

文章编号: 1004-4574(2007)01-0050-05

示踪法测量坡面水流速度理论缺陷分析

夏 卫 生^{1,2}, 刘 春 平¹, 雷 廷 武², 胡 月 明³, 赵 军²

(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; 3 华南农业大学, 广东 广州 510642)

摘要: 示踪法需对经验系数进行修正才能得到水流速度; 而经验系数受多种因素的影响, 在不同的条件下如何使用, 有较大的随意性。对溶质运移数学模型解析解的分析发现, 由溶质浓度在观测点达到最大值的时间计算得到的速度无法推算出实际水流速度, 以此为基础的染色示踪法或盐液示踪法存在着理论上的缺陷。溶质的弥散系数对示踪法测量水流速度也有较大的影响, 弥散系数越大, 质心到达观测点的时间与浓度最大值到达该点的时间偏离越远。在实验测量中, 泥沙含量对经验系数影响较大, 这可能是其影响弥散系数的结果; 理论上水流速度增大使经验系数增大, 但在实验测量中不同泥沙含量下水流速度对经验系数的影响并不显著, 因此在修正经验系数时必须考虑水流中的泥沙含量和其它水质差异。

关键词: 示踪法; 水流速度; 经验系数; 泥沙含量

中图分类号: S157.1 文献标识码: A

Analysis of faults in theory for measuring flow velocity on slope with tracer method

XIA Wei-sheng^{1,2}, LU Chun-ping¹, LEI Ting-wu², HU Yue-ming³, ZHAO Jun²

(1. College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences Ministry of Water Resources

Yangling 712100, China 3. South China Agricultural University Guangzhou 510642 China)

Abstract In the conventional tracer method, the flow velocity is determined by the time for the tracer to cover a certain distance, and an arbitrarily chosen empirical correction coefficient. The empirical coefficient is influenced by many factors. The analytical solution of mathematical model for solute transport in flowing water was graphically shown that the velocity of flow can not be calculated with the estimated velocity by the time for the peak solute concentration to cover a distance from the injection location to the measuring point, as used in color or salt tracer method. The conventional tracer methods for velocity determination have theoretical faults. The dispersion coefficient of the solute has significant effect on the velocity measured by the tracer method. The bigger the dispersion coefficient, the larger the time interval between the peak and centroid arriving time. The sediment concentration affects empirical coefficients and the dispersion of solute transport. Theoretically, the velocity enhances the coefficients, but there is not significant relation between them. Therefore, the sediment content or the water quality should be considered and different correction coefficient should be used while measuring the velocity of flow using tracer method.

Keywords tracer method; flow velocity; empirical coefficient; sediment content

收稿日期: 2004-03-15 修订日期: 2004-07-22

基金项目: 中国科学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目 (10501-158); 湖南省自然科学基金资助项目 (05JJ40116); 湖南省教育厅项目 (04C330)

作者简介: 夏卫生 (1966-), 男, 副教授, 博士, 主要从事土壤物理和侵蚀方面的研究。E-mail: xw@hunnu.edu.cn

坡面水流速度的测量是研究土壤侵蚀动力学研究的基础, 人们目前主要采用示踪法进行测量。示踪剂一般为染料或电解质如 NaCl 或 KCl 溶液。染料示踪法由于测量的时间误差较大, 人们改用盐液示踪法^{[2 8][9]290}。盐液示踪法和染料示踪法测量坡面水流速度的原理是相同的, 在加入盐溶液 (或染色剂) 后, 测量水流中两点 (距离为 ΔS) 的电导率变化时间差 (ΔT), 则速度为 $U = \Delta S / \Delta T$, 再用经验系数修正。电导率变化即可用电解质最先到达测点的时间计算水流的表面流速 (即电解质最先到达测点), 也可用电导率达到最大值的时间计算优势流速 U_p ; 前者经验系数为 α 后者的经验系数为 β 。对于经验系数 α 研究较多, 对于不同的水流状态, α 值不同。在国内一般认为水流为层流时, $\alpha = 0.67$; 混合水流 (或过渡流) 时 $\alpha = 0.7$; 紊流时 $\alpha = 0.8$ Merz^[1] 在田间测量薄层水流 (laminar flow) 时报道该系数接近 0.52。在不同的测量环境, 系数 α 差异较大, 但总的都认为, 系数 α 与流量关系不大, 但与水流状态或流速有一定的关系, 流速越大, 系数越大。在 1934 Horton et al^[7] 从理论中计算了经验系数 α 为 0.67。随后 Emmett (1970)^[5] 的薄层水流实验表明经验系数随水流速度或雷诺数的增加而增加, 最大可以达到 0.8。Luk、Merz 和 Phelps 在田间薄层水流测量中发现 α 在 0.4~0.52 之间^{[9]299[10]}。也有室内实验表明 α 与坡度成反比, 而与雷诺数无关。Taylor 研究表明经验系数 β 与 α 没有本质区别。在测点的电导率曲线中, 由于水流有一定的导电性, 加上水流的紊动, 判断电解液到达时间是有一定的难度的, 而用出现最大值时的时间比较容易确定, 因此在室内实验中, 更多是用速度 U_p 计算水流速度^[3 4 6], 本研究将从水流中溶质迁移的数学模型入手, 从理论上分析不同条件下示踪法经验系数变化的原因, 并用初步实验探讨泥沙含量和流速对经验系数 β 的影响。

