

doi: 10.12097/gbc.2022.12.005

# 山区河流水环境数值模拟 ——以四川古蔺河为例

王更, 白栋, 钱建利\*

WANG Geng, BAI Dong, QIAN Jianli\*

中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100

*Xi'an Mineral Resources Investigation Center, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi China*

**摘要:** 山区河流边界地形复杂、水动力条件变化剧烈且水文水质资料缺失, 水环境系统不确定性较大, 对其开展数值模拟研究具有重要的科学和实践意义。通过建立基于 Navier-Stokes 的 MIKE 21 水动力水质模型, 对四川省南部典型山区河流古蔺河进行水环境数值模拟, 为山区河流水环境研究提供支撑。结果显示, 所建模型表现良好, 水动力模型决定系数 ( $R^2$ ) 平均值为 0.93, 平均相对误差 (MRE) 平均值为 14.25%, 水质模型  $R^2$  平均值为 0.86, MRE 平均值为 19.83%。水动力情景模拟显示, 降雨量增加一倍, 控制断面处的平均流速增加 7.94%, 风速增加一倍, 控制断面处的平均流速增加 5.26%。在不同补水情景下, 当补水位置位于德耀镇、古蔺镇及太平镇再生水厂上游 5 km, 补水量为再生水厂规模的 50% (0.29 m<sup>3</sup>/s、0.58 m<sup>3</sup>/s、0.46 m<sup>3</sup>/s) 时, 控制断面处 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的平均浓度降幅最大, 分别为 24.55%、25.25% 和 26.79%。研究结果可为山区河流的水环境研究提供借鉴, 对于山区河流的水环境系统治理具有重要意义。

**关键词:** 山区河流; 水环境; 数值模拟; MIKE 21; 四川

**中图分类号:** P343.1; X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)06-0984-10

**Wang G, Bai D, Qian J L. Numerical simulation of water environment in mountainous river: A case of Gulin River, Sichuan Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(6): 984-993**

**Abstract:** The terrain of mountain river boundaries is complex, the hydrodynamic conditions change drastically, and hydrological and water quality data are lacking, leading to significant uncertainty in the water environment system. Conducting numerical simulation research has important scientific and practical significance. In this study, we established a MIKE 21 hydrodynamic and water quality model based on the Navier-Stokes equations to perform numerical simulations of the water environment in the Gulin River, a typical mountain river in the southern part of Sichuan Province. The results show that the established model performs well, with an average coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.93 for the hydrodynamic model and an average mean relative error (MRE) of 14.25%. For the water quality model, the average  $R^2$  is 0.86 and the average MRE is 19.83%. Hydrodynamic scenario simulations show that doubling the rainfall increases the average flow velocity at the control section by 7.94%, while doubling the wind speed increases the average flow velocity at the control section by 5.26%. Under different water supplementation scenarios, when the supplementation locations are 5 km upstream of the Deyao Town, Gulin Town, and Taiping Town wastewater treatment plants, and the supplementation amount is 50% of the treatment plant capacity (0.29 m<sup>3</sup>/s, 0.58 m<sup>3</sup>/s, 0.46 m<sup>3</sup>/s), the average concentrations of COD, NH<sub>3</sub>-N, and TP at the control section decrease the most, by 24.55%, 25.25%, and 26.79%, respectively. The research results can provide references for the study of mountain river water environments and are of significant importance for the management of water environment systems in mountain rivers.

**Key words:** mountainous river; water environment; numerical simulation; MIKE 21; Sichuan Province

收稿日期: 2022-12-02; 修订日期: 2023-03-13

资助项目: 中国地质调查局项目《石羊河中游区域生态保护修复地质调查》(编号: DD20242666)

作者简介: 王更 (1986-), 男, 工程师, 从事环境地质及水文地质研究。E-mail: 461501321@qq.com

\* 通信作者: 钱建利 (1990-), 男, 硕士, 工程师, 从事自然资源调查监测观测研究。E-mail: 1228143523@qq.com

水环境问题涉及因素复杂,从流域层次开展水环境系统分析面临时空分布广、污染物成分复杂等挑战,建立合理的数值模型是有效的解决方法(张昊等, 2010; 王民浩等, 2019)。水环境数值模型以其适用性强、精度高等特点,成为开展水环境现状分析、水质模拟预测、制定流域水体达标情景和水环境保护综合规划的主要技术手段(赖锡军, 2019; 陈军等, 2022)。针对不同流域,如何精确有效地构建反映流域本身水环境特征的数值模型是水环境模拟研究的重要问题之一(Mikulčić et al., 2020; 何剑波等, 2021),精确的模拟结果对于流域污染控制及实现“一河一策”精准施治具有重要意义。

水环境数值模型包括水动力和水质模型。水动力数值模拟相关研究起源较早, Saint 于 1871 年提出的圣维南方程为水动力模拟奠定了基础(Saint, 1871), 随后, 研究对圣维南方程进行了改进, 相继发展了二维(Endon, 1986)、三维水动力模型(Kim et al., 2017)。水质模型的研究相对起步较晚, 1920—1960 年, 一维氧平衡稳态 S-P(Streeter-Phelps) 模型的发展为水质模拟奠定了基础(Streeter et al., 1958); 1960—1990 年, 在 S-P 模型的基础上, 温度、水动力系数等多种因素被引入模型, 二维水质模型被逐渐开发利用(Imboden, 1974); 1990 年至今, 水质模型全面发展, 二维、三维水质模型进一步深化利用(Lopes et al., 2008; Missaghi et al., 2010)。为了方便、快捷地进行水质模拟, 前人研究将水质模拟原理与计算机相结合, 目前, 已有大量较成熟的综合性水质模拟软件, 如 QUAL(张亚丽等, 2018)、WASP(史铁锤等, 2010)、SWAT(Teshager et al., 2017)、EFDC(戴君等, 2018)、MIKE(Xiong et al., 2022) 等。其中, MIKE 系列软件模块更多、模拟过程更丰富、网格单元划分更灵活, 已成为目前水环境模拟的主流软件之一(Wang et al., 2020; 王岩等, 2022)。

