

中国 5 种典型土壤的侵蚀泥沙粒径分布特征

郝燕芳^{1,2}, 刘宝元², 杨 扬³, 刘瑛娜³, 王友胜⁴

(1. 黑龙江省水土保持科学研究院, 哈尔滨 150070;

2. 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100;

3. 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 通过天然降雨试验, 研究我国 5 种典型土壤的侵蚀泥沙团粒和单粒粒径分布以及泥沙各级团粒的机械组成特征。2013—2014 年汛期(6—9 月), 监测红壤、紫色土、黄绵土、褐土和黑土径流小区的降雨产流事件, 收集侵蚀泥沙样品, 利用湿筛法和吸管法测定其团粒和单粒粒径分布; 同时, 筛选出泥沙各级团粒样品, 进一步测定其单粒粒径组成。结果表明: (1) 侵蚀泥沙粒径分布是土壤质地和降雨强度综合作用的结果, 团粒粒径分布更适合作为表征泥沙输移的指标; (2) 5 种土壤的侵蚀泥沙皆表现出粉团(0.002~0.05 mm)和黏团(<0.002 mm)的明显富集; (3) 在泥沙单粒粒径分布方面, 除红壤的粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)有轻微富集外, 其余 4 种土壤的各级单粒均无明显富集; (4) 红壤侵蚀泥沙粉团(0.002~0.05 mm)中的黏粒含量最多, 其余 4 种土壤侵蚀泥沙机械组成和各级团粒的机械组成均与原土接近。

关键词: 侵蚀泥沙; 团粒粒径分布; 单粒粒径分布; 富集率; 天然降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0150-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.022

Size Distribution Characteristics of Sediments Eroded from Five Typical Soils in China

HAO Yanfang^{1,2}, LIU Baoyuan², YANG Yang³, LIU Yingna³, WANG Yousheng⁴

(1. Heilongjiang Institute of Soil and Water Conservation, Harbin 150070; 2. State Key Laboratory of Soil

Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048)

Abstract: This study investigated the size distributions of aggregates and primary particles in the sediments eroded from five typical soils in China under natural rainfalls. The experiment was conducted on five runoff plots packed with the Red Soil, Purple Soil, Loess, Cinnamon Soil and Black Soil. Sediment samples in four runoff events of these plots under natural rainfall were collected during June to September in 2013 and 2014. Using the pipette method and wet sieving technique, the compositions and size distributions of primary particles and aggregates were measured. Moreover, the sediment aggregates with different sizes were sieved and determined for the size distribution of primary particles. The results showed that: (1) The sediment size distribution was affected by both soil texture and rainfall intensity. The aggregate size distribution was more suitable as a better indicator for sediment transport. (2) Larger portions of silt-sized (0.002~0.05 mm) and clay-sized (<0.002 mm) aggregates were obtained in the sediments of five types of soils. (3) However, no obvious enrichment of primary particles was observed in the eroded sediments of any soil but the Red Soil, which possessed slightly elevated percentages of silt and clay in the corresponding sediments. (4) When further analyzing the primary particle-size composition of sediment aggregates with different size, the highest percentage of clay particles was determined in the silt-sized aggregates of the Red Soil. For the rest four types of soils, the mechanical composition of eroded sediment and the mechanical composition of the aggregates at all sizes were all similar to the source soil.

Keywords: runoff sediment; aggregate-size distribution; size distribution of primary particle; enrichment ratio; natural rainfall

收稿日期: 2017-11-09

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501604); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT_15R06)

第一作者: 郝燕芳(1983—), 女, 博士, 工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: haoyanfang@hotmail.com

通信作者: 刘宝元(1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: baoyuan@bnu.edu.cn

侵蚀泥沙通常由团粒(也称团聚体、未分散颗粒)和单粒(也称分散颗粒)共同组成^[1],其粒径分布不仅是影响泥沙输移和沉积的主要因素^[2],也是土壤侵蚀预报和养分输移模型的关键参数^[3]。自上世纪60年代开始,国内外就已广泛开展侵蚀泥沙粒径分布的研究工作^[4-7]。研究者们普遍认为,侵蚀泥沙颗粒多以团粒形式存在^[8-9]。然而,Meyer等^[1]和Young^[10]指出,中高黏粒含量的土壤和团聚性好的高粉土多以团粒形式被侵蚀;而对于一些砂粒含量高的土壤和团聚性差的高粉土而言,侵蚀泥沙中的单粒所占比例较高。不同质地的土壤因机械组成和团聚程度不同,其侵蚀泥沙的颗粒组成和输移搬运形式各异^[11-12]。

土壤侵蚀具有分选性。如果降雨和径流动能有限,不足以分离和搬运较大的土壤团粒和单粒,产生的泥沙往往较原土壤细^[13-15]。Swanson等^[16]以粉壤土为研究对象,采用雨强为63.5 mm/h,历时分别为1.4 h和1 h的模拟降雨,发现未分散条件下侵蚀泥沙中 <0.002 mm的颗粒较原土明显富集;Sutherland等^[17]对粉黏土的室内人工模拟降雨表明,当降雨强度为102 mm/h,历时为3 h时,其侵蚀泥沙中 <0.002 mm及 $0.002\sim 0.02$ mm粒级出现富集。当降雨和径流能量增强,泥沙中 $0.05\sim 2$ mm的粗颗粒也出现富集。Wan等^[18]指出,当径流流速很大并产生细沟时,泥沙中以 $0.053\sim 2$ mm粒级富集为主。但是,泥沙经过化学分散后,其单粒粒径分布与原土接近。Mitchell等^[19]和Martinez-Mena等^[20]分别通过室内和野外人工模拟降雨试验得到了相同的结论。可见,土壤侵蚀过程对分散后的单粒并不会产生明显的分选,未经化学分散的团粒粒径分布更能有效地反映侵蚀过程^[8,21-22]。

团粒在泥沙输移和养分迁移方面具有重要作用。Alberts等^[23]指出,侵蚀泥沙物理化学输移特性受泥沙各级团粒的单粒粒径组成影响,有必要进一步探讨各级团粒的机械组成,明确各级团粒的单粒粒径组成特征,尤其是黏粒等小颗粒在不同粒级团粒中的含量,为建立土壤侵蚀预报和化学物质输移模型提供有力的理论支撑。目前,有关各级团粒的机械组成研究不多,得出的结论主要包括以下2类:一类观点认为,团粒的机械组成与其粒径无关,不同团粒具有与原土相似的砂粒、粉粒和黏粒含量^[18,24]。Swanson等^[4]利用野外人工模拟降雨试验发现,极细砂壤土和粉黏壤土的侵蚀泥沙中 $0.1\sim 0.25$, $0.25\sim 0.5$, $0.5\sim 1$, $1\sim 2$ mm团粒的机械组成相似。另一类观点认为,泥沙各级团粒的机械组成因团粒大小而异。有研究指出团粒越小,其黏粒含量越高^[25];但也有学者认为大团粒的黏粒含量更高^[26],因为黏粒对团粒的稳定性至关重要^[27]。

