

# 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响<sup>\*</sup>

闫峰陵 史志华<sup>†</sup> 蔡崇法 李朝霞

(华中农业大学亚热带农业资源与环境农业部重点实验室, 武汉 430070)

**摘 要** 通过野外人工模拟降雨试验,研究了第四纪红粘土、泥质页岩和花岗岩三种母质发育的红壤团聚体稳定性对土壤坡面侵蚀和侵蚀泥沙特性的影响。结果表明:坡面土壤侵蚀量和径流强度与土壤团聚体稳定性存在显著负相关关系,且不同团聚体稳定性指标与二者相关程度存在差异,其中湿筛团聚体平均重量直径(MWD)和 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量( $WSA_{0.25}$ )与侵蚀量和径流强度相关程度最高,快速湿润中 1 ~ 0.5 mm 团聚体和湿润振荡中 2 ~ 1 mm 团聚体标准化平均重量直径(NMWD)与二者的相关性也达到了显著;泥沙粒径与湿筛 MWD 和  $WSA_{0.25}$  之间相关关系(偏相关分析)呈显著正相关( $r = 0.8283^*$ ,  $r = 0.8209^*$ );快速湿润中 1 ~ 0.5 mm 团聚体和湿润振荡中 2 ~ 1 mm 团聚体的 NMWD 与泥沙粒径也存在较好正相关关系( $r = 0.7458$ ,  $r = 0.6859$ )。泥沙粒径和水流功率在本研究中未表现出较好相关性( $r = -0.1852$ )。

**关键词** 红壤;团聚体;坡面侵蚀;泥沙粒径

中图分类号 S157 文献标识码 A

我国红壤丘陵区地处热带、亚热带,包括长江流域的大部分及其南部,跨南方 10 个省(区),面积 113 万  $km^2$ ,占国土总面积的 11.8%。该地区水热资源丰富,是我国重要的农业生产区域<sup>[1]</sup>。由于土地资源的不合理开发与利用,土壤退化已经成为本区农业生产主要障碍因素,其中分布最广的是土壤侵蚀退化<sup>[2]</sup>。土壤侵蚀退化程度可用土壤侵蚀量衡量,土壤侵蚀量不仅取决于引起土壤侵蚀的外部动力,而且也取决于土壤可蚀性(Soil erodibility)<sup>[3]</sup>,即土壤对侵蚀介质剥蚀和搬运的敏感性<sup>[4]</sup>。

土壤可蚀性是由土壤理化性质共同作用决定的<sup>[5]</sup>,其中土壤结构被认为是最重要和最直接的因子<sup>[6]</sup>。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其粒径分布及稳定性不仅影响土壤孔隙分布,还关系到水分在土表及土体内的运移方式与途径<sup>[7]</sup>,与地表径流和渗透性之间具有密切关系<sup>[8]</sup>。地表径流及渗透性则是影响土壤可蚀性的重要因素<sup>[9]</sup>,因此,土壤团聚体与土壤可蚀性之间存在必然的内在联系。现有土壤团聚体和侵蚀过程的研究大多数是在室内模拟进行,对土壤进行了人工筛选和分装,外力作用对土壤性质,特别是团聚体造成的影响是难以预料的<sup>[10]</sup>。

鉴于此,本研究以团聚体稳定性入手,选取不同团聚体稳定性指标,在原位土壤上进行不同条件下人工模拟降雨试验,通过监测坡面土壤侵蚀响应过程和径流泥沙特性,确定团聚体稳定性对坡面侵蚀和泥沙粒径的影响,以期对红壤可蚀性的确立提供理论基础。

## 1 研究区概况和试验方法

### 1.1 研究区概况及径流小区准备

试验布设于湖北省咸宁市境内,地处东经 114°06' ~ 114°43',北纬 29°39' ~ 30°02',属亚热带季风湿润气候区,多年平均降水量为 1572 mm。选取由第四纪红粘土、泥质页岩和花岗岩发育的三种红壤为供试土壤,根据中国土壤系统分类,供试土壤均属富铁土,粘土矿物以高岭石为主,土地利用类型为坡耕旱地,耕种时间在 10 a 以上。供试土壤基本性质见表 1,分析方法采用常规法<sup>[11]</sup>。人工模拟降雨前,对小区内土壤进行 10 cm 左右耕翻后耙平。试验小区为 2 m × 1 m,四周使用厚 0.5 cm 钢板打入 30 cm 作为隔水墙,以分隔小区内径流;小区下设集流装置,可定时采集径流样。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(40401034 和 40501040)资助

