

•水利工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202300293



本刊网刊

基于 LES 的连续分布植物斑块水动力特性研究

高欢¹, 龚轶青¹, 毛劲乔^{1*}, 陈彦宏¹, 戴杰^{1,2}, 王康¹, 孟定华¹, 杨吉¹

(1. 河海大学水利水电网学院, 江苏南京 210098; 2. 伦敦大学学院土木、环境与测绘工程学院, 伦敦 WC1E 6BT)

摘要: 河湖中存在大量连续分布的植物斑块, 水位发生变化时斑块与河岸之间距离随之改变, 进而影响流场结构。为明确水位变化过程中连续分布植物斑块周围的水动力特性, 利用 Hydro 3D 开源代码, 采用基于浸没边界法的 LES 技术, 构建了连续分布的圆形刚性挺水植物斑块的数学模型, 并通过试验数据验证了数学模型的准确性, 并以此为基础开展 3 维水动力特性研究。结果表明: 连续分布的植物斑块之间存在遮蔽效应, 斑块后方出现低速区, 水流向两侧偏转产生横向出流, 斑块内单个植株没有表现出明显的群体效应; 剪切作用使高湍动能区域位于斑块两侧, 下游斑块的存在破坏了上游斑块后方的尾涡结构; 当植物斑块内固体体积分数 ϕ 为 0.17 时, 斑块下游水流呈现出漩涡状结构, 有利于在斑块下游富集营养物质; 植物斑块与边壁之间的距离 (S) 显著影响了斑块周围的流场结构, 随着 S 的减少, 岸边流速降低, 减弱了水流对河岸的冲刷作用, 同时, 连续分布的植物斑块周围和内部涡结构的强度和完整性逐渐减小; ϕ 由 0.17 降低为 0.05 时, 上游斑块遮蔽效应减弱, 在斑块后方产生了长度与植被斑块直径 (D) 相近的涡旋空白区, 在斑块尺度上无法形成稳定的涡结构, 仅在植株尺度上存在少量涡。研究成果为明确河湖水位变化过程中植物斑块周围水动力特性提供了参考。

关键词: 植物斑块; 大涡模拟; 水力特性; 湍动能; 涡旋结构

中图分类号: TV131

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)03-0184-08

随着全球气候变化和人类活动的增多, 水生植物在河流和湖泊中的分布和数量受到越来越多的关注。天然河流中存在大量以连续分布形式存在的植物斑块^[1], 这些植物斑块一方面能够为水生生物提供栖息地和食物来源, 吸收水体中的污染物净化水体^[2]。另一方面对河流的水动力过程产生影响^[3], 如降低流速、抬高水位、降低河道的行洪能力等^[4]。因此, 研究连续分布植物斑块的水动力特性, 深入理解河流生态系统的运行规律, 对维持水生生态系统的健康、稳定和可持续发展具有重要意义。

在生长方式和环境因素的互相作用下, 天然河湖中水生植物多以圆形斑块的形式存在^[5]。大量学者采用试验和数值模拟的方式对植物斑块周围水动力特性进行了研究^[6-8]。李晗政等^[9]使用基于浸没边界法的大涡模拟技术, 开展了单个斑块在不同的植株密度下 3 维水流数值模拟研究, 发现高密度植物斑块对水

流的遮蔽作用更强, 且在斑块前端形成马蹄涡结构。Mulahasan 等^[10]在水槽中心布置沿流向等距分布的圆柱体, 以表示理想化的植物斑块, 通过对阻力系数进行量化分析, 得到刚性植被的直径会影响流动阻力的结论。斑块周围的水流运动能力明显高于斑块内部, 抑制了斑块附近沉积物沉淀, 加速了河道侵蚀, 在一定程度上限制了植物斑块向河道中心的生长^[11], 而斑块后的尾流区速度降低, 能够促进营养物质局部沉积, 促进斑块以连续分布的形式存在^[12]。

以往的研究大多将植物斑块设置于渠道中间位置^[13], 忽略了河岸对于植物斑块周围水动力特性的影响。河湖中水位变化频繁, 河岸与斑块之间的距离也随之改变^[14], 在这一过程中, 河岸对斑块剪切层和动量交换过程存在显著影响^[15]。相邻植物斑块之间存在相互影响, 斑块下游位置水流的湍动明显增加^[16]。植物斑块内植株的密度是影响斑块阻流能力的关键

收稿日期: 2023-04-17 修回日期: 2023-06-16 网络出版日期: 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279013); 江西省重大科技研发专项(20213AAG01012)

作者简介: 高欢(1997—), 男, 博士生. 研究方向: 环境流体力学. E-mail: huan1104484205@163.com

*通信作者: 毛劲乔, 教授, E-mail: jingqm@163.com

因素,随着斑块内植株密度的增加,斑块整体受到的拖曳力增加,而作用在单个植株上的拖曳力减小^[17]。

数值模拟能更全面地反映流场结构,常见的数值模拟方法主要有直接数值模拟(DNS)^[18]、雷诺时均法(RANS)^[19]和大涡模拟(LES)^[20]等。其中:DNS是解决所有尺度湍流问题最准确的方法,但计算成本过高;RANS只提供了时均化的结果,不能反映流场中湍流的细节;LES方法捕捉流场中涡旋结构变化的能力较强,能够细致刻画植物斑块周围水流的流场特征^[21],是一种兼顾准确性和计算效率的模型。

