# 土壤侵蚀物理模型中紫色土细沟侵蚀参数研究

王爱娟1,符素华2,3,朱小立2

(1.水利部水土保持监测中心,北京 100055;2.北京师范大学地理学与遥感科学学院,北京 100875;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,陕西 杨凌 712100)

摘要:以长江中上游典型侵蚀性土壤紫色土为研究对象,采用变坡限定性细沟土槽,研究不同流量、坡度和 沟长情况下,紫色土细沟侵蚀特征,并量化了细沟侵蚀参数。结果表明:细沟侵蚀受水流水力特征、土壤性 质和坡面影响,随着水流含沙量的增大,细沟侵蚀速率呈现减小趋势;流量越大,坡度越陡,细沟水流的剥 蚀率越大,造成细沟侵蚀速率也越大。在5 L/min的小流量下,细沟侵蚀速率受剥蚀率限制与含沙量没有 出现线性关系,15,25 L/min流量下,细沟侵蚀速率与含沙量呈线性相关。侵蚀速率在细沟开始处最大,随 沟长的增大,水流能量消耗于挟带泥沙而迅速减小,相关性分析得到侵蚀速率与沟长呈指数递减,相关系 数 R<sup>2</sup> 变化于 0.45~0.98 之间。通过回归分析得到试验条件下,紫色土细沟土壤可蚀性均值为 0.005 3 s/ m,临界剪切力均值为 2.92 Pa。研究结果对于坡面土壤侵蚀物理模型的建立和推广应用提供数据支撑,为 紫色土坡面侵蚀研究提供借鉴。

关键词:紫色土;细沟;水流挟沙力;土壤可蚀性;临界剪切力 中图分类号:TV133;TV135.2 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2016)06-0096-04 DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.017

### Study on Rill Erosion Parameters of Purple Soil in the Physical Erosion Model

WANG Aijuan<sup>1</sup>, FU Suhua<sup>2,3</sup>, ZHU Xiaoli<sup>2</sup>

Center of Soil and Water Conservation Monitoring, Ministry of Water Resources, Beijing 100055;
School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875;
State Key Laboratory

of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: A series of flume experiments were conducted under the conditions of different runoff discharge, slope gradient and slope length. The Purple soil with a clay texture is a typical soil in the upper reaches of the Yangtze river. Flumes with the size of 30 cm width and 12 m length were used. Eleven slope lengths, i. e. 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 9 m and 10 m, were used. The flume was divided into 3 rills and the width of each rill was 10 cm. Three slope gradients, i. e. 5°, 15° and 23° and three flow discharges with 5 L/min, 15 L/min, and 25 L/min were used in the experiments. All experiments were repeated three times and there were 297 test sessions in total. The results showed that rill erosion was affected by flow hydraulic characteristics, soil properties and slope characteristics, with the increase of flow sediment concentration, the rill erosion rate showed a trend of decrease. The greater the flow rate and slope gradient were, the bigger rill flow detachment and the rill erosion rate were. Under the condition of 5 L/min of small flow discharge, rill erosion rate was restricted by detachment rate and had no strict linear relationship with sediment concentration, but under conditions of 15 L/min, 25 L/min, rill erosion rate showed a linear correlation with sediment concentration. At the beginning of the rill, the rill erosion rate was the highest, with the increases of rill length, the flow energy consumption for sediment transport decreased, so sediment detachment decreased rapidly. The rill erosion rate and the rill length had an exponentially decreasing relationship, as shown by the correlation analysis, and the correlation coefficient  $R^2$  varied between 0.45 and 0.98. By regression analysis, the average purple soil erodibility was 0.005 3 s/m, and the average critical shear stress was 2. 92 Pa under the experimental conditions. The results provide data support for the establishment and application of distributed physical model and serve as a reference for further research on slope soil erosion of purple soil.

