

含沉水植被斑块明渠水流流速衰减区长度研究

张维乐¹, 吴时强^{1,2}, 吴修锋¹, 薛万云^{1,2}, 高 昂¹, 於思瀚¹

(1. 南京水利科学研究院水工水力研究所, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:通过水槽试验,研究了不同高径比、植被体积分数及淹没度影响下的沉水植被斑块沿程流速分布特性,得到了流速衰减区长度变化规律;通过特征值近似方法得到了流速衰减区长度预测公式。结果表明:沉水植被斑块流速衰减区长度分别与体积分数和淹没度呈负相关关系,在高度相同的情况下,与斑块宽度呈正相关关系;提出了沉水植被斑块流动影响下的三维流阻因子,对于高流阻斑块,流速衰减区长度由斑块宽度和高度共同决定,对于低流阻斑块,流速衰减区长度由斑块单位迎流面积决定;提出了流速衰减区长度预测公式,该公式预测精度较高,在测量平均不确定性度为 5.5% 的情况下,平均相对误差为 10.3%。

关键词:沉水植被斑块;流速衰减区长度;流速;阻力系数;粒子图像测速技术

中图分类号:TV133 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0219-09

Study on flow velocity adjustment length of submerged vegetation patch in open channel//ZHANG Weile¹, WU Shiqiang^{1,2}, WU Xiufeng¹, XUE Wanyun^{1,2}, GAO Ang¹, YU Sihan¹ (1. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through laboratory experiments, this study examines velocities distribution within submerged vegetation patches under varying patch height-to-width ratios、volume fractions and submergences. Scale equations were adopted to the prediction for flow velocity adjustment length. The results showed that the flow velocity adjustment length within submerged vegetation patches was negatively correlated with the vegetation volume fraction and submergence ratio. Under identical height conditions, the length exhibited a positive correlation with patch width. The three-dimensional flow resistance factor was proposed under the influence of submerged vegetation patch. For high flow-blockage, flow velocity adjustment length was determined by patch width and height. For low flow-blockage, flow velocity adjustment length was determined by the patch frontal area per unit volume. Prediction formulas for flow velocity adjustment length were developed forth. These formulas demonstrated a high accuracy and yielded an average relative error of 10.3% with an average measurement uncertainty of 5.5%.

Key words: submerged vegetation patches; flow velocity adjustment length; velocity; drag coefficient; PIV technology

水生植被作为水生态系统的重要组成部分,对维持水生生态健康稳定发挥着不可替代的作用^[1-7]。它们不仅可以拦截外源污染、净化水质,还有利于促进泥沙等细颗粒物沉积,维持河床稳定,在一定程度上影响了地貌发育及景观演变^[8-14]。在河流或湖泊中心,植被常以有限尺寸的沉水植被斑块形式存在,并在顺水流方向上延伸出不同的长度^[15-16]。不同斑块长度不仅会导致沿程流速的变化,还会影响斑块尾流区的水流结构,改变植被对养分的吸收效率及泥沙沉积模式。预测含斑块河道水流流速变化规律,判断斑块对水体流速影响长度,有助于沉水植被

斑块河道沿程流速预测模型的开发,对河道湖泊生态工程中植被斑块布置有着重要的指导意义。

近年来,众多学者已针对含挺水植被斑块或连续均匀沉水植被的明渠水流沿程流速变化展开了探究。研究结果表明,受植被斑块的阻挡作用,水流会在斑块前方一定距离处开始减速并发生分流,这使得部分水体发生横向或垂向绕流,另一部分则渗入斑块内部。斑块内水体流速从首部开始,随流向距离呈指数衰减,随后逐步恢复至均匀流流态。研究中通常将从斑块首部降至流速最低点的纵向距离定义为流速衰减区长度,该物理量是量化斑块沿程流

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20221190);国家自然科学基金项目(52209096)
作者简介:张维乐(1995—),男,工程师,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail: 1833305149@qq.com
通信作者:吴时强(1964—)男,正高级工程师,博士,主要从事水力学研究。E-mail: sqwu@nhri.cn

速变化的重要拐点,一些学者尝试对该值进行预测。Rominger 等^[17]通过特征值近似方法,结合试验得到挺水植被斑块流速衰减区长度的半经验关系式,认为流速衰减区长度由流阻因子和斑块宽度共同决定。Chen 等^[18]在其基础上,推导出连续均匀沉水植被流速衰减区长度预测公式,同样得出流速衰减区长度由流阻因子和斑块高度共同决定的结论。Lei 等^[19]通过动量方程建立了沉水植被斑块影响下的流速衰减区长度公式,该模型仅仅验证了体积分数为 0.025 的情形,对于大体积分数工况的适用性尚未可知。当前关于流速衰减区长度的预测研究多聚焦于二维流动场景,然而在自然环境中,特别是在植被生长初期,斑块多淹没于水中,流场呈强三维性^[20-24],此时,流速衰减区长度同时受斑块高度和宽度影响,其流动无法完全通过二维流动模型描述,因此有必要对沉水植被斑块的流速衰减区长度展开进一步研究。

本文通过水槽试验,采用粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术对河道沉水植被斑块内流场进行测量,得到斑块内沿程纵向平均流速分布,通过量纲分析,提出河道沉水植被斑块流速衰减区长度预测公式,可为三维流动条件下的沉水植被斑块内沿程流速模型开发提供基础。

1 理论推导

图 1 为沉水植被斑块影响下河道水流流动示意图。图中 h 为植被高度, b 为斑块半宽, D 为斑块宽度, H 为水深, B 为渠道宽度, U_0 为斑块前平均流速, U_∞ 为上游来流流速, L_1 为流速衰减区长度,定义为斑块首部至流速最低点的纵向距离。坐标零点位于斑块首部中心位置;方虚线框内为斑块内纵向时均流速沿流动方向的变化示意,其中标注了 L_1 的范围;大尺度涡的内外边缘用实线表示,此时水流纵向时均流速沿垂向呈 S 形分布^[8],在垂向上可划分为植被层、混合层及表面层, δ_e 为大尺度涡向植被内部的侵入深度。研究过程中,植被常被概化成刚性

