

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.002; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.002.

李佳明, 张志兰, 陈晓燕, 等. 翻斗式径流泥沙半自动监测设备的误差及校准分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 167-177.

Li Jiaming, Zhang Zhilan, Chen Xiaoyan, et al. Investigation on error and calibration of tipping bucket runoff and sediment semi-automatic monitoring equipment[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 167-177.

翻斗式径流泥沙半自动监测设备的误差及校准分析

李佳明¹, 张志兰², 陈晓燕¹, 吴俊南¹, 王星¹, 冯滔¹, 罗伏林¹, 朱平宗¹

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市水土保持监测总站, 重庆 401147)

摘要: [目的] 分析翻斗式径流泥沙半自动监测设备在野外实际应用下的误差规律, 构建径流量和泥沙量校准模型, 为径流泥沙半自动监测设备的应用提供依据。[方法] 采用天然降雨径流泥沙监测数据, 对翻斗式径流泥沙半自动监测设备的径流量和泥沙量测量值的误差进行分析, 基于人工模拟径流冲刷试验初步构建了径流量和泥沙量的校准函数, 结合自然降雨试验数据构建了 7 个径流小区径流泥沙半自动监测设备的径流量和泥沙量校准模型, 并验证校准模型的可行性。[结果] (1) 翻斗式径流泥沙半自动监测设备得到的径流量和泥沙量与实测值存在一定误差, 次降雨条件下各径流小区径流量和泥沙量相对误差分别介于 0.03%~139.52% 和 0.32%~346.19%, 且误差均随径流量和泥沙量的增大而减小; 年尺度上径流量和泥沙量的误差分别介于 2.23%~45.03% 和 -10.38%~103.26%, 径流量的自动测量数据总体偏大, 而泥沙量没有明显规律, 但半自动监测设备次降雨尺度监测结果的误差大于年尺度的误差。(2) 翻斗式径流泥沙半自动监测设备的监测数据可以用线性函数方程进行校准, 通过径流模型、泥沙模型校准后, 径流量和泥沙量均方根误差均大幅下降, 相对误差分别介于 -0.01%~0.68% 和 0.00%~3.52%, 能够达到径流泥沙监测数据误差均小于 5% 的相关要求。[结论] 虽然径流泥沙半自动监测设备的使用对加快水土流失监测自动化进程、提升数据获取效率具有重要意义, 但设备安装后需要进行进一步校准, 采用自然降雨真实径流数据建立的校准模型, 校准结果更佳。

关键词: 径流泥沙半自动监测设备; 翻斗式; 误差分析; 校准模型

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0167-11

Investigation on error and calibration of tipping bucket runoff and sediment semi-automatic monitoring equipment

Li Jiaming¹, Zhang Zhilan², Chen Xiaoyan¹, Wu Junnan¹,
Wang Xing¹, Feng Tao¹, Luo Fulin¹, Zhu Pingzong¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. Chongqing Central Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 401147, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to analyze the error law of tipping bucket type semi-automatic monitoring equipment for runoff and sediment in field application, to construct calibration models for runoff and sediment measured by semi-automatic monitoring equipment, and to provide a basis for the application of runoff and sediment semi-automatic monitoring equipment. [Methods] Natural rainfall runoff and sediment monitoring data were utilized to analyze the error of the measured values of runoff and sediment of the tipping bucket runoff and sediment semi-automatic monitoring equipment. Based on the artificial simulated runoff scouring experiment, the runoff and sediment calibration function of runoff and sediment

收稿日期: 2024-04-09

修回日期: 2024-05-09

接受日期: 2024-05-21

资助项目: 国家自然科学基金(42307422); 中央高校基本业务费项目(SWU-KQ22039); 重庆市水利科技项目(CQSLK-2022008); 西南大学研究生科研创新项目(SWUS23090)

第一作者: 李佳明(1999—), 男, 吉林榆树人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: 2257029037@qq.com

通信作者: 陈晓燕(1971—), 女, 重庆人, 博士, 教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: c400716@126.com

朱平宗(1991—), 男, 江西乐安人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: zpz2411615087@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

was preliminarily constructed. Combined with the natural rainfall test data, the runoff and sediment calibration models for 7 runoff plots were constructed, and the feasibility of the calibration models was verified. [Results] (1) There were some errors between the runoff and sediment monitored by the semi-automatic monitoring equipment and the measured values. At rainfall event scale, the relative errors of runoff and sediment in each runoff plot were between 0.03%~139.52% and 0.32%~346.19%, respectively, and the errors decreased with the increase of runoff volume and sediment amount. At annual scale, the errors of runoff and sediment were between 2.23%~45.03% and -10.38%~103.26%, respectively. The automatic measurement data of runoff was generally greater, whereas there was no obvious regularity in sediment amount. Nevertheless, the error of the monitoring results of the semi-automatic monitoring equipment at rainfall event scale was greater than that at annual scale. (2) The monitoring data of the tipping bucket runoff and sediment semi-automatic monitoring equipment could be calibrated by the linear functions. After the calibration of the runoff model and the sediment model, the root mean square error of runoff volume and sediment amount were greatly reduced. The relative errors were between -0.01%~0.68% and 0.00%~3.52%, which could meet the relevant requirements of runoff and sediment monitoring data error less than 5%. [Conclusions] Although the use of semi-automatic monitoring equipment for runoff and sediment is of great significance for promoting the automation process of soil erosion monitoring and improving the efficiency of data acquisition, further calibration is needed after the equipment is installed. The calibration model established by real runoff data of natural rainfall is better.

Keywords: runoff and sediment semi-automatic monitoring equipment; tipping bucket; error analysis; calibration model

径流量和泥沙量的实时准确测量是量化水土流失量、探究土壤侵蚀规律和科学评估水土保持效益的核心,同时也是现阶段水土流失监测的关键。2023年1月,中共中央办公厅国务院办公厅印发的《关于加强新时代水土保持工作的意见》明确提出“要建立水土保持监测设备计量制度,保证监测数据质量”。在开展水土保持监测标准化和监测信息化建设工作的进程中,翻斗式径流泥沙半自动监测设备作为常用的径流泥沙自动监测设备之一,实现了水土流失监测的实时化和自动化,极大地减少了人工投入^[1],但同时也存在误差,需要进一步校准。

自动监测设备在投入使用前通常会在室内进行校准,使其测量径流和泥沙量的测量误差在允许的范围内。但野外条件下,受安装条件、区域土壤性质差异等因素的影响,室内校准后的设备的监测结果与实测值往往仍存在一定误差,需要进一步校准^[2-3]。误差分为系统误差和随机误差两部分,其中随机误差主要是由一些不可预见的因素引起的偏差,如内部构件损坏,人为错误(由观察者测量和记录数据引起),较难预测;系统误差主要受监测设备自身设计或材料的限制,较容易预测^[4-5]。不同研究者采用了不同的方法对径流泥沙自动监测设备的误差进行了校准^[6-8]。Shedekar^[9]和 Shimizu^[10]等基于流速数据,构建了 5

种规格的翻斗流量计依据流速校准流量的模型,并发现流速和翻斗静态体积是影响测量误差的主要因素。刘瑛娜等^[11]基于 5 种流速和 5 个含沙浓度的室内冲刷试验,发现流速增大导致径流量测量偏大,浓度增大导致径流量测量偏小,并建立了流速、浓度共同影响下的径流校准模型。Cao 等^[12]通过对径流泥沙自动监测设备径流含沙量实测值与标准值的拟合发现,较低的含沙量下,含沙量测量相对误差较大。然而以往的率定均在室内完成,在室内建立模型过程中提供恒定流速、恒定浓度的径流,但野外条件下进入设备径流的流速是变化的,前人的校准模型不适用于校准野外条件下的数据^[13]。