为进一步探究通江河湖中连续分布的刚性挺水植物斑块3维流场特征,本文采用基于浸没边界法的LES方法,对连续分布的圆形植物斑块周围流场特性进行分析,探究了河岸与斑块之间的距离和斑块内植株的密度对连续分布的圆形植物斑块流场特性的影响,以明确天然河湖中连续分布植物斑块相互作用机理,进而揭示通江河湖水位变化过程中植被的生态效益。

1 数值模拟

1.1 控制方程及离散方法

本文采用开源代码Hydro 3D^[22],基于LES方法,对空间滤波后的N-S(Navier-Stokes)方程进行求解。

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $\mathbf{u}=(u,v,w)^T$ 为3维空间中的速度矢量; t 为时间; p 为压强; Re 为雷诺数; $\boldsymbol{\tau}$ 为亚格子应力张量; \mathbf{f} 为外源作用力,本文中主要指植物对水产生的阻力和升力,通过直接力-浸没边界法(Direct Forcing IBM)^[23]进行计算并施加于周围流体。

壁面自适应局部涡黏模型(WALE)是针对壁面涡黏系数 ν_t 而开发,能判定近壁面流动状态,自动对涡黏系数的计算进行调整,为提升计算精度,本文选择WALE模型结合浸没边界法解析复杂边界处的近壁面流速。N-S方程组的对流项和扩散项使用4阶中心差分格式进行离散,并使用3阶龙格-库塔显式格式(Explicit RK3)进行时间步的推进;通过库朗特数自动控制时间步长,库朗特数取值为0.3。

1.2 计算域及边界条件

参照植物斑块不对称布置的物理模型试验^[1],水槽长度为20.0 m,宽度 B 为0.6 m,高度 H 为0.5 m,流量固定为8.5 L/s,通过渠道末端挡板调节水深;单株植物的形状简化为圆柱体,单个圆柱体直径 d 为5.0 mm,高度 h 为20.0 cm;植物斑块由多个圆柱体组成,单个植物斑

块近似为圆形,直径 D 为10.0 cm;首个植物斑块距离进口7.0 m,植物斑块之间的距离 L 为35.0 cm,斑块与壁面的距离为 S 。植物斑块的中植株密度以单位面积内的圆柱体面积 n 表示; a 为表征单位体积下迎流向区域的长度, $a=nd$; Φ 为表征斑块区域内单位体积下固体的体积分数(植株密度),即斑块区域内植物所占体积占整个斑块区域体积的比例, $\Phi=\pi ad/4$ 。使用频率为50 Hz的声学多普勒流速仪(ADV)测量3维流速数据,并对采样后的数据进行滤波处理,确保数据的准确性。

数值模拟过程中的计算域如图1所示,计算域体型参数与试验一致。图1中, u_0 为初始状态全流场平均速度。以首个植物斑块后河岸处为 $x=0$ 建立坐标系,沿 y 方向的宽度为 $6.00D$,沿 z 方向的高度为 $1.52D$ 。因本文主要研究植物斑块与渠道壁面距离发生变化时的流场特性,为提升计算效率,数值模拟中仅保留靠近水流进口方向的2个植物斑块,沿 x 方向的长度缩减为 $9.00D$,植物斑块与一侧边壁之间的距离为 S ,首个斑块沿 x 方向的位置为 $-1 < x/D < 0$,尾端斑块距离出口为 $3.00D$,保证了尾流的充分发展。

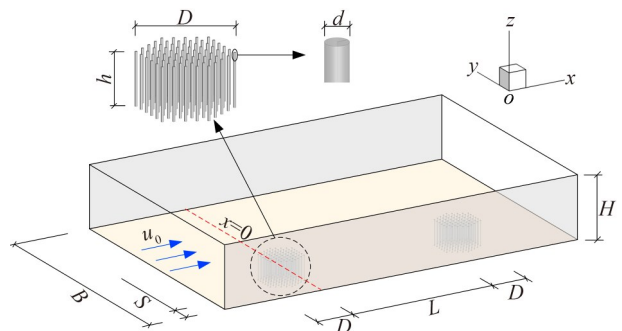


图1 计算域

Fig. 1 Computational domain

笛卡尔网格可以轻松处理多个连通区域、复杂边界和几何变形等问题,结构规则,有利于提升数值计算的效率,因此在网格划分过程中使用笛卡尔网格,计算域内采用等密度的网格划分方式,网格尺寸 $dx=0.0225D$, $dy=0.025D$, $dz=0.019D$,网格总数约为768万,网格壁面平均无量纲距离为4.88,使用壁面函数估计近壁面流速分布。部分涡旋随水流沿出口离开计算域,为减少其对数值计算稳定性的影响,进、出口采用对称边界条件,以获得无限延伸状态下的流场,即由出口流出的水流再次从入口流入,通过涡解析技术^[24]使入流为充分发展的湍流;侧壁和底面设置为无滑移边界,斑块前端进口水流已充分发展,降低了计算区域的总网格数,在保证计算精度的前提下降低了计算成本。所有工况下的弗劳德数均小于0.1,因此使用刚盖假定处理自由液面^[25]。