圆柱体阵列进行试验及理论分析。植被分布密集程度可由体积分数 φ 表示^[25], $\varphi = \pi a d / 4$, 其中 $a = n d$, 为单位体积迎流面积, d 为单个植被直径, n 为单位床面面积内的圆柱根数, $n = 1 / (s_x s_y)$, s_x 、 s_y 分别为植株间流向间距和横向间距。

以流向方向为例,对斑块内水体流速进行双平均处理,得到连续性方程和动量方程^[17]:

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle \bar{w} \rangle}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\langle \bar{u} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial x} + \langle \bar{v} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial y} + \langle \bar{w} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \langle \bar{\tau}_{xx} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{yx} \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{zx} \rangle}{\partial z} \right) - \frac{1}{2} \frac{C_D a}{(1 - \varphi)} \cdot \langle \bar{u} \rangle (\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \bar{v} \rangle^2 + \langle \bar{w} \rangle^2)^{1/2} \quad (2)$$

式中:横杠为时间平均;尖括号为空间平均; ρ 为水体密度;式(2)等号左侧为对流输运项,等号右侧 3 项分别为压力项,切应力项和植被阻力项; τ_{xx} 、 τ_{yx} 、 τ_{zx} 分别为 x 、 y 、 z 向的切应力; u 、 v 、 w 分别为空间任一点瞬时纵向流速、瞬时横向流速及瞬时垂向流速; C_D 为阻力系数。此外,空间脉动和时间平均值的相关性产生了色散应力, Poggi 等^[26]指出,除了较稀疏斑块 ($a < 4 \text{ m}^{-1}$) 外,色散应力可以忽略不计。由于本文工况中,斑块 $a > 4 \text{ m}^{-1}$,因此该项已在上述方程中省略。Rominger 等^[17-18]指出,在流速衰减区内,与植被阻力项相比,床层摩擦力和雷诺应力项可以忽略不计,故在方程中简化。在流速衰减区,3 个方向的流动控制方程可表示为

$$\langle \bar{u} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial x} + \langle \bar{v} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial y} + \langle \bar{w} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{C_D a}{(1 - \varphi)} \langle \bar{u} \rangle (\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \bar{v} \rangle^2 + \langle \bar{w} \rangle^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\langle \bar{u} \rangle \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial x} + \langle \bar{v} \rangle \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial y} + \langle \bar{w} \rangle \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{C_D a}{(1 - \varphi)} \langle \bar{v} \rangle (\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \bar{v} \rangle^2 + \langle \bar{w} \rangle^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\langle \bar{u} \rangle \frac{\partial \langle \bar{w} \rangle}{\partial x} + \langle \bar{v} \rangle \frac{\partial \langle \bar{w} \rangle}{\partial y} + \langle \bar{w} \rangle \frac{\partial \langle \bar{w} \rangle}{\partial z} = - g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial z} \quad (5)$$

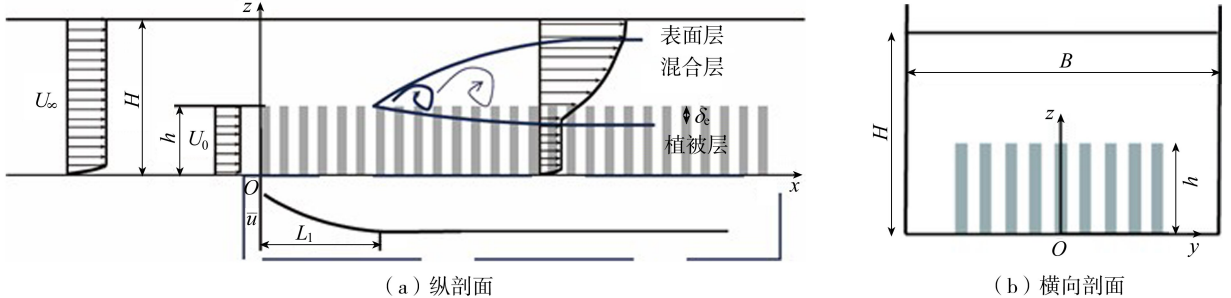


图 1 沉水植被斑块附近流动结构示意图

Fig. 1 Conceptual diagram for flow structure near the submerged vegetation patch

式中: g 为重力加速度; 式(3)(4)等式左侧为惯性项, 右侧最后一项分别为纵向、横向上的阻力项, 用流速平方表示^[17]。将式(3)~(5)中的物理量按特征值近似^[17-18]:

$$u \sim U_{\infty} \quad (6)$$

$$x \sim L_1 \quad (7)$$

$$y \sim b \quad (8)$$

$$z \sim h \quad (9)$$

为满足连续性方程式(1), 参考 Rominger 等^[17-18]研究中特征值近似方法, 则有:

$$v \sim bU_{\infty}/L_1 \quad (10)$$

$$w \sim hU_{\infty}/L_1 \quad (11)$$

将式(6)~(9)代入式(3)~(5), 可得:

$$\rho \frac{U_{\infty}^2}{L_1} \sim -\frac{\Delta p}{L_1} - \frac{1}{2} \frac{C_D a}{(1-\varphi)} U_{\infty}^2 \left[1 + \left(\frac{b}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{h}{L_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$\rho \frac{U_{\infty}^2}{L_1} \frac{b}{L_1} \sim -\frac{\Delta p}{b} - \frac{1}{2} \frac{C_D a}{(1-\varphi)} U_{\infty}^2 \cdot \left[\left(\frac{b}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{b}{L_1} \right)^4 + \left(\frac{b}{L_1} \right)^2 \left(\frac{h}{L_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$\rho \frac{U_{\infty}^2}{L_1} \frac{h}{L_1} \sim -g - \frac{\Delta p}{h} \quad (14)$$

式中 Δp 为压力变化项(也称压力降)。将等式两侧同时除以惯性项, 并将式(12)和式(14)合并, 整理可得:

$$1 \sim -\frac{\Delta p}{\rho U_{\infty}^2} - \frac{1}{2(1-\varphi)} \left[(C_D a L_1)^2 + (C_D a \sqrt{b^2 + h^2})^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$1 \sim -\left[\frac{L_1}{\left(\frac{\sqrt{2}hb}{\sqrt{b^2 + h^2}} \right)} \right]^2 \frac{\Delta p}{\rho U_{\infty}^2} - \frac{1}{4(1-\varphi)} \cdot \left[(C_D a L_1)^2 + (C_D a \sqrt{b^2 + h^2})^2 \right]^{1/2} - \frac{gL_1^2}{\rho U_{\infty}^2 h} \quad (16)$$