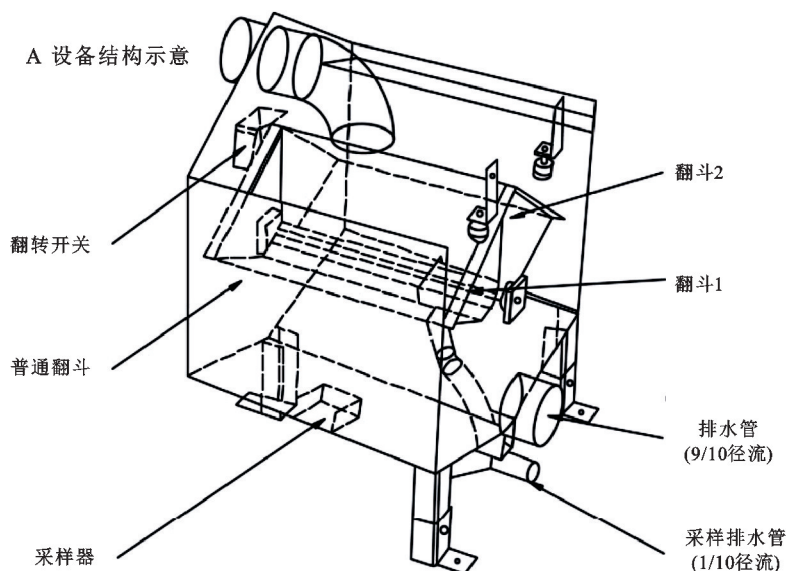
综上所述,虽然前人对于径流泥沙半自动监测设备的径流量和泥沙量监测结果的率定开展了部分工作,但以往的研究主要集中在室内的模拟试验,对于野外条件下设备的测量误差如何,是否可以采用校准模型对测量结果进行校准仍不清楚。基于本文采用野外冲刷试验结合自然降雨监测的方法,系统分析野外天然降雨条件下径流泥沙半自动监测设备的误差规律,明确翻斗式径流泥沙半自动监测设备的校准模型,相关研究对于该类型自动监测设备的野外校准工作可以提供实践指导。

1 材料与方法

1.1 径流泥沙半自动监测设备简介

率定的径流泥沙半自动监测设备为翻斗式全过程半自动径流泥沙监测系统(EL-RS/AMS)(图1),主要由采样翻斗、分流桶及数据采集器三部分组成。翻斗由两个组成,当径流达到一定量后(3 L),在重力的作用下失去平衡而翻转,此时径流流入到另一个翻斗中,以此往复。翻斗翻转一次,数据采集器记录径流量为3 L,来实

现径流量的自动监测,其工作原理与翻斗式雨量筒工作原理一致。基于翻斗次数计算得到的径流量称为自测径流量($W_{\text{自测}}$)。翻斗下面存在两个对称分布的采样器,可将翻下来的径流按9:1体积(体积比例可根据实际情况进行调整)流入到大小两个分流桶中,由于小分流桶可以通过全收集烘干法测量得到准确的含沙量,相较于大分流桶含沙量测量结果更加准确。因此,小区产沙量是通过测量小分流桶中的含沙量再乘以自测径流量计算得到,称为自测泥沙量($S_{\text{自测}}$)。



B 翻斗实物



C 设备与大小分流桶



图1 径流泥沙半自动监测设备

Fig. 1 Picture of semi-automatic monitoring equipment for runoff and sediment

1.2 径流泥沙半自动监测设备率定方法

试验于2022年9月—2023年10月在重庆市万盛经开区南桐坡面径流场内开展。径流场内建有不同土地利用方式(A经果林、B水保林、C裸地、D草地)和耕作方式(E顺坡耕作、F横坡耕作、G石坎梯田)的标准径流小区共7个,坡度为15°,每个径流小区均安装了1套径流泥沙半自动监测设备(2018年安装)。试验分为人工冲刷试验和自然降雨径流泥沙监测两部分,前者用于初步确定径流泥沙半自动监测设备径流量和泥沙量的校准函数,后者用于构建并验证每个小区径流泥沙半自动监测设备径流量和泥沙量校准模型(图2)。

校准模型的可靠性采用决定系数(R^2)、相对误差(δ)和均方根误差(RMSE)3个指标进行评估。其中 R^2 评估自测数据、校准数据和实际数据之间的共线性程度,在0和1之间变化,越接近1,自测数据、校准数据和实际数据之间的相关性越好。相对误差(δ)衡量测量数据与实际数据之间的差距,差距越小证明模型效果越好,正的相对误差值表示对代表参考数据的模型和设备的测量高估,而负值表示低估,当

等于0时,数据完全相关。均方根误差(RMSE)是一种用于衡量预测模型在连续性数据上的预测精度的指标。它表示预测值与真实值之间的平均偏差程度,衡量模型优劣,即预测值和真实值越接近,两者的均方差越小,(RMSE)的值就越小说明预测模型描述试验数据具有更好的精确度。

1.2.1 基于放水冲刷试验的径流泥沙校准函数的构建 根据监测站前期降雨量、径流量和泥沙量的监测数据,综合考虑极端降雨条件的径流量和泥沙量,设计了含沙量为5,10,20,40,60,100 g/L共6个含沙量梯度,并控制流量在0~1 L/s,人工模拟径流在不同的小区设备上上进行冲刷试验。试验开始前在径流小区周边收集表层土壤(保证与径流小区土壤性质基本相同),风干后过5 mm筛备用,然后称取一定量的土在长0.6 m、宽0.6 m、高0.8 m的容器中配置不同浓度的含沙水流进行冲刷试验。试验过程中,自动监测设备每翻转一次,人工分别收集自动监测设备两个分流口处的径流泥沙样直至试验结束,然后分别测定径流量和泥沙量。

