

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.03.004 CSTR:32310.14.stbcb.2025.03.004

张迪,张会兰,李峰,等.基于PIV的茎秆倒伏角度对坡面薄层流动力学特性的影响[J].水土保持学报,2025,39(3):335-344,351.

ZHANG Di, ZHANG Huilan, LI Feng, et al. Effect of stem lodging angle on the hydrodynamics of thin overland flow on a slope based on PIV[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):335-344,351.

## 基于PIV的茎秆倒伏角度对坡面薄层 流水动力学特性的影响

张迪<sup>1</sup>,张会兰<sup>1,2</sup>,李峰<sup>1</sup>,谷方正<sup>1</sup>,王铃涵<sup>1</sup>

(1.北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室,北京100083;2.北京林业大学

重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京100083)

**摘要:** [目的] 坡面植被在水流冲刷或风力等外力作用下,易发生不同程度的倒伏,为探究植被倒伏角度对坡面薄层流动力学特性及侵蚀冲刷过程的影响。[方法] 利用亚克力圆柱体模拟植株茎秆,开展室内水槽冲刷试验,设置6组倒伏角度(45°、75°、90°、105°、135°、150°)与3组流量条件(0.23、0.52、0.76 L/s),采用高频粒子图像测速系统(particle image velocimetry, PIV)捕捉流场图像并进行流场绘制,分析不同茎秆倒伏角度对流场特性、紊动特性与涡旋结构特征的影响。[结果] 1) 茎秆存在导致其上游对称面处的水流流速发生改变,在近床面区域形成沿床面向上游与沿茎秆向下的负向流动区( $x/D=-0.1$ 至 $x/D=-0.4$ ,  $y/D=0$ 至 $y/D=0.4$ ),且茎秆前倾与后倾均会削弱水流的负向流动。2) 随水深增加,垂向流速的紊动强度先增大后减小,紊动强度最大值出现的位置均位于 $y/D=0.2$ 附近,说明该区域涡旋微结构作用强烈。3) 茎秆存在导致上游对称面处的马蹄涡(horseshoe vortex, HV)结构产生。由于茎秆前倾与后倾对下降流的削弱作用,随倾斜角度的增加,马蹄涡系统变得明显,涡量增大且逐渐向柱体靠近,在达到90°后继续倾斜,马蹄涡系统强度反而减弱。HV1的涡量随柱体倾角变化总体呈先增大后减小的“抛物线型”变化规律,涡量最大值 $90^\circ > 105^\circ > 75^\circ > 135^\circ > 45^\circ > 150^\circ$ 。[结论] 综合表明,在坡面水流发展初期,倾斜植株茎秆能够在一定程度上减弱茎秆底部水流的逆向流动,抑制下降流的产生,削弱马蹄涡结构,进而减轻薄层流对床面的侵蚀,且茎秆倾斜程度越大,对土壤侵蚀的抑制效果越好。

**关键词:** 坡面薄层流; 倒伏角; 流场; 马蹄涡系统; PIV

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)03-0335-10

### Effect of Stem Lodging Angle on the Hydrodynamics of Thin Overland Flow on a Slope Based on PIV

ZHANG Di<sup>1</sup>, ZHANG Huilan<sup>1,2</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, GU Fangzheng<sup>1</sup>, WANG Linghan<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Soil and Water Conservation, National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Chongqing Jinyun Forest Eco-System Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 10083, China)

**Abstract:** [Objective] Slope vegetation is susceptible to different degrees of collapse under the action of external forces such as water flushing and wind. The aim of the study was to investigate the influence of vegetation collapse angle on the dynamic characteristics of thin-layer flow and erosion and scouring process on slopes. [Methods] Acrylic cylinders were used to simulate the stems of the plants, and an indoor flume scouring test was carried out to set up six groups of collapse angles (45°, 75°, 90°, 105°, 135°, 150°) and three sets of flow conditions (0.23, 0.52, 0.76 L/s), and a high-frequency Particle Image Velocimetry (PIV) system was used to capture and map the flow field, so as to analyze the effects of different stem lodging angles on the characteristics of the flow field, turbulence

收稿日期:2024-11-05 修回日期:2024-12-25 录用日期:2025-01-01 网络首发日期(www.cnki.net):2025-02-28

资助项目:国家自然科学基金项目(52279056)

第一作者:张迪(2002—),女,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:zhangdi0202@bjfu.edu.cn

通信作者:张会兰(1984—),女,博士,教授,主要从事水文与水沙动力过程研究。E-mail:zhanghl@bjfu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

characteristics and vortex structural features. [Results] 1) The presence of stalks caused the flow velocity at the symmetry plane of the upstream of the stems to change, forming negative flow zones along the upstream of the bed and downstream of the stalks in the near-bed region ( $x/D=-0.1$  to  $x/D=-0.4$ ,  $y/D=0$  to  $y/D=0.4$ ), and both forward and backward tilting of the stems weakened the negative flow of the water. 2) The turbulence intensity of the vertical flow increased and then decreased with increasing water depth, and the locations where the maximum turbulence intensity occurred were all located near  $y/D=0.2$ , indicating that the vortex microstructure played a strong role in this region. 3) The presence of stems led to the generation of Horseshoe Vortex (HV) structures at the upstream symmetry plane. Due to the weakening effect of the forward and backward tilting of the stems on the descending flow, the HV system became obvious with the increase of the tilting angle, the vortex volume increased and gradually approached to the column, and the strength of the HV system decreased with the continued tilting of the column after it reaches  $90^\circ$ . The change pattern of the vortex volume with the column tilting angle of HV1 showed a parabolic pattern of increasing first and then decreasing. The maximum value of vortex was  $90^\circ > 105^\circ > 75^\circ > 135^\circ > 45^\circ > 150^\circ$ . [Conclusion] The synthesis shows that, in the early stage of slope current development, tilting the plant stems can weaken the reverse flow of water at the bottom of the stems to a certain extent, inhibit the generation of downward flow, weaken the structure of horseshoe vortex, and then reduce the erosion of the bed by thin-layer flow, and the greater the degree of tilting of the stems, the better the inhibition effect on soil erosion.

**Keywords:** slope thin-layer flow; lodging angle; flow field; horseshoe vortex system; PIV

**Received:** 2024-11-05

**Revised:** 2024-12-25

**Accepted:** 2025-01-01

**Online**(www.cnki.net): 2025-02-28

我国是世界上水土流失最严重的国家之一, 强烈的水土流失导致区域生态环境脆弱、河道泄洪能力剧减、水质恶化等一系列生态环境问题<sup>[1]</sup>。为从根本上改善我国生态急剧恶化的状况, 我国全面启动“退耕还林(草)”等大规模生态修复工程。植被通过冠层、茎秆层和根系等不同垂直结构对水文、水动力过程产生影响并发挥水土保持作用<sup>[1-2]</sup>, 其中, 茎秆层通过增加水流阻力、降低水流流速, 同时减弱水流对土壤的冲刷能量等, 降低土壤侵蚀的风险<sup>[2]</sup>。植株茎秆通过改变坡面流水动力特性发挥重要水土保持作用, 对生态环境高质量和可持续发展亦具有重要意义。

