

基于格子 Boltzmann 的植被对河道的流场和污染物输运的影响研究

黄德法¹, 杨佳刚², 欧阳竞一³, 高 轩⁴

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司, 湖北 武汉 430070;

3. 四川省眉山市东坡区人民政府办公室, 四川 眉山 620010;

4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为了研究植被分布对河道输水能力及对污染物输运能力的影响机制, 基于格子 Boltzmann 数值模拟方法, 将植被的阻碍作用概化为植被粗糙率, 采用 D2Q16 多速度浅水模型模拟计算植被区间隔分布的河道中的流场, 再将计算得到的流场信息与 D2Q5 对流扩散模型得到的污染物浓度场耦合, 研究植被对流场以及污染物输运的影响。结果表明: 河道纵断面植被区流速降幅、过渡区和中心区流速增幅均与植被密度呈线性正相关, 横断面中心区流速远大于过渡区和植被区, 植被区和中心区流速呈直线分布, 且过渡区流速与植被密度呈二次幂相关, 污染物浓度的衰减幅度与植被区间隔距离呈正相关性。植被能够改变污染物输运的轨迹, 且能有效减少河道下游污染物的浓度。该研究可为城市人工生态景观建设中河道内人工布置植被的适宜密度和间隔提供参考。

关键词: 数值模拟; 浅水方程; 对流扩散模型; 格子 Boltzmann; 污染物输运

中图分类号: TV14

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)06—0181—09

Effects of Vegetation on the Flow Field and Pollutant Transport of River Channel Based on Lattice Boltzmann

HUANG Defa¹, YANG Jiagang², OUYANG Jingyi³, GAO Xuan⁴

(1. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311122, China;

2. Hubei Water Conservancy and Hydropower Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430070, China;

3. People's Government Office of Dongpo District, Meishan, Sichuan 620010, China;

4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Analyzing the impacts of vegetation distribution on the water transport capacity of rivers and the transport capacity of solutes such as pollutants is of great significance for reducing pollutants in downstream rivers and protecting the ecological environment of rivers. Based on the lattice Boltzmann numerical simulation method, the obstruction effect of vegetation is generalized as vegetation roughness, and the D2Q16 multi-velocity shallow water model is used to simulate and calculate the flow field in the river channel with spaced vegetation zones. The calculated flow field information is then combined with the D2Q5 convection-diffusion. The pollutant concentration field obtained by the model is coupled to study the influence of vegetation on the flow field and pollutant transport. The results are as follows. The flow velocity decrease in the vegetation area of the river longitudinal section and the flow velocity increase in the transition area and central area are linearly positively correlated with the vegetation density. The flow velocity in the central area of the cross section is much greater than the transition area and vegetation area. The flow velocity in the vegetation area and the central area are linearly distributed. Moreover, the flow velocity in the transition zone has a quadratic

收稿日期: 2023-08-24

修稿日期: 2023-09-17

作者简介: 黄德法(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事水工水力学等方面研究工作。E-mail: huang_df@hdec.com

通讯作者: 高 轩(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为水工水力学。E-mail: gaoxuan@nwfau.edu.cn

power correlation with the vegetation density, and the attenuation amplitude of the pollutant concentration has a positive correlation with the distance between vegetation zones. Vegetation can change the trajectory of pollutant transport and can effectively reduce the concentration of pollutants downstream of the river. This study can provide a reference for the appropriate density and spacing of artificially arranged vegetation in river channels in the construction of urban artificial ecological landscapes.

Keywords: numerical simulation; shallow water equation; convection-diffusion model; lattice Boltzmann; pollutant transport

近年来,河流开发的程度越来越大,造成了河流生态系统破坏,出现了越来越多的河流污染问题,河流的修复和保护成为了人们越来越关心的问题^[1],而植被在河流生态治理中有十分积极的作用,其对水流的物理阻挡作用会改变水流阻力和水流结构^[2-3],减轻了水流对河岸的冲刷作用,而水流结构的变化会影响河道中颗粒物、污染物、营养物质等溶质的输运,从而对水质和河床形态造成影响。但自然界河流中植被的分布方式往往十分复杂,研究复杂植被的分布方式对河道流场和污染物扩散输移的影响非常必要。

一些学者通过在水渠中移栽植被或者利用人工模拟植被的实验方法,研究了植被对明渠水流的影响^[4-5]。但随着计算机技术的不断发展,数值模拟方法由于其方便、快捷以及能模拟较复杂工况的优点,逐渐地成为了研究含植被水流以及污染物输移扩散的重要方法^[6-7]。惠二青^[8]分别将植被的作用概化为绕流拖曳阻力和曼宁底部摩阻,建立了水深平均的二维水流数值模型。鲁俊等^[9]采用分布算法以及有限差分求解控制方程,对含植被水渠中水流的流速和切应力分布进行了数值模拟。白凤朋等^[10]基于 Godunov 型有限体积法,将植被的作用视为一个拖曳力,建立了一个模拟浅水植被水流的二维数学模型。槐文信等^[11]则将植被的作用等效为河床的附加阻力,推导出了植被区域的等效曼宁系数以模拟植被水流的流速分布。

以上求解浅水方程以及对流扩散方程的传统数值模拟方法主要包括有限体积法、有限差分法、有限元法等,这些方法具有良好的模拟效果,但在效率或精度方面仍有待改进。除了这些传统数值模拟方法外,格子 Boltzmann 方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)在近年来成为了计算流体力学领域中比较重要的方法之一。与传统方法基于连续介质假定描述宏观流体运动不同,LBM 方法是一种基于介观模拟尺度的计算流体力学方法,具有介于微观分子动力学模型和宏观连续模型的特点^[12-13]。其具有易编程、计算效率高、并行化计算和便于处理复杂边界等

