

# 坡面薄层水流流速测量的比较研究

夏卫生<sup>1,2</sup>, 雷廷武<sup>2,3</sup>, 刘春平<sup>1</sup>, 吴金水<sup>2</sup>, 赵军<sup>2</sup>

(1. 湖南师范大学资源与环境科学院, 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, 杨凌 712100; 3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 在室内模拟水槽中分别用质心运动学原理、电解质脉冲法和流量法3种方法测量不同坡度、不同泥沙含量条件下的薄层水流流速。比较以上3种测量结果发现在下垫面无渗透时,即加入的盐液没有损失时,电解质脉冲法测量坡面薄层水流流速与质心运动速度及流量法测量结果基本是一致的。在泥沙含量较大时,电解质脉冲法测量结果的误差较大,流量对测量结果影响不显著;随着测量距离的延长,测量误差变小,这可能是随着测量距离的增加,加入电解质的时间与测量时间之比减小,从而使假设加入的电解质为电解质脉冲更加合理。总的来说,电解质脉冲法在实验条件下测量坡面薄层水流流速是可行的。

**关键词:** 质心运动速度; 坡面薄层水流; 电解质脉冲法; 流量法; 数学模拟

**中图分类号:** S158.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1002-6819(2004)02-0023-04

## 0 引言

在坡面土壤侵蚀中,水流是产生土壤侵蚀和使泥沙运移的动力,水流速度的研究是定量分析土壤剥蚀和径流挟沙能力的基础。颜色示踪法和盐液示踪法的采用为建立土壤侵蚀模型获取了许多重要参数<sup>[1-3]</sup>。目前的概念性土壤侵蚀模型如RUSLE和WEPP模型,综合了土壤侵蚀机理研究的成果,能达到一定的预报效果,但在精度上有时还不如经验模型。这主要是二方面的原因:一是土壤侵蚀机理的研究还不够深入;二是模型参数不够准确<sup>[4,5]</sup>。在坡面侵蚀过程中,影响土壤侵蚀主要是下垫面的特性,水流速度和泥沙含量等。其中水流速度的准确测量是目前土壤侵蚀定量研究的难题之一。

在无泥沙和流速较小时,示踪法能较好地测量水流速度,但在坡面土壤侵蚀过程中,由于坡度和坡长不同,水流速度不同,水流对土壤的剥蚀率也不同,径流所含泥沙也不同;同时径流中的泥沙含量是一个动态过程。由于剥蚀作用,水流中的泥沙不断增加,而泥沙的沉降作用使泥沙含量不断减少,因此水流中的泥沙是一个不断变化的过程。泥沙含量变化使示踪法经验系数无法确定,因此测量坡面薄层水流的方法必须要不受泥沙含量的影响<sup>[6-9]</sup>。

在明渠水流测量过程中,对于非常规则的渠道,流量法是目前测量流速比较准确的方法之一,其原理明确、简单。对于坡面薄层水流,由于水流深度在厘米级,其误差主要是产生于水层厚度的测量。在盐液无损失的情况下,盐液质心的运动速度能较好的表示水流速度<sup>[1,5,9]</sup>。在示踪法的基础上,假设加入的盐液为电解质脉冲,建立盐液在水流中迁移的数学模型,并求得解析

解。再根据测量结果拟合出水流速度,这种方法为电解质脉冲法,从理论和初步测量结果来看是可行的<sup>[10,11]</sup>。这种新的方法的可行性需要用大量的实验进行验证,分析泥沙含量、流速和流量对测量结果的影响。但在野外或室内不规范条件下,至今没有一种好的方法对薄层水流流速进行比较准确的测量,因此只有在室内设置规范的模拟水槽,用质心运动速度和流量法的测量结果对这种方法进行验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 模拟匀速水槽

