

# 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用

吴普特 周佩华

(中国科学院西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)  
水利部

## 提 要

试验采用人工模拟降雨方法,对薄层水流侵蚀的两个阶段——雨滴击溅及径流侵蚀进行了模拟试验研究。得出:在消除雨滴打击作用后,坡面侵蚀的主要营力为薄层水流的拖拽力( $\tau = r h \sin \alpha$ ),且径流侵蚀量 $S_R$ 与 $\tau$ 有下列关系式:

$$S_R = 921.497 \tau^{1.713}$$

$$r = 0.876 \quad \alpha = 0.017$$

以上式为基础,即可从有雨滴打击作用下所产生的侵蚀量中推算出径流侵蚀量 $S_R$ 与雨滴侵蚀量 $S_{Rd}$ 。结果表明: $S_{Rd}$ 一般占总侵蚀量的70%以上,最高可达95%,说明薄层水流侵蚀所产生的泥沙绝大部分是由雨滴击溅所致。因此,笔者认为坡度较小地段的薄层水流侵蚀,应以消除或降低雨滴击溅作用为其主要防治措施。

关键词:雨滴击溅 径流侵蚀 薄层水流

## The Action of Raindrop Splash on Sheet Flow Erosion

Wu Pute Zhon Peihua

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

## Abstract

The simulated rainfall tests have been carried out to approach two stages of raindrop splash and runoff erosion on sheet flow. It was obtained that the main stress of slope surface erosion is sheet flow stress ( $\tau = r h \sin \alpha$ ) where the action of raindrop splash is eliminatec, and the relationship between runoff erosion ( $S_R$ ) and sheet flow stress is as  $S_R = 921.497 \tau^{1.713}$  ( $r = 0.876$ ,  $\alpha = 0.01$ ). Based on this equation the runoff erosion ( $S_R$ ) and raindrop erosion ( $S_{Rd}$ ) can be calculated from the total erosive amount which is caused by the action of raindrop splash. The results show that rain drop erosion ( $S_{Rd}$ ) accounts for more than 70% of total erosion, and the maximum may reach 95% of that. It was indicated that the sediment of sheet flow erosion is mainly caused by raindrop splash. Therefore, the authors hold that the key measures to control sheet flow erosion, occurring at the land segment of Less steepness are to reduce or eliminate the raindrop splash.

Key words raindrop splash runoff erosion sheet flow

由于生产的需要和学科的发展,一种开创性的工作,即建立侵蚀基本物理概念的水蚀预报模型(WEPP)已迫在眉睫。因此本研究是一项探索性的工作。由于薄层水流侵蚀(Sheet flow erosion)亦即细沟间侵蚀(Inter-rill erosion)是该模型的基础组成部分,亦是坡面水蚀过程的开端,因而研究坡面薄层水流侵蚀,对进一步揭示坡面水蚀动力过程,以及建立水蚀预报模型就显得十分重要。

已往研究者对雨滴溅蚀研究较多,对于坡面径流的作用研究较少。而对溅蚀的研究又往往与径流的作用相互割裂,对进一步揭示溅蚀与径流侵蚀作用的相互关系研究较少;对于坡面径流作用的研究,亦往往由于在坡面上较难与细沟水流加以区分,进展缓慢。

我们认为薄层水流侵蚀是指地面发生雨滴击溅,产生了浅而分散的层流(实际上是不固定的微小流水的汇聚,它的流态为搅动层流<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)。实质上它是依靠地面径流的冲刷搬运作用,将地表被雨滴击溅分散后处于“孤立”及“半孤立”状态的土粒输出坡面<sup>[2]</sup>,从而使土层减薄,质地变粗,土壤肥力减退的一种侵蚀现象。其发生部位在比较平缓临近分水岭及细沟间地段,一般不易被人们察觉,因此常被人们所忽视,这亦是以往学者研究较少的一个原因。

事实上薄层水流侵蚀包括几个阶段。一是溅蚀阶段,在此阶段雨滴打击地表使土壤中的细小颗粒从土体表面剥离出来,并被溅散的雨滴带起而产生位移降落在坡面;同时雨滴打击,破坏了坡面土壤的固有结构,使其粘结作用降低,易被水流侵蚀、悬浮;这两种作用的结果都为径流冲刷、输移提供了物质来源。

