

# 流量及坡度对崩岗崩积体侵蚀的影响

赵 淦, 黄炎和, 林金石, 蒋芳市, 葛宏力, 陈培济, 李新光, 詹振芝, 郑巧凤

(福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002)

**摘 要:**崩积体是崩岗的重要组成部分,具有土质疏松、粗颗粒含量高、坡度大、易侵蚀等特征。通过不同上方来水(3.6, 7.2, 10.8, 14.4 L/min)和不同坡度(20°, 25°, 30°, 35°, 40°)相结合的室内放水冲刷试验,模拟不同上方来水及坡度对崩岗崩积体侵蚀的影响。结果表明:崩积体侵蚀产沙过程可分为逐步递增阶段、波动变化阶段和稳定阶段;含沙量随时间的变化分为平缓型和多峰型两种;在 20°, 25°和 30°条件下,崩积体坡面流基本都属于低含沙水流,在 35°和 40°条件下,崩积体坡面流均属于高含沙水流;上方来水对产沙量的影响大于坡度,而坡度对含沙量的影响大于上方来水;可利用上方来水和坡度对崩积体坡面产沙量及含沙量进行较好地预测。

**关键词:**崩岗; 崩积体; 流量; 坡度; 土壤侵蚀

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2014)02-0011-06

## Effect of Discharge and Slope Gradient on Colluvial Deposits Erosion in Benggang

ZHAO Gan, HUANG Yan-he, LIN Jin-shi, JIANG Fang-shi,

GE Hong-li, CHEN Pei-ji, LI Xin-guang, ZHAN Zhen-zhi, ZHENG Qiao-feng

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The colluvial deposits is an important part of Benggang, which has the characteristics of loose texture, high content of coarse particle, large slope gradient and high erosivity. This study aimed to analyze the characteristics of the colluvial deposits under different simulated upslope runoff and slope gradient conditions. Upslope runoff ranged from 3.6 to 14.4 L/min and slope gradient varied from 20° to 40°. Sediment yield and sediment concentration were monitored. Results indicated that the processes of sediment yield in colluvial deposits could be divided into three stages: gradual increase, fluctuation and stability; the changes of sediment concentration with time had smooth and multimodal types. Under the slope gradient (20°, 25° and 30°), the flow of colluvial deposits belonged to the low sediment flow, while it would be the high sediment flow under the slope gradient (35° and 40°). Upslope runoff has greater effect on sediment yield than slope gradient, while it has smaller influence on sediment concentration than slope gradient. Sediment yield and sediment concentration can be well predicted by using upslope runoff and slope gradient.

**Key words:** Benggang; colluvial deposits; discharge; slope gradient; soil erosion

崩岗侵蚀具有侵蚀量大、突发性强、发展迅速、侵蚀剧烈、治理难度大等特点,危害十分严重<sup>[1]</sup>。目前,崩岗已成为我国水土保持学科的重要研究方向。崩积体是崩岗的重要组成部分,具有土质疏松、粗颗粒含量高、坡度大、易侵蚀等特点<sup>[2]</sup>,其再侵蚀过程是崩岗侵蚀的重要环节,影响崩壁土体物质的再分配及崩岗的危害程度<sup>[1]</sup>。在崩积体侵蚀特征的研究中,蒋芳市等<sup>[2-3]</sup>利用环刀法渗透试验及土槽冲刷试验对崩积体的土壤渗透性能及水流分离土壤的动力学特征进

行了研究,结果表明,崩积体土壤的入渗能力强于崩壁的红土层和砂土层,流量和水深对土壤分离速率的影响均大于坡度。上方来水和坡度是土壤侵蚀的重要因素<sup>[4-5]</sup>。上方来水量的变化直接影响土壤坡面径流流态及坡面侵蚀方式的变化,坡度的不同造成土壤侵蚀量的差别。研究上方来水和坡度与土壤侵蚀之间的关系,对于揭示崩积体的侵蚀过程机理具有重要意义。国内外很多学者对不同上方来水和坡度条件下的侵蚀产沙规律做了研究,郑粉莉等<sup>[6]</sup>利用室内双

