

基于定体积溢流采样的泥沙含量快速测量装置

展小云^{1,2}, 李亚妮³, 徐志浩³, 税军峰^{1,2}, 张体彬^{1,2}, 刘宝元⁴, 郭明航^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 4. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 泥沙含量是量化水土流失规律和土壤侵蚀过程的重要物理量, 针对目前泥沙含量测量方法误差大, 时效性差等问题, 该研究研发了一种泥沙含量快速测量装置。该装置利用体积-质量转换原理测量泥沙含量, 主要包括定体积溢流采样模块、称量模块和控制模块, 体积较小, 便于携带。试验结果表明, 该装置测量结果服从正态分布, 标准差为 0.69 g/L, 相对误差均值仅为 3.64%, 最高测量准确度高达 99.75%, 相对误差<5% 的样本占样本总数的 74.36%, 表明该装置测量精度和准确性较高。此外, 利用该装置在野外部分河段测量河流瞬时泥沙含量, 发现本装置与烘干法测得的泥沙含量平均相对误差为 6.13%, 并且测量结果远远高于以往的研究结果, 在一定程度上说明该地区河流输沙量增大。该装置可快速高效的测量泥沙含量, 有望替代传统的烘干法开展区域水土流失调查。

关键词: 泥沙含量; 体积-质量转换; 溢流; 称量传感器

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404085

中图分类号: S157; TP216

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0108-07

展小云, 李亚妮, 徐志浩, 等. 基于定体积溢流采样的泥沙含量快速测量装置[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 108-114. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404085 <http://www.tcsae.org>

ZHAN Xiaoyun, LI Yani, XU Zhihao, et al. A device for sediment concentration measurement with fixed volume overflow sampling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 108-114. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404085 <http://www.tcsae.org>

0 引言

泥沙作为水体不可或缺的组成部分, 其含量与分布是土壤侵蚀研究及水土保持效益评价中的关键参数^[1-2], 同时对河流、湖泊、水库等水体的水质状况、生态平衡以及水资源的可持续利用具有重要影响^[3-4]。泥沙含量的精准监测, 不仅有助于定量评价水体的污染程度, 为水资源的科学配置与优化管理提供可靠依据, 还能及时发现土壤侵蚀的潜在问题, 并制定科学的防治措施^[5-7]。

泥沙含量的测定方法分为两大类: 直接方法和间接方法。其中, 烘干法是最为传统的泥沙含量直接测量方法, 通常是在径流小区下方放置集流槽或集流桶承接径流泥沙样品, 然后采用烘箱烘干称量进行泥沙含量测量^[8-9]。该方法简单易行, 具有较高的测量精度, 常被作为衡量其他方法的标准, 但是费时费力、采样误差大^[8, 10-11]。

随着科学技术的发展, 浊度法、振动法、光学法、 γ 射线法、超声波法等间接方法逐渐被用于泥沙含量测量, 但是这些方法具有一定的限制。浊度计受泥沙颗粒粒径、形状和颜色影响, 测量范围有限并且不确定性较高^[12-14]。振动法仪器笨重, 体积大, 并且振动管内部容

易发生泥沙沉积, 振动部件易被磨损^[15-16], 成本高。光学法的测量结果高度依赖泥沙颗粒大小, 即相同泥沙含量样品, 如果泥沙颗粒大小组成不同, 测量结果亦会发生变化^[17-21]。雷廷武等^[22-23]利用 γ 射线研制一种含沙量与流量测量系统, 但水平透射时泥沙沉积、分层现象、标准泥沙溶液的配制、射线脉冲的随机性等均对测量精度影响较大, 同时 γ 射线可对人体产生危害, 使得 γ 射线法无法广泛使用。超声波法主要利用超声波在混水中的衰减规律测量水体含沙量, 其中超声波反射法对于低含沙量水流较敏感, 测量精度较高, 但测量范围较窄, 在 0~3 g/L 之间^[24-25]。马志敏等^[26]提出了一种利用 B 超成像技术来测量含沙水流中含沙量的新方法, 但其只适用于低含沙量测量, 并且沙粒的材质、粒径及其级配等也会对 B 超的图像信号造成影响^[27]。这些方法存在以下一种或多种局限性: 测量范围小、受颗粒大小影响、仪器可用性受限和成本高等。比如, 崔宗培^[28]发现黄河干流龙门和三门峡水文站的最高沉积物浓度分别为 933 和 911 g/L, 部分水文站的平均泥沙含量亦高达 300 g/L, 而上述很多仪器无法满足这一测量需求, 因此, 目前尚无满意的泥沙含量测量方法。

因此, 为了实现野外泥沙含量的快速测量, 本研究研制了一款基于体积-质量转换原理的泥沙含量测量装置, 并对该装置测量精度和准确度进行了系统的性能检测, 同时利用该装置对青藏高原“一江两河”的河流泥沙含量进行了应用研究。

