研究简报

土壤侵蚀中细沟流的初步分析

夏 卫生[1], 刘贤赵[2]
(1. 湖南师范大学 国土学院, 湖南 长沙 410081; 2. 烟台师范学院 地理系, 山东 烟台 271000)

摘 要: 细沟中水流速度主要受流量、含沙量和下垫面等因素的影响。在流量不变的条件下, 通过假定粘滞阻力与流速成正比, 导出水流的运动学方程; 以此方程对实验测量结果进行非线性拟合, 得到了水流速度与时间的关系函数, 摩擦系数与侵蚀强度的关系式及流体粘滞力与泥沙含量的关系式。这些函数式表明此数学模型在流速较小时是可行的; 水流速度主要受泥沙含量和坡度的影响; 坡度越大, 在开始时速度快速增大, 但达到稳定流速的时间较长。

关键词: 细沟流; 动力学模型; 土壤侵蚀
文献标识码: A 文章编号: 1000—288X(2002)02—0013—03 中图分类号: S157.1

Elementary Analysis of Rill Flow in Course of Soil Erosion

XIA Wei-sheng[1], LIU Xian-zhao[2]
(1. *College of National Land, Hu´nan Normal University, Changsha* 410081, *Hu´nan Province, China*;
2. *Depeartment of Geography and Tourism, Yantai Normal University, Yantai* 271000, *Shandong Province, China*)

Abstract: The determination of the velocity in rill flow is the basis of studying the soil erosion. The velocity of rill flow is influenced by flow discharge, sediment concentration, underlying soil and so on. Under the steady discharge, by assuming the resistance of viscosity is directly proportional to the velocity of flow, the dynamic equation of rill flow is deduced. By nonlinear simulation of the experiment data, we obtained functions between velocity of flow and time, the friction coefficient and erosion intensity, and the viscosity force and sediment concentration in flow. The simulating procedure and results show that the model is feasible when the velocity of flow is lower. Velocity of flow is mainly affected by slope and sediment concentration. When the slope is steeper, the velocity enlarges more quickly, but needs more time to achieve steady value.

Keywords: **rill flow**; **dynamic model**; **soil erosion**

从力学角度来看, 径流对土壤的冲刷作用主要是取决于土壤的抗蚀能力和径流的侵蚀强度。对于一定的土壤而言, 其抗蚀能力是一定的(雷廷武, 2000)。径流的冲蚀能力主要是由径流量、径流速度和泥沙含量决定的[5—8], 这 3 个因素之间又存在着相互作用的关系。在平均流速和泥沙含量相同时, 流量越大, 水流对土壤的剪切力越小; 在流量一定时, 水流速度越大, 水流的挟沙能力越强, 水流对土壤的剪切力越大。由此可见, 水流速度是影响土壤侵蚀的主要因素。

水流平均速度主要是受流量、下垫面的粗糙程度、坡度等因素的影响。对于相同的土壤, 坡度越大, 水流达到稳定所需的时间越长, 最终的水流速度越大; 在土壤细沟或细沟间侵蚀阶段, 流量越大, 细沟越宽, 从而使水深基本稳定。因此在进行细沟流的动力学分析时主要考虑流量一定的情况。在坡度小于 25°, 不考虑或忽略跌坎对水流的搅动, 水流的雷诺系数 R 一般较小, 水流可以看成标准的牛顿流。

1 流体的动力学模型

根据流体力学原理和以前的研究可知, 流速越大, 阻力越大, 速度与阻力成正比, 流体的阻力是速度、流量与流体泥沙含量的函数。同时假设水流的阻力与流速成一次线性关系, 则摩擦阻力与流体单位质量比为:

$$f/m = kv + c \tag{1}$$

式中: f —— 摩擦阻力; v —— 水流速度; k, c —— 待定常数。

由此可知单位质量水流的加速度 a 的表达式:

$$a = g\sin\alpha - c - kv \tag{2}$$

式中: g ——重力加速度(m/s^2); α ——坡度(弧度)。

收稿日期: 2002-02-01
资助项目: 国家自然科学基金(4017062; 4011005)
作者简介: 夏卫生(1966—), 男(汉族), 湖南安化人, 博士生, 主要从事土壤物理和土壤侵蚀方面的研究。电话(029)7015048, E-mail: xws@ms.iswc.ac.cn。

