

# 利用自制压差装置测定水样含沙量的方法研究

徐飞飞<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>, 陈琳<sup>1</sup>, 邹易<sup>3</sup>, 杨昌<sup>1</sup>, 李建德<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

**摘要:** [目的] 开展基于压差测定水样含沙量的方法研究, 旨在寻求一种新方法以实现含沙量在野外的快速准确测定。[方法] 试验基于压差原理, 选取4种土壤(塷土、风沙土、盐碱土与水稻土)分别预制11个含沙量梯度的含沙水样, 使用数字式压差计测定含沙水样压强与大气压强之间的差值(简称压差), 建立含沙量与压差的函数关系式。[结果] 含沙量与压差在0.01的水平下呈极显著线性正相关; 对于其中3种含沙水样(塷土水样、盐碱土水样与水稻土水样), 压差结合理论公式计算含沙量的方法具有可行性, 最大相对误差绝对值小于15%, 但不适用于风沙土水样。风沙土水样含沙量的测定最大相对误差绝对值高达39%。因此, 为了缩小误差, 试验通过测定纯水与含沙量为500 kg/m<sup>3</sup>的水样压差建立修正方程, 再结合测定的压差值计算含沙量, 发现最大相对误差绝对值小于8%。[结论] 基于压差测定水样含沙量的方法能较为准确地测定水样含沙量, 可为水土保持监测等领域在野外便捷测定含沙量提供一种新思路与方法。

**关键词:** 压差; 水样; 含沙量; 数字式压差计; 液体密度

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2022)04-0172-07

**中图分类号:** S157

**文献参数:** 徐飞飞, 王健, 陈琳, 等. 利用自制压差装置测定水样含沙量的方法研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 172-178. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.022; Xu Feifei, Wang Jian, Chen Lin, et al. A method study on determination of sediment content in water samples based on self-made differential pressure device [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 172-178.

## A Method Study on Determination of Sediment Content in Water Samples Based on Self-made Differential Pressure Device

Xu Feifei<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>2</sup>, Chen Lin<sup>1</sup>, Zou Yi<sup>3</sup>, Yang Chang<sup>1</sup>, Li Jiande<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 3. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** [Objective] The method for quickly and accurately measuring sediment concentrations in water samples in the field based on differential pressure was studied. [Methods] Four soil types (including Lou soil, sandy soil, saline-alkali soil, and paddy soil) were chosen to prepare 11 water samples with different sediment concentrations based on the principle of pressure difference. The pressure difference between a water sample and the atmosphere was determined by using digital differential pressure meter (abbreviated as pressure difference) in order to establish the relationship between sediment concentration and pressure difference. [Results] Sediment concentration and pressure difference were linearly and positively correlated (significant at  $p=0.01$ ). The method of pressure difference combined with a theoretical formula to determine sediment concentration was feasible for three of the water samples (including the Lou soil water sample, the sandy soil water sample, and the paddy soil water sample), and the absolute value of the maximum relative error was less than 15%. However, the method was not suitable for the sandy soil water sample. The absolute value of the maximum relative error in the determination of sediment concentration for the sandy soil water sample

收稿日期: 2022-01-11

修回日期: 2022-02-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“坡耕地微地形水力连通性及入渗机理研究”(41771308)

第一作者: 徐飞飞(1996—), 女(汉族), 江西省南昌市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: Xu1996FF@163.com。

通讯作者: 王健(1973—), 男(汉族), 陕西省商洛市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用和土壤侵蚀方面的研究。Email: wangjian@nwsuaf.edu.cn。

was as high as 39%. Therefore, to reduce the error, a correction equation was established by determining the pressure difference between pure water and water samples with sediment content of  $500 \text{ kg/m}^3$ , and then combined with the measured pressure difference to calculate the sediment concentration. The absolute value of the maximum relative error was found to be less than 8%. [Conclusion] This method can accurately determine the sediment concentrations of water samples. It could provide a new way for conveniently determining sediment concentration in the field for soil and water conservation monitoring.

