

# 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的

韩珍<sup>1</sup> 王小燕<sup>1,2\*</sup> 李馨欣<sup>1</sup>

(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 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** 在室内人工模拟降雨条件下,对6种不同碎石含量(0.5%,10%,20%,30%,40%)的土壤侵蚀产流产沙的过程进行模拟研究。结果表明:碎石含量对径流流速的影响不显著,随着碎石含量的增加,平均径流流速呈减小的趋势。碎石含量对坡面侵蚀径流含沙率影响显著( $F=30.076, P<0.05$ ),随着碎石含量的增加,径流含沙率呈降低的趋势。累积产沙量与降雨历时具有对数相关关系,碎石含量为5%时相关性最大,碎石含量越大累积产沙量递增速率越小。土壤中碎石混合通过改变土壤的物质组成和结构,增强土壤的抗蚀性和抗冲性,随着碎石含量的增加,土壤流失量逐渐减少,土壤侵蚀速率显著降低。

**关键词** 碎石;平均流速;径流含沙率;累积产沙量;侵蚀速率

中图分类号 S 157.1

文章编号 1007-4333(2016)10-0102-07

文献标志码 A

## Processes of runoff velocity and stages of soil erosion under the effect of rock fragment content

HAN Zhen<sup>1</sup>, WANG Xiao-yan<sup>1,2\*</sup>, LI Xin-xin<sup>1</sup>

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

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

**Abstract** Experiments were conducted to evaluate the effect of six different rock fragment contents (0.5%, 10%, 20%, 30%, 40%) on runoff and sediment yield with simulated rainfall equipment on the purple soil hillslope. The results showed that: content of rock fragment has no significant effect on the runoff rate. The increase of rock fragment will promote the wetting front downward migration; The sediment yield rate of the slope erosion was significantly effected by rock fragment content ( $F = 30.076, P < 0.05$ ). With the increasement of rock fragment content, the rate of sediment yield decreased significantly. There was a linear correlation between cumulative erosion sediment yield and rainfall duration, which was maximum when rock fragment content is 5%. The more of rock fragment content, the lower of the sediment yield increasing rate. By changing the composition and structure of soil, soil mixed with rock fragments improved soil anti-erodibility and anti-scourability. With the increasement of rock fragment content, the soil loss amount decreased gradually and the rate of soil erosion decreased significantly.

**Keywords** rock fragment; average flow velocity; sediment concentration; cumulative sediments; erosion rate

水土流失是当今世界最为严重的生态问题之一。紫色土在我国分布广泛,占地2 000多万 $\text{hm}^2$ ,地跨热带、亚热带和温带地区,广泛分布于我国南部

15个省市,其中集中分布在四川盆地,是我国重要的土壤资源。紫色土地区土壤肥力高,水热丰富,是我国重要的农业生产基地。正是因为紫色土的地貌

收稿日期: 2015-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(40120514); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金课题(K318009902-14); 西南大学大学生科技创新“光炯”培育项目(20140105)

第一作者: 韩珍, 硕士研究生, E-mail: m13658372800@163.com

通讯作者: 王小燕, 讲师, 博士, 主要从事土壤侵蚀及水土保持研究, E-mail: wxy8388@gmail.com

状况、土壤特性以及高强度下的土地利用现状,其所在区域的侵蚀面积及强度仅次于北方黄土区,紫色土平均侵蚀强度高达  $3\ 000\sim 5\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{年})^{[1]}$ 。同时紫色土是一种初育土,结构疏松、强烈的物理风化及严重的土壤侵蚀使紫色土坡耕地土壤砾质化特征明显,土壤中  $1\sim 3\ \text{mm}$  的碎石达到  $142\sim 344\ \text{g}/\text{kg}$ ,  $>3\ \text{mm}$  碎石达到  $512\sim 741\ \text{g}/\text{kg}^{[2]}$ 。碎石(Rock fragment)是土壤中粒径  $>2\ \text{mm}$  的矿物颗粒<sup>[3]</sup>,在土壤里分布广泛<sup>[4]</sup>。美国有  $15.6\%$  的土壤含有碎石,地中海地区含碎石土壤更是高达  $60\%$ 。在我国北方土石山区褐土和西南地区紫色土中都有大量碎石存在;西北的黄土因富含钙质,表土层也含有大量的碎石<sup>[5]</sup>;南方红壤区山地土壤大多也含有碎石<sup>[6]</sup>。由于表土覆盖或土壤中混合的碎石通过各种途径直接或间接地影响了土壤侵蚀过程,改变了土壤结构及下垫面状态,含碎石土壤的侵蚀过程有着自身的特点。

