

DOI: 10.11766/trxb201812270440

# 不同质地重塑土坡面水沙定量关系研究\*

倪世民 张德谦 冯舒悦 王军光<sup>†</sup> 蔡崇法

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

**摘要** 为确定不同质地重塑土坡面水力学参数与土壤侵蚀速率间的定量关系, 采用模拟径流冲刷动床试验的方法, 对不同质地坡面的土壤侵蚀速率进行了研究, 建立了土壤侵蚀速率与水力学参数、土壤性质间的定量关系。结果表明: (1) 土壤侵蚀速率与坡度和流量关系密切, 且坡度对土壤侵蚀速率的影响更大; 土壤质地对土壤侵蚀速率具有明显的影响, 相同试验条件下使土壤侵蚀速率呈现“单峰状”分布, 在 50% 含沙量的坡面最大; (2) 细沟平均沟深、断面宽深比与土壤侵蚀速率之间具有极显著的相关关系 ( $r = -0.865$ ,  $P < 0.01$ ), 可以作为反映坡面侵蚀产沙程度的指标; (3) 单位水流功率是描述土壤侵蚀速率的最佳水力学参数 ( $r = 0.911$ ,  $P < 0.01$ ), 幂函数可以很好地表达两者之间的定量关系 ( $D_r = 49.96Pr^{2.07}$ ,  $R^2 = 0.795$ ); (4) 考虑到土壤性质对坡面侵蚀的影响, 在单位水流功率与土壤侵蚀速率的定量关系中引入了土壤黏聚力, 进一步提高了定量关系的可靠性 ( $D_r = 165.22Pr^{2.36}C^{-0.44}$ ,  $R^2 = 0.816$ ), 由于方程中参数获取的相对简便, 在实际应用中具有更广的适应范围与现实价值。

**关键词** 土壤侵蚀速率; 土壤质地; 水力学参数; 土壤黏聚力

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

水力侵蚀是引起土地退化和水土流失的主要驱动因子, 也是水体面源污染的主要来源之一<sup>[1]</sup>。水力侵蚀包括由降雨溅蚀和地表径流引起的土壤分离、泥沙输移、泥沙沉积 3 个过程<sup>[2-3]</sup>, 研究各过程间相互转化、相互影响的机理是建立土壤侵蚀物理模型的前提条件<sup>[4]</sup>。土壤分离是指径流将土壤颗粒从土壤基质表面剥离的过程<sup>[5]</sup>, 土壤分离速率 (soil detachment rate) 被定义为单位时间单位面积土壤表面被径流剥蚀掉的土壤质量<sup>[6]</sup>。

在已有的研究中, 一些学者通过定床水槽试验的方法, 对室内直径或宽度为 10 cm 的小尺寸样品进行径流冲刷来获取土壤分离速率<sup>[7-8]</sup>。在这种方法中, 土壤分离被假设为一个单独的土壤侵蚀系统, 考虑在限定性细沟内集中水流对土壤表面的侵蚀作用, 并没有涉及土壤侵蚀过程中细沟形态、水力学

特性及床面粗糙度等因素的动态变化。在自然条件下, 坡面侵蚀是从层状面蚀开始逐步向细沟状面蚀转变, 侵蚀形成的细沟是一个粗糙、复杂、不规则的形态, 细沟由下切侵蚀、侧向坍塌等引起的形态变化对细沟中的泥沙输移与沉积过程、水力学特性具有显著的影响<sup>[9]</sup>。研究表明, 在土壤侵蚀过程中径流对土壤的剥蚀能力随着径流含沙量的增加呈线性降低, 当径流泥沙载荷等于输沙能力时, 土壤分离速率达到最小值<sup>[10]</sup>。此外一部分学者采用动床试验的方法获取土壤分离速率, 考虑了土壤侵蚀过程中各个过程的相互作用与动态变化: 坡面的径流水力学特性、侵蚀产沙及侵蚀形态三者相互影响、相互制约, 是一个包含土壤分离、泥沙输移及泥沙沉积三个过程的动态侵蚀系统<sup>[11-12]</sup>。在 GUEST 模型中, 土壤分离与泥沙沉积被认为是一个同时发生的

\* 国家自然科学基金项目 (41771304) 和国家重点研发计划项目 (2017YFC0505404) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41771304) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0505404)

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

作者简介: 倪世民 (1992—), 男, 河南鹤壁人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理方面研究。E-mail: nishimin1016@163.com

收稿日期: 2018-12-27; 收到修改稿日期: 2019-05-22; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-06-24

连续过程,坡面的侵蚀产沙是土壤分离、泥沙沉积、泥沙输移相互作用的结果<sup>[13]</sup>。土壤分离能力是细沟侵蚀中下切侵蚀、溯源侵蚀、侧蚀等各个部位分量的总和。对于一个完整的坡面侵蚀系统而言,动床试验考虑了土壤分离、土壤沉积、土壤输移 3 个过程,而不是注重水力侵蚀过程中单独的土壤分离过程。可见,定床试验并不能充分地反映自然土壤坡面上的土壤分离过程,相关研究结果的应用受到限制与质疑<sup>[4, 11-12]</sup>;而动床试验更贴合自然条件下土壤侵蚀过程,两者之间的主要差异体现在水流阻力、水流形态、侵蚀泥沙来源等方面。动床试验条件下,土壤分离速率的概念被考虑为整个侵蚀面的土壤侵蚀速率(soil erosion rate),定义为单位时间单位侵蚀面积坡面土壤在水流侵蚀动力的作用下被剥蚀的土壤颗粒质量<sup>[10]</sup>。土壤分离速率与土壤侵蚀速率两者的概念相同,但是土壤侵蚀速率(或土壤剥蚀率)更适合描述动床条件下的坡面土壤侵蚀过程。

