

# 珠海一号高光谱卫星的于桥水库水质参数反演初步研究

殷子瑶<sup>1,2</sup>, 李俊生<sup>1,2\*</sup>, 范海生<sup>3</sup>, 高敏<sup>1,2</sup>, 谢娅<sup>1</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 数字地球重点实验室, 北京 100094

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 珠海欧比特宇航科技股份有限公司, 广东 珠海 519080

**摘要** 水体中的悬浮物浓度和透明度是水质调查中的基本参量,也是评价水环境优劣的重要指标。卫星遥感技术可以大范围、较快速、低成本地实现主要水质参数的反演,但是对于水质复杂多变且水域面积较小的内陆水体来说,目前常用的卫星不能满足水质参数的反演需要。珠海一号卫星星座是由珠海欧比特宇航公司发射的新型高光谱卫星星座,具有高空间、高光谱、高时间分辨率的特点,在内陆水体水质监测中具有重要潜力;然而目前对于运用珠海一号数据进行内陆水体水质参数遥感监测的适用性有待研究,需要开展星地同步实验检验其应用效果。以珠海一号高光谱卫星作为遥感数据源,以于桥水库为研究区,利用与卫星同步的水面实测数据,使用经验回归的方法分别构建了悬浮物和透明度的反演模型,并开展了悬浮物浓度和透明度的模型精度检验。检验结果证明,于桥水库悬浮物浓度和透明度的反演模型最佳波段组合分别为  $R_{rs}(684)/R_{rs}(540)$  和  $R_{rs}(656)/R_{rs}(556)$ ,模型反演相对误差分别为 8.6% 和 11.7%,均方根误差分别为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 18.2 cm。利用建模公式得到了 2018 年 11 月 22 日于桥水库的水质参数分布图,发现于桥水库的悬浮物浓度空间分布呈现北高南低的特点,而水体透明度的空间分布呈现出北低南高的分布特征,这种空间分布特征应该主要是由于于桥水库北部水较浅南部水较深,水越深底泥越不容易再悬浮导致的。基于星地同步实验的于桥水库水质参数反演建模和检验结果初步说明了珠海一号高光谱卫星在定量反演内陆水体水质参数方面具有潜力,未来需要开展更多的星地同步实验进一步完善预处理和反演模型。

**关键词** 珠海一号;高光谱;于桥水库;悬浮物浓度;透明度

**中图分类号**: X87; X832 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0494-05

## 引言

卫星遥感技术在内陆水体水质监测中具有重要作用,可以大范围、较快速、低成本的实现主要水质参数的反演<sup>[1-2]</sup>。不过,内陆水体水质监测也对卫星遥感技术提出了较高要求:小型水体需要较高的空间分辨率;快速变化的水质要求较高的时间分辨率;复杂多变的水体光学特性要求较高的光谱分辨率。因此,同时满足高空间、高时间、高光谱分辨率的卫星数据在内陆水体监测中具有巨大的优势,但是单颗卫星难以达到这一指标,只能通过星座的方式实现。珠海欧比特宇航科技股份有限公司于 2018 年 4 月 26 日成功发射了 4 颗珠海一号高光谱卫星,2019 年 9 月 19 日又成功发射了 4 颗珠海一号高光谱卫星。珠海一号高光谱卫星具有一致的参

数设置,在 400~1 000 nm 的波谱范围内具有 32 个波段,光谱分辨率达到 2.5 nm;成像幅宽 150 km,空间分辨率 10 m;8 颗卫星组网形成的高光谱卫星星座可以实现 2.5 d 重返周期<sup>[3]</sup>。因此,珠海一号高光谱卫星星座同时具有了高光谱、高空间、高时间分辨率,在内陆水体水质监测中具有重要潜力。不过,由于珠海一号高光谱卫星投入运行不久,利用其数据进行的研究还较少,并且目前研究方向主要集中在地物分类,关于内陆水体的研究很少,并且缺少星地同步实验检验其应用效果。

以 2018 年 11 月 22 日获取的覆盖于桥水库珠海一号高光谱影像为遥感数据源,基于星地同步实验获取的水质参数数据,开展珠海一号的水质参数反演建模和评价工作,探索珠海一号高光谱卫星在水质参数反演方面的潜力。

