

# 细沟侵蚀中泥沙含量及其粘粒流失量的试验

夏 卫 生<sup>1, 2</sup>, 雷 廷 武<sup>2</sup>, 张 晴 雯<sup>2</sup>, 赵 军<sup>2</sup>, 潘 英 华<sup>2</sup>, 高 佩 玲<sup>2</sup>

(1. 湖南师范大学资源与环境科学院, 湖南长沙, 410081; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌, 712100)

**摘 要:**通过室内模拟试验, 对细沟侵蚀中不同坡度和不同流量条件下一定坡长的泥沙含量及其粘粒含量进行了测定。分析试验结果表明, 含沙量随着坡度增加而增加, 而流量影响极小; 随沟长的延伸, 由于径流速度趋于稳定, 含沙量增加幅度减少。粘粒流失量分布是坡度、流量、细沟发育过程、流速的垂直分布等因素共同作用的结果; 粘粒迁移伴随着土壤剥蚀和粘粒沉降, 使得不同流量的粘粒流失量相近, 粘粒流失量沿细沟沟长呈波状分布。

**关键词:**细沟侵蚀; 泥沙含量; 粘粒流失量

中图分类号: PS51

文献标识码: A

土壤水力侵蚀是指在降水、地表径流、地下径流的作用下, 土壤、土体或其他地面组成物质被破坏、搬运和沉积的全过程。在黄土高原地区地表径流是最主要的水蚀方式之一, 细沟侵蚀是地表径流侵蚀的起点与源泉<sup>[1~ 3]</sup>。人们对细沟侵蚀已做了大量的研究工作, 对其在不同坡度下不同质地土壤下的侵蚀量已有了较初步的认识, 对细沟侵蚀形成过程和机理、侵蚀量与坡度和流量的关系进行了较多的研究, 但对细沟流开始坡长的含沙量分布规律研究较少。对被侵蚀的土壤而言, 人们更关心的是其肥力状况、土壤结构和耕性的变化, 所有这些特征都与土壤的颗粒组成, 特别是粘粒有非常直接的关系<sup>[4, 5]</sup>。土壤粘粒是土壤有机质与营养物质的载体, 土壤中 90% 以上的氮、磷、钾都吸附在粘粒上, 粘粒的流失基本上可以代表土壤肥力的流失<sup>[6~ 9]</sup>。随着被侵蚀土壤的粘粒变化, 土壤结构、可耕性和其它性质也相应发生变化。因此定量研究细沟侵蚀量和粘粒含量对分析土壤肥力具有特别重要的意义。为了研究土壤肥力的变化, 人们对被侵蚀土壤表层的机械组成进行了一些测定, 由于被侵蚀土壤表层的厚度和宽度不易确定, 特别野外试验中难度更大, 测试的结果往往可比性较差。本研究将黄绵土作为供试土壤, 通过室内模拟试验对细沟侵蚀中泥沙含

量和机械组成进行测定, 从而初步研究细沟侵蚀起始阶段的含沙量分布; 从另一个侧面分析细沟侵蚀中土壤肥力的变化规律。

## 1 试验设计

### 1.1 水槽

在现有宽 1 m 的水槽中, 每隔 10 cm 隔一挡板, 挡板高 33 cm, 长 8 m, 将挡板固定做成十个长 8 m, 宽 0.1 m 水槽。水槽可调节到试验所需要的坡度, 坡度分别为 5°, 15°, 25°。试验水槽如图 1 所示。

### 1.2 供试土壤

先在试验槽底部填入 20 cm 厚的粘黄土, 边装填边压实, 使其紧实程度接近犁底层, 然后再填入供试土壤——黄绵土。试验前将供试土壤风干, 测其机械组成(黄绵土的粘粒含量为 13.8%)。装填前将土过 10 mm 筛孔, 然后将土均匀装入土槽, 厚度约为 20 cm。试验槽四周边部尽量压实, 装填结束后, 用特制平尺将土刮平。装土时注意一定的地表糙度, 并在隔板处略有凸起, 以免水流集中冲刷。试验前将土壤充分饱和, 并放置 12 h 以上再开始实验, 从而保证均匀一致的初始含水量条件及部分消除填装不均匀的影响。

