

DOI: 10.11766/trxb202306270248

张晨阳, 杨伟, 汪零, 彭珏, 王军光, 蔡崇法. 基于 REE 示踪对红壤细沟间侵蚀团聚体周转和泥沙迁移特征的研究[J]. 土壤学报, 2024, 61 (6): 1492–1505.

ZHANG Chenyang, YANG Wei, WANG Ling, PENG Jue, WANG Junguang, CAI Chongfa. Characteristics of Aggregate Turnover and Sediment Transport by Interrill Erosion Using Rare Earth Elements in Red Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (6): 1492–1505.

基于 REE 示踪对红壤细沟间侵蚀团聚体周转和泥沙迁移特征的研究*

张晨阳¹, 杨 伟², 汪 零¹, 彭 珏¹, 王军光^{1†}, 蔡崇法¹

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070)

摘 要: 土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 土壤表层团聚体的粒径分布变化对土壤结构和侵蚀过程发育具有重要意义。为探究细沟间侵蚀过程中土壤团聚体周转和泥沙迁移路径过程, 本研究基于微型土槽, 设置 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强, 10° 坡度的条件, 进行室内模拟降雨试验。利用稀土元素示踪技术标记土壤团聚体, 通过 ICP-MS 测定稀土元素浓度, 对不同粒径土壤团聚体 ($5\sim 2\text{ mm}$ 、 $2\sim 0.25\text{ mm}$ 、 $0.25\sim 0.053\text{ mm}$ 、 $<0.053\text{ mm}$) 的破碎和形成过程进行定量分析, 同时量化侵蚀泥沙的来源特征。结果表明, 细沟间侵蚀过程中, 侵蚀泥沙颗粒主要由同等粒径大小的团聚体受径流搬运形成, 且该粒径泥沙含量随降雨时间增加而减少; 残留团聚体呈明显的周转过程, $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体更易粘结或吸附至大粒径团聚体上, 而 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体倾向于发生破碎 (破碎率分别为 45.8% 和 43.3%), 且破碎程度不断增加; $<0.053\text{ mm}$ 和 $2\sim 0.25\text{ mm}$ 大小的泥沙含量及相应粒径的团聚体在泥沙中的贡献率对径流系数和泥沙粒径分形维数具有重要作用。所以, 细沟间侵蚀过程中土壤表土结构变化、泥沙迁移与团聚体粒径密切相关, 该成果进一步为土壤侵蚀过程模型和水土保持措施提供理论依据。

关键词: 红壤; 人工模拟降雨; REE 示踪法; 团聚体周转; 细沟间侵蚀

中图分类号: S157 **文献标志码:** A

Characteristics of Aggregate Turnover and Sediment Transport by Interrill Erosion Using Rare Earth Elements in Red Soil

ZHANG Chenyang¹, YANG Wei², WANG Ling¹, PENG Jue¹, WANG Junguang^{1†}, CAI Chongfa¹

(1. Research Center of Soil and Water Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Water Resources and hydropower Research Institute, Wuhan 430070, China)

Abstract: Soil aggregates are the basic unit of soil structure and the particle size distribution of surface aggregates play an important role in soil structure and erosion process development. **【Objective】** Therefore, the purpose of this study was to explores

* 国家自然科学基金项目 (42177317) 和湖北省大别山区典型小流域次降雨水土流失预报模型研究项目 (HBSLKY202304) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42177317) and the Study on Sub-rainfall Erosion Forecasting Model for Typical Sub-watersheds in Dabie Mountainous Area of Hubei Province (No. HBSLKY202304)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jgwang@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 张晨阳, 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀机理。E-mail: zcy5688@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2023-06-27; 收到修改稿日期: 2023-10-26; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-02-01

the mutual transformation of soil aggregates of different particle sizes and the sediment migration path during the interrill erosion and quantify the source characteristics of eroded sediment. 【Method】 In this study, a quaternary red clay was collected from Xian'ning in Hubei Province of China, and the soil aggregates were labeled by the rare earth tracer method. Under the condition of $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ rainfall intensity, the laboratory simulated rainfall experiment was conducted based on a miniature soil trough with the slope set at 10° . Sediment samples were collected at an interval of 6 min after steady flow production during rainfall, and the contents of rare earth elements in the samples were determined by ICP-MS. A quantitative characterization was also performed on the transformation of soil aggregates within different particle sizes (5–2 mm, large macroaggregates; 2–0.25 mm, small macroaggregates; 0.25–0.053 mm, microaggregates; and <0.053 mm, silt and clay fractions) and the source characteristics of erosion sediment under the Rare Earth Element (REE) concentration. 【Result】 The results show that the eroded sediment particles were mainly formed by the same size aggregates transported by runoff, and the content of the sediment particles with the increase of rainfall time. The residual aggregates showed an obvious turnover process and the aggregates with size < 0.25 mm were more easily adsorbed to the aggregates with large size, while the aggregates with size >0.25 mm tended to be broken (the fragmentation rate reached 45.8% and 43.3%), and the broken degree of soil aggregates increased continuously. The characteristics of sediment yield were closely related to the change in topsoil structure and sediment migration and the sediment content of < 0.053 mm and 2–0.25 mm and the contribution rate of the corresponding aggregates in sediment played an important role in the fractal dimension of runoff coefficient and sediment particle size. For the characteristics of erosion sediment production, the sediment content of < 0.053 mm and 2–0.25 mm and the contribution rate of the corresponding aggregates in the sediment played an important role in the runoff coefficient and the fractal dimension of sediment particle size. 【Conclusion】 Thus, the change of soil topsoil structure and the characteristics of sediment loss during interrill erosion are closely related to aggregate particle size. This further deepens the dynamic process of the interrill erosion and provides a theoretical basis for the soil erosion model and soil and water conservation measures.

Key words: Red soil; Artificially simulated rainfall; REE tracer method; Aggregate turnover; Interrill erosion

细沟间侵蚀是坡面侵蚀的主要形式，主要是由于土壤表层受到雨滴打击作用的冲击，表面形成较致密的临时结皮层，土壤孔隙被封闭，导致土壤入渗能力降低，在表层形成坡面薄层水流，对土壤造成侵蚀^[1]。因此，在降雨作用下雨滴击溅分离和薄层水流直接冲刷坡面并搬运泥沙是细沟间侵蚀的主要过程^[2-3]。一般认为，雨滴打击不仅可以分散地表土壤颗粒，还能通过增强径流的紊动来提高径流输沙能力，是土壤颗粒发生位移或破碎的主要外力因素^[4]。土壤团聚体是土壤的基本结构单元^[5]，也是雨滴直接作用的对象，其稳定性常用于描述土壤抵抗侵蚀的能力^[6]。大量研究表明土壤团聚体的破碎过程及粒径分布与土壤侵蚀、结皮发育存在密切联系，一方面团聚体的破碎过程为表层土壤提供了更多的小粒径的土壤颗粒，另一方面团聚体的大小和质量决定了降雨和径流的分选过程，进而直接影响地表糙度、孔隙结构和入渗特性^[7-10]。随着降雨历时的增加，团聚体被不断打击搬运，产生泥沙，逐步形成细沟间侵蚀。因此，侵蚀过程中团聚体的动态过

程与侵蚀泥沙分布特征对于坡面侵蚀发展过程具有重要意义。在以往的研究中，陈琳等^[11]发现原土壤颗粒及泥沙会受到降雨径流的分选作用被直接搬运或破碎，这不仅是表土结皮产生的本质原因，也是侵蚀产沙量的主要来源。肖海等^[12]对降雨条件下土壤团聚体在不同作用下的侵蚀结果进行了比较。但针对团聚体与侵蚀过程关系的研究大多局限在单一粒径的尺度上，关于土壤粒径分布情况也主要围绕侵蚀的结果，或侵蚀泥沙的空间来源分布展开^[13-14]。对于土壤体系内多个粒径团聚体同时破碎、沉积交换过程仍是一个“黑箱”问题，土壤各粒径泥沙在侵蚀过程中的物质来源与转化尚不清楚，缺少土壤团聚体角度对侵蚀过程的动态量化和机理探究。

稀土元素（Rare Earth Element, REE）具有低土壤背景值、难溶于水、迁移能力弱、能被土壤吸附且对土壤理化性质影响较小等特点^[15-16]。即使外力剥蚀作用形成的 REEs 粉粒仍有极强的吸附与团聚能力，是理想的示踪元素。REE 示踪法是将不同稀土元素与土样混合，布设在不同地形位置或不同

