

## 秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验<sup>①</sup>

朱高立<sup>1,2</sup>, 王雪琪<sup>2</sup>, 李发志<sup>2</sup>, 黄炎和<sup>1\*</sup>, 邹伟<sup>2</sup>, 林金石<sup>1</sup>, 蒋芳市<sup>1</sup>

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350000; 2 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

**摘要:**通过室内模拟降雨试验,研究 60 mm/h 雨强条件下,不同秸秆覆盖度(0、25%、50%、75%、100%)和坡度(25°、30°和 35°)组合崩积体坡面的侵蚀状况。结果表明:不同条件下崩积体坡面初始产流时间在 49 ~ 913 s;同一坡度条件下,崩积体坡面初始产流时间随着覆盖度的增加而延长;同一覆盖度条件下,初始产流时间 35°>25°>30°;坡面产流时间与秸秆覆盖度呈线性正相关关系。崩积体坡面径流量的变化过程具有如下几个特征:第一,在降雨初期,坡面径流率在短时间内迅速增加,之后趋于平缓;第二,坡面径流量的起伏变化幅度随着坡度的增加而增大;第三,同一覆盖度条件下,30°坡面的径流率大于 25°和 35°坡面。崩积体坡面产沙量存在临界覆盖度,值为 50%。

**关键词:**人工降雨;秸秆覆盖;崩积体;产流;产沙

**中图分类号:**S157.1; S157.2 **文献标识码:**A

坡面产流产沙受到降雨、土壤、地形和植被等因素的共同影响<sup>[1]</sup>。近年来,国内外学者对坡面产流产沙的影响因素、侵蚀过程及动力学机制等方面进行了大量研究,并取得了不少成果。在坡面产流产沙的影响因素研究方面,Valentin 等<sup>[2]</sup>认为地形、土壤性质、土地利用变更和气候变化是影响坡面侵蚀的主要因素;袁久芹等<sup>[3]</sup>通过从微区尺度研究篱带范围内多种植物篱的产流产沙效益,发现各植物篱模式可以不同程度地改善土壤理化性质,减少水土流失量;米宏星等<sup>[4]</sup>的研究表明同一条件下,流速随坡度的增大而增加;余新晓等<sup>[5]</sup>发现产流、产沙量与降雨量和降雨强度有较好的相关性。在坡面侵蚀过程的研究方面,杨明义<sup>[6]</sup>以黄土丘陵沟壑区为研究对象,发现小流域泥沙主要来自沟谷地,约占整个流域产沙量的 70%;肖培青等<sup>[7]</sup>研究认为在坡面侵蚀发育的初期、中期和后期,沟蚀分别占坡面总侵蚀产沙量的 28.7%、70.4%和 37.1%;卢慧中等<sup>[8]</sup>采用野外测量等方法对矿堆的水土流失类型及其强烈程度进行研究后发现,在降雨过程中,随着距离侵蚀沟出口距离的增加,侵蚀沟内的水土流失状态由侵蚀转为堆积;郭伟等<sup>[9]</sup>通过室内人工模拟降雨方法,研究了湿润速率对坡面径流和侵蚀的影响以及泥沙特性,得出坡面侵蚀量随着湿润速率的增大而增加;郑良勇等<sup>[10]</sup>认为在降雨初期,坡

面主要发生的是面蚀,当细沟出现后,坡面侵蚀加剧,细沟侵蚀深度随之迅速增加。在坡面侵蚀的动力学机制研究方面,蒋芳市<sup>[11]</sup>认为可首选单位水流功率、单宽能耗及断面单位能量作为崩积体降雨输沙的动力学参数;马美景等<sup>[12]</sup>分析上方来水流量对红壤坡面径流侵蚀过程中泥沙的迁移规律及土壤溶质运移特征的影响后发现,上方来水流量越大,薄层径流冲刷作用越强烈,径流含沙量随时间的变化波动越剧烈;吴淑芳等<sup>[13]</sup>认为,对于裸地和调控措施坡面,输沙率与径流剪切力、径流功率之间均呈现良好线性关系,与水流动能之间呈现良好对数关系。张宽地<sup>[14]</sup>通过理论推导与阻力试验相结合的方法,发现坡面水流平均流速、平均水深、弗洛德数和阻力系数均与单宽流量、坡度、粗糙度呈幂函数形式变化,并给出了各水力要素的经验计算公式。