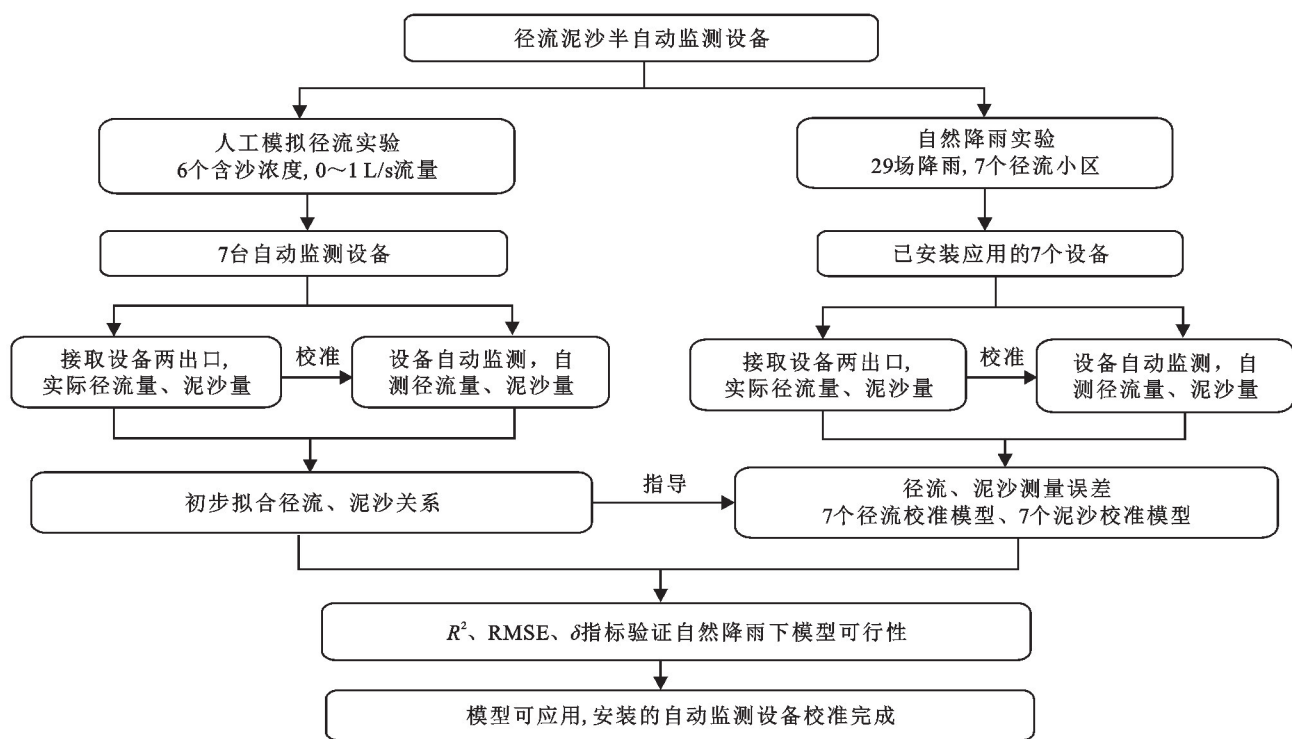


图 2 校准流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration process

结束后,自动监测设备自测径流量($W_{\text{自测}}$),通过系统直接读取得到;实测径流量($W_{\text{实测}}$)为人工实测大小两个分流桶径流量的总和,用公式(1)计算;自动监测设备自测泥沙量($S_{\text{自测}}$)是小分流桶含沙量与自测径流量($W_{\text{自测}}$)的乘积,用公式(2)计算;而泥沙量的实测值($S_{\text{实测}}$)则为人工实测小分流桶泥沙量与大分流桶泥沙量的总和,用公式(3)计算;($S_{\text{小分}}$)为小分流桶内泥沙量,用公式(4)计算。每个浓度选两个不同小区设备分别冲刷1次,其中5个小区各分配两个浓度、2个小区各分配一个浓度,共进行12场冲刷试验(表1)。基于不同径流小区放水冲刷试验结果,初步构建得到径流泥沙半自动监测设备径流和泥沙量

校准公式。

$$W_{\text{实测}} = (W_{A1} + W_{A2} + \cdots + W_{An}) + (W_{B1} + W_{B2} + \cdots + W_{Bn}) \quad (1)$$

$$S_{\text{自测}} = (S_{A1} + S_{A2} + \cdots + S_{An}) / (W_{A1} + W_{A2} + \cdots + W_{An}) \times W_{\text{自测}} \quad (2)$$

$$S_{\text{实测}} = (S_{A1} + S_{A2} + \cdots + S_{An}) + (S_{B1} + S_{B2} + \cdots + S_{Bn}) \quad (3)$$

$$S_{\text{小分}} = S_{A1} + S_{A2} + \cdots + S_{An} \quad (4)$$

式中: W_{An} 为翻斗翻转第 n 次的小分径流量(L); W_{Bn} 为翻斗翻转第 n 次的大分径流量(L); S_{An} 为翻斗翻转第 n 次的小分流泥沙量(g); S_{Bn} 为翻斗翻转第 n 次的大分流泥沙量(g)。

表 1 各小区设备试验含沙量分配

Table 1 Sediment concentration distribution table of equipment test in each district

g/L

含沙量	经果林小区	水保林小区	裸地小区	草地小区	顺坡耕作小区	横坡耕作小区	石坎梯田小区
含沙量 1	5	10	20	40	60	5	100
含沙量 2	10	20	40	60	100		

1.2.2 基于天然降雨监测数据的径流泥沙校准模型的验证 基于放水冲刷试验得到的自动监测设备径流和泥沙量校准公式形式,结合各小区的自然降雨的实测数据,构建得到不同径流小区径流量和泥沙量的校准模型。为增加数据量及模型验证的准确性,自然降雨径流泥沙的监测分两部分。其一是降雨发生在白天时监测降雨过程中的径流量和泥沙量,即降雨过程中,径流泥沙半自动监测设备每翻斗一次,人工分

别用收集自动监测设备大小量分流口处的全部径流样,直至试验结束,与冲刷试验收集方法以及参数计算方法相同;其二是当降雨发生在晚上或凌晨,则第二天及时取样,先测量两分流桶内径流体积,对小分流桶内径流全收集取样,对大分流桶内充分搅拌均匀后大分流取样瓶(500 ml)采集3瓶径流样,烘干称重法测定径流中的含沙量。基于每个径流小区径流泥沙的自测和实测数据,构建每个径流小区径流泥沙半

自动监测设备径流量和泥沙量的校准模型并进行验证。各参数计算方法如下：

$$W_{\text{实测}} = W_A + W_B \tag{5}$$

$$S_{\text{自测}} = S_A / W_A \times W_{\text{自测}} \tag{6}$$

$$S_{\text{实测}} = S_A + C_B \times W_B \tag{7}$$

$$S_{\text{小分}} = S_A \tag{8}$$

式中： W_A 为小分径流量(L)； W_B 为大分径流量(L)； S_A 小分流泥沙量(g)； C_B 为大分流桶内 3 次取样含沙量平均值(g/L)。

1.3 数据分析

使用 Excel 软件(2022 版)对试验数据进行处理,使用 SPSS 软件(19.0)中的线性分析得到径流泥沙校准模型,使用 Origin 2021 进行图形的绘制。

2 结果及分析

2.1 径流量、泥沙量监测结果误差分析

2022 年 9 月—2023 年 8 月试验期间,试验地共发生 27 场小区产流的天然次降雨,其中小雨 13 场、中雨 9 场、大雨 4 场、暴雨及以上降雨 1 场,降雨量介于 3.5~58.5 mm,降雨历时介于 60~1 211 min, I_{30} 最大值为 49.3 mm/h, I_{60} 最大值为 33.0 mm/h。通过分析天然降雨设备径流量和泥沙量的误差发现,径流量和泥沙量的相对误差分别介于 0.03%~139.50% 和 0.32%~346.19%,相对误差的平均值分别介于 15.84%~21.87% 和 50.22%~60.24%(表 2),均大于 5%。且径流量和泥沙量监测值相对误差小于 5%

的降雨场次占比分别为 44.09% 和 11.63%(图 3)。年尺度上(2023 年),各径流小区径流量和泥沙量自测值与实测值的差值介于 17.59~289.02 L 和 -281.5~526.2 g,误差介于 2.23%~44.26% 和 -10.38%~103.67%(表 3),径流量误差总体偏大,而泥沙量误差既可能偏大也可能偏小。总体来看,年尺度上径流量和泥沙量的误差小于次降雨尺度的误差。

不同降雨类型间,自动监测设备测量的径流量和泥沙量的误差也存在一定差异。不同降雨类型径流量和泥沙量的相对误差最大值分别介于 41.40%~139.52% 和 204.20%~346.19%(表 2),从平均误差来看,小雨和暴雨条件下径流量和泥沙量的误差略大于中雨和大雨条件下的误差。总体来看,自动监测设备径流量和泥沙量的测量误差均随着降雨量和径流量的增大逐渐减小(图 3—4)。

