

Preliminary Application of Turbidimeter in Sediment Measurement

Ansheng Yang, Huijun Cai

Upper Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Yibin Sichuan
Email: 909990909@qq.com, 179873574@qq.com

Received: Oct. 7th, 2018; accepted: Oct. 19th, 2018; published: Oct. 30th, 2018

Abstract

Accurate and timely sediment sampling is the basis for improving the accuracy and efficiency of sediment prediction. Based on the correlation between turbidity and single suspended sediment, turbidity data and single sediment data of Hengjiang hydrological station are collected during multiple fluctuations in 2017. The calculation accuracy of the existing turbidity-sediment relationship (recommended relationship) is analyzed and large error is found. A new relation is established with the measured data and tested with the measured data in 2018. The result shows that the error is still large and the cause of error is preliminarily analyzed in order to promote the progress of sediment concentration test technology.

Keywords

Turbidimeter, Sediment Concentration, Sediment Measurement

浊度仪在泥沙测验中的应用研究

杨安胜, 蔡惠军

长江上游水文水资源勘测局, 四川 宜宾
Email: 909990909@qq.com, 179873574@qq.com

收稿日期: 2018年10月7日; 录用日期: 2018年10月19日; 发布日期: 2018年10月30日

摘要

精准及时的泥沙采样, 是提高泥沙预报精度和时效的基础, 分析了当前三峡水库入库泥沙观测的工作难点, 从水体浊度与悬移质单沙存在相关关系入手, 通过收集横江水文站2017年多次涨落水期间的浊度资料和单沙资料, 作者简介: 杨安胜(1984-), 男, 助理工程师, 主要从事水文测验、水文分析计算、水文自动测报工作。

对现有浊度~单沙关系式(推荐关系式)的计算精度进行了分析,发现有较大误差。用实测资料建立了新的关系式,并用2018年的实测资料对新关系式进行了检验,结果表明仍然有较大误差。最后对误差成因进行了初步分析,以期促进含沙量测验技术的进步。

关键词

浊度仪, 含沙量, 泥沙测验

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

三峡水库运行期来沙情况关系到水库使用寿命和重庆的防洪安全。因此自投入运行以来,相关部门对水库来沙情况进行了持续观测。三峡水库上游干支流有金沙江(上游干流)、乌江、嘉陵江、岷江、横江等,为了探索入库泥沙年度总量、年际变化规律以及各支流占比组成,做好三峡水库泥沙预报,在乌江武隆水文站、嘉陵江北碛水文站、岷江高场水文站、横江横江(二)水文站观测断面,开展泥沙观测。一直以来上述各观测站采用取样称重法观测断面输沙情况,由于称重法测沙操作过程繁杂、效率低,资料时效性差等问题,难以满足泥沙预报的需要,探索一套快速测沙方法势在必行。基于水体浊度与悬移质单沙存在相关关系这一实事,选择上述其中一个泥沙观测断面,同步收集单沙资料和水体浊度资料,建立二者间的关系式,如二者间的关系式保持稳定,并在各观测断面推广,将大大提高工作效率。下文以横江站实测资料为例进行分析,建立关系曲线,并就关系曲线实际应用情况进行了分析。

2. 横江流域来水来沙特性

横江,又称关河,是金沙江下游右岸一级支流,同时也是金沙江最后一条支流。跨川、滇、黔三省,发源于云南省鲁甸县水磨乡大海子,流经鲁甸、昭通、大关、彝良、永善、盐津、威宁等县,在水富县云富镇东汇入金沙江,汇合口位于向家坝水电站坝址下游约3.8 km。

2.1. 来水特性

横江洪水主要由暴雨形成,由于受西南季风气候影响,降水季节性强,年内分配集中,一般5~10月为雨季,降水量占全年降水量的82%~90%,暴雨主要集中在6~9月,尤以7、8月份出现的次数为最多,11月至次年4月为旱季,其降水量仅占全年降水量的10%~18%;因此流域内洪水主要发生在6~9月。

2.2. 来沙特性

受横江流域地形、土质、暴雨频次及暴雨量的影响,横江水文站含沙量受洪水涨落影响较大。据近5年资料统计分析,当流域内洪水量级小、频次较少时,当年输沙量呈明显下降趋势,具体见表1。

