不同粒径红壤团聚体坡面溅蚀特征

郝好鑫1,马仁明2,占海歌1,郭忠录1,王先舟1

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要:为揭示不同粒径团聚体坡面溅蚀规律,以第四纪粘土发育红壤为研究对象,通过室内人工模拟降雨 试验(雨强 75 mm/h,历时 45 min)研究<0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~5 mm 粒径团聚体溅蚀规律, 系统分析了降雨条件下各粒径团聚体破碎、溅蚀率变化、溅蚀搬运量以及溅蚀搬运后的空间分布特征。结 果表明:(1)降雨条件下团聚体粒径越大越容易破碎,除 2~5 mm 团聚体破碎量高达 96.06%外,<2 mm 团聚体破碎量均小于 50.00%。(2)<0.25 mm 团聚体溅蚀率具有陡涨陡落特点,表土结皮发育迅速;0.25 ~0.5 mm 团聚体溅蚀率陡涨缓落,表土泥浆化过程明显;0.5~5 mm 团聚体溅蚀率则能保持较长时间增 长,随后降低。(3)不同粒径团聚体溅蚀总量、上下坡溅蚀量与净搬运量变化趋势一致,一次降雨过程中, 溅蚀搬运量峰值出现在粒径 0.25~0.5 mm 范围内,而后随着粒径的增大逐渐降低。(4)团聚体粒径越小, 溅蚀搬运后的平均重量距离越大,各粒径团聚体溅蚀量基本全部分布在半径 60 cm 范围内。研究结果能 为降雨侵蚀防治及侵蚀过程模型提供理论参考。

关键词:团聚体;粒径;破碎;溅蚀;空间分布 中图分类号:S157.1 文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2017)01-0037-06

DOI:10.13870/j. cnki. stbcxb. 2017.01.007

Splash Erosion of Red Soil Aggregate under Different Particle-size

HAO Haoxin¹, MA Renming², ZHAN Haige¹, GUO Zhonglu¹, WANG Xianzhou¹

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: In order to determine the effects of red soil aggregate in different particle-size (<0.25, 0.25–0.5, 0.5-1, 1-2, 2-5 mm) on splash erosion, a simulated rainfall experiment (75 mm/h rain rate and 45 min rain time) was conducted. Aggregate breakdown, splash rates change, net splashed particles and splash spatial distribution were chosen to analyze the splash regulation. The results showed that: (1)2-5 mm aggregate breakdown rate was as high as 96.06%, while $\leq 2 \text{ mm}$ was less than 50.00%. The index of breakdown rate significantly decreased with the aggregate size increasing. (2) The splash rates of < 0.25 mm aggregate skyrocketed at first, and soon collapsed, the soil surface crust developed rapidly. The splash rates of 0.25— 0.5 mm aggregate, which could be clearly observed to become muddy, also skyrocketed at first, but then decreased slowly. The splash rates of 0.5-5 mm aggregate kept a long time increase and also decreased slowly. (3) There were the same trends for the quantity of total splashed particles, upslope and downslope particles, net splashed particles among different size of aggregate. Splash erosion quantity within 0.25-0.5 mm was the maximum, and then gradually reduced with the particle size increasing. (4) Almost all of splashed aggregates spread in the scope of 60 cm, and the mean weight distance (MWS) of small aggregate was larger than those of the bigger one. This study provided a new approach to reveal the rainfall splash erosion mechanism of red soil, which had great significant for perfection of the physical progress model of rainfall erosion. Keywords: aggregate; particle-size; breakdown; splash erosion; spatial distribution

水力侵蚀包括土壤剥蚀、搬运和沉积三大过程, 而溅蚀被认为是土壤剥蚀和搬运的初始阶段^[1-2]。雨 滴溅蚀是降雨过程中,雨滴直接打击裸露地表,使土 壤发生分散、破碎、溅起并增加地表径流扰动的侵蚀 现象。溅蚀为侵蚀提供了丰富的物质基础,大量研究 表明,雨滴溅蚀对坡面土壤侵蚀产沙作用贡献可达一

第一作者:郝好鑫(1992—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀机理方面研究。E-mail:haohaoxin1992@163.com

