

DOI: 10.11766/trxb202003130116

王子轩, 吴发启. 模拟降雨条件下坡度对关中地区壤土溅蚀的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1416–1422.

WANG Zixuan, WU Faqi. Study on Effect of Slope Gradient on Splash Erosion of Lou Soil in Guanzhong area under Simulated Rainfall[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1416–1422.

## 模拟降雨条件下坡度对关中地区壤土溅蚀的影响\*

王子轩<sup>1</sup>, 吴发启<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌, 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌, 712100)

**摘要:**为掌握关中地区坡耕地上坡度对溅蚀量以及溅蚀距离的影响,深入探究不同坡度对单位面积溅蚀量影响的潜在机理。以陕西关中地区壤土为研究对象,选用 5 个具有不同坡度(0°, 5°, 10°, 15°, 20°)的装土槽进行单位面积土坡的模拟。使用针头式模拟降雨机进行模拟降雨试验,通过溅蚀收集装置对模拟降雨结束后的不同方向和不同距离范围的溅蚀量进行收集。结果表明:在 0~20°坡度范围内,溅蚀总分散量,溅蚀净搬运量以及向下坡溅蚀量随着坡度的增大呈现出不同的上升趋势。向上坡溅蚀量在 0~15°范围内呈减少趋势,在 15~20°范围内呈增加趋势。溅蚀距离随着坡度的增大而增大。研究结果对深入探究溅蚀的潜在机理有着重要作用。

**关键词:**坡度; 向下坡溅蚀量; 溅蚀总分散量; 溅蚀净搬运量

**中图分类号:** S157      **文献标志码:** A

## Influence of Slope on Splash Erosion of Lou Soil in Guanzhong Area under Simulated Rainfall

WANG Zixuan<sup>1</sup>, WU Faqi<sup>2</sup>

(1. Institute of soil and water conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China; 2. School of resources and environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 Soil erosion is a major contributor to the loss of land resources, and hinders development of the agricultural production and construction of the ecological civilization. The purpose of this study is to explore impacts of slope gradient on amount and distance of splash erosion. 【Method】 Using splash collectors that can be adjusted towards eight directions separately, five troughs (packed with lou soil and set at a slope gradient of 0°, 5°, 10°, 15° and 20°, separately and a new model of needle sprinkling device driven by a linear vibration motor, simulated rain-splash erosion experiments were carried out to explore relationships between slope gradient with amount and distance of splash erosion. 【Results】 (1) the amount of splash erosion on the slope of 0°, 5°, 10°, 15° and 20° was measured to be 0.486 g, 0.871 g, 1.235 g, 1.757 g and 3.570 g, respectively. It can be seen that a linear relationship between slope and amount of downward splash erosion was observed with  $y = 0.1411x + 0.173$  and  $R^2 = 0.9983$  in the range of 0°~20°. The amount of downward splash erosion on the slope of 0°, 5°, 10°, 15° and 20° reached 0.632 g, 0.629 g, 0.621 g, 0.557 g and 0.588 g respectively. (2) The total amount of splash erosion on the slope of 0°, 5°, 10°, 15°

\* 国家自然科学基金项目(41977065)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41977065)

通讯作者 Corresponding author, E-mail: wufaqui@263.net

作者简介: 王子轩, 男, 陕西省西安人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 709728063@qq.com

收稿日期: 2020-03-13; 收到修改稿日期: 2020-11-09; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-01-25

and 20° was 3.815g, 3.902g, 4.106g, 4.889 g and 6.657 g, respectively, from which a binary function relationship was observed with  $y = 0.0156 x^2 - 0.21 x + 4.5815$  and  $R^2 = 0.9983$  between total amount of dispersed splash erosion and slope. (3) the net sediment transportation volume of splash erosion on the slope of 0°, 5°, 10°, 15° and 20° was -0.148 g, 0.242 g, 0.614 g, 1.200g and 2.982 g, respectively. (4) the percentage of the splash erosion of first round on 0°, 5°, 10°, 15° and 20° slope was 46%, 34%, 33%, 30% and 29%, respectively, while the percentage of the splash erosion of the third round was 10%, 5%, 13%, 17% and 23%, respectively. 【Conclusion】 On the slope varying in the range of 0~20°, with rising slope gradient, the total amount of dispersed splash erosion, the net sediment carrying amount of splash erosion and the amount of downward splash erosion on the slope increases, while the amount of splash erosion decreases first and then increases. There is no significant relationship between splash erosion and slope gradient.

