

鄂东南花岗岩红壤不同土层侵蚀过程

张健华, 汪运东, 杨青松, 倪世民, 王军光, 蔡崇法

(华中农业大学 水土保持研究中心, 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要:为了探讨不同降雨动能条件下花岗岩红壤各层次(淋溶层、淀积层、母质层)在坡面侵蚀过程中的产流产沙特征,研究采用室内人工模拟降雨试验方法,对其水动力学参数变化特征及其与土壤侵蚀速率之间的定量关系进行了研究。结果表明:(1)降雨动能对各层次土壤坡面的产沙产流特征影响显著。随着降雨动能增加,各层次土壤初始产流时间不断递减,且径流含沙量和总产沙量均不断增大;(2)各层次土壤之间的侵蚀规律差异显著。初始产流时间、径流含沙量及总产沙量均表现出显著差异;通过回归分析,发现土壤侵蚀速率与降雨动能之间有良好的线性关系;(3)水流功率和单位水流功率与土壤侵蚀速率均呈显著的相关性,且能够用幂函数准确地描述它们之间的关系,引入土壤黏粒含量可使得模型更加可靠,在实际应用中有更广的应用范围和现实价值。综上,降雨动能和土壤质地对花岗岩红壤坡面侵蚀的形成和发展过程具有显著影响。

关键词:降雨动能;花岗岩红壤;土壤侵蚀速率;水动力学参数;量化

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0055-07

Experimental Study on Erosion Process Among Different Soil Layers of Granite Red Soil in Southeast Hubei Province

ZHANG Jianhua, WANG Yundong, YANG Qingsong, NI Shimin, WANG Junguang, CAI Chongfa

(Research Center of Soil and Water Conservation, Huazhong Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation for Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Through indoor artificial rainfall simulated experiments, we preliminarily explored the characteristics of runoff and sediment yield, the changes in hydrodynamic parameters and their quantitative relationships with soil erosion rate during the slope erosion process of the various layers of the granite red soil (eluvial layer, sediment layer, parent layer) under different rainfall kinetic energy conditions. The results show that: (1) rainfall kinetic energy had a significant impact on the sediment and runoff characteristics of different soil layers; with the increase of rainfall kinetic energy, the initial runoff time of each layer of soil continued to decrease, and the runoff sediment content and total sediment yield continued to increase; (2) there were significant differences in the erosion processes between the soil layers; the initial runoff time, runoff sediment content and total sediment yield all showed significant differences; It was found that there was a good linear relationship between soil erosion rate and rainfall kinetic energy through regression analysis; (3) stream power and unit stream power had a significant correlation with soil erosion rates, and the relationship between them could be accurately described by a power function; the introduction of soil clay content could make the model more reliable and have a wider range of applications and higher practical value in practical applications. In conclusion, rainfall kinetic energy and soil texture had significant effects on the formation and development of granite red soil slope erosion.

Keywords: rainfall kinetic energy; granite red soil; soil erosion rate; stream power; quantification

收稿日期:2021-07-06

修回日期:2021-07-21

资助项目:国家自然科学基金面上项目“不同胶结特性土壤坡面泥沙输移特征对侵蚀形态的响应”(41771304);国家自然科学基金重点项目“花岗岩风化岩土体特性的地带性分异及崩岗形成机理研究”(41630858)

第一作者:张健华(1998—),男,浙江舟山人,硕士研究生,主要研究方向:土壤侵蚀机理与过程。E-mail:2519890753@qq.com

通信作者:王军光(1984—),男,河南新乡人,副教授,主要研究方向:土壤侵蚀机理与应用研究。E-mail:jgwang@mail.hzau.edu.cn

坡面侵蚀包括雨滴击溅和地表径流冲刷引起的土壤分离、泥沙搬运和泥沙沉积三大过程^[1]。坡面侵蚀泥沙颗粒主要来源于破碎的表土团聚体和表面松散物质,雨滴击溅和坡面径流为其提供了动力条件^[2]。

雨滴击溅引起的土壤颗粒分离是坡面侵蚀的开端,降雨动能(KE)是描述降雨侵蚀力的主要指标之一,可以衡量雨滴分离土壤颗粒的能力。如果降雨动能克服了土壤颗粒分离的临界能量,土壤颗粒就会被分离、搬运^[3]。同时,当坡面产生径流时,降雨动能可能会增强径流的湍流,从而增强其侵蚀力和搬运能力^[4]。较高的降雨动能具有较高的分离能力和搬运能力,使泥沙中包含更多相对较大的土壤颗粒,而细颗粒含量随之下降,从而影响坡面径流的搬运机制。在许多研究中,学者们通过不同形式的覆盖处理来控制降雨动能,其原理是允许部分降雨雨滴通过覆盖物,实现雨滴对土壤表面产生不同程度的击溅作用。如 Wang 等^[5]通过不同孔径纱网的覆盖处理得到 6 个降雨动能,指出不同降雨动能条件下侵蚀泥沙的搬运是泥沙分选的过程。因此,研究不同降雨动能对土壤坡面径流侵蚀产沙的影响在防治水土流失中具有现实意义。

