

基于 MIKE21 模型的小河坝河水环境改善模拟研究

司益清¹ 闵婷婷² 张伟超³ 周洋⁴¹

(1. 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院有限公司, 重庆 401120;

2. 黄河小浪底水资源投资有限公司, 河南 郑州 450000;

3. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074;

4. 温州市水利电力勘测设计院有限公司, 浙江 温州 325002)

【摘要】: 小河坝河位于重庆市酉阳县, 为评估酉阳“一河一策”水质治理措施实施后对小河坝河水质的改善情况, 运用 MIKE21 模型对现状水质和“一河一策”系列治理措施实施后水质进行了模拟。根据相关资料设置水质模型参数, 特征性指标选取 COD、NH₃-N, 考虑了丰水期、平水期、枯水期三种模拟工况。根据模拟结果, 措施实施后水质与现状水质进行对比得到, COD 削减量约 3.6t/a (削减率约 11.55%), NH₃-N 削减量约 0.99t/a (削减率约 14.6%), 表明“一河一策”措施的实施对于小河坝的水质情况具有较大的改善效果。

【关键词】: 小河坝河 MIKE21 水质模拟

【中图分类号】 F301.2 **【文献标识码】** A

水质模型是污染物在水环境中的变化规律及其影响因素之间相互关系的数学描述, 它既是水环境科学研究的内容之一, 又是水环境研究的重要工具^[1]。在大量的工程实践以及科学研究基础上, 产生了一系列的水质模型, MIKE21 即为其中常用的二维水动力水质模型。袁玥等^[2]应用 MIKE21 二维动态水质模型对长江蕲春段水污染扩散对水质的影响范围与强度进行了研究; 秦成栋等^[3]基于 MIKE21 模型对宋家湾水库不同下泄流量对下游水质的影响进行了研究; 张守平等^[4]应用 MIKE21 模型对污水入河排污口布设位置进行评估, 通过对污染物入河后运动规律的研究, 得到了污染带的范围。梁志宏等^[5]选用 MIKE21 模型对不同水位条件下的工程取水风险进行了模拟研究, 表明 MIKE21 还可应用在工程取水可靠性分析方面。总之, MIKE21 模型可以广泛应用于大型河流河口与水库, 探究其水量水质的变化规律。

1 研究区域概况

小河坝河发源于重庆市酉阳县花田乡炭山盖茨竹山, 南偏西流过花田乡, 又南偏东过两沿, 再转西过铜鼓镇, 急转向南, 右纳哨蔚沟, 南过铜西村, 又南过石梁至两汇右纳董河, 南偏西至小河镇汇入甘龙河。

作者简介: 司益清(1985—), 女, 山西静乐人, 硕士研究生, 高工, 研究方向: 水文水资源。张伟超(1996—), 男, 重庆云阳人, 在读硕士研究生, 研究方向: 环境污染治理。

本水质模型主要研究小河坝河沿岸污染负荷对小河坝水质的影响，模型范围起于花田乡茶香村花园，止于小河镇小河村小河坝，共计 3 个乡镇，13 个行政村。河流全长 52km，流域面积 669km²，河口处多年平均流量 12.92m³/s。

2 基本算法与模型构建

MIKE21 是由丹麦水动力研究所(DHI)开发的系列水动力水质模型软件中的二维动态模型软件，多用于处理在水质预测中垂向变化可被忽略的湖泊、河口、海岸地区^[6]。本次小河坝河河流水质模拟选用水动力模块和水质模块，其中水动力模块用以模拟河道流场、流速、水位等水流运动的基本水力要素，是水质模块计算的基础^[7,8]。水质模块则主要是对水体污染物迁移转化规律进行模拟，直观地呈现污染物入河后对河流水质的影响过程。

2.1 基本方程

二维水动力控制方程为笛卡尔坐标系下基于水深平均的纳维——斯托克斯方程组，方程组由水流连续性方程、沿程水流方向(x 方向)的动量方程和垂直水流方向(y 方向)的动量方程组成^[9]。

