

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

王秋霞¹, 丁树文^{1,2}, 邓羽松¹, 马媛¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 选取湖北通城县五里镇发育典型的崩岗作为研究对象, 利用室内人工模拟降雨试验, 分析花岗岩崩岗区各层次土体的产流产沙状况和泥沙各粒径流失规律。结果表明, 各层次土体入渗率和累积入渗量在整个降雨时段内差异显著。随着降雨时间的延长, 各层次土体入渗率均表现出先快速减小后逐渐趋于稳定, 累积入渗量则相差越来越大; 淀积层的稳定入渗率最大为 328.75 ml/min, 是淋溶层的 1.13 倍, 母质层的 1.76 倍; Horton 模型能对各层次土体入渗率很好的拟合 ($R^2 > 0.922$), 且拟合结果证实了模拟降雨条件下各层次土体入渗率随时间变化规律。各层次土体产沙率和累积产沙量在整个降雨时段内差异显著。母质层平均产沙率为 40.43 g/(L·min), 是淀积层的 1.79 倍, 淋溶层的 3.11 倍; 淀积层的累积产沙量增加较快, 淋溶层的累积产沙量增长缓慢, 母质层的累积产沙量在整个降雨时段内不断增加且远大于淋溶层和淀积层的累积产沙量。各层次土体 < 0.2 mm 粒径的流失量最多, 0.2~1 mm 粒径次之, 1~2 mm 粒径和 > 2 mm 粒径流失量最小; 随着降雨时间的延长, 淋溶层各粒径流失量均逐渐减小, 淀积层各粒径流失量逐渐增多, 母质层各粒径流失量逐渐趋于稳定。该研究对揭示崩岗区各层次土体侵蚀的产流产沙机理及侵蚀规律的研究具有重要的理论和实践意义, 为崩岗水蚀过程物理模型的建立奠定基础。

关键词: 人工模拟降雨; 花岗岩崩岗区; 产流产沙; 粒径

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0007-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.002

Characteristics of Runoff and Sediment of Different Soil Layers in Granite Collapse Region Under Artificial Rainfall Simulation Condition

WANG Qiuxia¹, DING Shuwen^{1,2}, DENG Yusong¹, MA Yuan¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation for Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070)

Abstract: Through choosing the developing typical collapsing gully in Tongcheng as the research object, we analyzed the condition of runoff and sediment yield and the discipline of particle size of the different soil layers in granite region under the simulated rainfall experiments. The results showed that the differences between the infiltration rate and accumulative infiltration of the different soil layers were significant in the whole rainfall period; With the extension of rainfall duration, the infiltration rate of the different soil layers decreased at first and then kept stable, and the accumulative infiltration had relatively large difference; The infiltration rate of illuvial horizon was the highest of 328.75 ml/min, which was 1.13 times of that of eluvial horizon, and 1.76 times of that of parent material horizon; Horton model could describe the infiltration rate of the different soil layers well ($R^2 > 0.922$), and the fitting results confirmed the variation process of infiltration rate of the different soil layers under the simulated rainfall conditions. The difference between the sediment yielding rate and cumulative sediment of the different soil layers was significant in the whole rainfall period. With the extension of rainfall duration, the sediment yielding rate of parent material horizon was the highest of 40.43 g/(L·min), which was 1.79 times of that of illuvial horizon, and 3.11 times of that of eluvial horizon; The cumulative sediment of eluvial horizon increased rapidly, while that of illuvial horizon showed relative slow growth; The cumulative sediment of parent material horizon increased in the whole rainfall period, which was greater than that of eluvial horizon and illuvial horizon. The particles of < 0.2 mm showed the highest loss in different soil layers, followed by particles of 0.2 to 1 mm, 1 to 2 mm and > 2 mm. With the extension of rainfall duration, the loss of all particle sizes of eluvial horizon decreased gradually, while that of

收稿日期: 2016-06-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571258)

第一作者: 王秋霞(1991—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事花岗岩风化土可蚀性及崩岗稳定性研究。E-mail: qxwangchn@163.com

通信作者: 丁树文(1964—), 男, 湖北孝感人, 副教授, 主要从事水土保持、农业生态环境保护研究。E-mail: dingshuwen@mail.hzau.edu.cn

the illuvial horizon gradually increased, and that of the parent material horizon tended to be stable. This study has important significance in theory and practice to reveal the mechanism of runoff and sediment and the research about erosion law of the different soil layers in granite collapse region. The results obtained in this paper set up the basis of the physical model in water erosion process of collapse gully.

