

# 电解质示踪测量坡面薄层水流流速的改进方法

史晓楠<sup>1,2</sup>, 雷廷武<sup>1,3\*</sup>, 夏卫生<sup>4</sup>

- (1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;  
3. 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;  
4. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081)

**摘要:** 薄层水流速度测量对坡面水文和土壤侵蚀过程预测具有重要意义。电解质示踪脉冲模型在短距离测量流速的精度较低, 提高短距离测量精度是开发便携测量设备的需要。该文对电解质示踪脉冲模型的边界条件进行改进, 采用正态分布函数代替脉冲函数的边界, 提出了电解质示踪法测量流速的正态模型。用正态边界条件和脉冲模型解的卷积作为实际电解质传输过程的解, 得到更符合实际的电解质传输模型。利用正态模型与试验观测数据拟合, 得到水流流速的估计值。与脉冲模型比较, 正态模型不同程度地降低了不同测量位置流速预测的误差。研究结果为改进测量流速的设备开发提供了科学依据。

**关键词:** 流速测量, 电解质, 模型, 正态分布

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.05.011

中图分类号: TV131.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-05-0065-06

史晓楠, 雷廷武, 夏卫生. 电解质示踪测量坡面薄层水流流速的改进方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 65-70.  
Shi Xiaonan, Lei Tingwu, Xia Weisheng. Advanced method for measuring velocity of shallow flow on hill-slope with electrolyte tracer[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 65-70. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

坡面土壤侵蚀过程中, 水流是产生土壤侵蚀和使泥沙运移的动力, 坡面薄层水流流速是所有土壤侵蚀过程模型的必要参数<sup>[1]</sup>。如果流速不能准确地获得, 即使侵蚀总量预测是准确的, 也将造成侵蚀过程的错误预测<sup>[2-3]</sup>。径流水流的厚度通常都是毫米级的, 水流速度受坡度、坡长、流量和下垫面粗糙度等多因素的影响, 因此, 探求一种有效的测量水流流速的方法或工具是当前研究的重点和难点。在测量细沟或切沟等存在明显流线的水流时, 传统的流速计由于体积太大等原因而无法使用, 只好借用明渠的水流公式, 利用土壤粗糙度、径流量、细沟宽度、坡长等进行间接推求水流流速, 但是由于水流深度和含沙量等因素的影响, 这种方法所测结果的可信度较低。流量法对于规则横断面的流速测量是一种简单有效的标定工具<sup>[4]</sup>, 在实际中很难使用。新近提出的热脉冲法、浮游反光材料示踪法、光电或电导传感器法、电解质示踪法等<sup>[5-12]</sup>, 理论尚不完善, 有待进一步深入研究和大量实践验证<sup>[13]</sup>。目前研究常用的方法有盐液示踪法和染色剂示踪法, 但受泥沙含量和流态的影响, 由最

大流速计算平均流速的经验参数一直不能准确确定<sup>[14-16]</sup>。

2005 年 Lei 等<sup>[17]</sup>提出了利用电解质脉冲模型测量坡面薄层水流流速的方法, 该方法采用溶质运移模型理论, 将高浓度盐溶液在实际条件下尽可能快速地注入到径流中, 在一定距离处预设传感器监测电导率变化过程, 将试验数据与溶质运移的一维对流弥散模型拟合, 计算对流弥散方程中的参数, 包括平均流速, 达到测量水流流速的目的。该方法从理论上能够在一定条件下准确预测水流流速。然而, 由于设备的限制, 输入边界为脉冲函数的假定在实际中很难实现。因此需要对实际的边界输入函数进行捕捉, 从而完善溶质示踪模型, 使模型能够在短距离内准确预测坡面薄层水流流速, 为生产实践提供科学的依据和有利的工具。

本文采用更符合实际的正态分布函数代替脉冲函数作为边界条件, 提出了改进的电解质示踪法测量流速的正态模型。利用试验数据与模型拟合, 得到水流流速的估值, 与脉冲模型的计算结果进行比较, 分析正态模型在不同测量距离流速预测精度的改进程度。

## 1 模型理论发展

### 1.1 电解质示踪模型

当盐溶液注入到地表径流中, 将随水流发生对流弥散作用, 盐溶液在水中的迁移运动是个很复杂的过程, 受很多因素影响, 如水流流速、水流泥沙含量、水质等。为了有效地量化这一过程, 提出以下 3 点基本假定<sup>[17]</sup>:

- 1) 水流为一维稳态流, 溶质运移也是一维的;
- 2) 在给定测量距离内的流速可认为是平均值, 即为常数;

