

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.036; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.036.

刘聪聪, 周宗将, 张琼, 等. 土壤溅蚀颗粒的飞溅特征及迁移机制[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):21-28.

Liu Congcong, Zhou Zongjiang, Zhang Qiong, et al. Splash characteristics and migration mechanisms of soil particles[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):21-28.

土壤溅蚀颗粒的飞溅特征及迁移机制

刘聪聪¹, 周宗将¹, 张琼^{1,2}, 张帅帅¹, 李海茹¹, 郭珍³, 刘刚^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),
水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 四川华标检测技术有限公司, 成都 610097)

摘要: [目的] 定量描述溅蚀土壤颗粒的飞溅特征, 揭示溅蚀发生的迁移机制, 为建立基于物理过程的土壤侵蚀预测模型提供理论基础。[方法] 借助人工模拟降雨以及高速摄影技术在不同坡度条件下对不同质地土壤的 1~5 mm 团聚体进行雨滴击溅, 测定飞溅土壤颗粒质量以及速度, 并对雨滴动能的传递与转化过程进行分析。[结果] (1) 土壤团聚体稳定性越高, 土壤颗粒飞溅的质量及速度越小; (2) 向坡上方和向坡下方的颗粒飞溅速度分别随着坡度的增加而显著减小和显著增加, 并建立了土壤颗粒飞溅速度与团聚体稳定性和坡度的定量关系式; (3) 团聚体稳定性对于向坡上方的颗粒飞溅速度的影响大于向坡下方的颗粒飞溅速度; (4) 团聚体越稳定, 飞溅颗粒的动能越少, 同时飞溅颗粒的动能随着坡度的增加而增加。[结论] 坡度对向坡上方和向坡下方的颗粒飞溅速度影响均显著; 团聚体稳定性对向坡上方的颗粒飞溅速度的影响大于向坡下方的颗粒飞溅速度; 雨滴动能被转化为破坏土壤团聚体以及形成溅蚀坑的热能占比较大, 飞溅土壤颗粒的动能占比仅为 0.052%~0.330%, 且颗粒飞溅主要通过液膜拖曳力携带。

关键词: 击溅侵蚀; 能量耗散; 高速摄像机; 飞溅机制

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0021-08

Splash characteristics and migration mechanisms of soil particles

Liu Congcong¹, Zhou Zongjiang¹, Zhang Qiong^{1,2}, Zhang Shuaishuai¹, Li Hairu¹, Guo Zhen³, Liu Gang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Sichuan Huabiaoce Testing Technology Co. Ltd., Chengdu 610097, China)

Abstract: [Objective] To quantitatively describe the splash characteristics of soil particles, reveal the transport mechanism of splash erosion, and provide a theoretical foundation for developing soil erosion models based on physical processes. [Methods] Simulated rainfall and high-speed photography were used to measure the mass and velocity of splashed soil particles of 1~5 mm soil aggregates with different soil texture under different slopes, and to analyze the transfer and conversion of raindrop kinetic energy. [Results] (1) Higher soil aggregate stability resulted in lower splash velocity and splash mass. (2) Splash velocity towards upslope and downslope significantly decreased and increased, respectively, with increasing slope gradient. Quantitative relationships between splash velocity, soil aggregate stability, and slope gradient were established. (3) Soil aggregate stability had a greater effect on splash velocity towards upslope than towards downslope. (4) The more stable the soil aggregates were, the less kinetic energy the splashed particles had. The kinetic energy of splashed particles increased with increasing slope. [Conclusion] Slope has a significant effect on splash velocity in both upslope and downslope directions. Soil

收稿日期: 2025-03-31

修回日期: 2025-04-15

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42277344); 陕西省重点研发计划项目(2025GH-YBXM-062); 陕西省杰出青年科学基金项目(2024JC-JCQN-39)

第一作者: 刘聪聪(1999—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: liucc@nwfufu.edu.cn

通信作者: 刘刚(1982—), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: gliu@foxmail.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

aggregate stability has a greater effect on upslope splash velocity than on downslope. A large proportion of the raindrop kinetic energy was converted into thermal energy for breaking down soil aggregates and forming splash craters, while the kinetic energy of the splashed soil particles accounted for only 0.052%~0.330%. Splashed soil particles are mainly carried by the drag force of the liquid film.

Keywords: splash erosion; energy dissipation; high-speed camera; splash mechanism

雨滴击溅侵蚀是水力侵蚀的开始,其物理过程涉及雨滴动能向土壤的传递、团聚体破碎、颗粒脱离地表及运动等复杂机制。溅蚀剥离的土壤颗粒更容易被随后的地表径流冲蚀,发生二次起动。目前,研究人员已经对溅蚀的各个方面进行了大量研究,比如团聚体破碎机制^[1-3]、击溅侵蚀的影响因素^[4-5]以及溅蚀颗粒的分布与分选特征等^[6-7]方面,但对于溅蚀颗粒飞溅的物理过程描述较为欠缺,尤其是颗粒的飞溅物理机制以及雨滴能量的传递耗散过程。雨滴能量的耗散过程包含多个方面,雨滴下落作用于地表会破坏土壤团聚体、导致地表压实、溅蚀坑的形成、土壤颗粒的飞溅,每个过程均会耗散不同的雨滴能量,且耗散能量的多少与不同因素密切相关。吴普特等^[8]提出下落雨滴动能的一部分转化成热能,其余能量破坏团聚体,并使土粒分散并溅起而发生跃移。Horabik等^[9]指出成坑和压实是消耗雨滴能量最多的过程,但缺乏对雨滴能量耗散的定量研究。

