

# TES-91泥沙在线监测系统在宜昌水文站的 试验研究

张释今, 苏 敏\*

长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌

收稿日期: 2024年6月2日; 录用日期: 2024年8月2日; 发布日期: 2024年8月28日

## 摘 要

为探讨基于红外光技术的悬移质泥沙在线监测系统在宜昌水文站的适用性, 在宜昌水文站测验河段进行了TES-91含沙量在线监测系统比测试验。利用监测值与传统人工测验含沙量数据, 分析该泥沙监测仪的适用范围和使用条件。分析结果表明: 该系统在宜昌水文站有一定的适用性; 在线监测泥沙与人工实测断面平均含沙量相关系数为0.99; 泥沙监测仪在低含沙量水域的量程范围内(0.002~0.235 kg/m<sup>3</sup>)具有较好的稳定性, 且精度满足要求, 在现代泥沙测验中具有很好的应用推广价值。

## 关键词

泥沙在线监测系统, 含沙量, 比测试验, 宜昌水文站

# Experimental Study on TES-91 Sediment Online Monitoring System at Yichang Hydrological Station

Shijin Zhang, Min Su\*

Three Gorges Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Yichang Hubei

Received: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Aug. 2<sup>nd</sup>, 2024; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

**In order to discuss the applicability of the online monitoring system of suspended sediment based on**

作者简介: 张释今(1990-), 女, 工程师, 主要从事水文测验、水环境监测和水资源研究, Email: 970734026@qq.com

\*通讯作者 Email: 1211410268@qq.com

文章引用: 张释今, 苏敏. TES-91 泥沙在线监测系统在宜昌水文站的试验研究[J]. 水资源研究, 2024, 13(4): 414-423.

DOI: 10.12677/jwrr.2024.134048

infrared technology in Yichang Hydrological Station, the comparison test of TES-91 online monitoring system of sediment concentration is conducted in the test section of Yichang Hydrological Station. The application range and conditions of the sediment monitor are analyzed by the monitoring value and the sediment concentration data of traditional manual test. The analysis results show that the system has certain applicability in Yichang Hydrological Station. The correlation coefficient between online monitoring sediment and artificial measured cross-section average sediment concentration is 0.99. The sediment monitor has good stability in the range of low sediment concentration waters ( $0.002\sim0.235\text{ kg/m}^3$ ), and the accuracy meets the requirements, which has certain application and promotion value in modern sediment testing.

## Keywords

Online Sediment Monitoring System, Sediment Concentration, Comparison Test, Yichang Hydrological Station

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

长期以来,烘干称重法仍然是水流泥沙含量测定应用最广泛的方法。这种方法虽然精度高,但测量周期长、劳动强度大、检测过程繁琐。同时在水位较高流速较快时难以保证测验人员的安全。另一方面采样获得的是瞬时泥沙的浓度,在时间上无连续性,且受取样次数限制,不能反映泥沙实时变化过程,也难以捕捉含沙量峰值数据[1]。随着国家最严格的水资源管理制度的强制实行,利用在线自动化设备实现悬移质泥沙的在线实时连续监测是今后悬移质泥沙测量的必然发展方向,这给我们提供了进一步研究的机遇和挑战。

鉴于传统泥沙观测方法存在的问题,相关学者开展了大量观测泥沙新技术的研究,这些方法在特定的实验室条件或实验流域的应用中都取得了一定的成功[2] [3]。许多研究表明:基于红外光的悬移质泥沙在线监测技术是一种高效、安全和可靠的泥沙测验方法[4]-[6],但在不同条件的水域中,仍受到悬移质泥沙的颜色、粒径及水体颜色和气泡等影响[7]。因此,在应用光学法仪器测验时需根据不同条件水域,将仪器示值和人工测沙数据进行比测分析率定后,才能把仪器示值用于悬移质含沙量计算中。本文以宜昌水文站为研究对象,论证 TES-91 泥沙在线监测系统在宜昌水文站的适用性,开展了泥沙监测仪精度、稳定性、可靠性比测试验,为该系统在长江流域的推广应用提供一定的经验支持。

## 2. TES-91 泥沙在线监测系统

### 2.1. 系统组成

TES-91 泥沙在线监测系统由泥沙监测仪、遥测终端设备(Remote Terminal Unit, RTU)、通讯网络、数据中心等组成。泥沙监测仪基于红外技术测定水体中的悬移质泥沙含量,服务器通过无线路由器采集监测水体的泥沙数据,通过服务器将相应数据传输至网络进行存储和后续分析处理,用户可在泥沙在线监测管理软件上进行远程管理和浏览。

### 2.2. 测量原理

系统运用了组合红外吸收散射光线法的原理。系统核心是一个红外光学传感器,可监测散射角为  $90^\circ\sim135^\circ$  之间的红外光散射信号。根据不同泥沙的反射率差异,利用传感器软件的逆投影成像技术,在不受色度影响下测定悬移质泥沙含量,直接通过数理模型转换并输出含沙量数据,实现在线连续水体中悬移质泥沙含量的监测。

2.3. 主要参数

系统主要技术参数见表 1。

表 1. 泥沙在线监测红外光学传感器主要技术参数

|                 |                              |
|-----------------|------------------------------|
| 含沙量测量范围         | 0.0001~120 kg/m <sup>3</sup> |
| 测量精度            | 测量值的±5%                      |
| 耐压范围            | ≤0.3 Mpa/-30 m 水深标配，最大到 50 m |
| 流速范围            | ≤5.0 m/s                     |
| 测量环境温度          | 0℃~55℃                       |
| 传感器主要材料         | 钛合金外壳、蓝宝石、PVC、氟橡胶等           |
| 校准              | 根据泥沙同质性进行多点校准                |
| 防护等级            | IP68/NEMA6P                  |
| 传感器水下深度适用范围及分辨率 | 范围：0~100 m，分辨率：0.01 m        |
| 传感器水下温度适用范围及分辨率 | 范围：-20℃~80℃，分辨率：0.5℃         |

