

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.007

基于马斯京根法的河道汇污研究

李宥霖¹, 杨 凤², 费国松³, 吴金宁³, 邵飞燕³, 朱文杰³, 王船海^{1,4}, 陈 钢^{1,4}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江中水工程技术有限公司, 浙江 杭州 310017;
3. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022; 4. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为解决水动力水质模型建模过程数据需求量大且获取难度较高的问题,提出了一种基于水文学方法求解一维水质模型基本方程的方法,该方法采用水文学中河道汇流的马斯京根法参数 K 、 X 等效替换河道地形、流速等数据,与一维水质模型的基本方程进行耦合构建马斯京根法汇污模型。为解决 K 取定值导致的马斯京根法汇污模型计算污染物传播时间不合理的问题,建立 K 、 X 与流量 Q 的函数,使用马斯京根非线性模型与一维水质模型耦合构建非线性马斯京根法汇污模型。淮河上游大坡岭—长台关段实例验证结果表明,非线性马斯京根法汇污模型解决了马斯京根法汇污模型预测峰现时间不准确的问题,同时将污染物质量浓度预测结果的确定性系数提升了 0.04,均方根误差减小了 0.07 mg/L,平均绝对误差减小了 0.022 mg/L。

关键词:水质预测;一维水质方程;马斯京根法;山丘区

中图分类号:P333

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)06-0057-08

Study on river pollution confluence based on Muskingum method

LI Youlin¹, YANG Feng², FEI Guosong³, WU Jinning³, SHAO Feiyan³, ZHU Wenjie³,
WANG Chuanhai^{1,4}, CHEN Gang^{1,4}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Zhejiang Zhongshui Engineering Technology Co., Ltd., Hangzhou 310017, China;
3. Changzhou Branch of Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changzhou 213022, China;
4. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To address the issues of the large amount of data required and the high difficulty in obtaining data during the modeling process of hydrodynamic water quality models, a method based on hydrological approaches for solving the basic equations of one-dimensional water quality models was proposed. This method substituted river topography and flow velocity data with Muskingum method parameters K and X for river confluence in hydrology. Moreover, coupled with the basic equations of the one-dimensional water quality model, a river pollution confluence model based on the Muskingum method was developed. Since taking a constant value for K is unreasonable for calculating pollutant propagation time in the developed model, the functions of K and X relative to flow rate Q were derived to solve this problem, and the nonlinear Muskingum model was coupled with the one-dimensional water quality model to build a river pollution confluence model based on the nonlinear Muskingum method. The verification results of the Dapuling-Changtaiguan section of the upper reaches of the Huai River show that the river pollution confluence model based on the nonlinear Muskingum method has ensured accurate prediction of peak time compared with the river pollution confluence model based on the Muskingum method. At the same time, the deterministic coefficient of the pollutant mass concentration prediction results has been increased by 0.04, the root mean square error has been reduced by 0.07 mg/L, and the average absolute error has been decreased by 0.022 mg/L.

Key words: water quality prediction; one-dimensional water quality equation; Muskingum method; hilly region

模拟预测污染物浓度的变化趋势是环境污染预防和治理工作中十分重要的一环^[1]。通过模拟预测污染物浓度的变化趋势,可以推断污染物传播路径,并预测其可能对环境和生态系统产生的影响。水质预测模

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3208704);国家自然科学基金-联合基金项目(U2240209)

作者简介:李宥霖(1999—),男,博士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:iceli990308@gmail.com

通信作者:王船海(1963—),男,教授,博士,主要从事数字流域理论方法与系统开发研究。E-mail:chwang@hhu.edu.cn

引用本文:李宥霖,杨凤,费国松,等.基于马斯京根法的河道汇污研究[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):57-64.

LI Youlin, YANG Feng, FEI Guosong, et al. Study on river pollution confluence based on Muskingum method [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 57-64.

