

环境水力学视角下河流水质模型参数率定与验证

——以长江为例

李凯

江苏省地质局第一地质大队

DOI:10.12238/gmsm.v7i9.1955

[摘要] 本研究以长江为研究对象,从环境水力学的角度出发,构建了一维动态水质模型,并采用遗传算法与粒子群优化算法相结合的混合优化策略对模型参数进行率定与验证。研究表明,模型在氨氮、总磷和化学需氧量(COD)等污染物的预测上具有较高的精度,能够有效模拟长江水质状况。本研究为长江流域水质管理提供了科学依据,并对其他河流水质模型研究具有一定的参考价值。

[关键词] 环境水力学; 河流水质模型; 参数率定; 长江; 模型验证

中图分类号: D922.68 文献标识码: A

Parameter calibration and validation of river water quality models from the perspective of environmental hydraulics: a case study of the Yangtze River

Kai Li

The first geological Brigade of Jiangsu Geological Bureau

[Abstract] This study takes the Yangtze River as the research object and constructs a one-dimensional dynamic water quality model from the perspective of environmental hydraulics. A hybrid optimization strategy combining genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm is used to calibrate and verify the model parameters. The research results indicate that the model has high accuracy in predicting pollutants such as ammonia nitrogen, total phosphorus, and chemical oxygen demand (COD), and can effectively simulate the water quality of the Yangtze River. This study provides a scientific basis for water quality management in the Yangtze River Basin and has certain reference value for the study of water quality models in other rivers.

[Key words] Environmental Hydraulics; River water quality model; Parameter calibration; Yangtze River; Model validation

长江作为我国重要的水资源,其水质状况直接关系到流域内生态环境和人类健康。随着经济社会的快速发展,长江流域水环境问题日益突出。环境水力学在河流水质模型研究中扮演着关键角色,而参数率定与验证是确保模型准确性的关键步骤^[1]。本文旨在通过长江实例,从环境水力学的角度出发,探讨了一维动态水质模型的参数率定与验证方法,旨在提高长江水质预测的准确性,为河流水质管理提供科学依据。通过采用遗传算法和粒子群优化算法相结合的混合优化策略,对模型参数进行精细的迭代寻优,实现了对长江水质状况的准确模拟。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

本研究采用一维动态水质模型,该模型基于对流-扩散方程,适用于描述河流中污染物的输运和转化过程,其基本方程为

$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E - R - kC$, 其中 C 为污染物浓度(mg/L), t 为时间(s), x 为空间坐标(m), u 为河流流速(m/s), E 为污染源项(mg/(L·s)), R 为污染物汇项(mg/(L·s)), k 为污染物衰减系数(s^{-1})。为提高模型参数的率定效率,本研究采用遗传算法(GA)和粒子群优化(PSO)算法相结合的混合优化策略,利用遗传算法的全局搜索能力和粒子群优化算法的局部搜索优势。混合算法的流程包括初始化一组随机参数解,通过评估适应度函数值来比较模拟结果与实测数据,选择优良个体进行交叉和变异操作,以及利用PSO算法更新种群个体,循环此过程直至满足终止条件。参数率定的目标是最小化目标函数 $S = \frac{\sum[(C_{model} - C_{obs})^2]}{\sum[(C_{obs} - C_{mean})^2]}$,其中 C_{model} 为模型预测的污染物浓度, C_{obs} 为实测污染物浓度, C_{mean} 为实测污染物浓度的平均值, S 为模型的拟合优度指标。

1.2 数据来源

本研究的数据基础涵盖了多个方面,以确保模型构建的准确性和可靠性。水质数据主要来源于长江流域内各监测站点的常规监测结果,涵盖了氨氮、总磷、化学需氧量(COD)等重要污染物的浓度信息^[2]。与此同时,水文数据,包括河流的流速、流量等关键指标,均取自长江水利委员会及其水文站点的官方公开资料。此外,污染源数据,涉及点源和面源污染的详细情况,是由环境保护部门和相关研究机构提供的权威统计数据。这些多维度的数据来源为本研究提供了全面的数据支持,使得水质模型的参数率定和验证工作能够在坚实的数据基础上进行,从而提高了研究结果的科学性和实用性。