由式(15)(16)得到一个重要的无量纲参数——阻流因子 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}$, 该参数代表了沉水植被斑块影响下的三维阻力尺度, 与 Rominger 等^[17]在挺水植被斑块研究中所提 $C_D ab$ 和 Chen 等^[18]在沉水植被研究中所提二维 $C_D ah$ 相似。当 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5} \gg 1$ 时, 压力项会急剧增加, 根据 Rominger 等^[17]的研究, $\Delta p \sim \rho U_{\infty}^2$, 此时斑块视为高流阻斑块; 当 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5} < 1$ 时, $\Delta p \sim 0$, 此时斑块视为低流阻斑块。试验证明以 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5} \approx 2$ 来划分高低流阻工况更合适。

根据上述假定, 对于高流阻斑块, 式(16)中

$\Delta p/\rho U_{\infty}^2$ 近似为 1, 则有 $L_1 \sim 2^{0.5}hb/(b^2 + h^2)^{0.5}$, 其中 $g L_1^2/(\rho U_{\infty}^2 h)$ 所占比重较低; 对于低流阻斑块, $C_D a \cdot (b^2 + h^2)^{0.5} < 1$, 水体进入斑块后横向和垂向扩散较小, 因此 $\Delta p \sim 0$, $L_1 \sim 2(1-\varphi)/C_D a$ 。

2 试验设定

2.1 试验装置

试验在南京水利科学研究院渗流试验大厅的自循环水槽中进行。试验系统由水泵、电磁流量计、稳水装置、可变坡矩形有机玻璃水槽(底板透明)、尾水阀门、尾水池组成。其中有机玻璃试验水槽全长 11.4 m, 宽 $B=0.4$ m, 高 $H=0.6$ m; 水槽入口设置多孔格栅, 以使入流平稳, 并通过改变水槽末端尾门开度来调节水槽水位; 电磁流量计测量范围为 0~50 L/s, 测量精度为 ± 0.1 L/s; 沿程布置 4 处测尺测量水位; 植被斑块中心对称布置于渠道中心, 纵向布置于距水槽进口 400~500 cm 范围内; 水槽底坡通过上下游边界处的可升降螺旋杆进行调节, 在改变进流条件后, 调整底坡和尾门使沿程水深保持不变, 用水准仪对底坡进行率定。

PIV 由片激光发射器、高速相机及数据采集系统组成, 其中连续片激光发射器最大功率为 15W, 高速相机(MindVision, MV-XG903GC/M)最大有效像素为 900 万。在考虑图片对比度以及粒子拖尾后, 曝光时间设置为 120 μ s, 以 100 Hz 的采样频率针对每种工况拍摄 120 s, 共计 12000 张快照。所得快照通过开源软件 PIVlab^[27]进行处理。图 2(a)为 PIV 测量平面示意图。选择植被斑块一半高度处水平面和斑块中心相邻两圆柱中间位置的垂平面作为流速测量平面, 其中顺水流方向时均流速为 $\bar{u}$, 横向时均流速为 $\bar{v}$, 垂向时均流速为 $\bar{w}$ 。试验时, 将相机置于渠道侧面及底面对两平面内流场进行测量。为获得长距离范围内的流场, 试验时需保持相机和激光固定, 移动植被到不同位置进行测量, 并采用拼接融合方法对所测量的 3~4 个窗口进行融合。图 2(b)为 PIV 测量平面及窗口拼接示意图, 可见每个窗口都有重叠部分。后处理中, 需从上游或下游窗中删除重叠部分, 将两部分数据进行合并。将边界部分采用线性插值, 最终缝合成一个完整的流场, 该方法已在 Chen 等^[18]研究中得到应用。

2.2 试验工况设置

采用尼龙棒组成的刚性圆柱群概化植被斑块。在相同体积分数下, 虽然柔性植被顶部雷诺应力峰值没有刚性植被大, 但刚性植被影响下的水流结构与柔性植被相似^[4]。此外, 沉水植被斑块影响下的水流结构具有强三维性, 采用刚性植被斑块可严格

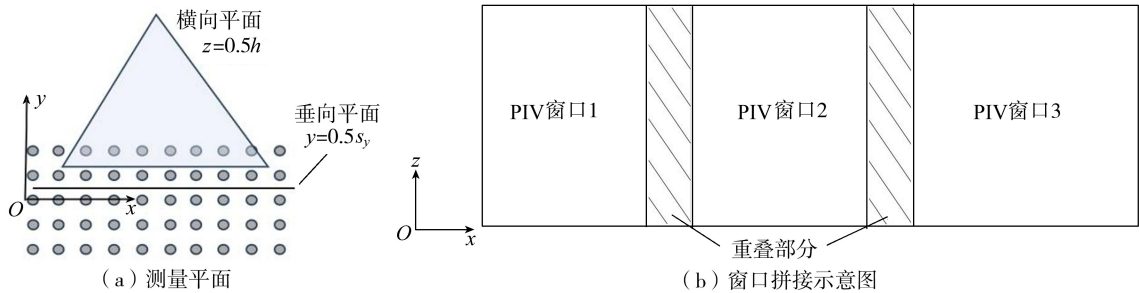


图2 PIV 测量平面及拼接方法示意图

Fig. 2 Diagram of measuring plane and splicing method

控制植株形状和高度等条件^[7],减少空间异质性对整体水流结构特性分析带来的偶然偏差,适合对其水流结构的初步探究,可见使用刚性尼龙棒来模拟沉水植被是合理的^[10]。

一些研究对自然界中常见沉水植被 d 进行了测量,发现其介于 $0.1 \sim 1.0 \text{ cm}$,且野外常见真实植被雷诺数 $R_d = u_{\text{ref}} d / \nu = 0 \sim 4\,000$ ^[10],其中 u_{ref} 为特征速度,此处 $u_{\text{ref}} = U_{\infty}$, ν 为水黏滞系数,因此设置 $d = 0.006 \text{ m}$,流速设置为 0.09 m/s , R_d 为 540 。