型根据模型原理可分为机理性模型与非机理性模型^[2],机理性模型通常以数学方法表达水体系统内部的物理变化与生化反应,综合反映污染物浓度的时空变化规律。常见的机理性模型包括 QUAL 模型^[3]、WASP 模型、SWAT 模型^[4]等。例如,Fernandez 等^[5]使用了 QUAL2Kw 模型对哥伦比亚第安斯山脉河流中的病原体、有机物和营养物的浓度进行了预测;胡婷婷等^[6]基于 HEC-RAS 模型建立梧桐山河流域一维水动力水质模型,模拟下游断面的污染物浓度;栾广学等^[7]基于图形处理器加速技术耦合了二维水动力模型与多组分污染物输移及衰减反应模型,应用于理想地形静水和 2 个复杂地形河道入流与溃坝算例的水质模拟。机理性模型因为考虑了污染物浓度的物理、化学变化等实际过程,能够取得较好的模拟结果。同时,机理性模型复杂度高,对基础观测数据的数量和多样性有着极高的要求,例如实测大断面数据、河床糙率及源汇项等参数,这些数据的获取工作量较大,需要投入大量的资源。非机理性模型是一种黑箱式模型,通常使用数学统计或其他数学方法将历史数据中的变化规律信息应用于其他样本中。目前常用的非机理性模型主要分为统计学模型与机器学习模型。统计学模型主要使用多元回归分析法^[8]、马尔可夫链状预测法^[9]、时间序列法^[10]等。例如,钟文武等^[11]使用灰色模型 GM(1,1)和残差修正对滇池观音山段的水质指标进行了预测。机器学习模型具有强大的特征提取能力,可以很好地表征复杂的映射关系^[12],是非机理性模型中使用较多的方法,常用的方法有 BP 神经网络^[13]、人工神经网络^[14]等。例如,嵇晓燕等^[15]以 ARIMA 和 Prophet 作为基学习器,结合 BP 神经网络构建了水质预测集成学习模型,并以 DO、COD 等 5 个水质指标对该模型进行了有效性检验;杨坪宏等^[16]提出一种基于小波变换和变色龙优化算法、猎豹优化算法和山瞪羚优化算法的优化门限循环控制单元、长短期记忆神经网络的预测模型,以 pH 及 DO、COD_{mn}、氨氮浓度为指标对模型精度进行验证,预测精度与计算效率较高,是有效的水质预测模型。此类方法往往需要对计算机输入大量的历史数据来进行学习训练,以达到更好的预测精度,但在实际工作中经常无法获得大量的数据来训练模型,导致预测精度下降。

基于上述问题,本文提出了一种基于水文学马斯京根法求解一维水质模型基本方程的方法,该方法以马斯京根法参数 K 、 X 等效替换河道地形、流速等数据,与一维水质模型基本方程进行耦合求解,用于山丘区河道的污染物浓度模拟预测。与传统非恒定流水质预测模型相比,本文方法对实测资料的需求较低,可以快速模拟水体中污染物浓度的传播和扩散情况,以期为水质管理、环境保护和应急响应提供支持。

1 马斯京根法汇污模型构建

马斯京根法可根据流量资料推求河道洪水演进过程,是一种水文学方法。一维水质模型基本方程描述了水体中污染物浓度随时间和空间变化,在求解过程中,需要先对该偏微分方程进行离散化处理,将其转化为适合计算机求解的数值形式。本文通过公式变换,将马斯京根法与一维水质模型基本方程耦合求解。

1.1 马斯京根法推求河道流量演进过程

假定河段槽蓄量与流量、入流量之间存在线性关系:

$$W = K[XI + (1 - X) Q]$$
 (1)

式中: W 为槽蓄量; K 为蓄量常数,表示稳定流时河段的传播时间,随流量的变化而变化; X 为楔蓄系数,由河道楔蓄因素和调蓄因素组成; I 为入流量; Q 为流量。

一般情况下, K 和 X 为马斯京根法主要参数。将式(1)代入水量平衡方程可得:

$$Q_2 = C_1 I'_1 + C_2 I'_2 + C_3 Q_1$$
 (2)

其中
$$C_1 = \left(KX + \frac{\Delta t}{2} \right) / b \quad C_2 = \left(-KX + \frac{\Delta t}{2} \right) / b \quad C_3 = \left[K(1 - X) - \frac{\Delta t}{2} \right] / b$$

$$b = K(1 - X) + \Delta t/2 \quad I'_i = I_i + q\Delta x \quad (i = 1, 2)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为时段始末下断面的流量; I_1 、 I_2 分别为时段始末上断面流量; Δt 为计算时段; I'_1 、 I'_2 为时段始末考虑旁侧入流上断面流量; q 为旁侧入流单宽流量; Δx 为上、下断面距离。

1.2 一维水质模型基本方程与马斯京根法耦合求解

一维水质模型基本方程为

$$\frac{\partial A c}{\partial t} + \frac{\partial Q c}{\partial x} = S + c_0 q$$
 (3)

其中

$$S = A(-\alpha c + S_c/h)$$

式中: A 为断面面积; x 为河道长度; c 为污染物质量浓度; S 为污染物生化反应项; α 为降解系数; S_c 为底泥耗氧系数; h 为断面平均水深; c_0 旁侧入流质量浓度。

化简式(3)可得:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + \left(\frac{q}{A} + \alpha\right)c = \frac{c_0 q}{A} + \frac{S_c}{h} \tag{4}$$