3. 泥沙测验

横江水文站是横江汇入金沙江前的控制站,控制集水面积14,781 km²,占横江流域面积的98.7%,向家坝电站蓄水后,横江输沙量在金沙江输沙量占比升高,因此研究横江输沙量,尝试用浊度仪测量浊度间接推算单沙、输沙量,对实现三峡水库泥沙预报具有重要意义,该站于2017年引进了浊度仪,已于当年尝试通过浊度~单沙

Table 1. Statistics of sediment discharge in the past 5 years at Hengjiang hydrological station**表 1.** 横江水文站近 5 年输沙量统计表

| 年份 | 超警洪水次数 | 年最高水位(m) | 年输沙量 10 ⁴ t | 最大断面平均含沙量(kg/m ³) |
|------|--------|----------|------------------------|-------------------------------|
| 2013 | 2 | 293.69 | 791 | 20.5 |
| 2014 | 0 | 289.97 | 312 | 10.2 |
| 2015 | 1 | 290.18 | 269 | 6.24 |
| 2016 | 6 | 297.06 | 1310 | 33.6 |
| 2017 | 2 | 296.92 | 886 | 17.6 |

综合曲线开展泥沙报讯，期间同步收集单沙、浊度实测资料。

3.1. 原有测验方式

和其它水文站含沙采样一样，建站以来，横江水文站泥沙测验方式依靠传统采样器取样、沉淀、烘干、称重，一般从采样到取得含沙量成果需要 5~7 天，测量方式操作过程繁杂、效率低，资料时效性差。称重法虽然有诸多弊端，但其测量结果能较真实的反映水体泥沙含量，仍是常规泥沙测验中最经典有效的方法，常用此法衡量浊度~单沙关系的准确性。

三峡入库来沙受上游多条支流(含干流)的影响，称重法需要先获取上述多个观测断面的来沙情况，才能预测三峡水库来沙情况，时效性差给泥沙预测和水库调沙决策带来较大困难，以致只能从实测泥沙资料或测绘手段获取的河道冲刷情况，来推算水库泥沙输移情况。

3.2. 现阶段测验方式

现阶段测验方式保留了原有测验方式，测验的单沙资料主要用于资料整编。自 2017 年开始，横江水文站引进了哈希公司 2100AN 型实验室浊度仪间接测沙，开始尝试用浊度仪进行泥沙观测报讯。两种测验方式收集的单沙、浊度资料，为探求浊度~单沙关系提供数据支撑。采用浊度仪测量水体浊度间接推求水体含沙量，操作简单，十几分钟就可以出测量结果，但因浊度~单沙关系尚无普遍适用公式，要准确计算出含沙量有待进一步研究。

3.3. 浊度仪测量原理[1]

水体浊度是由于水样中存在微粒物质导致水的透明度降低，是水样的一种光学特性。因此可以通过测量水体浊度，来推算沙量，横江站用浊度仪进行泥沙报讯就是基于此原理。

哈希公司 2100AN 型实验室浊度仪测量基于光的散射原理(见图 1)，该仪器的光学系统由钨丝灯、聚光透镜、光圈、90°散射光检测器、前向散光检测器、透过光检测器和后向散光检测器组成，浊度不一样，各向检测器探测到的信号强弱将不一样(见图 2)。仪器内部微处理器使用数学运算将每个检测器得到的信号进行转换，进行综合分析，计算出水样浊度[2]。

该型号浊度仪测量的是水体中二氧化硅的含量，而二氧化硅是泥沙的主要组成成分，因此从理论上讲，测准了其含量，推算出来的含沙量应接近含沙量真值。

3.4. 浊度仪主要技术指标[3]

- 1) 符合标准：满足 USEPA 方法 180.1 的要求
- 2) 量程范围：
 - ① 浊度：0~10000 NTU
 - ② 色度：0~500 CU



Figure 1. 2100AN laboratory turbidity tester of Hach company
图 1. 哈希公司 2100AN 型实验室浊度仪

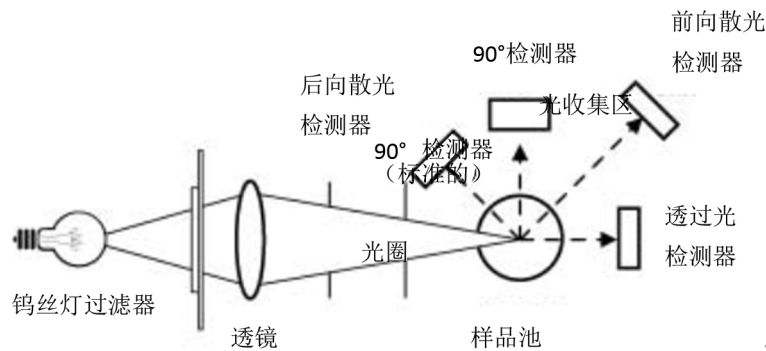


Figure 2. Schematic diagram of turbidimeter's light path
图 2. 浊度仪光路示意图

3) 精度：浊度：

- ① 0~1000 NTU：0.01 NTU 或读数的±2%
- ② 1000~4000 NTU：读数的±5%
- ③ 4000~10000 NTU：读数的±10%