鉴于碎石对土壤侵蚀过程有重要影响,国内外学者就含碎石土壤进行了大量的研究:包括含碎石土壤的取样方法、碎石自身性质研究、碎石对土壤物理性质的影响及碎石对土壤入渗、侵蚀过程的影响<sup>[4]</sup>。其中在碎石对土壤物理性质影响、对水分入渗的影响和碎石对土壤侵蚀的研究等方面做了深入的研究。碎石可通过改变原本均质土壤的重要物理特性(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<sup>[7-10]</sup>。碎石对土壤水力性质的影响依赖于碎石来源、大小、含量及空间分布特征和土壤质地等因素<sup>[11-13]</sup>。Poesen等<sup>[14]</sup>发现,在陡坡条件下,碎石覆盖对产沙量的影响存在阈值,当覆盖度低于这个阈值时,二者呈正相关关系。随着对碎石覆盖土壤降雨侵蚀研究的深入,一些学者研究了碎石覆盖对细沟侵蚀的作用,认为碎石覆盖能分散径流动能,显著减少细沟侵蚀量。梁洪儒等<sup>[15]</sup>的研究表明在同一降雨强度和坡度条件下,坡面产沙强度随砾石覆盖度的增加而减小,且在最大产沙强度处减小得最为明显,随着降雨的进行差异逐渐减小。这是因为地表砾石的存在可以对坡面起到一个保护作用,防止雨滴直接击溅坡面,从而使坡面侵蚀产沙强度减小。符素华等<sup>[16]</sup>的研究指出碎石的覆盖度对土壤侵蚀会产生影响,且土壤侵蚀量随砾石覆盖度的增加呈负指数递减。吴冰等<sup>[17]</sup>在室内人工模拟降雨条件下,对5种不同碎石含量(质量含量分别为  $0, 10\%, 20\%, 30\%$  和  $40\%$ )的土壤侵蚀产沙过程进行了研究。结果表明,降雨初期坡面产沙

量呈显著的增加趋势,其中含砾石土壤产沙量明显高于不含砾石的土壤,随后产沙量逐渐降低。在降雨的中后期,含砾石土壤的产沙量又呈增加趋势。同时,在降雨过程中随着含沙率的增加,土壤的产沙量也相应增加,含砾石土壤的产沙能力强于均质土壤。朱元骏等<sup>[18]</sup>在人工模拟降雨条件下,对4种不同碎石含量(质量含量分别为  $0, 10\%, 20\%$  和  $30\%$ )的土壤入渗进行了室内研究。结果表明,4种不同碎石含量的土壤的侵蚀产沙高峰期均出现在降雨初期  $0\sim 20\ \text{min}$ ,此后侵蚀产沙均下降并保持稳定,并且在不同碎石含量的土壤间差别不大。王小燕等<sup>[19]</sup>在含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程研究中指出,随着碎石含量增加,土壤的径流含沙率降低,土壤侵蚀速率降低。

国外在碎石对土壤侵蚀的影响进行了深入的研究,而国内仅在黄土高原地区有较为系统和全面的研究体系,在紫色土地区涉及甚少。因此本研究以长江上游紫色土为研究对象,针对其土体中含有碎石的特点,运用室内人工模拟降雨试验,揭示碎石含量在对紫色土坡面径流流速以及侵蚀阶段性的影响,以期明确碎石在紫色土侵蚀过程中的作用,从而对制定高强度利用下坡地的水土保持措施、控制坡地土壤流失、防止土壤退化、合理利用紫色土地资源以及提高紫色土土壤流失预测精度提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验安排

该试验采样时间为2014年6月,采样地点在重庆市北碚区歇马镇。试验时间为2014年7—8月,试验地点在中国科学院水利部水土保持研究所,试验用土由北碚区歇马镇运送至水土保持研究所。