另一阶段是径流侵蚀、冲刷作用。坡面产流后,由于薄层水流的缓冲作用,使得雨滴的直接作用对象由地表土壤变为薄层水流,雨滴击溅作用降低而以径流的冲刷作用为主,其结果已分散及易分散的土粒被冲刷,并进而随径流一起带走,输出坡面。

由此看来,雨滴击溅与径流侵蚀冲刷是坡面薄层水流侵蚀不可分割的两个方面。对于薄层水流侵蚀的研究目的,就在于揭示雨滴的击溅作用,径流的侵蚀冲刷作用,以及二者的相互关系,从而进一步阐明其侵蚀过程及其机理。为此,我们采用人工模拟降雨试验方法,选取两种降雨高度 $H_1=8.67\text{m}$ ,  $H_2<0.50\text{m}$ ;利用降低雨滴降落高度的方法,减少雨滴降落速度,达到消除或基本消除雨滴击溅作用的目的,并可保持坡面接受的雨滴大小、形状不发生变化;来单独研究径流侵蚀冲刷作用,从而搞清雨滴击溅在坡面薄层水流侵蚀中的作用。

## 一、试验材料及方法

(一) 试验材料及设备 试验用土采自黄土丘陵沟壑区,即西北水保所安塞茶坊试验站山地试验场坡耕地表层(深度0~20cm)黄绵土,机械组成如表1所示。

表1 试验用土机械组成

各级颗粒含量(mm、%)						
1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.01
0.28	38.49	28.99	4.59	12.01	15.69	37.29

盛土设备采用宽40cm,高35cm,投影长度为100cm的木箱,木箱四周墙顶做成楔形。木箱底部打有 $\phi 2.5\text{mm}$ 的小孔,布设成梅花形,以模拟天然条件下的土壤通道。在木箱的上、下、侧

三边分别安装溅蚀板观测溅蚀, 实验架可调坡度, 在盛土木箱的下部安置引流设备, 即可进行实验。降雨设备采用日产DIK—6000雨滴发生器, 其降雨面积 $2\text{m} \times 3\text{m}$ , 利用12个雨量桶, 将其排成 $3 \times 4$ 方阵, 对其降雨特征进行了测定, 结果如表2。

表2 DIK—6000雨滴发生器降雨特征表

流量 (L/h)	300	400	500	600	700
雨强 (mm/min)	0.822	1.090	1.468	1.757	2.037
降雨均匀度 P(%)	88.5	89.4	87.3	90.8	93.3

(二) 试验设计 本试验分为雨滴打击与无雨滴打击(事实上是尽量消除雨滴打击作用)两部分进行, 以往降低雨滴打击作用多采用沙网覆盖, 但沙网覆盖一方面破碎了天然雨滴, 使其直径减小, 另一方面易沿沙网顺坡方向上形成股流, 从而使坡面径流量产生失真现象。我们采用直接降低雨滴降落高度的方法, 来降低雨滴降落速度, 从而间接地降低雨滴打击力, 这是本实验与前人的主要不同之处。

试验选取5个坡度即 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 及 $30^\circ$ , 5种雨强即 $0.822\text{mm}/\text{min}$ ,  $1.090\text{mm}/\text{min}$ ,  $1.468\text{mm}/\text{min}$ ,  $1.757\text{mm}/\text{min}$ 及 $2.037\text{mm}/\text{min}$ , 采取组合试验的方法, 并布设两次重复, 共计实验场次为 $2 \times 5 \times 5 \times 2 = 100$ 场次。

未降低降雨高度时, 雨滴降落高度为 $8.67\text{m}$ , 据色斑法直接观测 $d_{\text{max}} < 4.0\text{mm}$ , 此高度可保证雨滴达终点速度。降低降雨高度后, 雨滴距地面高度为 $0.93\text{m}$ , 由于雨滴降落高度低, 坡度影响大, 故采用坡面中心处到雨滴出口处的高度为雨滴降落高度, 对应于不同坡度的雨滴降落高度如表3中的 $H_2$ 。经计算, 降低雨滴高度后可降低雨滴动能80%以上, 可认为基本消除雨滴打击作用。

表3 降低降雨高度后雨滴降落高度

坡度 ( $^\circ$ )	10	15	20	25	30
降落高度 $H_2$ (m)	0.50	0.46	0.42	0.38	0.34

(三) 试验方法 试验土壤容重控制在 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ , 试验前装土进行称重, 以控制容重。土壤含水量控制在10%左右, 误差小于 $\pm 2\%$ 。装土结束后, 将坡面采用直尺整平以保证试验条件大体一致。