**Keywords:** pressure difference; water sample; sediment concentration; digital differential pressure gauge; liquid density

中国作为世界上土壤侵蚀最严重的国家之一<sup>[1]</sup>,存在着水土流失、土壤质量退化、生产力下降和沙化等一系列生态环境问题<sup>[2]</sup>,而水力侵蚀是导致以上问题的一个重要原因,降雨冲刷土壤表面,形成径流后带走表层土壤,流入江河使河流含沙量增加<sup>[3-4]</sup>。不仅影响水质,堆积在河流下游的泥沙还会抬高河床从而引发洪水灾害,对人类赖以生存的环境造成威胁。因此,径流含沙量一直都是衡量土壤侵蚀的必要参数之一,也是河流水文特征参数之一,准确地测定含沙量对土壤侵蚀研究、河道水文观测和水库等水利工程等其他方面都具有重要的实际意义<sup>[5]</sup>。

含沙量指的是单位体积含沙水样中所含有干沙的质量<sup>[6]</sup>。根据测定原理不同,含沙量的测定方法分为直接测定法和间接测定法。直接测定法的原理是去除含沙水样中的水以确定含沙量,而间接测定法的原理是依据泥沙对某种物理特性的影响以确定含沙量<sup>[7]</sup>。直接测定法包括有烘干称重法与比重法。烘干称重法是利用烘箱高温加热,样品中水分蒸发后得到干沙,再通过电子秤称重,最后计算得到含沙量;该方法被认为是当前最准确的方法之一,因此其被广泛应用于实际研究中。然而烘干称重法步骤多、效率低,过程耗时费力;且受供电影响,不便于在野外获取数据<sup>[8]</sup>。比重法是利用泥沙比重采用比重瓶灌满含沙水样,进行称重与水温测定,结合水沙置换系数计算得到含沙量<sup>[9]</sup>。该法所需设备简单,常用于野外<sup>[10]</sup>,与烘干称重法相比,具有快速直接的优点。然而水中溶解质会影响测定结果,尤其在含沙量小、溶解质多的条件下,所测结果偏大<sup>[11]</sup>。间接测定方法包括激光法、电容法、红外线法、超声波法、振动法、 $\gamma$ 射线法等<sup>[12]</sup>。其中,激光法不仅存在一定的理论误差,而且以此原理研制的仪器笨重庞大,成本较高<sup>[13]</sup>;以电容为原理的仪器成本低,响应快,但其受水温等因素影响极大,因而此类方法尚处于试验研究阶段<sup>[14-15]</sup>;红外线法具有实时测定含沙量的优点,但受水中固体物理性质影响,使用范围较为局限<sup>[16-17]</sup>;以超声波为原理的测定方法省时省力,但超声波经过

水体时会对水中固体杂质产生作用,从而影响溶液密度产生误差,且当水体含沙量越高时,误差越明显,故此方法只适用于低浓度的含沙量测定<sup>[18-20]</sup>;以振动为原理研制的振动式悬移质测沙仪在监测河流含沙量方面具有快速、准确和稳定的优点,但该仪器只适用于水体流速大于  $0.5 \text{ m/s}$  的水流<sup>[21]</sup>,局限性较大; $\gamma$ 射线法测量精度较高,但其仪器制作花费高,无法推广普及;通过比较精度与适用性可知,现有的含沙量测定方法中,只有烘干称重法与  $\gamma$  射线法表现较佳,但前者效率低,后者仪器昂贵。因此在实际运用中,若想精确高效地测定含沙量,则需要寻求新方法。关于使用压差法测定含沙量的研究极为少见,最早李茂宗<sup>[22]</sup>提出了基于压差对河流含沙量进行电学测定,但仅提出了理论依据,未通过科学试验论证。因此,本研究基于液体压强与大气压强之间的差值原理,采用4种土壤为原料配制含沙水样,以含沙水样为研究对象,通过数字式压差计测定压差,分析不同水样中含沙量与压差的关系并建立修正方程,并将测定结果与设计含沙量进行对比分析,以验证该方法的可行性和准确性,以期能为野外快速测定水样含沙量提供相关理论依据。

## 1 测定原理与计算方法

### 1.1 测定原理

数字式压差计是用于测定流体中两点之间压强差的仪器,当压差计的一根软管与大气相连,另一根软管与固定深度的液体相连时,两点间所测压差为固定深度处的液体压强。当测定的液体深度不变时,压差与液体密度呈线性正相关关系;当一份含沙水样被搅拌均匀时,结合含沙量定义,进一步可得到压差与含沙量呈线性正相关关系,因此可通过数字式压差计测定压差建立一元函数方程计算含沙量。

### 1.2 计算方法

取质量为  $m_s$  的土样于容量瓶中,加入纯水直至达到含沙水样的设计体积  $V$ 。此时含沙水样密度关系表达式为:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V} \quad (1)$$

式中： $\rho$  为含沙水样的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $m$  为含沙水样的质量( $\text{kg}$ )； $m_s$  为含沙水样中的土样质量( $\text{kg}$ )； $m_w$  为含沙水样中水的质量( $\text{kg}$ )； $V$  为含沙水样的体积( $\text{m}^3$ )。

含沙水样中水的质量计算公式为：

$$m_w = \rho_w V_w = \rho_w (V - V_s) = \rho_w \left( V - \frac{m_s}{\rho_s} \right) \quad (2)$$

