

黄土土质对溅蚀特征的影响

刘柏玲^{1,2}, 蔡强国¹, 史志华², 孙莉英¹, 盛贺伟³

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070; 3. 中国科学院 水利部 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)

摘 要:土壤质地是土粒溅蚀量及溅出方式的重要影响因素。以黄土高原 4 种土壤(塬土、黑垆土、砂黄土、黄绵土)为试验用土,通过人工模拟降雨试验研究了黄土土质对溅蚀量、溅出土粒颗粒组成的影响。结果表明:(1) 溅蚀量随降雨历时增加呈幂函数趋势增加。降雨开始时溅蚀量取决于土表松散颗粒含量及土粒均匀程度。随后溅蚀量增加速率则取决于黏粒($<0.002\text{ mm}$)、细粉粒($0.002\sim0.02\text{ mm}$)及吸湿性黏土矿物含量,二者综合作用使得溅蚀量增加幅度减小。(2) 溅蚀过程中溅出土粒的粒径组成决定于供试土壤的颗粒组成, $>0.25\text{ mm}$ 颗粒含量高的土壤溅出土粒粒径分布均匀,而 $>0.25\text{ mm}$ 颗粒含量低的土壤溅出土粒集中分布于粗粉粒、细砂粒粒级内。(3) 通过溅出土粒实际与原始颗粒含量的比值可判断土壤颗粒溅出方式。供试土壤黏粒、细粉粒、粗粉粒($0.02\sim0.05\text{ mm}$)的实际与原始颗粒含量比值 <1 ,均以团粒形式溅出,不受土壤类别影响;而塬土、黑垆土砂粒的实际与原始颗粒含量的比值 >1 ,以团粒形式溅出;砂黄土、黄绵土土壤砂粒实际与原始颗粒含量比值 ≈ 1 ,以单粒形式溅出。

关键词:溅蚀; 黄土土质; 粒径分布; 颗粒溅出方式

中图分类号:S157; S152

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0001-06

Effects of Loess Soil Texture on Raindrop Splash

LIU Bailing^{1,2}, CAI Qiangguo¹, SHI Zhihua², SUN Liying¹, SHENG Hewei³

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil texture is one of the important factors on raindrop splash erosion and the form of particles splashed out. Rainfall simulation experiments with four loess soils of Lou soil, dark loessial soil, sandy loess, loessial soil, were performed to evaluate effects of soil texture on raindrop splash erosion and splashed particle size distribution (PSD). The results showed that: (1) power function were the best function to describe the splash erosion increases with the rainfall duration, at the beginning of rainfall, the raindrop splash erosion depends on the amount of loose particles on soil surface and the soil particle uniformity, and then the increase rate of raindrop splash erosion depends on the content of clay ($<0.002\text{ mm}$), fine silt ($0.002\sim0.02\text{ mm}$) and hygroscopicity clay mineral, the combination makes the increase amplitude of raindrop splash erosion decrease; (2) on the process of raindrop splash, the particle composition of splashed soil particle was determined by the particle composition of experimental bulk soil, if the content of coarse sand ($>0.25\text{ mm}$) in bulk soil was high the splashed soil had uniform distribution of particle sizes, otherwise when the content of coarse sand in bulk soil was low, the splashed soil particle concentrated distribution in coarse silt and fine sand; (3) the ratio of the splashed undispersed PSD and dispersed PSD revealed the form of particle splashed out, the undispersed/dispersed PSD ratios of clay-sized, fine-silt-sized and coarse-silt-sized particles for four experimental soils were less than 1, indicating that they were splashed out as aggregate, the undispersed/dispersed PSD ratios of sand-sized for Lou soil and dark loessial soil were more than 1, they were splashed out as aggregate, while the undispersed/dispersed PSD ratios of sand-sized for sandy soil and loessial soil were close to 1, they were splashed out as single grain.

