

文章编号: 1008-2786-(2017)4-000-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000242

土石混合紫色土坡面水文过程的实验研究

韩 珍¹ 王小燕^{1,2*} 李馨欣¹

(1. 西南大学资源环境学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室 重庆 北碚 400716;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 土壤中的碎石改变了均质土壤的容重、孔隙度与孔径分布等物理性质, 从而对土壤水文与侵蚀过程造成影响。该研究在室内人工模拟降雨条件下, 对 6 种不同碎石体积含量(0.5%、10%、20%、30%、40%) 紫色土坡面的水文过程进行了模拟。结果表明, 径流系数与碎石含量之间差异显著($F=115$, $P<0.01$) 且呈显著正相关关系; 土壤湿润锋随着碎石含量的增大呈增加的趋势; 不同碎石含量的土壤坡面起始产流时间差异显著($F=208$, $P<0.01$) 且产流时间随碎石含量的增加而减小; 碎石含量为 20% 时, 土壤平均产流量最高, 超过 20% 时, 产流量反而降低; 但碎石含量对径流流速没有显著影响。该研究结果可以为碎石含量在紫色土中的作用机理提供理论基础, 同时为紫色土区土壤资源的合理利用提供科学依据。

关键词: 碎石; 产流; 径流流速; 降水分配

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

紫色土是一种结构疏松、物理风化强烈的初育土, 主要分布在我国西南部地区, 因其土壤肥力高, 分布区水热条件好, 致其垦植度高, 成为我国重要的农业生产基地。正因为紫色土独特的土壤特性, 加上其分布区地形起伏, 在高强度的降雨和土地利用条件下, 紫色土坡耕地水土流失严重, 平均土壤侵蚀模数高达 3000~5000 t/(km²·a), 侵蚀强度仅次于西北地区的黄土。强烈的土壤侵蚀使紫色土砾质化特征明显, 碎石含量较高。碎石 (rock fragment) 是指土壤中粒径 > 2 mm 的矿物颗粒, 在土壤中分布广泛, 我国北方土石山区的褐土和西北的黄土表层也含有大量的碎石。紫色土碎石对土壤的饱和含水率、入渗率、孔隙度和地表糙度有很大的影响, 是紫色土土壤侵蚀过程的一个重要影响因子^[1-7]。

碎石通过改变原本均质土壤的容重、孔隙度及

孔径分布等来影响土壤蓄水能力和入渗能力等水力性质, 其中碎石来源、粒径大小、含量及空间分布特征和土壤质地等是主要的影响因素^[8-15]。不同的研究者在碎石对土壤水力性质的影响方面得出了不同的结论: 移除土壤中碎石导致土壤孔隙减少, 入渗率降低^[16]; 通过对没有用机械工具扰动的小区进行研究发现^[17], 土壤入渗量与碎石含量呈正相关关系; 当土壤中碎石直径较大且镶嵌于土壤中时, 碎石含量与入渗量呈负相关关系, 反之, 碎石较小且位于地表时, 碎石含量与入渗量间呈正相关关系^[14]。土壤的累积入渗量随碎石含量增大而降低, 且受到碎石直径的影响, 碎石直径与土壤的入渗能力呈负相关关系^[18-19]。通过人工模拟降雨试验, 对碎石质量含量为 0、10%、20% 和 30% 的 4 种土壤入渗性能进行了研究, 结果表明^[20], 碎石含量为 10% 时, 土壤

收稿日期(Received date): 2016-6-2; 改回日期(Accepted date): 2017-7-10

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金青年项目(41401298); 中国科学院水利部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开放基金项目(K318009902-1418); 西南大学大学生科技创新“光炯”培育项目(20140105)。[National Natural Science Foundation of China (41401298); The Foundation of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau under Project (K318009902-1418); The Science and Technology Innovation “GUANG Jiong” Project of Southwest University (20140105)]

作者简介(Biography): 韩珍(1994—), 女, 陕西铜川人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀及流域治理研究。[Han Zhen (1994—), female, born in Shan xi, M. Sc. candidate, mainly engaged in soil erosion.]E-mail: ml3658372800@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 王小燕(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀及流域治理研究。[Wang Xiaoyan (1983—), female, Ph. D., lecturer, mainly engaged in soil erosion research.]E-mail: wxy8388@gmail.com

入渗率最大;当碎石含量超过 10% 时,入渗率反而降低,这说明在土壤碎石含量增加的过程中,入渗率存在一个阈值,高于此入渗率阈值所对应的碎石含量时,土壤入渗率降低,反之入渗率随碎石含量的增加而增大。在对产流过程的研究中,含碎石土壤的坡面产流研究表明,含碎石土壤中碎石含量与坡面产流时间呈显著负相关关系^[21]。在降雨入渗过程中,碎石土中存在一个土壤水分饱和度急剧下降且较陡的湿润锋面,降雨结束后含碎石土壤平均水分饱和度高于不含碎石的土壤,说明土壤中碎石的存在导致土壤水分饱和度增加,但这种效应在碎石含量达到 20% 后不再明显^[22]。