式中： $\rho_w$  为水的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $V_w$  为含沙水样中水的体积( $\text{m}^3$ )； $V_s$  为含沙水样中的泥沙体积( $\text{m}^3$ )； $\rho_s$  为土壤的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

联立公式(1)–(2)，得出含沙水样密度表达式为：

$$\rho = \rho_w + \frac{m_s}{V} - \frac{m_s}{V} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (3)$$

在测定含沙水样压差时，其计算公式为：

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_w = \rho g h \quad (4)$$

式中： $\Delta P$  为两点间压差(Pa)； $P_1$  为固定深度处的液体绝对压强(Pa)； $P_2$  为大气压强(Pa)； $P_w$  为含沙水样的液体压强(Pa)； $g$  为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ )； $h$  为测定深度(m)。

由公式(4)可知，当测定深度一定时，压差与含沙水样密度呈正相关关系。根据含沙量(CS)计算公式  $CS = \frac{m_s}{V}$ ，结合含沙水样密度表达式(3)，可得含沙水样密度为：

$$\rho = CS \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) + \rho_w \quad (5)$$

由公式(5)可得，当泥沙密度不变时，含沙水样密度与含沙量呈正相关关系。通过式(4)–(5)联立可得含沙量计算公式：

$$CS = \Delta P \frac{1}{gh \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right)} - \frac{\rho_w \rho_s}{\rho_s - \rho_w} \quad (6)$$

即泥沙密度与测定深度不变时，含沙量与压差

呈正相关关系；因此，可通过测定压差计算水样含沙量。试验土样测定深度为 0.255 m，数字式压差计测定单位采用  $\text{cm} \times \text{水柱} (\text{cm} \cdot \text{H}_2\text{O})$ 。土壤平均颗粒密度为  $2.653 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，室温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  下，水的密度为  $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，试验所在地区咸阳的重力加速度为  $9.797 \text{ N}/\text{kg}$ ，因此将  $\rho_s = 2.653 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ， $h = 0.255 \text{ m}$ ， $\rho_w = 998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ， $g = 9.797 \text{ N}/\text{kg}$  代入公式(7)中，可得：

$$CS = 0.642 \Delta P - 1600.115 \quad (7)$$

故可以通过数字式压差计测定含沙量结合理论公式(7)计算含沙量。(其中  $CS \geq 0 \text{ kg}/\text{m}^3$ ， $\Delta P \geq 2492 \text{ Pa}$ )根据  $1 \text{ cm} \cdot \text{H}_2\text{O} = \rho \cdot g \cdot h = 998.2 \times 9.797 \times 0.01 = 97.794 \text{ Pa}$ ；当含沙量为零时， $\Delta P = 2492.391 \text{ Pa} = 24.49 \text{ cm} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，与预试验测得该条件下的纯水压差读数  $25.5 \text{ cm} \cdot \text{H}_2\text{O}$  相符合。

## 2 材料与方 法

### 2.1 试验材料与装置

2.1.1 试验材料 为验证基于压差测定含沙量方法的可行性，本试验采用陕西省咸阳市杨陵区( $34.28^\circ\text{N}$ ,  $108.07^\circ\text{E}$ )的塬土；陕西省靖边县( $37.60^\circ\text{N}$ ,  $108.80^\circ\text{E}$ )的风沙土；山东省滨州市( $37.38^\circ\text{N}$ ,  $117.97^\circ\text{E}$ )的盐碱土和江西省南昌市( $28.68^\circ\text{N}$ ,  $115.85^\circ\text{E}$ )的水稻土作为试验土壤。取土时，去除表层枯枝落叶等杂质，采用对角线取样法使用铁锹挖取表层土壤(0–20 cm 的土壤)。将刚采集的土壤样品平铺在干净的纸张上，将大土块破碎后，放置于室内通风处，待自然风干后去除杂质(植物根茎叶、虫体和石块等)。风干后的土壤样品混匀后平均分为 2 份，1 份土壤样品磨细过筛直到全部通过 0.25 mm 的圆孔土壤筛，后续将用于含沙水样的配置和土壤机械组成测定；另 1 份土壤样品用于土壤比重测定。土壤机械组成使用马尔文激光粒度仪测定，土壤比重通过比重瓶测定。各种土壤的基本物理性质如表 1 所示。

表 1 试验土壤基本物理性质

土壤类型	土壤机械组成/%			土壤质地	容重/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.02 mm)	砂粒(0.02~0.25 mm)		
塬土	4.43	58.49	37.08	轻粉质壤土	2.69
风沙土	0.00	2.60	97.40	砂土	2.74
盐碱土	3.25	49.15	47.60	粉砂壤土	2.67
水稻土	5.26	69.06	25.68	轻粉质壤土	2.65

