

# 亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性\*

吴新亮<sup>1</sup> 魏玉杰<sup>1</sup> 李朝霞<sup>1</sup> 蔡崇法<sup>1†</sup> 杨伟<sup>1,2</sup>

(1 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

(2 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070)

**摘要** 以三种母质发育的 5 个红壤为研究对象, 在人工降雨条件下, 研究不同降雨动能条件下坡面侵蚀泥沙的颗粒分布特征及物质组成状况。结果表明: 侵蚀泥沙的颗粒分布受土壤母质和降雨侵蚀力影响差异较大, 相同母质红壤产生泥沙的颗粒组成特征相似, 纱网覆盖条件下泥沙中细颗粒 ( $< 0.02 \text{ mm}$ ) 相对含量普遍高于裸地, 泥质页岩发育红壤 (HS) 和花岗岩发育红壤 (TG1 和 TG2) 泥沙 (分散后) 表现为黏粒和粉粒的富集, 富集率为 1.15 ~ 3.14, 第四纪红黏土发育红壤 (HQ1 和 HQ2) 泥沙中 (分散后) 砂粒富集比较明显, 富集率最高为 3.84; 对于 HS、TG1 和 TG2 土壤而言, 泥沙中有机质 (OM)、游离氧化铁铝 (Fed 和 Ald) 主要分布在  $< 0.05 \text{ mm}$  粒径中, 而对于 HQ1 和 HQ2 土壤而言, 则主要分布在  $> 0.25 \text{ mm}$  和  $< 0.05 \text{ mm}$  两个粒级的泥沙颗粒中, 其中有机质 (OM) 富集最明显; 泥沙中 OM、Fed 和 Ald 之间达到极显著相关 ( $r \geq 0.82$ ), 而且它们与土壤中阳离子交换量 (CEC)、Fed、Ald、非晶形氧化硅 (Sio)、黏粒含量的相关性也达到极显著水平 ( $r \geq 0.81$ ), 说明泥沙中这些物质间相互影响, 而且很大程度上取决于供试土壤的自身物质含量。

**关键词** 红壤; 坡面侵蚀; 泥沙; 物质组成; 富集率

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

土壤侵蚀不仅造成土壤颗粒和养分流失、导致土地质量退化, 而且侵蚀泥沙携带的养分和农药等其他化学物质造成水体污染和生态环境恶化<sup>[1-3]</sup>。因此研究侵蚀泥沙物质组成特性对揭示土壤侵蚀机制、评价土壤侵蚀程度、预测侵蚀危害具有重要意义。

国内外就侵蚀泥沙物质组成特性的研究主要侧重于两个方面: 颗粒组成和养分含量。研究表明, 土壤特性、土地利用方式、植被条件、降雨特性和地形因子等影响泥沙性质。在泥沙颗粒组成方面, Martinez-Mena 等<sup>[4]</sup>运用团聚率对泥沙颗粒进行分析, 研究了降雨动能对颗粒侵蚀形态的影响。Warrington 等<sup>[5]</sup>发现侵蚀泥沙的颗粒组成主要取决于降雨对表土团聚体的破坏程度。Berger 等<sup>[6]</sup>研究了坡度和雨强对泥沙颗粒分布的影响。Rienzi 等<sup>[3]</sup>、Defersha 和 Mellesse<sup>[7]</sup>研究了降雨强度、坡度、前期含水量对侵蚀泥沙的颗粒分布特性的影响。国内也存在一些关于土壤颗粒流失特性的研究<sup>[1-2, 8-9]</sup>, 但这些研究大多集中在黄土高原地区, 而且关于泥沙颗粒的形态结构特征

研究较少。在泥沙养分方面, 已有研究集中在泥沙有机质、氮、磷、钾等元素含量和富集程度上, 发现坡耕地和低覆盖度土壤或者雨强较大条件下, 养分的流失以径流泥沙为主<sup>[1, 10-13]</sup>, 同时由于细颗粒强烈的吸附作用和水流侵蚀的分选特性, 泥沙中养分含量高于供试土壤。虽然针对这些物质在泥沙中总体含量的研究很多, 但有关其在侵蚀泥沙中分布特性的研究报道则相对不足<sup>[14]</sup>。

我国红壤丘陵区地处热带亚热带地区, 土壤侵蚀已成为造成土壤退化、制约农业生产, 危害生态环境的重要因素。目前有关红壤区坡面侵蚀过程的研究集中在产流产沙量以及养分流失方面<sup>[12-13, 15-18]</sup>, 而在侵蚀泥沙的物质组成及分布规律方面则缺乏深入系统的研究。鉴于此, 本文综合考虑降雨动能、土壤类型两个影响泥沙性质的重要因素, 通过人工模拟降雨试验, 研究了裸地和纱网覆盖条件下三种母质发育的 5 种红壤坡面的产沙物质组成及其分布特性, 并分析了泥沙的理化性质与供

\* 国家自然科学基金项目 (40930529, 41001164) 资助

† 通讯作者, E-mail: cfcfai@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 吴新亮 (1989—), 男, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持和农业生态。E-mail: 1057760218@qq.com

收稿日期: 2013-08-18; 收到修改稿日期: 2014-03-12

试土壤间的关系,旨在深入了解红壤区坡面侵蚀机理和物质迁移规律,为水土流失防治措施设计提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验所用土壤样品共 5 个:泥质页岩发育红壤 1 个(HS);第四纪黏土发育红壤 2 个(HQ1、HQ2),它们均采自湖北省咸宁市贺胜桥地区;花岗岩发育红壤 2 个(TG1、TG2),它们均采自湖北省通城县。

采样点及供试土壤的基本情况见表 1。土壤样品均采自土壤表层 0~15 cm,风干后过筛备用,其中化学分析土样过 0.25 mm 筛,微团聚体和机械组成土样过 2 mm 筛,降雨试验使用土壤过 20 mm 筛。

### 1.2 模拟降雨试验

为研究降雨动能和土壤类型对坡面侵蚀泥沙的物质组成及分布规律的影响,本研究在室内进行了土槽坡面的人工模拟降雨试验。降雨动能通过采用裸露地和尼龙纱网覆盖(网孔 2 mm×2 mm)来控制,其中纱网距侵蚀槽土壤表面 10 cm(此时雨滴动能可以被消除 99.6%<sup>[19]</sup>)。

