

急陡黄土坡面土壤剥蚀率变化的水动力学机制研究

白玉洁¹, 张风宝^{1,2}, 杨明义^{1,2}, 李占斌^{2,3}, 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; 3. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 为探明模拟降雨条件下急陡黄土坡面侵蚀产沙的水动力学特征, 采用室内模拟降雨的方法研究了 6 个坡度(25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°)和 3 个雨强(1.0, 1.5, 2.0 mm/min)组合条件下急陡黄土坡面土壤剥蚀率变化规律以及土壤剥蚀率与各水动力学参数之间的关系。结果表明: 同坡度下土壤剥蚀率随雨强的增加而增大, 相同雨强下坡度对土壤剥蚀率的影响存在临界效应(40°~45°), 当坡度小于临界坡度时, 土壤剥蚀率随着坡度的增加而增大, 当坡度大于临界坡度时, 土壤剥蚀率随坡度的增加而减小; 径流剪切力、径流功率与过水断面单位能随坡度和雨强的增大均呈增加趋势, 其中规律最好的是径流功率; 急陡黄土坡面土壤剥蚀率与平均径流剪切力、平均径流功率与平均过水断面单位能均呈幂函数关系, 就拟合优度而言, $R^2(\omega) > R^2(\tau) > R^2(E)$ 。因此本试验条件下平均径流功率是描述急陡黄土坡面径流侵蚀的最优水力学参数。

关键词: 急陡坡; 模拟降雨; 侵蚀产沙; 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(2018)04-0001-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.001

Hydrodynamic Mechanism of Variation in Soil Erosion Rate on Steep Loess Slopes

BAI Yujie¹, ZHANG Fengbao^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}, LI Zhanbin^{2,3}, 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, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: This paper oriented to study hydrodynamic characteristics of steep loess slopes (25°~50°), in an attempt to lay down a foundation for elucidating the in-depth relationships of the hydrodynamic characteristics of shallow water flow on slopes with soil erosion. An indoor experiment was carried out to simulate rainfalls on steep loess slopes. The experiment was designed to have only one soil type (loessal soil), three rainfall intensities (1.0 mm/min, 1.5 mm/min and 2.0 mm/min) and six slope gradients (25°, 30°, 35°, 40°, 45° and 50°). Results showed that: (1) Soil erosion rate increased with rising rainfall intensities on slopes with the same gradient, and under the same rainfall intensity, the effects of slope gradients on soil erosion rate exhibited a critical point in gradient, that was, between 40° and 45°. On slopes with gradient lower than the critical point, soil erosion rate increased with rising slope gradients, whereas on slopes with gradient higher than the point, soil erosion rate decreased with rising slope gradients. (2) Flow shear stress, stream power and unit energy of water-carrying section were increased with the rising rainfall intensities and slope gradients, while stream power had the best regularity. (3) The increasing power functions were found between soil erosion rate with flow shear stress, unite stream power and unit energy of water-carrying section, with the determining coefficient of $R^2(\omega) > R^2(\tau) > R^2(E)$. So stream power was the best one of all the hydrodynamic parameters tested to describe the soil erosion process on the steep loess slopes.

Keywords: steep slope; simulated rainfall; soil erosion; hydrodynamic parameters

收稿日期: 2018-03-03

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402406); 国家自然科学基金项目(41571130082)

第一作者: 白玉洁(1990—), 女, 陕西神木人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: woshiyj999@163.com

通信作者: 张风宝(1980—), 男, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

水土流失是坡面物质和径流相互作用的结果,而坡面径流的动力作用是造成水土流失的根源,因此,深入了解坡面侵蚀水动力学特性是研究坡面水土流失特征和规律的前提和基础。目前国内外有诸多学者对水动力学特性进行了研究^[1-5]。已经有相关研究^[6]指出,土壤剥蚀率是水动力参数和土壤参数的函数,而水动力参数多以径流剪切力、径流功率和过水断面单位能等来描述,但究竟何种水动力参数能准确地描述复杂的径流剥离土壤的过程,众学者则持有不同意见。Foster 等^[7]研究指出侵蚀和径流剪切力呈正比;刘俊娥等^[8]研究发现过水断面单位能是描述其试验条件下黄土坡面片蚀动力学过程最好的动力学参数;张光辉等^[8-9]、张乐涛等^[5]认为径流功率比径流剪切力和单位径流功率更适合预报土壤侵蚀;黄炎和等^[10]通过冲刷试验研究发现径流剪切力、单位径流功率和断面单位能随着流量和坡度的增加呈增大趋势,但流量对三者的影响均大于坡度;而李鹏等^[11]认为能耗理论更有利于侵蚀过程的描述。由于试验对象的差异和研究手段的不同,坡面侵蚀的水动力学特征存在很大差异,到底哪种水动力学参数是坡面侵蚀产沙动力学原因,并对径流输沙发生核心动力作用,且能准确描述坡面流侵蚀过程,目前并没有一致的结论。

