

# 基于半分析模型的石头口门水库总悬浮物浓度反演研究

姜广甲<sup>1,2</sup>, 刘殿伟<sup>1</sup>, 宋开山<sup>1</sup>, 徐京萍<sup>1,2</sup>, 张 柏<sup>1</sup>, 王宗明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**总悬浮物(TSM)是水质遥感反演的重要参数之一,以遥感技术为手段监测总悬浮物浓度成为未来发展的趋势。利用 2008 年 6 月 13 日在石头口门水库采集的高光谱数据和实验室分析数据,计算得到水体总悬浮物的后向散射系数,并经相关分析,选取 675 nm 处的后向散射系数建立总悬浮物浓度的反演模型,决定系数为 0.8327。与基于遥感反射率的经验方法比较,半分析方法具有一定的物理意义,反演精度更高,且在悬浮泥沙含量较高的区域效果更佳。

**关 键 词:**总悬浮物浓度;遥感;半分析方法;石头口门水库

**中图分类号:**TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2010)01-0107-05

## 1 引 言

总悬浮物(TSM)是水质遥感反演的重要参数之一,决定着水体透明度和水体内部光的分布,最终影响了水体的初级生产力,在水质评价中起关键性作用<sup>[1,2]</sup>。测量估算总悬浮物浓度的传统方法费时费力,而遥感具有快速、大范围、周期性的特点,在湖泊水质监测方面具有常规水质监测不可比拟的优越性<sup>[3]</sup>。目前,主要的遥感监测方法有 3 种<sup>[4,5]</sup>,即经验统计方法、理论分析方法和半分析方法。经验统计方法是直接建立遥感数据与水质参数的统计关系,不考虑各水质参数的物理意义,这种算法是目前应用最广泛的方法,适用于一类水体和二类水体;理论分析方法则是利用水体生物光学模型以及辐射传输理论定量描述水体组分和表观光学特性之间的关系;半分析方法是在水体组分和表观光学量的经验关系中加入固有光学量,建立相关模型,达到水体组分反演目的<sup>[6]</sup>。本文采用半分析方法,建立总悬浮物浓度与后向散射系数之间的关系,反演石头口门水库的总悬浮物浓度,具有明显的物理意义,实现了水质遥感由“黑箱”到“灰箱”的转变。

## 2 数据获取

### 2.1 研究区介绍

石头口门水库地处长春市双阳区、九台市和吉林市永吉县交界地带,坝址在九台市西营城镇石头口门村石头口门屯西北 500 m 处,距九台市 30 km,距长春市 35 km<sup>[7]</sup>。库区呈狭长型,下游两侧为山区和丘陵区,山间支流两侧多有房屋和旱地。库区上游有岔路河、双阳河两大支流,库区末端至岔路河、双阳河下游处地势平坦、土质肥沃、良田集中、人口稠密。该水库地处北温带大陆半湿润季风性气候区,年均气温 5.3℃。年降水量 369.9~667.9 mm,降水多集中在 6~9 月份,占全年降水量的 80%。年均蒸发量为 1 658.1 mm,4~6 月份蒸发量最大,占全年蒸发量的 50%,常造成春旱和严重缺水的局面。总体而言,石头口门水库水质情况较好,适宜做城市饮用水源,但水库上游严重的水体流失使得水体悬浮泥沙含量偏高<sup>[8]</sup>。

### 2.2 实验数据获取

本文采用数据是 2008 年 6 月 13 日对石头口门水库 20 个采样点进行光谱测量获得的数据,并同步

收稿日期:2009-03-08;修订日期:2009-11-16

基金项目:吉林省重点项目“长春市石头口门水库水质遥感监测研究”(20080425)。

作者简介:姜广甲(1984—),男,硕士研究生,主要从事水质遥感研究。E-mail:jgj030106@yahoo.com.cn。

通讯作者:刘殿伟(1965—),男,博士,研究员,主要从事资源环境遥感信息技术及应用研究。E-mail:liudianwei@neigae.ac.cn。

采集水样以及 GPS 定位,采样点位置如图 1。所用仪器为美国 ASD 公司生产的 FieldSpec-FR 野外光谱仪,可在 350~2 500 nm 波长范围内进行连续测量,采样间隔为 1 nm,在 350~1 000 nm 光谱分辨率 3 nm,在 1 000~2 500 nm 光谱分辨率为 10 nm,视

