

基于 PIV 的渐变地表粗糙度对坡面流水动力特性的影响

谷方正¹, 张会兰^{1,2}, 王铃涵¹, 夏绍钦¹, 孙虎¹

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2.北京林业大学重庆缙云三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

摘要: 粗糙度是影响坡面流水动力特性的关键因子, 为探究渐变粗糙度影响下坡面流水力特性, 采用粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 观测并分析 3 组流量下渐变粗糙床面下坡面流的流速轮廓线、紊动强度、雷诺应力和壁面切应力的变化规律。结果表明: (1) 流速随粗糙度增加而减小; 拟合无量纲流速得到流速分布对数公式, 粗糙度增大与拟合常数 A 成反比, 与积分系数 B 成正比。 (2) 渐变地表粗糙度流向紊动强度与光滑床面坡面流变化趋势相似。流向紊动强度随相对水深的增大而减小。随着粗糙度增大, 流向紊动强度大小出现非显著性差异。渐变粗糙床面下流向紊动强度符合 Nezu 经验公式, 流量与经验系数成正比。 (3) 不同流量下, 渐变粗糙床面的雷诺应力分布与光滑床面相似。在粗糙度影响下, 雷诺应力最大值出现在 $y/H = 0.2 \sim 0.4$ 处。随着粗糙度逐渐增加, 壁面切应力逐渐增大。综合表明, 增加 PIV 分辨率方法可以适用于坡面流水力特性的研究。探究渐变粗糙度对坡面流的影响, 探讨坡面流水动力学特性, 为水土保持理论研究提供新思路。

关键词: 水动力特性; 坡面流; 粒子图像测速技术 (PIV); 渐变粗糙床面; 粗糙度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0018-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.003

The Influence of Gradient Surface Roughness on the Hydrodynamic Characteristics of Overland Flow Based on PIV

GU Fangzheng¹, ZHANG Huilan^{1,2}, WANG Linghan¹, XIA Shaoqin¹, SUN Hu¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Chongqing Jinyun Forest Eco-System Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Roughness is a key factor affecting the hydrodynamic characteristics of overland flow. In order to explore the hydraulic characteristics of overland flow under the influence of gradient roughness, using particle image velocimetry (PIV) to observe and analyze the velocity profile, turbulence intensity, Reynolds stress and wall shear stress of the overland flow under the three groups of flow rates. The results showed that: (1) The flow velocity decreased with the increase of roughness; the logarithmic formula of velocity distribution was obtained by fitting the dimensionless velocity. The increase of roughness was inversely proportional to the fitting constant A and proportional to the integral coefficient B. (2) The trend of streamwise turbulence intensity of gradient surface roughness was similar to that of smooth bed slope. The streamwise turbulence intensity decreased with the increase of relative water depth. With the increase of roughness, there was a nonsignificant difference in the intensity of streamwise turbulence. The turbulence intensity under the gradient rough bed was consistent with the Nezu empirical formula, and the flow rate was proportional to the empirical coefficient. (3) Under different flow rates, the Reynolds stress distribution of the graded rough bed was similar to that of the smooth bed. Under the influence of roughness, the maximum Reynolds stress appeared at $y/H = 0.2 \sim 0.4$. With the increase of roughness, the wall shear stress increased gradually. The synthesis showed that the method of increasing PIV resolution could be applied to the study of hydraulic characteristics of overland flow. Exploring the influence of gradient roughness on slope flow and

收稿日期: 2023-05-22

资助项目: 国家自然科学基金项目 (52279056); “十四五”重点研发计划项目 (2022YFF130009505)

第一作者: 谷方正 (1999—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: mgu999@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

exploring the hydrodynamic characteristics of slope flow provide new ideas for theoretical research of soil and water conservation.

Keywords: hydraulic characteristic; overland flow; particle image velocimetry (PIV); gradient rough bed surface; roughness

坡面流是指降雨或融雪在重力作用下,扣除截留、填洼、下渗等损失后的一种沿着坡面运动的浅层明流^[1]。坡面流是地表径流的起始阶段,通常以坡面漫流形式出现,是剥离土壤、搬运土壤颗粒和泥沙输移的主要动力^[2],其水动力特性通常可通过流速、阻力系数、流型和流态等^[3]水动力参数反映,因而坡面流水动力特性是研究坡面流水力侵蚀的基础。目前,国内外学者通过数值模拟^[4]、野外试验^[5]以及室内试验^[6]等方法观测坡面流水动力特性并进行大量研究。大量研究^[1,7-8]发现,坡面流水力特性易受土壤质地、下垫面形态结构、地表粗糙度以及植被排列结构等因素影响。在实际中,坡面流水深极浅通常为毫米量级^[1],受地表粗糙单元影响显著^[8-9]。