3.5. 早期浊度~单沙综合关系式的建立及报汛

从 2011 年开始，长江委水文局开始在高场、朱沱、寸滩、清溪场、北碚、武隆、庙河、黄陵庙、宜昌 9 站开展含沙量实时信息采集，为三峡水库开展泥沙报汛进行初步研究。各站配备了实验室浊度仪，制订了含沙量沙样采样任务书，将每次取得的沙样分成两个样本，一个样本用常规方法过滤、烘干、称重，获得单沙资料，并通过单沙等相关资料推求断沙和年输沙量等；另一个样本加入浊度仪自带的样品池自动测量，记录测量结果。2012 年~2014 年间高场水文站收集了大量实测资料，并利用这些实测资料，拟合得出关系式：

$$SSC = 0.0000000001498 T^3 - 0.0000006564303 T^2 + 0.0018909191664 T \quad (1)$$

式中：SSC 为含沙量，kg/m³；T 为浊度，NTU。

为提高含沙量报汛时效，尝试用浊度推求单沙，长江水文上游局暂定式(1)为横江站泥沙预报浊度~单沙综合关系式，同时探索该关系式在不同河道断面的适应性，以便对该关系式作进一步的修订完善。自 2017 年开始，横江站开始用该综合关系式进行泥沙报汛，同期用烘干法收集了实测单沙资料，并利用收集的实测资料对浊度~单沙综合关系式的精度进行了检验，结合实测资料，对式(1)进行完善，总结得出适合该站的浊度~单沙关系曲线。

4. 2017 年横江来水来沙分析

2017 年,横江水文站 6~9 月平均流量较近 10 年月平均流量均值偏大 11.2% (详见表 2),其中 6 月偏大 35.9%, 7 月偏小 15.8%, 8 月偏大 22.0%, 9 月偏大 9.5%; 6 月和 8 月各出现一次较大洪水过程(见图 3), 实测年最高洪水位 296.92 m (冻结基面)。

2017 年,横江水文站 6~9 月平均含沙量较近 10 年月平均含沙量均值偏大 71.8% (详见表 3), 其中 6 月偏大 129.4%, 7 月偏小 76.6%, 8 月偏大 126.5%, 9 月偏小 41%; 6 月和 8 月各出现一次较大沙峰过程, 全年实测最

Table 2. Statistics of the monthly discharge at the Hengjiang hydrological station

表 2. 横江水文站多年月平均流量统计表

| 年份 | 月平均流量 m ³ /s | | | | 6~9 月月平均流量 m ³ /s |
|----------------|-------------------------|-------|------|------|------------------------------|
| | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | |
| 2007 | 165 | 346 | 790 | 572 | 468 |
| 2008 | 400 | 649 | 769 | 275 | 523 |
| 2009 | 180 | 316 | 413 | 171 | 270 |
| 2010 | 350 | 489 | 434 | 253 | 381 |
| 2011 | 161 | 194 | 158 | 95.2 | 152 |
| 2012 | 323 | 802 | 482 | 564 | 542 |
| 2013 | 301 | 520 | 546 | 478 | 461 |
| 2014 | 188 | 439 | 718 | 423 | 442 |
| 2015 | 174 | 296 | 645 | 503 | 404 |
| 2016 | 731 | 626 | 553 | 519 | 607 |
| 近 10 年均值 | 297 | 468 | 551 | 385 | 425 |
| 2017 | 404 | 394 | 672 | 422 | 473 |
| 与近 10 年均值比较(%) | 35.9 | -15.8 | 22.0 | 9.5 | 11.2 |

注: 计算公式(2017 年月平均 - 近 10 年均值)/近 10 年均值。

Table 3. Statistics of sediment concentration for many years in Hengjiang hydrological station

