程的水质目标可达性.研究表明:工程实施后,两湖各水质指标的空间达标率都大于 90%,晴天的水质空间达标率大于雨天;全年降雨期(降雨量大于 31mm/d)中约有 8.63%的时段存在短暂的水质超标,经过若干天的恢复期主要水质评价指标可重新达标.

**关键词:**水质可达性分析;九江市两湖;水质模型

**中图分类号:**TV213.4      **文献标识码:**B      **文章编号:**1004-4701(2019)05-0382-09

## 0 引言

九江市两湖(甘棠湖和南门湖)位于江西省九江市中心城区,是九江著名景区、市民公共滨水开放空间和户外休闲场所.随着城市的发展,入湖污染负荷日益增加,加之两湖本身流动性较差,导致水体污染严重,主要水质指标为Ⅴ类及劣Ⅴ类,这严重影响了城市的形象与地区经济的可持续性发展.为了响应习近平总书记长江大保护的号召,九江作为“长江大保护”先行先试城市,亟需对城市内重点河湖进行水环境综合整治,两湖的水环境治理是其中重要的一环.为从根本上解决两湖污染问题,拟实施岸上截污、生态修复、活水畅流三大工程,从污染的源头治理、水生物降解以及活水等思路入手,着力于将两湖的主要水质指标达Ⅳ类目标要求,以期达到“水清、景美”的亲水平台.

水动力及水质的数值模拟受益于计算机技术的飞速发展而愈加成熟.宫雪亮等<sup>[1]</sup>利用 MIKE 21 模拟分析了多情景下南四湖上级湖内水质变化过程;赖锡军等<sup>[2]</sup>基于二维特定条件方程以及对流扩散方程组构建

了鄱阳湖二维水动力水质耦合模型.袁燕等<sup>[3]</sup>根据夏季典型降雨入库过程,模拟了流场及污染物入库对水库水质的影响.

MIKE 11 具有调度处理灵活且易于操作的特点,MIKE 21 可较好的拟合复杂地形,利用 MIKE FLOOD 耦合 MIKE 11 和 MIKE 21 可充分发挥两种模型的特色和优势,完全可以胜任与内陆湖泊相关课题的模型研究工作.本文基于此建立了两湖湖区的水动力水质耦合数学模型,将规划典型年溢流口的水量及水质作为输入资料,并优化活水规模及活水位置,进而对湖区内流场及污染物浓度场进行分析,研究工程实施后两湖水水质目标的可达性.

## 1 研究区概况及规划工程措施

九江市位于江西省北部,地处赣、鄂、湘、皖四省交界处的长江中下游南岸.甘棠湖和南门湖坐落于九江市浔阳区,李公堤将两湖分开,堤上建有思贤桥,两湖湖水在桥下相通.两湖是九江市重要的景观湖泊,也是城区重要的调蓄湖泊,其糟糕的水质状况将严重威胁

收稿日期:2019-07-12

作者简介:闫旭辉(1993-),男,硕士,助理工程师.

到区域经济的可持续发展及社会的稳定。本文研究区域为九江市两湖整个湖区，常水位下水面面积为 1.34km<sup>2</sup>，其现状主要存在清污不分、污染入湖、缺少入流、死水滞湖等问题。

在长江大保护的大背景下，开展了两湖水环境综合治理工程，规划对两湖开展环湖截污纳管工程、水生生态修复工程及活水畅流工程，通过截流岸上污水、构建湖区净水和水质维持水生态系统、引水八里湖等措施，以期达到Ⅳ类水水质目标。

两湖现状有 20 多个雨污排口，流域内的汇水及生活、工业排放污水均通过排口入湖；规划方案将所有排口全部截流，增加 4 个溢流口和 1 个就地处理排口；甘棠湖西侧设有三中泵站，可将八里湖水通过龙开河抽至两湖的 N1、N2 与三中泵站 3 个补水点；另外，两湖水体可通过甘棠湖北侧排口排向长江。两湖规划排口（溢流口）、主要水利设施、补水点位置如图 1 所示（坐标系是 Beijing 1954，下同）。

## 2 二维水动力水质耦合数学模型

### 2.1 模型理论体系

采用 MIKE 21 FM、MIKE 11 SO 分别构建两湖的

二维湖泊水动力水质模型和一维闸泵调度模型，并利用 MIKE FLOOD 进行二维湖泊水动力水质与一维闸泵调度的耦合计算。

### 2.2 基本原理

#### 2.2.1 MIKE 21

(1) 水动力模块 (HD)

MIKE 21 模型基于 Boussinesq 和流体静压假定的二维不可压雷诺平均 N-S 方程<sup>[4]</sup>，其基本原理如下：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x}\right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = & -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial x}\right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \tag{3}$$