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

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

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

式中：η 为水面高程，h 为总水深，g 为重力加速度，ρ 为水的密度，ρ₀为(淡)水的参考密度。f=2Ω sin φ 为科氏力系数(Ω 旋转角速率，φ 地理纬度)，s_{ij}为辐射应力张量。S 和(u_s, v_s)分别为点源的排放量和速度。u 和 v 为流速在深度上的平均值，T_{ij}为侧向应力，包括粘性摩擦、湍流摩擦和差异对流。

污染物运移方程：根据质量守恒定律，考虑污染物运移过程中的对流、扩散和降解等因素，污染物的运移方程可写为^[9]：

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial \bar{hu}C}{\partial x} + \frac{\partial \bar{hv}C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (hD_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hD_y \frac{\partial C}{\partial y}) - K_c hC + s \quad (4)$$

式中：C 为污染物的浓度；(D_x, D_y)为 x 和 y 方向的扩散系数，K_c为污染物线性降解系数，s 为源汇项污染物量。

2.2 模型构建

2.2.1 研究区域网格划分

通过 CAD 图得到研究区域相关坐标数据，将水陆边界坐标数据导入 MIKE 自带的网格生成器生成研究区网格，并且对网格进行平滑处理。通过设置参数进行网格划分，设置好的计算模型中一共有 4656 个三角形自适应网格，将地形数据导入网格中并插值生成研究区地形。

2.2.2 边界条件

水动力边界条件：模型上游边界即入河口处设置流量数据，下游边界处设置水位，以时间序列文件的格式输入到模型中。水质边界条件：模型上游边界(up)即各入河口处设置污染物(COD、NH₃-N)浓度，根据监测界面实测值调整，下游边界(down)处采用无梯度边界条件。干湿边界：本次模型计算启用干湿边界，在进行计算的过程中，每一时间步长计算网格的平均水深，经过实际调研及多次试算，确定干点水深 $h_{dry}=0.005m$ ，半干湿点水深 $h_{flood}=0.005m$ ，湿水深 $h_{wet}=0.1m$ 。

2.2.3 排污口概化

根据统计调查，小河坝河入河污染物来源主要为城镇生活污水及农村居民生活污水直排，另有部分排污口间歇性排污入河。为了简化计算，将小河坝河各个乡镇排污口概化合并为花田乡、铜鼓乡、小河镇 3 个排污口，概化排污口具体位置见图 1。

2.2.4 模型初始条件

水动力初始条件包含初始水位和初始流速，与模拟开始时刻的实际河流水动力条件一致。研究过程中初始水位采用下游边界处水位值，初始流速为零。水质初始条件包含各种污染物(COD、NH₃-N)的浓度，研究中根据实测数据进行赋值。

2.2.5 衰减系数



图 1 概化排污口位置图

为简化计算，在水质模型中，将污染物在水环境中的物理降解、化学降解和生物降解概化为综合衰减系数。综合衰减系数反映了有机污染物在水体中的降解速度，与河流的水文条件，如流量、流速、河宽、水深、泥沙含量等因素有关。本研究在参考有关资料的基础上，利用流域内水质监测实测值与相关分析实验结果经分析后，最终确定污染物综合衰减系数，取 COD: $2.314 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ， $\text{NH}_3\text{-N}$: $2.894 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

2.2.6 河床糙率与时间步长

水动力参数设置：水动力模型中的参数包括河床糙率和计算时间步长。河床底部糙率根据研究域内实测水位和流速与模型模拟结果的对比进行率定，本次模拟的河床糙率设置曼宁值为 25。模型计算时间步长根据 CFL 条件自适应调整。根据实际模拟可知，计算时间步长不宜设置得过大，可以增加步数来延长模拟时间。

2.2.7 模拟工况

水质模拟跟据年内不同水文特性分为平水期、枯水期、丰水期三种工况，对流域内污染负荷下小河坝河水质进行模拟计算，各工况流量参数见表 1。

表 1 工况流量参数

工况	流量/ m^3/s
工况 1(枯水期)	6.5
工况 2(平水期)	19.0
工况 3(丰水期)	33.3

3 模拟结果

模型根据流域情况，分别在小河坝河各位置处设置监测断面。流域内模拟监测断面共设置 20 个，其中 T_1 为上游进口断面， T_{20} 为下游出口断面，通过各监测断面得到的污染物浓度数据来探究河流整体的水质情况。