3. 测验河段概况

3.1. 测站基本情况

宜昌水文站位于长江中游干流上段(湖北省宜昌市滨江公园)，控制流域面积 1,005,501 km<sup>2</sup>，占全流域面积 55%，是国家基本水文站、国家重点水文站、三峡梯级水库总出库控制站。宜昌站测验项目有水位、水温、降水量、流量、悬移质输沙率及颗粒分析、沙质推移质、卵石推移质、床沙，长期以来为基本水文资料收集、长江中下游防汛抗旱、水资源管理和葛洲坝及三峡水利枢纽工程建设和运行服务。三峡水库蓄水运用后，宜昌站服务对象发生变化，增强了河道航运、水生态监测、水利枢纽工程运行调度服务要求，为水生态、水环境、水资源保护和利用提供监测资料。

枝城水文站位于长江中游干流上段(湖北省宜都市枝城镇滨江路)，集水面积 1,024,100 km<sup>2</sup>，为国家基本水文站，是长江荆江入口重要控制站，三峡大坝泥沙出库验证站。监测项目包括降水量、水位、流量、悬沙、悬移质颗分、沙质推移质、卵石推移质、床沙等。该站为荆江河段及洞庭湖防汛抗旱、水资源合理调配、河道整治提供水文资料。

3.2. 河流特征

宜昌站测验河段长约 3 km，较顺直，近几十年来河段河势未有大变化。断面上游约 2.2 km 处有一大弯，右岸为弯道凹岸，坡度较大。测验断面形态呈“U”型，左岸为砾卵石夹沙河床，低水时约有 100 m 的边滩裸露，高程 42 m 以上为混凝土护岸；右岸系基岩，地形陡峭。断面河床左边(起点距 210~300 m)为沙滩，坡度较缓；河床中泓(起点距约 300~700 m)为砾卵石夹沙质河床，近右岸(起点距约 700 m 以右)为礁板乱石组成。

枝城站测验河段在两弯道之间的顺直过渡段上，顺直段长度约 3 km，略显上窄下宽状。断面上游 700 m 处有石矶，高水影响主泓摆动，河槽中高水位河宽 1200~1400 m，属于宽浅型河流。测流断面河床组成为沙质和

礁岩，冲淤变化不大，河床较为稳定。上游 72 km 有葛洲坝水利枢纽，上游 20 km 右岸有清江入汇，入汇口沿清江上溯 10 km 有高坝洲水利枢纽，测站下游 2 km 有枝城长江大桥，下游 82 km 右岸有 1953 年建成的荆江分洪区进水闸北闸，区间有松滋口、太平口分流入洞庭湖。枝城站径流量来自上游长江干流和清江。