近年来,随着高速摄像技术的快速发展,部分学者借助高速摄影技术对颗粒飞溅物理过程展开一系列研究。Ghadir等^[10]指出,当打击速度为 15.5 m/s 时,飞溅能量占总能量的比例最高约 45%。Long等^[11]通过对液滴与松散砂粒床之间的相互作用进行试验研究发现,只有 2% 的能量被用于砂粒的运动。然而,上述研究是基于液滴或者其他球体对规则下垫面的模拟而得到。此外,Beczek等^[12]利用高速摄像机结合单雨滴研究了不同初始含水量条件下固-液两相溅蚀颗粒的飞溅规律,结果表明用于飞溅土壤颗粒的能量随含水量的增加而增大,且最大不超过 14%。鹿泽洋等^[13]通过单雨滴试验结合高速摄像机探究了单雨滴下颗粒的起动,发现雨滴的拖曳力对颗粒起动具有显著作用。值得注意的是,上述研究使用均匀土粒作为研究对象,同时也没有考虑多雨滴的“叠加效应”,难以阐明土壤性质以及雨滴对溅蚀土壤颗粒飞溅机制的影响。精确描述溅蚀发生的物理过程,可为进一步完善基于物理过程的土壤侵蚀预测模型提供理论基础。然而,目前的研究对于土壤团聚体颗粒的飞溅物理机制及能量耗散尚不清楚,从而严重影响了土壤侵蚀模型的预测精度。

因此,本研究采用室内模拟雨滴击溅试验结合高

速摄影技术,对不同因素影响下的溅蚀土壤颗粒飞溅特征、迁移机制及动能转化进行定量研究,从而为完善基于物理过程的土壤侵蚀模型提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

供试土壤采集自黄土高原 3 种土壤类型(塬土、黑垆土、风沙土),土地利用方式皆为农耕地。塬土、黑垆土、风沙土分别采自陕西省杨陵区五泉镇岭后(108°07'E, 34°20'N)、咸阳市长武县洪家镇王东村(107°41'E, 35°14'N)、靖边县海则滩乡(109°00'E, 37°47'N);年均气温分别为 13.0℃, 9.1℃, 7.8℃;年平均降雨量分别为 660 mm, 580.0 mm, 395.4 mm。经室内分析,3 种土壤的质地分别为壤质黏土、黏壤土、砂质壤土。

采用五点取样法进行土样采集^[14],在每个取样点采集表层原状土(0—20 cm)带回实验室。用干筛法筛分土壤团聚体:首先,按照土壤的自然纹理掰成直径约为 1 cm 的小土块,人工去除可见的植物残体、碎屑、砾石和杂质,然后将样本风干。将 1 cm 的土块过 1~5 mm 筛,以风干的 1~5 mm 混合土壤团聚体为试验材料^[15]。3 种土壤团聚体分别标记为 S₁, S₂, S₃。

使用烘干法^[16]测定土壤的风干含水量:S₁(2.64%)、S₂(3.30%)、S₃(1.07%);有机质含量采用重铬酸钾外加热法^[1];机械组成采用马尔文激光粒度仪法^[1]。表 1 为本研究中使用样品的基本特性(ISSS 系统—国际分类系统,1930 年)。

表 1 测试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the test soils

土壤类型	塬土	黑垆土	风沙土
采样地	杨凌	长武	靖边
土壤质地	壤质黏土	黏壤土	砂质壤土
团聚体编号	S ₁	S ₂	S ₃
黏粒/%	26.11	20.85	10.59
粉粒/%	40.01	33.09	18.93
砂粒/%	33.88	46.06	70.48
风干土壤含水量/%	2.64	3.3	1.07
有机质/%	1.46	1.55	0.41

1.2 试验设计

本研究采用自制针头式模拟降雨器,在不同坡

度($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$)条件下对不同土壤团聚体(S_1, S_2, S_3)进行模拟降雨试验。以去离子水为降雨材料,降雨高度为2.0 m,降雨强度为60 mm/h^[17](根据中国黄土高原的平均暴雨强度设计)。每种条件下重复试验2次,共计30场降雨。

通过多次预试验以确定在不同条件下土壤表面出现可见积液的时间,降雨持续时间统一定为10 min,该降雨持续时间可确保所有土壤团聚体达到饱和。在填充土样过程中,将风干土壤团聚体按设计容重装填至土壤容器(S_1, S_2, S_3 的容重根据野外耕作层容重确定);填充完成后,用塑料板轻轻抹平土壤容器的表面,防止团聚体破碎。为防止多针头多雨滴下溅蚀颗粒飞溅过于混乱,利用高速摄像机拍摄飞溅过程时采用单针头多雨滴,对整个溅蚀过程进行间隔2分钟的拍摄,以获取不同条件下不同阶段的颗粒飞溅瞬时照片,通过处理获得溅蚀颗粒的飞溅速度,该速度代表整个飞溅过程的平均速度。试验期间,当土壤表面出现明显水层时,降雨停止,每次试验待溅蚀板水分自然风干后,记录次降雨溅蚀土粒质量。

本研究试验装置针头直径为0.6 mm,产生雨滴直径大小为2.63 mm,降雨均匀度可达90%。雨滴动能的计算参考Xiao等^[18]的研究。在2.0 m高度下降,雨滴终速为5.35 m/s,该速度达到自然降雨雨滴终速的70%。本研究中降雨的总累积雨滴动能(E_1)为4.12 J,单针头10 min内累积雨滴动能(E_2)为 8.24×10^{-2} J。

1.3 试验装置

降雨装置由恒压水箱、降雨桶和支架组成。如图1所示,降雨筒由两部分组成,上部是直径20 cm,高20 cm的圆柱,底部是固定着针头的橡胶垫。土壤容器是一个直径为10 cm、深度为4.5 cm的圆柱体,在土壤容器底部钻孔,以方便排水。溅蚀盘是一个直径为80 cm的亚克力板,可用于收集次降雨全部溅蚀颗粒。该装置可通过调整溅蚀盘的倾斜度以模拟不同坡度。

