

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

李叶鑫^{1,2}, 吕刚², 傅昕阳³, 刘雅卓², 杜昕鹏², 董亮², 汤家喜²

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 3. 广元城建投资集团有限公司, 四川 广元 628000)

摘要:为揭示辽西低山丘陵区坡耕地典型土壤溅蚀特征,选取褐土为研究对象,采用人工模拟降雨试验研究降雨特性和坡度对溅蚀的影响。结果表明:随着降雨强度的增大,5°和10°溅蚀量分别由6.86 g/cm和8.13 g/cm增加到14.21 g/cm和16.00 g/cm,增加幅度为48.47%~209.81%;不同溅蚀距离内的溅蚀量表现为0~5 cm>5~10 cm>10~15 cm>15~20 cm>20~25 cm,溅蚀距离0~5 cm范围内的溅蚀量(75 mm/h)为7.29 g/cm,占0~25 cm范围内总溅蚀量(16.00 g/cm)的45.56%,溅蚀距离20~25 cm范围内的溅蚀量仅占9.88%。溅蚀量与降雨强度和溅蚀距离均具有较好的指数关系,其回归方程的决定系数 R^2 在0.8以上。随着降雨时间的延续,溅蚀量逐渐增加,但溅蚀量增长率呈减小的趋势;降雨历时由5 min增加到10 min时溅蚀量增长率最大。溅蚀量和降雨历时之间具有较好的指数关系,其回归方程的决定系数 R^2 在0.9以上。随着降雨强度发生变化时,溅蚀团聚体空间分布规律也随之发生改变。各径级团聚体的溅蚀距离均随降雨强度的增大而增大,2~5 mm团聚体由30 mm/h的0~5 cm扩大到75 mm/h的0~15 cm。溅蚀团聚体以粒径<1 mm为主,小粒径团聚体溅蚀距离和溅蚀量均大于大粒径团聚体,>5 mm团聚体并没有迁移。5°总溅蚀量、上坡溅蚀量、下坡溅蚀量、净溅蚀量(75 mm/h)依次为14.21, 3.54, 10.67, 7.13 g/cm, 10°依次为16.00, 3.85, 12.15, 8.30 g/cm,与5°相比显著增加12.60%, 8.76%, 13.87%, 16.41%,下坡溅蚀量大于上坡溅蚀量。

关键词: 溅蚀; 坡耕地; 辽西低山丘陵区; 团聚体; 空间分布; 溅蚀距离

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0037-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.006

Effects of Rainfall Characteristics and Slope on Splash Erosion of Cinnamon Soil on Slope Farmland in Low Mountain and Hilly Region of Western Liaoning Province

LI Yexin^{1,2}, LÜ Gang², FU Xinyang³, LIU Yazhuo², DU Xinpeng², DONG Liang², TANG Jiayi²

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;

2. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;

3. Guangyuan City Construction Investment Group Co., Ltd., Guangyuan, Sichuan 628000)

Abstract: In order to study the characteristics of typical soil splash erosion on slope farmland in low mountain and hilly region of western Liaoning Province, taking cinnamon soil as research object, the effects of rainfall characteristics and slope on splash erosion were studied by artificial rainfall simulation experiments. The results showed that with the increase of rainfall intensities, the splash erosion of 5° and 10° increased from 6.86 g/cm and 8.13 g/cm to 14.21 g/cm and 16.00 g/cm, respectively, with an increase range of 48.47% to 209.81%. The splash erosion with different splash distance was 0~5 cm>5~10 cm>10~15 cm>15~20 cm>20~25 cm. The splash erosion with splash distance at 0~5 cm with 75 mm/h was 7.29 g/cm, accounting for 45.56% of the total splash erosion (16.00 g/cm) in the range of 0~25 cm, and splash erosion with splash distance at 20~25 cm was only 9.88%. The splash erosion had a good exponential relationship with rainfall intensity and splash distance, and the determinant coefficient of the regression equation was above 0.8. With the extension of rainfall time, the splash erosion increased gradually, while the growth rate of splash erosion decreased. The growth rate of splash erosion was the largest when the rainfall duration increased from 5 min

收稿日期: 2019-02-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501548)

第一作者: 李叶鑫(1989—), 男, 辽宁阜新人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: liyexin2008@126.com

通信作者: 吕刚(1979—), 男, 吉林九台人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与土壤水文学的教学与研究。E-mail: lvgang2637@126.com

to 10 min. The splash erosion had a good exponential relationship with rainfall duration, and the determinant coefficient of the regression equation was above 0.9. Spatial distribution of splash aggregates changed with the changes of rainfall intensities. The splash distance of each diameter aggregate increased with the increasing rainfall intensities. The splash distance of 2~5 mm aggregate increased from 0~5 cm at 30 mm/h to 0~15 cm at 75 mm/h. Splash distance and splash erosion of small size aggregates were larger than that of large size aggregates. Splash aggregates were dominated by <1 mm aggregate, and >5 mm aggregate did not migrate. The total splash erosion, upslope erosion, downslope erosion, and net splash erosion of 5° with 75 mm/h were 14.21, 3.54, 10.67, and 7.13 g/cm, respectively, and which of 10° were 16.00, 3.85, 12.15, and 8.30 g/cm. Compared with 5°, the splash erosion of 10° increased by 12.60%, 8.76%, 13.87% and 16.41% respectively. The splash erosion on downslope was larger than that of upslope splash erosion.

