

人工模拟降雨条件下红壤团聚体流失特征研究

曹丹妮, 杜一凡, 郝好鑫, 郭忠录, 占海歌

(华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070)

摘要: 以第四纪红粘土发育红壤为研究对象, 通过室内模拟降雨和放水冲刷组合试验, 研究了不同降雨强度(0, 60, 90, 120 mm/h)和放水流量(5, 7.5 L/min)下红壤坡面团聚体流失特征, 分析了团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)和平均重量比表面积(MWSSA)的变化特征。结果表明: 侵蚀泥沙中 <0.05 mm微团聚体初始含量在19%~58%之间, 随产流时间的延长先降低后趋于稳定; >0.25 mm大团聚体含量最高, 随产流时间的延长先升高后趋于稳定。相同降雨强度下, 当放水流量由5 L/min增大到7.5 L/min时, 团聚体MWD和GMD有所增大, D 和MWSSA有所减小。无降雨时, 泥沙中团聚体的MWD和GMD低于有降雨时的MWD和GMD, 而 D 和MWSSA高于有降雨时的 D 和MWSSA。相同放水流量下, 随着降雨强度增强, 团聚体的MWD和GMD呈增大趋势, D 和MWSSA呈减小趋势。

关键词: 红壤; 团聚体流失; 侵蚀过程; 放水流量; 分形维数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0141-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.023

Aggregate Loss Characteristics on Red Soil Slope Under the Combination of Rainfall Simulator

CAO Danni, DU Yifan, HAO Haoxin, GUO Zhonglu, ZHAN Haige

(Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: To understand the characteristics of erosive aggregate loss in tropical and subtropical zones, a combination experiment of two discharge flow (5 L/min and 7.5 L/min) and four simulated rainfall intensities (0 mm/h, 60 mm/h, 90 mm/h, 120 mm/h) was conducted. The variation characteristics of aggregates, such as mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension (D), mean weight soil specific area (MWSSA), were analyzed. The results showed that: the aggregates of <0.05 mm occupied 19%~58% of the total sediment during the early phase of the event, and the tendency declined first then stabilized with rainfall duration. The content of >0.25 mm aggregates in erosive sediment was highest, and the tendency increased first and stabilized later, with the rainfall duration. When the discharge flow increased from 5 L/min to 7.5 L/min under the same rainfall intensity, MWD and GMD of aggregates increased, while D and MWSSA decreased. MWD and GMD of aggregates in the sediments without rainfall were lower than that in the rainfall; however, D and MWSSA of aggregates in the sediments without rainfall were higher than those with rainfall. Under the condition of the same rainfall, MWD and GMD increased as rainfall intensity increased, while D and MWSSA decreased.

Keywords: red soil; aggregates loss; soil erosion process; discharge flow; fractal dimension

坡面侵蚀包括雨滴击溅和径流冲刷引起的土壤颗粒分离、泥沙输移和沉积三大过程^[1]。坡面侵蚀泥沙颗粒主要来源于表土团聚体的破碎, 而雨滴打击和坡面径流为破碎团聚体的流失提供了动力条件^[2-4]。温磊磊等^[5]以黑土为研究对象, 发现当降雨强度为

30 mm/h时, 团聚体流失以 <0.25 mm 粒级团聚体为主, 其占团聚体流失总量的90%; 马仁明等^[6]研究表明, 团聚体受雨滴机械打击破碎主要发生在降雨的最初阶段, 随着降雨能量的不断累积, >0.25 mm 团聚体百分含量随降雨时间增加呈幂函数减小。Yang

等^[7]研究发现,在施加外力条件下,团聚体粒径越大,团聚体越容易破碎。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,对土壤侵蚀有着重要影响^[8]。侵蚀泥沙中团聚体分布特征可以更好的反应被侵蚀土壤的质地、抗侵蚀性能等,对于揭示土壤侵蚀机理、侵蚀过程等具有重要的科学价值。

我国南方红壤丘陵区水热资源丰富,土壤团聚体结构良好,在农业生产和经济发展中占有重要地位。由于土地资源的不合理开发与利用,导致该地区土壤侵蚀加剧,水土流失日益严重。目前关于红壤坡面土壤颗粒流失特征的研究主要集中在降雨强度、秸秆覆盖、坡度、产沙强度等方面^[9-11],这些研究从不同角度探讨了侵蚀泥沙量与侵蚀的关系。但针对降雨和放水冲刷共同作用下红壤坡面侵蚀过程中团聚体流失特征的研究还很少。近年来,采用分形维数作为定量描述侵蚀泥沙结构特征成为热点。鉴于此,本文以第四纪红粘土发育的红壤为研究对象,分析了不同降雨强度和放水流量下,红壤坡面团聚体流失规律和分形特征,进一步阐明红壤坡面侵蚀过程,为我国南方红壤坡地水土流失防治提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 土样采集与分析