高速摄像系统由高速摄像机、补光灯,高速图像采集及分析系统组成。高速摄像机采用千眼狼X213-M(合肥中科君达视界技术股份有限公司,中国),采样频率可达13 500帧/s,分辨率为1 280×1 024。补光灯采用金贝EF II-300。试验前通过预试验确定补光灯位置以及摄像机采样角度以确保达到最佳效果。确定参数:帧率为3 000 fps,曝光时间5 μ s。

1.4 数据处理与分析

(1) 团聚体稳定性。团聚体稳定性采用Le Bissonnais法进行分析^[1-3]。快速湿润:称取5 g 3~5 mm粒径的团聚体置于装有50 ml去离子水的烧杯中,浸泡10 min后用吸管吸走表层溶液,将处理好的

团聚体用酒精洗入浸没在酒精中的50 μ m筛目中;慢速湿润:称取5 g 3~5 mm粒径的团聚体置于预湿润的滤纸上,静置30~40 min,后将处理好的团聚体用酒精洗入浸没在酒精中的50 μ m筛目中;预湿润震荡:称取5 g 3~5 mm粒径的团聚体缓慢浸入装有50 ml酒精的烧杯中,静置10 min,然后用吸管吸走酒精。再将团聚体转移到一个250 ml的锥形瓶中,将水量调整到200 ml,锥形瓶加软木塞上下振荡20次,静置30 min至颗粒沉淀,然后用吸管吸走多余的水分,剩下的土壤和水的混合物用酒精洗入浸没在酒精中的50 μ m筛目中。3种前期处理后的团聚体在酒精中用50 μ m筛目上下振荡20次,将剩余的团聚体转移至铝盒中,在40 $^\circ$ C烘箱中烘干48 h。烘干后的团聚体分别通过3, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.1和0.05 mm筛目后,计算团聚体稳定性指标。

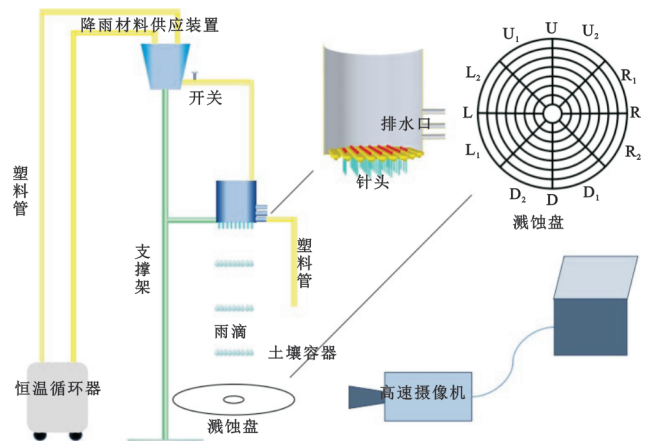


图1 模拟降雨试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device for simulated rainfall

团聚体综合稳定性特征用 A_s 表示。 A_s 值越大,团聚体的稳定性越差^[19]。 A_s 的具体计算公式如式1:

$$A_s = \text{RSI} \cdot \text{RMI} \quad (1)$$

式中: A_s 表示土壤团聚体稳定性指数;RSI和RMI分别代表相对消散指数和相对机械破坏指数。

(2) 飞溅颗粒的动能

$$E = \frac{1}{2} M \cdot V^2 \quad (2)$$

式中: E 为飞溅颗粒的动能(J); M 和 V 是溅蚀土壤颗粒的质量(kg)和平均飞溅速度(m/s)。

(3) 飞溅颗粒的动能占单针头10 min内累积雨滴动能的百分比 B 。

$$B = E/E_2 \quad (3)$$

式中: E 为飞溅颗粒的动能(J); E_2 为单针头10 min内累积雨滴动能,本研究通过计算取 8.24×10^{-2} J。

(4) 本研究中,我们随机选择70%数据用于构建方程,剩余30%独立数据进行方程验证。采用均

方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)和纳什系数(也称有效性系数 N_{SE})对方程的有效性进行评价。 R^2 和 N_{SE} 越接近1,方程的有效性越高。我们以 $R^2 > 0.5$, $N_{SE} > 0.5$ 为标准^[20-21],对构建的方程进行验证。

$$N_{SE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (5)$$

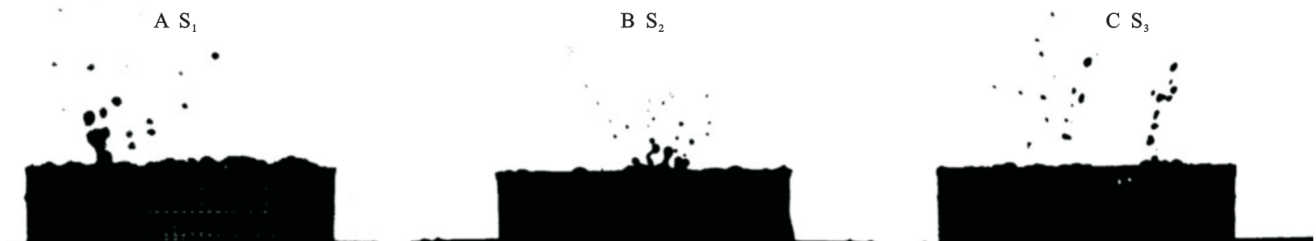
式中: O_i 为第*i*个实测值; S_i 为第*i*个模拟值; n 为实测值的总数; \bar{O} 为实测值的平均值。

表2 不同供试土壤团聚体的稳定性特征参数

Table 2 Stability parameters of different test soil aggregates

编号	S ₁	S ₂	S ₃
MWD _{FW} /mm	0.43	0.32	0.10
MWD _{WS} /mm	2.11	1.35	0.18
MWD _{SW} /mm	2.65	1.93	0.39
RSI	0.84	0.83	0.75
RMI	0.20	0.30	0.54
As	0.17	0.25	0.41