2.1.2 试验装置 试验于 2020 年 11 月至 2021 年 1 月在西北农林科技大学资源环境学院实验室进行，含沙量测定装置如图 1 所示，量筒设有 A、B、C 共 3 个

支管，A 支管用于连接溢流管，便于搅拌过程中水样的排出，以保证水样高度不变，B 和 C 两支管用于连接压差计的两根软管。

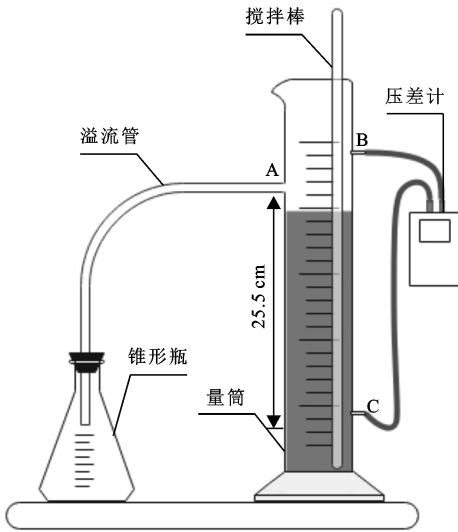


图1 自制压差水样含沙量测定装置

## 2.2 试验方法和数据处理

试验设计含沙量分别为 0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 和 0.5 g/ml, 每个含沙量设置 3 个重复。因本次试验含沙水样的设计体积为 1 000 ml, 根据含沙量计算公式, 可知所需土壤样品质量分别为 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 和 500 g。

试验采用纯水, 纯水水温为  $20 \pm 0.5$  °C。取纯水 1 000 ml 于装置中, 记录压差计读数。随后依次取配制完成的含沙水样放于含沙量测定装置中, 用搅拌棒将其搅拌均匀, 记录搅拌停止后压差计读数稳定时间(本试验通过预试验可知一般为 30 s)的数字式压差计数值。

采用 Excel, SPSS, Origin 2019 和亿图图示软件进行数据处理与制图。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同含沙量下的水样压差

4 种含沙水样搅拌均匀后, 含沙量与压差之间的关系如图 2 所示。由图 2 可知, 纯水(含沙量为  $0 \text{ kg/m}^3$ )对应压差为 2 493 Pa, 同一含沙量下, 压差大小顺序为: 埧土 > 水稻土 > 盐碱土 > 风沙土。且随含沙量增加, 4 种含沙水样的压差均呈现增加的趋势, 而增长幅度略有不同, 其中风沙土配制的含沙水样增长幅度最弱, 当含沙量由  $0 \text{ kg/m}^3$  增加到  $500 \text{ kg/m}^3$  时, 增幅仅有 19%, 而埧土、盐碱土、水稻土 3 种含沙水样的压差由增幅分别为 33%, 29%, 32%。通过相关性分析可知(表 2), 4 种浑水的含沙量与压差在 0.01 的水平下呈极显著相关, 拟合方程的决定系数均大于

0.99, 说明含沙量与压差之间存在极显著线性正相关关系。

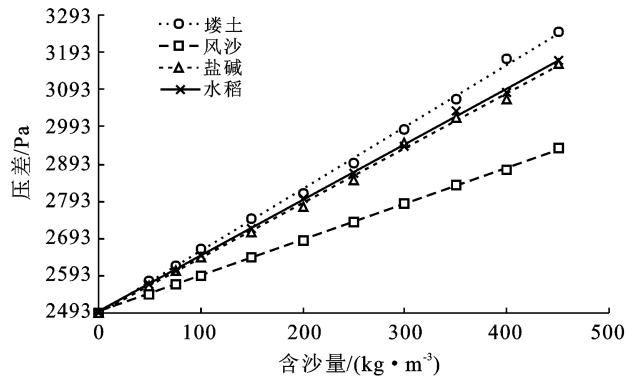


图2 样品不同含沙量下的水样压差

表2 样品含沙量(CS)与压差(P)的相关性分析

含沙水样种类	拟合公式	$R^2$	$r$
埧土水样	$P=1.664\ 0CS+2\ 493.2$	0.998\ 8	0.998**
风沙土水样	$P=0.970\ 5CS+2\ 495.3$	0.999\ 6	0.999**
盐碱土水样	$P=1.473\ 8CS+2\ 492.4$	0.998\ 5	0.999**
水稻土水样	$P=1.499\ 0CS+2\ 495.7$	0.999\ 2	0.998**

