

DOI: 10.11766/trxb201701090508

雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征*

肖海¹ 刘刚^{1, 2} 赵金凡³ 蒙蒂凯诺⁴ 刘普灵^{1, 2†}

(1 西北农林科技大学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, 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 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002)

(4 四川农业大学林学院, 成都 611130)

摘要 土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 其稳定性是描述土壤抵抗侵蚀过程中破坏作用的重要指标。但溅蚀过程中, 雨滴对团聚体的消散和机械打击两种破坏作用的相对贡献及其破坏机制尚未明晰。利用酒精和超纯水作为雨滴形成材料, 模拟机械打击单独作用及消散和机械打击共同作用, 分别在五个高度 (0.5、1、1.5、2 和 2.5 m) 对壤土和黄绵土进行溅蚀实验。结果表明: 当降雨动能相同时, 壤土的溅蚀率均小于黄绵土。同时, 超纯水雨滴对土壤的机械打击和消散共同作用所导致的溅蚀率均大于酒精雨滴单一机械打击作用的溅蚀率。随着降雨动能增加, 两种雨滴对两种土壤的溅蚀率均呈幂函数增加; 团聚体因消散破坏作用和机械打击作用的溅蚀率均亦随之增加。但两种土壤的消散破坏作用和机械打击作用的贡献率分别随着降雨动能增加而减小和增加。在相同降雨动能时, 壤土消散破坏作用的贡献率均大于黄绵土, 而机械打击作用贡献率均小于黄绵土。研究结果对深入理解溅蚀过程中团聚体破坏机理及评价溅蚀过程中团聚体稳定性具有重要意义。

关键词 溅蚀; 团聚体; 降雨动能; 消散作用; 机械打击

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

溅蚀是降雨侵蚀的初始阶段, 通过雨滴打击, 对坡面土壤进行分离、搬运, 同时为后续侵蚀过程提供泥沙来源, 是水力侵蚀的重要环节与组成部分^[1-2]。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元, 其稳定性是描述土壤抵抗侵蚀过程中破坏作用的重要指标^[3-5]。团粒性质好的土壤, 团聚体稳定性更高, 对雨滴击溅的抵抗力更强^[6]。雨滴打击过程中会导致土壤表层结皮, 影响土壤侵蚀过程^[7-8]。胡霞等^[9]发现不同土壤团聚体破碎后所形成的表土结皮机制不同, 因而影响着溅蚀速率的变化趋势。程琴娟和蔡强国^[10]发现团聚体稳定性高的黑

土溅蚀率远小于团聚体稳定性差的黄土。马仁明等^[11]研究发现在雨滴打击作用下, 土壤团聚体稳定性与溅蚀率之间有显著负相关关系。

现有研究表明, 降雨过程中水对土壤团聚体存在四种破坏作用: 消散作用、机械外力作用、土壤矿物湿润后非均匀膨胀作用和物理化学驱散作用^[12]。物理化学驱散作用在前三种作用破坏时均存在, 而且对各处理的影响是相似的^[12], 因此, Le Bissonais^[12]提出团聚体在快速湿润、湿润后机械震荡和缓慢湿润 3 种处理来评价其稳定性。同时, 由于土壤矿物湿润后非均匀膨胀作用对团聚

* 国家科技支撑计划项目 (2015BAC01B03-03)、中国科学院“西部之光”人才培养计划项目 (2014-91) 和陕西省自然科学基金基础研究计划青年人才项目 (2016JQ4017) 共同资助 Support by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2015BAC01B03-03), the Light of West China Foundation of Chinese Academy of Sciences (No. 2014-91) and the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (No. 2016JQ4017)

† 通信作者 Corresponding author, E-mail: pliu@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 肖海 (1988—), 男, 湖南郴州人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: xiaohai19881104@sohu.com

收稿日期: 2017-01-09; 收到修改稿日期: 2017-02-17; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-03-17

体破坏是有限的^[12]，因此，消散和机械外力两种破坏作用对降雨条件下侵蚀过程中土壤团聚体破坏起主要作用。一些学者使用相对消散指数（RSI）和相对机械破碎指数（RMI）的乘积得到土壤团聚体特征参数 K_a 来代替面蚀中土壤可蚀性因子参数 K_i ^[13-14]。但这些研究均假设侵蚀过程中雨滴机械打击和消散破坏两种作用贡献相同。这一假设是否成立仍需进一步研究，尤其在溅蚀阶段这两种团聚体破坏作用的相对贡献尚未明晰。

