

不连续植被斑对河道水动力-生境调控与应用

赵芳¹,王慧琳^{2*}

(1.中冶南方工程技术有限公司,湖北 武汉 430223;2.华南农业大学,广东 广州 510640)

摘要:不连续植被斑修复技术通过优化植被空间布局,可有效调控河道水流结构、促进物质循环并提升生物多样性。采用水槽试验与大涡模拟(Large eddy simulation, LES)相结合的方法,系统分析了植被密度、间隙区长度及雷诺数对河道流速分布、回流区形成的影响。结果表明:植被密度、雷诺数和间隙区长度是影响流速分布的关键因素,低密度($N=254$ 株/ m^2)条件下,植被区内纵向流速降低幅度达32%,间隙区流速降低约58%;高密度($N=423$ 株/ m^2)和高雷诺数($Re=89374$)进一步加剧冠层上下流速梯度,间隙区($z/h<1$)流速较高密度低雷诺数工况再降13.6%~27.4%,为物质沉积和生物栖息提供了有利条件;长间隙区($L=1.1$ m)有利于流速恢复,流速分布较短间隙区($L=0.5$ m)更稳定,间隙区流速降低约25.8%。以武汉市玉龙河整治工程为例,应用优化后的植被斑布置方案($N=250$ 株/ m^2 , $L=1.0\sim 1.5$ m)后,河道水质由V类提升至IV类。研究揭示了不连续植被斑“阻力调控-回流生境-生态响应”的链式作用机制,为生态河道设计提供了定量依据。

关键词:生态河道;不连续植被斑;大涡模拟;纵向流速;回流区;水动力调控

中图分类号:TV **文献标识码:** **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-12

随着城市化进程加快,河流生态系统面临严重威胁,表现为水体自净能力下降、生物多样性锐减等问题^[1-3]。城市河流作为城市水循环的重要组成部分,其健康状况直接关系到城市的可持续发展和居民的生活质量^[4]。河道治理不仅需要考虑防洪、排涝等传统功能,更需要重视河流的生态恢复和水质改善^[5-6]。近年来,生态河道治理技术逐渐兴起,其中植被修复因能同时改善水流条件、增强河岸稳定性和提供生物栖息地而备受关注^[7]。

植被对水流的干扰取决于其空间分布模式。连续植被虽能降低流速,但易导致沉积物过度淤积和物质交换受阻^[8]。不连续植被斑(Discontinuous Vegetation Patches)通过间隔布置植被块,在保留阻流效应的同时,于间隙区形成回流区,促进水流混合和营养物质循环^[9]。已有研究主要针对连续植被

或单株植被的水动力学特性^[10-11],但对不连续植被斑的流场结构、调控机制及其与生态效应的关联尚缺乏系统认识,尤其缺乏将水槽试验、数值模拟与工程应用相结合的综合研究。

本文通过水槽试验与大涡模拟(Large eddy simulation, LES),探究不同植被密度、间隙区长度和水流强度下不连续植被斑对纵向流速分布、回流区形成及紊动特性的影响规律,并结合武汉市玉龙河整治工程,验证研究成果的实际应用效果,旨在为生态河道设计提供科学依据。

1 水槽试验

1.1 试验模型

不连续植被斑水流试验在水力学试验室完成,水槽参数为 $20\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.5\text{ m}$,底坡为1‰。试验植被选用高度为0.25 m的仿生芦苇,植被直径

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2024BCB062);湖北省自然科学基金(JCZRYB202500908);国家自然科学基金(12202150)

收稿日期:2026-01-28 修回日期:2026-03-27

作者简介:赵芳(1989—),女,博士,高级工程师,主要从事水生态修复、流域综合治理等工作。

通信作者:王慧琳(1993—),女,博士,副教授,主要从事湿地污染物弥散、水环境生态修复等工作。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

$d = 8 \text{ mm}$ 。为系统揭示关键参数的影响规律,本次试验共设计4种工况(表1),以植被密度(低密度254株/ m^2 、高密度423株/ m^2)和间隙区长度(短间隙0.5 m、长间隙1.1 m)为主要变量,同时考虑雷诺数的影响(42 900和89 374)。Case A与B对比植被密度的影响(间隙区长度和雷诺数相同),Case A与D对比间隙区长度的影响(植被密度和雷诺数相同),Case B与C对比雷诺数的影响(植被密度相同,间隙区长度相同)。植被斑块呈矩形,宽度与水槽同宽(0.8 m),长度 L_p 分别为0.5 m(Case A、B、C)和1.1 m

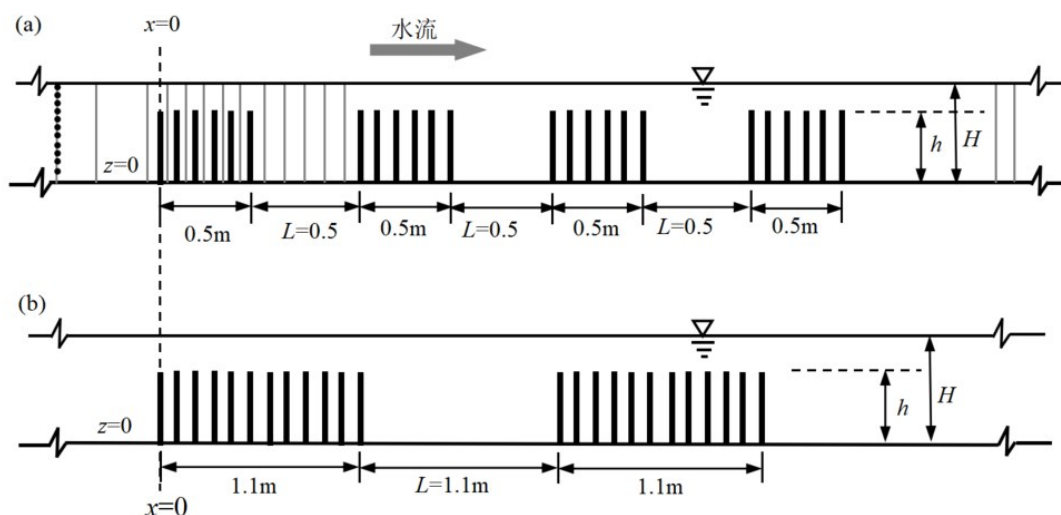
(Case D),间隙区长度 L 与斑块长度交替排列,2种排布方式的植被横向和纵向间距分别为0.05、0.10 m(图1)。图中灰色虚线表示ADV(Acoustic Doppler Current)测量垂线位置,所有测线均位于植被斑或间隙中心。本研究对Case A与D进行了详细的试验测量,试验数据用于描述水流沿程变化并验证数值模型。实验所采用的装置布局及坐标参照系统见图1,其中,坐标原点被设定于水槽底面植被前缘的几何中心点。

