

地表坡度对雨滴溅蚀的影响

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)

提 要

采用人工模拟降雨的试验方法,分别研究了地表坡度对向上坡,侧坡及下坡溅蚀量的影响。结果表明:向上坡、侧坡溅蚀量与地表坡度的关系大致为抛物线型,临界坡度在10°~15°与20°~25°之间,但当*i*=2.037mm/min时,向侧坡溅蚀量与地表坡度为幂函数关系,临界坡度消失。向下坡溅蚀量与地表坡度成线性递增关系,其递增速率随雨强的增加而增大。最后给出了雨滴溅蚀总量与EI及地表坡度*S*的复因子关系式。

$$ST = 5.985 (EI)^{0.544} S^{0.471}$$

式中: *ST* —— 单位面积上的溅蚀总量 (g); *E* —— 雨滴动能 (J/m^2);
I —— 降雨强度 (mm/min); *S* —— 地表坡度 (°)

关键词: 雨滴溅蚀 地表坡度 临界坡度

The Effect of Land slope upon Raindrop Splash Erosion

Wu Pute Zhou Peihua

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation of
Academia Sinica and the Ministry of Water Conservancy)

Abstract

The effect of land slope upon the amount of the upslope, sideslope and downslope splash erosion was studied by using the simulated rainfall tests individually. The results indicated that the relation between the amount of the upslope and downslope splash erosion and land slope was roughly parabolic, and that when the critical slope was between 10°-15° and 20°-25°, but when $i=2.037\text{mm}/\text{min}$, the relation between the amount of sideslope splash erosion and land slope was a power function, and the critical slope disappeared, and that the relation between the amount of downslope splash erosion and land slope was on the leaner increase, whose ascending rate increased with an increase in rainfall intensity. Finally, the multiple-factor equation of total amount of raindrop splash erosion, EI and land slope (*S*) was given in this paper, i. e.

$$S_T = 5.985 (EI)^{0.544} S^{0.471}$$

where,

S_T —— the total amount of splash erosion (g) per unit area

E —— raindrop kinetic energy (J/m^2)

I —— rainfall intensity (mm/min.)

Key words: raindrop splash erosion land slope critical slope

一、前言

雨滴溅蚀是以雨滴打击为主要动力，打击地表引起土壤分散、跃移的一种侵蚀方式。影响雨滴溅蚀的因子很多，大致可归为两大类即降雨动力因子与下垫面条件因子。本文只对于下垫面条件因子，诸如土壤、植被、土壤前期结皮、地表坡度、坡面微地形变化（如细沟形成）等进行讨论。为了进一步分析地表坡度因子的影响，本文研究的对象仅为单一土壤，无植被、坡面平整、降雨过程中未产生细沟的情况。

具有一定动能的雨滴与地表土壤发生碰撞，产生一定的冲击力，这种冲击力即是地表土壤发生溅蚀的直接动力。碰撞的结果，将使一部分能量被土壤所吸收，转化为热能。而未被吸收的“过剩”能量将原有的土壤结构破坏，使其分散，甚至转化为土粒势能，使一部分土粒溅起，发生跃移，即我们所说的溅蚀；由于重力的作用，这种被溅起的土粒再重新降落到地表，成为“孤立”的土粒。伴随着雨滴的不断打击，这种溅起土粒的过程亦不断进行，为径流提供的输沙源亦越多。

一旦地表产生径流后，雨滴的直接作用对象由土壤转化为“水层”，使碰撞发生了缓冲。即雨滴首先与水层发生碰撞，一部分能量被水层吸收发热；而“剩余”的能量再次与土壤发生碰撞，这种剩余的能量又再次分为两部分，一部分被土粒吸收，另一部分则用来破坏土壤结构。但此时这种“二次剩余”能量相对较小，因此产生的溅蚀亦就相对较小。如果地表水层较厚，则雨滴动能会被水层全部吸收，不会再发生溅蚀。

上述分析表明，溅蚀的结果并非使土壤颗粒输出坡面，它仅仅是一种侵蚀现象。而这种被溅起的土壤颗粒“孤立”体，最终要被坡面径流冲刷搬运，因此对于雨滴溅蚀的研究其主要目的就在于搞清楚它究竟溅起的总量有多大，为径流冲刷搬运提供的“物质量”有多少，这将是进一步研究径流侵蚀，从而弄清坡面水蚀动力过程机制的基础。

