

文章编号: 1000-4874(2005)06-0761-06

坡面细沟侵蚀的冲刷试验研究*

陈力, 刘青泉, 李家春
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 细沟侵蚀是土壤侵蚀的重要方式之一, 但定量研究困难很大。本文设计并完成了一系列小规模细沟侵蚀冲刷试验, 研究细沟侵蚀过程中的动力学规律。试验结果表明了一些细沟侵蚀的趋势性规律, 也反映出其中存在较强的随机性。通过分析试验数据, 得到了细沟宽度及过水断面湿周与流量和坡度的经验关系, 并发现湿周与它们的关系更为密切。

关键词: 细沟; 土壤侵蚀; 冲刷; 试验研究

中图分类号: TV143 **文献标识码:** A

Scouring experimental study on rill erosion on the slope

CHEN Li, LIU Qing-quan, LI Jia-chun
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Rill erosion is one of important erosion manners on the slope, while it is difficult to study quantitatively. This paper designed and finished a serial of small scale scouring experiments to study the dynamics in this process. The results of these experiments show some tendency of the dynamic performance in the process, and there is also high randomness in it. Some empirical relations between the rill width or wet perimeter and discharge and slope are presented through the data analysis. The relation about wet perimeter is found more notable.

Key words: rill; soil erosion; scouring; experimental study

1 概述

细沟侵蚀是坡面水蚀的一种常见侵蚀方式, 在黄土高原地区尤为普遍。在降雨过程中出现坡面水流后, 首先会产生片状侵蚀。随着水流强度的增强, 坡面逐渐产生细沟, 水流也由片状漫流转变为集中的线状流动, 出现细沟侵蚀。目前多数学者认为, 细沟产生后, 其水深、流速及侵蚀力均有较大增加, 坡面侵蚀

方式发生变化, 细沟侵蚀强度可以较细沟间片蚀强度增加几倍到几十倍, 片蚀强度与细沟侵蚀相比有时可以忽略^[1, 2]。因此研究细沟侵蚀的特性对于总结坡面水蚀过程规律, 预报水蚀强度具有重要意义。

细沟产生和发展的动力学过程至今尚未很好的描述, 这与该过程的复杂性有密切关系。细沟发生时往往先出现一些小的侵蚀穴^[3, 4], 在这些侵蚀穴处产生溯源、下切、侧蚀及向下游延伸等各种方式的冲刷, 逐渐形成较为明显的细沟。这一过程目前在定性上

* 收稿日期: 2002-08-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(19832060, 10332050)

作者简介: 陈力(1973~), 男, 武汉人, 博士。

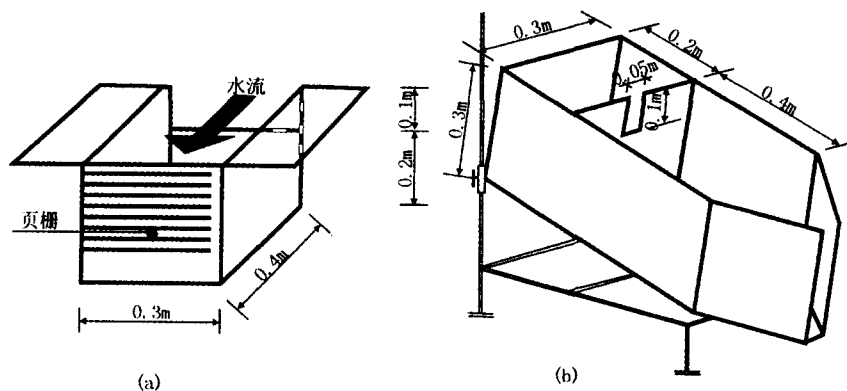


图1 试验设备示意图

已有不少认识,但定量描述仍然十分困难。一方面细沟侵蚀中存在较多的随机性因素,如细沟的横向摆动,细沟的交叉合并,细沟断面形态的差异,坡面横向水量分配的差异,以及水流、泥沙运动本身在时空上的随机性和水、沙、细沟形态相互作用而产生的随机性等等;另一方面,对此复杂物理过程本身的动力学研究还很不成熟,细沟水流有别于坡面漫流,也不同于普通的明渠流,其侵蚀和输沙机理还较为模糊。要较全面地描述细沟侵蚀还需要一些补充关系,其中较为重要的一项是细沟形态和细沟水流动力之间的关系。为此,本文基于对细沟侵蚀特性的基本认识,对细沟侵蚀过程进行了较为系列的冲刷试验研究,以期对细沟侵蚀的动力学规律认识上有所前进。

