



刚性植被淹没度对悬沙分布影响的 三维水沙数值模拟研究*

吴建民¹, 肖毅^{1,2}, 陈耀飞³

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 国家内河航道工程技术研究中心, 重庆 400074;
3. 平陆运河集团有限公司, 广西南宁 530200)

摘要: 平原河流中河道泥沙多为悬移质输移, 当水流中存在植被时, 水流的湍动特性发生显著变化, 悬沙颗粒沉速和浓度分布规律将受到影响。基于 OpenFOAM 平台求解器 driftFluxFoam, 构建了刚性植被影响下的三维水沙数值模型, 并通过圆柱绕流水槽试验与隔板试验验证其可靠性。设置 4 种植被淹没度工况 ($h/H=0.4, 0.6, 0.8, 1.0$), 开展了不同淹没度下植被周围水流结构与悬沙分布模拟。结果表明, 随着植被淹没度的增加, 沉水植被对流速的影响集中在植被层, 垂向流速在植被后 $5D$ 处大幅衰减, 区域最大瞬时流速涨幅约 55%; 植被前 $5D$ 的床面切应力增大, 临界挺水植被切应力较沉水植被高约 70%, 植被后 $5D$ 轴线上切应力形成峰值, 轴线两侧 $2D$ 处形成低值区, 尾流区影响较小。悬沙浓度变化区间逐步收缩, 植被底部的环形低浓度区缩小, 沉水植被对近床面沿程悬沙浓度差异性影响较小, 而临界挺水植被则相反, 植被后 $50D$ 的归一化时均悬沙浓度 C_E/C_A 约为 1.46。

关键词: 刚性植被; 悬沙分布; 流场分布; 植被淹没度; 三维数值模拟

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0041-11

Three-dimensional numerical simulation study on influence of rigid vegetation submergence degree on suspended sediment distribution

WU Jianmin¹, XIAO Yi^{1,2}, CHEN Yaofei³

(1. School of River & Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530200, China)

Abstract: In plain rivers, sediment transport is dominated by suspended load. When vegetation is present in the flow, significant changes occur in the flow field, which in turn affect the settling velocity and spatial distribution of suspended particles. In this study, a three-dimensional hydro-sediment numerical model incorporating the effects of rigid vegetation is developed based on the OpenFOAM solver driftFluxFoam. The model is validated through flume experiments involving flow around cylinders and partition plates. Four vegetation submergence ratios ($h/H=0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) are considered to simulate flow structures and suspended sediment distribution around vegetation under different submergence conditions. The results show that as vegetation submergence increases, the influence of submerged vegetation on flow velocity is confined to the vegetation layer. The vertical velocity decays significantly at $5D$ downstream of the vegetation, with a maximum increase in instantaneous velocity of approximately 55%. Bed shear stress increases within $5D$ upstream of the vegetation, the critical emergent

收稿日期: 2025-04-15 录用日期: 2025-05-23

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700)

作者简介: 吴建民(1998—), 男, 硕士研究生, 从事河流动力学方面研究。

通信作者: 肖毅(1985—), 女, 博士, 教授, 从事河流动力学及航道整治方面研究。E-mail: xymtlove@163.com

vegetation shear stress is about 70% higher than that of submerged vegetation. A peak in shear stress forms along the centerline at $5D$ downstream, with low-stress zones appearing at $2D$ on either side of the centerline, and the wake region shows limited influence. The variation range of suspended sediment concentration gradually narrows, and the annular low-concentration zone at the vegetation base decreases. Submerged vegetation has a limited impact on near-bed longitudinal suspended sediment concentration differences, while critical emergent vegetation shows the opposite trend. The normalized time-averaged suspended sediment concentration at $50D$ downstream (C_E/C_A) is approximately 1.46.

Keywords: rigid vegetation; suspended sediment distribution; flow field distribution; vegetation submergence degree; three-dimensional numerical simulation

悬移质作为平原河流泥沙输移的主要形式之一^[1-2], 其运动特性与水生植被的生态功能存在显著耦合效应。近年来, 跨流域运河工程与航道疏浚活动导致植被附近的悬沙浓度持续升高^[3], 对水生植被群落产生胁迫作用, 揭示植被-水流-悬沙相互作用机理成为生态水力学领域的重要课题。根据植被形态的空间分布特征, 水生植被可分为沉水型、挺水型和浮水型 3 类^[4]。王付等^[5]通过水槽试验系统揭示了不同类型植被对明渠水流结构及底沙再悬浮的差异化影响机制。师冰雪^[6]采用刚性材料模拟植被, 通过 15 种淹没度试验发现, 植被层使流速剖面呈现“三区”(植被底层、冠层顶部和上部水流区)分布特征。吕升奇^[7]运用 ADV(acoustic Doppler velocimeter, 声学多普勒测速仪)和 LDV(laser Doppler velocimeter, 激光多普勒测速仪)同步测量技术, 对比沉水植被和挺水植被条件下的悬沙浓度垂向分布, 发现沉水植被能使浓度分布均匀性提高, 挺水植被次之。随着计算流体力学的发展, 数值模拟被作为主要研究方法, 应用于植被水流的研究中。三维水沙运动模拟已形成三大方法体系: 单相流模型、双流模型和欧拉-拉格朗日模型^[8]。Lu 等^[9]基于三维大涡模拟, 对含沉水植被的明渠流及其泥沙输运进行研究, 揭示了植被密度对水动力和泥沙运动的影响。张炳昌^[10]、许栋^[11]基于自编程序 CgLES, 研究柔性植被在水流作用下的弯曲及运动响应。刘诚^[12]引入双欧拉模型, 研究了复杂边界条件和植被影响下水流泥沙运动特性和床面变形特点。针对

大规模模拟需求, 漂移通量模型作为双欧拉模型的简化形式展现出独特优势。Dahl^[13]和 Amidu 等^[14]将漂移通量模型应用于污水处理厂的沉降池, 验证了大尺度流动的预测能力, Brennan^[15]将其应用于使用活性污泥悬浮液的模拟中, Minor^[16]采用该模型模拟了红树林幼苗周围水流和沉积物输运的主要特征。Goeree 等^[17]将其应用于明渠中水流流速与泥沙浓度分布的预测。

