

# 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究

吴普特 周佩华

中国科学院  
水利部 西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100

## 提 要

该文从薄层水流侵蚀的动力入手,分别研究了薄层水流侵蚀动力及雨滴击溅与薄层水流动力共同作用下地表坡度与薄层水流侵蚀量的关系。结果表明:仅在薄层水流动力作用下,侵蚀量随地表坡度的递增而递增,二者呈幂函数关系,且递增速率随雨强、地表坡度的递增而增加。在雨滴击溅与薄层水流侵蚀动力共同作用下,侵蚀量与地表坡度呈二次抛物线型关系,即有一临界坡度 $S_k$ 存在,当地表坡度 $S < S_k$ 时,侵蚀量是地表坡度的增函数,反之侵蚀量则为地表坡度的减函数。最后分析了地表坡度对坡面薄层水流侵蚀的影响机制。

关键词: 地表坡度 侵蚀动力 临界坡度 薄层水流侵蚀

## Study on the Relationship between Land Slope and Sheet Flow Erosion

Wu Pute Zhou Peihua

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and  
Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100)

## Abstract

The relationship between land slope and sheet flow erosion was studied on the base of erosion force of sheet flow. The results indicated that by the erosion of sheet flow, the relationship between land slope and the amounts of erosion was a power function, the amounts of erosion increased with the land slope, and the increasing rate ( $dsF/ds$ ) added with land slope and rainfall intensity. By the raindrop splash and erosion force of sheet flow, the relationship between the amounts of erosion and land slope was roughly parabolic, that is there is a critical slope  $s_k$ . when  $S < S_k$ . The amounts of erosion was increased with land slope, but when  $S > S_k$ , the amounts of erosion decreased with land slope. Finally, the mechanism of land slope effect on the sheet flow erosion was also analysed.

**Key words** land slope erosion force critical slope sheet flow erosion

诸多试验表明,地表坡度与坡面土壤侵蚀量的关系曲线中,存在一临界坡度 $S_k$ 。当 $S < S_k$ 时,侵蚀量是坡度的增函数;而当 $S > S_k$ 时,侵蚀量反而随地表坡度的增加而减少。究其原因,尚无比较满意的解释。笔者翻阅了大量资料,结果发现以往学者在研究坡面侵蚀量与地表坡度关系时,所采用的侵蚀量资料是坡面上多种侵蚀方式所产生的侵蚀量的总和,诸如薄层水流片蚀、细沟侵蚀、甚至浅沟侵蚀等。由于各种侵蚀方式的机理及搬运过程不尽相同,这样利用其侵蚀总效应研究侵蚀量与地表坡度的关系,势必掩盖了矛盾。笔者认为,应首先研究不同侵蚀方式的机理,并进而研究地表

坡度等侵蚀影响因子与侵蚀量的关系,采取循序渐进的方法,才是解决上述问题的正确途径。我们着重讨论地表坡度因子与坡面薄层水流侵蚀的关系,并进而探讨地表坡度因子对其侵蚀量的影响机制。

## 一、试验设计

薄层水流侵蚀(sheet flow erosion)是指坡面发生雨滴击溅,产生了浅而分散的层流(实际上是不固定的微小流水的汇集,笔者定义它为搅动层流(agitated lamiar flow<sup>[1]</sup>)的情况下所引起的土粒比较均匀流失的现象。亦就是我们通常所说的片蚀(sheet erosion)及细沟间侵蚀(inter-rill erosion)。很明显,薄层水流的侵蚀动力包括雨滴击溅及薄层水流冲刷两大动力。要深入揭示其侵蚀机制,就首先必须搞清两大侵蚀动力在其侵蚀及搬运过程中所起的作用以及作用方式,因此本实验分有雨滴击溅及无雨滴击溅两部分进行。采用直接降低降雨高度的方法,降低雨滴降落速度,从而达到降低雨滴击溅动能的目的,以克服以往采用沙网覆盖方法降低雨滴击溅动能所引起的雨滴破碎,径流失真等缺陷。采用室内人工模拟降雨试验方法,供试土样来自安塞县茶坊村山地黄绵土, <0.01mm 的物理性粘粒含量为 37.3%。选取五种坡度 10°、15°、20°、25°及 30°;五种雨强 0.822mm/min、1.090mm/min、1.468mm/min、1.757mm/min 及 2.037mm/min,盛土设备采用宽 40cm、高 35cm,投影长度为 100cm 的木箱,以保证坡长不变。采取组合试验的方法,共布设两次重复。为保证试验的严密性,在整个试验过程中保证坡面无细沟产生,一旦产生细沟,即关机停止试验;实验观测及泥沙处理均采用常规方法。

