



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2507644

引用格式:汪存石, 武文强, 周倩倩, 等. 挺水植物-水体相互作用的多尺度水动力建模及水质响应特征[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(27): 11953-11963.

Wang Cunshi, Wu Wenqiang, Zhou Qianqian, et al. Multiscale hydrodynamic modeling of emergent macrophyte-water interactions and characterization of water quality responses[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11953-11963.

环境科学、安全科学

挺水植物-水体相互作用的多尺度水动力 建模及水质响应特征

汪存石^{1,2}, 武文强^{3*}, 周倩倩³, 王慧丽¹, 张晓可¹, 祝建中⁴

(1. 安庆师范大学生命科学与食品工程学院, 安徽省皖西南生物多样性保护与特色资源利用重点实验室, 安庆 246133;

2. 安徽雷克环境科技有限公司, 合肥 230040; 3. 徐州市河湖管理中心, 徐州 221000;

4. 河海大学环境学院, 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘 要 针对浅水河湖与人工湿地中流动结构—净化效应协同量化不足, 以及不同尺度模型难以在相同情景下开展验证的问题, 构建了基于图形处理器并行加速的二维浅水方程模型和采用多孔介质参数化的三维雷诺平均 Navier-Stokes 模型, 并以梭鱼草、再力花、菖蒲单种处理及三种植物的等株数混合处理为研究对象, 在静水、来流和波浪三种工况下开展环形水槽试验。经典算例验证结果表明, 二维模型在含水跃混合流、稳态缓流、干湿交替及产汇流耦合等复杂情形下具有良好的稳定性与精度, 最大相对误差不超过 8.28%。以刚性植被通道试验数据为参照, 二维模型更适于评估区域尺度的总体阻力效应与沿程水位变化趋势, 三维模型则更适于局部扰动显著情形下局部非线性流动结构的刻画。水质响应具有明显的指标和物种依赖性: 来流和波浪可促进梭鱼草的总氮去除, 静水总体有利于部分植物处理的总磷和氨氮削减; 化学需氧量对不同水动力工况未呈现一致响应, 且等株数混合处理未表现出稳定的协同净化优势。研究结果可为河湖与湿地生态修复中的模型选型、植物配置和水动力调控提供科学依据。

关键词 挺水植物; 浅水方程; 雷诺平均 Navier-Stokes 方程; 环形水槽; 水质净化

中图分类号 X173;

文献标志码 A

Multiscale Hydrodynamic Modeling of Emergent Macrophyte-water Interactions and Characterization of Water Quality Responses

WANG Cun-shi^{1,2}, WU Wen-qiang^{3*}, ZHOU Qian-qian³, WANG Hui-li¹,
ZHANG Xiao-ke¹, ZHU Jian-zhong⁴

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Characteristic Resource Utilization in Southwest Anhui, School of Life Sciences and Food Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China; 2. Anhui Lake Environmental Technology

Co., Ltd., Hefei 230040, China; 3. River and Lake Management Center of Xuzhou, Xuzhou 221000, China;

4. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

[Abstract] To address the limited joint quantification of flow structures and water purification performance in shallow rivers and lakes and in constructed wetlands, as well as the difficulty of validating models at different scales under matched scenarios, two hydrodynamic models were developed: a graphics processing unit (GPU)-accelerated two-dimensional model based on the shallow water equations and a three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) model with porous-medium parameterization. Annular-flume experiments were conducted under still-water, current, and wave conditions using *Pontederia cordata*, *Thalia dealbata*, and *Acorus calamus* as monocultures, together with an equal-number mixed-species treatment. Benchmark tests showed that the two-dimensional model reliably repro-

收稿日期: 2025-11-04 修订日期: 2026-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51979077); 安徽省高校自然科学研究重点项目(2023AH050477); 安徽省皖西南生物多样性保护与特色资源利用重点实验室开放课题(Wxn202504)

第一作者: 汪存石(1992—), 男, 汉族, 安徽桐城人, 博士, 讲师。研究方向: 河湖水环境治理与生态修复。E-mail: cunshi.wang@aqnu.edu.cn。

* 通信作者: 武文强(1994—), 男, 汉族, 安徽灵璧人, 硕士, 工程师。研究方向: 河湖水环境监测与治理。E-mail: wqwu1994@126.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

duced mixed flow with a hydraulic jump, steady subcritical flow, wetting and drying, and coupled runoff generation and routing, with a maximum relative error not exceeding 8.28%. Using experimental data from a rigid-vegetation channel as a benchmark, the two-dimensional model was more suitable for assessing overall flow resistance and longitudinal water-level trends at the regional scale, whereas the three-dimensional model was better suited to resolving localized nonlinear flow structures under conditions of pronounced local disturbance. Water-quality responses were both indicator- and species-dependent; current and wave conditions enhanced total nitrogen (TN) removal by *P. cordata*, whereas still-water conditions generally favored total phosphorus (TP) and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) removal in several plant treatments. Chemical oxygen demand (COD) showed no consistent response to hydrodynamic regime, and the equal-number mixed-species treatment did not exhibit a consistent synergistic purification benefit. These findings provide a scientific basis for model selection, plant configuration, and hydrodynamic regulation in the ecological restoration of rivers, lakes, and wetlands.

[**Keywords**] emergent macrophytes; shallow-water equations; Reynolds-averaged Navier-Stokes equations; annular flume; water purification

挺水植物(emergent macrophytes)作为重要的“自然基础设施”,能够通过改变局部阻力与紊动结构,显著影响浅水水体的水位分布、流速剖面与物质输运过程;同时,植物冠层、根际与生物膜为氮、磷及有机物的迁移转化提供反应位点,从而对水质产生持续影响^[1-3]。在近岸与浅水环境中,波浪、来流与植被相互作用,使能量在冠层内耗散,改变边界层换质与溶解氧供给,进而影响硝化-反硝化、颗粒物沉降/再悬浮等关键过程,最终表现为“水动力-植被-水质”的耦合效应^[4-7]。对这类耦合过程的定量描述,是河湖与人工湿地生态修复及工程调控的理论基础与技术支撑。

在数值模拟方面,二维浅水方程(shallow water equations, SWE)凭借计算高效、易于与溶质输运-反应耦合等优势被广泛应用^[8-9];但在起伏地形、干湿交替与小水深条件下,需要借助稳态保持策略与非负水深处理(如静压/水面重构),以维持通量-源项平衡和数值稳定性^[10-11]。三维雷诺平均 Navier-Stokes (RANS)模型能够解析垂向非均匀性与局地紊动结构^[12],常通过动量汇或多孔介质参数化表征植被冠层阻力,并将阻力系数与迎风面积密度、株径、密度等几何参数相关联^[13],实现从植株尺度到群落-水动力响应的模型闭合。总体而言,二维 SWE 与三维 RANS 在“效率-精度”上形成互补,为阐释挺水植物通流与水质净化机制提供了多尺度研究途径。

然而,现有研究仍存在三方面不足:其一,针对静水、定常来流、含波动等不同水动力背景,通流结构与净水响应的协同量化仍不充分,难以将水动力调控与水质改善建立统一关联^[14-15];其二,二维 SWE 与三维 RANS 在高密度植被、复杂边界条件下的适用性与参数化差异^[16],缺少针对同一物理情景的系统对比与验证,模型选型与参数取值缺乏可操作准则^[17-18];其三,关于混合群落是否优于单一物种,以及水动力对这种“协同优势”的调控机制,现有研究结论并不一致^[19-20],这导致工程配置策略缺乏明确指引。此外,为保证模型可信度,仍有必要借助渠道激波/缓流、抛

