

# 细沟侵蚀动力过程极限沟长试验研究

张晴雯<sup>1</sup>, 雷廷武<sup>1,2</sup>, 潘英华<sup>1</sup>, 夏卫生<sup>1</sup>, 刘纪根<sup>1</sup>

(1. 中国科学院、水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院)

**摘要:** 由细沟产生的野外动力条件, 设计了室内细沟侵蚀模拟冲刷实验。从能量角度, 分析了不同动力条件下侵蚀产沙量随沟长的变化规律。采用黄土高原黄绵土, 在实验室内用水槽进行了 5 种坡度、3 种流量下不同沟长时的细沟土壤侵蚀产沙的模拟侵蚀试验, 测量沟长为 0.5 ~ 8 m。提出了由细沟侵蚀产沙随沟长变化函数关系的回归结果, 在给定误差限下, 估计水流含沙量达到极限值——水流输沙能力的细沟长度的计算方法。并据此方法, 求得了不同坡度、流量条件下细沟侵蚀产沙达到极限值的细沟长度, 且在不同水动力条件下的  $R^2$  均大于 0.81。

**关键词:** 细沟侵蚀; 侵蚀产沙量; 极限沟长; 水槽试验

中图分类号: S 157.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2002)02-0032-04

特殊的沉积、成壤和成岩过程造就了黄土颗粒的点棱(侧斜)接触支架式多孔结构, 决定了其抗径流冲刷能力微弱的固有特性, 而黄土高原大陆性季风气候带来的多暴雨的降水条件使得黄土区坡地极易受到冲刷, 发生细沟侵蚀, 而细沟径流冲刷带来的直观结果就是坡面产沙量的增加。只有通过对外部现象的分析研究, 才可能认识侵蚀过程的内在实质。因此, 深入揭示坡面细沟侵蚀过程的演变机理, 就必须搞清楚坡面侵蚀产沙的发生机理、影响因素和作用结果。

细沟径流是一种运动的水流, 它的基本特征在于以径流依托对象为参照物, 处于一种运动状态, 有一定的速度和能量, 当其在土壤表面运动时, 必将在水流方向上产生一种动力, 其结果必然对其作用对象, 也就是径流的发生对象, 或者说下垫面有一定的力学作用。作用的结果必然产生能量交换, 消耗其能量, 而这种能量将转化为其它形式, 在其作用过程中体现出来。根据雷廷武<sup>[6]</sup>, Elliot<sup>[11]</sup>等, 细沟径流所具有的能量用来剥蚀土壤和输移泥沙, 而在一定的坡度和流量时, 细沟中径流能量在给定的时段内是有限的。随着径流的分散和冲刷作用, 径流从细沟剥蚀的泥沙量不断增加, 用于搬运径流携带泥沙所需要的能量就会越大, 则用于剥蚀新土粒的能量就会相应减小, 细沟中泥沙含量的增加量也就会因此减少。这样, 从能量分析的角度, 对特定的土壤类型和径流量, 径流所携带的泥沙量是有限的, 可能存在最大

值。此最大值必将与一定的沟长相对应。

由田间细沟产生的动力条件, 设计了室内细沟侵蚀模拟冲刷实验。从动力学的角度看, 影响细沟侵蚀产沙量的动力因子, 主要是径流强度, 坡面径流运动速度, 水力比降和沟长。在实验设计时, 主要考虑了径流强度(本实验主要考虑入口径流量)和坡度对侵蚀产沙量的影响。本次试验在不同坡度和流量下, 通过改变沟长, 量测径流的水力学特征, 对结果进行分析, 找出了产沙量随沟长变化的函数关系, 并估计出了水流含沙量达到极限值的沟长, 为细沟侵蚀模拟试验、模型建立及侵蚀预报提供参考依据。

## 1 试验材料及试验设计

在室内进行径流水槽侵蚀试验, 设计水槽长 8 m, 宽 1 m。每 10 cm 置一隔板将水槽分为  $8 \times 0.1 \text{ m}^2$  的细沟。隔板高 33 cm, 长 8 m, 固定在水槽中。为尽量减小边壁对侵蚀过程的影响, 对水槽隔板进行了处理: 在隔板上粘上与试验所用土壤相同的土粒, 使其尽可能接近试验土壤同样的糙度。先在试验槽底部填入 30 cm 厚的粘黄土( $< 0.01 \text{ mm}$  占 56.05%), 边装填边压实, 使其紧实程度接近犁底层, 然后再填入试验所用的土。本试验采用安塞的黄绵土。试验前将土风干, 测其机械组成。装填前将土过 10 mm 筛, 并测其容重。然后将土均匀装入土槽, 填入土容重控制在  $1.1 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ , 厚度约为 20 cm。试验槽四周边部尽量压实, 装土时注意一定的地表糙度, 并在隔板处略有凸起, 以免水流向边壁(隔板)集中侵蚀。试验前将土壤充分饱和, 并放置 24 h 以上再开始试验, 从而保证均匀一致的初始含水率条件及部分消除填装不均匀的影响。

