

# 刚性植被斑块分布形式对明渠水流特性的影响

李国豪<sup>1,2</sup>, 李书芳<sup>1,2</sup>, 张景洲<sup>1,2</sup>, 于子铖<sup>1,2</sup>, 周正<sup>1,2</sup>

(1. 河北工程大学水利水电学院; 2. 河北省智慧水利重点实验室)

**摘要:**为研究植被斑块分布形式对明渠水流特性的影响,设置了非淹没状态下3种植被斑块覆盖度和4种斑块破碎度,运用ANSYS Fluent对河道内纵向不连续分布的刚性植被斑块水流特性进行了数值模拟。结果表明:植被斑块纵向不连续分布干扰了流场流速的纵向连续性及其均匀性;当单元斑块尺寸恒定时,植被斑块覆盖度增大导致斑块区与主流区的流速差异增大;当植被斑块覆盖度恒定时,斑块破碎度增大促进了整体流场流速均匀化;植被底部至1/2水深区域的水流紊动性较大,且斑块覆盖度与斑块破碎度是影响紊动强度的重要因素;斑块覆盖度增大有利于增强主流区紊动特性,而斑块破碎度增大则有利于增强斑块内部的紊动特性。

**关键词:**水流特性;植被;斑块覆盖度;斑块破碎度;数值模拟

**Effects of rigid vegetation patch distribution patterns on open-channel flow characteristics//Li Guohao<sup>1,2</sup>, Li Shufang<sup>1,2</sup>, Zhang Jingzhou<sup>1,2</sup>, Yu Zicheng<sup>1,2</sup>, Zhou Zheng<sup>1,2</sup>(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Smart Water Conservancy)**

**Abstract:** To investigate the influence of vegetation patch distribution patterns on open-channel flow characteristics, three vegetation patch coverage ratios and four patch fragmentation degrees were designed under non-submerged conditions. Numerical simulations of flow through longitudinally discontinuous rigid vegetation patches in a river channel were conducted using ANSYS Fluent. The results show that the longitudinally discontinuous distribution of vegetation patches disrupts the continuity and uniformity of flow velocity in the flow field. When the unit patch size is constant, an increase in vegetation patch coverage ratio leads to a greater velocity difference between the patch region and the mainstream region. When the vegetation patch coverage ratio is constant, an increase in patch fragmentation degree promotes the homogenization of flow velocity across the entire flow field. Flow turbulence is relatively strong in the region from the vegetation bottom to half of the water depth, and both patch coverage ratio and patch fragmentation degree are important factors affecting turbulence intensity. An increase in patch coverage ratio enhances turbulence characteristics in the mainstream region, whereas an increase in patch fragmentation degree intensifies turbulence characteristics within the patches.

**Key words:** flow characteristics; vegetation; patch coverage ratio; patch fragmentation degree; numerical simulation

植被作为河流生态系统的重要组成部分,广泛分布于自然河道中,其对河道水流形态的影响是水力学学科当前的研究热点<sup>[1-2]</sup>。自然环境中,河道植物的存在虽会增大河床糙率及流阻<sup>[3-4]</sup>,但同时具有根系固土、减缓河床侵蚀、保滩护岸的功能,对治理河道水土流失、改善水环境、恢复水生态意义重大<sup>[5-7]</sup>。探讨植被对生态河道水流特性的影响,对河流及湖泊的生态修复具有重要的科学意义。

自然河道中植被分布多样化,其分布特征对河道水流特性影响显著。目前,有关植被斑块对河道水流特性影响的研究颇丰,主要以物理试验和数值

模拟方法为主<sup>[8]</sup>。就物理试验而言,Liu等<sup>[9]</sup>通过对不同高径比的植被斑块尾流区进行测量,发现高径比决定了尾迹中涡结构的主导类型:当斑块高径比小于1时以垂向涡为主导,反之则以平面卡门涡为主导。Barcelona等<sup>[10]</sup>选用聚乙烯丝条模拟柔性植被,探究了覆盖度对河道水流结构的影响,结果表明增加覆盖度会增强涡旋脱落并促进尾流数量增加。柳梦阳等<sup>[11]</sup>系统研究了单个植被斑块覆盖度与尾流结构的内在关系,结果表明植被斑块内的出流强度与植被密度呈正相关关系。张维乐等<sup>[12]</sup>通过室内水槽试验,分析了不同高径比及植被体积分

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2023YFC3209402);河北省自然科学基金青年科学基金项目(A类)(E20244021407);河北工程大学创新基金项目(SJ2401002176)

**作者简介:**李国豪(2001—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:1980900170@qq.com

**通信作者:**张景洲(1991—),男,讲师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zhangjingzhou@163.com

数影响下单个斑块后的水流特性,得到了时均流速及雷诺应力的分布规律,并探究了不同尺度涡的空间模态及能量分布特征。就数值模拟而言,de Lima 等<sup>[13-14]</sup>采用计算流体动力学技术研究了明渠水生植被周围的水流流动结构。Ghani 等<sup>[15]</sup>研究了圆形交错植被斑块周围的流动情况,并通过试验与数值模拟进行了验证。Anjum 等<sup>[16]</sup>运用 Fluent 软件中的雷诺应力模型,对占据河道一半宽度的纵向不连续刚性植被斑块的水流特性进行了数值研究,结果表明斑块间隙内的流速明显慢于斑块内部,植被不连续分布对水流结构具有显著影响。Liu 等<sup>[17]</sup>通过大涡模拟研究了不同体积分数下沉水植被斑块的尾流变化,发现植被体积分数增大会导致横向和垂向出流增强,纵向出流减弱。

综上所述,目前河道植被斑块水流特性研究主要围绕植被斑块覆盖度、刚柔性、淹没状态及分布模式等展开,且多集中于单个或两个相邻斑块分布特征对河道局部水流的影响。然而,现代流域受人类活动的高度影响,加之水生植被的自组织行为<sup>[18]</sup>,导致植被群落由连续分布转变为具有穿插间隙的斑块网格结构,加剧了河道生境破碎化<sup>[10]</sup>,破坏了自然流域空间属性的连续性,使河道径流响应关系异常。仅以单个或两个相邻斑块分布特征为研究对象不足以代表广泛分布于河道中的植被斑块群落;同时目前考虑河道植被景观异质性的植被斑块变化响应研究较少,且其对流域尺度水流结构的影响机制尚不明确<sup>[19]</sup>。为此,本文采用三维数值模拟方法,探究植被斑块覆盖度和斑块破碎度对河道水流流速及紊动结构的影响,以期为现代景观生态河道的规划及管理提供理论参考。

