

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.018

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

栾广学,侯精明,杨 露,李丙尧,郭敏鹏,杜颖恩,马 鑫

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要:为更好地模拟水污染事件中多组分污染物输移及衰减反应过程,全面耦合了基于图形处理器(GPU)加速技术的二维水动力模型与多组分污染物输移及衰减反应模型,通过改进模型源代码并在污染物输移控制方程中嵌入衰减项与反应项,建立了一个可应用于大区域复杂地形河道洪水演进全过程及多组分污染物输移和衰减反应的高性能耦合模型,同时引入 GPU 技术提升计算效率。将耦合模型应用于理想地形静水和两个复杂地形河道入流与溃坝算例的水质模拟,结果表明:多组分污染物输移及衰减反应过程在理想算例中的数值解与解析解基本吻合,在入流与溃坝算例中的模拟结果符合实际物理过程,模型运行速度快且计算效率高,可高效地模拟各类突发水污染事件并进行预警和评估。

关键词:多组分污染物;衰减反应;输移过程;GPU 并行计算技术;二维水动力模型

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0131-07

Multi-component pollutant transport and attenuation reaction model coupled with high-efficiency and high-precision hydrodynamic model // LUAN Guangxue, HOU Jingming, YANG Lu, LI Bingyao, GUO Minpeng, DU Ying'en, MA Xin (State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to better simulate the multi-component pollutant transport and attenuation reaction process in water pollution events, a two-dimensional hydrodynamic model based on the graphics processing unit (GPU) acceleration technology was fully coupled with the multi-component pollutant transport and attenuation reaction model. By improving the model source code, an attenuation term and a reaction term were embedded in the pollutant transport control equation. The high-performance coupling model can be applied to the whole process of flood evolution in rivers with complex terrain features in a large area and multi-component pollutant transport attenuation and mutual reaction processes. The GPU technology was used to accelerate calculation. The coupling model was applied to a static water case with an ideal terrain, river inflow with a complex terrain, and dam break with a complex terrain. The results show that the numerical and analytical solutions of the multi-component pollutant transport and attenuation reaction process in the ideal case are basically consistent. The results in the inflow and dam break cases are in line with the actual physical processes, and the model runs fast with high calculation efficiency. Thus, the model can be used to simulate accidental water pollution incidents reasonably and efficiently and conduct early warning and assessment.

Key words: multi-component pollutants; attenuation reaction; transport process; GPU parallel computing technology; two-dimensional hydrodynamic model

随着我国城镇化进程快速发展,各类水环境问题相继浮现,尤其是突发污染事故频繁发生^[1-4],不仅对城乡居民的饮用水安全和生态环境造成了严重

的影响,而且也影响了地区的经济发展^[5]。如 2012 年三友化工污染门事件、2012 年广西镉污染事件和 2014 年兰州自来水苯含量超标事件,对水市场、水

基金项目:中德合作交流项目(M-0427);国家自然科学基金(52009104,52079106)

作者简介:栾广学(1996—),男,博士研究生,主要从事污染物模拟与预测研究。E-mail: 963330152@qq.com

通信作者:侯精明(1982—),男,教授,博士,主要从事水文模型研究。E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

环境产生了严重的影响,造成大量的生命财产损失。为有效应对各类水污染事故,及时预测污染事故严重程度并开展预报预警工作,对污染事故进行模拟显得尤其重要^[6-10]。

在洪水演进及其伴随污染物输移模拟研究中,污染物的衰减反应与模型的计算精度和效率成为研究重点^[11-12]。以计算机为依托构建数值模型,精确掌握水体有机污染物的输移及衰减反应规律,是当前研究自然水体水动力过程和水环境特征的重要手段^[13-15]。目前,能够模拟水环境问题的水质模型有很多,如 SWAT、SWMM 和 MIKE21 FM 等^[16]。张京等^[17]应用 SWAT 模型对义乌江流域的径流、泥沙与水质过程进行了模拟。姚焕玫等^[18]基于 SWMM 模型构建了南宁市区地表径流及非点源污染精细化雨水径流模型。李添雨等^[19]采用 MIKE21 模型构建了沙河水库库区二维水动力水质模型,对沙河水库水量水质变化情况进行了模拟。以上模型均可对河流水库水质变化进行模拟,但模拟时存在输入地形网格精度低、计算效率不高等缺点^[20]。李一平等^[21]对地表水环境数学模型进行了系统的分析。陶亚等^[22]以深圳湾为例对突发污染物事故的输移扩散规律和影响因素进行了模拟分析。龙岩等^[23]采用 HEC-RAS 一维水动力水质模型对南水北调中线单组分水溶性突发污染事件的输移扩散规律进行了模拟预测研究。司鸽等^[24]对三峡库区突发污染物的输移及衰减规律进行了模拟分析。以上研究主要为单一污染物的输移特性,且采用的大多为国外开发的商业软件,无法根据实际模拟对象对源代码进行修改调整。由此可见,能够对多组分水污染事故输移及衰减反应过程进行模拟预测的国内自主开发的模型还不够成熟。