Keywords: splash erosion; slope farmland; low mountain and hilly region of western Liaoning Province; aggregate; spatial distribution; splash distance

雨滴击溅侵蚀是指雨滴打击土壤表面,使土粒发生分散、分离、跃迁位移的过程^[1-2],是土壤侵蚀发生的最初过程^[3]。溅蚀会破坏土壤团聚体,堵塞土壤孔隙,降低土壤入渗能力,增加径流紊动性和径流输沙能力^[4-5]。雨滴打击引起土壤颗粒溅蚀的作用程度主要受到降雨特性^[6]、地表粗糙度^[7]、土壤特性^[8]、地面坡度^[9]等影响。江忠善等^[10]利用安塞水土保持试验站 1985—1987 年 3 年野外定位天然降雨溅蚀观测资料,分析降雨因素和坡度对溅蚀的影响,结果表明降雨动能与最大 30 min 雨强乘积(EI_{30})和地面坡度是影响溅蚀的主导因素,并建立了反映降雨和坡度影响溅蚀的综合模型;高学田等^[6]认为,溅蚀量与降雨强度最佳拟合函数为指数函数,雨滴直径是影响溅蚀的主要降雨参数;秦越等^[11]采用人工降雨方法研究溅蚀量与降雨强度和降雨动能的关系,分析溅蚀量在水平距离的分布特征,认为降雨强度和降雨动能能够较好的反映降雨对溅蚀的影响,溅蚀土粒主要集中在 0—20 cm 范围内,占总溅蚀量的 61%~75%;胡伟等^[12]以东北典型黑土为研究对象,采用人工模拟降雨试验研究降雨能量对坡面不同方向溅蚀量及溅蚀过程的影响,揭示溅蚀量主要集中在下坡和侧坡,确定黑土溅蚀发生的临界降雨能力为 3~6 J/(m²·mm)。溅蚀是雨滴动能作用地表土壤最直接的结果,不仅破坏土壤结构,减少或堵塞表层土壤孔隙,而且还为水力侵蚀的发生发展提供丰富的物质基础。因此,研究溅蚀特征可以摸清土壤侵蚀机理,有效控制水土流失,具有重要的理论意义和现实意义。

2005 年第 4 次辽宁省土壤侵蚀遥感普查数据显示^[13],全省土壤侵蚀面积为 422.95 万 hm²,侵蚀强度以轻度侵蚀为主,其面积为 268.15 万 hm²,约占全省土壤侵蚀面积的 63.4%;坡耕地侵蚀面积为 175.76 万 hm²,约占全省土壤侵蚀面积的 41.4%。辽西低山丘陵区(阜新、朝阳、锦州、葫芦岛 4 市)植被覆盖度较差,土壤侵蚀

面积占辽西低山丘陵区总面积 41.6%^[13],是辽宁省土壤侵蚀最严重的地区。相关资料^[13]表明,辽西低山丘陵区水力侵蚀面积 2.47 万 km²,占土壤侵蚀总面积的 94%。该区坡耕地土壤类型以褐土为主,耕层土壤有机质含量偏低、结构性差、土壤抗蚀差^[14-15]。辽西低山丘陵区共有耕地面积 188.68 万 hm²,多为坡耕地,其中 5°~15°坡耕地面积占坡耕地总面积的 80.36%。坡耕地是该区域主要土地利用类型,更是重要的耕地资源^[16],也是辽西低山丘陵区坡耕地水土流失主要策源地^[17]。以往关于辽西低山丘陵区土壤侵蚀的研究主要集中在降雨特性(降雨量、降雨强度、降雨侵蚀力)^[18-19]、地面坡度^[18-19]、植被类型及盖度^[18-20]、土地利用方式^[18,21]、耕种方式^[21-22]等因素对土壤侵蚀的影响,以及土壤侵蚀强度的空间分布特征及其定量评价^[23],多为天然降雨条件下定位观测和利用修正的土壤流失方程计算土壤侵蚀量,但关于室内模拟及揭示土壤侵蚀机理方面的研究鲜见。

基于此,本文以辽西低山丘陵区坡耕地典型褐土为研究对象,采用人工模拟降雨试验研究其溅蚀特征,分析不同降雨强度、降雨历时和坡度条件下土壤溅蚀量特征及其空间分布,有利于深入理解溅蚀发生的过程和机理,以期对辽西低山丘陵区坡耕地土壤侵蚀防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验用土

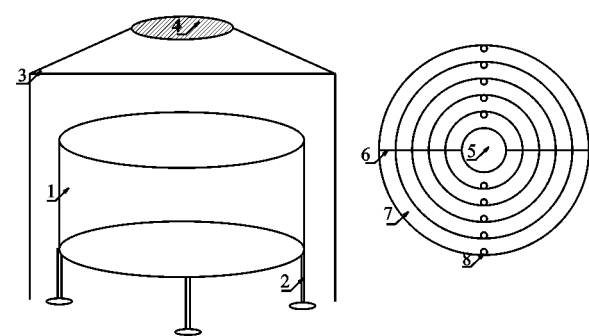
试验所用褐土来自辽宁省阜新蒙古族自治县(41°44'—42°34'N,121°01'—122°26'E),属辽西低山丘陵区(阜新、朝阳、锦州、葫芦岛 4 市),北温带大陆性半干旱季风气候,夏季炎热,年蒸发量 1 790 mm,年均气温 7.3℃,≥10℃年积温 3 476℃,无霜期 154 d,年均日照时间 2 865.5 h,年均风速 3 m/s,年均降水量 511.4 mm,且多集中于 7、8 月份。土壤类型以褐土、棕壤、草甸土、风沙土为主,其中褐土是阜新地

