

电解质脉冲法测量降雨条件下 坡地水流速度的实验研究

夏卫生^{1,2}, 张宏², 刘贤赵³

(1. 湖南师范大学 资源与环境科学院, 湖南 长沙 410081; 2. 杨凌职业技术学院 水利系,
陕西 杨凌 712100; 3. 烟台师范学院 地理与旅游系, 山东 烟台 264025)

摘要: 在降雨强度为 50 mm/h 的条件下, 在降雨 10 min 后, 在坡面初步形成细沟时, 用电解质脉冲法对 4 种坡度的水流速度进行了测量。测量结果表明无论土壤表面是细漫流或细沟流, 用这种方法均可进行测量。从理论上和拟合结果来看, 这种方法测量水流速度是可行的。若进一步研究, 有可能用于解释细沟侵蚀的机理。

关键词: 电解质脉冲法; 细沟侵蚀; 薄层水流; 水流速度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2002)06-0026-03

中图分类号: O646.1

Experimental Research on Flow Velocity of Rillslopes in Rainfall

XIA Wei-sheng^{1,2}, ZHANG Hong², LIU Xian-zhao³

(1. College of National Land, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. Department of Water Conservancy, Hydrology, Occupational Technology College of Yangling, Yangling District 712100, Shanxi Province, China; 3. Department of Geography and Tourism, Yantai Teachers University, Yantai 264025, Shandong Province, China)

Abstract Four types flow velocity are measured using electrolyte pulse method while rills are formed at slope, and when it rain for 10 minutes with intensity of 50 mm/h. The results show that the method is feasible to measure the velocity of sheet flow, no matter the rill is formed or not. The velocity of flow on soil surface can be measured and may be used to explain the mechanism of rill erosion.

Keywords electrolyte pulse method; rill erosion; sheet flow; flow velocity

在细沟侵蚀中, 水土流失量主要与水流速度、流量和水流的挟沙能力有关。水流速度不仅与坡度有关, 同时受流量的影响, 人们对细沟流中水流速度与流量的关系认识主要借助于江河或明渠的测量和研究成果。细沟流中水流速度沿流线方向的垂直分布是一个非常困难的问题。要研究这个问题, 首先要测量细沟流的平均速度。细沟流与漫流的水层都较薄, 测量河流和明渠水流速度的方法都无法适用, 为此目前比较常用的主要有示踪法^[1-4]。示踪剂主要用高锰酸钾溶液^[3-6]或 NaCl 溶液^[1,7-8]。用高锰酸钾溶液主要是应用其红色随水流的流动而进行测定, 其测量的结果表征的是最快水流速度, 要计算其平均速度需乘以一定的系数, 这个系数主要根据水流的特征进行确定。而水流状态的人为确定和系数的相对固定值可能对平均速度的测量产生较大的误差。同时用秒表测量时间有较大的误差, 使测量结果可信度较低。NaCl 溶

液作为示踪剂, 用电表测量水流中电导率的变化, 克服了用秒表测量时间而引起的误差, 但由于对水流的状态无法确定, 计算时仍需引用经验系数。在无法准确测量水流速度的情况, 就无法了解径流对土壤侵蚀的机理, 并对土壤的抗蚀能力进行评价, 因此探讨一种新的方法测量薄层水流速度是非常必要的。

1 电解质脉冲迁移数学模型

在土壤侵蚀过程中, 在距离较短时, 可以假定流量不变, 水流速度稳定, 由溶质扩散理论可得电解质脉冲迁移的微分方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (D_H \frac{\partial C}{\partial x}) \quad (1)$$

式中: C ——水流中电脉冲迁移强度 (相对值, mv), 是 x 和 t 的函数; x ——沿坡向坐标 (m); t ——时间 (s); D_H ——泥沙在水中的扩散系数 (m^2/s)。

(1) 式的边界条件和初始条件为:

$$C(0, t) = C_0 W(t) \quad (1a)$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad (1b)$$

$$C(x, 0) = 0 \quad (1c)$$

用 Laplace 变换, 可得:

$$C(x, t) = C_0 \frac{x}{2t \pi D_H t} \exp\left(\frac{ux}{2D_H}\right) \exp\left(-\frac{u^2 t}{4D_H}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{4D_H t}\right) \quad (2)$$

