

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.033.

张逸飞, 汪零, 徐玲, 等. 降雨驱动下红壤团聚体的溅蚀特征及周转过程[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 27-33, 41.

ZHANG Yifei, WANG Ling, XU Ling, et al. Splash Erosion Characteristics and Turnover Process of Red Soil Aggregates Driven by Rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 27-33, 41.

降雨驱动下红壤团聚体的溅蚀特征及周转过程

张逸飞, 汪零, 徐玲, 王军光

(华中农业大学 水土保持研究中心/农村农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: [目的] 研究降雨驱动作用下土壤团聚体受雨滴打击发生破碎和形成的过程, 丰富土壤侵蚀研究机理。[方法] 基于稀土元素示踪法, 对各粒径土壤团聚体同时进行标记。在 90 mm/h 降雨溅蚀条件下, 通过各粒径土壤团聚体 (2~5 mm, 0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm, <0.053 mm) 在不同降雨特征参数 (降雨历时、雨滴大小) 下的质量变化和稀土元素含量变化, 定量分析了团聚体间的周转路径和溅蚀颗粒特征。[结果] 降雨驱动作用下, 溅蚀量和溅蚀率会随着降雨动能的增加而变大, 溅蚀颗粒主要分布于 0.25~2 mm 粒径范围内; 除 >2 mm 的颗粒为大团聚体直接飞溅产生, <0.25 mm 粒级溅蚀颗粒均主要源于大粒级团聚体破碎形成, 最高可达到 73.83%, 其次为该粒级直接被击飞形成, 同时会有小粒级颗粒吸附黏结形成; 在残余团聚体的动态周转过程中, 主要是相邻级别的团聚体间形成和破碎过程占比较高, 其中大团聚体破碎产生小团聚体和粉黏粒团聚形成小团聚体分别对原粒级团聚体的破碎和形成方向的贡献率较高, 分别达到 24.06%~42.15% 和 36.83%~70.76%, 且随着降雨时间的变化, 大团聚体首先破碎成小团聚体, 再逐级破碎成更小粒级的团聚体, 未参与动态周转的团聚体比例会逐渐下降。[结论] 降雨溅蚀不断驱动土壤团聚体的周转过程, 并对溅蚀特征产生较大影响, 未来应引入土壤营养物质迁移研究, 完善土壤侵蚀过程定量模型。

关键词: 红壤团聚体; 溅蚀; 稀土元素示踪法; 动态周转模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0027-07

Splash Erosion Characteristics and Turnover Process of Red Soil Aggregates Driven by Rainfall

ZHANG Yifei, WANG Ling, XU Ling, WANG Junguang

(Research Center of Soil and Water Conservation, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Cultivated Land Conservation in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Rural Agriculture, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the process of breakdown and formation of soil aggregates driven by rainfall, and then to enrich the research of mechanisms of soil erosion. [Methods] Based on the rare earth element tracing method, a variety of rare earth elements were used to label soil aggregates with various particle sizes. Splash erosion tests were conducted under the stimulated rainfall intensity of 90 mm/h with the different rainfall characteristic parameters controlled (rainfall duration, raindrop size) to obtain the changes of distribution of mass and rare earth element content of soil aggregates (2~5 mm, 0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm, <0.053 mm), the turnover paths between aggregates could be quantitatively analyzed. [Results] The splash amounts and rates increase with the increase of rainfall kinetic energy, most of which range in 0.25~2 mm. Except for the >2 mm particles which directly originate from large aggregates, the splash particles whose diameter are <0.25 mm are mainly formed by the crushing of large-size aggregates, and the highest can reach 73.83%; the second is the aggregates of the current particle size

收稿日期: 2022-05-17

修回日期: 2022-07-10

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (42177317); 湖北省水利重点科研项目 (HBSLKY202304)

第一作者: 张逸飞 (1998—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀机理。E-mail: 1794683409@qq.com

通信作者: 王军光 (1984—), 男, 河南新乡人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: jgwang@mail.hzau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

knocked off by the raindrop, with little aggregates of small-sized particles adsorbed and bound together. In the dynamic turnover process of residual aggregates, the formation and breakdown processes between adjacent-level aggregates are mainly responsible, among which the breakdown of large aggregates that produces small aggregates and the formation of the small aggregates that originate from silt and clay have higher contribution rates to the breakdown or forming direction of the current size aggregates, reaching 24.06%~42.15% and 36.83%~70.76%, respectively, and with the change of rainfall durations, the large aggregates are first broken into smaller aggregates, then microaggregates and silt and clay step by step, and the proportion of aggregates that do not participate in dynamic turnover gradually decrease. [Conclusion] Splash erosion continuously drives the turnover process of soil aggregates and has a great impact on splash erosion characteristics. In the future, the research on soil nutrient migration should be introduced to improve the quantitative model of soil erosion process.

