

黄土丘陵区坡面薄层水流动力学特性及其对土壤侵蚀的影响

安妙颖^{1,2} 韩玉国^{1,2*} 王金满³ 徐磊⁴ 王秀茹^{1,2} 庞丹波¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持国家林业局重点实验室,北京 100083;

2. 山西省吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,山西 吉县 042200;

3. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院/国土资源部土地整治重点实验室,北京 100083;

4. 中国灌溉排水发展中心,北京 100054)

摘要 为奠定基于运动力学参数构建土壤侵蚀模型的理论基础,通过不同降雨强度(25、50和75 mm/h)、不同坡长(1、5、10、15和20 m)下径流小区内人工模拟降雨试验,对不同处理下坡面薄层水动力学特性进行分析,并对水动力学参数与土壤侵蚀之间的关系进行初步探讨。结果表明:当坡度一定时,坡面平均流速主要受坡长及单宽流量影响,降雨强度通过影响单宽流量的大小间接影响坡面平均流速;在试验设计范围内,当坡长>1 m时,整体上呈“层流-急流态”,当坡长为1 m时,整体上呈“层流-缓流态”;当降雨强度一定时,雷诺数随着坡长的增加线性增加,佛汝德数随着坡长的增加以幂函数形式增加;降雨强度对坡面流有明显的“增阻”效应;坡面阻力系数随着坡长的增加呈幂函数减小趋势;坡面平均土壤侵蚀率与单宽流量间呈一元线性趋势增加,与水流平均流速间呈指数函数增加,与雷诺数间呈二次函数增加。

关键词 黄土丘陵区; 坡面流; 水动力学特性; 土壤侵蚀

中图分类号 S157.1

文章编号 1007-4333(2020)02-0142-09

文献标志码 A

Hydrodynamic characteristics of overland flow and its impact on erosion in Loess Hilly Region

AN Miaoying^{1,2}, HAN Yuguo^{1,2*}, WANG Jinman³, XU Lei⁴, WANG Xiuru^{1,2}, PANG Danbo¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Forest Ecosystem Studies, National Observation and Research Station, Jixian 042200, China;

3. School of Land Science and Technology/Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation of Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

4. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China)

Abstract Overland flow is the main source of soil erosion. Research on the hydrodynamic characteristics and its impact on soil erosion are important to deeply understand the mechanism of soil erosion. In recent years, numerous studies have focused on the characteristics of overland flow on slopes, which ignored the role of slope hydrodynamics in soil erosion mechanisms. In this study, the characteristics of overland flow and its impact on soil erosion were analyzed by conducting artificial simulation experiments in runoff plots with different slope lengths (1, 5, 10, 15 and 20 m) under different rainfall intensities (25, 50 and 75 mm/h). The results showed that the average velocity was mainly affected by the lengths of slope and the discharge per unit width, whereas the rainfall intensity indirectly affected the average velocity by influencing the discharge per unit width. The overland flow presented laminar torrent pattern when the slope length was greater than 1m and laminar subcritical pattern when the slope was 1 m. When the rainfall intensity was

收稿日期: 2019-04-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(BJFUKF201801);国家自然科学基金(51879005)

第一作者: 安妙颖,博士研究生,E-mail:miaoying_an@bjfu.edu.cn

通讯作者: 韩玉国,副教授,主要从事水土保持与农业面源污染物迁移方面研究,E-mail:yghan@bjfu.edu.cn

constant, the Reynolds number increased linearly with the increase of slope length, and the Froude number increased with the increase of the slope length as a power function. The rainfall intensity displayed a significant “drag-increasing” effect on overland flow. The slope resistance coefficient decreased in power function with the increase of slope length. The average soil erosion rate on slope increased with the discharge per unit width linearly, with the average velocity exponentially and the Reynolds numbers quadratically.

Keywords Loess Hilly Region; overland flow; hydrodynamic characteristics; soil erosion

坡面薄层水流是指降雨量超过植物截留、土壤入渗及填洼能力后沿坡面形成的浅层明流,是土壤侵蚀的主要动力之一^[1]。众多学者在薄层水流动力学特性方面做了大量研究,李占斌等^[2]采用陡坡室内冲刷试验表明黄土高原陡坡丘陵区坡面流均处于急流范围,坡面阻力系数受雷诺数和坡度的影响。张宽地等^[3]揭示了不同坡度下坡面水流流态指数随坡度呈不同的变化趋势。王祗渊等^[4]探究了不同植被覆盖度下坡面流阻力变化的内在规律,认为流量是影响阻力的主要因素,阻力系数随着流量的增大而增大,而坡度对其影响可以忽略。柳晓娜等^[5]通过室内定床冲刷试验揭示了大粗糙单元下垫面具有增加坡面流阻力、延缓坡面流速、雍高流水深的作用。杨坪坪等^[6]认为不同刚性植被空间配置模式对坡面流水动力学参数有显著影响,品字状配置对坡面流流速抑制最大。蒋利斌等^[1]提出在降雨和坡面流共同作用下平均流速随单宽流量呈幂函数增加,且降雨对坡面流有扰动作用。但是,这些研究着重考虑了降雨、坡度、地表粗糙度、植被覆盖度及上方来水流量对坡面流水力动力学参数特性的影响,忽视了坡长在径流汇水过程中的重要作用。

