

# 雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响

王 蕙, 胡秀君, 山成菊

(浙江水利水电学院水利与环境工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 采用人工模拟降雨的方法研究了嵌套砾石红壤坡面的产流产沙特征, 分析了雨强(60, 120 mm/h)和坡度(10°, 15°, 20°, 25°)条件下嵌套砾石和无砾石红壤坡面的产流和产沙过程差异。结果表明: (1) 产流开始时间  $T_{\text{嵌套砾石}} < T_{\text{无砾石}}$ , 60 mm/h 雨强条件下嵌套砾石较无砾石坡面在 10°, 15°, 20°, 25° 坡度分别延迟 4.20, 2.95, 2.23, 1.03 min; (2) 坡度相同时, 嵌套砾石坡面较无砾石坡面产流率明显减少, 但雨强的增大会掩盖嵌套砾石对坡面产流率减小的影响; (3) 嵌套砾石红壤坡面在 60 mm/h 雨强、坡度 10° 条件下平均产流率最小, 在 120 mm/h 雨强、25° 坡面下平均产流率是前者的 4.5 倍; 无砾石红壤坡面在 120 mm/h 雨强、坡度 25° 条件下平均产流率最大, 为最小平均产流率的 4.8 倍; (4) 各坡面产沙强度、次降雨产沙量随雨强和坡度增大而增大, 60 mm/h 雨强、坡度 10° 和 25° 时, 嵌套砾石坡面平均产沙强度为无砾石坡面的 6.0% 和 28.4%; 120 mm/h 雨强时, 此两个坡度的嵌套砾石坡面为无砾石坡面平均产沙强度的 33.9% 和 25.3%。

**关键词:** 嵌套砾石; 雨强; 坡度; 产流过程; 产沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0024-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.005

## Effect of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Sediment Yield on the Red Soil Slope Nested Gravel-sand

WANG Hui, HU Xiujun, SHAN Chengju

(College of Hydraulic & Environmental Engineering, Zhejiang

University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018)

**Abstract:** The characteristics of runoff and sediment yield on the red soil slope nested gravel-sand were studied through artificial simulated rainfall, and the differences of runoff and sediment yield between nested gravel red soil slope and no gravel slope under the conditions of rainfall intensity (60, 120 mm/h) and slope gradient (10°, 15°, 20° and 25°) were analyzed. The results were as follows: (1) The start time of production runoff ( $T$ ) on the nested gravel slope was less than that on the no gravel slope, and compare with no gravel slope, the runoff production time on the nested gravel slope was delayed 4.20, 2.95, 2.23 and 1.03 min, respectively, when the slope gradient was 10°, 15°, 20° and 25° under the rainfall intensity 60 mm/h. (2) When the slope gradient was the same, the runoff rate of the nested gravel-sand slope was less than that of no gravel slope obviously, but the increase of rainfall intensity could cover up the influence of nested gravel-sand on the decrease of runoff rate. (3) When the rainfall intensity was 60 mm/h and the slope was 10°, the average runoff rate of nested gravel-sand slope was the lowest, while the average runoff rate was 4.5 times higher than the lowest value when the rainfall intensity was 120 mm/h and the slope gradient was 25°. When the rainfall intensity was 120 mm/h and the slope gradient was 25°, the average runoff rate of no gravel-sand slope was 4.8 times higher than the lowest. (4) The sediment yield intensity and the amount of sediment yield increased with the increasing of rainfall intensity and slope gradient. When the rainfall intensity was 60 mm/h and the gradient was 10° and 25°, the average sediment yield intensity of nested gravel-sand slope was 6.0% and 28.4% of the no gravel slope, respectively. When the rainfall intensity was 120 mm/h, the value was 33.9% and 25.3%, respectively.

