#### DOI: 10.5846/stxb201412312613

胡伟,郑粉莉,边锋.降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响.生态学报,2016,36(15): - . Hu W, Zheng F L, Bian F.Effects of raindrop kinetic energy on splash erosion in typical black soil region of Northeast China.Acta Ecologica Sinica,2016, 36(15): - .

# 降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响

胡 伟<sup>1,3</sup>,郑粉莉<sup>1,2,\*</sup>,边 锋<sup>2</sup>

1 中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100
 2 西北农林科技大学 资源环境学院,杨凌 712100
 3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:溅蚀特征研究可揭示溅蚀发生机理,而现有研究大多用溅蚀量来表征溅蚀特征,不能全面准确地反应溅蚀作用过程。为此,基于改进的试验土槽进行室内模拟降雨试验,研究降雨能量对坡面不同方向溅蚀量及溅蚀过程的影响。试验设计包括2种降雨强度(50和100mm/h)和10个降雨能量,其中10个降雨能量是通过2种降雨强度(50和100mm/h)和5个雨滴降落高度(3.5,5.5,7.5,9.5和11.5m)来实现的。结果表明:在相同降雨强度下,坡面各方向溅蚀分量均随降雨能量的增加而增大。次降雨坡面溅蚀量均为向下坡最大,其次为侧坡溅蚀量,而向上坡溅蚀量最小。当降雨强度由50mm/h增加至100mm/h时,坡面向上坡溅蚀量增加2.3—5.0倍,向下坡溅蚀量增加1.7—5.1倍,侧坡溅蚀量增加1.9—4.3倍,总溅蚀量增加1.9—4.5倍,净溅蚀量增加1.2—6.4倍。对于不同降雨能量处理,坡面各方向溅蚀率均表现为坡面产流前随降雨历时的增加而递增,产流后迅速达到峰值,之后逐渐减小并趋于稳定。定量分析了各溅蚀分量、总溅蚀量、净溅蚀量与降雨能量的关系,提出了溅蚀发生的降雨能量

关键词:降雨能量;溅蚀;溅蚀过程;总溅蚀量;净溅蚀量;典型黑土区

# Effects of raindrop kinetic energy on splash erosion in typical black soil region of Northeast China

HU Wei<sup>1,3</sup>, ZHENG Fenli<sup>1,2,\*</sup>, BIAN Feng<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Splash erosion is an important form of soil erosion caused by the impact of raindrops. Raindrop kinetic energy is the principal factor that affects splash erosion, and studies on splash characteristics can reveal splash erosion mechanics. However, current studies only characterize the amount of splash erosion, which cannot accurately and comprehensively reflect the splash processes. Therefore, this study examines the effects of raindrop kinetic energy on splash erosion processes and on the amount of splash erosion from different directions on a hillslope. The experimental treatments included two rainfall intensities (50 and 100 mm/h) and 10 rainfall kinetic energies that were obtained with a combination of the two rainfall intensities and five raindrop falling heights (3.5 m, 5.5 m, 7.5 m, 9.5 m, 11.5 m); the slope gradient was set at  $10^{\circ}$ . In the experiment, all treatments were replicated twice. The soil used in this study was a Mollisol (USDA system of

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41571263)

收稿日期:2014-12-31; 网络出版日期:2015-00-00

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

Soil Taxonomy), containing 3.3% sand, 76.4% silt, and 20.3% clay. The tested soil was collected from 0-20 cm depth in the Ap horizon of a maize field in Liujia Town (44°43'N, 126°11'E), Yushu City, Jilin Province, located in the center of the Mollisol region in Northeast China. This study was completed in the rainfall simulation laboratory of the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling City, China. A side-sprinkle rainfall simulator was used to apply rainfall and a soil pan was specially designed to measure both splash and sheet erosion. Results showed that directional splash erosion increased with the increase of raindrop kinetic energy for a given rainfall intensity. However, at each individual rainfall, the amount of splash erosion was in the order of downslope > lateral slope > upslope . When rainfall intensity increased from 50 to 100 mm/h, the total splash and net splash erosion increased 1.9-4.5 and 1.2-6.4 times, respectively; splash erosion on the upslope, downslope, and lateral slope were enhanced 2.3-5.0, 1.7-5.1, and 1.9-4.3 times, respectively. For all rainfall kinetic energies, splash erosion rate gradually increased with rainfall duration; when runoff occurred, splash erosion rate reached the maximum value, and then gradually decreased until reaching a steady state. According to the relationships between directional, total, and net splash erosion and rainfall kinetic energy, the critical energy for splash erosion initiation was 3-6 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>. Splash erosion increased with an increase in raindrop kinetic energy above the critical value. Furthermore, the relationship between raindrop kinetic energy and upslope, downslope, total, and net splash erosion was expressed by power function, while raindrop kinetic energy had a quadratic polynomial relationship with lateral splash erosion.