## 二、薄层水流动力作用下侵蚀量与地表坡度的关系

降低降雨高度后,雨滴击溅动能基本消除。此时坡面侵蚀的物理图像大致可描述为,不具有击溅动能的雨滴,垂直落在坡面土壤上,雨滴本身不具有发生侵蚀的动力,坡面侵蚀的主要动力将来自降雨在坡面上所转换成的薄层水流,换句话讲,亦就是坡面薄层水流的拖拽力。因此地表坡度对薄层水流侵蚀的影响,将主要通过坡度的改变来改变它的侵蚀动力—薄层水流的拖拽力。根据实验资料,将不同雨强作用下,地表坡度与坡面薄层水流侵蚀量的对应数值点绘在直角坐标系中,有如下关系曲线,如图 1。

由图 1 可明显看出,侵蚀量是坡度的增函数,而且雨强越大,侵蚀量亦越大。对图 1 关系曲线进行统计分析,有如下结果,如表 1。

表中: $S_F$  为薄层水流侵蚀动力作用下所产生的侵蚀量(g);  $S$  为地表坡度(°)。

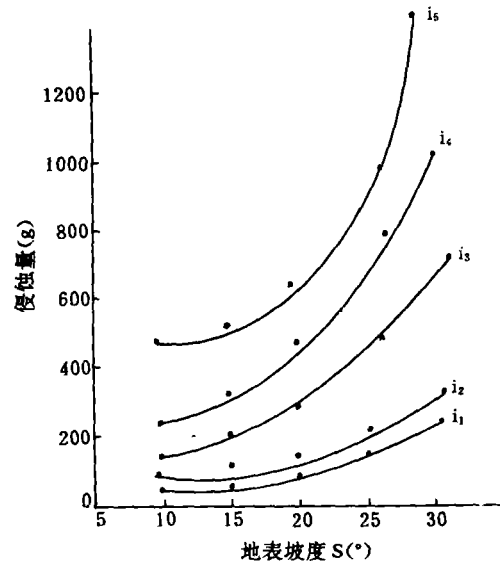


图 1 薄层水流侵蚀动力作用下地表坡度与侵蚀量的关系

亦就是说,在薄层水流动力作用下,坡面侵蚀量与地表坡度呈幂函数关系,其显著性水平为高度显著( $\alpha=0.01$ ),且坡度幂指数大致在 1.3~1.5 之间。如果对上述关系方程式求导,其导数  $ds_F/ds$  将代表侵蚀量随地表坡度的递增速率,计算结果如下。

表 1 薄层水流侵蚀动力作用下地表坡度与侵蚀量的统计方程

雨 强(mm/min)	统计方程	相关系数	显著水平
0.082	$S_F = 2.465 S^{1.441}$	0.962	0.01
1.090	$S_F = 3.219 S^{1.429}$	0.956	0.01
1.468	$S_F = 5.812 S^{1.311}$	0.950	0.01
1.757	$S_F = 8.039 S^{1.330}$	0.953	0.01
2.037	$S_F = 9.088 S^{1.388}$	0.940	0.01

$$i=0.822 \quad ds_F/ds=3.552S^{0.441}$$

$$i=1.090 \quad ds_F/ds=4.600S^{0.429}$$

$$i=1.468 \quad ds_F/ds=7.620S^{0.311}$$

$$i=1.757 \quad ds_F/ds=10.764S^{0.330}$$

$$i=2.037 \quad ds_F/ds=12.614S^{0.388}$$

分别将  $S=10^\circ、15^\circ、20^\circ、25^\circ$  及  $30^\circ$  代入上述各方程式,即可求出不同雨强下侵蚀量随坡度的递增速率,其结果如表 2 所示。将递增速率  $ds_F/ds$  与地表坡度  $S$  进行统计分析,结果如表 3。

表 2 侵蚀量随坡度递增速率  $ds_F/ds$  计算结果表

i	S(°)				
	10	15	20	25	30
	$ds_F/ds$				
0.822	9.723	11.626	13.199	14.564	15.783
1.090	12.353	14.699	16.630	18.301	19.790
1.468	15.594	17.690	19.345	20.735	21.945
1.757	23.013	26.308	28.928	31.138	33.069
2.037	30.821	36.072	40.332	43.980	47.204

表 3 侵蚀量随地表坡度递增速率  $ds_F/ds$  与地表坡度  $S$  的统计方程式

雨 强(mm/min)	统计方程式	相关系数	显著水平
0.822	$ds_F/ds=6.956+0.301S$	0.966	0.01
1.090	$ds_F/ds=8.964+0.370S$	0.996	0.01
1.468	$ds_F/ds=12.763+0.315S$	0.994	0.01
1.757	$ds_F/ds=18.514+0.499S$	0.994	0.01
2.037	$ds_F/ds=23.412+0.813S$	0.995	0.01