收稿日期: 2018-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41701312); 浙江省自然科学基金项目(LQ16D010004)

第一作者: 王蕙(1979—), 女, 汉族, 讲师, 博士, 主要从事水土保持与生态水文学研究。E-mail: wanghui@zjweu.edu.cn

**Keywords:** nested gravel-sand; rainfall intensity; slope gradient; runoff process; sediment yield

砾石是指土壤中粒径 $\geq 2$  mm的矿物颗粒<sup>[1]</sup>。含砾石土壤在世界上有着广泛的分布,其中中国18%土壤资源是含砾石土壤<sup>[2-3]</sup>。我国西南喀斯特地区的土石山区、北方土石山区褐土和西南地区紫色土中及南方红壤区山地土壤中都有大量的砾石存在<sup>[4-5]</sup>。大量试验研究表明,砾石覆盖影响土壤含水量和导水率<sup>[6-9]</sup>、影响土壤入渗规律<sup>[10]</sup>和土壤蒸发规律<sup>[11]</sup>等土壤物理性质及土壤水文过程。南方红壤丘陵区由于受梅雨季节影响,降雨总量及单位时间降雨量波动较大,极易形成梅汛期暴雨(如根据浙江省2009年梅雨期雨情报告,梅雨期小时降雨量甚至可以达到93 mm)<sup>[12]</sup>,这也导致了某些地区出现严重的土壤粗化问题,使得土壤含有大量的砂砾。对于南方多雨且土层薄的实际情况而言,这种土壤侵蚀是严重且不容忽视的。已有的砾石对土壤水分入渗和蒸发研究对于理解坡面产流机制提供了较好的基础,但砾石对坡面侵蚀的影响方面研究结论相异,且中国目前的研究大部分集中于黄土高原地区,紫色土区域也有一定的研究<sup>[13-14]</sup>,而对于南方红壤丘陵地区砾石在坡面产流中的作用机制研究还鲜有报道。因此,开展模拟降雨条件下红壤坡面嵌套砾石对侵蚀产流产沙影响的研究有着重要的价值。本文通过模拟降雨试验,研究不同雨强和不同坡度条件下,地表嵌套砾石对南方红壤坡面产流产沙的影响,为量化非均质土壤坡面水土过程及深入研究和应用土壤侵蚀、坡面水文模型提供数据资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与材料

本试验于2017年4—9月在浙江水利水电学院水利仿真实验室人工模拟降雨设备下完成。径流泥沙样品的采集及分析工作同步进行。模拟降雨采用下喷式人工降雨系统,降雨高度6 m,可保证绝大部分雨滴达到降雨终速。本次试验使用可移动液压式变坡钢槽,规格为长1.5 m,宽0.5 m,深0.35 m,坡度的变化范围为0~30°。钢槽底部均匀打孔,便于土壤中的水分自由下渗。试验土壤采自浙江省临海市括苍镇农田耕层(0—20 cm)的红壤,土壤风干后,除去根系等杂物过6 mm筛备用。

装土时于槽底铺10 cm石英砂,以确保土槽入渗水顺利排出。为保证模拟试验的降雨入渗产流过程与实际情况比较吻合,下层10 cm填土进行人工压实,容重控制在 $1.5 \text{ g/cm}^3$ ,表层15 cm土或土石混合物采用边填充边压实的方法,每两层之间打毛以防

止在降雨过程中土体垂直分层,为消除边壁效应的影响,将边界处土或土石混合物尽量压实。在每场降雨前,用容积为 $100 \text{ cm}^3$ 的环刀在上、中、下坡面分别取土样,烘干前后称其质量,测定其容重和前期含水量,使供试土石混合物在降雨前下垫面处理保持一致。

### 1.2 试验设计与步骤

试验时选取的供试砾石粒径为6~25 mm,坡面砾石含量设为0(空白)和5%(6~10,10~20,20~25 mm,3:5:2配比,与表层土壤均匀混和)。选择雨强60,120 mm/h,4种坡度 $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ ,在两个平行小区共进行16场降雨。正式降雨前对供试土壤进行前期降雨,雨强30 mm/h,降雨至坡面产流为止,静置24 h后开始试验,以保证每次试验时的土壤含水量和水分分布状况较为一致。每次正式降雨开始后,在钢槽周围均匀分布4个雨量筒率定雨强,根据各测点降雨量,采用均匀性公式<sup>[15]</sup>计算降雨均匀度,降雨均匀度 $> 85\%$ 后正式开始试验。降雨时间参考自然降雨历时以及预试验各雨强条件下砾石红壤坡面侵蚀状况,将产流历时定为60 min。从产流开始后,前10 min每隔1 min收集1次径流泥沙样,10 min后每隔5 min收集1次径流泥沙样,并用秒表记录取样时间。降雨结束后量测径流样的体积,产流率为单位时间内径流泥沙样中径流的体积( $\text{mL/s}$ );将取得的泥沙样置 $105^\circ\text{C}$ 烘箱内烘干至恒重,称量干泥沙重<sup>[16]</sup>,产沙强度为单位时间内径流泥沙样中的干泥沙重( $\text{g/min}$ );将每次降雨流出径流小区出口断面的总流量作为最终地表总产流量( $\text{mL}$ );最终小区土壤流失量为出口断面的次降雨产沙量( $\text{g}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流过程的影响