Key Words: raindrop kinetic energy; splash erosion; splash erosion processes; total splash erosion; net splash erosion; typical black soil region

雨滴溅蚀是指雨滴打击土壤表面,使土粒发生分散、分离、跃迁位移的过程<sup>[1-3]</sup>。雨滴打击不仅搬运土 粒,为坡面径流搬运提供大量松散物质<sup>[4]</sup>,还通过增加坡面薄层水流的扰动而增加径流的搬运能力<sup>[5]</sup>。因 此,雨滴打击对坡面侵蚀的分离和搬运有重要影响<sup>[6]</sup>。有关研究结果表明,雨滴打击对溅蚀的影响起关键作 用,降雨强度越大,则溅蚀量越大<sup>[7]</sup>。降雨能量也是影响溅蚀的重要因素,随着降雨能量的增加,溅蚀量随之 增加<sup>[8]</sup>。蔡强国等<sup>[9]</sup>研究表明,溅蚀量与降雨强度和降雨雨滴直径密切相关,并建立了溅蚀量与降雨强度, 雨滴直径的二元线性回归方程。江忠善<sup>[10]</sup>和 Free 等<sup>[11]</sup>的试验结果表明,溅蚀量与降雨能量呈幂函数相关。 然而,现有研究多是探讨降雨强度或降雨能量对溅蚀量的影响,对溅蚀作用过程的影响研究有所欠缺,溅蚀的 特征研究是认识溅蚀发生机理的前提<sup>[12]</sup>。目前,在室内通过溅蚀盘<sup>[13]</sup>,在野外通过溅蚀板<sup>[14]</sup>来进行降雨溅 蚀试验。但是,运用溅蚀盘或溅蚀板大多是对溅蚀量的测定,缺乏对溅蚀作用过程及不同方向溅蚀量的定量 描述,且尚不清楚雨滴打击对溅蚀发生过程的影响。据此,基于改进的试验土槽进行不同降雨强度和不同降 雨能量的模拟降雨试验,分析降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀特征的影响,有助于加深理解溅蚀发生的 过程和机理,以期为东北典型黑土区坡耕地土壤侵蚀防治提供科学依据。

#### 1 材料与方法

# 1.1 试验装置与材料

试验在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨 大厅进行。人工模拟降雨设备采用中国科学院水利部水土保持研究所研制的侧喷式单喷头的降雨装置<sup>[15]</sup>, 降雨方式为两个降雨器对喷,通过设计不同雨滴降落高度形成不同的降雨能量。供水压力由压力表控制,降 雨强度主要通过孔板的孔径来调节,孔径为 5—12 mm,可控制雨强 30—165 mm/h,降雨均匀度大于 85%。

试验土槽是基于 Bradford<sup>[16]</sup>试验所用土槽进行改进的结果(图1),该土槽可在同一降雨时间对上坡溅蚀、侧坡溅蚀、下坡溅蚀和薄层水流侵蚀(片蚀)能进行分开采样。试验装置规格为:长×宽×高=124 cm×117 cm×80 cm,中央为试验土槽,其规格为:长×宽×高=50 cm×50 cm×40 cm,下端设集流装置采集径流泥沙样,四

周设有溅蚀收集槽,通过底部的塑料软管进行收集,外 侧为溅蚀缓冲区。上、下坡溅蚀收集槽规格为:长×宽× 高=57 cm×3.5 cm×40 cm,侧坡溅蚀收集槽规格为:长× 宽×高=50 cm×3.5 cm×40 cm,溅蚀板高出土槽约 40 cm。土槽底部每隔 10 cm(长)和 10 cm(宽)处设计孔 径为 2 mm 的排水孔,用以保证降雨试验过程中排水 良好。

吉林省榆树市位于我国黑土区的中心地带,属于典型黑土区。该区主要土壤类型为黑土,其占总面积的47.4%<sup>[17-18]</sup>。试验用土取自吉林省榆树市刘家镇合心村南城子屯的0—20 cm 耕层土。试验土壤为研究区域内的典型黑土,质地为粉壤土,其颗粒组成为(美国农业部制):砂粒(2—0.05 mm)含量为3.3%,粉粒(0.05—0.002 mm)为76.4%,粘粒(<0.002 mm)为20.3%,有机质含量为(重铬酸钾氧化—外加热法)23.81 g/kg,pH值(水浸提法,水土比2.5:1)为5.92。由于近年来,该区坡耕地土壤侵蚀严重,黑土层已由开垦前的50—60 cm下降到目前的20—30 cm,且在部分区域已出现"破皮黄"现象。因此,本研究选取的研究区和试验土壤均具有一定的代表性和典型性。试验用土风干后沿自然节理将其掰成稍小的土块以保持原有的土壤结构。



a,b,c,d分别收集上坡,左侧,右侧,下坡溅蚀,e收集薄层水流侵 蚀(片蚀)

