

DOI:10.13332/j.1000-1522.20180246

径流含沙量测定方法研究

温文杰 张建军 李依璇 黄小清 贺佩
(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:【目的】径流含沙量是水文测验和水土流失监测中必须测定的重要参数,更是衡量水土流失程度的重要指标,简单便捷的径流含沙量测定方法是目前水土保持监测中需要解决的关键问题之一,这对于实现水土流失量的自动监测和预警,及时准确地把握水土流失强度,进而选择合理的水土保持措施,开展水土流失治理均具有重要意义。【方法】本文通过采集国内不同省份的土壤样品,利用室内实验,构建了称重法测定径流含沙量的基本原理,提出了计算含沙量的经验模型,探讨了称重法测定径流含沙量精度的主要因素(泥沙比重、泥水样体积、水温)。【结果】称重法测量径流含沙量的模型精度较高,能满足水土保持监测中径流含沙量测定的精度要求,径流含沙量在5.00~20.00 g/L时,平均相对误差<20.00%;径流含沙量在20.00~200.00 g/L时,平均相对误差<5.00%。泥沙比重对泥沙含量测定结果的影响不显著,可采用水土流失地区表层土壤平均比重(变化范围基本在2.50~2.70之间),利用称重法模型计算出径流含沙量。泥水样体积的测定误差是影响称重法测量泥沙含量精度的关键,研制以称重法为基本原理的径流泥沙含量自动监测仪器时,准确测量泥水样的体积最为关键。温度对称重法测量径流含沙量的精度影响很小($P > 0.05$)。【结论】称重法操作简单,精度高,在水土流失自动监测领域具有良好的应用前景。

关键词:径流含沙量;称重法;泥沙比重;泥水样体积;土壤侵蚀

中图分类号: S714.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2019)11-0155-08

引文格式: 温文杰, 张建军, 李依璇, 等. 径流含沙量测定方法研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11):155-162. Wen Wenjie, Zhang Jianjun, Li Yixuan, et al. A simple method for estimating runoff sediment concentration[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11): 155-162.

A simple method for estimating runoff sediment concentration

Wen Wenjie Zhang Jianjun Li Yixuan Huang Xiaoqing He Pei
(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Runoff sediment concentration is an important variable in monitoring hydrological processes and quantifying soil erosion. Methodological improvements in measuring sediment concentration are critical to the automatic, efficient and accurate estimation of soil losses, and could also guide soil and water conservation practices. [Method] We collected and analyzed soil samples from different provinces in China, and developed a weighing-based empirical model for estimating sediment concentration. We also investigated factors(specific gravity of sediment, volume of sample, water temperature) which may influence the accuracy of the method. [Result] The results showed that measured data agreed well with true values, and the method for estimating sediment concentration was accurate enough for practical use. When the sediment concentration was between 5 g/L and 20 g/L, the average relative error is less than 20%; when the sediment concentration was between 20 g/L and 200 g/L, the average relative error is less than 5%. Both specific gravity of sediment and temperature ($P > 0.05$) had no significant effect on the

收稿日期: 2018-07-24 修回日期: 2018-11-14

基金项目: 国家重点研发计划“黄土残塬沟壑区水土保持型景观优化与特色林产业技术及示范”(2016YFC0501704)。

第一作者: 温文杰。主要研究方向: 水土保持与森林水文。Email: wenwenjie@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区北京林业大学水土保持学院。

责任编辑: 张建军, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 水土保持与森林水文。Email: zhangjianjun@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

accuracy of the method, it is therefore reasonable to use the average specific gravity of the top-layer soil in the calculations, and the range of variation was between 2.50 and 2.70. However, the accuracy was significantly influenced by the measurement of the sample's volume, how to accurately measure the volume of sample is the key to invent automatic monitoring machine for estimating sediment concentration in surface runoff.

[Conclusion] The weighing method has simple operation and high accuracy. It has a good application prospect in the study of inventing automatic monitoring machine for estimating sediment concentration in surface runoff.