区主要土壤类型之一,占 55%^[24]。植被属华北植物区系、蒙古植物系和长白植物系交错地区,主要以油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、荆条(*Vitex negundo*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、多叶隐子草(*Cleistogenes polyphylla*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、大针茅(*Stipa grandis*)等。全县总面积 6 245.1 km²,其中低山丘陵面积 5 232.9 km²,占总面积的 83.8%,河流平原面积 1 012.2 km²,占 16.2%。水土流失面积 254 544.71 hm²,占总面积的 41%,轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积分别为 165 891.54,58 542.19,22 853.02,6 053.62,1 204.34 hm²,平均侵蚀模数 2 741 t/km²。于 2017 年 4 月在阜新蒙古自治县王府镇皂力营子村布设典型褐土坡耕地采样点,采样深度为 0—20 cm。带回实验室去除石块、植物根系等杂质,风干后备用。供试土壤有机质含量 10.71 g/kg,全氮含量 204.85 mg/kg,有效磷含量 6.17 mg/kg,速效钾含量 86.28 mg/kg。

1.2 试验装置与试验设计

1.2.1 人工模拟降雨器 试验采用的人工模拟降雨器为下喷式降雨系统^[25],降雨高度为 4 m,降雨器采用 5 组喷头降雨,喷头行间距为 0.5 m,喷头口径为 2.5 mm,采用潜水泵将集水箱中的水升压,可控制水压为 0.04~0.1 MPa,每个喷头有效降雨半径为 1.5 m。本降雨器由于喷头压力,使得雨滴在降落初期已具备初速度,在具备初速度的下喷式喷头,当降雨高度在 2 m 时,即可满足不同直径的雨滴获得 2.0~2.9 m/s 的终点速度,与天然降雨雨滴终速分布范围一致^[26],因此人工模拟降雨器可满足试验要求。根据辽西低山丘陵区多年降雨资料,结合辽宁省中小河流无资料地区设计暴雨洪水计算方法^[27],设计降雨强度为 30,45,60,75 mm/h,降雨历时为 5,10,15,20,25,30 min。试验前对降雨均匀度和降雨强度反复率定,每次降雨均匀度保证在 85%以上,降雨强度相对误差控制在 5%以内。

1.2.2 溅蚀盘 采用溅蚀盘分析不同降雨条件下褐土溅蚀特征。为获得溅蚀颗粒的空间分布状况,改进 Morgan 溅蚀盘^[28]和周一杨等^[29]采用的溅蚀盘。本试验采用的溅蚀盘直径为 70 cm,高度为 45 cm(底部距地面高度为 30 cm,最外环高为 15 cm),其中装土盘(盘底打孔)位于正中心,直径为 20 cm,高度为 5 cm;收集盘位于装土盘外侧,由 5 个间距依次为 5 cm 的圆环组成,每个圆环高度均为 5 cm,并各自设有 1 漏口用于收集溅蚀颗粒。采用手动调节坡度,可控制坡度为 0~25°。根据辽西低山丘陵区坡耕地坡度组成特征^[17],本次试验设计坡度为 5°和 10°。溅蚀盘见图 1。



注:1 为溅蚀盘外部;2 为可控制高度支撑杆;3 为挡雨器;4 为雨滴降落口;5 为装土盘;6 为上坡下坡分界挡板;7 为溅蚀环;8 为土壤颗粒收集口。

图 1 溅蚀盘示意

1.2.3 样品收集与溅蚀量计算 在装土盘底部铺设透水纱布,保证试验装置的透水性,将过 10 mm 土壤筛的风干土样填入装土盘中,控制土壤容重为 1.3 g/cm³。降雨结束后,采集收集盘不同溅蚀距离(0~5, 5~10, 10~15, 15~20, 20~25 cm)上坡和下坡土样,采用湿筛法测定溅蚀团聚体分布特征,然后测定烘干质量,计算总溅蚀量、上坡溅蚀量、下坡溅蚀量和净溅蚀量。计算公式为^[29-30]:

$$M = \frac{m}{w}$$

式中: M 为溅蚀量(g/cm); m 为溅蚀土壤颗粒质量(g); w 为环宽(cm)。

总溅蚀量为上坡和下坡溅蚀量总和,其中上坡溅蚀量为溅蚀盘中心线上方的溅蚀量,下坡溅蚀量为溅蚀盘中心线下方的溅蚀量,净溅蚀量为下坡溅蚀量与上坡溅蚀量的差值,反映雨滴打击作用下向下坡搬运的土壤量。