收稿日期: 2009-08-12 修订日期: 2009-11-25

基金项目: 中科院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划:“流域水土过程模拟”(2007-380)

作者简介: 史晓楠 (1981-), 女, 辽宁人, 博士生, 主要从事土壤物理及溶质运移方面的研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: shxnan@yahoo.com.cn

\*通信作者: 雷廷武 (1958-), 男, 湖北人, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和旱地农业等方面研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

3) 初始注入盐溶液的时间很短, 可以假设符合脉冲函数。

基于上面假设, 描述溶质在一维稳态水流中的对流弥散方程表达式为

$$hw\frac{\partial C}{\partial t} + hwu\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(hwD\frac{\partial C}{\partial x}\right) \quad (1)$$

式中:  $C$ ——归一化的溶液浓度;  $h$ ——径流水深,  $m$ ;  $w$ ——径流宽度,  $m$ ;  $x$ ——沿坡长方向的横坐标,  $m$ ;  $u$ ——水流流速,  $m/s$ ;  $t$ ——时间,  $s$ ;  $D$ ——水动力弥散系数,  $m^2/s$ 。

当不考虑降雨及入渗的影响, 水流流量为常数, 且层流的流速变化很小, 故: 流速  $u$  为常数, 且  $Q_0 = hwu$  为常数, 由此方程简化为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) \quad (2)$$

根据模型假设, 上边界条件为脉冲函数, 表示为

$$C(x, t) = \delta(t) \quad x = 0 \quad (3)$$

式中  $\delta(t)$ ——脉冲函数。

认为水槽无限长, 因此下边界条件为 Dirichlet 第一类边界, 表达式为

$$C(x, t) = 0 \quad x = \infty \quad (4)$$

径流中溶质的初始浓度为零, 因此初始条件为

$$C(x, t) = 0 \quad t = 0 \quad (5)$$

联立偏微分方程 (2), 边界条件式 (3)、(4) 及初始条件式 (5), 利用拉普拉斯变换 (Laplace's transformation) 求得模型的解析解, 形式如下

$$C(x, t) = \frac{x}{2t\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{ux}{2D}\right) \exp\left(-\frac{u^2 t}{4D}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (6)$$

方程 (6) 是在上边界条件为单位脉冲函数时溶质对流弥散方程的解析解, 实际上是脉冲输入的一个系统响应函数。模型中存在 2 个未知参数, 即水流平均速度  $u$  和水动力弥散系数  $D$ 。通过用模型解析解 (式 (6)) 与试验获得的一定测距上的溶质电导率随时间的变化离散点相拟合, 利用最小二乘法即可优化模型参数: 水流平均流速及水动力弥散系数, 从而达到测量坡面薄层水流平均流速的目的。

## 1.2 改进的电解质示踪正态模型法

在实际试验操作中, 由于盐溶液注入设备的限制, 注入溶液的时间是达不到理论意义上的脉冲函数效果的。高浓度溶质在固定点以 0.6 s 的时间间隔连续注入到流动水流中, 根据水力学知识和盐液注入设备开启和关闭过程机械运动的特点, 将注入点处的溶液浓度形态进行分析, 浓度随时间的变化应该遵循逐渐增加再减小的趋势, 可以利用正态分布函数曲线来描述边界条件的形式。因此, 本文利用正态分布函数描述溶质注入的实际边界条件, 对电解质脉冲示踪法理论模型进行改进与完善, 建立计算地表薄层径流水流流速的溶质示踪正态模型法, 以下将简称为正态模型。

根据实际溶质在径流上边界注入的性质, 相应的正态分布函数边界条件的表达式为

$$\begin{cases} \varphi(t) = B \exp\left[-\frac{(t-0.3)^2}{2A^2}\right] & 0 \leq t \leq 0.6 \\ \varphi(t) = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\varphi(t)$ ——正态分布函数;  $A$  和  $B$ ——边界条件的形状系数。为了便于与脉冲函数法的预测结果进行比较, 将试验监测的浓度随时间变化数据进行归一化处理, 使曲线下的面积积分等于 1, 这与脉冲函数的性质一致。因此, 参数  $B$  可以根据面积积分及已知的参数  $A$  值计算得到, 从而模型中只需计算 1 个未知参数即形状系数  $A$ 。参数  $B$  的计算公式如下

$$B = \left\{ \int_0^{0.6} \exp\left[-\frac{(t-0.3)^2}{2A^2}\right] dt \right\}^{-1} \quad (8)$$