收稿日期: 2024-04-12 修订日期: 2024-11-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF1300104; 2022YFC3204504); 陕西省创新能力支撑计划项目 (2022PT-23)

作者简介: 展小云, 博士, 副研究员, 研究方向为水土流失过程与水土保持。Email: zhanxiaoyun2005@163.com

1 测量原理

该装置主要是利用定体积的体积-质量转换原理测量泥沙含量。通过获取水沙二相体的总体积和总质量计算泥沙含量，样品总体积为泥沙与水的体积之和，样品总质量等于泥沙与水的质量之和。即

$$M_t = V_w \times \rho_w + V_s \times \rho_s \quad (1)$$

$$V_t = V_w + V_s \quad (2)$$

式中 M_t 为样品的总质量，g； V_t 为样品的总体积， cm^3 ； V_w 为水的体积， cm^3 ； V_s 为泥沙的体积， cm^3 ； ρ_w 为水的密度， g/cm^3 ； ρ_s 为泥沙的密度， g/cm^3 。其中， M_t 由称量传感器获取； V_t 和采样瓶体积相同； ρ_w 和 ρ_s 均可取固定值，分别取值为 1.00 g/cm^3 和 2.65 g/cm^3 。为了提高测量结果的准确性， ρ_w 亦可通过实测径流液温度，根据水的密度与温度的关系对照表进行取值， ρ_s 则用土壤比重计进行实时测量修正。

由式 (1) 和式 (2) 可得，水的体积 (V_w) 和泥沙体积 (V_s) 可分别表达为

$$V_w = V_t - V_s \quad (3)$$

$$V_s = \frac{M_t - V_t \times \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (4)$$

根据泥沙含量的定义可得

$$S = \frac{V_s \times \rho_s}{V_t} \times 1000 \quad (5)$$

式中 S 为泥沙含量，g/L。

将式 (4) 代入式 (5)

$$S = \left(\frac{M_t - V_t \times \rho_w}{V_t} \right) \times \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \right) \times 1000 \quad (6)$$

可见，只要获取样品总质量 (M_t) 和总体积 (V_t)，结合水的密度 (ρ_w) 和泥沙密度 (ρ_s) 就可计算出泥沙含量。

2 结构组成与工作流程

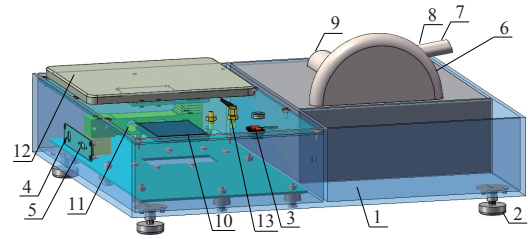
2.1 结构组成

该测量装置由三部分构成，即定体积溢流采样模块、称量模块和控制模块。具体包括不锈钢箱体、采样瓶、温度传感器、称量传感器、显示屏等 (图 1a)。仪器箱体尺寸长×宽×高=50 cm×40 cm×15 cm，箱体框架采用高强度铝型材，承重板为 5 mm 胶合板 (图 1b)，具有结构坚固、外形美观、承重能力强的特点。所有铰轴采用不锈钢 304，防腐耐用，正常工作范围-40 ~ 80 ℃。箱体左侧留有电源插孔和 USB 接口，底部安装调平底座，内部安有蓄电池 (12 V/30W)。此外，仪器测量数据可以在显示屏实时显示，同步保存在本地优盘，并实时传输至数据管理平台，方便数据的后期查看和集成分析。

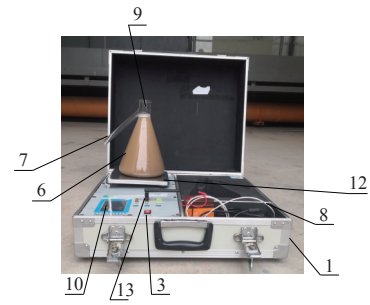
2.1.1 定体积溢流采样模块

该模块主要是完成泥沙样品的采集，即人工操作将泥沙样品采集到固定体积的采样瓶。该模块平时放置于箱体的采样瓶隔断内，采样时拿出。泥沙含量测量的关

键是体积和质量的测量，而采样瓶独特的结构是实现体积精准控制的关键。采样瓶采用价格低廉的玻璃材质，形状为锥形、细颈设计，可以最大程度的降低液体表面张力对体积测量的影响。采样瓶的颈部附有一个超疏水角度 150° 的溢流管 (图 2)，溢流口下缘所在的平面作为采样瓶体积测量的上限，确保径流到达溢流口下缘时，径流通过溢流管排出，使得样品液面在该下缘处保持稳定，进而实现样品体积的标定。



a. 结构示意图
a. Structural diagram



b. 实物图
b. Real view

1. 箱体 2. 调平底座 3. 电源开关 4. 电源插孔 5. USB 接口 6. 采样瓶 7. 溢流管 8. 温度传感器 9. 进样口 10. 显示屏 11. 称量传感器 12. 称量盘 13. GPRS
1. Box 2. Leveling base 3. Power switch 4. Power jack 5. USB interface 6. Sampling bottle 7. Overflow pipe 8. Temperature sensor 9. Inlet port 10. Display screen 11. Weighing sensor 12. Weighing panel 13. GPRS