表1 不连续植被斑水流不同工况下的水力条件

Tab. 1 Hydraulic conditions for different cases of flow interacting with discontinuous vegetation patches

Case	$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	H/m	$U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$N/(\text{株}\cdot\text{m}^{-2})$	L/m	h/m	l_w/m	l_i/l_w	$Re(=UH/\nu)$	$Re^*(=Ud/\nu)$
A	25.92	0.36	0.12	254	0.5	0.24	3.50	0.11	42 900	953
B	25.92	0.36	0.12	423	0.5	0.24	6.35	0.09	42 900	953
C	54.00	0.45	0.20	423	0.5	0.24	8.47	0.07	89 374	1 589
D	25.92	0.36	0.12	254	1.1	0.24	6.99	0.04	42 900	953

注: Q 为流量; H 为水深; U 为体平均纵向流速; N 为植被密度; d 为植被直径; L 为间隙区长度; h 为淹没植被斑高度; Re 为整体雷诺数; Re^* 为植被尺度雷诺数; l_w 和 l_i 为特征长度。



注:a)Case A、B和C b)Case D 灰线代表ADV测线。

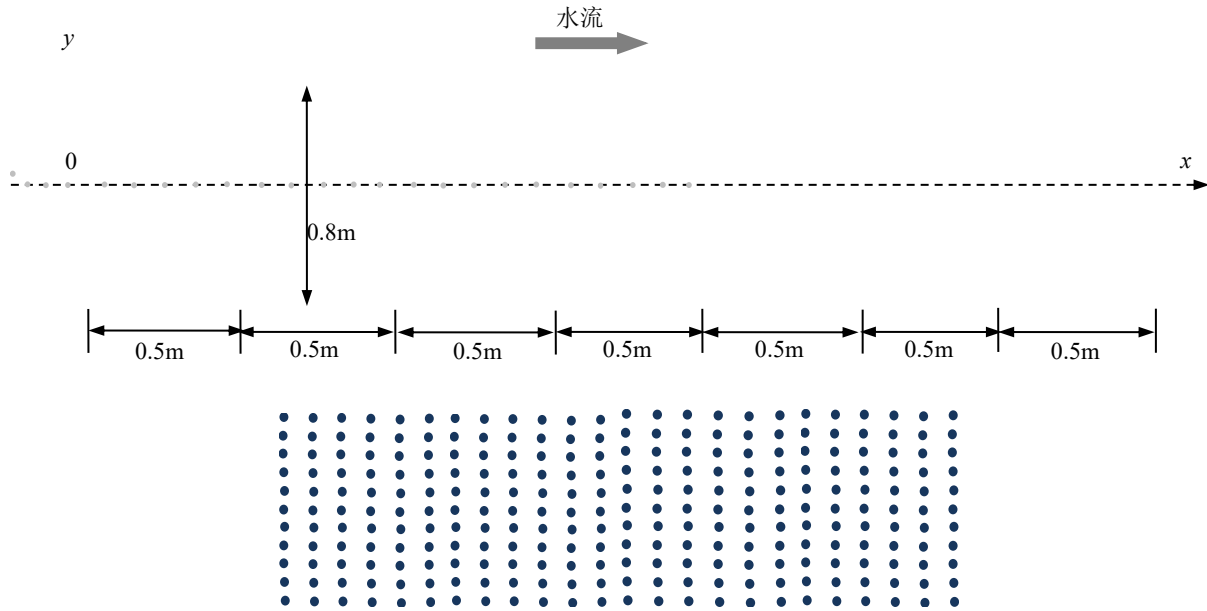
图1 植被斑示意图。

Fig. 1 Schematic layout of the discontinuous vegetation patches

1.2 测点布置与数据采集

采用声学多普勒流速仪(ADV)测量三维瞬时流速,采样频率 50 Hz,采样时长 160 s,每测点采集 8 000 个样本。在空间分布上,测点沿水流方向(x)

间隔 10 cm,沿水深方向(z)间隔 1 cm,共布设 50 条垂线,见图 1、2。坐标原点设于首个植被斑前缘底部中心, x 正向为水流方向, z 正向为垂直向上。



注:灰点代表 ADV 测线。

图2 植被排列俯视图

Fig. 2 Plan view of the vegetation patch layout

2 数值模拟

2.1 大涡模拟

大涡模拟(LES)通过过滤小尺度的紊流波动,直接模拟流动中的主要大尺度结构,与直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)相比,LES在计算成本和实现难度上具有明显优势,特别适用于植被水流的复杂边界问题。本研究计算域长度 $L_x=15$ m(覆盖植被影响核心区),宽度 0.8 m,高度 0.6 m。植被茎秆简化为刚性圆柱,采用浸没边界法处理。模拟的总计算时长约为 $30T$,其中 T 定义为特征时间尺度,由计算区域长度 L_x 与初始平均流速 U 的比值确定,即 $T=L_x/U$,为确保分析数据不受初始条件非稳态特性的影响,并依据 Lund 等^[9]和 Huai 等^[7]的研究方法,本研究选取 $15T\sim 30T$ 时段内的模拟结果用于统计分析。

2.2 网格尺度与无关性验证

为确保模拟结果的可靠性,采用三套结构化网格进行无关性验证:粗网格 1 813 万($1\ 750\times 280\times 37$)、中等网格 14 700 万($3\ 500\times 560\times 75$)、细网格 25 402 万($4\ 200\times 672\times 90$)。以典型工况(Case C)为例,对比 $x=175$ cm 的水深平均流速,中等网格与细网格的流速相对误差小于 1.8%,而粗网格与细网格的误差达到 12%。综合考虑计算精度与效率,选用中等网格进行后续所有工况的模拟,具体见图 3。近壁面网格满足 $y^+<3.2$,其中 y^+ 为无量纲的壁面距离参数,确保边界层流动捕捉精度^[12],针对单株植被周围的复杂流场特性,进行了局部网格加密处理,以增强对精细流场结构的捕捉能力。