1.3 工况设定

试验共设置 4 个工况,如表 1 所示。表 1 的所有工况中斑块内植株排列方式均为均匀分布,其中,工况 2 与试验中布置相同,用于验证数学模型的准确性。

表 1 工况设置

Tab. 1 Working condition setting

工况编号	植株排列方式	S/cm	a/cm	Φ	L/cm	$u_0/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	均匀	25	0.44	0.17	35	9.32
2	均匀	5	0.44	0.17	35	9.32
3	均匀	5	0.13	0.05	35	9.32
4	均匀	0	0.44	0.17	35	9.32

为探究斑块内植株密度对流场的影响,工况 3 将植物斑块内植株密度 Φ 降低为 0.05,其他布置与工况 2 相同;为明确河岸与斑块之间的距离对流场特性的影响,工况 1 中 $S=25\text{ cm}$,植物斑块位于渠道中心位置,

工况 4 中 $S=0\text{ cm}$,植物斑块与河岸相切,其他布置均与工况 2 相同。

模拟工况的初始状态全流场平均速度(u_0),为获得更为准确计算结果,经过 90 个贯穿流动时长 $t_L(D/u_0 \approx 1)$ 后,视为流场达到稳定,进行 1 阶统计量的平均;再经过 60 个贯穿流动时长后,进行 2 阶统计量的平均;最终经过 30 个贯穿流动时长后,输出计算结果,计算结束时,流场状态为瞬时流场。

2 数学模型验证

在工况 2 的条件下,使用流速和雷诺应力对数值模拟的准确性进行验证,结果如图 2 所示。图 2 中, \bar{u} 为平均流速, $-\bar{u}'v'$ 为水平方向的雷诺应力。图 2(a) 为 $x/D=0.75$ 时, Li 等^[1] 的试验中时均流速值与使用 LES 进行模拟的结果对比,数值模拟结果与试验结果基本一致,仅在 $2 < y/D < 5$ 区域存在一定误差,其原因可能是试验中测量仪器对流场存在一定干扰。

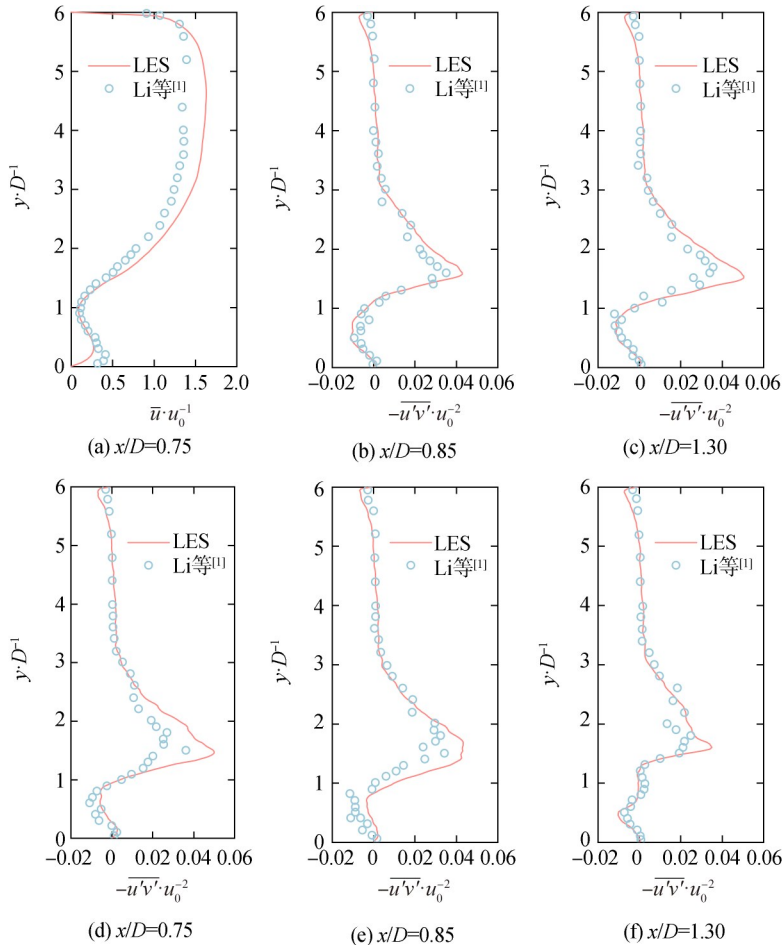


图 2 流速和雷诺应力数值模拟结果验证

Fig. 2 Validation of numerical simulation results for flow velocity and Reynolds

雷诺应力是脉动动量交换引起的附加应力,能够反映水流的脉动状态,图 2(b) ~ (f) 为雷诺应力在斑块之间的横向分布,设置 5 个断面,每个断面之间存在一

定间隔,结果表明,试验结果与模拟结果吻合良好,平均相对误差小于 10%,但在 $1 < y/D < 2$ 区域的模拟值略大于试验值,其原因可能是测量使用的 ADV 探头对