2 结果与分析

2.1 降雨强度对溅蚀量的影响

降雨强度是影响土壤溅蚀的重要因素之一,直接影响溅蚀量和溅蚀距离^[11]。不同降雨强度和溅蚀距离条件下褐土 30 min 溅蚀量见图 2 和图 3。由图 2 可知,溅蚀量随着降雨强度的增大而增加,当降雨强度由 30 mm/h 增加到 75 mm/h 时,5°和 10°溅蚀量分别由 6.86,8.13 g/cm 增加到 14.21,16.00 g/cm。不同溅蚀距离溅蚀量均有所增加,溅蚀距离 0~5 cm 范围内的溅蚀量(10°)由 4.91 g/cm 增加到 7.29 g/cm,其增加幅度为 48.47%,20~25 cm 范围内的溅蚀量由 0.51 g/cm 增加到 1.58 g/cm,增加幅度为 209.81%,说明溅蚀量随降雨强度的增大而显著增加($P<0.05$)。5°和 10°褐土溅蚀量 M 和降雨强度 I 之间具有较好的指数关系($M = ae^{bI}$),其回归方程的决定系数 R^2 在 0.9 以上。

由图 3 可知,随着溅蚀距离的增大,溅蚀量呈现

减小的变化趋势,具体表现为 0~5 cm>5~10 cm>10~15 cm>15~20 cm>20~25 cm,其中溅蚀距离 0~5 cm 范围内的溅蚀量(75 mm/h)为 7.29 g/cm,占 0~25 cm 范围内总溅蚀量(16.00 g/cm)的 45.56%,而溅蚀距离 20~25 cm 范围内的溅蚀量仅为 1.58 g/cm,占 9.88%,这是因为土壤颗粒被雨滴溅起后,在重力作用下以抛物线轨迹运动,由于溅蚀

土粒大小及土粒运动方向不同,受到的重力作用也不同,进而导致溅蚀量在水平距离上的差异。溅蚀量 M 和溅蚀距离 r 之间具有较好的指数关系($M = ae^{-br}$),其回归方程的决定系数 R^2 在 0.8 以上。由回归方程可知,参数 b 随着降雨强度的增大而减小,当降雨强度为 30 mm/h 时,参数 $b(10^\circ)$ 为 0.559,当降雨强度为 75 mm/h 时,参数 $b(10^\circ)$ 为 0.368。

