

坡沟系统水动力因子的坡长效应研究

张洋¹, 李占斌^{1,2}, 王飞³, 杨峰⁴

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 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;

3. 黄河上中游管理局, 西安 710043; 4. 城固县水土保持工作站, 陕西 城固 723200)

摘要: 基于可调控的放水冲刷试验, 建立黄土高原典型沟壑区坡沟系统试验模型, 研究不同放水流量和坡长条件下坡沟系统各过水断面水动力参数的变化特征, 为研究坡沟系统水蚀过程作用机理提供科学依据。通过室内放水冲刷试验, 采用 5 个放水流量 (6, 8, 10, 12, 14 L/min) 和 3 个坡长 (4, 6, 8 m) 研究坡沟系统侵蚀动力因子的坡长效应。结果表明: 坡沟系统中沿程各过水断面的雷诺数随放水流量的增大而增大, 且不同放水流量和坡长条件下坡面雷诺数明显大于沟道。弗劳德数在坡沟系统中沿程变化过程中逐渐增大, 且沟道增长速率明显大于坡面; 不同坡长条件下放水流量为 10 L/min 时, 弗劳德数远大于其他放水流量。相同放水流量条件下, 沟道的径流流速明显大于坡面, 坡沟系统的坡面径流流速相对沟道明显稳定且变化范围较小。不同坡长条件下放水流量为 10 L/min 时沿程阻力系数值从 2 号断面急剧减小到 0.03~0.05 范围之内, 且远小于其他放水流量下同断面的阻力系数值; 相同放水流量条件下 (除 10 L/min 外), 坡长越小, 坡面和沟道的波动性相对越小, 且坡面处的波动值大于沟道。径流侵蚀功率与雷诺数、弗劳德数、流速显著相关, 与雷诺数呈对数函数关系, 而与弗劳德数、流速和沿程 Darcy-Weisbach 阻力系数值呈幂函数关系。研究结果表明, 坡长能够影响坡沟系统中坡面和沟道的侵蚀动力因子, 并对坡面和沟道沿程侵蚀能量削减和增加效应研究提供重要的科学依据。

关键词: 坡沟系统; 水动力特性; 不同坡长; 黄土高原沟壑区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0097-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.015

Study of Effects of Slope Length on the Hydrodynamic Factors of Slope-gully System

ZHANG Yang¹, LI Zhanbin^{1,2}, WANG Fei³, YANG Feng⁴

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry,

Education at Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion

and Dryland Agriculture on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Bureau of Upper and Middle Reaches of

Yellow River, Xi'an 710043; 4. Chenggu Soil and Water Conservation Station, Chenggu, Shaanxi 723200)

Abstract: Slope-gully model system of the Loess Plateau was established based on the controlled scouring experiments. Study of the effects of slope length on the erosion power factors of slope-gully system could provide scientific guidance for the mechanism of water erosion process in slope-gully system. This study set up five water flow rates (6, 8, 10, 12, 14 L/min) and three slope lengths (4, 6, 8 m). The results showed that the Reynolds number increased with the increasing water flow rates acrossing each section of the slope-gully system, and the Reynolds number in the slope was higher than in the gully. Froude number also increased in the slope-gully system and the increased rate of Froude number in the gully was obviously higher than that in the slope. The Froude number had the highest value when the water flow rate was 10 L/min. The runoff velocity in the gully was obviously higher than in the slope under the same water flow rate, and the runoff velocity in the slope was much stable than in the gully. The resistance coefficients sharply reduced to 0.03~0.05 from section 2 under different slope length and water flow rate of 10 L/min. The fluctuation of resistance coefficients was less with the decreased slope length under the same water flow rate (except for 10 L/min). Runoff erosion power was significantly correlated with Reynolds number, Froude number, runoff velocity. The relationship between runoff erosion power and Reynolds number was a logarithmic

收稿日期: 2017-10-19

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402404); 国家自然科学基金重点项目 (41330858)

第一作者: 张洋 (1986—), 男, 陕西陇县人, 在读博士, 主要从事水文与雨洪侵蚀研究。E-mail: peace-eternity@163.com

通信作者: 李占斌 (1962—), 男, 河南镇坪人, 教授, 博导, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhanbinli@126.com

function, while the power functions occurred between runoff erosion power and Froude number, flow velocity and resistance coefficients. These results showed that the slope length obviously affected the erosion hydraulic parameters in the slope gully system, and these findings could provide scientific bases for the research of erosion energy transfer in the slope-gully system.

