

集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及抗剪强度定量关系

王军光 李朝霞[†] 蔡崇法 杨伟 马仁明 张国彪

(华中农业大学农业部亚热带农业资源与环境重点实验室, 武汉 430070)

摘要 为明确红壤结构特征与抗剪强度对坡面土壤分离能力的影响, 选取 8 种典型红壤为研究对象, 通过团聚体稳定性分析, 饱和抗剪强度测定, 和室内模拟冲刷试验, 就各参数间定量关系进行了初步探讨。研究表明: 团聚体稳定性特征参数 A_s 集合了红壤团聚体破碎的主要机制, 与不同水流剪切力中红壤分离速率有较好的相关性; 红壤饱和抗剪强度(σ_s)与集中水流内临界水流剪切力(τ_c)呈较好的线性关系。基于 WEPP 细沟侵蚀模型, 将团聚体稳定性特征参数 A_s 代替可蚀性因子 K_c , 饱和抗剪强度(σ_s)代替临界水流剪切力(τ_c), 得出新的预测方程。结果显示预测方程能准确的预测坡面集中水流内红壤分离速率($R^2=0.8871$)。该结果为深入研究红壤侵蚀机理提供了新思路, 对完善侵蚀物理过程模型具有重要的意义。

关键词 集中水流; 红壤分离速率; 团聚体稳定性; 饱和抗剪强度

中图分类号 S157.1

文献标识码 A

我国红壤丘陵区地处热带、亚热带, 面积 113 万 km^2 , 水热资源丰富, 在中国农业生产中占有重要地位^[1]。但由于该区以丘陵地形为主, 土壤性能较差, 加之不合理的土地利用, 土壤侵蚀退化严重, 已成为我国仅次于黄土高原的严重水土流失区^[1-2]。该区域降雨集中且强度大, 分散的地表径流由于地形影响逐渐集中, 形成的集中水流冲刷地表, 在土壤表面有明显的细沟和侵蚀沟出现, 特别在侵蚀严重的地方, 由于 A 层和 B 层表面土壤颗粒被严重冲蚀, 下部红白相间的网纹层(C 层)裸露于地表^[2-3]。因此, 研究该区域集中水流内土壤分离机制十分必要。

目前, 关于坡面集中水流内水力学特性, 以及该水力学特性与土壤分离速率间的定量关系已有较为详尽的分析^[4-6], 土壤分离速率在不同时间内随耕作措施和土壤性能的变化已有研究^[7-8]。但在坡面冲刷过程中, 除考虑水动力学参数外, 土壤分离能力还受土壤性状(土壤类型、土壤团聚结构、粘结力、有机质等)的影响, 坡面土壤分离过程是由坡面水蚀因子和土壤自身性质共同决定。

坡面侵蚀过程中, 表土团聚体的崩解、分散等水土间相互作用, 改变了土壤结构, 对于土壤的分离和侵蚀物质的提供都有重要意义^[9]。已有研究得出表征不同破碎机制的团聚体特征参数可代替细沟间土壤可蚀性因子, 并建立新的侵蚀预测模型^[10-11]。在坡面冲刷过程中,

*国家自然科学基金资助项目(40930529; 41001164)和国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407201)资助

[†]通讯作者, Email: zxli@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 王军光, 男, 河南延津人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理与应用研究。E-mail:

junyong518@163.com

收稿日期: 2011-03-17; 收到修改稿日期: 2011-05-25

多数研究已得出水稳性团聚体与土壤抗冲性(抗分离能力)间的关系,但并未考虑土壤分离过程中团聚体不同的破碎机制^[12-13]。另外,坡面冲刷中表土土壤抗剪强度可作为预测集中水流内临界水流剪切力最好的土壤性质,但就两者之间关系报道较少且不一致^[14]。鉴于此,本文通过野外采集原状土样进行室内模拟冲刷试验,利用 WEPP(Water Erosion Production Project)模型细沟(集中水流)侵蚀预测方程,定量描述了红壤团聚体特征与集中水流可蚀性因子及饱和抗剪强度与临界水流剪切力间关系,以期红壤分离能力的定量研究提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区域概况及供试土壤

供试土壤采集于湖北省咸宁市境内,该区域属亚热带季风湿润气候区,年均温 16.8℃,降水量 1572 mm,地处江汉平原和鄂东南丘陵山地的过渡带,成土母质以第四纪黏土和泥质类页岩为主,土壤类型主要有红壤和水稻土。