植株尺度紊流的精细测量存在一定干扰。

整体而言,数值模拟结果能够反映渠道内水流状态,雷诺应力沿 y 方向呈先减小后增加随后继续减少的趋势,各断面在 $y/D=0$ 和 $y/D=6$ 边壁处雷诺应力均为0。从图2(b)~(f)还可以看出,与位于渠道中心的植物斑块^[26]相比,雷诺应力与斑块呈现出不对称分布的现象,靠近边壁一侧的雷诺应力明显小于渠道中心一侧,表明植物斑块能够减少边壁附近脉动动量的交换,起到稳定河岸的作用。

3 结果分析

3.1 水平时均流场

中层流场在整个流场中具有代表性,在一定程度上反映了整个流场结构^[27],图3为4个工况下中层流场($z/D=0.5$)沿 x 方向的时均流速及流线分布。根据图3中流线分布,植物斑块与传统的圆柱绕流现象存在一定差异^[28],具有透水性的植物斑块附近水流不仅存

在绕流现象,还存在斑块内部植株间的贯穿流动。但具有一定透水性的植物斑块仍具有一定的阻流效果,4个工况中水流在斑块上游均出现明显的减速趋势,在斑块后方形成低速区($\bar{u}/u_0 \leq 0.6$)。工况1低速区沿渠道中线对称分布,低速区域以斑块为中心,流速向外依次递增,至斑块前端 $0.5D$ ($x/D=-1.5$)处减速至 $0.6u_0$,斑块后方 $1.4D$ ($x/D=1.4$)处流速同样降低为 $0.6u_0$,沿流向低速区域长度为 $2.9D$;工况2受渠道边壁影响,低速区并未呈现出对称分布的趋势,且流速最低区域未出现在斑块内部,而是出现在斑块后方,与植物斑块不相交,与工况1相比,低速区面积更大,且低速区与边壁相交,斑块与边壁之间因斑块的分流作用存在流速增加的现象;工况3斑块内植株密度降低,阻流效果减弱,仅在植株后方形成极小范围流速低于 $0.6u_0$ 的低速区;工况4中植物斑块与渠道边壁相交,其流速分布与工况2相近,但其低速区面积更大,因斑块与边壁相交,斑块与边壁之间不存在流速升高的现象。

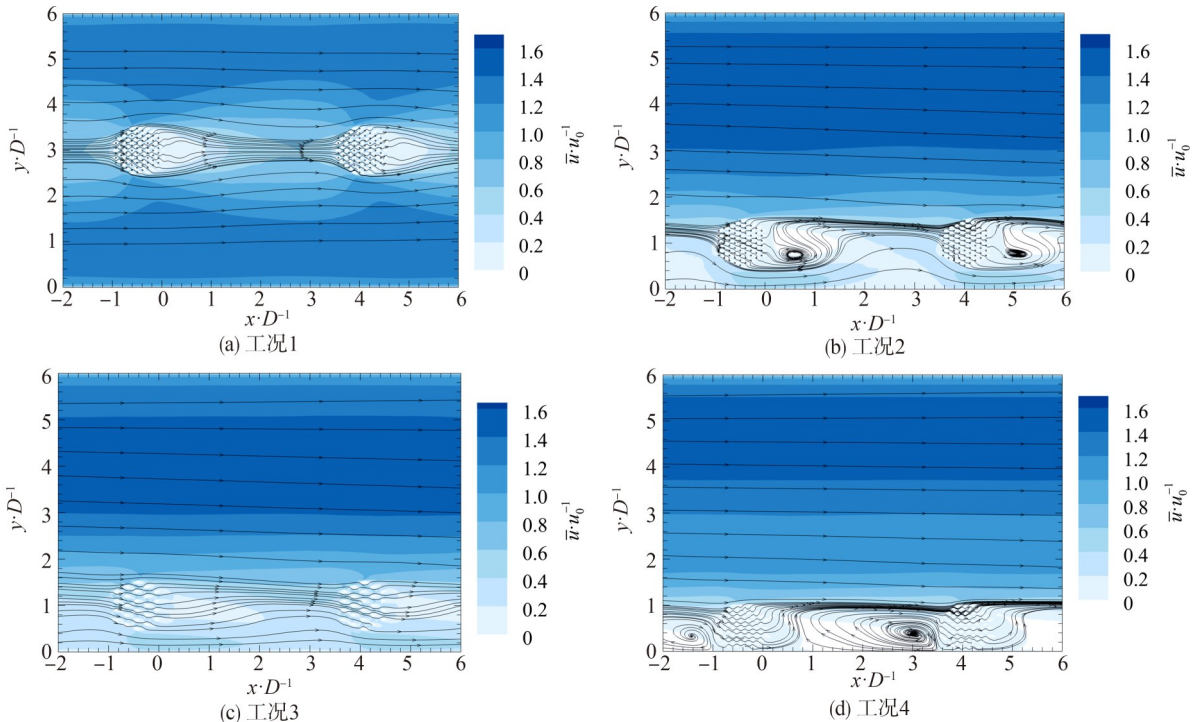


图3 不同工况下水平时均流场分布

Fig. 3 Time-averaged flow fields horizontal under varied conditions

水流进入斑块后,在圆柱体的作用下向斑块两侧偏转产生横向出流,斑块内单个植株没有表现出明显的群体效应。渠道中心单个植物斑块遇到水流后,受植被阻力影响,斑块内水体流速减小,斑块两侧流速增加^[29]。