Keywords: slope-gully system; hydrodynamic characteristic; different slope length; Loess Plateau gully region

黄土高原是全球水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一^[1],其主要地貌单元可划分为沟谷地与沟间地^[2],坡沟系统是这种自上而下由沟间地的塬、梁、峁等组成的坡面和沟谷地的侵蚀沟道连续系统构成的侵蚀地貌单元^[3]。坡沟系统是小流域坡面尺度上的多元地貌单元,是黄土高原侵蚀产沙的主要策源地,揭示其侵蚀动力特征和过程对构建流域侵蚀产沙预报模型和产沙机理具有重要意义^[4-7]。

目前,众多学者对黄土高原坡沟系统水动力特征及侵蚀产沙机理做了大量研究,王文龙等^[8]利用人工模拟降雨试验及多坡段组合模型探究了坡沟系统发生侵蚀的水动力参数临界值;肖培青等^[9]通过调控坡沟系统的坡度及模拟人工降雨试验研究了坡沟系统各断面径流水动力参数变化的特征;魏霞等^[10]采用放水冲刷试验对黄土高原的坡沟系统径流侵蚀产沙过程进行了研究;吕威等^[11]通过模拟径流冲刷试验研究了径流量和坡度对复合坡薄层径流水力学特性的影响。目前,国内外学者对不同雨强、坡度及放水流量条件下坡沟系统的水动参数特征研究较多,而对不同坡长条件下坡沟系统水动力学参数的影响考虑较少。据此,本文通过建立黄土高原典型沟壑区坡沟系统试验模型,利用室内放水冲刷试验,分析不同放水流量和坡长条件下坡沟系统各过水断面水动力参数的变化特征,为研究坡沟系统水蚀过程作用机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在陕北黄土高原沟壑区中度水蚀保土蓄水區^[12]的典型流域薛孟河流域。该流域位于洛川县

东部,地理坐标为 109°27'30"—109°32'30"E,35°42'30"—35°49'30"N,流域面积 53.62 km²,近似鸭掌形,主沟长 11.30 km,流域水土流失面积达 48.30 km²,占流域总面积的 87.5%。流域境内多年降水量 550~650 mm,主要集中在 7—9 月份,年蒸发量 1 000 mm。流域内土壤以黄绵土和黑垆土为主。土地利用类型以次生天然林、人工林和荒草地为主,林草覆盖率为 34.72%。流域主要地貌单元可分为沟间地和沟谷地,其中沟间地主要包括塬、梁、峁,沟谷地主要指发育的沟道,该流域具有典型性和代表性。笔者以该流域作为研究对象,将沟间地和沟谷地分别概化为黄土坡面和沟道,建立室内黄土高原坡沟系统概化模型,开展室内模拟试验研究。

1.2 试验装置与材料

试验于 2016 年 5—7 月在西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地雨洪侵蚀大厅进行,采用长 12 m、宽 1 m、深 0.5 m 的钢槽概化黄土高原坡沟系统模型。将 1 m 宽的土槽用 PVC 板平分为两个宽 0.5 m 的土槽,互为重复。其中:模拟沟间地(坡面)部分长 8 m(可调节长度),坡度 12°,模拟沟谷地(沟道)长 4 m(固定长度),坡度 25°,所建模型可代表黄土高原薛孟河小流域的典型地貌特征。模拟径流冲刷试验在该坡沟系统模型上完成,试验装置见图 1。

试验坡面填土取自陕北地区的黄绵土,通过 Malvern 2000 泥沙颗粒分析仪分析测算,依据美国农业部(USDA)的土壤分级标准得出试验用土的土壤颗粒分级特征。试验用土的颗粒组成分别为:1.0~0.5 mm 占比 0.01%,0.5~0.25 mm 占比 0.32%,0.25~0.1 mm 占比 4.21%,0.1~0.05 mm 占比 12.21%,0.05~0.002 mm 占比 78.90%,<0.002 mm 占比 4.35%。

