

引用:姚华鑫,肖潇,陈品祥,等.新一代国产高光谱 ZY1-02E 卫星在内陆水体水质参数反演中的应用[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(1):11-20.

YAO Huaxin, XIAO Xiao, CHEN Pinxiang, et al. Application of China's new generation of ZY1-02E hyperspectral satellite in the inversion of water quality parameters in inland waters[J]. Journal of North China university of water resources and electric power (natural science edition), 2024, 45(1): 11-20.

DOI:10.19760/j.nwu.zk.2024002

新一代国产高光谱 ZY1-02E 卫星在内陆水体水质参数反演中的应用

姚华鑫^{1,2,3}, 肖潇^{4,5}, 陈品祥^{4,5}, 周庆^{4,5}, 郭津^{4,5}, 刘瑶⁶,
张方方^{1,3}, 王胜蕾^{1,3}, 李俊生^{1,3,7}

- (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 资源与环境学院, 北京 100049;
3. 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094; 4. 北京市测绘设计研究院, 北京 100038;
5. 城市空间信息工程北京市重点实验室, 北京 100038; 6. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;
7. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要:2021 年 12 月 26 日,我国成功发射资源一号 02E (ZY1-02E) 卫星,其搭载了新一代高光谱相机 (Advanced Hyperspectral Imager, AHSI),拥有 30 m 空间分辨率的可见光到短波红外范围内的 166 个波段,在内陆水体水质参数反演方面具有重要潜力。本研究以北京市沙河水库和金海湖为研究区,开展基于 ZY1-02E AHSI 影像数据的叶绿素 a 浓度和透明度反演研究,以评价其实际应用效果。基于京津冀地区 12 个湖库的遥感反射率和叶绿素 a 浓度实测数据,构建叶绿素 a 反演半经验模型。将该模型和基于准解析算法 (Quasi-Analytical Algorithm, QAA) 的透明度半分析模型应用于 ZY1-02E AHSI 影像,并利用在沙河水库和金海湖两个研究区获取的星地同步实测水质数据对反演结果进行精度评价。结果表明,基于 670 nm 和 705 nm 波长的归一化指数的叶绿素 a 反演半经验模型的精度最高,拟合度和平均相对误差分别为 0.79 和 21.70%;基于 QAA-V6 的透明度半分析模型的精度最高,拟合度和平均相对误差分别为 0.93 和 13.90%。该研究结果初步证明了 ZY1-02E 高光谱数据在内陆水体水质参数反演中的潜力。

关键词:ZY1-02E 卫星;高光谱影像;内陆水体;叶绿素 a;透明度

中图分类号:TP79

文献标识码:A

文章编号:2096-6792(2024)01-0011-10

Application of China's New Generation of ZY1-02E Hyperspectral Satellite in the Inversion of Water Quality Parameters in Inland Waters

YAO Huaxin^{1,2,3}, XIAO Xiao^{4,5}, CHEN Pinxiang^{4,5}, ZHOU Qing^{4,5},
GUO Jin^{4,5}, LIU Yao⁶, ZHANG Fangfang^{1,3}, WANG Shenglei^{1,3}, LI Junsheng^{1,3,7}