收稿日期: 2019-12-29, 修订日期: 2020-04-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41971318), 珠海引进创新创业团队(ZH01110405170027PWC)资助

作者简介: 殷子瑶, 1998 年生, 中国科学院空天信息创新研究院硕士研究生 e-mail: yinziyao19@mails.ucas.ac.cn

\* 通讯作者 e-mail: lijis@radi.ac.cn

## 1 研究区与研究数据

### 1.1 研究区概况

于桥水库(39°99′71″—40°07′44″N, 117°43′09″—117°68′26″E)是天津市的主要供水源之一,坐落在天津市蓟州区城东,流域总面积超过 2 000 km<sup>2</sup>,是国家级重点大型水库<sup>[4-5]</sup>。近年来随着经济的发展,于桥水库水环境状况恶化,富营养化问题较为严重<sup>[6]</sup>,而且地表径流携带了较多悬浮泥沙和有色可溶性有机物,导致于桥水库水体光学特性比较复杂,水

质参数遥感监测的难度较大。通过分析于桥水库中总悬浮物浓度(total suspended matter, TSM)、水体透明度(secchi disk depth,  $Z_{sd}$ )的分布特征,可以预测及了解于桥水库水质的发展趋势,为相关部门进行水资源规划提供支撑。

### 1.2 遥感数据

使用的遥感数据为珠海一号高光谱数据,该数据的辐射量化级别为 10 bit,辐射动态范围为 1 024 级,数据级别为 L1A 级,即 DN 值,具体波段参数信息如表 1 所示。获取了与实测数据同步的一景珠海一号高光谱影像,成像日期为 2018 年 11 月 22 日。

表 1 珠海一号高光谱卫星波谱基本信息

Table 1 Basic spectral information of Zhuhai-1 hyperspectral satellite

波段	中心波长/nm	波段	中心波长/nm	波段	中心波长/nm	波段	中心波长/nm
1	466	9	596	17	716	25	836
2	480	10	610	18	730	26	850
3	500	11	626	19	746	27	866
4	520	12	640	20	760	28	880
5	536	13	656	21	776	29	896
6	550	14	670	22	790	30	910
7	566	15	686	23	806	31	926
8	580	16	700	24	820	32	940

### 1.3 卫星同步水面实验

2018 年 11 月 22 日在于桥水库开展水面实验,布设了 13 个采样点,如图 1 所示。现场利用赛克盘法测量了水体透明度,并采集水样,送到实验室内利用烘干称重法测量悬浮物浓度。

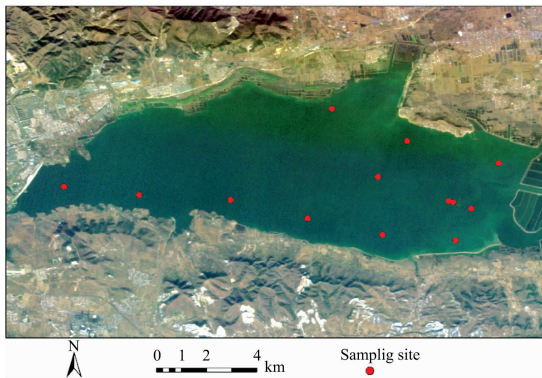


图 1 2018 年 11 月 22 日珠海一号高光谱彩色合成图像及水面实验采样点位

Fig. 1 Hyperspectral color synthetic image of Zhuhai-1 and sampling points of water surface experiment on November 22, 2018

## 2 实验部分

### 2.1 珠海一号高光谱图像定量化预处理

基于卫星遥感图像的水质参数定量反演,要对图像进行定量化预处理,首先计算了原始图像各波段的信噪比;然后进行辐射定标,将图像数码值转为大气层顶辐亮度;再进行

大气校正,将大气层顶辐亮度转为地面的反射率。

同时采用 FLAASH(fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes)模型的大气校正方法,对珠海一号高光谱影像进行大气校正,获取了影像的地表反射率,其中用到的能见度可以根据当天 MODIS 气溶胶反演产品换算得到。水质参数反演一般使用离水反射率或遥感反射率,它与地表反射率存在差别,需要在地表反射率的基础上进一步校正天空光反射率的影响。因此在地表反射率的基础上采用了一种减去近红外(NIR)波段最小值来校正天空光反射的影响,得到离水反射率<sup>[7]</sup>;离水反射率除以  $\pi$ ,便可最终获得水色遥感中常用的遥感反射率 $[R_{rs}(\lambda)]$ 。