式中：*t* 为时间，*s*；*x*、*y*、*z* 为右手 Cartesian 坐标系；

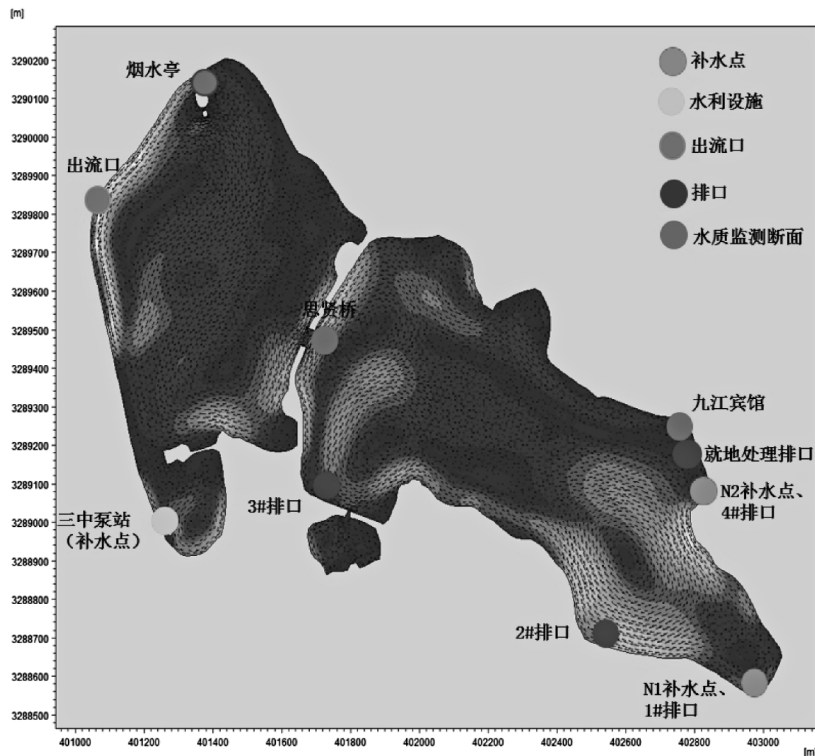


图 1 甘棠湖-南门湖规划排口、水利设施及补水点位置

$h$  为水深, m;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为流速在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量, m/s;  $p_a$  为当地大气压;  $\rho$  为水密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_0$  为参考水密度, kg/m<sup>3</sup>;  $f=2\Omega\sin\varphi$  为 Coriolis 力参数;  $f\bar{v}$ 、 $f\bar{u}$  为地球自转引起的加速度, m/s<sup>2</sup>;  $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$ 、 $S_{yx}$ 、 $S_{yy}$  为辐射应力分量, kg/m<sup>3</sup>;  $T_{xx}$ 、 $T_{xy}$ 、 $T_{yx}$ 、 $T_{yy}$  为水平粘滞应力项;  $S$  为源汇项;  $(u_s, v_s)$  为源汇项水流流速, m/s。

### (2) 对流扩散模块 (AD)

描述水体中污染成分输移转化运动过程的平面二维运动方程<sup>[5]</sup>为:

$$h \frac{\partial C}{\partial t} + uh \frac{\partial C}{\partial x} + vh \frac{\partial C}{\partial y} = D_x h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y h \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + S_c + P_c \quad (4)$$

式中:  $C$  为污染成分浓度, mg/l;  $u$ 、 $v$  为沿  $x$ 、 $y$  方向的流速, m/s;  $D_x$ 、 $D_y$  为  $x$ 、 $y$  方向的扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  $S_c$  为源(汇)项, g/m<sup>2</sup>/s;  $P_c$  为污染成分的生化反应过程。

### 2.2.2 MIKE 11

MIKE 11 SO 中将水工建筑物定义为闸孔出流型(如泄流闸)、越流型(如橡胶坝)、流量型(如泵)等, 对水工建筑物运行可以设置复杂的调度规则, 可依据河道某处的水位或流量、水位差或流量差、蓄水量、时间等数十种逻辑判断条件控制水工建筑物的运行。模型根据建筑物上下游水文条件自动判断所处流态(亚临界流、临界流、超临界流等)<sup>[6]</sup>, 选用相应的流体力学公式进行计算。

### 2.2.3 MIKE FLOOD

MIKE FLOOD 是将一维模型(MIKE 11)和二维模型(MIKE 21)动态耦合的模拟系统。把一维模型和二维模型相耦合<sup>[7]</sup>, 可以充分发挥两种模型的各自特色和优势, 解决两种模型分别使用时经常遇到的空间分辨率和计算精度等问题。

## 3 水质水动力模拟及可达性分析

### 3.1 计算条件

#### 3.1.1 建模范围及地形网格

建模范围为甘棠湖、南门湖整个湖区, 模型覆盖范围为 1.34km<sup>2</sup>。模型网格划分采用非结构三角形网格, 共划分 8 957 个三角形网格, 4 722 个网格节点, 网格尺寸 20m。计算网格及地形如图 2 所示。

#### 3.1.2 水质监测断面

两湖湖区现状共有 3 处水质监测断面, 分别位于九江宾馆、思贤桥、烟水亭, 如图 1 所示。收集到 3 处水质监测断面 2015~2016 年的水质监测数据, 监测频率为 2 个月 1 次。