收稿日期:2016-06-28

资助项目:国家自然科学基金项目(41101260)

**第一作者:**王爱娟(1981—),女,高工,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wang-ai-juan@163.com

通信作者:符素华(1973一),女,教授,博士,主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail:suhua@bnu.edu.cn

Keywords: purple soil; rill; sediment carrying capacity; soil erodibility; critical shear stress

坡面侵蚀分为细沟侵蚀和细沟间侵蚀,由坡面上 聚集的股流引起的土壤分离和搬运的侵蚀称为细沟 侵蚀。细沟侵蚀参数研究对于量化坡面侵蚀,研究坡 耕地土壤侵蚀防治,提高农业生产水平具有非常重要 的作用<sup>[1]</sup>。被广泛应用的美国土壤侵蚀机理模型 WEPP、欧洲土壤侵蚀模型 EUROSEM 以及 LISEM 模型均将坡面侵蚀分为细沟侵蚀和细沟间侵蚀进行 量化[2]。细沟侵蚀参数主要包括细沟土壤可蚀性、土 壤临界剪切力和水流挟沙力[3]。围绕细沟侵蚀特征、 侵蚀参数量化和其影响因素,国内外学者开展了大量 的研究<sup>[4]</sup>。Polyakov 等<sup>[5]</sup>采用放水冲刷法研究细沟 在侵蚀和沉积两种状态不同沟长情况下的输沙率,研 究发现含沙量在沟长为8m时达到稳定,在8m坡 长时,沉积状态和侵蚀状态的输沙率分别为 71 g/L 和 31 g/L,并且侵蚀状态下没有达到水流挟沙力; Merten 等<sup>[6]</sup>研究指出土壤分离率和沉积量的减少与 水流含沙量的增加呈线性关系,土壤表面覆盖泥沙较 水流紊动强度对土壤分离率的减少影响更大; Léonard 等<sup>[7]</sup>研究指出临界剪切力与土壤组成、颗粒 结构及土壤紧密程度相关的结论具有局限性,认为临 界剪切力会随时间不断发生变化,土壤性质在短时间 内变化很小;Nouwakpo 等<sup>[8]</sup>研究认为侵蚀参数除了 土壤可蚀性、临界剪切力外,水力梯度增大也会造成 细沟土壤侵蚀的增大;Lei 等[9-10] 采用限定性细沟研 究不同沟长不同流量情况下土壤临界剪切力、可蚀性 以及细沟分离率,研究指出在试验坡度范围内土壤可 蚀性没有明显变化而临界剪切力随着坡度增大有轻 微增大,黄土细沟土壤可蚀性值为(0.3211±0.001) s/m。雷廷武等[11-12] 以粉壤土为研究对象,研究细沟 剥蚀率与含沙量呈线性相关,与沟长的变化显著相 关,呈指数递减;并通过细沟剥蚀率与细沟长度的函 数关系,提出剥蚀率含沙量和沟长变化的函数关系; 张光辉等[13-14]研究指出黄土土壤分离率与流量和坡 度成幂函数相关,水流功率和土壤分离速率的关系最 为密切,挟沙力受流量和坡度影响,挟沙力受水流剪 切力和水流功率影响;丁文峰等[15]研究红壤和紫色 土的侵蚀特征指出在相同坡度条件下,剥蚀率随放水 流量的增大而增大;相同流量情况下,剥蚀率呈现先 增大后减小最后趋于稳定的趋势,流量越大达到峰值 所需的时间越短;雷俊山等[16]通过室内放水冲刷试 验得到径流剪切产沙率和单位面积径流剪切力呈显 著的正相关关系,土壤被分离的临界剪切力为 0.258 Pa。坡面粗糙度和进入坡面流的泥沙粒径会消耗水 流能量导致水流挟沙力减小,不同的土壤类型粒径组

