

基于光电传感技术的薄层水流流速测量系统构建与试验

白凯强, 朱昱, 田野, 叶大鹏, 张越, 蒋芳市, 黄炎和, 林金石

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要: 为减小染色法测量坡面水流流速的误差, 提高染色法测量准确度, 根据染色示踪剂在水中扩散引起颜色发生变化的特性, 结合漫反射型模拟量光电颜色传感器和数据采集卡采集信号, 通过小波变换对信号进行去噪, 研发一种基于光电传感技术的薄层水流流速测量系统。以流量法为参照, 确定该系统传感器最优数据采集距离为 0.6~0.8 m; 传感器数据采集距离为 0.7 m 时, 该系统测量数据最小相对误差仅为 0.48%, 变异系数 < 15%。相比染色法, 该系统与流量法拟合的决定系数在 0.90 以上, 大于染色法的决定系数 0.75。表明薄层水流流速测量系统优于染色法, 可以用坡面薄层水流试验研究中。

关键词: 流速; 薄层水流; 光电传感器; 小波变换; 染色示踪

中图分类号: TH815; S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)04-0034-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.006

Construction and Experiment of Shallow Flow Velocity Measurement System Based on Photoelectric Sensor Technology

BAI Kaiqiang, ZHU Yu, TIAN Ye, YE Dapeng, ZHANG Yue,

JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

Abstract: In order to reduce the staining method of slope flow velocity measurement error, improve the dyeing method of measurement accuracy, according to the characteristics of color change caused by the diffusion of dye tracer in water, a shallow water flow velocity measurement system based on photoelectric sensor technology was developed by combining diffuse reflection analog photoelectric color sensor and data acquisition card to collect signals, and wavelet transform was used to denoise the signal. Taking the discharge method as a reference, the optimal data acquisition distance of the sensor of the system was determined to be 0.6~0.8 m. When the sensor data acquisition distance was 0.7 m, the minimum relative error of the measured data of the system was only 0.48%, and the coefficient of variation was less than 15%. Compared with the dye tracing technique, the fitting coefficient of the system and the discharge method was more than 0.90, which is greater than the dye tracing technique's coefficient of 0.75. The results show that the measuring system is superior to the dye tracing technique and can be used in the experimental study of shallow overland flows.

Keywords: flow velocity; shallow flow; photoelectric sensor; wavelet transform; dye tracing

坡面薄层水流是一种不同于明渠水流的浅层明流, 水深很浅且流向不稳定, 一般深度在零点几毫米到几毫米之间^[1]。薄层水流流速受到包括流量、坡度和下垫面条件等因素的综合影响^[2-4], 坡面薄层水流流速是研究土壤侵蚀过程重要的水动力学特性之一, 也是构建土壤侵蚀模型的重要参数^[5]。因此, 对坡面薄层水流流速进行准确测量具有重大意义。

目前坡面薄层水流流速测量方法有染色法、热示踪法、盐溶液示踪法和基于声学与超声波技术的声学

多普勒测速仪(ADV)^[6-9]。染色法以不同颜色染料作为示踪剂, 通过肉眼或者光学摄像机人为观察示踪剂前缘到达时间计算水流流速^[7,10]; 盐溶液示踪法基于溶质对流弥散理论, 以氯化钾溶液作为示踪剂, 通过传感器监测水流中的电导率变化确定示踪剂到达时间从而计算流速^[11-13]。近些年, 热示踪法被应用于坡面薄层水流流速测量, 其示踪剂主要包括热水、冰块和冷油滴等, 通过红外摄像机测量流速^[6-7]。用染色法、热示踪法和盐溶液示踪法测量平均速度, 均需

收稿日期: 2021-03-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(41977071)

第一作者: 白凯强(1994—), 男, 山西翼城人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程方向研究。E-mail: baikqiang@163.com

通信作者: 林金石(1980—), 男, 福建屏南人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、农业水土工程等方面研究。E-mail: jslin@fafu.edu.cn

引入合适的修正系数。基于声学 and 超声波技术的声学多普勒测速仪(ADV),其仪器原理更为复杂,测量结果更为精确,但在水流深度为几毫米时无法使用;大尺度粒子图像测速仪(LSPIV)和粒子追踪测速仪(PTV)的测量结果也非常可靠^[14],在薄层水流流速上,PTV 技术优于 LSPIV 技术^[15],但这些仪器属于精密仪器,价格昂贵,维护费用较高。

