



不同模拟糙度集中水流内红壤团聚体剥蚀特征研究^{*}

余冰 宋云瑞 程嘉宁 王军光[†] 蔡崇法 段猷

(华中农业大学水土保持研究中心, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要 研究了5种模拟糙度和6种不同冲刷距离组合下3种粒径的红壤团聚体在集中水流内的剥蚀破坏规律, 分析了糙度、运移距离以及相关水力学参数对团聚体剥蚀破坏的影响。结果表明, 在相同运移距离条件下, 随粒径和糙度的增加团聚体剥蚀破坏程度呈增加趋势, 与粒径相比, 糙度对剥蚀破坏程度的影响更大。相同模拟糙度下, 随着运移距离的增加, 剥蚀率均呈抛物线形先增大后减小的趋势; 各运移距离下, 7~5 mm粒径团聚体的剥蚀率随糙度的增加而增加; 5~3 mm和3~1 mm粒径团聚体在各运移距离内随糙度的增加变化规律不一致。在不同糙度情况下, 以运移距离等于36 m为例, 团聚体与原始团聚体质量比(W_r/W_i)随径流水深、阻力系数、水流剪切力的增加均呈幂函数减小之后趋于平缓的趋势。该结果为研究红壤团聚体破碎理论机制提供了参考, 对于完善土壤侵蚀过程模型, 具有重要的理论意义。

关键词 团聚体; 集中水流; 糙度; 运移距离; 水力学参数

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

团聚体作为土壤结构的基本单元, 其粒径大小、稳定特性及其与坡面水流变化的综合响应过程, 对地表土壤的孔隙分布状况、坡面侵蚀过程的发生发展以及侵蚀泥沙的颗粒特性有重要影响^[1]。研究得知, 降雨前期团聚体主要以消散破碎为主, 表现为在土壤表面迅速形成大量微团聚体, 随着降雨的进行, 团聚体主要以雨滴击溅作用下的机械破碎为主, 团聚体破碎相对缓慢, 即干燥土壤在湿润前期主要以消散作用为主, 而湿润后主要以机械破碎为主^[2]。目前, 国内外Lado等^[3]、郭伟等^[4]、Wuddivira等^[5]研究了降雨条件下湿润速率、粒径、黏粒含量对团聚体的破碎机制及其与坡面侵蚀过程的关系; 降雨动能、雨强对坡面侵蚀泥沙颗粒分布及物质组成的影响^[6-7]; 还有一些研究者对反映不同破碎机制的团聚体稳定性特征参数替代可蚀性参数, 建立了预测性能较好的侵蚀

模型^[8]。但是, 上述关系的建立多是基于模拟降雨条件下的研究, 而关于坡面集中水流内团聚体的剥蚀破坏程度的研究较少, 较多集中在细颗粒泥沙的研究, 如Ali等^[9]研究了在模拟降雨和径流冲刷的情况下, 水力学特性对细颗粒泥沙输移的影响; Guo等^[10]研究了可蚀性床面上水力学特性对泥沙输移能力的影响, 其他研究者还对细颗粒泥沙的输移能力与水力学参数(流速、阻力系数、径流水深等)之间的关系以及细颗粒泥沙在不同坡面糙度下的粒径分布进行了研究^[11-13]。对于粗颗粒泥沙(团聚体)在坡面集中水流中的剥蚀破坏主要集中在相同坡面糙度情况下运移距离、运移形态、水力学特性以及土壤层次等对团聚体的剥蚀影响^[14-15], 并得出团聚体在坡面水流运移过程中是逐渐剥蚀变圆的过程, 并非迅速破碎的过程, 但在不同坡面糙度集中水流条件下团聚体的剥蚀破坏规律以及破坏

^{*} 国家自然科学基金项目(41401303, 41471231)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41401303, 41471231)

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

作者简介: 余冰(1990—), 女, 湖北省丹江口人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理与应用研究。E-mail: yu20008bing@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2016-01-08; 收到修改稿日期: 2016-03-09; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-04-20



特征尚不清楚。

坡面流流经地表边界的表面粗糙不平，当水流流经地表时，由于坡面流较浅且流向很不稳定，随着地表粗糙程度的不同对坡面流的影响程度也不同，地表的糙度对坡面水力学特征产生显著影响。反映坡面糙度的指标常用坡面地表糙度和糙率系数，有研究表明，糙度的变化直接影响着坡面集中水流水力学特性的变化^[16-17]。又有研究指出，阻力系数、径流水深等水力学特性是表征坡面流输移过程中粗颗粒泥沙（团聚体）侵蚀状况的最佳水力学参数^[13, 18-19]。所以不同坡面糙度引起水力学特性的变化也可能会进一步对集中水流中团聚体的破坏产生影响。因此，本文采用定床人工模拟粗糙坡面的试验方法，分析研究了不同坡面糙度下坡面集中水流内运移距离、粒径大小和相关水力学特性对团聚体剥蚀破坏程度的影响，得出团聚体在集中水流内剥蚀破坏特征，研究结果对于完善土壤侵蚀过程模型，具有重要的理论意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

