

# 黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究

刘俊娥<sup>1,3</sup>, 王占礼<sup>2,3\*</sup>, 高素娟<sup>1</sup>, 张宽地<sup>4</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100;  
3. 中国科学院水利部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;  
4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 片蚀是坡面侵蚀演变的初始形态, 揭示片蚀动力学机理, 找出与片蚀关系最密切的水动力学参数对有效防治片蚀具有重要意义。该文采用人工模拟降雨方法, 对黄土坡面片蚀过程动力学机理进行了研究, 结果表明: 1) 一次降雨过程的黄土坡面片蚀模数对水动力学参数平均值响应关系的相关系数大小顺序为平均断面单位能量>平均水流功率>平均单位水流功率>平均水流切应力; 2) 降雨过程中黄土坡面片蚀率对水动力学参数瞬时值响应关系的相关系数大小顺序是断面单位能量>水流功率>单位水流功率>水流切应力; 3) 水流断面单位能量是与试验条件下黄土坡面片蚀动力学过程关系最密切的水动力学指标, 是描述试验条件下片蚀动力学过程最好的动力学参数。试验条件下黄土坡面片蚀动力学过程的发生发展根源于坡面片蚀中水流断面单位能量的动力作用。

**关键词:** 切应力, 降雨, 试验, 黄土坡面, 片蚀, 水流功率, 断面单位能量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.024

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-07-0144-06

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 Jun'e, 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)

## 0 引言

中国黄土高原地区是世界上土壤侵蚀最严重的地区, 该地区坡面存在着各种不同等级阶段的侵蚀形态和侵蚀过程, 其中, 片蚀过程是坡面径流侵蚀过程的初始阶段, 是坡面径流侵蚀形态演变的最初形态。片蚀过程是在坡面薄层水流及其雨滴对它打击扰动作用下发生发展的, 因此也是坡面水蚀中最复杂的过程, 具有其独特的侵蚀特征, 是极其重要的土壤侵蚀过程之一。因此, 开展黄土坡面片蚀过程机理的研究, 对于深入揭示坡面片蚀过程, 建立片蚀模型, 促进片蚀理论的进一步发展和完善, 预报预防黄土高原土壤侵蚀具有重要意义。

对片蚀的研究不仅要阐明其侵蚀过程和侵蚀特征, 同时也要揭示其侵蚀发生机理, 才能从根本上认识和控制侵蚀的发生。侵蚀受土壤性质和水动力条件的共同影响, 其中, 水动力作用的强弱直接影响侵蚀的强弱。从水动力学的角度揭示侵蚀发生及演变的机理, 主要是揭示最能准确地描述坡面片蚀过程的水动力学参数。国内

外以往针对侵蚀动力学机理探索水动力学参数对侵蚀影响的研究, 最为典型的主要体现在国际上较为先进的几个侵蚀过程物理模型中<sup>[1-8]</sup>。WEPP 采用了传统的水流切应力参数, EUROSEM 和 LISEM 采用了单位水流功率, GUEST 采用了水流功率描述侵蚀过程。Foster 等<sup>[9-12]</sup>认为侵蚀和切应力成正比。Nearing 等<sup>[13]</sup>的野外试验证明水流功率能更好地描述土壤分离。Govers<sup>[14]</sup>得到与 EUROSEM 和 LISEM 一样的结论, 认为侵蚀是单位水流功率的函数。张光辉等<sup>[15]</sup>认为水流功率比水流切应力和单位水流功率更适合预报土壤侵蚀, 水流功率是表征能量的参数, 更能说明是侵蚀的发生和发展是基于水流能量的积累和耗散过程。李占斌等<sup>[16]</sup>根据能量守恒定律, 提出径流能量耗散, 并通过缓坡变坡冲刷试验得出侵蚀率与径流能量耗散的关系比侵蚀率和水流平均切应力的关系密切。李鹏等<sup>[17]</sup>在此基础上结合径流剪切力进行了 3°~30°系列坡度下的侵蚀产沙过程比较研究, 对比分析了坡面径流剪切力理论、径流能耗理论和单宽水流功率理论这 3 种理论, 得出能耗理论更有利于侵蚀过程的描述。

