

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.023

# 华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究\*

程金花<sup>1</sup> 秦越<sup>1</sup> 张洪江<sup>1</sup> 丛月<sup>1</sup> 杨帆<sup>1</sup> 闫永庆<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083;

2. 北京市延庆县水土保持试验站, 北京 102100)

**摘要:** 采取野外模拟降雨试验,研究了降雨强度、降雨动能以及降雨历时对溅蚀量的影响规律,分析了溅蚀土粒的距离、方位的分布特征,以及溅蚀土粒的粒径组成规律。研究表明:雨滴击溅过程中,在不同强度的降雨作用下,下坡方向产生的溅蚀量最大,上坡方向产生的溅蚀量最小。溅蚀总搬运量与溅蚀净搬运量均与降雨强度呈正相关。溅蚀量与降雨强度呈指数函数关系,与降雨动能呈现线性函数关系。溅蚀率与降雨历时呈现指数函数关系。溅蚀土粒主要分布在0~10 cm,占溅蚀总搬运量的45.40%~57.75%,在50~60 cm内的溅蚀量所占比例不高于1.75%。溅蚀量与溅蚀距离呈负指数函数关系。溅蚀土粒径小于等于2 mm,溅蚀土粒中细砂粒和粗粉粒百分比与原状土壤较为接近,粗砂粒百分比远低于原状土壤,而粘粒百分比高于原状土壤,粉粒百分比低于原状土壤。溅蚀土粒中细砂粒(0.05~0.2 mm)最易于被溅蚀,而小粒径(小于0.002 mm)和大粒径(大于0.2 mm)土壤颗粒不易被溅蚀。当降雨强度足够大时,对于同种特征的土壤,溅蚀土粒存在稳定的粒径组成。当降雨强度保持不变时,溅蚀平均粒径随溅蚀距离的增加而变小。溅蚀距离在0~30 cm,溅蚀平均粒径的变化率较大;随溅蚀距离的不断增加,溅蚀平均粒径的变化率较小。

**关键词:** 雨滴击溅 降雨因素 距离分选 粒径分选

**中图分类号:** S157.1; P426.615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0153-09

## Splash Erosion under Artificial Rainfall in Rocky Mountain Area of Northern China

Cheng Jinhua<sup>1</sup> Qin Yue<sup>1</sup> Zhang Hongjiang<sup>1</sup> Cong Yue<sup>1</sup> Yang Fan<sup>1</sup> Yan Yongqing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China 2. Soil and Water Conservation Station of Beijing Yanqing County, Beijing 102100, China)

**Abstract:** Raindrop-impact-induced erosion as the beginning of soil erosion had significant impact on the whole erosion process. In order to systematically understand the effect of rainfall characteristics on splash characteristics of Beijing, artificial rainfall experiment was conducted. Rainfall intensity, rainfall kinetic energy and duration of raining time were chosen to analyze the splash regulation. The characteristics of splash distance and fragment size distribution were also tested. The results of rainfall caused splash erosion indicated that during the splash erosion process, the quantity of splashed soil particles in down slope had a significantly larger amount than that of the up slope, while the quantity of up slope was the smallest of all the four directions. The amount of total splashed particles and net splashed particles were all positively related to rainfall intensity. Quantity of splashed soil particles was significantly positively correlated to rainfall intensity and rainfall kinetic energy, respectively. The quantity of splashed soil particles was exponentially increased with rainfall intensity. And a linear function could show the relationship between quantity of splashed soil particles and rainfall kinetic energy. The rate of total

收稿日期: 2014-03-04 修回日期: 2014-04-26

\* 国家自然科学基金资助项目(41271300, 30900866, 40771042)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD38B0403)和中央高校基本科研业务费专项资助项目(TD2011-2)

作者简介: 程金花, 副教授, 主要从事土壤溅蚀与植被恢复研究, E-mail: jinhua-cheng@126.com

splashed soil particles decreased exponentially with duration of raining time. The splashed fragments distributed mainly in 0 ~ 10 cm of the study plot, which accounted 45.4% ~ 57.75% of the total splash erosion, while that in 50 ~ 60 cm of the plot was less than 1.75%. The quantity of splashed particles was exponentially decreased with splash distance. The splashed fragment size distribution showed that fragments smaller than 2 mm were transported by raindrop impacts. The mass percentage of splashed soil particles with size of 0.02 ~ 0.05 mm and 0.05 ~ 0.2 mm was similar to that of the texted soil. The content of fragments with size less than 0.02 mm was higher than that of texted soil, while the content of fragments with size of 0.2 ~ 2 mm was lower. The mass percentage of particles with size of 0.05 ~ 0.2 mm was the most, while the mass percentage of particles with size less than 0.002 mm and size of 0.05 ~ 0.2 mm were the least. Theoretically, the quantity of splashed soil particles with certain fragment size distribution of soil reached the peak. The percentage of splashed soil particles with size less than 0.05 mm increased with rainfall intensity, and then almost kept the same. The percentage of splashed soil particles with size of 0.05 ~ 0.2 mm was negatively correlated with rainfall intensity. The percentage of splashed soil particles with size of 0.2 ~ 2 mm increased with rainfall intensity. Splashed fragment size distribution kept the same when rainfall intensity was large enough. The amount of five kinds of splashed soil particles were all exponentially decreased with splash distance with high relationship respectively, which was the same as that of total amount of splashed soil particles. Mean size distribution decreased with splash distance under the same rainfall intensity. Mean size distribution was significantly higher under 121.4 mm/h rainfall intensity than other three rainfall intensities. The changing rate of mean size distribution was large in 0 ~ 30 cm from the study plot, and the changing rate decreased as the splash distance increased.