## 1 研究方法

### 1.1 数值模拟方法

Zhao 等<sup>[20]</sup>以非连续方形植被斑块为研究对象开展物理模型试验,其植被斑块分布特征与本文研究工况相似,试验结果具有良好的代表性,故选择该试验作为本文数值模型验证的基准。该试验水槽长 20 m、宽 0.6 m、高 0.4 m,采用直径 8 mm、高 25 cm 的圆柱棒模拟植被。由于试验区域较大而植被尺寸较小,若对全域进行精细建模将导致网格数量庞大,因此对模型进行几何简化。在保持水槽断面尺寸、植被参数不变及流场均匀性与稳定性的前提下,仅取 2.0 m 长的局部区域作为计算域。ANSYS Fluent 软件中雷诺应力模型是模拟植被明渠水流特性的主要方法之一<sup>[21]</sup>,具有较高的物理真实性及模拟精度。故本文采用该模型,并基于有限体积法离散求解纳

维-斯托克斯方程(N-S 程),选用压力基分离求解器,采用 SIMPLEC 算法进行压力-速度耦合。边界条件设置如下:进口为速度入口,出口为压力出口;圆柱表面和壁面均设为无滑移固壁边界;自由水面采用刚盖假定。以特定位置的流速为对比参数,通过分析试验值与模拟值的吻合程度,完成模型参数率定,并验证所选数值模型的合理性。通过模拟调试对主要参数进行率定,最终确定动量与压力的松弛因子分别为 0.7 和 0.3,雷诺应力因子为 0.5,湍流动能与湍流耗散率均为 0.8,各控制方程的最小残差值设为  $1 \times 10^{-5}$ 。

因模型参数的无量纲化具有更好的物理意义<sup>[22]</sup>,为了排除量纲影响,增强结果的物理意义,本文对模型参数进行了无量纲化处理。图 1 为试验结果与数值模拟结果的对比(图中  $v$  为测量点流速, $v_0$  为进口流速(0.12 m/s), $h$  为测量点水深, $h_v$  为模拟植被高度(25 cm), $v_s$  为数值模拟流速, $v_e$  为物理试验流速, $v/v_0$  为无量纲流速, $h/h_v$  为无量纲水深),可知模拟结果与试验结果吻合良好(图 1(a)), $v_s$  与  $v_e$  数据点均分布在 1:1 线周围(图 1(b)),表明数值模型能够较好地模拟不连续植被斑块作用下的明渠水流。

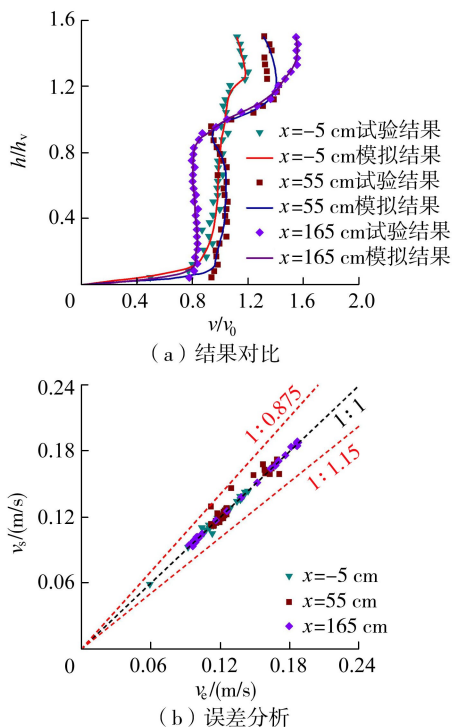


图 1 试验结果与数值模拟结果对比

### 1.2 计算方案

在数值模拟及试验中通常将植株概化为阻水圆柱体<sup>[23]</sup>。本文数学模型中植被高  $h_v = 0.08$  m,直径  $d = 0.01$  m,计算区域长 1.72 m,宽 0.4 m(图 2)。在保证单元斑块形状及尺寸不变的前提下,通过缩减相邻植株间距以增加斑块内植株数量,从而提高斑