供试团聚体采集于湖北省咸宁市境内，试验选择的土壤为第四纪黏土发育的红壤，用符号QX表示，土地利用类型为林地。土壤理化性质分析采用常规方法^[20]。团聚体稳定性分析采用可区分不同破碎机制的LeBissonnais^[21]法测定。团聚体稳定性用平均重量直径（MWD）表示：

$$MWD = \sum_{j=1}^7 x_j w_j \quad (1)$$

式中， x_j 为分筛该粒级前后两个筛子的均值，mm， x_1 选取5 mm与2 mm筛孔径均值， x_7 选取最后一个筛子的孔径； w_j 为第 j 个粒级团聚体质量百分比，%； j 为7个不同粒级（<0.05、0.05~0.1、0.1~0.25、0.25~0.5、0.5~1、1~2、>2 mm）。

供试土壤pH为4.51，酸性土壤；砂粒、粉粒、黏粒含量分别为8.6%、37.5%、53.9%，质地为黏土。快速湿润、慢速湿润和预湿润后机械震荡条件下团聚体的平均质量直径分别为1.85、2.71和1.88 mm，说明团聚体破碎主要是受消散作用和机械破碎的影响。

1.2 集中水流冲刷试验

在长3.8 m、宽0.2 m的钢制变坡冲刷水槽内进行试验，水槽上端高度可调，坡度可在8.8%~46.6%之间变化，水槽顶端设有规格为0.4 m×0.2 m×0.4 m的稳水箱。试验设计坡度为17.6%，流量为0.4 L s⁻¹，此流量为5~7 mm粒径团聚体在集中水流内发生运移而又未出现沉积的最小流量。

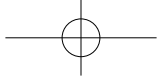
试验在不锈钢制光滑床面（ $d=0$ mm）和不同人工模拟糙率床面状况（ $d=0$ mm、0.25~1 mm、1~3 mm、3~5 mm、5~7 mm）下进行。人工模拟糙率床面的获取方法详见文献^[17]。试验共采用3个粒径的团聚体（7~5 mm、5~3 mm、3~1 mm）、5个糙度以及6个运移距离（9 m、18 m、36 m、54 m、72 m、108 m）的90个组合。每个组合重复5次。

首先，干筛得到7~5 mm、5~3 mm和3~1 mm粒径的团聚体，置于40℃烘箱内烘干24 h以确定相同的含水量。然后称取20 g（精确到0.0001 g）团聚体浸泡于盛有200 ml酒精（质量分数为95%）的烧杯中，目的是消除快速湿润对团聚体的破坏。30 min后用移液管移除酒精。最后，将预湿润处理的团聚体移至0.25 mm孔径的筛子上，用洗瓶轻轻将筛子上的团聚体洗入水槽上端的水流中，同时在水槽底端用另一个0.25 mm的筛子收集冲刷剥蚀破坏后的团聚体，团聚体在整个水槽中的运移距离为3 m。重复上述操作直至达到所需距离。试验结束后，将收集到的团聚体在105℃烘干。用经过冲刷后最终留在0.25 mm筛子上的团聚体与原始团聚体的质量比（ W_r/W_i ）表征团聚体在运移过程中剥蚀破坏程度，用团聚体剥蚀率（ α ）表示单位运移距离内团聚体剥蚀破坏特征：

$$\alpha = \frac{\ln W_r/W_i}{x} \quad (2)$$

式中， α 为团聚体剥蚀率， W_r 和 W_i 分别为经过运移 x （m）后最终留在0.25 mm筛子上的团聚体和原始团聚体质量。

试验开始前调整坡度和流量，流量大小由阀门组来控制，并用称重法进行率定。待试验床面的水流稳定之后，使用高锰酸钾染色的方法在试验坡面多次测定0~1.5 m和1.5~3 m两段的表面流速，然后求其平均值，并乘以修正系数0.75，从而获得水



流断面平均流速^[22]。水流平均水深由流量与平均流速关系计算得到。同时计算水流阻力系数 f 和水流剪切力 τ 公式如下:

$$f = \frac{8gRS}{V^2} \quad \tau = \rho ghS \quad (3)$$

式中, V 为平均流速, m s^{-1} ; g 为重力加速度, m s^{-2} ; R 为水力半径, m , 本研究中用径流水深代替; S 为坡度的正切值; h 为水深, m s^{-2} ; ρ 为水流密度, m s^{-2} 。