径流对泥沙的搬运作用源于坡面径流的动力作用,其中流速、水流功率以及单位水流功率是表征径流水动力学特性的主要指标。坡面侵蚀过程中,径流的水动力学特性和坡面侵蚀产沙规律之间的关系一直是研究的热点,量化地阐明两者的关系是建立土壤侵蚀物理预测模型的前提条件^[6]。在已有的研究中,目前国内外学者多采用水流功率、单位水流功率等参数来描述坡面径流的水动力学特征,如澳大利亚的 GUEST 模型采用水流功率来描述水流的分离与输沙的过程和能力,而 EUROSEM 和 LISEM 模型则将单位水流功率作为描述水流输沙过程和能力的水动力学参数^[7]。郭太龙等^[8]发现由水深和曼宁糙率系数共同组成的复合水动力特征参数可作为表征不同雨强及坡度下的华南红壤坡面水蚀侵蚀产沙的特征水动力参数指标。倪世民^[6]和王龙生等^[7]发现在径流的水力学参数中,单位水流功率是最适合描述土壤侵蚀程度的参数。田培等^[9]通过模拟降雨试验研究发现弗劳德数和流速可以较好地模拟红壤坡面产沙率。然而,王秋霞等^[10]研究表明单位水流功率不能准确地描述崩岗各土层土壤剥蚀率。因此,究竟何种水动力学参数能够更准确地描述坡面径流侵蚀过程,揭示侵蚀动力学机理,目前还需要进一步探究。

我国南方红壤丘陵区降雨充裕,地表径流量大,在部分地区土壤侵蚀严重,尤其是水力侵蚀和重力侵

蚀综合作用下形成的崩岗危害最为严重,制约了当地生态、经济、社会的发展。近些年来,许多学者对南方红壤丘陵区的坡面侵蚀机理进行了研究。但是,在不同降雨动能条件下不同层次花岗岩红壤的抗蚀能力尚不明确,尤其是水动力参数指标的选定及侵蚀产沙机制、侵蚀物理模型尚不明确。鉴于此,本研究采用室内人工模拟降雨试验,初步探讨不同降雨动能条件下花岗岩红壤在坡面侵蚀过程中的水动力学特性及其产流产沙特性之间的定量关系。该结果对于认识土壤侵蚀水动力学机理、完善土壤侵蚀过程模型具有重要的理论意义,为进一步研究崩岗区侵蚀规律和防治水土流失提供重要依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验土壤的采样点位于湖北省通城县(29°12′39″E, 113°46′26″N),该区属亚热带季风气候,年平均降水量和温度分别为 1 525 mm 和 16℃,土壤为花岗岩母质发育,属于典型的南方丘陵区,具有土壤、气候和地理环境的代表性^[11]。采样点土壤类型为花岗岩母质发育的红壤,土地利用方式为林地。根据风化程度、土壤颜色和土壤结构特征,试验采集了花岗岩风化层的典型剖面中的 3 个层次(淋溶层、淀积层、母质层),分别被定义为:TCA,TCB 和 TCC。将采集的土样进行自然风干,然后过 10 mm 筛网以去除石块和杂草,测定其机械组成,土壤基本理化性质见表 1。其中土壤容重和总孔隙度由环刀采集的各层次土壤样品测得;土壤密度通过比重瓶法测定;土壤有机质通过重铬酸钾外加热法测定;阳离子交换量用乙酸铵法测定;土壤质地通过吸管法和湿筛法测定^[12]。根据美国土壤分类制,3 个层次的土壤皆为砂壤土。上述试验重复进行 3 次,利用邻近点数据比较法剔除异常值后,选取三组重复数据的平均值作为试验数据。

表 1 各层次土壤的基本性质

土壤层次	TCA	TCB	TCC
容重/(g·cm ⁻³)	1.30±0.03	1.41±0.02	1.34±0.02
总孔隙度/%	50.41±1.45	44.02±0.18	47.62±0.16
土壤密度/(g·cm ⁻³)	2.58±0.02	2.65±0.01	2.63±0.02
有机质/(g·kg ⁻¹)	24.19±0.64	7.17±0.20	1.10±0.07
阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	18.18±0.73	10.48±0.60	4.03±0.35
黏粒/%	13.60±1.12	19.49±0.39	8.14±0.48
粉粒/%	13.05±0.74	14.08±0.61	14.46±0.54
砂粒/%	67.55±1.05	62.24±0.66	72.19±1.14
砾石/%	5.80±0.40	4.19±0.42	5.21±0.31

1.2 试验设计

人工模拟降雨试验在华中农业大学模拟降雨大

厅中展开,降雨装置器材见图1。模拟降雨装置采用垂直旋转下喷式自动模拟降雨系统。在试验中,降雨高度为10 m,保证雨滴可以达到终点速度。模拟降雨器通过小、中、大3种规格的喷头组合实现15~220 mm/h降雨强度变化范围,降雨均匀度超过90%,满足降雨试验条件^[13]。试验土槽为可调坡钢制土槽,长、宽、深分别为3.00 m,0.80 m,0.45 m。试验土槽下端设置了径流收集装置,用于收集试验过程中产生的径流泥沙样。

在装填土槽时,先在试验土槽底部填入10 cm厚的细沙,然后将细沙布铺在细沙表面,保证试验土层的透水状况接近天然坡面。3个层次土壤为3种试验材料,将土样以5 cm的厚度进行分层填充,分别按其容重填入土槽,用平衡尺刮平土壤表面。同时,在不破坏团聚体颗粒的前提下,将试验土槽边缘的土样尽量压实,以尽量减小边界效应的影响。