水槽可调节到试验所需要的坡度, 试验坡度为

收稿日期: 2001-05-31 修订日期: 2001-12-10

基金项目: 中国科学院引进国外杰出人才基金项目资助(编号 982602), 教育部项目(重大 01-10)

作者简介: 张晴雯, 博士生, 陕西杨凌 中国科学院、水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100

5°; 10°; 15°; 20°; 25°。试验由全沟长 8 m 开始放水, 然后入水口移至下游段距出口 0.5 m 沟长处第二次放水, 入水口进一步逐渐上移至距出口 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 m 沟长的不同坡段处逐次进行试验。由自来水管或水箱加水泵供水, 采用阀门控制流量, 在不同坡段用水表计时标定流量和确定流量大小。试验采用的控制流量为 0.12, 0.24, 0.48 m<sup>3</sup>/h。试验设 3 次重复, 3 个水槽流量分别标定。为了使入水管的水均匀注入, 在水管出水口采用 9 cm 长的出水端口, 其上布有许多均匀的小孔, 并用纱布均匀缠绕该出水端口, 保证水流在细沟内均匀分布, 并且使其对出水口处土壤的侵蚀力降到尽可能小。在水管接触水槽内土壤的地方, 用纱布衬垫, 以消减水流的局部扰动。径流稳定时, 记录径流通过一定沟长的时间, 用以计算流速。流速测量用有色试剂进行。做一个出水口为 10 cm 的集水槽, 同时做一个每次可采集相邻 3 个出水口泥沙样品的采样器, 用于同时采集 3 个重复的样品。径流稳定后, 在每个出水口处收集泥沙样 3 个。对采集的泥沙样量测体积后, 烘干称重, 用于确定泥沙含量(kg/L 或 g/mL)。试验结束

后, 用直尺在不同沟长部位量测细沟宽度和深度。将一定坡度、流量及沟长下重复试验的土样混合成一个样品, 测其土壤颗粒分布。试验设计共有 135 个处理, 每一个处理有 3 个重复, 总试验次数为 405 次。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 侵蚀产沙量与沟长的关系

经分析试验结果, 得到了不同坡度和流量下细沟侵蚀产沙量与沟长的关系(见图 1a, 5°; b, 10°; c, 15°; d, 20°; e, 25° 所示)。由图 1a 至 e 不同坡度下产沙量在给定流量时随坡长的变化趋势可以看出, 尽管坡度和流量不同, 侵蚀产沙量随沟长的变化却表现出了相似的趋势: 一定坡度和流量下, 产沙量随着沟长的增加而增加, 但增加的幅度越来越小, 且趋近一个稳定值。且坡度越大, 这种趋于稳定的趋势越快, 同样同一坡度下, 流量越大, 这种趋于稳定的趋势也越快。也就是说, 产沙量随沟长的变化并不因特定坡度下流量的变化受到明显的影响, 但含沙量达到饱和所需要的坡长随着坡度的增加明显变短。

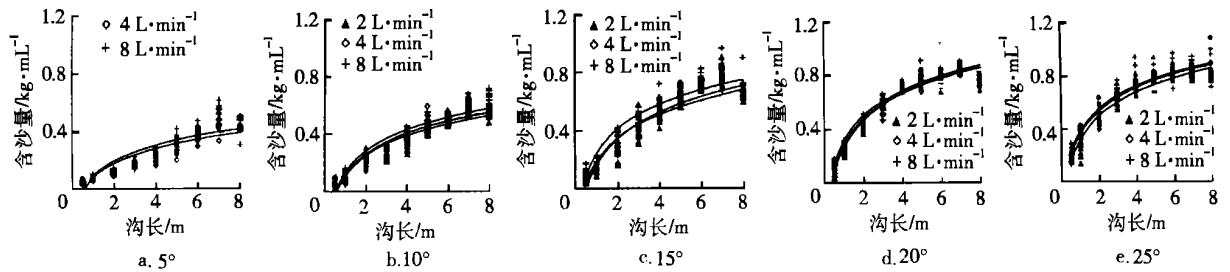


图 1 不同坡度及流量时产沙量沿沟长的变化

Fig. 1 Sediment concentration changes along slope lengths under different slopes and flow rates