2.3 边界条件

a)进口边界:采用速度进口边界条件,其中流速与紊动能参数基于实验测量值进行设定,具体参数

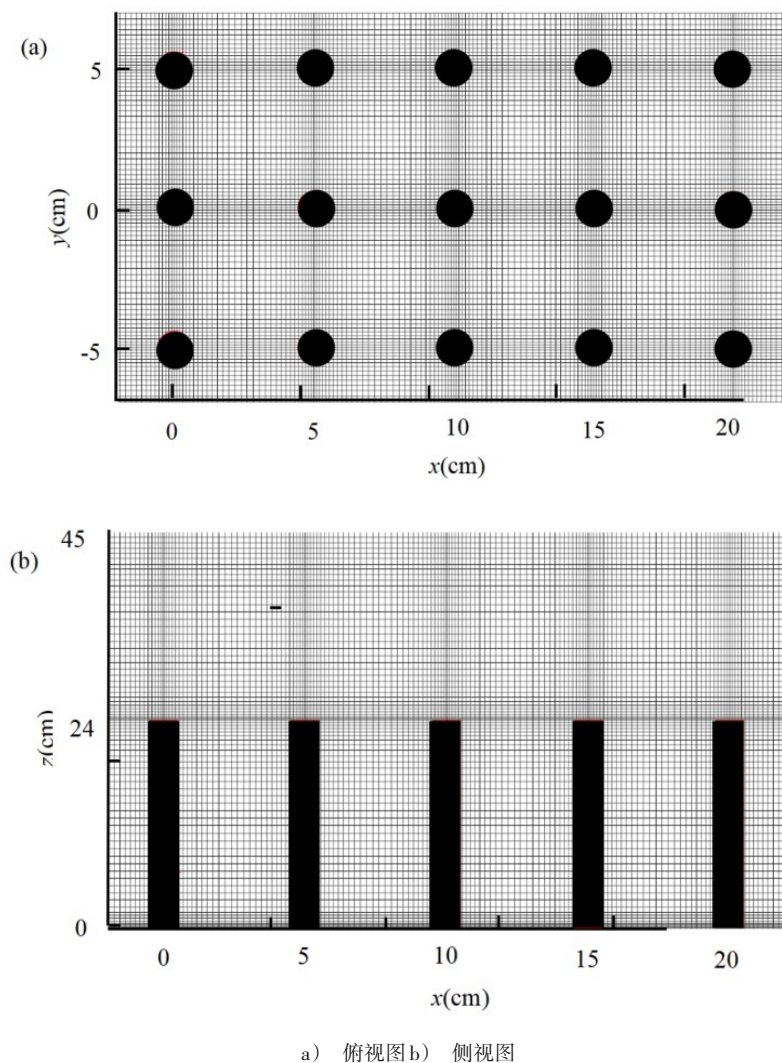


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh generation schematic for the computational domain:

为平均流速 0.14、0.22 m/s, 以及对应的水深为 0.36、0.45 m。为了更贴近真实地模拟紊流边界层的拟序结构特征, 本研究引入了合成涡方法 (synthetic eddy method)^[13]。

b) 出口边界: 采用压力出口边界条件。

c) 水槽及植被边壁: 无滑移壁面函数。

2.4 模型验证

本研究深入对比分析了 Case A 与 Case D 的 LES 结果与试验数据, 具体结果见图 4。并随机选取了 4 个位置 ($x = -5, 55, 165, 275$ cm) 以对比无量纲时均流速 \bar{u}/U , 同时另选 4 个位置 ($x = -5, 85, 175, 285$ cm) 以对比无量纲雷诺应力 $-\overline{u'w'}/U^2$ 。结果表

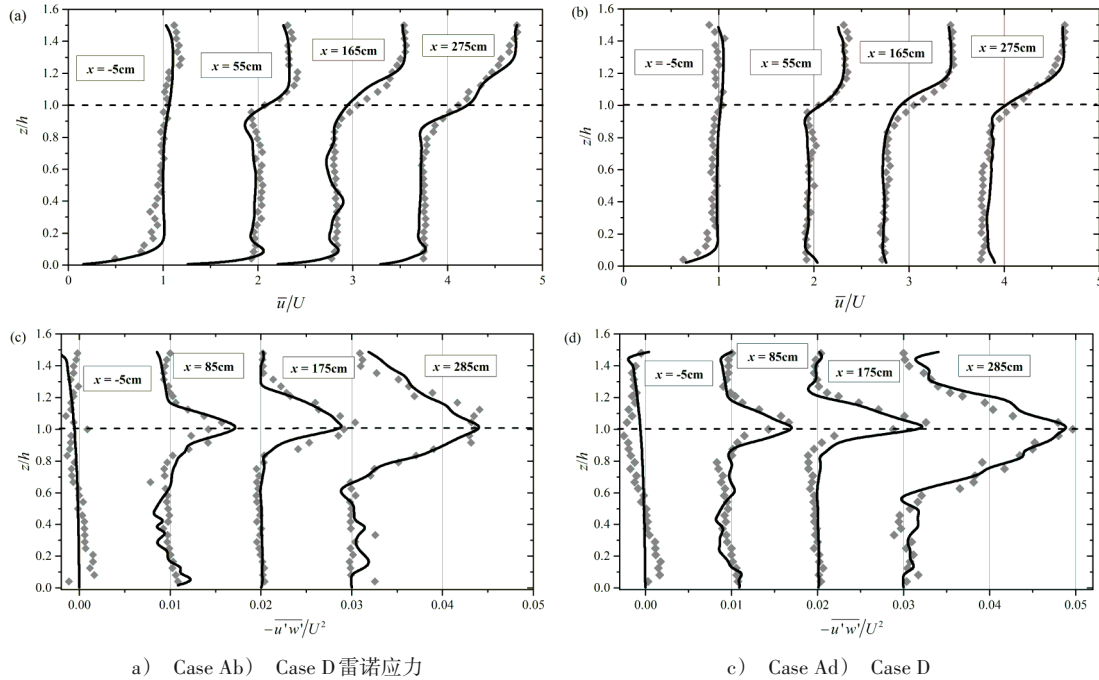
明, 试验数据和大涡模拟数据呈现出高度的一致性 ($R^2 > 0.96$), 验证了模拟结果的可靠性, 为本研究后续的成果分析提供了坚实而可靠的基础。