**Key words:** Slope; Amount of downward splash erosion; Total amount of dispersed splash erosion; The net sediment transport of splash erosion

黄土高原区夏季集中降雨的气候特征,使得水力侵蚀一直是引起黄土高原地区土壤资源流失的主要原因。薄层水流搬运侵蚀是细沟间侵蚀的一大分支,前人已对薄层水流搬运侵蚀的侵蚀发生过程和发生机理进行了细致的研究<sup>[1]</sup>。降雨溅蚀作为细沟间侵蚀的另一分支是降雨前期的主要侵蚀类型,会导致土壤颗粒发生跃迁,将土面压实,进而造成土壤入渗能力降低,土壤产生结皮,降低土壤生产力等现象<sup>[2-5]</sup>。溅蚀是由于雨滴打击而造成的土壤颗粒发生分散并产生跃迁的一种侵蚀方式<sup>[6]</sup>。原理为雨滴由于在下降过程中受重力作用而具有一定的动能,当雨滴掉落地面与地表发生碰撞时,一部分能量被土粒所吸收转化为了内能,另外一部分转化为土体结构发生破坏的形变势能,导致被破坏的部分土粒具有了动能并向四周发生跃迁。坡度作为影响溅蚀的重要因素,前人对坡度对溅蚀影响方面的进行了相关研究。Ellison<sup>[7]</sup>研究表明在 10°的坡上,向下溅蚀量为向上溅蚀量的 3 倍;王双涛<sup>[8]</sup>、王贵平<sup>[9]</sup>、李叶鑫<sup>[10]</sup>和田娜玲等<sup>[11]</sup>研究表明溅蚀总分散量与向下坡溅蚀量随坡度的增大而增大;焦银龙<sup>[12]</sup>、张慧荟<sup>[13]</sup>以及赵晓光和吴发启<sup>[14]</sup>的研究结果为向下坡溅蚀量随坡度的增加先增加后减小;张科利和细山田健三<sup>[15]</sup>、Morgan<sup>[16]</sup>研究发现由于径流流速的影响导致向上坡溅蚀量和溅蚀总分散量随着坡度的增加变化不明显<sup>[17-18]</sup>。前人研究多为野外观测和径流小区模拟降雨实验,从大面积尺度上对坡度与溅蚀量的关系进行研究,由于所选用的土壤类型、坡度范围与降雨强度不同,所获结果存在差异性<sup>[19-20]</sup>。本

研究选用关中地区主要耕作土壤——壤土为对象,通过模拟降雨对单位面积尺度上不同方向和不同距离范围溅蚀量进行处理和分析从而深入探究溅蚀的潜在机理。为控制降雨范围,减小降雨对收集装置的影响,防止二次溅蚀造成的误差,选用针头式模拟降雨机。并给针头式模拟降雨机安装线性震动马达解决雨滴始终滴落在同一点的问题,确保了雨滴掉落坡面的随机性使模拟降雨更加接近于自然降雨,提高了数据的准确性和可靠性。研究结果将为黄土高原溅蚀发生机制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省杨凌高新技术产业示范区, 107°59'~108°08'E, 34°14'~34°20'N, 平均海拔为 468 m, 总面积为 135 km<sup>2</sup>。该地区位于黄土高原南缘, 关中平原腹地, 属于温带半湿润大陆性季风气候, 常年平均温度为 12.9℃, 年平均降水量为 635.1~646.9 mm, 是该地区水资源的主要来源, 且 60%~70%降水集中于 7—10 月份。