大量研究认为秸秆覆盖可以有效减轻坡面侵蚀。在产流时间延缓方面,朱高立等<sup>[15]</sup>研究了大雨强条件下崩岗崩积体坡面的侵蚀状况,发现秸秆覆盖能够有效延长坡面产流时间,且产流时间随着覆盖度的增加而延长;王青杵等<sup>[16]</sup>认为植物篱地比裸地产流时间延缓 5 ~ 25 min。在防治坡面侵蚀方面,闵俊杰<sup>[17]</sup>研究认为植被覆盖度由 60% 升至 80% 时,产流量(产沙量)减幅最大;王英文<sup>[18]</sup>利用人工模拟降雨方

基金项目:国家自然科学基金项目(41571272,41001169)和国家科技支撑计划项目(2014BAD15B0303)资助。

\* 通讯作者(yanhehuang@163.com)

作者简介:朱高立(1989—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要从事土地经济与管理研究。E-mail: zhugaoli1989@126.com

法,定量研究了秸秆覆盖对黄绵土产流产沙的影响,发现秸秆覆盖在玉米整个生长期可以减少产沙总量的 55.26%~72.63%;徐锡蒙等<sup>[19]</sup>认为秸秆覆盖主要通过改变坡面径流与侵蚀产沙量的关系而非减少径流量来减少坡面侵蚀量;王浩<sup>[20]</sup>研究表明在同坡度同流量条件下植物路较土质路输沙量减少率为 48.35%~85.31%。在坡面覆盖度取值研究方面,张翼夫等<sup>[21]</sup>研究认为 30%~60%(1 400~3 100 kg/hm<sup>2</sup>)的玉米秸秆覆盖度可以达到较好的水土保持效果;黄俊等<sup>[22]</sup>认为稳定入渗率随植被覆盖度增加的速率是非恒定的,存在着增速变化的临界植被覆盖度;丛月等<sup>[23]</sup>通过野外人工模拟降雨试验,研究植被覆盖度对雨滴动能和土壤溅蚀量的影响,结果表明溅蚀量随植被覆盖度的增大而减小,在植被覆盖度为 40% 前十分显著,可认为 40% 植被覆盖度是一个临界值。这些研究从不同角度分析了秸秆覆盖与坡面侵蚀的关系,然而以崩岗崩积体为对象,研究秸秆覆盖对崩积体坡面侵蚀影响的文章还较少。为了揭示秸秆覆盖条件下崩积土体的侵蚀变化规律,本研究通过室内模拟降雨试验,分析秸秆覆盖条件下崩积体坡面的侵蚀变化特征,以为崩岗崩积体的治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与装置

采样地位于福建省安溪县洋坑村(118°03'E, 24°57'N)。洋坑村为河谷小盆地,丘陵地带,属南亚热带气候,气候温和,年平均温度 18℃,年平均降雨量 1 800 mm,全年总日照时数 2 030 h。试验土壤的理化性质为:pH 5.2;有机质含量较低,为 1.70 g/kg;砂粒含量高,可达到 546.7 g/kg,黏粒含量低;砾石 粗砂 细砂 粗粉 细粉 黏粒=19.78 46.06 8.61 8.18 14.55 2.81;土壤质地疏松,结构性差。试验所用覆盖材料为秸秆,秸秆长度控制在 30~40 cm。模拟降雨试验于 2014 年 7—11 月在福建农林大学金山水土保持科教园人工降雨大厅内进行,采用西安清远测控技术有限公司生产的 QYJY-501 型模拟降雨控制器,降雨高度为 12 m,雨滴降落到地表的终速可以达到自然降雨终速;模拟降雨器降雨面积 3 m×6 m,降雨强度变化范围为 15~200 mm/h,降雨均匀度大于 0.85。试验土槽为固定式可变坡钢槽,坡度调节范围为 0~40°,土槽长×宽×高=5 m×2 m×1 m,土槽按宽 1 m 平均分成 2 个槽。

### 1.2 试验设计

通过野外调查可知,安溪县崩岗崩积体的坡度主

要集中在 25°~35°,所以试验坡度设置为 25°,30°,35°。通过分析安溪县常年降雨数据,根据安溪县大雨暴雨降雨强度特征,将试验雨强设定为 60 mm/h。坡面采用 5 种处理,均匀覆盖秸秆,秸秆覆盖量分别为 0、1 500、3 000、4 500、6 000 kg/hm<sup>2</sup>,折合覆盖率约为 0、25%、50%、75%、100%。