(2)式可写为:

$$\frac{d^2S}{dt^2} + k\frac{dS}{dt} = g\sin\alpha - c \qquad (3)$$

设初始条件和边界条件为:

$$S = 0, \qquad t = 0 \qquad (3.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = v_0, \qquad t = 0 \qquad (3.2)$$

$$\frac{d^2S}{dt^2} = 0, \qquad t = \infty \qquad (3.3)$$

对方程(3)和(3.1),(3.2)进行 Laplace 变换可得:

$$S^2L(s) + ksL(s) = \frac{g\sin\alpha - c}{s} + v_0 \qquad (4)$$

上式中 $L(s) = \int S(t)e^{-st}dt$;(4)式($k \neq 0$)可简化为:

$$L(s) = \frac{g\sin\alpha - c}{s(s^2 + sk)} + \frac{v_0}{s^2 + sk}$$

$$= \frac{g\sin\alpha - c}{k^2}\left(\frac{1}{s} - \frac{k}{s^2} - \frac{1}{s+k}\right) + \frac{v_0}{k}\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+k}\right) \qquad (5)$$

求 Laplace 逆变换可得:

$$S = -\frac{g\sin\alpha - c}{k^2}(1 - kt - e^{-kt}) + \frac{v_0}{k}(1 - e^{-kt}) \qquad (6)$$

根据试验测定的 S 和 t 的关系曲线就可以推求出 k 和 c 的值。

由(6)式可求得速度为:

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{g\sin\alpha - c}{k}(1 - e^{-kt}) + v_0e^{-kt} \qquad (7)$$

加速度 a 为:

$$a = (g\sin\alpha - c - kv_0)e^{-kt} \qquad (8)$$

当 $k\hat{U}O$ 时

$$a = (g\sin\alpha - c)t \qquad (9)$$

由(9)式和经典力学原理可知,本数学模型在理论上是合理的。由于开始时的速度 v_0 也是未知的,因此在方程(6)或(7)式中共有3个未知参数 k, c 和 v_0,可用最小二乘法进行求解。

2 材料与方法

本实验分别采用过2mm筛的重壤土和轻壤土作为供试土壤,2种土壤的容重分别控制为1 300 kg/m^{3}和1 350 kg/m^3,机械组成如表1所示。对土壤表层饱和后,在坡度为5°,10°,15时,用流量为0.09 m^3/s的水进行冲刷。在形成细沟后,用染色剂测定0.5m,1.0m,1.5m,2.0m,2.5m,3.0m,3.5m,4.0m,4.5m和5.0m处的时间。染色剂采用汽油和油漆的混合物,比重为1 090 kg/m^3。

这样的染色剂测定的不是水流表层的流速,而是能近似地表示水流的平均流速。同时用烘干法测定各点的泥沙含量。

表1 土壤的机械组成

粒级/mm	2～0.25	0.25～0.05	0.05～0.01	0.01～0.005	0.005～0.001	<0.001	<0.01
轻壤土	0.16	22.57	60.6	4.2	3.1	9.4	16.7
重壤土	0.40	4.50	44.7	10.7	20.6	19.1	50.4

3 结果与分析

用公式(6)对染色剂测量结果进行拟合可得到不同土壤在不同坡度下的参数 k, c 和 v_0,结果如表2所示。用表2中的参数代入公式(7)中可求得不同土壤在不同坡度下的速度分布如图1和图2所示。

表2 染色剂测量结果

土壤	坡度	k	c	v_0	R^2
轻壤土	5°	0.524 1	0.089 8	0.125 4	0.91
	10°	0.825 4	0.321 1	0.154 2	0.94
	15°	1.235 1	0.086 21	0.095 6	0.89
重壤土	5°	0.485 4	0.115 4	0.112 4	0.88
	10°	0.724 1	0.420 5	0.098 5	0.86
	15°	0.985 4	0.442 1	0.105 8	0.91

由表2可知,对于相同的土壤,在相同的初速度 v_0 下,参数 k 值有一定的差别,即随着坡度的增大而增大,同时我们还注意到在相同的坡度下,轻壤土的 k 值大于重壤土,这可能是重壤土本身所含的细颗粒较多的原因。如图1和图2可知,随着坡度的增大,在相同测点的速度越大,冲刷能力和载沙能力增强,从而使得下垫面的土壤细颗粒减少,表土层粗化,与水流接触面的摩擦系数增大,也可能是水流中泥沙含量增加,使摩擦系数增大,从而使参数 k 值增大。

