

砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响

马晨雷¹, 戴翠婷¹, 刘窑军², 周怡雯¹, 王天巍¹, 李朝霞¹, 占 顺¹, 胡宇潇³

(1.华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2.江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029; 3.秭归县水土保持试验站, 湖北 秭归 443600)

摘要: 地表砾石覆盖可以促进降雨入渗, 减少土壤侵蚀。然而, 砾石覆盖对紫色土坡面流的影响尚缺乏深入研究。通过室内模拟冲刷试验, 在 3 个冲刷流量(2, 4, 6 L/min)下, 研究不同砾石覆盖度(0, 10%, 20%, 30%和 40%)对紫色土坡面流水动力学特性的影响。结果表明: (1)随着砾石覆盖度的增大, 流速和弗劳德数呈减小趋势; 径流深、水流剪切力、阻力系数和曼宁糙率系数呈增大趋势, 雷诺数变化不明显。(2)坡面总侵蚀量随着砾石覆盖度的增加呈负指数减少, 且砾石覆盖在冲刷流量较小的情况下, 对坡面侵蚀量的减少效果越明显。(3)冲刷流量的大小并不影响砾石覆盖度和坡面总侵蚀量之间的关系。研究结果为探究紫色土坡面流侵蚀过程及机理研究提供一定的理论基础。

关键词: 紫色土; 坡面流; 砾石覆盖; 水动力学参数; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0150-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.021

Effects of Gravel Covering on Hydraulic Characteristics of Slope Flow on Purple Soil

MA Chenlei¹, DAI Cuiting¹, LIU Yaojun², ZHOU Yiwen¹,

WANG Tianwei¹, LI Zhaoxia¹, ZHAN Shun¹, HU Yuxiao³

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University,

Wuhan 430070; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029;

3. Zigui County Soil and Water Conservation Experimental Station, Zigui, Hubei 443600)

Abstract: Gravel covering on the surface of soils can increase water infiltration and protect the soil against erosion. However, the effects of gravel covering in purple soils was less well investigated. In this paper, the influence of gravel covering on hydraulic characteristics of slope flow on purple soils in southern China was studied under simulated scouring conditions. Different gravel covering ages from 0 to 40% under three flow rates (2 L/min, 4 L/min, 6 L/min) were set up. Results showed that: (1) Flow velocity and the Froude number decreased, but the runoff depth, flow shear stress, Darcy resistance coefficient and the Manning roughness coefficient increased with the increase of cover ages. (2) The total erosion of the slope decreased negatively with the increase of cover ages. Under the small flow rates, the reduction effect of gravel covering on erosion amount of slope flow was more obvious. (3) The flow rates did not affect the relationship between gravel coverage and total erosion on the slope.

Keywords: purple soil; slope flow; gravel covering; hydraulic characteristics; soil erosion

受风化作用和人类活动的影响, 砾石(>2 mm)在土壤中广泛分布, 尤其在南方山区, 湖北宜昌秭归县紫色土砾石含量超过 30%的占 36%^[1]。砾石覆盖影响土壤的物理性质, 如孔隙度、表土结皮和压实度等, 从而影响坡面水蚀过程。地表砾石覆盖对土壤侵蚀过程的影响主要包括: (1)防止地表受到雨滴击溅和剥蚀; (2)影响土壤物理性质, 减少表土物理退化; (3)改变水流路径弯曲度, 影响入渗; (4)影响地表产

流, 改变坡面流水力特性^[2-5]。坡面流作为土壤剥离和泥沙输移的主要驱动力, 研究坡面流水动力特性有助于构建土壤侵蚀预报模型, 为紫色土水资源保护与水土保持措施规划提供有效的科学依据。

许多研究表明砾石是影响土壤侵蚀和坡面流水力特性的一个关键因素。在不同砾石覆盖度下, Jo-maa 等^[6]通过室内水槽试验研究发现, 降雨侵蚀与表土裸露面积和有效降雨量成正比, 且该比例受到土壤

收稿日期: 2019-04-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571266)

第一作者: 马晨雷(1996—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与环境生态研究。E-mail: 553527199@qq.com

通信作者: 李朝霞(1976—), 女, 湖北丹江口人, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: zxli@mail.hzau.edu.cn

初始条件(如含水量和下垫面特征)的作用;Nasri等^[7]研究表明,黏壤土中砾石的存在促进了优先流路径,增大了大孔隙弯曲度;Rieke-Zapp等^[4]发现,砾石消散水流能量,因此土壤流失量随砾石覆盖增大而呈线性减小的趋势;王小燕等^[8]的研究得出,地表径流速率及地表径流系数随砾石覆盖度的增加而降低,相对地表径流系数与地表砾石覆盖度呈指数负相关关系的结论。此外,也有研究^[9]提出影响坡面流特性的一个关键参数是径流深与砾石粒径的比值。目前,对大流量条件下含砾石土壤的侵蚀规律和水流形态特征研究较多,而在低流量条件下砾石覆盖对坡面流特性的影响研究仍不足。