国内外对侵蚀动力学过程机理的研究基本上基于水流切应力, 水流功率, 单位水流功率 3 个水动力学参数, 但哪个参数能准确描述侵蚀过程并没有定论。3 个参数有着本质的区别, 水流切应力是力的概念, 水流功率是能量的概念。由于土壤侵蚀过程的发生和发展根源是水流对其的做功过程, 是能量消耗的过程, 因此, 表征水流能量的动力学参数似乎更能准确地描述侵蚀过程, 所以用径流能量的大小来描述侵蚀过程的强弱就成为新的探

收稿日期: 2011-07-29 修订日期: 2011-10-10

资助项目: 国家自然科学基金项目 (40971172); 国家自然科学基金项目 (41171227)。

作者简介: 刘俊娥 (1987—), 女 (汉族), 山西省河曲县人, 博士生, 研究方向为土壤侵蚀。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。

Email: liujune20041021@yahoo.com.cn。

\*通信作者: 王占礼 (1960—), 男 (汉族), 陕西榆林人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: zwang@nwsuaf.edu.cn。

索方向。总体而言，究竟哪种水动力学参数最能准确揭示侵蚀动力过程机理，还需要更深入的研究。基于此，本文采用模拟降雨试验方法对黄土坡面片蚀动力学机理进行研究，揭示片蚀对各个水动力学参数的响应关系，以探求与片蚀过程最密切的水动力学指标，从而为从根本上治理和预防侵蚀发生提供科学依据。

## 1 材料与方法

本研究在中科院水利部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人工模拟降雨大厅开展，试验在该模拟降雨大厅的侧喷降雨区进行，侧喷区喷头位置距地面 14.5 m，水喷出后向上喷高 1.5 m，随后向地面降落，实际降雨高度为 16 m，降雨均匀度大于 80%<sup>[18]</sup>。试验雨强条件下，雨滴大小处于 0.36~3.11 mm 之内<sup>[19]</sup>，降落到地面的雨滴均已达到雨滴终点速度<sup>[20]</sup>。试验时将小区置于降雨均匀度最高的雨区中心范围内，保证小区上降雨雨强及雨滴打击能量均匀分布、稳定。试验土壤为陕西省神木县沙黄土，颗粒组成为：沙粒 65.2%，粉粒 28%，黏粒 5.8%，中数直径为 0.095 mm。试验前将土壤自然风干并过 5 mm 筛。

试验小区是长 1 m，宽 0.5 m，深 0.4 m 的可调坡度升降钢槽。填土厚度为 20 cm，分层装填，每次试验均装填新土，填土之前先铺设厚 10 cm 的天然细沙，用透水纱布覆盖，以模拟天然坡面的透水状况。为了降低土壤装填的变异性，每场试验前进行 30 mm/h 的预降雨，降雨时间控制在产流刚出现时为止。

设计雨强分别为 1, 1.33, 1.67, 2, 2.33 mm/min，设计坡度分别为 9°, 12°, 15°, 18°, 21°。采用完全组合试验，设计重复试验 1 次，共 50 场次。试验开始后，在产流出现时，在小区的径流出口开始接样，每分钟接前 30 s 的径流泥沙样，接样的同时用染色示踪法在坡面测定流速，降雨结束，量取接样浑水体积，烘干称泥沙质量。根据观测的径流量和水流流速计算相应的径流水深，再根据水深、流速及试验坡度计算水流切应力、水流功率、单位水流功率、过水断面单位能量等相关水动力学参数，计算公式如下

$$\tau = \gamma R J \quad (1)$$

式中： $\tau$  为水流切应力，Pa 或 N/m<sup>2</sup>； $\gamma$  为水流体积质量，N/m<sup>3</sup>； $R$  为水力半径，m，对于矩形断面， $R=hb/2h+b$ ，其中， $h$  为水深，m， $b$  为水宽，m，对于薄层水流，可近似用水深  $h$  代替； $J$  为水力坡度， $J=\sin\theta$ ， $\theta$  为床面坡度。

$$\omega = \gamma q J = \gamma h v J = \tau V \quad (2)$$

式中， $\omega$  为水流功率，W/m<sup>2</sup> 或 N/(m·s)； $\gamma$  为水流体积质量，N/m<sup>3</sup>； $q$  为单宽流量，m<sup>2</sup>/s； $J$  为水力坡度， $J=\sin\theta$ ， $\theta$  为床面坡度； $h$  为水深，m； $V$  为平均流速，m/s； $\tau$  为水流切应力，Pa。

$$P = \frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} \times \frac{dy}{dx} = V \times J \quad (3)$$