坡面薄层水流作为土壤侵蚀过程中破坏、剥蚀、搬运泥沙颗粒的主要载体和动力,对土壤侵蚀过程有重要影响。因此,采用坡面水流动力学参数阐明土壤侵蚀的机理是必要的。徐锡蒙等^[7]通过室内人工模拟降雨试验得出建立秸秆缓冲带可以有效减小细沟水流流速、雷诺数和佛汝德数,增加 Darcy-Weisbach 阻力系数,从而有效减小坡面细沟侵蚀。郝好鑫等^[8]认为在红壤缓坡区水力坡度与雷诺数乘积的复合水动力参数可以表征坡面侵蚀产沙特征。郭太龙等^[9]认为相对水深和曼宁糙率系数 2 种水动力因子共同组成的复合水动力特征参数可以表征华南红壤区不同雨强及坡度下的坡面水蚀侵蚀产流产沙的特征。柳玉梅等^[10]利用变坡试验水槽研究了水深、平均流速、雷诺数、佛汝德数和阻力系数对土壤分离能力的定量影响。张锐波等^[11]认为流速是

坡面侵蚀产沙的主要影响参数,剪切力是判断坡面侵蚀产沙的综合性指标。综上可知,基于坡面水流动力学特性对红壤区土壤侵蚀作用机制的研究已经较为完善,而黄土丘陵区作为我国水土流失的重点区域之一,具有地形破碎、土质疏松和降雨集中等特点,但是基于水流动力学特性对土壤侵蚀机制的研究还存在缺陷。

本研究旨在通过径流小区人工模拟降雨试验的方法,定量研究黄土丘陵区不同坡长和降雨强度对坡面水力要素的变化特征的影响,初步探讨水动力学特性与土壤侵蚀之间的内在规律,以期为建立基于运动力学参数的土壤侵蚀模型奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

该试验于 2015 年 6—8 月在内蒙古呼和浩特市和林格尔县水科院水资源研究所灌溉试验中心站开展,地处 $111^{\circ}26' \sim 112^{\circ}18' E$, $39^{\circ}58' \sim 40^{\circ}41' N$,属中温带半干旱大陆性季风气候。该地区年平均气温为 $6.2^{\circ} C$,极端最高温度为 $37.9^{\circ} C$,极端最低温度为 $-31.7^{\circ} C$ 。多年平均降雨量为 $392.8 mm$,年降雨量最大值为 $571.4 mm$,最小值为 $250.3 mm$ 。试验小区内土壤按发生分类属全新世以来由玄武岩基岩风化发育的暗栗钙土,按土壤质地分类属砂壤土,其物理化学性质如表 1 所示。试验土壤的机械组成、容重、有机质、pH、初始含水量、总氮分别采用马尔文 Mastersizer 3000 激光粒度仪、环刀法、重铬酸钾容量法-油浴法、水浸提法(水土体积比为 2.5 : 1.0)、烘干法、浓硫酸消煮-半微量凯氏法测定^[12]。

1.2 试验设计

本试验设计的径流小区坡长分别为 1、5、10、15 和 20 m,宽度为 5 m,坡度为 5° ,均为裸坡,每个坡长设 3 个重复,共 15 个径流小区。结合当地天然降雨情况,本试验设计降雨强度为 25、50 和 75 mm/h 共 3 个水平,共计有效降雨 45 场。试验采用侧喷式人工模拟降雨装置,降雨喷头分别布设在坡面 2 个

表1 供试土壤的物理化学性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of soil samples tested

土壤类型 Soil type	机械组成/% Soil texture			土壤容重/ (g/cm ³) Soil bulk density	有机质/ (g/kg) Organic matter	pH	初始含水量/ % Initial soil moisture content	总氮/ (g/kg) Total nitrogen
	黏粒 (<0.002 mm) Clay	粉粒 (0.002~0.02 mm) Silt	砂粒 (0.02~2.0 mm) Sand					
砂壤土	5.02±0.06	5.54±0.43	89.55±0.39	1.52±0.06	2.81±0.07	8.40±0.16	15.21±0.38	0.37±0.02