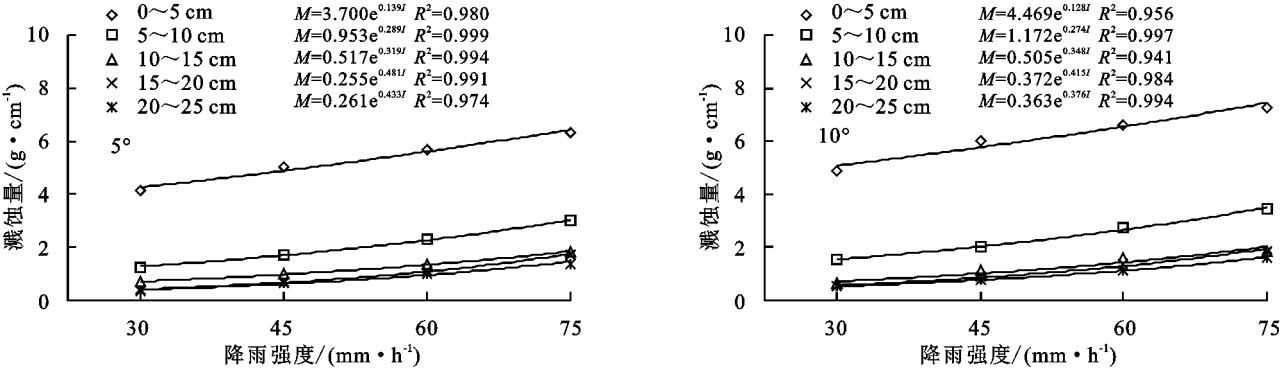


图 2 溅蚀量与降雨强度的关系

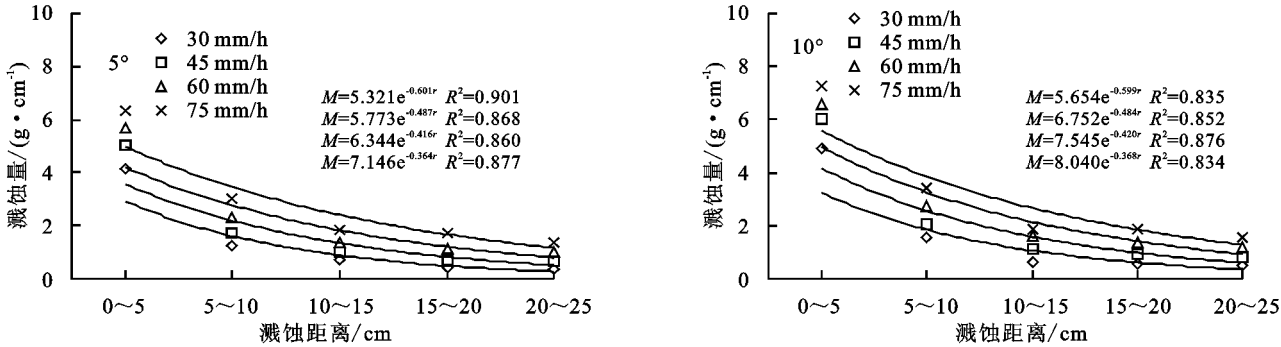


图 3 溅蚀量与溅蚀距离的关系

2.2 降雨历时对溅蚀量的影响

随着降雨的不断进行,累计雨滴动能增大,同时试验土壤含水率逐渐增加,土壤团聚体受到破坏,形成颗粒更为细小的团聚体或土粒,进而影响溅蚀量^[12,31]。由图 4 可知,随着降雨时间的延长,溅蚀量呈现增长的趋势。当坡度为 10°时,30 mm/h 降雨强度的溅蚀量由 5 min 的 0.84 g/cm 增加到 30 min 的 8.13 g/cm,溅蚀量增加 8.68 倍,45, 60,75 mm/h 降雨强度的溅蚀量分别增加 9.35,9.85, 9.26 倍。说明无论是小雨强还是大雨强,土壤溅蚀量均随着降雨历时的增加而呈非线性增加。通过计算溅蚀量增长率(相邻降雨历时溅蚀量增加程度)分析溅蚀量随降雨历时的变化特征。当降雨强度 30 mm/h 时,10,15,20,25, 30 min 溅蚀量增长率依次为 119.05%,53.26%,78.37%, 48.11%,9.13%;当降雨强度增加到 70 mm/h 时,溅蚀量增长率依次为 153.85%,39.40%,38.04%,87.80%, 11.81%。说明无论是小雨强还是大雨强,土壤溅蚀量增长率呈现随降雨历时增加而减小的变化趋势,当降雨历时由 5 min 增加到 10 min 时,溅蚀量增长率最大,这主要是由于试验前期为风干土壤颗粒,降雨动能直接作用在土壤颗粒表面,破坏能力较强,进而产生较多的溅蚀

量;但随着降雨历时的延长,试验土壤逐渐湿润而接近饱和,大颗粒土壤团聚体被破坏,装土盘内以细小颗粒为主,表层土壤形成薄水层,导致雨滴动能作用对象由土壤转变为薄水层,这在一定程度上降低雨滴与土壤颗粒的接触面积以及雨滴的打击动能,降低土壤溅蚀量增长率,刘和平等^[32]也得到了类似结论。溅蚀量 M 和降雨历时 T 之间具有较好的指数关系($M = ae^{bT}$),其回归方程的决定系数 R^2 在 0.9 以上。当坡度为 5°时,参数 b 在 60 mm/h 降雨强度时达到最大,而对于 10°而言,参数 b 则在 45 mm/h 降雨强度时达到最大。说明随着坡度的增大,溅蚀更容易发生。

2.3 溅蚀团聚体分布特征

降雨强度和降雨历时不仅影响溅蚀量的大小,也影响着溅蚀团聚体空间分布特征。由图 5 可知,随着降雨强度发生变化时,溅蚀团聚体空间分布规律也随之发生改变。当降雨强度为 30 mm/h 时,2~5 mm 团聚体仅分布在 0~5 cm 范围内,1~2 mm 团聚体分布在 0~15 cm 范围内,<1 mm 团聚体在 0~25 cm 范围内均有分布;而当降雨强度达到 45 mm/h 时,能够将 <2 mm 团聚体分布在溅蚀盘全部范围

内。随着降雨强度的增大,各径级团聚体的溅蚀距离均增大,2~5 mm 团聚体由 30 mm/h 的 0~5 cm 扩大到 75 mm/h 的 0~15 cm,且 75 mm/h 降雨强度 2~5 mm 团聚体质量依次为 0~5 cm>5~10 cm>10~15 cm,表现为溅蚀量随溅蚀距离增加而减小的变化规律。无论是小雨强还是大雨强,>5 mm 团聚体并没有迁移,一是由于大团聚体在降雨过程中被分

解为粒径较小的团聚体,二是大粒径团聚体质量较大,发生迁移所需要的降雨动能也较大,本试验所采用的最大降雨强度可能对该区域粒径>5 mm 的褐土团聚体影响较小;对于<5 mm 团聚体,各粒径质量均表现为随着溅蚀距离增加而减小的变化趋势,这是因为土壤团聚体的迁移主要受到降雨动能和自身重力的综合作用,跃移距离越远,重力影响越大。