Keywords: red soil aggregate; splash erosion; rare earth element tracing method; dynamic turnover model

土壤侵蚀是全球性环境问题之一,不仅是作为水力侵蚀的初始阶段,雨滴溅蚀是指雨滴直接打击地表土壤,并使土壤颗粒发生分散、破碎和分离的过程^[1]。在雨滴打击作用下,溅蚀不仅会搬运土粒为坡面径流搬运提供大量松散物质,还会破坏土壤表层结构,减少或者阻止降水入渗,增加径流紊动性,进而增加径流的分散和搬运能力,从而促进土壤侵蚀的持续发生^[2]。其中,土壤团聚体破碎是降雨溅蚀发生的关键一步^[3]。研究表明土壤团聚体作为土壤结构和功能的基本单元,是土壤的重要组成部分,其稳定性和粒径分布会直接或间接影响土壤的孔隙特征和入渗功能、地表结构变化^[4-6]。Ma 等^[7]研究发现降雨条件下总溅蚀量随着团聚体的破碎而增大,且在团聚体易发生破碎的降雨前期也是土壤溅蚀量增长最快的时期;郝好鑫等^[8]发现不同粒径的团聚体在降雨条件下的破碎程度、溅蚀总量也不一致。同时溅蚀条件下,含水量的增加促进黏粒的吸附^[9]、黏结^[7]以及大团聚体孔隙结构的填充^[10],阻滞水分的入渗而影响侵蚀的发展^[11]。因此土壤团聚体动态变化和溅蚀特征对溅蚀的发展具有重要意义。然而此前的研究往往通过溅蚀盘、溅蚀板等对自然环刀土样或是单粒级团聚体的粒径分布变化和溅蚀量进行研究,缺乏侵蚀过程中各粒径团聚体相互影响、制约的过程以及各粒径团聚体周转路径的刻画,无法直接

衡量溅蚀颗粒究竟主要来源于哪一个粒级的团聚体。因此,基于稀土元素(rare earth element, REE)示踪技术在土壤团聚体周转过程中的发展和应用,即能够根据研究目的,一次性人工使用多种稀土元素对土壤进行标记,甚至能够对不同粒径的团聚体的形成和破碎过程进行同时示踪^[12]。用稀土元素示踪技术可以量化描述土壤团聚体的形成和破碎过程从而研究团聚体在不同降雨历时和雨滴直径下的周转路径。分析溅蚀过程中各粒级土壤团聚体质量的再分布路径和溅蚀颗粒的粒径分布及其质量来源特征,可以为深刻认识溅蚀机理提供理论依据,有利于为土壤侵蚀预测和土壤结构的改善与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验土样采自湖北省咸宁市贺胜桥镇,该地位于鄂东南丘陵山地和汉江平原的交界处(东经 114°19'23.9"—114°22'27.9",北纬 30°00'01.7"—30°59'30.3")。供试土样为第四纪红黏土发育林地红壤,采用 0—30 cm 的表层土,黏粒含量高,土壤团聚体稳定性强。

1.1.1 供试土样基本理化性质测定 供试土样经风干后过 5 mm 孔筛网,去除其中的石块、根系等杂质,用常规方法测定供试土样的基本理化性质,结果见表 1。

表 1 供试土样基本理化性质

土壤类型	机械组成/%			容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	全氮/ (g·kg ⁻¹)
	黏粒	粉粒	砂粒				
红壤	43	45	12	1.37	13.86	5.46	0.54

采用 Elliott 湿筛法^[13]测定水稳性土壤团聚体的粒径分布特征(表 2)。先随机选取 50 g 风干土壤,置于 2 mm 孔径筛网上,并在纯水中浸泡 5 min 后开始轻轻震荡(2 min 内 50 次),使下一粒级团聚体洗出,

其中留在筛网上的为 5~2 mm 的粒级团聚体,洗出的土壤溶液则继续依次通过 0.25 mm,0.053 mm 的筛子,重复上述震荡过程分别得到 0.25~2 mm,0.053~0.25 mm 的团聚体。而<0.053 mm 的溶液

需要进一步静置沉淀,除去上层清液。最后在 60℃ 下烘干 24 h,称重即可。

表 2 各粒径土壤团聚体比例

粒径/mm	质量分数/%
2~5	2.43±0.36
0.25~2	81.32±0.69
0.053~0.25	8.65±0.54
<0.053	7.60±0.54

注:表中数据为均值±标准差。

1.2 稀土元素标记

本试验使用三氧化二镧(La₂O₃)、三氧化二钕(Nd₂O₃)、三氧化二钐(Sm₂O₃)和三氧化二钆(Gd₂O₃)4种稀土元素氧化物(rare earth oxide, REO)作为标记物,通过湿混法^[14]分别标记 4 份全土样。根据土样质量,按照 500 mg/kg 的浓度配置单种 REO 溶液后,均匀喷洒于待标记的土样中,并调节土壤含水量达到田间持水量的 60%左右。然后恒温条件下静置培养 7 d 后在 40℃ 烘箱中烘 48 h。用手轻轻将其破碎至<5 mm 后按照 Elliott 湿筛法土样进行湿筛分级,得到不同粒径均被该元素标记的土样团聚体。其他元素进行同样培养标记过程。最终,分别从不同元素标记的土样团聚体中挑选一种粒级,即分别被 La₂O₃、Sm₂O₃、Nd₂O₃ 和 Gd₂O₃ 标记的大团聚体(2~5 mm)、小团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉黏粒(<0.053 mm),然后根据表 2 进行质量配比,混合均匀后得到全粒级土壤均被标记的试验土样。