紫色土由于结构疏松,易于风化,且容易受到侵蚀的危害,土层浅薄,剖面层次分异不明显,砾石含量高,现有研究多关注于紫色土砾石的分布特点^[10]、持水性能^[11]、优先流形态^[12]、水分入渗^[13]等方面,对于紫色土坡面流水动力学特性的研究缺乏。因此本文通过室内模拟冲刷试验,设计3种低流量条件以及5种砾石覆盖度,旨在研究砾石覆盖对紫色土坡面流及土壤侵蚀的影响,以期为紫色土水蚀过程及机理研究提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

采用室内土槽冲刷试验,模拟研究不同流量以及砾石覆盖度下坡面流的水动力学特性。试验于2014年11月在华中农业大学人工模拟降雨大厅进行,试验土槽规格为长2 m,宽0.5 m,深0.15 m。试验土壤为紫色土,来自三峡库区秭归县王家桥小流域,其中砂粒含量37%,粉粒含量39.5%,黏粒含量23.5%,土壤经自然风干后过5 mm筛。试验前,在土槽底部放置1层5 cm厚的砾石(粒径10~20 mm),然后在砾石上铺1层透水细纱布,用分层填土法填土,每次填土5 cm,填土总厚度为10 cm。通过填土压实,控制土壤容重约为1.35 g/cm³,保证土壤容重和天然状态下一致,每次试验前控制含水量在30%左右,含水量采用烘干法测定。地表砾石覆盖度设置5个梯度,分别为0,10%,20%,30%和40%;冲刷流量设置为2,4,6 L/min,冲刷历时为30 min,试验在5°坡度下进行。冲刷流量采用水泵供水,阀门控制其大小,采用称重法测量冲刷流量。

1.2 砾石覆盖

通过建立砾石覆盖度与质量之间的关系确定砾石覆盖度大小。首先,取一定质量的砾石(粒径2~5 mm),将其均匀、不重叠地铺在1 m×1 m的PVC塑料板上,然后用全自动光学相机,固定焦距为28 mm,相机离地面约3 m,进行垂直照相。通过GIS和IDRISI软件对获得的照片进行分类和处理(图1),计算出砾石在PVC塑料板上的覆盖度,建立砾石覆盖度与质量的相关

性,从而计算出不同覆盖度(10%,20%,30%和40%)所需的砾石质量。本试验中砾石覆盖度和质量之间的关系为: $Y=10.55X-0.038$, $R^2=0.908$ 。式中: Y 为砾石覆盖度(%); X 为砾石质量(kg)。

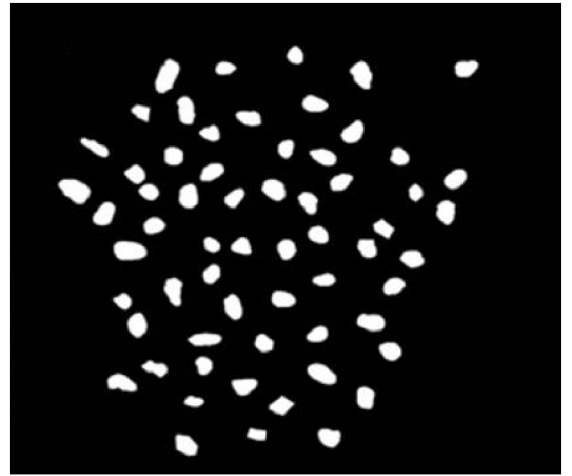


图1 构建砾石质量与覆盖度的关系

1.3 冲刷试验

冲刷过程中需要测量的数据包括:水流流速、径流量、含沙量、坡面径流宽度和水温。

1.3.1 水流速度的测定 采用颜色示踪法(KMnO₄溶液)测量水流流速,记录水流流过一定距离所用的时间,再通过计算得到水流流速。选择坡顶0.5 m和坡底0.5 m处进行流速测量,冲刷开始后每2 min测定1次流速,计算出上、下坡段的流速,取其平均值作为整个坡面流速。颜色示踪法测得的流速是水流表面最大速度,水流表面最大速度乘以修正系数就是水流的平均流速,修正系数随水流状态的变化而变化,根据本试验条件下的坡面径流流态,采用0.67作为平均流速的修正系数。

1.3.2 径流量、含沙量测定 冲刷开始后每2 min测定1次径流量,采用500 mL塑料瓶收集部分样,剩下样用桶收集。试验完成后称量塑料瓶和桶中的径流量体积。再将塑料瓶中的泥沙沉淀、干燥后称量泥沙量,计算含沙率。根据含沙率和径流量总体积计算总的含沙量。

