

# 量子点光谱悬移质泥沙监测设备在 水土保持监测站的应用研究

孙常库<sup>1</sup>, 宗小天<sup>2,3</sup>, 安乐平<sup>4</sup>, 李雷<sup>4</sup>, 戴宁<sup>2</sup>, 丛佩娟<sup>2</sup>, 周田硕<sup>1</sup>

[1.芯视界(北京)科技有限公司, 北京 100083; 2.水利部水土保持监测中心, 北京 100053;

3.江西省水利科学院, 江西 南昌 330029; 4.黄河水土保持天水治理监督局, 甘肃 天水 741000]

**摘要:** [目的] 通过实验室模拟和野外的比测试验, 优化量子点光谱悬移质泥沙监测设备在水土保持监测中的计算模型, 分析误差来源, 为设备进一步改进和推广应用奠定基础。[方法] 在实验室搭建了量子点含沙量在线监测试验系统, 对不同含沙量样本进行重复性试验, 并将实验室收集数据分成训练集和测试集, 通过精度分析比选了计算模型; 在野外试验中选择天水水土保持监测站罗玉沟断面安装了设备, 以人工置换法测定的含沙量作为真值, 对2023年8—9月发生的8次产流产沙过程进行了同步比测分析。[结果] 试验系统中设计含沙量与人工实测含沙量之间的相对误差为-12%~-28%, 人工实测重复性试验的相对标准差为0.1%~5.0%之间; 拟合指数回归模型(模型1)和二次多项式回归模型(模型2)在训练集的决定系数分别为0.966, 0.996, 模型2在测试集4项精度评价指标中3项占优, 其中决定系数为0.991; 野外比测数据的决定系数为0.939, 平均绝对误差为9.1 g/L。[结论] 量子点光谱悬移质泥沙监测设备具有较好的稳定性和可靠性。未来可通过布设方式的优化、硬件量程的拓展和计算模型的优化进一步提升应用效果。

**关键词:** 悬移质泥沙监测; 量子点光谱; 黄河流域; 水土保持监测站; 试验系统

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)02-0151-08

中图分类号: S157, P332.5

**文献参数:** 孙常库, 宗小天, 安乐平, 等. 量子点光谱悬移质泥沙监测设备在水土保持监测站的应用研究[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 151-158. Sun Changku, Zong Xiaotian, An Leping, et al. Application study of quantum dot spectral sensing suspended sediment monitoring equipment at soil and water conservation monitoring station [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 151-158. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.016; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.016.

## Application study of quantum dot spectral sensing suspended sediment monitoring equipment at soil and water conservation monitoring station

Sun Changku<sup>1</sup>, Zong Xiaotian<sup>2,3</sup>, An Leping<sup>4</sup>,

Li Lei<sup>4</sup>, Dai Ning<sup>2</sup>, Cong Peijuan<sup>2</sup>, Zhou Tianshuo<sup>1</sup>

[1.QuantaEye (Beijing) Technologies Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2.Monitoring

Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053,

China; 3.Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 4.Tianshui

Governance and Supervision Bureau of Soil and Water Conservation of the Yellow River, Tianshui, Gansu 741000, China]

**Abstract:** [Objective] Through a series of laboratory and field experiments, a computational model of quantum dot spectral sensing suspended sediment monitoring equipment was optimized, and the sources of error were analyzed to lay the foundation for further improvement and application of the equipment. [Methods] An in situ suspended sediment concentration monitoring system using quantum dots was constructed in a laboratory. Reproducibility tests were performed on samples with different sediment concentrations. Laboratory data were divided into training and testing sets, and accuracy analysis was performed to select the

收稿日期: 2024-09-30

修回日期: 2024-12-30

采用日期: 2024-12-30

资助项目: 水利部重大科技项目“量子点光谱法自动测水沙设备研发及在黄河流域水土保持监测应用研究”(SKS-2022090)

第一作者: 孙常库(1983—), 男(汉族), 山东省威海市人, 博士, 高级工程师, 主要从事光谱传感技术研发及应用研究。Email: sun@quantaeye.com.

通信作者: 宗小天(1993—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士, 主要从事水土保持监测研究。Email: zongxiaotian666@163.com.

best computational model. For the field experiment, the equipment was installed at the Luoyu Gou site at the Tianshui Soil and Water Conservation Monitoring Station. The sediment concentration, measured using the manual replacement method, served as the true value. A comparative analysis was conducted for eight runoff and sediment transport events that occurred between August and September 2023. [Results] The relative errors between the designed and manually measured sediment concentrations ranged from  $-12\%$  to  $-28\%$ . The relative standard deviations of the repeatability tests for manually measured sediment concentrations ranged from  $0.1\%$  to  $5.0\%$ . The fitted index regression model (model 1) and quadratic polynomial regression model (model 2) had determination coefficients of 0.966 and 0.996, respectively, for the training set. For the testing set, model 2 outperformed model 1 in three of the four accuracy evaluation metrics with a determination coefficient of 0.991. The determination coefficient for the field comparison data was 0.939 with an average absolute error of 9.1 g/L. [Conclusion] The quantum dot spectral suspended sediment monitoring equipment demonstrated good stability and reliability. Future improvements in application effectiveness can be achieved by optimizing the installation method, expanding the hardware range, and optimizing the computational model.