随着跨流域运河工程的持续建设及航道疏浚活动的加剧, 水生植被修复工程规模不断扩大, 而植被动态生长过程中的高度变化对悬沙分布的调控机制亟需量化。然而, 现有研究主要聚焦于固定植被高度的工况, 难以全面揭示不同植被淹没比对悬沙分布特性的影响。为此, 本文基于 OpenFOAM 平台构建水流-悬沙-植被耦合模型, 系统分析不同植被淹没度条件下的水流结构及泥沙输移响应关系, 并定量阐明植被淹没度对悬沙分布特性的作用机制。

1 模型构建

1.1 控制方程

漂移通量模型是一个基于混合物假设的多相流模型, 其核心在于将多相流动视为一种混合物进行分析, 其连续性方程、动量方程及输运方程如下:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_m u_m = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_m u_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m u_m) = -\nabla p_m + \nabla \cdot (\tau + \tau_t) - \nabla \cdot \left(\frac{\alpha_k}{1 - \alpha_k} \frac{\rho_f \rho_s}{\rho_m} u_{kj} u_{kj} \right) + \rho_m g + M_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_s \rho_s u_m = -\nabla \cdot \left(\frac{\alpha_s \rho_f \rho_s}{\rho_m} \right) u_{sj} \quad (3)$$

式中: ρ_m 、 ρ_f 、 ρ_s 分别为混合相、连续相和分散相的密度, 且满足 $\rho_m = \alpha_f \rho_f + \alpha_s \rho_s$; u_m 为混合相速度; α_f 、 α_s 分别为连续相和分散相的体积分数; α_k 为第 k 相的体积分数, 其中 k 代表离散相或分散相; u_{kj} 表示第 k 相相对混合相的漂移速度; τ 和 τ_t 分别为黏性应力和湍流应力; M_m 为源项, 代表相间作用力。

1.2 湍流模型

大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 是一种介于直接数值模拟和雷诺时均法之间的数值求解方法, 能在计算成本和精度间取得平衡^[18]。本文采用 Smagorinsky 模型^[19], 其经滤波处理后的连续性方程和动量方程中的亚格子湍流应力 $\tau_{ij,SGS}$ 与亚格子涡黏性系数 μ_{SGS} 满足如下关系。

$$\tau_{ij,SGS} - \frac{1}{3} \tau_{kk,SGS} \delta_{ij} = 2\mu_{SGS} \overline{S_{ij}} \quad (4)$$

$$\mu_{SGS} = \rho (C_s \Delta)^2 |\overline{S}| \quad (5)$$

$$\overline{S} = \sqrt{2\overline{S_{ij}S_{ij}}} \quad (6)$$

其中:

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

式中: $\overline{S_{ij}}$ 为格子尺度变形率张量; C_s 为 Smagorinsky 常数; Δ 为滤波过程的限制尺度。

1.3 边界条件

入口速度采用 Dirichlet 型边界条件, 通过 codeFixedValue 边界类型设定垂向流速对数分布, 其表达式基于 Spalding 壁面律^[20], 见式 (8)。速度出口采用 Neumann 型边界条件 (零梯度条件); 压强边界条件反之: 入口压强为 Neumann 型 ($\partial p / \partial n = 0$), 出口压强为 Dirichlet 型 (静水压力)。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y u_*}{\nu} \right) + 5 \quad (8)$$

式中: u 为高度 y 处的流速; u_* 为摩阻流速; κ 为冯卡门系数; ν 为流体的运动黏滞系数。

固壁边界 (底面和圆柱表面) 采用壁面边界条件。其中速度设为无滑移边界 ($u=0$); 压强采用零梯度边界条件; 湍流黏度采用 nutUSpaldingWallFunction 壁面函数。顶面 (top) 采用“刚盖假定”, 忽略自由表面形变, 设定垂向速度分量 $w=0$ 。两侧面 (side) 均采用滑移边界条件, 即法向速度分量 $v_n=0$, 切向速度梯度 $\partial u_i / \partial n = 0$ 。

1.4 数值方法

本文采用有限体积法 (finite volume method, FVM) 进行数值求解。对离散后的控制方程采用 PIMPLE 算法进行求解, 该算法能够求解瞬态问题, 且具有较强稳定性与收敛性。离散方法见表 1。

表 1 控制方程各项离散格式

Tab. 1 Discretization for terms in the governing equations

方程项	离散格式
时间	Euler
梯度	Gauss linear
div (rhoPhi, U)	GausslinearUpwind
div (tauDm)	Gauss linear
散度	
div \ (phi, alpha.* \)	GaussvanLeer
div \ (phirb, alpha.* \)	Gauss linear
div (rhoPhi, nuTilda)	GausslimitedLinear 1
div (((rho * nuEff) * dev2(T(grad(U)))))	Gauss linear
拉普拉斯	Gauss linear corrected

1.5 物性参数

在本文构建的三维数值模型中, 将含沙水流视为宾汉塑性体, 泥沙颗粒直径设定为 $20 \mu\text{m}$, 密度为 2650 kg/m^3 。为描述流体的宾汉塑性特性, 指定屈服应力 τ_y 和塑性黏度 η 两个关键参数, 并引入颗粒沉降速度的本构关系式:

$$\phi = aC^{bc} \quad (9)$$

式中: ϕ 可表示屈服应力 τ_y 或塑性黏度 μ ; a 、 b 为经验常数; C 为泥沙相体积浓度; C 为一个常数, 其值的选择一般为 e 或 10 。变量 a 和 b 的选

取依据来源于对含沙水流的现场测量，数值模型经验参数设置见表 2。

表 2 宾汉塑性流体幂指数关系式经验参数设置
Tab. 2 Empirical parameter setting for the power-law relationship of Bingham plastic fluid

ϕ	a	b
屈服应力 τ_y	$4.24 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	3.794 1
塑性黏度 μ	$2.83 \times 10^{-4} \text{ Pa}$	4.058 7

泥沙颗粒的受阻沉降速度 ω_s 选择 Richardson 等^[21]提出的经验公式：

$$\omega_0 = gd^2(\rho_s - \rho_f) / 18\mu_f \quad (10)$$

$$\omega_s = \omega_0(1 - \alpha)n \quad (11)$$

式中： ω_0 为单颗粒在清水中的沉降速度； ω_s 为颗粒在含沙水流中的沉降速度； n 为与颗粒雷诺数 Re 相关的指数。当 $Re < 0.2$ 时， n 可通过经验关系式 $n = 4.65 + 19.5d/D$ 估算 (d 为悬沙颗粒的直径， D 为特征长度，本文中即圆柱直径)，以修正沉降速度受颗粒间相互作用的影响。