在自然界中,坡面流下垫面情况复杂多变。坡面流在发生发展过程中,地表粗糙度往往不呈现单一粗糙度的特点,而以逐渐变化的形式存在,例如,在河漫滩地区通常从粗砂过渡到细砂,河口地区附近以粗粉砂过渡到细黏土,在滑坡、泥石流等自然灾害影响下的山区河川地区,下游地区床沙级配宽于上游地区^[10]。地表粗糙度的复杂变化加大坡面流运动的复杂性^[11]。受粗糙度影响,坡面流沿坡面运动高低起伏,水流紊动特性在不断改变,使其沿坡面方向水动力特性发生不断变化。在粗糙度逐渐变化情况下,坡面流水动力特性如何变化少有研究。目前,对于室内模拟下垫面粗糙的坡面流试验其流速测量方法大部分采用流量法^[12]和染色剂示踪法^[13],2种测量方法都为单点测量,所测的流速为坡面流平均流速。受制于测量技术无法测量到粗糙床面至水面的流速分布,对坡面流的流速轮廓线、紊动强度、雷诺应力和壁面切应力等水动力学参数的研究较少。粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术是瞬时二维流场的流速测量技术,具有不干扰测试流场,摆脱单点测试局限实现测试对象的全程动态测量优势,准确捕获瞬时流场矢量值,提供流场信息^[2,14]。基于该项技术,Yang 等^[15]测量坡面流的流速分区,并进一步计算光滑床面下坡面流的紊动强度与雷诺应力等水动力参数。

将重点研究渐变地表粗糙影响下的坡面流水动力特性,探究粗糙度逐渐改变情况下与光滑床面下坡面流的流速、雷诺应力、紊动强度和壁面切应力的不同。因粗糙度由小变大分布是自然界的常见分布模

式,也是室内试验中其他类型渐变粗糙度模拟的基础,所以,设置地表粗糙度沿水流方向逐渐增大的工况。将 PIV 观测应用于水土保持研究中较少,尝试通过提高 PIV 分辨率,将粒子图像测速(PIV)技术观测应用到坡面流的观测之中,通过拍摄计算进而分析紊动强度、雷诺应力和壁面切应力等水动力学特性。研究结果有助于进一步认识坡面流水动力特性,丰富坡面流侵蚀理论,为深入认识复杂下垫面条件下的坡面流理论提供研究技术与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设备

试验于 2023 年 1 月 10 日在北京林业大学水土保持学院水蚀机理实验室进行。试验水槽长、宽、高分别为 12.4,0.3,0.3 m,水槽边壁由钢化玻璃制成,边壁光滑,对水流结构影响小。水流由明渠水槽自动控制系统 JFC 控制。试验水槽的控制系统由数字式智能采集控制箱、专用线缆和测控软件组成,可实现供水的全自动控制和水流的自循环流动。为稳定水流且避免水流出现较大的紊动结构,在水槽出口处安设蜂窝状的硬质管,使进入试验段的水流基本平行于床面。水槽尾部设置尾门,调节尾门可以使水槽中的水流达到均匀流的状态。同时在水槽中沿程放置 6 个超声波水位计,以观测水位的沿程变化。

PIV 量测系统由 CMOS 相机、ZK-LASER 的高频绿光激光器、示踪粒子和 PIV 流场计算软件组成(图 1)。示踪粒子使用密度为 $1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的空心玻璃珠,直径为 $10 \mu\text{m}$ 。空心玻璃珠与水的密度相近,亲水性好,能够有效示踪水流且较好反射激光保证成像清晰。相机最高像素为 2560×1920 ,频率为 1 000 Hz。为保证高频激光与相机频率一致,使用同步器控制且保证无拖尾现象。采用 Duty Cycle 模式采集流场,设置 2 对瞬时流场间隔 0.1 s。每次试验共计拍摄照片 10 000 张(5 000 对流场),满足流场分析条件。在流场处理时,计算窗口像素大小 16×16 ,重叠率为 50%,计算流场最终分辨率为 8×8 像素。结果表明,试验获得的紊动强度和雷诺应力分布特性与现有经典结果^[2]吻合较好。

为保证水流充分发展^[16],相机放置在距离入口 8 m 处。为满足坡面流水深极浅的拍摄条件,通过增加相机与镜头间的接圈增加 PIV 分辨率^[2],最终分辨率高达 70.9 pixels/mm,测量效果好。

