

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250135

植被化河道底部多孔动量射流运动特性数值研究

汪 旭¹, 夏春华^{2a}, 张宗江^{2a}, 顾爱军³, 胡瑞昌^{2a,2b}

(1. 北京中水利德科技发展有限公司, 北京 100070; 2. 重庆交通大学 a. 河海学院;
b. 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400074; 3. 绥阳县水利工程运行服务中心, 贵州 遵义 563300)

摘要: 为探究植被对多孔射流运动特性的影响, 采用 Realizable κ - ϵ 湍流模型, 分别从流速分布、旋涡形态及射流轨迹等方面分析了射流—横流流速比和射流间距对植被化河道中串联排列多孔动量射流运动特性的影响规律。结果表明, 植被抑制射流的展向扩展并促进垂向扩展; 低流速比时前侧射流抑制后侧射流的垂向扩散, 高流速比时前侧射流对后侧射流的遮挡效应明显使得后侧射流能够扩散至更高的位置。研究结果可为植被化河道中污水排放设计与优化提供理论依据。

关键词: 植被化河道; 多孔射流; 流速分布; 漩涡场; 射流轨迹

中图分类号: TV133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2026)01-0067-06

Numerical Study on Flow Characteristics of Multiple Momentum Jets at the Bottom of Vegetated River Channels

WANG Xu¹, XIA Chun-hua^{2a}, ZHANG Zong-jiang^{2a}, GU Ai-jun³, HU Rui-chang^{2a,2b}

(1. Beijing Zhongshui Lide Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China;
2a. School of River and Ocean Engineering; 2b. Southwest Water Transport Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Suiyang County Water Conservancy Engineering Operation Service Center, Zunyi 563300, China)

Abstract: To investigate the impact of vegetation on the motion characteristics of porous jet flow, the Realizable κ - ϵ turbulence model was adopted to analyze the influence laws of the jet-cross-flow velocity ratio and jet spacing on the motion characteristics of the momentum jets arranged in series in vegetated river channels from the aspects of flow velocity distribution, vortex morphology and jet trajectory, respectively. The results show that vegetation inhibits the horizontal expansion of the jets and promotes their vertical spread. At low jet-to-crossflow velocity ratios, the front jet suppresses the vertical diffusion of the rear jet, while at high jet-to-crossflow velocity ratios, the shading effect of the front jet on the rear jet is significant, allowing the rear jet to diffuse to higher positions. This study can provide theoretical guidance for the design and optimization of wastewater discharge in vegetated channels.

Key words: vegetated channel; multiple jets; velocity distribution; vortex field; jet trajectory

1 引言

生活和工业污水通常以射流形式向河道排放, 为减少对水生态的影响, 应在射流附近小范围内高度稀释。天然水体中常分布着水生植被, 这些植被不仅可以净化河流, 还会显著增加射流流

动的复杂性^[1], 因此研究植被化河道中射流流动特性具有重要的生态意义。近年来, 关于生态河道中植被影响射流扩散机制的研究较丰富, 尤其是河道底部单孔射流情况。如 BEN MEFTAH M 等^[2]通过系列水槽试验分析了刚性植被产生的湍流结构对射流扩散及其内部结构的影响, 揭示了射流与植被之间的相互作用; GAO M

收稿日期: 2025-01-18, **修回日期:** 2025-03-12, **接受日期:** 2025-03-20

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202400705); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2024NSCQ-MSX0824)

作者简介: 汪旭(1988-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为河道水力学, E-mail: 1272045440@qq.com