### 2.2 水质参数反演建模方法

纯水以及水中的悬浮颗粒和可溶解物质等对太阳辐射的吸收和散射及水体的状态决定了水体的光谱特征。太阳辐射在水中的传输和分布主要受悬浮颗粒物、浮游植物、溶解性有机物等物质的影响,并且传感器接收的离水辐射的差异主要取决于水体中不同组分对光的吸收和散射。因此,用遥感技术定量监测水质参数的本质是水体中不同组分含量、浓度的差异在一定波谱范围内引起的反射率差异<sup>[8]</sup>的度量。

常用的水体悬浮物浓度和透明度反演算法主要可以分为两大类,即解析/半解析法和经验/半经验法。本工作主要是初步检验珠海一号高光谱在悬浮物和透明度反演中的效果,因此使用了比较简单的经验/半经验方法进行反演建模分析。在统计学中,常见的回归方法主要包括单自变量的线性、非线性回归,多自变量的多元回归、主成分回归,以及在各种自变量数据转换之后的相关分析等。本研究尝试对各波段及波段组合进行分析,选择最优方法建立基于珠海一号数据的于桥水库悬浮物浓度、透明度反演模型。

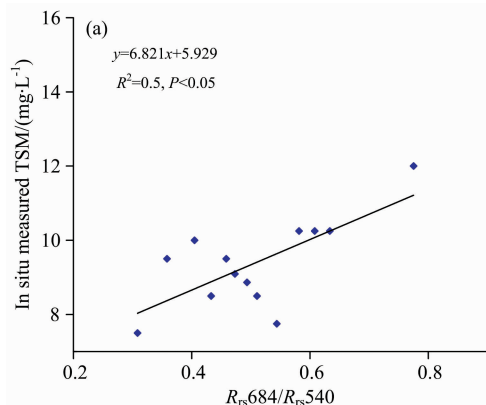
根据 13 个采样点的经纬度位置, 提取珠海一号高光谱离水反射率图像中对应的数值, 组成数据对, 用于水质参数反演建模和精度评价。为了减少采样点与图像象元的匹配误差, 需要保证采样点附近的水体图像是比较均匀的。因此, 要求每个采样点对应的图像像素为中心的  $3 \times 3$  象元的变化率小于 40%<sup>[9-10]</sup>。

利用最终确定的实测和图像数据对, 对悬浮物和透明度反演的常用波段和波段组合进行统计分析, 构建适用于珠海一号高光谱图像的于桥水库悬浮物和透明度反演模型。

### 2.3 水质参数反演模型精度评价方法

由于同步采样点比较少, 只有 13 个, 不宜再划分为训练样本和检验样本, 因此采用每次留一点法 (leave-one-out cross validation, LOOCV) 进行精度评价<sup>[11-12]</sup>。该方法的主要思想是每次保留 1 个采样点的值, 用其余 12 个点的采样值进行建模, 然后把模型应用于保留的这个点; 这样迭代 13 次, 就得到 13 个点对应的反演结果, 从而进一步计算反演精度。与其他验证方法相比, LOOCV 方法不会受到建模和验证样本的分离的影响, 消除了潜在异常值对算法精度的影响, 更适合于小样本数据的验证<sup>[10-13]</sup>。在此基础上, 采用统计参数对水质参数的反演精度进行检验, 包括平均相对误差 (mean relative error, MRE) 和均方根误差 (root mean square Error, RMSE) 二者公式如式(1)和式(2)

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - X|}{X} \times 100\% \quad (1)$$



$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - X)^2}{n}} \quad (2)$$

式中,  $Y$  是水质参数的反演值,  $X$  是水质参数的实测值,  $n$  为样本数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水质参数反演模型构建结果