表 1 采样点及供试土壤基本情况

Table 1 Information of the sampling sites and test soils

编号 Code	母质 Parent material	利用方式 Land use	土壤层次 Soil layer	采样部位 Sampling site	侵蚀程度和类型 Erosion degree and type	土壤质地 Soil texture
HS	泥质页岩 Shale	旱地 Upland field	A	低丘下部 Lower part of low mount	轻度 Slight/面蚀 Surface erosion	黏壤土 Clay loam
HQ1	第四纪红黏土 Quaternary red clay	林改旱地 field from woodland	A	低丘中下部 Middle-lower part of low mount	轻度 Slight/ 面蚀 Surface erosion	粉质黏土 Silty clay
HQ2	第四纪红黏土 Quaternary red clay	裸地 Bare land	BC	低丘下部 Lower part of low mount	强度 Intensive/面蚀 Surface erosion	黏土 Clay
TG1	花岗岩 Granite	旱地 Upland field	A	低丘下部 Lower part of low mount	轻度 Slight/面蚀 Surface erosion	砂黏土 Sandy clay
TG2	花岗岩 Granite	杂草荒地 Uncultivated land	B	低丘中下部 Middle-lower part of low mount	中度 Medium/面蚀和沟蚀 Surface and gully erosion	砂壤土 Sandy loam

模拟降雨器采用 SPRACO 锥形喷头,喷头距地面高度 4.75 m,模拟降雨动能约为等雨强天然降雨的 90%,均匀度为 0.9,降雨强度由喷头数来控制<sup>[20]</sup>,根据当地一年一遇暴雨频率,试验中降雨强度控制在 1 mm min<sup>-1</sup>,供水压力为 0.08 MPa。所用冲蚀槽规格为 2 m×1.2 m×0.3 m,冲蚀槽内填土厚度为 20 cm,容重约为 1.10 g cm<sup>-3</sup>。在冲蚀槽左右两侧各设置 0.1 m 的缓冲区以消除边缘效应。降雨时间为初始产流后持续 1 h,坡度设定为 15°。降雨前将冲蚀槽水平放置,用覆盖的方法将土壤湿润饱和,静置 24 h 排干重力水后,将表层 2~3 cm 土壤翻耕。

坡面产流开始后收集径流水样和泥沙,降雨结束后用一组金属筛进行泥沙过筛,金属筛孔径分别为:2、1、0.5、0.25 mm。过筛后的水样采用吸管法测定 0.05~0.25 mm,0.02~0.05 mm,0.002~0.02 mm,<0.002 mm 粒径的泥沙含量。泥沙分级后,在 40℃ 下烘干称重,获取各粒径含量后,再将筛分获得

各粒级泥沙颗粒按侵蚀泥沙粒级组成比例配制成为一个总泥沙样和三个粒级泥沙:>0.25 mm,0.05~0.25 mm,<0.05 mm,其中总泥沙样进行分散处理测定其机械组成,三个泥沙颗粒级分别进行有机质和游离铁铝氧化物含量测定。

### 1.3 测定指标与方法

土壤 pH 采用土水比 1:2.5—pH 计测定;有机质(OM)采用重铬酸钾容量法—外加热法测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定;游离氧化物(Fed 和 Ald)采用连二亚硫酸钠—柠檬酸钠—碳酸氢钠(DCB)浸提、非晶形氧化物(Sio)采用草酸—草酸铵溶液浸提,浸提液铁、铝、硅含量采用等离子发射光谱法(ICP)测定;黏土矿物类型采用 X 射线衍射法(XRD)测定;机械组成采用 NaOH 溶液加热分散后吸管法测定<sup>[21]</sup>。土壤微团聚体采用蒸馏水浸泡 24 h 后机械震荡 2 h,然后用吸管法测定其组成;土壤团聚体水稳性采用湿筛法测定<sup>[22]</sup>。

### 1.4 计算方法

土壤平均重量直径 (Mean weight diameter, MWD)、团聚体分散度 (Percentage of aggregate disruption, PAD)、>0.25 mm 水稳性团聚体百分含量 (Water stable aggregate, WSA<sub>>0.25 mm</sub>) 及团聚度 (Aggregation degree, AD) 和分散系数 (Clay dispersion index, CDI) 采用如下公式计算:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times w_i \quad (1)$$

式中,  $r_i$  为第  $i$  个粒径孔径 (mm);  $r_0 = r_1$ ;  $r_n = r_{n+1}$ ;  $w_i$  为第  $i$  个粒径颗粒重量百分比。

$$PAD_{>0.25 \text{ mm}} = \frac{>0.25 \text{ mm 团聚体含量(干筛-湿筛)}(\%)}{>0.25 \text{ mm 干筛团聚体含量}(\%)} \times 100 \quad (2)$$

$$PAD_{>0.2 \text{ mm}} = \frac{>0.2 \text{ mm 团聚体含量(干筛-湿筛)}(\%)}{>0.2 \text{ mm 干筛团聚体含量}(\%)} \times 100 \quad (3)$$

$$WSA_{>0.25 \text{ mm}} = >0.25 \text{ mm 湿筛团聚体含量}(\%) \quad (4)$$

$$AD(\%) = \frac{>0.05 \text{ mm(微团聚体-机械组成)}(\%)}{>0.05 \text{ mm 微团聚体含量}(\%)} \times 100 \quad (5)$$

$$CDI(\%) = \frac{<0.002 \text{ mm 微团聚体含量}(\%)}{<0.002 \text{ mm 机械组成}(\%)} \times 100 \quad (6)$$

富集率的计算公式为:

$$\begin{aligned} & \text{泥沙(分散后颗粒、OM、Fed、Ald)富集率} \\ &= \frac{\text{泥沙(分散后颗粒、OM、Fed、Ald)含量}}{\text{土壤(分散后颗粒、OM、Fed、Ald)含量}} \quad (7) \end{aligned}$$

式中, OM 表示有机质 ( $\text{g kg}^{-1}$ ), Fed 和 Ald 分别表示游离氧化铁和游离氧化铝 ( $\text{g kg}^{-1}$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 供试土壤的团聚体稳定性

从表 3 可知, HQ2 土壤黏粒含量最高, TG2 土壤黏粒含量最低。HS、HQ1 和 HQ2 微团聚体主要分布在 0.002~0.05 mm 范围内, TG1 和 TG2 微团聚体中 >0.05 mm 颗粒含量最高, 其中 HQ2 的分散系数 (CDI) 最小, 团聚度 (AD) 最大, 说明该土壤微团聚体稳定性最高, 这与其黏粒含量及铁铝氧化物含量较高有关 (表 2)<sup>[15]</sup>。微团聚体中黏粒的稳定性依次为: HQ2 > TG1 > HQ1 > TG2 > HS, 而微团聚体中砂粒稳定性依次为 HQ2 > HQ1 > HS > TG1 > TG2。

