

考虑紊流效应的深度平均二维模型 在澜沧江水质预测中的应用

杨坪宏¹, 杨杰², 马冰^{3*}, 黄爱平³

(1.云南省水文水资源局, 昆明 650106; 2.北京全路通信信号研究设计院集团有限公司昆明分公司, 昆明 650041; 3.流域水循环模拟与调控国家重点实验室 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 采用可靠的水动力水质模型对水质进行预测是水污染治理的有效措施。常用的深度平均二维浅水模型因忽略了紊流项的影响, 难以准确模拟水流运动, 会对水质预测造成影响。鉴于此, 本研究构建了考虑紊流效应的二维水动力水质模型, 以南木冷河汇入澜沧江段为研究对象, 分析不同排污情景下的污染物浓度变化。结果表明, 构建的二维水动力水质模型在研究区域具有较好的适用性, 排污口设置对水功能水质达标存在不利影响。本研究可为澜沧江水环境保护提供科学依据。

关键词: 深度平均二维模型; 水质模型; 澜沧江

中图分类号: X703

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023205

杨坪宏, 杨杰, 马冰, 等. 考虑紊流效应的深度平均二维模型在澜沧江水质预测中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 109-112.

YANG Pinghong, YANG Jie, MA Bing, et al. The Application of Depth-averaged Two-dimensional Model Considering Turbulence Effect in Water Quality Prediction of Lancang River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 109-112.

0 引言

随着经济社会的发展, 水环境污染问题日益严重, 明确水环境污染存在的问题及发展趋势, 对水污染防治具有重要意义^[1]。水动力水质模型可依据水量、水质等数据, 建立流量、污染负荷等水环境因子与水质指标之间的数学关系, 预测未来水质时空变化趋势^[2-4]。水资源管理需求不断扩大, 提高了对水动力水质模拟预测技术的需求^[5]。以往围绕二维浅水模型的研究大多集中于对数值^[6-9]、干湿边界^[10-11]、对流项^[12-14]、摩阻源项^[15-17]等方面的研究。紊流的模拟对精确地模拟水流运动至关重要, 现有的二维浅水模型在开发和应用过程中忽略了紊流的影响。紊流是一种不规则、多尺度的非线性流体运动。考虑紊流的数值模型能够更准确地模拟溃坝下游水位的变化情况^[18]; 将考虑紊流的二维浅水模型用于溃坝洪水的演进模拟能够显著提高紊流强度较大区域的模拟准确性^[19]。当紊流较

为显著时, 在二维浅水模型中考虑紊流模型能够有效改进流速模拟效果^[20]。鉴于此, 本研究建立了考虑紊流效应的二维浅水 Water 2D 模型, 同时耦合了污染物对流扩散方程, 构建了二维水动力水质模型。以南木冷河汇入澜沧江段为研究对象, 探究了入河排污口在不同排放条件下的 COD 和氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 浓度的时空变化, 为澜沧江水环境保护提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

澜沧江干流流经云南省迪庆、怒江、大理、保山、临沧、普洱和西双版纳 7 个州(市), 在西双版纳州勐腊县的南腊河口出境。干流在景洪市境内的长度约为 170 km。南木冷河为澜沧江一级支流, 发源于景洪市小街乡, 干流河长 25.9 km, 平均比降 8.4‰, 集水面积 153.0 km²。澜沧江河段设有取水口与入河排污口, 入河排污口位于江心岛支流, 距离澜沧江下游主流交汇点以下 1.0 km 处。

根据《云南省水功能区划》, 本项目涉及的水功能区为澜沧江景洪勐腊保留区, 水功能区长度 106.9 km, 水质保护目标为 III 类。根据云南省水环境监测中心西双版纳分中心提供的监测数据, 2008 年澜沧江景洪勐腊保留区的汛期、非汛期、年平均水质评价

收稿日期: 2023-05-10 修回日期: 2023-05-10

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200903); 国家自然科学基金(51809288); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费(WR0145B022021)

作者简介: 杨坪宏(1967-), 男, 云南兰坪人。高级工程师, 主要从事水环境监测评价及水资源保护工作。E-mail: 624751820@qq.com

通信作者: 马冰(1993-), 女, 山西运城人。工程师, 主要从事流域水环境过程机理研究和数值模拟。E-mail: 294843280@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

均为Ⅲ类。

1.2 研究方法

模型控制方程包含二维浅水方程中的连续方程和动量方程以及求解雷诺应力项的水深平均 $k-\varepsilon$ 方程^[21]。

污染物对流扩散方程为:

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中: u 、 v 分别是 x 、 y 方向的水流速度 (m/s); c 为污染物浓度 (mg/L); D_x 、 D_y 为 x 、 y 方向的扩散系数。

考虑到滩地水动力水质模拟计算效率,经过多次测试,模型计算网格采用 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的矩形正交网格,网格总数为 5 222 个,排污口处最小网格直径为 1 m。

2 边界条件

水动力模型上游边界条件为:澜沧江流量为 $849 \text{ m}^3/\text{s}$,南木冷河入河流量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表 1 验证断面实测值与模拟值对比结果

Table 1 The comparison between measured and simulated

距右岸距离/m	实测流速/(m s^{-1})	模拟流速/(m s^{-1})	相对误差/%	COD 实测值/(mg L^{-1})	COD 模拟值/(mg L^{-1})	相对误差/%
20	2.03	1.80	11.20	2.4	2.39	0.42
50	1.93	1.94	0.53	2.1	2.08	0.95
100	1.81	1.67	8.06	2.1	2.07	1.43

4 模拟情景

4.1 水文条件

根据《水域纳污能力计算规程》(SL348-2006),计算河流域纳污能力时,应采用枯水期 90%保证率条件下的流量作为河流水质评价的控制流量。工程河段上游约 40 km 处有景洪水文站,景洪水文站与入河排污口之间有较大支流流沙河汇入,因此采用景洪水文站、勐海水文站、关累水文站的水文资料计算设计流量,经计算,入河排污口处澜沧江枯水期 90%保证率最小月平均流量为 $585 \text{ m}^3/\text{s}$,相应的流速为 0.98 m/s ,平均水深为 1.80 m。

表 2 入河排污口工况设置

Table 2 Scenario setting of sewage outlet into river

工况	排放口流浓度/($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)		COD 浓度/(mg L^{-1})		NH ₃ -N 浓度/(mg L^{-1})	
	河道流浓度	污水排放流浓度	排放浓度	背景浓度	排放浓度	背景浓度
正常排放	585	0.404 2	95.2	9.5	9.92	0.18
非正常排放	585	0.404 2	903.1	9.5	12.91	0.18

5 结果与讨论

流场分布如图 1 所示。Ⅱ类和Ⅲ类地表水的 COD 浓度分别为 15 mg/L 和 20 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别为

水质模型上游边界条件为:澜沧江 COD 浓度 5 mg/L ,南木冷河 COD 浓度 2 mg/L 。

3 模型验证

选取 2010 年 12 月 18 日南木冷河入澜沧江汇口下游 500 m 处的断面进行验证,由于缺乏水位数据,因此选取距右岸 20、50、100 m 的实测流速对二维浅水模型进行验证,流速实测和模拟结果如表 1 所示。验证断面中间位置处的流速模拟值与实测值的相对误差仅为 0.53%,验证断面两侧的相对误差为 11.20% 和 8.06%。由于南木冷河入澜沧江汇口的下游 500 m 断面处的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 未检出,因此仅用 COD 浓度对水质模型进行验证。与流速模拟结果相同,验证断面中间位置处的 COD 模拟值与实测值的相对误差最小,为 0.95%,验证断面两侧的相对误差为 0.42% 和 1.43%,表明构建的二维水动力水质模型在澜沧江段具有较好的适用性。

4.2 入河排污口设置

入河排污口的排污能力为 $34 919 \text{ m}^3/\text{d}$,即 $0.404 2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。按照正常排放和非正常排放 2 种情况设置排放浓度,其中正常排放为入河排污口浓度达到《制浆造纸工业水污染物排放标准》排放标准,非正常排放指污水处理厂出现异常情况,排放浓度超过排放标准。工况设置如表 2 所示。

正常排放情况:进入澜沧江的 COD 排放浓度为 95.2 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 9.92 mg/L 。

非正常排放情况:进入澜沧江的 COD 排放浓度为 903.1 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 12.91 mg/L 。

0.5 mg/L 和 1 mg/L 。探讨正常排放和非正常排放 2 种工况下河道污染物的分布情况。

正常排放情况下, COD 排放浓度为 95.2 mg/L 。经计算,排放的污水进入澜沧江后,由于河道来水浓

度较大，污染物剧烈稀释降解，在入河排污口下游 44 m，横向距岸边 91 m 处的 COD 浓度达到地表水Ⅲ类标准，污染区面积为 2 001 m²，详见图 2 (a)。正常排放情况下，NH₃-N 排放浓度为 9.92 mg/L。排放

