

# 集中流作用下黄土坡面剥蚀率对侵蚀动力学参数的响应

肖 海<sup>1</sup>, 刘 刚<sup>1,2</sup>, 刘普灵<sup>1,2\*</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘 要:** 集中流引起的细沟侵蚀是黄土高原坡耕地主要侵蚀方式之一, 对坡面集中水流动力学特性研究有利于掌握坡面集中流剥蚀产沙的根本原因, 但目前哪种集中流水动力学参数最能准确揭示侵蚀动力过程机理尚不明确。该文采用室内集中流放水冲刷试验, 以黄土高原典型黄绵土为研究对象, 研究坡面平均和瞬时剥蚀率与相应水流剪切力、水流功率、单位水流功率以及过水断面单位能量之间的关系。结果表明, 除了瞬时过水断面单位能量拟合效果较差外, 其他平均和瞬时水力学参数均能够较好地与坡面剥蚀率建立不同的拟合关系。所有参数中平均水流功率是描述本试验条件下的最优水力学参数。由于细沟发育过程中大量坍塌的出现, 导致整个径流剪切力和水流功率与剥蚀率之间的关系曲线整体上升, 出现了临界剪切力和临界水流功率为负值的情况。通过与仅考虑水流对坡面直接作用参数所得结果对比, 表明坍塌等作用在细沟发育过程中具有重要影响, 对剥蚀率的贡献可达 90.93%。研究可为控制和预防集中流侵蚀发生提供科学依据。

**关键词:** 水动力学; 径流; 剪切力; 集中流; 土壤剥蚀率; 坍塌作用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.015

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0106-06

肖 海, 刘 刚, 刘普灵. 集中流作用下黄土坡面剥蚀率对侵蚀动力学参数的响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17):

106—111. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.015 http://www.tcsae.org

Xiao Hai, Liu Gang, Liu Puling. Response of detachment rate of loess slope to hydrodynamic characteristics under concentrate flow condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17):

106—111. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.015 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

黄土高原是世界上土壤侵蚀最严重的地区之一, 其 70% 以上坡耕地侵蚀归功于集中流引起的细沟侵蚀<sup>[1]</sup>。集中流在细沟侵蚀过程中提供剥离和搬运泥沙的动力和能量, 因此对坡面集中水流动力学特性研究有利于探讨坡面集中流剥蚀产沙的根本原因, 并为建立水土流失预报模型奠定基础。

国内外针对土壤侵蚀过程和侵蚀水力学动力机理的研究主要集中在以水流剪切力为代表的“力”参数和以水流功率, 单位水流功率及过水断面单位能量为代表的“能量”指标<sup>[2]</sup>。目前学界对适用于描述侵蚀动力过程的指标尚无定论, 这也明显地体现在国际上几种基于物理过程模型中。WEPP (water erosion prediction project), EUROSEM (European soil erosion model) 和 LISEM (Limburg soil erosion mode) 以及 GUEST (Griffith University erosion system template) 模型分别采用水流切应力参数、单位水流功率及水流功率来描述水流动力参

数与侵蚀率之间的关系<sup>[3]</sup>。大量研究通过使用特定的试验装置和方法对这些模型进行验证。Foster 等<sup>[4-6]</sup>认为侵蚀和切应力成正比, 随后 Nearing 等<sup>[7]</sup>则建立了以径流剪切力为参数的细沟侵蚀率方程。Zhang 等<sup>[8]</sup>证明水流功率能更好地描述土壤分离, 而后又通过形成集中流对特定面积的土样进行冲刷试验认为剪切力和水流功率均能很好的用于模拟细沟剥离过程<sup>[9]</sup>。Govers 等<sup>[10]</sup>则认为侵蚀是单位水流功率的函数。Wirtz 等<sup>[11]</sup>通过在野外已有细沟中进行放水冲刷认为单一的水力参数如剪切力并不能很好地模拟细沟侵蚀过程。

通过以上分析可以看出, 坡面侵蚀动力学参数与坡面侵蚀之间的关系较为复杂, 需要深入研究描述集中流侵蚀动力过程的水动力学参数。本文以黄绵土为研究对象, 通过在坡面顶部进行集中流冲刷试验, 对坡面集中流侵蚀的水动力学过程进行研究, 旨在分析坡面集中水流动力学参数与坡面侵蚀之间的关系, 研究适用于描述黄土坡面集中流侵蚀动力过程的水力学参数, 以期深入理解集中流侵蚀机制, 并为控制和预防其发生提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验土壤为陕西省延安市黄绵土, 土壤颗粒体积分数由马尔文激光粒度仪 (Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd., UK) 扫描获得: 砂粒 31.33%, 粉粒 59.59%, 黏粒 9.08%。有机质为 1.52 g/kg。试验前将土壤