试验选择了该地区具有代表性的 8 种红壤,为得到相同的地表扰动情况,供试红壤表层 0~15 cm 于 2009 年 11 月中下旬通过当地传统方式翻耕。所有原状土样采集于 2010 年 7~8 月的雨季。由于地表干燥易使土壤表层结构破坏,每次样品采集于降雨过后,含水量控制在 18%~21%,选择在平整的作物垄之间。在采样前,移除土壤表面杂草和覆盖物,采样时,将一规格为 0.39 m 长,0.1 m 宽和 0.09 m 深的长方形取样盒垂直压入土壤表面,为了减小取样盒可能引起土样的破坏,同时用剖面刀将土样环周围的土壤切开。在将土样取出以前,先检查取样盒是否充满,当确认取样盒已经被土壤填满时,盖上盖子,然后将土样反过来,慢慢地削去多余的土壤,再盖上取样盒下面的盖子。为减小土样运输过程中可能造成的扰动,在土样表面垫上棉布垫子。

每个试验样点采集表层原装土样 15 个,共采集原状土样 120 个。同时每个试验点采集表层(0~15 cm)土用于土壤性质和团聚体特征分析。土壤性质分析采用常规方法^[15],即有机质采用重铬酸钾外加热法,容重采用环刀法,机械组成采用吸管法,阳离子交换量采用乙酸铵交换法。各试验点基本情况详见表 1。

表 1 供试土壤基本情况

Table 1 Basic physico-chemical properties of the test soil

母质 Parent material	土 样 编 号 Soil cod e	土地利用 Land use	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	机械组成 Particle-size distribution (g kg ⁻¹)			有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	阳离子交 换量 CEC (cmol kg ⁻¹)
				砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay		
第四纪红黏 土 Quaternary clay	QP 1	茶园 Tea garden	1.27±0.0 2	189±7	313±1 1	498±1 6	17.55±0.3 5	15.18±1.5 7
	QP 2	苗木 Plantlet	1.40±0.0 4	86±13	375±2 6	539±3 4	21.16±0.5 6	19.38±1.5 7
	QP 3	玉米 Corn	1.15±0.0 4	67±12	471±1 4	462±2 1	15.34±0.2 9	15.63±1.7 9
	QP 4	芝麻 Sesame	1.34±0.0 5	181±1 3	314±3 4	505±1 0	16.59±0.7 9	14.05±1.8 4
泥质页岩 Shale	SH 1	茶园 Tea garden	1.36±0.0 1	244±1 1	398±6 4	358±5 3	17.26±0.2 4	13.95±1.9 2
	SH 2	苗木 Plantlet	1.23±0.0 8	126±1 5	633±2 7	241±1 4	16.67±0.7 8	16.28±1.0 6
	SH 3	玉米 Corn	1.13±0.0 6	218±1 1	399±2 1	383±2 2	18.13±0.5 6	15.63±1.5 4
	SH 4	花生 Peanut	1.33±0.0 8	235±8	439±1 4	326±1 2	16.35±0.4 1	14.35±1.6 5

1.2 坡面集中水流模拟及红壤分离速率测定

试验前将原状土样放置于一容器内饱和, 逐渐向容器内加水, 水面低于土样表面 0.5 cm, 放置 8 h, 然后再将饱和的土样放置于 30 °C 温室内 72 h, 得到与野外采样时相似的自然干燥条件。土壤分离试验在长 3.8 m、宽 0.2 m 的钢制变坡水槽内进行, 坡度在 8.8%~46.6% 之间变化。水槽顶端另有规格为 0.4 m×0.2 m×0.4 m 稳水箱, 下端距出口 20 cm 处有一放样室, 规格为 0.39 m×0.1 m×0.09 m。将过 5 mm 筛子的土样均匀铺撒于水槽底部, 然后用油漆将其粘合, 使底部粗糙度与实验土壤地面粗糙度基本一致, 并保持稳定^[5-6]。试验开始前将供试土样盒放入水槽下端的土样室内, 尽量使土样表面与水槽底部保持相同高度。