2.1.1 初始产流时间 产流时间是坡面综合效应的反映,主要取决于土壤初始含水率。由于试验前进行了前期降雨,使土壤含水量比较高,从而坡面产流时间都比较短(表1)。试验条件下坡度对于坡面产流时间具有一定影响,坡面初始产流时间存在明显规律。在60 mm/h雨强条件下,无砾石坡面, $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$  4个坡度产流时间分别为6.18,5.02,1.98,0.32 min;嵌套砾石坡面,4个坡度坡面产流时间分别为10.38,7.97,4.21,1.35 min;在120 mm/h雨强条件下,坡面产流时间与60 mm/h雨强在各红壤坡面上具有相似的趋势,产流时间( $T$ )随坡度变化为 $T_{25^\circ} < T_{20^\circ} < T_{15^\circ} < T_{10^\circ}$ ,产流时间与坡度均呈线性负相关(表2)。

表 1 不同雨强和坡度下初始产流时间

雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	单位: min							
	无砾石				嵌套砾石			
	10°	15°	20°	25°	10°	15°	20°	25°
60	6.18	5.02	1.98	0.32	10.38	7.97	4.21	1.35
120	3.17	2.13	1.02	0.20	8.05	6.93	3.53	0.92

表 2 坡面产流时间与坡度的线性回归分析

坡面特征	雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	拟合方程	相关系数 R <sup>2</sup>
无砾石	60	$y = -0.41x + 10.60$	0.973**
	120	$y = -0.20x + 5.12$	0.996**
嵌套砾石	60	$y = -0.62x + 16.77$	0.994**
	120	$y = -0.50x + 13.54$	0.967**

将 120 mm/h 雨强条件下的产流开始时间与 60 mm/h 雨强进行比较,无砾石红壤坡面对应 10°,15°,20°,25°的产流开始时间分别减少 49%,58%,48%,38%;嵌套砾石红壤坡面 4 个坡度分别减少 22%,13%,16%,32%。各坡面均表现出初始产流时间随雨强的增大而缩短,即  $T_{120\text{ mm/h}} < T_{60\text{ mm/h}}$ ,减小幅度为 13%~58%。试验坡面初始产流时间最长为雨强 60 mm/h、嵌套砾石 10°坡面下的 10.38 min;最短为雨强 120 mm/h、无砾石 25°坡面下的 0.20 min,是 60 mm/h 无砾石 25°坡面下的 62.5%。张会茹等<sup>[17]</sup>经方差分析得出,坡度引起坡面产流时间差异在 60 mm/h 雨强时最大,在 120 mm/h 雨强时最小,雨强的增大可以掩盖坡度对产流时间的影响。雨强相同时,坡度增大使雨滴降落坡面的垂直分力减小,坡面入渗率减小,使坡面径流提前出现;雨强增大时,初始产流时间受雨强变化影响明显,不同坡度坡面初始产流时间差异减小。

将嵌套砾石与无砾石红壤坡面产流开始时间进行比较,60 mm/h 雨强条件下 10°,15°,20°,25°坡面产流开始时间分别延迟 4.20,2.95,2.23,1.03 min;120 mm/h 雨强条件下也有类似的规律,即  $T_{\text{嵌套砾石}} < T_{\text{无砾石}}$ 。这与梁洪儒等<sup>[18]</sup>对北京山区褐土坡面产流时间与砾石覆盖度呈正相关的研究结论一致。一方面原因是表层土壤中嵌入砾石增加了土壤坡面的粗糙度,并防止土壤表层产生结皮,使水分能够继续入渗,从而延迟地表填洼时间,进而延迟坡面产流时间;另一方面,砾石的嵌入增加了土壤的空隙数量,使得土壤入渗速率加快,从而增加土壤入渗。