Keywords: the simulated rainfall experiments; in granite collapse region; runoff and sediment yield; particle size

土壤侵蚀是水流和土壤相互作用的复杂物理过程,径流和土壤是水土流失的两个基本因子^[1-2]。坡面径流是造成水土流失的主导因子,同时坡面径流的冲刷力是土壤侵蚀的主要动力^[3-4]。降雨背景下,雨水在土壤剖面主要以入渗和径流两种方式进行转移,当雨水入渗量超过土壤最大蓄水量时径流产生,土壤表层易受降雨径流冲刷侵蚀的影响,随后发展为泥沙流失,进而引起水土流失^[5]。吕玉娟等^[6]研究发现,红壤区不同土地利用方式对产流产沙量影响较大,农地径流产沙量远大于经果林,且后者呈逐渐降低趋势;耿晓东等^[7]基于室内模拟降雨试验研究发现红壤坡面入渗率随降雨强度增大,呈先增加后降低变化趋势;不同土地利用类型径流量和产沙量对降雨因子的响应不一样,与裸露荒地、坡耕地和旱地相比,林地和疏林地径流量及产沙量相对变化较缓^[8];王雪松等^[9]通过降雨试验对坡顶平台有车碾压堆积体进行研究,发现径流含沙量随时间变化曲线可被描述为“先增大一再小幅度减小一再稳定一再急剧减小一最后小幅度上升”的趋势,并将杨凌的重壤质土作为试验材料在室内进行了堆积形态仿真模拟的人工降雨试验,得到了不同堆积形态之间的产流产沙规律^[10];郭明明、王文龙等^[11-12]研究发现砾石含量及土壤质地改变了坡面入渗速率,且径流系数受入渗率的影响;汪邦稳等^[13]对南方红壤区 8 种典型小流域研究发现不同利用土地的径流和泥沙流失差异明显,但是由于南方红壤与北方黄土在性质上有着很大的差异性,这也必然导致侵蚀规律有所不同;黄炎和、蒋芳市和刘希林等^[14-16]对崩岗崩积体产流产沙状况进行了研究,发现不同径流量作用下崩积体累积产沙量和平均含沙量差异显著。

崩岗是指在水力和重力综合作用下山坡土体受破坏而崩塌和冲刷的侵蚀现象,属于复合侵蚀类型^[17-19]。崩壁暴露在外,最易受到降雨及地表径流的影响,是崩

岗系统中最活跃的部位,其侵蚀直接影响崩岗的严重程度以及侵蚀面积的扩大^[20-21]。Borah 等^[22]研究发现径流冲刷过程与土壤质地关系密切,而崩岗形成的主要原因是各层次土壤理化性质及抗蚀性差异极其显著^[23-25]。目前国内利用人工模拟降雨试验对北方黄土、褐土坡面的研究较多,而对南方红壤丘陵区发育典型崩岗的研究较少,并且关于崩岗区各层次土壤的产流产沙状况及各粒径流失规律尚不明确。鉴于以上现状,本文以花岗岩崩岗区不同层次土体为研究对象,通过人工模拟降雨试验研究崩岗各层次土体的产流产沙状况及各粒径流失量。该研究对于准确分析崩岗区各层次土壤的泥沙输移特征、土壤侵蚀过程模型等诸多领域都具有重要的指导意义。