**Keywords: suspended sediment monitoring; quantum dot spectroscopy; Yellow River basin; soil and water conservation monitoring station, experimental system**

黄河是中国第二大河,是世界上含沙量最高的河流。开展黄河流域水土保持监测有助于了解产沙机理,掌握泥沙时空变化规律,从而为黄河治理工作提供科学依据。21 世纪初开始,黄河水利委会和省、市、县(区)监测机构相继在黄河流域布设了 215 个水土保持监测站<sup>[1]</sup>,监测雨量、径流、泥沙、沟道重力侵蚀等,其中悬移质含沙量是水土保持监测的重要因素之一,国内外众多学者不断推动着悬移质泥沙监测技术的发展,积极探索各种实现悬移质泥沙含量观测的方法及新型设备。目前悬移质泥沙含量监测主要包括人工测量法<sup>[2]</sup>、振动法<sup>[3-4]</sup>、 $\gamma$  射线测量法<sup>[5-6]</sup>、超声波测量法<sup>[7]</sup>、电容法<sup>[8]</sup>、遥感法等<sup>[9]</sup>。水土保持监测技术规范(SL/T 277—2024)中的人工测量法是目前水文和水土保持监测的标准方法,主要采用烘干法、过滤法和置换法<sup>[10]</sup>对悬移质泥沙含量进行预处理、分析计算,但该方法不仅耗费大量人力、物力,且测量周期长,无法实现实时、高频、在线观测河流悬移质含沙量的动态变化。振动测量法由于零点漂移严重,测量结果稳定性较差<sup>[11]</sup>。 $\gamma$  射线测量法虽然精度高、适用范围广且适应性强,但由于<sup>137</sup>Cs 存在放射污染问题,对人体伤害较大,目前仍无法得到大规模推广<sup>[12]</sup>。超声波法测量范围较小,仅适合于含沙量较低的水体的测量<sup>[13]</sup>。电容法成本低、响应快<sup>[8]</sup>,但电容测量过程中容易受到温度影响导致输出值发生改变,电容传感器输出与温度等环境因素具有非线性相关性,使得电容法的适用条件受到限制<sup>[14]</sup>。卫星遥感技术通过光学和微波传感器对水体泥沙进行大面积的监测,该方法受到卫星照片的拍摄间隔、天气条件、水体深度等因素限制,多用于宏观层面的趋势性

分析评估,难以做到断面级的高精度、实时在线监测,不能实现坡面、沟道定点高精度测量<sup>[13]</sup>。可见上述方法存在效率低、危害大、设备受限于条件等问题,难以在野外实行长期动态测量。

基于以上悬移质泥沙自动监测的问题,国内外众多学者相继提出了基于光学法的悬移质泥沙测量技术,如 C. G. Campbell 等<sup>[15]</sup>设计了连续测量水流悬移质含沙量的光纤透射率仪,试验测试表明在低含沙量和高含沙量的水体中都有较高的性能和测值精确性;曾为军等<sup>[16]</sup>设计了基于计时和光照法的泥沙监测系统,可实现径流量及泥沙含量同步在线观测。光学测量方法是利用光线经过不同悬移质泥沙含量的水体被吸收和散射,其强度衰减程度不同的原理来测得含沙量<sup>[17]</sup>。但悬移质泥沙并不是影响水体浑浊度的唯一因素,除悬移质外,水体浑浊度还与藻类、气泡、有机物、其他漂浮碎片甚至水体变色等因素有关,泥沙监测设备无法区分悬移质的成分,导致测量值往往和真实值存在差异<sup>[18-19]</sup>。

本研究针对目前水土保持监测站悬移质含沙量自动监测设备误差大,尚无法推广应用的实际问题,将自主研发的量子点光谱悬移质含沙量监测设备,通过实验室和人工监测的同步对比,建模分析设备的误差,并在水土保持监测站罗玉沟断面的泥沙监测开展比测和分析,通过系统搭建、含沙量计算模型建立及误差分析、野外监测站比测等方面进行试验性研究,为新技术的多场景推广应用奠定理论基础。