收稿日期:2023-06-10

基金项目:北京市测绘设计研究院委托项目;“自然资源卫星遥感技术体系建设与应用示范”项目;中欧科技合作“龙计划”项目(59193)。

第一作者:姚华鑫(2001—),男,博士研究生,从事国产高光谱卫星水环境应用方面的研究。E-mail:yaohuaxin22@mails.ucas.ac.cn。

通信作者:李俊生(1979—),男,研究员,博导,博士,从事水环境遥感方面的研究。E-mail:lijunsheng@radi.ac.cn。

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China; 4. Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing 100038, China; 5. Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Beijing 100038, China; 6. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of China, Beijing 100048, China; 7. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The ZY1-02E satellite, launched on December 26 in 2021, carries the new-generation Advanced Hyperspectral Imager (AHSI). It has 166 bands in the visible to shortwave infrared range with a spatial resolution of 30 m, and has considerable potential in retrieving water quality parameters in inland waters. This study evaluated the practical application of ZY1-02E AHSI imagery in the retrieval of chlorophyll-a concentration and Secchi-disk depth in the Shahe Reservoir and Jinhai Lake in Beijing, China. Based on the measured data of remote sensing reflectance and chlorophyll-a concentration of 12 lakes and reservoirs in the Beijing-Tianjin-Hebei region, the semi-empirical models for chlorophyll-a retrieval were established. The established chlorophyll-a retrieval model and Secchi-disk depth retrieval model with the Quasi-Analytical Algorithm (QAA) were applied to the ZY1-02E AHSI images, and the accuracy assessment was conducted using the synchronized measured in-situ water quality data in Shahe Reservoir and Jinhai Lake. The results showed that the normalized difference index at 670 nm and 705 nm wavelengths based chlorophyll-a concentration retrieval model achieved the highest accuracy, with R^2 and mean relative error to be 0.79 and 21.70%, respectively. The QAA-V6 based Secchi-disk depth retrieval model achieved the highest accuracy with R^2 and mean relative error to be 0.93 and 13.90%, respectively. These findings preliminarily demonstrated the potential of ZY1-02E hyperspectral data in the retrieval of water quality parameters in inland water.

Keywords: ZY1-02E satellite; hyperspectral imagery; inland water; chlorophyll-a; Secchi-disk depth

河流、湖泊等内陆水体是人类和自然生态系统的重要水资源,开展大范围内陆水体水质的动态监测具有重要意义^[1-2]。相比于传统的测量方式,卫星遥感技术具有快速、易获取、大范围、持续监测等优点,可实现长时序、动态监测,监测结果可为水环境监管提供决策支持^[3-4]。

然而,由于内陆水体的光学特性十分复杂,具有明显的空间和季节异质性,难以构建具有普适性的高精度水质参数反演遥感模型。现阶段常用于陆地资源监测的多光谱卫星波段数量较少且宽度较大,缺乏专门面向内陆水体水质监测的卫星传感器,难以准确获取内陆水体的光谱特征^[5]。

近年来,中国先后成功发射了 HJ-1A^[6]、珠海一号^[7]、GF5^[8]、ZY1-02D^[9]、GF5-02 和 ZY1-02E 等搭载有高光谱相机的遥感卫星。GF5 和 GF5-02 搭载的可见短波红外高光谱相机(Advanced Hyperspectral Imager, AHSI)能够提供 0.45~2.50 μm 光谱范围内共 330 个波段的高光谱数据,具有 30 m 的空间分辨率和 60 km 的幅宽,在可见近红外(Visible to Near-Infrared, VNIR)和短波红外(Short-Wave Infrared, SWIR)波段分别拥有 5 nm 和 10 nm 的光谱分辨率^[8]。ZY1-02D 和 ZY1-02E 搭载了新一代

AHSI, VNIR 和 SWIR 波段的光谱分辨率分别为 10 nm 和 20 nm,空间分辨率和幅宽与 GF5 AHSI 保持一致,通过将波段数量减少到 166 个,进一步提高数据的信噪比^[9]。这些高光谱数据为内陆水体水质参数反演提供了精细的光谱特征,且具有较高的空间分辨率和覆盖能力,为内陆中小型水体水质监测提供契机。

HJ-1A、珠海一号、GF5 和 ZY1-02D 高光谱数据已经被应用于内陆水体水质监测,包括对叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度及透明度等水质参数监测^[10-15]。基于 GF5 的高光谱数据在京津冀地区的官厅水库、白洋淀、潘家口水库和大黑汀水库实现了透明度反演^[10];在长江口水域实现了叶绿素 a 浓度和悬浮物浓度反演^[11]。基于 ZY1-02D 的高光谱数据在白洋淀、太湖、小浪底水库和于桥水库实现了叶绿素 a 浓度反演^[12,13];在太湖、官厅水库和丹江口水库实现了透明度反演^[14];在太湖、于桥水库和青海湖实现了悬浮物浓度反演^[15]。