长边每隔5 m处设置的3个铁杆上距离地面高3 m的位置,每个铁杆上绑一个喷头(图1)。试验中通过控制打开的喷头数量及压强控制降雨强度(每个喷头标定为25 mm/h)。试验设定相同降雨强度为一组,在3个坡长相同的径流小区同时试验。每次降雨前24 h于坡面上采用25 mm/h的降雨强度进行预降雨,至坡面饱和即将产流时停止降雨。每次降雨前先将坡面用塑料布覆盖,采用雨量器率定实际降雨强度与设计降雨强度误差在5%以内,均匀度达到70%~80%后进行正式降雨。正式降雨开始后,记录降雨时间和产流时间,产流后设置不等间距采样间隔,采用径流小桶收集产流后0~1,2~3,5~6,10~11,20~21,30~31 min径流样,其余径流样全部收集在径流大桶中,每场降雨持续40 min。沿坡面自上而下设置上、中和下3个断面,每个断面横向设3个等间距观测点,采用水位测针仪,观测每个点的水深;采用KMnO₄染色剂示踪法测定3个断面水流流速^[13],取平均值作为坡面表层流速。

测定径流小桶中的径流样及大桶中的径流样的体积,确定不同时刻的径流量以及总径流量。然后,分别将所有的径流样沉淀、风干,取出泥沙样称重备用,确定不同时刻的侵蚀量及总侵蚀量。

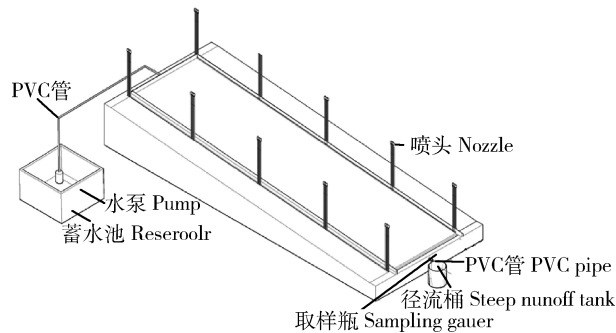


图1 坡长20 m时的人工模拟降雨系统示意图

Fig.1 Simulated rainfall system on a slope of 20 m in length

1.3 土壤侵蚀率及坡面流水动力学参数的计算

坡面平均土壤侵蚀率(D)是指单位时间单位面积内通过坡底断面的泥沙量,计算公式为:

$$D = \frac{M}{S \cdot T} \quad (1)$$

式中: D 为平均土壤侵蚀率,g/(m²·min); M 为坡面总侵蚀量,g; S 为坡面承雨面积,m²; T 为总产流时间,min。

单宽流量(Q)是指坡面单位宽度上单位时间内通过的坡底断面的径流量,计算公式为:

$$Q = \frac{V}{B \cdot T} \times 1000 \quad (2)$$

式中: Q 为坡面流平均单宽流量,L/(min·m); V 为坡面总径流量,m³; B 为坡面宽度,m。

平均流速(v)是衡量水流强度的主要指标,也是坡面水动力学要素的基础指标之一。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:

$$v = \frac{V}{60 \cdot B \cdot T \cdot h} \times 10^4 \quad (3)$$

式中: v 为断面平均流速,cm/s; h 为实测断面平均水深,cm。

水流雷诺数(Re)是表征水流流动情况的无量纲数,由流体惯性力与粘性力的比计算所得。其公式为:

$$Re = \frac{v \cdot R}{\nu_0} \quad (4)$$

式中: R 为水力半径,cm; ν_0 为水流运动粘滞系数,cm²/s。由于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 ,实际计算中由 h 代替;水流运动粘滞系数 ν_0 采用泊肃叶公式计算为:

$$\nu_0 = 0.01775 / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2) \quad (5)$$

式中: t 为水流温度,℃。

佛汝德数(Fr)是表征坡面水流流态的指标,其计算公式为:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (6)$$

式中: Fr 为佛汝德数; g 为重力加速度,取 980 cm/s^2 ;

Darcy-Weisbach 阻力系数(f)是指坡面水流在流动过程中所受到的来自水土界面摩擦力的阻滞作用和水流内部紊动所产生的阻碍水流运动的综合阻力,计算公式为:

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot R \cdot J}{v^2} \quad (7)$$

式中: f 为阻力系数; J 为水力坡度,常取坡度的正弦值。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 软件进行整理,采用 R 语言进行多元线性回归和方差分析($\alpha=0.05$),并采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 坡面流水动力学特征

2.1.1 平均流速和单宽流量

坡面平均流速是影响坡面径流和侵蚀过程最主要的水动力学参数,坡面流速的大小直接影响土壤侵蚀的整个过程,而平均流速受地形特征及降雨条件等多个因素影响。不同坡长和不同降雨强度下坡面流水动力学特征如表 2 所示。由表 2 可知,当坡长从 1 m 增加到 5、10、15 和 20 m 时,平均流速分别增加了 4.983~5.073,10.056~12.359,15.269~15.342,20.384~21.033 倍;而当降雨强度从 25 mm/h,增加到 50,75 mm/h 时,平均流速只增加了 5%~25%,说明坡长对平均流速的影响远大于降雨强度。结合不同组合各水动力学参数之间的相关性分析(表 3),可得平均流速与坡长呈显著正相关关系,相关系数高达 0.982,而降雨强度对平均流

