

坡面细沟侵蚀过程中的水动力特性变化

林俊秋¹, 杨大明², 方怒放^{1,2}, 史志华^{2,3}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;
2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 3.华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要:为定量揭示坡面细沟水流侵蚀过程中的水动力特征,开展不同流量(2 L/min, 4 L/min, 8 L/min)、不同坡度(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)下的放水冲刷试验,对坡面细沟发育过程中的水动力学参数变化规律进行了研究。结果表明:在试验的流量和坡度范围内,平均流速随冲刷历时的延长和细沟形态的发展呈迅速递减—略有起伏—缓慢减小并最终趋于稳定的变化趋势,径流深随冲刷历时的增大而增大;坡面细沟水流的雷诺数变化范围为 237~1 090,在小流量时,雷诺数随冲刷历时增大而略有增大,在大流量时,雷诺数随冲刷历时增大而减小;在整个冲刷过程中,弗劳德数始终大于 1,表明该试验条件下的坡面流属于急流范畴;坡面细沟水流的阻力系数随冲刷持续而增大;弗劳德数随阻力系数的增大而减小,且具有良好的负向幂函数关系。该研究结果初步表明了黄土坡面的细沟侵蚀特征和水动力学特性,为黄土侵蚀动力学机制的进一步研究提供理论基础。

关键词:黄土; 细沟; 冲刷; 土壤侵蚀; 水动力学特性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)01-0001-07

Variation of Hydrodynamic Characteristics in the Process of Rill Erosion on the Slope

LIN Junqiu¹, YANG Daming², FANG Nufang^{1,2}, SHI Zhihua^{2,3}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: This study aims to quantitatively study the hydrodynamic characteristics of rill flow. Three different flow discharges (2 L/min, 4 L/min, 8 L/min) and five slope gradients (5°, 10°, 15°, 20°, 25°) of controlled slope experiments were conducted. The results show that the average velocity decreases with the increase of scouring duration and the development of rill morphology; the runoff depth increases with the increase of scouring duration. The Reynolds number varies from 237 to 1 090. At the large flow discharge, the Reynolds number decreases with the increase of scouring duration; by contrast, the small flow capacity increases. During the whole scouring process, the Froude number keeps greater than 1, indicating that the overland flow belongs to the category of jet stream. Darcy resistance coefficient of the slope rill flow increases with the continuously scouring, while the Froude number decreases with the increase of the Darcy-Weisbach resistance coefficient. A negative power function relationship is found between the resistance coefficient and the Froude number.

Keywords: Lou soil; rill; scour; soil erosion; hydrodynamic characteristics

土壤侵蚀是一个全球性问题^[1],是指土壤及其成土母质在水力、风力、重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程^[2]。细沟侵蚀是黄土坡面上

重要的土壤侵蚀形式之一,侵蚀量占坡面土壤流失的 62.2%~84.8%^[3],其动态演化过程复杂,主要驱动力是坡面径流^[4-5]。径流的水动力学特性与土壤的剥

收稿日期:2021-01-20

修回日期:2021-02-06

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41930755);西部青年学者 A 类(XAB2018A03)

第一作者:林俊秋(1996—),女,四川宜宾人,硕士生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail: junqiul0@nwafu.edu.cn

通信作者:方怒放(1985—),男,安徽铜陵人,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: fnf@ms.iswc.ac.cn

蚀、搬运和沉积过程相关^[6],而对侵蚀过程中的地表径流进行水动力学特性分析是定量描述土壤侵蚀的必要条件^[7]。因此,研究细沟侵蚀过程中水力学和动力学特性随水流的动态变化过程,有助于从水力学和动力学角度了解细沟侵蚀发育和形成的内在机理,并为建立基于过程的土壤侵蚀模型提供依据。

目前,国内外对坡面细沟水流水动力学特性的研究主要围绕水动力学参数与流量、雨强和坡度的关系以及参数间的关系展开。如杨大明等^[8]通过放水冲刷试验,对比分析了不同流量和坡度下的均匀细沟和侵蚀细沟的水动力学特性;王龙生等^[9]的室内降雨试验,表明了细沟和细沟间的水流水动力学参数与雨强和坡度的关系;张科利^[10]通过试验得到陡坡和缓坡条件下阻力系数和雷诺数的关系;Wang 等^[11]通过降雨试验,分析了三维地形条件下的水动力学特性。这些研究在水动力学特性方面取得了一定的成果,但对细沟侵蚀发育和形成过程中水动力学特性变化的探讨还有待深入。此外,虽然有部分研究注意到水动力学参数在细沟侵蚀过程中的变化,但由于试验条件各异,致使研究结果存在差异。如在流速方面,李占斌等^[12]通过陡坡放水冲刷试验,得到流速呈先减后增又减的变化趋势;丁文峰等^[13]通过试验,得到流速在冲刷过程中呈先减后增的趋势。在弗劳德数和阻力系数方面,张海东^[14]的试验表明,在冲刷过程中,弗劳德数减小,阻力系数增大;而孙立全^[15]的试验则表明,随冲刷历时的增加,弗劳德数增大,阻力系数减小。在水动力参数关系方面,丁文峰等^[16]认为弗劳德数与阻力系数呈指数函数关系,而施明新、王龙生等^[9,17]认为二者呈幂函数关系。综上,坡面细沟侵蚀发育和形成过程中水动力学特性的变化有待进一步研究。