1.3 数据分析

采用Excel、DPS v7.05软件进行数据分析, 文中糙度与粒径对团聚体剥蚀破坏程度的影响采用DPS v7.05软件进行双因素方差分析, 运用Duncan进行多重比较, 显著水平 $p < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 团聚体在不同糙度和运移距离中的剥蚀破坏程度

试验中, 3种粒径的红壤团聚体在5种糙度和6种运移距离组合情况下冲刷后的 W_r/W_i 值见表1。由表1可知, 糙度相同时, 不同粒径的红壤团聚体随着运移距离的增加 W_r/W_i 值逐渐减小且差异显著, 即剥蚀破坏程度随着运移距离的增加而增大; 粗糙度越大, 随着运移距离的增加, 大粒径团聚体(7~5 mm)的剥蚀破坏程度更明显, 这可能是因为在运移过程中, 不同粒径的团聚体运移形态不同, 粒径较大的团聚体以滚动的形式运动, 与坡面碰撞的几率较大, 表现为剥蚀破坏程度较大, 而较小的团聚体则以跃移、悬移的形式运动, 与坡面碰

表1 红壤中各粒径团聚体 W_r/W_i 值

Table 1 W_r/W_i of aggregates relative to particle size in red soil

运移距离 Distance (m)	粒径 Particle size (mm)	糙度Roughness				
		0 mm	0.25 ~ 1 mm	1 ~ 3 mm	3 ~ 5 mm	5 ~ 7 mm
9	7 ~ 5	96.56Aa	95.56Ab	93.67Ac	93.12Bed	92.83Bd
	5 ~ 3	95.84Aa	95.11Aa	93.36Ab	94.09Ab	93.71Ab
	3 ~ 1	94.83Ba	93.39Bb	93.88Ab	94.14Aab	91.22Cc
18	7 ~ 5	92.74Aa	88.47Ab	83.62Ac	83.02Ac	84.33Ac
	5 ~ 3	90.46Ba	86.35Bb	81.43Bd	84.51Abe	83.42ABe
	3 ~ 1	86.81Ca	83.23Cbc	84.16Ab	83.98Abe	82.32Be
36	7 ~ 5	83.98Aa	72.10Ab	66.98Ac	64.80Bd	62.00Be
	5 ~ 3	79.33Ba	68.59Bb	64.56Bc	66.72ABbc	65.15Ac
	3 ~ 1	72.84Ca	65.20Cd	69.63Cb	67.56Ac	64.86Ad
54	7 ~ 5	73.11Aa	58.93Ab	53.40Bc	50.82Bd	48.85Be
	5 ~ 3	68.52Ba	55.48Bb	56.29ABb	52.69Bc	51.38Ac
	3 ~ 1	60.46Ca	49.66Cd	57.96Aab	56.60Ab	52.91Ac
72	7 ~ 5	62.70Aa	46.85Ab	41.73Cc	40.98Bc	37.61Cd
	5 ~ 3	56.57Ba	45.54ABb	45.35Bb	41.90Bc	41.62Bc
	3 ~ 1	53.36Ca	43.59Bb	48.52Ab	45.24Ac	43.95Ac
108	7 ~ 5	45.77Aa	31.22Ac	29.48Bb	27.39Bc	26.99Cc
	5 ~ 3	43.06Ba	31.61Ab	31.77Ab	28.88Bc	32.55Bb
	3 ~ 1	42.46Ba	30.26Ab	30.57ABc	30.39Ac	34.80Ab

注: 表中 W_r/W_i 为运移了一定距离后残留在0.25 mm筛子上的红壤团聚体与原始红壤团聚体的质量比, 下同。大写字母代表相同运移距离下各粒径间的差异显著, 小写字母代表相同运移距离下各糙度间的差异显著, $p < 0.05$ Note: W_r/W_i stands for mass ratio of aggregates that after a certain transport distance still remains on the 0.25 mm sieve vs aggregate at the start, the same below. Different capital letters mean significant difference between fractions of aggregates in particle size when transport distances were the same and different lowercase letters mean significant difference between slope surfaces different in roughness when transport distances were the same, $p < 0.05$

