

# 引江济太工程新沟河河湖水系水沙数学模型 试验研究

张素香<sup>1</sup>, 洪国喜<sup>2</sup>, 徐 兴<sup>2</sup>, 沈顺中<sup>2</sup>, Tan Soon Keat<sup>3</sup>, Chu V. H.<sup>4</sup>, 李 熙<sup>5</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 无锡市水文局, 江苏 无锡 214031; 3. 南洋理工大学, 新加坡 639798; 4. 麦吉尔大学, 加拿大 H3A2K6; 5. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 作为引江济太工程的一部分, 新沟河整治工程在 2014 年开始实施。基于 2013 ~ 2014 年的太湖水系湖网水文站实测资料, 通过河湖耦合的一维水沙数学模型计算新沟河整治工程前后水位和水流泥沙冲淤变化, 进行新沟河河网水沙动力分析; 通过二维水沙数学模型计算新沟河工程前后的水位、流场及河道的冲淤变化, 进行工程整治效果预测分析并提出优化建议。实施新沟河整治工程后, 新沟河水系河网的主要功能是排涝, 应急情况下也能通过新沟河向太湖调水以改善水质。

**关键词:** 太湖; 潮位; 水流; 水沙模型; 河网

中图分类号: TV146

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 10-0006-04

## Numerical modeling of hydraulics and sediment transport in river and lake network of Xingou regulation project of Yangtze River to Taihu Lake Water Transfer Project

ZHANG Suxiang<sup>1</sup>, HONG Guoxi<sup>2</sup>, XU Xing<sup>2</sup>, SHEN Shunzhong<sup>2</sup>, TAN Soon Keat<sup>3</sup>, CHU V. H.<sup>4</sup>, LI Xi<sup>5</sup>

( 1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu; 2. Wuxi Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resource Investigation Bureau, Wuxi 214031, Jiangsu; 3. Nanyang Technological University, 50 Nanyang Avenue, Singapore; 4. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Quebec H3A 2K6, Canada; 5. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu )

**Abstract:** As part of the Yangtze River to Taihu Lake Water Transfer Project, Xingou River regulation project was initiated in 2014. Based on the measured data in Taihu river network during 2013–2014, 1D lake and river coupling model was applied to water level and sediment transport calculations of the Xingou river network; 2D hydraulics and sediment transport model was applied to water level, flow field and sediment calculations of the project, and suggestions and optimization of the regulation scheme were brought up. Main functions of Xingou River network was flood routing and sewage discharge. It also provided a water transfer channel in emergence, which would transfer water to Taihu Lake improving water quality of Taihu Lake.

**Key words:** Taihu Lake; tide level; flow velocity; sediment transport and hydraulics model; river network

收稿日期: 2018-06-23

基金项目: 江苏省水利创新项目 (2017039)

作者简介: 张素香 (1971—), 女, 博士, 主要从事海岸及河流动力学研究。

## 1 概述

调水工程是改善太湖水系水环境的有效方法和途径之一<sup>[1]</sup>, 利用已建成的防洪河道, 太湖流域在 2014 年开始疏通新沟河、新孟河两条河道, 太湖将通过新孟河、望虞河补水, 借助走马塘、新沟河、太浦河向长江排水, 形成“两进三出”的循环系统, 通过让水体动起来改善水质。本文基于 2013 ~ 2014 年的太湖水系湖网水文站实测资料, 采用自然引排水方式与水利枢纽人工调度相结合的建模途径, 建立了能适应江湖分合、分蓄滞泄、吐纳交替等复杂水沙条件和洪水调度要求的一维和二维非恒定流数学模型<sup>[2-6]</sup>。通过江湖耦合的一维水沙数学模型计算新沟河整治工程前后水位和水流泥沙冲淤变化, 进行新沟河防洪、排涝影响分析; 通过二维水沙数学模型计算新沟河工程前后的水位、流场及河道的冲淤变化, 进行工程整治效果预测分析并提出优化建议。新沟河整治工程河湖水系示意图见图 1。