因此,本文通过组合不同流量和坡度,进行室内放水冲刷试验,探讨细沟侵蚀发育过程中,坡面细沟水流水动力学特性的变化规律,及其参数间的关系。定量分析细沟侵蚀发育和形成过程的内在机理,为坡面流理论的发展和基于过程的细沟侵蚀预测模型的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验方法

试验于中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行。试验用土为陕西杨陵本地塿土,取自弃耕多年的农地。试验装置由集水桶、水泵、稳流槽和冲刷槽组成。冲刷槽长、宽、高分别为 2.6 m, 1 m, 0.4 m, 水流通道的长度为 1.6 m, 以往的研究表明,该水流通道的长度可以满足试验要求。例如, Dunker-

ley^[18]使用 0.6×1.2 m 长的胶粘砂板测量染料示踪法在流速测量方面的可行性。Ali 等^[19]使用长 3 m、宽 0.5 m 的水槽在移动床上进行水槽试验,并通过沿水槽(1.24 m)的长度来获取表层流速。Abrantes 等^[20]使用三重示踪剂(即染料和盐)进行水槽试验,其水流通道的长度仅为 0.9 m。

根据试验需要,用钢板将冲刷槽分隔为 10 个 0.1 m 宽的小冲刷槽,一个冲刷槽对应一个稳流槽。在试验之前,将试验用土自然风干,同时为去除土中杂草和碎石对试验结果的影响,使其过 10 mm 细筛。小冲刷槽底部铺设透水细纱布,在细纱布上铺 15 cm 厚的细沙,使冲刷槽的透水性接近天然坡面,最后在细沙之上依次装填 4 层 5 cm 厚的试验土壤。在装土的过程中,边装土边压实,并将土壤容重控制在 1.2 g/cm^3 左右,以符合取土区的土壤条件,并且每一层之间打毛粗化处理,以减少分层带来的影响。为有效减少边界效应对试验过程的影响,在土层表面人为设置一个浅“U”形沟,避免试验初期边界对水流的导向作用。另外,为保证水流稳定,在稳流槽出水口前铺设长 20 cm 的胶纸。

试验设置 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ 的 5 个坡度级和 2 L/min, 4 L/min, 8 L/min 的 3 个流量级。待径流平稳后,采用染色剂示踪法测坡面水流的表层流速。在细沟下坡距出水口 1.2 m 处,滴高锰酸钾溶液,使用秒表记录其运动到距出水口 0.2 m 处所用的时间,试验前 2.5 min 测量两次表层流速,其后每隔 2.5 min 测量一次。另外,每隔 2.5 min 使用自制测针排测量一次细沟形态参数(包括宽度和深度)。测针排由 9 个直径为 3 mm 的钢针组成,安装在一块木板上,木板上的尺子显示了每根针的高度,每次测量时通过钢针针尖与土壤表面接触的高度,获取细沟形态变化。其测量精度为 0.1 cm,具体描述在 Yang 等^[21]的研究中有介绍。另外,水流深度通过使用水位测针来测量(精度为 0.01 cm)。在 Ali 等^[19]的研究中,于移动床的下端放置一块木块,在木块上测量了水流深度, Ali 等^[19]认为用这种方法计算的流速可以代表水槽内的平均流速。此外, Zhang 等^[22]还认为,表面流速测量与断面以下的水深测量值可用于计算水槽内的平均流速。水流深度的每次测量重复 6 次,当出现错误时,测量值被丢弃并重复。6 个水流深度的平均值被认为是平均水流深度。试验过程中水流表面不均匀,这是由于存在波动和波纹造成的。在两个波动或波纹之间尽可能快地测量水流深度,并通过增加测量次数来计算平均值,以消除波动或波纹对测量的影响^[22-23]。本试验组合不同的流量及坡度,进行重复试验 3 次,共计 45 次放水冲刷试验。

1.2 水动力学特征的表达

根据试验需要,将坡面流简化处理^[24]。坡面细沟流因水流较为集中与河流相似,而与坡面漫流有所区别,又因目前没有较为成熟的坡面流理论,故而在现阶段研究坡面细沟水流,一般借用河流水动力学的相关理论,用其有关的公式和方法处理坡面细沟水流的水动力学参数,定量研究坡面水流的水动力学特性^[10,12],主要涉及径流平均流速、径流深、雷诺数、弗劳德数以及阻力系数。

