

DOI: 10.11766/trxb201907270327

李海茹, 广慧冰, 刘刚, 谷举, 师宏强, 陈鸿, 雷宇宏. 有机质影响溅蚀破坏土壤团聚体的主要作用机制[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 106–114.

LI Hairu, GUANG Huibing, LIU Gang, GU Ju, SHI Hongqiang, CHEN Hong, LEI Yuhong. Mechanism of Effects of Soil Organic Matter on Splash Erosion Disintegrating Aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 106–114.

有机质影响溅蚀破坏土壤团聚体的主要作用机制*

李海茹¹, 广慧冰¹, 刘刚^{1, 2†}, 谷举¹, 师宏强¹, 陈鸿¹, 雷宇宏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)

摘要: 土壤有机质是团聚体的重要组成部分, 其在团聚体形成过程中作用机制已有大量研究, 但有机质在团聚体破坏过程中起何种作用尚未明晰, 其对团聚体破坏过程中雨滴机械打击和消散作用贡献的影响也有待深入研究。为研究不同有机质含量对土壤团聚体的影响, 选取 5 种不同退耕还林年限的土壤为研究对象, 利用 95%酒精和超纯水作为降雨液体, 分别在 4 个高度下 (0.5、1、1.5 和 2 m) 对其进行溅蚀试验。结果表明: 随有机质含量的增加, 团聚体稳定性逐渐增强, 土壤对雨滴机械打击和消散作用的敏感程度越来越弱, 土壤抵抗侵蚀的能力越来越强; 降雨前后大团聚体数量随着有机质含量的增加逐渐趋近相似, 且酒精雨滴作用下的大团聚体含量明显大于超纯水作用下的大团聚体含量; 在相同的降雨动能条件下, 有机质含量增加使消散作用的贡献率呈现减小的趋势, 且其对消散作用的影响在降雨动能较小时较为显著。研究结果对深入理解溅蚀过程中团聚体稳定性评价以及团聚体破坏因子具有重要作用。

关键词: 溅蚀; 团聚体; 有机质; 消散作用; 机械打击

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Mechanism of Effects of Soil Organic Matter on Splash Erosion Disintegrating Aggregates

LI Hairu¹, GUANG Huibing¹, LIU Gang^{1, 2†}, GU Ju¹, SHI Hongqiang¹, CHEN Hong¹, LEI Yuhong²

(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)

Abstract: 【Objective】 Soil organic matter is an important component of soil aggregate. Though much study has already been done on its role and mechanism in the forming of soil aggregate, little is available in the literature about its effects on splash erosion disintegrating soil aggregates and on contributions to the mechanical impact and slaking effect of raindrops disintegrating

* 国家重点研发计划项目 (2016YFE0202900)、国家自然科学基金项目 (41761144060) 和中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (161461KYSB20170013) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Plan Project (No. 2016YFE0202900) and National Natural Science Foundation of China (No. 41761144060) and Key Project of Foreign Cooperation of the International Cooperation Bureau of the Chinese Academy of Sciences (No. 161461KYSB20170013)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gliu@foxmail.com

作者简介: 李海茹 (1995—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: 270819544@qq.com

收稿日期: 2019-07-27; 收到修改稿日期: 2019-08-06; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-11-04

soil aggregates, too. So more studies need to be done in this aspect. The purpose of this study is to explore effects of organic matter content on breakdown of soil aggregates in splash erosion. 【Method】An indoor splash erosion experiment was conducted in the State Key Laboratory of Dryland Farming and Soil Erosion on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, China. Soil samples different in soil organic matter content were collected from Fuxian of Shanxi Province for test in the experiment, which was designed to have home-made needle nozzles to simulate rainfalls of 95% alcohol solution and ultra-pure water, separately to distinguish effect of mechanical impact from slaking effect of raindrops on soil aggregates. The nozzle setting was designed to have four levels of height, i.e. 0.5 m, 1 m, 1.5 m and 2 m for controlling strength of the impact of raindrops. 【Result】Results show that of the five soil samples different in soil organic matter content, soil aggregate stability exhibited an order of $MWD_{SW} > MWD_{WS} > MWD_{FW}$, indicating that the higher the content of soil organic matter, the higher the stability of the soil aggregates and the higher the breakdown resistance of the soil. A significant relationship was observed between the content of organic matter and the stability index of soil aggregates. In soils high in organic matter content, the fraction of large aggregates (>0.25 mm) after the rainfall was approaching to that in proportion before the rainfall with the organic matter content increasing. The amount of large aggregates was significantly higher in the soil subjected with rainfall of alcohol than in the soil done with ultra-pure water. Splash erosion rate in all the five soils increased with rising height of the nozzles or kinetic energy of raindrops, regardless of type of raindrops and their relationship could be described with a power function. With rising kinetic energy of the rainfall, contribution rate of the slaking effect and mechanical impact decreased and increased, respectively. Under raindrops the same in kinetic energy, contribution of the slaking effect decreases with increasing organic matter content. 【Conclusion】Increase in organic matter content enhances stability of the soil aggregates and reduces contribution of the slaking effect in the process of splash erosion. All the findings in this study can serve as a scientific basis for evaluation of stability of soil aggregates and exploration of factors disintegrating soil aggregates during the process of splash erosion.