优势。这些优势使得可以将格子 Boltzmann 方法作为处理浅水流动和对流扩散的一个重要工具^[14-17],但目前相关研究相对较少。

本文使用基于离散 Boltzmann 方法的 D2Q16 多速度浅水模型和基于格子 Boltzmann 方法的 D2Q5 对流扩散模型来研究植被间隔覆盖情况下植被的不同分布条件对流场和污染物输运的影响。

1 河道流场及污染物输运模型

使用基于离散 Boltzmann 方法的 D2Q16 多速度浅水模型和基于格子 Boltzmann 方法的 D2Q5 模型,计算含植被河道的流场和污染物浓度场分布以及研究复杂分布植被对河道流场和污染物输运的影响。模型计算步骤如图 1。

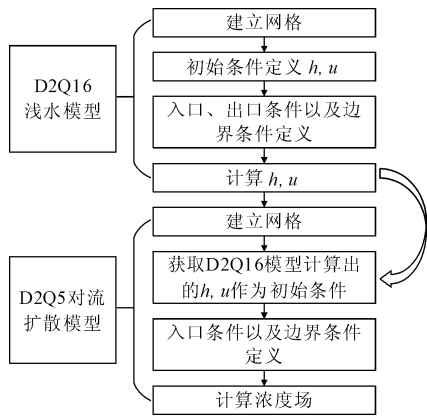


图 1 模型计算步骤

1.1 D2Q16 多速度浅水模型

单松弛因子的 Boltzmann 浅水控制方程为^[18-19]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \frac{\partial f}{\partial r} + F \frac{\partial f}{\partial c} = \frac{f^{eq} - f}{\tau} \tag{1}$$

$$f^{eq} = \frac{1}{\pi g} \exp \left[\frac{(c - V) \cdot (c - V)}{gh} \right] \tag{2}$$

式中: f 为粒子的分布函数 $f(r, c, t)$; F 为作用力加速度; f^{eq} 为平衡分布函数; τ 为松弛因子; g 为重力加速度; V 表示水深方向上的平均速度; h 为水深;分布函数 $f(r, c, t)$ 的物理意义为 t 时刻以 $r = (x, y)$ 为中心

的单位面积内,以速度 $c = (c_x, c_y)$ 为中心的单位粒子速度区间内的总粒子数量。宏观变量可以通过对分布函数在粒子速度区间内积分得到。

当使用离散玻尔兹曼模型时,为方便计算,采用无量纲变量表示,即:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{r} = \frac{r}{h_0}, \\ \hat{c} = \frac{\sqrt{2}c}{\sqrt{gh_0}}, \\ \hat{t} = \frac{\sqrt{gh_0}t}{\sqrt{2}h_0}, \\ \hat{Q} = \frac{Q\sqrt{2}}{h_0^2\sqrt{gh_0}}, \\ \hat{V} = \frac{\sqrt{2}V}{\sqrt{gh_0}}, \\ \hat{h} = \frac{h}{h_0}, \\ \hat{F} = \frac{2F}{g}, \\ \hat{f} = f\frac{g}{2}, \\ \hat{v} = \frac{v}{v_0}, \\ \hat{P} = \frac{P}{P_0} = \hat{h}^2 \end{array} \right. \quad (3)$$

式中:顶部带小角符号的表示无量纲化后的变量; r 为物理长度; h_0 为数值模拟中的特征水深; Q 表示流量; v 为运动粘性系数; v_0 为参考运动粘性系数; P_0 为参考压强; P 为压强。

因此可以将式(1) 和式(2) 转换为无量纲的形式,同时引用一个“Knudsen”数如下:

$$\kappa = \frac{v_0\sqrt{gh_0/2}}{P_0} = \frac{v_0\sqrt{gh_0/2}}{gh_0^2/2} \quad (4)$$

弗劳德数则变为:

$$Fr = \frac{\hat{V}}{\sqrt{2\hat{h}}} \quad (5)$$

式中: $\hat{V}$ 表示无量纲速度。

引入无量纲弛豫时间 τ' :

$$\tau' = \frac{\kappa}{\hat{h}} \quad (6)$$

式(1) 变为如下形式:

$$\frac{\partial \hat{f}}{\partial \hat{t}} + \hat{c} \frac{\partial \hat{f}}{\partial \hat{r}} + \hat{F} \frac{\partial \hat{f}}{\partial \hat{c}} = \frac{\hat{h}}{\kappa} (\hat{f}^{eq} - \hat{f}) \quad (7)$$

通过 Hermite 展开和 Gauss 型积分对粒子速度区间进行离散,得到离散 Boltzmann 多速度浅水模型的控制方程^[18]:

$$\frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{t}} + \hat{c}_\alpha \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{r}} = -\frac{1}{\tau'} (\hat{f}_\alpha - \hat{f}_\alpha^{eq}) + \hat{F}_\alpha \quad (8)$$