我国是世界上水土流失最为严重的国家之一,尤其是黄土高原地区地形复杂,坡陡沟深,加之近年来经济快速发展,公路铁路建设、矿产资源开发、治沟造地及梯田建设等各类开发建设活动逐渐增多,黄土高原地区形成了大量 $>25^\circ$ 的急陡边坡,成为土壤侵蚀的潜在新源地,可能造成严重的土壤侵蚀。根据国际地理学会地貌调查与制图委员会对坡度的分级,坡度 $>25^\circ$ 时属于急坡急陡坡范畴^[12]。而目前有关急陡黄土边坡土壤侵蚀特征的研究较少,因此,亟需加强急陡坡面侵蚀水动力学特性及与土壤侵蚀之间关系的研究,为急陡坡面土壤侵蚀的预测预报预防奠定基础。基于此,本文利用室内模拟降雨的动床试验,模拟黄土高原急陡边坡,并结合流体力学的相关理论,对黄土急陡坡面水动力学特性进行深入研究,对比分析缓坡坡面与急陡坡坡面侵蚀水动力学特征方面的差异,以期深入揭示坡面侵蚀水动力学特征及其与坡面土壤侵蚀的关系奠定基础。

1 材料与方法

本研究采用室内人工模拟降雨试验的方法,试验于 2016 年 7—10 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行。试验采用侧喷式人工模拟降雨系统,降雨器高度为 16 m,可保证所有雨滴在

降落时达到终点速度,降雨均匀度大于 80%^[13]。试验土样取自黄土高原腹地的陕西安塞县一典型黄土斜坡,土壤类型为黄绵土,黄绵土质地均一,为粉砂质土壤,其黏粒含量 14.5%,粉粒含量 68%,砂粒含量 17.5%。黄绵土是陕北黄土高原地区的一个主要土类,分布甚广,约占全区总土地面积的 67.8%,占耕地面积 80%左右,在农业生产上占有重要地位^[14],因此选黄绵土为试验土壤具有一定的代表性。将试验土壤中的根系和石块等杂质除去,并过 5 mm 筛,通过阴干或洒水的方式控制土壤前期含水量为 10%。

本试验所用钢制土槽长 3.3 m,宽 1 m,深 0.30 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,以保证水分及时渗出。试验设计坡度为 $25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 和 50° ,为了消除因坡度变化导致有效承雨面积变化对试验结果的影响,保持投影面积 2 m^2 (2 m 长 $\times 1\text{ m}$ 宽)不变,土槽后挡板设计为可移动式的,随坡度增加向后移动,坡长随坡度增加分别为 2.21, 2.31, 2.44, 2.61, 2.83, 3.11 m。在土槽装土前,土槽底部铺 5 cm 河道粗砂,以保证良好的透水性,粗砂上铺一层纱布,纱布上铺 20 cm 试验所用黄土,容重控制在 1.3 g/cm^3 。为准确控制容重,土壤按 5 cm 厚度分层填装,每两层之间进行打毛处理以便层与层之间的连续接触,表层保持光滑,将土槽四周压实以防止边坡效应发生。为了保证每场试验的初始条件基本一致,降低坡面含水率变异性对试验结果的影响,试验开始前一天,进行前期预降雨,雨强为 0.5 mm/min ,时间以坡面即将开始产流为准,使土壤处于饱和状态,然后放置 12 h 以上,使得坡面水分充分扩散,以达到前期含水量的一致。为保证降雨强度的均匀性和稳定性,试验前进行雨强率定,先用遮雨布盖住土槽,在土槽四周均匀布设 4 个雨量筒,测定 3 min 的降雨量,保证 4 个雨量筒的标准误差不大于 10%,率定结果与设计雨强误差不超过 5%,雨强达到要求后,快速揭开遮雨布并用精度为 0.01 s 的秒表计时。水流呈层流状态流至出水口时视为产流开始,用精度为 0.01 s 的秒表记录产流时间,试验采取接全样的方式,产流后前 3 min 每 1 min 接 1 次径流泥沙样,之后每 2 min 接 1 次样,在接样时段内用高锰酸钾染色剂法连续两次测定坡面中部的流速,测距为 1 m,求两次测量平均值代表全坡面平均流速。降雨结束后用精度为 0.01 g 的电子天平称全样重量,静置 12 h 以上,用虹吸法除去上层清水,然后用精度为 0.01 g 的电子天平称剩余水及泥沙的重量,再将泥沙搅拌均匀并取少量代表样称重烘干,测定其含水量,推算降雨过程的