式中， $P$  为单位水流功率，m/s； $V$  为平均流速，m/s； $J$

为水力坡度， $J=\sin\theta$ ， $\theta$  为床面坡度。

$$E = \alpha V^2 / 2g + h \cos\theta \quad (4)$$

式中， $E$  为单位能量，cm； $\alpha$  为动能校正系数，取为 1； $V$  为流速，cm/s； $g$  为重力加速度， $g=980 \text{ cm/s}^2$ ； $h$  为水深，m； $\theta$  为床面坡度，(°)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同雨强及坡度条件下坡面片蚀对水流切应力的响应关系

图 1 为不同雨强及坡度下，次降雨过程前 10 min 对应的坡面片蚀模数（即单位面积片蚀量，等于坡面总片蚀量除以坡面投影面积）与水流平均切应力的关系，可以看出，在试验条件下，坡面片蚀模数总体上随平均切应力的增大而增大。统计分析结果表明，二者之间的关系可用线性方程描述

$$M_a = 4.4194 \bar{\tau} - 0.8841 \quad (R^2=0.4348, P<0.01) \quad (5)$$

式中， $M_a$  为片蚀模数，kg/m<sup>2</sup>； $\bar{\tau}$  为坡面片蚀水流平均切应力，Pa。可以看出，试验条件下，坡面片蚀模数和相应的平均水流切应力的相关性不高。试验条件下的土壤可蚀性参数为 4.42 s<sup>2</sup>/m，片蚀发生的临界水流切应力为 0.2 Pa。

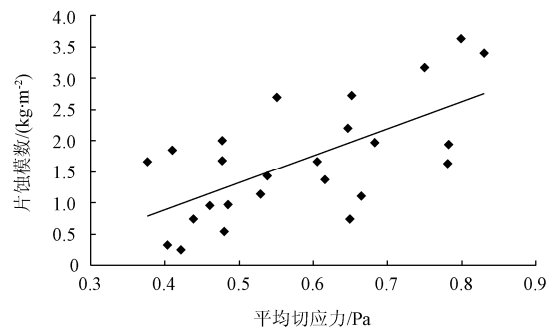


图 1 坡面片蚀模数与平均切应力的关系  
Fig.1 Relationship of sheet erosion modulus and mean flow shear stress

对不同雨强及坡度条件下坡面片蚀率与水流瞬时切应力的关系进行统计分析，结果表示为

$$M = -2.0902 \tau^3 + 3.8506 \tau^2 - 1.9394 \tau + 0.4002 \quad (R^2=0.251, P<0.01) \quad (6)$$

式中， $M$  为片蚀率，kg/(m<sup>2</sup>·min)， $\tau$  为瞬时水流切应力，Pa。可以看出，坡面片蚀率与相应的水流切应力的相关性差。

对比分析上述结果，可以得出，在试验条件下，坡面片蚀模数对水流平均切应力的响应关系和坡面片蚀率对水流瞬时切应力的响应关系差异较大，相对而言，水流平均切应力可以稍较好的描述一次降雨过程的片蚀模数，但水流瞬时切应力对片蚀率的影响呈现多项式的变化趋势，不符合侵蚀的动力作用规律，且相关性差。因此，水流切应力与坡面片蚀动力学过程的关系较弱，不是描述试验条件下坡面片蚀动力学过程的好的动力学参数之一。

### 2.2 不同雨强及坡度条件下坡面片蚀对水流功率的响应关系

图 2 为不同雨强及坡度条件下，一次降雨过程前 10 min 对应的坡面片蚀模数与平均水流功率的关系，可以看出，在试验条件下，坡面片蚀模数随平均水流功率的增大而增大，统计分析结果表明，二者关系可以用线性方程描述

$$M_a=30.476\bar{\omega}-0.0642 (R^2=0.8226, P<0.01) \quad (7)$$

式中， $M_a$  为片蚀模数， $kg/m^2$ ； $\bar{\omega}$  为平均水流功率， $W/m^2$ 。可以看出，试验条件下，坡面片蚀模数和相应的平均水流功率之间具有较高的相关性。试验条件下的土壤可蚀性参数为  $30.48 kg/W$ ，片蚀发生的临界水流功率为  $0.002 W/m^2$ 。