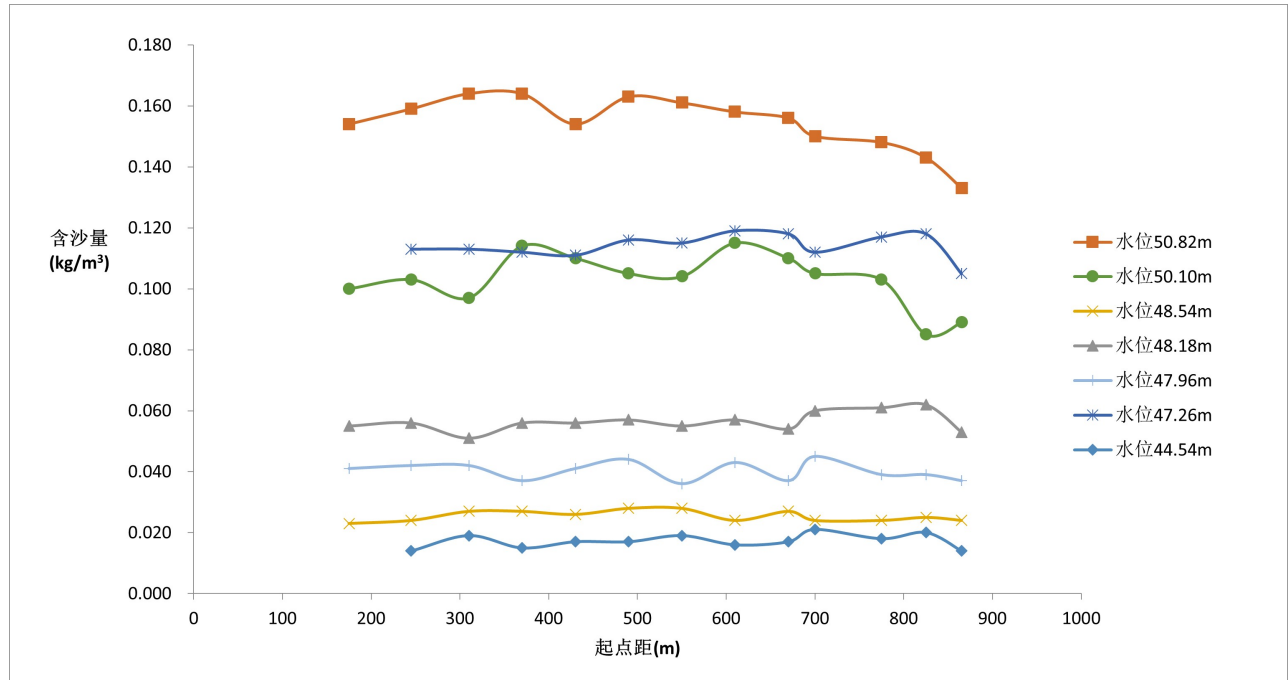


图 1. 垂线含沙量横向分布

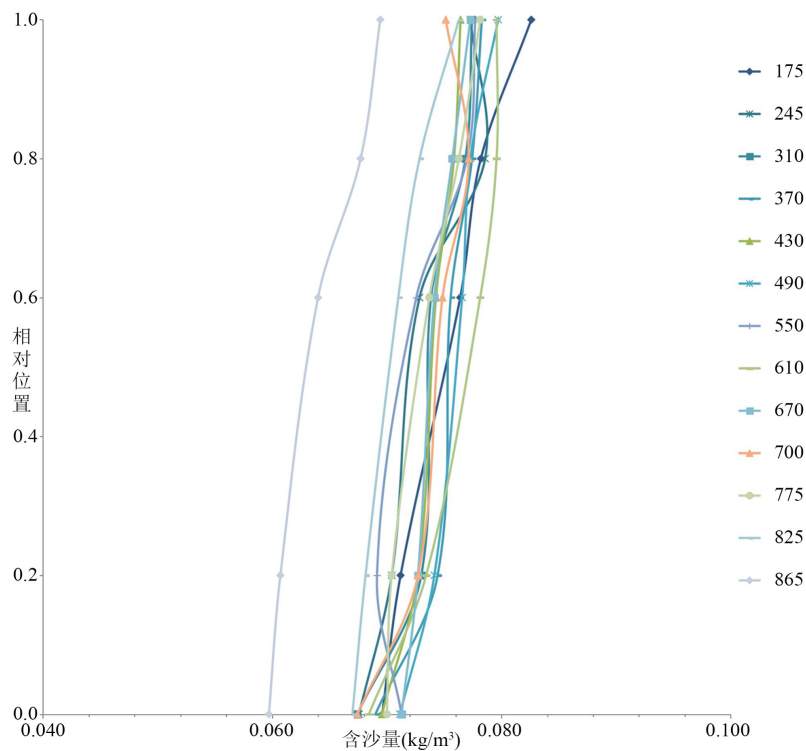


图 2. 垂线各测点含沙量分布

### 3.3. 测站断面含沙量横向分布

根据 2017~2021 年宜昌站选点法测验资料, 点绘不同水位级下含沙量横向分布(图 1), 各级水位级下垂线含沙量横向变化形态较为均匀, 横向分布较为相似, 一般主泓含沙量略大于其他区域含沙量, 靠近左岸区域含沙量与断面平均含沙量具有较好的相关性, 且波动性较为稳定; 右岸含沙量最小; 随着水位或流量变化, 含沙量横向分布差异略有不同, 当断面平均含沙量小于  $0.010 \text{ kg/m}^3$  时, 横向分布差异逐渐缩小。

根据 2017~2021 年宜昌站选点法测验资料, 统计近 5 年选点法 13 条取样垂线水深相对位置 0.0、0.2、0.6、0.8、1.0 的测点含沙量平均值, 点绘选点法取样垂线沿垂向含沙量分布(图 2), 各垂线水深相对位置测点含沙量具有从水面到河底逐渐增加的特点, 但各测点含沙量差距较小, 垂向分布较为均匀。

随着长江上游梯级水库修建和水土流失治理, 三峡水库蓄水后上游来沙逐渐减小[8], 上游补给满足不了现有悬移质和床沙交换的需要, 水流中悬浮的泥沙含量常处于不饱和状态, 导致沿程河道床沙被清水冲刷至下游, 河底上方悬浮的较大粒径泥沙含量逐渐减小, 直至整个垂向含沙量变化减小。

## 4. TES-91 现场比测试验

### 4.1. 仪器安装

系统于 2020 年 11 月 6 日安装在宜昌水文趸船内侧中部水下 1.5 m 处, 在天然水体中进行测量。

### 4.2. 含沙量率定方法

1) 仪器稳定性率定分析: 在监测仪探头旁同水深处, 采用横式采样器独立取样, 利用烘干法处理、计算测点含沙量, 开展传感器处传统法测点含沙量与断面平均含沙量的比测, 寻找相关关系, 分析仪器监测数据的稳定性。

2) 建立仪器探头同位置的传统法测点含沙量与同步施测的断面平均含沙量相关关系, 分析仪器安装位置处含沙量与断面含沙量之间是否有稳定关系, 仪器安装位置是否合理, 该处含沙量是否具有代表性。

3) 利用泥沙在线监测数据与断面平均含沙量建立相关关系, 分析关系变化规律, 判断在线监测数据过程推算断面平均含沙量的代表性及精度。

### 4.3. 比测率定资料选取

比测时间为 2020 年 12 月 01 日~2021 年 12 月 31 日, 人工测验含沙量样本 160 份。实测泥沙含沙量范围为  $0.002 \sim 0.235 \text{ kg/m}^3$ , 本次比测试验含沙量级配均匀, 剪表性剪。

系统收集的全年资料完整, 未出现仪器故障、数据中断现象, 通过数据采集面板实时进行含沙量采集。仪器每 30 s 自动采集一次。每 5 分钟将采集到的 10 组数据自动进行一次平滑处理, 并存储 1 次[9] [10]。可通过登录系统, 查询或导出已收集到的数据。