1.3 降雨试验设计

在华中农业大学降雨大厅进行室内人工降雨,该降雨系统配置了多组垂直下喷式旋转喷头,使其具备降雨覆盖面广且降雨均匀度高等特点,能充分满足溅蚀试验的各项要求。根据我国低山丘陵区耕地的常见坡度与降雨量,试验坡度设计为 15°,降雨强度设定为 90 mm/h。根据降雨时间不同,设置历时 10, 20, 40, 60 min 的 4 组溅蚀试验;根据雨滴大小不同,设置 60 min 降雨时间下覆盖 19 目(1 mm 孔径)筛网和 14 目(1.6 mm 孔径)筛网的 2 组溅蚀试验。每种降雨参数下均设置两个重复。

团聚体的溅蚀过程发生在根据摩根盘改进后的溅蚀盘中,整体呈圆柱形结构,高 15 cm,直径 35 cm,由收集区和置样区构成,置样区直径为 15 cm 且设有 1 cm 的挡水板,用于放置底部有疏水孔的筛盘,其优点为可以及时排水且避免产生水膜。将标记团聚体按自然团聚体占比组成 300 g 左右的溅蚀土样,充分混合后,均匀地填入筛盘中并轻力压实,在溅蚀试验开始前放置于溅蚀盘内并用遮板遮盖。多次测量降

雨强度,待其稳定于 90 mm/h 时放入溅蚀盘,去掉遮板,开始溅蚀试验,期间每 5 分钟收集一次溅蚀出来的颗粒,溅蚀试验结束后,将溅蚀出来的土壤颗粒混匀,后和溅蚀盘中剩余的土样分别湿筛分级,放入 60℃ 烘箱烘干并称重。

1.4 稀土元素含量测定

用 Na₂O₂ 碱熔法^[15]提取各粒径团聚体中稀土元素的含量。即称取约 0.125 g 的待测土样于刚玉坩埚中,加入约 1 g Na₂O₂,用玻璃棒搅拌混匀后,覆盖约 0.25 g Na₂O₂后放入提前预热 700℃ 的马弗炉中,计时 15 min,关闭电源,冷却过夜。次日再将冷却好的坩埚放入装有 200 ml 左右热水的烧杯中,将烧杯放置于电热板上加热至熔块熔解,定量滤纸过滤后,用 NaOH 冲洗烧杯和沉淀。在容量瓶中预先加入酚酞,用超纯水将滤纸上的沉淀洗入容量瓶,滴加 HNO₃溶液刚好变色时,加入 2 ml 浓 HCl 后用纯水定容。转移至 15 ml 离心管中,密封保存,最后上电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。

其中稀土元素标记值与镧(La)、钐(Sm)、钕(Nd)及钆(Gd)4种稀土元素的土壤背景值、标记值见表 3。

表 3 稀土元素标记值与土壤背景值 mg/kg

稀土元素氧化物	标记值	背景值
La ₂ O ₃	202.90±2.53	27.17±0.10
Sm ₂ O ₃	387.44±0.99	4.13±0.15
Nd ₂ O ₃	169.52±1.84	21.31±0.21
Gd ₂ O ₃	459.30±0.79	3.94±0.05

注:表中数据为均值±标准差。

2 数据处理

2.1 团聚体溅蚀特征计算

根据 90 mm/h 的雨强下不同降雨特征参数对土壤团聚体溅蚀量的影响,计算雨滴溅蚀率,即单位时间单位面积内土壤的溅蚀量(P),如下式:

$$P=\frac{Q}{T\times S}$$
(1)

式中:Q 为一定时间内收集的溅蚀颗粒质量(g);T 为时间(min);S 为溅蚀盘面积(cm²)。

团聚体富集率(Er)用以描述不同粒级团聚体在溅蚀过程中发生迁移的难易程度^[16]。当 Er 的值大于 1 时,表明某一粒级团聚体在溅蚀过程中容易发生迁移,反之,当 Er 的值小于 1 时,则表明某一粒级团聚体在溅蚀过程中较为稳定,迁移能力较弱。

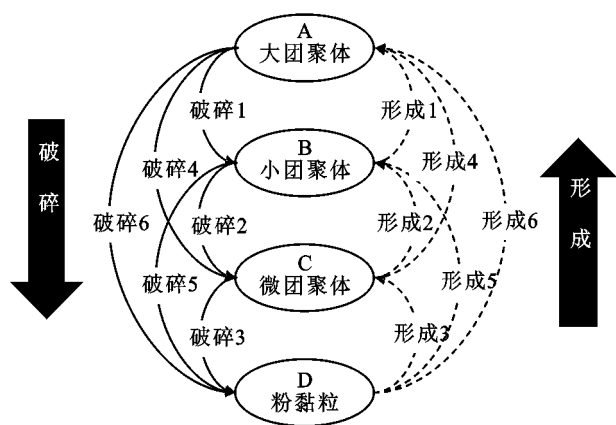
$$Er=\frac{P_s}{P_0}$$
(2)

式中:P_s为某一粒级溅蚀颗粒占总溅蚀量的质量分数(%);

