

# 嵌套砾石红壤坡面壤中流对降雨强度的响应

王蕙<sup>1</sup>, 卢德宝<sup>1</sup>, 徐铭泽<sup>2</sup>

(1. 浙江水利水电学院水利与环境工程学院, 杭州 310018; 2. 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029)

**摘要:** 为研究嵌套砾石红壤坡面的壤中流动态过程及降雨产流分配, 以红壤缓坡(10°)和陡坡(25°)坡面为研究对象, 采用室内人工模拟降雨的方法研究不同降雨强度(60, 90, 120 mm/h)和不同砾石含量(0, 10%, 20%, 30%)条件下壤中流的初始产流时间、产流速率和径流过程。结果表明:(1)不同含量砾石嵌套红壤坡面壤中流初始产流时间在雨强 60 mm/h 时接近 15 min, 在雨强 90, 120 mm/h 时差别较大; 雨强从 60 mm/h 增大到 120 mm/h, 不同含量砾石嵌套红壤坡面壤中流量和产流速率基本上表现为降低, 其中 25° 嵌套 20% 和 30% 砾石坡面的壤中流产流速率均值分别下降 86.7% 和 89.0%, 雨强 120 mm/h 时壤中流峰值仅为 60 mm/h 条件下的 10.7% 和 10.2%。(2)10° 和 25° 各试验坡面, 雨强 60 mm/h 时地表径流所占比例为 8.0%~66.3%, 雨强 120 mm/h 时地表径流所占比例为 76.1%~93.5%, 地表径流所占比例均随雨强的增大而提高 32.8%~1 009.4%; 雨强 60 mm/h 时壤中流所占比例为 7.3%~30.0%, 雨强 120 mm/h 时壤中流所占比例为 1.1%~9.6%, 壤中流所占比例随雨强增大而减小 46.1%~93.9%。(3)回归结果显示, 壤中流峰值流量  $I_p$ 、壤中流系数  $I_t$ 、壤中流消退速率  $K$  和降雨强度、砾石含量的二元线性回归效果都达到了显著水平( $P < 0.05$ ); 坡度 10° 时, 降雨强度和砾石含量对壤中流过程参数所起的作用是相反的, 而坡度 25° 时, 砾石含量和降雨强度对壤中流各参数的作用相同。

**关键词:** 降雨强度; 嵌套砾石; 红壤; 壤中流

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0001-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.03.001

## Response of Subsurface Flow to Rainfall Intensity in the Red Soil Slope with Embedded Gravel

WANG Hui<sup>1</sup>, LU Debao<sup>1</sup>, XU Mingze<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029)

**Abstract:** In order to understand the impact of rainfall intensity on runoff distribution and subsurface flow process in the red soil slope with embedded gravel, the artificial simulated rainfall method was used to determine the subsurface flow characteristics of generation time, runoff rate and runoff process. The red soil gentle slope (10°) and steep slope (25°) were taken as research objects with different gravel contents (0, 10%, 20%, 30%) and rainfall intensities (60, 90, 120 mm/h). The results indicated that: (1) The runoff generation time of red soil slope with different contents of embedded gravel was close 15 min under 60 mm/h rainfall intensity, and varied greatly under 90 mm/h and 120 mm/h. The increase of rainfall intensities from 60 mm/h to 120 mm/h, the runoff quantity and runoff rates decreased with varying degrees, and the runoff rates in red soil embedded gravel with 20% and 30% at slope gradient 25° deceased 86.7% and 89.0% respectively. When the rainfall intensity was 120 mm/h, the peak values of subsurface flow were only 10.7% and 10.2% respectively of the 60 mm/h. (2) The proportions of surface runoff increased 32.8%~1 009.4% with the increasing rainfall intensities on the experimental slopes of 10° and 25°. The proportions of surface runoff were 8.0%~66.3% under rainfall intensity 60 mm/h, 76.1%~93.5% under 120 mm/h. The proportions of subsurface flow decreased 46.1%~93.9% with the increasing rainfall intensities. The proportions of subsurface flow were 7.3%~30.0% under 60 mm/h rainfall intensity, 1.1%~9.6% under 120 mm/h. (3) The binary linear regression results showed all the relationships of peak flow of subsurface flow ( $I_p$ ), coefficient of subsurface flow ( $I_t$ ), subsidence rate of subsurface flow ( $K$ ) with rainfall intensity and gravel content reached the significant levels ( $P < 0.05$ ). Rainfall intensity and gravel content played the op-

posite roles in the subsurface flow process at slope gradient  $10^\circ$ , while both roles were same at  $25^\circ$ .