粒子 i 的平衡分布函数的表达式为:

$$\hat{f}_\alpha^{eq} = \hat{h}\omega_\alpha \left[\begin{array}{l} 1 + \hat{c}_i \hat{V}_i + \frac{1}{2}((\hat{c}_i \hat{V}_i)^2 - \hat{V}_i \hat{V}_i + (\hat{h} - 1)(\hat{c}_i \hat{c}_i - 2)) \\ + \frac{\hat{c}_i \hat{V}_i}{6}((\hat{c}_i \hat{V}_i)^2 - 3\hat{V}_i \hat{V}_i + 3(\hat{h} - 1)(\hat{c}_i \hat{c}_i - 4)) \\ + \frac{1}{24}((\hat{c}_i \hat{V}_i)^4 - 6(\hat{V}_i \hat{c}_i)^2 \hat{V}_i \hat{V}_i + 3(\hat{V}_i \hat{V}_i)^2) \\ + \frac{\hat{h} - 1}{4}((\hat{c}_i \hat{c}_i - 4)((\hat{V}_i \hat{c}_i)^2 - \hat{V}_i \hat{V}_i) - 2(\hat{V}_i \hat{c}_i)^2) \\ + \frac{(\hat{h} - 1)^2}{8}((\hat{c}_i \hat{c}_i)^2 - 8\hat{c}_i \hat{c}_i + 8) \end{array} \right] \quad (9)$$

式中: ω_α 为权重。

ω_α 权重值如下:

$$\omega_\alpha = \begin{cases} 0.0021, \alpha = 1, 4, 13, 16 \\ 0.0208, \alpha = 2, 3, 5, 8, 9, 12, 14, 15 \\ 0.2062, \alpha = 6, 7, 10, 11 \end{cases} \quad (10)$$

式中: α 为粒子速度方向的序号。

在模型中,D2Q16 的格子模型如图 2 所示。

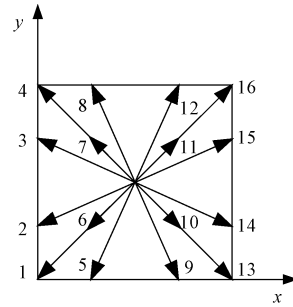


图 2 D2Q16 格子模型

通过对整个粒子速度空间上的分布函数进行积分,可以获得宏观量水深和速度,表达式如下:

$$h = \sum f_\alpha \quad (11)$$

$$V_i = \frac{1}{h} \sum c_{\alpha i} f_\alpha \quad (12)$$

1.2 D2Q5 对流扩散模型

通过基于格子 Boltzmann 方法的 D2Q5 模型求解对流扩散方程以用于模拟污染物的扩散输移^[20-21]。单松弛因子的 Boltzmann 对流扩散模型的控制方程可以表示为^[22]:

$$g_{\alpha}(x + e_{\alpha}\Delta t, t + \Delta t) - g_{\alpha}(x, t) = \frac{1}{\tau_1}(g_{\alpha}(x, t) - g_{\alpha}^{eq}(x, t)) + \frac{h\Delta t}{s}S_{c'} \quad (13)$$

式中: g_{α} 表示粒子分布函数; g_{α}^{eq} 表示平衡分布函数; τ_1 表示单松弛时间; s 为速度分量个数; e_{α} 为速度矢量; t 为时间; x 表示粒子 t 时刻所在位置; Δt 为时间间隔; $S_{c'}$ 表示源项。

e_{α} 表达形式为:

$$e_{\alpha} = \begin{cases} (0, 0) & , \alpha = 0 \\ e_x \left(\cos \frac{(\alpha - 1)\pi}{2}, \sin \frac{(\alpha - 1)\pi}{2} \right) & , \alpha = 1, 3 \\ e_y \left(\cos \frac{(\alpha - 1)\pi}{2}, \sin \frac{(\alpha - 1)\pi}{2} \right) & , \alpha = 2, 4 \end{cases} \quad (14)$$

式中: e_x 和 e_y 为 x 和 y 方向上的格子速度。

e_x, e_y 分别表示为:

$$e_x = \Delta x / \Delta t \quad (15)$$

$$e_y = \Delta y / \Delta t \quad (16)$$

式中: Δx 和 Δy 分别为 x 和 y 方向上的格子大小。

平衡分布函数的表达式为:

$$g_{\alpha}^{eq} = \begin{cases} \left(1 - \frac{\lambda_x e_x^2 + \lambda_y e_y^2}{e_x e_y} \right) hc', & \alpha = 0 \\ \left(\frac{e_y}{2e_x} \lambda_x + \frac{e_{ai} u_i}{2e_x^2} \right) hc', & \alpha = 1, 3 \\ \left(\frac{e_x}{2e_y} \lambda_y + \frac{e_{ai} u_i}{2e_y^2} \right) hc', & \alpha = 2, 4 \end{cases} \quad (17)$$

式中: λ_x, λ_y 分别为 x, y 方向上无量纲后的物理扩散系数, 表达式如式 (18); c' 为污染物浓度。

$$\lambda_I = \frac{D_i}{\Delta t(\tau_1 - 0.5)e_x e_y}, \quad I = x, y \quad (18)$$

在模型中, D2Q5 的格子模型如图 3 所示。

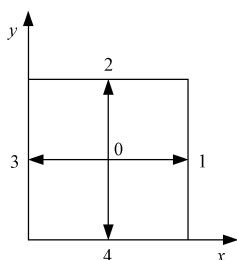


图 3 D2Q5 格子模型

沿深度方向上的平均浓度值 c' 可以通过式 (19) 获得:

$$c' = \frac{\sum_{\alpha} g_{\alpha}^{eq}}{h} \quad (19)$$

2 应用案例

自然界河流中植被分布往往十分复杂, 同时, 在一些城市的河道中, 布置着一些人工生态植被用于净化水质、恢复生态, 其分布方式有: 沿河道两侧以不同密度分布、沿河道两侧间隔分布和在河道中呈斑状分布等^[17]。其中沿河道两侧间隔分布是常见的分布方式之一, 如图 4 所示。