国内自主开发的水动力水质模型对流域水质模拟时必须解决的关键问题是提高水质模拟性能和功能。基于以上模型对污染物输移过程模拟的不足,本文全面耦合基于图形处理器(graphics processing unit, GPU)加速技术的二维水动力模型与多组分污染物输移及衰减反应的 Streeter-Phelps 模型,建立一个可应用于复杂地形河道入流与溃坝洪水演进全过程与多组分伴随污染物输移及衰减反应的高性能耦合模型(GPU accelerated surface water flow and associated transport, GAST 模型),以期合理高效地模拟各类突发水污染事件并进行预警和评估。

1 数值模型及求解方法

1.1 二维水动力模型

GAST 模型水动力模块控制方程为二维浅水方

程^[25],主要针对具有自由液面且以平面运动为主的水流,只考虑水平方向流速,忽略垂向运动。忽略了运动黏性项、紊流黏性项、风应力和科氏力的二维非线性浅水方程守恒形式为

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x \\ -gh\partial z_b/\partial y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix}$$

式中: t 为时间, s ; $\mathbf{q}$ 为变量矢量; h 为水深, m ; q_x 、 q_y 分别为 x 、 y 方向的单宽流量, m^2/s ; $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$ 分别为 x 、 y 方向的通量矢量; g 为重力加速度, m/s^2 ; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速, m/s ; $\mathbf{S}$ 是源项矢量; i 为入渗源项; z_b 为河床底面高程; C_f 为谢才系数, $C_f = gn^2/h^{1/3}$, 其中 n 为曼宁系数。

1.2 多组分污染物输移及衰减反应模型

污染物输移控制方程为二维对流扩散方程:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + q_{in} C_{in} - hR \quad (2)$$

式中: C 为污染物垂线平均质量浓度, mg/L ; D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向的扩散系数; q_{in} 为点源排放的流量强度, m/s ; C_{in} 为点源的物质垂线平均质量浓度, mg/L ; R 为转化项, 如污染物生化反应、生物作用等。

以 BOD-DO 耦合模型为例, 仅考虑衰减与考虑生化反应情况时转化项 R 可分别表示为

$$R = k_1 \rho(\text{BOD}) \quad (3)$$

$$R = k_1 \rho(\text{BOD}) - k_2 D \quad (4)$$

其中 $D = \rho_s(\text{DO}) - \rho(\text{DO})$

式中: k_1 为生化需氧量 BOD 耗氧速率, s^{-1} ; k_2 为溶解氧 DO 复氧速率, s^{-1} ; $\rho(\text{BOD})$ 为 BOD 质量浓度, mg/L ; D 为氧亏值, mg/L ; $\rho(\text{DO})$ 为 DO 质量浓度, mg/L ; $\rho_s(\text{DO})$ 为饱和溶解氧质量浓度, mg/L 。

1.3 数值方法

本文模型对水动力及污染物控制方程进行离散所采用的方法为基于 Godunov 格式的有限体积法, 该方法保证了守恒性且能有效解决溃坝激波等非连

续问题。采用可自动满足 Godunov 格式的 HLLC 近似黎曼求解器计算单元界面上的质量通量和动量通量以解决如冲击波等的间断问题^[26]。通过静水重构来实现干湿边界处全稳条件,采用格式自适应方法来保障干湿交替过程模拟的稳定性。为达到复杂地形上的全稳条件,底坡源项使用底坡通量法处理复杂地形引起的动量不守恒问题。采用 TVD-MUSCL 方法进行数值重构,并采用两步 Runge-Kutta 法进行时间步长的推进,以保证时间积分的二阶精度^[26]。离散网格类型为均匀结构网格。采用水深变化和水深值共同作为判别条件,以有效解决复杂地形干湿界面处的负水深和极端高流速等非物理现象所造成的计算失稳和物质动量的不守恒等问题。为提高模型的计算效率,通过 CUDA 语言自主编程实现 GPU 并行计算,以达到高速运算的目的^[27],图 1 为 GPU 加速计算流程图。

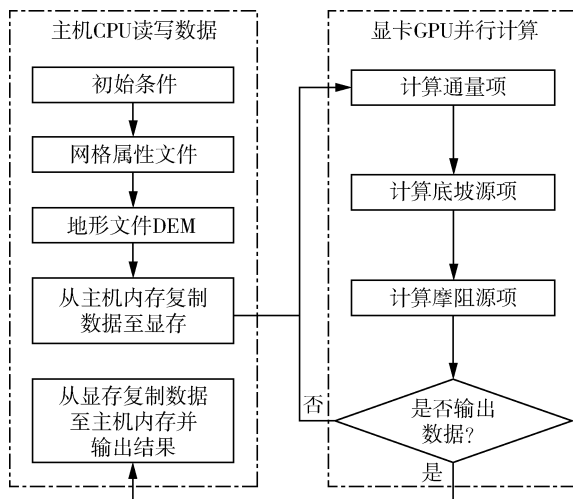


图 1 GPU 加速计算流程

Fig.1 GPU accelerated calculation flowchart

2 模型验证

为验证污染物输移及衰减模型的计算精度,本文通过建立理想地形算例对污染物衰减的数值解与解析解进行对比分析,模型处理扩散项的合理性已得到充分验证^[28],故模型验证忽略污染物的扩散项,仅对模型的衰减过程进行验证。构建一个边长为 50 m、底坡为 0 的正方形作为理想地形,以验证模型在静水状态下的污染物衰减过程。