在恒定流速水槽中,恒定流速水槽高度为50 cm,长4 m,内宽14.7 cm。用恒压输沙系统加入恒流量的含沙水流,流量分别为0.0004、0.0008和0.0004 m<sup>3</sup>/s。在离入水1、1.5、2.0和2.5 m处布置电导感应探针,探针之间的宽度为1 cm。水槽坡度可调,坡度分别为1°、2°、3°、4°、5°、6°、7°、8°、9°和10°;共10个坡度,以便在水槽中产生不同水流速度。

### 1.2 流速测量方法

三种测量模拟水槽水流流速的方法简介如下:一是流量法即在不同坡度和泥沙含量条件下,测量水流流量与水深,流量用积分桶测量,水深用水位计测量,水位计的精度为1/10 mm。二是电解质脉冲法<sup>[9-11]</sup>,即用电导感应探针的检测电导率,经模数转换后用最小二乘法对电解质迁移的数学模型进行拟合,计算出水流速度。三是运动学原理计算质心运动速度。对电解质脉冲法水流速度测量系统的计算部分进行修改,各感应探点质心通过的时间 $T_c^n$ 计算如下

$$T_c^n = \frac{\sum_{i=1}^k C_i^n T_i^n}{C_i^n} \quad n = 1, 4; k = N \quad (1)$$

式中 $C_i^n$ —— $n$ 个探针在时间 $T_i^n$ 所测的电压值。以第一个探针测量的质心通过的时间为起点,由各点的时间差和距离计算质点运动速度。

收稿日期: 2002-12-10 修订日期: 2003-12-12

资助项目: 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)

作者简介: 夏卫生(1966-), 博士, 副教授, 湖南安化县人, 主要从事土壤物理和土壤侵蚀方面的研究。长沙市 湖南师范大学资源与环境科学院, 410081



## 2 结果与分析

### 2.1 泥沙含量对流速测量的影响

在坡度  $1 \sim 10$  内, 设定流量为  $0.0004 \text{ m}^3/\text{s}$ , 泥沙含量分别为清水、 $31.50$  (各种坡度下的平均值, 下同)、 $87.47$ 、 $187.02$ 、 $328.41$  和  $458.10 \text{ kg/m}^3$ , 测量距离为  $1 \text{ m}$ 。其中无泥沙和泥沙含量分别为  $31.50$ 、 $187.02$  和  $483.10 \text{ kg/m}^3$  测量结果如图 1~4 所示, 其中质心速度为  $V_1$  (m/s), 电解质脉冲法测量的水流速度为  $V_2$  (m/s), 流量法测量的速度为  $V_3$  (m/s)。每次实验均重复 3 次, 重复结果的差异较小。