**Key words:** Splash erosion    Rainfall characters    Fragment size distribution    Splash distance

## 引言

水力侵蚀是北京地区最主要的土壤侵蚀类型,雨滴击溅作为水力侵蚀的初始过程,对整个水力侵蚀过程尤其是其后发生的侵蚀过程具有重要影响,是水力侵蚀的重要环节与组成部分。然而,由于溅蚀的过程较短、机制复杂、研究困难,导致国内外学者对于雨滴击溅侵蚀的深入与细化研究较难开展。

北京位于华北平原,土壤多属于褐土,土壤粗骨质含量大,抗蚀、抗冲性高于黄土,但由于土层较薄,土壤底层多为渗透性很差的基岩,土壤被侵蚀后生态环境急剧恶化而不易恢复。雨滴溅蚀是降雨过程中,雨滴打击地表引起土壤团粒被破坏、分散、溅起并增加地表薄层径流紊动的侵蚀现象,雨滴击溅作为土壤侵蚀的初始过程,为其后发生的土壤侵蚀过程提供溅蚀物质<sup>[1]</sup>。了解溅蚀机理,有利于从水土流失的源头对其治理,并改善和保护当地的生态环境。

国外研究者在19世纪40年代开始进行土壤溅蚀的研究。在国内,对于黄土区的溅蚀研究已广为开展,研究分析了降雨、土壤、植被等因素对溅蚀特征的影响,得出一系列经验模型与公式。然而,在华北土石山区进行的溅蚀研究较少,而且由于研究地

域的不同,研究结果和结论存在显著区别,模型经验参数的取值对模型的结果影响较大,溅蚀模型间差异较大,不同地域的溅蚀研究很难使用同一个溅蚀模型。另外,大部分研究都是在室内模拟完成,野外的实地研究较少,室内试验的结论在实际推广与应用中,存在较大误差,因此在华北地区进行土壤溅蚀的相关研究很有必要。

以往的研究主要关注溅蚀的影响因素,以及溅蚀的发生、发展过程,忽视了溅蚀土粒自身的特征、溅蚀土粒在空间上的分布及其粒径组成特征对溅蚀机理研究也具有重要意义。

本文采取野外人工降雨试验,研究华北地区降雨特征对土壤溅蚀的影响,分析溅蚀土粒的距离、方位的分布特征,以及溅蚀土粒的粒径组成规律。期为华北地区土壤溅蚀研究提供经验数据,为模型建立提供参考,为水土流失的治理提供帮助,达到保护与改善当地生态环境的目的。

## 1 研究区概况

研究区位于北京市延庆县上辛庄水土保持研究站,地理坐标为东经116°03'11" ~ 116°04'19",北纬40°26'19" ~ 40°27'26"。土壤类型为褐土,试验地土壤的理化性质如表1所示。

表1 土壤理化性质  
Tab.1 Soil properties of study area

参数	粘粒含量 ( <0.002 mm)	粉粒含量 (0.002 ~ 0.02 mm)	粗粉粒含量 (0.02 ~ 0.05 mm)	细砂粒含量 (0.05 ~ 0.2 mm)	粗砂粒含量 (0.2 ~ 2 mm)	有机质含量 %
数值	9.8	22.9	31.8	23.3	12.2	1.61

## 2 研究方法

### 2.1 样地选取

关于溅蚀过程的研究,研究者在坡度小于20°时得出的结论较为一致<sup>[2-6]</sup>。综合试验区的地形,在坡度为5°的坡面上选取39块植被盖度为0的试验样地,每块样地均为半径0.5 m的圆形,由于在一块试验样地多次重复降雨将会改变样地土壤理化性质,为了确保试验土壤具有基本相同理化性质,每块样地只进行一次人工降雨。

### 2.2 试验仪器

试验选用人工降雨器模拟自然降雨,人工降雨器长宽均为2 m,高度为4 m,垂直降雨高度3.8 m,降雨器采用侧喷喷头中心区域进行降雨,喷头孔径分别为:1.5、2.0、2.5 mm,雨滴中数直径为1.3~2.4 mm,可调雨强范围为20~150 mm/h。在样地的上坡、下坡、左坡、右坡4个方向分别布设了改良的溅蚀盘(图1)。溅蚀盘由钢板制成,内径为50 cm,外径为110 cm,溅蚀盘上设有距离5 cm的隔断,隔断高2 cm,以测定不同溅蚀距离内溅蚀量的分布(图2)。为防止降雨期间溅蚀土粒产生二次溅蚀,在溅蚀盘上方使用塑料挡棚进行遮挡,试验设计简图如图3所示。

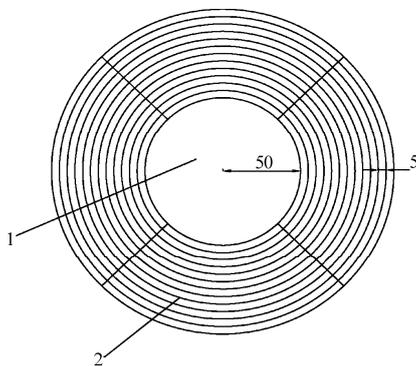


图1 溅蚀盘的布设示意图(单位:cm)

Fig.1 Layout of splash trays

1. 试验样地 2. 溅蚀盘

大部分研究的试验结果表明,小于20 mm/h的降雨强度不产生或产生极少量的土壤溅蚀量<sup>[1]</sup>。所以本试验设定13个降雨强度,即20~30、30~40、40~50、50~60、60~70、70~80、80~90、90~100、100~110、110~120、120~130、130~140、140~150 mm/h,以测定不同强度的降雨在样地

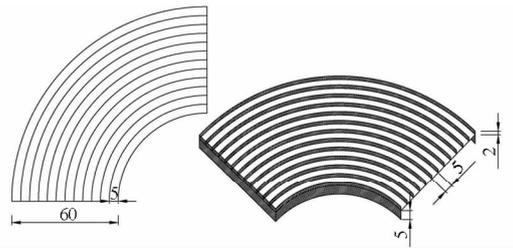


图2 改良溅蚀盘示意图(单位:cm)