前人<sup>[3-4]</sup>在植被茎秆影响水流水动力特性的研究中已取得大量成果, 目前的研究主要从宏观和微观 2 个角度开展。宏观研究主要关注植被茎秆对水流流速、流体形态及流动阻力等动力参数的影响, 在国内外得到广泛而深入的探讨; 微观研究则侧重于紊动特征和漩涡结构等方面<sup>[5]</sup>。BAKER<sup>[6]</sup>利用流体可视化技术揭示绕圆柱体流动时的涡旋结构, 这些结构被认为是引发土壤侵蚀的主要因素。随后, DARGAHI<sup>[7]</sup>与 MASSARO 等<sup>[8]</sup>的研究进一步支持这一涡旋模式的存在, 但对其如何演变、运动及消退的过程尚不明晰。随着科技的进步, 粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术的应用使得研

究者能够更精确地测量各种流场中的涡旋特征。不同学者针对多种因素对柱前流场的影响展开研究, 如水流条件、地表状况及植被特性等, 逐渐成为水土保持学和水沙动力学等领域的研究前沿和热点<sup>[9-10]</sup>。已有研究<sup>[11-13]</sup>指出, 水流条件的改变导致柱前涡旋结构发生移动, 进而影响流动分离点的位置。此外, 多数学者通过冲刷试验验证土壤侵蚀与圆柱形茎秆倾角之间的定量关系。有学者<sup>[14]</sup>研究发现, 圆柱形桥墩在垂直时的冲刷深度最大; 另有研究<sup>[15-16]</sup>也指出, 柱前相对冲刷深度随倾斜角度增加而减小, 主要归因于柱体倾角的变化导致马蹄涡系统的削弱, 进而影响柱前土壤侵蚀过程。

鉴于目前对坡面薄层流中植被茎秆影响水动力学特性和土壤侵蚀机理的认知有限, 尤其是茎秆倾斜角度如何影响薄层流中的紊动强度、马蹄涡等动力结构, 仍需进一步研究。因此, 本研究选取不易变形、几何结构与植被茎秆相似的黑色亚克力圆柱体模拟简化的刚性植被茎秆<sup>[5]</sup>, 通过设置不同的茎秆倒伏角度, 基于课题组自主研发的高精度和高频率粒子图像测速技术 (PIV)<sup>[5, 12]</sup>, 以茎秆前端对称面为观察窗口, 提取并分析坡面薄层流的流速、紊动特性及漩涡结构特征, 量化不同茎秆倾角与坡面流水动力特性之间的关系。研究结果对深入探讨植被措施影响坡面水土流失动力过程具有重要理论意义, 对植

被生态保护措施的结构优化和水土保持功能提升等亦具有实际的指导价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

本试验于 2024 年 4—6 月在北京林业大学沟槽侵蚀机理与过程实验室进行,所使用的水槽系统为开敞式自循环玻璃水槽,边壁由光滑的玻璃制成,尺寸为 12 m×0.3 m×0.3 m,坡度设置为 0.5%,水槽系统布置见图 1。使用电磁流量计实时测量流量(Q)。在水槽入口处装有蜂窝状硬质管,末端安装有尾门,确保水流的稳定性与试验结果的准确性。水深通过沿水槽等距安装的 6 个超声波水位计测量,精度可达 0.2%。同时,水流温度由数显温度计实时测量,精度可达±0.1℃。

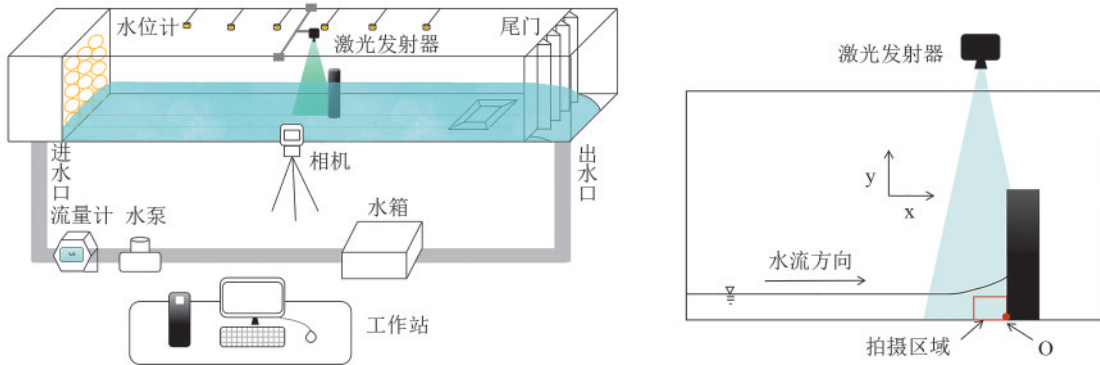


图 1 水槽系统与拍摄区域及坐标轴示意

Fig. 1 Schematic diagram showing the sink system, the shooting area and the axes

### 1.2 水流条件

前期研究<sup>[17]</sup>发现,光滑条件下薄层流的水深范围为 0~2.0 cm。由于水深极浅,雷诺数(Re)为 500~5 000,弗劳德数(Fr)为 0.5~2。为避免水深过浅而出现大规模的漩涡结构,试验选取>0.5 cm 的 3 组水深 h(0.68、0.86、1.08 cm)。所有试验的水流宽深比均>5,因此边壁对水槽中心轴线处的水流没有显著影响,从而确保试验的准确性和可靠性。试验工况见表 1。

### 1.3 参数处理方法

柱体前端存在侵蚀力较强的涡旋,早期研究者<sup>[18-19]</sup>将涡定义为携带涡量的结构,并将涡量强度作为涡识别变量,涡量为正代表该涡旋逆时针旋转,反之则为顺时针旋转。在识别涡旋结构时,仅依赖涡量这一指标在区别背景剪切与涡旋剪切方面存在局限性,可能导致涡旋结构的不准确识别。为解决这一问题,ZHOU 等<sup>[20]</sup>提出的旋转强度( $\lambda_{ci}$ )可以精确地辨识涡旋结构,在实际研究中得到广泛应用。改进后的方法可以消除垂向不均匀性、涡的旋转方向及

本试验选择距离进水口 7.5 m 处的位置作为试验区域,确保水流达到充分发展的状态。在试验段水槽床面的中心线上放置一个直径(D)为 20 mm,高度( $h_c$ )为 80 mm 的黑色亚克力柱体用以模拟植被茎秆,设置 6 组不同倒伏角度(45°、75°、90°、105°、135°、150°)。在水中加入聚酰胺球作为示踪颗粒(直径为 10 μm,密度为  $1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ),其密度与水较为接近,能够更好地反映水流的运动轨迹。由于本研究重点关注柱体前端由马蹄涡系统引起的局部冲刷,因此 PIV 测量区域位于圆柱体前缘,使用高频绿光双脉冲激光系统照亮拍摄区域,并采用高分辨率 PIV 系统捕捉圆柱体上游对称面处的瞬时速度流场(图 1)。图像采集系统采用 MLink 软件,每组图像连续采样 9 min,获取 5 000 对(10 000 张)独立流场图像。每张流场由连续的 2 帧图片计算而得。

雷诺数对涡识别结果的影响<sup>[18]</sup>。

1.3.1 马蹄涡涡量及旋转强度的计算 (1)柱体前端的涡量计算采用其定义计算:

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为涡量, $s^{-1}$ ;  $u$ 、 $v$ 分别为某点处流向和垂向的瞬时速度分量,cm/s;对空间流场的每一点求取即可得到整个流场的涡量。