撞的几率相对较小, 表现为剥蚀破坏程度相对较小。运移距离相同时, 通过对比可以看出各粒径的红壤团聚体在运移距离为9和18 m时, 由于运移距离太短差异不明显之外, 在其他相同运移距离中, 均基本呈现出糙度越大其 W_r/W_i 值越小, 红壤团聚体剥蚀破坏程度越大的规律, 其剥蚀破坏程度表现为 $7 \sim 5 \text{ mm} > 5 \sim 3 \text{ mm} > 3 \sim 1 \text{ mm}$; 在相同运移距离情况下, $5 \sim 3 \text{ mm}$ 、 $3 \sim 1 \text{ mm}$ 团聚体的剥蚀破坏程度随着粗糙度的变化出现有规律的波动, 而 $7 \sim 5 \text{ mm}$ 团聚体则随着粗糙度的增加呈增加趋势。不同粒径和糙度组合下双因素方差分析结果显示糙度对团聚体剥蚀破坏的影响均有显著性差异, 且均大于粒径对其的影响。

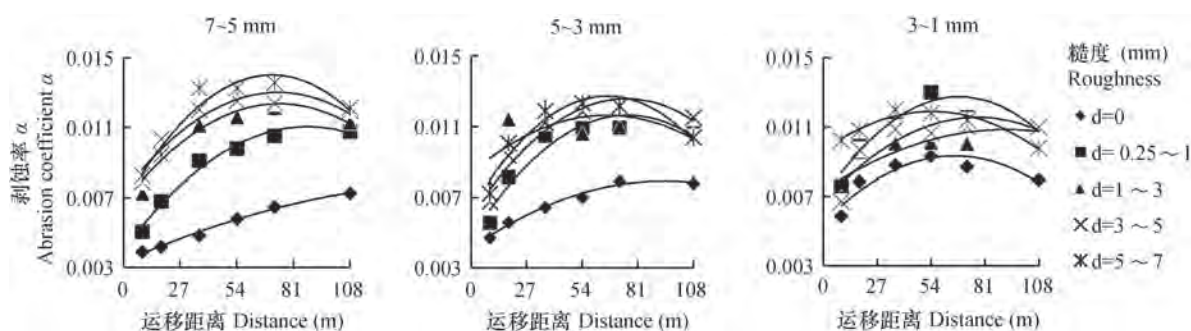


图1 不同运移距离中各粒径团聚体在各糙度下的剥蚀率 α 值

Fig. 1 Abrasion coefficient α relative to particle size of aggregates, roughness of slope surface and transport distance with runoff flow

团聚体在坡面运移过程中主要以机械破碎为主, 不同粒径团聚体的剥蚀破坏程度可以由运移距离和粗糙度两个参数直接反映, 但其与水力学参数间的内在关系并不清楚。正如上述分析得出团聚体剥蚀破坏程度在相同粗糙度条件下均随运移距离的增加而增大, 但相同运移距离条件下, 各粒径团聚体剥蚀破坏程度随粗糙度的增加规律却不完全相同, $7 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径团聚体剥蚀破坏程度随粗糙度的增加呈增加趋势, 但 $5 \sim 3 \text{ mm}$ 和 $3 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径的团聚体的变化趋势却出现有规律的波动, 可能是由于在不同粗糙度条件下水力学特性发生了改变^[23-24], 进而对团聚体的运移形态造成影响。而综合已有的研究结果^[19, 25-26], 水深、阻力系数和水流剪切力均与团聚体剥蚀破坏程度之间有密切关系, 因此, 本文从径流水深、阻力系数以及水流剪切力三个方面对团聚体的剥蚀破坏情况进行综合分析。由于本研究中, 各粒径团聚体的剥蚀破坏规律均在36 m时表现最明显, 因此, 以下分析均在运移

Wang等^[14]结合砾石在河流中的剥蚀破坏规律, 将红壤团聚体在坡面水流中不同运移距离后的 W_r/W_i 来代替Steinberg方程中砾石的相关系数得出团聚体剥蚀率 α 值。由图1可以看出三种粒径红壤团聚体在不同运移距离情况下, 各粒径团聚体的剥蚀率在72 m运移距离之前随距离增大而变大, 之后随着距离的减小而降低, 剥蚀率 α 值在运移距离增大过程中, 均有先增大后减小两阶段, 即剥蚀率 α 值随着运移距离的增加均呈抛物线的关系, 与Wang等^[14]得出的结论一致; 由图1可以看出在各运移距离下, $7 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径团聚体的剥蚀率随糙度的增加而增加; $5 \sim 3 \text{ mm}$ 和 $3 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径团聚体在各运移距离内随糙度的增加变化规律不一致。

距离为36 m条件下进行。

表2为5种模拟坡面糙度条件下各水力学参数的变化。由表2可以看出, 随着糙度增加平均流速和弗汝德数呈减小趋势; 平均水深、阻力系数和水流剪切力呈增大趋势; 而雷诺数的变化不大。由雷诺数和弗汝德数的数值可以得出试验时水流流态为紊流, 水流流型为急流。