2.1 解析解

式(3)与(4)中反应项 R 可看作水质变量的质量浓度对时间的全导数,DO 与 BOD 的反应项形式为

$$\frac{d\rho(\text{BOD})}{dt} = -k_1\rho(\text{BOD}) \quad (5)$$

$$\frac{d\rho_0(\text{DO})}{dt} = -k_1\rho(\text{BOD}) + k_2\rho(\text{DO}) \quad (6)$$

其边界条件为:在 $x = 0$ 处, $\rho(\text{BOD}) = \rho_0(\text{BOD})$, $\rho(\text{DO}) = \rho_0(\text{DO})$, $D = D_0$ 。因数值模拟时间步长很短,因此对上述反应项使用有限差分法求解可得一个步长内的解析解形式为

$$\rho(\text{BOD}) = \rho_0(\text{BOD}) - k_1\rho(\text{BOD})dt \quad (7)$$

$$\rho(\text{DO}) = \rho_0(\text{DO}) - k_1\rho_0(\text{DO})dt + k_2\rho_0(\text{DO})dt \quad (8)$$

式(7)为单组分衰减模型解析解,式(7)与(8)为多组分衰减反应模型解析解。

2.2 单组分衰减模型

单组分衰减模型验证算例四周均为固壁边界,点源污染物设置在 $x = 25 \text{ m}$ 、 $y = 25 \text{ m}$ 处,质量浓度为 1 mg/L 、初始水深为 1 m 、衰减系数取 0.1 ,计算点源污染物质量浓度的衰减变化,计算时长为 50 s 。图 2 为点源中心位置单组分污染物质量浓度在线性衰减情况下的变化趋势。结果表明:在线性衰减情况下,污染物质量浓度随时间的推移逐渐降低,因其与自身质量浓度有关,因此在污染物衰减速率不变时衰减量随污染物质量浓度的减小而减小;单组分污染物质量浓度的衰减过程数值解与解析解基本吻合,无明显数值震荡现象,表明模型稳定性好且精度高。

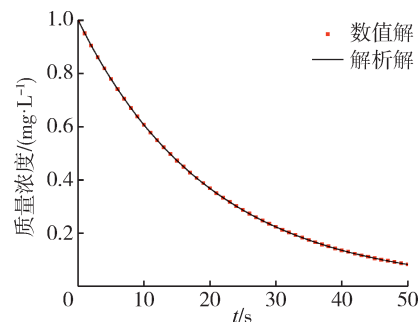


图 2 单组分污染物质量浓度衰减变化过程

Fig.2 Change process of attenuation of single-component pollutant concentration

2.3 多组分衰减反应模型

多组分衰减模型验证算例采用 BOD 和 DO 两种污染物组分耦合模型,忽略纵向离散作用,且不考虑饱和 DO 质量浓度对复氧速率的作用。多组分点源污染物位置设置在 $x = 25 \text{ m}$ 、 $y = 25 \text{ m}$ 处,将 BOD 和 DO 初始质量浓度均设置为 1 mg/L ,水深为 1 m ,BOD 耗氧系数取 0.05 ,DO 复氧系数取 0.02 ,计算多组分点源污染物质量浓度的衰减反应变化,计算时长为 50 s 。

静水流场中多组分污染物衰减反应模拟结果对比与数值解及解析解部分计算结果如图 3 所示。由

图3可见,在忽略对流项与扩散项的情况下,BOD和DO相互反应的数值解与解析解在模拟时间内的任何时刻相对差值均极小。计算得出,BOD数值解与分析值的相对误差为1.8%;DO数值解与解析解的相对误差为1.0%。显然,模型模拟多组分污染物的数值模拟结果与理论值相比偏差较小,在允许范围内,具有较高的稳定性和精度。模型实现了多组分污染物衰减反应功能,BOD的质量浓度逐渐降低且衰减速率逐渐变缓;DO质量浓度在26s之前降低且衰减速率逐渐变小,在26s达到转折点,随后其质量浓度开始回升,且回升速率逐渐增加。本算例BOD质量浓度的衰减只与其自身质量浓度有关,不受DO质量浓度影响,且为线性衰减,故其质量浓度逐渐降低且总量衰减速度逐渐变缓;DO质量浓度的变化受BOD质量浓度的影响且其复氧速率与其自身浓度有关,BOD质量浓度较大时,其耗氧速率较DO的复氧速率大,故DO质量浓度降低,因BOD耗氧速率比其自身的衰减速率小,因此随着BOD质量浓度的减小,其耗氧速率逐渐接近DO的复氧速率,并且在26s时刻相等,DO质量浓度到达最低值,随后BOD质量浓度继续降低,耗氧速率越来越微弱,故复氧速率逐渐占主导地位,DO质量浓度开始回升且回升速率越来越快。