## 5. 比测数据分析

### 5.1. 稳定性分析

按照设计要求, 在监测仪探头旁同深度处同步取样(采用 1000 ml 手提式横式采样器单独取样, 利用烘干法处理和计算测点含沙量), 根据不同沙量级共取样 46 次, 并利用与取样同时的在线监测数据建立相关关系, 其相关性为 0.99。建立传感器处传统法测点含沙量与断面平均含沙量相关关系, 传统法测含沙量与断面平均含沙量关系值的相关度为 0.9951, 接近 1.00, 相关性较好, 仪器安装位置较合理。

### 5.2. 相关性分析

当仪器感应器同位置测点含沙量与断面平均含沙量相关性很好情况下, 对在线测沙仪器示值与实测断面含

沙量建立相关关系(图 3), 结果显示两者相关性显著。将在线测沙仪示值与实测断面含沙量建立的关系线节点录入整编程序中, 按一元三点插值法推求在线断面平均含沙量。

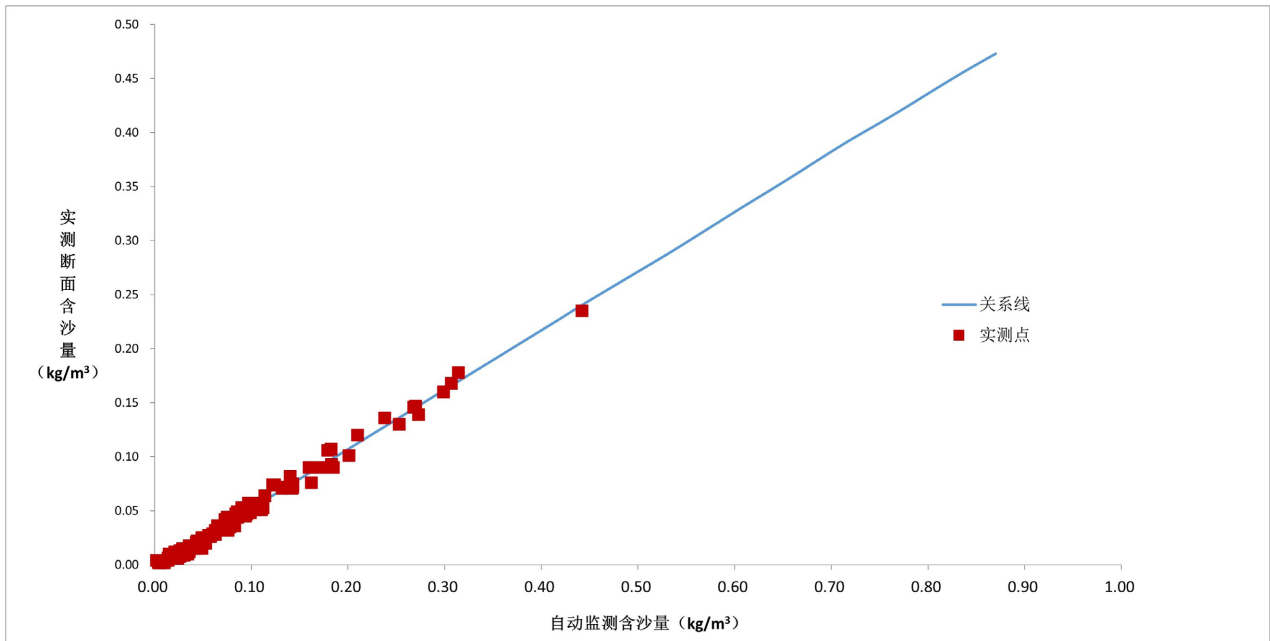


图 3. 2021 年宜昌站 TES-91 自动监测含沙量与断面平均含沙量相关关系

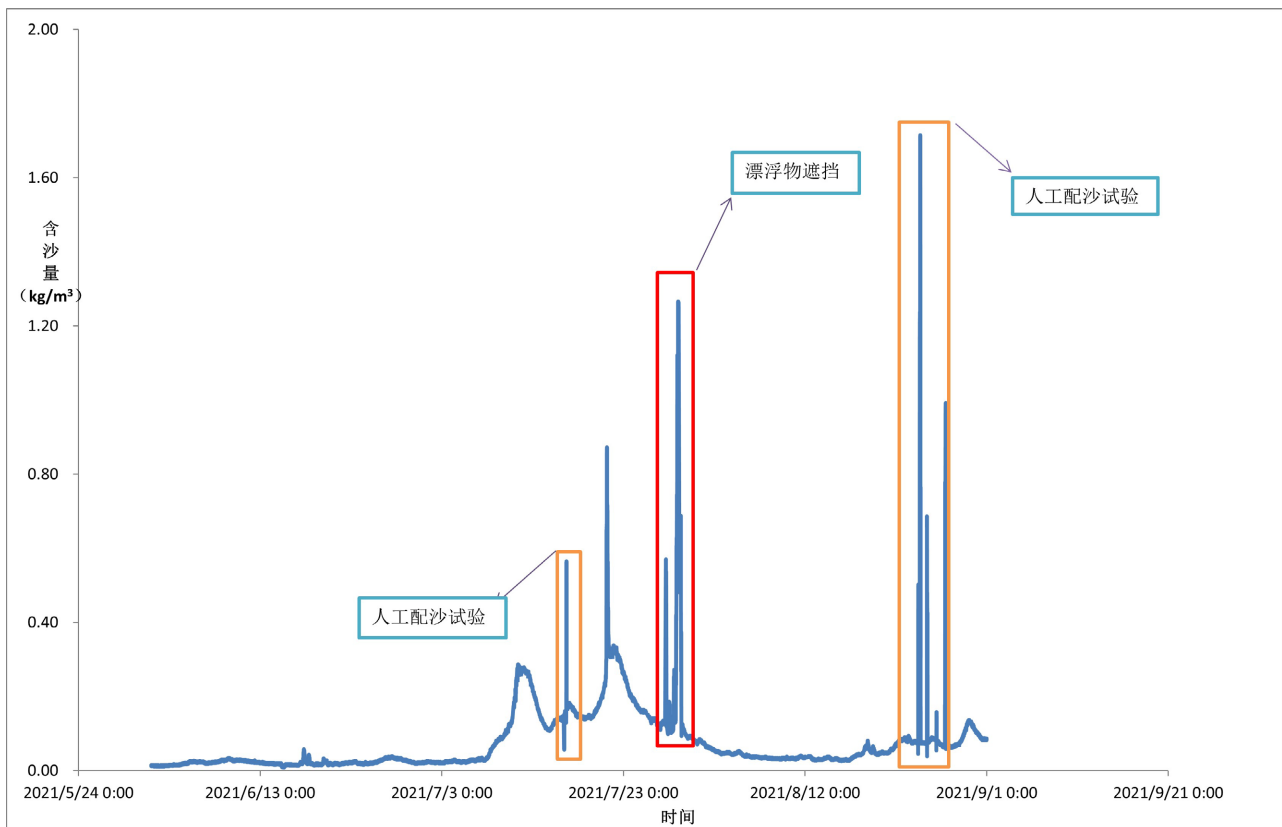


图 4. 2021 年 6~8 月 TES-91 自动监测过程



对上述关系线断面含沙量大于  $0.020 \text{ kg/m}^3$  的测次进行检验，样本容量  $N = 71$ ，三项检验均合格，随机不确定度为 17.8%，系统误差为 0.8%，满足《水文资料整编规范》中随机不确定度与系统误差分别不超过 $\pm 18\%$ 和 $\pm 2\%$ 的要求。因此，瞬时断面平均含沙量可由上述关系线和泥沙在线测沙仪器测量值推算而得。