物盆地往复震荡、坡面降雨-下渗等经典算例对数值模型的稳定性与精度开展针对性验证。

针对上述不足,构建 GPU 并行加速的二维 SWE 模型和多孔介质参数化的三维 RANS 模型。通过非平坦渠道、抛物盆地振荡和坡面降雨-入渗等经典算例验证二维模型的稳定性与精度,并结合刚性挺水植被通道试验数据,对比两类模型对植被阻力效应和沿程水位变化的表征能力及适用范围。进一步依托环形水槽,以梭鱼草、再力花、菖蒲及其等株数混合配置为对象,考察静水、来流和波浪条件下总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)的响应特征,分析水动力条件与植物配置对净化效能的影响,为浅水河湖与人工湿地生态修复中的模型选型、植物配置和水动力调控提供依据。

1 模拟与实验方法

1.1 数值模型

1.1.1 二维 SWE 模型与 GPU 加速

采用非线性浅水方程的守恒形式对平面水动力进行描述为

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

式(1)中: $\mathbf{q}$ 为守恒变量向量; $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{G}$ 分别为 x 、 y 方向的通量向量; $\mathbf{R}$ 为降雨-入渗质量源汇项向量; $\mathbf{S}_b$ 为床面坡度源项向量; $\mathbf{S}_f$ 为底部摩阻源项向量。各向量分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{q} = [h, uh, vh]^T \\ \mathbf{F} = [uh, u^2h + \frac{1}{2}gh^2, uvh]^T \\ \mathbf{G} = [vh, uvh, v^2h + \frac{1}{2}gh^2]^T \\ \mathbf{R} = [r - I, 0, 0]^T \\ \mathbf{S}_b = [0, -gh \frac{\partial b}{\partial x}, -gh \frac{\partial b}{\partial y}]^T \\ \mathbf{S}_f = [0, -\frac{\tau_{bx}}{\rho}, -\frac{\tau_{by}}{\rho}]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中: h 为水深; b 为底床高程; u, v 分别为 x, y 方向的平均流速分量; r 为降雨强度; I 为入渗强度; ρ 为流体密度; g 为重力加速度的大小。底摩阻采用基于曼宁糙率的二次阻力关系, 即

$$\begin{cases} \tau_{hx} = \rho C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \tau_{hy} = \rho C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \\ C_f = gn^2 h^{(-1/3)} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: C_f 为由曼宁糙率 n 和水深 h 确定的无量纲底床摩阻系数, 用于表征底床对水流的阻力。为与后续输运-反应耦合保持一致, 产汇流仅进入质量方程(R 的第一分量), 动量方程中的源项仅包含底床坡度与底摩阻。

数值求解在矩形结构网格上采用 Godunov 型有限体积法(finite volume method, FVM), 并采用含接触波的 Harten-Lax-Van Leer 近似黎曼求解器(Harten-Lax-Van Leer-Contact approximate Riemann solver, HLLC)计算单元界面通量^[21]。在时间步从 n 到 $n+1$ 的推进过程中, 单元(i, j)的更新格式为

$$\begin{aligned} q_{i,j}^{n+1} &= q_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(F_{i+\frac{1}{2},j} - F_{i-\frac{1}{2},j} \right) - \\ &\quad \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2}} - G_{i,j-\frac{1}{2}} \right) + \\ &\quad \Delta t [R_{i,j}^n + (S_b)_{i,j}^n + (S_f)_{i,j}^{n+1}] \end{aligned} \quad (4)$$

为保证通量-源项的平衡性与干湿稳定, 界面状态采用水面重构(surface reconstruction method, SRM), 并配合 minmod 限坡处理抑制数值振荡; 底床在界面处取单值以维持静水平衡^[22-23]。底摩阻在小水深下显式处理易致不稳定, 采用单元内全隐式求解并以 Newton-Raphson 迭代闭合; 时间步长依据库朗-弗里德里希斯-列维(Courant-Friedrichs-Lewy, CFL)条件自适应控制(取库朗数 $C=0.5$)。边界条件方面, 固壁边界采用镜像单元法, 开边界按弗劳德数判别; 缓流工况给定水位或流量并闭合另一特征量, 急流工况在入流端给定(h, u, v)而在出流端外推。降雨-入渗以算子分裂方式耦合, 入渗强度 I 按 Green-Ampt 机理计算。干湿界面的判别采用极小水深阈值 ε 以避免假负深与非物理解($\varepsilon=1 \times 10^{-10}$)。为提升计算效率, 采用统一计算设备架构(compute unified device architecture, CUDA)在 GPU 上实现数据并行计算, 各环节按流水线方式依次执行: 干湿判别与边界构造、界面重构与通量/源项计算、时间推进、自适应步长更新; CPU 端负责初始化、数据交换与调度。上述策略在保持 Godunov-FVM 主体框架的同时, 兼顾 SRM/HLLC 的分支逻辑与隐式摩阻求解的可扩展性^[24]。

1.1.2 三维 RANS 模型与植被参数化

为解析植被冠层内外的垂向非均匀结构与局地紊动特征, 建立不可压三维 RANS 自由水面流模型。控制方程为质量守恒与时间平均动量方程, 即

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \\ \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S}_v \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $\mathbf{u}$ 为速度; p 为压力; μ 和 μ_t 分别为分子黏度与湍流黏度; $\mathbf{S}_v$ 为植被区动量汇项。采用两方程湍流闭合(如 realizable $k-\varepsilon$); μ_t 由相应的输运方程计算。自由水面采用流体体积法(volume of fluid, VOF)方法追踪, 界面采用几何重构, 重力源项 $\rho \mathbf{g}$ 显式加入动量方程; 在本研究流动尺度下忽略表面张力。不解析单株几何, 植被冠层按多孔介质/体力项处理, 动量汇表示为

$$\mathbf{S}_v = -\frac{\mu}{K} \mathbf{u} - \rho \beta |\mathbf{u}| \mathbf{u} \quad (6)$$

式(6)中: K 为植被区等效多孔介质的固有渗透率, m^2 , 用于表征介质的通流能力; β 为 Forchheimer 惯性阻力系数, m^{-1} , 用于表征非达西流动中的惯性阻力强度。其中第一项为 Darcy 黏性损失, 第二项为 Forchheimer 惯性损失。来流/出流边界分别采用速度入口与压力出口以形成定常过水条件; 造波边界用于生成规则波浪; 底部与侧壁为无滑移固壁边界; 自由水面为大气压力边界。采用有限体积法离散, 空间二阶, 瞬态求解, 压力-速度耦合算法(如 PISO/SIMPLEC)并满足 CFL 条件的步长控制; 植被阻力产生的动量汇项 $\mathbf{S}_v$ 作为源项加入动量方程, 并在每个时间步内与压力-速度场同步迭代求解, 以提高高阻力植被区的数值稳定性。

