冲刷条件下坡面水流速度与产沙关系研究*

夏 卫生[1,2] 雷廷武[2] 张晴雯[2] 潘英华[2] 赵 军[2]
(1 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081)
(2 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 在冲刷条件下, 通过 5 种坡度下的水流速度和泥沙含量测量, 发现两者存在同步的关系; 水流速度的变化与细沟的发育存在明显的对应关系。在细沟开始发育时, 水流速度逐渐增大; 当细沟基本形成后, 水流速度减小并平稳。水流速度是影响坡面产沙的主要原因, 在低坡度时, 细沟发育较慢, 产沙量较少, 但坡度在 10° ~ 20° 之间产沙量相差不大, 到 25° 时的产沙量反而比 20° 的还少, 出现了人们观察到的临界坡度。根据坡面特性, 分析水流速度和泥沙含量之间关系使土壤侵蚀的临界坡度得到比较合理的解释。在大于临界坡度时, 水流速度一开始很快增大, 所冲刷的泥沙量并不比坡度小的少; 跌坎容易形成, 且比较深, 从而使水流速度减小。但细沟在较短的时间内发育完成, 水流速度也随之减小, 泥沙含量降低; 从而使在一定时间之后, 大于临界坡度时所冲刷的累积泥沙含量较少。通过用电解质脉冲法测量水流速度解释了坡面冲刷侵蚀过程中的一些现象, 若进一步测量其时空分布, 有可能更深入地揭示其侵蚀机理, 为建立合理的土壤侵蚀预报模型提供准确参数。

关键词 土壤侵蚀; 水流速度; 泥沙
中图分类号 157.1 文献标识码 A

土壤侵蚀已成为全世界关注的问题, 研究土壤侵蚀的机理并建立黄土高原土壤侵蚀预报模型是目前主要的研究课题之一。土壤侵蚀主要是由于径流冲刷所产生的, 降雨溅蚀也必须通过径流进行运输。径流从漫流、细沟流到切沟都会对土壤产生侵蚀作用, 而以往的研究表明, 细沟侵蚀是水土流失的主要产沙源泉, 细沟流的形成过程就是一个产沙过程。从物理学的角度来看, 细沟流对土壤的剥蚀过程就是一个径流动能转化为泥沙动能的过程, 径流的挟沙能力反映的是径流能量的大小, 而坡面坡度只决定了径流开始的能态, 从能量的角度分析土壤侵蚀的机理, 必须分析不同坡度径流的剥蚀能力。

径流侵蚀能力是指单位时间、单位长度细沟中径流分散搬运坡面土壤的能力, 主要表现在径流起动和悬浮土粒两个方面。在河流泥沙运动研究中, 早在 20 世纪 40 年代, Slields 就推导出了泥沙起动的剥蚀率:

$$D_r = K\tau(\tau - \tau_c)^{\alpha} \quad (1)$$

式中, K_τ 是指与土壤有关的性质, τ 是作用于单位土壤面积上的水流剪切力, τ_c 是侵蚀发生的临界切应力, α 为一常数。许多研究者围绕上式用不同的土壤进行了多次试验, 探讨上式中有关参数的变化。证实了水流切应力与侵蚀冲刷能力之间的基本关系与(1) 式符合[1,2]。最近的研究结果更表明, 细沟中水流侵蚀冲刷能力与水流切应力之间为简单的线性关系[3~6]。因此, 在美国新近开发的水蚀预报模型中, 取(1) 式中的 α 为 1。在研究黄土高原土壤侵蚀时, 张科利等[7~9]发现了黄土坡面径流侵蚀产沙的临界径流动能值及径流含沙量达到最大时的动能值。这些计算结果是建立在 Yang 所假设的单位水流动能与含沙量无关的基础之上, 由于受实验条件的限制, 并没有直接测量径流的水流速度。细沟对土壤的剥蚀率与水流剪切力有关; 根据流体力学的观点, 水流的剪切力是水流速度和深度的函数, 特别是水流速度直接影响水流的冲刷能力。因此解决以上问题关键是要准确测量坡面水流速度。以前测量坡面水流速度主要采用染色法, 测量结果不够准确, 电解质脉冲法[9,10]则为比较准确和及时地测量坡面水流速度提供了可能[11~13]。