2 试验方法

细沟侵蚀的发生需要一定强度的水动力条件,一般在距坡顶一定距离处,水流强度增加到一定程度才会发生。由于细沟中的侵蚀过程主要是水流冲刷,用放水冲刷试验代替降雨试验很大程度上是可行的。为此我们设计进行了一系列的小规模土槽放水冲刷试验。

冲刷试验的有利之处有三方面,一是可以较准确地控制细沟水流的流量,从而可以得到较为准确的冲刷率和水流流量之间的关系,而降雨试验的流量是沿程不断变化的,因此较难得到各级流量所对应的冲刷率;二是可以在较小尺度内使用较大的水流流量,而降雨试验要产生较大流量则需较长的坡长;三是试验操作较为方便。

试验在中国科学院西北水土保持所的人工降雨试验大厅内完成。试验填土槽为2mm钢板制成,其

形状、尺寸如图1所示。另外配有一套平水供水装置。

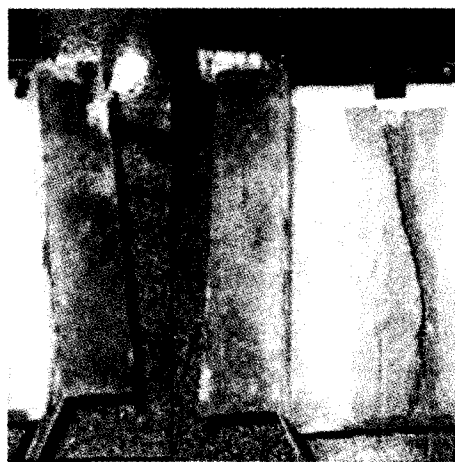


图2 试验结束后的细沟形态

试验的基本过程是:首先在a槽内填入20cm厚的干土,然后在土体表面出口端沿中心线人为挖一条沟槽。将b槽调至预定的坡度,并将a槽放入b槽中固定。将供水设备的出流流量调至预定流量,使水流入b槽后部的储水槽中,注满后水流从隔板的窄缝间流入a槽。控制水流全部流入预先挖好的沟槽中,使水流一开始就是细沟水流,进行细沟冲刷输移过程(图2所示为试验完成后的细沟形态)。试验过程中主要观测了出口处的含沙量和输沙率过程,以及细沟水流的深度、宽度和流速。一次试验完成后取下a槽,挖去剩余土壤,再填新土准备下一轮试验。试验土样取自试验地陕西杨陵当地的黄土,其组成如图3。试验的具体步骤如下:

(1) 将试验用土首先晾干,经0.01m孔径的筛网去除杂质。

(2) 将干土填入 a 号槽内,每填入一层即将其均匀压实,控制填土的干容重在 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 左右。填土深度为 20cm,使土体表面平整。

(3) 在填土表面顺水流方向沿土槽中心线预先挖一条 10cm (长) $\times 5\text{cm}$ (宽) $\times 2\text{cm}$ (深)的沟槽,沟槽的一头直到叶栅。

(4) 将 b 槽调至预定坡度,将 a 槽放入 b 槽中固定。试验共采用了 5 种坡面坡度: 5° , 10° , 15° , 20° , 25° 。

(5) 试验前用称重法测量土壤容重及土壤水分。然后在土体表层洒少量水使表土接近饱和。

(6) 调节供水水流至预定流量并注入 b 槽后部的储水槽中。试验中共采用了 5 种流量: $0.01 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$, $0.025 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$, $0.05 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$, $0.075 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$, $0.1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ 。

(7) 储水槽满后水流将从隔板上的窄缝间流至土体上,进而流至细沟中,开始细沟冲刷输移试验。试验中主要测量出口处的含沙量和输沙率过程,并测量细沟水流的深度、宽度和流速。含沙量和输沙率用计时采样的方法测量,细沟水流的深、宽用薄尺测量,水流速度用染色法测量。