#### 3.1.3 边界条件

采用九江站的典型年降雨, 平水年 2014 年九江站的蒸发资料, 计算甘棠湖和南门湖湖区水体的降雨水

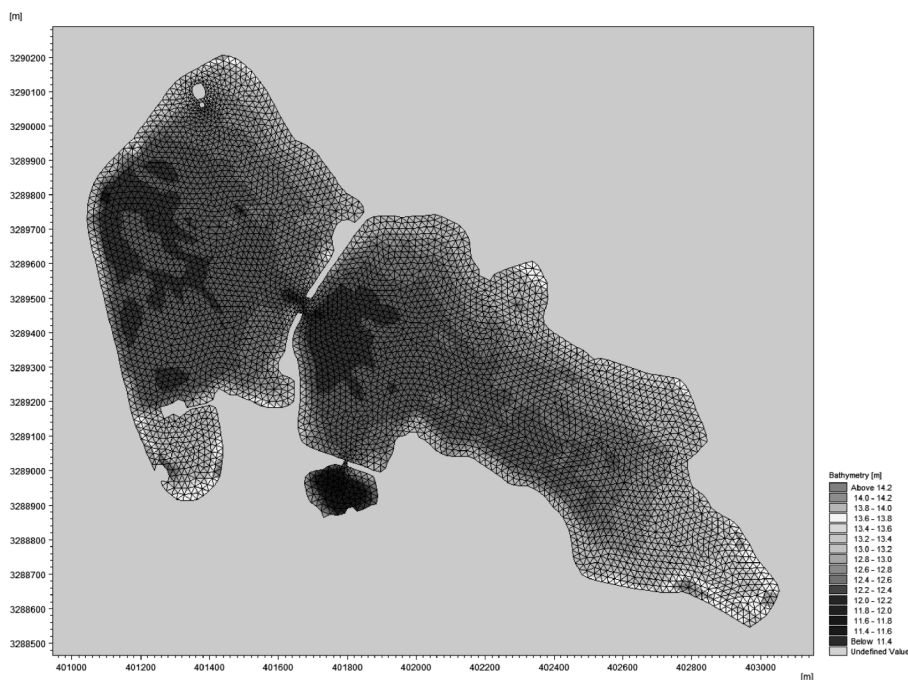


图 2 甘棠湖-南门湖计算网格及地形

量和蒸发水量,采用大气沉降的污染负荷估算结果计算降雨的输入浓度。采用 2014 年的风速、风向资料计算风场作用。

甘棠湖和南门湖主要考虑点源、面源、溢流、内源污染输入。整治方案实施后,点源(污水口)、面源(雨水口)、溢流(溢流口)污染输入,其水量水质数据由 ICM 模型计算提供,在 MIKE 模型中以源(Source)的形式输入。考虑到清淤后的土方转运和处置等问题,内源(底泥)污染随生态清淤工程去除 50%。

甘棠湖和南门湖的水通过新桥闸、河口泵站排入长江,水位控制条件为维持常水位 15.62m(黄海高程,下同)。

### 3.1.4 工程措施概化

#### (1) 排水治理、截污、调蓄池及就地处理工程

工程实施后,主要体现在模型中点源、面源、溢流污染的位置、水量、水质的变化上,工程后排口入湖的水量水质由 ICM 模型计算提供。

#### (2) 水生态修复工程

工程实施后,对水质的改善主要体现在综合降解系数的提升,在 MIKE 模型中以降解系数的方式体现该项工程的作用。

水生态修复工程中,水生植物的种植面积是 220hm<sup>2</sup>,大约占甘棠湖-南门湖水面面积的 10%,湿地的综合降解系数通常能达到 0.400 0/d,按照水生植物种植面积占水面面积的比例,并考虑水生植物夏季与冬季不同工况的对污染物削减作用的影响差异,综合得到工程后的降解系数,COD 综合降解系数 K 取值为 0.015 0~

0.053 5/d,NH<sub>3</sub>-N 综合降解系数 K 取值为 0.020 0~0.058/d,TP 综合降解系数 K 取值为 0.016 0~0.052 6/d,TN 综合降解系数 K 取值为 0.014 0~0.034 4/d。

#### (3) 生态清淤工程

工程实施后,内源污染随生态清淤工程去除,按照现状的 50%去除。

#### (4) 活水畅流工程

引水工程将八里湖的水按照 30 万 m<sup>3</sup>/d 的规模,IV 类水水质,补至甘棠湖的三中泵站和南门湖南部湖湾的 N1 及 N2 处,全年引水 1 525.3 万 m<sup>3</sup>,非汛期平均每月引水 1 天,汛期平均每月引水 4 天。在 MIKE 模型中以源(Source)的形式输入。