2.2 径流水深对团聚体剥蚀破坏程度的影响

径流水深是坡面集中水流内最基本的水力学参数之一, 本研究初始团聚体粒径为 $7 \sim 5 \text{ mm}$ 、 $5 \sim 3 \text{ mm}$ 、 $3 \sim 1 \text{ mm}$, 加之团聚体自身质量较小, 径流水深的变化会直接导致团聚体在坡面运移过程中运动形态的变化, 由表2可以看出随着坡面糙度的增加, 径流水深增大。图2给出了3个粒径团聚体在不同粗糙度下, 团聚体剥蚀破坏程度随径流水深的变化关系。可以看出, 3种粒径的团聚体 W_r/W_i 均随着水深的增加呈幂函数减小, 团聚体的剥蚀破坏程度随水深的增加而增加, 并且大颗粒的红壤团聚

表2 5种模拟坡面糙度条件下的水力学参数

Table 2 Hydraulic parameters of the five treatments in roughness						
糙度 Roughness (mm)	雷诺数 Reynolds number	弗汝德数 Froude number	平均流速 Mean velocity (m s ⁻¹)	平均水深 Mean depth (cm)	阻力系数 Friction coefficient	水流剪切力 Shear stress (Pa)
0	1995	6.34	0.92	0.22	0.04	3.71
0.25 ~ 1	1717	3.79	0.65	0.30	0.10	5.17
1 ~ 3	2021	2.12	0.45	0.46	0.31	7.93
3 ~ 5	1946	1.92	0.42	0.49	0.38	8.45
5 ~ 7	2026	1.46	0.35	0.59	0.66	10.18

体随水深的变化明显。此结果与Wang等^[14]得出的团聚体剥蚀破坏程度随径流水深的增加而呈幂函数减小的趋势不同。其原因可能是由于试验条件不同所导致的，本试验在单一流量（0.4 L s⁻¹）和坡度（17.6%）条件下改变坡面粗糙度，团聚体的剥蚀破坏不仅仅只受到水深因素的影响，同时不同的坡面糙度也会对其产生不可忽视的影响。因此，对于糙度和径流水深对团聚体剥蚀破坏程度的具体规律，还需进一步在多流量多坡度条件下进行研究。郭伟等^[4]利用LB法测定了不同粒径团聚体的标准化平均重量直径，研究得出团聚体粒径越小稳定性越强。由图可知，在径流水深<0.4 mm时，剥蚀破坏程度为5~7 mm>3~5 mm>1~3 mm粒径团聚体，而当径流水深>0.4 mm时与之相反。此结果是因为水深较小（<0.4 mm）时，大团聚体先剥蚀破坏为小团聚体同时释放出些细小物质，而小粒径团聚体相对稳定不易被剥蚀破坏，在运移过程中直接释放出细小物质^[27]；随着水深逐渐变大（>0.4 mm），较小粒径团聚体运移状态由推移逐渐变为跃移和悬移，从而减少团聚体与下垫面碰撞频率，导致剥蚀破坏程度减小。

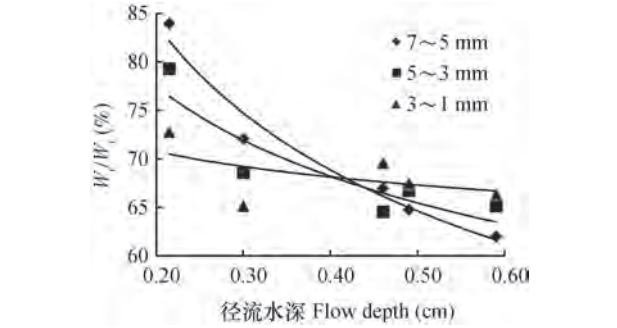


图2 红壤团聚体 W_r/W_i (%)与径流水深的变化关系
Fig. 2 Relationship between W_r/W_i (%) of red soil aggregates and flow depth

2.3 阻力系数对团聚体剥蚀破坏程度的影响

水流在流动过程中必然受到阻力的作用，对坡面流阻力的研究主要是借助于明渠水流阻力概念和相应的表达方法，如Darcy-Weisbach阻力系数、Chezy系数和Manning糙率系数等。而大部分学者主要选择对Darcy-Weisbach阻力系数进行研究，Darcy-Weisbach阻力系数 f 反映坡面流在流动过程中所受到阻力的大小^[28-29]。已有研究表明，在流量、坡度等水力条件相同的情况下，阻力系数越大，水流克服阻力所消耗的能量越多，则水流用于土壤分离和泥沙输移的能量越少^[26]。由表2得出，随着坡面糙度的增加，阻力系数减小，与Foster^[30]、Abrahams和Parsons^[31]得出的结论相似。同时，由图3可以看出，随着阻力系数的增大，3种不同粒径的红壤团聚体的 W_r/W_i (%)值呈幂函数减小的趋势，红壤团聚体的剥蚀破坏程度随着阻力系数的增加而增加，并且红壤团聚体的粒径越大，随阻力系数变化也越明显。可见，随着阻力系数的增大，虽然水流用于侵蚀的能量降低，但粗泥沙颗粒（团聚体）自身的剥蚀破坏程度却呈增加趋势。且当阻力系数大于0.3时，阻力系数对大粒