由于土粒飞溅的随机性，即它可能向所有方向飞溅，因此溅蚀总量就应是各个方向上溅蚀量的总和；研究地表坡度因子对雨滴溅蚀的影响，就应分别研究各个方向上溅蚀量受地表坡度的影响状况。

二、试验设计及方法

该实验在室内进行，降雨设备选用DIK—6000雨滴发生器，降雨高度为8.67m，雨滴最大直径 $d_{\max} < 4.0\text{mm}$ ，可保证雨滴达终点速度。供试土样采自陕北安塞茶坊实验场，为坡耕地表层黄绵土，其机械组成如表1所示。盛土设备采用投影长度为100cm，宽40cm，高35cm的木箱，

表1 试验用土各级粒径组成

各级颗粒含量百分数 (mm、%)						
1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.01
0.23	38.49	28.99	4.59	12.01	15.69	37.29

箱的底部充分开孔，以克服边界条件的影响。在木箱的上、下、侧三个方向分别安装溅蚀板观测溅蚀。选用5种坡度，分别为 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° ；5种雨强， $0.822\text{mm}/\text{min}$ 、

1.090mm/min、1.468mm/min、1.757mm/min、2.037mm/min。采用组合试验的方法，并布设一次重复，共计50场次实验。土壤容量控制在 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，土壤含水量为10%左右，试验前分别称重、实测含水量，误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。每次降雨前均将坡面整平，尽量减少边界条件的影响；坡面产流后开始计时，每次实验降雨历时为50分钟，在整个试验过程中坡面未产生细沟。泥沙处理采用常规的烘干法。

三、试验结果及分析

根据实验数据，对向上坡、侧坡及下坡溅蚀量与地表坡度的关系进行了分析，具体结果如下。

(一) 向上坡溅蚀量与坡度的关系

通过对实验数据整理计算，点绘出关系曲线如图1。

对上述实验数据进行相关分析，得出下列关系式：

$$i = 0.822 \quad Su = 16.76 + 0.82S - 0.04S^2$$

$$r = 0.906$$

$$i = 1.090 \quad Su = 9.26 + 2.312S - 0.076S^2$$

$$r = 0.855$$

$$i = 1.468 \quad Su = 26.795 + 1.23S + 0.058S^2$$

$$r = 0.964$$

$$i = 1.757 \quad Su = 9.469 + 4.17S - 0.137S^2$$

$$r = 0.892$$

$$i = 2.037 \quad Su = 42.565 + 1.833S - 0.0916S^2$$

$$r = 0.955$$

i 为雨强mm/min； Su 为上坡溅蚀量。

由上述曲线可知向上坡溅蚀量随坡度的变化有递增趋势，但递增到一定程度后即递减。我们定义对应于溅蚀极大值的地表坡度为临界坡度 S_k 。根据上述关系式

$$\text{令 } \frac{dSu}{dS} = 0$$

即可求出 S_k ，结果如下：

$i = 0.822$ 时，	$S_k = 10.5^\circ$
$i = 1.090$ 时，	$S_k = 15.1^\circ$
$i = 1.468$ 时，	$S_k = 10.7^\circ$
$i = 1.757$ 时，	$S_k = 15.2^\circ$
$i = 2.037$ 时，	$S_k = 10.0^\circ$

由此看来，向上坡溅蚀量的临界坡度大致在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 之间。

(二) 向侧坡溅蚀量与地表坡度的关系

由图2曲线知，当 $i < i_1, i_2, i_3, i_4, i_5$ 时，其坡度的变化规律与向上坡度蚀量变化规律同，即都存在一个临界坡度 S_k ，当 $S < S_k$ 时，坡度对溅蚀起增加作用，当 $S > S_k$ 时，坡度对溅蚀起减缓作用。但应 $i = i_5 = 2.037\text{mm}/\text{min}$ 时，坡度对溅蚀的减缓作用消失，溅蚀量随坡度的增加有增加