在 $C(x, t)$ 达到最大值时, 需有

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\left[-\frac{3}{2t} - \frac{u^2}{4D_H} + \frac{x^2}{4D_H t^2}\right] = 0 \quad (4)$$

$$u^2 t^2 + 6D_H t - x^2 = 0 \quad (5)$$

$$u = \frac{x^2 - 6D_H t}{t} \quad (6)$$

由 (6) 可知, D_H 和 u 是相关联的, (2) 式中只有 2 个待求参数, 用最小二乘法就可简单地计算出结果

2 实验材料与方法

2.1 电解质脉冲测量水流速度装置

电解质脉冲测量水流速度装置主要由 3 部分组成: (1) 脉冲波检测部分, 这部分由电解质脉冲发生装置和探针组成; (2) 数据采集, 即把探针采集的信号经模数转换成数字信号, 并用一定格式进行存储, 数据采集频率为 100 点/s; (3) 数据处理和速度计算, 由 Visual Basic 语言编写。

2.2 实验方法

实验采用长为 8 m, 宽 15 cm, 高 20 cm 的土槽, 底层铺 2 cm 厚的细沙, 上层为陕北安塞黄绵土 (轻壤土), 其容重为 1.335 kg/m^3 , 初始含水量为 25% (kg/kg), 饱和导水率为 $2.79 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (饱和含水量为 36.25%)。细沙与土壤之间用纱布隔开。在离顶端 3 m 处放入 KCl 溶液自动滴入装置, 在 4, 5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8 m 处共放入 7 组测试探针。KCl 溶液加入的时间为 600 ms, 由于加入的时间较短, KCl 溶液加入水中可以看成是一个电解质脉冲, 在加入 KCl 溶液时, 探针同时开始测量。实验坡度分别为 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$; 雨强为 50 mm/h , 在实验中用电解质脉冲法测定水流速度的时间间隔为 1 min。

3 结果与讨论

探针测量结果经数模转换后, 输入计算机, 得到以时间为横轴 (X 轴), 相对电导率为纵轴 (Y 轴) 的

波形图, 经归一化处理, 用公式 (2) 和 (6), 经最小二乘法计算可得到各点在不同降雨历时下的水流速度。在 5 个坡度下, 降雨历时为 10 min 的拟合结果如图 1~5 所示, 图中虚线为实测结果, 光滑线为模拟结果, 随着曲线最大值的右移, 分别为距离电解质脉冲发生点 1, 2, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 m 处的测量结果和模拟结果。由图 1~5 可知, 本仪器能比较完整地测量电解质脉冲在水流中的迁移。