收稿日期(Received date): 2002- 09- 15; 改回日期(Accepted): 2003- 06- 18。

资助项目(Foundation item): 国家自然科学基金(40171062), 中科院知识创新重要研究方向项目(KZCX3- SW- 422) [The project funded by National Science of China(No. 40171062), and The important research project in the CAS(No. KZCX3- SW- 422)]

作者简介(Biography): 夏卫生(1966- ), 男, 汉族, 湖南安化人, 博士, 副教授, 研究方向为土壤物理和土壤侵蚀, 发表论 10 余篇 [XIA Wei sheng(1966- ), male, Doctor, researcher on soil physics and erosion. Tel: 0731- 8871317; E-mail: xws@hunnu.edu.cn]

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

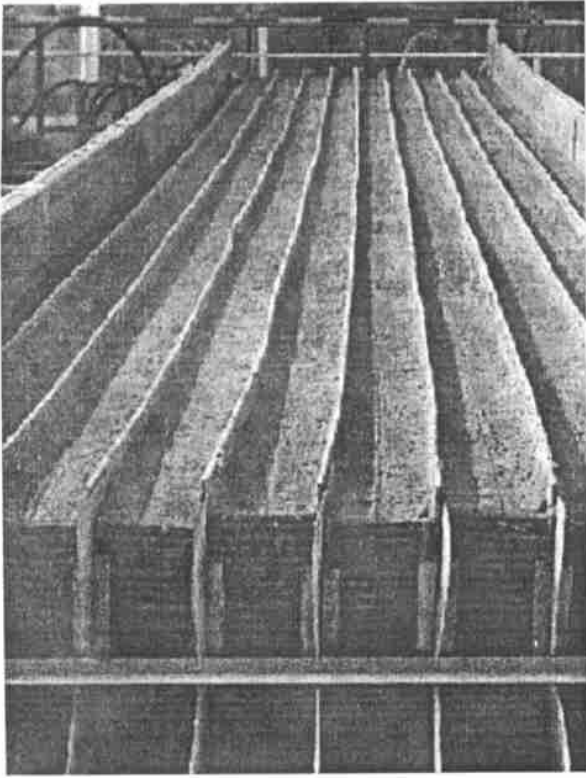


图 1 试验水槽  
Fig. 1 Experiment flume

1.3 径流量控制

由水箱加水泵供水,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  $0.12\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0.24\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0.48\text{ m}^3/\text{h}$  (即  $2\text{ L}/\text{min}$ ,  $4\text{ L}/\text{min}$ ,  $8\text{ L}/\text{min}$ )。试验重复 3 次(即在三个小土槽内同时进行),三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  $9\text{ cm}$  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,并且其对出水口处土壤的冲刷力降到尽可能小。在水

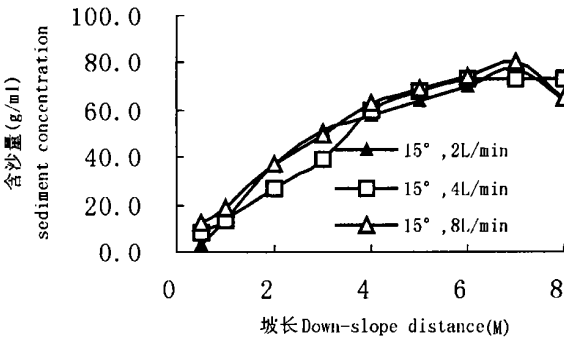


图 3 坡度为  $15^\circ$  的含沙量  
Fig. 3 The sediment concentration on slope of  $15^\circ$

管接触水槽内土壤的地方,用纱布衬垫,以减小水流的局部扰动。

1.4 径流坡长和含沙量采集

试验坡长为  $0.5\text{ m}$ ,  $1\text{ m}$ ,  $2\text{ m}$ ,  $3\text{ m}$ ,  $4\text{ m}$ ,  $6\text{ m}$ ,  $8\text{ m}$ 。观察分析实验设计汇总表数据。做一个每隔  $10\text{ cm}$  有一出水口的集水铁皮槽。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。径流稳定后,在出水口处收集泥沙样  $2\sim 3$  个。对采集的泥沙样量测体积后,烘干称重,确定含沙量。

