

三峡水库入库泥沙实时监测试验研究

周波, 许全喜, 李雨

(水利部长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 入库泥沙实时监测是三峡水库科学调度的重要基础。长江委水文局以比浊法浊度仪为主要研究对象, 对三峡入库悬移质泥沙进行了 1 500 余次比测试验。并考虑不同水力和泥沙因子对含沙量的影响, 提出了浊度与含沙量非线性回归模型及精度指标。研究表明, 比浊法浊度仪施测浊度具有时效性强、性能稳定、自动化程度高等特点, 计算含沙量过程与传统方法得到的含沙量变化过程一致, 沙峰含沙量、次洪输沙量推算误差均能满足三峡水库科学调度的需要, 可为三峡水库科学调度提供技术支撑。

关键词: 三峡水库; 悬移质泥沙含沙量; 实时监测; 比测试验; 浊度; 精度评价

中图分类号: TV149

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2016)04-0053-05

1 前言

入库泥沙实时监测是三峡水库科学调度的重要基础。汛期利用泥沙实时监测技术, 实时掌握入库泥沙过程、大小, 沙峰在库区沿程输移特性, 并通过水库实时调度, 提高水库的排沙比, 减少水库淤积, 对三峡水库长期使用和科学调度有着十分重要的实际和理论意义。

传统悬移质泥沙分析方法由于时效性不高, 难以满足实时监测的需求, 亟需寻求一种时效性高、精度满足工程调度需求的替代方法用于泥沙实时监测。在此背景下, 从 2011 年 5 月开始, 长江委水文局在三峡入库主要控制站引进了比浊法浊度仪, 用于悬移质泥沙监测的比测试验与研究, 并实现了悬移质泥沙含沙量试验性报讯。主要研究内容包括: (1) 不同来水来沙特性的三峡入库泥沙比测试验及实时监测数据的整理、分析和统计; (2) 研制各监测站的含沙量回归转换模型, 利用数理统计公式统计模型系统误差、沙峰含沙量及次洪输沙总量误差, 提出三峡入库泥沙实时监测精度评价指标。

2 三峡水库入库泥沙实时监测方法

三峡水库入库泥沙实时监测的技术要求包括以下几方面: (1) 时效性高; (2) 精度符合相关规范的要求; (3) 仪器性价比高、易操作。为了满足三峡水库悬

移质泥沙实时监测的需要, 入库泥沙监测仪器必须快速、高效且工作曲线稳定, 且便于率定。

为了满足三峡水库科学调度的要求, 经大量比选, 三峡水库入库泥沙监测仪器选用比浊法浊度仪, 仪器光源发射一定波长的光, 被水体中的颗粒进行散射, 该信号被各检测器接收后, 采用专门的算法进行信号处理, 最终获取水体的浊度, 其工作原理见图 1。主要性能指标为: (1) 浊度测量范围为 0~4 000 NTU; (2) 精度指标为: 当浊度为 0~1 000 NTU 时, 精度为读数的 $\pm 2\% + 0.01$ NTU; 浊度为 1 000~4 000 NTU, 精度为读数的 $\pm 5\%$ ^[1]。通过建立浊度与含沙量的相关转换模型, 利用浊度间接推求含沙量为三峡水库入库泥沙实时监测方法。

