

## 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究\*

雷廷武<sup>1,2</sup> 张晴雯<sup>1</sup> 赵 军<sup>1</sup> 唐泽军<sup>2</sup>

(1 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2 中国农业大学水利与  
土木工程学院, 北京 100083)

**摘 要** 细沟水流的输沙能力是土壤侵蚀的重要参数之一, 对于土壤侵蚀预报和土壤侵蚀过程模拟尤为重要。在不考虑土壤团粒结构条件下, 根据集中稳定水流条件下侵蚀产沙随沟长增加而增加并将最终趋近于水流输沙能力的事实, 提出了通过改变沟长来量测水流输沙能力的实验室水槽测量方法。相应地提出了根据试验数据计算水流输沙能力的函数表达式。用一种粉粘(黄土)土壤, 进行了一系列(405 次)室内水槽模拟试验。采用五种坡度(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)、三个流量(2, 4, 8 L min<sup>-1</sup>)的细沟侵蚀产沙数据, 分析了输沙能力与沟坡、人流量的相互关系。

**关键词** 细沟侵蚀, 动力侵蚀过程, 输沙能力, 集中水流

**中图分类号** 157.1

细沟侵蚀是黄土高原坡耕地严重土壤侵蚀的主要方式, 是坡耕地表土和养分流失的重要原因。目前对于细沟侵蚀的研究, 由于细沟侵蚀机理的复杂性及发生过程的随机性, 涉及到细沟发生临界条件的研究比较多, 对细沟发育过程的研究很少且不够深入。从侵蚀过程机制出发, 研究细沟侵蚀形成规律及演变机制, 对于坡面侵蚀预报及模型的建立、制定水土保持规划和实施部署、有效防治坡耕地土壤侵蚀有着重要意义。

土壤侵蚀的剥蚀、搬运、沉积过程在很大程度上受水流的水力学特性及输沙能力的影响<sup>[1]</sup>。细沟中水流搬动泥沙的能力是泥沙沉降和搬运平衡状态时的水流挟带泥沙能力的综合性指标。水流的输沙能力一直受到土壤侵蚀界的关注, 在侵蚀产沙及泥沙输运和泥沙的沉积研究中十分重要。例如, 在美国农业部(农业研究局、林业局、水保局)、国家土地管理局、国家环保局组织研究开发的 WEPP(Water Erosion Prediction Project)土壤水蚀预报模型中<sup>[2,3]</sup>, 稳态的细沟侵蚀泥沙连续方程为:

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad (1)$$

式中:  $x$  为距离(m);  $G(\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}) = cq$  为泥沙含量;  $D_i(\text{kg m}^{-2})$  为沟间泥沙向细沟内的输沙量;  $D_r$  为细沟侵蚀量。其中, 细沟侵蚀是水流剥蚀能力, 泥沙搬运能力和泥沙含量的函数:

\* 中国科学院“百人计划”项目资助

收稿日期: 2000-09-20; 收到修改稿日期: 2001-08-09

$$D_r = k(\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{qc}{T_c}\right) \quad (2)$$

式中: $k$ 为细沟可蚀性参数; $\tau$ 为水流剪切应力; $\tau_c$ 为土壤临界抗剪切应力; $T_c$ 为水流的输沙能力。从上式看出,当细沟中的水力剪切力大于土壤临界抗剪切应力并且泥沙含量小于水流的输沙能力(即 $qc/T_c < 1$ )时,才出现剥蚀。剥蚀时, $D_r$ 为正,说明沿水流的下方泥沙含量增加;当泥沙含量大于搬运能力( $qc/T_c > 1$ )时,出现沉积。沉积时, $D_r$ 为负。由此可见,水流的输沙能力是水蚀预报模型中最重要的参数之一。