至今, 水环境数值模拟研究多集中于平原河流、湖泊、水库等, 针对山区河流的研究相对较少, 相关研究亟待深入。中国西南地区绝大部分为山区, 如四川省丘陵及低山占比高达 93%, 同时, 西南地区降雨丰沛, 水力资源丰富, 山区河流众多(张光科, 1999)。山区河流河道形态复杂, 地形落差大, 流量普遍偏小且丰枯变化明显, 水环境容量、污染物稀释降解过程均不同于平原河流, 致使其水环境系统更易受到人为活动干扰(钟宗莲, 2016)。近年来, 随着中

国经济全面发展, 山区河流天然的水环境系统逐渐被破坏, 针对山区河流水环境问题的研究逐渐被人们所重视(吴贻创等, 2019)。

对于山区河流的水环境问题开展数值模拟研究面临很多困难, 例如山区河流水文水质监测资料缺乏, 边界地形复杂多变(漆露, 2018; 罗铭等, 2019)。同时, 山区河流数值模拟参数受多种因素影响, 如水文条件、污染物输入、水体结构物差异等, 导致参数变化不确定性变大(Stefunkova et al., 2021)。目前, 针对山区河流水环境的研究多集中在水文特征方面(刘兴邦等, 2018; 王瑞敏等, 2022)。水环境模拟软件是水环境数值模拟的主要手段, 而将其应用于山区河流水环境模拟的研究较少, 所以有必要开展相关研究以弥补该方面研究的不足。因此, 本次研究以四川省南部典型山区河流古蔺河为研究对象, 采用基于 Navier-Stokes 方程的 MIKE 21 模型, 构建符合古蔺河流域特征的水动力-水质模型, 并开展水环境情景模拟分析, 研究结果具有重要的科学和实践意义, 可为山区河流的水环境研究提供借鉴。

## 1 研究区域和方法

### 1.1 研究区域概况

古蔺河位于四川省古蔺县境内, 属长江水系, 是赤水河左岸一级支流。古蔺河属山区河流, 发源于古蔺县箭竹乡, 由西向东横穿县境中北部, 流经箭竹、德耀、古蔺、永乐、太平等乡镇后, 在太平渡处注入赤水河, 主要承担生产、纳污、泄洪等生态水环境功能(古蔺县生态环境局, 2017)。

### 1.2 计算单元划分

本次研究依据流域特征对研究区域进行河道分段概化, 以系统反映河道特征。结合古蔺河流域特征, 分段概化时考虑河道断面发生剧烈变化处, 如急弯-坡降较大河道等、支流或排污口的汇入处、水工结构物修建处、水文站等。

根据以上河道概化原则, 结合古蔺河流域水系及监测断面的分布情况, 将研究河段设定为德耀镇断面-太平渡断面, 其次, 再设定 2 个控制断面: 飞龙河断面及古蔺水文站断面(图 1)。在此基础上, 根据 2017 年古蔺县环境统计数据对流域内排污进行概化处理, 对于点源排污口, 采用集中点概化法, 对于非点源排污口, 如农业面源, 采用重心概化法概化为点源排污口(付素静等, 2021), 共概化为 8 个排污

口。同时考虑河流形态、水文、支流汇入、水工结构物、监测资料等因素,将研究河段划分为 12 个计算单元(表 1)。

### 1.3 水动力-水质模型建立

#### 1.3.1 地形网格建立

为准确反映古蔺河复杂的河道变化,本次研究沿河岸每隔 10 m 取一个边界坐标,左右边界坐标共计设定 11723 个。同时,网格剖分时划分为细致稳定的三角形网格,采用有限体积法计算研究区域的空间离散程度,共计生成网格 19823 个,计算节点 15938 个,研究区域局部网格剖分图见图 2。研究采

用 DEM(数字高程模型)数据,结合实测水深得到河底高程,基于剖分网格,对地形进行自然邻近插值,生成模拟区域地形分布。

#### 1.3.2 水动力模型建立

##### (1)控制方程

MIKE 21 水动力模型基于三向不可压缩和雷诺数(Re)均匀分布的 Navier-Stokes 方程,并服从 Boussinesq 假定和流体静定假设 (Danish, 2012)。控制方程包括:

$$\text{水流连续方程: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}}{\partial y} = hs \quad (1)$$

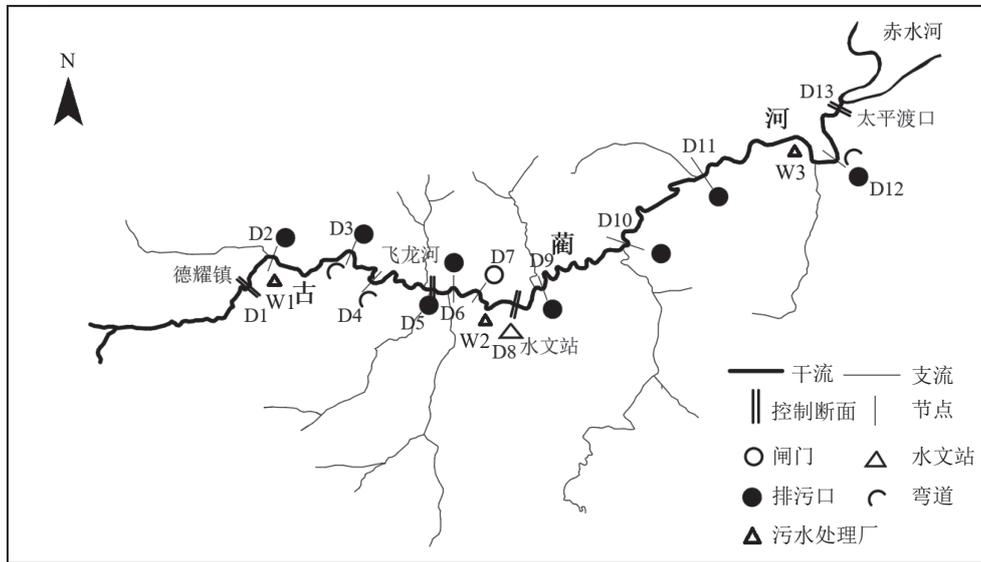


图 1 古蔺河分段示意图(图中 D1 ~ D13 代表计算单元节点)