从图3(a)中流线分布可以看出,相邻植物斑块间存在相互作用,尾流在中轴线两侧并未形成对称的涡旋结构,在植物斑块后方束窄。图3(b)中,植物斑块

后方约 $0.4D \sim 1.4D$ 处出现明显的偏心涡旋结构,其中心位于斑块后 $0.7D$ 靠近边壁一侧,这是由于边壁处切应力较大,产生的偏心旋转现象。图3(c)中植物斑块内 $\Phi=0.5$,当植物斑块 $\Phi \leq 0.5$ 时,阻流效果大幅减弱,因此在斑块后方未产生明显的涡旋流^[2]。图3(d)中植物斑块与渠道边壁相交,且斑块内植株密度较大,因此形成与丁坝类似的阻流效果^[30],偏心涡旋出现在植物斑块前方。

3.2 湍动能

湍动能是反映水流湍动能力的重要指标,其计算公式如下:

$$E_k = \frac{1}{2} (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2) \quad (3)$$

式中, E_k 为湍动能, \bar{u}' 、 \bar{v}' 、 \bar{w}' 分别为 x 、 y 、 z 3 个方向上的脉动速度。

图 4 为 4 个工况下瞬时湍动能 (E_k) 横向分布情况 ($z/D=0.5, x/D=0.75$)。从图 4 中可以看出: 工况 1 中, E_k 的峰值出现在 $y/D=3.75$ 处, 极值为 $0.42 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, E_k 值较高区域出现在 $2.4 \leq y/D \leq 4.3$ 区域, 与斑块放置位置存在一定差异, 其原因是斑块尺度的尾流效应造成了涡的不对称分布, 进而影响湍动能的对称性; 工况 2 中, E_k 的峰值出现在 $y/D=1.7$ 处, E_k 值较高区域出现在 $1.3 \leq y/D \leq 2.5$ 区域, 这是因为植物斑块在渠道内位置靠近边壁一侧, 而不受边壁影响的一侧流速更大, 水流的湍动能力更强, 因此 E_k 峰值出现在斑块边缘位置; 工况 3 中, E_k 的峰值出现在 $y/D=2.6$ 处, E_k 值较高区域出现在 $2.6 \leq y/D \leq 3.3$ 区域, 其原因是工况 3 中植物斑块阻水效果不明显, 因此 E_k 峰值出现在渠道中心位置流速最大处; 工况 4 中, E_k 的峰值出现在 $y/D=1.1$ 处, E_k 值较高区域出现在 $1.0 \leq y/D \leq 1.5$ 区域, 工况 4 斑块与边壁相交, 水流经过斑块后, 向渠道中心方向偏转, 因此斑块后方靠近渠道中心一侧湍动剧烈。

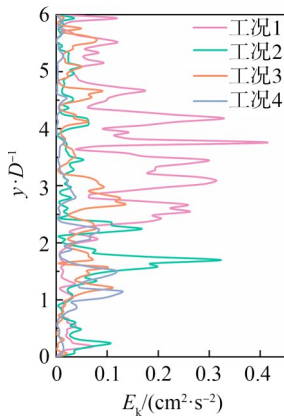


图 4 不同工况下瞬时湍动能横向分布

Fig. 4 Transverse distribution of instantaneous turbulent kinetic energy under varying conditions

综上所述, 含植物渠道内水流湍动与植物斑块分布位置相关, 斑块后方两侧水流湍动强度最高, 且随着植物斑块与边壁之间距离的降低, 边壁对植物斑块后方湍动分布的影响增大。

