

连续降雨作用下褐土坡面侵蚀及其水动力学特征

袁和第¹, 信忠保^{1,2}, 蒋秋玲¹, 余新晓^{1,2}, 樊登星^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京林业大学北京市水土保持工程技术研究中心,北京 100083)

摘要:为研究在长时间降雨侵蚀过程中北京褐土坡面侵蚀特征及其水动力学机制,通过室内人工模拟降雨试验,分别在60,90 mm/h雨强下对褐土坡面进行连续10场次降雨试验,探讨了坡面侵蚀过程中的产流产沙特征及其与水动力学参数间的关系。结果表明:(1)在雨强及次降雨量较一致的条件下,随降雨场次增加坡面次降雨产流量变动较小,而次降雨产沙量变化较大,60,90 mm/h雨强下次降雨产沙量的变异系数为23.94%和59.88%,且第10场降雨的产沙量仅为第1场降雨的59.74%和22.28%;(2)连续降雨条件下,平均次降雨产沙速率随雨强增大而增大,径流含沙量随降雨时间呈幂函数下降趋势;(3)受褐土坡面细沟形态变化和土壤粗化的影响,60,90 mm/h雨强下坡面径流平均流速分别随降雨时间呈指数函数和幂函数下降趋势,弗劳德数亦表现出相同趋势;坡面径流阻力系数随降雨历时均呈对数函数增加;(4)长时间降雨侵蚀条件下径流含沙量与平均流速、弗劳德数、阻力系数、径流功率相关关系极显著,其中平均流速是径流含沙量变化过程中与其关系最为密切的水动力学参数,径流含沙量的变化深刻受到坡面径流平均流速的动力作用过程影响。

关键词:土壤侵蚀;水动力学参数;模拟降雨;坡面粗化;褐土

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0014-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.003

Slope Erosion and Its Hydrodynamic Characteristic of Cinnamon Soil Under Continuous Rainfall

YUAN Hedi¹, XIN Zhongbao^{1,2}, JIANG Qiuling¹, YU Xinxiao^{1,2}, FAN Dengxing^{1,2}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to study the erosion characteristics and hydraulic mechanism of cinnamon soil slope during long-term rainfall erosion, 10 consecutive rainfall experiments were carried out under 60, 90 mm/h rainfall intensity respectively by the mean of indoor simulated rainfall experiment. The characteristics of runoff and sediment discharge, hydraulic parameters change, and the relationship between runoff sediment concentration and hydraulic parameters were discussed. The results showed that: (1) Under the premise that the same rainfall intensity and rainfall event, the change of runoff was smaller with the increase of rainfall events number, but the sediment discharge of the sub-rainfall changed greatly. Under the rainfall intensity of 60, 90 mm/h, the variation coefficient of sediment yield was 23.94% and 59.88%, and the sediment yield of the 10th rainfall was only 59.74% and 22.28% to the first rainfall. (2) The average sediment yield rate of each rainfall increased with the rainfall intensity, the runoff sediment concentration showed the decrease trend of power function with rainfall time. (3) Influenced by morphological changes of rills and soil coarsening on the slope of brown soil, the average flow velocity of 60, 90 mm/h showed the descending trend of exponential function and power function in the process of erosion, respectively. Froude number showed the same trend with average flow velocity. The Darcy-weisbach resistance coefficient increased logarithmically in the process of erosion under 60, 90 mm/h rainfall intensity. (4) The correlation relationship between runoff sediment concentration and average flow velocity, Froude number, Darcy-weisbach resistance coefficient and runoff power were extremely significant, respectively. The average flow velocity was the most closely related hydrodynamic

收稿日期:2019-12-18

资助项目:中央高校基本科研业务费专项“京津风沙源人工林与土壤水分互馈机制”(2017ZY02);国家自然科学基金项目“砾石对坡面土壤侵蚀水动力学机制的影响”(41501292)

第一作者:袁和第(1995—),男,硕士研究生,主要从事水土保持原理研究。E-mail:1210295648@qq.com

通信作者:信忠保(1978—),男,博士,副教授,主要从事水土保持原理研究。E-mail:xinzhongbao@126.com

parameter in the process of runoff sediment concentration change. The change of runoff sediment concentration is deeply affected by the dynamic process of average flow velocity of slope runoff.

Keywords: soil erosion; hydrodynamic parameters; simulated rainfall; slope roughening; cinnamon soil

水蚀是土壤侵蚀的重要组成部分,包括土壤分离、泥沙搬运和沉积三大过程^[1]。在坡面土壤侵蚀中,土壤分离和泥沙搬运的主要动力来源于降雨和坡面径流,坡面径流的水动力学特征决定着坡面产流产沙特征和侵蚀程度^[2]。从动力学角度去认识坡面土壤侵蚀的机理,深入理解坡面流和坡面侵蚀产沙水动力特征,对认识坡面侵蚀产沙机理和规律具有重要意义^[3]。为此研究者们从不同角度做了大量研究,如郭忠录等^[4]通过模拟降雨研究发现,降雨和径流冲刷对坡面产沙过程及径流水力学特性产生了较大影响;张锐波等^[3]通过研究坡面侵蚀产沙与水力学特征参数的关系表明,流速是坡面侵蚀产沙的主要影响参数;李少华等^[5]认为,土壤分离能力与水流剪切力、水流功率、单位水流功率的关系可以用幂函数来描述,利用水流剪切力与水流功率预测土壤分离能力效果更好;肖丛宇等^[6]通过野外放水冲刷试验研究了在不同流量条件下台田的坡面流水力学特征值认为,坡面流土壤分离速率与阻力系数呈显著的幂函数关系;左烽林等^[7]通过对紫色土丘陵区新改土坡面进行放水冲刷试验认为,径流功率是描述新改土坡面侵蚀产沙的最佳水动力学参数;师宏强等^[8]通过黄绵土冲刷试验,拟合集中流输沙能力与常用水力学参数后认为,水流功率是描述集中流输沙能力最好的水动力学参数。