坡面产流后开始计时, 降雨历时50min。每5min观测一次坡面流速及径流泥沙; 对于未降低降雨高度试验, 同时观测溅蚀, 产流前同样观测溅蚀; 由于降低降雨高度后坡面上基本不产生溅蚀, 故省略溅蚀观测。

径流观测采用常规法, 对收集的浑水采用烘干法, 计算泥沙含量。

坡面流速采用染色剂( $\text{KMnO}_4$ )法, 并沿坡向布设5个断面观测, 取其算术平均值即为坡面平均流速。

溅蚀观测如前所述采用溅蚀板收集水样, 烘干称重即为溅蚀量。

## 二、试验结果及分析

当降雨强度大于蒸发、入渗、余水填平坑洼之后, 即在重力作用下顺坡水平流动。坡面产流

初期其水流常为极薄的一层,即我们所说的薄层水流。这种水流就其本身的冲刷力而言,的确是不大的,但坡面薄层水流可以带走被雨滴击溅起来的泥沙,这两种作用的叠加便可以产生相当显著的侵蚀效果。而事实上我们经常观测到的坡面侵蚀量,亦正是雨滴击溅与薄层水流冲刷两种作用共同产生的。

因此坡面薄层水流侵蚀正是雨滴击溅与薄层水流冲刷共同作用的结果,二者是不可分割的。雨滴击溅的结果,使坡面土壤颗粒分散,结构破坏,同时土粒飞溅在重力作用下再次落地,并产生一定的位移。这部分土粒成为单个土粒,虽然它在坡面上仍处于静止状态,但维持其稳定的力仅仅是土粒与坡面的摩擦力及土粒间的分子引力,由于单个土粒本身的重量是比较小的,其静摩擦力亦就相当小了;因此坡面薄层水流的冲刷力只要克服了土粒与坡面的静摩擦力,土粒便可在坡面发生移动,即沿水流方向移动,一旦土粒发生运动,此时静摩擦力即变为动摩擦力,由于动摩擦力小于静摩擦力,因此开始运动的土粒便会加速或继续向前运动。

(一) 消除雨滴打击作用后坡面侵蚀状况分析 消除雨滴打击作用后,坡面基本上不发生雨滴击溅,雨滴的直接作用对象由坡面土壤变为坡面薄层水流,雨滴的动能基本上由于水流的缓冲作用而被其吸收。此时坡面的侵蚀营力主要取决于薄层水流的冲刷力,坡面水流冲刷的结果实际上是给坡面土壤施加了一个沿水流方向的剪切力,当水流的切应力 $\tau$ 大于土壤的抗剪力 $\tau_s$ 时,坡面土壤即发生破坏,处于临界静止状态,继而被水流冲走。 $\tau_s$ 可用下式表示:

$$\tau_s = c + \sigma tg\beta \quad (1)$$

式中: $\tau_s$ ——土壤抗剪力(N);  $c$ ——土壤粘结力(N);  $\sigma$ ——土壤承受的正压力(N);  
 $\beta$ ——土壤内摩擦角(°)。

因此消除雨滴击溅作用后,坡面侵蚀状况完全取决于坡面径流及土壤状况。

图1为坡面薄层水流作用力示意图,由图1可明显看出单位坡面面积上水流的切应力为:

$$\tau = \gamma h \sin\alpha \quad (2)$$

式中 $\tau$ ——单位坡面面积上的水流切应力(N);  
 $\gamma$ ——水的容量(N/m<sup>3</sup>);  $\alpha$ ——地表坡度(°);  $h$ ——薄层水流厚度(mm)。

图1 坡面水流作用力平衡图

上式中 $\gamma$ 与 $\alpha$ 均为已知量,因此只要测出薄层水流厚度 $h$ 即可计算出水流切应力 $\tau$ 。由上述分析已知,只要 $\tau > \tau_s$ ,即: $\gamma h \sin\alpha \geq c + \gamma t g\alpha$