图 1 泥沙含量测量装置结构图和实物图

Fig.1 Structure diagram and real view of weighing rain gauge

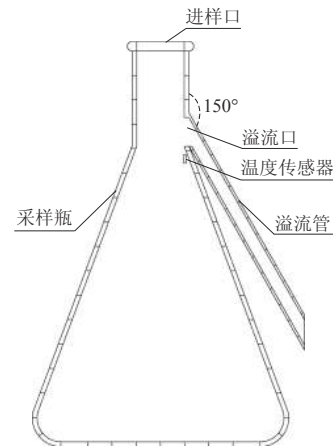


图 2 采样瓶结构示意图

Fig.2 Structure diagram of sampling bottle

采样瓶体积是在设备加工生产时确定的，可以根据实际需求制作以满足不同场合需求，本研究中采样瓶体积设计大约为 1.0 L。鉴于水温波动会引起水密度变化，而水密度的差异进而会对采样瓶的体积造成影响，该体积效

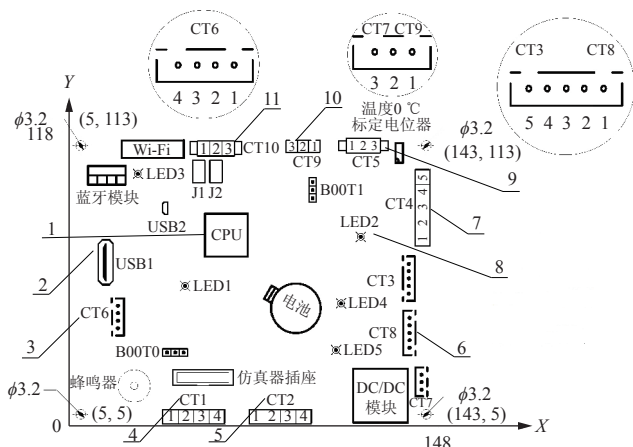
应在后续内容中详细阐述。为确保体积标定的准确性,在采样瓶采样时将精度为 0.1° 的 PT100 温度传感器置于径流液中,实时测量径流液温度进行采样瓶体积校正。

2.1.2 称量模块

该模块的功能是完成样品泥沙含量的测量,主要包括称量传感器、称量盘、显示屏和相关配件。利用称量传感器部件完成对样品质量的精确测量,随之将测量数据传输到 CPU 处理器,通过运算处理后将泥沙含量显示在屏幕上,同时将数据存储在本地存储卡,也可通过无线网络(GPRS)发送到数据管理平台。其中,称量传感器采用的是托利多 MT1041-5 kg 梁式传感器,量程为 5 kg,精度为 1/10 000,灵敏度为 $(2.0 \pm 0.2) \text{ mV/V}$,零点输出 $\leq \pm 10\% \text{ R-C}$ (额定载荷, rated capacity),工作温度为 $-20 \sim 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,在每次测量前,需要对称量传感器进行零点校正,避免零点漂移带来的测量误差。

2.1.3 控制模块

该模块采用 STM32 控制芯片,融入自动化控制、PCB 设计、移动互联 GPRS 等技术,实现了数据采集、计算、质量控制、远程发送、远程诊断、充电保护等功能(图 3),主要包括数据采集模块、运算控制模块、数据发送及储存模块和数据通讯扩展模块。数据采集模块由称量传感器部件和 A/D 转换部件组成。控制模块由 32 位 MCU STM32F107 VCT6 控制部件组成,实现仪器的自动化、信息化控制。数据发送及储存模块包含 GPRS 模块参数和上位机平台通讯设置及本地 USB 数据存储。数据通讯扩展模块根据实际需要可进行扩展,系统开放 RS485、SDI-12 通讯接口可与各种传感器,例如土壤水分、盐分等传感器连接采集数据。



1. STM32 芯片 2. USB 接口 3. 显示屏接口 4. 电源接口 5. 开关接口 6. RS485 接口 7. 称量传感器接口 8. A/D 转换 9. 温度传感器接口 10. SDI-12 接口 11. 阀接口

Fig.3 Schematic diagram of measurement and control circuit

2.2 工作流程

该装置平时处于初始化状态,开启工作前首先对仪器进行调平操作,然后进行零点校正和泥沙密度赋值,

系统即可开始工作。利用采样瓶进行采样,并将其放置于称量盘上,直至溢流产生,稳定 5 s 后将样品进行称量测量和温度测量,获取泥沙含量数据。该数据可实时显示在显示屏上,亦可同时存储在本地 U 盘,或发送至数据管理平台。仪器工作流程如图 4 所示。