将每个坡度、流量及坡长下的三个重复中的  $6\sim 9$  个沙样混合成一个样品,进行颗粒分析,测定土壤粘粒含量(粒径  $< 0.001\text{ mm}$ )。

2 试验结果及分析

2.1 细沟侵蚀中的含沙量

在坡度为  $5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $25^\circ$ , 流量为  $2\text{ L}/\text{min}$ ,  $4\text{ L}/\text{min}$ ,  $8\text{ L}/\text{min}$  时测定沟长为  $0.5\text{ m}$ 、 $1\text{ m}$ 、 $2\text{ m}$ 、 $3\text{ m}$ 、 $4\text{ m}$ 、 $5\text{ m}$ 、 $6\text{ m}$ 、 $7\text{ m}$ 、 $8\text{ m}$  处的含沙量如图 2~ 4 所示。

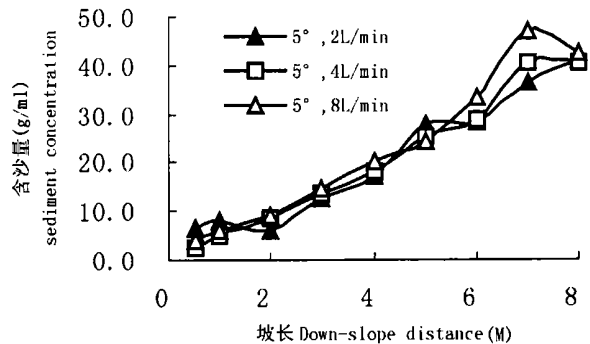


图 2 坡度为  $5^\circ$  的含沙量  
Fig. 2 The sediment concentration on slope of  $5^\circ$

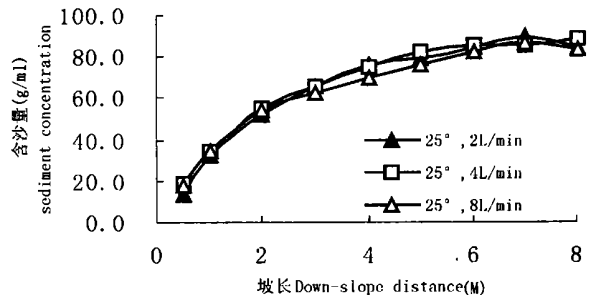


图 4 坡度为  $25^\circ$  的含沙量

Fig. 4 The sediment concentration on slope of  $25^\circ$

由图 2~ 4 可知, 在相同的坡度不同流量下的含沙量分布非常相近。由许炯心(1999)、张科利(2000 年)等的研究可知, 在一定下垫面和坡度条件下不同径流量下的土壤细沟侵蚀径流平均速度基本一致。由上图可知尽管有冲刷和沉降的相互作用, 细沟侵蚀泥沙含量和径流速度的变化具有同步性; 即在开始时由于径流主要处于加速阶段, 泥沙含量增加幅度较大; 随着速度的增大, 细沟流与下垫面的摩擦力增大, 加速度减小, 细沟流含沙量增加幅度也随之减小。由此可见, 细沟流含沙量主要与径流速度有关, 与细沟流流量的关系很小, 这样我们选取不同坡度下径流量为 4 L/min 的含沙量分布如图 5 所示。

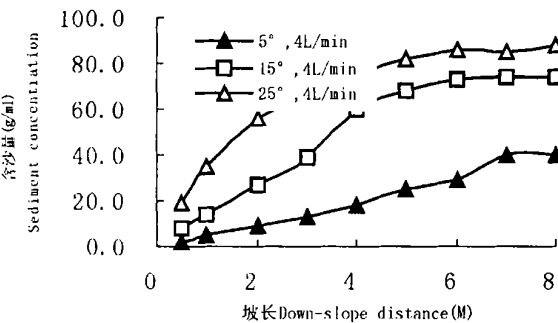


图 5 径流量为 4L/min 的含沙量

Fig. 5 The sediment concentration for flow rate of 4L/min

根据上图中含沙量的变化趋势, 设在一定坡度量时含沙量  $C$  随坡长  $x$  变化的函数式为

$$c=c_0(1-e^{-\beta x})^b \tag{1}$$

式中  $c_0, \beta, b$  为拟合参数, 进行拟合, 结果如表 1 所示, 其中  $R^2$  为决定系数。由表 1 可知, 用函数式 1 进行拟合是可行的。