坡面土壤颗粒即发生运动,继而输出坡面。 $c$ 、 $\alpha$ 均为反映下垫面特征的客观因子, $\alpha$ 又与薄层水流的厚度有关,这样在很大程度上坡面薄层水流侵蚀的强弱取决于水流厚度 $h$ ,亦就是水流切应力 $\tau$ 。同时 $\tau$ 又是消除雨滴击溅作用后径流侵蚀的主要营力,因此 $\tau$ 将与径流侵蚀量 $S_R$ 有着密切的关系。

根据水流连续理论,可得:

$$h = \frac{q}{10v} \quad (3)$$

式中: $h$ ——薄层水流厚度(mm);  $q$ ——单宽流量(mL/m·s);  $v$ ——薄层水流速度(cm/s)。

将实验数据代入(3)式即可计算出薄层水流厚度 $h$ ，再将 $h$ 代入(2)式，并取 $\gamma = 9800\text{N/m}^3$ ，可求出薄层水流切应力 $\tau$ ，如表4所示。

表4 坡面薄层水流切应力计算结果

切应力 ( $\tau$ )		坡 度 ( $^{\circ}$ )					
		10	15	20	25	30	
(mm/min)	雨强	0.822	0.218	0.279	0.462	0.476	0.510
		1.090	0.254	10.02	0.530	0.547	0.583
		1.468	0.293	3.139	0.600	0.650	0.617
		1.757	0.362	0.502	0.717	0.853	0.764
		2.037	0.422	0.566	0.895	1.011	0.907

上述切应力 $\tau$ 的物理含义为，单位坡面面积上的水流切应力，也叫水流拖拽力，即坡面水流侵蚀力。将 $\tau$ 与其对应所产生的侵蚀量进行统计分析，有如下结果。

$$S_R = 921.497\tau^{1.713} \quad (r = 0.876 \quad \alpha = 0.01) \quad (4)$$

式中： $S_R$ ——薄层水流径流侵蚀量( $g$ )； $\tau$ ——水流切应力( $N$ )

由上式可明显看出， $S_R$ 与 $\tau$ 成正相关， $S_R$ 是 $\tau$ 的1.713次方幂，即若 $\tau$ 有微小增加，则 $S_R$ 以接近平方的速度递增。

(二) 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用 未消除雨滴打击作用时，坡面的侵蚀状况与消除雨滴打击作用后完全不同。此时坡面径流的冲刷作用不在是侵蚀的唯一外力作用，雨滴击溅不但完全破坏了土壤的固有结构，使其粘结作用降低，稳定性减弱，而且使一部分土壤颗粒完全分散，处于“孤立”状态，即所谓的“临界平衡”。一旦有微小的径流作用力加于其上，克服掉其静止摩擦力，它即开始在坡面发生位移，因此雨滴的击溅作用已经为径流的冲刷、搬运提供了足够的物质来源。那么究竟雨滴的击溅为薄层水流冲刷提供了多少侵蚀物质呢？

前述已经得出了径流侵蚀量 $S_R$ 与水流切应力 $\tau$ 的关系式，亦分析了雨滴击溅状况下坡面侵蚀的状况。因此我们认为，在伴有雨滴击溅状况下坡面侵蚀量大于径流侵蚀量的那部分正是雨滴击溅的结果，即雨滴作用侵蚀量。

$$S_{Rd} = S_F - S_R \quad (5)$$

式中： $S_{Rd}$ ——雨滴作用侵蚀量( $g$ )； $S_F$ ——总侵蚀量( $g$ )； $S_R$ ——径流作用侵蚀量( $g$ )

$S_F$ 为实测数据。根据实验数据，通过式(3)即可求出水流厚度 $h$ ，并代入(2)式可求得水流的切应力 $\tau$ ，如表5所示。

将表5结果代入式(4)即可求出径流作用侵蚀量 $S_R$ ，再将 $S_R$ 代入式(5)即得出雨滴作用侵蚀量 $S_{Rd}$ ，如表6所示。在表6中我们还求出了径流作用侵蚀量及雨滴侵蚀作用量在总侵蚀量中的比重 $S_R/S_F$ 和 $S_{Rd}/S_F$ ，以及雨滴作用侵蚀量与径流作用侵蚀量的比值 $S_{Rd}/S_R$ 。

由表6可以看出，尽管伴有雨滴的击溅作用坡面侵蚀量较大，但真正由于径流作用所产生的侵蚀量并不大，平均仅占总侵蚀量的17.1%，最小为4.1%，最大可达33.2%，还不到总侵蚀量的一半，相反由于雨滴的击溅作用所给径流提供的侵蚀搬运物却很大，平均占总侵蚀量的83.276%，最小也为73.1%，而最大可达95.9%。同时 $S_{Rd}/S_R$ 的平均比值为4.863，最小值亦将近2.0，最