试验用土采自湖北省咸宁市贺胜桥镇的 0—20 cm 耕层土壤(114°06′—114°43′E, 29°39′—30°02′N)。土壤类型为第四纪红粘土发育的红壤,其机械组成(美国农业部土壤质地分级制)为:砂粒(0.05~2 mm)含量 12.12%,粉粒(0.002~0.05 mm)含量 44.40%,黏粒(<0.002 mm)含量 43.48%;耕层土壤容重为 1.35 g/cm³。

1.2 试验设计与方法

室内模拟降雨试验于 2016 年 4 月在华中农业大学模拟降雨大厅进行,采用垂直旋转下喷式自动模拟降雨系统。在具体试验中,降雨高度为 10 m,降雨强度变化范围为 15~220 mm/h,降雨均匀度大于 90%。试验土槽为自行设计的移动可变坡度钢质土槽,长、宽、深分别为 3.00,0.50,0.40 m。在试验土槽下端设径流收集装置,用于采集试验过程中的泥沙径流。

土槽填土之前在其底部铺设一层 20 cm 厚的细沙,沙层上部铺一层透水粗面纱布,以确保下垫面土壤性质的变异性达到最小,然后在细沙上分层填 15 cm 厚的试验用土,边填土边压实。每次在装下一层土样前先将表土打毛,防止出现分层现象。装填土壤容重大约控制在 1.35 g/cm³,接近田间自然状况。每次试验前先将土壤表面缓慢浸水,用土壤水分快速测定仪测得土壤含水率下降至 30%时开始试验。

试验设计 2 个放水流量(5,7.5 L/min),4 个降

雨强度(0,60,90,120 mm/h),1 个坡度(10°),每个试验处理重复 2 次。人工模拟降雨试验和放水冲刷试验同时进行。试验时待坡面产流后,开始计时,同时接取第一个泥沙样品。试验产流时间为 45 min,前 6 min 每隔 1 min 接 1 次样,6~30 min 每隔 3 min 接 1 次样,30~45 min 每隔 5 min 接 1 次样,接样时间为 20 s。待样品澄清后用细胶管导出上层清液,并记录每次采样的体积。试验结束后,用烘干法测定泥沙质量,湿筛法测定各粒级团聚体含量。

1.3 数据处理

为反映侵蚀泥沙中团聚体的流失特征,计算泥沙中团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和平均重量比表面积(MWSSA)。其公式为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times w_i}{w_0} \quad (1)$$

$$GMD = \exp \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \ln x_i}{w_0} \quad (2)$$

$$MWSSA = \sum_{i=1}^n \frac{6w_i}{i\rho_i \times x_i} \quad (3)$$

式中: $\rho_1 \dots \rho_n = 2.65 \text{ g/cm}^3$; i 为分级团聚体组别; n 为分级团聚体粒级总数; x_i 为某一级团聚体平均直径(mm); w_i 为某一级团聚体重量(g); w_0 为各粒级团聚体的质量之和(g)。

土壤作为一种由不同颗粒组成、具有不规则形状自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特征^[12]。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其分布状况是影响土壤性质的一个重要因素^[13-15]。研究表明,团聚体的分形维数不仅能够反映侵蚀泥沙中团聚体粒径大小分布,而且还能表征侵蚀土壤质地、抗冲性以及土壤肥力等^[16]。因此,利用分形维数来描述侵蚀泥沙中流失团聚体的变化规律等具有积极的应用意义。本文采用杨培岭等^[17]提出的以不同级别团聚体质量分布表征的土壤分形模型。其公式为:

$$\left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} = \frac{w(\delta < d_i)}{w_0} \quad (4)$$

等式两边取对数得:

$$D = 3 - \lg \frac{\left(\frac{w(\delta < d_i)}{w_0} \right)}{\lg \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)} \quad (5)$$

式中: $w(\delta < d_i)$ 为粒径小于 d_i 的团聚体累计质量(g)。 d_i 为各个粒级的最大粒径($i=1,2,\dots$)(mm); $d_{\max}$ 为最大粒级的粒径(mm)。以 $\lg \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)$ 为自变量, $\lg \frac{w(\delta < d_i)}{w_0}$ 为因变量进行线性拟合,计算出其斜率 $3-D$,最后由斜率推算出分形维数 D 。

