

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.020

基于改进重叠投影法的空间耦合水污染评估模型

张 影¹, 杨晓东², 贾子璇², 章 胤², 王 晶^{3,4}

(1. 燕山大学里仁学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学理学院, 河北 秦皇岛 066004;
3. 燕山大学经济管理学院, 河北 秦皇岛 066004; 4. 燕山大学区域经济发展研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:为准确评估库区上游河流突发水污染的危害程度, 针对库区上游区域河床中上游窄、下游宽的结构特点, 在传统重叠投影法的基础上, 于重叠区域上边界引入流速、水位、污染物浓度等物理量的二次横向分布函数, 基于神经网络的思想, 采用最速下降法构建训练算法, 对各分布函数中的未知参数进行训练, 将收敛后的分布函数作为模型的连接条件, 进而建立改进的一维、二维水动力和水质空间耦合模型; 以青龙河流域为例, 将训练得到的分布函数的必要参数作为一维、二维连接, 模拟了河流环境中污染物的时空变化规律。结果表明, 改进的耦合模型计算结果稳定, 显著降低了物理量由一维向二维过渡时的突变性, 相比传统重叠投影的单数值传递, 改进的方法以训练后的分布函数作为一维、二维耦合的连接, 可以大幅度提高耦合的精确性。

关键词:水污染评估; 水动力模型; 水质模型; 耦合模型; 重叠投影法; 最速下降法

中图分类号:TV131.4; X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0128-07

Space coupling water pollution evaluation model based on improved overlapping projection method // ZHANG Ying¹, YANG Xiaodong², JIA Zixuan², ZHANG Yin², WANG Jing^{3,4} (1. LiRen College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 4. Research Center of Regional Economic Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To accurately assess the damage degree of sudden water pollution in the upstream of the reservoir area, according to the structural characteristics of narrow upstream and wide downstream in the upstream riverbed of the reservoir area, one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic and water quality space coupling models were established and improved. Based on the traditional overlapping projection method, a quadratic transverse distribution function of the flow velocity, water level, pollutant concentration and other physical quantities were introduced at the boundary of the overlapping area. Based on the idea of neural network, the steepest descent method was adopted and a training algorithm was constructed to train the unknown parameters in each distribution function. Finally, the converged distribution function was used as the connection condition of the model. In the case of Qinglong River Basin in Taolinkou, the necessary parameters of the distribution function were obtained through training, and it was taken as the connection of one-dimensional and two-dimensional to simulate the temporal and spatial variation law of pollutants in the river environment. The results show that the calculation results of the improved coupling model are stable, which significantly reduces the mutation of physical quantity in the transition from one to two dimensions. Compared with the single numerical transfer of traditional overlapping projection, the improved method takes the trained distribution function as the connection of 1D-2D coupling, which can greatly improve the accuracy of coupling.

Key words: water pollution evaluation; hydrodynamic model; water quality model; coupling model; overlapping projection method; steepest descent method

水污染评估是研究水污染问题的重要途径, 利用水动力水质数值模型模拟计算水污染的输移扩散

过程, 可为水污染风险评估和相关部门采取应对措施提供重要参考信息。水库作为水资源重要存储

基金项目: 河北省教育厅人文重点研究基地资助项目(JJJJD1816); 秦皇岛市科技计划(201902A033)

作者简介: 张影(1980—), 女, 实验师, 硕士, 主要从事智能仪器仪表、大数据与智能决策研究。E-mail: ysu-zy@qq.com

通信作者: 王晶(1978—), 女, 副教授, 博士, 主要从事物流与供应链管理及大数据与智能决策等研究。E-mail: wangjing@ysu.edu.cn

地,库区上游突发性水污染的研究一直备受关注。针对库区上游河床特点,往往建立一维、二维耦合水动力水质模型模拟污染物的扩散,于库区中上游河道窄长区域构建一维河网模型^[1],下游河道开阔水域构建二维模型,并在交接面处进行合理的耦合,既可较准确地反映污染物浓度的时空变化规律,同时又可控制模型的复杂度以满足实际需求^[2]。