### 1.3 试验步骤

试验用土自然风干后过 10 mm 筛以清除土样中的杂物。填土前,先在土槽底部填入 60 cm 厚沙石,上铺设棉纱布,使试验过程中土壤水分能自由下渗。之后采用分层填土,每层土厚 10 cm 的方式向土槽中填入 30 cm 厚的土样并压实,土壤体质量(容重)控制在 1.25~1.40 g/cm<sup>3</sup>,与野外崩积体的土壤体质量相似。降雨开始前在坡面上均匀覆盖秸秆,以不破坏坡面表层土壤物理性状为前提,用 30 mm/h 小雨强降雨湿润供试土壤,直到坡面出现产流为止,目的是保证每次试验土壤地表状况均一,然后用塑料布覆盖坡面,使水分充分运动渗透,放置 18 h 后开始试验。每次降雨时间为 1 h,两次降雨试验间隔时间为 48 h。试验过程中,坡面产流开始后记录下产流时间,每隔 2 min 收集 1 次径流和泥沙。将土槽坡面等距离分为 5 份,用染色剂法(KMnO<sub>4</sub>)分别沿土槽纵断面测定 5 个坡段内的平均流速,每 5 min 测定 1 次。用量筒测定径流样体积。用烘干法(105℃)测定泥沙量,试验重复 2 次以减少系统误差提高数据的准确值。

### 1.4 数据分析与处理

试验数据采用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 进行分析。通过 Excel 2013 进行数据处理、相关性分析和绘图等。利用 SPSS 18.0 进行逐步回归分析和方差分析等。

## 2 结果与分析

### 2.1 覆盖条件下坡面的产流时间

初始产流时间是指从降雨开始到薄层径流汇集到小区出口所需的时间<sup>[24]</sup>,它是影响降雨径流过程及其大小的主要因素<sup>[25]</sup>。由图 1 可以可知,坡面初始产流时间在 49~913 s,不同条件下的初始产流时间差别较大。具体来看,同一坡度条件下,坡面初始产流时间随着覆盖度的增加而延长。以 25° 坡面为例,100% 覆盖度坡面的产流时间比 0、25%、50%、75% 覆盖度坡面分别延长 423、312、99、36 s。

张会茹和郑粉莉<sup>[26]</sup>通过研究红壤坡地土壤侵蚀过程指出,小雨强条件下,坡度对产流时间有一定的影响。由表 1 可以看出,同一覆盖度条件下,初始产

流时间 35° 坡面大于 25° 和 30° 坡面。以覆盖度为 50% 的坡面为例, 35° 坡面的初始产流时间较 25° 坡面长 311 s, 较 30° 坡面长 492 s。具体分析, 35° 坡面的初始产流时间最长, 主要原因是较大的坡度意味着较小的有效降雨面积, 有效降雨面积的减少使得坡面接收到的降雨量降低, 坡面径流量也随之减少, 进而会延缓坡面产流时间。此时, 虽然 35° 坡面的坡面流速大于 25° 和 30° 坡面, 但从坡面产流机制上来说, 流速与初始产流时间并没有直接关系, 而有效降雨面积的减少会延缓初始产流时间, 此时有效降雨面积成为延长初始产流时间的主导因素。

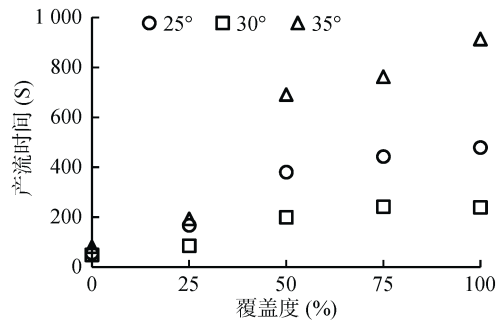


图 1 不同覆盖度和坡度条件下初始产流时间

Fig. 1 Initial time of runoffs under different coverages and slope gradients

采用回归方法定量分析坡面产流时间( $t$ )与秸秆覆盖度( $C$ )的关系。由表 1 可知, 坡面产流时间与秸

秆覆盖度呈线性正相关关系。这表明秸秆覆盖可以有效延长坡面产流时间, 覆盖度越高, 其对坡面产流时间的延缓作用越明显, 主要原因: 一是秸秆对坡面径流具有阻蓄作用, 进而会降低径流速度, 延迟产流; 二是坡面秸秆对径流的阻蓄有利于径流的下渗, 进而增加入渗率, 降低坡面径流量, 延缓产流时间; 三是秸秆的存在降低了雨滴对坡面的击溅力, 保护了坡面土体, 使得降雨具有有序下渗的条件, 缩短了产流时间。花东文和温仲明<sup>[27]</sup>通过野外人工降雨试验研究了自然恢复草地、人工林地和人工刺槐林地下的坡面产流时间, 结果发现枯枝落叶层不仅能拦蓄降雨, 增加土壤入渗率, 还能增加地表粗糙度, 降低坡面径流速度, 从而延缓径流时间, 与本试验的研究结果吻合。