式中 u 为流速。

根据马斯京根法差分格式对一维水质模型基本方程进行离散,空间项加权系数为马斯京根法参数 X ,时间项采用中心差分格式,得到以下形式:

$$\begin{cases} c = \frac{X}{2}(c_{j,\lambda+1} + c_{j,\lambda}) + \frac{1-X}{2}(c_{j+1,\lambda+1} + c_{j+1,\lambda}) \\ \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{X(c_{j,\lambda+1} - c_{j,\lambda}) + (1-X)(c_{j+1,\lambda+1} - c_{j+1,\lambda})}{\Delta t} \\ \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c_{j+1,\lambda+1} + c_{j+1,\lambda} - c_{j,\lambda+1} - c_{j,\lambda}}{2\Delta x} \end{cases} \tag{5}$$

式中 $c_{j,\lambda+1}$ 为 $\lambda+1$ 时刻 j 断面的污染物质量浓度。

将式(5)代入式(4)可得:

$$\frac{X(c_{j,\lambda+1} - c_{j,\lambda}) + (1-X)(c_{j+1,\lambda+1} - c_{j+1,\lambda})}{\Delta t} + u \frac{c_{j+1,\lambda+1} + c_{j+1,\lambda} - c_{j,\lambda+1} - c_{j,\lambda}}{2\Delta x} + \frac{1}{2}\left(\frac{q}{A} + \alpha\right)[X(c_{j,\lambda+1} + c_{j,\lambda}) + (1-X)(c_{j+1,\lambda+1} + c_{j+1,\lambda})] = \frac{c_0 q}{A} + \frac{S_c}{h} \tag{6}$$

令 $K_c = \Delta x/u$,式(6)两边同时乘以 $K_c \Delta t$,同时为提高计算效率进行整理变形,得:

$$c_{j+1,\lambda+1} = (d_1 c_{j,\lambda} + d_2 c_{j,\lambda+1} + d_3 c_{j+1,\lambda} + d_4)/\beta \tag{7}$$

其中

$$\begin{aligned} d_1 &= K_c \left(X - \frac{X}{2} \Delta t \alpha \right) + \frac{\Delta t}{2} - \frac{X}{1-X} \gamma & d_2 &= -K_c \left(X + \frac{X}{2} \Delta t \alpha \right) + \frac{\Delta t}{2} - \frac{X}{1-X} \gamma \\ d_3 &= K_c \left[(1-X) - \frac{1-X}{2} \Delta t \alpha \right] - \frac{\Delta t}{2} - \gamma & d_4 &= K_c \Delta t \left(\frac{c_0 q'}{A'} + \frac{S_c}{h} \right) = K_c \Delta t \left(\frac{S'_q}{A'} + \frac{S_c}{h} \right) \\ \beta &= K_c \left[(1-X) + \frac{1-X}{2} \Delta t \alpha \right] + \frac{\Delta t}{2} + \gamma \\ A' &= \frac{K}{2} [X(Q_{j,\lambda+1} + Q_{j,\lambda}) + (1-X)(Q_{j+1,\lambda+1} + Q_{j+1,\lambda})] \\ \gamma &= \frac{1-X}{2} K_c \Delta t \frac{q}{A} = \frac{1-X}{2} K_c \Delta t \frac{q'}{A'} & q' &= q \Delta x & S'_q &= q' c_0 \\ A &= \frac{W}{\Delta x} = \frac{K}{2\Delta x} [X(Q_{j,\lambda+1} + Q_{j,\lambda}) + (1-X)(Q_{j+1,\lambda+1} + Q_{j+1,\lambda})] \\ K_c &= \frac{K[X(Q_{j,\lambda+1} + Q_{j,\lambda}) + (1-X)(Q_{j+1,\lambda+1} + Q_{j+1,\lambda})]}{Q_{j,\lambda+1} + Q_{j+1,\lambda+1}} \end{aligned}$$

式中: β 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 为计算参数; $Q_{j,\lambda}$ 为 λ 时刻 j 断面的流量; S'_q 为旁侧入流污染物汇流速率,在式(7)中仅作为计算参数。

式(7)中 h 可采用马斯京根等效河道方法^[16]的变形式进行计算,各计算参数均与流量 $Q_{j,\lambda+1}$ 、 $Q_{j,\lambda}$ 、 $Q_{j+1,\lambda+1}$ 、 $Q_{j+1,\lambda}$ 有关,因此将式(1)计算出的流量代入式(7),计算可得到下一个断面的污染物浓度 $c_{j+1,\lambda+1}$ 。

以溶解氧 DO 为例,DO 的生化反应项为

$$S = A \left[-\alpha_b c_b + \alpha_o (c_{os} - c_o) - \frac{64}{14} \alpha_n c_n - \frac{S_c}{h} \right] \tag{8}$$