以上试验主要通过室内模拟降雨和径流冲刷的方法,研究在降雨和径流等外部因素下的坡面流水力学特征,探讨了坡面水动力学特征参数与坡面侵蚀产沙的关系,但由于持续降雨或径流冲刷时间有限,缺少考虑长时间侵蚀条件下,坡面表层土体变化导致的产沙特征及其水动力学参数的变化。此外,相关研究多集中黄土和紫色土区域,在以褐土为主要土壤类型的北京土石山区较少。近年来,北京市夏季降水发生了结构性调整,最大降水量集中在 ≤ 6 h的持续降水事件中^[9]。因此,在持续长时间降水条件下,研究褐土坡面侵蚀产沙过程及坡面流水动力学特征的工作有待展开。鉴于此,本研究拟采用室内人工降雨的方法模拟野外自然状态下的持续性降雨,通过对褐土坡面进行多场次连续降雨,获取坡面侵蚀产流产沙及径流流速、弗劳德数、阻力系数和径流功率等水力学参数,分析在长时间降水下褐土坡面流水动力特征,揭示坡面水动力学参数的时空变化规律及其与坡面产流产沙之间的关系,以期为华北土石山区褐土水蚀过程及其机理研究提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验将北京山区典型土壤的淋溶褐土作为供试土壤,采集于北京市海淀区鹫峰国家森林公园附近林地。经过重铬酸钾稀释热法测定得土壤有机碳含量为 (6.92 ± 0.03) g/kg,粒径 < 0.002 mm的颗粒占2.64%, $0.002 \sim 0.02$ mm的颗粒占50.96%, $0.02 \sim 2$ mm的颗粒占46.40%,根据国际制土壤质地分类标准确定该土壤为粉砂壤土。

1.2 试验方法

试验于2017年7月1日至8月16日在北京林业大学人工模拟降雨大厅进行,采用QYJY-503C人工模拟降雨装置,有效降雨高度为12 m,降雨强度变化范围为 $10 \sim 300$ mm/h,有效降雨均匀度超过80%,可使模拟降雨的雨滴粒径、降雨动能接近天然降雨^[10]。试验土槽采用中型液压升降钢槽,长、宽、高为 $5 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,中间用钢板隔开形成2个同样大小、宽度为1 m的土槽,为保证降雨试验过程中排水良好,土槽底部设有透水孔。试验前将土样自然风干并过10 mm筛,去除石块和植物根系,使试验土层的透水状况接近自然坡面,装填土槽时先在土槽底部填入10 cm厚的细沙,并在细沙上铺上透水纱布。采用分层填土的方法保证装土均匀性,每层填土厚度5 cm,总共装土厚度为30 cm,控制土壤容重为 1.30 g/cm^3 。填土时保持土面平整,每层装填完后对土面进行刮毛,制定一定地表粗糙度以防止土层间相互滑动;同时,将试验土槽边壁尽量压实,以减小边界效应的影响。坡面首次正式降雨前用18 mm/h雨强进行预降雨,至坡面产流为止,以保证每次降雨都在相同的前期含水量条件下进行。

根据北京山区坡地地形特点,设计坡度为 10° ,基于北京山区降雨特征^[9],设置雨强为60,90 mm/h,降雨历时30 min。每个雨强分别进行10场次连续降雨,前后2场降雨间隔24 h,共计20场次降雨。为模拟野外连续降水条件,试验初始坡面均为平整裸坡,其后每1场降雨均在前1场降雨结束后的坡面上进行。试验开始前对降雨强度进行率定,率定雨强与设定雨强的差值 $< 5\%$ 。降雨过程中,从坡面产流时开始计时,前6 min每隔1 min收集径流样, $6 \sim 30$ min每隔2 min收集径流样。每个小区设置4个测量断面,分别为距坡顶1,2,3,4 m处,每隔5 min采用高锰酸钾示踪法自下而上测定各断面流速,每个断

面测 2 次,测试点为横断面等间隔点,流速测距为 1 m,各断面流速的平均值乘以修正系数 0.75^[7]作为坡面水流断面平均流速;直尺测量法测试各断面径流深。降雨结束后采用大体积量杯测量径流样体积,之后将其静置 8~10 h,倒掉上清液,所得泥沙样放入烘箱烘干并称重确定泥沙量。待坡面无积水后,静置 24 h 进行下一次降雨试验。

1.3 水力参数计算

为准确描述连续降雨条件下坡面流过程中水流动力学特征及其对坡面侵蚀的影响,选取平均流速、弗劳德数、阻力系数和径流功率 4 个水动力学参数为主要研究指标。计算公式为:

(1)平均流速(V):流速采用高锰酸钾染色法测定,为坡面测得的最大径流流速与其修正系数 k ($k=0.75$)的乘积。

(2)弗劳德数(F_r):判断缓流急流的定量标准,表征水流惯性力与重力比值,公式为:

$$F_r = \frac{V}{V_w} \quad (1)$$

式中: V 为水流平均流速(m/s); V_w 为微波波速(m/s), V_w 计算公式为:

$$V_w = \sqrt{\frac{gh/(1+\Delta h)^2}{1+\frac{0.5\Delta h}{h}}} \quad (2)$$

式中: Δh 为滚波波高(m),薄层水流波高与水深的比值为 0.5~0.8,本研究近似取 0.6; g 为重力加速度,取 9.81 m/s²。

(3)达西—韦斯巴赫阻力系数(f):表征水流受到来自下垫面的水力阻力大小,其计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (3)$$

式中: R 为水力半径(m),用断面平均水深 h 替代; J 为水力坡度。

(4)径流功率(ω):表征作用于单位面积水流所消耗功率,反映剥蚀一定量土壤所需功率。

$$\omega = \rho g R J V \quad (4)$$

式中: ω 为径流功率(N/(m·s)); ρ 为水的重度(kg/m³)。

2 结果与分析

2.1 连续降雨条件下坡面水动力学特征

2.1.1 平均流速 流速是坡面流水动力学研究中的重要参数,是表征坡面径流侵蚀能力的重要因素之一,其与坡型、坡度、坡面糙度及流量等因素密切相关^[4,11]。坡面流的流态变化十分复杂,目前一般将坡面流简化为一维恒定非均匀的沿程变量流处理。褐土坡面水流平均流速在降雨事件持续下的变化趋势见图 1a。其坡面流速随降雨场次的增加呈减少趋

势,60 mm/h 雨强下坡面流平均流速呈指数函数($R^2=0.601$)减小,90 mm/h 雨强呈幂函数($R^2=0.847$)减小趋势。就整个降雨过程而言,随着降雨场次的增加,平均流速的动态变化范围逐渐平缓,在 60,90 mm/h 雨强下平均流速范围分别为 0.067~0.087,0.083~0.130 m/s,分别在 0~20,0~10 min 呈增长趋势,随后减少并呈现小幅波动,但整体表现为平稳减小趋势。

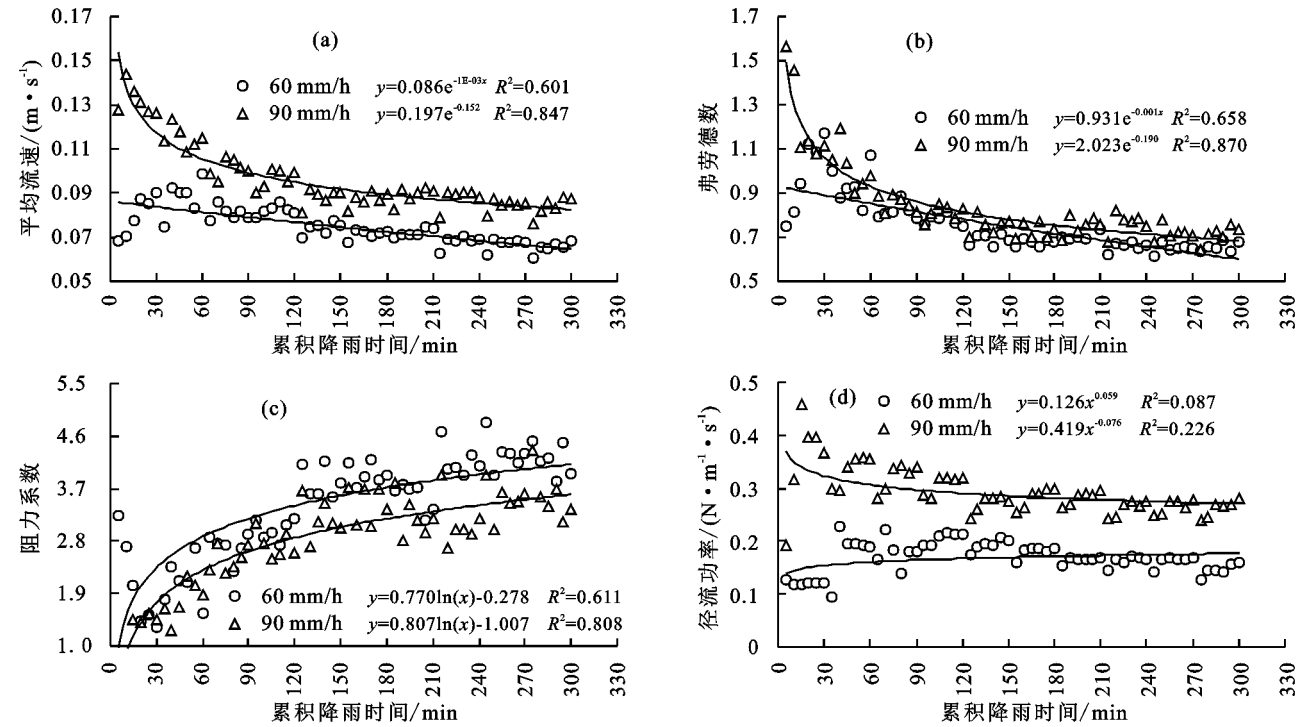
2.1.2 弗劳德数 弗劳德数(F_r)反映水流惯性力和重力的比值关系,是判别急流和缓流的参数^[12],为无量纲参数。由图 1b 可知, F_r 的数值随降雨侵蚀事件的持续呈减小趋势,与坡面平均流速的变化趋势相近。在 60 mm/h 雨强下呈指数函数减小趋势($R^2=0.658$),其中第 1 次降雨的 F_r 数值较大,在降雨前 30 min 保持增加趋势,并在 30 min 处达到该雨强下 F_r 数值的最大值 1.17,其数值在第 2 次降雨呈现小幅波动后开始呈降低趋势,在第 3 场降雨开始后 F_r 的数值皆小于 1;90 mm/h 雨强下 F_r 数值呈幂函数减小趋势($R^2=0.870$),其中第 1 次降雨前 10 min F_r 数值较高,其后开始保持降低趋势,到第 2 次降雨的 15 min 后 F_r 数值皆低于 1,坡面流已经由急流转变为了缓流,较 60,90 mm/h 雨强下急流时间多 10 min。表明在 60,90 mm/h 雨强下,坡面流在不同坡面冲刷过程中均由急流变化为缓流,径流的挟沙及径流剪切力亦表现为减小^[3,7]。