因此，本文以壤土和黄绵土作为研究对象，利用酒精和超纯水作为雨滴形成材料，分别模拟机械打击单独作用及消散和机械打击共同作用，从而研究溅蚀过程中不同破坏作用随降雨动能的变化，及其对团聚体破坏作用的相对贡献。本研究对深入理解溅蚀过程中团聚体破坏机理、评价溅蚀过程中团聚体稳定性具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究选择黄土高原地区两种不同质地土壤（壤质黏土（杨凌壤土，即土垫早耕人为土）和砂质壤土（安塞黄绵土，即黄土正常新成土）），经

风干后过5 mm筛，剔除土壤中小石子及根系等杂质，土壤基本理化性质见表1。

在降雨条件下，土壤矿物湿润后非均匀膨胀作用对团聚体破坏是有限的^[12]，同时，用于本试验的黄土母质土壤所含矿物质的膨胀性较差^[15]，因此，本研究将土壤矿物湿润后非均匀膨胀作用对团聚体的破坏作用忽略。本研究将侵蚀过程中团聚体破坏视为由消散作用和机械外力作用共同导致。酒精通过改变表面张力、黏度和接触角度能够大幅度减小水分消散作用对土壤团聚体破坏^[12]。结合LB（Le Bissonnais）团聚体测试方法，为探讨在溅蚀过程中不同土壤团聚体破坏形式的贡献，本研究分别采用超纯水和95%酒精模拟团聚体在溅蚀过程中完全充分破坏（包括消散作用和降雨动能作用）和仅存在降雨动能破坏两种情况。对两种土壤分别使用超纯水和95%酒精进行降雨模拟，通过在0.5、1、1.5、2和2.5 m五个不同降雨高度形成五种降雨动能，进行溅蚀研究。每种实验条件下重复两次，累计共40场降雨。

采用LB法^[12]、马尔文激光粒度仪（Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd., 英国）扫描法和重铬酸钾氧化外加加热法分别测定土壤团聚体稳定性、土壤颗粒体积分数（国际制）和有机质含量。

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic physical-chemical properties of the soils in the experiment

土壤类型 Soil type	取土地点 Location	土壤质地 Soil texture	黏粒 Clay (%)	粉粒 Slit (%)	砂粒 Sand (%)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)
土垫早耕人为土（壤土） Earth-cumuli-Orthic Anthrosols (Lou soil)	杨凌 Yangling	壤质黏土 Loam clay soil	26.11	40.01	33.88	6.03
黄土正常新成土（黄绵土） Loessi-Orthic primosols (Huangmian soil)	安塞 Ansai	砂质壤土 Sandy loam soil	10.59	18.93	70.48	4.12

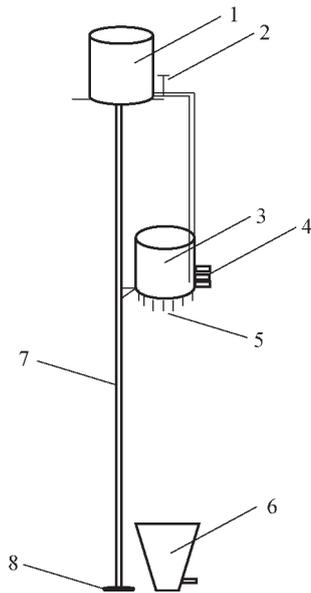
1.2 试验装置

本研究在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅，使用自制针式降雨器进行人工模拟降雨。自制针式降雨器由供液装置、供雨装置以及支撑装置组成（图1）。支撑装置总长1.7 m，底部为一圆盘以确保装置平稳，在1 m高处伸出一个空心支架安放供雨装置，顶部为一平台用

来放置供液装置。供液装置为一塑料桶，在侧面开孔连接一根有开关的塑料管对供雨装置提供液体。供雨装置为直径10 cm的圆筒，圆筒底部均匀分布39个6号针头（直径0.6 mm），圆筒侧壁留有上下三个孔。实际降雨过程中通过调节针头高度以及侧壁开孔高度得到所需要的降雨强度。

本试验所使用溅蚀盘为外环顶部直径及高均为

30 cm、外环底部直径为15 cm的倒圆台形装置,在底部中间安放有直径和高均为10 cm的内环作为溅蚀盘。使用铁皮焊接外环与内环中间形成斜面,并使用玻璃胶将接口处进行粘胶处理以防止漏液,在斜面最低处打孔形成出液口。内环底部打孔,以确保入渗液体能够及时排除。此装置与马仁明等^[16]研究所用类似,是在Morgan溅蚀盘基础上改进的。