表 2 不同降雨类型下半自动监测设备径流量、泥沙量测量相对误差

Table 2 Measurement error of runoff and sediment of semi-automatic monitoring equipment under different rainfall types

降雨类型	场数	径流量误差/%			泥沙量误差/%		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
小雨	13	0.03	138.34	21.87	0.65	346.19	60.24
中雨	9	0.27	139.52	19.56	0.32	260.36	50.22
大雨	4	0.13	67.35	15.84	0.44	204.20	54.81
暴雨	1	8.05	41.40	21.68	2.08	241.92	58.97

注:小雨、中雨、大雨和暴雨分别为次降雨降雨量<10 mm, 10~25 mm, 25~50 mm 和>50 mm。

表 3 全年径流、泥沙自测值与实际值对比

Table 3 Comparison of annual runoff and sediment self-measured values with actual values

径流小区	径流量				泥沙量			
	$W_{\text{实测}}/\text{L}$	$W_{\text{自测}}/\text{L}$	绝对误差/L	相对误差/%	$S_{\text{实测}}/\text{g}$	$S_{\text{自测}}/\text{g}$	绝对误差/g	相对误差/%
经果林	238.48	258.00	19.52	8.19	118.12	105.86	-12.26	-10.38
水保林	147.14	180.00	32.86	22.33	28.59	45.13	16.54	57.85
裸地	1375.29	1482.00	106.71	7.76	24795.40	24513.89	-281.51	-1.14
草地	126.41	144.00	17.59	13.92	22.36	45.54	23.18	103.67
顺坡耕作	1945.64	1989.00	43.36	2.23	23630.51	24156.70	526.19	2.23
横坡耕作	652.98	942.00	289.02	44.26	2674.42	2484.53	-189.89	-7.10
石坎梯田	546.94	627.00	80.06	14.64	3142.79	3624.85	482.06	15.34

注:相对误差为该小区所有场次降雨累计的自测值或校准值与实际值的差再与实际值的比值,下同。

2.2 放水冲刷试验下径流量和泥沙量校准模型初步构建

径流泥沙半自动监测设备监测得到的径流量和泥沙量可用线性模型进行校准。基于不同径流小区的人工放水冲刷试验,初步构建了径流泥沙半自动监测设备径流量和泥沙量的校准模型。结果表明小区产流量和产沙量可以采用基于自动监测设备得到的径流量和小分流桶的泥沙量来校准,模型的 R^2 均大

于 0.99(图 5)。其中校准前径流量的均方根误差和相对误差分别为 13.06 L 和 8.83%,校准后径流量的均方根误差和相对误差分别为 6.39 L 和 4.48%;校准前泥沙量的均方根误差和相对误差分别为 1 392.74 g 和 17.16%,校准后泥沙量的均方根误差和绝对误差分别为 386.54 g 和 8.03%。

总体来看,校准后径流量和泥沙量误差大幅减小,表明设备测量得到的径流量和泥沙量可以用线性模型

进行校准,但由于不同设备之间导致监测数据存在误差的因素可能存在差异,使得将所有径流泥沙半自动监测设备综合考虑时,校准后泥沙量的误差仍大于 5%,且试验设计流量和含沙量远大于设备所监测小区

的真实情况,冲刷初步构建模型校准结果未达到径流小区监测数据误差小于 5%的相关要求。因此,需要单独考虑每个自动监测设备径流小区实际运行产流产沙范围,并分别率定得到其径流和泥沙量的校准模型。

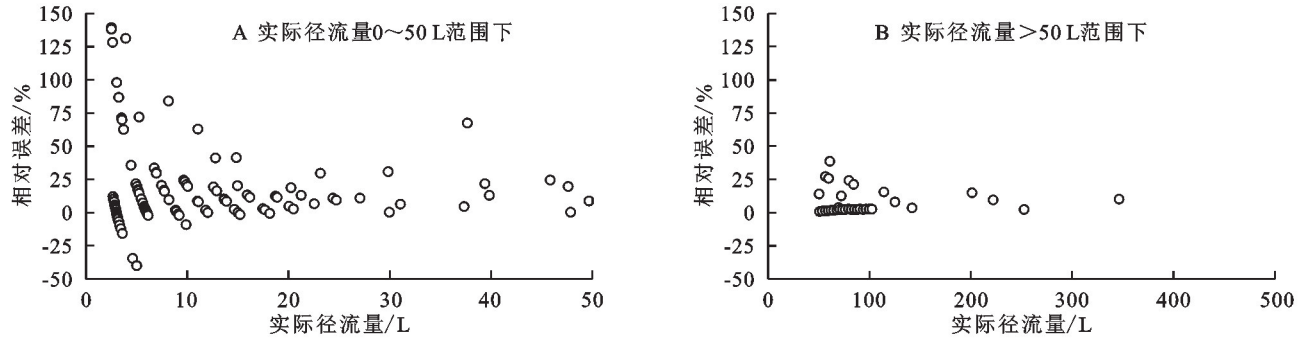


图 3 径流量监测相对误差随产流量的变化规律

Fig. 3 Variation law of runoff monitoring error with runoff yield

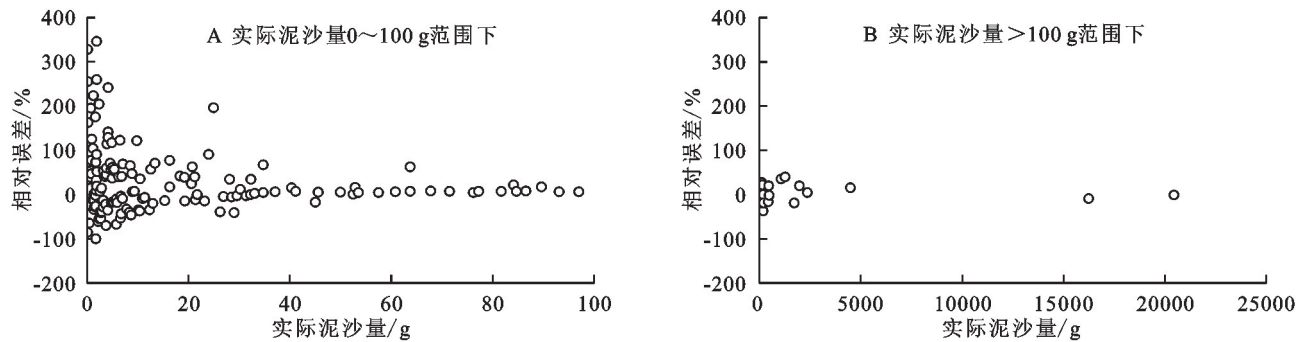


图 4 泥沙量监测相对误差随泥沙量的变化规律

Fig. 4 Variation law of relative error of sediment monitoring with sediment amount