目前,多数研究均采用室内或野外人工模拟降雨试验,天然降雨条件下的侵蚀泥沙粒径分布研究相对匮乏。此外,相关研究多止步于泥沙团粒和单粒粒径分布,缺少对各级团粒机械组成的深入研究。因此,本研究利用天然降雨,以中国5种典型土壤为对象,分析土壤与泥沙的团粒和单粒粒径分布以及泥沙各级团粒的机械组成,探讨不同质地土壤的侵蚀泥沙粒径特征及黏粒等细小颗粒在不同粒级团粒中的分布特点,以期为深入理解泥沙输移机制和营养元素富集规律提供理论支持,也为土壤侵蚀模型开发和水土保持措施的制定提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 径流小区概况

本研究在北京市房山区北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室野外试验基地的5个径流小区上开展。小区所填土壤为我国5种典型土壤,填土厚度为30 cm,于2005年分别采自5个不同地区的耕层,包括福建省安溪县的红壤、四川省南充市的紫色土、陕西省米脂县的黄绵土、北京市密云区的褐土和黑龙江省嫩江县的黑土。根据中国土壤系统分类,这5种土壤分别属于:黏化湿润富铁土(Agri-Udic ferrosols)、石灰紫色湿润雏形土(Calcaric Purpli-Udic Cambosols)、黄土正常新成土(Loessi-Orthic Primosols)、筒育干润淋溶土(Hapli-Ustic Argosols)和筒育湿润均腐土(Hapli-Udic Isohumosols)^[28]。

5种土壤的基本理化性质见表1。各小区坡长水平投影为20 m,坡宽2.1 m,坡度 5° ,坐南朝北,小区间隔1.5 m。从2006年开始,按照当地的耕作习惯,每年4月对小区土壤进行翻耕,并定期除草保持清耕裸露。

1.2 降雨和产流产沙观测

2013年和2014年汛期(6—9月),利用安装在试验基地的虹吸式自记雨量计,收集、记录历次降雨过程。同时,测量历次降雨事件中各小区的产流产沙情况,收集径流泥沙样品。本文研究的4次降雨产流事件基本特征见表2。

1.3 采样与测定方法

2014年8月,采集各小区坡上、坡中、坡下表层0—10 cm土壤样品,均匀混合后用于测定土壤的团粒和单粒粒径分布。2013年和2014年6—9月,每次降雨产流后,用1 L的采样瓶采集各小区的径流泥沙样品各4个。其中,2个用于测定泥沙团粒粒径分布,2个用于测定泥沙单粒粒径分布。待以上泥沙样品采集完成之后,用一套直径20 cm,孔径分别为5,2,1,0.5,0.25,0.1,0.05 mm的套筛,湿筛出足量的各级团粒样品^[29],保证各级样品不少于30 g,用于测定侵蚀泥沙各级团粒的机械组成。

表 1 5 种典型土壤的基本理化性质

土壤 类型	采样 地点	土壤 质地	机械组成/%			有机质/ %	pH
			黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	砂粒(0.05~2 mm)		
红壤	福建	黏壤土	25.9	29.1	45.0	0.78	6.03
紫色土	四川	粉黏壤土	36.2	57.1	6.7	0.64	7.84
黄绵土	陕西	粉壤土	13.2	63.0	23.8	0.51	8.19
褐土	北京	粉壤土	18.2	57.8	24.0	1.16	8.06
黑土	黑龙江	粉黏壤土	38.7	53.5	7.8	5.40	5.94

表 2 4 次降雨产流事件的降雨和产流产沙特征

日期 (年-月-日)	降雨量/ 平均雨强/		$I_{30}/$ (mm·h ⁻¹)	径流深/mm					侵蚀模数/(t·hm ⁻²)				
	mm	(mm·h ⁻¹)		红壤	紫色土	黄绵土	褐土	黑土	红壤	紫色土	黄绵土	褐土	黑土
2013-07-01	50.2	8.4	61.1	40.9	39.3	29.0	27.6	24.0	17.3	25.4	16.9	12.0	11.9
2014-07-29	34.4	2.9	17.6	13.0	8.8	2.0	4.7	2.7	1.3	1.3	0.1	0.1	0.9
2014-08-21	20.9	3.5	21.4	11.0	9.1	2.6	4.1	5.5	2.1	4.5	0.3	0.3	3.8
2014-08-22	9.5	21.8	18.9	8.5	7.2	4.5	5.0	7.0	2.1	4.0	0.4	0.4	6.9

根据美国农业部土壤粒径分级方案,将单粒划分为 10 个粒级(表 3)。团粒一般只区分大团粒和微团粒。为了与单粒粒级分布对比,本研究将团粒也划分为 10 个粒级,并参照单粒粒级的命名方式,将其分为黏团、细粉团等(表 3)。对于>0.1 mm 的 6 个粒级,采用湿筛法^[29]测定,<0.1 mm 的 4 个粒级采用标准的吸管法^[30]。单粒粒径分布所采用的测定方法与团粒分级一致,二者的区别在于是否进行了分散处理。团粒分析在未分散条件下进行,单粒分析需根据土壤的 pH 和其他化学性质对样品进行相应的预处理,如除钙、除有机质、化学分散等。例如,使用稀盐酸去除紫色土和黄绵土中的钙离子,用双氧水除去褐土和黑土中的有机质。红壤和黑土是酸性土,pH 分别为 6.03 和 5.94,采用氢氧化钠作为分散剂;其余 3 种土壤均为碱性土(表 1),用六偏磷酸钠作为分散剂。

表 3 团粒和单粒粒级的划分与对应名称

粒级/mm	团粒	单粒
<0.002	黏团	黏粒
0.002~0.02	细粉团	细粉粒
0.02~0.05	粗粉团	粗粉粒
0.05~0.1	极细砂团	极细砂粒
0.1~0.25	细砂团	细砂粒
0.25~0.5	中砂团	中砂粒
0.5~1	粗砂团	粗砂粒
1~2	极粗砂团	极粗砂粒
2~5	细砾团	细砾
>5	中砾团	中砾

1.4 数据分析

采用平均重量直径(MWD)^[31]描述土壤和泥沙颗粒的平均粒径:

$$MWD=\sum_{i=1}^n\overline{X}_iW_i$$

(1)

式中:MWD 为平均重量直径(mm); $\overline{X}_i$ 为粒级*i*的平均直径(mm); W_i 为粒级*i*的百分比含量(%);*n*为粒径划分的级数。MWD 越大,土壤或泥沙的颗粒越粗,反之亦然。对于不同土壤或泥沙而言,其单粒粒径组成各不相同,简单计算团粒 MWD 无法反映其

团聚程度^[21]。因此,分别计算团粒和单粒 MWD,并用前者除以后者得到 MWD 比值。MWD 比值越大,则团聚程度越高;反之亦然。

不同粒级团粒和单粒在泥沙中的富集程度可以通过富集率(ER)计算,表示为侵蚀泥沙某一粒级的百分比含量与原土壤对应粒级的含量之比,是衡量土壤侵蚀对土壤颗粒(团粒和单粒)分选作用的重要指标。当 ER>1 时,表示富集,即该粒级的颗粒被选择性地侵蚀;当 ER<1 时,表示贫集,即该粒级的颗粒不容易被侵蚀而使其在泥沙中的含量少于土壤;当 ER 接近 1 时,则表示泥沙中该粒级的百分比含量与原土接近,土壤侵蚀对其没有分选。对于某一粒级*i*,富集率 ER_{*i*}计算公式为:

$$ER_i=\frac{Sed_i}{Soil_i}$$

(2)