2.1.2 产流特征 由图 1 可以看出,各红壤坡面产流过程线在试验雨强条件下 4 个坡度产流过程基本一致,产流率随降雨进行而缓慢增长,最后达到一个稳定的状态直至降雨结束。当雨强为 60 mm/h 时,

10°,15°,20°,25°无砾石红壤坡面的地表产流率均值依次为 8.8,9.3,12.2,13.9 mL/s;嵌套砾石红壤坡面在 4 个坡度的地表产流率均值分别为 4.7,5.4,7.8,9.6 mL/s。雨强为 120 mm/h 时,地表产流率有相似规律,即坡面产流率随坡度的增大而增大,与坡面初始产流时间随坡度的变化相契合。坡度相同时,与无砾石坡面相比,嵌套砾石的坡面产流率明显减少,但雨强的增大会掩盖嵌套砾石对坡面产流率减小的影响。从图 1 还可看出,嵌套砾石红壤坡面在 60 mm/h 雨强、坡度 10°条件下平均产流率最小,在 120 mm/h 雨强、25°坡面下平均产流率是前者的 4.5 倍;无砾石红壤坡面在 120 mm/h 雨强、坡度 25°条件下平均产流率最大,为最小平均产流率的 4.8 倍。平均产流率随坡度变化的趋势受到雨强的影响,雨强增大后,相同坡度下坡面的承雨量增加,产流率差异随坡度增加而减小。这与王丽园等<sup>[19]</sup>在不同雨强下坡度对红壤坡面产流特征的研究结论相同。雨强相同时,嵌套砾石红壤坡面较无砾石红壤坡面地表产流率低,原因是砾石的存在及嵌套改变了土壤入渗及产流特征,嵌套砾石土壤入渗速率加快,从而增加土壤入渗量而减少坡面径流量。

降雨历时 10 min 后,图 1 中大多数产流率曲线近似水平,坡面产流率倾斜率变化不明显,但产流率仍随坡度增加存在较大差别。以雨强为 60 mm/h 为例,无砾石红壤坡面产流率在 10°坡面稳定在 9.7 mL/s,15°,20°,25°分别稳定在 11.2,14.4,16.0 mL/s。由于坡度增加坡面流速增加,产流率随之增加。各坡面在 60 mm/h 雨强时地表产流率在较长时间内仍以一定的速率递增,而 120 mm/h 雨强时地表产流率递增不明显。雨强 120 mm/h 时无砾石 10°坡面产流率过程线波动幅度最大,变异系数 0.1,呈多峰谷的特点。原因可能是无砾石红壤坡面在较大雨强降雨侵蚀力作用下易形成细沟侵蚀,细沟不断发育造成沟壁崩塌及暂时性沉积影响径流路径,进而改变坡面流速和产流率。相同条件下嵌套砾石较无砾石红壤坡面波动幅度小,说明砾石能抑制表土细沟的形成,增加细沟糙度,降低细沟径流速率<sup>[20]</sup>。

2.1.3 总产流量 由图 2 可知,嵌套砾石和无砾石坡面总产流量均随坡度增大而增加。相同雨强和相同坡度时嵌套砾石坡面较无砾石坡面总产流量均减少,雨强 60 mm/h 时,嵌套砾石坡面在坡度 10°,15°,20°,25°的总产流量分别较无砾石坡面 4 个坡度下的总产流量减少 46.3%,43.9%,35.4%,29.5%;在雨强为 120 mm/h 时,4 个坡度总产流量分别减少 58.3%,10.0%,

17.4%,9.5%;雨强较小的情况下嵌套砾石对坡面径流量削减的效果更显著。原因是坡面嵌套砾石的存在能够增加土壤空隙及入渗<sup>[21]</sup>,从而使坡面总产流量减少,当雨强增加时坡面单位面积的承雨量增加,从而对砾石的减流效应起到了削弱作用<sup>[17]</sup>。以60 mm/h、坡度

10°无砾石坡面径流总量为比较基准,分析径流总量与雨强和坡度的关系。当雨强从60 mm/h增大至120 mm/h,坡度从10°增大至25°过程中,坡度对总径流量的影响率由19.6%减小至6.3%,而对应的雨强对径流的影响率随坡度增大而增加。