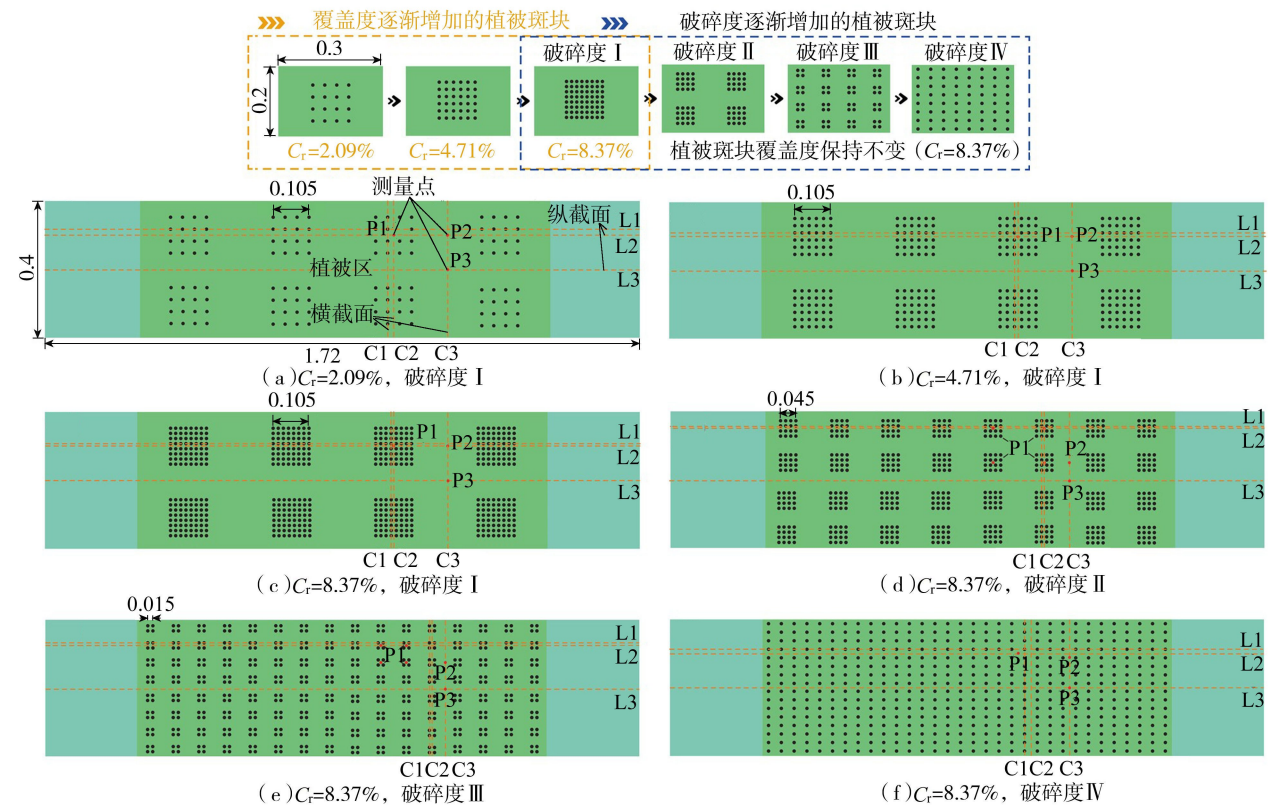


图2 不同植被斑块覆盖度和破碎度下数值计算区域底板布设示意图(单位:m)

块覆盖度。针对单元斑块尺寸为  $0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$  的特定植被区,设置3种覆盖度( $C_r$ ),分别为  $2.09\%$ 、 $4.71\%$ 和  $8.37\%$ (图2(a)~(c)),该覆盖度范围符合河道植被斑块分布实况<sup>[17]</sup>,具有一定代表性。由于目前河道水流特性研究多以植被均匀分布整个河道为主,而流域植被斑块群落具有破碎化分布特征<sup>[24]</sup>,考虑植被斑块景观异质性,将相同覆盖度( $8.37\%$ )下的单元斑块进行四分化。设置I~IV 4种斑块破碎度,前3种(I~III)单元方形斑块的边长依次为  $0.105$ 、 $0.045$ 、 $0.015\text{m}$ ,第4种(IV)单元斑块边长为植株直径  $0.01\text{m}$ (单株植被均匀分布于植被区),以研究植被斑块破碎化对明渠水流特性的影响(图2(c)~(f))。

## 2 结果与分析

### 2.1 流速分布

#### 2.1.1 纵截面流速分布

为更好地描述不连续植被斑块作用下流向流速

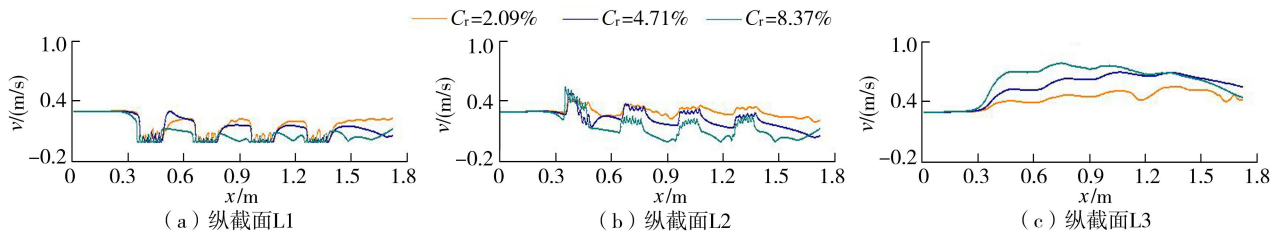


图3 不同植被斑块覆盖度下各纵截面流速沿程变化

变化特征,选取纵截面 L1(贯穿植被柱体)、L2(植株间过水区)、L3(河宽中心线),研究非淹没状态下特定水深( $h = 0.06\text{m}$ )处流速沿流向( $x$ 轴)的变化规律。

图3为不同植被斑块覆盖度下各纵截面流速沿程变化。由图3可知,纵截面 L1处斑块区内流速小于其后方间隙区(图3(a)),而纵截面 L2处流速大于其后方间隙区(图3(b))。植被斑块前后的流速差异表明斑块不连续分布干扰了流速的纵向连续性,破坏了纵向流场的流速均匀化。流经斑块区的流速呈锯齿状分布,这与吕升奇等<sup>[25]</sup>所得的平均流速在簇状植被区呈波浪状分布的结论相似,其原因在于植被的尾流效应。此外,植被斑块区与间隙区的流速均与斑块覆盖度及沿程距离呈负相关关系。而纵截面 L3的流速与斑块覆盖度呈正相关关系(图3(c)),这与植被区的规律完全相反。

图4为不同植被斑块破碎度下各纵截面的流速沿程变化。纵截面 L1处水流以低于初始流速进入

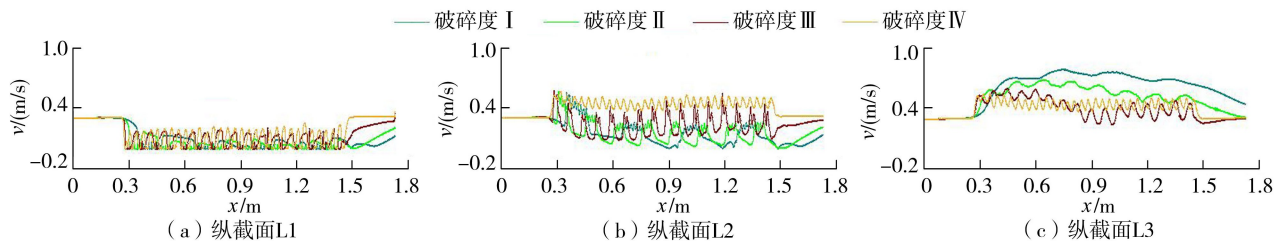


图4 不同植被斑块破碎度下各纵截面流速沿程变化

植被区,流速波动频率及变化幅度均与斑块破碎度呈正相关关系。纵截面 L2 的水流规律与 L1 相似,但流速随斑块破碎度的增大而增大的幅度更为显著;当植被均匀分布于整个河道时,流速变化幅度减小。相比于纵截面 L1 和 L2,纵截面 L3 处流速与斑块破碎度的关系呈现相反的规律,即流速与斑块破碎度呈负相关关系(图 4(c))。