2.1.3 阻力系数 达西—韦斯巴赫阻力系数(f)表征了下垫面对水流的水力阻力大小^[13]。相同水力条件下(坡面径流量、坡长、坡度等), f 数值越大,表明水流克服阻力所消耗的能量越多。由图 1c 可知,2 个雨强(60,90 mm/h)降雨事件的 f 数值均随着降雨场次的增加呈对数函数增大趋势(R^2 分别为 0.611 和 0.808),其中在前 7 场降雨, f 的数值均表现为稳定的增长趋势,在之后的数值波动较大,分别为(4.18±0.33),(3.39±0.41),最大值分别出现在第 9 次降雨的第 5 min($f=4.83$)和第 9 次降雨的第 5 min($f=4.35$),整体上呈现增大趋势。 f 的数值随着降雨时间增加而增加,表明径流克服阻力所消耗能量增加,且连续降雨后 60 mm/h 雨强下径流能量消耗更多。

2.1.4 径流功率 径流功率是影响侵蚀的重要水力学参数,能衡量径流在分散、剪切土壤颗粒作用中的潜在侵蚀能力^[14]。连续降雨作用下,坡面径流功率随着降雨时间增加呈减小趋势。由图 1d 可知,60 mm/h 雨强下径流功率与降雨时间呈先上升后下降的抛物线关系($R^2=0.372\ 3$),90 mm/h 雨强下径流功率与降雨时间呈线性下降关系($R^2=0.379\ 5$)。60,90 mm/h 雨强下整个降雨侵蚀过程的坡面径流功率分别为(0.17±0.03),(0.29±0.04)N/(m·s)。

径流功率数值随着降雨的进行减小,表明坡面径流的

潜在侵蚀能力逐渐减小。



注:每 30 min 为 1 场单独的降雨,共 10 场。下同。

图 1 60,90 mm/h 雨强下水动力学参数随降雨场次的变化

2.2 连续降雨条件下褐土坡面侵蚀特征

2.2.1 降雨及产流产沙变化过程 降雨是坡面地表径流产生的前提条件和物质基础,径流产生后进一步冲刷导致坡面侵蚀现象^[15]。从表 1 可以看出,褐土坡面在连续 10 次降雨下,坡面累积降雨量及累积产流产沙量随雨强的增大而增大。90 mm/h 雨强下,坡面累积降雨量为 450.55 mm,累积产流量为 407.90 mm,累积产沙量为 17.20 kg/m²,分别是 60 mm/h 雨强的 1.49,1.64 和 2.42 倍。在相同雨强及次降雨量较一致的前提下,随着降雨场次增加,坡面产流量变动较小,而产沙量变动较大。60,90 mm/h 雨强下,坡面次降雨量平均值的变

