

急陡黄土坡面细沟侵蚀的水动力学特性试验研究

杨茹珍^{1,2}, 张风宝^{1,2}, 杨明义^{1,2}, 张加琼^{1,2}

(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 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过组合不同坡度(25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°)、不同流量(0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 L/min)的室内放水冲刷试验, 对急陡黄土坡面细沟侵蚀发生过程中的细沟水动力学特性进行了研究。结果表明: 细沟水流平均流速随细沟的发育呈现出先减小后稳定的变化趋势。细沟流的雷诺数 Re 在 199.996~873.482 变化, 且主要受流量的影响, 随着流量的增大呈线性关系; 而弗劳德数 Fr 在整个细沟发育过程中均大于 1, 表明细沟流均处于急流范围, 且与流量呈倒数关系, 随着放水流量的增大 Fr 呈曲线减小。阻力系数 f 随着流量的增加而增大, 且与雷诺数之间存在 $f = a \cdot Re^{-b}$ (a, b 为系数) 的幂函数关系。

关键词: 急陡坡; 细沟侵蚀; 水动力学参数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0031-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.005

Hydraulic Characteristics of Rill Erosion on Steep Loess Slope

YANG Ruzhen¹, ZHANG Fengbao^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}, ZHANG Jiaqiong^{1,2}

(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; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The hydraulic characteristics of rill erosion were studied by using runoff scouring experiment under the different steep Loess slope gradients(25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°) and the different flow discharges(0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 L/min). The results showed that velocity decreased first, then kept smooth and steady as the scouring time. The Reynolds number of the flow varied between 199.996 and 873.482 in the erosion process. It was affected mainly by the flow discharge which was in a linear relationship with flow discharge. The Froude number of flow was larger than 1 in the whole experiments, which indicated that the rill flow belonged to the supercritical flow condition. Meanwhile, the Froude number of rill flow was in a reciprocal decreased relationship with flow. Darcy-Weisbach resistance coefficient (f) was positively related to flow and was in a power function relationship with the Reynolds number.

Keywords: steep loess slope; rill erosion; hydraulic parameters

土壤侵蚀是当今重大的全球性环境问题之一, 不仅给当地的生态环境、土壤生产力和粮食安全带来严重影响, 而且有很强的异地效应, 严重制约着全球社会经济的可持续发展^[1]。坡面细沟侵蚀作为土壤侵蚀的主要形式之一, 不仅是坡面土壤侵蚀的重要产沙源, 也是坡面侵蚀产物的输送通道^[2]。细沟侵蚀主要是由降雨产生的地表径流(坡面细沟流和细沟间的薄层水流)先后对地表、细沟沟壁、沟底、沟头土壤的冲散和搬运过程最终破坏土壤下垫面稳定性和分离土壤颗粒造成的^[3]。其发生取决于坡面水流的水力学

特性和土壤条件, 当坡面水流达到一定的水力学指标时才能发生细沟侵蚀^[4]。黄土高原沟壑纵横、生态环境脆弱, 区域降雨集中且强度大, 植被覆盖度低; 此外由于黄绵土的主要成分是粉粒, 结构疏松且孔隙度比较大^[5-6]等一系列因素的影响, 坡面在遭遇大暴雨时易产生严重的细沟侵蚀。

多年来已经有大量学者从细沟形态演变特征、水力参数特征及影响因素等方面对细沟侵蚀进行了大量的研究, 并取得了一系列成果, 如沈海鸥等^[7-8]从细沟形态演变特征研究降雨强度和坡度对细沟侵蚀的

收稿日期: 2019-12-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877080, 41671281)

第一作者: 杨茹珍(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事坡面土壤侵蚀过程研究。E-mail: 1323103747@qq.com

通信作者: 张风宝(1980—), 男, 博士生导师, 主要从事坡面土壤侵蚀过程研究。E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

影响发现,细沟横断面主要呈“V”形,随着降雨强度和坡度的增加,径流紊动性增强,细沟横断面变化趋于不规则;Qin 等^[9]在研究上方来水对沟床下切过程的影响发现,细沟的形态演变过程在沟头前进、沟底下切和沟壁扩张的基础上,沟底下切又分为下切沟头形成前期、二级沟头下切期、下切沟头形成后期 3 个子过程,更加细化了沟床下切过程中细沟发育状况以及各水力参数的研究;也有研究^[7,9-10]发现,坡度是影响细沟侵蚀水力参数变化和细沟形成的重要因子之一。近年来,在我国由于工程建设的弃土弃渣堆积体、梯田田坎、治沟造地及路基开挖等形成了大量 $>25^\circ$ 的急陡坡坡面。裸露的急陡坡面遭受雨滴打击以及径流冲刷后很容易发生细沟侵蚀,形成新的产沙源地。但目前绝大多数的研究^[5,7,11-14]都集中在缓坡坡面($<25^\circ$),专门针对急陡坡细沟侵蚀的相关性研究少之又少,以至于人们对细沟侵蚀很难形成完整的认识。因此,在前人研究的基础上,本文以黄土高原黄绵土为研究对象,采用水槽冲刷试验,研究急陡坡面($>25^\circ$)细沟发育演变过程中水力学特性的变化规律,揭示急陡坡对细沟形成的影响机制,为急陡坡面细沟侵蚀的预报和防治提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计与观测方法