场角 25°。采样时,尽量在深水处采集水样和光谱,以避开水底对水体光谱的影响。测量方法采用文献[9]水体光学观测规范:水面以上测量法,分别测量水体、标准板以及天空光光谱,各记录 20 条光谱,取 400~900 nm,如图 2。

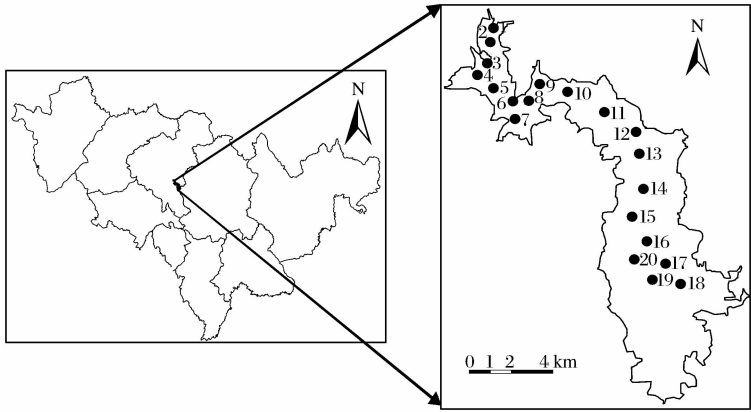


图 1 石头口门采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points in Shitoukoumen reservoir

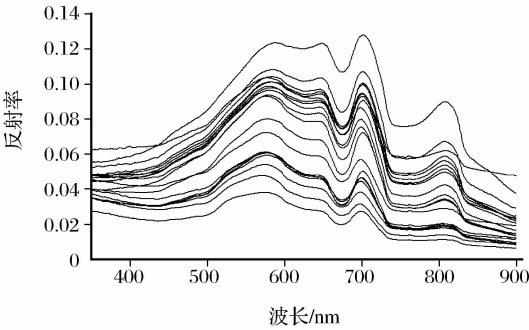


图 2 采样点水体表面光谱反射率

Fig. 2 Water surface reflectance spectra on the sampling points

将采集的水样立即带回实验室进行处理,进行水质参数测量。对水样用 0.45 μm 的 WhatmanGF/C 滤纸过滤,采用电子天平称重法完成对总悬浮物浓度的测定。同时用分光光度计法测量水体叶绿素含量。

3 研究方法 及 数据处理分析

3.1 研究方法

水体光学特性包括两个方面<sup>[9,10]</sup>:表观光学特性(Apparent Optic Properties, AOPs)和固有光学特性(Inherent Optic Properties, IOPs)。所谓表观光学特性是指随入射光场变化而变化的水体光学参数,如向上辐亮度  $L_u$ 、辐照度  $E_d$ 、漫衰减系数  $K$  等;固有光学量是仅与水体成分有关的光学量,如光束衰减系数  $c$ 、吸收系数  $a$ 、散射系数  $b$ 、散射相函数  $P$

等,这些量不随入射光场的变化而变化。在水体组分和表观光学量关系中加入固有光学量,建立相关模型,达到水体组分反演目的,即本文采用的半分析方法。

恰好位于水体表面之上的漫反射比  $R(\lambda)$  可表示为<sup>[11]</sup>:

$$R(\lambda) = \frac{E_u(0^-)}{E_d(0^+)} \tag{1}$$

其中: $0^-$  指恰好位于水面以下; $0^+$  指恰好位于水面以上; $E_u(0^-)$  指上传输的辐射通量密度; $E_d(0^+)$  指向下传输的辐射通量密度。