式中: α_b 为 BOD 的降解系数; α_o 为复氧系数; α_n 为氨氮的硝化速率; c_b 、 c_o 、 c_n 分别为 BOD、DO、氨氮的质量

浓度; c_{os} 为饱和溶解氧质量浓度。

将式(8)代入式(7)的各系数表达式,可得:

$$\begin{cases} \beta = K_c \left[(1 - X) + \frac{1 - X}{2} \Delta t \alpha_o \right] + \frac{\Delta t}{2} + \gamma \\ d_1 = K_c \left[X - \frac{X}{2} \Delta t \alpha_o \right] + \frac{\Delta t}{2} - \frac{X}{1 - X} \gamma \\ d_2 = -K_c \left[X + \frac{X}{2} \Delta t \alpha_o \right] + \frac{\Delta t}{2} - \frac{X}{1 - X} \gamma \\ d_3 = K_c \left[(1 - X) - \frac{1 - X}{2} \Delta t \alpha_o \right] - \frac{\Delta t}{2} - \gamma \\ d_4 = K_c \Delta t \left(\frac{c_o q'}{A'} + \alpha_o c_{os} - \alpha_b c_b - \frac{32}{7} \alpha_n c_n - \frac{S_c}{h} \right) \\ \gamma = \frac{1 - X}{2} K_c \Delta t \frac{q}{A} = \frac{1 - X}{2} K_c \Delta t \frac{q'}{A'} \\ A = \frac{W}{\Delta x} = \frac{K}{2 \Delta x} [X(Q_{j,\lambda+1} + Q_{j,\lambda}) + (1 - X)(Q_{j+1,\lambda+1} + Q_{j+1,\lambda})] \end{cases} \quad (9)$$

2 模型验证

2.1 模拟验证

根据第 1 节建立马斯京根法汇污模型,设置 $\Delta t=3600\text{ s}$, $\Delta x=9000\text{ m}$,共设 9 个断面。设置经验参数空间项加权系数与马斯京根法参数 X 相等,为 0.3,降解系数取 0.01 d^{-1} , $q=0.001\text{ m}^2/\text{ s}$, $c_0=5\text{ mg/L}$ 。入流过程采用洪峰为 $500\text{ m}^3/\text{ s}$ 的流量过程线,其余 9 个断面的流量根据马斯京根法计算得到(图 1),入流质量浓度采用 5 mg/L 的恒定浓度过程。由图 2 可知,时间上,污染物质量浓度呈先下降后上升再趋于平稳的趋势,这是由于污染物质量浓度受流量变化的影响,当无外来污染物汇入时,污染物质量浓度与流量呈负相关关系;空间上看,污染物质量浓度随河长的增加而减少;此模拟结果基本符合污染物运动迁移的物理机理,说明本文模型具有合理性。

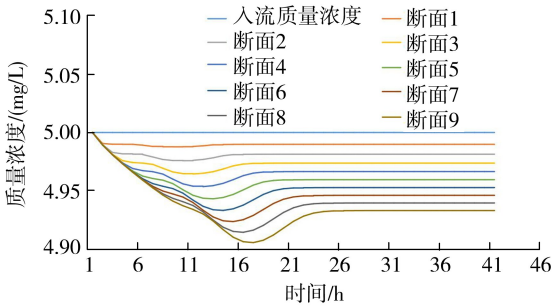
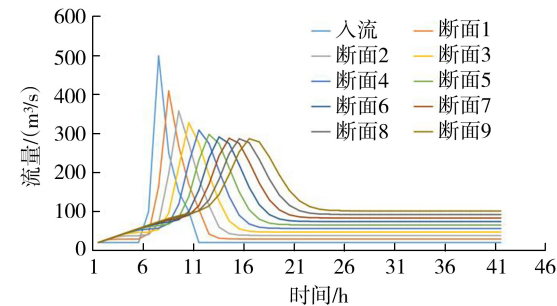


图 1 马斯京根法模拟流量过程线

Fig. 1 Simulation of flow process line using Muskingum method

图 2 马斯京根法汇污模型模拟污染物质量浓度过程线

Fig. 2 Simulation of pollutant mass concentration process line using river pollution confluence model based on Muskingum method

2.2 实例验证

2.2.1 研究区概况

选取淮河上游大坡岭—长台关段作为研究河道。该河道总长 52.5 km ,高程落差 32.75 m ,坡度较大^[17],概化河道如图 3 所示。作为淮河的上游河段,其不仅具有重要的生态保护意义,也是重要的水源地。

2.2.2 结果与分析

实测流量、水位与实测大断面数据(起点距、对应高程)来自水文年鉴;污染物质量浓度数据来自国家水质自动综合监测平台,因实测数据较少,以淮河支流灌河大坝北—固始马罡段污染物质量浓度过程进行替代。以高锰酸钾指数(COD_{Mn})作为模拟指标,根据大坡岭站 2018 年 7 月逐日流量过程和大坝北站 2018 年 7 月污染物浓度过程线构建马斯京根法汇污模型。同时,为验证马斯京根法汇污模型的准确性,构建了一维