表 3. 横江水文站多年月平均含沙量统计表

| 年份 | 月平均含沙量 kg/m ³ | | | | 6~9 月月平均含沙量 kg/m ³ | 年最大含沙量 kg/m ³ |
|----------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------------------------|
| | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | | |
| 2007 | 0.067 | 5.77 | 4.08 | 0.174 | 2.52 | 19.1 |
| 2008 | 1.18 | 6.40 | 3.12 | 0.075 | 2.69 | 20.2 |
| 2009 | 0.121 | 1.63 | 0.969 | 0.071 | 0.698 | 5.92 |
| 2010 | 0.268 | 2.15 | 1.18 | 0.065 | 0.915 | 4.33 |
| 2011 | 0.340 | 0.957 | 0.28 | 0.048 | 0.406 | 1.31 |
| 2012 | 0.811 | 5.01 | 0.564 | 1.66 | 2.01 | 20.5 |
| 2013 | 0.934 | 5.82 | 2.97 | 0.457 | 2.55 | 20.5 |
| 2014 | 0.086 | 1.92 | 1.07 | 0.364 | 0.860 | 10.2 |
| 2015 | 0.035 | 1.51 | 1.24 | 0.093 | 0.720 | 6.24 |
| 2016 | 2.87 | 7.58 | 0.953 | 0.128 | 2.883 | 33.6 |
| 近 10 年均值 | 0.671 | 3.88 | 1.64 | 0.314 | 1.63 | / |
| 2017 | 1.54 | 5.74 | 3.72 | 0.185 | 2.80 | 17.6 |
| 与近 10 年均值比较(%) | 129.4 | 48 | 126.5 | -41 | 71.8 | / |

注: 计算公式(2017 年月平均 - 近 10 年均值)/近 10 年均值。

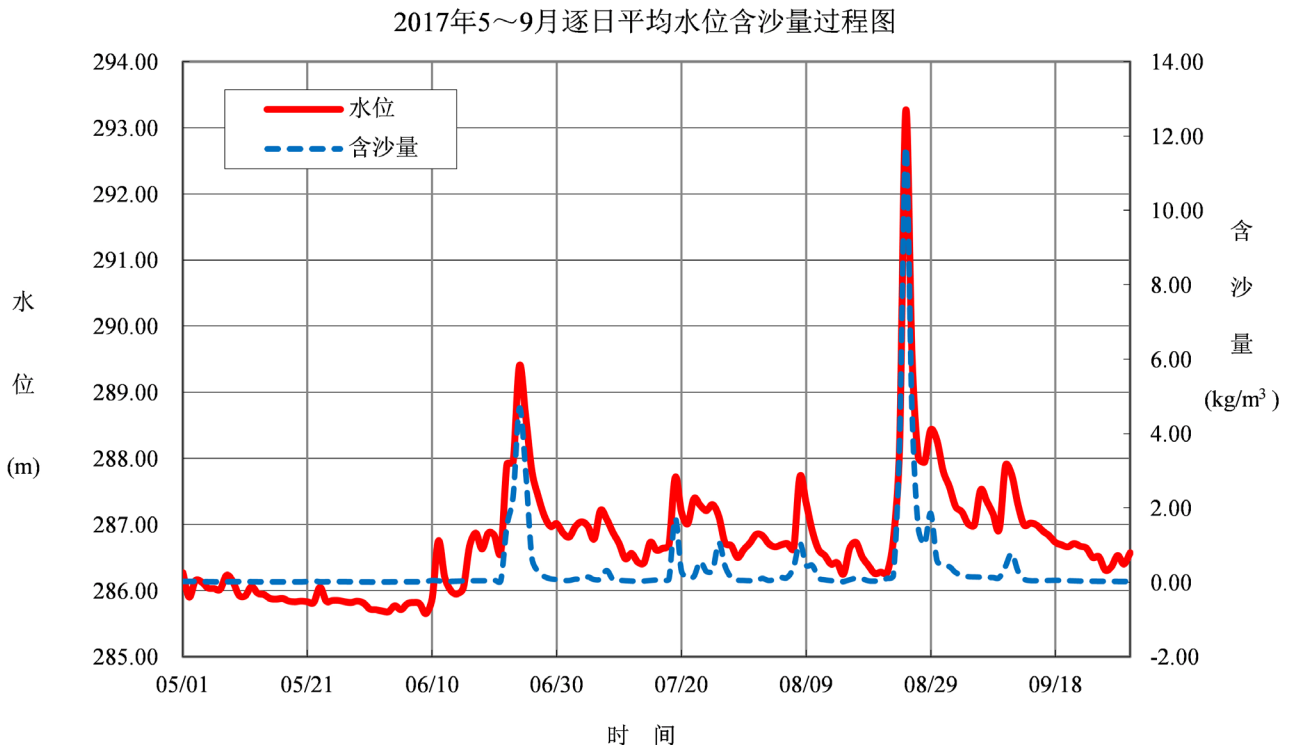


Figure 3. Daily average water level and suspended sediment at Hengjiang hydrological station in 2017
 图 3. 横江水文站 2017 年 5~9 月逐日平均水位和含沙量过程线图