试验设计坡度为15°,是崩岗侵蚀区常见坡度^[5],模拟降雨强度为90 mm/h,与研究区典型的暴雨强度相对应^[14]。近年来,纱网覆盖措施被广泛应用于边坡治理工程中(图1),雨滴经过纱网之后其速度和直径会随之变化。因此本试验模拟纱网覆盖措施下雨滴动能变化的现象,在土槽上方距离土壤表面5 cm处设置了5个不同孔径的不锈钢筛网。在相同的降雨强度下,通过不同孔径的筛网控制雨滴的直径和速度以获取不同的降雨动能。雨滴通过5个孔径(无,3.80,2.50,1.40,0.75 mm)的筛网获得5个梯度的降雨动能,降雨雨滴的直径、速度和数量通过激光雨滴光谱仪(OTTHydroMet,德国)实时获取,将该仪器放置于筛网下5 cm处,以确保其测得的雨滴动能与土壤表面一致。5种孔径(无,3.80,2.50,1.40,0.75 mm)筛网分别获取了628,443,324,231,110 J/(m²·h)的降雨动能。与无覆盖的裸露坡面相比,4种筛网覆盖条件下的降雨动能分别减少了大约29.46%,48.41%,62.22%和82.48%。

试验前用纱布覆盖坡面,并对覆盖坡面进行预湿润处理,直至产流。将土槽放置24 h,使其自然排水。当土壤含水量达到30%时开始试验。在降雨前,对降雨强度进行校准,将其调整为(90.00±4.50) mm/h,以确保实际降雨强度达到目标降雨强度。坡面径流泥沙样的收集总时间为产流开始后的60 min,同时记录坡面初始产流时间。使用铝盒和塑料桶收集泥沙样,每隔3 min用铝盒接一次样,接样时间为1 min,每场降雨试验共采集径流泥沙样品20个。降雨过程中通过染色剂法测得径流流速作为表

面流速,将土槽顶部作为测量起点,土槽底部为测量终点,自径流产生后每隔6 min测量1次,取其均值。试验结束后,称量每个径流样品的质量用于计算径流体积;泥沙质量用烘干法测定,在105℃温度下烘干8 h至恒重,称重测得;含沙量主要通过试验测定的产流体积和泥沙质量进行计算;总产沙量通过样品泥沙质量结合试验时间推算测得;各粒级团聚体含量由湿筛法测定,将土样置于分样筛中,在离子水中震荡5 min,静置、烘干、称重测得。同时,径流平均水深利用测得径流体积除以径流流速计算得到。

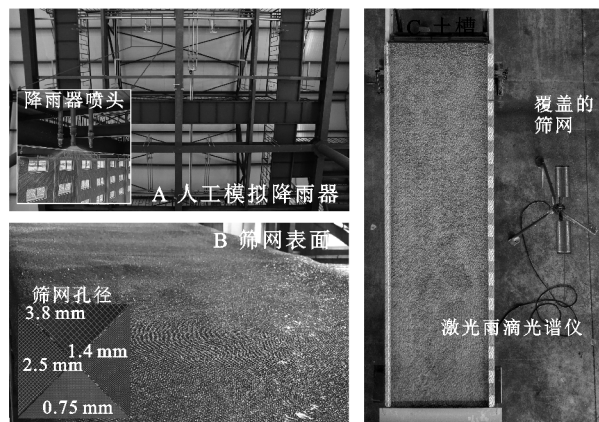


图1 模拟降雨试验仪器及筛网覆盖措施

1.3 相关水动力学参数计算

本文选择以下参数作为表征水动力学特性的指标,其有关公式如下所示。

将试验测得的流速乘以修正系数作为坡面径流平均流速^[15],其表达式为:

$$V = kV_m \quad (1)$$

式中: V 为径流平均流速(cm/s); V_m 为坡面最大径流流速(cm/s); k 为修正系数,本研究中 $k=0.75$ ^[16]。

水流剪切应力(τ)表征分离土壤颗粒和搬运泥沙的径流冲刷力^[15],其表达式如下:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot J \quad (2)$$

式中: τ 为水流剪切应力(Pa); ρ 为水流密度(kg/m³); R 为水力半径(m),由于坡面水流为薄层水流,可以用平均水深 h 代替。

水流功率(ω)表示作用于单位面积的水流所消耗的功率,其表达式如下^[17]:

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

式中: V 为径流平均流速(cm/s)。

Darcy-Weisbach阻力系数是径流流动过程中受到的来自坡面的阻滞水流运动力的总称^[15],其表达式如下:

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

式中: g 为重力加速度,取 $g=9.8 \text{ m/s}^2$; R 为水力半

径(m);对于薄层水流,可近似用水深 h 代替 R ; V 为径流平均流速(m/s); J 为水力坡度, $J = \sin\theta$, θ 为床面坡度。

单位水流功率(P)表示作用于泥沙床面的单位重量水体所消耗的功率。其表达式为^[10]:

$$P = VJ \quad (5)$$

土壤侵蚀速率是单位时间单位侵蚀面积坡面土壤在径流侵蚀冲刷作用下被分离剥蚀的土壤颗粒质量,表示径流对坡面土壤的分离能力,其表达式如下^[18]:

$$D_r = \frac{m_t}{BLT} \quad (6)$$

式中: D_r 为土壤侵蚀速率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$]; m_t 为累计产沙量(kg); B 为水宽(cm); L 为沟长(m); T 为时间(min)。