2 模型验证与算例设置

2.1 模型验证

2.1.1 水动力规律验证

为验证本文数值模型的准确性，采用 Palau-Salvador 等^[22]提出的不同深径比 h/D 条件下圆柱后方水动力特性进行对比分析。计算域为 $1\ 560\ \text{mm} \times 400\ \text{mm} \times 560\ \text{mm}$ ，圆柱直径 D 为 $80\ \text{mm}$ ，高度 h 为 $200\ \text{mm}$ ，水深 H 为 $400\ \text{mm}$ ，入口平均流速设定为 $0.54\ \text{m/s}$ 。模拟结果与试验数据的对比见图 1，包括流向速度 u_x 、展向速度 u_z 和垂向速度 u_y 。整体来看，数值模拟结果和试验数据吻合较好，其中 u_x 在近床面 ($y/H = 0.05$) 处的偏差最大，相对误差为 9.4% ，表明本文的数学模型能够较准确地计算圆柱周围的水动力条件。

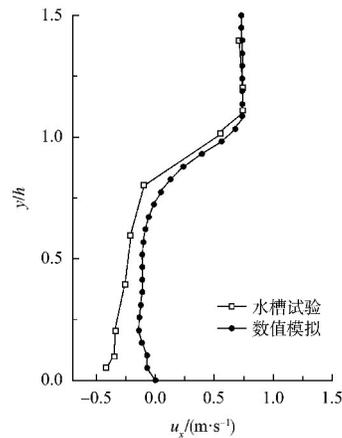
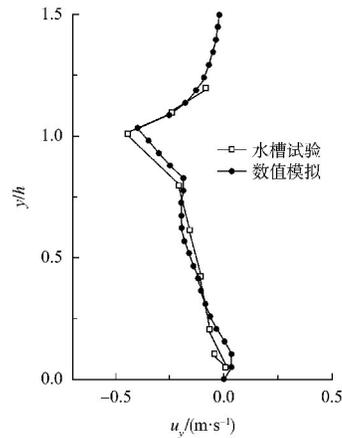
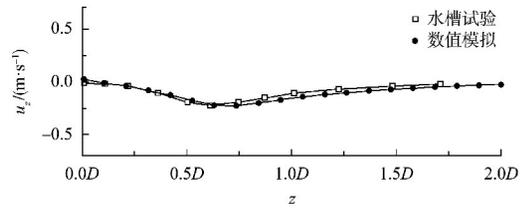
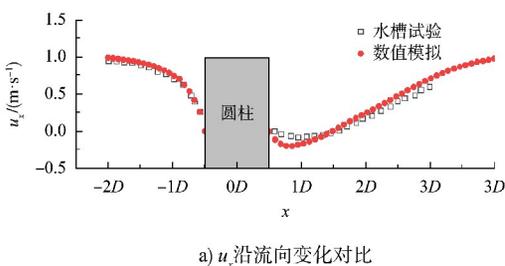


图 1 圆柱绕流水动力试验与数模验证对比

Fig. 1 Comparison between hydrodynamic tests and numerical model validation for flow around a cylinder

2.1.2 悬沙运动规律验证

为进一步验证模型在悬沙运动模拟中的适用性，采用 Larsen^[23]提出的隔板试验进行验证。试验容器左侧填充含沙水流，右侧为清水，当隔板快速抽出后，泥沙掺混随即发生，见图 2。通过跟踪界面位置变化估算侵入速度，并将模拟结果与理论侵入速度-悬沙初始浓度函数关系进行对比，见图 3。本文模拟了 8 组不同浓度 ($0.1 \sim 100\ \text{g/L}$)

的试验, 模型拟合效果良好。其中, 最大的误差出现在 $c_0 = 100 \text{ mg/L}$ 处, 相对误差为 3.2%, 表明本文数值模型能够合理预测悬沙掺混行为。

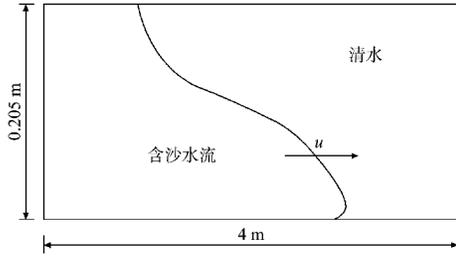


图 2 隔板试验
Fig. 2 Partition plate test

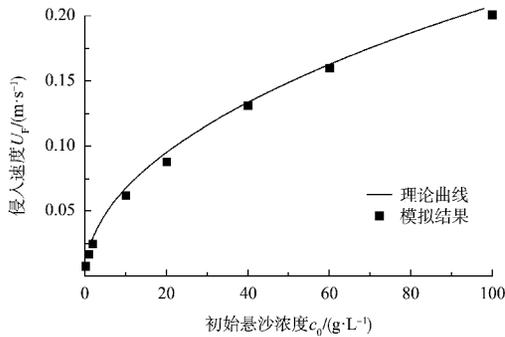


图 3 模拟结果与理论曲线对比
Fig. 3 Comparison of simulation result and theoretical curve

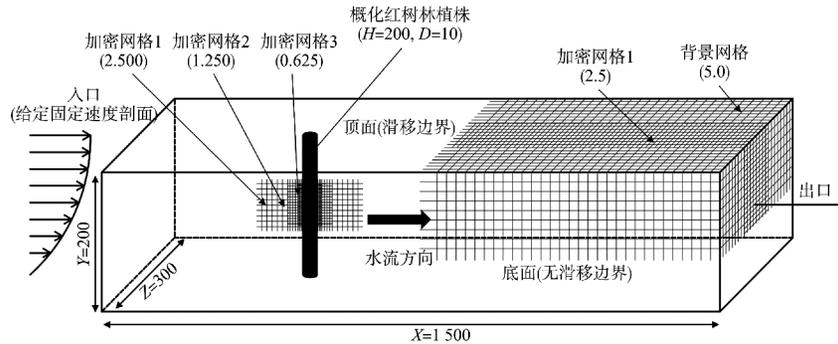


图 4 计算域划分及网格精细化 (单位: mm)
Fig. 4 Computational domain division and grid refinement (unit: mm)