Key words: runoff sediment concentration; weighing method; specific gravity of sediment; volume of muddy water sample; soil erosion

我国是一个多山国家，在降雨的作用下，坡面上被侵蚀的表层土壤随坡面径流进入江河，并向河口方向运动^[1]，从而在我国形成了 129.32 万 km² 的水蚀面积和数条多沙河流。径流含沙量是水文测验、水土保持监测中必须测定的重要参数，更是衡量水土流失程度的重要指标，这对于评价流域的水土流失程度和水土保持效益具有重要意义^[2]，但目前在水土保持监测中尚缺乏快速、便捷、高精度的含沙量测定方法，为此本研究拟通过室内实验，对称重法测量含沙量的精度以及影响因素进行探讨，以期为今后水土保持监测中泥沙含量自动观测仪器的研制提供理论依据。

径流含沙量传统也最为常用的测量方法为人工取样的过滤烘干法，该方法操作繁琐，耗时费力，从取样到烘干计算往往需要数十小时，无法开展实时动态监测，而且取样本身会直接影响测量精度，取样准确则测量准确，取样若存在较大误差，泥沙含量测量结果也会出现较大偏差，从而给水土保持监测和研究工作带来诸多不便，而现阶段水土保持监测中急需掌握径流含沙量的实时动态过程。为此，近年来水文测验和水土保持监测技术人员提出了一系列测定径流含沙量的测验仪器，这些仪器运用现代测量方法，即通过量化泥沙对某种物理特性的影响来确定含沙量，主要包括振动法、超声波法、γ 射线法、电容法、光电法等。振动法通过振动频率来测算含沙量，长期稳定性较强，但就在低流速时，是否会出现泥沙沉积而造成较大误差的问题上还存在争议。超声波法根据超声波在含沙水流中的反射和衰减特性测量含沙量，但测量范围小，国内还未见产品^[3-8]。γ 射线法根据 γ 射线穿过水沙混合体时所遵循的衰减规律进行测量^[9]，但因 γ 射线可能对人体造成危害而慎用^[3]。电容法利用水沙混合物会引起介电常数差异的电物理特性来测量含沙量，但其精度会受到温度、流速等多种因素的干扰，目前也尚处于研究和实验阶段^[10-12]。光电法利用光线在水体中的散射规律进行测量，目前使用较多的仪器有 OBS 浊度仪，

能实现实时、快速、连续地测量径流含沙量^[13-14]。但其容易出现窗口污染问题，影响红外光线的散射，而且随着测量次数增多，误差将逐渐积累。同时浊度仪测量范围有限，在泥沙含量较高的水土流失地区也无法使用。

上述径流含沙量的测定方法和测验仪器都存在着或多或少的缺陷，水文监测和水土保持监测领域亟需一种简单方便的测定方法或测验仪器来弥补上述缺陷。近年来有人用称重法来测定径流含沙量，程冬兵等^[15]探讨了称重法与过滤法、比重计法之间的测量差异，但称重法实验时样本数据少，只有一种土壤比重的土样，设定的径流含沙量范围小，在 60.00 g/L 以内，其泥水样体积的固定方法是将 1 000 mL 的带盖塑料瓶直接放入桶内水面以下装满拧上盖，并不十分准确，整个实验过程没有重复，对于称重法的测量精度及影响测量精度的因素也尚未有准确和深入的研究。为此本文通过室内实验，探究称重法测定径流含沙量的可行性以及影响因素，以期为利用称重法自动监测径流含沙量提供依据。

1 计算模型

假设水的密度为 1 g/cm³, $M_{\text{泥}}$ 为泥水样中泥沙的质量(g), M 为泥水样的质量(g), $M_{\text{水}}$ 为泥水样中水的质量(g), $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度(g/cm³), V 为泥水样的体积(cm³), d 为泥沙比重；在泥水样中泥沙孔隙全部被水充满的前提下，按照以下公式计算含沙量(S , g/cm³):

$$M_{\text{泥}} = M - M_{\text{水}} = M - V_{\text{水}} \cdot \rho_{\text{水}} = M - (V - V_{\text{泥}}) \quad (1)$$

$$\rho_{\text{水}} = M - V \cdot \rho_{\text{水}} + \frac{M_{\text{泥}}}{d}$$

$$M_{\text{泥}} = \frac{(M - V \cdot \rho_{\text{水}}) \cdot d}{d - 1} \quad (2)$$

$$S = \frac{(M - V \cdot \rho_{\text{水}}) \cdot d}{(d - 1) \cdot V} \quad (3)$$

从以上公式可以看出，计算含沙量(S)需要知道泥水样的质量(M)、泥水样的体积(V)、泥沙比重

(d), 泥水样的质量可以通过高精度电子天平准确测定, 因此泥水样中的含沙量主要由泥水样的体积和泥沙比重决定。

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集和处理

土壤学研究表明, 自然界的土壤比重主要取决于矿物组成和有机质含量, 大多处于 2.50~2.70 之间, 极少数能达到 2.80, 较为稳定。由于有机质的存在, 土壤比重在一定范围内随土层深度的增加而增加, 而水土流失产生的泥沙大多来自地面表层土壤,