表 2 不同坡长和不同雨强下坡面流水动力学特征

Table 2 Hydrodynamic characteristics of overland flow under the different slopes and the different rainfall intensity

降雨强度/ (mm/h) Rainfall intensity (R)	坡长/m Slope length (L)	单宽流量/ ($L/(\text{min} \cdot \text{m})$) Discharge per unit width (Q)	平均水深/ mm Average depth (h)	平均流速/ (cm/s) Average velocity (v)	雷诺数 Reynolds number (Re)	佛汝德数 Froude (Fr)	达西-韦斯 巴赫阻力系数 Darcy- weisbach (f)
75	20	19.742	0.987	33.776	347.048	3.435	0.059
	15	14.883	0.992	25.421	262.549	2.579	0.105
	10	9.359	0.936	20.479	199.505	2.139	0.152
	5	6.074	1.215	8.336	105.413	0.764	1.192
	1	1.357	1.357	1.657	23.396	0.144	33.678
50	20	7.223	0.361	34.578	130.029	5.812	0.021
	15	5.945	0.396	25.182	103.921	4.041	0.043
	10	4.272	0.427	16.637	73.992	2.571	0.105
	5	2.243	0.449	8.340	38.951	1.258	0.440
	1	0.521	0.521	1.644	8.917	0.230	13.136
25	20	2.017	0.101	33.378	35.054	10.617	0.006
	15	1.604	0.107	24.980	27.817	7.717	0.012
	10	1.175	0.117	16.451	20.121	4.849	0.030
	5	0.650	0.130	8.153	11.034	2.284	0.133
	1	0.143	0.143	1.636	2.443	0.437	3.650

表3 不同组合水动力学参数及平均土壤侵蚀率的相关性系数

Table 3 Correlation coefficient between the different combinations of hydrodynamic parameters and average soil erosion rate

相关系数 Correlation coefficient	L	R	Q	h	v	Re	Fr	f	平均土壤 侵蚀率/ Average soil erosion rate (D)
L	1								
R	0.000	1							
Q	0.655**	0.699**	1						
h	-0.295	0.945**	0.457	1					
v	0.982**	0.151	0.754**	-0.150	1				
Re	0.655**	0.699**	1.000**	0.457	0.754**	1			
Fr	0.895**	-0.397	0.307	-0.643**	0.818**	0.307	1		
f	-0.890**	0.407	-0.298	0.652**	-0.811**	-0.298	-0.999**	1	
D	0.698**	0.680**	0.957**	0.425	0.789**	0.957**	0.346	-0.340	1

注: ** 在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是极显著的。

Note: **, the correlation is extremely significant when the confidence (bilateral) is 0.01.

速影响不显著。由表 3 可知坡面平均流速单宽流量之间呈极显著相关关系,相关系数为 0.754,说明当坡度一定时,坡面平均流速主要受坡长及单宽流量影响。通过对不同雨强和坡长条件下断面平均流速与单宽流量和坡长之间的关系进行拟合分析可知,平均流速与单宽流量和坡长之间均呈幂函数正相关关系,拟合方程为:

$$v = 0.224 \times Q^{0.023} L^{0.993} \quad R^2 = 0.998 \quad (8)$$

式中: v 为坡面平均流速, cm/s; Q 为单宽流量, L/(min·m); L 为坡长, m。坡面平均流速随着坡长的增加呈幂函数形式增加,这主要是因为坡长的增加使得坡面水流沿程势能增加,从而在流动过程中不断转化为动能。张宽地等^[3]和张光辉等^[14]的径流冲刷试验和变坡试验水槽中水动力学参数的研究均发现坡面流速随单宽流量的增大呈幂函数形式,与本研究结果一致。

由表 3 可知,单宽流量与坡长和降雨强度之间均存在极显著相关关系,相关系数分别为 0.655 和 0.699,说明降雨强度和坡长是影响单宽流量的主要因子。降雨强度和坡长与单宽流量之间分别呈幂函数正相关关系,拟合方程为:

$$Q = 2.328 \times 10^{-4} \times L^{0.885} \times R^{1.997} \quad R^2 = 0.997 \quad (9)$$

式中: R 为降雨强度, mm/h。综上可知,降雨强度通过改变单宽流量的大小间接影响坡面平均流速。

2.1.2 雷诺数与佛汝德数

雷诺数是判定坡面水流紊动程度的主要参数。根据明渠水流判别方法,当 $Re < 500$ 时,水流为层流;当 $500 < Re < 5\,000$ 时,水流为过渡流;当 $Re > 5\,000$ 时,水流为紊流。在本试验设计范围内,黄土丘陵区的坡面雷诺数为 2.443~347.048(表 2),均属层流。雷诺数与坡长、雨强、单宽流量、平均流速之间均呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.655、0.699、1.000 和 0.754(表 2 和表 3)。因此,坡长、降雨强度、单宽流量和平均流速是影响雷诺数的主要因素。李勉等^[15]、张小娜等^[16]、杨坪坪等^[6]均发现平均流速随着降雨强度和单宽流量的增加呈增加趋势,与本研究结果一致。因此,此处着重研究坡长对雷诺数的影响。不同降雨强度下雷诺数随坡长的变化如图 2 所示。降雨强度一定时,雷诺数随着坡长的增加呈一元线性关系增加,拟合公式如图 2 所示。