Fig.2 Modified splash tray

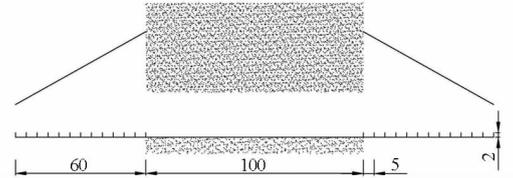


图3 试验设计示意图(单位:cm)

Fig.3 Schematic design

4个坡向产生的溅蚀量。

### 2.3 溅蚀量及粒径分选的测定

模拟人工降雨开始前,用环刀收集样地外部距离样地10 cm范围内上、下、左、右4个坡向的土样,烘干并干燥土样,求得土壤前期含水率。每次人工降雨时间为15 min,人工降雨结束后,即开始收集溅蚀盘中的溅蚀土粒,用盛装蒸馏水的洗瓶分别对溅蚀盘内各个隔断内的溅蚀板进行冲洗,并用铝盒收集洗液。将铝盒置于干燥箱,在105℃下干燥24 h。干燥结束后,称取铝盒中的泥沙净质量,并根据样地前期含水率计算溅蚀土粒质量。为了测定溅蚀土粒中粘粒(小于0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)、粗粉粒(0.02~0.05 mm)、细砂粒(0.05~0.2 mm)和粗砂粒(0.2~2 mm)的粒径分选规律,将称量后的样品过筛,土壤筛的孔径分别为2、0.2、0.05、0.02、0.002 mm。

## 3 数据处理

### 3.1 溅蚀总搬运量和溅蚀净搬运量

溅蚀总搬运量等于各方向溅蚀量之和,表示雨滴击溅为地表搬运的总松散物质的量;溅蚀净搬运量等于下坡溅蚀量减去上坡溅蚀量,表示雨滴击溅作用向下坡搬运土壤的质量<sup>[6]</sup>。溅蚀总搬运量为

$$S_t = S_l + S_r + S_u + S_d \quad (1)$$

式中  $S_t$ ——溅蚀总搬运量

$S_l$ ——左坡溅蚀量

$S_r$ ——右坡溅蚀量

$S_u$ ——上坡溅蚀量

$S_d$ ——下坡溅蚀量

溅蚀净搬运量为

$$S_n = S_d - S_u \quad (2)$$

式中  $S_n$ ——溅蚀净搬运量

### 3.2 降雨动能计算

雨滴对土壤颗粒的打击和搬运的能量来自其在降落到地表前由势能所转化的动能,由于受到空气阻力的作用,雨滴在降落的过程中其速度会达到一个最大值,称为终点速度。因此,通常雨滴动能是指雨滴达到终点速度时的动能,降雨动能可以看作是所有雨滴动能的和。因此单个雨滴的动能与降雨所包含的不同大小雨滴的数目是计算降雨动能的基础。本试验利用马廷等<sup>[7]</sup>研究得出的降雨动能计算式计算人工降雨动能

$$E_k(t) = 4.1^{-b} a I(t)^{0.21b} \quad (3)$$

式中  $I(t)$ —— $t$ 时刻的降雨强度

$a$ ——率定系数

$b$ ——基于雨滴直径的参数

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 溅蚀量特征分析

#### 4.1.1 不同方位溅蚀量分析

试验得到的溅蚀量数据如表2所示。利用 $t$ 检验方差分析法分析样地左坡、右坡、上坡以及下坡产生的溅蚀量发现:在降雨强度相同时,下坡溅蚀量最多,与其他3个坡向产生的溅蚀量有显著差异( $p < 0.001$ , 样本数  $n' = 13$ ),左坡与右坡方向产生的溅蚀量次之,上坡溅蚀量最少,与其他3个坡向产生的溅蚀量呈显著差异( $p \leq 0.001$ ,  $n' = 13$ )。试验测得的左坡溅蚀量和右坡溅蚀量在相同降雨强度下的差异较小( $p = 0.337$ ,  $n' = 13$ ),理论上左坡与右坡产生的溅蚀量应完全相同,分析溅蚀量产生差异的原因,可能是受样地微地形影响,以及溅蚀土量收集与处理过程存在人为误差。

以上结果表明,在雨滴击溅过程中,下坡产生的溅蚀量最大,侧坡方向次之,上坡产生的溅蚀量最小。这是由于在不考虑风的影响下,雨滴打击地表的作用力分为垂直于地表的正压力和平行于地表的剪切力(沿上坡、下坡和侧坡3个方向),土粒飞溅时还受到垂直向下的重力作用。向上坡飞溅的土粒其重力做负功,成为土粒运移的阻力,向下坡运移的土粒情况相反,所以下坡产生的溅蚀量最大。刘和平等<sup>[3]</sup>的室内试验结果表明坡度为 $5^\circ$ 时下坡溅蚀量并不显著大于上坡和侧坡溅蚀

量。本文与其研究结论不同,可能由于本研究是在野外原状土壤下直接收集的溅蚀量,与室内试验存在差异。

#### 4.1.2 溅蚀总搬运量和净搬运量分析

由表2可知溅蚀总搬运量与溅蚀净搬运量均随降雨强度的增加而增大,两者均与降雨强度呈正相关关系。在20~30、30~40、40~50、50~60、60~70、70~80、80~90、90~100、100~110、110~120、120~130、130~140、140~150 mm/h,13个降雨强度各3次试验条件下,溅蚀总搬运量的变化率为0.024~0.153 g/h,溅蚀净搬运量的变化率为0.002~0.047 g/h。溅蚀总搬运量与净搬运量的变化率均随降雨强度的增加呈不规律的变化趋势,因此不能形成相关关系。其中降雨强度由110~120 mm/h升至120~130 mm/h时,溅蚀总搬运量的变化率均达到最大值;降雨强度在120~130 mm/h升至130~140 mm/h时,溅蚀净搬运量的变化率达到最大值。