1 坡面薄层水流的溶质迁移模型

在盐液示踪法中, 假设流量变化不大, 盐液也没有损失时, 根据溶质运移理论, 盐液浓度的控制方程为:

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

在加盐溶液时如果时间较短, 可以认为是一个电解质脉冲。由此可得边界条件和边界条件为:

$$C(0, t) = C_0 \delta(t)$$

$$C(\infty, t) = 0$$

$$C(x, 0) = 0$$

式中 C 为水流中的盐液浓度, 若用电导率测量时为电解液的迁移强度 (V), 是 x 和 t 的函数; x 为沿坡向的坐标 (m); t 为时间 (s); D_H 为 (电解质) 泥沙在水中的弥散系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。上式经 Laplace 变换可得解析解为

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

2 理论分析

2.1 速度对电解质迁移的影响

假设 $C_0 = 1.0\text{V}$, 弥散系数 $D_H = 0.01\text{m}^2/\text{s}$ 测量距离为 0.5m, 水流速度分别为 0.1m/s, 0.2m/s, 0.4m/s 利用公式 (2) 绘制电解质脉冲在水流中迁移如图 1 所示。由图 (1) 可知, 随着水流速度的增大, 盐液电解液的浓度 (电导率) 达到最大值的时间分别为 2.83s, 1.86s 和 1.07s 最大值也逐渐变大。这是由于水流速度越快, 盐液到达测量点的时间越短, 在弥散系数相同的条件下, 弥散的距离越短, 在速度较小, 测点的电导率与时间曲线更趋缓和, 说明盐液的动力弥散占优势。利用以上结果可计算水流平均速度与优势流速之比 (经验系数 β) 分别为 0.57, 0.74 和 0.86 这说明经验系数 β 随水流平均速度增大。

2.2 弥散系数对电解质脉冲迁移的影响

假设 $C_0 = 1.0\text{V}$, 水流速度 $u = 0.2\text{m/s}$ 测量距离为 0.5m, 弥散系数分别为 $0.01\text{m}^2/\text{s}$, $0.005\text{m}^2/\text{s}$, $0.001\text{m}^2/\text{s}$ 利用公式绘制电解质脉冲在水流中迁移分布如图 2 所示。由 (2) 式可知, 在电压也即电解液的浓度达到最大值的时间分别为 1.86s, 2.15s 和 2.43s 随着弥散速度的减小, 在相同速度的条件下出现最大的时

间越慢,而波峰越高,并且陡峭,这应和实际情况是一致的。由出现最大值的时间可计算出速度分别为 0.268 m/s、0.232 m/s、0.206 m/s 而实际速度为 0.2 m/s。从这也可以看到,最高点不是电解质脉冲的质心位置,随着弥散系数的减小,由最大值出现的时间计算的水流速度越接近于实际速度,当溶质在溶液中无弥散时,出现最大值的时间才是质点到达的时间。这也就说明用最大值出现的时间计算的速度来推求水流速度时,还要考虑弥散系数的大小,否则会出现很大的误差。甚至是错误。由溶质弥散研究可知,泥沙含量影响水流中盐液的弥散系数,其影响大小将通过下面实验进行初步探讨。