水动力水质模型^[18]。马斯京根法汇污模型只需要大坡岭逐日流量过程、大坝北站污染物浓度过程数据;一维水动力水质模型需要大坡岭逐日流量过程、长台关逐日水位过程、大坝北站和固始马罡站污染物浓度过程、实测大断面数据。

一维水动力水质模型中以大坡岭站 2018 年 7 月逐日流量过程作为上边界流量条件,长台关站 2018 年逐日水位过程作为下边界水位条件。大坝北站 2018 年 7 月污染物质量浓度逐日过程为上边界浓度条件,固始马罡站 2018 年 7 月污染物质量浓度逐日过程为下边界浓度条件。模型中共概化了 50 个河道断面,其中上、下断面根据水文年鉴中大坡岭站与长台关站实测大断面资料对模型断面进行概化(图 4),中间断面采用插值法进行概化,断面间距控制在 1~2 km。在马斯京根法汇污模型中,由于河道长度较大,洪水传播时间 K 较长,同时受马斯京根法基本假定的影响, K 与 Δt 相差过大会导致误差较大或流量负值等不合理的现象,而 Δt 过大会导致预见期无法满足实际应用需求,故采用分段马斯京根法进行计算。通过试算法确定 K 值后,河段数 $N=K/K_1$,其中 K_1 为单个河段的洪水传播时间,且 $K_1=\Delta t$ 。马斯京根法汇污模型和一维水动力水质模型参数设置见表 1。



图 3 淮河大坡岭—长台关段河道概化
Fig.3 Schematic diagram of Dapoling-Changtaiguan section along Huaihe River

在马斯京根法汇污模型中,由于河道长度较大,洪水传播时间 K 较长,同时受马斯京根法基本假定的影响, K 与 Δt 相差过大会导致误差较大或流量负值等不合理的现象,而 Δt 过大会导致预见期无法满足实际应用需求,故采用分段马斯京根法进行计算。通过试算法确定 K 值后,河段数 $N=K/K_1$,其中 K_1 为单个河段的洪水传播时间,且 $K_1=\Delta t$ 。马斯京根法汇污模型和一维水动力水质模型参数设置见表 1。

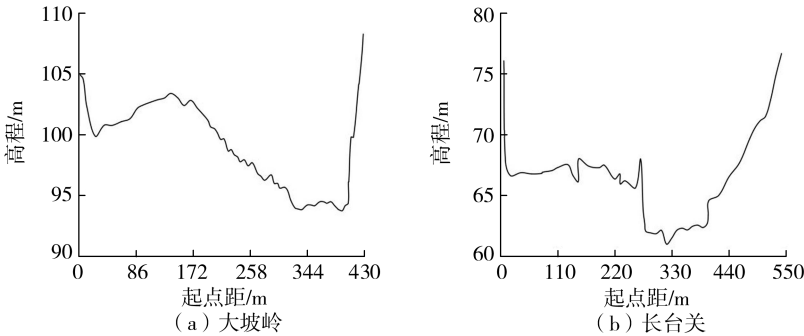


图 4 大坡岭、长台关断面概化图

Fig.4 Schematic diagram of Dapoling and Changtaiguan cross-sections

马斯京根法汇污模型所需实测资料包括上断面流量过程及上断面污染物浓度过程,与一维水动力水质模型相比,该方法所需的实测资料较少,且更容易获取。受水动力模型边界条件影响,本文采用马斯京根汇污法中下断面与一维水动力水质模型中第 49 号断面(即下断面前一断面)模拟结果进行对

比,结果见图 5。与一维水动力水质模型相比,马斯京根法汇污模型对流量模拟的确定性系数(R^2)约为 0.98,峰现时间相同,洪峰误差约为 7.51%,流量的模拟结果基本一致(图 5(a)),满足后续对污染物质量浓度模拟的计算需求。马斯京根法汇污模型对 COD_{Mn} 质量浓度的模拟结果较好,其 R^2 为 0.95,均方根误差为 0.08 mg/L,平均绝对误差为 0.026 mg/L。但在迁移时间方面,马斯京根法汇污模型对 COD_{Mn} 质量浓度峰值的预测时间比一维水动力水质模型提前了 20 h(图 5(b)),表明马斯京根法汇污模型对污染物迁移时间的模拟不准确。

2.2.3 马斯京根法汇污模型改进

使用马斯京根法进行洪水演进计算的过程中, K 通常用来描述洪峰的传播时间,但污染物质量浓度峰值往往出现在小流量时刻。因此,取 K 为常数来描述小流量时刻污染物的迁移时间会产生一定的误差。为消除该误差,分别建立 X 、 K 与 Q 的函数关系,采用差分牛顿迭代法^[19]求解马斯京根法的非线性演算模型,并与一维水质模型进行耦合。

