

基于 MIKE21 FM 的松山村河水动力模拟研究

于乾贤¹, 张佳迪¹, 陈春坤²

1. 吉林省水利科学研究院, 吉林 长春 130022

2. 长春工程学院 水利工程学院, 吉林 长春 130012

DOI:10.61369/ME.2025080019

摘 要 : 抚松县松山村河道存在严重淤积与天然坑塘干涸问题, 为了提升河道、坑塘的水体流动性和生态功能, 对松山村河与周边坑塘进行河湖连通措施。本文采用 MIKE21FM 数值模拟软件, 对松山村河水系连通工程进行水动力数值模拟研究。将验证点数据进行多次率定并进行误差分析计算, 结果表明 MIKE21FM 模型能够有效地反应松山村河水位、流速变化情况, 同时为后续进一步模拟水质变化情况打下坚实的基础, 为其他小型乡村河水动力的模拟研究提供一定的参考价值。

关 键 词 : MIKE21FM; 松山村河; 水动力模拟

Hydrodynamic Simulation of River Flow in Songshan Village Using MIKE21 FM

Yu Qianxian¹, Zhang Jiadi¹, Chen Chunkun²

1. Jilin Water Conservancy Research Institute, Changchun, Jilin 130022

2. School of Water Resources Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012

Abstract : The Songshan River in Fusong County faces severe siltation and drying of natural ponds. To enhance water flow dynamics and ecological functions in the river and surrounding water bodies, a river-lakhe MIKE21FM model effectively captures water level and flow velocity variations in the Soe connectivity project was implemented. This study employed MIKE21FM numerical simulation software to conduct hydrodynamic modeling of the river connectivity project. Through multiple calibration cycles and error analysis of verification data, the results demonstrate that tngshan River. The findings provide a solid foundation for subsequent water quality simulations and offer valuable references for hydrodynamic modeling of small rural rivers.

Keywords : MIKE21FM; Songshan village river; hydrodynamic simulation

引言

2018年12月水利部办公厅发布《关于实施乡村振兴战略加强农村河湖管理的通知》, 对实施乡村振兴战略作出阶段性谋划, 提出要积极开展农村水生态修复, 实施水系连通和河塘清淤整治。本文就探究东北寒区乡村水系松山村河河湖连通工程连通效果, 对松山村河采用水动力数值模拟软件进行研究。常见的水动力数值模拟软件有荷兰的 Delft3D 模型、英国的 InfoWorks 模型、丹麦的 Mike 模型等, 其中, Mike 软件应用广泛, 能模拟一维、二维和三维多种水环境, 且模拟结果较符合实际^[1]。国内利用 MIKE21 模型做过大量的研究, 廖威林等^[2]建立 MIKE21 洪水淹没模型, 模拟分析了深圳龙口水库洪水对下游的淹没情况; 辛小康^[3]借助于 MIKE 21 水动力模型, 分析平面二维数学模型中不同桥墩概化方法对宜昌江段某桥梁工程防洪评价结果的影响; 于晓霞等^[4]利用 Mike21 HD 模拟莱州湾的潮流场变化用于计算水交换能力, 分析海洋开发活动对莱州湾的影响; 袁文娟^[5]等采用 MIKE 21 模型进行模拟和验证了东平湖水动力及水质情况, 研究入湖流量变化对东平湖安全状况的影响。

本文在搜集大量实测资料和开展实地的勘察采样工作的基础上, 根据松山村河流域的实际情况, 基于 MIKE21FM 模块建立水动力模型, 对松山村河水系连通工程进行数值模拟研究, 为后续深入探究水质模拟过程奠定可靠基础。

注: 本论文内容为吉林省水利科学研究院基本科研经费-寒区水美乡村季节性河流水系连通及生态修复技术研究(JLSKY-JBKYJF-2024-05)的研究成果。

作者简介:

于乾贤(1980-), 男, 汉族, 辽宁庄河人, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向: 河道治理工程、水工结构工程等;

张佳迪(1982-), 女, 汉族, 吉林长春人, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向: 科研档案管理;

陈春坤(2001-), 男, 汉族, 福建大田人, 硕士研究生, 学生。

一、研究区域概括

抚松县位于吉林省的东南部，松花江上游，白山市的东北部，东与安图县接壤，南临临江市，西与靖宇县隔江相望，北连桦甸市、敦化市，东南与长白朝鲜族自治县和朝鲜民主主义人民共和国毗邻，辖区总面积6159 km²。