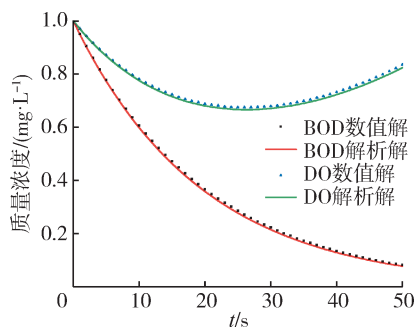


图3 静水流场中多组分污染物相互反应的数值解与解析解对比

Fig.3 Comparison of numerical and analytical solutions of multi-component pollutant interaction in static water flow field

3 Toce 河道多组分点源输移及衰减过程模拟

对 Toce 河道上释放的多组分点源污染物输移及衰减过程进行模拟,河道 DEM 数据分辨率为 0.05 m,网格单元共计 206 640 个。河道数字地形高程如图4所示,左边界为入流口,入流宽度设置为 3.4 m,右边界为自由出流的开边界,其余为闭边界。入流流量过程线如图5所示,河道曼宁系数取 0.0162 s/m^{1/3},初始水深设为 0 m,点源位置设置在 $x = 7.868\text{ m}$ 、 $y = 5.882\text{ m}$ 处,如图4所示。点源同时

释放两种污染物,用 C1 和 C2 表示,排放质量浓度为 1 mg/L,强度为 0.8 m/s,设置 C1 衰减系数为 0.3 s⁻¹,C2 无衰减,污染物随水流向下游推进。

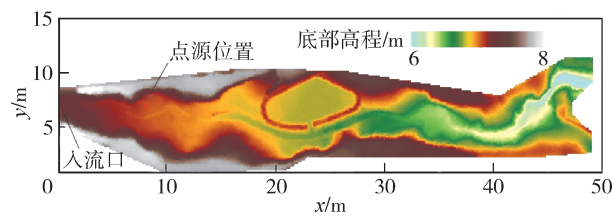


图4 Toce 河道数字地形高程及点源位置
Fig.4 Digital terrain elevation and point source location of the Toce River

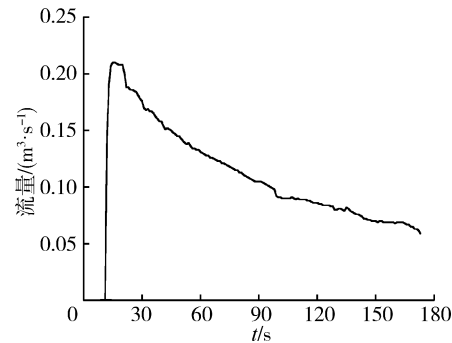


图5 入流流量过程线
Fig.5 Inflow hydrograph

采用本文模型模拟计算 3 min 内的水流演进及其伴随污染物输移及衰减过程。在 $t = 20\text{ s}$ 和 $t = 50\text{ s}$ 时的水深模拟结果如图6所示,污染物有衰减与无衰减输移在 $t = 20\text{ s}$ 、 40 s 、 60 s 、 80 s 时的质量浓度分布情况如图7所示,多组分污染物在 $x = 11.125\text{ m}$ 、 $y = 5.825\text{ m}$ 处的有衰减与无衰减过程质量浓度对比如图8所示。

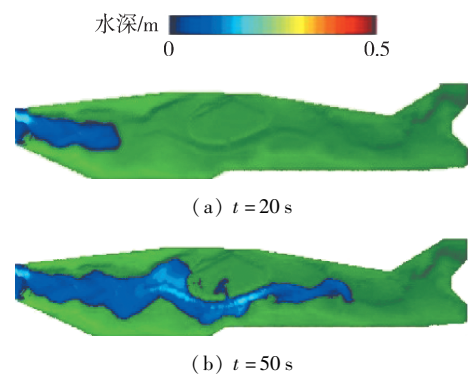


图6 不同时刻的水深分布
Fig.6 Water depth distribution at different time

由图6可知水流向下游推进速度很快。图7表明,在 $t = 20\text{ s}$ 时水流即流过点源位置,污染物随着水流向下游推进,质量浓度逐渐降低。在 $t = 40\text{ s}$ 时,污染物随水流向周围低洼处输移;在 $t = 60\text{ s}$ 时,部分水流进入旁侧低洼区,污染物随水流开始分流;在 $t = 80\text{ s}$ 时,污染物即将随水流从河道下游边界流

