

# 不同坡长条件下楼土堆积体坡面产流产沙过程

张翔<sup>1</sup>, 高照良<sup>2</sup>

(1. 萍乡学院, 江西 萍乡 337000; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为揭示不同坡长条件下楼土堆积体坡面产流产沙过程,通过不同坡度、不同坡长(4, 8, 12, 16, 20 m)条件下的野外模拟径流冲刷试验,对楼土堆积体坡面产流产沙过程进行了分析。结果表明:工程堆积体坡面产流率随放水时间持续呈现波动性增大,随着坡长增大,产沙率波动振幅也变大。径流含沙量随着放水时间的持续呈现先减小而后保持稳定变化,随着坡长增大,含沙量呈递增变化。工程堆积体坡面累积产流量随放水时间的变化可以用线性函数表达,累积产沙量与放水时间呈极显著幂函数关系,累积产沙量和累积产流量均随着坡长的增大呈现递增变化。试验坡度、坡长均对坡面累积产流产沙量具有重要的影响,坡长对坡面累积产流产沙的影响大于坡度,二者均对累积产流产沙量产生正效应。

**关键词:**楼土; 工程堆积体; 产流产沙; 径流冲刷

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0079-06

## Processes of Runoff and Sediment Yield on the Slopes with Different Lengths on Lou Soil Mound

ZHANG Xiang<sup>1</sup>, GAO Zhaoliang<sup>2</sup>

(1. Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi 337000, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to reveal the processes of runoff and sediment yield on the slopes with different lengths on Lou soil mound, through the field simulated runoff-scouring experiment under the conditions of different slopes and different slope lengths (4, 8, 12, 16, 20 m), the processes of runoff and sediment yield on the slope of Lou soil mound were analyzed. The results show that the flow rate on the slope of the engineering mound increases with the constant fluctuation over the water discharge scouring time. With the increase of slope length, the amplitude of fluctuation of sediment yield is larger. The sediment concentration of runoff decreases first and then keeps stable over the water discharge scouring time. With the increase of slope length, the sediment content increases. The cumulative flow rate on the slope of engineering mound with the change of the time of water drainage can be expressed using linear function. There is a very significant power function relationship between cumulative sediment yield and water drainage time. Both of them show the increasing change with the increase of the slope length. The test slope and the length of the slope have the important influences on the cumulative runoff yield and sediment yield. The effect of slope length on cumulative runoff and sediment yield is greater than that of slope gradient, and all of the two factors have the positive effect on cumulative runoff and sediment yield.

**Keywords:** Lou soil; engineering mound; runoff and sediment; runoff scouring

工程堆积体已成为生产建设项目新增水土流失最主要的泥沙策源地<sup>[1-2]</sup>,碾压密实的堆积平台也为堆积体边坡土壤侵蚀的发生提供了充足的汇水面积。堆积体坡面土壤侵蚀已然严峻,但作为影响坡面径流

与水流侵蚀产沙过程的重要地貌因素之一的坡长,分析其对堆积体坡面产流产沙过程的影响显得尤为必要<sup>[3]</sup>,此研究对建立土壤侵蚀预报模型、制订合理、有效的水土保持体系有着重要的理论价值。

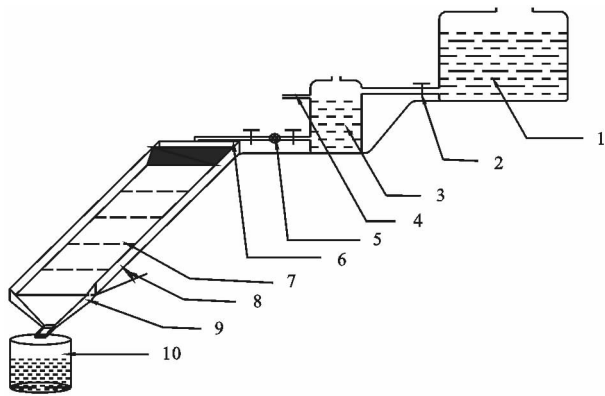
至于坡长对坡面产流产沙的影响,其实各国学者均已展开过深入的研究,但所得到的结论却莫衷一是。Lal<sup>[4]</sup>通过对尼日利亚的淋溶土研究表明,单位面积径流量是随着坡长的增加而减少的,年均径流量与坡长呈显著的幂函数关系。Truman 等<sup>[5]</sup>分别对 0.6, 3, 43 m 共 3 个坡长的野外小区进行研究,表明,径流量和泥沙含量均与坡长存在显著相关性,一旦达到临界坡长,细沟侵蚀便开始发生,细沟在 0.6 m 坡长上未出现,在 3 m 坡长上细沟出现并不起主导作用,43 m 的坡长的细沟侵蚀量远大于前两个坡长。蔡强国<sup>[6]</sup>的研究揭示出,径流量和侵蚀产沙量均随着坡长的增大而递增,但当坡长达到某一临界坡长时,单位面积的侵蚀产沙量会随着坡长的增大而递减<sup>[7]</sup>,说明当坡面径流量相同时,坡面侵蚀量存在最大值,且存在一个对应的临界坡长,但目前的研究对此临界值是否存在以及大小尚无定论<sup>[8]</sup>。黎四龙等<sup>[9]</sup>根据好几年的观测资料,探讨降雨强度变化对坡长与侵蚀量关系的影响程度表明:小雨强情况下,产沙量随着坡长的增大呈缓慢增大趋势,雨强较大情况时,产沙量随坡长的增大递增幅度更大。郭新亚等<sup>[10]</sup>对黔西北地区坡面进行试验研究表明,径流量随坡长的增大呈上下波动的变化趋势,产沙量随坡长的增大而递增,且产沙量与坡长之间存在良好的线性函数关系。