表 1 径流含沙量与沟长的回归结果

Fig. 1 Regressed results of sediment concentration with rill lengths

坡度 Slope	流量(L/min) Discharge	$c_0$	$\beta$	$b$	$R^2$
5°	4	0.51	0.26	1.07	0.95
15°	4	0.76	0.37	1.39	0.85
25°	4	0.85	0.51	1.00	0.95

由公式 1 可知, 当  $x \rightarrow \infty$  时  $c=c_0$ , 即  $c_0$  为一定坡度下最大载沙量。由表 1 和图 1 可知, 随坡度的增加, 径流的载沙能力也相应增加。公式 1 对细沟

沟长  $x$  求导可得细沟侵蚀中含沙量随坡长的变化速率  $V$  为

$$V=\frac{\partial c}{\partial x}=c_0b\beta(1-e^{-\beta x})^{b-1}e^{-\beta x} \tag{2}$$

利用公式(2)和表 1 的参数计算细沟侵蚀中含沙量随坡长的变化速率如图 5.1 所示。由图 5.1 可以清楚看出, 坡度越大, 开始时泥沙含量增加较快, 这说明此时的加速度较大; 同时我们看到  $-\frac{\partial V}{\partial x}$  与坡度成正相关, 这说明细沟流的阻力或者说摩擦力增加较快。即坡度较大, 泥沙含量越大, 径流速度越易达到稳定。同时在沟长达到 8 m 时, 坡度 15° 和 25° 的含水沙量非常接近, 这是由于径流稳定之后, 稳定的径流速度主要受下垫面影响的原因(张光辉等, 2001 年), 而坡度为 5° 时径流在 8 m 的沟长内仍处于加速阶段, 泥沙含量仍在增加, 最终有可能趋于一致。

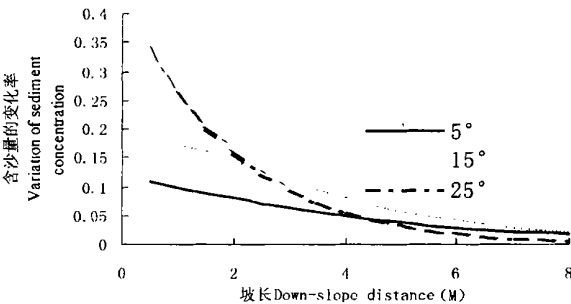


图 5.1 含沙量随坡长的变化率曲线

Fig. 5 The curve of variation of sediment concentration along downr slope distance

2.2 细沟侵蚀中的粘粒流失量

在研究土壤侵蚀时, 土壤流失量是一个很重要的参数, 用含沙量和流量的乘积就可以计算出土壤流失的强度, 而土壤肥力流失的估计只有用粘粒流失量计算。侵蚀粘粒流失量为单位重量水流中粘粒含量, 即泥沙含量与其粘粒含量(粒径< 0.001 mm 的含量)的乘积。由试验测定的含沙量及其机械组成可得粘粒流失量如图 6、7、8、9 所示。

由图 6 可知, 在相同的流量时坡度越大, 粘粒流失量总的趋势随沟长逐渐增大; 但达到一定沟长后, 坡度较大的粘粒流失量趋于一致。这是由于在开始时径流速度随坡度的增大, 增加较快, 当达到稳定或将达到稳定时, 在相同的径流量下径流速度主要与下垫面有关。