该区分布有 7 个土类, 11 个亚类, 15 个土属, 24 个土种。其中壤土占总面积的 71.7%, 为该区的主要土壤类型。壤土是我国陕西关中平原、晋南、豫西一带主要的农业生产土壤, 该土壤是人类长期耕种褐土和施肥熟化所形成的特殊土壤类型, 土壤肥沃, 非常适宜耕作, 土壤呈棕灰色。土壤具体理化性质见表 1。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

土壤类型 Soil type	颗粒组成			有机质 Organic matter/%	铵态氮 Ammonium nitrogen /(mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮 Nitrate nitrogen /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium /(mg·kg <sup>-1</sup> )
	Particle composition/%						
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay				
壤土 Lou soil	21.5	50.8	30.3	7.4	37	4	64

## 1.2 试验设计

室内模拟降雨试验于西北农林科技大学资源环境学院水工实验室内进行。采用针头式模拟降雨机如图 1 所示。降雨机由恒压水箱、雨滴发生装置及钢筋框架三部分构成。恒压水箱通过马氏瓶原理使水箱保持恒压，通过调节水箱中玻璃管内水深改变水箱的压强使降雨强度恒定为 80 mm·h<sup>-1</sup>。雨滴发生装置为下滴式，由长方形凹槽和底部的 80 个针头组成。通过色斑法对不同规格尺寸的注射针头所产生的雨滴粒径进行测量后，发现九号针头所产生的雨滴粒径在雨强稳定后集中在 1 至 2 mm 范围内，且雨滴数密度与天然降雨十分接近，可以用来进行模拟降雨试验。针头式模拟降雨机上的线性震动马达是为了解决雨滴始终滴落在同一点的问题而设置，由研究者自行改进，这确保了雨滴掉落坡面的随机性，使模拟降雨更加接近于自然降雨。使用长方体装土槽 (25 cm × 20 cm × 15 cm) 进行不同坡度单位面积土坡的模拟。使用两块木工板 (1 220 mm × 2 440 mm) 合并在一起作为溅蚀量收集装置。

该试验共设置三组重复。选取 5°、10°、15° 和 20° 四个坡度处理，0° 平面作为对照。降雨强度设定为 80 mm·h<sup>-1</sup>，降雨历时为 10 min。土壤溅蚀主要是降雨过程前期的侵蚀现象。重复试验发现，当降雨超过 10 min 后土壤表面会形成积水，此时土粒发生的跃迁不仅仅由雨滴击溅造成，还有其他途径。为了保证试验数据的准确性，选用降雨历时前 10 min 进行观测。装土时每装 5 cm 进行一次压实和打毛，将土壤容重控制在 1.3 g·cm<sup>-3</sup>。将装土槽放在木工板上进行降雨试验。试验时各个方向均存在大于 30 cm 距离范围的溅蚀土粒，未收集到超过 50 cm 距离范围的溅蚀土粒，因此本试验设计的溅蚀盘可收集全部溅蚀量。降雨结束后将溅蚀出来的土粒在木工板上风干 1 h，使用事先称好的铝盒对木工板上的土粒进行收集，

收集结束后将铝盒放入烘箱烘干并称重。一些溅蚀到木工板上较为细小的土粒收集十分困难，这是试验误差的主要来源。每次试验结束后均冲洗收集板，以消除第一次试验未收集的溅蚀量对第二次试验的影响。该研究针对单位面积上的溅蚀量，因此溅蚀量较少，为提高数据的准确性，称重时使用千分之一天平，记录数据时保留三位有效数字。