表5 坡面薄层水流切应力计算结果(有雨滴击溅作用)

切应力 ( $\tau$ )		坡 度 ( $^{\circ}$ )				
		10	15	20	25	30
(mm/min)	0.822	0.133	0.236	0.261	0.270	0.338
	1.090	0.140	0.282	0.255	0.273	0.407
	1.468	0.151	0.365	0.365	0.514	0.593
	1.757	0.168	0.269	0.452	0.617	0.490
	2.037	0.220	0.283	0.530	0.464	0.745

注：坡面径流冲刷力即切应力，拖拽力，(牛顿)。

表6 雨滴侵蚀与径流侵蚀作用对照表

序号	坡度 ( $^{\circ}$ )	雨 强 (mm/min)	总侵蚀量 $S_F$ (g)	径流冲刷量 $S_R$ (g)	雨滴作用侵蚀量 (g)	$S_R \setminus S_F$ (%)	$S_{Rd} \setminus S_F$ (%)	$S_{Rd} / S_R$ (%)
1	10	0.822	166.425	29.084	137.341	17.5	82.5	4.722
2	10	1.090	375.350	31.755	343.595	8.5	91.5	10.820
3	10	1.468	582.495	36.148	546.347	6.2	93.8	15.114
4	10	1.757	779.505	43.396	736.109	5.6	94.4	16.963
5	15	2.037	936.615	68.875	867.740	7.4	92.6	12.599
6	15	0.822	236.070	77.677	158.398	32.9	67.1	2.039
7	15	1.090	682.200	111.865	570.335	16.4	83.6	5.098
8	15	1.468	791.610	163.946	627.664	20.7	79.3	3.828
9	15	1.757	1,132.775	96.580	1,036.195	8.5	91.5	10.729
10	15	2.037	1,356.810	75.953	1,280.857	5.6	94.4	16.864
11	20	0.822	382.825	92.299	290.526	4.1	95.9	3.148
12	20	1.090	760.510	88.695	671.815	11.7	88.3	7.574
13	20	1.468	1,246.625	163.946	1,082.679	13.2	86.8	6.604
14	20	1.757	1,508.210	236.454	1,271.756	15.7	84.3	4.960
15	20	2.037	1,851.100	310.584	1,540.516	16.8	83.2	4.960
16	25	0.822	414.100	68.875	345.225	16.6	88.4	5.012
17	25	1.090	696.000	99.687	560.313	14.3	85.7	5.982
18	25	1.468	1,296.735	294.696	1,002.039	22.7	77.3	3.400
19	25	1.757	2,008.590	402.951	1,605.639	20.1	79.9	3.985
20	25	2.037	2,293.175	247.309	2,045.866	10.8	89.2	8.273
21	30	0.822	391.825	143.724	248.101	36.7	63.3	1.726
22	30	1.090	640.925	197.574	443.351	30.8	69.2	2.244
23	30	1.468	1,135.610	376.475	759.135	33.2	66.8	2.016
24	30	1.757	1,782.635	271.519	1,511.116	25.2	84.8	5.565
25	30	2.037	2,068.275	556.542	1,511.733	26.9	73.1	2.716
					平均值	17.124	83.276	4.863

大值为16.963。

由此看来，坡面薄层水流侵蚀过程可以概括为：雨滴的击溅作用为径流的冲刷搬运提供了足够的物质来源；同时径流的冲刷亦在坡面上以剥蚀的方式进行侵蚀，二者共同作用的结果将通过坡面径流输出坡面；但前者的作用大得多，前者对坡面输沙量的贡献约是后者的5倍。但这里所指的 $S_{Rd}$ 亦仅仅是雨滴击溅分散土壤后被径流输出坡面的那部分量，而并非雨滴击溅分散土壤的全量，即理论上的雨滴击溅分散侵蚀量。

(三) 雨滴击溅对薄层水流侵蚀的影响 坡面土壤被雨滴击溅的结果，主要是为径流的冲刷搬运提供足够的物质，因此毫无疑问雨滴的打击作用将会增加坡面侵蚀量。关于这一方面的研究，前人已做过大量的研究，但由于试验多采用沙网覆盖等消除雨滴打击作用，改变了雨滴直径，加之径流的失真未能更好地反映侵蚀实际状况。为此我们对两种降雨高度下所产生的侵蚀量亦进行了分析计算，结果如表7所示，消除雨滴打击作用后侵蚀量平均降低63.45%，最高可达83.90%。