式中:Sed_{*i*}和 Soil_{*i*}分别是泥沙和原土中粒级*i*的质量百分含量(%)。

2 结果与分析

2.1 侵蚀泥沙团粒和单粒粒径分布

4 次降雨侵蚀泥沙的团粒和单粒粒径分布见图 1。从图 1 可以看出,黄绵土和褐土的产沙量普遍较少,难以满足试验分析的需要。因此,仅测定了 2013 年 7 月 1 日的侵蚀泥沙(图 1a、图 1b);由于采样失误,未采集 2014 年 7 月 29 日的红壤、紫色土和黑土团粒样品(图 1c)以及 2014 年 8 月 21 日的红壤团粒样品(图 1d)。

对红壤、黄绵土和褐土而言,侵蚀泥沙分散前,粗粉团(0.02~0.05 mm)所占比例最高,为泥沙总量的 28.3%~60.1%;紫色土和黑土则以细粉团(0.002~0.02 mm)为最多,占 23.3%~39.2%。侵蚀泥沙分散后,黄绵土和褐土以 0.02~0.05 mm 的粗粉粒为最多,但所占比例较分散前的对应团粒略少;而红壤、紫色土和黑土皆以黏粒(<0.002 mm)和细粉粒为主,占 28.1%~46.5%。

计算次降雨侵蚀泥沙团粒和单粒的 MWD 及其比值(MWD Ratio)发现,5 种土壤对应的历次降雨侵

蚀泥沙中,团粒明显比单粒粗(图 2a、图 2b);团粒和单粒 MWD 的 MWD 比值 >1 ,且以紫色土和黑土的对应值最高(图 2c),说明紫色土和黑土的侵蚀泥沙团聚程度较其他 3 种土壤大。从 5 种土壤的原土团粒和单粒 MWD 及其 MWD 比值也可明显看出,紫色土和黑土的团聚程度最大,MWD 比值分别为 18.5 和 11.8,这主要与其黏粒含量较高有关^[32]。褐土与黄绵土质地接近,但 MWD 比值却高很多,分别为 10.7 和 3.1(图 2c),这可能是褐土有机质含量高的结果(表 1)。有研究指出,土壤有机质含量与团聚体稳定性呈正相关关系^[33],从而使褐土具有更高的团聚度。

除土壤质地和有机质含量外,降雨特征也是影响土壤侵蚀过程及泥沙粒径分布的重要因素^[18,34]。比较 2013 年 7 月 1 日的大雨强(61.1 mm/h)事件和 2014 年 8 月 22 日的小雨强(18.9 mm/h)事件发现,

泥沙团粒粒径分布存在明显差异(图 1a、图 1f),并以红壤表现最为明显。2013 年 7 月 1 日,红壤侵蚀泥沙以粗粉团(0.02~0.05 mm)为主,含量高达 60.1%;而 2014 年 8 月 22 日的小雨强降雨条件下,粗粉团含量降至 28.3%。粒径较小的细粉团(0.002~0.02 mm)含量则呈现与此相反的趋势,在小雨强事件中的对应含量较高。这种差异与不同雨强下雨滴及径流动能有关。雨强越大,动能越大,越多的粗颗粒被分离和搬运^[34],从而增加侵蚀泥沙中粗粉团的含量。

虽然无法从严格意义上将侵蚀泥沙中的团粒和单粒分开,但对比团粒和单粒的粒径分布可以发现(图 1),5 种土壤侵蚀泥沙中 <0.002 mm 的黏团含量远小于黏粒含量,说明泥沙中绝大部分的黏粒以团聚体的形式存在,这与大部分研究结果一致^[21,35-36]。该结论在营养物质输移和环境污染方面具有重要意义^[10]。