2 结果与分析

2.1 团聚体粒径变化特征

由图1可知,坡面侵蚀过程中,粒径 $<0.05\text{ mm}$ 的微团聚体初始含量较高,随产流时间的延长其含量先降低后趋于稳定,原因是随着产流时间的延长,坡面径流逐渐增多,径流携沙能力增强,团聚体的破坏方式由雨滴击溅转变为水流剪切、搬运,导致侵蚀泥沙中微团聚体含量降低。 $0.05\sim0.105\text{ mm}$ 的团聚体含量最低,平均值为 5.06% ,随产流时间的延长分布较稳定,这可能与供试土壤本身性质有关,因为供试土壤中,砂粒含量最少。 $1\sim2\text{ mm}$ 的团聚体含量随产流时间的延长先升高再降低之后趋于稳定。 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体被认为是土壤中最好的结构体,称为土壤团粒结构体,是维持土壤结构稳定的基础^[18]。从图1可以看出,侵蚀泥沙中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量最高,平均值在 50% 以上,随产流时间的延长,其含量先升高,大约在 30 min 后趋于稳定,原因可能是随产流时间的延长,土壤结皮破坏,形成浅沟,径流冲刷力增大,搬运较大的团聚体,侵蚀泥沙中 $>0.25\text{ mm}$ 大团聚体含量增大; 30 min 后,细沟发育比较稳定,坡面侵蚀由原来的细沟侵蚀变成细沟间侵蚀,此阶段侵蚀泥沙主要来源于薄层水流对溅散土粒的输移和对土壤表面的层状剥蚀,所以侵蚀泥沙中 $>0.25\text{ mm}$ 大团聚体含量分布比较稳定。

同一降雨强度下,当放水流量由 5 L/min 增大到 7.5 L/min 时,侵蚀泥沙中 $<0.05\text{ mm}$ 的微团聚体含量有减小趋势; $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体含量有增大趋势。随着降雨强度增大,泥沙中 $<0.05\text{ mm}$ 团聚体初始含量逐渐减小; $1\sim2\text{ mm}$ 团聚体含量显著增加; $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量逐渐增大,且增加到峰值的时间越短。但是,当放水流量为 7.5 L/min 、降雨强度增加到 120 mm/h 时,泥沙中 $<0.05\text{ mm}$ 的微团聚体所占比例明显大于 90 mm/h ,而 $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体所占比例小于 90 mm/h 。

2.2 富集率

富集率(enrichment ration, ER)被广泛用于描述土壤侵蚀过程中的养分富集,同时也可以用来表征侵蚀泥沙中各粒级团聚体分选及其严重程度。某一粒级团聚体的富集率等于它在泥沙中的含量和在相同质量原状土壤中的含量之比^[19]。当 $ER<1$ 时,说明试验过程中主要消耗富集的是泥沙原始颗粒;当 $ER>1$ 时,与原状土壤相比,泥沙中该粒级团聚体含量显著增加。

不同试验条件下各粒级团聚体富集率有所不同。当放水流量为 5 L/min 时,4种降雨强度下侵蚀泥沙

中 $<0.05\text{ mm}$ 团聚体富集率的平均值分别为 $0.41, 0.45, 0.39, 0.38$;当放水流量为 7.5 L/min 时,4种降雨强度下侵蚀泥沙中 $<0.05\text{ mm}$ 团聚体富集率的平均值分别为 $0.38, 0.34, 0.33, 0.37$ 。说明侵蚀泥沙中粒径 $<0.05\text{ mm}$ 团聚体所占比例比其在原状土壤中所占比例小。当放水流量为 5 L/min 时,4种降雨强度下侵蚀泥沙中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体富集率的平均值分别为 $3.48, 3.50, 3.72, 3.93$;当放水流量为 7.5 L/min 时,4种降雨强度下侵蚀泥沙中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体富集率的平均值分别为 $3.62, 4.09, 4.05, 4.02$ 。进一步说明侵蚀泥沙中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体所占比例较大。此外,当放水流量由 5 L/min 增大到 7.5 L/min ,粒径 $<0.05\text{ mm}$ 团聚体富集率呈减小趋势;而粒径 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体富集率呈增大趋势。

2.3 团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)特征

图2、图3分别是不同试验条件下团聚体的MWD和GMD随产流时间的变化特征曲线。从图2和图3可以看出,随着产流时间的延长,团聚体MWD和GMD都呈先升高后稳定趋势。产流初期,团聚体MWD和GMD较小,一是产流初期,雨滴击溅作用较强,二是此时坡面实际径流量较小,搬运泥沙能力较弱,导致侵蚀泥沙中 $<0.05\text{ mm}$ 的微团聚体含量较高;随着产流时间的延长,侵蚀泥沙中 $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体增加,导致流失团聚体的MWD和GMD增大;细沟发育稳定后,泥沙中各粒级团聚体分布比较稳定,因此在降雨后期,MWD和GMD趋于稳定。