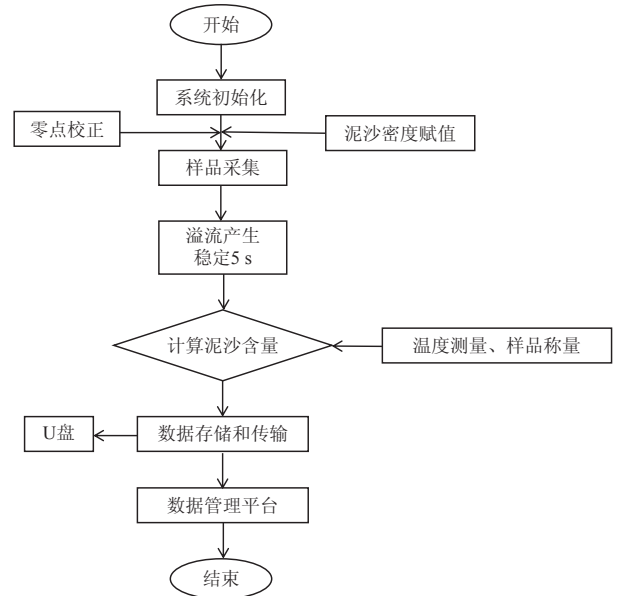


图 4 测量装置工作流程

Fig.4 Flow chart of the operating procedure for designed device

3 性能检测与野外应用

3.1 采样瓶体积标定

采样瓶质量 (M_c) 和体积 (V_t) 在其制作时就已确定,但是制作过程中难免存在偏差,所以在使用前必须进行室内标定,主要利用冰和热水混合的方式制备 $0 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 不同温度的水标定。水温由温度传感器测量,水的密度根据水温查表获得。测量空的采样瓶质量 (M_c , g) 和充满水的采样瓶质量 (M , g),通过 M 和 M_c 的差值计算采样瓶水的质量 (M_w , g),进而计算采样瓶体积。

$$V_t = \frac{M_w}{\rho_w} = \frac{M - M_c}{\rho_w} \quad (7)$$

结果表明,采样瓶体积平均为 1.01 L,与设计的体积极其接近,但是不同水温条件下采样瓶体积变化范围为 $0.96 \sim 1.05 \text{ L}$ (表 1)。

表 1 采样瓶体积标定

水温 Water temperature/ $^{\circ}\text{C}$	水的密度 Water density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	水的质量 Water mass/g	采样瓶体积 sampling bottle volume/ cm^3
0.8	0.999 891 2	1 030.10	1 030.21
3.2	0.999 970 0	1 049.98	1 050.01
5.6	0.999 954 4	1 040.27	1 040.32
9.8	0.999 719 4	960.16	960.43
12.6	0.999 428 9	970.34	970.89
16.9	0.998 794 2	979.80	980.98
19.3	0.998 348 1	1 047.48	1 049.21
23.4	0.997 445 6	1 025.37	1 028.00
25.7	0.996 866 3	957.53	960.54
28.9	0.995 977 8	1 015.57	1 019.67
29.9	0.995 681 3	1 013.83	1 018.23

此外,采用变异系数(coefficient of variation, CV)衡量采样瓶体积的变异度,变异系数为 3.46%。所以,在实际应用中,需要实时测定径流液温度,进行采样瓶体积校正,以提高泥沙含量测量的准确性。

3.2 性能检测

为了检测该装置性能,进行了标准泥沙样品的室内测试试验。试验选用土层深度为 0~40 cm 的杨凌楼土,土壤密度为 2.42 g/cm³,土壤经烘干粉碎过 10 mm 筛去除杂物。为了尽可能兼顾自然界中径流泥沙含量变化,本研究设置了 12 个不同的泥沙含量梯度:1、2、5、8、10、15、20、50、100、200、300、500、800 g/L。其中,利用该装置对 20 g/L 泥沙含量样品重复测量 40 次,分析该装置的测量精度,其余泥沙含量梯度则重复测量 3 次,用以分析该装置测量的准确度。选取标准差衡量仪器测量精度,相对误差和均方根误差表征测量值和真值间的偏差,评价仪器测量准确度。

$$S_d = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$R_e = \frac{y_i - x_i}{x_i} \times 100\% \quad (9)$$

$$R_{mse} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - x_i)^2}{n}} \quad (10)$$