土壤深度完成试验，最后通过分析技术测定样品中 REEs 的种类和含量，由此判断不同位置土壤侵蚀差异^[15]。我国对于示踪技术在土壤侵蚀速率估算方面应用广泛，也应用于泥沙来源研究^[16]。通过将 REE 示踪技术与室内降雨，冲刷等试验相结合，或在野外采用 REE 示踪法进行全坡面径流小区的土壤侵蚀研究，不断揭示土壤迁移、剥蚀和沉积的原理，了解坡面土壤侵蚀垂直分布特征及泥沙运移和沉积特点^[17-19]。目前稀土元素示踪法可用于同时定量研究多粒径团聚体的破碎、形成和稳定过程^[20-22]。

综上，本研究基于微型土槽进行细沟间侵蚀试验，收集开始稳定产流后连续一小时的侵蚀泥沙和径流，分析侵蚀泥沙的粒径分布特征、泥沙浓度及稀土元素含量，从而探究不同土壤侵蚀泥沙的物质来源及分选机制；同时结合侵蚀前后表层土壤团聚体粒径分布及侵蚀过程中各粒径土壤团聚体间的周转率，定量研究细沟间侵蚀团聚体动态变化与侵蚀量的关系。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土样采自湖北省咸宁市贺胜桥镇，地跨 30°00′01.7″—30°59′30.3″N，114°19′23.9″—114°22′27.9″E，

属亚热带季风湿润气候区，年均降水量为 1 572 mm，4—8 月降水量可达全年的 70%左右。地貌以低丘岗地为主，坡度主要在 8~15°之间。土壤为第四纪黏土发育的红壤，土地利用类型为灌木园地，主要种植油茶。野外采样时用环刀采集表层原状土（0~20 cm），带回实验室用于测定田间持水量及容重。所有散土样均在室内风干，去除石块、根系后过 5 mm 筛备用。用于测定基本理化性质的土壤样品按试验要求过筛。

土壤理化性质采用常规方法测定^[23]。土壤机械组成采用吸管法测定；土壤质地采用美国制标准划分；土壤容重采用环刀法；pH 采用水土比为 2.5 : 1 的 pH 计测定；土壤有机质采用重铬酸钾外加热法。测定团聚体的样品单独采集，为不破坏团聚体自身结构，将装有团聚体样品的自封袋放入收纳盒中运输保存，测定时取保存较完整的土块，过 5 mm 筛后用 Elliott 湿筛法^[24]分级，分为大团聚体（5~2 mm，LMA）、小团聚体（2~0.25 mm，SMA）、微团聚体（0.25~0.053 mm，MIA），以及黏粉粒部分（<0.053 mm，SCP）共 4 个部分，并获得各粒径水稳性团聚体的占比，质量分数依次为 6.71%，55.95%，18.27%和 19.06%。其中，供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the test soil

土壤类型 Soil type	pH	容重 Bulk density / (g·cm ⁻³)	田间持水量 Field moisture capacity/%	颗粒组成			有机碳 SOC/ (g·kg ⁻¹)	质地 Soil texture
				Soil particle composition/%				
				砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay		
红壤 Red soil	5.36±0.05	1.29±0.07	25.73±1.42	4.60±0.00	51.85±2.07	43.55±2.07	17.79±0.86	粉砂质黏土

注：表中数据为均值±均方根。Note: Values are mean ± Standard deviation.

1.2 REE 的标记与测定方法

本研究选用四种稀土氧化物 La₂O₃、Sm₂O₃、Nd₂O₃ 和 Gd₂O₃ 作为标记物，其纯度均> 99.99%。REOs 的平均直径为 4.23~4.65 μm，颗粒密度为 6.51~7.54 g·cm⁻³，四种稀土元素的分子质量分别为 La₂O₃（325.84），Nd₂O₃（336.47），Sm₂O₃（348.72）和 Gd₂O₃（362.50），土壤中的背景值分别为（26.91±1.04）mg·kg⁻¹，（18.48±1.76）mg·kg⁻¹，

（1.31±0.23）mg·kg⁻¹ 和（1.90±0.63）mg·kg⁻¹。

全土样标记采用湿混法^[20]。将土壤分成四份分别用一种 REE 元素进行全土样培养，然后湿筛分级，得到分别被不同元素标记的四个粒径的水稳性团聚体。以 La₂O₃ 为例，根据所需土壤质量称取定量的 La₂O₃（REE 的添加含量为 500 mg·kg⁻¹）配置成溶液后，均匀喷于待标记土壤中，边喷边轻轻搅拌，最后所添加的水量保持在土壤田间持水量的 60%。

然后将标记土壤密封, 常温静置 5 d, 在 40 °C 烘箱中烘干 48 h, 即可得到 La 标记的全土样。最后通过 Elliott 湿筛法获得 La 元素标记的 4 个粒径土壤团聚体, 其他稀土元素标记的土壤同样按照该方法培养。湿筛后收集不同 REO_s 标记的团聚体, 称重并根据原始土壤样品中各粒径团聚体的质量百分比重新组合为标记试验土样。试验选取 Nd₂O₃ 标记的 5~2 mm 团聚体, La₂O₃ 标记的 2~0.25 mm 团聚体, Sm₂O₃ 标记的 0.25~0.053 mm 团聚体和 Gd₂O₃ 标记的 <0.053 mm 团聚体重组土样, 并保存 15 g 土样进行测定, 作为各元素原始浓度, 并将重组土样用于装填土槽进行降雨试验。

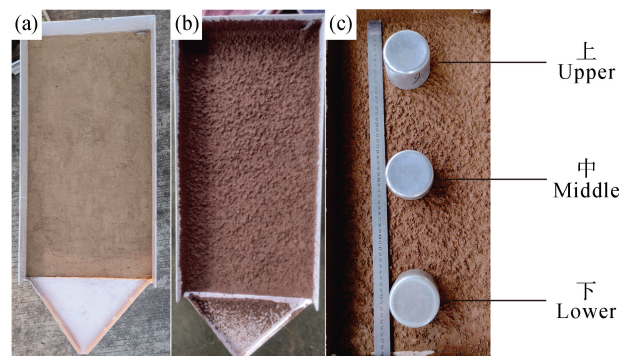
稀土元素的测定采用 Na₂O₂ 碱熔法^[25], 每个样品分别取 2 次土样进行测样配制, 作为重复。

1.3 室内人工模拟降雨试验

室内人工模拟降雨试验在华中农业大学降雨大厅内完成。细沟间侵蚀过程在自制微型侵蚀土槽进行, 规格为 60 cm×30 cm×15 cm (长×宽×高), 下层装有干细砂便于及时排水, 其中侵蚀槽顶部用过筛土样装填并固定以模拟自然裸坡糙面 (图 1)。根据野外采集的环刀实测的容重数据, 控制填土容重为 1.29 g·cm⁻³。将试验土槽四周边壁尽量压实, 尽可能减小边界效应的影响。本研究所有试验土壤为前期土壤含水量相近的干土。降雨强度设置为 90 mm·h⁻¹, 控制坡度为 10°。降雨试验开始前, 对降雨强度进行率定, 直至达到稳定。每场降雨历时为坡面产流后 1 h。降雨过程中每 6 min 采集一次水沙样品, 用 Elliott 湿筛法对泥沙颗粒进行分级, 即 5~2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm、<0.053 mm 共 4 个粒径, 烘干后称重, 同时用于测定各粒径泥沙稀土元素含量。降雨结束后对土槽上残余土壤进行分块取样 (上、中、下分别取样), 分别过筛、烘干测定土壤团聚体粒径分布及稀土元素含量。

1.4 土壤侵蚀指标

细沟间侵蚀过程中, 产流指标包括初始产流时间与径流系数 (Rc)。初始产流时间为达到目标雨强并稳定后, 撤去挡板并开始计时, 直至在侵蚀槽出口处观察到线状水流的时间。产流量为每次接样时的水沙混合样品减去接样容器和泥沙的总质量, 径流系数为单位面积产流量与降水量的比值。产沙指标包括土壤产沙率 (Di) 和径流泥沙浓度 (Cs)。土壤产沙率为单位面积单位时间土壤流失量, 径流泥



注: (a) 降雨前土槽; (b) 降雨后土槽; (c) 侵蚀团聚体采样

Note: (a) Soil trough before rainfall; (b) Soil trough after rainfall; (c) Erosion aggregates sampling