表 2 供试土壤的化学性质和黏土矿物类型

Table 2 Chemical properties and clay mineral compositions of test soils

编号 Code	pH	有机质 OM ( $\text{g kg}^{-1}$ )	CEC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	Fed ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Ald ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Sio ( $\text{g kg}^{-1}$ )	黏土矿物 Clay mineralogy
HS	5.03	18.70	14.50	19.16	4.48	0.25	以高岭石、水云母为主, 含少量 1.4 nm 过渡矿物
HQ1	5.79	17.58	16.13	26.46	4.99	0.31	Dominantly kaolinite and hydromica, with traces of
HQ2	5.12	3.18	17.64	39.40	7.71	0.48	1.4 nm intergrade mineral
TG1	4.55	17.20	12.01	16.73	4.69	0.28	以高岭石为主, 含少量水云母和 1.4 nm 过渡矿物
TG2	4.67	5.60	7.26	6.07	1.60	0.16	Dominantly kaolinite, with traces of hydromica

表 3 供试土壤的机械组成、微团聚体组成状况

Table 3 Mechanical composition and micro-aggregate compositions of test soils

编号 Code	土壤机械组成 Mechanical composition (%)			微团聚体 Micro-aggregate (%)			分散系数 CDI Clay dispersion index (%)	团聚度 AD Aggregation degree (%)
	砂粒 Sand 2~0.05 mm	粉粒 Silt 0.05~0.002 mm	黏粒 Clay <0.002 mm	砂粒 Sand 2~0.05 mm	粉粒 Silt 0.05~0.002 mm	黏粒 Clay <0.002 mm		
HS	19.70	56.77	23.53	31.64	58.27	10.09	42.88	37.74
HQ1	4.41	60.52	35.07	26.48	66.33	7.19	20.50	83.35
HQ2	5.08	36.33	58.59	39.66	57.74	2.61	4.45	87.19
TG1	54.37	19.76	25.87	68.20	28.77	3.03	11.71	20.28
TG2	66.02	26.05	7.93	67.40	30.63	1.97	24.84	2.05

湿筛结果表明(表4),TG1和TG2团聚体水稳性最大,其次为HQ2,HS和HQ1较小;由水稳性团聚体含量(WSA)及团聚体分散度(PAD)可知,HQ2、TG1、TG2水稳性团聚体以 $>0.25$  mm粒径为

主,其中TG1和TG2中 $>2$  mm团聚体水稳性含量较高;而HQ1和HS以 $<0.25$  mm的团聚体为主,这可能是由于土壤中黏粒含量较高,湿润过程中消散作用明显,导致大团聚体的水稳性较差。

表4 湿筛条件下土壤团聚体稳定性及粒径分布状况  
Table 4 Aggregate stability and size distributions under wet-sieving

编号 Code	粒径分布 Particle size distribution (%)						平均重量 直径 MWD Mean weight diameter (mm)	$>0.25$ mm 水稳性团 聚体 WSA Water stable aggregate $>0.25$ mm (%)	团聚体分散度 PAD Percentage of aggregate disruption (%)	
	$>5$ mm	$5 \sim 2$ mm	$2 \sim 1$ mm	$1 \sim 0.5$ mm	$0.5 \sim 0.25$ mm	$<0.25$ mm			$>0.25$ mm	$>2$ mm
HS	1.08	3.40	5.00	8.28	16.68	65.98	0.48	34.02	58.51	92.30
HQ1	0.43	1.86	5.52	15.83	23.50	52.86	0.45	47.14	47.80	95.87
HQ2	2.71	20.66	21.04	24.19	14.16	17.23	1.80	82.77	10.25	61.74
TG1	30.77	11.03	12.45	16.65	12.47	16.63	3.37	83.37	12.67	38.44
TG2	36.33	11.30	7.59	8.49	11.99	24.35	3.07	75.65	14.10	24.09

## 2.2 侵蚀泥沙颗粒组成及富集状况

裸地和纱网覆盖下坡面侵蚀泥沙的颗粒累积分布状况见图1。由图可知,不同母质发育土壤侵蚀泥沙的颗粒分布状况差异明显:

(1)对于HS,泥沙颗粒集中在 $0.002 \sim 0.02$  mm范围内(裸地为60%、纱网覆盖为45%),裸地条件下泥沙中 $<0.05$  mm颗粒相对含量高于纱网覆盖。泥沙分散后,其机械组成中 $0.002 \sim 0.02$  mm含量最高,其次为黏粒;与原土相比,裸地下 $0.002 \sim 0.02$  mm颗粒富集程度最高,富集率为1.53,而在纱网覆盖下黏粒富集率最高,其次为 $0.002 \sim 0.02$  mm颗粒,其富集率分别为1.41和1.36(表5);

(2)HQ1和HQ2泥沙颗粒及分散后颗粒组成比较相似, $0.002 \sim 0.02$  mm泥沙(未分散)含量最高(31%~49%),而且在纱网覆盖下其相对含量高于裸地,其次为 $0.25 \sim 1$  mm泥沙(24%~40%),但在纱网覆盖下该粒级泥沙相对含量低于裸地,说明裸地条件下降雨侵蚀力较强,泥沙粒级无论大小均可以发生侵蚀,而纱网覆盖下坡面侵蚀力较小,坡面水流以细颗粒搬运为主。不同地表状况下侵蚀泥沙的机械组成变化一致,HQ1集中在 $0.002 \sim 0.02$  mm范围,其次为 $<0.002$  mm颗粒,而HQ2则

相反,这可能与供试土壤中黏粒含量较高有关。与原土相比(见表5),HQ1泥沙中 $0.05 \sim 0.25$  mm颗粒(分散后)富集率最大(裸地为3.84、纱网覆盖为2.62),其次为 $1 \sim 2$  mm颗粒;HQ2泥沙分散后各粒径颗粒的富集程度不明显,这可能与其微团聚体结构稳定性较高有关,侵蚀过程中不易破碎分散,导致水流的分选作用不显著<sup>[15,17]</sup>;