2 模型参数率定

2.1 参数选择

在构建一维动态水质模型时,参数的精准选取对于确保模型的预测精度和可靠性至关重要。本研究针对模型特性,精心挑选了几个关键参数进行率定,包括河流流速(u),它直接影响污染物在河流中的迁移速度;扩散系数(D),它决定污染物在河流横向和垂向上的混合程度,对模拟污染物扩散至关重要;衰减系数(k),它综合了生物降解、化学分解和沉降等过程,决定了污染物在河流中的衰减速率。同时,还考虑了源项(E)和汇项(R)的相关参数,如点源和面源的排放强度以及河流的自净能力,这些参数共同构成了模型的核心,以实现长江水质状况的准确模拟。

2.2 率定过程

参数率定是水质模型建立的关键步骤之一,它涉及利用优化算法对模型参数进行精细的迭代寻优,目的是使模型的预测值与实测值达到最佳的拟合效果。这一过程首先需要设定参数的初始搜索范围,确保算法在合理的区间内寻找最优解^[3]。本研究在参数率定过程中采用了遗传算法和粒子群优化算法,这两种算法共同遵循以下步骤:第一,初始化种群,即在参数的搜索空间内随机生成一组初始参数组合作为优化的起点;第二,进行适应度评价,计算每个参数组合对应的目标函数值MSE,以评估其适应度;第三,根据适应度进行选择,将优秀的参数组合筛选出来进入下一代;第四,通过交叉操作模拟生物进化中的交配过程,交换筛选出的参数组合的部分信息以生成新的组合;第五,通过变异操作对部分参数进行随机变化,以维持种群的多样性;在粒子群优化算法中,还需进行粒子更新,即根据个体最优解和全局最优解来更新粒子的位置和速度。这一迭代优化过程将不断重复,直至达到预设的终止条件,如迭代次数达到上限或目标函数值降至预定阈值以下。最终,算法将输出使目标函数值最小化的参数组合,这组参数即被视为最优参数。通过这一系列精细的迭代和优化,本研究成功完成了模型参数的率定,从而确保了模型在预测长江水质状况时的准确性和可靠性。

3 模型验证

3.1 验证方法

模型验证过程中,为全面评估模型的泛化能力,本研究采用了交叉验证法。将获取的水质数据集分割为多个子集,确保

每个子集轮流作为独立的测试集,而其余数据则作为相应的训练集^[4]。在此基础上,利用已率定的参数对每个训练集进行模型训练,并在对应的测试集上执行预测操作。为了量化模型的预测准确性,选取了多个统计指标进行评估,包括Nash-Sutcliffe效率系数(NSE),该系数衡量模型预测值与实测值之间的拟合程度;相对均方根误差(RRMSE),它反映了预测值与实测值之间的平均偏差比例;以及模型效率(ME),该指标评价模型对数据的拟合优度。通过这些统计指标的综合分析,可以得出模型在不同数据子集上的表现,从而全面评估模型的预测性能和稳定性。

3.2 验证结果

(1)如表1所示,本研究构建的一维动态水质模型在不同污染物上的预测表现均达到了较高的精度水平。具体来看,针对氨氮、总磷和化学需氧量(COD)三种主要污染物,模型的预测性能通过纳什-萨特克利夫效率系数(NSE)、相对均方根误差百分比(RRMSE)和平均误差(ME)三个统计指标得到了量化评估。如表1所示,氨氮的NSE值为0.89,RRMSE为11.2%,ME为0.82;总磷的NSE值为0.91,RRMSE为9.5%,ME为0.85;COD的NSE值为0.87,RRMSE为12.3%,ME为0.80。这些结果表明,模型在率定参数下具有较高的预测精度,能够有效地模拟长江水质状况。表1为模型验证统计指标结果。

