

### 3 种坡面流水深测量方法比较

胡国芳<sup>1</sup>, 张光辉<sup>1,2</sup>, 朱良君<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

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, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 为坡面流水深的快速、准确测量提供技术支持。[方法] 采用超声波系统测量变坡试验水槽不同坡度和流量条件下坡面流水深, 同时用测针法和染色法对其进行平行测量, 利用平均绝对误差(MAE), 平均相对误差(MRE), 相对均方差误差(RRMSE)和 Nash—Sultcliffe 系数(NSE)4 个指标比较超声波法和染色法或测针法测量数据的接近程度。[结果] 通过对 3 种方法测量结果的分析发现, 不管以测针法还是以染色法的测量值为参照, 超声波法测量的水深值与参照值更接近且相关程度更高。[结论] 超声波法能快速有效地测量坡面流水深, 用于侵蚀静床坡面流水动力学、土壤侵蚀机理等相关的研究工作。

**关键词:** 坡面流; 水深; 超声波法; 测针法; 染色法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)03-0152-05

中图分类号: P332.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.034

### Comparison of Three Methods to Measure Depth of Overland Flow

HU Guofang<sup>1</sup>, ZHANG Guanghui<sup>1,2</sup>, ZHU Liangjun<sup>1</sup>

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] To provide technical support for measuring the overland flow depth rapidly and accurately. [Methods] The overland flow depth was measured with ultrasonic method under different slope gradients and flow rates. At the same time the flow depth was measured with the digital display probe method and dye tracing method. Based on the measurement results of digital display probe method or dye tracing method, four indexes including mean absolute error(MAE), mean relative error(MRE), the relative mean square error(RRMSE), and Nash—Sultcliffe efficiency coefficient(NSE) were calculated to analyze the similarity of the three methods. [Results] The depths measured by ultrasonic method were closer to the reference values and had a high degree of correlation with other two methods. [Conclusion] The ultrasonic method could be used to measure the depth of overland flow quickly and effectively in un-eroding bed experiments in laboratory for the studies of hydrodynamics properties of overland flow and soil erosion mechanism.

**Keywords:** overland flow; flow depth; ultrasonic method; digital display probe method; dye tracing method

土壤侵蚀包括土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积三大过程, 研究这些过程发生、发展的水动力学条件及各过程相互影响的水动力学机制, 是建立土壤侵蚀过程模型的基础<sup>[1]</sup>。水深是常用的坡面流水动力学参数之一, 是计算坡面流流速、水流剪切力、水流功率的基础, 因此, 准确测定坡面流水深至关重要。然而, 在野外条件下, 由于坡面流水深浅, 受下垫面状况、植被

覆盖、降雨及其扰动的影响十分强烈<sup>[2-3]</sup>, 因此坡面流水深在野外条件下不易直接测定。在实验室条件下, 特别是侵蚀静床条件下, 坡面流水深与流量、坡度、下垫面糙率及输沙率密切相关, 而这些因素在侵蚀静床均可控制, 从而使得坡面流水深的测量成为可能<sup>[4]</sup>。

在侵蚀静床试验中常用的水深测定方法包括直接测量和间接测量两类。直接测量多采用直尺、游标

收稿日期: 2014-03-27

修回日期: 2014-04-17

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“输沙对坡面侵蚀的影响及其水动力学机理研究”(41271287); 国家自然科学基金创新研究群体项目(41321001); 地表过程与资源生态国家重点实验室自主研究课题(2012-ZY-02); 中国科学院“百人计划”择优支持项目联合资助

第一作者: 胡国芳(1972—), 女(汉族), 山东省诸城市人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: gfh@mail.bnu.edu.cn。

通信作者: 张光辉(1969—), 男(汉族), 甘肃省静宁县人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn。