注: \*\* 表示在 0.01 级别(双尾), 相关性显著

### 3.2 理论含沙量误差分析

将试验所得压差代入公式(7)中计算得到理论含沙量, 通过将理论含沙量与设计含沙量用公式(8)拟合以评价该方法的准确性(图 3)。

$$y=Bx+A \quad (8)$$

式中:  $y$  为理论含沙量 ( $\text{kg/m}^3$ );  $x$  为设计含沙量 ( $\text{kg/m}^3$ );  $A, B$  为回归系数。

由图 3 可知, 对于埧土水样, 理论含沙量略大于设计含沙量; 对于其他 3 种含沙水样, 则是设计含沙量大于理论含沙量。分析理论含沙量与设计含沙量关系可知, 对于 4 种含沙水样, 理论含沙量与设计含沙量的偏差都随含沙量的增加而增大。埧土水样、盐碱土水样、水稻土水样的理论含沙量与设计含沙量偏差较小(回归系数  $B \approx 1$ ); 而风沙土水样理论含沙量与设计含沙量偏差则较为显著(回归系数  $B=0.6$ )。为进一步衡量压差法结合理论公式计算测含沙量的可行性与准确性, 采用最大相对误差、最小相对误差、平均绝对误差与均方根误差进行评价(表 3)。相对误差(RE)可反映理论含沙量偏离设计含沙量大小, 平均绝对误差(MAE)可准确反映实际测定误差大小, 均方根误差(RMSE)可用于衡量理论含沙量与设计含沙量之间的偏差<sup>[23]</sup>。由表 3 可知, 除风沙土水样, 其他 3 种含沙水样的相对误差绝对值小于 15%, 平均绝对误差小于  $\pm 17 \text{ kg/m}^3$ , 均方根误差小于  $\pm 21 \text{ kg/m}^3$ ,

误差在试验接受范围内,即对于这 3 种含沙水样采用该方法计算含沙量具有可行性,其中水稻土水样与其他 3 种水样相比,最大相对误差仅为  $-5.14\%$ ,测定结果最为准确。但对风沙土水样而言,最小相对误差约为  $-32\%$ ,平均绝对误差接近  $-86 \text{ kg/m}^3$ ,均方根误差约为  $100 \text{ kg/m}^3$ ,表明该方法不适用于风沙土水样含沙量的测定。

土壤样品的比重和机械组成都影响了理论公式(7)的准确性,尤其是机械组成。因此,理论公式的准确性是由土壤粒径组成和比重综合作用决定的。土

壤样品比重越接近于  $2.653 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,机械组成中黏粒和粉粒的质量比例越大时,使用理论公式(7)得到的含沙量结果越准确;瘠土、风沙土、盐碱土、水稻土的比重分别为  $2.69, 2.74, 2.67$  和  $2.65 \text{ kg/m}^3$ ,黏粒和粉粒质量比例之和分别为  $62.92\%, 2.60\%, 52.39\%$  和  $74.32\%$ ,其中风沙土黏粒和粉粒质量比例仅有  $2.60\%$ ,因此,风沙土含沙水样使用理论公式计算的均方根误差达到  $99.49 \text{ kg/m}^3$ ,而比重为  $2.65 \text{ kg/m}^3$ ,黏粒与粉粒含量达到  $74.32\%$  的水稻土制成的含沙水样使用理论公式误差较小,均方根误差仅有  $9.62 \text{ kg/m}^3$ 。