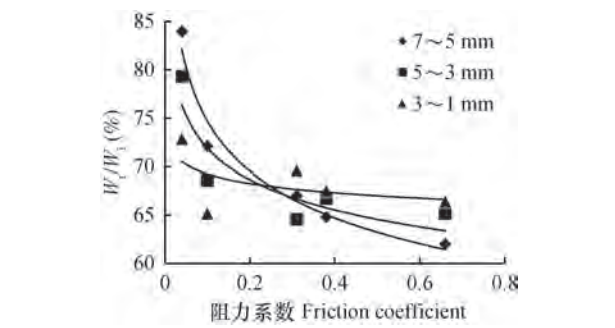


图3 红壤团聚体 W_r/W_i (%)与阻力系数的变化关系
Fig. 3 Relationship between W_r/W_i (%) of red soil aggregates and friction coefficient

径团聚体的剥蚀破坏的影响更明显。

2.4 水流剪切力对团聚体剥蚀破坏程度的影响

目前常见的水动力学参数为水流功率、水流剪切力和单位水流功率三种，本试验中水流剪切力对团聚体的剥蚀破坏影响最明显。

综合其他研究者的结论，可以看出随着水流剪切力的增加，土壤的分离速率呈增加趋势^[25]。三种粒径红壤团聚体的 W_r/W_i (%) 值在相同冲刷距离下，随着水流剪切力的增大呈幂函数减小，团聚体的剥蚀破坏程度随着水流剪切力的增大而增大，且粒径大的红壤团聚体随水流剪切力变化更加明显，此结论与王瑄等^[26]得到的土壤剥蚀率随剪切力变化关系一致。

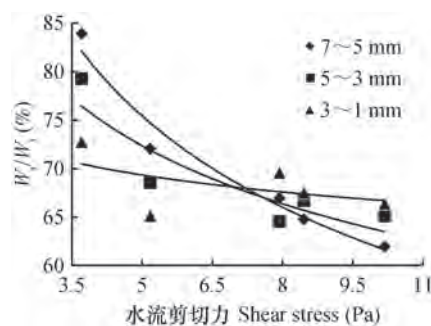


图4 红壤团聚体 W_r/W_i (%) 与水流剪切力的变化关系
Fig. 4 Relationship between W_r/W_i (%) of red soil aggregates and flow shear stress

3 结 论

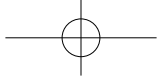
糙度相同时，不同粒径的红壤团聚体剥蚀破坏程度随着运移距离的增加而增大。运移距离相同时，除了在运移距离为9 m和18 m外，在其他相同运移距离中，各粒径红壤团聚体的剥蚀破坏程度均基本呈现出随糙度的增加而增加的规律；在相同运移距离情况下，由于不同粗糙度下水力学特性发生变化，5~3 mm、3~1 mm团聚体的剥蚀破坏程度随着粗糙度的增加出现先减小后增加再减小的变化规律，而7~5 mm团聚体的剥蚀破坏程度则随着粗糙度的增加均呈增加的趋势。各运移距离下，7~5 mm粒径团聚体的剥蚀率随糙度的增加而增加；5~3 mm和3~1 mm粒径团聚体的剥蚀率在各运移距离内随糙度的增加的变化规律不一致。运移距离为36 m时，团聚体剥蚀破坏程度随径流水深、阻力系数、水流剪切力的增加均呈幂函数减小后趋于平缓的趋势，且大粒径较小粒径变化趋势更明

显；但是不同糙度下，水深对团聚体剥蚀破坏程度的影响还需在多坡度多流量条件下进行探索。

参 考 文 献

- [1] Legout C, Leguédais S, Le Bissonnais Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56 (2): 225—237
- [2] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma*, 2001, 99 (1/2): 123—145
- [3] Lado M, Paz A, Ben-hur M. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of American Journal*, 2004, 68 (3): 935—942
- [4] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 等. 不同湿润速率对三种红壤坡面侵蚀过程的影响. *土壤学报*, 2008, 45 (1): 26—31
Guo W, Shi Z H, Chen L D, et al. Effects of wetting rate on erosion processes on hillslopes of red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (1): 26—31
- [5] Wuddivira M N, Stone R J, Ekwue E I. Clay, organic matter, and wetting effects on splash detachment and aggregate breakdown under intense rainfall. *Soil Science Society of American Journal*, 2009, 73 (1): 226—232
- [6] 吴新亮, 魏玉杰, 李朝霞, 等. 亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性. *土壤学报*, 2014, 51 (6): 1223—1233
Wu X L, Wei Y J, Li Z X, et al. Composition of sediments of erosion from different red soil slopes in subtropical area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (6): 1223—1233
- [7] 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. *土壤学报*, 2012, 49 (6): 1235—1240
Wu F Z, Shi Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1235—1240
- [8] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (3): 37—41