径流量和产沙量。试验设计雨强为 1.0, 1.5, 2.0 mm/min, 对所有试验重复 1 次, 将 2 次试验数据用 SPSS 软件进行差异性分析, 当 2 次试验数据不存在显著性差异时, 对 2 次试验数据求均值作为本研究的最终结果, 方差分析时除外。其中对土壤剥蚀率数据做方差分析时, 取每场试验土壤剥蚀率变化较为稳定时段内(产流历时为 9~45 min)的数据。

2 相关计算公式

土壤剥蚀率(D_r): 坡面径流在单位时间单位面积上所输移出的泥沙质量, 计算式为:

$$D_r = \frac{M}{b \cdot L \cdot t} \quad (1)$$

式中: D_r 为土壤剥蚀率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); M 为测量时段 t (s) 内的产沙量(g); b 为过水断面宽度(m); L 为坡长(m)。目前的研究均采用此种方法获得土壤剥蚀率, 但是张光辉^[15]的研究指出, 土壤的分离能力与泥沙的输移存在着耦合机制, 在试验条件下, 由于土槽的面积较大, 输沙对土壤的分离能力产生影响, 所以通过这种利用侵蚀泥沙反推剥蚀率的方法获得的土壤剥蚀率较实际土壤分离能力偏小, 然而在坡面尺度上, 由于土壤侵蚀与沉积的动态变化, 无法获取坡面每一点位剥蚀率的真值, 只能通过反推的平均值代替。

径流剪切力(τ): 径流剪切力是反映径流在流动时对坡面土壤剥蚀力大小的参数, 计算式为:

$$\tau = \gamma_m g R J \quad (2)$$

式中: τ 为径流剪切力(Pa 或 N/m^2); γ_m 为浑水密度(kg/m^3), 考虑了含沙量的影响; g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; R 为水力半径(m), 薄层水流可视为二元流, 水力半径近似等于断面平均水深; J 为水力坡度, 用坡度的正切值近似代替, 即 $J = \tan \theta$, θ 为坡度($^\circ$)。

径流功率(ω): 径流功率表征作用于单位面积水流所消耗的功率, 反映水流流动时挟沙能力的参数, 计算公式为:

$$\omega = \tau \cdot V \quad (3)$$

式中: ω 为径流功率($\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$), 是径流剪切力(包含坡度、水深)和流速的函数, 包含了径流剪切力和流速的影响; V 为坡面水流速率(m/s)。

过水断面单位能(E): 以过水断面最低点做基准面的单位水重的动能和势能之和, 计算公式为:

$$E = \frac{a \cdot V^2}{2g} + h \quad (4)$$

式中: E 为过水断面单位能(m); a 为校正系数, 取值为 1; h 为平均径流水深(m)。

为了研究各因素对水力学参数影响的贡献大小, 本

文采用 Sadeghi 等^[16]研究中所采用的基于方差分析结果估算自变量对因变量影响的贡献率的计算公式。

$$P_F = \frac{SS_F - (\text{DOF}_F \cdot V_{E_r})}{SS_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: P_F 为自变量 F 对因变量影响的贡献率(%); SS_F 为自变量 F 的平方和; DOF_F 为自变量 F 的自由度; V_{E_r} 为误差的均方; SS_T 为总平方和。