尽管前人就坡长对坡面产流产沙影响的研究比较多,但关于在不同坡长情况下工程堆积体坡面产流产沙过程的研究还甚少,分析多个坡长(5 个)对单一土壤(塬土)堆积体坡面产流产沙过程的影响更不多见。为此,选择野外堆积体坡面进行人工模拟径流冲刷试验,分析不同坡长情况下塬土堆积体坡面产流产沙过程,对堆积体坡面侵蚀产沙过程进行探讨,以期土壤侵蚀预报模型的建立提供基础数据。

## 1 材料与方法

试验地选在陕西杨凌水土保持试验站,地处国家杨凌高新技术开发区,后河右岸,地理坐标为东经 108°—108°07',北纬 34°—34°20'<sup>[11]</sup>。该地区属于大陆性季风气候,多年的平均气温在 13℃ 左右,多年平均降水量为 610.2 mm,该区的地带性土壤属于塬土,坡面重力侵蚀严重,雨季短而集中,侵蚀较为严重,小区通过在自然陡坡面进行机械开挖出试验所需坡度,在开挖坡面上建立径流小区,在径流小区内填入工程项目开挖产生的弃土弃渣,清除弃渣中的杂草和植物根系,坡面未采取任何植物和工程措施,小区坡面在水平面上的面积为 20 m×5 m。把试验收集并烘干的泥沙土壤进行室内粒径分析试验,结果可知粒径基本上都在 1 mm 以

下,土壤颗粒粒径在 <0.002 mm, 0.005~0.002 mm, 0.01~0.005 mm, 0.02~0.01 mm, 0.05~0.02 mm, 0.1~0.05 mm, 0.2~0.1 mm 范围内,对应含量依次是 24.04%, 6.64%, 9.22%, 20.29%, 35.20%, 4.51%, 0.1%。试验装置图如图 1 所示。



注:1 储水桶、2 水阀、3 恒压桶、4 溢流管、5 流量计、6 溢流槽、7 观测断面、8 坡度、9 试验小区、10 集流桶。

图 1 试验小区及放水装置示意图

试验准备期,先用铁皮把坡面竖立分割成坡宽为 1 m 的坡面,对应试验方案内的 3 个坡度、5 个坡长共计 15 个试验坡面,根据设计雨强(1.5 mm/min)和前期放水预试验情况,确定冲刷流量分别为 6, 12, 18, 24, 30 L/min。为保证试验各个坡面下垫面基本相同,对各个坡面同时进行坡面整理。为控制土壤容重和含水率,人为地对坡面进行翻挖 30 cm,然后整平、压实,并在试验前 24 h 对坡面土壤进行均匀洒水,直到坡面即将产流为止并用塑料薄膜覆盖,坡面产流后,记录下产流时间,且在试验的前 3 min 内每隔 1 min 测量 1 次断面稳定流速、水深、浑水总量、收集径流泥沙样品,3 min 以后每隔 3 min 测量 1 次各项指标。30 min 后停止放水。坡面细沟的发育情况以人工现场测量沟宽和沟深,坡面水流流速采用高锰酸钾染色示踪法。坡长为 4 m 时,流速测量间距为 0.6 m,沟深和沟宽测量间隔分别为 0.5 m;坡长为 8, 12, 16 m 时,流速测量间距均为 1.5 m,沟深和沟宽测量间隔分别为 1, 1.5, 2 m;坡长为 20 m 时,流速测量间距为 2 m,沟深和沟宽测量间隔为 2 m。用温度计测定水温,收集的径流泥沙样品采用烘干法进行处理,沟宽和沟深采用钢尺进行人工测量,试验土壤采用激光粒度分析仪分析其机械组成<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面产流率的变化过程