卡尺和数显测针<sup>[4]</sup>,由于坡面流水深很小<sup>[5]</sup>,同时多点、多断面测量耗时长,影响试验进度,因人工判读测针是否接触水面会引起测量误差。间接测量法是通过流速的测量来反推坡面流水深,常用的水流流速测定方法包括染色法、盐溶液法、热膜流速仪等。染色法需对测定的表面流速进行二次修正<sup>[6]</sup>,但修正系数随着含沙量的变化而变化<sup>[7]</sup>,当水流含沙量较高、水流颜色发生变化时,也因试剂颜色不易观察,而产生测量误差。盐溶液法受测流区长度和盐浓度分布函数的影响<sup>[8]</sup>,热膜流速仪无法测量含沙水流的流速<sup>[9]</sup>,从而影响了坡面流水深的准确测量。

超声波方向性好,穿透能力强,在均匀介质中速度恒定,适合用于测距技术<sup>[10]</sup>。超声波测距技术已广泛应用于地表粗糙度<sup>[11]</sup>、水下地形<sup>[12]</sup>、河流水位<sup>[13-14]</sup>、流量<sup>[15]</sup>、流速<sup>[16]</sup>等的测量,但在坡面流水深测量中的应用鲜见报道。朱良君等<sup>[17]</sup>对坡面流超声波水深测量系统的原理、参数设置及精度进行了调试与检验,结果表明其精度能够满足坡面水文过程、土壤侵蚀机理等研究工作对坡面流水深的需求,但是超声波测量的坡面流水深,其测量结果及其变化规律性是否与传统的测针法和染色法的测量结果一致还不得而知。因此,本文在不同流量、坡度组合下利用超声波法、测针法和染色法分别对坡面流水深进行测量,并将测量结果进行两两比较和分析,目的是为坡面流水深的快速、准确测量提供技术支持。

# 1 试验与方法

## 1.1 试验装置

试验于 2012 年 9—10 月在北京师范大学房山综合实验基地进行,试验水槽长 5 m,宽 0.4 m,深 0.28 m,水槽底部为 4.7 m 长的有机玻璃板,板上粘有中值粒径为 0.22 mm 的沙子,试验过程中下垫面糙率稳定,保持不变。水槽一端高度可调,可使坡度在 0°~30°间变化,供水系统由 1.95 m<sup>3</sup> 蓄水池、水泵、阀门组、分流箱和管道组成,可通过调整阀门组来控制水槽内流量。水槽升降端带有长 0.3 m,深 0.4 m 的消能池,水流通过溢流形式进入水槽,以保证水流进入水槽时稳定,且初速度为 0。

超声波测量系统包括 28 个由美国 Senix 公司生产的 TSPC-30S2-232 型超声波距离传感器和 2 个美国 Campbell 科技公司生产的 PC400 数据采集器。将 28 个传感器按每 4 个一组进行安装,共 7 组,第 *i* 组标记为  $i_1, i_2, i_3, i_4 (i=2, \dots, 8)$ ,安装时保证传感器垂直于水槽底部。

测针为重庆水文仪器厂生产的 SX40-A 型水位测针,其分辨率为 0.01 mm。3 个测针(标记为 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>)分别安装在第 3,4 组,4,5 组和 5,6 组超声波传感器的中间位置,测针安装在导轨上,可以沿横断面滑动并固定。超声波系统传感器及测针安装位置如图 1 所示。