图 2 是  $ds_F/ds$  与  $S$  的递增关系曲线。由图 2 可以看出,在不同降雨强度下,递增速率  $ds_F/ds$  与地表坡度  $S$  成线性关系递增;且在不同地表坡度下,递增速率  $ds_F/ds$  与地表坡度  $S$  亦成递增关系。

上述分析表明,在薄层水流侵蚀动力作用下,所产生的侵蚀量  $S_F$  与地表坡度  $S$  成幂函数递增关系,坡度越大,在雨强不变的情况下,其侵蚀量亦越大,没有临界坡度  $S_k$  存在。且递增速率  $ds_F/ds$  不但随地表坡度的增加而增加,亦随着降雨强度的增加而增加。

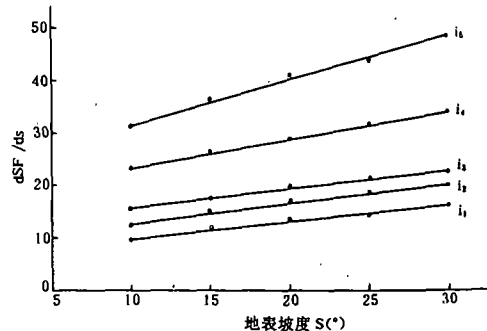


图 2  $ds_F/ds$  与  $s$  的关系

### 三、雨滴击溅与薄层水流侵蚀动力共同作用下 侵蚀量与地表坡度的关系

未降低降雨高度时,坡面薄层水流侵蚀的动力除了薄层水流侵蚀的拖拽力之外,还有雨滴击溅动力。此时坡面侵蚀的物理图像大致可描述为<sup>[2]</sup>,自空而降并具有一定动能的雨滴,首先与坡面土壤发生碰撞,碰撞的结果将雨滴本身所具有的动能消耗于侵蚀对象——土壤,结果使土壤结构遭到破坏,土壤颗粒被分散,并使一部分土粒完全丧失其之间的粘结作用,从土壤表面分离出来而处于“孤立”状态。

一旦坡面产生径流,薄层水流的冲刷作用首先将这部分“孤立”状态的土粒输出坡面;而结构遭到破坏的土壤亦很容易被薄层水流再次侵蚀,进而搬运,输出坡面。因此此时地表坡度的影响除了影响其水流侵蚀动力外,还将影响雨滴击溅动力破坏作用。根据实验资料,将不同雨强作用下,地表坡度与薄层水流侵蚀量的对应数据点绘在直角坐标系内,其结果如图 3 所示,图 3 为雨强  $i=0.822\text{mm}/\text{min}$  时,侵蚀量与坡度的关系曲线。

同样,当雨强变化时,侵蚀量与地表坡度关系曲线的变化趋势与图 3 相同。因此我们可以得出,不管降雨强度多大,侵蚀量随坡度的变化趋势大体一致,都是随着地表坡度的递增而增加,但增加到一定程度后有递减趋势,即有一临界坡度  $S_k$  存在。通过最佳曲线拟合计算得出侵蚀量与地表坡度符合二次抛物线型方程,拟合结果如表 4 所示。

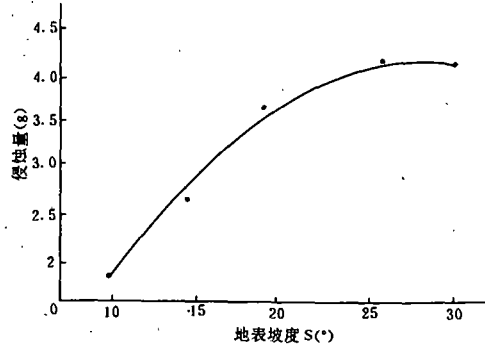


图 3 侵蚀量与地表坡度  $S$  的关系  
( $i=0.822\text{mm}/\text{min}$  时)曲线

表 4 雨滴击溅与薄层水流侵蚀动力共同作用下侵蚀量  $S_{RF}$  与坡度  $S$  的拟合方程

雨强 (mm/min)	拟合方程	相关系数	显著水平
0.822	$S_{RF} = -232.600 + 46.785S - 0.855S^2$	0.973	0.01
1.090	$S_{RF} = -453.671 + 109.949S - 2.476S^2$	0.967	0.01
1.468	$S_{RF} = -779.312 + 163.128S - 3.273S^2$	0.959	0.01
2.037	$S_{RF} = -921.084 + 217.411S - 3.836S^2$	0.976	0.01
1.757	$S_{RF} = -743.992 + 175.756S - 2.953S^2$	0.964	0.01