Key words: Splash erosion; Soil aggregate; Organic matter; Slaking effect; Mechanical impact

土壤侵蚀作为我国头号环境问题,已经严重制约了我国国民经济的可持续发展。严重的土壤侵蚀更是导致了耕地资源减少、土壤质量和肥力下降、河道泥沙淤积、农业非点源污染等综合性问题。溅蚀作为土壤侵蚀的初始阶段,为径流输移提供了物质基础^[1]。由雨滴的打击作用引起的团聚体破碎和土壤颗粒的迁移是溅蚀中的第一个关键进程^[2-3]。研究表明,雨滴打击作用可以破坏土壤结构,分散和搬运土壤颗粒,从而引起土壤渗透性降低,增加径流的搬运能力,雨滴撞击土壤表面的速度越大,溅起的土壤颗粒就越多,土壤溅蚀量也就越大^[4]。Fu等^[5]采用褐土和壤土进行雨滴击溅试验,结果表明二者的溅蚀量均与雨滴大小呈线性增加关系,且其溅蚀距离和雨滴大小之间呈现出极显著的指数关系。马仁明等^[6]通过控制土壤前期含水量来研究红壤团聚体稳定性,结果表明消散作用是团聚体破坏的最主要机制。Xiao等^[7-8]利用不同雨滴形成材料(超纯水和酒精)对溅蚀过程中团聚体的破坏机制进行了研究,证明了溅蚀率与降雨动能呈显著正相关,

且雨滴的消散作用对溅蚀的贡献随降雨动能的增加逐渐减小,而机械破坏作用则相反。

退耕还林(草)工程是黄土高原生态环境治理中的一项重要措施,坡耕地退耕还林后土壤的腐质化作用增强,能够促进有机质的形成和发育,土壤有机质含量水平得到了大幅度提高^[9]。研究表明,土壤有机质含量随植被恢复年限的增长有增加趋势,恢复10年平均可达1.5%以上,且有机质的积累速度与植被恢复地区的水热状况有关^[10]。在广东省肇庆地区柠条林的演替过程中,有机质含量随演替年限的增加而增加,演替年限达10~22 a时,有机质积累速度最快^[11]。有机质是土壤团聚体的重要组成部分,土壤颗粒需要经过有机质的胶结作用才能形成团聚体。而表层土壤中90%的有机质均存在于团聚体中^[12],且主要分布于较大粒径的水稳性团聚体中^[13]。由此可见,在团聚体的形成过程中,土壤有机质起到了促进作用^[14]。而有机质含量对团聚体破坏机制的影响尚未明晰,对溅蚀过程中团聚体破坏的雨滴机械打击和消散作用的影响也有待深

入研究。

本研究以不同退耕还林年限的土壤作为研究对象,分别利用超纯水和 95%酒精作为降雨液体,模拟雨滴机械打击作用及其与消散二者的共同作用,分析有机质含量对雨滴机械打击与消散作用贡献率的影响,从微观的角度揭示团聚体在溅蚀过程中的破坏机理,其结果为研究团聚体在水力侵蚀过程中的失稳机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省富县任家台林场,采样点位置为 36°04′10″N~36°05′23″N, 109°08′55″E~109°11′53″E,地貌属黄土丘陵沟壑区,土壤类型主要以黄绵土为主,土地利用类型为林地和撂荒地,海拔 920~1 683 m,年均降雨量 576.7 mm,多集中在 7、8、9 三个月,占全年降雨的 60%以上。林内郁闭度大于 0.7,主要植被包括榆树、山杨、白桦、辽东栎等。采集表层 0~20 cm 土壤样品。