佛汝德数是判定水流缓急程度的主要参数。根据明渠水流判别方法,当 $Fr > 1$ 时,坡面水流的惯性力大于重力,属急流;当 $Fr < 1$ 时,水流的惯性力小于重力,属缓流;当 $Fr = 1$ 时,水流的惯性力等于

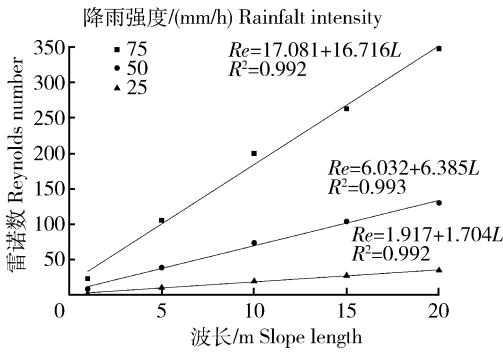


图2 坡长与雷诺数之间的关系

Fig. 2 Relationship between slope length and Reynolds number

重力,属临界流。在本试验条件中,当坡长为10、15、20 m时,佛汝德数为2.138~10.617,呈急流;当坡长为5 m时,佛汝德数为0.764~2.284,既有缓流也有急流;当坡长为1 m时,佛汝德数为0.144~0.437,呈缓流,说明随着坡长的增加,坡面水流流态逐渐由缓流向急流转化。这主要是因为随着坡长的增加径流流路增长,径流的重力势能不断转化为动能,促进水流不断向急流流态转化。结合表3可知,佛汝德数与坡长呈极显著相关关系,相关系数为0.895。通过回归分析,可知佛汝德数与坡长之间呈幂函数正相关关系,关系式为:

$$Fr = 1.071 \times L^{0.242} \quad R^2 = 0.873 \quad (10)$$

式中: Fr 为佛汝德数。

结合表2和表3可知,佛汝德数随着坡面平均流速的增加而增加,两者之间呈显著正相关关系,相关系数为0.818。这主要是因为坡面流平均流速越大,水流沿坡面的惯性力也越大,佛汝德数越大。同时,佛汝德数和径流水深之间呈现显著的负相关关系,相关系数为-0.643。这主要是因为当水流平均流速相同时,随着径流水深的增加,坡面单位面积上水流重力增加,水流的惯性力与重力之比减小,从而佛汝德数减小。这与张宽地等^[17]在人工模拟植被试验中得到随着水深的增加水流远离急流流态而趋于缓流流态的结论一致。

2.1.3 坡面流阻力

坡面流阻力主要采用 Darcy-weisbach 阻力系数公式来表征,主要包括:坡面颗粒阻力、形态阻力、波阻力以及降雨阻力^[18]。由于本试验在裸坡的条件下完成,故不考虑形态阻力。由表2可知,本试验条件下坡面流阻力系数为0.006~33.678。当坡长

一定时,随着降雨强度的增加,阻力系数明显增加,说明降雨强度有明显的“增阻”效应,这主要是因为降雨击溅坡面薄层水流的能量增加,对坡面流的打击和扰动作用增强,导致水流平均流速减小。这与汪孟尧^[19]、陈国祥等^[20]通过人工模拟降雨试验提出的降雨具有增加坡面流阻力的结论一致。但是与潘成忠等^[21]提出的降雨强度对阻力系数无影响的结论不同,主要因为潘成忠等^[21]试验中采取了0.5 mm/min的单一雨强,且雨强较小,也不同于王俊杰等^[22]在不同雨强和糙度条件下模拟试验所得的流阻力系数随着降雨强度增加而减小的结论,这可能是由于下垫面条件的不同产生了具有不同特征坡面流^[23]。