当降雨溢流污染入湖,引水方案的水质情况存在突发风险时,自循环工程作为应急备用方案,将甘棠湖的水从三中泵站处按照 20 万 m<sup>3</sup>/d 的规模将甘棠湖的实时水体通过引水管线输送至南门湖的 N1 和 N3。在 MIKE 模型中以一维模型概化引水管线和泵站,一、二维模型实时耦合计算湖区水量水质的变化。作为应急调度措施,在发生突发风险无法实施引水方案且降雨溢流污染入湖时,运行自循环工程,每次运行时间最长为 8.41 天。

### 3.1.5 参数设置

甘棠湖和南门湖水动力水质数学模型主要参数包括计算时间步长、曼宁系数、风摩阻系数以及污染物降解系数,本模型中污染物因子选取 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP、TN,具体参数取值见表 1。

### 3.1.6 率定验证

表 1 模型主要参数设置

模块	参数	取值
水动力模块	时间步长/s	1~30
	涡粘函数	Smagorinsky 亚格子尺度模型
	Smagorinsky 系数	0.3
	曼宁系数	32
	风摩擦阻力系数	0.001 255
水质模块	COD <sub>G</sub> 降解系数 K/(1/d)	0.015 0~0.053 5
	NH <sub>3</sub> -N 降解系数 K/(1/d)	0.020 0~0.058 0
	TP 降解系数 K/(1/d)	0.016 0~0.052 6
	TN 降解系数 K/(1/d)	0.014 0~0.034 4

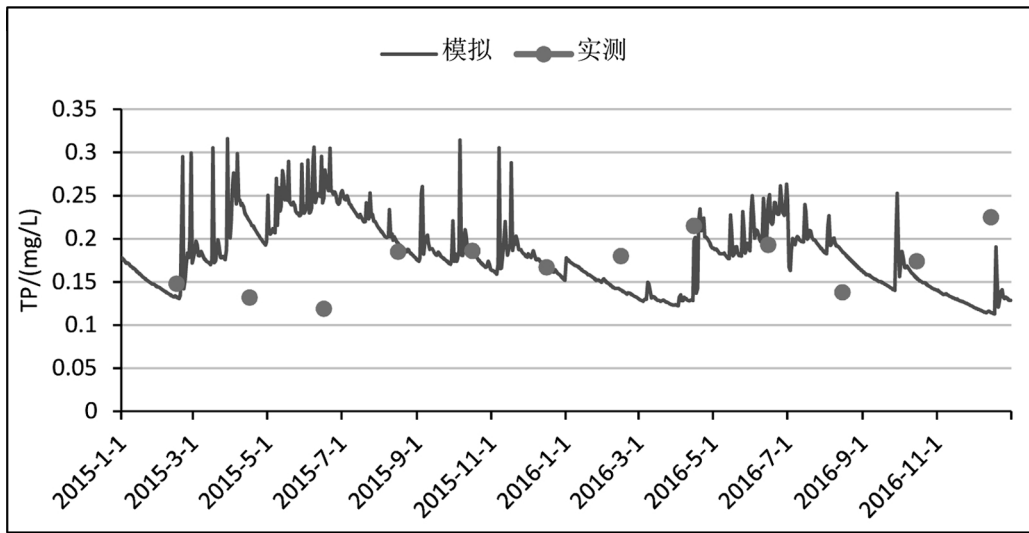


图3 九江宾馆 TP 率定验证图(2015~2016)

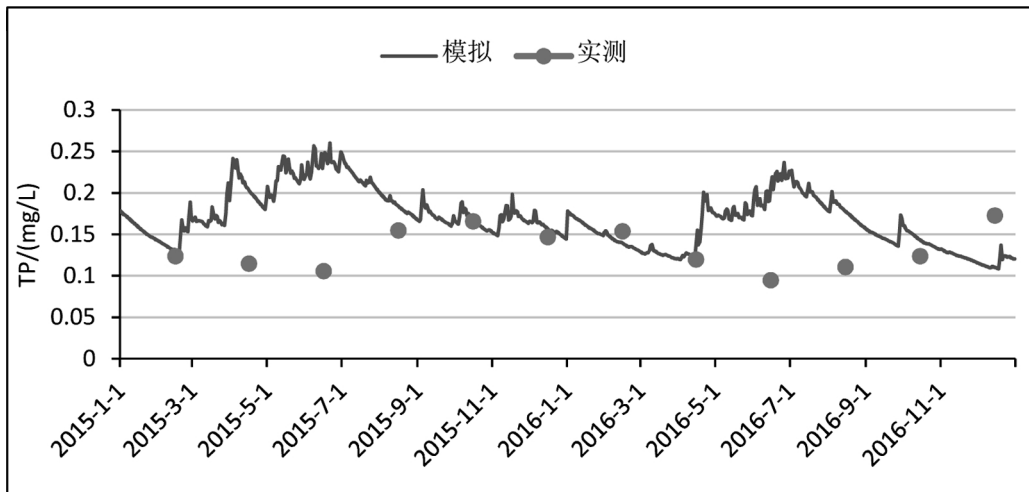


图4 思贤桥 TP 率定验证图(2015~2016)