利用大气校正后的遥感反射率与同步采样点的悬浮物浓度和透明度值进行单波段/波段组合的 Pearson 相关性分析和显著性检验, 并利用 LOOCV 法建模, 发现  $R_{rs}(684)/R_{rs}(540)$  与悬浮物浓度的相关系数最高,  $R_{rs}(656)/R_{rs}(556)$  与透明度的相关系数最高。据此, 建立了于桥水库悬浮物浓度和透明度的反演模型:

$$\text{TSM} = 6.821 \times \left[ \frac{R_{rs}(684)}{R_{rs}(540)} \right] + 5.929 \quad (3)$$

$$Z_{sd} = 283.266 \exp \left[ -1.297 \times \left( \frac{R_{rs}(656)}{R_{rs}(556)} \right) \right] \quad (4)$$

式(3)中, TSM 为于桥水库的悬浮物浓度,  $R_{rs}(684)/R_{rs}(540)$  为珠海一号 684 nm 波段与 540 nm 波段遥感反射率的比值。式(4)中,  $Z_{sd}$  为于桥水库的水体透明度,  $R_{rs}(656)/R_{rs}(556)$  为珠海一号 656 nm 波段与 556 nm 波段遥感反射率的比值, 建模的结果如图 2 所示。

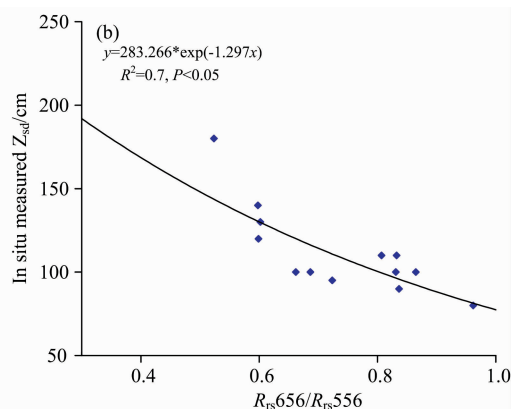


图 2 于桥水库悬浮物浓度和透明度的模型构建

Fig. 2 Model construction of suspended matters concentration and water clarity in Yuqiao Reservoir

### 3.2 水质参数反演模型精度评价结果

根据留一验证法, 对构建的悬浮物浓度和透明度模型进行了精度验证(图 3)。验证发现悬浮物反演模型的平均相对误差为 8.6%, 均方根误差为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 透明度反演模型的平均相对误差为 11.7%, 均方根误差为 18.2 cm。两种水质参数实测值与反演值的散点都较均匀的分布在 1:1 线的两侧, 说明构建的模型可以用来反演于桥水库的水体悬浮物浓度和透明度。

### 3.3 于桥水库水质参数反演结果

利用于桥水库悬浮物浓度和水体透明度的反演模型, 应

用于珠海一号高光谱遥感反射率图像, 得到了于桥水库悬浮物浓度和水体透明度的空间分布图(图 4)。从图中可以看到, 于桥水库的悬浮物浓度空间分布呈现出明显的北高南低的特点, 变化范围  $6 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而水体透明度呈现出北低南高的特点, 变化范围为  $40 \sim 170 \text{ cm}$ 。

于桥水库悬浮物浓度北高南低的分布特点与于桥水库的水深分布有关。于桥水库南部是古河道, 水体相对比较深, 北部水体相对较浅<sup>[14]</sup>。水体越深, 底泥越不容易再悬浮<sup>[15]</sup>, 水体表层的悬浮物浓度一般会越低, 透明度也会越高。

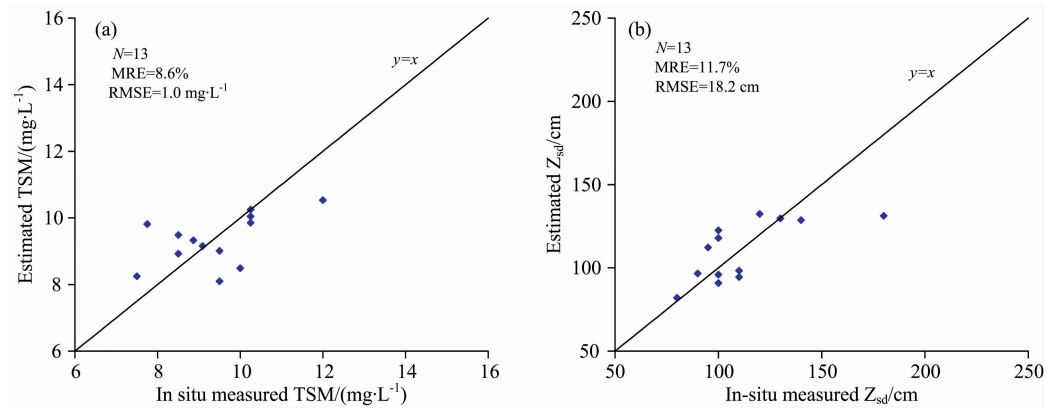


图 3 于桥水库悬浮物浓度和透明度模型的验证

Fig. 3 Model validation of suspended matters concentration and water clarity in Yuqiao Reservoir