流速和水深不仅是坡面细沟流水动力学特性的重要指标因子,而且其他水动力学参数的计算也离不开二者^[25]。水流平均流速 V 不能直接测得,而是通过对表层流速 V_s 的修正后才能得到,表达式为:

$$V = aV_s \quad (1)$$

式中: a 为平均流速的修正系数,取 0.75^[26]。

因本试验中下垫面条件复杂,径流深 h 较浅,变化较大,实测难度大,故而通过流量法确定,即

$$h = \frac{q}{V} \quad (2)$$

式中: q 为单宽流量(m^2/s)。

雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 是用来表征水流型态且没有量纲的水动力学参数。雷诺数是水流惯性离心力与黏性力的比值,用来确定水流为层流还是紊流,计算公式为:

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (3)$$

式中: R 为水力半径(m), $R = bh/(b+2h)$, b 为水流过水断面的宽度(m); ν 为水流粘滞力系数(m^2/s),是关于水温 t 的函数, $\nu = 0.01775 \times 10^{-4}/(1 + 0.0337t + 0.000221t^2)$ 。

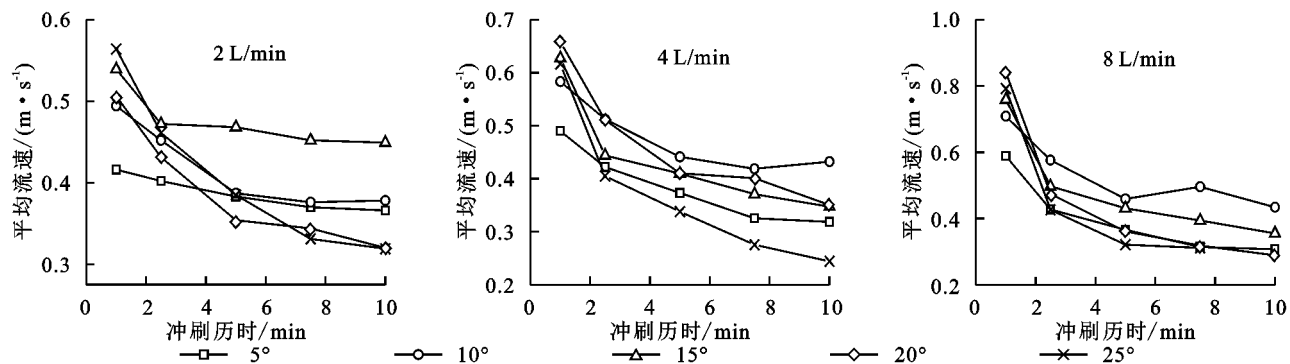


图 1 不同流量和坡度下平均流速随冲刷历时的变化过程

2.2 水流型态

根据传统明渠流的相关原理,当雷诺数低于 500 时,水流为层流,高于 500 时,水流为紊流;弗劳德数以 1 为界,当其小于 1 时,水流为缓流,反之则为急流^[29]。表 1 为坡面细沟流在冲刷过程中的雷诺数与

弗劳德数是水流惯性离心力与重力的比值,反映的是径流深和流速的状态,用来判别水流的缓急程度,表达式为

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

式中: g 为重力加速度(m/s^2),取 $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

坡面流阻力有多种表示方法,常用的有 Darcy-weisbach 阻力系数和 Manning 糙率系数,由于 Darcy-weisbach 阻力系数没有量纲表达式,同时适用于层流和紊流^[27-28],且又是径流型态、断面特性、沟道粗糙度等因素的综合体现^[17],故而选用 Darcy-weisbach 阻力系数表征坡面流阻力,表达式为

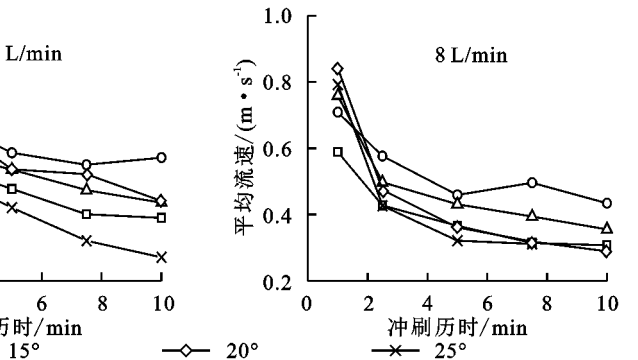
$$\lambda = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (5)$$