土槽径流小区在模拟降雨试验条件下,研究了 20°坡度时上方来水来沙对坡下方浅沟侵蚀产沙量的影响,试验表明,上方来水引起的侵蚀产沙量随降雨强度的增加可增加 4.4%~83.5%。张乐涛等<sup>[5]</sup>利用模拟径流对工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程的研究结果表明,产沙量随放水流量的增大而增大。Fox 等<sup>[4]</sup>利用模拟降雨对不同坡度下浅沟侵蚀过程进行研究,结果表明产沙量随着坡度的增加而增大,而 Fu 等<sup>[7]</sup>的研究结果认为坡度对产沙量的影响存在临界值,且这个值是波动的。由于影响土壤侵蚀的因素众多且复杂,崩岗上方来水对崩积体的侵蚀机理研究还没有开展。因此,本文拟通过室内放水试验,模拟不同流量上方来水和坡度对崩积体坡面产沙过程的影响,为进一步丰富和完善崩岗崩积体的侵蚀机理提供依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验区概况

研究区位于福建省安溪县龙门镇(118°05'E, 24°57'N),属于亚热带气候区,年平均气温 18℃,年平均降水量 1 800 mm。该区土壤主要由花岗岩发育而成,由于土层深厚且人为活动频繁导致崩岗侵蚀现象十分普遍。根据 2005 年调查的数据,安溪县崩岗数量为 12 828 个,占福建省崩岗总数(26 024 个)的 49.28%,崩岗面积为 2 305 hm<sup>2</sup>,占福建省崩岗总面积(6 406 hm<sup>2</sup>)的 35.98%;龙门镇共有崩岗 1 228 个,密度为 7.86 个/km<sup>2</sup>,崩岗侵蚀面积 264.77 hm<sup>2</sup>,数量和面积分别占安溪县的 9.57%和 11.48%,崩岗侵蚀剧烈,治理难度大,是福建省崩岗最发育的地区之一;在南方崩岗发生区,龙门镇的崩岗侵蚀也具有典型性和代表性。

### 1.2 土样的采集及性质

试验土壤取自福建省安溪县龙门镇洋坑村,为花岗岩发育的崩岗崩积土,土壤理化性质如下:土壤 pH 值为 5.19;有机质含量低,为 1.68 g/kg;阳离子交换量(CEC)低,为 1.07 cmol/kg;砾石(>2 mm)含量高,可达到 35.26%,<2 mm 的颗粒以砂粒、粉粒为主,黏粒含量低,砾石:砂粒:粉粒:黏粒=1:0.95:0.84:0.12;无大团粒结构,>0.25 mm 微团聚含量低,为 13.40%,土壤质地疏松,结构性差。

### 1.3 试验设计

结合安溪县降雨特征和崩岗崩积体的坡度调查,采用双因素完全试验设计。根据野外调查可知,崩岗崩积体的坡度主要集中在 20°~40°,所以试验坡度设计为 20°,25°,30°,35°,40°。根据研究区常年的降雨数据设定雨强为 1.5 mm/min,设定崩积体上方来水

坡面长度分别为 3,6,9,12 m,坡面宽度为 1 m,坡面径流系数为 0.8 的条件下,对应的上方来水量分别为:3.6,7.2,10.8,14.4 L/min。试验重复 1 次,共计 40 场次。