<sup>†</sup> 通讯作者, E-mail: pengshi@mail.hzau.edu.cn

作者简介:闫峰陵(1980~),男,博士研究生,研究方向为土壤侵蚀机理

收稿日期:2006-03-22;收到修改稿日期:2006-07-12

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Selected properties of the soils studied

土壤代号 Soil code	母质 Parent material	机械组成 Mechanical composition ( $\text{g kg}^{-1}$ )			有机质 Organic matter ( $\text{g kg}^{-1}$ )	阳离子交换量 CEC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )
		砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay		
Q	第四纪红粘土 Quaternary clay	96	463	441	22.7	15.8
S	泥质页岩 Shale	394	371	235	18.7	14.5
G	花岗岩 Granite	712	205	83	6.8	6.1

## 1.2 人工模拟降雨试验

模拟降雨器采用美国 SPRACO 锥形喷头, 喷头距地面垂直高度 4.75 m, 通过压力阀和喷头组合控制雨强和雨滴直径分布, 雨滴中数直径为 2.40 mm, 降雨均匀度为 90%<sup>[12]</sup>。按照当地降雨以及地貌条件设置 4 个试验处理, 各个试验处理在每种土壤上选取 3 个小区作为重复, 处理试验结果为重复均值, 共计降雨 36 场。试验设计见表 2。试验过程中, 从坡面产流开始每隔 3 min 采集一次径流样, 测定径流体积和含沙量。

表 2 人工降雨试验设计

Table 2 Experimental treatments of simulated rainfall

项目 Item	处理编号 Treatment No.			
	1	2	3	4
坡度 Slope ( $^\circ$ )	5	5	15	15
雨强 Rainfall intensity ( $\text{mm h}^{-1}$ )	30	60	30	60

## 1.3 土壤团聚体稳定性分析

土壤团聚体稳定性分析采用湿筛法<sup>[11]</sup>和 LB 法<sup>[9]</sup>。湿筛法是测定团聚体稳定性的传统方法, 其破碎过程基本上包括所有团聚体破碎机制, 多用于衡量土壤全样团聚体稳定性; LB 法依据降雨过程中团聚体不同破碎机制设计试验, 以区分团聚体的抗糊化作用和抗机械破碎作用<sup>[9]</sup>。LB 法按如下方法进行: 在各个试验点取表层 (0~15 cm) 原状土风干, 干筛法筛出 5~2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm 三级团聚体, 于 40 烘箱内烘 24 h, 使团聚体土壤含水量一致后进行以下三种处理: (1) 快速湿润 (Fast Wetting, FW): 取 5 g 团聚体快速浸没在去离子水中 10 min 后用移液管吸掉水分; (2) 湿润振荡 (Wet Stirring, WS): 取 5 g 团聚体浸没在酒精中以排出空气, 浸泡 10 min 后用移液管吸掉酒精, 将土壤转入盛有 50 ml 去离子水的 250 ml 锥形瓶中, 加水至 200 ml, 加塞后上下振荡 20 次, 静置 30 min 使粗分散体沉

淀, 然后用吸管吸去多余水分; (3) 慢速湿润 (Slow Wetting, SW): 取 5g 团聚体置于张力为 -0.3 kPa 滤纸上, 静置 30~40 min 使团聚体完全湿润。将已作湿润处理的土壤转移到浸没在 95% 酒精中的 50  $\mu\text{m}$  孔径筛子上, 上下振荡 20 次 (幅度 2 cm); 然后在 40 烘箱中蒸干酒精, 转入铝盒中, 40 下烘干 24 h, 称重。干筛过 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.2 mm、0.1 mm 和 0.05 mm 筛, 称重得到每个粒级的破碎团聚体。

湿筛法采用平均重量直径 (MWD)、>0.25 mm 水稳性团聚体 ( $\text{WSA}_{0.25}$ ) 和团聚体分散度 (PAD) 来衡量团聚体稳定性; LB 法中, 采用 Zhang<sup>[13]</sup> 提出的标准化平均重量直径 (NMWD) 来表征不同初始粒径的团聚体稳定性。各参数计算方法如下:

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

$$\text{PAD}_{0.25} = [(\text{DA}_{0.25} - \text{WA}_{0.25}) / \text{DA}_{0.25}] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{PAD}_2 = [(\text{DA}_2 - \text{WA}_2) / \text{DA}_2] \times 100 \quad (3)$$

$$\text{NMWD} = \frac{\text{MWD}}{r_{\max} - r_{\min}} \times 100 \quad (4)$$

式中,  $r_i$  为第  $i$  个筛子孔径 (mm),  $r_0 = r_1$ ,  $r_n = r_{n+1}$ ,  $m_i$  为第  $i$  个筛子的破碎团聚体重量百分比;  $\text{DA}_{0.25}$  和  $\text{DA}_2$  分别为 >0.25 mm 和 >2 mm 干筛团聚体含量;  $\text{WA}_{0.25}$  和  $\text{WA}_2$  分别为 >0.25 mm 和 >2 mm 湿筛团聚体含量;  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$  分别代表最大初始筛子孔径和最小筛子孔径。

## 1.4 径流泥沙特性分析

由于泥沙样品较少, 每两个时段 (即 6 min) 收集一次泥沙样品进行湿筛分析。筛分前将样品先通过 0.05 mm 筛滤出泥沙, <0.05 mm 泥沙用吸管法测定其含量, >0.05 mm 泥沙按湿筛法测定其粒径分布状况, 并用平均重量直径表示。为防止团聚体进一步崩解, 筛分过程在 95% 酒精中进行<sup>[14]</sup>。

1.5 土壤坡面侵蚀能量

水流功率( $Wm^{-2}$ )表示的是水流在单位面积上的能量,是土壤表层团聚体破碎后运移的能量来源,在没有细沟产生的侵蚀表层,水流功率<sup>[14]</sup>( $Wm^{-2}$ )可由下式得出:

$$= gSq \tag{5}$$

式中, $W$ 为水流密度( $kgm^{-3}$ ), $g$ 为重力加速度( $ms^{-2}$ ), $S$ 为坡度(正弦值), $q$ 为侵蚀面单宽流量( $m^3m^{-1}s^{-1}$ )。

2 结果与讨论

2.1 土壤团聚体稳定性

表3是湿筛法测定团聚体稳定性结果。由湿筛团聚体平均重量直径、 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体和团聚体分散度对比可知,供试土壤团聚体稳定性排序是第四纪粘土红壤(Q) $>$ 花岗岩红壤(G) $>$ 泥质页岩红壤(S);干筛法第四纪粘土红壤与泥质页岩红壤未显示出差异。

表3 湿筛法测定团聚体稳定性

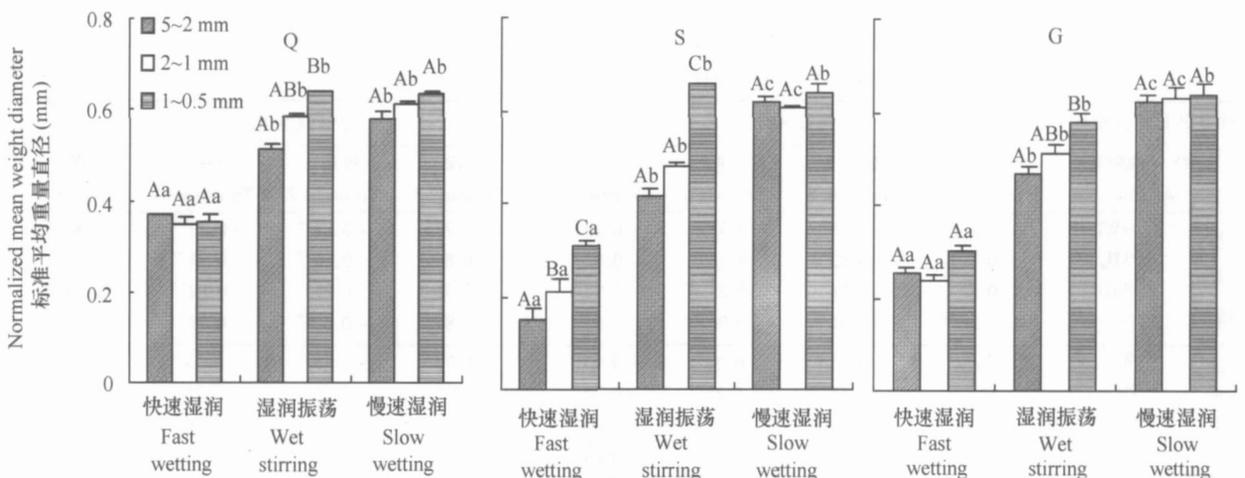
Table 3 Aggregate stability measured by wet-sieving method

土壤代号 Soil code	平均重量直径 (mm)		$>0.25\text{ mm}$ 水稳性 团聚体 (%)	团聚体分散度 (%)	
	干筛法	湿筛法		$>0.25\text{ mm}$	$>2\text{ mm}$
	Dry sieving method	Wet sieving method			
Q	3.26 b	1.88 c	68.26	16.44	46.79
S	3.60 b	0.48 a	34.02	58.51	92.30
G	1.56 a	0.90 b	55.62	25.17	58.07