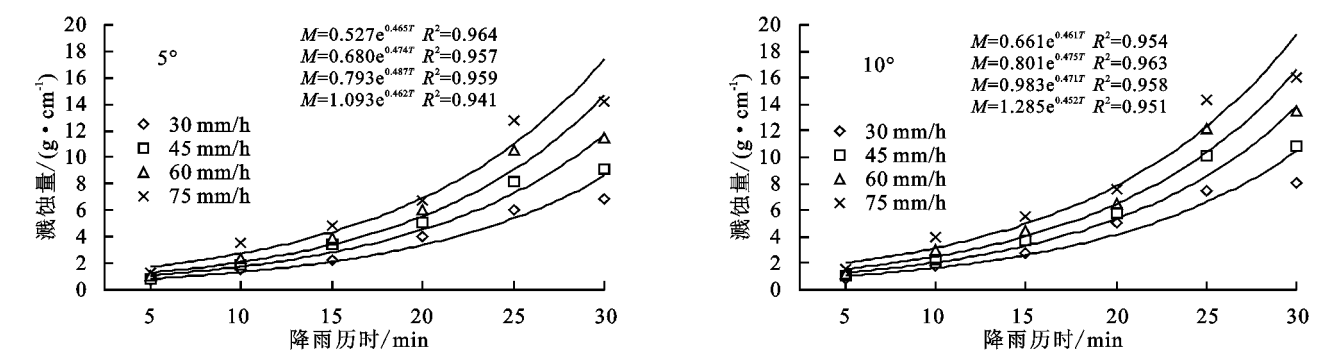


图4 溅蚀量与降雨历时的关系

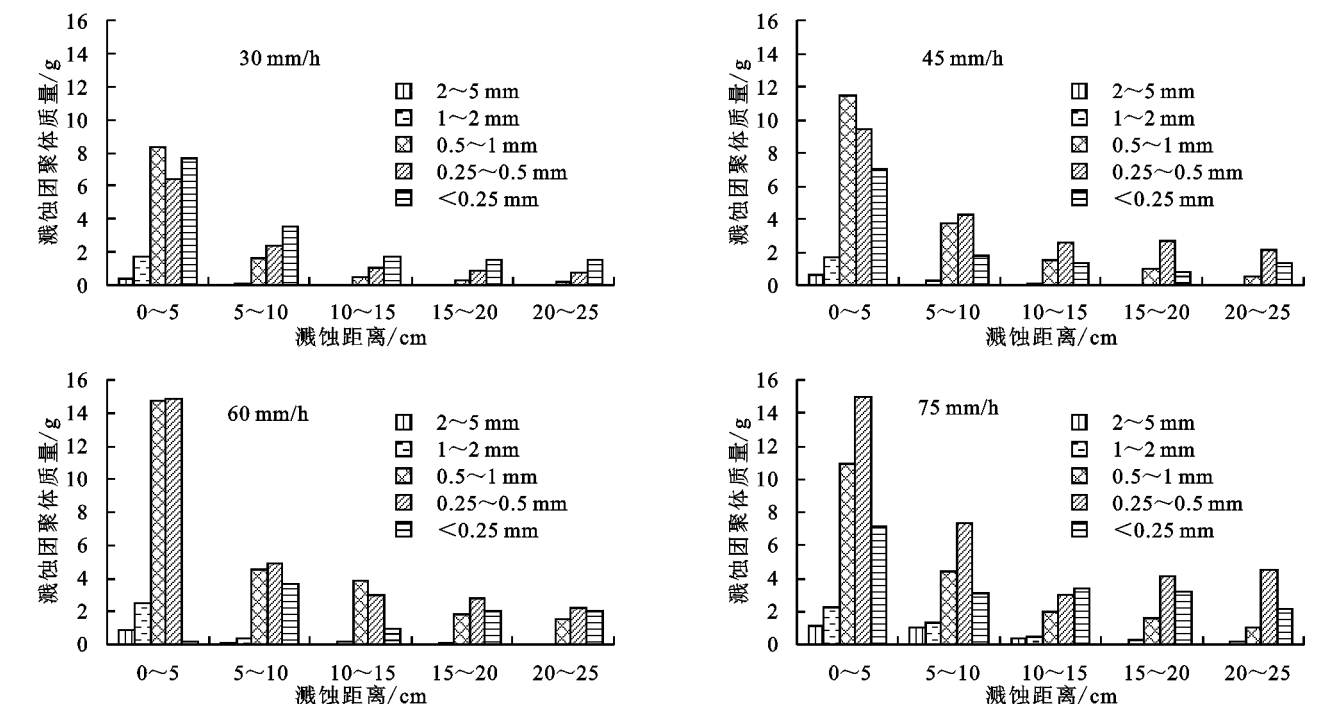


图5 不同溅蚀距离溅蚀团聚体分布

不同降雨强度的溅蚀团聚体粒径分布特征不同,30,45,60,75 mm/h 降雨强度<0.25 mm 团聚体质量为16.02,12.28,8.86,19.02 g,占溅蚀量的39.41%,22.59%,13.17%,23.75%;而2~5,1~2 mm 团聚体质量分别为0.37,0.66,0.90,2.56 g和1.80,2.07,3.24,4.60 g,仅占溅蚀量的0.91%~3.20%和3.81%~5.74%,表现为小粒径团聚体溅蚀量显著大于大粒径团聚体,是因为小粒径团聚体容易发生迁移,且降雨动能的增大加强了雨滴对土壤团聚体的破坏作用,形成更多的小粒径团聚体。30 mm/h 降雨强度溅蚀团聚体以粒径<0.25 mm 团聚体为主,而对于45,60,75 mm/h 降雨强度则以

0.25~0.5 mm 和 0.5~1 mm 团聚体为主,其质量分别为39.36,54.26,53.90 g,占溅蚀量的72.39%,80.67%,67.31%,说明当降雨强度增大后,被迁移的溅蚀团聚体粒径有所增加。