Keywords: raindrop plash; loess soil texture; particle size distribution; the form of particle splash out

收稿日期: 2015-10-02

修回日期: 2015-11-11

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41471229; 41271304); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放资助项目(A314021402-1518)

第一作者: 刘柏玲(1991—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: liuboling2014@163.com

通信作者: 孙莉英(1978—), 女, 河北灵寿人, 助理研究员, 博士, 主要从事水沙环境风险与控制研究。E-mail: sunliying@igsnr.ac.cn

坡面土壤侵蚀过程包括降雨溅蚀和径流冲刷引起的土壤分离、泥沙输移和沉积三大过程^[1]。溅蚀作为土壤侵蚀的第一阶段,为径流输移提供物质基础。影响溅蚀的降雨特性包括雨强、降雨动能、降雨历时、降雨量等^[2]。学者通过研究得出一系列降雨特性与溅蚀量的关系方程。蔡强国等^[3]得出雨滴直径相同时溅蚀量(Y)与雨强(I)呈线性关系($Y=a+bI$),高学田等^[4]认为溅蚀量(Y)与降雨动能(E)之间具有较好的指数相关关系($Y=aE^b$)。部分学者研究了土壤特性随溅蚀的变化规律。卜崇峰等^[5]通过偏光显微镜观察溅蚀黄土纵切面土壤薄片,发现团聚体随降雨进行不断分散,土壤小颗粒增加,表层黄土结构变紧实、孔隙度明显下降。Ellison^[6]、Woodburn^[7]、范荣生等^[8]认为土壤颗粒级配决定土壤溅蚀特征。朱远达等^[9]认为 0.002~0.2 mm 内土壤颗粒是结皮形成的物质基础,>0.2 mm 土壤颗粒对结皮类型起决定性作用,且土壤团聚体的水稳性、黏土矿物类型和含量对结皮形成均有影响。分析现有研究发现学者更多关注不同粒级的颗粒被溅蚀的难易程度及土壤质地对结皮发育的影响,而对于溅出土壤颗粒的粒径组成、分布规律及不同粒级土粒的溅出方式研究并不多。黄土高原是世界高含沙水流最为发育的地区^[10],是我国土壤侵蚀研究热点区域之一。研究黄土土质对溅蚀的影响及溅出土粒的颗粒组成情况有利于进一步了解黄土溅蚀过程。

本文以黄土高原典型土壤塬土、黑垆土、黄绵土、砂黄土为研究对象,研究土壤颗粒组成、矿物组成对溅蚀特征的影响,分析溅出土粒颗粒组成及其溅出方式,以丰富坡面土壤侵蚀机理,为降雨溅蚀预报提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验用土

根据黄土高原由南到北土壤地带性分布规律^[11],试验用土分别取自杨凌(34°16'N,108°4'E,塬土)、长武(35°12'N,107°47'E,黑垆土)、安塞(36°58'N,109°20'E,黄绵土)、绥德县(37°31'N,110°16'E,砂黄土)。所有试验用土均取自农耕层 0—20 cm。土壤机械组成采用 MS 2000 型激光粒度分析仪(0.01~2 000 μm)测定,容重采用环刀法^[12]。

1.2 人工模拟降雨

人工模拟降雨试验在中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的人工降雨大厅进行,试验采用下喷式降雨系统,降雨覆盖面积为 27 m×18 m,降雨高度为 18 m。降雨系统可将水喷射至空中,受空气阻力作用破碎成不同大小

的雨滴,保证所有雨滴在落地之前都能达到最大速度,与天然降雨形成的雨滴较相似^[13]。试验降雨强度为 90 mm/h,试验前反复率定降雨系统,使得试验雨强下的均匀度达到 90%左右。

1.3 溅蚀试验装置

溅蚀试验装置为改进的摩根溅蚀盘^[14]。溅蚀盘采用白铁皮制成,直径 30 cm,高 10 cm。盘中心为直径 10 cm、高 3 cm 的圆形活动装土盘,盘底部有渗水小孔。圆形活动装土盘与溅蚀盘间存在 0.2 cm 的间隙,易于溅蚀盘内水流出。试验溅蚀盘见图 1。