P_0 为同一粒级的团聚体占团聚体总量的质量分数(%)。

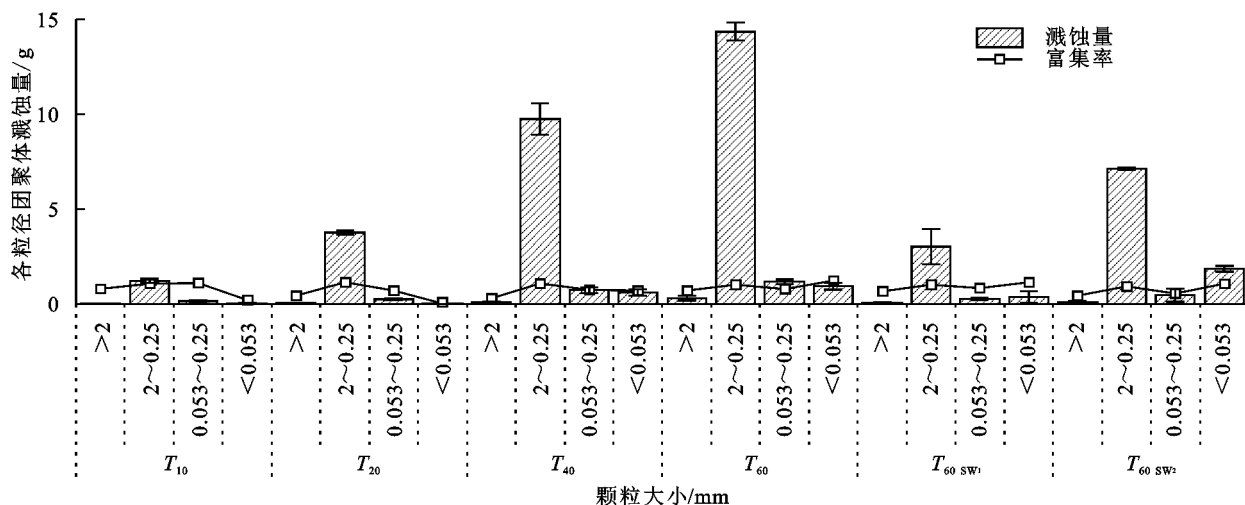
2.2 稀土元素周转率计算

测定各粒径土壤团聚体中稀土元素含量,参照 Peng 等^[12]的相关方法,计算出团聚体间稀土元素浓度的变化率,从而定量化表示土壤团聚体的周转路径。通过湿筛法将团聚体分为 A 大团聚体(2~5 mm)、B 小团聚体(0.25~2 mm)、C 微团聚体(0.053~0.25 mm)、D 粉黏粒(<0.053 mm)共 4 级,在溅蚀过程中各粒级团聚体可形成 12 条周转路径(图 1)^[12],其中实线表示的是大团聚体破碎成小团聚体的破碎路径(破碎 1—破碎 6),虚线部分则表示为小团聚体团聚成大团聚体的形成路径(形成 1—形成 6)。



注:此图引自参考文献[12]。

图1 各粒级团聚体间的周转路径



注: T_{10} 、 T_{20} 、 T_{40} 、 T_{60} 分别表示降雨历时 10、20、40、60 min; T_{60sw1} 、 T_{60sw2} 分别表示降雨历时 60 min 时覆盖 19 目孔径(1 mm)筛网和 14 目孔径(1.6 mm)筛网。下同。

图2 不同降雨特征参数下各粒径土壤团聚体的累积溅蚀量、溅蚀率和富集率

由图 3 可知,由于降雨试验前,不同粒级团聚体分别被不同元素所标记,因此可以根据溅蚀后元素分布分析溅蚀颗粒的主要来源。从整体来看,除 >2 mm 溅蚀颗粒是 >2 mm 团聚体被雨滴直接打击发生位移外,其他粒级溅蚀颗粒可由大粒级团聚体破碎、小粒级团聚体粘结吸附或是该粒级团聚体直接飞

3 结果分析与讨论

3.1 不同降雨特征参数下溅蚀颗粒的分布及来源

降雨历时和雨滴大小是影响溅蚀过程中土壤团聚体的溅蚀量和溅蚀率的主要因素^[17]。由图 2 可知,90 mm/h 雨强下,随着降雨历时的增加溅蚀量和溅蚀率均呈现增加的趋势,其中溅蚀颗粒质量从 1.42 g 增加到 4.06, 11.16, 17.46 g, 溅蚀率从 8.00×10^{-4} g/(min·cm²) 增加至 1.15×10^{-3} , 1.58×10^{-3} , 1.65×10^{-3} g/(min·cm²),这是因为同一雨强条件下,随着降雨时间的增加,降雨能量随之不断累积,同时土壤含水量也不断增加,土壤黏结力减小,因此土壤团聚体不断被雨滴打击直至破碎和分离^[18]。而当降雨时间相同时,相较于无覆盖土壤,随着雨滴变小,土壤溅蚀颗粒的溅蚀量下降了 13.76, 7.91 g, 溅蚀率则由 1.65×10^{-3} g/(min·cm²) 下降到 3.49×10^{-4} g/(min·cm²), 9.01×10^{-4} g/(min·cm²),说明雨滴减小,其携带的降雨动能降低,越不利于团聚体发生溅蚀搬运,这也与胡伟等^[17]的研究一致。

结合溅蚀颗粒的粒径分布和富集率可以看出,主要为 <2 mm 的侵蚀泥沙发生了位移,其中 0.25~2 mm 的颗粒达到总溅蚀量的 70%以上,远高于其他粒径的侵蚀颗粒,且 0.25~2 mm 的团聚体的富集率始终大于 1,说明 0.25~2 mm 颗粒更容易发生位移,这是该粒径团聚体在土壤全样中占比较高导致的^[19]。