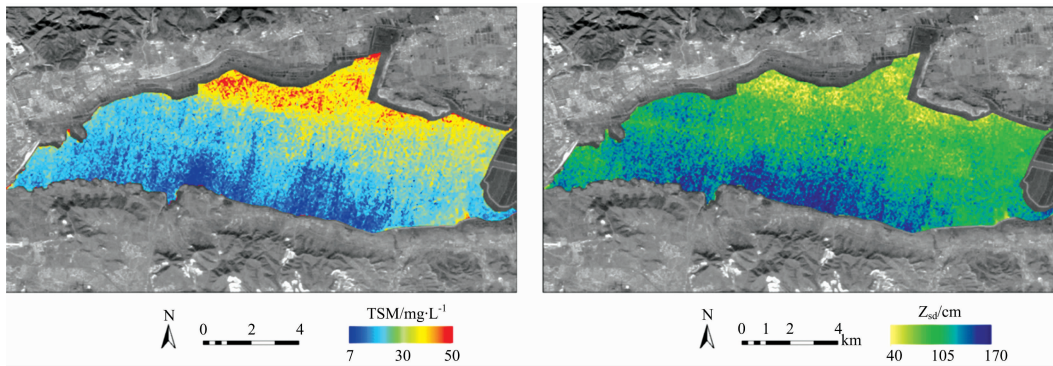


图 4 2018 年 11 月 22 日珠海一号高光谱影像反演的于桥水库水体悬浮物浓度和透明度分布图

Fig. 4 Distribution of suspended matters concentration and water clarity in Yuqiao Reservoir retrieved from Zhuhai-1 hyperspectral satellite; data on Nov. 11, 2018

## 4 结 论

高光谱卫星具有较多波段, 可以从中选择最适用于研究区水质参数反演建模的波段。使用珠海一号高光谱卫星数据, 以于桥水库为研究区, 定量反演了于桥水库的悬浮物浓度、水体透明度, 对反演数据进行了验证, 并绘制了于桥水库水体悬浮物浓度和透明度的空间分布图。通过研究得到如下结论:

(1) 珠海一号高光谱遥感影像  $R_{rs}(684)/R_{rs}(540)$  波段组合是于桥水库悬浮物浓度反演建模的最佳波段组合, 模型的决定系数  $R^2$  为 0.5, 平均相对误差为 8.6%, 均方根误差为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

## References

- [1] Bukata R P. Journal of Great Lakes Research, 2013, 39: 2.
- [2] Li J S, Wang S L, Wu Y H, et al. International Journal of Digital Earth, 2016, 9(8): 788.
- [3] YUN Xing(云 行). Satellite Application(卫星应用), 2017, 6: 78.
- [4] CHANG Chun, FENG Ping, SUN Dong-mei, et al(常 淳, 冯 平, 孙冬梅, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2015, 35(9): 2805.

(2) 以珠海一号高光谱遥感影像  $R_{rs}(656)/R_{rs}(556)$  波段组合是于桥水库透明度反演建模的最佳波段组合, 模型的决定系数  $R^2$  为 0.7, 平均相对误差为 11.7%, 均方根误差为 18.2 cm。

(3) 于桥水库的水体悬浮物浓度空间分布呈现北高南低的特点, 水体透明度的空间分布则与之相反, 呈现出北低南高的分布特征, 这种分布特征的形成应该是于桥水库北部水较浅, 南部水较深导致的。

(4) 基于星地同步实验的于桥水库水质参数反演建模和检验结果初步说明了珠海一号高光谱卫星在定量反演内陆水体水质参数方面具有潜力, 未来需要开展更多的星地同步实验进一步完善预处理和反演模型。