最新一代国产高光谱 ZY1-02E 卫星于 2021 年 12 月 26 日发射升空,2022 年 12 月 19 日通过在轨测试并正式投入运行。该卫星为中国的高光谱数据提供更多数据源,且与 ZY1-02D 的数据组网运行后

将进一步提高 AHSI 数据的获取效率。该卫星在内陆水体水质参数反演方面的应用表现有待评估。叶绿素 a 浓度和透明度能够有效描述水体的光学特性,与水体营养状态存在密切关系,具有重要意义^[16]。

基于 ZY1-02E AHSI 数据,在北京市沙河水库和金海湖反演叶绿素 a 浓度和透明度,通过同步获取的实测数据进行精度评价,初步探究高光谱 ZY1-02E 卫星在内陆水体水质参数反演中的应用效果。

1 数据获取

1.1 ZY1-02E AHSI 图像及同步水面实验数据获取

北京市沙河水库和金海湖的 ZY1-02E AHSI 图像获取时间分别为 2022 年 9 月 24 日和 2022 年 9 月 27 日,并在卫星过境当天开展同步水面实验。在沙河水库和金海湖共布设 22 个采样点,其空间分布如图 1 所示。

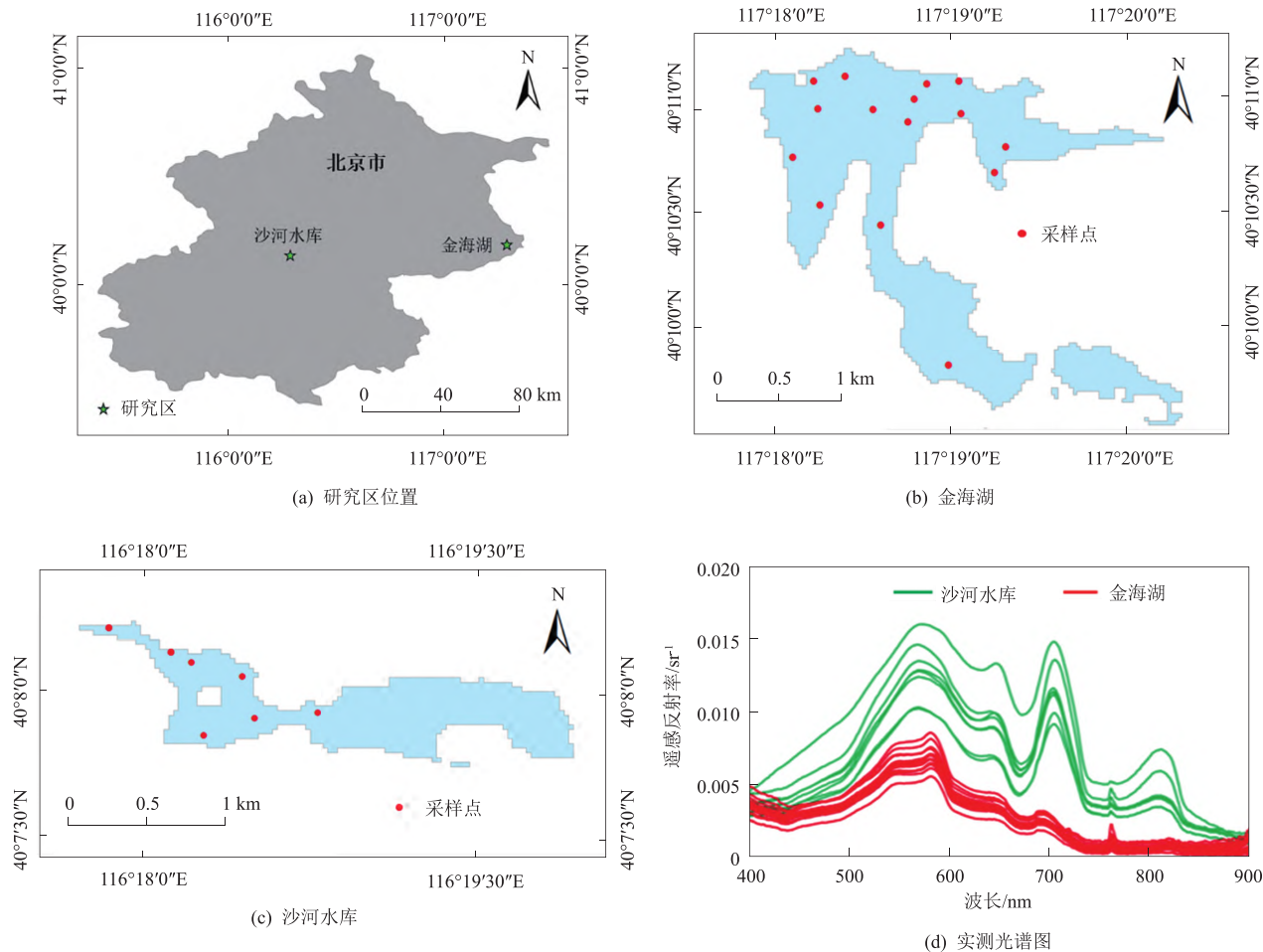


图 1 北京市沙河水库和金海湖的同步水面实验采样点空间分布及实测光谱

在每个采样点完成光谱测量、透明度测量及表层水样采集。在水面上将直径为 30 cm 的塞氏盘 (Secchi Disk) 沉入水中,直到刚好无法看见盘面,记录此时从水面到观察不到塞氏盘时的深度为透明

度。将实验当天采集的表面水样低温保存,在实验室内按照热乙醇-分光光度计法测量叶绿素 a 的浓度^[17]。在沙河水库和金海湖测量的叶绿素 a 浓度和透明度结果见表 1。