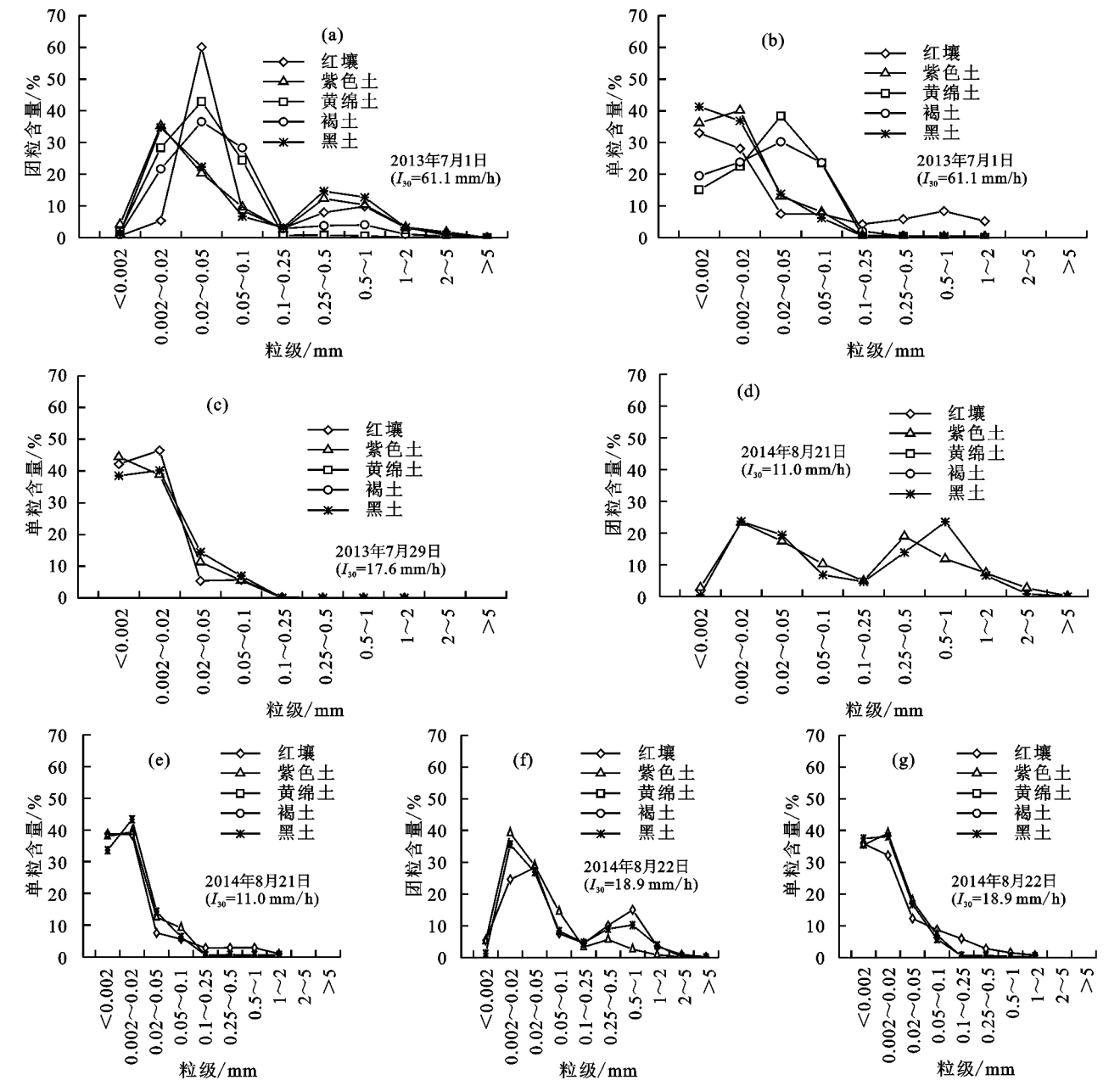


图 1 4 次降雨侵蚀泥沙团粒和单粒粒径分布

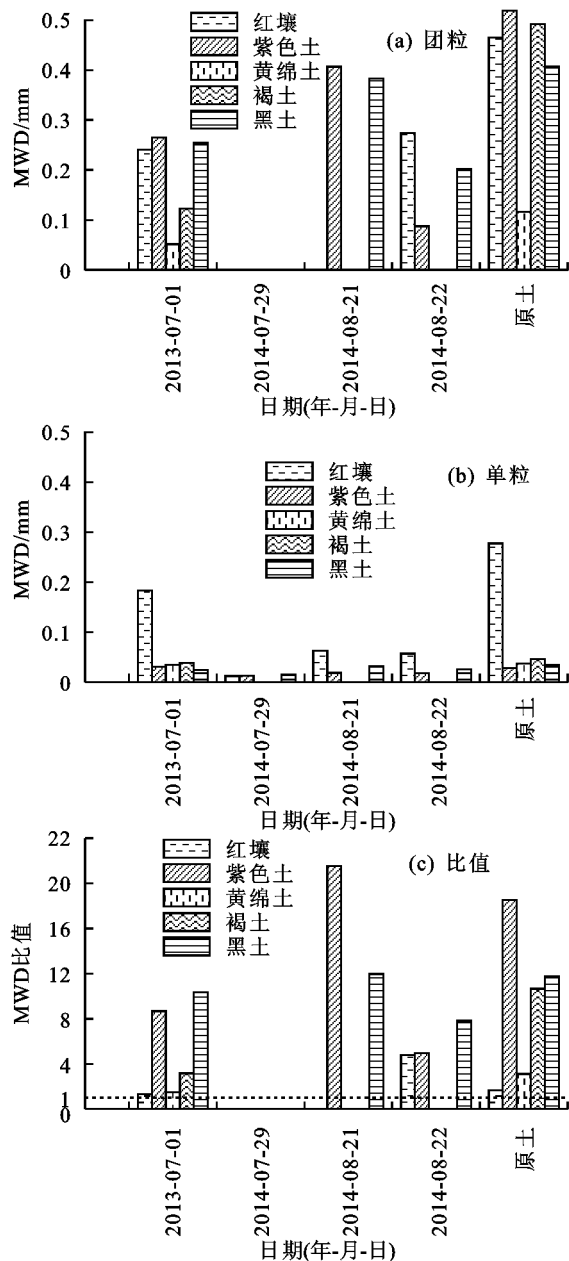


图 2 次降雨侵蚀泥沙和原土团粒和单粒的平均重量直径(MWD)及 MWD 比值

2.2 团粒和单粒的富集率(ER)

以 2 次代表性降雨事件为例,分析侵蚀泥沙中团粒和单粒的富集现象。图 3a、图 3b 分别是 2013 年 7 月 1 日(雨强 61.1 mm/h)和 2014 年 8 月 22 日(雨强 18.9 mm/h)降雨事件中各土壤的侵蚀泥沙团粒和单粒的富集率(ER)分布。就红壤而言,降雨强度对其团粒 ER 的影响较大。在 2013 年 7 月 1 日降雨中,粗粉团(0.02~0.05 mm)富集最明显,ER 为 2.68(图 3a);而在 2014 年 8 月 22 日降雨中,细粉团(0.002~0.02 mm)富集最显著,ER 高达 6.76;黏团也出现明显富集,ER 为 5.91(图 3b)。其原因可能在于大雨强的降雨动能大,更容易搬运粗颗粒。除红壤外,降雨强度对其余 4 种土壤团粒 ER 的影响较小。在大雨强和小雨强 2

次降雨事件中,均以细粉团富集最多,其中紫色土的 ER 分别为 3.40 和 3.77,黑土的 ER 分别为 3.36 和 3.45,均表现出小雨强的细粉团 ER 稍大于大雨强,这同样与大雨强更容易搬运粗颗粒有关。

相比之下,降雨强度对单粒 ER 的影响不甚明显。大雨强和小雨强条件下,红壤侵蚀泥沙单粒粒径组成均表现为<0.05 mm 的细颗粒轻微富集,平均 ER 为 1.45;而其余 4 种土壤侵蚀泥沙单粒均无明显富集。Mitchell 等^[19]和 Meyer 等^[1]也指出,侵蚀对土壤单粒的分选特征并不明显,泥沙单粒分布多继承原土。可见,较单粒组成而言,土壤团粒对侵蚀更为敏感。因此,团粒粒径分布更适合作为表征泥沙输移行为的指标^[8,22,37]。

2.3 侵蚀泥沙各级团粒的机械组成

对不同土壤而言,其各级团粒的单粒组成也有所不同。根据土壤质地,将 5 种土壤分为 3 组:黏壤土(红壤)、粉黏壤土(紫色土、黑土)和粉壤土(黄绵土、褐土)。由于每种土壤侵蚀泥沙各级团粒的机械组成在次降雨中的结果非常相似,本文统一选取 2013 年 7 月 1 日降雨的结果。

2.3.1 红壤侵蚀泥沙各级团粒的机械组成 对比侵蚀泥沙和原土的机械组成,分析红壤侵蚀泥沙各级团粒的机械组成变化(图 4)。粉团(0.002~0.05 mm)以<0.002 mm 的黏粒含量最多,为 48.6%;其次是 0.002~0.02 mm 的细粉粒,含量为 36.1%。极细砂团(0.05~0.1 mm)、细砂团(0.1~0.25 mm)、中砂团(0.25~0.5 mm)、粗砂团(0.5~1 mm)以及极粗砂团(1~2 mm)5 个粒级的团粒中均以其本粒级的单粒为主,且随着团粒粒径的增大,本粒级单粒所占比例逐渐增加,从 31.4%增加到 74.5%。细砾团(2~5 mm)和中砾团(>5 mm)均以细砾(2~5 mm)为主,所占比例均在 50%以上。此外,通过与泥沙和原土的机械组成对比发现:8 个不同粒级团粒中,粉团的黏粒(<0.002 mm)和细粉粒(0.002~0.02 mm)含量最高,且高于泥沙和原土;随着团粒粒径增大,黏粒和细粉粒含量逐渐减少,黏粒含量从中砂团(0.25~0.5 mm)开始低于泥沙和原土,细粉粒含量从细砂团(0.1~0.25 mm)开始低于泥沙和原土。计算各级团粒、泥沙和原土 MWD 发现随团粒粒径增大,MWD 相应增大,从 0.01 增加到 3.09;从粗砂团(0.5~1 mm)开始,各级团粒的 MWD 均大于泥沙(0.18)和原土(0.28)。