近年来,众多学者针对一维、二维耦合模型开展了大量研究工作。诸裕良等^[3]在河口一维、二维连接处通过接口断面法传递水力因子,建立了一种一维、二维全隐河网海湾水动力联网数学模型;Lai等^[4]提出了适用于大尺度水动力模拟的一维、二维耦合方法,并对长江中游流域的河流-湖泊洪水演进进行了模拟;陈文龙等^[5]构造并求解 Riemann 问题实现了一维、二维模型耦合,有效克服了传统堰流公式缺点,并提出时间步长自适应匹配方法解决了一维、二维模型时间步长不一致的问题;王秀杰等^[6]建立了复杂条件下天然河道漫溃堤洪水在防洪保护区的一维、二维水动力模型;顾杰等^[2]基于 MIKE FLOOD 建立了入海河流及近岸海域一维、二维耦合河流-海岸水动力和水质模型;田福昌等^[7]建立了山洪沟道溃堤洪水演进一维、二维水动力耦合数值模拟模型以分析评估溃堤山洪淹没风险。目前,一维、二维耦合模型研究多为基于堰流公式和数值通量的侧向型联解耦合,构建水动力的一维、二维耦合模型以研究漫溃堤洪水问题,而针对一维、二维水动力水质耦合模型的研究较少,多为 MIKE 软件的实际应用。此外,针对耦合交接面的连接问题,对参数及连接条件的过度概化,往往造成模拟结果的不准确。

针对上述问题,本文在传统重叠投影法^[8]的基础上,于重叠区域的上边界引入流速等物理量的二次横向分布函数,基于神经网络训练思想,采用最速下降法构建训练算法,对分布函数进行优化训练,将收敛后的分布函数作为模型的连接条件,进而建立了基于改进重叠投影法的空间耦合模型,有效地降低了耦合处物理量的突变,实现了一维、二维水动力和水质模型精准耦合。

1 一维、二维水动力与水质模型

1.1 一维河网水动力模型

采用描述明渠非恒定流的水动力运动方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = q_t \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为沿程距离; t 为时间; z 为水位; Q 为流量;

q_t 为旁侧入流流量; B 为宽度; A 为断面面积; K 为流量模数; g 为重力加速度。

结合河网汉点连接条件,利用 Preissmann 四点加权隐式格式^[9]离散控制方程,然后采用河网三级联解法求解(详见文献[10])。

1.2 一维河网水质模型

河道污染物的一维对流扩散方程为

$$\frac{\partial (Ac)}{\partial t} + \frac{\partial (Qc)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - K_1 c \quad (2)$$

式中: c 为水流输送的污染物浓度; E_x 为污染物纵向扩散系数; K_1 为污染物综合降解系数。

对方程(2)采用前差分离散时间项、隐式迎风格式离散对流项、中心差分离散扩散项,整理得各断面浓度递推关系式,并结合汉点质量平衡方程建立方程组求解,回代至各河段得各断面污染物浓度(详见文献[11])。

1.3 平面二维水动力模型

二维控制方程有水流连续性方程和水流运动方程组:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial (Hu)}{\partial t} + u \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + v \frac{\partial (Hu)}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial x} + fHu - \Omega Hv = \nu \nabla^2 (Hu) + \lambda Hw_x \\ \frac{\partial (Hv)}{\partial t} + u \frac{\partial (Hv)}{\partial x} + v \frac{\partial (Hv)}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial y} + fHv + \Omega Hu = \nu \nabla^2 (Hv) + \lambda Hw_y \end{cases} \quad (4)$$

式中: H 为水深; u 、 v 为 x 、 y 方向的流速; f 为阻力系数; Ω 为科氏力系数; ν 为紊流涡黏性系数; λ 为风应力系数; w_x 、 w_y 为风速在 x 、 y 方向上的分量。

采用贴体坐标法^[12-13],通过 Poisson 方程对控制方程进行坐标变换,并采用交替方向隐格式法(ADI)求解(详见文献[14])。

1.4 平面二维水质模型

二维对流扩散方程用以描述污染物在水体中的输移扩散规律:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (Hc)}{\partial t} + \frac{\partial (uHc)}{\partial x} + \frac{\partial (vHc)}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(HE_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HE_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 E_x 、 E_y 为 x 、 y 方向的扩散系数。

对流扩散方程经坐标变换后,基于水动力模型计算的流速、水位等结果,采用交替方向隐格式法求解(详见文献[14])。

2 一维、二维模型的改进耦合模型

采用一维、二维耦合的水动力和水质模型模拟

污染物的扩散时,在耦合交接面的连接区域上对参数及连接条件的过度概化,往往造成模拟结果的不准确。一般情况下,沿河宽方向各物理量——如水位、流速及污染物浓度等——不是均匀分布的,为体现连接后二维区域各物理量的真实分布情况,在传统重叠投影法的基础上,于一维、二维区域引入水位、流速、污染物浓度等物理量的二次横向分布函数,进而构建训练算法,对各分布函数中的未知参数进行训练,将收敛后的分布函数作为模型的连接条件,建立改进的一维、二维水动力和水质空间耦合模型。