表 1 坡面产流时间与秸秆覆盖度的相关性分析		
Table 1 Correlation between initial time of runoff and straw coverage		
坡度(°)	经验方程	$R^2$
25	$t = 4.488C + 80.6$	0.925 7
30	$t = 2.144C + 55.8$	0.891 2
35	$t = 8.932C + 81.4$	0.920 7

2.2 覆盖条件下坡面的产流特征

2.2.1 坡面产流过程 图 2 为各条件下坡面径流量随时间的变化过程。由图 2 可以看出, 崩积体坡面的径流量变化过程具有如下几个特征: 第一, 在降雨

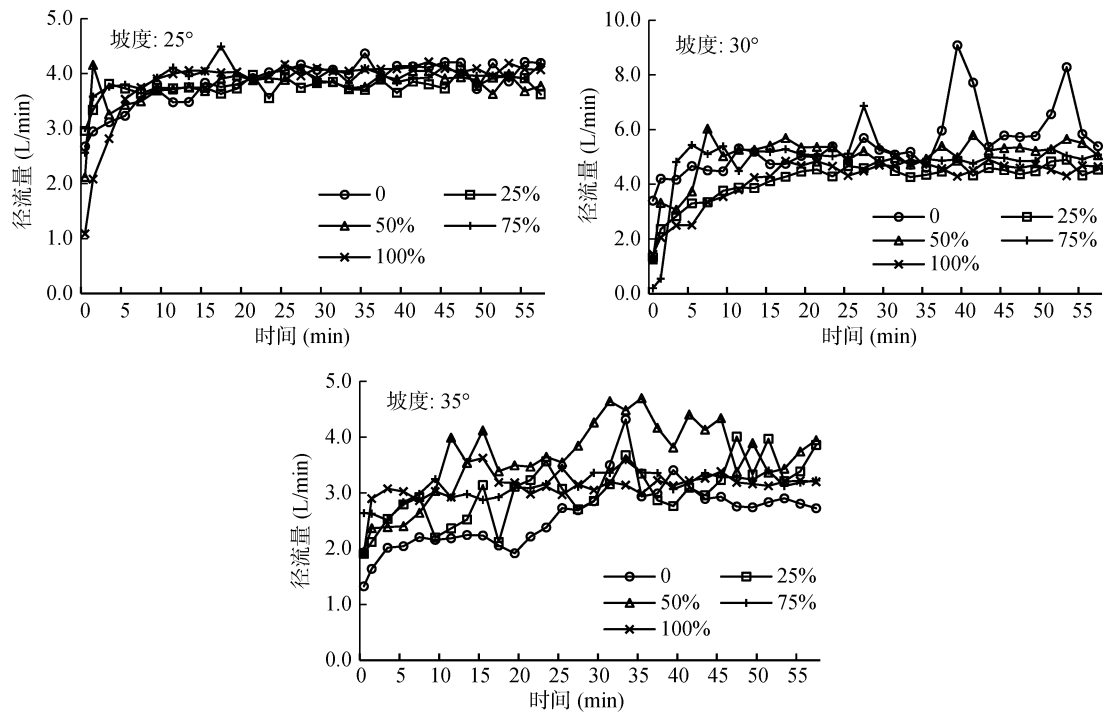


图 2 不同覆盖度和坡度条件下径流量随时间的变化特征

Fig. 2 Changes of runoffs with time under different coverages and slope gradients

初期,坡面径流率在短时间内迅速增加,之后趋于平缓。主要原因是降雨开始后,由于坡面土体水分未达到饱和,因此会吸收大量降水,从而使得坡面径流量较低,径流在短时间内无法形成规模。当坡面土体吸水饱和后,降雨下渗较少且稳定,使得径流率在降雨后期保持相对稳定;第二,坡面径流量的起伏变化幅度随着坡度的增加而增大,主要原因是坡度的增加一方面会使坡面土体的稳定性降低,造成细沟侵蚀和下切侵蚀的加剧<sup>[28]</sup>,另一方面也会导致坡面流速增加,流速增加带来的较高动能作用于不太稳定的坡面土体之上,使得坡面径流率出现紊乱;第三,同一覆盖度条件下,在降雨过程中,30°坡面的径流率大于25°和35°坡面。