3 成果分析

3.1 时均纵向流速

时均纵向流速的沿程变化是理解植被斑水流调控机理的核心。图 5 分别展示了 Case B 和 Case C 在无量纲化处理后的时均纵向流速沿程分布情况, 测量断面自上游 $x = -60$ cm 起, 贯穿第一块植被斑、间隙区、第四块植被斑至下游恢复区。

在植被上游区域 ($x = -60$ cm), 2 种工况的流速



注:灰点代表试验数据;黑色实线代表模型数据。

图4 模型验证结果,时均纵向流速

Fig. 4 Validation of the large eddy simulation against experimental data: Time-averaged longitudinal velocity

剖面均呈现典型的对数分布规律,且与经典紊流边界层理论曲线吻合良好($R^2 > 0.98$),表明该区域尚未受到植被斑块的干扰,水流处于充分发展的均匀紊流状态。当水流进入第一块植被斑($x=27.5$ cm),流速分布开始发生变化,在植被顶部($z=h$)附近,冠层上方时均纵向流速较冠层内的流速增加8%~12%;在第一个间隙区($x=75$ cm),流速变化呈现出显著的垂直分层特征:在 $z/h < 1$ 的区域内,流速呈现递减趋势;相反,在 $z/h > 1$ 的区域内,流速则有所增加,较 z/h 小于1的区域,Case C的时均纵向流速相较于Case B展现出明显的降低。当水流进入第四块植被斑($x=327.5$ cm)后,“冠层内减速、冠层上增速”的流速垂向重组现象更为显著,Case B冠层内($z/h < 1$)时均纵向流速较第一斑块降低15.2%~18.7%,冠层上($z/h=1.4$)时均纵向流速较第一斑块增大31%;Case C冠层内($z/h < 1$)时均纵向流速较第一斑块降低30.1%~33.3%,冠层上($z/h=1.6$)时均纵向流速较第一斑块增大33.5%。这表明多斑块布置具有累积效应,前序斑块对水流结构的改变会影响后续斑块的水动力响应。

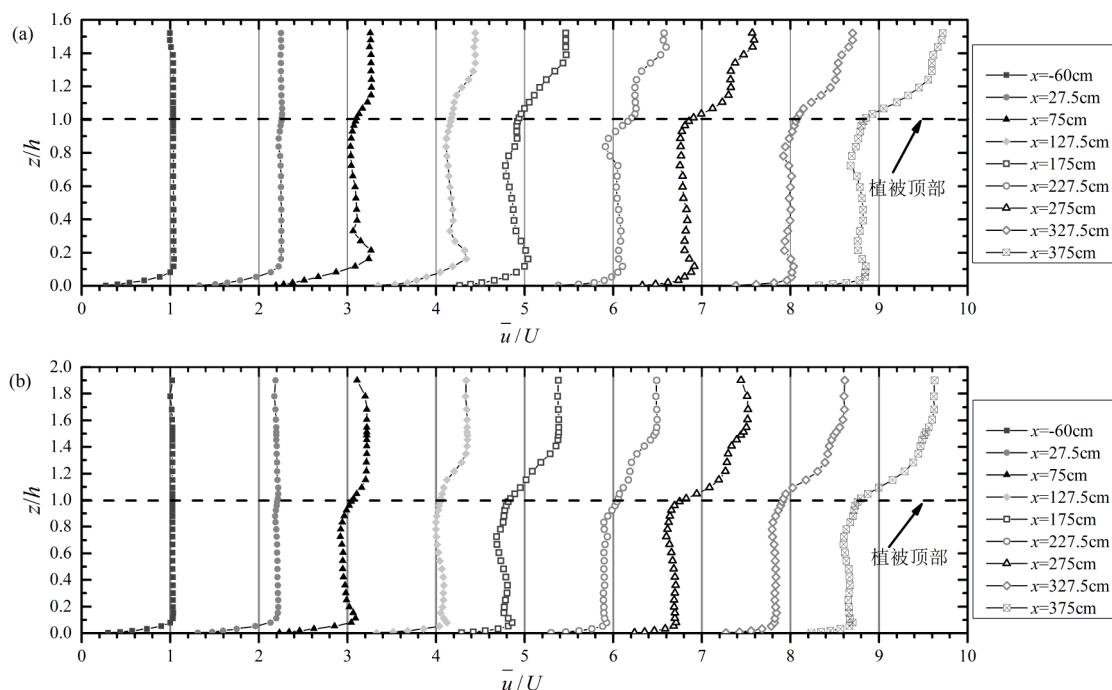
对比Case B($Re=42\ 900$ 、 $Re^*=953$)与Case C($Re=89\ 374$ 、 $Re^*=1\ 589$)在关键断面的流速差异,可揭示雷诺数的作用。在第四块植被斑($x=327.5$ cm),Case C冠层内($z/h=0.5$)的时均纵向流速较Case B同位置低17%,冠层上方($z/h=1.3$)则高5%。进入下游恢复区($x=375$ cm),Case C冠层内($z/h=0.5$)的时均纵向流速较Case B同位置低22.1%,冠层上方($z/h=1.3$)则高4.5%。可以看出,雷诺数的增大(从42 900增至89 374)显著加剧了冠层上下流速的垂向梯度,增强了冠层与自由水层之间的剪切效应。

此外,LES结果揭示了水槽底部($z/h=0.1\sim 0.2$)的局部流速异常突增现象,特别是Case B的 $x=75$ cm断面, $z/h=0.2$ 处的时均纵向流速远高于 $z/h=0.5$ 处,流速增加20%,在 $x=127.5, 175, 275$ cm断面,水槽底部也出现明显的流速突增现象,这一现象与Liu等^[10]及Zhang和Nepf^[14]的观测一致,可归因于单株植被根部形成的马蹄形涡系:来流遇植被茎秆阻滞,部分流体向下绕流,在根部前方形成下冲流,导致近底区域局部动量增强。这一发现对理解植被根部附近的局部冲刷、溶解氧输送等过程具有重要

意义。LES 同样捕捉到间隙区出现流速极小值现象,图 5b 中 Case C 的间隙区 $x = 75, 175, 275, 375$ cm 断面, $z/h = 0.7 \sim 0.8$ 处的时均纵向流速明显低于 $z/h = 0.5$ 处,流速减少 14.2%~15.5%。这与间隙区形成回流有关。