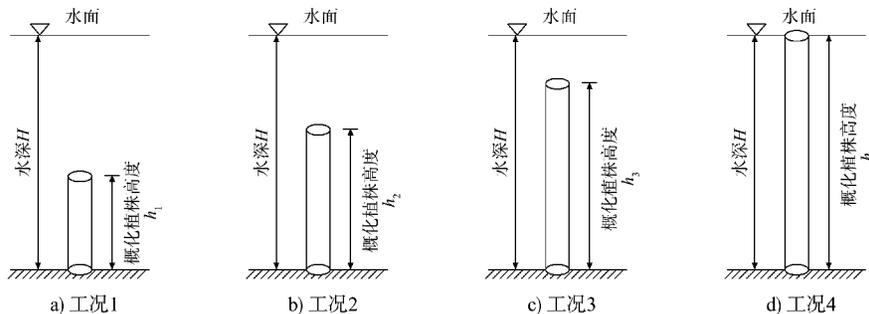


图 5 概化植被淹没度模拟工况
Fig. 5 Simulation conditions of generalized vegetation submergence degree

2.2 算例设置

为研究刚性植被淹没度对水沙运动的影响, 本文构建了一个三维数值模型, 计算域尺寸设定为 $1500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。刚性植被被概化为刚性圆柱, 直径 $D = 10 \text{ mm}$, 完全淹没在水中, 水深 $H = 200 \text{ mm}$, 并布置在 $X = 500 \text{ mm}$ 、 $Z = 150 \text{ mm}$ 处。模型背景网格分辨率设定为 5 mm , 刚性圆柱周围 $0.5D$ 范围内的网格精细化至 0.625 mm , 见图 4。

初始悬沙浓度设定为 100 mg/L , 并在整个计算域内均匀分布至每个网格单元。同时, 来流方向 (入口) 施加恒定的输沙通量, 浓度同为 100 mg/L 。模拟过程中, 含沙水流自模型域的左侧流入, 经过概化植被后, 从右侧流出, 无回流现象发生。为了保证计算稳定性和数据可靠性, 时间步长 Δt 根据 CFL 条件设定为 0.001 s 。

为探讨不同植被淹没度 (即植被高度与水深的比值, h/H) 对悬沙分布特性的影响, 设置 4 种不同的植被淹没度工况, 分别为 $h/H = 0.4$ 、 0.6 、 0.8 和 1.0 , 见图 5。其中, 对应的植被高度分别为 $h_1 = 8D$, $h_2 = 12D$, $h_3 = 16D$ 和 $h_4 = 20D$ 。并采用相同的来流平均流速 $U = 0.15 \text{ m/s}$ 。

3 结果分析

3.1 植被区域流场分布

不同淹没度下计算区域的瞬时流场分布见图6。对于沉水植被($h/H=0.4\sim 0.8$)，其冠层位于流速中低层区域，并在植被正后方约 $10D$ 范围内形成显著的低速区。此时，绕流引起的水流加速主要受中层流速主导，整体加速幅度较小，最大流速仅增至 0.21 m/s ，较初始最大流速(0.15 m/s)仅提升 0.06 m/s ，见图6a)~c)；然而，当植被处于临界挺水状态时，其正后方低速区范围明显缩小，且绕流拓展至表层高流速区，见图6d)。随着淹没度的逐渐增加，最大瞬时流速由 0.18 m/s 增至 0.28 m/s ，涨幅达 55% ，表明淹没度对水流结构的调控作用显著增强。

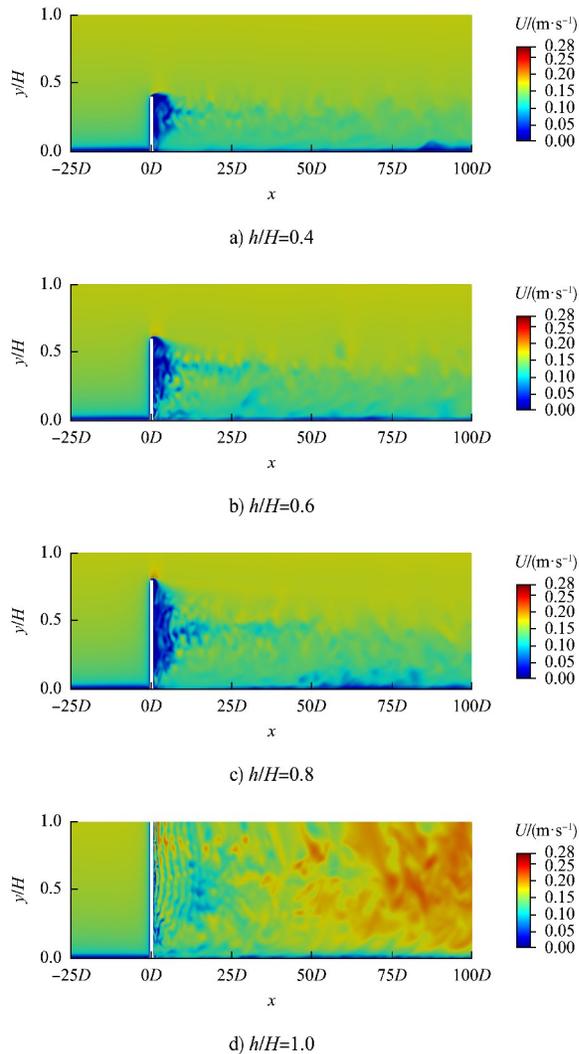
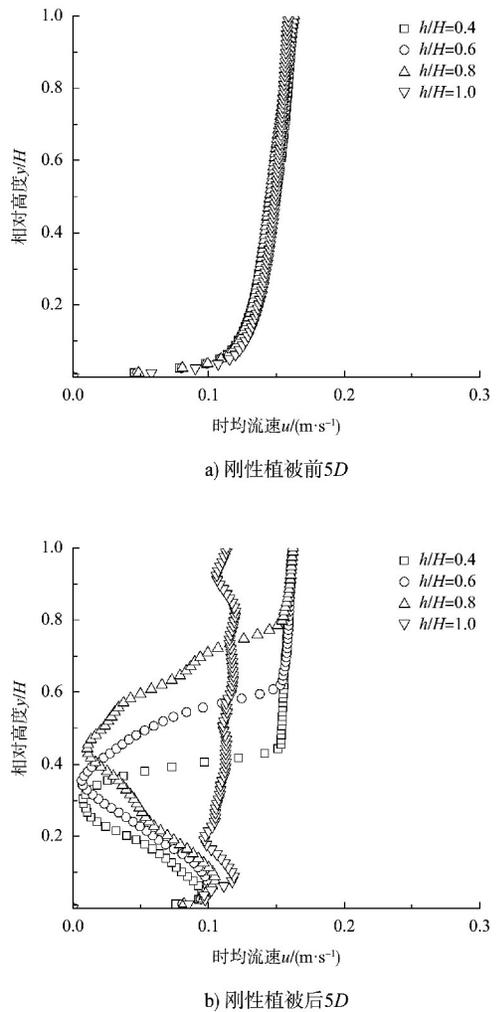