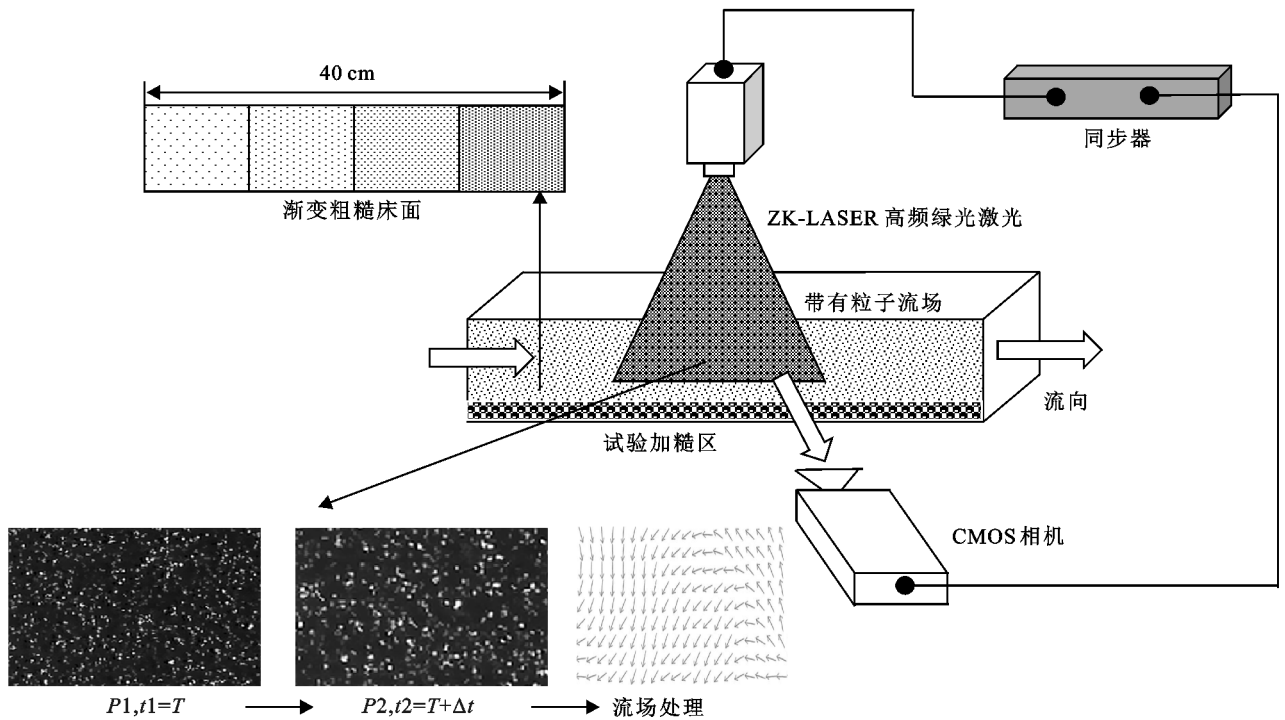


图 1 试验原理示意

1.2 试验工况

为使渐变粗糙度的设计更好符合实际自然条件,根据《SL42—2010—河流泥沙颗粒分析规程》粒径的划分,沙砾粒径范围在 0.062~2 mm。研究选取 4 种粒径范围的沙砾作为粗糙单元进行床面制作。试验模拟粗糙床面的粗糙单元材料选取河里水洗粗砂。经过筛分,4 种粗糙单元的粒径范围分别为 0.2~0.3, 0.4~0.6, 0.9~1.1, 1~3 mm。根据 Sadeque 等^[17]的方法,以中值粒径 D_{50} 来表示地表粗糙度(k_s)。通过粒径分析仪器测出 D_{50} 分别为 0.201, 0.505, 1.043, 2.037 mm。4 种粗糙单元各占 PVC 板 10 cm,粗糙单元由小到大使用清漆黏合在 1 m 的 PVC 板上, PVC 板前面留有 50 cm 光滑部分。

研究进行 3 组不同流量(0.4, 0.5, 0.6 L/s)试验。保持各组水槽的底坡($i=0.001$)不变,通过调节水槽尾门保证水流尽可能接近均匀流。试验工况参数见表 1。表 1 按粗糙度由小到大排列。为防止坡面流水深过浅而出现滚波影响坡面流特性,水深(H)均 >0.5 cm^[2]。试验中流速(U)为 0.08~0.21 m/s,雷诺数(Re) $<5\ 000$,属于过渡流。在 1~3 组工况中, H 和 Re 逐渐变大。所有工况中,宽深比(B/H)均 >5 ^[18],满足二维流动,忽略边壁对试验影响。光滑组次包括在所有工况中,其作用为对照渐变粗糙度下的坡面流与光滑明渠流紊动差异特性。表中 ν 为运动黏滞系数(cm^2/s), $\nu=0.017\ 75/(1+0.003\ 7\ t+0.000\ 22\ t^2)$,其中 t 为温度($^{\circ}\text{C}$)。

表 1 研究试验工况参数

工况	$Q/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	粒径/mm	H/cm	B/H	Re	$\nu/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.4	0	0.92	32.68	648.01	0.016
		0.2~0.3	1.17	25.66	812.38	0.015
		0.4~0.6	1.31	22.85	813.19	0.015
		0.9~1.1	1.32	22.78	812.09	0.015
		1.0~3.0	1.33	22.54	819.58	0.015
2	0.5	0	1.11	27.00	883.20	0.016
		0.2~0.3	1.28	23.40	1008.43	0.015
		0.4~0.6	1.40	21.38	1010.91	0.015
		0.9~1.1	1.48	20.23	1004.89	0.015
		1.0~3.0	1.52	19.74	1012.75	0.015
3	0.6	0	1.21	24.71	1029.36	0.015
		0.2~0.3	1.44	20.82	1204.97	0.015
		0.4~0.6	1.56	19.28	1201.88	0.015
		0.9~1.1	1.67	17.95	1192.27	0.015
		1.0~3.0	1.71	17.53	1201.41	0.015

1.3 计算方法

(1) 流速分布与流速轮廓线。通过 PIV 拍摄测量得到流场瞬时流速场,在光滑床面流速轮廓线采用其 Keulegan^[19] 提出的通用公式为:

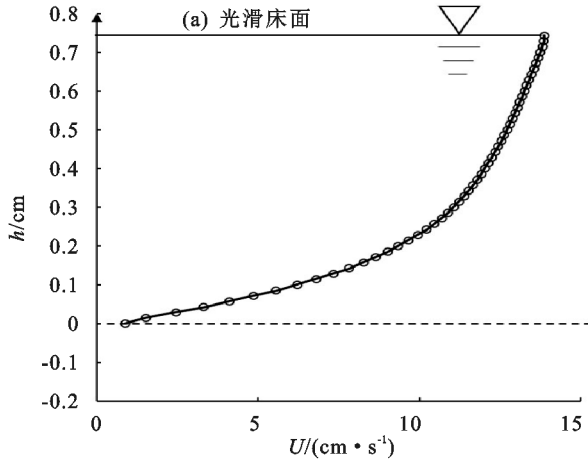
$$\frac{u}{u_*} = A \lg \left(\frac{yu_*}{\nu} \right) + B \quad (1)$$