Fig. 1 Segmentation diagram of Gulin River(D1 ~ D13 representing the computational unit nodes)

表 1 计算单元信息

Table 1 Calculation unit information

序号	控制单元	计算单元	长度/m	宽度/m	水深/m	体积/m <sup>3</sup>	坡降
1	德耀镇-飞龙河段	D1-D2	2392	10	0.3	7176	0.0107
2		D2-D3	5623	14	0.35	27553	0.0269
3		D3-D4	2825	16	0.3	13560	0.0145
4		D4-D5	6643	10	0.5	33215	0.0054
5	飞龙河段-水文站段	D5-D6	1497	22	0.45	14820	0.0095
6		D6-D7	2737	20	0.5	27370	0.0030
7		D7-D8	3255	18	0.5	29295	0.0066
8	水文站-太平渡段	D8-D9	1326	14	0.3	5570	0.0068
9		D9-D10	8413	18	0.3	45430	0.0059
10		D10-D11	10110	20	0.5	101100	0.0021
11		D11-D12	8620	25	0.5	107750	0.0033
12		D12-D13	5169	30	0.6	93042	0.0050

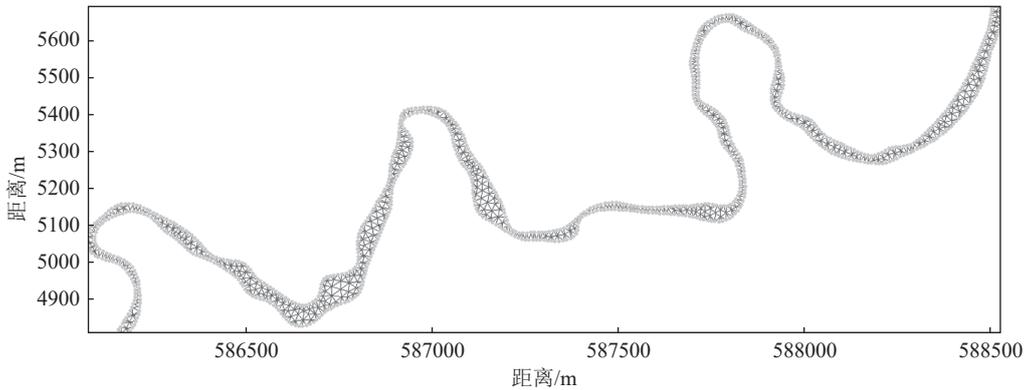


图 2 研究区域局部网格剖分图

Fig. 2 Local grid division of the study area

动量方程:

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

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

式中:  $h$  为水深(m),  $t$  为时间(s);  $\eta$  为波面高程(m);  $d$  为静水水深(m);  $h_s$  为源汇项(m/s);  $u$ 、 $v$  为  $x$ 、 $y$  方向上的流速(m/s);  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$  为  $x$ 、 $y$  方向上的垂线速度(m/s);  $P_a$  为压强(Pa);  $\rho$  为密度(kg/m<sup>3</sup>);  $\rho_0$  为参考密度(kg/m<sup>3</sup>);  $S$  为点源处的流量(m<sup>3</sup>/s);  $u_s$ 、 $v_s$  为点源的流速(m/s);  $f$  为科氏参数( $f = 2\omega \sin\psi$ ,  $\omega$  为地球旋转角速度,  $\psi$  为纬度);  $T_{xy}$ 、 $T_{yy}$  为横向应力。

(2) 参数设定

水动力模型相关参数设定如下。

时间步长: 本次研究水动力模型构建模拟时间为 2017 年 1 月 1 日—12 月 31 日, 总时间步数为 8760 步, 时间步长为 1 h, 即 3600 s。

涡粘系数: 研究涡粘系数采用 Smagorinsky 公式进行设定(公式 (4)~(5))。

$$A = C_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4)$$

式中:  $C_s$  为常数;  $l$  代表特征长度;  $S_{ij}$  为变形率, 定义为:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), i, j = 1, 2 \quad (5)$$

式中,  $u_i$ 、 $u_j$  分别是速度分量,  $x_i$ 、 $x_j$  分别是空间坐标。

通过选取不同的  $C_s$  进行多次模拟, 最终确定  $C_s$  为 0.28。

河底糙率: 山区河河底糙率不确定性较大, 研究根据不同地形设置不同数值后采用分段插值法生成(图 3)。

风场: 根据古蔺县国家气象观测站统计资料, 古蔺县常年盛行西风, 选取 2017 年全年逐日风速数据输入模型。由于本次模拟设置主时间步长为 1 h, 而风速数据步长为 1 d, 在时间步数不吻合的情况下, 设置模型进行线性插值。

降雨蒸发: 古蔺河河道偏窄, 降雨蒸发忽略空间变化, 以古蔺县国家气象观测站观测数据为基础, 仅考虑降雨蒸发时间序列影响。时间范围为 2017 年全年, 时间间隔为 1 d。

水工结构物: 古蔺河存在的主要水工结构物为狮子桥翻水闸, 位于古蔺县西城街社区(图 1), 2010 年建成, 工程等级为 III 等(设计洪水标准为 50 年一遇, 校核洪水标准为百年一遇), 相关输入参数为: 闸孔数量为 3 孔, 闸孔总净宽为 60 m, 过闸流量为 930 m<sup>3</sup>/s。