注:(1)MWD_{FW}, MWD_{WS}和MWD_{SW}分别代表快速润湿、预湿润振荡和慢速润湿处理下的团聚体平均重量直径,mm;(2)RSI,RMI,As分别代表相对消散指数、相对机械破碎指数和团聚体稳定性综合指数;(3)S₁,S₂,S₃代表3种不同质地土壤(壤质黏土、黏壤土、砂质壤土)的团聚体,下表及图相同。



注:S₁,S₂,S₃代表3种不同质地土壤(壤质黏土、黏壤土、砂质壤土)的团聚体。

图2 在0坡度时,S₁,S₂,S₃土壤团聚体在同一时间下的飞溅情况

Fig. 2 Splash of S₁, S₂, and S₃ soil aggregates at the same time at 0° slope

S₁团聚体在0°,5°和10°坡面的溅蚀颗粒质量均与15°,20°坡面之间均存在显著差异($p < 0.05$)。S₂团聚体在0°,5°坡面的溅蚀颗粒质量均与10°,15°和20°之间均存在显著差异($p < 0.05$)。S₃团聚体溅蚀颗粒质量在0°和20°坡面的溅蚀土壤颗粒质量之间存在显著差异($p < 0.05$)。整体来看,同一土壤团聚体的溅蚀土壤颗粒质量随坡度的增加而略有增加。如图3所示,随着坡度的增加,土壤团聚体的溅蚀颗粒向下坡的飞溅明显增多。

2.2 土壤颗粒飞溅速度分析

2.2.1 不同土壤团聚体的溅蚀颗粒飞溅速度 在不同坡度下,3种质地土壤团聚体溅蚀颗粒的平均飞溅

以上数据处理使用 Excel 2019, Origin 2022, SPSS 27 和 Image J 等软件。

2 结果与分析

2.1 不同坡度和土壤团聚体的飞溅土壤颗粒质量

团聚体稳定性指数 A_s 表明 S₁ 团聚体稳定性最高, S₂ 次之, S₃ 团聚体稳定性最弱(表2)。如表3所示。整体来看, S₁ 和 S₂ 团聚体的溅蚀土壤颗粒质量均小于 S₃, 且 S₃ > S₂ > S₁; S₃ 团聚体溅蚀颗粒质量分别是 S₁, S₂ 团聚体的 1.93~2.56 倍、1.73~2.24 倍, S₂ 团聚体溅蚀颗粒质量是 S₁ 团聚体的 1.12~1.14 倍。如图2所示,在0°时, S₃ 土壤团聚体的溅蚀颗粒明显多于 S₁ 和 S₂。

表3 不同坡度和土壤团聚体的溅蚀土壤颗粒总质量

Table 3 Total mass of splashed soil particles of different

slopes and soil aggregates				g
坡度	S ₁	S ₂	S ₃	
0°	1.5669Aa	1.7877Aa	4.0095Ba	
5°	1.7328Aa	2.0938Bab	4.3227Cab	
10°	1.8621Aa	2.2936Ab	4.7423Babc	
15°	2.2902Ab	3.1794Bc	4.9885Cbc	
20°	2.7924Ac	3.1248Ac	5.3976Bc	

注:(1)同一行中不同的大写字母(A, B, C)表示在相同坡度条件下,不同土壤团聚体之间的溅蚀土壤颗粒质量在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异;(2)同一列中不同的小写字母(a, b, c)表示同一土壤团聚体在不同坡度的溅蚀土壤颗粒质量在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异。

速度变化范围分别为 1.66~2.20 m/s, 1.70~2.22 m/s, 1.73~2.20 m/s, 1.75~2.20 m/s, 1.79~2.25 m/s。当坡度为0°和5°时, S₁ 和 S₂ 团聚体颗粒飞溅速度之间无显著差异,但均与 S₃ 团聚体之间有显著差异(图4);当坡度为10°,15°和20°时, S₁ 和 S₃ 团聚体颗粒飞溅速度之间有显著差异(图4)。所有坡度条件下,3种团聚体溅蚀颗粒平均飞溅速度为 S₃ > S₂ > S₁。这说明,土壤团聚体越稳定,颗粒飞溅速度越小。

2.2.2 不同坡度条件下的土壤颗粒飞溅速度 不同土壤团聚体,在0°和5°时,向坡上方的颗粒飞溅速度之间无显著性差异,10°,15°和20°时,向坡上方的颗粒飞溅速度之间无显著性差异;但0°和5°时向坡上方的颗

粒飞溅速度均与 10°, 15° 和 20° 之间存在显著性差异; 向坡上方的颗粒飞溅速度均随着坡度的增加而减小(图 5A)。向坡下方的颗粒飞溅速度呈现相反的趋势, 飞溅速度均随着坡度的增加而增加(图 5B)。当坡度从 0° 增加到 20° 时, S₁ 土壤团聚体向坡下方的颗粒飞溅速度与向坡上方的颗粒飞溅速度之间的比值从 1.06

增加到 2.08; S₂ 土壤团聚体向坡下方的颗粒飞溅速度与向坡上方的颗粒飞溅速度之间的比值从 1.02 增加到 2.09; S₃ 土壤团聚体向坡下方的颗粒飞溅速度与向坡上方的颗粒飞溅速度之间的比值从 1.00 增加到 1.82。表明溅蚀颗粒向坡上方飞溅的速度与向坡下方飞溅的速度之间的差异随着坡度的增加而增加。