5.3. 与下游站自动监测含沙量过程线比较

为检验监测数据的合理性，将宜昌站与下游已投产的枝城水文站 TES-91 自动监测含沙量过程进行比较。枝城站于 2019 年 4 月在荆江河段开展了比测试验，现已成功投产用于泥沙在线监测报讯[4]。由于 2021 年宜昌站较大的含沙量集中在 5~8 月(图 4)，绘制该时段自动监测数据绘制成过程线图。其中 7 月 16 日、8 月 24~26 日为人工配沙试验数据，7 月 28 日为漂浮物遮挡造成数据失真。

剔除掉人工配沙试验和漂浮物遮挡影响的监测数据后，与枝城水文站 TES-91 自动监测数据进行比较。含沙量变化过程基本一致，说明泥沙在线监测系统测定的宜昌站含沙量变化过程合理性好，仪器用于宜昌站悬移质含沙量监测的性能稳定。

5.4. 仪器示值与实测含沙量洪水泥沙过程对比

将自动测沙监测数据通过仪器示值与实测断面含沙量建立的关系线进行换算，得到瞬时断面含沙量过程，并与宜昌站实测含沙量过程进行比较后可以看出，自动监测仪换算后的断面平均含沙量与实测断面含沙量关系较好，过程一致，吻合程度高，但最大沙峰峰值相差较大。

为进一步分析最大含沙量相差较大的原因，绘制自动监测含沙量过程线及实测断面含沙量测点关系图(图 5)，河流断面含沙量浓度的变化过程可能受降雨的短期影响而产生短暂、剧烈的变化[11]，同一月份的最大含沙量能