### 2.1.2 横截面流速分布

为揭示植被斑块分布形式对河道横截面水流结构的影响,选取特定横截面 C2(位于斑块区内)和 C3(位于前后斑块之间)分析其流速变化。图 5 和图 6 分别为非淹没状态下不同植被斑块覆盖度及破碎度下横截面流速分布。

非淹没状态下,由横截面 C2 可知,无植被通流区的流速显著高于植被受阻区(图 5(a)、图 6(a)),表明植被区与通流区的交界处存在较大的流速差异,与 Zhang 等<sup>[26]</sup>的研究结论相似。由横截面 C3 可知,植被后方的流速较小且变幅甚微(图 5(b)),表明植被后方有利于泥沙沉降。此外,由于植被区的阻水效应,水流被迫向植被区外侧产生侧向流,导致无植被通流区的流速骤增。

植被斑块覆盖度及破碎度是影响横截面流速的重要因素。斑块覆盖度增大导致斑块内部及其后方流速波动频率增大(图 5);斑块破碎度增大同样会

导致斑块内部及后方流速波动频率增大但变化幅度减小,即斑块内部及后方与其相邻过流区的流速差异减小(图 6)。此外,随着斑块破碎度的增大,横截面流速呈缓慢增大的趋势。这进一步表明斑块破碎化有利于横向流速均匀化,且有助于提高断面通流能力。

### 2.1.3 流速垂向分布

选取植被斑块内部点 P1、斑块间隙点 P2 和河道中心无植被通流区点 P3,研究其流速垂向分布规律。图 7 和 8 分别为非淹没状态下不同植被斑块覆盖度及破碎度下测点流速垂向分布。非淹没状态下,各测点流速沿垂向均呈“J”形分布。斑块覆盖度增大导致点 P1、P2 处的流速逐渐减小(图 7(a)(b)),当斑块覆盖度从 2.09% 增加至 4.71% 和 8.37% 时,点 P1 的平均流速分别减小 19% 和 52%,点 P2 的平均流速分别减小 52% 和 90%。与斑块覆盖度的影响相反,斑块破碎度增大却使点 P1、P2 处流速逐渐增大(图 8(a)(b)),当斑块破碎度从 I 增大到 II、III 和 IV 时,点 P1 的平均流速分别增加 18%、86%、275%,点 P2 的平均流速分别增加 76%、476%、58%。点 P3 处流速显著大于点 P1、P2,其原因为该处水流不受植被阻碍。此外,点 P3 处流速随斑块覆盖度增加而逐渐增大(图 7(c)),当植被斑块覆盖度从 2.09% 增加至 4.71% 和 8.37% 时,点

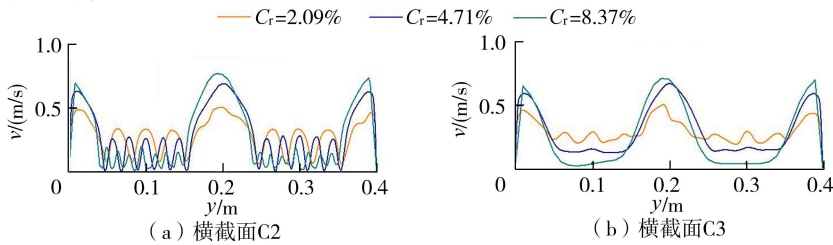


图5 不同植被斑块覆盖度下2个横截面的流速分布

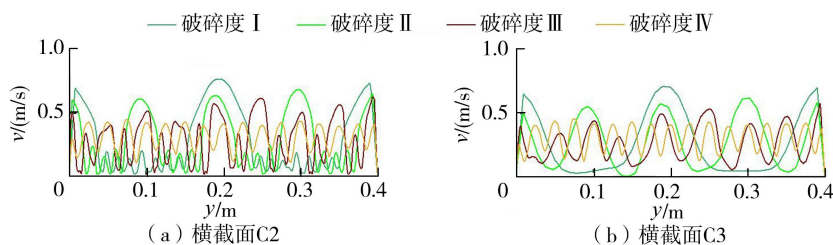


图6 不同植被斑块破碎度下2个横截面的流速分布

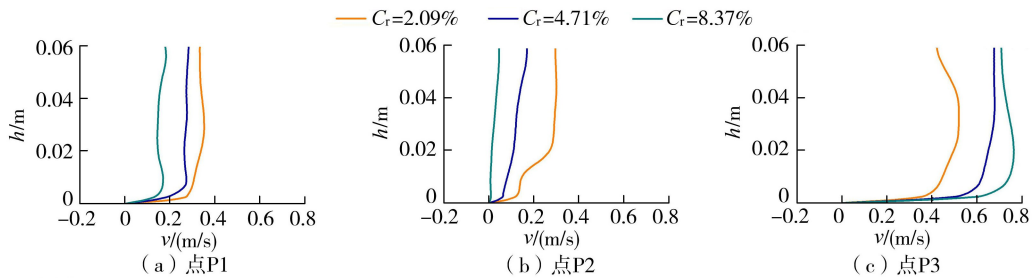


图7 不同植被斑块覆盖度下各测点的流速垂向分布

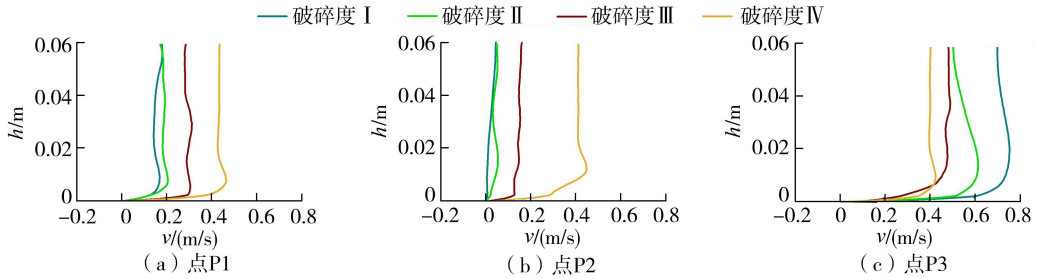


图8 不同植被斑块破碎度下各测点的流速垂向分布

P3 的平均流速分别增加 38%和 54%,这与点 P1、P2 处的规律相反,其原因为增大斑块覆盖度使植被与水流的碰撞作用增强,水流所受辐射程度增大,从而导致点 P3 处的流速增大。而点 P3 处流速随斑块破碎度的增加而减小(图 8(c)),当植被斑块破碎度从 I 增大至 II、III 和 IV 时,点 P3 的平均流速分别减小 22%、35%和 45%,究其原因因为斑块破碎化细化了整体河道的过水网格。这表明在单元植被斑块尺寸恒定的条件下,增大植被斑块覆盖度加剧了植被区与非植被区的流速分布差异化,而在覆盖度恒定的条件下,增大植被斑块破碎度则促使植被区与非植被区的流速分布均匀化。