1.1.3 数值验证算例与设置

通过三类经典算例验证模型可靠性。其一, 采用 Goutal 与 Maurel 的非平坦渠道恒定流基准^[25], 设置含激波的混合流与稳定缓流两种工况: 渠道长度 25 m、底床光滑, 上游分别给定单位流量 $0.18 \text{ m}^2/\text{s}$ 与 $4.42 \text{ m}^2/\text{s}$, 下游分别给定水位 0.33 m 与 2.0 m; 空间离散为 200 等分网格, 利用常用的水深相对误差判据判断稳态。其二, 采用 Sampson 的抛物盆地往复震荡流算例^[26], 计算域 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, 底形为对称抛物面, 网格 200×200 , 四周固壁, 模拟时长 6 000 s, 用以检验含摩阻条件下的干湿稳定性与数值耗散。其三, 采用 Woolhiser 的坡面降雨-下渗算例^[27], 坡面 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 、坡度 5%, 曼宁系数 0.03; Green-Ampt 参数取 $K_s = 0.0212 \text{ cm/min}$ 、 $h_f = 11 \text{ cm}$ 、 $\Delta\theta = 0.25$ 。其中, K_s 为

饱和导水率, h_f 为湿润锋处平均吸力水头, $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$ 为土壤含水率亏缺, θ_s 和 θ_i 分别为饱和体积含水率和初始体积含水率。降雨强度 0.296 cm/min、历时 20 min, 上游零流量、下游自由出流, 用于检验产汇流与入渗耦合能力。上述算例共同覆盖了床面起伏、干湿交替、激波与入渗等关键数值情形, 为二维模型的稳定性与精度提供基线支撑。

1.1.4 植被通流验证设置

考虑到实测区域内植被密度较高而流速数据不足, 选用文献中的刚性挺水植物通道试验作为对比^[28]; 二维模型将植被区域处理为永久干网格以刻画不可通流的体积占据效应, 三维模型将植被丛簇简化为多孔介质区并以密度与直径估算孔隙率与阻力参数; 对比指标为水位沿程扰动与整体趋势拟合度。该验证针对不同等效孔隙率(即不同密度)条件下的水位抬升与通流特性, 评估两类模型在高密植区的适用边界及互补优势。

1.2 环形水槽实验

自制椭圆环形水槽: 总长 3 m、宽 2 m; 环形段外径 1 m、内径 0.5 m; 过水断面为宽 0.25 m、高 0.8 m 的矩形; 直线段侧壁为透明钢化有机玻璃(图 1)。该

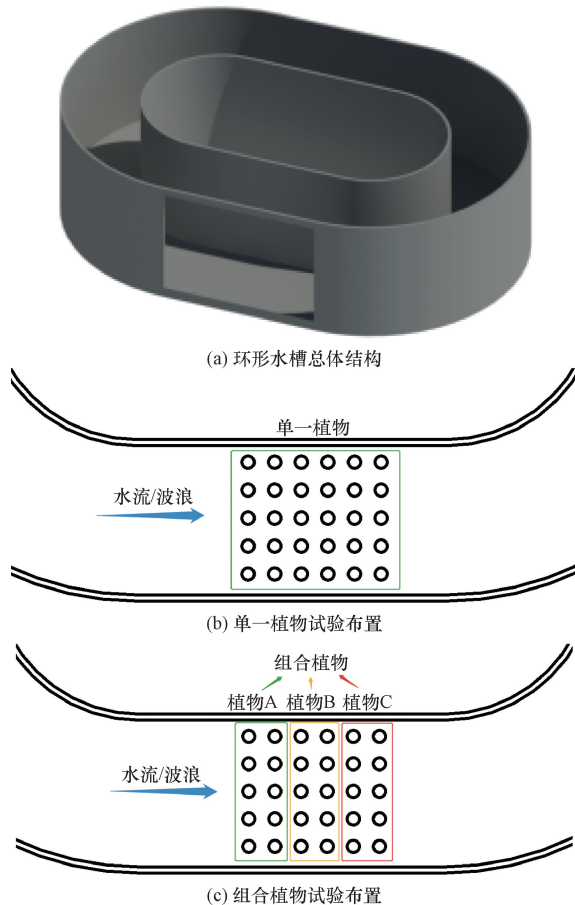


图 1 环形试验水槽与植被布置示意

Fig. 1 Schematic of the flume and vegetation layouts

装置能够在相同几何边界与植物布置条件下切换静水、来流与波浪工况, 从而减少不同试验平台和边界条件差异对结果比较的影响, 为不同水动力背景下植物响应的统一对比提供条件。选取三种典型挺水植物: 梭鱼草、再力花、菖蒲。每组按 5 株 $\times$ 6 排均匀布置于直线段, 以泡沫板固定防止位移(图 2)。处理组包括三种单一植物与等株数组组合, 组合组总株数与单一组一致。所有处理组置于相同初始水质条件: $TN = 1.58$ mg/L、 $TP = 0.11$ mg/L、 $NH_4^+-N = 0.87$ mg/L、 $COD = 20.17$ mg/L。试验周期 12 d, 每 3 d 采样一次, 测定 TN 、 TP 、 NH_4^+-N 、 COD 的浓度, 并以 C/C_0 (测试浓度/初始浓度) 形式进行归一化处理, 用于不同处理与工况间的可比性分析。

2 结果与分析

2.1 数值模型验证

为确保二维浅水模型在后续植被通流与环槽试验解释中的可信度, 采用三个经典基准对模型进行验证: ①非平坦渠道的混合流(含激波)/缓流工况, 用于检验在起伏地形上对急缓流转换与激波定位的刻画能力; ②抛物盆地往复震荡, 用于检验干湿交替与源项平衡/数值耗散; ③坡面降雨-下渗, 用于检验产汇流与 Green-Ampt 入渗耦合的再现能力。

2.1.1 激波与缓流模拟精度验证

在 Goutal-Maurel 非平坦渠道基准中^[25], 分别构造带激波的混合流与稳定缓流两类典型流态。该类“过丘(bump)”定常流(含/不含水跃)是浅水方程研究中用于检验起伏地形源项平衡处理与水跃分辨能力的经典算例, 常见于平衡保持有限体积格式研究, 并被解析解基准库(如 SWASHES)收录^[22, 29-30]。如图 3 所示, 混合流工况下, 模型能够准确再现水跃位置及下游缓流特征, 水位与单宽流量总体贴合解析解[图 3(a)、图 3(b)]; 相对误差主要集中在跃变邻域, 单宽流量在水跃附近出现峰值, 最大相对误差约 5.7%, 这种“间断附近误差更突出、其余区段偏小”的分布在同类基准验证中较为典型^[29-30]。随着时间的推进, 解在约 2 000 步内达到稳态[图 3(c)]。缓流工况下, 模拟水位与单宽流量与解析解几乎重合, 最大相对误差 $< 0.4\%$, 计算过程稳定, 约 3 000 步收敛[图 3(f)], 表明该模型在无跃变的平衡态下具有较低数值耗散与良好的源项平衡能力^[22, 29]。总之, 所构建的 Godunov-FVM (HLLC) 浅水模型在起伏地形上具有准确、稳定地捕捉急缓流转换及激波的能力, 其“误差在激波处集中、其他区域较小”的分布特征与同类研究结果相符^[22, 29-30]。