### 1.4 试验设备及试验过程

试验土槽为固定式可变坡钢槽,坡度变化范围为 0~40°,土槽长 5 m,深 1 m,宽 2 m,土槽按宽 1 m 分成两个槽。试验土槽上方分别放置一个与其同宽的溢流槽,保证试验中水能均匀地从溢流槽流出,试验水源来自容积为 10 m<sup>3</sup> 的不锈钢水罐,可满足试验用水需求。所有试验土样经自然风干并过 10 mm 筛,以除去杂草和石块。在填土之前,先在土槽底部铺 60 cm 厚细沙,并铺上透水纱布,以保持试验土层的透水状况接近天然坡面,然后在沙层上填 30 cm 的试验用土。为保证试验用土容重均匀,填土时采用分层填土并压实,每次填土厚度为 5 cm,土壤容重控制在 1.33~1.47 g/cm<sup>3</sup>,平均容重 1.40 g/cm<sup>3</sup>,标准差为 0.04。试验前一天,用 0.5 mm/min 雨强进行降雨至坡面产流为止,放置 18 h 后进行试验,这样既能使试验土壤水分接近自然状态,又能保证各场次试验前期土壤含水率保持一致。试验前土壤质量含水量为 23.97%~27.56%,土壤平均含水量为 25.84%,标准差为 1.16。每次试验开始前,采用定水头控制流量的方法通过阀门控制流量,并用标有刻度的径流桶率定上方来水量 3 次,在精度均达到 95% 以上后再进行试验;试验开始后,水流通过自制的溢流槽进行稳流和消能,然后流经防渗布,使水流在坡面上尽可能均匀分散,坡面产流后记录产流时间,产流开始时刻记为 0。径流泥沙样在产流后每 1 min 接取 1 次,径流桶接收全部径流和泥沙。单场次试验持续时间为 20 min。径流量用量筒直接测量,泥沙用称重和烘干法(105℃)测定;输沙率为单位时间内坡面的产沙量;含沙量为单位体积的浑水中所含的干沙的质量。

### 1.5 模型精度检验

本文利用模型有效系数(ME)<sup>[8]</sup>来检验产沙量及含沙量的模型拟合效果,计算方法为:

$$ME=1-\sum(Q_i-Q_a)^2/\sum(Q_i-Q_m)^2 \quad (1)$$

式中:ME——模型有效系数; $Q_i$ ——第  $i$  个样本实测值; $Q_a$ ——第  $i$  个样本计算值; $Q_m$ ——实测值平均值。

### 1.6 数据分析与处理

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 进行数理统计与分析。方差分析、相关性分析和绘图等通过 Excel 2007 进行完成。回归、非线性拟合检验等利用 SPSS 18.0 进行完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同上方来水和坡度下崩积体坡面产沙量研究

#### 2.1.1 不同上方来水和坡度下产沙量特征

不同上方来水和坡度条件下崩积体坡面产沙量变化曲线如图1所示,结果表明产沙量过程大致可分为以下三个阶段:第一,产沙量逐步递增阶段。发生在产流后7 min内,且为坡面形成细沟侵蚀的时间。同一上方来水量时,随着坡度的增大,径流的流速和径流切应力增大,径流对坡面土壤的侵蚀力增强,产沙量逐步递增。同时,产沙量达到前期峰值的时间也随着坡度的增大而变短。第二,产沙量波动变化阶段。在大坡度(30°,35°,40°)、小流量(3.6,7.2 L/min)和大流量(10.8,14.4 L/min)、小坡度(20°,25°)时,波动变化阶段在8~16 min;在大坡度(30°,35°,40°)、大流量(10.8,14.4 L/min)时,波动变化阶段一直持续到试

验结束。波动变化阶段即为细沟侵蚀形成后的阶段,且上方来水量和坡度越大,产沙量的波动性越强烈。这主要因为:随着坡度和上方来水的增大,崩积体坡面土体自身的稳定性降低,径流的流速和切应力增大,细沟的发育更加迅速和复杂,沟壁崩塌土体量也更多,常常会阻塞沟道,而后分多次被水流侵蚀搬运。第三,产沙量稳定阶段。该阶段土壤坡面的细沟侵蚀已发育成熟,细沟内径流挟沙能力稳定,产沙量也趋于稳定状态。

崩积体坡面产沙量变化过程与张乐涛等<sup>[5]</sup>利用模拟径流对工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程进行的研究结果非常相似,这是因为两者的试验土壤均具有质地疏松、结构性差、极易被水流冲蚀搬运的特点。李宏伟等<sup>[9]</sup>对煤田原地地面侵蚀产沙规律的研究结果表明,坡面产沙量曲线的波动性随着坡面径流量和坡度的增大而越来越剧烈,这与本试验的研究结果一致。