总体而言,作为黏壤土的红壤侵蚀泥沙团粒粒径越小,黏粒含量越高,更易于携带 N、P、K 等养分,严重威胁水体质量^[10]。因此,在我国红壤地区的水土

保持措施制定过程中,应着重考虑拦截粒径较小的粉团,防止其流失。然而,早期对黏壤土的相关研究却得到了不同的结果。Voorhees 等^[38]研究了 0.5~1,1~2,2~3,3~5 mm 4 个粒径土壤团粒的机械组成,发现不同粒径的团粒具有相似的单粒粒径分布特征,且各级团粒的机械组成都呈现黏粒含量比土壤低,粉粒含量比土壤高,砂粒含量与土壤一致的规

律。本文未分析原土各粒级团粒的机械组成。若参照 Voorhees 的研究,假定原土>0.5 mm 粒级团粒的机械组成与原土总体接近,而土壤侵蚀发生后,泥沙中>0.5 mm 的各级团粒总体比原土粗。据此可推断,红壤的降雨侵蚀过程主要体现为黏粒或黏粒含量高的小团粒,如粗粉团(图 3a),从大团粒中被分离和搬运。

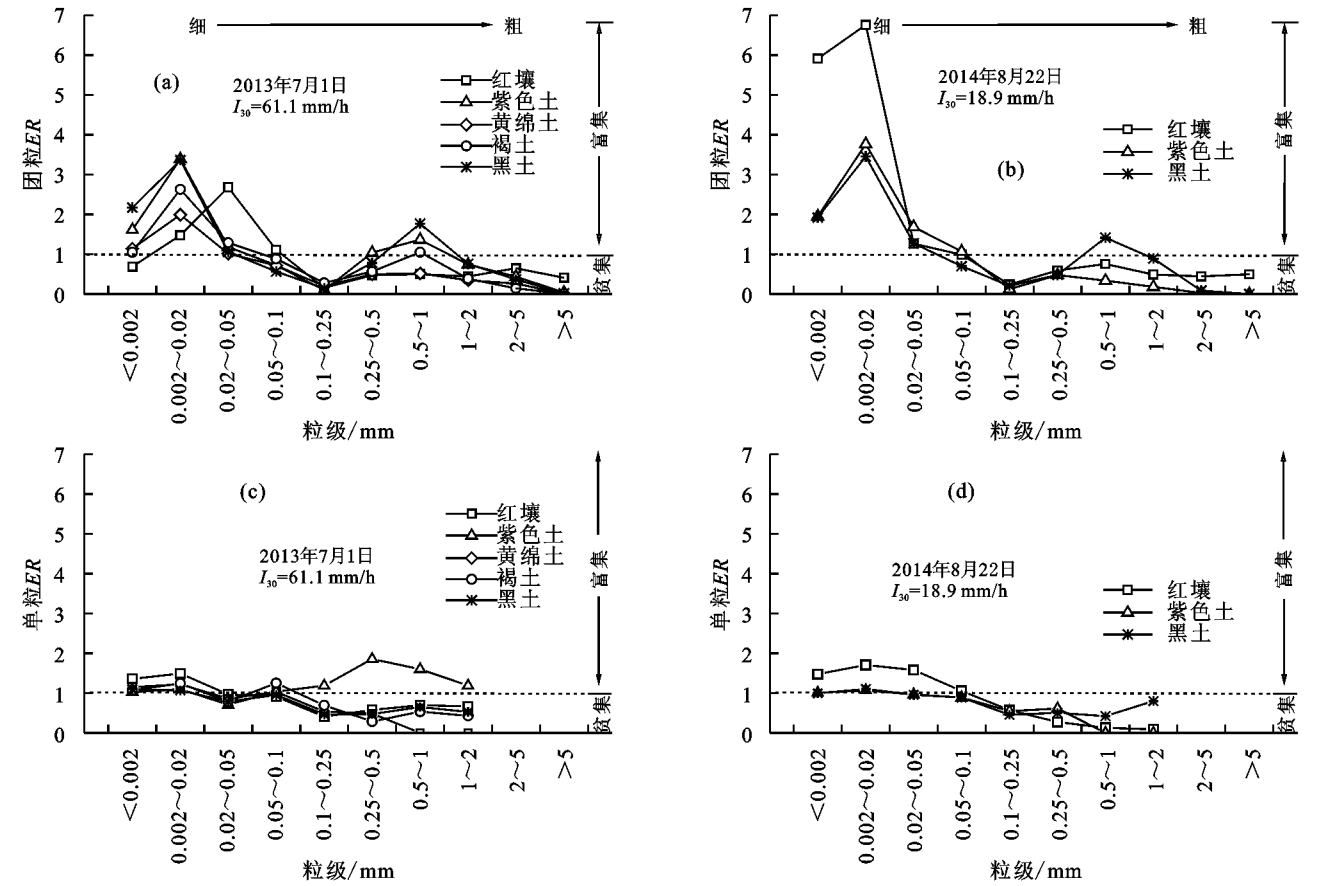


图 3 侵蚀泥沙不同大小团粒和单粒的富集率(ER)

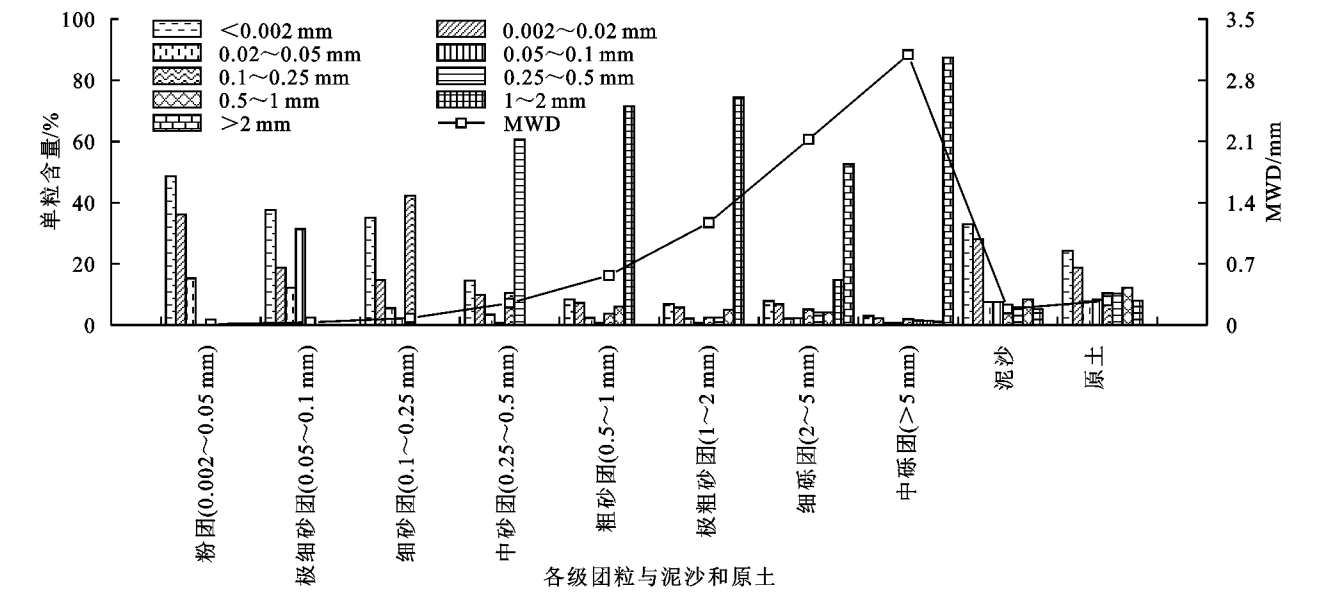


图 4 红壤侵蚀泥沙各级团粒的机械组成及其与泥沙和原土机械组成的对比

2.3.2 紫色土和黑土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成

图 5 和图 6 分别是紫色土和黑土侵蚀泥沙各级团粒的

机械组成与其泥沙和原土的机械组成对比结果。对紫色土而言,粉团(0.002~0.05 mm)以0.002~0.02 mm 的细粉粒含量最多,约为 41.6%; <0.002 mm 的黏粒和 0.02~0.05 mm 的粗粉粒所占比例几乎相当,大约各占 30%。除极细砂团(0.05~0.1 mm)和中砾团(>5 mm)以外,其余各级团粒均以细粉粒含量最多。从细砂团到