收稿日期: 2016-02-15 修订日期: 2016-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41201270); 国家科技支撑计划 (2015BAC01B03-03); 中国科学院西部之光人才培养计划项目 (2014-91); 陕西省科技统筹创新工程项目 (2013KTDZ03-03-01); 西北农林科技大学博士科研启动基金 (2013BSJJ082)。

作者简介: 肖海, 男, 湖南郴州人, 博士生, 研究方向为土壤侵蚀。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: xiaohai19881104@sohu.com  
\*通信作者: 刘普灵, 男, 博士生导师, 研究员, 研究方向为土壤侵蚀。杨凌 中科院水利部水土保持研究所, 712100。Email: pliu@ms.iswc.ac.cn

自然风干并过 5 mm 筛。

### 1.2 集中清坡面细沟侵蚀试验

预试验表明, 试验小区设置为 1 m 宽时, 集中流及细沟发育均未达小区边界, 集中流在坡面形成的细沟能够自由发育不受边界限制。因而, 使用小区宽度为 1 m、长度为 5 m、深 0.5 m 的可调坡度升降钢槽进行试验。填土之前先在地下铺设 10 cm 厚的天然细沙, 用透水纱布覆盖, 以保证坡面能够顺利透水。填土厚度为 40 cm, 分层装填, 容重控制在  $1.25 \text{ g/cm}^3$  左右。每次装好土后使用电动喷雾器(临沂鲁农喷雾器厂)对坡面进行均匀喷洒雾状水至坡面各处即将产流, 以减低坡面因装土造成的变异性。

在杨凌中国科学院水利部水土保持实验室降雨大厅进行试验( $35^\circ 21' - 37^\circ 31' \text{ N}$  and  $107^\circ 41' - 110^\circ 31' \text{ E}$ )。根据黄土高原地区典型雨强及坡度, 试验设计流量为 10、15、20 和 25 L/min, 设计坡度为  $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $25^\circ$ , 相互交叉组合共 16 场次。试验前将坡度调到设计坡度, 使用量筒对放水流量进行率定, 待率定放水流量与设计流量相对误差  $\leq 5\%$  时, 在放水条件不变的情况下接着重复率定 2 次, 确保放水流量达到设计要求。为使所放水流能够在坡面平稳流出, 将率定好的流量水管放置于坡面 4.75 m 处的正中间形成集中流, 待下方接水口产流后开始计时, 以 1 min 为时间间隔接取全部泥沙样品用以测定泥沙量和径流量。同时使用染色剂法测出集中流 1~4 m 断面处流速。

集中流深度一般在几毫米范围内, 同时集中流对坡面不断侵蚀, 造成径流深在不同地形位置差异较大, 因此造成集中流深度直接测量比较困难。本文使用尺子在坡面 0.5~1.5、>1.5~2.5、>2.5~3.5 及 >3.5~4.5 m 4 个坡段中测量坡面集中流宽。产流 10 min 后停止冲刷。根据观测的径流量和所测 4 个坡段的平均宽度及流速计算集中流深, 再根据水深、流速及试验坡度计算水动力学参数。

### 1.3 指标测定与计算

1) 瞬时剥蚀率是指各次取样时单位时间内单位面积所剥离搬运出坡面的泥沙量。

$$D'_r = \frac{E_r}{L \cdot W \cdot t} \quad (1)$$

式中  $D'_r$  为瞬时剥蚀率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $E_r$  为每个样品中所收集到的泥沙样,  $\text{kg}$ ;  $t$  为每个观测时长 60 s;  $L$  为实际试验坡长 4.75 m;  $W$  为试验  $t$  时间内所测量的 4 个坡段平均宽度,  $\text{m}$ 。

2) 瞬时水流剪切力是指各次取样时坡面集中流在坡面下坡梯度方向产生的对坡面土壤剥蚀力的参数。

$$\tau' = \rho \cdot g \cdot R \cdot J \quad (2)$$

式中  $\tau'$  为瞬时水流剪切力,  $\text{Pa}$  或  $\text{N/m}^2$ ;  $\rho$  为水密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $R$  水力半径, 由于集中流相对较薄, 计算时取径流深  $H$ ,  $\text{m}$ ;  $J$  为水力坡度,  $\text{m/m}$ , 计算时的可用正弦值近似代替<sup>[2]</sup>。

$$H = \frac{Q}{V \cdot W \cdot t} \quad (3)$$

式中  $Q$  为观测时段  $t$  内的径流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $V$  为观测时段所测的表层流速乘以流速修正系数  $k$  (0.67) 所得的值<sup>[12]</sup>,  $\text{m/s}$ 。