(2)设空间中一点的流速梯度矩阵(M)可表示为:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

旋转强度 $\lambda_{ci}$ 为(M)特征值的虚部,在二维平面下计算方法为:

$$\lambda_{ci} = \begin{cases} \sqrt{Q - \frac{P^2}{4}} & Q - \frac{P^2}{4} > 0 \\ 0 & Q - \frac{P^2}{4} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

表 1 试验工况

Table 1 The test condition

试验编号	流量(Q)/ (L·s <sup>-1</sup> )	水深(h)/ cm	流速(U)/ (m·s <sup>-1</sup> )	倒伏角度/ (°)	水力半径 (R)/cm	相机分辨率 (Res)/(Pixel·mm <sup>-1</sup> )	水温(T)/°C	弗劳德数 (Fr)	雷诺数 (Re)
C1		0.67	0.11	45	0.64	75	18.8	0.43	708
C2		0.68	0.11	75	0.65	65	18.2	0.43	698
C3	0.23	0.68	0.11	90	0.65	72	20.1	0.43	731
C4		0.68	0.11	105	0.65	64	19.0	0.43	712
C5		0.72	0.11	135	0.69	80	24.3	0.41	804
C6		0.70	0.11	150	0.67	79	23.9	0.42	804
C7		0.86	0.20	45	0.81	72	19.3	0.69	1 602
C8		0.86	0.20	75	0.81	64	18.8	0.69	1 583
C9	0.52	0.86	0.20	90	0.81	65	20.0	0.69	1 630
C10		0.86	0.20	105	0.81	58	18.8	0.69	1 583
C11		0.87	0.20	135	0.82	62	25.4	0.68	1 847
C12		0.88	0.20	150	0.81	61	25.4	0.68	1 746
C13		1.08	0.23	45	1.01	66	19.5	0.72	2 321
C14		1.09	0.23	75	1.02	55	19.0	0.71	2 291
C15	0.76	1.07	0.24	90	1.00	67	19.8	0.73	2 339
C16		1.08	0.23	105	1.01	57	18.3	0.72	2 253
C17		1.09	0.23	135	1.02	59	25.6	0.71	2 675
C18		1.07	0.24	150	1.00	59	25.6	0.73	2 701

注:弗劳德数反映流体惯性和重力之比,  $Fr = U/\sqrt{gH}$ ; 雷诺数反映流体惯性和黏滞力之比,  $Re = UR/\nu$ 。

$$P = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (4)$$

$$Q = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (5)$$

式中:  $P$ 、 $Q$  分别为矩阵  $M$  的第 1、第 2 不变量;  $u$ 、 $v$  分别为流向和垂向的瞬时速度分量, cm/s。当旋转强度  $\lambda_{ci} > 0$  时, 该区域存在螺旋形运动的涡旋。

### 1.3.2 紊动强度及雷诺应力的计算

1) 紊动强度为流速的二阶矩, 代表测点流体脉动的强弱程度, 计算方法<sup>[5]</sup>为:

$$u' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2} \quad (6)$$

$$v' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (7)$$

式中:  $u'$ 、 $v'$  分别为流向方向 ( $x$  轴) 和垂向方向 ( $y$  轴) 的紊动强度, cm/s。

2) 雷诺应力是流体作湍流运动时所产生的应力, 是同一测点 2 个方向脉动强度的乘积, 代表测点流体碰撞的强弱程度, 计算方法<sup>[5]</sup>为:

$$-\overline{u'v'} = \frac{-1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u}) v_i \quad (8)$$

式中:  $-\overline{u'v'}$  为雷诺应力,  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ;  $u_i$ 、 $v_i$  分别为每个测点的瞬时流向流速和瞬时垂向流速, cm/s;  $N$  为瞬时流

场的个数;  $u$  为流向方向上的时均流速, cm/s。

## 2 结果与分析

### 2.1 时均流速场

流速是坡面流水动力学特性中最为基础的参数, PIV 能够精确测量柱前流场的流速分布<sup>[5]</sup>。由于本文重点关注在同一流量条件、不同柱体倾角下柱前流场的分布与空间变化规律, 且不同流量条件下的流场变化呈现出相似的规律, 因此以流量条件为 0.76 L/s 时的数据为例展开分析。图 2 为不同柱体倾角条件下的柱前流场时均流向流速分布。当水流遇到柱体障碍物时, 其速度分布受到逆压梯度的影响而发生显著变化<sup>[5,19]</sup>。水流在接近柱体的过程中, 其流向流速逐渐降低。受到柱体与床面的限制, 流向流速在接近床面的区域降低至负值, 方向发生改变, 形成明显的带状逆流区域。在柱体角度为 90° 的情况下, 该负向流速区域范围最大, 位于  $x/D = -0.1 \sim -0.4$ , 而在其他角度条件下, 这一区域均有不同程度地缩小, 是由于柱体前倾或后倾导致柱前回流的流动分离点位置向上游移动<sup>[11]</sup>, 表明在低流量条件下, 柱体倾斜具有更明显的阻流效果。柱体后倾时具有的“顺流线”结构特征, 几乎完全破坏下降流的形成 (图 3), 柱体倾角  $< 90^\circ$  时产生的负垂向流速区 ( $y/D = 0 \sim 0.4$ ) 在柱体倾角增大至 150° 时消失, 说明柱体后倾能够更有效地削弱下降流强度<sup>[15]</sup>。