回顾以往研究,诸多学者使用了不同类型的土壤进行关于土壤分离的研究,如黄土<sup>[9, 11-12]</sup>、培肥土壤<sup>[8]</sup>、红壤<sup>[7]</sup>、工程堆积体<sup>[15]</sup>、农田<sup>[16]</sup>等。这些研究中,土壤分离速率通常通过水力学参数进行表达,如在 WEPP 模型中使用水流剪切力对其进行描述,在 EUROSEM 模型中使用单位水流功率进行描述,在 GUEST 模型中使用水流功率进行描述等<sup>[13, 17]</sup>,但由于试验材料与条件的差异,究竟哪个是最适合的参数尚无定论。同时,已有的研究大多集中在单一质地或者粒径范围较窄的土壤上,而关于土壤侵蚀速率随土壤质地变化规律的相关研究较为有限;且由于试验土壤的差异,不同数据集之间所得的结果仅仅适用于特定的土壤,建立的模型在不同的土壤中应用时需要进行校准<sup>[18]</sup>。因此,在进行不同质地土壤间土壤侵蚀速率的系统试验研究具有重要的理论意义和现实价值。鉴于上述研究背景与存在问题,本研究采用了红壤(黏土)和砂土混合配制的不同质地的土壤为研究对象,通过动床试验的方法,探讨了不同质地土壤坡面的土壤侵蚀速率,分析了土壤侵蚀速率与坡面的细沟形态特征之间的响应关系,确定了水力学参数与土壤侵蚀速率间的定量关系,以期为坡面土壤侵蚀预报模型研究提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验材料为人工混合配制的重塑土。配制土样所用的黏土采自鄂南丘陵区湖北省咸宁市咸安区贺胜桥镇(114°42'12"E, 29°99'35"N),采样深度为 0~15 cm,土壤类型为第四纪红黏土发育的红壤,土地利用方式为林地;试验所用的沙土为普通工程沙土。土样被自然风干并过 5 mm 筛,以剔除石块、根系等杂质。不同质量分数的黏土与沙土在干燥条件下按设置的含沙量梯度被均匀混合,配置不同质地类型的重塑土。根据已有研究,试验设置了 5 个含沙量梯度:沙土质量百分数依次为 0、30%、50%、70%、100%<sup>[19]</sup>。本研究中,5 种质地的重塑土(含沙量由低至高)分别被定义为试验组 S1、S2、S3、S4、S5,根据美国土壤质地分类制,土壤质地依次为粉质黏土、黏土、砂质黏壤土、砂质壤土、砂土,涵盖了从黏土至砂土的质地范围。土样的抗剪强度( $\tau_0$ )通过 ZJ 型应变式控制直接剪切仪测定,环刀含水率控制在 30%,垂直法向压力分别为 50、100、150 和 200 kPa,剪切速率为 0.8 mm·min<sup>-1</sup><sup>[19]</sup>。根据库仑-摩尔公式: $\tau_0 = C + \lambda \tan \varphi$ ,计算土壤黏聚力  $C$  (kPa) 和内摩擦角  $\varphi$  (°),其中  $\lambda$  为法向压力<sup>[19]</sup>。土样的基本理化性质采用常规方法测定(表 1)<sup>[19]</sup>。

### 1.2 研究方法

试验通过室内模拟径流冲刷动床试验的方法进行。试验装置主要由试验土槽、供水装置和接样装置组成(图 1)。土槽为长 3.00 m、宽 1.00 m、高 0.35 m 的变坡式大型钢制土槽,分为相同的两个平行土槽,且可在 0~30°的范围调节坡度。土槽后端安装了内部有不锈钢消能板的稳流箱,以保证水流平稳流入土槽。供水设备由蓄水池、恒压水泵、阀门组和水管组成,在试验过程中持续向蓄水池注水,放水流量由阀门控制。

土槽的填土容重控制在 1.35 g·cm<sup>-3</sup>,接近田间的自然状况。填土采取分层填土的方式,边填边压实,且在填装上层土壤前,将下层土壤的表层进行抓毛处理,以保证填土尽量均匀。同时,坡顶 15 cm 处被覆盖纱布以削弱稳流箱出口跌水能量与边缘效应的影响。在每次试验开始前,使用降雨器以 30 mm·h<sup>-1</sup> 的雨强对土槽进行预湿润处理,放置后当

表 1 试验土样的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the soil samples used in the experiment

试验组 Group	含沙量 Sand content/%	土粒密度 Specific gravity / (g·cm <sup>-3</sup> )	黏聚力 Cohesion / (kPa)	内摩擦角 Internal friction / °	风干含水率 Air-dried moisture content/ %	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%	质地 Soil texture
S1	0	2.67	3.98	41.75	5.25	51.88	40.33	7.79	粉质黏土
S2	30	2.69	2.76	42.97	2.85	42.59	29.40	28.02	黏土
S3	50	2.65	2.13	44.58	1.55	33.33	21.74	44.96	砂质黏壤土
S4	70	2.57	1.85	45.00	0.86	19.64	16.09	64.27	砂质壤土
S5	100	2.45	1.58	47.54	0.22	4.25	4.64	91.11	砂土