1.3.3 过水断面宽度的测定 在坡面产流开始后,用钢尺测量上、下坡段的过水断面宽度,然后求其平均值,得到的数值为该小区的平均过水断面宽度。

径流深是测量时段内坡面径流平均水深,由于径流沿坡面方向是动态的,因此很难测量坡面径流深。假设坡面流为均匀流,则平均径流深计算公式^[14]为:

$$h = \frac{q}{Vbt}$$

式中: h 为径流深(m); q 为 t 时间内的径流量(m³); t 为径流取样时间(s); V 为平均流速(m/s); b 为过水断面宽度(m)。

雷诺数 Re 是辨别水流为层流或紊流的无量纲参数,

它表示水流惯性力与黏性力的对比关系,计算公式为:

$$Re=\frac{VR}{v} \tag{1}$$

式中: V 为平均流速(m/s); R 为水力半径(m),坡面薄层水流可用径流深 h 近似代替; v 为黏滞系数,与温度有关。

弗劳德数 Fr 是辨别水流为急流或缓流的无量纲参数,它表示水流惯性力与重力作用的对比关系,计算公式为:

$$Fr=\frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{2}$$

式中: h 为径流水深(m); g 为重力加速度(m/s²),取 $g=9.8\text{ m/s}^2$; V 为平均流速(m/s)。

阻力系数 f 为径流向下运动过程中受到下界面的阻滞水流运动力的总称,计算公式为:

$$f=\frac{8gRS}{V^2} \tag{3}$$

式中: f 为阻力系数; R 为水力半径(m),由水深 h 代替; V 为平均流速(m/s); g 为重力加速度(m/s²); S 为水力坡度,其值为坡度的正切值。

曼宁粗糙系数 n 是反映坡面对水流阻滞作用的参数。其公式为:

$$n=\frac{R^{2/3}J^{1/2}}{V} \tag{4}$$

式中: n 为曼宁粗糙系数; R 为断面水力半径(m),对于坡面薄层水流,可近似用水深 h 代替; V 为径流速度(m/s); J 为水力坡度。

水流剪切力 τ 是指水流沿坡面向下运动时,在其运动方向上产生的作用力,这个作用力是分离分散土壤颗粒的主要动力,使其随着径流流失。计算公式为:

$$\tau=\rho ghS \tag{5}$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa); ρ 为水流密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²); h 为径流水深(m); S 为水力坡度。

1.3.4 数据处理及分析方法 差异性 & 回归方程采用 Origin 软件分析,图表采用 Origin 和 Excel 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 砾石覆盖对坡面流速的影响

流速是坡面流水动力学研究中的重要因子,由于坡面水流是一种三维、非恒定、非均匀的沿程变量,易受到多种因素影响,使得流速变化复杂。为了解决实际问题,在试验中通常采用明渠均匀流理论,将坡面流简化为一维恒定非均匀的沿程变量流来计算。本试验结果表明,不同砾石覆盖度下坡面流速随冲刷历时呈现出不同的变化趋势。从图 2 可以看出,在不同砾石覆盖度下,流速的变化趋势基本相同,均为先增大,再减小,最后趋于稳定,并且随着覆盖度的增大减小