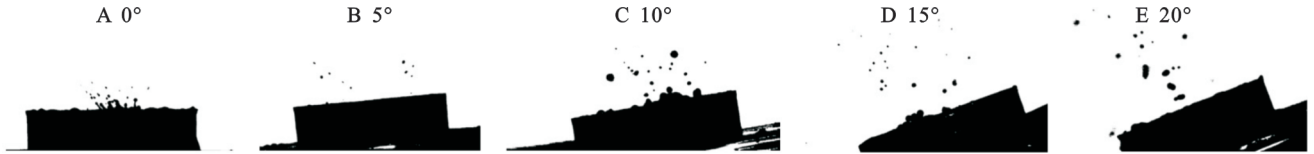
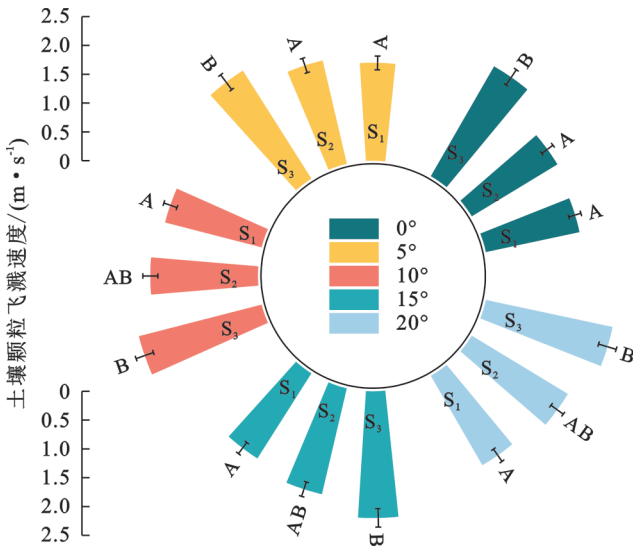


图 3 砂质壤土的土壤团聚体(S₃)在不同坡度下的溅蚀情况

Fig. 3 Splash of soil aggregate (S₃) of sandy loam at different slopes



注: (1) 同一组中不同的大写字母(A, B)表示在相同坡度条件下, 不同土壤团聚体之间的土壤颗粒飞溅速度在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异。

图 4 不同土壤团聚体的颗粒飞溅速度

Fig. 4 Splash velocity of soil particles from different soil aggregates

2.2.3 土壤颗粒飞溅速度预测方程构建与验证 根据相关分析(表 4), 向坡上方和向坡下方的颗粒飞溅

速度与土壤团聚体稳定性(A_s)、和坡度(α)之间存在显著的相关性。向坡上方的颗粒飞溅速度与团聚体稳定性(A_s)呈现显著的正相关, 而与坡度(α)呈现显著的负相关; 向坡下方的颗粒飞溅速度与团聚体稳定性(A_s)和坡度(α)之间均呈现显著的正相关。

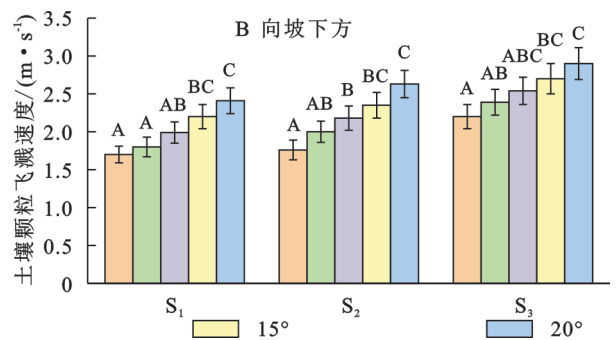
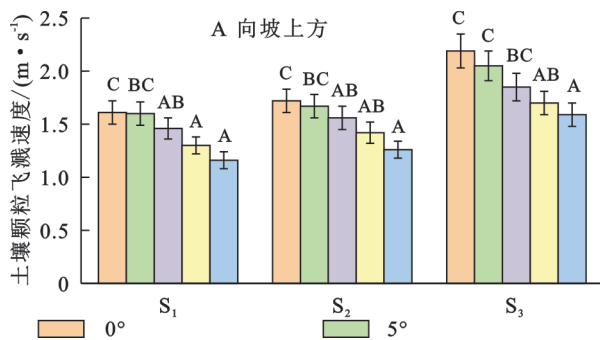
为进一步阐明不同条件下土壤颗粒的飞溅特征, 我们分别构建了向坡上方的颗粒飞溅速度(V_{\uparrow})以及向坡下方的颗粒飞溅速度(V_{\downarrow})和土壤团聚体稳定性(A_s)与坡度(α)之间的预测方程。

$$V_{\uparrow} = 2.86A_s^{0.31} \times e^{(-0.93S)} (R^2=0.96, p<0.01) \quad (6)$$

$$V_{\downarrow} = 2.74A_s^{0.28} \times e^{0.96S} (R^2=0.97, p<0.01) \quad (7)$$

式中: V_{\uparrow} 代表向坡上方的颗粒飞溅速度; V_{\downarrow} 代表向坡下方的颗粒飞溅速度; A_s 表示土壤团聚体的稳定性; S 表示坡度 α 的正切值, $S = \tan(\alpha)$ 。

由方程系数可知, A_s 的指数(坡面上方: 0.31 > 坡面下方: 0.28), 说明团聚体稳定性(A_s)对于向坡上方的颗粒飞溅速度影响大于向坡下方; 而 S 的参数(坡面上方: -0.93, 坡面下方: 0.96)表明坡度抑制坡面上方颗粒飞溅速度(指数级衰减), 促进坡面下方颗粒飞溅速度(指数级增加)。



注: 同一组不同的大写字母(A, B, C)表示同一土壤团聚体在不同坡度条件下的溅蚀颗粒飞溅速度在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异。