试验通过改变圆柱间 s_y 和 s_x 来控制植被 φ 。根据 Nicolle 等^[28] 的研究,植被不同会改变斑块影响下的主导涡尺度。根据是否产生斑块尺度涡结构,设置 φ 为 0.025 、 0.032 、 0.049 、 0.065 、 0.098 。试验中 D 与 B 之比均小于 0.5 ,水槽边壁对斑块尾流区内水流结构几乎没有影响^[10]。斑块高宽比 h/D 会影响尾流区的涡主导类型^[20],当 $h < D$ 时,尾流区以垂向涡为主导; $h > D$ 时,尾流区以横向涡为主导。基于此,试验设置 3 个 h/D ,分别为 0.43 、 0.64 、 1.20 。淹没度会限制冠层相干涡强度^[25],因此试验设置了 3 个淹没度,分别为 1.5 、 2.2 、 3.3 , H 范围为 $9.7 \text{ cm} (\pm 0.1 \text{ cm}) \sim 21.40 \text{ cm} (\pm 0.1 \text{ cm})$ 。共采用 19 组试验数据,包含本文的 17 组和 Lei 等^[19] 的 2 组试验数据(数据 1、数据 2)。具体试验条件见表 1(表中 L 为斑块长度)。

2.3 平均流速计算方法验证

对于中心对称布置沉水植被斑块,沿流动方向,植被区平均流速应表示为 $(0 < y < b, 0 < z < h)$ 范围内所有测点流速的平均值。为了简化,用植被半高处 ($z = 0.5h$) 平均流速代替植被内底板到植被顶部范围 ($z = 0 \sim h$) 的平均流速,此时,植被区平均流速应为植被斑块半宽范围内所有植被半高度处 ($0 < y < b, z = 0.5h$) 测点流速的平均值。

为验证上述方法的正确性,将垂向平面内不同纵向位置植被区平均流速 ($z = 0 \sim h$) 与植被区半高处平均流速 ($z = 0.5h$) 进行对比,结果见图 3,图中红色箭头位置为流速衰减区末端。垂向平面内植被

表 1 试验条件

Table 1 Test conditions

工况	s_x/s_y	a/m^{-1}	φ	L/m	H/h	h/D
A1	0.024/0.012	20.84	0.098	0.612	1.5	0.64
A2	0.024/0.012	20.84	0.098	0.612	2.2	0.64
A3	0.024/0.012	20.84	0.098	0.612	3.3	0.64
B1	0.036/0.012	13.89	0.065	0.864	1.5	0.64
B2	0.036/0.012	13.89	0.065	0.864	2.2	0.64
B3	0.036/0.012	13.89	0.065	0.864	3.3	0.64
C1	0.024/0.024	10.83	0.049	0.816	2.2	0.64
C2	0.024/0.024	10.83	0.049	0.816	3.3	0.64
D1	0.036/0.024	6.94	0.032	0.612	1.5	0.64
D2	0.036/0.024	6.94	0.032	0.612	2.2	0.64
D3	0.036/0.024	6.94	0.032	0.612	2.2	0.64
E1	0.048/0.024	5.21	0.025	1.224	1.5	0.64
E2	0.048/0.024	5.21	0.025	1.224	2.2	0.64
E3	0.048/0.024	5.21	0.025	1.224	3.3	0.64
F1	0.024/0.012	20.84	0.098	0.612	2.2	1.20
F2	0.024/0.012	20.84	0.098	0.612	3.3	1.20
F3	0.024/0.012	20.84	0.098	0.612	2.2	0.43
数据 1		5	0.025	2	2.86	0.19
数据 2		5	0.025	2	2.86	0.12

区平均流速由底板至植被顶部间测点流速积分后平均得到,流速衰减区长度测量不确定性由 s_x 确定。

由图 3 可知,垂向平面内植被区平均流速与植被区半高处平均流速 ($z = 0.5h$) 相差较小,在流速衰减区内二者几乎重合,在超过流速衰减区长度之后,由于植被顶部上方剪切层开始发育,并向植被内部延伸至一定深度^[25],植被区平均流速会略大于植被半高处 ($z = 0.5h$) 平均流速。但经计算验证,距首部距离大于流速衰减区长度后,最大绝对流速差介于 $0.003 \sim 0.006 \text{ m/s}$,该测量误差较小^[20],因此将植被半高平面内 ($z = 0.5h$) 流速平均值代表植被区平均流速是合理的。

3 结果与讨论

3.1 流速分布

图 4 为不同影响因素下植被区平均流速沿纵向分布,图中红色箭头为流速衰减区末端位置,纵向位置已通过 D 进行无量纲化处理。整体上,在 $0 < x <$

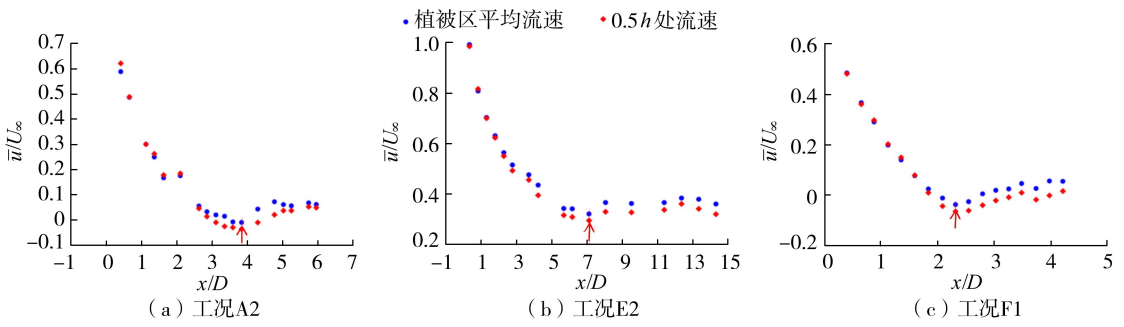


图3 垂平面内植被区平均流速与植被半高度处($z=0.5h$)平均流速对比

Fig. 3 Comparison of the average flow velocity of vegetation area and average flow velocity ($z=0.5h$) in vertical plane