通信作者:郭忠录(1980—),男,副教授,主要从事水土保持与生态恢复方面研究。E-mail:zlguohzau@163.com

收稿日期:2016-09-07

资助项目:国家自然科学基金项目(41301285;40901132)

半左右[3-4],研究溅蚀机理,有利于从侵蚀源头对其治 理,而且能深化对侵蚀机理过程的认识。影响溅蚀的 土壤因素主要集中在土壤物理结构方面。Saedi 等^[5] 和范荣生等[6]指出,土壤颗粒的组成配比对溅蚀影响 最为显著,细砂最易被雨滴击溅,而粗砂不易被击溅, 更细的颗粒则因具有粘性也不易被击溅。团聚体作 为土壤结构的基本单元,除自身粒径大小外,其在溅 蚀过程中的破碎也受到学者的广泛关注[7-10]。已有 研究表明,团聚体粒径越小,降雨过程中破碎程度越 低, 目稳定性越好, 其破碎越缓慢, 溅蚀量也越低。此 外,降雨过程中土壤表面结构的变化是影响溅蚀过程 的重要因素,雨滴击溅产生的微小土粒在降雨入渗和 雨滴压实作用下能使表层土壤产生结皮,增强土壤抗 蚀性[11-13]。呈琴娟等[14]针对黄绵土的研究表明,细 颗粒是表土发育结皮的物质基础,不同粒径黄绵土均 随着结皮发育溅蚀率逐渐降低,粒径在 0.15 mm 附 近的土样溅蚀量最大。

我国红壤丘陵区地处热带、亚热带,面积 1.13×10⁶ km²,水热资源丰富,土壤团聚结构良好,是我国重要的 农业生产区。但由于降雨集中且强度大,加之土地资源 的不合理开发利用,使得该区域已成为我国仅次于黄土 高原的严重水土流失区^[9]。目前,针对区域内红壤的溅 蚀研究主要集中在团聚体破碎、溅蚀率、溅蚀过程、溅蚀 量及溅蚀物质空间分布等,但以往研究多侧重于单一溅 蚀特征上^[15],未能综合反映土壤溅蚀特征。本文以不同 粒径红壤团聚体为研究对象,综合以上溅蚀指标,揭示 了不同粒径团聚体溅蚀特征,以期为南方红壤区降雨侵 蚀防治及建立侵蚀过程模型提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

供试土壤于 2014 年 12 月采自湖北省咸宁市境内 (114°06′—114°43′ E,29°39′—30°02′ N),属江汉平原和鄂 东南丘陵山地的过渡带,属亚热带季风湿润气候,年均 气温 16.8 ℃,年均降水量 1 572 mm。采样点土壤类型 为第四纪粘土发育的红壤,土地利用类型为旱地。

野外采样时用铝制取样盒采集表层(0—15 cm)原状 土,并保存在取样盒中以保持原状土结构。土样带回实 验室后去除石块、根系等杂质,风干后用干筛法筛分出 <0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~5 mm 5 种粒径团聚 体。供试土壤有机质含量为 13.9 g/kg(重铬酸钾外加热 法),pH 为 5.47(1:2.5 土水比电位法),砂粒、粉粒、黏粒 含量分别为 12.12%,44.40%,43.48%(吸管法)。

1.2 人工模拟降雨试验

人工模拟降雨试验于 2015 年 11 月在华中农业 大学降雨大厅进行。采用垂直旋转下喷式自动模拟 降雨系统,降雨高度 10 m,雨滴达到的终点速度满足 天然降雨特性。综合当地一年一遇暴雨频率和降雨 器最优稳定区间(均匀度大于 90%),设置雨强为 75 mm/h,历时 45 min。试验采用 2 种不同装置收集溅蚀 团聚体。一种为自制的溅蚀环,该装置由钢板制成,中 间是直径 15 cm、孔径为 0.25 mm 筛盘做成的装土盘, 装土盘与收集盘之间留有 0.3 cm 缝隙且上端齐平, 收集盘设有间隔 10 cm、高 3 cm 的隔断。试验坡度 设为 10°,在每个隔断下坡一端设有连接好排水软管 的小孔,软管另一端用塑料瓶收集泥沙(图 1)。另一 种为磨根溅蚀盘改良的溅蚀盘,外环直径 30 cm,高 30 cm,内环直径 15.6 cm,高 10 cm,外环与内环中间 用玻璃胶填充为光滑斜面,斜面最低处连接排水口收 集泥沙,装土盘放于内环上固定(图 1)^[9]。