## 2.2 流速等值线空间分布

图 9 为非淹没状态下水平截面( $z = 0.06\text{ m}$ )的流速等值线空间分布,可以直观地反映植被斑块覆盖度和破碎度对河道水流流速整体变化的影响。由图 9 可见,未受植被阻碍区域的水流流速显著大于

受植被阻碍区域,植被斑块覆盖度增大加剧了斑块内部和后方与通流区之间的流速差异(图 9(a)~(c)),而在相同植被斑块覆盖度条件下,斑块破碎度的增大则缓解了这一流速差异现象(图 9(c)~(f))。沿斑块内部植被的横截面 C1、斑块内部间隙的横截面 C2 和相邻斑块间横截面 C3 的速度等值线空间分布,也反映了上述变化规律,限于篇幅,图 10 仅给出了横截面 C1 的流速空间分布。

图 11~13 分别为非淹没状态下纵截面 L1、L2、L3 的流速空间分布(0.06 m 水深范围内)。水流通过纵截面 L1 时,该区域流速较为缓慢,因受植被后方的尾流效应影响,导致斑块区流速低于其后方向隙区。水流通过纵截面 L2 时,植株间的互相挤压导致流经两斑块间的流速大于其后方向隙区。在受植被阻碍的区域,斑块内部及其后方方向隙区的流速随沿程距离的增大而逐渐减小;而纵截面 L3(河宽中心线)的流速呈沿程增大趋势。综上所述,当植被