本研究的目的是了解碎石含量对紫色土坡面侵蚀水文过程的影响,揭示碎石在紫色土侵蚀过程中的作用,为紫色土坡耕地水土保持措施布设、控制水土流失、防止土壤退化及提高水土流失量预测精度提供重要理论依据,以期能够达到保护及合理利用珍贵紫色土资源的目的。本文以长江上游含碎石的紫色土为研究对象,通过室内人工模拟降雨试验,研究不同碎石含量对紫色土坡面水文过程的影响,为该土壤资源的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自重庆市北碚区歇马镇(29° 45' N, 106° 22' E),为侏罗纪沙溪庙组母质发育的中性灰棕紫泥土。根据国际土壤质地分类标准,供试土壤为粘壤土。土壤颗粒分析时,先用 30% 双氧水(化学纯)去除供试土壤中的有机成分,后用 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠分散土壤,随后采用 MS2000 激光粒度分析仪(英国马尔文公司生产,粒径精度 0.01 ~ 2000 μm)分析分散后的粒级。采用容量分析法测定土壤有机质含量,通过凯氏定氮法测定土壤全氮含量。测得供试土样有机质含量为 3.22 g/kg,全氮含量为 0.67 g/kg,具体测定结果见表 1。

1.2 试验方法

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点试验室模拟降雨大厅进行,采用下喷式降雨系统,试验土槽尺寸为 5 m × 1 m × 0.4 m (长 × 宽 × 深),土

槽下部有出水口,如图 1 所示。供试土壤风干后过 10 mm 的筛,按照控制土壤容重为 1.3 g/cm³,与直径为 2 ~ 4 cm 的碎石相混合。为保证供试土壤底部的透水性,土槽最下层先装填 10 cm 细沙,随后铺设纱布。沙层上部装填 30 cm 的供试土样,为使下垫面土壤条件变异性最小,土样装填时每 5 cm 一层,用直尺将表面刮平之后用毛刷打毛,并用环刀(100 cm³)法测定坡面土壤容重。本试验设定 0.5%、10%、20%、30% 和 40% 6 种碎石含量,降雨强度设计为 90 mm/h,土槽坡度设置为 15°。试验设计两组重复,共进行 6 场降雨试验,利用风干法将各供试土样前期含水率控制在 9% 左右。

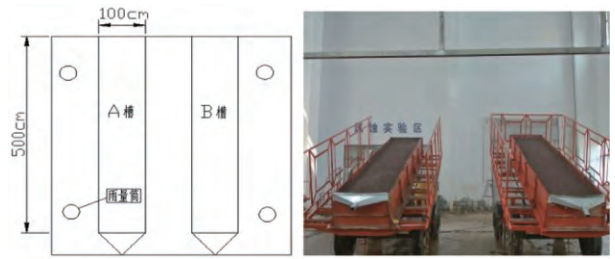


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set

产流开始后,每 1 min 采用有刻度的水桶收集地表径流并测量其体积;利用 KMnO₄ 染色剂法记录水流动过 50 cm 坡长所需的时间,换算出离土槽顶部 1 m、2 m、3 m 及 4 m 处坡面径流的流速。人工降雨结束后,在土槽上、中、下坡处分别挖至土壤干湿交界面以下约 5 cm 处,用直尺测量上、中、下坡处 3 个点的湿润锋,取平均值作为该处的最终湿润锋。

2 结果与讨论

2.1 碎石含量对降水分配的影响

在人工降雨过程中,由于降雨系统本身存在的缺陷和外界环境的影响,实际的降雨强度与试验设定的降雨强度有一定的差异,这种差异对结果的影响是不定且不可忽略的。本次试验对降雨过程中的雨强进行了实时监测,以便更为准确地研究碎石含量对坡面产流的影响。如表 2 所示,根据分析计算得出的雨强变异系数可知,其差异在允许范围内。

表 1 供试土壤的理化性质表
Tab. 1 The physicochemical property of test soil

土壤质地	有机质含量 /(g/kg)	氮含量 /(g/kg)	颗粒组成/%			
			<0.002	0.002 ~ 0.02	0.02 ~ 0.1	0.1 ~ 0.5
粘壤土	3.22 ± 0.01	0.67 ± 0.03	18.25 ± 1.24	24.90 ± 1.11	37.66 ± 1.63	18.17 ± 0.81