3 结果与分析

3.1 土壤剥蚀率随降雨历时的变化规律

土壤剥蚀是土壤侵蚀发生的初始阶段, 指径流剥蚀地土粒脱离原土体的过程。从图 1 可以看出, 每场试验产流开始的前 6 min 土壤剥蚀率均较大, 且呈迅速递减的趋势, 6 min 之后递减速率减缓, 土壤剥蚀率处于准稳定状态; 在降雨后期, 2.0 mm/min 雨强下土壤剥蚀率呈增大趋势。这与张光辉^[17]、王秋霞等^[18]的研究结果类似。在本研究条件下主要是因为土槽填装好之后坡面表层存在浮土, 经雨滴打击之后更容易脱离坡面, 产流初期被径流剥蚀的土壤较多, 但是随着产流的继续, 坡面土壤孔隙被泥浆阻塞, 坡面形成板结, 土壤剥蚀率在产流开始较大之后迅速减小, 且处于准稳定状态。降雨强度为 1.0 mm/min 时, 各坡度下土壤剥蚀率变化规律为 $25^\circ < 30^\circ < 50^\circ < 35^\circ < 40^\circ < 45^\circ$, 最小和最大平均土壤剥蚀率分别为 0.04, 0.22 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 降雨强度为 1.5 mm/min 时, 各坡度下土壤剥蚀率变化规律为 $25^\circ < 30^\circ < 50^\circ < 35^\circ < 40^\circ < 45^\circ$, 最小和最大平均土壤剥蚀率分别为 0.08, 0.26 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 降雨强度为 2.0 mm/min 时, 各坡度下土壤剥蚀率变化规律为 $25^\circ < 45^\circ < 30^\circ < 35^\circ < 40^\circ < 50^\circ$, 最小和最大平均土壤剥蚀率分别为 0.10, 0.59 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。总体表现为土壤剥蚀率随降雨强度的增加而增大, 而相同雨强下土壤剥蚀率随坡度的变化较为复杂, 降雨强度较小时(1.0, 1.5 mm/min), 土壤剥蚀率随坡度总体呈先增加后减小的变化趋势, 坡度 $< 45^\circ$ 时, 剥蚀率随坡度的增加而增大, 当坡度为 50° 时, 剥蚀率减小, 造成这种现象的原因可能由于本试验设计为了保持有效承雨面积不变, 坡度增加的同时坡长随之增大, 坡度的增加使得重力作用加强, 土壤更加容易被分离, 从而使得剥蚀增加, 而坡长的增加则使得泥沙在输移的过程中经过的粗糙坡面增多, 阻力增加, 从而使得剥蚀率有所降低。坡度对剥蚀率的影响主要取决于这两方面的综合作用, 随着坡度等梯度增加, 坡长增加的幅度逐渐增大, 当坡度 $< 45^\circ$ 时, 坡长增加的幅度相对较小, 当坡度由 45° 增加到 50° 时, 坡长增加幅度最大, 从而当坡度

$<45^\circ$ 时坡度增加导致的剥蚀率增加作用占主导,剥蚀率增大,而当坡度增大到 50° 时,坡长增加较大,坡面的阻力增加较多,从而使得剥蚀率有所减小。当降雨强度较大时(2.0 mm/min),在坡度 $<40^\circ$ 的条件下剥蚀率随着坡度的增加而增大,这是因为大雨强条件下,径流的搬运能力较强,导致粗糙坡面对泥沙的阻力效应减弱,坡度增大使得剥蚀率增加的作用占主导,从而剥蚀率随坡度的增加而增大,但试验中发现,雨强为 2.0 mm/min 、坡度为 45° 和 50° 时,在大雨强作用的后期由于重力和径流的双重作用,坡面会出现裂缝和细沟,使得土壤剥蚀率波动较大。本试验中土壤剥蚀率随坡度变化的变化特征与前人^[17-18]研究成果不同,张光辉^[17]、王秋霞等^[18]的研究中坡度较小,土壤剥蚀率随坡度的增加而增大。方差分析结果(表 1)显示,雨强、坡度及雨强与坡度的交互作用对土壤剥蚀率均有极显著影响($p < 0.01$)。雨强、坡度、雨强与坡度的交互作用及不可控因素对土壤剥蚀率的贡献分别为 44.16% 、 24.04% 、 19.18% 和 12.62% ,说明雨强控制坡面土壤剥蚀率,坡度对土壤剥蚀率的影响相对雨强较小。