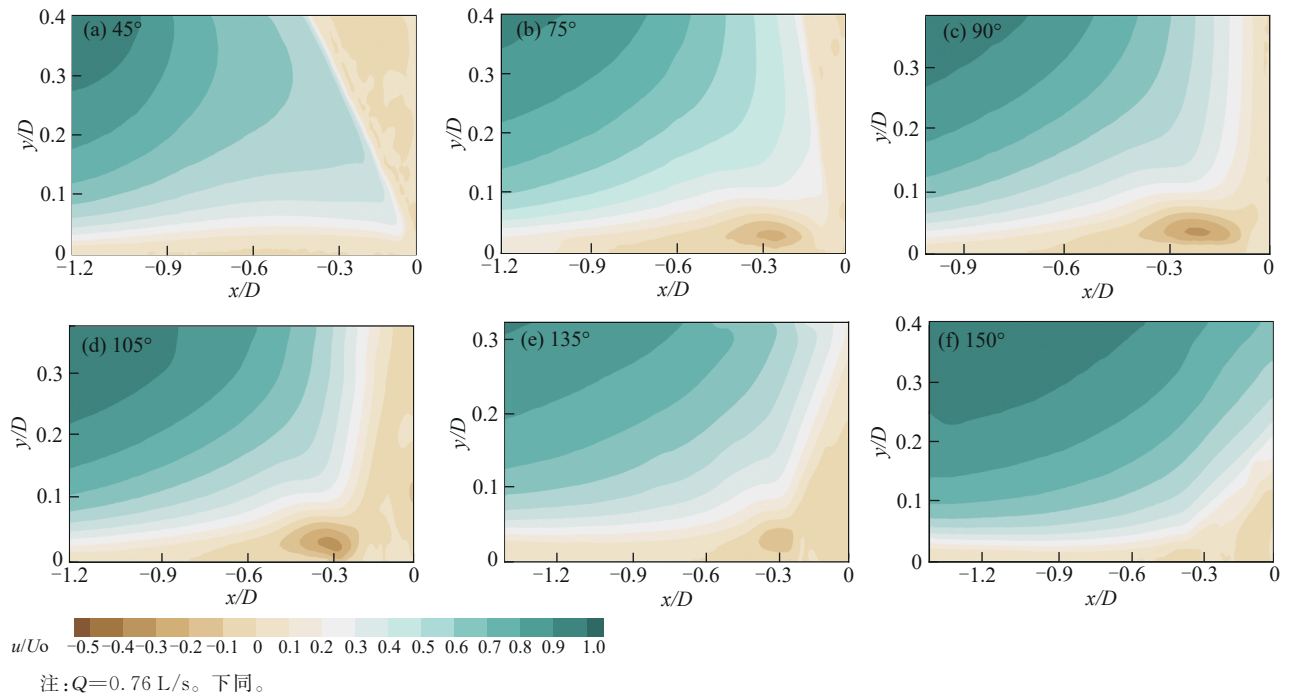


图 2 不同倾角条件下流向流速分布

Fig. 2 Distribution of the flow rate in the flow direction under different inclination conditions

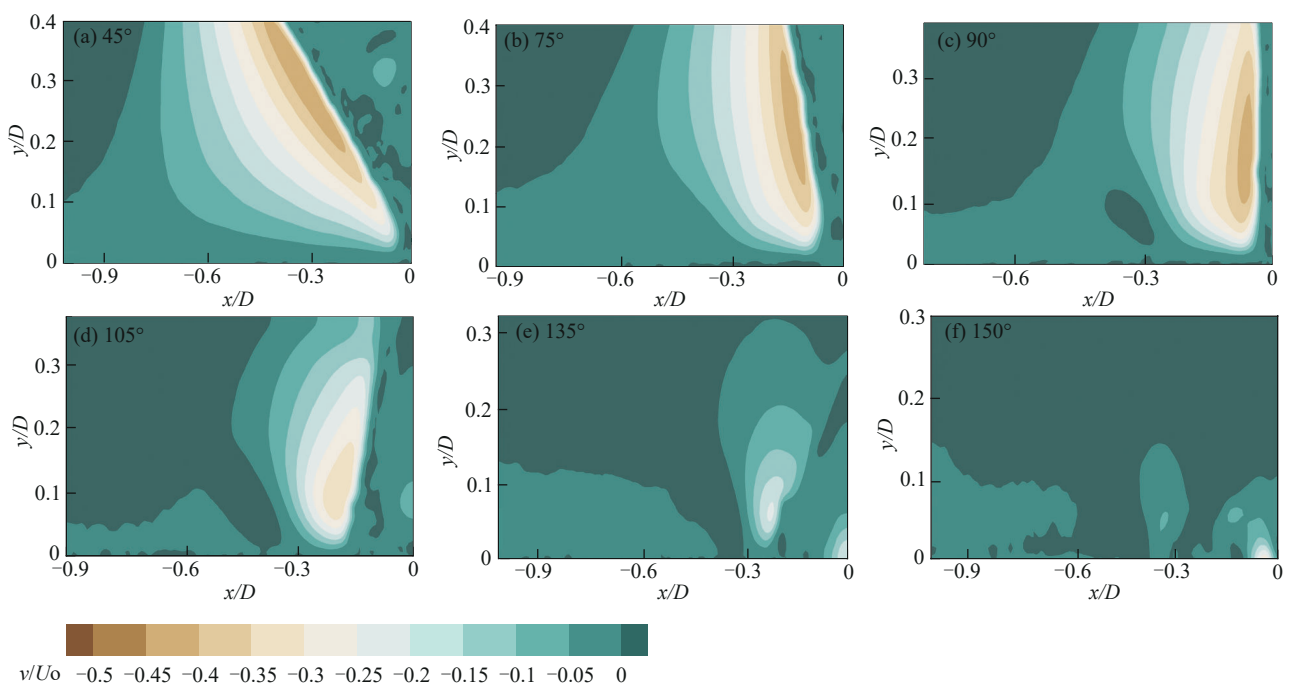


图 3 不同倾角条件下垂向流速分布

Fig. 3 Distribution of the vertical flow rate under different inclination conditions

### 2.2 紊动特征

2.2.1 紊动强度 植被覆盖对水流紊动特性的影响显著<sup>[4,21]</sup>,在明渠流研究中,沿水流方向的速度分布通常比较均匀,因此主要关注垂向的紊动强度。图 4 为垂向流速紊动强度在柱前上游对称平面处的分布云图。结果表明,所有倾角条件下均在柱体与床面交界处形成椭圆状的紊动剧烈区域( $x/D$ 为 $-0.1\sim-0.4$ , $y/D$ 为 $0\sim 0.2$ ),与流速方向发生改变的区域基本重合,是

由于近底水流受剪切作用与柱体的影响,容易发生紊流猝发现象,紊动强度相对较大,内部存在着剧烈的水体相互作用<sup>[5,22]</sup>。最大垂向紊动强度为 $90^\circ > 105^\circ > 75^\circ > 135^\circ > 45^\circ > 150^\circ$ ,说明柱体垂直时垂向流速的变化最为剧烈,柱体倾斜程度的增加能够削弱水流的紊动强度,在一定程度上起到稳定水流的作用,柱体后倾稳定水流的效果更好,是由于柱体后倾时沿柱体流向床面的下降流减弱。

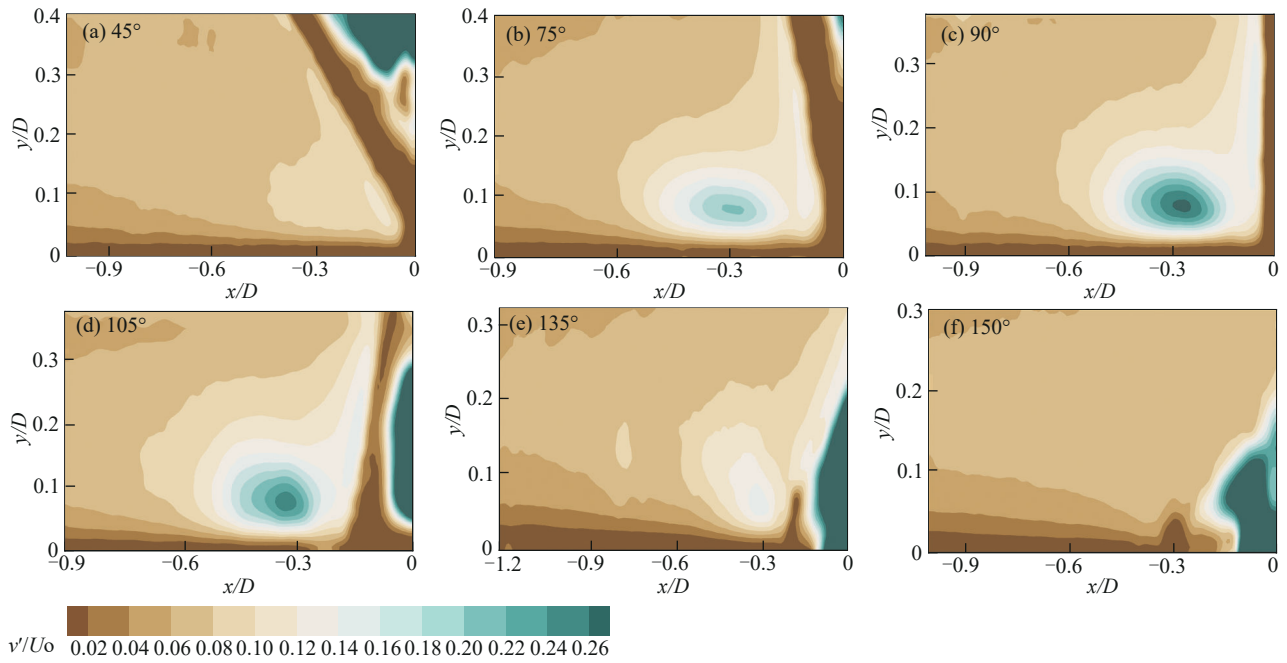


图 4 不同倾角条件下垂向流速紊动强度分布

Fig.4 Distribution of the turbulence intensity of vertical flow velocity under different inclination conditions