3.1 现状水质模拟验证

根据小河坝河污染负荷计算情况，模拟现状污染负荷下小河坝河水质沿程变化情况。模拟过程中小河坝污染源输入采用各乡镇概化排污口，现假定排污口污水排放浓度达到城市污水处理厂污染物排量一级 A 标准，对现状污染负荷入河后小河坝河河流水质进行模拟。模拟过程中小河镇、铜鼓乡、花田乡三个概化排污口的 COD 分别为 10.22t/a、17.35t/a、3.61t/a；氨氮污染物入河量分别为 1.72t/a、4.29t/a、0.97t/a。

在现状污染负荷输入条件下，小河坝河各概化排污口以一级 A 标准进行排污时，小河坝河下游出口断面在枯、平、丰三个工况下的污染负荷 COD 浓度分别为 0.132mg/L、0.047mg/L、0.027mg/L；氨氮浓度分别为 0.030mg/L、0.011mg/L、0.006mg/L，模拟结果与实测数据重合度高，表明 MIKE21 模型能有效运用在小河坝河经过水环境修复后的水质预测。此外，枯水期时小河坝河水流流量较小，污染物入河后，河流水质污染物浓度更高。断面 T_{11} 后河流污染物浓度增长较大，主要原因为铜鼓乡污染入河量较大，污染物入河对河流水质情况造成明显波动。

3.2 措施后水质模拟

根据小河坝河“一河一策”相关整治措施，河流水环境修复从保护水资源、水污染防治与水生态修复三个方面入手。具体措施包括：加强水资源开发利用管理与排污口监督管理；强化对水域岸线与涉河建设项目的管理，加快推进“清四乱”专项行动；通过推进城镇污水管网建设与加强流域内生活垃圾集中收运，全面提高污水收集率与处理能力来治理点源污染；通过大力推进生态循环农业建设来解决农田面源污染；在水生态修复方面，主要通过水土保持、加强禁渔管理与生物多样性保护和生态流量管理与监督等举措来进行。

推算得到措施实施后污染负荷入河量，小河镇、铜鼓乡、花田乡三个概化排污口的措施后 COD 分别为 7.29t/a、16.73t/a、3.53t/a；氨氮污染物措施后入河量分别为 1.28t/a、3.81t/a、0.90t/a。在排污口输入流量不变的情况下，措施后污染负荷量同样按照一级 A 标准排污，根据模拟结果来分析措施后小河坝河水质变化情况，以此为评估措施实施后对河流水质改善效果提供理论依据。

在措施后污染负荷输入条件下进行水质模拟，小河坝河各概化排污口以一级 A 标准进行排污时，小河坝河下游出口断面在枯、平、丰三个工况下的污染负荷 COD 浓度分别为 0.125mg/L、0.042mg/L、0.024mg/L；氨氮浓度分别为 0.027mg/L、0.009mg/L、0.005mg/L。模拟得小河坝河出口断面 COD 最大浓度值为 0.125mg/L，氨氮最大浓度值为 0.027mg/L。与现状水质情况进行对比有所改善，在河流流量增大的情况下，河流污染物浓度较现状污染物浓度减小幅度增大，说明枯水期的水质情况较丰水期水质情况整体要差。

通过将丰水期工况下“一河一策”措施实施前与措施实施后各特征指标的浓度进行对比，直观地呈现“一河一策”系列河流水环境修复措施对小河坝河水质的改善情况，对比结果详见图 2、图 3。

