

大粗糙单元对坡面流水动力学特性的影响

柳晓娜, 樊登星, 余新晓, 郑鹏飞, 王渝淞, 朱翔辉, 孙乐乐

(北京林业大学水土保持学院, 国家林业局水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要: 通过室内定床冲刷试验, 选用砂布床面模拟土壤下垫面, 选用砂布+塑料半球体(直径为 40 mm)床面模拟大粗糙单元下垫面, 在较大流量(2.81~84.43 L/min)、坡度(2°~10°)范围内, 系统研究了大粗糙单元对坡面流水动力学特性的影响。结果表明:(1)大粗糙单元床面的平均流速、平均水深和弗劳德数与流量之间均呈幂函数正相关关系;平均流速和弗劳德数与坡度之间均呈幂函数正相关关系, 而平均水深与坡度之间呈幂函数负相关关系;阻力系数随雷诺数的增大而逐渐减小。(2)大粗糙单元增加了坡面流阻力, 延缓了坡面流流速, 雍高了坡面流水深, 并使得水流流型由急流趋向缓流发展。(3)坡面流绕流现象明显, 大粗糙单元周围水深的大小为迎水深(h_1)>侧水深(h_2)>背水深(h_3), 在较小坡度下(2°和 4°), h_1-h_3 随流量的增大先增大后趋于稳定, 在较大坡度下(6°, 8°和 10°), h_1-h_3 随流量的增大先增大后减小。(4)坡面流阻力由颗粒阻力和绕流阻力组成, 绕流阻力占总阻力的 29%~77%, 绕流阻力随流量的增加而减小。研究结果可为坡面土壤侵蚀物理模型的构建提供一定理论依据。

关键词: 大粗糙单元; 坡面流; 水力学特性; 绕流阻力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0043-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.04.008

Influence of Large-scale Roughness Element on Hydraulic Characteristics of Overland Flow

LIU Xiaona, FAN Dengxing, YU Xinxiao, ZHENG Pengfei, WANG Yusong, ZHU Xuhui, SUN Lele

(College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, State Forestry Administration, Beijing 100083)

Abstract: Large-scale roughness element plays an important role in soil erosion control, but few studies have been performed to quantify the effects of large-scale roughness element on hydraulics of overland flow. Laboratory flume experiments were conducted to investigate the potential effects of large-scale roughness element on flow velocity, water depth, Froude number, and hydraulic resistance of overland flow. The plastic hemispherical were glued onto the flume bed to simulate the large-scale roughness element, and a sand cloth bed was used as control. The flow discharges varied from 2.81 L/min to 84.43 L/min and the slope gradients ranged from 2° to 10°. Results showed that: (1) The mean flow velocity, mean water depth and Froude number had power function relationships with the flow discharges and slope gradients. However, the resistance coefficient decreased as Reynolds number increased. (2) The variation trend of water depth around the large-scale roughness element was water depth in front of the large-scale roughness element (h_1)>water depth on both sides of the large-scale roughness element (h_2)>water depth behind the large-scale roughness element (h_3). At a smaller slope gradient, h_1-h_3 increased first and then became stable with the increasing flow discharges. At a larger slope gradient, h_1-h_3 increased first and then decreased with the increasing flow discharges. (3) Compared with the sand cloth bed surface, the large-scale roughness element had a function of reducing flow velocity, increasing resistance, and changing flow regime. (4) The total resistance on large-scale roughness element was partitioned into grain resistance and form resistance, and form resistance accounted for 29%~77% of the total resistance. In a word, the large-scale roughness element cloud retards the flow, reduce soil erosion and have obvious effect on soil and water conservation.

收稿日期: 2018-02-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501292); 中央高校基本科研业务费专项(2015ZCQ-SB-01); 国家重点研发计划项目(2016YFC0500802); 科技创新服务能力建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心项目(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2018_014207_000024)

第一作者: 柳晓娜(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: liuxiaona1007@163.com

通信作者: 樊登星(1982—), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: fandengxing@126.com

Keywords: large-scale roughness element; overland flow; hydraulic characteristic; form resistance

坡面流是土壤分离和泥沙输移的主要动力。有关坡面流水动力学特性的研究非常重要,它是构建土壤侵蚀物理模型的基础^[1]。长期以来,国内外学者通过室内试验^[2-3]、野外观测^[4-5]和数值模拟^[6-7]等手段对坡面流水动力学特性进行了系统研究。大量研究^[8-9]表明,坡面流水动力学特性主要受降雨、土壤质地、地表覆盖物以及地貌特性等因素影响。事实上,由于坡面薄层水流的水深很小(常常仅有毫米级别),其受地表覆盖物的影响尤为显著^[10]。

自然坡面或土壤表面除了土壤颗粒外,还广泛分布着大量较大尺寸的物体,如砾石、枯落物、灌丛等(本文统称之为大粗糙单元)。由于大粗糙单元的存在,改变了近地表的糙率及土壤理化性状,极大地增强了坡面流运动的复杂性^[11]。受大粗糙单元的影响,一方面坡面流沿坡面运动呈高低起伏变化,导致坡面流的水流紊动性不断变化,致使坡面流水动力学特性沿坡面方向变化剧烈^[8];另一方面,坡面薄层水流不能完全淹没地表的大粗糙单元,水流流经大粗糙单元时发生了明显的绕流现象,使得大粗糙单元周围区域坡面流的分布、水深、流速等也发生了复杂变化,导致坡面流水力特性在局部也产生了明显的变化。然而,目前已有研究大多集中在土壤颗粒或较小粗糙度下垫面的土壤侵蚀规律及相关研究^[12-16],而对大粗糙单元影响下垫面流特征及其变化规律的认识仍不充分。