本次研究区域抚松县松山村河为北黄泥沟河上游支流，现状有两条河道穿村庄而过，流域面积10.3km²，需整治河道长度2.2km。河道存在严重淤积问题，部分河道护岸工程因冻融破坏问题损坏严重；沿河植被覆盖率较低，生态效果差，与周边环境不匹配。河道沿线有一些天然坑塘，因水量不足基本处于干涸状态。

实施水系连通建设是保护水生态环境的重要手段之一^[6]。目前通过对确定的河道实施范围内的治理长度1.41km河道段的现状问题进行梳理，采取将松山村河与现状农村坑塘河湖连通、河道清障、岸坡整治等措施对河道进行综合整治。

二、MIKE21FM水动力模型

（一）模型简介

MIKE21FM水动力模块是基于数值解的二维浅水方程，因此该模型包括连续性、动量、温度、盐度和密度方程，可以使用直角坐标或球面坐标，可以模拟因各种作用力作用而产生的水位和水流变化及模拟任何忽略分层的二维自由表面流，在平面上采用非结构化网格^[7]。与传统一维水动力学模型相比，MIKE 21模型具有更强的计算能力和更细致的空间离散化，可以更好地反映水流的二维特性^[8]。为研究松山村河的水动力特性，本文应用MIKE21FM的二维水动力模拟技术，对抚松县松山村河水系连通河道段进行水动力模拟研究。

（二）模型原理

基于MIKE21FM水动力模块构建的数学模型方程组包含以下方程：

连续性方程为：

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

x方向动量方程为：

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial s_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{sy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

y方向动量方程为：

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial s_{sx}}{\partial y} + \frac{\partial s_{sy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (4)$$

式中：x,y为笛卡尔坐标系坐标； \bar{u} 、 \bar{v} 为水深平均流速； u 、 v

分别为沿水平x和竖直y方向的速度分量； η 为底高程； d 为静止水深； $h=\eta+d$ 为总水深；g为重力加速度； t 为时间； τ_b 为液体内部剪切力； τ_s 为液体表面剪切力； f 为科氏力系数； ρ 为水体密度； ρ_0 为水的相对密度； P_a 为当地大气压强； s_{sy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力分量； S 为源项； u_s 、 v_s 为源项水流流速分量； T_{xy} 、 T_{yy} 为水平粘滞应力项。

三、水动力模型建立与验证

（一）网格划分及地形建立

本文以松山村河水系连通工程河段为研究对象，根据水文计算结果、遥感和GPS技术及地形资料构建河道水动力模型，其模型计算范围为沿松山村河主河段（桩号K1+050）至下游葫芦潭与分叉河道汇流处，总长701m，宽为8m，其中葫芦潭总长47m。研究区域的地形数据是通过现场实地勘测数据获取河道边界坐标以及地形高程点数据，于网格生成器中导入河道边界线，定义开边界，修改删除多余高程点与边界线，并导入地形散点高程数据进行插值，其坐标系为CGCS2000国家大地坐标系。

采用非结构性三角形网格对松山村河水系连通河段区域进行剖分，非结构性网格能够更为准确地拟合复杂不规则地形^[9]。初步生成网格后进行光滑处理，对于狭小河道区域进行网格局部加密并保证网格疏密过渡均匀。模拟网格区域总计1902个网格节点，3144个三角形网格单元。进行局部加密后的网格图和水深平面地形图如图1、2所示。

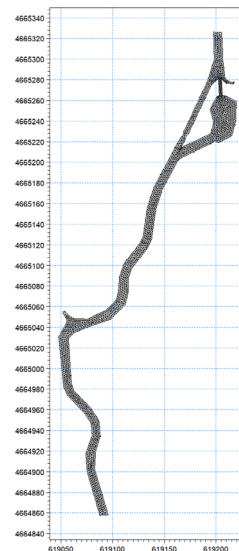


图1 松山村河道网格

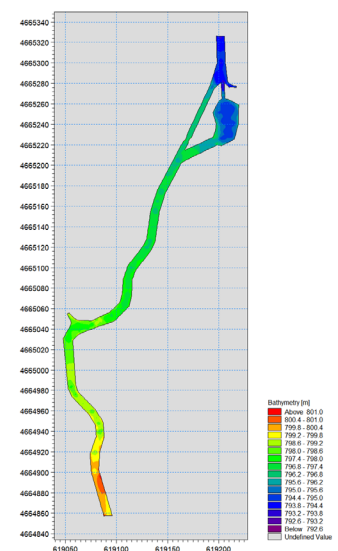


图2 松山村河道水深平面地形

（二）参数设置

（1）初始条件和边界条件

因为缺少松山村河历史水文资料，依据松山村河水系连通工程实际资料以及实地监测数据，将初始水位设定为793m，以保证模型顺利启动和稳定运行。假定模拟区域内河道起始状态为静止水体，即初始流速设为0。上游进水口采用流量控制方式，设定流量为0.626 m³/s；下游进水口采用水位控制，将水位设定为