的污水进入澜沧江后，由于河道来水量较大，污染物剧烈稀释降解，在入河排污口下游 44 m，横向距岸边 91 m 处 NH₃-N 浓度达到地表水Ⅲ类标准，污染区面积为 2 244 m²，详见图 2 (b)。

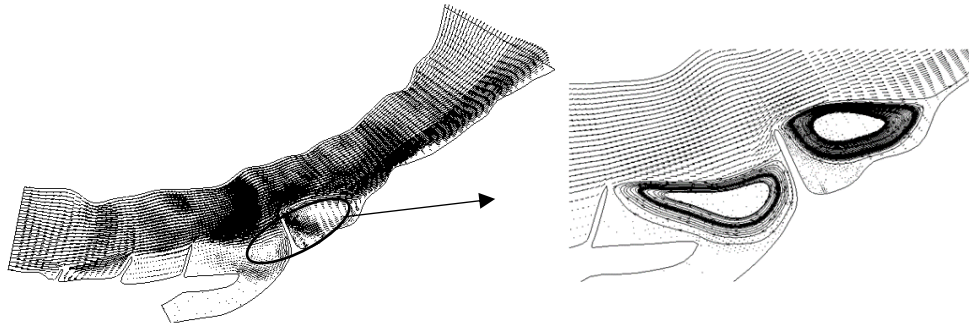


图 1 流场模拟结果

Fig.1 Flow field simulation results

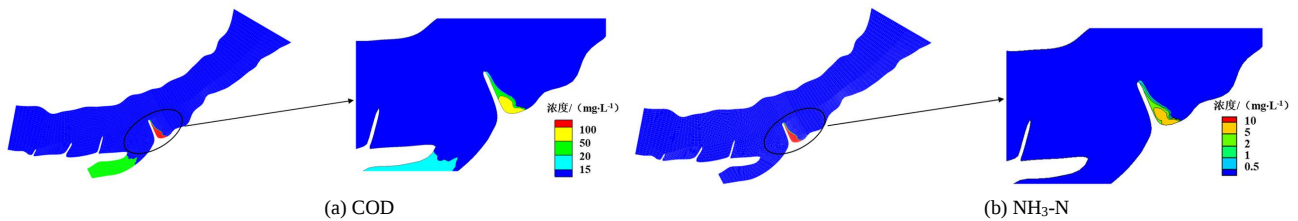


图 2 正常排放情况污染物排放浓度分布

Fig.2 Concentration distribution diagram under normal discharge scenario

非正常排放情况下，COD 排放浓度为 903.1 mg/L。排放的污水进入澜沧江后，在入河排污口下游 48 m，横向距岸边 112 m 处的 COD 浓度达到地表水Ⅲ类标准，污染区面积为 3 584 m²，详见图 3 (a)。非正常排放情况下，NH₃-N 排放浓度为 12.91 mg/L。排

放污水进入澜沧江后，由于河道来水量较大，污染物剧烈稀释降解，在入河排污口下游 46 m，横向距岸边 110 m 处的 NH₃-N 浓度达到地表水Ⅲ类标准，污染区面积为 2 530 m²，详见图 3 (b)。

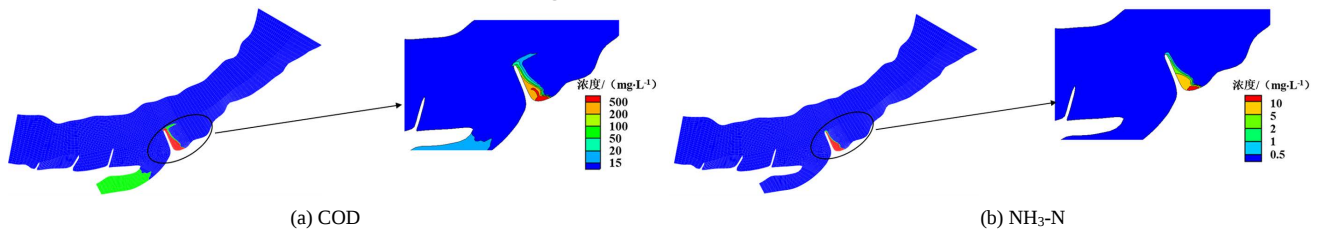


图 3 非正常排放情况污染物排放浓度分布

Fig.3 Concentration distribution diagram under abnormal discharge scenario

6 结论

本研究所构建的考虑紊流效应的二维水动力水质模型的模拟结果与实测结果之间的相对误差较小、精度较高。

入河排污口设置后，在不利水文条件下，污染物浓度在澜沧江段受丁坝间漩涡的影响，滞留混合区的时间相对较长，对水功能区水质达标存在不利影响。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献：

[1] 王健, 向峰, 邱飞, 等. 水质预测模型研究进展[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(4): 63-67.