鉴于此,本研究使用直径为 40 mm 的塑料半球体来模拟大粗糙单元,在较大流量、坡度范围内开展室内定床冲刷试验,研究大粗糙单元对坡面流水动力学特性的影响,以期为坡面水蚀过程及机理研究、构建土壤侵蚀物理模型提供试验数据和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

本研究采用室内定床冲刷试验,模拟研究不同流量、坡度下大粗糙单元坡面薄层水流的水动力学特性及其变化规律。试验于 2017 年 8 月在北京林业大学人工模拟降雨实验室进行。

(1)试验装置:包括供水系统、流量控制系统、稳流箱、平水设施和试验水槽。试验水槽的尺寸为长 6 m,宽 0.5 m,深 0.3 m。水槽用 12 mm 厚的钢化玻璃制作而成。坡度可调范围为 0~15°。

(2)试验下垫面设置:本研究共设置 2 种不同类型下垫面的床面,分别为砂布床面和大粗糙单元床面。其中:①砂布床面,用来模拟土壤下垫面,在玻璃槽底部粘贴 60 目水砂布,按水砂布国标标准换算其粒径为 0.25 mm;②大粗糙单元床面,用来模拟砾

石、枯落物等覆盖的下垫面,在砂布床面的基础上铺设大粗糙单元,用 40 mm 的塑料半球体来模拟大粗糙单元,并将其均匀粘贴在砂布床面上,以梅花形排列,为控制大粗糙单元的覆盖度为 5%,设置塑料半球体之间的横向距离为 14 cm,纵向距离为 18 cm。

(3)坡度和流量设置:①坡度,共设置 5 个不同坡度,依次为 2°,4°,6°,8°,10°;②流量,共设置 8 个流量,依次为 2.81,5.63,8.44,11.26,22.52,45.03,70.36,84.43 L/min。流量大小由阀门和电磁流量计共同控制,并且在水槽出口端采用体积法对流量进行标定。采用完全组合试验,共进行 80 组试验。

(4)测量断面及测量点位:①测量断面,沿水流方向设 5 个测量断面(图 1),将距离水槽进水口 70 cm 处作为 0 断面,各测量断面间距为 1 m,5 个测量断面依次为 1,2,3,4,5 测量断面;②测量点位,在每个测量断面横向设 4 个测量点位,测量点位间隔 10 cm。大粗糙单元床面的测量断面位于两排粗糙单元间隔处,测量点位位于 2 个塑料半球体之间,并避免水面雍高区和尾流区,尽可能消除水面不均匀性对试验结果的影响;大粗糙单元周围水深测量点位位于正切于粗糙单元的前端、下端和左右两侧。

(5)测量指标及方法:①表层流速采用染色剂示踪法(KMnO₄)测定,在每个点位测量 7 次,去掉最大值和最小值,剩余 5 次取均值作为该测量点位表层流速,4 个测点值取平均值作为该测量断面表层流速,5 个测量断面平均值作为该工况下表层流速;②水深采用水位测针测定,精度为 0.010 mm,在每个点位测量 3 次,取 3 次平均值作为该测量点位水深值,4 个测点平均值作为该测量断面水深值,5 个测量断面平均值作为该工况下水深值;③水温利用水银温度计,在试验开始和结束之间各测一次水温,精度为 0.10,用于计算水流的运动黏滞系数。

1.2 水力参数计算

(1)平均流速 染色剂示踪法测定的坡面流速为坡面表层流速,根据水流连续性方程,断面平均流速可采用实测断面平均水深来计算,其计算公式为:

$$u = Q/hb_e \quad (1)$$

式中: u 为断面平均流速(m/s); Q 为放水流量(m³/s); h 为实测断面平均水深(m); $b_e = (1-A)b$, b_e 为有效过流宽度(m); b 为试验水槽宽度(m); A 为大粗糙单元覆盖度(%)。

(2)水流雷诺数 雷诺数 Re 是判别水流流态的核心参数,其计算公式为:

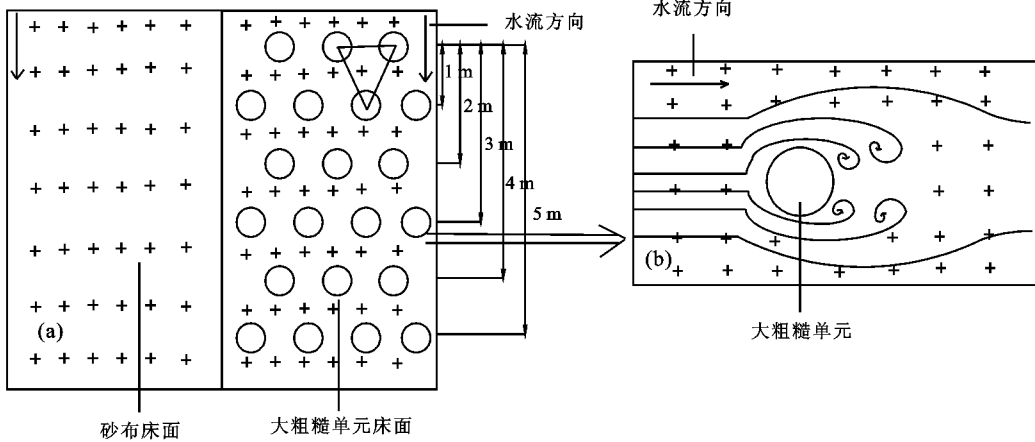
$$Re = \frac{uR}{\nu_m} \quad (2)$$

式中: R 为水力半径(m),薄层水流可视为二元流,水力半径近似等于断面平均水深 h ; ν_m 为水流运动黏滞系数(cm^2/s);本试验水流为清水,采用泊肃叶公式