注:字母表示多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同表示达到 $p$ 为0.05显著差异 Note :Different letters in the same column mean difference of significance at  $p < 0.05$  level by SSR. Q. 第四纪粘土红壤 Quaternary clay red soil ;S. 泥质页岩红壤 Shale red soil ;G. 花岗岩红壤 Granite red soil. Mean weight diameter ; Water stable aggregates larger than 0.25mm ; Percentage of aggregate disruption

LB 法测定团聚体稳定性结果见图1。在三种不同破碎机制中,团聚体稳定性排序是快速湿润 $<$ 湿润振荡 $<$ 慢速湿润,团聚体标准平均重量直径随团聚体粒径减小而增大。快速湿润破碎后,就三个粒级团聚体 NMWD 状况来看,第四纪粘土红壤和花岗岩红壤差异均不显著,泥质页岩红壤粒级间差异显著;湿润振荡破碎后,第四纪粘土红壤和花岗岩红壤 $5\sim 2\text{ mm}$ 和 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 团聚体 NMWD 差异显著,

泥质页岩红壤 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 和其他两个粒级间差异显著;慢速湿润中,供试土壤各粒级间均未显示差异。土壤间差异主要体现在快速湿润和湿润振荡中,第四纪粘土红壤和花岗岩红壤 NMWD 值均高于泥质页岩红壤,这种趋势在 $2\sim 1\text{ mm}$ 和 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 体现的尤为明显。可见,第四纪粘土红壤和花岗岩红壤团聚体稳定性较泥质页岩红壤要高,且二者团粒性质较为接近。



注:不同大写字母表示粒级之间差异显著,不同小写字母表示破碎方法之间差异显著, $p < 0.05$  Note :Different capital letters indicate difference of significance at  $p < 0.05$  in aggregate size and different small letters indicate difference of significance at  $p < 0.05$  between methods.

Q. 第四纪粘土红壤 Quaternary clay red soil ;S. 泥质页岩红壤 Shale red soil ;G. 花岗岩红壤 Granite red soil

图1 LB 法测定团聚体标准化平均重量直径

Fig. 1 Normalized Mean Weight Diameter (NMWD) of soil aggregates determined by LB method

## 2.2 团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响

土壤侵蚀量与径流强度分析结果见表4。由表可知,在所有处理上供试土壤侵蚀量大小排序均为第四纪粘土红壤(Q) < 花岗岩红壤(G) < 泥质页岩红壤(S),但只有处理4上泥质页岩红壤与花岗岩红壤、第四纪粘土红壤差异达到显著,这可能是由于外力侵蚀作用力较小、土壤结构破坏程度不大造成的;径流强度分析结果与侵蚀量类似,泥

质页岩红壤径流强度在处理4上显著高于其他两种土壤。可见,母质类型对土壤侵蚀有重要影响,第四纪粘土红壤粘粒含量高,<0.25 mm微团聚体的形成主要取决于粘粒和三氧化物的粘结作用<sup>[15]</sup>,大量水稳性微团聚体的存在提高了其抗蚀性;花岗岩红壤颗粒较粗,水分入渗能力强,且径流对大颗粒的泥沙携带能力有限,故二者均表现出较小的侵蚀量和径流强度。

表4 不同处理坡面侵蚀量与径流强度

Table 4 Soil loss and runoff rate in different treatments

处理编号 Treatment No.	侵蚀量 Soil loss (kg m <sup>-2</sup> )			径流强度 Runoff rate (mm h <sup>-1</sup> )			径流系数 Runoff coefficient (%)		
	Q	S	G	Q	S	G	Q	S	G
1	0.0287 a	0.0300 a	0.0303 a	17.14 a	20.03 a	20.32 a	57.15	67.33	67.74
2	0.0674 ab	0.1650 b	0.0648 ab	34.37 c	45.21 c	38.36 c	56.67	75.01	63.93
3	0.0564 ab	0.1690 b	0.0825 ab	20.60 b	23.86 b	24.18 b	68.67	79.25	80.60
4	0.4530 c	0.8470 d	0.5819 c	42.39 d	44.99 c	42.85 d	70.65	74.99	71.42

注:字母表示多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同表示达到 $p$ 为0.05显著差异 Note: Different letters in the same column mean difference of significance at  $p < 0.05$  level by SSR. Q. 第四纪粘土红壤 Quaternary clay red soil; S. 泥质页岩红壤 Shale red soil; G. 花岗岩红壤 Granite red soil