综上,时均纵向流速的沿程变化定量揭示了不连续植被斑对水流的垂向重组作用:冠层内流速降

低幅度与植被密度、雷诺数正相关,Case C(高密度+高雷诺数)的冠层内减速达 30.1%~33.3%,冠层上增速达 33.5%;间隙区 $z/h < 1$ 区域出现流速极小值,与回流区形成直接相关;植被根部附近的马蹄形涡导致近底流速局部增大。这些发现为后续分析植被密度、雷诺数的影响及回流区生态效应奠定了基础。



注:虚线表示植被顶部,黑色实线代表在植被斑区域内,灰色实线代表在间隙区域内。

a) Case B b) Case C

图 5 纵向平均流速沿程变化

Fig. 5 Streamwise evolution of vertical profiles of time-averaged streamwise velocity

3.2 水深平均流速

图 6 展示了无量纲水深平均流速 u_m/U 的沿程变化,水深平均流速反映了水流经过不连续植被斑块后的整体动量变化,是评估植被对河道过流能力影响的关键指标。从整体趋势来看,所有工况均呈现出“植被区内增速、间隙区内恢复”的波动模式,即植被斑块处的 u_m/U 普遍高于间隙区,但不同工况的波动幅度和恢复速率存在显著差异,反映了植被密度、间隙区长度及雷诺数对水流调控的综合影响。

LES 结果显示,水深平均流速在植被斑块处呈现出一种锯齿状的分布模式,该现象主要归因于单

个植被所产生的尾流结构效应。试验数据由于受到试验条件的限制,图 6b 相邻 2 条测量垂线间距为 10 cm,在植被斑区域很难呈现锯齿状变化,但是间隙区域的水深平均流速还是明显小于植被斑区域。

对比 Case A ($N=254$ 株/ m^2 , 间隙区长度 $L=0.5$ m) 和 Case B ($N=423$ 株/ m^2 , $L=0.5$ m), u_m/U 沿四块植被斑均呈现递减趋势,Case A 第一块植被斑 $x = 27.5$ cm 处, $u_m/U=1.26$, 第四块植被斑 $x = 327.5$ cm 处, $u_m/U=1.09$, 降幅为 13.5%; Case B 第一块植被斑 $x = 27.5$ cm 处, $u_m/U=1.22$, 第四块植被斑 $x = 327.5$ cm 处, $u_m/U=1.1$, 降幅为 9.8%。可以看出,植被密

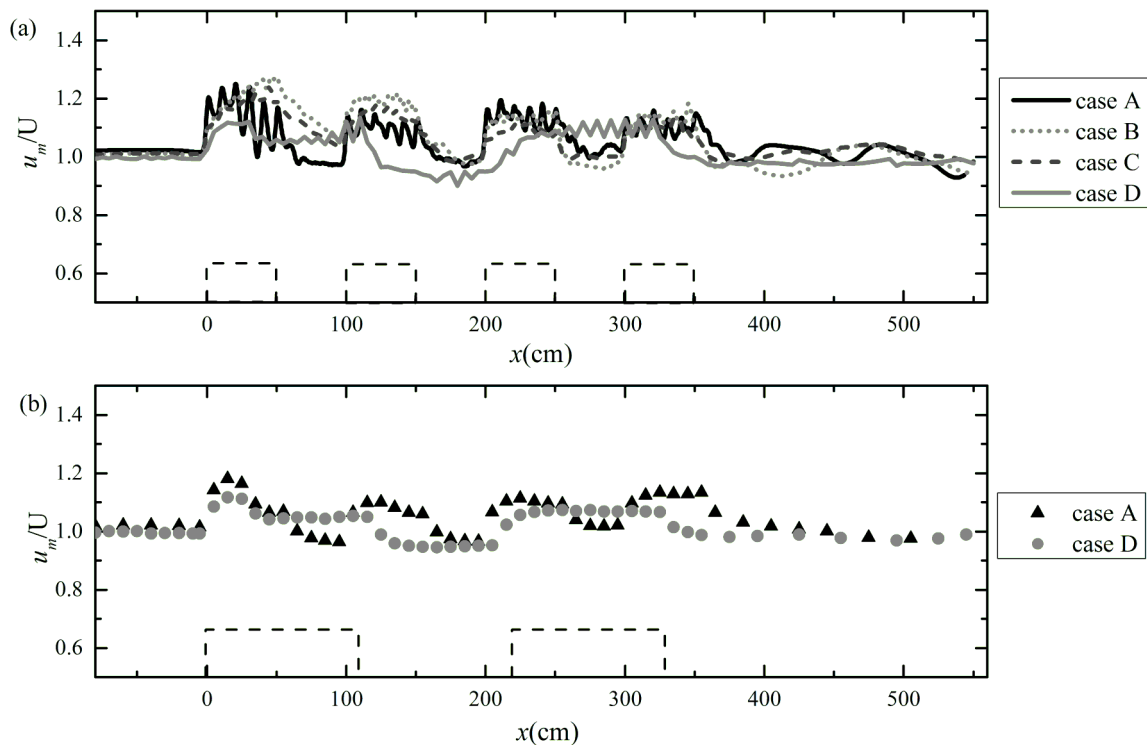
度越大,对水流的阻力效应越大,水深平均流速降幅越小,过流能力越小。

对比 Case A ($N=254$ 株/ m^2 , $L=0.5$ m) 和 Case D ($N=423$ 株/ m^2 , $L=1.1$ m), 相同密度下, 植被斑及间隙区越大, 水深平均流速越平稳, 表明较长的间隙区为水流重新调整提供了足够空间, 削弱了多斑块的累积效应, 过流能力越大。

值得注意的是, 在植被斑块上游 ($x < 0$), 水深平均流速 u_m/U 等于 1, 进入植被区域后, 受植被与间隙

区相互作用的复杂影响, 水深平均流速发生了显著的变化, 直至植被下游恢复区约 $x = 500$ cm 处, u_m/U 再次趋近于 1, 流速逐渐恢复至接近初始状态, 表明植被对流速的影响具有显著的局部性特征。

综上, 不连续植被斑的水深平均流速呈“植被区增速、间隙区恢复”的波动模式。植被密度越小, 间隙区越长, 水流越平稳, 过流能力越大。植被对流速的影响具有显著局部性, 在植被斑下游约 2 m 处恢复至初始状态。



注:a)LES数据 b)试验数据虚线框代表植被区域,线代表LES数据,点代表试验数据。

图6 水深平均流速沿程变化

Fig. 6 Streamwise variation of depth-averaged velocity

3.3 植被密度、间隙区长度与雷诺数对水流结构的影响

图7展示了4种工况对应的无量纲纵向平均流速 \bar{u}/U 的等值图, 不同工况下的水流存在明显差异, 直观展示了植被密度、间隙区长度及雷诺数对流速场的综合调控作用。