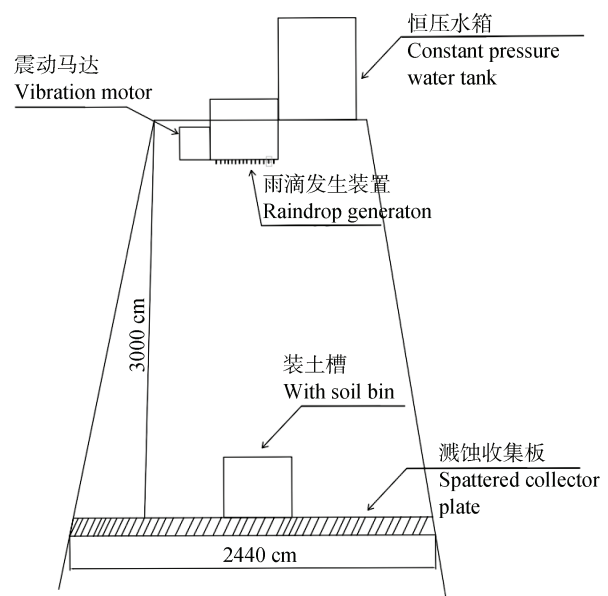


图 1 针头式模拟机降雨机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the new model of needle sprinkling device

## 1.3 试验指标的定义及计算

为了研究坡度对不同方向溅蚀量的影响。采用向下坡溅蚀量、向上坡溅蚀量、侧坡溅蚀量、溅蚀总分散量及溅蚀净搬运量 5 个指标进行综合对比分析。向下坡溅蚀量是由雨滴击溅造成向坡面下方发生跃迁的土粒总量，本研究中将坡面前方两个扇形区域收集的土粒总量视为向下坡溅蚀量。向上坡溅蚀量是由雨滴击溅造成向坡面上方发生跃迁的土粒

总量, 本研究中将坡面后方两个扇形区域收集的土粒总量视为向上坡溅蚀量。侧坡溅蚀量是由雨滴击溅作用造成向坡面两侧发生跃迁的土粒总量, 本研究中将坡面两侧四个扇形区域收集的土粒总量视为侧坡溅蚀量。溅蚀净搬运量和溅蚀总分散量是具有实际意义的溅蚀量概念, 可以描述溅蚀特性。溅蚀总分散量是区域内发生溅蚀的总量, 也可以理解为向上坡溅蚀量、向下坡溅蚀量和侧坡溅蚀量的总和。溅蚀净搬运量是真实发生土壤转移的量, 也可以理解为向下坡溅蚀量和向上坡溅蚀量之差。

#### 1.4 数据处理与分析

采用 Origin2017 进行坡度和不同类型溅蚀量关系图表的绘制, 使用 SPSS19.0 对不同坡度下溅蚀量数据进行显著性差异分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 坡度对溅蚀距离的影响

图 2 为不同坡度下不同距离内溅蚀分散量占总分散量的百分比。由图可知: 0~10 cm 距离范围内溅蚀分散量占总分散量的百分比随着坡度的增加呈单调递减的趋势。10~30 cm 距离范围内溅蚀分散量占总分散量的百分比随着坡度的增加多次出现峰值, 不存在明显的相关性关系。大于 30 cm 距离范围的溅蚀分散量占总分散量的百分比随着坡度增加呈单调递增的趋势。可以得出 0~20° 范围内溅蚀距离随

着坡度的增大而增大。随着坡度的增大, 雨滴动能在正交分解后平行于坡面方向的分力增大, 导致发生溅蚀的土粒平行于坡面方向运动的初始加速度增大。因此 0~20° 范围内土粒溅蚀距离随着坡度的增大而增大。