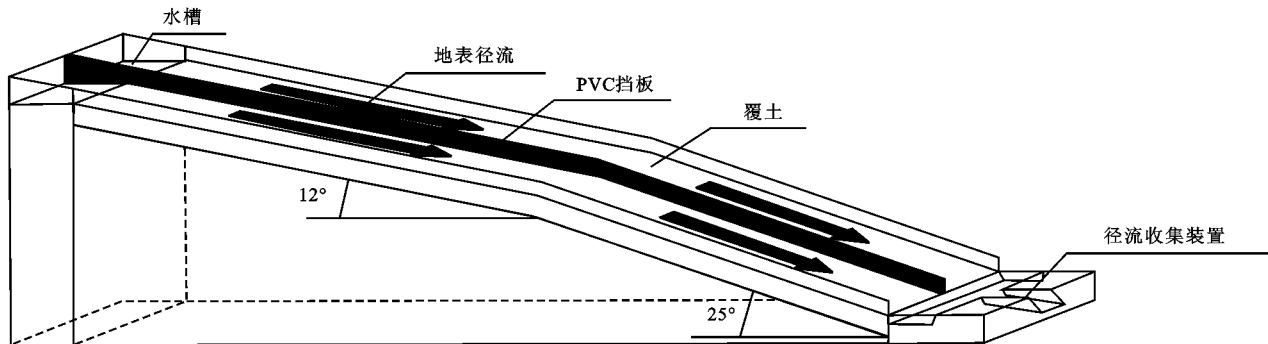


图 1 坡沟系统冲刷装置示意

1.3 试验设计

装填试验用土之前,为保证坡沟系统土壤水分均匀下渗,在土槽底部装入 20 cm 厚的天然沙,使模拟

坡沟系统土层渗透率接近自然坡面。然后,在其上部分层填入 20 cm 厚的黄土,分层刮平打毛并压实,保证土质均匀;在试验用土装填过程中,控制试验槽内

的土壤干容重在 $(1.2 \pm 0.5) \text{ g/cm}^3$,土壤前期含水量在 $(18 \pm 1) \%$ 。为确保每次试验条件基本一致,试验前采用水平尺对坡面平整度进行校正。每场试验前后率定试验放水流量以保证放水流量的准确性。试验放水流量根据洛川观测站暴雨发生频率标准径流小区上产生的单宽流量进行换算,设计了6,8,10,12,14 L/min 5个不同流量;依据黄土高原丘陵沟壑区坡面一沟道垂直投影面积比选择了4,6,8 m 3个坡长,沟道长度始终为4 m,共进行75组(每组测5次)。

每次试验前,先用温度计测量水温,然后在同一流量和同一坡长条件下,用薄钢卷尺测量每个断面的水流宽度,同时用染色剂法测量每个断面的水流流速,每组反复测量5次,取平均值。运动黏滞系数 μ 依据水流温度计算获得,再由平均水流宽度和流速计算每个断面的水流深度 h 。根据水流深度、流速和运动黏滞系数计算出不同过水断面的雷诺数、弗劳德数、流速、沿程阻力系数和径流侵蚀功率。

1.4 指标计算

1.4.1 径流流态 判别径流流态的两个重要指标是雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr (均为无量纲参数)^[9]。雷诺数 Re 的经验表达式^[13]为:

$$Re = \frac{UR}{\nu} \quad (1)$$

式中: U 为径流表面平均流速(m/s); R 为过水断面的水力半径(m); ν 为径流运动黏滞系数,计算公式为 $\nu = 0.01775/(1+0.0337t+0.000221t^2)$; t 为水温($^{\circ}\text{C}$)。

弗劳德数 Fr 反映径流水平力和垂直力的比值,是缓流和急流判定的重要依据^[14]。其数学表达式为:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

式中: U 为径流表面平均流速(m/s); g 为重力加速度,取值 9.8 m/s^2 ; h 为过水断面平均水深(m)。

1.4.2 流速 在侵蚀动力过程及能量研究方面,染色剂法是测量坡面水流速度的基本方法,通常根据径流流态来确定测量水流流速的修正系数,层流、过渡流和紊流时分别为0.67,0.70和0.80^[15],径流流速计算式为:

$$V = a \cdot U \quad (3)$$

式中: V 为径流平均流速(m/s); a 为修正系数; U 为径流表面平均流速(m/s)。

1.4.3 径流阻力 径流阻力越大,表明径流克服坡面阻力所消耗的能量越大,用于坡面侵蚀和泥沙输移的能量越少。Darcy-Weisbach阻力系数 f 是普遍采用的反映径流阻力特性的定量指标^[16],其计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度,取值 9.8 m/s^2 ; R 为水力半

径,用水深值代替(m); J 为水力能坡,取地面地形坡度 α 的正切值; V 为径流平均流速(m/s)。

1.4.4 径流侵蚀功率 径流侵蚀功率表示坡面水平能量和重力势能的综合动力指标。Bagnold^[17]提出径流功率为作用于单位面积的水流所消耗的功率,本试验径流侵蚀功率近似等于径流功率,其表达式为:

$$\omega = \gamma a S = \gamma h V S = \tau V \quad (5)$$

式中: ω 为径流功率($\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$); q 为单宽流量($\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{min})$); h 为过水断面平均水深(m); τ 为径流剪切力(N); V 为径流表面流速(m/s); S 为地面坡度($^{\circ}$)。

2 结果与分析

2.1 径流流态沿程的变化特征

2.1.1 雷诺数沿程的变化 本试验属于坡面流,根据明渠均匀流的基本理论并结合临界雷诺数^[18]的概念,选择900作为层流和紊流的临界值。从表1可以看出,坡沟系统中沿程各过水断面的 Re 值随放水流量的增大而增大;不同放水流量条件下,各过水断面的 Re 值沿程先急剧增加而后缓慢减小,且坡面 Re 值的波动性高于沟道;根据试验坡沟系统坡面流水深明显大于沟道,而水深决定水力半径大小,因此坡面 Re 值明显大于沟道,且沟道径流流态为层流,坡面径流流态为紊流;相同放水流量条件下,当坡长分别为4,6,8 m时,坡面的 Re 值分别是沟道的1.16~1.48倍,1.51~1.60倍和1.65~2.45倍。综上所述,坡沟系统中坡长对坡面 Re 值的影响程度明显大于沟道,坡沟系统中从坡面到沟道存在径流惯性力减弱、黏滞力削弱现象。分析黄土坡面模拟径流过程,黄土层吸收径流直至黄土坡面达到饱和含水量后蓄满产流,在这一过程中水流质点随坡面越长,其不规则运动、互相混掺、轨迹曲折混乱的现象越明显;同时,根据黄土坡面水流受力规律^[19],试验中沟道的坡度明显大于坡面,因此水流质点的这种不规则运动明显小于坡面。