图 1 新沟河整治工程河湖水系图

## 2 一维河网水沙模型

### 2.1 河湖水系水沙及其河床变形一维计算原理

各相关因子计算式分别为:

水流连续方程:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

泥沙连续方程:

$$\frac{\partial (AS_i)}{\partial t} + \frac{\partial (QS_i)}{\partial x} = -\alpha B \omega (S_i - S_{i*}) \quad (3)$$

河床变形方程:

$$\rho_s \frac{\partial \eta_i}{\partial t} = -\alpha \omega (S_{i*} - S_i) \quad (4)$$

式中:  $Z$ 、 $Q$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $S$ 、 $S_*$  分别为水位、流量、过水面积、水面宽度、含沙量、水流挟沙力;  $\beta$  为动量修正系数;  $S_f$  为摩阻坡降, 采用曼宁公式计算;  $q$  为旁侧入流。

上述方程中, 水位、流速是断面平均值, 当水流漫滩时, 平均流速与实况有差异, 为了使水流漫滩后, 计算断面过水能力逼近实际过水能力, 需引进动量修正系数  $\beta$ 。  $S_i$  为第  $i$  组粒径含沙量,  $S_{i*}$  为第  $i$  组粒径的挟沙力,  $\rho_s$  为泥沙干容重,  $\eta_i$  为第  $i$  组粒径泥沙引起的河道变形,  $\alpha$  为恢复饱和系数,  $\omega$  为沉降速度。

方程 (1) 至方程 (4) 可以归纳为解如下普遍形式的偏微分方程:

$$\frac{\partial h \varphi}{\partial t} + \frac{\partial h u_0 \varphi}{\partial x} = S_\varphi \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  为普遍的变量, 用  $Z$ 、 $Q$ 、 $S$ 、 $S_i$ 、 $\eta_i$  代替可以得到方程 (1) 至方程 (4),  $S_\varphi$  为源项, 采用控制体积法对方程离散求解。

### 2.2 新沟河整治工程对防洪排涝影响分析

利用率定后的一维水沙模型对新沟河整治工程后的河湖水系河网进行了模拟, 参照图 2; 主要进行了工程实施后的水位和流量试验, 参照图 3, 流向基本为入江排涝, 偶尔会有逆流。相对于工程前, 新沟河主河道水位包络线最大下降值为 3.9 mm; 河网仍主要以淤积为主, 但淤积量大为减少。

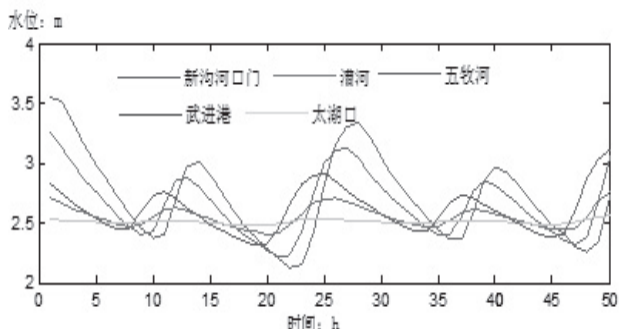


图 2 一维河网水系图

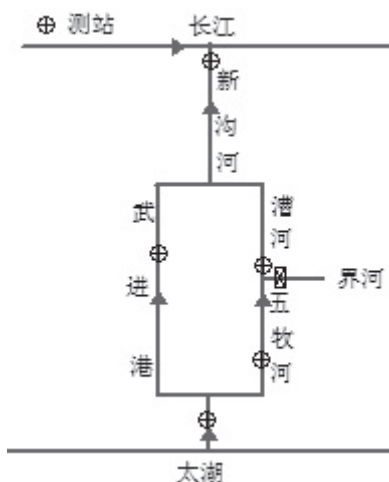


图3 整治工程后各站流量过程线

### 3 二维河网水沙模型

#### 3.1 河湖水系水沙及其河床变形二维计算原理

##### (1) 二维水流方程

二维水流方程的普遍形式为:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F(W)}{\partial x} + \frac{\partial G(W)}{\partial y} = D(W) \quad (6)$$