大含沙量 17.6 kg/m³ (8 月 25 日), 较历年最大含沙量偏小。

5. 单沙与浊度的关系研究

2017 年, 横江站来沙主要集中在 6 月和 8 月, 其他月份含沙量较小, 5~10 月期间, 共收集单沙、浊度比测资料 162 次。比测期间, 实测最大单沙 17.6 kg/m³, 相应浊度 12150 NTU (8 月 25 日 14 时); 最小单沙含沙量 0.007 kg/m³, 相应浊度 7.65 NTU (5 月 16 日 8 时)。

5.1. 浊度~单沙关系分析

根据 2017 年横江水文站站收集的单沙、浊度比测资料分析得出, 本站浊度与单沙关系曲线见图 4, 其拟合公式为:

$$SSC = 0.0000000000299687116 T^3 + 0.00000001922314478139 T^2 + 0.00078347156738072800T + 0.02331286847605050000 \quad (2)$$

式(2)中各变量含义同式(1), 横江水文站 2017 年单沙与单沙水样浊度的相关系数 R² 为 0.973。

5.2. 浊度~单沙关系推求单沙精度分析

根据横江站 2017 年实测单沙、浊度~单沙综合曲线、2017 年浊度~单沙关系曲线三种不同方式推求单沙, 6 月、8 月两次较大沙峰三种单沙过程线图见图 5、图 6。从图中可以看出, 横江站 2017 年浊度~单沙关系曲线推求单沙与实测单沙相比, 两种方式单沙过程线整体基本相应。