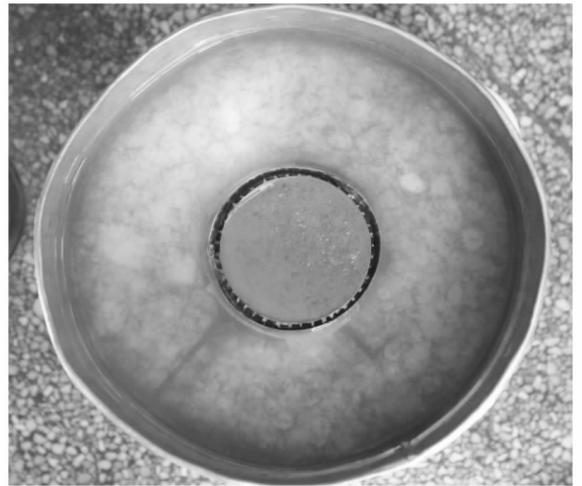


图 1 改进的摩根溅蚀盘

1.4 溅蚀试验设计与样品分析

试验前将土样自然风干并过 10 mm 铁质网筛,除去杂草和石块。填土时在圆形活动装土盘底部覆盖 1 层纱布,含水量控制在 10%左右。野外采样测得土壤容重:塬土为 1.18 g/cm³,黑垆土为 1.13 g/cm³,黄绵土为 1.13 g/cm³,砂黄土为 1.25 g/cm³,本着兼顾野外容重及试验方便的原则,人工模拟降雨试验塬土,黑垆土,黄绵土填土容重 1.13 g/cm³,砂黄土填土容重 1.25 g/cm³。试验共设置 7 场降雨,降雨历时分别为 5,10,15,20,30,40,50 min。每一降雨历时下每种土摆放 8 个溅蚀盘,即每场雨摆 32 个溅蚀盘。

每场降雨开始时首先调试雨强,待雨强稳定后摆入 32 个溅蚀盘,降雨结束后取出活动装土盘,慢慢倾倒溅蚀盘上部清水,将浑浊液无损的转入铁盒内。每种土选择 4 个铁盒用烘干法测定溅蚀量。另外 4 个铁盒内的浑浊液采用 MS 2000 型激光粒度分析仪(0.01~2 000 μm)测定溅出土粒的实际泥沙颗粒含量,经过 H₂O₂ 分散后测定溅出土粒原始颗粒含量^[15]。

通过溅出土粒同一粒级实际泥沙颗粒含量(分散前)与原始颗粒的含量(分散后)的比值可分析颗粒是以原始粒子还是以团粒形式运动。实际(分散前)与原始(分散后)颗粒含量的比值 ≈ 1 表示颗粒被雨滴

分散后以原始粒子的形式运动;实际(分散前)与原始(分散后)颗粒含量的比值<1 表示颗粒是以团聚体的形式存在,以团粒形式搬运;实际(分散前)与原始(分散后)颗粒含量的比值>1 表示此粒级内的土壤颗粒由小粒级的颗粒团聚而成,以团粒形式运动^[16]。

2 结果与分析

2.1 土壤基本性质对溅蚀量的影响

如图 2 所示,整体来看,4 种土壤溅蚀量与降雨历时的关系符合幂函数回归趋势,拟合方程及 R^2 见表 1,供试土壤溅蚀量随降雨历时的增加而增加,而增加的幅度逐渐减小,最终趋于稳定。Woodbarn^[7]认为溅蚀率随降雨历时的延长呈指数递减。蔡强国等^[17]研究结果表明溅蚀量随降雨历时变化过程符合生长曲线函数,可用分段指数曲线进行拟合。高学田等^[4]认为溅蚀量随降雨历时的增加呈幂函数增加。不同学者因试验所用土壤、降雨历时长短等试验条件不同得出的拟合函数不同,但都说明溅蚀量随降雨历时增加呈曲线变化,最终趋于稳定。

0~10 min 溅蚀量迅速增加。降雨刚开始土盘表面存在很多松散颗粒,雨滴打击土表使得松散颗粒首先发生跃移被溅蚀出去,此时雨滴大部分与土粒直接接触,溅蚀量取决于降雨动能^[18]。黄绵土、砂黄土较塬土、黑垆土颗粒均匀,在雨滴直接分散搬运土粒阶段塬土、黑垆土明显占优势。降雨历时 5 min 时,