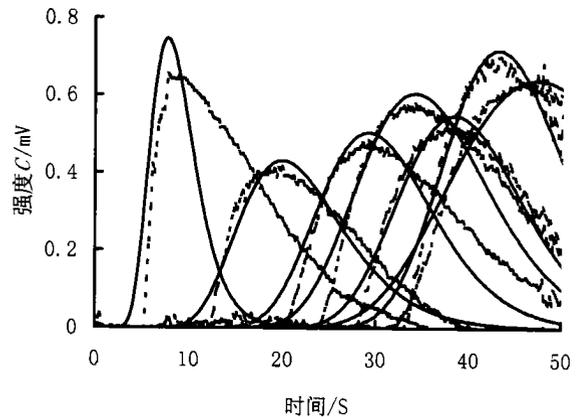


图 1 坡度为 5° 时的实测与拟合结果

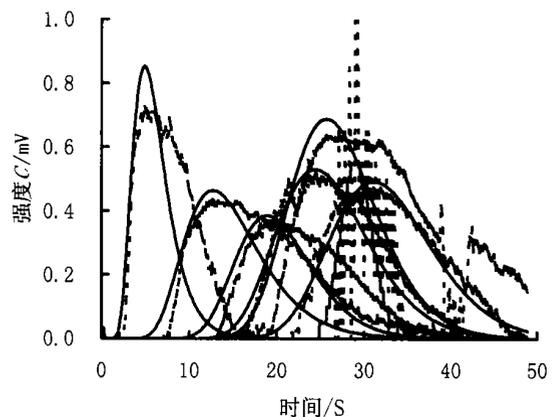


图 2 坡度为 10° 时的实测与拟合结果

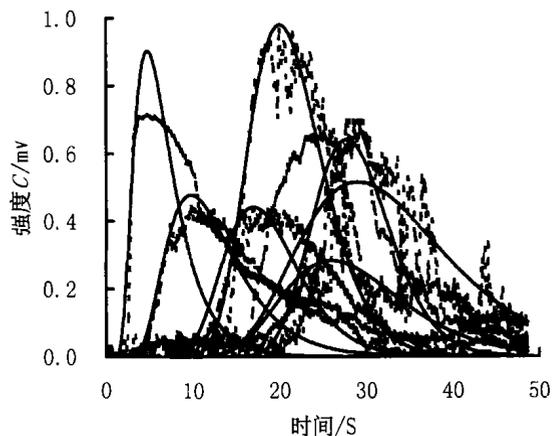


图 3 坡度为 15° 时的实测与拟合结果

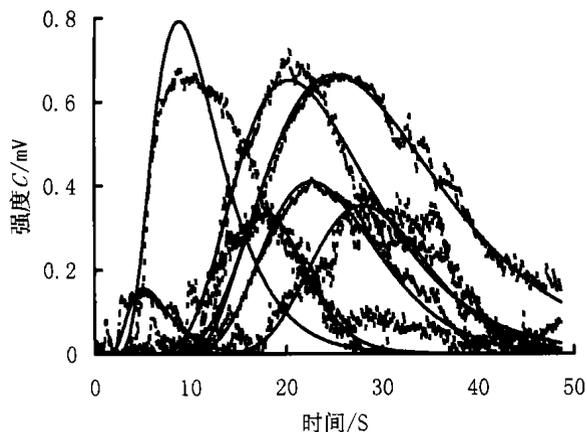


图 4 坡度为 20°时的实测与拟合结果

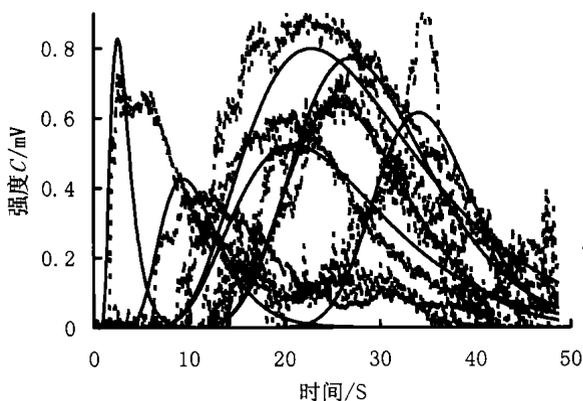


图 5 坡度为 25°时的实测与拟合结果

随着坡度增大,测量结果的抖动也随之增大,模拟值与实测值的误差也较大,这可能是由坡度增大,水流速也增大,水流紊流系数增大,同时在降雨时,雨滴的击溅对电解质脉冲的迁移也有一定的影响。在图中还可以看到随着坡长的增加,测量的 C 值并没有随之减小,这可能是基于两方面的原因,一是由于各组探针接触水的深度不一样;二是由于探针加的电压稍有差异,由于在计算过程中采用的相对值,这种测量差异只会对参数 C_0 产生影响,而不会影响速度和扩散率的计算。在坡长较大的测点,由于土壤冲刷比较严重,细沟较深,从而使探针出现了轻微的摆动,测量的电导率出现了较大的偏差,这在将来的实际测量中须把探针加长一些,以增加其稳定性。

用公式(2)对实测结果进行拟合,可得到在降雨 10 min 后径流的平均速度(表 1),拟合结果与实测结果的标准差均小于 0.001。从总的趋势来看,开始水流速度随坡度增加而增加,经过一定坡长(如 5 时 3.5 m)之后水流平均速度逐渐稳定。在不同的坡度下,降雨 10 min 时由于形成的细沟长度不同,细沟源头的跌坎作用,使水流速度减小,从下划线的数据来看,随坡度的增加,细沟发育越快。由此可见,细沟发育、形成机理有可能用水流平均速度进行定量的探讨。

表 1 降雨历时为 10 min 时水流速度 m/s

坡度	1 m	2 m	3 m	3.5 m	4 m	4.5 m	5 m
5°	0.117	0.126	0.136	0.123	0.115	0.123	0.115
10°	0.149	0.152	0.166	0.162	0.167	0.172	0.163
15°	0.291	0.259	0.190	0.23	0.241	0.272	0.293
20°	0.374	0.287	0.113	0.114	0.135	0.129	0.116
25°	0.405	0.329	0.202	0.183	0.241	0.214	0.203

4 结 论

(1) 用电解质脉冲法测量降雨条件下水流流速利用了经典的溶质迁移理论和脉冲传导方程,在理论上是合理的,仪器设计也是可行的。相对盐溶液示踪法,电解质脉冲法不需要采用经验参数对水流速度进行校正。

(2) 从测量结果来看,基本上和前人的研究成果^[8]相似,若进一步研究,用本方法测定不同降雨历时下水流速度,有可能用于定量研究细沟侵蚀机理。

(3) 脉冲时间的长短可能是影响测量结果的主要原因,在速度较大的情况,测量距离必须加长,或者缩短加入电解质的时间,使时间相对较短的方波能作为脉冲对待,否则会使计算产生误差。

[参 考 文 献]

- [1] Abrahams 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, Vliet V R. Laminar sheet-flow [J]. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1934, 15: 393- 404.
- [5] Gang Li, Abrahams 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Abrahams 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.