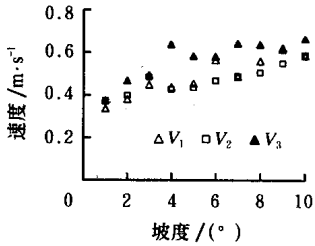


图 1 清水的测量结果

Fig. 1 Measured velocities of flow without sediment

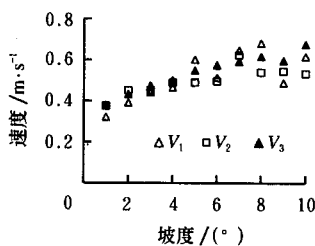


图 2 含沙量为  $31.50 \text{ kg/m}^3$  水流测量结果

Fig. 2 Measured velocities of flow with  $31.50 \text{ kg/m}^3$  sediment

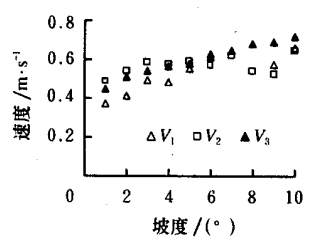


图 3 含沙量为  $187.02 \text{ kg/m}^3$  水流测量结果

Fig. 3 Measured velocities of flow with  $187.02 \text{ kg/m}^3$  sediment

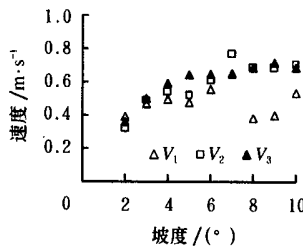


图 4 含沙量为  $483.10 \text{ kg/m}^3$  水流测量结果

Fig. 4 Measured velocities of flow with  $483.10 \text{ kg/m}^3$  sediment

由图 1~4 可知, 在清水和含沙量较少时如含沙量为  $31.50 \text{ kg/m}^3$  (1.6%, 质量含沙量, 下同) 和  $187.02 \text{ kg/m}^3$  (10.1%) 时, 流量法和电解质脉冲法测量的速度  $V_2, V_3$ , 与质心速度  $V_1$  大小基本相同。随着泥沙含量的增加, 流量法与电解质脉冲法测量结果还能基本一致, 质心速度较小时, 三者还能保持一致, 当速度较大, 与前两种方法的测量结果有较大的差异。如在泥沙含量为  $483.10 \text{ kg/m}^3$ , 坡度大于 7 时质心速度偏离较大。这可能是由于泥沙含量增加, 泥沙沉降加剧, 从泥沙含量的测量结果可以看到, 实验时配置的泥沙浓度为  $600 \text{ kg/m}^3$ , 而实际测量结果为  $483.10 \text{ kg/m}^3$ 。盐液加入水流中后一部分被泥沙吸附, 部分泥沙使水流中盐液浓度降低; 在速度较小时, 沉降的泥沙不再流动, 影响的是整体浓度, 因此对测量结果影响极小; 而在流速较大时, 冲刷更加剧烈, 沉降和冲刷使水中泥沙和沉降的泥沙发生交换, 使后部分时间测量的电导率偏大, 由公式 (1) 可

知,  $T_c$  增大, 质心运动的时间出现了滞后, 从而使计算的质心速度偏小。

为了分析 3 种测量方法的整体差异, 用以上不同泥沙含量下的流量法测量的速度和质心速度进行对比分析如图 5 所示。电解质脉冲法与流量法测量结果的对比如图 6 所示。

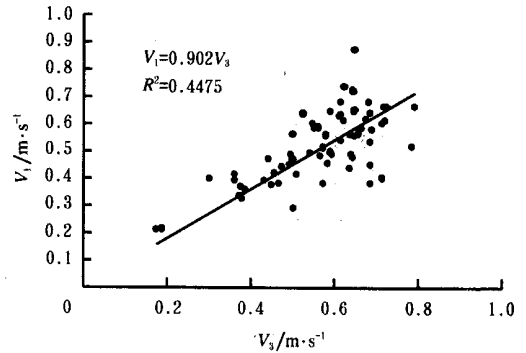


图 5 流量法测量速度与质心速度的比较 (测量距离为  $1 \text{ m}$ )

Fig. 5 Comparing of velocities measured by discharge method and centroid velocities

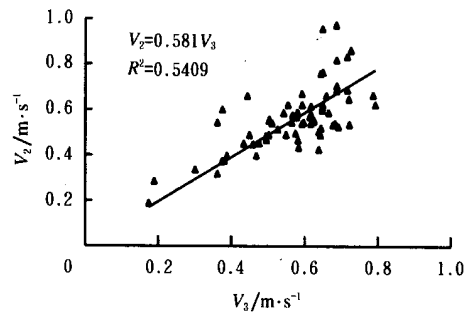


图 6 流量法与电解质脉冲法测量的水流速度比较 (测量距离为  $1 \text{ m}$ )

Fig. 6 Flow velocities measured by discharge method and electrolyte pulse method

在图 5 和图 6 中, 用流量法测量的速度为自变量, 质心速度与电解质脉冲法测量的速度为因变量横坐标, 进行线性拟合。结果表明, 质心速度与流量法的整体误差在 10% 左右, 而电解质脉冲法与流量法的整体误差小于 5%, 后者的拟合系数明显高于前者。由此可见, 在理论上用盐液质心运动速度计算水流速度是可行的, 但在实际中电解质脉冲法测量的水流速度更好一点。这可能是由于用质心速度表示水流速度要求所测的每一点都十分准确, 而电解质脉冲法只要求其趋势是正确的, 尽管有部分点测量有误差, 但对计算结果影响较小。