对于加糙床面的流速分布,Keulegan^[19] 考虑到糙率的影响,将变化为公式(2)、公式(3):

$$\frac{u}{u_*} = A \lg \left(\frac{Y}{k_s} \right) + B \quad (2)$$

$$u_* = \sqrt{gHJ} \quad (3)$$

式中:拟合常数 $A = 2.3/k$, $Y = Y_T + Y_0$, $Y_0 = 0.15 d$;



d 为沙砾中值粒径(mm); u 为流场中的点流速(cm/s); u_* 为摩阻流速(cm/s); $J = \sin S$, S 为坡度($^\circ$); g 为重力加速度(m/s^2), 为 9.8; y 为测点距床面的距离(cm); k_s 为粗糙高度即粗糙度(mm); k 、 B 分别为卡门常数与积分常数。其中定义相对水深 $\eta = y/H$, 其中 y 和 H 均为从理论床面(图 2)起算的水深,光滑床面的理论床面位于水槽底部,但粗糙床面流速为 0 处并不位于渠面底部,通常需计算理论床面位置。理论床面确定的方法较多^[16,20-21]。粗糙床面的理论床面位置根据实测流速资料按相关系数最大法^[16] 推求,结果显示,各工况理论床面约在颗粒顶部以下(0.142~0.156 d),平均约为 0.15 d 。

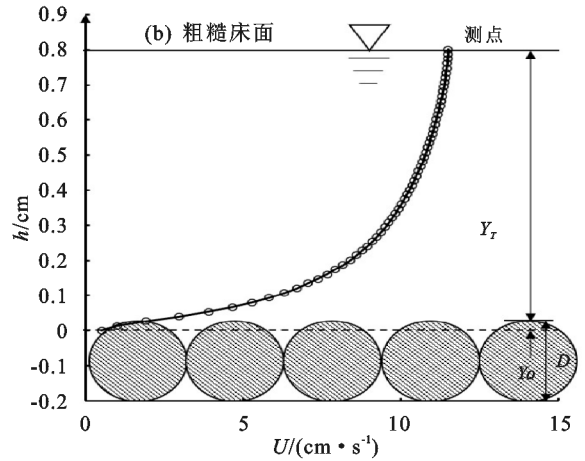


图 2 理论床面示意

(2) 紊动强度。紊动强度是流速的二阶矩,表示流体质点的脉动强度^[2],计算公式为:

$$u' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (4)$$

$$v' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (5)$$

式中: u' 和 v' 分别表示 x 和 y 方向上的紊动强度; u_i 和 v_i 表示第 i 个流场的流向和垂向的瞬时流速(cm/s); $\bar{u}$ 表示流向方向的时均流速(cm/s); $\bar{v}$ 表示垂向方向的时均流速(cm/s); N 表示流场的个数。

(3) 雷诺应力。雷诺应力是流体质点 2 个方向脉动强度乘积,表示 2 个流体质点间碰撞的强弱程度^[2],计算公式为:

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

式中: $-\overline{u'v'}$ 表示雷诺应力,其中 u_i , v_i 和 $\bar{u}$ 参照公式(4)和公式(5)计算所得。

(4) 壁面切应力。由 N-S 方程推导的总应力沿水深^[2],计算公式为:

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{u'v'} + \nu \frac{\partial U}{\partial y} = u_*^2 \left(1 - \frac{y}{H} \right) \quad (7)$$

$$\tau_0 = \rho u_*^2 = \rho g R J \quad (8)$$

式中: τ 为切应力(N);公式(7) $\nu \frac{\partial U}{\partial y}$ 表示黏性应力,由摩擦力产生(cm^2/s^2); τ_0 为壁面切应力(N/m^2); ρ 为水的密度(Kg/m^3),与温度相关; R 为水力半径(m)。

2 结果与分析

2.1 渐变地表粗糙度影响下的坡面流流速垂向分布

在明渠水流中,流速研究是水动力学特性中最为重要的基础部分。在坡面流水深极浅的情况下,传统流速测量方法并不能较好地测量流场瞬时状态。测量使用 PIV 粒子图像观测技术,满足从床面到水面多点观测且观测不改变流场状态,提高观测精度和结果准确性。根据工况所示,最小宽深比(B/H)为 17.53,满足二维流计算要求且忽略边壁效应。图 3 为研究流量下流向流速(u)的轮廓线, k_s 为边壁的等效粗糙度。各组最大流速出现在粗糙度最小处,最大流速随着流量的增大而逐渐增加。各粗糙断面流向流速分布曲线大致相同。随粗糙度增加即颗粒粒径增加,流速逐渐减小。光滑床面最大流速与粗糙度 $Ks=2$ 处最大流速相差 5.27 cm。Nezu^[18] 将明渠紊流垂线上分成内区($0 \leq y/H < 0.2$)和外区($0.2 < y/H \leq 1$)。内区包含黏性底层、缓冲区和対数区,外区包含中间区和水面