由于柱体倾角 $<90^\circ$ 时柱体干扰流场平均紊动强度的计算,因此只考虑 $90^\circ$ 、 $105^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $150^\circ$  4种倾角条件下垂向流速紊动强度沿水深的分布。从图5可以看出,垂向流速紊动强度沿水深呈先急剧增大后减小趋势,且在 $y/D$ 为 $0.2\sim 0.3$ 附近产生最大值,根据前人<sup>[21-23]</sup>的研究,该处流速变化剧烈,可能是由于马蹄涡系统的作用,水流结构发生急剧改变。在明渠流中<sup>[5]</sup>,接近自由水面处的紊动强度通常接近于0,但由于薄层流水深极浅的特性,自由水面不能完全抑制沿水深方向的紊动,因此 $y/D > 0.6$ 时的紊动强

度仍然存在波动,不能趋于稳定。在相同流量条件下,垂向流速紊动强度最大值为 $90^\circ > 105^\circ > 135^\circ > 150^\circ$ ,是由于柱体倾斜程度越大,水流在沿柱体流动过程中动量损失越大,垂向流速的变化越小,垂向紊动强度也随之减小<sup>[15]</sup>。在流量条件为 $0.23\text{ L/s}$ 时,紊动强度最大值较其他2组更大,沿水深方向的紊动强度变化更为剧烈且靠近自由水面处的紊动强度始终大于其余2组,是由于薄层流水深极浅,流量越小,下垫面及自由水面对流速的干扰越强烈,流速梯度更大。

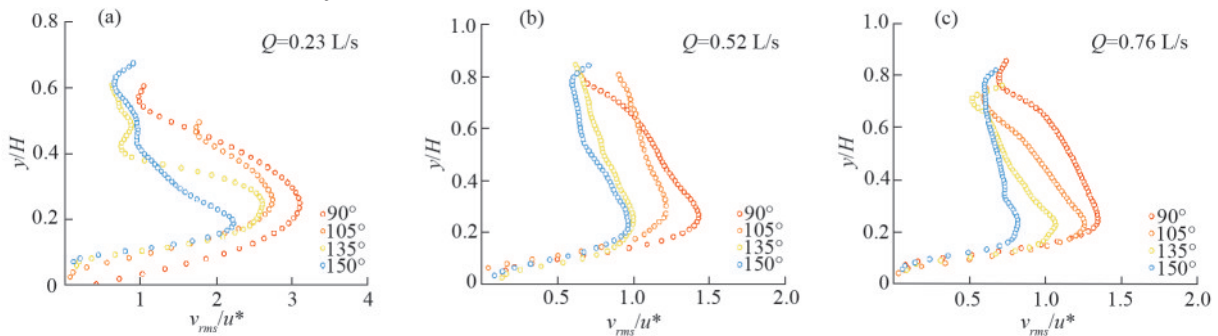


图 5 不同倾角条件下垂向流速紊动强度沿水深分布

Fig.5 Distribution of the vertical flow turbulence intensity along the water depth under different inclination conditions

2.3.2 雷诺应力 雷诺应力作为流速不均匀性的量化指标,直观反映流体区域内流速分布的非均匀程度。由图6可知,随柱体倾角的增大,靠近柱体与床面区域的雷诺应力呈现先增大后减小趋势,柱体 $90^\circ$ 时具有最大的雷诺应力,与紊动强度的变化一致。所有倾角条件下,雷诺应力增大区域均出现在柱体上游近床面处,是由于在该区域内沿床面的回流与

上游来流相撞,在靠近床面的分离区产生紊流涡旋结构,这些涡旋结构导致紊动增强,促进水体动量在纵向和垂向的交换<sup>[22]</sup>。在主涡旋上游区域,紊动强度和雷诺应力均达到峰值,且二者峰值区域通常与马蹄涡区域相吻合<sup>[26]</sup>,从能量守恒和水流结构变化的角度分析,涡旋结构的形成是雷诺应力增大的主要驱动因素<sup>[10]</sup>。