另外,通过光电传感器也可以测量薄层水流流速。Dunkerley^[16]以圆形铝箔作为示踪粒子,通过对射型光电传感器对水流流速进行测量;刘鹏等^[17-18]以聚苯乙烯泡沫粒子作为示踪剂,基于相关方法通过漫反射型光电传感器对薄层水流流速进行准确测量;刘桂元^[19]以荧光剂作为示踪剂,通过光电二极管对层流流态下的水流流速进行测定。然而,在有一定糙率的试验条件下,随着流动深度进一步降低,圆形铝箔、聚苯乙烯泡沫粒子等固体示踪剂可能会受到坡面阻碍影响测量结果^[7]。另外,染色法在测量时易受人类感知和反应时间影响^[6],而使用光电传感器进行流速测量可有效避免此类计时误差,目前在关于测定薄层水流流速的研究上将光电传感器与染色剂相结合的研究较少,但该方法是一种值得探索的高效、经济测量方法。

流量法^[17]测量平均流速,即用流体体积与过水断面面积的比值表征该流体通过截面的速度。目前土壤侵蚀研究中水流速度常用流量法测量结果进行标定。以流量法为参照,夏卫生等^[12]对电解质脉冲法的测量结果进行验证;刘鹏等^[18]对基于相关法的流速测量系统测量结果进行对比分析;Abrantes等^[6]对以水动力弥散方程为模型的热示踪法测量结果进行测试;Mujiaba等^[7]对一种新型热示踪剂的测量效果进行分析。因此,本研究以染料(高锰酸钾)为示踪剂,通过漫反射型模拟量光电传感器对染料颜色变化进行监测,通过设置不同试验条件和数据处理方法,对薄层水流流速进行测量,并将测量结果与流量法所求流速进行比较,为推广高效、经济的薄层水流流速测量手段提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验装置

本试验于2020年8—12月在福建金山水土保持科教园降雨大厅进行。试验水槽长度为3 m,宽度为0.2 m,深度为0.1 m,水槽材质为硬化镀锌板,测流区槽底部分粘贴红色PVC防水贴纸,同一流量、过水断面的流型和流态主要受下垫面影响,本质上是床面粗糙度对水流运动的影响,床面粗糙度对水流影响的大小由黏性底层厚度与水槽底部颗粒高度之间的关系决定,一般用淹没率表示。选取的PVC防水贴纸与硬化镀锌板均为光滑表面差异较小,两者均被黏性

底层覆盖,PVC防水贴纸对流型和流态的影响较小,而本试验在宏观尺度下该影响可忽略不计,因此可认为试验过程下垫面条件保持不变。供水系统由蓄水桶、蠕动泵、溢流槽、水管组成,测量时由蠕动泵控制流量,蠕动泵产自河北保定兰格恒流泵有限公司,型号为WT600-4F-C,误差精度为20 mL/min。在冲刷槽的上方设计对应宽度的溢流槽,保证水流进入水槽时保持稳定。

试验设计坡度为15°,根据在水土流失的坡面建立的径流小区产生的单宽流量,通过换算设计5个不同流量(4,8,12,16,20 L/min)。刘鹏^[17]以泡沫粒子为示踪粒子,通过光电传感器对流速进行测量时,传感器间距设计为1 m。根据染色示踪剂特性第1阶段设计5个不同长度测流区(0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 m)对传感器数据采集的最优距离进行分析,每组试验均采用流量法和薄层水流流速测量系统对坡面薄层水流的流速进行测量;第2阶段设计试验在最优传感器距离下进行,每组试验均采用流量法,染色法和薄层水流流速测量系统对坡面薄层水流的流速进行测量。试验前使用电子水平仪先将水槽调平至所需坡度,然后开启蠕动泵调整流量,连续测量3次,误差在1%则认为流量调整达到要求。

除以上共同使用的装置外,流量法在测量流速时需要使用水深测针,水深测针产自北京中慧天诚科技有限公司,型号为SW1-40,测量范围0~400 mm,误差为±0.18 mm。采用染色法测量流速时,则采用分辨率为1 280×720 dpi,采集频率为50 Hz的佳能D50数码单反相机,记录示踪剂(高锰酸钾)前缘经过测流区的时刻。

薄层水流流速测量系统主要由示踪剂注射器、漫反射式模拟量光电传感器、传感器支架、数据采集卡等构成。传感器选用中山市科维光电技术有限公司生产的漫反射式模拟量光电传感器AW-F60,不同颜色对应不同电压值,利用染料示踪剂经过传感器时电压数据的变化,从而确定染料示踪剂经过两传感器的时刻。示踪剂选用饱和高锰酸钾溶液,颜色为紫黑色,经试验确定示踪剂用量为2~4 mL。通过阿尔泰测控科技有限公司制造的数据采集卡USB3100及其配套软件,对传感器模拟电压信号进行采集。

1.2 研究方法

1.2.1 流量法 将水深测针垂直于水槽底部安装在水槽上,并保证水深测针基座与水槽底部平行。在测流区使用水深测针沿水槽宽度方向每隔0.02 m共测量10次水深,去掉最大值和最小值后取平均值作为该测流区水深,水流垂直剖面面积为水深与水槽宽度的乘积。根据设定的流量反推出坡面薄层水流的平