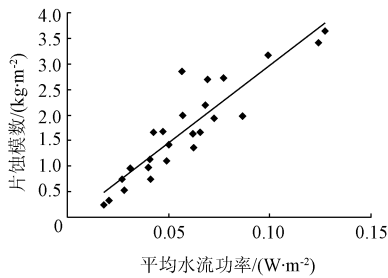


图 2 坡面片蚀模数与平均水流功率的关系  
Fig.2 Relationship of sheet erosion modulus and mean stream power

图 3 为不同雨强及坡度条件下，坡面片蚀率与水流功率的关系，统计分析结果表示为

$$M=6.4201 \omega^{1.2953} (R^2=0.833, P<0.01) \quad (8)$$

式中， $M$  为片蚀率， $kg/(m^2 \cdot min)$ ， $\omega$  为瞬时水流功率， $W/m^2$ 。可以看出，坡面片蚀率与相应的水流功率的相关性也较高。

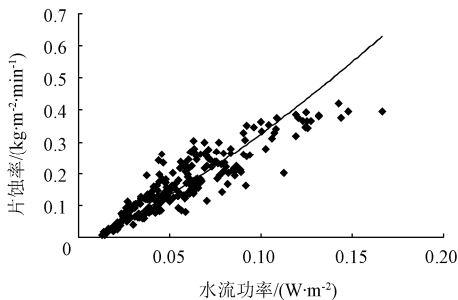


图 3 坡面片蚀率与水流功率的关系  
Fig.3 Relationship of sheet erosion rate and stream power

对比分析上述结果，可以得出，在试验条件下，坡面片蚀模数对平均水流功率的响应关系表现为线性正相关关系，坡面片蚀率对水流功率的响应关系表现为幂函数正相关关系，且相关性都显著，因此，对于平均水流功率和瞬时水流功率，水流功率都是试验条件下与坡面片蚀动力学过程有密切关系的水动力学指标之一，是描述试验条件下坡面片蚀动力学过程的好的动力参数之一。由于片蚀率与水流功率的相关性系数稍高于片蚀模数与平均水流功率的相关性系数，而且片蚀是随着径流

的变化过程逐步变化的，因此，选择水流功率比平均水流功率能更好地描述描述片蚀动力学过程，也更符合片蚀过程的实际。

### 2.3 不同雨强及坡度条件下坡面片蚀对单位水流功率的响应关系

图 4 为不同雨强及坡度条件下，一次降雨过程前 10 min 对应的坡面片蚀模数与平均单位水流功率的关系，可以看出，在试验条件下，坡面片蚀模数随平均单位水流功率的增大而增大，统计分析结果表明，二者关系可以用线性方程描述

$$M_a=65.371\bar{P}-0.0222 (R^2=0.8206, P<0.01) \quad (9)$$

式中， $M_a$  为片蚀模数， $kg/m^2$ ； $\bar{P}$  为平均单位水流功率， $m/s$ 。可以看出，试验条件下，坡面片蚀模数和相应的平均单位水流功率之间具有较高的相关性。试验条件下的土壤可蚀性参数为  $65.37 kg/(s \cdot m^3)$ ，片蚀发生的临界单位水流功率为  $0.00034 m/s$ 。

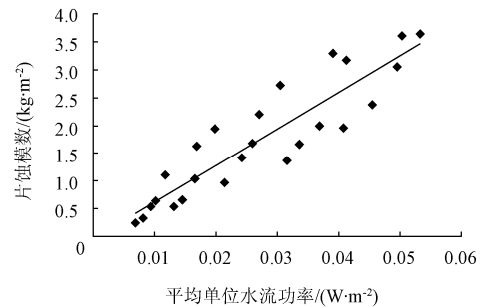


图 4 坡面片蚀模数与平均单位水流功率的关系  
Fig.4 Relationship of sheet erosion modulus and mean unit stream power