**2.2.2 覆盖对径流量的影响** 图3表示不同覆盖度和坡度条件下的径流总量。由图3可以看出,同一坡度条件下,坡面径流总量随覆盖度的增加变化不大,说明覆盖度对坡面径流的影响不大。同一覆盖度条件下,坡面径流总量 30°>25°>35°。25°坡面径流量小于30°坡面,原因可能是虽然30°坡面的有效降雨面积较小,但其坡度大于25°坡面,较大的坡度可以提高坡面径流速度,降低坡面水流的下渗能力,坡面多出的降水可以转化为地表径流,此时流速增加导致的径流量的增多可以抵消有效降雨面积的减小导致的径流量的减小,使得30°坡面径流量大于25°坡面。25°坡面径流量大于35°坡面,主要原因为:一是25°坡面的有效降雨面积较大,较大的降雨面积意味着接收的降雨量较多;二是较低坡度情况下,较大的雨滴加速度使得雨滴动能较大,此时雨滴的打击使得坡面结皮厚度和硬度发育更加完全,降雨的下渗较慢,更容易产生径流。

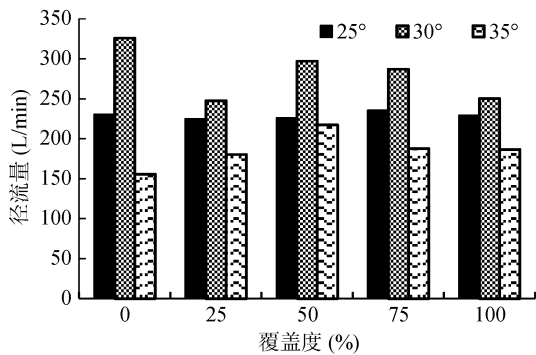


图3 不同覆盖度和坡度条件下坡面径流量的变化

Fig. 3 Changes of runoffs under different coverages and slope gradients

通过双因素方差分析可以发现,坡度对径流量的影响达到极显著水平,而覆盖度对径流量的影响不显

著(表2)。

表2 坡度和覆盖度对径流量影响的方差分析结果  
Table 2 Results of variance analysis of effects of coverage and slope gradient to runoff

差异源	离均差平方和	自由度	均方差	F	P
覆盖度	1 740.677	4	435.169	0.749	0.586
坡度	23 155.736	2	11 577.868	19.920**	0.001
误差	4 649.854	8	581.232		
总计	836 820.988	15			

注:\*\*表示达到极显著水平( $P<0.01$ )。

2.3 覆盖条件下坡面的产沙特征

**2.3.1 坡面产沙过程** 图4表示不同覆盖度和坡度条件下崩积体坡面的产沙量变化。由图4可以看出,当坡面无覆盖时,25°坡面在降雨过程中的产沙量维持在低水平,原因可能是较低坡度条件下,坡面土体结构稳定,坡面流流速较低,径流对坡体的冲刷作用较弱。此时,虽然降雨一方面会直接击溅裸露坡面,但另一方面也可以通过冲击坡面压实土体,稳定坡体结构,从而起到降低坡面产沙量的效果;较高坡度(30°和35°)坡面的产沙量在降雨前期处于低水平,在降雨中后期开始迅速增加,主要原因是在降雨前期,部分降雨被土体吸收,导致坡面径流量较少,径流的冲刷作用较弱,在降雨中后期,长时间的降雨使得坡面土体稳定性下降,加上坡面土体水分达到饱和,坡面径流量增大,使得坡面土体较容易被冲刷侵蚀,导致坡面产沙量升高。当坡面覆盖秸秆时,可以发现,不同覆盖度条件下,25°和30°坡面的产沙量随着降雨的进行无显著变化,维持在较低水平,说明在较低坡度条件下,秸秆覆盖可以显著降低坡面产沙量,且较小的坡度也可以达到很好的减沙效果;高坡度(35°)条件下,当坡面覆盖度为25%和50%时,坡面的产沙量在降雨过程中处于较高值,主要原因是较高的坡度使得坡面土体不稳定,加上坡面秸秆吸水使得自身的重力势能增加,两者相结合容易造成坡面土体的崩塌,进而增加产沙量;当覆盖度为75%和100%时,高坡度坡面的产沙量在降雨过程中始终处于较低水平,此时虽然坡面秸秆的重力势能较低覆盖度坡面更大,但超大重力势能反过来可以压实坡面土体,提高土体的稳定性,阻止坡面土体发生崩塌,从而降低坡面产沙量。