在 0.05 的显著水平下 4 种土壤溅蚀量差异显著($p=0.002$),二者的溅蚀量(塬土:206.10 g/m²,黑垆土:172.91 g/m²)比黄绵土,砂黄土(黄绵土:129.94 g/m²,砂黄土:133.12 g/m²)高。

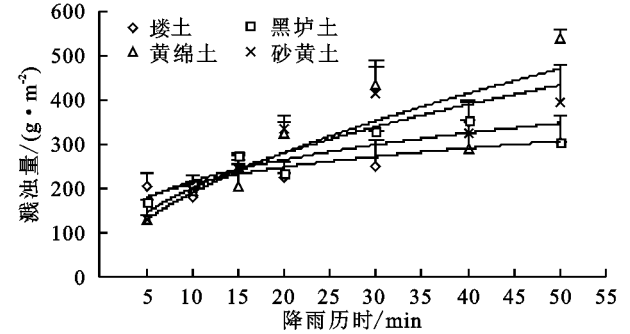


图 2 雨强为 90 mm/h 时不同降雨历时溅蚀量

表 1 雨强为 90 mm/h 时溅蚀量拟合方程参数

| 土壤 | 拟合方程 | R^2 |
|-----|--------------------|-------|
| 塬土 | $y=124.85x^{0.23}$ | 0.69 |
| 黑垆土 | $y=110.69x^{0.29}$ | 0.85 |
| 黄绵土 | $y=52.72x^{0.56}$ | 0.84 |
| 砂黄土 | $y=67.64x^{0.48}$ | 0.88 |

降雨历时 10~15 min 时,4 种土壤溅蚀量差异不显著($p=0.445$)。此阶段土壤表层松散颗粒已被溅蚀出去,随着含水率提高,土壤粘聚力和内摩擦力减小,同时雨滴打击及快速湿润引起团聚体内部空气爆破使得团聚体破碎,大团聚体破碎形成微团聚体和更细小颗粒,土壤结构受到破坏^[19-20]。雨滴能量主要用于破坏土壤结构,4 种土壤溅蚀量没有明显区别(表 2—3)。

表 2 4 种土壤溅蚀量两两比较(LSD)显著性

| 土壤 | | 降雨历时 | | | | | | |
|-----|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 40 min | 50 min |
| 塬土 | 黑垆土 | 0.786 | 0.121 | 0.055 | 0.739 | 0.072 | 0.855 | 0.102 |
| | 黄绵土 | 0.003 | 0.525 | 0.160 | 0.003 | 0.001 | 0.100 | 0.016 |
| | 砂黄土 | 0.004 | 0.369 | 0.910 | 0.005 | 0.001 | 0.563 | 0.990 |
| 黑垆土 | 塬土 | 0.786 | 0.121 | 0.055 | 0.739 | 0.072 | 0.855 | 0.102 |
| | 黄绵土 | 0.002 | 0.330 | 0.006 | 0.004 | 0.045 | 0.073 | 0.000 |
| | 砂黄土 | 0.003 | 0.476 | 0.066 | 0.006 | 0.047 | 0.462 | 0.068 |
| 黄绵土 | 塬土 | 0.003 | 0.525 | 0.160 | 0.003 | 0.001 | 0.100 | 0.016 |
| | 黑垆土 | 0.002 | 0.330 | 0.006 | 0.004 | 0.045 | 0.073 | 0.000 |
| | 砂黄土 | 0.880 | 0.786 | 0.135 | 0.696 | 0.986 | 0.344 | 0.010 |
| 砂黄土 | 塬土 | 0.004 | 0.369 | 0.910 | 0.005 | 0.001 | 0.563 | 0.990 |
| | 黑垆土 | 0.003 | 0.476 | 0.066 | 0.006 | 0.047 | 0.462 | 0.068 |
| | 黄绵土 | 0.880 | 0.786 | 0.135 | 0.696 | 0.986 | 0.344 | 0.010 |