均流速,并计算雷诺数^[17]。

$$v_m = \frac{Q}{wd} \quad (1)$$

$$Re = \frac{v_m R}{\nu} \quad (2)$$

式中: v_m 为平均流速(m/s); Q 为流量(L/min); w 为宽度(m); d 为水流深度(m); Re 为雷诺数; R 为水力半径(m); ν 为水流的运动黏性系数(m^2/s)。

1.2.2 染色法 通过三脚架固定数码单反相机,保证镜头垂直于水槽底部,将示踪剂沿水槽宽度方向每隔 0.02 m 左右注入示踪剂,记录示踪剂前缘经过测流区的时刻(图 1)。通过 Adobe Premiere Pro CC 2018 逐帧回放计算示踪剂前缘通过测流区的时间,共计测量 10 次,去掉最大值和最小值后取平均值作为测流区的渡越时间。将测流区长度与渡越时间的比值作为染色法未经修正的流速^[20],计算公式为:

$$v_{dye} = \frac{L}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

$$\alpha_{dye} = \frac{v_m}{v_E} \quad (4)$$

$$v_E = \alpha_{dye} v_{dye} \quad (5)$$

式中: v_{dye} 为染色法未经修正的水流前缘流速(m/s); L 为染料流经长度(m); t_1 、 t_2 为示踪剂前缘进入和流出测流区的时间(s); α_{dye} 为染色法的修正系数; v_E 为修正后的流速(m/s)。

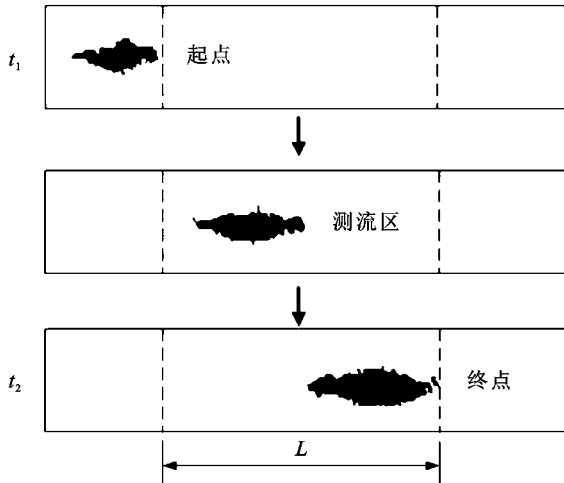


图 1 染色法流速测量原理

1.2.3 薄层水流流速测量系统 从图 2 可以看出,薄层水流流速测量系统测量方法为:在水流上游通过示踪剂注射器投放示踪剂,由于示踪剂在水中扩散而使颜色发生变化,传感器将颜色的变化转换为电压值并通过数据采集卡进行采集,采集数据频率 500 点/s,采集点数为 2 816 个。采集结束后保存数据格式为 bin,再通过该公司的数据转换程序将其格式转换为 txt 格式。计算示踪剂通过传感器间距的时间,从而求得示踪剂的速度,见公式(6),再将该速度乘修正系

数即可得到薄层水流的流速,见公式(8)。修正系数为流量法所求平均流速与该系统测量示踪剂速度的比值,见公式(7):

$$v = \frac{L}{T} \quad (6)$$

$$\alpha_w = \frac{v_m}{v} \quad (7)$$

$$v_w = \alpha_w v \quad (8)$$

式中: L 为两传感器间的距离(m); T 为示踪剂通过两传感器的时间(s); α_w 修正系数; v_w 薄层水流流速测量系统测量的流速值(m/s)。

由于坡面径流的表面呈不规则形状以及滚波等因素的影响^[7],该系统在采集电压信号过程中会受到不同程度干扰。因此,需要对采集信号进行去噪,去噪的方法为小波变换法,去噪时使用软件为 Matlab 自带的小波变换工具箱。分析原始信号与去噪后信号的相似性及光滑性,选用的小波基函数为 bior 6.8,小波分解层数为 6 层,采用固定阈值形式和软阈值函数对信号的高频系数进行处理。

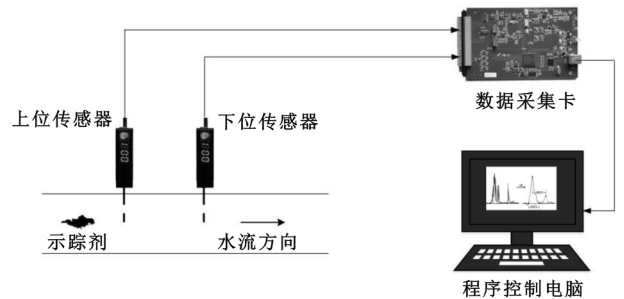
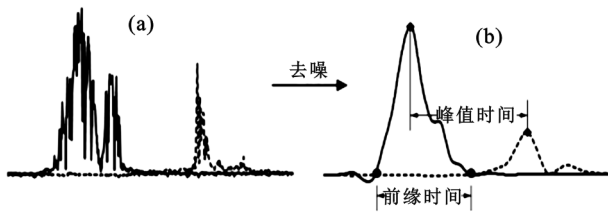