同一降雨强度下,当放水流量由 5 L/min 增大到 7.5 L/min 时,团聚体的MWD和GMD有所增大。无降雨时侵蚀泥沙团聚体MWD和GMD低于有降雨时的MWD和GMD。随着降雨强度增大,团聚体的MWD和GMD总体上呈增大趋势,同时其初始含量也有所增大。但是,当放水流量为 7.5 L/min 、降雨强度为 120 mm/h 时,团聚体的MWD和GMD明显小于 90 mm/h 。此外,由图2可知,当降雨强度为 60 mm/h ,放水流量由 5 L/min 增大到 7.5 L/min 时,泥沙中团聚体的MWD增加率最大,增加了 36.28% 。

2.4 团聚体分形维数(D)和平均重量比表面积(MWSSA)特征

由图4可知,团聚体分形维数在 $2.55\sim2.91$ 之间,平均值为 2.73 ,相比丁扬等^[20]通过对碳酸盐褐土研究发现土壤团粒结构的粒径分布分形维数在 $2.22\sim2.60$ 之间的结果较大,原因可能是试验所用土壤不同。褐土机械组成中粉粒含量多,而第四纪红粘土发育的红壤中黏粒含量多。

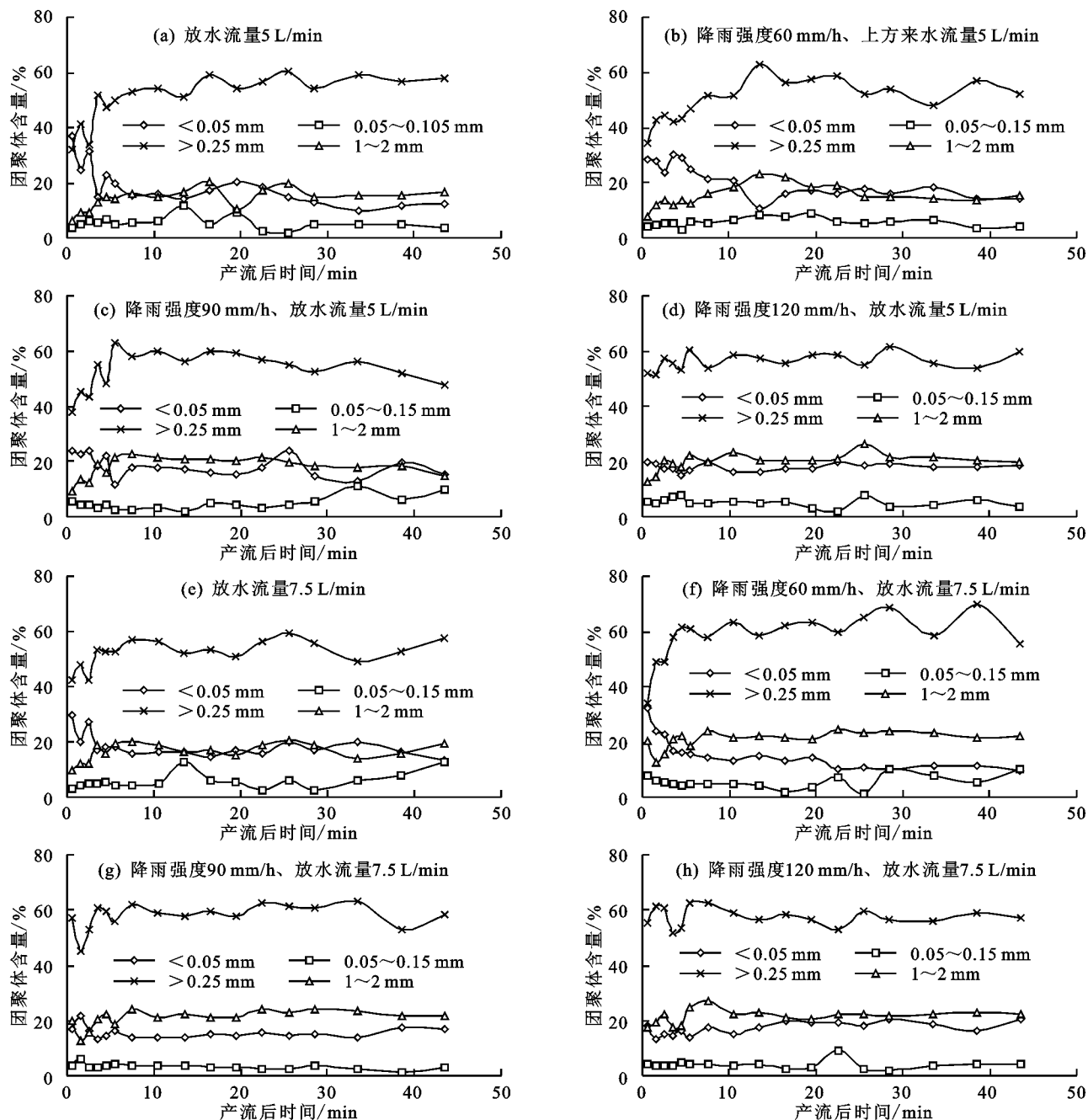


图 1 团聚体含量随时间的变化

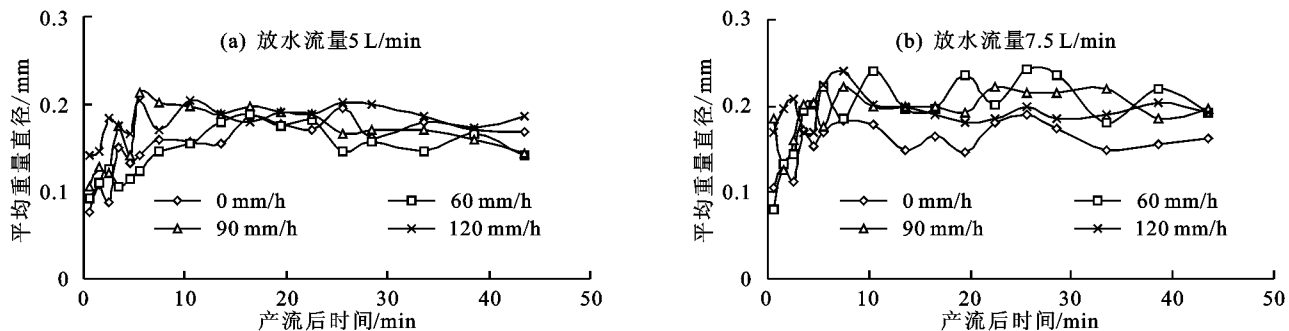


图 2 不同试验条件下平均重量直径变化

随着产流时间的延长,团聚体 D 和 $MWSSA$ 先降低后趋于稳定。从图 4、图 5 可以看出, D 和 $MWSSA$ 变化特征在一定程度上可以表征溅蚀、面蚀、细沟侵蚀、细沟间侵蚀等坡面侵蚀的几个阶段。

产流初期,雨滴击溅作用较强,径流搬运能力较弱,侵蚀泥沙中 <0.05 mm 的微团聚体较多, D 和 $MWSSA$ 较大;之后,由于土壤表面形成“结皮”,导致侵蚀泥沙中 <0.05 mm 的微团聚体减少, D 和 $MWSSA$

减小;随着侵蚀的发展,坡面逐渐出现跌坎,侵蚀泥沙中各粒级团聚体分布不稳定, D 和 $MWSSA$ 波动较大;当坡面细沟发育稳定后,侵蚀泥沙中各粒级团聚体含量分布比较稳定, D 和 $MWSSA$ 趋于稳定。