式中: λ 为 Darcy-weisbach 阻力系数; J 为细沟水力坡度,近似取 $\sin\theta$; θ 为冲刷槽坡度。

2 结果与分析

2.1 水流流速与径流深

图 1 为坡面径流平均流速随冲刷历时的变化过程。在整个坡面径流冲刷过程中,径流冲刷初期的平均流速最大,而后平均流速随冲刷历时的增大迅速减小;冲刷持续至 5 min 以后,除部分略有起伏外,平均流速整体上呈现缓慢减小并逐渐趋于稳定的趋势。图 2 为不同流量和坡度条件下径流深随冲刷历时的变化过程。可以看出,在冲刷历时增大的过程中,径流深总体上呈现增大趋势。在坡度为 10° 的条件下,坡面流冲刷至 7.5 min 时,流量为 8 L/min 的径流深减小,随后又有所增大;而冲刷至 10 min 时,流量为 2 L/min 和 4 L/min 的径流深均减小。



弗劳德数。由表 1 可知,径流雷诺数变化于 237 ~ 1 090,整体上随径流量的增大而增大。当流量为 2 L/min 时,雷诺数的变化范围为 237 ~ 266,表明水流流态属于层流,并且雷诺数随冲刷历时的增加而略有增加。当流量为 4 L/min 和 8 L/min 时,雷诺数的

变化范围分别为 470~558,906~1 090,径流流态分别为过渡流和紊流,同时除个别情况外,雷诺数均随冲刷历时的增加而减小。在整个坡面细沟发育过程

中,径流弗劳德数始终大于 1,表明在此条件下,坡面细沟流均处于急流状态,并且在试验条件下,弗劳德数随着冲刷历时的增大而持续减小。

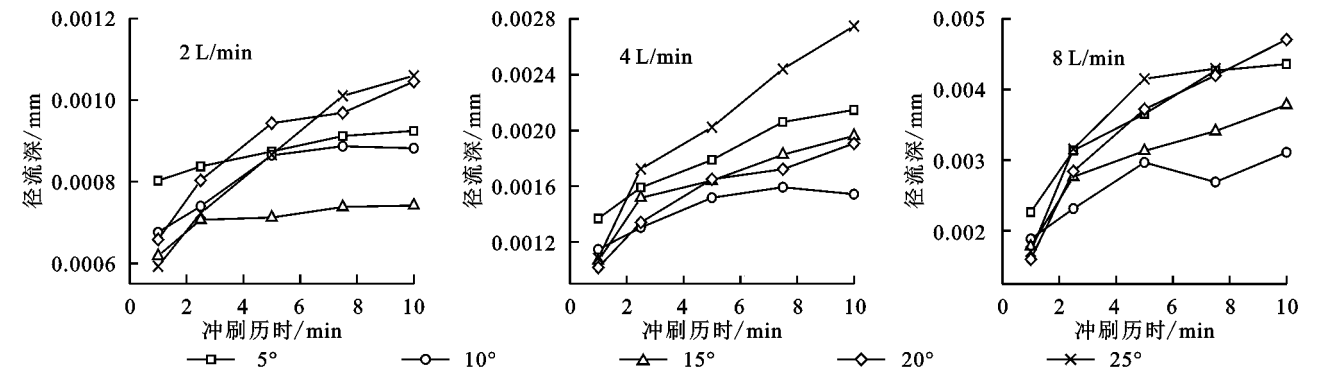


图 2 不同流量和坡度下的径流深随冲刷时间的变化过程

表 1 坡面细沟流雷诺数与弗劳德数

坡度/(°)	流量/ (L·min ⁻¹)	时间/min								
		雷诺数				弗劳德数				
		2.5	5	7.5	10	1	2.5	5	7.5	10
5	2	237	240	240	241	4.7	4.5	4.2	3.9	3.9
	4	552	549	546	545	4.3	3.4	2.8	2.3	2.2
	8	1090	1080	1067	1063	4.0	2.4	1.9	1.5	1.5
10	2	266	265	266	266	6.1	5.3	4.2	4.0	4.1
	4	558	557	555	556	5.5	4.5	3.6	3.4	3.5
	8	1079	1067	1074	1063	5.2	3.8	2.7	3.1	2.5
15	2	256	257	257	257	6.9	5.7	5.6	5.3	5.3
	4	510	510	508	506	6.2	3.7	3.3	2.8	2.5
	8	1016	1027	1026	1023	5.8	3.1	2.5	2.2	1.9
20	2	250	251	254	254	6.3	5.0	3.7	3.5	3.2
	4	517	517	515	512	6.6	4.6	3.3	3.2	2.6
	8	1007	993	988	969	6.8	2.9	1.9	1.6	1.4
25	2	238	239	239	239	7.4	5.5	4.2	3.3	3.2
	4	475	476	472	470	6.0	3.2	2.5	1.8	1.5
	8	932	920	906	—	6.2	2.4	1.6	1.5	—

注:“—”表示试验过程中未测量。

2.3 坡面流阻力

坡面细沟水流阻力系数随冲刷历时的变化过程见图 3。在本试验的流量和坡度条件下,阻力系数变化于 0.037~2.974。随着冲刷历时的增大,阻力系数逐渐增大,并且无明显的转折点。较小坡度(5°)与较大坡度(25°)的阻力系数增大迅速,而坡度为 10°,15°和 20°条件下的阻力系数缓慢增大。值得一提的是,坡度为 10°时,在试验流量范围内,阻力系数均呈先增后减的变化过程。将阻力系数与弗劳德数的关系绘制为图 4。