1.2 土壤基本性质

土壤颗粒质量百分数(国际制)和有机质含量分别采用吸管法和重铬酸钾氧化外加热法分别测定,其基本理化性质见表 1。

1.3 试验设计

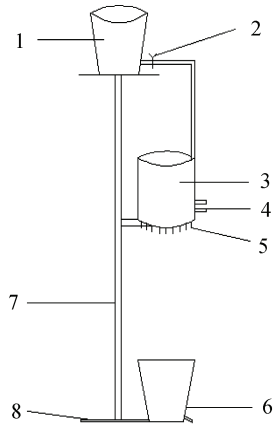
本试验所采用的降雨器由支撑装置、雨滴生成装置和降雨材料供应装置三个部分组成(图 1)。降雨材料供应装置的底部连有一根塑料管和阀门开关,对雨滴生成装置提供降雨液体,用于控制雨滴生成装置内部的水压,稳定降雨强度。降雨高度可通过升降支撑装置来调节。试验所采用的溅蚀装置是一高为 30 cm 的倒圆台,由直径为 15 cm 和 30 cm 的内环和外环组成,外环中间底部有一直径和高均为 10 cm 的内环为溅蚀盘,溅蚀盘底部设有数个小圆孔,用以保证入渗水分及时排出,将外环与内环用铁皮焊接成一个光滑的斜面,斜面的底端留置一个排液孔,用于接取降雨过程中的溅蚀土样。此装置与 Xiao 等^[7]研究所用类似。

由于本试验所选用的黄土母质土壤矿物的膨胀性差,并且土壤矿物湿润后的非均匀膨胀作用对团聚体破坏非常有限,在短历时条件下可被忽略,故将团聚体在溅蚀过程中的破坏视为由雨滴机械打击与消散作用共同导致^[15]。酒精能够大大减小水分消散作用对团聚体的破坏,因此溅蚀试验中酒精雨滴对土壤表面破坏以机械打击作用为主^[16]。本研究采用两种降雨液体(超纯水和 95%酒精),4 个降雨高度(0.5、1.0、1.5、2.0 m)与 5 种不同退耕还林年限的土壤进行溅蚀试验,降雨强度设定在 60 mm·h⁻¹。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Basic physical-chemical properties of the soils

土样序号 Sample number	退耕年限 Year of farmland desertion/a	地理位置 Geographic position	植被 Vegetation	土壤质地 Soil texture	黏粒 Clay/%	粉粒 Slit /%	砂粒 Sand/%	CaCO ₃ / (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)
1	3	36°03.61'N 109°08.99'E	猪毛蒿、蒙古蒿等	砂质黏壤土	22.36	21.16	56.48	81.09	13.0
2	20	36°03.60'N 109°09.03'E	白羊草、苔草等	砂壤土	23.54	25.23	51.23	82.53	23.0
3	100	36°04.94'N 109°08.71'E	辽东栎、柃子等	砂壤土	20.18	29.63	50.20	77.63	25.6
4	80	36°03.68'N 109°08.87'E	侧柏、山桃等	砂质黏壤土	21.05	18.06	60.88	76.76	31.7
5	55	36°03.85'N 109°08.78'E	杏树、山桃等	砂质黏壤土	22.12	15.84	62.04	79.98	37.4



注：1. 供液装置；2. 阀门；3. 雨滴生成装置；4. 导液口；5. 降雨针头；6. 溅蚀盘；7. 支撑装置；8. 支撑圆盘 Note: 1. Liquid supply device, 2. Valve, 3. Raindrop production plant, 4. Liquid discharge port, 5. Rainfall needle-type nozzles, 6. Splash pan, 7. Support device, 8. Bottom support disc.

图 1 降雨装置图

Fig. 1 Schematic diagram of rainfall

试验开始前，先在溅蚀盘内环底部填装直径为 1~2 cm 的碎石，在碎石子上平铺一张滤纸，将风干土按照设计容重装填在滤纸上（容重根据野外耕层容重设计为 $1.20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ），填装厚度为 1.5 cm。土壤装填结束后将溅蚀盘用挡板盖住，待降雨强度率定好并稳定后撤开挡板开始计时，溅蚀盘的出水口用标记好的烧杯接取全部溅蚀泥沙样品，待土壤表面结皮时试验结束，将溅蚀盘外环壁上的泥沙样冲洗进烧杯，土壤颗粒沉降完全后去除上清液，烘干后称重。每种试验重复两次。