3.3 涡旋结构分析

Q 准则是由 Hunt 等^[31]引入的一种著名的涡旋识别方法, 它利用速度梯度张量的第二不变量定义涡旋

区域^[32]。为避免纯剪切流动对判别流场涡旋运动的干扰, 使用 Q 准则来刻画流场中的涡旋结构, 绘制出 4 个工况下的 Q 准则等值面, 如图 5 所示。

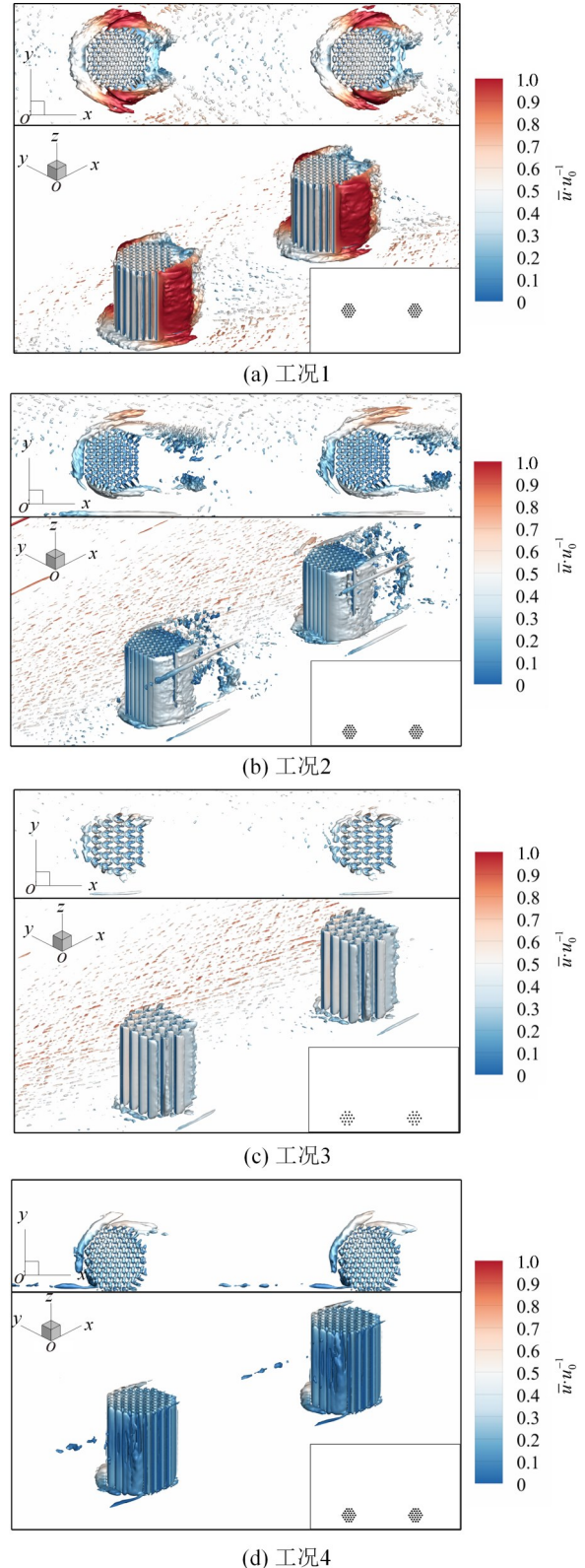


图 5 采用 x 方向平均流速着色的 Q 准则等值面
Fig. 5 Iso-surfaces of Q-criterion colored by the x -direction mean velocity

图5中,每张图片右下角为表示斑块位置的缩略图,并采用 x 方向的平均流速对 Q 准则等值面进行着色。

图5(a)为工况1中斑块附近的涡旋结构,主要由两部分组成,包括从斑块两翼脱落的分离涡以及斑块上游近底面出现的马蹄涡。其中,斑块两翼的分离涡主要是由斑块外缘各植株脱落的边界层混合叠加而成,在两侧剪切层中,流速梯度引发的K-H(Kelvin-Helmholtz)不稳定持续发展,直至因能量耗散而衰减,分离涡的存在增加了水流紊动且流速较高,不利于水中营养物质的沉积。图5(b)为工况2中斑块附近的涡旋结构,其涡旋结构与工况1类似,但涡旋沿斑块中轴线未呈现出对称分布的趋势,靠近边壁一侧的马蹄涡和分离涡均小于另一侧,其原因是受边界层影响,靠近边壁一侧水流流速低,不利于涡旋的产生和发展。图5(c)为工况3中斑块附近的涡旋结构,斑块内植株密度的降低,两侧剪切层的流速梯度较小,从斑块翼缘分离的涡旋无法获得能量补充,在两侧扩展的强度和范围都快速减小,斑块上游近底面仅出现少量的马蹄涡,斑块两侧未出现明显的分离涡。图5(d)为工况4中斑块附近的涡旋结构,边壁的阻碍作用使得斑块前方靠近边壁一侧不能形成完整的马蹄涡,仅在另一侧存在。斑块前方与边壁相交位置沿垂直方向存在柱状的立轴旋涡。

因此,随着植物斑块与边壁距离的减少,边壁对斑块周围的涡旋结构产生影响越大,尤其是靠近边壁一侧受到的影响更为明显。马蹄涡的强度和完整性随着植物斑块与边壁距离的减少而降低,逐渐向渠道中心一侧偏转,当植物斑块与边壁之间的距离为 $0.5D$ 时,斑块后方出现明显的分离涡。同时,随着植物斑块内植株密度的降低,斑块周围和斑块内部涡结构的强度和完整性逐渐减小。

4 结论

本文利用Hydro 3D开源代码,采用基于浸没边界法的大涡模拟技术,对不同工况下连续分布的植物斑块水动力特性和开展了数值模拟研究,以连续分布的圆形刚性挺水植物斑块为例,分析了通江河湖水位变化过程中植物斑块周围流场结构,明确了此过程中植物斑块周围水动力特性的变化。结论如下。