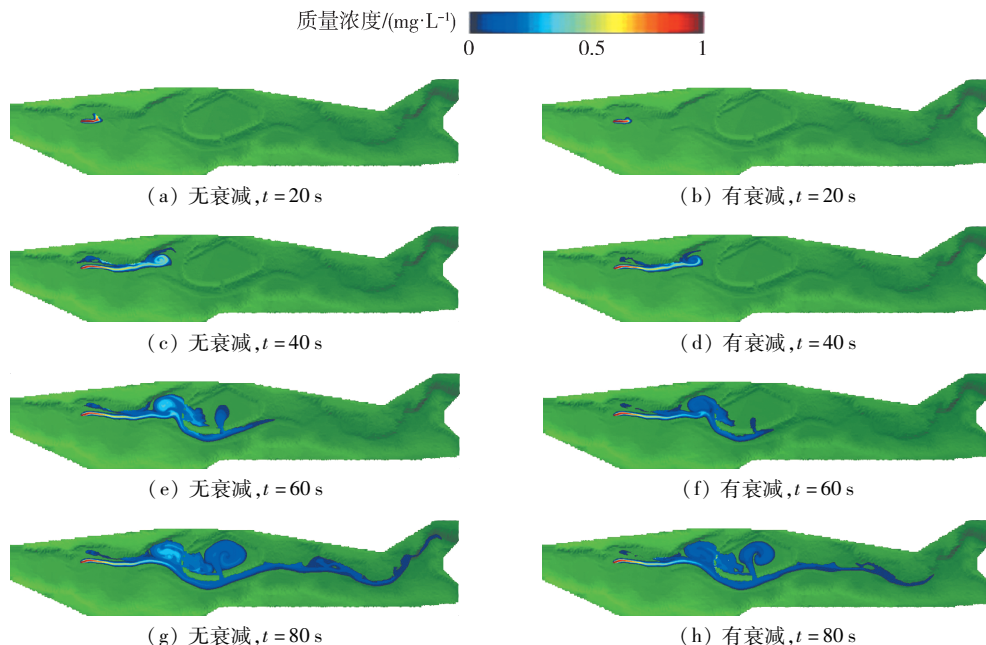


图7 Toce 河道污染物无衰减与有衰减输移质量浓度分布

Fig.7 Distribution of pollutant concentration without and with attenuation transport in the Toce River

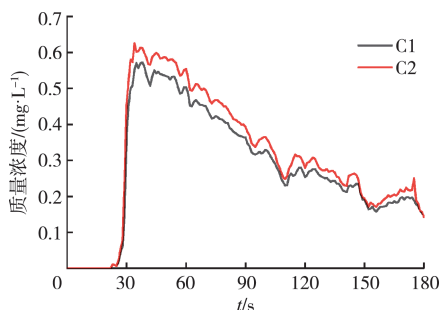


图8 多组分污染物有衰减与无衰减输移过程质量浓度对比

Fig.8 Comparison of concentrations of multi-component pollutants with and without attenuation

出,污染物 C1 随水流迁移过程中因自身的衰减,质量浓度明显低于无衰减情况,C1 到达下游出口位置时间明显较 C2 延后。图 7 也显示了污染物在点源位置释放并向下游输移的整个过程,污染物分布与干湿界面相匹配,在复杂地形的河道内始终随水流向下游输移,由此表明:点源污染物排放不仅会造成严重的水体污染,而且对下游水体的影响很大。图 8 表明,在 $x = 11.125$ m、 $y = 5.825$ m 处,C1 的质量浓度始终低于 C2 的质量浓度,由于复杂地形河道的影响,C1 与 C2 的质量浓度差值呈不规则趋势。

4 Malpasset 溃坝多组分点源输移及衰减过程模拟

本节模拟计算 Malpasset 河道溃坝水流运动及其伴随污染物的输移、衰减过程。河道数字地形高程如图 9 所示,网格精度为 10 m,网格单元共计

1 581 714 个,坝前水位设置为 100 m,多组分点源污染物排放口设置于 $x = 5.257$ km、 $y = 6.685$ km 处,如图 9 所示,排放质量浓度为 1 mg/L,强度为 1 m/s,河道曼宁系数取 $0.0162 \text{ s/m}^{1/3}$,点源同时释放两种污染物,用 C3 和 C4 表示,点源排放质量浓度为 1 mg/L,强度为 0.8 m/s,设置 C3 衰减系数为 0.0001 s^{-1} ,C4 无衰减。图 10 为 $t = 300$ s 和 $t = 1800$ s 时的水深分布,图 11 为污染物无衰减与衰减输移($t = 300$ s,1 500 s,3 000 s)质量浓度分布。

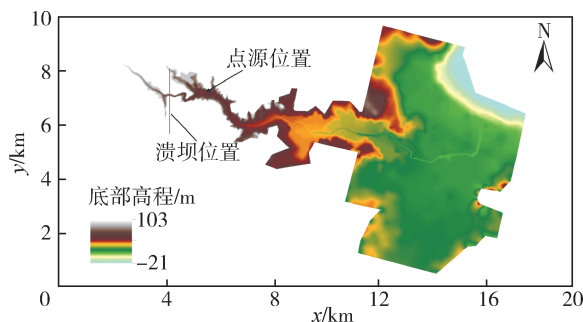


图9 Malpasset 河道数字地形高程及点源位置

Fig.9 Digital terrain elevation and location of point source of the Malpasset River

由图 10 可见,溃坝发生后,水流迅速向下游推进。由图 11 可见,多组分污染物随溃坝水流向下游推进,1 500 s 时即到达下游位置。河道下游 C3 的质量浓度明显小于 C4 的质量浓度,由此表明污染物因其自身的衰减反应,随水流到达下游时,质量浓度削减效果明显。本文模型在 GTX1080 计算机上运行 0.37 h 即可完成 2 h 水流及污染物输移、衰减反应过程模拟。