本研究采用室内放水冲刷试验的方法,试验用土于 2018 年 5 月取自黄土高原的陕西安塞县某一典型黄土斜坡,试验于 2018 年 7—10 月在水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行。并于 2018 年 12 月和 2019 年 1 月集中处理试验数据。试验所用钢制土槽长 3.3 m,宽 1 m,深 0.3 m,可调坡度为 $25^\circ\sim 50^\circ$;底部每隔 10 cm 间距打孔,孔径 2 mm,以便重力水能自由流出。用 PVC 板将其隔离成 10 条规格为 3.3 m \times 0.1 m 的细沟,土槽顶端布设 2 排消力池。采用定流量的方式,按设计要求通过蠕动泵来控制流量。

在土槽装土之前先装填 15 cm 的河道粗砂以保证试验土槽的透水状况接近天然状况,在粗砂表面铺 1 层纱布(隔离土层和砂层),纱布表层每 5 cm 装 1 层黄绵土以便更好地控制土壤容重在 1.35 g/cm^3 左右,土层共 15 cm。每 2 层土壤之间进行打毛处理以便层与层之间连续接触,表层保持光滑,在 PVC 板两侧粘上相同的黄绵土使粗糙度尽可能接近试验土层,将四周压实并在 PVC 板处略有凸起,使土层表面呈微“U”形防止边壁效应。在细沟入口前 10 cm 铺设塑料纸进一步稳定水流,减小水流的直接冲刷带来的侵蚀。为了保证试验之前的初始含水量变异性对试

验的影响,进行试验前 1 天采用农用喷雾器润湿土层直至产流,并用塑料布遮盖放置 12 h 使水分充分扩散,使前期含水量保持在 10%。

试验流量是根据研究区暴雨发生频率在坡面建立的标准径流小区上产生的单宽流量换算并结合前期的预试验得到,分别为 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 L/min。试验设计坡度为急陡坡: $25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 和 50° 。考虑其对比及重复性,采用流量、坡度完全组合的方法进行试验,每个组合连续重复 3 次,共进行 30 场试验(3 个重复同时进行,视为 1 场试验)。每次试验前率定流量保证 3 个重复的一致性。在坡面产生径流后开始计时,每 30 s 距底端 2.4, 1.2 m 处注入配好的 KMnO_4 溶液,通过时间差分别计算水流速度,并用温度计测量水流的温度用于计算水运动黏滞系数。

1.2 水动力学参数

与河道中的水流相比,坡面细沟的发育发生在较陡的坡面,发育过程中细沟内的水流深度不同造成沟道形状不规则。然而沟道流在沉积物运移和沉积方面与河道流相似,因此在坡面流理论尚未成熟时,从动力学的角度研究坡面细沟侵蚀需要采用河流动力学的有关公式来计算细沟侵蚀的水动力学参数^[15]。其中水流流速 V 、径流深 H 、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 和 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 等都是反映水流动力学特征的重要指标。其计算公式为:

$$H = \frac{q}{v} \quad (1)$$

$$Re = \frac{vR}{\nu_0} \quad (2)$$

$$\nu_0 = 0.01775 \times 10^{-4} / (1 + 0.0337t + 0.00022t^2) \quad (3)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} \quad (4)$$

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

式中: H 为水深(m); q 为单宽流量(m^3/s); v 为观测时段 t 内水流的平均流速(即采用高锰酸钾染色法观测到的水流表面流速乘以修正系数 k , $0.75^{[13,16-18]}$) (m/s); R 为水力半径($R = \frac{A}{p}$), $p = 2H + b$; A 为过水断面面积(m^2); p 为湿周(m); b 为过水断面宽度(m); ν_0 为含沙水流运动黏滞系数(m^2/s); g 为重力加速度(9.8 m/s^2); J 为水力坡度。

1.3 评价指标

分别对水流平均流速 V 、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 和阻力系数 f 进行方差分析,得到坡度和流量对各水力

参数影响的显著性以及总离差平方和(SS_T)、各因子离差平方和(SS_F)、误差平方和(V_{Er})和因子的自由度(DF),利用公式估算各影响因子的贡献率(PC):