图6 不同淹没度条件下瞬时速度分布

Fig. 6 Instantaneous velocity distribution under different submergence degree

不同淹没度条件下刚性植被前 $5D$ 、后 $5D$ 、后 $15D$ 和后 $30D$ 位置的时均流速沿垂线分布见图7。在植被前 $5D$ 处，各工况流速分布基本一致($u\approx 0.16\text{ m/s}$)，表明该区域水流尚未受到植被干扰。然而，在植被后 $5D$ 处，流速垂向分布较前区 $5D$ 发生显著变化，在临界挺水条件下，近水面时均流速降至 0.11 m/s ，较植被前区衰减 31.2% ，见图7b)；而对于沉水植被，植被冠层以上流速分布保持稳定，但当在植被层范围内，流速沿水深急剧衰减至 0.02 m/s 。随着下游距离的增加，植被对流动的影响逐渐减弱。在植被后 $15D$ 处，沉水与临界挺水状态的流速变化趋于一致，植被层内流速衰减至 0.12 m/s 。至植被后 $30D$ 处，各工况的流速垂向分布差异性进一步减弱，说明该处仍处于植被形成的尾流区内。



b) 刚性植被后5D

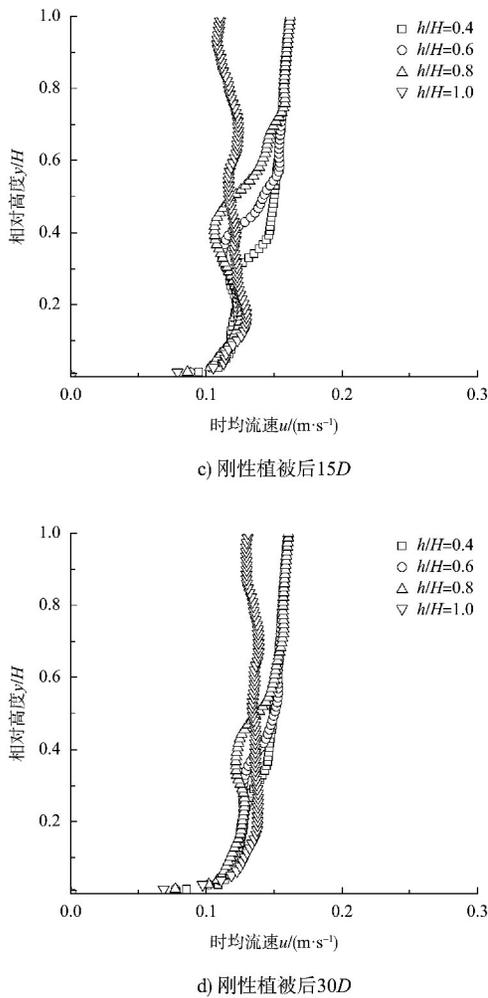


图 7 不同淹没度条件下植被轴线方向的垂向时均流速分布
Fig. 7 Vertical mean velocity distribution along vegetation axis under different submergence degree

不同淹没度条件下概化植被前 5D 和后 5D 处的床面切应力对比见图 8。由图可见, 在植被前 5D 处, 床面切应力随淹没度的增大而增大, 且在植被正前方产生衰减。然而, 沉水植被工况的切应力差异较小, 约为 0.02 N/m, 而临界挺水工况的床面切应力较沉速植被提高了约 70%; 在植被后方 5D 处, 床面切应力分布呈现典型的尾流特征, 在植被尾部轴线处形成应力峰值, 而在轴线两侧 2D 位置出现应力最小值。各工况的最大切应力均稳定在 0.075 N/m² 左右, 表明淹没度变化对尾流核心区域的床面切应力分布影响有限。

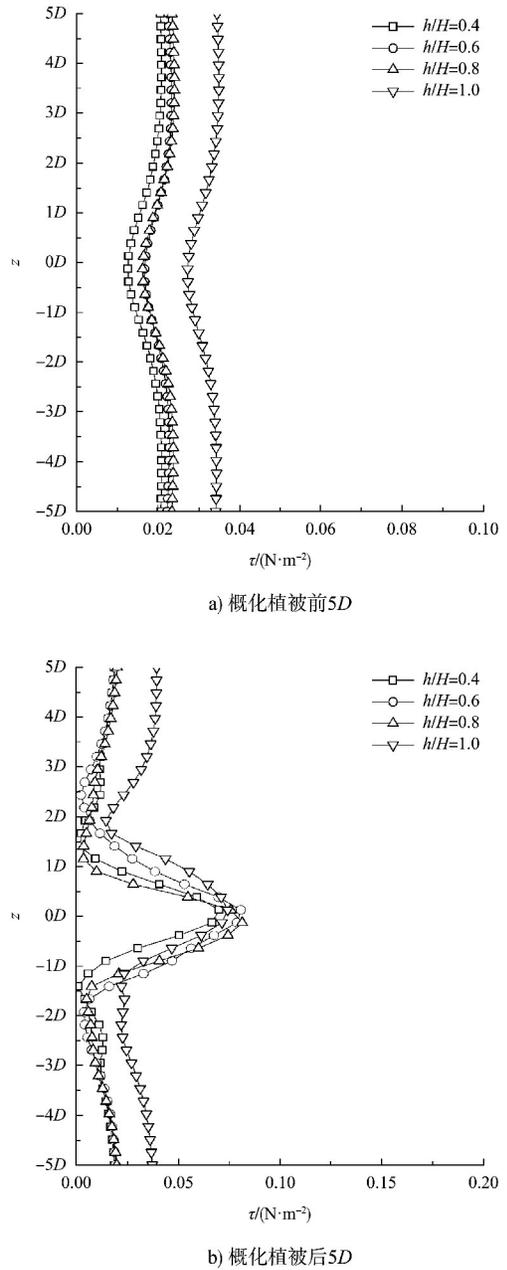


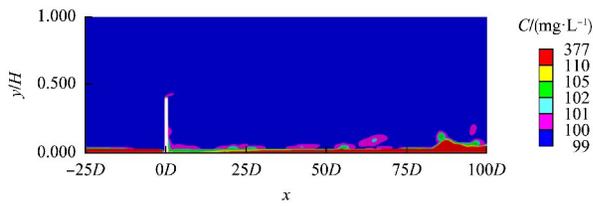
图 8 概化植被前后床面切应力对比
Fig. 8 Comparison of bed shear stress before and after generalized vegetation