区。在流速内区时,流速变化剧烈,曲线斜率变化大; 在外区时,曲线斜率平缓,流速变化小。

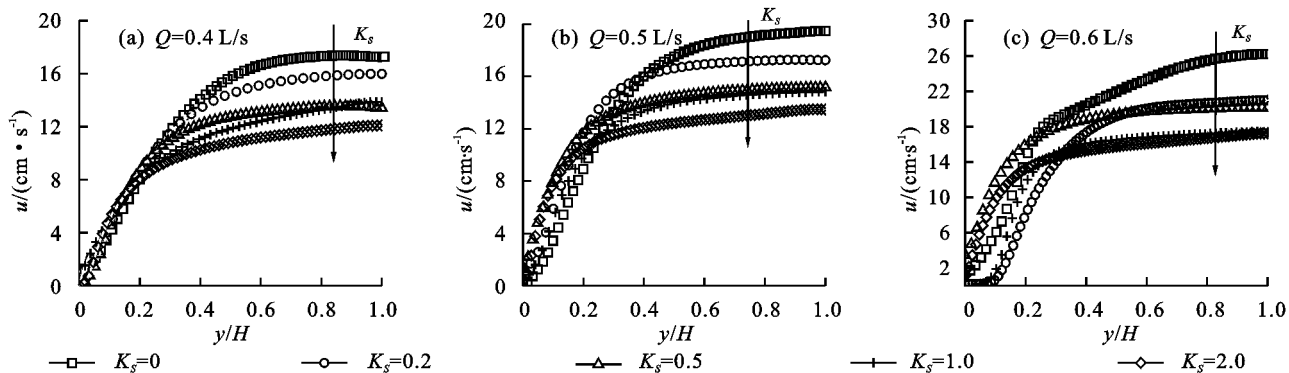


图 3 流向流速轮廓线

令 $u^+ = u/u^*$, 在光滑条件下 $y^+ = yu^*/\nu$, 粗糙条件下 $y^+ = Y/k_s$ 。由表 2 可知, 对数区拟合结果与 Kuelegan^[19] 提出粗糙床面分布公式拟合程度较高 (R^2 均 > 0.92)。测得 (A) 为 2.89~4.37, 积分常数 (B) 为 3.58~14.53。随着流量 (Q) 的增大, 拟合常数 (A) 呈减小趋势。在相同流量情况下, 随着粗糙度的不断增加, 积分常数 (A) 逐渐减小, 积分系数 (B) 逐渐呈增大趋势。

2.2 渐变地表粗糙度影响下的紊动强度变化规律

紊动强度为流速的二阶矩^[2]。试验水深极浅, 所以观测数据只计算流向方向紊动强度, 进行无量纲化处理比较方便分析。图 4 为无量纲紊动强度的分布, Nezu^[22] 经验计算公式为:

$$\frac{u'^2}{u_*^2} = D_u \cdot \exp(-\lambda_u \frac{y}{H}) \quad (9)$$

根据试验结果可知, D_u 为 1.84~2.18, λ_u 为 0.77~1.35, 流量与经验系数成正比。各组紊动强度沿 y/H 增大而减小。

由图 4 可知, 流向紊动强度在不同流量条件下均呈外区紊动强度随水深增加而不断减少, 光滑床面处紊动强度大于粗糙床面的紊动强度。在各个渐变粗

糙床面处, 紊动强度差异变化不大。变化趋势与粗糙度为 0 处相同, 当 y/H 值为 0~0.2 时, 曲线发生明显转折, 在近床面处流向紊动强度达到最大值。随着粗糙度的逐渐增大, 流向紊动强度值出现差异, 但差异不显著。

表 2 不同流量下流速分布拟合

流量/ (L · s ⁻¹)	糙率	拟合公式	相关系数 (R^2)
0.4	0	$u^+ = 4.37 \lg y^+ + 7.8524$	0.98
	0.2	$u^+ = 3.56 \lg y^+ + 5.1507$	0.97
	0.5	$u^+ = 3.24 \lg y^+ + 10.9444$	0.98
	1	$u^+ = 2.93 \lg y^+ + 13.9134$	0.92
	2	$u^+ = 2.99 \lg y^+ + 14.5502$	0.94
0.5	0	$u^+ = 4.25 \lg y^+ + 8.4789$	0.98
	0.2	$u^+ = 3.06 \lg y^+ + 6.4286$	0.98
	0.5	$u^+ = 3.01 \lg y^+ + 12.3528$	0.98
	1	$u^+ = 3.11 \lg y^+ + 14.1635$	0.95
	2	$u^+ = 3.01 \lg y^+ + 14.4379$	0.94
0.6	0	$u^+ = 4.21 \lg y^+ + 6.3814$	0.98
	0.2	$u^+ = 2.94 \lg y^+ + 3.5825$	0.92
	0.5	$u^+ = 2.89 \lg y^+ + 10.9141$	0.93
	1	$u^+ = 3.05 \lg y^+ + 14.5275$	0.96
	2	$u^+ = 2.98 \lg y^+ + 14.5562$	0.98