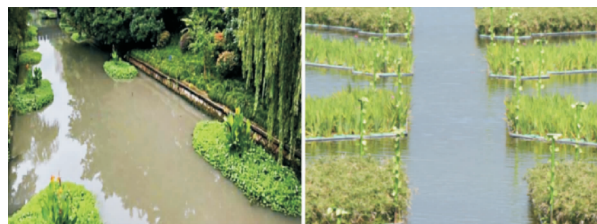


图 4 河道两岸植被间隔分布

参考图 4 中自然河流以及人工布置生态植被的河道中两侧植被区间隔分布的情况, 利用 D2Q16 多速度浅水模型和 D2Q5 对流扩散模型模拟研究植被区间隔布置的情况下水流的流速分布以及污染物扩散的浓度分布, 并研究植被区间隔的距离对流场和污染物运输的影响。假定一段长度为 5.8 m、宽度为 1.95 m 的河道, 沿程坡降为 1‰, 自由流动无植被区域的床面粗糙度曼宁系数为 0.01, 入口处控制流量为 28.6 L/s。植被直径为 0.5 cm, 密度设为 124 株/m², 即植被区的粗糙度 n_v 设为 0.06。设置 4 种研究工况, 如表 1, 植被区布置分布图见图 5, 横断面分为 CS-1、CS-2、CS-3 三个断面, 分别代表第一段植被出口断面、第二段植被入口断面和第二段植被出口断面, 纵断面分为 LS-1、LS-2、LS-3 三个断面, 对应植被区、过渡区和中心无植被区, K-1、K-2、K-3 分别表示各个区域内的污染物投入点的起始位置, 投入点的水深为平均水深。其中, 植被粗糙度 n_v 计算公式为^[23]:

$$n_v = (1 + k) \sqrt{(1 - d)^2 n_b^2 + \frac{2C_d \alpha_v d h^{4/3}}{g \pi D_v}} \quad (20)$$

式中: k 表示含植被渠道中因植被作用所引起的一种阻力系数, 根据经验取值, 对于部分植被覆盖的矩形渠道, k 取 0~0.3; d 表示植被区的植被密度占比; n_b 为河床的曼宁摩擦系数; C_d 表示植被拖拽阻力系数, C_d 的经验取值范围为 0.8~3.5^[24]; α_v 为形状系

数; D_v 为植被要素的直径。

模型的参数设置上,采用 $0.01\text{ m}\times0.01\text{ m}$ 大小的网格,即在长度和宽度方向分别离散为 581 和 196 个网格节点, $dt=0.005\text{ s}$,特征水深 $h_0=0.029\text{ m}$,弛豫时间 $\tau=1.5$,无量纲化后的污染物扩散系数 $\lambda=0.016$ 。上下边壁采用周期边界,入口和出口处使用非平衡外推边界类型,水深通过插值一点得到,出口处控制水深使平均水深为 4.4 cm ,流速通过插

值一点得到。

表 1 植被区间隔分布研究各工况参数

工况	植被密度 (体现为粗糙度 n_v)	植被区间隔 D/m
1	0.06	1.0
2	0.06	2.2
3	0.06	3.4
4	0.06	4.6

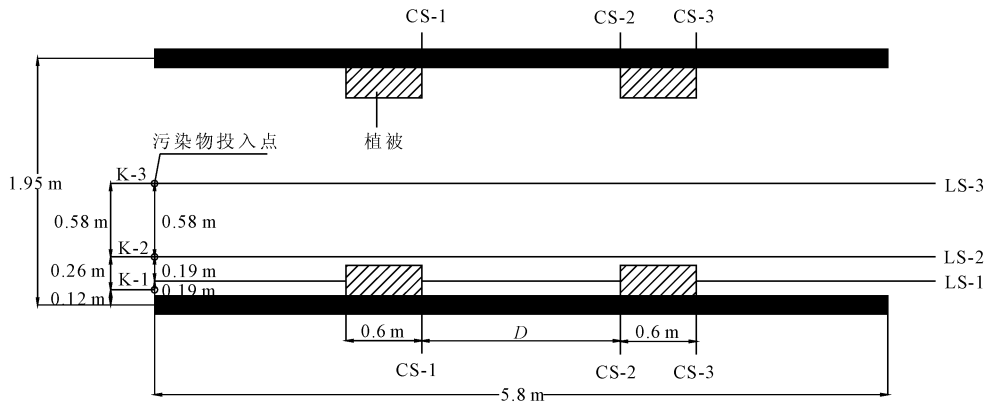


图 5 植被区间隔布置情况数值模拟模型图

3 结果与讨论

3.1 间隔植被覆盖情况流场模拟结果

使用工况 1—工况 4 模拟植被区间隔分布条件下的流速沿程变化规律、横断面流速分布规律以及横向流速的分布和变化规律。

据图 6(a) 展示的是植被区 (LS-1) 的流速沿程变化规律。可以看到各个工况下,这个区域的沿程流速在进入第一段植被后都会有下降趋势,离开第一段植被后速度逐渐升高,进入第二段植被后再次下降。工况 1 情况下,在离开第一段植被后速度回升不明显,是因为该工况下两个植被区间隔较小,水流在离开第一个植被段后马上就会受到第二个植被段的影响。图 6(b) 展示的是过渡区 (LS-2) 的流速沿程变化规律。在该区域,流速变化十分不均匀,转点非常明显,这些转点即为植被段和无植被段的交界处,不同工况下该区域的沿程流速变化规律大致相同,只是速度变化的位置发生了改变。图 6(c) 展示的是中心无植被区 (LS-3) 的流速沿程变化规律。各个工况下,该区域的沿程流速在进入第一个植被段的断面后都会有较大的升高趋势,离开第一个植被段的断面后速度升高趋势逐渐平缓,进入第二个植被段的断面后趋势再次上升。通过三个区域的结果可以看到,植被区的间隔距离对于三个区域内流