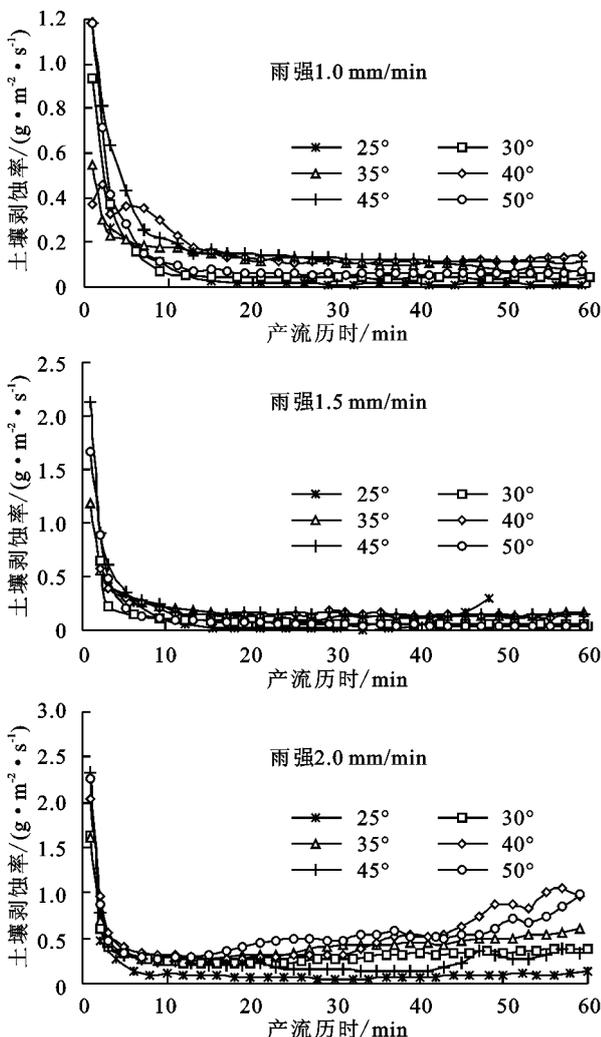


图 1 坡面表层土壤剥蚀率随径流过程的动态变化

表 1 基于方差分析的雨强和坡度对土壤剥蚀率及各水力学参数影响的显著性和贡献率

变量	源	F 值	显著性	因子贡献率/%
剥蚀率	雨强	408.70	0.00	44.16
	坡度	89.79	0.00	24.04
	交互	36.41	0.00	19.18
	误差			12.62
径流剪切力	雨强	873.13	0.00	55.00
	坡度	148.93	0.00	23.32
	交互	32.06	0.00	9.79
	误差			11.89
径流功率	雨强	2344.73	0.00	36.97
	坡度	1298.36	0.00	51.16
	交互	113.75	0.00	8.89
	误差			2.97
过水断面单位能	雨强	853.65	0.00	16.62
	坡度	1041.27	0.00	50.71
	交互	298.39	0.00	28.99
	误差			3.68

3.2 水动力学参数的变化规律

从图 2 可以看出,当坡度相同时,径流剪切力、径流功率和过水断面单位能均随降雨强度的增加而增加,其中径流功率的规律性最好, 2.0 mm/min 雨强时的径流功率是 1.0 mm/min 雨强的 2~3 倍,是 1.5 mm/min 雨强的 1~2 倍。在同一降雨强度下,径流剪切力、径流功率和过水断面单位能随坡度的增加呈波动增加的趋势,降雨强度为 1.0 mm/min 时增幅分别为 59% 、 293% 和 285% ,降雨强度为 1.5 mm/min 时增幅分别为 259% 、 627% 和 317% ,降雨强度为 2.0 mm/min 时增幅分别为 65% 、 333% 和 186% 。本试验条件下水动力学参数变化特征结果与张光辉^[17]研究相似,这主要是因为随着坡度或者降雨强度的增大,坡面流的平均流速逐渐增大,坡度的增大也会使水力坡度增大,但在坡面宽度不变的情况下流速的增加却导致平均水深和水力半径变小,因此坡面径流剪切力、径流功率及过水断面单位能受坡度和降雨强度的影响,但是不呈现单一的线性函数关系,变化规律不明显。方差分析结果(表 1)显示,雨强、坡度及雨强与坡度的交互作用对径流剪切力、径流功率及过水断面单位能均有极显著影响($p < 0.01$)。其中雨强对径流剪切力、径流功率及过水断面单位能的贡献分别为 55.00% 、 36.97% 、 16.62% ,坡度对径流剪切力、径流功率及过水断面单位能的贡献分别为 23.32% 、 51.16% 、 50.71% ,雨强与坡度的交互作用对径流剪切力、径流功率及过水断面单位能的贡献分别为 9.79% 、 8.89% 、 28.99% ,不可控因素对径流剪切力、径流功率及过水断面单位能的贡献分别为 11.89% 、 2.97% 、 3.68% ,说明雨强对径流剪切力起主导作用,而坡度对径流功