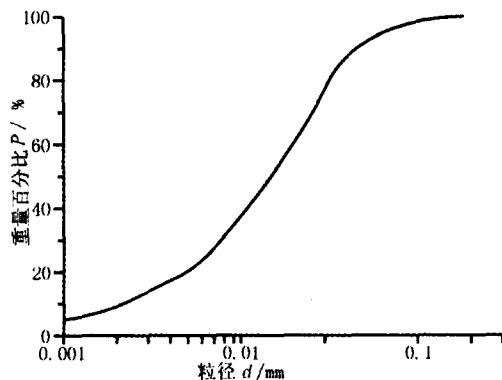


图 3 试验土颗粒级配曲线

试验中预先挖沟的目的是为使水流全部流入细沟,实验一开始就是细沟水流,并可以确切知道细沟水流流量和细沟冲刷量。一般的人工降雨试验或水流冲刷试验中只能知道整个坡面的流量和冲刷量,对于某一条细沟的流量、冲刷量则难以准确观测,因此本文的试验方法对于确定细沟侵蚀的定量关系是有利的。试验前所挖沟槽并未贯通整个坡面而只有 10cm 长度,其目的是观察包括沟头变化在内的细沟侵蚀过程。

试验的最大流量为 $0.1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$,如果换算成实际降雨,按细沟间距 0.5m 计算,并假设细沟间水

流全部汇入细沟之中,相当于 $1\text{mm}/\text{min}$ 的净雨强,在 15° 坡面上 12.4m 坡长处细沟流量;或相当于 $0.414\text{mm}/\text{min}$ 的净雨强, 15° 坡面上 30m 坡长处细沟流量。

3 试验结果及分析

试验按照前述 5 种坡度和每种坡度 5 级流量共进行了 25 组次。图 4 所示为不同坡度和不同流量下的细沟输沙率试验结果。图 5 为各次试验的时间平均结果,即平均含沙量和平均输沙率与细沟流量和坡度的关系。

试验观察表明,除了最小的流量级 $0.01 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ 外,细沟冲刷过程在各坡度、各级流量下都发展的很快,一次试验过程的有效时间一般只能持续 5~10 分钟。冲刷过程中有多种侵蚀方式发生,包括沟头溯源侵蚀、下切侵蚀和侧壁崩塌,其中前两种方式是主要的,侧壁崩塌只是偶尔发生。这与试验的目的和方式是有关的,试验水流限制在细沟内流动,不同于实际的降雨侵蚀往往沿程有两侧的水流汇入,因此侧向侵蚀并不严重。试验的前半段,沟头溯源侵蚀十分显著,大流量级时尤甚。而在沟头的上游,水流也仍有下切能力。在两方面的作用下,不久就形成一条贯穿整个土槽的深沟。此后就基本上是单一的下切侵蚀。细沟的断面绝大多数为矩形或矩形复式断面,也有极少数为梯形或三角形。

试验结果表明了细沟侵蚀变化的一些规律和趋势。输沙率具有随坡度和流量的增加均增加的变化趋势,而含沙量具有随坡度增加而增加和随流量增加而减小的趋势。这是由细沟水流的水动力变化所决定的。

流量相同时,假设糙率不变,由 Manning 公式 $q = n^{-1} h^{5/3} S_0^{1/2}$ 可知,坡度增加将使水深减小。此时水流切应力 $\tau = \gamma h S_0 = \gamma m^2 q^2 / h^{7/3}$ 将增加,如果认为含沙量与切应力成正比例关系,可知含沙量将随坡度增加而增加。

坡度相同时,切应力又可表示为

$$\tau = \gamma h S_0 = \gamma S_0 \left[\frac{(nq)^2}{S_0} \right]^{3/10} = \gamma (nq)^{3/5} S_0^{7/10} \quad (1)$$