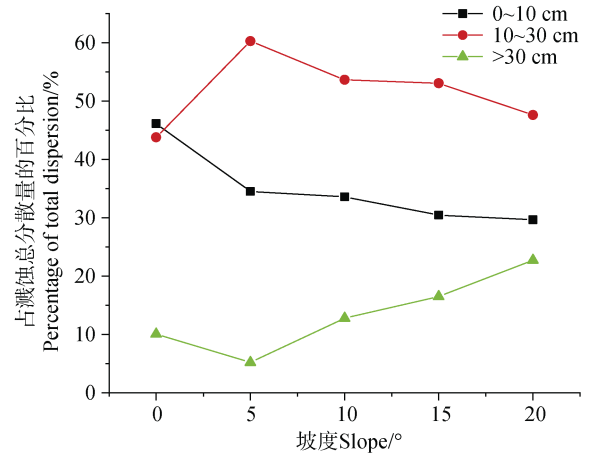


图 2 不同坡度下不同距离范围内溅蚀分散量占溅蚀总分散量的百分比

Fig. 2 Percentage of the splash erosion dispersion within a certain range to the total dispersed splash erosion relative to distance and slope gradient

### 2.2 坡度对不同方向溅蚀量的影响

表 2 为不同坡度下不同方向的溅蚀量, 由表可知向下坡溅蚀量在 0~20° 内随着坡度的增加而增加, 向上坡溅蚀量随着坡度的增加先减小后增加, 侧坡溅蚀量上下波动无显著规律。

表 2 不同坡度下不同方向溅蚀量

Table 2 Amount of splash erosion relative to direction and slopes gradients

方向 Direction	溅蚀量 Amount of splash erosion/g				
	0°	5°	10°	15°	20°
向下坡溅蚀量 <sup>①</sup>	0.479±0.006cC	0.870±0.019dB	1.250±0.155cB	1.752±0.039bB	3.553±0.225aC
侧坡溅蚀量 <sup>②</sup>	2.676±0.018aA	2.394±0.026bcA	2.267±0.225cA	2.560±0.018abA	2.370±0.234bcB
向上坡溅蚀量 <sup>③</sup>	0.636±0.027aB	0.624±0.023abC	0.629±0.033aC	0.575±0.016bcC	0.556±0.037cA

注: ① Downward splash erosion, ② Sideward splash erosion, ③ Upward splash erosion. 注: \*表内大写字母为不同方向溅蚀量数据间的显著性差异分析, 表内小写字母表示各方向溅蚀量与坡度间的显著性差异分析。Note: The capital letters in the table mean significant difference between splash erosion different in direction, and the small letters in the table significant difference between splash erosions relative to direction and slope gradient.

图 3 为不同方向溅蚀量与坡度的关系。由图可知在 0~20° 范围内向下坡溅蚀量随着坡度的增加呈单调递增趋势, 对向下坡溅蚀量与坡度进行线性方程拟合, 得出  $y=0.1411x+0.173$ , 且相关性显著。在

0~15° 范围内向上坡溅蚀量随着坡度的增大而减小, 在 15~20° 范围内向上坡溅蚀量随着坡度的增加而增加。

上述结果可总结为: 在 0~20° 范围内向下坡溅

蚀量与坡度呈  $y=0.1411x+0.173$  的线性关系, 决定系数  $R^2$  为 0.8565。当坡度小于  $15^\circ$  时, 向上坡溅蚀量随着坡度的增加而减小, 当坡度大于  $15^\circ$  时, 向上坡溅蚀量随着坡度的增加而增加。 $0\sim 20^\circ$  范围内侧坡溅蚀量与坡度之间无显著相关性。雨滴在击打地面时所施加的力可正交分解为垂直于坡面的压力与平行于坡面的剪切力。土壤发生颗粒迁移的重要原因是剪切力破坏了土粒原本土体结构使土粒具备了发生跃迁的动能。将平行于坡面的剪切力分为向上坡方向、向下坡方向和侧坡方向。当坡度增大时雨滴的剪切力在向下坡方向的分力越来越大, 向上坡方向的分力越来越小, 导致向下坡发生跃迁的土粒数量增加, 向上坡方向发生跃迁的土粒数量减少。由于土粒自身重力平行于坡面的分力, 对其向下坡运动有促进作用, 对其向上坡运动有阻碍作用。随着坡度的增大, 重力平行于坡面的分力也会随之增大, 导致重力分力对土粒向下坡运动的促进作用和向上坡的阻碍作用更加显著。所以在  $0\sim 20^\circ$  范围内随着坡度的增大向下坡溅蚀量越来越大, 向上坡溅蚀量越来越少。