1.2 试验设计

东北黑土区地形主要是山前波状起伏台地或漫岗地,坡度一般为1°—8°,有少部分超过10°,而当坡度大 于7°后,坡面土壤侵蚀急剧增加<sup>[19]</sup>。因此,本试验研究选取10°代表黑土区坡耕地的大坡度范围。目前,国 内外研究雨滴能量的方法主要有三种,一是改变降雨强度<sup>[20]</sup>,降雨强度越大,雨滴能量越大,降雨强度和雨滴 能量之间存在交互作用,不能单独分离雨滴能量;二是改变降雨强度越大,雨滴能量越大,降雨强度和雨滴 能量之间存在交互作用,不能单独分离雨滴能量;二是改变降雨机<sup>[21]</sup>,相同降雨强度具有不同的雨滴能量,不 能真正的研究雨滴能量;三是在相同的降雨强度下,改变雨滴的降落高度能够直接获取不同的雨滴能量<sup>[22]</sup>。 鉴于前两种方法不能有效的分离雨滴能量,本研究在保证降雨强度不变的前提下,改变雨滴降落高度获取不 同的雨滴能量。当雨滴降落高度在4.3 m以上时,可使大雨滴达到终点速度的80%<sup>[23]</sup>。当降落高度在7—8 m时,即可使95%的雨滴达到终点速度,要使所有不同大小的雨滴达到终点速度,最小的降落高度需要20 m<sup>[24]</sup>。20世纪80年代,国内学者使用侧喷式模拟降雨机选用的雨滴降落高度多为6.5 m,使直径大于2.0 mm 的雨滴达不到终点速度<sup>[25]</sup>。本研究设计的最大降雨高度为11.5 m,可满足 0—6 mm 直径的雨滴达到终点速 度<sup>[24]</sup>,能够较好的模拟天然降雨的能量。本研究为了更好的研究降雨能量对黑土溅蚀的影响,设计了从3.5 m到11.5 m的5 个雨滴降落高度水平,其变化步长为2 m。依据黑土区侵蚀性降雨标准<sup>[26-27]</sup>(即 $I_{10} \ge 0.71$ mm/min),设计试验降雨强度为50 mm/h和100 mm/h(表1),降雨历时为30 min。所有试验处理的土壤均为 风干土。每一个试验处理重复两次,试验设计见表1。

为保证良好的透水性,在试验土槽底部铺20 cm 厚细沙。沙子上部每5 cm 一层填装容重为1.25 g/cm<sup>3</sup>的 黑土用于模拟农耕地的犁底层,装土厚度为10 cm。犁底层之上填装容重为1.20 g/cm<sup>3</sup>的黑土,每5 cm 一层 填装,装土厚度为10 cm。装上层土之前,用1 cm 厚的木板抓毛下层土壤表面,以减少土壤分层现象。每次试 验前翻耕表土约5 cm,并用齿耙耙平,模拟黑土区农耕地坡面情况。

为了确保模拟降雨的均匀性和准确性,试验开始前对降雨强度进行率定,当降雨均匀度大于85%,实测

降雨强度与目标降雨强度的差值小于 5%时方可进行正式降雨。降雨开始后,各方向的溅蚀量分别取全样。 对于降雨强度为 50 mm/h 试验处理,采样间隔为 6 min;对降雨强度为 100 mm/h 试验处理,采样间隔为 3 min。降雨结束后,用清水分别冲洗上、下、左、右溅蚀板内残留的溅蚀土样,以保证溅蚀土样被完全收集。坡 面产流后,记录初始产流时间,接取径流泥沙样,取样间隔为 3—6 min。降雨结束后,称取径流泥沙的总重量 (电子称量程为 60 kg,精度为 0.001 kg),采用烘干法(105℃,24 h)测得溅蚀和径流泥沙重(电子天平精度为 0.1 g)。

Table 1         Design of experimental treatments											
降雨强度 Rainfall intensity/ (mm/h)	降雨历时 Rainfall duration/min	雨滴降落高度 Raindrop falling height/m	重复 Replications	降雨强度 Rainfall intensity/ (mm/h)	降雨历时 Rainfall duration/min	雨滴降落高度 Raindrop falling height/m	重复 Replications				
50	30	3.5	2	100	30	3.5	2				
		5.5				5.5					
		7.5				7.5					
		9.5				9.5					
		11.5				11.5					

表1 试验设计

1.3 雨滴测定及降雨动能计算

雨滴大小的测定采用滤纸色斑法。色斑法是历史悠久、应用最广泛的一种雨滴粒径测量方法<sup>[28]</sup>。滤纸使用新华造纸厂生产的直径为 15 cm 的定性中速滤纸,涂料用曙红和滑石粉混合粉末,按重量比为 1:10 混合均匀,用刷子将混合粉末均匀地抹在滤纸上备用,当雨滴落到滤纸上时,产生近似圆形的色斑<sup>[29]</sup>。将采集的滤纸扫描后使用 Image-J<sup>[30]</sup>软件的直尺功能测出色斑直径,每个色斑按垂直方向测四次,测量精度为 0.001 mm,取平均值为色斑直径,进而推求雨滴实际直径。

由于试验条件与窦堡璋<sup>[29]</sup>相同,雨滴直径采用下述公式进行计算,即:

$$d = 0.356D^{0.712} \tag{1}$$

式中,d为雨滴直径(mm);D为色斑直径(mm)。

对于天然降雨,雨滴终点速度采用牟金泽<sup>[31]</sup>提出的公式进行计算,即:

当 d< 1.9 mm 时,用修正的沙玉清公式:

$$v_i = 0.496antilog(\sqrt{28.32 + 6.524lg0.1d - (lg0.1d)^2} - 3.665)$$
(2)