计算:

$$\nu_m = 0.01775 / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2) \quad (3)$$

式中: t 为水流温度($^{\circ}\text{C}$)。



注:(a)为砂布和大粗糙单元床面示意;(b)为大粗糙单元周围绕流现象示意。

图 1 测量断面示意

(3)水流弗劳德数 弗劳德数 Fr 是判别水流流型的核心参数,计算公式为:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

式中: Fr 为弗劳德数; g 为重力加速度(m/s^2),取 $9.80 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

(4)薄层水流阻力系数 坡面流阻力系数主要是借助于明渠水流阻力概念和相应的表达式,由于 Darcy-Weisbach 阻力系数同时适用于层流和湍流,具有良好的物理意义且符合量纲一致原则,因此在坡面流的研究中被广泛应用。计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{u^2} \quad (5)$$

式中: f 为阻力系数; J 为水力坡度,对于均匀流, $J = i = \sin \theta$, θ 为水槽坡度($^{\circ}$)。

2 结果与分析

2.1 大粗糙单元对平均流速的影响

坡面流平均流速是计算坡面流侵蚀能力和挟沙能力的重要参数。前人研究^[17-18]表明,在复杂地表条件下,粗糙单元的存在改变了坡面流流速及其分布状

况,导致坡面流水动力条件发生了根本的改变,从而直接影响坡面土壤侵蚀过程及泥沙运移规律。

大粗糙度单元床面坡面流平均流速与流量和坡度的关系见图 2。由图 2 可知,大粗糙单元床面的坡面流平均流速为 $0.03 \sim 0.57 \text{ m}/\text{s}$ 。在相同坡度条件下,平均流速随着流量的增大而增大;在相同流量条件下,平均流速随着坡度的增大而增大,且增大的幅度随着流量的增大而增大。当流量 $Q \leq 11.26 \text{ L}/\text{min}$ ($Re < 500$)时,增大幅度为 $3.28\% \sim 56.12\%$ 。而当流量 $Q > 11.26 \text{ L}/\text{min}$ ($Re > 500$)时,增大幅度为 $18.23\% \sim 119.27\%$,即大流量条件下坡度对平均流速的影响更加明显。通过回归分析可知,大粗糙单元床面坡面流平均流速与流量和坡度的关系为:

$$u = 7.694q^{0.623}J^{0.430} (R^2 = 0.992) \quad (6)$$

式中: q 为单宽流量(m^2/s)。

由公式(6)可以看出,平均流速的变化受到单宽流量和坡度的共同作用,坡面流平均流速与单宽流量和坡度均呈幂函数正相关的关系。这与江忠善等^[19]、Meyer 等^[20]的研究结果一致。

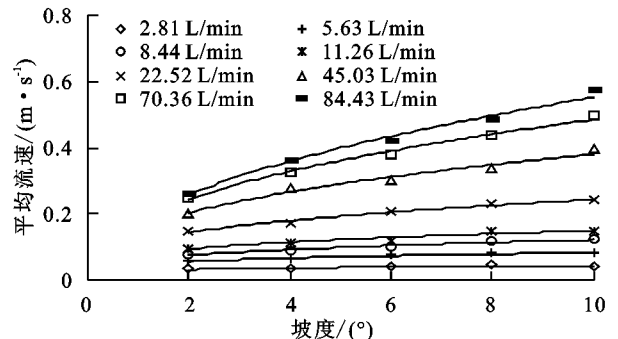
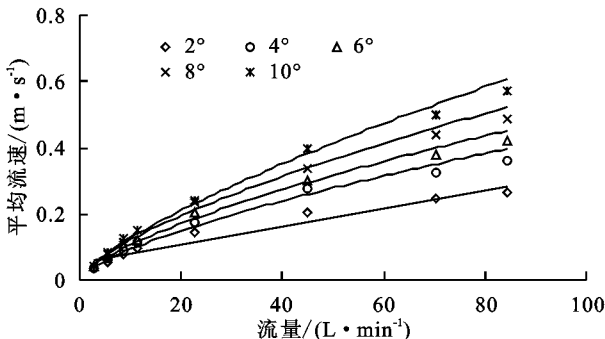


图 2 大粗糙单元床面下流量和坡度对平均流速的影响

与砂布床面相比,在一定流量和坡度条件下,大粗糙单元床面的坡面流平均流速均小于砂布床面,削

减值为 $0.002 \sim 0.140 \text{ m}/\text{s}$,削减率为 $1.45\% \sim 35.69\%$ 。这说明大粗糙单元对坡面流平均流速具有

延缓作用。究其原因,当坡面流流经大粗糙单元时,由于大粗糙单元的存在,根据最小能耗原理,水流必然绕大粗糙单元流动,不仅延长了水流运动路径从而导致沿程损失增大,且在大粗糙单元尾部所形成的漩涡增加了局部损失,因绕流作用大大减小了水流的动能,起到减缓流速的作用。

大粗糙单元对坡面流平均流速的削减值与流量和坡度的关系见图 3。由图 3(a)可知,大粗糙单元对平均流速的削减值随流量的增大而增大,这与赵春红等^[21]研究结果一致,即对于某一粗糙下垫面,流量越大,其减速效益也越大。这主要归因于两个方面:在一定坡度条件下,一方面当流量较小时,坡面流