由图 3 可知, 侧坡溅蚀量与坡度间不存在显著性关系。理论上随着坡度的增加, 雨滴在侧坡方向的剪切力越来越小, 侧坡溅蚀量应该随之减少。但由于坡度对侧坡溅蚀量影响不明显, 雨强较大时雨滴击打对溅蚀的促进作用较坡度对溅蚀的减缓作用更为显著。因此侧坡溅蚀量与坡度关系不显著。

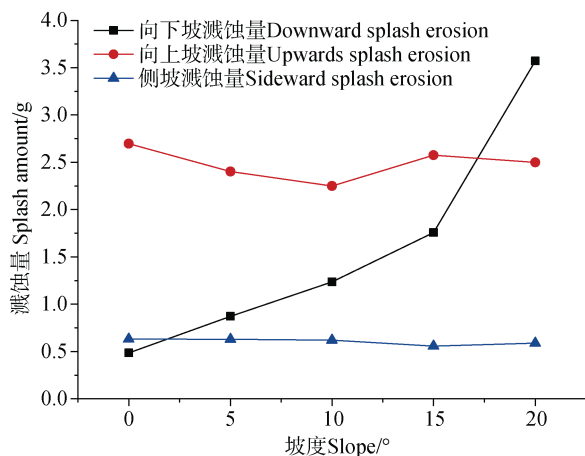


图 3 不同方向溅蚀量与坡度的关系

Fig. 3 Relationship between splash erosion and slope gradient relative to direction

### 2.3 坡度对溅蚀总分散量影响

图 4 为溅蚀总分散量、溅蚀净搬运量与坡度的关系。由图 4 可知在  $0\sim 20^\circ$  的范围内溅蚀总分散量随着坡度增加而增加, 并且增加幅度越来越大, 关系趋近于二次函数关系。

上述结果可总结为: 在  $0\sim 20^\circ$  范围内, 溅蚀总分散量与坡度间呈  $y=0.0156x^2-0.21x+4.5815$  的二元函数关系, 决定系数  $R^2$  为 0.9983。该函数反映了溅蚀总分散量随着坡度的增大而增大, 坡度越大, 溅蚀总分散量变化越明显。当坡度增大时平行于坡面的剪切力增大, 破坏土粒本身土体结构的效果就会越明显, 垂直于坡面方向的压力越来越小, 使雨滴对地面的压实效果变弱, 土粒更容易发生跃迁。随着坡度的增大土壤含水量降低, 土粒自身的黏结力越来越低, 导致土粒本身更容易向上坡方向、向下坡方向和侧坡方向发生溅蚀。由于随着坡度的增加, 土粒自身的重力在沿着平行于地面方向的分力越来越大, 因此存在越来越多土粒发生跃迁。

### 2.4 坡度对溅蚀净搬运量的影响

由图 4 可知  $0\sim 20^\circ$  的范围内, 当坡度为  $0^\circ$  时溅蚀净搬运量接近于 0, 当坡度不为  $0^\circ$  时溅蚀净搬运量始终大于 0, 因此在坡面内存在向下坡溅蚀量恒大于向上坡溅蚀量的现象。宏观上体现为溅蚀在坡面内表现为向下堆积的过程。在  $0\sim 20^\circ$  范围内溅蚀净搬运量随坡度的增大而增大, 增大幅度也越来越大, 呈二次函数关系:  $y=0.0086x^2-0.0273x-0.0355$ , 决定系数  $R^2$  为 0.9742。该函数反映了坡度越大溅蚀净搬运量的效果越明显, 可以理解为随着坡度的增加, 降雨过程中由于溅蚀造成的土壤转移量也会增大。随着坡度的增大, 雨滴剪切力沿下坡方向分力越来越大, 沿上坡方向分力越来越小。土粒自身重力平行于坡面方向分力越来越大。从而导致坡面上更多的土粒向下跃迁。溅蚀净搬运量在坡度为  $0^\circ$  时接近于 0, 是由于当坡度为  $0^\circ$  时, 土粒不受任何平行于土壤表面剪切力分力的影响, 导致土壤发生溅蚀跃迁出该面积的土粒总量与该面积周围区域发生溅蚀跃迁入该面积的土粒总量大体一致, 宏观表现为该面积未发生土壤搬运。溅蚀净搬运量随着坡度的增大而增大, 且恒大于 0。