**2.3.2 覆盖度对产沙量的影响** 图5表示不同覆盖度和坡度下的产沙量。由图5可以看出,当坡度为25°和30°时,无覆盖坡面的产沙总量远远大于有覆盖坡面的产沙量,且有覆盖条件下各覆盖度坡面的产沙量

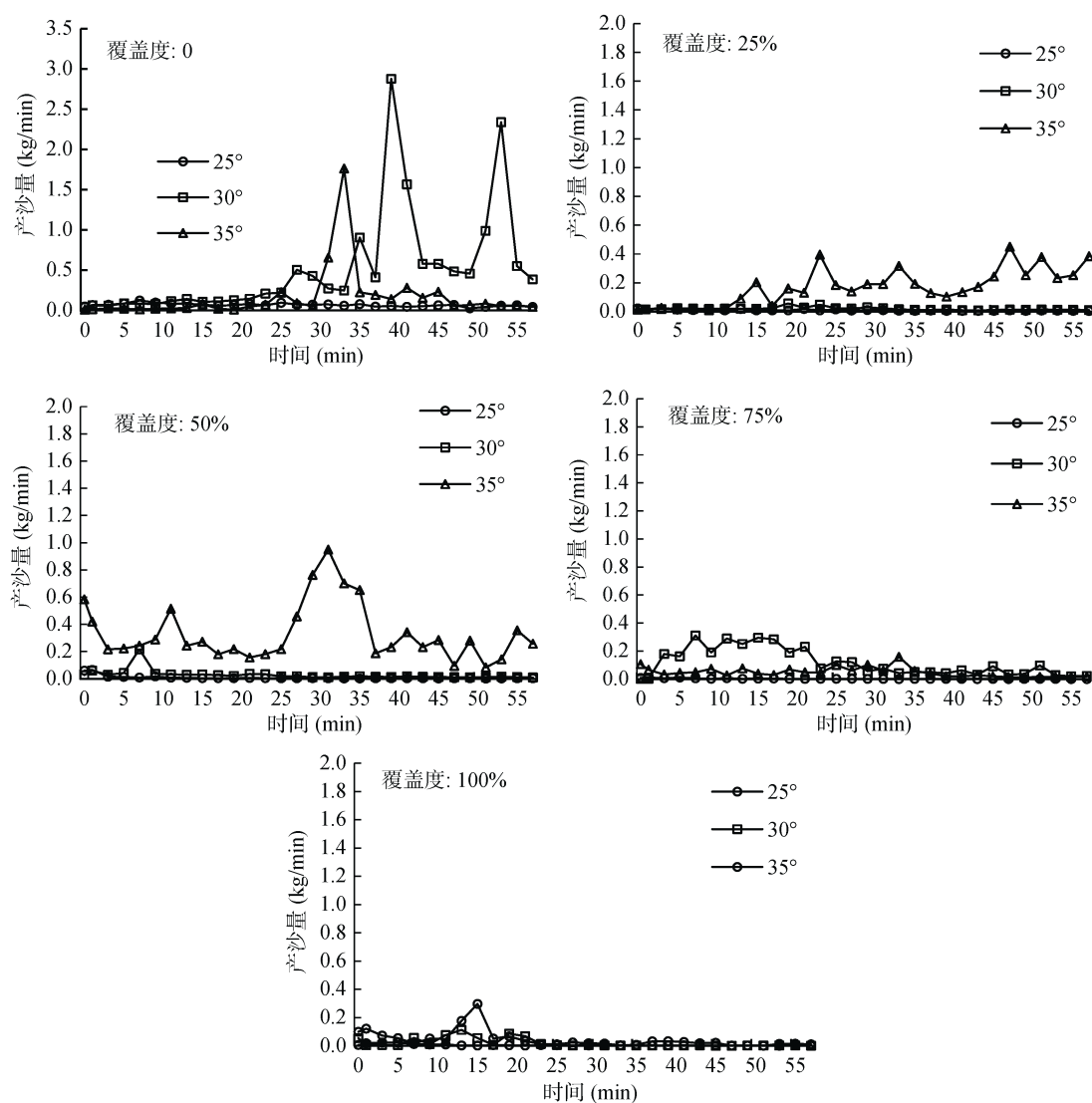


图 4 不同覆盖度和坡度条件下坡面产沙量随时间的变化特征  
Fig. 4 Changes of sediment yields under different coverages and slope gradients