注: 1, 供液装置; 2, 开关; 3, 供雨装置; 4, 排液口; 5, 针头; 6, 溅蚀盘; 7, 支撑装置; 8, 底部圆盘 Note: 1. Liquid supply apparatus; 2. Switch; 3. Raindrop generator apparatus; 4. Outfall; 5. Needle-type nozzles; 6. Splash pan; 7. Support frame; 8. Bottom disc

图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

1.3 模拟降雨步骤

将自制针式降雨器安放至设计高度后,开始调节针头高度及侧壁开孔位置对降雨强度进行率定,本试验设计降雨强度为 60 mm h^{-1} ,实际降雨强度为 $(62.70 \pm 0.59) \text{ mm h}^{-1}$ 。率定好降雨强度之后,将溅蚀装置位置标记好,将其拿出降雨范围之外,开始进行溅蚀盘装填土壤:先在内环底部8 cm先填充直径为1~2 cm的石子,然后在上面铺一层滤纸,将风干土按设计容重装填内环顶部2 cm(设计容重根据野外耕作层容重确定:壤土 1.20 g cm^{-3} ;黄绵土为 1.23 g cm^{-3})。使用挡板盖在溅蚀盘上,将溅蚀盘放置于标记好的位置上后,将挡板撤开时按下秒表,开始试验。试验过程中以3 min为时间

间隔在出口处接取全部泥沙样品,待溅蚀盘表面出现明显积液时停止试验。每次接样时,用注射器使用与雨滴相同的液体冲洗在外环收集盘上的土壤颗粒。将各次接样泥沙样烘干后在万分之一天平上称重得到溅蚀量。

1.4 降雨动能测定与计算

在率定好降雨强度后,对同一高度同种液体情况下每一个针头雨滴速度及大小进行测定。使用10 ml容量瓶放置于所测定针头下;记录10滴雨所需要的时间;用吸水性能较好的纸巾将容量瓶外部雨滴擦拭干净后使用万分之一天平称取10滴雨的质量。所有针头测完后开始下一轮测定,共测4轮。计算时假设形成雨滴为球形,使用式(1)计算雨滴直径:

$$D = 10 \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}} \quad (1)$$

式中, D 为雨滴直径,mm; m 为单颗雨滴质量,g; ρ 为密度, g cm^{-3} ,水取1.0,95%酒精取0.81。

雨滴降落时因重力作用而逐渐加速,由于空气的阻力产生向上的浮力,二力趋于平衡时,雨滴则以固定速度下降,称为雨滴终点速度。不同大小雨滴终点速度不同,本文使用文献[17]中公式计算。

根据动能计算公式,单个雨滴动能采用式(2)计算:

$$e_i = \frac{1}{2} m_i v_{ai}^2 \quad (2)$$

式中, e_i 为单颗雨滴动能,J; m_i 为单颗雨滴质量,kg; v_{ai} 为雨滴*i*实际速度, m s^{-1} 。

根据式(2)计算单个雨滴动能,在同一高度时对所有雨滴动能相加,得到此高度下的总动能,经换算得到单位时间单位面积的降雨动能KE, $\text{J m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

$$\text{KE} = \frac{\sum_{i=1}^{n=39} N_i e_i}{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n=39} 36000/T_i e_i}{A} \quad (3)$$

式中, N_i 为1 h中*i*针头的雨滴数,颗; T_i 为*i*针头的10雨滴时间,s; A 为降雨面积, m^2 。

1.5 数据处理

土壤溅蚀率(D_s)表示雨滴在单位时间单位面

积内从溅蚀盘内击溅出来的土壤质量, $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ 。

$$D_s = \frac{S}{A_s t} \quad (4)$$

式中, S 为 t 时间内溅蚀出来的土壤量, g ; A_s 为溅蚀盘面积, m^2 , 本研究取值 $0.007\ 854\ \text{m}^2$; t 为溅蚀时间, min 。

LB法所测团聚体在快速湿润、预湿润后机械震荡和慢速湿润 3 种处理下稳定性分别使用平均重量直径 MWD_{fw} 、 MWD_{ws} 、 MWD_{sw} 表示。不同处理中, MWD 值越低表示团聚体稳定性越低, 该处理对团聚体的破碎作用越大^[13]。平均重量直径计算方法为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (5)$$

式中, \bar{x}_i 为 i 个筛子与上一个筛子的平均直径, mm ; w_i 为第 i 个筛子的破碎团聚体重量百分比, %。

同时, 分别使用相对消散指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI)来评价土壤团聚体对消散作

用和机械打击作用的敏感性。二者的值越大, 表明团聚体对消散作用和机械破碎作用敏感程度越高^[6, 13]。相对消散指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI)分别使用文献[13]中公式计算。