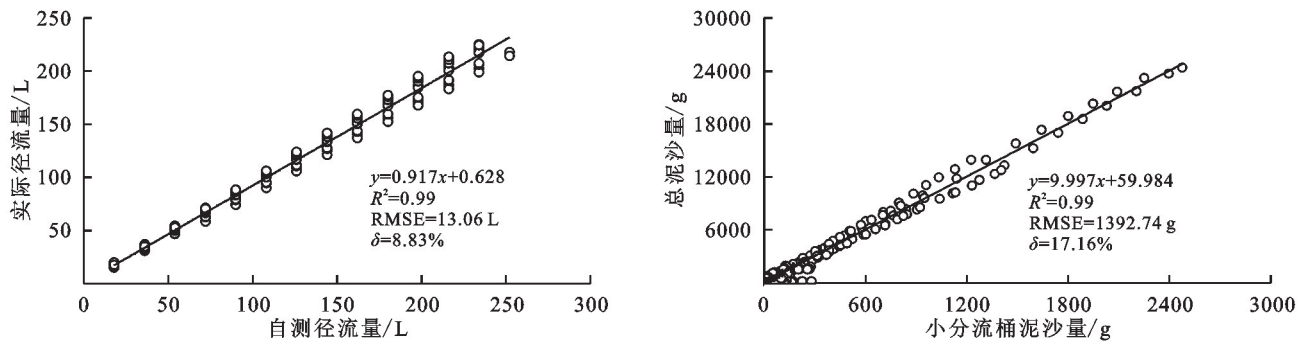


图 5 冲刷下自动监测设备径流、泥沙校准

Fig. 5 Calibration of runoff and sediment of automatic monitoring equipment under scouring

2.3 天然次降雨下径流泥沙校准模型构建

由于自动监测设备所应用的小区条件不同,即使同一场降雨,各小区产流量产沙量范围存在差异,因此需要对设备安装后,对不同小区设备测量径流量和泥沙量的率定函数进行构建,进而直接运用于不同小区径流量的校准。基于径流小区天然降雨条件下径流泥沙的实测数据,构建各小区径流泥沙半自动监测设备径流量和泥沙量的校准模型。结果表明,各径流小区的实际径流量、泥沙量可以采用线性方程,基于自动监测设备测量的径流量计算得到,拟合方程的 R^2 均大于 0.980(表 4);而各径流小区的实际泥沙量也可以采用

线性方程,基于自动监测设备小分流桶的泥沙量计算得到,拟合方程的 R^2 均大于 0.950(表 4)。

但不同径流小区径流量和泥沙量的校准模型拟合系数差异较大。不同小区径流泥沙半自动监测设备径流量校准模型的线性拟合系数介于 0.658~0.976,除横坡耕作小区校准模型拟合系数较小(0.658)外,其与小区校准模型拟合系数均在 0.848 以上(表 4)。理论上,径流量校准模型的拟合系数越接近于 1,表明自动监测设备测量值与实测值越接近。因此,从径流量校准模型的拟合系数来看,自动监测设备径流量的自测值均偏大。不同小区径流泥沙半自动监测设备泥沙量

校准模型的拟合系数介于 3.167~17.355,其中草地小区的校准系数最小,而横坡耕地小区校准系数最大(表 4)。由于小分流桶预期仅包含 1/10 的径流和泥沙总量,因此,理论上小区的总泥沙量应为小分流桶泥沙量的 10 倍,即拟合泥沙量校准模型的拟合系数越接近于 10,表明自动监测设备泥沙量监测值越准

确。从泥沙量校准模型拟合系数来看,不同小区径流泥沙半自动监测设备对于泥沙量的监测存在较大偏差,但没有明显规律,即可能偏大,也可能偏小。究其原因,不同小区径流泥沙半自动监测设备径流量和泥沙量自测值的误差主要与各小区设备安装的差异、径流量大小等的差异有关。

表 4 不同小区监测设备径流、泥沙校准模型

Table 4 Calibration model of runoff and sediment of monitoring equipment in different runoff plots

小区	径流校准模型	$R^2_{\text{径流}}$	泥沙校准模型	$R^2_{\text{泥沙}}$
经果林	$W_{\text{校准}}=0.905W_{\text{自测}}+0.294$	0.993	$S_{\text{校准}}=15.810S_{\text{小分}}-4.098$	0.965
水保林	$W_{\text{校准}}=0.848W_{\text{自测}}-0.312$	0.988	$S_{\text{校准}}=4.722S_{\text{小分}}+0.388$	0.984
裸地	$W_{\text{校准}}=0.919W_{\text{自测}}+1.395$	0.997	$S_{\text{校准}}=10.104S_{\text{小分}}+8.705$	0.999
草地	$W_{\text{校准}}=0.880W_{\text{自测}}+0.095$	0.995	$S_{\text{校准}}=3.167S_{\text{小分}}+0.279$	0.952
顺坡耕作	$W_{\text{校准}}=0.976W_{\text{自测}}+0.116$	0.998	$S_{\text{校准}}=9.285S_{\text{小分}}-3.043$	0.999
横坡耕作	$W_{\text{校准}}=0.658W_{\text{自测}}+1.172$	0.998	$S_{\text{校准}}=17.355S_{\text{小分}}-16.572$	0.998
石坎梯田	$W_{\text{校准}}=0.865W_{\text{自测}}+0.242$	0.999	$S_{\text{校准}}=10.776S_{\text{小分}}-4.518$	0.993

注:径流校准值($W_{\text{校准}}$)是将径流自测值($W_{\text{自测}}$)带入径流校准模型得到的校准值,泥沙校准值($S_{\text{校准}}$)是将小分流桶内泥沙量($S_{\text{小分}}$)带入泥沙校准模型得到的泥沙总量的校准值。

2.4 径流泥沙校准模型的验证

设备自动监测的径流、泥沙数据校准后可以满足径流小区对于监测数据的相关要求。通过对比校准前后的径流量与实测径流量的值发现,虽然校准前后的径流量与实测径流量均能用线性函数很好地拟合(R^2 均大于 0.986),但拟合方程的拟合系数存在较大差异(表 5)。校准前后径流量与实测径流量拟合方程的系数分别介于 1.024~1.517,0.988~0.999,校准后系数更接近于 1,表明校准后的径流量与实测

径流量更接近(图 6),校准前后径流量与实测径流量的均方根和误差也证实了这一结论。校准前后各径流小区径流量监测值与实测值的均方根误差分别介于 1.63~38.95 L 和 0.70~3.64 L,而误差分别介于 2.23%~45.03%和-0.01%~0.68%。校准后,各径流小区径流量的均方根误差显著减小,误差也显著小于 5%,表明校准后的径流量满足径流小区对于监测数据的相关要求,径流校准模型可用于对设备径流量监测值的校准。

表 5 径流量校准模型验证结果

Table 5 Validation results of runoff calibration model

小区	校准前				校准后			
	方程	R^2	RMSE/L	$\delta/\%$	方程	R^2	RMSE/L	$\delta/\%$
经果林	$y=1.097x-0.209$	0.993	2.55	8.18	$y=0.993x+0.105$	0.993	1.44	0.00
水保林	$y=1.163x+0.527$	0.986	3.12	21.80	$y=0.988x+0.099$	0.986	1.25	0.00
裸地	$y=1.085x-1.387$	0.997	7.32	5.22	$y=0.997x+0.122$	0.997	3.64	0.00
草地	$y=1.131x-0.045$	0.995	2.02	13.32	$y=0.995x+0.056$	0.995	1.07	0.68
顺坡耕作	$y=1.024x-0.095$	0.999	1.63	2.23	$y=0.999x+0.023$	0.999	0.70	-0.01
横坡耕作	$y=1.517x-1.716$	0.998	38.95	45.03	$y=0.998x+0.043$	0.998	1.93	0.01
石坎梯田	$y=1.156x-0.381$	0.999	8.33	14.54	$y=0.999x-0.088$	0.999	1.68	0.00

注:校准前 RMSE 为设备自测值与人工实测值的均方根误差,校准后 RMSE 为校准值与人工实测值的均方根误差, δ 为相对误差,下同。

通过对比校准前后的泥沙量与实测泥沙量的值发现,校准前后的泥沙量与实测泥沙量也可以很好地用线性方程进行拟合,除个别小区的 R^2 较小外(草地小区为 0.751),其余均在 0.9 以上,但拟合方程的拟合系数存在较大差异。校准前后泥沙量与实测泥沙量拟合方程的拟合系数分别介于 0.755~2.014 和 0.943~1.000(表 6),校准后更接近于 1,表明校准后的泥沙量与实测泥沙量更接近(图 7)。而校准前后泥沙量与实