- [ 5 ] FANG Xu, DUAN Hong-tao, CAO Zhi-gang, et al(房旭, 段洪涛, 曹志刚, 等). Journal of Lake Sciences(湖泊科学), 2018, 30(4): 967.
- [ 6 ] ZHOU Ping, CHEN Dong-sheng, ZHAO Wei-guo(周平, 陈东升, 赵卫国). Water Sciences and Engineering Technology(水科学与工程), 2010, 5: 18.
- [ 7 ] Wang S L, Li J S, Zhang B. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(24): 6076.
- [ 8 ] Le C F, Hu C M, Cannizzaro J, et al. Remote Sensing of Environment, 2013, 129: 75.
- [ 9 ] Bailey S W, Werdell P J. Remote Sensing of Environment, 2006, 102: 12.
- [10] El-Alem A, Chokmani K, Laurion I, et al. Remote Sensing, 2012, 4: 2373.
- [11] Efron B. Journal of the American Statistical Association, 1983, 78: 316.
- [12] Feng L, Hu C M, Han X X, et al. Remote Sensing, 2015, 7: 275.
- [13] Shao Z F, Er M J. Neurocomputing, 2016, 194: 260.
- [14] YUE Ang, JI Yun-feng, LIU Hong-lei, et al(岳昂, 戢运峰, 刘红磊, 等). Journal of Safety and Environment(安全与环境学报), 2019, 19(4): 1448.
- [15] Gao L, Yao H Y, Zhang M M, et al. Journal of Marine Sciences, 2017, 35(3): 79.

## Preliminary Study on Water Quality Parameter Inversion for the Yuqiao Reservoir Based on Zhuhai-1 Hyperspectral Satellite Data

YIN Zi-yao<sup>1, 2</sup>, LI Jun-sheng<sup>1, 2\*</sup>, FAN Hai-sheng<sup>3</sup>, GAO Min<sup>1, 2</sup>, XIE Ya<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Zhuhai Orbita Aerospace Technology Co., Ltd., Zhuhai 519080, China

**Abstract** The concentration of suspended matter and water clarity are basic parameters for water quality investigations and important indexes to evaluate the quality of water environments. Remote sensing technologies can be used to realize the inversion of the main water quality parameters in a large range, quickly, and at low cost; however, those same technologies cannot be applied to inland water bodies that extend over small areas and have complex and variable water qualities. The Zhuhai-1 satellite constellation is composed of new hyperspectral satellites launched by the Zhuhai Orbita Aerospace Technology Company. Such satellites possess high spatial, temporal, and hyperspectral resolutions; moreover, they have considerable potential for the monitoring of inland water quality. The applicability of remote sensing to the monitoring of inland water quality parameters using data from the Zhuhai-1 satellites has not been studied in detail, and satellite ground synchronization experiments need to be carried out to test its effectiveness. In this paper, we considered remote sensing data collected from those hyperspectral satellites to study the Yuqiao reservoir; based on water surface synchronous data, we constructed inversion models of suspended matter and water clarity using the empirical regression method, and subsequently tested their accuracy. The test results showed that the best band combinations for the inversion models, in order to obtain the concentration of suspended matter and the water clarity in the Yuqiao reservoir, were  $R_{rs}(684)/R_{rs}(540)$  (relative error=8.6%; root mean square error=1.0 mg · L<sup>-1</sup>) and  $R_{rs}(656)/R_{rs}(556)$  (relative error=11.7%; root mean square error=18.2 cm), respectively. The distribution map of the water quality parameters in the Yuqiao Reservoir on November 22, 2018 was obtained by using the modeling formula; suspended matter was found to be more abundant in the north than in the south, while water clarity was lower in the north and higher in the south. These spatial distributions mainly depended on the configuration of the Yuqiao reservoir, in which the water depth increases from north to south; in the case of a deeper water column, sediments are less likely to be resuspended. According to the inversion modeling of the water quality parameters and to the test results of the measurements conducted on the Yuqiao Reservoir, we conclude that the hyperspectral remote sensing data of Zhuhai-1 can be used to retrieve the water quality parameters quantitatively. These results have important implications for the monitoring of inland water quality; still, more satellite-ground synchronization experiments are needed to improve further the preprocessing of data and the correspondent inversion models.

**Keywords** Zhuhai-1; Hyperspectral satellite; Yuqiao reservoir; Suspended matter concentration; Water clarity