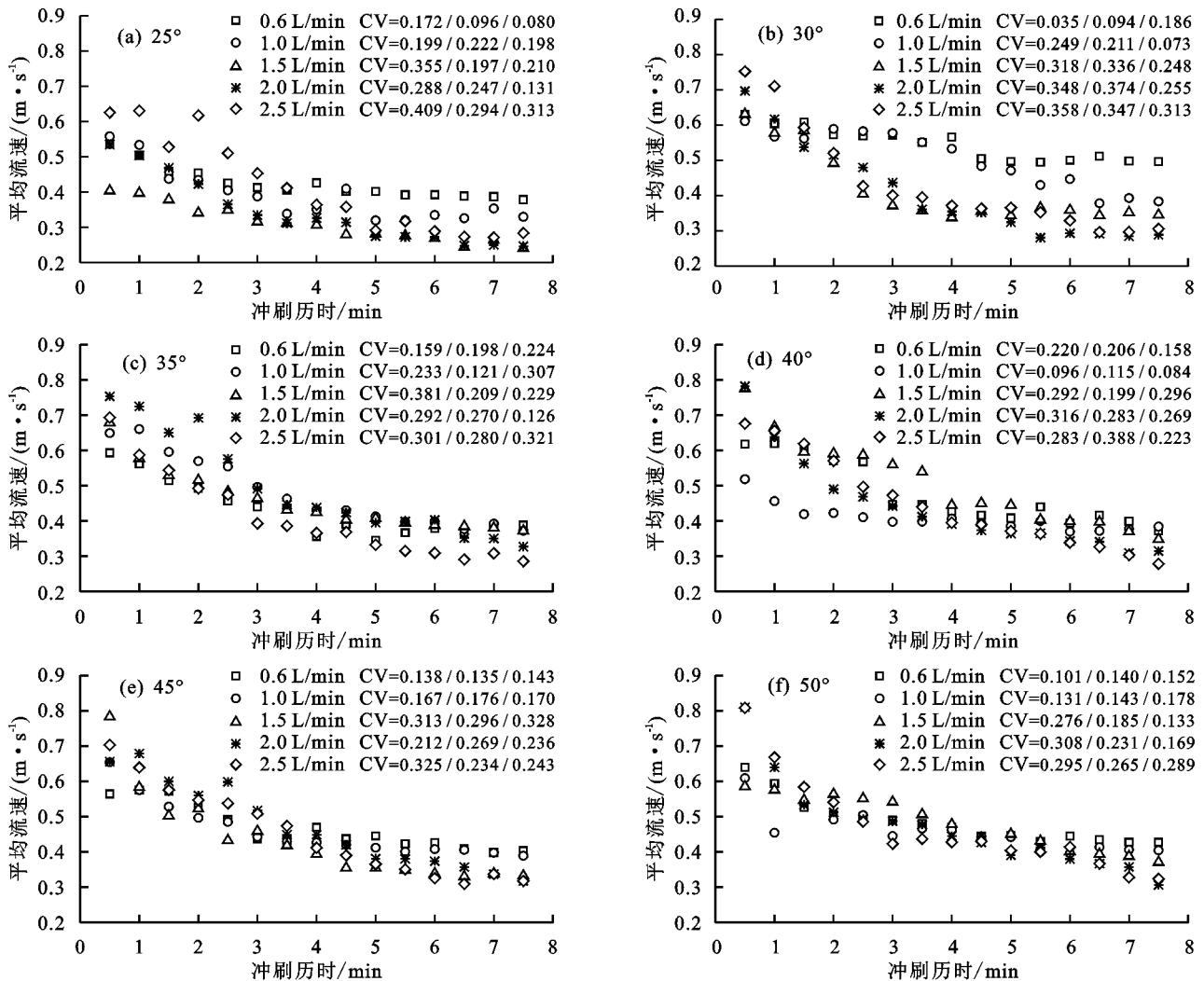
$$PC = \frac{SS_F - (DF \times V_{Er})}{SS_T} \times 100\% \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 细沟流平均流速

由图 1 可知,水流平均流速的变异性系数为 0.035~0.409,属于中等变异性(0.1~1.0),表明急陡坡面细沟侵蚀的水流流速随细沟发育整体都呈逐渐减小趋势。在冲刷初期,由于坡面为裸坡且经过人为平整使得坡表面光滑,对流速阻力小,导致冲刷初期流速较大;从能量角度来看,细沟流对土壤的侵蚀过程是一个径流动能转化为泥沙动能的过

程^[11],冲刷初期用于运移泥沙所损失的能量较少,更多的能量转化为向坡下移动的动能。之后随着细沟发育,水流挟沙增加使得流速逐渐减小,大约在 5 min 左右流速减小的速率变小,大流量下流速的减小速率快于小流量。6 min 左右小流量下的水流流速又有一定增加且高于大流量,可能是由于同一坡度不同流量下细沟发育的剧烈程度和细沟内的粗糙度不同所致,相对原始坡面细沟内的粗糙度增加,跌坎、漩涡等产生的阻力导致细沟内水流流速减小;随着侵蚀的进行,细沟内粗糙度相对减小,流速逐渐趋于平稳。然而在小流量下,水流的动力相对偏小,冲刷出的跌坎和漩涡也会相应小于大流量,同时携带的泥沙量少,导致小流量下流速变化小且在 6 min 之后高于大流量。