为了从能量角度讨论土壤侵蚀过程, 首先从研

* 引进国外杰出人才基金(982602)、国家自然科学基金项目(40171062)、中国科学院知识创新重要研究方向项目(KZCX3-SW-422)
作者简介: 夏卫生(1966~), 湖南安化人, 博士, 副教授, 研究方向为土壤物理和土壤侵蚀
收稿日期: 2003-09-02; 收到修改稿日期: 2004-06-15

究冲刷条件下细沟发育开始, 分析其形成过程中流速与泥沙含量的关系。

1　材料与方法

1.1　试验水槽

水槽宽 10 cm, 高 33 cm, 长 8 m; 水槽可调节到试验所需要的坡度, 坡度分别调节为 5°、10°、15°、20°和 25°。

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 20 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, 部分消除填装不均匀对测量结果的影响。一次共装 15 个土槽, 其均匀性用容重控制, 容重平均值为 1 350 kg m^{-3}, 以供在 5 个坡度下的定流量冲刷, 重复 3 次。

1.3　径流量控制

由水箱供水, 采用阀门控制流量, 用水表计时, 标定流量并确定流量大小。试验采用的控制流量为 0.000 65 $m^3 s^{-1}$, 试验重复 3 次。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, 保证水流在试验槽中均匀分布, 并且使其对出水口处土壤的冲刷力降到尽可能小。在水管接触水槽内土壤的地方, 用纱布衬垫, 以减消水流的局部扰动。

1.4　含沙量和流量测量

试验坡长 8 m, 在坡面开始产流时即开始采样, 采样间隔为每分钟一次, 对采集的泥沙样量测体积后, 烘干称重, 确定含沙量。用积分桶测量体积, 加上泥沙样累积值, 可求得总流量。测量从坡面产流开始计时, 当细沟发育贯通时停止冲刷。

1.5　径流速度测量

在离入水口 1 m 处安置电解质脉冲发生器, 探针放置离电解质脉冲 7 m 处, 用电解质脉冲法测量流速系统[9,10]测量 5 个坡度的水流速度, 同时测量细沟发育长度。试验重复 3 次。

2　结果与分析

2.1　不同坡度下的水流速度变化

在不同坡度下测量的水流速度如表 1 所示。通过表 1 可知, 电解质脉冲法能在较短的时间内测量水流速度的变化, 开始时坡度越大, 水流速度越大, 一定时间之后, 低坡度的水流速度增大, 高坡度的水流速度减小, 在细沟发育完成后, 5 个坡度的水流速度相差较小, 都在 0.2 m s^{-1} 左右, 这和实际情况一致。从表 1 和图 1(图 1 中为了说明产流时间, 起始时间为开始放水冲刷的时间) 可知, 在坡度为 5° 时, 水流速度是一个比较缓慢增加的过程, 细沟形成较慢, 在第 13 分钟时形成明显的细沟; 当坡度大于或等于 10°时, 水流速度开始增加然后迅速减小, 经过一段时间后水流速度基本平稳, 水流速度的变化和细沟的发育存在明显的对应关系; 在坡度为 25° 时, 细沟发育最快, 水流速度从小很快增大, 然后迅速变小, 约在 4~ 5 min 细沟基本形成, 水流速度也开始平稳。在低坡度下, 由于细沟的形成, 水流速度增

表 1　不同坡度下水流速度随时间的变化

Table 1　Flow velocity varying with time and slopes (m s^{-1})

时间 Time (min)	坡度 Slope				
	5°	10°	15°	20°	25°
1	0.169	0.311	0.170	0.116	0.101
2	0.178	0.235	0.402	0.310	0.404
3	0.171	0.220	0.371	0.177	0.326
4	0.180	0.230	0.352	0.196	0.271
5	0.174	0.157	0.269	0.214	0.252
6	0.171	0.186	0.264	0.209	0.255
7	0.162	0.176	0.259	0.238	0.244
8	0.162	0.200	0.250	0.215	0.246
9	0.147	0.186	0.240	0.223	0.231
10	0.184	0.174	0.167	0.182	0.233
11	0.181	0.165	0.217	0.180	0.238
12	0.184	0.166	0.217	0.168	0.226
13	0.177	0.163	0.190	0.173	0.235
14	0.200	0.164	0.192	0.174	0.219
15	0.189	0.160	0.198	0.169	0.216
16	0.193	0.156	0.201		
17	0.191	0.159	0.202		
18	0.189	0.161	0.207		
19	0.184	0.166	0.203		
20	0.185	0.173	0.199		
21	0.192	0.172	0.213		
22	0.192				