3) 瞬时水流功率 ( $\omega'$ ,  $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ) 是指各次取样时径流作用于单位面积的水流所消耗的功率, 反映剥蚀一定量土壤所需功率, 计算式为

$$\omega' = \tau \cdot V \quad (4)$$

4) 瞬时单位水流功率 ( $P'$ ,  $\text{m/s}$ ) 是指各次取样时径流作用于泥沙床面的单位质量水体所消耗的功率, 计算公式为

$$P' = V \cdot J \quad (5)$$

5) 瞬时过水断面单位能量 ( $E'$ ,  $\text{m}$ ) 各次取样时以过水断面最低点做基准面的单位水重的动能与势能之和, 计算式为

$$E' = \frac{a \cdot V^2}{2g} + H \quad (6)$$

式中  $a$  为校正系数, 取为 1<sup>[13-14]</sup>。

6) 平均剥蚀率 ( $D_r$ ) 与各平均水力参数 ( $\tau$ 、 $\omega$ 、 $P_l$  和  $E$ ) 为各次试验数据的平均值。

### 1.4 数据处理及模型评价

$D_r$  与  $\tau$ 、 $\omega$ 、 $P_l$  和  $E$  及  $D'_r$  与  $\tau'$ 、 $\omega'$ 、 $P'$  和  $E'$  之间关系分别用指数、线性、对数、幂函数及二次函数拟合, 选择决定系数 ( $R^2$ ) 和标准根均方差 (normalized root mean square error, NRMSE) 进行模型评价。 $R^2$  越大, NRMSE 越小, 表明两者之间拟合关系越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 剥蚀率与水流剪切力之间关系

集中流平均剥蚀率随平均水流剪切力增加而增加 (图 1a), 两者呈极显著的线性关系。

$$D_r = 0.0068 \times (\tau + 6.9412),$$

$$(R^2=0.95, \text{NRMSE}=0.1401, n=16, P<0.01). \quad (7)$$

式中  $\tau$  为平均水流剪切力,  $\text{Pa}$  或  $\text{N/m}^2$ ;  $D_r$  为平均剥蚀率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

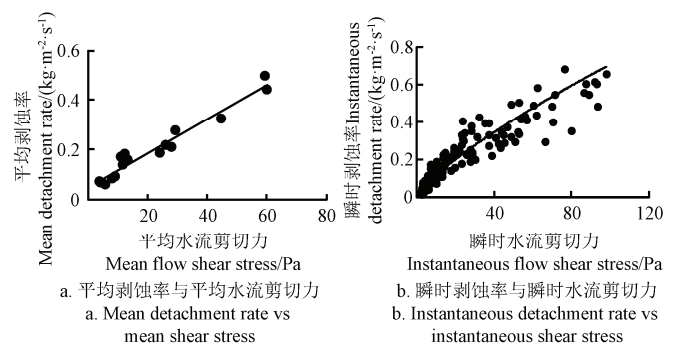


图 1 土壤剥蚀率与平均及瞬时水流剪切力的关系

Fig.1 Relationships of soil detachment rate with mean and instantaneous shear stress

在本试验坡度和放水流量条件下坡面径流剪切力对应的土壤可蚀性参数为  $0.0068 \text{ s/m}$ , 侵蚀性细沟开始剥离土壤颗粒产生侵蚀的临界水流剪切应力  $-6.9412 \text{ Pa}$ 。临界水流剪切应力出现负值的主要原因是试验过程中细沟

沟壁坍塌严重,大幅度提高了剥蚀率,从而将两者关系曲线整体上升。这与李永红等<sup>[14]</sup>在野外放水冲刷工程堆积体所得结果类似。

坡面集中流瞬时剥蚀率随瞬时水流剪切力增加而呈现先快速增加后增幅趋于减小的趋势(图 1b),二者呈幂函数关系(式(8))。 $R^2=0.89$  表明瞬时水流剪切力能够较好地描述坡面集中流剥蚀过程。

$$D'_r = 0.0190 \tau^{0.7847}。$$

$$(R^2=0.89, \text{NRMSE}=0.2873, n=160, P<0.01) \quad (8)$$

根据上述分析可知,在集中流作用下,平均剥蚀率与平均水流剪切力存在线性关系而瞬时剥蚀率与瞬时水流剪切力存在幂函数关系。相对而言,平均剥蚀率与平均水流剪切力之间具有更大的决定系数以及更小的标准根均方差,因此认为平均水流剪切力比瞬时水流剪切力更能够较好地描述集中流在坡面剥蚀情况。