关于水流输沙能力的研究,长期以来,国内外许多学者或从理论,或根据小区野外实测资料和实验室资料出发,提出了不少半理论半经验或经验性的公式。Govers等<sup>[4]</sup>研究了平面和不规则地块漫流条件下的水流输沙能力。Julien和Simons<sup>[5]</sup>在维数分析的基础上提出了一种作为坡度、流量、剪切应力和降雨强度的幂函数关系的输沙能力表达式。Alonso等评价了几种易用的输沙能力方程,在泥沙颗粒和水流类型基础上提出了几个方程,并用Yalin方程对他的6组数据进行了拟合。Nearing等<sup>[6]</sup>根据大量室内细沟侵蚀试验数据,提出了侵蚀产沙与溪流动力(Stream power)间的关系表达式,并由回归得到了方程参数。这一表达式为雷廷武<sup>[1]</sup>、Nearing<sup>[6]</sup>证实可以作为水流输沙能力方程使用,模拟得到的侵蚀产沙过程与实测结果相关性良好。尽管其良好的表达性态,实际使用中仍需要根据不同土壤类型标定,方能使模拟模型给出准确预报结果。该表达式具有如下形式:

$$\log_{10}(T_c) = A + \frac{B e^{[a + b \log(\omega)]}}{1 + e^{[a + b \log(\omega)]}} \quad (3)$$

其中, $T_c$ ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )为输沙能力; $a$ 、 $b$ 、 $A$ 、 $B$ 为回归参数; $\omega$ ( $\text{g s}^{-3}$ )为溪流动力,定义为:

$$\omega = \rho g S_x q \quad (4)$$

式中, $\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )为水的密度, $g$ ( $\text{m s}^{-2}$ )为重力加速度, $S_x$ (%)为坡度, $q$ ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )为单位细沟宽度上的水流量。

尽管输沙能力的确定在土壤侵蚀研究中十分重要,至今尚无可用的测定方法。

本研究根据集中稳定水流条件下侵蚀产沙随沟长增加而增加并将最终趋近于水流输沙能力的事实,提出了一种方法以确定水流的输沙能力。本文报道:(1)用该方法进行的室内水槽试验;(2)根据试验数据计算水流输沙能力的方法;(3)输沙能力与沟坡、入流量以及沟长的相互关系。

## 1 材料与方 法

据已有的细沟侵蚀研究可知,细沟侵蚀主要是由短历时暴雨形成水流冲刷产生的<sup>[7,8]</sup>,多发生在大于 $5^\circ$ 的坡耕地上,深多不超过耕层(约20 cm),以5~15 cm居多。细沟侵蚀过程主要受水流特征和土壤性质的影响。细沟不仅是侵蚀泥沙的运输通道,更是重要的坡面侵蚀的泥沙来源。细沟产沙受输沙能力的制约。因此,研究细沟中水流的输沙能力具有重要意义。

### 1.1 试验方法

根据式(2)和Elliot<sup>[9]</sup>和雷廷武等<sup>[1]</sup>,概念上来讲,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,即 $D_r$ 取得极大值;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的值。该稳定值对应于水流的输沙能力,代表了由沟床剥离进入水流中的泥沙量与水流中泥沙向沟床沉积的量相平衡而净剥离量为零的一种状态。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。当细沟长度达到某一长度、水流中的泥沙含量达到稳定或不再显著增加时,即可认为水流中的泥沙含量对应于水流输沙能力的泥沙含量。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%)的极限值来作为水流输沙能力的估计值。

因此,试验的关键是测出确定的不同沟长时对应的泥沙含量,得到泥沙含量与沟长的对应关系。对于不同沟床坡度、入流量重复上述实验,可得出水流输沙能力与坡度及流量的关系。

## 1.2 试验水槽设计及土壤处理

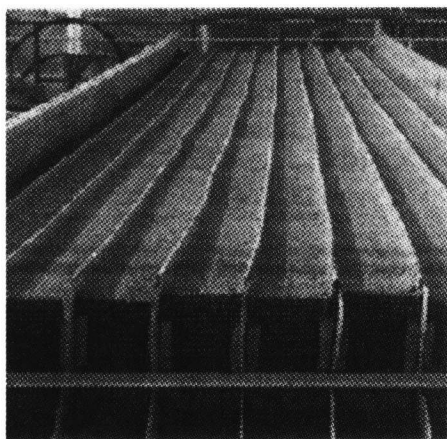


图1 实验水槽  
Fig.1 Experiment flume

在不考虑土壤团粒结构的情况下,进行室内水槽试验。设计的水槽长8 m,宽1 m,沿宽度方向上每10 cm置一隔板,将水槽分隔成宽10 cm、长8 m的细沟。隔板高33 cm,长8 m,固定在水槽中。为尽量减小隔板边壁对水流及侵蚀过程的影响,对水槽隔板进行了处理:在隔板上粘上与实验土壤相同的土粒,使其尽可能接近试验土同样的糙度。水槽放置在一个坡度可调的平台上,调节平台的坡度即可调节到实验所需要的坡度(图1)。