2.1 耦合模型连接条件的改进

考虑在一般情况下沿河宽方向各物理量不是均匀分布,在一维、二维交接面设置物理量沿河宽方向的分布函数 $\Psi(y)$,并采用二次函数形式来拟合其在边界的分布:

$$\Psi(y) = a_{z1}y^2 + a_{z2}y + a_{z3} \quad (6)$$

式中: y 为河宽方向坐标; a_{z1} 、 a_{z2} 、 a_{z3} 为待定系数。将分布函数 $\Psi(y)$ 于二维边界离散化,设其在控制体 i ($i=1,2,\dots,N$, N 为二维边界处控制体个数) 的取值为 Ψ_i ,有:

$$\Psi_i = a_{z1}y_i^2 + a_{z2}y_i + a_{z3} \quad (7)$$

由于二维边界物理量随时间变化的模拟计算过于复杂,因而本文代之以适用于一定时段的二维边界各控制体的波动比值 ω_i ,有:

$$\omega_i = \frac{\Psi_i}{\bar{\Psi}} = a_{\omega1}y_i^2 + a_{\omega2}y_i + a_{\omega3} \quad (8)$$

式中 $\bar{\Psi}$ 为物理量在二维边界控制体的平均值。

此时,通过训练得到波动比值向量 ω ,在已知交接面处的平均值后就可得该物理量的分布情况,能准确体现其在交接面的连接关系,从而提高耦合准确度。

据此,在二维边界控制体上设置水位、流速、污染物浓度分布函数,需要注意的是重叠区域二维边界的流速需要纵向流速分布函数 $u(y)$ 以及流速矢量方向与纵向的夹角分布函数 $\theta(y)$ 两个分布函数以表示其分布情况,分布函数皆采用二次函数形式拟合,通过训练可得收敛的水位波动比值向量 ω_z 、流速波动比值向量 ω_u 、夹角分布向量 θ ,进而得到污染物浓度波动比值向量 ω_c ,作为污染物浓度在交接面上的连接条件。

2.2 改进的耦合模型的实现步骤

考虑到二维区域数值波的传播受柯朗-弗里德里斯-列维 (Courant-Fredrich-Lewy, CFL) 条件限制,进行水域延伸构造虚拟重叠区域^[8],并考虑在一维准确计算水域中进行二维区域物理量的细化分

布函数的训练,将二维计算水域的边界向一维计算水域延伸 Courant 个网格点,见图 1。此时,定义左侧虚拟边界为 Ω_1 ,右侧一维、二维交接面为 Ω_2 ,其中, Ω_1 为一维、二维转化平面, Ω_2 为比较训练平面;图 1 中 Φ 为一维区域内的物理量, Ψ 为二维区域的物理量, L 表示重叠区域中虚拟的一维断面数。

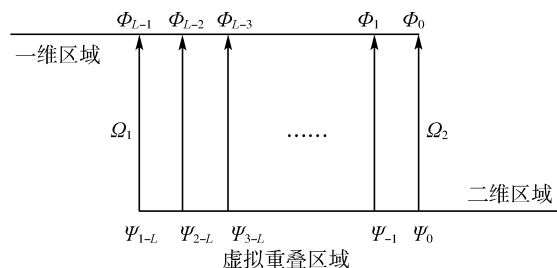


图1 重叠-投影示意图

Fig.1 Overlapping projection diagram

训练时,面 Ω_2 采用滞后条件,即下一时步虚拟重叠区域的物理量通过该时间步长内的迭代计算得到含参精确值。在一维准确计算水域中进行二维区域物理量的细化分布函数的训练,利用该精确值与原滞后值之差构建目标函数以训练分布函数相关系数。

以训练稳定后的分布函数作为模型一维、二维的连接条件进行耦合计算,进而构建改进的重叠投影区域。改进的重叠投影关系见图 2。

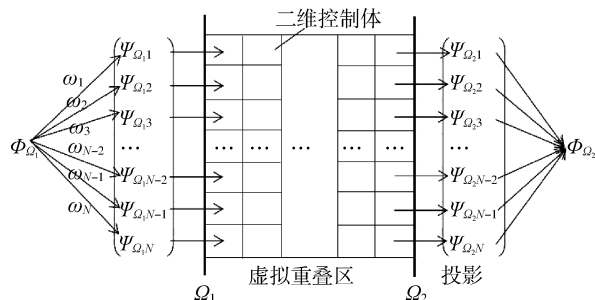


图2 重叠区域一、二维连接关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of the connection relation of 1D and 2D connection in the overlapping area