793m。

(2) 时间条件

模拟时段设置为2025年4月9日至2025年9月5日，即进行河道段水位监测时段，步长为86400s，共设置150步。

(3) 求解格式与CFL数

结合松山村河的实际情况，使用“低阶，快速算法”。为了让模型更加稳定，对克朗数 Courant Friedrich Levy (CFL) 作出限制，默认值为0.8。

(4) 干湿边界

为避免计算失稳，模型需对研究区域内每个网格进行干湿状态判断。该判断基于网格水深值，将网格划分为“干”、“湿”与“半干半湿”三种状态。当网格点水深 $h < 0.01\text{m}$ 时，该网格点为干点，不参与水动力计算；当网格点水深 $0.01 < h < 0.05\text{m}$ 时，该网格点处流速为零，仅参与水流连续方程计算；当 $h > 0.1\text{m}$ 时，该网格点参与水动力计算^[10]。

(5) 涡粘系数

涡粘系数的设定通过 Smagorinsky 公式计算确定，取默认值为 $0.28\text{m}^2/\text{s}$ 。

(6) 底摩擦力

鉴于本研究区域空间尺度相对较小，水动力过程受局部地形变化影响有限，为简化模型参数设置并保证计算稳定性，底摩擦力综合参考《水力计算手册》中关于天然河道及平原河网曼宁糙率系数 n 的推荐取值范围，并结合研究区实地水文地貌特征，最终确定该区域的曼宁糙率系数 $n=0.03$ ，曼宁数 M 设定为 $32\text{m}^{1/3}/\text{s}$ 。

(7) 降雨

基于东岗气象站的长期监测数据，本研究将降雨设定为模拟期内随时间动态变化但空间上均匀分布的模型边界参数，并依托 MIKE Zero 平台中的 Time Series 模块，构建降雨时间序列文件，以准确反映研究区水文气象要素的时空特征。

(8) 蒸发和风场

由于缺乏现场实测的风场观测数据和实际蒸发量记录，本研究依据中国气象网发布的抚松县气候基本资料，以及《吉林省水文手册》中所提供的区域水文气象参数，采用抚松县多年平均风速 2.7m/s 作为基础风场输入值，主导风向为西南风；蒸发量参数采用抚松县多年平均水面蒸发量 3.29mm/d 作为模型输入，以反映区域长期蒸发能力。

(9) 其他参数

鉴于本研究区域松山村河整体空间尺度较小，其水动力过程主要受局部地形、流量边界及河道形态等因素控制，而密度分层科氏力、冰盖引潮力以及波浪辐射应力等物理机制在该尺度下所产生的影响可忽略不计。因此，在构建松山村河河道水动力模型时，暂未纳入上述因素，以简化模型结构并提高计算效率。

(三) 水动力模型的验证

本研究选取松山村河段桩号 K1+250 处及下游葫芦潭与分叉河道汇流处作为水动力模型的验证点位，分别记为点位1和点位2，其具体位置如图3所示。在模型构建过程中，首先利用2025年

4月9日至2025年7月7日期间在上述两个断面获取的实测流速与水位数据对水动力模型进行率定；随后，采用2025年7月7日至2025年9月5日的实测流速与水位数据对率定后的模型进行独立验证。点位1和点位2处流速的模拟值与实测值对比结果如图4所示，水位的模拟值与实测值对比结果如图5所示。