加,从而存在一个加速侵蚀的过程,当细沟发展到一定程度后,水流速度增加变缓(13~ 20 min),细沟发育较慢,然后水流速度增加,细沟发育又开始加速,这主要是在这种坡度下,开始的水流速度较小,没有形成较多的跌坎,土壤侵蚀是由面蚀到细沟侵蚀的缓慢过渡过程,水流基本处于稳定流状态。在低坡度下,在细沟形成后的水流速度随坡度增加而增加。而在较高坡度时,开始的流速较大,极易形成多个跌坎,水流进入跌坎,水流速度减小,溢出跌坎再加速,坡度越大,跌坎越多,细沟发育更快,从图1可知,细沟发育完成的时间与水流开始时具有的势能成反比($T = 3.1/\sin\alpha$, α 为坡度, $R^2 = 0.89$)。从能量的角度来看,坡度较大时,水流的一部分动能消耗在形成跌坎上,因此水流速度在细沟发育中随着坡度的增加,更多的能量消耗在跌坎中。从能量转换的角度来看,细沟流由开始的势能转为水流动能的过程中,坡度越大的细沟流产生较多较深的跌坎,消耗了较多的能量,从而使经过一定坡度后单位质量具有的动能相差不大。

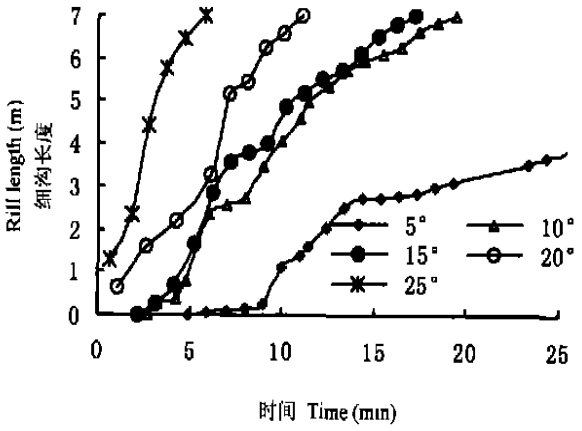


图1 不同坡度下的细沟发育

Fig 1 Rill growth on slopes different in gradient

2.2 不同坡度下的泥沙含量变化

在不同坡度下测量的泥沙含量如表2所示。计算得到5个坡度下的累积含沙量变化,如图2所示。从图中可以明显地看到,坡度为5°时径流中的泥沙含量增加缓慢,远小于其他坡度下的泥沙含量增加。在坡度5°~ 20°时,在相同的时间内,泥沙含量随坡度增大而增大。25°时5 min后的累积泥沙量小于10°时的累积值,这可能是25°已大于人们所研究的临界坡度[7],但在此时间以前,其累积泥沙量仍是较大的。因此从细沟贯通以前的情况来看,坡度越大,产生的泥沙相对较多,临界坡度可能是不存在的。同时也看到,在细沟形成过程中泥沙含量变化明显,在形成细沟后,较高坡度下的泥沙含量相对减少。因此在实际中前次形成的细沟一旦被填平,下次冲刷有可能产生更多的泥沙。

表2 不同坡度下泥沙含量随时间的变化

Table 2 Sediment concentration varying with time and slope (kg m^{-3})

时间 Time (min)	坡度 Slope 5°	10°	15°	20°	25°
1	38.0	636.5	346.6	710.9	754.9
2	142.1	661.5	693.2	584.5	678.0
3	147.2	686.5	623.8	529.9	678.1
4	152.2	620.7	530.0	617.5	439.4
5	178.9	554.9	538.4	716.4	419.9
6	205.6	497.0	525.6	720.4	400.3
7	195.2	439.1	541.8	740.5	406.8
8	184.8	453.2	536.8	691.3	330.9
9	239.1	467.3	529.4	686.4	320.7
10	293.3	410.4	501.2	725.4	337.1
11	307.2	353.4	466.0	615.5	304.8
12	321.0	333.9	412.7	552.4	406.8
13	296.2	314.4	480.9	538.6	318.7
14	271.5	319.9	530.3	499.0	219.4
15	285.4	325.4	516.9	539.8	242.4
16	274.2	297.5	483.3		
17	263.0	269.6	473.4		
18	274.5	362.9	445.0		
19	286.0	456.1	436.2		
20	283.3	377.4	410.3		
21	280.5	298.7	347.3		
22	247.4				