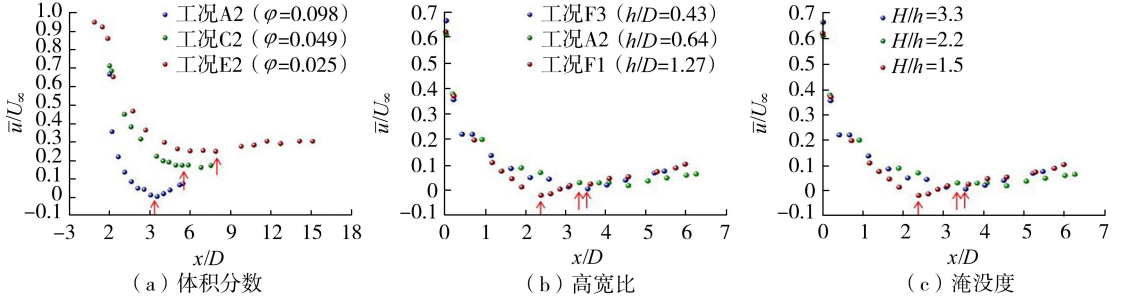


图4 不同因素影响下植被区平均流速沿纵向分布

Fig. 4 Averaged velocity distribution in vegetation along the longitudinal direction under the influence of different factors

L_1 时均流速自斑块首部呈现指数衰减趋势,随后由于冠层剪切层发展长度和流速衰减长度不一致,在 $x>L_1$ 后,流速会出现短暂再加速现象,最后趋于平衡。由图4(a)可知,植被体积分数会产生更大的速度梯度降和更小的速度极小值,这是因为植被体积分数增大导致水流阻力增加,加剧了动能的消耗,不仅会造成较大速度梯度降,还会导致 L_1 减小,使流速更快达到平衡状态。

由图4(b)可知,在高度固定的情况下,较大宽度的斑块有着更长的 L_1 和较大的流速极小值,这与Zhang等^[16]在挺水植被斑块研究中得到的规律一致。这是因为斑块宽度增大会使更多水体进入斑块内部,水流由此额外获得的时均动量需要更长距离才能耗散完毕。由于工况A2与工况F3的斑块高宽比相差较小,二者的流速值也较为接近。此外,植被体积分数和高宽比越大,流速再加速现象就越显著,这是因为植被体积分数增大会增强冠层顶部及两侧的剪切涡强度,而斑块宽度减小则会使两侧剪切涡更易侵入斑块内部,二者共同加剧了动量交换,从而使流速更快恢复^[16]。

由图4(c)知,当淹没度 $H/h<2$ 时, L_1 及纵向时均流速随 H/h 增大而减小,当 $H/h\geq 2$ 后, L_1 和流速剖面相差较小,这与Chang等^[24]在圆形斑块研究中得出结论一致。这是因为当 $H/h\geq 2$ 时,KH(Kelvin-Helmholtz)涡发展不再受自由表面影响,涡的侵入深度仅为冠层密度和植被高度的函数^[25]。

当水深远大于植被高度时,植被斑块可被视为大尺度粗糙元,其存在增大了河床糙率,因此斑块整体像处于边界层流动中,此时斑块内流速相比主流较小。而当 H/h 降低时,主流会被迫向植被内部转移,导致植被区的水流纵向流速逐渐增大,流速衰减区长度也随之增加。

3.2 模型验证

3.2.1 阻力系数确定

对于圆柱群绕流,阻力系数需综合考虑圆柱间遮蔽效应、阻塞效应及延迟分离效应的影响,其中阻塞效应可以用 φ 表征,延迟分离效应及遮蔽效应则与 R_d 有关。现有研究中,常将挺水植被的阻力系数应用于沉水植被影响下的水流流速计算,且取得了较高的精度^[29]。经多模型比选^[30-34],参考Sonnenwald等^[31]的方法计算阻力系数,该方法适用于 φ 为0.003~0.400的范围:

$$C_D = 2 \left(\frac{6475d + 32}{R_d} + 17d + 3.2\varphi + 0.5 \right) \quad (17)$$

姚春萍等^[29]针对不同数据集的研究也证实,该模型可以较好地适用于沉水植被影响下的植被区流速计算(相对误差约为10%),尤其是 $\varphi>0.02$ 的情况。由于斑块沿程流速是降低的,为方便计算, R_d 特征流速统一选取为 U_0 。

3.2.2 高流阻工况

数据源共有17组数据,其中低流阻工况8组,高流阻工况9组。图5为高流阻工况 $gL_1^2/(\rho U_\infty^2 h)$

计算结果,流速衰减区长度尺度 L_{III} 表达式为

$$L_{III} = \frac{\sqrt{2}hb}{\sqrt{h^2 + b^2}} \quad (18)$$

由图 5 可知,在高流阻工况, $gL_1^2/(\rho U_\infty^2 h)$ 所占比例较小,介于 2%~9%,说明该余项对 L_I 的计算影响可以忽略。

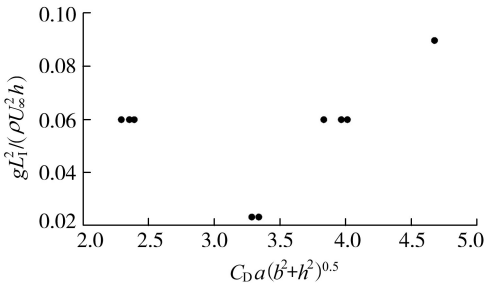


图 5 $gL_1^2/(\rho U_\infty^2 h)$ 随 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}$ 变化

Fig. 5 Variation of $gL_1^2/(\rho U_\infty^2 h)$ with $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}$

图 6 为高流阻工况 ($C_D a(b^2 + h^2)^{0.5} > 2$) 下实测 L_I 随 L_{III} 的变化关系,二者有着良好的线性关系,这与二维流动情况下的研究结果有着相似性^[17]。通过线性拟合可得:

$$L_I = (5.72 \pm 0.2) \frac{hb}{\sqrt{h^2 + b^2}} \quad (19)$$

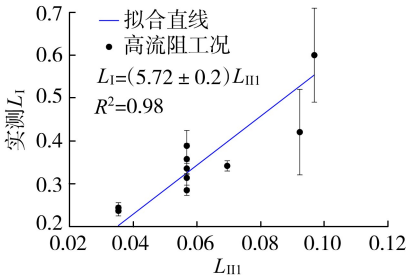


图 6 实测 L_I 随 L_{III} 变化

Fig. 6 Variation of measured L_I with L_{III}

3.2.3 低流阻工况

对于低流阻工况 ($C_D a(b^2 + h^2)^{0.5} \ll 2$),需对压力降不为 0 的情况进行修正,其中压力降参考 Rominger 等^[17]的研究,用特征值近似的方法进行计算:

$$\frac{\Delta p}{\rho U_\infty^2} = \frac{\rho U_\infty^2 - \rho U_0^2}{\rho U_\infty^2} \quad (20)$$