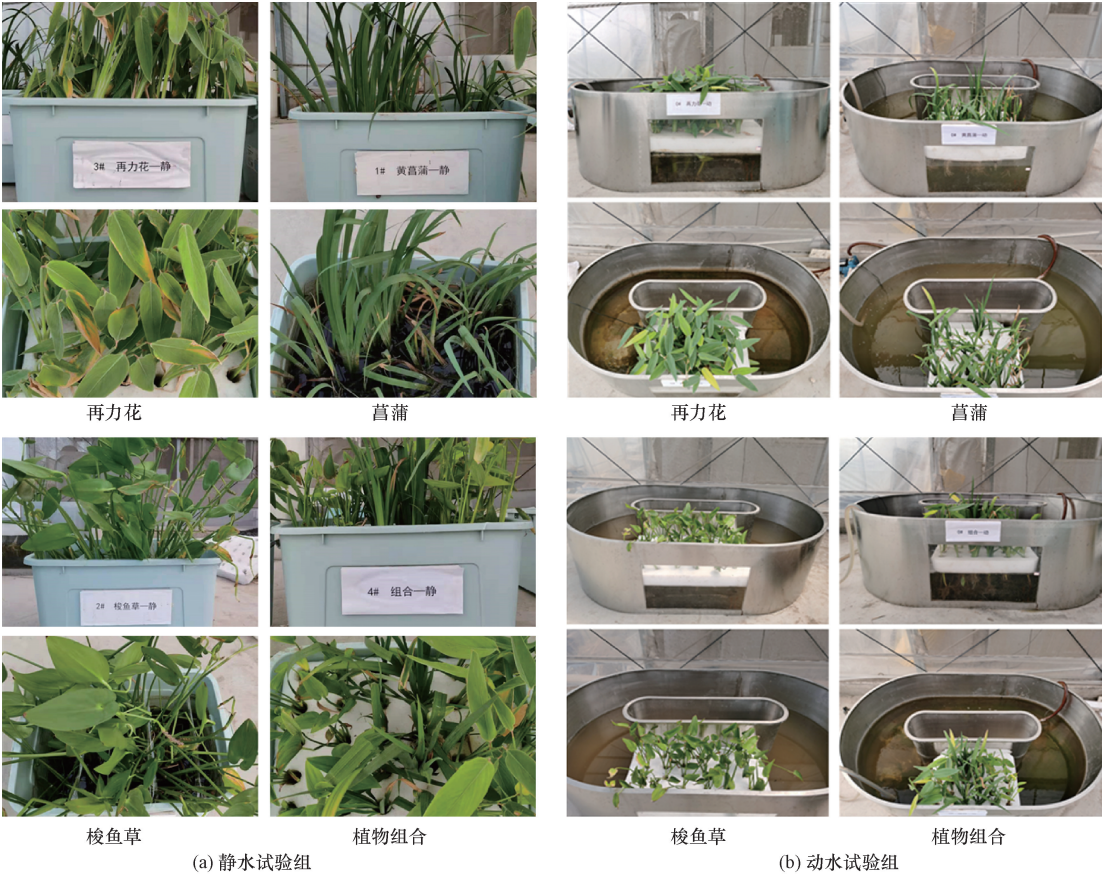


图2 室内实验现场:静水与动水工况下四种植被配置的实景

Fig. 2 Indoor experimental setup: photographs of four vegetation configurations under still-water and dynamic-flow conditions

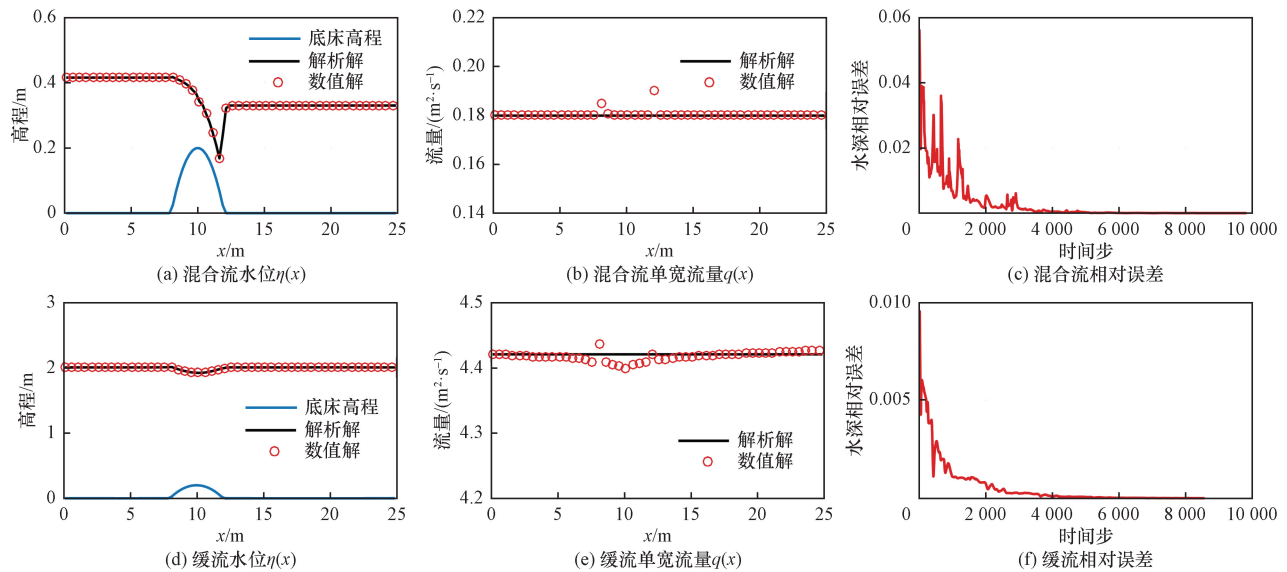


图3 模型验证-Goutal-Maurel 非平坦渠道基准

Fig. 3 Model validation-Goutal-Maurel non-flat-bed channel benchmark

2.1.2 抛物床面与下渗过程模拟

为检验干湿处理与摩阻源项离散的稳健性,采用 Sampson 等^[26]提出的抛物盆地往复振荡算例。该解析解包含移动岸线与反复干湿转化,是浅水方

程平衡保持格式与干湿前沿处理能力的常用检验工况之一^[10,22]。计算以解析解为初始场,四周固壁,模拟时长6 000 s。结果显示,在 $y = 0$ 剖面各时刻的水位分布与解析解吻合良好(图4),水位最大

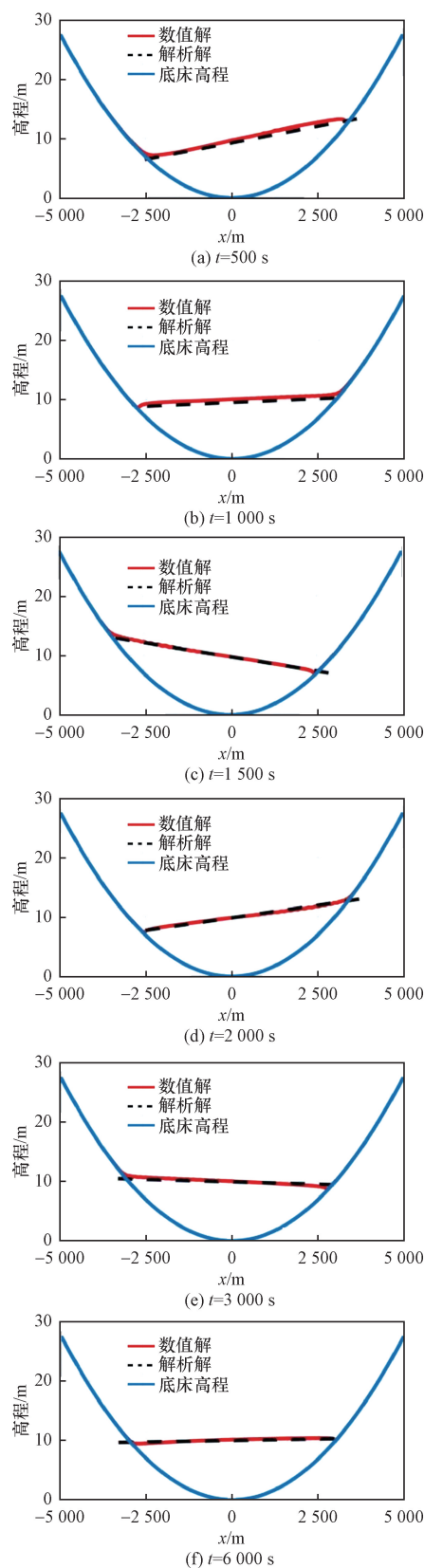


图4 抛物盆地往复震荡基准: $y = 0$ 剖面在不同时刻的水面高程 $\eta(x)$ 与底床高程对比

Fig. 4 Parabolic-basin oscillation benchmark: comparison of water-surface elevation $\eta(x)$ and bed elevation along the $y = 0$ transect at different times