图1 降雨试验示意

填装装土盘时,为避免较大粒径团聚体发生破碎, 供试土样容重统一控制为轻微震实的<0.25 mm 团聚 体容重(1.10 g/cm³)。具体操作:将各粒径团聚体置于 40 ℃烘箱内烘 24 h以保证相同含水率^[9],首先用<0.25 mm 团聚体填满装土盘,用矩形钢尺沿装土盘四周轻微 敲打 10 次,再用钢尺水平抹去多余土样使其与装土盘 盘口持平,此时土壤容重可视为轻微震实的填土容重, 记下填土质量并计算土壤容重。>0.25 mm 各粒径团 聚体填装土盘时,先用天平称取与<0.25 mm 所填装土 盘质量相等的土样,再将土样分多次多层填于装土盘, 每次轻微敲打震实,直到恰好与盘口齐平为止。

2种溅蚀装置坡度均设置为10°,每次试验同时 需要1个溅蚀环和2个溅蚀盘。降雨时溅蚀环收集 不同距离内团聚体溅蚀量,一个溅蚀盘收集溅蚀总量 用于湿筛分级,另一个溅蚀盘以3 min 为周期收集溅 蚀产生的团聚体。溅蚀搬运后的团聚体采用湿筛法 分级,即在水中将团聚体洗入孔径为<0.05,0.05~ 0.105,0.105~0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~5 mm的套筛组中,轻轻上下振荡10次,幅度为2 cm, 湿筛分级后的团聚体及收集的溅蚀颗粒均采用烘干 法称重。每种粒径团聚体设置3个重复。

1.3 数据处理

1.3.1 团聚体破碎特征比较 首先计算降雨前后各粒

径团聚体平均重量直径 MWD(公式1),在此基础上为使 不同粒径团聚体破碎特征具有可比性,采用破碎指数 R (公式2)来评价团聚体在降雨条件下的破碎特征。由于 试验区红壤基本不含2:1型膨胀黏土矿物^[10],所以破 碎指数反映了消散作用和雨滴打击机械作用下团聚 体稳定性,其值越高表明降雨条件下团聚体对消散作 用和雨滴打击的机械作用敏感程度越高^[9,16]。

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i$$
(1)

$$R = \frac{MWD_q - MWD_h}{MWD_q}$$
(2)

式中:*i*为第*i*个筛子孔径(mm), $r_0 = r_1, \dots, r_n = r_{n+1}$; *m_i*为第*i*个筛子团聚体重量百分比;MWD_q和 MWD_h 分别为溅蚀前团聚体(q)和溅蚀搬运后团聚体(h)平均 重量直径(mm)。试验前干筛分级得到<0.25 mm 团 聚体各粒径组成:0.105~0.25 mm 占 11.54%;0.105~ 0.05 mm 占 47.40%;<0.05 mm 占 41.05%,采用公 式(1)计算得出该粒径 MWD_q为 0.07 mm。其余粒 径团聚体采用公式(1)计算 MWD_q时 *m_i*均取 100%。 1.3.2 溅蚀率

$$D = \frac{M}{t} \tag{3}$$

式中:D 为溅蚀率(g/min);M 为溅蚀量(g);t 为时间 (min)。本试验中 M 为 3 min 溅蚀盘收集的溅蚀量, t 取 3 min。

 1.3.3 减蚀总搬运量和溅蚀净搬运量 溅蚀总搬运 量等于上坡和下坡溅蚀量之和,表示雨滴击溅地表搬运 总松散物质的量;溅蚀净搬运量等于下坡溅蚀量减去上 坡溅蚀量,表示雨滴击溅作用向下坡搬运土壤质量^[17]。

1.3.4 溅蚀搬运平均重量距离 参考团聚体平均重量直径(MWD),本研究为评价不同粒径团聚体溅蚀搬运距离的能力,引入平均重量距离 MWS(mean weight distance)。其值越高,反映溅蚀使团聚体分散程度越大。

$$MWS = \sum_{i=1}^{n+1} s_i \times m_i \tag{4}$$

式中: S_i 为第 i 个隔断的中心离溅蚀填土盘距离, $S_1 = 5$ cm; m_i 为第 i 个隔断中溅蚀搬运团聚体重量百分比。 1.3.5 数据分析 采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0