## 1 测量原理及算法

量子点光谱传感技术<sup>[20]</sup>,利用不同量子点可以

吸收不同波长光的特性,使用多种不同量子点材料制成的矩阵薄膜代替传统光谱仪的分光器件,利用多路复用的光谱检测原理,实现芯片级的光谱传感器,体积则可以加工到几毫米见方甚至更小。利用量子点光谱传感技术的光谱仪灵敏度、检出限、信噪比以及光谱的获取速度都与现有的微型光谱仪相当,一体化的结构保证了数据的稳定性和可靠性,避免了温度变化、机械振动、撞击等对光学系统的影响,有效地解决了传统光谱仪无法突破的技术瓶颈和不足。

量子点光谱悬移质泥沙监测设备(以下简称“监测设备”)采用量子点光谱传感技术,通过采集经过悬浮泥沙水样的光谱信息,建立量子点光谱数据与泥沙含量数据的映射关系模型,从而可以不用称重获取目标水域的泥沙信息,针对含沙量低和含沙量高的水体泥沙监测采用的量子点光谱算法有所差异。

对于低含沙量的场景,光谱推算含沙量的原理来源于比尔—朗伯定律(Beer-Lambert law)。公式为:

$$A = -\lg \frac{I_t}{I_0} = \lg \frac{1}{I_0} = K \cdot l \cdot c \quad (1)$$

式中: $A$  为吸光度; $I_t$  为透射光的强度; $I_0$  为入射光的强度; $K$  为系数(吸收系数); $l$  为光在介质中通过的路程; $c$  吸光物质的浓度。

对于高含沙量的场景尤其 30 g/L 以上时,受到多级散射的影响,吸光度不再与含沙量成正比,比尔—朗伯定律不再适用。本文将原始光谱信息经过特征构造和特征筛选转化成与含沙量标签相关性更高的特征参数,然后由这些特征参数与对应的含沙量标签联合训练出二者的映射模型。操作流程如下。

(1) 原始光谱信号经过降噪后通过高阶差分、不同通道组合相除等方法以提升特征敏感度或消除潜在的本底信号。

(2) 计算各特征和含沙量的相关系数,识别出对含沙量变化解释性强的特征。以相关度最高的特征为出发点,通过增—法筛选敏感度高且正交性好的特征集。相关系数计算公式为:

$$r_k = \frac{\sum (X_k - \bar{X}_k)(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_k - \bar{X}_k)^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: $r_k$  为第  $k$  个特征的相关系数; $X_k, \bar{X}_k$  分别为第  $k$  个特征及其均值; $Y, \bar{Y}$  分别为含沙量及其均值。

(3) 对于筛选完成的特征,搭建两种模型框架。其中,模型框架 1 采用拟合指数回归模型;模型框架 2 采用二次多项式回归模型。

(4) 将特征—标签联合信号划分成训练集、测试集,在训练集上用两种模型框架确定各模型的最佳超

参数,最后在测试集上比较不同模型的精度确定最终模型。

## 2 研究材料与方法

### 2.1 实验室模拟试验

在实验室搭建了监测试验系统(以下简称“试验系统”),由电磁搅拌装置、监测设备、泥沙水样容器 3 部分组成。其中电磁搅拌装置和搅拌子用于制备不同含沙量的水样;监测设备用于实时获取水样含沙量数据,探头处配备有光学镜头清洁装置,用于降低泥沙附着对于光学监测结果的干扰。试验所用泥沙样本取自天水水土保持监测站罗玉沟小流域监测断面附近沟道内。

人工实测含沙量测试系统试验过程如下:①称取不同重量的泥沙将其加入到装有纯水的搅拌器中,持续搅拌 5 min;②试验过程中持续搅拌,在监测设备附近距离水面深度 10 cm 处,每间隔 3 min 取一个水样,共取 3 个平行样本;③采用烘干称重法获得人工实测含沙量数据作为数据建模及分析的真值。

由于实验室模拟试验会受到泥沙样本含水率、电磁搅拌装置搅拌能力、悬浮液分散度等多方面因素的影响,为了保证试验数据准确,采用人工实测含沙量与设计含沙量进行重复性和相关性分析评估试验系统的可靠性。评估试验系统可靠后再次配置不同梯度含沙量水样,以人工实测含沙量作为真值进行悬移质泥沙含量建模,通过比较监测设备与人工实测含沙量的试验结果分析含沙量模型的精度。

### 2.2 设备野外布设安装及现场试验

野外试验地布设在罗玉沟小流域水土保持监测断面,监测产流时的含量沙。该监测站位于甘肃省天水市北郊,地处东经 105°30′—105°45′,北纬 34°34′—34°40′,是渭河支流藉河左岸的一级支沟,属黄土丘陵沟壑区第三副区。流域面积 72.79 km<sup>2</sup>,年平均气温 11 ℃,流域多年平均降水量 553.5 mm,其中 7—9 月这 3 个月的降水量占年平均降水量的 47.1%,占汛期的 57.6%。年径流量 1.99 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,年输沙量 3.13 × 10<sup>5</sup> t,汛期(5—10 月)输沙量 2.92 × 10<sup>5</sup> t,占年径流量的 95.1%。