同一降雨强度下,当放水流量由 5 L/min 增大到 7.5 L/min 时, D 和 $MWSSA$ 都有所降低。可能

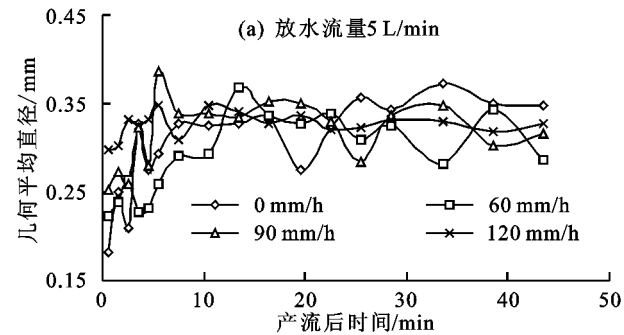


图 3 不同试验条件下几何平均直径变化

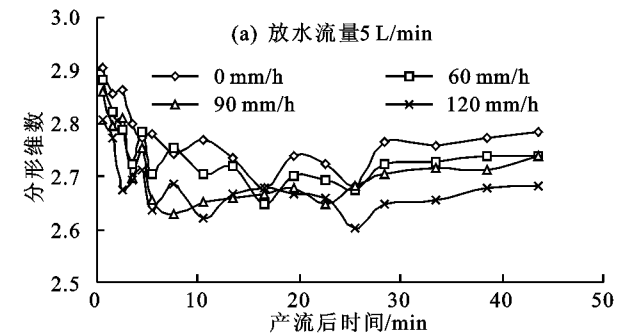


图 4 不同试验条件下分形维数变化

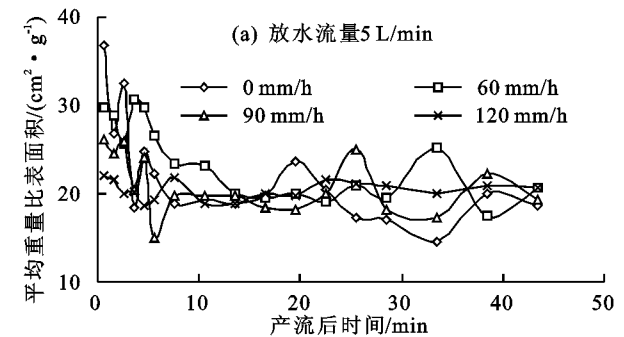
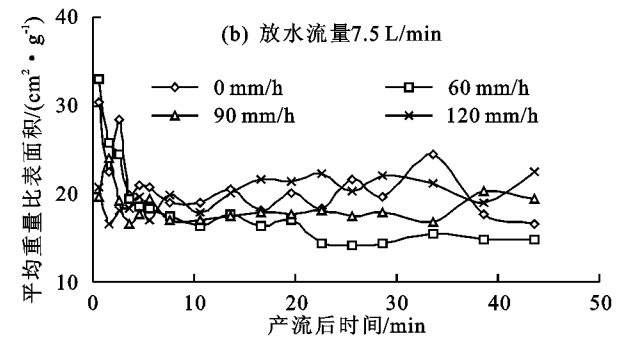
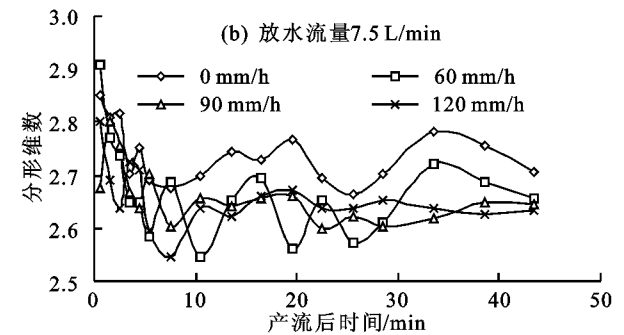
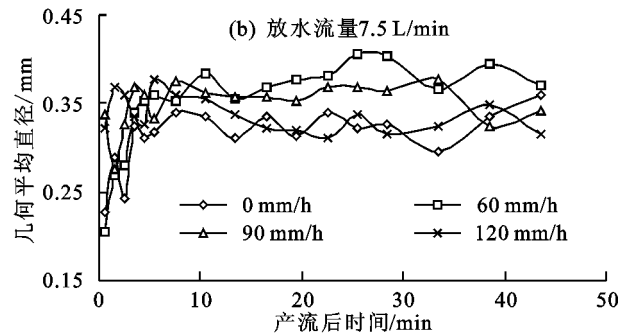


图 5 不同试验条件下平均重量比表面积变化

3 讨论

坡面侵蚀过程中土壤各粒径团聚体流失量可直接反映表土团聚体的破碎程度。降雨过程中,随着雨滴对团聚体连续打击作用,机械外力累积能量逐渐克服团聚体中胶结物质胶结力的影响,较大的团聚体逐渐破碎为较小的团聚体^[8]。本文研究结果表明,坡面侵蚀过程中,粒径 <0.05 mm 的微团聚体初始含量较高,一方面由于径流对泥沙具有分选作用,优先携带这一粒径的泥沙;另一方面是因为降雨初期,雨滴击溅作用较强,使大团聚体被溅散,分散成更多小团聚体。侵蚀泥沙中 >0.25 mm 的大团聚体含量最高,平均值在 50% 以上,一方面表明原状土具有良好

是因为当放水流量增大时,导致地表径流携沙能力增强, D 和 $MWSSA$ 减小。无降雨时团聚体 D 明显高于有降雨时的 D 。随着降雨强度增大, D 和 $MWSSA$ 总体上呈减小趋势。但是,当放水流量为 7.5 L/min、降雨强度为 120 mm/h 时, D 和 $MWSSA$ 反而增大。