通讯作者: 胡瑞昌(1991-), 男, 博士、助理研究员, 研究方向为河道水力学, E-mail: huruichang@cqjtu.edu.cn

等^[3]采用大涡模拟分析了植被化河道射流中旋涡的时空演化过程,进一步阐明了植被对射流发展的影响机制。多孔射流因其能够将总流量分散成多部分来增加射流与环境流动之间的接触面积,并促进射流的扩散而得到广泛应用。受前后射流之间卷吸效应的影响,串联排列多孔射流的流动形式及结构比单孔射流更为复杂。YU D 等^[4]利用粒子图像测速法和激光诱导荧光法研究射流—横流速度比对串联排列多孔射流有效流速和浓度稀释特性的影响,并预测了多孔射流的运动轨迹;李志伟等^[5]使用 Realizable κ - ϵ 湍流模型获得了串联排列多孔射流中浓度轨迹线、浓度半宽值,以及沿射流轨迹线的衰减和稀释规律;李少华等^[6]研究了横流中串联排列多孔射流的旋涡场,揭示了马蹄形涡和反向涡对的变化规律。现有研究已对孔间距、流速比等因素影响下的射流运动、扩散特性进行了深入研究,但河道存在植被时,植被对串联排列多孔射流间卷吸作用的影响尚未得到深入研究。本文采用 Realizable κ - ϵ 湍流模型,在既有研究成果的基础上,通过分析植被化河道内串联排列多孔射流的流速、旋涡分布及运动轨迹等特征,以探究植被对串联排列多孔射流运动特性的影响规律。

2 模型设置

2.1 模型建立

以 BEN MEFTAH M 等^[2]的水槽为基础建立计算模型(图1)。河道水深为 0.3 m,刚性植被直径 D 为 3 mm,按间距 $16.7D$ 均匀排列。流向(x)、展向(y)和垂向(z)范围分别为 $333D \times 133D \times 110D$,其中植被区域长度为 $225D$ 。每个射流孔被设置于两个植被的中点位置处且射流孔直径 D 为 3 mm,第一个射流孔距离模型入口的距离为 $150D$,多个射流孔串联排列,射流孔依次命名为#1、#2、#3, #1射流的中心为坐标原点(0,0,0)。河道横流流速为 U_a ,垂向射流速度为

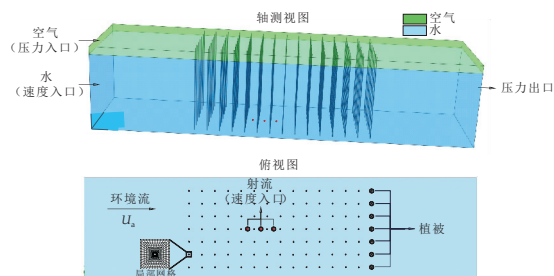


图1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model

U_j ,射流与横流的流速比 $\alpha = U_j/U_a$,在 10.53 ~ 31.58 范围内。

所有工况均采用相同的网格划分方式,计算网格采用六面体结构化网格,网格总数约为 139×10^4 个。考虑到射流出口及植被附近流场较为复杂,对植被及射流孔区域进行局部加密处理;考虑到边壁效应对壁面函数的影响,在植被及射流孔等固壁边界附近设置 10 层边界层网格,以更好地解析流场。

为研究射流—横流速度比及射流孔间距对串联排列多孔射流运动特性的影响,保持横流速度为 0.19 m/s 不变,改变射流孔数量、射流速度和射流孔间距形成 9 个含植被工况以及 1 个无植被工况,见表 1。

表 1 模拟工况

Tab. 1 Simulation conditions

工况	射流孔数/个	无量纲射流间距	横流速度	射流速度	射流—横流流速比
有植被近距双射流 N21	2	16.7	0.19	2	10.53
有植被近距双射流 N22	2	16.7	0.19	4	21.05
有植被近距双射流 N23	2	16.7	0.19	6	31.58
有植被远距双射流 F21	2	33.4	0.19	2	10.53
有植被远距双射流 F22	2	33.4	0.19	4	21.05
有植被远距双射流 F23	2	33.4	0.19	6	31.58
有植被近距三射流 N31	3	16.7	0.19	2	10.53
有植被近距三射流 N32	3	16.7	0.19	4	21.05
有植被近距三射流 N33	3	16.7	0.19	6	31.58
无植被近距三射流 W32	3	16.7	0.19	6	31.58

注:横流速度、射流速度单位均为 m/s。

2.2 控制方程

Realizable κ - ϵ 湍流模型通过在湍流黏度计算中引入应变和旋转张量,能够更准确地计算射流喷射进入横流时,射流与横流之间发生的强烈剪切和掺混过程^[7],且在开展射流模拟时具有合理性^[5,8],故选择 Realizable κ - ϵ 湍流模型开展数值计算,控制方程如下。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

紊动能(κ)方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \kappa) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \\ & + G_\kappa + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_\kappa \end{aligned} \quad (3)$$

耗散率(ϵ)方程为:

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} C_{2\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (4)$$