当 *d* ≥ 1.9 mm 时,采用修正的牛顿公式:

$$v_i = (17.20 - 0.844d) \sqrt{0.1d} \tag{3}$$

式中,d为雨滴直径(mm); $v_i$ 为天然降雨雨滴降落速度(m/s)。

对于人工模拟降雨,雨滴未完全到达终点速度,故雨滴速度不能按天然降雨雨滴速度计算<sup>[30, 32]</sup>,采用下 述公式计算:

$$V = v_i \sqrt{1 - e^{-\frac{2g}{v_i^2 H}}}$$
(4)

式中,V为人工模拟降雨雨滴降落速度(m/s);g为重力加速度 $(m s^{-2})$ ;H为雨滴降落高度(m)。 单个雨滴的动能.

$$e_i = \frac{1}{2}m_i V^2 \tag{5}$$

式中, $e_i$ 为第*i*个雨滴的动能(J); $m_i$ 为第*i*个雨滴的质量,将其视为球体计算(g),;V为雨滴降落速度(m/s)。 雨滴的总动能:

$$e_t = \sum_{i=1}^n e_i \tag{6}$$

式中,*e*<sub>*i*</sub>为全部雨滴的总动能(J);*e*<sub>*i*</sub>为第*i*个雨滴的动能(J);*n* 为雨滴的个数。 降雨深<sup>[33]</sup>:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{\rho S} \tag{7}$$

式中,*h* 为降雨深(mm);*m<sub>i</sub>*为第*i* 个雨滴的质量(g); $\rho$  为雨滴的密度(kg/m<sup>3</sup>);*S* 为滤纸的面积(m<sup>2</sup>);*n* 为雨滴的个数。

降雨能量:

$$E = \frac{e_t}{hS} \tag{8}$$

式中, E 为降雨能量( $J m^{-2} mm^{-1}$ );  $e_i$ 为全部雨滴的总动能(J); h 为降雨深(mm); S 为滤纸的面积( $m^2$ )。

1.4 溅蚀量计算

总溅蚀量计算公式:

$$S_i = S_u + S_d + S_l + S_r \tag{9}$$

式中, $S_t$ 为总溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $S_u$ 为向上坡溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $S_d$ 为向下坡溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $S_l$ 为向左侧溅 蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $S_t$ 为向右侧溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)。

净溅蚀量[34-35]计算公式:

$$S_n = S_d - S_u \tag{10}$$

式中, $S_n$ 为净溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $S_d$ 为向下坡溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $S_u$ 为向上坡溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)。 侧坡溅蚀量计算公式:

$$S_{la} = \frac{1}{2} (S_l + S_r)$$
(11)

式中, $S_{la}$ 为侧坡溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $S_l$ 为向左侧溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $S_r$ 为向右侧溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)。 **1.5** 数据处理

应用 Excel 2003、SigmaPlot 12.5 和 Matlab R2010b 对数据进行处理与分析:采用 SigmaPlot 12.5 绘制不同 降雨能量下总溅蚀率随降雨历时的变化图;采用 Matlab R2010b 中 Curve Fitting Tool 对各溅蚀分量,总溅蚀 量,净溅蚀量与降雨能量的关系进行拟合,拟合过程中采用信赖域方法,同时要考虑方程的物理意义。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 降雨能量对不同方向溅蚀量的影响

在前期试验条件和相同降雨强度下,不同降雨能量对坡面溅蚀的影响存在差异(表 2)。相同降雨强度下,坡面各方向溅蚀分量均随降雨能量的增加而增大。各降雨能量下,次降雨坡面溅蚀量表现为:向下坡的溅 蚀量最大,其次为向左侧和右侧的溅蚀量(侧坡溅蚀量),二者基本相同,而以向上坡的溅蚀量最小。这主要 是土粒自身重力对向下坡溅蚀产生了一个动力,而对向上坡溅蚀则起一个阻力的作用,因此导致向下坡的溅 蚀量要大于向上坡的溅蚀量。对于侧坡溅蚀,重力即是动力又是阻力,因此其变化相对向上坡和向下坡较为 平缓<sup>[36]</sup>。

当雨滴降落高度相同时,100 mm/h 雨强下的溅蚀量大于 50 mm/h 的溅蚀量。在 50 mm/h 降雨强度下,降雨能量平均每增加 1 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>,向上坡溅蚀量增加 9.4—17.0 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,向下坡溅蚀量增加 13.9—43.0 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,侧坡溅蚀量增加 7.1—35.6 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,总溅蚀量增加 37.8—131.3 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,净溅蚀量增加 4.2—26.0 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。100 mm/h 降雨强度下,降雨能量平均每增加 1 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>,向上坡溅蚀量增加 11.7—46.8 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,

向下坡溅蚀量增加 49.7—146.0 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, 侧坡溅蚀量增加 36.8—106.6 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, 总溅蚀量增加 135.0—405.9 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, 净溅蚀量增加 17.8—99.2 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。这主要是因为降雨能量增强所致。当降雨强度相同时,随着雨 滴降落高度的增加,雨滴降落速度增加,降雨能量随之增大,从而间接地增强了雨滴打击力,