注:均值差的显著水平为 0.05。

降雨历时 20 min 之后 4 种土壤溅蚀量出现稳定趋势,溅蚀量显著性及其标注见表 2—3。土壤的颗粒组成、矿物组成均会影响溅蚀量。

颗粒组成对 20 min 后的溅蚀量起决定作用。研

究指出使溅蚀量达到最大值的粒径范围 0.105~0.15 mm,小于此范围的土样黏粒含量多,湿润条件下易形成致密层使得溅蚀量降低;大于此范围的土样水稳性团聚体含量多,不易被分离溅散溅蚀量低^[21]。塬土、黑

垆土黏粒($<0.002\text{ mm}$)、细粉粒($0.002\sim0.02\text{ mm}$)含量相对高(表 4),在相同降雨条件下具备较先形成致密层的物质基础,致密层形成后表层密度增加,土壤不易溅出;此外致密层不利于水分入渗,装土盘表层积水同样降低雨滴打击土表的能量,减少溅蚀量。砂粒含量高土壤渗透性好,黄绵土、砂黄土砂粒($0.05\sim0.25\text{ mm}$)含量较高(表 4),表层水分快速下渗避免在活动装土盘表面大量积水,较少地消耗雨滴能量,因此黄绵土、砂黄土的溅蚀量高于另外两种土。

表 3 溅蚀量显著性标注

| 土壤类型 | 降雨历时 | | | | | | |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 40 min | 50 min |
| 垆土 | a | a | ab | a | a | a | a |
| 黑垆土 | a | a | ac | a | a | a | a |
| 黄绵土 | b | a | b | b | b | a | b |
| 砂黄土 | b | a | bc | b | b | a | ac |

注:表中 a,b,c 为显著性标记,字母相同表示不显著,字母不同表示显著。

矿物组成也会影响溅蚀量。研究认为土壤中吸湿性黏土矿物吸水迅速膨胀使得土壤孔隙变细,为雨滴打击土壤团聚体破碎形成的小颗粒迅速堵塞孔隙提供条件,从而有利于结皮形成^[9]。试验土壤黏土矿物含量见表 5,高吸湿性和胀缩性黏土矿物含量垆土,黑垆土高于砂黄土、黄绵土,同样降雨下黏土矿物吸水膨胀阻断、填充土壤孔隙的速度也遵循此规律,溅蚀量黄绵土、砂黄土大于垆土、黑垆土。

为了尽可能与野外采土容重一致,本试验设计填土容重砂黄土(1.25 g/cm^3)大于另外 3 种土。土壤干容重越大土体结构越密实,土壤抗剪强度越大^[22]。容重对土壤入渗能力有较大影响,土壤入渗能力随容重增大而递减^[23]。土壤抗剪强度越大,土壤结构越稳定,抗雨滴打击能力越强,溅蚀量越小。同样土壤入渗能力越小,表层土壤含水量越大,相同降雨条件下溅蚀量越少。因此作者推测若砂黄土与其他 3 种土容重设置相同,溅蚀量要比本试验测得量高,与其他土壤的差异更显著。

2.2 不同土质黄土溅出土粒颗粒组成

由图 3 可看出,垆土、黑垆土溅出土粒各粒级内颗粒含量相差相对小,黄绵土、砂黄土各粒级颗粒含量相差较大。各降雨历时下黄绵土的 82%、砂黄土的 78% 及以上的土粒分布在粗粉粒($0.02\sim0.05\text{ mm}$)和细砂粒两个粒级内。垆土、黑垆土溅出土粒在黏粒、细粉粒、粗砂粒($>0.25\text{ mm}$)粒级内多于黄绵土、砂黄土。原土壤实际(分散前)颗粒含量见表 4,垆土、黑垆土中 $>0.25\text{ mm}$ 的土粒含量分别为 32.19%,14.16%,且多以团聚体形式存在,被雨滴打碎后补充给小粒级土粒,因此溅出土粒分散。