## 2.2 剥蚀率与水流功率之间关系

坡面集中流平均剥蚀率随水流功率增加而极显著线性增加(图 2a),两者之间线性拟合决定系数  $R^2$  达到 0.97。这意味着水流功率越大,水流对坡面物质所做的功也就越大,其对于所剥离搬运的泥沙也就相应越多,因此对应的剥蚀率也就相应越大。本试验条件下对应的水流功率对应的土壤可蚀性参数为  $0.0252 \text{ s}^2/\text{m}^2$ ,与临界平均水流剪切力类似,由于试验过程中坍塌作用,临界平均水流功率亦为负数,为  $-1.9285 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

$$D_r = 0.0252 \times (\omega + 1.9285)$$

$$(R^2=0.97, \text{NRMSE}=0.1098, n=16, P<0.01)。 \quad (9)$$

式中  $\omega$  为平均水流功率,  $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

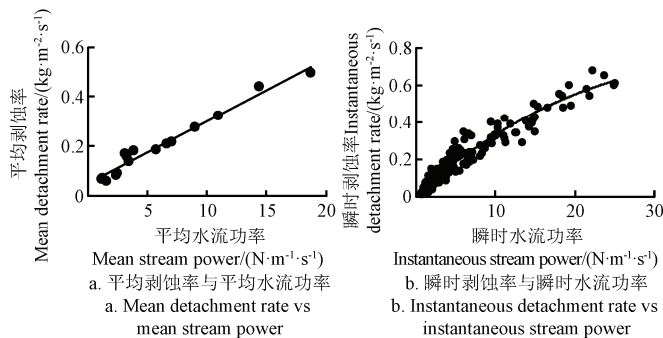


图 2 土壤剥蚀率与平均及瞬时水流功率的关系

Fig.2 Relationships of soil detachment rate with mean and instantaneous stream power

与瞬时剥蚀率与瞬时水流剪切力类似,集中流瞬时剥蚀率随瞬时水流功率增加而呈先快速增加后增幅趋于减小的趋势(图 2b),经拟合两者关系发现存在决定系数  $R^2$  为 0.93 的二次函数关系,表明瞬时水流功率能够较好地描述集中流作用下坡面剥蚀过程。

$$D'_r = -0.0005 \omega'^2 + 0.0364 \omega' + 0.0156$$

$$(R^2=0.93, \text{NRMSE}=0.2054, n=160, P<0.01)。 \quad (10)$$

相比而言,平均剥蚀率与平均水流功率之间具有更大的决定系数以及更小的标准根均方差,说明在本研究中平均水流功率能够更好地描述集中流在坡面剥蚀动力情况。

## 2.3 剥蚀率与单位水流功率之间关系

集中流平均剥蚀率随平均单位水流功率增加而呈现增幅逐渐增大的趋势(图 3a),两者之间存在决定系数  $R^2$  达到 0.96 的幂函数关系,表明平均单位水流功率能够很好地对集中流作用下坡面剥蚀率进行预测。

$$D_r = 4.6946 P_l^{1.0377}$$

$$(R^2=0.96, \text{NRMSE}=0.1098, n=16, P<0.01)。 \quad (11)$$

式中  $P_l$  为平均单位水流功率,  $\text{m}/\text{s}$ 。

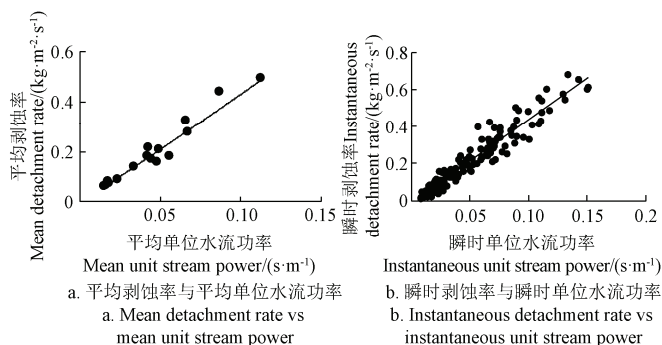


图 3 土壤剥蚀率与平均及瞬时单位水流功率的关系

Fig.3 Relationships of soil detachment rate with mean and instantaneous unit stream power

瞬时剥蚀率随着瞬时单位水流功率增加而增加,两者存在着正相关关系(图 3b),进行拟合分析发现两者存在决定系数  $R^2=0.93$  的线性函数关系,表明瞬时单位水流功率能够较好地描述集中流冲刷过程中瞬时剥蚀率的变化。

$$D'_r = 4.4527 P' - 0.0084$$

$$(R^2=0.93, \text{NRMSE}=0.2054, n=160, P<0.01)。 \quad (12)$$

相比而言,平均剥蚀率与平均单位水流功率之间幂函数关系更加密切,具有更大的决定系数以及更小的标准根均方差,这说明在本研究中平均单位水流功率能够更好地描述集中流在坡面剥蚀动力情况。