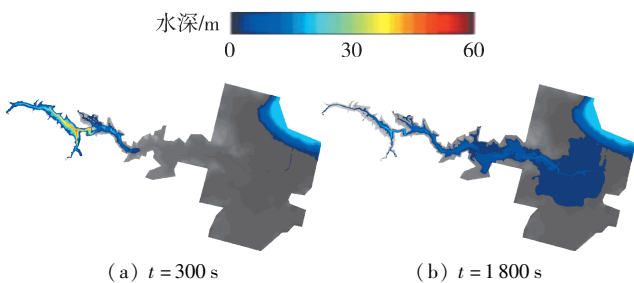


图 10 不同时刻水深分布

Fig. 10 Water depth distribution at different time

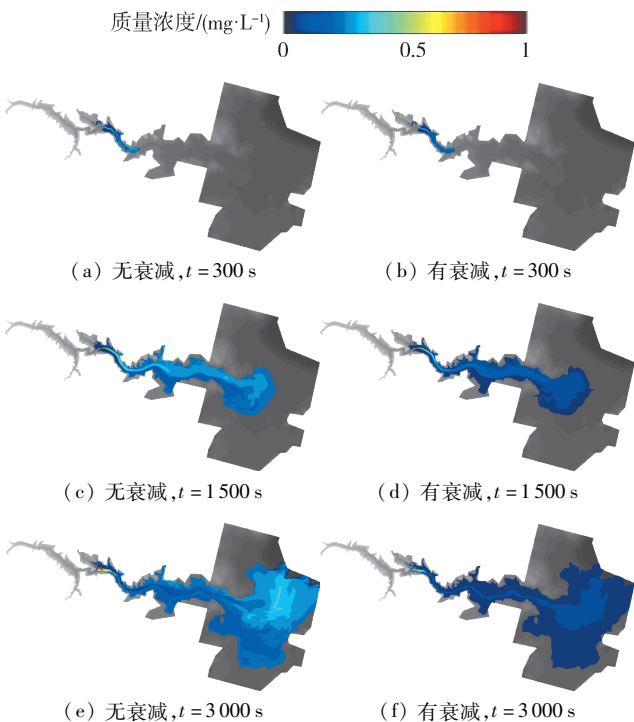


图 11 Malpasset 河道污染物无衰减与有衰减输移质量浓度分布

Fig. 11 Concentration distribution of pollution without and with attenuation transport in the Malpasset River

5 结 语

本文将基于 GPU 加速技术的二维水动力模型与多组分污染物输移及衰减反应模型进行耦合,构建了一个可应用于复杂地形河道入流与溃坝洪水演进全过程与多组分污染物输移及衰减反应的高性能耦合模型。模型实现多组分污染物输移、衰减反应模拟功能,适用于大区域复杂地形河道的水质模拟;引入 GPU 加速技术提高了模拟效率,计算 1 581 714 个均匀结构网格 2 h 的溃坝及污染物输移、衰减反应模拟,仅需运行 0.37 h。

通过对理想地形及两个复杂地形河道的水质模拟,结果表明,模型计算结果与解析解基本吻合,在入流与溃坝算例中的模拟结果符合实际的物理过程,运行速度快且计算效率高,具有较好的鲁棒性,能高效

地模拟各类水污染事件并进行预警和评估,可为敏感水域水环境的治理和保护提供技术与数据支撑。

参考文献:

- [1] 许静,王永桂,陈岩,等. 中国突发水污染事件时空分布特征[J]. 中国环境科学,2018,38(12):4566-4575. (XU Jing, WANG Yonggui, CHEN Yan, et al. Spatial distribution and temporal variation of sudden water pollution incidents in China[J]. China Environmental Science,2018,38(12):4566-4575. (in Chinese))
- [2] 李春晖,田雨桐,赵彦伟等. 突发水污染风险评价与应急对策研究进展[J]. 农业环境科学学报,2020,39(6):1161-1167. (LI Chunhui, TIAN Yutong, ZHAO Yanwei, et al. Research progress on risk assessment and emergency countermeasures of sudden water pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science,2020,39(6):1161-1167. (in Chinese))
- [3] 陶亚,任华堂,夏建新. 突发水污染事故不同应对措施处置效果模拟[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(2):203-213. (TAO Ya, REN Huatang, XIA Jianxin. Effect analysis of different emergency measures for accidental water pollution[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2013,21(2):203-213. (in Chinese))
- [4] 徐小钰,朱记伟,李占斌,等. 国内外突发性水污染事件研究综述[J]. 中国农村水利水电,2015(6):1-5. (XU Xiaoyu, ZHU Jiwei, LI Zhanbin, et al. An overview of the domestic and foreign research on accidental water pollution events[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(6):1-5. (in Chinese))
- [5] ZHANG Wenjing, LIN Xueyu, SU Xiaosi. Transport and fate modeling of nitrobenzene in groundwater after the Songhua River pollution accident [J]. Journal of Environmental Management,2010,91(11):2378-2384.
- [6] 翁士创,杨静,廉浩. 感潮河网区突发性水污染事故预警预报关键技术探讨[J]. 水文,2009,29(增刊1):137-140. (WENG Shichuang, YANG Jing, LIAN Hao. Discussion on key technology for forecasting and warning unexpected water pollution accidents in tide river network [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29 (Sup1): 137-140. (in Chinese))
- [7] 王琳,吕永龙,贺桂珍,等. 我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建[J]. 环境科学,2014,35(10):4009-4014. (WANG Lin, LYU Yonglong, HE Guizhen, et al. Construction of index system for early warning of persistent organic pollutants (POPs) pollution incidents in China[J]. Environmental Science, 2014, 35 (10): 4009-4014. (in Chinese))
- [8] 王璐,谢能刚,李锐,等. 基于元胞自动机的水体污染带扩散漂移仿真[J]. 水利学报,2009,40(4):481-485. (WANG Lu, XIE Nenggang, LI Rui, et al. Simulation of