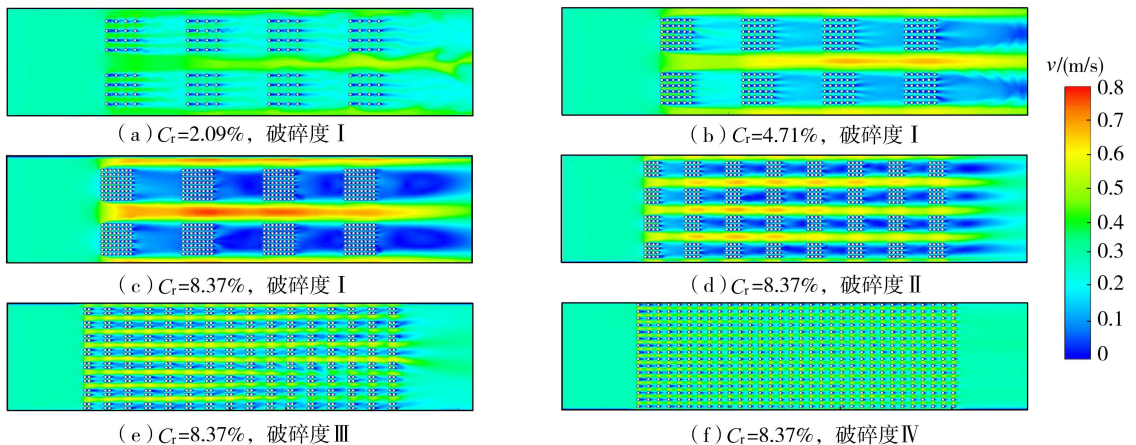


图9 非淹没状态下水平截面( $z = 0.06\text{ m}$ )的流速空间分布

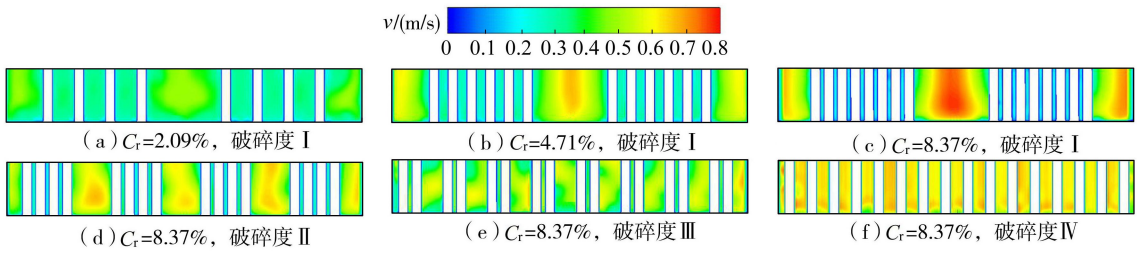


图 10 非淹没状态下横截面 C1 的流速空间分布

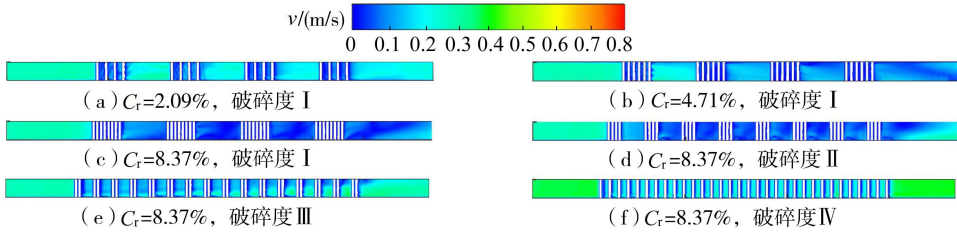


图 11 非淹没状态下纵截面 L1 的流速空间分布

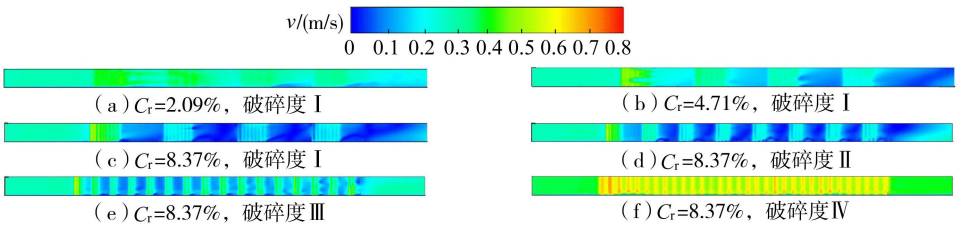


图 12 非淹没状态下纵截面 L2 的流速空间分布

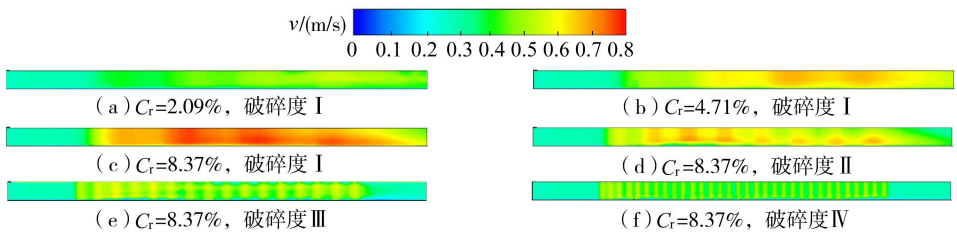


图 13 非淹没状态下纵截面 L3 的流速空间分布

斑块覆盖度增加时,水流阻碍作用增强,斑块内部水流流速减缓,进而可能导致泥沙堆积。当植被斑块破碎度增大时,河道内植被分布形式发生改变,导致植被分布均匀化,河道过水网格更为细致,同时水流整体流速更加稳定均匀。

## 2.3 湍流特征

### 2.3.1 雷诺应力垂向分布

图 14 和 15 分别为非淹没状态下不同植被斑块

覆盖度和破碎度下点 P1、P2、P3 的雷诺应力垂向分布。在植被底部至约 1/3 水深处,点 P1、P2 的雷诺应力与斑块覆盖度呈负相关关系(图 14(a)(b)),与斑块破碎度呈正相关关系(图 15(a)(b));而在相同水深范围内,P3 点处雷诺应力与斑块覆盖度呈正相关关系,与破碎度呈负相关关系(图 14(c)和图 15(c))。此外,在约 1/3 水深至水面范围内,植被斑块分布形式及水深对雷诺应力的影响甚微,雷

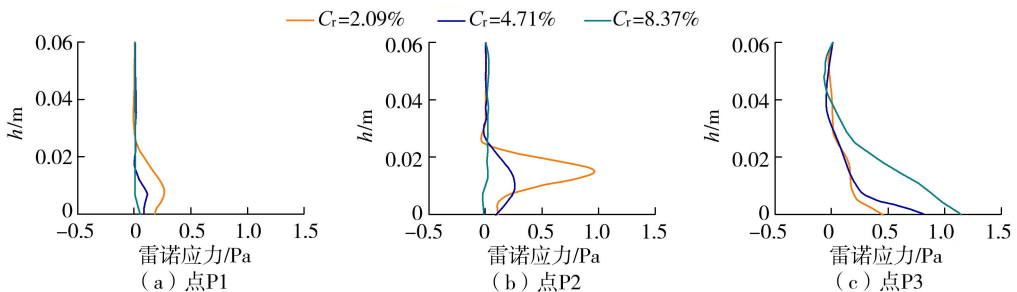


图 14 不同植被斑块覆盖度下各测点雷诺应力垂向分布

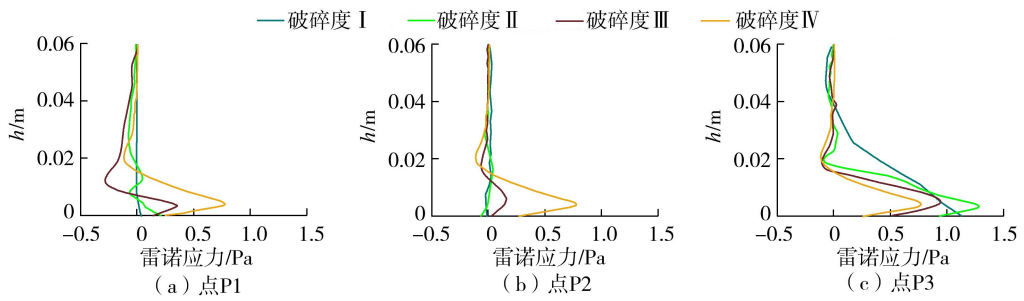


图 15 不同植被斑块破碎度下各测点雷诺应力垂向分布

雷诺应力值基本趋近于 0。当斑块覆盖度从 2.09% 增大至 4.71% 和 8.37% 时,点 P1 的平均雷诺应力值分别减小 69% 和 95%,点 P2 分别减小 57% 和 94%,而点 P3 则分别增大 34% 和 297%。当斑块破碎度从 I 增大至 II、III 和 IV 时,点 P1 的平均雷诺应力分别增大 3.00、9.33、28.66 倍,点 P2 分别增大 1.50、2.80、7.90 倍,而点 P3 则分别减小 24%、52% 和 69%。上述结果表明植被斑块覆盖度的增大加剧了植被区与非植被区之间雷诺应力分布的差异化,而斑块破碎度的增大则促进雷诺应力分布均匀化。

### 2.3.2 湍流动能纵向分布

图 16 和图 17 分别给出了非淹没状态下 ( $h = 0.06\text{ m}$ ) 不同植被斑块覆盖度和破碎度条件下 3 个纵截面的湍流动能纵向分布,图 18 为非淹没状态下水平截面 ( $z = 0.06\text{ m}$ ) 湍流动能的整体分布云图。

非淹没状态下,水流流经植被区纵截面 L1 时,斑块内部的湍流动能呈锯齿状分布且波动频率较大,而斑块后方则相对平缓;湍流动能与斑块覆盖度呈负相关关系(图 16(a))。究其原因为斑块覆盖度增大导致水流所受植被阻力随之增大,进而使斑块内部的水流流速降低,故湍流动能逐渐降低(图 18(a)~(c))。当水流流经相邻植株间过水区

纵截面 L2 时,植被段湍流动能随斑块覆盖度的增加缓慢增大(图 16(b))。当水流流经无植被通流区纵截面 L3 时,湍流动能随沿程距离的增大而增大,随斑块覆盖度的增大而显著增大(图 16(c))。