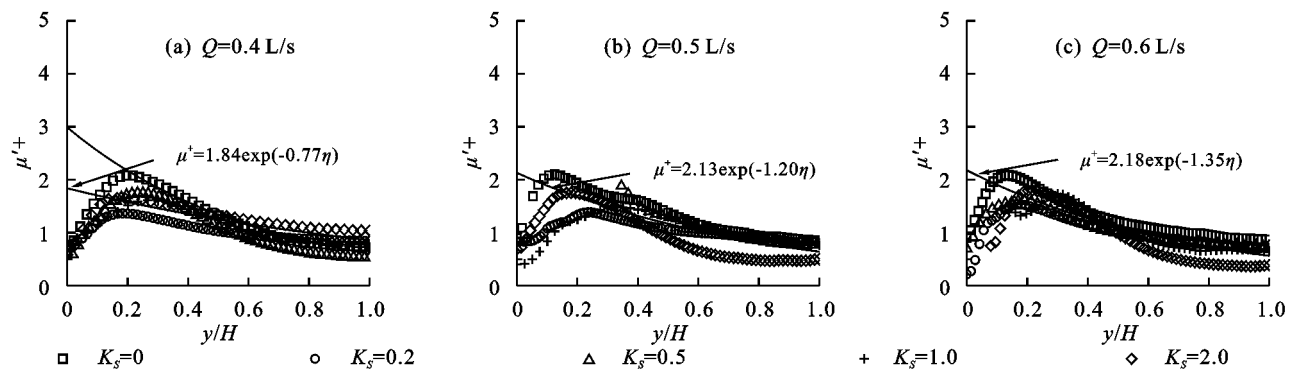


图 4 无量纲紊动强度

2.3 渐变地表粗糙度影响下的雷诺应力和壁面切应力变化规律

在明渠均匀流二维流中, 雷诺应力常用紊动切应力公式 (6)。在雷诺方程中, 雷诺应力表示由脉动流量交

换引起的附加应力。附加应力由附加法向应力和附加剪应力组成。用 u_* 无量纲化雷诺应力, 图 5 为各组次下渐变地表粗糙度的雷诺应力分布。为避免雷诺应力相互重合, 各组应力分布顺次向右平移 1 个单位。由图 5

可知,不同粗糙度下雷诺应力与光滑床面分布相似。随着相对水深(y/H)增加,雷诺应力呈先增大后减小态势,其中雷诺的应力的最小值出现在水面 $y/H=1$ 处。光滑床面的最大值位于相对水深 $y/H=0.2$ 处。随着粗糙度增加,最大值出现的位置提升至 $y/H \approx 0.2 \sim 0.4$ 处。由公式(7)可知,当黏性应力趋近于 0 时,无量纲化

雷诺应力与相对水深呈线性关系即受黏性应力微弱,雷诺应力增加。在光滑床面下,受黏性应力和雷诺应力的影响稳定,雷诺应力影响 80% 左右,所以光滑床面处雷诺应力最大值出现在相对水深 0.2 处。但研究发现,随着粗糙度逐渐增加,坡面流所受雷诺应力减弱,黏性应力加强即雷诺应力最大值点出现上升趋势。

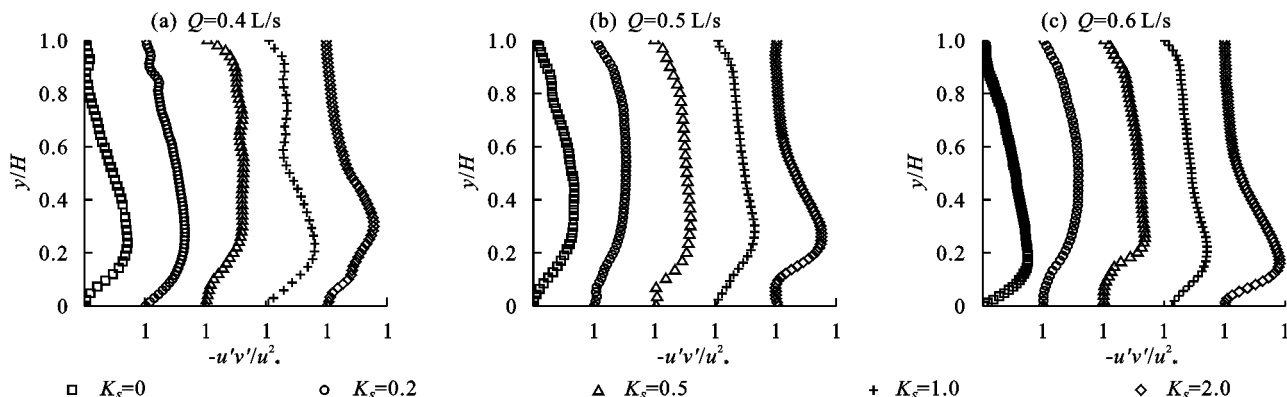


图 5 无量纲化雷诺应力分布

由图 6 可知,在同一流量的工况条件下,在光滑处壁面切应力最小。随着床面粗糙程度加大,相应流量坡度下的壁面切应力也不断增加。因为当床面粗糙程度增加时,水流阻力增加,水深变大,水力半径增加,壁面切应力增加。另外,壁面切应力在最大流量和最小流量下的差值与不同粗糙程度的床面相关,床面粗糙程度越大,其壁面切应力差值越大。