试验共有3个处理:坡度,沟长,流量。试验采用5个沟坡水平:5°,10°,15°,20°,25°;9个试验沟长水平:0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0,7.0,8.0 m。3个流量水平:2,4,8 L min<sup>-1</sup>(即0.12,0.24,0.48 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)。每一个处理有3个重复,总试验次数为405次。

试验采用延安安塞(黄土高原)的黄绵土。试验前将土风干测其机械组成。装填前将土过边长为10 mm的筛孔,并测其容重。填土时,先在试验槽底部填入30 cm厚的粘黄土(<0.001 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壤。将土均匀装入土槽,填入土容重控制在1.1~1.2 g cm<sup>-3</sup>,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,以尽可能避免边壁的影响。试验前将土壤充分饱和,并放置24小时以上再开始试验,从而保证均匀一致的初始含水量及部分消除填装不均匀的影响。

## 1.3 供水及流量控制

由自来水管及水箱加水泵供水,采用阀门控制流量,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2,4,8 L min<sup>-1</sup>(即0.12,0.24,0.48 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)。三个水槽流量分别标定。为了使入水管水流均匀注入,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局部扰动尽可能地小。

## 1.4 试验量测

水流稳定时,记录水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三个出水口泥沙样品的采样器,用于同时采集三个重复的样品。水流稳定后,在各个出水口分别收集泥沙样3个。量测采集的泥沙样体积后,烘干称重,用于确定泥沙含量(kg L<sup>-1</sup>或g ml<sup>-1</sup>)。试验结束后,用直尺在不同沟长部位量测细沟宽度和深度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 产沙量与沟长的关系

输沙能力的概念是在物理过程分析的基础上得来的。细沟中的泥沙受力作用有重力,浮力和紊流作用力。重力使得泥沙向沟床移动,浮力和紊流力支持和悬浮泥沙颗粒。水流的侵蚀、搬运和沉积作用是同时进行的,且不断的转化。但就坡面的某一段来说,总是以某一作用为主。细沟流形成后,运动泥沙和床面泥沙有可能发生交换,但当泥沙含量达到水流的输沙能力时这种交换出现平衡状态。结果表现为水流中的泥沙含量保持稳定不变。

作为试验结果的一个例子,根据试验结果,绘制了一定坡度下,产沙量与沟长和流量关系的散点图如图 2(坡度为  $20^\circ$ )。由图 2 所示的产沙量随沟长变化的趋势图可以明显的看出,在一定坡度和流量下,泥沙含量随着沟长的增加而增加,但增加的幅度(含沙量曲线的斜率)由入口处的较大值变得越来越小。如所期望的那样,泥沙含量渐渐趋近一个稳定值。可以认为该稳定的极限含沙量即为水流输沙能力所对应的含沙量。

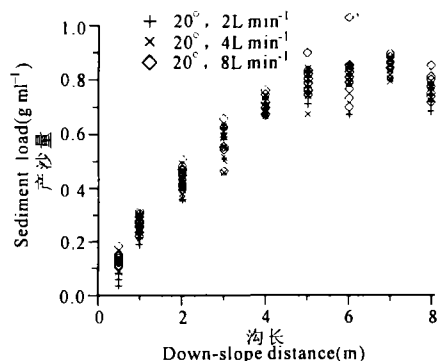


图 2 产沙量在不同流量下沿沟长的变化趋势

Fig.2 Sediment load vs down-slope distance

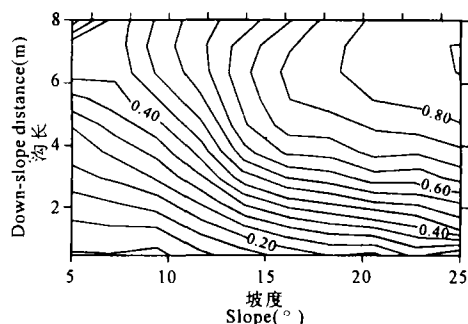


图 3 产沙量与坡度和沟长的关系

Fig.3 Relationship of sediment load with slope and down-slope distance (flow rate  $8 \text{ L min}^{-1}$ )