均处于较低值,这说明秸秆覆盖可以有效降低坡面产沙量。主要原因为:一是秸秆覆盖可以减小降雨对坡面的击溅;二是秸秆覆盖可以通过机械作用阻挡坡面泥沙,有效降低坡面产沙量;三是秸秆覆盖可以减缓坡面径流,降低径流的携沙能力。Zhou 和 Shanguan<sup>[29]</sup>的研究也表明植被覆盖可以有效降低雨滴动能、增加土壤入渗、减少径流量与泥沙量。当坡度为 35° 时,可以发现,坡面产沙总量随着覆盖度的增大而增加,当覆盖度为 50% 时,坡面产沙量达到最大值,随后,产沙量随着覆盖度的继续增大而减少。这说明崩积体坡面产沙量存在临界覆盖度,在这个临界覆盖度之下,坡面产沙总量随着覆盖度的增加而上升,在这个临界覆盖度之上,坡面产沙总量随着覆盖度的增加而下降,本研究的临界覆盖度为 50%。产沙总量在 50% 覆盖度条件下达

到最大,主要原因是当覆盖度为 50% 时,秸秆覆盖由于吸收了大量降水,重力势能迅速增大,加上高坡度(35°)导致的坡面土体结构不稳定,使得秸秆重力势能产生的剪切力超过坡面土体的自稳定性,坡面土体容易受到水流的破坏侵蚀,甚至会产生崩塌,进而导致坡面产沙量的增大。当覆盖度低于 50% 时,坡面土体虽然受雨水的击溅作用较大,但此时坡面秸秆的重力势能较小,不会引起土体大范围的破坏与崩塌,产沙量较小。当覆盖度高于 50% 时,坡面秸秆的重力势能较高,较高的重力势能对坡面土体有压实的作用,进而会稳定土体结构,使其遭受破坏的程度较小,所以坡面产沙量较低。朱高立等<sup>[15]</sup>通过研究 120 mm/h 降雨条件下的崩积体坡面产流产沙特征发现,崩积体坡面产沙量的临界植被覆盖度为 75%,与本试验结果相近。通过双因素方

差分析可知,覆盖度和坡度对坡面产沙总量的影响不显著。

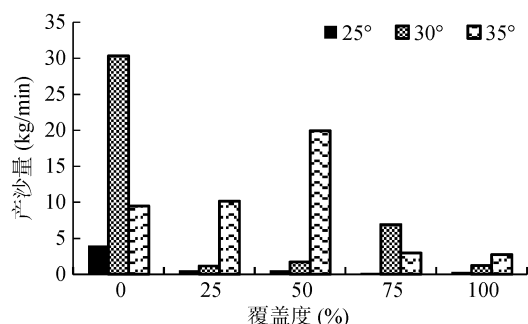


图 5 不同覆盖度和坡度条件下产沙量的变化

Fig. 5 Change of sediment yields under different coverages and slope gradients

### 3 结论

1) 不同条件下崩积体坡面初始产流时间在 49 ~ 913 s; 同一坡度条件下,崩积体坡面初始产流时间随着覆盖度的增加而延长,说明秸秆覆盖对坡面初始产流时间具有延缓作用;同一覆盖度条件下,初始产流时间  $35^\circ > 25^\circ > 30^\circ$ , 主要原因是  $35^\circ$  坡面较  $25^\circ$  和  $30^\circ$  坡面具有较小的有效降雨面积,而  $25^\circ$  坡面较  $30^\circ$  坡面具有较低的坡面流流速;坡面产流时间与秸秆覆盖度之间呈线性正相关关系。

2) 崩积体坡面的径流量变化过程具有如下特征:第一,在降雨初期,坡面径流率在短时间内迅速增加,之后趋于平缓;第二,坡面径流量的起伏变化幅度随着坡度的增加而增大;第三,同一覆盖度条件下,  $30^\circ$  坡面的径流率大于  $25^\circ$  和  $35^\circ$  坡面。

3) 同一覆盖度条件下,崩积体坡面径流总量  $30^\circ > 25^\circ > 35^\circ$ ;当坡度为  $35^\circ$  时,崩积体坡面产沙量存在临界覆盖度,值为 50%;坡度对径流量的影响达到极显著水平,而覆盖度对径流量的影响不显著。

4) 当崩积体坡面无覆盖时,  $25^\circ$  坡面在降雨过程中的产沙量维持在低水平,较高坡度( $30^\circ$  和  $35^\circ$ )坡面的产沙量在降雨前期处于低水平,在降雨中后期开始迅速增加。当坡面有秸秆覆盖时,  $25^\circ$  和  $30^\circ$  坡面的产沙量随着降雨的进行维持在较低水平;高坡度( $35^\circ$ )条件下,当覆盖度为 25% 和 50% 时,坡面产沙量在降雨过程中处于较高值,当覆盖度为 75% 和 100% 时,坡面的产沙量在降雨过程中始终处于较低水平。