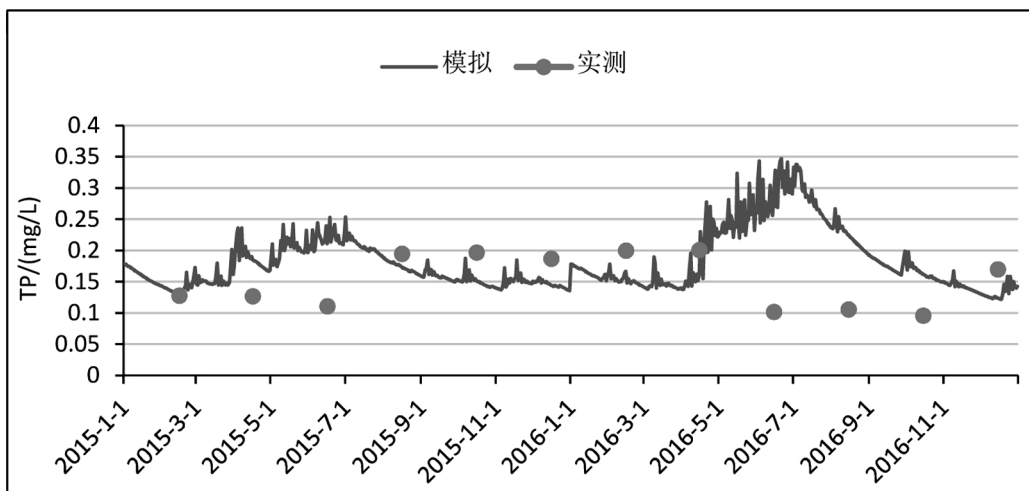


图5 烟水亭 TP 率定验证图(2015~2016)

由于缺乏湖泊水位长期监测资料，本模型不能以两湖水位的模拟值和实测值进行对比，但全年维持常水位 15.62m 基本符合两湖水位的客观情况。3 处水质监测断面的监测时间为 2015~2016 年，因此分别选取 2015 和 2016 年对两湖模型进行率定和验证。水质率定验证结果见图 3~图 5 所示，由于甘棠湖和南门湖受降雨溢流污染影响，3 个断面各指标汛期水质浓度模拟值普遍大于非汛期水质浓度模拟值，这与水质变化规律是相符的。

然而由于监测数据为瞬时值，存在偶然性误差，导致个别时段实测值与模拟值有一定差异。为了进一步验证模型的准确性，特在误差较大时段前后（2019 年 4 月 20 日）对九江宾馆和思贤桥进行补充监测，增加对模型的合理性分析。补测数据与模拟数据如表 2 所示，模拟值与补测值比较接近，COD 平均相对误差为 -8.24%，NH<sub>3</sub>-N 平均相对误差为 1.17%，TP 平均相对误差为 -6.79%，模拟结果具有较高的准确性，可用于后续

的模拟计算工作。

表 2 两湖水水质补测数据

污染物	数据类型	mg/l	
		九江宾馆	烟水亭
COD	补测值	63.21	75.25
	模拟值	64.23	71.63
NH <sub>3</sub> -N	补测值	3.42	1.92
	模拟值	2.91	2.13
TP	补测值	0.418	0.41
	模拟值	0.35	0.37

### 3.2 结果与分析

在甘棠湖和南门湖开展综合治理，湖区水质可得到大幅度改善。晴天期间，COD、NH<sub>3</sub>-N 基本为 I 类至 II 类，TP 为 III 类至 IV 类，TN 为 II 类至 III 类；雨天（降雨超过 31mm/d）期间，污染主要集中在溢流口