### 1.2 试验材料

试验用土为侏罗纪沙溪庙组母质发育的中性灰棕紫泥土。采用英国马尔文公司生产的MS2000激光粒度分析仪( $0.01\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ )进行颗粒分析,使用  $30\%$  双氧水(化学纯)去除紫色土中的有机成分,使用  $0.5\ \text{mol}/\text{L}$  的六偏磷酸钠作为分散剂,分别分析分散前后的粒级。按国际土壤质地分类标准,供试验的紫色土为粘壤土。采用2个样品对土壤有机质含量和全氮含量测定,土壤有机质测定方法采用容量分析法,采用凯式定氮法测定土壤的全氮量。测得有机质质量分数为  $3.22\ \text{g}/\text{kg}$ ,比紫色土平均有机质含量低,土壤全氮质量分数为  $0.67\ \text{g}/\text{kg}$ ,具体测定结果见土壤基本理化性质表(表1)。

表1 试验用土的理化性质

Table 1 The physicochemical property of test soil

土壤质地 Soil texture	有机质质量 分数/(g/kg) Organic matter content	全氮质量 分数/(g/kg) Total nitrogen content	颗粒组成/% Particle size distribution				
			<0.002 mm	0.002~ 0.02 mm	0.02~ 0.1 mm	0.1~ 0.5 mm	0.5~ 2.0 mm
粘壤土	3.22	0.67	18.25	24.90	37.66	18.17	1.02

### 1.3 试验方法

1) 试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行, 采用下喷式降雨系统<sup>[20]</sup>, 降雨高度为 18 m, 满足所有降雨雨滴达到终点速度, 降雨均匀系数大于 80%。试验土槽尺寸为 5 m×1 m×0.4 m (长×宽×深), 如图 1 所示。

2) 供试土样经自然风干后人工碾碎, 去除土壤中的杂物, 过 1cm 筛, 留取直径为 2~4 cm 的碎石作为试验混合的碎石, 测得土壤初始质量含水率为 9%。

3) 在试验前, 按照控制土壤密度为 1.3 g/cm<sup>3</sup>, 计算出不同碎石含量土壤各自需要的过筛后的土和碎石 (直径 2~4 cm) 的质量, 按质量分数 0.5%、10%、20%、30% 和 40% 进行混合。在试验土槽最下层装填 10 cm 细沙并用纱布覆盖, 以保证良好的透水性。其上装填 30 cm 的供试土样, 以 5 cm 为单位分层装填, 并在每层表面用毛刷打毛, 从而使下垫面土壤条件的变异性达到最小。装好土槽后, 用直尺将表面刮平, 并用环刀 (100 cm<sup>3</sup>) 法测定坡面土壤容重, 分别在坡上、坡中和坡下 3 个位置进行取样, 测得实际的土壤容重为 1.4 g/cm<sup>3</sup> (不包含碎石)。在试验土槽边上, 均匀放置 4 个雨量筒记录降雨

强度。

4) 本试验设计 2 个重复, 分别为 A 槽、B 槽, 雨强设置为 90 mm/h, 土槽坡度设置为 15°。在降雨之前对降雨强度进行率定, 每次误差不超过 5%, 以确保降雨均匀度和降雨强度达到试验要求<sup>[21]</sup>。在率定雨强时, 将雨量筒和雨量计均匀放置在土槽放置的位置, 打开控制开关, 测定降雨历时 10 min 的降雨量, 计算其降雨强度来作为此降雨的实际降雨强度值。然后根据所测的实际降雨强度的大小, 调整降雨机控制室的各控制开关和雨量筒及雨量计的位置, 并重新率定, 直至率定为试验所需降雨强度大小。率定结束后, 记录控制室各仪器数据, 然后将试验土槽堆放至雨量筒放置的位置。