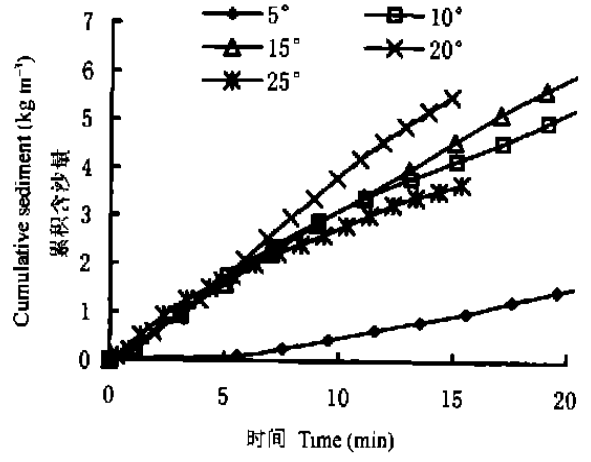


图2 不同坡度下的累积含沙量

Fig 2 Cumulative sediment concentrations on five slopes different in gradient

2.3　水流速度与泥沙含量相互作用关系

在各种坡度下, 径流的泥沙含量与速度的变化是同步的, 如在 5°时, 冲刷 13 min 时, 速度增加, 泥沙含量急剧增加, 这可能是由于速度增加, 使水流剪切力刚好大于临界剪切力。在其他坡度下, 水流速度从大到小变化, 速度逐渐平稳, 泥沙含量的变化也体现出相同的趋势, 如在 25°时, 在前 5 min 水流速度快速减小, 泥沙含量也迅速减小。冲刷的泥沙含量从高到低, 水流速度从大变小, 但水流开始的能态是一定的, 因此水流的能量只是一部分转变为泥沙动能。在细沟发育过程中, 有更多的能量被消耗, 这部分能量对于产沙而言是无效的, 而是消耗在细沟之中, 因此在细沟发育过程中, 不仅形成细沟需要消耗能量, 同时在细沟形成之后, 同样也有能量损耗。这是在计算临界坡度时必须考虑的问题。

3　结　论

综上所述, 可以得到以下结论:

1) 电解质脉冲测量冲刷条件下的水流速度是可行的, 测量的结果与实际情况基本吻合, 不同坡度下水流速度随着细沟的发育而趋于稳定, 细沟发育与水流速度的变化存在相互作用的关系。

2) 在细沟发育期间, 坡度越大, 产生的泥沙越多, 但由于坡度较小(10°~ 20°) 时, 细沟发育时间相对较长, 当细沟发育完成时, 泥沙累积量有可能高于大坡度(25°) 同等时间内的累积值。细沟形成中产沙量较多可能是导致临界坡度的原因之一。

3) 径流中含沙量的变化与水流速度是同步的, 水流速度越大, 对土壤的剥蚀能力越强, 产沙率越高。细沟发育完成的时间与径流开始的能态成反比, 开始的能态越高, 跌坎更易形成, 细沟发展也越快。

4) 径流的能量在细沟形成过程中分为三部分, 一部分是径流本身的动能, 另一部分是剥蚀和携带泥沙消耗的能量, 还有一部分是形成细沟时和在细沟中所消耗的能量。用能量的观点分析坡面水流特征, 可以从这三方面进行考虑。

以上只是在一个坡长和一个流量下对冲刷条件下水流速度和泥沙含量进行了初步的探讨, 同时这种实验条件是非常简单的, 和实际情况有很大的差距, 如土壤的下层的透水性所产生的土壤剖面含水量的差异对侵蚀强度的影响、土槽变宽所引起的细沟间侵蚀以及坡面不同距离上速度的变化等都需要进一步研究, 从能态的角度分析细沟侵蚀机理还需要做大量的工作。