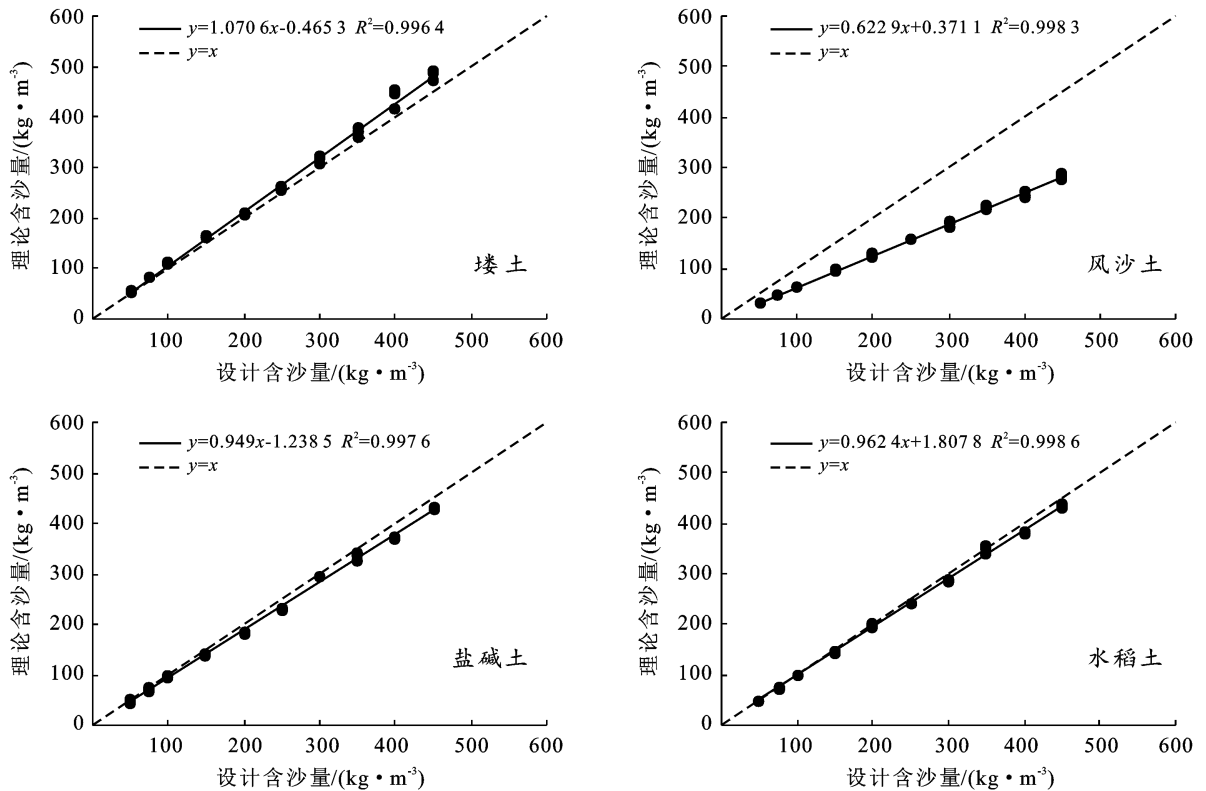


图 3 样品设计含沙量与理论含沙量对比

表 3 样品理论含沙量误差分析

项目	瘠土	风沙土	盐碱土	水稻土
最小相对误差/ $\%$	2.06	-31.71	-0.32	-0.10
最大相对误差/ $\%$	14.75	-39.02	-9.16	-5.14
MAE/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	16.39	-85.69	-12.61	-6.46
RMSE/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	20.63	99.49	15.69	9.62

### 3.3 修正含沙量误差分析

由以上结果可知,使用理论公式测定含沙量并不适用于所有土壤类别,尤其是本试验中的风沙土。因此,为了缩小误差并验证压差法测定含沙量的可行性,根据含沙量与压差之间的线性相关原理,选择含沙量 0 和  $500 \text{ kg/m}^3$  的试验数据,建立压差与含沙量的修正方程,将剩下 10 组含沙量(50, 75, 100, 150,

200, 250, 300, 350, 400 和  $450 \text{ kg/m}^3$ )代入修正方程,得到修正含沙量,通过与设计含沙量对比得到修正含沙量误差分析结果(详见表 4)。由表 4 可知,对于 4 种含沙水样,采用压差法结合修正方程计算含沙量,最小相对误差接近  $\pm 1\%$ ,最大相对误差绝对值小于  $8\%$ ,平均绝对误差绝对值均小于  $13 \text{ kg/m}^3$ ,均方根误差小于  $16 \text{ kg/m}^3$ 。这说明采用压差法结合修正方程具有可行性,并且能够较为准确测定水样含沙量。由表 3 与表 4 对比发现,对于瘠土、盐碱土、风沙土含沙水样,采用理论公式的最小相对误差分别为  $2.06\%, -31.71\%$  和  $0.32\%$ ,而使用修正方程最小相对误差都小于  $1\%$ ;理论公式的最大相对误差分别为  $14.75\%, -39.02\%$  和  $-9.16\%$ ,而使用修正方程最大

相对误差都小于 7%;理论公式的平均绝对误差分别为 16.39, -85.69 和 -12.61 kg/m<sup>3</sup>,而使用修正方程平均绝对误差都小于 4 kg/m<sup>3</sup>;理论公式的均方根误差分别为 20.63, 99.49 和 15.69 kg/m<sup>3</sup>,而使用修正方程均方根误差都小于 9 kg/m<sup>3</sup>。其中水稻土水样使用

修正方程与理论公式相比,各种误差反而增大了,如平均绝对误差由 -6.46 kg/m<sup>3</sup> 增加至 -12.12 kg/m<sup>3</sup>。因此,塍土、盐碱土、风沙土 3 种含沙水样的含沙量测定结合修正方程更为准确,而水稻土水样的含沙量测定结合理论公式更为准确。