速的涨幅影响不大。此外,流速沿程增加,说明还没有形成均匀流。

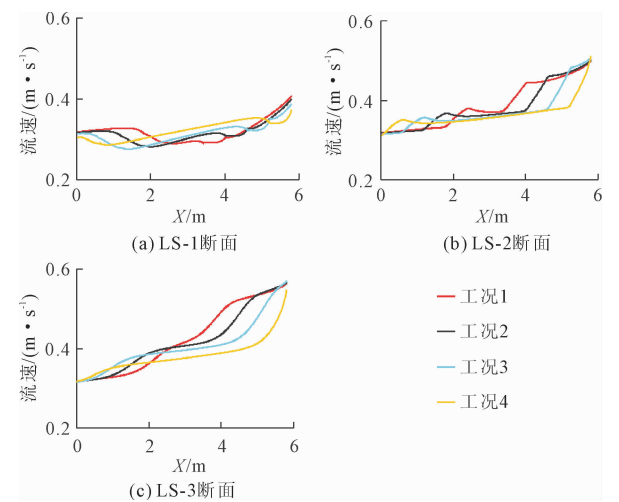


图 6 纵断面流速沿程变化

图 7 展示的分别是 CS-1、CS-2 和 CS-3 三个横断面的 4 种工况下的流速分布规律。

由于 4 种工况下植被布置的位置不同,每个工况的横断面设置有所差异,但水流流速分布均呈中间大两边小的趋势,即植被区流速整体较小,中心无植被区流速较大,过渡区存在较大的流速梯度,选取受植被影响充分的 CS-3 断面,横断面流速分布仍然可以表达为式(21)形式,但系数变为与植被区间隔

D 有关。

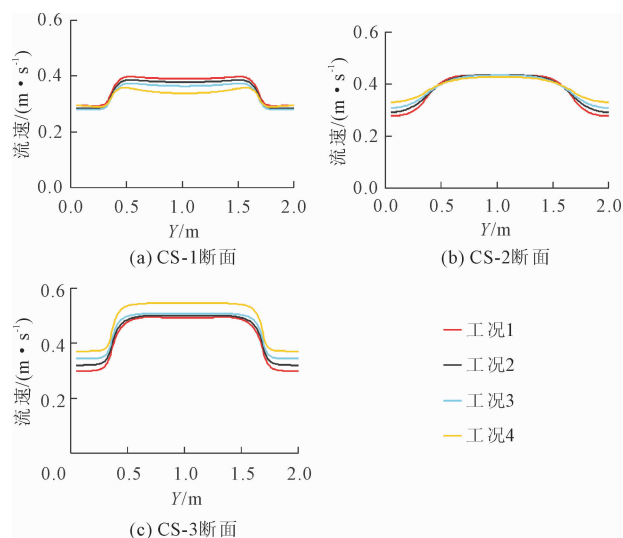


图 7 横断面流速分布

$$u = \begin{cases} a_1 \bar{u} & , 0 \leq \hat{y} < 0.38 \\ (a_2 \hat{y}^2 + b_2 \hat{y} + c_2) \bar{u} & , 0.38 \leq \hat{y} < 0.62 \\ a_3 \bar{u} & , 0.62 \leq \hat{y} \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中:横断面位置 y 无量纲化为 $\hat{y} = y/0.5W$, 以增加关系式的适用范围; u 为流速; $\bar{u}$ 为平均流速; a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_2 、 c_2 均为与植被区间隔距离 D 有关的系数:

$$\begin{cases} a_1 = -0.005D^2 + 0.043D + 0.67 \\ a_2 = -0.58D - 12.36 \\ a_3 = 0.003D^2 - 0.027D + 1.18 \\ b_2 = 0.36D + 11.27 \\ c_2 = -0.05D - 1.46 \end{cases} \quad (22)$$

植被区 (LS-1) 中, 流速大小 u 基本一致, 呈直线分布, 与平均流速 $\bar{u}$ 相关; 过渡区 (LS-2) 中, 流速大小 u 梯度较大, 呈幂函数分布, 与平均流速 $\bar{u}$ 相关; 中心无植被区 (LS-3) 中, 流速大小 u 基本一致, 呈直线分布, 与平均流速 $\bar{u}$ 相关。

通过建立植被段末端断面的植被区、过渡区和中心无植被区流速与植被区间隔关系的公式, 可以得到植被段末端断面不同植被间隔分布下的植被区和中心无植被区的流速, 以及过渡区不同位置处的流速。

图 8 展示的是 4 种工况下的横向流速场的总体分布。当水流在经过植被段时, 受植被的影响会产生方向指向河道中心的横向流速, 在两个植被区中间间隔的部分, 水流又会以较小的流速流向两边边壁, 工况 1 中由于两个植被区的间隔很小, 所以在间

隔的区域只出现了一小部分区域的水流流向边壁。总体来看, 横向流速基本上是以 $y = 1 \text{ m}$ 为中心线对称的, 但是也有局部地方不对称, 原因是本文中采用算法的误差造成的。