图 1 微型侵蚀土槽示意图

Fig. 1 Diagram of a miniature soil trough

沙浓度为泥沙质量和径流体积的比值。

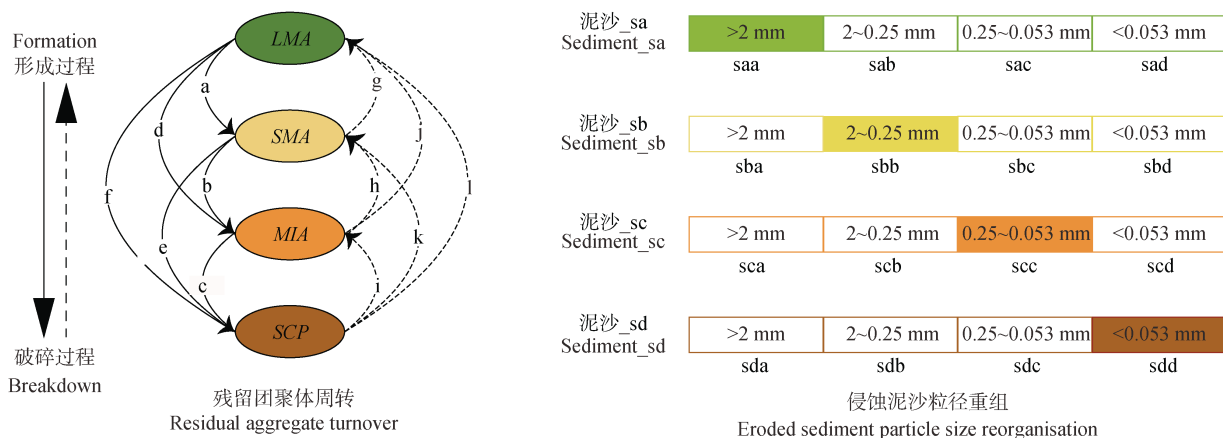
通过土壤颗粒质量与颗粒直径的关联, 对土壤中各粒径团聚体或泥沙的粒径分布来表示分形特征^[26], 计算相应的残留土壤或侵蚀泥沙的粒径分形维数 D。公式如下:

$$\frac{M(\delta < \bar{d}_i)}{M_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)^{3-D} \quad (1)$$

式中, $M(\delta < \bar{d}_i)$ 代表土壤中小于 \bar{d}_i 的颗粒的累积质量; M_0 为各粒径颗粒的质量之和; \bar{d}_i 为筛分粒径范围 (d_i, d_{i+1}) 平均值; \bar{d}_{\max} 为最大粒径平均直径, D 表示土壤分形维数。

1.5 土壤残余团聚体周转路径和侵蚀泥沙来源路径

侵蚀过程中, 土壤团聚体会转化为残留团聚体和侵蚀泥沙两部分。通过测定团聚体和泥沙中 REE 含量变化定量计算各粒径团聚体在不同周转路径下的变化率^[20]。通过湿筛, 将团聚体和侵蚀泥沙分别分为上述 4 个粒径。其中, 残留团聚体存在如图 2 所示的 12 条各粒径团聚体周转路径, 分别为团聚体破碎方向 a~f 的 6 条路径 (实线箭头部分), 例如: “a” 代表 5~2 mm 粒径的团聚体经过降雨侵蚀转化为 2~0.25 mm 粒径团聚体的破碎过程; 和团聚体形成方向 g~l 的 6 条路径 (虚线箭头部分), 例如: “g” 代表 2~0.25 mm 粒径团聚体转化为 5~2 mm 粒径的团聚体的形成过程^[27]。



注：实线部分表示团聚体破碎过程，虚线部分表示团聚体形成过程。其中，LMA、SMA、MIA 和 SCP 代表不同粒径土壤团聚体，分别为 5~2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒径，a~f 分别代表团聚体破碎过程中 6 种破碎路径方向，g~l 分别代表团聚体形成过程中 6 种形成路径方向。Note: The solid lines represent the processes of the breakdown of aggregates and the dashed lines represent processes of formation of aggregates. Where, LMA, SMA, MIA and SCP represent different particle size aggregates, 5~2 mm, 0.25~2 mm, 0.053~<0.25 mm and <0.053 mm particle size respectively, a~f represent the six fragmentation path directions during aggregate fragmentation, g~l represent the six formation path directions during aggregate formation respectively.

图 2 侵蚀过程团聚体周转和侵蚀泥沙来源示意图

Fig. 2 Schematic diagram of aggregate turnover and erosion sediment sources in interrill erosion

细沟间侵蚀过程中收集的泥沙为表面土壤团聚体侵蚀周转后的产物，4 个粒径团聚体均可形成泥沙，以土壤表层的大团聚体为例，5~2 mm 粒径的团聚体可能以 >2 mm 的泥沙颗粒脱离土体形成泥沙，也可能破碎形成 2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 的泥沙颗粒脱离土体，共 4 种可能的形式形成“泥沙_{sa}”，依次表示为 saa、sab、sac 和 sad。同理，小团聚体、微团聚体、黏粉粒也分别有 4 种可能的形式形成“泥沙_{sb}”、“泥沙_{sc}”和“泥沙_{sd}”。因此，最终 >2 mm 的侵蚀泥沙颗粒由不同粒径团聚体分别通过 saa、sba、sca 和 sda 这 4 条路径共同形成的结果，同理 2~0.25 mm 侵蚀泥沙颗粒，0.25 mm~0.053 mm 侵蚀泥沙颗粒和 <0.053 mm 侵蚀泥沙颗粒则分别通过“sab、sbb、scb 和 sdb”，“sac、sbc、scc 和 sdc”以及“sad、sbd、scd 和 sdd”这 3 组路径形成的结果，所以侵蚀泥沙部分存在破碎、形成和稳定的 16 条路径。在细沟间侵蚀过程中，稳定产流前会损失一部分泥沙样品，质量不守恒，因此在本文中将残余团聚体周转和侵蚀泥沙作为独立的两部分单独进行计算，即在计算残余团聚体周转部分时只考虑表层土壤在侵蚀过程中的周转过程，忽略土壤表面损失部分，视 sa、sb、sc 和 sd 均为 0。

(1) 团聚体的周转指标。残余土壤团聚体周转路径分析具体参考汪零等^[27]。本研究中，由于土壤样品混合时无外力干扰，视作未发生周转， t_1 时刻

即为初始状态^[28]。因此，可以通过团聚体的周转率 (Turnover) 来衡量团聚体参与周转过程的比例，周转率越大，说明团聚体保持稳定的比例越低^[15]。

$$\text{Turnover}_{\text{LMA}} = \frac{(a + d + f)}{t} \quad (2)$$

$\text{Turnover}_{\text{LMA}}$ 为大团聚体的周转率， a 、 d 和 f 分别为大团聚体转化为小团聚体，微团聚体和黏粉粒团聚体的周转比例。以此类推 $\text{Turnover}_{\text{SMA}}$ 、 $\text{Turnover}_{\text{MIA}}$ 和 $\text{Turnover}_{\text{SCP}}$ 分别为小团聚体，微团聚体和黏粉粒团聚体的周转率； t 为降雨事件的相应时间间隔 (在本研究连续稳定产流时间为 1 h，所以 $t=1$ h)。

在降雨侵蚀驱动下，团聚体破碎或形成方向上，土壤体系中大团聚体、小团聚体和微团聚体的累积破碎率 BD 和累积形成率 FM 可通过其转化路径计算得到^[29]。但由于侵蚀颗粒往往是土壤损失部分而脱离原位土壤体系，因此，对于土壤体系而言，大团聚体的累积破碎率和累积形成率为：

$$BD(\text{LMA}) = a + d + f \quad (3)$$

$$FM(\text{LMA}) = \frac{(g * m_{\text{SMA}} + j * m_{\text{MIA}} + l * m_{\text{SCP}})}{m_{\text{LMA}}} \quad (4)$$

式中， $BD(\text{LMA})$ 为大团聚体累积破碎的比例， FM

(LMA) 为新形成的大团聚体的比例。 m_{LMA} 、 m_{SMA} 、 m_{MIA} 和 m_{SCP} 分别为大团聚体、小团聚体、微团聚体和黏粉粒团聚体的初始质量。小团聚体、微团聚体

的累积破碎率和累积形成率以此类推。

对于土壤体系的总破碎率及总形成率, 即侵蚀土壤净破碎率和净形成率为:

$$BD(TBS) = \frac{BD(LMA) \times m_{LMA} + BD(SMA) \times m_{SMA} + BD(MIA) \times m_{MIA}}{M} \quad (5)$$

$$FM(TBS) = \frac{FM(LMA) \times m_{LMA} + FM(SMA) \times m_{SMA} + FM(MIA) \times m_{MIA}}{M} \quad (6)$$