由图 4 可知,随着阻力系数的增大,弗劳德数逐渐减小,二者的拟合关系见表 2。结果表明,在试验的流量与坡度范围内,阻力系数与弗劳德数呈现良好的负向幂函数关系($R^2 > 0.95$)。

3 讨论

3.1 水流流速及径流深与细沟形态发育

坡面径流侵蚀作为水蚀类型之一,是一个能量增强的过程^[30]。在此过程中,细沟的宽度和深度不断发育,改变细沟形态,影响细沟内水流流速的变化,同时,水流流速迫使细沟形态发生变化,二者之间相互影响^[31]。细沟流速是量化坡面细沟侵蚀的重要指标^[32],是表征细沟侵蚀机理的最佳水力参数^[3],同时坡面细沟侵蚀对细沟流速十分敏感^[33],在整个坡面细沟侵蚀过程中,细沟流速的大小对土壤的分离和搬运起着重要作用。

图 5 表示不同流量和坡度条件下,坡面细沟宽深比随冲刷历时的变化过程,与流速的变化趋势具有一致性。在径流冲刷初期,细沟宽深比较大,细沟横断

面形状近似“宽浅式”^[34],但经过人为修整的浅 U 形沟道较为平整,坡面径流所受到的阻力较小;径流含沙量较小,运输泥沙所消耗的能量少,重力势能更多的转化为水流动能,而坡面上的水流动能和重力势能的变化对坡面形成细沟起着重要作用,因此这一阶段流速较大。随着坡面径流的集中以及对沟道侵蚀的加剧,坡面会逐渐形成跌坎,增加水流阻力;跌坎出现使得坡面微地形发生剧烈变化,径流运动过程中势能被消耗,导致向动能转化的部分减少,流速迅速减小。因跌坎发育,坡面形成断续的小型沟头溯源侵蚀,伴随侵蚀加剧,沟头坍塌,原来的跌坎相接,发育成不连

续细沟。坡面径流逐渐汇集,形成连续细沟,水流集中且流量增大迅速,冲刷沟道而导致沟底下切、沟壁扩张、沟头坍塌甚至形成壅水现象。在此阶段,细沟宽度、深度均增加,宽深比下降迅速,细沟横截面形态由原来的“宽浅式”向“窄深式”发展,水流强烈下切,除部分流速、径流深变化略有起伏外,整体上流速减小,径流深增大。随着冲刷的持续,沟道逐渐被加深,径流深增大,宽深比基本趋于稳定,加之此时径流含沙量达到稳定状态,因此流速逐渐减小并趋于稳定。整个细沟侵蚀发育过程与郑粉莉等^[35]研究得出细沟侵蚀过程的 5 个阶段具有相似性。