图 2 薄层水流流速测量系统原理

薄层水流流速测量系统采集到的数据见图 3。随着水流对示踪剂的运移以及示踪剂本身的扩散,示踪剂与注入点距离增加,颜色逐渐变浅,可以观察到上位传感器的信号峰值高于下位传感器。因此,采集的信号较好地体现示踪剂在水中的扩散情况。本系统采用阈值电压区分染料示踪剂与水槽底部的电压值,阈值电压为添加染料示踪剂之前时间内测量的最小电压值。用阈值电压逐个减去示踪剂通过过程中测量的电压值,第 1 次出现大于峰值 20% 的极大值时,则取极大值对应的时刻为峰值时间;否则,取极大值对应的时刻为峰值时间;峰值对应 > 0 的上升沿为示踪剂的前缘到达时间。本流速测量系统通过采集示踪剂前缘到达传感器的时间间隔计算水流流速的方法称为前缘测速法,可得到坡面薄层水流表面的优势流速 v_s ,再将该速度与修正系数 α_s 的平均值相乘得到水流表面的真实优势流速 v_{ws} ;通过测量示踪剂经过两传感器电压值达到峰值的时间间隔来计算水流流速的方法称为峰值测速法,可得到坡面薄层水流表面的平均流速 v_p ,再将该速度与修正系数 α_p 的平

均值相乘得到水流表面的真实平均流速 v_{wp} 。



注:(a)原始检测信号;(b)去噪后信号。实线为上位传感器;虚线为下位传感器。

图 3 示踪剂经过上位传感器和下位传感器采集信号

1.3 统计分析

以流量法所测流速作为参照值,分析薄层水流流速测量系统传感器数据采集距离对所测平均流速的影响,选取 4 种常用统计参数作为评价 2 种方法接近程度的指标,分别是相对均方差误差(RRMSE)、相对误差(RE)、平均绝对误差(MAE)和决定系数(R^2)。RRMSE、RE、MAE 值越小,表明测量值与流量法流速值间差异越小,相似程度越高。 R^2 确定的是该系统与流量法两者所测流速的相关性,其最大值可以取 1, R^2 越接近 1,相关性越好^[21]。

以流量法所测流速作为参照值,对薄层水流流速测量系统的精确度和稳定性进行评价。评价指标分

别是相对误差(RE)和变异系数(CV),在对数据进行统计分析时,如果变异系数低于 15%,则表明采集的数据正常。RE 和 CV 的值越小,表明该流速测量方法精确度越高,稳定性越好^[9]。同时采用相对误差(RE)和决定系数(R^2)作为评价指标对比染色法、前缘测速法和峰值测速法的差异,与流量法所测流速越接近的方法,表明该测量方法效果越优。

2 结果与分析

2.1 薄层水流流速测量系统传感器数据采集最优距离分析

由于不同的传感器间距会对测量结果产生影响^[18],本研究分析 5 个不同传感器间距下薄层水流流速测量系统测量值与流量法测量值之间的差异(表 1)。前缘流速法变异系数最大值为 34.531%,最小值为 4.810%;峰值流速法变异系数最大值为 35.275%,最小值为 4.282%。当传感器间距在 0.2 m 时,前缘流速法和峰值流速法的变异系数均 $>15\%$,表明该系统无法在传感器间距为 0.2 m 时有效测量。原因是间距在 0.2 m 时示踪剂经过两传感器的时间过短,大约为 0.2~0.5 s,系统误差对测量结果影响较大。