由图 17(a) 可见,纵截面 L1 的湍流动能波动频率及变动幅度均与斑块破碎度呈正相关关系,究其原因为随着植被斑块破碎度增大,斑块内部水流流速增大,致使湍流动能增大(图 18(d)~(f))。因此植被斑块破碎度也是影响河道流场紊动强度变化的重要因素。纵截面 L2 的湍流动能变化规律与纵截面 L1 相似,湍流动能波动频率及变动幅度均与斑块破碎度呈正相关关系,但当植被均匀分布于整个河道时,其变动幅度骤然减小(图 17(b)),究其原因为破碎度较低时(植株未达到均匀分布于整个河道),单元斑块内相邻植株的纵向间距均为 0.015 m,植株间距较小导致过流通道较窄,受植被影响流场极不稳定,故湍流动能变幅较大;随着植被均匀分布于整个河道,相邻植株纵向间距增大至 0.025 m,过流通道宽度增大,水流受植株的影响减小,故湍流动能变动幅度骤然减小。在无植被通流区纵截面 L3,湍流动能随着斑块破碎度增大而增大(图 17(c)),但直至植被均匀分布于整个河道时,

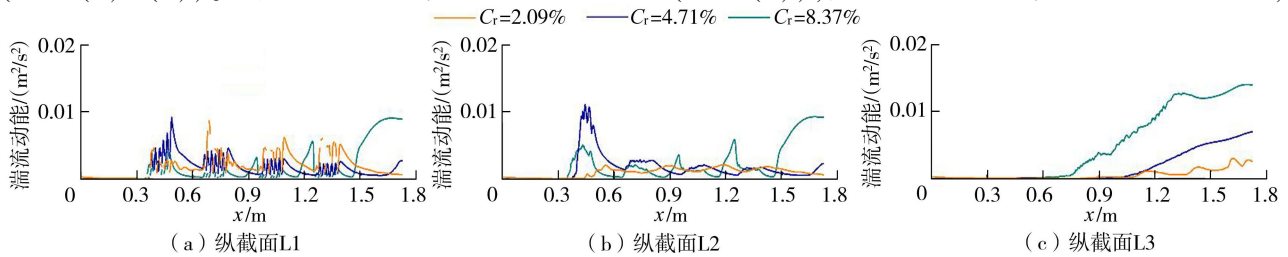


图 16 不同植被斑块覆盖度下各纵截面的湍流动能沿程分布

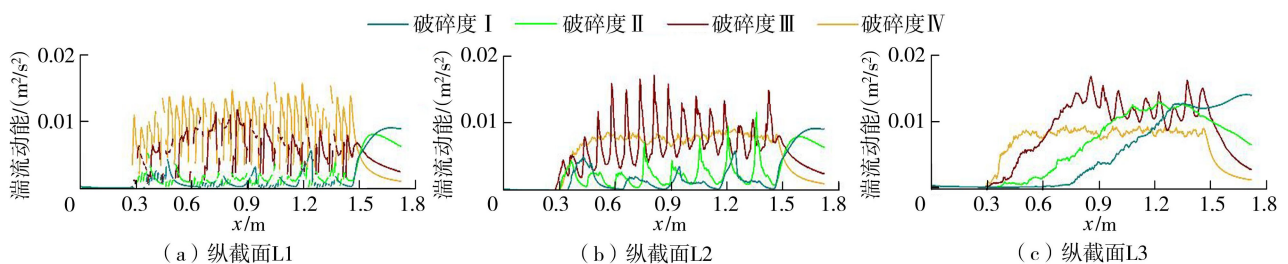


图 17 不同植被斑块破碎度下各纵截面的湍流动能沿程分布

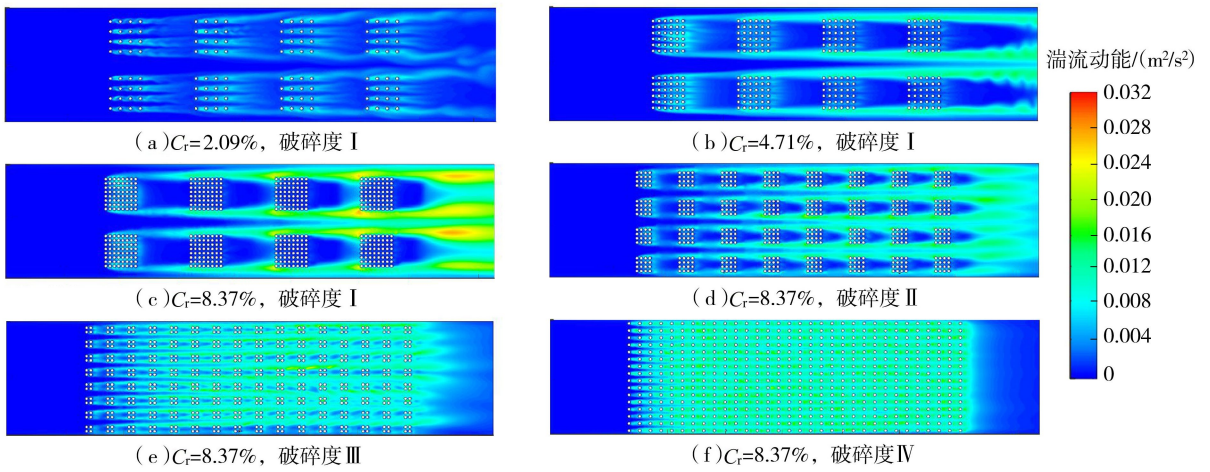


图 18 非淹没状态下水平截面 ( $z=0.06\text{ m}$ ) 的湍流动能空间分布

整体湍流动能相对减小。

### 3 结论

**a.** 植被斑块分布形式的变化导致流场水流结构的时空变异性。当斑块覆盖度从 2.09% 增加至 8.37% 时,斑块内部平均流速减小 19%~52%,而无植被通流区平均流速增加 38%~54%,表明增加斑块覆盖度增大了植被区与无植被区之间的流速差异,斑块覆盖度的增大有利于斑块内部及后方河流生物适宜生境的塑造。当斑块破碎度从 I 增大至 IV 时,斑块内部平均流速增加 18%~52%,而无植被通流区减小 22%~45%,表明增加斑块破碎度促进了河道流场的整体均匀化,有利于河道泥沙沉积的空间分布均质化。