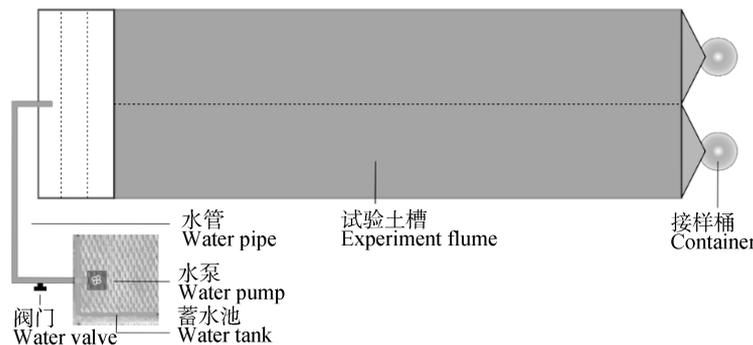


图 1 试验装置

Fig. 1 Sketch of the experiment apparatus

土壤含水率降至 30% 时开始进行试验。试验设置了 2 个坡度 (5° 与 15°) 和 4 个流量 (2、4、6、8 L·min<sup>-1</sup>), 每组试验设置两个平行, 试验时间设置为 15 min。在前期预试验中, 由于在 15° 坡度、8 L·min<sup>-1</sup> 流量条件下坡面侵蚀强烈, 造成短时间内坡面下段发生大量沉积, 因此未进行该条件下的试验。坡面产流后, 沿坡面每隔 20 cm (共 15 个断面) 使用直尺获取径流水宽; 径流表面流速采用高锰酸钾染色法分段测定, 水温通过稳流槽内的温度计读取。试验过程中在出水口收集泥沙和径流样品, 以获取含沙量、产沙量和径流量, 接样容器为接样瓶 (间隔 30 s 接 1 次) 和接样桶 (间隔 1 min 接 1 次)。在试验结束后, 通过直尺法沿坡面获取细沟 (15 个断面) 的形态参数 (沟深、沟宽、宽深比)。

### 1.3 参数获取方法

综合有关研究, 本研究选取下列相关参数。土壤侵蚀速率 (土壤剥蚀率) 为单位时间单位侵蚀面积坡面土壤在水流侵蚀动力作用下被剥蚀的土壤颗

粒质量<sup>[11]</sup>, 表征径流对坡面土壤的分离能力, 其求解方法如下:

$$D_r = \frac{m_t}{BLT} \quad (1)$$

式中,  $D_r$  为土壤侵蚀速率, kg·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>;  $m_t$  为累计产沙量, kg;  $B$  为水宽, cm;  $L$  为沟长, m;  $T$  为时间, min。

平均流速 ( $V$ ) 通过试验过程中染色法测得的表面流速根据相应的流态乘以换算系数得到:

$$V = kV_s \quad (2)$$

式中,  $V$  为平均流速, m·s<sup>-1</sup>;  $V_s$  为表面流速, m·s<sup>-1</sup>;  $k$  为相关的换算系数, 根据对应的流态 (层流、过渡流、紊流) 分别取值 0.67、0.70、0.80<sup>[20]</sup>。

坡面径流的流态通过水流内部的紊流指标来描述, 通常使用的判别参数为雷诺数与弗汝德数<sup>[21]</sup>:

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (3)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

式中,  $R$  为水力学半径, m, 本试验条件下可近似用水深  $h$  代替;  $\nu$  为黏滞系数,  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $g$  为重力加速度,  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $h$  为径流水深, cm。

水力学参数选用水流剪切力、水流功率、单位水流功率, 分别通过下式计算<sup>[22]</sup>:

$$\tau = \rho g R J \quad (5)$$

$$\omega = \tau V \quad (6)$$

$$Pr = V J \quad (7)$$

式中,  $\tau$  为水流剪切力, Pa;  $\rho$  为水流容重,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $J$  为水力坡度, m;  $\omega$  为水流功率,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Pr$  为单位水流功率,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

细沟断面宽深比是无量纲参数, 表示细沟的断面形态在水平方向和垂直方向上尺寸的相对大小, 其数学表达式为:

$$\mu = \sqrt{\frac{d_r}{h_r}} \quad (8)$$

式中,  $\mu$  为细沟断面宽深比;  $d_r$  为细沟沟宽, cm;  $h_r$  为细沟沟深, cm。宽深比  $\mu$  的值越大, 断面形状越趋近“宽浅式”, 宽深比  $\mu$  的值越小, 断面形状越趋近“窄深式”。

本文采用方程决定系数和均方根误差来评估拟合函数的表现, 筛选试验结果, 其求解形式为:

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (9)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - P_i)^2}{n}} \quad (10)$$

式中,  $R^2$  为方程决定系数, RMSE 为均方根误差,  $M_i$  为实测值,  $\bar{M}$  为实测值的平均值,  $P_i$  为预测值,  $\bar{P}$  为预测值的平均值,  $n$  为样本数。

#### 1.4 数据处理方法

数据处理与分析在 Excel 2016、Origin 2017 与 SPSS 19.0 软件中完成, 相关分析采用 Spearman 双侧显著性检验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 坡面侵蚀产沙特征

各试验条件下重塑土坡面的土壤侵蚀速率如图 2 所示。土壤侵蚀速率随着坡度、流量与土壤质地的变化呈现明显的规律性: 土壤侵蚀速率随着流量的增加而增加, 随着坡度的增加呈现剧烈增加的趋势, 表明坡度对土壤侵蚀速率的影响占主要地位。这与张光辉等<sup>[22]</sup>的研究结果不同, 原因与在动床条件下坡度的增加使坡面土体的稳定性大幅降低有关。对于不同质地的土壤而言, 随着土壤质地的偏砂化土壤侵蚀速率呈现“峰状”分布, 即先增加后减小的趋势, 并在 S3 (50% 含沙量) 坡面处取极值。坡度和流量是坡面水流侵蚀力变化的源动力, 大量研究表明, 坡面产沙与坡度、流量呈正相关性, 在一定范围内, 坡度和流量越大产沙量越大<sup>[8, 12, 15]</sup>。