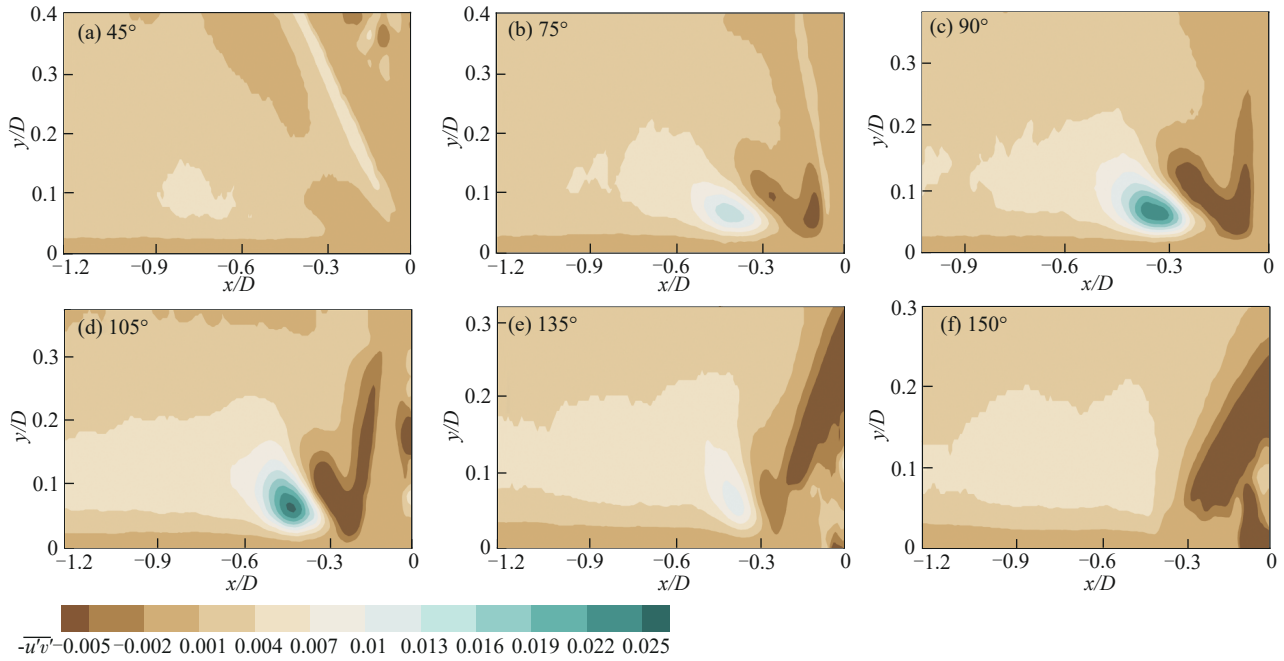


图 6 不同倾角条件下雷诺应力

Fig. 6 Diagram of Reynolds stress under different inclination conditions

2.3 马蹄涡结构

2.3.1 涡旋结构识别 由图7可知,在深水明渠流中,水流流经圆柱体时,受到逆压梯度的影响,在圆柱体上游形成复杂的马蹄涡系统(HV)。该系统由至少4个涡旋组成,分别为位于圆柱底部的逆时针CV,以及顺时针旋转靠近圆柱的HV1与远离圆柱的次级漩涡HV2,还有逆时针旋转的三级漩涡HV3。这些涡旋结构被限制在圆柱体上游的特定区域内,大约占据圆柱体直径的1/2距离内<sup>[24-25]</sup>。

图8和图9为经过PIV计算后得到的时均流场涡量和旋转强度云图。结果表明,不同植被倾角下,薄层流在圆柱体上游对称平面内也存在类似的HV系统。这些系统包括顺时针旋转的HV1和远离柱体的HV2,HV2明显弱于HV1<sup>[5,13]</sup>。二者中心基本在同一条直线上,沿着 $y/D=0.05$ 逐渐上升,通过明显的尾迹连接,形成一个靠近床面的带状结构,是由于

HV2在靠近床面处发生流动分离并向下游移动,然后与HV1相合并。然而,在HV1的正下方,虽然理论上存在逆时针旋转的HV3,但在本次试验中并未观测到,可能是因为该涡旋交替经历多个复杂的过程,在时均流场的计算过程中可能因非恒定状态而被剔除<sup>[5]</sup>。随着倾角的增加,涡旋结构变得明显,但角度增加至 $90^\circ$ 后,倾角进一步增加,涡旋结构稍有减弱。柱体倾斜程度越大,形成的涡旋结构越弱,涡量也越小,进一步印证涡旋结构的产生与沿柱体向下流动的下陷流密切相关。与前人<sup>[15]</sup>研究发现,相对于垂直柱体,随倾角的减小或增加,柱体前端的局部冲刷坑深度及冲刷坑大小均有不同程度的减小,且前倾柱体对局部冲刷的减弱程度大于后倾柱体的结果一致,说明柱体前端的侵蚀冲刷是由HV系统驱动产生的,HV系统的强弱直接决定着冲刷发生的程度<sup>[26-27]</sup>。

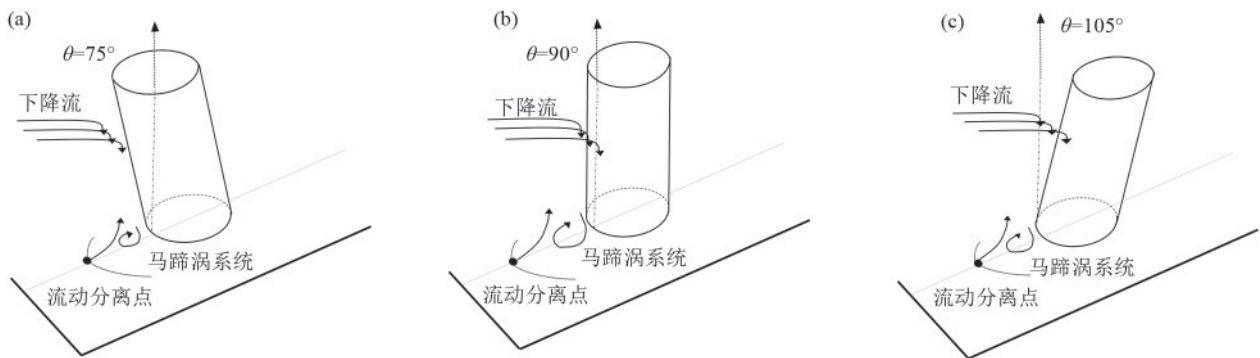


图 7 马蹄涡系统示意

Fig. 7 Schematic diagram of the horseshoe vortex system

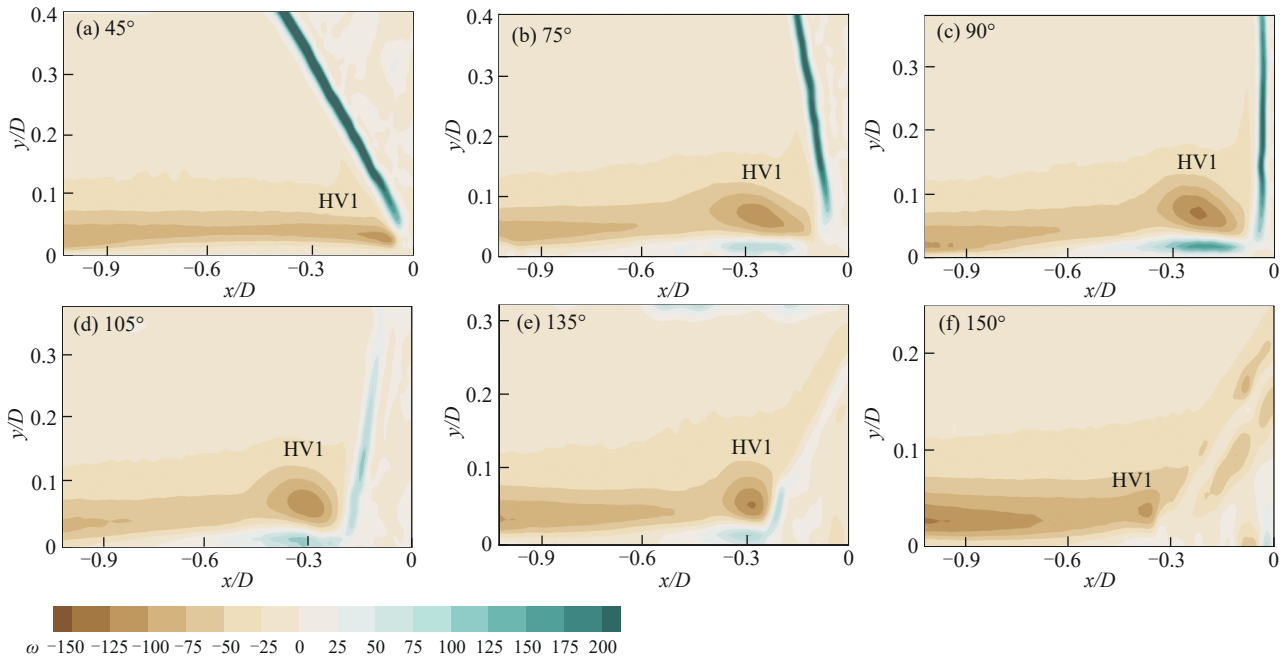


图 8 不同倾角条件下 HV 系统涡量云图

Fig. 8 Vortex cloud diagram of the HV system under different inclination conditions