## 2.4 剥蚀率与过水断面单位能量之间关系

集中流平均剥蚀率随着平均过水断面单位能量增大而呈现增幅逐渐增大的趋势(图 4a),两者之间存在决定系数  $R^2$  为 0.94 的幂函数关系,表明平均过水断面单位能量能够很好地预测集中流作用下坡面剥蚀率。

$$D_r = 375.4541 E^{1.7474}$$

$$(R^2=0.94, \text{NRMSE}=0.1846, n=16, P<0.01)。 \quad (13)$$

式中  $E$  为平均过水断面单位能量,  $\text{m}$ 。

瞬时剥蚀率随瞬时过水断面单位能量增加而呈现逐渐增加的趋势(图 4b),进行拟合分析可知两者存在决定系数  $R^2$  仅为 0.64 的二次函数关系。

$$D'_r = -955.1985 E'^2 + 51.4479 E' - 0.2625$$

$$(R^2=0.64, \text{NRMSE}=0.4806, n=160, P<0.01)。 \quad (14)$$

对数据进行分析发现在大坡度情况下,由于初始几个样品中所测流速较大,而流速对过水断面单位能量存在二次方的影响(式(6)),从而得到较大的几个瞬时过水断面能量,而与此对应的瞬时剥蚀率在此阶段却相对较小,因此极大地影响了两者之间的拟合关系。



因此, 在试验条件范围内, 对于过水断面单位能量来说, 平均过水断面单位能量能够用来描述坡面侵蚀动力, 而瞬时过水断面单位能量在本试验中与剥蚀率关系相对较差,  $R^2$  仅为 0.64、NRMSE 却达 0.4806。总体来说, 平均过水断面能量能够更好地描述集中流作用下坡面剥蚀情况。

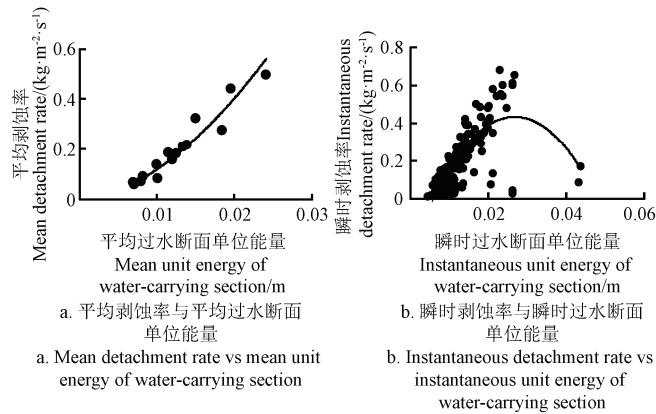


图 4 土壤剥蚀率与平均及瞬时过水断面单位能量的关系  
Fig.4 Relationships of soil detachment rate with mean and instantaneous unit energy of water-carrying section

### 3 讨论

本文针对集中流作用下坡面细沟发育不受边界条件限制下分析了土壤剥蚀率与侵蚀动力学参数之间的关系。根据上述结果, 除了瞬时过水断面能量对瞬时剥蚀率拟合效果较差外, 其余各水力参数均能够较好地拟合坡面剥蚀率。就拟合效果而言, 从决  $R^2$  和 NRMSE 2 个指标来看, 各指标从优到劣排列为平均水流功率、平均单位水流功率、平均径流剪切力、平均过水断面单位能量、瞬时单位水流功率及瞬时水流功率、瞬时径流剪切力。本试验结果中平均水力学参数拟合效果均优于瞬时计算值是因为平均计算值抵消并减弱了瞬时样中的突变样的影响。本研究表明水流功率是描述本试验条件下的最优水力学参数, 这与其他降雨和冲刷研究结果一致<sup>[2,13-15]</sup>。同时水流功率优于径流剪切力对剥蚀率的描述, 这与康宏亮等<sup>[13]</sup>在降雨条件下风沙区土质和 10%砾石质量分数工程堆积体试验研究结果一致。总的来说, 水流能的参数指标拟合效果优于力的参数指标。这是由于在细沟发育过程中, 泥沙来源不仅仅是剪切力对坡面的剥离所产生的, 同时还存在着大量坍塌、沟头溯源等作用引起的来源<sup>[16]</sup>。虽然这些作用在细沟发育过程中占有重要作用<sup>[17]</sup>, 但是却无法被仅仅作用在沟底表明的剪切力所体现。而对于能量指标来说, 这些作用的出现仅仅会影响能量剥离搬运的分配进行响应。同时, 平均水动力学参数 ( $\tau$ 、 $\omega$ 、 $P_f$ 、 $E$ ) 和瞬时水动力学参数 ( $\tau'$ 、 $\omega'$ 、 $P'$ ) 均具有较高的拟合决定系数, 均可以作为描述坡面集中流作用下细沟发育不受边界条件限制情况下侵蚀动力过程很好的指标, 相比而言, 平均值与剥蚀率的相关性均要高于瞬时