相对误差 $< 1.5\%$, 计算过程中未见非物理振荡与明显数值耗散, 表明模型在干湿交替与边界水位快速变化条件下具有良好的数值稳定性。

进一步采用 Woolhiser 坡面降雨-下渗算例检验产汇流-入渗耦合能力。在坡面 Horton 型产流模拟中, 降雨与入渗通常以源项/汇项形式进入浅水方程, 该类算例常用于评估源汇项离散与耦合策略对流量过程线的影响^[23,27]。出口流量历时曲线较好再现“快速增长-缓慢增长-迅速衰减”的三阶段过程(图5), 最大相对误差为 8.28%。总体上, 模型能够捕捉坡面由入渗主导向产流主导的阶段转换及退水过程, 为后续含降雨-入渗情景下的通流模拟提供支撑。

三类基准共同覆盖了床面起伏、激波与缓流、干湿交替、摩阻与入渗耦合等关键数值情形。对应最大相对误差分别为 5.7%、 $< 0.4\%$ 、 $< 1.5\%$ 、8.28%, 说明所建模型在通量-源项平衡、非负水深保持以及降雨-入渗源汇项耦合方面具备可用的稳定性与精度, 也为后续将水动力模拟与植被净化效应解释相衔接提供了可靠基础。

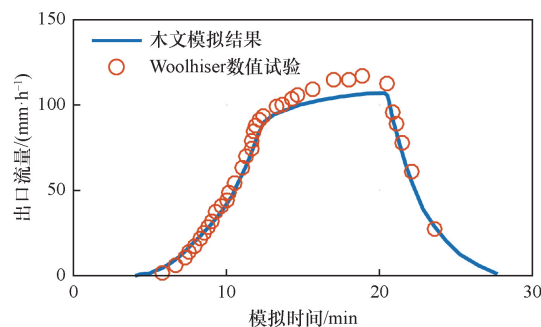


图5 坡面降雨-下渗基准(Woolhiser): 出口流量历时曲线对比

Fig. 5 Hillslope rainfall-infiltration benchmark (Woolhiser): comparison of outlet discharge hydrographs

2.2 挺水植物-水流相互作用

采用文献[28]中刚性挺水植物通道试验作为间接对比数据集, 检验二维 SWE 模型与三维 RANS 模型在“植物通流-水位响应”问题上的适用性。为保证与两类数值框架相匹配, SWE 将植被区处理为永久干网格以等效表征刚性植株对有效过水断面的削减(体积占据效应); RANS 以 Darcy-Forchheimer 动量汇将植被冠层简化为多孔介质, 孔隙率依据植株密度与直径换算。类似的“以等效阻力/动量损失来参数化植被作用”的思路, 也常见于植被阻力系数与流动结构研究中^[17-18]。如图6所示为8组不同等效孔隙率 φ 下归一化距离 x^* 与归一化水位 η^* 的关系图。

从趋势看, 两类模型均能再现“通过植被区域

的水位抬升-下游恢复”的基本形态;但随着 φ 降低(即植株密度增大、阻力增强),两类模型在下游段的细节表现出更清晰的分化。高密植工况($\varphi \approx 0.010 \sim 0.018$)中,实验曲线在下游段表现出更强的弯曲度与局部起伏;SWE可稳定再现总体水位趋势,RANS在密植或局部扰动显著时更能反映水面线非线性与局部结构,两者互补。从机理上看,密植冠层更容易形成明显的剪切层与尾涡扰动,这类局部结构对水面线细节会产生影响,而RANS框架通常更有利于解析该类流动结构差异^[17];同时,挺水植被的拖曳系数随密度与流态变化而改变,也会放大回水抬升与非均匀性^[18]。进入中密植工况($\varphi \approx 0.041 \sim 0.073$)后,两模型与实验的吻合度显著提高,仅在出口段曲率上存在细微差别。在低密

植工况($\varphi \geq 0.163$),两模型曲线几乎重合且与实验高度一致,表明在阻力较弱、通流更接近一维缓变时,SWE的深度平均近似已可稳定描述沿程水位变化^[28]。

上述结果表明:SWE适于大尺度、快速评估总体阻力效应与水位沿程趋势,尤其在中低密度或工程初步方案比选场景;RANS适用于密植或存在显著局部扰动的场景,可用于分析冠层剪切与尾涡对水位曲率/局部波动的影响^[17],并为阻力参数选取与敏感性解释提供支撑^[18]。两者在本节验证工况下呈互补关系:区域尺度与方案对比可优先采用SWE,在关键断面或高密植情形下再以RANS复核。该认识有助于减少河湖与湿地修复工程中模型选型的盲目性,提高方案比选与局部精细分析的针对性。