由不同坡度下的侵蚀产沙量可以看出, 坡度和流量是影响侵蚀产沙量的主要因素。坡度较流量对产沙量的影响要大, 不同坡度时产沙量不同, 产沙量随坡度的增加而增加。在同一坡度下, 流量不同产沙量也不同, 产沙量随流量的增加而增加, 只是这种增加没有随坡度的变化那么明显。这主要是因为在下垫面相同的情况下, 径流所具有的能量是径流量和流速的函数, 而流速的大小主要决定于径流深度和地面坡度。坡面土壤侵蚀的动力是径流, 阻力为侵蚀体与坡面之间的摩擦力以及土壤本身对径流冲刷的抵抗力。径流的作用表现在对土壤表层的土粒的分散和冲刷作用, 引起表层土壤结构的破坏及移动。坡度的存在使得坡面土体的受力作用发生了变化, 随着坡度的增加, 土壤颗粒固有重力将更有利于分散土粒向下坡移动。同时坡度的增加, 降低了土壤的稳定性, 土壤抗蚀能力减弱。坡度还影响着径流入渗及

水流的速度, 随着坡度的增加, 入渗减少, 地表径流增加, 所以坡度直接影响径流的冲刷能力。即使到超渗产流时, 与水平面相比坡面水层流速大, 侵蚀物质能被及时带走, 利于下层土的冲刷, 侵蚀量也会随之增加。

### 2.2 极限沟长估算

由图 1a 至 e 不同坡度下产沙量在给定流量下随坡长的变化趋势可以看出, 一定坡度和流量下, 产沙量随着沟长的增加而增加, 但增加的速率越来越小, 且趋近一个稳定值。由不同坡度下产沙量随沟长的变化的趋势图可以看出, 产沙量随沟长的变化并不因特定坡度下流量的变化受到明显的影响, 但含沙量达到饱和需要的坡长随着坡度的增加明显变短。为了验证这种推断, 对 5 种试验坡度及 3 种不同流量下产沙量随沟长的变化进行了回归分析, 并找到了与试验结果符合很好的有极限值的修正指数曲

线

$$c = A(1 - e^{-\beta x})^B \quad (1)$$

式中  $c$ ——产沙量, g/mL;  $\beta$ ——衰减系数;  $x$ ——沟长, m;  $A$  和  $B$  为回归系数。上式所表达的物理意义和实验结果是相符的, 即产沙量  $c$  随着沟长  $x$  的增加逐渐增加, 但增加的幅度越来越小, 且趋近一个极限值  $A$ 。

当水流中的泥沙含量与其极限值相差很小(如相差 5%) 时, 即认为此时的泥沙含量为对应于水流输沙能力的泥沙含量, 即由

$$\frac{\lim_x (c) - c}{\lim_x (c)} = 5\% = 0.05 \quad (2)$$

可得出水流泥沙含量达到输沙能力时所对应的沟长。由上式及式(1)可得

$$\frac{\lim_x [A(1 - e^{-\beta x})^B] - A(1 - e^{-\beta x})^B}{\lim_x [A(1 - e^{-\beta x})^B]} = \frac{1 - (1 - e^{-\beta x})^B}{1} = 0.05 \quad (3)$$

或

$$(1 - e^{-\beta x})^B = 0.95 \quad (4)$$

$$B \ln(1 - e^{-\beta x}) = \ln(0.95) \quad (5)$$

即

$$1 - e^{-\beta x} = e^{\frac{\ln(0.95)}{B}} \quad (6)$$

$$e^{-\beta x} = 1 - e^{\frac{\ln(0.95)}{B}} \quad (7)$$

$$x = -\frac{1}{\beta} \ln \left( 1 - e^{\frac{\ln(0.95)}{B}} \right) \quad (8)$$