5.3. 三种不同方法推求断面输沙量的结果对比分析

为了进一步探索浊度~单沙关系曲线推求单沙误差情况, 用三种不同方法得出的日平均含沙量推算断面输沙

量，并统计输沙量误差，统计数据见表 4。

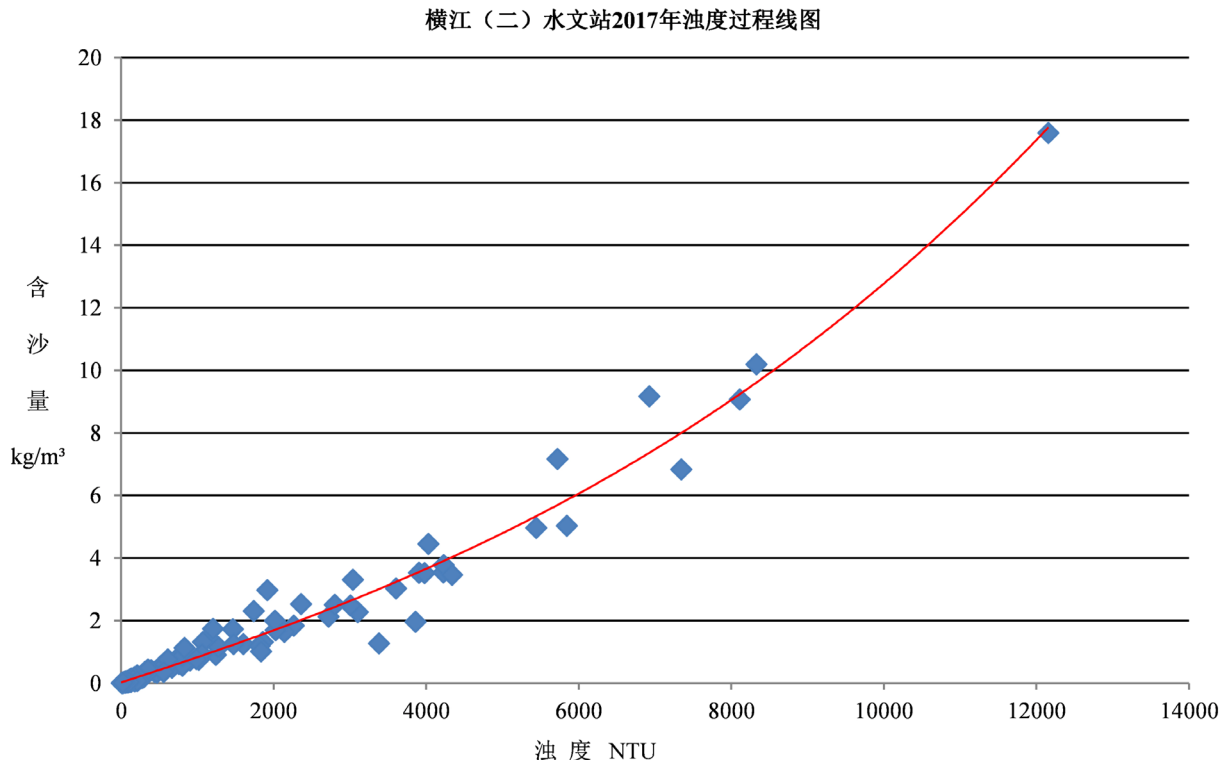


Figure 4. Relationship between suspended sediment and turbidity at Hengjiang station in 2017

图 4. 横江站 2017 年单沙与单沙水样浊度关系图

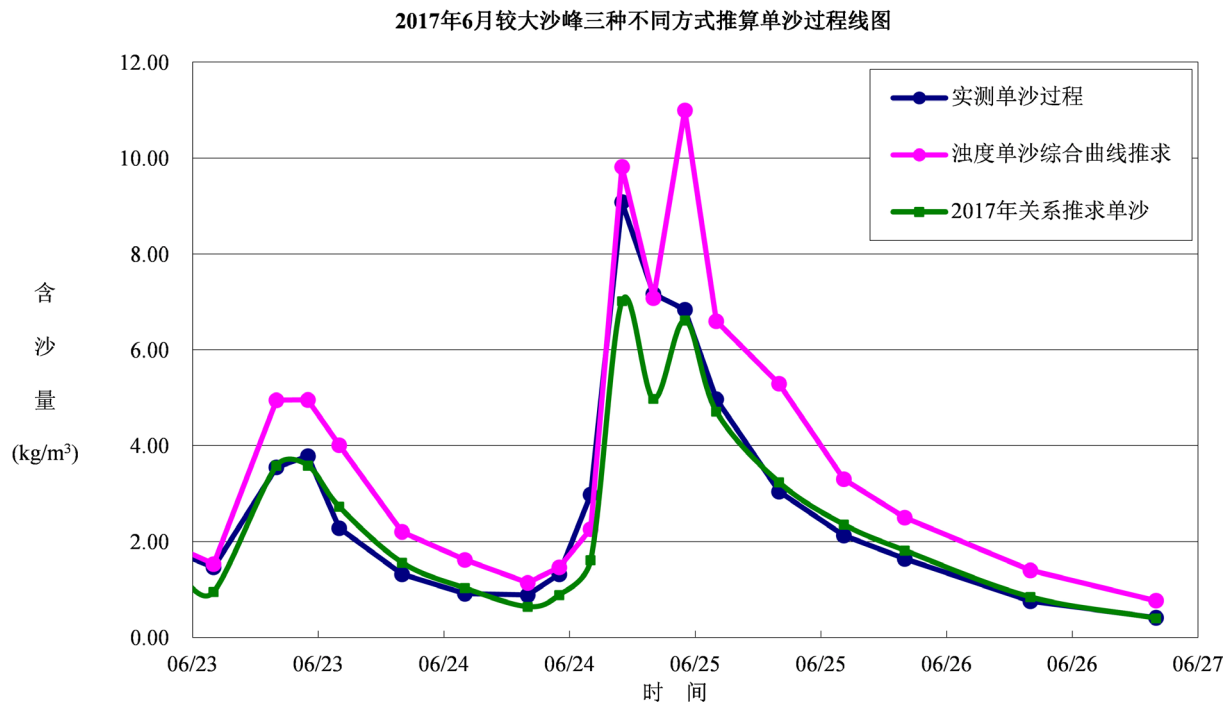


Figure 5. Suspended sediment calculated by 3 methods of the greater sand peak in June, 2017