1 研究区概况

研究区位于湖北省东南部咸宁市通城县五里镇五里社区,地跨东经 113°36′—114°4′,北纬 29°2′—29°24′,属于北亚热带季风气候区,气候温和,雨量充沛,全县平均气温 16.7℃,日最高气温为 39.7℃,最低气温为 -15.2℃,年平均降雨量 1 450~1 600 mm。该区花岗岩出露面积占地区总面积的 70%,水土流失总面积为 38 410 hm²,土壤类型为红壤。覆盖植被类型为常绿阔叶与落叶阔叶混交林为主。县域内崩岗数量达 1 120 多处,占湖北省崩岗总数的 47%,是崩岗集中分布的典型区域。在通城地区开展崩岗研究工作具有很强的代表性。

2 材料与方法

2.1 试验装置与材料

试验装置主要有土槽车、降雨器、雨量筒 4 个、径流瓶(1 L)和时域反射仪(TDR)。

试验材料:根据崩岗发生剖面的土壤层次,采取湖北通城五里镇花岗岩风化土发育较典型的淋溶层、淀积层、母质层土样,测定各层次土体理化性质(表 1)。

表 1 崩岗各层次土体理化性质

土壤层次	取土深/m	>2 mm	0.2~2 mm	0.02~0.2 mm	<0.02 mm	有机质含量/(g·kg ⁻¹)
淋溶层	0.1~0.3	5.85	38.21	18.19	37.75	12.35
淀积层	0.5~1.5	27.21	21.17	14.80	36.82	3.53
母质层	8.0~15.0	33.45	19.23	16.77	30.55	2.20

2.2 试验方法

试验在华中农业大学水土保持研究中心降雨大厅进行。分别对 3 层土进行人工模拟降雨试验,根据南

方年降雨情况及地形地貌状况,设计雨强为(70±4) mm/h,降雨时长 40 min,设计坡度 20°,收集径流和泥沙,每层土做 5 个重复。

试验所采用的土槽为自行设计的钢槽。规格为长 2 m,宽 0.6 m,深 0.2 m,土槽径流出口处安装“V”形钢槽用以收集径流泥沙,将土样按照室外实测容重装在土槽车内用以模拟自然条件下的坡面,每层土填车时以 5 cm 压实 1 次,填装 3 层,每层均匀压实到固定容重 1.37 g/cm³。

填车装土后对土表进行平整处理,试验前在土槽表面覆盖纱布进行小雨强预湿润,以防湿陷作用或者干土溅散引起的结果不均匀,并放置 24 h 去掉重力水。用 TDR 测定初期含水率在(20±2)%时开始试验。

降雨过程中将 4 个雨量筒均匀摆放在土槽车两侧进行雨强数据的收集,用径流瓶收集每 2 min 土槽产生的径流及泥沙,收集阶段记录细沟产生的时间并观察细沟产生状况。测量并记录各个土层每 2 min 收集的径流量,将收集的泥沙分别过 2,1,0.2 mm 筛,对各时间段粒径进行烘干称重。

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

3 结果与分析

3.1 入渗速率和累积入渗量特征

入渗是指水分进入土壤的过程,是降水、地表水、土壤水和地下水相互转化过程中的一个关键环节^[26]。土壤的入渗性能对于水文过程、土壤侵蚀、作物水分利用和灌溉管理等研究和实践非常重要^[27]。土壤的入渗能力常用入渗速率来表示,入渗速率是指单位时间、单位面积土壤表面入渗的水量。累积入渗量是降雨时间段内的降雨量与径流量的差值。综合分析 3 个土层 15 次降雨的入渗数据,绘制模拟降雨

条件下各层次土体入渗速率和累积入渗量随时间的变化关系(图 1)。

从图 1 可以看出,在初期含水量达(20±2)%的条件下,各层次土体的入渗速率在整个降雨时间段内随着降雨时间的延长均表现出先快速减小后趋于稳定,且各层次土体的入渗速率均在 10 min 后趋于平稳;淀积层的稳定入渗速率最高,淋溶层次之,母质层最小,且各层次入渗速率之间表现出均匀差异。在降雨初期各层次土体累积入渗量相差不大,随着降雨时间的延长,各层次的累积入渗量相差越来越大,淀积层的累积入渗量最大,淋溶层次之,母质层最小。