测泥沙量的均方根和误差也证实了这一结论。校准前和校准后,各径流小区泥沙量与实测泥沙量的均方根误差分别介于 3.39~192.57 g 和 0.44~76.66 g,而误差分别介于-10.38%~103.26%和 0.00%~3.52%。校准后各径流小区泥沙量的均方根误差显著减小,误差也显著小于 5%,表明校准后的泥沙量满足监测数据的相关要求,各小区的泥沙流校准模型可以用于对小区自动监测设备泥沙量监测值的校准。

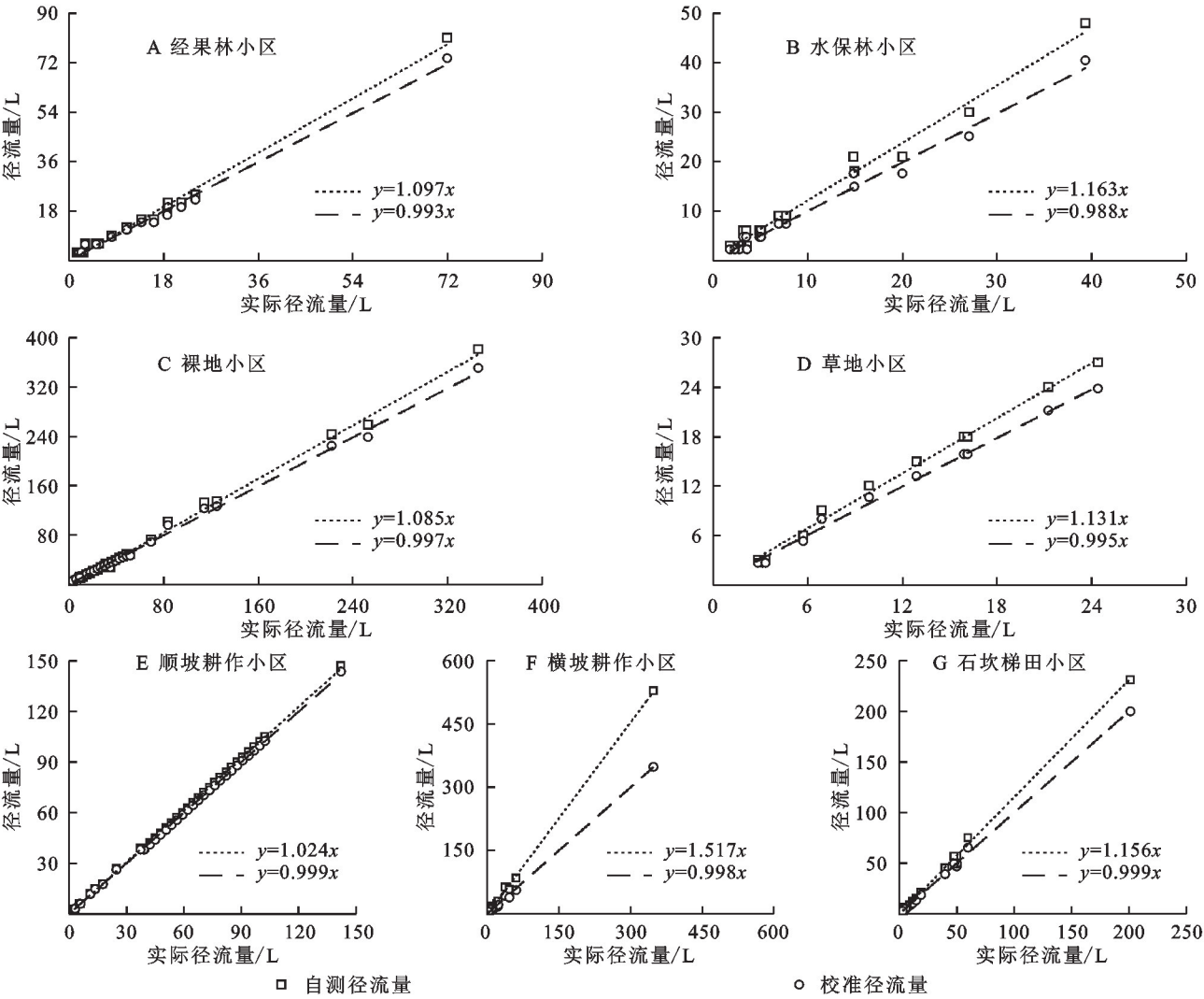


图 6 自然降雨下径流量校准模型的验证结果

Fig. 6 Validation results of runoff calibration model under natural rainfall

表 6 泥沙校准模型验证结果

Table 6 Validation results of sediment calibration model

小区	校准前				校准后			
	方程	R^2	RMSE/g	$\delta/\%$	方程	R^2	RMSE/g	$\delta/\%$
经果林	$y=0.755x+1.321$	0.928	3.39	-10.38	$y=0.943x+0.962$	0.981	1.65	1.95
水保林	$y=1.713x-0.294$	0.995	10.86	59.46	$y=0.984x+0.041$	0.984	0.46	0.00
裸地	$y=0.930x+29.080$	0.994	192.57	1.33	$y=0.999x+0.545$	0.999	76.66	0.00
草地	$y=2.014x+0.390$	0.751	4.02	103.26	$y=0.952x+0.099$	0.952	0.44	0.00
顺坡耕作	$y=0.994x+17.067$	0.999	84.86	2.23	$y=1.000x+0.136$	0.999	12.84	0.02
横坡耕作	$y=0.817x+12.116$	0.996	60.68	-7.00	$y=0.995x+4.338$	0.999	11.43	3.52
石坎梯田	$y=1.821x-4.299$	0.995	89.94	15.34	$y=0.992x+1.927$	0.993	37.50	0.49

3 讨论

由前可知,所使用的翻斗式径流泥沙半自动监测设备总体高估了径流量(表 2),且误差随径流量的增大逐渐减小(图 3)。这与 Shedekar^[9]、Colli^[14]等在实验室中翻斗式雨量计的测量结果规律相同。其主要原因是,翻斗式径流泥沙半自动监测设备内的翻斗

按静态校准容积计数^[15],但翻斗是否翻转取决于翻斗和径流总重量,径流增加扭矩力转向打破原有平衡,径流小区内的设备在出厂使用前进行了静态校准,即确定质量中心向待填充腔翻斗移动所需的清水水量为 3 L^[16]。实际应用中,小区径流含有泥沙,径流密度大于清水密度,所接径流不到设计容积 3 L 就会打破扭矩力平衡提前翻转,但仍自动记为 3 L,造

成自测值偏大。然而在本试验监测中径流量会偶然出现相对误差为负的异常情况,即径流自测值低于实际径流量,且仅发生在径流量小于20 L小流量情况下,测量偏小的主要原因是在一场降雨结束后不足翻斗设定翻转容积而残留在翻斗内留下的径流,所选径流泥沙半自动监测设备的翻斗规格越大,未计数残余径流就可能越多,对于产流小的情况低估误差较大^[17]。另一原因是在野外条件下,自动监测设备内部零件生锈老化或泥沙卡顿,使翻转轴增大摩擦力,翻斗不易翻转,尤其是在雨强小产流少时,径流成滴