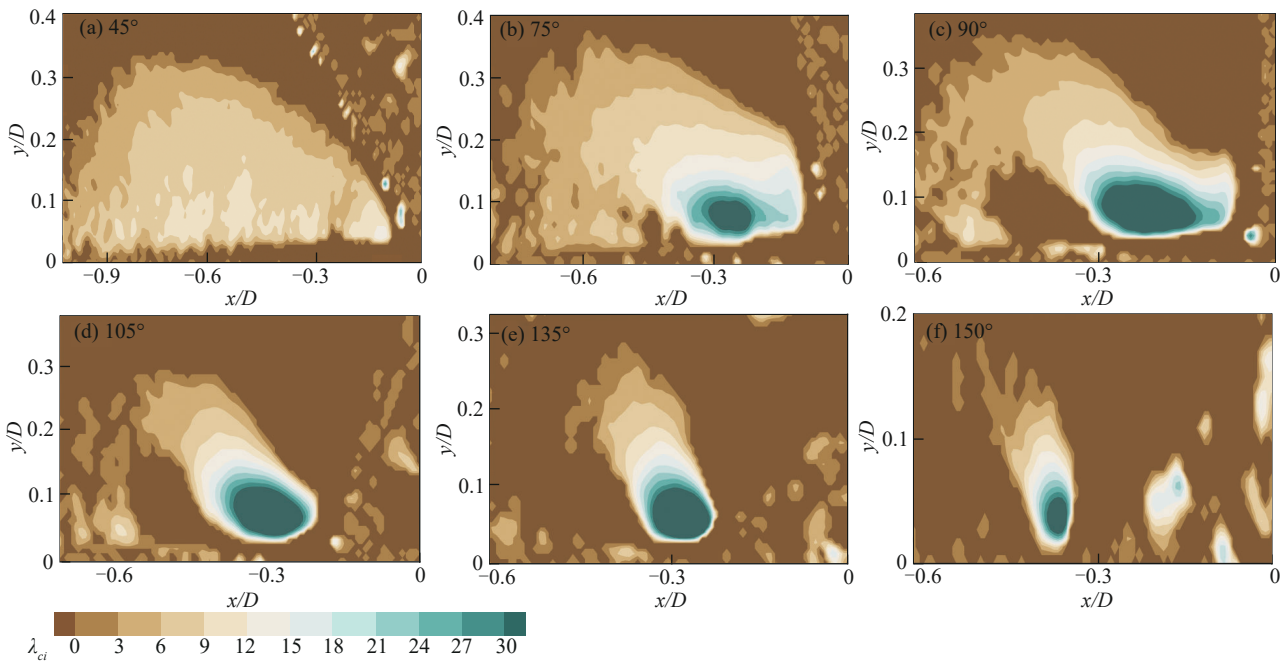


图 9 不同倾角条件下 HV 系统旋转强度云图

Fig. 9 Cloud diagram of the rotational intensity of the HV system under different inclination conditions

2.3.2 柱体雷诺数和涡量之间的关系 图 10 为主马蹄涡(HV1)的涡量随柱体雷诺数的变化趋势。结果显示,在保持流量恒定的前提下,随着柱体倾角的增加,HV1的涡量均呈现先增后减趋势,柱体垂直作为一种特殊情况,其对水流流速、紊动强度的干扰最显著,产生的HV1涡量最大。值得注意的是,当柱体向下游倾斜时,HV1的涡量显著降低。是由于水流沿后倾柱体前缘流动,下降流的形成受到抑制,回流减弱,水流动量减小,马蹄涡的形成受到抑制<sup>[13]</sup>。在水

深较浅的情况下,柱体倾斜对削弱马蹄涡系统的效果更为显著。是由于在水深较浅的情况下,水流更容易受到床面及柱体前缘的干扰而导致速度梯度增大,马蹄涡的生成也进一步加剧局部流场的紊动,促进HV系统持续发展演变<sup>[27]</sup>。在相同角度条件下,随 $Re_D$ 的增大,HV1涡量先显著增大,后略有减小,可能是由于试验过程中水温变化导致水体黏滞性改变,进而影响主马蹄涡的涡量。

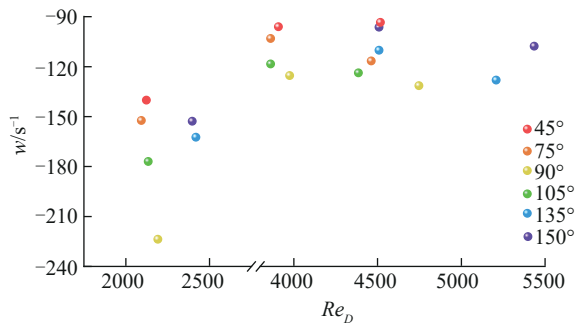


图10 柱体雷诺数与HV1涡量的关系

Fig. 10 Column Reynolds number versus HV1 vortex volume

### 3 讨论

本试验主要关注水流在通过固定植被茎秆时的速度分布等水动力学特性,聚焦在植被茎秆倾角影响下坡面薄层流产生土壤侵蚀的微观机理,因此选择刚性亚克力圆柱体来确保试验条件的一致性和可重复性,避免因柔性而带来的不确定性<sup>[5]</sup>。利用高分辨率的粒子图像测速系统观测坡面薄层流的柱前流场,试验结果表明,柱体倾角显著影响水流的流速分布。水流遇到柱体后,沿柱体前缘产生面积较大的水流强烈下冲,在靠近床面处向上游回流,在流动过程中流速不断减小,与YANG等<sup>[12]</sup>研究结果相似。柱体倾斜减弱水流的负向流动,王晓光等<sup>[15]</sup>研究表明,柱体一旦倾斜,其流体力学形状发生改变,受柱体“流线特征”的影响,沿柱体的下降流减弱,且柱体后倾对柱前逆流的削弱效果更佳。

紊动强度与雷诺应力反映流速变化的剧烈程度,研究发现,柱前靠近床面区域存在着明显的紊动强烈区域。王村等<sup>[21]</sup>研究表明,柱体的存在增加水流流动过程中的摩擦阻力,造成能量耗散,在靠近柱体前缘出现紊动强度的显著增加。随着柱体倾角的逐渐增大,柱前流场的垂向紊动强度与雷诺应力均呈现先增大后减小趋势,是由于柱体垂直时,速度梯度最大,水流之间的相互作用强烈,促进紊动的发展。季铭昱等<sup>[28]</sup>使用PIV测量无柱体坡面流的紊动强度分布为先增大后减小,与本研究相似。由于坡面薄层流水深极浅,且受到柱体的限制,出现紊动能在垂向的重分配<sup>[5]</sup>,最大垂向紊动强度随流量的增大而减小。

流速的改变是柱体前端形成马蹄涡的基础。陈启刚等<sup>[18-19]</sup>研究表明,在靠近床面发生流动分离的区域内形成马蹄涡系统,在本研究中观测到相似的结构。随着倾角的增加,主马蹄涡HV1的涡量先增大后减小,最大值出现在90°条件下,是由于柱体垂直时