**b.** 植被底部至 1/2 水深区域的流场紊动较强,且受植被斑块覆盖度与破碎度因素的制约:斑块内部及后方的紊动强度与覆盖度呈负相关关系、与破碎度呈正相关关系,而无植被通道区则呈相反规律。在 1/2 水深至自由表面区域,斑块分布形式对雷诺应力的影响甚微。当斑块覆盖度从 2.09% 增大至 8.37% 时,斑块内部平均雷诺应力减小 69%~95%,而无植被通流区增加 34%~297%,当斑块破碎度从 I 增大至 IV 时,斑块内部平均雷诺应力增大 3.00~28.66 倍,而无植被通流区减小 24%~69%。由此可见,斑块覆盖度的增大,同样加剧了植被区与非植被区之间雷诺应力分布差异化,而斑块破碎度的增大则促使雷诺应力分布趋于均匀。

**c.** 斑块内部的湍流动能呈锯齿状分布,且显著大于斑块后方。斑块覆盖度的增大加剧了斑块区与通流区的紊动差异性,有助于增强非植被通流区的紊动特性,而斑块破碎度的增大则缩小了斑块区与通流区的紊动差异性,有利于增强斑块内部的紊动特性。因此,合理调控斑块覆盖度和破碎度是调节

流场紊动特性的可行措施。

### 参考文献:

- [1] 桂婕,王平. 含复杂形态柔性植被水流水力特性的试验研究[J]. 水动力学研究与进展,2023,38(6):974-986. (Gui Jie, Wang Ping. Experimental study on hydraulic characteristics of water flow with complex flexible vegetation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(6): 974-986. (in Chinese))
- [2] 张云昌,丁洋,赵进勇. 河流伦理建构中的八个理论和实践问题探讨[J]. 中国水利,2024(16):7-11. (Zhang Yunchang, Ding Yang, Zhao Jinyong. Discussions on eight theoretical and practical issues in establishment of river ethics[J]. China Water Resources, 2024(16): 7-11. (in Chinese))
- [3] 张思毅,梁志权,谢真越,等. 白三叶不同部位减沙效应及其对径流水动力学参数的影响[J]. 生态环境学报,2016,25(8):1306-1314. (Zhang Siyi, Liang Zhiquan, Xie Zhenyue, et al. Effects of different parts of *Trifolium repens* L. on sediment reduction and runoff hydrodynamic parameters[J]. Ecology and Environment Sciences, 2016, 25(8): 1306-1314. (in Chinese))
- [4] 李妍敏,安翼,刘青泉. 植被分布对小流域产流影响的数值实验[J]. 水科学进展,2015,26(2):187-195. (Li Yanmin, An Yi, Liu Qingquan. Effects of the distribution of vegetation on small catchment runoff during rainstorm events[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 187-195. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] Yamasaki T N, Jiang Bei Han, Janzen J G, et al. Feedback between vegetation, flow, and deposition: a study of

- artificial vegetation patch development [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126322.
- [7] 姜博, 张仟龙, 宋志坤, 等. 波流和植物作用下辽河口潮滩湿地水沙运动过程数值模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 47-54. (Jiang Bo, Zhang Qianlong, Song Zhikun, et al. Numerical simulation of water and sediment movement processes in the Liaohe Estuary tidal flat wetland under influence of wave flow and vegetation[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 47-54. (in Chinese))
- [8] 周峰, 姜厦, Radnaeva D L, 等. 柔性植物影响下水沙运动及物质运输研究进展[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))
- [9] 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.
- [10] Barcelona A, Oldham C, Colomer J, et al. Functional dynamics of vegetated model patches: the minimum patch size effect for canopy restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148854.
- [11] 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))
- [12] 张维乐, 吴时强, 吴时锋, 等. 沉水植被斑时均尾流多尺度紊流结构研究[J]. *水科学进展*, 2023, 34(6): 913-927. (Zhang Weile, Wu Shiqiang, Wu Xiufeng, et al. Investigation of wake flow on submerged vegetation patches based on spectral proper orthogonal decomposition[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(6): 913-927. (in Chinese))
- [13] de Lima P H S, Janzen J G, Nepf H M. Flow patterns around two neighboring patches of emergent vegetation and possible implications for deposition and vegetation growth[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2015, 15(4): 881-898.
- [14] Weber A, Zhang J, Nardin A, et al. Modelling the influence of aquatic vegetation on the hydrodynamics of an alternative bank protection measure in a navigable waterway[J]. *River Research and Applications*, 2016, 32(10): 2071-2080.
- [15] 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.
- [16] Anjum N, Tanaka N. Hydrodynamics of longitudinally discontinuous, vertically double layered and partially covered rigid vegetation patches in open channel flow[J]. *River Research and Applications*, 2020, 36(1): 115-127.
- [17] 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.
- [18] Ruiz-Reynés D, Gomila D, Sintés T, et al. Fairy circle landscapes under the sea[J]. *Science Advances*, 2017, 3(8): e1603262.
- [19] Liu Ji, Liu Xinliang, Wang Yi, et al. Landscape composition or configuration: which contributes more to catchment hydrological flows and variations? [J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(7): 1531-1551.
- [20] Zhao Fang, Huai Wenxin. Hydrodynamics of discontinuous rigid submerged vegetation patches in open-channel flow[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2016, 12: 148-160.
- [21] Choi S U, Kang H. Numerical investigations of mean flow and turbulence structures of partly-vegetated open-channel flows using the Reynolds stress model[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2006, 44(2): 203-217.
- [22] 闫静, 鲁经宇, 赵汗青, 等. 含植物明渠紊流流速分布无量纲化方法及流动分区[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3): 101-106. (Yan Jing, Lu Jingyu, Zhao Hanqing, et al. Dimensionless method for velocity distribution in vegetated open channel turbulent flows and flow sub-division[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(3): 101-106. (in Chinese))
- [23] Atrah A B, Ab-Rahman M S, Salleh H, et al. Karman vortex creation using cylinder for flutter energy harvester device[J]. *Micromachines*, 2017, 8(7): 227.
- [24] Riva F, Martin C J, Galán Acedo C, et al. Incorporating effects of habitat patches into species distribution models[J]. *Journal of Ecology*, 2024, 112(10): 2162-2182.
- [25] 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))
- [26] Zhang Jingzhou, Zhang Shengtang, Wang Chuantao, et al. Flow characteristics of open channels based on patch distribution of partially discontinuous rigid combined vegetation[J]. *Frontiers in Plant Science*. 2022, 13: 976646.

(收稿日期: 2025-05-20 编辑: 雷燕)