率和过水断面单位起主导作用。

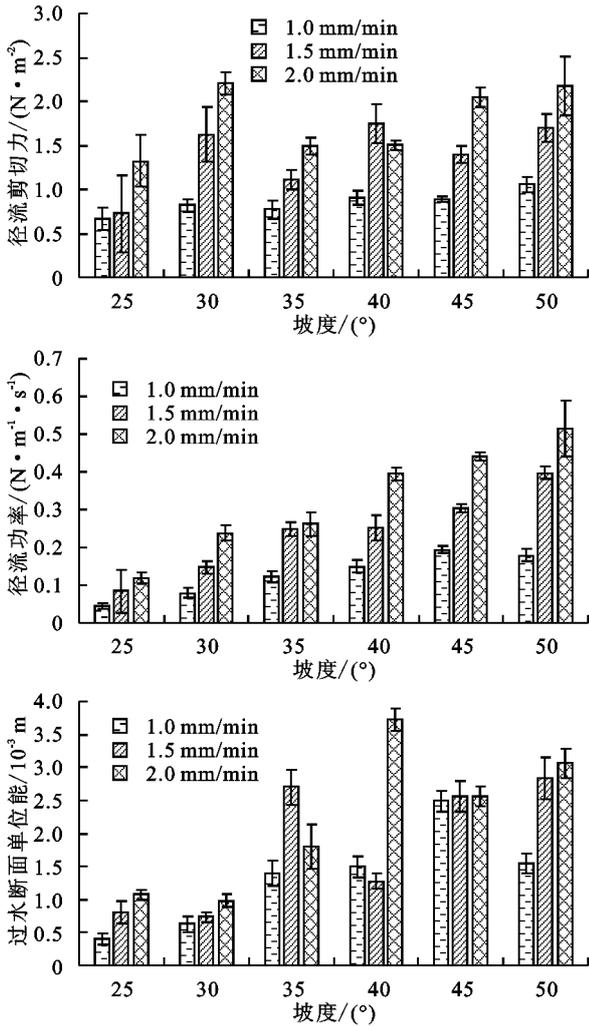


图 2 各试验条件下水动力学参数

3.3 土壤剥蚀率与水动力学参数之间的关系

为探明各水力学参数对急陡黄土坡面土壤侵蚀的影响, 将不同降雨强度及不同坡度条件下一次降雨径流侵蚀过程中的平均土壤剥蚀率随平均径流剪切力、平均径流功率、平均过水断面单位能的关系点绘成图 3。

由图 3 可知, 不同降雨强度及不同坡度条件下, 一次降雨坡面土壤剥蚀率随平均径流剪切力、平均径流功率、平均过水断面单位能的增加均呈增大趋势。为进一步确定土壤剥蚀率与其余三者之间的关系, 利用 SPSS 对试验数据进行回归分析, 得到关系式为:

$$D_r = 0.147\tau^{1.128} \quad (R^2 = 0.492, p < 0.01) \quad (6)$$

$$D_r = 0.79\omega^{0.869} \quad (R^2 = 0.757, p < 0.01) \quad (7)$$

$$D_r = 0.131E^{0.851} \quad (R^2 = 0.597, p < 0.01) \quad (8)$$

根据公式(6)~公式(8)可知, 急陡黄土坡面土壤剥蚀率与径流剪切力、径流功率与过水断面单位能均呈幂函数关系, 且概率均小于显著性水平 0.01, 说明这些公式的获得有一定的可靠性。因此可以用平均径流剪切力、平均径流功率与平均过水断面单位能来预测急陡黄土坡面土壤剥蚀率。但就拟合优度而言,

$R^2(\omega) > R^2(\tau) > R^2(E)$, 因此可以认为在试验条件下, 平均径流功率是描述急陡黄土坡面径流侵蚀的最优水力学参数。但刘俊娥等^[3]研究发现, 断面单位能是其试验条件下(坡度为 $9^\circ \sim 21^\circ$)黄土坡面片蚀过程中最密切的水动力学指标, 谭贞学等^[4]研究证明, 径流剪切力是描述黄土坡面(坡度为 $9^\circ \sim 21^\circ$)细沟径流输沙的最好水动力学指标。说明试验对象及坡度等条件的不同, 坡面侵蚀的水动力学特征及与土壤剥蚀率的关系差异较大。