结合表3可知,坡面流阻力与平均流速之间呈极显著负相关关系,相关系数为-0.811,关系式为:

$$f = 32.928 \times v^{-2.096} \quad R^2 = 0.862 \quad (11)$$

式中: f 为 Darcy-weisbach 阻力系数。这与郝好鑫等^[8]对红壤缓坡的水流动力学特性研究中提出的坡面流阻力与平均流速呈负相关的结论一致。

当降雨强度一定时,随着坡长的增加,坡面阻力系数呈减小的趋势,在坡长为1 m时阻力系数最大(表2)。这主要是因为随着坡长的减小,坡面径流深增加,土壤颗粒和微团聚体引起的颗粒阻力增加。对坡长和阻力系数进行相关性分析(表3),两者之间存在极显著负相关关系,相关系数为-0.890。通过回归分析得出随着坡长的增加,阻力系数呈幂函数负相关关系减小,关系式为:

$$f = 11.935 \times L^{-2.140} \quad R^2 = 0.873 \quad (12)$$

式中: f 为阻力系数。

阻力系数与雷诺数和佛汝德数之间的关系一直备受关注^[24-25]。由表3可知,本试验条件下 f 与 Re 无显著相关关系,这与丁文峰等^[26]在紫色土区研究的坡面水动力学特性结果一致。阻力系数与佛汝德数之间呈极显著负相关关系,相关系数为-0.999,经拟合可得:

$$f = 0.697 \times Fr^{-1.999} \quad R^2 = 1.000 \quad (13)$$

因此,坡面阻力系数与佛汝德数之间呈幂函数关系减小。

2.2 水动力学参数对坡面平均侵蚀率的影响

坡面薄层水流是指当降雨强度高于土壤入渗能力且未发生细沟侵蚀前在坡面上形成的薄层片流以及细沟侵蚀发生后沟道内的水流^[27],因降雨和下垫面条件的不同产生不同的水动力学特征,从而对坡

面造成侵蚀。

由表3可知,坡面薄层水流的单宽流量、平均流速、雷诺数与坡面平均侵蚀率呈极显著相关关系,相关系数分别为0.957、0.789和0.957。因此,分别对单宽流量、平均流速、雷诺数与坡面平均侵蚀率的关系进行分析。

单宽流量作为表征径流量的主要指标,是影响坡面输沙的重要动力源^[28]。当坡面单宽流量较小时,对平均土壤侵蚀力的影响较小,但随着单宽流量的增加,平均土壤侵蚀率呈线性趋势增加(图3(a))。这主要是因为当坡面条件一致时,随着坡面单宽流量的增加,径流垂直于坡面的剪切力增加,导致径流对坡面土壤颗粒的剥蚀力增加,从而增加了土壤的侵蚀率^[28],这与柳晓娜等^[5]、徐锡蒙等^[7]的研究结果一致。

结合图3(b)可知,土壤平均侵蚀率随水流平均流速的增加呈指数函数增加,当降雨强度为50和75 mm/h时,坡面平均侵蚀率分别为25 mm/h的

3.322~17.581和9.295~39.370倍。这与丁文峰等^[26]指出的径流流速的增加是坡面产沙量增加的重要原因的结论一致,并进一步提出了水流平均流速与土壤平均侵蚀率之间的关系。

当坡度一定时,坡面平均土壤侵蚀率随着雷诺数的增加呈二次函数增加(图3(c))。这与柳玉梅等^[10]提出土壤的分离能力随雷诺数的增加呈先增加后减小的趋势不同,主要是因为柳玉梅等^[10]的试验中涵盖了坡度与雷诺数之间的关系,没有单一分析坡度条件一定时雷诺数与土壤分离能力的关系。

为了说明单宽流量、平均流速、雷诺数以及试验设计的自变量要素雨强和坡长对坡面平均侵蚀率的综合影响,采用R语言进行多元线性回归拟合得:

$$D = 16.536L - 0.536R + 7.946Q - 10.508v + 0.232Re + 11.552 \quad R^2 = 0.964 \quad (14)$$