表 2 不同试验组平均降雨强度

Tab. 2 Average rainfall intensity of different experimental groups

碎石含量/(%)	0	5	10	20	30	40	标准差	平均值	变异系数
平均降雨强度/(mm/h)	91.34 ± 5.71	88.88 ± 3.09	88.62 ± 1.59	97.27 ± 2.58	85.51 ± 2.98	90.21 ± 3.52	3.60	90.30	0.04

降水分配主要包括地表径流和入渗两部分,而土壤中碎石的存在一方面增加了不透水性,从而阻碍入渗;另一方面由于碎石与土壤不能紧密结合,增加了土壤的非毛管孔隙度,对水分入渗又有促进作用^[23]。根据表 2 计算出每场降雨的降雨量,根据每场降雨产生的径流量得出入渗系数与径流系数随碎石含量变化的具体分配情况,如图 2 所示。

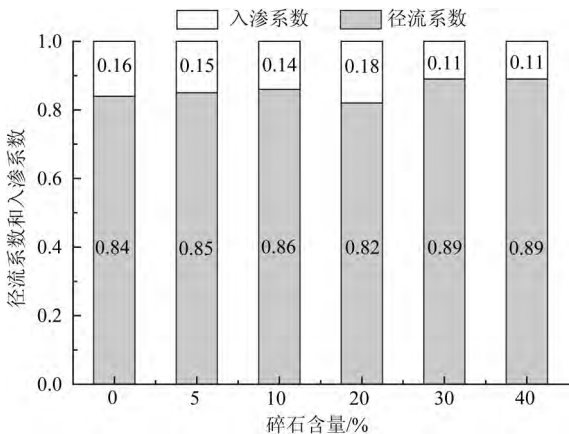


图 2 不同碎石含量条件下径流系数与入渗系数

Fig. 2 Infiltration and runoff coefficient under different rock fragment contents

雨量径流系数是指在设定时段内降雨产生的径流总量与降雨总量之比,主要用于估计单位面积产生的平均径流厚度。它综合反映了自然地理要素对径流的影响,受土壤理化性质、地表糙度和坡度等多方面的影响。本文将降雨总量设定为 1,从图 2 中可以看出,紫色土坡面径流系数较大,均在 0.80 以上。0.5%、10%、20%、30%、40% 6 种碎石含量条件下径流系数分别为 0.84、0.85、0.86、0.82、0.89、0.89,可以看出,径流系数与碎石含量呈正相关关系,且碎石含量对径流系数的影响呈显著性差异($F = 115$, $p < 0.01$)。从水量平衡角度进行分析,坡面产流主要受入渗率的影响。结果表明,土壤入渗率随碎石含量增加呈减小的趋势。碎石作为相对不透水介质,对入渗过程存在显著的影响,碎石含量的增加导致过水断面和水流弯曲度的增大,使土壤的入渗能力降低,从而促进了坡面径流的产生。

从图 2 可以看出,碎石含量为 20% 时径流系数

是一个异常值,与其它碎石含量土壤的径流系数存在较大的差异,可能是由于 20% 条件下降雨强度明显大于设计的降雨强度,造成降雨量显著增加,从而影响了径流系数。

2.2 碎石含量对土壤湿润锋的影响

湿润锋是表征土壤入渗性能最直接的外部表现特征^[24]。它是指水分下渗过程中土壤被湿润的先头部位与干土层形成的明显交界面^[25]。从图 3 可以看出,在坡面上、中、下三个位置,湿润锋随着碎石含量的增加呈增大的趋势,在碎石含量分别为 0%、5%、10%、20%、30%、40% 条件下,上坡湿润锋分别为 6.25、7.5、7.15、7.5、8、8.25 cm;中坡湿润锋分别为 7.5、8.5、8.25、9.5、9、9.75 cm;下坡湿润锋分别为 9、9.25、9.75、10.75、10.25、11 cm。在碎石含量为 10% 时,中坡湿润锋和下坡湿润锋出现了减小的现象,原因可能是因为降雨强度变小的影响,同时由于 20% 降雨强度的较大变化导致该处湿润锋出现了突变。由湿润锋的变化情况可以得出,坡面不同位置湿润锋也存在较大的差异。