水深也较小,薄层水流与大粗糙单元接触面积较小,而随着流量的增大,水深逐渐增加,大粗糙单元的阻水面积增加,对流速的削减作用增大;另一方面,随着流量的增大以及水深的增厚,坡面水流内部动量频繁交换,水流紊动性更加明显,增加了能量的损失,从而减小了水流能量向动能的转化,对流速的削减作用也增大。由图 3(b)可知,大粗糙单元对平均流速的削减值随坡度的增大而减小。究其原因,在一定流量条件下,随着坡度的增加,坡面流自身重力沿坡面方向的分力增加,大粗糙单元对水流的阻滞作用一部分被其抵消,因而流速增加缓慢,导致对流速的削减作用减小。

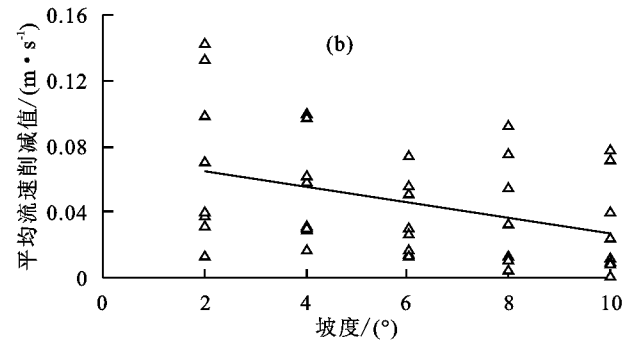
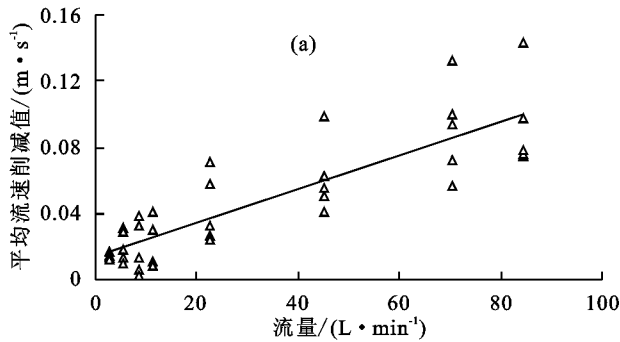


图 3 流量和坡度对大粗糙单元床面平均流速削减值的影响

2.2 大粗糙单元对平均水深的影响

水深是反映坡面薄层水流水动力学特性的重要指标。大粗糙单元床面坡面流平均水深与流量、坡度的关系见图 4。大粗糙单元床面坡面流平均水深为 2.22~11.31 mm。在相同坡度条件下,平均水深随流量的增大而增大;在相同流量条件下,平均水深随坡度的增大而减小,而且减小幅度随流量的增大而增大。当流量 $Q \leq 11.26 \text{ L/min}$ ($Re < 500$) 时,减小幅度为 0.30%~20.01%,而当流量 $Q > 11.26 \text{ L/min}$

($Re > 500$) 时,减小幅度为 3.58%~27.59%,说明在大流量条件下坡度对平均水深的影响更加明显。通过回归分析可知,大粗糙单元床面坡面流平均水深与流量和坡度的关系为:

$$h = 0.131q^{0.388} J^{-0.389} \quad (R^2 = 0.969) \quad (7)$$

式中: h 为平均水深(m); q 为单宽流量(m^2/s)。

由公式(7)可以看出,平均水深的变化受单宽流量和坡度的共同作用,坡面流平均水深与单宽流量呈幂函数增加关系,与坡度呈幂函数减小的关系。

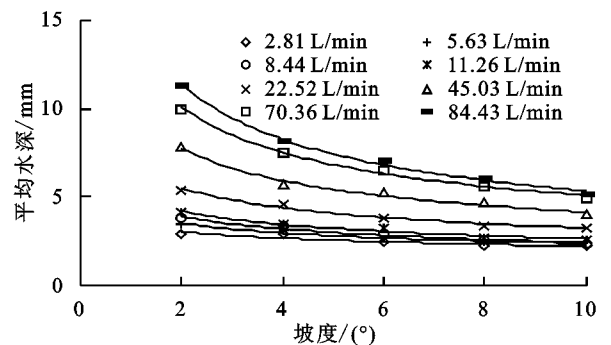
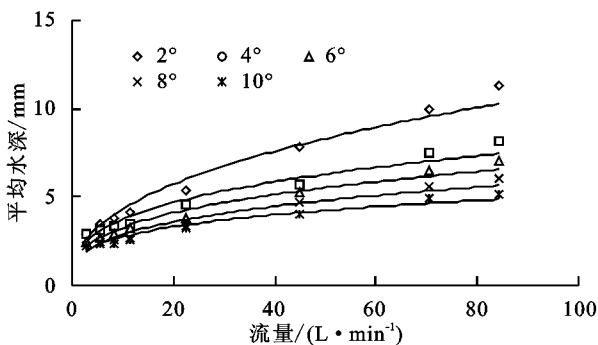


图 4 大粗糙单元床面下流量和坡度对平均水深的影响

与砂布床面相比,在一定流量和坡度条件下,大粗糙单元床面坡面流平均水深均大于砂布床面,增大值为 0.15~4.36 mm,增大了 1.07~1.64 倍,这表明大粗糙单元起到了壅高水深的作用。究其原因,由公式 $Q = uhb_c$ 可知,由于大粗糙单元的阻碍作用,水流流宽 b_c 减小,坡面流平均流速 u 减小(见 2.1 结果分析),使得在相同的放水冲刷流量下水深会高于砂布床面。