产流率是表征在不同坡长、坡度、雨强及下垫面等因素齐力作用下,径流对坡面土壤分离和运输的能力<sup>[13]</sup>,分析产流率的时空变化是研究坡面土壤侵蚀

的前提,在不同坡长、坡度情况下,点绘坡面产流率随时间变化的曲线图(图2)。

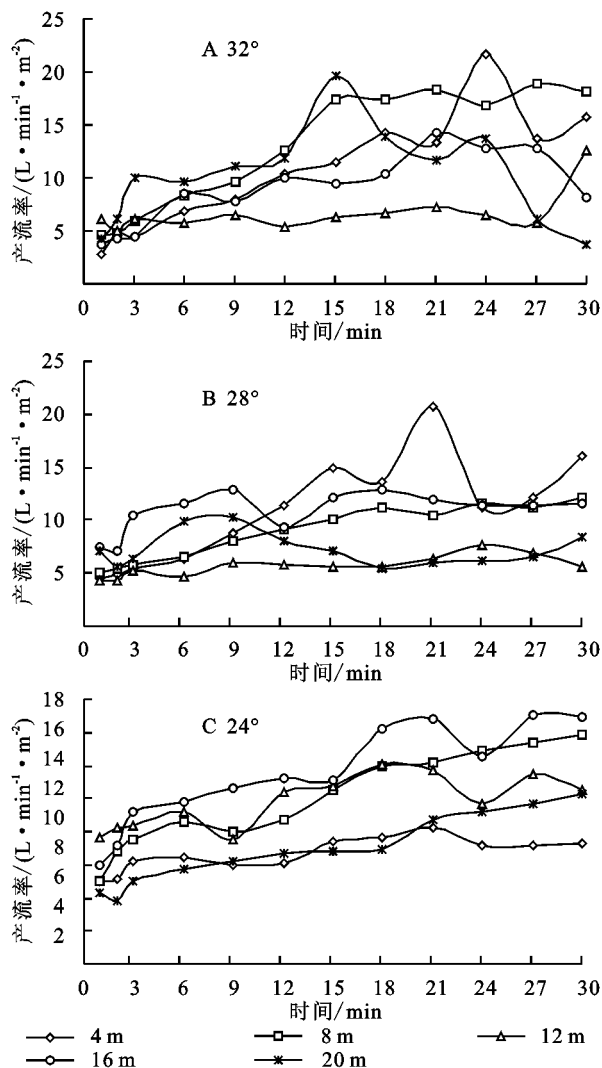


图2 产流率随放水时间的变化特征

如图2A所示,32°坡度条件下的产流率的时空变化情况如下:

(1) 产流率在0~12 min前,随放水时间的持续呈现比较稳定的增大变化,在12~30 min内,产流率随时间呈现上下波动的变化;原因是水耗因子(入渗、蒸发等)逐渐趋于稳定,以致坡面径流增大,相应的产流率逐渐递增;但在12~30 min内,产流率随时间呈上下波动变化,原因是在试验前期,坡面经过人为地整为稍凹型,诱导坡面只形成了一条细沟,过水面积内的土壤在0~12 min左右便达到饱和状态,但随着放水试验的继续,随着沟岸、沟底的不断横向纵向侵蚀,坡面不时出现沟壁倒塌冲击沟内水流形成壅水、水流加速,导致产流率陡增,而后水流稳定,产流率骤降,如此周而复始,以致产流率在此阶段呈现波动性变化。

(2) 不同坡长条件下,产流率随时间的变化并不一致,在16,20 m坡长下,产流率随产流时间的持续

均波动性比较大;在4,8,12 m坡长条件下,产流率随时间呈现整体上升并趋于稳定的状态。原因是在32°坡度、大坡长条件下,坡面水流流速逐渐加速,快速的坡面流后,坡面逐渐形成跌坎链,然而随着坡面细沟的贯通,伴随着是不断的溯源、重力和下切侵蚀,沟内时而产生土块冲击水流,致使产流率上下波动比较大,但在小坡长情况下,坡面相应的径流量较小,水流侵蚀力不足,坡面细沟发育比较缓慢,主要在试验后期才出现沟壁倒塌,因此坡面产流率在小坡长条件下,前期呈现缓慢稳定的增长趋势,在试验的中后期才出现波动。

如图2B所示,28°坡度条件下的产流率的时空变化情况如下:

(1) 产流率在0~18 min前,随冲刷历时的变化呈现稳定的递增状态,在18~30 min内,产流率随时间的变化便逐渐趋于平稳。原因是在28°坡度下,较32°坡度相比,坡面水流动能较小,径流侵蚀能力较弱,坡面水流状态从薄层流到出现跌坎链再到完整的贯通细沟需要的时间更长,由于坡面不断的侵蚀,产生新的土壤接触面,一直沟内的入渗、蒸发等水量损耗因素才逐渐稳定,因此坡度下的产流率在18 min前随时间呈现逐渐增大的趋势;由于在18 min左右,坡面细沟已形成,沟内水流形态也趋于稳定,所以在18~30 min内,产流率随冲刷历时的进行逐渐趋于稳定。

(2) 不同坡长条件下,产流率随时间的变化并不一致,在16,20 m坡长下,产流率在0~18 min前的波动性较大,在18 min后便逐渐趋于稳定;在4,8,12 m坡长条件下,产流率在0~18 min前稳步递增,在18 min后才稍有波动。原因是在大坡长条件下,试验初期坡面水流流速迅速增大,坡面水流的径流侵蚀能力较大,很快形成跌坎并贯通细沟,而且由于侵蚀能力大,沟内沟壁时有坍塌,导致前18 min产流率呈现波动性变化,在坡面细沟基本形成,沟内水流形态也趋于稳定,才逐渐趋于稳定;在小坡长情况下,坡面相应的径流量较小,水流侵蚀力不足,坡面细沟发育比较缓慢,主要在试验后期才出现沟壁倒塌,所以出现先递增在逐渐稳定的趋势。