3.2 植被区域悬沙浓度分布变化

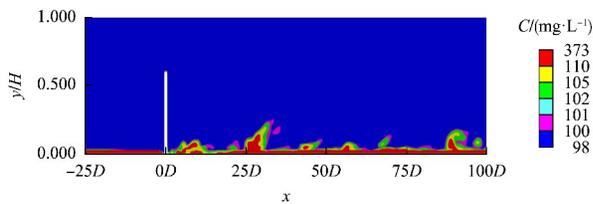
不同植被淹没度条件下植被区域的瞬时悬沙浓度 C 分布见图 9。随着植被淹没度的增加, 植被区域瞬时悬沙浓度的极大值 C_{max} 由 377 mg/L 降至 257 mg/L, 而浓度极小值 C_{min} 稳定在 98 mg/L 附近, 浓度极差逐步减小。

对计算域正视图分析可知, 低淹没度时大于 100 mg/L 的浓度区域呈离散分布, 见图 9a); 当淹没度增至 0.8 时, 植被下游 50D~85D 范围内形

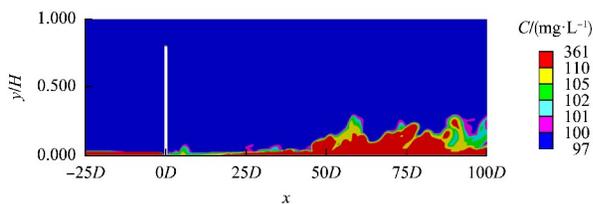
成连续高浓度带(垂向高度 $3D \sim 5D$)。而在临界挺水状态下,床面附近出现连续的锯齿状浓度区并向植被底部延伸。对俯视图分析可知, $y/H=0.250$ 断面中,低淹没度时悬沙浓度分布均匀,随着淹没度增大浓度波动增强,完全淹没时形成间断的“之”字形高浓度结构,见图 9b); $y/H=0.050$ 断面中,沉水植被后呈现两条分离的高浓度带,而临界挺水植被则发育连续的“之”字形高浓度带,这归因于淹没度增加使两侧剪切层延伸合并低速区,形成集中尾流区,见图 9c); $y/H=0.025$ 断面中,植被底部的环形低浓度区随淹没度的增加而缩小,尾流长度缩短,表明高淹没度植被强化了底沙的扩散,见图 9d)。