降雨历时 60 min, 整个降雨过程中处在室内封闭的状态, 避免其他环境因素 (如风) 对人工降雨的影响。从产流开始计时, 记录产流起始时间, 每隔 1 min 收集一次径流 (径流中包含泥沙), 并测定径流量, 用于计算累积径流量; 并用容积为 1 L 的取样瓶每隔 1 min 接取径流泥沙样, 用烘干称量法测定每分钟径流挟带的泥沙量, 从而计算出径流含沙率和累积产沙量<sup>[17]</sup>。采用染色法测定坡面径流流速, 分别测定距土槽底 4、3、2 和 1 m 的坡面径流流速,

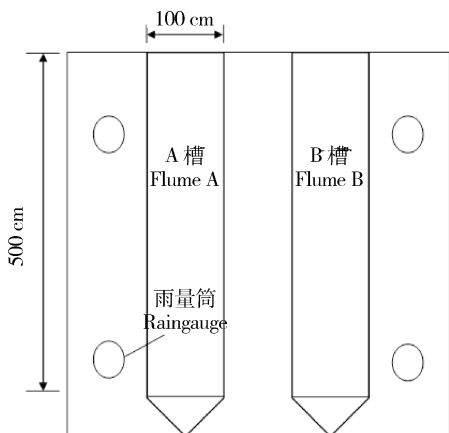


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set

同时使用卷尺测量坡面径流的深度。人工降雨结束后,测定上、中、下坡土壤的湿润峰。降雨结束后,对坡面拍取照片记录侵蚀形态。

## 2 结果与分析

### 2.1 碎石含量对平均流速的影响

由于坡面径流流速随降雨历时存在较大的波动,碎石含量与径流流速之间的关系并不明显。流速的波动主要受人工降雨过程中实际降雨强度的影响,同时使用染色法测定流速时人为上存在较大的误差,这种影响是很难校准的。研究碎石含量对径流流速的影响难以得出正确的结论,所以下面将研究碎石含量对平均径流流速的影响。

图 2 为不同碎石含量土壤在坡面不同位置的平均径流流速图。从拟合的直线可以看出,在坡面的各个位置上碎石含量与平均径流流速呈不显著的线性相关。在碎石含量为 10% 和 20% 条件下, $L=1$  m 和  $L=3$  m 处的平均径流流速均呈现暂时增大的现象,这可能是由于雨强不均匀造成的。随着碎石含量的增加,坡面同一位置上径流流速呈下降的趋势,碎石含量这种影响在坡面最底端最明显。

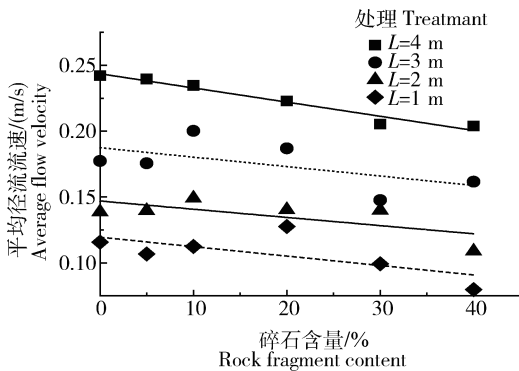


图 2 不同碎石含量土壤在不同坡面位置平均径流流速

Fig. 2 Changes of the average flow velocity of different rock fragment content in different slope position

在本试验中,坡面径流流速的差异主要受碎石含量和径流量的影响。碎石含量很大程度上影响了地表碎石盖度,在坡面径流形成,流速达到稳定后,碎石对径流主要影响表现在增加了地表的糙度,增大了地表的摩擦力,减缓了径流的流速。在不同碎石含量的情况下,坡面径流流速随着碎石含量的增加而减小,但影响是不显著的。

### 2.2 碎石含量对径流含沙率的影响

侵蚀产沙过程的一个主要指标就是径流含沙率的变化,为此,分析了不同碎石含量下侵蚀坡面的径流含沙率变化过程<sup>[22]</sup>。如图 3 所示,在降雨历时 0~10 min 即浮土侵蚀阶段,径流含沙率迅速增长,这是因为在降雨初期雨滴击溅坡面产生大量分散的颗粒被径流带走。10~30 min,侵蚀过程趋于平稳,随后,碎石含量为 0、5%、10% 的土壤侵蚀过程依旧平稳,但 20% 和 30% 碎石含量土壤含沙率逐渐降低,同时 40% 碎石含量的土壤含沙率一直较少,这是因为土壤中的碎石本身具有很强的抗蚀性,能够消散雨滴击溅动能和径流冲刷能力,从而大大降低了径流的挟沙能力,故径流含沙率随着碎石含量的增加而显著降低。