式中 S_d 为标准差, g/L; R_e 为相对误差, %; R_{mse} 为均方根误差, g/L; x_i 为第 i 个样品的泥沙含量真值, g/L; $\bar{x}$ 为 n 次测量的泥沙含量平均值, g/L; y_i 为第 i 个样品的泥沙含量测量值, g/L; n 为样本数。

对 20 g/L 泥沙含量 40 次测量结果进行统计分析可知,泥沙含量变化范围为 18.30~21.54 g/L,平均值为

19.94 g/L,标准差为 0.69 g/L,最小测量误差为 0.01 g/L,说明该测量装置的精度较高。同时进行 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验,得出样本偏度值和丰度值分别为 -0.91 和 0.55,均小于 1,且 P 值为 0.20,大于 0.05,说明测量结果服从正态分布,测量结果的分布如图 5 所示。

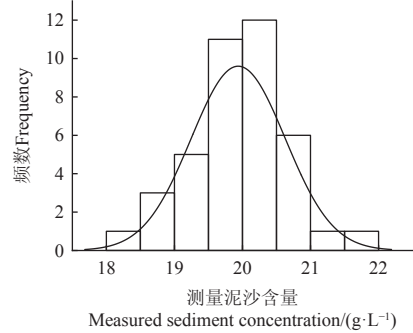
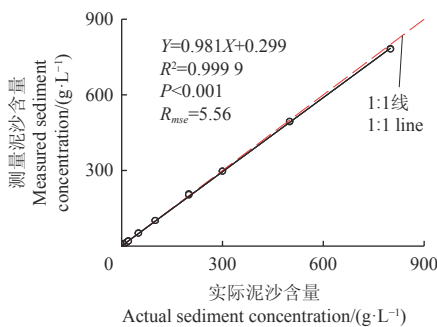


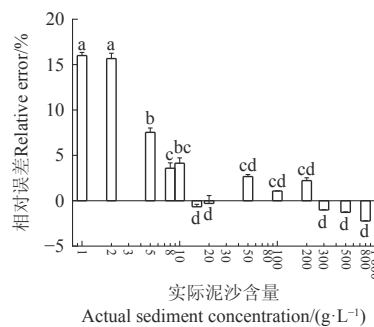
图 5 泥沙含量分布图

Fig.5 Histogram of measured sediment concentration

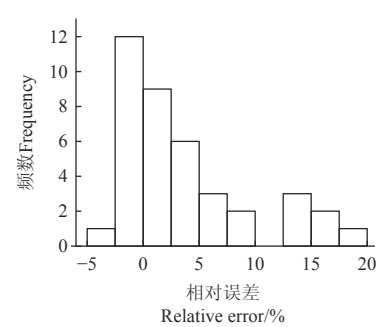
此外,分析不同泥沙含量条件下该装置测量结果的准确性。结果发现不同水平泥沙浓度的测量值和实际值两者之间回归系数接近 1,决定系数高达 0.999 9,均方根误差为 5.56 g/L (图 6a)。分析测量结果的相对误差表明,相对误差均值为 3.64%,最高测量准确度高达 99.75% (图 6b)。在泥沙含量为 1 和 2 g/L 的低含沙水流条件下,相对误差较大,分别为 16.00% 和 15.67%,显著高于其他泥沙含量条件下的相对误差,而 8~800 g/L 的泥沙含量水平范围内,相对误差均较小,平均为 0.81% (图 6b)。对相对误差进行频数分布分析,发现大部分相对误差较小,相对误差 <5% 的样本占样本总数的 74.36% (图 6c)。以上结果表明,该装置适用的泥沙含量测量范围大,且观测结果准确可靠。



a. 实测值和测量值关系
a. Relationship of measured and actual values



b. 相对误差
b. Relative error



c. 相对误差分布
c. Distribution of relative error

注:图 6c 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different letters in figure 6c indicate significant differences ($P < 0.05$)

图 6 泥沙含量测量值与真值关系

Fig.6 Relationships between measured and actual sediment concentration

3.3 野外应用

西藏“一江两河”地区位于雅鲁藏布江、拉萨河、年楚河中部流域,水土流失严重。采用研制的装置在雅鲁藏布江拉萨至日喀则段以及拉萨河、年楚河部分河段测量河流瞬时泥沙含量,同时采用烘干法进行同步采样

测量(图 7)。其中,采用 10 L 塑料桶进行样品采集,将采集到的样品充分搅拌均匀,一部分样品转移到研制装置中,一部分样品带回实验室,105 °C 条件下利用烘箱烘干 24 h,烘干后称量,每个采样点每种方法重复测量 3 次。将两者测量结果进行对比分析,结果表明,研