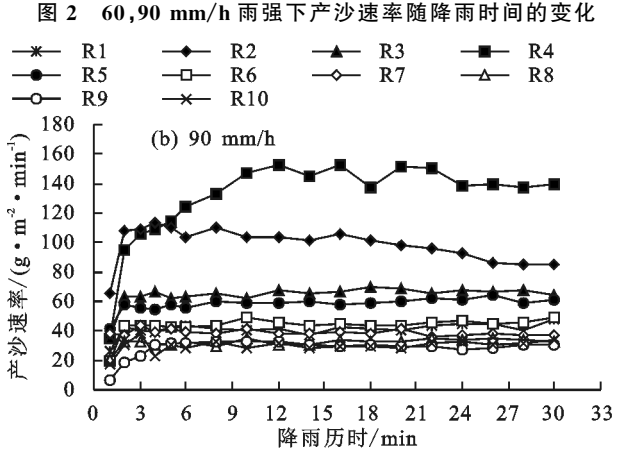
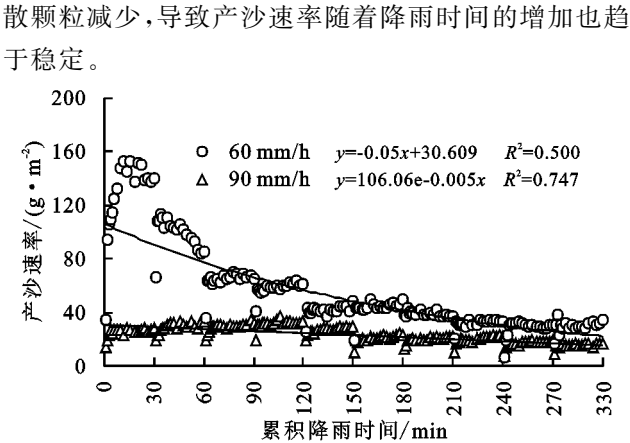
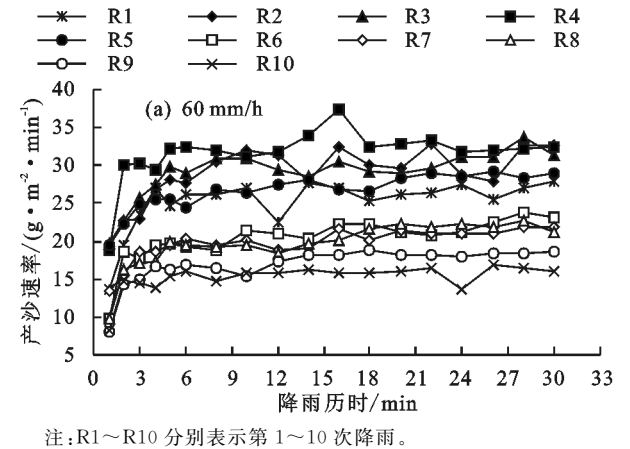
异系数分别为 1.52%和 2.69%,可以认为次降雨量较一致;坡面次降雨产流量的平均值分别为(24.90±0.13), (40.79±0.94) mm,变异系数较小,分别为 0.52%和 2.30%,而次降雨产沙量的平均值分别为(0.71±0.17), (1.72±1.03) kg/m²,变异系数较大,分别为 23.94%和 59.88%。不同雨强(60,90 mm/h)下产沙量变化过程不同,前者表现为先缓慢增加后降低,后者则为急剧下降后再降低,但整体过程表现为坡面产沙量随着降雨事件的持续呈下降趋势。60,90 mm/h 雨强下,相比第 1 场降雨,第 10 场降雨的产沙量分别为 0.46,0.90 kg/m²,仅为第 1 场降雨的 59.74%和 22.28%。

表 1 坡面降雨及产流产沙量

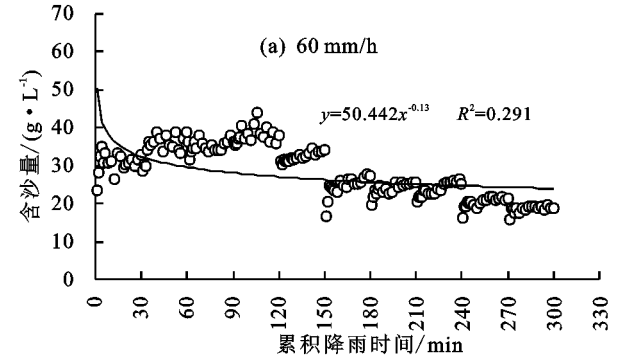
降雨场次	60 mm/h			90 mm/h		
	降雨量/mm	产流量/mm	产沙量/ (kg·m ⁻²)	降雨量/mm	产流量/mm	产沙量/ (kg·m ⁻²)
1	30.48	24.84	0.77	46.53	41.35	4.04
2	30.63	24.84	0.89	46.04	41.42	2.95
3	30.97	25.06	0.89	45.20	40.74	1.95
4	30.58	25.10	0.96	45.89	41.82	1.77
5	30.43	24.92	0.81	42.64	38.52	1.25
6	29.45	24.70	0.62	44.61	40.89	1.33
7	29.64	24.76	0.60	45.35	41.41	1.16
8	30.28	24.85	0.60	43.68	40.17	0.97
9	30.09	24.92	0.51	46.04	40.48	0.89
10	30.43	25.01	0.46	44.56	41.09	0.90
平均值	30.30±0.46	24.90±0.13	0.71±0.17	45.05±1.21	40.79±0.94	1.72±1.03
累计值	302.98	249.00	7.11	450.55	407.90	17.20