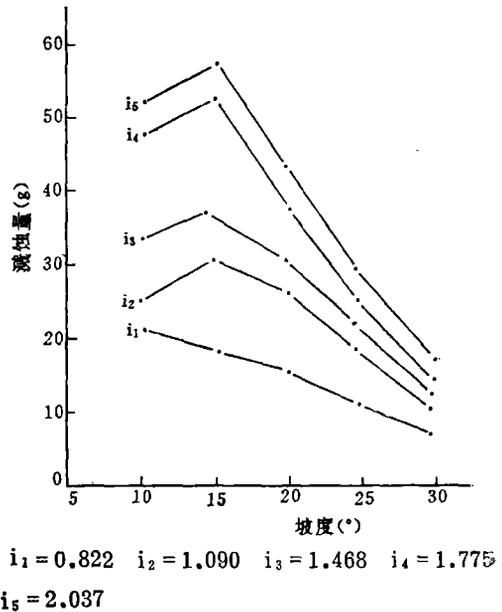


图1 上坡溅蚀量与坡度的关系曲线

趋势,但趋势趋于平缓,究竟是什么原因还无法解释清楚,但可以认为,对于溅蚀雨滴的打击在起主要作用,当雨强较大其打击作用特别强时,地表坡度减缓溅蚀的作用将消失,或者说雨滴的打击作用远大于坡度减缓溅蚀的作用。

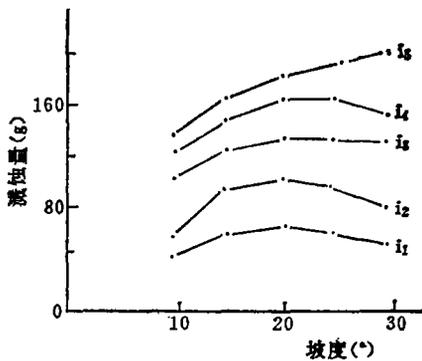
采用同样方式对实验数据回归,并根据方程式求 S_k 。

$i = 0.822$	$S_s = 1.70 + 5.685S - 0.134S^2$	$r = 0.965$
$i = 1.090$	$S_s = -52.5 + 14.511S - 0.341S^2$	$r = 0.964$
$i = 1.468$	$S_s = 44.09 + 7.314S - 0.151S^2$	$r = 0.986$
$i = 1.757$	$S_s = 33.41 + 11.326S - 0.247S^2$	$r = 0.996$
$i = 2.037$	$S_s = 259.045S^{0.429}$	$r = 0.977$

当 $i = 0.822$ 时	$S_k = 21^\circ$
当 $i = 1.090$ 时	$S_k = 21.3^\circ$
当 $i = 1.468$ 时	$S_k = 24.2^\circ$
当 $i = 1.757$ 时	$S_k = 23^\circ$

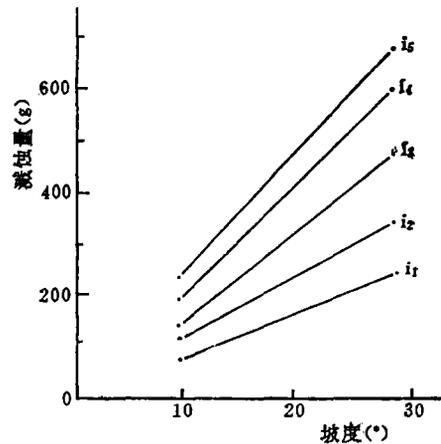
即： S_k 大致在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 之间。

(三) 向下坡溅蚀量与坡度的关系



$i_1 = 0.822$ $i_2 = 1.090$ $i_3 = 1.468$
 $i_4 = 1.757$ $i_5 = 2.037$

图 2 向侧坡溅蚀量与坡度关系曲线



$i_1 = 0.822$ $i_2 = 1.090$ $i_3 = 1.468$ $i_4 = 1.757$
 $i_5 = 2.037$

图 3 向下坡溅蚀量与坡度的关系

由图 3 曲线可以看出, 向下坡溅蚀量与坡度呈递增关系, 即坡度的递增, 溅蚀量随坡度以线型趋势递增。

对实验数据进行相关分析有下列关系:

$i = 0.822$	$S_d = 9.063 + 6.741S$	$r = 0.962$
$i = 1.090$	$S_d = -17.256 + 10.813S$	$r = 0.999$
$i = 1.468$	$S_d = -34.025 + 15.434S$	$r = 0.981$
$i = 1.757$	$S_d = -16.570 + 19.131S$	$r = 0.985$
$i = 2.037$	$S_d = -41.550 + 23.079S$	$r = 0.992$