土壤性质 (尤其是土壤质地) 对细沟形态特征、土壤侵蚀速率具有重要的影响<sup>[23-24]</sup>。相比黏重的土壤, 砂质的土壤由于土壤黏结性差而易被径流所剥离。同时, 土壤侵蚀速率取决于径流输移能力和径流剥蚀速率中的较小者<sup>[25]</sup>。在相同的径流侵蚀力条件下, 土壤侵蚀速率呈现“峰状”分布, 表明质地黏重的土壤的产沙过程主要受径流剥蚀能力的限制, 质地偏砂的土壤的产沙过程主要受径流搬运能力的限制。与 S4 (70% 含沙量)、S5 (100% 含沙量) 坡面相比, 虽然 S1 (含沙量为 0) 坡面产沙略高, 但显而易见, S1 坡面的产沙过程受径流剥蚀能力的限制, 这表明红壤较高的黏结性与较好的团粒结构可以在一定程度上增加坡面的抗蚀性<sup>[7]</sup>; 而 S4、S5 坡面则表现为径流剥离的土壤大于径流的输沙能力, 从而在坡面下段发生较为明显的沉积。

### 2.2 坡面断面形态对侵蚀产沙的响应

坡面的侵蚀形态受控于坡面的径流侵蚀力与土

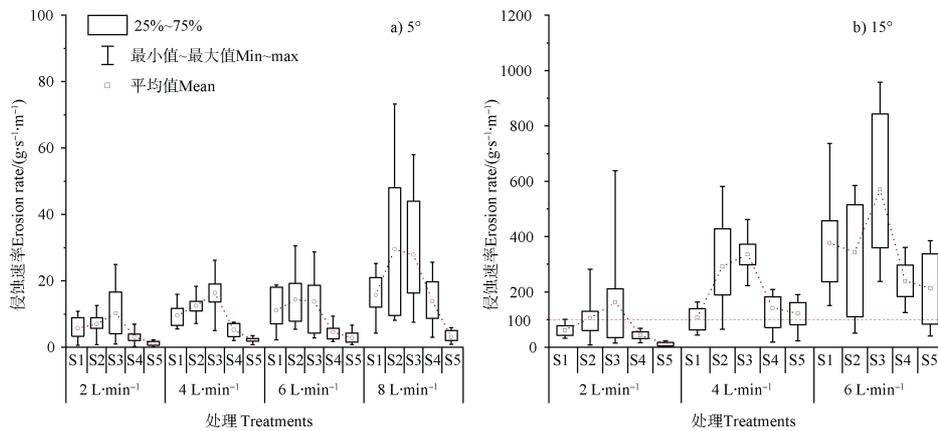


图 2 不同试验条件下土壤侵蚀速率  
Fig. 2 Soil erosion rate relative to treatment

壤抗蚀性的共同作用<sup>[26]</sup>, 明确坡面侵蚀形态与坡面侵蚀产沙的关系具有重要意义。图 3 所示为各试验条件下的细沟断面宽深比。细沟断面宽深比随坡度的增大呈现减小的趋势, 断面形态由“宽浅式”趋向于“窄深式”。在缓坡条件下, 流量对细沟断面形态没有显著的影响, 在陡坡条件下, 随着流量的增加细沟断面宽深比随之减少。土壤质地的差异使不同坡面的细沟断面形态呈现明显的规律性, 质地越砂化(坡面含沙量越高)断面形态越趋近于“宽浅式”(图 4)。土壤的颗粒组成是影响土壤抗蚀性的重要因素, 颗粒组成越细的土壤, 黏结力越强, 土壤抗蚀性和形成的细沟的稳定性越强<sup>[27]</sup>。细沟侵蚀为径流输沙提供了输移通道, 一方面黏结力较差的土壤坡面细沟沟壁稳定性差, 沟壁坍塌引起的侧向侵蚀频繁, 使细沟断面形态趋向“宽浅式”; 另一方

面宽浅的细沟引起径流输沙能力减小, 坡面上方侵蚀的泥沙因径流搬运能力的限制而在下方发生沉积, 致使断面形态进一步趋向“宽浅式”。

为进一步揭示坡面产沙特征与细沟形态特征之间的关系, 对土壤侵蚀速率、累计产沙量与细沟形态参数进行了相关分析, 以判断其内在的联系。如表 2 所示, 细沟的平均沟深和土壤侵蚀速率、坡面累计产沙量具有极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ )。相关研究表明, 径流对坡面土壤的侵蚀使坡面沟床形态发生改变, 沟床形态的改变又反过来影响径流的水力学特性与坡面的侵蚀产沙<sup>[28]</sup>。径流的下切侵蚀是坡面产沙的主要来源, 在本研究中平均沟深能显著地表达坡面的产沙情况。此外, 细沟断面宽深比和土壤侵蚀速率、坡面产沙量具有负显著相关关系 ( $P < 0.01$ ), 细沟的断面形态越加“窄深”, 土壤侵

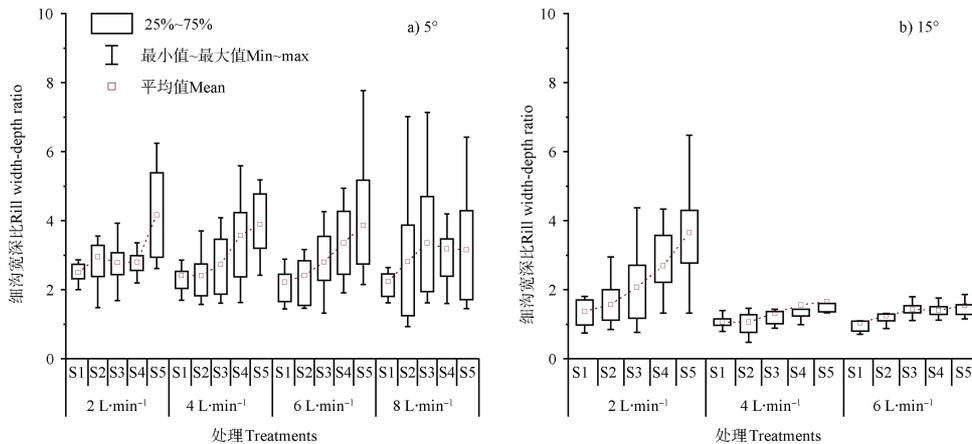


图 3 不同试验条件下细沟宽深比  
Fig. 3 Rill width-depth ratio relative to treatment



图 4 不同质地土壤坡面细沟断面形态

Fig. 4 Rill width-depth morphology of slope relative to different soil textures

表 2 坡面产沙特征与细沟形态参数的相关关系矩阵 ( $n=35$ )