如图2C所示,24°坡度条件下的产流率的时空变化情况如下:

(1) 产流率在前3 min出现陡增,然后是随着放水时间的持续表现为略带波动的稳步增大。出现此现象的原因可能是:在前3 min时,坡面水流状态还是薄层坡面流,并未产生跌坎,加上坡面经过人工平整,坡面比较光滑,水流受到的阻力较小,因此阶段产流率的增幅较大,而后坡面逐渐出现跌坎,此时坡面

水流阻力增大,坡面水流流速降低,才导致产流率随冲刷历时的持续呈现稳步增大,加上一个个的跌坎产生跌坎链并逐步贯通成细沟,沟内不时出现沟壁坍塌,导致某些时刻会出现骤增骤降,从而形成产流率随时间呈现略微的波动变化。

(2) 不同坡长条件下,产流率随时间的变化规律基本一致,这表明在  $24^\circ$  坡度下,不同坡长的坡面径流量都比较稳定,坡长对产流率的影响不明显。

## 2.2 产沙率变化过程

产沙率表示单位时间内坡面径流侵蚀所挟带的泥沙,分析产沙率随时间的时空变化,有利于进一步了解工程堆积体坡面土壤侵蚀的动态过程。不同坡度、坡长情况下,点绘产沙率随时间变化曲线(图3)。

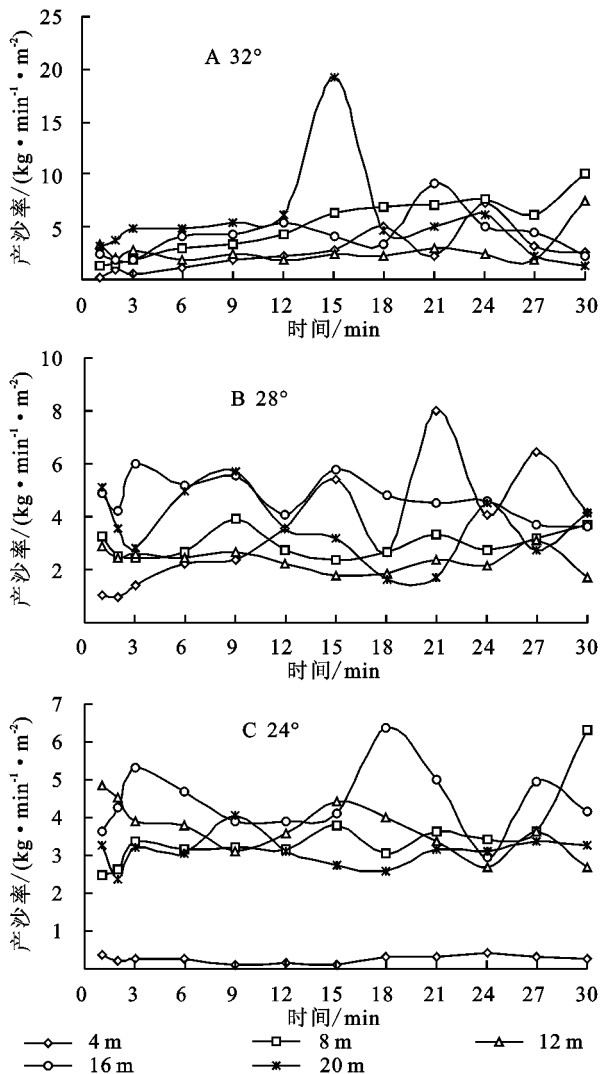


图3 产沙率随放水时间变化特征

如图3A所示, $32^\circ$ 坡面堆积体坡面细沟侵蚀产沙率的变化情况如下:

(1) 产沙率在  $0\sim12$  min 前,随着放水时间的持续呈现稍微的增大,在  $12\sim30$  min 内,产沙率随时间呈现上下波动的变化。这是因为在产流初期,堆积体

坡面表面组成物质结构松散,表层抗蚀性较差的物质较多,此阶段坡面已形成跌坎链并开始形成细沟,细沟的逐渐贯通致使产沙量有所递增。而后坡面细沟形成,为泥沙的输移提供了通道,径流剪切力较大,细沟不断往横向纵向发展,细沟沟壁倒塌冲击水流,致使此阶段产沙率随冲刷时间的持续呈上下波动的变化。