**Keywords:** rainfall intensity; embedded gravel; red soil; subsurface flow

含砾石土壤是一种重要的土壤资源,在世界上有着广泛的分布,地中海地区超过 60% 的土壤含有砾石,美国有 15.6% 的土壤资源有砾石分布,中国 18% 土壤资源是含砾石土壤<sup>[1-2]</sup>。在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>[3-4]</sup>。近年来,含砾石土壤研究成果集中在砾石覆盖影响土壤含水量和导水率<sup>[5-6]</sup>、影响土壤入渗和蒸发生态规律<sup>[7-9]</sup>、影响坡面产流和产沙规律<sup>[10-11]</sup>等土壤水文物理性质及土壤侵蚀过程。Poesen 等<sup>[12]</sup>研究认为,随着嵌入表土砾石覆盖度的增加,含砾石坡面径流呈网状,径流深和径流速率增大;史倩华等<sup>[11]</sup>研究得出砾石含量对径流量的影响存在一个阈值,这个阈值在 10% 左右。目前由于研究方法和技术手段的欠缺,对坡面尺度上非均质土壤的水文过程与水土流失过程的认识还存在不足<sup>[13-15]</sup>。

壤中流是指水分在土壤内的运动,包括水分在土壤内的垂直下渗和水平侧渗<sup>[16-17]</sup>,它受到降雨强度、坡度、土地利用方式、土层厚度等的影响<sup>[18-20]</sup>,是坡地径流的重要组成部分,并对流域径流形成、土壤养分流失和土壤侵蚀等产生重要影响<sup>[21-22]</sup>。Wilson 等<sup>[23]</sup>研究指出在壤中流普遍存在的地区,土壤侵蚀量是仅有面蚀条件时的 20 倍;段剑等<sup>[24]</sup>对植草覆盖和干草覆盖的红壤坡地的研究表明,壤中流次降雨径流系数为地表裸露坡地的 2.47~3.22 倍;徐铭泽等<sup>[25]</sup>对不同母质红壤坡面壤中流的研究表明,花岗岩红壤壤中流量仅为第四纪红壤的 53%~67%。由于土壤本身存在的空间异质性以及砾石分布的不均匀性,含砾石土壤的水分运动过程较均质土壤更为复杂,有研究<sup>[14]</sup>认为砾石通过增加水流弯曲度而限制水分入渗,另有研究<sup>[26]</sup>则认为砾石的存在会产生更多的大孔隙流通道而促进水分入渗和再分布。另外,由于含砾石土壤分布的广泛性和复杂性,关于降雨强度对砾石土壤坡面的降雨产流分配及壤中流过程等的影响研究尚无统一的定论,且对于嵌套砾石红壤坡面的相关研究更是鲜有报道。

本文通过模拟降雨试验,研究不同降雨强度和不同砾石含量条件下,表层土壤嵌套砾石对红壤坡面壤中流产流特征及过程的影响,为认识和量化非均质土壤坡面水文过程,也为深入研究和应用土壤侵蚀、坡面水文模型等提供基础数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 降雨装置

试验于 2018 年 7 月 3 日至 8 月 14 日在江西省水土

保持生态科技园内的降雨大厅进行。降雨设备为西安清远测控技术有限公司生产的 QYJY—503T 降雨器,喷头为垂直下喷式喷头,有效高度 18 m,雨强连续变化范围为 10~200 mm/h,降雨均匀度  $>0.8$ ,雨强变化调节时间  $<30$  s。

### 1.2 试验钢槽与填土

本次试验使用可移动变坡钢槽,坡度的变化范围为  $0\sim30^\circ$ 。钢槽规格为长 1.5 m、宽 0.5 m、深 0.5 m。钢槽底部铺 5 cm 厚的鹅卵石,以便土体下层水分充分排出。在鹅卵石上铺 1 层细纱布,防止试验土进入石块空隙,影响排水和堵住出水口。钢槽设置 3 个出水口:地表径流(上)、壤中流(中)、底层下渗(下)。为保证试验过程中壤中流收集槽内均为侧向移动的壤中流,在紧贴壤中流收集口上方平行于土面固定 1 张规格为长 0.5 m、宽 0.2 m、厚 0.02 m 的铁板,铁板与钢槽内壁之间的空隙用玻璃胶填补,试验装置示意图见图 1。

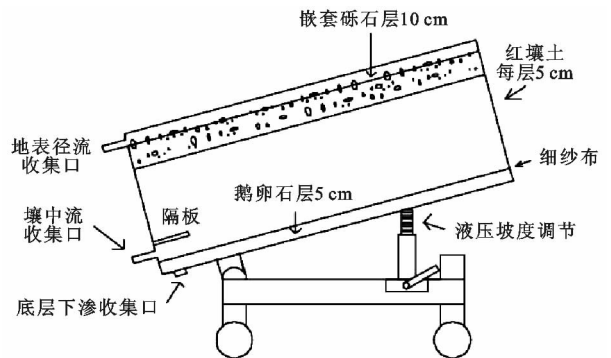


图 1 试验钢槽布设示意

试验用红土取自江西省德安县,风干后过 5 mm 筛。钢槽内鹅卵石层之上分层填入试验用土,每层 5 cm,共 8 层,其中表层(0—10 cm)为土或土石混合物。每层按照容重  $1.5 \text{ g/cm}^3$  (通过控制每层土壤重量实现)的要求压实、平整,层与层之间打毛以防止在降雨过程中土壤分层。表层(0—10 cm)为嵌套砾石处理时,分为 2 个 5 cm 层将土壤与砾石充分混合后拍打压实。每次降雨试验为单次试验,试验完成后把钢槽清空,重新填土再降雨。