表 4 样品修正含沙量(CS)误差分析

含沙水样种类	塍土	风沙土	盐碱土	水稻土
修正方程	CS=0.600P-1 496.5	CS=1.039P-2 591.5	CS=0.687P-1 712.2	CS=0.627P-1 563.1
最小相对误差/%	0.06	0.61	0.1	-0.88
最大相对误差/%	5.55	6.71	6.82	-7.45
MAE/(kg·m <sup>-3</sup> )	-0.96	3.18	2.87	-12.12
RMSE/(kg·m <sup>-3</sup> )	8.06	6.51	7.25	15.39

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

虽然 4 种含沙水样的压差都与含沙量呈正相关,但同一含沙量下,4 种含沙水样的压差存在差异,其中盐碱土水样压差与水稻土水样压差较为接近,塍土水样的压差最大,风沙土水样的压差远小于其他 3 种含沙水样。当含沙水样搅拌均匀时,根据公式(6)压差与土壤比重(土壤颗粒密度)成正比,即此时压差的大小顺序为:风沙土>塍土>盐碱土>水稻土;经过搅拌均匀的含沙水样是悬浮液,停止后将发生自由沉降,含沙水样密度减小;根据斯托克斯定律,土壤颗粒在水中沉降速度与土壤颗粒粒径的平方、土壤比重成正比,即压差与土壤颗粒粒径的平方成反比<sup>[24]</sup>;因此,含沙水样压差值的大小是由土壤粒径组成和比重综合作用决定的。其中风沙土发育于风成沙性母质的土壤<sup>[25]</sup>,土壤比重最大,土壤颗粒组成中砂砾比例为 97.4%(表 1),因此在 30 s 内风沙土大量沉降,导致其压差远小于其他 3 种含沙水样压差。

压差法结合理论公式计算含沙量误差主要来源于两个方面。首先,理论公式对应的是搅拌均匀时的含沙水样压差,而试验使用的是搅拌停止后的 30 s 压差,停止后土壤颗粒将发生自由沉降,因此 30 s 压差小于搅拌均匀的瞬时压差;其次,不同土壤的颗粒密度存在差异,一般为 2.60~2.80 g/cm<sup>3</sup>,而理论公式采用的是土壤颗粒密度平均值 2.653 g/cm<sup>3</sup><sup>[26-27]</sup>,所以得到的理论含沙量与设计含沙量存在一定理论误差。

现有试验只能证明该方法可准确测定含沙量范围为 50~500 kg/m<sup>3</sup> 且泥沙粒径范围为 0~0.25 mm 水样的含沙量,而在实际中,不同流域的含沙量和悬移质泥沙组成存在差异。例如,黄河中游的泥沙组成

中,细颗粒来自黄土,粗颗粒则主要来自风成沙、基岩风化物和沙黄土中的粗粒部分<sup>[28]</sup>。因此,后续试验还将增加低含沙量,扩大泥沙粒径范围和通过混合不同种类土壤配置含沙水样来探究基于压差测定水样含沙量的方法的适用性与准确性。对于其中盐碱土和 水稻土这两种含沙水样的压差较为接近的现象,同时后续试验将增加观测因子,扩大含沙量设计范围与加密试验(以 10 kg/m<sup>3</sup> 递增设置含沙量)的方式,以获取盐碱土和 水稻土更准确、更具体的结果。

### 4.2 结论

本试验通过测定不同含沙水样压差,提出一种基于压差原理测定含沙量的简易方法,确定了该含沙量测定方法的可行性与准确性。试验测得塍土、风沙土、盐碱土、水稻土 4 类含沙水样的压差均与含沙量呈线性正相关关系,但具体线性关系存在差异,其中盐碱土水样与水稻土水样的两者的拟合图像较为接近(图 2)。数字式压差计测定的压差结合理论公式计算得到的理论含沙量与设计含沙量之间存在误差,其中风沙土水样则完全不适用于理论公式。因此,为了缩小误差,通过两点确定一条直线的直线原理建立修正方程(以纯水压差为起点,含沙量为 500 kg/m<sup>3</sup> 为终点),当含沙量在 50~500 kg/m<sup>3</sup> 的测定范围,采用压差法结合修正方程得到的修正含沙量与设计含沙量相比较,最大相对误差的绝对值小于 8%,说明该方法具有合理性与可行性。虽然存在一定的系统误差,但压差法具有操作简单、节约时间、经济成本低、能够满足野外快速获得含沙量的优点,同时装置存在可改进的空间,以获得更准确的结果,因此具有较好的应用前景,同时对水土流失预测、防治和治理具有重大意义。