1.4 测定指标与数据处理

采集每一场试验结束后土壤表层 0.5 cm 土样，自然风干后，用湿筛法^[17]测量降雨后表层土壤的水稳性团聚体。

用 LB 法^[16]测得团聚体在快速湿润、慢速湿润与预湿润震荡 3 种不同处理下的稳定性分别用 MWD_{FW} 、 MWD_{SW} 、 MWD_{WS} 表示。MWD 的计算公式为：

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1)$$

式中， w_i 为第 i 个筛子的团聚体质量占比，%； x_i 为第 i 个筛子与上一个筛子的平均直径，mm。

用 RSI 与 RMI 分别表示团聚体对消散和机械打击作用的敏感程度，二者的值越小，说明团聚体对

两种作用的敏感性越弱^[18]。团聚体综合稳定性特征用 Ka 表示，其值越大，表示团聚体越不稳定^[19]。

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (2)$$

$$RMI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{WS}}{MWD_{SW}} \quad (3)$$

$$Ka = RSI \times RMI \quad (4)$$

土壤溅蚀率 (D) 指的是雨滴在单位时间单位面积上从溅蚀盘中被击溅出来的土壤质量， $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

$$D = \frac{S}{At} \quad (5)$$

式中， S 为溅蚀量，g； A 为溅蚀盘的面积，本研究溅蚀盘面积为 0.007854 m^2 ； t 为溅蚀时间，min。

消散作用贡献率计算公式如下：

$$C_S = \frac{D_w - D_e}{D_w} \times 100\% \quad (6)$$

式中， C_S 为消散作用贡献率，%； D_w 为超纯水条件下的溅蚀率， $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ ； D_e 为 95%酒精条件下的溅蚀率， $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

降雨动能参考 Xiao 等^[8]文中的公式进行计算。

统计数据采用 EXCEL 2010 和 SPSS 19.0 进行分析。

2 结果与讨论

2.1 有机质对土壤团聚体稳定性指标的影响

LB 法所测的三种土壤团聚体稳定性指标如表 2 所示，5 种土壤在快速湿润、慢速湿润与预湿润震荡下的 MWD 分别随有机质含量的增加而增大，其大小依次为 $MWD_{SW} > MWD_{WS} > MWD_{FW}$ ，慢速湿润与预湿润震荡处理后的 MWD 要明显大于快速湿润处理下的 MWD，说明在快速湿润条件下，团聚体内部空气的爆破力产生的消散作用对其具有最强的破坏能力；而预湿润后震荡模拟的机械破坏作用次之；慢速湿润所产生的非均匀膨胀作用对团聚体的

破坏最弱^[19]，这主要是由于黄土的黏粒矿物组成主要是由水云母和高岭石组成，膨胀性较差造成^[20]。5种土壤的相对消散指数与机械破坏指数均随着有机质含量的增加而减小，且 RSI 均明显大于 RMI，说

明试验土壤对于消散作用的敏感程度均大于机械破坏作用。团聚体不稳定系数随着有机质的增加从 0.259 减小为 0.010，说明土壤团聚体稳定性随有机质含量增加而增加。

表 2 土壤团聚体稳定性指标

Table 2 Aggregate stabilities index in the test soils

土样序号 Sample number	平均重量直径 Mean weight diameter/mm			RSI	RMI	Ka
	MWD _{FW}	MWD _{WS}	MWD _{SW}			
1	0.612	1.202	1.935	0.684	0.379	0.259
2	1.155	2.134	2.698	0.572	0.209	0.119
3	1.977	2.686	3.295	0.400	0.185	0.074
4	2.097	3.068	3.288	0.362	0.067	0.024
5	2.389	3.262	3.376	0.292	0.034	0.010

土壤中黏粒含量是影响团聚体稳定性的主要因素之一^[21]，而从表 3 中可以看出其对土壤团聚体稳定性指标的影响不显著，故说明本研究中不同土壤样品间的团聚体稳定性差异主要是由有机质含量不同所致。土壤有机质含量分别与 MWD_{SW}、MWD_{WS}、MWD_{FW} 显著正相关（表 3），与 RSI、RMI、Ka 显

著负相关，说明随着有机质含量的增加，土壤团聚体稳定性越来越好，而土壤对于消散作用敏感程度越来越低，其原因可能是在团聚体的形成过程中，有机质起到了重要作用，土壤有机质含量越高，形成的团聚体数量就越多，其稳定性就越强，这与安韶山等^[21]的研究结果一致。