滴入翻斗沿外壁漫出溢流,翻斗不翻转缺少对径流量计数,径流漏测造成自测值偏小^[18]。此外,径流流速也会对测量结果的准确性产生影响^[19]。Sun^[20]和Iida^[21]等研究了高低流速对误差的影响,发现低流速下水的表面张力会影响沿空腔表面的位移,而高流速下重力中心理想的缓慢的位移受到湍流下水的快速进入的影响,均会影响重心的变化增加误差。刘瑛娜等^[11]研究表明0~500 g/L含沙量范围内,随着含沙量增大,设备自动测量流量结果比实际值偏大,且误差逐渐增大。

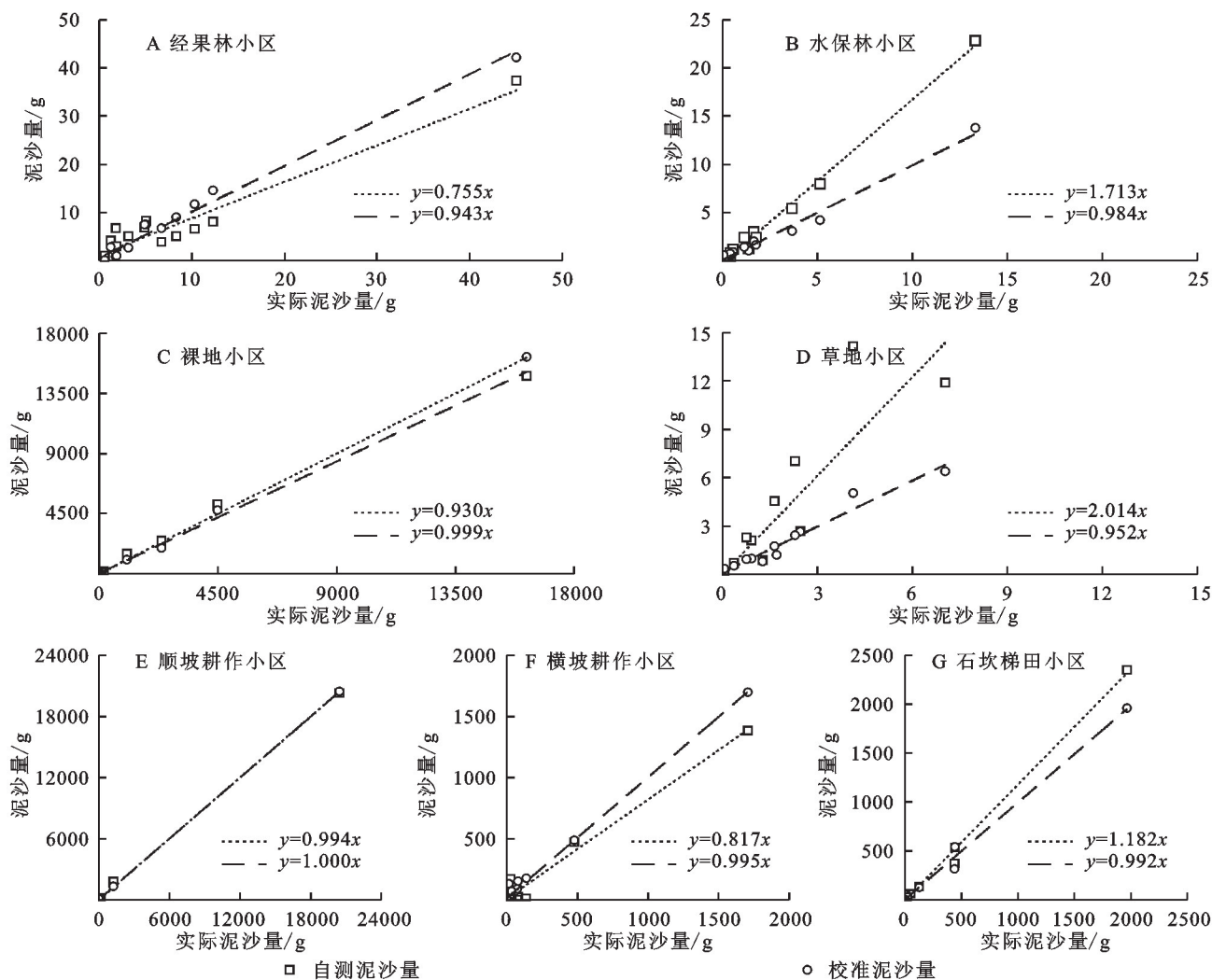


图7 自然降雨下泥沙量校准模型的验证结果

Fig. 7 Validation results of sediment calibration model under natural rainfall

设备自动测量泥沙量为自测径流量与小分流桶内径流含沙浓度两者的乘积所得,所以泥沙量自动测量误差较大原因有两个,一是受径流测量偏大所致,二是由于设备径流分流不均,泥沙空间分布不均,泥沙分流不均造成的^[12]。通过统计7个径流泥沙半自动监测设备大小分流两出口分流量、分沙量发现,水保林、草地、横坡、石坎梯田4个小区自动监测设备径流分流占比与泥沙分流占比相差较大,实际小分流占

总径流在9.74%~11.97%,而小分流所含泥沙量占总泥沙量的比例在10.05%~20.32%,采样器所分取的泥沙比例高于径流分取比例(表7)。分流分沙结果说明泥沙并未随径流比例分流,小分流泥沙量占比高于小分流径流量占比,导致小分流桶内径流泥沙浓度高于分流前总径流泥沙浓度。分沙结果会受到径流流速、泥沙含量等多种因素影响,因此分沙不均也是设备泥沙测量误差的主要原因。

表 7 自然降雨下 7 个径流泥沙半自动监测
设备分流、分沙比例

Table 7 Seven semi-automatic monitoring equipment
for runoff and sediment diversion and
sediment diversion ratio %

径流小区	小分流径 流量占比	大分流径 流量占比	小分流泥 沙量占比	大分流泥 沙量占比
经果林小区	11.97	88.03	13.20	82.97
水保林小区	11.06	88.95	20.32	78.85
裸地小区	9.74	90.25	10.05	89.98
草地小区	11.53	88.47	18.98	79.68
顺坡耕作小区	10.70	89.30	11.72	87.74
横坡耕作小区	11.08	88.91	16.91	83.14
石坎梯田小区	10.69	89.30	14.54	84.47

对于设备改进及维护问题,由于径流泥沙半自动监测设备在野外运行,且运行过程中与水进行接触,翻斗及其他部件容易生锈,尤其是翻斗连接轴生锈容易导致仪器测量值产生误差,因此可以通过替换仪器关键部位的材质防止上述情况的发生^[22]。其次,现有仪器的翻斗相对较小,当径流流量较大、冲击力较大时,径流泥沙样易发生外溅情况,导致泥沙停留在仪器上对仪器的正常运转产生影响,比如泥沙通过卡住翻斗轴影响翻斗的正常运行,进而对测量结果产生误差。因此可以通过加大翻斗体积等方法来改进仪器。此外,设备翻斗后少部分泥沙仍会粘在翻斗壁上,尤其是小雨情况下,泥沙容易沉积,导致测量的含沙量可能偏小。这可以通过改变翻斗的材质、外形或在底部加装一些搅拌器等避免此类问题对设备监测结果的影响。因此,为了确保从自动监测设备获得可靠的测量结果,除对设备误差率定建立校准模型,监测站的人在每次降雨后应该及时清理干净自动监测设备,同时仪器供应商每年需对设备定期进行调试,加强维护和检修^[23-24]。