- [9] Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16: 591—601
- [10] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion. *Catena*, 2013, 107: 143—153
- [11] Foster G R, Meyer L D. Transport of particles by shallowflow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1972, 15 (1) : 99—102
- [12] Abrahams A D, Li G, Krishana C, et al. A sedimenttransport equation for interrill overland flow on roughsurface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26 (13) : 1443—1459
- [13] Giménez R, Léonard J, Duval Y, et al. Effect of bed topography on soil aggregates transport by rill flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32: 602—611
- [14] Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. Effects of stability, transport distance and two hydraulic parameters on aggregate abrasion of Ultisols in overland flow. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126: 134—142
- [15] 闫璐, 王军光, 蔡崇法. 不同层次黄棕壤团聚体在坡面集中水流中的输移特征. *水土保持学报*, 2014, 28 (2) : 30—35
Yan L, Wang J G, Cai C F. Transport characteristics of aggregates of yellow brown soil under different layers in overland concentrated flow (In Chinese) . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (2) : 30—35
- [16] 杨锦. 人工加糙坡面薄层水流水动力学特性试验研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008
Yang J. Experimental study on hydraulic characteristics of shallow flow on artificial rough bed (In Chinese) . Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2008
- [17] 余冰, 王军光, 蔡崇法, 等. 不同模拟糙度定床坡面集中水流水力学特性研究. *水土保持学报*, 2015, 29 (3) : 50—54
Yu B, Wang J G, Cai C F, et al. Study on hydraulic properties of concentrated flow under different artificial surface roughness (In Chinese) . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (3) : 50—54
- [18] 王瑄, 李占斌, 鲁克新, 等. 坡面水蚀动力因子与土壤剥蚀率灰色关联分析. *水利学报*, 2005, 36 (5) : 525—530
Wang X, Li Z B, Lu K X, et al. Grey correlation analysis on relationship between soil detachment rate and hydrodynamic erosion factors (In Chinese) . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36 (5) : 525—530
- [19] 柳玉梅, 张光辉, 李丽娟, 等. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响. *农业工程学报*, 2009, 25 (6) : 96—99
Liu Y M, Zhang G H, Li L J, et al. Quantitative effects of hydro-dynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow (In Chinese) . *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (6) : 96—99
- [20] 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
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical analysis (In Chinese) . Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 466—532
- [21] LeBissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I: Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (4) : 425—437
- [22] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验. *农业工程学报*, 2010, 26 (3) : 14—19
Wu S F, Wu P T, Yuan L F. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation (In Chinese) . *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (3) : 14—19
- [23] 敬向峰, 吕宏兴, 张宽地, 等. 不同糙率坡面水力学特征的试验研究. *水土保持通报*, 2007, 27 (2) : 33—38
Jing X F, Lü H X, Zhang K D, et al. Experimental study of overland flow hydromechanics under different degrees of roughness (In Chinese) . *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27 (2) : 33—38
- [24] Verman J, Norton L D, Huang C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79: 903—916
- [25] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法. 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. *土壤学报*, 2011, 48 (6) : 1133—1140
Wang J G, Li Z X, Cai C F. Quantitative relationships detachment rate of red soil in concentrated flow with soil aggregate characteristics and soil shear strength (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6) : 1133—1140
- [26] 王瑄, 李占斌, 郑良勇. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验. *沈阳农业大学学报*, 2007, 38 (4) : 577—580
Wang X, Li Z B, Zheng L Y. An indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and shear stress (In Chinese) . *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38 (4) : 577—580



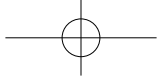
- [27] Larionov G A, Bushueva O G, Dobrovol'skayan N G, et al. Destruction of soil aggregates in slope flows. *Eurasian Soil Science*, 2007, 40 (10) : 1263—1269
- [28] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究. *水科学进展*, 2002, 13 (2) : 159—165
Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2002, 13 (2) : 159—165
- [29] 蒋昌波, 隆院男, 胡世雄, 等. 坡面流阻力研究进展. *水利学报*, 2012, 43 (2) : 189—197
Jiang C B, Long Y N, Hu S X, et al. Recent progress in studies of overland flow resistance (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43 (2) : 189—197
- [30] Foster GR. Modeling the erosion process // Haan CT. *Hydrologic modeling of small watersheds*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1982: 295—380
- [31] Abrahams AD, Parsons AJ. Resistance to overland flow on desert pavement and its implications for sediment transport modeling. *Water Resource Research*, 1991, 27: 1827—1836