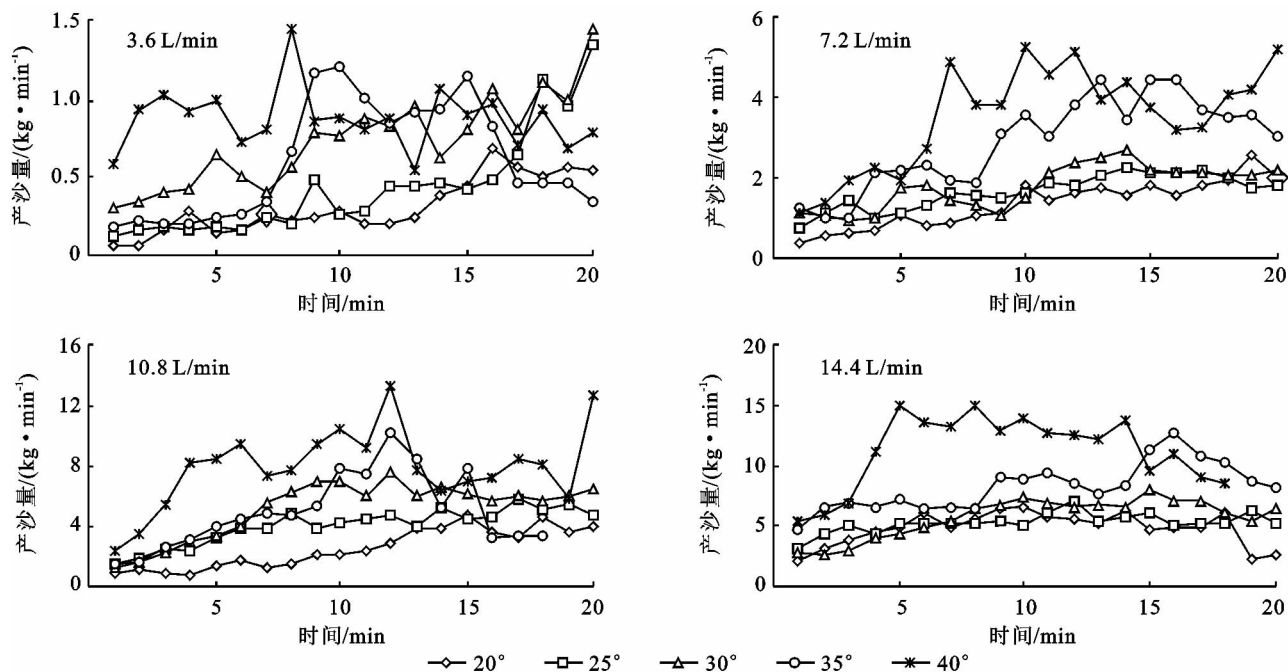


图1 不同上方来水和坡度下产沙量随时间变化

2.1.2 上方来水和坡度对产沙量的影响 已有试验研究表明,随着上方来水和坡度的增大,径流的冲刷能力增强,产沙量也随之增大<sup>[3,10]</sup>,本试验的研究结果也表现出相同的规律(图2)。由图2可以看出,20°,25°和30°时产沙量随上方来水的增大呈幂函数关系,而35°和40°时产沙量随上方来水的增大却呈对数函数关系。由此可以看出:在小坡度时,小流量条件下产沙量增加幅度较小,但在大流量条件下产沙量增加迅速;在大坡度时,小流量条件下产沙量增加的幅度较大,但在大流量条件下增加的幅度趋于缓和。