植被密度的影响: 对比 Case A ($N=254$ 株/ m^2) 与 Case B ($N=423$ 株/ m^2), 从图7a和7b可以看出, 整体上 Case A 比 Case B 的纵向平均流速更小, 在植被

区, 流速越小, 越有利于颗粒物沉降和生物附着。在间隙区 $x = 1.75$ m、 $z = 0.125$ m 处, Case A $\bar{u}/U = 0.65$, Case B $\bar{u}/U = 1.03$, 比 Case A 高 58.5%。植被密度越小, 间隙区流速越小, 越有利于水生生物及微生物的生存。

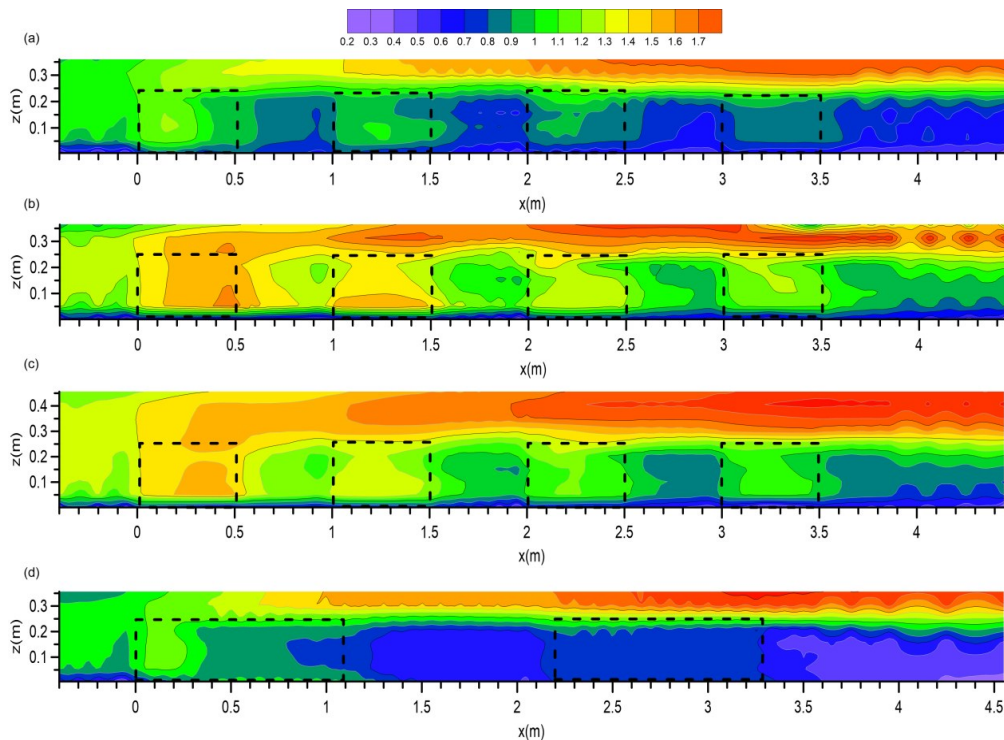
间隙区长度的影响: 对比 Case A ($L=0.5$ m) 与 Case D ($L=1.1$ m), 对比图7a与7d, Case D 在第一块植被斑内部 ($x = 0.2 \sim 1.1$ m) 表现出持续的减速过程, 在 $z = 0.125$ m, \bar{u}/U 从 1.08 降至 0.76; 在第二块植

被斑内部($x=2.2\sim 3.3\text{ m}$),纵向平均流速趋于稳定, $\bar{u}/U=0.72\sim 0.77$ 。同样地,在间隙区 $x=1.75\text{ m}$ 、 $z=0.125\text{ m}$ 处,Case A $\bar{u}/U=0.78$,Case D $\bar{u}/U=0.62$,比Case D高25.8%。总体来说Case D相较Case A在植被区域流速分布更稳定,说明较长的植被斑块使水流有充分空间发展,减速效应得以充分体现,较长间隙区为回流充分发展和水流重新调整提供了充足空间,有利于动量恢复,更有助于水生生物栖息。

雷诺数的影响:对比Case B($Re=42\ 900$ 、 $Re^*=953$)与Case C($Re=89\ 374$ 、 $Re^*=1589$),从图7b和7c可以看出,在间隙区 $x=1.75\text{ m}$ 、 $z=0.125\text{ m}$ 处,Case B $\bar{u}/U=1.07$,Case C $\bar{u}/U=0.84$,比Case C高27.4%;在 $x=2.75\text{ m}$ 、 $z=0.125\text{ m}$ 处,Case B $\bar{u}/U=0.92$,Case C $\bar{u}/U=0.81$,比Case C高13.6%。Case C冠层上(z/h

>1)流速分布与Case B相比变化也更剧烈,Case C在冠层内($z/h<1$)流速相比Case B有所减小。表明了高雷诺数条件下,冠层与自由水层之间的剪切不稳定性作用越强,流速变化更为剧烈,更强的湍流混合使得冠层内动量更快地被输送到上方,同时加剧了冠层内的动量亏损,并在间隙区形成更强的回流。

综上,植被密度越小,间隙区流速越小,有利于生物栖息;间隙区越长,流速分布越稳定,为动量恢复和生物栖息提供充足空间;雷诺数越大,冠层剪切效应越强,间隙区流速降低越显著,强化湍流混合与回流形成。因此,在设计生态河道治理方案时,需要综合考虑植被密度、间隙区长度和雷诺数等关键参数,以达到最佳的水流调控效果。



注:虚线框表示植被区域。

a) Case A b) Case B c) Case C d) Case D

图7 纵向平均流速 \bar{u}/U 等值图

Fig. 7 Contours of time-averaged streamwise velocity

3.4 回流区的形成与生态效应

在图7间隙区,观察到了回流区的形成,这为物

质交换和水生生物及微生物的生存提供了有利条件。Case D中的间隙区流速分布相较于其他模拟条

件展现出了更高的稳定性。值得注意的是,回流区的出现干扰了原本可能由连续植被斑块引起的水流有序调整过程,转而更多地体现了初始调整区域与出流区域之间复杂的相互作用关系。进一步探讨了回流区对沉积物堆积和水生植被种子发芽生长的影响,发现间隙区的流速和紊动较小,有利于沉积物的堆积,为水生植被的生长创造了条件。