监测设备安装布设如图 1 所示,采用吊索的形式进行安装固定,通讯和电池模组固定在测站测桥处。光谱采集探头距离设备底部的距离为 10 cm,因此满足监测设备采集数据要求的最小水深为 10 cm。断面产流时启动监测设备,监测频率为每 10 min 进行 1 次含沙量数据采集,选用人工取样时间同步的监测设备采集的数值用于数据分析。

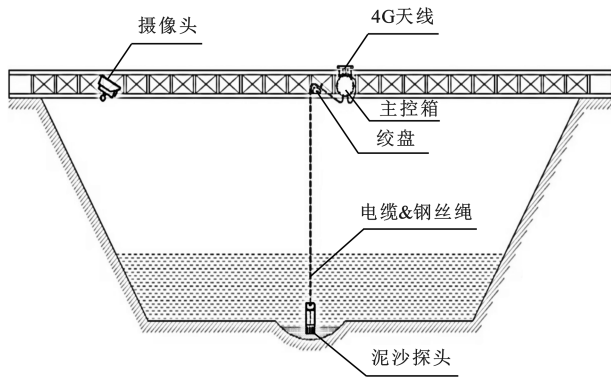


图 1 现场安装布设方案及现场安装调试场景



Fig.1 Site installation layout scheme and installation condition

## 3 结果与分析

### 3.1 试验系统可靠性评估

采用设计含沙量(单位为  $\text{g/L}$ )分别为 30, 50, 70, 100, 120, 150, 180, 200, 220, 250, 300 共 11 组梯度样本进行试验系统评估,在测试过程中每个样本取样 3 次以降低水样本本身不稳定导致的随机误差。通过烘干称重法获得人工实测含沙量数据,将设计含沙量与人工实测含沙量的比较如图 2 所示,其中相对误差在  $-12\% \sim -28\%$  之间,均为负偏差,可以看出人工实测含沙量均低于设计含沙量的值,这是泥沙的含水性、搅拌系统的能力所导致的系统误差。

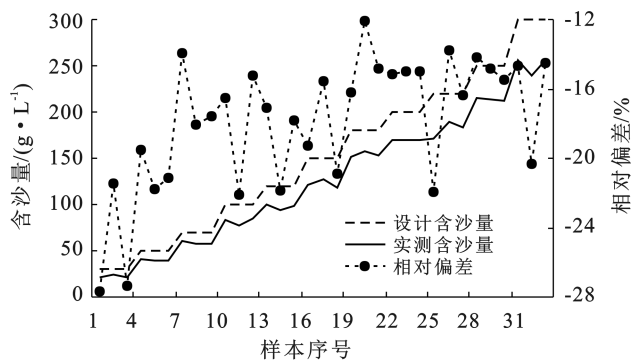


图 2 人工实测含沙量与设计含沙量对比

Fig.2 Comparison of artificial measured sand content and design sand content

试验系统的可靠性主要通过实测含沙量的重复性分析,以及设计含沙量与人工实测含沙量的相关性分析进行评估(详见图 3)。通过不同梯度含沙量下 3 次独立取样的人工实测含沙量计算相对标准差,进行平行采样的重复性分析(如图 3 中虚线所示),人工实测平行样的相对标准差在  $0.1\%$  到  $5.0\%$  之间,平均值为  $2.9\%$ ,平行样的取样间隔为 3 min,标准差较小,说明此过程中试验系统搅拌的泥沙水样已流态稳定,取

样深度的悬移质泥沙较为均匀,人工实测含沙量偏差小、重复性好。相关性评估中对 3 次人工实测含沙量取平均值,与设计含沙量做线性函数拟合(如图 3 中实线所示),决定系数  $R^2$  达到 0.999,结果表明设计与人工实测含沙量具有显著的线性相关性,相关系数为 0.837,也验证了在整个容器中随着设计含沙量的增加固定深度的水样含沙量都等比例增加,试验系统在整个试验含沙量区间范围内具备良好的搅拌分散能力,固定深度取样的人工实测含沙量具备不同梯度的数据代表性。