由图2可知,3.6 L/min 流量下,产沙量随坡度

的增大表现为增大—减小—稳定的趋势,可见该条件下产沙量对坡度响应的临界坡度在35°附近。罗斌等<sup>[11]</sup>通过理论分析结果表明花岗岩地区工程边坡侵蚀也存在临界坡度(35°~43°)。但在7.2,10.8,14.4 L/min 流量条件下,产沙量均随着坡度的增大而增大,且流量越大,产沙量的增加速度越快;另外,在坡度小于30°时产沙量增加速度缓慢,大于30°后随坡度的增大产沙量迅速增加,说明坡度在20°~30°时,坡度对产沙量的影响较小,坡度大于30°后,坡度对产沙量的影响作用急剧增强。出现这一现象的原因可能是:在流量为7.2 L/min,坡度达到30°附近时,崩积

体坡面的径流冲刷力刚好打破崩积体土体综合受力稳定状态的极限值,因此满足或大于该条件时坡面产沙量急剧增加。在 7.2,10.8,14.4 L/min 流量条件下没有临界坡度的出现,这可能是由于其临界坡度不在本试验研究的坡度范围内,具体临界坡度需进一步深入研究。

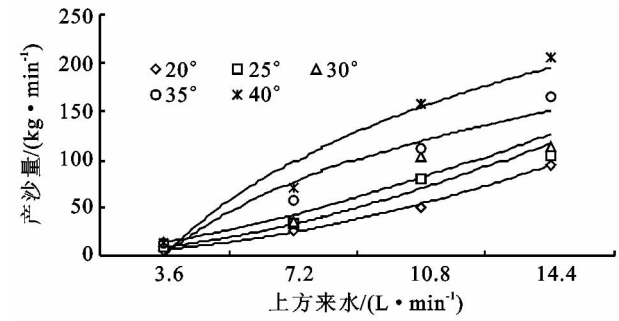


图 2 不同上方来水和坡度下产沙量的变化

通过双因素方差分析可知,上方来水和坡度对产沙量的影响均达到极显著水平,且上方来水对产沙量的影响大于坡度( $F_{流量}=32.84, F_{0.01}=5.95; F_{坡度}=5.79, F_{0.01}=5.41$ )。

2.2 不同上方来水和坡度下崩积体坡面含沙量研究

2.2.1 不同上方来水和坡度下含沙量特征 土壤侵蚀过程是土壤本身属性所决定的抗蚀能力与径流能量相互作用的结果,对于特定下垫面来说土壤属性基本一致,因而径流冲刷能力决定了整个产沙过程,影响径流冲刷能力的因素主要有径流量、坡度以及径流动能等,含沙量可以很好地体现一次试验过程中各时段的水沙关系<sup>[10]</sup>。由图 3 分析可知,崩积体坡面径

流含沙量的变化过程具有以下几个特征:第一,在不同上方来水条件下径流含沙量的变化趋势不同。3.6,7.2,10.8 L/min 流量下的径流含沙量随时间整体上表现为减小—增大—减小—趋于稳定;14.4 L/min流量下的含沙量随时间表现为增大—减小—趋于稳定。两种情况下的稳定状态均具有波动性,且坡度越大波动性越明显。第二,试验初期含沙量减小过程主要发生在试验前期 3~5 min 内,此间水流主要搬运坡面表层的松散物质,水流作用力较不稳定。之后坡面出现细沟,水流沿细沟逐渐汇聚,径流侵蚀力逐渐增强并对土壤颗粒进行分散、侵蚀和搬运,且随着坡度和流量的增大,径流挟沙能力也越来越强,含沙量也随之增大,当坡面细沟发育成熟后,径流含沙量也逐渐趋于稳定,但稳定具有波动性,这主要是因为:细沟侵蚀形成后,冲蚀沟发育迅速,径流对沟底和沟壁的侵蚀冲刷作用剧烈,使沟壁发生崩塌现象,导致径流含沙量出现时大时小的变化。第三,崩积体坡面含沙量曲线大致可分为平缓型和多峰型。其中平缓型主要发生在小坡度(20°和 25°)的所有流量条件下;多峰型主要发生在小流量大坡度和大流量大坡度条件下。