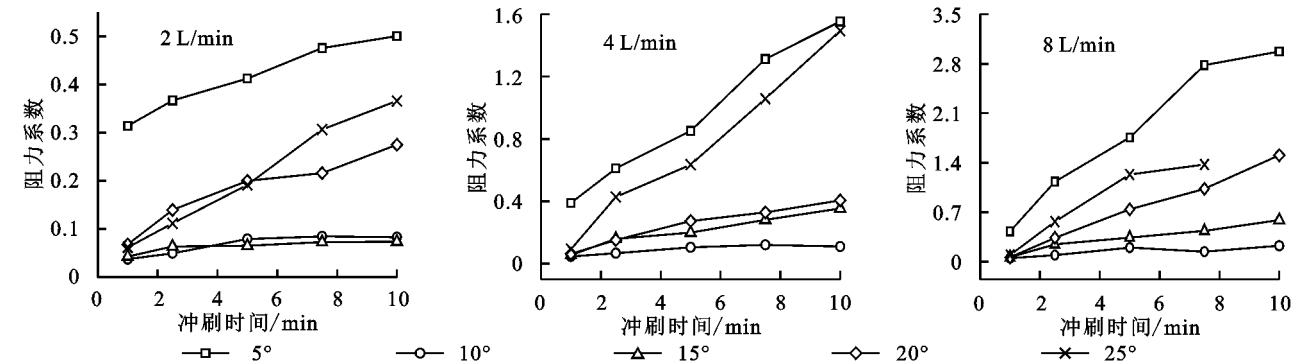


图 3 坡面细沟流阻力系数随冲刷时间的变化

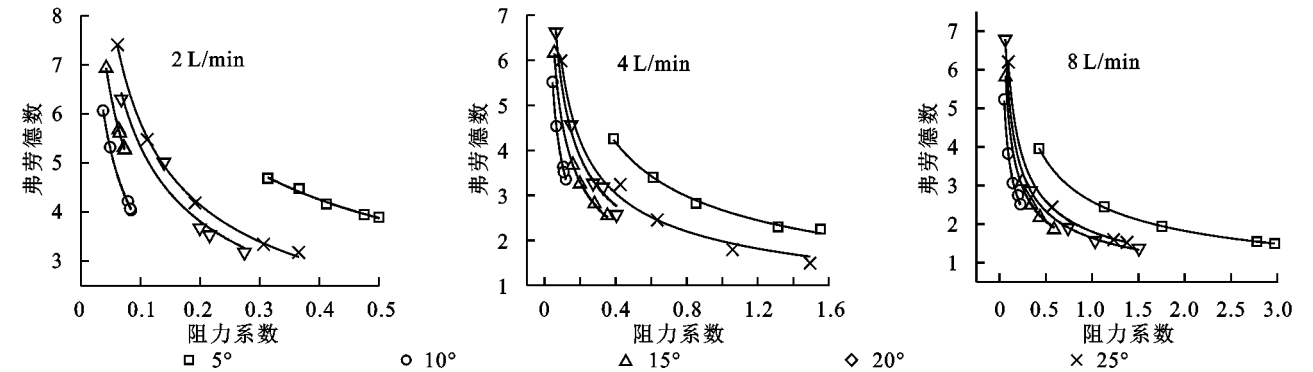


图 4 阻力系数与弗劳德数的关系

表 2 阻力系数与弗劳德数的拟合关系

坡度/(°)	流量/(L·min ⁻¹)					
	2		4		8	
	拟合函数	R ²	拟合函数	R ²	拟合函数	R ²
5	$y=2.9072x^{-0.416}$	0.987	$y=2.6795x^{-0.477}$	0.992	$y=6.5746x^{-1.985}$	0.999
10	$y=1.1771x^{-0.500}$	0.999	$y=1.1434x^{-0.509}$	0.999	$y=1.2398x^{-0.476}$	0.995
15	$y=1.4233x^{-0.502}$	0.999	$y=1.5356x^{-0.476}$	0.999	$y=1.4339x^{-0.516}$	0.996
20	$y=1.6612x^{-0.510}$	0.959	$y=1.7467x^{-0.491}$	0.986	$y=1.6408x^{-0.508}$	0.999
25	$y=1.913x^{-0.482}$	0.998	$y=1.9071x^{-0.503}$	0.987	$y=1.7973x^{-0.525}$	0.999

在本试验条件下,细沟流速随冲刷历时的持续和坡面细沟形态的不断发育,呈现迅速递减—略有起伏—缓慢减小并趋于稳定的变化过程。这与李占斌、丁文峰、张乐涛、张翔^[12-13,36-37]等的研究结论基本一致,在这一系列研究中,试验土壤有黄土、工程堆积体,也有与本试验相同的壤土,细沟流速随冲刷历时的持续均呈现逐渐