### 1.3 试验设计

在对南方红壤区天然坡面中砾石大小、含量等调查分析的基础上,根据已有研究<sup>[11,27]</sup>中产流产沙量突变的临界坡度大致在  $25^\circ$  的研究结果,结合试验钢槽的实际尺寸,将本试验中的砾石粒径设计为 6~25 mm(6~10,10~20,20~25 mm,配比为 3:5:2),并将坡面砾石含量设 4 个梯度,分别为 0(对照),10%,20%,30%。坡度设置为缓坡( $10^\circ$ )和陡坡

(25°)。又由于南方红壤区受梅雨季节影响,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,梅雨期小时降雨量甚至可以达到 93 mm<sup>[28]</sup>。因此试验降雨强度设为 60, 90, 120 mm/h。在 2 个平行小区共进行 24 场降雨。正式降雨前对供试土壤进行预降雨,以保证每次试验时的土壤前期含水量和水分分布状况较为一致。预降雨时在钢槽表面盖 1 层细纱布,减少湿润过程对表土面结构的破坏,降雨强度 30 mm/h,降雨至钢槽底部出水口持续有水滴出为止,静置 24 h 排除重力水后开始试验。正式降雨前取表土铝盒样烘干,称重并测定土壤前期含水量为 (20.6±0.4)%。

试验过程中记录壤中流、地表径流初始产流时间,观察坡面的产流过程以及壤中流出流特征,每 3 min 采集 1 次径流样。试验总降雨时长为地表径流产流后 60 min。壤中流水样收集时间从降雨开始至降雨停止后 2 h。

#### 1.4 计算方法

壤中流系数  $I_t$  计算公式为:

$$I_t = (h_i \cdot 60) / (I \cdot T_s \cdot 100)$$

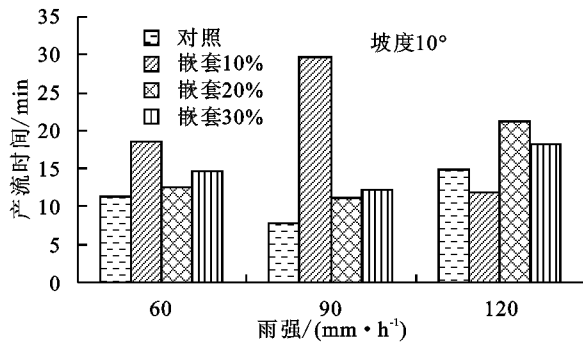


图2 壤中流初始产流时间

由图 3 可知,3 种雨强和 2 个坡度下,不同含量砾石嵌套红壤坡面壤中流产流过程基本都呈单峰型,且趋势一致。在 60 mm/h 降雨条件下,坡度 10°嵌套 30%砾石坡面壤中流产流速率在降雨 62 min 内增长快速,之后又急速降低,104 min 后壤中流出流逐渐稳定,其平均值分别是对照、嵌套 10%、嵌套 20%坡面的 2.8, 4.0, 2.0 倍。壤中流峰值表现为嵌套 30% > 嵌套 20% > 对照 > 嵌套 10%,其中嵌套 10%砾石坡面峰值仅为嵌套 30.0%的 21.6%。雨强 60 mm/h、坡度 25°时,对照与嵌套 30%坡面壤中流产流速率在降雨 28~31 min 后达到峰值,之后呈波动和稳定降低。当雨强从 60 mm/h 增大到 120 mm/h,不同含量砾石嵌套红壤坡面壤中流量和产流速率基本上表现为降低。其中嵌套 20%和 30%砾石 25°坡面的壤中流产流速率受雨强的影响最大,雨强 120 mm/h 较 60 mm/h 条件下的壤中流产流速率均值分别下降了 86.7%和 89.0%;壤中流峰值仅

式中: $I_t$  为壤中流系数(%); $h_i$  为壤中流总产流深(mm); $I$  为降雨强度(mm/h); $T_s$  为停雨时间(min)。

壤中流消退速率  $K$  计算公式为:

$$K = Q_s / (T_s - T_b)$$

式中: $K$  为壤中流消退速率(mL/(m<sup>2</sup>·min<sup>2</sup>)); $Q_s$  为停雨时壤中流流量(mL/(m<sup>2</sup>·min)); $T_b$  为壤中流停止时间(min)。