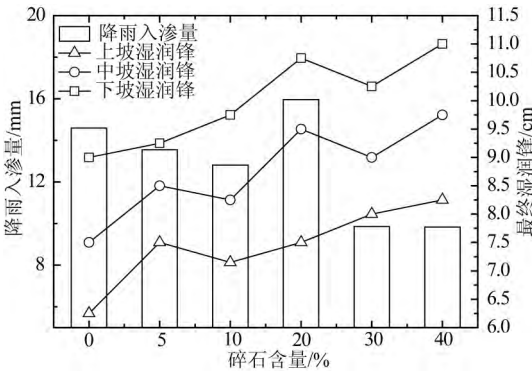


图 3 湿润锋随碎石含量的变化

Fig. 3 Wetting front under different rock fragment contents

由于碎石的饱和导水率远小于土壤的饱和导水率,水分在进入土石混合介质时主要湿润土壤,在本试验条件下(碎石直径 2~4 cm),相同质量的土壤,碎石含量越大,水分需要湿润的土壤体积越小,湿润锋向下运移的深度越大,这与王永东等^[24]的研究结论相一致。土壤坡面随着降雨的持续逐渐饱和并开始产流,并在表层碎石土内形成径流通道^[26],后续降下的雨水多形成坡面流并很快向下流动,在上坡

和中坡停留的时间很短,因而相应的入渗时间较短,入渗到一定深度后几乎不再入渗。相反,因上坡和中坡的降雨均向下坡汇聚,使下坡处的入渗时间最长、深度最大。

2.3 碎石含量对产流的影响

如表3所示,不同碎石含量的土壤在降雨开始后125~192 s内开始产流,5%碎石含量土壤起始产流时间最晚为192 s,而30%碎石含量土壤起始产流时间降到130 s,两者之间相差达1 min。随着碎石含量的增加,土壤起始产流时间呈下降的趋势,特别是在碎石含量较高时,起始产流时间急剧缩短。这与毛天旭^[21]研究指出的坡面产流时间与碎石含量呈负相关一致,且碎石含量对初始产流时间的影响呈显著性差异($F=208, P<0.01$)。由于碎石的存在,水流的弯曲度和过水断面增加,从而延缓了入渗,入渗率降低,增加了坡面径流,使产流时间缩短,这一作用在碎石含量越大时越明显。碎石另一方面还会影响土壤表面的盖度,随着碎石含量的增加,碎石覆盖度增加,土壤表面的光滑度随之增加,进而促进了坡面径流的汇集,导致起始产流时间降低。

土壤侵蚀是多种因素相互作用的结果,对产流参数与降雨强度值 I 和碎石含量值 R 、降雨强度值和碎石含量特征值的乘积 IR 进行Spearman相关性分析(表4),结果表明,初始产流时间与碎石含量相关性达到极显著水平,而与降雨强度相关性不显著,

这主要是因为碎石含量对初始产流时间的影响大于降雨强度的影响;最大径流速率与降雨强度呈显著相关水平,与碎石含量相关性不显著,这主要是因为降雨强度对最大径流速率的影响大于碎石含量的影响;径流稳定时间与碎石含量呈显著相关水平,与降雨强度相关性不显著,这主要是因为碎石含量对径流稳定时间的影响大于碎石含量的影响;稳定地表平均径流速率与降雨强度呈显著相关水平,与碎石含量相关性不显著,这主要是因为降雨强度对稳定地表平均径流速率的影响大于碎石含量的影响。

由表3可知,产流过程中,均在4 min以后达到稳定产流,0.5%、10%、20%、30%和40% 6种碎石含量条件下最大径流速率分别为1.55、1.45、1.46、1.54、1.44和1.44 mm/min。稳定以后的平均地表径流速率为1.36、1.36、1.40、1.47、1.35和1.32 mm/min。地表平均径流速率在碎石含量为0~20%之间呈递增趋势,之后呈现减少的趋势,这说明在碎石含量逐渐增加的过程中,径流速率可能存在于一个阈值,高于此径流速率阈值所对应的碎石含量时,径流速率降低,反之径流速率随碎石含量的增加而增大。在碎石含量为20%时出现了异常值,也是因为降雨强度过大从而影响了径流速率。

根据图4可以得知,降雨过程中径流速率的变化趋势与降雨强度的变化趋势基本一致,部分时间点出现了雨强突变的现象,这与雨强控制系统有关,

表3 不同碎石含量条件下产流参数

Tab.3 Runoff parameter under different rock fragment contents

碎石含量/%	0	5	10	20	30	40
降雨强度/(mm/min)	1.52±5.71	1.48±3.09	1.47±1.59	1.62±2.58	1.43±2.98	1.50±3.52
初始产流时间/s	180±5.50	192±5.00	170±4.50	168±4.50	130±4.00	125±5.50
最大径流速率/(mm/min)	1.55±0.14	1.45±0.08	1.46±0.01	1.54±0.08	1.44±0.04	1.44±0.08
径流稳定时间/min	4±0.50	5±0.25	4±0.25	5±0.75	7±0.50	6±0.50
稳定地表平均径流速率/(mm/min)	1.36±0.04	1.36±0.14	1.40±0.05	1.47±0.03	1.35±0.11	1.32±0.08