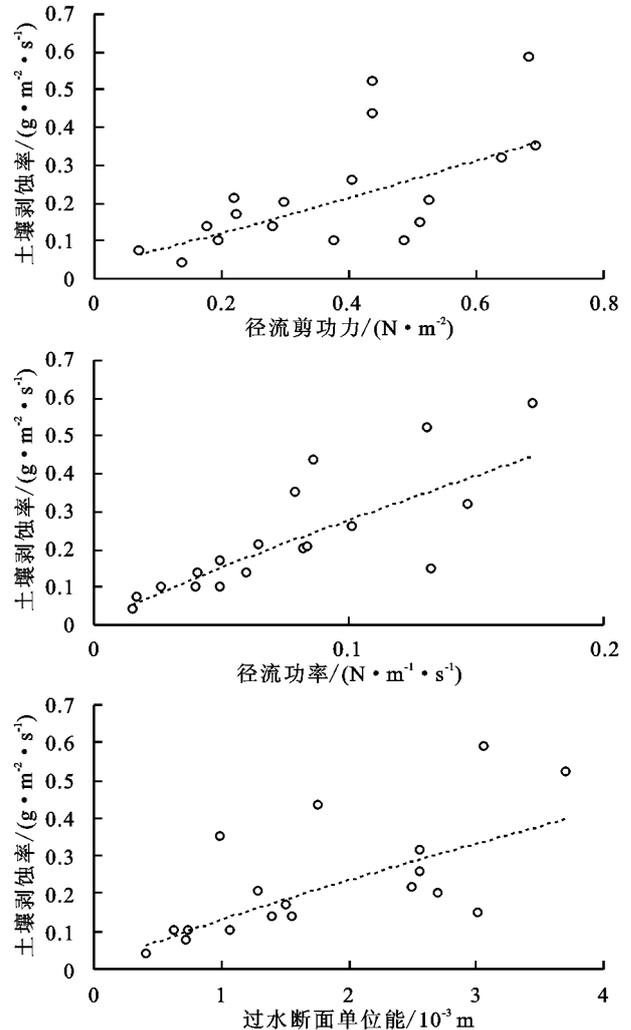


图 3 土壤剥蚀率与水动力学参数的关系

对不同降雨强度及不同坡度条件下径流产沙过程中的坡面土壤剥蚀率与瞬时径流剪切力、瞬时径流功率、瞬时过水断面单位能的数据进行回归分析, 由于本试验中瞬时值较多, 为了保证每场降雨的各个时刻都有代表点, 因此只取相邻 3 个瞬时值中的 1 个, 做成散点图(图 4)。从图 4 可以看出, 急陡黄土坡面土壤剥蚀率随瞬时径流剪切力、瞬时径流功率、瞬时过水断面单位能的变化规律不明显, 相关性极差。因此瞬时径流剪切力、瞬时径流功率、瞬时过水断面单位能不能很好地描述试验条件下急陡黄土坡面土壤侵蚀过程中土壤剥蚀率的变化。