由于处理间雨强差异,进一步对比径流系数<sup>[16]</sup>(Runoff Coefficient, ROC,即径流强度与降雨强度比值)可发现,土壤类型对坡面径流影响更大,泥质页岩红壤较其他两种土壤,降雨更大程度上转化为坡面流,在坡度较小时这种趋势更明显。

表5是团聚体稳定性参数与土壤侵蚀量及径流强度间相关关系统计分析结果。由表可知,在所有处理中指标MWD和 $WSA_{0.25}$ 与侵蚀量和径流强度均呈显著或极显著负相关,其中 $WSA_{0.25}$ 显著性更高;

$PAD_{0.25}$ 与侵蚀量和径流强度间相关性较 $PAD_2$ 要高。由此可见,红壤的抗蚀能力主要通过>0.25 mm水稳性团聚体来体现;坡面侵蚀过程中,小粒级团聚体体现了更好的稳定性。红壤中有机质含量较低,铁铝氧化物等无机胶体是团聚体形成的主要胶结物质,在这种情况下形成的团聚体一般以小粒级为主,且小团聚体孔隙小,弯曲程度大,其内聚力也较大<sup>[17]</sup>,在侵蚀过程中比大粒径的团聚体稳定,故小团聚体的稳定性是红壤抗蚀作用的主要体现。

表5 土壤团聚体稳定性与土壤侵蚀量和径流强度间相关系数  $r$

Table 5 Soil loss and runoff rate in relation to aggregate stability

团聚体稳定性指标 <sup>1)</sup>		侵蚀量 Soil loss				径流强度 Runoff rate			
Index of aggregate stability		处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
		Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3	Treatment 4	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3	Treatment 4
湿 筛 法	MWD	-0.85 **	-0.73 *	-0.95 **	-0.90 **	-0.78 *	-0.84 **	-0.83 **	-0.82 **
	$PAD_{0.25}$	0.32	0.82 **	0.76 *	0.91 **	0.86 **	0.88 **	0.82 **	0.22
	$PAD_2$	0.25	0.73 *	0.53	0.43	0.31	0.28	0.82 **	0.88 **
	$WSA_{0.25}$	-0.86 **	-0.94 **	-0.86 **	-0.93 **	-0.87 **	-0.85 **	-0.72 *	-0.85 **
LB 法 指 标	$FW_{1-0.5}$	-0.73 *	-0.75 *	-0.69 *	-0.90 **	-0.77 *	-0.85 **	-0.73 *	-0.86 **
	$FW_{2-1}$	-0.33	-0.85 **	-0.88 **	-0.26	-0.36	-0.26	-0.38	-0.38
	$WS_{1-0.5}$	-0.84 **	-0.74 *	-0.43	-0.92 **	-0.78 *	-0.35	-0.76 *	-0.41
	$WS_{2-1}$	-0.76 *	-0.87 **	-0.72 *	-0.83 **	-0.73 *	-0.77 *	-0.78 *	-0.80 **

1) MWD:平均重量直径 Mean weight diameter;  $PAD_{0.25}$ : >0.25 mm 团聚体分散度 Percentage of aggregates (>0.25 mm) disruption;  $PAD_2$ : >2 mm 团聚体分散度 Percentage of aggregates (>2 mm) disruption;  $WSA_{0.25}$ : >0.25 mm 水稳性团聚体 Water stable aggregates (>0.25 mm);  $FW_{1-0.5}$ :快速湿润 1~0.5 mm 团聚体标准平均重量直径 Normalized mean weight diameter of 1~0.5 mm aggregates by fast wetting treatment;  $FW_{2-1}$ :快速湿润 2~1 mm 团聚体标准平均重量直径 Normalized mean weight diameter of 2~1 mm aggregates by fast wetting treatment;  $WS_{1-0.5}$ :湿润振荡 1~0.5 mm 团聚体标准平均重量直径 Normalized mean weight diameter of 1~0.5 mm aggregates by wet stirring treatment;  $WS_{2-1}$ :湿润振荡 2~1 mm 团聚体标准平均重量直径 Normalized mean weight diameter of 2~1 mm aggregates by wet stirring treatment; \*, \*\*: 分别表示 0.05、0.01 显著水平 Significant at 0.05 and 0.01. Wet sieving method; Index by LB method