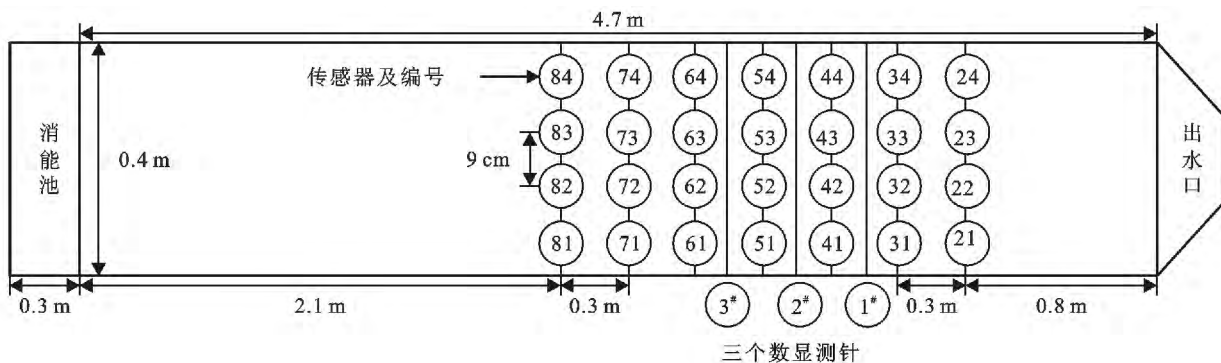


图 1 超声波传感器及数显测针布设

## 1.2 试验方法

试验设计 5 个坡度(5°,10°,15°,20°,25°),每个坡度下设计 5 个流量(0.25,0.5,1.0,1.5,2.0 L/s),共进行 5×5=25 组试验。试验时先将水槽调至设计坡度,然后开启供水装置对水槽放水,调整阀门组调节流量。用量筒对流量进行标定,即用量筒测量一定时间内的水量,计算流量,如果连续 6 次的流量与设计流量相对误差在 2% 内,则认为流量已达到要求,并

取 6 次测量结果的平均值作为该次实验的流量值。每组试验均使用超声波法、测针法和染色法对坡面流水深进行测定。

1.2.1 超声波法 朱良君等<sup>[17]</sup>对超声波测量系统原理和最优参数的确定进行了详细描述,本文不再赘述。将水槽调至试验坡度后,先利用超声波对干燥槽底进行测量,待试验所需流量稳定后,再次进行超声波测量。每次测量持续 2 min,每个传感器共记录 1 200 个数据。由于坡面流流动时超声波测量系统的

测量值稳定性较静止槽底时的测量值稳定性差<sup>[17]</sup>,会出现少量的异常值(比如远大于放水前对静止槽底的测量值),为了避免这些异常值对测量均值产生影响,也为提高测量精度,手工剔除这些明显异常值后,计算剩余数据的均值 $\mu$ 和标准差 $\sigma$ ,取 $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$ 区间内的平均值作为该传感器的测量结果。每个超声波传感器测量水槽放水前后的距离差即为该传感器所在位置在该坡度和流量条件下的坡面流水深。将 28 个传感器的测量均值作为超声波法测量的水深。

1.2.2 测针法 测量时,缓慢旋转测针上的旋钮,使测针缓慢下移,直至测针尖端恰好接触槽底或水流表面,读取数显屏幕上的读数,放水前后分别进行测量,两次读数之差即为该位置的水深值。测量时将测针沿水槽横断面滑动(图 1),均匀选取 12 个位置进行测量,每个位置读数 3 次,并取其平均值作为该次的读数。3 个测针共测量 36 个位置的水深,将其平均获得该流量和坡度下测针法测得的水深。

1.2.3 染色法 选取水槽出水口以上 0.6~2.6 m 的区域进行染色法测量水流表面最大流速<sup>[18]</sup>。沿水槽横断面均匀选取 12 个位置,每个位置滴 1 滴高锰酸钾溶液,用秒表记录高锰酸钾溶液流过两米测速区所需的时间,每个位置重复 5 次,将其平均值作为该位置的水流表面最大流速。测量前后,各测 1 次水温,前后 2 次水温均值作为该次试验水温。计算 12 个位置处测得水流的表面最大流速,去除最大值最小值后,将剩余 10 次测量结果的均值作为该次试验水流的表面流速  $V_{\text{表面}}$ 。由式(1)~(3)计算染色法坡面流水深:

$$h = \frac{Q}{\alpha V_{\text{表面}} B} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{V_{\text{平均}} R}{v} \approx \frac{V_{\text{平均}} h}{v} = \frac{Q}{Bv} \quad (2)$$

$$v = \frac{0.01775}{10000(1+0.0337t+0.000221t^2)} \quad (3)$$

式中: $h$ ——水深(m); $Q$ ——流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $\alpha$ ——染色法修正系数,当  $R_e < 500$  时, $\alpha = 0.67$ ,当  $500 < R_e < 2000$  时, $\alpha = 0.7$ ,当  $R_e > 2000$  时, $\alpha = 0.8$ <sup>[21]</sup>; $V_{\text{表面}}$ ——染色法测定的水流表面最大流速( $\text{m}/\text{s}$ ); $B$ ——水槽宽(m); $R_e$ ——雷诺数; $V_{\text{平均}}$ ——水流平均流速( $\text{m}/\text{s}$ ); $R$ ——水力半径(m),对坡面流而言其可用  $h$  代替; $v$ ——清水的黏滞系数( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $t$ ——水温( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 1.3 数据处理方法