根据模拟降雨条件下各层次土体入渗速率和累积入渗量随时间的变化关系得出各层次土体的稳定入渗速率和累积入渗量的多重比较结果(表 2)。由表 2 可知,淀积层的稳定入渗率最大为 328.75 ml/min,是淋溶层的 1.13 倍,母质层的 1.76 倍,且淋溶层和淀积层的稳定入渗率差异不显著,但母质层与淋溶层、淀积层的稳定入渗率差异显著;根据水量平衡法可知:淋溶层和淀积层累积入渗量的差异不显著,母质层与以上两层的累积入渗量差异显著。这可能由于母质层是发育程度较低的岩石风化层,有机质含量较低,颗粒组成主要为砂粒且较粗,降雨时细颗粒沉降,孔隙重新分布时大孔隙被填满,土壤容重大,入渗率相应较小;淋溶层颗粒组成主要为黏粒且较细,土壤有机质含量较高且结合紧密,容重小,土质疏松,小孔隙发育较完全,有良好的入渗路径;淀积层颗粒组成主要为粉粒,<0.02 mm 的土壤粒径最多,比淋溶层孔隙大,而细颗粒又比母质层少,故入渗速率和累积入渗量最大。

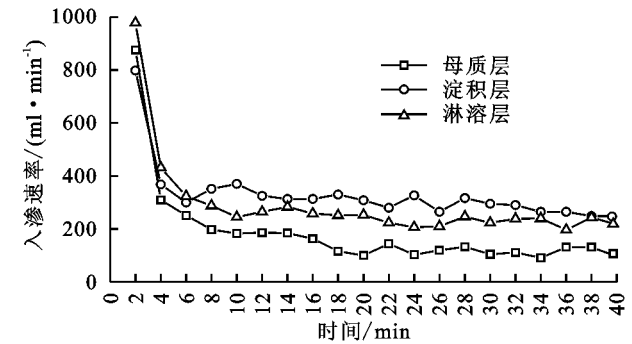


图 1 各层次土体入渗速率和累积入渗量随时间的变化

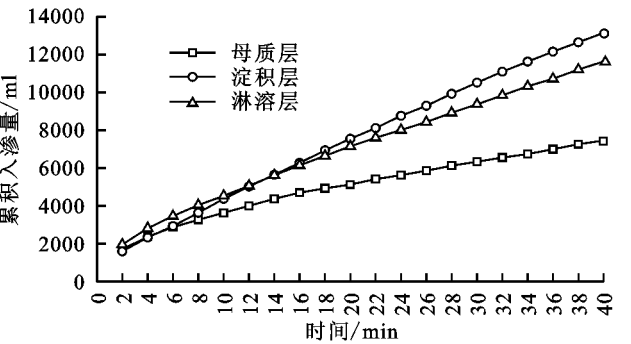


表 2 各层次土体稳定入渗率和累积入渗量的多重比较			
测定项目	淀积层	淋溶层	母质层
稳定入渗率/(ml·min ⁻¹)	328.75a	291.00a	186.42b
累积入渗量/ml	13155a	11643a	8727b

注:表中数字后不同小写字母表示各层差异显著(P<0.05)。
为进一步深入研究各层次土体入渗速率随时间的变化关系,采用常用的 Philip 模型和 Horton 模型对各层次土体入渗速率随降雨历时的变化过程进行

拟合并进行显著性分析,模型表达式为:
Philip 模型公式: $f(t)=1/2St^{-1/2}+A$
式中: $f(t)$ 为某时刻的入渗率(ml/min); t 为入渗时间(min); A 为常数; S 为吸水系数。
Horton 模型公式: $f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$
式中: $f(t)$ 为某时刻的入渗率(ml/min); f_0 为初渗速率(ml/min); f_c 为稳渗速率(ml/min); k 为常数; t 为入渗时间(min); e 为自然对数的底。