注:平均值数据为平均值±标准差。

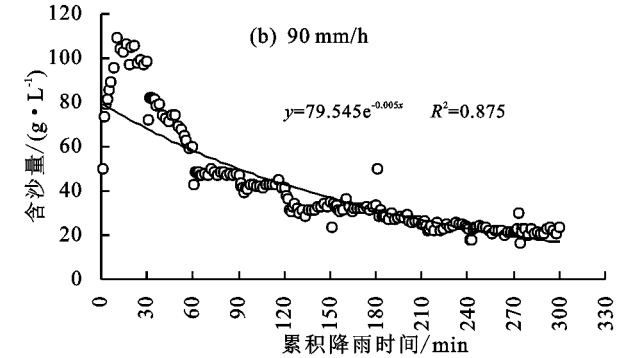
2.2.2 产沙速率变化过程 从表 1 可以看出,在持续的降雨侵蚀作用下,不同雨强(60,90 mm/h)下其平均次降雨产沙速率分别为 (23.17 ± 6.14) , $(56.25\pm33.27)\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$,其产沙速率随着降雨时间的持续呈下降趋势(图 2)。对于组成持续降雨事件的每单次降雨来说,随着降雨时间的增加,次降雨产沙速率的稳定时间更短。由图 3 可知,随降雨历时增加,在 60 mm/h 雨强下后 5 次降雨的产沙速率达到稳定状态所需时间更短;90 mm/h 雨强下,第 1 次降雨坡面产沙速率波动性较大,第 2 次更快趋于稳定,其后 8 次产沙速率均迅速达到稳定状态。这可能是因为持续降雨侵蚀下,坡面微地貌形态已经趋于稳定,松



2.2.3 径流含沙量变化过程 土壤侵蚀过程中的径流含沙量变化是产流、产沙及水沙关系消长与演变过程的重要指标^[16]。由图 4 可知,随着降雨侵蚀时间的增加,径流含沙量呈减小趋势,60 mm/h 雨强下呈幂函数减小($R^2=0.291$),表现为先增大后减小;90 mm/h 雨强下亦呈幂函数减小($R^2=0.875$),表现为随着时间单调递减。从含沙量的变化过程来说,60



mm/h 雨强下,径流含沙量先呈缓慢增大趋势,并在 50 min 时出现 1 次波动,增大至 110 min 时径流含沙量达到最大值 41.07 g/L,随后持续降低;90 mm/h 雨强下,在降雨开始时坡面径流含沙量迅速增大,在第 10 min 达到最大值 109.37 g/L,其后在降雨侵蚀时间 120~150 min 含沙量迅速下降,150~300 min 径流含沙量在小幅波动中稳定下降。



2.2.4 坡面产流产沙与水动力参数的关系 坡面径流含沙量变化过程实际上是坡面径流侵蚀输沙变化过程,综合反映了径流对土壤的分离作用及对泥沙的搬运作用过程^[17-18]。在连续降雨下由于径流含沙量变化过程是随着径流变化过程逐步进行的,所以通过分析径流含沙量与相应水动力学参数之间的关系,可

以揭示坡面水流含沙量变化过程的动力学机理。相关分析(表 2 和表 3)表明,在 60,90 mm/h 雨强的连续降雨作用下,褐土坡面径流含沙量与平均流速、弗劳德数、径流功率等水动力学参数均呈极显著的正相关关系($P<0.01$),与阻力系数呈极显著的负相关关系($P<0.01$)。其中阻力系数与累积降雨量

呈极显著的正相关关系($P<0.01$),平均流速、弗劳德数与阻力系数均呈极显著的负相关关系($P<0.01$),表明坡面径流在连续降雨作用下受下垫面阻力逐渐增大,流速减小,由急流向缓流转变。通过分析径流含沙量与平均流速、径流功率、阻力系数之间的关系,取得结果为:

$$G=13645V^2-1629.9V+70.91(R^2=0.852,P<0.01)$$
$$G=84.886f^{-0.904}(R^2=0.616,P<0.01)$$
$$G=1307.1\omega^2-485.13\omega+70.454(R^2=0.594,P<0.01)$$
$$G=87.799F_r-34.68(R^2=0.585,P<0.01)$$

式中: G 为径流含沙量(kg/m^3); V 为平均流速(m/s); f 为阻力系数; ω 为径流功率($\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})$); F_r 为弗劳德数。

从公式(5)~公式(8)可知,拟合优度 $R^2(V)>R^2(f)>R^2(\omega)>R^2(F_r)$,因此可以认为试验条件下平均流速是径流含沙量变化过程中与其关系最为密切的水动力学参数,长时间降雨侵蚀条件下径流含沙量的变化受到坡面径流平均流速的动力作用过程影响。相比之下径流功率、阻力系数和弗劳德数不能很好地描述试验条件下褐土坡面土壤侵蚀过程中的径流含沙量变化。

表 2 60 mm/h 雨强下瞬时径流含沙量与水动力学参数的相关分析

侵蚀参数	含沙量	平均流速	弗劳德数	阻力系数	径流功率	累积降雨量	径流量
含沙量	1	0.811**	0.568**	-0.697**	0.490**	-0.821**	0.149
平均流速		1	0.820**	-0.873**	0.394**	-0.764**	0.325*
弗劳德数			1	-0.967**	-0.196	-0.782**	0.158
阻力系数				1	0.062	0.852**	-0.173
径流功率					1	0.059	0.320*
累积降雨量						1	-0.090
径流量							1

注: ** 表示在 0.01 的水平上显著; * 表示在 0.05 的水平上显著。下同。

表 3 90 mm/h 雨强下瞬时径流含沙量与水动力学参数的相关分析

侵蚀参数	含沙量	平均流速	弗劳德数	阻力系数	径流功率	累积降雨量	径流量
含沙量	1	0.948**	0.843**	-0.879**	0.731**	-0.872**	0.188
平均流速		1	0.931**	-0.960**	0.689**	-0.823**	0.292*
弗劳德数			1	-0.938**	0.383**	-0.746**	0.081
阻力系数				1	-0.565**	0.819**	-0.234
径流功率					1	0.616**	0.598**
累积降雨量						1	-0.032
径流量							1