每一个原状土样分别在 5 种不同水流剪切力($\tau = 4.54, 9.38, 15.01, 17.49$ 和 22.54 Pa) 下进行冲刷试验, 该 5 种不同水流剪切力由不同流量($0.4\sim 1.0$ L s⁻¹)和坡度(8.8%~36.4%)组合得到, 水流剪切力范围参照 Nachtergaele 和 Poesen 的研究^[16]。水流剪切力通过如下公式计算得到,

$$\tau = \rho ghS \tag{1}$$

式中： τ 为水流剪切力(Pa)， ρ 为水流密度(kg m^{-3})， g 为重力加速度(m s^{-2})， S 为坡度的正切值， h 为径流水深(m)，由流量、水槽宽度和水流平均流速计算获得。水流表面流速用高锰酸钾染色法测定，记录染色水流流过水槽区域 2.4 m 长所用时间，获得水流表面流速，流速测定重复 12 次。将表面流速乘以 0.8 获得水流平均流速^[17]。该试验雷诺数范围在 1969~5215，弗汝德数在 1.65~3.38 之间变化，所有试验水流流态为扰动流。

试验持续时间根据流量大小每 10s 或 15s 用径流桶接泥沙样，当冲刷土样深度超过 2 cm 时，结束试验，记录冲刷时间，随后将泥沙样静止放置一段时间，倒去上清液，在 105 °C 下烘干称重。土壤分离速率(Dr)用全部径流桶内的泥沙样计算而得，计算公式如下：

$$Dr = \frac{C \times Q}{A} \quad (2)$$

Dr 为土壤分离速率($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)， C 为泥沙含量(kg L^{-1})， Q 为流量(L^{-1})， A 为土壤样本表面积(m^2)。

1.3 团聚体特征分析与饱和土壤抗剪强度测定

团聚体稳定性采用 LB 法测定^[18]。首先，干筛得到 3~5 mm 团聚体，于 40 °C 烘箱内 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) 预湿润振荡(Pre-wetting and 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 5 g 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 μm 孔径筛子上，上下振荡 20 次(幅度 2 cm)；然后在 40 °C 烘箱中蒸干酒精，转入铝盒中，40 °C 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。

团聚体稳定性用平均重量直径(MWD)表示：

$$MWD = \sum_{i=1}^7 x_i w_i \quad (3)$$

式中， x_i 为筛分该粒级前后两个筛子孔径的均值(mm)，最大粒级选取 5 mm 筛与 2 mm 筛孔径均值，最小粒级选取最后一个筛子的孔径； w_i 为第 i 个粒级团聚体质量百分比(%)； i 为 7 个不同粒级(<0.05 mm；0.05~0.1 mm；0.1~0.25 mm；0.25~0.5 mm；0.5~1 mm；1~2 mm；>2 mm)。

用相对消散指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI)来比较不同湿润处理的影响，其中 RSI 反映土壤快速湿润情况下孔隙中空气受压而造成团聚体的分散程度； RMI 反映了雨滴打击、径流剪切等外应力作用下的团聚体稳定性。二者的值越大，表明团聚体对消散作用和机械破碎作用敏感程度越高^[19]。

$$RSI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{FW}}{MWD_{SW}} \quad (4)$$

$$RMI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{WS}}{MWD_{SW}} \quad (5)$$

MWD_{FW} 、 MWD_{WS} 和 MWD_{SW} 表示快速湿润(FW)、预湿润后震荡(WS)和慢速湿润(SW)的测定结果。

闫峰陵等研究提出以团聚体稳定性特征参数 $As = RSI \times RMI$ 来综合反映红壤团聚体稳定性特征^[10]。在本研究中, As 综合反映了供试表土团聚体在坡面流冲刷过程中径流对其消散和剪切破坏的敏感性。

饱和土壤抗剪强度由 ELE international 袖珍抗剪仪测定, 该抗剪仪主要包括三个大小不同的叶片, 叶片的压力范围在 $0 \sim 1 \text{ kg cm}^{-2}$, 此范围也是手指提供合适的旋转力范围。根据该仪器使用说明, 最大的叶片用来测定饱和和较为松散的扰动土样, 结果乘以系数 0.2, 最小的叶片用来测定较为粘重和硬度较大的原状土样, 结果乘以系数 2.5。