### 2.2 流量对流速测量的影响

调节实验流量分别为  $0.0004 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $0.0008 \text{ m}^3/\text{s}$ , 测量距离为  $1 \text{ m}$ , 测量坡度分别为  $1 \sim 10^\circ$ ; 用质心运动计算法、电解质脉冲法和流量法测量清水和泥沙含量为  $87.47 \text{ kg/m}^3$  和  $483.48 \text{ kg/m}^3$  的水流速度如图 5、10~12 所示。在图中  $V_1, V_2$  和  $V_3$  表示在流量为  $0.0004 \text{ m}^3/\text{s}$  时分别以上 3 种方法测量的水流速度结果;  $V_1, V_2$  和  $V_3$  分别用以上 3 种方法在流量为  $0.0008 \text{ m}^3/\text{s}$  时测量的水流速度。

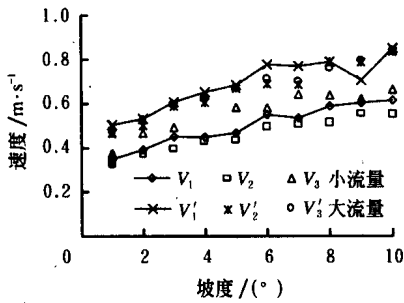


图 7 两种流量下的清水流速

Fig 7 Flow velocity of two kinds of discharge without sediment

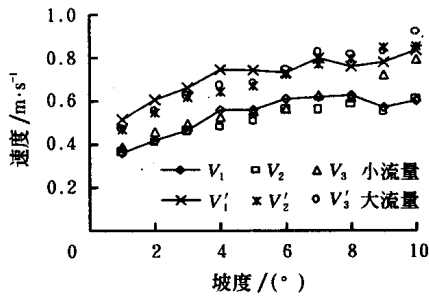


图 8 两种流量下泥沙含量为 87.47 kg/m³ 时的水流速度

Fig 8 Flow velocity with 87.47 kg/m³ sediment of two kinds of runoff

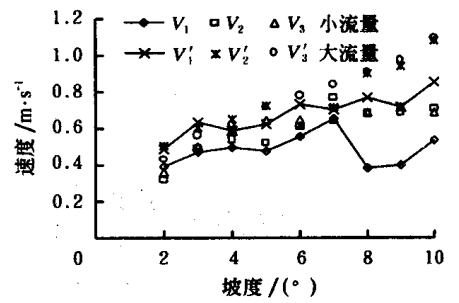


图 9 两种流量下泥沙含量为 483.48 kg/m³ 时的水流速度

Fig 9 Flow velocity with 483.48 kg/m³ sediment of two kinds of runoff

由图 7~ 9 可知, 流量越大, 在相同坡度下水流速度越大; 电解质脉冲法和流量法测量的水流速度与盐液质心运动速度基本相同, 说明清水和泥沙含量较低时, 在上述实验条件下, 这 3 种方法都能测量薄层水流流速。在实验中也可观测到泥沙含量较低时, 水槽中的泥沙沉降极小。这说明水流挟沙能力大于或等于水中的泥沙含量时, 泥沙沉降极少, 电解质脉冲法和质心运动计算方法测量水流速度的测量比较准确, 不受流量的影响。

在图 9 中可见, 在坡度较小时, 流速较小, 3 种方法测量结果非常接近, 在大流量坡度为 4 时和小流量坡度为 6 时, 的质心速度开始偏离流量法和电解质脉冲法测量的水流速度, 这与图 5、13 中泥沙含量的变化相对应, 说明由于大流量的流速较大, 随着坡度增大, 流速达到一定值后, 水流的挟沙能力增强, 剥蚀能力也增强, 由公式 1 计算的质心速度也比实际水流速度要小, 而电解质脉冲法没有受太大的影响, 可见电解质脉冲法从理论上而言, 测量结果应等于质心速度, 但由于测量曲线的后部分在拟合中进行了合理的舍弃, 使测量的结果比质心速度更接近实际水流流速。