2.2.1 参数训练步骤

a. 先计算水动力模型,面 Ω_2 的时间滞后条件取为 $\Delta\Phi_{n+1}=0$ (n 为模型已完成迭代的次数),记此时的边界值为 Φ_{Ω_2} 。

b. 求解一维隐格式,得面 Ω_1 的物理量值 Φ_{Ω_1} ,并乘以波动比值向量 ω_z 、 ω_u 将面 Ω_1 上一维物理量值转化为二维边界条件 $\Psi_{\Omega_1}(P_1)$ 。

c. 计算二维区域。取面 Ω_2 上流速等物理量投影得到一维精确边界条件 Φ'_{Ω_2} 。

d. 确定目标函数 $p(P_1)$:

$$p(P_1) = (\Phi'_{\Omega_2} - \Phi_{\Omega_2})^2 \quad (9)$$

目标函数越小,一维、二维连接效果越好。

e. 以目标函数最小为目标,采用最速下降法,训练得到水动力模型各物理量的分布函数系数向量的估计 $\hat{P}_1 = (\hat{a}_{\omega_{z1}}, \hat{a}_{\omega_{z2}}, \hat{a}_{\omega_{z3}}, \hat{a}_{\omega_{u1}}, \hat{a}_{\omega_{u2}}, \hat{a}_{\omega_{u3}}, \hat{a}_{\theta1}, \hat{a}_{\theta2}, \hat{a}_{\theta3})$ 。

f. 水质模型的训练过程同水动力模型,进而得到 $\hat{P}_2 = (\hat{a}_{\omega_{c1}}, \hat{a}_{\omega_{c2}}, \hat{a}_{\omega_{c3}})$ 。

g. 根据得到的系数向量 $\hat{P}_1$ 、 $\hat{P}_2$ 可得波动比值向量 $\hat{\omega}_z$ 、 $\hat{\omega}_u$ 、 $\hat{\omega}_c$ 及夹角分布向量 $\hat{\theta}$, 输入耦合模型, 进行一、二维耦合。

2.2.2 模型耦合步骤

a. 面 Ω_2 的时间滞后条件取为 $\Delta\Phi_{n+1} = 0$, 记此时的边界值为 Φ_{Ω_2} 。

b. 将滞后边界值 Φ_{Ω_2} 作为一维水动力模型的下边界, 采用三级联解法得到各水力要素在一维计算区域各断面的取值。

c. 取一维计算区域中面 Ω_1 的水力要素值, 即计算所得一维边界条件 Φ_{Ω_1} , 经由面 Ω_1 波动比值向量 $\hat{\omega}_z$ 、 $\hat{\omega}_u$ 及夹角分布向量 $\hat{\theta}$ 转化为二维边界条件 $\Psi_{\Omega_1}(P_1)$ 。

d. 求解二维计算区域, 代入二维边界条件 $\Psi_{\Omega_1}(P_1)$, 采用交替方向隐格式法结合追赶法得水力要素于二维计算区域的分布。

e. 取面 Ω_2 的水力要素分布, 投影得到下一时刻一维边界条件 Φ'_{Ω_2} , 即 $\Phi_{\Omega_2, n+2}$ 。

f. 将水动力模型相关水力参数输入水质模型。同水动力模型训练耦合步骤, 并由面 Ω_1 的污染物浓度波动比值向量 ω_c 实现污染物浓度一维、二维区域的连接, 最终得到整个计算区域内的污染物浓度分布。

g. 重复上述步骤, 根据实时训练出的面 Ω_1 的分布函数, 实现一维、二维交接面物理量的转化, 直至模拟结束。

3 模型检验

以秦皇岛桃林口库区上游青龙河流域为研究区域, 模拟青龙县某污水泄漏事件, 对上述改进的一维、二维耦合河网水动力水质模型进行检验和分析。

3.1 研究区域概况

桃林口水库位于河北省东北部的滦河主要支流青龙河上, 总库容 8.59 亿 m^3 , 区域内地势北高南低, 降雨主要集中于每年的 7、8 月。库区上游河流以青龙河水系为主, 河长 265 km, 控制面积 3431.5 km^2 , 河床主要为砂卵石, 中游河床宽 50 ~ 70 m, 下游段河床较宽, 为 400 ~ 1000 m, 平均纵坡

0.1556%。

通过分析区域的河段组成, 确定一维河网研究范围为: 上边界取自小柳条沟北庄 S358 县道, 下边界取至小菜峪。径流量较大支流包括沙河、起河、都源河以及星干河。一维模型共布设了 505 个断面, 典型断面如图 3 所示, 断面平均距离 $\Delta x = 500$ m。为满足 CFL 条件和控制方程的微分性质, 设定一维模型的时间步长 $\Delta t = 120$ s。