溅产生,这是因为大团聚体孔隙结构更为发达,黏聚力低于小团聚体,更容易发生破碎^[8]。其中溅蚀量最高的 2~0.25 mm 的溅蚀颗粒中以 Sm 为主(51.13%~95.21%),且与该粒径团聚体的标记元素一致,这说明 >0.25 mm 侵蚀颗粒主要是团聚体直接被击溅出溅蚀盘产生;而 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 的溅

蚀颗粒内 Sm 的含量分别达到 47.33%~73.83% 和 20.00%~75.11%,说明 <0.25 mm 的溅蚀颗粒中也

主要是 0.25~2 mm 团聚体破碎飞溅的产物,这主要与土壤的水稳性团聚体粒径分布有关^[7]。

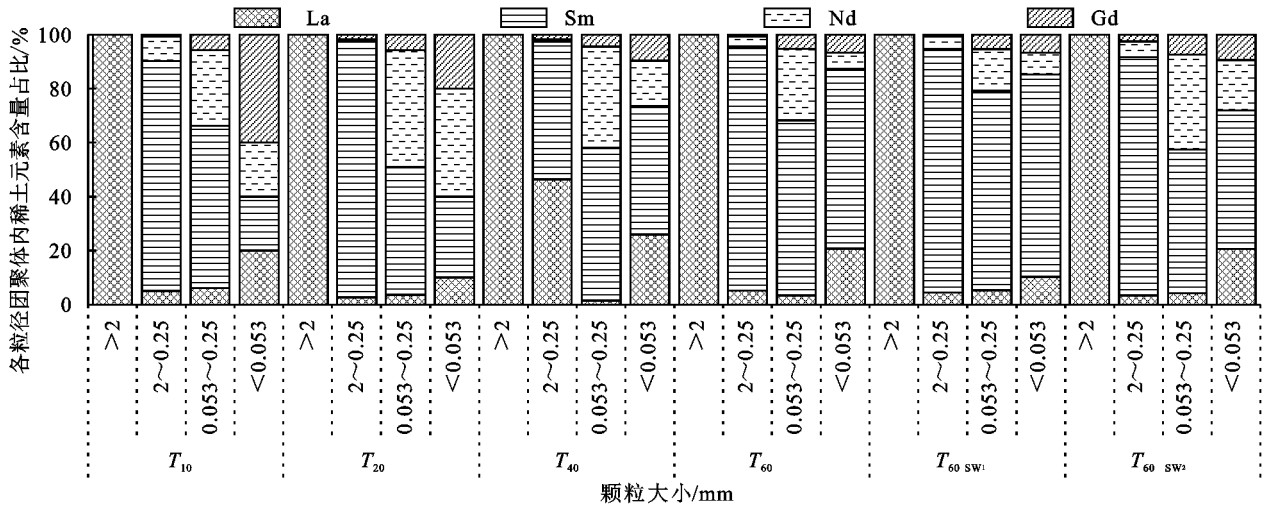


图3 不同降雨特征参数下各粒径土壤团聚体中稀土元素含量的占比

其中,在无覆盖条件下,0.25~2 mm 的溅蚀颗粒中 La 和 Nd 占比分别达到 2.69%~46.39% 和 0.36%~9.10%,但 Gd 仅占 1% 左右,可见该粒级侵蚀颗粒主要是大团聚体破碎或小团聚体直接飞溅产生,且存在部分微团聚体被雨滴打击到团聚体孔隙中而发生位移。而 10 min 时 Sm 标记的小团聚体破碎形成的 0.25~0.053 mm 的侵蚀颗粒占该粒级的 60.19%,但微团聚体直接飞溅在该粒级中仅占 28.14%;随降雨历时的增加,由 0.25~2 mm 粒级破碎形成 0.25~0.053 mm 侵蚀颗粒的占该粒级溅蚀颗粒的比例先减小至 47.33%,后增大至 56.55%,最终达到 64.93%,这与该粒级中 2~5 mm 大团聚体破碎形成的占比变化一致,但由 0.25~0.053 mm 团聚体直接飞溅产生的溅蚀颗粒比例正好与之相反,说明随着降雨历时的增加,>0.25 mm 团聚体会逐级破碎形成微团聚体并被雨滴击飞溅出溅蚀盘^[7]。

相同时间下,随着雨滴直径减小,溅蚀颗粒源于团聚体破碎和形成的比例均发生了变化。其中,2~0.25 mm 的溅蚀颗粒中,源于大团聚体破碎产生的占比分别为 5.14%,而覆盖 1.6 mm 和 1.0 mm 筛网后其占比分别降至 4.44%,3.42%,这表明溅蚀过程中,随着雨滴直径减小,降雨能量也随之降低,因此大团聚体发生破碎并被搬运的比例减小,这也与胡伟等^[17]的研究一致。同时溅蚀过程中,随雨滴直径的减小,<0.25 mm 团聚体吸附形成大粒级团聚体(<2 mm)的比例均有所增加,其中 2~0.25 mm 的溅蚀颗粒中源于微团聚体黏结吸附形成的占比为 3.77%,而在覆盖 1.6 mm,1.0 mm 筛网后其占比分别增至 4.77%,5.91%,0.053~0.25 mm 溅蚀颗粒中