而恰好位于水面以下的漫反射比  $R(\lambda, 0^-)$  可表示为<sup>[12]</sup>:

$$R(\lambda, 0^-) = \frac{E_u(0^-)}{E_d(0^-)} = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \tag{2}$$

其中: $f$  与太阳高度角有关,取值为 0.33~0.38,本文取 0.33; $b_b(\lambda)$  为后向散射系数; $a(\lambda)$  指吸收系数,由实验测得。

通过计算可以得到<sup>[9]</sup>:

$$E_u(0^-) = QL_u(0^-) \tag{3}$$

$$L_u(0^-) = (n^2/t)L_w(\lambda) \tag{4}$$

$$E_d(0^-) = (1 - \rho_{aw})E_d(0^+) \tag{5}$$

$$R_{rs}(\lambda) = L_w(\lambda)/E_d(0^+) \tag{6}$$

其中: $L_w(\lambda)$  为离水辐亮度; $Q$  为光场分布函数,取值为 1.7~7<sup>[13]</sup>; $\rho_{aw}$  为气水表面辐照度反射率,通常取值为 0.04~0.06; $n$  为水的折射率,取值为

1.33;  $t$  为气—水表面透射率;  $R_s(\lambda)$  为遥感反射率,由实测得到。

由以上公式推出:

$$R(\lambda,0^-)=R_s(\lambda)\times\frac{Qn^2}{t(1-\rho_{aw})}\tag{7}$$

参考相关文献<sup>[6,9,14]</sup>,本文确定  $Q$ 、 $n$ 、 $\rho_{aw}$  和  $t$  分别取 1.7、1.33、0.05 和 0.97。

将公式(7)代入公式(2)可得:

$$f\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)+b_b(\lambda)}=R_s(\lambda)\times\frac{Qn^2}{t(1-\rho_{aw})}\tag{8}$$

水体总吸收系数可以表示为水体中各组分吸收系数的线性和,即:

$$a(\lambda)=a_w(\lambda)+a_g(\lambda)+a_p(\lambda)\tag{9}$$

其中:  $a_w(\lambda)$  代表纯水的吸收系数,在文献中可以查到<sup>[15]</sup>;  $a_p(\lambda)$  和  $a_g(\lambda)$  分别代表总悬浮物和有 色溶解有机物(CDOM) 的吸收系数,由实验测得。根据公式(9) 计算得到的水体总吸收系数如图 3。

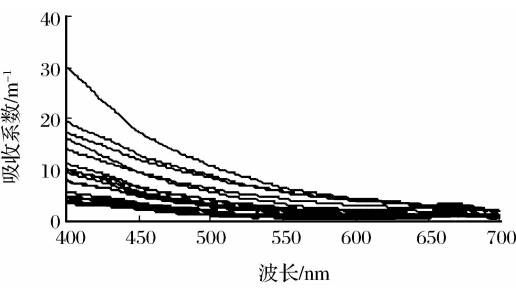


图 3 采样点水体总吸收系数  
Fig. 3 Total absorption coefficients of water on the sampling points

水体总散射系数同时可以表示水体各组分散射系数的线性和,即:

$$b(\lambda)=b_{bw}(\lambda)+b_{bp}(\lambda)\tag{10}$$

其中:  $b_{bw}(\lambda)$  代表纯水的后向散射系数,在文献中可以查到<sup>[15]</sup>;  $b_{bp}(\lambda)$  代表总悬浮物后向散射系数,是本文需要计算的。

将公式(10)、(9) 代入(8),经整理可得:

$$b_{bp}(\lambda)=\frac{a(\lambda)\cdot R_s(\lambda)\cdot Qn^2}{f\cdot t(1-\rho_{aw})-R_s(\lambda)\cdot Qn^2}-b_{bw}(\lambda)\tag{11}$$

3.2 数据处理

对数据进行平滑处理,由于太阳耀斑的影响,18、19 两个样本光谱出现异常,故舍弃。将不同波长对应的吸收系数以及在文献中获得的经验参数代入公式(11)中,最终得到各个波长不同采样点总悬浮物散射系数。计算各样点散射系数与总悬浮物浓度的相关系数,得知波长 675 nm 处相关性最好(图 4)。建立 675 nm 处后向散射系数与总悬浮物之