(3)对于TG1,裸地和纱网覆盖下 $<0.02$  mm泥沙(未分散)分布比较接近,其中 $0.002 \sim 0.02$  mm泥沙含量最高(40%~45%),其次为 $<0.002$  mm泥沙(21%~25%);泥沙分散后, $<0.002$  mm颗粒含量最高(约为56%),其次为 $0.002 \sim 0.02$  mm,含量为33%~36%;与原土相比(见表5),侵蚀泥沙中 $<0.02$  mm颗粒(分散后)富集率最大,其中 $0.002 \sim 0.02$  mm富集率在2.90~3.14, $<0.002$  mm富集率为2.17。而对于TG2,侵蚀泥沙(未分散)集中在 $0.002 \sim 0.02$  mm粒径范围内(裸地为51%、纱网覆盖为58%);分散后,泥沙颗粒组成中 $0.002 \sim 0.02$  mm含量最高(47%~52%),其次为 $<0.002$  mm颗粒,这主要与TG2本身黏粒含量低有关。纱网覆盖下 $<0.02$  mm颗粒的富集率大于裸地,这是因为覆盖条件下水流的侵蚀力较小,优先搬运细颗粒。

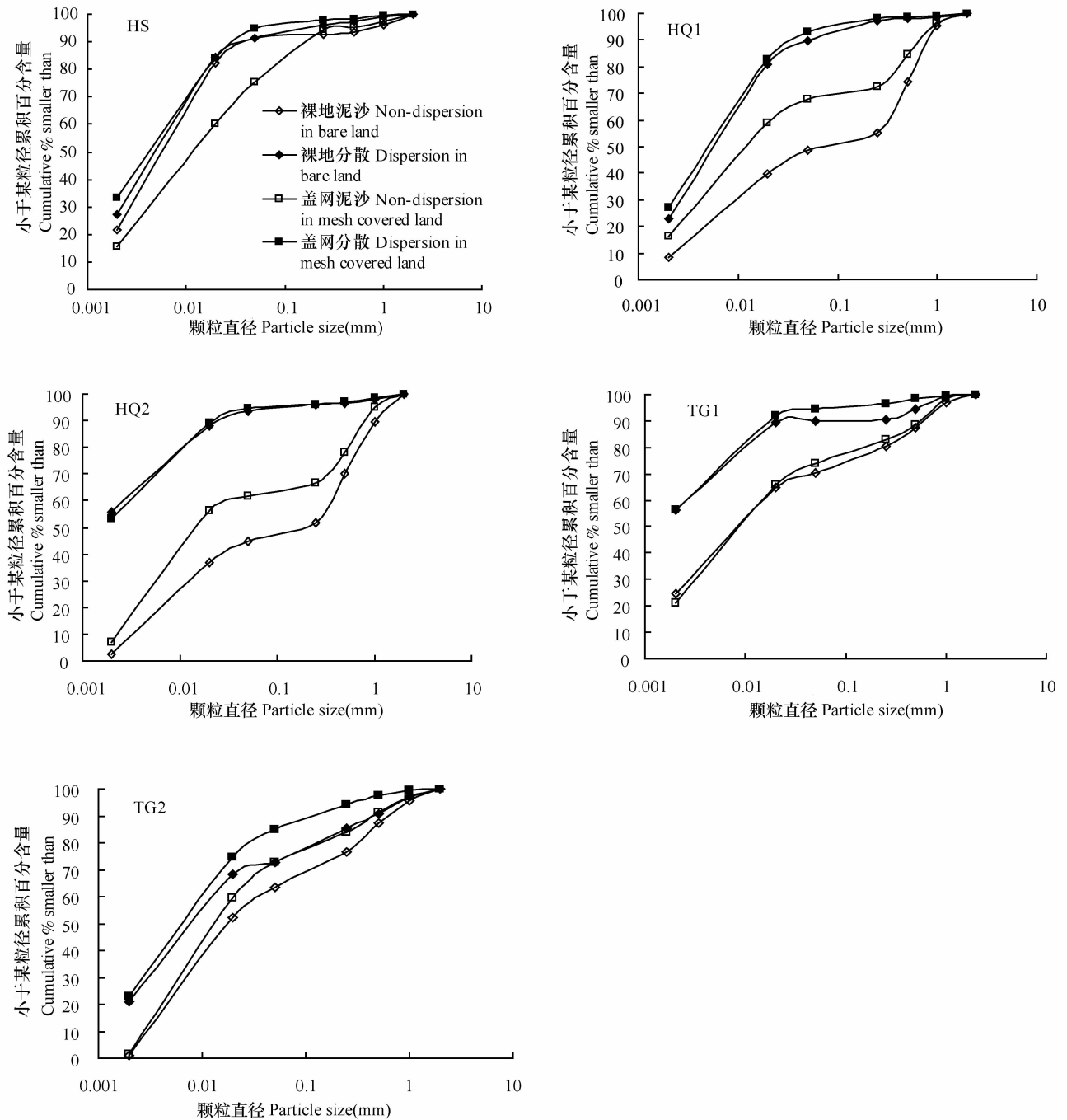


图 1 裸地和纱网覆盖条件下侵蚀泥沙分散前后颗粒累积百分含量

Fig. 1 Particle cumulative percentage of sediments before and after dispersion as affected by coverage of the land

由图 2 可知,各土壤侵蚀泥沙颗粒的结构稳定性不同:对于 HS,裸地时泥沙分散系数最大(79.74%),团聚度最小(1.04%),这是因为在雨滴打击和径流冲刷作用下,土壤团聚体破碎分散成较小的颗粒或“单粒”,造成侵蚀泥沙的结构较差<sup>[7,23]</sup>;而在纱网覆盖下地表仅受水流冲刷搬运作用,土壤团聚体破坏程度较小,泥沙的结构性相对较好。对于 HQ1 和 HQ2 而言,泥沙颗粒团聚度与

原土差别较小,这是由于原土团聚体自身稳定性较高,雨滴打击和径流冲刷作用对其破坏分散相对较弱;泥沙分散系数较原土高,其中纱网覆盖下泥沙颗粒的分散系数最大(HQ1 为 60.47% 和 HQ2 为 13.42%),这可能是水流优先搬运破坏产生的细颗粒或“单粒”( < 0.02 mm)的缘故。TG1 泥沙结构特性与 HS 变化相似,但稳定性相对较高,这可能是由于 TG1 质地偏粗,土壤渗透性较好,导致产流减