2.1.2 弗劳德数沿程的变化 为判断坡沟系统坡面和沟道各过水断面径流的缓急程度,分别计算了不同放水流量和坡长条件下沿程各过水断面的弗劳德数 Fr 。从图2可以看出,在模拟坡沟系统的放水冲刷试验过程中,整个坡沟系统中各沿程过水断面径流均处于急流状态,这主要决定于放水流量大小和模拟坡沟系统坡度; Fr 在坡沟系统沿程变化过程中逐渐增大且沟道增长速率明显大于坡面;同时分析5种放水流量、不同坡面长条件下,当坡面长分别为4,6,8 m时,沟道的 Fr 平均值分别是坡面的1.91,1.99,2.03倍,这主要是因为径流流速在沿程变化中逐渐增大,同时沟道的坡度大于坡面,因此径流流态在坡沟系统

中由缓到急,这与丁文峰等^[20]研究成果一致;不同坡长条件下,当放水流量为 10 L/min 时, Fr 远大于其他放水流量,说明 Fr 变化存在临界流量。

表 1 不同放水流量与不同坡长条件下坡沟系统
雷诺数沿程的变化特征

放水流量/ (L·min ⁻¹)	坡长/ m	坡面		沟道	
		变化范围	平均值	变化范围	平均值
6	4	477~673	574	334~718	493
8		633~883	759	437~883	618
10		728~900	842	499~867	658
12		854~1040	954	536~910	692
14	6	894~1184	1038	452~958	702
6		666~977	733	380~542	459
8		789~971	869	436~636	545
10		875~1086	952	499~738	593
12	8	839~1310	1011	556~825	665
14		933~1479	1108	622~921	735
6		588~904	740	371~525	448
8		914~2074	1354	438~732	553
10		1130~2446	1508	552~912	692
12		930~3084	1499	672~1007	809
14		1027~2631	1573	777~1116	916

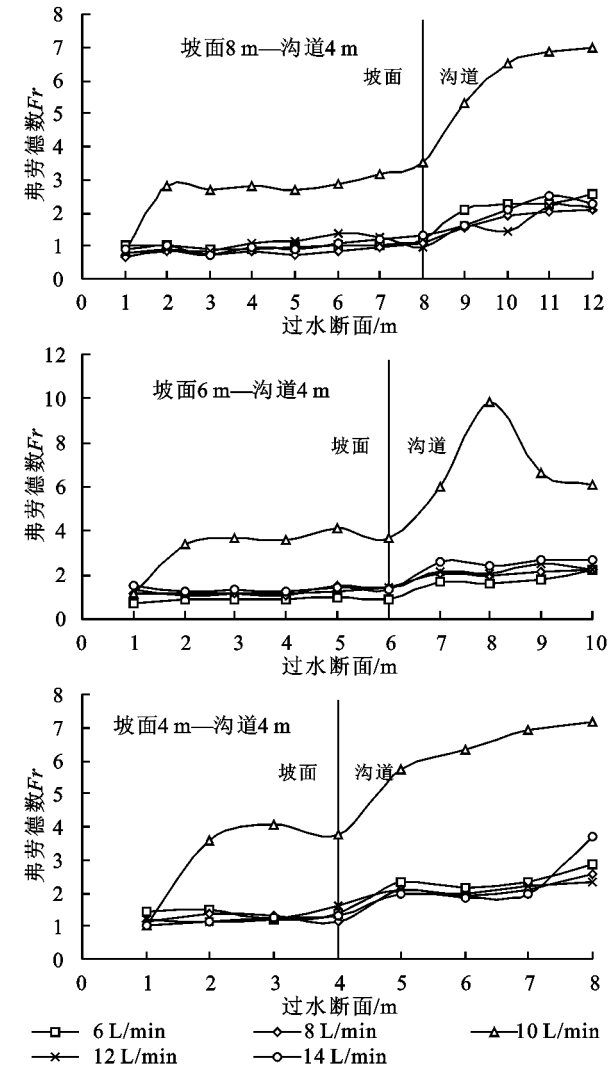


图 2 不同放水流量与不同坡长条件下坡沟系统弗劳德数沿程的变化

2.2 流速沿程的变化特征

坡面流流速是坡面径流主要的水动力要素之一,其变化影响着坡面水蚀的颗粒剥离、泥沙输移和沉积过程。从图 3 可以看出,相同放水流量条件下,沟道的径流流速明显大于坡面,且当坡面长分别为 4,6,8 m 时的沟道 V 值分别为坡面的 1.25~1.37 倍,1.20~1.40 倍和 1.24~1.47 倍;不同坡长和不同放水流量条件下,坡面和沟道交界处 V 值突然增大且均达峰值,坡长为 4,6,8 m 时 V 值增大幅度分别为 18.10%~53.97%,17.84%~52.52%,14.87%~43.07%;坡沟系统的坡面 V 值相对比较稳定,而沟道 V 值波动较大。综上所述,坡面流流速主要与放水流量和坡度等因素有关,这与梁志权等^[21]的研究一致。同时坡面长对坡面与沟道交汇处流速影响较大,究其原因主要是因为黄土坡面在模拟径流产流中经下渗和蓄满过程,致使土壤颗粒剥离和沉积产生的能量与坡面径流能量基本平衡,故坡面流速相对稳定;但当径流从坡面到沟道过程中,由于坡度等因素影响土壤颗粒所产生的的阻力能远未达到径流能,因此沟道流速会产生先急剧增大而后逐渐平稳的现象。