值。尽管如此, 与平均水力学参数只能对整个试验剥蚀率描述相比, 瞬时水力学参数对集中流剥蚀过程描述还具有其独特优势。

如上文所述, 本试验中在水流剪切公式和水流功率中相应的土壤可蚀性  $0.0068 \text{ s/m}$ 、 $0.0252 \text{ s}^2/\text{m}^2$ , 同时由于试验过程存在大量坍塌导致整个拟合关系曲线整体上升, 对应的临界水流剪切力及临界水流功率均为负值, 分别为  $-6.94 \text{ Pa}$ 、 $-1.93 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。所得可蚀性参数与同一地区同种土壤类型在仅仅考虑水流直接对土体表面作用情况下的  $0.55 \text{ s/m}$  和  $0.42 \text{ s}^2/\text{m}^2$  均较小<sup>[18]</sup>, 表明试验坍塌作用虽然整体提高拟合关系曲线, 但由于集中流在剥蚀过程中存在坍塌与坡面物质反馈作用使得相应的剥蚀量变小<sup>[19]</sup>。

集中流最大剥蚀率为径流在清水状态时的剥离能力, 表明径流在不受任何其他作用条件下的最大剥离能力<sup>[20]</sup>。陈浩<sup>[18]</sup>在同一土壤进行集中流试验, 表明侵蚀过程中无坍塌等现象发生, 平均水流功率、平均水流剪切力与平均剥蚀率呈形同式 (9) 和式 (7) 的线性函数关系, 且在清水状态下土壤临界水流剪切力及临界水流功率为  $2.27 \text{ Pa}$  和  $0.72 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 土壤可蚀性参数为  $0.55 \text{ s/m}$  和  $0.42 \text{ s}^2/\text{m}^2$ 。将本试验获得的平均水流剪切力和平均水流功率代入陈浩所得的线性公式中, 获得本试验条件下清水状态 (无坍塌等现象发生) 时基于平均水流功率、平均水流剪切力的平均剥蚀率  $D_d$  和  $D_c$ , 则基于平均水流功率、平均水流剪切力获得的坍塌等作用对平均剥蚀率的贡献率为  $(D_d - D_r)/D_d \times 100\%$  和  $(D_c - D_r)/D_c \times 100\%$ , 如表 1 所示。 $D_c$  在各试验场次下均远大于  $D_d$ , 这与两者对坡面作用不同有直接关系。径流剪切力直接对坡面土壤颗粒物起到剥离力的作用, 而且在计算过程中只考虑的是径流中未含泥沙时的最大剪切作用力, 而试验过程中由于本身剥离作用和沿途坍塌作用均会为径流中提供大量泥沙, 泥沙的加入会大大降低径流对坡面土壤的直接剪切作用力。同一径流条件下, 剥蚀率与径流含沙量呈现极强的线性负相关<sup>[20]</sup>, 因此  $D_c$  会严重高估实际径流剪切剥蚀率。对于  $D_d$ , 由于水流功率反映水流对坡面泥沙物质做功的过程, 尽管在试验过程中也会出现因本身剥离作用和沿途坍塌作用提高径流泥沙含量, 造成含沙水流对坡面作用减弱, 但这只影响水流本身做功的分配。由于泥沙含量的存在或增加, 仅影响径流功率分配在搬运泥沙的功增加而相应减小对坡面土壤颗粒物质的剥离做功作用减小, 从而导致  $D_d$  比  $D_c$  小得多。因此,  $D_c$  高估了实际径流剪切剥蚀率, 而  $D_d$  更为合理。从所计算获得的坍塌等作用的贡献率来看, 基于径流剪切力计算的平均百分比为 98.18%, 而水流功率计算出来的平均百分比为达到了 90.93%, 考虑到  $D_c$  会严重高估实际径流剪切剥蚀率, 因此可以认为坍塌等作用所影响的剥蚀率为 90.93%。本试验场次大多数百分比均超过 80%, 这与本试验过程时间比较短, 细沟一直处于快速发育过程中有关。

表 1 基于径流剪切力和水流功率计算的平均剥蚀率及坍塌影响的剥蚀率

Table 1 Estimated mean detachment rate and contribution of collapse calculated by shear stress and stream power