## 1.3 模型求解

对于 1 个线性系统而言, 在已知单位脉冲信号下作用的响应函数  $C_0(x, t)$  (方程 (6)) 时, 则任何输入信号的响应是输入信号与脉冲响应函数的卷积<sup>[18]</sup>。假设溶质运移的驱动力是不随时间变化的, 即水流为稳态, 对于实际的边界输入  $\varphi(t)$ , 其响应函数可以由下面的公式计算

$$C(x, t) = \int_0^t C_0(x, t-\tau)\varphi(\tau) d\tau \quad (9)$$

式中  $\tau$ ——虚拟变量。

因此根据正态分布函数边界形式, 如方程 (7) 所示, 结合电解质脉冲法的响应函数 (式 (6)), 代入上式即可得到改进模型的表达式

$$C(x, t) = \int_0^t \frac{x}{2\sqrt{\pi D}} \cdot (t-\tau)^{-\frac{3}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{[u(t-\tau)-x]^2}{4D(t-\tau)}\right] \varphi(\tau) d\tau \quad (10)$$

方程 (7)、(8)、(10) 构成了电解质示踪正态模型。模型中有 3 个未知参数, 分别为平均流速  $u$ 、水动力弥散系数  $D$  和边界条件形状系数  $A$ 。模型表达式中的参数  $B$  可以利用方程 (8) 转换成参数  $A$  的表达式。利用实测的溶质浓度在时空上的变化数据与模型解拟合, 进而推求模型参数。具体做法是, 对上式 (10) 进行数值积分, 即可得到溶液浓度的时空变化的数值解  $C(x, t)$ 。利用最小二乘法对试验数据与数值解拟合优化得到参数: 平均流速  $u$ , 水动力弥散系数  $D$ , 及边界条件形状系数  $A$  的值。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验过程

试验操作及数据采集由夏卫生博士<sup>[19]</sup>在中科院水土保持研究所的重点实验室降雨大厅进行。试验诠释了在稳态径流的上端注入高频高浓度盐溶液, 在不同距离监测溶液浓度随时间变化的数据。试验系统由 5 部分组成, 分别为试验土槽、电解质脉冲发生器、水量注入系统、电导传感器、数据采集与存储设备, 如图 1 所示。

恒定流速水槽高度为 50 cm, 长 4 m, 内宽 14.7 cm, 土槽底部预先铺设砂纸模拟土壤表面, 即假定均一不变

的土壤表面粗糙度。在恒定流速水槽中，用恒压输沙系统加入恒流量的含沙水流，输入流量为  $0.0004 \text{ m}^3/\text{s}$ ，泥沙含量为  $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。水槽坡度设置为  $12^\circ$ 。当水流达到稳定后，在坡面径流的上端一点利用电解质脉冲发生器注入高频高浓度的电解质溶液，在  $0.6 \text{ s}$  内完成盐溶液的一次释放，一次释放  $\text{KCl}$  饱和溶液量为  $6 \text{ mL}$ 。在离溶液注入点  $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.0$ 、 $2.5$  和  $3.0 \text{ m}$  处分别布置电导传感器。传感器为直径  $0.5 \text{ mm}$ ，长  $10 \text{ cm}$  的钢针，用以监测溶液浓度随时间变化的离散数据。传感器监测的电导率通过数据采集系统由计算机输出，数据采集频率为  $100 \text{ s}^{-1}$ 。

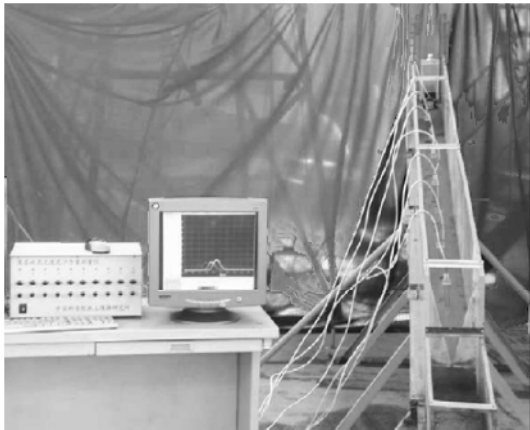


图 1 试验系统图  
Fig.1 Experimental system

试验过程中，同时监测水流流量与水深，流量用积

分桶测量，水深用水位计测量，水位计的精度为  $1/10 \text{ mm}$ 。从而利用流量计算出水流平均速度，其值为沿程多处位置测量结果的平均值。在本试验中对于规则断面测量的条件下，认为流量法测量精度足够高，可以作为标准值用来验证模型方法预测的流速精度。