试验数据及绘图使用 SPSS 18.0 软件和 Origin 8.0 进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 坡面产流特征

不同降雨动能条件各层次土壤的初始产流时间具有明显的规律性,观测结果见图 2。可以看出,随着降雨动能的增加,不同层次土壤的初始产流时间逐步递减,其原因在于降雨动能的不同会导致坡面存在不同的产流方式,当降雨动能较小时为蓄满产流,当降雨动能较大时则转变为超渗产流^[19]。随着降雨动能增加,单位时间单位面积接受的雨量越大,蓄满产流时间缩短,在降雨动能大时转变为超渗产流,产流时间必然缩短^[20]。在相同降雨动能条件下,各层次土壤初始产流时间表现为 $\text{TCA} > \text{TCC} > \text{TCB}$ 。这是由于 TCB 土壤容重大,总孔隙度小,结构紧实,水分入渗缓慢,且在降雨过程中形成地表结皮,促进坡面产流,使得 TCB 初始产流时间远小于 TCA 和 TCC;而 TCA 有机质含量高,孔隙发育良好,产流过程中下渗多^[21],不利于地表径流形成,因此 TCA 的初始产流时间整体大于 TCC。这与大多数学者的研究结论一致^[19-20]。

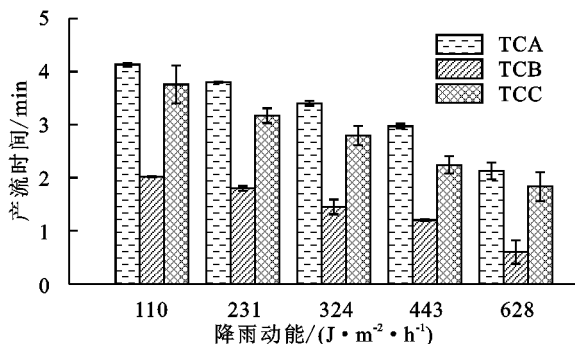


图 2 各层次土壤初始产流时间与降雨动能的关系

2.2 坡面产沙特性

试验过程中 3 个层次土壤在不同的降雨动能条件下坡面径流含沙量随时间变化规律见图 3。各层次土壤的径流含沙量差异显著, TCA 含沙量变化范围为 $0.02 \sim 0.09 \text{ g/ml}$, TCB 含沙量变化范围为 $0.026 \sim 0.36 \text{ g/ml}$, TCC 含沙量变化范围为 $0.08 \sim 0.17 \text{ g/ml}$ 。土壤有机质含量和黏粒含量是土壤抗蚀性的主导因素^[22], 有机质含量越高, 土壤团聚体稳定性越高^[23], 土壤抗蚀性随之增强, 从而使得坡面径流含沙量减小。TCA 有机质含量远高于 TCB 和 TCC, 土壤团聚体稳定性强, 土壤抗蚀性强, 土壤颗粒较 TCB 和 TCC 更难被分离, 因此 TCA 径流含沙量较小; 而 TCC 黏粒含量和有机质含量小, 土壤团聚体抗蚀性弱, 在降雨过程中坡面土壤颗粒易被剥蚀, 因此 TCC 径流含沙量大。各土层土壤坡面径流含沙量随着降雨动能的增大而增大, 且降雨动能越大, 含沙量增长幅度越大。其原因是随着降雨动能的增大, 径流剥蚀和搬运土壤的能力逐渐增大, 致使径流含沙量增大^[24]。

TCA 和 TCB 的径流含沙量总体呈现递减趋势。这和本试验的坡面产流伊始, 降雨及其产生的径流的作用下土壤表面的松散颗粒和浮土不断消耗有关, 随着松散颗粒的耗尽, 径流含沙量逐渐减小, 这与多数学者的研究结果一致^[24]。TCC 径流含沙量呈现不断递增的趋势, 这与其土壤抗蚀性较弱有关。在降雨初期坡面侵蚀以溅蚀为主, 在径流产生后, 雨滴打击水面增大水流的紊动性, 径流对土壤颗粒的剥蚀和搬运能力增强。加之 TCC 的较弱的抗蚀性, 使土壤侵蚀呈现愈演愈烈的正反馈关系。在王秋霞等^[25]人的研究结果中, 母质层的径流含沙量随着降雨试验的进行, 整体呈下降趋势, 与我们的研究结果并不一致, 分析其原因可能是其试验的模拟降雨强度较小所导致的。较小的降雨动能将导致径流量和流速较小, 径流对土壤颗粒的分离搬运作用减弱, 泥沙在搬运过程中更易沉积, 因此其试验呈现出径流含沙量递减的结果。

另外, 随着降雨时间的延长, 3 个层次土壤产沙量差异显著, TCA 和 TCB 产沙量变化趋于准稳定状态, 而 TCC 的产沙量大且随着降雨动能和降雨时间不断增加。

不同降雨动能条件下, 各层次土壤的总产沙量具有显著的变化规律, 见图 4。随着降雨动能增加, 各层次土壤的总产沙量均不断增大, 这与邓龙洲等^[19]人的研究结论一致。这是因为较大的降雨动能条件下, 雨滴击溅作用和径流分离搬运作用较强, 坡面泥沙易被携带离开坡面, 使得坡面产沙量大。