表4 产流系数与降雨强度、碎石含量及其组合变量因子相关性分析

Tab.4 Correlation analysis between runoff coefficient, rainfall intensity, rock fragment content and combined factor

变量	初始产流时间/s		最大径流速率/(mm/min)		径流稳定时间/min		稳定地表平均径流速率/(mm/min)	
	相关性	显著性	相关性	显著性	相关性	显著性	相关性	显著性
I	0.284ns	0.293	0.764*	0.039	0.353ns	0.247	0.729*	0.05
R	-0.938**	0.003	0.496ns	0.158	0.805*	0.027	0.276ns	0.222
IR	0.925**	0.004	0.754*	0.042	0.780*	0.034	0.464ns	0.177

注:I表示降雨强度值,R表示碎石含量值,IR表示降雨强度值和碎石含量特征值的乘积,**表示极显著相关,*表示显著相关,ns表示相关性不显著。

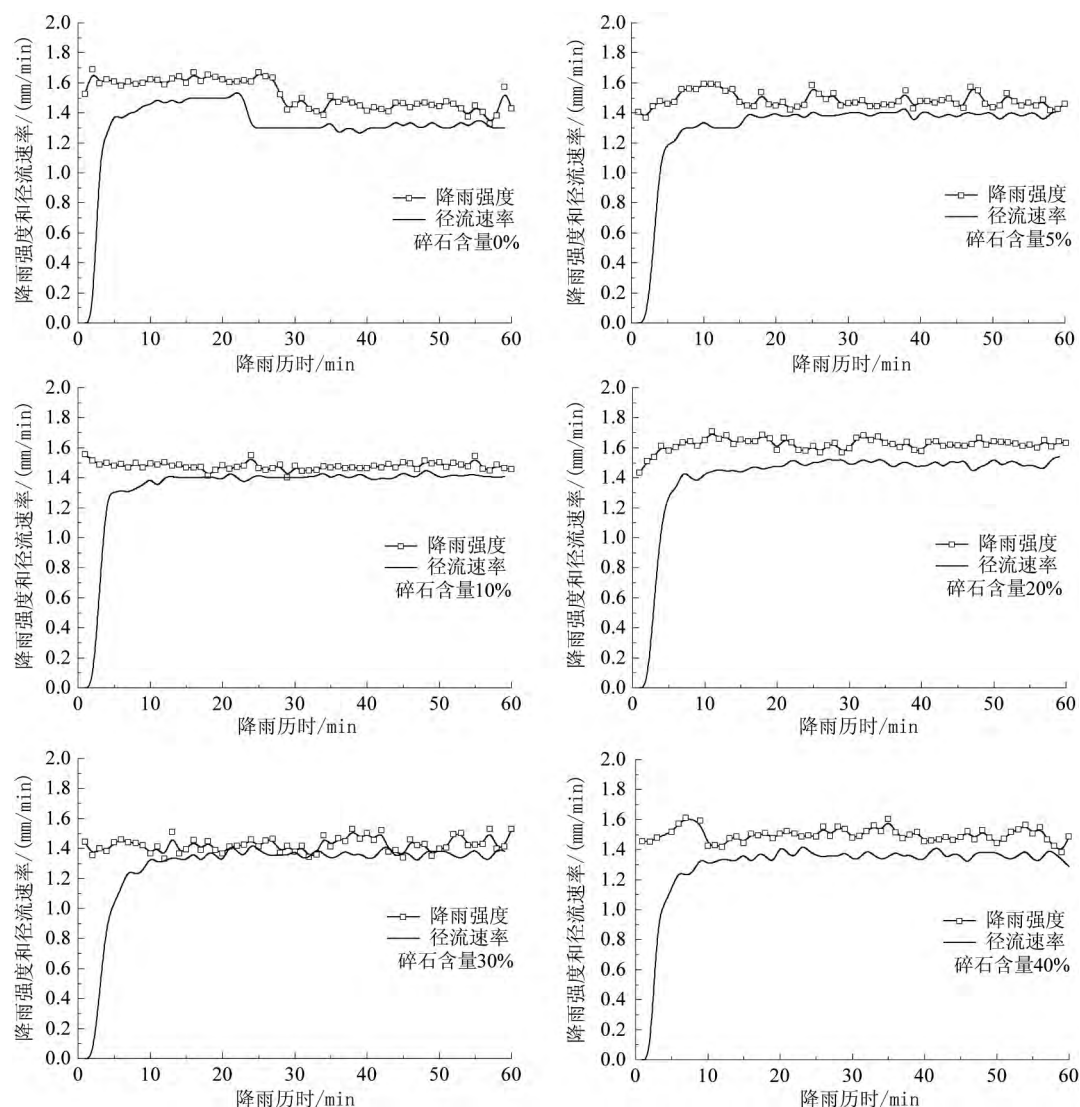


图4 不同碎石含量条件下降雨过程中降雨强度变化与径流速率变化

Fig. 4 Changes of rainfall intensity and runoff rate during rainfall under different rock fragment contents