拟合方程的F检验均达到 $P < 0.01$ 极显著水平,符合统计学意义。

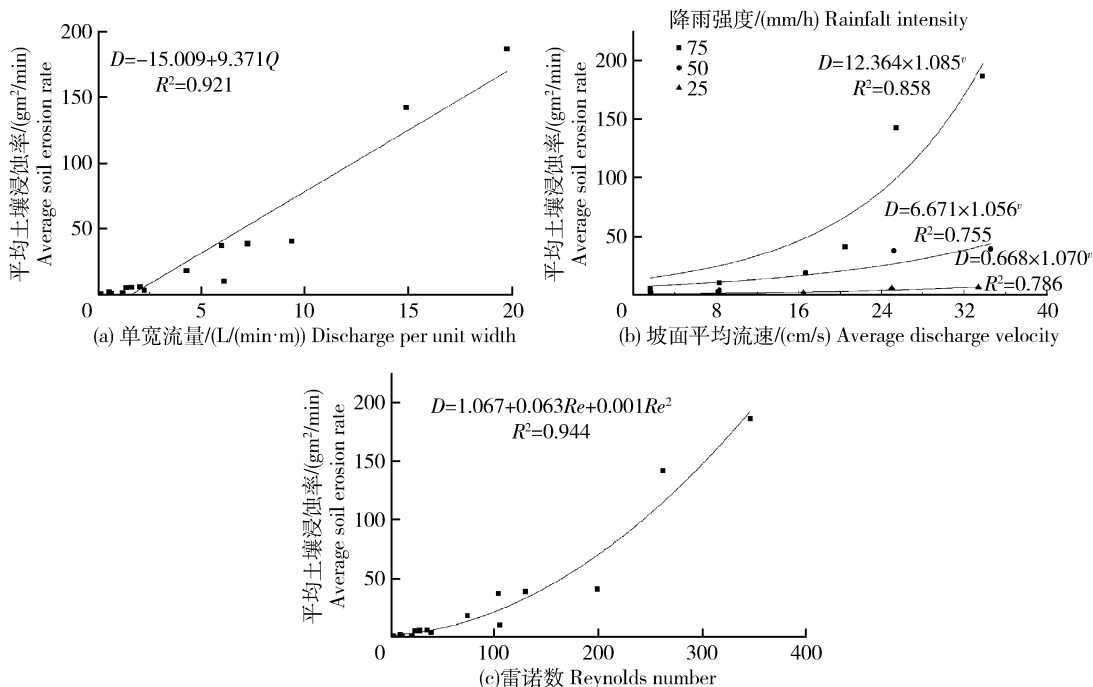


图3 平均土壤侵蚀率与单宽流量、平均流速及雷诺数的关系

Fig. 3 Relationships of average soil erosion rate and discharge per unit width, average velocity and Reynolds number

3 结论

当坡度一定时,坡面平均流速主要受坡长及单宽流量影响,且与单宽流量和坡长之间均呈幂函数

正相关关系。降雨强度通过影响单宽流量的大小间接影响坡面平均流速。

本试验条件下,当坡长 > 1 m时,整体上呈“层流-急流态”;当坡长为1 m时,整体上呈“层流-缓流

态”。降雨强度一定时雷诺数随着坡长的增加呈一元线性关系增加,而佛汝德数与坡长之间呈幂函数正相关关系。

坡长一定时,阻力系数随着降雨强度的增加而增加,降雨强度有明显的“增阻”效应。同时,坡面阻力系数随着坡长的增加呈幂函数减小的趋势。

坡面平均土壤侵蚀率与单宽流量呈一元线性趋势增加,与水流平均流速呈指数函数增加,与雷诺数呈二次函数增加。

参考文献 References

- [1] 蒋利斌,张会兰,杨坪坪,刘文剑. 降雨和坡面流共同作用下的坡面薄层水流动力学特性[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(8): 77-86

Jiang L B, Zhang H L, Yang P P, Liu W J. Hydrodynamics of overland flow under combined effects of precipitation and slope discharge[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(8): 77-86 (in Chinese)

- [2] 李占斌,秦百顺,亢伟,李雯,魏霞. 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

Li Z B, Qin B S, Kang W, Li W, Wei X. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill erosion procession steep slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(6): 64-68 (in Chinese)

- [3] 张宽地,王光谦,孙晓敏,杨帆,吕宏兴. 坡面薄层水流动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 182-189

Zhang K D, Wang G Q, Sun X M, Yang F, Lv H X. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 182-189 (in Chinese)

- [4] 王祗渊,杨帆,张宽地,吕凡,姬祥祥,国库. 流量和坡度对植被水流水动力学特性的影响[J]. 人民黄河, 2017, 39(6): 86-93

Wang D Y, Yang F, Zhang K D, Lv F, Ji X X, Guo K. Discharge and slope on hydraulic characteristics of overland flow under vegetated coverage[J]. *Yellow River*, 2017, 39(6): 86-93 (in Chinese)

- [5] 柳晓娜,樊登星,余新晓,郑鹏飞,王渝淞,朱翔辉,孙乐乐. 大粗糙单元对坡面水流动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 43-50

Liu X N, Fan D X, Yu X X, Zheng P F, Wang Y S, Zhu X H, Sun L L. Influence of large-scale roughness element on hydraulic characteristics of overland flow[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 43-50 (in Chinese)

- [6] 杨坪坪,张会兰,王玉杰,王云琦,王彬,刘昫东. 刚性植被

空间配置模式对坡面水流动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 90-95

Yang P P, Zhang H L, Wang Y J, Wang Y Q, Wang B, Liu Y D. Impact of configuration mode of rigid vegetation on overland flow[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 90-95 (in Chinese)

- [7] 徐锡蒙,郑粉莉,吴红艳,覃超. 玉米秸秆覆盖缓冲带对细沟侵蚀及其水动力学特征的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 111-119

Xu X M, Zheng F L, Wu H Y, Qin C. Impacts of cornstalk mulching buffer strip on rill erosion and its hydrodynamic character [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24): 111-119 (in Chinese)

- [8] 郝好鑫,杜一凡,曹丹妮,李朝霞,郭忠录. 红壤缓坡水流动力学特性及其对侵蚀影响的试验研究[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 4-11

Hao H X, Du Y F, Cao D N, Li Z X, Guo Z L. Experimental study of flow hydraulic characteristics and soil erosion on red soil hilly-slope[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(2): 4-11 (in Chinese)