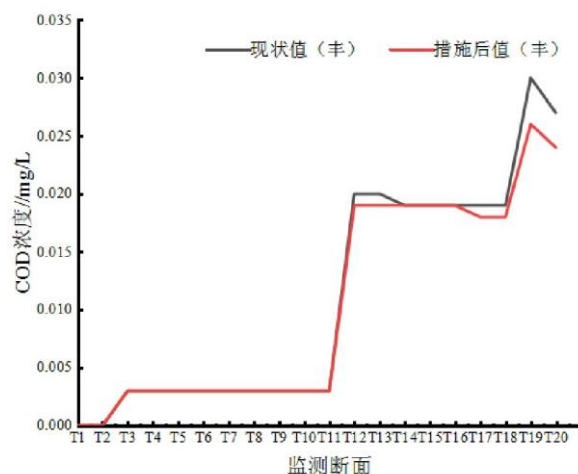


图2 COD浓度对比图

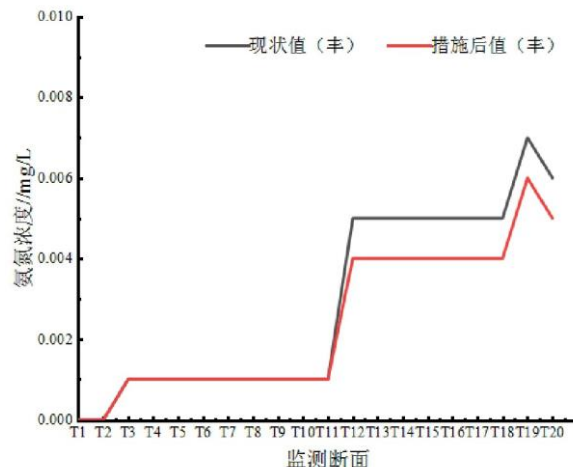


图 3 氨氮浓度对比图

由对比结果可见,“一河一策”系列治理措施实施后对小河坝的水质具有一定的改善效果,尤其是水体中氨氮浓度呈现较为明显的下降。图中 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度值在 T_{11} 断面后均出现骤升的现象,考虑是由于铜鼓乡排污口污染物入河所造成的,因此要进一步加强铜鼓乡污染物入河整治。

此外,下游水质的改善效果明显优于对上游水质的改善效果,这也可能是上游水质情况本身较好导致整治效果不明显。并且由于小河坝河河长相对较小,且小河坝河段流域内不存在大型的高污染工矿企业,污染物主要来源为农村生活污水入河,流域内污染物入河对河流水质影响较小。

4 结论

通过将模拟结果与实测的水质数据进行对比,发现 MIKE21 模型能有效应用在河流水量水质模拟预测中。根据小河坝河水质资料,采用单因子法对水质监测断面的水质进行评价,小河坝河下游断面水质基本保持在 II 类。根据小河坝河流域管理保护措施,待“一河一策”系列治理措施实施后,小河坝河污染负荷入河总量为污染物 COD 入河量为 27.56t/a、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 入河量为 6.00t/a。其中 COD 削减量约 3.6t/a(削减率约 11.55%), $\text{NH}_3\text{-N}$ 削减量约 0.99t/a(削减率约 14.6%)。

综上所述,小河坝河流域内整治措施实施后,对小河坝河水质有一定程度的改善。由于流域内污染物入河对河流水质影响较小,支流水质对小河坝河水质控制起到了很大影响,因此还应加强对流域支流范围内污染源治理及水质控制,以保证小河坝河流域水质得到整体改善。

参考文献:

- [1] 马莉, 桂和荣, 曹彭强. 河流污染二维水质模型研究及 RMA4 模型概述[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2011 (1): 102-108.
- [2] 袁玥, 师懿, 程胜高. 基于二维动态水质模型的长江蕲春段水污染扩散分析[J]. 安全与环境学报, 2016, 16 (1): 212-217.
- [3] 秦成栋, 钱鞠, 李明都, 等. 基于 MIKE21 模型的宋家湾水库水环境影响数值模拟[J/OL]. 甘肃水利水电技术, 2021, 57 (2): 1-10, 19. DOI:10.19645/j.issn2095-0144. 2021.02.001.

-
- [4]张守平,辛小康.MIKE21 模型在企业污水处理厂入河排污口布设中的应用[J].水电能源科学,2013,31(9):101-104,57.
- [5]梁志宏,郑江丽,陈秀洪,等.基于 MIKE 模型的取水可靠性分析[J].人民珠江,2021,42(10):18-23,31.
- [6]曹永中,周孝德,吴秋平,等.河流水质模型研究概述[J].水利科技与经济,2008(3):197-199.
- [7]胡广鑫.二维水动力——水质耦合模型对东昌湖生态补水的应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [8]李添雨,李振华,黄炳彬,等.基于 MIKE21 模型的沙河水库水量水质响应模拟研究[J].环境科学学报,2021,41(1):293-300.
- [9]王欢,陈江海,陈翔,等.基于 MIKE21FM 模型的厦门筴筴湖水质提升方案[J].水电能源科学,2019,37(2):43-46.