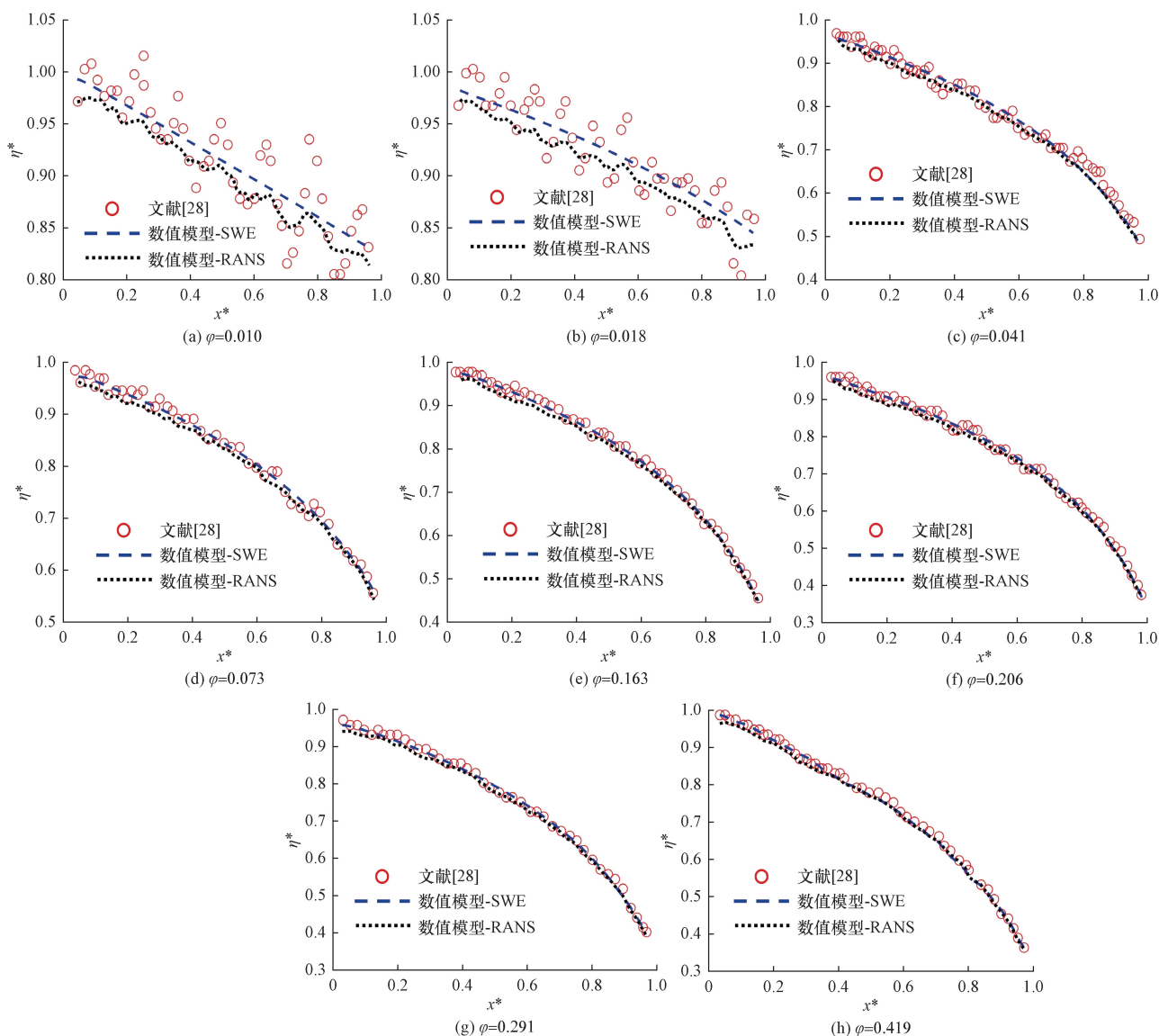


图6 不同等效孔隙率(φ)的植被通道内归一化水位沿程对比

Fig. 6 Comparison of normalized water-surface profiles along a vegetated channel for different effective porosities (φ)

2.3 净水效果试验分析

2.3.1 不同植物类型下的净化效果

如图7所示为不同植物类型在静水、来流与波浪条件下 C/C_0 的变化。各处理在第1~第6天降幅较大、后期趋缓,可理解为前期由快速吸附/同化与根际反应启动贡献,后期逐步受传质与底物/位点约束而放缓,这类“快-慢”动力学在单植与混植的多污染物去除试验中均较常见^[19]。

不同植物的优势指标与水动力条件呈“分工”特征。由图7(a)可知,梭鱼草在动水下控氮优势突出:第12天 TN^* (C/C_0) 在来流与波浪下分别约为0.34和0.23,显著低于静水(约为0.74),提示其控氮更依赖动水强化后的交换与根际过程;但其控磷在静水中更有利(TP^* 第12天约为0.27,而来流/波

浪约为0.72/0.81),说明扰动增强时颗粒态磷再悬浮与界面再分配会削弱净去除^[14]。由图7(b)可知,再力花在静水下表现出更稳定的综合净化,尤其 TP^* 与 $NH_4^+-N^*$: TP^* 第6天即降至约为0.27并维持至第12天(约为0.26), $NH_4^+-N^*$ 第12天约为0.34,均优于动水工况,与工程应用中“低扰动更利于稳定削减磷与氨氮”的经验一致^[1-2]。由图7(c)可知,菖蒲的控氮与控氨氮同样以静水更优(第12天 TN^* 约0.33、 $NH_4^+-N^*$ 约0.20),但其控磷在动水条件下反而更明显(TP^* 第12天来流/波浪约0.43/0.60,而静水约0.83),提示不同物种对水动力的敏感性存在差异。

由图7(d)可知,等株数组合在试验初期出现较快下降,但后期未稳定超过最佳单一物种:如组合静

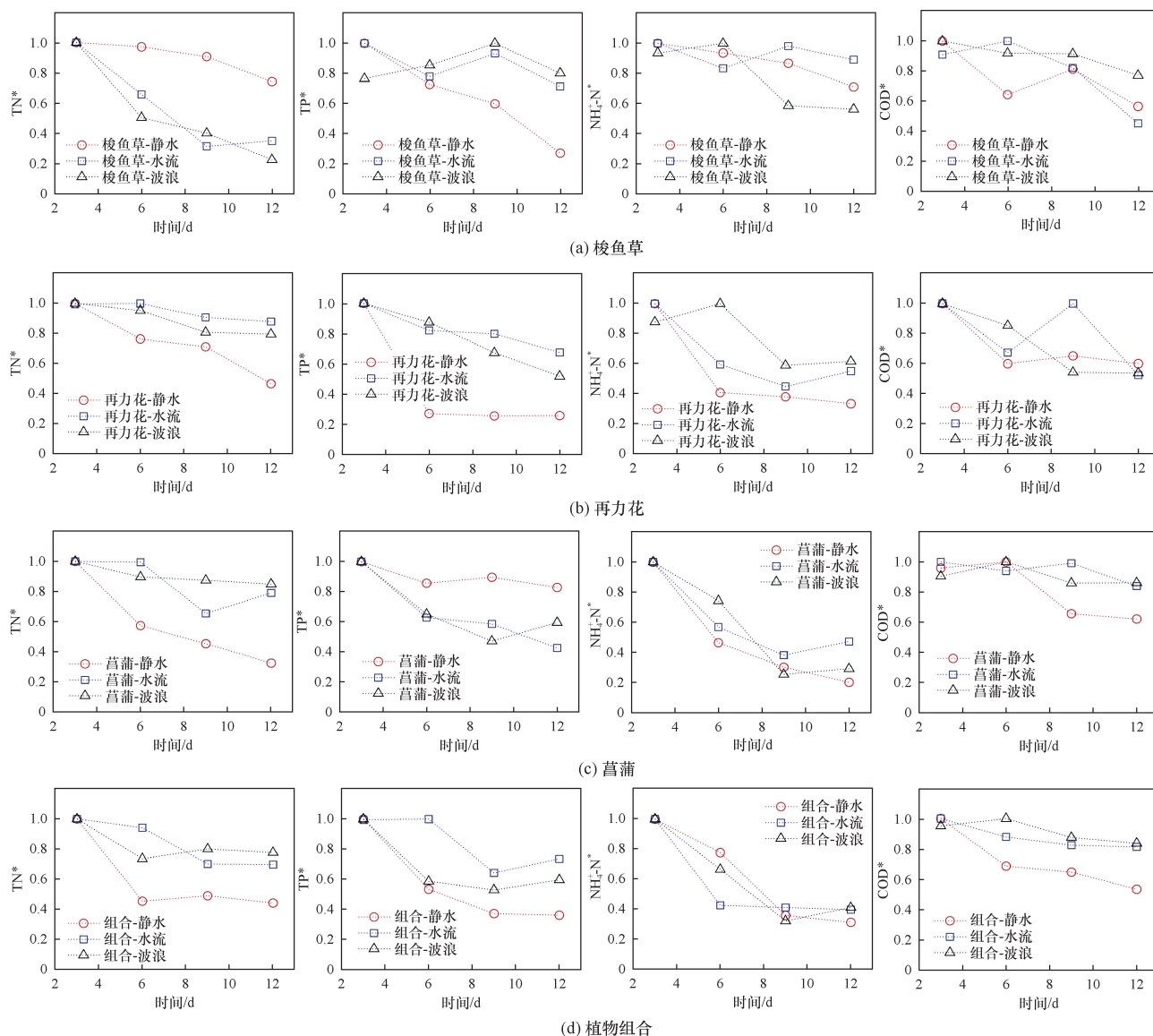


图7 三种单一挺水植物及其组合在不同水动力条件下的归一化水质指标随时间变化

Fig.7 Temporal evolution of normalized water-quality indicators (C/C_0) under different hydrodynamic conditions for three emergent macrophyte monocultures and a mixed-species treatment