2.4 坡度对溅蚀量的影响

坡度是影响溅蚀的一个重要因素,雨滴打击引起土粒分散和迁移,由于溅散方向的随机性,造成不同方向溅蚀量的差异。由表1可知,各降雨强度下的总溅蚀量、上坡溅蚀量、下坡溅蚀量、净溅蚀量均随着坡度的增大而增大,其中5°总溅蚀量、上坡溅蚀量、下坡溅蚀量、净溅蚀量(75 mm/h)依次为14.21,3.54,10.67,7.13 g/cm,10°上坡溅蚀量、下坡溅蚀量、净溅蚀量(75

mm/h)依次为 16.00,3.85,12.15,8.30 g/cm,与 5°相比 显著增加 12.60%,8.76%,13.87%,16.41%。

表 1 不同坡度溅蚀量

坡度/(°)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	总溅蚀量/ (g·cm ⁻¹)	上坡溅蚀量/ (g·cm ⁻¹)	下坡溅蚀量/ (g·cm ⁻¹)	净溅蚀量/ (g·cm ⁻¹)	下坡溅蚀量与 上坡溅蚀量的比值
5	30	6.86	1.56	5.30	3.74	3.40
	45	9.17	2.38	6.79	4.41	2.85
	60	11.47	2.98	8.49	5.51	2.85
	75	14.21	3.54	10.67	7.13	3.01
	30	8.13	1.67	6.46	4.79	3.87
10	45	10.88	2.58	8.30	5.72	3.22
	60	13.45	3.24	10.21	6.97	3.15
	75	16.00	3.85	12.15	8.30	3.16

溅蚀量在上坡和下坡的分布特征不同。当降雨强度为 75 mm/h 时,5°和 10°上坡溅蚀量分别为 3.54,3.85 g/cm,下坡溅蚀量则分别为 10.67,12.15 g/cm,同时由净溅蚀量以及下坡溅蚀量与上坡溅蚀量的比值可知,下坡溅蚀量也明显大于上坡溅蚀量,这是由于坡度改变雨滴的打击角度和打击动能,当土粒向下运动时,打击动能和自身重力会加大土粒运动的初始动能,有利于土粒向下坡运动;而当土粒向上运动时,重力会起到阻碍的作用,进而造成溅蚀量在坡向上的差异。当坡度越大时,向下运动土粒获取的动能也越大,产生的溅蚀量也越大。

3 讨论

土壤侵蚀是导致土地退化的主要原因,已成为全球性的环境问题之一^[33]。溅蚀是土壤侵蚀的初始阶段,对坡面土壤侵蚀产沙作用的贡献率可达 50%^[34],对整个土壤侵蚀过程具有重要影响。以往关于溅蚀的研究多集中在黄土高原^[8]、南方红壤区^[5]、紫色丘陵区^[35]、华北土石山区^[36]、东北黑土区^[12],土壤类型多为黄绵土^[37]、塿土^[37]、红壤^[38]、紫色土^[35]、褐土^[11]和黑土^[12]。相关研究^[11]表明,降雨强度可以作为雨滴击溅过程中有效影响溅蚀的降雨特征参数,揭示溅蚀量与降雨强度之间呈指数函数关系($M=ae^{bt}$)。从本研究来看,辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀量随降雨强度的增大而增加,溅蚀量与降雨强度也具有较好的指数函数关系,但拟合方程中的参数 a 和 b 取值范围有所不同,这与土壤类型和土壤质地关系密切。程金花等^[36]研究认为,华北土石山区褐土溅蚀量主要集中在 0~10 cm 范围内,占总溅蚀量的 45.40%~57.75%,溅蚀量与溅蚀距离呈负相关关系。周一杨等^[29]也认为,溅蚀量随着溅蚀距离的增大而减小,主要集中在 0~5 cm。本研究表明,辽西低山丘陵区坡耕地褐土 0~5 cm 范围内的溅蚀量占总溅蚀量的 45.56%,20~25 cm 范围内的溅蚀量仅占 9.88%,这是溅蚀土粒质量、大小和重力共同作用的结果,进而导致近距离溅蚀量更多。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,在雨滴打击作用下被破坏、溅散。马仁明

等^[39]认为,降雨条件下团聚体粒径越大越容易破碎,进而影响溅蚀过程。本研究表明,溅蚀团聚体粒径主要集中在<1 mm,0.25~0.5,0.5~1 mm 团聚体所占比重大,这与付玉等^[8]研究结果相一致。本文研究了 2 个坡度水平(5°和 10°)下辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀特征,未考虑 10°以上坡度对溅蚀的影响,今后可加强坡度的连续变化对溅蚀量及溅蚀空间分布方面的研究。溅蚀的影响因素很多,本文仅研究了降雨强度、降雨历时、坡度对褐土溅蚀特征的影响,但坡耕地作物类型、耕作方式、下垫面覆盖度等也是影响溅蚀特征的关键因素,今后应加强这些方面的研究,不仅可以为进一步研究辽西低山丘陵区水力侵蚀机制提供依据,也可为建立并完善该区域坡耕地土壤侵蚀预报模型提供参考。