的统计关系,如图 5。

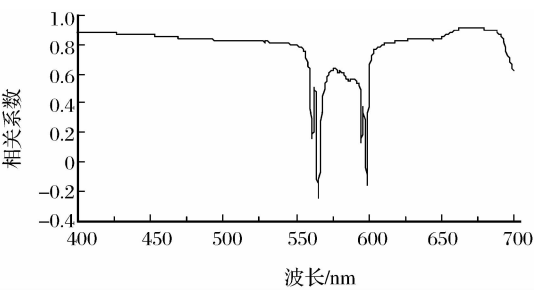


图 4 后向散射系数与总悬浮物浓度相关系数  
Fig. 4 Correlation between TSM concentration and back-scattering

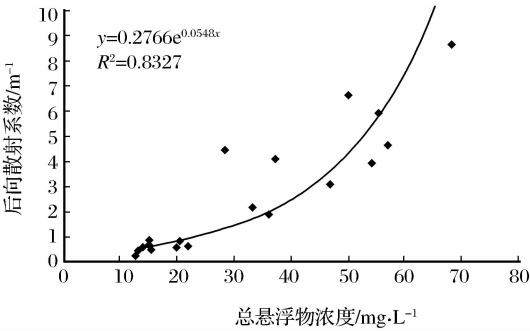


图 5 675 nm 处后向散射系数与总悬浮物浓度拟合曲线  
Fig. 5 Curve fitting between TSM concentration and back-scattering at 675 nm

3.3 数据分析

为了比较半分析模型的精度,本文还建立了经验模型。两种方法反演的总悬浮物浓度与实测总悬浮物浓度的比较结果如图 6。计算各回归方程的决定系数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE),结果如表 1。总体而言,半分析模型精度比基于遥感反射率的经验模型精度要高,这主要是半分析模型是建立在水

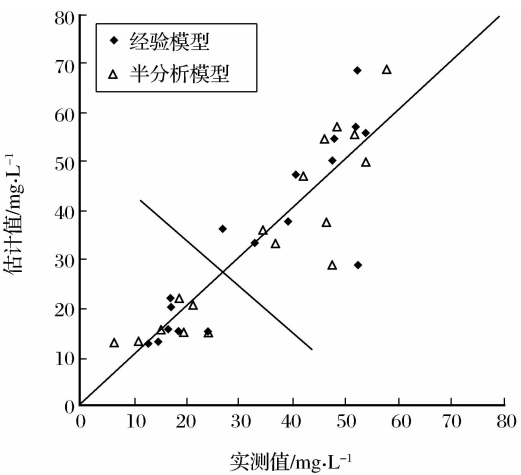


图 6 反演的总悬浮物浓度与实测值比较  
Fig. 6 Comparison of simulated TSM and in-situ STM

表 1 经验模型和半分析模型比较表

Table 1 Comparison between empirical model and semi-empirical model

模型	回归方程	相关系数	均方根误差/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
经验模型	$\text{TSM}=7.7117 * \exp(25.67 * R_n)$	0.8255	8.10
半分析模型	$\text{TSM}=15.187 * \ln(B_{\text{bp}})+25.1$	0.8327	7.18

体辐射传输理论上的,具有明显的物理意义,虽然在计算过程中做了一定的假设,即经验参数的选择,但在采样时,天气晴朗,基本无风,采样时间比较集中,石头口门水库面积较小,可以在较短的时间内完成整个实验,因此可以选用稳定的经验参数,满足本文的需求。而直接建立遥感反射率与总悬浮物浓度之间的关系,只是一种统计关系,没有特定的物理意义,并且遥感反射率受水中其它组分的影响,并不能只是反映某一种组分信息,虽然在特定的波长处水体某种组分对遥感反射率的影响占主要地位,但并没有消除其它组分的影响。