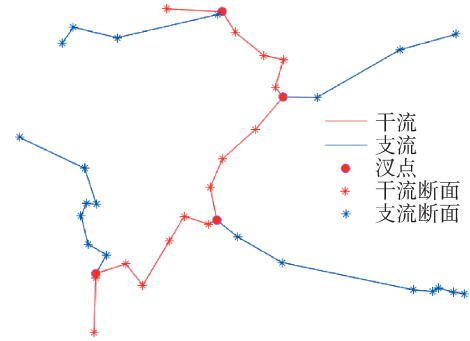


图3 河网各河段典型断面位置概化示意图

Fig.3 Generalized sketch map of typical section location of each river section in the river network

二维模型研究范围包括小菜峪断面至入库口。为适应复杂河道边界, 本文建立贴体坐标系将物理计算区域进行转化^[15], 最终生成了 3451 个计算网格。基于 CFL 条件选择时间步长为 4 s。一维、二维计算结果的输出间隔均为 120 s。

3.2 定解条件

3.2.1 初始条件

以青龙河水系监测站最近(2019 年 7 月 15 日)的一次检测数据为基础, 通过数据处理, 得到各典型断面的流量、水位、自然状态下污染物的浓度等数据。采用一维、二维插值方法, 分别得到一维、二维区域各断面、控制体的流量、水位等数据作为水动力模型的初始条件; 各断面、控制体的自然状态下污染物的浓度作为水质模型的初始条件。

3.2.2 边界条件

一维水动力模型的上边界条件是各干支流河段上游实际的流量、水位变化, 下边界条件为一维、二维耦合界面处二维模型计算得到的平均流量和平均水位。

二维水动力模型的耦合界面为流量-水位边界, 其余边界为固壁边界, 本文根据流域特点和模拟时长, 固壁边界采用闭边界条件, 沿边界法线(n_{r_0})方向流速为零。

河网水质模型的边界条件是单源点污染源, 位于青龙县河南村断面的满源污水处理厂的生活污水均匀地排入所在的河流系统中。

3.3 参数计算方法

以秦皇岛市水文局等部门提供的部分数据为基础,通过 Google Earth 遥感与图像处理技术^[16-17] 设计提取算法,提取河网各断面和控制体的基础数据,并结合河流纵向扩散系数^[18] 等水力学经验计算公式,计算得到模型必要的基本参数。对于某些需要率定的参数,按断面采用试错法调试有较大任意性,河网规模较大时调试工作量十分巨大,本文采用分级法,即同一等级的河道按一定的参数取值,保证模型参数的相对准确性及可行性,并通过实地勘察和咨询水力学专业人员等途径,综合考量,对一维、二维每个经典断面和经典控制体的水力参数进行打分,采用插值方法计算所有断面和控制体的水力参数。

3.4 模拟场景

假定满源污水处理厂突发污水泄漏事故,有 9 400 m³ 的生活污水均匀地排入研究水系中,本文主要研究浓度为 1.606×10^{-4} mol/L 的总磷 (TP) 在未来 26.7 h 内的变化情况^[19],并从秦皇岛市水文局监测站监测时间 (2019-07-15) 开始计时。

图 4 和图 5 为河网水动力模型在一维区域的计算结果。在整个模拟期间,最大流量是 876.23 m³/s,在一个时间步长 (120 s) 内变化最大为 14.17 m³/s,最高水位是 216.34 m,一个时间步长内变化最大为 0.23 m。

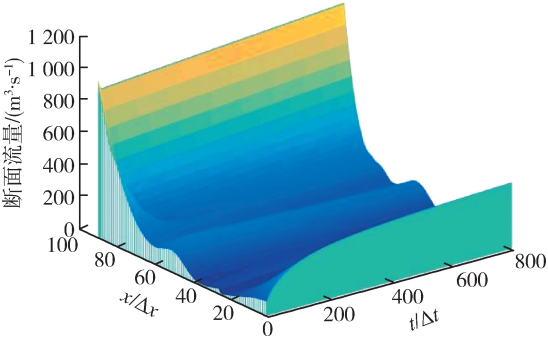


图 4 断面流量的时空变化

Fig. 4 Temporal and spatial variation of section discharge

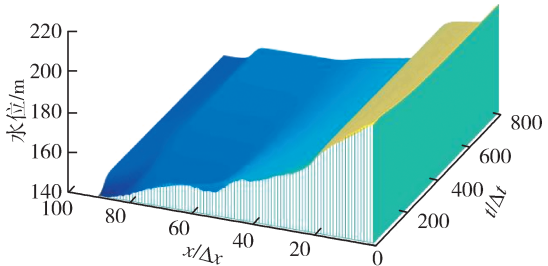


图 5 断面水位的时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial variation of section water level