1)连续分布的植物斑块之间存在相互影响,下游斑块的阻碍作用使得水流流速降低,影响了上游斑块后方水流内涡旋的产生,减少了水流的湍动,有利于形成更加稳定的水流结构,水中营养物质在斑块之间易沉积,进而影响植物斑块的生长和发育,因此在自

然界中植物斑块多呈现出连续分布的状态。

2)植物斑块与边壁之间的距离显著影响了斑块周围的流场和涡旋结构,随着斑块与边壁距离的减少,相较于靠近渠道中心一侧,斑块周围靠近边壁一侧水流流速更低,湍动能更小,马蹄涡和分离涡的稳定性降低。但当植物斑块与渠道边壁相交后,斑块上游靠近边壁一侧出现立轴旋涡。

3)斑块内植株密度的差异同样导致流场和涡旋结构的差异,当 $S=5\text{ cm}$ 、 $\Phi=0.17$ 时,因斑块前端植物存在强烈的遮蔽效应,在斑块后方产生了长度约 $1D$ 的涡旋空白区;当 $S=5\text{ cm}$ 、 $\Phi=0.05$ 时,斑块的阻水效果减弱,斑块周围无法形成稳定的涡旋结构,仅在斑块内部存在少量涡旋。

参考文献:

- [1] Li Dian, Huai Wenxin, Liu Mengyang. Investigation of the flow characteristics with one-line emergent canopy patches in open channel[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125248.
- [2] Liu Mengyang, Huai Wenxin, Ji Bin. Characteristics of the flow structures through and around a submerged canopy patch[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(3): 035144.
- [3] Yamasaki T N, de Lima P H S, Silva D F, et al. From patch to channel scale: The evolution of emergent vegetation in a channel[J]. Advances in Water Resources, 2019, 129: 131–145.
- [4] Huai Wenxin, Zhang Jiao, Katul G G, et al. The structure of turbulent flow through submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(2): 274–292.
- [5] Gong Yiqing, Stoesser T, Mao Jingqiao, et al. LES of flow through and around a finite patch of thin plates[J]. Water Resources Research, 2019, 55(9): 7587–7605.
- [6] Liu Chao, Nepf H. Sediment deposition within and around a finite patch of model vegetation over a range of channel velocity[J]. Water Resources Research, 2016, 52(1): 600–612.
- [7] Gu Jiyi, Shan Yuqi, Liu Chao, et al. Feedbacks of flow and bed morphology from a submerged dense vegetation patch without upstream sediment supply[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2019, 19(2): 475–493.
- [8] Li Yaqi, Liu Shanjun, Liu Chao, et al. Comparison of two numerical simulation methods in fluent for wake area of rigid vegetation[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(2): 82–85. [李雅琪, 刘善均, 刘超, 等. Fluent关于刚性植被尾流区两种数值模拟方法对比[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2): 82–85.]
- [9] Li Hanmei, Mao Jingqiao, Gong Yiqing, et al. Numerical investigation of hydrodynamic properties of cylindrical veg-