表2 降雨参数与4个方向的溅蚀量

Tab.2 Rainfall parameters and quantity of splashed particles

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	过程最大 降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	溅蚀量/g				溅蚀总 搬运 量/g	溅蚀净 搬运 量/g
		左坡	右坡	上坡	下坡		
26.4	27.5	1.03	1.00	1.03	1.10	4.16	0.07
34.9	43.1	1.21	1.20	1.11	1.31	4.83	0.20
43.7	47.6	1.43	1.51	1.32	1.65	5.91	0.33
51.2	53.4	1.45	1.47	1.40	1.57	5.89	0.17
64.8	68.8	1.50	1.49	1.43	1.71	6.13	0.28
77.0	82.5	1.63	1.70	1.63	2.11	7.07	0.48
83.1	93.2	1.80	1.87	1.77	2.19	7.63	0.42
91.4	95.6	2.09	2.01	1.81	2.24	8.15	0.43
100.3	107.4	2.21	2.18	1.97	2.66	9.02	0.69
117.2	121.0	2.30	2.28	2.17	2.83	9.58	0.66
121.4	127.3	2.43	2.50	2.24	3.12	10.29	0.88
136.5	140.2	2.88	2.90	2.47	3.40	11.65	0.93
144.5	150.0	2.94	2.95	2.43	3.51	11.83	1.08

### 4.2 溅蚀量与降雨特征参数的关系

#### 4.2.1 不同方位溅蚀量与降雨强度的关系

对不同方位的溅蚀量与降雨强度进行回归分析,得出上、下、左、右坡4个方位的溅蚀量 $S$ 与降雨强度 $I$ 均呈现 $S = me^{nI}$ 的指数函数关系,其中 $m$ 、 $n$ 为与方位及土壤有关的参数(图4),两者相关性较高(表3)。这一结果与高学田等<sup>[8]</sup>以及Free<sup>[9]</sup>和Meyer等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。范荣生<sup>[11]</sup>等认为降雨强度通过影响降雨动能,进而影响降雨侵蚀力,达到最终影响土壤溅蚀量的结果。本研究也表明降雨强度可以作为雨滴击溅过程中有效影响溅蚀的降雨特征参数之一。

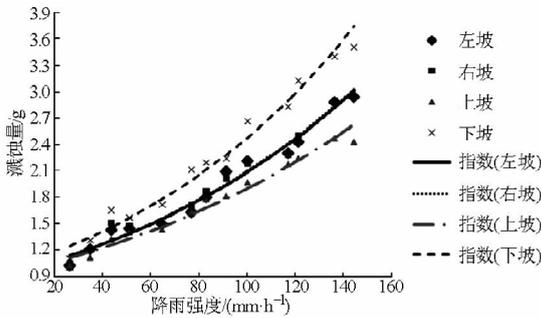


图4 4个方位溅蚀量与降雨强度的关系

Fig. 4 Relationship between rainfall intensity and quantity of splashed particles in four directions

表3 4个方位的溅蚀量与降雨强度的拟合函数

Tab. 3 Equation of relationship between rainfall intensity and quantity of splashed soil particles

不同方位	溅蚀量与降雨强度关系式	R <sup>2</sup>
左坡	$S = 0.9073e^{0.0083I}$	0.9724
右坡	$S = 0.9125e^{0.0083I}$	0.9621
上坡	$S = 0.9032e^{0.0074I}$	0.9702
下坡	$S = 0.9712e^{0.0093I}$	0.9703

注：样本数  $n' = 13$ 。

#### 4.2.2 不同方位溅蚀量与降雨动能的关系

吴普特等<sup>[6]</sup>对雨滴动能产生土壤溅蚀的过程做了清楚的物理分析,认为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。碰撞使一部分能量被土壤吸收,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,即溅蚀。由于重力作用,这种被溅起的土粒再重新降落到地表,成为“孤立”的土粒。所以降雨动能被认为是对滴击溅过程中最有价值的降雨特征参数之一。Rose<sup>[12]</sup>和Parsons等<sup>[13]</sup>分别研究了降雨动能对土壤溅蚀的影响,认为土壤溅蚀受降雨动能的影响较大,两者呈正相关关系。本研究利用回归分析的统计方法分析上、下、左、右坡4个方位的溅蚀量  $S$  与降雨动能  $E$  的数据,发现线性函数的拟合效果最好,回归方程为:  $S = mE - n$ , 其中  $m$ 、 $n$  为与方位及土壤有关的参数(图5),两者相关性较高(表4)。表明降雨动能可以良好地反映降雨对雨滴击溅侵蚀的影响。

#### 4.2.3 溅蚀总搬运量与降雨历时的关系

随着降雨历时的延长,地表条件在持续变化,这对溅蚀过程具有一定的影响。试验选取了31.4、67.2、95.3 mm/h 3种降雨强度下9个降雨历时(3、6、10、15、20、25、30、40、50 min)的溅蚀总搬运量(表5),由表5可知,3种降雨强度下,溅蚀总搬运量均随降雨历时的增加而增大。降雨历时不变时,

溅蚀总搬运量与降雨强度呈正相关关系。

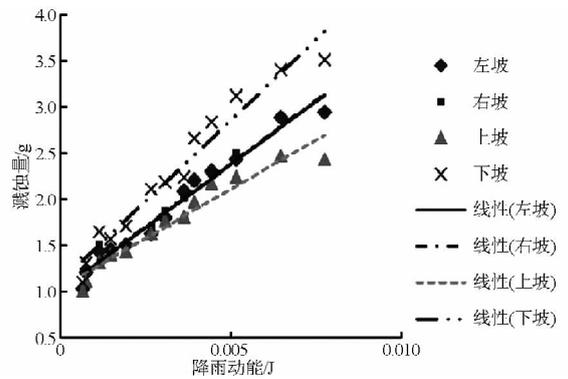


图5 4个方位的溅蚀量与降雨动能的关系

Fig. 5 Relationship between rainfall kinetic energy and quantity of splashed soil particles in four directions

表4 4个方位的溅蚀量与降雨动能的拟合函数

Tab. 4 Equation of relationship between rainfall kinetic energy and quantity of splashed soil particles