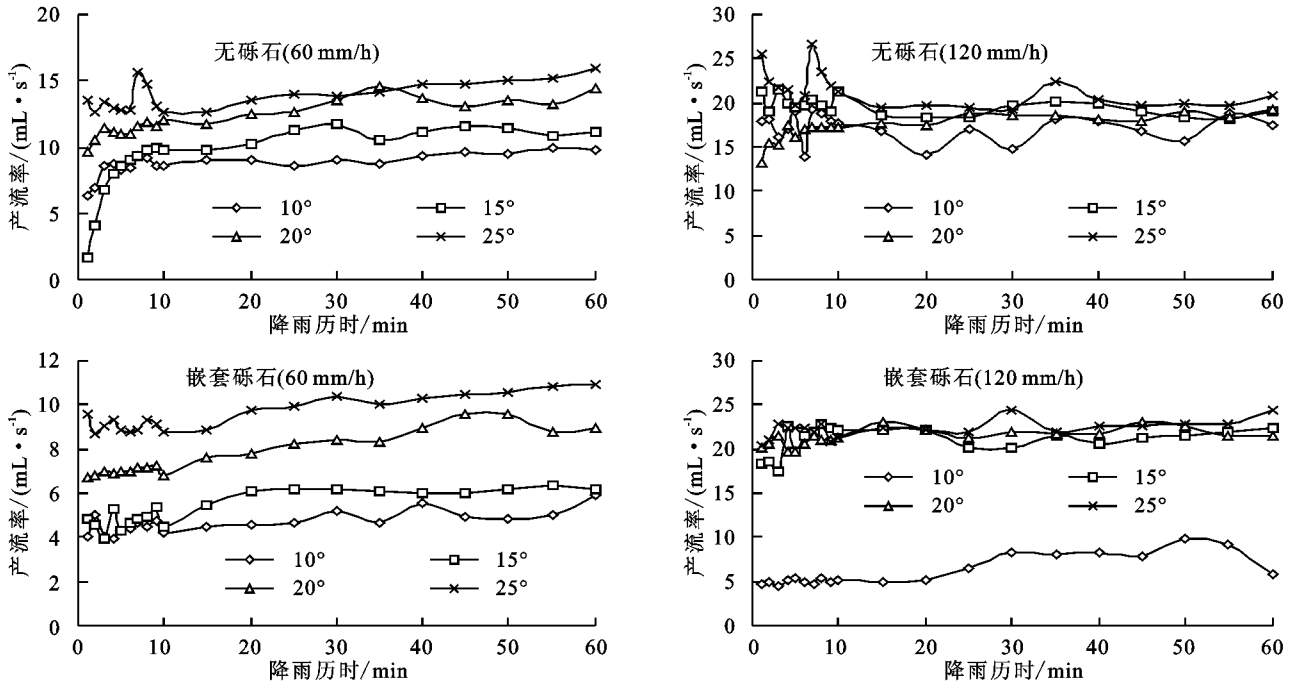


图1 不同雨强和坡度下红壤坡面产流率的变化

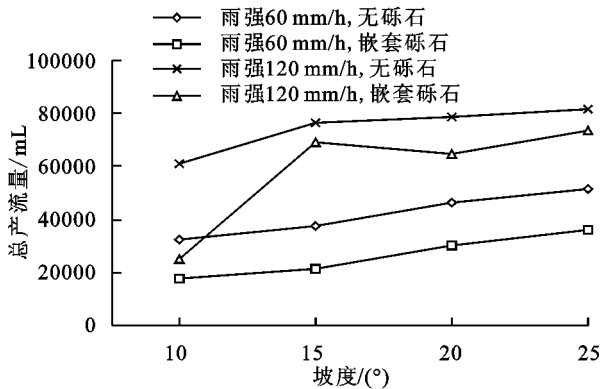


图2 不同雨强和坡度下红壤坡面总产流量变化

## 2.2 雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产沙过程的影响

2.2.1 产沙强度 由图3可知,从各坡面产沙过程曲线来看,随坡度增大坡面产沙强度增大;随雨强增大,坡面产沙强度也呈增大趋势。10°和25°坡面下,60 mm/h雨强时无砾石坡面平均产沙强度为6.9,11.6 g/min,嵌套砾石坡面平均产沙强度为无砾石坡面的6.0%和28.4%;120 mm/h雨强时,嵌套砾石坡面为无砾石坡面平均产沙强度的33.9%和25.3%。10°坡面、60 mm/h雨强下无砾石和嵌套砾石坡面平均产沙强度差异最大,这种差异主要由于砾石嵌套的作用,坡面嵌套砾石会影响到坡面产流和滞雨量的不同,从而改变坡面侵蚀方式,影响产沙过程变化。另