式中, ρ 为密度; u_i 、 u_j 分别为沿 i 、 j 方向的平均速度; x_i 、 x_j 分别为沿 i 、 j 方向的坐标分量; p 为时均压力; μ 为黏性系数; μ_t 为湍流涡黏系数; σ_κ 、 σ_ϵ 分别为湍动能和耗散率方程的湍流普朗特数, 分别取为 1.0、1.2; G_κ 为平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为浮力引起的湍动能; Y_M 为可压缩湍流中脉动膨胀对总体耗散率的影响; S_κ 、 S_ϵ 均为用户定义的源项; C_1 、 C_2 、 $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 均为常数项, 即 $C_1 = \max[0.43, \eta/(\eta + 5)]$ 、 $C_2 = 1.9$ 、 $C_{1\epsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\epsilon} = 1.92$ 。

2.3 边界条件与模型设置

模型边界条件如图 1 所示。横流和射流入口设置为速度入口, 空气入口设置为压力入口, 出口设置为压力出口, 水气交界面设置为标准大气压, 采用流体体积法 (VOF) 捕捉自由表面。河道边壁与植被壁面均设为无滑移固壁边界且采用标准壁面函数。空间离散采用标量二阶迎风格式, 压力—速度耦合采用 SIMPLEC 算法实现, 所有方程收敛标准均控制为 1×10^{-5} 。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

为验证湍流模型的准确性, 本研究复现 BEN MEFTAH M 等^[2]进行的植被环境中单孔射流试验。在 $x/D = 40$ 、 $y/D = 1.67$ 位置处, 对比模拟与试验得到的沿水深变化的无量纲速度 V_x/U_a 、 V_y/U_a 、 V_z/U_a , 结果见图 2。可见, 数值模拟结果整体与试验结果吻合较好, 模拟得到的无量纲速度 V_z/U_a 虽然较试验结果偏大, 但变化趋势一

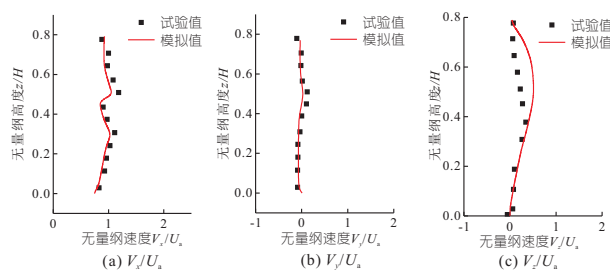


图 2 射流流向速度、展向速度、垂向速度模拟值与试验值对比

Fig. 2 Comparison between simulated and experimental values of streamwise, spanwise, and vertical velocity components

致, 类似于 XIAO Y Z 等^[9]的数值计算。考虑数值模拟边界条件与物理试验难以完全一致, 加之实际测量过程中测量位置可能存在轻微偏差, 认为数值计算结果与试验结果的差异可接受, Realizable κ - ϵ 湍流模型适用于本研究。

此外, 为检验网格无关性, 同时还使用网格数约为 63×10^4 个的粗糙网格和 167×10^4 个的精细网格进行模拟, 三种网格数量模拟得到的射流轨迹与试验结果的对比见图 3。由图 3 可知, 采用 139×10^4 个网格模拟得到的结果与 167×10^4 个网格模拟得到的结果非常接近, 考虑到计算精确和计算效率, 最终采用 139×10^4 个网格开展数值计算。

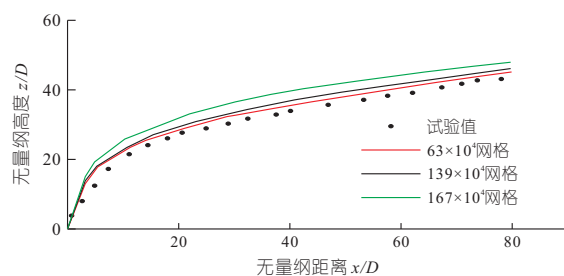


图 3 不同网格数量下射流轨迹线模拟值与试验值对比
Fig. 3 Comparison between simulated and experimental jet trajectories under different grid resolutions

3.2 速度场

为探究植被对射流流场的影响, 图 4 展示了工况 N32、W32 中三孔射流在有无植被环境中的流线分布。可以发现, 在无植被河道中, 射流上升至一定高度后明显偏转并向外扩展, 前后射流逐渐融合并卷吸周围流体形成反向涡对 (CVP), 并沿着流向缓慢消散。而在植被化河道中, 植被的阻碍作用及植被区域圆柱绕流产生的旋涡抑制了 CVP 的产生, 射流呈束状聚集流下, 同时射流速度衰减更快。