计算条件: 初始条件设定为模型开始模拟起始时刻的水深; 上边界计算条件设定为 2017 年月均流量数据, 下边界计算条件设定为 2017 年月均水位数据。

1.3.3 水质模型建立

(1) 控制方程

MIKE 21 水质模型基于对流扩散方程(公式 (6)~

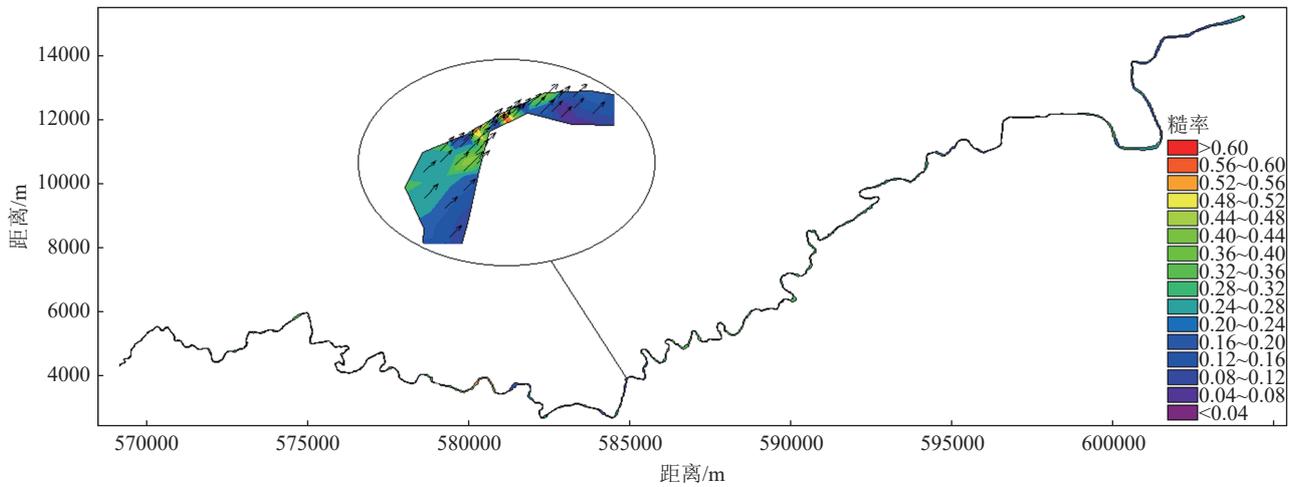


图3 研究区域河底糙率设定图  
(图中放大部分为局部河道糙率分布,箭头为水流矢量方向)

Fig. 3 Frictional force of the study area

(7)), 模拟对流扩散作用下水体中物质的输移扩散过程(杨晨等, 2017)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(uhC) + \frac{\partial}{\partial y}(vhC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + FhC + S \quad (6)$$

$$S = Q_s(C_s - C) \quad (7)$$

式中:  $D_x$ 、 $D_y$  为  $x$ 、 $y$  方向上的扩散系数;  $C$  为复合浓度(常数);  $F$  为线性衰减系数;  $h$  为水深(m);  $u$ 、 $v$  为  $x$ 、 $y$  方向上的流速(m/s);  $Q_s$  为源汇流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $C_s$  为源汇污染物浓度(mg/L)。

## (2) 参数设定

古蔺河河道功能主要为排污、灌溉等, 沿途接纳生活污水、畜禽养殖等废水较多, 本次选取化学需氧量(COD)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )及总磷(TP)3种污染物质作为污染物指标。水质模型相关参数设定如下:

**扩散系数:** 扩散系数根据对流扩散方程用连续测量值确定(公式8), 依据文献王文章等(2018), 古蔺河污染物扩散系数在  $0.01 \sim 1 \text{ m}^2/\text{s}$  之间。

$$D = aV^b \quad (8)$$

式中:  $V$  为流速;  $a$ 、 $b$  为系数。通过不断调整  $a$ 、 $b$  值进行多次率定, 最终确定污染物扩散系数为  $0.28 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

**降解系数:** 污染物降解、转化过程遵循一级动力学规律(公式(9))。

$$\rho = \rho_0 e^{-kt} \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为  $t$  时刻的污染物浓度(mg/L);  $\rho_0$  为初始时刻污染物浓度(mg/L);  $k$  为降解系数( $\text{d}^{-1}$ )。经过多次率定, 确定 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  及 TP 的降解系数分别为:  $0.45 \text{ d}^{-1}$ 、 $0.082 \text{ d}^{-1}$  和  $0.015 \text{ d}^{-1}$ 。

**计算条件:** 初始条件设定为模型开始模拟起始时刻的污染物浓度; 上、下边界计算条件均设定为 2017 年月均污染物监测数据。

## 2 结果分析

### 2.1 模型验证结果

#### 2.1.1 水动力模型验证

根据所建水动力模型运行情况并结合古蔺河河流概化结果, 验证断面取研究区域中游水文站断面及下游太平渡断面。选取 2017 年 1 月 1 日—12 月 31 日断面的流量及水位指标进行模型验证。模型评估指标包括平均绝对误差(MAE)、决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)。

水动力模型验证结果如图4所示。流量、水位模拟结果与测量值整体吻合较好, 各变量在不同断面处的 MAE 和 RMSE 值均较低,  $R^2$  值均大于 0.90, MRE 值均小于 20%(表2), 说明构建的水动力模型可较好地反映古蔺河水动力变化特征, 满足数值模拟需求。