图 5 不同坡度下溅蚀土壤颗粒的飞溅速度

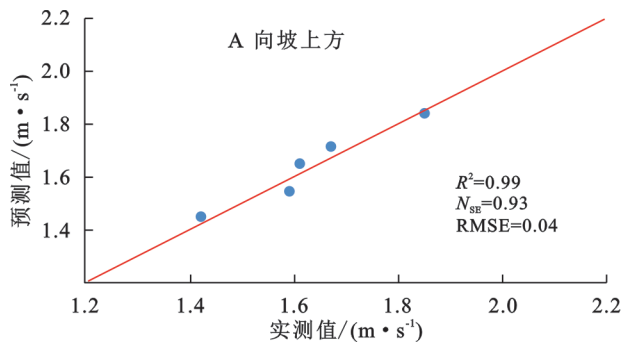
Fig. 5 Splash velocity of soil particles at different slopes

通过验证, 向坡上方的颗粒飞溅速度和向坡下方的颗粒飞溅速度测量值和预测值之间沿着 1:1 的直线出现了最佳拟合结果。向坡上方的颗粒飞溅速度实

测值与预测值之间 RMSE 为 0.04, N_{SE} 为 0.93, R^2 为 0.99(图 6A); 向坡下方的颗粒飞溅速度实测值与预测值之间 RMSE 为 0.06, N_{SE} 为 0.99, R^2 为 0.99(图 6B)。

2.3 飞溅颗粒的动能

在本研究中,下落液滴总动能的0.052%至0.33%被转化为飞溅颗粒的动能(表5)。3种土壤团聚体颗粒飞溅的动能变化范围为0.052%~0.234%,0.061%~0.259%,0.067%~0.277%,0.085%~0.293%,0.108%~0.330%。3种土壤团聚体颗粒飞溅的动能占比在不同坡度(0°,5°,10°,15°和20°)的变化范围为0.052%~0.108%,0.066%~0.143%,0.234%~0.330%。整体来看,3种土壤团聚体颗粒飞溅的动能均为 $S_3>S_2>S_1$;这说明团聚体越稳定,飞溅颗粒的动能越少,而转化于破坏土壤团聚体、对地表压实及成坑作用的热能越多。不同坡度条件下飞溅颗粒的动能随着坡度的



增加而增加,说明同一土壤团聚体下,坡度越大,飞溅颗粒的动能越大(表5)。

表4 飞溅颗粒速度与各种影响因素之间的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between velocity of splashed particles and various influencing factors

相关性		A_s	S
V_{\uparrow}	皮尔逊相关性	0.709**	-0.685**
	显著性(单尾)	0.002	0.002
V_{\downarrow}	皮尔逊相关性	0.635**	0.767**
	显著性(单尾)	0.005	0.001

注:(1)**表示相关性显著, $p<0.01$ (单尾);(2)表中, V_{\uparrow} 代表向坡上方的颗粒飞溅速度;(3) V_{\downarrow} 代表向坡下方的颗粒飞溅速度;(4) A_s 代表土壤团聚稳定性;(5)S表示坡度 α 的正切值, $S=\tan(\alpha)$ 。

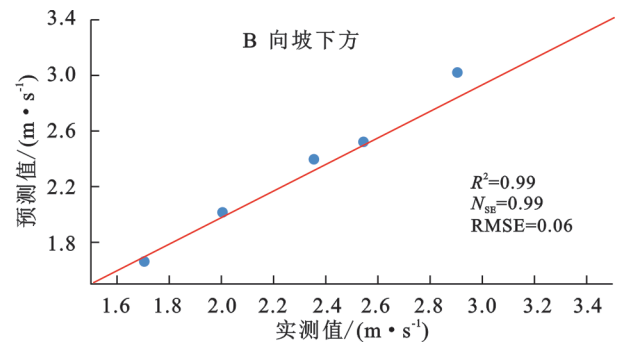


图6 土壤颗粒飞溅速度的测量值与预测值的比较

Fig. 6 Comparison between the measured and predicted velocity of splashed soil particles

表5 不同坡度及土壤团聚体下飞溅颗粒的动能占总动能(E_2)的比例

Table 5 Kinetic energy of splashed soil particles as a proportion of total kinetic energy (E_2) at different slopes and soil aggregates

坡度	飞溅颗粒的动能/mJ			飞溅颗粒的动能占总动能(E_2)的比例/%		
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3
0°	2.1459	2.7062	9.6589	0.052	0.066	0.234
5°	2.5039	3.5251	10.6520	0.061	0.086	0.259
10°	2.7705	4.0102	11.4243	0.067	0.097	0.277
15°	3.5069	5.6486	12.0722	0.085	0.137	0.293
20°	4.4486	5.9106	13.6020	0.108	0.143	0.330

注: E_2 为单针头10 min内累积雨滴动能,本研究通过计算取 8.24×10^{-2} J。

3 讨论

3.1 飞溅土壤颗粒质量

当雨滴打击土壤团聚体表面,土壤团聚体会因消散作用、雨滴机械打击作用、黏土膨胀作用和物理化学分散作用而被分解,释放出大量可供飞溅的小颗粒,随后在雨滴的冲击下发生位移^[5,22-23]。溅蚀颗粒质量差异主要归因于团聚体稳定性^[15]。在本研究中, S_1 土壤的团聚体稳定性最高, S_3 土壤团聚体稳定性最低(表2)。这可能是由于 S_3 土壤团聚体中有机

质和黏粒含量较低,导致哈马克常数和范德华力最弱,形成稳定和较大团聚体的能力降低^[3,23-24]。因此, S_3 团聚体本身可能具有较多的小颗粒可供雨滴迁移,所以 S_3 团聚体溅蚀颗粒质量较大,这与Epstein等^[25]的结论一致,他们的研究表明相同降雨条件下,黏粒含量最低的砂土溅蚀量最多。