根据入渗模型及降雨入渗数据通过 SPSS 18.0 进行拟合(表 3),Philip 模型和 Horton 模型均能对各层次土体的入渗过程进行拟合,Philip 模型对淀积层的拟合效果较低($R^2=0.855$),但 Horton 模型的

表 3 各层次土体入渗过程拟合结果

土壤层次	Philip 模型				Horton 模型				
	S	A	R^2	P	$f_{(c)}$	f_0	k	R^2	P
淋溶层	5863.019	159.165	0.932	0	239.101	2761.082	0.616	0.982	0
淀积层	3843.506	242.325	0.855	0	299.808	3875.497	0.985	0.922	0
母质层	5973.968	52.087	0.945	0	133.42	2515.835	0.589	0.961	0

注:P 为显著性水平; R^2 为相关系数。

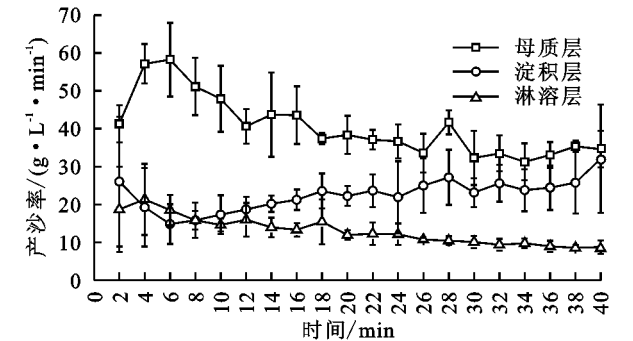
3.2 产沙率和累积产沙量特征

采用产沙率对模拟降雨条件下各层次土体侵蚀产沙量特征进行定量描述,分析 3 个土层 15 次降雨的产沙数据表明,在初期含水量达(20±2)%的情况下,各层次土体产沙率和累积产沙量在整个降雨时间段内差异显著。从表 4 可以看出,母质层平均产沙率为 40.43 g/(L·min),是淀积层的 1.79 倍,淋溶层的 3.11 倍,母质层在整个降雨时间段内的累积产沙量为 3 658.55 g,是淀积层的 1.99 倍,淋溶层的 3.40 倍。

表 4 各层次土体产沙率及累积产沙量的多重比较

测定项目	母质层	淀积层	淋溶层
平均产沙率/(g·L ⁻¹ ·min ⁻¹)	40.43A	22.56B	13.01C
累积产沙量/g	3658.55A	1832.44B	1076.77C

注:数据采用 DUNCAN 检验,不同大写字母代表差异显著(P<0.05)。



拟合度更好($R^2>0.922$)。Horton 模型对各层次土体的拟合结果证实了图 1 模拟降雨条件下各层次土体入渗速率随时间的变化关系,即淀积层稳定入渗率>淋溶层稳定入渗率>母质层稳定入渗率。

从图 2 可以看出,母质层的产沙率随时间波动较大,但随着降雨时间的延长整体呈下降趋势;淀积层产沙率在最初 6 min 内下降,随后呈缓慢上升趋势;淋溶层产沙率在降雨 4 min 后整体呈缓慢下降趋势。母质层产沙率明显高于淀积层和淋溶层,淀积层平均产沙率高于淋溶层。试验过程中,母质层土体经过长时间降雨,形成冲沟,造成细沟侵蚀,这可能是图 3 中降雨 28 min 时产沙率波动的原因。

从图 2 还可看出,在人工模拟降雨初期淋溶层和淀积层的累积产沙量相差不大,但随着降雨时间的延长,产沙量差异明显,且淀积层累积产沙量的增加速率不断加快,淋溶层的累积产沙量呈较缓慢的增长趋势;母质层的累积产沙量在整个降雨时间段内不断增加,且远远大于淋溶层和淀积层的累积产沙量。因此,母质层的防治是崩岗预防治理中较关键的环节。