源于黏粒级的占比也呈现相同的增加趋势,这是因为筛网的增加极大地消减了降雨动能,而未减少雨滴的浸润过程,因此土壤含水量有效增加,并增强了土壤颗粒之间的黏结力^[6]。

3.2 不同降雨特征参数下残余团聚体的分布及动态周转变

降雨侵蚀下,表面土壤的结构变化直接影响到雨滴对于土壤颗粒的起动与搬运,以及降雨侵蚀的发展进程^[7]。溅蚀颗粒的质量仅占总土样质量的 0.49%~5.82%,其余则都为残余团聚体,其主要分布在 0.25~2 mm 的小团聚体粒径范围内,占总残余量的 70% 以上。从图 4 中可以看出,土壤团聚体在溅蚀过程中粒径分布发生了显著的变化。溅蚀前后小团聚体、微团聚体、粉黏粒的质量发生显著变化,随着降雨时间的增加,小团聚体的质量在 10,20,40,60 min 时分别减少了 15.20,18.95,20.71,33.89 g,而粉黏粒则分别增加了 8.20,11.88,11.25,12.63 g,说明残余团聚体间存在形成和破碎过程。相同时间下,改变雨滴直径会影响团聚体的形成和破碎过程。60 min 时,微团聚体增加 11.33 g,粉黏粒增加 12.63 g,但覆盖筛网 1 后,微团聚体质量减少了 8.44 g 粉黏粒增加了 6.41 g,覆盖筛网 2 后,微团聚体减少了 7.79 g,粉黏粒增加了 6.86 g,可以发现,微团聚体由质量增加变为质量减少,而粉黏粒的质量增加量变小,说明随着雨滴直径变小,导致降雨动能减少,不利于团聚体发生破碎,有益于团聚体的形成过程。这是由于降雨过程中土壤团聚体含水量逐渐饱和,土层表面逐渐泥浆化,对团聚体形成保护,而雨滴直径又影响降雨动能,雨滴不足以击打致使团聚体继续发生破碎。结果与

Gilley 等^[20]研究一致,即雨滴会先对大团聚体进行拆分,使其破裂,分散;随着雨滴动能的不断累积,当团聚体粒级和重量达到一定的范围时,雨滴的动能足以使其运动,进而使更多的土壤团聚体产生迁移。

基于稀土元素含量变化可计算得到各粒级团聚体的周转率(图5)。从整体上看,主要是大团聚体破碎产生小团聚体和微团聚体破碎产生粉黏粒对原粒级团聚体破碎方向的贡献率较高,分别达到24.06%~42.15%,10.51%~38.59%;而土壤团聚体的形成过程中粉黏粒团聚形成小团聚体、微团聚体团聚形成小团聚体和粉黏粒团聚形成微团聚体对原粒级形成方向