进行数据分析,方差分析采用 LSD(最小显著差法)进行多重比较,显著水平 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 不同粒径团聚体溅蚀后破碎特征

团聚体粒径是影响团聚体破碎的主要物理因素 之一,团聚体粒径及其破碎后粒径分布很大程度上影 响溅蚀过程^[7-10]。由表1可知,>0.25 mm的团聚 体,溅蚀后73.10%~97.79%的粒径仍>0.25 mm。 2~5 mm 团聚体破碎程度最大,96.06%的该粒径团 聚体溅蚀后粒径小于 2 mm。1~2,0.5~1,0.25~ 0.5 mm 团聚体的破碎程度依次降低,破碎量依次为 49.76%,37.72%,16.90%。各粒径团聚体破碎指数 差异显著(P < 0.05), < 0.25, 0.25 < 0.5, 0.5 < 1, 1 < 2, 2 < 5 mm 团聚体破碎指数依: -0.35, 0.17, 0.23, 0.45, 1.84。该结果表明,团聚体粒径越小,对 消散作用和雨滴打击机械作用敏感度越低,彭新华 等^[18]认为小粒径团聚体内部孔隙小,弯曲程度大,其 内聚力也较大,所以不易发生破碎。

<0.25 mm 团聚体破碎指数值为一0.35,这是 因为<0.25 mm 团聚体的 MWD_a(0.07 mm)小于 MWD_b(0.10 mm),所以在采用公式(2)计算其破碎 指数时为负数。对比溅蚀前后团聚体粒径分布可知, <0.25 mm 团聚体经溅蚀搬运后粒径在 0.105~ 0.25 mm 范围内的团聚体为原土的 3.91 倍,反映出 该粒径团聚体在溅蚀搬运过程中发生了明显的富集; 而<0.105 mm 团聚体含量则降至原土的 62.39%, 反映出该粒径团聚体在溅蚀搬运过程中发生了较大 损耗。出现上述现象原因可能是:小粒径(<0.105 mm)团聚体中黏粒含量较高,加上本身粒径和质 量都比较小,容易被水吸附。而本研究所用装土盘 和收集盘中间有 0.3 cm 的缝隙用来导排表层积水, 以消除表层水膜对溅蚀影响。所以,雨滴打击下的 <0.105 mm 团聚体不易被雨滴溅起从而飞跃到收 集盘里,反而被扰动的部分易随表层积水流失。说明 本试验雨强下<0.105 mm 红壤团聚体在降雨侵蚀 过程中主要运移方式为径流输移。

2.2 不同粒径团聚体溅蚀率随降雨时间变化规律

溅蚀率的变化与溅蚀过程密切相关^[19]。国内外 学者研究发现,溅蚀率与降雨时间呈现经典的变化曲 线关系,即溅蚀率开始阶段增加,到达某一时刻后逐渐 减小,具有陡涨陡落的特点^[19-21]。但本试验中,仅有 < 0.25 mm 团聚体具有如上特点;0.25~0.5 mm 团聚体 溅蚀率表现为陡涨缓落;0.5~5 mm 间 3 组粒径的团 聚体表现为先持续增加,较长时间后缓慢降低。

<0.25 mm团聚体溅蚀率随时间变化规律如图2所示,前6min该粒径团聚体溅蚀率陡增到峰值0.23 g/min,随后6~27min又陡降至0.08 g/min, 27min后溅蚀率基本维持不变。降雨初始阶段,具 有一定动能的雨滴打击表层干土,导致干土溅散。此 阶段团聚体粒径越小,越容易被溅蚀搬运。此外,马 仁明等^[10]研究表明,低含水率条件下团聚体破碎机制 主要是快速湿润引起的消散作用。吴普特等^[21]研究表 明,薄层水流在雨滴打击的扰动下,其侵蚀能力大大提 高。而本研究中,雨滴打击干土,一方面使干土快速湿 润产生大量破碎团聚体为溅蚀提供丰富物质,另一方面 雨滴打击表土产生大量"馅口","馅口"中存积未下渗的 薄层雨水增加了雨滴打击的侵蚀能力(图 3),此时溅蚀 率最大;在雨滴打击不断压实下,细颗粒下渗填塞下层 大孔隙,逐渐在表面形成平滑的质密结皮层,此时土壤 的抗蚀性提高,其溅蚀率也开始降低;同时,土壤含水量 饱和以及结皮的发育也使得表层雨水入渗速率下降,薄 层积水越来越厚。有研究表明,当薄层积水深度超过雨 滴直径后,水层就具有明显的消能作用^[19],本研究 27 min 后薄层积水已达 5 mm 左右,所以该时期溅蚀率降 到最低,并且几乎不变。