由式(8)即可求出水流泥沙含量达到极限含沙量(输沙能力)时的沟长  $x$ , 计算结果见表 1 所示。

表 1 一定坡度和流量下达到极限含沙量的沟长

Table 1 Limited rill lengths under different slopes and flow rates

| 坡度<br>流量                           | 5°    |       | 10°   |       |       | 15°  |      |      | 20°  |      |      | 25°  |      |      |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                    | 4     | 8     | 2     | 4     | 8     | 2    | 4    | 8    | 2    | 4    | 8    | 2    | 4    | 8    |
| $/L \cdot m \cdot \text{min}^{-1}$ |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $A$                                | 0.50  | 0.50  | 0.61  | 0.61  | 0.64  | 0.78 | 0.76 | 0.76 | 0.85 | 0.80 | 0.85 | 0.82 | 0.85 | 0.87 |
| $\beta$                            | 0.20  | 0.26  | 0.30  | 0.34  | 0.34  | 0.40 | 0.37 | 0.45 | 0.52 | 0.51 | 0.51 | 0.50 | 0.51 | 0.55 |
| $B$                                | 1.10  | 1.07  | 1.16  | 1.52  | 1.46  | 1.73 | 1.39 | 1.25 | 1.50 | 0.92 | 1.18 | 1.09 | 1.00 | 1.04 |
| $x/m$                              | 14.20 | 11.90 | 10.60 | 10.10 | 10.00 | 8.90 | 9.00 | 7.20 | 6.60 | 5.80 | 6.20 | 6.20 | 5.90 | 5.60 |
| $R^2$                              | 0.99  | 0.97  | 0.83  | 0.81  | 0.85  | 0.87 | 0.85 | 0.89 | 0.92 | 0.96 | 0.94 | 0.94 | 0.95 | 0.96 |

从表中可以看出, 流量对含沙量随沟长变化的影响没有坡度明显, 表现在同一坡度, 不同流量下的  $x$  值无显著差异。同时可以看出, 坡度越陡含沙量趋于稳定所需要的沟长越短。在同一坡度下, 流量对极限沟长没有大的影响, 尤其在陡坡条件下极限沟长不随流量的增加有明显的增加。且坡度增到一定值, 含沙量达到稳定所需的沟长的变化不再随坡度增加有明显的变化。试验坡度为 5 时, 含沙量达到稳定所需的沟长为 14.2 m, 即沟长达到该值后含沙量不再随沟长而明显增加。试验坡度为 10 时, 含沙量达到稳定所需的沟长为 10.6 m 沟长。试验坡度为 15° 时, 极限沟长约为 9 m。坡度 20 是一个转折点, 试验坡度自 20 增加到 25°, 达到极限含沙量需要的沟长没有明显的改变, 表明沟长约 6 m 后, 含沙量不再随沟长增加明显增加。计算得出的结果与由实验结果绘出的散点图所描述的物理意义是相符的。

由试验得出的不同水动力条件下得到的侵蚀产沙量与沟长的关系, 验证了本文开始分析的正确性, 即在稳定的水流作用下, 细沟上端水流入口处, 泥沙含量为零, 水流具有最大的侵蚀剥离能力, 随着细沟的增长, 水流中的泥沙含量迅速增加, 而水流的(净)剥离能力急剧下降。随着细沟不断增长, 水流的(净)剥离能力将趋近于零, 而水流中的泥沙含量将

趋近于一个稳定值。由此, 可以在给定稳定水流的条件下, 测定(一系列)不同细沟长度水流的泥沙含量, 得到泥沙含量与细沟长度的对应关系, 用此关系在给定误差限下, 可以估计水流含沙量达到极限值——水流输沙能力的细沟长度。而在某种沟坡条件下, 即使细沟长度达到试验水槽长度时, 水流中的泥沙含量仍未达到稳定。此时, 可由试验测得的泥沙含量与细沟长度的对应关系, 用一个恰当的数学表达式进行拟合。可用拟合得到的函数(在一定误差限下, 如 5% 或 10%)的极限值所对应的沟长来作为估计水流含沙量达到水流输沙能力的细沟长度。由表 1 的计算结果看出, 试验得到的估算极限细沟长度的数学表达式在不同水动力条件下的  $R^2$  均大于 0.81, 也就是说计算结果至少可以解释实验结果的 81%。

以上研究表明对于非粘性土壤, 陡坡时细沟水流达到饱和含沙量的极限沟长只需要很短, 约 6 m; 在缓坡条件下达到极限含沙量的沟长则需要更长。由试验结果看出, 当坡度小于 5 时, 沟长至少应不小于 14 m。这些结果对细沟侵蚀模拟试验, 侵蚀模型建立以及模型参数的直接测量有重要的启示和参考价值。目前在细沟侵蚀过程研究中, 不管是采用径流小区, 还是试验水槽, 在沟长采样时, 一般都没有