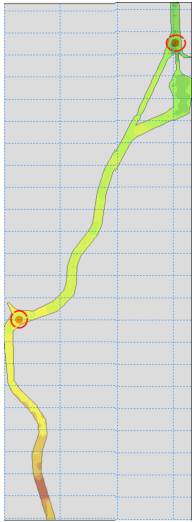


图3 验证点位置图

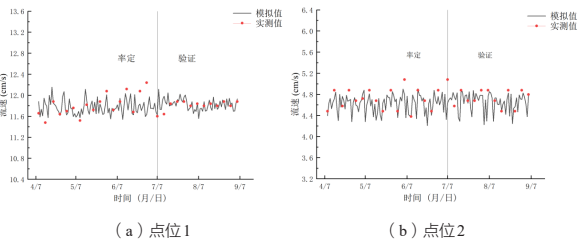


图4 点位1和点位2处模拟流速与实测流速对比图

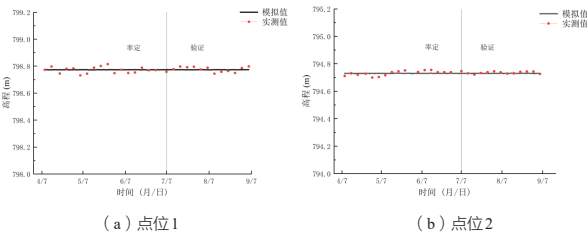


图5 点位1和点位2处模拟水位与实测水位对比图

由图4-5可见，水动力模型的模拟结果与实测数据总体吻合较好，初步表明模型具有一定的可靠性。为进一步定量评估模型的模拟精度，本文采用平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 两种统计指标，对两个验证点的模拟值与实测值之间的偏差进行系统性误差分析。具体的误差计算结果详见表1。

表1 验证点水位和流速模拟结果误差分析值

		点位1		点位2	
		水位 (m)	流速 (cm/s)	水位 (m)	流速 (cm/s)
率定期	MAE	0.019	0.17	0.0147	0.133
	MSE	0.0066	0.52	0.004	0.319
验证期	MAE	0.015	0.075	0.0081	0.077
	MSE	0.0027	0.063	0.00073	0.065

经计算，率定期间两个点位模拟水位与实际测量水位平均绝对误差（MAE）和均方误差（MSE）在0.0066–0.015之间，差异值相对较小；流速模拟的流速值与实际测量的流速值平均绝对误差（MAE）和均方误差（MSE）在0.133–0.52之间，差异值相对较大，因为水动力模型模拟出的流速值为日尺度数据，实际测量值受测量日不同时段和气候因素影响，模拟结果与实际监测数据两者对比会存在一定的误差，误差在可接受范围内。验证期间两个点位水位和流速值相对稳定，整体误差处于合理范围内，模拟精度较高，表明 MIKE21FM模型能够有效再现松山村河段的水动力过程，具备良好的适用性与可靠性。

四、结语

本文采用 MIKE21FM 水动力模型模拟了松山村河水系连通工程河道二维水动力模型，对历史水文资料相对短缺的乡村流域采用验证点定期监测水位流速的方法，并与研究区域实地水位和流速数据多次率定后经误差分析验证水动力模型的准确性，结果切合松山村河的实际情况，为后续进一步模拟水质变化情况打下坚实的基础；同时本次研究模拟结果能给其他小型乡村河流水动力的模拟研究提供有益的参考与借鉴。

参考文献

[1] 奚斌, 陈倩倩, 陈伟等. 基于 Mike21 模型的河道水质提升工程试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2023, (5): 5–11.

[2] 廖威林, 周小文, 何勇彬. 城市地区水库溃坝洪水演进模拟 [J]. 长江科学院院学报, 2014, 31(10): 98–103.

[3] 辛小康. 桥墩概化方法对水动力数学模型计算结果的影响研究 [J]. 三峡生态环境监测, 2017, 2(04): 34–41, 53.

[4] 于晓霞, 王占金, 冷星等. 海洋开发活动对莱州湾水动力条件的影响研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2022, 52(08): 132–139.

[5] 袁文娟, 刘定莹, 张英豪等. 基于 MKE21 模型的东平湖水动力及水质模拟 [J]. 当代化工研究, 2025, (06): 85–87.

[6] 伊永玲. 抚松县水系连通布局与建设探讨 [J]. 吉林水利, 2023, (12): 14–17.

[7] 李晓冰. 基于 MIKE21 的丁坝和导流排对河道流速的影响研究 [J]. 水科学与工程, 2025, (2): 54–56.

[8] 李冠. 基于 MIKE 21 水动力学模型在桥梁防洪评价中的应用 [J]. 城市建设理论研究, 2024, 219–222.

[9] 袁小梦. 城市人工湖水动力水质耦合模拟研究—以兴庆湖为例 [D]. 西安理工大学, 2024.

[10] 孙玲玲, 王树谦, 石宝红等. 基于 MIKE21FM 的黄壁庄水库水动力模拟研究 [J]. 人民珠江, 2024, 38(9): 64–68.