钱宁<sup>[12]</sup>将日平均含沙量大于 400 kg/m<sup>3</sup>(即 0.4 g/ml)作为高含沙水流的标准。由图 3 可看出,在 20°,25°和 30°条件下,崩积体坡面流基本都属于低含沙水流;在 35°和 40°条件下,崩积体坡面流均属于高含沙水流,这与张乐涛等<sup>[5]</sup>利用模拟径流对工程堆积体土壤侵蚀过程进行的研究结果相似。

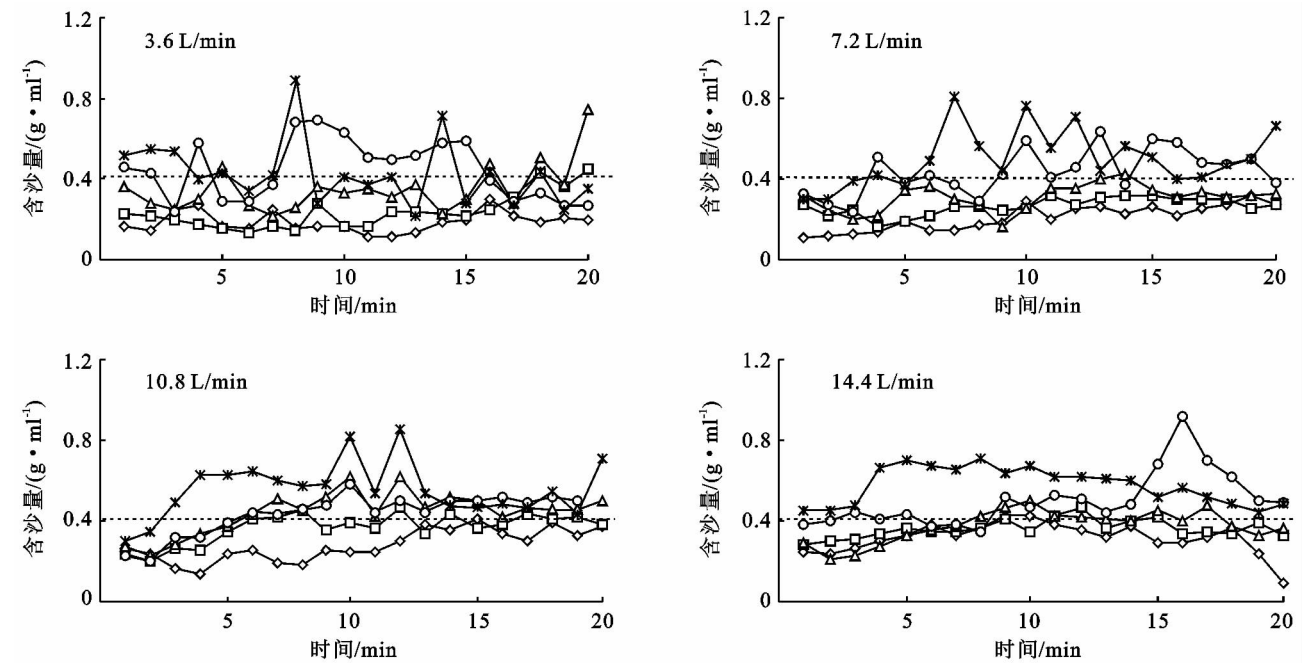


图 3 不同上方来水和坡度下含沙量随时间变化(图中虚线为高含沙水流标准线,0.4 g/ml)

2.2.2 上方来水和坡度对含沙量的影响 在某一特定水动力条件下,径流所能挟带泥沙的最大数量叫做挟沙力,它是径流侵蚀、泥沙输移的控制性参数之一,也是判别地表径流对坡面冲刷或淤积的重要依据<sup>[13]</sup>,当径流含沙量小于径流挟带含沙量极值时,径流对坡面产生侵蚀;当径流含沙量等于其含沙量极值时,径流不对坡面产生侵蚀;当径流含沙量大于其含沙量极值时,泥沙会在坡面产生淤积<sup>[14]</sup>。