外,坡度较平缓时,坡面稳定性较好,随着雨强的增大,坡度对产沙量的影响程度不如雨强。

进一步分析发现,无砾石红壤坡面在120 mm/h雨强条件下受坡度影响较大,10°,15°,20°坡面产沙强度曲线起伏不大,较为平缓,但在25°坡面产沙强度波动大,形似“M”。王丽园等<sup>[19]</sup>在90 mm/h雨强下15°和20°坡面有相同发现;其他学者<sup>[22-23]</sup>曾在15°坡面产沙量中发现类似变化过程。这种波动与坡面水力侵蚀方式变化有关,坡面土壤侵蚀过程中,雨强越大,小跌水出现越早,当坡面形成细沟侵蚀后,坡面汇流量增大,径流不断汇入细沟,之后溯源侵蚀和沟壁侧蚀发展,甚至发生崩塌<sup>[24]</sup>,崩塌的泥沙冲刷下来使得产沙量随机波动。60 mm/h雨强条件下嵌套砾石坡面在10°,15°,20°产沙强度曲线相对平稳,降雨中期至结束产沙强度曲线变化由水平至下降趋势,产沙强度总体随坡度变化的波动范围小,约在0.7~0.8 g/min。原因可能是随着降雨的进行,表层土壤逐渐被剥离,越来越多的砾石暴露于坡面,同时大部分坡面水流逐渐沿砾石孔隙向下运动,相对于降雨开始时的坡面,其入渗率增大,导致径流量减小。而无砾石坡面在60 mm/h雨强、4个坡度条件下都表现为波动时间长,降雨后期产沙强度有下降趋势。原因可能

是降雨初期降雨对于坡面侵蚀的影响主要在于雨滴对于表土的击溅侵蚀及径流携带小颗粒泥沙,且无砾石土壤坡面松散物质较多,易被径流冲刷,雨滴直接打击和坡面径流的侵蚀机会增加;随着降雨持续,由

于雨滴的夯实和水分下渗,土壤孔隙被填充,入渗能力降低,形成坡面薄层水流,使得表层土壤抗冲能力增强,而水流的冲蚀能力变弱,因此坡面产沙强度逐渐减小并逐渐达到稳定状态<sup>[16]</sup>。