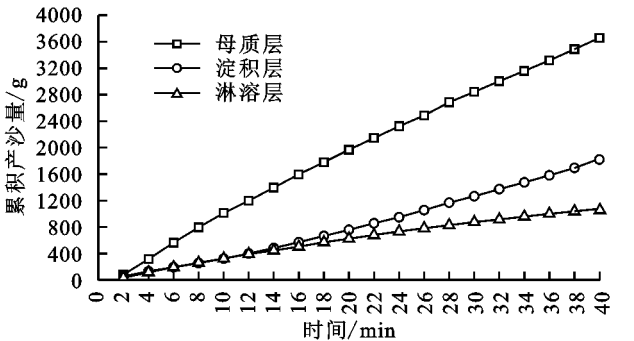


图 2 各层次土体产沙率和累积产沙量随时间的变化

3.3 粒径流失特征

侵蚀泥沙的粒径分布是研究土壤侵蚀过程中泥沙和养分输移的重要基础^[28]。为了进一步理解土壤水蚀机理,探索泥沙和养分的输移特征,有必要对侵蚀泥沙的粒径分布展开深入、系统的研究^[29]。根据 3 个土层 15 次降雨数据得出各层次土体粒径流失量随时间变化关系图(图 3)。在整个降雨时段内,各层次土体<0.2 mm 粒径的流失量最多,0.2~1 mm 粒径次之,1~2 mm 粒径和>2 mm 粒径流失量最小;母质层各粒径流失量较淋溶层、淀积层显著增多。

从图 3 可以看出,0.2~1 mm 及<0.2 mm 粒径的流失量占淋溶层总流失量的比重较大,且流失量均

稳定减小;在降雨初期(0~10 min),0.2~1 mm 粒径流失量最大,10 min 后 0.2~1 mm 粒径流失速率逐渐高于<0.2 mm 粒径的流失速率,<0.2 mm 粒径的流失量逐渐高于 0.2~1 mm 粒径流失量,且<0.2 mm 的黏粉粒流失量保持稳定下滑;淋溶层>2 mm 粒径颗粒含量较少,且随降雨时间延长>2 mm 粒径流失量出现显著降低的现象,这可能由于团聚体是淋溶层大颗粒的主要组成成分,在模拟降雨初期径流最先剥离接触面积小、黏着性弱的大团聚体,随着降雨时间的延长表层大颗粒逐渐趋于稳定。

淀积层各粒径流失量中<0.2 mm 粒径流失量所占比重较大,且随降雨时间延长各粒径流失量都趋

于增大,<0.2 mm 及 0.2~1 mm 粒径流失量增加速率逐渐降低,1~2 mm 及>2 mm 粒径流失量的增加速率逐渐加快;淀积层粉粒及黏粒含量较高,在径流冲刷过程中,小颗粒含量流失较多,大颗粒含量流失量相对较少,且各粒径流失量都不稳定;各粒径流失量逐渐增大的现象说明淀积层在裸露情况下极易被侵蚀,且侵蚀速率随着侵蚀时间的延长逐渐增大。

母质层沙砾含量最多,且大颗粒构成基本全部为沙砾,因此离散程度较小;母质层有机质含量最低,黏着性最弱,母质层各粒径的平均流失量最高。<0.2 mm 粒径颗粒流失量巨大,0.2~1 mm 及<0.2 mm 粒径流失量较大,占总流失量的比重也较大,但随降雨时间的延长逐渐趋于平稳,1~2 mm 及>2 mm 粒径流失量所占比重较小,随降雨时间的延长出现先增加后趋于稳定;母质层<0.2 mm 粒径颗粒流失量巨大,是淀积层最大粒径流失量的一倍多。