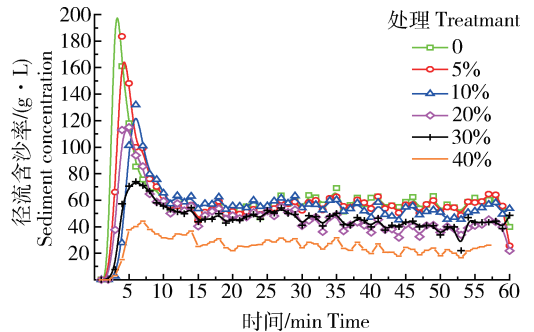


图 3 不同碎石含量下径流含沙率随降雨历时变化过程

Fig. 3 Sediment concentration changed with time for different rock fragment content

0、5%、10%、20%、30% 和 40% 6 种碎石含量土壤的径流含沙率分别在降雨历时为 3、4、6、5、6 和 7 min 达到最大值,分别为 1191.13、917.46、659.20、575.18、370.17 和 220.86 g/L,其平均径流含沙率分别为 306.28、295.97、276.63、234.67、222.94 和 126.22 g/L。研究结果表明不同碎石含量下径流含沙率差异显著( $F=30.076, P<0.05$ )。随着碎石含量的增加,径流含沙率呈现逐渐降低的趋势,当碎石含量超过 30% 时,径流含沙率随着碎石含量增加而减少的趋势更加明显。

### 2.3 碎石含量对累积产沙量的影响

坡面土壤颗粒随径流迁移出坡面成为侵蚀泥沙是一个动态发展过程,受到径流特性、土壤特性、坡面特性、降雨强度等诸多因素的影响,是土壤侵蚀的微观表现形式<sup>[23]</sup>。不同碎石含量下,坡面的抗蚀能力存在差异,坡面土壤颗粒随径流的迁移过程不同,

表现在累积产沙量随产流历时呈现一定的规律变化。

由图4可以看出,在降雨过程中,累积产沙量大小随碎石含量的变化趋势依次为:0%>5%>10%>

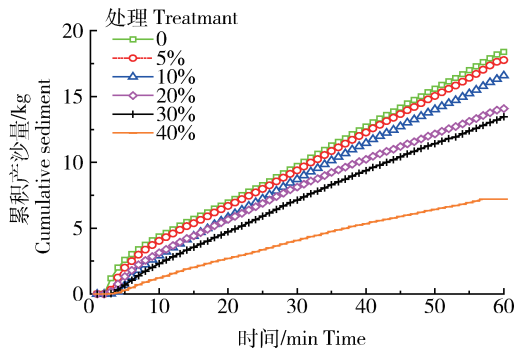


图4 不同碎石含量下累积产沙量变化

Fig. 4 The change of cumulative sediments under different rock fragment content

20%>30%>40%,说明随着碎石含量的增加,累积产沙量呈减小的趋势,且增长速率呈递减变化。这主要与降雨过程中前一段时间为坡面形态剧烈变化阶段有关,土壤侵蚀现象较为明显,随着降雨的持续进行,坡面形态逐渐稳定,产沙量逐渐减小,因此累积产沙量的增长速率也逐渐减小。结果表明,碎石含量越大,累积产沙量的增长速率越小,特别是在碎石含量大于30%的范围内表现明显。

进一步对累积产沙量与稳定产沙以后的降雨历时(降雨10 min以后)进行相关分析,表明碎石含量分别为0%、5%、10%、20%、30%和40%时,累积产沙量与降雨历时呈显著相关关系,相关系数分别为0.9996、0.9998、0.9991、0.9966、0.9983和0.9942,碎石含量为5%时相关性最大。对累积产沙量与降雨历时进行拟合,发现累积产沙量与降雨历时具有线性相关关系,其回归方程见表2。

表2 累积产沙量随降雨历时变化回归方程

Table 2 The regression equations of cumulative sediments with the duration of rainfall

碎石占供试土壤比例/% Percentage of rock fragment in experimental soil	回归方程 Regression equations	$R^2$
0	$y=285.08x+1301.4$	0.9996
5	$y=277.93x+1137.4$	0.9998
10	$y=271.81x+444.48$	0.9991
20	$y=216.85x+1384.6$	0.9966
30	$y=221.64x+357.11$	0.9983
40	$y=122.45x+290.6$	0.9942

注:y代表累积产沙量,g;x代表降雨历时,min。

Note:y:Cumulative sediments,g;x:Duration of rainfall,min.