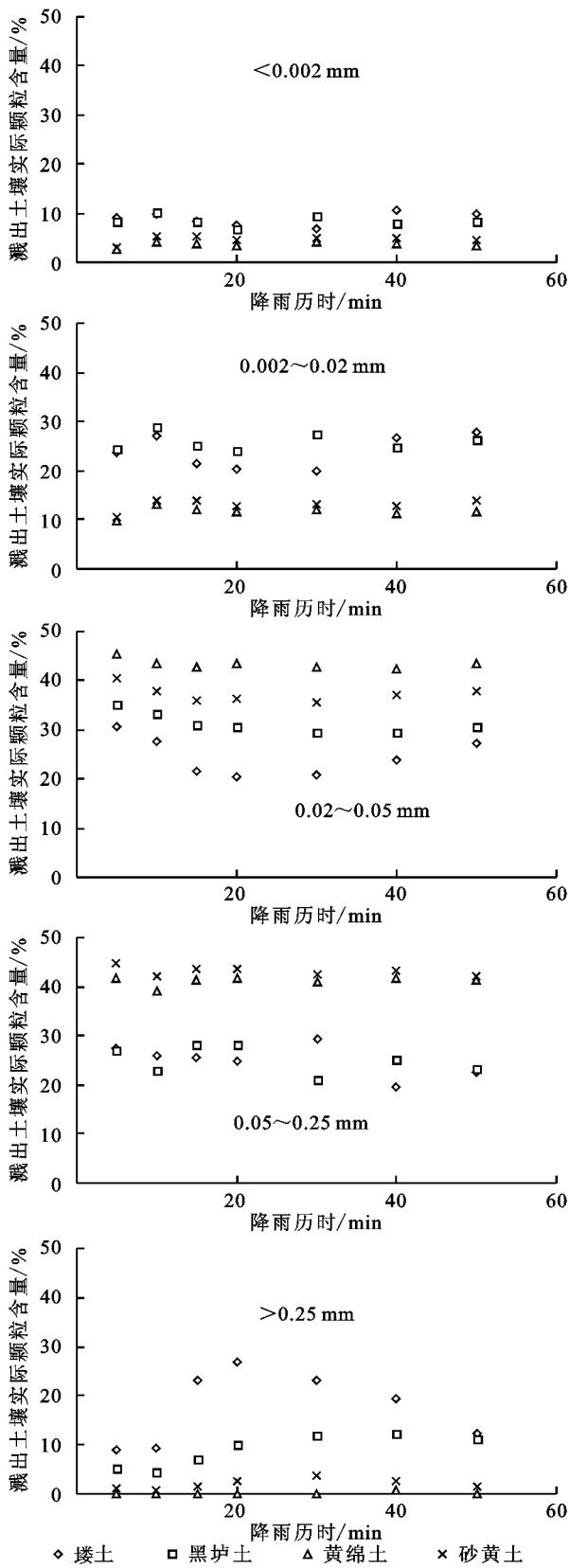


图 3 溅出土粒实际(分散前)颗粒组成

随降雨历时的增加 $>0.25\text{ mm}$ 的土粒含量先增加后减小,垆土在 20 min 时达到最大值,黑垆土和砂黄土在 30 min 时达到峰值(图 3),说明垆土的土壤溅蚀发展比其他 3 种土壤快,这从图 2 溅蚀量变化趋势线也可看出。

表 4 原始土壤分散前后各粒级颗粒含量 %

| 土壤类型 | | 粒级 | | | | |
|------|-----|-----------|---------------|--------------|--------------|----------|
| | | <0.002 mm | 0.002~0.02 mm | 0.02~0.05 mm | 0.05~0.25 mm | >0.25 mm |
| 分散前 | 塋土 | 4.75 | 12.84 | 17.70 | 32.53 | 32.19 |
| | 黑垆土 | 7.13 | 18.92 | 27.23 | 32.57 | 14.16 |
| | 黄绵土 | 6.42 | 15.23 | 43.48 | 34.87 | 0.00 |
| | 砂黄土 | 7.69 | 15.45 | 31.75 | 38.52 | 6.59 |
| 分散后 | 塋土 | 25.97 | 41.51 | 25.80 | 6.72 | 0.05 |
| | 黑垆土 | 13.78 | 27.11 | 40.40 | 18.71 | 0.00 |
| | 黄绵土 | 7.23 | 15.33 | 41.80 | 35.64 | 0.04 |
| | 砂黄土 | 11.21 | 18.21 | 35.98 | 34.60 | 0.02 |

| 表 5 土壤黏土矿物含量 % | | | | |
|----------------|----|-----|-----|-----|
| 黏土矿物 | 塋土 | 黑垆土 | 黄绵土 | 砂黄土 |
| 伊蒙混层 | 73 | 70 | 56 | 62 |
| 伊利石 | 16 | 17 | 29 | 23 |
| 高岭石 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| 绿泥石 | 6 | 8 | 9 | 9 |
| 混层比 | 40 | 40 | 50 | 50 |