式中: 守恒物理量  $W$ ,  $x$  向和  $y$  向通量向量  $F$  和  $G$ , 以及源项向量  $D$  分别为:

$$W = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} hu \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $h$  为水深,  $u$  和  $v$  分别是  $x$  和  $y$  方向垂线平均的水平流速分量,  $g$  为重力加速度,  $S_0^x$  和  $S_0^y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的水底底坡, 定义为:

$$(S_0^x, S_0^y) = \left( -\frac{\partial Z_b}{\partial x}, -\frac{\partial Z_b}{\partial y} \right) \quad (8)$$

其中,  $Z_b$  为水底高程, 摩阻坡度定义为:

$$(S_f^x, S_f^y) = \frac{n^2 \cdot \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} (u, v) \quad (9)$$

式中,  $n$  为曼宁糙率系数,  $q$  为湖泊单元旁侧入流, 先确定湖泊总的逐日旁侧入流过程, 再按单元面积平均分配。

##### (2) 非均匀悬沙非平衡输沙方程

泥沙输运采用如下对流扩散方程的守恒形式:

$$\frac{\partial(hS_i)}{\partial t} + \frac{\partial(huS_i)}{\partial x} + \frac{\partial(hvS_i)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial S_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial S_i}{\partial y} \right) + \alpha \omega (S_{i*} - S_i) \quad (10)$$

河床变形方程为:

$$\rho_s \frac{\partial \eta_i}{\partial t} = -\alpha \omega (S_{i*} - S_i) \quad (11)$$

式中,  $K_x$ 、 $K_y$  分别为  $x$  和  $y$  向扩散系数, 其余系数同上。

二维水沙方程组仍采用控制体积法对方程离散求解, 其实质是逐单元进行水量、动量和沙量平衡, 准确满足积分形式的守恒律, 成果无守恒误差, 能处理含间断或陡梯度的流动。

#### 3.2 新沟河整治工程前后的水位、流场及河道的冲淤变化

二维水沙模型的计算表明, 新沟河整治工程前后, 太湖入新沟河的分流量有所增加 (约增 20%); 新沟河分流比受长江干流水位影响明显, 低潮位时分流比大于高潮位, 漕河口门的分流比变化不大, 五牧河分流能力较强; 漕河口门的分沙比变化较大, 受到枢纽的影响较多。为防止汛期太湖水位过高, 新沟河将承担太湖北部区域向长江排水的功能。同时, 应急情况下也能通过新沟河向太湖调水, 改善梅梁湖水质。

新沟河整治工程后, 参照图 4 和图 5, 水位略有下降, 流速特征值变化不大, 说明新沟河整治工程对河湖水系的水流特征影响不是很大。长江水倒灌和逆流的存在对于长江水引入新沟河水系有重要意义, 通过新沟河口门双向泵站抽引长江水入太湖, 抬高水系北部水位, 打开其他口门建筑

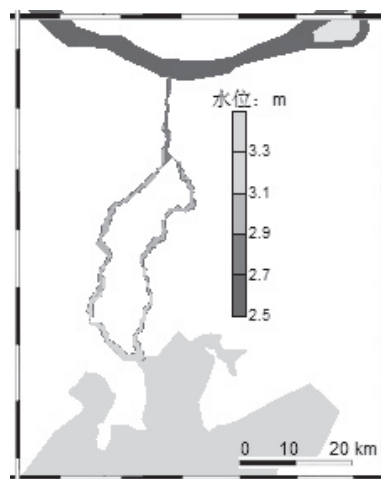


图4 低潮位水位沿程分布图

物自流出水能够将水系内河道水体轮流换清。参照图 6 和图 7, 对新沟河疏浚整治后的悬沙分布和河道冲淤进行了分析, 河道疏浚量大的区段泥沙回淤明显, 没有疏浚的河段淤积量较工程前减少, 新沟河湖网水系总体上仍以淤积为主。