上述各式经检验, 其显著性水平均为 $\alpha = 0.01$ 。很显然, 上述各式的标准型为:

$$S_d = a + bS$$

该直线的斜率 k 即为 b , 对上述直线的斜率进行分析有如下结果

$i = 0.822$	$k = 6.741$
$i = 1.090$	$k = 10.813$
$i = 1.468$	$k = 15.434$
$i = 1.757$	$k = 19.131$
$i = 2.037$	$k = 23.079$

如果对上述直线斜率与雨强进行统计分析, 其相关性非常好。

$$k = 9.124i^{1.33} \quad r = 0.997 \quad (\alpha = 0.01)$$

直线的斜率表示因变量随自变量的递增速率。很明显, 雨强的增大, 向下坡溅蚀量随坡度的递增速率将是雨强的幂函数。

上述分析表明, 向上坡溅蚀量 S_u 与坡度成抛物线型关系, 向侧坡溅蚀量当雨强 $i < 2.037$ mm/min时, 其溅蚀量 S_s 亦与坡度成抛物线型关系, 但当 $i = 2.037$ mm/min时, 二者关系变成幂函数型, 向下坡溅蚀量与坡度成直线关系, 且直线斜率与雨强成幂函数关系。

产生上述结果的原因比较复杂。我们初步认为, 这主要是土粒本身重力的作用。被击溅起的土粒, 其运动轨迹是随机的, 由于其重力的作用, 产生了一个向下的分力, 这样重力作用对于向下坡溅蚀即产生了一个动力, 坡度越大, 这种分力越大, 因此向下坡的溅蚀量越大。相反重力的作用对于向上坡溅蚀量却起一个阻力的作用, 当坡度较小时这种阻力较小, 它对溅蚀所起的阻碍作用不是太大, 但随着坡度的增大这种阻力逐渐增大; 因而就导致了向上坡溅蚀量在坡度较小时随坡度递增, 但当坡度增大到一定程度时, 反而随坡度递减。对于向侧坡溅蚀量, 溅蚀的来源不但来自正对溅蚀板的小区部位, 而且亦来自溅蚀板上、下部的小区部位, 如图4。

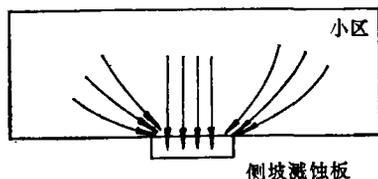


图4 向侧坡溅蚀部位示意图

因此仍有重力的影响, 不过此时重力即是动力又是阻力, 这种正负结果将导致向侧坡溅蚀量随坡度的变化, 不同于向上坡及向下坡溅蚀量随坡度的变化那么“陡峻”, 相对比较平缓。如图1、图2、图3所示。

四、雨滴溅蚀模型

我们认为溅蚀仅是侵蚀的一种方式, 而溅蚀量仍不能算作坡面产沙量。雨滴溅蚀对坡面产沙的重要作用, 在于它为坡面径流的冲刷提供了充分的“孤立”松散体, 使得利用较小的径流即可将其输出坡面。因此研究溅蚀的主要目的就在于搞清它为径流冲刷提供的物质总量。这样不管 S_u 、 S_s 、 S_d 都是径流的冲刷对象。

$$\text{令 } S_T = S_u + S_s + S_d \quad \text{为溅蚀总量}$$

建立 S_T 与降雨特性因子以及坡度因子的关系式即我们所说的雨滴溅蚀模型。

对于降雨特性因子选用 EI 综合因子作为指标, 坡度因子选用坡度指标。选用 $S_T = a(EI)^m S^n$ 模型。

式中: a 、 m 、 n 分别为参数。

根据实验数据, 经过分析计算得出, 溅蚀总量的预报模型为:

$$S_T = 5.985(EI)^{0.544}S^{0.471} \quad (r = 0.873, F = 34.96)$$

经F检验，显著性水平为 $\alpha = 0.01$ ，为高度显著。

上式中： S_T ——单位面积上的溅蚀总量 (g)； E ——雨滴动能 (J/m^2)；

I ——降雨强度 (mm/min)； S ——地表坡度 ($^\circ$)