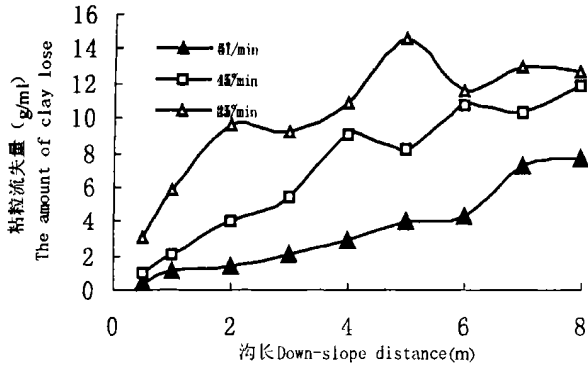


图6 流量为4L/min的粘粒流失量

Fig. 6 The amount of clay lose at 4L/min

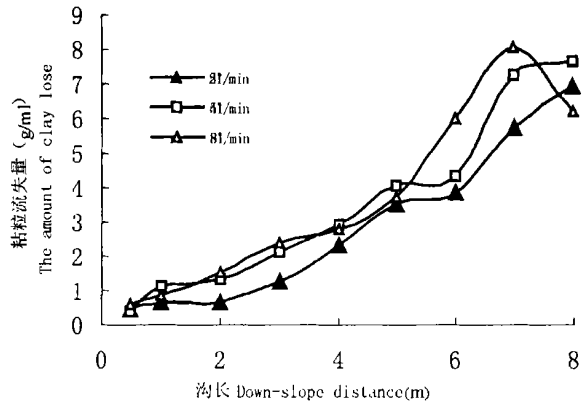


图7 坡度为5°的粘粒流失量

Fig. 7 The amount of clay lose at 5 degree

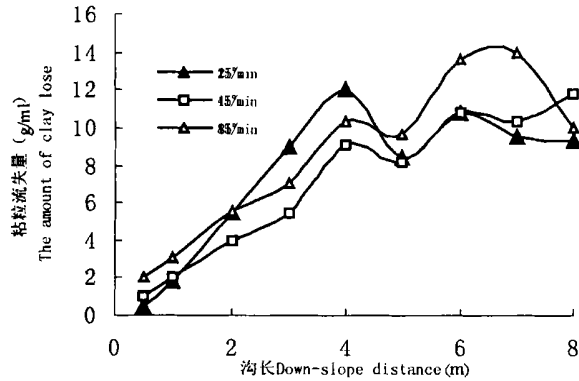


图8 坡度为15°的粘粒流失量

Fig. 8 The amount of clay lose at 15 degree

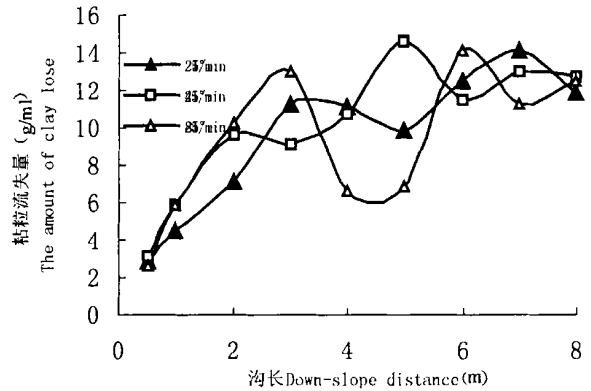


图9 坡度为25°的粘粒流失量

Fig. 9 The amount of clay lose at 25 degree

由图7~9可知,在相同的坡度下,尽管流量不一样,细沟的粘粒流失量非常接近,坡度较小时相差更小。根据流水动力学可知,粘粒在细沟中的迁移不仅与流量和速度有关,而且是粘粒沉降和剥蚀同时作用的过程。在相同的坡度下,径流流过相同的高度时,若忽略泥沙含量对径流的影响,表层水流速度基本相同;根据流速的垂直分布特性,在流量较大时,下垫面处的速度较小,剥蚀能力也较弱,剥蚀的粘粒相对较少;同时由于流量大,水层厚,粘粒沉降少。因此在同一坡度下,粘粒流失量基本相同;在坡度较大时,由于速度较快,水流呈现紊流状态,在流量不同的粘粒流失量差异较大。在细沟侵蚀中,由于沟头下切形成小跌水,使细沟流有别于一般的水流,流速、水流深度和宽度在细沟中是不稳定的,或者说这些参数的函数是不连续的,这就使粘粒流失量在细沟中的分布具有起伏性或者说呈波状分布,要定量研究这些问题还有待于进一步的实验。