小,坡面侵蚀力减弱,侵蚀泥沙以密度较小的颗粒为主<sup>[3]</sup>。同样地,TG2 泥沙结构稳定性高于原土。对于 TG1 和 TG2 而言,纱网覆盖下泥沙性普遍高于

裸地,说明地表团聚体破碎主要受雨滴打击作用,进而影响侵蚀泥沙的颗粒结构。

表 5 裸地和纱网覆盖条件下各粒径侵蚀泥沙颗粒(分散后)富集率

Table 5 Enrichment rates of different size fractions of particles after dispersion in sediments as affected by land coverage

编号 Code	地表状况 Surface condition	富集率 Enrichment rate						
		2 ~ 1	0.5 ~ 1	0.25 ~ 0.5	0.05 ~ 0.25	0.02 ~ 0.05	0.002 ~ 0.02	< 0.002
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
HS	裸地 Bare land	0.14	0.42	0.54	0.75	0.35	1.53	1.15
	盖网 Mesh covered land	0.05	0.29	0.30	0.45	0.54	1.36	1.41
HQ1	裸地 Bare land	1.58	0.72	0.99	3.84	0.81	1.17	0.65
	盖网 Mesh covered land	1.25	0.50	0.54	2.62	0.93	1.12	0.78
HQ2	裸地 Bare land	1.92	1.11	0.66	1.53	0.97	1.06	0.95
	盖网 Mesh covered land	1.33	1.26	1.00	0.80	1.02	1.16	0.91
TG1	裸地 Bare land	0.02	0.51	0.63	0.03	0.11	2.90	2.17
	盖网 Mesh covered land	0.01	0.15	0.26	0.19	0.30	3.14	2.17
TG2	裸地 Bare land	0.09	0.85	0.59	0.71	0.54	2.61	2.65
	盖网 Mesh covered land	0.02	0.26	0.35	0.53	1.28	2.85	2.89

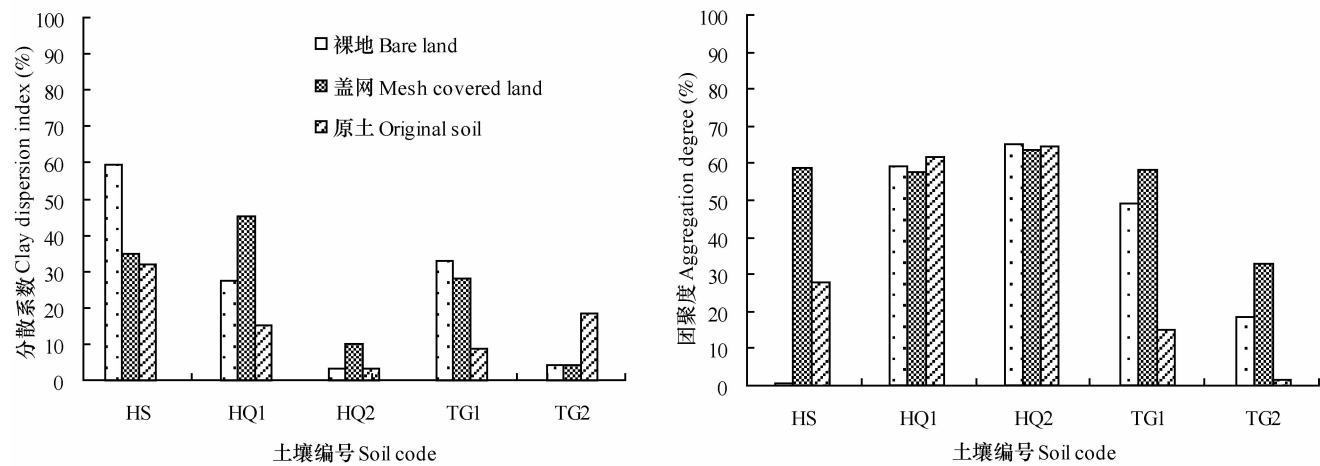


图 2 泥沙和原土的分散系数和团聚度对比

Fig. 2 Comparison between sediments and original soil in clay dispersion index and aggregation degree

### 2.3 侵蚀泥沙的物质组成

土壤有机质、游离铁铝氧化物既是团聚体形成和稳定的胶结剂,又是土壤中的活性物质,养分、污染物的重要“载体”<sup>[3,15,24]</sup>。

不同粒径泥沙颗粒中 OM、Fed 和 Ald 含量分布及富集状况见图 3 和表 6。可以看出,对于 HS、HQ1 和 HQ2 而言,三种物质含量均随泥沙颗粒(未分散)粒径的增加而增大,说明其在团聚体中发挥胶结稳定作用<sup>[15,25]</sup>;而对于 TG1 和 TG2 而言,三种物

质含量随着泥沙颗粒粒径的增大逐渐降低,在 < 0.05 mm 泥沙颗粒中含量最高(OM 为 8.2 ~ 24.8 g kg<sup>-1</sup>, Fed 为 8.57 ~ 22.36 g kg<sup>-1</sup>, Ald 为 1.49 ~ 7.82 g kg<sup>-1</sup>),说明对于质地较粗的土壤而言,坡面侵蚀力较弱,这些物质主要结合在细颗粒泥沙上。由于三个粒径泥沙含量所占比重不同,使得各粒径中 OM、Fed 和 Ald 在泥沙的相对含量差异较大,其中 0.05 ~ 0.25 mm 泥沙中各物质的含量最低;对于 HS、TG1 和 TG2 而言,泥沙中 OM、Fed 和 Ald 主要

分布在  $<0.05$  mm 泥沙上,说明对于质地较粗团聚作用较弱的土壤而言,细粒泥沙 ( $<0.05$  mm) 是这些物质的主要载体;而对于 HQ1 和 HQ2 而言,OM、Fed 和 Ald 则主要分布在  $>0.25$  mm 和  $<0.05$  mm

粒径范围内,裸地时在  $>0.25$  mm 中的含量高于  $<0.05$  mm,纱网覆盖下则相反,这与裸地下雨滴打击和坡面水流作用的侵蚀力更大有关<sup>[3,26]</sup>。