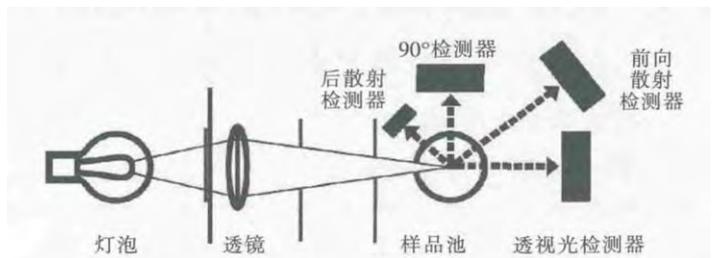


图 1 比浊法浊度仪工作原理图

Fig.1 The operation principle of the nephelometry turbidimeter

3 比测试验

3.1 试验站点

根据库区泥沙输移特性及泥沙预报的相关技术要

求,比测站点选定为三峡入库主要控制站朱沱、寸滩、清溪场、北碚、武隆等站。

3.2 技术要求

传统法含沙量是采用烘干称重法分析,技术要求应满足 GB 50159-1992 的相关条款。浊度仪应按规定进行检定、校准,保证其精度和性能达到技术要求。在每个单沙垂线水样中取代表样进行浊度分析时,应将水样搅拌均匀后再进行,待浊度施测结束后需将该水样倒回原水样中。在含沙量较小时,一般每日 8 时开展同步比测,当遇沙峰时,加密比测次数,各年测次分布能较好地控制含沙量的变化过程。研究中所用数据均能满足上述比测技术要求。

3.3 比测范围

2011~2013 年,在各比测站共收集样本 1 532 次,比测特征参数见表 1。

表1 比测特征参数表

Table1 The characteristic parameters of the comparative test

控制站	朱沱	寸滩	清溪场	北碚	武隆	
浊度 / NTU	最小值	13.3	13.4	9.5	3.74	2.41
	最大值	11000	10527	6721.7	19538	2774
含沙量 / kg·m ⁻³	最小值	0.015	0.024	0.006	0.006	0.002
	最大值	7.25	6.29	5.01	14.6	2.25
水位 / m	最小值	197.13	161.38	146.75	173.02	168.88
	最大值	215.47	186.76	169.49	199.31	184.01
流量 / m ³ ·s ⁻¹	最小值	2900	4140	5810	281	342
	最大值	49900	65900	65400	35700	6510
中值粒径 / μm	最小值	7.01	5.42	6.32	6.62	7.51
	最大值	29.77	22.08	81.47	22.66	40.12

4 浊度-含沙量转换模型研究

4.1 模型框架及建模步骤

为提高浊度推算含沙量的精度,满足三峡水库泥沙科学调度的需要,考虑不同水力和泥沙因子对含沙量的影响,研究提出了 3 类含沙量非线性回归模型:浊度-含沙量模型(简称 Turb-SSC 模型)、浊度-流量-含沙量模型(简称 Turb-Q-SSC 模型)及浊度-流量-级配特征参数-含沙量模型(简称 Turb-Q-PSD-SSC 模型),并进行模型优选。利用 SPSS 统计软件分别对各模型进行参数率定与检验,建模流程见图 2。

PSD 可表征泥沙的颗粒级配组成,其定义如下:

$$PSD = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^4}{S^4(n-1)} \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (3)$$

式中: n 为样本总数; i 为粒径级数; P_i 为小于某粒径百分数(%)。

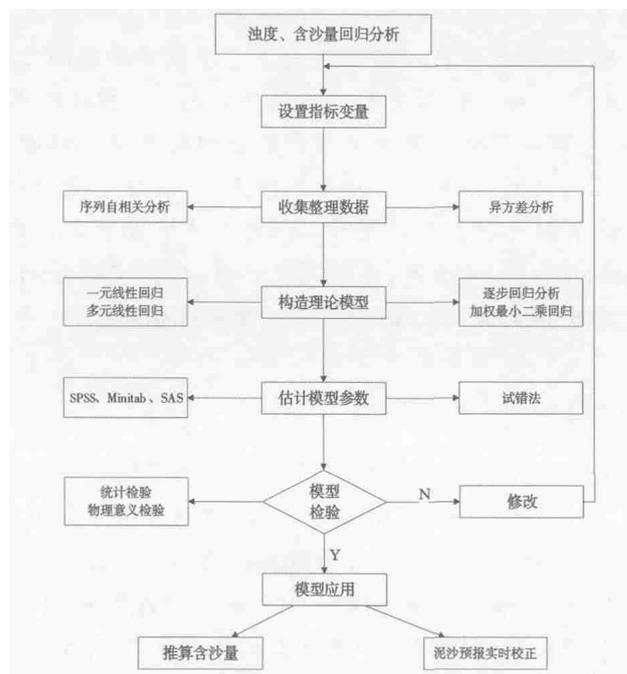


图2 浊度-含沙量回归模型建模流程图

Fig.2 The process of the turbidity-SSC regression modeling

4.2 模型研究

限于篇幅,本文以朱沱站为例详细说明模型研制的相关内容。

4.2.1 代表性分析

选取朱沱水文站 2003~2010 年 5~9 月含沙量、流量整编成果为长系列样本,与 2011~2013 年本研究采用的短序列样本资料比较,对比结果分别见表 2 和图 3。由表 2 可知,该站比测资料对应的含沙量、流量