成差异很大,所以不同土壤的水流挟沙力不同。

总结已有的研究发现对于粉壤土和砂壤土的研 究较多,而粘壤土的研究较少。影响土壤侵蚀参数的 因素除了水力参数、地形参数以外,土壤参数是非常 重要的因素。本研究以长江中上游典型侵蚀性土壤 紫色土为研究对象,在限定性细沟的小区上开展细沟 侵蚀参数研究,采用不同沟长不同流量和坡度研究细 沟侵蚀参数明确区分分离率和输移率,为细沟土壤可 蚀性和临界剪切力的确定提供科学依据,细沟侵蚀参 数的确定为物理机制土壤侵蚀模型提供数据支持,便 于模型的推广应用,为土壤侵蚀物理模型的发展提供 参数支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验土槽由钢板制成,长12 m,宽30 cm,深50 cm。用隔板将土槽隔成3个10 cm宽的细沟。隔板 边壁粘贴了供试土壤以保持相同的粗糙度。供水设 备采用定水头装置,用流量计控制流量,将水放入水 头恒定的水槽,通过水管均匀注水,水管出水口布设 均匀小孔,并用纱布缠绕出水口来保证水流均匀,水 槽注满后以恒定流量顺坡而下。

### 1.2 供试土壤及填土方法

试验土壤为紫色土,2014 年 4 月取自四川南充。母 岩为侏罗系遂宁组岩层。土壤粘粒、粉粒、砂粒的含量 分别为 30.85%,22.82%和 46.33%,有机质含量为 4.17 g/kg。填土前,将试验土壤过 5 mm 筛,填入土槽,边填 边压实,填土厚度为 30 cm,容重控制为 1.3 g/cm<sup>3</sup>。

#### 1.3 试验方法

根据四川南充气象站 1961—2000 年的次降雨资料,分析得到不同重现期下雨量产生的单宽流量,结合已有的研究拟定试验流量为 5,15,25 L/min,试验 坡度根据坡耕地坡度特征结合试验条件拟定为 5°, 15°和 23°,沟长设为 0.5,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 m 等 11 个级别。每场试验完成之后,将土槽中剩余土 壤挖出,重新填入筛好的土,控制容重和填土表面的 平整度。所有试验重复 3 次,共试验场次 297 次。

装好土后,将土槽水平放置,并放无侵蚀水流使 土壤充分饱和 24 h。试验时将土槽坡度调节为试验 坡度。试验开始前测定水温,调节流量阀门至设计流 量。在细沟表面先放上同样宽度的粘有供试土壤的 铁皮,使其糙度与细沟表面糙度尽可能相近,放水测 定清水流速。之后不同沟长试验,取掉相应场次沟长 内的粘有供试土壤的铁皮开始正式试验,比如试验沟 长为 0.5 m 时,0.5~10 m 沟长范围内土壤受粘有供 试土壤的铁皮覆盖不受冲刷,只冲刷 0.5 m 以下部 分。试验开始放水时计时,水槽出口有水流出时也记 录时间,接第一个土样,并记录采样时间,连续接 3 个 土样后停止放水,记录水流结束时间。试验过程中采 用高锰酸钾染色剂示踪法测定浑水流速,2 m 以上的 沟长时只测定距出口 2 m 的流速,2 m 以下的沟长试 验时测定实际沟长的浑水流速,考虑到染色剂法测得 的是径流表面流速,观测的流速数据乘以 0.7 作为整 个断面的径流流速<sup>[17]</sup>。试验结束后采用测针法和量 测法间隔 20 cm 测定细沟的形态、拍摄照片,测定土 样的体积,用烘干法获取含沙量数据。