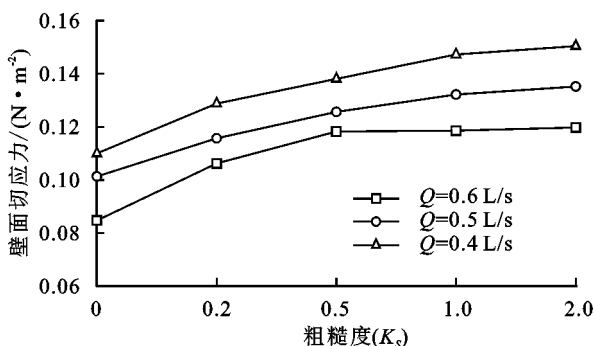


图 6 沿程壁面切应力分布

3 讨论

通过增加相机接圈的方法提高 PIV 观测分辨率,使粒子图像测速技术应用到坡面流研究之中。试验使用 PIV 观测在渐变粗糙度影响下坡面流水动力特性发现,在渐变粗糙度影响下的坡面流水动力特性与光滑壁面情况下明显不同。本试验中,流速随着粗糙度增大而减小,与李斌^[23]研究结果相似。在流速内区时,流速变化剧烈,曲线斜率变化大;在外区时,曲线斜率平缓,流速变化小,与杨坪坪等^[2]和钟亮等^[24]研究结果一致。流速分布产生该现象是因为靠近床面流速梯度($\frac{\partial U}{\partial y}$)大,受黏性应力影响大,当远离床

面时,受黏性应力影响小,流速梯度($\frac{\partial U}{\partial y}$)小。通过流速无量纲化,拟合不同渐变粗糙度下流速分布对数公式,粗糙度增大,拟合常数(A)减小,积分系数(B)逐渐增大。A 和 B 变化情况与单一粗糙度变化情况相同^[23]。可能是随着粗糙度增加摩阻流速(u_*)增大,但和时均流速的绝对值变化不大有关。

紊动强度是流速的二阶矩。钟强等^[25]使用 PIV 测量明渠水流的紊动强度分布为先增大后减小趋势,与本研究光滑床面分布趋势相同。在粗糙度渐变条件下,紊动强度基本变化趋势与路明等^[26]研究结果一致。在本次试验条件下,渐变粗糙度的流向紊动强度随着相对水深的增大而减小,原因是受水面的影响,限制垂向脉动,出现紊动能的重分配^[2],使垂向脉动方向能量移动到流向。随着粗糙度的逐渐增大,流向紊动强度大小出现差异,但差异不显著。是因为在同一流量条件下,随着粗糙度的增大,水流阻力变大、流速变小,但流向紊动强度增加,因而,导致各粗糙度条件下的紊动强度较为接近。

对渐变粗糙度影响下坡面流的雷诺应力观测发现,在受粗糙度的影响下的雷诺应力与光滑床面分布相似。随着粗糙度增加,雷诺应力最大值出现的位置提升至 $y/H \approx 0.2 \sim 0.4$ 处。钟亮等^[24]研究表明,床面粗糙度对水流紊动参数的影响主要体现在内区,与本研究相互印证。随着流向粗糙度的改变,粗糙度变大,流体微团运动减弱,碰撞减小从而减小雷诺应力作用,使坡面流运动过程中受雷诺应力影响的范围减小,故最大值位置提升。张红光等^[27]研究认为,壁面

切应力的变化与粗糙度有关,壁面粗糙度越大切应力也越大,与本结果相一致。董曾南等^[16]研究认为,光滑明渠壁面切应力的大小与流量、坡度相关。但在同一流量下,粗糙度增加,流速逐渐减小,壁面切应力却逐渐增大。Joel Sundstrom 等^[28]研究发现,壁面切应力是受对流体施加的压力梯度以及振荡雷诺应力二者影响。从宏观角度分析粗糙度影响下,水流阻力增加,水深变大,水力半径增加,使得壁面切应力增加。通过 PIV 的观测发现,在粗糙度影响下,与光滑条件下坡面流水动力特性存在差异,起到增阻力减速的效果。

4 结论

(1)流速随粗糙度增加而减小。通过流速无量纲化,拟合渐变地表粗糙度的流速分布对数公式,随着粗糙度增大,拟合常数(A)逐渐减小,积分系数(B)逐渐增大。

(2)渐变地表粗糙度流向紊动强度与光滑床面坡面流变化趋势相似,紊动强度随相对水深(y/H)增大而减小。随着粗糙度的增大,流向紊动强度值出现差异,但差异不显著。渐变粗糙床面的流向紊动强度符合 Nezu 的经验公式。 D_u 为 1.84~2.18, λ_u 为 0.77~1.35,流量与经验系数成正比。

(3)不同流量下,渐变地表粗糙度影响下的雷诺应力分布与光滑床面分布相似。随着相对水深(y/H)增加,雷诺应力呈现出先增大后减小的态势。光滑床面雷诺应力的最大值位于相对水深 $y/H=0.2$ 处。随着粗糙度增加,最大值出现的位置提升至 $y/H \approx 0.2 \sim 0.4$ 处。粗糙度逐渐增加,壁面切应力的大小逐渐增加即坡面流克服阻力的能量增加,减少坡面流侵蚀能力。

综合表明,通过增加 PIV 分辨率方法可以适用于坡面流水力特性的研究。通过观测与计算得出,渐变粗糙度影响下水力特性与光滑条件下坡面流水动力特性存在变化趋势与数值大小的差异,能够较好解决水力侵蚀的机理问题。

参考文献:

- [1] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [2] 杨坪坪,张会兰,王云琦,等.基于粒子图像测速的坡面流水动力学特性[J].农业工程学报,2020,36(17):115-124.
- [3] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges[J]. Land Degradation and Development, 2016, 27(3): 748-757.
- [4] Henao-Garcia S, Xiao C N, Senocak I. Investigation of