表2 朱沱站比测资料长短系列对比表

Table2 Comparison between the long data series and short data series at the Zhutuo station

统计项目	2003~2010 年 5~9 月		2011~2013 年 5~9 月	
	整编统计		比测样本	
	含沙量 / kg·m ⁻³	流量 / m ³ ·s ⁻¹	含沙量 / kg·m ⁻³	流量 / m ³ ·s ⁻¹
最小	0.024	2 800	0.015	2 900
最大	5.79	35 200	7.25	49 900
平均	0.961	12 800	1.07	13 000

变幅已覆盖长系列资料的变化范围。从图3可见,比测资料较均匀地散布在多年平均日含沙量系列频率曲线范围。因此,比测资料具有较好的代表性。

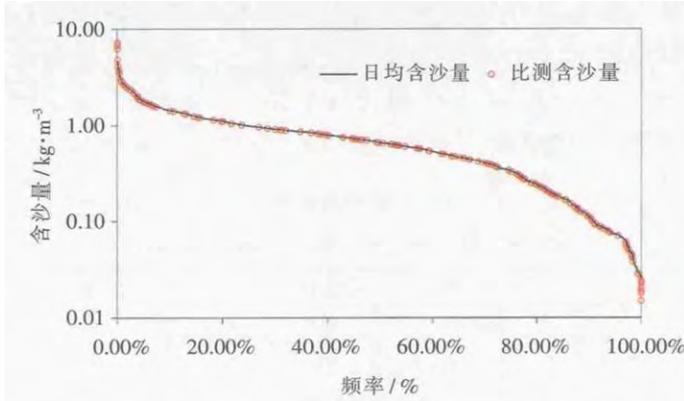


图3 朱沱站含沙量频率曲线

Fig.3 The frequency curve of the sediment concentration at the Zhutuo station

4.2.2 Turb-SSC 模型参数率定与检验

通过线型优选,一元 Turb-SSC 回归模型的线型采用非线性函数最佳^[2],其理论形式为:

$$\lg SSC = a \lg Turb^4 + b \lg Turb^3 + c \lg Turb^2 + d \lg Turb + e \quad (4)$$

利用 SPSS 统计软件进行非线性回归,其方程的形式如下:

$$SSC = 10^{0.109 \lg Turb^4 - 1.138 \lg Turb^3 + 4.149 \lg Turb^2 - 5.217 \lg Turb + 3.318} \quad (5)$$

采用 SPSS 进行非线性回归,模型统计检验如下^[3]:

(1) 浊度-含沙量非线性回归模型经过 4 次迭代计算和 2 次求导计算后,残差平方和稳定地达到最小化,计算终止。

(2) 所有参数 95% 置信区间都不包括 0,说明各个参数都有统计学意义。

(3) 进行各参数估计的相关性检验,参数 a 与参数 b 的相关系数为 -0.997,参数 a 与 c 的相关系数为 0.987,参数 a 与 d 的相关系数为 -0.970,参数 a 与 e 的相关系数为 0.941,各参数之间的相关系数均很高。

(4) 方差分析:确定性系数 R² 为 0.969,表明浊度-含沙量非线性回归模型能够解释含沙量 96.9% 的变异,模型的拟合效果良好。

4.2.3 其他模型

采用上述 Turb-SSC 的建模步骤,进行 Turb-Q-SSC 模型(式 6)及 Turb-Q-PSD-SSC 模型(式 7)的参数率定与统计检验。利用 SPSS 拟合的 Turb-Q-SSC 模型及 Turb-Q-PSD-SSC 模型分别如下:

$$SSC = 0.666 Turb^{0.723} Q^{0.253} \quad (6)$$

$$SSC = 7.283 Turb^{0.799} Q^{0.017} PSD^{-1.182} \quad (7)$$

4.2.4 模型比选

根据模型确定性系数 R²、系统误差、沙峰含沙量精度、月输沙量精度及简易程度等几个方面综合考虑进行模型优选。确定性系数、系统误差、沙峰含沙量精度对比见表 3,月输沙量推算精度对比见表 4。