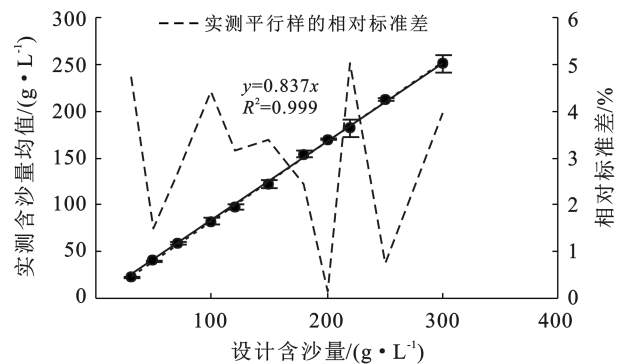


图 3 实测含沙量平均值与设计含沙量线性相关性  
及实测平行样相对标准差

Fig.3 Linear correlation between measured average sand content and design sand content, and relative standard deviation of measured parallel samples

综上所述,试验系统具备良好的重复性和线性相关性,证明试验系统稳定数据可靠,同时人工实测含沙量重复性好,代表性强,且符合行业应用标准,能够满足含沙量建模精度要求,因此后续采用人工实测含沙量作为真值数据进行建模和数据分析。

### 3.2 含沙量模型搭建及精度分析

采用上述试验系统,通过 10 组人工实测含沙量分别为 9, 17, 43, 51, 68, 85, 102, 128, 153, 170  $\text{g/L}$  开

展模型搭建及精度分析。抽取其中 9, 17, 85, 102, 153, 170 共 6 组训练集构建模型, 其余 4 组作为测试集进行模型精度分析。

本文使用训练集数据构建含沙量模型, 对原有特征进行幂变换、对数变换等特征转换, 将结果向量和量子点光谱特征信号放置在一起, 根据相关系数和增一法进行特征筛选, 训练含沙量  $y$  与最终筛选的特征  $x$  的监督学习模型, 基于最小化代价函数的回归方程求解, 得到含沙量和光谱特征信号的拟合指数回归模型(模型 1)和二次多项式回归模型(模型 2)如图 4 所示, 在训练集上模型 1 的决定系数  $R^2$  为 0.966, 模型 2 的决定系数  $R^2$  为 0.996, 在训练集上两个模型的回归拟合效果相近。

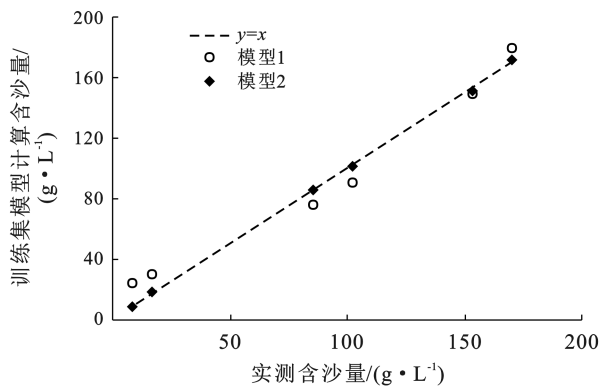


图 4 两种含沙量模型训练集拟合程度对比

Fig.4 Comparison of fitting degree for training sets of two sand content models

将上述训练的含沙量模型, 在测试集上进行验证, 对比两种含沙量模型验证集精度。两种模型计算的含沙量与测试集对比散点图见图 5。模型精度用决定系数( $R^2$ )、相对均方根误差(RRMSE)、随机不确定度( $S_e$ )和系统误差( $\delta\bar{Y}$ )进行评价, 计算公式分别为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{Ai} - Y_{Gi})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{Gi} - \bar{Y}_{Gi})^2} \quad (3)$$

$$RRMSE = \frac{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{Ai} - Y_{Gi})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{Y}_{Gi}} \quad (4)$$

$$S_e = 2 \left[ \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Y_{Ai} - Y_{Gi}}{Y_{Gi}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\delta\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Y_{Ai} - Y_{Gi}}{Y_{Gi}} \quad (6)$$

式中:  $n$  为样本量;  $Y_{Ai}$  为样本  $i$  的计算值;  $Y_{Gi}$  为样本  $i$  的实测值;  $\bar{Y}_{Gi}$  为实测值的平均值。

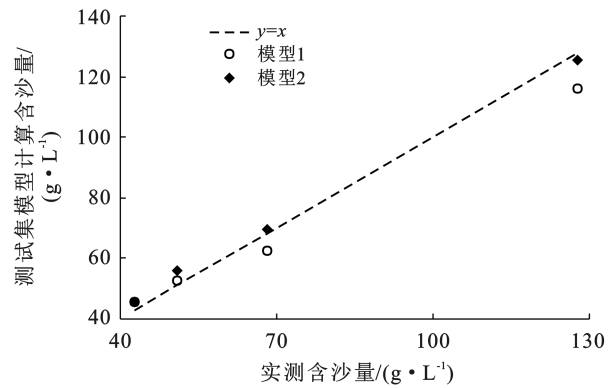


图 5 两种含沙量模型测试集的拟合程度对比

Fig.5 Comparison of fitting degree between two sand content models on test datasets