表1 溅蚀搬运后团聚体粒径分布

粒径	溅蚀搬运后团聚体粒径分布/%							$MWD_h/$	
	$2\!\sim\!5~mm$	$1{\sim}2~{\rm mm}$	0.5 \sim 1 mm	0.25 ${\sim}$ 0.5 mm	0.105~0.25 mm	0.105~0.05 mm	<0.05 mm	mm	W叶伯奴
$2\sim 5 \text{ mm}$	3.94 ± 0.92	58.08±1.02	23.37 ± 0.34	12.40 ± 0.21	1.92 ± 0.33	0.29 ± 0.05	_	1.23 ± 0.02	1.84±0.03a
$1\!\sim\!2~\mathrm{mm}$		50.24 ± 12.67	28.38 ± 6.24	17.03 ± 5.45	3.78 ± 0.74	0.57 ± 0.13	—	1.04 ± 0.12	$0.45 \pm 0.05 b$
0.5 $\sim\!1~\mathrm{mm}$			65.28 ± 8.80	30.17±8.90	4.10±1.12	0.44±0.09	—	0.61 ± 0.11	$0.23 \pm 0.04 c$
0.25 \sim 0.5 mm				73.10±2.63	25.96 ± 2.80	0.94±0.18	—	0.32 ± 0.01	$0.17 \pm 0.09 d$
<0.25 mm					45.13±5.19	19.56 ± 3.81	35.32 ± 4.44	0.10 ± 0.02	$-0.35 \pm 0.04 e$

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05);一表示溅蚀质量过小难以被收集和测量。下同。

0.25~0.5 mm 团聚体溅蚀率先快速上升,21 min 达到峰值后开始缓慢下降。相比<0.25 mm 团 聚体表层土壤含水量的快速饱和以及结皮,该粒径团 聚体溅蚀发育相对缓慢。这是由于该粒径团聚体颗 粒间孔隙较大,造成土壤入渗速率较大,且大团聚体 质量大不易被溅起,需要累积雨滴动能提供破碎的细 颗粒土壤。降雨前 21 min,表土团聚体在雨滴打击 和消散作用下发生破碎,并累积细颗粒。随着表土含 水量逐渐饱和,表层团聚体逐渐泥浆化(图 3),此时 溅蚀率最高。此外,溅蚀率增加过程中细颗粒团聚体 被溅蚀搬运的量也逐渐增加,而产生破碎的不稳定团 聚逐渐较少,即表层土壤团聚体稳定性越来越强,当 破碎产生的细颗粒团聚体少于溅蚀所能搬运的量时, 溅蚀率便开始缓慢下降。

0.5~5 mm 团聚体溅蚀率先上升,36~42 min 后开始出现降低。小粒径团聚体无论是溅蚀率上升 速度还是上升峰值,都比大粒径团聚体高。该粒径范 围内表土溅蚀过程中没有产生结皮、薄层积水和泥浆 飞溅(图 3),溅蚀率的变化只与团聚体大小及破碎程 度有关。即破碎后团聚体粒径越小越容易被溅蚀,团 聚体稳定性和抗蚀性也增强^[9]。

2.3 不同粒径团聚体上、下坡溅蚀量与净搬运量分析

溅蚀量是普遍用来描述土壤击溅侵蚀的特征指标。事实上,溅蚀量的大小只能反映溅蚀为径流冲刷搬运提供的"物质量"多少,而不能体现坡面溅蚀对土壤颗粒的搬运能力^[17,24]。因此,本研究引入溅蚀总量、上下坡溅蚀量和净搬运量分析溅蚀的空间分布特征。