减小,最终趋于稳定的状态。这说明即使试验条件不同,细沟流速的整体变化趋势却是一致的,均是呈现逐渐减小,最终趋于稳定的发展趋势。

3.2 水流型态和坡面流阻力的变化

水流型态是分析研究坡面细沟水流水动力学特性的重要因子,也是分析坡面径流属性的前提条件,

但由于其属于薄层水流范畴,同时又受多个因子影响,故而坡面流型态的变化非常复杂^[9,32];又因众多

研究者研究前提条件各异,缺乏一致性,因此到目前为止,坡面流究竟属于何种型态仍无定论。

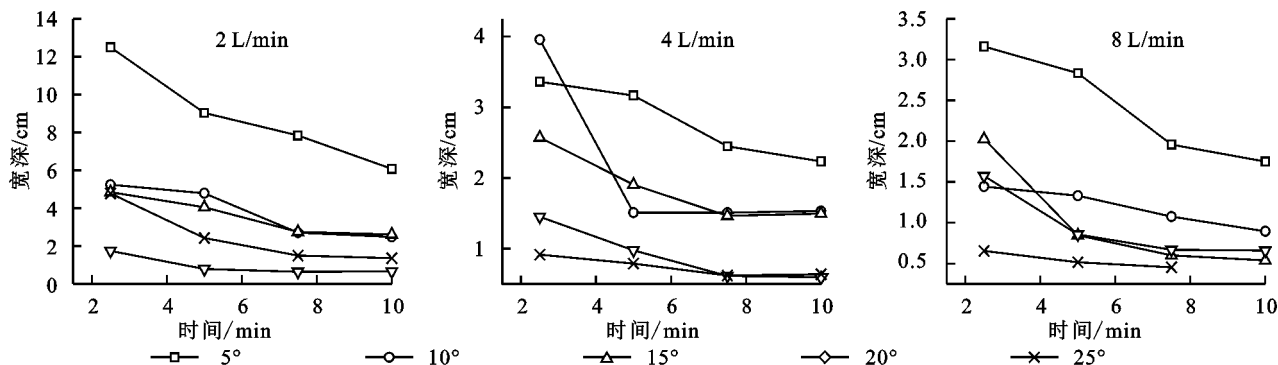


图5 坡面细沟宽深比随冲刷时间的变化

雷诺数随流量的变化趋势与杨大明、李占斌等^[8,12]的试验结果一致,均随流量的增大而增大,而随冲刷历时变化的情况较为复杂。雷诺数的主要影响因素为流速、水力半径。在坡面细沟形成初期,径流在坡面较为分散,部分下渗,坡面水深浅;随着冲刷的持续,形成细沟,径流深增加且稳定^[16],故而在 2 L/min 的小流量条件下,坡面形成较浅的薄层水流,且雷诺数随冲刷历时的增大而增大。在大流量(4 L/min 和 8 L/min)条件下,雷诺数随冲刷历时的增大而减小,原因是在冲刷过程中,水流侵蚀强度大,泥沙增多,出现大量跌坎,特别是 8 L/min 流量条件下,出现了沟壁崩塌;且整体上流速呈减小趋势,水深呈增大趋势,流速的减小速率远大于水力半径的增大速率,导致雷诺数减小^[38]。小流量条件下的雷诺数随冲刷历时的变化趋势与大多数研究者的结论一致,而大流量条件下雷诺数变化趋势则与之相悖,如李占斌、丁文峰、张翔、张乐涛等^[12-13,36-37],这可能是由试验所用土壤类型、侵蚀强度以及水流泥沙含量等差异造成。

弗劳德数在冲刷过程中逐渐减小,推测是相较于径流深增大对弗劳德数的影响,水流流速减小的影响更大^[38]。并且推测若冲刷时间足够长,则径流形态存在由急流向缓流渐变的可能。径流弗劳德数表征的流态与大多数研究者^[12-13,15,36-37]的试验结论一致,与孙立全^[15]得出的结果相反,主要是由于在孙立全的试验过程中,流速的增幅超过水深的增幅,故而导致弗劳德数在试验过程中增大。

径流阻力贯穿坡面细沟的发育和形成过程,其影响力在此过程中逐渐上升,不仅直接影响坡面径流的流速,还影响坡面细沟的发育和形成^[9]。本试验中,阻力系数随冲刷过程的变化主要与细沟形态和径流深的变化密切相关。细沟形成前期,坡面水流分散,同时冲刷侵蚀较轻,下垫面较为平整,所以此时坡面沟道所受的阻力小;但后期伴随着细沟的不断发育,冲刷加剧,沟壁时有坍塌等重力作用发生影响沟道,以致原本就存在微

地形的沟底起伏愈加剧烈,同时径流深不断增加,导致阻力系数增大。小坡度时,水流受浅“U”型沟槽的引导,水流集中,水流深度大且增加迅速,而大坡度时,重力作用影响显著,水流集中,冲刷剧烈,水流深度大且增加迅速,同时大坡度与小坡度时流速均减小迅速,故而较大坡度与较小坡度条件下的阻力系数均增大迅速。至于坡度为 10°条件下阻力系数变化趋势的原因,则与该条件下径流深变化的原因相一致。

影响水流阻力的因素很多,主要来自细沟形态、径流含沙量以及泥沙颗粒本身^[32],而这些因素的变化会影响细沟水流在坡面的流动过程,进而影响水流型态,因此,在研究坡面细沟水流的时候,有必要将阻力规律与水流型态结合起来分析^[9]。在细沟侵蚀发育和形成的过程中,随着冲刷的加剧,下垫面条件越复杂,坡面径流所受的阻力越大,细沟水流越为平缓,故随着阻力系数的增大,弗劳德数逐渐减小。

4 结论

(1) 在试验的流量和坡度范围内,随冲刷的持续和坡面细沟形态的不断发育,流速呈现迅速递减一略有起伏—缓慢减小并趋于稳定的变化过程,整体上趋于减小;而径流深则随冲刷历时的增大而增大。

(2) 坡面细沟流的雷诺数变化范围为 237 ~ 1 090,在 2 L/min, 4 L/min, 8 L/min 流量条件下,水流状态分别为层流、过渡流、紊流;且雷诺数在小流量(2 L/min)时,随冲刷历时的增大而增大,在大流量(8 L/min, 4 L/min)时,随冲刷历时的增大而减小。

(3) 坡面细沟流的阻力系数伴随冲刷的持续,其值呈增长趋势;阻力系数与弗劳德数呈现良好的负向幂函数关系。

参考文献:

- [1] Omidwar E, Hajizadeh Z, Ghasemieh H. Sediment yield, runoff and hydraulic characteristics in straw and rock fragment covers [J]. Soil & Tillage Research, 2019, 194: 1-12.