大粗糙单元对坡面流平均水深的壅高值与流量和坡度的关系见图 5。由图 5 可知,壅高值随流量的增大而增加,壅高值随坡度的增加而减小。大粗糙单元对坡面流水深壅高作用的主要原因与延缓流速作用相关。

2.3 大粗糙单元对局部水深的影响

本研究中大粗糙单元的粒径(40 mm)远大于坡面流平均水深,坡面流不能完全淹没整个床面。另

外,从整个试验过程来看,在大粗糙单元周围的坡面流发生了明显的绕流现象,这是明显区别于砂布床面的。因而研究大粗糙单元周围水深及其变化规律,更能反映大粗糙单元对局部水流结构的影响。杨帆等^[22]通过室内模拟试验定性描述了圆柱绕流现象并

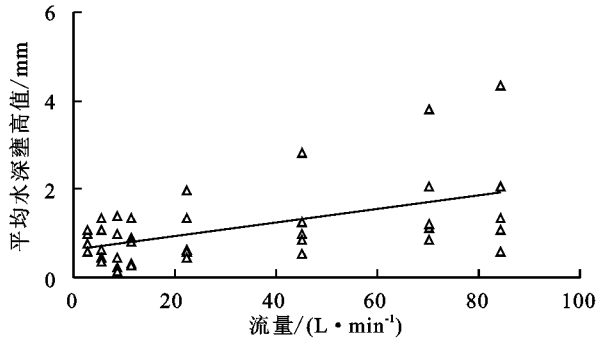
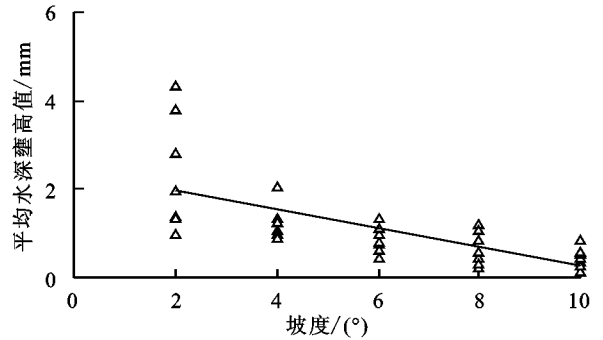


图5 流量和坡度对大粗糙单元床面坡面流平均水深壅高值的影响

大粗糙单元周围水深与流量和坡度的关系见图6。由图6可知,在一定流量和坡度下, $h_1 > h_2 > h_3$,说明迎水面水深较大,而背水面水深较小。这是由于水流穿梭于大粗糙单元之间做绕流运动时,在大粗糙单元的迎水面形成一定高度的壅浪,水深增加;后经侧水面绕流而过,而在背水面当水流绕过大粗糙单元的某一个点后,造成水流流线脱离,形成尾涡,水深减小。与平均水深类似, h_1 、 h_2 、 h_3 随着流量的增大而增大,随坡度的增加而减小,研究结果与杨帆等^[22]研究结果一致。

大粗糙单元在迎水面雍高水深,阻碍水流运动,减小了水流强度;而在背水面形成的旋涡增大了水流局部的紊动性,增加了土壤侵蚀力^[23]。因此,通过对比分析迎水面与背水面水深的关系,可以反映出大粗糙单元不同部位坡面流侵蚀力大小的变化。对比 h_1-h_3 水深的差值发现,在较小坡度下(2°和4°),差值随流量的增大先增大后趋于稳定。在较大坡度下(6°,8°和10°),差值随流量的增大先增大后减小(图6)。其主要原因是,在小坡度下,当流量较小时,水深较小,大粗糙单元的阻水作用不明显;随着流量增大,水深增大,水流紊动性增强,大粗糙单元的阻水面积增加,迎水面水深 h_1 逐渐增大,当水流绕过大粗糙单元后,在背水面形成漩涡区,背水面水深 h_3 减小,因此迎水面与背水面的差值 h_1-h_3 增大。而当流量继续增大,前排大粗糙单元产生的漩涡扩散至后排时受到后排大粗糙单元的干扰作用,使得背水面水深 h_3 增加,则差值 h_1-h_3 的增加幅度变小,并逐渐趋于稳定。但是,在大坡度下,水流沿坡面向下的重力分力增大,流速增加而水深减小,当流量由小到大增加时,后排大粗糙单元的干扰作用逐渐增强,尾流区水深 h_3 增加的幅度不断增大,差值 h_1-h_3 出现先增大后减小的趋势。

定量分析了植被茎秆壅水区 and 尾水区水深变化规律,为相关研究提供了有益借鉴。本试验将大粗糙单元周围水深分为迎水面水深 h_1 、侧水面水深 h_2 、背水面水深 h_3 ,对其进行准确测量,并分析其与流量和坡度的关系。



2.4 大粗糙单元对弗劳德数的影响

弗劳德数 Fr 是表征坡面径流流型的重要参数,反映了水流惯性力与重力的对比关系,是判别水流处于急流或缓流的主要指标。一般认为,当 $Fr < 1$,水流为缓流;当 $Fr = 1$ 时,水流为临界流;当 $Fr > 1$,水流为急流。