由此可以确定径流中泥沙的比重也基本处于 2.50~2.70 之间^[15-17]。本实验中为获得不同土壤比重的土壤样品, 在较大的地域范围内采集土样。采集北方山地丘陵区(北京、辽宁)、南方山地丘陵区(福建)、西北黄土高原区(山西、陕西)不同地区不同土地利用类型下, 属于不同土壤质地和土壤类型的容易被侵蚀的表层土壤(0~20 cm), 在烘箱中烘干 4~8 h, 将烘干后的土样研磨并过 1 mm 土壤筛, 筛过的土样用比重瓶法测定比重, 每一组土样重复 6 次, 取平均值作为样品的比重。不同地区采样点的土地利用类型、土壤类型、土壤质地和土样比重如表 1 所示:

表 1 土样基本情况

Tab. 1 Basic information of the soil samples

采样地 Sample site	土地利用类型 Land use type	土壤类型 Soil type	土壤质地 Soil texture	土样比重 Specific gravity of sediment
北京 Beijing	林地 Forestland	褐土 Cinnamon soil	壤黏土 Loam clay	2.60
北京 Beijing	裸地 Bare land	风沙土 Sandy soil	粗砂土 Coarse sand	2.67
辽宁 Liaoning	草地 Grassland	棕壤 Brown soil	壤土 Loam	2.50
福建 Fujian	林地 Forestland	红壤 Red soil	黏土 Clay	2.61
山西 Shanxi	林地 Forestland	黄绵土 Loess soil	壤土 Loam	2.57
陕西 Shaanxi	林地 Forestland	黄绵土 Loess soil	壤土 Loam	2.60

2.2 实验设计

2.2.1 不同泥沙比重条件下含沙量的测定

从表 1 可以看出, 本实验中所采集的北京、辽宁、福建、山西、陕西不同省份不同土地利用类型下, 属于不同土壤质地和土壤类型的容易被侵蚀的表层(0~20 cm)土壤比重的分布范围为 2.50~2.67, 而考虑到由前人已经总结出的自然界土壤比重的分布范围^[15-17]以及数据的代表性, 本文选取比重为 2.50、2.57、2.60、2.67 的土样作为待试材料, 分别用 20 °C 的去离子水在体积为 250 mL 的容量瓶中配置成含沙量为 5.00、6.00、7.00、8.00、9.00、10.00、20.00、30.00、40.00、50.00、60.00、70.00、80.00、90.00、100.00、150.00、200.00 g/L 的泥水样, 将装有泥水样的容量瓶用感量为 0.01 g 的电子天平进行称质量, 并用模型(公式 3)计算出理论含沙量, 以 g/L 为单位, 保留到小数点后两位。每个含沙量重复 10 次试验。在此基础上探讨称重法在不同比重条件下测量径流含沙量的精度。

2.2.2 不同泥水样体积条件下含沙量的测定

利用比重为 2.60 的土样作为待试材料, 分别用 20 °C 的去离子水在体积为 250 mL 的容量瓶中配置成含沙量为 5.00、6.00、7.00、8.00、9.00、10.00、20.00、30.00、40.00、50.00、60.00、70.00、80.00、90.00 g/L 的泥水样, 在这些已知泥沙含量的样品中用滴管加入质量和体积已知的水滴(每滴水的体积利用称重法

测定)后, 对加入不同水滴数的样品用感量为 0.01 g 的电子天平进行称质量, 利用模型(公式 3)计算理论含沙量, 以 g/L 为单位, 保留到小数点后两位。并与真实泥沙含量进行对比, 在此基础上探讨体积误差对泥沙含量测量值的影响。

2.2.3 不同水温条件下含沙量的测定

选取比重为 2.67 的土样, 按照河水温度的变化范围, 分别用 5、10、15、20 °C 的去离子水在温度可控的培养箱中, 用体积为 250 mL 的容量瓶配置成含沙量为 5.00、10.00、20.00、30.00、40.00 g/L 的泥水样, 配制的泥水样在不同温度的培养箱中静置 2 h 后, 用感量为 0.01 g 的电子天平进行称质量, 并用模型(公式 3)计算理论含沙量, 以 g/L 为单位, 保留到小数点后两位。每个含沙量重复 3 次实验。在此基础上探讨水温对泥沙含量测量值的影响。