表 1 薄层水流流速测量系统不同传感器间距的速度测量结果

L/m	$q/(m^2 \cdot min^{-1})$	$v_m/(m \cdot s^{-1})$	$v_{us}/(m \cdot s^{-1})$	CV/%	$v_{wp}/(m \cdot s^{-1})$	CV/%
0.20	0.02	0.382	0.501±0.173	34.531	0.483±0.145	30.021
	0.04	0.531	0.579±0.140	24.180	0.567±0.133	23.457
	0.06	0.628	0.620±0.122	19.677	0.618±0.218	35.275
	0.08	0.719	0.634±0.211	33.228	0.639±0.137	21.440
	0.10	0.828	0.705±0.192	27.234	0.732±0.147	20.082
0.40	0.02	0.382	0.434±0.122	28.111	0.423±0.061	14.421
	0.04	0.531	0.564±0.162	28.546	0.542±0.076	14.022
	0.06	0.628	0.675±0.088	13.037	0.661±0.142	21.483
	0.08	0.719	0.685±0.195	28.467	0.691±0.131	18.958
	0.10	0.828	0.691±0.082	11.867	0.735±0.117	15.918
0.60	0.02	0.382	0.443±0.030	6.772	0.415±0.032	7.711
	0.04	0.531	0.519±0.041	7.900	0.535±0.064	11.963
	0.06	0.628	0.624±0.096	15.385	0.634±0.033	5.205
	0.08	0.719	0.689±0.085	12.337	0.682±0.057	8.358
	0.10	0.828	0.780±0.062	7.949	0.794±0.034	4.282
0.80	0.02	0.382	0.435±0.065	14.943	0.414±0.037	8.937
	0.04	0.531	0.534±0.068	12.734	0.534±0.043	8.052
	0.06	0.628	0.653±0.083	12.711	0.651±0.028	4.301
	0.08	0.719	0.686±0.033	4.810	0.683±0.049	7.174
	0.10	0.828	0.742±0.083	11.186	0.778±0.125	16.067
1.00	0.02	0.382	0.440±0.040	9.091	0.460±0.051	11.087
	0.04	0.531	0.565±0.059	10.440	0.523±0.048	9.178
	0.06	0.628	0.621±0.075	12.080	0.618±0.029	4.693
	0.08	0.719	0.664±0.054	8.130	0.685±0.034	4.964
	0.10	0.828	0.754±0.120	15.920	0.761±0.061	8.016

注: L 为传感器间距; q 为单宽流量;流速值为平均值±标准差。

当传感器间距为 0.2~0.6 m 时,前缘测速法和

峰值测速法的 RRMSE、RE、MAE 值均随距离增大

而减小;当传感器间距为 0.6~1.0 m 时,前缘测速法和峰值测速法的 RRMSE、RE、MAE 值均在 0.6~0.8 m 达到最小值,之后随传感器采集距离增大而增大(图 4)。以传感器间距为自变量,相关统计参数为因变量,分别进行二次多项式拟合,可得到相应的回归方程。方程的决定系数均 >0.98 ,说明二次多项式可以较好地模拟曲线。对拟合方程求导,求得的极小值即为相应的传感器间距。前缘测速法 RRMSE、RE、MAE 的最小值对应的传感器间距分别为 0.79,0.77,

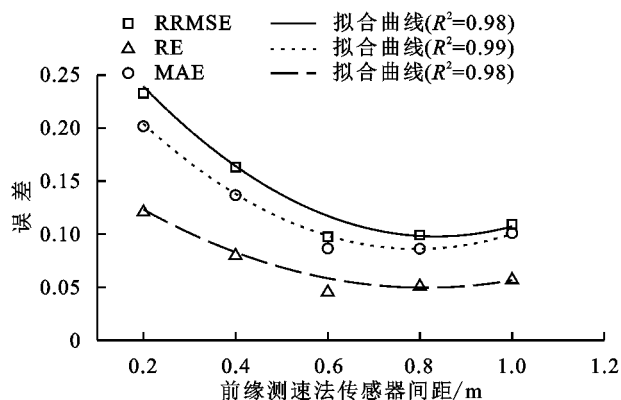


图 4 不同传感器间距下前缘测速法和峰值测速法的统计参数值

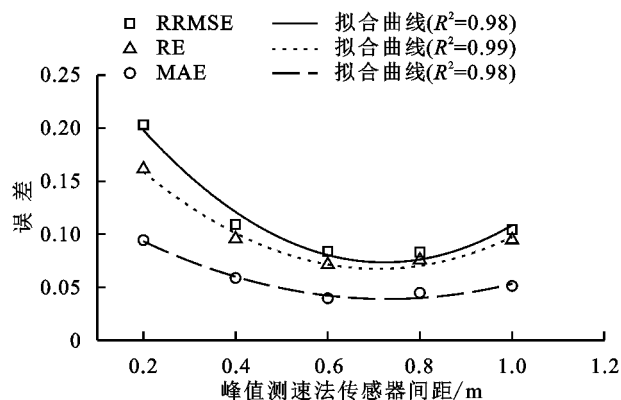
2.2 薄层水流流速测量系统的结果标定

在传感器最优采集距离下对薄层水流流速测量系统的精确度和稳定性进行验证。综合各统计参数分析,传感器采集距离设为 0.7 m,前缘流速法和峰值流速法测量的真实流速值(表 2)。该系统以前缘流速法进行测量时,相对误差为 1.32%~12.3%,变异系数为 9.49%~13.7%;以峰值流速法进行测量时,相对误差为 0.48%~7.07%,变异系数为 7.92%~14.59%。2 种测量方法的变异系数均 $<15%$ 。在流量为 4 L/min 时,由于示踪剂受到床面的摩擦力和剪应力的影响,2 种测速方法所测流速的相对误差均较大。目前关于薄层水流相关试验测量数据的精确度和稳定性尚无具体要求,但夏卫生等^[12]基于溶质对流弥散理论使用氯化钾溶液对流速进行测量研究时表明,测定的相对误差在 0.6%~8.2%,用电解质脉冲测量薄层水流速度可行。因此,可认为薄层水流流速测量系统的精确度和稳定性基本达到试验要求。