Table 2 Correlation matrix between characteristics of slope sediment yield and rill morphological parameters

	平均沟深 Mean rill depth	平均沟宽 Mean rill width	断面宽深比 Rill width-depth ratio	土壤侵蚀速率 Soil erosion rate	累计产沙量 Sediment yield
平均沟深 Mean rill depth	1				
平均沟宽 Mean rill width	-0.016	1			
断面宽深比 Rill width-depth ratio	-0.795**	-0.666**	1		
土壤侵蚀速率 Soil erosion rate	0.943**	-0.347*	-0.865**	1	
累计产沙量 Sediment yield	0.954**	-0.157	-0.722**	0.940**	1

注：\* $P<0.05$ ，\*\* $P<0.01$  Note: \* $P<0.05$ ，\*\* $P<0.01$

蚀速率和坡面产沙量越大。坡面的侵蚀过程是一个径流能量耗散的过程<sup>[26]</sup>，细沟形态的改变、泥沙的输移及坡面产沙伴随着能量的耗散，在相同的流量下，狭窄细沟内形成的集中水流具有较大的径流能量，从而增强了径流的土壤剥蚀能力和搬运能力<sup>[24]</sup>。

### 2.3 水力学参数与土壤侵蚀速率的关系

土壤侵蚀速率是水力学参数与土壤参数的函数，深刻理解坡面侵蚀产沙对水动力学参数的响应关系是建立土壤侵蚀物理模型的基础。表 3 所示为土壤侵蚀相关参数与和水力学参数的相关关系。土壤侵蚀速率与坡度、水流剪切力、水流功率及单位水流功率呈极显著的相关关系 ( $P<0.01$ )，与单宽流量、流速、雷诺数、弗汝德数呈显著的相关关系 ( $P<0.01$ )，相关系数  $r$  从大到小依次为： $Pr > \omega > S > \tau > V > Fr > q$ ，表明在相同试验条件下单位水流功率对土壤侵蚀速率影响最大。坡度对坡面水力侵蚀具有重要影响，与土壤侵蚀速率关系密切 ( $r=0.812$ ， $P<0.01$ )，与前人的研究结果一致<sup>[11]</sup>。在本试验中，坡面侵蚀属于细沟侵蚀的范畴，坡度增加时，坡面

土体的稳定性下降，细沟沟壁坍塌频繁，导致产沙量剧增。雷诺数与弗汝德数是表征径流紊流程度的参数，两者可在一定程度上反映坡面的土壤侵蚀速率和坡面侵蚀形态特征<sup>[24]</sup>。“窄深式”细沟内径流湍急、紊流，流态趋向于紊流和急流的范畴，径流的土壤剥蚀能力和搬运能力较强；而“宽浅式”细沟内径流流态趋向于层流和缓流的范畴，土壤剥蚀能力和搬运能力较低。水流剪切力、水流功率、单位水流功率是坡度与流量的函数，是与土壤侵蚀速率密切相关的水力学参数，不同学者选用描述土壤侵蚀速率的参数存在分歧。在本研究中，单位水流功率是描述坡面土壤侵蚀速率的最佳水动力学参数 ( $r=0.911$ ， $P<0.01$ )。

### 2.4 建立水力学参数与土壤侵蚀速率的定量关系

在过去的几十年间，诸多学者对水力学参数与土壤侵蚀速率之间的关系进行了定量表述<sup>[8, 14, 29]</sup>。土壤侵蚀速率首先是简单水力变量的函数，研究发现基于坡度和单宽流量的幂函数可以很好地描述土壤侵蚀速率：

表 3 土壤侵蚀相关参数与水力学参数的相关关系

Table 3 Correlation between the relevant parameters of soil erosion and hydraulic parameters

<i>S</i>	<i>Q</i>	<i>q</i>	<i>V</i>	$\tau$	$\omega$	<i>Pr</i>	<i>Re</i>	<i>Fr</i>	<i>f</i>	<i>c<sub>s</sub></i>	<i>D<sub>r</sub></i>	
<i>S</i>	1											
<i>Q</i>	-0.223	1										
<i>q</i>	0.154	0.416*	1									
<i>V</i>	0.169	0.777**	0.770**	1								
$\tau$	0.835**	-0.199	0.559**	0.300	1							
$\omega$	0.775**	0.113	0.731**	0.595**	0.933**	1						
<i>Pr</i>	0.889**	0.101	0.430**	0.549**	0.802**	0.882**	1					
<i>Re</i>	0.292	0.371*	0.962**	0.752**	0.671**	0.821**	0.559**	1				
<i>Fr</i>	0.177	0.707**	0.181	0.718**	-0.074	0.215	0.475**	0.181	1			
<i>f</i>	0.632**	-0.729**	0.165	-0.452**	0.645**	0.369*	0.296	-0.004	-0.613**	1		
<i>c<sub>s</sub></i>	0.857**	0.007	0.205	0.390*	0.659**	0.685**	0.890**	0.281	0.485**	0.279	1	
<i>D<sub>r</sub></i>	0.812**	0.152	0.461**	0.580**	0.769**	0.845**	0.911**	0.553**	0.468**	0.249	0.915**	1