注:从左到右依次为<0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~5 mm 团聚体表土结构不同降雨时间照片。

图 3 不同粒径团聚体表土结构随降雨时间变化

由图 4 可知,10°坡度下,不同粒径团聚体下坡溅 蚀量均大于上坡溅蚀量,各粒径的净搬运量占到总量 的 47.05%~56.56%,这与刘和平等^[20]、Liu 等^[22]研 究结果一致。0.25~0.5 mm 团聚体溅蚀总量、上下 坡溅蚀量和净搬运量均最大,分别为:14.43,7.96, 11.15,3.19 g。而 2~5 mm 团聚体溅蚀总量仅 3.95 g,不及 0.25~0.5 mm 团聚体溅蚀总量的 1/3。值 得一提的是,不同粒径团聚体4种溅蚀量变化趋势一 致,从大到小依次为:0.25~0.5,0.5~1,<0.25,1~ 2,2~5 mm,溅蚀量峰值出现在粒径 0.25~0.5 mm 范围内。该结果相比程琴娟等[14]研究发现黄绵土溅 蚀量峰值出现在粒径 0.15 mm 附近明显偏大,一方 面是由于供试红壤<0.25 mm 团聚体溅蚀过程中表 土结皮发育迅速,溅蚀率随时间呈现陡增陡降的特点; 另一方面,试验收集溅蚀量与降雨时间相关,不同时间 内最大溅蚀量对应的粒径值也不尽相同。本研究发现 >0.25 mm 团聚体溅蚀率峰值均出现在 21 min 后(图 2),设置降雨历时长 45 min,相比后者降雨时长 25 min, 还考虑到溅蚀率达到峰值后的缓降过程,这也是造成研 究结果差异的原因之一。事实上,溅蚀量受团聚体破 碎、表土结构发育和雨滴对团聚体搬运能力三者共同影 响,表土结皮发育迅速或程度高、团聚体稳定性强、雨滴 对团聚体搬运能力弱是土壤不易被溅蚀的主要原因。



2.4 溅蚀量空间分布

溅蚀团聚体的空间分布反映雨滴打击对不同粒径 团聚体的搬运能力和分散程度。由表 2 可知,<0.25, 0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~5 mm 团聚体在 0~10 cm 范围内的溅蚀搬运量分别占到各粒径溅蚀总量的 46.27%,58.75%,73.41%,78.61%,80.71%;在 0~30 cm 范围内,分别占到各粒径溅蚀总量的 89.50%, 91.07%,96.75%,97.84%,98.4%;同时,试验条件下溅 蚀量基本全部分布在半径 60 cm 范围内。此外,不同粒径团聚体溅蚀后平均重量距离 MWS 差异显著(P<0.05),随着粒径的增大而减小。其中<0.25 mm 团聚体 MWS 值最大,是 2~5 mm 团聚体 MWS 值的1.88倍,这表示雨滴击溅搬运同样质量的团聚体,小粒径的空间分散能力较强。上述结果表明:团聚体的溅蚀搬运距离和分散程度随其粒径的增大而减小。这是因为具有一定动能的雨滴打击到土壤表面,使部分团聚体获得足够的能量,在重力作用下产生轨迹为抛物线的飞溅跃移。降雨动能一定的前提下,重量轻的小粒径团聚体需要克服重力做的功较少^[7,23],所以飞溅距离也就更远。

溅蚀量与距离的分布规律表明,溅蚀搬运的团聚 体随距离的增加而减少(图 5)。对溅蚀量和距离进 行回归分析,发现溅蚀总量与溅蚀距离呈现指数函数 关系,且相关性较高,其相关方程分别为:

$$\begin{split} S_{<0.25 \text{ mm}} &= 9.3965 e^{-0.082d} \left(R^2 = 0.97, P < 0.01 \right); \\ S_{0.25 \sim 0.5 \text{ mm}} &= 13.64 e^{-0.088d} \left(R^2 = 0.97, P < 0.01 \right); \\ S_{0.5 \sim 1 \text{ mm}} &= 18.168 e^{-0.128d} \left(R^2 = 0.98, P < 0.01 \right); \\ S_{1 \sim 2 \text{ mm}} &= 5.8759 e^{-0.114d} \left(R^2 = 0.97, P < 0.01 \right); \\ S_{2 \sim 5 \text{ mm}} &= 4.2968 e^{-0.125d} \left(R^2 = 0.97, P < 0.01 \right); \end{split}$$