一套严格统一的选取标准, 研究者大多是据其个人的知识和经验及其试验经费的多少来确定各自的试验所需的模型长度, 而且跨度很大。加之其它非标准化因素的影响, 同样条件不同的人会得出不同的结果, 同一结果试验重复性也很差。这使得模拟试验结果很难进行比较, 结论缺乏客观性。本次试验找出的产沙量随沟长变化的函数关系, 以及水流含沙量达到沟长极限值的估计方法, 为细沟侵蚀模拟试验、模型建立及侵蚀预报提供了很好的参考依据。极限沟长估算方法的提出, 对于长期以来研究者们关于侵蚀产沙量与坡长的关系出现不同甚至相反结论的原因在一定程度上做了解释。

### 3 结论

径流含沙量是指坡地径流小区观测断面处的水沙二相流中单位清水中所含泥沙量的多少, 由于水沙二相流的动态变化, 尤其是坡面径流冲刷的动态变化, 使得径流含沙量也将有一个动态变化的响应过程。由不同细沟长度测得的水流含沙量表明, 细沟侵蚀产沙量随细沟长度的增长而增长, 并随着沟坡和入流量的增加而增加。

由沟长与产沙的函数关系:  $c = A(1 - e^{-\beta c})^B$ , 按一定的误差限, 可以估计出细沟水流含沙量达到稳定(对应于水流的输沙能力)时所需的细沟长度。极限沟长的提出为深入理解细沟侵蚀产沙机制提供了一种新的思路。细沟流产沙量随沟长的增加而增加, 但增加的幅度越来越小, 且趋近一个稳定值。在同一坡度下, 含沙量随沟长的变化受流量的影响较小。坡度越陡, 达到极限含沙量所需要的沟长越短, 但大于20°; 坡度对含沙量的这种变化趋势不再明显。对于

非粘性沙壤土, 陡坡条件下达到极限产沙量需要的沟长较短, 缓坡试验条件下则需要较长的试验沟长。

#### [参 考 文 献]

- [1] 雷廷武, 邵明安, 李占斌. 土壤侵蚀预报及其在中国发展的考虑[J]. 水土保持研究, 1999(2): 162~166.
- [2] Weber J E. 数学分析——在企业管理与经济学中的应用[M]. 北京: 对外贸易教育出版社, 1987.
- [3] 吴普特. 动力水蚀试验研究[M]. 西安: 陕西科学出版社, 1997.
- [4] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间和侵蚀细沟侵蚀影响因素研究[J]. 土壤学报, 1998(1): 95~103.
- [5] 史培军, 刘宝元, 张科利. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. 资源科学, 1999, 25(5): 9~18.
- [6] Lei T W, Nearing M A, Haghghi K, et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model[J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157~3168.
- [7] Foster G R, Huggins L F, Meyer L P. A laboratory study of rill hydraulics: . Shear stress relationship [J]. Trans of the ASAE, 1984b, 797~804.
- [8] Finkler S C, Nearing M A. A simplified equation for modeling sediment transport capacity [J]. Trans of the ASAE, 1989, 32: 1545~1550.
- [9] 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.
- [10] Franti T G, Laflen J M, Watson D A. Predicting soil detachment from high-discharge concentrated flow [J]. Trans of the ASAE, 1999, 42(2): 329~335.
- [11] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model [J]. Trans of the ASAE, 1993, 36: 65~72.

## Dynamic Sediment Yield of Rill Erosion

Zhang Qingwen<sup>1</sup>, Lei Tingwu<sup>1,2</sup>, Pan Yinghua<sup>1</sup>, Xia Weisheng<sup>1</sup>, Liu Jigen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100;

2. Faculty of Irrigation and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

**Abstract:** Using a typical silt-clay soil from the Loess Plateau, laboratory simulated experiments were conducted with a flume on 5 different slopes (5°, 10°, 15°, 20°, 25°) and 3 flow rates (2 L/min, 4 L/min, 8 L/min) to determine the relation of sediment yields to rill lengths of 0.5 to 8 m. A computational method was developed to estimate, with a given error, the sampling length at which sediment yield reached transport capacity, with the regressed functional relation of sediment load to rill length, which determined with experimental data obtained. With the suggested algorithm, sample lengths of rill on different slopes and at different flow rates were estimated with the related functional relation, as determined with the experiments. Further more, the influences of slope and flow rate on sample length were presented.

**Key words:** rill erosion; sediment yield; sample length; flume experiment