制装置测得的泥沙含量均高于烘干法测得的泥沙含量,但是只有在年楚河的江孜县和江孜热龙乡两个采样点差异显著(表2),这可能是由于烘干法在烘干称量的过程中样品需要转移,在一定程度上部分泥沙损失,测量结果偏低。此外,两种观测方法获得的泥沙含量平均相对误差为6.13%,大于室内性能测试时的平均相对误差3.64%,这可能是由于泥沙颗粒容易沉降和粘附,很难保证烘干法和研制装置采集的样品完全一致,并且烘干法在操作过程中会有样品损失。

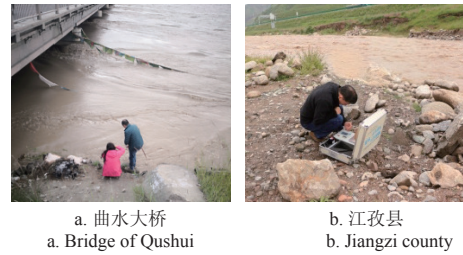


图7 河流泥沙采样现场

Fig.7 Sampling sites for stream sediments

表2 烘干法和研制装置观测对比

Table 2 Comparison of oven-dried method and designed device

河流 River	采样点 Sampling site	经纬度/(°)	烘干法 Oven-dried method/(g·L ⁻¹)	本文装置 Designed device/(g·L ⁻¹)	相对误差 Relative error/%
拉萨河 Lhasa River	拉萨市	91.04E, 29.63N	6.92±0.23a	7.19±0.12a	3.90
年楚河 Nianchu River	日喀则市	88.89E, 29.28N	12.21±0.45a	12.73±0.23a	4.26
	江孜县	89.38E, 29.07N	7.23±0.16b	7.68±0.06a	6.22
	江孜热龙乡	89.81E, 28.84N	8.01±0.43b	8.41±0.06a	4.99
	江孜热龙乡的支流	90.04E, 28.82N	5.98±0.56a	6.80±0.04a	13.71
雅鲁藏布江 Yarlung Zangbo River	拉孜来东塘嘴附近支流	88.15E, 29.22N	15.75±0.76a	16.50±0.32a	4.76
	曲水大桥	90.68E, 29.32N	8.95±0.32a	9.40±0.13a	5.03

注: 同行中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same row indicate significant differences ($P < 0.05$).

采用研制装置测量的河流瞬时泥沙含量平均为9.82 g/L, 其中, 雅鲁藏布江平均瞬时泥沙含量显著高于拉萨河和年楚河平均瞬时泥沙含量, 分别为12.95, 7.19和8.91 g/L(表2)。有研究表明^[29], 雅鲁藏布江20世纪60年代泥沙含量为0.85 g/L, 而70年代显著降低, 仅为0.55 g/L, 直至90年代, 泥沙含量又增加到0.87 g/L; 拉萨河从20世纪60年代到90年代泥沙含量相对稳定, 大概在0.10 g/L; 年楚河泥沙含量则相对较高, 从20世纪80年代的2.19 g/L增加到90年代的2.55 g/L。本研究结果中采样点的泥沙含量明显大于已往研究结果, 一方面可能是由于采集的是瞬时的泥沙样品, 不能准确代表当地的泥沙含量变化, 另一方面在一定程度上说明该地区河流输沙量在增大。

4 结 论

1) 研制了一款基于定体积溢流采样的泥沙含量测量装置, 主要利用体积-质量转换原理测量泥沙含量, 即手动将泥沙样品采集到特定形状的采样瓶, 通过称量获取固定体积泥沙样品的质量, 从而计算泥沙含量。相对于传统的烘干法该方法更方便、快捷, 并且便于携带, 可近乎实时地测量泥沙含量。

2) 该装置测量结果重复性好, 测量精度高, 泥沙含量的测量值和真实值差异不显著, 具有较高的一致性, 相对误差均值为3.64%, 最高测量准确度高达99.75%, 相对误差<5%的样本占样本总数的74.36%, 表明该装置可准确可靠地测量泥沙含量。

3) 利用该装置和烘干法同步在雅鲁藏布江拉萨至日喀则段以及拉萨河、年楚河部分河段并测量河流瞬时泥沙含量, 结果发现两者具有很好的一致性, 但是两者的平均相对误差为6.13%, 大于室内测试的平均相对误差,

这可能是两种方法测量的样品差异和烘干法测量过程中样品损失导致的。

[参 考 文 献]

- [1] 李瑞, 陈康, 刘瑞禄, 等. 基于小流域尺度的黔北喀斯特地区产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 139-147. LI Rui, CHEN Kang, LIU Ruilu, et al. Characteristics of runoff and sediment in karst area of northern Guizhou province based on small watershed scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(11): 139-147. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 802-809. LI Zhanbin, ZHU Bingbing, LI Peng. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 802-809. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王好芳, 代晨洋, 张祎珂, 等. 基于水质目标的小清河流域邹平段污染物综合治理效果评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 212-220. WANG Haofang, DAI Chenyang, ZHANG Yike, et al. Evaluation of the comprehensive pollution control effectiveness in the Zouping section of the Xiaoqing River Basin based on water quality targets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 212-220. (in Chinese with English abstract)
- [4] SHEN Z, CHEN L, HONG Q, et al. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Science of the Total Environment, 2013, 454: 383-392.
- [5] COLOMBO S, HANLEY N, CALATRAVA - REQUENA J. Designing policy for reducing the off - farm effects of soil