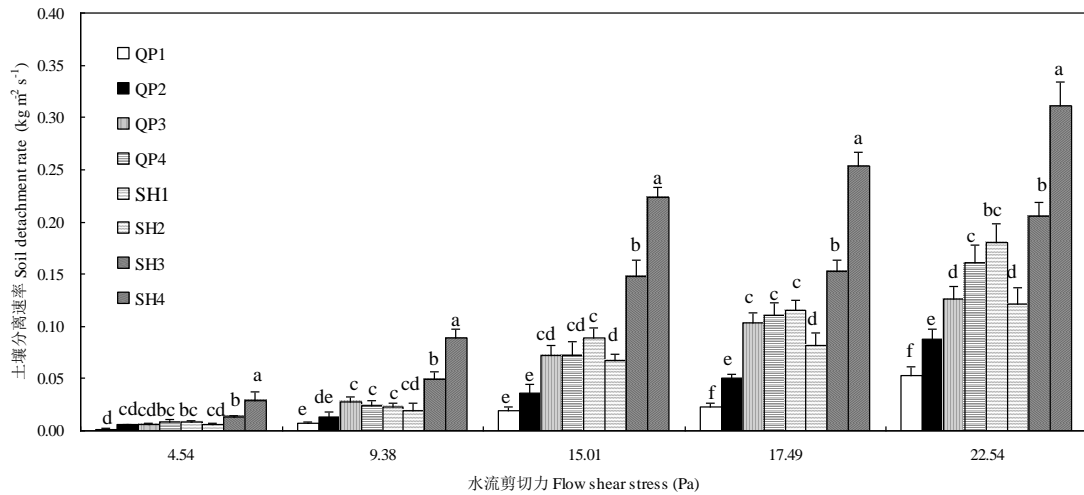
1.4 数据分析

采用 Excel 和 SPSS16.0 进行数据分析, 方差分析中运用 LSD (最小极差法) 进行多重比较, 显著水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同红壤分离能力及其与水流剪切力关系

坡面冲刷过程中的土壤分离是径流作用力和表土之间的响应过程, 本研究中供试红壤含水量、表面状况基本一致, 分离过程主要受土壤结构和水流剪切力的影响。供试 8 种红壤分离速率在各水流剪切力作用下显著不同, 特别是在较大水流剪切力(17.49 Pa, 22.45 Pa)下各红壤间分离速率更加明显(图 1)。第四纪黏土发育 4 种红壤分离速率顺序为(QP3, QP4) > QP2 > QP1, 而泥质页岩发育 4 种红壤分离速率为 SH4 > SH3 > SH1 > SH2。对同一种母质发育红壤而言, 耕地土壤分离速率均高于茶园及苗木, 结果表明在较大雨强和表面径流作用下, 耕地土壤更容易从地表分离。相同土地利用类型中, 泥质页岩发育红壤分离能力高于第四纪黏土发育红壤。



注：不同字母表示土壤间差异显著 $p < 0.05$ Note: Values followed by the different letter are significantly different at the 0.05 probability level by LSD

图 1 不同水力剪切力作用下各红壤分离速率

Fig. 1 Detachment rates of red soils under different flow shear stresses

土壤分离速率与水流剪切力间呈较好的线性关系(表 2)，此预测方程与 Lafren 等^[20]、Zhang 等^[8]研究结果一致。由 WEPP 模型可知，如果两者间为线性关系，斜率代表集中水流可蚀性系数 K_c ，与 x 轴截距为临界水流剪切力 τ_c ^[21]。供试 8 种不同红壤中可蚀性系数 K_c 与临界水流剪切力 τ_c 列于表 2。可蚀性系数 K_c 范围为在 0.0026 s m^{-1} ~ 0.0166 s m^{-1} 之间，而临界水流剪切力 τ_c 范围在 2.92 Pa ~ 6.04 Pa 之间，各红壤间可蚀性系数 K_c 与临界水流剪切力 τ_c 有较大差异。分析原因可能为供试红壤间土壤某一种或几种性质差别较大所致。