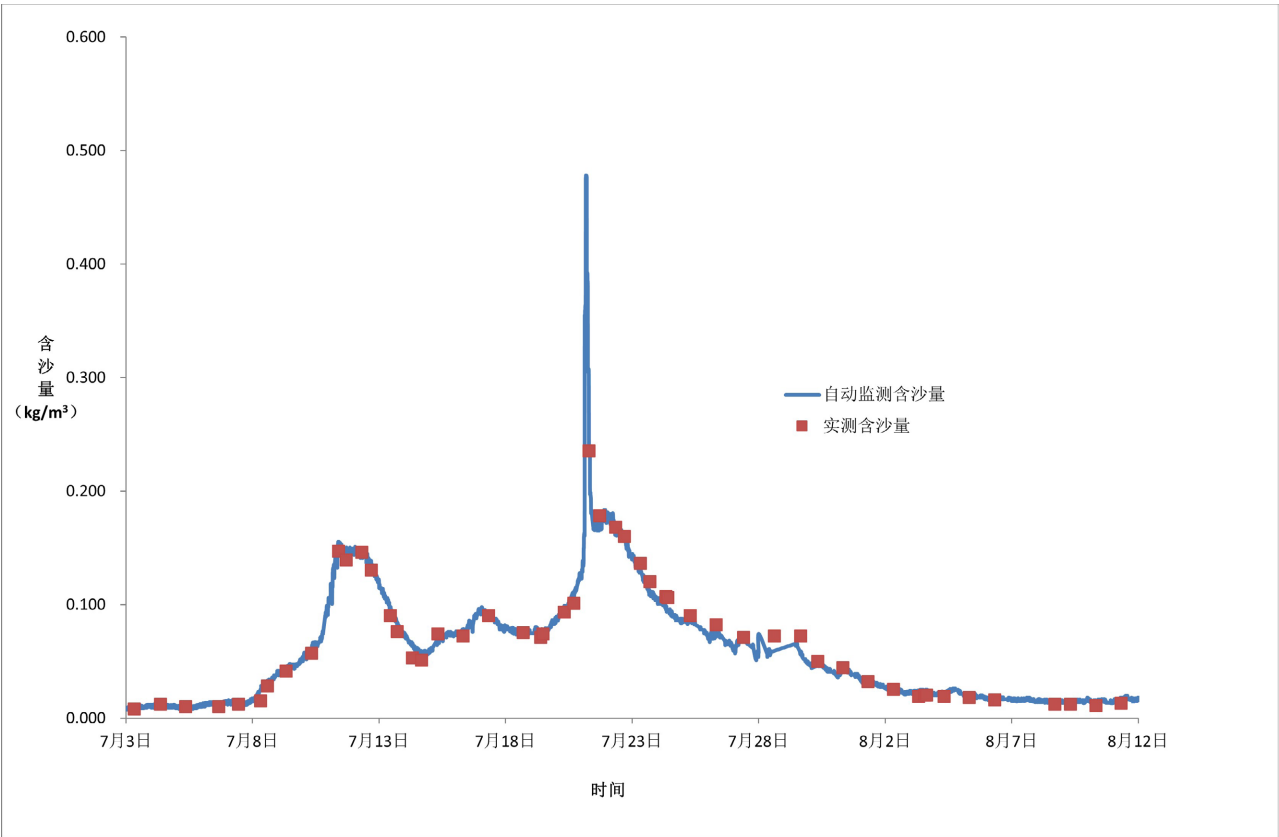


图 5. 2021 年宜昌站 TES-91 自动监测含沙量过程线及实测含沙量测点

达到平日的数倍。这种短暂剧烈的变化过程表明人工测验含沙量的测次密集布置在流量发生较大变化的时候, 具有较好的代表性, 但由于人工测验的时间一般较为固定, 难以捕捉到含沙量变化过程的转折点[12] [13], 比如 2021 年最大沙峰出现在 7 月 21 日 04 点, 且沙峰消退速度特别快, 最大沙峰峰顶处附近未布置实测断面含沙量测点。

### 5.5. 仪器示值与含沙量整编成果分析

根据 2021 年 1 月 1 日~12 月 31 日在线测沙数据和已建立的关系线, 计算断面平均含沙量, 并利用该过程进行时段含沙量资料整编, 生成在线逐日平均含沙量和逐日平均输沙率, 并与传统人工测验含沙量取样方法计算的含沙量整编成果对照分析(图 6 和图 7), 可以看出, 两种逐日平均含沙量过程线较为吻合, 变化趋势基本一致, 但最大沙峰峰后段存在一定的过程变化偏差, 与人工测验含沙量测次疏密有关。