### 2.2 数据分析方法

为了消除传感器测量的波动和负值误差，使模型拟合更准确，首先对实测数据进行光滑化处理。在脉冲模型中，Lei 等<sup>[17]</sup>将初始浓度  $C_0$  作为未知参数通过模型模拟计算，在不同距离得到的数值差异显著，这样做增加了模型预测的不确定性。根据单位脉冲函数的性质，即函数积分等于 1，从而对实测浓度数据进行归一化处理，即乘以校正系数使函数积分（曲线下面积）为 1。最后将归一化的溶液浓度数据分别与 2 类边界条件模型的数值解拟合，用 CXTFIT (version 2.1)<sup>[20]</sup>软件包编写程序并运行，计算出模型的未知参数及拟合系数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 脉冲模型模拟结果

利用试验获得的不同距离的浓度数据归一化后（以下无特别说明，浓度均指归一化浓度）与电解质脉冲模型的解析解（6）相拟合，估算模型参数水流流速与水动力弥散系数的值，并分析测量距离对电解质脉冲模型对流速预测精度的影响。

图 2 显示了不同距离处电解质脉冲模型预测的电导率与实测值的拟合结果。

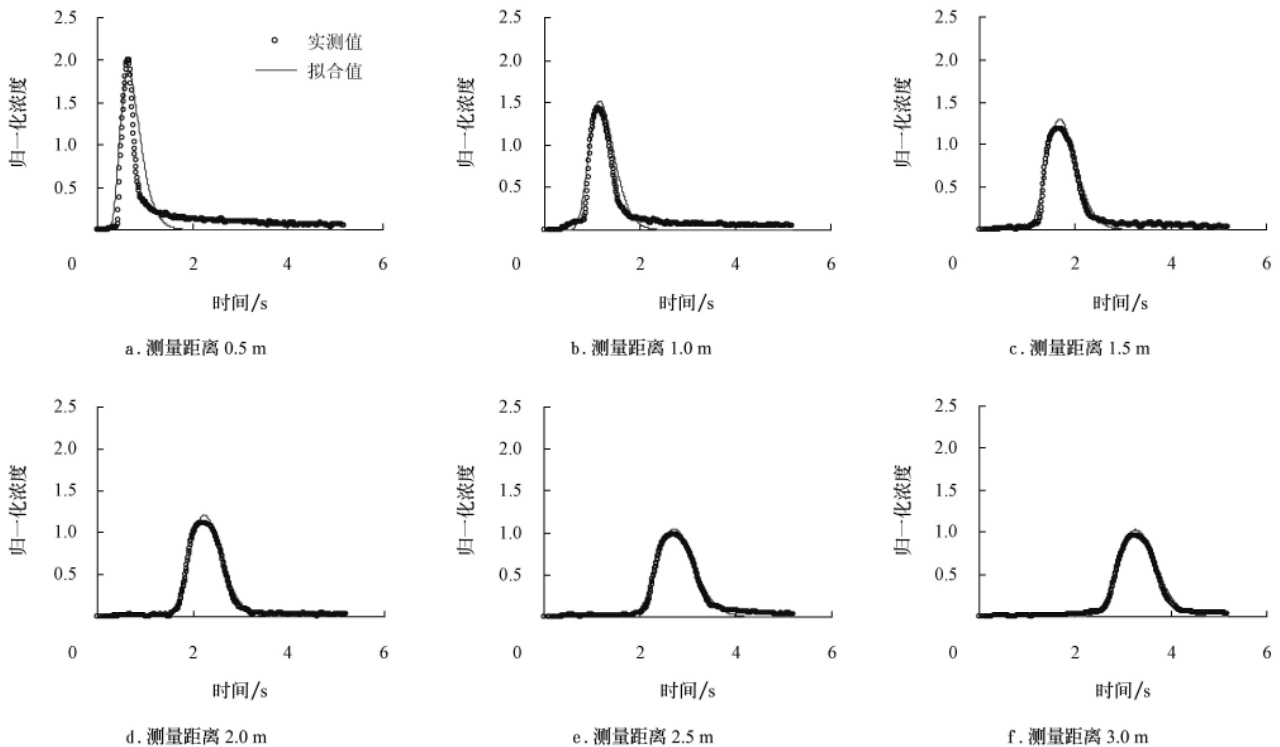


图 2 不同测量距离的脉冲模型模拟的溶液归一化浓度随时间变化结果

Fig.2 Temporal processes of solute transport given by pulse model and experimental data measured at different distances