表 1 与 ZY1-02E 卫星同步获取的沙河水库和金海湖的叶绿素 a 浓度和透明度结果

研究区	野外实验及卫星图像获取时间	采样点数量	实测叶绿素 a 浓度/(mg/m ³)	实测透明度/m
沙河水库	2022 年 9 月 24 日	7	40.5~58.9	0.4~0.6
金海湖	2022 年 9 月 27 日	15	11.8~15.4	1.0~1.4

水面实验时,使用 ASD FiledSpec 光谱仪,按照“水面以上法”^[18]完成每个采样点的光谱测量。测

量水面辐亮度 (L_u)、参考板辐亮度 (L_b) 和天空辐亮度 (L_{sky}),按照下面公式计算水面测量的遥感反

射率(R_{rs}^m)^[19]:

$$R_{rs}^m(\lambda) = \frac{L_u(\lambda) - \rho_{sky}(\lambda)L_{sky}(\lambda)}{\pi L_b(\lambda)/\rho_b(\lambda)} - \Delta \quad (1)$$

式中: λ 为波长; ρ_b 为参考板的反射率,在实验室内标定得到; ρ_{sky} 为天空光在气水界面的反射率,可以从查找表^[20]获得; Δ 为其他方向粗糙水面对天空光的反射率,根据内陆浑浊水体在短波红外波段反射率为0的假设确定^[19]。

沙河水库和金海湖每个采样点的实测光谱如图1(d)所示,从光谱曲线上看,由于水色三要素(叶绿素a、悬浮物和有色可溶性有机物)在蓝紫光波段的强吸收作用,400~500 nm波段光的反射率较低;由于水色三要素的弱吸收及细胞的散射作用,在550~580 nm波段形成反射峰;由于叶绿素a对波长675 nm左右光的强吸收,在红光波段形成一个反射