图 6 为河网水质模型在一维区域的计算结果,可见污染事件发生后 561 个时间步长 (即 18.7 h) 污染物到达了二维区域 (小菜峪断面)。值得注意的

是,污染物汇入汉点时未污染水流汇入稀释,导致输出断面的污染物浓度出现突变。

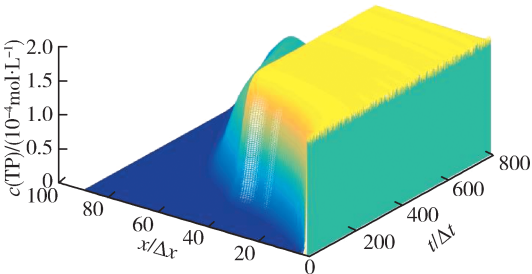
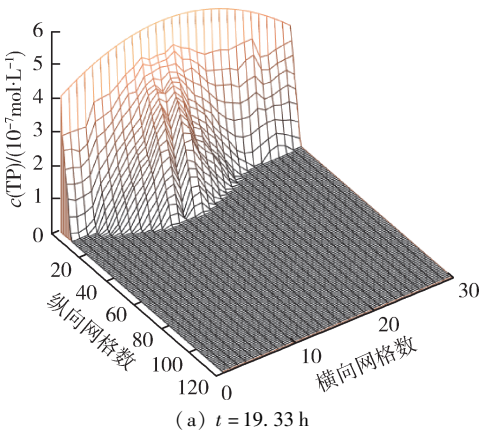


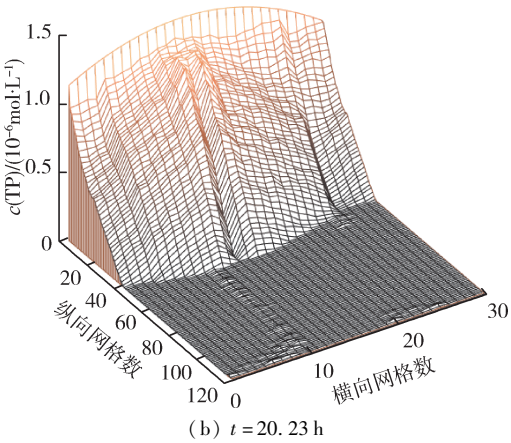
图 6 污染物 TP 浓度的时空变化

Fig. 6 Temporal and spatial variation of TP concentration

图 7 为河网模型在二维区域的计算结果,即在污染事件发生后 581、601 个时间步长 (即 19.33 h、20.23 h) 时,二维区域中各控制体上污染物浓度的分布,可以看出,当以二次函数作为交接面污染物浓度分布的拟合函数时,后续的二维区域同一横截面的控制体上的 TP 浓度,仍然呈中间高、两端低近似二次函数趋势的分布,从而验证了用二次函数作为拟合函数的合理性。



(a) $t = 19.33\text{ h}$



(b) $t = 20.23\text{ h}$

图 7 TP 浓度在二维区域贴体坐标系中的分布

Fig. 7 Distribution of TP concentration in two-dimensional regional body-fitted coordinate

由以上计算结果可知,通过最速下降法训练改进后的重叠投影法实现一维、二维模型的耦合,在河段推演、汉点连接、一维和二维耦合等过程均未出现

解的“奇点”,方法的改进并未引起模型解的突变,表明改进后的模型稳定性较高,达到了预期目标。

首次训练稳定后的一维和二维交接面处纵向流速、流速矢量方向与纵向的夹角、水位和污染物浓度的分布函数中的参数如表3所示,可以看到,4个分布函数的二次项系数均较小,表明河流同一截面上的该4个变量数值相差不会太大;夹角 θ 的二次系数为负,河流中央夹角小,两端夹角大,其他3个变量正好相反;各分布函数的一次项系数很小,表明河流中该4个水力要素近似呈对称分布。以上结果近似符合青龙河在二维区域的河流特征,进而验证了参数训练算法的正确性。

表3 首次训练稳定后各物理量分布函数的系数
Table 3 Coefficients of quadratic distribution function of each physical quantity after first training and stabilization

物理量	二次项系数	一次项系数	常数项
纵向流速 u	-6.0010×10^{-4}	-9.4266×10^{-13}	1.0812
夹角 θ	6.0000×10^{-4}	4.8298×10^{-10}	0.1004
水位 z	-3.9998×10^{-4}	0.0010	1.0512
污染物浓度 c	-2.0372×10^{-3}	-0.0041	1.3071