由模型拟合结果可见，各测量位置的模型解析解与试验数据拟合较好，计算的模型参数及拟合误差列于表 1

中。决定系数随着测量距离增加有增大的趋势。模型预

测的平均流速随着距离的增加逐渐增大,水动力弥散系数的差异不是很显著。

表1 电解质脉冲模型拟合参数值  
Table 1 Parameters predicted by pulse model

测量距离/ m	平均流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水动力弥散系数/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	决定系数	协方差系数
0.5	0.702	0.018	0.732	0.035
1.0	0.823	0.021	0.912	0.058
1.5	0.867	0.021	0.967	0.005
2.0	0.878	0.019	0.988	-0.010
2.5	0.905	0.022	0.983	-0.014
3.0	0.907	0.019	0.985	-0.027

流量法测得的流速为 1.042 m/s, 将此作为标准值来检验模型流速的预测精度, 与此标准值相比, 不同距离测得的平均流速相对误差分别为 -32.6%、-21.0%、-16.8%、-15.7%、-13.1%、-13.0%, 随着测量距离的增加流速预测误差逐渐降低。在测量距离盐溶液注入点 0.5 m 及 1.0 m 处测量的流速值与标准值间差距较大。分析造成模型低估流速值的原因, 模型的边界条件假设为脉冲函数, 然而试验中的溶质注入时间间隔为 0.6 s, 从图 2 中可以看到, 溶质流经到最远 ( $x=3$  m) 的电导传感器的时间小于 6 s。对比 2 个时间的相对概念, 显然不能视 0.6 s 作无限小的脉冲函数。因此模型计算中脉冲函数的假设将导致溶质注入点与信号接收点的时间距离增大, 从而使预测的流速值较真实值偏小, 并且测量距离越短, 脉冲信号误差越大, 即出现了如上的模型预测结果。如果能够提高溶质注入的频率, 使溶质边界注入时间远远小于测量距离内溶质运移的时间, 这样电解质脉冲法的预测精度会大大改善, 对生产实践具有重要意义。

由于同时预测模型中的 2 个参数, 参数间的相关性影响模型的预测精度, 因此计算了 2 个模型参数  $D$  和  $u$  之间的协方差系数, 结果亦列于表 1 中。协方差反映的是在模型预测时 2 个参数间的同变性, 其值越小说明 2 参数的相关性越小, 可认为同时预测 2 个参数不影响模型对流速值预测的准确度。表中显示的不同距离得到的协方差系数均较小, 可以认为模型预测中的 2 个参数线性无关, 因此模型同时预测 2 个参数是可行的, 不会影响试验结果的准确性。

### 3.2 正态模型模拟结果

为了与脉冲模型的结果进行比较, 选用同一组试验数据进行模拟分析。利用不同距离测得的浓度数据分别与正态模型的解优化拟合, 计算得到的边界条件形状系数  $A$  值差异很大, 这与实际的边界条件不变性原则是不相符的。根据上述分析, 首先同时利用 6 组传感器的数据对边界条件进行预测, 在已知边界条件的情况下, 利用不同位置的单数据与模型再次拟合优化模型参数水流流速及水动力弥散系数, 来分析测量距离对模型计算结果的影响。

利用不同距离监测得到的浓度数据同时与模型解进行拟合, 图 3 显示了模型预测与实测的浓度随时间变化曲线。

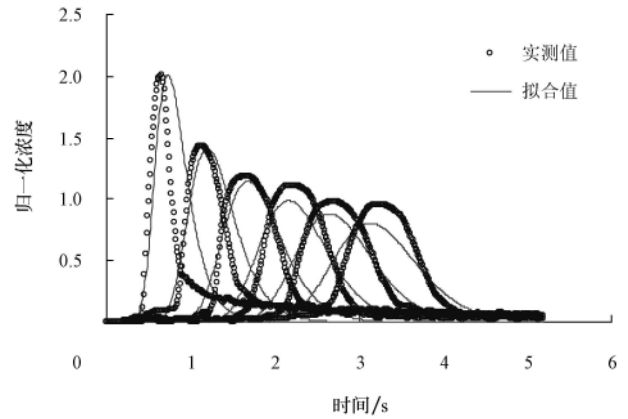


图3 正态模型同时模拟6个位置的归一化浓度变化过程  
Fig.3 Temporal processes of solute transport given by normal distribution model and experimental data at six locations