LB 法中,快速湿润的 1~0.5 mm 团聚体和湿润振荡的 2~1 mm 团聚体 NMWD 与所有处理的侵蚀量和径流强度相关关系均达到显著或极显著水平,而大粒级(5~2 mm)团聚体 NMWD 与侵蚀量和径流强度相关程度较低,这与 Améketa 等<sup>[8]</sup>研究结论一致。可见,红壤中 1~0.5 mm 团聚体抗消散作用和 2~1 mm 团聚体抗机械破碎作用与可蚀性关系最为密切,其他粒级团聚体的作用在本研究中未有明显体现,更进一步体现了小粒径团聚体稳定性对红壤可蚀性的重要作用。

本研究是在野外原位土上进行,与室内扰动土研究结果存在一定差异。本研究结果对比李朝霞等<sup>[18]</sup>室内研究结果可发现,泥质页岩红壤试验结果差别较小,而第四纪粘土和花岗岩红壤存在较大差异,二者在红壤的侵蚀量和径流强度均大于扰动土壤。这主要是由于室内研究对土壤进行了筛分,去除了较大粒级团聚体,土壤中以小粒级团聚体为主,而红壤中小粒级团聚体在侵蚀过程中更为稳定,所以其侵蚀量和径流强度比原位土壤要小。第四纪

粘土和花岗岩红壤的团聚体稳定性较泥质页岩红壤更高,所以由于土壤筛分过程造成影响也越明显。同时,室内填土时土壤层次与自然剖面的差别也是造成试验结果差异的重要原因。原位土壤的模拟研究能更为真实地反映自然条件下侵蚀状况,因而,在实践中也更具指导意义。

### 2.3 团聚体稳定性对泥沙颗粒特性的影响

表 6 是不同处理的土壤侵蚀泥沙平均重量直径分析结果。坡面侵蚀过程中,细颗粒泥沙一般在产流之初形成<sup>[19]</sup>。试验中供试土壤侵蚀泥沙平均重量直径随时间变化很小,这可能是由于表面变化过程太快,取样时间比泥沙变化时间段长,掩盖了变化过程。

分析表 6 的数据,泥沙 MWD 最大值出现在处理 3,各处理间差异不明显。侵蚀动能较大(雨强为 60 mmh<sup>-1</sup>)处理中,侵蚀量越大,泥沙 MWD 值越小,在雨强为 30 mmh<sup>-1</sup>的处理中未体现这种趋势;不同土壤间差异显著,特别是第四纪粘土红壤和泥质页岩红壤,在所有处理中,二者的差异均达到显著,花岗岩红壤则介于二者之间。

表 6 不同处理土壤侵蚀泥沙平均重量直径

Table 6 Mean weight diameters of sediments in different treatments(mm)

处理编号 Treatment No.	第四纪粘土红壤 Quaternary clay red soil	泥质页岩红壤 Shale red soil	花岗岩红壤 Granite red soil
1	0.357 d	0.149 ab	0.256 c
2	0.419 d	0.187 abc	0.362 d
3	0.536 e	0.230 bc	0.385 d
4	0.362 d	0.116 a	0.238 bc

注:字母表示多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同表示达到  $p$  为 0.05 显著差异 Note: Different letters in the same column mean difference of significance at  $p < 0.05$  level by SSR

侵蚀过程中,细颗粒泥沙容易被搬运,且搬运距离较远,团粒性质好的土壤对侵蚀力(雨滴打击、径流剪切)的抵抗力更强,在侵蚀过程中较难破碎,形成泥沙颗粒较粗;径流动能大时,可携带泥沙量大,被搬运的泥沙粒径也大,反之径流动能较小时,可携带泥沙量少,形成泥沙粒径也较小。可见,团聚体稳

定性和坡面流能量大小共同决定了侵蚀泥沙粒径。本研究中,由于各个处理的坡度和雨强设置不同,坡面流能量大小存在较大差异,因此,在分析团聚体稳定性对侵蚀泥沙粒径影响时,以表征坡面流能量的水流功率作为控制变量,对二者进行偏相关分析,具体分析结果见表 7。

表 7 土壤团聚体稳定性与泥沙粒径关系

Table 7 MWD of sediment in relation to soil aggregate stability indices

泥沙平均重量直 径 Mean weight diameter of sediments	偏相关系数 Partial correlation coefficients	团聚体稳定性参数 <sup>1)</sup> Parameters of aggregate stability				水流功率 Stream power ( $W m^{-2}$ )	
		MWD <sub>w</sub>	MWD <sub>d</sub>	WSA <sub>0.25</sub>	FW <sub>1-0.5</sub>		WS <sub>2-1</sub>
	显著性概率 Signi- ficant probability	0.021	0.566	0.026	0.066	0.071	0.564