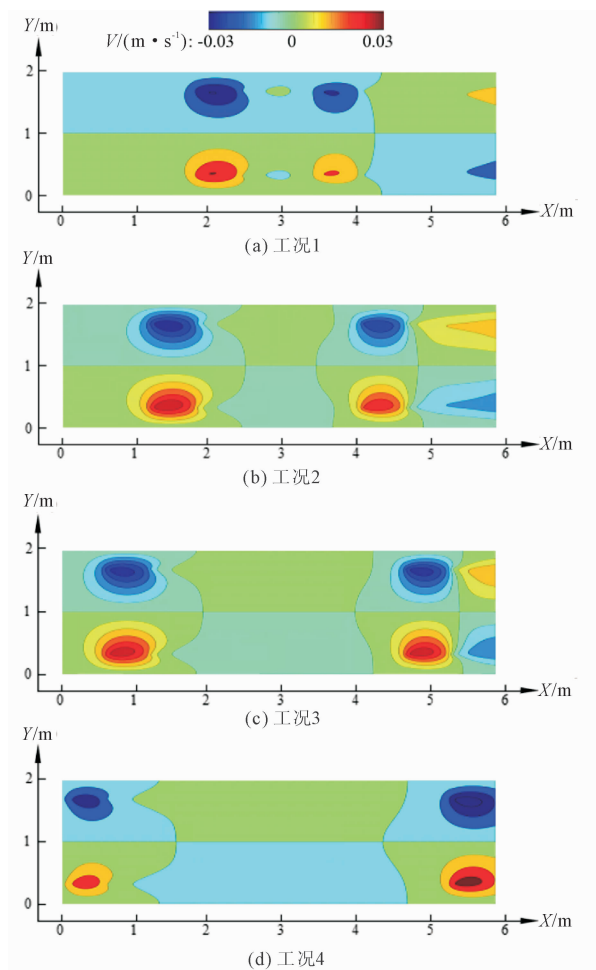


图 8 横向流速场总体分布

图 9 展示的是植被区 (LS-1) 和过渡区 (LS-2) 的横向流速沿程变化。各工况下, 横向流速均有两个波峰, 两个波峰所在的断面大致为植被段所在断面。对比不同工况, 横向流速的最大值还与植被区的间隔距离有关, 在植被区和过渡区中, 该规律一致, 即植被区间隔距离越大, 前一个植被区植被导致的水流横向流速越小, 而后一个植被区植被导致的水流横向流速越大。横向流速的峰值大小见表 2, 可以由表中数据得到, 植被区中横向流速两个波峰的峰值大小 $V_{\max 1}$ 和 $V_{\max 2}$ 与植被区间隔 D 基本呈线性关系, 如图 10, 可概括为式 (23), 过渡区中满足的关系也基本一致。

$$\begin{cases} V_{\max 1} = -0.0006D + 0.0182 \\ V_{\max 2} = 0.002D + 0.0081 \end{cases} \quad (23)$$

工况	植被区		过渡区	
	$V_{\max1}$	$V_{\max2}$	$V_{\max1}$	$V_{\max2}$
1	0.0175	0.0101	0.0296	0.0204
2	0.0168	0.0126	0.0283	0.0239
3	0.0163	0.0148	0.0271	0.0273
4	0.0152	0.0173	0.0241	0.0336

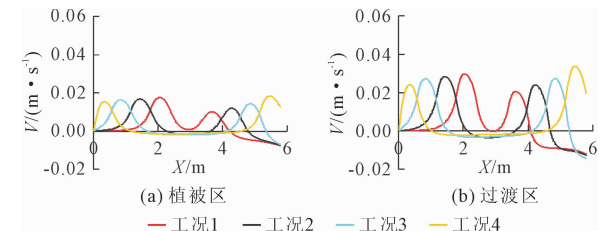


图 9 横向流速沿程变化

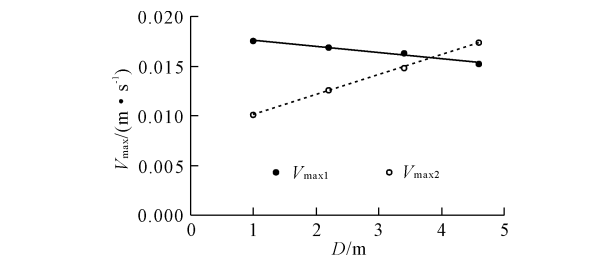


图 10 横向流速最大值与植被间隔的关系

3.2 间隔植被覆盖情况污染物输运过程模拟结果

对 4 种工况下河道的污染物浓度场分布进行模拟。图 11 展示的分别是 4 种工况下从 K-1 处释放污染物后整体的浓度场分布情况,图 12 展示的是 4 种工况下从 K-2 处释放污染物后整体的浓度场分布情况。图 13 为 K-1 点位处释放污染物时该点位纵截面的污染物浓度值。K-3 处释放的污染物由于受到两侧植被的对称影响,仍然呈沿程不断减小的顺直条状分布,这里不再展示。在每个工况下,污染物在没有进入植被段时都以直线向下游输移,遇到植被后会发生横向移动,同一个工况下,在河道较为边缘处(K-1)释放污染物的横向移动的发生位置要比在过渡区前方(K-2)释放污染物时靠前。在离开植被段后,污染物又会沿着直线往下游输移。污染物浓度沿程不断减小。

接下来分析植被区间隔距离对于污染物浓度最终衰减大小以及污染物最终偏移距离的影响。据表 3 和图 14,可以看到从 K-1 释放污染物时,4 种工况下出口断面污染物浓度衰减情况与植被间隔 D 呈线性关系,从 K-2 释放污染物时,4 种工况下出口断面污染物浓度衰减情况与植被间隔 D 呈二次关系。