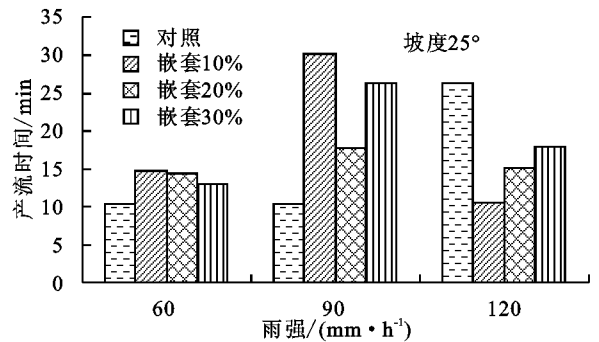
#### 1.5 数据处理

应用 Excel 和 SPSS 23.0 软件对数据进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 壤中流过程

由图 2 可知,10°和 25°坡度条件下,不同含量砾石嵌套红壤坡面壤中流初始产流时间在雨强 60 mm/h 时接近 15 min,在雨强 90, 120 mm/h 时差别较大。其中,坡度 10°、雨强 90 mm/h 时嵌套 10%砾石坡面壤中流初始产流时间晚于其他坡面,而嵌套 20%和嵌套 30%砾石坡面壤中流初始产流时间较接近;坡度 25°时,嵌套 20%, 30%砾石坡面壤中流初始产流时间均表现出 90 mm/h > 120 mm/h > 60 mm/h。



为 60 mm/h 条件下的 10.7%和 10.2%。

### 2.2 雨强、坡度、砾石含量对径流分配的影响

径流分配是反映土壤水文过程的重要参数,由于砾石的存在土壤性质具有差异性,它对降雨过程及降雨强度的响应不同。由图 4 可知,雨强对坡面径流分配的影响非常明显,10°和 25°各试验坡面,雨强 60 mm/h 时地表径流所占比例为 8.0%~66.3%,雨强 120 mm/h 时地表径流所占比例为 76.1%~93.5%,地表径流所占比例均随雨强的增大而提高 32.8%~1 009.4%;雨强 60 mm/h 时壤中流所占比例为 7.3%~30.0%,雨强 120 mm/h 时壤中流所占比例为 1.1%~9.6%,壤中流所占比例随雨强增大而减小 46.1%~93.9%。说明雨强较小有利于土壤坡面水分入渗,促进壤中流出流。另外,砾石的存在有利于壤中流的发育,因而随砾石含量的增加壤中流所占比例也相应增加,雨强 60 mm/h 时嵌套 30%壤中流所占比例为 3 种含砾石

试验坡面中最高,为 30.0%(10°)和 28.0%(25°)。雨强 60 mm/h 条件下坡度变化对径流分配影响较

大,雨强的增大掩盖了坡度变化对各试验坡面径流分配的影响。

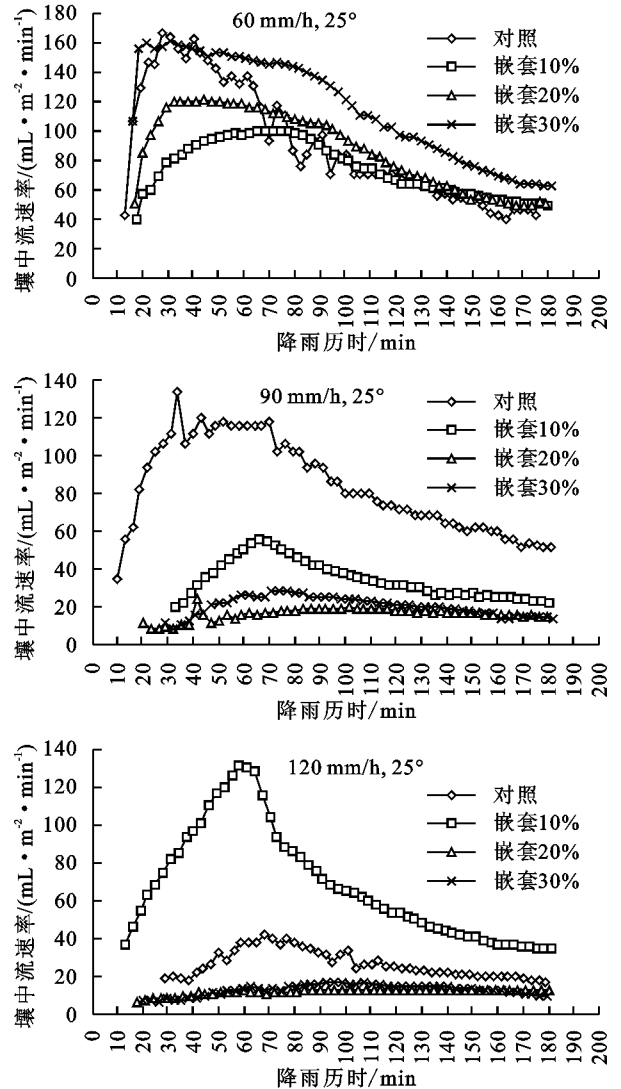
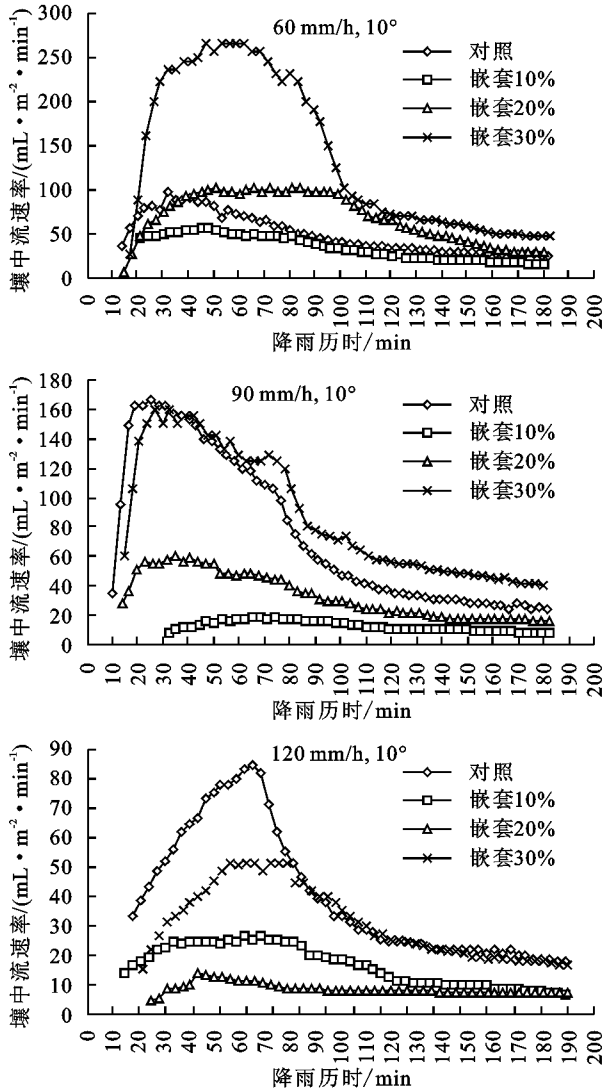