采用测试集数据对光谱特征回归方程进行精度分析, 结果如表 1 所示。指数回归模型(模型 1)的决定系数为 0.959, 二次多项式回归模型(模型 2)的决定系数为 0.991, 模型 2 的决定系数更高; 模型 1 计算结果的相对均方根误差为 9.35%, 模型 2 的计算结果的相对均方根误差为 4.48%, 模型 2 计算结果的偏差更小; 模型 1 计算结果的随机不确定度为 14.11%, 模型 2 计算结果的随机不确定度为 9.15%, 模型 2 的随机不确定度更低; 模型 1 的系统误差为 -1.95%, 模型 2 的系统误差为 4.26%, 模型 1 的系统误差更低。由于模型 2 在四项精度评价指标中有三项最优, 因此选择模型 2 作为含沙量计算模型。

表 1 两种含沙量模型的精度分析结果一览表

Table 1 Summary table of accuracy analysis results for two san content models

拟合方程	决定系数 ( $R^2$ )	相对均方根误差/%	随机不确定度/%	系统误差/%
模型 1	0.959	9.35	14.11	-1.95
模型 2	0.991	4.48	9.15	4.26

### 3.3 天水水土保持站罗玉沟小流域控制断面含沙量比测分析

2023 年 8 月, 在天水水土保持监测站的罗玉沟断面完成监测设备安装, 根据产流统计天水站 2023 年 8—9 月发生 8 次产流产沙过程, 对 2023 年 8 月 20 日至 9 月 30 日的测站人工置换法和监测设备测定的含沙量进行了对比, 具体结果如表 2 所示。

共有人工置换法对应数据的结果 24 组, 将人工置换法与监测设备测定的含沙量相关关系如图 6, 图 7 所示。其中比测序号 1—11, 12—18, 19—24 分别来自 3 场产流过程; 24 组样本人工置换法与监测设备测定的含沙量比测结果如图 6 所示, 将两组数据进行回归分析, 相关系数为 0.95, 说明比测结果整体数据一致性关系较明显; 监测设备与人工置换法测定含

沙量线性关系的决定系数为 0.939, 两组数据存在强线性正相关; 其中人工置换法量值在 315.532 g/L

时, 监测设备读数为 330.516 g/L, 说明了监测设备可实现在高含沙量场景下自动监测。

表 2 2023 年罗玉沟汛期含沙量对比测试结果

Table 2 Field tested sand content for 2023 flood season at Luoyugou Station

序号	时间	水位/ cm	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	含沙量/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )		绝对误差/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	相对误差/ %
				人工置换法量值	监测设备		
1	20230822 21:00	28	2.319 0	111.849	114.384	2.5	2.27
2	20230822 21:10	29	3.281 4	88.806	107.686	18.9	21.26
3	20230822 21:30	82	21.453 9	295.270	300.712	5.4	1.84
4	20230822 21:45	72	19.096 7	315.532	330.516	15.0	4.75
5	20230822 22:00	63	9.452 5	217.621	238.654	21.0	9.66
6	20230822 22:30	64	7.858 6	211.674	201.166	-10.5	-4.96
7	20230822 23:00	45	4.232 7	177.962	138.708	-39.3	-22.06
8	20230823 00:00	37	2.889 5	113.825	79.592	-34.2	-30.08
9	20230823 00:30	25	1.328 1	60.220	73.074	12.9	21.35
10	20230823 01:00	22	0.971 6	59.243	101.643	42.4	71.57
11	20230823 02:00	17	0.651 1	41.114	74.681	33.6	81.65
12	20230826 00:00	12	0.354 8	28.444	61.825	33.4	117.36
13	20230826 02:00	11	0.212 1	20.628	57.624	37.0	179.35
14	20230826 08:00	11	0.247 6	8.665	32.652	24.0	276.82
15	20230826 09:00	13	0.340 3	8.301	33.483	25.2	303.37
16	20230826 10:00	14	0.423 3	9.390	11.369	2.0	21.08
17	20230826 11:00	12	0.284 4	5.578	5.810	0.2	4.16
18	20230826 12:00	10	0.219 8	4.851	27.599	22.7	468.91
19	20230919 08:00	31	1.999 0	54.491	45.875	-8.6	-15.81
20	20230919 09:00	30	1.862 3	90.082	72.298	-17.8	-19.74
21	20230919 10:30	25	1.275 3	69.572	106.100	36.5	52.50
22	20230919 12:00	21	0.862 9	71.899	73.221	1.3	1.84
23	20230920 23:00	10	0.196 9	7.062	4.394	-2.7	-37.78
24	20230928 12:00	10	0.193 1	7.764	4.383	-3.4	-43.54
平均	—	—	—	—	—	9.1	—