2 结果与讨论

2.1 不同高度下降雨动能

由于超纯水和95%浓度酒精基本理化性质不同, 因此, 在同一高度情况下, 所形成的雨滴大小、数量及相应的降雨动能也存在较大的差别(表2)。超纯水和酒精所形成各自的雨滴大小和10滴所需要时间在不同高度间无显著差别。而在同一高度下, 超纯水10滴与95%酒精10滴所需要时间和平均雨滴直径有所差别, 前者五种高度的平均值分别为后者的1.56倍和1.29倍。通过计算, 超纯水五个高度所形成的降雨对应的降雨动能为 $59.44 \sim 806.9\ \text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 95%酒精五个高度所形成的降雨对应的降雨动能为 $40.13 \sim 497.2\ \text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 超纯水五个高度所形成的降雨对应的降雨动能为95%酒精降雨动能的1.48倍~1.62倍。

表2 不同高度下雨滴基本信息及降雨动能

Table 2 Information of raindrops and related rainfall kinetic energy relative to height where the drops fell from

高度 Fall height (m)	超纯水 Ultra-pure water				酒精 Alcohol			
	10滴时间 Time for 10 raindrops (s)	10滴重量 Weight of 10 raindrops (g)	平均直径 Mean diameter of raindrops (mm)	降雨动能 Rainfall kinetic energy ($\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	10滴时间 Time for 10 raindrops (s)	10滴重量 Weight of 10 raindrops (g)	平均直径 Mean diameter of raindrops (mm)	降雨动能 Rainfall kinetic energy ($\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
0.5	9.91	0.094 5	2.62	59.44	6.45	0.035 4	2.03	40.13
1.0	9.91	0.094 7	2.63	202.9	6.23	0.035 7	2.03	138.2
1.5	9.91	0.094 5	2.62	390.6	6.34	0.035 5	2.03	253.0
2.0	9.92	0.094 8	2.63	598.3	6.29	0.035 6	2.03	380.6
2.5	9.91	0.094 5	2.62	806.9	6.33	0.035 6	2.03	497.2

2.2 两种土壤团聚体稳定性

LB法所测土壤团聚体三种稳定性指标及两种相对指数见表3。壤土的三种团聚体稳定性指标与黄绵土均存在显著差异。壤土在快速湿润、预湿润后震荡和慢速湿润条件下 MWD 大小分别为 0.492 、 2.109 和 $2.647\ \text{mm}$, 黄绵土三种条件下的 MWD 大小

分别为 0.103 、 0.171 和 $0.433\ \text{mm}$, 即三种条件下壤土均远大于黄绵土, 说明壤土团聚体稳定性相对较大, 这与壤土含有更高的可为土壤团聚体形成和稳定提供胶结作用的黏粒和有机质有关。同种土壤不同破碎机制中, MWD 均存在慢速湿润最大、预湿润后震荡次之、快速湿润最小。表明, 壤土和黄绵

土的土壤团聚体破坏均是团聚体快速湿润时孔隙内部封闭的空气压力作用为主，其次是机械扰动作用，黏粒膨胀作用影响最小。这主要是因为两种土壤黏粒矿物组成主要是膨胀性较差的云母和高岭石^[15]。两种土壤相对消散指数（RSI）均大于相对机械破碎指数（RMI），这表明两种土壤对消散作用敏感性均大于机械破碎作用。壤土相对消散指数显著大于黄绵土，表明壤土对消散作用敏感性显著高于黄绵土。壤土之间的相对机械破碎指数大于黄绵土，两者之间存在显著性差异，表明黄绵土对机械破碎作用敏感性远大于壤土。

表3 LB法所测试验土壤团聚体稳定性和敏感性指标

Table 3 Aggregate stabilities measured with the LB-method and related sensitively index in study soils

土壤类型 Soil type	MWD _{fw} (mm)	MWD _{ws} (mm)	MWD _{sw} (mm)	RSI	RMI
壤土 Lou soil	0.429a	2.109a	2.647a	0.838a	0.203a
黄绵土 Huangmian soil	0.103b	0.171b	0.433b	0.760b	0.605b