2.3 不同土质黄土土粒的溅出方式

4 种土壤溅出土粒不同粒级实际与原始颗粒含量的比值随降雨历时变化见图 4,黏粒、细粉粒范围内 4 种土壤的实际与原始颗粒含量的比值均<1,说明土粒以团粒的形式溅出,加入分散剂后分散为此范围粒径的颗粒。粗粉粒粒级内降雨历时 5 min 时 4

种土壤溅出土粒实际与原始颗粒含量比值>1,降雨历时 10 min 开始该比值<1,说明小降雨历时这一粒径溅出的土粒本身是由黏粒和细粉粒团聚而成的,降雨时以团粒的形式溅出,加分散剂后分散为更小粒径的颗粒。对于细砂粒而言,塋土、黑垆土的实际与原始颗粒含量的比值>1,说明这两种土壤在细砂范围内的土粒并不是单粒,而是由黏粒和粉粒形成的团聚体,并以团粒形式搬运;而砂黄土、黄绵土实际与原始颗粒含量比值≈1,说明砂粒粒级内的黄绵土、砂黄土以单粒形式存在。塋土在各个粒径范围内实际与原始颗粒含量比值距离 1 最远,说明相较于其他 3 种土塋土更多以团聚体形式存在以团粒形式溅出。

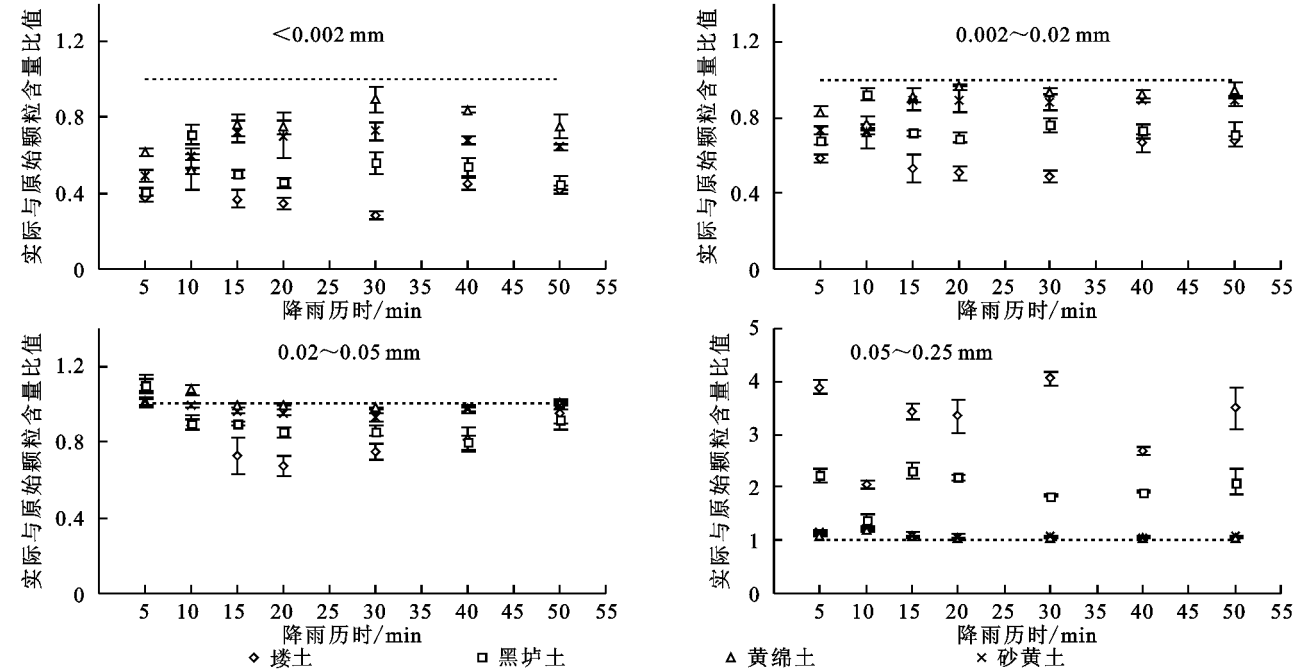


图 4 溅出土粒不同粒级实际与原始颗粒含量比值

3 结论

(1) 溅蚀量随降雨历时增加呈幂函数趋势增加,最终趋于稳定。降雨开始时溅蚀量取决于土表松散

颗粒含量及土粒均匀程度,松散颗粒越多越不均匀的土壤溅蚀量越大。随着降雨进行土壤结构遭到破坏,雨滴打击下黏粒、细粉粒在土表形成致密层,吸湿性黏土矿物吸水膨胀阻断、填充土壤孔隙,二者综合作

用使得土壤表面密实度增加水分入渗率降低,溅蚀量增加幅度减小。

(2) 溅出土粒各粒级颗粒含量取决于供试土壤的颗粒组成,供试土壤砂粒含量高并以团粒形式存在的土壤如塋土,溅出土粒各粒级颗粒含量相差相对小,而供试土壤砂粒含量低并以单粒形式存在的土壤如砂黄土,溅出的土粒大部分集中存在于粗粉粒、细砂粒粒径内。

(3) 供试土壤溅出土粒中黏粒、细粉粒、粗粉粒级内的土壤颗粒是以团粒形式溅出的;砂粒粒级内塋土,黑垆土是以团聚体形式存在,以团粒形式溅出;而砂黄土,黄绵土的原始土粒是单粒并以单粒形式溅出。

参考文献:

- [1] Morgan R P C, Quinton J N, Rickson R J. Modeling methodology for soil-erosion assessment and soil conservation design the eurosem approach[J]. Outlook on Agriculture, 1994,23(1):5-9.
- [2] 韩学坤,吴伯志,安瞳昕,等. 溅蚀研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(4):46-51.
- [3] 蔡强国,陈浩. 降雨特性对溅蚀影响的初步试验研究[J]. 中国水土保持,1986(6):41-42.
- [4] 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.
- [5] 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[J]. 土壤学报,2009,46(1):16-23.
- [6] Ellison W D. Soil erosion studies Part I [J]. Agricultural Engineering,1947,28:145-147.