根据2.1分析得知,雨强的变异系数在允许范围内,因此在该雨强条件下,可以进行产流情况与碎石含量之间变化的分析。

2.4 碎石含量对径流流速的影响

从图5可以看出,在本试验条件下,碎石含量对径流流速的影响不显著,降雨开始后不同碎石含量土壤径流流速都在前20 min缓慢增加,在降雨20 min后,均稳定在一定水平上下波动,不同碎石含量土壤的径流流速在坡面距槽底3 m处最稳定,10%碎石含量土壤平均流速最大为0.2 m/s,30%碎石含量土壤平均径流流速0.14 m/s,与其它水平差异明显,流速相差在0.14 m/s以上。40%碎石含量土壤流速波动较大,是因为随着碎石含量的提高和持续的降雨使细土不断流失,地表碎石覆盖度会越来

越大,碎石盖度的增加一方面使碎石土的透水性变差,从而促进地表径流的汇聚,另一方面碎石使地表糙度变大,从而增大了径流摩擦阻力。在这两种影响的相互作用下导致了其流速波动较大。

在坡面不同位置上,碎石含量对径流流速的作用在一定程度上是存在差异的。随着向坡底的延伸,碎石含量对径流流速的影响越显著。坡面4个位置上不同碎石含量土壤径流流速之间差异有差别,可能有两方面的因素。一方面是因为坡面的位置越接近底部,径流量越大,挟沙量同时也增加,对径流流速产生复杂的影响。另一方面可能是在径流流速较小的情况下,其它因素如土壤表面碎石盖度对它作用表现就不明显。总之,坡面位置对径流流速的影响还需要进一步研究。