表 3 有机质和黏粒含量与团聚体稳定性指标的相关性

Table 3 Pearson correlations of organic matter content and clay content with aggregate stability index

	MWD _{FW}	MWD _{WS}	MWD _{SW}	RSI	RMI	Ka
有机质 SOM	0.949*	0.975**	0.911*	-0.957*	-0.990**	-0.966**
黏粒 Clay	-0.546	-0.431	-0.531	0.526	0.275	0.376

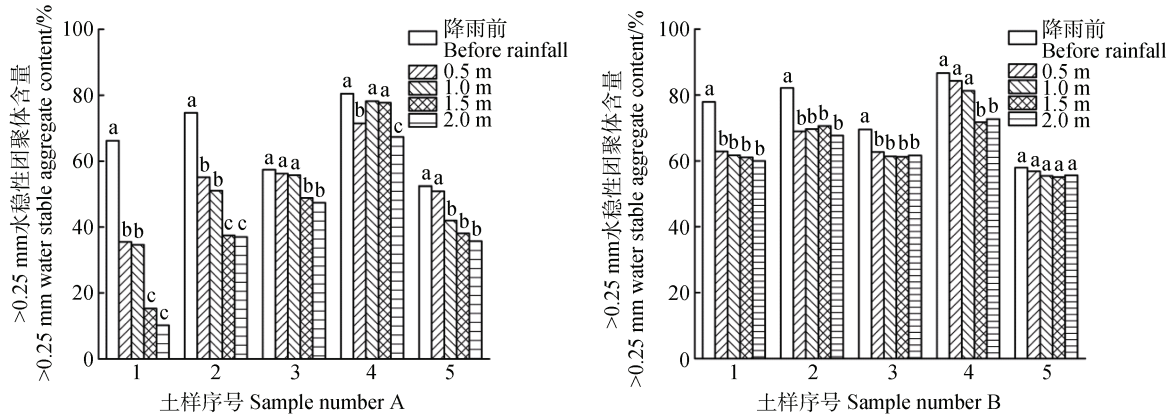
注：* 在 0.05 水平（双侧）上显著相关，** 在 0.01 水平（双侧）上显著相关。Note: * means significant correlation at 5% level (both sides), ** means significant correlation at 1% level (both sides).

2.2 雨滴对大团聚体 (>0.25 mm) 的破坏作用

大于 0.25 mm 水稳性团聚体的数量能判别土壤结构的好坏，是表征团聚体稳定性的重要指标之一^[13]。在超纯水条件下，随着降雨高度即降雨动能的增加，溅蚀盘剩余表土中 >0.25 mm 的大团聚体含量主要呈下降趋势（图 2），说明降雨动能越大，其对团聚体的破坏程度也越大，即侵蚀程度与水稳定性大团聚体含量呈负相关，这一点验证了 Bernard 和 Eric^[22]的土壤团聚体稳定性与易蚀性存在极显著负相关的结论。而降雨前与降雨后的大团聚体的粒径也发生了显著变化，降雨后剩余土壤中的大团聚体几乎均低于降雨前的量。随着土壤中有机质的增加，被破坏的土壤中大团聚体的数量慢慢趋近于原

始土壤，这主要是由于随着有机质含量的增加，土壤水稳性团聚体之间有机胶结物质增多，导致雨滴的机械打击和消散作用逐渐减弱^[23]。

在酒精条件下，其大团聚体数量要多于超纯水作用下的数量（图 2）。其主要原因可能是，一方面相同高度下酒精的降雨动能小于超纯水的降雨动能（表 4），因此以酒精作为降雨液体其打击作用要小于超纯水的机械打击作用力；另一方面，酒精使消散作用大大减少，超纯水雨滴存在机械打击与消散两种作用力，对于大团聚体的破坏能力要大于酒精雨滴^[7-8]。酒精雨滴降雨后，溅蚀盘中 5 种土壤在各降雨高度下的大团聚体含量均相差不大（图 2），这同样可能是由于酒精对于消散存在屏蔽作用，而机



注：同一组中字母不同表示差异显著， $P < 0.05$ Note: Different letters in the same set of data indicate significant differences at 5% level.