4 结论

- (1)溅蚀量随着降雨强度的增加而增多,增加幅度为 48.47%~209.81%,溅蚀量 M 和降雨强度 I 间具有较好的指数关系($M=ae^{bI}$)。溅蚀量随溅蚀距离的增大而减小,表现为 0~5 cm>5~10 cm>10~15 cm>15~20 cm>20~25 cm,0~5 cm 溅蚀距离范围内的溅蚀量占总溅蚀量的 45.56%,20~25 cm 溅蚀距离范围内的溅蚀量仅为 9.88%,溅蚀量 M 和溅蚀距离 r 之间具有较好的指数关系($M=ae^{-br}$)。
- (2)溅蚀量随降雨时间的延长而增加,不同降雨强度下 30 min 溅蚀量是 5 min 溅蚀量的 8.68~9.85 倍;无论是小雨强还是大雨强,土壤溅蚀量增长率呈现随降雨历时增加而减小的变化趋势;溅蚀量 M 和降雨历时 T 之间具有较好的指数关系($M=ae^{bT}$)。
- (3)随着降雨强度的增大,各径级团聚体的溅蚀距离均增大,2~5 mm 团聚体由 0~5 cm 扩大到 0~15 cm,<1 mm 团聚体在 0~25 cm 范围内均有分布;无论是小雨强还是大雨强,>5 mm 团聚体并没有迁移。不同降雨强度的溅蚀团聚体粒径分布特征不同,小粒径团聚体溅蚀量大于大粒径团聚体。
- (4)总溅蚀量、上坡溅蚀量、下坡溅蚀量、净溅蚀量均随着坡度的增大而增大,10°总溅蚀量、上坡

溅蚀量、下坡溅蚀量、净溅蚀量与 5°相比分别增加 12.60%,8.76%,13.87%,16.41%。同一坡度和降雨强度的下坡溅蚀量大于上坡溅蚀量,这与坡向和重力作用关系密切。

参考文献:

[1] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展[J].地理科学,2003,23(2):230-235.

[2] Morin J, Winkel J V. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1223-1227.

[3] Legout C, Legu  dois S, Bissonnais Y L. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements[J].European Journal of Soil Science,2005,56(2):225-238.

[4] Ramos M C, Nacci S, Pla I. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces[J].Catena,2003,53(4):365-376.

[5] 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[J].农业工程学报,2014,30(3):95-103.

[6] 高学田,包忠谟.降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2001,15(3):24-26.

[7] 郑子成,何淑勤,吴发启.降雨条件下耕作方式对地表糙度的溅蚀效应[J].农业工程学报,2009,25(11):103-108.

[8] 付玉,李光录,郑腾辉,等.雨滴击溅对耕作层土壤团聚粒径分布的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):155-160.

[9] 陈浩,蔡强国.坡度对溅蚀影响的初步试验研究[J].人民黄河,1986,38(1):36-38.

[10] 江忠善,刘志.降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究[J].水土保持学报,1989,3(2):29-35.

[11] 秦越,程金花,张洪江,等.北京市褐土区降雨参数对土壤溅蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):16-20.

[12] 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[J].生态学报,2016,36(15):4708-4717.

[13] 曹忠杰,蔡景平,何建明,等.辽宁省第四次土壤侵蚀遥感普查成果分析[J].水土保持应用技术,2007,27(5):21-22.

[14] 张凯.辽西褐土耕层结构障碍因素分析及其耕作培肥措施研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.

[15] 李忠芳,唐政,李继光,等.长期施肥对辽西褐土区土壤有机碳含量和玉米产量的影响[J].土壤与作物,2013,2(4):150-156.

[16] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.

[17] 刘立权,凡胜豪,宋国献,等.辽宁省坡耕地现状与防治对策[J].中国水土保持,2015,36(4):15-18.

[18] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等.辽西地区农耕地土壤侵蚀影响因素及相关关系[J].水土保持学报,2015,29(5):13-19.

[19] 林素兰,黄毅,曹忠杰,等.辽西黄土丘陵区坡耕地土壤侵蚀研究[J].水土保持研究,2002,9(1):14-16.

[20] 年玉欣,邓继峰,李国忠,等.辽西地区沙地栽植大扁杏林对地表径流和土壤流失的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(1):65-71.

[21] 徐翠娇,郭成久,范昊明.辽宁省土石质低山丘陵区土壤侵蚀研究[J].安徽农业科学,2006,34(3):539-539.

[22] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等.辽西地区坡耕地垄膜沟耕对土壤侵蚀和作物产量的影响[J].中国农业科学,2016,49(20):3904-3917.

[23] 董婷婷,张增祥,左利君.基于 GIS 和 RS 的辽西地区土壤侵蚀的定量研究[J].水土保持研究,2008,15(4):48-52.

[24] 阜新市土地志编撰办公室.阜新市土地志[M].阜新:阜新市政府机关印刷厂,2001.

[25] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等.褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):64-69.

[26] 苏薇娜,田一梅,高波,等.人工模拟降雨装置的设计及其参数的率定[J].水土保持通报,2015,35(6):120-123.

[27] 王才,唐继业,段一贯,等.辽宁省中小河流(无资料地区)设计暴雨洪水计算方法[M].沈阳:辽宁省水文水资源勘测局,1998.

[28] Morgan R P C. Field studies of rainsplash erosion[J]. Earth Surface Processes,1978,3(3):295-299.

[29] 周一杨,王恩姮,陈祥伟.不同开垦年限黑土溅蚀与团聚体分选特征[J].应用生态学报,2009,20(10):2411-2416.

[30] Legout C, Legu  dois S, Bissonnais Y L, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J].Geoderma,2005,124(3/4):279-292.

[31] Ma R M, Li Z X, Cai C F. The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China)[J].Catena,2014,121(7):279-287.

[32] 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.

[33] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.

[34] 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.

[35] 陈正发,夏清,史东梅,等.基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J].水土保持学报,2011,25(4):6-11.

[36] 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):153-161.

[37] 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[J].土壤学报,2017,54(4):827-835.

[38] 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.

[39] 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.