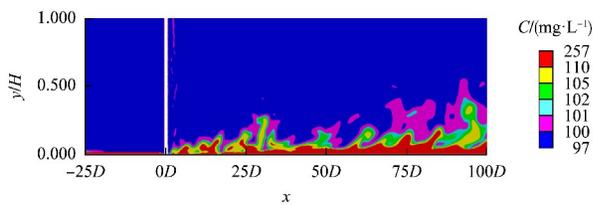
a) $z/D=0, h/H=0.4$, 正视



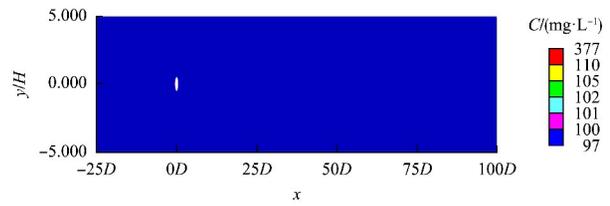
b) $z/D=0, h/H=0.6$, 正视



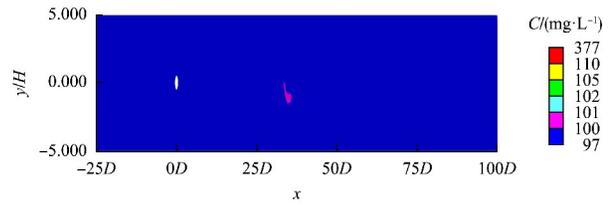
c) $z/D=0, h/H=0.8$, 正视



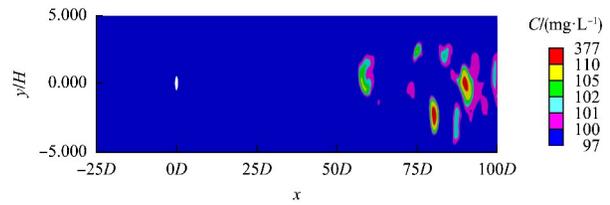
d) $z/D=0, h/H=1.0$, 正视



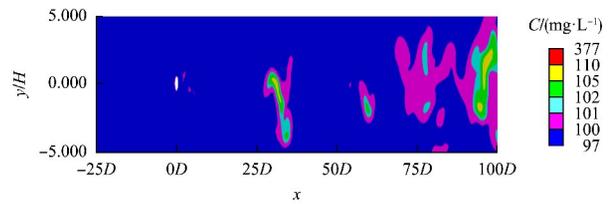
e) $y/H=0.250, h/H=0.4$, 俯视



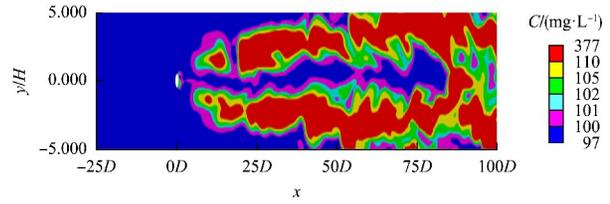
f) $y/H=0.250, h/H=0.6$, 俯视



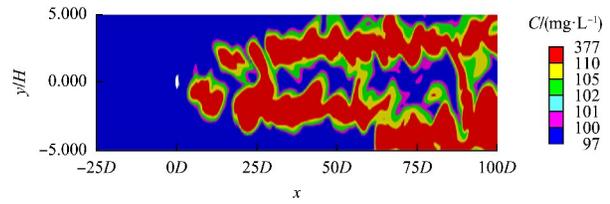
g) $y/H=0.250, h/H=0.8$, 俯视



h) $y/H=0.250, h/H=1.0$, 俯视



i) $y/H=0.500, h/H=0.4$, 俯视



j) $y/H=0.500, h/H=0.6$, 俯视

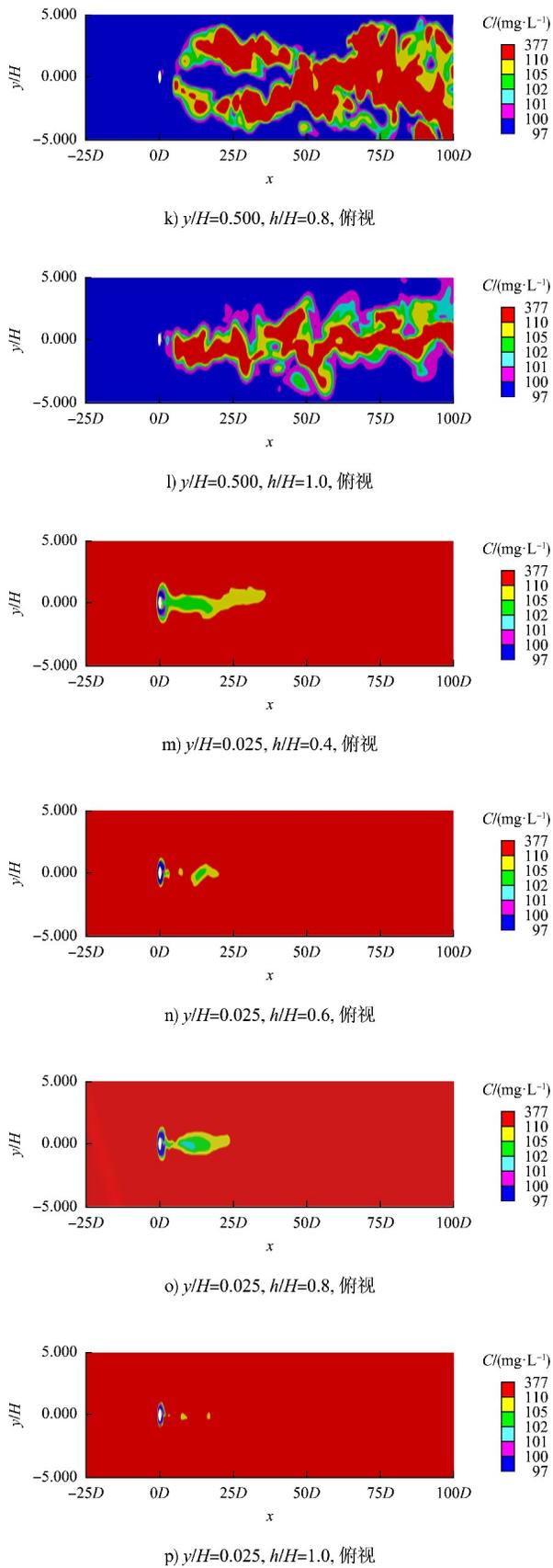
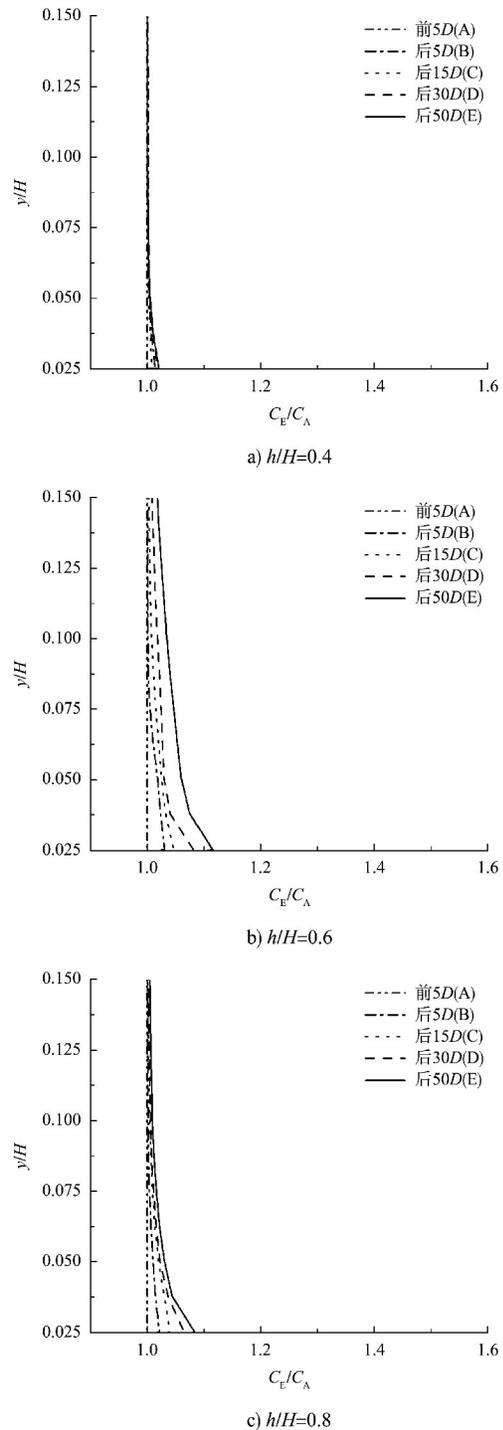


图 9 不同淹没度条件下悬沙浓度分布

Fig. 9 Suspended sediment concentration distribution under different submergence degree

植被区不同位置悬沙浓度垂向分布特征的统计分析见图 10。由图可知, 植被对悬沙浓度的影响主要集中在 $0.15H$ 范围内, 且归一化悬沙浓度随距离增大而增大。随着淹没度的增加, 相同测点的归一化悬沙浓度呈增大趋势。具体而言, 沉水植被后 $50D$ 处的归一化悬沙浓度 C_E/C_A 由 1.02 增至 1.12, 近床面悬沙浓度差异较小, 见图 10a)~10c); 临界挺水植被的 C_E/C_A 约为 1.46, 见图 10d), 表明临界挺水植被对近床面悬沙浓度沿程分布影响显著。



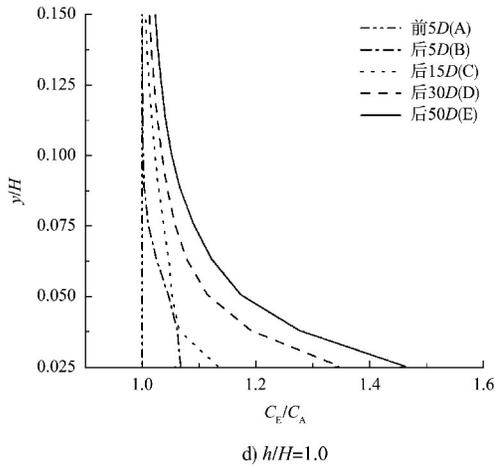


图 10 不同淹没度条件下归一化时均悬沙浓度对比

Fig. 10 Comparison of normalized time-averaged suspended sediment concentration under different submergence degree