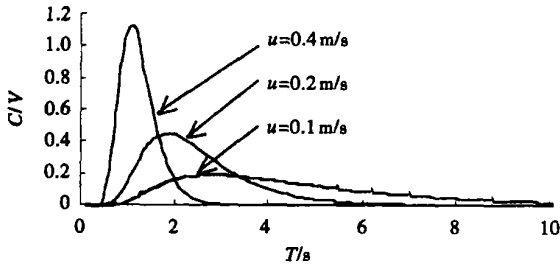


图 1 不同水流速度下的电解质脉冲迁移曲线
Fig 1 Transferring curves of electrolyte pulse in flow with different velocities

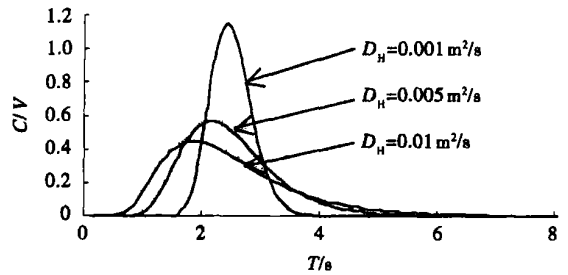


图 2 不同弥散系数条件下的电解质脉冲迁移
Fig 2 Transferring of electrolyte pulse in flow with different dispersion coefficients

3 实验分析

3.1 材料与方 法

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,泥沙含量分别为 0% (清水), 4.94%, 9.39%, 21.87%, 24.05%, 34.16%, 44.71% 和 60.16%;流量为 0.0005 m³ · s⁻¹。在离入水 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2.0 m 和 2.5 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,坡度在 0.5°~20°之间。用流量法测量水流速度为 V₃。根据电导感应探针测量的曲线找到电导率到达最大值的时间,以此为自变量,距离为因变量进行线性拟合计算出优势流的速度为 V₁₀。清水和泥沙含量分别为 9.39%, 34.16% 与 44.71% 的结果如表 1-表 4 所示,表中 R 为拟合系数。

3.2 结果分析

表 1 清水的示踪法与流量法测量结果

Table 1 Measured results from tracer method and discharge method in clear flow

坡度	0.5°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	8°	10°	12°
V ₁	0.182	0.711	0.768	0.921	1.055	1.099	1.266	1.101	1.215	1.273
R ²	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.95
V ₂	0.125	0.512	0.537	0.654	0.746	0.712	0.854	0.781	0.84	0.916
β	0.69	0.72	0.70	0.71	0.71	0.65	0.67	0.71	0.69	0.72

表 2 泥沙含量为 9.39% 的示踪法与流量法测量结果

Table 2 Measured results from tracer method and discharge method in flow with 9.39 percent sediment

坡度	0.5°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	8°	10°	12°
V ₁	0.401	0.760	0.751	0.949	1.078	1.017	0.957	1.102	1.253	1.189
R ₂	0.95	0.99	0.97	0.99	0.98	0.99	0.97	0.97	0.98	0.98
V ₂	0.319	0.499	0.547	0.640	0.759	0.823	0.725	0.763	0.914	0.934
β	0.80	0.66	0.73	0.67	0.70	0.81	0.76	0.69	0.73	0.79

表 3 泥沙含量为 34.16% 的示踪法与流量法测量结果

Table 3 Measured results from tracer method and discharge method in flow with 34.16 percent sediment

坡度	3°	4°	5°	6°	8°	10°	12°	15°	20°
V_1	1.019	1.12	1.151	1.195	1.238	1.308	1.27	1.46	1.575
R^2	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99
V_2	0.72	0.886	0.902	1.013	1.023	0.98	0.986	1.088	1.147
β	0.71	0.79	0.78	0.85	0.83	0.75	0.78	0.75	0.73

表 4 泥沙含量为 44.71% 的示踪法与流量法测量结果

Table 4 Measured results from tracer method and discharge method in flow with 44.71 percent sediment

坡度	3°	4°	5°	6°	8°	10°	12°	15°	20°
V_1	1.030	1.162	1.199	1.342	1.419	1.544	1.466	1.595	1.688
R^2	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99
V_2	0.768	0.922	0.936	1.191	1.217	1.279	1.301	1.312	1.271
β	0.75	0.79	0.78	0.89	0.86	0.83	0.89	0.82	0.75