[2] 姜北, 邱林, 郑志宏. 水质预测方法研究综述[J]. 农业与技术, 2016, 36(23): 68-69, 80.

[3] ZHANG Y Y, XIA J, SHAO Q X, et al. Water quantity and quality simulation by improved SWAT in highly regulated Huai River Basin of China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(1): 11-27.

[4] 李兴, 史洪森, 张树礼, 等. 基于环境流体力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 3 987-3 994.

[5] THAN N H, LY C D, VAN TAT P, et al. Application of a neural network technique for prediction of the water quality index in the Dong Nai River, Vietnam[J]. Journal of Environmental Science and Engineering B, 2016, 5(7): 363-370.

[6] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.

- [7] LUETTICH R A, WESTERINK J J. A (parallel) advanced circulation model for oceanic, coastal and estuarine waters[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(2): 1-12.
- [8] LIANG Q H, BORTHWICK A G L. Adaptive quadtree simulation of shallow flows with wet-dry fronts over complex topography[J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(2): 221-234.
- [9] HUANG Y X, ZHANG N C, PEI Y G. Well-balanced finite volume scheme for shallow water flooding and drying over arbitrary topography[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2013, 7(1): 40-54.
- [10] BRUFAU P, GARCÍA-NAVARRO P, VÁZQUEZ-CENDÓN M E. Zero mass error using unsteady wetting-drying conditions in shallow flows over dry irregular topography[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2004, 45(10): 1 047-1 082.
- [11] 柏禄海, 金生. 无质浓度误差的具有复杂地形的浅水问题[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2008, 23(5): 515-521.
- [12] 陈祖华, 赖冠文, 王光谦, 等. 非规则网格下二维浅水流动的数值模拟[J]. *水科学进展*, 2002, 13(6): 657-664.
- [13] 王志力, 耿艳芬, 金生. 具有复杂计算域和地形的二维浅水流动数值模拟[J]. *水利学报*, 2005, 36(4): 439-444.
- [14] 张宏伟, 康海贵. 具有复杂计算域和地形的潮汐流动数值模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 118-123.
- [15] YOON T H, KANG S K. Finite volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(7): 678-688.
- [16] BEGNUDELLI L, SANDERS B F. Unstructured grid finite-volume algorithm for shallow-water flow and scalar transport with wetting and drying[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(4): 371-384.
- [17] 岳志远, 曹志先, 李有为, 等. 基于非结构网格的非恒定浅水二维有限体积数学模型研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2011, 26(3): 359-367.
- [18] HOSSEINZADEH-TABRIZI A, GHAEINI-HESSAROEYEH M. Modelling of dam failure-induced flows over movable beds considering turbulence effects[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 161: 199-210.
- [19] YU C S, DUAN J. Two-dimensional depth-averaged finite volume model for unsteady turbulent flow[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(6): 599-611.
- [20] 杨哲豪. 考虑紊流效应的二维浅水模型的开发与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [21] 马冰, 张新华, 张小霞. 丁坝间距对改善水生生物栖息地作用的数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(27): 93-100.

The Application of Depth-averaged Two-dimensional Model Considering Turbulence Effect in Water Quality Prediction of Lancang River

YANG Pinghong¹, YANG Jie², MA Bing^{3*}, HUANG Aiping³

(1. Yunnan Hydrology and Water Resources Bureau, Kunming 650106, China; 2. Beijing All-Road Communication Signal Research and Design Institute Group Co., Ltd. Kunming Branch, Kunming 650041, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute Water resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Using reliable hydrodynamic water quality model to predict water quality is an effective measure to prevent water pollution. The commonly used depth average 2D shallow water model is difficult to accurately simulate the flow movement due to ignoring the influence of turbulence, which has an impact on water quality prediction. Therefore, this paper constructed a 2D hydrodynamic and water quality model considering turbulence effect. Taking the section of nanmuleng river flowing into Lancang River as the research object, the pollutant concentration distribution under different sewage inflow scenarios is analyzed. The results show that the 2D hydrodynamic and water quality model has good applicability in the study area, and the setting of sewage outlet has an adverse effect on water quality standards, which provides scientific basis for water environmental protection of Lancang River.

Key words: depth-averaged model; water quality model; Lancang River

责任编辑: 韩 洋