注:CV 为 3 组重复数据的变异性系数。

图 1 水流平均流速随冲刷历时的变化过程

由图 2 可知,水流平均流速的变化范围为 0.311~0.545 m/s。当坡度为 25°和 30°时,流速随着流量的增大先减小后增大,流量 1.5 L/min 时流速最小;当坡度>30°时,整个放水流量下水流流速为 0.4~0.5 m/s,变化不显著。说明 30°~35°存在临界坡度,当

坡度小于临界坡度时,流速随着流量的增大先减小后增大,随着坡度的增大而增大;当坡度大于临界坡度时,流速受坡度和流量的影响变化不大。出现这种现象的原因可能是水流沿坡面向下运动的过程中,小流量下细沟发育速度缓慢,细沟内水流流速受沟内粗糙

度的影响程度高于流量,因此随着流量的增大而减小;大流量下细沟发育相对较快,沟内粗糙度增加,沟内流体内部紊动较大导致水流流速主要随着流量的增加而增加。随着坡度和流量的增大径流动能增大,与此同时携带泥沙增多,以及细沟内粗糙度的增大反而导致径流动能削弱,径流冲刷过程中反复出现跌坎和漩涡,径流流速在一定时间内减小,之后产生壅水冲垮跌坎流速又变大,以此反复直到坡面细沟形成后水流才会趋于稳定。当流量为小流量(0.6, 1.0 L/min)时,流速随着坡度的增大先增大后减小且趋于波动稳定,在 30° 坡度下达到最大;大流量(1.5, 2.0, 2.5 L/min)下水流流速随着坡度的增加而增大。整体来看,不同流量同一坡度下流速之间的差值随着坡度的增大而减小,即坡度对平均流速的影响逐渐减小,说明水流平均流速对流量的敏感性高于坡度,更

容易受流量的影响。传统的水力学观点认为,径流流速与坡度和流量呈幂函数正相关关系,即流速随着流量和坡度的增加而增加。米宏星等^[12]采用放水冲刷试验研究在 5 个坡度(5°~25°)和 3 个流量(2, 4, 8 L/min)条件下黄土坡面细沟径流流速时发现,细沟流的流速与坡度和流量呈幂函数关系,随坡度和流量增加而增加;Govers^[19]通过假设水流侵蚀性与沟床的形态之间的反馈机制,物理性地解释了坡度与侵蚀沟内水流平均流速无关;李凤英等^[20]对陡坡(25°~45°)土壤侵蚀试验进行了研究并发现,随着坡度增加流量呈下降趋势,即流量变化是径流流速发生变化更重要的因素。本研究与其研究结果一致。坡度对水流平均流速影响较小是由于抵消作用造成的,在侵蚀沟发育过程中水流流速随坡度的增大而增大,沟床粗糙度也随之增加进而减慢流速,这与坡度引起的流速预期增大相抵消。

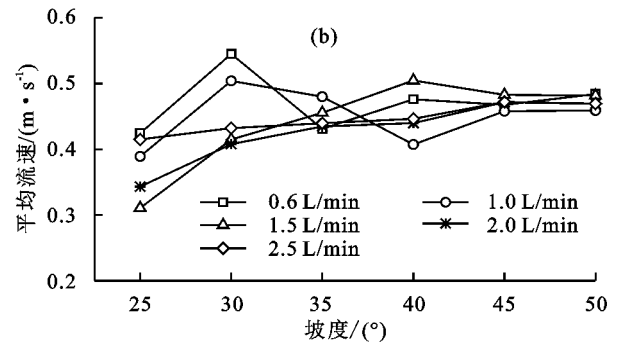
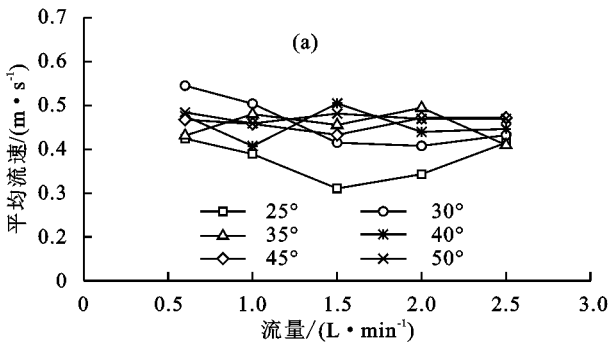