图8为通过传统的重叠投影法、改进的重叠投影法计算的一维、二维交接面与其下游相邻20 m断

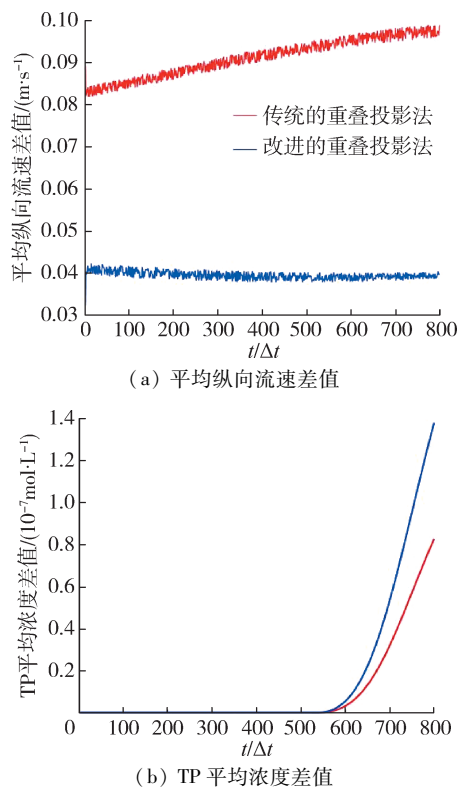


图8 二维上边界与下游20 m 相邻断面平均纵向流速差值和TP 平均浓度差值
Fig. 8 Mean longitudinal velocity difference and mean TP concentration difference between the upper boundary of two-dimensional area and the adjacent section 20 m downstream

面处的平均纵向流速差值和TP 平均浓度差值的变化,传统重叠投影法计算的平均纵向流速差值的平均值为0.091 m/s,改进的重叠投影法计算的平均值为0.040 m/s,实测的平均值为0.046 m/s,可见改进的重叠投影法使一维向二维过渡时流速等水力参数的突变性大大减小,保证了水动力耦合模型的精确性。由于流速和TP 浓度的非均匀分布(河中央流速大处TP 浓度高),改进后的水质耦合模型污染物TP 扩散速度稍微加快,更加符合实际情况。

由于传统的重叠投影法在处理一维、二维数值交换时,是将交接面上各物理量的一维数值赋予该截面所有二维控制体,即交接面上所有控制体上各物理量的数值均相等,而河流的实际情况是各物理量的数值在横截面上呈某种分布,因而导致了河网模型的解在一维、二维耦合处出现较大的突变。针对库区上游河流,本文通过引入分布函数的方法可实现减小此种突变的目的。

4 结 语

本文于一维、二维交接面处引入流速、水位等物理量的二次分布函数,通过最速下降法对分布函数中的系数进行训练,将训练得到的分布函数作为物理量从一维向二维过渡的连接,提高了耦合的精确性。桃林口库区上游青龙河流域实例验证结果表明,模型耦合的精确性得到了很大的提高,且计算的稳定性较高。相比较传统的重叠投影法,由于增加了最速下降法训练参数的过程,计算的时间复杂度有了较大提升,但随着并行计算算法和超级计算机的快速发展,改进的重叠投影法适用性会得到更大的提高。改进的模型适用于上中游河道狭窄、下游河面开阔,且在一维、二维交接面河道宽度变化较缓的河流发生的突发性污染场景。本文选用二次函数作为各物理量在交接面分布的拟合函数,寻找更精确的分布函数是下一步的研究方向。

参考文献:

[1] 韩龙喜,陆冬. 平原河网水流水质数值模拟研究展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 127-130. (HAN Longxi, LU Dong. Prospects of water quality numerical simulation for plain river network[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(2): 127-130. (in Chinese))
[2] 顾杰,胡成飞,李正尧,等. 秦皇岛河流-海岸水动力和水质耦合模拟分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(2): 1-11. (GU Jie, HU Chengfei, LI Zhengyao, et al. Coupling simulation and analysis of hydrodynamics and water quality in Qinhuangdao rivers and coastal waters [J].