1) MWD<sub>w</sub>:湿筛平均重量直径 Mean weight diameter by wet sieving method; MWD<sub>d</sub>:干筛平均重量直径 Mean weight diameter by dry sieving method; WSA<sub>0.25</sub>: > 0.25 mm 水稳性团聚体 Water stable aggregates (> 0.25 mm); FW<sub>1-0.5</sub>:快速湿润 1~0.5 mm 团聚体标准平均重量直径 Normalized mean weight diameter of 1~0.5 mm aggregates by fast wetting treatment; WS<sub>2-1</sub>:湿润振荡 2~1 mm 团聚体标准平均重量直径 Normalized mean weight diameter of 2~1 mm aggregates by wet stirring treatment; \*:表示 0.05 显著水平 Significant at 0.05

由表7可知,湿筛团聚体平均重量直径和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体与泥沙平均重量直径存在显著正相关关系;干筛团聚体MWD与泥沙粒径相关性很小;LB法中,快速湿润 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 和湿润振荡 $2\sim 1\text{ mm}$ 团聚体标准化平均重量直径与泥沙粒径存在较好正相关关系,但未达到显著;水流功率和泥沙的粒径有一定联系,本研究中由于坡长设置的缘故,二者未表现出显著相关关系。

在众多团聚体稳定性参数当中,湿筛团聚体MWD和 $WSA_{0.25}$ 值大小对泥沙粒径影响最大,团聚体湿筛过程中包括多种破碎方式,与降雨条件下泥沙形成环境相似,故二者相关性较高;红壤结构主要是通过水稳性团聚体来体现,特别是在第四纪粘土红壤和泥质页岩红壤中, $WSA_{0.25}$ 值不仅影响侵蚀量和径流强度,对泥沙粒径也有重要作用。由于降雨条件下团聚体的破碎包括多种方式,所以在LB法中,单一衡量团聚体抗消散作用和抗机械破碎能力的NMWD值与泥沙粒径相关程度不如湿筛法的指标,但是LB法区分了不同粒径和不同破碎方式对泥沙粒径的影响,为找到更好的描述团聚体稳定性指标提供了理论基础。

综上所述,红壤团聚体稳定性可作为衡量泥沙粒径的指标,湿筛团聚体MWD与 $WSA_{0.25}$ 值与泥沙粒径都存在显著正相关关系。同时,团聚体破碎和泥沙搬运所需能量也是一个重要因素,但其对红壤侵蚀泥沙粒径的影响在本研究中未有明显体现,这可能是因为坡长设置较短,径流对泥沙的分选作用不够造成的<sup>[14]</sup>。

### 3 结论

1) 在各种降雨条件下,湿筛团聚体指标MWD、 $WSA_{0.25}$ 值与侵蚀量和径流强度之间均呈显著负相关,说明二者是衡量红壤可蚀性的良好指标;指标 $PAD_{0.25}$ 和 $PAD_2$ 值与侵蚀量和径流强度之间存在正相关关系,但其显著性低于指标MWD和 $WSA_{0.25}$ ,同时 $PAD_{0.25}$ 值与侵蚀量和径流强度间显著性高于 $PAD_2$ ,说明红壤中小粒级团聚体稳定性更强,在侵蚀过程中不易崩解。

2) LB法中,快速湿润测定 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 团聚体和湿润振荡的 $2\sim 1\text{ mm}$ 测定团聚体NMWD值与侵蚀量和径流强度相关性最高,在各种条件下,均呈显著负相关,说明 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 团聚体抗消散作用和

$2\sim 1\text{ mm}$ 团聚体抗机械破碎能力与红壤可蚀性关系最为密切。

3) 湿筛指标MWD和 $WSA_{0.25}$ 与泥沙粒径都存在显著正相关关系;LB法中指标NMWD值与泥沙粒径相关程度低于湿筛法指标,但LB法区分了不同粒径和不同破碎方式对泥沙粒径的影响,为找到更好的描述团聚体稳定性指标提供了理论基础;由于坡长较短,坡面流能量与泥沙粒径间相关性较低,其对泥沙粒径影响需要进一步深入研究。