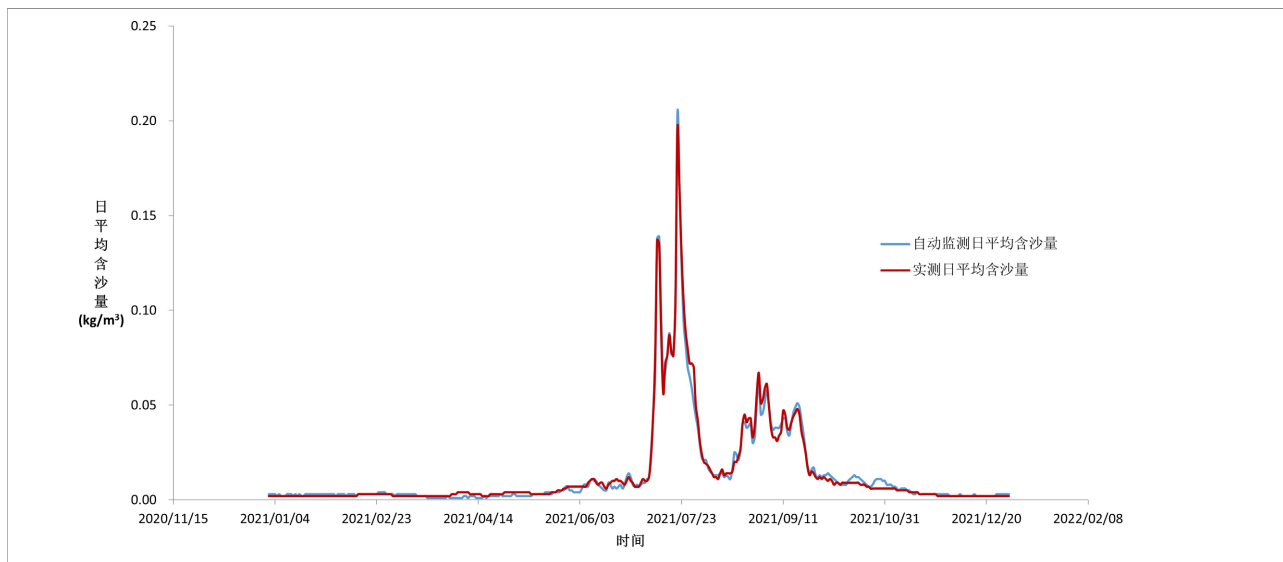


图 6. 自动监测逐日平均含沙量与实测逐日平均含沙量过程线

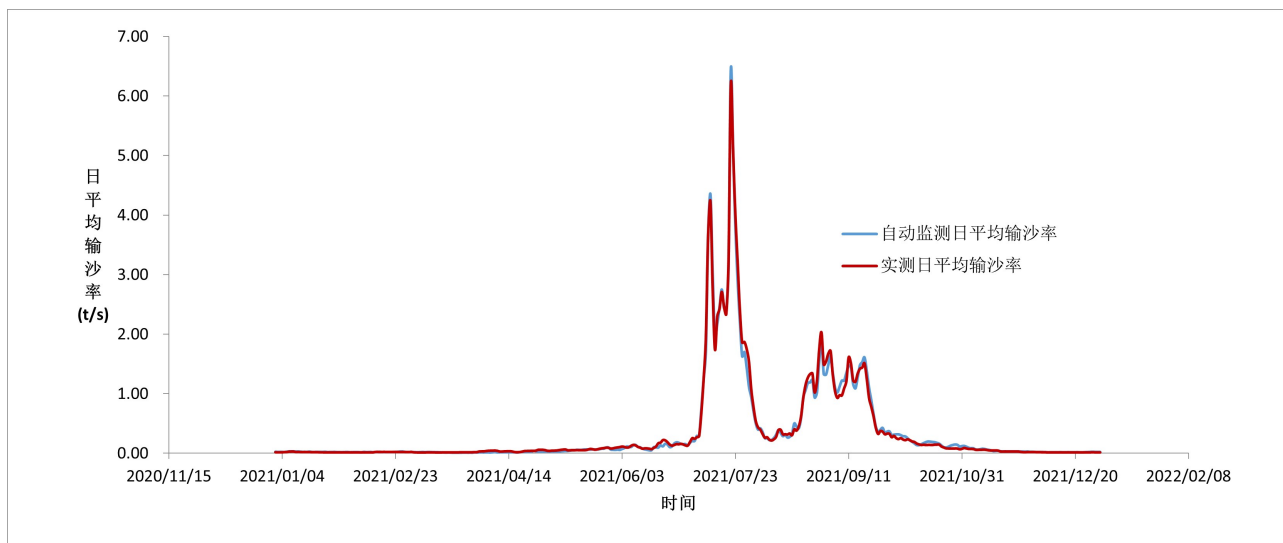


图 7. 自动监测逐日平均输沙率与实测逐日平均输沙率过程线

将两种方法得到的含沙量各月特征值及误差进行统计, 6~7 月最大含沙量相对误差较大, 分别为 33.3%、



101.3%，原因为最大沙峰出现在 7 月 21 日 04 点，且沙峰消退速度特别快，因安全考虑，人工测验含沙量未布置测次(断面含沙量测次布置时间在 7 月 21 日 7:00~8:00)而在线监测基本实测到最大沙峰过程，造成两种方法含沙量沙峰数据出现较大误差；加上 6 月含沙量整体较小，绝对差为  $0.004 \text{ kg/m}^3$ ，导致相对误差较大。统计 2021 年的年输沙量，实测值和自动监测值分别为 1110 t 和 1100 t，两者相对误差为-0.9%，误差较小。综上，2021 年宜昌站 TES-91 自动监测逐日平均含沙量与实测逐日平均含沙量过程线较为吻合，变化趋势基本一致，在线监测系统能真实反映含沙量变化过程。

### 5.6. 人工配沙试验

因 2021 年宜昌站断面含沙量较小，考虑到未来可能出现较大含沙量，在保证沙型情况下，人工增加单位体积内泥沙含量，检验 TES-91 测沙仪在大含沙量情况下的监测数据可靠性和代表性。

将宜昌站送水质泥沙室的悬移质泥沙样品烘干称重后进行配样，配样区间为  $0.010 \sim 3.00 \text{ kg/m}^3$ ，按照沙量级均匀递增，配置 96 个沙样。

将测沙仪感应器放置在人工配沙的已知含沙量水样中进行测量，待数据稳定后，读取面板 5 组瞬时数据，取平均值作为不同沙量级下监测数据，最后将测得的 96 组数据建立关系线，并与今年已收集到传统法断面平均含沙量和在线监测数据对应关系，以及枝城站投产方案中传统法断面平均含沙量和在线监测数据对应关系共同进行比较(图 8)。