2.3 统计分析

对同一实验条件下重复 3 次以上的实验数据按照 Dixon 检验法剔除可疑值, 然后再进行后续的统计分析。Dixon 检验法是将重复 n 次的实验数据从小到大排列为 X_1, X_2, \dots, X_n , 通过表 2 中相应的计算公式求算检验统计量(Q), 通过 Dixon 检验临界值表得到相应显著性水平 α 和重复实验 n 次数条件下的临界值 Q_α , 若 $Q > Q_{0.01}$, 可疑值为离群值, 舍弃; 若 $Q_{0.05} < Q < Q_{0.01}$, 可疑值为偏移值, 取中位数代替平均数值; 若 $Q < Q_{0.05}$, 可疑值为正常值, 保留。

表 2 Dixon 检验统计量的计算公式

Tab. 2 Formula of Dixon test statistics

n 值区间 Interval of n value	可疑值为最小值 X_1 Suspicious value is the minimum value X_1	可疑值为最大值 X_n Suspicious value is the maximum value X_n
3 ~ 7	$Q = (X_2 - X_1)/(X_n - X_1)$	$Q = (X_n - X_{n-1})/(X_n - X_1)$
8 ~ 10	$Q = (X_2 - X_1)/(X_{n-1} - X_1)$	$Q = (X_n - X_{n-1})/(X_n - X_2)$

注: n 为重复实验次数; Q 为检验统计量; X_1 为实验数据中的最小值; X_2 为实验数据中除 X_1 以外的最小值, $X_2 > X_1$; X_n 为实验数据中的最大值, X_{n-1} 为实验数据中除 X_n 以外的最大值, $X_{n-1} < X_n$ 。 Notes: n represents the number of repeated experiments; Q represents the test statistic; X_1 represents the minimum value in the experimental data; X_2 represents the minimum value other than X_1 in the experimental data, $X_2 > X_1$; X_n represents the maximum value in the experimental data; X_{n-1} represents the maximum value other than X_n in the experimental data, $X_{n-1} < X_n$.

用相关分析探讨在不同的实验条件下测量的含沙量与真实值的相关关系。利用 SPSS22.0 进行独立样本 T 检验($P < 0.05$), 采用下式计算真实含沙量与实测值之间的相对误差:

$$\delta = \frac{|C_c - C_m|}{C_c} \times 100\% \quad (4)$$

$$E_r = \frac{1}{N} \sum_i \frac{|C_c - C_m|}{C_c} \times 100\% \quad (5)$$

式中: δ 是相对误差, E_r 是平均相对误差, C_c 、 C_m 是真实和实测的含沙量(g/L), N 是数据个数。

3 结果与分析

3.1 泥沙比重对测量精度的影响

20 °C 水温时, 用不同比重(2.50、2.57、2.60、2.67)的泥沙配置成不同含沙量的泥水样, 并采用称重法模型进行计算, 将得到的含沙量与真实值之间进行回归分析, 得到的相关分析表如表 3 所示:

表 3 4 种泥沙比重条件下测量值与真实值的相关关系

Tab. 3 Correlations between measurements and true data under four sediment specific gravities

数据量 Amount of data	泥沙比重 Specific gravity of sediment	关系式 Relationship formula	相关系数 Correlation coefficient (r^2)
170	2.50	$y = 0.9835x + 0.8419$	0.9993
168	2.57	$y = 0.9907x + 0.8047$	0.9998
168	2.60	$y = 0.9779x + 1.1056$	0.9983
169	2.67	$y = 1.0027x + 0.4349$	0.9996

注: x 为真实的含沙量; y 为称重法测定的含沙量; 数据量两个为一组。 Notes: x represents true sediment concentration; y represents the sediment concentration calculated by the weighing method; Two data volume is acted as one group.

表 3 显示, 4 种比重条件下称重法模型计算的含沙量与真实的含沙量存在显著的线性关系, r^2 高达 0.99。如果用称重法模型计算的含沙量与真实的含沙量完全相等, 则回归系数为 1, 截距为 0。在回归系数非常接近于 1 的情况下, 截距表示一个恒定的误差, 这个误差是人工操作误差和测量工具系统误差的总和。表 3 中 4 个回归方程的回归系数均非常接近于 1, 截距在 1 g/L 左右, 浮动较小, 说明称重法测量出的泥沙含量可以很好地反映真实值, 在实际应用过程中具有良好的可行性。

对称重法测量误差与真实含沙量的关系进行分析, 结果见表 4, 从表 4 可以看出, 不同比重条件下平均相对误差均呈现出随着含沙量升高而降低的趋势, 含沙量在 5.00 ~ 20.00 g/L 时, 平均相对误差 $< 20.00\%$; 含沙量在 20.00 ~ 200.00 g/L 时, 平均相对误差 $< 5.00\%$ 。这表明称重法在含沙量为 5.00 ~ 200.00 g/L 时是适用的, 符合实践中的精度要求, 而且径流中的含沙量越高, 称重法的测量精度越高。