图 2 降雨前后 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 (A: 超纯水, B: 酒精)

Fig. 2 Size of the >0.25 mm fraction of water stable aggregates content before and after rainfall (A: Ultra-pure water, B: Alcohol)

表 4 不同高度下雨滴降雨动能

高度 Fall height/ m	超纯水 Ultra-pure water/ ($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	酒精 Alcohol/ ($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
0.5	59.440	40.130
1.0	202.900	138.200
1.5	390.600	253.000
2.0	598.300	380.600

械打击作用对团聚体破坏程度有限所造成的。此外，随着土壤有机质含量的增加，降雨后大团聚体含量越来越趋近于降雨前土壤的大团聚体含量，说明有机质明显增加了大团聚体的稳定性。

2.3 有机质含量对溅蚀率的影响

5 种土壤在两种雨滴作用下的溅蚀率均随降雨

动能的增加而增加 (图 3)，因为降雨动能增大，土壤颗粒所获得的动能与势能也增加，同时雨滴撞击土壤表面的下落速度增大，分离和搬运的土壤颗粒就越多^[4]。土壤溅蚀率与降雨动能呈幂函数增加趋势，相关系数均大于 0.96 (表 5)，说明幂函数能够很好地描述溅蚀率与降雨动能的关系，这与肖海等^[15]的研究结果一致。

有机质含量与溅蚀率之间的相关性不显著 (表 6)，这可能是由于溅蚀过程是一个较为复杂的动力迁移过程，是土壤因子和降雨因子共同作用的结果^[24]。溅蚀有团聚体破碎、土表形成溅蚀坑、雨滴击溅、击溅后的跃迁和飞溅蠕动五个过程^[25]，本文有机质含量主要影响团聚体的稳定性，其主要是影响溅蚀过程中的第一个阶段，而有机质含量对溅蚀其他阶段的影响尚不明确，因此很难清晰地得出有机质含量与溅蚀率之间的相关关系。

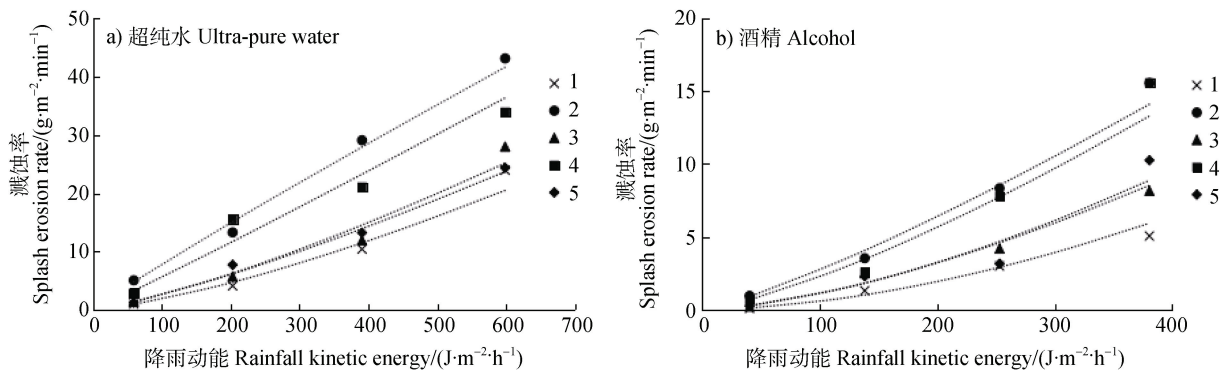


图 3 降雨动能与溅蚀率关系图

Fig. 3 Relationship between rainfall kinetic energy and soil splash erosion rate

表5 五种团聚体破坏情况下溅蚀率与降雨动能的关系

Table 5 Relationship between splash erosion rate and rainfall kinetic energy relative to breakdown condition of aggregates

土样序号 Sample number	超纯水雨滴 Ultra-pure water raindrop		酒精雨滴 Alcohol raindrop	
	方程 Equation	R^2	方程 Equation	R^2
1	$D = 0.0034 E^{1.3592}$	0.989	$D = 0.0002 E^{1.7292}$	0.989
2	$D = 0.1036 E^{0.9379}$	0.992	$D = 0.0098 E^{1.2232}$	0.992
3	$D = 0.0081 E^{1.2479}$	0.987	$D = 0.0008 E^{1.5573}$	0.981
4	$D = 0.0446 E^{1.0487}$	0.969	$D = 0.0052 E^{1.3217}$	0.974
5	$D = 0.0067 E^{1.2866}$	0.989	$D = 0.0011 E^{1.5082}$	0.967