的团粒结构;另一方面表明径流对该粒径团聚体的携带作用较强,而这一粒径团聚体的来源很可能是大团聚体的破碎。随着降雨强度增大,泥沙中 <0.05 mm 团聚体初始含量逐渐减小;而 >0.25 mm 团聚体含量逐渐增大,且增加到峰值的时间越短。可能是因为随着降雨强度增大,雨滴击溅作用较强,土壤表层孔隙会减少或者堵塞,形成“结皮”。土壤“结皮”可增加土壤表面薄层水流,一方面会减轻雨滴对土粒的击溅分散作用;另一方面导致坡面实际径流量增大,地表径流流速快,径流动能增强,对坡面土壤的冲刷侵蚀力更加剧烈,径流深增加,土壤颗粒崩解速度加快,大团聚体随径流流失越多^[21]。但是,当放水流量为

7.5 L/min、降雨强度增加到 120 mm/h 时,泥沙中 <0.05 mm 的微团聚体所占比例明显大于 90 mm/h,而 >0.25 mm 的大团聚体所占比例小于 90 mm/h。说明当侵蚀强度足够大时会导致表土微团聚体流失量增加,土壤性质恶化,这与闫峰陵等^[22]、王春燕等^[23]的研究结果一致。闫峰陵等^[22]研究表明,第四纪粘土红壤侵蚀泥沙中 >0.25 mm 大团聚体多是由黏粒和粉粒经过多级团聚形成的团聚体。王春燕等^[23]研究表明,红壤侵蚀程度越高,泥沙中 >0.25 mm 大团聚体含量越低,团聚体的分散度越大,团聚体更容易遭到破坏。可能是因为随着降雨强度增大,雨滴击溅作用增强,大团聚体更容易破碎;同时由于放水流量增大,坡面实际径流量增大,使得微团聚体更容易被输移和搬运。

团聚体平均重量直径和几何平均直径作为描述土壤团聚体状况的指标,可以反映侵蚀土壤的团聚特征和稳定性,其值越大表示侵蚀泥沙中团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强^[24]。本文研究结果表明,随着降雨强度增大,团聚体的 MWD 和 GMD 总体上呈增大趋势,这与卢嘉等^[25]得出的结论不一致。卢嘉等以对黑土为研究对象,发现随着降雨强度增加,流失团聚体平均重量直径呈减小趋势。可能是因为放水流量增大,导致坡面径流量增大,细沟发育越快,细沟内径流汇聚能力增大,侵蚀泥沙中 >0.25 mm 团聚体含量增多。当放水流量为 7.5 L/min、降雨强度为 120 mm/h 时,团聚体的 MWD 和 GMD 明显小于 90 mm/h,是因为当坡面实际径流量足够大时,侵蚀泥沙中 <0.05 mm 的微团聚体明显增大。

团聚体分形维数和团聚体平均重量比表面积与侵蚀泥沙的物理性质有关,反映了侵蚀泥沙水稳定性微团聚体及水稳性大团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,其值越大,则团聚体的团聚力越弱,分散度越大。黄小娟等^[26]指出,泥沙中微团聚体数量越多,团聚体分形维数越大;苏静等^[27]以黄土为研究对象,发现分形维数与粒径 >0.25 mm 的大团聚体呈负相关性;温磊磊等^[5]对东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征研究发现, D 和 MWSSA 与降雨强度和含沙量之间呈现极显著负相关关系;刘森等^[28]指出,当坡长为 5 m 时,侵蚀泥沙分形维数随降雨历时的延长有先降低后升高趋势。本文研究结果表明,随着降雨强度增大,团聚体 D 和 MWSSA 总体上呈减小趋势。但是,当放水流量为 7.5 L/min、降雨强度为 120 mm/h 时,团聚体 D 和 MWSSA 反而增大。一是雨滴击溅作用使坡面上微团聚体数量增多;二是由于放水流量增大,坡面实际径流量增大,坡面上的微团聚体容易被搬运;三是随着降雨强度和放水流量

增大,坡面细沟发育较快,随着细沟的发育,细沟内径流动能增大,对土粒的分散能力增强,导致侵蚀泥沙中 <0.05 mm 的微团聚体明显增大, >0.25 mm 大团聚体减少。

4 结论

(1)红壤坡面侵蚀过程中,侵蚀泥沙中 >0.25 mm 的大团聚体平均值在 50% 以上,随产流时间的延长其含量先升高后趋于稳定。粒径为 0.05 ~ 0.105 mm 团聚体含量最低,平均值为 5.06%,随产流时间的延长分布较稳定。降雨初期侵蚀泥沙中 <0.05 mm 的微团聚体初始含量在 19% ~ 58% 之间,随产流时间的延长先降低后趋于稳定。