2.3 不同流速测量结果的差异性分析

利用前文中得到的最优传感器采集距离(0.7 m)进行流速测量,平均流速 v_p 和优势流速 v_s 分别为 0.45~1.22,0.49~1.17 m/s,染色法测量的流速值 v_{dye} 为 0.57~1.25 m/s,将 v_{dye} 、 v_p 和 v_s 与通过流量法反推的流速值作比较(图 5)。染色法的决定系数为 0.75,而薄层水流流速测量系统的决定系数在 0.9 以上,证明薄层水流流速测量系统的稳定性高于染色法。与染色法相比,峰值测速法和前缘测速法的测量

0.76 m。峰值测速法 RRMSE、RE、MAE 的最小值对应传感器间距分别为 0.72,0.71,0.73 m。由此可知,薄层水流流速系统传感器数据采集最优距离为 0.6~0.8 m。罗榕婷等^[21]对传统染色法测量坡面径流速度的最优测流间距进行研究,表明,不同测流间距的测量结果有差异,并确定其最优测流间距为 2 m。2 种方法的最佳距离不同是由于传统的染色法用秒表和人工判断示踪剂前缘的到达时间,人为误差更大,因此需要更长的检测距离来消除误差。



误差更小,证明该系统对坡面薄层水流平均流速的测量更加可靠。对比峰值测速法和前缘测速法,峰值测速法的测量误差更小,表明前缘流速法的测量值总体上大于峰值测速法。Zhang 等^[22]研究发现,当水流流态为过度流时,速度轮廓是一个抛物线,前缘的流速被认为是流动速度剖面上的理论最大值,其试验结果与本试验相同。Abrantes 等^[8]在使用热示踪剂测量流速时,假定示踪剂在流动中守恒,则认为质心速度是流动速度剖面的理论平均值,由于不存在绝对守恒,因此 v_p 高于 1:1 线。Mujtaba 等^[7]也通过试验得到类似结论。

3 种方法均高估了水流的流速,因此需要对流速进行修正,而测量值越接近参照值,修正系数对最终计算的真实流速值影响就越小。对染色法、前缘测速法和峰值测速法的修正系数进行对比(图 6)。在不同的测量条件下,前缘测速法和峰值测速法的修正系数均大于染色法。流态为层流时,染色法的平均修正系数是 0.62,小于 Abrahams 测定的理论值 0.67,可能是由于水深太浅,平均水深仅为 0.09 mm。Emmett 也观察到当水深变浅时,修正系数会有减小的趋势。前缘测速法的平均修正系数是 0.67,与 Abrahams 测定的理论值相等。然而,峰值测速法的修正系数为 0.75,远大于 0.67。流态为过度流时,染色法的修正系数为 0.63~0.75,平均值为 0.70,与 Abrahams 测定的理论值相等;前缘测速法和峰值测速法的修正系数分别为 0.74~0.80,0.80~0.83,平均分

别为 0.78 和 0.81, 大于 Abrahams 测定的理论值 0.70。但与 Mujtaba 通过红外粒子图像示踪法测量得到的修正系数相似, 修正系数为 0.78。Abrantes 等^[6]通过盐溶液示踪法和热示踪法得到的修正系数平均值分别为 0.95 和 0.92, 也大于 0.7。因此, 前缘测速法和峰值测速法测定薄层水流速度的效果更优。

表 2 不同流量下的真实流速值及统计参数

方法	Q/ (L·min ⁻¹)	v _m / (m·s ⁻¹)	v _w / (m·s ⁻¹)	δ	RE/%	CV/%
前缘流速法	4	0.382	0.429	0.047	12.30	10.96
	8	0.531	0.538	0.056	1.32	10.41
	12	0.628	0.618	0.063	1.59	10.19
	16	0.719	0.679	0.093	5.56	13.70
	20	0.828	0.790	0.075	4.59	9.49
峰值流速法	4	0.382	0.409	0.035	7.07	8.56
	8	0.531	0.514	0.075	3.20	14.59
	12	0.628	0.631	0.050	0.48	7.92
	16	0.719	0.699	0.069	2.78	9.87
	20	0.828	0.821	0.118	0.85	14.37