利用上述模型对溅蚀量进行预报误差小于20%，如表2。

表 2 溅蚀量实测值与模拟值对照表

序 号	实 测 值 (g)	模 拟 值 (g)	误 差 (%)	备 注
1	340.129	409.042	+20.26	
2	396.045	473.107	+19.46	
3	673.545	660.916	-1.88	
4	843.001	781.163	-7.34	
5	942.068	911.243	-3.27	
6	465.265	454.577	-2.30	
7	674.800	578.252	-14.30	
8	865.577	812.938	-6.08	
9	1104.170	943.459	-14.56	
10	1191.003	1605.872	-7.15	
11	469.678	497.735	+5.97	
12	753.065	671.116	-10.88	
13	990.953	913.376	-7.83	
14	1256.588	1072.043	-14.69	
15	1370.568	1264.211	-7.76	
16	469.810	560.576	+19.32	
17	769.443	742.594	-3.49	
18	1106.338	1018.850	-7.91	
19	1332.700	1188.812	-10.80	
20	1572.675	1399.421	-11.02	
21	592.505	616.436	+4.04	
22	782.660	814.855	+4.11	
23	1230.215	1119.956	-8.96	
24	1476.705	1304.350	-11.67	
25	1805.595	1530.705	-15.22	误差值 = (模拟值 - 实测值)/实测值

五、结 论

上述分析表明，地表坡度对雨滴溅蚀的影响，主要是通过坡面上土粒的重力在起作用。由于土粒飞溅在方向上的随机性导致了不同方向上溅蚀量随地表坡度变化的规律有所差异。大致有如下变化趋势。

1. 向上坡溅蚀量与地表坡度为抛物线型关系，临界坡度在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 之间。

(下转第28页)

抗旱能力,达到保土、保水、保肥和提高农作物产量的目的。如凌云县东和乡陇雅村吴天平一户,1988年自筹资金350元,建造石坎梯地4.2亩,并采取深翻压青措施,1989年玉米平均亩产291.7kg,比1987年增产2.88倍。近两年来,广西在石灰岩地区还推广一种用塑料薄膜覆盖种植玉米新技术,这种在点种玉米后用薄膜覆盖地面,能防寒、保温、保持土壤水分,增加温度,加速玉米生长,提高单位面积产量,全自治区1990年推广地膜覆盖玉米种植30万亩,每亩可增产100~150kg,仅此一项全区可增产粮食3 000万kg以上。

(五) 建立生态建设目标责任制, 加强生态环境建设 为工农业发展创造良好的自然环境,1987年广西壮族自治区党委,人民政府作出《关于保护森林,发展林业,力争15年基本绿化广西的决定》,1989年又作出《关于建立县级领导干部造林绿化任期责任制的决定》这些行政措施,为防治水土流失,提供了有利条件。全自治区山权地界及造林绿化责任均已明确。如都安瑶族自治县,从1980年起,在县林业部门的指导下,集中力量,狠抓了山林权属的落实,目前全县90%的荒山均已责任落实到户,调动了群众治山,管山的积极性,做到山有主,治有责,管有利。

石灰岩区山水土流失日趋严重,危害程度大是客观现实,但决非不治之症,只要按照自然规律,通过人们的势力,广泛发动和依靠人民群众,采取因地制宜和行之有效的措施,完全可以恢复和发展石灰岩山区林灌茂密,山青水秀的景貌。

(上接第13页)

2. 一般情况下,向侧坡溅蚀量与地表坡度亦呈抛物线型关系,临界坡度在 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间;但当雨强较大时,如 $i = 2.037 \text{ mm/min}$,该关系转而呈幂函数关系,临界坡度消失。

3. 向下坡溅蚀量与地表坡度呈线性递增关系,且递增速率随雨强的增加而增大。

同时采用 $S_T = a(EI)^m S^n$ 模型对雨滴溅蚀总量进行预报是可行的,其误差小于20%。

参 考 文 献

- [1] 周佩华等. 降雨能量试验研究初报. 《水土保持通报》, 1981年
- [2] 王礼先等译. 《土壤侵蚀》·北京: 水电出版社, 1987年
- [3] 江忠善等. 降雨因素和坡度对溅蚀影响的试验研究. 《水土保持学报》, 1989年
- [4] S. W. Park et al. Splash erosion modeling physieal analyses, ASAE, 1982年



党在我心中



幸福不忘共产党

(东北轻合金加工厂 张维春)