式中, M 为土壤的最初质量。

(2) 侵蚀泥沙周转矩阵。以下公式及推导过程由汪零等^[27]团聚体周转过程延伸所得, t_1 到 t_2 时刻侵蚀泥沙通过转移矩阵 $K_{\text{泥沙}}(t_2-t_1)$ 表示为

$$K_{\text{泥沙}}(t_2-t_1) = \begin{bmatrix} saa & sba & sca & sda \\ sab & sbb & scb & sdb \\ sac & sbc & scc & sdc \\ sad & sbd & scd & sdd \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $sa=saa+sab+sac+saa$, 均为大团聚体迁移形成泥沙的可能路径, 以此类推。

侵蚀泥沙体系在时间 t 的含量用 $S_{\text{泥沙}}(t)$ 表示如下:

$$S_{\text{泥沙}}(t) = \begin{bmatrix} ELMA(t) \\ ESMA(t) \\ EMIA(t) \\ ESCP(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

ELMA(t)代表 t 时刻 5~2 mm 大小的泥沙颗粒

含量, 以此类推。

根据质量守恒定律, $S_{\text{泥沙}}(t_1)$ 和 $S_{\text{泥沙}}(t_2)$ 的关系可以根据 $K_{\text{泥沙}}(t_2-t_1)$ 联系起来, 即 S 和 K 矩阵满足公式:

$$S_{\text{泥沙}}(t_2) = K_{\text{泥沙}}(t_2-t_1) S_{\text{泥沙}}(t_1) \quad (9)$$

用稀土氧化物示踪的方法来量化泥沙的迁移路径。

REO_{泥沙}con.(t)为 t 时刻各级泥沙颗粒中的稀土氧化物浓度:

$$\text{REO}_{\text{泥沙}}\text{con}(t) = \begin{bmatrix} [La_{ELMA}] & [Sm_{ELMA}] & [Nd_{ELMA}] & [Gd_{ELMA}] \\ [La_{ESMA}] & [Sm_{ESMA}] & [Nd_{ESMA}] & [Gd_{ESMA}] \\ [La_{EMIA}] & [Sm_{EMIA}] & [Nd_{EMIA}] & [Gd_{EMIA}] \\ [La_{ESCP}] & [Sm_{ESCP}] & [Nd_{ESCP}] & [Gd_{ESCP}] \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $[La_{ELMA}]$ 为 ELMA (>2 mm 的泥沙颗粒) 中 La 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 以此类推。

则各粒径团聚体中稀土元素的总量为:

$$\text{REO}_{\text{泥沙}}\text{amo}(t) = \begin{bmatrix} ELMA(t)[La_{ELMA}] & ELMA(t)[Sm_{ELMA}] & ELMA(t)[Nd_{ELMA}] & ELMA(t)[Gd_{ELMA}] \\ ESMA(t)[La_{ESMA}] & ESMA(t)[Sm_{ESMA}] & ESMA(t)[Nd_{ESMA}] & ESMA(t)[Gd_{ESMA}] \\ EMIA(t)[La_{EMIA}] & EMIA(t)[Sm_{EMIA}] & EMIA(t)[Nd_{EMIA}] & EMIA(t)[Gd_{EMIA}] \\ ESCP(t)[La_{ESCP}] & ESCP(t)[Sm_{ESCP}] & ESCP(t)[Nd_{ESCP}] & ESCP(t)[Gd_{ESCP}] \end{bmatrix} \quad (11)$$

当稀土元素遵循质量守恒定律, 公式可修改为:

$$\text{REO}_{\text{泥沙}}\text{amo.}(t_2) = K_{\text{泥沙}}(t_2-t_1) \text{REO}_{\text{泥沙}}\text{amo.}(t_1) \quad (12)$$

则上述周转矩阵 $K_{\text{泥沙}}(t_2-t_1)$ 公式可修改为:

$$K_{\text{泥沙}}(t_2-t_1) = \text{REO}_{\text{泥沙}}\text{amo.}(t_2) \text{REO}_{\text{泥沙}}\text{amo.}(t_1)^{-1} \quad (13)$$

(3) 侵蚀泥沙的来源。泥沙的来源可通过稀土元素含量分布求得。以 >2 mm 泥沙为例, 该泥沙来自大团聚体、小团聚体、微团聚体和黏粉粒径团聚体的含量分别为:

$$\begin{aligned} m'(LMA) &= \frac{[La_{ELMA}] * ELMA}{La_{\text{标记浓度LMA}}}; \\ m'(SMA) &= \frac{[Sm_{ELMA}] * ELMA}{Sm_{\text{标记浓度SMA}}}; \\ m'(MIA) &= \frac{[Nd_{ELMA}] * ELMA}{Nd_{\text{标记浓度MIA}}}; \\ m'(SCP) &= \frac{[Gd_{ELMA}] * ELMA}{Gd_{\text{标记浓度SCP}}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, ELMA 为 >2 mm 侵蚀泥沙的质量 (g);

$La_{\text{标记浓度LMA}}$ 为试验中 La 标记大团聚体的浓度。以

此类推。

则泥沙>2 mm 的颗粒中, 来自各粒径团聚体的比例为:

$$\begin{aligned} R(saa) &= \frac{m'(LMA)}{ELMA}; R(sba) = \frac{m'(SMA)}{ELMA}; \\ R(sca) &= \frac{m'(MIA)}{ELMA}; R(sda) = \frac{m'(SCP)}{ELMA} \quad (15) \end{aligned}$$

1.6 数据处理

利用 SPSS 软件进行数据分析, Origin (2021 版) 软件进行绘图。

2 结 果

2.1 REE 标记可行性

团聚体预测值是由 ICP-MS 测得的稀土元素浓度通过式 (7)~式 (14) 计算求出的各时期各粒径的团聚体含量; 而实测值则是将降雨试验中各时间段采集的样品通过湿筛分成四个粒径然后称重的物理方法获得的团聚体含量。实测值与预测值之间的线性相关程度反映了稀土氧化物示踪效果, 两者越接近则该示踪方法在试验中的准确性和可行性越高^[17]。细沟间侵蚀过程中, 每间隔 6 min 所收集的泥沙样是由坡面四个粒径团聚体破碎或结合后随径流冲刷而来, 因此本文用收集的 4 个粒径泥沙含量实测值和预测值拟合验证 REE 标记的可行性。根据细沟间侵蚀过程中土壤侵蚀泥沙预测值与实测值的线性关系结果 (图 3), 拟合曲线线性关系斜率为 1.292, 稍偏离 1:1。这说明在持续的水流扰动作用下, 尽管示踪效果可能会受到干扰^[21], 但是稳定性仍较高。 R^2 达到 0.973, 可见通过稀土元素示踪法, 能准确预测团聚体的含量变化。说明了本试验中稀土元素示踪的可行性。

2.2 细沟间侵蚀产流产沙的基本特征

产流时间是产流特征的重要参数。在降雨初始阶段, 土壤处于非饱和状态, 当表层疏松的土壤水分蓄满后才发生产流。土样开始稳定产流时间为 (3.92±0.42) min, 而初始产流时间与地表结皮的形成有关^[5], 团聚体破碎不仅为侵蚀过程不断提供着可搬运的物质, 还会导致结皮产生并影响水分入渗等过程^[4, 30]。一般团聚体越易破碎, 土壤中游离的

小颗粒含量越高, 结皮越容易产生^[6], 而当结皮产生后, 泥沙运移从搬运限制转化为剥蚀限制。由表 2 可知, 径流强度随着降雨历时增加, 呈现先增大后逐渐稳定的趋势, 整体在 0.75~1.21 mm·min⁻¹ 范围内, 同样径流系数随降雨历时增加也呈现相同趋势。大雨强作用下初始阶段产流强度快速增加, 这是因为大雨强下土壤结皮形成速率相对较快, 随着降雨的进行, 在雨滴打击、压实和表层团聚体破碎的综合作用下, 地表结皮逐渐形成, 导致土壤入渗速率逐渐下降, 产流强度逐渐增加^[31]。土样泥沙浓度分布在 18.37~32.01 g·L⁻¹ 之间, 在产流初期快速增加, 产流 12 min 时达到峰值, 然后呈下降趋势, 产沙率呈现相同的趋势。这是因为在降雨初期, 土壤湿润后黏结力减小, 使土壤颗粒更容易被分离和溅散, 含沙量增加^[32]。此外, 在地表开始产生径流后土壤颗粒从单一的雨滴打击作用转化为雨滴打击与径流输移共同作用。这导致土壤颗粒更易从母体中分离, 进一步增强径流挟沙能力; 而当土壤结皮形成后表面土壤颗粒间黏结力增强, 土壤分离能力下降, 泥沙量逐渐减少。尽管土壤的径流强度在降雨过程中逐渐增加达到相对稳定, 土壤侵蚀量不断累积, 土壤的产沙强度却表现出先增加后逐渐减小的趋势。这表明降雨过程中表层土壤团聚体对降雨和薄层水流的响应会引起土壤结构的不断变化, 并进一步影响侵蚀特征。