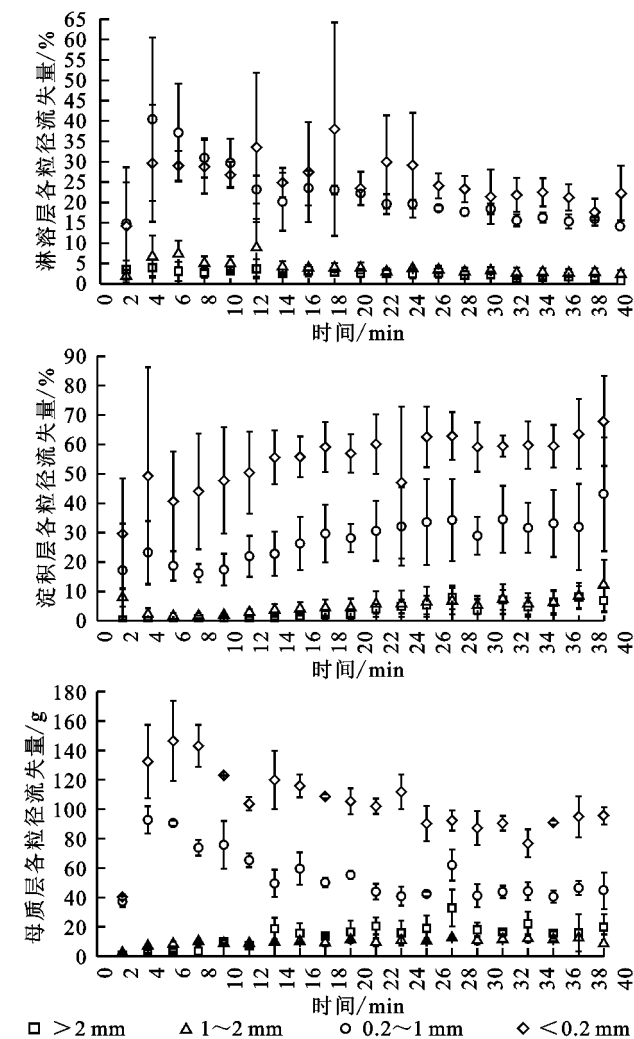


图 3 各层次土体不同粒径流失量随时间的变化

4 结论

(1)花岗岩崩岗区各层次土体的水分渗透性能不同,且差异显著。各层次土体的入渗速率均在降雨

10 min 后趋于平稳,淀积层的稳定入渗率最高,淋溶层次之,母质层最小。随着降雨时间的延长,各层次的累积入渗量相差越来越大,淀积层的累积入渗量最大,淋溶层次之,母质层最小。采用 Philip 模型和 Horton 模型对各层次土体入渗速率随降雨历时的变化过程进行拟合,发现 Horton 模型能很好的描述崩岗各层次土体侵蚀状况,且拟合结果证实了各层次土体随降雨时间的变化规律。

(2)崩岗区各层次土体的流失量均以小颗粒(0.2~1 mm,<0.2 mm)为主。母质层各粒径的流失量均高于淋溶层和淀积层各粒径流失量,且离散程度较小;随着降雨时间的延长,淋溶层各粒径的流失量逐渐降低,淀积层各粒径的流失量逐渐增多,母质层各粒径的流失量逐渐趋于稳定;淋溶层小颗粒流失量较少,大颗粒流失以团聚体为主,淀积层小颗粒流失量适中,但随着时间增加流失速度也会增长,母质层小颗粒流失量巨大,是淀积层最大粒径流失量的一倍多;决定各层次土体侵蚀强弱的主要条件是小颗粒的多少及粘结能力的大小。

(3)崩岗各层次土体产沙率和累积产沙量在整个降雨时间段内差异显著。母质层平均产母质层在整个降雨时间段内的累积产沙量为 3 658.55 g,是淀积层的 1.99 倍,淋溶层的 3.40 倍;随着降雨时间的延长,各层次土体的累积产沙量差异较明显,母质层的累积产沙量在整个降雨时间段内不断增加且远远大于淋溶层和淀积层的累积产沙量。