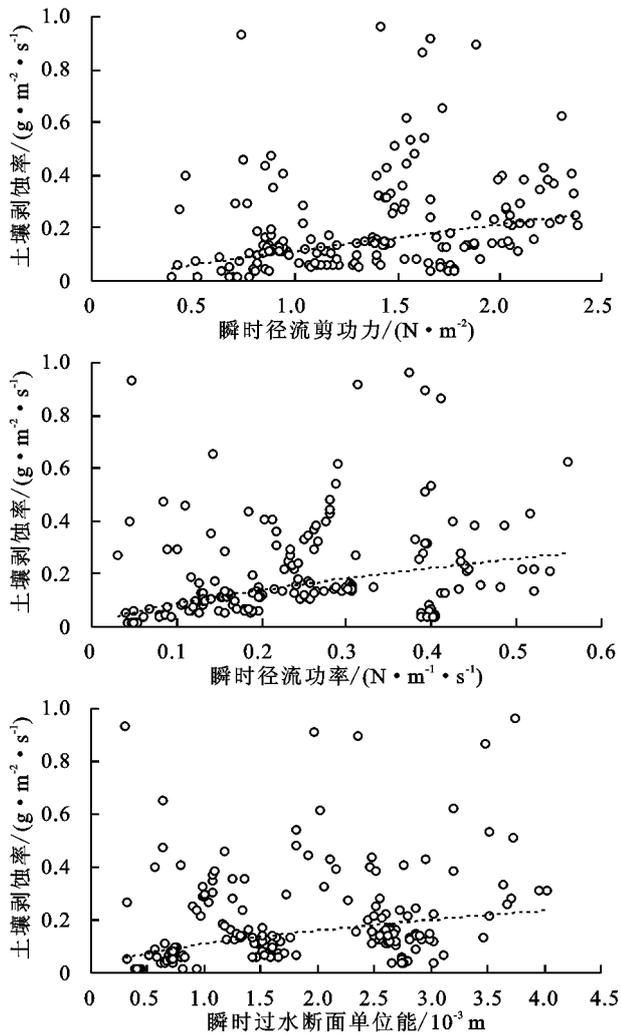


图 4 土壤剥蚀率与瞬时水动力学参数的关系

4 结论

(1) 每场降雨的土壤剥蚀率总体表现为同坡度下土壤剥蚀速率随雨强的增加而增大, 同一雨强、不同坡度条件下的土壤剥蚀率变化差异较大, 坡度对土壤剥蚀率的变化趋势存在阈值效应, 坡度 $< 45^\circ$ (2.0 mm/min 时为 40°) 时土壤剥蚀率随坡度的增加而增大, 之后随之减小, 雨强对土壤剥蚀率的贡献 (44.16%) 最大, 对土壤剥蚀率的变化起主导作用。

(2) 当坡度相同时, 径流剪切力、径流功率和过水断面单位能都会随着降雨强度的增加而增加, 其中规律性最好的是径流功率, 在同一降雨强度下, 径流剪切力、径流功率和过水断面单位能随坡度的增加呈波动增加的趋势。雨强和坡度对径流剪切力、径流功率和过水断面单位能均有极显著影响 ($p < 0.01$), 其中雨强对径流剪切力起主导作用 (贡献率为 55.00%), 而坡度对径流功率和过水断面单位能起主导作用 (贡献率分别为 51.16% 和 50.71%)。

(3) 急陡黄土坡面土壤剥蚀率与径流剪切力、径

流功率与过水断面单位能呈幂函数关系, 但就拟合优度而言, $R^2(\omega) > R^2(\tau) > R^2(E)$ 。因此在试验条件下, 平均径流功率是描述急陡黄土坡面径流侵蚀的最优水力学参数; 相比之下瞬时径流剪切力、瞬时径流功率、瞬时过水断面单位能不能很好地描述试验条件下急陡黄土坡面土壤侵蚀过程中土壤剥蚀率的变化。

参考文献:

- [1] 郭太龙, 卓慕宁, 李定强, 等. 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.
- [2] 丁文斌, 史东梅, 何文健, 等. 放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 153-161.
- [3] 刘俊娥, 王占礼, 高素娟, 等. 黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 144-149.
- [4] 谭贞学, 王占礼, 刘俊娥, 等. 黄土坡面细沟径流输沙对水动力学参数的响应[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 1-6.
- [5] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94-102.
- [6] 王瑄, 李占斌, 尚佰晓, 等. 坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 22-26.
- [7] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 797-804.
- [8] 张光辉, 刘宝元, 何小武. 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 48-52.
- [9] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 882-886.
- [10] 黄炎和, 赵淦, 蒋芳市, 等. 崩岗崩积体陡坡侵蚀的水动力学特征[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 304-309.
- [11] 李鹏, 李占斌, 郑良勇, 等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 66-69.
- [12] 刘元保, 唐克丽. 国内外坡度分级和王东沟试验区的坡度组成[J]. 水土保持通报, 1987, 8(3): 59-65.
- [13] 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177-178.
- [14] 黄自立. 陕北地区黄绵土分类的研究[J]. 土壤学报, 1987, 24(3): 266-271.
- [15] 张光辉. 土壤分离能力测定的不确定性分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 1-6.
- [16] Sadeghi S H, Moosavi V, Karami A, et al. Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method[J]. Journal of Hydrology, 2012, S448/449(15): 174-180.
- [17] 张光辉. 冲刷时间对土壤分离速率定量影响的实验模拟[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 1-4.
- [18] 王秋霞, 丁树文, 邓羽松, 等. 花岗岩崩岗区不同土层的侵蚀水动力学特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 570-580.