### 2.3 测量距离对电解质脉冲法测量流速的影响

调节流量为 0.0004 m³/s, 电解质脉冲宽度为 600 ms, 坡度为 1°~ 10°, 间隔 1°, 泥沙含量分别为 0, 31.50, 87.47, 187.02, 328.41 和 458.10 kg/m³, 在距离加入电

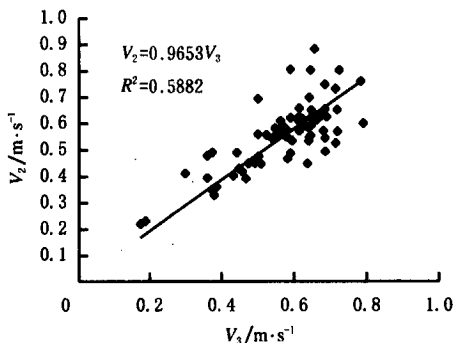


图 10 距离为 1.5 m 时各种坡度和泥沙含量下的流速测量结果  
Fig 10 Measured velocities with two methods at different slopes and sediment concentrations at 1.5 m distance

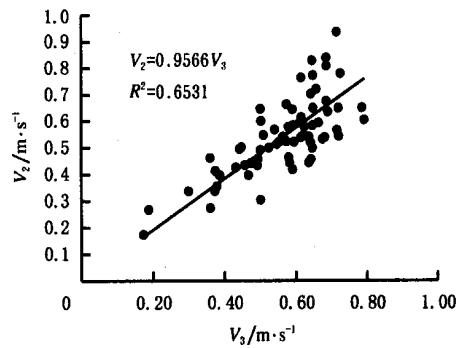


图 11 距离为 2 m 时各种坡度和泥沙含量下的流速测量结果  
Fig 11 Measured velocities with two methods at different slopes and sediment concentrations at 2 m distance

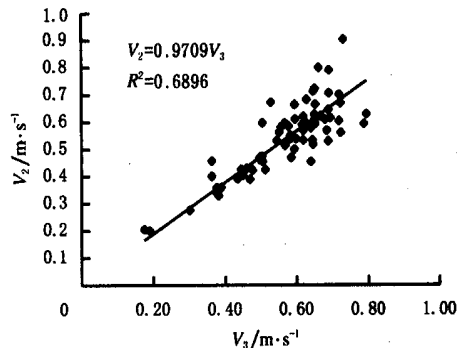


图 12 距离为 2.5 m 时各种坡度和泥沙含量下的流速测量结果  
Fig 12 Measured velocities with two methods at different slopes and sediment concentrations at 2.5 m distance

解质脉冲 1、1.5、2.0 和 2.5 m 处用流量法和电解质脉冲法测量水流速度分别加为  $V_3$  和  $V_2$ , 用在各种泥沙含量和坡度下流量法测量的水流速度为横坐标, 以电解质脉冲法测量的水流速度为纵坐标, 其结果分别如图 6 和图 10~ 12 所示。

由图 6、图 10~ 12 可知, 由  $V_2 = KV_3$  进行拟合时,  $K$  值接近 1, 说明电解质脉冲法和流量法测量的水流速度整体是一致的。随着测量距离的增长, 拟合的决定系数  $R^2$  也逐渐增大, 说明电解质脉冲法与流量法测量的差异逐渐缩小。可能是由于在相同的流速下, 电解质脉冲宽度与测量距离的比值减小, 使加入的盐水产生的电波更接近于一个电脉冲, 从而使电解质脉冲法测量水流

速度的精度有所提高,因此要测量更短距离内的坡面薄层水流流速,需要对电解质脉冲的频率进一步增大,否则只有修改数学模型的初始条件,用数值解计算水流速度,此问题还有待于更深一步的研究。

### 3 结 论

通过质心运动学原理、电解质脉冲法和流量法测量不同坡度、流量和泥沙含量的薄层水流流速表明:

在含沙量较少的情况下,3种方法在不同坡度下测量的结果非常接近,泥沙含量较高时,由于水流的沉降和冲刷使质心运动速度滞后于水流速度,因此在含沙量较大时,水流达到一定速度后,质心的速度小于流量法测量的流速,而电解质脉冲法测量的水流速度受此影响不大。

流量对以上3种测量方法的影响均很小。在小流量下流量法中水流深度的测量误差会较大程度地影响其计算结果;在有泥沙时,小流量的流速较慢,泥沙更易沉降,这会影响到质心速度的计算结果,而电解质脉冲法能很好地克服这方面的问题。

测量距离对电解质脉冲法测量流速的影响主要是由于测量系统本身的局限性,即发生电解质脉冲的频率。当距离较短,速度较快时,加入盐水就不可能看成电解质脉冲,盐液迁移的初始条件发生了变化,必须采用数值法对数学模型进行求解,只有当距离足够长时,加入的盐水更接近理论上的电解质脉冲,从而使数学模型更加准确。因此进一步改进电解质脉冲发生器就有可能测量更短距离内的水流速度,或者用有限元法求解溶质迁移数学模型也有可能使模拟更加准确。

综上所述,电解质脉冲法测量水流速度不仅理论上是合理的,只要合理设计,在室内无渗透的条件下是可以应用的。

### [参 考 文 献]

- [1] Gang Li, Athol D. Abrahams. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 509- 515.
- [2] Abrahams A D, Atkinson J F. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29: 3021- 3028.
- [3] 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.
- [4] Elder J W. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1959, 5: 544- 560.
- [5] Emmett W W. The hydraulics of overland flow on hillslope [M]. U. S. Geological Survey Professional paper, 1970, 662- A, A- 1- A- 68.
- [6] Gilley R E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rill [J]. *Transactions of American Society of Agriculture Engineering*, 1970, 33, 1900- 1906.
- [7] Horton R E, Leach H R, Van Vilet R. Laminar sheet flow [J]. *Transactions of American Society of Agriculture Engineering Meeting presentation paper* 1934, 92: 25- 42.
- [8] King K W, Norton L D. Methods of rill flow velocity dynamics [A]. *American society of Agriculture Engineering Meeting Presentation paper*, 92- 2542.
- [9] 夏卫生,雷廷武,赵军,等.泥沙含量对盐液示踪法经验系数影响的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 4: 348- 352.
- [10] 夏卫生,雷廷武,赵军,等.薄层水流速度测量系统的研究[J]. *水科学进展*, 2003, 6: 85- 90.
- [11] 夏卫生,雷廷武,张晴雯,等.薄层水流中电解质脉冲迁移模型理论分析[J]. *水利学报*, 2003, 11: 90- 95.

## Comparative analysis of measurement of velocity of slope laminar flow

Xia Weisheng<sup>1,2</sup>, Lei Tingwu<sup>2,3</sup>, Liu Chunping<sup>1</sup>, Wu J inshui<sup>2</sup>, Zhao Jun<sup>2</sup>

(1. College of Resource and Environment 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 Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The velocity of sheet flow in simulating trough, which is at different slopes and discharges and sediment concentration, is measured with three methods, i.e., centroid-velocity calculating method, electrolyte-pulse method and flow-rate method. Comparing results measured by these three methods showed that velocity of flow measured by electrolyte pulse method agree with those of other two methods while no permeating in the bottom or no losing of salt solute in the experimental process. When the sediment concentration is too much, the error of velocity measured by electrolyte pulse method argument, but the discharge of flow affect the measuring results little. Prolonging the measuring distance can make the error of velocity measured by electrolyte pulse method decrease, which supposing the inputting electrolyte as a pulse become more in reason when the ratio between inputting time and measure interval decrease along the measuring distance increases. In a word, the electrolyte pulse method is feasible for measuring the velocity of sheet flow in the experimental condition.

**Key words:** centroid velocity; laminar flow on slope; electrolyte pulse method; flow-rate method; mathematical simulation