图 2 水流平均流速随流量和坡度的变化过程

2.2 细沟流流态

雷诺数和弗劳德数是表征坡面细沟侵蚀水动力学特征的基本参数,同时也是判别流态的重要方法。根据明渠水流的判别理论,当雷诺数 $Re < 500$ 时为层流; $Re > 500$ 时为紊流。弗劳德数 $Fr > 1$ 时水流为急流;当 $Fr < 1$ 时水流为缓流^[21]。

由图 3 可知,在急陡坡的细沟侵蚀中,水流雷诺

数的整体变化范围为 199.996~873.482,流量 < 1.5 L/min 时水流流态属于层流;流量为 1.5 L/min 时雷诺数为 487.588~535.297,处于临界雷诺数波动范围,水流流态处在层流与紊流的过渡流;流量 > 1.5 L/min 时水流流态属于紊流。说明随着流量的增加水流流态逐渐由层流向紊流发展。

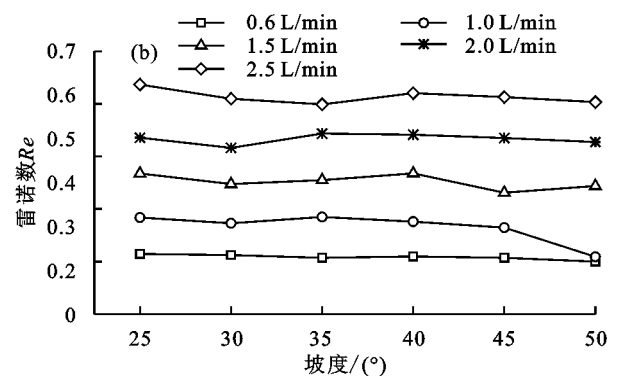
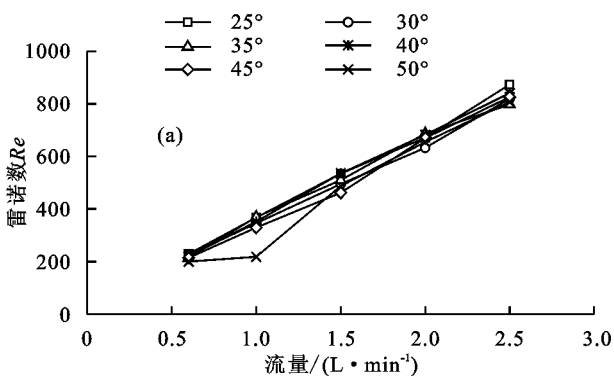


图 3 水流雷诺数 Re 随流量和坡度的变化过程

坡度对雷诺数影响很小,雷诺数的变化主要与流量有关,且随流量的增大而增大。图 3(a)当坡度一定时, Re 随着流量的增加呈线性增加趋势;表 1 为有关雷诺数 Re 与流量的回归式方程,其中 P 值都小

于 0.05, R^2 的范围为 0.970~0.999,说明流量对雷诺数有极显著的影响;图 3(b)为坡度对水流雷诺数的影响不显著,整个试验流量下 Re 的变化规律为 $0.6 < 1.0 < 1.5 < 2.0 < 2.5$ L/min。方差分析结果显

示,流量、坡度、流量和坡度的交互作用对雷诺数 Re 均有极显著影响($P < 0.01$)。流量、坡度、流量和坡度的交互作用以及误差因子对水流雷诺数 Re 的贡献率分别为 98.86%, 0.31%, 0.82%, 0.01%, 说明流量基本上主导了水流雷诺数的变化,坡度对其影响较小。关于雷诺数与坡度和流量的关系研究,杨大明等^[13]在坡度为 $0 \sim 25^\circ$ 的缓坡上,对细沟水动力学特性进行了研究并发现,坡度对水流雷诺数的变化影响不显著,而流量是影响雷诺数的主要因素;李占斌等^[4]在 $21^\circ, 24^\circ$ 和 27° 的陡坡上研究细沟水动力学特性发现,坡面流雷诺数随着冲刷历时和流量的增大而增大;敬向峰等^[22]对急陡坡细沟侵蚀的水流雷诺数与放水流量进行量化分析发现,雷诺数与流量之间呈线性关系且坡度对水流雷诺数的影响不是很明显,与本研究结果基本一致。

不同放水流量条件下细沟流的弗劳德数 Fr 变化范围为 2.506~9.154。随着细沟的发育,水流有由急流向缓流逐渐转变的趋势,但 Fr 总大于 1,属于急流范畴。由图 4(a)可知, Fr 与流量呈负相关关系,随着放水流量的增大, Fr 呈曲线减小,即水流随着流量的增加有从急流到缓流转变的趋势;图 4(b)中当