因此流量增加将使切应力增加,冲起的沙量也增加,但切应力增加的幅度没有流量的增幅大,因而含沙量反而有减小的趋势,但输沙率随坡度和流量的增

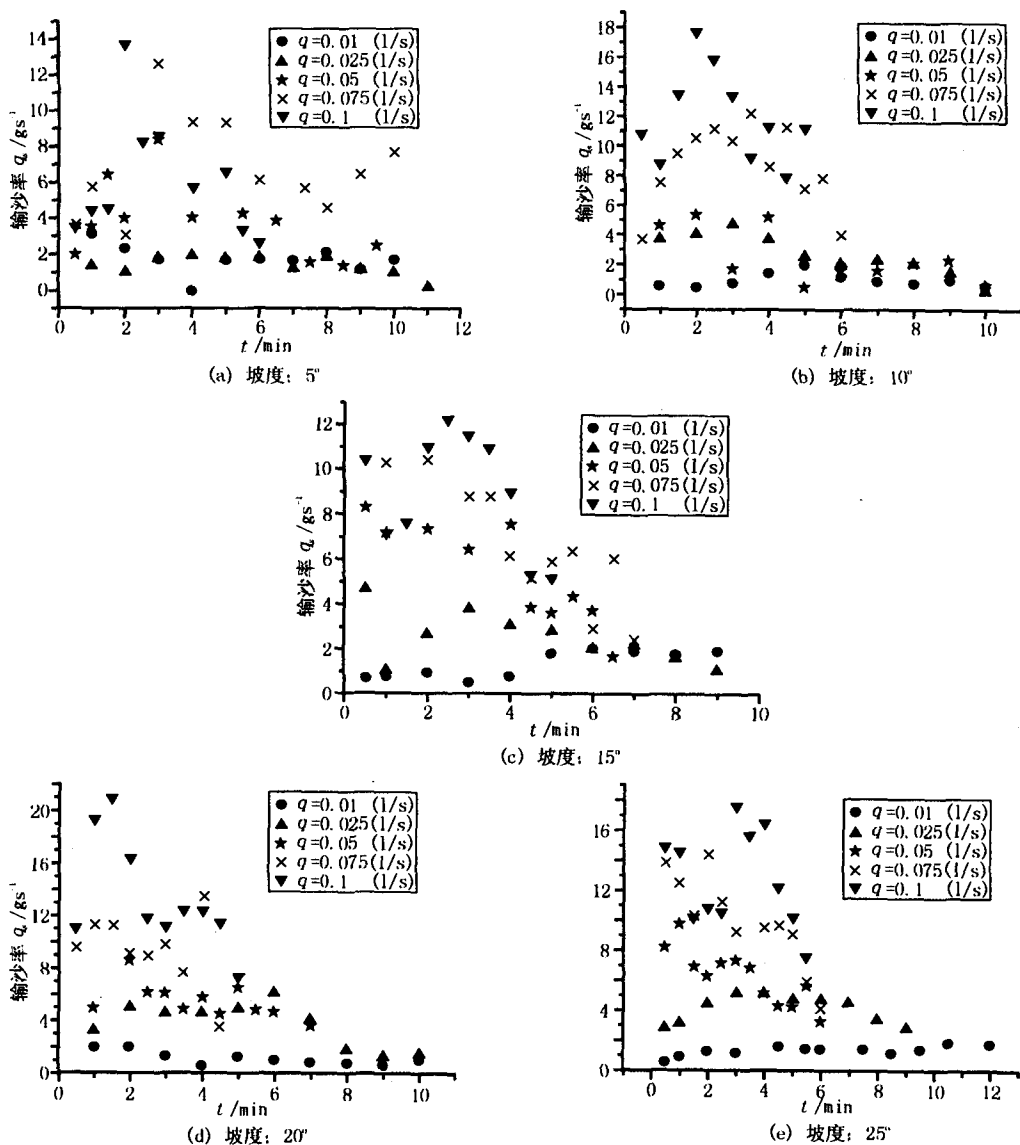


图4 输沙率过程试验结果

加均增加。

上述分析中忽略了起动切应力的概念和阻力可能的变化趋势,也没有考虑含沙量饱和与不饱和的问题,因而只是一种粗略的分析。

试验结果表明了细沟侵蚀随水流变化的基本规律,但具体数值表现出较强的随机性,各组次试验结果中均有所反映。含沙量和输沙率时间变化过程及其平均值的试验结果都有较强的波动,一场试验中相邻两次测值可出现较大差异,其平均值也存在较大起伏,同一物理量的总体变化趋势也不完全一致。其中有一部分试验结果可能与填土的干容重大小有关,干

容重大的土壤较密实,所需起动切应力也较大,输沙率会较小。试验填土的干容重最大值为 $1.37g/cm^3$,最小值为 $1.18g/cm^3$,这种差别对侵蚀过程会有影响。但还有许多试验数据无法用于干容重的差别解释。这种状况不能完全归因于试验测试的精度,而应与侵蚀过程本身存在较强的随机性有关,尤其是细沟的形成过程及形态具有很大的随机性。

另一个使分析与实际情况偏离的因素是流量和单宽流量并非成线性关系。流量不同时,细沟的过流宽度也是不同的,这将使单位宽度的水流动力条件的变化趋势变得复杂起来。由于细沟宽窄是水流切