表 2 红壤分离速率与水流剪切力线性回归结果

Table 2 Linear regression of soil detachment rate and flow shear stresses

土样编号 Soil code	回归方程 Regression equation	可蚀性系数 Erodibility parameter $K_c (\text{s m}^{-1})$	临界水流剪切力 Critical flow shear stress $\tau_c (\text{Pa})$	决定系数 Correlation coefficients R^2
QP1	$Dr=0.0026\tau-0.0157$	0.0026	6.04	0.8716
QP2	$Dr=0.0045\tau-0.0238$	0.0045	5.29	0.9324
QP3	$Dr=0.0071\tau-0.0303$	0.0071	4.27	0.9784
QP3	$Dr=0.0087\tau-0.0452$	0.0087	5.20	0.9583
SH1	$Dr=0.0099\tau-0.0527$	0.0099	5.32	0.9639
SH2	$Dr=0.0066\tau-0.0321$	0.0066	4.86	0.9752

SH3	$Dr=0.0112\tau-0.0409$	0.0112	3.65	0.9730
SH4	$Dr=0.0166\tau-0.0485$	0.0166	2.92	0.9776

本研究中无降雨雨滴打击作用的影响,集中水流内土壤分离主要是指径流对土壤结构进行剪切破坏的过程。团聚体作为抵抗这种剪切力和搬运力的基本结构单元,其稳定性影响着土壤的分离和搬运,相关文献指出,土壤团聚体稳定性是南方红壤丘陵区坡面侵蚀过程中的主控因子^[10, 22, 23],分析红壤间团聚体稳定性及其与坡面集中水流可蚀性因子间的关系具有重要意义。

2.2 红壤团聚体稳定性特征及对红壤分离速率的影响

LB法测得团聚体稳定性值见表3,不同破碎机制处理中,所有红壤团聚体平均质量直径排序均为 $MWD_{FW} < MWD_{WS} < MWD_{SW}$,可见快速湿润引起的消散作用和外应力引起的机械破碎作用是红壤团聚体的主要破碎机制。各处理间团聚体稳定性排序有所区别,其中 MWD_{FW} 大小分布在0.30~2.13 mm之间, MWD_{WS} 分布在1.27~2.30 mm之间, MWD_{SW} 分布在2.34~3.12 mm之间。第四纪粘土发育红壤中 MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 两个处理值均显著高于泥质页岩,而 MWD_{SW} 两母质间无显著差异。

所有供试红壤中 RSI , RMI 和 As 的值范围依次为 0.32~0.89, 0.26~0.42 和 0.08~0.34, RSI 与 RMI 二者的值越大,表明团聚体对消散作用和机械破碎作用敏感程度越高^[19]。团聚体稳定性特征参数 $As=RSI \times RMI$ 用来综合反映团聚体稳定性特征,其值越大,团聚体稳定性越低^[10-11]。由以上参数值可知, QP1 与 QP2 红壤稳定性最强,而 SH1 红壤稳定性最弱。

表 3 LB 法测得团聚体稳定性

Table 3 Aggregate stabilities measured with the LB-method of different test soils

土样编号 Soil code	MWD_{FW} (mm)	MWD_{WS} (mm)	MWD_{SW} (mm)	RSI	RMI	As
QP1	2.13±0.13a	2.30±0.13a	3.12±0.04a	0.32	0.26	0.08
QP2	1.85±0.17b	2.11±0.06ab	2.87±0.04b	0.36	0.26	0.09
QP3	1.00±0.05cd	1.88±0.02cd	2.71±0.03b	0.63	0.31	0.19
QP4	1.07±0.07c	2.03±0.04bc	2.84±0.08b	0.62	0.29	0.18
SH1	0.58±0.03e	1.27±0.03f	2.34±0.13c	0.75	0.46	0.34
SH2	0.30±0.03f	2.07±0.02b	2.82±0.11b	0.89	0.27	0.24
SH3	0.89±0.15d	1.65±0.10e	2.84±0.17b	0.69	0.42	0.29
SH4	0.42±0.03ef	1.69±0.25de	2.73±0.20b	0.85	0.38	0.32

注: MWD_{FW} 、 MWD_{WS} 和 MWD_{SW} 表示快速湿润(FW)、预湿润后振荡(WS)和慢速湿润 (SW)的平均重量直径; RSI : 相对消散指数; RMI : 相对机械破碎指数; As : 团聚体稳定性特征参数; 同一列不同字母表示土壤间差异显著 $p < 0.05$ Notes: MWD_{FW} , MWD_{WS} and MWD_{SW} stands for the mean weight diameters obtained after the fast-wetting (FW), pre-wetting and stirring (WS) and slow-wetting (SW), respectively; RSI for relative slaking

index; *RMI* for relative mechanical breakdown index; and *As* for Aggregate stability index; Different letters in the same column mean significant difference at $p < 0.05$