图 3 壤中流过程

### 2.3 降雨强度和砾石含量与壤中流过程参数的关系

为了定量评价降雨强度、砾石含量等变量对壤中流过程参数的影响,对试验数据进行了偏相关分析(表 1)。结果表明,降雨强度除与初始产流时间  $T_0$  偏相关关系不显著外,与其他参数都表现出极显著的相关性( $P < 0.01$ )。砾石含量除与壤中流系数  $It$  偏相关关系显著( $P < 0.1$ )外,与其他参数都无显著的相关性。说明降雨强度是影响壤中流过程的主要因素,砾石含量则是次要因素。

对降雨强度和砾石含量与壤中流过程参数进行二元线性回归分析(表 2)。回归结果表明,  $I_p$ 、 $It$ 、 $K$  和降雨强度、砾石含量的回归效果都达到了显著水平( $P < 0.05$ )。说明降雨强度和砾石含量是定量描述含砾石红壤坡面土壤水文过程和壤中流过程的重要参数。坡度 10° 时,所有回归方程中降雨强度和砾石含量对相应的参数所起的作用都是截然相反的,当变量砾石含量是正效应时,另一变量降雨强度是负效

应;而坡度 25° 时,砾石含量和降雨强度 2 个变量对壤中流参数的作用是相同的。说明降雨强度和砾石含量是影响红壤坡面壤中流过程的重要因素,增加降雨强度会阻碍坡面壤中流的发生;而砾石含量增加会有助于较缓坡面壤中流的发生,而阻碍较陡坡面壤中流的形成。

## 3 讨论

众多研究<sup>[24-25,29]</sup>表明,降雨强度对地表径流和壤中流产生重要影响。本研究在室内人工模拟坡面上进一步证实了降雨强度也是影响嵌套砾石红壤坡面壤中流产流过程的重要因素。试验中各坡面所表现出的坡面水文过程差异不仅受砾石存在和坡度的影响,更是降雨强度和砾石含量对坡面土壤水文过程综合作用的结果。由表 3 可知,以 10° 坡面为例,不同含量砾石嵌套的红壤坡面,地表径流初始产流时间表现出随雨强增加而提前。这与徐铭泽等<sup>[25]</sup>对不同母质红壤的研究和邓龙洲

等<sup>[29]</sup>对侵蚀性风化花岗岩坡地的研究结果较为一致。本研究还发现,壤中流初始产流时间并未随雨强增大而缩短(表 3),原因可能为表层土壤中嵌入砾石增加了土壤坡面的粗糙度,影响土壤表层结皮的产生<sup>[30-31]</sup>。本研究中 4 种含量砾石坡面均存在厚度 2~3 mm、面积不一

的结皮,说明表土结构变化对坡面产流存在一定影响。Heppell 等<sup>[32]</sup>研究表明,结皮本身对土壤产流过程影响不明显,而是结皮造成的土壤前期含水量的差异使表层土壤湿润锋运移速度加快,从而壤中流发生时间提前,且产流量明显增加。