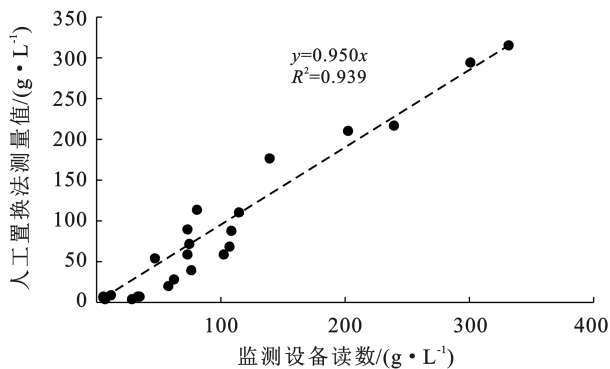


图 6 监测设备与人工置换法比测悬移质泥沙结果相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between quantum dot suspended sediment in-situ monitoring equipment and manual substitution method

在罗玉沟监测断面比测过程中, 监测设备与人工置换法对比平均绝对误差为 9.1 g/L。在 24 组数据中最大绝对误差为 42.4 g/L, 发生在第 10 次比测上

(如图 7 所示)。其比测数据显示, 在第一场产流过程中的洪水退水过程中监测的含沙量整体低于人工置换法; 第二场产流过程中的洪水退水过程中在监测设备监测的含沙量整体高于人工置换法; 第三场产流过程中整体误差较小。在洪水退水过程中存在明显的设备监测误差, 考虑可能在产流初期涨水过程中, 断面过水流速较大, 含沙量分布较均匀, 仪器读数与人工置换法比测较接近, 而在退水过程中, 随着流速的降低, 断面含沙量分布差异变大, 仪器读数与人工置换法比测误差增大。

监测设备也于 2023 年 8 月在四川省夹江水文站完成了主汛期的对比测定<sup>[21]</sup>, 设备的安装位置始终处于水下淹没状态, 断面河流流速相对波动小, 在 21 组比测中, 人工实测的含沙量在 0.04 g/L 到 1.68 g/L 间, 含沙量显著低于罗玉沟断面; 夹江水文站比测中人工法和设备读数的平均绝对误差是 0.02 g/L, 平均

相对误差是 9.96%，决定系数为 0.996，也明显优于罗玉沟断面的比测结果，说明相对高的含沙量，且相对流速不稳定的水土保持监测对设备的可靠性提出了更高的要求。

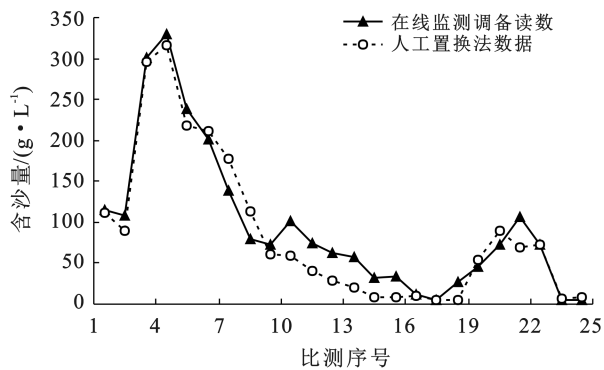


图 7 量子点悬移质泥沙在线监测设备与人工置换法比测过程对比

Fig.7 Comparison of process between quantum dot suspended sediment in-situ monitoring equipment and manual substitution method

综上所述,通过对仪器设备安装位置、测验河段情况以及和水文站监测数据对比,罗玉沟监测断面设备产生误差的原因如下:①监测设备探头采用缆绳悬吊入水方式安装,在高流速产流过程中存在设备探头侧漂,影响设备精度。②是水土保持监测断面含沙量变化迅速,设备监测的含沙量是瞬时值,而人工采样是约数秒到数十秒的过程值,在含沙量快速变化时可能产生偏差。③水土保持监测断面洪水的含沙量空间分布差异显著,人工取样空间上的细小差异都会对比测结果产生影响。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

在实验室的模拟场景中和天水水土保持监测站中,量子点光谱悬移质泥沙监测设备与人工实测数据都表现出了较好的趋势一致性。不同梯度含沙量的实验室模拟试验中设备数据与人工监测数据的决定系数达到 0.991,在野外偶发产流的天水水土保持监测断面场景下,监测设备数据与人工实测数据的决定系数达到 0.939,平均绝对误差为 9.10 g/L,比测中监测设备和人工置换法测定的含沙量相关性较高,但在退水过程中,相对误差和绝对误差仍较为显著。