不同方位	溅蚀量与降雨动能的关系式	R <sup>2</sup>
左坡	$S = 272.62E + 1.0140$	0.9711
右坡	$S = 272.91E + 1.0254$	0.9685
上坡	$S = 212.87E + 1.0462$	0.9385
下坡	$S = 349.49E + 1.1060$	0.9583

注：样本数  $n' = 13$ 。

表5 溅蚀总搬运量与降雨历时的关系

Tab. 5 Amount of total splash soil particles as a function of duration of raining time g

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨历时/min							
	6	10	15	20	25	30	40	50
31.4	1.63	2.77	4.28	6.11	6.22	6.47	7.03	7.07
67.2	2.21	4.35	7.03	8.20	9.17	9.81	10.14	10.26
95.3	3.03	6.80	8.72	9.48	10.81	10.75	11.32	11.57

蔡强国等<sup>[4]</sup>研究了降雨历时对土壤溅蚀的影响,其结果表明溅蚀量与降雨历时的关系与生长曲线函数相符合,其过程可以用分段指数曲线进行拟合;溅蚀率  $U$  与降雨历时  $T$  之间的关系为:  $U = 0.49Te^{-0.09T}$ ,相关性较高。Woodbarn<sup>[14]</sup>研究发现单位时间溅蚀率随降雨历时的增加呈指数递减,认为这主要是由于粗颗粒增加了地表粗糙度从而增加了土壤的抗蚀性。对溅蚀总搬运量的溅蚀率与降雨历时进行回归分析,发现3种降雨强度下,溅蚀率  $U$  与降雨历时  $T$  均呈现  $U = me^{-nT}$  的指数函数关系,相关性较高(表6)。这与Woodbarn的结论一致。由图6可知,降雨初期溅蚀总搬运量的溅蚀率随时间不断增大,达到一个峰值(降雨10~20 min),并且降雨强度越大,溅蚀率达到峰值所需的时间越少。随着降雨历时的不断延长,溅蚀率稳步减小,并逐渐形成稳定状态。分析原因,降雨初期,土壤较为干燥,雨滴降落,拍击地表,破坏土壤结构,土壤颗粒分

散、飞溅,发生位移,这段时间内,降雨强度越大,其对地表的打击能力越大,溅起的土粒更多;随着降雨的持续,地表土壤不断湿润,土壤颗粒间的粘聚力不断地增大,增加了土壤的抗侵蚀能力,使得溅蚀率减小,直至地表径流产生,径流深度不断变深,宽度不断增大,雨滴不能直接接触地表,同时地表水层对雨滴动能能起到缓冲作用,大大降低雨滴的击溅能力,直至径流足够深使击溅侵蚀基本消失。

表6 溅蚀总搬运量的溅蚀率与降雨历时的拟合函数

Tab.6 Equation of relationship between rainfall time and ratio of total splashed soil particles

降雨强度/( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	溅蚀率与降雨历时的关系式	$R^2$
31.4	$U = 0.3486e^{-0.0167T}$	0.8409
67.2	$U = 0.5713e^{-0.0177T}$	0.8047
95.3	$U = 0.7345e^{-0.0237T}$	0.8960

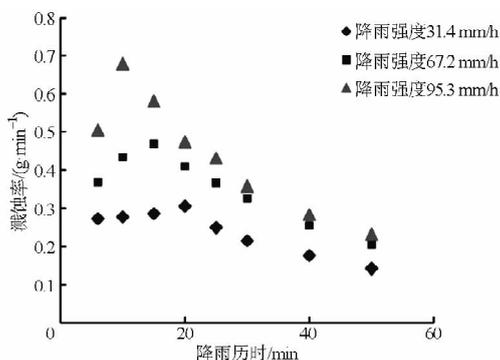


图6 溅蚀总搬运量的溅蚀率与降雨历时的关系

Fig.6 Relationship between duration of raining time and ratio of total splashed particles

### 4.3 溅蚀土粒的距离分布特征

溅蚀总搬运量随距离的分布如表7所示。试验数据表明溅蚀量主要分布在样地0~60 cm范围内,其中分布在0~10 cm范围的溅蚀量占溅蚀总搬运

量的45.40%~57.75%,显著高于其他距离的溅蚀量;10~20 cm距离范围内的溅蚀量占溅蚀总搬运量的19.50%~32.70%;在20~50 cm范围内的溅蚀量占溅蚀总搬运量的18.75%~23.00%;而在50~60 cm范围内溅蚀量占溅蚀总搬运量的比例则不高于1.75%,显著少于其他距离范围的溅蚀量。这是由于雨滴撞击产生松散跃移土粒因受到重力作用而做抛物线运动,土粒大小及质量的差异,导致了抛物线路径的不同,即降落点与起溅点距离的不同。理论上,距离越近,土粒需要的能量越小,距离越远所需的能量越大,所以近距离沉积的跃移土粒较多。

雨滴打击土壤表面,产生的溅蚀物质以抛物线运动轨迹向四周跃移,溅蚀量随距离的分布规律表明,溅蚀量随着跃移距离的增大而减小,与溅蚀距离呈负相关关系。对不同方位的溅蚀量与溅蚀距离进行相关分析,发现溅蚀量 $S$ 与溅蚀距离 $r$ (即溅蚀分散半径)呈现 $S = me^{-nr}$ 指数函数关系,相关性较高(图7)。这与Vandijk等<sup>[15]</sup>和Legout等<sup>[16]</sup>的研究结论一致。

### 4.4 溅蚀土粒的粒径分选特征

#### 4.4.1 降雨强度对溅蚀粒径的影响

通过对溅蚀样品进行筛分,得到4种降雨强度下,不同溅蚀距离内溅蚀土粒的粒径组成(表8)。由表可知,当降雨强度一定时,溅蚀土粒中细砂粒(0.05~0.2 mm)的百分比最大,占总溅蚀量的39.3%;粗粉粒(0.02~0.05 mm)百分比次大,占溅蚀总量的25.0%;粗砂粒(0.2~2 mm)百分比最小,为2.5%,低于原状土壤;粘粒(小于0.002 mm)的含量次少,占总溅蚀量的14.0%,高于原状土壤;粉粒(0.002~0.02 mm)的百分比为19.2%。综上,溅蚀土粒中细砂粒和粗粘粒百分比与原状土较为接