图 5 为不同雨强及坡度条件下，坡面片蚀率与单位水流功率的关系，统计分析结果表示为

$$M=5.290P^{0.963} (R^2=0.741, P<0.01) \quad (10)$$

式中， $M$  为片蚀率， $kg/(m^2 \cdot min)$ ， $P$  为瞬时单位水流功率， $m/s$ 。可以看出，坡面片蚀率与相应的单位水流功率的相关性也较好。

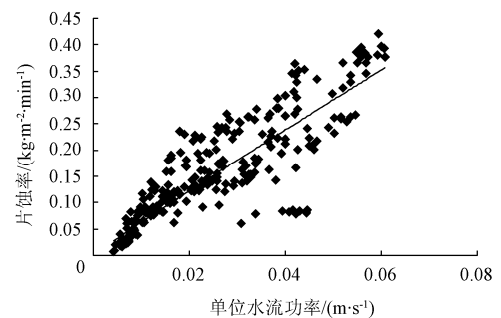


图 5 坡面片蚀率与单位水流功率的关系  
Fig.5 Relationship of sheet erosion rate and unit stream power

对比分析上述结果，可以得出，在试验条件下，坡面片蚀模数对平均单位水流功率的响应关系表现为线性正相关关系，坡面片蚀率对单位水流功率的响应关系表现为幂函数正相关关系，且相关性都显著，因此，对于

平均单位水流功率和瞬时单位水流功率，单位水流功率也是试验条件下与坡面片蚀动力学过程有密切关系的水动力学指标之一，是描述试验条件下坡面片蚀动力学过程的好的动力参数之一。

#### 2.4 不同雨强及坡度条件下坡面片蚀对断面单位能量的响应关系

图 6 为不同雨强及坡度条件下，一次降雨过程前 10 min 对应的坡面片蚀模数与平均断面单位能量的关系，可以看出，在试验条件下，坡面片蚀模数随平均断面单位能量的增大而增大，统计分析结果表明，二者关系用线性方程描述

$$M_a = 31.604 \bar{E} - 0.7687 \quad (R^2 = 0.9164, P < 0.01) \quad (11)$$

式中， $M_a$  为片蚀模数， $\text{kg}/\text{m}^2$ ； $\bar{E}$  为平均断面单位能量， $\text{cm}$ 。可以看出，试验条件下，坡面片蚀模数和相应的平均断面单位能量的相关性好。试验条件下的土壤可蚀性参数为  $3.16 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，片蚀发生的临界平均断面单位能量为  $0.024 \text{ cm}$ 。

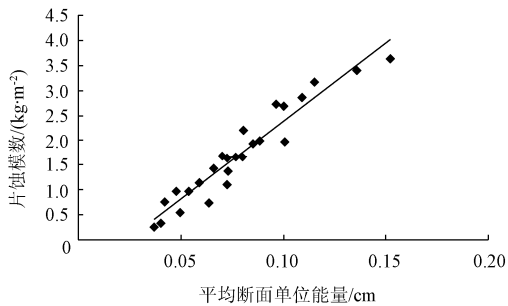


图 6 坡面片蚀模数与平均断面单位能量的关系  
Fig.6 Relationship of sheet erosion modulus and mean cross-section specific energy

图 7 为不同雨强及坡度条件下，坡面片蚀率与瞬时断面单位能量的关系，统计分析结果表示为

$$M = 2.9405E - 0.0574 \quad (R^2 = 0.854, P < 0.01) \quad (12)$$

式中， $M$  为片蚀率， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ， $E$  为瞬时断面单位能量， $\text{cm}$ 。可以看出，坡面片蚀率与相应的断面单位能量的相关性也较好。

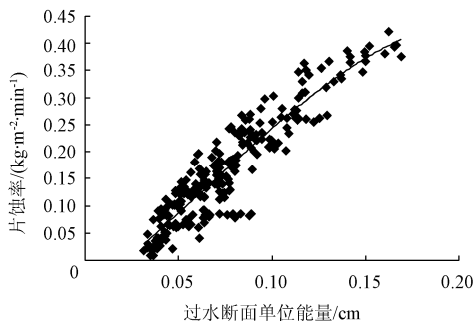


图 7 坡面片蚀率与断面单位能量的关系  
Fig.7 Relationship of sheet erosion rate and cross-section specific energy