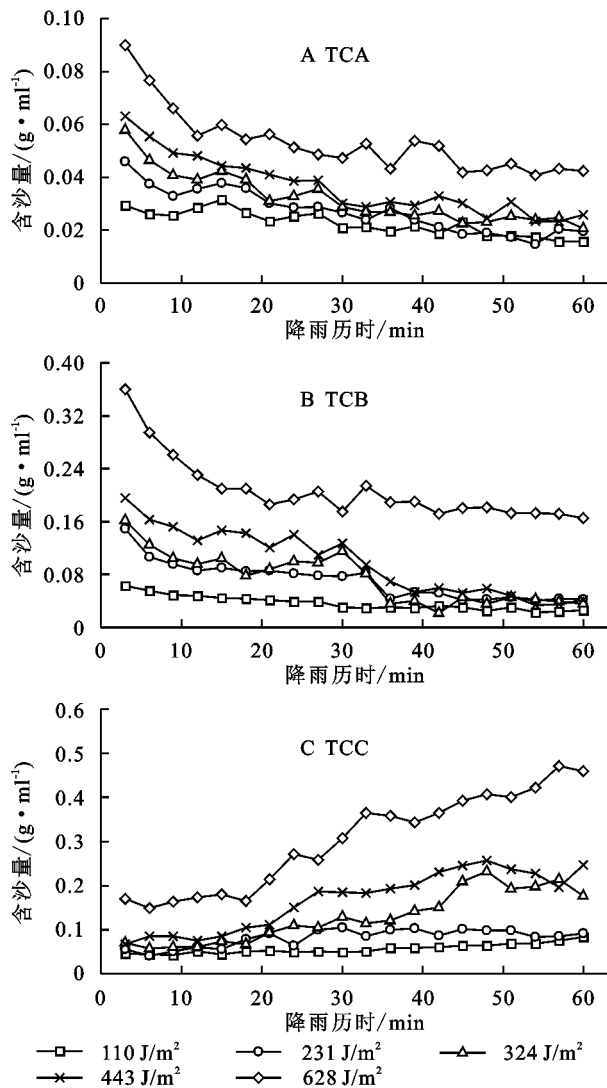


图3 不同降雨动能条件下各层次土壤径流含沙量随时间变化的规律

不同层次土壤的总产沙量与含沙量规律相同,表现为 $TCC > TCB > TCA$ 。造成这种差异的原因是各层次土壤团聚体抗蚀性及坡面径流冲刷强度不同。TCA 孔隙发育,下渗多,产生的坡面径流小,坡面受到的径流冲刷作用较弱,且 TCA 有机质含量高,团聚体稳定性强,在同一降雨动能条件下,TCA 土壤团聚体破碎程度小,因此 TCA 坡面产沙量小。TCB 产生的坡面径流流量量大,流速快,冲刷作用强,因此总产沙量大于 TCA。TCC 有机质含量极低,黏粒含量少,土壤团聚体稳定性弱,在雨滴击溅作用下,大量团聚体颗粒破碎并被径流冲刷离开坡面,因此 TCC 产沙量最大。

将每场降雨试验得到的 20 个含沙量数据分别取平均值,得到的平均含沙量用于计算各降雨动能条件下各层次土壤的土壤侵蚀速率,并将土壤侵蚀速率和降雨动能进行拟合,见图 5。拟合结果表明土壤侵蚀速率与降雨动能呈线性关系,决定系数 R^2 分别达到

了 0.89, 0.94, 0.94。不同层次土壤的土壤侵蚀速率差异显著,总体表现为 $TCC > TCB > TCA$,其中 TCA, TCB, TCC 的拟合方程中降雨动能的系数分别为 0.07, 0.14, 0.17, 表明降雨动能增加对各层次土壤的土壤侵蚀速率造成的影响程度呈现 $TCC > TCB > TCA$ 的规律,说明土壤质地对土壤侵蚀速率具有显著影响,这与前人的研究结论一致^[6]。

综上所述,表层土壤比下层土壤具有更强的抗蚀性,当坡面发生侵蚀时,上层土壤一旦被剥蚀,下层土壤易出现加速侵蚀的趋势,因此保护土壤表层(尤其是 A 层)是坡面侵蚀预防治理中的关键环节。