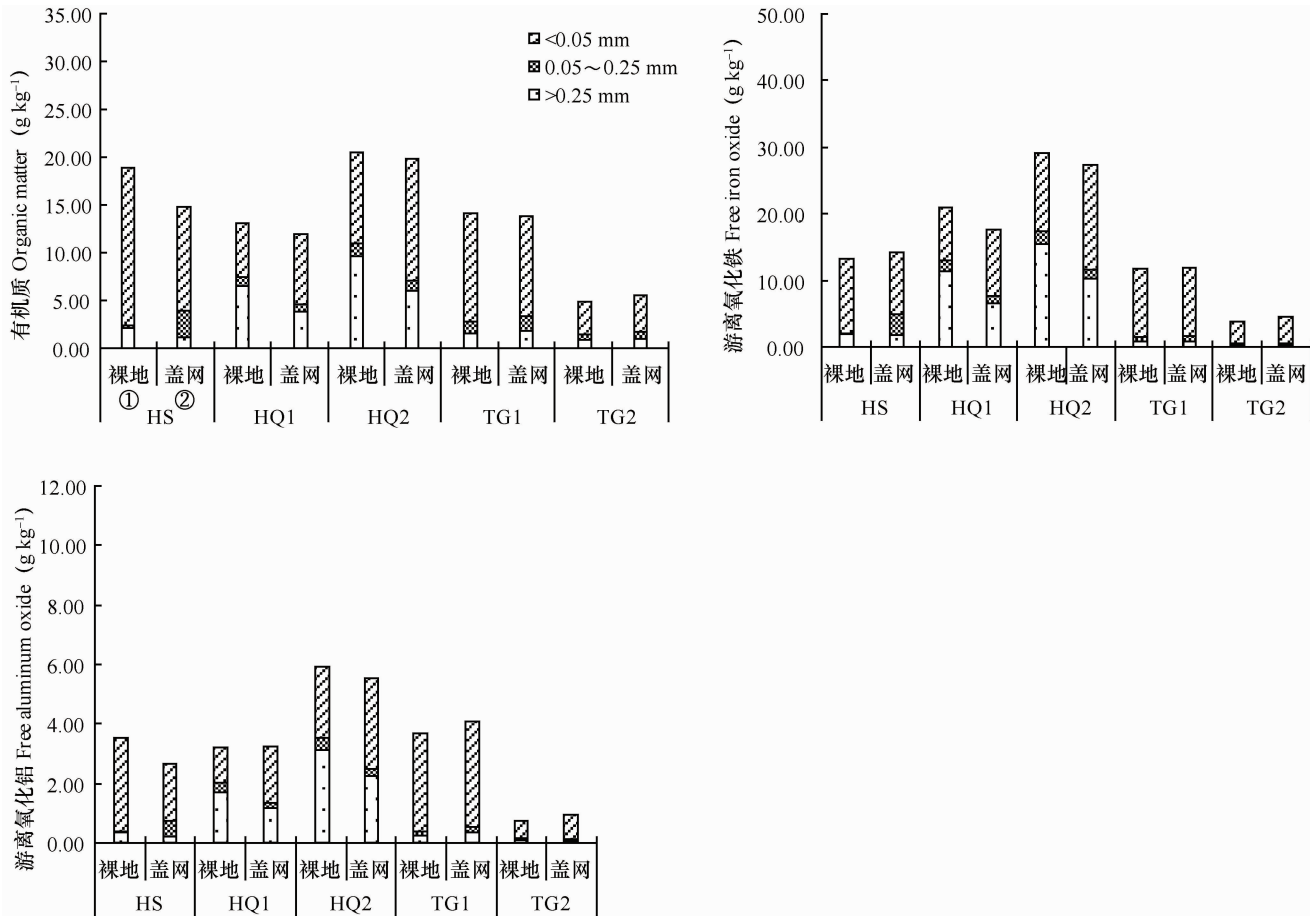


图 3 各粒径侵蚀泥沙颗粒(未分散)中有机质、游离氧化物分布状况

Fig. 3 Distributions of OM, free oxides in different size fractions of sediments(non-dispersion) (① Bare land, ② Mesh covered land)

表 6 侵蚀泥沙中有机质、游离氧化物的富集率

Table 6 Enrichment rates of organic matter and free oxides in sediments

编号 Code	地表状况 Surface condition	有机质 OM Organic matter	游离氧化铁 Fed Free iron oxide	游离氧化铝 Ald Free aluminum oxide
HS	裸地 Bare land	1.55	1.06	1.28
	盖网 Mesh covered land	1.22	1.15	0.96
HQ1	裸地 Bare land	1.14	1.22	1.04
	盖网 Mesh covered land	1.05	1.03	1.05
HQ2	裸地 Bare land	9.88	1.14	1.24
	盖网 Mesh covered land	9.53	1.07	1.16
TG1	裸地 Bare land	1.26	1.09	1.27
	盖网 Mesh covered land	1.24	1.09	1.41
TG2	裸地 Bare land	1.34	0.97	0.73
	盖网 Mesh covered land	1.54	1.15	0.94

与供试土壤相比,侵蚀泥沙中三种物质表现出不同程度的富集,其中有机质富集最明显,尤其是HQ2,富集率大于9,其他土壤泥沙中的富集率在1.05~1.55之间,这与有机质本身密度较小、易侵蚀有关<sup>[14]</sup>;其次为Ald,HQ2和TG1土壤泥沙中Ald富集程度最明显,而在TG2土壤泥沙中富集不显著,这可能是泥沙中粉粒含量太高的原因;在所有土壤泥沙中Fed的富集程度最小。

#### 2.4 侵蚀泥沙特性与供试土壤理化性质的关系

由表7可知,泥沙平均重量直径(MWD)和AD与Fed相关性显著( $r=0.74$ 和 $0.64$ ),说明泥沙中团聚体稳定性受Fed影响,而侵蚀泥沙颗粒的稳定性相对于原土较低,这在一定程度上也解释泥沙游离氧化铁富集不明显的原因所在;Fed和Ald及其与OM之间相关性达到极显著水平( $r>0.82$ ),有机质和黏粒之间也呈极显著相关( $r=0.78$ ),说明坡面侵蚀中,地表水流对这些“活性物质”的分选作用相似,而黏粒是这些物质的主要载体<sup>[14,27]</sup>。