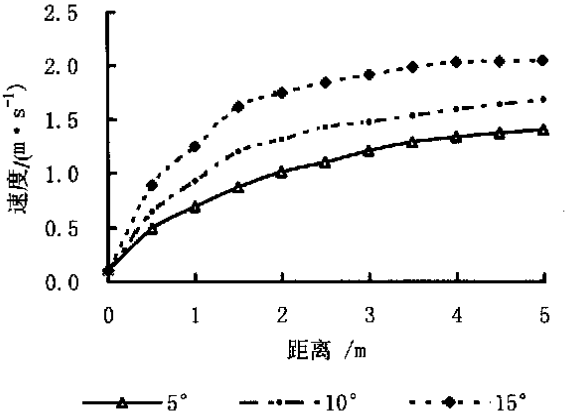

图1 下垫面为轻壤土时速度在各测点的分布

由图 1 和图 2 可知, 无论轻壤土还是重壤土, 随着坡度的增大, 相应各测点的速度增大, 在开始一段时间内(距离约 2 m) 坡度较大时速度增加较快, 随后速度增加变缓。这点从表 2 中参数 k 值可以解释, 在开始时, 由于水流中含泥沙较少, 水流的加速度主要与坡度有关, 速度增加较快。在速度增大后, 冲蚀能力增强, 从而使土壤表面粗化或水流中的含沙量增大, 使得参数 k 值增加。由(2) 式可知, 加速度与速度成反比关系, 因此在后一段尽管坡度较大时速度较大, 但增加较缓慢。由于坡度较大时, 重力在斜坡产生的加速度较大, 速度要达到稳定值, 仍需要较长的时间。

各测点(从 0.5 m 处开始, 每 1.0 m 取样) 的泥沙含量($kg \cdot kg^{-1}\%$) 分别如图 3 所示。由图 3 可知, 对不同土壤在相同坡度时含沙量是基本相同的, 土壤细颗粒含量较高时, 相同测点的泥沙含量稍高, 但差别不明显。这说明由于在表 2 中相同坡度下参数 k 值相差不是很大, 在相应测点水的冲蚀能力也相差不大。

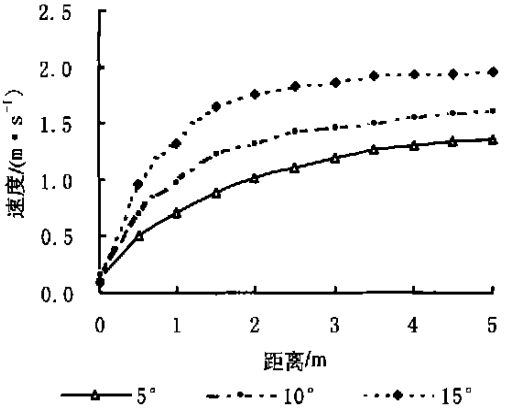

图 2　下垫面为重壤土时速度在各测点的分布

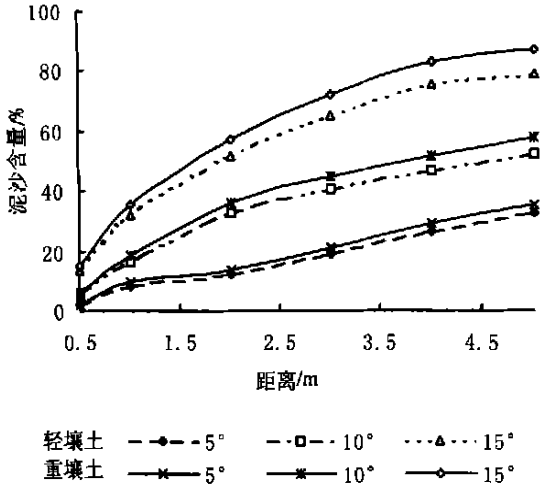

图 3　不同坡度下的含沙量分布

由于本实验采用的是示踪法测量水流速度, 测量的距离不能太长, 所以拟合参数的测点数据不多, 拟合结果有一定的局限性。同时用秒表测量时间, 所得到的结果实验误差较大, 这一方面有待于以后研究中进一步提高。

[参 考 文 献]

[1] Abraham A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11: 653—657.

[2] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. Soil Technology, 1992, 5: 289—301.

[3] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics. I: velocity relationships[J]. Soil Technology, 1992, 5: 289—301.

[4] Horton R E, Leach H R, Viet V R. Laminar sheet-flow[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1934, 15: 393—404.

[5] King K W, Norton L. Methods of rill flow velocity dynamics[C]. American Society of Agricultural Engineering Meeting Presentation Paper[C], 1992: 92: 2532—2542.

[6] Gang Li, Abraham A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 509—515.

[7] Guy B T, Dickinson W T, R P. The rules of rainfall in the sediment transport capacity of interrill flow [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1378—1387.

[8] Govers G. Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. Earth Surface Processes Landforms, 1992, 17: 515—528.

[9] Abraham A D, Li G, Parsons J. Rill hydraulics on a semiarid hill slope, southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 35—47.

[10] 唐克丽. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其防治途径[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990. 1—249.

[11] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395—402.

[12] 雷廷武, M. A. Nearing. 确定侵蚀细沟水力学特征及细沟侵蚀与形态的水槽试验研究[J], 水利学报, 2000 (11): 49—54.