- erosion using choice experiments[J]. *Journal of Agricultural Economics*, 2005, 56(1): 81-95.
- [6] CERDAN O, GOVERS G, LE BISSONNAIS Y, et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data[J]. *Geomorphology*, 2010, 122(1-2): 167-177.
- [7] SADEGHI S H, SINGH V P. Dynamics of suspended sediment concentration, flow discharge and sediment particle size interdependency to identify sediment source[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 554: 100-110.
- [8] 叶芝菡, 刘宝元, 路炳军, 等. 径流小区集流桶含沙量全深剖面采样器的研制与试验[J]. *泥沙研究*, 2005(3): 24-29. YE Zhihan, LIU Baoyuan, LU Bingjun, et al. Design and testing of the depth profile sediment sampler for runoff plots[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005(3): 24-29. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李建明, 陈兰, 任洪玉, 等. 工程堆积体产流产沙及水沙效益对植被近地表特征的响应[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(7): 142-151. LI Jianming, CHEN Lan, REN Hongyu, et al. Response of runoff and sediment production and sediment and water benefits of engineering spoil heaps to vegetation characteristics[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(7): 142-151. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈晓安, 曹智, 喻荣岗, 等. 坡面径流小区集流桶含沙量测量方法对比[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21): 130-136. CHEN Xiaohan, CAO Zhi, YU Ronggang, et al. Comparison of measurement methods of sediment concentration in collecting tanks of slope runoff plots[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(21): 130-136. (in Chinese with English abstract)
- [11] HUANG Y, ZHAO H, LI F, et al. Measurement errors on sediment concentration from traditional runoff collection tanks and its correction possibility[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(3): 77-83.
- [12] RILEY S J. The sediment concentration-turbidity relation: its value in monitoring at Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia[J]. *Catena*, 1998, 32(1): 1-14.
- [13] NAVRATIL O, ESTEVES M, LEGOUT C, et al. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 398(3/4): 246-259.
- [14] MERTEN G H, CAPEL P D, MINELLA J P G. Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14: 1235-1241.
- [15] BASSE N T. A review of the theory of Coriolis flowmeter measurement errors due to entrained particles[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 37: 107-118.
- [16] FELIX D, ALBAYRAK I, BOES R M. Continuous measurement of suspended sediment concentration: Discussion of four techniques[J]. *Measurement*, 2016, 89: 44-47.
- [17] HATCHER A, HILL P, GRANT J, et al. Spectral optical backscatter of sand in suspension: effects of particle size, composition and colour[J]. *Marine Geology*, 2000, 168(1/4): 115-128.
- [18] CAMPBELL C G, LAYCAK D T, HOPPE W, et al. High concentration suspended sediment measurements using a continuous fiber optic in-stream transmissometer[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 311(1/4): 244-253.
- [19] PULEO J A, JOHNSON R V, BUTT T, et al. The effect of air bubbles on optical backscatter sensors[J]. *Marine Geology*, 2006, 230(1/2): 87-97.
- [20] CHUNG C C, LIN C P. High concentration suspended sediment measurements using time domain reflectometry[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 401(1-2): 134-144.
- [21] 曾为军, 张云伟, 陈岭, 等. 基于计时与光照法的坡面径流量及含沙量动态检测系统[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(24): 114-123. ZENG Weijun, ZHANG Yunwei, CHEN Ling, et al. Dynamic measured system for hillslope runoff rate and sediment concentration based on time method and illumination method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(24): 114-123. (in Chinese with English abstract)
- [22] 雷廷武, 赵军, 袁建平, 等. 利用 γ 射线透射法测量径流含沙量及算法[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 18-21. LEI Tingwu, ZHAO Jun, YUAN Jianping, et al. Determining sediment concentration in runoff flow with γ ray attenuation and the related theoretical algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2002, 18(1): 18-21. (in Chinese with English abstract)
- [23] 雷廷武, 刘清坤, 黄兴法, 等. 伽玛射线测量径流泥沙含量算法中质量吸收系数优选及其对测量误差影响的分析[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 51-53. LEI Tingwu, LIU Qingkun, HUANG Xingfa, et al. Optimal choice of mass absorption coefficient and analysis of its influence on measured error in algorithm of using gamma ray to measure runoff sediment concentration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(1): 51-53. (in Chinese with English abstract)
- [24] WREN D G, BARKDOLL B D, KUHNLE R A, et al. Field techniques for suspended-sediment measurement[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(2): 97-104.
- [25] RAI A K, KUMAR A, HIES T, et al. Field application of a multi-frequency acoustic instrument to monitor sediment for silt erosion study in Pelton turbine in Himalayan region, India[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2016, 49(12): 122004.
- [26] 马志敏, 邹先坚, 赵小红, 等. 基于 B 超成像的低含沙量测量[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(4): 796-803. MA Zhimin, ZOU Xianjian, ZHAO Xiaohong, et al. The Measurement of low sediment concentration based on B-mode ultrasound images[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(4): 796-803. (in Chinese with English abstract)