表7 不同距离范围的溅蚀总搬运量分布

Tab.7 Quantity of total splashed soil particles in different splash distances

降雨强度/ ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	溅蚀距离/cm									溅蚀总 搬运量 g
	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~40	40~50	50~60	
26.4	1.350	0.982	0.699	0.303	0.298	0.288	0.115	0.106	0.041	4.182
34.9	1.306	1.136	0.804	0.476	0.432	0.245	0.243	0.145	0.047	4.834
43.7	1.506	1.405	0.948	0.673	0.476	0.325	0.291	0.203	0.058	5.885
51.2	1.446	1.231	0.917	0.819	0.554	0.328	0.310	0.227	0.060	5.892
64.8	1.570	1.331	0.887	0.801	0.580	0.360	0.288	0.219	0.090	6.126
77.0	2.124	1.731	0.968	0.779	0.538	0.390	0.321	0.231	0.082	7.164
83.1	2.346	2.061	0.820	0.670	0.647	0.692	0.145	0.192	0.058	7.631
91.4	2.335	1.946	0.986	0.942	0.668	0.444	0.319	0.228	0.086	7.954
100.3	2.482	2.286	1.340	0.987	0.650	0.472	0.337	0.288	0.128	8.970
117.2	2.450	2.307	1.481	1.204	0.859	0.473	0.353	0.287	0.158	9.572
121.4	2.559	2.431	1.698	1.565	0.822	0.574	0.328	0.278	0.148	10.403
136.5	2.769	2.822	1.935	1.843	0.970	0.564	0.317	0.293	0.185	11.698
144.5	2.810	2.931	1.956	1.920	0.915	0.670	0.228	0.200	0.207	11.837

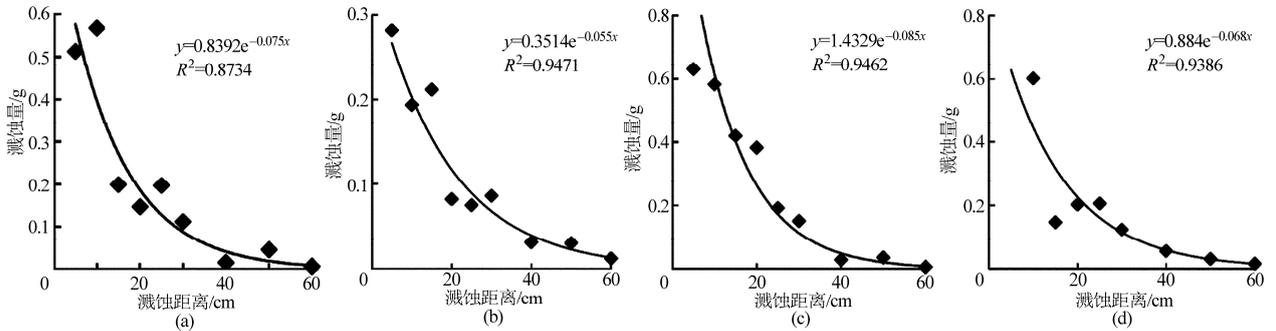


图 7 不同降雨强度下 4 个方位溅蚀量随溅蚀距离的分布图

Fig. 7 Quantity distribution of splashed soil particles in differernt distances from study plot

(a) 降雨强度 83.1 mm/h, 左坡 (b) 降雨强度 26.4 mm/h, 右坡 (c) 降雨强度 144.5 mm/h, 上坡 (d) 降雨强度 83.1 mm/h, 下坡

表 8 不同溅蚀距离内溅蚀量的颗粒组成

Tab. 8 Size distribution of splashed soil particles under different splash distances

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	溅蚀距离/ cm	颗粒组成/%				
		粘粒 (0~0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.02 mm)	粗粉粒 (0.02~0.05 mm)	细砂粒 (0.05~0.2 mm)	粗砂粒 (0.2~2 mm)
34.9	10	12	13	22	54	2
	20	13	21	23	43	0
	30	9	25	20	44	0
	40	8	18	24	48	0
	60	5	19	23	53	0
77.0	10	14	21	28	34	2
	20	21	22	19	37	3
	30	13	16	32	36	1
	40	12	17	34	38	0
	60	13	22	27	41	0
100.3	10	14	22	25	32	6
	20	19	19	23	34	4
	30	14	17	36	30	2
	40	17	15	33	35	2
	60	11	10	30	47	1
121.4	10	14	17	27	33	12
	20	13	25	24	30	8
	30	11	18	31	36	7
	40	12	14	37	35	4
	60	10	12	32	44	5

近,粗砂粒百分比远低于原状土,而粘粒百分比高于原状土,粉粒百分比低于原状土。由表 8 可知,随降雨强度的增加,溅蚀土粒中细砂粒百分比的逐渐减少,其随降雨强度的变化率较小;粗砂粒的百分比逐渐增多,其随降雨强度的变化率较大;粘粒、粉粒和粗粉粒的百分比在降雨强度小于 77.0 mm/h 时,呈快速增加的趋势,当降雨强度大于 77.0 mm/h 时,三者的百分比的变化规律不明显,基本保持在稳定状态。

4.4.2 溅蚀粒径在不同溅蚀距离的分布特征

由图 8 可知,随着降雨强度的增加,5 种溅蚀颗粒随着溅蚀距离变化的规律明显。当降雨强度一定时,随着溅蚀距离的增加,粘粒、粉粒和粗砂粒 3 种颗粒的百分比逐渐减小;粗粉粒和细砂粒的百分比随溅蚀距离的增加而增大;在一定的降雨强度范围内,粗砂粒的百分比随溅蚀距离的增加而递减。这表明粘粒、粉粒和粗砂粒 3 种颗粒的溅蚀量以及溅蚀距离随