图 7 为 $\Delta p/\rho U_\infty^2$ 随 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}$ 的变化。可知,高、低流阻工况以 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5} \approx 2$ 来区分更加明显。在 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5} \leq 2$ 时,冠层前缘压力降随 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}$ 增大而增大,有着良好的线性关系;但 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5} > 2$ 后,压力降逐渐保持不变,介于 0.6~0.8,这与 Rominger 等^[17]的研究结果类似。图 8 为速度降 $(1 - U_0/U_\infty)$ 随 $[C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}]^{0.5}$ 的变

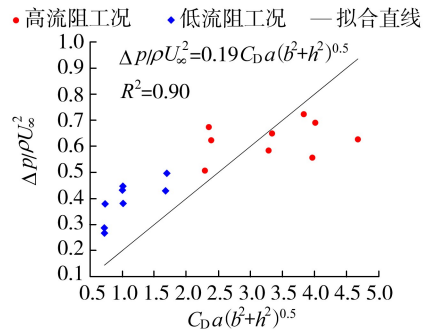


图 7 $\Delta p/\rho U_\infty^2$ 随 $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}$ 的变化

Fig. 7 Variation of $\Delta p/\rho U_\infty^2$ with $C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}$

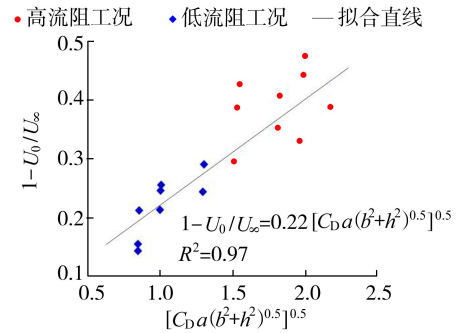


图 8 $(1 - U_0/U_\infty)$ 随 $[C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}]^{0.5}$ 的变化

Fig. 8 Variation of $(1 - U_0/U_\infty)$ with $[C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}]^{0.5}$

化,可见二者存在良好的线性关系,表示为

$$1 - U_0/U_\infty = 0.22 [C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}]^{0.5} \quad (21)$$

因此,将冠层前缘压力降表示为 $\Delta p/\rho U_\infty^2 \sim C_D a(b^2 + h^2)^{0.5}$,代入式(15),则流速衰减区长度尺度 L_{II2} 可表示为

$$L_{II2} = (1 + C_D a \sqrt{b^2 + h^2}) \frac{2(1 - \varphi)}{C_D a} \quad (22)$$

图 9 为低流阻条件实测 L_I 与 L_{II2} 的变化关系,二者相关系数 $R^2 = 0.99$,通过拟合可得:

$$L_I = (1.84 \pm 0.04) L_{II2} \quad (23)$$

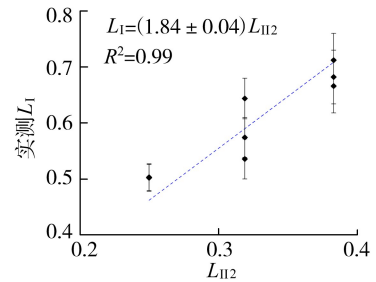


图 9 实测 L_I 随 L_{II2} 变化

Fig. 9 Variation of measured L_I with L_{II2}

3.3 讨论

3.3.1 公式精度及模型对比

首先结合式(17)(21)对 U_0 进行迭代求解。令 U_0 初值为 U_∞ ,迭代步长为 -0.0005 m/s ,当前后两次迭代绝对误差小于 10^{-3} m/s 时,将最终迭代值作

为 U_0 进行流速衰减区长度计算,其中高流阻工况采用式(18)(19)计算,低流阻工况采用式(22)(23)计算。为进一步说明公式的适用性,与 Lei 等^[19]提出的公式进行对比:

$$\frac{L_1}{hb/(h+b)} = 3.4 + 2.5 \frac{1}{C_D ah [b/(h+b)]} - 3.3 \left(\frac{BH - bh}{BH} \right)^2 \quad (24)$$

表 2 对比了不同工况下本文计算结果与 Lei 等^[19]研究结果的差异。本文在测量平均不确定性度为 5.5% 的条件下,计算结果的平均相对误差为 10.3%,精度较高。其中,高流阻工况的平均计算误差为 13.1%,低流阻工况为 6.0%。此外,不同淹没度之间,本文公式均表现出良好的适应性,除工况 A 组的最大相对误差差值为 11.2% 外,其余工况最大相对误差差值均介于 1.1%~7.2%。

表 2 本文和 Lei 等^[19]计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results between this study and the study of Lei et al ^[19]						
工况	实测 L_1/m	Lei 等		本文计算		$C_D a (h^2 + b^2)^{0.5}$
		L_1/m	相对误差绝对值/%	L_1/m	相对误差绝对值/%	
A1	0.347±0.012	0.134	60.1	0.325	3.1	3.97
A2	0.313±0.012	0.125	60.1	0.325	3.7	3.97
A3	0.284±0.012	0.118	58.4	0.325	14.3	3.97
B1	0.388±0.018	0.175	54.9	0.325	16.3	2.72
B2	0.388±0.018	0.166	57.2	0.325	16.3	2.72
B3	0.357±0.018	0.160	55.3	0.325	9.1	2.72
C1	0.503±0.018	0.221	59.6	0.457	9.1	1.69
C2	0.502±0.012	0.215	57.2	0.457	8.0	1.69
D1	0.643±0.018	0.345	46.4	0.583	8.3	1.00
D2	0.574±0.018	0.335	41.7	0.583	2.7	1.00
D3	0.536±0.018	0.329	38.5	0.583	10.1	1.00
E1	0.712±0.024	0.446	37.3	0.701	0.5	0.73
E2	0.682±0.024	0.438	35.8	0.701	3.7	0.73
E3	0.666±0.024	0.431	35.3	0.701	6.4	0.73
F1	0.243±0.012	0.111	54.2	0.202	17.0	3.34
F2	0.235±0.012	0.110	53.7	0.202	14.5	3.34
F3	0.341±0.012	0.140	58.9	0.397	16.5	4.83
数据 1	0.420±0.10	0.435	3.7	0.528	25.7	2.00
数据 2	0.600±0.11	0.467	22.7	0.551	8.1	3.05