### 2 结果与分析

#### 2.1 细沟侵蚀速率与含沙量的关系

依据不同流量、不同坡度细沟侵蚀速率的变化 (图 1)可以看出,随着水流含沙量的增大,细沟侵蚀 速率呈现减小趋势,且流量越大,细沟侵蚀速率越大, 坡度越陡,细沟侵蚀速率也越大。水流速度与坡度和 流量呈正比,坡度和流量决定了水流挟沙力,对细沟侵 蚀速率产生影响。该结果与雷廷武等<sup>[18]</sup>的研究结果 一致,但是不同的是,3种试验坡度下紫色土细沟侵蚀 速率与含沙量在 15,25 L/min 的流量下呈线性递减的 关系,相关系数 R<sup>2</sup> 均值为 0.75。这是因为水流顺坡 而下时,一部分能量用于侵蚀土壤,一部分输沙。随 着含沙量的增加,输沙所消耗的能量增大,侵蚀土壤 的能力减小,甚至出现沉积现象。因此细沟侵蚀速率 随含沙量增加而减小。当流量为 5 L/min 时线性递 减关系不明显,由于紫色土粘性较大,此时水流挟沙 力并不是限制条件,细沟分离速率是水流含沙量的限 制因素,致使侵蚀速率随含沙量的变化不明显。

#### 2.2 细沟侵蚀速率与沟长的关系

坡面土壤侵蚀表现为径流对土壤的剥离、搬运和 沉积过程的相互转化和平衡。在给定坡度和流量条 件下,可以得到含沙量与细沟长度的对应关系。一般 认为,在恒定水流冲刷情况下,随着水流顺坡而下,水 流含沙量逐渐增加,含沙量逐渐趋于稳定,侵蚀速率 逐步趋于0,当含沙量随细沟长度不变时的含沙量即 为水流挟沙力。从图2可以看出,细沟侵蚀速率总体 呈现随沟长的增大而减小,开始时减小很快,随着沟 长增大,减小的越来越慢,即在沟顶引入清水时侵蚀 速率最大,沟长增加,径流含沙量增加,侵蚀速率减 小。这是因为随着沟长的增加,径流输移泥沙的能量 损耗较大,而用于剥蚀土壤的能量减小,导致侵蚀速 率随沟长出现减小的趋势。

受土壤质地、流量和坡度的影响,出现细沟长度已 达到试验条件下的水槽长度,而含沙量还未稳定,此时 需对试验数据进行回归分析(表 1)得到侵蚀速率随坡长



| 坡度/ | 流量/                  | 拟合                         | 相关系数  |
|-----|----------------------|----------------------------|-------|
| (°) | $(m^3 \cdot s^{-1})$ | 关系式                        | $R^2$ |
| 5   | 0.9                  | $D_r = 0.017 e^{-0.348x}$  | 0.92  |
|     | 1.5                  | $D_r = 0.0296 e^{-0.405x}$ | 0.98  |
| 15  | 0.9                  | $D_r = 0.044 e^{-0.245x}$  | 0.65  |
|     | 1.5                  | $D_r = 0.0436 e^{-0.18x}$  | 0.58  |
| 23  | 0.9                  | $D_r = 0.0617 e^{-0.406x}$ | 0.45  |
|     | 1.5                  | $D_r = 0.1005 e^{-0.125x}$ | 0.75  |

### 2.3 细沟土壤可蚀性和临界抗剪切力计算

美国水蚀预报模型 WEPP 坡面泥沙输移方程中 细沟侵蚀计算为<sup>[4]</sup>:

$$D_r = D_c \left( 1 - \frac{G}{TC} \right) \tag{2}$$

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \tag{3}$$

式中: $D_r$ 为细沟侵蚀速率(kg/(m<sup>2</sup> • s));TC为细沟 水流挟沙力(kg/(m • s));G为细沟水流输沙率(kg/ (m • s)); $D_c$ 为细沟水流的分离能力(kg/(m<sup>2</sup> • s));  $\tau_c$ 、 $\tau$ 分别为临界剪切力和细沟水流剪切力(Pa); $K_r$ 为细沟土壤可蚀性(s/m)。