在资料充足的情况下, K 、 X 可以根据历史洪水要素摘录的数据,使用水力学法^[20]进行计算。但历史洪

表 1 模型参数设置

Table 1 Model parameter configuration

模型	糙率	N	$\Delta t/\text{s}$	K/s	X
马斯京根法汇污模型	0.03	12	3 600	3 800	0.325
一维水动力水质模型	0.03	50	600		

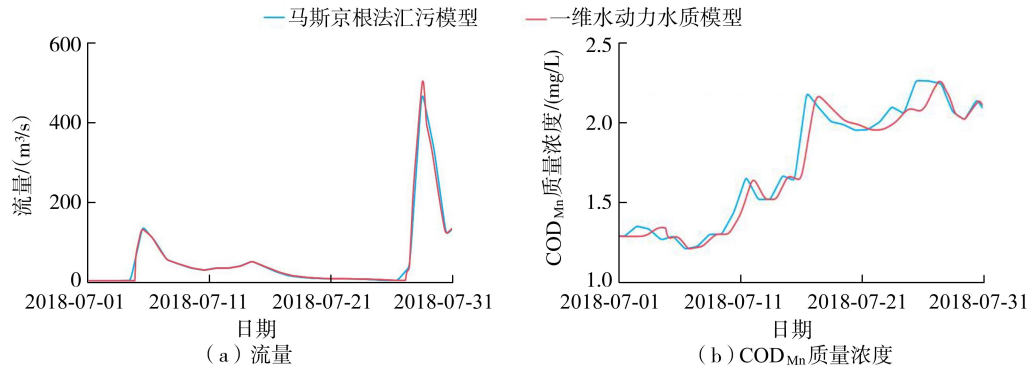


图 5 流量过程线、COD_{Mn} 质量浓度模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of flow process line and COD_{Mn} mass concentration simulation results

水摘录要素中对小流量的记录较少,可能导致所建立的 $K \sim Q$ 、 $X \sim Q$ 函数关系仍无法准确描述污染物的迁移过程。针对该问题,提出以下方法。

在有实测断面资料时,设河道有 J 个断面,断面 j 的流量模数和流量分别为

$$k_j = C_j A_j \sqrt{R_j} \tag{10}$$

$$Q_j = k_j \sqrt{i_{j+\frac{1}{2}}} \tag{11}$$

式中: C_j 为断面 j 的谢才系数; A_j 为断面 j 的面积; R_j 为断面 j 的水力半径; $i_{j+\frac{1}{2}}$ 为断面 j 与断面 $j+1$ 之间平均水面坡降。

特征河长:

$$l_{j+\frac{1}{2}} = \frac{\varphi_j + \varphi_{j+1}}{2} \frac{1}{i_{j+\frac{1}{2}}} \tag{12}$$

其中

$$\varphi = li = k \frac{1}{\partial k / \partial Z}$$

式中 Z 为断面水位。

以河长(L)为权重,计算河道平均特征河长:

$$l = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^J (l_{j+\frac{1}{2}} + L_{j+\frac{1}{2}}) \tag{13}$$

X 、 K 计算公式为

$$X = \frac{1}{2} - \frac{l}{2L} \quad K_{j+\frac{1}{2}} = \frac{2L_{j+\frac{1}{2}}}{\tau_j + \tau_{j+1}} \tag{14}$$

其中

$$\tau = \sigma u$$

式中: τ 为波速; σ 为波速转化流速系数。

将式(13)代入式(14)可计算得到 X 和 K 。因此可根据实测大断面资料与实测水位、流量数据计算不同量级流量下的 K 、 X ,从而与 Q 建立函数关系。

等效河道是一种将复杂的实际河流简化为具有相似的水动力特性的“理想河道”的概念,能够将复杂的自然河道形态简化为等效的理想河道形状和参数^[21]。在无实测大断面资料的情况下,可先根据历史洪水要素推求 K 、 X ,再使用马斯京根等效河道法对河道断面进行概化,得到河宽、水面坡降、流量模数等断面参数,最后通过式(14)确定不同量级流量下的 K 、 X 。确定好 $K \sim Q$ 、 $X \sim Q$ 的函数关系后即可对马斯京根非线性模型进行求解,并将计算结果代入式(7),得到污染物的运动迁移过程。

非线性马斯京根法汇污模型与一维水动力水质模型计算的流量过程如图 6(a) 所示。非线性马斯京根法汇污模型的 R^2 约为 0.978,较马斯京根法汇污模型略微下降;洪峰误差约为 1.43%,较马斯京根法洪汇污模型有所下降;峰现时间相同,较马斯京根法汇污模型无变化。由此,非线性马斯京根法汇污模型对流量的求解满足后续对污染物浓度模拟的计算需求。