### 3 结论

1. 细沟侵蚀中含沙量受坡度、下垫面和流量等多种因素的影响;在下垫面和坡度相同时,流量对细沟流的含沙量影响较小;在下垫面相同时细沟流的含沙量随坡度的增大而增加。

2. 在坡度较大时,细沟含沙量趋于稳定的沟长较短。在达到稳定时,不同坡度的含沙量有可能接近,细沟侵蚀量随流量的增大而增加。

3. 细沟侵蚀中粘粒流失量不仅与流速、下垫面、流量有关,同时受水流深度、流速分布等因素的影响。在坡度增大时,粘粒流失量总的趋势是增加的。由于水流特性和细沟发育过程的影响,粘粒流失量在细沟中沿沟长呈波状分布。

4. 由以上结论可以推知在细沟侵蚀中,坡度越大,粘粒流失量越大,土壤肥力流失也相对严重;在

相同的坡度下, 流量对土壤肥力的影响相对较小。

5. 要从动力学角度定量分析细沟侵蚀中泥沙含量及粘粒流失量的规律, 首先要比较准确地测定细沟的径流速度及其分布。其次是要多考虑下垫面的影响。

致谢: 在研究过程中得到了杨文治研究员、唐克丽研究员、李玉山研究员的指导和帮助, 在此表示衷心的感谢。

## 参考文献(References):

- [1] Hu Shixiong, Jin Changxing. The new development on the study of slope flow and erosion dynamic process[J]. *Geography Research*, 1998(3): 327~ 325. [胡世雄, 靳长兴. 坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展[J]. 地理研究 1998(3): 327~ 325.]
- [2] Wang Xiurui, Cao Weirui. Summary on Slope Soil Erosion and Sediment and Mathematical Simulation[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil & water Conservation*, 1999(9): 87~ 92. [王秀英, 曹文洪. 坡面土壤侵蚀产沙机理及数学模拟研究综述[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999(9): 87~ 92]
- [3] Xu Jiongxing. The Study on Flow Erosion of High Sediment in

Loess Plateau. *Journal of Soil Erosion and Soil & Water Conservation*[J]. 1999(3): 27~ 45. [许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999(3): 27~ 45]

- [4] Zhang Kerli. The Experiment Study on the Dynamic of Rill Erosion on Loess Slope. *The Journal of Soil and Water Conservation*, 2000(2): 9~ 15. [张科利. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 水土保持学报, 2000(2): 9~ 15]
- [5] Zhang Guanghui, Zhang Zengxiang, Han Xirui. The Characteristic Research on Flow Dynamic of Slope. *The Journal of Soil and Water Conservation*, 2001(1): 58~ 61. [张光辉, 张增祥, 韩秀珍等. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2001(1): 58~ 61]
- [6] D. K. Borah, P. K. Bordoloi. Nonuniform Sediment Transport Model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1631~ 1636
- [7] J. Y. Lu, E. A. Cassol, W. C. Moldenhauer. Sediment Transport Relationships for Sand and Silt Loam Soils[J]. *Transactions of the ASAS*. 1989, 32(6): 1923~ 1931
- [8] P. I. A. Kinnell. The Effect of Slope Length on Sediment Concentrations Associated With Side slope Erosion[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. 64: 1004~ 1008
- [9] Ferli Zheng, Chihua Huang and L. Darrell Norton. Vertical Hydraulic Gradient and Run on Water and E diment Effects on Erosion Processes and Sediment Regimes[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. 64: 4~ 11.

# Experimental Research on Sediment Concentration and Clay Loss in Rill Erosion

XIA Weisheng<sup>1, 2</sup>, LEI Tingwu<sup>2</sup>, ZHANG Qingwen<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>, PIAN Yin-hua, GAO Pili<sup>2</sup>

(1. College of resource and environment science, Changsha, Hunan Province 410081; 2 Institute of Soil and Water conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling District, Shaanxi Province 712100 PRC)

**Abstract:** Sediment concentration and clay content in runoff on a given rill length are measured under different slopes and runoff velocities in laboratory simulating experiments. The results show that the sediment concentration increases with the slope. The increasing rate of concentration decreases along the rill length, while the velocity of runoff comes to a stable value. The distribution of the amount of clay loss is the result affected by slope, flow, developed process of rill erosion, and the vertical distribution of velocity. The clay transference accompanying the detachment of soil and clay subsiding make the clay loss similar at different flow rates, and distribute undulantly along the rill lengths.

**Key words:** rill erosion; sediment content; the amount of clay lose