对比分析上述结果，可以得出，在试验条件下，坡面片蚀模数对平均断面单位能量的响应关系和坡面片蚀

率对断面单位能量的响应关系皆表现为线性正相关关系，且相关性都显著，因此，对于平均断面单位能量和瞬时断面单位能量，断面单位能量也是试验条件下与坡面片蚀动力学过程有密切关系的水动力学指标之一，是描述试验条件下坡面片蚀动力学过程的好的动力参数之一。

#### 2.5 坡面片蚀动力学指标

综合上述分析，可以得到：

1) 描述次降雨过程的片蚀模数对片蚀水流水动力学参数平均值的响应关系，根据决定系数的大小排序为：平均断面单位能量 ( $R^2=0.9164$ ) > 平均水流功率 ( $R^2=0.8226$ ) > 平均单位水流功率 ( $R^2=0.8206$ ) > 平均切应力 ( $R^2=0.4348$ )。因此，描述一次降雨过程坡面片蚀模数对水动力学参数平均值的响应关系的动力学指标，应该优选平均断面单位能量，其次选择平均水流功率和平均单位水流功率。

2) 描述降雨过程的片蚀率对片蚀水流水动力学参数瞬时值的响应关系，根据决定系数的大小排序为：断面单位能量 ( $R^2=0.854$ ) > 水流功率 ( $R^2=0.833$ ) > 单位水流功率 ( $R^2=0.741$ ) > 切应力 ( $R^2=0.251$ )。因此，描述降雨过程坡面片蚀率对水动力学参数瞬时值的响应关系的动力学指标，应该优选断面单位能量，其次选择水流功率和单位水流功率。

结合 1) 2) 的分析，断面单位能量是与试验条件下坡面片蚀动力学过程关系最密切的水动力指标，是描述试验条件下坡面片蚀动力学过程最好的水动力参数。试验条件下坡面片蚀发生发展根源在于坡面片蚀水流断面单位能量的动力作用。在本试验条件下，片蚀模数对平均断面单位能量的响应关系 ( $R^2=0.9164$ ) 比片蚀率对瞬时断面单位能量的响应关系 ( $R^2=0.854$ ) 更好。

### 3 结论与讨论

1) 次降雨过程的坡面片蚀模数与平均断面单位能量，平均水流功率，平均单位水流功率都具有显著相关性，且与平均断面单位能量的相关系数最高，因此，平均断面单位能量是描述黄土坡面片蚀过程片蚀模数对水动力学参数平均值响应关系的最好的指标，其次是平均水流功率和平均单位水流功率。

2) 降雨过程的坡面片蚀率与断面单位能量，水流功率，单位水流功率都具有显著相关性，且与断面单位能量的相关系数最高，因此，断面单位能量是描述黄土坡面片蚀过程片蚀率对水动力学参数瞬时值响应关系的最好的指标，其次是水流功率和单位水流功率。

3) 断面单位能量是描述试验条件下黄土坡面片蚀动力学过程最好的水动力学指标，坡面片蚀动力学过程的发生发展即根源于坡面片蚀过程中水流断面单位能量的动力作用。

从上述分析可知，断面单位能量、水流功率、单位水流功率和水流切应力均可用来描述坡面侵蚀的动力过程，但断面单位能量较之其他 3 个参数更能更好地描述坡面侵蚀过程，这与李占斌等<sup>[16-17]</sup>认为径流能耗理论优

于其他参数的研究结果相贴近,均得出直接用径流能量的大小能很好地描述侵蚀动力过程。其次,水流功率和单位水流功率比水流切应力更有利于描述侵蚀,这与前面提到的有关学者<sup>[13,15,17]</sup>的研究结果基本一致。