3.2 泥水样体积误差对测量结果的影响

在使用称重法的测量过程中, 泥水样体积有时无法准确控制, 为了探讨泥水样体积误差对测量结果的影响, 在已知泥沙含量的样品中用滴管加入质量和体积已知的水滴, 来模拟泥水样体积的误差, 表 5 为不同含沙量条件下由于泥水样体积测定的相对误差造成测量结果的相对误差。

从表 5 可以看出, 在径流含沙量为 5.00 g/L 的条件下, 当有 0.02% 的体积相对误差时, 含沙量的测量结果可产生 13.00% 的相对误差; 当有 0.20% 的体积相对误差时, 含沙量的测量结果可产生的相对误差高达 71.00%。在径流含沙量为 90.00 g/L 的条件下, 0.02% 的体积相对误差造成的测量结果的相对误差只有 1.00%, 可忽略不计, 当体积相对误差达到 0.20% 时, 含沙量的测量结果也只有 4.00%。说明泥水样体积测量的准确性对于泥沙含量测量结果的准确性有很大影响, 是否能在测量过程中保证泥水样体积的准确性, 将直接影响泥沙含量的测量精度。

表4 不同泥沙比重条件下称重法的平均相对误差

Tab. 4 Average relative error of the weighing method under different sediment specific gravities %

径流含沙量 Sediment concentration/ (g·L ⁻¹)	泥沙比重 Specific gravity of sediment			
	2.50	2.57	2.60	2.67
5.00	8.40	17.34	19.00	11.71
6.00	17.89	18.84	9.85	11.06
7.00	10.86	18.14	8.71	5.43
8.00	9.00	17.86	6.83	8.42
9.00	4.15	12.55	3.19	5.77
10.00	1.99	9.54	4.12	7.55
20.00	1.24	2.99	2.03	4.68
30.00	2.51	0.97	2.57	1.83
40.00	0.82	1.16	1.93	2.23
50.00	0.87	0.58	1.01	1.36
60.00	0.78	1.02	1.33	1.16
70.00	0.66	0.69	2.26	0.72
80.00	0.44	0.75	3.60	0.67
90.00	1.09	0.55	0.62	0.53
100.00	0.33	0.53	2.03	1.10
150.00	2.05	0.58	1.68	1.01
200.00	1.93	0.50	4.10	0.39

泥水样体积误差对含沙量测定结果的影响随径流中含沙量的增加而逐渐减弱。在实际的泥沙测验中, 泥水样的体积往往用量筒进行测量, 量筒口径较大, 水的表面张力会使其测量体积的误差一般也较大。因此, 采用称重法测量含沙量时, 不能用量筒测量泥水样的体积, 建议采用体积固定, 口径较小且不易变形的容量瓶。

进一步分析称重法的原理, 将径流含沙量的表达式变形, 得到:

$$S = \frac{dM}{(d-1)V} - \frac{d\rho_{\text{水}}}{d-1} \quad (6)$$

泥水样的质量(M)前的比例系数为 $\frac{d}{(d-1)V}$, 公式的截距为 $\frac{d\rho_{\text{水}}}{d-1}$, 如将土样比重 2.60 以及所使用的容量瓶体积 $V=0.25 \text{ L}$ 代入公式, 得到比例系数和截距分别为 6.5 和 -1.625。这也就意味着泥水样的质量每变化 1.00 g, 径流含沙量平均变化将高达 6.50 g/L。

影响泥水样质量测量的因素有两个, 电子天平的精度和泥水样的体积, 由于测量过程中所使用的电子天平的感量为 0.01 g 或者精度更高的天平, 相比于泥水样的体积, 天平的测量误差很小, 所以泥水样体积的准确测定对于测量结果的准确性有很大影响。

表5 不同含沙量条件下体积相对误差造成的测量相对误差

Tab. 5 Relative measurement error caused by relative error of volume under different sediment concentrations %