注: Q 为流量; v_w 为前缘流速法和峰值流速法测量的真实流速值; δ 为标准差。

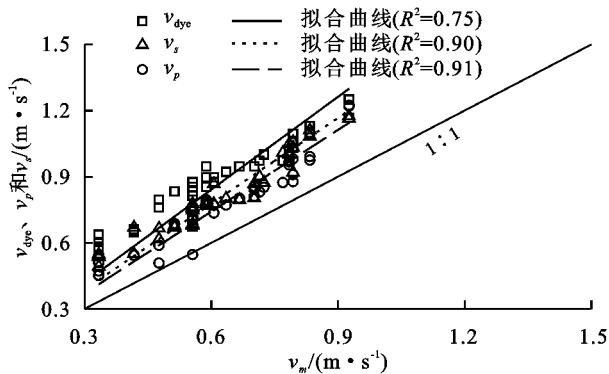


图 5 染色法、前缘测速法和峰值测速法的流速测量值与流量法所测平均流速的关系

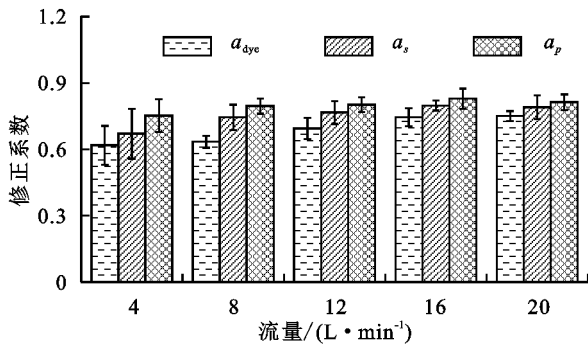


图 6 不同流量下 3 种测速方法的修正系数

2.4 薄层水流流速测量系统的影响因素分析

采用不同测量方法对薄层水流的流速进行测量, 流量的大小对测量方法的干扰越小, 表明该方法的实用性越好。对比 v_{dye}、v_p、v_s 与 v_m 之间的相对误差结果(图 7), 当水流的流量较小时, 3 种方法的相对误差都比较大; 随着水流的流量不断加大, 流速也相应增加, 而 3 种方法的相对误差逐渐减小, 同时薄层水流

流速测量系统的相对误差趋于稳定。根据相对误差的试验数据建立对数回归方程, 3 种测速方法的决定系数均在 0.86 以上, 表明流量大小与相对误差相关性较高。刘鹏等^[17-18]以聚苯乙烯泡沫作为示踪粒子用光电传感器进行测量时, 相对误差随着流量增加也出现减小的现象。Mujtaba 等^[7]以冷油滴作为示踪剂的测量结果也表明相对误差随着流量增加而减小。产生该结果主要原因有: 流量较低时水深较浅 (<1 mm), 示踪剂被床面的摩擦力和剪应力影响; 另一方面, 流量较小时水流流速也较低, 示踪剂在水中随流传输也会影响测量结果。染色法的相对误差高于薄层水流流速测量系统, 表明染色法受流量的影响较大。原因可能是染色法通过单反相机进行摄影测量, 随着流量的增加, 相机分辨率和采集频率会相对降低而带来系统误差, 并且通过人眼对图像进行逐帧分析也会带来人为误差。

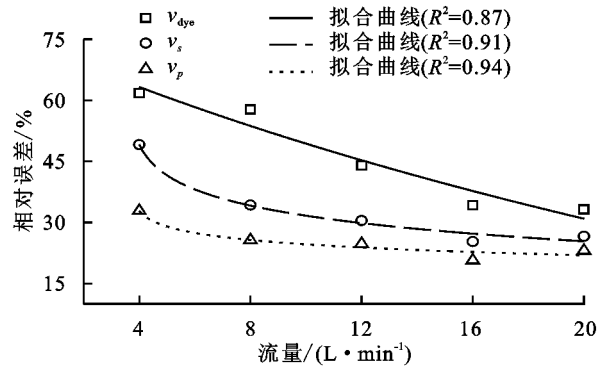


图 7 不同流量下 3 种测速方法的相对误差

平均速度与示踪速度的关系非常复杂, 其结果受到垂直流速剖面形状、下垫面条件、弗劳德数和雷诺数等因素的影响。从图 8 可以看出, 3 种测速方法的修正系数均随雷诺数增加而增大, 随着雷诺数的增加, 流态发生变化, 流速的测量值更接近剖面平均流速, 从而使修正系数更接近 1。Abrantes 等^[6]以热水为示踪剂, 通过热示踪法测量示踪剂的质心和前缘流速, 也得到相同结论。但其修正系数与雷诺数无明显相关性, Zhang 等^[22]在水流流态为层流时, 也未发现雷诺数和修正系数之间有显著的相关性。在本次试验研究中, 雷诺数与修正系数 α 平均值的决定系数为 0.86~0.93, 为正相关关系。Mujtaba 等^[7]以冷油滴为示踪剂的热示踪法测量薄层水流流速, 其修正系数也与雷诺数有很好的正相关关系。Abrantes 等^[8]以溶质在水流中的对流与弥散方程的解析解为数学基础通过热示踪法测量时发现, 修正系数与流态之间也有很强的正相关关系, 原因是随着雷诺数的增大, 水流流动的湍流度和流动速度增大, 示踪剂和水流更好地融合使速度剖面的抛物线更为平缓。因此, 雷诺数与修正系数之间的关系需进一步验证。