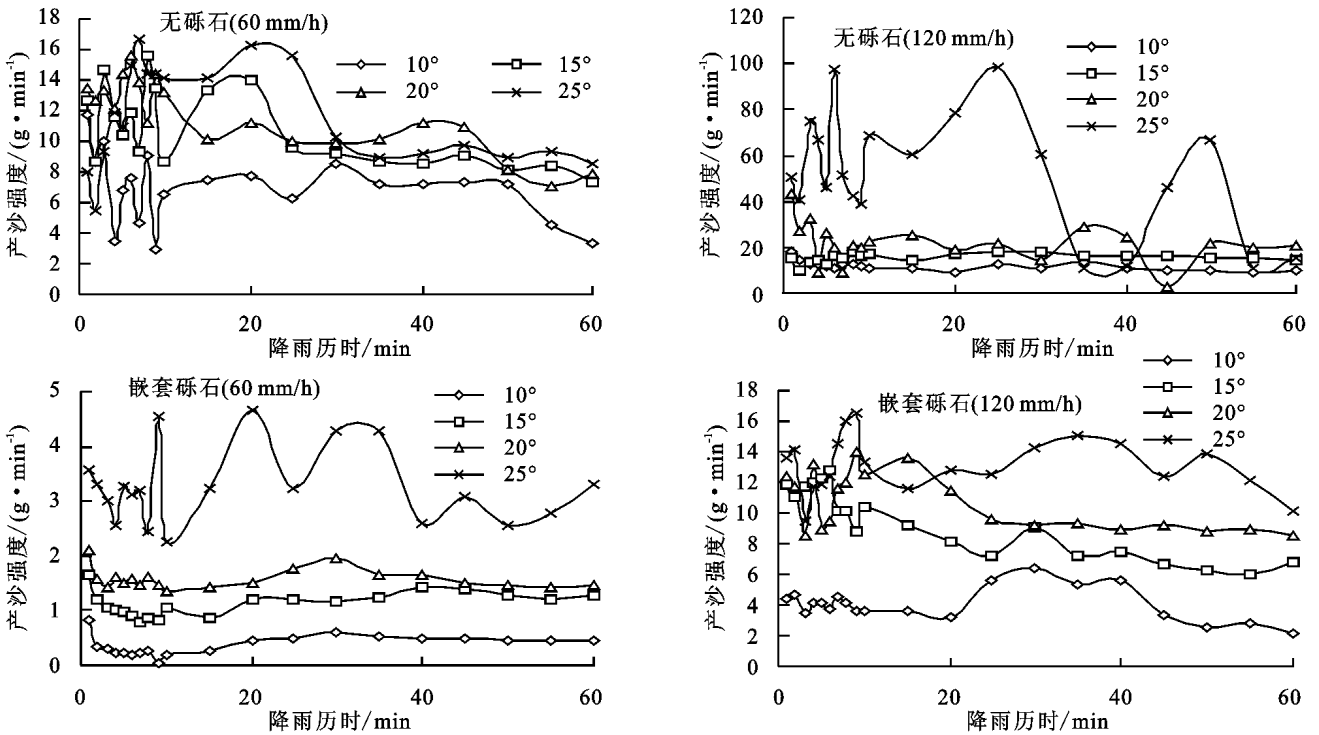


图 3 不同雨强和坡度下红壤坡面产沙强度变化

2.2.2 次降雨产沙量 从图 4 可以看出,当雨强 60 mm/h 时,无砾石坡面次降雨产沙量随坡度增加呈增加趋势,15°,20°,25°坡面较 10°坡面增沙幅度分别为 55.3%,60.6%,67.3%;嵌套砾石坡面产沙量 4 个坡度均显著低于无砾石坡面,减沙幅度分别为 93.8%,89.9%,86.1%,69.1%。雨强 120 mm/h 条件下,次降雨产沙量有相似规律。相似的研究表明雨强 60 mm/h 时,产沙量随砾石含量增大而增大,砾石存在加剧土壤侵蚀,雨强大于 60 mm/h 时,砾石的存在减弱土壤侵蚀<sup>[25]</sup>。对此尚需作进一步研究和探讨。

从图 4 还可看出,随雨强增大产沙量也增大。120 mm/h 雨强时,无砾石坡面在坡度 10°,15°,20°,25°的次降雨产沙量分别较 60 mm/h 雨强时各坡度

增加 56.4%,44.3%,78.7%,345.7%;嵌套砾石坡面具有相似规律。原因是随雨强和坡度的增大,坡面径流量增大且汇流作用增强,从而使径流剥蚀土壤能力增强,同时也使细沟侵蚀更为剧烈,导致产沙量大幅增加。

当雨强较小时,雨滴直径及末速度都较小,此时雨滴具有较小的动能,对土壤颗粒的破坏作用较轻,嵌套砾石坡面上的降雨大部分被地表砾石截留或者入渗,即使形成径流也非常小;随着雨强的增大,雨滴直径及末速度都增大,因而其动能也增大,对于土壤坡面的击溅作用表现强烈,相同时间内土壤的渗透及砾石截留量远远小于降雨量,因而在短时间内能形成大量地表径流,具有较强的冲刷能力。