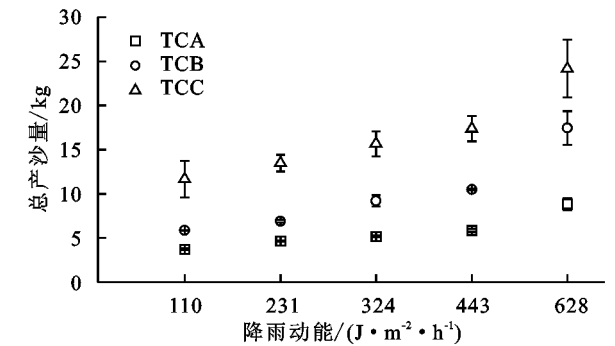


图4 各层次土壤总产沙量随降雨动能的变化规律

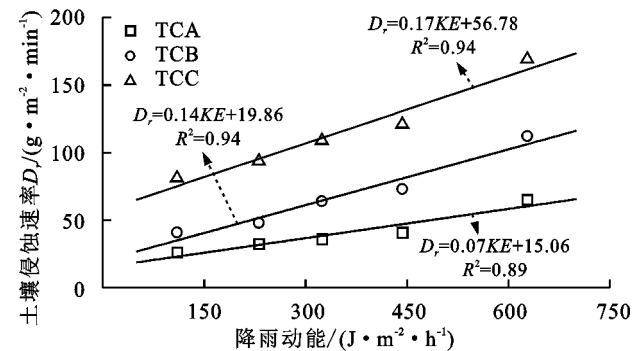


图5 各层次土壤的土壤侵蚀速率与降雨动能之间的拟合关系

2.3 不同试验条件下水动力学参数

2.3.1 流速 坡面流速是影响坡面侵蚀的重要参数,是推导各水动力学参数的基础参数^[26]。由图 6 看出,在不同降雨动能条件下不同层次土壤坡面的径流平均流速范围为 0.08~0.21 m/s,各层次土壤坡面径流流速随降雨动能的变化呈现明显的规律性:同一层次土壤的径流流速随着降雨动能的增加而增大,表明降雨动能对坡面流速影响显著,这与郭太龙等^[8]研究结果一致。而在同一降雨动能条件下,不同层次土壤的平均流速大致表现为 $TCB > TCC > TCA$,这与土壤坡面地表特征有关。在片蚀阶段,径流流速受雨滴击溅和径流冲刷造成的坡面粗化、跌坎发育等微地表变化的影响^[27]较为显著,不同层次土壤的抗蚀性不同,在雨滴击溅作用下,各层次土壤的微地表特征产生差异。同时,TCB 黏粒含量最高,在降雨过程

中,容易形成程度较大的结皮,这有利于坡面产流,增加流速,这与吴秋菊等^[28]研究结论一致。根据试验观测,砾石含量较高的 TCA 在发生侵蚀后,坡面粗粒现象比较明显,削减了径流能量,降低了径流流速。因此,径流流速表现为 TCB>TCC>TCA。另外,随着降雨动能增加,3 个层次土壤坡面径流的流速呈现递增的趋势,这表明降雨强度直接决定了雨量大小和强度,其对坡面径流的运动快慢起着关键作用,雨强对于坡面侵蚀水流的流速影响显著。王龙生等^[13]以黄土作为研究对象,发现坡面的微地表和糙度的变化会对坡面径流流速产生影响,进一步验证了本试验的研究结论。

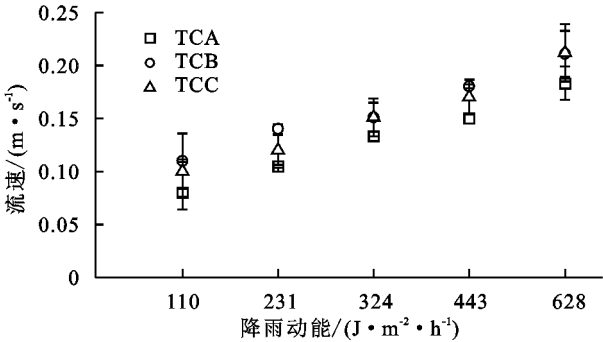
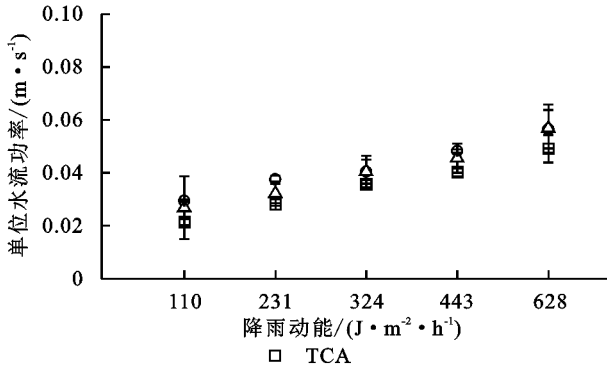


图 6 各层次土壤流速与降雨动能的关系



2.3.2 水流功率和单位水流功率 从物理学角度看,坡面径流的冲刷侵蚀过程是一个做功消耗能量的过程^[29]。水流功率和单位水流功率是影响侵蚀的重要水动力学参数,部分研究表明其能够帮助预测坡面侵蚀过程中的土壤侵蚀速率^[6,16]。其中,水流功率表征径流在分离、剪切土壤颗粒作用中的功率大小^[8]。单位水流功率能够反映单位质量水体势能随时间的变化率^[10]。由图 7 看出,不同降雨动能条件下各层次土壤坡面的水流功率取值范围为 0.09~0.15 W/m²,单位水流功率取值范围为 0.02~0.06 m/s。随着降雨动能的增加,水流功率和单位水流功率呈增大趋势。另外,各层次土壤之间的水流功率和单位水流功率均表现为 TCB>TCC>TCA。其原因是,水流功率受水流剪切力和流速的共同作用,单位水流功率则取决于坡面坡度和水流流速,王龙生等^[7]认为二者的数值大小很大程度上取决于水流流速,因此在降雨试验中,水流功率和单位水流功率的变化特征与流速相似。而郭太龙等^[8]发现水流功率受多个变化因素的综合影响后不呈现单一的线性函数关系,变化规律不明显。因此,将水流功率应用于土壤侵蚀研究的理论还需通过不断的实践来完善。