- [9] 郭太龙,卓慕宁,李定强,蔡庆,谢真越,廖义善,胡建. 华南红壤坡面侵蚀水动力学机制试验研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1556-1563

Guo T L, Zhuo M N, Li D Q, Cai Q, Xie Z Y, Liao Y S, Hu J. Experimental study on soil erosion and flow hydraulics on red soil slope[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(9): 1556-1563 (in Chinese)

- [10] 柳玉梅,张光辉,李丽娟,韩艳峰. 坡面水流动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 96-99

Liu Y M, Zhang G H, Li L J, Han Y F. Quantitative effects of hydrodynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(6): 96-99 (in Chinese)

- [11] 张锐波,张丽萍,付兴涛. 坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 81-86

Zhang R B, Zhang L P, Fu X T. Research on relationships between sediment yield and hydraulics parameters on slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 81-86 (in Chinese)

- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2010
Bao S D. *Soil Agricultural Chemistry Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010 (in Chinese)

- [13] 孙一,田勇,刘晓燕,王协康. 坡面水流流速对贴地植被的响应特性试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(2): 89-93

Sun Y, Tian Y, Liu X Y, Wang X K. Experimental study on the response characteristics of the velocity of overland flow to the ground vegetation [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(2): 85-93 (in Chinese)

- [14] 张光辉. 坡面薄层水流动力学特性的实验研究[J]. 水科学进

- 展, 2002, 13(2): 159-165
- Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(2): 159-165 (in Chinese)
- [15] 李勉, 姚文艺, 杨剑锋, 陈江南, 丁文峰, 李莉, 杨春霞. 草被覆盖对坡面流态影响的人工模拟试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 513-523
- Li M, Yao W Y, Yang J F, Chen J N, Ding W F, Li L, Yang C X. Experimental study on the effect of grass cover on the overland flow pattern in the hillslope-gully side erosion system [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17(4): 513-523 (in Chinese)
- [16] 张小娜, 冯杰, 张超, 高玉芳. 不同雨强下土壤大孔隙对坡面流水动力学参数的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(3): 264-269
- Zhang X N, Feng J, Zhang C, Gao Y F. Influence of soil macropore on hydrodynamic parameters of overland flow with different rainfall intensities[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(3): 264-269 (in Chinese)
- [17] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 王俊杰. 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
- Zhang K D, Wang G Q, Sun X M, Wang J J. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 825-834 (in Chinese)
- [18] 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
- Wu S F, Wu P T, Yuan L F. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 14-19 (in Chinese)
- [19] 汪孟尧. 模拟降雨条件下坡面流体力学特性试验研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2018
- Wang M Y. Experimental studies on hydraulic characteristics of overland flow under simulated rainfall [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2018 (in Chinese)
- [20] 陈国祥, 姚文艺. 降雨对浅层水流阻力的影响. 水科学进展, 1996, 7(1): 42-46
- Cheng G X, Yao W Y. Effect of rainfall on hydraulic resistance of shallow flow[J]. *Advances in Water Science*, 1996, 7(1): 42-46 (in Chinese)
- [21] 潘成忠, 上官周平. 降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 6(6): 843-851
- Pan C Z, Shangguan Z P. Experimental study on influence of rainfall land slope gradient on overland shallow flow hydraulics [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 6(6): 843-851 (in Chinese)
- [22] 王俊杰, 张宽地, 杨苗, 范典, 龚家国. 雨强和糙度对坡面薄层流水动力学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 155-162
- Wang J J, Zhang K D, Yang M, Fan D, Gong J G. Influence of rainfall and roughness on hydrodynamic characteristics of overland flow [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(9): 155-162 (in Chinese)
- [23] 梅欣佩. 降雨条件下坡面薄层水流水动力学特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004
- Mei X P. Experimental study on hydrodynamic characteristics of sheet flow on slope under rain[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004 (in Chinese)
- [24] Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills[J]. *Transactions of the ASABE*, 1990, 33(6): 1900-1906
- [25] Foster G R, Huggins L F. A laboratory study of rill hydraulics: Velocity relationship [J]. *Transactions of the ASABE*, 1984, 27(3): 790-796
- [26] 丁文峰, 李亚龙, 王一峰, 程冬兵, 张平仓. 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
- Ding W F, Li Y L, Wang Y F, Cheng D B, Zhang P C. Study on runoff hydrodynamic of purple soil slope under the rainfall simulation experiment [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 66-69 (in Chinese)
- [27] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 唐克利. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(9): 66-70
- Wang W L, Lei A L, Li Z B, Tang K L. Experimental study on soil erosion dynamic mechanism of slope flow in loess hilly region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(9): 66-70 (in Chinese)
- [28] 赵春红. 坡面侵蚀性降雨径流水动力学特性及其对输沙的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014
- Zhao C H. Slope erosion rainfall runoff hydraulics and its effect on sediment transport[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华