着降雨强度的增加而降低;粗粉粒和细砂粒的溅蚀量以及溅蚀距离随降雨强度的增加而增加。

对各个粒径溅蚀颗粒的溅蚀距离与溅蚀量进行相关性分析发现 5 种溅蚀粒径溅蚀颗粒的溅蚀量  $S$  与溅蚀距离  $r$  均呈现  $S = me^{-mr}$  的指数函数关系,相关性较高(图 9)。其中粗砂粒随降雨强度的增加而越来越明显,与总溅蚀量随距离的变化规律一致。

4.4.3 溅蚀平均粒径的特征

不同溅蚀距离内的溅蚀平均粒径如图 10 所示。由图 10 可知,随降雨强度的增加,各个溅蚀距离范围内的溅蚀平均粒径呈增加趋势,降雨强度较小时,溅蚀平均粒径的变化规律不明显;当降雨强度保持不变时,溅蚀平均粒径随溅蚀距离的增加而减小,降雨强度为 121.4 mm/h 时,0~10、10~20、20~30、30~40、40~60 cm 5 个范围内的溅蚀平均粒径值显著高于其他 3 个降雨强度下的值。溅蚀距离在 0~

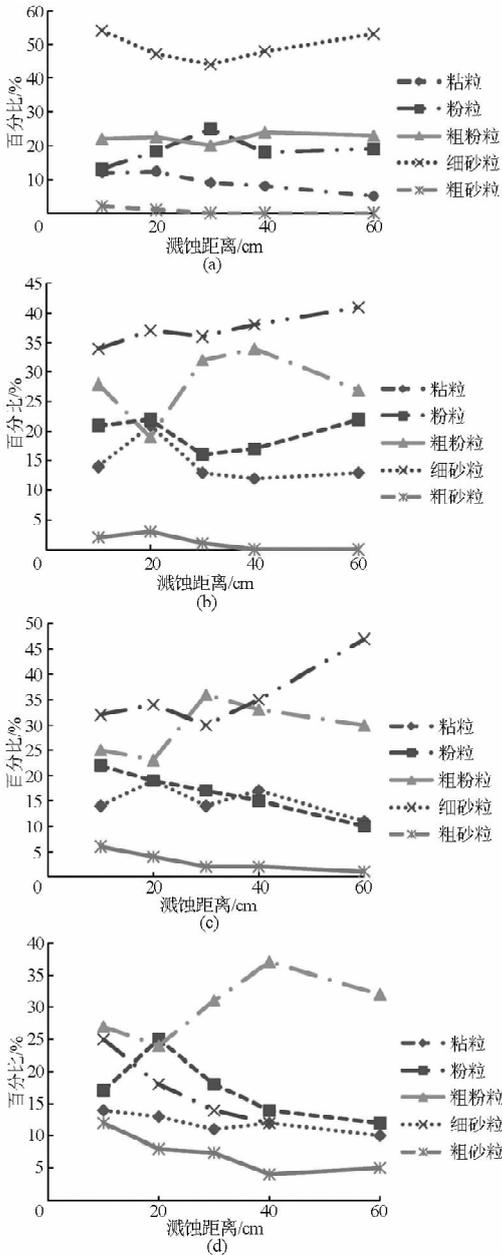


图8 不同降雨强度不同溅蚀距离内5种溅蚀颗粒的百分含量

Fig.8 Size composition of splashed fragments as a function of distance from source circle centre

(a) 降雨强度为 34.9 mm/h (b) 降雨强度为 77.0 mm/h  
(c) 降雨强度为 100.3 mm/h (d) 降雨强度为 121.4 mm/h

30 cm 内时, 溅蚀平均粒径随溅蚀距离的变化率较大; 随着溅蚀距离的不断加, 溅蚀平均粒径随溅蚀距离的变化率较小, 相对保持稳定。

综上, 在溅蚀土粒中, 细砂粒(0.05 ~ 0.2 mm) 最易于被溅蚀, 而小粒径(小于 0.002 mm) 和大粒径(大于 0.2 mm) 土壤颗粒不易被溅蚀, 由此可以推测存在使溅蚀量达到最大的粒径范围。随雨滴强度的增大, 溅蚀土粒的分选规律明显。小粒径(小于 0.05 mm) 土粒随着雨滴动能的增大而在溅蚀量中的百分比随降雨强度的增加先增加后保持稳定; 在 0.05 ~

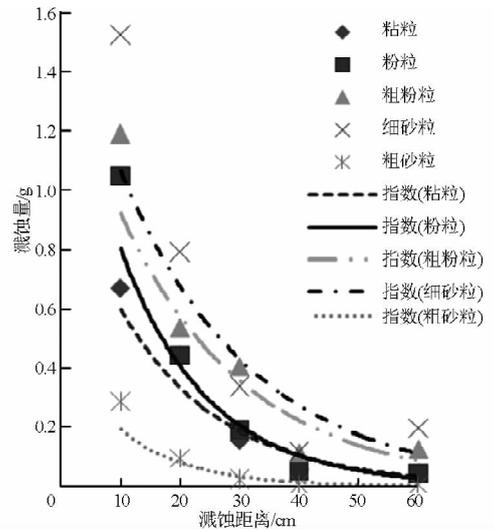


图9 5种粒径溅蚀颗粒的溅蚀量与溅蚀距离的关系  
Fig.9 Quantity distribution of splashed soil particles in differernt distances from study plot

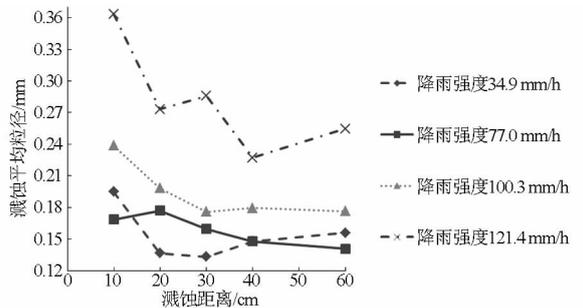


图10 4种降雨强度下不同溅蚀距离内的溅蚀平均粒径  
Fig.10 Mean size distribution of splashed fragments as a function of distance of four rainfall intensities