侵蚀产沙总量是指在同一时间段内相同条件下侵蚀产沙量的总和,试验取降雨历时时间60 min,根据每分钟产沙量求取60 min内的总产沙量<sup>[24]</sup>。统计分析结果显示,侵蚀产沙总量与碎石含量之间存在着一定的关系,如图5所示,随着碎石含量的增加,侵蚀产沙总量呈现逐渐减小的趋势,且侵蚀产沙总量与碎石含量呈极显著相关关系。

#### 2.4 碎石含量对侵蚀速率的影响

土壤中的碎石主要是通过提高整个土体的抗蚀性和抗冲性来减少土壤流失,降低侵蚀速率。试验结果显示,0%、5%、10%、20%、30%和40% 6种碎石

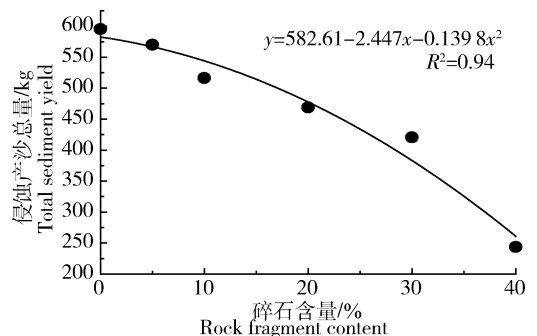


图5 侵蚀产沙总量和碎石含量的关系

Fig. 5 Relationship between the total sediment yield and rock fragment content

含量土壤的平均侵蚀速率依次为 63.37、61.24、57.21、48.55、46.44 和 26.16  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ , 即  $0\% > 5\% > 10\% > 20\% > 30\% > 40\%$ 。表明随着碎石含量的增加, 土壤的侵蚀速率呈逐渐降低的趋势。如图 6 所示, 将土壤侵蚀的阶段划分为 3 个阶段, 即第一阶段: 浮土侵蚀阶段; 第二阶段: 稳定侵蚀阶段; 第三阶段: 最终侵蚀阶段。分别对 3 个不同阶段的土壤平均侵蚀速率与碎石含量的变化之间的关系进行线性拟合, 可以得知: 3 个阶段的土壤平均侵蚀速率均随碎石含量的增加呈逐渐降低的趋势。

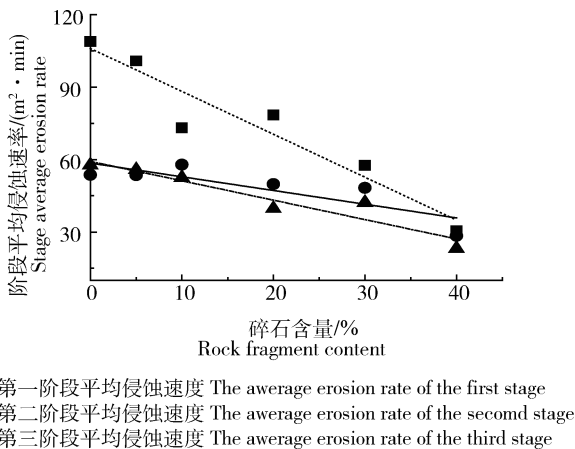


图 6 阶段平均侵蚀速率随碎石含量的变化

Fig. 6 The change of stage average erosion rate with the rock fragment content

### 3 结论

1) 碎石含量对紫色土坡面径流流速的影响不显著。碎石含量与平均径流流速呈负相关, 这主要是因为碎石的增加会使土壤表面的糙度增加, 从而减缓了径流的流速。另一方面, 坡面位置、碎石含量和径流流速之间存在一定的关系, 这还需要进一步研究。