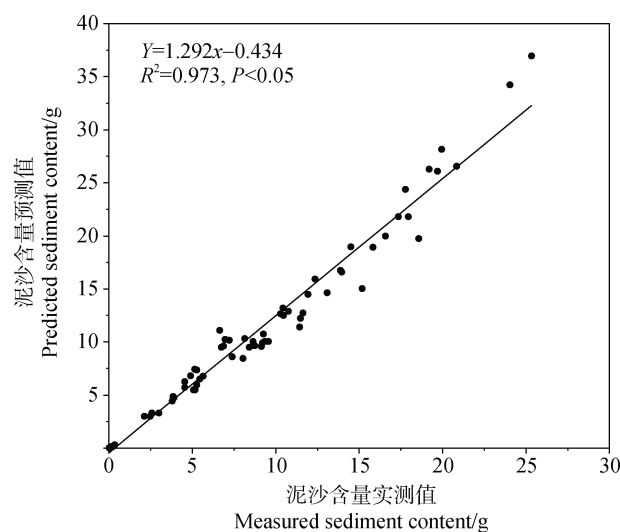


图 3 细沟间侵蚀过程中土壤团聚体预测值与实际值的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between predicted and actual values of soil aggregates during interrill erosion

表 2 细沟间侵蚀过程中产流产沙基本数据

Table 2 Basic data of runoff and sediment during interrill erosion				
产流时间	径流强度	径流系数	泥沙浓度 Cs	产沙率 Di
Runoff duration/	Runoff intensity/	Rc	Sediment concentration/	Sediment production rate/
min	(mm·min ⁻¹)	Runoff coefficient	(g·L ⁻¹)	(g·m ⁻² min ⁻¹)
6	0.748	0.499	18.370	13.669
12	1.119	0.746	32.007	35.528
18	1.177	0.785	29.497	34.796
24	1.185	0.790	28.375	33.863
30	1.183	0.789	25.402	30.155
36	1.209	0.806	24.442	29.5135
42	1.179	0.786	23.650	27.947
48	1.150	0.766	23.925	27.594
54	1.181	0.787	23.092	27.343
60	1.191	0.794	20.847	24.783

结合图 4 泥沙粒径分布可以看出，泥沙颗粒以 2~0.25 mm 和<0.053 mm 粒径为主，呈“双峰”分布^[33]。土样粒径变化在 18~24 min 之后达到稳定，<0.053 mm 的泥沙含量先增加后减小，最终逐渐稳定在 34%~38%，这可能是因为坡面表层土壤中分散的<0.053 mm 的团聚体含量由于在降雨过程中相互粘结或是受径流搬运逐渐降低，导致该粒径泥沙含量逐渐降低。2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 的泥沙含量均先呈现减小后增加至稳定的趋势，分别稳定在 43%~47%和 16%~20%范围内。

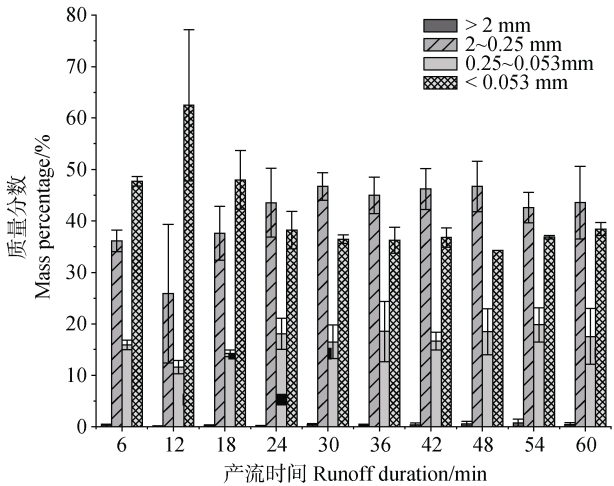
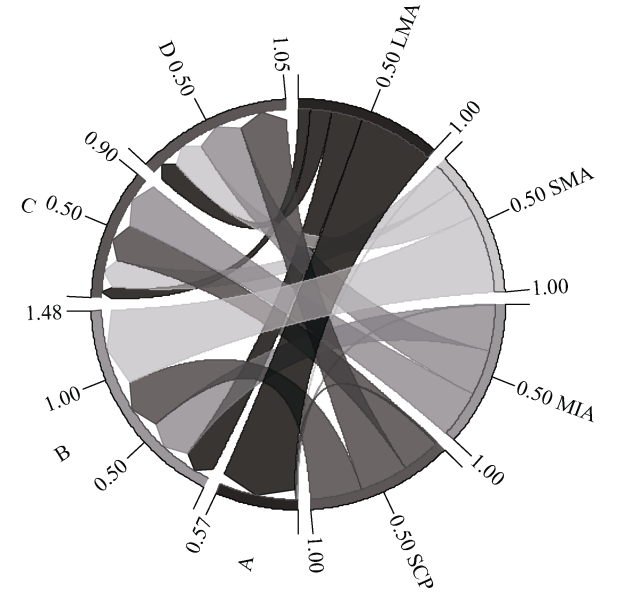


图 4 细沟间侵蚀过程中泥沙粒径随产流时间的分布
Fig. 4 Distribution of sediment grain size over time during interrill erosion

2.3 残余土壤团聚体的周转特征与细沟间侵蚀的定量关系

对于细沟间侵蚀团聚体，自然条件下土壤流失量往往较为复杂，难以准确获得，因此视残留土壤为整体进行周转过程计算。基于各粒径团聚体中 REE 含量变化可计算得到各粒径之间的质量转化率，从而量化降雨侵蚀驱动下土壤各粒径团聚体的周转路径。由图 5 土壤团聚体在细沟间侵蚀的周转矩阵图可知，细沟间侵蚀促使更多的大颗粒团聚体发生破碎，而形成方向的转化较少，因为团聚体粒径越大，孔隙越发达，联结越不紧密，其对降雨打击更敏感而易发生破碎^[28, 34]。未参与周转过程的>0.25 mm 的团聚体占比较大（分别为 54.1%和 56.3%），对于大团聚体转化，其主要破碎形成次粒



注：A, B, C, D 分别为降雨试验后的大团聚体（5~2 mm），小团聚体（2~0.25 mm），微团聚体（0.25~0.053 mm）和黏粉粒（<0.053 mm）；LMA, SMA, MIA 和 SCP 则为降雨前的大团聚体（5~2 mm），小团聚体（2~0.25 mm），微团聚体（0.25~0.053 mm）和黏粉粒（<0.053 mm）。Note: A, B, C and D respectively are large macroaggregates (5~2 mm), small macroaggregates (2~0.25 mm), microaggregates (0.25~0.053mm) and clay & silt fractions (<0.053 mm) after rainfall erosion. And LMA, SMA, MIA and SCP respectively are the initial aggregates, namely large macroaggregates (5~2 mm), small macroaggregates (2~0.25 mm), microaggregates (0.25~0.053 mm) and clay & silt fractions (<0.053 mm) before rainfall erosion.