体积相对误差 Relative error of volume/%	含沙量 Sediment content/(g·L ⁻¹)													
	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00	90.00
0.02	13.00	11.00	9.00	8.00	7.00	6.00	3.00	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.04	19.00	16.00	14.00	12.00	11.00	10.00	5.00	3.00	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.06	26.00	22.00	19.00	16.00	14.00	13.00	6.00	4.00	3.00	3.00	2.00	2.00	2.00	1.00
0.08	32.00	27.00	23.00	20.00	18.00	16.00	8.00	5.00	4.00	3.00	3.00	2.00	2.00	2.00
0.10	39.00	33.00	28.00	24.00	22.00	19.00	10.00	7.00	5.00	4.00	3.00	3.00	2.00	2.00
0.12	45.00	38.00	32.00	28.00	25.00	23.00	11.00	8.00	6.00	5.00	4.00	3.00	3.00	3.00
0.14	52.00	43.00	37.00	33.00	29.00	26.00	13.00	9.00	7.00	5.00	4.00	4.00	3.00	3.00
0.16	58.00	49.00	42.00	37.00	33.00	29.00	15.00	10.00	7.00	6.00	5.00	4.00	4.00	3.00
0.18	65.00	54.00	46.00	41.00	36.00	32.00	16.00	11.00	8.00	7.00	5.00	5.00	4.00	4.00
0.20	71.00	60.00	51.00	45.00	40.00	36.00	18.00	12.00	9.00	7.00	6.00	5.00	4.00	4.00

3.3 水温对测量精度的影响

自然界的河水温度随着一年四季是不断变化的, 而水温的变化会影响到称重法测量中水的比重和容量瓶的体积, 为了探讨水温对测量精度的影响, 进行不同水温条件下含沙量的测定实验。表6为不同水温条件下模型计算的含沙量的 T 检验和 P 值统计结果, 除 0.026 和 0.048 这两个由实验误差造成

的异常值之外, P 值均大于 0.05, 说明在 5~20 °C 的范围内, 称重法的测量结果并无显著差异。

图1为不同水温条件下称重法测量产生的平均相对误差, 可以看出, 不同水温条件下均可满足测量精度的要求, 径流含沙量在 5.00~20.00 g/L 时, 平均相对误差 < 20.00%; 径流含沙量在 20.00~40.00 g/L 时, 平均相对误差 < 5.00%。

表 6 独立样本 T 检验 P 值统计结果

Tab. 6 Statistical results for independent sample T-test

水温组别 Group of water temperature/°C	含沙量 Sediment concentration/(g·L⁻¹)				
	5.00	10.00	20.00	30.00	40.00
5~10	0.486	0.390	0.078	0.320	0.935
5~15	1.000	0.125	0.160	0.916	0.637
5~20	0.445	0.216	0.258	0.026	0.464
10~15	0.719	0.185	0.931	0.315	0.481
10~20	0.241	0.368	0.794	0.437	0.168
15~20	0.609	0.747	0.762	0.048	0.649

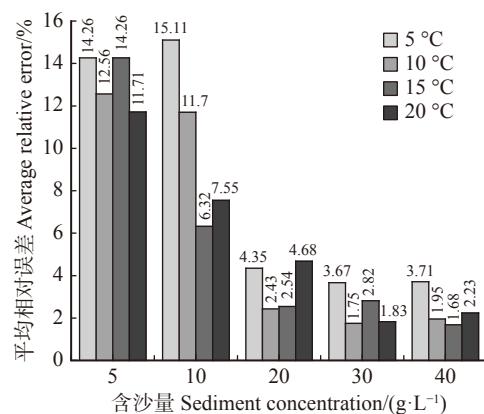


图 1 不同水温条件下称重法的平均相对误差

Fig. 1 Average relative error of the weighing method under different water temperatures

4 讨 论

称重法的计算模型中, 泥沙比重是一个关键参数。径流中泥沙的比重基本处于 2.50~2.70 之间, 变化范围相对较小, 因此在含沙量测验中能否用平均泥沙比重进行计算, 以简化泥沙测验过程, 为此选用平均比重 2.60, 用前文的实验数据计算理论含沙量, 分析得出理论含沙量与真实含沙量的关系如表 7 所示。从表 7 可见理论含沙量与真实含沙量之间存在显著的线性关系, r^2 高达 0.99 以上, 回归系数均接近于 1, 这说明用平均泥沙比重计算出的含沙量与真实含沙量线性相关, 可以直接用平均比重进行计算。

表 7 用平均比重 2.60 计算的含沙量与真实值的相关关系

Tab. 7 Relationship between true data and measurements calculated using an average specific gravity of 2.60

泥沙比重 Sediment specific gravity (d)	关系式 Relationship formula	相关系数 Correlation coefficient (r^2)
2.50	$y_y = 0.9589x_x + 0.8208$	0.9993
2.57	$y_y = 0.9833x_x + 0.7906$	0.9998
2.67	$y_y = 1.0185x_x + 0.5387$	0.9999

注: x_x 为真实的径流含沙量; y_y 为用比重 2.60 计算的径流含沙量。Notes: x_x represents true sediment concentration; y_y represents sediment concentration calculated using a specific gravity of 2.60.