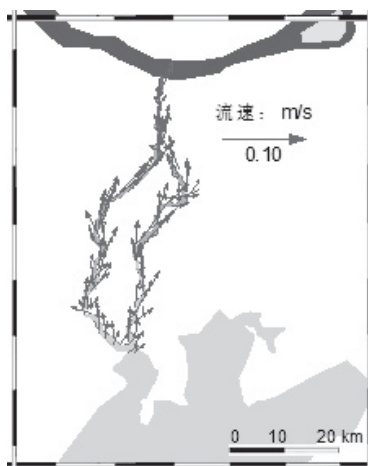


图 5 低潮流速沿程分布图

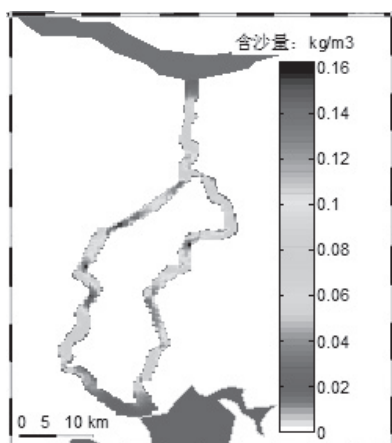


图 6 悬沙分布图

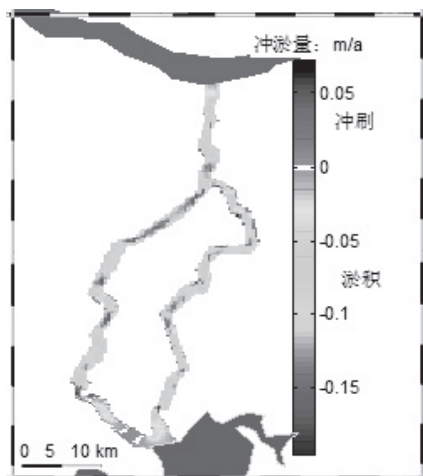


图 7 河床冲淤变化分布图

## 4 新沟河整治工程效果及影响分析

新沟河水系洪水的形成与发展不仅受太湖和区间降雨洪水的影响, 还受到长江洪水制约。新沟河水系洪水的上涨速度主要受太湖洪水制约, 而洪峰水位的高低和洪水消退快慢主要受长江洪水制约。总的来说, 新沟河水系洪水量级大小与持续时间长短, 主要由长江洪水大小和太湖高水位维持时间长短所决定。在防洪影响方面, 主要通过水利枢纽的合理调度实现长江洪水与太湖水系洪水的错峰。作为辅助措施, 利用水利工程的优化调度, 调水换水也是改善水环境的方法和途径之一。充分利用已建成的防洪基础设施, 长江潮位较高时, 利用沿江闸站、泵站引长江水入太湖, 同时将河湖水系内各主要河道水体轮流换清; 太湖水位较高时, 湖网沿水系自排长江, 再适时调控河湖水系其他口门建筑物出水。

## 5 结论与建议

从数学模型试验初步结果表明, 通过河湖耦合的一维水沙数学模型计算新沟河整治工程前后水位和水流泥沙冲淤变化, 新沟河流向基本为入江排涝, 偶尔会有逆流。相较于工程前, 新沟河主河道水位略有下降; 河网仍主要以淤积为主, 但淤积量大为减少。通过二维水沙数学模型计算新沟河工程前后的水位、流场及河道的冲淤变化, 新沟河分流比受长江干流水位影响明显, 低潮位时分流比大于高潮位, 漕河口门的分流比变化不大, 五牧河分流能力较强; 漕河口门的分沙比变化较大, 受到枢纽的影响较多。实施新沟河整治工程后, 新沟河水系河网的主要功能是排涝, 应急情况下也能通过新沟河向太湖调水以改善水质。

### 参考文献:

- [1] 黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及“引江济太”工程对其的影响[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 22-31.
- [2] 姚仕明, 卢金友. 三峡水库蓄水运用前后坝下水沙输移特性研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 117-123.
- [3] 唐洪武, 袁赛瑜, 肖洋. 河流水沙运动对污染物迁移转化效应研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 25(1): 139-147.

(下转第 16 页)

---

-