图 5. 横江站 2017 年 6 月较大沙峰 3 种方法推算单沙过程线

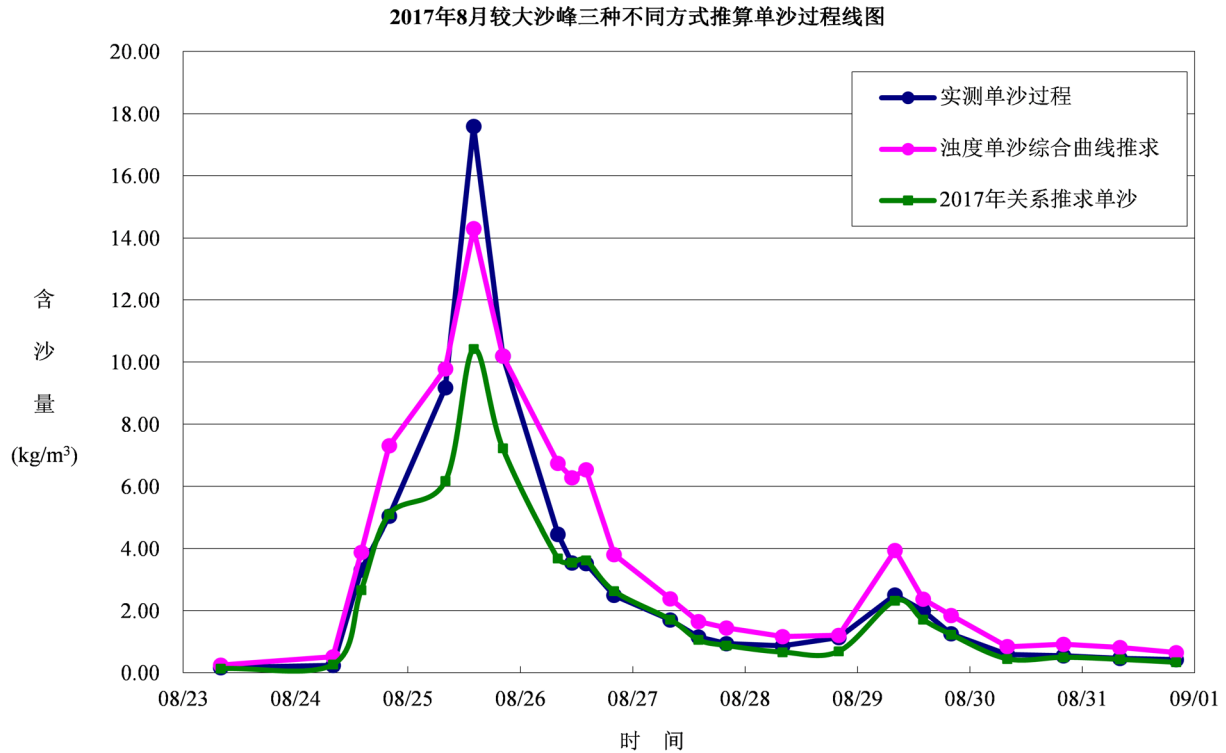


Figure 6. Suspended sediment calculated by the 3 methods of the greater sand peak in Aug, 2017

图 6. 横江站 2017 年 8 月较大沙峰 3 种方法推算单沙过程线

Table 4. Comparison of sediment discharge calculated by three methods (*10⁴ t)

表 4. 三种方法推算输沙量比较(*10⁴ t)

| 项目 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 5~9 月总量 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 实测单沙推算输沙量 | 0.4 | 161.5 | 30.8 | 669.6 | 20.2 | 882.5 |
| 浊度~单沙综合曲线推求单沙推算输沙量 | 1.1 | 212 | 69.6 | 731.2 | 41.2 | 1055.1 |
| 2017 年浊度~单沙关系曲线推求单沙推算输沙量 | 1.2 | 142.8 | 41.8 | 487.5 | 23.5 | 697 |
| 浊度~单沙综合曲线推算误差(%) | 175.0 | 31.3 | 126.0 | 9.2 | 104.0 | 19.6 |
| 2017 年浊度~单沙综合曲线推算误差(%) | 200.0 | -11.6 | 35.7 | -27.2 | 16.3 | -21.0 |

注：计算方式(浊度推算输沙 - 实测单沙推算输沙)/实测单沙推算输沙。

5~9 月利用浊度~单沙综合曲线推算输沙量与实测单沙推算输沙量相对误差分别为 175%、31.3%、126%、9.2%、104%，5~9 月总量相对误差为 19.6%；利用 2017 年浊度~单沙关系曲线推算输沙量与单沙推算输沙量相对误差分别为 200%、-11.6%、35.7%、-27.2%、16.3%，其中 5 月、6 月、7 月、9 月虽然相对误差较大，但是这 4 个月绝对含沙量少，在 5~9 月总输沙量的占比不足 20%，8 月泥沙含沙量大，8 月含沙量推算精度直接关系到全年输沙量的精度。