注：同一列中字母不同表示差异显著， $p < 0.05$ ；MWD_{fw}、MWD_{ws}和MWD_{sw}分别为快速湿润、预湿润后震荡和慢速湿润平均重量直径；RSI和RMI分别为相对消散指数和相对机械破碎指数 Note: Different letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level; MWD_{fw}, MWD_{ws} and MWD_{sw} were the mean weight diameters obtained after the fast-wetting (FW), pre-wetting and stirring (WS) and slow wetting (SW), respectively; RSI and RMI were relative slaking index and relative mechanical impact index, respectively

2.3 降雨动能对溅蚀的影响

雨滴携带动能与土壤表面发生碰撞，形成冲击力，为土壤颗粒产生溅蚀提供直接动力^[18]。除了由于撞击使得部分能量被土壤吸收为热能以外，剩余部分能量将土壤结构破坏，分散破坏土壤团聚体，部分土壤颗粒获得由雨滴传递过来的动量，获得能量后与破碎的水滴向四周发生跃移，从而击溅出溅蚀盘，形成溅蚀^[19]。降雨动能越大，对土壤结构破坏也越严重，土壤颗粒获得的动能和势能也相应增加，土壤颗粒被击溅出溅蚀盘的可能性也将增加。因此，两种土壤在两种雨滴作用下溅蚀率均随着降雨动能的增加而增加（图2）。土壤溅蚀率与降雨动能关系进行拟合，发现幂函数能够很好地描述两者之间的关系，相关系数均达到0.95以上（表4），说明降雨动能变化能够较好地反映土壤溅蚀情况^[2, 17, 20]。

此外，两种土壤的试验结果均表明，超纯水雨滴对土壤的机械打击和消散共同作用所导致的溅蚀率均大于酒精雨滴机械打击作用的溅蚀率。在同一降雨动能下，壤土溅蚀率均小于黄绵土，这是因为，这两种土壤抵抗雨滴动能的土粒间的黏结作用不同，土壤黏粒和有机质越多，所形成的土壤团聚体含量越高且稳定性更好（表3），因而所产生的溅蚀量也越少。

2.4 消散和机械打击作用对降雨动能的响应及贡献率

利用表4中不同土壤溅蚀率与降雨动能关系，分别计算从50到800 J m⁻² h⁻¹ 9种降雨动能下两种土壤相应溅蚀率（表5）。超纯水雨滴对土壤的机械打击和消散共同作用的溅蚀率为总溅蚀率，酒精

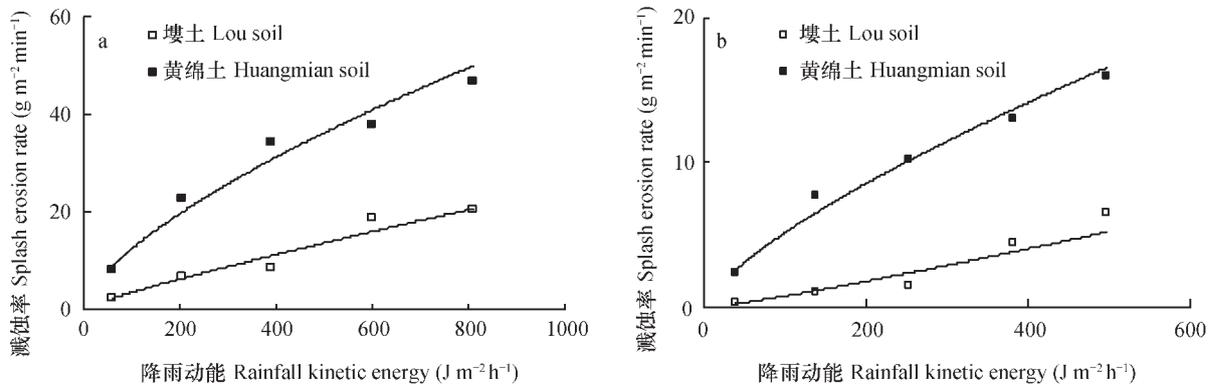


图2 溅蚀率与降雨动能关系图（a. 超纯水；b. 酒精）

Fig. 2 Relationship between rainfall kinetic energy and splash erosion rate (a. Ultra-pure water; b. Alcohol)

表4 两种团聚体破坏情况下土壤溅蚀率与降雨动能关系

Table 4 Correlation coefficients between rainfall kinetic energy and splash erosion rate under two breakdown conditions on aggregate

土壤类型 Soil type	消散和机械打击作用 Slaking plus mechanical impact effect		R^2	土壤类型 Soil type	机械打击作用 Mechanical impact effect		R^2
	土壤类型 Soil type	消散和机械打击作用 Slaking plus mechanical impact effect			土壤类型 Soil type	机械打击作用 Mechanical impact effect	
壤土 Lou soil		$D_s=0.056 5E^{0.880 7}$	0.972 1	壤土 Lou soil		$D_s =0.004 3E^{1.142 5}$	0.950 9
黄绵土 Huangmian soil		$D_s =0.554 2E^{0.672 6}$	0.975 2	黄绵土 Huangmian soil		$D_s =0.185 1E^{0.723 7}$	0.983 6