- etation patch using large-eddy simulation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37(1): 108–114. [李晗玫, 毛劲乔, 龚轶青, 等. 圆柱形植物斑块水动力特性的大涡模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2022, 37(1): 108–114.]
- [10] Mulahasan S, Stoesser T. Flow resistance of in-line vegetation in open channel flow[J]. International Journal of River Basin Management, 2017, 15(3): 329–334.
- [11] Bouma T J, van Duren L A, Temmerman S, et al. Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: Combining field, flume and modelling experiments[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(8): 1020–1045.
- [12] Tsujimoto T. Fluvial processes in streams with vegetation [J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(6): 789–803.
- [13] Nepf H M. Hydrodynamics of vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 50(3): 262–279.
- [14] Caroppi G, Vástilá K, Gualtieri P, et al. Comparison of flexible and rigid vegetation induced shear layers in partly vegetated channels[J]. Water Resources Research, 2021, 57(3): e2020WR028243.
- [15] White B L, Nepf H M. A vortex-based model of velocity and shear stress in a partially vegetated shallow channel[J]. Water Resources Research, 2008, 44(1): 2006WR005651.
- [16] Ghani U, Anjum N, Pasha G A, et al. Investigating the turbulent flow characteristics in an open channel with staggered vegetation patches[J]. River Research and Applications, 2019, 35(7): 966–978.
- [17] Liu Mengyang, Huai Wenxin, Ji Bin, et al. Numerical study on the drag characteristics of rigid submerged vegetation patches[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(8): 085123.
- [18] Shi Xungang. A survey of direct numerical simulation of turbulence[J]. Journal of Hydrodynamics, 1992, 7(1): 103–109. [是勋刚. 湍流直接数值模拟的进展与前景[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 1992, 7(1): 103–109.]
- [19] Yan Chao, Yu Jian, Xu Jinglei, et al. On the achievements and prospects for the methods of computational fluid dynamics[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5): 562–589. [阎超, 于剑, 徐晶磊, 等. CFD 模拟方法的发展成就与展望[J]. 力学进展, 2011, 41(5): 562–589.]
- [20] Wang Lingling. Large eddy simulation theory and its application[J]. Journal of Hehai University(Natural Sciences), 2004, 32(3): 261–265. [王玲玲. 大涡模拟理论及其应用综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 261–265.]
- [21] Guo Wensi, Li Longguo, Liu Chao, et al. Study on evolution process of submerged jet flow field[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(Supp1): 35–43. [郭文思, 李龙国, 刘超, 等. 淹没射流流场演化过程研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(增刊 1): 35–43.]
- [22] Stoesser T, Kim S J, Diplas P. Turbulent flow through idealized emergent vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(12): 1003–1017.
- [23] Ouro P, Stoesser T. An immersed boundary-based large-eddy simulation approach to predict the performance of vertical axis tidal turbines[J]. Computers & Fluids, 2017, 152: 74–87.
- [24] Bomminayuni S, Stoesser T. Turbulence statistics in an open-channel flow over a rough bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(11): 1347–1358.
- [25] Jarrin N, Benhamadouche S, Laurence D, et al. A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large-eddy simulations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, 27(4): 585–593.
- [26] Liu Chao, Hu Zhenghong, Lei Jiarui, et al. Vortex structure and sediment deposition in the wake behind a finite patch of model submerged vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(2): 04017065.
- [27] White B L, Nepf H M. Shear instability and coherent structures in shallow flow adjacent to a porous layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 593: 1–32.
- [28] Huai Wenxin, Liu Mengyang, Yang Zhonghua. Analysis of vortex characteristics in wake of circular cylinder based on LES[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2018, 46(5): 95–99. [槐文信, 柳梦阳, 杨中华. 基于 LES 的圆柱尾流漩涡特性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 95–99.]
- [29] Zhang Yinghao, Lai Xijun, Tang Caihong. Advances in studies on the influence of aquatic vegetation on flow-sediment movement under unidirectional open-channel flow and wave conditions[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 309–319. [张英豪, 赖锡军, 唐彩红. 单向明渠流与波浪作用下植被对水沙运动影响研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 309–319.]
- [30] Chen Yanhong, Lu Yang, Yang Shutan, et al. Numerical investigation of flow structure and turbulence characteristic around a spur dike using large-eddy simulation[J]. Water, 2022, 14(19): 3158.
- [31] Hunt J C R, Wray A A, Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows[C]//Proceedings of the 1988 Summer Program in Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases. Stanford: Center for Turbulence Research, 1988: 193–208.
- [32] Dubief Y, Delcayre F. On coherent vortex identification in turbulence[J]. Journal of Turbulence, 2000, 1(1): 011.

Study on Hydrodynamic Characteristics of Continuous Distribution Vegetation Patches Based on LES

GAO Huan¹, GONG Yiqing¹, MAO Jinqiao^{1*}, CHEN Yanhong¹, DAI Jie^{1,2}, WANG Kang¹, MENG Dinghua¹, YANG Ji¹

(1.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2.Department of Civil, Environmental & Geomatic Engineering, University College London, London WC1E 6BT, United Kingdom)

Abstract: There are numerous continuous plant patches in rivers and lakes, and the distance between these patches and the riverbank changes with water level fluctuations, affecting the flow field structure. This study uses the Hydro 3D open-source code and LES technology based on the Immersed Boundary method to construct a mathematical model of circular rigid emergent vegetation patches to clarify the hydrodynamic characteristics of continuous plant patches under varying water levels. The accuracy of the mathematical model is verified using experimental data, and three-dimensional hydrodynamic characteristics are then analyzed. The results show that a “sheltering effect” exists between continuous plant patches, a “low-speed zone” appears behind the patch, and lateral outflow is generated when water flows toward both sides. Individual plants within the patch do not exhibit significant group effects. High turbulence energy occurs on both sides of the patch due to shear, and the presence of downstream patches disrupts the vortex structure behind the upstream patches. When the solid volume fraction Φ inside a patch is 0.17, the downstream flow forms a vortex structure, which facilitates nutrient enrichment downstream of the patch. The distance (S) between the plant patch and the wall significantly affects the flow field structure around the patch. As S decreases, the flow velocity near the bank decreases, weakening the erosion of the riverbank by the water flow, and the strength and integrity of the vortex structure around and within the continuous plant patches gradually decrease. When Φ decreases from 0.17 to 0.05, the sheltering effect of the upstream patch weakens, and a vortex “blank zone” with a length of approximately $1D$ appears behind the patch, preventing the formation of a stable vortex structure at the patch scale; only a small amount of vortex exists at the plant scale. The research results provide a reference for clarifying the hydrodynamic characteristics around plant patches during water level fluctuations in rivers and lakes.

Key words: vegetation patch; large eddy simulation; hydraulic performance; turbulent kinetic energy; vortex structure

(编辑 张琼)

引用格式: Gao Huan, Gong Yiqing, Mao Jinqiao, et al. Study on hydrodynamic characteristics of continuous distribution vegetation patches based on LES[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(3): 184–191. [高欢, 龚轶青, 毛劲乔, 等. 基于LES的连续分布植物斑块水动力特性研究[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(3): 184–191.]