- [27] 胡向阳, 许明, 邹先坚, 等. B 超在含沙量及其垂线分布测量中的首次应用[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 12-15. HU Xiangyang, XU Ming, ZOU Xianjian, et al. Application of b-mode ultrasound to the measurement of sediment concentration and its vertical distribution for the first time[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(2): 12-15. (in Chinese with English abstract)
- [28] 崔宗培. 中国水利百科全书[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2006.
- [29] 文安邦, 刘淑珍, 范建容, 等. 雅鲁藏布江中游地区河流泥沙近期变化及防治对策[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 148-150. WEN Anbang, LIU Shuzhen, FAN Jianrong, et al. Current change on sedimentation and controlits method in middle Yalungtsangpo river [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(6): 148-150. (in Chinese with English abstract)

A device for sediment concentration measurement with fixed volume overflow sampling

ZHAN Xiaoyun^{1,2}, LI Yani³, XU Zhihao³, SHUI Junfeng^{1,2}, ZHANG Tabin^{1,2}, LIU Baoyuan⁴, GUO Minghang^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 4. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Sediment concentration is one of the most crucial physical parameters for the soil and water loss and soil erosion. However, it is still lacking on the accurate and rapid measurement on the sediment concentration at present. In this study, the novel device was designed with a constant volume sampling bottle. Three subsystems included the fixed-volume overflow sampling, weighing measurement and control subsystem. The developed device was small and easy to carry for the sediment concentration measurement. According to the volume-mass conversion, sediment concentration was calculated to accurately measure the volume and mass of the water-sediment mixture. Specifically, the total mass of runoff sample was the sum of sediment and water mass, and the total volume was equal to the sediment volume plus water volume. In order to avoid the impact of sediment particle size on measurement, the total mass of runoff sample was determined by a weighing sensor; the total volume of runoff sample was equal to the sampling bottle volume. The sampling bottle volume was precisely determined to fill the chamber with the distilled water at different temperatures. The results showed that the sampling bottle volume was averaged 1.01 L, and the volume varied from 0.96 to 1.05 L, with an average Coefficient of Variation of 3.46%. After that, the experiment was conducted on the samples with different sediment concentrations, in order to test the sensitivity and accuracy of the device. The result showed that the concentrations of 20 g/L were measured for 40 times, and the average concentration was 19.94 g/L. The histograms of the two target sediment concentrations showed the normal distributions, indicating a high precision of the device. Then, a linear regression was fitted to measure the concentrations with a slope of 0.981 and R^2 of 0.999. Additionally, the sediment concentrations were measured with the averaged relative error of 3.64% and the highest precision of 99.75%. Specifically, the averaged relative errors were 0.81% for the high sediment concentration group in the range from 8 to 800 g/L. While the sediment concentration of 1 and 2 g/L was resulted in the lager errors of 16.00% and 15.67%, indicating that this device was limited to the sediment concentrations less than 2 g/L. The better confidence was achieved in the high repeatability and accuracy of the device. The frequency distribution of relative errors showed that the small value was observed in the most relative errors, where the samples with the relative errors $<5\%$ were accounted for 74.36% of the total. Moreover, the developed device was used to collect and measure the instantaneous sediment content of Yarlung Zangbo River from Lhasa to Shigatse and some reaches of Lhasa River and Nianchu River. Meanwhile, the oven drying and the device were used to carry out synchronous sampling and measurement. The results show that the sediment concentration measured by the developed device was much higher than that by oven drying, with the average relative error of 6.13%. Furthermore, the average instantaneous sediment concentration was 9.82 g/L measured by the development device. The average instantaneous sediment content of Yarlung Zangbo River was significantly higher than that of Lhasa River and Nianchu River, which were 12.95, 7.19 and 8.91 g/L, respectively. Filed experiment showed that the instantaneous measurement on sediment concentrations in different rivers was extremely higher than the rest from previous studies, indicating the intensified soil and water loss in this region. The device can be expected to measure the sediment concentration with the high accuracy in near real-time. The finding can provide a strong reference for the regional soil erosion as an alternative way with the excellent potential.

Keywords: sediment concentration; volume-mass conversion; overflow; weighing sensor