坡度 Slope gradient/ (°)	放水流量 Flow rate/ (L·min <sup>-1</sup> )	基于径流剪切力计算 Calculation based on shear stress			基于水流功率计算 Calculation based on stream power		
		$D_c$ / (kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$D_r$ / (kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	坍塌等作用贡献率 Contribution of collapse effect/%	$D_d$ / (kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$D_r$ / (kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	坍塌等作用贡献率 Contribution of collapse effect/%
10	10	1.05	0.98	93.63	0.17	0.10	60.64
	15	0.87	0.80	91.69	0.21	0.14	65.57
	20	6.07	5.91	97.41	1.08	0.92	85.47
	25	5.53	5.35	96.72	1.29	1.11	85.92
15	10	2.01	1.95	96.96	0.34	0.28	82.06
	15	3.81	3.72	97.63	0.71	0.62	87.28
	20	5.25	5.11	97.39	1.13	0.99	87.87
	25	4.82	4.65	96.49	0.98	0.81	82.74
20	10	3.23	3.15	97.46	0.69	0.61	88.12
	15	12.04	11.86	98.48	2.08	1.90	91.19
	20	14.13	13.92	98.53	2.47	2.26	91.56
	25	14.95	14.67	98.14	3.47	3.19	92.01
25	10	13.1	12.88	98.35	2.65	2.43	91.83
	15	23.37	23.05	98.62	4.28	3.96	92.45
	20	31.85	31.41	98.61	5.75	5.31	92.32
	25	31.54	31.04	98.43	7.55	7.05	93.44
平均值 Average		10.85	10.65	98.18	2.18	1.98	90.93

注:  $D_d$  和  $D_c$  为清水状态(无坍塌等现象发生)时基于平均水流功率、平均水流剪切力计算的平均剥蚀率。 $D_r$  为集中流试验实测平均剥蚀率。

Note:  $D_d$  and  $D_c$  are mean detachment rate calculated based on mean stream power and mean shear stress in experiment without collapse effect;  $D_r$  is mean detachment rate measured in concentrated flow experiment.

## 4 结 论

在集中流作用下,黄土坡面剥蚀率与各水力学参数关系密切,除了瞬时过水断面能量拟合效果较差以外,其他各水力学参数均能够较好地拟合坡面剥蚀率变化。本试验中最优水力学参数为水流功率,总的来说关于能的水力学指标比关于力的水力学指标,平均水力学参数指标比瞬时水力学参数指标拟合效果好。尽管如此,与平均水力学参数只能对整个试验剥蚀率描述相比,瞬时水力学参数对集中流剥蚀过程描述具有独特优势。

本试验中大量坍塌的出现导致整个径流剪切力和水流功率与剥蚀率之间的关系曲线整体上升,出现了临界剪切力和临界水流功率为负值的情况。通过与同一地区同种土壤仅仅考虑径流对坡面直接作用试验结果对比,表明径流功率在描述坍塌等作用对剥蚀率的影响时更为合理,基于径流功率计算的剥蚀率占总剥蚀率的90.93%,表明坍塌等在细沟发育过程中起着重要作用。

## 参 考 文 献

- [1] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 110—117.  
Wang Longsheng, Cai Qiangguo, Cai Chongfa, et al. Morphological changes of rill on loess slope and its relationship with flow velocity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 110—117. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王雪松, 谢永生. 模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水力特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 117—124.  
Wang Xuesong, Xie Yongsheng. Hydrodynamic characteristics of tapered spoilbank under simulated rainfall condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 117—124. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘俊娥, 王占礼, 高素娟, 等. 黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 144—149.  
Liu June, Wang Zhanli, Gao Sujuan, et al. Experimental study on hydro-dynamic mechanism of sheet erosion processes on loess hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 144—149. (in Chinese with English abstract)
- [4] Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. Transactions of ASAE, 1977, 20(4): 678—682.
- [5] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics, II. Shear stress relationships[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 797—804.
- [6] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(1): 99—102.
- [7] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865—876.
- [8] Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Liu Guobin, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Sci Soc Am J, 2003, 67: 713—719.
- [9] Zhang Guanghui, Liu Guobin, Tang Mingke, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(3): 883—890.
- [10] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow: Erosion, transport, and deposition process[J]. LAHS Pub1, 1990(189): 45—63.
- [11] Wirtz A, Seeger M, Remke A, et al. Do deterministic sediment detachment and transport equations adequately represent the process-interactions in eroding rills? An experimental field study[J]. Catena, 2013, 101: 61—78.
- [12] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. Earth Surf Process Landf, 1996, 21: 509—515.
- [13] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 北方风沙区砾石对堆积体