式中:S为溅蚀总量(g);d为溅蚀距离(cm),试验当 中d < 60 cm。这与 Legout 等^[7]和 Leguedois 等^[23] 研究结果相似,不同的是 Leguedois 等的研究结果表 明,溅蚀距离最远为 23 cm,对比后者试验雨强 29 mm/h,本试验 75 mm/h 雨强和 10°坡度均是造成溅 蚀团聚体搬运距离较远的原因。

溅蚀量/g MWS/cm 粒径 坡向 $10\!\sim\!20~{\rm cm}$ $20 \sim 30 \text{ cm}$ $40\!\sim\!50~{\rm cm}$ $0 \sim 10 \text{ cm}$ $30\!\sim\!40~{\rm cm}$ $50 \sim 60 \text{ cm}$ 上坡 0.81±0.14ef $0.53 \pm 0.07 de$ $0.24 \pm 0.05 d$ $0.06 \pm 0.05 d$ 0.02 ± 0.01 cd 14.39±1.40a $0.01\pm 0.01h$ <0.25 mm 下坡 $2.34 \pm 0.52 d$ 1.38±0.10c $0.79 \pm 0.09 \mathrm{b}$ 0.41±0.02b 0.17±0.07b $0.05 \pm 0.01a$ 上坡 2.17 \pm 0.21de 0.74±0.11d $0.20 \pm 0.05 ef$ $0.08 \pm 0.02d$ 12.27±1.02b $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 下坡 $6.26\!\pm\!0.76\mathrm{b}$ $2.55 \pm 0.11a$ $1.14 \pm 0.06a$ $0.75 \pm 0.04 a$ $0.39 \pm 0.07 a$ $0.07 \pm 0.01a$ 上坡 $2.08 \pm 0.02 de$ $0.50 \pm 0.09 \text{ef}$ $0.08 \pm 0.01 \text{fg}$ 0.01±0.01de 8.87±0.35c $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 下坡 $7.03 \pm 0.38a$ $1.78 \pm 0.21 \text{b}$ $0.56 \pm 0.06c$ $0.28 \pm 0.05c$ $0.08 \pm 0.04c$ $0.01 \pm 0.01 b$ $0.22 \pm 0.05 g$ 上坡 $1.14 \pm 0.18 f$ $0.08 \pm 0.00 g$ $8.24 \pm 0.72 d$ $1\sim 2 \text{ mm}$ 下坡 $3.49 \pm 0.95c$ $0.59 \pm 0.06 \text{ef}$ $0.23 \pm 0.05e$ $0.08 \pm 0.01 d$ 0.06 ± 0.02 cd 上坡 $0.91 \pm 0.05 f$ $0.11 \pm 0.01 g$ $0.02 \pm 0.01 g$ $7.64 \pm 0.59e$ $2\sim 5 \text{ mm}$ 0.02 ± 0.01 cd 下坡 $2.27 \pm 0.03 de$ $0.45 \pm 0.01 f$ $0.12 \pm 0.00 \, \text{fg}$ 0.04 ± 0.00 de 10.0 3 结论 □ <0.25 mm



表 2 不同距离范围内溅蚀量分布

(1)团聚体粒径越大在降雨条件下越容易发生破碎。除 2~5 mm 团聚体破碎量高达 96.06%外,<2 mm 团聚体破碎量均小于 50.00%。<0.105 mm 团聚体不易被溅蚀搬运,主要降雨运移方式为径流输移。

(2)<0.25 mm 团聚体溅蚀率具有陡涨陡落特点,表土结皮发育迅速;0.25~0.5 mm 团聚体溅蚀 率陡涨缓落,表土泥浆化过程明显;0.5~5 mm 团聚 体溅蚀率则在整个试验中保持较长时间的增长,而后 降低。团聚体破碎、表土结构发育和雨滴对团聚体搬 运能力是影响溅蚀的主要因素。