表3 朱沱站三种模型模拟精度对比

Table3 Comparison of simulating accuracy between three models for the Zhutuo station

类别	确定性系数	系统偏差		沙峰含沙量 / kg·m ⁻³	
		系统误差 / kg·m ⁻³	标准差 / kg·m ⁻³	最小误差	最大误差
Turb-SSC	0.969	0.006	0.171	-0.470	0.446
Turb-Q-SSC	0.970	0.021	0.157	-0.210	0.490
Turb-Q-PSD-SSC	0.974	0.001	0.145	-0.550	-0.280

表4 朱沱站三种模型推算月沙量对比

Table4 Comparison of simulating accuracy for monthly sediment runoff computation of three models for the Zhutuo station

年份	模型	输沙量误差 / 10 ⁴ t					
		5月	6月	7月	8月	9月	小计
2011	Turb-SSC	1	78	-297	94	18	-107
	Turb-Q-SSC	30	-88	-396	96	91	-267
	Turb-Q-PSD-SSC	19	-78	-442	-21	62	-460
2012	Turb-SSC	-2	-3	-509	241	181	-91
	Turb-Q-SSC	29	-34	321	214	207	739
	Turb-Q-PSD-SSC	56	-5	-214	80	-104	-187
2013	Turb-SSC	13	10	-107	24		-60
	Turb-Q-SSC	44	29	321	230		624
	Turb-Q-PSD-SSC	61	47	134	112		354

从模型的简易程度来看,Turb-SSC 模型最简单,实际使用时只需输入浊度 Turb 即可;Turb-Q-PSD-SSC 模型最复杂,因为在实际使用时不仅要输入浊度 Turb,而且还需获得流量 Q 及颗粒级配峰度 PSD,由于泥沙颗粒级配曲线若采用传统法分析,在现场无法获取信息,仅有在使用马尔文粒度仪或现场测沙仪 LISST-100X 的情况下才能即时获取,因此该模型在实用上是最复杂的。因此,Turb-SSC 模型较优。

模型优选采用评分制,每项因素评分最优为 3 分,次优为 2 分,最差为 1 分。所有因素评分之和最高者即为相对最优模型,评分之和最低者即为相对最差模型,见表 5。从表 5 可见,朱沱站含沙量推算相对最优模型为 Turb-SSC 模型。不同模型计算含沙量与实

表5 三种模型评分结果

Table5 Scoring results of the three modes at the Zhutuo station

模型	Turb-SSC	Turb-Q-SSC	Turb-Q-PSD-SSC
确定性系数	1	2	3
推算单沙精度	2	1	3
推算沙峰含沙量精度	3	2	1
推算月输沙量精度	3	1	2
模型简易程度	3	2	1
综合评分	12	8	10