小趋势,流速最大值出现的时间也延后,这与细沟发展形态密切相关。

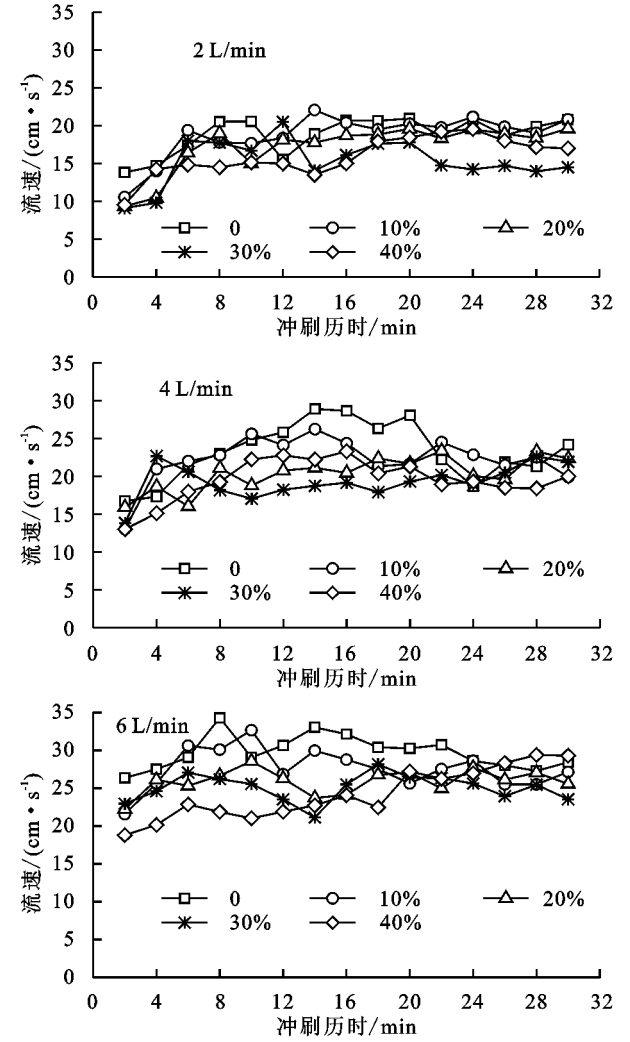


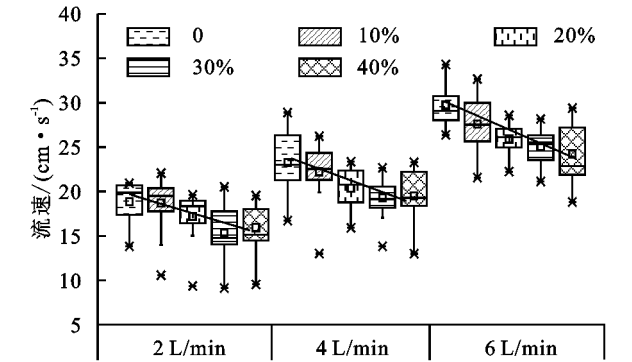
图 2 流速随冲刷历时的变化

在 2,4,6 L/min 的冲刷流量下不同砾石覆盖度下坡面平均流速变化情况见图 3。从图 3 可以看出,在相同冲刷流量不同覆盖度下,径流流速基本上随着砾石覆盖度的增大呈逐渐减小的趋势,较裸露坡面,砾石覆盖下的坡面平均流速减幅分别为 24%~34%,5%~29%,16%~35%。通过线性拟合发现,流速与砾石覆盖度呈负指数关系(表 1),这与符素华等^[15]、Bunte 等^[16]的研究结果一致。从能量角度分析,流速随着砾石覆盖度增大呈减小趋势的主要原因是:砾石覆盖增大了地表粗糙度;而地表粗糙度对水流的运动起着至关重要的作用,水流在坡面向下运动过程中与砾石发生相撞,导致水流能量减少,流速降低,而水流与砾石碰撞频率随着砾石覆盖度的增大呈增大趋势,损失的能量也随之增多,流速随之变小。

2.2 砾石覆盖对径流深的影响

径流深是薄层流水动力学特性的一个重要参数,涉及到其他水力学参数的计算。但由于薄层水流的特殊性,易受外界条件影响(地形地貌、下垫面状况、

植被覆盖、砾石覆盖、降雨强度等),又由于测量技术的限制,所以对复杂坡面的径流深进行准确的测量是非常困难。因此,本试验采用明渠均匀流理论对它进行计算分析。本试验研究结果表明,坡面流径流水深均较浅,变化范围为 0.48~1.40 mm,随着砾石覆盖度和冲刷流量的增加,径流水深呈增大趋势(图 4),在 2, 4, 6 L/min 的冲刷流量下,有砾石覆盖的径流深分别为无砾石覆盖条件下的 1.3~1.5, 1.1~1.3, 1.2~1.5 倍,这与符素华等^[15]研究的结果刚好相反,与 Bunte 等^[16]研究的结果相同,通过线性拟合分析得出径流深与砾石覆盖度呈较好的指数关系。砾石的存在使得坡面水流宽度减小,在流量一定的情况下,由于有效径流宽度的变小,使得水流更加集中,水流能量和侵蚀力随之增大,径流水深也就随之增大,所以径流水深与有效径流宽度成反比。因此,砾石覆盖下的径流水深比裸露时大,并且随着砾石覆盖度的增大呈增大趋势。



注:图中箱体横线表示数据的中位数;箱体中的小方块表示均值;箱体边缘向上、下延伸的外端点表示数据的最大值和最小值。

图 3 不同冲刷流量下流速与覆盖度的关系
表 1 流速与覆盖度的函数关系

冲刷流量/(L·min ⁻¹)	函数关系	判定系数 R ²
2	$y = 12.06e^{-0.766x}$	0.50 **
4	$y = 16.39e^{-0.645x}$	0.76 **
6	$y = 20.68e^{-0.77x}$	0.63 **