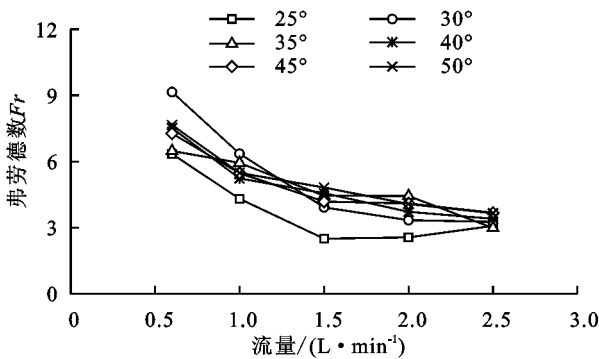


图 4 水流弗劳德数 Fr 随流量和坡度的变化过程

表 2 急陡坡弗劳德数 Fr 与流量的关系

坡度/ $^\circ$	P	R^2	回归式方程
25	0.013	0.904	$y = 1.218 + 3.005/x$
30	0.001	0.984	$y = 1.043 + 4.920/x$
35	0.036	0.813	$y = 2.801 + 2.432/x$
40	0.022	0.863	$y = 2.377 + 2.970/x$
45	0	0.989	$y = 2.533 + 2.847/x$
50	0	0.992	$y = 3.605 + 4.325/x$

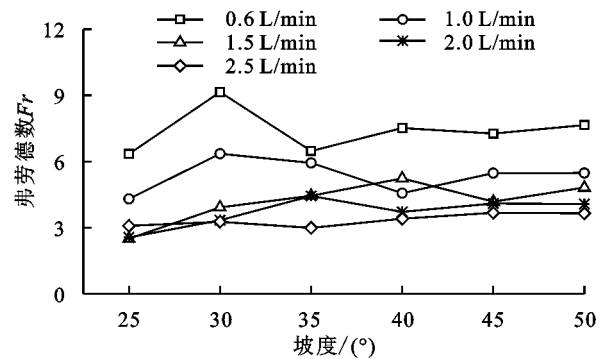
2.3 细沟流阻力

坡面水流沿坡面向下流动时必然会受到阻力作用,尤其在坡面细沟出现之后。水流所受阻力从能量角度分析分为土颗粒本身对水流的阻碍作用、细沟形态以及水流挟沙的影响^[23]。当水动力条件相同时,细沟流受到的阻力越大,其水流形态越复杂。水流形态在一定程度上取决于流量和坡度的作用,因此细沟侵蚀过程中细沟流阻力与坡度和流量密切相关。由图 5 可知,阻力系数的变化范围为 0.054~0.727,随

放水流量一定时 Fr 受坡度的影响不明显,且在整个坡度不同流量下的弗劳德数排序为: $0.6 > 1.0 > 1.5 > 2.0 > 2.5$ L/min。整体上弗劳德数 Fr 随着流量的增大而减小,对流量的敏感程度高于坡度。为了进一步研究坡度和流量对弗劳德数的影响,对弗劳德数和流量进行拟合回归方程。由表 2 可知,在不同放水流量下急陡坡($25^\circ \sim 50^\circ$)细沟侵蚀的弗劳德数均可用流量的倒数形式表示,决定系数 R^2 为 0.813~0.992,且 $P < 0.05$ 。方差分析结果显示,流量、坡度、流量和坡度的交互作用对弗劳德数 Fr 均有极显著影响($P < 0.01$)。流量、坡度、流量和坡度的交互作用以及误差因子对 Fr 的贡献率分别为 67.20%, 8.76%, 17.19%, 6.86%, 说明弗劳德数的变化主要受流量的影响,坡度对其影响较小。

表 1 急陡坡雷诺数 Re 与流量的关系

坡度/ $^\circ$	P	R^2	回归式方程
25	0	0.997	$y = 30.721 + 331.848x$
30	0	0.997	$y = 35.721 + 307.760x$
35	0	0.993	$y = 46.260 + 308.818x$
40	0	0.999	$y = 28.012 + 327.581x$
45	0	0.994	$y = 4.099 + 326.413x$
50	0.002	0.970	$y = -51.951 + 345.667x$



着放水流量的增大整体呈增大趋势,受坡度的影响较小。丁文峰等^[14]通过放水冲刷试验研究细沟侵蚀中坡面流水动力学特性发现, ($6^\circ \sim 12^\circ$) 坡面阻力系数变化为 0.16~0.65,其大小与水流雷诺数有关;Foster 等^[24]通过模拟天然细沟形态进行定床试验的研究结果表明,在 $1.70^\circ \sim 5.16^\circ$ 的坡度范围内,阻力系数 $f < 0.5$ 。为了进一步研究细沟流阻力系数与水流形态之间的关系,点绘阻力系数与水流雷诺数的关系(图 6)。由图 6 可知,坡面阻力系数随着雷诺数的增加呈幂函数增大趋势,且方差分析可知阻力系数 f 与雷诺数之间存在有 $f = (9.159E-5)Re^{1.322}$ 的关系 ($R^2 = 0.833, P < 0.01$),本研究结果与张科利^[25]的研究结果阻力系数 f 与水流雷诺数之间存在有 $f = aRe^{-b}$ (a, b 为系数)关系一致。方差分析结果显示,流量对急陡坡细沟流阻力系数有极显著影响($P <$