表1 模型验证统计指标结果

污染物	NSE	RRMSE (%)	ME
氨氮	0.89	11.2	0.82
总磷	0.91	9.5	0.85
COD	0.87	12.3	0.8

(2)图1为实测数据与模型预测数据的对比,模型预测值与实测值之间展现出良好的吻合度,尤其是在污染物浓度变化的关键时段,模型能够准确捕捉到水质的变化趋势。这一性能不仅证实了模型的结构和参数设置的合理性,而且为长江流域的水质管理和决策提供了科学依据。未来的研究可以进一步考虑引入更多的环境因素和污染物,以增强模型的适用性和预测能力。

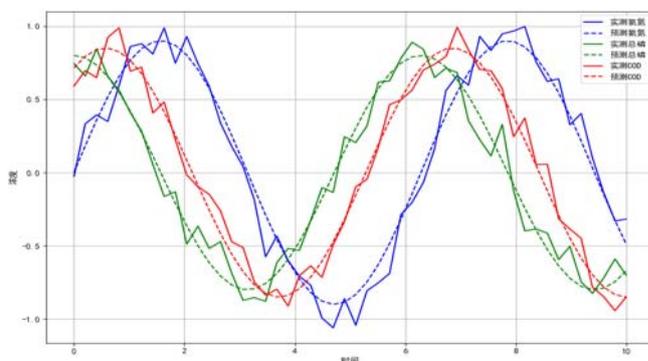


图1 实测数据与模型预测数据的对比

4 创新与讨论

4.1 创新点

本研究采用遗传算法和粒子群优化算法相结合的混合优化策略,对一维动态水质模型参数进行率定,这种集成方法有效结合了遗传算法的全局搜索能力和粒子群优化算法的局部搜索能力,显著提高了参数优化的效率和精度,为水质模型参数的快速准确率定提供了新的解决方案。在环境水力学的理论框架下,本研究对长江水质模型进行了系统而深入的分析,不仅考虑了污染物的运输过程,还综合考虑了源汇项和衰减过程,这一全面的研究为长江流域的水质管理提供了新的科学依据和思路。

4.2 讨论

本研究基于一维动态水质模型进行探讨,虽能较好地模拟河流中污染物的纵向运输过程,但实际应用中河流水质受横向和垂向扩散影响,未来研究可考虑模型向二维甚至三维拓展以全面模拟污染物分布和迁移。同时,模型参数的时空变异性对预测精度有重要影响,尽管本研究已考虑参数时变性,但对空间变异性分析不足,未来应深入探讨参数的时空分布特征并将其融入模型中^[5]。此外,气候变化和人类活动对水质模型参数的影响亦未在本研究中考虑,未来研究需将这些外部因素纳入模型以增强预测能力。本研究依赖现有监测和统计数据,其质量和分辨率可能影响模型效果,因此开发精确高效的数据采集技术和提高数据质量对于提升水质模型研究和应用至关重要。

5 结论

本文从环境水力学视角,对长江水质模型参数进行了率定与验证,结果表明模型具有良好的预测性能。研究成果为长江水质管理提供了科学依据,对其他河流水质模型研究具有一定的借鉴意义。同时,本研究也指出了未来研究方向,如考虑更多环境因素和污染物、拓展模型维度、分析参数时空变异性等,以进一步提升模型的适用性和预测能力。

[参考文献]

- [1]杨颖,马莲,李树森,等.长江源区SWAT水文模型数据库构建及模型的率定与验证[J].安徽大学学报(自然科学版),2022,46(4):76-84.
- [2]陈瑾哈,夏军强,李铁键,等.数字流域模型在长江上游龙河流域的应用[J].水力发电学报,2019,38(7):1-10.
- [3]李翔,张利平,王纲胜,等.洪水预报模型参数优化与影响因素分析[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(9):1191-1202.
- [4]王雨潇,刘波,王文鹏,等.基于HEC-HMS模型的三峡区间洪水模拟[J].长江科学院院报,2024,41(6):76-83.
- [5]汤维明,付晓花,王盼,等.基于SWMM和MIKE11的城市河流水质动态模型构建及应用[J].西北水电,2023(1):6-12.

作者简介:

李凯(1990--),男,汉族,浙江温州人,本科,技术员,研究方向:水工环。