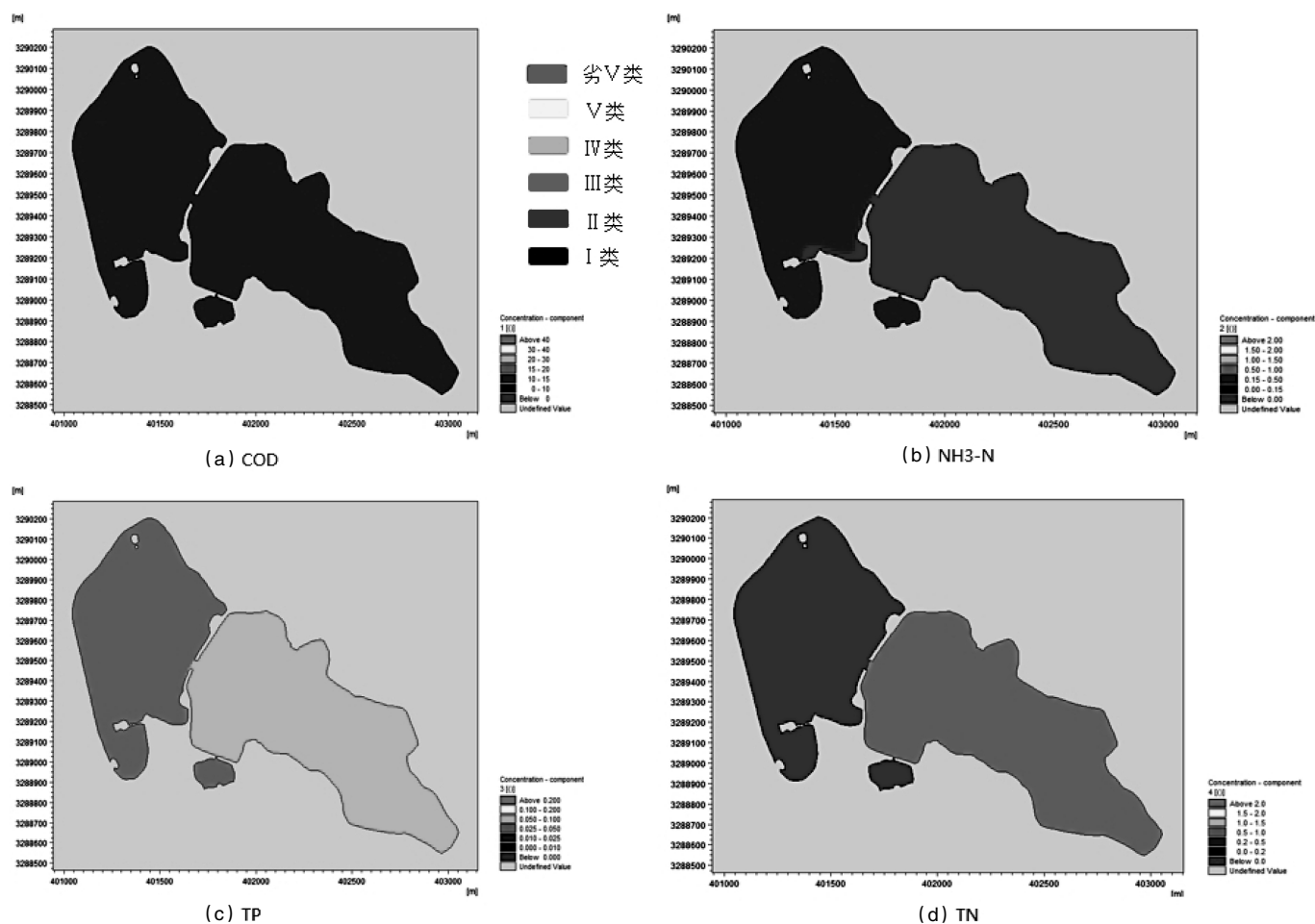


图 6 晴天各水质指标浓度分布图

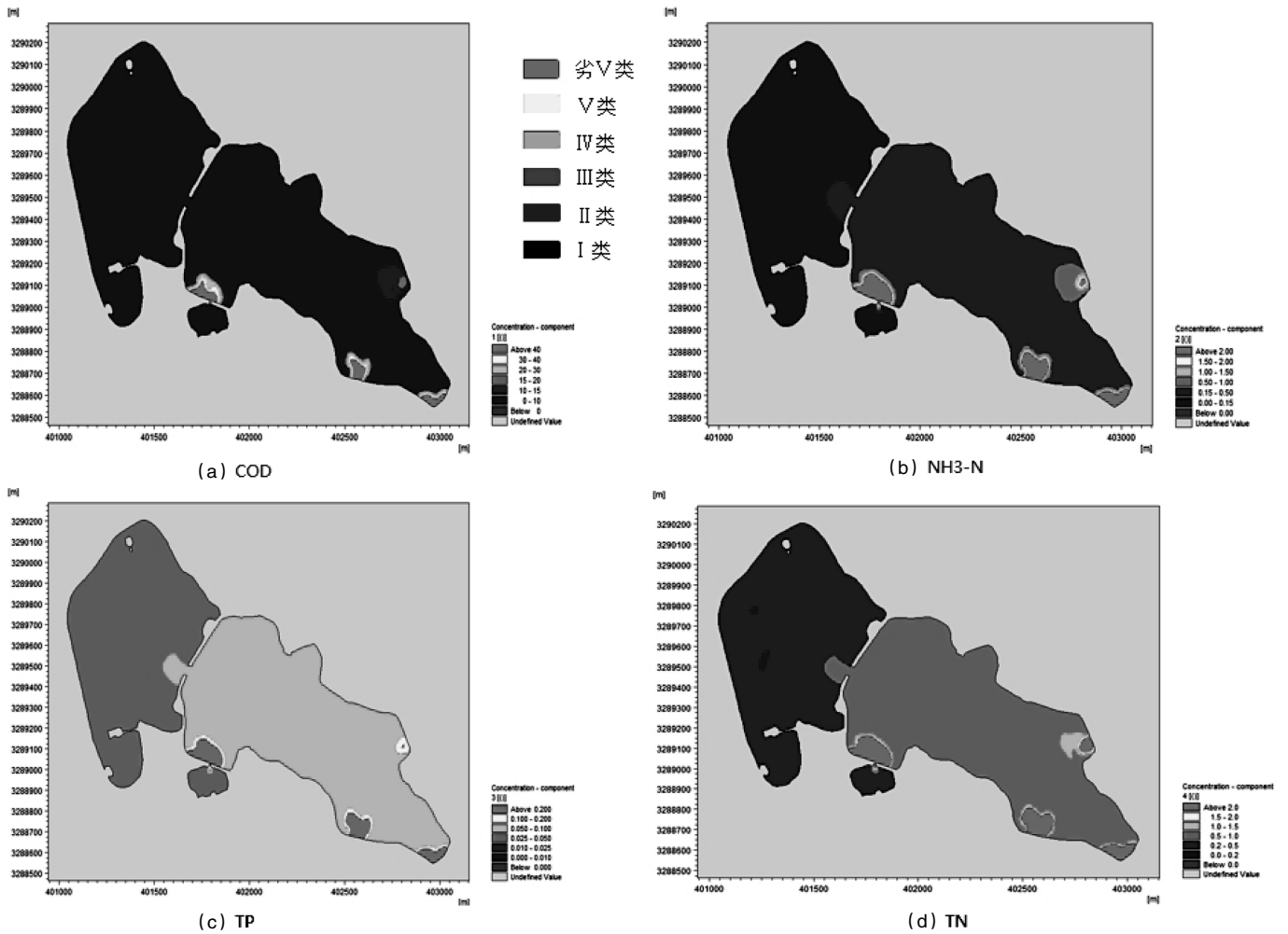


图7 雨天各水质指标浓度分布图

附近的岸边。晴、雨天各水质指标浓度分布如图6及图7所示。

从空间达标率的角度分析,根据甘棠湖和南门湖水水质IV类治理目标,晴天期间,水体主要指标基本全面达标;雨天(31mm/d)期间,由于降雨径流携带面源污染物由排口入湖,局部水体会出现恶化,超标水体主要出现在南门湖几个溢流排口附近,各指标空间达标率

都大于90%,如表3所示。

从全年时间水质达标分析,工程实施后,甘棠和南门湖水水质得到明显改善,COD、NH<sub>3</sub>-N、TP、TN绝大部分时间段可达到IV类水质目标,全年降雨期约有8.63%存在短暂的水质超标,思贤桥TN的超标倍数最大,超标倍数为5.52;超标后5天后可恢复至IV类水质标准,5天内TN的浓度变化过程如图8所示。