表5 消散和机械打击作用对两种土壤在不同降雨动能下溅蚀率及相对贡献率

Table 5 Splash erosion rate and contribution rate of slaking effect and mechanical impact relative to rainfall kinetic energy and soil type

降雨动能 Rainfall kinetic energy ($J m^{-2} h^{-1}$)	溅蚀率 Splash erosion rate ($g m^2 min^{-1}$)						贡献率 Contribution rate (%)					
	消散和机械打击 作用 Slaking plus mechanical impact effect				机械打击作用 Mechanical impact effect		消散破坏作用 Slaking effect		机械打击作用 Mechanical impact effect			
	壤土 Lou soil		黄绵土 Huangmian soil		壤土 Lou soil		黄绵土 Huangmian soil		壤土 Lou soil		黄绵土 Huangmian soil	
	壤土 Lou soil	黄绵土 Huangmian soil	壤土 Lou soil	黄绵土 Huangmian soil	壤土 Lou soil	黄绵土 Huangmian soil	壤土 Lou soil	黄绵土 Huangmian soil	壤土 Lou soil	黄绵土 Huangmian soil	壤土 Lou soil	黄绵土 Huangmian soil
50	1.77	7.70	1.40	4.56	0.38	3.14	78.81	59.21	21.19	40.79		
100	3.26	12.27	2.43	7.08	0.83	5.19	74.59	57.74	25.41	42.26		
200	6.01	19.56	4.18	10.99	1.83	8.56	69.53	56.22	30.47	43.78		
300	8.58	25.69	5.68	14.21	2.91	11.48	66.12	55.30	33.88	44.70		
400	11.06	31.18	7.02	17.03	4.04	14.14	63.47	54.64	36.53	45.36		
500	13.46	36.22	8.25	19.60	5.21	16.62	61.27	54.12	38.73	45.88		
600	15.80	40.95	9.38	21.98	6.42	18.97	59.38	53.69	40.62	46.31		
700	18.10	45.42	10.45	24.22	7.66	21.20	57.71	53.32	42.29	46.68		
800	20.36	49.69	11.44	26.34	8.92	23.35	56.20	53.00	43.80	47.00		

雨滴打击作用为机械打击作用贡献的溅蚀率，二者之差为消散破坏作用贡献溅蚀率。分别将消散破坏作用和机械打击作用所贡献的溅蚀率与总溅蚀率相除得到消散作用和机械作用破坏对应的贡献率。

团聚体消散破坏作用和机械打击作用的溅蚀率均随着降雨动能增加而增加。这是因为，团聚体在消散作用和降雨动能破坏后，需要由雨滴动能提供原始动能才能被携带出溅蚀盘，形成溅蚀^[20]。从贡献率来看，无论壤土还是黄绵土，消散破坏作用和机械打击作用的贡献率分别随着降雨动能的增加而减小和增加（表5）。这是因为，随着降雨动能增加，雨滴机械打击的团聚体增加，从而提高了机械打击作用贡献率。相同降雨动能时，壤土消散破坏作用的贡献率均大于黄绵土，而机械打击作用贡献率则小于黄绵土，这是因为，与壤土相比，黄绵

土对消散破坏作用的敏感性（RSI）更大，而对机械打击敏感性（RMI）更小（表3）。

此外，在降雨动能较小时，壤土的消散破坏作用贡献率大于65%，尤其在50和100 $J m^{-2} h^{-1}$ 时，贡献率超过70%，对溅蚀贡献率占主导地位，而黄绵土并未出现此现象，其消散作用贡献率一直小于60%。这可能与两种土壤对消散和机械打击作用的敏感性不同有关。壤土对消散作用及机械打击作用的敏感性分别为0.838和0.760，黄绵土相对应的敏感性分别为0.203和0.605（表3）。壤土的RSI是RMI的4.128倍，而黄绵土的RSI仅为RMI的1.256倍，这表明，与机械打击作用相比，壤土对消散作用敏感性远大于黄绵土。