注: *S*: 坡度; *Q*: 流量; *q*: 单宽流量; *V*: 平均流速;  $\tau$ : 水流剪切力;  $\omega$ : 水流功率; *Pr*: 单位水流功率; *Re*: 雷诺数; *Fr*: 弗汝德数; *f*: 阻力系数; *c<sub>s</sub>*: 平均含沙量; *D<sub>r</sub>*: 土壤侵蚀速率; \**P*<0.05, \*\**P*<0.01 Note: *S*: Slope gradient; *Q*: Flow discharge; *q*: Unit width flow discharge; *V*: Mean flow velocity;  $\tau$ : Shear stress;  $\omega$ : Stream power; *Pr*: Unit stream power; *Re*: Reynold number; *Fr*: Froude number; *f*: Resistance coefficient; *c<sub>s</sub>*: Mean sediment content; *D<sub>r</sub>*: Soil erosion rate; \**P*<0.05, \*\**P*<0.01

$$D_r = 0.10q^{0.54}S^{2.59} \quad R^2 = 0.644, \text{ RMSE} = 0.421 \quad (11)$$

式 (11) 中, 坡度因子指数 (2.59) 大于单宽流量 (0.54), 表明坡度对土壤侵蚀速率的贡献大于流量; 决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.644, 方程的拟合程度良好, 坡度和单宽流量的函数可以在一定程度上较好地描述土壤侵蚀速率。根据表 3 中水力学参数与土壤侵蚀速率的相关性, 对单位水流功率 (*Pr*) 与土壤侵蚀速率的定量关系进行分析, 发现幂函数可以有效地描述两者的关系:

$$D_r = 49.96Pr^{2.07} \quad R^2 = 0.795, \text{ RMSE} = 0.325 \quad (12)$$

与式 (11) 相比, 式 (12) 对于土壤侵蚀速率具有更高的表达能力 ( $R^2 = 0.795$ ,  $\text{RMSE} = 0.325$ )。如图 5 所示, 单位水流功率与土壤侵蚀速率之间存在良好的拟合关系, 单位水流功率较小时, 式 (12) 的拟合效果最佳, 随着单位水流功率的增大, 拟合效果相对变差, 表明在水深较浅、流速较小、坡度较缓时, 式 (12) 对土壤侵蚀速率具有较为出色的预测能力, 其原因可能与紊流、急流状态下 (大坡度、

大流量) 坡面产沙过程频繁的波动性和突变性有关。单位水流功率是一个基于坡度和流量的综合性参数, 是一个受表面粗糙度影响的适用性参数<sup>[30]</sup>。对于坡面侵蚀而言, 尤其是细沟侵蚀, 与水深相比, 流速更易精确地获取, 因此在实际应用中使用单位水流功率描述土壤侵蚀速率优于水流剪切力和水流功率。

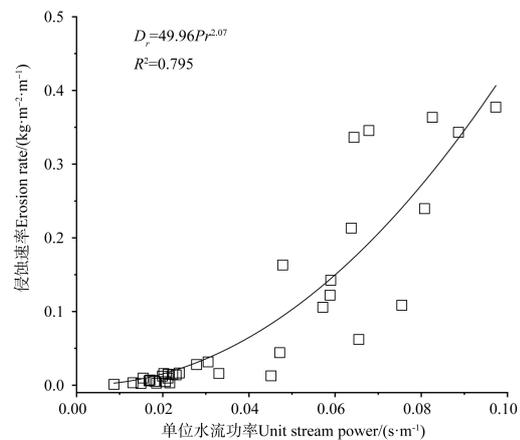


图 5 单位水流功率与土壤侵蚀速率的定量关系  
Fig. 5 Quantitative relationship between unit stream power and soil erosion rate

Wirtz 等<sup>[31]</sup>认为单独的水力学参数不足以用来预测土壤分离速率, 应考虑到土壤性质对细沟侵蚀过程的影响。Ali 等<sup>[32]</sup>在建立泥沙输移能力预测方程时引入了土壤的中值粒径  $D_{50}$  以表征土壤性质。Kinnell<sup>[33]</sup>指出分选良好的试验材料在坡面输移过程中受土壤黏聚力  $C$  的影响。由于土壤颗粒间黏聚力的阻力, 与非黏性土相比, 黏性土不易被径流剥离<sup>[7]</sup>。相比其他影响因素, 对土壤黏聚力影响最大的因子是土壤机械组成<sup>[34]</sup>。基于此, 本研究尝试在水力学参数与土壤侵蚀速率定量关系的基础上, 引入表征土壤性质的土壤黏聚力参与建立基于土壤性质与水力学参数的定量关系, 用于评估坡面的土壤侵蚀速率, 见式 (13)、式 (14):

$$D_r = 82.39q^{1.05}S^{2.56}C^{-0.82} R^2 = 0.682, \text{RMSE} = 0.392 \quad (13)$$

$$D_r = 165.22Pr^{2.36}C^{-0.44} R^2 = 0.816, \text{RMSE} = 0.303 \quad (14)$$

对比分析上述式 (11)~式 (14) 可知, 在引入土壤黏聚力后定量方程的拟合效果得到了提高, 对土壤侵蚀速率具有更好的解释能力。在方程中, 黏聚力的指数呈负数, 土壤黏聚力对土壤的侵蚀程度呈消极作用, 越黏重的土壤, 其抗蚀性越强。与应用单独的水力学参数发展的预测模型相比, 本研究考虑到了土壤性质对土壤侵蚀过程的定量影响, 在预测土壤侵蚀速率时方程的可靠性与适用性更强<sup>[11-12]</sup>。本研究旨在探讨更具实际意义的土壤侵蚀速率预测方程, 但限于试验工作量等因素, 试验中只选取了 5 种质地的土壤材料, 试验材料覆盖范围不足, 进一步研究需要考虑更多质地类型的土壤。