的流体力学结构加强沿柱体产生的下降流强度。MAJD等<sup>[11]</sup>研究发现,柱体倾斜使其横截面变成椭圆形,增加摩擦面积,并在柱体的边界层上产生湍流边界层。圆柱体靠近床面的上游分离距离随着倾斜度的变化而明显改变,进而影响马蹄涡的涡量与旋转强度。已有研究<sup>[15,27]</sup>表明,柱体后倾通过减弱下降流使得马蹄涡系统明显减弱,相对于柱体前倾防治土壤侵蚀的效果更好。由于柱前柱后涡旋结构具有连续性,本研究只重点关注柱前的局部侵蚀机理,柱后的分离区和回流涡旋可能导致下游区域的二次侵蚀或沉积,这些效应在当前研究中未被充分考虑,后续的研究应同时考虑柱前和柱后的涡旋结构及其对整体侵蚀模式的影响,以更全面地理解整个系统的动力学行为。

### 4 结论

1)水流遇柱体障碍时,流速分布受逆压梯度影响显著变化。负流向流速区位于 $x/D=-0.1$ 至 $x/D=-0.4$ 之间,负垂向流速区位于 $y/D=0$ 至 $y/D=0.4$ 之间,约占据水深的1/2。水流撞击柱体后朝床面运动,部分水向上游回流,持续与来流相互作用,促使涡旋结构形成。柱体垂直(90°)时负向流动最显著,柱体倾斜通过影响流动分离点的位置减弱沿柱体向下流动的下流,进而抑制马蹄涡系统的形成。

2)植被覆盖显著影响水流紊动特性,最大垂向紊动强度为 $90^\circ > 105^\circ > 75^\circ > 135^\circ > 45^\circ > 150^\circ$ ,柱体后倾减弱水流紊动的效果更加明显。垂向紊动强度沿水深先增后减,在 $y/D=0.2$ 至 $y/D=0.3$ 处达最大值,该近床面区域内涡旋系统作用强烈,促进水体的垂向和纵向能量交换,导致紊动强度与雷诺应力均增大。

3)不同植被倾角下,薄层流圆柱体上游均形成马蹄涡系统,涡旋中心沿 $y/D=0.05$ 逐渐上升。随雷诺数增大,HV1的涡量呈现先增大后减小趋势。柱体垂直时马蹄涡系统发展最充分,柱体前倾与后倾均能通过减弱下降流削弱马蹄涡系统,且柱体后倾对减弱马蹄涡,抑制土壤侵蚀效果更为显著。

#### 参考文献:

- [1] 齐鸿雁. 河岸植被类型对坡面流水动力特性影响研究[J]. 水利技术监督, 2024(2): 197-200.  
QI H Y. Impact of riparian vegetation types on hydrodynamic characteristics of slope flow[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2024(2): 197-200.
- [2] 蔡泽康, 王健, 陈俞池, 等. 柔性植被倒伏对地表径流水力特性及侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 19-28.

- CAI Z K, WANG J, CHEN Y C, et al. The impact of flexible vegetation lodging on the hydraulic characteristics of surface runoff and erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3):19-28.
- [3] 刘文剑,张会兰,王玉杰,等.模拟植被地表覆盖率和粗糙度对坡面流水动力特性的影响[J].*水土保持学报*, 2017, 31(6):1-7.
- LIU W J, ZHANG H L, WANG Y J, et al. Effect of simulate vegetation coverage and surface roughness on hydrodynamics of overland flows [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6):1-7.
- [4] 江春波,侯迪,惠二青.河道植被对水流运动影响研究之现状[J].*水力发电*, 2009, 35(7):11-13.
- JIANG C B, HOU D, HUI E Q. Impact of channel vegetations on river flow [J]. *Water Power*, 2009, 35(7):11-13.
- [5] 杨坪坪.坡面薄层流水动力学特性研究[D].北京:北京林业大学, 2019.
- YANG P P. Study on hydrodynamic properties of overland flow [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [6] BAKER C J. The turbulent horseshoe vortex [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1980, 6(1):9-23.
- [7] DARGAHI B. The turbulent flow field around a circular cylinder [J]. *Experiments in Fluids*, 1989, 8(1):1-12.
- [8] MASSARO D, PEPLINSKI A, SCHLATTER P. Coherent structures in the turbulent stepped cylinder flow at  $Re_D=5\ 000$  [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2023, 102:e109144.
- [9] KITSIKOUDIS V, KIRCA V, YAGCI O, et al. Clear-water scour and flow field alteration around an inclined pile [J]. *Coastal Engineering*, 2017, 129:59-73.
- [10] MISURIYA G, EL DHO T I, MAZUMDER B S. Turbulent flow field around a cylindrical pier on a gravel bed [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 149(10):e04023040.
- [11] FARAZI MAJD S, YAGCI O, KIRCA V S O, et al. Flow and turbulence around an inclined pile [Z]. The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2016: ISOPE-I-16-556.
- [12] YANG P P, ZHANG H L, WANG Y Q, et al. Hydrodynamic characteristics in a sheet flow upstream water flow of a circular cylinder [J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(12):e127106.
- [13] 杨坪坪,张会兰,王云琦,等.低柱体雷诺数下柱体上游薄层水流马蹄涡特征研究[J].*工程科学与技术*, 2019, 51(1):52-59.
- YANG P P, ZHANG H L, WANG Y Q, et al. Characteristics of horseshoe vortex upstream of the cylinder in shallow water with low cylinder Reynolds number [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1):52-59.
- [14] KARIMI N, HEIDARNEJAD M, MASJEDI A. Scour depth at inclined bridge piers along a straight path: A laboratory study [J]. *Engineering Science and Technology*, 2017, 20(4):1302-1307.
- [15] 王晓光,程永舟,罗巍,等.水流作用下斜桩局部冲刷及流场变化试验研究[J].*中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(3):131-138.
- WANG X G, CHENG Y Z, LUO W, et al. Experimental study of local scour and flow field alteration around an inclined pile in steady currents [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2022, 52(3):131-138.
- [16] 程永舟,程海洋,王晓光,等.波浪共同作用下反斜桩局部冲刷特性试验研究[J].*水科学进展*, 2022, 33(2):306-315.
- CHENG Y Z, CHENG H Y, WANG X G, et al. Experimental study on local scour characteristics around an upstream inclined pile under combined wave and current action [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2):306-315.
- [17] YANG P P, ZHANG H L, WANG Y Q, et al. Overland flow velocities measured using a high-resolution particle image velocimetry system [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, e125225.
- [18] 陈启刚,钟强.明渠紊流中涡结构的运动规律[J].*水科学进展*, 2017, 28(4):579-587.
- CHEN Q G, ZHONG Q. Experimental study on the movement of vortices in turbulent open-channel flows [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4):579-587.
- [19] 陈启刚.基于高频PIV的明渠湍流涡结构研究[D].北京:清华大学, 2014.
- CHEN Q G. High-frequency measurement of vortices in open channel flow with particle image velocimetry [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [20] ZHOU J, ADRIAN R J, BALACHANDAR S, et al. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 387(1):353-396.
- [21] 王村,王超.含挺水植物和沉水植物水流紊动特性[J].*水科学进展*, 2010, 21(6):816-822.
- WANG C, WANG C. Turbulent characteristics in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6):816-822.
- [22] 陈月君,赵连军,王瑶,等.淹没刚性植被明渠紊流沿程流动特性差异[J].*水科学进展*, 2024, 35(2):256-264.
- CHEN Y J, ZHAO L J, WANG Y, et al. A study on the differences of turbulent flow properties along the open channel with submerged rigid vegetation [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(2):256-264.

(下转第 351 页)