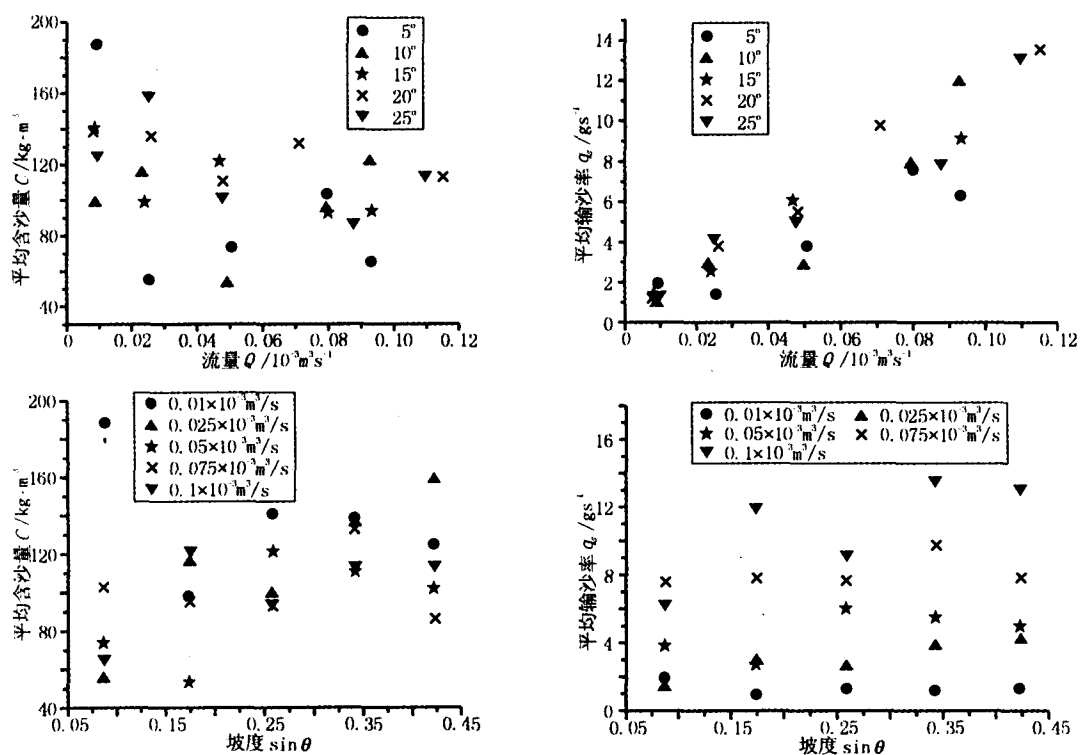


图5 平均含沙量 C 和平均输沙率 q 。

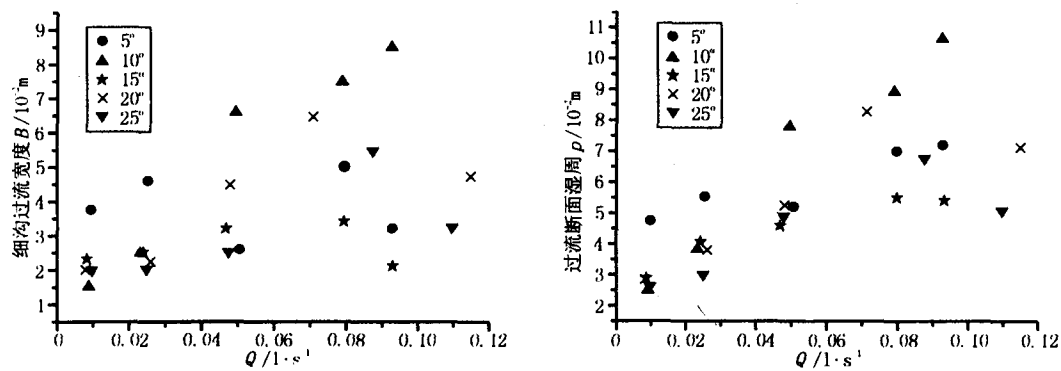


图6 过水断面宽度 (B) 和湿周 (p)

割而成,未受到外部因素的制约,因而其值具有较大的随机性,图6(细沟过流宽度和湿周随流量变化的试验结果)就反映了这一特性。这样水流流量增加将不意味着单宽流量按相同比例增加,甚至可能减小。这是含沙量和输沙率随机性变化的一个重要因素。