### 参考文献

- [1] 赵其国,徐梦洁,吴志东.东南红壤丘陵地区农业可持续发展研究.土壤学报,2000,37(4):433~442. Zhao Q G, Xu M J, Wu Z D. Agricultural sustainability of red soil upland region in southeast China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 433~442
- [2] 于东升,史学正.低丘红壤区旱地土壤渗透性与可蚀性定量关系的研究.土壤学报,2000,37(3):316~322. Yu D S, Shi X Z. Quantificational relationship between soil permeability of upland and soil erodibility in hilly red soil region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(3): 316~322
- [3] 史学正,于东升,刑延炎.用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性 $K$ 值.土壤学报,1997,34(3):299~305. Shi X Z, Yu D S, Xing Y Y. Soil erodibility factor  $K$  studied using field plots in subtropical China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(3): 299~305
- [4] 姜小三,潘剑君,杨林章,等.土壤可蚀性 $K$ 值的计算和 $K$ 值图的制作方法研究—以南京市方便水库小流域为例.土壤,2004,36(2):177~180. Jiang X S, Pan J J, Yang L Z, et al. Methods of calculating and mapping soil erodibility  $K$ —A case study of Fangbian watershed of Nanjing (In Chinese). Soils, 2004, 36(2): 177~180
- [5] Fox D M, Le Bissonnais Y. Process-based analysis of aggregate stability effects on sealing, infiltration and interrill erosion. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62: 717~724
- [6] Bryan R B. Soil erodibility and process of water erosion on hillslopes. Geomorphology, 2000, 3: 385~415
- [7] Duiker S W, Flanagan D C, Lal R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. Catena, 2001, 45: 103~121
- [8] Améketa E, Singer M J, Le Bissonnais Y. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60: 888~894
- [9] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment for soil crustability and erodibility I. Theory and methodology. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 425~437
- [10] Agassi M, Bradford J M. Methodologies for interrill soil erosion studies. Soil & Tillage Research, 1999, 49: 277~287
- [11] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析.上海:上海科学技术出版社,1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978

- [12] Luk S, Abrahams A D, Parsons A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphical experiments. *Physical Geography*, 1986, 7: 344 ~ 356
- [13] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma*, 2001, 99: 123 ~ 145
- [14] Teixeira P C, Misra R K. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soil as affected by mechanical stability of aggregates. *Catena*, 1997, 30: 119 ~ 134
- [15] 姚贤良, 许绣云, 于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成. *土壤学报*, 1990, 27(1): 25 ~ 33. Yao X L, Xu X Y, Yu D F. Formation of structure in red soils under different forms of utilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1990, 27(1): 25 ~ 33
- [16] Alan D Z, Ross A Z, Thomas W G. Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of inter-storm surface preparation and dynamic erodibility. *Water Resources Research*, 2000, 36(9): 2787 ~ 2791
- [17] 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. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176 ~ 2183. Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2176 ~ 2183
- [18] 李朝霞, 王天巍, 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. Li Z X, Wang T W, Shi Z H, *et al.* Relationship between top soil structure changes and erosion process of red soil under simulated rainfall (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 1 ~ 4
- [19] Palis R G, Okwach G, Rose C W. Soil erosion processes and nutrient loss. *Australian Journal of Soil Research*, 1990, 28: 623 ~ 639

## EFFECTS OF TOPSOIL AGGREGATE STABILITY ON SOIL EROSION AT HILLSLOPE ON ULTISOILS

Yan Fengling Shi Zihua<sup>†</sup> Cai Chongfa Li Zhaoxia

(Key Lab of Subtropical Agriculture & Environment, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070 China)

**Abstract** Relationships of soil aggregates stability with soil loss, runoff and sediment characteristics were studied under simulated rainfall in red soils derived from Quaternary clay, Shale and Granite. Results show that soil loss and runoff rate were significantly related to aggregate stability, but the relationship varied with the aggregate stability indices. Among them, mean weight diameter with wet-sieving method and content of water stable aggregates larger than 0.25 mm were the highest in relativity. As for Le Bissonnais' method, soil loss and mean runoff rate were also significantly correlated with the normalized mean weight diameter of aggregates (1 ~ 0.5 mm in size) in the fast wetting treatment and aggregates (2 ~ 1 mm in size) in the wet stirring treatment. A significant relationship (partial correlation analysis) was found between particle size of sediment and mean weight diameter ( $r = 0.8283^*$ ), water stable aggregates  $> 0.25$  mm ( $r = 0.8209^*$ ). In Le Bissonnais' method, the NMWD of aggregates (1 ~ 0.5 mm) in the fast wetting treatment and aggregates (2 ~ 1 mm) in the wet stirring treatment showed close but not significant relationship with particle size of sediments ( $r = 0.7458$ ,  $r = 0.6859$ ). However, the stream power and particle size of sediments did not show much ( $r = -0.1852$ ) in this study.

**Key words** Red soils; Aggregate; Hillslope erosion; Sediment characteristics