表6 有机质与不同降雨强度下溅蚀率的相关性

Table 6 Pearson correlation between organic matter and splash erosion rate relative to rainfall intensity

	超纯水 Ultra-pure water				酒精 Alcohol			
	$D_{0.5m}$	$D_{1.0m}$	$D_{1.5m}$	$D_{2.0m}$	$D_{0.5m}$	$D_{1.0m}$	$D_{1.5m}$	$D_{2.0m}$
有机质 SOM	0.020	0.409	0.109	-0.008	0.208	0.362	0.116	0.482

2.4 有机质对雨滴机械打击和消散作用的影响

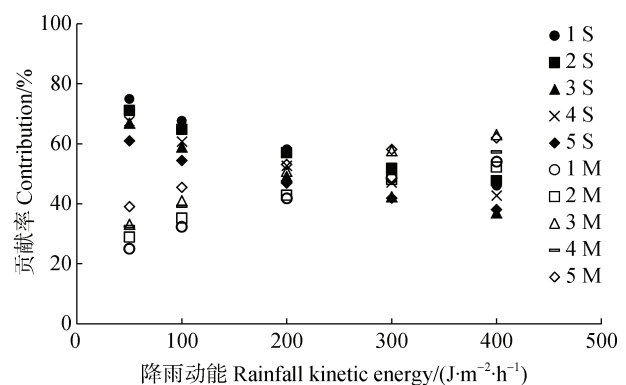
为得到相同降雨动能下的两种液体击溅造成的溅蚀率,利用表5中溅蚀率与降雨动能的关系式,分别计算得到降雨动能介于 $50 \sim 400 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 下的溅蚀率,进而计算机械打击和消散作用相对应的贡献率(图4)。

结果表明随着降雨动能增大,机械打击作用对团聚体的破坏占主导地位。同一降雨动能下,随着有机质的增加,消散作用的贡献率呈现减小的趋势,这是由于试验土壤对消散作用的敏感程度不同,RSI随有机质含量的增加从0.684逐渐减小至0.292(表2),说明土壤对消散作用的敏感程度越小,消散作用的贡献率就越小。有机质与消散作用贡献率的相关关系随着降雨动能的增大越来越弱(表7),当降雨动能增大至 $200 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上时二者的相关性不显著。因此,有机质对消散作用的影响在降雨动能较小时比较显著。

3 结论

在本研究中, LB法对团聚体三种不同处理条件下,快速湿润时,团聚体内部空气的爆破力产生的消散作用对其破坏能力最强,预湿润后震荡模拟的机械破坏作用次之,慢速湿润所产生的非均匀膨胀

对团聚体的破坏作用最弱。随着有机质含量的增加,团聚体稳定性越来越好,土壤对机械打击与消散作用的敏感性越来越弱。降雨前后的大团聚体数量在超纯水条件下随降雨动能的增加逐渐下降,且酒精雨滴作用下的大团聚体含量明显大于超纯水雨滴作用下的含量,并随着土壤有机质含量的增加,雨滴的破坏作用逐渐减弱。幂函数能够很好地描述溅蚀率与降雨动能的关系。消散作用和机械打击作用的贡献率分别随着降雨动能的增大而减小和增大。降



注: M 为机械打击作用贡献率; S 为消散作用贡献率。Note: M stands for contribution rate of mechanical impact; and S for contribution rate of slaking.

图4 降雨动能与机械打击和消散作用贡献率的关系
Fig. 4 Relationships of rainfall kinetic energy with contributions of slaking and mechanical breakdown

表 7 有机质与不同降雨动能下消散作用贡献率的相关性

Table 7 Pearson correlation between organic matter and contribution rate of slaking to rainfall kinetic energy

	降雨动能				
	Rainfall kinetic energy/ (J·m ⁻² ·h ⁻¹)				
	50	100	200	300	400
有机质 SOM	-0.948*	-0.915*	-0.830	-0.729	-0.618

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。Note: * means significant correlation(both sides), and ** means significant correlation at 1% level (both sides) .