- Marine Sciences,2017,41(2):1-11. (in Chinese))
- [3] 诸裕良,严以新,李瑞杰,等. 河网海湾水动力联网数学模型[J]. 水科学进展,2003,14(2):131-135. (ZHU Yuliang, YAN Yixin, LI Ruijie, et al. A coupled hydrodynamic numerical model for bay-river network[J]. Advances in Water Science,2003,14(2):131-135. (in Chinese))
- [4] LAI X, JIANG J, LIANG Q, et al. Large-scale hydrodynamic modeling of the middle Yangtze River Basin with complex river-lake interactions [J]. Journal of Hydrology,2013,492:228-243.
- [5] 陈文龙,宋利祥,邢领航,等. 一维-二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J]. 水科学进展,2014,25(6):848-855. (CHEN Wenlong, SONG Lixiang, XING Linghang, et al. A 1D-2D coupled mathematical model for numerical simulating of flood routine in flood protected zone[J]. Advances in Water Science,2014,25(6):848-855. (in Chinese))
- [6] 王秀杰,胡冰,苑希民,等. 洪水与风暴潮共同作用下的溃堤洪水一维、二维耦合模型及应用[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(5):43-49. (WANG Xiujie, HU Bing, YUAN Ximin, et al. 1-D and 2-D coupled model of the dambreak flood under the joint action of flood and storm surge and its application[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(5):43-49. (in Chinese))
- [7] 田福昌,张兴源,苑希民. 溃堤山洪淹没风险评估水动力耦合模型及应用[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):127-131. (TIAN Fuchang, ZHANG Xingyuan, YUAN Ximin. Hydrodynamic coupling model and its application for risk assessment of dike burst mountain flooding[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2018,29(4):127-131. (in Chinese))
- [8] 赖锡军,汪德燿. 非恒定水流的一维、二维耦合数值模型[J]. 水利水运工程学报,2002(2):48-51. (LAI Xijun, WANG Deguan. 1-D and 2-D coupling numerical model of unsteady flow [J]. Hydeo-Science and Enginneering,2002(2):48-51. (in Chinese))
- [9] 苑希民,薛文宇,冯国娜,等. 溃堤洪水分析的一、二维水动力耦合模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4):53-58. (YUAN Ximin, XUE Wenyu, FENG Guona, et al. A coupled one-and two-dimensional hydrodynamic model for analysis of levee-breach flood and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(4):53-58. (in Chinese))
- [10] 邵卫云,钟力云. 城市河网洪水过程的一维数值模拟[J]. 固体力学学报,2006(增刊1):132-137. (SHAO Weiyun, ZHONG Liyun. Numerical model of flooding flow in urban river net[J]. Acta Mechanica Solida Sinica,2006(Sup1):132-137. (in Chinese))
- [11] 张明亮,沈永明. 河网水动力及综合水质模型的研究[J]. 中国工程科学,2008(10):78-83. (ZHANG Mingliang, SHEN Yongming. Study on hydrodynamic and synthetic water quality model for river networks [J]. Strategic Study of CAE,2008(10):78-83. (in Chinese))
- [12] 黄碧珊. 天然河道二维正交贴体坐标系的生成[J]. 水运工程,1992(4):31-36. (HUANG Bishan. Generation of two-dimensional orthogonal body fitted coordinate system for natural river[J]. Port & Waterway Engineering,1992(4):31-36. (in Chinese))
- [13] CHAU K, JIN H. Two-layered, 2D unsteady eutrophication model in boundary-fitted coordinate system [J]. Marine Pollution Bulletin,2002,45(1):300-310.
- [14] 郑忠,胡燕,罗小刚,等. 基于交替方向隐式差分算法的连铸坯凝固传热模型[J]. 过程工程学报,2008(增刊1):152-156. (ZHENG Zhong, HU Yan, LUO Xiaogang, et al. Model of heat transfer of solidification in continuously cast slab based on alternating direction implicit algorithm [J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2008(Sup1):152-156. (in Chinese))
- [15] 宋策,刘玉玲. 近似正交的曲线网格生成技术研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(3):68-70. (SONG Ce, LIU Yuling. Research on generation technique of orthogonal curvilinear grid[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2012,23(3):68-70. (in Chinese))
- [16] 卢敏,靳甜甜,尹婧,等. 少资料河流一维水动力水质模型概化断面参数获取方法[J]. 科技导报,2017,35(16):74-83. (LU Min, JIN Tiantian, YIN Jing, et al. Determination of river cross section for 1-D water quality model in area without observation data [J]. Science & Technology Review,2017,35(16):74-83. (in Chinese))
- [17] 苏程佳,陈晓宏. 一种基于 Google Earth 影像的河道地形数据提取方法[J]. 水资源保护,2019,35(2):80-84. (SU Chengjia, CHEN Xiaohong. A new method for extracting river terrain data based on Google Earth image [J]. Water Resources Protection,2019,35(2):80-84. (in Chinese))
- [18] 邓志强,褚君达. 河流纵向分散系数研究[J]. 水科学进展,2001,12(2):137-142. (DENG Zhiqiang, ZHU Junda. Longitudinal dispersion coefficient in natural rivers [J]. Advances in Water Science,2001,12(2):137-142. (in Chinese))
- [19] 汪锋,钱庄,张周,等. 污水处理厂尾水对排放河道水质的影响[J]. 安徽农业科学,2016,44(14):65-68. (WANG Feng, QIAN Zhuang, ZHANG Zhou, et al. Impact of effluent from municipal sewage plant on the water qualities of receiving river [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(14):65-68. (in Chinese))

(收稿日期:2019-12-20 编辑:熊水斌)