综上所述，在溅蚀阶段，消散破坏作用和机械打击作用的贡献率并非简单的相等，而是在不同土

壤和不同降雨动能时存在区别, 同时, 随着降雨动能的增加, 消散作用贡献率减小而机械打击作用贡献率增加。

3 结 论

本研究中, 超纯水五个高度所形成的降雨对应的降雨动能为 $59.44 \sim 806.9 \text{ J m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 95%酒精五个高度所形成的降雨对应的降雨动能为 $40.13 \sim 497.2 \text{ J m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 超纯水的降雨动能为95%酒精的1.48倍~1.62倍。LB法的三种测试条件下, 壤土的中值粒径均比黄绵土大, 两种土壤团聚体破坏均以团聚体快速湿润时孔隙内部封闭的空气压力作用为主, 其次是机械扰动作用, 黏粒膨胀作用影响最小。壤土对消散作用敏感性显著大于黄绵土, 而对机械破碎作用敏感性远小于黄绵土。两种雨滴对两种土壤溅蚀过程中, 土壤溅蚀率均随着降雨动能的增加而增加。幂函数能够很好地描述土壤溅蚀率与降雨动能之间的关系。相同降雨动能时, 超纯水雨滴对土壤的机械打击和消散共同作用所导致的溅蚀率均大于酒精雨滴单一机械破坏作用的溅蚀率。团聚体因消散破坏作用和机械打击作用的溅蚀率均随着降雨动能增加而增加。从贡献率来看, 壤土和黄绵土的消散破坏作用的贡献率均随着降雨动能增加而减小而机械打击作用的贡献率均随着降雨动能而增加。在溅蚀阶段, 消散破坏作用和机械打击作用的贡献率在不同土壤和不同降雨动能时存在区别, 同时, 随着降雨动能的增加, 消散作用贡献率减小而机械打击作用贡献率增加。

参 考 文 献

- [1] 刘和平, 符素华, 王秀颖, 等. 坡度对降雨溅蚀影响的研究. 土壤学报, 2011, 48 (3) : 479—486
Liu H P, Fu S H, Wang X Y, et al. Effects of slope gradient on raindrop splash erosion (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (3) : 479—486
- [2] 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. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80 (4) : 1071—1077
- [3] 余冰, 宋云瑞, 程嘉宁, 等. 不同模拟糙度集中水流内红壤团聚体剥蚀特征研究. 土壤学报, 2016, 53 (4) : 860—868
- Yu B, Song Y R, Cheng J N, et al. Denudation of red soil aggregates in concentrated flow as affected by artificial surface roughness (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (4) : 860—868
- [4] Dimoyiannis D, Valmis S, Danalatos N G. Interrill erosion on cultivated Greek soils: Modeling sediment delivery. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31 (8) : 940—949
- [5] Cantón Y, Solé-Benet A, Asensio C, et al. Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion. Catena, 2009, 77 (3) : 192—199
- [6] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. Geoderma, 2001, 99 (1) : 123—145
- [7] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究. 土壤学报, 2004, 41 (4) : 632—635
Tang Z J, Lei T W, Zhang Q W, et al. Quantitative determination of the impacts of raindrop splash and crust on soil erosion with REE experimental data (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (4) : 632—635
- [8] 卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究. 土壤学报, 2009, 46 (1) : 16—23
Bu C F, Cai Q G, Zhang X C, et al. Mechanism and erosion effect of development of soil crust of loess (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (1) : 16—23
- [9] 胡霞, 严平, 李顺江, 等. 人工降雨条件下土壤结皮的形成以及与土壤溅蚀的关系. 水土保持学报, 2005, 19 (2) : 13—16
Hu X, Yan P, Li S J, et al. Development of soil crust through rainfall simulating in laboratory and relationship between crust and splash erosion (In Chinese) . Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19 (2) : 13—16
- [10] 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
Cheng Q J, Cai Q G. Splash erosion by raindrops in typical soil and water loss regions of China (In Chinese) . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30 (1) : 17—21
- [11] 马仁明, 王军光, 李朝霞, 等. 降雨过程中红壤团聚体粒径变化对溅蚀的影响. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (6) : 779—785
Ma R M, Wang J G, Li Z X, et al. Effects of dynamic distribution of aggregate size on splash erosion under rainfall in red soils (In Chinese) . Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22 (6) : 779—785