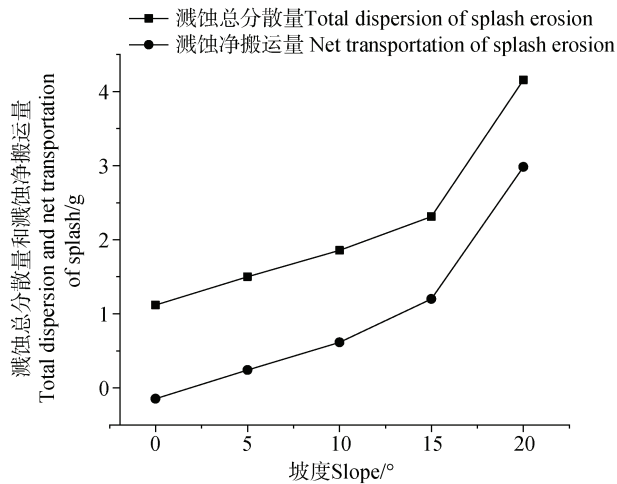


图4 溅蚀总分散量和净搬运量与坡度的关系

Fig. 4 Relationships of total dispersion and net transportation of splash erosion with slope gradient

### 3 结 论

采用小面积的装土槽研究了单位面积上坡度对溅蚀量的影响。选用5个具有不同坡度(0°, 5°, 10°, 15°, 20°)的装土槽进行单位面积土坡的模拟, 使用较为先进的新型针头模拟降雨装置有效控制降雨面积, 防止雨滴对收集装置造成土粒的二次跃迁, 可以较为准确的数据。研究发现, 在0~20°坡度范围内, 溅蚀总分散量、溅蚀净搬运量以及向下坡溅蚀量均随着坡度的增大而增大, 向上坡溅蚀量随着坡度的增加先减少后增加。造成这一现象的主要原因在于雨滴剪切力向下坡方向分力越来越大, 向上坡方向分力越来越小, 土粒自身重力产生平行于坡面方向的分力越来越大。坡度的改变会影响土壤含水量与黏结力, 导致上述现象的发生。本研究所得结论与焦银龙、张慧荟以及赵晓光等研究的部分结果一致。文献中报道的相关研究大多基于野外径流小区试验, 本研究基于单位面积室内试验, 但由于坡度是影响溅蚀量的主要因素——土粒重力分力以及雨滴沿坡面方向剪切力分力大小均未发生显著变化, 因此得出的结论具有可比性。由于得出的试验结论一致, 可以肯定无论是微观地形还是野外实地研究, 发生改变的其他因素均未导致壤土在坡度发生变化时, 溅蚀量发生改变。因此, 该研究可为进一步分析黄土高原区壤土溅蚀的内 在机理提供参考。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Meyer L D, Foster G R, R mkens M J M. Source of soil erodedby water from upland slopes[D]. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1975
- [ 2 ] Meyer L D, Harmon W C. How row-sideslope length and steepness affect sideslope erosion[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32 ( 2 ): 639—644.
- [ 3 ] Cook H L. The nature and controlling variables of the water erosion process. Soil Science Society of America Proceedings, 1936, 1: 487—494.
- [ 4 ] Prats S A, Malvar M C, Coelho C O A, et al. Hydrologic and erosion responses to compaction and added surface cover in post-fire logged areas: Isolating splash, interrill and rill erosion[J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 408—419.
- [ 5 ] Wu P T, Zhou P H. Influence of surface slope on raindrop splash erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11 ( 3 ): 8—13, 28. [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.]
- [ 6 ] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Fragmentation of soil aggregates induced by secondary raindrop splash erosion[J]. Catena, 2020, 185: 104342.
- [ 7 ] Ellison W D. Studies of raindrop erosion[J]. Agricultural Engineering, 1944, 25: 131—136, 181—182.
- [ 8 ] Wang S T. Experimental study on the relationship between characteristics of runoff production and sand mixing ratio, slope and rain intensity of sediment in sand covered slope[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019. [王双涛. 压砂地坡面产流产沙特性与砂土混合比、坡度、雨强关系的试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.]
- [ 9 ] Wang G P, Zeng B Q, Lu Z X, et al. Study on slope soil erosion and its prediction in Loess Hilly and gully area of Western Shanxi Province: Part I rill erosion[J]. China Soil and Water Conservation, 1992 ( 5 ): 15—18. [王贵平, 曾伯庆, 陆兆熊, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀及预报研究: 第一部分 细沟间侵蚀[J]. 中国水土保持, 1992 ( 5 ): 15—18.]
- [ 10 ] Li Y X, Lu G, Fu XY, et al. The influence of rainfall characteristics and slope on the splash erosion of cinnamon soil in low mountain and hilly area of western Liaoning Province [J]. Journal of soil and water conservation, 2019, 33 ( 4 ): 37—43. [李叶鑫, 吕刚, 傅昕阳, 等. 降雨特性和坡度对辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 ( 4 ): 37—43.]
- [ 11 ] Tian N L. Experimental study on dynamic processes of splash and sheet erosion on grassland hillslope in the loess region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2019. [田娜玲. 黄土区草地坡面溅蚀片蚀