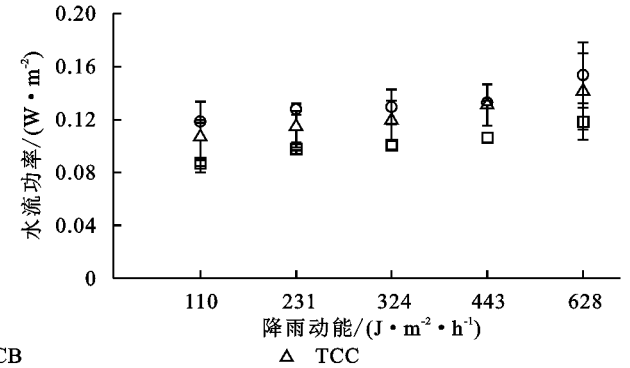


图 7 各层次土壤水流功率和单位水流功率随降雨动能的变化规律

2.4 探讨水动力学参数与土壤侵蚀速率之间的关系

影响土壤侵蚀速率的因素很多,不只受单一因子的影响,不同学者选用描述土壤侵蚀速率的参数存在分歧。通过对本试验数据结果进行分析,发现水流功率和单位水流功率也能与土壤侵蚀速率建立很好的幂函数关系:

$$D_r = 2.54 \times 10^4 \omega^{2.80} \quad R^2 = 0.58 \quad (7)$$

$$D_r = 4.88 \times 10^3 P^{1.32} \quad R^2 = 0.48 \quad (8)$$

式中: ω 为水流功率; P 为单位水流功率;样本数 $n=40$ 。

Nearing 等^[30]首次用变坡水槽对土壤侵蚀速率进行了研究,得出土壤侵蚀速率与土壤中性粒径 D_{50} 呈线性函数关系。Wirtz 等^[31]通过试验研究发现泥沙搬运和沉积过程具有很高的时空变异性,难以利用单一因素描述

其过程。国内外也有研究认为土壤分离能力与土壤特性、近地表特性有关^[32]。综合以上结论,认为除了水动力学参数以外,还有必要结合更多的影响因素进行讨论,进一步完善定量关系。试验所用土壤为同一母质发育不同层次的花岗岩红壤,由表 1 可知,相比其他影响因素,土壤的机械组成是使土壤特性呈现出差异的主要原因,并且主要是由土壤黏粒含量引起的^[33]。因此在与土壤侵蚀速率关系密切的水动力学参数之中加入代表土壤自身性质的黏粒含量指标,建立了两者与土壤侵蚀速率之间的关系,结果见下式:

$$D_r = 4.40 \times 10^4 \omega^{1.36} C_l^{-0.80} \quad R^2 = 0.97 \quad (9)$$

$$D_r = 3.95 \times 10^5 P^{3.07} C_l^{-0.80} \quad R^2 = 0.80 \quad (10)$$

式中: C_l 为土壤黏粒含量,样本数 $n=40$ 。

对比分析上述式(7—10)发现引入黏粒含量之后拟合优度得到了显著提高。两者黏粒含量的指数均为负数,说明土壤黏粒含量对土壤侵蚀具有消极作用,黏粒含量是影响土壤黏结力的主要因素^[6],土壤质地越粘重,抗侵蚀能力越强,这与前人的研究结果一致^[34-35]。本文在探究土壤侵蚀速率与水动力学参数的关系上考虑了土壤本身的性质,预测土壤侵蚀速率的效果更好。但由于工作量等各种限制因素,没有考虑近地表特性的影响,例如枯落物覆盖、生物结皮等,在实际应用中还有待进一步深入。

3 结论

(1) 不同降雨动能条件下,各层次土壤的产流产沙规律显著。随着降雨动能增加,各层次土壤初始产流时间不断递减,径流含沙量和总产沙量不断增大,流速、水流功率和单位水流功率也随之增大;

(2) 各层次土壤之间的侵蚀规律差异显著。初始产流时间表现为: $TCA > TCC > TCB$; 径流含沙量和总产沙量均表现为 $TCC > TCB > TCA$; 流速、水流功率、单位水流功率表现为 $TCB > TCC > TCA$; 通过建立土壤侵蚀速率和降雨动能之间的拟合方程,发现在同一降雨动能条件下土壤侵蚀程度与趋势均表现为 $TCC > TCB > TCA$, 因此保护土壤表层(尤其是 A 层)是预防和治理坡面侵蚀的关键环节;

(3) 水流功率和单位水流功率均与土壤侵蚀速率呈幂函数相关关系,但对于土壤侵蚀速率的预测精度较低。而在表达式中引入土壤黏粒含量,可以提高模型精度,在实际应用中有更广的应用范围和现实价值。

参考文献:

[1] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.

[2] 曹丹妮,杜一凡,郝好鑫,等.人工模拟降雨条件下红壤团聚体流失特征研究[J].水土保持学报,2017,31(4):141-147.

[3] Tony W. Soil erosion and conservation [J]. Geology Today, 2005,21(3):118-119.

[4] Bradford J M, Ferris J E, Remley P A. Interrill soil erosion processes:I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987,51(6):1566-1571.

[5] Wang L, Shi Z H, Wang J G, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2014,512:168-176.

[6] 倪世民,张德谦,冯舒悦,等.不同质地重塑土坡面水沙

定量关系研究[J].土壤学报,2019,56(6):1336-1346.

[7] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟发育过程中含沙量与水动力学参数的关系[J].水土保持学报,2013,27(5):1-6.

[8] 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.

[9] 田培,仇浩然,冯宇,等.雨强和坡度对红壤坡面产流产沙及侵蚀动力过程影响[J].水土保持研究,2020,27(6):1-8.