本研究发现不同坡度坡面的飞溅土壤颗粒质量大小为 $20^\circ>15^\circ>10^\circ>5^\circ>0^\circ$ (表3)。这可能是由于随着坡度的增加,垂直于坡面的压力减小,从而削弱了雨滴对地面的压实作用,导致可供运输的飞溅土壤颗粒增加^[13]。同时,随着坡度的增加,平行于坡面方向的剪切力也随之增加,从而提高了雨滴向下坡迁移土壤颗粒的能力。这两方面可能共同导致飞溅土壤颗粒的总质量随坡度增加而增加^[26]。

3.2 土壤颗粒飞溅速度

雨滴击溅土壤颗粒的起动一部分是受到飞溅液膜的拖曳力而发生位移,还有一部分是由于动能转化与传递导致引起,而地表土层的抗剪强度会影响液滴飞溅的角度^[27]。雨滴打击地表会导致土壤颗粒的破碎以及溅蚀坑的逐步形成,使得飞溅液膜的拖曳力也随之加大,同时在溅蚀坑边缘效应的作用下,飞溅颗粒的飞溅角度和飞溅速度会有所增加^[13]。团聚体越不稳定,溅蚀坑深度与宽度会更显著,越多的

土壤颗粒会被飞溅。

在本研究中,我们发现 3 种团聚体在 0° 时,坡面上、下方的溅蚀颗粒飞溅速度差别不大,且溅蚀颗粒飞溅速度均为 S_3 最大, S_1 最小(图 4)。主要是因为雨滴下落在水平面上,沿各个方向的体积分量较均衡,使雨滴对各个方向的剪切力以及拖曳力差异不显著,各方向颗粒飞溅速度差异不明显; S_1 团聚体稳定性较高, S_3 团聚体稳定性最弱, S_3 土壤团聚体在雨滴打击下所形成的溅蚀坑相比于 S_1 土壤团聚体,溅蚀坑的深度和宽度都较大,在溅蚀坑边缘效应和拖曳力的作用下,飞溅颗粒速度大于 S_1 ;同时, S_3 团聚体因为其稳定性较差,转化为破坏团聚体的热能占比较少,使得颗粒飞溅的动能较多,因此会进一步增加 S_3 团聚体土壤颗粒的飞溅速度。如图 2 所示, S_3 土壤团聚体溅蚀颗粒明显多于 S_1 和 S_2 ,且飞溅角度较大。由于 S_3 团聚体

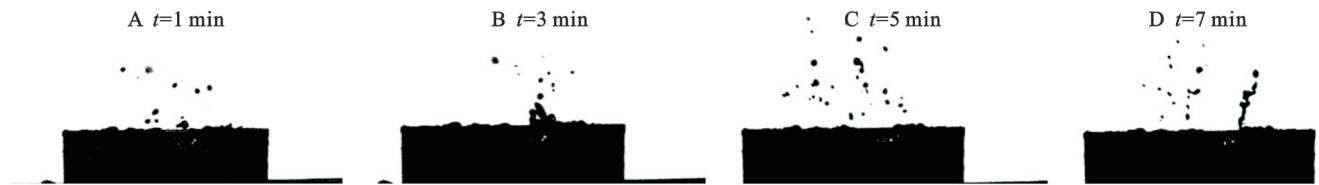


图 7 在 0° 坡度时,砂质壤土的土壤团聚体(S_3)在不同时间下的飞溅情况

Fig. 7 Splash of soil aggregate (S_3) of sandy loam at different times at 0° slope

3.3 雨滴打击下土壤颗粒飞溅的动能

本研究发现, S_3 土壤团聚体颗粒飞溅的动能占比大于 S_1 和 S_2 (表 5),主要是因为团聚体稳定性越大,转化为破坏团聚体、对地表压实以及成坑作用的热能就越多,从而导致飞溅土壤颗粒的动能越少。另外,飞溅颗粒的动能随着坡度的增加而增加。主要是因为随着坡度的增加,溅蚀颗粒质量增加(表 3);同时由于雨滴剪切和飞溅液膜的双重作用,坡面下方颗粒飞溅速度显著增加^[28],使得坡面平均速度随坡度略有增加(图 5),这两方面共同导致飞溅颗粒的动能随坡度而增加。总体来说,无论在什么条件下,超过 80% 的雨滴动能均被土壤团聚体耗散,飞溅颗粒的动能占比很小。这与 Beczek 等^[12]的研究一致,用于颗粒飞溅的雨滴动能占比 1%~14%。此外, Long 等^[11]也指出,只有 2% 的雨滴动能被用于粒子飞溅。

需要指出的是,本研究中飞溅颗粒的动能比例均小于 1%,主要原因可能是本研究所使用的模拟降雨在 2 m 高度下落的雨滴动能小于天然降雨,从而可能削弱了雨滴对土粒的飞溅能力,从而低估了雨滴飞溅土壤颗粒的动能占比。Ghadiri 等^[10]指出,当液滴速度为 15.5 m/s 时,飞溅动能占总动能的比例最高约 45%。其次,本研究中并未对不同条件下雨滴破坏团聚体,对地表压实以及成坑作用的热能进行区分,未来需要进一步加强这方面的研究。

稳定性较差,随着时间推移,雨滴打击下的溅蚀坑逐渐变深和变大,在拖曳力和溅蚀坑边缘效应下颗粒飞溅角度较大且分散于两边飞溅(图 2C,图 7)。

当坡度增加时,沿坡面下方的颗粒飞溅速度大于坡面上方(图 5)。坡度越大,坡面下方颗粒飞溅速度越大;团聚体越不稳定,坡面下方颗粒飞溅速度越大(图 5)。主要是因为坡度增加,沿坡面向下的雨滴体积分量增加,雨滴对下坡剪切能力增强,溅蚀坑向坡面下方发育导致溅蚀坑的直径沿坡面增大,且形状也逐渐由“斗状”转向“铲状”,下坡液膜拖曳力随之增加^[13],导致坡面上、下方颗粒飞溅速度差异显著;团聚体越不稳定,在溅蚀坑下方的颗粒由于雨滴剪切和飞溅液膜的双重作用更容易且以较高速度被飞溅。同时,受颗粒自身重力影响,飞溅的高度和飞溅距离各不相同,坡面下方的位移更远(图 3)。