- [12] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (4): 425—437
- [13] 闫峰陵, 李朝霞, 史志华, 等. 红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系. *农业工程学报*, 2009, 25 (3): 37—41
Yan F L, Li Z X, Shi Z H, et al. Quantitative relationship between aggregate characteristics of red soil and slope erosion (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (3): 37—41
- [14] 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. *Catena*, 2010, 81 (3): 240—248
- [15] 范云涛, 雷廷武, 蔡强国. 湿润速度对土壤表面强度和土壤团聚体结构的影响. *农业工程学报*, 2008, 24 (5): 46—50
Fan Y T, Lei T W, Cai Q G. Effects of wetting rate on soil surface strength and aggregate stability (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 (5): 46—50
- [16] 马仁明, 蔡崇法, 李朝霞, 等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响. *农业工程学报*, 2014, 30 (3): 95—103
Ma R M, Cai C F, Li Z X, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozom (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (3): 95—103
- [17] 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): 4708—4717
Hu W, Zheng F L, Bian F. Effects of raindrop kinetic energy on splash erosion in the typical black soil region of Northeast China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (15): 4708—4717
- [18] 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
Wu P T, Zhou P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991, 11 (3): 8—13, 28
- [19] 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
Zhang K L, Hosoyamada K. Splash erosion process and its relation to slope gradient (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18 (6): 561—566
- [20] 程金花, 秦越, 张洪江, 等. 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
Cheng J H, Qin Y, Zhang H J, et al. Splash erosion under artificial rainfall in rocky mountain area of northern China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46 (2): 153—161

Characteristics of Mechanical Impact and Slaking Effect of Rain Drops on Soil Aggregates

XIAO Hai¹ LIU Gang^{1, 2} ZHAO Jinfan³ MENG Dikainuo⁴ LIU Puling^{1, 2†}

(1 State Key Laboratory of Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

(4 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract 【Objective】 Soil aggregate is a basic unit in soil structure and its stability is an important index describing soil's resistance to breakdown in the process of water erosion. However, in splash erosion how raindrops function through mechanical impact and slaking effect on soil aggregates and what are the mechanisms and contribution rates of the two are still unclear. This study is oriented to investigate effects of mechanical impact and slaking effect of rain drops on breakdown of soil aggregates during splash erosion. 【Method】 A series of indoor splash erosion experiments were carried out in the State Key Laboratory of

Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, China. Samples of Loessal soil (Sandy loamy soil) collected from Yan'an and Lou soil (Loamy loam soil) collected from Yangling in Shaanxi province, two typical soils in the Loess Plateau, were tested in the experiments. A home-made needle type rainfall simulator, consisting of three parts: water supply apparatus, needle nozzles and support frame, was used to simulate rain drops of ultra-pure water and alcohol to determine effect of mechanical impact alone and joint effect of mechanical impact and slaking on soil aggregates, separately. The splash erosion experiments were designed to have two type of soils and 5 treatments in height for rain drops to fall, i.e. 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m and 2.5 m. **【Result】** Results show that in the two soils soil aggregate stability exhibited an order of $MWD_{fw} < MWD_{ws} < MWD_{sw}$. Slaking effect (Fast wetting) was the major mechanism of the breakdown of soil aggregates, and followed by mechanical disturbance (Wetting and Shaking), and then chemical slaking (Slow Wetting) in the end. The soil of loamy clay was higher than the soil of sandy loam in RSI (Relative Slaking Index), suggesting the former is more susceptible to slaking effect than sandy loam soil, while the latter is more to mechanical impact. In splash erosion, when rain drops fell from the same height, splash erosion rate was lower in loamy clay soil than in sandy loam soil, and splash erosion rate caused by rain drops of pure water through the joint effect of mechanical impact and slaking was higher than that caused by drops of alcohol through mechanical impact alone in both soils. Regardless of pathways of the rain drops affecting soil aggregates, splash erosion rate increased with rising kinetic energy of the rain drops, and power function could be used to well describe the relationship between splash erosion rate and rain drop kinetic energy. The splash erosion rates caused by slaking effect and/or mechanical impact of rain drops both increased with rising rain drop kinetic energy or rising height where rain drops fell from. The slaking effect contributed more than 50% to the splash erosion rate, indicting slaking effect was the main factor causing aggregate breakdown effect, but the slaking effect decreased in contribution to splash erosion rate with rising rain drop kinetic energy, while the mechanical impact acted reversely. In the cases the same in rain drop kinetic energy, the contribution of slaking effect was higher in loamy clay soil than in sandy loam soil, but that of mechanical impact was just the reverse. **【Conclusion】** Contribution rates of slaking effect and mechanical impact vary with rain drop kinetic energy and soil type. All the findings in this study could be of great significance to evaluation of aggregate stability and to in-depth understanding of the mechanism of aggregate breakdown during splash erosion.

Key words Splash erosion; Soil aggregate; Rainfall kinetic energy; Slaking effect; Mechanical impact

(责任编辑: 陈荣府)