### 4.2 展望

目前量子点光谱悬移质泥沙监测设备无论在实验室,还是在水土保持小流域卡口站断面监测环境下,均初步实现了实时稳定的在线监测,下一步在水

土保持监测站应用场景下推广,尚需在以下方面开展进一步的试验研究:①受限于光学传感器的量程,当前的监测设备在小流域产流含沙量较高(大于 200 g/L)时有一定限制,未来可通过光学系统的优化和器件能力的提升,扩大量程范围;②设备输出的量子点光谱信号依赖模型计算悬移质含沙量,目前尚需积累大量实验室以及外场同步人工实测的比测数据,进一步训练模型,以提高和验证监测设备数据输出的可靠性,从量程和可靠性两方面满足水土保持泥沙自动化监测的应用需求。

### 参考文献 (References)

- [1] 殷宝库,曹伟,王略,等.黄河流域水土保持监测体系及能力建设[J].中国水土保持,2016(9):83-85.  
Yin Baoku, Cao Wei, Wang Lue, et al. Soil and water conservation monitoring system and capacity building in the Yellow River basin [J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(9):83-85.
- [2] 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, 2020,36(21):130-136.
- [3] Willis J C, Bolton G C. Statistical analysis of concentration records [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1979,105(1):1-15.
- [4] 王辉,雷廷武,赵军,等.LTW-1 型径流泥沙含量与流量动态测量系统研究[J].水土保持通报,2003,23(2):43-45.  
Wang Hui, Lei Tingwu, Zhao Jun, et al. LTW-1 dynamic measuring system for sediment concentration and flow rate determination of runoff flow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003,23(2):43-45.
- [5] 雷廷武,赵军,袁建平,等.利用  $\gamma$  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  $\gamma$  ray attenuation and the related theoretical algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002,18(1):18-21.
- [6] 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, 2003,19(1):51-53.
- [7] Kuang Zhen, Yang Wenjun, Lin Haili, et al. Research on sediment concentration measurement based on multi-frequency ultrasonic signal response [J]. Measurement, 2023,208:112485.
- [8] Yin-Sung H, Wei Chima, Ting Yuanchi, et al. Capacitive sensing technique for silt suspended sediment concentration monitoring [J]. International Journal of Sediment Research, 2010,25(2):175-184.
- [9] 李志威,汤韬.基于无人机航测黄河源弯曲河道泥沙亏损量计算[J].水科学进展,2020,31(1):39-50.  
Li Zhiwei, Tang Tao. Calculation of bend-scale sediment balance in meandering rivers of Yellow River source based on UAV aerial survey [J]. Advances in Water Science, 2020,31(1):39-50.
- [10] 李军,胡维银.置换法在水土保持泥沙自动监测研究中的应用[J].中国水土保持,2020(2):49-52.  
Li Jun, Hu Weiyin. Application of displacement method in automatic monitoring of sediment in soil and water conservation [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(2):49-52.
- [11] 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,2004,29(5):28-33.  
Gao Peiling, Lei Tingwu, Zhao Jun, et al. Evaluating the measuring methods to sediment concentration in the runoff of slope erosion [J]. Journal of Sediment Research, 2004,29(5):28-33.
- [12] 王讷敏,洪美玲,单帅,等.径流泥沙监测方法研究进展[J].亚热带水土保持,2023,35(2):21-24.  
Wang N, Hong Meiling, Shan Shuai, et al. Study progress on the monitoring method of runoff sediment [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2023,35(2):21-24.
- [13] 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.  
Zhan Xiaoyun, Cao Xiaoping, Guo Minghang, et al. Current status and prospects of runoff sediment monitoring methods [J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(6):13-17.
- [14] 邓罗晟.基于数据融合的含沙量测量方法研究[D].云南昆明:昆明理工大学,2023.  
Deng Luosheng. Research on sediment content measurement method based on data fusion [D]. Kunming, Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2023.
- [15] Campbell C G, Laycak D T, Hoppes W, et al. High concentration suspended sediment measurements using a continuous fiber optic in-stream transmissometer [J]. Journal of Hydrology, 2005,311(1/2/3/4):244-253.
- [16] 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, 2014,30(24):114-123.
- [17] Downing J. Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly [J]. Continental Shelf Research, 2006,26(17/18):2299-2318.
- [18] 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.
- [19] Rai A K, Kumar A. Continuous measurement of suspended sediment concentration: Technological advancement and future outlook [J]. Measurement, 2015,76:209-227.
- [20] Bao Jie, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer [J]. Nature, 2015,523(7558):67-70.
- [21] 杨俊,周露尘.量子点光谱泥沙监测系统在水文泥沙监测中的应用[J].四川水利,2024,45(1):87-91.  
Yang Jun, Zhou Luchen. Application of quantum dots spectral sediment monitoring system in hydrological sediment monitoring [J]. Sichuan Water Resources, 2024,45(1):87-91.