Denudation of Red Soil Aggregates in Concentrated Flow as Affected by Artificial Surface Roughness

YU Bing SONG Yunrui CHENG Jianing WANG Junguang[†] CAI Chongfa DUAN You

(Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River of the Ministry of Agriculture, Soil and Water Conservation Research Centre, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract 【Objective】 Soil aggregate is the basic unit of soil structure. Soil aggregates in runoff cause severe abrasion of soil surface, thus significantly affecting water infiltration rate of the soil surface, sediment transport and deposition, and development of soil erosion. With the aggregates breaking into numerous small particles, soil erosion starts. Researches have been reported illustrating that changes in roughness of the surface of a slope directly affect hydraulic characteristics of overland runoffs on the slope, like friction factor, flow depth and so on, which are the best hydraulic parameters to characterize aggregate erosion in the process of aggregate transport with runoff on the slope. Therefore, roughness of the surface of a slope may also affect disintegration of soil aggregates in runoff to a varying extent relative to degree of roughness. 【Method】 In order to study erosive effect of soil aggregates in runoff on slopes different in surface roughness, an experiment was conducted in the artificial rainfall simulation lab of the Huazhong Agricultural University. The soil used in the experiment was Ultisols, collected from Xianning of Hubei Province, China. The soil sample was air-dried and oven-dried at 40℃ for 24h to ensure that the soil sample was constant in moisture content. Before the experiment, portions of soil aggregates 20g each were weighed out, 0.0001g in diversion, and were put separately in flasks containing ethanol (95%) for 10 min to expel air from the aggregates so as to eliminate the risk of breaking up the aggregates in the process of fast-wetting. Stainless steel flumes, adjustable in slope gradient, were set up. The pretreated soil samples were spread out in the flumes and prepared into 5 degrees of roughness ($d=0$, $0.25 \sim 1$, $1 \sim 3$, $3 \sim 5$ and $5 \sim 7$ mm) separately. The flumes were adjusted to 10° in gradient and the water flow controlled at 0.4 L s^{-1} . The experiment was designed to explore abrasion effects of soil aggregates in runoff as affected by particle size of the aggregates ($7 \sim 5$, $5 \sim 3$ and $3 \sim 1$ mm), roughness of the surface ($d=0$, $0.25 \sim 1$, $1 \sim 3$, $3 \sim 5$ and $5 \sim 7$ mm) and transport distance (9, 18, 36, 54, 72 and 108 m) and effects of particle size, surface roughness, transport distance and some related hydraulic parameters (flow depth, friction factor, flow shear stress) on aggregate abrasion. 【Result】 Results show that (1) aggregate abrasion aggravated with rising particle size of the aggregates, and with rising surface roughness, too, when transport distance remained the same.



Yet, the effect of the latter was more obvious than that of the former. The effects of roughness and interaction of roughness and particle size all reached the significance level $p < 0.05$, regardless of transport distance, however, the effect of particle size was not significant when the transport distance reached 54 m or 72 m. (2) On slopes the same in roughness, abrasion rate followed a paracurve, rising and then falling with increasing transport distance. Regardless of transport distance, the abrasion rate of the aggregates, 7 ~ 5 mm in particle size, increased with increasing roughness; but that of the aggregates, 5 ~ 3 mm or 3 ~ 1 mm in particle size, varied irregularly with increasing roughness. (3) When the transport distance was fixed to be 36 m, W_r/W_i of aggregates declined as a power function of increasing depth of the runoff, regardless of roughness, which may be attributed to the joint effect of roughness and runoff depth, and the effect of roughness was more obvious in the case of the flow rate and slope gradient set in the experiment. Aggregate abrasion rate decreased as a power function of increasing friction factor and/or flow shear stress, declining first and then leveling off. However, in the case of varying roughness, the effect of runoff depth on abrasion rate of aggregates as affected by slope gradient and flow rate needs to be studied further. 【Conclusion】 All the findings in this experiment may serve as reference for researchers in studying mechanisms of red soil aggregates breaking down in runoff and have some great theoretical significance to the development of proper soil erosion models.

Key words Aggregate; Concentrated flow; Roughness; Transport distance; Hydraulic parameter

(责任编辑: 檀满枝)