通过分析侵蚀泥沙理化指标和供试土壤的相关关系发现(表8~表9),泥沙MWD与土壤黏粒、Fed和非晶形氧化硅(Sio)呈显著正相关( $r=0.73$ 、 $0.71$ 和 $0.72$ ),而且与土壤的CDI和AD呈显著负相关和显著正相关关系( $r=-0.68$ 和 $0.72$ );泥沙CDI和土壤OM及微团聚体中黏粒分别呈极显著正相关( $r>0.80$ ),与水稳性团聚体( $WSA_{>0.25mm}$ )呈显著负相关( $r=-0.72$ ),与 $PAD_{>2mm}$ 和 $PAD_{>0.25mm}$ 呈显著和极显著正相关( $r=0.66$ 和 $0.77$ ),这说明泥沙中颗粒结构稳定性受供试土壤胶结物质含量和结构稳定性影响较大,而且与土壤微团聚体稳定性指标的关系密切。

除黏粒外,泥沙中Fed、Ald、OM和土壤的CEC、Fed、Ald、黏粒含量呈极显著正相关关系( $r>0.81$ ),和砂粒含量呈显著和极显著负相关( $r=-0.64$ ~ $-0.87$ ),说明泥沙中活性物质(除黏粒外)含量主要取决于土壤自身物质含量以及黏粒的携带作用,而泥沙黏粒含量主要受雨滴打击破坏和地表水流的“分选搬运”的影响。

表7 泥沙中各指标间相关关系

Table 7 Correlations between different indices of sediments

	MWD <sup>1)</sup>	CDI <sup>2)</sup>	AD <sup>3)</sup>	Fed	Ald	OM	Clay
MWD <sup>1)</sup>	1.00						
CDI <sup>2)</sup>	-0.48	1.00					
AD <sup>3)</sup>	0.49	-0.25	1.00				
Fed	0.74 *	-0.05	0.64 *	1.00			
Ald	0.54	0.06	0.55	0.88 **	1.00		
OM	0.33	0.29	0.33	0.82 **	0.92 **	1.00	
Clay	0.24	-0.15	0.54	0.48	0.78 **	0.62	1.00

1)平均重量直径 Mean weight diameter,2)黏粒分散系数 Clay dispersion index,3)团聚度 Aggregation degree 下同;\*,\*\*分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平下显著相关, $n=10$ ;\*,\*\* mean significant correlation at  $p<0.05$  and  $p<0.01$  levels, respectively and  $n=10$

表8 侵蚀泥沙与供试土壤的理化性质之间的相关关系

Table 8 Correlations of physicochemical properties of sediments with the original soils

供试土壤 Test soil	侵蚀泥沙 Sediment						
	MWD <sup>1)</sup>	CDI <sup>2)</sup>	AD <sup>3)</sup>	Fed	Ald	OM	Clay
OM	-0.49	0.88 **	-0.05	-0.18	-0.08	0.08	-0.14
CEC	0.52	0.29	0.55	0.93 **	0.83 **	0.86 **	0.37
Fed	0.71 *	-0.03	0.62	0.99 **	0.90 **	0.82 **	0.50
Ald	0.60	0.04	0.62	0.96 **	0.97 **	0.91 **	0.68 *
Sio	0.72 *	-0.16	0.64 *	0.96 **	0.94 **	0.82 **	0.66 *
砂粒 Sand	-0.52	-0.29	-0.44	-0.87 **	-0.64 *	-0.71 *	-0.07
粉粒 Silt	0.07	0.57	0.03	0.36	0.07	0.28	-0.50
黏粒 Clay	0.73 *	-0.12	0.64 *	0.98 **	0.92 **	0.81 **	0.59

1)平均重量直径 Mean weight diameter,2)黏粒分散系数 Clay dispersion index,3)团聚度 Aggregation degree;\*,\*\*分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平下显著相关, $n=10$ ;\*,\*\* mean significant correlation at  $p<0.05$  and  $p<0.01$  levels, respectively and  $n=10$



表 9 泥沙颗粒稳定性指标与土壤结构稳定性之间的相关关系

Table 9 Correlations of particle stability indices of sediments with structural stability of the original soils

		供试土壤 Test soil								
		WSA <sub>&gt;0.25 mm</sub> <sup>1)</sup>	PAD <sub>&gt;0.25 mm</sub> <sup>2)</sup>	PAD <sub>&gt;2 mm</sub>	MWD	CDI	AD	微团聚体 Micro-aggregate		
								砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
侵蚀泥沙 Sediment	MWD	0.33	-0.32	0.11	-0.12	-0.68*	0.72*	-0.29	0.40	-0.34
	CDI	-0.72*	0.77**	0.66*	-0.55	0.55	0.08	-0.46	0.36	0.81**
	AD	0.25	-0.20	0.17	-0.07	-0.60	0.58	-0.21	0.28	-0.16

1) >0.25 mm 水稳性团聚体 Water stable aggregate larger than 0.25 mm, 2) 团聚体分散度 Percentage of aggregate disruption; \*, \*\* 分别表示  $p < 0.05$  和  $p < 0.01$  水平下显著相关,  $n = 10$ , \*\*, \* mean significant correlation at  $p < 0.05$  and  $p < 0.01$  levels, respectively and  $n = 10$