图 5 细沟间侵蚀过程中团聚体周转矩阵
Fig. 5 Erosion aggregate turnover path

径的小团聚体, 占比为 22.3%, 仅有 8.6%的大团聚体形成了微团聚体。微团聚体未参与周转的部分 (34.4%), 破碎部分 (32.5%) 和团聚部分 (32.5%) 占比相近。而形成过程主要发生在<0.25 mm 粒径的团聚体上, 这反映出湿润情况下黏粒的强吸附作用和黏结作用^[35], 尤其是黏粉粒转化为<0.25 mm 粒径的团聚体占 36.7%, 所以相邻级别间的破碎或团聚比例更高^[36]。基本未向大团聚体形成的过程, 这是由于微团聚体表现出更高的内联结力, 因此在降雨侵蚀条件下土壤团聚体主要以微团聚体的形式稳定存在^[37-40]。Lipiec 等^[41]发现不同大小的团聚体孔隙结构存在差异, 这些空间形态的差异显著影响了团聚体的水稳定性和力稳定性, 因此不同粒径团聚体对于降雨侵蚀的响应也不同。

同样, 周转率 (表 3) 也受到团聚体粒径的影响。<0.25 mm 团聚体表现出更高的周转率, 因为团聚体粒径越小, 黏聚力越强。小团聚体周转率最低, 这与其在土壤中含量大高有密切联系。通过分形维数的计算, 侵蚀后土壤团聚体分形维数 (2.675) 较侵蚀前 (2.571) 有所增加, 进一步计算侵蚀团聚体各粒径分形维数 (表 3)。土壤分形维数越大, 小粒径团聚体的占比越

高。可以看出, 土样的分形维数均较侵蚀之前有所增加, 说明土壤粒径整体逐渐减小。同时, 各粒径团聚体的贡献分级表明团聚体粒径越小, 贡献分形维数越高, 小粒径团聚体中小颗粒的贡献比例越高。团聚体稳定性是影响团聚体破碎程度的重要因素, 结合土壤团聚体的累积破碎率以及形成率, 可知各粒径团聚体的累积变化情况。团聚体粒径越大, 其在侵蚀过程中的累积破碎率越大而累积形成率越低, 这是因为大粒径团聚体孔隙发达, 在雨滴打击和径流冲刷作用下更容易发生破碎, 小粒径团聚体则表现出更高的稳定性。小粒径团聚体表现更高的累积形成率, 因为随着土壤含水量增加, 小粒径团聚体之间的黏聚作用增强^[10, 42]。同时随着含大量悬浮泥沙的径流冲刷, 有小粒径团聚体进入团聚体间的孔隙或团聚体内的孔隙^[43], 或是结合土壤团聚体中释放出来的有机胶结物质后再次团聚。但是在降雨-径流的持续扰动下, 表土被分散的程度增强^[11], 团聚体破碎率始终高于团聚率。所以, 水分运动对团聚体颗粒具有更显著的作用, 导致细沟间侵蚀过程中团聚体更高的累积破碎率。对于土壤整体而言, 其破碎率也高于其形成率, 最终土壤团聚体粒径向逐渐减小的趋势转化。

表 3 土壤团聚体的周转指标

Table 3 Indicators of soil residual aggregates by turnover

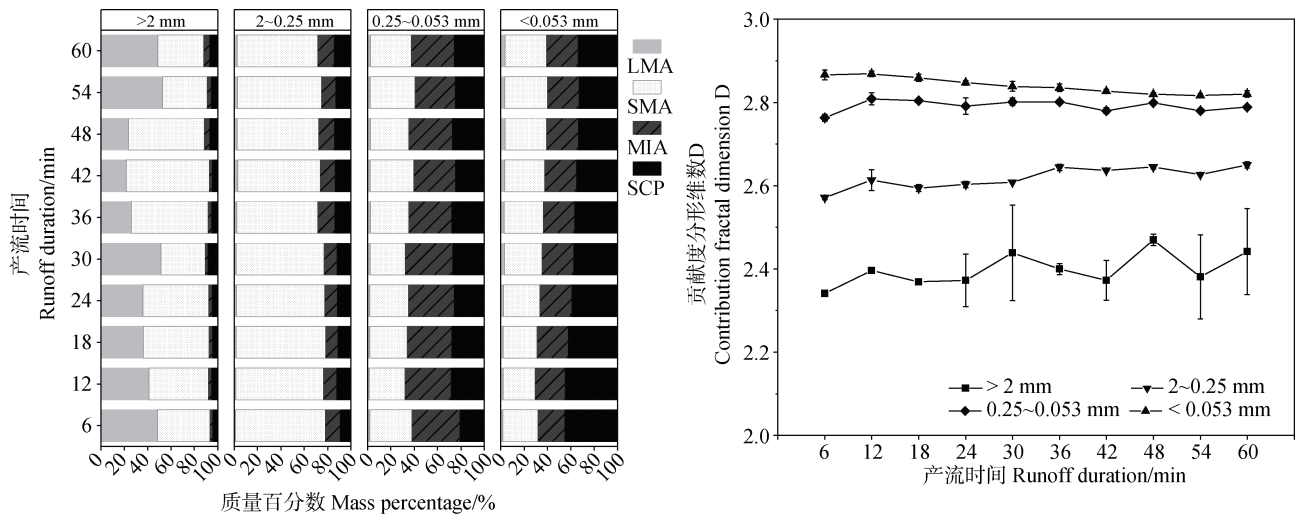
团聚体	周转率	分形维数 D	团聚体	累积破碎率	累积形成率
Aggregate	Turnover rate/%	Fractal dimension	Aggregate	Accumulated breakdown rate/%	Accumulated aggregation rate/%
LMA	45.94±0.2	2.198	LMA	45.8±0.2	9.5±2.1
SMA	43.69±1.7	2.496	SMA	43.3±1.7	23.1±0.5
MIA	65.94±0.4	2.633	MIA	32.5±0.7	28.8±0.4
SCP	65.59±2.1	2.645	TBS	33.3±0.8	18.8±0.5

注: TBS 是基于土壤团聚体粒径分布计算的土壤整体。本研究中不涉及小于黏粉粒的颗粒部分形成黏粉粒的可能路径, 以及黏粉粒再次破碎为更小粒径颗粒的变化路径。Note: TBS, based on soil aggregates particle size distribution calculated for the soil as a whole. The possible paths for the formation of sticky powder particles from the fraction of particles smaller than sticky powder particles and the change paths for the re-fragmentation of sticky powder particles into smaller particle size particles are not involved in this study.

2.4 侵蚀泥沙的来源特征与细沟间侵蚀的关系

受到各粒径团聚体的周转过程及坡面输移过程影响, 侵蚀泥沙存在多种来源: 可能原粒径团聚体直接被径流携带形成泥沙, 也可能团聚体在坡面破碎或重组被径流冲刷形成。从图 6 可以看出 4 个粒径侵蚀泥沙的来源分布情况随降雨时间及泥沙粒径大小而变化。整体而言, >0.25 mm 大小的泥沙颗粒主要来源于>0.25 mm 粒径的团聚体。88%~93%的

>2 mm 泥沙颗粒通过>0.25 mm 粒径的团聚体颗粒黏结或直接被冲刷带走的形式产生, 且该比例随着降雨历时增加呈下降趋势, 仅 2%~4%的微团聚体形成>2 mm 的泥沙颗粒。2~0.25 mm 大小的泥沙颗粒 69.0%~77.0%由小团聚体形成, 只有 1.3%~3.5%由大团聚体组成, 且其余三个粒径团聚体比例随降雨时间增加而增加。在 0.25~0.053 mm 侵蚀泥沙中, 微团聚体贡献范围为 34%~41%, 该比例随降雨历



注：LMA, SMA, MIA, SCP 分别代表大团聚体（5~2 mm）、小团聚体（2~0.25 mm）、微团聚体（0.25~0.053 mm）和黏粉粒部分（<0.053mm）。Note: LMA, SMA, MIA and SCP are respectively large aggregates (5~2 mm), small aggregates (2~0.25 mm), microaggregates (0.25~0.053mm), and the sticky particle fraction (<0.053 mm).