由图4可以看出,在坡度一定时,含沙量随上方来水的增大整体上呈先增大后趋于稳定的趋势。尤其是在流量大于10.8 L/min后,各坡度的平均含沙量变化趋于稳定,这说明大流量条件下坡面挟沙能力已经达到极限值,随着上方来水的增大径流含沙量趋于一个恒值。由此可见,大流量条件下崩积体坡面土壤颗粒更容易被分离,形成各坡度条件下的最高含沙水流,且随坡度的增大,径流的最高含沙量也增大。综上所述,可推断10.8 L/min流量是崩积体土壤坡面产生含沙量极值的阈值流量。

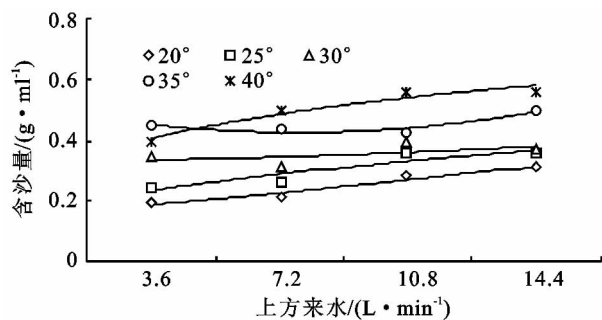
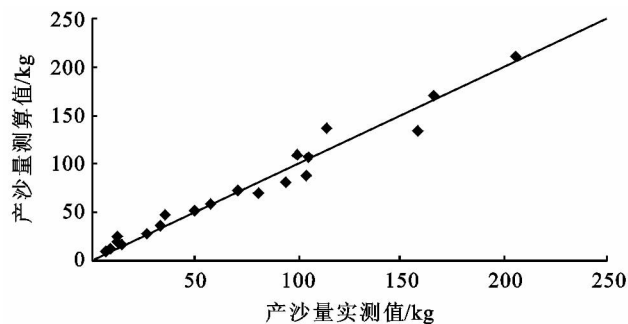


图4 不同上方来水和坡度下径流含沙量的变化



由图4可知,在3.6 L/min流量下的含沙量随坡度的增大呈先增大后减小,这说明小流量下的径流挟沙力存在临界坡度,这与刘力<sup>[15]</sup>对紫色土和黄土坡耕地的研究结果一致。在其余流量条件下,含沙量整体上随坡度的增大而增大,这主要是因为随着坡度的增大,土体的稳定性降低,更易被水流破坏侵蚀,因此用于分散土壤颗粒的能量降低,用于运移泥沙的能量则明显增多,径流的含沙量也随之增大;此外,其余流量条件下没有出现临界坡度,这可能是因为大流量的径流挟沙力临界坡度超出本试验的研究坡度范围,还需进一步研究。通过双因素方差分析可知,上方来水对含沙量的影响达到了显著水平,而坡度对含沙量的影响达到了极显著水平,说明坡度对含沙量的影响大于上方来水( $F_{\text{流量}}=5.78, F_{0.05}=3.49, F_{0.01}=5.95; F_{\text{坡度}}=21.99, F_{0.01}=5.41$ )。

### 2.3 崩积体产沙量及含沙量的模拟

通过对不同上方来水和坡度条件下的土壤侵蚀试验结果进行多元统计分析,获得崩积体坡面次冲刷侵蚀泥沙量和含沙量的经验方程,分别为:

$$S_y = 0.021q^{1.550}S^{1.147} \quad (2)$$

$$S_c = 6.879q^{0.201}S^{0.878} \quad (3)$$

式中: $S_y$ ——产沙量(kg); $S_c$ ——含沙量(g/L); $q$ ——单宽流量[L/(min·m)]; $S$ ——坡度的正切值(%)。

利用测算所得的结果与实测结果拟合效果见图5。对产沙量和含沙量的模拟效果显著,模型有效系数分别为0.966和0.877,说明可以应用公式(2),(3)对崩积体坡面的产沙量和含沙量进行预测。