### 3 结 论

本研究在 2 个坡度 ( $5^\circ$ 、 $15^\circ$ ) 和 4 个流量 ( $2$ 、 $4$ 、 $6$ 、 $8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 条件下, 分析研究了 5 种质地的重塑土坡面的土壤侵蚀速率, 建立了水力学参数、土壤性质与土壤侵蚀速率的定量关系。研究得出以下主要结论: (1) 坡度和流量对土壤侵蚀速率有显著的积极影响, 相对而言, 坡度对土壤侵蚀速率的影响较大; 土壤侵蚀速率随着土壤质地的变化 (黏土至砂土) 呈现单峰状分布, 在 50% 含沙量时最大; (2) 细沟断面宽深比随着坡度、流量及土壤质地的变化表现出明显的规律性, 与土壤侵蚀速率之间具

有良好的相关关系, 在应用中可以一定程度地反映坡面的侵蚀程度; (3) 单位水流功率、水流功率、坡度、水流剪切力、流速、雷诺数及弗汝德数与土壤侵蚀速率具有显著的相关性, 其中, 单位水流功率是最适合描述土壤侵蚀速率的水力学参数; (4) 基于单位水流功率与土壤侵蚀速率的定量关系可以用幂函数表达, 在表达式中引入土壤黏聚力后, 可以得到更加精确、可靠的定量关系, 考虑到参数获取方式的简便, 在实际应用中具有较广的适应范围与现实价值。本研究为土壤侵蚀预测模型的发展提供了参考依据, 对工程堆积体、崩岗崩积堆等类土沙混合体的土壤侵蚀防治工作也具有指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] Lei T W, Zhang Q W, Yan L J, et al. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. *Geoderma*, 2008, 144 (3): 628—633
- [2] Pieri L, Bittelli M, Hanuskova M, et al. Characteristics of eroded sediments from soil under wheat and maize in the north italian apennines. *Geoderma*, 2009, 154 (1): 20—29
- [3] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455: 123—130
- [4] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展. *水科学进展*, 2001, 12 (3): 395—402  
Zhang G H. Advances in study of runoff detachment processes based on hydraulic (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2001, 12 (3): 395—402
- [5] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 1298—1304
- [6] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型. 北京: 科学出版社, 2009, 17—23  
Lei T W, Zhang Q W, Yan L J. Physical model of rill erosion. Beijing, Science Press, 2009, 17—23
- [7] Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. Predicting physical equations of soil detachment by simulated concentrated flow in ultisols (subtropical China). *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37 (6): 633—641
- [8] Wang Y, Cao L X, Fan J B, et al. Modelling soil detachment of different management practices in the red soil region of China. *Land Degradation & Development*, 2017, 28 (5): 1496—1505
- [9] 和继军, 宫辉力, 李小娟, 等. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响. *水科学进展*, 2014, 25 (1): 90—97  
He J J, Gong H L, Li X J, et al. Effects of rill

- development on runoff and sediment yielding processes (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 90—97
- [ 10 ] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1587—1593
- [ 11 ] Xiao H, Liu G, Liu P L, et al. Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes on the loess plateau of China. *Hydrological Processes*, 2017, 31(14): 2613—2621
- [ 12 ] Zhang Q W, Dong Y Q, Li F, et al. Quantifying detachment rate of eroding rill or ephemeral gully for wepp with flume experiments. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 2012—2019
- [ 13 ] Yu B. A unified framework for water erosion and deposition equations. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(1): 251—257
- [ 14 ] Zhang Q W, Lei T W, Zhao J. Estimation of the detachment rate in eroding rills in flume experiments using an REE tracing method. *Geoderma*, 2008, 147(1): 8—15
- [ 15 ] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 145—153
- Zhang L T, Gao Z L, Li Y H, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 145—153
- [ 16 ] 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
- [ 17 ] 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. *Earth Surface Processes & Landforms*, 1998, 23(6): 527—544
- [ 18 ] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 2007, 80(1): 75—109
- [ 19 ] Wei Y J, Wu X L, Cai C F. Splash erosion of clay-sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure. *Catena*, 2015, 135: 254—262
- [ 20 ] Li G, Abrahams A D. Controls of sediment transport capacity in laminar interrill flow on stone-covered surfaces. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 305—310
- [ 21 ] Rose C W, Hogarth W L, Ghadiri H, et al. Overland flow to and through a segment of uniform resistance. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(1): 134—150
- [ 22 ] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究. *土壤学报*, 2002, 39(6): 882—886
- Zhang G H, Liu B Y, Zhang K L. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on slopeland (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 882—886
- [ 23 ] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素. *土壤学报*, 2013, 50(2): 281—288
- Chen J J, Shun L Y, Cai C F, et al. Rill erosion on different soil slopes and their affecting factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 281—288
- [ 24 ] 倪世民, 冯舒悦, 王军光, 等. 不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 149—156
- Ni S M, Feng S Y, Wang J G, et al. Relationship between rill erosion morphology and hydraulic characteristics and sediment yield on artificial soils slope with different textures (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 149—156
- [ 25 ] Meyer L D, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1969, 12: 754—758, 762
- [ 26 ] 张攀, 姚文艺, 唐洪武, 等. 模拟降雨条件下坡面细沟形态演变与量化方法. *水科学进展*, 2015, 26(1): 51—58
- Zhang P, Yao W Y, Tang H W, et al. Evolution and quantization methods of rill morphology on the slope under rainfall simulation (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 51—58
- [ 27 ] 和继军, 吕焯, 官辉力, 等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究. *水利学报*, 2013, 44(4): 398—405
- He J J, Lü Y, Gong H L, et al. Experimental study on rill erosion characteristics and its runoff and sediment yield process (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(4): 398—405
- [ 28 ] 和继军, 孙莉英, 蔡强国, 等. 坡面细沟发育特征及其对流速分布的影响. *土壤学报*, 2013, 50(5): 862—870
- He J J, Sun L Y, Cai Q G, et al. Characteristics of rill development on slope and theirs effects on flow velocity distribution (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 862—870
- [ 29 ] Zhang G H, Tang M K, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the loess plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(9): 1302—1309
- [ 30 ] Yang C T, Stall J B. Unit stream power for sediment transport in natural rivers. *Illinois State Water Survey*,