图 2 不同坡度和流量下细沟侵蚀速率随沟长的变化

由公式(3)可以看出,水流分离能力与剪切力成线 性关系,直线的斜率即为细沟土壤可蚀性 K<sub>r</sub>,当水流 分离能力为零时的水流剪切力即为临界剪切力。计算 水流剪切力,须知道细沟的宽度、流速和坡度等,计算 土壤可蚀性和土壤临界剪切力时,为了尽可能地减少 误差,采用限定性细沟和稳定水流。当细沟长度趋于 0,水流剥蚀率最大时,细沟侵蚀速率公式简化为:

 $D_r = D_c = K_r(\tau - \tau_c) \tag{4}$ 

根据试验条件下的细沟水流特征和细沟宽等计 算得到水流剪切力和细沟侵蚀速率得到图 3,通过回 归分析得到不同坡度情况下细沟侵蚀土壤可蚀性值 和土壤临界剪切力见表 2。



表 2 不同坡度下的细沟土壤可蚀性和临界剪切力

| 坡度/<br>(°) | $K_r/$<br>(s • m <sup>-1</sup> ) | τ <sub>c</sub> /<br>Pa | п | 回归方程                 | $R^2$ |
|------------|----------------------------------|------------------------|---|----------------------|-------|
| 5          | 0.0057                           | 1.30                   | 9 | y = 0.0057x - 0.0074 | 0.75  |
| 15         | 0.0062                           | 3.56                   | 9 | y=0.0062x-0.0221     | 0.75  |
| 23         | 0.0041                           | 3.90                   | 9 | y=0.0041x-0.0160     | 0.88  |

土壤可蚀性主要受土壤自身的性质包括土壤粒径 组成、有机质、渗透性、容重等影响外,扰动后的紧实情 况、土壤含水量等也会对其产生影响,土壤可蚀性作为 土壤的一种性质,对于同一种土壤的可蚀性值应该是 相对不变的。不同坡度的水流冲刷试验数据结果显示 (表 2),不同坡度不同的水动力条件下,土壤可蚀性值 较接近,所有试验得到的紫色土土壤可蚀性均值为 0.005 3 s/m,土壤可蚀性值并不随坡度的增大而增 大。试验结果表明土壤抗临界剪切力随着坡度的增大 而增大,所有试验得到的临界剪切力均值为 2.92 Pa。

### 3 结论

细沟侵蚀受水流水力特征、土壤性质和坡面特征 等影响,细沟水流能量一部分用于挟带泥沙,一部分 用于侵蚀土壤,随着水流含沙量的增大,水流挟沙力 大而剥蚀率小,细沟侵蚀速率呈现减小趋势;流量越 大,坡度越陡,细沟水流的剥蚀率越大,造成细沟侵蚀 速率也越大。

紫色土因质地粘重,在 5 L/min 的小流量情况 下,细沟侵蚀速率受剥蚀率限制与含沙量没有出现严 格的线性关系,15,25 L/min 情况下细沟侵蚀速率与 含沙量呈线性相关。

侵蚀速率在细沟开始处最大,随沟长的增大,水 流能量消耗于挟带泥沙而迅速减小,相关性分析得到 侵蚀速率与沟长呈指数递减,相关系数 R<sup>2</sup> 变化于 0.45~0.98之间。

根据细沟侵蚀速率与土壤可蚀性和剪切力的线性 关系,回归分析得到试验条件下,紫色土细沟土壤可蚀 性均值为 0.005 3 s/m,临界剪切力均值为 2.92 Pa。

### 参考文献:

- [1] 胡玉法.长江流域坡耕地治理探讨[J].人民长江,2009, 40(8):72-75.
- [2] Flanagan D C, Gilley J E, Franti T G. Water erosion prediction project (WEPP): Development history, model capabilities and future enhancements[J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(5):1603-1612.
- [3] Liu Q Q, Chen J C, Li J C, et al. A non-equilibrium sediment transport model for rill erosion [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(8):1074-1084.
- [4] 张科利,张竹梅. 坡面侵蚀过程中细沟水流动力学参数 估算探讨[J]. 地理科学,2000,20(4):326-330.