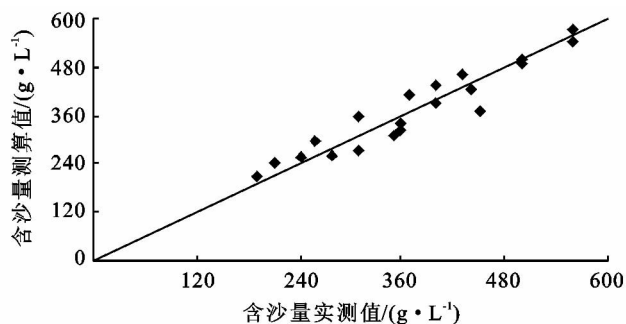


图5 产沙量及含沙量实测值与测算值的比较

## 3 结论

(1) 崩积体坡面侵蚀产沙过程可分为逐步递增阶段、波动变化阶段和稳定阶段。在不同上方来水和坡度条件下径流含沙量的变化趋势不同,径流含沙量曲线包括小坡度(20°和25°)所有流量条件下的平缓型和小流量大坡度及大流量大坡度条件下的多峰型。

(2) 在20°,25°和30°条件下,崩积体坡面流基本

都属于低含沙水流,产沙量随上方来水的增大呈幂函数关系;在35°和40°条件下,崩积体坡面流均属于高含沙水流,产沙量随上方来水的增大呈对数函数关系。上方来水和坡度对产沙量、含沙量的影响均达到显著或极显著水平,且上方来水对产沙量的影响大于坡度,而坡度对含沙量的影响大于上方来水。

(3) 可利用上方来水和坡度对崩积体的产沙量和含沙量进行较好的预测,模型有效系数分别达到了

0.966 和 0.877。模型有助于定量评价崩积体坡面土壤侵蚀的影响因子,为崩积体治理的施工设计提供科学理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 阮伏水. 福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J]. 山地学报, 2003, 1(6): 675-680.
- [2] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 49-54.
- [3] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 86-89, 229.
- [4] Fox D M, Bryan R B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient [J]. Catena, 2000, 38(3): 211-222.
- [5] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 145-153.
- [6] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000.
- [7] Fu S, Liu B, Liu H, et al. The effect of slope on interrill

erosion at short slopes[J]. Catena, 2011, 84(1): 29-34.

- [8] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models. part I: A discussion of principles[J]. Journal of hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [9] 李宏伟, 王文龙, 王贞, 等. 神东煤田原地地面侵蚀产沙规律野外降雨试验[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(2): 195-201.
- [10] 于国强, 李占斌, 李霞, 等. 野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 10-14.
- [11] 罗斌, 陈强, 黄少强. 南方花岗岩地区坡面侵蚀临界坡度探讨[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 67-70.
- [12] 钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [13] 田凯, 姚文艺, 李小青. 坡面沟道水力侵蚀及黄土坡沟耦合系统径流输沙能力试验研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- [14] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [15] 刘力. 紫色土和黄土坡耕地土壤侵蚀过程对比研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006.

(上接第 10 页)

- [17] 李小昱, 雷延武, 王为. 农田土壤特性的空间变异性及分形特征[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 61-65.
- [18] 薛冬, 姚槐应, 何振立, 等. 红壤酶活性与肥力的关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1455-1458.
- [19] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 53-56.
- [20] Vieira, S R Hatfield J L, Nielsen D R. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties[J]. Hilgardia, 1982, 51(3): 74-75.
- [21] 陈玉福, 于飞海, 董鸣. 毛乌素沙地沙生半灌木群落的空间异质性[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 568-572.
- [22] 王存国, 韩士杰, 张军辉, 等. 长白山阔叶红松林表层土壤水分空间异质性的地统计分析[J]. 应用生态学

报, 2010, 21(4): 849-855.

- [23] 刘春利, 胡伟, 贾宏福, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1211-1219.
- [24] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
- [25] Ettema C H, Wardle D A. Spatial soil ecology[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2002, 17(4): 177-183.
- [26] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 降雨对地表糙度影响的研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 151-154.
- [27] 张霞, 贾莲莲, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下地表糙度动态变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 16-20.