同时由表7还可看出，消除雨滴打击作用后坡面侵蚀量降低的百分数 $(S_{F1} - S_{F2})/S_{F1}$ 随雨强变化的幅度不太明显；当坡度 $\alpha \leq 25^\circ$ 时，坡度对其的影响亦不明显，但当 $\alpha = 30^\circ$ 时， $(S_{F1} - S_{F2})/S_{F1}$ 迅速降低。如果随机选取 $I = 1.468 \text{ mm/min}$ ， $\alpha = 20^\circ$ 的资料，将 $(S_{F1} - S_{F2})/S_{F1}$ 分别与雨强及坡度的关系以直方柱图的形式显示出来，则这一结果非常明显，如图2，图3。

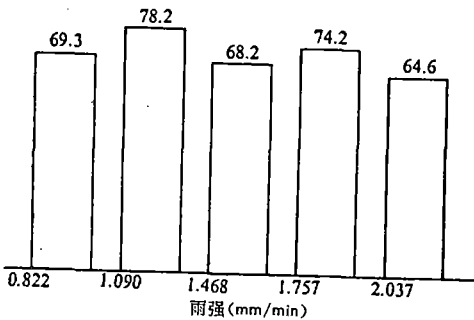


图2 雨强对 $(S_{F1} - S_{F2})/S_{F1}$ 的影响

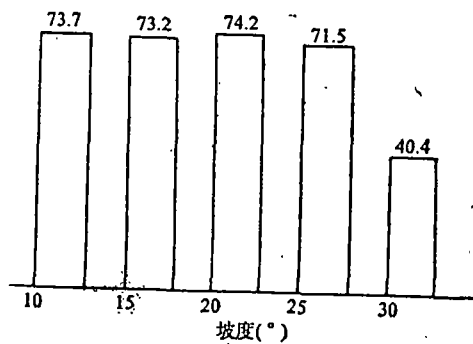


图3 坡度对 $(S_{F1} - S_{F2})/S_{F1}$ 的影响 (%)

对于这种现象我们初步认为，雨强的增大一方面雨滴的击溅作用在增强，而另一方面径流的冲刷搬运作用亦在增强。换句话说讲，雨强的增大，不但未消除雨滴击溅作用的坡面侵蚀量 $S_{F1}$ 在增大，而且消除雨滴打击作用后的坡面侵蚀量 $S_{F2}$ 亦在增大，二者同步增大的结果，就使得 $(S_{F1} - S_{F2})/S_{F1}$ 基本趋于稳定。

关于坡度的影响问题比较复杂，一般认为未消除雨滴击溅作用时，侵蚀量与坡度的关系曲线中有一临界坡度 $\alpha_K$ ，当 $\alpha \leq \alpha_K$ ，侵蚀量随坡度递增；当 $\alpha > \alpha_K$ 时，侵蚀量随坡度递减，且 $\alpha_K$ 大致在 $25^\circ \sim 27^\circ$ 之间。当消除雨滴打击作用后，侵蚀量的大小主要取决于坡面水流切应力 $\tau$ ，而 $\tau = \gamma h \sin \alpha$ 则 $\tau$ 正比于 $\alpha$ ，因此侵蚀量一直随坡度递增。

于是： 当 $\alpha \leq 25^\circ$ 时， $S_{F1} \uparrow$ ， $S_{F2} \uparrow$

当 $\alpha = 30^\circ$ 时， $S_{F1} \downarrow$ ， $S_{F2} \uparrow$

这样在 $\alpha \leq 25^\circ$ 的情况下， $S_{F1}$ 与 $S_{F2}$ 同步递增的结果就使得 $(S_{F1} - S_{F2})/S_{F1}$ 基本趋于稳定；当 $\alpha = 30^\circ$ 时， $S_{F1}$ 减少而 $S_{F2}$ 递增，其结果就使得 $(S_{F1} - S_{F2})/S_{F1}$ 相对减小。