- [2] 吴发启,张洪江.土壤侵蚀学[M].北京:科学出版社,2012.
- [3] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155:429-436.
- [4] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J].土壤学报,1989,26(2):109-116.
- [5] Zhang G H, Liu G B, Tang K M, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the loess plateau of china[J]. Tasabe, 2008,51(3):883-890.
- [6] Yang D M, Gao P L, Zhao Y D, et al. Modeling sediment concentration of rill flow [J]. Journal of Hydrology, 2018,561:286-294.
- [7] Wirtz S, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes [J]. Catena, 2012,91:21-34.
- [8] 杨大明,高佩玲,张晴雯,等.黄土坡面细沟水动力学特性试验研究[J].泥沙研究,2018,43(4):49-56.
- [9] 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.
- [10] 张科利.黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究[J].泥沙研究,1999(1):57-62.
- [11] Wang G Y, Sun G R, Li J K, et al. The experimental study of hydrodynamic characteristics of the overland flow on a slope with three-dimensional Geomat [J]. Journal of Hydrodynamics, 2018,30(1):153-159.
- [12] 李占斌,秦百顺,亢伟,等.陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J].农业工程学报,2008,24(6):64-68.
- [13] 丁文峰,李占斌,丁登山.坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J].水土保持学报,2002,16(3):72-75.
- [14] 张海东.砾石含量对崩积体坡面细沟侵蚀的影响[D].福州:福建农林大学,2019.
- [15] 孙立全.梁峁坡面土壤侵蚀演化过程及水动力学特性模拟试验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [16] 丁文峰,李亚龙,王一峰,等.人工模拟降雨条件下紫色土坡面流水水动力学参数特征[J].水土保持学报,2010,24(2):66-69.
- [17] 施明新,李陶陶,吴秉校,等.地表粗糙度对坡面流水水动力学参数的影响[J].泥沙研究,2015(4):59-65.
- [18] Dunkerley D. Estimating the mean speed of laminar overland flow using dye injection-uncertainty on rough surfaces[J]. Earth Surface Process and Landforms, 2001, 26:363-374.
- [19] 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, 452/453:150-160.
- [20] Abrantes J R, Moruzzi R B, Silveira A, et al. Comparison of thermal, salt and dye tracing to estimate shallow flow velocities: Novel triple-tracer approach [J]. Journal of Hydrology, 2018,557:362-377.
- [21] Yang D M, Fang N F, Shi Z H. Correction factor for rill flow velocity measured by the dye tracer method under varying rill morphologies and hydraulic characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2020,591:125560.
- [22] Zhang G H, Luo R T, Ying C, et al. Correction factor to dyemeasured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1/2):205-213.
- [23] Pan C Z, Shangguan Z P, Ma L. Assessing the dye-tracer correction factor for documenting the mean velocity of sheet flow over smooth and grassed surfaces [J]. Hydrological Processes, 2015,29(26):5369-5382.
- [24] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面发育平稳的细沟流水水动力学特性[J].地理科学进展,2014,33(8):1117-1124.
- [25] 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.
- [26] 雷廷武,张晴雯,闫丽娟.细沟侵蚀物理模型[M].北京:科学出版社,2009.
- [27] 汪孟尧,姚原,宗芯伊.不同地表糙度下坡面流水水动力学特性试验研究[J].科技通报,2019,35(4):180-184.
- [28] 蒋昌波,隆院男,胡世雄,等.坡面流阻力研究进展[J].水利学报,2012,43(2):189-197.
- [29] 刘敏,方如康.现代地理科学词典[M].北京:科学出版社,2009.
- [30] An J, Zheng F, Lu J, et al. Investigating the Role of Raindrop Impact on Hydrodynamic Mechanism of Soil Erosion Under Simulated Rainfall Conditions [J]. Soil Science, 2012,177(8):517-526.
- [31] 张攀,姚文艺,魏鹤举,等.黄丘区坡面细沟流速分布特征试验研究[J].水利学报,2017,48(11):1334-1340.
- [32] 张光辉,卫海燕,刘宝元.坡面流水水动力学特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1):58-61.
- [33] Jiang F S, Zhan Z Z, Chen J L, et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain [J]. Catena, 2018,169:46-58.
- [34] 李鹤.坡面细沟横断面形态演化规律研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [35] Zheng F L, Tang K L. Rill erosion process on steep slope land of the loess plateau [J]. International Journal of Sediment Research, 1997,12(1):52-59.
- [36] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面径流水水动力学特性[J].水土保持学报,2013,27(4):34-38.
- [37] 张翔,高照良,袁雪红,等.工程堆积体坡面细沟流水水力学参数特性研究[J].泥沙研究,2016(4):34-40.
- [38] 陈培济.集中水流冲刷条件下土石混合崩积物坡面侵蚀机理研究[D].福州:福建农林大学,2016.