#### 2.1.2 水质模型验证

水质模型验证结果如图5所示。模拟值与实测

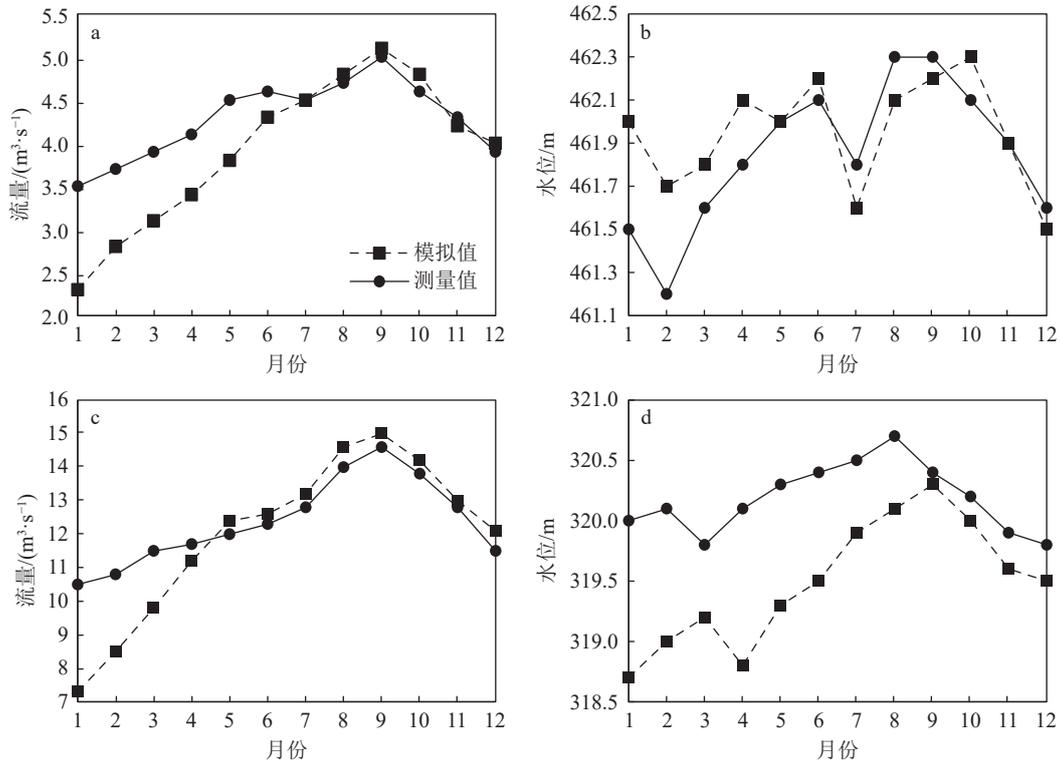


图 4 水动力模型验证结果(a、b 为水文站断面;c、d 为太平渡断面)

Fig. 4 Validation results of hydrodynamic model

表 2 水动力模块各变量测量值与模拟值指标比较

Table 2 Index of comparison for simulated and measured values of hydrodynamic model

变量	断面	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MRE/%
流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	水文站	0.53	0.91	0.55	20
	太平渡	0.25	0.96	0.28	10
水位/m	水文站	1.12	0.90	1.62	19
	太平渡	1.06	0.95	1.11	8

值基本接近, 总体变化趋势与实际情况相符。太平渡断面处 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 的模拟值与实测值吻合情况较水文站断面更好, 表明模型在研究区域下游的模拟效果更佳, 其中 R<sup>2</sup> 值均在太平渡断面处最大, MRE 值在太平渡断面处均为最小(表 3)。各断面处 R<sup>2</sup> 值均大于 0.80, MRE 值均在 30% 以内, 说明模拟结果基本符合实际规律, 构建的水质模型可以反映古蔺河的水质变化特征。

### 2.2 古蔺河水环境模拟应用

本次研究通过情景分析法进行古蔺河水环境模拟。结合古蔺河实际水动力水质情况, 将构建好的水动力模型和水质模型耦合, 利用情景分析法, 模拟

不同情景方案下古蔺河水动力和水质变化过程。

#### 2.2.1 古蔺河水动力模拟分析

本次研究模拟水动力在其他参数条件不变的情况下, 不同降雨、风速情景下河道水动力场的变化情况。根据研究区多年降雨及风场数据资料分析结果, 研究模拟情景(表 4)。选取模拟第 300 天的水文站、太平渡断面月均模拟流速进行对比分析。

将情景 1、2、3 依次导入模型进行模拟, 得到不同降雨情景下模拟第 300 天的各断面流速情况(图 6), 在情景 4、5、6 下, 得到不同风速情景下模拟第 300 天的各断面流速情况。

通过对不同降雨及风速情景下水文站及太平渡断面处的流速对比分析, 随着降雨量的增加, 各断面处流速均增大, 当降雨量由 5 mm 增加至 30 mm 时, 水文站断面处的平均流速增加 21.57%, 而太平渡断面处的平均流速增加 73.60%。随着风速的增大, 各断面处流速均增大, 当风速由 1 m/s 增加至 5 m/s 时, 水文站断面处的平均流速增加 16.33%, 而太平渡断面处的平均流速增加 36.21%。降雨和风速均对水体流动具有一定的驱动作用, 当降雨量增加, 风速增大时, 区域流场流速整体变快 (Porté-Agel et al.,