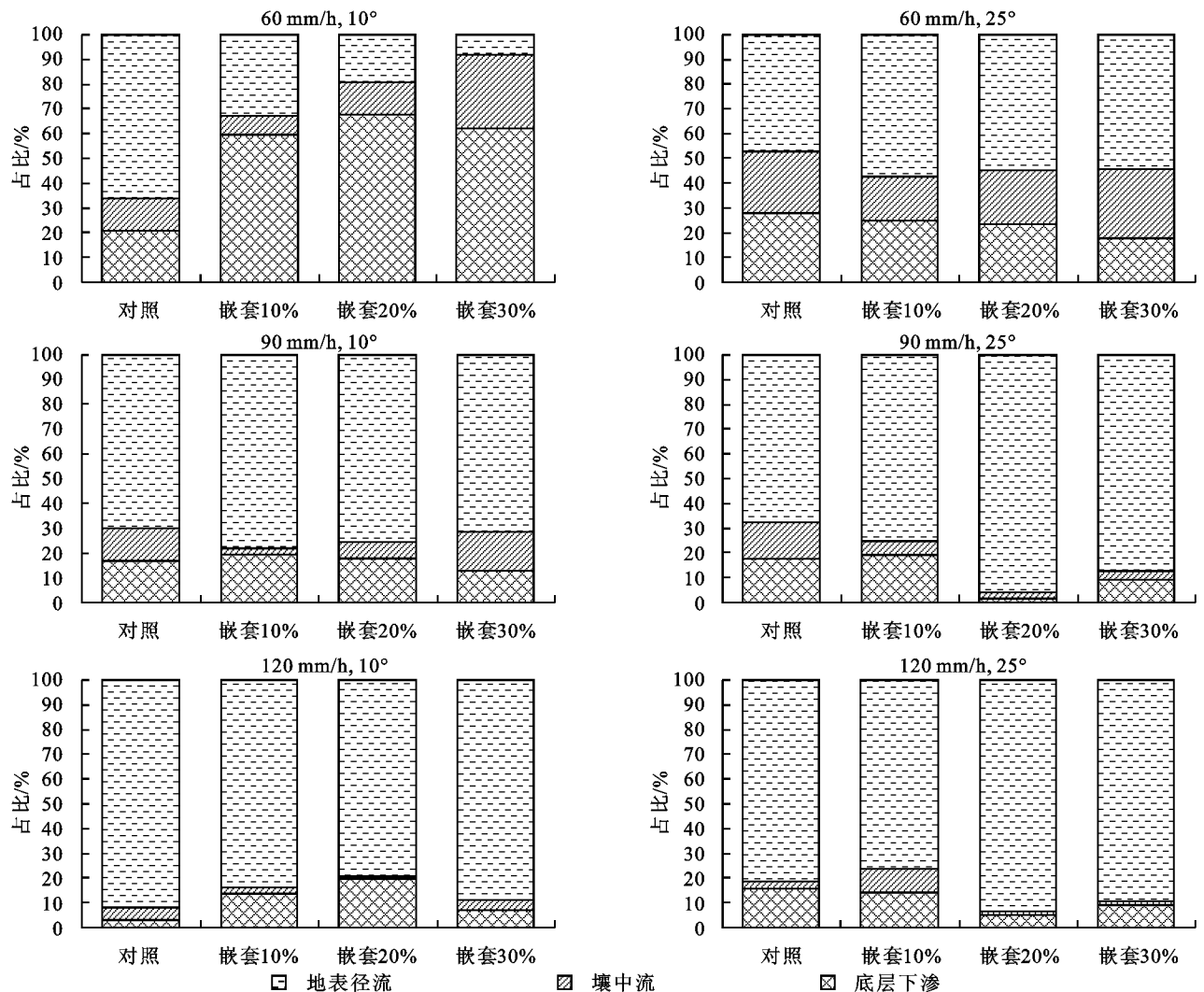


图 4 坡面径流分配

表 1 降雨强度、砾石含量与壤中流过程参数的偏相关分析

参数	壤中流过程参数			
	$I_p$	$I_t$	$K$	$T_0$
$I$	-0.552**	-0.744**	-0.574**	0.219
$P$ 值	0.006	0.000	0.004	0.316
$G$	-0.034	0.388#	0.060	0.128
$P$ 值	0.879	0.069	0.786	0.560

注:  $I$  为降雨强度(mm/h);  $G$  为砾石含量(%);  $I_p$  为壤中流峰值流量( $mL/(m^2 \cdot min)$ );  $I_t$  为壤中流系数(%);  $K$  为壤中流消退速率( $mL/(m^2 \cdot min)$ );  $T_0$  为初始产流时间(min); \*\*表示在 0.01 水平上显著; #表示在 0.1 水平上显著。下同。

雨强 60 mm/h 条件下,地表径流总流量在缓坡 10°表现为对照>嵌套 10%>嵌套 20%>嵌套 30%;雨强 90,120 mm/h 条件下,4 种含量砾石坡面地表径流总流量差异不明显(表 3)。说明较小雨强的雨