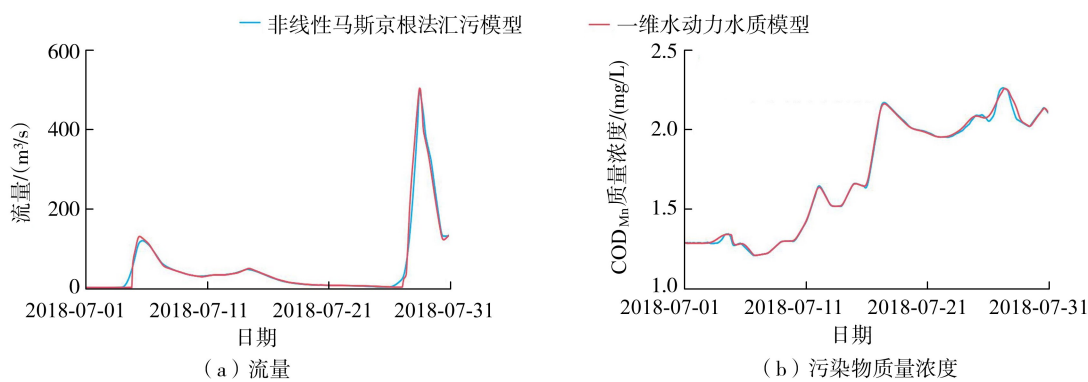


图 6 非线性马斯京根法汇污模型与一维水动力水质模型模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results between river pollution confluence model based on nonlinear Muskingum method and one-dimensional hydrodynamic water quality model

对 COD_{Mn} 质量浓度的模拟,非线性马斯京根法汇污模型的 R^2 为 0.99,较马斯京根法汇污模型提升了 0.04,均方根误差为 0.01 mg/L,较马斯京根法汇污模型减小了 0.07 mg/L,平均绝对误差为 0.004 mg/L,减小了 0.022 mg/L。在迁移时间上,非线性马斯京根法汇污模型与一维水动力水质法计算的 COD_{Mn} 质量浓度的峰值出现在同一时刻,解决了马斯京根法汇污模型污染物浓度峰现时间误差问题。

综上,马斯京根法汇污模型能够在流量变化不大的情况下取得较好的拟合结果,但在有较大洪峰流量的情况下,会导致污染物浓度的迁移时间出现偏差。非线性马斯京根法汇污模型较好地解决了这一问题,通过建立 K 、 X 与 Q 的函数关系,消除了马斯京根法汇污模型中取 K 、 X 为常数而导致的误差,使其成为解决山丘区污染物浓度模拟问题的一种有效且可行的方法。

3 结 语

本文提出了一种基于马斯京根法求解河道汇污过程的方法,该方法计算过程简洁,对实测资料的依赖性较低,能够解决山丘区污染物的汇污问题。然而,分析表明该方法存在一个固有局限:参数 K 描述的是洪峰流量传播时间,但污染物浓度峰值通常出现于小流量时刻。因此,在流量变幅较大的情况下, K 为常数不合理。给出了有实测大断面资料与无实测大断面资料的情况下的 K - Q 、 X - Q 函数关系确定方法,并基于该函数关系,采用非线性马斯京根法解决了马斯京根法模拟产生的污染物质量浓度峰现时间误差问题。在淮河上游大坡岭—长台关河道的实例验证中,将确定性系数提升了 0.04,均方根误差减小了 0.07 mg/L,平均绝对误差减小了 0.022 mg/L。

参考文献:

[1] 王海涛,金星. 水质模型的分类及研究进展[J]. 水产学杂志,2019,32(3):48-52. (WANG Haitao, JIN Xing. Classification and research progress of water quality models[J]. Chinese Journal of Fisheries,2019,32(3):48-52. (in Chinese))

[2] 王颖. 河流水环境水质预测模型研究应用及发展[J]. 广东化工,2022,49(10):135-136. (WANG Ying. Research, application and development of river water environment and water quality prediction model[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022,49(10):135-136. (in Chinese))

[3] BRUM M, FAN F M, SALLA M R, et al. Analysis of a probabilistic approach for modelling and assessment of the water quality of rivers[J]. Journal of Hydroinformatics, 2022,24(4):783-797.

[4] HAN Yanlai, DU Xinzong, FARJAD B, et al. A numerical modeling framework for simulating the key in-stream fate processes of PAH decay in Muskeg River Watershed, Alberta, Canada[J]. Science of the Total Environment, 2022,848:157246.

[5] FERNANDEZ N, CAMACHO L A. Water quality modeling in headwater catchments: comprehensive data assessment, model development and simulation of scenarios[J]. Water, 2023,15(5):868.