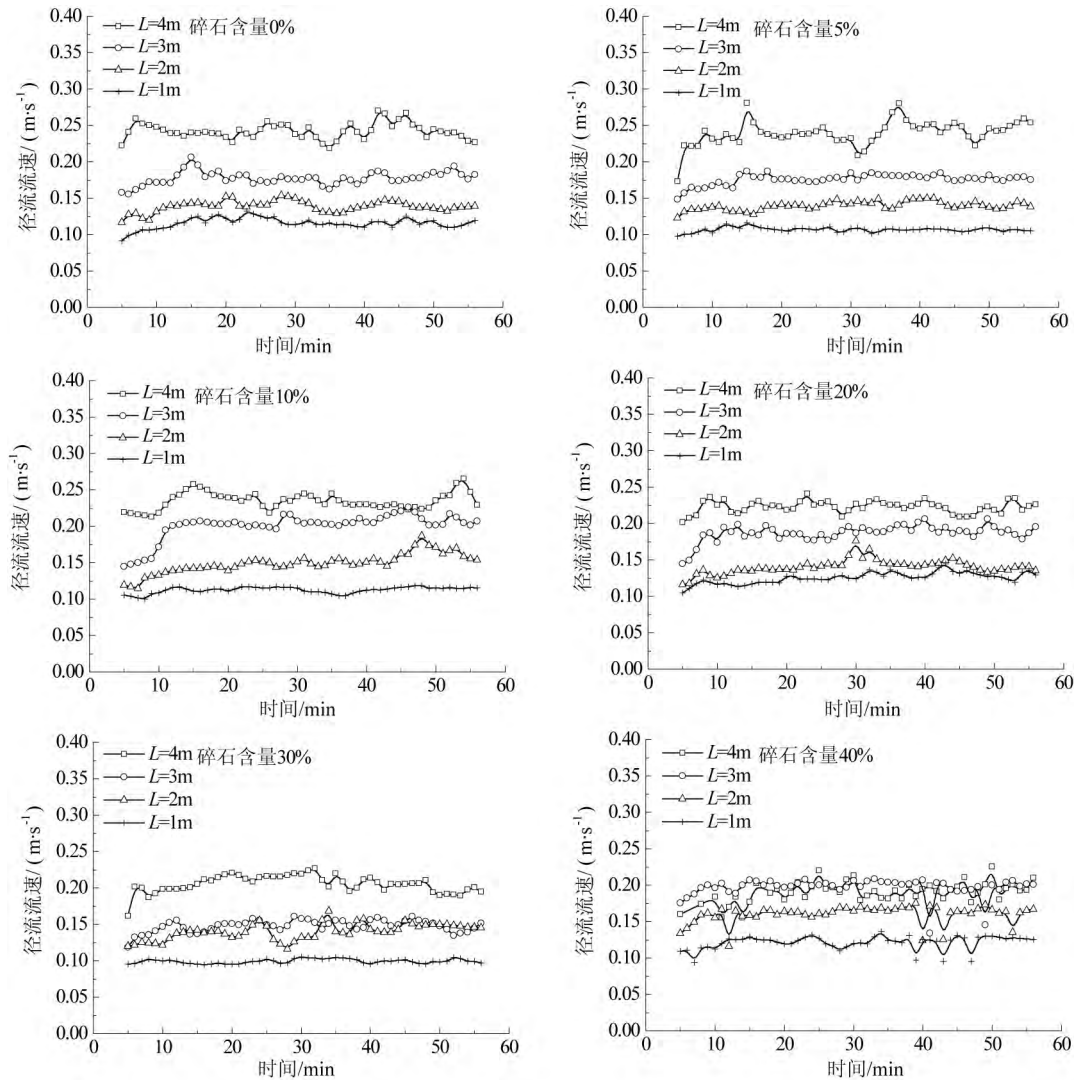


图5 不同碎石含量土壤不同坡面位置径流流速随降雨历时变化

Fig. 5 Changes of the runoff flow velocity under different rock fragment contents with time

3 结论

通过室内人工模拟降雨试验,对6种不同碎石含量的土壤水文过程进行研究。试验结果表明:

- 1) 紫色土坡面径流系数较大,均在0.80以上,且径流系数与碎石含量呈显著正相关关系,土壤入渗系数随碎石含量增加呈减小的趋势;
- 2) 最终湿润峰与碎石含量呈正相关关系,坡面不同位置最终湿润峰存在较大的差异;
- 3) 坡面起始产流时间与碎石含量差异显著 ($F=208, P<0.01$),随着碎石含量的增加,起始产流时间也缩短;

4) 碎石含量为20%时,土壤产流量最高,超过20%则呈现减少的趋势,因此在碎石含量为20%左右可能存在阈值;

5) 碎石含量对紫色土坡面径流流速的影响不显著,坡面位置、碎石含量和径流流速之间可能存在一定的关系。

参考文献(References)

- [1] 何疏蓉,郑霖,陈学华,等. 中国紫色土: 下篇[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 13-16 [HE Yurong, ZHENG Lin, CHEN Xuehua, et al. Purple soils in China: Part II [M]. Beijing: Science Press, 2003: 13-16]
- [2] 赵健,梁敏. 紫色土水土流失特点及调控范式[J]. 中国水利, 2010(2): 41-43 [ZHAO Jian, LIANG Min. Characteristics and control paradigm of purple soil water loss and soil erosion [J]. China Water Resource, 2010(2): 41-43]