(2) 在不同坡长条件下,产沙率在  $0\sim12$  min 前,随着坡长的增加,基本呈现的是逐渐增大的趋势,在  $12\sim30$  min 内,大坡长(16, 20 m)条件下产沙率随时间的波动幅度相对小坡长(4, 8, 12 m)较大。这是因为在产流初期,随着坡长的增大,整体表层可侵蚀物质更多,相应坡面侵蚀量也更大,因此产沙率在此阶段随着坡长的增大是呈现递增趋势的;而后在大坡长(16, 20 m)条件下坡面水流流速较大,坡面侵蚀很快转向细沟侵蚀,加上水流侵蚀力、剪切力相应较大,细沟沟壁坍塌更严重,以致大坡长情况下产沙率随时间的波动幅度大于小坡长情况下。

如图3B所示, $28^\circ$ 坡面堆积体坡面细沟侵蚀产沙率的变化情况如下:

(1) 产沙率随着放水时间的持续呈显著的上下跳跃波动变化,这是因为在  $28^\circ$  坡度下,坡面水流在不同坡长条件下均能达到较大的流速和剪切力,很快坡面形成细沟,加上细沟的不断侵蚀,细沟沟壁不时的坍塌引起产沙率整体上的上下跳跃波动。

(2) 不同坡长条件下产沙率随放水时间的变化过程并不一致的,4 m 坡长情况下,产沙率在  $0\sim9$  min 内表现着稳定的上升,后期便出现跳跃波动特征;其他坡长(8, 12, 16, 20 m)情况下,产沙率基本在整个试验过程均表现出上下波动特征。这是因为对应  $28^\circ$  的坡度在 4 m 坡长情况下,坡面水流侵蚀能力相对较小,坡面土壤侵蚀过程较缓慢,可以观察到坡面水流形态从坡面流到细沟流的变化过程,此阶段也就是产沙率增大的阶段,而后侵蚀加剧,沟道下切、沟壁扩张,甚至沟壁塌陷,导致后期产沙率出现跳跃波动的情况;在其他坡长条件下,由于坡面呈微凹型,在产流初期坡面便已形成一条细沟,因此在整个试验过程均表现为上下波动特征。

如图3C所示, $24^\circ$ 坡面堆积体坡面细沟侵蚀产沙率的变化情况如下:

产沙率在坡长(8, 12, 16, 20 m)条件下,随着放水时间呈现上下波动变化,这与其他两个坡度情况一致,都是由于发生细沟侵蚀,细沟沟壁坍塌、沟岸扩张引起的。但产沙率在 4 m 坡长情况下,整个试验过程基本上呈现平稳不变的趋势,出现这种情况的原因是在此坡度、坡长条件下,整个试验过程坡面细沟侵

蚀不显著,只出现少量的跌坎,由此也可得出在 24° 坡度条件下,细沟发生的临界坡长还应在 4 m 以下。

2.3 坡面含沙量变化过程

含沙量作为表征坡面土壤侵蚀程度的重要参数<sup>[14-15]</sup>,探讨含沙量在坡面上的时空变化具有一定的现实意义。点绘不同坡度、坡长条件下,含沙量随时间的变化曲线如图 4 所示。

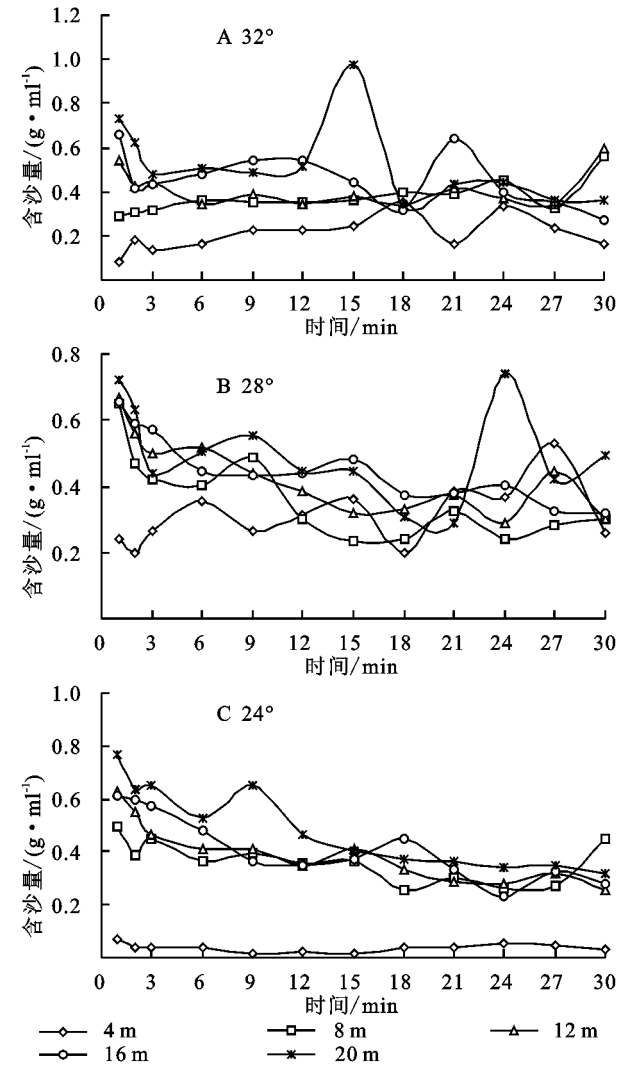


图 4 含沙量随放水时间变化特征

由图 4 可以看出,含沙量随放水时间呈现的是先减小而后保持稳定的趋势,这是由于产流初期,表层土质疏松,表层侵蚀严重,因此含沙量大,随着坡面细沟的形成,下层土壤抗蚀能力大,侵蚀速率变缓,因此含沙量呈现先减小而后保持稳定。