当降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h 时,降雨能量增加幅度为 18.4%—49.5%,向上坡溅蚀量增加 2. 3—5.0 倍,向下坡溅蚀量增加 1.7—5.1 倍,侧坡溅蚀量增加 1.9—4.3 倍,总溅蚀量增加 1.9—4.5 倍,净溅蚀量 增加 1.2—6.4 倍。由上述结果可知,随着降雨强度的增大,雨滴打击作用增强,促使更多的土壤颗粒分离。黑 土富含有机质,土壤团聚体含量较高,在较小降雨强度下,雨滴打击对土壤溅蚀作用较小,随着雨强的增大,雨 滴打击土壤团聚体的作用增强,从而使这些分散的土壤颗粒更容易被击溅。因此,雨滴打击力是黑土坡面发 生溅蚀的主要侵蚀动力,这与安娟<sup>[37]</sup>等的研究结果一致。范昊明<sup>[17]</sup>和张晓平<sup>[19]</sup>等研究也认为雨滴侵蚀是 我国黑土区最主要的侵蚀方式。上述研究结果进一步表明消除雨滴打击在黑土区农耕地的重要性。

Table 2 Comparison of directional splash, total splash and net splash erosion under different raindrop kinetic energy										
降雨强度/(mm/h)Rai	infall intensity			50						
雨滴降落高度/m Raindrop falling height		3.5	5.5	7.5	9.5	11.5				
降雨能量/(Jm <sup>2</sup> mm <sup>-1</sup> ) Raindrop kinetic energy		6.48	6.77	7.75	8.59	9.83				
溅蚀量/(g m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	向上坡 Upslope	9.2±0.6	$14.0 \pm 5.6$	23.2±0.2	36.3±1.5	48.5±0.2				
Splash erosion	向下坡 Downslope	19.5±1.0	31.7±8.7	52.1±4.8	80.9±3.9	98.3±1.8				
	向左侧 Left	$15.3 \pm 1.0$	$28.9 \pm 12.8$	46.6±0.9	63.9±3.3	69.6±17.0				
	向右侧 Right	17.2±0.6	23.7±3.5	39.5±4.0	71.7±1.9	83.6±5.1				
	侧坡 Lateral	$16.2 \pm 0.8$	26.3±8.1	43.0±2.5	67.8±2.6	76.6±11.0				
	总溅蚀量 Total splash	61.2±3.2	98.3±30.5	161.4±9.9	252.9±10.6	299.9±23.7				
	净溅蚀量 Net splash	10.3±0.4	17.7±3.2	28.9±4.6	44.6±2.3	49.8±2.1				
降雨强度 Rainfall intensity/(mm/h)				100						
雨滴降落高度/m Raindrop falling height		3.5	5.5	7.5	9.5	11.5				
降雨能量/(Jm <sup>2</sup> mm <sup>-1</sup> ) Raindrop kinetic energy		7.67	8.52	10.23	12.85	14.47				
溅蚀量/(g m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	向上坡 Upslope	30.1±3.9	69.5±16.8	138.4±25.2	168.8±1.3	235.1±38.5				
Splash erosion	向下坡 Downslope	$52.5 \pm 0.3$	$175.3 \pm 78.2$	$274.8 \pm 46.0$	404.6±35.3	$602.9 \pm 17.6$				
	向左侧 Left	52.9±11.9	132.4±74.7	$255.6 \pm 60.5$	309.2±49.2	$376.4 \pm 14.1$				
	向右侧 Right	41.7±10.2	$141.6 \pm 24.3$	$200.8 \pm 23.8$	339.6±11.9	$430.8 \pm 156.7$				
	侧坡 Lateral	47.3±11.1	$137.0 \pm 49.5$	228.2±42.1	324.4±30.5	403.6±85.4				
	总溅蚀量 Total splash	177.2±18.1	518.8±194.0	869.6±155.5	1222.2±97.7	$1645.2 \pm 114.8$				
	净溅蚀量 Net splash	22.4±3.6	105.8±61.3	136.4±20.8	235.7±34.0	367.7±20.9				

表 2 相同降雨能量下各方向溅蚀分量、总溅蚀量和净溅蚀量

表中数值表示平均值±标准差

# 2.2 降雨能量对溅蚀过程的影响

通过对不同降雨能量下总溅蚀率随降雨历时的比较,发现 100 mm/h 降雨强度下的最大溅蚀率是 50 mm/h 降雨条件的 4.3—9.5 倍(图 2)。在 50 mm/h 降雨强度下,产流时间集中在 24—27 min,溅蚀率随降雨 历时呈现递增的趋势。这主要是因为试验土壤比较干燥,当雨滴降落到干燥的土壤时,大部分能量被表层土 壤所吸收,因此溅蚀搬运的土粒较少,随着土壤含水量增加,土壤粘结力减小,坡面产生大量松散的物质供溅 蚀搬运,这个过程主要是雨滴与土粒间的能量交换。而 100 mm/h 降雨强度下总溅蚀率在降雨初期呈现急剧 上升,坡面在 9—12 min 产流,产流后溅蚀率迅速到达峰值,之后逐渐减小。这种变化趋势在降雨能量较大时 更加明显,如在100mm/h降雨强度和雨滴降落高度为11.5m对应的降雨能量为14.47Jm<sup>-2</sup>mm<sup>-1</sup>,在前