注: ** 表示 $p < 0.01$ 。

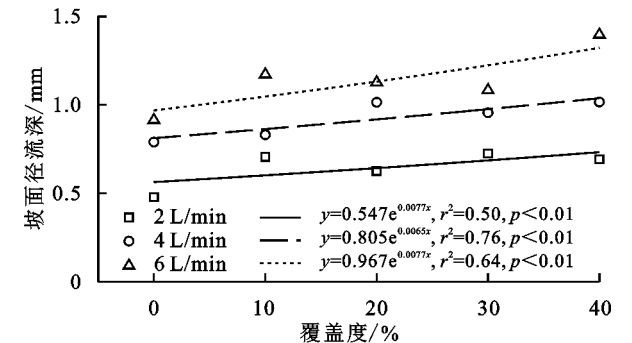


图 4 径流深与覆盖度的关系

2.3 砾石覆盖对坡面流态的影响

流态是坡面流水动力学特性的重要参数之一,它涉及到径流计算、流速、阻力特性、径流剥蚀力以及泥

沙输移等重大理论问题。目前关于坡面流究竟属于层流、紊流还是过渡流存在较多的分歧,尚无统一的定论。根据水动力学原理,现阶段判别坡面流流态一般用雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 为依据来进行判定。表 2 为不同砾石覆盖条件下下坡面径流的雷诺数(Re)变化情况。坡面薄层水流 Re 变化范围为 98~333,均小于 500,属于层流;坡面径流 Fr 的在细沟间变化范围为 1.08~2.31, Fr 均大于 1,属于急流。 Re 随着冲刷流量增大呈增大趋势,而跟砾石覆盖度的相关性并不明显; Fr 随着冲刷流量的增大呈增大趋势,而随砾石覆盖度增大却有减小趋势,在 2, 4, 6 L/min 的冲刷流量下,40% 砾石覆盖下的 Fr 相对于裸露条件下分别减少 0.86, 0.60, 1.09, Fr 随砾石覆盖度的变化见图 5。通过数据分析发现, Fr 与砾石覆盖度呈负指数关系,相关性较好。这与张光辉^[17]、Guo 等^[5]研究结果一致,其研究表明,下垫面状况和流量(或水深)在很大程度上控制坡面流的流态,随着冲刷流量的增大,水流流态从层流开始向紊流过渡。有砾石覆盖下的 Fr 比裸露时小,表明砾石的存在对水流速度起到一定的阻碍作用,降低水流速度,减少了水流紊动性。

表 2 不同砾石覆盖下坡面径流雷诺数 Re

冲刷流量/ (L·min ⁻¹)	砾石覆盖度/%				
	0	10	20	30	40
2	110	107	112	110	98
4	225	220	220	210	191
6	326	333	318	311	282

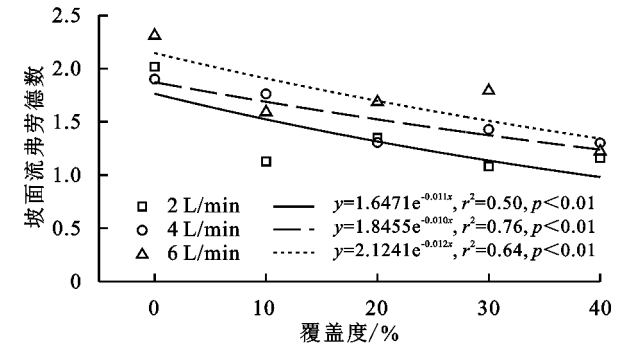


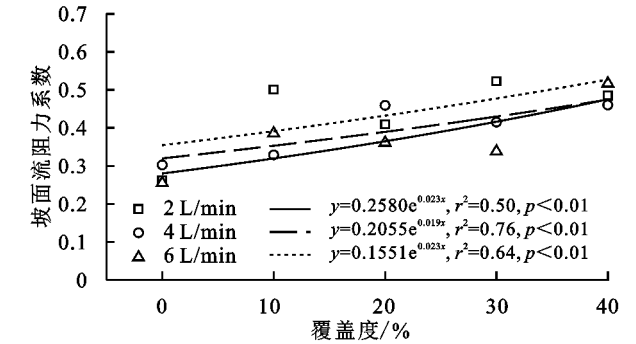
图 5 弗劳德数与砾石覆盖度的关系

2.4 砾石覆盖对坡面阻力的影响

坡面径流阻力特性一直是坡面径流研究中的核心和最主要问题,目前通常采用明渠均匀流的阻力概念和表示式对其进行研究,选用阻力系数 f 和曼宁粗糙系数 n 来反映水流阻力特征。本次试验研究结果表明,坡面径流阻力系数 f 的变化范围为 0.13~0.59,曼宁粗糙系数 n 变化范围为 0.013~0.031。目前国内外对于阻力系数 f 与雷诺数 Re 关系的研究比较多,普遍认为他们呈幂函数关系: $f = a \cdot Re^{-b}$, a, b 为回归系数,数值为正,它们与地表土壤性质、坡面流态以及下垫面状况等有关^[18]。但本次试验结果表明,阻力系数 f 与雷诺数

Re 之间不存在幂函数关系,反而阻力系数 f 与砾石覆盖度之间有较好的指数相关性。

阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n 随砾石覆盖度的变化情况见图 6。从图 6 可以看出,阻力系数 f 随着覆盖度的增大呈增大趋势,随着冲刷流量增大呈减小趋势,这与敬向峰等^[19]研究结果一致;曼宁糙率系数 n 与阻力系数 f 的变化规律基本一致。在 2,4,6 L/min 的冲刷流量下 40%砾石覆盖下的阻力系数 f 分别是裸露条



件下的 3.0,2.1,3.6 倍,曼宁糙率系数 n 分别是裸露条件下的 1.9,1.5,2.0 倍,阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n 均与砾石覆盖度之间呈较好的指数正相关性,原因是坡面砾石覆盖增大了地表粗糙度,所以水流在运动过程中与砾石发生碰撞频率随之增加,消耗能量也增多,流速自然减少,而阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n 均与流速呈负相关关系,所以阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n 随着砾石覆盖度的增大呈增大趋势。