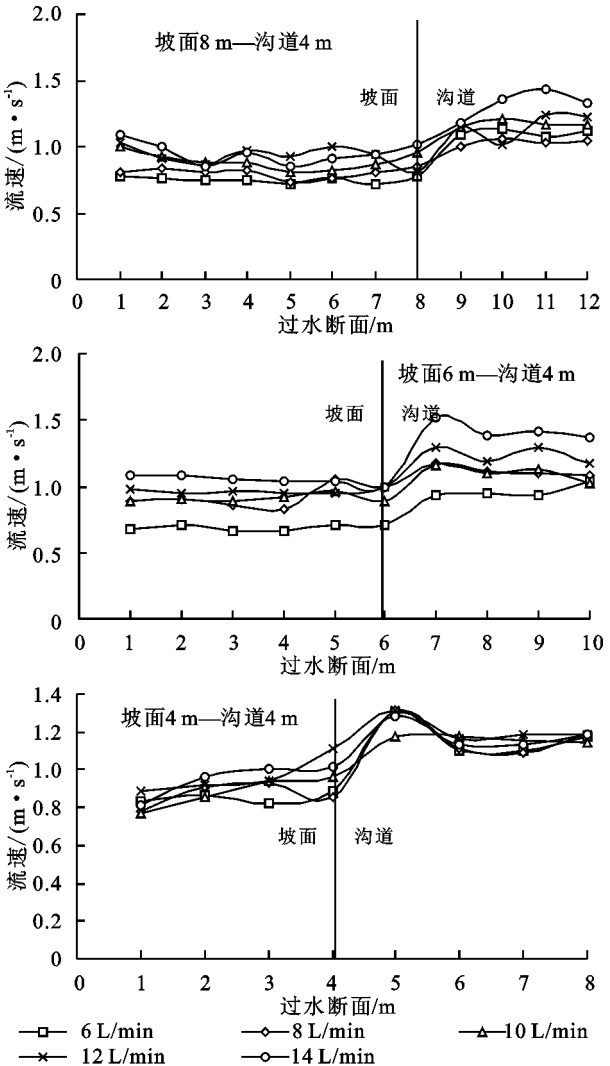


图 3 不同放水流量与不同坡长条件下坡沟系统流速沿程的变化

2.3 径流阻力沿程的变化特征

从图 4 可以看出,当放水流量为 10 L/min 时,不同坡长条件下 f 值从开始急剧减小到 0.03~0.05 范围之内,远小于其他试验放水流量下断面阻力系数 f 值;相同放水流量条件下(除 10 L/min),阻力系数 f 值从坡面到沟道波动式逐渐减小;沟道的阻力系数 f 值小于坡面值,且在坡面和沟道的交界处出现峰值(非最大值),坡长分别为 4、6、8 m 时,坡面和沟道的交界 f 均值分别为 0.26、0.32 和 0.38,因此坡长越大,其对应峰值越大。通过计算 f 值在坡面和沟道的变异系数来反映坡面和沟道 f 值的波动性(离散型),当坡长为 4 m 时,坡面和沟道 f 值的平均变异系数分别为 53.47%、48.22%;当坡长为 6 m 时,坡面和沟道 f 值的平均变异系数分别为 55.62%、51.24%;当坡长为 8 m 时,坡面和沟道 f 值的平均变异系数分别为 59.8%、54.3%。因此,相同放水流量条件下(除 10 L/min),坡长越小,坡面和沟道的 f 值波动性相对越小,且坡面的波动值大于沟道。