### 参考文献:

[1] 郭新亚, 张兴奇, 顾礼彬, 等. 坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 40-44

[2] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: impacts, factors and control[J]. Catena, 2005, 63(2): 132-153

[3] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407

[4] 米宏星, 陈晓燕, 赵宇, 等. 黄土坡面细沟径流流速的试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 66-69, 110

[5] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26

[6] 杨明义. 多核素复合示踪定量研究坡面侵蚀过程[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2001

[7] 肖培青, 郑粉莉, 汪晓勇, 等. 黄土坡面侵蚀方式演变与侵蚀产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 24-27

[8] 卢慧中, 梁音, 曹龙熹, 等. 赣南稀土尾矿堆积区水土流失规律初探[J]. 土壤, 2015, 47(2): 387-393

[9] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 等. 不同湿润速率对三种红壤坡面侵蚀过程的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 26-31

[10] 郑良勇, 李占斌, 李鹏, 等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 87-91

[11] 蒋芳市. 花岗岩崩岗崩积体侵蚀机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013

[12] 马美景, 王军光, 郭忠录, 等. 放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 365-374

[13] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 223-228

[14] 张宽地. 坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011

[15] 朱高立, 黄炎和, 林金石, 等. 模拟降雨条件下秸秆覆盖对崩积体侵蚀产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 27-31, 37

[16] 王青杵, 王彩琴, 杨丙益. 黄土残塬沟壑区植物篱水土保持效益研究[J]. 中国水土保持, 2001(12): 29-30, 50

[17] 闵俊杰. 不同植被格局下人工模拟降雨对坡面侵蚀的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2012

[18] 王英文. 人工模拟降雨条件下保护性耕作的水土保持效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010

[19] 徐锡蒙, 郑粉莉, 覃超, 等. 沟蚀发育的黄土坡面上秸秆覆盖防蚀效果研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 130-137

[20] 王浩. 黄土高塬沟壑区沟坡道路侵蚀特征及植物路防蚀机理研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010

[21] 张翼夫, 李洪文, 何进, 等. 玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 118-124

[22] 黄俊, 吴普特, 赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 29-37

[23] 丛月, 张洪江, 程金花, 等. 华北土石山区草本植被覆盖度对降雨溅蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 59-62, 67

[24] Salvador R, Bautista-Capetillo C, Burguete J, et al. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers[J]. Irrigation Science, 2009, 27(4): 307-317

- [25] 余长洪, 李就好, 陈凯, 等. 强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 7–10, 54
- [26] 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
- [27] 花东文, 温仲明. 黄土丘陵区不同植被恢复阶段下的暴雨产流产沙研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 27–31, 90
- [28] 和继军, 孙莉英, 蔡强国, 等. 坡面细沟发育特征及其对流速分布的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 862–870
- [29] Zhou Z C, Shanguan Z P. Effects of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Original Research Article Pedosphere, 2008, 18(1): 131–136

## Simulation of Straw Mulch on Colluvial Soil Erosion and Yield of Runoff and Sediment

ZHU Gaoli<sup>1,2</sup>, WANG Xueqi<sup>2</sup>, LI Fazhi<sup>2</sup>, HUANG Yanhe<sup>1\*</sup>, ZHOU Wei<sup>2</sup>, LIN Jinshi<sup>1</sup>, JIANG Fangshi<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000, China;

2 College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Through simulation of rainfall in laboratory, the impacts of different straw coverages (0, 25%, 50%, 75%, 100%) and different slope gradients (25°, 30°, 35°) on the slope erosion of colluvial deposits were disclosed under the condition of 60 mm/h rainfall rate. The main results showed that: 1) The initial time of runoff under different conditions changed from 49 s to 913 s. The initial time of runoff would be putted off with the increase of straw coverage under the same slope gradient. The initial time of runoff was longest at 35° but shortest at 30°. The initial time of runoff was positively correlated with straw coverage. 2) At the beginning of raining, the runoff ratios increased rapidly in a short time, then slowed down gradually. The range of runoff increased with the increasing slope. 3) The runoff ratio was higher at 30° than at 25° and 35° under the same straw coverage. The critical straw coverage of sediment yield was 50%.

**Key words:** Simulated rainfall; Straw mulch; Colluvial soil; Runoff; Sediment