对于细沟过流宽度目前尚无任何理论可以用于进行分析,目前也不了解其中的物理机理。曾有一些研究者借用天然河道河床演变分析中的河相关系的表达方式对这个问题作过一些经验分析,得到了一些指数型的经验关系。我们也采用这种方法分析了细沟宽度的变化规律。假设细沟过流宽度 B 和流量 Q

与坡度 S_0 成指数关系,由所测试验资料运用多元线性回归分析,可以得到下式

$$B = 0.596Q^{0.316} S_0^{-0.23} \quad (2)$$

式中流量 Q 的单位为 m^3/s ,细沟过流宽度 B 的单位为 m 。对上式取常用对数后的多元回归关系的相关系数为 $r = 0.674$ 。上述关系式与张科利^[5]得到的黄土坡面上的关系较为相近,但坡度的影响更强一些。

从图4实验结果可以发现,细沟水流的湿周 p 与流量 Q 和坡度 S_0 的关系显然较细沟过流宽度更密切

一些。如用细沟水流的湿周 p 代替细沟过流宽度,重复上述回归分析,则得到

$$p = 1.512Q^{0.371} S_0^{-0.245} \quad (3)$$

相关系数为 $r = 0.9011$, 显然相关程度大得多。上式中湿周 p 的单位也是 m 。

在回归分析中增加考虑土壤干容重的影响, 所得回归关系的相关系数与上式相比几乎没有增加。说明本文试验中土壤的密实程度对于细沟横向发展没有明显影响。

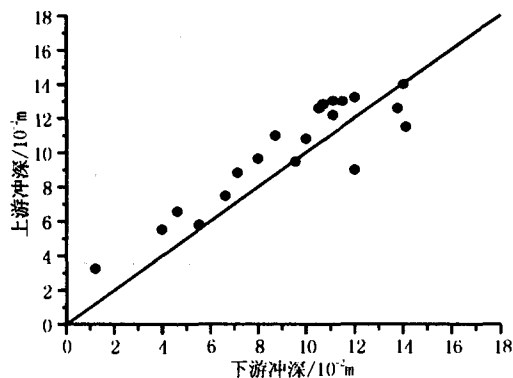


图7 上、下游冲深比较

试验中还观测了冲刷结束后细沟中间相距 20cm 的两点的冲刷深度, 其结果绘于图 7 中。试验结果反映出一个很显著的规律, 即上游冲深一般比下游冲深大, 绝大部分试验都表现出这一规律。这说明上游的冲刷率一般较下游大。出现这一结果的原因应该是沿程不断冲刷使上游水流的含沙量小, 下游水流的含沙量大, 而水流的冲刷率与含沙量成反比, 因而土槽中上游冲得略多, 下游冲得略少。这一机制的另一结果是细沟的底坡在冲刷过程中将逐渐变缓。

试验过程中还有另一个较明显的趋势是在多数试验过程中, 特别是较大流量级的情形, 含沙量和冲刷率都有在经过一段时间的冲刷后逐渐下降的趋势。

从上面的分析可以认为这有两方面的原因。一是试验经过一段时间细沟贯通整个土槽, 不再有沟头溯源侵蚀, 因此一定冲刷距离内侵蚀强度会有所降低。二是冲刷过程中细沟底坡有所减小, 这也会导致冲刷强度的降低。

4 结论

本文通过特别设计的细沟冲刷试验研究了细沟冲刷的动力学特性, 主要得到如下结论:

(1) 细沟水流含沙量大致具有随坡度增加而增加和随流量增加而减小的变化规律, 而输沙率具有随坡度和流量的增加均增加的变化规律。

(2) 由于细沟形成过程、几何形态, 以及细沟宽度和单宽流量都是一些变量, 因此细沟侵蚀也具有较大的随机性。

(3) 针对试验土样得到了细沟过流宽度和湿周与流量和坡度的经验关系, 并表明湿周与流量和坡度的关系更密切一些。

参 考 文 献:

- [1] 郑粉莉, 康绍忠. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理[J]. 地理学报, 1998, 53(5): 422-428.
- [2] NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, FINKNER S C. A Process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. Trans. of ASAE, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [3] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究, 1998, (1): 52-59.
- [4] 胡世雄. 坡度、降雨和土壤条件对坡面流及坡面动力侵蚀过程的影响研究[D]. 中科院地理所博士论文, 1998.
- [5] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究[J]. 泥沙研究, 1999, (1): 56-61.