经计算验证,式(24)计算结果的平均相对误差为 46.9%,误差较大,其原因可能是:①式(24)中,等式右侧第 3 项可理解为剪切项对植被流动的影响,这在植被体积分分数较小时成立,但当植被体积分分数较大时,流速衰减区域内剪切力对植被内部流动的影响可忽略不计,导致误差较大;②式(24)假设前提是冠层外流速分布均匀,且两侧动量交换系数基于均匀流条件推导,其动量交换系数与植被特性及排列方式相关。本文植被的纵向与横向排列间距

不一致,KH 涡在垂向和横向侵入深度也可能存在差异,因此应用在本文试验工况时会产生误差。此外,由于 Lei 等^[19]的研究测量不确定性接近 20%,并仅针对体积分分数为 0.025 的情况进行测量,因此该式的参数仍需更多的数据进一步率定。

综上,通过对比可知,本文所提流速衰减区长度预测公式适用范围较广,精度较高,可为植被斑块流速分布预测提供基础。

3.3.2 U_0 敏感性

以工况 E2 为例,针对低流阻工况,通过改变 U_0 的大小得到不同阻力系数,进而探究 U_0 对公式精度的影响。由图 3 可见,工况 E2 中水流流速从首部到平衡位置的取值范围为 2.7~7.1 cm/s。以 1 cm/s 为间隔, U_0 在 2~8 cm/s 范围取值,将 L_1 实测值与计算值进行对比,结果见表 3。可知, U_0 在 2~8 cm/s 时,相对流速 U_0/U_∞ 介于 0.22~0.88,此时, L_1 计算值与实测值的相对误差介于 0~6.6%,说明 U_0 对流速衰减区长度影响并不明显。

表 3 U_0 取值不同时 L_1 计算值及相对误差

Table 3 Calculated values of L_1 and relative errors for different values of U_0				
实测 L_1/m	$U_0/(\text{m/s})$	U_0/U_∞	计算值/m	相对误差
0.682±0.024	0.08	0.88	0.716	5.0
0.682±0.024	0.07	0.78	0.713	4.5
0.682±0.024	0.06	0.67	0.703	3.1
0.682±0.024	0.05	0.56	0.694	1.8
0.682±0.024	0.04	0.44	0.682	0
0.682±0.024	0.03	0.33	0.664	2.6
0.682±0.024	0.02	0.22	0.637	6.6

4 结 论

a. 当植被斑块长度小于流速衰减区长度时,水流纵向流速在斑块内呈现指数衰减趋势,当斑块长度超过流速衰减区长度后,水流流速会呈现先加速,然后保持不变的趋势。高宽比(高度一致)和植被体积分分数越大,再加速现象越明显。

b. 沉水植被斑块流速衰减区长度与植被体积分分数、高宽比及淹没度呈负相关趋势。

c. 三维沉水植被斑块下的流阻因子 $C_D a (b^2 + h^2)^{0.5}$ 控制着沉水植被斑块流速衰减区长度尺度,当 $C_D a (b^2 + h^2)^{0.5} > 2$ 时,斑块可定义为高流阻斑块,此时流速衰减区长度与 $hb(h^2 + b^2)^{-0.5}$ 成正相关关系;当 $C_D a (b^2 + h^2)^{0.5} \leq 2$ 时,斑块可定义为低流阻斑块,此时流速衰减区长度与 $2(1-\varphi)/C_D a$ 成正相关关系。

d. 提出高流阻斑块和低流阻斑块影响下的流速衰减区长度半经验预测公式,结果表明:公式预测

精度较高,在测量平均不确定性度为 5.5%的情况下,平均相对误差为 10.3%。

参考文献:

[1] 刘胜琪,夏军强,石希,等. 长江中游洲滩植被生长动态及其对水流阻力的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 233-241. (LIU Shengqi, XIA Junqiang, SHI Xi, et al. Growth dynamics of vegetation on the floodplains and its impact on flow resistance in the middle Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 233-241. (in Chinese))

[2] 周峰,娄厦,RADNAEVA D L,等. 柔性植物影响下水沙运动及物质输运研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (3): 107-116. (ZHOU Feng, LOU Sha, RADNAEVA D L, et al. Research progress on sediment movement and substance transport in flows with flexible vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (3): 107-116. (in Chinese))

[3] HUAI Wenxin, LI Shuolin, KATUL G G, et al. Flow dynamics and sediment transport in vegetated rivers: a review[J]. Journal of Hydrodynamics, 2021, 33 (3): 400-420.

[4] 张皎. 植被化明渠水流特性及细颗粒沉积模式研究[D]. 武汉:武汉大学, 2020.

[5] ZHANG Peipei, GONG Yiqing, CHUA K V, et al. Numerical study of submerged bending vegetation under unidirectional flow[J]. Water Science and Engineering, 2024, 17 (1): 92-100.

[6] 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): 35144.

[7] 陆彦,王唯旭,陆永军,等. 灌木植被分布区阻力特性理论及试验研究[J]. 水科学进展, 2020, 31 (4): 556-564. (LU Yan, WANG Weixun, LU Yongjun, et al. Theoretical and experimental study on resistance characteristics of shrub vegetation distribution area[J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (4): 556-564. (in Chinese))

[8] 槐文信,赵磊,李丹,等. 有植被明渠纵向流速垂向分布特性的 PIV 试验分析[J]. 实验流体力学, 2009, 23 (1): 26-30. (HUAI Wenxin, ZHAO Lei, LI Dan, et al. Experimental analysis of vertical profiles of stream-wise velocities in flows through vegetation with PIV [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23 (1): 26-30. (in Chinese))

[9] 陈永喆,崔艳红,张才金,等. 变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的时空协同演变[J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 141-149. (CHEN Yongzhe, CUI Yanhong, ZHANG Caijin, et al. Spatio-temporal co-

evolution of vegetation and hydrological elements in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin under changing environments[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (2): 141-149. (in Chinese))