产沙量随坡度和沟长变化的趋势关系,如图 3(流量为  $8 \text{ L min}^{-1}$ )不同坡度下产沙量随沟长的变化趋势图所示。从趋势图可以看出,等值线随坡度和沟长的增加,由密集变得稀疏——标志着侵蚀产沙随着坡度和坡长的增加而增加,但增加幅度逐渐降低;最后逐渐出现一个平台,表明产沙量随沟长和坡度增加达到一定值后就不再增加,可以认为含沙量此时已达饱和。水流的饱和含沙量即为对应于水流输沙能力的含沙量。并且由图 3,可以确定一定坡度下的水流输沙能力及与之相应的坡长。同时可以由图 3 看出,当坡度增大时,泥沙含量等值线有疏变密,表示沟坡增加,侵蚀加剧,并且水流中含沙量达到饱和的坡长变短。这一结果表示,当要测量较大坡度细沟水流的输沙能力时,所需的水槽长度可以比测量较缓细沟水流输沙能力的水槽短一些。更有趣的是,当沟坡达到某一值后(此例为约  $20^\circ$ ),产沙等值线与坡度坐标线基本平行,表示坡度到达这一值以后,不仅不同的坡

度下的细沟侵蚀具有相同的侵蚀产沙过程(产沙随坡长的变化一致),而且具有相同的水流输沙能力。

### 2.2 输沙能力的估计方法

为了用试验数据得出水流的输沙能力,本文提出了一个符合上文所描述的侵蚀产沙规律及适合于试验所测得数据的数学模型,对不同坡度及不同流量下侵蚀产沙量随沟长的变化进行回归分析,该模型为:

$$S = A(1 - e^{-\beta x})^B \tag{5}$$

式中  $S$  为侵蚀产沙量( $g\ ml^{-1}$ ),  $\beta$  为衰减系数,  $x$  为沟长(m),  $A$  和  $B$  为回归系数。

函数的系数所表达的物理意义可描述如下:回归系数  $A$  表示含沙量能够达到的最大极限值,也就是说,  $A$  值实际就是与细沟水流的输沙能力对应含沙量,即  $T_c = A$ 。而  $\beta$  和  $B$  是侵蚀产沙量随距离增加其增长衰减的指数。由于  $1 - e^{-\beta x} < 1$ , 所有回归所得的  $B > 1$ , 则  $(1 - e^{-\beta x})^B$  较  $1 - e^{-\beta x}$  随距离的增加衰减得更快。回归结果列于表 1。

表 1 回归参数

Table 1 Regression parameter

参数 Parameter	坡度 Slope														
	5°			10°			15°			20°			25°		
	流量 Inflow rate ( $L\ min^{-1}$ )														
	4	8	4	8	12	2	4	8	2	4	8	2	4	8	
$A$	0.5	0.5	0.61	0.61	0.64	0.78	0.76	0.76	0.85	0.80	0.85	0.82	0.85	0.87	
$\beta$	0.2	0.26	0.3	0.34	0.34	0.4	0.37	0.45	0.52	0.51	0.51	0.5	0.51	0.55	
$B$	1.1	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	
$R^2$	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	

回归结果表明,(5)式是一个与试验结果符合很好的曲线,相关系数  $R^2$  值均很高,最低为 0.809,最好达 0.961。由回归分析结果可以看出,在同一坡度下,随着流量的增加,  $A$  没有明显的增加,即水流的输沙能力随流量变化较小。但随着坡度的增加,  $A$  有明显的增加,即输沙能力随坡度变化明显。但坡度从 20° 增加到 25°,  $A$  却没有明显的改变,即输沙能力不变。