10 min 的总溅蚀率为 11.4 g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>,第 15 min 迅速增大至 32.8 g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>,至 24 min 时,又减小至 24.8 g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>,此后略有减小但变化不大。这与 Fox <sup>[38]</sup>和刘和平等<sup>[35,39]</sup>的试验结果一致。随着降雨能量的不同,前 15 min 溅蚀率变化幅度明显大于后 15 min,说明降雨能量在前 15 min 对溅蚀的影响较大。这主要是因为降雨初期,雨滴能量主要用于破坏土壤团聚体,此时溅蚀率大小主要取决于雨滴打击力,即降雨能量的大小,这与张科利等<sup>[40]</sup>的研究结果相一致。随着降雨的继续,在雨滴的打击作用下,土壤表面形成临时结皮层,土壤抗蚀力增强,同时,土壤入渗能力减弱,坡面形成薄层水流,溅蚀作用过程变为雨滴、土粒及薄层水流间的能量交换过程,随着地表水层厚度增加,雨滴击溅的土粒减少,坡面溅蚀率逐渐下降并趋于稳定。溅蚀率在降雨初期急剧上升说明侵蚀过程是以溅蚀击溅为主导的阶段,而后迅速减少说明侵蚀过程由溅蚀搬运为主的阶段向薄层水流搬运为主的阶段转变。此外,坡面形成薄层

12)

径流后,径流深对雨滴打击力的屏蔽作用不容忽视<sup>[41]</sup>。 雨滴溅蚀与径流深呈负相关,当径流深超过3倍雨滴直 径时,雨滴打击作用消失<sup>[42]</sup>。

2.3 降雨能量与溅蚀量的关系

**2.3.1** 向上坡、向下坡和侧坡溅蚀量与降雨能量的 关系

本试验得到的各方向的溅蚀量与降雨能量的关系如图 3 所示,随着降雨能量的增大,各方向溅蚀量均有一定幅度的增加。采用 Matlab R2010b 进行拟合,获取最优经验方程:

向上坡溅蚀量:

$$S_u = 14.670 (E - 5.932)^{1.289}, R^2 = 0.906, n = 20,$$

向下坡溅蚀量:

$$S_d = 8.913 (E - 4.782)^{1.85}, R^2 = 0.933, n = 20,$$
  

$$P < 0.0001$$
(13)

侧坡溅蚀量:



#### 图 3 不同方向溅蚀量与降雨能量的关系



 $S_{la} = 3.201E^2 - 17.154E, R^2 = 0.889, n = 20,$ 

P < 0.0001

式中, $S_u$ 为向上坡溅蚀量(gm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>); $S_d$ 为向下坡溅蚀量(gm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>); $S_{la}$ 为侧坡溅蚀量(gm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>);E为降雨能量(Jm<sup>-2</sup>mm<sup>-1</sup>);n为样本数(式 12—14 中均使用的是单位时间的溅蚀量)。

由经验回归方程可知,向上坡溅蚀量和向下坡溅蚀量均与降雨能量呈幂函数关系,侧坡溅蚀量与降雨能量的关系符合一元二次曲线分布特征。对比回归方程(8)和(9)发现,降雨能量对溅蚀的影响存在一个阈值。 当降雨能量小到一定值时,坡面无溅蚀发生,这主要是因为雨滴能量较小时,大部分能量被土壤吸收,很少一 部分能量用于破坏土壤团聚体,因此可供溅蚀搬运的土粒较少。这与 Salles<sup>[43]</sup>和秦越<sup>[44]</sup>等的研究基本一致。 吴普特等<sup>[36]</sup>认为,雨滴与地表土壤发生碰撞产生的冲击力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,而未被吸收的能量将破坏原有的土壤结构,使其分散,发生跃移。当坡面存在一定坡度时,雨 滴打击地表,向上坡和向下坡搬运土粒均需克服一定的能量做功,溅蚀才会发生,与向下坡搬运相比,向上坡 搬运需克服更多的能量来做功,因此向上坡溅蚀发生的能量阈值要高于向下坡。

2.3.2 总溅蚀量和净溅蚀量与降雨能量的关系

随着降雨能量的增大,总溅蚀量和净溅蚀量均随降雨能量的增大而增加(图4)。总溅蚀量等于各方向溅 蚀量之和,表示雨滴击溅为溅蚀搬运和径流搬运提供的松散物质的量,以实测各方向的溅蚀量之和统计值进 行拟合相关分析得出:

$$S_{t} = 75.670 (E - 5.699)^{1.418}, R^{2} = 0.921, n = 20, P < 0.0001$$
(15)

式中, $S_t$ 为总溅蚀量(g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>);E 为降雨能量(J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>);n 为样本数。

净溅蚀量是向下坡的溅蚀量与向上坡的溅蚀量之差,表示雨滴击溅作用向下坡搬运土粒的多少。根据向 下坡和向上坡的实测溅蚀量差值与降雨能量的相关分析得出:

 $S_n = 0.405 (E - 2.647)^{2.647}, R^2 = 0.930, n = 20, P < 0.0001$ (16)  $\exists \tau P, S_n \beta \beta$   $\exists \tau P = 0.405 (E - 2.647)^{2.647}, R^2 = 0.930, n = 20, P < 0.0001$ (16)  $\exists \tau P, S_n \beta \beta$   $\exists \tau P = 0.405 (E - 2.647)^{2.647}, R^2 = 0.930, n = 20, P < 0.0001$ (16)  $\exists \tau P, S_n \beta \beta$   $\exists \tau P = 0.405 (E - 2.647)^{2.647}, R^2 = 0.930, n = 20, P < 0.0001$ (16)  $\exists \tau P, S_n \beta \beta$   $\exists \tau P = 0.405 (E - 2.647)^{2.647}, R^2 = 0.930, n = 20, P < 0.0001$ (16)  $\exists \tau P, S_n \beta \beta$   $\exists \tau P = 0.405 (E - 2.647)^{2.647}, R^2 = 0.930, n = 20, P < 0.0001$ (16)  $\exists \tau P, S_n \beta \beta$   $\exists \tau P = 0.405 (E - 2.647)^{2.647}, R^2 = 0.930, n = 20, P < 0.0001$ (16)  $\exists \tau P, S_n \beta \beta \beta$ ( $\exists \tau P = 0.405 (E - 2.647)^{2.647}, R^2 = 0.930, n = 20, P < 0.0001$ (16)

由回归方程(11)和(12)可以看出,雨滴击溅侵蚀 发生的阈值为 3-6 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>。这一结论与 Agassi 等<sup>[45]</sup>的研究结论相符。当降雨能量高于阈值时,溅蚀 量随降雨能量的增加而增大;当降雨能量较小时,无溅 蚀发生。这是因为干土溅散阶段,土壤较为疏松,较大 一部分降雨能量损耗于对土壤颗粒的缓冲作用;随着土 壤含水量的增加,降雨能量的损耗用于对土壤颗粒的击 溅<sup>[46]</sup>。雨滴击溅的本质在于它具有一定的动能,当雨 滴动能克服土粒间的黏结作用及土粒的重力势能时便 使土粒发生位移。在雨滴溅蚀能力确定的前提下,土壤 被侵蚀的量取决于土壤的抗蚀能力。黑土有机质含量 高,致使其团聚体含量、稳定性高,未降雨前,黑土表面 基本上都为大团聚体,随降雨历时的延长,在雨滴的不 断打击压实作用下,团聚体被破坏为细小颗粒或微团聚 体才能被雨滴击溅<sup>[47]</sup>。因此,降雨能量可以很好的反 映降雨对雨滴溅蚀的影响。



图 4 总溅蚀量和净溅蚀量与降雨能量的关系

Fig.4 Relationships of total and net splash erosion with raindrop kinetic energy

(14)

### 3 结论

基于改进的试验土槽进行不同降雨强度和不同降

雨能量条件下的模拟降雨试验,研究了降雨能量对向上坡溅蚀、向下坡溅蚀、侧坡溅蚀以及总溅蚀量和净侵蚀 量的影响,得到如下研究结论:

(1)相同降雨强度下,坡面各方向溅蚀分量均随降雨能量的增加而增大。次降雨坡面溅蚀量均为向下坡 最大,其次为侧坡溅蚀量,而向上坡溅蚀量最小。当降雨强度由 50 mm/h 增加至 100 mm/h 时,向上坡溅蚀量 增加 2.3—5.0 倍,向下坡溅蚀量增加 1.7—5.1 倍,侧坡溅蚀量增加 1.9—4.3 倍,总溅蚀量增加 1.9—4.5 倍,净 溅蚀量增加 1.2—6.4 倍。

(2)随着降雨能量的不同,各方向溅蚀率均呈现产流前随降雨历时的增长而递增,产流后迅速达到峰值, 之后逐渐减小并趋于稳定。

(3)定量分析了各溅蚀分量,总溅蚀量,净溅蚀量与降雨能量的关系,提出了溅蚀发生的降雨能量阈值, 发现黑土区雨滴溅蚀发生的临界能量为3—6Jm<sup>-2</sup>mm<sup>-1</sup>,且向上坡溅蚀量,向下坡溅蚀量,净溅蚀量和总溅蚀 量皆与降雨能量呈幂函数关系,而侧坡溅蚀量与降雨能量呈二次多项式关系。