2) 径流含沙率的大小和变化与碎石含量因子密切相关, 降雨初期时径流含沙率迅速增长, 随后一段时间逐渐趋于稳定值。碎石含量因子对径流含沙率影响显著 ( $F=30.076, P<0.05$ ), 随着碎石含量的增加, 径流含沙率呈降低的趋势。

3) 累积产沙量与降雨历时之间具有对数相关关系, 且碎石含量为 5% 时相关性最大。且碎石含量越大累积产沙量的递增速率越小, 当碎石含量超过 30% 时, 累积产沙量随着碎石含量增加而减少的趋势更加明显。

4) 土壤中含有的碎石改变了其物质组成和结构, 增强了其抗蚀性和抗冲性。随着碎石含量的增加, 土壤流失量减少, 土壤侵蚀速率逐渐降低。

### 参 考 文 献

- [1] 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 J, Liang M. Characteristics and control paradigm of purple soil water loss and soil erosion [J]. *China Water Resource*, 2010(2):41-43 (in Chinese)
- [2] 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 Y S, Shi D M, Lv X X. Research on soil deterioration in the Yangtze Three-Gorge Region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(3):53-62 (in Chinese)
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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:地球科学), 2008, 38(3):375-383  
Zhu Y J, Shao M A. 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 (in Chinese)
- [6] 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 C F, Ding S W, Zhang G Y. 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 (in Chinese)
- [7] Wesemael B V, Poesen J, Figueriedo T. Effect of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall [J]. *Soil and Till Research*, 1995, 33(3):229-250
- [8] 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
- [9] 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 S H. Effect of containing rock fragment on infiltration [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):171-175 (in Chinese)
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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 Surface Processes and Landforms*, 1990, 15: 653-671
- [13] Posesen J, 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
- [14] Posesen J, Wesemael B, Govers G, Martinez-Fernandez J, Desmet, P, Vandaele K, Quine, T, Degraer G. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion [J]. *Geomorphology*, 1997, 18(3): 183-197
- [15] 梁洪儒, 余新晓, 樊登星, 孙佳美, 常玉, 李瀚之. 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  
Liang H R, Yu X X, Fan D X, Sun J M, Chang Y, Li H Z. Effect of gravel-sand mulching on slope runoff and sediment yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 57-61 (in Chinese)
- [16] 符素华, 路炳军, 叶芝菡. 地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 15-18  
Fu S H, Lu B J, Ye Z H. Effects of fragments on runoff and soil erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 15-18 (in Chinese)
- [17] 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  
Wu B, Zhu Y J, Shao M A. Flow velocity and processes of runoff and sediment generation on soils containing gravels[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 99-103 (in Chinese)
- [18] 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 Y J, Shao M A. 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 (in Chinese)
- [19] 王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 谢德体. 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  
Wang X Y, Wang T W, Cai C F, Xie D T. Processes of rainfall infiltration, runoff and sediment yield on purple soil slope containing rock fragments[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 189-195 (in Chinese)
- [20] 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  
Geng X D, Zheng F L, Liu L. Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion process on purple soil hill slopes [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(6): 48-53 (in Chinese)
- [21] 王小燕, 李朝霞, 徐勤学, 蔡崇法. 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  
Wang X Y, Li Z X, Xu Q X, Cai C F. Review of effects of rock fragment cover on soil water erosion processes[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 115-120 (in Chinese)
- [22] 冯勇. 紫色土坡面侵蚀产沙及氮磷流失特征研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2012  
Feng Y. Study on the characteristics of erosion and nitrogen, phosphorus loss on slope of purple soil[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2012 (in Chinese)
- [23] 王茹. 不同坡度条件下紫色土坡面土壤侵蚀特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013  
Wang R. Study on the slope erosion characteristics of purple soil under the different slope [D]. Chongqing: Southwest University, 2013 (in Chinese)
- [24] 刘力. 紫色土和黄土坡耕地土壤侵蚀过程对比研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006  
Liu L. Comparison study on purple soil and loess soil erosion processes at sloping cultivated field[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华