不同水流剪切力中红壤分离速率与团聚体稳定性特征参数 A_s 有较好的相关性，由表 4 中相关系数和显著性概率可知，随着水流剪切力的变大，两者间相关程度增加，特别是在高水流剪切力条件下(22.54 Pa)，相关系数为 0.6695。 A_s 值与可蚀性系数 K_c 间也呈较好的线性关系($R^2=0.6979, p < 0.01$)。由此， A_s 不仅与红壤分离速率和可蚀性系数 K_c 间有较好的统计学相关性，同时具有一定的物理学意义，可以作为预测红壤分离速率的重要因子。

表 4 红壤分离速率与团聚体稳定性特征参数相关性分析

Table 4 Correlation coefficients (with significant probability) of aggregate stability with soil detachment rate under different flow shear stresses

	水流剪切力 Flow shear stress				
	4.54 Pa	9.38 Pa	15.01 Pa	17.49 Pa	22.54 Pa
相关系数 Correlation coefficients	0.4160	0.4260	0.5903*	0.6000*	0.6695*
显著性概率 Significant probability	0.084	0.079	0.026	0.024	0.013

注: * $p < 0.05$ Note: * $p < 0.05$

2.3 饱和抗剪强度与集中水流临界剪切力关系

土壤抗剪强度表征着土壤颗粒间粘结状况，与团聚体稳定性特征一样，也是预测坡面集中水流内土壤分离速率的重要参数。相关研究表明，饱和土壤抗剪强度是预测集中水流内临界水流剪切力最好的土壤性能，同时指出二者之间存在较好的线性关系^[7, 14]。本研究中得出饱和抗剪强度(σ_s)与临界水流剪切力(τ_c)之间的线性关系如图 2 所示 ($R^2 = 0.6415, p = 0.02$)，由决定系数 R^2 和显著性概率 p 可知两者间线性关系较好。

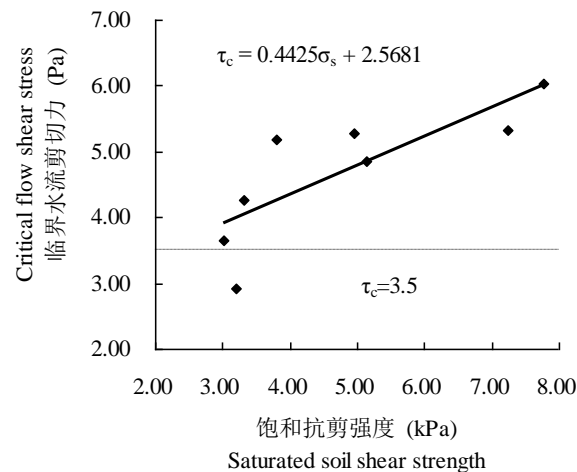


图 2 饱和抗剪强度(σ_s)与集中水流内临界水流剪切力(τ_c)关系

Fig. 2 Relationship between saturated soil shear strength (σ_s) and critical flow shear stress (τ_c) in different soils

在 WEPP 模型中，当土壤含砂量大于 30%时，基础临界水流剪切力 $\tau_c=3.5$ Pa。而由图 6

可知，本研究中除 2.92 Pa 外，所得 τ_c 值均大于 3.5 Pa，WEPP 模型中所给值并不能较好的预测 τ_c 值。

2.4 建立集中水流内红壤分离速率预测模型

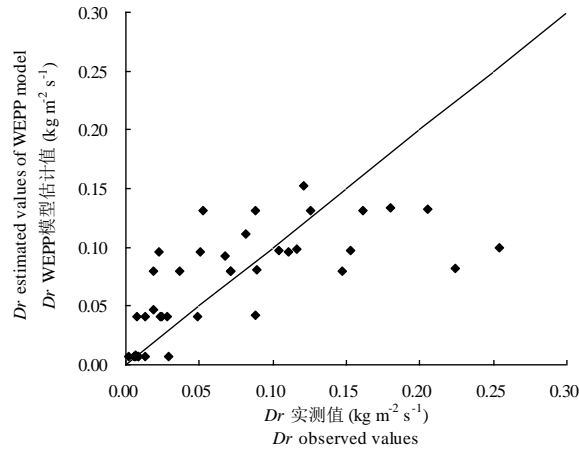
WEPP 模型中预测集中水流(细沟)内土壤分离速率模型及土壤可蚀性因子 K_c (土壤含砂量小于 30%)由如下公式表示^[21]:

$$Dr = K_c (\tau - \tau_c) \quad (6)$$

$$K_c = 6.9 \times 10^{-3} + 0.136e^{-20clay} \quad (7)$$

式中 $\tau_c=3.5$ Pa(土壤含砂量大于 30%时), $clay$ 表示黏粒含量(< 0.002 mm)。

已有研究证实，WEPP 模型对我国南方红壤区坡面细沟间侵蚀预测存在较大偏差^[10]，本研究也得出 WEPP 模型预测集中水流内(细沟侵蚀)红壤分离速率与实测值有明显差异 ($R^2=0.4845$)，如图 3。WEPP 模型在计算可蚀性 K_c 时，仅仅简单考虑了土壤质地的影响，而忽略了土壤结构、土壤团聚体稳定性等重要因素。



注: Dr : 土壤分离速率。Note: Dr : Soil detachment rate

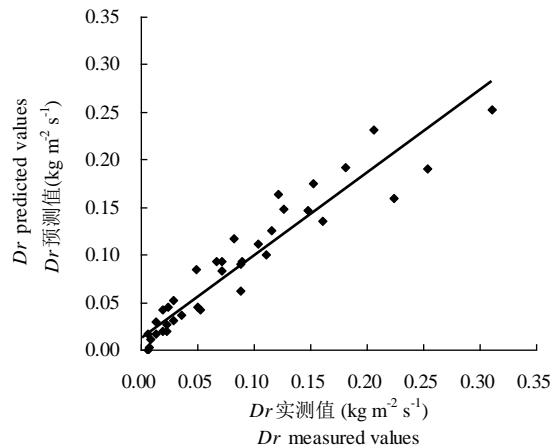
图 3 WEPP 模型中红壤分离速率估计值与实测值关系

Fig. 3 Observed detachment rate versus estimated with the WEPP model of red soils

上述研究结果已经表明，红壤团聚体特征参数 A_s 与可蚀性系数 K_c ，饱和抗剪强度 σ_s 与临界水流剪切力 τ_c 均存在显著相关关系。基于此，本文采用 WEPP 细沟侵蚀预测模型框架，利用团聚体稳定性特征参数 A_s 和饱和抗剪强度 σ_s 代替 WEPP 模型中可蚀性因子 K_c 与临界水流剪切力 τ_c ，将试验结果通过回归分析，得出新的预测方程和决定系数如下：

$$Dr = 0.0385A_s(\tau - (1.431\sigma_s - 2.487)) \quad (R^2=0.8871, p=0.00) \quad (8)$$

将上式预测值与实测值进行比较，二者拟合度较高，说明新建立方程能较为准确的预测集中水流内红壤分离速率(如图 4)。



注: Dr : 土壤分离速率。Note: Dr : Soil detachment rate

图 4 集中水流内红壤分离速率预测值与实测值比较

Fig. 4 Predicted detachment rate versus measured values of red soils in concentrated flow

3 结论

1) 两种母质及不同土地利用类型间红壤分离能力差异明显, 各红壤分离速率与水流剪切力间呈较好的线性关系, 但红壤间集中水流内可蚀性系数 K_c 与临界水流剪切力 τ_c 有较大差异。

2) 两种母质及不同土地利用类型间红壤团聚体稳定性明显不同; 消散作用和机械破碎作用是红壤团聚体的主要破碎机制; 团聚体稳定性特征参数 A_s 集合了红壤团聚体破碎的主要机制, 与不同水流剪切力中红壤分离速率有较好的相关; 红壤饱和抗剪强度(σ_s)与集中水流内临界水流剪切力(τ_c)呈较好的线性关系。

3) 利用 WEPP 细沟侵蚀模型框架, 以团聚体稳定性特征参数 A_s 代替可蚀性因子 K_c , 饱和抗剪强度 σ_s 代替临界水流剪切力 τ_c , 通过回归分析, 得出新的预测方程。结果显示新方程能较为准确的预测红壤坡面集中水流内红壤分离能力。另外, 由于研究区域限制, 该方程更为广泛的应用有待进一步验证。