滴溅蚀对表土的打击不剧烈,此时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>[33]</sup>,促进壤中流形成;动能较大的降雨对土壤表面的打击不但破坏地表土壤结构,且易形成细沟侵蚀,进而改变坡面流速和产流率,不利于壤中流形成。试验中各坡面在雨强 60 mm/h 时壤中流总流量为雨强 120 mm/h 时的 1.3~8.5 倍。这与研究者对三峡库区紫色土坡耕地壤中流的产流特征研究发现较一致,贾海燕等<sup>[34]</sup>研究表明,小雨强(30 mm/h)时壤中流输出量为大雨强(90 mm/h)的 4.2 倍。Kienzler 等<sup>[35]</sup>研究表明,在小雨强时,红壤坡地的降雨径流入渗量达到最大值,之后降雨强度的增加对壤中流量影响不显著。说明土壤类型、土壤结构、前期降雨等能改变降雨强度对坡地壤中流的影响规律。

表 2 壤中流过程参数与降雨强度和砾石含量二元线性回归结果

坡度/(°)	回归方程	R <sup>2</sup>	P
10	$I_p=199.607-1.448I+149.037G$	0.507	0.039
	$I_t=24.953-0.208I+21.369G$	0.513	0.039
	$K=1.504-0.012I+1.651G$	0.589	0.033
25	$I_p=239.344-1.443I-181.185G$	0.518	0.037
	$I_t=41.893-0.319I-12.215G$	0.717	0.003
	$K=1.891-0.012I-1.251G$	0.501	0.043

土壤饱和导水率越小,水分下渗速度越慢,多余的水分越容易在土层间滞留,进一步形成侧向壤中

流<sup>[25]</sup>。中、高雨强条件下壤中流产流过程呈单峰<sup>[25]</sup>或双峰<sup>[36]</sup>型。本研究结果表明,不同含量砾石嵌套红壤坡面壤中流产流过程基本都呈单峰型,且趋势一致;随雨强的增大,各坡面壤中流量和产流速率基本上表现为降低(图 3)。说明在较大雨强的打击下,一方面表土易形成沟蚀,大部分降水以地表径流形式流失;另一方面较深层土壤结构也遭到破坏,影响土体内部空隙的连通状况,使土壤饱和导水率发生变化,从而影响壤中流产流过程。另外,在较小雨强条件下深层土壤在降雨过程中孔隙状况无急剧变化,因而出现较为缓慢发展的单峰壤中流过程。

表 3 不同含量砾石嵌套红壤坡面产流特征

砾石含量/%	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	地表产流			壤中流		
		产流时间/ min	总流量/ L	峰值/ (mL·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	产流时间/ min	总流量/ L	峰值/ (mL·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )
0(对照)	60	6.3	32.9	875.6	11.3	6.4	96.9
10		17.8	19.3	555.6	18.5	4.2	57.8
20		31.1	13.3	431.1	12.6	8.7	102.2
30		18.2	4.7	284.4	14.7	17.6	266.7
0(对照)	90	6.0	52.0	1364.4	7.7	9.9	166.7
10		0.8	53.6	1342.2	29.7	1.5	19.1
20		1.9	52.8	1408.9	11.1	4.3	58.7
30		1.9	49.9	1342.2	12.3	11.1	155.6
0(对照)	120	0.6	83.3	1986.7	14.9	5.0	84.4
10		0.6	76.3	1897.8	11.8	2.0	26.7
20		0.4	71.9	1808.9	21.2	1.0	13.8
30		1.1	81.4	1942.2	18.2	3.8	51.1

注:表中数据均在 10°坡度下测定。

徐勤学等<sup>[37]</sup>对紫色土的研究发现,降雨强度是紫色土坡耕地壤中流径流系数的主要影响因素。本研究在不同含量砾石嵌套红壤坡面壤中流产流过程、坡面径流分配对降雨强度的响应研究基础上,采用半定量的方法初步探讨了壤中流过程参数与降雨强度和砾石含量的关系。回归结果显示, $I_p$ 、 $I_t$ 、 $K$  和降雨强度、砾石含量的二元线性回归效果都达到了显著水平( $P<0.05$ );坡度 10°时,降雨强度和砾石含量对壤中流过程参数所起的作用是不同的,而坡度 25°时,砾石含量和降雨强度对壤中流各参数的作用是相同的(表 2)。这与付智勇等<sup>[20]</sup>和李馨欣等<sup>[36]</sup>对紫色土壤中流产流时间、产流速率与降雨强度均呈显著的指数负相关关系有一定的差异。也有研究<sup>[24]</sup>表明,降雨强度对壤中流影响不明显。造成这种差异的原因可能是研究对象土壤壤中流的形成机理不同,付智勇等<sup>[20,38]</sup>研究发现,土层较薄是紫色土壤中流形成的主导因素,而第四纪红黏土发育的红壤土层相对深厚<sup>[24]</sup>。本研究仅探讨了嵌套砾石红壤坡面设定 0,10%,20%,30%砾石含量和 60,90,120 mm/h 降雨强度条件下,缓坡(10°)和陡坡(25°)上所