用比重 2.60 计算出的含沙量的平均相对误差如表 8 所示, 从表 8 可以看出径流含沙量在 5.00~20.00 g/L 时, 平均相对误差 < 20.00%; 径流含沙量在 20.00~200.00 g/L 时, 平均相对误差 < 5.00%。这表明用自然界径流泥沙平均比重进行计算的结果能够满足水土保持监测的需求, 称重法测量径流含沙量可以在自然界中得到广泛应用, 进一步提高了称重法的实用性和便捷性。

称重法操作简单, 省时省力, 与传统的过滤烘干法相比精度如何?为此选取比重为 2.57 的土样, 用 20 °C 的去离子水在体积为 250 mL 的容量瓶中配置成含沙量为 5.00、10.00、20.00、30.00、40.00、50.00 g/L 的泥水样, 将装有泥水样的容量瓶用感量为 0.01 g 的电子天平进行称质量, 之后再将容量瓶

中的泥水样进行过滤烘干, 分别用称重法的计算模型和烘干法的计算公式计算含沙量, 每个含沙量重复 3 次, 以此对比称重法和烘干法测量精度。

图 2 为不同含沙量条件下过滤法与称重法的平均相对误差对比, 据图 2 所示, 在含沙量较小的情况下, 过滤法所测得的含沙量的平均相对误差要明显低于称重法, 说明当含沙量较小时, 传统过滤法在精度方面还是要优于称重法。但当含沙量增大到 30.00 g/L 时, 两者的平均相对误差已然很接近。传统过滤法在操作过程中还需要烘箱、漏斗、滤纸等仪器, 过滤和烘干所需的时间也往往需要数十小时甚至几天, 操作的繁琐程度以及对于操作人员的技术要求远远高于称重法。

表 8 用平均比重 2.60 计算的含沙量的平均相对误差

Tab. 8 Average relative error of measurements calculated using an average specific gravity of 2.60 %

含沙量 Sediment concentration/ (g·L ⁻¹)	原比重 Original specific gravity of sediment		
	2.50	2.57	2.67
5.00	7.21	16.48	13.21
6.00	14.94	17.97	12.88
7.00	8.09	17.28	7.16
8.00	6.78	17.00	9.86
9.00	3.91	11.73	7.25
10.00	2.06	8.74	8.98
20.00	2.66	2.67	6.49
30.00	0.78	0.87	3.50
40.00	2.35	1.29	3.64
50.00	1.78	0.77	3.02
60.00	1.83	1.46	2.72
70.00	1.95	0.69	1.83
80.00	2.39	1.47	2.30
90.00	3.56	1.08	2.17
100.00	2.30	1.03	2.75
150.00	3.87	0.65	2.66
200.00	4.01	1.07	1.97

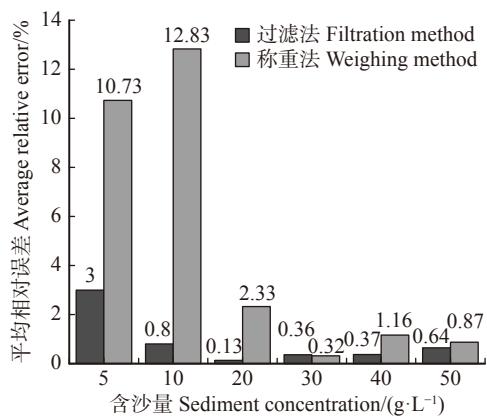


图 2 不同含沙量条件下过滤法与称重法的平均相对误差对比

Fig. 2 Comparison between the average relative error of the filtration method and that of the weighing method under different sediment concentrations

5 结论

(1) 利用称重法测量径流含沙量可以满足水土保持监测的精度要求, 尤其适用于高含沙量水流。径流含沙量在 5.00~20.00 g/L 时, 平均相对误差 < 20.00%; 径流含沙量在 20.00~200.00 g/L 时, 平均相对误差 < 5.00%。称重法相比于传统的过滤法操作更为简单, 易于掌握。当径流含沙量大于 30.00 g/L 时, 称重法的测量精度与过滤法相差无几。

(2) 泥沙比重对称重法的测量结果的影响不显著, 可以直接用监测区域表层土壤的平均比重计算含沙量, 且由于自然界泥沙比重变化范围很小, 称重法测量径流含沙量可以在自然界中得到广泛应用。