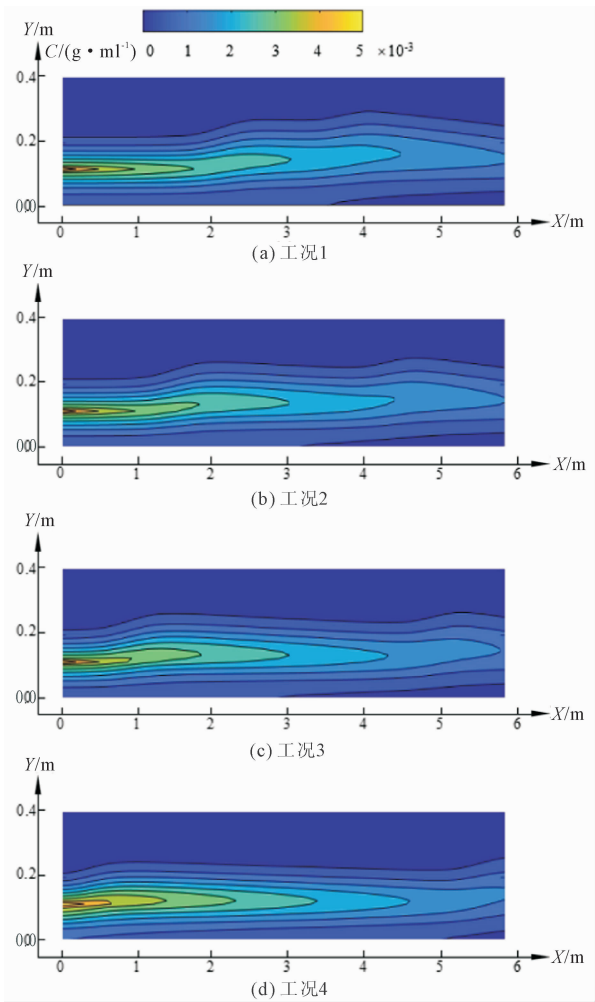


图 11 K-1 处释放污染物的浓度场分布

工况	污染物浓度衰减情况/%		污染物横向偏移距离/m	
	K-1	K-2	K-1	K-2
1	61.68	58.58	0.03	0.06
2	62.38	59.53	0.03	0.06
3	62.95	59.78	0.03	0.06
4	63.50	59.81	0.03	0.06

其关系可以表达为:

$$\begin{cases} 1 - C/C_{\max} = 0.005D + 0.6122 & (\text{K-1 处}) \\ 1 - C/C_{\max} = -0.0016D^2 + 0.012D + 0.5753 & (\text{K-2 处}) \end{cases}$$

(24)

从 K-1 释放污染物时,在出口断面浓度最大值处离浓度投放点的横向偏移距离在 4 种工况下均为 0.03 m,从 K-2 释放污染物时,在出口断面浓度最大值处离浓度投放点的横向偏移距离在 4 种工况下则均为 0.06 m。说明植被区分布的间隔距离对于污

染物横向偏移的距离基本没有影响。

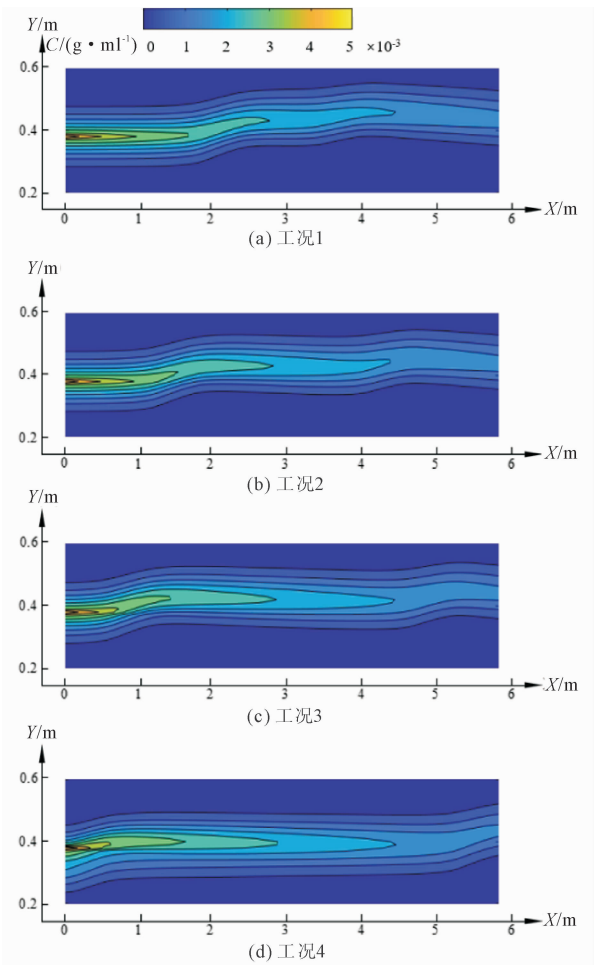


图 12 K-2 处释放污染物的浓度场分布

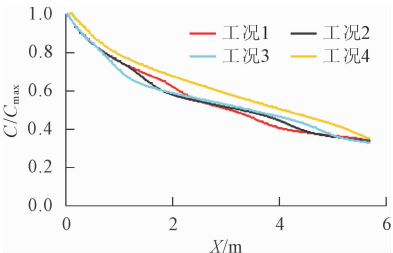


图 13 K-1 处释放污染物时纵截面污染物浓度值

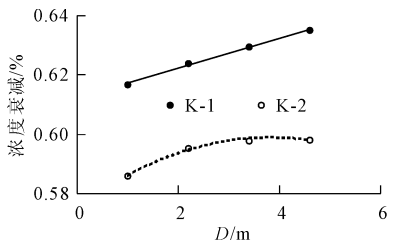


图 14 污染物浓度衰减与植被间隔的关系

4 结 论

本文基于格子 Boltzmann 方法模拟计算了植被区间隔布置条件下河道的流场和污染物输运浓度场分布情况,主要得到以下结论:

- (1) 在流速沿程变化中,两个植被区之间的间隔中流速会出现迅速回升,过渡区的水流流速变化十分不均匀,植被段和无植被段的交界处的转点明显。
- (2) 植被区和中心区流速呈直线分布,过渡区流速与植被密度呈二次幂相关,植被的存在会使流线出现明显的偏转,出现横向流速,横向流速的最大值与植被密度呈线性正相关,横向流速中出现的两个波峰峰值分别与植被区间隔距离呈负相关性和正相关性,可概括为线性关系。
- (3) 污染物呈一个带有两段明显横向偏移的条状分布,污染物衰减幅度与植被区间隔呈正相关性,在植被区为线性关系,在过渡区为二次关系。

参考文献:

[1] 吴宸晖,鞠茂森. 河流生态修复的国际经验及对长江大保护的启示[J]. 水资源保护,2021,37(3):136-144.