- [7] Woodburn R. The effect of structural condition on soil detachment by raindrop action[J]. Agricultural Engineering,1948,29:154-156.
- [8] 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.
- [9] 朱远达,蔡强国,胡霞,等. 土壤理化性质对结皮形成的影响[J]. 土壤学报,2004,41(1):13-19.
- [10] 闫云霞,许炯心. 黄土高原地区侵蚀产沙的尺度效应研究初探[J]. 中国科学:D 辑,2006,36(8):767-776.
- [11] 李玉山,韩仕峰,汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1985(2):1-17.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
- [13] 张光辉,刘宝元,李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J]. 水土保持通报,2008,27(6):56-60.
- [14] 胡霞,蔡强国,刘连友,等. 人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征[J]. 土壤学报,2005,42(3):504-507.
- [15] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(3):917-929.
- [16] Martinez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J]. Geomorphology,2002,45(3/4):261-275.
- [17] 蔡强国,陈浩. 影响降雨击溅侵蚀过程的多元回归正交试验研究[J]. 地理研究,1989,8(4):28-35.
- [18] 张科利. 坡面溅蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究[J]. 地理科学,1998,18(6):561-566.
- [19] 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[J]. 农业工程学报,2008,24(5):46-50.
- [20] Bissonnais Y L E. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of soil science,1996,47(4):425-437.
- [21] 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.
- [22] 赵晓光,石辉. 水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J]. 干旱区地理,2003,26(1):12-16.
- [23] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):40-45.