### 3 结 论

侵蚀泥沙的颗粒组成状况及其稳定性受土壤结构稳定性和坡面侵蚀力耦合作用影响。相同母质发育红壤泥沙的颗粒(分散前和分散后)组成情况相似。团聚体稳定性较高的土壤产生的泥沙颗粒以团聚体为主,而且颗粒稳定性较好,降雨动能对泥沙颗粒组成影响不大;而团聚体稳定性较差土壤产生的泥沙中细颗粒富集(<0.02 mm)最明显,纱网覆盖条件下(降雨动能很小)对细颗粒富集作用更强。泥沙中有机质、游离氧化铁和游离氧化铝含量及分布随土壤不同差异明显,这主要与土壤自身物质含量及黏粒的载体作用有关。此外不同降雨动能下三种物质的组成和富集程度也存在差异。该研究结果为理解降雨动能的侵蚀作用和坡面侵蚀机制及地表覆盖措施的设计提供了参考。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 白红英,唐克丽,陈文亮,等. 坡地土壤侵蚀与养分流失过程的研究. 水土保持通报,1991,11(3):14—19. Bai H Y, Tang K L, Chen W L, et al. Studies on the process of soil erosion and nutrient loss in the sloping lands (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991,11(3):14—19
- [ 2 ] 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. 环境科学,2012,33(7):2497—2502. Wu F Z, Shi Z H, Fang N F, et al. Temporal variations of clay content in eroded sediment under different rainfall condition (In Chinese). Environmental Science, 2012, 33(7): 2497—2502
- [ 3 ] Rienzi E A, Fox J F, Grove J H, et al. Interrill erosion in soils with different land uses: The kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution. Catena, 2013, 107: 130—138
- [ 4 ] 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. Geomorphology, 2002, 45: 261—275
- [ 5 ] 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. European Journal of Soil Science, 2009, 60(1):84—93
- [ 6 ] Berger C, Schulze M, Ricke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12):1456—1467
- [ 7 ] Defersha B M, Melesse M A. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. Catena, 2012, 90:47—52
- [ 8 ] 肖培青,郑粉莉. 上方来水来沙对沟洫侵蚀泥沙颗粒组成的影响. 泥沙研究,2003(5):64—68. Xiao P Q, Zheng F L. Effects of up-slope runoff and sediment on rill erosive sediment particle size distribution (In Chinese). Journal of Sediment Research, 2003(5):64—68
- [ 9 ] 彭怡,王玉宽,傅斌,等. 紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素. 水土保持通报,2010,30(2):142—144. Peng Y, Wang Y K, Fu B, et al. Particle characteristics and influencing factors of eroded purple soil (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2):142—144
- [ 10 ] 刘秉正,李光录,吴发启,等. 黄土高原南部土壤养分流失规律. 水土保持学报,1995,9(2):77—86. Liu B Z, Li G L, Wu F Q, et al. The regular patters of the loss of soil nutrients on southern Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2):77—86
- [ 11 ] 蔡崇法,丁树文,张光远,等. 三峡库区紫色土坡地养分流失状况及养分流失. 地理研究,1996,15(3):77—84. Cai C F, Ding S W, Zhang G Y, et al. A preliminary study on the conditions and losses of nutrients of purple soils in Three Gorge Reservoir Area (In Chinese). Geographical Research, 1996,15(3):77—84
- [ 12 ] 马琨,王兆骞,陈欣,等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究. 水土保持学报,2002,16(3):16—19. Ma K, Wang Z Q, Chen X, et al. Study on properties of nutrient loss from red soil in sloping land under different rainfall intensities (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2002,16(3):16—19
- [ 13 ] 聂小东,李忠武,王晓燕,等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究. 土壤学报,2013,50(5):900—

908. Nie X D, Li Z W, Wang X Y, et al. Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil and organic carbon enrichment in sediment (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5):900—908
- [14] 李光录,姚军,庞小明. 黄土丘陵区土壤和泥沙不同粒径有机碳分布及其侵蚀过程. *土壤学报*, 2008, 45(4):740—744. Li G L, Yao J, Pang X M. Distribution and erosion process of organic carbon in the different particle size fractions in Loess Hills region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4):740—744
- [15] Li Z X, Cai C F, Shi Z H, et al. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China. *Pedosphere*, 2005, 15(1):129—136
- [16] 李朝霞,王天魏,史志华,等. 降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系. *水土保持学报*, 2005, 19(1):1—4, 9. Li Z X, Wang T W, Shi Z H, et al. Relationship between top soil structure changes and erosion process of red soils under simulated rainfall (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):1—4, 9
- [17] 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. *土壤学报*, 2007, 44(4):577—583. Yan F L, Shi Z H, Cai C F, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on Ultisols (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4):577—583
- [18] Yan F L, Shi Z H, Li Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 2008, 100:34—41
- [19] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究. *土壤学报*, 1998, 35(1):95—103. Zheng F L. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1):95—103
- [20] Luk S H, Abrahams A D, Parson A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphic experiment. *Physical Geography*, 1986, 7:344—356
- [21] 熊毅. 土壤胶体研究法. 北京: 农业出版社, 1985. Hseung Y. Research methods for soil colloid (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1985
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化性质分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analytical methods for soil physicochemical property (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [23] Lado M, Ben-Hur M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. *Applied Clay Science*, 2004, 24:209—224
- [24] 郭杏妹,吴宏海,罗媚,等. 红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(6):515—521. Guo X M, Wu H H, Luo M, et al. The morphological change of Fe/Al-oxide minerals in red soils in the process of acidification and its environmental significance (In Chinese). *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2007, 26(6):515—521
- [25] Wuddivira M N, Camps-Roach G. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58:722—727
- [26] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes. *Earth Surface Processes and Landform*, 2007, 32:711—724
- [27] Barthès B G, Kouakoua E, Larré-Larrouy M C, et al. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*, 2008, 143:14—25

## COMPOSITION OF SEDIMENTS OF EROSION FROM DIFFERENT RED SOIL SLOPES IN SUBTROPICAL AREA

Wu Xinliang<sup>1</sup> Wei Yujie<sup>1</sup> Li Zhaoxia<sup>1</sup> Cai Chongfa<sup>1†</sup> Yang Wei<sup>1,2</sup>

(1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2 Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China)

**Abstract** Particle size distribution and material composition was measured of sediments of erosion from slopes of red soils (five different types of red soils derived from three different kinds of parent materials, i. e., Shale, Quaternary red clay and Granite) as affected by rainfall kinetic energy of artificial rainfall. Rainfall kinetic energy was controlled by either leaving the slopes bare or covering them with mesh. Results show that particle size distribution of the sediments of erosion was influenced significantly by parent material and rainfall erosive force. That is to say, soils derived from the same parent material would generate erosion sediments similar in particle composition and mesh coverage increased the content of fine fractions (non-dispersed) in sediments which was due mainly to the interaction between stability of aggregates and erosive force of rainfall on the slope. The sediments from red soils derived from Shale (HS) and Granite (soil TG1 and TG2) were enriched with silt and clay (dispersed) (1.15 to 3.14 in enrichment rate) while those from soil HQ1 and HQ2 derived from Quaternary red clay enriched with sands with the highest enrichment rate reaching 3.84. In sediments from soil

HS, TG1 and TG2, organic matter (OM), free iron oxide (Fed) and aluminum oxide (Ald) were mostly distributed in fine particles smaller than 0.05 mm (non-dispersed) in size; however, in sediments from HQ1 and HQ2, they were concentrated in two particle size fractions, i. e.  $>0.25$  mm and  $<0.05$  mm. Among them, OM was the most obvious with enrichment rate varying from 1.05 to 9.88. In the sediments OM, Fed and Ald were extremely significantly related to each other ( $r \geq 0.82$ ). So were they with cation exchange capacity, Fed, Ald, amorphous silica and clay in the original soils, indicating that these substances in the sediments influence each other and depend largely on their content in the original soils.

**Key words** Red soil; Slope erosion; Sediment; Material composition; Enrichment rate

(责任编辑:檀满枝)