3 讨论

3.1 连续降雨对坡面产流产沙的影响

本文通过对不同雨强连续降雨作用下坡面产流产沙特征的研究发现,在雨强和次降雨量较一致前提下,坡面次降雨产流量变动很小,基本不受连续降雨的影响。这是因为坡面径流量的大小主要由坡面承雨量和土壤入渗性能决定,在坡面承雨量相同的情况下,土壤入渗性能是影响坡面径流量的最主要因素。本研究在首次降雨前 24 h 进行了预降雨,其后每次降雨在前 1 次降雨的坡面上进行,次降雨间隔时间相同,故每次降雨坡面初始含水率较一致;同一坡面的土壤空隙状况在连续降雨作用下变化较小,因此坡面产流受连续降雨影响很小。

本研究旨在模仿北京土石山区的野外自然状态下的持续性降雨,长时间的降雨侵蚀下褐土坡面表层粗化、变得破碎,坡面粗颗粒逐渐富集,从而影响了坡面径流的产沙能力。在连续降雨侵蚀过程中,降雨及径流等外部驱动力较一致的前提下,次降雨产沙量受

连续降雨影响较大,径流含沙量随降雨历时分别呈现先增大后减小的趋势。这是由于长时间降雨侵蚀过程中坡面细沟发育和土壤粗化的共同作用,相关研究^[19-20]表明,细沟发育可使径流含沙量增大,导致径流含沙量随降雨时间先表现出增大的趋势^[21];而其后的下降趋势主要因为在长时间降雨侵蚀过程中降雨及其径流对坡面土壤颗粒进行分选搬运,造成粗颗粒和石砾逐渐富集,使得降雨减蚀、径流侵蚀及挟沙能力下降,表明了长时间降雨下坡面粗化具有减蚀作用^[22-23]。同时适宜搬运沙源减少,也是导致径流含沙量减少的重要原因。

3.2 连续降雨对坡面径流水动力学参数的影响

长时间的降雨及径流侵蚀过程会导致坡面形态发生变化,其变化对坡面流的水动力特性有着重要的影响^[24-25]。在连续降雨作用下,60,90 mm/h 雨强下坡面径流平均流速分别随降雨历时呈指数函数和幂函数下降趋势,弗劳德数亦表现出相同趋势;2 种雨强的坡面径流阻力系数随降雨历时呈对数函数增加。

在降雨量及径流量近似不变的情况下,水动力学参数数值随降雨时间出现不同程度的变化,主要是由于坡面形态变化所致,即坡面土壤粗化和细沟形态变化。随着降雨进行,粗颗粒和石砾不能被径流所搬运,而在坡面不断富集,使得坡面糙率不断增大,导致径流所受阻力增大,流速减小^[26];同时,坡面细沟的发育导致细沟形态的改变,影响沟道径流深及沟道、沟间的径流量分配,进而影响流速的变化,由流速和径流深衍生出来的水动力学参数亦会随之变化^[27];此外,坡面表层粗化后,会抑制细沟的发育^[28],使侵蚀沟向下扩张受限,而以横向扩张为主,沟道径流深随之减小,导致径流功率减小。

3.3 坡面径流含沙量对水动力学参数的响应

降雨及其径流是坡面侵蚀产沙的动力来源^[4],在降雨一定的情况下,径流含沙量综合反映了径流对土壤的分离作用及对泥沙的搬运作用过程,表明在 60, 90 mm/h 雨强的连续降雨作用下,坡面径流含沙量与平均流速、弗劳德数、径流功率均呈极显著的正相关关系,与阻力系数、累积降雨量呈极显著的负相关关系,而与径流量相关关系不显著,与廖义善等^[22]在崩岗崩积体的连续降雨试验得出的结论相似。在连续降雨事件下,坡面侵蚀除了使用上述水力学参数来表征径流能量对产沙量的影响,同时还需要考虑坡面适宜被搬运的沙源是否充足。本研究中 60mm/h 雨强降雨坡面前 35 min 的含沙量大于 151~300 min 的含沙量。产生该现象的原因是由于降雨前期坡面适宜被搬运的沙源充足,随着降雨侵蚀的持续,适宜搬运沙源逐渐匮乏,但径流能量相对降雨前期只有小幅增加,对产沙的贡献甚微。

4 结论

(1)在同一雨强及次降雨量较一致的前提下,随降雨场次增加,坡面次降雨产流量波动较小,而次降雨产沙量变化较大,60,90 mm/h 雨强下次降雨平均产沙量变异系数为 23.94%和 59.88%;坡面产沙量随着降雨时间的持续呈下降趋势,第 10 次降雨的产沙量分别仅为第 1 场降雨的 59.74%和 22.28%,表明褐土表层的粗化现象对减少坡面侵蚀有积极意义。

(2)60,90 mm/h 雨强连续降雨条件下,次降雨产沙速率随雨强增大而增大,且随降雨历时增加均呈先增加后波动稳定的趋势;随着降雨侵蚀时间的增加,60,90 mm/h 雨强下径流含沙量呈幂函数减小趋势(R^2 分别为 0.291 和 0.875),其减小的趋势表现为 60 mm/h 雨强下表现为先增大后减小,90 mm/h 雨强下则表现为随着时间单调递减。