2017 年浊度~单沙综合曲线推算 2017 年 8 月含沙量比实测单沙推算输沙量偏小 27.2%，直接导致 5~9 月总输沙量偏小 21%，2017 年 8 月推算的含沙量偏小主要是因为粗砂多且沉淀太快，所测浊度 NTU 比河水浊度小，导致推算的含沙量也小[2]。

5.4. 2017 年浊度~单沙关系曲线实用效果检验

2018 年 5~7 月，收集了实测单沙和浊度资料，应用横江站 2017 年实测单沙、浊度拟合的浊度~单沙曲线推

Table 5. Error analysis using the relationship between turbidity and suspended sediment in 2018
表 5. 2018 年浊度~单沙关系推求单沙误差分析表

| 项目 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 5~7 月 |
|--------------------|------|-------|-------|--------|
| 实测单沙推算输沙量 | 1.08 | 9.2 | 110.1 | 120.38 |
| 浊度~单沙关系曲线推求单沙推算输沙量 | 1.56 | 13.45 | 83.03 | 98.04 |
| 浊度~单沙关系曲线推算误差(%) | 44.4 | 46.2 | -24.6 | -18.6 |

注：误差计算方式(浊度推算输沙 - 实测单沙推算输沙)/实测单沙推算输沙。

求了输沙量，误差分析见表 5。

从表 5 可以看出，2018 年，应用该站 2017 年拟合的浊度~单沙关系曲线推算的单沙与实测单沙误差与 2017 年的误差情况类似，即含沙量小时，推算的含沙量偏大，当含沙量大时，推算的含沙量偏小，5~7 月总输沙量偏小 18.6%，在泥沙报讯精度要求不高的情况下，可以应用该关系曲线，通过测量水体浊度间接推求单沙，实现泥沙预报。

6. 结论与建议

1) 原有单沙测量方式从采样到获取水体含沙量需要 5~7 天且工序繁杂，资料时效性较差，采用浊度仪测量浊度间接推求单沙，操作简单，从采集样本到获取水体含沙量只需要十几分钟，能极大的减轻水文测站工作量，提高资料时效性[4]。

2) 采用浊度~单沙综合曲线推求单沙，2017 年 5~9 月逐月推算的单沙基本偏大，5~9 月总输沙量偏大 19.6%，说明浊度~单沙综合曲线不具备普遍实用性。

3) 应用横江站实测资料，对浊度~单沙综合曲线关系式进行修订，因实测数据有较大的离散性，推算的单沙仍然有较大误差，5~9 月总输沙量偏小 21.0%，需要进一步探索。

4) 从图 3~图 4 中的散点图可以看出，当浊度相近时，含沙量会出现差别较大的情况，这可能是浊度测量不够准确，也可能是浊度虽然相同，但是泥沙成分不一样，如颗粒级配不一样，实测单沙差别较大。

建议：继续观测增加样本容量，尤其是含沙量大的月份加密取样，对同一个含沙水样，多次搅拌，多次测定浊度，确保实测浊度接近真值；根据浊度高低，分别建立低含沙量浊度~单沙关系曲线和高含沙量浊度~单沙关系曲线，也可以尝试拟合成指数曲线或者对数曲线，确保年度总输沙量尽量准确。

浊度受多要素的影响，即使在同一个观测断面，浊度和含沙量关系也可能随要素变化而随机改变，可以尝试多要素监测，综合推求含沙量。

参考文献

- [1] 美国 HACH 公司. 浊度测量技术及应用[Z]. HACH Company of USA. Turbidity measurement technology and application. (in Chinese)
- [2] 王渝万. 浊度仪在河流悬移质含沙量测验过程的研究[J]. 大科技, 2012(17): 158-159. WANG Yuwan. Study on turbidimeter in the testing process of suspended sediment concentration in rivers. Big Science and Technology, 2012(17): 158-159. (in Chinese)
- [3] 美国 HACH 公司. 2100AN 台式浊度仪使用说明书[Z]. HACH Company of USA. 2100AN table turbidimeter instruction manual. (in Chinese)
- [4] 付帅, 石永恩. 浊度仪在悬移质泥沙测验中的应用[J]. 水能经济, 2017(10): 368. FU Shuai, SHI Yongen Application of turbidimeter in suspended sediment load test. Water Energy Economy, 2017(10): 368. (in Chinese)