水 TN^* 第 6 天降至约 0.46 后在第 12 天仍约 0.45, 而梭鱼草波浪下可降至约 0.23、菖蒲静水约 0.33。这说明“混植必然优于单植”并非普适规律,其增益更依赖物种互补性与资源/空间竞争格局^[19-20]。据此,以 TN 控制为主时,可优先选择梭鱼草并配置适度动水条件;以 TP 与 NH_4^+-N 控制为主时,可优先选择再力花并控制扰动强度;混植不宜被预设为优于单植,而应结合物种互补性和现场目标加以选择。

2.3.2 不同水动力条件下的植物响应差异

水动力条件对净化效果的影响具有明显的指标和物种依赖性。对于 TN , 动水条件的促进作用主要体现在梭鱼草处理中。梭鱼草在来流和波浪条件下的 TN^* 下降更明显[图 8(a)~图 8(c)]; 以第 12 天为例,其 TN^* 分别降至 0.34 和 0.23, 低于静水条件下的 0.74。而再力花、菖蒲及等株数组合并未呈现完全相同的变化趋势,说明 TN 削减对水动力条件的响应具有物种差异。上述现象可能与来流和波浪在植被冠层内形成剪切与湍混、提高冠层内外物质输运效率有关^[5,16], 并可能为根区复氧与氮素转化提供更有利的传质条件^[2]。

对于 TP , 静水条件下梭鱼草、再力花及等株数

组合的 TP^* 总体较低,而菖蒲在来流和波浪条件下的 TP^* 较低,表明不同植物的 TP^* 响应并不一致。以再力花为例,其 TP^* 第 6 天降至约 0.27, 第 12 天维持在约 0.26, 低于来流和波浪条件下第 12 天的 0.69 和 0.52。这一差异可能与动水扰动下颗粒态磷再悬浮及其在水-底界面的重新分配有关,从而部分抵消沉降或固定产生的“净去除”^[14]。 NH_4^+-N 的响应同样具有物种差异。再力花和菖蒲在静水条件下的 $NH_4^+-N^*$ 相对较低,梭鱼草在波浪条件下相对较低,而等株数组合在不同工况间的差异较小。例如,再力花在静水、来流和波浪条件下第 12 天的 $NH_4^+-N^*$ 分别约为 0.34、0.56 和 0.62, 而梭鱼草在波浪条件下约为 0.55, 低于静水条件下的 0.71。这种差异可能反映了复氧促进硝化与界面再释放回补的共同作用,其中后者在扰动增强时可能更明显^[14], 而不同物种的根系通气和根际氧化能力也会影响两者的相对贡献^[2,4]。 COD^* 在不同水动力条件下未呈现一致的变化方向,第 12 天各处理约为 0.45~0.86, 表明短期内水动力条件可能并非 COD 去除的单一主控因素,其变化还可能受到底物组成和生物降解过程的影响^[1-2]。

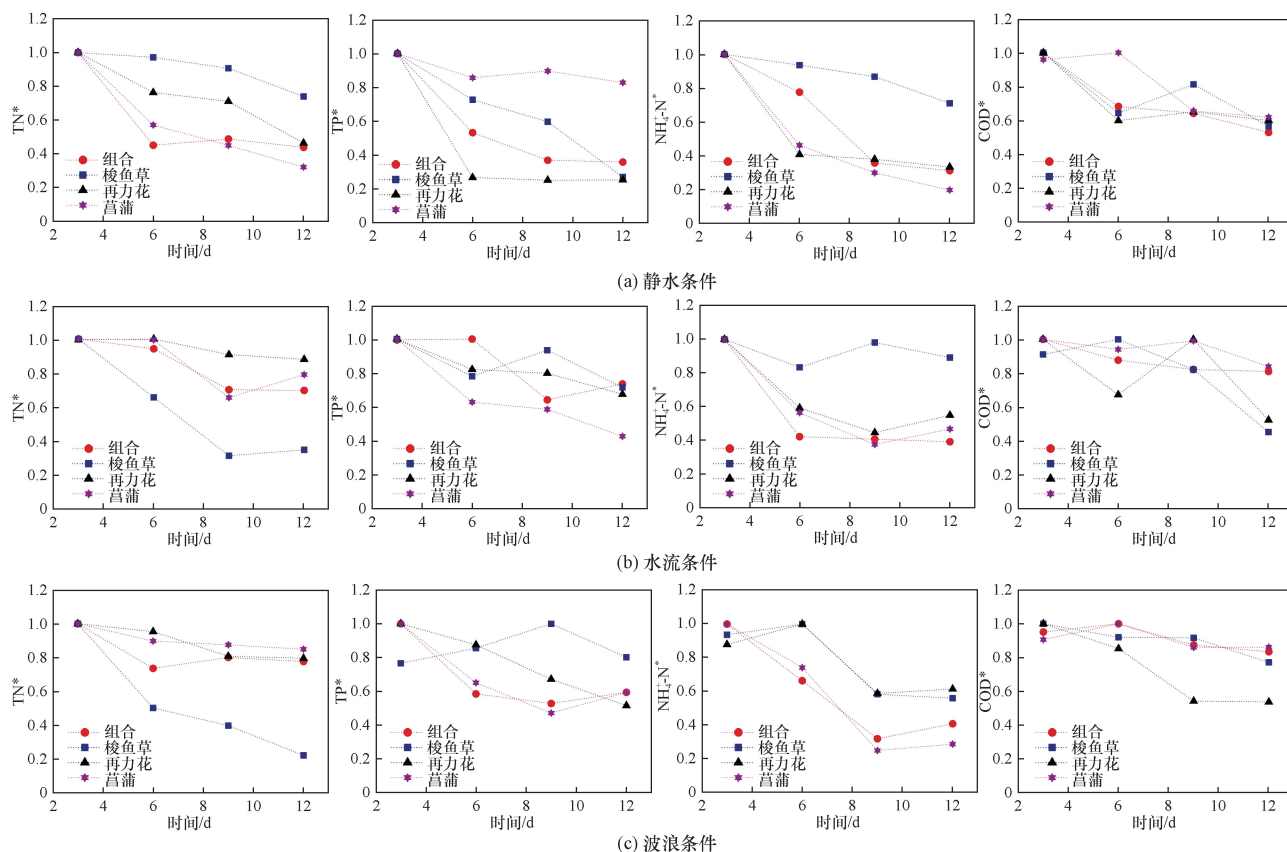


图 8 三类水动力工况下四种植被配置的归一化水质指标 C/C_0 随时间变化对比

Fig. 8 Comparison of the temporal evolution of normalized water-quality indicators (C/C_0) for four vegetation configurations under three hydrodynamic regimes

综上,不同水质指标对水动力条件的响应具有明显的植物种类依赖性,不能简单概括为动水有利于控氮、静水有利于控磷和控氨氮。工程应用中应结合目标污染物、植物种类及现场水动力条件确定植物配置和扰动强度。