片蚀过程是坡面水蚀中最复杂的过程,具有其独特的侵蚀特征,相对于河流等明渠水流而言,坡面上降雨产生的水流,尤其是片状水流,其水层厚度小,水面及水体受雨滴打击扰动作用明显,受坡面表面糙率影响突出,且水力坡度陡,边界条件复杂,因此,应用明渠水流力学理论中的动力学参数揭示和阐明坡面侵蚀动力学过程机理还需要通过更多的试验进行更深入、全面的不断探索、研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] Flangan D C, Nearing M A. USDA Water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation[R]. USDA-ARS, NSERL: Technical Report, 1995.
- [2] Flanagan D C, Nearing M A. Sediment particle sorting on hillslope profiles[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(3): 573—583.
- [3] Morgan R P C, Quinton J N, Rickson R J. EUROSEM documentation manual[R]. Silsoe College, Silsoe, UK, 1992.
- [4] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E. et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surf Processed, 1998, 23: 527—544.
- [5] Misra R K, Rose C W. Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 593—604.
- [6] De Roo A P J, Wesseling C G, Cremers N, et al. LISEM: a physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS[C]. // Karel Kovar H P. Fifth European conference on application of geographic information systems in hydrology and water resources management. Vienna: IAHS, 1996: 395-403.
- [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] Lei T, Nearing M A, Haghghi K, et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model[J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157-3168.
- [9] 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.
- [10] Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. Trans.of ASAE, 1977, 20(4): 678—682.
- [11] Meyer L D, Foster G R. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow[J]. Trans. of ASAE, 1965, 8(4): 689—693.
- [12] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(1): 99—102.
- [13] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D. et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope[J]. Earth Surf. Process. Landforms, 1999, 24: 677—686.
- [14] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow: Erosion, transport, and deposition process[J]. LAHS Pub1, 1990(189): 45—63.
- [15] 张光辉, 刘宝元, 何小武. 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 48—52. Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, He Xiaowu. Study on hydrodynamic mechanism of natural soil detachment in loess region[J]. Journal of soil and water conservation, 2005, 19(4): 48—52. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力学过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 5—7, 49. Li Zhanbin, Lu Kexin, Ding Wenfeng. Experimental study on dynamic processes of soil erosion on loess slope[J]. Journal of soil and water conservation, 2002, 16(2): 5—7, 49. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李鹏, 李占斌, 郑良勇, 等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 66—69. Li Peng, Li Zhanbin, Zheng Liangyong, et al. Comparisons of dynamic mechanics of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope[J]. Journal of soil and water Conservation, 2005, 19(3): 66—69. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177—178.
- [19] 王占礼, 孙全敏, 郑粉莉, 等. 降雨流动能物理模型[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1280—1285. Wang Zhanli, Sun Quanmin, Zheng Fenli, et al. Physically-based model of rainfall flow kinetic energy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11): 1280—1285.
- [20] 陈文亮, 王占礼. 人工模拟降雨特性的试验研究[J]. 水土保持通报, 1991, 3(2): 55—62. Chen Wenliang, Wang Zhanli. Trial research on the behaviours of artificial rainfall by simulation[J]. Bulletin of soil and water conversation, 1991, 3(2): 55—62. (in Chinese with English abstract)

## Experimental study on hydro-dynamic mechanism of sheet erosion processes on loess hillslope

Liu Jun'e<sup>1,3</sup>, Wang Zhanli<sup>2,3\*</sup>, Gao Sujuan<sup>1</sup>, Zhang Kuandi<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming in the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

4. School of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Sheet erosion is the initial form of soil erosion evolution on a hillslope. Revealing the hydrodynamic mechanisms of sheet erosion and determining the hydrodynamic parameters closely related to sheet erosion are of importance to control sheet erosion effectively. The hydrodynamic mechanisms of sheet erosion processes on a loess hillslope were studied by a simulated rainfall experiment. Results showed that: 1) In terms of the correlation coefficients for the responsive relationships of sheet erosion modulus to mean hydrodynamic parameters in a single rainfall on the loess hillslope, the mean parameters examined could be ranged in the order of mean cross-section specific energy > mean stream power > mean unit stream power > mean stream shear stress. 2) In terms of the correlation coefficients for the responsive relationships of sheet erosion rates to instantaneous hydrodynamic parameters in a rainfall process on the loess hillslope, the instantaneous hydrodynamic parameters could be ranged in the order of cross-section specific energy > stream power > unit stream power > stream shear stress. 3) Cross-section specific energy was the hydrodynamic index closely related to hydrodynamic processes of sheet erosion on loess hillslope under the experimental conditions and the best hydrodynamic parameter describing hydrodynamic processes of sheet erosion. Under the experimental conditions, the occurrence and development of hydrodynamic processes of sheet erosion on the loess hillslope were basically driven by the hydrodynamic functions characterized by cross-section specific energy.

**Key words:** shear stress, rain, experiments, loess hillslope, sheet erosion, stream power, cross-section specific energy