中砾团,随着粒径增大,黏粒含量逐渐减少。将紫色土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成分别与其泥沙和原土的机械组成对比发现,泥沙和原土的机械组成非常相似,但 8 个不同粒级团粒中,细砂团(0.1~0.25 mm)的黏粒含量最高,并高于泥沙和原土的黏粒含量;其余粒级团粒的黏粒含量均少于泥沙和原土。

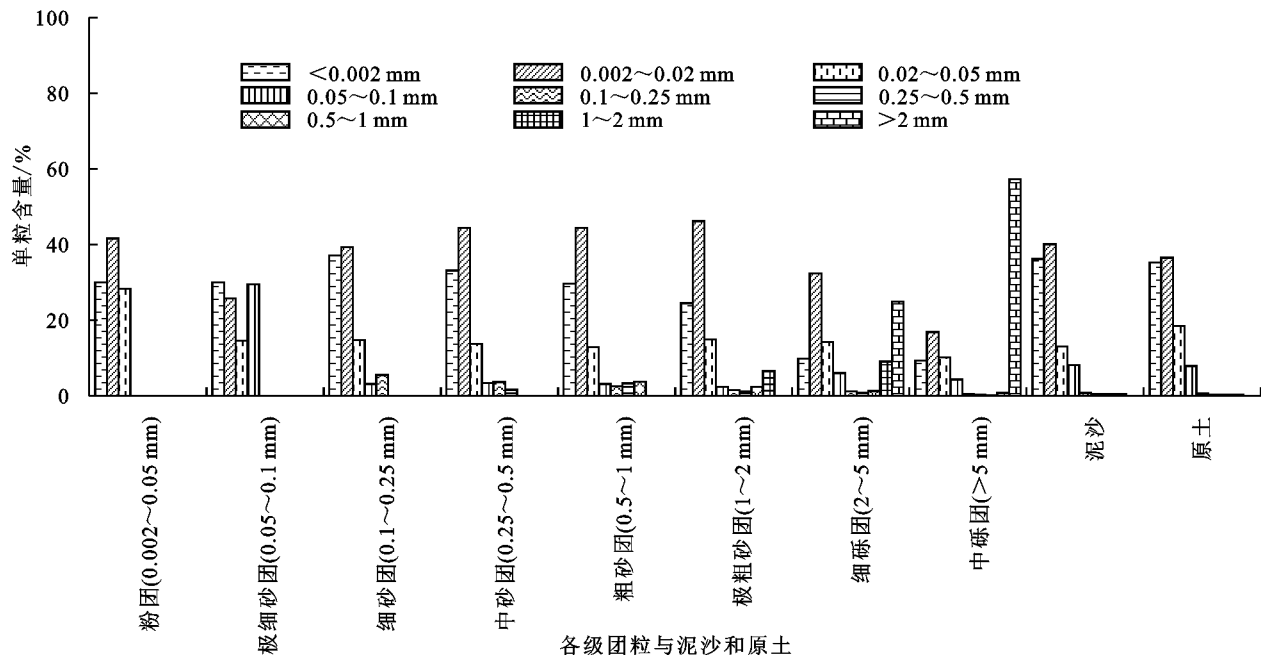


图 5 紫色土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成与泥沙和原土机械组成的对比

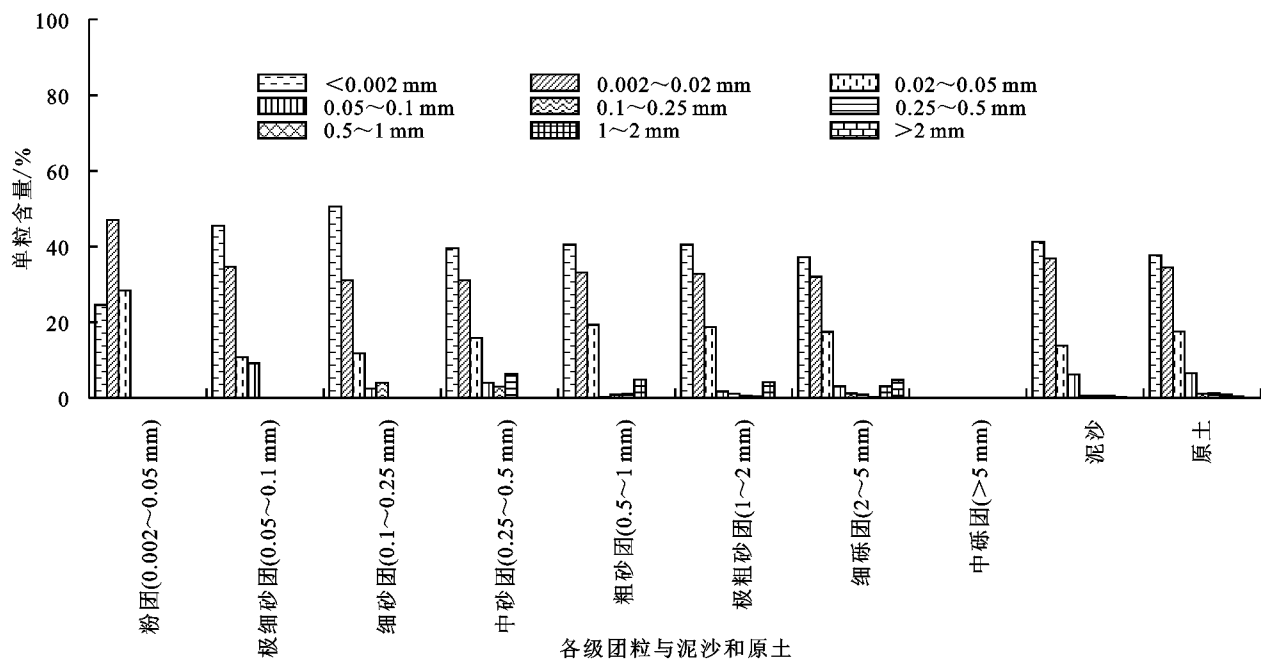


图 6 黑土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成与泥沙和原土机械组成的对比

作为与紫色土相同质地的黑土,其侵蚀泥沙中 >5 mm 的团粒很少,没有收集到足够的样品,但其他各级团粒的机械组成特征均与紫色土表现基本一致(图 6);粉团以细粉粒所占比例最高,且含量高于泥沙和原土;细砂团的黏粒含量最高,并高于泥沙和原土。但是,从极细砂团到极粗砂团,均以黏粒所占比