半分析模型、经验模型反演的总悬浮物浓度与实测总悬浮物浓度进行比较,并通过计算得到各样点的相对误差(RD)如图 7。从图 6 和图 7 可以看出

头口门水库悬浮泥沙含量比较高,因此石头口门水库水质适合采用该方法反演总悬浮物浓度。

4 结 语

本文采用半分析模式对石头口门水库进行了总悬浮物浓度的反演,并与基于遥感反射率的经验模式进行了比较。结果表明,基于生物光学模型的总悬浮物浓度反演精度要高于经验模式的反演精度,与其它学者<sup>[2,8]</sup>研究相似,根据计算出的总悬浮物散射系数与实测数据之间的相关性大小,最终选择 675 nm 作为反演总悬浮物浓度的最佳波段<sup>[17]</sup>。并且对石头口门水库水体总悬浮物组成成分进行了分析,认为在水体组分中以悬浮泥沙为主时会有更好的反演效果。

参考文献:

[1] Zhang Yunlin, Qin Boqiang, Chen Weimin, *et al.* A Study on Total Suspended Matter in Lake Taihu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(3): 266-271. [张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体中悬浮物研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3): 266-271.]

[2] Zhang B, Li J, Shen Q, *et al.* A Bio-optical Model Based Method of Estimating Total Suspended Matter of Lake Taihu from Near-infrared Remote Sensing Reflectance[J]. Environment Monitoring Assessing, 2008, 145: 339-347.

[3] Pan Delu, Ma Ronghua, Several Key Problems of Lake Water Quality Remote Sensing[J]. Journal of Lake Science, 2008, 20(2): 139-144. [潘德炉, 马荣华. 湖泊水质遥感的几个关键问题[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 139-144.]

[4] Qi Feng, Wang Xuejun. Application of Remote Sensing Techniques in Monitoring and Assessing Inland Water Quality[J]. Advances in Environmental Science, 1999, 7(3): 90-99. [齐峰, 王学军. 内陆水体水质监测与评价中的遥感应用[J]. 环境科学进展, 1999, 7(3): 90-99.]

[5] Yang Yipeng, Wang Qiao, Wang Wenjie, *et al.* Application and Advances of Remote Sensing Techniques in Determining Water Quality[J]. Geography and Geo-information Science, 2004, 20(6): 6-12. [杨一鹏, 王桥, 王文杰, 等. 水质遥感监测技术研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 6-12.]

[6] Wang Fan. Estuary Water Suspended Matter Inherent Optical Property and Concentration Remote Sensing Inversion Model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. [王繁. 河口水体

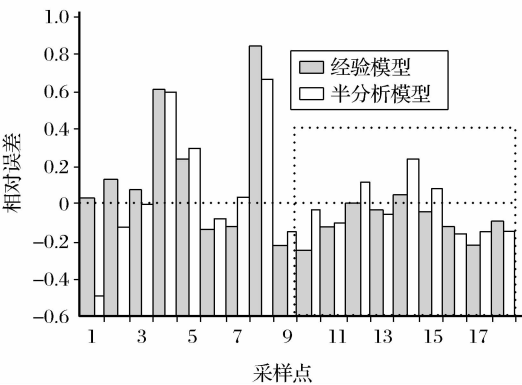


图 7 反演的总悬浮物浓度与实测值相对误差  
Fig. 7 Relative deviation of simulated TSM and in-situ STM

(用虚线给出), TSM 有明显的分界点, 即从第 9 个采样点开始, TSM 浓度突然增加, 但两种模型反演的相对误差都比较小。从第 9 个点开始, 采样点逐渐延伸到水库的上游。肖桂义<sup>[16]</sup>、徐京萍<sup>[8]</sup>等研究表明, 石头口门水库上游主要是由岔路河、双阳河上游的水土流失导致大量泥沙进入河道, 使得石头口门水库水体总悬浮物中泥沙含量偏高。这说明上游主要是悬浮泥沙对后向散射贡献, 影响比较单一, 反演精度也相对比较高。总悬浮物浓度是水质遥感反演的一个重要参数, 其后向散射对水体光谱影响最大, 利用该方法反演总悬浮物浓度效果较好。而石