3 种方法数据测量值的误差分析、水深与流量的相关关系采用 Excel 软件,制图利用 Origin 和 Excel 进行。利用了 SPSS 17.0 软件分析 3 种方法测量水

深与单宽流量和坡度的相关关系、水深数据的 Pearson 相关性分析和  $T$  检验。

为比较上述 3 种测量坡面流水深方法的差异性,本文选取了 4 个常用的指标来进行分析,这 4 个指标分别是平均绝对误差(MAE, mm),平均相对误差(MRE, %),相对均方差误差(RRMSE)和 Nash-Sultcliffe 系数(NSE)<sup>[18-19]</sup>,其表达式分别为:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (4)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i - O_i}{Q_i} \times 100\% \right) \quad (5)$$

$$\text{RRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{O_m} \quad (6)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \quad (7)$$

式中: $O_i$ ——第  $i$  个参照值; $O_m$ —— $n$  个参照值的平均值; $P_i$ ——第  $i$  个测定值; $P_m$ —— $n$  个测定值的平均值。MAE, MRE 和 RRMSE 值越小,说明测定值与参照值间的差异越小,接近程度越高。NSE 反映的是测定值与参照值间的相关程度,取值上限为 1,其值越接近 1,测定值和参照值的相关程度越高。

## 2 结果与分析

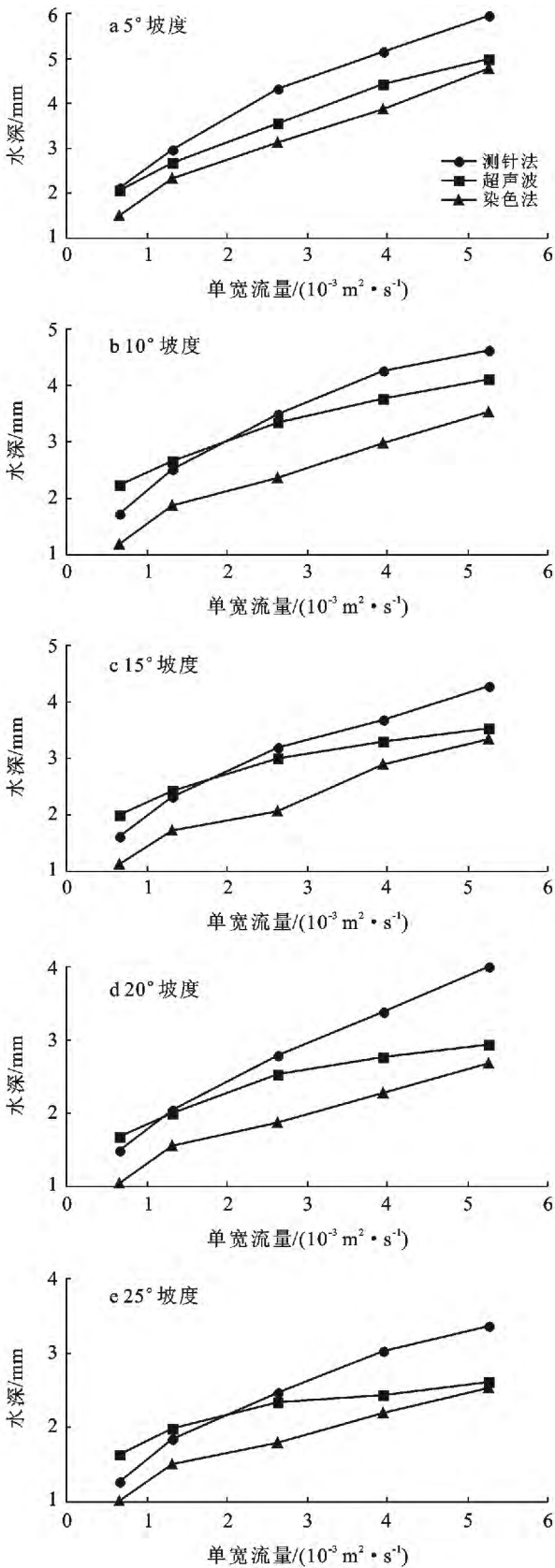
### 2.1 3 种方法测量结果的相关性分析

测针法、染色法及超声波在不同坡度和流量下测量的坡面流水深见图 2。从图 2 中可以看出,3 种方法测定的坡面流水深均随着流量的增大而增大,随着坡度的增大而减小,从整体来看测针法测定的水深最大,超声波法测定结果居中,而染色法测定结果最小。超声波测量结果在 3 种方法中的相对位置,随着流量的变化会发生一定的变化,当流量较小时,超声波测量结果大于测针法,而当流量较大时超声波测量结果小于测针法。对 3 种方法测定的水深数据进行 Pearson 相关性分析发现,测针法与染色法测量数据的相关系数为 0.986,超声波法与测针法相关系数为 0.968,超声波法与染色法相关为系数 0.964,在 0.01 水平上都显著相关,说明 3 种方法测量的水深数据具有一致的规律性。

张光辉<sup>[4]</sup>研究坡面薄层水流水动力学特性时发现,平均水深与流量和坡度间呈简单的幂函数关系: $h = 0.0348q^{0.428}S^{-0.307}$