例最高,为 40%左右,且接近于泥沙和原土。黑土的这一结果与 Swanson 等^[4]在粉黏壤土上开展野外人工模拟降雨结果较一致。

2.3.3 黄绵土和褐土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成

图 7 和图 8 分别是黄绵土和褐土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成及其与泥沙和原土机械组成的对比结

果。黄绵土侵蚀泥沙中的粉团($0.002\sim0.05\text{ mm}$)以 $0.02\sim0.05\text{ mm}$ 的粗粉粒为主,含量高达 70.7% ;极细砂团($0.05\sim0.1\text{ mm}$)以其本粒级的单粒为主,占比 71.6% ;细砂团($0.1\sim0.25\text{ mm}$)的机械组成较为特殊,其各级单粒分布比较均匀,含量均在 20% 左右,以 $<0.002\text{ mm}$ 的黏粒所占比例稍多,近 30% ;中砂团($0.25\sim0.5\text{ mm}$)、粗砂团($0.5\sim1\text{ mm}$)、极粗砂团($1\sim2\text{ mm}$)、细砾团($2\sim5\text{ mm}$)和中砾团($>5\text{ mm}$)5 个粒级团粒均以 $0.02\sim0.05\text{ mm}$ 的粗粉粒所占比例最高,且随着团粒粒径增大,粗粉粒所占比例

呈先增加后减少趋势。将黄绵土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成分别与其泥沙和原土的机械组成对比发现,8 个不同粒径团粒中,细砂团($0.1\sim0.25\text{ mm}$)的黏粒含量最高,高于泥沙和原土;极细砂团($0.05\sim0.1\text{ mm}$)的黏粒含量最低,低于泥沙和原土;其余各级团粒中的黏粒占比接近泥沙和原土。

褐土侵蚀泥沙各级团粒机械组成结果与黄绵土基本相似,唯一不同的是细砂团($0.1\sim0.25\text{ mm}$)以其本粒级的单粒所占比例最高,接近 40% ;中砂团($0.25\sim0.5\text{ mm}$)的单粒分布比较均匀。