- [3] 杨艳生, 史德明, 吕喜玺. 长江三峡区土壤退化的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(3): 53 – 62 [YANG Yansheng, SHI Deming, LV Xixi. Research on soil deterioration in the Yangtze Three – Gorge Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(3): 53 – 62]
- [4] MILLER F, GUTHRIE R. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States [J]. Soil Science Society of America Journal Special Publication, 1984, 13: 1 – 12
- [5] BUNTE K. POESEN J. Effects of rock fragment size and cover on overland flow hydraulics, local turbulence and sediment and sediment yield on an erodible soil surface [J]. Earth Surface Processes and Land Forms, 1994, 19: 115 – 135
- [6] 朱元骏, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布[J]. 中国科学: D 辑, 2008, 38(3): 375 – 383 [ZHU Yuanjun, SHAO Mingan. Spatial distribution of surface rock fragment on hill-slopes in a small catchment in wind – water erosion crisscross region of the Loess Plateau [J]. Science in China: Series D, 2008, 38(3): 375 – 383]
- [7] 韩珍, 王小燕, 李馨欣. 碎石含量影响下紫色土坡面径流流速变化过程及土壤侵蚀的阶段性[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(10): 102 – 108 [HAN Zhen, WANG Xiaoyan, LI Xinxin. Processes of runoff velocity and stages of soil erosion under the effect of rock fragment content [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(10): 102 – 108]
- [8] 蔡崇法, 丁树文, 张光远. 花岗岩红壤表土特征及对坡面侵蚀影响的研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(4): 111 – 115. [CAI Chongfa, DING Shuwen, ZHANG Guangyuan. Study on soil surface characteristics and its effect on slope erosion of red soils derived from granite [J]. Research Of Soil And Water Conservation, 1996, 3(4): 111 – 115]
- [9] WESEMAEL B V, POESEN J, DE FIGUERIEDO T. Effect of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall [J]. Soil and Till Research, 1995, 33(3): 229 – 250
- [10] WESEMAEL B V, MULLIGAN M, POESEN J. Spatial patterns of soil water balance on intensively cultivated hillslopes in a semi-arid environment: the impact of rock fragments and soil thickness [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(10): 1811 – 1828.
- [11] 符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 171 – 175 [FU Suhua. Effect of containing rock fragment on infiltration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 171 – 175]
- [12] MA D H, SHAO M A. Simulating infiltration in stony soil with a dual-porosity model [J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59: 950 – 959
- [13] REIGNER I C, PHILLIPS J J. Variations in bulk density and moisture content within two New Jersey coastal plain soils, Lakeland and Lakehurst sands [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 1964, 106(2): 152 – 192
- [14] POESEN J, INGELMO-SANCHEZ F, MFICHER H. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer [J]. Earth Surf. Process Landforms, 1990, 15: 653 – 671
- [15] POESEN, TORRI D. BUNTE K. Effect of rock fragments on soil erosion by water at different spatial Scales: a review [J]. Catena, 1994b, 23: 141 – 166
- [16] GRANT W J, STRUCHTEMEYER R A. Effect of stones on runoff, erosion, and soil moisture [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1966, 30: 638 – 640
- [17] ABRAHAMS A D, PARSONS A J. Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, southern Arizona [J]. Journal of Hydrology, 1991, 122: 49 – 59
- [18] WILCOX B P, WOOD M K. Factors influencing interrill erosion from semiarid slopes in New Mexico [J]. Journal of Range Management, 1988, 42: 66 – 70
- [19] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 801 – 807 [ZHOU Beibei, SHAO Mingan. Effect of content and size of rock detritus on infiltration [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 801 – 807]
- [20] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 64 – 67 [ZHU Yuanjun, SHAO Mingan. Process of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 64 – 67]
- [21] 毛天旭, 朱元骏, 邵明安, 等. 模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(05): 1214 – 1218 [MAO Tianxu, ZHU Yuanjun, SHAO Mingan, et al. Characteristics of runoff and infiltration in stony soils under simulated rainfall conditions [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1214 – 1218]
- [22] 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J]. 水科学进展, 2010(06): 779 – 787 [ZHU Yuanjun, SHAO Mingan. Simulation of rainfall infiltration in stony soil [J]. Advances In Water Science, 2010(06): 779 – 787]
- [23] 王小燕. 紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012 [WANG Xiaoyan. Distribution of rock fragments and their effects on hillslope soil erosion in purple soil [D]. Wuhan: Hua zhong Agricultural University, 2012: 61 – 63]
- [24] 王永东, 张宏武, 徐新文, 等. 风沙土水分入渗与再分布过程中湿润锋运移试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(08): 190 – 194 [WANG Yongdong, ZHANG Hongwu, XU Xinwen, et al. Study on the wetting front of water infiltration and soil water redistribution in aeolian sandy soil [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(8): 190 – 194]
- [25] 张启昌, 孟庆繁, 兰晓龙. 黄土低山丘陵区湿润锋运动的实验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(4): 84 – 88 [ZHANG Qichang, MENG Qingfan, LAN Xiaolong. Study on damp-surface motion in loess low hill area [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996, 2(4): 84 – 88]
- [26] 董辉, 罗潇. 强降雨作用下堆积碎石土渗流规律研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 616 – 623 [DONG Hui, LUO Xiao. Field tests on seepage regulation of aggregate gravel soil under artificial heavy rainfall [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 616 – 623]

Effects of Rock Fragment Cover on Hydrological Processes in Purple Soils

HAN Zhen¹, WANG Xiaoyan^{1 2}, LI Xinxin¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Region (Ministry of Education), Beibei, Chongqing 400716, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Variable rock fragments in purple soil change some of the physical properties of homogeneous soil and therefore their influence is significant on the hydrological and erosional processes in purple soil regions. Considerable attention is being paid to quantitative information of the effects of rock fragment cover on soil infiltration, runoff and erosion. This research investigated six purple soil samples from a hillslope area with different rock fragment contents ranging from 0 to 5%, 10%, 20%, 30%, and 40%. The results showed that the runoff coefficient and initial runoff rate were significantly influenced by the rock fragment content. As the rock fragment increased, the runoff coefficient ($F = 115$, $P < 0.01$) and wetting front increased while the surface runoff rate decreased significantly ($F = 208$, $P < 0.01$). The average runoff rate reached its highest value with a rock fragment content of 20% and declined when rock fragment content was more than 20%. Rock fragment content had no significant effect on runoff flow velocity. The results of this research can provide empirical a case study for further exploring the mechanism of rock fragment content in purple soils and its effect on hydrological processes. Findings can also be helpful for rational utilization of soil resources and improving soil erosion models in purple soil regions.

Key words: rock fragment; runoff; flow velocity; precipitation distribution