0.01), 贡献率为 74.96%; 而坡度对其影响不显著 ($P > 0.05$), 贡献率仅为 2.01%; 流量和坡度的交互作用以

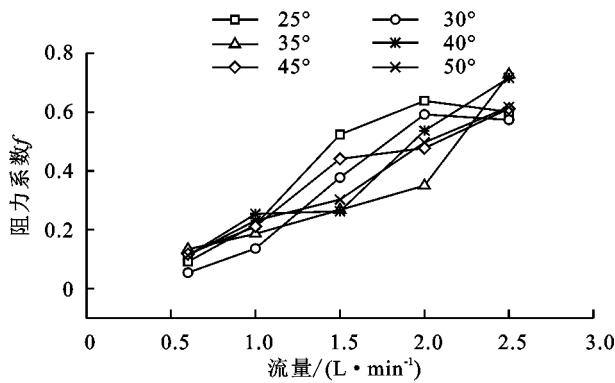


图 5 阻力系数 f 随流量和坡度的变化过程

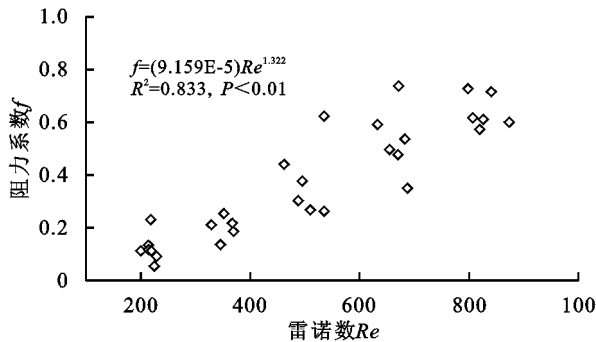


图 6 阻力系数 f 与雷诺数 Re 的关系变化

3 结论

(1) 急陡坡细沟发育过程中, 水流平均流速随着冲刷历时呈缓慢减小趋势, 5 min 左右流速减小的速率变小, 大流量下流速的减小速率快于小流量。6 min 左右小流量下的水流流速高于大流量。坡度和流量都为影响水流平均流速的重要因素, 但水流平均流速对流量的敏感性高于坡度, 更容易受流量的影响。

(2) 细沟水流雷诺数 Re 变化范围为 199.996 ~ 873.482, 其大小主要受流量的影响, 且随流量的增大呈线性关系。弗劳德数 Fr 的变化范围为 2.506 ~ 9.154, 且与流量呈倒数关系, 随着流量的增大而减小。

(3) 坡面流阻力系数的变化范围为 0.054 ~ 0.727, 随着放水流量和坡度的增大整体呈增大趋势; 受流量变化的作用比较明显, 而随坡度的变化增加较缓慢; 且阻力系数 f 与雷诺数之间存在 $f = aRe^{-b}$ (a, b 为系数) 的关系。

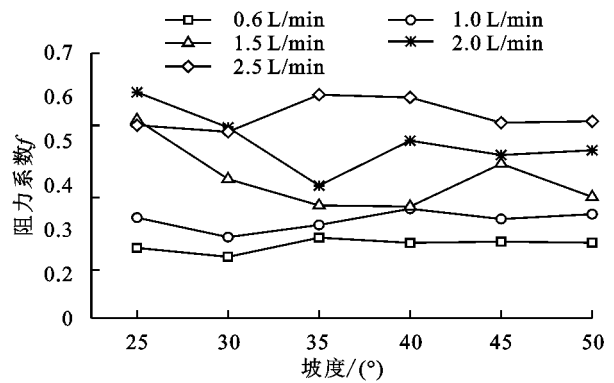
参考文献:

[1] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 土壤侵蚀学科发展战略[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 1-10.

[2] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1319-1325.

[3] FAO. Soil erosion by water: Some measures for its control on cultivated lands [M]. FAO/UNESCO, Rome, 1956: 98-104.

及误差因子对阻力系数的贡献率分别为 6.66%, 16.98%, 说明阻力系数的变化主要受流量的影响。



[4] 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.

[5] 江长通, 王银梅, 胡乾亮, 等. 黄土边坡冲刷过程及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 14-17, 47.

[6] 刘纪根, 雷廷武, 潘英华, 等. 陡坡耕地施加 PAM 侵蚀产沙规律及临界坡长的试验研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 504-510.

[7] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. 农业机械学报, 2017, 46(7): 162-170.

[8] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5514-5521.