由图 3 可见, 整体上模型预测的结果与试验数据一致性很好, 模型拟合的决定系数为 0.839。在短距离内 ( $\leq 1$  m) 模型预测的浓度值有不同程度的滞后, 对浓度的峰值预测得偏低。优化的参数值分别为  $u=1.030$  m/s,  $D=0.046$   $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $A=0.072$ 。模型估算的流速 1.030 与流量法测得的平均流速 1.042 非常接近。由预测的形状系数还原的正态分布函数形态, 说明了初始溶液在注入瞬间就达到一定的浓度值然后再逐渐增加。2 个模型参数  $D$  和  $u$  的协方差为 0.046, 其值较小, 因此可认为 2 个参数线性无关, 同时预测 2 个参数将不影响模型精度。

在边界条件不变的前提下, 应用不同位置监测的浓度随时间变化数据与模型的解相拟合求解模型参数。不同距离处模型预测的与试验观测的数据点绘在图 4 中, 拟合的参数值及模型计算误差分别列于表 2 中。

表2 正态模型拟合的参数值

Table 2 Parameters predicted by normal distribution model

测量距离/ m	平均流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水动力弥散系数/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	决定系数	协方差系数
0.5	1.187	0.117	0.789	0.226
1.0	1.093	0.047	0.917	0.095
1.5	1.049	0.037	0.968	0.029
2.0	1.012	0.028	0.989	0.006
2.5	1.015	0.030	0.983	-0.002
3.0	0.996	0.024	0.985	-0.008

由图 4 可见, 模型预测的归一化浓度与实测数据拟合趋于一致, 能够较好地捕捉峰值及浓度下降的趋势。在距离 0.5 m 位置计算的决定系数仍然较低, 但较脉冲模型相应位置的结果有一定的改善。其他测量距离的决定系数与脉冲模型的结果基本一致。

模型预测的平均流速随着测量距离的增加逐渐减小, 且减小幅度亦降低。与流量法测量的标准值间的相对误差分别为 13.9%, 4.9%, 0.67%, -2.88%, -2.59%, -4.4%, 相对误差随距离的增加先降低而后负向增加, 在  $x=1.5$  m 处得到相对误差最小。从流速预测角度分析, 正态模型在测量距离超过 1 m 时流速预测相对误差均较小,

能够准确的预测坡面平均流速, 在  $x=0.5\text{ m}$  处模型以 13.9% 的相对误差高估了水流平均流速, 虽然较脉冲模型的预测结果有很大的改进, 但流速预测精度仍有待进一步