[10] 柳梦阳,槐文信. 基于粒子图像测速技术的淹没植被斑时均尾流结构研究[J]. 水利学报, 2021, 52 (11): 1324-1331. (LIU Mengyang, HUAI Wenxin. Investigation of the mean wake structures of submerged vegetation patches based on PIV measurement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (11): 1324-1331. (in Chinese))

[11] 方浩泽,杨中华. 淹没植被和河床吸收边界对湿地污染物输移影响[J]. 水科学进展, 2023, 34 (1): 126-133. (FANG Haoze, YANG Zhonghua. Effects of submerged vegetation and bed absorption boundary on pollutant transport in wetland [J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (1): 126-133. (in Chinese))

[12] 江雅赛,张景新. 有限植被群水流尾流场特征的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2021, 36 (3): 429-438. (JIANG Yasai, ZHANG Jingxin. Numerical investigation on flow characteristics of wake behind finite vegetation patch [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36 (3): 429-438. (in Chinese))

[13] 吕升奇,陈俊舟,陈红,等. 簇状分布的刚性双层植被明渠紊流特性分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (3): 8-12. (LYU Shengqi, CHEN Junzhou, CHEN Hong, et al. Analysis of turbulent characteristics of open channel flow with patchy distributed double-layer rigid vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (3): 8-12. (in Chinese))

[14] 谢亚军,顾浩,苏宇宸,等. 考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (2): 61-68. (XIE Yajun, GU Hao, SU Yuchen, et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (2): 61-68. (in Chinese))

[15] YU Zijian, SHAN Yuqi, LIU Chao, et al. Wake flow and vortex structures behind emergent vegetation patches elongated in the longitudinal direction [J]. Journal of Hydrodynamics, 2021, 33 (6): 1148-1161.

[16] ZHANG Yuanheng, DUAN Huanfeng, YAN Xufeng, et al. Experimental study on the combined effects of patch density and elongation on wake structure behind a rectangular porous patch[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2023, 959: 156.

[17] ROMINGER J T, NEPF H M. Flow adjustment and interior flow associated with a rectangular porous obstruction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 680: 636-659

[18] CHEN Zhengbing, JIANG Chunbo, NEPF H. Flow

adjustment at the leading edge of a submerged aquatic canopy[J]. *Water Resources Research*. 2013, 49(9): 5537-5551.

[19] LEI Jiarui, NEPF H. Evolution of flow velocity from the leading edge of 2-D and 3-D submerged canopies[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 916:197.

[20] 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): 4017065.

[21] ZONG Lijun, NEPF H. Vortex development behind a finite porous obstruction in a channel[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 691:368-391.

[22] CHUNG H, KOSEFF J. Turbulence structure and scales in canopy-wake reattachment[J]. *Physical Review Fluids*, 2021, 6:114605.

[23] YANG Qingjun, NEPF H. A turbulence-based bed-load transport model for bare and vegetated channels[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(19): 10428-10436.

[24] CHANG W Y, CONSTANTINESCU G, TSAI W F. Effect of array submergence on flow and coherent structures through and around a circular array of rigid vertical cylinders[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(3): 35110.

[25] NEPF H. Hydrodynamics of vegetated channels[J]. *Journal of Hydraulic Research*. 2012, 50(3): 262-279.

[26] POGGI D, PORPORATO A, RIDOLFI L, et al. The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2004, 111(3): 565-580.

[27] THIELICKE W, STAMHUIS E J. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. *Journal of Open Research Software*, 2014, 2:1.

[28] NICOLLE A, EAMES I. Numerical study of flow through and around a circular array of cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*. 2011, 679:1-31.

[29] 姚春萍, 杨江龙, 汪精云, 等. 河流中低淹没度下刚性沉水植被阻力系数改进研究[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(4): 62-66. (YAO Chunping, YANG Jianglong, WANG Jingyun, et al. Study of resistance coefficient of rigid vegetation in low submergence[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(4): 62-66. (in Chinese))

[30] KOTHYARI U C, HASHIMOTO H, HAYASHI K. Effect of tall vegetation on sediment transport by channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(6): 700-710.

[31] SONNENWALD F, STOVIN V, GUYMER I. Estimating drag coefficient for arrays of rigid cylinders representing emergent vegetation[J]. *Journal of Hydraulic Research*. 2019, 57(4): 591-597.

[32] WHITE F M. *Viscous fluid flow* [M]. New York: McGrawHill, 1991.

[33] ETMINAN V, LOWE R J, GHISALBERTI M. A new model for predicting the drag exerted by vegetation canopies[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 3179-3196.

[34] TINOCO R O, COWEN E A. The direct and indirect measurement of boundary stress and drag on individual and complex arrays of elements[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(4): 1509.

(收稿日期: 2024-12-31 编辑: 胡新宇)

(上接第 218 页)

[29] ZHOU Sha, YU Bofu, ZHANG Lu, et al. A new method to partition climate and catchment effect on the mean annual runoff based on the Budyko complementary relationship[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 7163-7177.

[30] 钟昊哲, 徐宪立, 张荣飞, 等. 基于 Penman-Monteith Leuning 遥感模型的西南喀斯特区域蒸散发估算[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1617-1625. (ZHONG Haozhe, XU Xianli, ZHANG Rongfei, et al. MODIS-driven estimation of regional evapotranspiration in Karst area of southwest China based on the Penman-Monteith-Leuning algorithm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(5): 1617-1625. (in Chinese))

[31] 贾路, 于坤霞, 李占斌, 等. 秦岭山区潜在蒸散发时空变化及典型流域径流归因分析[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(24): 59-71. (JIA Lu, YU Kunxia, LI Zhanbin, et al. Spatiotemporal variation of potential evapotranspiration in the Qinling Mountain Areas and attribution analysis of typical watershed runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(24): 59-71. (in Chinese))

[32] 唐骄宇. 渭河上游水文要素特征与非一致性演变规律分析[D]. 西安: 长安大学, 2023.

[33] 吴延锐. 变化环境下渭河上游河川径流统计非一致性物理溯源研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.

[34] 张晔, 侯精明, 龚佳辉, 等. 1980—2020 年渭河中上游流域土地利用演变及其对径流的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 231-237. (ZHANG Ye, HOU Jingming, GONG Jiahui, et al. Land use evolution and its impact on runoff response in middle and upper reaches of Weihe River Basin during 1980—2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 231-237. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-09-26 编辑: 胡新宇)