- 1974
- [ 31 ] Wirtz S, Seeger M, Zell A, et al. Applicability of different hydraulic parameters to describe soil detachment in eroding rills. *PLoS One*, 2013, 8 ( 5 ): e64861
- [ 32 ] 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 ( 2 ): 591—601
- [ 33 ] Kinnell P I A. Simulations demonstrating interaction between coarse and fine sediment loads in rain-impacted flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31 ( 3 ): 355—367
- [ 34 ] 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响. *农业工程学报*, 2006, 22 ( 3 ): 40—45
- Wang Y Q, Wang Y J, Zhang H J, et al. Impacts of soil structure on shear-resistance of soil under different land uses in Jinyun Mountain of Chongqing City ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 ( 3 ): 40—45

## Quantitative Relationship between Hydraulics Parameters and Soil Erosion Rate on Remolded Soil Slopes with Different Textures

NI Shimin ZHANG Deqian FENG Shuyue WANG Junguang<sup>†</sup> CAI Chongfa

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

**Abstract** 【Objective】Water erosion is one of the factors driving land degradation, water non-point source pollution and soil erosion, which involves a complex processes that include soil detachment, sediment transport and deposition owing to the interaction of raindrops and overland runoff. Soil detachment refers to the dislodging of soil particles from the soil surface triggered by water flow, and soil detachment rate (or soil erosion rate at erodible beds) is a key parameter in process-based erosion models. However, the study on the pattern of soil erosion rate among different texture soils is still unclear. 【Method】Therefore, an indoor experiment of running overland flow on erodible beds with remoulded soils of different textures was conducted. Thirty five combinations included 2 slopes (5° and 15°), 4 discharges (2, 4, 6 and 8 L·min<sup>-1</sup>) and 5 types of remoulded soil (0, 30%, 50%, 70% and 100% in sand contents) were carried out on a steel flume (3 m long, 1 m wide and 0.35 m high) adjustable in slope gradient. The five types of remoulded soil were prepared by mixing red soil and normal engineering sand at different mass fraction and were labeled as S1, S2, S3, S4 and S5 treatment, respectively. Those texture were silty clay, clay, sandy clay, sandy loam and sandy soil from S1 to S5, respectively. The prepared soil was packed layer by layer (5 cm depth per layer) in the flume to ensure the soil uniform in bulk density (1.35 g·cm<sup>-3</sup>). The packed flume was pre-wetted (30 mm·h<sup>-1</sup>) with a rainfall simulator to make the soil moisture saturation. When the moisture content in the soil reduced to 30%, the test started, and ended 15 minutes after surface runoff was initiated. During the test, flow surface velocity was measured with the dye tracing method (using potassium permanganate), and flow width, mean rill depth and mean rill width were measured by using a steel ruler at 20 cm intervals along the tick marks along the edge of the flume (amount to 15 sections). Runoff volume and sediment yield were measured with plastic bottles (at 30 s intervals) and plastic buckets (at 1 min intervals) at the outlet of the flume. 【Result】Results show: (1) Slope gradient and flow discharge were the two basic factors affecting soil erosion rate, both show a close relationship, but the former as more significant. Besides, soil texture had a significant effect on the soil erosion rate, making the latter appear in “monomodal” distribution pattern in the same test condition, with the peak being the maximum in S3 treatment (sandy clay, 50% in sand content); (2) The mean rill depth and rill cross-section width-depth ratio represented obvious regularity with the variations of slope gradient, flow discharge and soil texture. Furthermore, soil erosion rate closely correlated with mean rill depth and the rill cross-section width-depth ratio ( $r=0.943$  and  $-0.865$ ,  $P<0.01$ , respectively), which could be used as indicators of slope erosion and sediment yield; (3) Slope gradient, flow shear stress, stream power and unit stream power were all remarkably related to soil erosion rate, especially the unit stream power was the best hydraulic parameter to describe soil erosion rate ( $r=-0.911$ ,  $P<0.01$ ), and their relationship can be well described quantitatively with a power function ( $D_r=49.96Pr^{2.07}$ ,

$R^2=0.795$ ); and (4) Considering the effect of soil properties on slope erosion, soil cohesion was introduced into quantitating the relationship between unit stream power and soil erosion rate ( $D_r = 165.22Pr^{2.36}C^{-0.44}$ ,  $R^2=0.816$ ), so as to make the quantitation more reliable. The new equation based on soil cohesion make the tests more dependable in predicting soil erosion rate regardless of soil texture. 【Conclusion】 All the above described findings show that soil erosion on slopes varies regularly with soil texture, and unit stream power and soil cohesion are proper parameters in quantifying soil erosion patterns. Since acquisition of the parameters in the equation is relatively simple, the equation has a wider adaptation range and a higher reference value in practical applications.

**Key words** Soil erosion rate; Soil texture; Hydraulics parameter; Soil cohesion

(责任编辑: 檀满枝)