式中: $q$ ——单宽流量( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $S$ ——坡度( $\text{m}/\text{m}$ )。

图 2 不同坡度 3 种方法测量的水深



因此,对 3 种方法测量的水深数据进行逐步回归分析,得到 3 种测量方法水深与单宽流量和坡度的关系式:

$$H_{\text{Ultrasonic}} = 0.011 3q^{0.302} S^{-0.280} \quad (R^2 = 0.928) \quad (8)$$

$$H_{\text{Pin}} = 0.034 7q^{0.476} S^{-0.300} \quad (R^2 = 0.993) \quad (9)$$

$$H_{\text{Dyeing}} = 0.025 2q^{0.478} S^{-0.310} \quad (R^2 = 0.978) \quad (10)$$

式中:  $H_{\text{Ultrasonic}}$ ,  $H_{\text{Pin}}$ ,  $H_{\text{Dyeing}}$ ——超声波、测针法和染色法测定的水深(mm)。上述比较结果表明 3 种方法测定的水深,均与流量和坡度密切相关,尽管各方程的决定系数存在一定的差异,但都达到了极显著水平。

### 2.2 水深测量结果比较分析

虽然 3 种方法测量的水深数据随流量和坡度的变化规律一致,但通过配对  $T$  检验发现,在 95% 的置信区间上任何两种方法的水深测量值都存在显著差异。为此选取了 4 个常用的评价两者接近程度的指标(MAE, MRE, RRMSE 和 NSE)对 3 种方法的测量值进行比较。

鉴于测针法和染色法是侵蚀静床试验中最常用的水深测量方法,因此,分别以测针法和染色法测量的水深数据为参照,将超声波法和另一种测量方法的测量数值进行比较。以染色法测定的水深数据为参照值,超声波和测针法测量值的比较数据见表 1。

表 1 超声波和测针法比较

指标	MAE	MRE	RRMSE	NSE
超声波法	0.55	30.92	0.27	0.57
测针法	0.83	37.17	0.39	0.09

从表 1 可以看出,超声波的 3 个指标 MAE, MRE 和 RRMSE 都明显小于测针法的相应值,说明超声波法测量的水深更接近染色法测定的结果;而超声波法的 NSE 指标显著大于测针法的 NSE 指标,说明与测针法相比,超声波与染色法的接近程度更高。因此,以染色法测量的水深值为参照时,上述 4 个指标都表明超声波法的测量值明显优于测针法的测量值。

以测针法测量的水深数据作为参照值,超声波和染色法测量值的比较结果见表 2。

表 2 超声波和染色法的比较

指标	MAE	MRE	RRMSE	NSE
超声波法	0.42	13.44	0.16	0.82
染色法	0.83	26.79	0.28	0.45

从表 2 可以看出,超声波法的 MAE, MRE 和 RRMSE 指标大约是染色法对应的指标的一半,说明超声波法与测针法的测量值间差距更小;超声波法的 NSE 指标几乎是染色法的 2 倍,说明超声波法测量