4 结 论

(1) 自动监测设备在小雨和暴雨条件下径流和泥沙量监测值误差均较大,但总体上径流量测量相对误差均随径流量增大而缩小。泥沙量测量相对误差均随泥沙量增大而缩小,且逐渐趋于 0。

(2) 翻斗式径流泥沙半自动监测设备监测得到的径流量和泥沙量可以用线性函数进行校准,且校准后径流量和泥沙量的误差均小于 5%,相较于模拟径流下对自动监测设备误差校准,采用自然降雨真实径流校准,建立符合设备应用小区产流产沙条件的校准模型,可使设备误差降低效果更佳。

(3) 综合来看,虽然径流泥沙半自动监测设备的使用对加快水土流失监测自动化进程,提升自动监测

数据质量具有重要意义,但设备安装后使用前需要基于天然降雨的监测对自动监测设备进行进一步率定。

参考文献 (References):

- [1] 刘恋,谈晓珊,周亚平,等.江苏省水土保持监测系统建设[J].中国水土保持,2023(3):39-41.
Liu L, Tan X S, Zhou Y P, et al. Building of soil and water conservation monitoring system in Jiangsu Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023 (3):39-41.
- [2] 史明昌,赵永军.新时代水土保持监测技术体系[J].中国水土保持科学,2023,21(5):146-154.
Shi M C, Zhao Y J. Monitoring technology system of soil and water conservation in the New Era[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(5):146-154.
- [3] 李智广,曹文华,牛勇.坡面径流实时监测装置的测试与率定[J].中国水土保持科学,2017,15(3):58-64.
Li Z G, Cao W H, Niu Y. Test and calibration of a real-time hillslope runoff measuring device[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017,15(3):58-64.
- [4] Tabada M T, Loretero M E. Innovative configuration design of two-wire tip mechanisms for a tipping-bucket rain gauge[J]. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 2020,10(2):156-164.
- [5] Choi J H, Chang K H, Kim K E, et al. Improvement of rainfall measurements by using a dual tipping bucket rain gauge [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2023,59(2):271-280.
- [6] 田晓雨,林锦,廖爱民,等.基于快速率定方法的翻斗式流量计误差分析[J].国外电子测量技术,2022,41(2):16-25.
Tian X Y, Lin J, Liao A M, et al. Error analysis of tipping bucket flowmeter based on fast calibration method [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022,41(2):16-25.
- [7] Sypka P. Dynamic real-time volumetric correction for tipping-bucket rain gauges[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,271:158-167.
- [8] Liao M, Liu J, Liao A, et al. Investigation of tipping-bucket rain gauges using digital photographic technology [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2020,37(2):327-339.
- [9] Shedekar V S, King K W, Fausey N R, et al. Assessment of measurement errors and dynamic calibration methods for three different tipping bucket rain gauges [J]. Atmospheric Research, 2016,178/179:445-458.
- [10] Shimizu T, Kobayashi M, Iida S, et al. A generalized correction equation for large tipping-bucket flow meters for use in hydrological applications[J]. Journal of Hydrology, 2018,563:1051-1056.
- [11] 刘瑛娜,刘刚,刘宝元,等.翻斗流量计测量径流小区流量的精度与校正[J].中国水土保持,2015(10):44-46.
Liu Y N, Liu G, Liu B Y, et al. Accuracy and calibra-

- tion of tipping bucket flow meter in flow rate measurement of runoff plots[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(10):44-46.
- [12] Cao J S, Zhang W J, Qi Y Q. An automatic slope runoff sediment and flow monitoring system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014,30(1):5-9.
- [13] 李续峰,张兴义,刘洪家.径流泥沙混合装置研发[J].水土保持研究,2012,19(1):23-26,32.
Li X F, Zhang X Y, Liu H J. Design of integrated equipment on runoff and sediment[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,19(1):23-26,32.
- [14] Colli M, Lanza L G, La Barbera P. Performance of a weighing rain gauge under laboratory simulated time-varying reference rainfall rates [J]. Atmospheric Research, 2013,131:3-12.
- [15] Schwambach D, Anache J A A, Wendland E C. Calibration and error investigation of large tipping bucket flow meters[J]. Catena, 2022,209:105834.
- [16] Nam K Y, Chang K H, Kim K E, et al. Method for analysis on optimization of averaging interval of rainfall rate measured by tipping-bucket rain gauges[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2008,24(1):17-24.
- [17] Nehls T, Nam Rim Y, Wessolek G. Technical note on measuring run-off dynamics from pavements using a new device: the weighable tipping bucket[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(5):1379-1386.
- [18] Wijayawardhana L M J R, Weerasinghe K D N, Navaratne C M. Tipping bucket device for measuring runoff in small catchments[J]. Hydrological Sciences Journal, 2021, 66(15):2258-2266.
- [19] Duchon C E, Biddle C J. Undercatch of tipping-bucket gauges in high rain rate events[J]. Advances in Geosciences, 2010,25:11-15.
- [20] Sun T, Cruse R M, Chen Q, et al. Design and initial evaluation of a portable in situ runoff and sediment monitoring device[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519:1141-1148.
- [21] Iida S, Shimizu T, Kabeya N, et al. Calibration of tipping-bucket flow meters and rain gauges to measure gross rainfall, throughfall, and stemflow applied to data from a Japanese temperate coniferous forest and a Cambodian tropical deciduous forest[J]. Hydrological Processes, 2012,26(16):2445-2454.
- [22] La B P, Lanza L G, Stagi L. Tipping bucket mechanical errors and their influence on rainfall statistics and extremes [J]. Water Science and Technology, 2002,45(2):1-10.
- [23] Wang J X, Fisher B L, Wolff D B. Estimating rain rates from tipping-bucket rain gauge measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008,25(1):43-56.
- [24] Humphrey M D, Istok J D, Lee J Y, et al. A new method for automated dynamic calibration of tipping-bucket rain gauges [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997,14(6):1513-1519.

~~~~~  
(上接第166页)

- [25] 王松伟,郭忠升.多年生人工柠条林生长对土壤水分的影响[J].水土保持研究,2020,27(3):70-75.  
Wang S W, Guo Z S. Effects of perennial *Caragana korshinskii* kom on soil moisture[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(3):70-75.
- [26] 高宇,樊军,彭小平,等.水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J].生态学报,2014,34(23):7038-7046.  
Gao Y, Fan J, Peng X P, et al. Soil water depletion and infiltration under the typical vegetation in the water-wind erosion crisscross region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(23):7038-7046.
- [27] 于晓燕,汪星,吕雯,等.黄土丘陵区带状柠条锦鸡儿林地深层土壤干化及根系分布[J].干旱区地理,2023,46(5):753-762.  
Yu X Y, Wang X, lyu W, et al. Deep soil desiccation and root distribution of belted *Caragana korshinskii* forest in loess hilly region[J]. Arid Land Geography, 2023,46(5):753-762.
- [28] 邱德勋,赵佰礼,尹殿胜,等.黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J].中国水土保持科学(中英文), 2021,19(3):72-80.  
Qiu D X, Zhao B L, Yin D S, et al. Vertical variation of soil moisture in the loess hilly and gully region and its influence factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(3):72-80.
- [29] Singh J S, Milchunas D G, Lauenroth W K. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland[J]. Plant Ecology, 1998,134(1):77-89.
- [30] 郭忠升,邵明安.土壤水分植被承载力初步研究[J].科技导报,2006,24(2):56-59.  
Guo Z S, Shao M A. Preliminary study of vegetation carrying capacity of soil water(VCCSW)[J]. Science & Technology Review, 2006,24(2):56-59.