的贡献率较高,分别达到36.83%~70.76%,17.82%~37.29%和13.78%~25.25%。

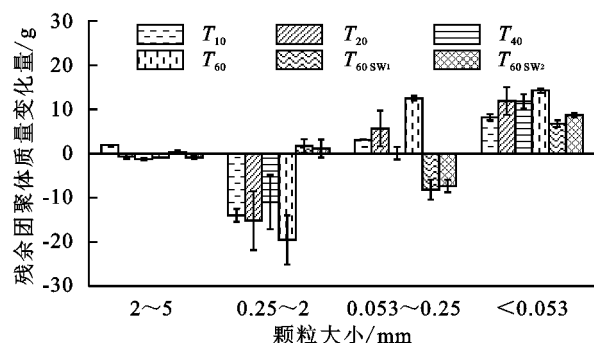
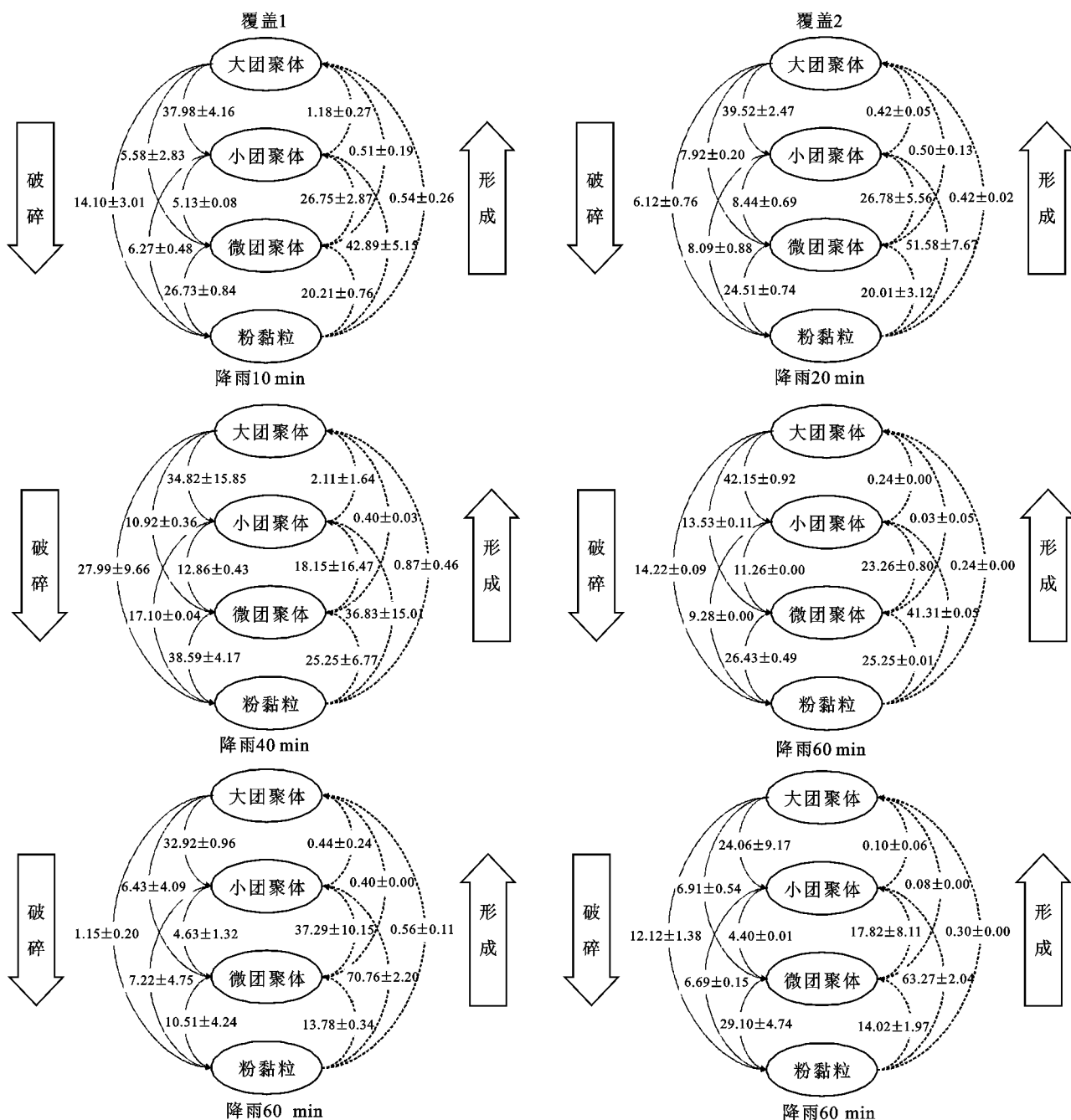


图4 不同降雨特征参数下各粒径残余团聚体质量的变化量



注:图中覆盖1,覆盖2分别表示覆盖19目孔径(1 mm)筛网和14目孔径(1.6 mm)筛网。

图5 不同降雨特征参数下土壤团聚体的周转模型

此外,尽管各粒级向小团聚体转化的贡献率较高,但该粒级本身含量较高,因此结合残余团聚体质量变化,团聚体粒级仍为向 $<0.25\text{ mm}$ 团聚体转化的方向,这是因为土壤团聚体间内联结力会有效保护团聚体结构,使得红壤团聚体发生侵蚀周转时主要以微团聚体的形式稳定存在^[8]。随着降雨时间的累积,可以发现未参与破碎过程和形成过程的团聚体比例逐渐降低,其中大团聚体破碎路径中,破碎为各粒级团聚体的周转率均表现出波动增加的趋势,其中,10 min时形成小团聚体的比例占降雨前大团聚体含量的37.98%,随后先增加至39.52%,再减小34.82%,最终达到42.15%;而在大团聚体破碎形成微团聚体对大团聚体破碎过程的贡献率随时间逐渐增加,从5.58%增至13.53%,这是因为大团聚体破碎形成小团聚体后可能会继续发生破碎,形成微团聚体并释放包裹的黏粉粒,而微团聚体结构也更加稳定,不易发生破碎^[10],这一结果也与章明奎等^[21]的研究一致。

当降雨时间一定时,改变雨滴直径会影响降雨动能,从而影响土壤周转过程。其中随着筛网孔径的减小,大团聚体破碎形成小团聚体的过程对大团聚体破碎过程的贡献率由42.15%降至32.92%,24.06%;同样的,小团聚体破碎形成微团聚体以及小团聚体破碎形成黏粉粒的过程对小团聚体破碎过程的贡献率均随筛网孔径,即雨滴直径的减小而减小,分别由11.26%,9.28%减至4.63%,7.22%,最终达到4.40%和6.69%。这是因为降雨能量减小,对团聚体的打击作用减小而减缓团聚体破碎过程^[17]。而各粒级的多条形成路径对该粒级形成过程的贡献率呈现波动变化,其中黏粉粒形成微团聚体的贡献率均低于未覆盖条件,而黏粉粒形成小团聚体的贡献率达到60%以上,均高于未覆盖条件,可见减小雨滴直径的同时也减缓了土壤团聚体的湿润速率,在降低团聚体受到雨滴直接打击的作用能量的同时,缓慢的湿润过程有效地增进了黏粒与土壤颗粒之间的黏聚力,显著提升了团聚体的形成过程。