- oscillations in katabatic Prandtl slope flows[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2023, 149(750): 247-261.
- [5] 戴矜君,程金花,张洪江,等.野外放水条件下坡面流水动力学特征[J].中国水土保持科学,2016,14(3):52-59.
- [6] Shin S S, Park S D, Sim Y J, et al. Hydraulic conditions of incipient rill by raindrop-induced overland flow on steep slopes of sandy soil[J]. Water, 2023, 15(3): e502.
- [7] 孟铖铖,张会兰,杨坪坪.模拟植被类型及空间配置对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):50-56,78.
- [8] 刘洋,孙保平,杨坪坪,等.模拟植被地表覆盖率与地表粗糙度对坡面流流速的影响[J].浙江农业学报,2017,29(3):498-505.
- [9] 刘青泉,李家春,陈力,等.坡面流及土壤侵蚀动力学(I):坡面流[J].力学进展,2004,34(3):360-372.
- [10] 叶晨,王海周,郑媛予,等.山区河流河床对漂石的突变响应及其近底水流结构特征[J].工程科学与技术,2017,49(3):22-28.
- [11] Pagliara S, Das R, Carnacina I. Flow resistance in large-scale roughness condition[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(11): 1285-1293.
- [12] 张光辉,卫海燕,刘宝元.坡面流水动力学特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1):58-61.
- [13] 杨坪坪,张会兰,王云琦,等.植被覆盖度与空间格局对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):26-33.
- [14] 陈启刚,钟强.体视粒子图像测速技术研究进展[J].水力发电学报,2018,37(8):38-54.
- [15] 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, 590: e125225.
- [16] 董曾南,陈长植,李新宇.明槽均匀紊流的水力特性[J].水动力学研究与进展(A辑),1994,9(1):8-22.
- [17] Sadeque M A, Rajaratnam N, Loewen M R. Effects of bed roughness on flow around bed-mounted cylinders in open channels[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(2): 100-110.
- [18] Nezu I. Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(4): 229-246.
- [19] Keulegan G H. Laws of turbulent flow in open channels[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1938, 21(6): e707.
- [20] Subhasish Dey, Vijit Rathore, Nadia Penna, et al. Hydrodynamics of flow over a gradually varied bed roughness[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(12): e125112.

- [13] 洪大林, 缪国斌, 邓东升, 等. 粘性原状土起动切应力与物理力学指标的关系[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 774-779.
- [14] 孙宝洋. 季节性冻融对黄土高原风水蚀交错区土壤可蚀性作用机理研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [15] 范昊明, 蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 50-55.
- [16] 左小锋, 王磊, 郑粉莉, 等. 冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 30-35, 42.
- [17] 王力, 李喜安, 洪勃, 等. 黏粒含量对黄土抗剪强度影响试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 179-185.
- [18] Zhang H Y, Li M, Wells R R, et al. Effect of soil water content on soil detachment capacity for coarse- and fine-grained soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(3): 697-706.
- [19] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(5): 977-986.
- [20] 郑郎, 马巍, 郝慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294.
- [21] Wang D D, Wang Z L, Shen N, et al. Modeling soil detachment capacity by rill flow using hydraulic parameters[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 473-479.
- [22] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(6): 653-657.
- [23] Zhang G, Tang K, Ren Z, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the Asabe, 2013, 56(3): 927-934.
- [24] Yu Y C, Zhang G H, Geng R, et al. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the Loess Plateau of China[J]. Bio-systems Engineering, 2014, 122: 139-148.
- [25] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff[J]. Plant and Soil, 2007, 294(1): 169-183.
- [26] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [27] Geng R, Zhang G H, Li Z W, et al. Spatial variation in soil resistance to flowing water erosion along a regional transect in the Loess Plateau[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(15): 2049-2058.
- [28] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [29] 郑郎, 马巍, 郝慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 132-137.
- [30] Bissonnais Y L, Singer M J. Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1898-1903.
- [31] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China[J]. Catena, 2010, 81(3): 240-248.
- [32] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, South China[J]. Natural Hazards, 2015, 79(1): 455-478.
- [33] Xie S B, Qu J J, Lai Y M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(4): 999-1009.
- [34] 朱龙祥, 范昊明, 郭成久, 等. 冻融作用对原状棕壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 55-60, 67.
- [35] 胡田飞, 刘建坤, 房建宏, 等. 冻融循环下含水率对粉质黏土力学性质影响试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 123-130.
- (上接第24页)
- [21] 毛冉冉, 程年生, 卢叶盛. 二维加糙明渠流理论床面的确定方法[J]. 泥沙研究, 2022, 47(6): 9-14.
- [22] Nezu I. Turbulence intensities in open channel flows[J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 1977, 1977(261): 67-76.
- [23] 李斌. 不同粗糙床面的水力特性研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2021.
- [24] 钟亮, 廖尚超, 张建梅, 等. 密排粗糙床面明渠水流的紊动特性[J]. 泥沙研究, 2020, 45(3): 8-14.
- [25] 钟强, 王兴奎, 苗蔚, 等. 高分辨率粒子示踪测速技术在光滑明渠紊流黏性底层测量中的应用[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 513-520.
- [26] 路明, 霍自民, 范志高, 等. 人工加糙对明渠紊动特性影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2008, 39(9): 44-46.
- [27] 张红光, 路明, 范志高, 等. 明渠渠底糙率突变对紊流摩阻流速及壁面切应力影响的试验分析[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 89-92.
- [28] Joel Sundstrom L R, Cervantes M J. Characteristics of the wall shear stress in pulsating wall-bounded turbulent flows[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 96: 257-265.