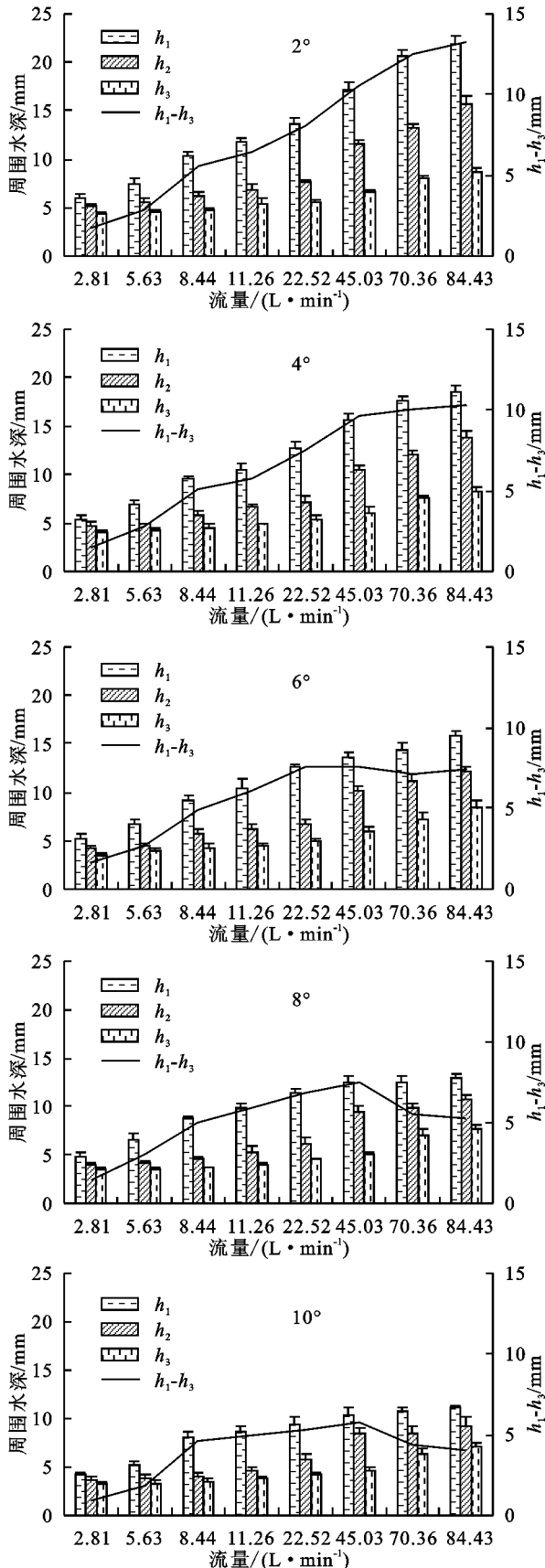
大粗糙单元床面坡面流弗劳德数与流量和坡度的关系见图7。大粗糙单元床面弗劳德数的变化范围为0.20~2.55,表明本试验的坡面流既有缓流也有急流。当坡度为2°时,不同流量下的弗劳德数均小于1,坡面流处于缓流。除2°之外,在其他坡度下,弗劳德数随着流量的增大而增大,坡面流从缓流逐渐变为急流。同一流量下,弗劳德数随着坡度的增大而增大。但是,在不同流量条件下,坡面流流型不同。当流量 $Q \leq 11.26$ L/min($Re < 500$)时,弗劳德数均小于1,说明坡面流都属于缓流。而当 $Q > 11.26$ L/min($Re > 500$)时,弗劳德数随着坡度的增大而增大,坡面流从缓流逐渐变为急流。说明在大流量条件(过渡流区)流型从缓流转变为急流。通过回归分析可知,大粗糙单元床面坡面流弗劳德数与流量和坡度的关系为:

$$Fr = 8.428q^{0.464} J^{0.634} (R^2 = 0.973) \quad (8)$$

式中: q 为单宽流量(m^2/s)。

由公式(8)可知,弗劳德数与流量和坡度均呈幂函数增加的趋势。此结果与施明新等^[24]研究不同地表粗糙度下(粒径 ≤ 10 mm)坡面流水力特性的影响研究是一致的,然而高延良等^[25]研究植被下的坡面流水动力学特性时得出 Fr 与流量呈幂函数减小关系,这可能与粗糙单元的覆盖度有关,本研究大粗糙单元覆盖度(5%)小于高延良等^[25]研究中植被覆盖度(9.30%),粗糙单元对水流的阻滞作用相对较小,使得动能转化为势能较小,

因而弗劳德数随流量增大而增大。



注: h_1 为迎水面水深; h_2 为侧水面水深; h_3 为背水面水深; $h_1 - h_3$ 为迎水面与背水面水深之差。

图 6 流量和坡度对大粗糙单元周围水深的影

响

0.34~2.89。在一定流量和坡度下,砂布床面的弗劳德数均大于大粗糙单元床面。大粗糙单元起到了分散和阻滞径流的作用,能够减小流速,使得径流流动变缓,即随着阻力的增加,流速的增加退居其次,而水深的增加占主导作用,水流流型由急流趋向缓流发展^[26]。相反,砂布床面的流速较大,坡面径流惯性力较大,导致弗劳德数较大。