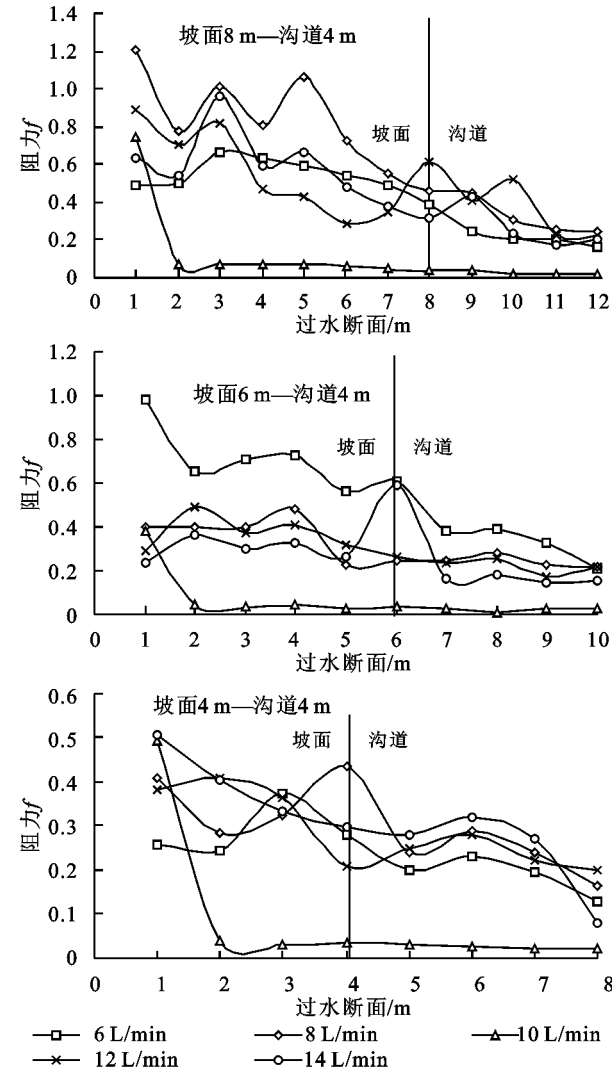


图 4 不同放水流量与不同坡长条件下坡沟系统阻力系数沿程的变化特征

2.4 径流侵蚀功率沿程的变化特征

2.4.1 径流侵蚀功率沿程的变化特征 从图 5 可以

看出,不同放水流量与不同坡长条件下,坡面径流侵蚀功率明显大于沟道;放水流量分别为 6、8、10、12、14 L/min 时,坡面长为 4 m 的坡面径流侵蚀功率分别为沟道的 2.5、2.6、2.9、2.9、3.0 倍,坡面长为 6 m 的坡面径流侵蚀功率分别为沟道的 3.4、3.4、3.3、3.2、3.2 倍,坡面长为 8 m 的坡面径流侵蚀功率分别为沟道的 3.5、5.2、4.6、3.9、3.6 倍,说明坡面越长,坡面径流侵蚀功率与沟道比值越大,同一放水流量条件下坡长影响沟道径流侵蚀功率的大小;同时当放水流量分别为 6、8、10、12、14 L/min 时,坡面长 4、6、8 m 时坡面径流侵蚀功率的比值分别为 1:1.2:1.3、1:1.1:1.8、1:1.1:1.7、1:1.1:1.6、1:1.1:1.5,说明坡面长对坡面径流侵蚀功率的影响大于放水流量。模拟的坡沟系统径流侵蚀功率出现双峰现象,且均在坡面和沟道交界处出现峰值,随后径流功率突然减小,4 m 长减小幅度 61.16%~69.38%,6 m 坡长减小幅度 64.16%~74.30%,8 m 坡长减小幅度在 57.68%~71.24%。综上所述,模拟坡沟系统中黄土坡面形成细沟时产生的阻力能耗明显高于沟道,且黄土坡面径流所消耗的功率沿程波动性明显高于沟道。

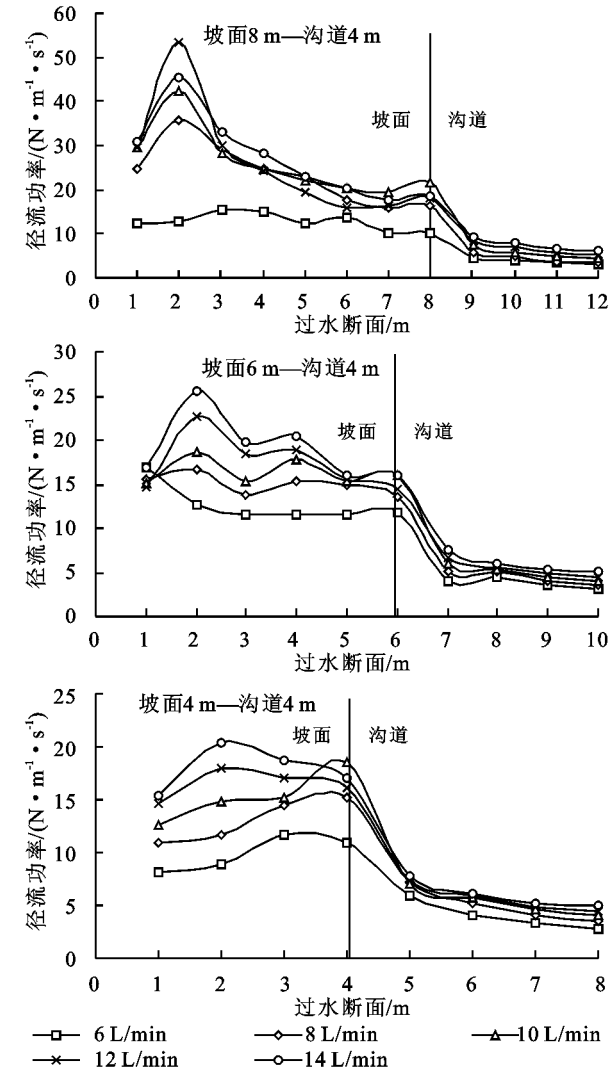


图 5 不同放水流量与不同坡长条件下坡沟系统径流侵蚀功率沿程的变化

2.4.2 单一水动力参数对径流侵蚀功率的影响 试验选取雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、流速 V 、Darcy-Weisbach 阻力系数 f 4 个水动力参数作为自变量,分别与径流侵蚀功率进行双变量相关分析,结果见表 2。