4 结论

(1) 团聚体稳定性越高,颗粒飞溅的速度越小且飞溅颗粒的质量越小。向坡上方的颗粒飞溅速度随着坡度的增加而显著减小;向坡下方的颗粒飞溅速度随着坡度的增加而明显增加;并基于相关分析分别建立了向坡上方的颗粒飞溅速度、向坡下方的颗粒飞溅速度与团聚体稳定性与坡度的定量关系式。

(2) 团聚体稳定性的影响:向坡上方的颗粒飞溅速度 > 向坡下方的颗粒飞溅速度;坡度的影响:向坡下方的颗粒飞溅速度 > 向坡上方的颗粒飞溅速度。

(3) 团聚体越稳定,雨滴动能大部分被转化为破坏团聚体以及形成溅蚀坑的热能,而飞溅颗粒的动能较少;不同坡度下飞溅颗粒的动能随着坡度的增加而增加。

参考文献(References):

- [1] Li H R, Gu J, Liu G, et al. Effects of raindrop temperature on the contributions of slaking and mechanical striking to aggregate disintegration during splash erosion [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 224: 105518.
- [2] Li H R, Liu G, Gu J, et al. Response of soil aggregate disintegration to the different content of organic carbon and its fractions during splash erosion [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(2): e14060.
- [3] Li H R, Zhang Q, Wu J J, et al. Response of soil aggre-

- gate disintegration to antecedent moisture during splash erosion[J]. *Catena*, 2024,234:107633.
- [4] Liu L, Zhang Y, Li Z W, et al. Effect of slope borders in reducing splash erosion during sediment transport by rain-induced overland flow[J]. *European Journal of Soil Science*, 2023,74(2):e13360.
- [5] Zambon N, Johannsen L L, Strauss P, et al. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2021,196:104827.
- [6] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action[J]. *Catena*, 2017,150:154-160.
- [7] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Impact of raindrop characteristics on the selective detachment and transport of aggregate fragments in the Loess Plateau of China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016,80(4):1071-1077.
- [8] 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.
Wu P T, Zhou P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991,11(3):8-13,28.
- [9] Horabik J, Sochan A, Beczek M, et al. Discrete element method simulations and experimental study of interactions in 3D granular bedding during low-velocity impact[J]. *Powder Technology*, 2018,340:52-67.
- [10] Ghadir H, Payne D. The formation and characteristics of splash following raindrop impact on soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1988,39(4):563-575.
- [11] Long E J, Hargrave G K, Cooper J R, et al. Experimental investigation into the impact of a liquid droplet onto a granular bed using three-dimensional, time-resolved, particle tracking[J]. *Physical Review E, Statistical, Non-linear, and Soft Matter Physics*, 2014,89(3):032201.
- [12] Beczek M, Ryżak M, Sochan A, et al. The mass ratio of splashed particles during raindrop splash phenomenon on soil surface[J]. *Geoderma*, 2019,347:40-48.
- [13] 鹿泽洋,彭清娥,赵瑜琪,等.单颗粒液滴飞溅对颗粒起动的的影响[J].*水土保持学报*,2022,36(4):37-42.
Lu Z Y, Peng Q E, Zhao Y Q, et al. Effect of single particle droplet splash on sediment inapient motion initiation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(4):37-42.
- [14] Kukal S S and Sarkar M. Laboratory simulation studies on splash erosion and crusting in relation to surface roughness and raindrop size [J]. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 2011,59,87-93.
- [15] Xiao H, Liu G, Zhang Q, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,178:150-158.
- [16] 郝萍萍,韩金朝,刘晓,等.土壤水分含量测定方法的技术现状与发展趋势[J].*江苏农业科学*,2024,52(17):11-20.
- Hao P P, Han J Z, Liu X, et al. Technical status and development trend of soil moisture content measurement methods[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024,52(17):11-20.
- [17] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨标准[J].*水土保持通报*,1987,7(1):38-44.
Zhou P H, Wang Z L. Soil erosion storm rainfall standard in the Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1987,7(1):38-44.
- [18] Xiao H, Liu G, Abd-Elbasit M A M, et al. Effects of slaking and mechanical breakdown on disaggregation and splash erosion[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017,68(6):797-805.
- [19] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China [J]. *Catena*, 2010,81(3):240-248.
- [20] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001,44(6):1559-1570.
- [21] Nafees Ahmad H M, Sinclair A, Jamieson R, et al. Modeling sediment and nitrogen export from a rural watershed in eastern Canada using the soil and water assessment tool[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011,40(4):1182-1194.
- [22] Shainberg I, Levy G J, Rengasamy P, et al. Aggregate stability and seal formation as affected by drops' impact energy and soil amendments[J]. *Soil Science*, 154(2):113-119.
- [23] Yu Z H, Zhang J B, Zhang C Z, et al. The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017,174:251-260.
- [24] Ma R T, Hu F N, Liu J F, et al. Evaluating the effect of soil internal forces on the stability of natural soil aggregates during vegetation restoration [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021,21(9):3034-3043.
- [25] Epstein E, Grant W J. Soil losses and crust formation as related to some soil physical properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1967,31(4):547-550.
- [26] 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 Z X, Wu F Q. Influence of slope on splash erosion of Lou soil in Guanzhong area under simulated rainfall [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021,58(6):1416-1422.
- [27] Liu Y, Tan P, Xu L. Kelvin-Helmholtz instability in an ultrathin air film causes drop splashing on smooth surfaces [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015,112(11):3280-3284.
- [28] Choo H, Park K H, Won J, et al. Resistance of coarse-grained particles against raindrop splash and its relation with splash erosion [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,184:1-10.