- drift-diffusion of water pollution zone based on cellular automata[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (4): 481-485. (in Chinese))
- [9] 张影, 杨晓东, 贾子璇, 等. 基于改进重叠投影法的空间耦合水污染评估模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 128-134. (ZHANG Ying, YANG Xiaodong, JIA Zixuan, et al. Space coupling water pollution evaluation model based on improved overlapping projection method [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 128-134. (in Chinese))
- [10] 张婷, 徐彬鑫, 康爱卿, 等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (3): 11-19. (ZHANG Ting, XU Binxin, KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (3): 11-19. (in Chinese))
- [11] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望[J]. 湖泊科学, 2012, 24 (2): 169-177. (CAI Qinghua, SUN Zhiyu. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: progress and prospects[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24 (2): 169-177. (in Chinese))
- [12] 许栋, 王迪, 及春宁, 等. 海南南渡江下游二维水动力及水生态数值模拟[J]. 环境科学研究, 2017, 30(2): 214-223. (XU Dong, WANG Di, JI Chunling, et al. Numerical simulation of two-dimensional hydrodynamics and aquatic ecology of the lower reach of Nanduijiang River in Hainan Island, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(2): 214-223. (in Chinese))
- [13] 侯俊, 许晓雅, 程芳, 等. 微塑料与有机污染物的相互作用及环境行为研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48 (1): 22-28. (HOU Jun, XU Xiaoya, CHENG Fang, et al. Research progress on interaction and environment behavior between microplastics and organic pollutants [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 22-28. (in Chinese))
- [14] 朱寒松, 董增川, 曲兆松, 等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护, 2019, 35 (2): 32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 32-36. (in Chinese))
- [15] 王忠慧, 贡力, 康春涛, 等. 基于 BAS 算法的河渠突发水污染溯源[J]. 水资源保护, 2020, 36 (5): 87-92. (WANG Zhonghui, GONG Li, KANG Chuntao, et al. Tracing source of sudden water pollution in rivers and canals based on BAS algorithm [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 87-92. (in Chinese))
- [16] LI Jiake, DENG Chenning, LI Huaian, et al. Hydrological environmental responses of LID and approach for rainfall pattern selection in precipitation data-lacked region [J]. Water Resources Management, 2018, 32 (10): 3271-3284.
- [17] 张京, 郑华, 何梦男, 等. 流域水环境污染模拟及关键源区鉴别: 以义乌江流域为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15 (4): 1167-1177. (ZHANG Jing, ZHENG Hua, HE Mengnan, et al. Simulation of water environmental pollution and identification of key source areas: A case study of Yiwu River Basin [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15 (4): 1167-1177. (in Chinese))
- [18] 姚焕玫, 卢燕南, 王石. 基于 SWMM 模型的南宁市海绵城市建设优化模拟[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 102-109. (YAO Huanmei, LU Yannan, WANG Shi. An optimizing simulation study of sponge city construction in Nanning based on SWMM [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 102-109. (in Chinese))
- [19] 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. (LI Tianyu, LI Zhenhua, HUANG Bingbin, et al. Simulation on water quantity and quality of Shahe Reservoir by MIKE21 model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1): 293-300. (in Chinese))
- [20] 郭敏鹏, 侯精明, 付德宇, 等. 面源污染输移过程高性能数值模拟方法[J]. 环境工程, 2020, 38 (8): 160-166. (GUO Minpeng, HOU Jingming, FU Deyu, et al. High performance numerical simulation method for non-point source pollution transfer process [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(8): 160-166. (in Chinese))
- [21] 李一平, 施媛媛, 姜龙, 等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. 水资源保护, 2019, 35 (4): 1-8. (LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, et al. Advances in surface water environment numerical models [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 1-8. (in Chinese))
- [22] 陶亚, 雷坤, 夏建新. 突发水污染事故中污染物输移主导水动力识别: 以深圳湾为例[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 888-897. (TAO Ya, LEI Kun, XIA Jianxin. Main hydrodynamic factors identification for pollutant transport in sudden water pollution accident in Shenzhen Bay [J]. Advances in Water Science, 2017, 28 (6): 888-897. (in Chinese))
- [23] 龙岩, 徐国宾, 马超, 等. 南水北调中线突发水污染事件的快速预测[J]. 水科学进展, 2016, 27 (6): 883-889. (LONG Yan, XU Guobin, MA Chao, et al. Study on the rapid prediction of sudden water pollution for South-to-North Water Transfer Project [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 883-889. (in Chinese))

(下转第 161 页)