(3) 泥水样体积的准确性对称重法测量结果的影响很大, 微小的体积误差将会造成很大的测量误差, 但随着含沙量的增大, 体积误差的影响将会显著减小。称重法测定含沙量时, 必须选用瓶口面积较小、体积固定的容量瓶作为测定容器, 用口径较大的量筒测量泥水样体积, 将会造成很大的测量误差。

(4) 温度对称重法测定径流含沙量的精度影响甚微, 称重法可作为常年监测河水中泥沙含量的有效方法。相比于其他受温度影响较大的测量方法而言, 称重法在这方面适用性较为广泛。

致谢 在论文撰写阶段, 得到了北京林业大学水土保持学院张守红副教授和贾昕老师的帮助和支持, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 邵学军, 王兴奎. 河流动力学概论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- Shao X J, Wang X K. Introduction to river mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [2] 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.
- Gao P L, Lei T W, Zhao J, et al. Evaluating the measuring methods to sediment concentration in the runoff of slope erosion [J]. Journal of Sediment Research, 2004(5): 28~33.
- [3] 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.
- Lei T W, Zhang Y Q, Zhao J, et al. Study on near infrared reflectance sensor for high sediment concentration measurement [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(7): 51~57.
- [4] 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.
- Li D G, Luo Q, Chen L H, et al. A comparative study of online monitoring technology on river sediment content [J]. Yellow River, 2014, 36(10): 16~19.
- [5] 王智进, 宋海松. 河流泥沙测验仪器的研究 [J]. 水文, 2005, 25(3): 38~41.
- Wang Z J, Song H S. A study of monitoring machine on river sediment [J]. Hydrology, 2005, 25(3): 38~41.
- [6] 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.
- Wang Z J, Song H S, Liu W. The principle and application of vibrating monitoring machine on suspensid sediment content [J]. Yellow River, 2004, 26(4): 19~20.
- [7] 张叔英, 钱炳兴. 高浓度悬浮泥沙的声学观测 [J]. 海洋学报 (中文版), 2003, 25(6): 54~60.
- Zhang S Y, Qian B X. Acoustic observation of thick suspended-

- sediments[J]. *Acta Oceanologica Sinica (Chinses Edition)*, 2003, 25(6): 54–60.
- [8] 赵昕, 田岳明, 徐汉光, 等. 激光类测沙仪在长江泥沙测验中的应用[J]. *水文*, 2011, 31(增刊1): 117–120.
Zhao X, Tian Y M, Xu H G, et al. Application of laser sediment measuring equipment in Yangtze River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(Suppl.1): 117–120.
- [9] 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 T W, Zhao J, Yuan J P, 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*, 2002, 18(1): 18–21.
- [10] 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.
Li X Y, Lei T W, Wang W. A study of capacitance sensor on measuring sediment content[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 429–435.
- [11] 沈逸, 李小昱, 雷廷武, 等. 电容式水流泥沙含量传感器数据融合的研究[J]. *华中农业大学学报*, 2004, 23(4): 459–462.
Shen Y, Li X Y, Lei T W, et al. Data fusion of capacitance sensor of sediment concentration in water current[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2004, 23(4): 459–462.
- [12] 刘明堂, 张成才, 田壮壮, 等. 基于RBF神经网络的黄河含沙量测量数据融合研究[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(1): 126–130.
Liu M T, Zhang C C, Tian Z Z, et al. RBF neural networks based-study on data fusion for measurement of sediment concentration of Yellow River[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, 46(1): 126–130.
- [13] 薛元忠, 何青, 王元叶. OBS浊度计测量泥沙浓度的方法与实践研究[J]. *泥沙研究*, 2004(4): 56–60.
Xue Y Z, He Q, Wang Y Y. The method and application of OBS in the measurement of sediment concentration[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(4): 56–60.
- [14] 邓才, 竺红阳. OBS-3A浊度仪在含沙量测验中的应用分析[J]. *水利水电快报*, 2016, 37(7): 4–7.
Deng C, Zhu H Y. Application analysis of OBS-3A in sediment concentration test[J]. *Express Water Resources*, 2016, 37(7): 4–7.
- [15] 程冬兵, 张平仓, 张长伟, 等. 泥沙含量简易测算方法的探讨[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 193–197.
Cheng D B, Zhang P C, Zhang C W, et al. Study on simple method of measuring and calculating sediment content[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 193–197.
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
Huang C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [17] 熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001.
Xiong S G. Basic soil science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001.

(责任编辑 范娟
责任编委 杨晓晖)