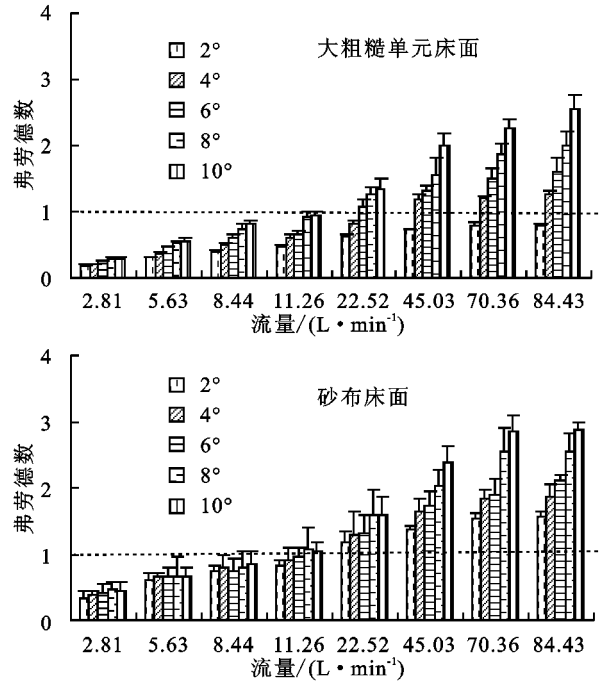


图 7 流量和坡度对大粗糙单元床面和砂布床面弗劳德数的影响

2.5 大粗糙单元对综合阻力系数的影响

坡面流阻力是反映坡面流体力学特性的一个关键参数,坡面流阻力的规律研究对于认识土壤侵蚀过程的水动力学机理具有重要意义。阻力系数与雷诺数的关系是研究坡面流阻力的一个核心问题。大粗糙单元床面和砂布床面坡面流阻力系数与雷诺数的关系见图 8。由图 8 可知,不同床面坡面流阻力系数均随雷诺数增大呈幂函数减小关系,这与刘文剑等^[27]的研究一致。然而,由于试验设定的下垫面不同,不同研究结果存在一定的差异,如杨帆等^[22]研究表明在仅考虑植被阻力的情况下,当植被茎秆覆盖度为 32.32% 时,阻力系数随雷诺数的增大而增大。高延良等^[25]研究发现坡面流阻力系数随雷诺数的变化呈单驼峰形式。张宽地等^[28]认为坡面流阻力与雷诺数的变化规律并非呈单调增加或者单调递减的关系,而是随着植被覆盖度、坡度和植被类型的变化而呈现出不同的变化趋势。

大粗糙单元床面坡面流阻力系数的变化范围为 0.21~15.74。砂布床面坡面流阻力系数的变化范围为 0.12~7.08。大粗糙单元床面的阻力系数比砂布床面

大 0.050~9.52, 约为砂布床面阻力系数的 1.10~3.96 倍。由此可知, 与砂布床面相比, 大粗糙单元对坡面流流动的阻滞作用更大, 增加了坡面流阻力。这表明坡面薄层水流除了受到水槽粗糙表面的摩擦阻作用之外, 同时还受到了突入水流本身的大粗糙单元的阻碍作用。

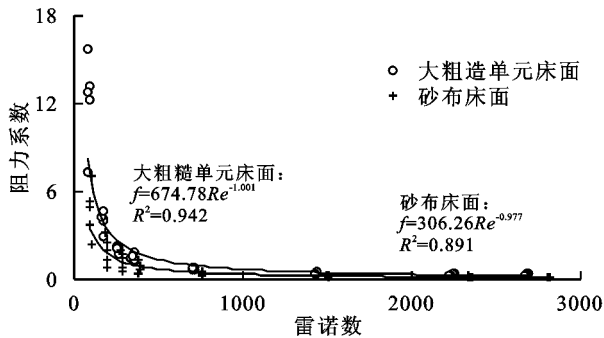


图8 大粗糙单元床面和砂布床面阻力系数与雷诺数的关系

事实上, 大量研究^[29]表明, 受地表覆盖物及微地形变化的影响, 坡面流阻力变化规律非常复杂。目前较一致的认识是, 在复杂地表条件下可以根据地表特征差异将坡面流阻力分为颗粒阻力、形态阻力、波阻力(绕流阻力)和降雨阻力 4 个部分, 并且认为这几个部分是可以相互叠加的^[10,30]。因此, 可以根据阻力叠加的方法研究坡面流阻力的构成情况, 并定量区分不同阻力形式的大小。本研究采用室内定床冲刷试验, 整个试验过程中床面形态相对不变, 也无降雨的影响, 因而不考虑形态阻力和降雨阻力, 可以认为本研究中大粗糙单元床面的坡面流阻力主要由颗粒阻力和绕流阻力构成。其中, 颗粒阻力由砂布床面阻力系数与雷诺数的关系式(图8)计算得到, 则绕流阻力等于坡面流总阻力减去颗粒阻力。绕流阻力随流量的增大而减小, 二者为幂函数关系。绕流阻力大小范围为 0.10~12.12, 绕流阻力占总阻力的比例为 28.58%~77.00%, 平均为 52.79%。这个比例低于 Zhao 等^[31]试验结果 78.37%, 究其主要原因是因为本试验所研究的是砂布床面, 与赵春红等^[21]试验的光滑床面相比, 颗粒阻力更大, 颗粒阻力占总阻力的比例更大, 而绕流阻力所占的比例就相应较小。

3 结论

(1)大粗糙单元床面的平均流速、平均水深和弗劳德数与流量之间均呈幂函数正相关关系。平均流速和弗劳德数与坡度之间均呈幂函数正相关关系, 而平均水深与坡度之间呈幂函数负相关关系。大粗糙单元周围水深的大小为迎水深(h_1)>侧水深(h_2)>背水深(h_3), 在较小坡度下(2° 和 4°), h_1-h_3 随流量的增大先增大后趋于稳定, 在较大坡度下($6^\circ, 8^\circ$ 和