0.2 mm这一粒径范围的细砂粒随降雨强度呈负相关关系; 大粒径(大于 0.2 mm) 的土粒百分比随降雨强度的增大而增加。这与程勤娟等<sup>[5]</sup> 和范荣生等<sup>[11]</sup> 的结论相符。这是因为雨滴降落撞击地表, 同时使土壤湿润, 土壤中的非水稳性团聚体被破坏、分散, 粘粒、粉粒等小粒径土壤颗粒吸水膨胀, 使得土壤颗粒之间的粘结力增大, 从而在表层形成一层紧密的稳定层, 增加了土壤的抗蚀性, 使其不易被溅蚀; 大粒径土壤颗粒主要由于自身的质量较大, 被溅蚀所需的能量较大, 使其不易被搬运, 因此溅蚀量较小。

### 5 结论

(1) 雨滴击溅过程中, 在不同强度的降雨作用下, 下坡方向产生的溅蚀量最大, 上坡方向产生的溅蚀量最小。溅蚀量与降雨强度呈指数函数关系, 与降雨动能呈线性函数关系。溅蚀率与降雨历时呈指数函数关系。

(2) 溅蚀土粒主要分布在样地 0 ~ 60 cm 范围内, 集中在 0 ~ 10 cm, 而在 50 ~ 60 cm 的溅蚀量占溅蚀总搬运量的比例则不高于 1.75%; 溅蚀量与溅蚀

距离呈指数函数关系。

(3) 溅蚀土粒径小于等于 2 mm 时, 溅蚀土粒中细砂粒和粗粘粒百分比与原状土较为接近, 粗砂粒百分比远低于原状土, 而粘粒百分比高于原状土, 粉粒百分比低于原状土。溅蚀土粒中细砂粒(0.05 ~ 0.2 mm)最易于被溅蚀, 而小粒径(小于 0.002 mm)和大粒径(大于 0.2 mm)土壤颗粒不易被溅蚀, 由此可以推测存在使溅蚀量达到最大的粒径范围。

(4) 随雨滴强度的增大, 溅蚀土粒的分选规律明显。小粒径(小于 0.05 mm)土粒随雨滴动能的增大, 在溅蚀量中的百分比先增加后保持稳定; 细砂粒

(0.05 ~ 0.2 mm) 随降雨强度呈负相关; 大粒径(大于 0.2 mm)的百分比随降雨强度的增大而增加。当降雨强度足够大时, 对于同种特征的土壤, 其溅蚀土粒存在稳定的粒径组成。

(5) 5 种溅蚀粒径颗粒的溅蚀量与溅蚀距离均呈指数函数关系。

(6) 当降雨强度保持不变时, 溅蚀平均粒径随溅蚀距离的增加而变小。溅蚀距离在 0 ~ 30 cm 内, 溅蚀平均粒径随溅蚀距离的变化率较大; 随溅蚀距离的不断增加, 溅蚀平均粒径随溅蚀距离的变化率较小, 相对保持稳定。

#### 参 考 文 献

- 1 韩学坤, 吴伯志, 安瞳昕, 等. 溅蚀研究进展[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 49 - 51.  
Han Xuekun, Wu Bozhi, An Tongxin, et al. Advance of research for splash erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(4): 49 - 51. (in Chinese)
- 2 张科利, 细山田健三. 坡面溅蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究[J]. 地理科学, 1998, 18(6): 561 - 566.  
Zhang Keli, Hosoyamada K. Splash erosion process and its relation to slope gradient[J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(6): 561 - 566. (in Chinese)
- 3 刘和平, 符素华, 王秀颖, 等. 坡度对降雨溅蚀影响的研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 479 - 486.  
Liu Heping, Fu Suhua, Wang Xiuying, et al. Effects of slope gradient on raindrop splash erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3): 479 - 486. (in Chinese)
- 4 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 5 程琴娟, 蔡强国, 胡霞. 不同粒径黄绵土的溅蚀规律及表土结皮发育研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 393 - 396.  
Cheng Qinjuan, Cai Qianguo, Hu Xia. Rain splash erosion and soil crust development of loess soils different in particle-size[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 393 - 396. (in Chinese)
- 6 吴普特, 周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J]. 水土保持通报, 1991, 11(3): 8 - 13, 28.
- 7 马廷, 周成虎. 基于雨滴谱函数的降雨动能理论计算模型[J]. 自然科学进展, 2006, 16(10): 1251 - 1256.
- 8 高学田, 包忠谟. 降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 24 - 26, 47.  
Gao Xuetian, Bao Zhongmo. Study on effects of rainfall and soil structure on raindrop splash[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(3): 24 - 26, 47. (in Chinese)
- 9 Free G R. Erosion characteristics of rainfall[J]. Agricultural Engineering, 1960, 41: 447 - 449.
- 10 Meyer L D, Foster G D, Nikolov S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion[J]. Transactions of the ASAE, 1975, 18(5): 905 - 911.
- 11 范荣生, 李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型[J]. 水利学报, 1993(6): 24 - 29.
- 12 Rose C W. Soil detachment caused by rainfall[J]. Soil Science, 1960, 89(1): 28 - 35.
- 13 Parsons A J, Abrahams A D, Wainwright J. Rainsplash and erosion rates in an interrill area on semi-arid grassland southern Arizona[J]. CATENA, 1994, 22(3): 215 - 226.
- 14 Woodburn R. The effect of structural condition on soil detachment by raindrop action[J]. Agricultural Engineering, 1958, 29: 154 - 158.
- 15 Vandijk A I J M, Meesters A G C A, Bruijnzeel L A. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(5): 1466 - 1474.
- 16 Legout C, Leguédouls S, Bissonnais Y Le, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005, 112(3 - 4): 279 - 292.