#### 参考文献(References):

- [1] Ellison W D. Soil erosion study-Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash. Agricultural Engineering, 1947, 28: 197-201.
- [2] Ellison W D. Soil erosion study-Part V: Soil transport in the splash process. Agricultural Engineering, 1947, 28: 349-351, 353-353.
- [3] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展.地理科学,2003,23(2):230-235.
- [4] Kinnell P I A. Raindrop-induced saltation and the enrichment of sediment discharged from sheet and interrill erosion areas. Hydrological Processes, 2012, 26(10): 1449-1456.
- [5] An J, Zheng F L, Han Y. Effects of rainstorm patterns on runoff and sediment yield processes. Soil Science, 2014, 179(6): 293-303.
- [6] Ellison W D. Studies of raindrop erosion. Agricultural Engineering, 1944, 25(4): 131-136, 181-182.
- [7] 秦越,程金花,张洪江,丛月,杨帆,周柱栋.北京市褐土区降雨参数对土壤溅蚀的影响.水土保持学报,2013,27(6):16-20.
- [8] 高学田,包忠谟.降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响.水土保持学报,2001,15(3):24-26.
- [9] 蔡强国,陈浩.降雨特性对溅蚀影响的初步试验研究.中国水土保持,1986,(6):30-33,39-39.
- [10] 江忠善, 刘志. 降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究. 水土保持学报, 1989, 3(2): 29-35.
- [11] Free G R. Erosion characteristics of rainfall. Agricultural Engineering, 1960, 41: 447-449.
- [12] 程金花,秦越,张洪江,丛月,杨帆,闫永庆.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究.农业机械学报,2015,46(2):153-161.
- [13] Morgan R P C. Field studies of rainsplash erosion. Earth Surface Processes, 1978, 3(3): 295-299.
- [14] Ellison W D. Two devices for measuring soil erosion. Agriculture Engineering, 1944, 25(2): 53-55.
- [15] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工模拟降雨装置. 水土保持通报, 1984, 4(5): 43-47.
- [16] Bradford J M, Huang C. Comparison of interrill soil loss for laboratory and field procedures. Soil Technology, 1993, 6(2): 145-156.
- [17] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境. 水土保持学报, 2004, 18(2): 66-70.
- [18] 阎百兴,杨育红,刘兴土,张树文,刘宝元,沈波,王玉玺,郑国相.东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势.中国水土保持,2008,(12): 26-30.
- [19] 张晓平,梁爱珍,申艳,李文凤,张学林,王玉玺,解运杰,刘凤飞,杨学明.东北黑土水土流失特点.地理科学,2006,26(6):687-692.
- [20] Van Dijk A I J M, Bruijnzeel L A, Rosewell C J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. Journal of Hydrology, 2002, 261(1/4): 1-23.
- [21] 代肖,张海涛,周大迈,张爱军.人工模拟降雨装置及其应用介绍.中国水土保持,2012,(12):52-54,72-72.
- [22] Shainberg I, Mamedov A I, Levy G J. Role of wetting rate and rain energy in seal formation and erosion. Soil Science, 2003, 168(1): 54-62.
- [23] Gunn R, Kinzer G D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. Journal of Meteorology, 1949, 6(4): 243-248.
- [24] Laws J O. Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops. Transactions of American Geophysical Union, 1941, 22(3): 709-721.
- [25] 郑粉莉, 唐克丽, 陈文亮. 细沟侵蚀过程的研究方法. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集), 1993, (1): 107-111.
- [26] 詹敏, 厉占才, 信玉林. 黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系. 黑龙江水专学报, 1998, (1): 40-43.

- [28] 廖炜, 卫苗苗, 黄煜煜. 采用滤纸色斑法对雨滴直径的研究. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(6): 1165-1168.
- [29] 窦葆璋,周佩华.雨滴的观测和计算方法.水土保持通报,1982,(1):44-47.
- [30] 吴光艳,郝民利,刘超群,成婧,吴发启.天然降雨与人工降雨特性的研究.人民珠江,2013,(2):5-7.
- [31] 牟金泽. 雨滴速度计算公式. 中国水土保持, 1983, (3): 40-41.
- [32] 郑粉莉. 模拟降雨中地面坡度对雨滴动能影响的研究. 中国水土保持, 1987, (11): 38-39.
- [33] 尚佰晓, 王瑄, 陶伟, 任秉枢. 沈阳市天然降雨雨滴特征研究. 水土保持研究, 2008, 15(6): 139-141.
- [34] 蔡强国,陈浩.影响降雨击溅侵蚀过程的多元回归正交试验研究.地理研究, 1989, 8(4): 28-36.
- [35] 刘和平, 符素华, 王秀颖, 徐丽, 方岚, 刘宝元, 路炳军. 坡度对降雨溅蚀影响的研究. 土壤学报, 2011, 48(3): 479-486.
- [36] 吴普特,周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响. 水土保持通报, 1991, 11(3): 8-13, 28-28.
- [37] An J, Zheng F L, Lu J, Li G F. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions. Soil Science, 2012, 177(8): 517-526.
- [38] Fox D M, Bryan R B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. Catena, 1999, 38(3): 211-222.
- [39] Fu S H, Liu B Y, Liu H P, Xu L. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. Catena, 2011, 84(1/2): 29-34.
- [40] 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. 地理科学, 1998, 18(6): 561-566.
- [41] Kinnell P I A. Modeling of the effect of flow depth on sediment discharged by rain-impacted flows from sheet and interrill erosion areas: a review. Hydrological Processes, 2013, 27(18): 2567-2578.
- [42] 汤立群. 坡面降雨溅蚀及其模拟. 水科学进展, 1995, 6(4): 304-310.
- [43] Salles C, Poesen J, Govers G. Statistical and physical analysis of soil detachment by raindrop impact: Rain erosivity indices and threshold energy.
   Water Resources Research, 2000, 36(9): 2721-2729.
- [44] 秦越,程金花,张洪江,丛月,杨帆,周柱栋.雨滴对击溅侵蚀的影响研究.水土保持学报,2014,28(2):74-78.
- [45] Agassi M, Bloem D, Ben-Hur M. Effect of drop energy and soil and water chemistry on infiltration and erosion. Water Resources Research, 1994, 30(4): 1187-1193.
- [46] 尹武君. 黄土坡面土壤侵蚀能量描述[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [47] 程琴娟, 蔡强国. 我国水土流失典型区土壤溅蚀特征研究. 水土保持通报, 2010, 30(1): 17-21.