4 结论

1) 不同植被淹没度对其周围水流结构影响不同。沉水植被后方 10D 范围内形成显著低速区, 绕流引起的流速增幅有限(最大增幅 0.06 m/s); 临界挺水状态使最大瞬时流速提升约 55%, 后方低速区范围显著减小; 植被下游 30D 处时均流速垂向分布仍受到扰动。

2) 随植被淹没度增加, 植被前 5D 的床面切应力增大, 临界挺水工况切应力较沉水工况高约 70%; 植被后 5D 处, 各工况床面切应力在轴线上形成峰值, 轴线两侧 2D 处形成低值区, 沉水植被的床面切应力整体较低, 尾流核心区受淹没度影响较小。

3) 高淹没度使植被被根部环形低浓度区范围缩小; 沉水植被后方近床面的悬沙浓度沿程变化率($C_E/C_A = 1.02 \sim 1.12$)显著低于临界挺水植被工况($C_E/C_A = 1.46$)。

参考文献:

[1] 金鏐. 细颗粒泥沙运动及滩槽交换对航道回淤的影响[J]. 水运工程, 2019(8): 111-116.
JIN L. Influences of fine sediment transport and transversal sediment transport between shoal and channel

on channel siltation [J]. Port & waterway engineering, 2019(8): 111-116.
[2] 李勇, 余锡平. 基于两相紊流模型的航道悬移质泥沙运动数值模拟[J]. 水运工程, 2007(12): 85-88.
LI Y, YU X P. Numerical simulation of channel suspended sediment motion based on a two-phase turbulent flow model [J]. Port & waterway engineering, 2007(12): 85-88.
[3] 吴修广, 季大润, 史英标, 等. 港池和航道疏浚过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 水运工程, 2006(8): 87-91.
WU X G, JI D R, SHI Y B, et al. Numerical simulation of suspended sediment's transportation during dredging of harbor basin and channel [J]. Port & waterway engineering, 2006(8): 87-91.
[4] 韩新星, 艾金泉, 叶子君, 等. 基于遥感云计算的鄱阳湖湿地植被群落分类研究[J]. 人民长江, 2023, 54(7): 55-60.
HAN X X, AI J Q, YE Z J, et al. Classification of wetland vegetation community in Poyang Lake based on remote sensing cloud computing [J]. Yangtze River, 2023, 54(7): 55-60.
[5] 王村, 王超. 含挺水植物和沉水植物水流紊动特性[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 816-822.
WANG C, WANG C. Turbulent characteristics in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes [J]. Advances in water science, 2010, 21(6): 816-822.
[6] 师冰雪. 淹没植被作用下流速及含沙量垂线分布试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
SHI B X. Study on the vertical distribution of water flow velocity and sediment concentration in water permeable barrier [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
[7] 吕升奇. 含刚性植物水流中悬移质泥沙分布规律实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
LYU S Q. Experimental study on distribution of suspended sediment in flow with rigid vegetation [D]. Nanjing: Hohai University, 2008.

- [8] 肖柏青,李然,戎贵文.基于欧拉-拉格朗日方法的明渠中悬移质淤积数值模拟[J].水力发电学报,2015,34(9):46-51.
XIAO B Q, LI R, RONG G W. Eulerian-Lagrangian simulations of suspended sediment deposition in open channels[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2015, 34(9): 46-51.
- [9] LU J, DAI H C. Effect of submerged vegetation on solute transport in an open channel using large eddy simulation [J]. Advances in water resources, 2016, 97(11): 87-99.
- [10] 张炳昌.植被对明渠紊流结构及床面冲淤影响的大涡模拟研究[D].天津:天津大学,2019.
ZHANG B C. Large eddy simulation of turbulent flow and bedmorphodynamics of open channel with vegetation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [11] 许栋,梁心雅,张炳昌,等.明渠紊流中淹没柔性植被流固耦合大涡数值模拟[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(3):313-321.
XU D, LIANG X Y, ZHANG B C, et al. Large eddy simulation of submerged flexible vegetation fluid-solid coupling in open channel turbulent flow[J]. Journal of Tianjin University (science and technology), 2022, 55(3): 313-321.
- [12] 刘诚.水沙运动及植被影响的三维固液两相双流体湍流模型[D].大连:大连理工大学,2008.
LIU C. A three-dimensional solid-liquid two-phase two-fluid turbulence model for water-sediment movement with and without the effect of vegetation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [13] DAHL C. Numerical modelling of flow and settling in secondary settling tanks [D]. Aalborg: Aalborg University, 1995.
- [14] AMIDU M A, ABDULRAHEEM K K. Numerical simulation of a rectangular clarifier using drift-flux model in OpenFOAM[Z]. Research square, 2021.
- [15] BRENNAN D. The numerical simulation of two-phase flows in settling tanks [D]. London: Imperial College London, 2001.
- [16] MINOR M L, BARTZKE G, ZIMMER M, et al. Numerical modelling of hydraulics and sediment dynamics around mangrove seedlings: implications for mangrove establishment and reforestation [J]. Estuarine coastal and shelf science, 2019, 217(2): 81-95.
- [17] GOEREE J C, KEETELS G H, MUNTS E A, et al. Concentration and velocity profiles of sediment-water mixtures using the drift flux model[J]. Canadian journal of chemical engineering, 2016, 94(6): 1048-1058.
- [18] 杨丹丹,赵明翔,叶维祥,等.基于沉浸边界法的轴流泵内鱼体运动数值模拟[J].水力发电学报,2021,40(7):95-104.
YANG D D, ZHAO M X, YE W X, et al. Numerical simulations of fish movement in axial pump using immersed boundary method[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2021, 40(7): 95-104.
- [19] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations [J]. Monthly weather review, 1963, 91(3): 99-164.
- [20] SPALDING D B. A single formula for the Law of the wall [J]. Journal of applied mechanics, 1961, 28(3): 455-458.
- [21] RICHARDSON J F, ZAKI W N. Sedimentation and fluidisation: part I [J]. Chemical engineering research and design, 1997, 75(S): 82-100.
- [22] PALAU-SALVADOR G, STOESSER T, FRÖHLICH J, et al. Large eddy simulations and experiments of flow around finite-height cylinders [J]. Flow, turbulence and combustion, 2010, 84(2): 239-275.
- [23] BABE D I H, HASSAN A. Densimetric exchange flow in rectangular channels [J]. Houille blanche-revue internationale de l'eau, 1967, 53(6): 619-632.