提高。另外, 随着距离的继续增加, 相对误差又负向增加, 这是因为距离的增加导致溶质横向扩散作用的增强, 从而使测量结果不准确。

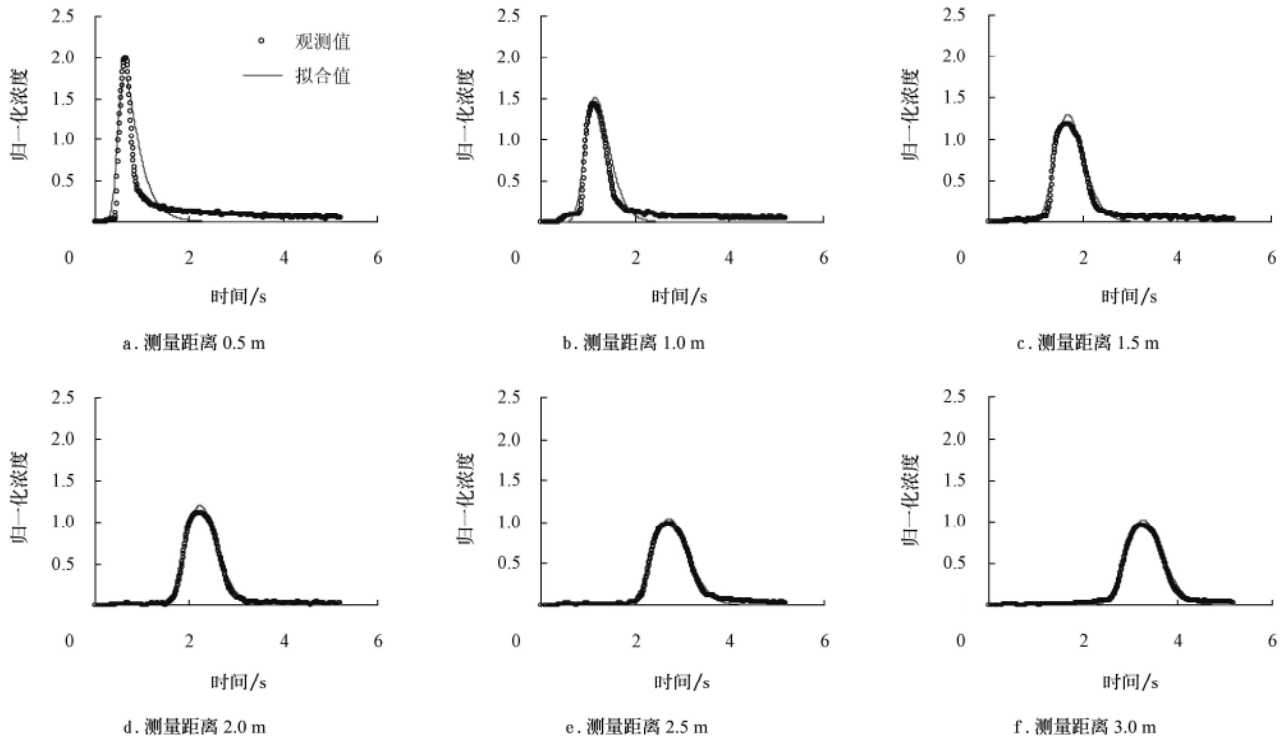


图4 不同测量距离的脉冲模型模拟的溶液归一化浓度随时间变化结果

Fig.4 Temporal processes of solute transport given by normal distribution model and experimental data measured at different distances

模型参数  $u$  和  $D$  之间的协方差系数列于表 2 内, 通过与脉冲模型计算的参数协方差系数对比分析, 正态模型在不同距离处的参数协方差均高于脉冲模型的结果, 在短距离内差异尤为显著。正态模型推求的 2 个参数间的协方差系数在  $x=0.5\text{ m}$  处明显高于其他位置的情况。这一结果表明在短距离内利用正态模型同时预测 2 个参数存在一定的相关性, 从而将导致不信任的预测值。另外, 估算的水动力弥散系数在  $0.5\text{ m}$  位置亦呈现突出的增加, 这进一步证明了 2 个参数同时预测的相关性导致了模拟结果的失真, 因此在  $0.5\text{ m}$  处预测流速误差较大是可以解释的。因此, 在本试验条件下距离盐溶液注入点  $0.5\text{ m}$  处利用正态模型预测流速时, 建议通过试验方法预先确定水动力弥散系数或给定范围后, 再推求坡面薄层水流流速, 估计可以有效减少流速预测的误差。这部分工作将在后续研究中进一步深入探讨及改进, 使之能够准确地应用于流速测量仪器的开发。

#### 4 结论与讨论

本文利用正态分布函数描述溶质示踪法的实际边界, 代替盐溶液输入为脉冲函数的假定, 提出改进的电解质示踪正态模型法。利用试验数据对模型进行求解验证, 与脉冲模型计算结果对比分析, 得出结论: 在距离盐溶液注入点不同距离处, 利用正态模型预测的流速精度不同程度地高于脉冲模型的预测精度。本试验条件下, 正态模型在距盐溶液注入点  $1\text{ m}$  以外的流速测量相对误

差绝对值小于 5%, 相对误差随着距离的增加先降低后负向增大, 测量距离较大时, 溶质的横向扩散将导致电导传感器接受的信号减弱, 造成预测的流速值偏低。在距注入点  $0.5\text{ m}$  处模型以 13.9% 的相对误差高估了平均流速, 预测精度仍有待进一步提高。经分析, 模型同时拟合的 2 个未知参数具有一定的协相关性, 从而导致流速预测的失真。建议在短距离内应用正态模型预测流速时, 最好先预测水动力弥散系数的值或给定范围, 从而减少模型计算的不确定性。

#### [参 考 文 献]

- [1] Takken I, Govers G, Jetten Victor, et al. The influence of both process descriptions and runoff patterns on predictions from a spatially distributed soil erosion model [J]. *Earth Surf Process Landforms*, 2005, 30(2): 213—229.
- [2] Takken I, Beuselinck L, Nachtergaele J, et al. Spatial evaluation of a physically—based distributed erosion model (LISEM) [J]. *Catena*, 1999, 37(3/4): 431—447.
- [3] Favis-Mortlock D T, Boardman J, Parsons A J. Emergence and erosion: a model for rill initiation and development[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(11/12): 2173—2205.
- [4] Abrahams A D, Parsons A J. Relation between sediment yield and gradient on debris—covered hillslopes, walnut—gulch, Arizona[J]. *Geological society of America Bulletin*, 1991, 103(8): 1109—1113.
- [5] 李永祥, 苑明顺, 李春华. 热膜技术在水流测速中的应用研究[J]. *流体力学实验与测量*, 1997, 11(4): 45—50.