表现的壤中流产流特征,以及壤中流过程参数与降雨强度和砾石含量的拟合关系,为含砾石红壤坡地产流规律的研究做了一些尝试。为了深入研究含砾石红壤的坡面产流产沙过程,今后还需在壤中流产流规律及其在土壤侵蚀中的作用等方面加强研究。

## 4 结论

(1)各红壤坡面壤中流产流过程基本都呈单峰型,且趋势一致。随雨强的增大,不同含量砾石嵌套红壤坡面壤中流量和产流速率基本上表现为降低。

(2)各试验坡面地表径流所占比例均随雨强的增大而提高,壤中流所占比例随雨强增大而减小。雨强较小有利于土壤坡面水分入渗,促进壤中流出流,且砾石的存在有利于壤中流的发育,因而随砾石含量的增加壤中流所占比例也相应增加。

(3)降雨强度是影响壤中流过程的主要因素,砾石含量则是次要因素。增加降雨强度会阻碍坡面壤中流的发生;而砾石含量增加会有助于较缓坡面壤中流的发生,而阻碍较陡坡面壤中流的形成。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Xiao Y L. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China [J]. *Catena*, 2003, 52: 105-127.
- [6] 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.
- [7] Cerda A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion [J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 59-68.
- [8] 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.
- [9] 关红杰,冯浩,吴普特. 土壤砂砾覆盖对入渗和蒸发影响研究进展[J]. 中国农学通报,2008,24(12):289-293.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Poesen J, Luna E D, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content [J]. *Catena*, 1999, 36: 315-329.
- [13] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等. 六盘山典型植被类型土壤中石砾对大孔隙形成的影响[J]. 山地学报,2007,25(5):541-547.
- [14] 戴翠婷,刘窑军,王天巍,等. 三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J]. 水土保持学报,2017,31(1):103-108.
- [15] 吴冰,朱元骏,邵明安. 含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究[J]. 中国水土保持科学,2011,9(1):99-103.
- [16] 张洪江,何凡,史玉虎,等. 长江三峡花岗岩坡面管流在壤中流中的作用[J]. 中国水土保持科学,2005,3(1):38-42.
- [17] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6): 2174-2182.
- [18] 尹忠东,左长清,高国雄,等. 江西红壤缓坡地壤中流影响因素分析[J]. 西北林学院学报,2006,21(5):1-6.
- [19] 徐勤学,涂安国,莫明浩,等. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. 水科学进展,2015,26(4):526-534.
- [20] 付智勇,李朝霞,蔡崇法,等. 不同起始条件下坡面薄层紫色土水分和壤中流响应[J]. 水利学报,2011,42(8):899-907.
- [21] 丁文峰,张平仓. 紫色土坡面壤中流养分输出特征[J]. 水土保持学报,2009,23(4):15-19.
- [22] 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.
- [23] Wilson G V, Cullum R F, Romkens M J M. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe [J]. *Catena*, 2008, 73: 98-106.
- [24] 段剑,刘窑军,汤崇军,等. 不同下垫面红壤坡地壤中流对自然降雨的响应[J]. 水利学报,2017,48(8):977-983.
- [25] 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.
- [26] 李燕,刘吉振,魏朝富,等. 砾石对土壤水分入渗(扩散)的影响研究[J]. 土壤学报,2011,48(2):435-439.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 邓龙洲,张丽萍,邬燕红,等. 侵蚀性风化花岗岩坡地降雨产流及水文过程研究[J]. 水土保持学报,2018,32(2):67-73.
- [30] 陈洪松,邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(4):513-520.
- [31] 曹建生,张万军,刘昌明,等. 石子和秸秆覆盖条件下降雨水量转化特征试验研究[J]. 水利学报,2007,38(3):378-382.
- [32] Heppell C M, Chapman A S, Bidwell V J, et al. A packed lysimeter experiment to investigate the effect of surface sealing on hydrology and pesticide loss from a heavy clay soil. 1. Hydrological characteristics [J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20: 384-393.
- [33] 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.
- [34] 贾海燕,雷阿林,雷俊山,等. 紫色土地区水文特征对硝态氮流失的影响研究[J]. 环境科学学报,2006,26(10):1658-1664.
- [35] Kienzler P M, Naef F. Temporal variability of subsurface storm flow formation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 4(4): 257-265.
- [36] 李馨欣,王小燕,蔡崇法,等. 紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J]. 水土保持学报,2017,31(5):25-31.
- [37] 徐勤学,王天巍,李朝霞,等. 紫色土坡地壤中流特征[J]. 水科学进展,2010,21(2):229-234.
- [38] 付智勇,李朝霞,蔡崇法,等. 三峡库区不同厚度紫色土坡耕地产流机制分析[J]. 水科学进展,2011,22(5):680-688.