4 结论

(1) 溅蚀团聚体的分布特征反映雨滴打击对不同粒径团聚体的破坏程度和搬运能力。随着降雨历时和雨滴直径的增加,累计降雨动能越大,溅蚀颗粒的质量和溅蚀率越大;在溅蚀过程中小团聚体、微团聚体、粉黏粒更容易发生迁移;大部分溅蚀颗粒为雨滴打击下直接溅出溅蚀盘产生,而小粒级溅蚀颗粒也主要是大团聚体和小团聚体破碎飞溅的产物。

(2) 在降雨过程中,土壤团聚体的破碎是由大团聚体被雨滴打击破碎形成小团聚体开始的,再逐级破碎成更小粒级的团聚体。随着降雨时间的变化,未参与团聚体间动态周转的土壤团聚体比例逐渐降低,同时受团聚体内联结力的影响,相邻粒级团聚体间周转的比例比跨粒级周转的比例高。相同时间下雨滴直径改变降雨动能,影响动态周转速率。

(3) 本次试验中采用单一的雨强和土样,未来仍需进一步对不同降雨条件下的多种土壤进行试验验证,并结合不同的土壤理化性质对团聚体的周转路径进行深入分析,对完善土壤退化过程及侵蚀预测模型具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Legout C, Legu  dois S, Le Bissonnais Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005, 124(3/4): 279-292.
- [4] 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.
- [5] Xiao H, Liu G, Zhang Q, et al. Qualifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the loess plateau of China[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 178:150-158.
- [6] 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.
- [7] Ma R M, Li Z X, Cai C F, et al. The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China)[J]. Catena, 2014,121:279-287.
- [8] 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.
- [9] Zhou S, Wilson C G, Hathaway J M, et al. Tracking in-situ soil aggregate turnover under raindrop impact and wetting-drying cycles using rare earth elements[J]. Catena,2022,213:106227.
- [10] 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.
- [11] 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.

- of reservoir sediment using multiple composite fingerprints in an arid region experiencing both wind and water erosion[J]. *Geomorphology*, 2019,332:112-121.
- [22] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2005,344:159-184.
- [23] Wilkinson S N, Hancock G J, Bartley R, et al. Using sediment tracing to assess processes and spatial patterns of erosion in grazed rangelands, Burdekin River basin, Australia[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013,180:90-102.
- [24] Chen F, Zhang F, Fang N, et al. Sediment source analysis using the fingerprinting method in a small catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016,16(5):1655-1669.
- [25] Franz C, Makeschin F, Weiß H, et al. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil: Using the fingerprint approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2014,466:513-523.
- [26] Zhang X C J, Liu B L. Using multiple composite fingerprints to quantify fine sediment source contributions: A new direction[J]. *Geoderma*, 2016,268:108-118.
- [27] Xiang Y, Sun D Y, Fan W, et al. Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model[J]. *Physics Letters A*, 1997,233(3): 216-220.
- [28] Lacey J P, Olley J. An examination of geochemical modelling approaches to tracing sediment sources incorporating distribution mixing and elemental correlations [J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(6):1669-1685.
- [29] Huang D, Du P, Walling D E, et al. Using reservoir deposits to reconstruct the impact of recent changes in land management on sediment yield and sediment sources for a small catchment in the Black Soil region of Northeast China[J]. *Geoderma*, 2019,343:139-154.
- [30] 郝福星,黄炎和,林金石,等.指纹法研究花岗岩区典型崩岗小流域悬浮泥沙来源[J].*水土保持学报*,2017,31(2):45-49,102.
- [31] Quan X, He J, Cai Q, et al. Soil erosion and deposition characteristics of slope surfaces for two loess soils using indoor simulated rainfall experiment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,204:104714.
- [32] Ren Z, Zhang X, Zhang X J, et al. Sand cover enhances rill formation under laboratory rainfall simulation[J]. *Catena*, 2021,205:105472.
- [33] Pulley S, Foster I, Collins A L. The impact of catchment source group classification on the accuracy of sediment fingerprinting outputs[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017,194:16-26.
- [34] 汤珊珊,李占斌,任宗萍,等.覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J].*水土保持学报*,2015,29(5):25-28.
- [35] Fang H, Sun L, Tang Z. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils[J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(11):2649-2658.

~~~~~

(上接第33页)

- [12] Peng X H, Zhu Q H, Zhang Z B, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017,109:81-94.
- [13] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986,50(3):627-633.
- [14] Liu S, Guo Z C, Pan Y B, et al. Rare earth oxides for labelling soil aggregate turnover: Impacts of soil properties, labelling method and aggregate structure[J]. *Geoderma*, 2019,351:36-48.
- [15] 杨小丽,崔森,杨梅,等.碱熔离子交换-电感耦合等离子体质谱法测定多金属矿中痕量稀土元素[J].*冶金分析*,2011,31(3):11-16.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 刘婧芳,胡斐南,杨志花,等.土粒表面电场对土壤团聚体破碎及溅蚀的影响[J].*农业工程学报*,2020,36(7): 149-156.
- [19] Saedi T, Shorafa M, Gorji M, et al. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soil of the central Zagroess, Iran: A laboratory study[J]. *Geoderma*, 2016,271(6):1-9.
- [20] Gilley J E, Finkner S C. Estimating soil detachment caused by raindrop impact [J]. *Transactions of the Asae-American Society of Agricultural Engineers*, 1985,28(1):140-146.
- [21] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J].*土壤学报*,1997,34(4):359-366.