- Li Yongxiang, Yuan Mingshun, Li Chunhua. Hot film technique in the application of flow velocity measurement[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 1997, 11(4): 45—50. (in Chinese with English abstract)
- [6] Delhay J M, Galaup J P. Hot-film anemometry in air-water flow[C]//Symposium on Turbulence in Liquids. Missouri: University of Missouri—Rolla, 1975: 83—90.
- [7] 刘鹏, 李小昱, 王为, 等. 基于相关法的坡面径流流速测量系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 48—52.  
Liu Peng, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Runoff flow velocity measurement system based on correlation method[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 48—52. (in Chinese with English abstract)
- [8] Hyun B S, Balachandar R, Yu K, et al. Assessment of PIV to measure mean velocity and turbulence in open-channel flow [J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(3): 262—267.
- [9] 刘鹏, 李小昱, 王为. 基于光电传感器和示踪法的径流流速测量系统的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 116—120.  
Liu Peng, Li Xiaoyu, Wang Wei. Runoff flow velocity measurement system using photoelectric sensor and tracing method[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 116—120. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王为, 李小昱, 张军, 等. 基于电导式传感器径流流速测量系统的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 1—5.  
Wang Wei, Li Xiaoyu, Zhang Jun, et al. Experimental study on measurement system of runoff velocity based on conductance sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.
- [12] 夏卫生, 雷廷武, 赵军. 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, 19(4): 97—100.
- Xia Weisheng, Lei Tingwu, Zhao Jun. Research of empirical coefficient of salt tracer method affected by sediment[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 97—100. (in Chinese with English abstract)
- [13] 雷廷武, Nearing M A. 侵蚀细沟水流水力学特性与形态特征的试验研究[J]. 水利学报, 2000, (11): 49—54.  
Lei Tingwu, Nearing M A. Flume experiments for determining rill hydraulic characteristic erosion and rill patterns[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (11): 49—54. (in Chinese with English abstract)
- [14] Dunkerley D L. Estimating the mean speed of laminar overland flow using dye injection uncertainty on rough surfaces[J]. Earth Surf Process Landforms, 2001, 26(4): 363—374.
- [15] Myers T G. Modelling laminar sheet flow over rough surfaces [J]. Water Resources Research, 2002, 38(11): 1230.
- [16] Olivier P, Norbert S, Raphael G, et al. An automated salt-tracing gauge for flow-velocity measurement[J]. Earth Surf Process Landforms, 2005, 30(7): 833—844.
- [17] Lei T, Xia W, Zhao J. Method for measuring velocity of shallow water flow for soil erosion with an electrolyte tracer [J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1/2/3/4): 139—145.
- [18] Arfken G. Mathematical Methods for Physicists[M]. New York: Academic Press, 1985.
- [19] 夏卫生. 电解质脉冲法测量坡面薄层恒定水流速度的研究及其初步应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学资源环境学院, 2003.  
Xia Weisheng. Study on velocity Measurement of Steady Sheet Flow with the Electrolyte Pulse Method and its Application[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, College of Resources and Environment, 2003.
- [20] Toride N, Leij F J, Van Genuchten M T. The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments (Version 2.1) [R]. USSL, Riverside, CA, 1999.

## Advanced method for measuring velocity of shallow flow on hill-slope with an electrolyte tracer

Shi Xiaonan<sup>1,2</sup>, Lei Tingwu<sup>1,3\*</sup>, Xia Weisheng<sup>4</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science/Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 4. College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

**Abstract:** The measurement of velocity of shallow water flow is of great importance for hill-slope hydrology and soil erosion prediction. The electrolyte tracer pulse model was found to be unable to predict the velocity correctly at short distance though it is desired for portable apparatus development. In this paper, electrolyte tracer normal distribution model was proposed by using Normal distribution function as boundary condition instead of pulse function to predict velocity of shallow water flow. An improved method for measuring the flow velocity was advanced based on the Normal Distribution Model, which uses the convolution integral of the pulse response and the normal distribution boundary as the more realistic solution to the solute transport processes. By fitting the Normal Distribution Model with the actually measured solute transport processes, the flow velocity values under different conditions were estimated. Compared with the velocity values measured with the pulse model, the Normal Distribution Model reduced the measurement errors at different locations to different degrees. The results will provide theoretical foundation for advanced apparatus development of velocity measurement.

**Key words:** velocity measurement, electrolytes, models, Normal distribution