[2] Temple D M. Velocity distribution coefficients for grass-lined channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986,112(3):193-205.

[3] Elhakim O,Salama M. Velocity distribution inside and above branched flexible roughness[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,1992,118(6):914-927.

[4] Li Yiping,Du Wei,Yu Zhongbo,et al. Impact of flexible emergent vegetation on the flow turbulence and kinetic energy characteristics in a flume experiment[J]. Journal of Hydro-environment Research,2015,9(3):354-367.

[5] Armanini A,Righetti M,Grisenti P,et al. Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale Discussion[J]. Journal of Hydraulic Research,2009,47(3):384-386.

[6] 陆圣杰,朱海,徐洁如,等. 连续弯曲河道点源污染物输运特性三维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023,43(2):16-26.

[7] 潘文浩. 不同尺度密集粗糙与植被床面明渠流流场与总流特性研究[D]. 武汉:武汉大学,2018;2-15.

[8] 惠二青. 植被之间水流特性及污染物扩散试验研究[D]. 北京:清华大学,2009;132-147.

[9] 鲁俊,陆永平,李晓宇,等. 含植被明渠水流特性三维数值模拟研究[C]//中国水利学会. 科技创新与水利改革——中国水利学会 2014 学术年会论文集(上册). 2014-10-28, 中国天津, 河海大学出版社, 2014;

- [10] 白凤朋,杨中华,向爱农,等. 浅水数学模型在植被影响河道水流运动中的应用[J]. 水电能源科学,2019,37(5):53-56.
- [11] 槐文信,杨水草,杨中华,等. 基于水深平均模型的植被水流数值模拟[J]. 深圳大学学报(理工版),2012,29(1):56-60.
- [12] Liu X, Liu H, Liu Y. Theory and application of Lattice Boltzmann method [C]//Inter-national Conference on Chemical, Mechanical and Materials Engineering(CMME 2011),2011:270-275.
- [13] Benzi R, Succi S, Vergassola M. The lattice boltzmann-equation theory and applications [J]. Physics Reports Review Section of Physics Letters,1992,222(3):145-197.
- [14] 彭碧涛. 对流扩散方程的格子 Boltzmann 方法研究[D]. 长沙:中南大学,2014:40-46.
- [15] 杜海川. 基于离散 Boltzmann 方法的复杂曲线边界污染物输运模型研究[D]. 成都:四川大学,2022:41-62.
- [16] Peng Yong, Du Haichuan, Wang Bo. A curved boundary treatment for discrete Boltzmann model of shallow water flows based on a partially saturated method[J]. Journal of Hydraulic Research,2023,61(3):346-355.
- [17] 欧阳竞一. 植被分布对河道流场及污染物输运影响

- [18] Meng J, Gu X J, Emerson D R, et al. Discrete Boltzmann model of shallow water equations with polynomial equilibria[J]. International Journal of Modern Physics C, 2018, 29(9):1850080.
- [19] 费云龙. 离散 Boltzmann 浅水模型的开发与验证[D]. 成都: 四川大学, 2020:9-17.
- [20] Zhou Jianguo. A lattice Boltzmann method for solute transport[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 61(8):848-863.
- [21] Wang H D, Cater J, Liu H F, et al. A lattice Boltzmann model for solute transport in open channel flow [J]. Journal of Hydrology, 2018, 556:419-426.
- [22] Peng Y, Zhou J G, Burrows R. Modelling solute transport in shallow water with the lattice Boltzmann method [J]. Computers & Fluids, 2011, 50(1):181-188.
- [23] Bulat M, Biron P M, Lacey J R W, et al. A three-dimensional numerical model investigation of the impact of submerged macro-phytes on flow dynamics in a large fluvial lake [J]. Freshwater Biology, 2019, 64(9):1627-1642.
- [24] Guan M, Liang Q. A two-dimensional hydro-morphological model for river hydraulics and morphology with vegetation [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 88:10-21.

[49] Zeng Z, Yuan X, Liang J, et al. Designing and implementing an SWMM-based web service framework to provide decision support for real-time urban stormwater management[J]. Environmental Modelling and Software, 2021, 135:104887.

[50] 刘雄. 大数据技术在城市洪涝灾害分析预警中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

[51] 黄春豹. 论我国城市洪涝灾害应急管理——以广州市为例[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[52] 宋晓猛, 张建业, 贺瑞敏, 等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 153-165.

- [53] 靳奎峰,巢惟志,陈虹杏,等. 双偏振天气雷达在灾害性降水估测中的应用——以广州“5.22”特大暴雨灾害为例[J]. 灾害学,2021,36(3):140-146.
- [54] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392.
- [55] 张雅斌,罗 慧,赵 荣,等. 西安致灾短时暴雨中尺度与动力指数特征[J]. 热带气象学报,2019,35(5):614-628.
- [56] 任宏昌,张恒德. 郑州 720 特大致洪暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):1-9.