[10] 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.

[11] 邓羽松.南方花岗岩区崩岗特性、分布与地理环境因素研究[D].武汉:华中农业大学,2018.

[12] Ma R M, Cai C F, Li Z X, et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography [J]. Soil and Tillage Research, 2015,149:1-11.

[13] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟与细沟间水流水动力学特性研究[J].泥沙研究,2013(6):45-52.

[14] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014,78(5):1741-1752.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 雷廷武,张晴雯,赵军.陡坡细沟含沙水流剥蚀率的试验研究及其计算方法[J].农业工程学报,2001,17(3):24-27.

[18] Xiao H, Liu G, Liu P L, et al. Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes on the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2017, 31 (14): 2613-2621.

[19] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.

[20] 王振龙,杜明成,姜翠玲,等.基于人工降雨试验的淮北地区产流产沙差异性研究[J].水科学进展,2019,30(4):507-514.

[21] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3):188-190.

[22] 潘树林,辜彬,杨晓亮.土壤抗蚀性及评价研究进展[J].宜宾学院学报,2011,11(12):101-104.

[23] 刘晓利,何园球,李成亮,等.不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征[J].土壤学报,2008,45(3):459-465.

Journal of Food, Agriculture and Environment, 2013, 11(1):1069-1071.

[15] 郑鹏.降水强度及坡度对不同土壤产流产沙影响[J].水土保持应用技术,2020(4):15-16.

[16] Liao K H, Lv L G, Yang G S, et al. Sensitivity of simulated hillslope subsurface flow to rainfall patterns, soil texture and land use[J]. Soil Use and Management, 2016,32:422-432.

[17] 彭浩,李忠武,刘春,等.湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水土保持措施的综合响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.

[18] 吴荣镇,权志城.新疆伊犁地区土壤[R].新疆伊宁:伊犁地区土壤土壤普查办公室,1985.

[19] 肖开提·多莱特.新疆降水量级标准的划分[J].新疆气象,2005,28(3):7-8.

[20] 蔡进军,李生宝,蒋齐,等.半干旱黄土丘陵区典型抗旱造林整地技术集流效果研究[J].水土保持研究,2009,16(5):127-130.

[21] 宿婷婷,韩丙芳,马红彬,等.水平沟整地措施对黄土丘陵区草原土壤水分动态平衡的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):125-134.

[22] Prosdocimi M, Tarolli P, Cerda A. Mulching practices for reducing soil water erosion;a review[J]. Earth-Science Reviews, 2016,161:191-203.

[23] 何琪琳,李斌斌,张风宝,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀对影响因素响应的定量分析[J].地理学报,2021,76(5):1218-1230.

[24] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J]. Land Degradation & Development, 2013,24:582-590.

[25] Zhang Y, Wei H, Nearing M A. Effects of antecedent soil moisture on runoff modeling in small semiarid watersheds of southeastern Arizona[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2011,15:3171-3179.

[26] 胡国锋,王济,蔡雄飞,等.初始含水量对土壤侵蚀的影响研究进展[J].贵州农业科学,2013,41(5):100-103.

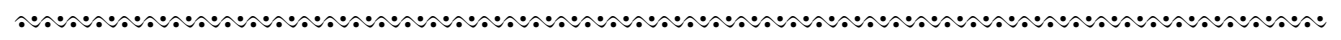
[27] 洪雨馨,姚蕊,孙鹏,等.降雨和前期含水量对大别山区不同作物坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):53-59.

[28] 程琴娟,蔡强国,马文军.我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性[J].地理研究,2008,27(6):1290-1298.

[29] 程圣东,李占斌,李强.干热河谷地区土壤物理特性对土壤侵蚀的影响[J].水资源与水工程学报,2008,19(5):38-41.

[30] 杨伟,张琪,李朝霞,等.几种典型红壤模拟降雨条件下的泥沙特征研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(3):439-444.

[31] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等.不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J].水土保持学报,2018,32(2):34-39.



(上接第 61 页)

[24] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J].农业工程学报,2011,27(3):73-78.

[25] 王秋霞,丁树文,邓羽松,等.人工模拟降雨下花岗岩崩岗区不同层次土体产流产沙特征[J].水土保持学报,2016,30(6):7-12.

[26] 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.

[27] Ni S M, Zhang D Q, Wen H, et al. Erosion processes and features for a coarse-textured soil with different horizons;A laboratory simulation [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020,20(7):2997-3012.

[28] 吴秋菊,吴发启,王林华.土壤结皮坡面流水动力学特征[J].农业工程学报,2014,30(1):73-80.

[29] 崔文滨,李鹏,李占斌,等.径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(9):103-107.

[30] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991,55(2):339-344.

[31] Wirtz S, Seeger M, Zell A, et al. Applicability of different hydraulic parameters to describe soil detachment in eroding rills [J]. Plos One, 2013,8(5):e64861.

[32] 张冠华,胡甲均.径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J].水科学进展,2019,30(2):294-304.

[33] 王云琦,王玉杰,张洪江,等.重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J].农业工程学报,2006,22(3):40-45.

[34] Su Z L, Zhang G H, Yi T, et al. Soil detachment capacity by overland flow for soils of the Beijing region [J]. Soil Science, 2014,179(9):446-453.

[35] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. Biosystems Engineering, 2015,129:248-257.