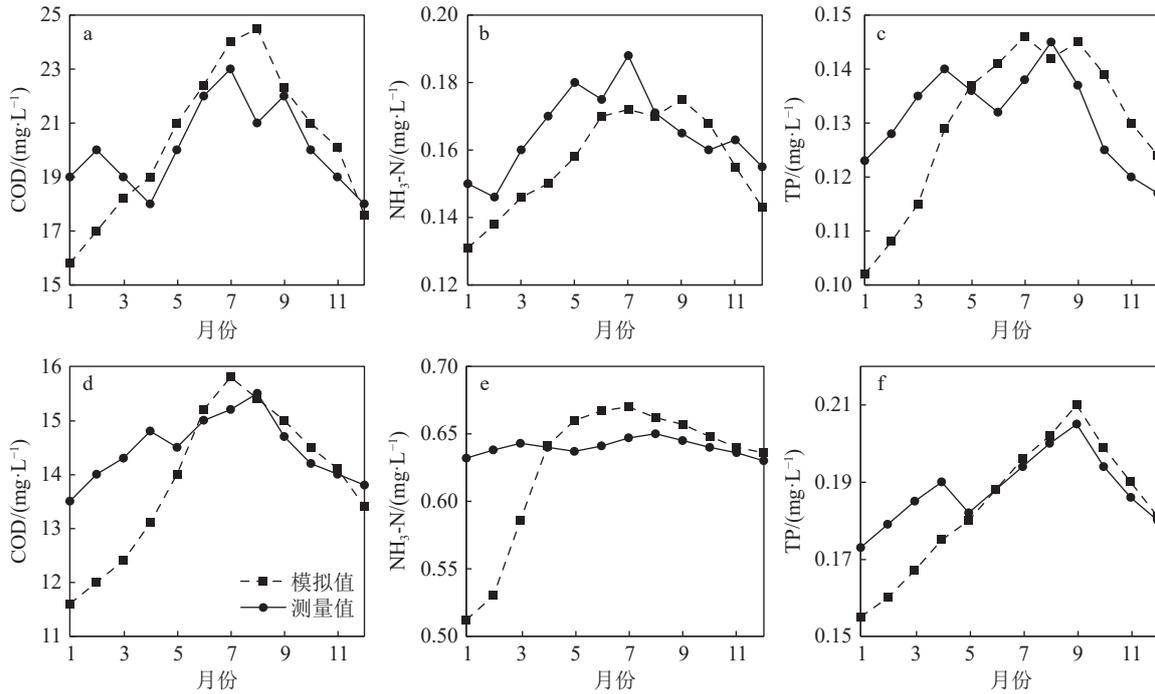


图5 水质模型验证结果(a、b、c为水文站断面;d、e、f为太平渡断面)

Fig. 5 Validation results of water quality model

表3 水质模块各变量测量值与模拟值指标比较

Table 3 Index of comparison for simulated and measured values of water quality model

污染物	断面	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MRE/%
COD	水文站	0.83	0.82	0.74	28
	太平渡	0.66	0.90	0.51	16
NH <sub>3</sub> -N	水文站	0.56	0.80	1.34	25
	太平渡	0.29	0.89	1.12	15
TP	水文站	1.08	0.84	1.41	23
	太平渡	0.77	0.91	0.98	12

表4 水动力模拟情景设定

Table 4 Setting of hydrodynamic simulation scenarios

情景	降雨量/mm	风速/(m·s <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>
1	5	1
2	15	1
3	30	1
4	0	1
5	0	3
6	0	5

注: <sup>a</sup>研究设定模拟风向为正西

2020), 河道水动力条件更优, 更有利于污染物的稀释降解。

2.2.2 古蔺河水水质模拟分析

2017年, 古蔺县人民政府提出“撤县建市”的总体目标, “撤县建市”规划对县城水资源量提出了更高要求。初步估算, “撤县建市”完成后, 城市年供水缺口达  $1000 \times 10^4 \sim 1500 \times 10^4 \text{ m}^3$  (韩先毅, 2017)。再生水是解决水资源短缺的重要途径之一, 通过对古蔺河流域现状的调查与了解, 古蔺河生态流量偏小, 水动力条件不足是导致水质恶化的主要原因之一。因此, 本次研究模拟在不同补水情景下古蔺河的水质变化情况。

古蔺河流域规划建设的3座再生水厂均与污水处理厂合建(污水处理厂位置见图1), 再生水厂规模为: 德耀镇再生水厂 W1:  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 古蔺镇再生水厂 W2:  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 太平镇再生水厂 W3:  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (古蔺县生态环境局, 2017)。本次研究以再生水厂补水量及补水位置为变量进行补水情景设定, 补水量为占再生水厂规模的比例, 补水位置设于水厂上游, 拟定6种模拟情景(表5), 情景1、2、3补水位置均位于再生水厂, 补水量依次增大, 分别占再生水厂水量的30%、50%、80%; 情景4、5、6补水量一定, 补水位置设置在水厂上游, 依次距水厂1 km、3 km、5 km。

将设置好的6种补水情景依次导入所建的水动力与水质耦合模型进行模拟, 通过模拟计算, 得到不

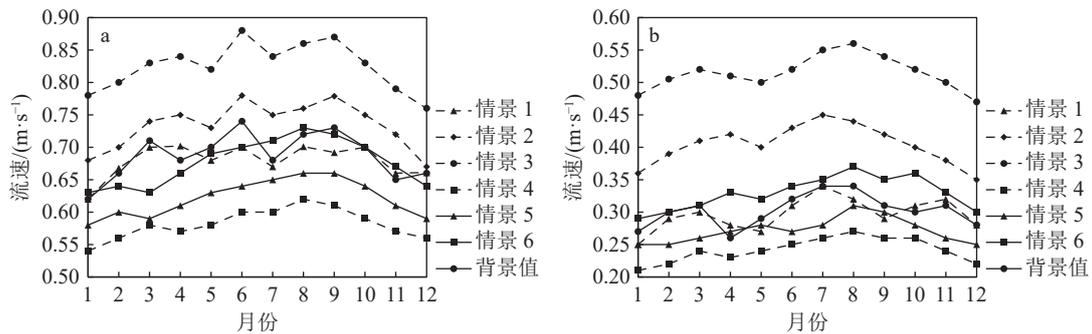


图 6 不同水动力条件情景下各断面流速对比图

Fig. 6 Comparison of velocity of each section under different hydrodynamic conditions

a—水文站; b—太平渡口

表 5 补水情景设定

Table 5 Water supplement scheme setting

情景	水厂	补水位置 (距水厂距离/km)	补水比例	补水量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1	W1	0	30%	0.17
	W2	0	30%	0.35
	W3	0	30%	0.28
2	W1	0	50%	0.29
	W2	0	50%	0.58
	W3	0	50%	0.46
3	W1	0	80%	0.46
	W2	0	80%	0.93
	W3	0	80%	0.74
4	W1	1	50%	0.29
	W2	1	50%	0.58
	W3	1	50%	0.46
5	W1	3	50%	0.29
	W2	3	50%	0.58
	W3	3	50%	0.46
6	W1	5	50%	0.29
	W2	5	50%	0.58
	W3	5	50%	0.46