- [17] JIA X, CHEN J, SHEN J, et al. Synthesis of hollow structural hydroxyapatite with different morphologies using calcium carbonate as hard template [J]. *Advanced Powder Technology*, 2018, 29(7): 1562-1570.
- [18] JENIFER A, SENTHILARASAN K, ARUMUGAM S, et al. Investigation on antibacterial and hemolytic properties of magnesium-doped hydroxyapatite nanocomposite [J]. *Chemical Physics Letters*, 2021, 771: 138539.
- [19] SONG C, ZHAO L, QI M, et al. Hydrothermal preparation and properties of $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{HAP}$ composite photocatalyst [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2020, 36(3): 521-528.
- [20] ZHANG S, GU X, ZHAO Y, et al. Effect of annealing temperature and time on structure, morphology and visible-light photocatalytic activities Ag_3PO_4 microparticles [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2015, 201: 57-65.
- [21] DHAND V, RHEE K Y, PARK S J. The facile and low temperature synthesis of nanophase hydroxyapatite crystals using wet chemistry [J]. *Materials Science & Engineering: C*, 2014, 36: 152-159.
- [22] 蔡汝汝, 杨云, 孙珍珍, 等. 牡蛎壳纳米羟基磷灰石的制备与表征 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2010, 49(5): 666-670. (CAI Ruru, YANG Yun, SUN Zhenzhen, et al. Preparation and characterization of nano-hydroxyapatite from oyster shell [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2010, 49(5): 666-670. (in Chinese))
- [23] PALIERSE E, HÉLARY C, KRAFFT J M, et al. Baicalein-modified hydroxyapatite nanoparticles and coatings with antibacterial and antioxidant properties [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2021, 118: 111537.
- [24] CAO J, LUO B, LIN H, et al. Visible light photocatalytic activity enhancement and mechanism of $\text{AgBr}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ hybrids for degradation of methyl orange [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 217/218: 107-115.
- [25] SULAEMAN U, SUHENDAR S, DIASTUTI H, et al. Design of Ag_3PO_4 for highly enhanced photocatalyst using hydroxyapatite as source of phosphate ion [J]. *Solid State Sciences*, 2018, 86: 1-5.
- [26] 宋萃, 戚明颖, 刘金芳, 等. Ag_3PO_4 /羟基磷灰石复合光催化剂的制备及其对亚甲基蓝的高效降解 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(6): 1418-1425. (SONG Cui, QI Mingying, LIU Jinfang, et al. Preparation of $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{HAP}$ composite photocatalyst and its efficient degradation of methylene blue [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(6): 1418-1425. (in Chinese))
- [27] 周婧, 原金海, 奚锐, 等. 钙钛矿型 CaFeO_3 的制备及其光催化性能研究 [J]. *重庆科技学院学报 (自然科学版)*, 2021(23): 105-110. (ZHOU Jing, YUAN Jinhai, XI Rui, et al. Preparation of perovskite CaFeO_3 and study on its photocatalytic performance [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021(23): 105-110. (in Chinese))
- [28] CHANKHANITTHA T, SOMAUDON V, PHOTIWAT T, et al. Preparation, characterization, and photocatalytic study of solvothermally grown CTAB-capped Bi_2WO_6 photocatalyst toward photodegradation of rhodamine B dye [J]. *Optical Materials*, 2021, 117: 111183.
- [29] 张连科, 王畅, 李玉梅, 等. $\text{Vis}/\text{LaFeO}_3/\text{PDS}$ 复合高级氧化体系降解亚甲基蓝的机制 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(6): 142-149. (ZHANG Lianke, WANG Chang, LI Yumei, et al. Mechanism of complex superior oxidation system $\text{Vis}/\text{LaFeO}_3/\text{PDS}$ for methylene blue degradation [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6): 142-149. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-03-20 编辑: 王芳)

(上接第 137 页)

- [24] 司鹤, 毕海普. 数值分析三峡库区突发事故污染物运移特性 [J]. *环境科学*, 2008(9): 2432-2436. (SI Hu, BI Haipu. Numerical analysis on pollutant decline in the emergency of water pollution in Three Gorges [J]. *Environmental Science*, 2008(9): 2432-2436. (in Chinese))
- [25] HOU Jingming, SIMONS Franz, MAHGOUB Mohamed, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2013, 257(15): 126-149.
- [26] 侯精明, 李桂伊, 李国栋, 等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(2): 96-107. (HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(2): 96-107. (in Chinese))
- [27] 龚佳辉, 侯精明, 薛阳, 等. 城市雨洪过程模拟 GPU 加速计算效率研究 [J]. *环境工程*, 2020, 38(4): 164-169. (GONG Jiahui, HOU Jingming, XUE Yang, et al. Computational efficiency of GPU acceleration in numerical simulation of urban rain-flood process [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(4): 164-169. (in Chinese))
- [28] 石宝山, 侯精明, 夏军强, 等. 基于 GPU 加速的污染物输移高分辨率数值模型 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2020, 35(6): 759-766. (SHI Baoshan, HOU Jingming, XIA Junqiang, et al. High-resolution numerical model of pollutant transport based on GPU acceleration [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(6): 759-766. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-07 编辑: 俞云利)