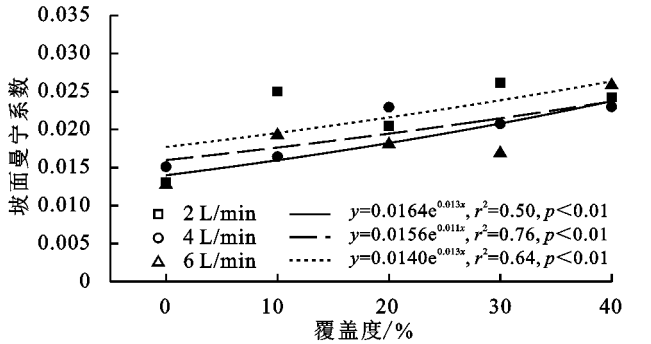


图 6 阻力系数、曼宁系数与砾石覆盖度的关系

2.5 砾石覆盖对水流剪切力的影响

水流剪切力和水流功率是水动力学中的重要参数,可以较好地模拟土壤剥蚀过程。其主要作用是破坏土壤原有的结构、分散土壤颗粒和搬运土壤颗粒,水流功率是指单位面积水体势能随时间的变化率。

水流剪切力 τ 随砾石覆盖度的变化情况见图 7。水流剪切力的变化范围为 0.41~1.20 Pa,水流剪切力随着冲刷流量和砾石覆盖度的增大呈增大趋势,在 2,4,6 L/min 的冲刷流量下,有砾石覆盖时的水流剪切力相比裸露时的增幅范围分别为 0.13~0.21,0.04~0.19,0.15~0.41 Pa。坡面水流功率与砾石覆盖度无关,只与冲刷流量有关,在 2,4,6 L/min 的冲刷流量下,水流功率分别为 0.056,0.113,0.171 N/(m·s)。将坡面径流水流剪切力与砾石覆盖度进行回归分析,结果表明二者之间呈较好的指数关系,这与张光辉^[17]、Bunte 等^[20]的研究结果一致。从水流剪切力物理学公式上可以看出, τ 是径流深的函数,并且与径流深呈正相关,在相同冲刷流量下,砾石覆盖使得有效径流宽度减小,径流深变大,因此水流剪切力随着砾石覆盖度的增大而呈增大趋势。

2.6 砾石覆盖与坡面总侵蚀量的关系

目前国内外大量研究^[6,8,21]表明,砾石覆盖对坡面侵蚀有着重要影响,学者们^[22-23]研究发现,坡面侵蚀量与砾石覆盖度呈负相关,原因是砾石覆盖增大了地表粗糙度,降低雨滴动能的作用,减小了对土壤的溅蚀作用,分散了水流,减少了坡面径流对土壤的剥蚀作用,以及阻碍了泥沙的运移。图 8(a)为在不同冲刷流量条件下,不同砾石覆盖度对坡面总侵蚀量大小的影响。坡面侵蚀量随着冲刷流量的增大呈增大趋势,在裸露条件下,冲刷流量为 6 L/min 是 2 L/min 时侵蚀量的 4.7 倍,随

着冲刷流量的增大,坡面径流侵蚀能力随之增大,土壤侵蚀量随之增多。这时砾石覆盖对减少坡面侵蚀量的作用不明显,但是冲刷流量的大小并不影响砾石覆盖度和坡面侵蚀量之间的关系。在不同的冲刷流量下,坡面总侵蚀量随着砾石覆盖度的增加呈减小趋势,在冲刷流量为 2,4,6 L/min 下,砾石覆盖度为 40%的坡面总侵蚀量比裸露时的坡面总侵蚀量分别减少 44.3%,33.3%和 36.0%,砾石覆盖在冲刷流量较小时减少坡面侵蚀的作用越大。为了定量分析砾石覆盖度对土壤侵蚀量的影响,将同一冲刷流量下、不同砾石覆盖度产生的土壤侵蚀量与无砾石覆盖时产生的土壤侵蚀量的比值即相对侵蚀量作为定量分析的基础。图 8(b)点绘了不同冲刷流量、不同砾石覆盖度(C)下的相对侵蚀量,可知随砾石覆盖度的增加,相对土壤侵蚀量(S)减小。相对土壤侵蚀量与砾石覆盖度之间存在负指数相关关系: $S = a \cdot e^{-bC}$ 。式中: a 、 b 为反映砾石覆盖度对相对侵蚀量影响程度的参数。通过对本试验数据分析得出 a 值为 0.93, b 值取 0.01,相关系数 $R^2 = 0.876$,这与 Wang 等^[2]、符素华等^[15]、王小燕^[24]、梁洪儒等^[25]、Cerdá^[26]和 Box^[27]的研究结果均比较接近。