压差法虽然存在一定的系统误差,但具有操作简单、节约时间、经济成本低和满足野外快速测定含沙

量的优点。压差法有较好应用前景,其对水土流失、防治和治理等工作具有重要意义。

### [参 考 文 献]

- [1] 张思聪,徐海波,唐莉华.基于GIS和RS技术的土壤侵蚀快速调查研究[J].水力发电学报,2005,24(3):70-74.
- [2] 史东梅,金慧芳,蒋光毅.土壤侵蚀对坡耕地耕层质量退化作用及其评价趋势展望[J].农业工程学报,2019,35(18):118-126.
- [3] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制[J].生态学报,2018,38(2):624-634.
- [4] 展小云,曹晓萍,郭明航,等.径流泥沙监测方法研究现状与展望[J].中国水土保持,2017(6):13-17.
- [5] 赵其国.土壤科学发展的战略思考[J].土壤,2009,41(5):681-688.
- [6] 彭永勤,李克锋,曹薇.利用浑浊度推算含沙量方法的限制性与适用性研究[J].四川环境,2009,28(1):20-23.
- [7] 雷廷武,张宜清,赵军,等.近红外反射高含量泥沙传感器研制[J].农业工程学报,2013,29(7):51-57.
- [8] 陈天勤.含沙量直接测量及取样方法对精度的影响[D].北京:中国农业大学,2016.
- [9] 付艳红,时铁彬,徐岩.含沙量测量方法及比较分析[J].东北水利水电,2010,28(9):35-36.
- [10] 高佩玲,雷廷武,赵军,等.坡面侵蚀中径流含沙量测量方法研究与展望[J].泥沙研究,2004(5):28-33.
- [11] 吴彰松,张根广,梁宗祥,等.比重瓶法测验低含沙量误差分析[J].长江科学院院报,2016,33(3):5-8.
- [12] 陈敏杰,王伟聪.浅析含沙量的测量[J].价值工程,2010,29(3):37.
- [13] Teufel M, Trimis D, Lohmüller A, et al. Determination of velocity profiles in oscillating pipe-flows by using laser Doppler velocimetry and ultrasonic measuring devices [J]. Flow measurement and Instrumentation, 1992, 3(2): 95-101.
- [14] Li Xiaoyu, Lei Tingwu, Wang Wei, et al. Capacitance sensors for measuring suspended sediment concentration [J]. Catena, 2005, 60(3): 227-237.
- [15] 李小昱,雷廷武,王为.电容式传感器测量水流泥沙含量的研究[J].土壤学报,2002,39(3):429-435.
- [16] 李勇涛,李立新,焦宝明.BP神经网络模型在红外线法测量含沙量中的应用研究[J].水利科学与寒区工程,2019,2(5):48-52.
- [17] 李勇涛,陈英智,李立新,等.红外泥沙测量中的多种影响因素对比分析[J].水土保持应用技术,2017(5):19-21.
- [18] 李德贵,罗珺,陈莉红,等.河流含沙量在线测验技术对比研究[J].人民黄河,2014,36(10):16-19.
- [19] 展小云,郭明航,赵军,等.径流泥沙实时自动监测仪的研制[J].农业工程学报,2017,33(15):112-118.
- [20] 方彦军,唐懋官.超声衰减法含沙量测试研究[J].泥沙研究,1990(2):1-12.
- [21] 王智进,宋海松,刘文.振动式悬移质测沙仪的原理与应用[J].人民黄河,2004,26(4):19-20.
- [22] 李茂宗.用压差法对河流含沙量的电学直接测量[J].黄河建设,1956(11):17-20.
- [23] 邓兵,杨武年,慕楠,等.基于光谱分析与角度斜率指数的植被含水量研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(8):2546-2552.
- [24] 刘成,陆杨,寇伟,等.泥浆悬浮砂粒能力分层测定试验研究[J].隧道建设,2017,37(9):1097-1104.
- [25] 李从娟,雷加强,高培,等.人工防护林作用下风沙土成土过程的研究进展[J].土壤学报,2012,49(6):1227-1234.
- [26] Blanco-Canqui H, Lal R, Post W M, et al. 有机碳对土壤颗粒密度和流变特性的影响[J].美国土壤学报,2006,70(4):1407-1414.
- [27] 马玉莹,雷廷武,庄晓晖.测量土壤颗粒密度的体积置换法[J].农业工程学报,2014,30(15):130-139.
- [28] 许炯心.黄河中游支流悬移质粒度与含沙量、流量间的复杂关系[J].地理研究,2003,22(1):39-48.