- 悬浮物固有光学性质及浓度遥感反演模式研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.]
- [7] Ning Yaling. Simulation and Retrieval to Water Quality Parameters by Remote Sensing in Shitoukoumen Reservoir of Changchun[D]. Changchun: Jilin University, 2007. [宁亚灵. 长春石头口门水库水质参数遥感反演与模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.]
- [8] Xu Jingping, Zhang Bai, Lin Yu, *et al.* Estimating Total Suspended Sediments Concentrations and Transparency with Hyper-spectral Reflectance in Shitoukoumen Reservoir, Jilin Province[J]. Journal of Lake Science, 2007, 19(3): 269-274. [徐京萍, 张柏, 蔺钰, 等. 结合高光谱数据反演吉林石头口门水库悬浮物含量和透明度[J]. 湖泊科学, 2007, 19(3): 269-274.]
- [9] Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong, *et al.* The Methods of Water Spectra Measurement and Analysis I: Above-Water Method[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 37-44. [唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.]
- [10] Mobley C D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural water[M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [11] Morel A, Prieur L. Analysis of Variations in Ocean Color[J]. Limnol. Oceanogr., 1977, 22(4): 709-722.
- [12] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed Relationship between the Inherent and Apparent Optical Properties of a Flat Homogeneous Ocean[J]. Applied Optics, 1975, 14(2): 417-427.
- [13] Gons H J. Optical Teledetection of Chlorophyll a in Turbid Inland Water[J]. Environment Science & Technology, 1999, 33(7): 1127-1132.
- [14] Li Junsheng, Zhang Bing, Zhang Xia, *et al.* A Method of Calculating Back-scattering Coefficients of Suspended Matter in Water[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(2): 193-198. [李俊生, 张兵, 张霞, 等. 一种计算水体中悬浮物后向散射系数的方法[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 193-198.]
- [15] NASA/TM-2003-211621/Rev4-Vol. IV, Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4 [Z]. Volume IV: Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations, Field Measurements and Data Analysis Protocols, Greenbelt, Maryland 20771, May 2003.
- [16] Xiao Guiyi, Lu Jilong, Cai Bo, *et al.* Water Quality of the Shitoukoumen Reservoir[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(6): 61-63. [肖桂义, 陆继龙, 蔡波, 等. 长春市石头口门水库水质演变及对策[J]. 地质与勘探, 2003, 39(6): 61-63.]
- [17] Liu Qian, Rossiter D G. Estimation on Suspended Sedimentation Concentration of Poyang Lake Using MODIS and Hyper-spectral Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(1): 7-11. [刘茜, David G Rossiter. 基于高光谱数据和 MODIS 影像的鄱阳湖悬浮泥沙浓度计算[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(1): 7-11.]

## Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Shitoukoumen Reservoir Based on a Semi-empirical Model

JIANG Guang-jia<sup>1,2</sup>, LIU Dian-wei<sup>1</sup>, SONG Kai-shan<sup>1</sup>, XU Jing-ping<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Bai<sup>1</sup>, WANG Zong-ming<sup>1</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Total suspended matter is an important water quality parameter, and it has a bright future for remote sensing to monitor the concentration of TSM. The way to inverse the water quality parameters mainly contains three methods, and the semi-empirical algorithm is applied in this paper. Based on the in situ spectral and TSM concentration in Shitoukoumen reservoir in June 13th, 2008, the back-scattering coefficient of TSM is calculated. Also, it needs to select some empirical parameters and optimum wavelength (675 nm). And then, regression algorithm is built between the in situ TSM concentration and back-scattering coefficient with the determination coefficient 0.8327. It is clear that semi-empirical algorithm has more advantages in the inversion precision than empirical one which is based on the remote sensing reflectance, because of the inherent optic parameters involved. Furthermore, it will lead better results in the area which is rich in suspended sediment.

**Key words:** Total suspended matter; Remote sensing; Semi-empirical Algorithm; Shitoukoumen