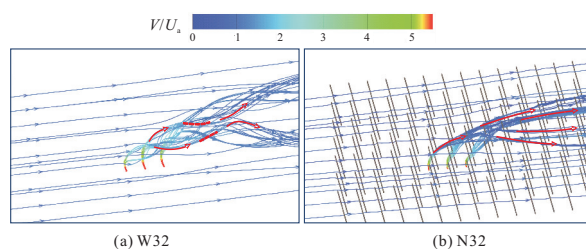


图 4 有无植被环境中多孔射流的流线对比

Fig. 4 Comparison of streamline distributions in porous jet flows with and without vegetation

图 5 展示了 #1、#2 射流孔后方及侧边 $5D$ 位置上流速沿水深的分布情况。由图 5(a)、(b) 可知, 在有植被环境中, 射流孔后方 $5D$ 位置的高流速区域沿水深方向的扩展范围更大但峰值较低。这是由于植被对横向流动的遮挡作用导致植被后

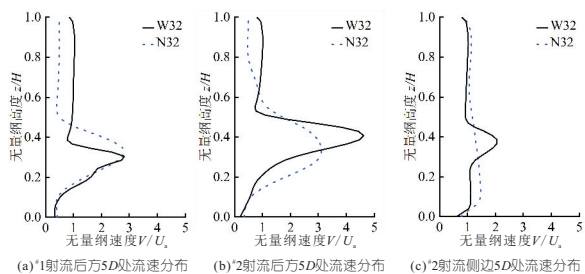


图 5 有无植被环境中射流孔附近流速对比

Fig. 5 Comparison of flow velocities near the jet orifice in vegetated and non-vegetated environments

方流速降低,从而促进了射流的垂向扩散。在第二个射流孔侧边 $5D$ 位置,无植被环境中射流展开扩散导致流速增大,而在有植被环境中,射流引起的流速增大不明显,表明植被抑制了射流的展开扩展。

工况 N22、F22、N32 在流动对称剖面 ($y/D=0$) 速度分布情况见图 6(a)、(b)、(c),绿色柱体表示植被。可以发现,由于植被对横流的阻挡作用,植被前方横流流速快速衰减至 $0.5U_a$ 以下。比较图 6(a)、(b) 后侧射流的发展趋势可以发现,前侧射流对横流的遮挡使得后侧射流上升至更高位置,这种遮挡效应随射流间距增大而减弱。受射流间卷吸作用影响,前侧射流在到达后侧射流上方后与后侧射流汇合,使得后侧射流的流速增大。因此后侧射流的轨迹受到前侧射流对横流的遮挡作用以及前侧射流的动量输运两方面影响。

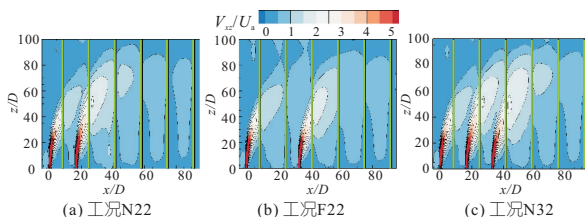
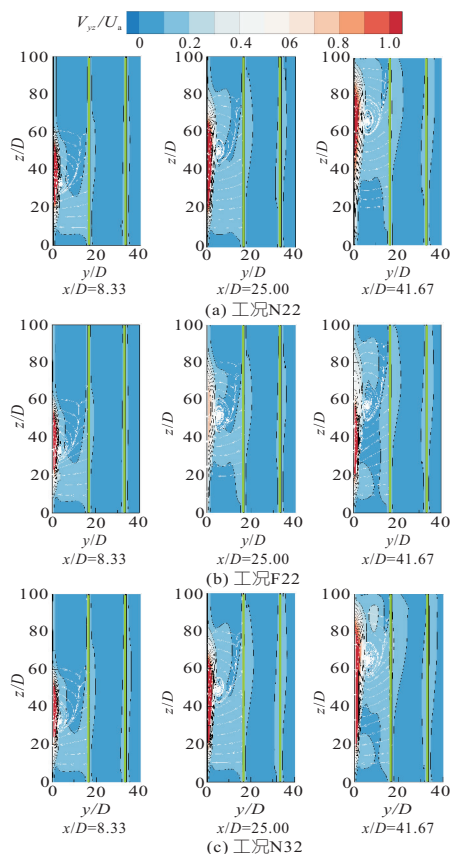