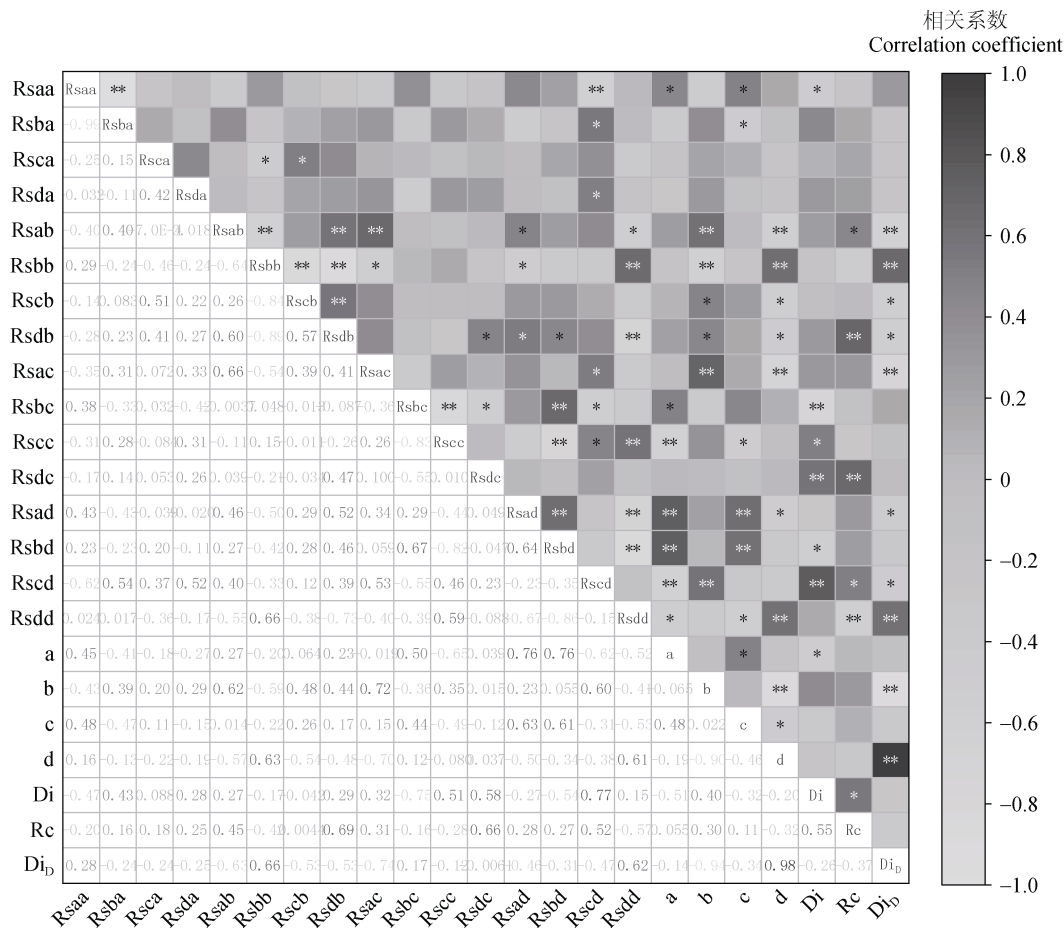
图 6 侵蚀泥沙中各粒径团聚体的贡献率和分形维数随产流时间的变化

Fig. 6 Contribution of aggregates and fractal dimension of each grain size in eroded sediment as a function of flow production time

时增加而减小；其余团聚体贡献率从大到小依次为小团聚体（29%~38%），黏粉粒（20%~28%）和大团聚体（1%~3%）。<0.053 mm 的泥沙主要源于黏粉粒和小团聚体，贡献率范围分别为 3%~45%和 27%~37%，黏粉粒贡献率随降雨时间增加而减小。有 13%~27% 的 <0.053 mm 的泥沙颗粒由微团聚体破碎产生，仅有 2%~11% 的泥沙颗粒由大团聚体破碎产生。因此，大部分泥沙颗粒由同等粒径的团聚体直接受径流搬运形成，且这部分占比随时间增加逐渐降低；其次为黏粉粒。主要因为 <0.053 mm 的黏粉粒具有强吸附性，更易与其他粒径团聚体黏结。而供试土样大团聚体占比最低，表面黏聚性较差，发生转化的机会较少，所以主要直接被冲刷形成 5~2 mm 粒径的泥沙，而其他 3 个粒径的泥沙颗粒中该粒径团聚体含量均最少。其他三个粒径团聚体转化为该粒径泥沙的比例逐渐增加，更多的团聚体逐渐参与到土壤周转过程中。结合土壤泥沙粒径内团聚体的贡献分形维数可知，分形维数越大则该粒径泥沙中小粒径团聚体的比例越高。>2 mm 的泥沙中，贡献分形维数波动较大，整体呈现上升趋势；2~0.053 mm 的两个粒径泥沙颗粒分形维数均随降雨历时增加而增加；而对于 <0.053 mm 的泥沙颗粒而言，分形维数随着降雨时间增加而逐渐降低。整体来看分形维数始终 SCP>MIA>SMA>LMA。可见，

随着降雨侵蚀的发生，表层土壤团聚体逐级发生破碎，越来越多的黏粉粒在径流作用下相互黏聚。

细沟间侵蚀过程中，土壤从离开原位置到输出坡面的过程中，在絮凝作用下不断发生转化，留在坡面或形成泥沙，因此泥沙的形成过程也是土壤侵蚀的动态量化过程。侵蚀泥沙的迁移路径与坡面产流产沙过程的相关性分析（图 7）显示，产沙量受各转化路径的影响，但主要与泥沙中小粒径团聚体絮凝的占比呈显著正相关，尤其是与 <0.053 mm 粒径的团聚体，例如产沙率（ D_i ）与黏粉粒团聚体转化为 0.25~0.053 mm 粒径泥沙的途径（ R_{sdc} ）呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），这是因为泥沙浓度增加，有利于泥沙颗粒间的碰撞而促进泥沙输移时发生絮凝^[41]。泥沙粒径分布主要为 2~0.25 mm 小团聚体和 <0.053 mm 黏粉粒，径流冲刷主要将团聚体破碎为更小的粒径携带下来。径流系数和产沙率呈显著正相关（ $P<0.05$ ），且与 <0.053 mm 黏粉粒团聚体转化为 0.25~2 mm 粒径的泥沙途径（ R_{sdb} ）和转化为 0.25~0.053 mm 粒径泥沙（ R_{sdc} ）呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），由基本理化性质也可知土样粉粒和黏粒占比较大，所以 <0.053 mm 黏粉粒主要团聚成大颗粒泥沙而流失。但坡面分布的小颗粒含量增多，颗粒间黏结力增强，表面结皮越致密，入渗能力越低，因此径流系数 R_c 更易受到 <0.053 mm 泥沙含量



注: a, b, c 和 d 分别为 5~2 mm, 2~0.25 mm, 0.25~0.053 mm 和<0.053 mm 泥沙颗粒质量百分比, Di_D 为侵蚀泥沙的粒径分形维数, R_c 为径流系数, Di 为产沙率。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。Note: a, b, c, and d are the proportions of eroded sediment of 5~2 mm, 2~0.25 mm, 0.25~0.053 mm, and <0.053 mm in the same time period, respectively. Di_D is the fractal dimension of particle size of sediment, R_c is the runoff coefficient and Di is sediment yield. * and ** indicate correlation is significant at 0.05 and 0.01 level, respectively.

图 7 侵蚀泥沙来源特征与坡面产流产沙特征的相关性热图
Fig. 7 Correlation heat map of sediment source and slope runoff and sediment characteristics

的抑制作用, 即 R_c 与泥沙形成过程 $Rsdd$ 呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

泥沙粒径的分形维数 Di_D 主要受到 2~0.25 mm 和<0.053 mm 泥沙颗粒及其转化过程的影响, Di_D 与 5~2 mm 粒径的团聚体破碎形成 2~0.25 mm 大小的泥沙过程 ($Rsab$), 0.25~0.053 mm、<0.053 mm 粒径团聚体形成 2~0.25 mm 大小的泥沙过程 ($Rscb$ 和 $Rsdb$) 均呈负相关, 与同等大小团聚体形成的泥沙过程 ($Rsbb$) 呈极显著正相关 ($P<0.01$)。相反, 在 4 个粒径团聚体转化为<0.053 mm 泥沙的 4 条路径中, Di_D 与其余 3 个粒径团聚体侵蚀为<0.053 mm 泥沙的过程 ($Rsad$, $Rsbd$ 和 $Rscd$) 呈负相关, 与 $Rsdd$ 呈极显著正相关 ($P<0.01$)。结合泥沙各粒径

来源情况分析, <0.053 mm 粒径的泥沙主要由同等粒径团聚体形成, $Rsdd$ 对 Di_D 的影响占主导地位, 且分形维数越大, 小粒径团聚体占比越大。所以整体侵蚀泥沙粒径以 2~0.25 mm 粒径泥沙 (b) 和<0.053 mm 泥沙 (d) 为主导作用, 而在整个侵蚀过程中其他粒径团聚体转化为小团聚体和黏粉粒也间接对泥沙分布和周转情况产生影响。

3 结 论

综合利用稀土元素示踪法和室内人工模拟降雨, 对细沟间侵蚀过程中红壤团聚体周转和侵蚀泥沙来源进行分析。(1) 侵蚀产流产沙与表土结构变

化和泥沙迁移作用联系密切。 $<0.053\text{ mm}$ 和 $2\sim 0.25\text{ mm}$ 粒径的泥沙含量及同等粒径的团聚体在泥沙中的贡献率对径流系数和泥沙粒径分形维数具有重要作用。侵蚀泥沙各粒径来源与泥沙总体粒径来源一致，主要由该粒径的团聚体被径流搬运形成，占比与降雨时间成反比。但其他粒径团聚体转化为该粒径泥沙的比例逐渐增加，以 $2\sim 0.25\text{ mm}$ 和 $<0.053\text{ mm}$ 粒径为主，呈现“双峰”分布，且分形维数越大该粒径泥沙中小粒径团聚体的比例越高。