表 2 不同坡长条件下径流侵蚀功率与水动力因子的双变量分析

坡长/ m	雷诺数 Re		弗劳德数 Fr		流速 V		阻力系数 f	
	相关系数	Sig. (双侧)	相关系数	Sig. (双侧)	相关系数	Sig. (双侧)	相关系数	Sig. (双侧)
4	0.799*	0.017	0.801*	0.015	0.805*	0.016	0.679	0.064
6	0.944**	0.001	0.949**	0.001	0.956**	0.001	0.917**	0.001
8	0.973**	0.001	0.854**	0.001	0.775**	0.003	0.805**	0.002

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

将径流侵蚀功率 ω 分别与雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、流速 V 、Darcy-Weisbach 阻力系数 f 进行回归分析(表 3)可以看出,不同水动力因子与径流侵蚀功率的拟合方程有所不同。径流侵蚀功率与雷诺数呈对数函数相关,而与弗劳德数 Fr 、流速 V 和沿程 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 呈幂函数相关。

表 3 不同坡长条件下径流侵蚀功率与单一水动力因子的关系分析

自变量	坡长/ m	线性函数 回归方程	决定 系数 R^2	对数函数 回归方程	决定 系数 R^2	幂函数 回归方程	决定 系数 R^2
雷诺数 Re	4	$y=0.0246x-8.1617$	0.64	$y=16.106\ln(x)-95.969$	0.62	$y=2E-5x^{1.9634}$	0.71
	6	$y=0.0275x-10.398$	0.89	$y=21.166\ln(x)-129.220$	0.90	$y=3E-6x^{2.2393}$	0.90
	8	$y=0.0215x-6.8168$	0.95	$y=24.984\ln(x)-156.260$	0.95	$y=1E-4x^{1.7110}$	0.90
弗劳德数 Fr	4	$y=-5.2552x+22.387$	0.78	$y=-11.1\ln(x)+18.810$	0.70	$y=24.775x^{-1.3180}$	0.76
	6	$y=-6.6074x+26.383$	0.90	$y=-14.62\ln(x)+22.410$	0.88	$y=31.101x^{-1.5470}$	0.88
	8	$y=-10.6x+36.755$	0.73	$y=-20.37\ln(x)+27.862$	0.73	$y=31.878x^{-1.5860}$	0.89
流速 V	4	$y=-25.896x+36.862$	0.65	$y=-26.58\ln(x)+10.691$	0.65	$y=9.4082x^{-2.9960}$	0.63
	6	$y=-41.392x+53.367$	0.91	$y=-42.68\ln(x)+11.635$	0.92	$y=9.9465x^{-4.5020}$	0.91
	8	$y=-54.063x+69.283$	0.60	$y=-53.19\ln(x)+14.659$	0.59	$y=11.27x^{-4.3920}$	0.80
Darcy-Weisbach 阻力系数 f	4	$y=40.379x-0.0422$	0.45	$y=10.214\ln(x)+24.78$	0.52	$y=54.024x^{1.2607}$	0.61
	6	$y=52.904x-4.3606$	0.84	$y=15.306\ln(x)+30.823$	0.88	$y=77.29x^{1.6355}$	0.90
	8	$y=42.471x-1.102$	0.65	$y=17.662\ln(x)+33.924$	0.71	$y=50.014x^{1.3521}$	0.84

3 结论

通过建立黄土高原典型沟壑区坡沟系统试验模型,利用室内放水冲刷试验,分析不同放水流量和坡长条件下坡沟系统各过水断面水动力参数的变化特征,研究了径流侵蚀功率与各水动力因子的关系,主要结论为:

(1)不同放水流量和坡长条件下 Re 明显大于沟道,且在坡沟系统中坡长对坡面的 Re 值的影响程度明显大于沟道。 Fr 在坡沟系统中沿程的变化逐渐增大且沟道增长速率明显大于坡面;相同放水流量条件下坡面越长,沟道与坡面 Fr 平均比值越大。

(2)相同放水流量条件下,沟道的径流流速明显大于坡面,且当坡面长分别为 4,6,8 m 时的沟道 V 值分别为坡面的 1.25~1.37 倍、1.20~1.40 倍和 1.24~1.47 倍;坡沟系统的坡面 V 值相对沟道明显稳定,且变化范围较小,而坡长为 4,6,8 m 时坡面和沟道交汇处 V 值增幅分别为 18.1%~53.97%,17.84%~