图 6 中心平面速度场

Fig. 6 Velocity field on the center plane

工况 N22、F22、N32 在距离射流孔不同位置处的无量纲速度 V_{yz}/U_a 半宽云图见图 7(a)、(b)、(c)。所选取三个位置分别位于每个射流孔后方 $8.33D$, 即植被所在位置。由图 7 可知,横流在流经植被处的水流形态类似圆柱绕流,无量纲流速 V_{yz}/U_a 在植被附近小范围内增加 $0.1 \sim 0.2$ 。与无植被情况^[3]相比,射流高流速区沿植被在垂向上的扩展更明显,而展开扩展则受到抑制。原因是植被束窄河道使得植被间局部横流的流速增大,射流在横流的挤压下沿中心平面流下。

三个工况在[#]1射流后方 $x/D=8.33$ 断面上的速度分布形态和范围比较接近,原因是本研究采用的射流间距较大,加之横流影响,后方射流对

图 7 无量纲速度 V_{yz}/U_a 半宽云图Fig. 7 Contour plot of the half-width distribution of dimensionless velocity V_{yz}/U_a

前方射流影响有限。尽管植被的存在抑制了CVP的发展,但由于射流与横流之间的高流速差,射流依然能够卷吸周围水体,CVP在射流与 y 方向上相邻植被间小范围内形成。随着射流继续向下游发展,由射流卷吸周围流体形成的CVP不断升高。而在[#]3射流后侧 $x/D=41.67$ 位置上,N32工况的CVP位置略低于N22工况,这是因为N32工况中前方两孔射流发展至第三孔射流上方后,前侧射流带来的流速增大使得第三孔射流穿透环境流体的难度增大,从而抑制了CVP的垂向发展。

3.3 z 平面旋涡场

图 8 展示了不同流速比工况 N31、N32、N33 在 $z/D=10、20、30$ 平面上的旋涡场,黑色虚线表示射流孔。由图 8 可知,在射流前方 $y=0$ 位置处植被附近的尾迹涡,其大小和范围均小于 $y=\pm 16.67D$ 处植被附近的尾迹涡,这是由于[#]1射流对横流的阻碍作用降低了植被前方小范围内的横流流速。在三个 z 平面 $x=60D$ 位置后,各工况在流动对称剖面附近的旋涡特征几乎相同,并与位于 $y=\pm 16.67D$ 处植被附近的旋涡形态类似。这说明此处射流引入的旋涡已显著耗散,旋涡主要由水流流经植被产生。

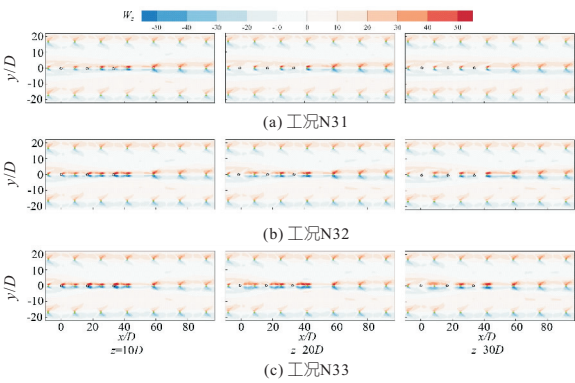


图 8 z 平面旋涡场

Fig. 8 Vortex field on the z -plane

射流增大了局部流速,其流经植被产生的尾迹涡在展向上的扩展宽度理论上也应增大。图 8 显示,旋涡的展向扩展受到抑制,而流向扩展得到增强。这是因为射流产生的 CVP 与水流流经植被产生的尾迹涡发生合并,由于接触区域内发生剪切耗散使得旋涡的强度降低,随着射流向下游发展并流经更多植被,射流紊动强度迅速衰减。由于射流 CVP 与射流后方植被尾迹涡均主要受到射流流速影响,在本研究的流速范围内,其强度均随射流流速的增大而增大。因此,不同流速比工况的旋涡均表现出相同的展向、流向扩展趋势及一致的衰减规律。