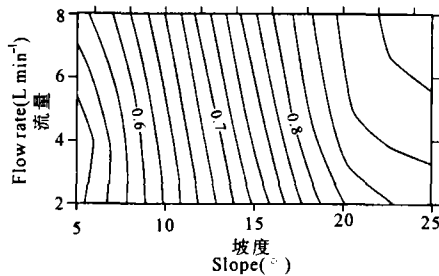


图 4 输沙能力与坡度和流量的关系

Fig. 4 Relationship of transport capacity with slope and flow rate

这与前面讨论的结果一致。同时  $\beta$  值与  $A$  值具有类似的变化趋势:同一坡度时,随流量变化不明显;但随坡度增加而明显增大;当坡度达到 20° 以后,该值基本稳定。

### 2.3 输沙能力与坡度和流量的关系

根据试验数据,由上述(5)式回归得到了不同坡度和流量时的水流输沙能力,如图 4 所示。从输沙能力与坡度和流量的关系图中可以看出,等值线

随坡度和流量的增加有密到疏,逐渐趋于平缓。在沟坡达到  $20^\circ$  后,等值线随坡度无明显的变化。这说明输沙能力随坡度和流量的增加逐渐增加,但增加的幅度越来越小,增加到一定值后逐渐趋于稳定。从趋势图还可以看出流量对输沙能力的影响没有坡度明显;即一定坡度下,输沙能力随流量的变化不大。由此可以确定,细沟水流的输沙能力是坡度、入流量和沟长的函数。

### 3 结 论

本研究提出了一种用室内水槽通过测量不同坡长下泥沙含量来测定细沟侵蚀水流输沙能力的方法。按此方法用一种黄土高原的典型土壤—黄绵土进行了包括不同坡度、坡长、入口流量的一系列试验,共 405 次。提出了有上述试验所得的泥沙含量与沟长关系数据来估计水流输沙能力的方法,并给出了相应的计算公式。求出了水流的输沙能力,并且得出,输沙能力随坡度的变化较大, $20^\circ$  为临界坡度;输沙能力随流量的变化则较小。由此推论,坡度小时如欲测得水流的输沙能力所需的水槽较坡度大时应长一些。

### 参 考 文 献

1. Lei T W, Nearing M A, Haghghi K, *et al.* Rill erosion and morphological evolution: A simulation model. *Water Resources Research*, 1998, 34(11):3157 ~ 3168
2. 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. *水土保持研究*, 1999(2):162 ~ 166
3. Nearing M A, Foster G R, Lane I. J., *et al.* A process based soil erosion model for USDA Water Erosion Prediction Project Technology. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32:1587 ~ 1593
4. Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. *Earth Surface Processes Landforms*, 1986, 11:515 ~ 524
5. Julien P Y, Simons D B. Sediment transport capacity of overland flow. *Transactions of ASAE*, 1985, 28(3):755 ~ 762
6. Nearing M A, Norton I. D., Bulgakov D A, *et al.* Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*. 1997, 33(4):865 ~ 876
7. 郑粉莉. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究. *土壤学报*, 1989, 26(2):109 ~ 116
8. 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究. *泥沙研究*, 1999(1):56 ~ 61
9. Elliot W J, Laflen J M. A process - based rill erosion model. *Trans. of the ASAE*, 1993, 366 ~ 572

## LABORATORY STUDY ON SEDIMENT TRANSPORT CAPACITY IN THE DYNAMIC PROCESS OF RILL EROSION

Lei Ting-wu<sup>1,2</sup> Zhang Qing-wen<sup>1</sup> Zhao Jun<sup>1</sup> Tang Ze-jun<sup>2</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, Shaanxi 712100*)

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

### Summary

Transport capacity of flowing water in a rill is one of the important parameters in soil erosion, especially in soil erosion prediction and soil erosion process modeling. Considering the fact that, under steady flow, sediment load increases with slope length and will finally approach the transport capacity, a laboratory flume experimental method with variable slope length is advanced for transport capacity determination. And a mathematical expression is suggested to estimate transport capacity with thus obtained experimental data. A series of 405 flume experiments were conducted with sand-clay(loess) soil. Transport capacity is related to slope and inflow rate, based on the experimental data under five slopes (5°, 10°, 15°, 20°, 25°), and three flow rates(2, 4, 8 L min<sup>-1</sup>).

**Key words** Rill erosion, Dynamic soil erosion processes, Sediment transport capacity, Concentrated flow