[9] Qin C, Zheng F L, Zhang X C, et al. A simulation of rill bed incision processes in upland concentrated flows [J]. Catena, 2018, 165: 310-319.

[10] 李军鹏, 董卫国, 孟惠芳, 等. 降雨条件下坡面细沟侵蚀模型及临界坡度研究[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 207-212.

[11] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯, 等. 冲刷条件下坡面水流速度与产沙关系研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 876-880.

[12] 米宏星, 陈晓燕, 赵宇, 等. 黄土坡面细沟径流流速的试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 66-69, 110.

[13] 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(4): 49-56.

[14] 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.

[15] Moss A J, Walker P H, Hutka J. Raindrop-simulated transportation in shallow water flows: An experimental study[J]. Sedimentary Geology, 1979, 2: 165-184.

[16] 李天阳, 何丙辉, 雷廷武, 等. 汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面细沟水动力学特征室内试验[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 892-902.

[17] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟, 等. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[18] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.

(下转第 42 页)

别超过 89% 和 85%，对于降低面源污染风险具有积极意义。

(3) 秸秆覆盖模式对地表径流、土壤流失及氮磷流失的阻控效果均为随坡度降低，阻控率增加。

参考文献：

- [1] 欧洋, 阎百兴, 白建宏, 等. 东北黑土区侵蚀沟危害面积识别研究[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 24-30.
- [2] 蔡强国, 范昊明, 沈波. 松辽流域土壤侵蚀危险性分析与防治对策研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 21-24.
- [3] Xu X Z, Xu Y, Chen S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: A retrospective study[J]. Environmental Science and Policy, 2010, 13(8): 793-800.
- [4] 吴电明, 夏立忠, 俞元春, 等. 坡耕地氮磷流失及其控制技术进展[J]. 土壤, 2009, 41(6): 857-861.
- [5] 张孝存, 郑粉莉, 安娟, 等. 典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 182-186.
- [6] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299.
- [7] 余玮, 黄璜, 官春云, 等. 我国典型农作区作物生产碳汇功能研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(1): 106-113.
- [8] 王勇强, 王玉宽, 傅斌, 等. 不同耕作方式对紫色土侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 333-335.
- [9] 杨子, 刘晓光, 宁静, 等. 典型黑土垄作区耕地沟蚀对土壤养分的影响研究[J]. 土壤, 2017, 49(2): 379-385.
- [10] 孟令钦, 李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 7-11, 44.
- [11] Domagalski J, Lin C, Luo Y, et al. Eutrophication study at the Panjiakou-Daheiting Reservoir system, northern Hebei Province, People's Republic of China: Chlorophyll-a model and sources of phosphorus and nitrogen[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1/3): 43-53.
- [12] 郑海金, 王辉文, 杨洁, 等. 地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J]. 中国水土保持, 2015(2): 36-39, 69.
- [13] 王良民, 王彦辉. 植被过滤带的研究和应用进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2074-2080.
- [14] 徐英鹏, 赵兰坡, 王宇, 等. 深松筑挡对黑土顺坡耕地不同形态磷流失的阻控效果[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 13-31, 66.
- [15] 潘继征, 李文朝, 陈开宁. 滇池东北岸生态修复区的环境效应: II. 污染净化效应[J]. 湖泊科学, 2006, 18(6): 578-584.
- [16] 王宇, 韩兴, 赵占军, 等. 垄沟秸秆覆盖对黑土顺坡耕地氮、磷养分阻控效果[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 137-140.
- [17] 陈帅. 黑土区坡耕地玉米秸秆还田水土保持功效研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 127-135.
- [19] 鲁耀, 胡万里, 雷宝坤, 等. 云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1544-1553.
- [20] 王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 69-75.
- [21] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 223-228.
- [22] Li L, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48(6): 3403-3410.
- [23] 王静, 郭熙盛, 王允青. 自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 492-495.
- [24] 辛平, 黄高宝, 徐银萍, 等. 耕作方式与地表覆盖量对苜蓿及小麦地水蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 16-18, 23.
- [25] 江森华, 黄荣珍, 谢锦升, 等. 闽北不同土地利用方式水土流失与降雨量的关系研究[J]. 闽江学院学报, 2011, 32(5): 125-129.
- [19] Govers G. Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. Earth Surface Processes Landforms, 1992, 17: 515-528.
- [20] 李凤英, 何小武, 肖青亮, 等. 急陡坡土壤侵蚀试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 38-44.
- [21] 任熠, 王先拓, 王玉宽, 等. 紫色土坡面细沟流的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 39-42, 46.
- [22] 敬向峰, 吕宏兴, 张宽地, 等. 不同糙率坡面水力学特征的实验研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 33-38.
- [23] 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.
- [24] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D, et al. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationship[J]. Transactions of the Asabe, 1984, 27(3): 790-796.
- [25] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究, 1991(4): 39-46.

(上接第 36 页)