值更为接近。因此,以测针法测量的水深值为参照时,上述 4 个指标都表明超声波法的测量值明显优于染色法的测量值。

### 2.3 3 种测量方法的适用性比较

在文本设计的试验过程中,每个坡度、每个流量条件下,用测针法(3 个测针,每个测针测 12 个位置,每个位置测 3 次)进行测量所需时间约为 40 min,染色法(12 个位置,每个位置测 5 次)所需时间约为 15 min,而用超声波法测量(28 个传感器同时测量,数据采集器同步采集数据)所需时间不超过 5 min,显然在测量时间上超声波法具有很大的优势。测针法和超声波法需要将测针或超声波探头安装固定于水槽上,在一定程度上增大了测量成本和难度。对于含沙的水流或者表面有附着物的水流,染色后水流变化不明显会增加测量的误差,但超声波法和测针法仍适用。

## 3 结论

本文在较大坡度和流量范围内,较为系统地比较了 3 种侵蚀静床坡面流水深测量方法,结果发现超声波法、测针法和染色法测量的水深均为单宽流量和坡度的幂函数,随着流量的增大而增大,随着坡度的增大而减小,拟合效果都很好(决定系数  $R^2$  均大于 0.93)。测针法测定结果最大(平均为 3.12 mm),超声波法测定结果次之(平均为 2.84 mm),染色法测定结果最小(平均为 2.29 mm)。分别以测针法和染色法测量的水深数据为参照值,采用平均绝对误差、平均相对误差、相对均方差误差和 Nash—Sutcliffe 模型效率系数 4 个参数比较分析发现,超声波法测定的结果优于染色法或测针法。同时超声波法测量耗时仅为测针法的 1/20,染色法的 1/7.5,充分表明了超声波法在坡面流水深测量中的优势,可用于实验室侵蚀静床坡面流水动力学特性、侵蚀机理等相关的实验。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 张光辉. 国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 112-115.  
[2] Horton R E, Leach H R, Van Vliet R. Laminar sheet-

flow[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1934(15):393-404.

- [3] 陈国祥,姚文艺. 坡面流水力学[J]. 河海科技进展, 1992, 12(2): 7-13.  
[4] 张光辉. 坡面薄层流动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165.  
[5] 刘青泉,李家春,陈力,等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(I): 坡面流[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 360-372.  
[6] Li Gang, 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(6): 509-515.  
[7] Zhang Guanghui, Luo Rongting, Cao Ying, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1): 205-213.  
[8] 夏卫生,雷廷武,吴金水,等. 电解质脉冲法测量薄层水流流速的实验研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(11): 70-74.  
[9] 李永祥,苑明顺,李春华. 热膜技术在水流测速中的应用研究. 流体力学实验与测量[J]. 1997, 11(4): 45-50.  
[10] 戴建国. SB-IA 型超声波测深仪[J]. 水文, 1982(4): 34-38.  
[11] Robichaud P R, Molnau M. Measuring soil roughness changes with an ultrasonic profiler[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(6): 1851-1858.  
[12] 张建中. 利用超声波测量水下地形的基本原理及目前存在的主要问题[J]. 黄河建设, 1958(2): 55-59.  
[13] 陈新益,方德胜,郑俊孝. CCS-II 型超声波长期自记水位仪的研制及应用[J]. 水文, 2002, 22(5): 56-58.  
[14] 梁国华. 超声波技术在我国水文测验中的应用[J]. 中国水利, 1985(2): 18-19.  
[15] 王晓玲,徐永君,刘曰武. 超声波在不规则截面渠道水流量测量中的应用研究[J]. 计量技术, 2006(9): 8-10.  
[16] 阿地力·艾力. 超声波流量测量系统在喀什噶尔流域三县引水明渠中的应用[J]. 中国水运, 2012, 12(9): 161-162.  
[17] 朱良君,张光辉,胡国芳,等. 坡面流超声波水深测量系统研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 235-239.  
[18] Zhang Guanghui, Liu Yumei, Han Yanfang, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes (I): Transport capacity estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1291-1297.