3 结论

建立二维浅水方程(SWE)与三维雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)模型,并在典型基准算例上验证二维模型在含水跃混合流、稳态缓流、干湿交替及降雨-入渗耦合条件下的稳定性与精度(最大相对误差 $\leq 8.28\%$)。结果表明,二维模型适于总体阻力效应与沿程水位趋势评估,三维模型更适于局部扰动显著场景下的结构刻画,两者适用场景互补。水动力对净化效能具有指标和物种依赖性:来流和波浪有利于梭鱼草的TN去除,静水有利于部分植物处理的TP与 NH_4^+-N 削减,COD未呈现一致的水动力响应;等株数组合未表现持续协同优势。总体而言,明确了多尺度模型的适用边界,并揭示了挺水植物在不同水动力条件下的水质响应规律,可为浅水河湖生态修复、人工湿地尾水净化和局部活水调控提供参考。

参 考 文 献

- [1] 卢秀秀, 刘云根, 王妍, 等. 典型挺水植物应用于湿地生态修复工程污染净化效应差异性研究[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(1): 87-91, 98.
Lu Xiuxiu, Liu Yungen, Wang Yan, et al. Study on the difference of pollution purification effect of typical water-holding plants applied to wetland ecological restoration projects[J]. Environmental Pollution & Control, 2024, 46(1): 87-91, 98.
- [2] 黄晓晨, 于金山, 王晓奕, 等. 挺水植物在富营养化水体净化中的应用进展[J]. 中南农业科技, 2024, 45(2): 144-151.
Huang Xiaochen, Yu Jinshan, Wang Xiaoyi, et al. The application progress of emergent plants in the purification of eutrophic water bodies[J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2024, 45(2): 144-151.
- [3] 汪涛. 四种挺水植物浸提液对铜绿微囊藻的化感作用及对富营养化水体的修复[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2025.
Wang Tao. Allelopathic effects on *Microcystis aeruginosa* and restoration effects on eutrophic water bodies of four emergent plants[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2025.
- [4] Vymazal J. Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting-biomass and load matter the most[J]. Ecological Engineering, 2020, 155: 105962.
- [5] Weitzman J S, Zeller R B, Thomas F I M, et al. The attenuation of current-and wave-driven flow within submerged multispecific vegetative canopies[J]. Limnology and Oceanography, 2015, 60(6): 1855-1874.
- [6] Luan G, Wang T, Hou J, et al. A novel hydrodynamic-water quality coupling model for high-efficiency and high-resolution simulations of urban NSPs[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 64: 105680.
- [7] 周洁, 朱丽. 南海湿地生态长效补水优化控制方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(31): 246-251.
Zhou Jie, Zhu Li. Optimal control method for long term replenishment of wetland in South China Sea[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(31): 246-251.
- [8] Bresch D. Shallow-water equations and related topics[M]//Handbook of Differential Equations: Evolutionary Equations. Amsterdam: North-Holland, 2009.
- [9] Qi X, de Almeida G A M, Maldonado S. Physics-informed neural networks for solving flow problems modeled by the 2D shallow water equations without labeled data[J]. Journal of Hydrology, 2024, 636: 131263.
- [10] Barsukow W, Berberich J P. A well-balanced active flux method for the shallow water equations with wetting and drying[J]. Communications on Applied Mathematics and Computation, 2024, 6(4): 2385-2430.
- [11] Wu G, Li Z, Weng H. A robust two-dimensional shallow flow model with adaptive quadtree mesh[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(10): 1834.
- [12] Benoumessad K, Fourar F Z, Fourar A, et al. Modeling turbulent flow velocity profiles in irregularly shaped open channels: a 3D approach[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2025, 15(2): 22203-22208.
- [13] Huang N, Sun J, Zhao Y, et al. Modeling plant canopy through numerical simulation of cylindrical array[J]. Computers & Fluids, 2025, 289: 106551.
- [14] 田柏嘉, 于珊, 李一平, 等. 水动力条件对平原河网区底泥氮磷释放特性影响及定量化解析[J]. 环境科学学报, 2025, 45(12): 191-202.
Tian Baijia, Yu Shan, Li Yiping, et al. Effect of hydrodynamic conditions on nitrogen and phosphorus release characteristics of sediment in plain river network and its quantitative analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45(12): 191-202.
- [15] 靳垚, 孙洪广, 王连. 畅流活水净化动力学行为分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(11): 4800-4810.
Jin Yao, Sun Hongguang, Wang Lian. Analysis of dynamic behavior of water purification through flowing water[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(11): 4800-4810.
- [16] Wu C, Wu S, Wu X, et al. Numerical investigation of the effects of aquatic vegetation on wind-induced wave and current characteristics in shallow lakes[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 9: 829376.
- [17] Yu S, Dai H, Zhai Y, et al. A comparative study on 2D CFD simulation of flow structure in an open channel with an emerged vegetation patch based on different RANS turbulence models[J]. Water, 2022, 14(18): 2873.
- [18] Zhang Y, Cheng J, Hassan M A, et al. Drag coefficient of emergent vegetation in a shallow nonuniform flow over a mobile sand bed[J]. Water Resources Research, 2024, 60(5): e2023WR036535.
- [19] Fletcher J, Willby N J, Oliver D M, et al. Multi-pollutant removal dynamics by aquatic plants in monoculture or mixed communities[J]. Environmental Research, 2024, 263: 120041.
- [20] Chen Z, Sawyer A H, Lee J, et al. Effects of polyculture on nutrient removal from residential raw sewage using field-scale artificial floating islands[J]. Journal of Environmental Management, 2025,

- 377; 124562.
- [21] Toro E F. Shock-capturing methods for free-surface shallow flows [M]. Hoboken: Wiley and Sons Ltd., 2001.
- [22] Audusse E, Bouchut F, Bristeau M O, et al. A fast and stable well-balanced scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2004, 25(6): 2050-2065.
- [23] Xia X, Liang Q, Ming X, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations [J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3730-3759.
- [24] NVIDIA. CUDA C programming guide [M]. Santa Clara: NVIDIA Corporation, 2013.
- [25] Goutal N, Maurel F. Proceedings of the 2nd workshop on dam-break wave simulation[R]. Paris: Electricité de France (EDF), 1997.
- [26] Sampson J, Easton A, Singh M. Moving boundary shallow water flow above parabolic bottom topography [J]. The Proceedings of ANZIAM, 2006, 47: C373-C387.
- [27] Woolhiser D A, Smith R E, Giraldez J V. Effects of spatial variability of saturated hydraulic conductivity on Hortonian overland flow[J]. Water Resources Research, 1996, 32(3): 671-678.
- [28] Wang W J, Huai W X, Thompson S, et al. Steady nonuniform shallow flow within emergent vegetation[J]. Water Resources Research, 2015, 51(12): 10047-10064.
- [29] Delestre O, Lucas C, Ksinant P A, et al. SWASHES: a compilation of shallow water analytic solutions for hydraulic and environmental studies[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2013, 72(3): 269-300.
- [30] 艾丛芳, 金生. 基于非结构网格求解二维浅水方程的高精度有限体积方法[J]. 计算力学学报, 2009, 26(6): 900-905.
Ai Congfang, Jin Sheng. Solution of the 2D shallow water equations using the high-resolution finite-volume method on unstructured meshes[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(6): 900-905.