上述方程经  $t$  检验,其显著性水平均为  $\alpha=0.01$ ,属高度显著。对上述方程式求导,并令其一阶导数为零,即可求出临界坡度  $S_k$ ,结果如下。

$$\begin{aligned}
 i = 0.822 & \quad S_k = 27.4^\circ \\
 i = 1.090 & \quad S_k = 22.2^\circ \\
 i = 1.468 & \quad S_k = 24.9^\circ \\
 i = 1.757 & \quad S_k = 29.7^\circ \\
 i = 2.037 & \quad S_k = 28.3^\circ
 \end{aligned}$$

临界坡度  $S_k$  的变化范围大致在  $22^\circ \sim 30^\circ$  之间,且与雨强的大小有关,总的趋势是随着雨强的增大而增大。

#### 四、地表坡度对坡面薄层水流影响的机理

上述分析表明,在消除雨滴击溅动力后,侵蚀量是坡度的幂函数,且坡度的增加引起侵蚀量的增加,无临界坡度  $S_k$  存在。在未消除雨滴击溅侵蚀动力的情况下,即雨滴击溅侵蚀动力与薄层水流侵蚀动力同时作用下,坡面侵蚀量与地表坡度的关系曲线中存在一临界坡度  $S_k$ ,当  $S < S_k$  时,侵蚀量是地表坡度的增函数,而当  $S > S_k$  时,侵蚀量反而随地表坡度而减少。由于两种实验条件完全一致,因此很显然  $S_k$  的存在是由于雨滴击溅的结果。

那么雨滴击溅又是如何导致  $S_k$  的存在呢?

事实上,仅在薄层水流侵蚀动力作用下,坡面侵蚀的动力就是薄层水流的拖拽力,而:

$$\tau = \gamma R J$$

式中:  $\tau$ ——薄层水流拖拽力;  $\gamma$ ——水的容重;

$R$ ——薄层水流水力半径;  $J$ ——水力坡降即地表坡度。

因此坡度越大,薄层水流拖拽力  $\tau$  越大,即侵蚀动力越大,随之而产生的侵蚀量亦就越大。这样就导致了侵蚀量随地表坡度而递增的结果。

而在雨滴击溅动力与薄层水流侵蚀动力共同作用下,坡面侵蚀动力除了薄层水流的拖拽力  $\tau$  之外,还有雨滴击溅侵蚀动力。雨滴击溅动力的主要作用在于为坡面薄层水流冲刷提供搬运物质,它本身的作用并不会使土壤颗粒输出坡面;而薄层水流侵蚀动力除了本身的侵蚀作用外,更重要的作用在于将坡面上处于“孤立”及“半孤立”状态的土粒输出坡面;且雨滴击溅作用对于坡面产沙量的贡献量大,约是薄层水流的5倍<sup>[3]</sup>。因此对于坡面薄层水流侵蚀,其侵蚀量的多少就主要取决于雨滴击溅为薄层水流冲刷所提供的搬运物质的多少;尽管薄层水流拖拽力  $\tau$  是坡度的增函数,但它本身所产生的侵蚀量在总侵蚀量中所占比例较小,其主要作用在于冲刷搬运。这样地表坡度对薄层水流侵蚀的影响,将主要取决于地表坡度对于雨滴击溅的影响。由于在雨滴击溅侵蚀量与地表坡度的关系曲线中有一临界坡度  $S_k$  存在<sup>[2]</sup>,也就导致了薄层水流侵蚀量与地表坡度的关系曲线中有一临界坡度  $S_k$  的存在。

#### 五、结 论

综上所述,可初步得出下列结论。

1. 消除雨滴击溅侵蚀动力后,即仅在薄层水流侵蚀动力作用下,坡面侵蚀量随地表坡度的递增而增加,二者呈幂函数关系。且侵蚀量随地表坡度的递增速率均随坡度、雨强的增加而递增。
2. 未消除雨滴击溅动力时,即在雨滴击溅侵蚀动力与薄层水流侵蚀动力共同作用下,坡面侵蚀量随地表坡度的递增而递增,但递增到一定程度后,反而随坡度的增加而递减,即有一临界坡度  $S_k$  存在,且  $S_k$  大致在  $22^\circ \sim 30^\circ$  之间。
3. 临界坡度  $S_k$  的存在,主要是由于雨滴击溅侵蚀动力作用的结果。

#### 参 考 文 献

1. 吴普特等. 坡面薄层水流流动型态及侵蚀搬运方式的研究. 水土保持学报, 1992年, 第1期
2. 吴普特等. 地表坡度对雨滴击溅的影响. 水土保持通报, 1991年, 第3期
3. 吴普特等. 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用. 水土保持通报, 1992年, 第4期