通过进一步分析不同坡度不同坡长条件下,含沙量平均值的变化规律可知,在 32°坡度条件下,4,8,12,16,20 m 坡长对应的平均含沙量分别为 0.21,0.37,0.41,0.46,0.52,在 28°坡度条件下,4,8,12,16,20 m 坡长对应的平均含沙量分别为 0.31,0.36,0.42,0.45,0.50,在 24°坡度条件下,4,8,12,16,20 m 坡长对应的平均含沙量分别为 0.04,0.36,0.39,

0.41,0.49。由具体的数据可知,在不同坡度条件下,平均含沙量均随着坡长的增加呈现递增的趋势,且 24°坡度、4 m 坡长对应的坡面水流平均含沙量显著偏低。出现这种情况的原因是随着坡长的增大,坡面表层可侵蚀物质更多,相应坡面侵蚀量也更大,对应坡面水流含沙量也逐渐增大,对于 24°坡度、4 m 坡长出现的情况,是因为坡面细沟侵蚀不显著,坡面水流仅侵蚀坡面少量松散物质,由试验测量沟深偏低也可知,坡面水流含沙量显著偏低。

2.4 坡面累积产流量和产沙量变化过程

2.4.1 累积产流量变化过程 为探讨坡面累积产流量随时间的关系,拟合不同坡度、坡长条件下累积产流量与时间函数关系(表 1)。

由表 1 可知,坡面累积产流量与放水时间的关系能很好地用线性方程表达,累积产流量随着放水时间呈现不断增大的趋势。在 32°坡度条件下,累积产流量的增长率随着坡长增大依次为 4.05,10.45,8.91,25.07,29.75 L/min,8,12 m 和 16,20 m 这两组坡长条件下,累积产流量的增长率差异性不大;在 28°坡度条件下,累积产流量的增长率随着坡长增大依次为 4.14,10.06,8.32,23.78,23.09 L/min,同样 8,12 m 和 16,20 m 两组坡长条件下的增长率互相差异不大;在 24°坡度条件下,累积产流量的增长率随着坡长增大依次为 3.75,9.87,16.48,23.24,20.79 L/min,16,20 m 坡长条件下的增长率互相差异不大;综合来看,累积产流量随着坡长的增大总体是增大的,但受坡度的影响,会使增长率在有些坡长之间不存在递增现象。在 4 m 坡长下,增长率按坡度增大顺序依次为 3.75,4.14,4.05 L/min,在 8 m 坡长下,增长率按坡度增大顺序依次为 9.87,10.06,10.45 L/min,在 12 m 坡长下,增长率按坡度增大顺序依次为 16.48,8.32,8.91 L/min,在 16 m 坡长下,增长率按坡度增大顺序依次为 23.24,23.78,25.07 L/min,在 20 m 坡长下,增长率按坡度增大顺序依次为 20.79,23.09,29.75 L/min,整体来看,累积产流量随时间的增长率,在同一坡长情况下,基本上是随着坡度的增大而增大的。

2.4.2 累积产沙量变化过程 为探讨累积产沙量随时间的变化规律,拟合试验条件下累积产沙量与时间的函数关系(表 2)。

由表 2 可知,坡面累积产沙量与放水时间呈现极显著的幂函数关系,表明随着时间的增加,累积产沙量是在不断增大的,通过拟合方程对应的具体试验数据可知,在 32°,28°坡度条件下,累积产沙量随着坡长的增大呈现递增的趋势,但在 8,12 m 两坡长情况下,二者的累积产沙量差异不大;在 24°坡长情况下,

累积产沙量随着坡长的增大均呈递增状态。这可能是因为是在稍大坡度(28°, 32°)情况下,坡面水流流速较大,侵蚀能力较强,导致 8, 12 m 坡长的细沟水流产沙量相似,因此累积产沙量情况相差不大。

表 1 累积产流量  $M_Q$  与放水时间  $t$  拟合函数关系

坡度/(°)	坡长/m	拟合方程	$R^2$
32	4	$M_Q = 4.05t + 4.18$	0.99**
	8	$M_Q = 10.455t - 13.55$	0.99**
	12	$M_Q = 8.91t + 9.81$	0.99**
	16	$M_Q = 25.07t - 17.60$	0.99**
	20	$M_Q = 29.75t + 14.21$	0.99**
28	4	$M_Q = 4.14t - 3.54$	0.99**
	8	$M_Q = 10.06t - 7.77$	0.99**
	12	$M_Q = 8.32t + 4.30$	0.99**
	16	$M_Q = 23.78t + 0.64$	0.99**
	20	$M_Q = 23.09t + 35.20$	0.99**
24	4	$M_Q = 3.75t + 1.60$	0.99**
	8	$M_Q = 9.87t - 3.87$	0.99**
	12	$M_Q = 16.48t + 8.06$	0.99**
	16	$M_Q = 23.24t + 4.96$	0.99**
	20	$M_Q = 20.79t + 8.14$	0.99**