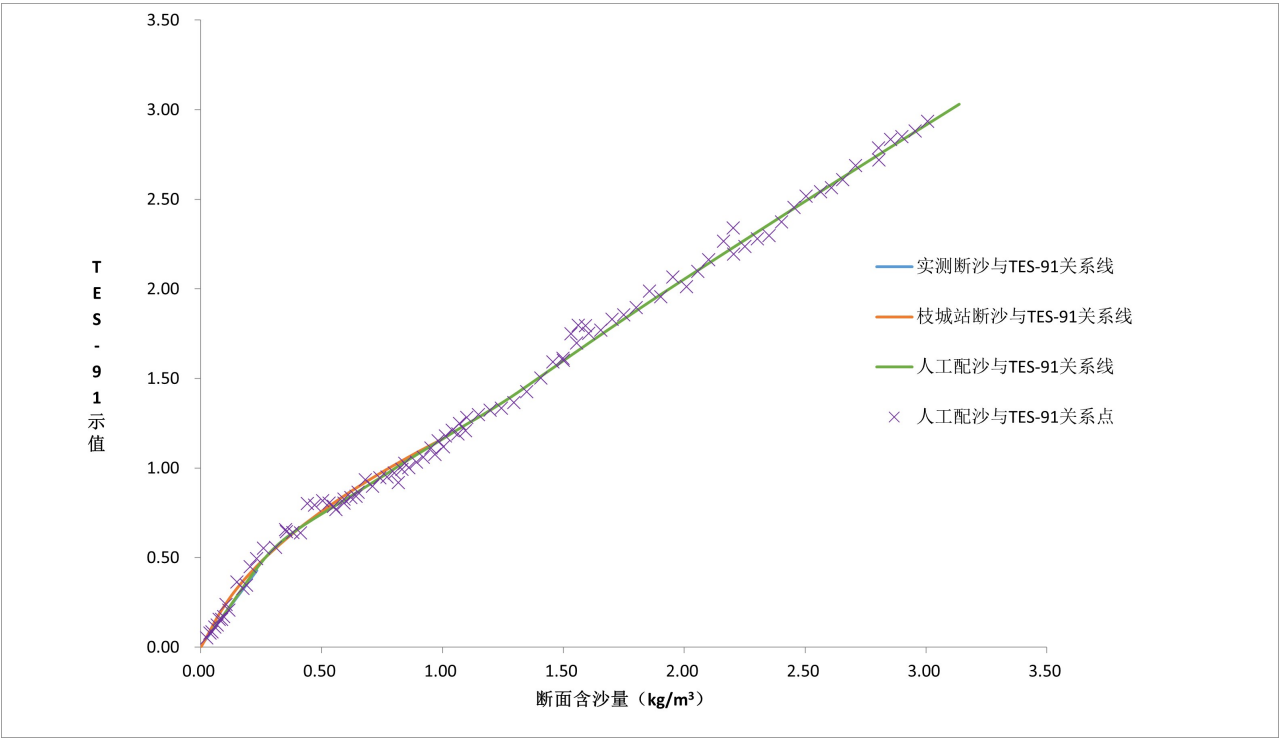


图 8. 三组关系对比图

如图，三组关系线(宜昌站实测断沙与 TES-91 关系线、枝城站实测断沙与 TES-91 关系线、人工配沙与 TES-91 关系线)较一致，其中宜昌站实测断沙与 TES-91 断沙关系与人工配样建立的关系线基本重合。人工配样建立的(含沙量范围为  $0.010 \sim 3.00 \text{ kg/m}^3$ )关系中，当含沙量小于  $0.8 \text{ kg/m}^3$  时，关系线呈  $60^\circ$  角；当含沙量大于  $0.8 \text{ kg/m}^3$  时，关系线呈  $45^\circ$  角，当含沙量在  $0.4 \sim 0.8 \text{ kg/m}^3$  区间，关系线呈曲线，相关性较差。

对 TES-91 监测示值与人工配沙试验含沙量关系进行检验, 三项检验均合格; 随机不确定度为 12.8%, 系统误差为-1.0%, 满足《水文资料整编规范》相关要求。

## 6. 结论

1) 经比测分析 TES-91 在线测系统监测值与同水深下传统人工测验含沙量取样得到的测点含沙量相关性, 发现两者相关系数为 0.99, 表明 TES-91 在线测沙仪示值与实测断面含沙量相关性好。

2) 为检验监测数据的合理性, 将宜昌站与下游已投产的枝城水文站 TES-91 自动监测含沙量过程进行比较, 发现两站的含沙量变化过程基本一致, 说明在线监测系统测定的宜昌站含沙量变化过程合理性好, 仪器用于宜昌站悬移质含沙量监测的性能稳定。

3) 自动监测数据与宜昌断面平均含沙量关系在  $0.002 \sim 0.235 \text{ kg/m}^3$  范围内良好, 通过三项检验和误差分析, 误差满足《水文资料整编规范》相关要求, 2021 年宜昌站自动监测逐日平均含沙量与实测逐日平均含沙量过程线较为吻合, 变化趋势基本一致, 监测系统能真实反映含沙量变化过程。

4) 因 2021 年宜昌断面含沙量较小, 采用人工配沙试验, 比测试验的实测含沙量范围有待于进一步扩大, 为实现长江流域的悬移质泥沙实时在线监测的推广应用奠定基础。

## 参考文献

- [1] 江晖, 胡兴艺, 李刚. 红外光技术在悬移质泥沙自动化测量中的应用——以湖南冷水滩水文站为例[J]. 湖南水利水电, 2018(1): 61-64.
- [2] 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.
- [3] 张坚樑, 刘冬雪. OBS-3A 浊度计在钱塘江涌潮观测中的应用研究[J]. 海洋技术, 2011, 30(2): 76-79.
- [4] 胡友莽, 樊铭哲, 杨成, 等. 长江枝城水文站 TES-91 泥沙在线监测系统比测试验分析[J]. 水利水电快报, 2020, 41(7): 18-21.
- [5] 唐小娅, 童思陈, 王亮, 等. 图像处理技术在泥沙粒径分析中的应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(6): 6.
- [6] 杨志斌, 梁树栋. TES-91 泥沙监测仪在马口站的应用研究[J]. 陕西水利, 2020(10): 4-6, 9.
- [7] 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.
- [8] 毛海涛, 王正成, 林荣, 等. 三峡水库蓄水后上下游河段水沙特性变化及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 161-169.
- [9] GB/T 50159-2015. 河流悬移质泥沙测验规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [10] SL 195-2015. 水文巡测规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [11] 郑庆涛, 曾淳灏, 常博, 等. 基于红外光技术的悬移质泥沙在线监测系统及应用[J]. 人民珠江, 2017, 38(11): 94-98.
- [12] 潘仁红. 广西河流 OBS 浊度仪在线监测系统含沙量关系模型研究与应用[J]. 广西水利水电, 2021(6): 57-61, 67.
- [13] 王丹丹. OBS-3A 浊度仪在阜新地区多沙河流含沙量测验的应用分析[J]. 黑龙江水利科技, 2021(1): 153-155.