表7 侵蚀量对照表

序号	坡度 (°)	雨强 (mm/min)	$S_{F1}$ (g)	$S_{F2}$ (g)	$S_{F1}-S_{F2}/S_{F1}$ (%)	备注
1	10	0.822	166.425	73.675	55.7	$S_{F1}$ 为未降低降雨高度即未消除雨滴打击作用时的侵蚀量 $S_{F2}$ 为消除雨滴打击作用即降低降雨高度后的侵蚀量 $\frac{S_{F1}-S_{F2}}{S_{F1}}$ 为消除雨滴打击作用后侵蚀量降低的百分数。
2	10	1.090	375.350	83.650	77.7	
3	10	1.468	582.495	152.975	73.7	
4	10	1.757	779.505	223.800	71.3	
5	10	2.037	936.075	486.470	48.1	
6	15	0.822	236.075	100.400	57.5	
7	15	1.090	682.200	115.750	83.0	
8	15	1.468	791.610	211.950	73.2	
9	15	1.757	1,132.775	328.561	71.0	
10	15	2.037	1,356.810	502.970	62.9	
11	20	0.822	382.825	117.600	69.3	
12	20	1.090	760.510	117.600	78.2	
13	20	1.468	1,246.625	165.420	74.2	
14	20	1.757	1,508.210	321.405	68.2	
15	20	2.037	1,851.100	479.975	64.6	
16	25	0.822	414.100	655.650	64.9	
17	25	1.090	696.000	145.150	72.4	
18	25	1.468	1,296.735	191.875	71.5	
19	25	1.757	2,008.590	369.15	67.9	
20	25	2.037	2,293.175	644.750	63.5	
21	30	0.822	391.825	837.520	45.9	
22	30	1.090	640.925	212.000	58.1	
23	30	1.468	1,135.610	268.520	40.4	
24	30	1.757	1,782.635	676.700	42.5	
25	30	2.037	2,068.275	625.675	30.5	
					63.45	

### 三、结 论

综上所述,得出如下结论。

1. 消除雨滴打击作用后,坡面上基本上不发生溅蚀,坡面侵蚀的主要营力是薄层水流的切应力 $\tau$ ,且此时的侵蚀量 $S_R$ 与 $\tau$ 有下列关系式:  $S_R = 921.497\tau^{1.713}$

即 $S_R$ 大致与 $\tau$ 成二次幂函数关系。

2. 以 $S_R = 921.497\tau^{1.713}$ 为基础,可分割出在有雨滴击溅作用下一次侵蚀量中雨滴击溅及径流侵蚀的比重 $S_{Rd}$ 与 $S_R$ ,结果表明 $S_{Rd}$ 约占侵蚀总量的83.276%, $S_{Rd}$ 约为 $S_R$ 的5倍。薄层水流侵蚀主要是通过雨滴击溅破坏土壤结构提供产沙源,而后通过径流搬运输出坡面。

3. 消除雨滴打击作用后,坡面侵蚀量明显降低,平均为63.45%,最高可达83.90%。

因此坡面薄层水流所产生的侵蚀量主要是由雨滴击溅所致,对于发生在坡度较小地段的薄层水流侵蚀应以消除或降低雨滴击溅作用为主要防治措施。

(下转第47页)



耕技术措施不大接受，同时该项技术措施也还不够完善，有待进一步的研究和探索。

#### 四、结 语

坡耕地已成为贵州山区人民的主要耕地资源和粮食产地，坡耕地利用的好坏直接影响山区人民的生活，甚至生存，对坡耕地的开发利用，必须把保护每一粒土壤放在首位，一旦造成土壤流失，要形成或恢复就十分困难，特别是贵州喀斯特地区，土壤的形成不是以年为单位所能计算的，若不认真对待，将会把本来就很少的山区耕地资源损失殆尽，这样人们将失去生存之地。

本文得到贵州省科协副主席朱安国教授的指导，在此表示感谢。

---

(上接第26页)

#### 参 考 文 献

- [2] 吴普特等. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响. 《水土保持通报》, 1991年, 第3期
- [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
- [3] 周佩华. 中国农业百科全书. 1987年
- [4] 清华大学编. 水力学. 北京: 人民教育出版社, 1980年
- [5] Hsiehw shen. Rainfall effect on sheet flow over Smooth Sarface 1973
- [6] G. R. Florster Shear stree reajtjomship. ASAE. 1984
- [7] 钱宁等. 坡面及沟槽的水流与泥沙运动. 1963年