注:样本数  $n=12$ , 其中\*表示( $p<0.05$ ), \*\*表示( $p<0.001$ ), 下表同。

表 2 累积产沙量  $M_S$  与放水时间  $t$  拟合函数关系

坡度/(°)	坡长/m	拟合方程	$R^2$
32	4	$M_S = 0.23t^{1.44}$	0.99**
	8	$M_S = 1.67t^{1.24}$	0.99**
	12	$M_S = 7.31t^{0.78}$	0.99**
	16	$M_S = 8.50t^{1.11}$	0.99**
	20	$M_S = 22.37t^{0.91}$	0.99**
28	4	$M_S = 0.62t^{1.23}$	0.99**
	8	$M_S = 5.03t^{0.87}$	0.99**
	12	$M_S = 6.67t^{0.81}$	0.99**
	16	$M_S = 16.62t^{0.85}$	0.99**
	20	$M_S = 23.86t^{0.79}$	0.99**
24	4	$M_S = 0.25t^{0.77}$	0.99**
	8	$M_S = 3.60t^{0.99}$	0.99**
	12	$M_S = 13.60t^{0.77}$	0.99**
	16	$M_S = 17.25t^{0.82}$	0.99**
	20	$M_S = 18.30t^{0.83}$	0.99**

## 2.5 试验因素对产流产沙的影响

2.5.1 坡度和坡长对累积产流量和累积产沙量的影响 通过查看不同的类型工程堆积体的形态数据可知,任何一个工程堆积体都具有其不一致的形态,即不一样的坡长与坡度,且不同类型工程堆积体坡面的细沟侵蚀量迥异,坡度、坡长作为影响坡面细沟侵蚀产流产沙的基本因素,对其与产流产沙量的关系进行研究具有重要的意义,通过得出不同坡长、坡度条件对坡面产流产沙量的具体函数关系,有利于分辨各个因子对坡面细沟产流产沙量的影响程度,进一步得出主要决定因素。

$$M_Q = 2.89S^{0.36}L^{1.23} \quad R^2 = 0.88 \quad (1)$$

$$M_S = 0.05S^{0.94}L^{1.75} \quad R^2 = 0.93 \quad (2)$$

式中:  $M_Q$  表示累积产流量(L);  $M_S$  表示累积产沙量(kg);  $S$  表示坡度(°);  $L$  表示坡长(m)。

由公式(1),(2)可以看出,坡度和坡长均对坡面累积产流产沙量产生影响,且二者均对累积产流产沙量产生正效应,即随着坡度、坡长的增大,工程堆积体坡面细沟累积产流产沙量均增大;由坡度和坡长因素的指数可以发现,坡长对坡面细沟累积产流产沙量的贡献率更大,占主要决定因素。

## 3 结论

(1) 工程堆积体坡面产流率随放水时间持续呈现波动性增大的趋势,坡度和坡长对产流率的变化过程均有影响,坡面产沙率随产流时间的持续呈现上下波动的变化趋势,随着坡长的增大,产沙率的波动幅度也较大,并在 24° 坡度下,细沟侵蚀发生的临界坡长还在 4 m 以下。

(2) 径流含沙量随着放水时间的持续呈现稍微递减的波动变化,坡度对含沙量的影响不显著,随着坡长的增大,含沙量呈递增的趋势。

(3) 工程堆积体坡面累积产流量与放水时间的关系可以很好地用线性函数表达,累积产流量随着坡长的增大呈现增大的趋势,累积产沙量与放水时间呈现极显著的幂函数关系,累积产沙量随着坡长的增大呈现递增的趋势。

(4) 试验坡度、坡长均对坡面累积产流产沙量产生重要的影响,坡长对坡面累积产流产沙的贡献作用大于坡度,二者均对累积产流产沙量产生正效应。

### 参考文献:

- [1] 张翔,高照良,杜捷,等. 工程堆积体坡面产流产沙特性的现场试验[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 19-24.
- [2] 张翔,高照良,袁雪红,等. 工程堆积体坡面细沟流体力学参数特性研究[J]. 泥沙研究, 2016(4): 34-40.
- [3] 袁普金,张翔,王万君,等. 植物篱措施下工程堆积体坡面减流减沙效益研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 374-380.
- [4] Lal R. Effect of slope length on runoff from Alfisols in Western Nigeria[J]. Geoderma, 1983, 31(3): 185-193.
- [5] Truman C C, Wauchope R D. Slope length effects on runoff and sediment delivery[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2001, 56(3): 249-256.
- [6] 蔡强国. 坡长对坡耕地侵蚀产沙过程的影响[J]. 云南地理环境研究, 1998(1): 34-43.
- [7] 蔡强国. 坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J]. 泥沙研究, 1989(4): 84-91.