- 动力学过程试验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.]
- [ 12 ] Jiao Y L. Study on the characteristics of soil splash erosion from sloping cropland in the purple soil area during the corn growing season[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2015. [焦银龙. 紫色土区玉米季坡耕地土壤溅蚀特征研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2015.]
- [ 13 ] Zhang H H. Fractal characteristics research on microtopography at loess artificial digging tillage slope in water erosion[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2017. [张慧芸. 黄土人工掏挖坡耕地地表微地形侵蚀分形特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.]
- [ 14 ] Zhao X G, Wu F Q. Single raindrop splash law and its selection role on soil particles splashed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 43—45, 49. [赵晓光, 吴发启. 单雨滴击溅规律及其对溅蚀土粒的分选作用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 43—45, 49.]
- [ 15 ] Zhang K L, Hsiyamada J. Simulation study on the occurrence process of slope splash erosion and its relationship with slope gradient[J]. Geoscience, 1998, 18(9): 561—566. [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(9): 561—566.]
- [ 16 ] Morgan R P C. Soil erosion and conservation[D]. 3rd ed. Malden, MA, USA: Blackwell Publishing Ltd, 2005.
- [ 17 ] Purwanto E, Bruijnzeel L A. Soil conservation on rainfed bench terraces in upland West Java, Indonesia: Towards a new paradigm[J]. Advances in Geocology, 1998(31): 1267—1274.
- [ 18 ] Nearing M A, Polyakov V O, Nichols M H, et al. Slope-velocity equilibrium and evolution of surface roughness on a stony hillslope[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(6): 3221—3229.
- [ 19 ] Hao H X, Ma R M, Zhan H G, et al. Splash erosion of red soil aggregate under different particle-size[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 37—42. [郝好鑫, 马仁明, 占海歌, 等. 不同粒径红壤团聚体坡面溅蚀特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 37—42.]
- [ 20 ] Ji H Y. Experimental study on the influence of soil texture, stratification and water quality on soil erosion [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2017. [吉恒莹. 土壤质地层状性和水质对土壤侵蚀影响的试验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.]

(责任编辑: 檀满枝)