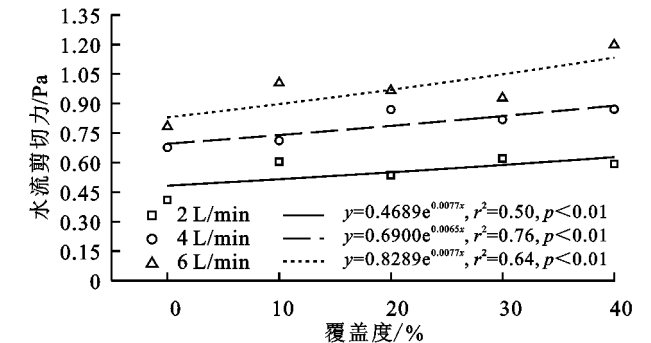


图 7 水流剪切力与砾石覆盖度的关系

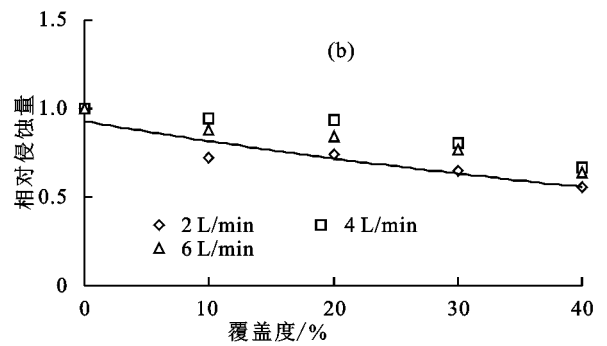
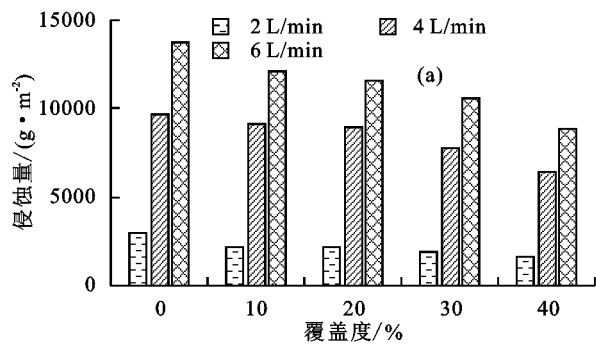


图 8 侵蚀量与砾石覆盖度的关系

3 结论

(1)随着砾石覆盖度的增大,流速和弗劳德数呈减小趋势,拟合发现其与砾石覆盖度呈负指数关系,且相关性较好。较裸露坡面,在 2,4,6 L/min 冲刷流量下,砾石覆盖时坡面平均流速减幅分别为 24%~34%,5%~29%,16%~35%,40%砾石覆盖下 Fr 分别减少 0.86,0.60,1.09。

(2)随着砾石覆盖度的增大,径流深、水流剪切力、阻力系数和曼宁糙率系数均呈增大趋势,雷诺数变化不明显,拟合发现其与砾石覆盖度呈指数关系,且相关性较好。在 2,4,6 L/min 冲刷流量下,有砾石覆盖时,径流深分别为裸露条件下的 1.3~1.5,1.1~1.3,1.2~1.5 倍;水流剪切力的增幅范围分别为 0.13~0.21,0.04~0.19,0.15~0.41 Pa;40%砾石覆盖下的阻力系数和曼宁糙率系数分别是裸露条件下的 3.0,2.1,3.6 倍和 1.9,1.5,2.0 倍。

(3)冲刷流量的大小并不影响砾石覆盖度和坡面总侵蚀量之间的关系,坡面总侵蚀量随着砾石覆盖度的增加呈负指数减少,且砾石覆盖在冲刷流量较小的情况下,对坡面侵蚀量的减少效果越明显。冲刷流量为 2,4,6 L/min 下,砾石覆盖度为 40%时坡面总侵蚀量较裸露时的分别减少 44.3%,33.3%和 36.0%。

在坡面流水动力学特性研究中,由于坡面水流是一种三维、非恒定均匀的沿程变量,易受到多种因素影响,加上监测技术的限制,前人在参数计算时一般采用明渠均匀流,将坡面流简化为一维恒定非均匀的沿程变量流来计算,实际上坡面流和一般明渠流之间存在一定的差异。所以,现阶段的研究成果是否能够全面揭示坡面流水动力学特性,还有待进一步的深入分析和验证。

参考文献:

[1] 史立人.长江流域水土流失特征,防治对策及实施成效[J].人民长江,1998,29(1):41-43.
[2] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J].Geomorphology,2012,151/152:234-242.