(3)受褐土坡面细沟发育和表层粗化的影响,60,

90 mm/h 雨强下坡面径流平均流速分别随降雨历时呈指数函数($R^2=0.601$)和幂函数($R^2=0.847$)下降趋势,弗劳德数亦表现出相同趋势(R^2 分别为 0.658 和 0.870);坡面径流阻力系数随降雨历时均呈对数函数增加(R^2 分别为 0.611 和 0.808)。

(4)褐土坡面径流含沙量与平均流速、弗劳德数、径流功率均呈极显著的正相关关系,与阻力系数呈极显著的负相关关系。其中平均流速是描述北京褐土坡面径流含沙量变化的最佳水动力学参数,二者呈二次曲线函数关系。

参考文献:

- [1] Rose C W, Williams J R, Sander G C, et al. A mathematical model of soil erosion and deposition process: I. Theory for a plane element[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(5): 991-995.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 郭忠录,马美景,蔡崇法,等.模拟降雨径流作用下红壤坡面侵蚀水动力学机制[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 150-157.
- [5] 李少华,何丙辉,李天阳,等.紫色土丘陵区生物埂不同植被类型土壤分离水动力学特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 70-75.
- [6] 肖丛宇,程金花,姜群鸥,等.台田措施下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 10-15.
- [7] 左烽林,钟守琴,冉卓灵,等.紫色土丘陵区新改土坡面产流产沙及水动力学参数特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 59-66.
- [8] 师宏强,刘刚,谷举,等.不同坡度坡面径流输沙能力对集中流流量变化的响应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 25-31.
- [9] 孙继松,雷蕾,于波,等.近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 609-623.
- [10] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.QYJY-503C 人工模拟降雨装置降雨特性试验[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 31-36.
- [11] 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.
- [12] Polyakov V O, Nearing M A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions [J]. Catena, 2003, 51(1): 33-43.
- [13] 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.
- [14] 李永红,牛耀彬,王正中,等.工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 83-88.

- Effects of plant litter incorporation rate under simulated rainfall conditions[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30: 1293-1302.
- [21] 李宁宁, 张光辉, 王浩, 等. 黄土丘陵沟壑区浅层滑坡堆积体植被演替特征及土壤养分响应[J]. *山地学报*, 2018, 36(5): 669-678.
- [22] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38: 1725-1734.
- [23] Zhang B J, Zhang G H, Yang H Y, et al. Temporal variation in soil erosion resistance of steep slopes restored with different vegetation communities on the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2019, 182: 104170.
- [24] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4): 143-154.
- [25] Zhang G H, Tang K M, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34: 1302-1309.
- [26] Zhang G H, Liu G B, Tang M K, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2008, 51(3): 883-890.
- [27] 李智广, 张光辉, 刘秉正, 等. 水土流失测验与调查[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [28] Zhang X C, Zhang G H, Garbrecht J D, et al. Dating sediment in a fast sedimentation reservoir using Cesium-137 and lead-210[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 948-956.
- [29] 张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望[J]. *水科学进展*, 2002, 13(3): 389-396.
- [31] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1298-1304.
- [31] Sun L, Zhang G H, Fa L, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 147: 238-247.
- [32] 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.
- [33] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1291-1297.
- [34] Zhang G H, Wang L L, Tang K M, et al. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(7): 1289-1299.
- [35] 张光辉. 对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J]. *水科学进展*, 2018, 29(2): 151-158.
- (上接第 20 页)
- [15] 何玉广, 信忠保, 余新晓, 等. 模拟降雨条件下侧柏林地枯落物对坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 27-32, 38.
- [16] 王栋栋, 王占礼, 张庆玮, 等. 草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 119-125.
- [17] 白玉洁, 张风宝, 杨明义, 等. 急陡黄土坡面土壤剥蚀率变化的水动力学机制研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 1-6.
- [18] 刘晓燕, 刘昌明, 党素珍. 黄土丘陵区雨强对水流含沙量的影响[J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1723-1732.
- [19] 林姿, 史东梅, 姜义宝, 等. 岩溶区煤矿工程堆积体边坡细沟发育及其水沙关系研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 615-626.
- [20] 张攀, 姚文艺, 唐洪武, 等. 黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 114-119.
- [21] He J J, Sun L Y, Gong H L, et al. Laboratory studies on the influence of rainfall pattern on rill erosion and its runoff and sediment characteristics[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(5): 1615-1625.
- [22] 廖义善, 卓慕宁, 谢真越, 等. 崩岗崩积体坡面产沙与坡面形态的耦合影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 66-72.
- [23] 陈心逸, 李丽, 余冬立. 砾石覆盖条件下盐碱土边坡降雨侵蚀水动力学特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 116-120.
- [24] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 48-56.
- [25] 郭慧莉, 孙立全, 吴淑芳, 等. 黄土高原地区鱼鳞坑坡面侵蚀演化过程及水力学特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1125-1135.
- [26] 翟艳宾, 吴发启, 王健, 等. 不同人工糙率床面水力学特性的试验研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 38-42.
- [27] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 110-117.
- [28] 王小燕, 李朝霞, 徐勤学, 等. 砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 115-120.