(2)团聚体的平均重量直径和几何平均直径随着产流时间延长先升高后趋于稳定。相同降雨强度下,当放水流量由 5 L/min 增大到 7.5 L/min 时,团聚体的平均重量直径和几何平均直径都有所增大。随着降雨强度增大,团聚体的平均重量直径和几何平均直径总体上呈增大趋势。但是,当放水流量为 7.5 L/min、降雨强度为 120 mm/h 时,团聚体的平均重量直径和几何平均直径都小于 90 mm/h。

(3)团聚体分形维数在 2.55 ~ 2.91 之间。随着产流时间的延长,团聚体分形维数和团聚体平均重量比表面积先降低后趋于稳定。相同降雨强度下,当放水流量由 5 L/min 增大到 7.5 L/min 时,团聚体分形维数和团聚体平均重量比表面积有所减小。无降雨时团聚体分形维数明显高于有降雨时的分形维数。随着降雨强度增大,分形维数和平均重量比表面积总体上呈减小趋势。但是,当放水流量为 7.5 L/min、降雨强度为 120 mm/h 时,分形维数和平均重量比表面积反而增大。

参考文献:

- [1] 吴凤至,史志华,方怒放,等. 不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律[J]. 环境科学,2012,33(7):2497-2502.
- [2] 汤珊珊,李鹏,任宗萍,等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J]. 土壤学报,2016,53(1):39-47.
- [3] Ncizah A D, Wakindiki I I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility[J]. Archives of Agronomy and Soil Science,2015,61(6):827-842.
- [4] Warrington D N. Primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development[J]. European Journal of Soil Science,2009,60(1):84-93.
- [5] 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J]. 土壤学报,2015,52(3):489-498.
- [6] 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.

- [7] Yang W, Li Z X, Cai C F, et al. Tensile strength and friability of Ultisols in sub-tropical China and effects on aggregate breakdown under simulated rainfall[J]. Soil Science, 2012, 177(6): 377-384.
- [8] 卢嘉, 郑粉莉, 安娟, 等. 降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2264-2273.
- [9] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513-1520.
- [10] 张怡, 丁迎盈, 王大安, 等. 坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 25-29.
- [11] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456-1467.
- [12] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J]. 生态环境学报, 2000, 9(4): 7-9.
- [13] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 459-465.
- [14] 张超, 刘国彬, 薛莲, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 507-515.
- [15] 徐国策, 李鹏等. 丹江中游典型小流域土壤颗粒及分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 28-35.
- [16] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 413-419.
- [17] 杨培岭, 罗远培. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [18] 郭进, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 18-21.
- [19] 胡宏祥, 洪天求, 马友华, 等. 土壤及泥沙颗粒组成与养分流失的研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 26-29.
- [20] 丁杨, 张建军, 茹豪, 等. 晋西黄土区不同林地土壤团聚体分形维数特征与土壤养分相关关系[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(4): 42-46.
- [21] 陈晓燕, 牛青霞, 周继, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 163-168.
- [22] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 577-583.
- [23] 王春燕, 黄丽, 谭文峰, 等. 几种侵蚀红壤中有机质和团聚体的关系[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 52-56.
- [24] 蒲玉琳, 林超文, 谢德体, 等. 植物篱—农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 122-128.
- [25] 卢嘉, 郑粉莉, 安娟, 等. 东北黑土区土壤团聚体迁移特征的模拟降雨试验研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 6-10.
- [26] 黄小娟, 郝庆菊, 袁雪. 耕作方式对紫色水稻土微团聚体分形特征影响的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(6): 97-102.
- [27] 苏静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 114-117.
- [28] 刘森, 吴媛媛, 杨明义, 等. 次降雨过程中侵蚀泥沙分形维数的变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 37-43.

(上接第 111 页)

- [14] 罗欢. 芽孢杆菌对植物的促生和耐盐作用及其相关机制的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [15] 张洋. 银杏内生真菌的分离及其产黄酮特性的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2015.
- [16] 李岩. 好氧共代谢降解地下水和土壤中三氯乙烯的研究[D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [17] 魏海燕, 蔡磊明, 赵玉艳, 等. 枯草芽孢杆菌对黑土中可培养微生物的生态效应[J]. 农药, 2009, 48(2): 111-113.
- [18] 吴军虎, 陶汪海, 王海洋, 等. 羧甲基纤维素钠对土壤团聚结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 117-123.
- [19] 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.
- [20] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188-190.
- [21] 史文娟, 梁嘉平, 陶汪海, 等. 添加 γ -聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J]. 农业工程学报, 2015(23): 94-100.
- [22] 柳朝霞. *Bacillus pumilus* C2 合成 γ -PGA 及其絮凝性质表征[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [23] 张启昌, 孟庆繁, 兰晓龙. 黄土低山丘陵区湿润锋运动的实验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(4): 84-88.
- [24] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347.