的大趋势<sup>[14]</sup>,这是本区气候状态的突变还是一个渐进的过程,还取决于今后进一步加强对西北脆弱带气候变化事实、降水量时空变化未来趋势的全面分析及其机制的深入研究,这无论对气象学还是国民经济发展都将是一个重大的课题。

参考文献:

[1] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2011.

[2] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定[J]. 生态学报,1989,9(2):97-105.

[3] 刘洪来,王艺萌,窦潇,等. 农牧交错带研究进展[J]. 生态学报,2009,29(8):4420-4425.

[4] 常学礼,赵爱芬,李胜功. 生态脆弱带的尺度与等级特征[J]. 中国沙漠,1999,19(2):115-119.

[5] 刘军会,高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(9):2016-2022.

[6] 汪朝辉,王克林,李仁东,等. 水陆交错生态脆弱带景观格局时空变化分析:以洞庭湖区为例[J]. 自然资源学

报,2004,19(2):240-247.

[7] 丁彩霞,延军平,李敏敏. 西北地区气候变化与风速响应特征[J]. 水土保持通报,2014,32(4):134-137.

[8] 贾文雄,何元庆,李宗省,等. 祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征[J]. 中国沙漠,2008,28(6):1151-1155.

[9] 杨金虎,江志红,魏锋,等. 近 45 a 来中国西北年极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应[J]. 干旱区地理,2006,29(5):625-631.

[10] 王遵娅,丁汇,何金海,等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报,2004,62(2):228-236.

[11] 杨蓉,延军平. 宁夏旱涝灾害对气候变化的响应[J]. 水土保持通报,2014,34(5):272-277.

[12] 左洪超,吕川华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,2004,23(2):238-244.

[13] 李双双,延军平,杨蓉,等. 气候变暖背景下 1961—2010 年宁夏旱涝灾害空间分布特征和变化规律[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1552-1559.

[14] 赵俊虎,封国林,张世轩,等. 近 48 年中国的季节变化与极端温度事件的联系[J]. 物理学报,2011,60(9):842-850.



(上接第 78 页)

[10] 朱金方,全占军,王琦,等. 乌兰木伦河径流量衰减驱动因素研究[J]. 水土保持研究,2014,21(1):34-38.

[11] 张思锋,马策,张立. 榆林大柳塔矿区乌兰木伦河径流量衰减的影响因素分析[J]. 环境科学学报,2011,31(4):889-896.

[12] 占光辉. 基于乌兰木伦河流域 SWAT 模型的植被与水资源关系研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2010.

[13] 邓飞,全占军,于云江,等. 20 年来乌兰木伦河流域植被盖度变化及影响因素[J]. 水土保持研究,2011,18(3):137-152.

[14] Gao P, Violette G., Temme A. A M, et al. A wavelet analysis of the relationship between Loess Plateau erosion and sunspots[J]. Geoderma, 2014,213:453-459.

[15] 刘二佳,张晓萍,张建军,等. 1956—2005 年窟野河径流

变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报,2013,28(7):1159-1168.

[16] 李舒,吕志方. 窟野河径流突变点分析[J]. 人民黄河,2015,37(1):27-29.

[17] 吴喜军,李怀恩,董颖. 煤炭开采对水资源影响的定量识别:以陕北窟野河流域为例[J]. 干旱区地理 2016,39(2):246-253.

[18] 高文永,高亚军,徐建华. 采矿塌陷对窟野河流域水沙的影响[J]. 人民黄河,2017,39(11):76-80,102.

[19] 王童,何海,吴志勇,等. 近 30 年来窟野河流域土地利用与植被覆盖度变化分析[J]. 水电能源科学,2017,35(11):127-130,183.

[20] 刘笑彤,蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析:以通天河为例[J]. 北京大学学报:自然科学版,2014,50(3):549-556.



(上接第 84 页)

[8] Barbosa F T, Bertol I, Werner R D S, et al. Critical slope length for water erosion for three crop residue types and rates in two sowing directions in no-till[J]. Revista Brasileira De Ciênci Do Solo, 2012, 36(4): 1279-1290.

[9] 黎四龙,蔡强国,吴淑安,等. 坡长对径流及侵蚀的影响[J]. 干旱区资源与环境,1998(1):29-35.

[10] 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.

[11] 吴淑芳,吴普特,原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报,2010,26(3):14-19.

[12] 张乐涛,高照良,田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报,2013,29(24):94-102.

[13] 齐洪亮,田伟平,舒延俊. 基于坡面径流强度的中国公路水文区划研究[J]. 公路交通科技,2010,27(3):12-16.

[14] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报,1982(3):40-44.

[15] 李小昱,雷廷武,王为. 电容式传感器测量水流泥沙含量的研究[J]. 土壤学报,2002,39(3):429-435.