[6] 胡婷婷,徐刚,苏东旭,等. 基于 HEC-RAS 的梧桐山河流域水质模拟及应用[J]. 水文,2022,42(3):37-42. (HU Tingting, XU Gang, SU Dongxu, et al. Water quality simulation and application of Wutongshan River basin based on HEC-RAS[J]. Journal of China Hydrology, 2022,42(3):37-42. (in Chinese))

[7] 栾广学,侯精明,杨露,等. 耦合高效高精度水动力模型的多组分污染物输移及衰减反应模型[J]. 水资源保护,2022,38

(6):131-137. (LUAN Guangxue,HOU Jingming,YANG Lu,et al. Multi-component pollutant transport and attenuation reaction model coupled with high-efficiency and high-precision hydrodynamic model[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):131-137. (in Chinese))

[8] 李秋瑶. 多元线性回归模型在河流水质预测中的应用[J]. 信息系统工程,2023(7):79-82. (LI Qiuyao. Application of multiple linear regression model in river water quality prediction[J]. China CIO News,2023(7):79-82. (in Chinese))

[9] 王腾,熊仲华,杜庆治,等. 基于马尔可夫链的河流水质污染预测模型研究[J]. 安徽农业科学,2015,43(27):209-211. (WANG Teng,XIONG Zhonghua,DU Qingzhi,et al. Study on prediction model of river water quality contamination based on Markov Chain[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2015,43(27):209-211. (in Chinese))

[10] 赵春兰,李屹,何婷,等. 基于动态隶属度的模糊时间序列模型的水质预测研究[J]. 计算机工程与科学,2022,44(8):1488-1496. (ZHAO Chunlan,LI Yi,HE Ting,et al. Water quality prediction based on fuzzy time series model of dynamic membership degree[J]. Computer Engineering & Science,2022,44(8):1488-1496. (in Chinese))

[11] 钟文武,李光华,罗永新,等. Markov 灰色残差 GM(1,1)模型在滇池观音山断面水质预测中的应用研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(11):80-84. (ZHONG Wenwu,LI Guanghua,LUO Yongxin,et al. Water quality prediction of Guanyin mountain in Tien lake based on Markov grey residual error modified model[J]. Environmental Science and Management,2016,41(11):80-84. (in Chinese))

[12] 方浩澎. 基于机器学习的水质 COD 建模研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.

[13] 张梦迪,徐庆,刘振鸿,等. 基于动态滑动窗口 BP 神经网络的水质时间序列预测[J]. 环境工程技术学报,2022,12(3):809-815. (ZHANG Mengdi,XU Qing,LIU Zhenhong,et al. Prediction of water quality time series based on the dynamic sliding window BP neural network model[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2022,12(3):809-815. (in Chinese))

[14] LU Fang,ZHANG Haoqing,LIU Wenquan. Development and application of a GIS-based artificial neural network system for water quality prediction;a case study at the Lake Champlain area[J]. Journal of Oceanology and Limnology,2020,38(6):1835-1845.

[15] 嵇晓燕,杨凯,陈亚男,等. 基于 ARIMA 和 Prophet 的水质预测集成学习模型[J]. 水资源保护,2022,38(6):111-115. (JI Xiaoyan,YANG Kai,CHEN Yanan,et al. An ensemble learning model for water quality forecast based on ARIMA and Prophet [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):111-115. (in Chinese))

[16] 杨坪宏,胡奥,崔东文,等. 基于数据处理与若干群体算法优化的 GRU/LSTM 水质时间序列预测[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(4):45-53. (YANG Pinghong,HU Ao,CUI Dongwen,et al. Prediction of GRU/LSTM water quality time series based on data processing and optimization of several swarm intelligence algorithms[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2023,34(4):45-53. (in Chinese))

[17] 孙苗苗,石朋,瞿思敏,等. VIC 模型系统微分响应参数率定方法在大坡岭流域的应用[J]. 中国农村水利水电,2021(12):122-128. (SUN Miaomiao,SHI Peng,QU Simin,et al. Application of the system response parameter calibration method for VIC model in Dapoling catchment[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(12):122-128. (in Chinese))

[18] 程文辉,王船海,朱琰,等. 太湖流域模型[M]. 南京:河海大学出版社,2006.

[19] 陈森林. 马斯京根法非线性演算模型的差分牛顿迭代解法[J]. 水文,1992,12(1):30-33. (CHEN Senlin. Differential newton iteration method for nonlinear arithmetic model of Muskingum method[J]. Journal of China Hydrology,1992,12(1):30-33. (in Chinese))

[20] 包为民. 水文预报[M]. 5 版. 北京:中国水利水电出版社,2017.

[21] 王船海,俞悦,吴金宁,等. 基于马斯京根参数 K 、 X 的等效河道计算方法研究[J]. 水利学报,2023,54(10):1257-1265. (WANG Chuanhai,YU Yue,WU Jinning,et al. Research on calculation method of equivalent channel based on Muskingum parameters K and X [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(10):1257-1265. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 09 - 01 编辑:刘晓艳)