[3] Zavala L M, Jordan A, Bellinfante N, et al. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment[J].Soil Science and Plant Nutrition,2010,56(1):95-104.
[4] Rieke-Zapp D, Poesen J, Nearing M A. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion[J].Earth Surface Processes and Landforms,2010,32(7):1063-1076.
[5] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, et al. Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semi-arid loess region of northwestern China[J]. Journal of Soils and Sediments,2010,10(6):1200-1208.
[6] Jomaa S, Barry D A, Heng B C P, et al. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling[J]. Water Resources Research,2012,48(5):213-223.
[7] Nasri B, Fouché O, Torri D. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils[J].Catena,2015,131:99-108.
[8] 王小燕,李朝霞,蔡崇法.砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J].水科学进展,2012,23(1):38-45.
[9] Tsakiris A G, Papanicolaou A N T, Hajimirzaie S M, et al. Influence of collective boulder array on the surrounding time-averaged and turbulent flow fields[J].Journal of Mountain Science,2014,11(6):1420-1428.
[10] 李燕,魏朝富,刘吉振,等.丘陵紫色土砾石的性质及其空间分布[J].西南农业学报,2008,21(5):1320-1325.
[11] 李燕,刘吉振,魏朝富,等.砾石对丘陵紫色砾质土持水性的影响[J].水土保持通报,2009,29(5):35-39.
[12] 戴翠婷,刘富军,王天巍,等.三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J].水土保持学报,2017,31(1):103-108.
[13] 李燕,刘吉振,魏朝富,等.砾石对土壤水分入渗(扩散)的影响研究[J].土壤学报,2011,48(2):435-439.
[14] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion[J].Catena,2013,107:145-153.
[15] 符素华,路炳军,叶芝茜.地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):15-18.

[5] 刘文光.夹砂层土壤膜孔灌水分入渗规律数值模拟研究[D].兰州:甘肃农业大学,2018.

[6] 刘思琦.微咸水膜孔灌田间试验土壤水盐运移规律研究[D].河北 邯郸:河北工程大学,2017.

[7] 李文.变浓度条件下点源入渗水氮运移规律研究[D].北京:中国农业科学院,2017.

[8] 范严伟,赵彤,赵文举,等.膜孔灌灌溉入渗量的简化计算方法及验证[J].农业工程学报,2016,32(13):67-74.

[9] Li Y B, Fan Y W, Liu Y, et al. In fluencing factors and simplified model of film hole irrigation[J].Water,2017,9(7):5-23.

[10] Bouwer H, Ludke J, Rrice R C. Sealing pond bottoms with muddy water[J].Ecological Engineering,2001,18(2):5-8.

[11] 费良军,吴军虎,王文焰,等.充分供水条件下单点膜孔入渗湿润特性研究[J].水土保持学报,2001,15(5):137-140.

[12] 姜瑞瑞,费良军,金世杰,等.浑水含沙率和泥沙粒度组

成对膜孔灌入渗特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):157-161.

[13] 费良军,王锦辉.泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):105-112.

[14] 费良军,王锦辉,金世杰.不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性研究[J].农业机械学报,2016,47(2):172-178.

[15] 周文,曹琳,王锦辉.浑水膜孔灌单向交汇入渗特性试验研究[J].排灌机械工程学报,2017,35(7):627-633.

[16] 中华人民共和国国家标准.GB/T 32737-2016 土壤硝态氮的测定紫外分光光度法[S].北京:中国标准出版社,2016.

[17] 刘利华,费良军,陈琳,等.膜孔直径对浑水膜孔灌土壤水氮运移特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):126-131.

[18] 陈琳,费良军,刘利华,等.土壤初始含水率对浑水膜孔灌肥液自由入渗水氮运移特性影响[J].水土保持学报,2018,32(2):58-66.

(上接第 155 页)

[16] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment size and cover on overland flow hydraulics, local turbulence and sediment yield on an erodible soil surface[J].Earth Surface Processes and Landforms,2010,19(2):115-135.

[17] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.

[18] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟与细沟间水流水动力学特性研究[J].泥沙研究,2013(6):45-52.

[19] 敬向锋,吕宏兴,张宽地,等.不同糙率坡面水力学特征的试验研究[J].水土保持通报,2007,27(2):33-38.

[20] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow[J].Water Resources Research,1993,29(5):1415-1424.

[21] Smets T, López-Vicente M, Poesen J. Impact of sub-surface rock fragments on runoff and interrill soil loss from cultivated soils[J].Earth Surface Processes and

Landforms,2011,36(14):1929-1937.

[22] 王葆,马俊明,程金花,等.华北土石山区砾石覆盖对土壤溅蚀的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(5):93-98.

[23] Fang N F, Shi Z H, Chen F X, et al. Discharge and suspended sediment patterns in a small mountainous watershed with widely distributed rock fragments[J].Journal of Hydrology,2015,528:238-248.

[24] 王小燕.紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D].武汉:华中农业大学,2012.

[25] 梁洪儒,余新晓,樊登星,等.砾石覆盖对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):57-61.

[26] Cerdà A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J].European Journal of Soil Science,2001,52(1):59-68.

[27] Box J E. The effects of surface slaty fragments on soil erosion by water[J].Soil Science Society of America Journal,1981,45(1):111-116.