由表 2 可以看出,径流侵蚀功率除在 4 m 坡长条件下与雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、流速 V 在 $p=0.05$ 水平显著相关外,其余坡长条件下均在 $p=0.01$ 水平显著相关。

52.52%,14.87%~43.07%。

(3)相同放水流量条件下(除 10 L/min),阻力系数 f 值沿程从坡面到沟道呈波动式逐渐减小;相同放水流量条件下(除 10 L/min),坡长越小,坡面和沟道的波动性相对越小,且坡面的波动值大于沟道。

(4)径流侵蚀功率与雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、流速 V 显著相关,其中径流侵蚀功率与雷诺数 Re 呈对数函数相关,而与弗劳德数 Fr 、流速 V 和沿程 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 呈幂函数相关。

参考文献:

[1] 吕文强,王立,党宏忠,等.黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性的空间分异特征[J].水土保持学报,2015,29(6):233-240.

[2] 田剑,汤国安,周毅,等.黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J].地理科学,2013,33(5):622-628.

[3] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄丘区坡沟系统不同时间尺度下的侵蚀产沙特征[J].水利学报,2013,44(11):

- 1347-1351.
- [4] 魏霞,李占斌,李勋贵.黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(1):108-113.
- [5] 雷阿林,唐克丽.坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望[J].水土保持通报,1997,17(3):37-43.
- [6] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.草被覆盖下坡面径流渗入过程及水力学参数特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):50-53.
- [7] 陈浩.黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系[J].地理学报,2000,55(3):354-363.
- [8] 王文龙,王兆印,雷阿林,等.黄土丘陵区坡沟系统不同侵蚀方式的水力特性初步研究[J].中国水土保持科学,2007,5(2):11-17.
- [9] 肖培青,郑粉莉,姚文艺.坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J].水科学进展,2009,20(2):236-240.
- [10] 魏霞,李勋贵,李占斌,等.黄土高原坡沟系统径流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2009,25(10):19-24.
- [11] 吕威,武新英,李法虎.径流量和坡度对复合坡薄层径流水力学特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):11-17.
- [12] 赵岩,王治国,孙保平,等.中国水土保持区划方案初步研究[J].地理学报,2013,68(3):307-317.
- [13] 王健,李鹤,孟秦倩,等.黄土坡面细沟横断面形态及其水流动力学与挟沙特性[J].水土保持学报,2015,29(3):32-37.
- [14] 敬向锋,吕宏兴,潘成忠,等.坡面薄层水流流态判定方法的初步探讨[J].农业工程学报,2007,23(5):56-61.
- [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(25):150-160.
- [16] 戴矜君,程金花,张洪江,等.植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J].水土保持学报,2016,30(2):44-49.
- [17] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics[M]. Washington: United States Government Printing Office, 1966:231-291.
- [18] 姚文艺.坡面流阻力规律试验研究[J].泥沙研究,1996(1):74-82.
- [19] 张慧芸,塔娜,章慧,等.黄土坡耕地径流水力学参数与侵蚀产沙的模拟[J].水土保持学报,2016,30(5):112-118.
- [20] 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动力学参数特征[J].水土保持学报,2010,24(2):66-69.
- [21] 梁志权,卓慕宁,郭太龙,等.不同雨强及坡度下坡面流的水动力特性[J].生态环境学报,2015,24(4):638-642.
- (上接第91页)
- [10] 张华.北京房山区黄院采石场松散堆积体生态修复技术研究[D].北京:北京林业大学,2013.
- [11] 胡振琪,魏忠义,秦萍.矿山复垦土壤重构的概念与方法[J].土壤,2005,37(1):8-12.
- [12] Kanti S T, Khilar K C. Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006, 119(2/3):71-96.
- [13] Bradford S A, Bettahar M. Concentration dependent transport of colloids in saturated porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, 82(1/2):99-117.
- [14] Rosenbrand E, Kjeller C, Riis J F, et al. Different effects of temperature and salinity on permeability reduction by fines migration in Berea sandstone[J]. Geothermics, 2015, 53(1):225-235.
- [15] 张鹏远.多孔介质中悬浮颗粒的渗透迁移:孔隙结构和颗粒尺度效应[D].北京:北京交通大学,2016.
- [16] 杜丽娜,邵明安,魏孝荣,等.砂质多孔介质中土壤颗粒的迁移[J].土壤学报,2014,51(1):49-57.
- [17] 刘泉声,崔先泽,张程远,等.粒径对多孔介质中悬浮颗粒迁移-沉积特性的影响[J].岩土工程学报,2014,36(10):1777-1783.
- [18] 陈星欣,白冰,于涛,等.粒径和渗流速度对多孔介质中悬浮颗粒迁移和沉积特性的耦合影响[J].岩石力学与工程学报,2013,31(增刊1):2840-2845.
- [19] 夏栋.南方花岗岩区崩岗崩壁稳定性研究[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [20] Alaoui A, Lipiec J, Gerke H H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective [J]. Soil and Tillage Research, 2011, 115/116(5):1-15.