3.4 射流轨迹特性

射流在流动对称剖面($y/D=0$)上的轨迹线和弯曲角度分别见图 9、10,射流轨迹根据流动对称剖面上无量纲速度 V_{xz}/U_a 的最大值定义。由

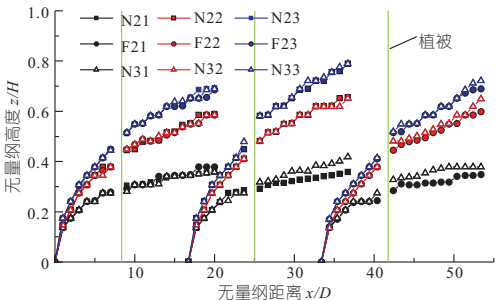


图 9 无量纲射流轨迹

Fig. 9 Jet trajectory in dimensionless coordinates

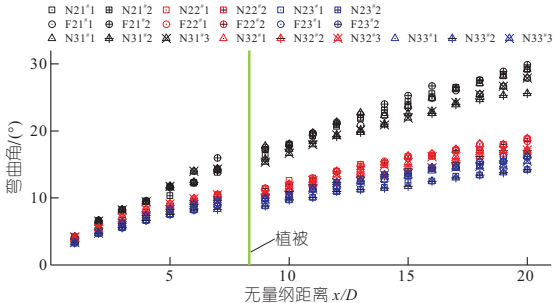


图 10 射流弯曲角度

Fig. 10 Curvature angle of the jet

图 9、10 可知,相同流速比工况中,射流轨迹在早期阶段(距射流孔 $0\sim8D$ 范围内)内基本一致,差异主要出现在末端位置。由于在横流的作用下射流向下游偏转,后侧射流对前侧射流的影响相对较小,因此在射流间距和孔数不同的情况下, # 1 射流轨迹基本一致。在低流速比的工况 N21、F21、N31 中,后侧射流轨迹差异明显,且随着流速比增大后侧射流轨迹的差异减小。

比较工况 N21、F21 不同射流孔的射流轨迹,可以发现在低流速比下,N21、F21 工况中后侧射流的轨迹低于前侧射流。这是由于低流速比情况下,前侧射流在横流的作用下更早弯曲,其速度方向逐渐与横流速度一致,从而减弱了前侧射流对后侧射流的遮挡效应,使后侧射流上方的横流流速增大,带来的速度分量使得后侧射流更早弯曲。随着流速比增大,同一工况中最后侧射流能够发展至更高的位置。可见,由于前侧射流的弯曲程度会改变前侧射流对后侧射流的影响机制,前侧射流对后侧的影响主要与射流—横流流速比有关。在低流速比下,前侧射流弯曲角度较大,前侧射流发展至后侧射流上方时高度较低,从而抑制了后侧射流向上侵入流体。而在高流速比下,前侧射流发展至后侧射流上方时已处于较高位置,对后侧射流的抑制作用不明显。

各工况中射流速度沿轨迹线的衰减过程见图 11。射流射出后,在距射流孔中心 D 的小范围内即大幅度衰减,衰减率平均可达 60%。在射流孔至植被前的 $8D$ 范围内流速衰减率平均为 85%,同时射流流速在植被附近流速衰减率激增,平均为 6%。因此,射流流至第一株植被时的流速衰减率即高达 91%,而后续植被的影响很小,距射流孔 $9D\sim20D$ 范围内流速衰减率仅变化 2%~7%。在同一工况中,第一孔射流的流速总衰减率最大,距射流孔 $20D$ 位置上总衰减率平均为 97%,而第二、三孔射流在距射流孔 $20D$ 位置上总衰减率平均分别为 93%、92%。此外,流速比对射流轨迹速度的沿程衰减率影响很小,使得大

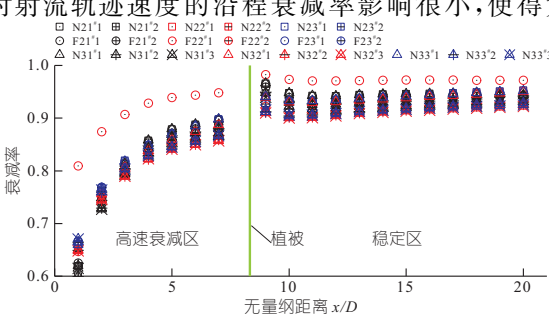


图 11 射流轨迹速度衰减过程

Fig. 11 Velocity attenuation process along the jet trajectory