(2) 在降雨-薄层水流的连续侵蚀条件下，残留团聚体不断发生周转变化的，其中 $>0.25\text{ mm}$ 粒径的团聚体未参与周转部分占比较大，且更易发生破碎；而 $<0.25\text{ mm}$ 粒径的团聚体均以形成小团聚体 (SMA) 为主要转化方向，表现出更高的周转率，尤其是 $<0.053\text{ mm}$ 粒径的团聚体转化为次粒径 $0.25\sim 0.053\text{ mm}$ 的团聚体，占总体的 36.7%。相邻粒径间的团聚体破碎或团聚比例更高更易团聚形成 $2\sim 0.25\text{ mm}$ 团聚体，基本没有大团聚体形成的过程。随着降雨时间的增加，更多的团聚体逐渐参与到土壤周转过程中。对于土壤整体而言，土壤团聚体累积破碎率始终高于累积团聚率，土壤整体破碎程度不断增加，分形维数增大，最终土壤团聚体粒径向逐渐减小的趋势转化。

参考文献 (References)

- [1] Zheng F. L. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35 (1): 95—103. [郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. *土壤学报*, 1998, 35(1): 95—103.]
- [2] Zhang X. C. Determining and modeling dominant processes of interrill soil erosion[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55 (1): 4—20.
- [3] Alavinia M, Saleh F N, Asadi H. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2019, 34 (3): 270—278.
- [4] Xiao H, Liu G, Zhang Q, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 150—158.
- [5] Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 627—643. [刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (3): 627—643.]
- [6] Le Bissonnais Y, Blavet D, De Noni G, et al. Erodibility of Mediterranean vineyard soils: Relevant aggregate stability methods and significant soil variables[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58: 188—195.
- [7] 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.
- [8] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China[J]. *Catena*, 2010, 81 (3): 240—248.
- [9] Sadeghi S H, Kiani Harchegani M, Asadi H. Variability of particle size distributions of upward/downward splashed materials in different rainfall intensities and slopes[J]. *Geoderma*, 2017, 290: 100—106.
- [10] Zhu X A, Liu W J, Yuan X, et al. Aggregate stability and size distribution regulate rainsplash erosion: Evidence from a humid tropical soil under different land-use regimes[J]. *Geoderma*, 2022, 420: 115880.
- [11] Chen L, Wang J, Huo C P, et al. Study on particle distribution characteristics of soil physical crust profile in sloping farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (4): 983—992. [陈琳, 王健, 霍春平, 等. 坡耕地土壤物理结皮分层颗粒组成特征研究[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (4): 983—992.]
- [12] Xiao H, Liu G, Zhao J F, et al. Characteristics of mechanical impact and slaking effect of rain drops on soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (4): 827—835. [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.]
- [13] Yan F L, Shi Z H, Cai C F, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on ultisols[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (4): 577—583. [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.]
- [14] Zhang X C, Liu G, Zheng F L. Understanding erosion processes using rare earth element tracers in a preformed interrill-rill system[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 920—927.
- [15] Wu Q Y. Applications of REEs tracer method used in soil erosion study[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45 (32): 124—126, 155. [吴倩云. REEs 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45 (32): 124—126, 155.]
- [16] Zhang J Q, Shang Y T, Bai R R, et al. Application of rare earth element tracer in the research of soil erosion and sediment source[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30 (3): 55—61. [张加琼, 尚月

- 婷, 白茹茹, 等. 稀土元素示踪法在土壤侵蚀与泥沙来源研究中的应用[J]. 水土保持研究, 2023, 30 (3): 55—61.]
- [17] Ding W F, Li Z B, Ding D S. Application of REE trace method to vertical erosion on land slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19 (2): 65—69. [丁文峰, 李占斌, 丁登山. 稀土元素示踪法在坡面侵蚀产沙垂直分布研究中的应用[J]. 农业工程学报, 2003, 19 (2): 65—69.]
- [18] Shang B X, Wang X, Li Z B, et al. Simulation experimental study of soil erosion process of slope scouring with rare earth elements tracer[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, 26(4): 510—515. [尚佰晓, 王瑄, 李占斌, 等. 稀土元素示踪坡面冲刷侵蚀过程的室内模拟试验研究[J]. 中国稀土学报, 2008, 26 (4): 510—515.]
- [19] Tang Z J, Lei T W, Zhang Q W, et al. Rain simulation of dynamic soil erosion processes with rare earth element tracers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (3): 32—35. [唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀动态过程的降雨模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22 (3): 32—35.]
- [20] 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 and Biochemistry, 2017, 109: 81—94.
- [21] Zhang W L, Wang B, Wang Y Q, et al. Quantitative transformation pathways of soil aggregate breakdown using rare earth element (REE) tracer method[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 154—161, 169. [张文龙, 王彬, 王云琦, 等. 基于REE示踪的土壤团聚体破碎转化路径定量表征[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (1): 154—161, 169.]
- [22] Liu S, Six J, Zhang H X, et al. Integrated aggregate turnover and soil organic carbon sequestration using rare earth oxides and ^{13}C isotope as dual tracers[J]. Geoderma, 2023, 430: 116313.
- [23] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [24] 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.
- [25] Yang X L, Cui S, Yang M, et al. Determination of rare earth elements in polymetallic ore by inductively coupled plasma mass spectrometry after alkali fusion and ion exchange[J]. Metallurgical Analysis, 2011, 31 (3): 11—16. [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.]
- [26] Yang P L, Luo Y P, Shi Y. Soil fractal characteristics characterized by weight distribution of particle size [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38 (20): 1896—1899. [杨培岭, 罗远培, 石元春. 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.]
- [27] Wang L, Wu W X, Ni S M, et al. Quantitative characterization of the turnover path of red soil aggregate in the splash process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (8): 115—123. [汪零, 吴文泉, 倪世民, 等. 溅蚀过程中红壤团聚体周转路径的定量表征[J]. 农业工程学报, 2022, 38 (8): 115—123.]
- [28] Zhou S N, 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.
- [29] 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.
- [30] Shi Z H, Song C Q. Water erosion processes: A historical review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 (5): 1—10. [史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. 水土保持学报, 2016, 30 (5): 1—10.]
- [31] Ran Q H, Su D Y, Li P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion[J]. Journal of Hydrology, 2012, 424/425: 99—111.
- [32] Wu F Z, Shi Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (6): 1235—1240. [吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J]. 土壤学报, 2012, 49 (6): 1235—1240.]
- [33] Almajmaie A, Hardie M, Acuna T, et al. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 167: 39—45
- [34] Wang X H, Yin L M, Dijkstra F A, et al. Rhizosphere priming is tightly associated with root-driven aggregate turnover[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 149: 107964.
- [35] Han Z G, Zhou Y C, Ren J J, et al. Distribution of organic carbon after wet sieving of soil aggregates of various particle sizes in Masson Pine plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (23): 9388—9398. [韩贞贵, 周运超, 任娇娇, 等. 马尾松人工林土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9388—9398.]
- [36] Liu S, Guo Z C, Halder M, et al. Impacts of residue

- quality and soil texture on soil aggregation pathways by using rare earth oxides as tracers[J]. *Geoderma*, 2021, 399: 115114.
- [37] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (10): 2176—2183. [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.]
- [38] Ma R M, Cai C F, Li Z X, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (3): 95—103. [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.]
- [39] Wu X L, Wei Y J, Wang J G, et al. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient[J]. *Catena*, 2017, 156: 205—215.
- [40] Mizuta K, Taguchi S, Sato S. Soil aggregate formation and stability induced by starch and cellulose[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 87: 90—96.
- [41] Lipiec J, Walczak R, Witkowska-Walczak B, et al. The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 97 (2): 239—246.
- [42] Moragoda N, Kumar M, Cohen S. Representing the role of soil moisture on erosion resistance in sediment models: Challenges and opportunities[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 229: 104032.
- [43] Sun L Y, Zhou J L, Cai Q G, et al. Comparing surface erosion processes in four soils from the Loess Plateau under extreme rainfall events[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9 (4): 520—531.

(责任编辑：檀满枝)