10°), h_1-h_3 随流量的增大先增大后减小。

(2)与砂布床面相比, 大粗糙单元改变了坡面薄层水流在坡面上的分布, 发生了明显的绕流现象, 大粗糙单元具有明显的阻滞水流的作用, 延缓了坡面流流速, 引起了坡面水深的增加, 并使得水流流型由急流趋向缓流发展。大粗糙单元增加了坡面流阻力并改变了坡面流阻力构成。坡面流阻力主要由颗粒阻力和绕流阻力组成, 其中绕流阻力占总阻力的 29%~77%, 绕流阻力随着流量的增加而减小。同时, 坡面流阻力系数与雷诺数之间呈幂函数负相关关系。

(3)本文仅对 5%覆盖度和梅花形排列方式下大粗糙单元床面的坡面流水动力学特性进行了研究。在未来还需要进一步对比研究不同覆盖度以及不同排列方式的大粗糙单元对坡面流水动力学特性的影响。

参考文献:

- [1] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 567-574.
- [2] 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.
- [3] 王俊杰, 张宽地, 杨苗, 等. 雨强和糙度对坡面薄层水流水动力学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 147-154.
- [4] 戴矜君, 程金花, 张洪江, 等. 野外放水条件下坡面水流水动力学特征[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 52-59.
- [5] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 野外模拟降雨条件下矿区土质道路径流产沙及细沟发育研究[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 155-163.
- [6] Roche N, Daian J, Lawrence D S L. Hydraulic modeling of runoff over a rough surface under partial inundation[J]. Water Resources Research, 2007, 43(8): 159-164.
- [7] Myers T G. Modeling laminar sheet flow over rough surfaces[J]. Water Resources Research, 2002, 38(11): 1230.
- [8] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 143-154.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Pagliara S P, Das R D, Carnacina I C. Flow resistance in large-scale roughness condition[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(11): 1285-1293.
- [12] 张宽地, 王光谦, 王占礼, 等. 人工加糙床面薄层滚波水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 28-34.
- [13] Giménez R, Govers G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 791-799.
- [14] 余冰, 王军光, 蔡崇法, 等. 不同模拟糙度定床坡面集中

- 水流水力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 50-54.
- [15] Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of flow discharge and median grain size on mean flow velocity under overland flow[J]. Journal of Hydrology, 2012, 452/453(1):150-160.
- [16] 翟艳宾, 吴发启, 张一, 等. 人工模拟粗糙度对坡面阻力的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1):93-95.
- [17] 姚文艺. 坡面流流速计算的研究[J]. 中国水土保持, 1993(3):21-25.
- [18] Zhang G H, Luo R T, Ying C, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1/2):205-213.
- [19] 江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究[J]. 水土保持研究, 1988(1):46-52.
- [20] Meyer L D, Foster G R, Huggins L F. A laboratory study of rill hydraulics: 1. Velocity relationships[J]. Transactions of the Asabe, 1984, 27(3):790-796.
- [21] 赵春红, 高建恩, 徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):113-121.
- [22] 杨帆, 张宽地, 杨明义, 等. 植物茎秆影响坡面径流水动力学特性研究[J]. 泥沙研究, 2016(4):22-27.
- [23] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of no cohesive sediment by shallow overland flow [J]. Water Resources Research, 2010, 29(5):1415-1424.
- [24] 施明新, 吴发启, 田国成, 等. 地表粗糙度对坡面流动力学参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7):83-87.
- [25] 高延良, 董旭, 杨帆, 等. 坡面植被水流水动力学特性研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9):38-47.
- [26] 张宽地. 坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- [27] 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学特性的影响[J]. 水土保持报, 2017, 31(6):1-7.
- [28] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(6):825-834.
- [29] Abrahams A D, Parsons A J, Wainwright J. Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrub land hillslopes, Walnut Gulch, southern Arizona[J]. Journal of Hydrology, 1994, 156(1/4):431-446.
- [30] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3):14-19.
- [31] Zhao C H, Gao J N, 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.
- (上接第 42 页)
- [22] 王辉, 董元华, 安琼, 等. 高度集约化利用下蔬菜地土壤养分累积状况:以南京市南郊为例[J]. 土壤, 2006, 38(1):61-65.
- [23] 冀宏杰, 张认连, 武淑霞, 等. 太湖流域农田肥料投入与养分平衡状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2008(5):70-75.
- [24] 鲁如坤, 刘鸿祥, 闻大钟, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究Ⅳ. 农田养分平衡的评价方法和原则[J]. 土壤通报, 1996, 27(5):197-199.
- [25] 李强坤, 胡亚伟, 孙娟. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):210-214.
- [26] 郑少文, 郭智, 王子臣, 等. 太湖流域典型蔬菜地氮素径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):204-208.
- [27] 吴永红, 胡正义, 杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源—拦截—修复”(3R)理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):1-6.
- [28] 张刚, 王德建, 陈效民. 稻田化肥减量施用的环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2):327-330.
- [29] 李大伟, 周加顺, 潘根兴, 等. 生物炭基肥施用对蔬菜产量和品质以及氮素农学利用率的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(3):433-440.
- [30] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1):68-79.
- [31] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2013, 89(11):1467-1471.
- [32] 贾俊香, 熊正琴. 秸秆生物炭对菜地 N_2O 、 CO_2 与 CH_4 排放及土壤化学性质的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2):283-288.
- [33] 仓龙, 朱向东, 汪玉, 等. 生物炭中的污染物含量及其田间施用的环境风险预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15):163-167.
- [34] 石红蕾, 周启星. 生物炭对污染物的土壤环境行为影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2):486-494.