(3)不同粒径团聚体溅蚀总量、上下坡溅蚀量与净 搬运量变化趋势一致;粒径在 0.25~0.5 mm 范围内 的团聚体溅蚀量最大,而后随着粒径的增大而逐渐降 低;各粒径溅蚀净搬运量占总量的 47.05%~56.56%。

(4)团聚体溅蚀量随距离的增加而减少,呈现典型的指数函数关系;粒径越小,其平均重量距离 MWS越大,即溅蚀搬运和分散能力越大;<0.25 mm团聚体溅蚀搬运距离最远,各粒径团聚体溅蚀量 基本全部分布在半径 60 cm 范围内。

参考文献:

- [1] Asadi H, Moussavi A, Ghadie H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment
 [J]. Journal of Hydrology, 2011, 406(1):73-81.
- [2] Kinnell P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review[J]. Hydrological Processes, 2005,19(14):2815-2844.
- [3] 徐震,高建恩,赵春红,等.雨滴击溅对坡面径流输沙的 影响[J].水土保持学报,2010,24(6):20-23.
- [4] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀 特征的影响[J].农业机械学报,2015,46(8):104-112.
- [5] Saedi T, Shorafa M, Gorji M, et al. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran; A laboratory study[J]. Geoderma, 2016, 271(6):1-9.
- [6] 范荣生,李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型[J]. 水利学报,1993(6):24-29.
- [7] Legout C, Leguedois S, Bissonnais Y L, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005, 124(3):279-292.
- [8] 郭伟,史志华,陈利顶,等. 红壤表土团聚体粒径对坡面 侵蚀过程的影响[J]. 生态学报,2007,27(6):2516-2522.
- [9] 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[J].长江流域资源与环境,2013, 22(6):779-785.
- [10] Ma R M, Li Z X, Cai C F, et al. The dynamic response

(上接第36页)

- [10] 谭德水,江丽华,谭淑樱,等.湖区小麦一玉米轮作模式 下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究[J].土壤学 报,2015,52(1):128-137.
- [11] 林超文,罗春燕,庞良玉,等.不同耕作和覆盖方式对紫 色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J].生态学 报,2010,30(22):6091-6101.
- [12] 蒲玉琳,谢德体,林超文,等.紫色土区不同植物篱模式 控制坡耕地氮素流失效应[J].农业工程学报,2014,30 (23):138-147.

of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China)[J]. Catena, 2014, 121(7): 279-287.

- [12] Lado M, Benhur M, Shainberg I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004,68(6):1992-1999.
- [13] 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[J].水土保持学报,2005,19 (2):13-16.
- [14] 程琴娟,蔡强国,胡霞.不同粒径黄绵土的溅蚀规律及表土 结皮发育研究[J].土壤学报,2007,44(3):392-396.
- [15] 周一杨,王恩姮,陈祥伟.模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚 体分选特征[J].水土保持学报,2008,22(6):176-179.
- [16] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001,99(1):123-145.
- [17] 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[J].农业机械学报,2015,46(2):154-161.
- [18] 彭新华,张斌,赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤 有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报,2003,23 (10):2176-2183.
- [19] 郑腾辉,邢媛媛,何凯旋,等.雨滴击溅与薄层水流混合 侵蚀的输沙机理[J].西北农林科技大学学报(自然科 学版),2016,44(3):211-218.
- [20] 刘和平,符素华,王秀颖,等. 坡度对降雨溅蚀影响的研 究[J]. 土壤学报,2011,48(3):479-486.
- [21] 吴普特,周佩华.雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用 [J].水土保持通报,1992,12(4):19-26.
- [22] Liu D, She D, Yu S, et al. Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation[J]. Catena, 2015,128(3):54-62.
- [23] Leguedois S, Planchon O, Legout C, et al. Splash projection distance for aggregated soils: theory and experiment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005,69(1):30-37.
- [13] 高德才,张蕾,刘强,等.旱地土壤施用生物炭减少土壤 氮损失及提高氮素利用率[J].农业工程学报,2014,30 (6):54-61.
- [14] Inbar A, Ben-Hur M, Marcelo S, et al. Using polyacrylamide to mitigate post-fire soil erosion[J]. Geoderma,2015(S239/S240):107-114.
- [15] 蒋翔,李博,李元,等. 秸秆覆盖对桃一大豆套种地表径 流及 N、P 流失的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(6): 41-44,73.