参 考 文 献

[1] El-Swaify S A, Dangler E W. Erodibility of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters. *In*: Soil Erosion: Prediction and Control. Ankeny, Iowa: Soil Cons. Soc. Am., 1976. 105~ 114

[2] Mortolock D F. A self-organizing dynamics system approach to the simulation of rill initiation and development on hill-slopes. Computer & Geosciences, 1998, 24(4): 353~ 372

[3] 倪晋仁, 马蔼乃. 河流动力地貌学. 北京: 北京大学出版社, 1998. Li J R, Ma A N. The Physiognomy of River Dynamic (In Chinese). Beijing: Beijing University Press, 1998

[4] Hudson N. Soil Conservation. Iowa, USA: Iowa State University Press, 1995

[5] Lakshmikantham V, Liu X Z. On quasi stability for impulsive differential systems. Nonlinear Anal., 1989, 13: 819~ 828

[6] Nearing M A. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. Trans. ASAE, 1989, 32(5): 327~ 346

[7] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 41~ 46. Zhang K L, Akiyoshiro. Critical hydraulic condition of rill erosion on sloping surface (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 41~ 46

[8] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究. 土壤学报, 2000, 37(1): 9~ 15. Zhang K L, Tang K L. A study on hydraulic characteristics of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1): 9~ 15

[9] 夏卫生, 雷廷武, 赵军, 等. 薄层水流速度测量系统的研究. 水科学进展, 2003, (5): 85~ 90. Xia W S, Li T W, Zhao J, *et al*. Study on velocity measuring system of sheet flow (In Chinese). Advances in Water Science, 2003, (5): 85~ 90

[10] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯, 等. 坡面薄层水流中电解质脉冲迁移模型. 水利学报, 2003, 11: 22~ 26. Xia W S, Li T W, Zhang Q W, *et al*. Mathematical model of electrolyte pulse transferring in shallow water flow on hill slope (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 11: 22~ 26

[11] Gao X G, Hu X F, Wang S P, *et al*. Nitrogen losses from flooded rice field. Pedosphere, 2002, 12(2): 151~ 156

[12] Zhao Y G, Zhang G L, Gong Z T. SOTER-based soil water erosion simulation in Hainan island. Pedosphere, 2003, 13(2): 139~ 146

[13] Kumar S. Effect of different vegetation systems on soil erosion and soil nutrients in red soil region of southeastern China. Pedosphere, 2003, 13(2): 121~ 128

RELATIONSHIP BETWEEN VELOCITY OF SLOPE FLOW AND SEDIMENT GENERATION DURING EROSION

Xia Weisheng[1,2] Lei Tingwu[2] Zhang Qinwen[2] Pan Yinhua[2] Zhao Jun[2]

(1 College of Resource and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

(2 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, China)

Abstract Under erosion conditions, velocities and sediment concentrations in water flows running down five slopes different in gradient were measured. Results show that sediment concentration changes with velocity. The former is positively correlated to rill development. At the beginning of rill development, velocity of the flow increases gradually, and when rills come basically into shape, it decreases and then levels off. The velocity of the flow is the main factor causing production and transference of sediment. When the gradient of a slope is low, rills develop slowly and little sediment is produced. The production of sediment does not differ much when the slope varies between 10°~ 20°. When the gradient is at 25°, however, even less sediment is produced than 20° indicating a critical gradient existing between 20° and 25°. Based on the characteristics of a slope, analysis of the relationship between velocity of the flow and sediment concentration therein may help explain reasonably the critical gradient of the slope. When the gradient of a slope is bigger than the critical value, velocity of the flow increases at the beginning, bringing down sediment not less than that on the slope with gradient smaller than the critical value. In this case, a deep sink is more likely to form, thus reducing the velocity of the flow. Rills, however, complete their development within a short period of time, causing the velocity of the flow and sediment concentration therein to decline. As a result, the cumulated sediment eroded within a certain time from the slope with gradient bigger than the critical value is less. The measurement of velocity with the electrolyte pulse method explains some phenomena of the erosion process. If the spatio-temporal distribution of velocity is further measured, the study may likely go deep enough to reveal mechanism of erosion and provide more accurate parameters for establishment of a rational model for prediction of soil erosion.

Key words Soil erosion; Flow velocity; Sediment concentration