表3 甘棠湖和南门湖湖水水质空间达标率

工况	COD	HN <sub>3</sub> -N	TP	TN	%
甘棠湖晴天	100.00	100.00	100.00	100.00	
南门湖晴天	100.00	100.00	100.00	100.00	
甘棠湖降雨(31mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	
南门湖降雨(31mm)	97.15	95.28	94.51	94.29	

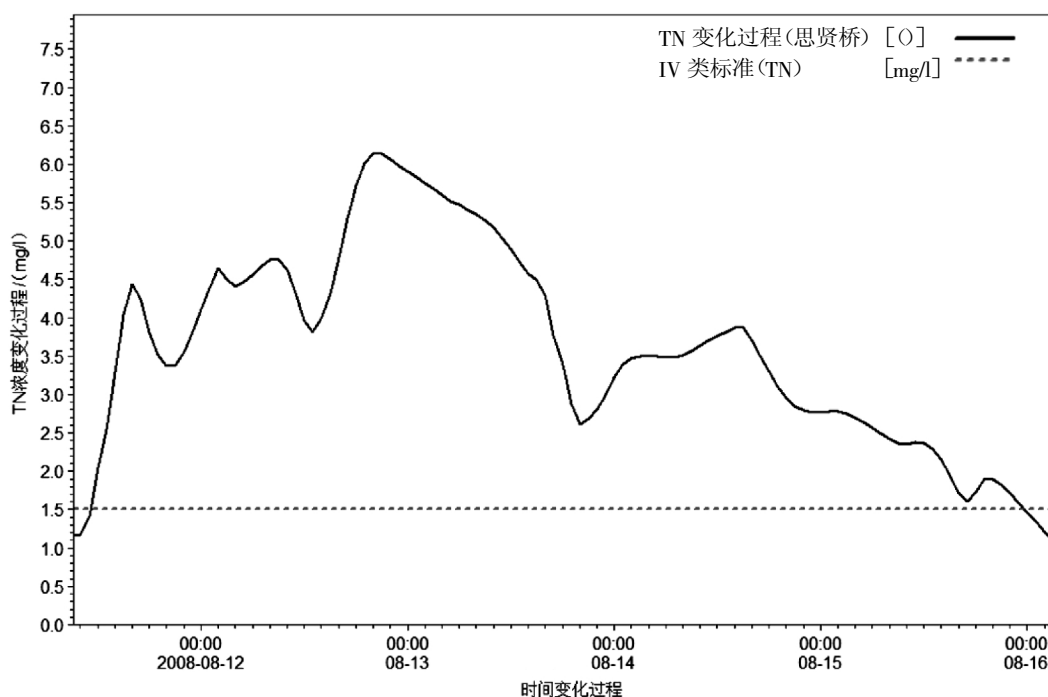


图 8 TN 超标 5d 内浓度变化过程

## 4 结 论

甘棠湖-南门湖水环境综合治理工程以水质改善和水生态修复为主要目的,通过点源截污、面源治理、内源清淤、生态修复、活水畅流等多种措施,使得水质得以改善。本方案在各工程措施整体实施,有序落实的前提下进行综合分析,得出以下结论:

(1)晴天,全湖水体主要指标基本达到 IV 类水质目标;31mm 日降雨条件下的雨天,局部水体会出现恶化,超标水体主要出现在南门湖几个溢流排口附近,各指标空间达标率都大于 90%。

(2)甘棠湖-南门湖全年绝大部分时间段可达到 IV 类水质目标,部分时段存在超标现象,其中 COD 超标占比为 0%~0.32%, $\text{NH}_3\text{-N}$  超标占比为 0.02%~2.25%,TP 超标占比为 5.37%~8.63%,TN 超标占比为 5.85%~6.38%,各指标全年达标率都大于 90%。思贤桥 TN 的超标倍数最大,超标倍数为 5.52,超标后 5 天后恢复至 IV 类水质标准。

## 参考文献:

- [1] 宫雪亮,孙蓉,芦昌兴,等. 基于 MIKE 21 的南四湖上级湖水量水质响应模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019(01): 70~76+82.
- [2] 赖锡军,姜加虎,黄群,等. 鄱阳湖二维水动力和水质耦合数值模拟[J]. 湖泊科学, 2011, 23(06): 893~902.
- [3] 袁燕,韩龙喜,孙杨,等. 基于典型降雨 TN 入库过程的水库水质响应数值模拟分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(03): 189~193.
- [4] 王领元. 应用 MIKE 对河流一、二维的数值模拟[D]. 大连理工大学, 2007.
- [5] 冯静. MIKE 21 FM 数值模型在海洋工程环境影响评价中的应用研究[D]. 中国海洋大学, 2011.
- [6] 许婷. MIKE 21 HD 计算原理及应用实例 [J]. 港工技术, 2010, 47(05): 1~5.
- [7] 王世旭. 基于 MIKE FLOOD 的济南市雨洪模拟及其应用研究[D]. 山东师范大学, 2015.

编辑:张绍付



## Water quality accessibility analysis for two lakes in Jiujiang Lianghu water environment comprehensive treatment project

YAN Xuhui, YING Bixi, CUI Ranxi

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200335, China)

**Abstract:** In response to the call of General Secretary Xi's "Yangtze River Protection", two lakes in Jiujiang (Gantang lake-Nanmen lake) are planned to carry out a series of water environment comprehensive treatment projects including shore interception, water ecological restoration and live water flow engineering, in order to achieve the Class IV water quality target. The mathematical model of hydrodynamic and water quality was established by MIKE 11, MIKE 21 and MIKE FLOOD. The flow field and pollutant concentration field of the two lakes were simulated and analyzed, and the water quality target accessibility of the water treatment project was evaluated. The research shows that after the implementation of the project, the spatial compliance rate of each water quality index of the two lakes is up to 90%, and the water quality compliance rate of sunny days is greater than rainy days; there are about 8.63% of the rainfall period (rainfall more than 31mm/d) exceed the water quality standard, which can re-standard after several days of recovery.

**Key words:** Water quality accessibility analysis; Two lakes in Jiujiang; Water quality model

翻译: 闫旭辉

(上接第 351 页)

## Stability analysis of sliding dangerous rock based on maximum circumferential stress criterion

XIAO Shengliang

(Jiangxi Provincial Yanshan County Water Conservancy Bureau, Yanshan 334500, China)

**Abstract:** China's mountainous terrain is widely distributed, and the collapse of mountainous dangerous rocks is one of the major geological disasters in mountainous areas. In order to study the influence of different crack angles, horizontal seismic forces and vertical seismic forces on the safety factor of dangerous rock mass, the maximum circumferential stress criterion is used to deeply cut the "V" type valley of the Chishui river in the intersection of Guizhou plateau and Sichuan basin. The stability analysis of the dangerous rock mass leads to the conclusion that the safety factor of the dangerous rock body decreases with the increase of the crack angle, but when the crack angle is less than 55°, the safety factor of the dangerous rock mass decreases rapidly, and the crack When the angle is greater than 55°, the safety factor decreases slowly; the safety factor of dangerous rock mass decreases with the increase of horizontal seismic coefficient or vertical seismic coefficient, and it decreases linearly; the damage of horizontal seismic force to dangerous rock mass. The degree is higher than the vertical seismic force of equal size.

**Key words:** Sliding type dangerous rock; Maximum circumferential stress criterion; Safety factor; Crack angle; Seismic force

翻译: 肖圣亮