同情景下的水质模拟结果, 选取水文站断面(图 7)及太平渡断面(图 8), 分析不同补水情景下的水质改善效果。

在不同的补水情景下, 水文站和太平渡断面的污染物浓度均有一定程度的降低, 各情景下水质优劣顺序为: 情景 6>情景 3>情景 5>情景 4>情景 2>情景 1。在情景 6 模拟方案下, COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 的平均浓度降幅最大, 水文站断面处降幅分别为 17.98%、20.64%、23.72%, 太平渡断面降幅分别为

31.12%、29.85%、31.16%, 由于 W3 再生水厂补水位置在水文站断面下游, 故太平渡断面处各污染物的浓度降低幅度较水文站断面处更大。比较情景 1、2、3 下各断面处 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 的浓度变化情况, 当补水位置不变时, 补水量越大, 污染物浓度降低幅度越大, 水质改善效果越好; 比较情景 2、4、5、6 下各断面处污染物浓度变化情况, 当补水量不变时, 补水位置越偏向上游, 水质改善效果越好。

随着“撤县建市”的实施, 城镇化进程将进一步加快, 随之带来的生活污水负荷将持续增加, 古蔺河水环境质量不容乐观。加强再生水循环利用, 补充古蔺河生态流量。在再生水厂敷设中水回用管道, 同时考虑管道建设及经济成本, 将再生水尽量提升至河流上游, 补充河道生态环境用水, 达到常态化补水, 提高河道纳污能力, 改善水环境质量。同时, 再生水还可用于街道冲洗、农田、绿地灌溉、工业、生活杂用等, 促进废水资源化利用, 有效缓解古蔺县“撤县建市”后水资源短缺的现象。

### 3 结论

(1) 对所建水动力水质模型的可靠性进行模拟验证, 水动力模型验证结果显示: 不同断面处的  $R^2$  平均值为 0.93,  $MRE$  平均值为 14.25%, 最大值为 20%; 水质模型验证结果显示: 不同断面处的  $R^2$  均大于 0.80,  $MRE$  均小于 30%, 构建的 MIKE 21 模型可较好地反映古蔺河的水环境特征。

(2) 对不同降雨及风速情景下的古蔺河流域进行模拟分析显示, 降雨量增加可使流场的流速加快, 河道水动力条件更优, 同时, 风速对于流场的水体流动具有一定驱动作用。

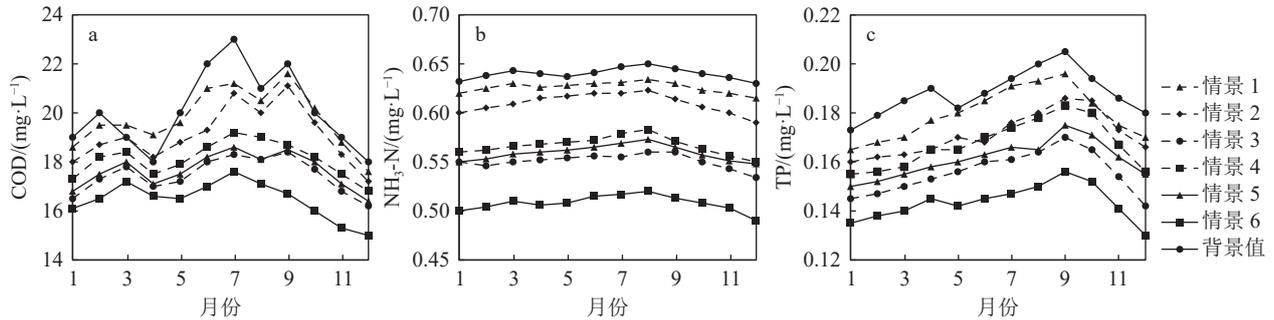


图7 不同补水情景下水文站断面水质模拟结果

(a, b, c 分别表示不同断面 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 在不同情景下的浓度变化情况)

Fig. 7 Water quality simulation results of Shui-wen section under different water supplement schemes

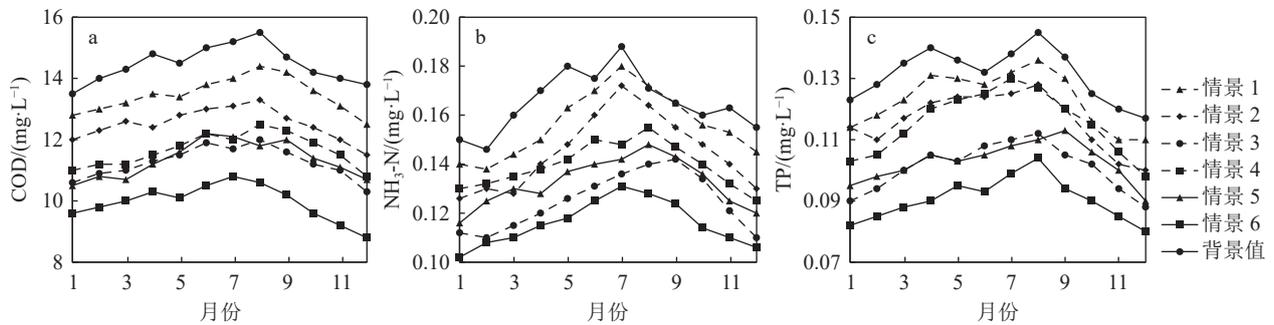


图8 不同补水情景下太平渡断面水质模拟结果

(a, b, c 分别表示不同断面 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 在不同情景下的浓度变化情况)

Fig. 8 Water quality simulation results of Taiping-du section under different water supplement schemes

(3)不同补水情景下的古蔺河水水质模拟分析结果显示,不同情景下,当补水位置位于德耀镇、古蔺镇及太平镇再生水厂上游 5 km,补水量为再生水厂规模的 50%(0.29 m<sup>3</sup>/s、0.58 m<sup>3</sup>/s、0.46 m<sup>3</sup>/s)时,水质改善最明显。补充河流生态环境用水,对于古蔺河的水资源治理具有重要意义。