由表 1-表 4 可知, 电导率达到最大值的时间与距离的拟合时的回归系数接近 1, 说明两者成较好的线性关系, 同时也表明了模拟水槽的水流速度基本上是稳定不变的。随着坡度增大, 流速一般增加, 同时也有个别现象, 这是由于流量的控制及水深测量有一定的误差。当无泥沙或泥沙含量较低时, 在各种坡度下的经验系数 β 非常接近; 当泥沙含量达到一定值时 (如 44.71%) 经验系数 β 有随速度增大而增大的趋势, 但相关性不太明显。因此从理论上讲, 水流速度影响经验系数相当显著, 而在实验测量中却不明显, 这种现象有待进一步研究。

由于在相同泥沙含量下不同坡度 (或速度) 的经验系数基本一致, 取其平均值与泥沙含量作图, 如图 3 所示。从图 3 可知, 随着泥沙含量增加, 经验系数增大, 即在泥沙含量较高时, 优势流速更接近水流的平均流速; 这表明盐液在高浓度泥水中弥散系数减小。这可能是由于泥沙含量增大, 水流中层与层之间的磨擦系数增大, 水流上下层的速度差异缩小, 从而使平均流速与优势流速进一步接近, 使经验系数增大。这种泥沙含量与弥散系数的关系和溶质运移研究结果是一致的。

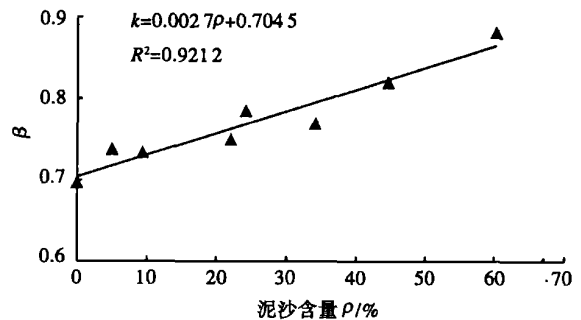


图 3 示踪法经验系数与含沙量的关系曲线

Fig. 3 Relationship between empiric coefficient of tracer method and sediment content

4 结论

综上所述, 通过坡面水流中盐液迁移数学模型的解析解和实验分析可得到如下结论:

(1) 示踪法在测量坡面水流时的经验系数受多种因素的影响, 人们在不同的条件下如使用时具有多样性, 考虑主要影响因素是研究土壤侵蚀动力学必须探讨的问题之一。

(2) 用溶质运移数学模型的解析解分析发现, 用溶质浓度在观测点达到最大值的时间计算得到的速度无法推算出实际水流速度, 以此为基础的染色示踪法或盐液示踪法在理论上存在一定的缺陷。从理论上而言溶质的弥散系数和水流速度对示踪法测量水流速度也有较大的影响。

(3) 在实验测量中泥沙含量对经验系数影响较大, 这可能是其影响弥散系数的结果; 理论上水流速度增大使经验系数增大, 泥沙含量增加 1%, 经验系数增加 0.0027, 相当于增加 0.9%; 在实验测量中不同泥沙含量下水流速度对经验系数的影响不显著, 因此如果用示踪法测量水流速度, 其经验系数必须考虑水流中泥沙含量或其它水质差异, 否则其测量的水流速度将与实际值有较大的误差。

(4)在田间应用示踪法测量水流速度时其经验系数的影响因素可能存在不同的情况,这有待于进一步探讨。

参考文献:

- [1] Gang Li, Abrahams A. 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 JF. 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] Eklor 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 [R]. 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 Vleet R. Laminar sheet flow [C] // Transactions of American Society of Agriculture Engineering Meeting presentation paper, U. S, 1934, 92- 2542.
- [8] King K W, Norton L D. Methods of rill flow velocity dynamics [C] // American society of Agriculture Engineering Meeting Presentation paper, 92 - 2542
- [9] 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
- [10] Phelps H O. Shallow laminar flows over rough granular surfaces [C] // Journal of the hydraulics Division, Proceedings of the American society of civil Engineers, U. S, 1992, 101: 367- 384
- [11] Taylor G I. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe [C] // Proceedings of the Royal society, GB, 1954, Series A, 223: 446- 468