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] 何园球, 孙波. 红壤质量演变与调控. 北京: 科学出版社, 2008, 1-375. He Y Q, Sun B. Evolvement and regulation of red soil quality (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008, 1-375
- [3] Zhang B, Yang Y S, Zepp H. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China. Catena, 2004, 57: 77-90
- [4] 张光辉. 坡面薄层流动力学特性的实验研究. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165. Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow (In Chinese). Advances in Water Science, 2002, 13(2): 159-165

- [5] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 713-719
- [6] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 坡面冲刷过程中红壤分离速率定量研究. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(1): 96-100. Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. The quantitative research of red soil detachment rate in the slope scouring process (In Chinese). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(1): 96-100
- [7] Knapen A, Poesen J, De Baets S. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices. *Soil Tillage Research*, 2007, 94: 425-440
- [8] Zhang G H, Tang K M, Zhang C X. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34: 1302-1309
- [9] Barths B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 2002, 47(2): 133-149
- [10] 闫峰陵, 李朝霞, 史志华, 等. 红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 37-41. Yan F L, Li Z X, Shi Z H, et al. Quantitative relationship between aggregate characteristics of red soil and slope erosion (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(3): 37-41
- [11] 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. *Catena*, 2010, 81 (3): 240-248
- [12] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性. *生态学报*, 2006, 26(10): 3270-3275. Zhou Z C, Shanguan Z P. Soil anti-scourability during vegetation succession of Ziwuling secondary fores (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3270-3275
- [13] 史冬梅, 陈晏. 紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素. *中国农业科学*, 2008, 41(5): 1400-1409. Shi D M, Chen Y. The influencing factors of soil anti-scourability of tree-crop intercropping land in purple soil hilly region (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(5): 1400-1409
- [14] Lónard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena*, 2004, 57 (3): 233-249
- [15] 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. 466-532. ISSAS: Soil physical and chemical analysis (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978, 466-532
- [16] Nachtergaele J, Poesen J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53: 449-463
- [17] Luk SH, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow. *Soil Technology*, 1992, 5:289-301
- [18] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425-437
- [19] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma*, 2001, 99 (1/2): 123-145
- [20] Laflen J M, Elliot W J, Simanton R, et al. WEPP soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(1): 39-44
- [21] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process - based soil erosion model for USDA - Water Erosion Prediction Project technology. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1989, 32(5): 1587-1593
- [22] 李朝霞, 蔡崇法, 史志华, 等. 鄂南第四纪粘土红壤团聚体的稳定性及其稳定机制初探. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 69-72. Li Z X, Cai C F, Shi Z H, et al. Aggregate stability and stable mechanism of aggregate derived from Quaternary red clay in south of Hubei province (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 69-72
- [23] Yan F L, Shi Z H, Cai C F, et al. Wetting rate and clay content effects on interrill erosion in Ultisols of southeastern China. *Pedosphere*, 2010, 20(1): 129-136

Quantitative relationships of detachment rate of red soil in concentrated flow

with soil aggregate characteristics and soil shear strength

Wang Janguang Li Zhaoxia[†] Cai Chongfa Yang Wei Ma Renming Zhang Guobiao

(Key Laboratory of Subtropical Agriculture and Environment, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan

430070, China)

Abstract In order to determine effects of structure characteristics and shear strength of red soil on soil detachment, relationships of soil detachment rate with soil aggregate characteristics and shear strength of the red soil were studied through indoor simulated erosion experiment with concentrated flows. Eight typical types of red soils were chosen for the study. Results show that aggregate stability index (A_s) integrated main mechanisms of aggregate breakdown, and was found to be well related with soil detachment rate under different flow shear stresses; A positive linear relationship was observed between saturated soil shear strength (σ_s) and critical flow shear stress (τ_c) in concentrated flow. By introducing A_s and σ_s into the WEPP (Water Erosion Production Project) model of rill erosion, a prediction equation of red soil detachment rate was established with a good correlation coefficient ($R^2 = 0.8871$). The study provides a new approach to research on erosion mechanisms of red soil, which is of great significance to perfection of the physical process model of soil erosion.

Key words Concentrated flow; Red soil detachment rate; Aggregate stability; Soil shear strength