雨动能相同时, 有机质增加使消散作用的贡献率慢慢减小, 且有机质对消散作用的影响仅在降雨动能较小时比较显著。本研究结果对认识和理解团聚体在降雨过程中的破坏机制有重要的指导意义, 但研究仅考虑有机质含量对团聚体破坏的影响, 区分有机质不同组分对溅蚀过程中团聚体破坏的影响应该予以深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Han X K, Wu B Z, An T X, et al. Advance of research for splash erosion. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17 (4): 46—51. [韩学坤, 吴伯志, 安瞳昕, 等. 溅蚀研究进展. *水土保持研究*, 2010, 17 (4): 46—51.]
- [2] Shainberg I, Levy G J, Rengasamy P, et al. Aggregate stability and seal formation as affected by drops impact energy and soil amendments. *Soil Science*, 1992, 154 (2): 113—119.
- [3] Legout C, Leguedois S, Bissonnais Y L, et al. Splash distance and size distributions for various soils. *Geoderma*, 2005, 124 (3/4): 279—292.
- [4] Moss A J, Green T W. Erosive effects of the large water drops (gravity drops) that fall from plants. *Australia Journal of Soil Research*, 1987, 25 (1): 9—20.
- [5] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action. *Catena*, 2017, 150: 154—160.
- [6] Ma R M, Cai C F, Li Z X, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozem. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (3): 95—103. [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.]
- [7] Xiao H, Liu G, Abd-Elbasit M A M, et al. Effects of slaking and mechanical breakdown on disaggregation and splash erosion. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68: 797—805.
- [8] 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. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 150—158.
- [9] Zhang J H, Chang Q R, Jia K L, et al. Effect of plant restoration to soil fertility quality on Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17 (4): 38—41. [张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究. *水土保持学报*, 2003, 17 (4): 38—41.]
- [10] Peng W Y, Zhang K L, Yang Q K. Research on soil property dynamics in retired farmland in the Loess sloping land. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20 (5): 153—158. [彭文英, 张科利, 杨勤科. 黄土坡面土壤性质随退耕时间的动态变化研究. *干旱区资源与环境*, 2006, 20 (5): 153—158.]
- [11] Huang Z L, Kong G H, Wei P, et al. A study on the soil seed banks at the different succession stages of south subtropical forests. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1996, 4 (4): 42—49. [黄忠良, 孔国辉, 魏平, 等. 南亚热带森林不同演替阶段土壤种子库的初步研究. *热带亚热带植物学报*, 1996, 4 (4): 42—49.]
- [12] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28 (4/5): 665—676.
- [13] Yang Y Y, Wei Z M, Huang L, et al. Distribution of organic matter in water stable aggregates of eroded red soil under different restoration measures. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (3): 154—158. [杨莹莹, 魏兆猛, 黄丽, 等. 不同修复措施下红壤水稳性团聚体中有机质分布特征. *水土保持学报*, 2012, 26 (3): 154—158.]
- [14] Six J, Bossuyt H, De Gryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79 (1): 7—31.
- [15] Xiao H, Liu G, Zhao J F, et al. Characteristics of mechanical impact and slaking effect of rain drops on soil aggregates. *Acta Pedologica Scnica*, 2017, 54 (4): 827—835. [肖海, 刘刚, 赵金凡, 等. 雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征. *土壤学报*, 2017, 54 (4): 827—835.]

- [16] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (4): 425—437.
- [17] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy*, 1936, 28(5): 337—351.
- [18] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma*, 2001, 99 (1): 123—145.
- [19] Yan F L, Li Z X, Shi Z H, et al. Quantitative relationship between aggregate characteristics of red soil and slope erosion. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (3): 37—41. [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.]
- [20] Fan Y T, Lei T W, Cai Q G. Effects of wetting rate on soil surface strength and aggregate stability. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 (5): 46—50. [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.]
- [21] An S S, Huang Y M, Li B C, et al. Characteristics of soil water stable aggregates and relationship with soil properties during vegetation rehabilitation in a Loess hilly region. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (1): 45—50. [安韶山, 黄懿梅, 李壁成, 等. 黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系. *土壤通报*, 2006, 37 (1): 45—50.]
- [22] Bernard B, Eric R. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; Validation at several levels. *Catena*, 2002, 47: 133—149.
- [23] Zhang X C, Zheng F L, Wang B, et al. The relationships between aggregate water stability and soil organic matter of slop land with different reclamation years in black soil region. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 39 (5): 90—95. [张孝存, 郑粉莉, 王彬, 等. 不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 39 (5): 90—95.]
- [24] Luo Q P, Liu W J. A review of soil splash erosion processes and its study approaches. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (1): 230—235. [罗亲普, 刘文杰. 土壤溅蚀过程和研究方法综述. *土壤通报*, 2012, 43 (1): 230—235.]
- [25] Terry J P. A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 525—542.

(责任编辑: 檀满枝)