4 工程应用

基于试验与模拟成果,将试验工况参数(密度 N 、间隙区长度 L)映射至实际河道条件,通过组合优化平衡河道行洪安全与生态功能,最终通过效果验证反馈设计。

在武汉市玉龙河整治项目中,需要优先满足河道行洪安全,兼顾水质净化和生境营造。参考 Case D($N=254$ 株/ m^2 , $L=1.1$ m),采用低密度($N\approx 250$ 株/ m^2)搭配长间隙($L\approx 1\sim 2$ m),经行洪能力计算满足要求;参考 Case A,低密度冠层内减速利于颗粒物沉降,同时在间隙区形成回流区,可为水生生物提供

避难栖息场所。雷诺数与河道流速及水深呈正相关,高流速河道中植被的水动力效应会被放大,因此可适当降低植被密度以避免过度阻水;低流速河道中则可通过增加密度来强化生态功能^[15]。

在河流中下游 1 500 m 河段两侧,河流宽度为 28 m,选定植被密度 $N=250$ 株/ m^2 、间隙区长度 $L=1.0$ m 和 1.5 m 两种方案组合(图 8)。项目实施后,通过连续 3 a 的监测评估,发现优化后的植被斑排布形式有效调整了水流流态结构,在净化河道水质的同时,未对河道行洪造成负面影响。项目的实施显著提升了水体生物多样性,水质从 V 类提升至 IV 类。通过植被斑的布置,河道中的回流区为水生生物提供了栖息地,促进了营养物质的循环,有利于水生植物的生长和繁殖。此外,植被斑的存在减少了河道侵蚀,增强了河岸的稳定性,营造了优美的湿地景观,改善了河道的生态环境,为构建人与自然和谐发展的生态河道和湿地建设提供了借鉴与参考。

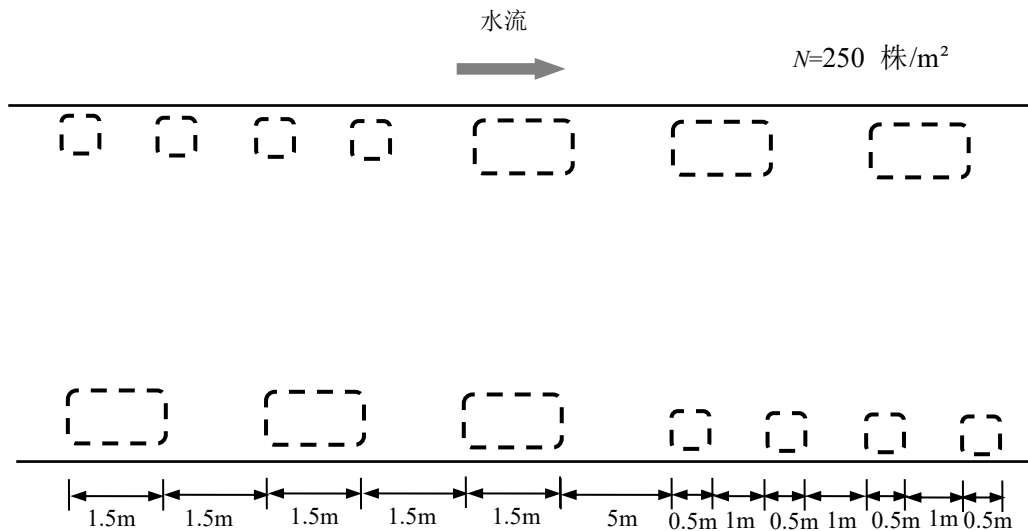


图 8 武汉玉龙河不连续植被排布方案

Fig. 8 Schematic diagram of the discontinuous vegetation layout in the Yulong River, Wuhan

5 结论

本研究综合运用水槽试验与大涡模拟(LES)技术,系统研究了不连续植被斑的水流调控机理及其

生态效应,主要结论如下。

a)大涡模拟方法验证:LES成功模拟了不连续植被斑的复杂水流结构,准确捕捉了植被冠层内减



图9 武汉玉龙河不连续植被斑生态修复技术应用实景

Fig. 9 Photograph of the discontinuous vegetation patch layout implemented for river ecological restoration in the Yulong River, Wuhan, China

速(降幅15%~33%)、冠层上增速(增幅31%~34%)、间隙区回流及植被根部马蹄形涡引发的近底流速突增现象,与试验数据吻合良好($R^2>0.96$),验证了该方法在植被水流研究中的可靠性与精度。

b) 植被密度与间隙区长度调控规律: 植被密度是影响流速分布的关键因素, 低密度($N=254$ 株/ m^2)条件下, 植被区内纵向流速降低幅度达32%, 间隙区流速降低约58.5%; 多斑块布置具有累积效应, 第四块植被斑冠层内流速较第一斑块降低15%~33%。长间隙区($L=1.1$ m)流速分布较短间隙区($L=0.5$ m)更稳定, 间隙区流速降低约25.8%, 为回流充分发展提供了空间, 回流区长度达0.5 m, 同时促进流速恢复。

c) 雷诺数对水流结构的强化作用: 高雷诺数($Re=89\ 374$)显著加剧冠层上下流速的垂向梯度, 冠层内流速较高密度低雷诺数工况($Re=42\ 900$)再降17%~22%, 植被冠层顶部剪切效应更加明显, 间隙区流速降低13.6%~27.4%, 强化了湍流混合与回流形成。

d) 工程应用成效: 武汉玉龙河整治工程采用优化后的植被斑布置方案($N=250$ 株/ m^2 , $L=1.0$ ~ 1.5 m), 水质由V类提升至IV类, 验证了研究成果的工程指导价值。

综上, 本研究揭示了不连续植被斑“阻力调控-回流生境-生态响应”的链式作用机制, 为生态河道设计中植被参数的优化选择提供了定量依据。后续可进一步探讨植被柔性、非均匀布局及多因素耦合影响, 完善生态修复技术体系。

参考文献:

- [1] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth[J]. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [2] Dudgeon D, Arthington A H, Gessner M O, et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges[J]. *Biological Reviews*, 2006, 81(2): 163-182.
- [3] 刘世庆, 许英明. 中国快速城市化进程中的城市水问题及应对战略探讨[J]. *经济体制改革*, 2012(5): 57-61.
Liu Shiqing, Xu Yingming. Discussion on Urban Water Problems and Countermeasures in China's Rapid Urbanization Process[J]. *Economic System Reform*, 2012(5): 57-61. (in Chinese)
- [4] Walsh C J, Roy A H, Feminella J W, et al. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3): 706-723.
- [5] 阳秀春, 陈誉. 城市雨源型河流水生态修复及景观构建: 以丁山河为例[J]. *人民珠江*, 2024, 45(S1): 113-119.
Yang Xiuchun, Chen Yu. Water Ecological Restoration and Landscape Construction of Urban Rain-source Rivers: A Case

- Study of Dingshan River[J]. Pearl River, 2024, 45(S1): 113–119. (in Chinese)
- [6] 王少波, 张舒, 熊玉龙, 等. 河湖水系连通对城市河道生态修复水力作用效果:以猎德涌为例[J]. 人民珠江, 2025, 46(1): 1–8.
Wang Shaobo, Zhang Shu, Xiong Yulong, et al. Hydrodynamic Effects of River–Lake System Connection on Urban River Ecological Restoration: A Case Study of Liede Creek [J]. Pearl River, 2025, 46(1):1–8. (in Chinese)
- [7] Palmer M A, Bernhardt E S, Schlesinger W H, et al. River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a disorderly international movement. Ecological Applications, 2014, 24(3): 645–657.
- [8] Nepf H M. Flow and transport in regions with aquatic vegetation [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2012, 44: 123–142.
- [9] Huai Wenxin, Xue Wanyun, Qian Zhongdong. Large-eddy simulation of turbulent rectangular open-channel flow with an emergent rigid vegetation patch [J]. Advances in Water Resources, 2015, 80: 30–42.
- [10] Liu D, Diplas P, Fairbanks J D, et al. An experimental study of flow through rigid vegetation [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2008, 113 (F4). DOI: 10.1029/2008JF001042.
- [11] Lund T S, Wu Xiaohua, Squires K D. Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations [J]. Journal of Computational Physics, 1998, 140(2): 233–258.
- [12] 张斌. 大涡模拟滤波网格分析及网格自适应控制研究与应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
Zhang Bin. Research and Application of Filter Grid Analysis and Adaptive Grid Control for Large Eddy Simulation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] Zhang Yuanheng, Nepf H. Morphological change within and around a rectangular array of emergent vegetation is linked to flow structure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2025, 1002. DOI: 10.1017/jfm.2025.10492.
- [15] Bae I, Ji U, Järvelä J, et al. Blockage effect of emergent riparian vegetation patches on river flow [J]. Water Resources Research, 2024, 635. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131197.

Discontinuous Vegetation Patches for Hydrodynamic-Habitat Regulation in Rivers

ZHAO Fang¹, WANG Huilin^{2*}

(1. WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited, , Wuhan 430223, China; 2. South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Discontinuous vegetation patch restoration technology, which optimizes vegetation spatial layout, can effectively regulate river flow structure, promote material cycling, and enhance biodiversity. This study aims to systematically investigate the hydrodynamic regulation mechanisms of discontinuous vegetation patches and their ecological effects, providing a quantitative basis for ecological river design. A combined approach of flume experiments and large eddy simulation (LES) was employed. The flume experiments were conducted in a 20 m×0.8 m×0.5 m recirculating flume with a 1‰ bed slope, using artificial reed vegetation (height 0.25 m, diameter 8 mm). A 2×2 factorial experimental design was adopted with four distinct cases, varying vegetation density (254 and 423 plants/m²), gap length (0.5 and 1.1 m), and Reynolds number (42 900 and 89 374). Acoustic Doppler velocimetry (ADV) was used to measure three-dimensional instantaneous velocities. For LES, the Smagorinsky subgrid-scale model ($C_s=0.1$) was employed with an immersed boundary method to represent rigid vegetation stems. The computational domain measured 15 m×0.8 m×0.6 m. Inlet boundary conditions incorporated a synthetic eddy method to generate realistic turbulent inflow. Grid independence was verified using three structured grids (18.13 million, 147 million, and 254 million cells), with the medium grid (147 million cells) selected for all simulations, ensuring near-wall resolution of $y^+<3.2$. Model validation against experimental data demonstrated excellent agreement ($R^2 > 0.96$). Results revealed that vegetation density, gap length and Reynolds number are key factors governing flow velocity distribution. Under low-density conditions ($N=254$ plants/m²), longitudinal velocity decreased by 32% within vegetation zones and by approximately 58% within gap zones. High-density conditions ($N=423$ plants/m²) combined with high Reynolds number ($Re=89\ 374$)

intensified the vertical velocity gradient across the canopy, with gap zone velocities ($z/h < 1$) decreasing by an additional 13.6% - 27.4% compared to high-density low-Reynolds conditions, creating favorable conditions for material deposition and biological habitat formation. Recirculation zone length expanded with increasing vegetation density, reaching a maximum of 0.6 m. Long gaps ($L=1.1$ m) facilitated more stable velocity distribution and promoted flow recovery compared to short gaps ($L=0.5$ m), with gap zone velocities reduced by approximately 25.8% and depth-averaged velocity recovering to 0.98UU in the middle of the gap. Multi-patch arrangements exhibited cumulative effects, with flow velocities within the fourth vegetation patch decreasing by 15% - 33% relative to the first patch. High Reynolds number significantly enhanced shear layer intensity at the canopy top, increasing turbulent kinetic energy by 45% and further reducing gap zone velocities. The LES successfully captured complex flow structures including canopy deceleration (15% - 33% reduction), canopy acceleration (31% - 34% increase), recirculation zones, and near-bed velocity enhancement induced by horseshoe vortices around vegetation stems. The optimized vegetation patch layout derived from experimental and numerical findings ($N=250$ plants/m², $L=1.0 - 1.5$ m) was applied to the Yulong River restoration project in Wuhan. Post-implementation monitoring over three years demonstrated significant improvements: water quality improved from Class V to Class IV and bank erosion depth decreased by 67%. This study reveals the "resistance regulation - recirculation habitat - ecological response" cascade mechanism of discontinuous vegetation patches, providing quantitative insights for vegetation parameter optimization in ecological river design. Future research directions include investigation of vegetation flexibility, non-uniform spatial arrangements, and coupled multi-factor effects on flow characteristics.

Keywords: ecological river; discontinuous vegetation patches; large eddy simulation; longitudinal velocity; recirculation zone; hydrodynamic regulation

(责任编辑:向 飞)