- 坡面径流及侵蚀特征的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 125—134
- Kang Hongliang, Wang Wenlong, Xue Zhide, et al. Effect of gravel on runoff and erosion characteristics on engineering accumulation slope in windy and sandy area, northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(3): 125—134. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李永红, 牛耀彬, 王正中, 等. 工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 83—88.
- Li Yonghong, Niu Yaobin, Wang Zhengzhong, et al. Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff over engineering accumulation slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(22): 83—88. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94—102.
- Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Tian Hongwei. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 94—102. (in Chinese with English abstract)
- [16] Wirtz A, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes[J]. Catena, 2012, 91: 21—34.
- [17] Stefanovic J R, Bryan R B. Flow energy and channel adjustments in rills developed in loamy sand and sandy loam soils[J]. Earth Surf Proc Land, 2009, 34: 133—144.
- [18] 陈浩. 黄土坡面细沟水流分离动力学过程试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- Chen Hao. Experimental Research on Dynamic Processes of Soil Detachment on Loess Hillslope[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhang Guanghui, Liu Yumei, Han Yanfeng, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship[J]. Soil Sci Soc Am J, 2009, (73): 1298—1304
- [20] 赵宇, 陈晓燕, 米宏星, 等. 估算细沟含沙水流剥蚀率的改进方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 174—181.
- Zhao Yu, Chen Xiaoyan, Mi Hongxing, et al. Improved approach for estimation of detachment rate of rill sediment loading flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 174—181. (in Chinese with English abstract)

## Response of detachment rate of loess slope to hydrodynamic characteristics under concentrate flow condition

Xiao Hai<sup>1</sup>, Liu Gang<sup>1,2</sup>, Liu Puling<sup>1,2\*</sup>

(1. State key laboratory of Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Rill erosion caused by concentrate flow is one of the main erosion types on cultivated slope in the Loess Plateau. It is necessary to research on the response of concentrate flow hydrodynamic characteristics for a better understanding of rill erosion mechanism. However, the optimal runoff hydrodynamic parameter for estimating detachment rate was still ambiguous. An indoor concentrate scouring experiment was carried out in the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland arming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, China to investigate the response of runoff hydrodynamic characteristics to detachment rate under concentrate flow condition with different inflow rates and slope gradients. Loessal soil collected from Yanan (35°21'–37°31' N and 107°41'–110°31' E) in Shaanxi province, a kind of typical soil in the Loess Plateau, was prepared for this research. The experiments were applied to a soil plot with 5 m long, 1 m wide and 0.5 m deep. Packing was carried out layer by layer to attain the desired uniform bulk density (about 1.25 g/cm<sup>3</sup>) with 40 cm in depth. The bottoms of the boxes were perforated and covered with a layer of 10 cm sand under the gauze to facilitate even drainage of percolating soil water. After packing, the soil was watered to saturation with an electric sprayer to reduce the variability caused by packing. Four flow rate (10, 15, 20 and 25 L/min) combined with four slope gradient (10°, 15°, 20° and 25°) were designed for this research. The experiment lasted for 10 min after runoff initiation. Runoff and sediments were collected in a series of plastic containers at intervals of 1 min throughout the 10 min. The volume of water in each container was measured, and the sediment was dried in an oven and weighed. The flow velocity was measured by dye-tracing technique within the 1–4 m away from the bottom and the flow width was also measured at 4 sections between 0.5–4.5 m to estimate flow depth at every minute during the experiment. The relations between runoff hydrodynamic characteristics, including shear stress, stream power, unit stream power and unit energy of water-carrying section, and detachment rate were analyzed. The results showed that all the mean and instantaneous runoff hydrodynamic characteristics factors fitted the detachment rate well with different regressions equations except instantaneous unit energy of water-carrying section. The mean runoff hydrodynamic characteristics factors were better than those of average values for fitting with detachment rate. The optimal runoff hydrodynamic characteristics factor in our research was mean stream power because it was of the largest determination coefficient 0.97. The curve of linear regressions of mean shear stress and stream power with detachment rate became ascended because of collapse during the experiment process, which also led to a negative value for corresponding critical shear stress and stream power. By comparing results with that from a published paper that only considered the flow effect on soil surface in the same soil, the detachment rate directly estimated based on mean stream power were more reasonable than those estimated based on mean shear stress. The collapse could account for 90.93% of the detachment rate, indicating an important role of collapse during rill development process. The results provide valuable information for a better understand of the response of concentrate flow hydrodynamic characteristic factors to detachment rate and its corresponding erosion mechanism.

**Keywords:** hydrodynamics; runoff; shear stress; concentrate flow; soil detachment rate; collapse effect