测含沙量相关关系见图 4。

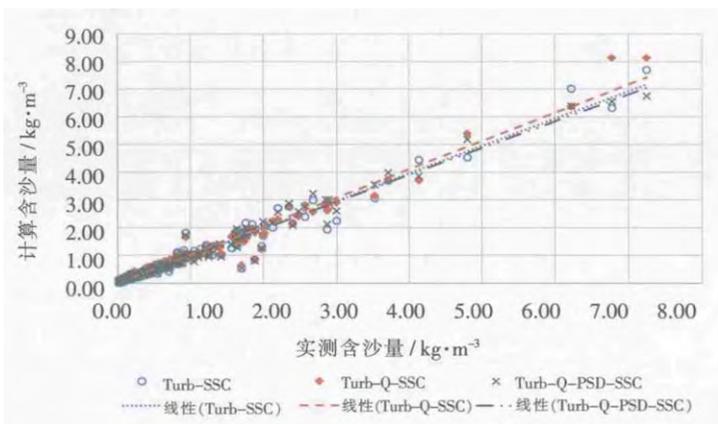


图 4 不同模型含沙量计算值与实测值相关图

Fig4 The correlation between the calculated SSC and the observed value

根据上述步骤分别进行了其余 4 站浊度-含沙量回归模型,并进行了模型优选,见表 6。

5 三峡入库泥沙实时监测精度指标评价

三峡入库泥沙实时监测精度指标评价指标包括模型系统误差、模型推算沙峰含沙量相对误差及推算次洪输沙量相对误差。精度指标详见表 7。

从表 7 可见,利用浊度仪推算单点含沙量误差较大,不能满足《河流悬移质泥沙测验规范》(GB50159-92)的精度要求。因此,在现阶段不能将浊度推算含沙量的方法作为泥沙基本资料收集的手段。主要原因在于浊度测量受泥沙颗粒形状、大小、级配组成、颗粒表

面吸附物、水质及颜色等因素影响,文中所建浊度与含沙量相关模型由于受资料等条件限制,未能全面考虑这些因素的影响,仅考虑了主要因素的影响。

图 5 绘制了浊度仪推算的沙峰含沙量与实测沙峰含沙量的所有控制站相关关系,从图可见,推算的沙峰含沙量与实测沙峰含沙量相关关系较好,确定性系数达 0.9653。

表7 模型精度指标

Table7 The statistics of the model errors

比测测站	模型系统	沙峰含沙量系统	次洪输沙量系统
	误差 / %	误差 / %	误差 / %
朱 沱	3.49	1.37	-1.56
寸 滩	17.58	4.3	-2.46
清溪场	9.76	-13.93	-3.34
北 碚	12.64	-0.34	5.28
武 隆	6.38	-7.63	-6.81

注:(1)模型系统误差:测量点含沙量对比精度指标;(2)沙峰含沙量系统误差:模型推算的沙峰含沙量与实测沙峰含沙量的相对误差;(3)次洪输沙量系统误差:各年选择主要沙峰过程的模型推算输沙总量与实测输沙总量的相对误差。

从表 7 可见,各站次洪输沙总量的系统平均相对误差均较小,均在 7.00%以内。图 6 绘制了利用浊度仪推算的各站次洪输沙总量与实测输沙总量的相关关系,从图可见,两者相关性良好,表明推算的次洪输沙

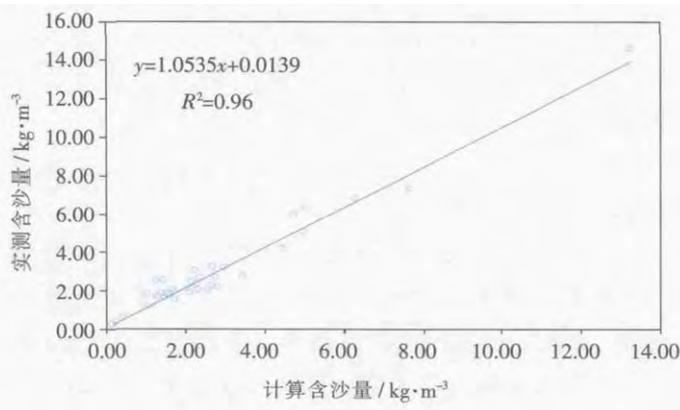


图 5 沙峰含沙量推算值与实测值相关关系图

Fig.5 The correlation between the calculated peak SSC and observed value

表6 其余4站浊度-含沙量最优回归模型

Table6 The optimal models between turbidity and SSC of the other four stations

测站	模型形式	模型方程
寸滩	Turb-Q-PSD-SSC	$SSC = 0.332Turb^{0.728}Q^{0.262}PSD^{0.734}$
清溪场	Turb-SSC	$lgSSC = -0.082(lgTurb)^4 + 0.863(lgTurb)^3 - 3.307(lgTurb)^2 + 6.394lgTurb - 3.11$
北碚	Turb-Q-SSC	$SSC = 0.689Turb^{0.861}Q^{0.160}$
武隆	Turb-SSC	$lgSSC = -0.0045(lgTurb)^4 - 0.1077(lgTurb)^3 - 0.489(lgTurb)^2 + 0.2688lgTurb + 0.4018$