(4)崩岗区各层次土体侵蚀的产流产沙状况存在显著差异。随着土层深度的增加,土体的抗侵蚀能力逐渐减弱;随着降雨侵蚀的持续,深层土体的侵蚀速率加快,长期过度的侵蚀导致泥沙流失量大幅度增多,最终形成窝。水蚀过程促进窝的形成,随着窝的不断扩大,崩壁上层土体在重力作用下发生崩塌,加快溯源侵蚀进程,导致崩岗不断扩大。因此,防治崩岗区土壤侵蚀的关键在于减少水力作用时间。在自然条件下,淀积层相对母质层更容易暴露在外,为防止扩大侵蚀,应注意淀积层的保护,同时,增加淋溶层表面的植被覆盖,减少径流等水力对土层的作用时间,对于改善崩岗频发状况、防治水土流失具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Sun W,Shao Q,Liu J,et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. Catena,2014,121(7):151-163.
- [2] 左长清,马良. 天然降雨对红壤坡地侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(2):1-4.
- [3] 李裕元,邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙

- 特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46-50.
- [4] Wong T S W. Assessment of time of concentration formulas for overland flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 131(4): 383-387.
- [5] 胡尧, 侯雨乐, 李懿. 模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 62-67.
- [6] 吕玉娟, 彭新华, 高磊, 等. 红壤丘陵岗地区坡地产流产沙特征及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 19-23.
- [7] 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 39-43.
- [8] 闫胜军, 郭青霞, 闫瑞, 等. 不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 45-49.
- [9] 王雪松, 谢永生. 模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 117-124.
- [10] 王雪松, 谢永生, 陈曦, 等. 模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J]. 泥沙研究, 2015(4): 74-80.
- [11] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 黄土区坡耕地耕作对浅沟径流产沙及其形态发育特征的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 114-123.
- [12] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 黄土区不同地貌部位径流泥沙空间分布试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 40-43.
- [13] 汪邦稳, 肖胜生, 张光辉, 等. 南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 239-243.
- [14] 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.
- [15] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 86-89.
- [16] 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 204-211.
- [17] 阮伏水. 福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J]. 山地学报, 2003, 21(6): 675-680.
- [18] 邓羽松, 李双喜, 丁树文, 等. 鄂东南崩岗不同层次土壤分形特征及抗蚀性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1): 63-70.
- [19] Zhong B L, Peng S Y, Zhang Q, et al. Using an ecological economics approach to support the restoration of collapsing gullies in southern China[J]. Land Use Policy, 2013, 32(5): 119-124.
- [20] 牛德奎, 左长清. 我国南方红壤丘陵区崩岗侵蚀的分布及其环境背景分析[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(2): 204-206.
- [21] 林敬兰, 黄炎和, 蒋芳市. 崩岗土体的渗透性能机理研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 53-56.
- [22] Borah D K. Water, sediment, nutrient, and pesticide measurements in an agricultural watershed in Illinois during storm events[J]. Transactions of the Asae, 2003, 46(3): 657-674.
- [23] 张勇, 丁树文, 万绍文, 等. 黄麻土工布对不同层次土体的水土保持效用分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 23-28.
- [24] 邓羽松, 丁树文, 刘辰明, 等. 鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 132-137.
- [25] 王秋霞, 丁树文, 赵欣, 等. 花岗岩风化土不同土层抗蚀性差异分析[J]. 水土保持研究, 2015, 29(3): 6-9.
- [26] 王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 189-195.
- [27] Peterson J E, Kulik G, Jelinek T, et al. Rainfall-infiltration-runoff relationships in a semi-arid hillslope and their interactions with vegetation cover[C]//EGU general assembly conference. EGU general assembly conference abstracts, 2015: 31562-31571.
- [28] 张怡, 丁迎盈, 王大安, 等. 坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 25-29.
- [29] Zhao L, Wu J, Zhang Q. Runoff, erosion and sediment particle size from smooth and rough soil surfaces under steady rainfall-runoff conditions[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science, 2014, 64(7): 623-632.