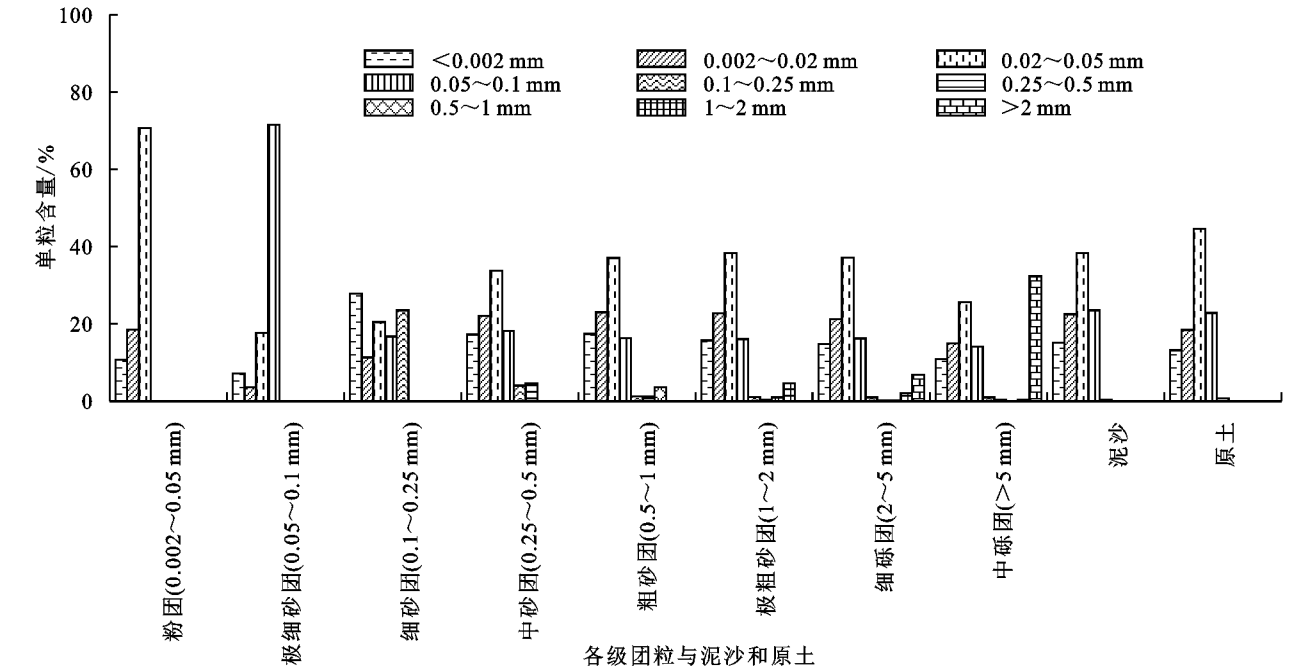


图 7 黄绵土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成与泥沙和原土机械组成的对比

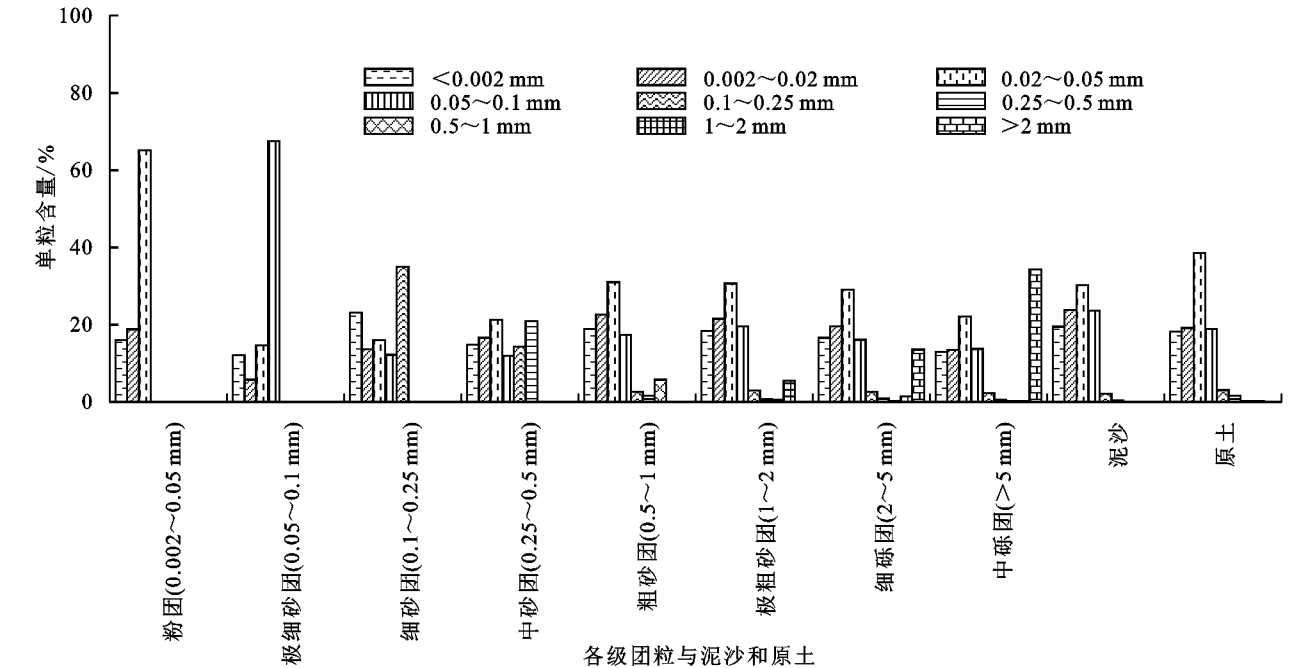


图 8 褐土侵蚀泥沙各级团粒的机械组成与泥沙和原土机械组成的对比

黄绵土和褐土侵蚀泥沙的粉团和极细砂团均以 本粒级的单粒为主,黏粒的含量比泥沙和原土低;此

外, >0.25 mm 各级团粒均以粗粉粒含量最高, 且随着团粒粒径增大, 黏粒的含量变化不大, 并与泥沙和原土非常相近(图 7、图 8)。可见, 泥沙机械组成和各级团粒的机械组成有继承原土的性质。Alberts 等^[23]关于美国中西部粉壤土的研究得到大致相似的结果: 在侵蚀泥沙 $0.21\sim 2$ mm 的各级团粒中, <0.002 mm 的黏粒含量与原土基本相近。但也有不同结果, Meyer 等^[39]研究了美国密西西比州北部的 9 种粉壤土, 发现多数土壤的各级团粒机械组成与泥沙整体接近, 但有 2 种土壤的侵蚀泥沙黏粒含量随团粒粒径增大而增加。Meyer 等^[39]认为, 对于后 2 种土壤而言, 黏粒含量与大团粒的稳定性紧密相关。

3 结论

(1) 侵蚀泥沙粒径分布是土壤质地和降雨强度综合作用的结果。相比广泛采用的单粒粒径组成, 团粒粒径分布作为表征泥沙输移的指标更适合。

(2) 5 种典型土壤侵蚀泥沙中, 粉团($0.002\sim 0.05$ mm)和黏团(<0.002 mm)明显富集; 而单粒除红壤的粉粒($0.002\sim 0.05$ mm)和黏粒(<0.002 mm)轻微富集以外, 其余 4 种土壤的各级单粒均无明显富集。

(3) 红壤侵蚀泥沙粉团($0.002\sim 0.05$ mm)中的黏粒含量最多, 是泥沙黏粒的主要来源, 对红壤流失防治具有重要意义; 其余 4 种土壤侵蚀泥沙机械组成和各级团粒的机械组成均与原土接近。

参考文献:

- [1] Meyer L D, Line D E, Harmon W C. Size characteristics of sediment from agricultural soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 47(1): 107-111.
- [2] Rhoton F E, Meyer L D. Sediment size distributions predicted for selected soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 42(2): 127-129.
- [3] Merritt W S, Letcher R A, Jakeman A J. A review of erosion and sediment transport models[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2003, 18: 761-799.
- [4] Swanson N P, Dedrick A R, Weakly H E. Soil particles and aggregates transported in runoff from simulated rainfall[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1965, 8: 437-440.
- [5] 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.
- [6] 周柱栋, 程金花, 杨帆, 等. 北方土石山区植株密度对坡面流粒径分选的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 96-102.
- [7] 杨帆, 张洪江, 程金花, 等. 华北土石山区坡面溅蚀和片蚀泥沙颗粒特征研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 71-77.
- [8] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 22(8): 705-719.
- [9] 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.
- [10] Young R A. Characteristics of eroded sediment[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1980, 23(5): 1139-1142.
- [11] Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 406(1/2): 73-81.
- [12] Rienzi E A, Fox J F, Groveet J H, et al. Interrill erosion in soils with different land uses: The kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution[J]. *Catena*, 2013, 107(8): 130-138.
- [13] Nicholas A P, Walling D E. The significance of particle aggregation in the overbank deposition of suspended sediment on river floodplains[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 186(1/4): 275-293.
- [14] Issa O M, Le Bissonnais Y, Planchon O, et al. Soil detachment and transport on field- and laboratory-scale interrill areas: Erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(8): 929-939.
- [15] 黄丽, 张光远, 丁树文, 等. 侵蚀紫色土土壤颗粒流失的研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(1): 35-39.
- [16] Swanson N P, Dedrick A R. Soil particles and aggregates transported in water runoff[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1967, 8: 437-440.
- [17] Sutherland R A, Wan Y, Lee C T, et al. Aggregate enrichment ratios for splash and wash transported sediment from an Oxisol[J]. *Catena*, 1996, 26(3): 187-208.
- [18] Wan Y, El-Swaify S A. Flow-induced transport and enrichment of erosional sediment from a well-aggregated and uniformly-textured Oxisol[J]. *Geoderma*, 1997, 75(3): 251-265.
- [19] Mitchell J K, Mostaghimi S, Pond M C. Primary particle and aggregate size distribution of eroded soil from sequenced rainfall events[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1983, 26(6): 1773-1777.
- [20] 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.

- [21] Hao Y F, Yang Y, Liu B Y, et al. Size characteristics of sediments eroded from three soils in China under natural rainfall[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(8): 2153-2165.
- [22] Yang Y, Wendroth O, Walton R J. Field-scale bromide leaching as affected by land use and rain characteristics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(4): 1157-1167.
- [23] Alberts E E, Moldenhauer W C, Foster G R. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(3): 590-595.
- [24] Beuselinck L, Steegen A, Govers G, et al. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt[J]. *Geomorphology*, 2000, 32(1/2): 69-82.
- [25] Gabriels D, Moldenhauer W C. Size distribution of eroded material from simulated rainfall-effect over a range of texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(6): 954-958.
- [26] Alberts E E, Wendt R C, Piess R F. Physical and chemical properties of eroded soil aggregates[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1983, 26(2): 465-471.
- [27] Kristiansen S M, Schjønning P, Thomsen I K, et al. Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture[J]. *Geoderma*, 2006, 137(1/2): 147-154.
- [28] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究. 土壤物理性质测定法[M]. 南京: 科学出版社, 1978.
- [29] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. *American Society of Agronomy*, 1936, 28(5): 337-351.
- [30] Warrington D N, Mamedov A I, Bhardwaj A K, et al. 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.
- [31] Marquez C O, Garcia V J, Cambardella C A, et al. Aggregate—size stability distribution and soil stability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 725-735.
- [32] Lado M, Ben-Hur M, Shainberg I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 1992-1999.
- [33] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators[J]. *Catena*, 2001, 44(1): 47-67.
- [34] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512(5): 168-176.
- [35] 王剑. 降雨驱动下侵蚀泥沙颗粒分选特征及搬运机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [36] Martinez-Mena M, Rogel J A, Albaladejo J, et al. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment[J]. *Catena*, 2000, 38(3): 175-190.
- [37] Walling D E, Owens P N, Waterfall B D, et al. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 251/252(1): 205-222.
- [38] Voorhees W B, Allmaras R R, Larson W E. Porosity of surface soil aggregates at various moisture contents[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1966, 30(2): 163-167.
- [39] Meyer L D, Harmon W C, McDowell L L. Sediment sizes eroded from crop row sideslopes[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1980, 23(4): 891-898.