### 参考文献

- Danish Hydraulic Institute. 2012. WQTEMPLATES Scientific Description[R]. Denmark.
- Endon. 1986. Diagnostic study on the vertical circulation and the maintenance mechanisms of the cyclonic gyre in lake Biwa[J]. Journal of Geophysical Research, C1(9): 869-876.
- Imboden M D. 1974. Phosphorus model of lake eutrophication, limno[J]. Ocanogr, 19(2): 144-150.
- Kim J, Lee T, Seo D. 2017. Algal bloom prediction of the lower Han River, Korea using the EFDC hydrodynamic and water quality model[J]. Ecological Modelling, 366: 27-36.
- Lopes J F, Silva C I, Cardoso A C. 2008. Validation of a water quality model for the Ria de Aveiro lagoon, Portugal[J]. Environmental Modelling & Software, 23(4): 479-494.
- Mikulčić H, Wang X, Duić N, et al. 2020. Environmental problems arising from the sustainable development of energy, water and environment system[J]. Journal of Environmental Management, 259: 109666.
- Missaghi S, Hondzo M. 2010. Evaluation and application of a three-dimensional water quality model in a shallow lake with complex morphometry[J]. Ecological Modelling, 221(11): 1512-1525.
- Porté-agel F, Bastankhah M, Shamsoddin S. 2020. Wind-turbine and wind-farm flows: A review[J]. Boundary-Layer Meteorology, 174(1): 50-59.
- Saint V B. 1871. Movement non-permanent seaux avec Application auxcures des RIVERS[J]. Pintroducton Desmaeres Dansleur Lit, Acad Sci Comptesrekus, 73(1): 148-154.
- Stefunkova Z, Macura V, Skrinar A, et al. 2021. Relationship between morphological characteristics and quality of aquatic habitat in mountain streams of Slovakia[J]. Water, 13(2): 1-14.
- Streeter H W, Phelps E B. 1958. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River[R]. US Department of Health, Education, & Welfare.
- Teshager A D, Gassman P W, Secchi S, et al. 2017. Simulation of targeted pollutant-mitigation-strategies to reduce nitrate and sediment hotspots in agricultural watershed[J]. Science of the Total Environment, 607/608: 1188-1200.
- Wang Q, Peng W, Dong F, et al. 2020. Simulating Flow of An Urban River Course with Complex Cross Sections Based on the MIKE 21 FM

- Model[J]. *Water*, 12(3): 761.
- Xiong H B, Ma Y N, Liu T X. 2022. Purification-analysis of urban rivers by combining graphene photocatalysis with sewage treatment improvement based on the MIKE 11 model[J]. *Environmental Technology*, 43(4): 585-594.
- 陈军, 吴程, 李爽, 等. 2022. 灞河流域水环境数值模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 50(9): 80-88.
- 戴君, 刘硕, 韩金凤, 等. 2018. 污染负荷多情景变化下河流水质响应关系研究[J]. 中国环境科学, 38(2): 776-783.
- 付素静, 赵娜, 张晓晴, 等. 2021. 基于高时空分辨率流域水污染源清单的河流概化研究[J]. 环境生态学, 3(7): 11-16, 62.
- 古蔺县生态环境局. 2017. 古蔺县古蔺河“一河一策”管理保护规划[R].
- 韩先毅. 2017. 古蔺撤县设市城市供水问题初探[J]. 四川水利, 38(4): 84-86.
- 何剑波, 李玉山, 胡立堂, 等. 2021. “引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 48(6): 34-43.
- 赖锡军. 2019. 流域水环境过程综合模拟研究进展[J]. 地理科学进展, 38(8): 1123-1135.
- 刘兴邦, 杜威. 2018. 关于山区中小河流水面线计算的探讨[J]. 中国水运(下半月), 18(10): 182-184.
- 罗铭, 丁锐, 黄尔, 等. 2019. 山区河流水位流量关系曲线研究[J]. 工程科学与技术, 51(5): 137-142.
- 漆露. 2018. 西南城市山溪性河流水系建设规划方法及实例研究[D]. 重庆大学硕士学位论文.
- 史铁锤, 王飞儿, 方晓波. 2010. 基于 WASP 的湖州市环太湖河网区水质管理模式[J]. 环境科学学报, 30(3): 631-640.
- 王民浩, 周晓平, 焦梦, 等. 2019. 流域水环境综合治理技术体系研究: 以兆河流域为例[J]. 环境工程, 37(10): 16-22.
- 王瑞敏, 胡静, 周末, 等. 2022. 基于 HEC-HMS 模型的西南地区典型中小河流洪水预报研究[J]. 水电能源科学, 40(5): 79-82.
- 王文章, 程艳, 敖天其, 等. 2018. 基于 SWAT 模型的古蔺河流域面源污染模拟研究[J]. 中国农村水利水电, (10): 32-42.
- 王岩, 刘园, 高珍, 等. 2022. 环巢湖流域典型圩区水环境模拟与污染控制研究[J]. 水电能源科学, 40(9): 70-73.
- 吴贻创, 何守阳, 杨应增, 等. 2019. 喀斯特山区河流环境容量核算与污染控制的单元化研究——以清水江流域鱼梁江河段为例[J]. 中国农村水利水电, (9): 111-120.
- 杨晨, 徐明德, 郭媛. 2017. 基于 MIKE21 的汾河水库突发环境事件数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 36(11): 115-121.
- 张光科. 1999. 山区河流若干特性研究[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 3(1): 14-22.
- 张昊, 张代钧. 2010. 复杂水环境模拟研究与发展趋势[J]. 环境科学与管理, 35(4): 24-28.
- 张亚丽, 王艺铭, 史淑娟, 等. 2018. 基于 QUAL2K 模型的鹤壁卫河水水质模拟预警研究[J]. 中国环境监测, 34(5): 138-143.
- 钟宗莲. 2016. 小流域水环境系统运行特性分析[D]. 西南交通大学.