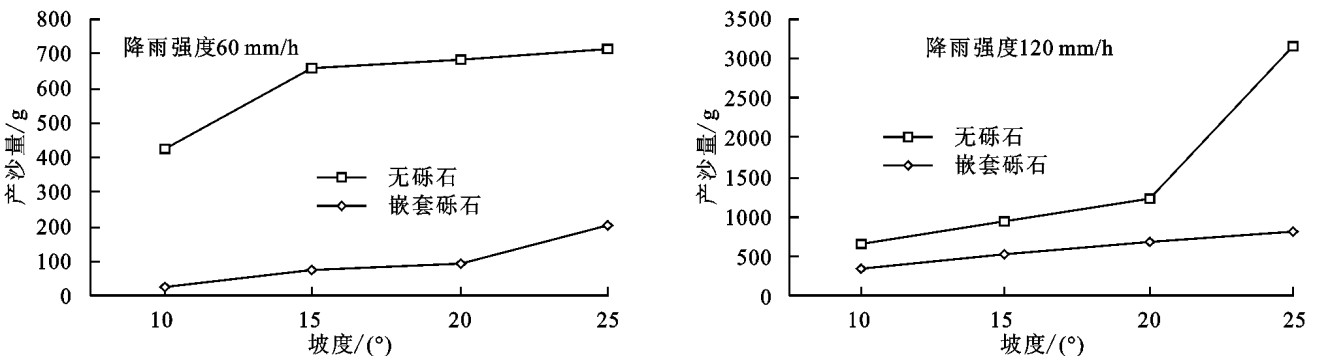


图 4 不同雨强和坡度下红壤坡面次降雨产沙量变化

### 3 结论

(1)产流时间随坡度变化表现为  $T_{25^\circ} < T_{20^\circ} < T_{15^\circ} < T_{10^\circ}$ , 随雨强增大而缩短。各坡面产流率、总产流量均随雨强和坡度的增大而增大。平均产流率随坡度变化的趋势受到雨强的影响, 雨强增大后, 相同坡度下坡面的承雨量增加, 产流率差异随坡度增加而减小。

(2)产沙强度和次降雨产沙量随雨强和坡度增大而增大。坡度较平缓时, 坡面稳定性较好, 随着雨强的增大, 坡度对产沙量的影响程度不如雨强。

(3)嵌套砾石对坡面产流产沙影响显著。雨强相同和坡度相同时, 产流时间  $T_{\text{嵌套砾石}} < T_{\text{无砾石}}$ , 嵌套砾石坡面产流率、总产流量、次降雨产沙量较无砾石坡面明显减少, 雨强 60 mm/h 时嵌套砾石对坡面径流量削减的效果最显著。

#### 参考文献:

- [1] Miller F T, Guthrie R L. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States [J]. Soil Science Society America Journal Special Publication, 1984, 13: 1-6.
- [2] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318.
- [3] Ma D, Shao M. Simulating infiltration into stony soils with a dual-porosity model[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(5): 950-959.
- [4] 符素华, 段淑怀, 刘宝元. 密云石匣小流域土地利用对土壤粗化的影响[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 697-702.
- [5] 李燕, 高明, 魏朝富. 土壤砾石的分布及其对水文过程的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 6(5): 271-276.
- [6] 吕忠恕, 陈邦瑜. 甘肃砂田的研究[J]. 农业学报, 1955, 6(3): 299-312.
- [7] Li X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. Catena, 2003, 52: 105-127.
- [8] 刘谦和, 李志强. 砂田土壤的水蒸发特征和温度变化[J]. 甘肃农业科技, 1993(8): 27-28.
- [9] 陈士辉, 谢忠奎, 王亚军, 等. 砂田西瓜不同粒径砂砾石覆盖的水分效应研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(30): 433-436.
- [10] Cerda A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52: 59-68.
- [11] Diaz F, Jimenez C C, Tejedor M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation [J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(1): 47-55.
- [12] 付兴涛, 张丽萍. 红壤丘陵区坡长对作物覆盖坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 91-98.
- [13] 耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. 泥沙研究, 2010(6): 48-53.
- [14] 陈正发, 郭宏忠, 史东梅, 等. 地形因子对紫色土坡耕地土壤侵蚀作用的试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 83-87.
- [15] 史倩华, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2673-2680.
- [16] 邵明安, 王全九, 黄明斌, 等. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 57-58.
- [17] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 40-43.
- [18] 梁洪儒, 余新晓, 樊登星, 等. 砾石覆盖对坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 57-61.
- [19] 王丽园, 查轩, 黄少燕, 等. 不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 40-44.
- [20] 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.
- [21] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Mucher H. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(7): 653-671.
- [22] 刘宏伟, 余钟波, 崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 822-829.
- [23] 王志伟, 陈志成, 艾钊, 等. 不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 17-20.
- [24] Zhao X, Wu P, Chen X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China[J]. Soil Research, 2013, 51: 50-58.
- [25] 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(5): 1214-1218.