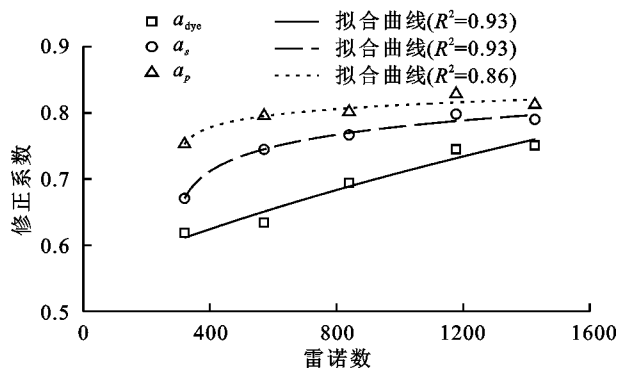


图 8 雷诺数与修正系数 α 对数拟合关系

3 结论

(1) 薄层水流流速测量系统传感器数据采集最优距离为 0.6~0.8 m。

(2) 在传感器数据采集距离为 0.7 m 时,以流量法为参照,薄层水流流速测量系统所测的流速值的相对误差为 0.48%~12.30%,变异系数 < 15%,证明该流速测量系统具有较好的精确度和稳定性。

(3) 与染色法相比,薄层水流流速测量系统测定的速度更接近流量法所测平均流速,其平均修正系数为 0.78,比染色法的修正系数 ($\alpha = 0.69$) 更接近 1,而前缘测速法与峰值测速法相比,峰值测速法的测量结果略优于前缘流速法。因此,对于坡面薄层水流的流速测量,薄层水流流速测量系统优于染色法。

(4) 薄层水流流速测量系统在水流流量较小时,相对误差较大;随着水流流量不断加大,相对误差逐渐减小,同时该系统的相对误差趋于稳定。该系统雷诺数与修正系数有较强的正相关关系。

由于本研究仅在颜色单一的下垫面条件下对该薄层水流流速测量系统进行了验证,该系统对于其他更为复杂的试验条件下流速测量有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [2] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等.降雨过程对地表糙度的影响[J].水土保持学报,2009,23(5):30-33.
- [3] 路荣,贾超,郝红敏,等.水蚀风蚀交错带灌丛沙堆形态演替及水养特征变化[J].水土保持学报,2018,32(3):74-79,85.
- [4] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.
- [5] 吸瑞媛,雷廷武,史晓楠,等.测量坡面薄层水流流速的电解质示踪真实边界条件法与系统[J].农业工程学报,2012,28(2):77-83.
- [6] Abrantes J R C B, Moruzzi R B, Silveira A, et al. Comparison of thermal, salt and dye tracing to estimate shallow flow velocities: Novel triple-tracer approach[J].

Journal of Hydrology, 2018,557:362-377.

- [7] Mujtaba B, de Lima J L M P. Laboratory testing of a new thermal tracer for infrared-based PTV technique for shallow overland flows[J].Catena,2018,169:69-79.
- [8] Abrantes J R C B, Moruzzi R B, de Lima J L M P, et al. Combining a thermal tracer with a transport model to estimate shallow flow velocities[J].Physics and Chemistry of the Earth,2019,109:59-69.
- [9] 杨苗,龚家国,张宽地,等.坡面水流滚波特征参数超声波自动测量系统构建与试验[J].农业工程学报,2017,33(3):134-139.
- [10] 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.
- [11] 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].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [12] 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,2003,14(6):781-784.
- [13] Yang D M, Gao P L, Liu X Y, et al. A method for determining steady velocity of shallow water flow on hill-slope and the distance when water flow reaches stability[J].Journal of Hydrology,2018,565:214-223.
- [14] Kantoush S A, Schleiss A J, Sumi T, et al. LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases[J].Journal of Hydro-environment Research,2011,5(4):263-276.
- [15] Tauro F, Grimaldi S. Ice dices for monitoring stream surface velocity[J].Journal of Hydro-environment Research,2017,14:143-149
- [16] Dunkerley D L. An optical tachometer for short-path measurement of flow speeds in shallow overland flows: Improved alternative to dye timing[J].Earth Surface Processes and Landforms,2003,28(7):777-786.
- [17] 刘鹏.基于相关法的径流流速虚拟仪器测量系统[D].武汉:华中农业大学,2007.
- [18] 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.
- [19] 刘桂元.基于荧光示踪技术的微流速测量系统设计与开发[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [20] Dunkerley D. Estimating the mean speed of laminar overland flow using dye injection-uncertainty on rough surfaces[J].Earth Surface Processes and Landforms, 2001,26(4):363-374.
- [21] 罗榕婷,张光辉,沈瑞昌,等.染色法测量坡面流流速的最佳测流区长度研究[J].水文,2010,30(3):5-9.
- [22] Zhang G H, Luo R T, Cao Y, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J].Journal of Hydrology, 2010, 389(1):205-213.