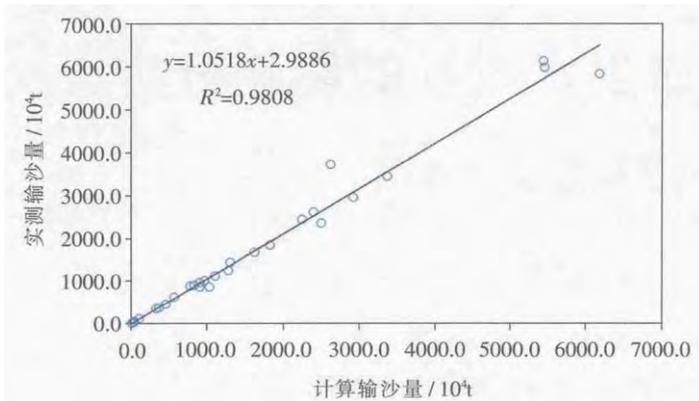


图6 次洪输沙总量推算值与实测值相关关系图

Fig.6 The correlation between the calculated sediment runoff of one flood process and observed value

总量的精度较高。

6 结论与展望

6.1 研究结论

在各类悬移质泥沙含沙量测验仪器比测试验的基础上,以比浊法浊度仪为主要研究对象,对三峡入库悬移质泥沙进行了大量、持续的比测试验,并研制了浊度与含沙量的非线性回归模型。试验结果表明,浊度仪施测浊度,具有性能稳定、效率高、自动化程度高等特点;能及时提供三峡入库含沙量变化过程,准确掌握沙峰含沙量大小及峰现时间;推算得到的含沙量过程与传统方法得到的含沙量变化过程一致,峰、谷相应,具有很好的相似性;沙峰含沙量、次洪输沙量推算误差较小;适宜于三峡水库入库泥沙实时监测,可满足三峡水

库科学调度的需要。

6.2 展望

由于浊度测量受泥沙颗粒形状、大小、级配组成、颗粒表面吸附物、水质及颜色等诸多因素的影响,现阶段所建浊度与含沙量相关模型未能全面考虑这些因素的影响,其模型推算单点含沙量误差较大,不能将其作为泥沙基本资料收集的手段。下一步应进一步分析水质、颜色、颗粒表面吸附物对浊度测量的影响,优化浊度-含沙量转换模型,提高计算精度,并定期对所建模型进行检验,使其精度满足基本资料收集的要求,并结合较为成熟的流量在线监测技术,实现输沙量的在线监测,提高泥沙监测的现代化水平。

参考文献:

- [1] Mike Sadar,程立. 水浊度精确检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Mike Sadar, CHENG Li. Water Turbidity Accurate Detection Technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [2] Patrick P. Rasmussen, John R. Gray, G. Douglas Glysson, et al. Guidelines and Procedures for Computing Time-Series Suspended-Sediment Concentrations and Loads from In-Stream Turbidity-Sensor and Streamflow Data [M]. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2009.
- [3] 何晓群. 实用回归分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (HE Xiaqun. Practical Regression Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [4] 张平,刘毅. 长江三峡水库河流泥沙系统灰色分析[J]. 水文, 1991,(1). (Grey analysis of sediment system in Three Gorges reservoir of Yangtze river [J]. Journal of China Hydrology, 1991,(1). (in Chinese))

On New Technology of Sediment Real-time Monitoring in Three Gorges Reservoir

ZHOU Bo, XU Quanxi, LI Yu

(Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Real-time monitoring of suspended sediment concentration is an important foundation for the scientific scheduling of the Three Gorges Reservoir. More than 1,500 times comparative tests between the traditional equipment and nephelometry turbidimeter have been conducted by the Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. The non-linear regression models for the conversion between turbidity and suspended sediment concentration (Hereinafter referred to as SSC) and the accuracy assessment system have been proposed in this study. The results show that the proposed non-linear regression models have a number of special features such as time-sensitive, stable performance and high automatism. Furthermore, the change processes of the SSC values calculated by the proposed models are very similar with the traditional method. The calculated values of the peak SSC or sediment runoff of one flood process have high accuracy, which can provide the technical support for the scientific scheduling of the Three Gorges Reservoir.

Key words: Three Gorges Reservoir; suspended sediment concentration; real-time monitoring; comparative test; turbidity; accuracy assessment