谷;随着纯水在红边波段的吸收作用不断增强,在705 nm波长附近形成一个吸收谷,进而形成反射峰,该光谱特征对于叶绿素a浓度的反演具有重要作用^[12-13]。

1.2 京津冀地区水体实测叶绿素a浓度数据的获取

内陆水体的叶绿素a浓度反演模型通常为半经验模型,但沙河水库和金海湖的采样点数量难以构建稳定的统计关系。因此,除了在研究区获取的星地同步实测数据外,还获取了2013—2022年京津冀地区其他10个湖库的32次野外实验数据,以增加建模数据的分布范围及时间跨度,使得构建的水质参数反演半经验模型在京津冀地区具有更好的适用性。京津冀地区10个湖库的采样点数量及叶绿素a浓度范围统计结果见表2。

表2 京津冀地区10个湖库的采样点数量及叶绿素a浓度范围统计结果

湖库名称	采样点数量/ 个	叶绿素a浓度 范围/(mg/m ³)	湖库名称	采样点数量/ 个	叶绿素a浓度 范围/(mg/m ³)
白洋淀	29	3.9~76.0	黄壁庄水库	14	6.1~26.4
大黑汀水库	23	5.5~74.8	密云水库	5	3.3~4.7
岗南水库	9	5.0~16.3	潘家口水库	42	2.6~29.1
大运河	58	5.1~68.5	王快水库	20	2.5~6.9
官厅水库	152	5.3~59.7	于桥水库	136	5.5~189.7

2 研究方法

2.1 叶绿素a浓度反演模型

使用京津冀地区12个湖库采集的实测遥感反射率和叶绿素a浓度构建半经验模型,即以生物光学理论模型为基础,基于与叶绿素a浓度相关的光谱指数建立两者的统计关系,实现ZY1-02E图像的叶绿素a浓度反演。由于叶绿素a的吸收作用,反

射率光谱在670 nm左右波长处出现反射谷;叶绿素a和纯水的共同吸收作用使反射率光谱在波长705 nm左右处出现反射峰;在波长670 nm附近的反射谷深度、在波长705 nm附近的反射峰高度和反射峰的波长位置与叶绿素a浓度呈正相关。基于这些光谱特征,建立了二波段比值、归一化叶绿素等光谱指数进行内陆水体叶绿素a浓度反演^[21-25],叶绿素a反演模型中使用的光谱指数见表3。

表3 叶绿素a反演模型中使用的光谱指数

反演模型(简称)	光谱指数	波长/nm			参考文献
		λ_1	λ_2	λ_3	
二波段比值指数(BR)	$R_{rs}(\lambda_2)/R_{rs}(\lambda_1)$	665	708		[21]
归一化叶绿素指数(NDCI)	$\frac{R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2) + R_{rs}(\lambda_1)}$	665	708		[22]
三波段指数(TBI)	$[R_{rs}(\lambda_1)^{-1} - R_{rs}(\lambda_2)^{-1}]R_{rs}(\lambda_3)$	665	708	754	[23]
反射峰指数(MCI)	$\frac{R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1) - (\lambda_2 - \lambda_1)[R_{rs}(\lambda_3) - R_{rs}(\lambda_1)]}{\lambda_3 - \lambda_1}$	681	709	753	[24]
荧光基线高度(FLH)	$\lambda_3 - \lambda_1$	665	681	709	[25]

2.2 透明度反演模型

透明度反演模型为LEE Z P等^[26]提出的基于最佳穿透窗口(最小漫衰减系数)的半分析模型,该

模型方法已经被应用于GF5 AHSI^[10]和ZY1-02D AHSI^[14]的高光谱数据反演,对中国京津冀及东部地区的内陆水体反演取得了较好的效果。在计算漫

衰减系数之前,需要通过准解析算法(Quasi-Analytical Algorithm, QAA)^[27]计算固有光学量。由于该算法在不同水体中的适用性差异较大,需要使用不同版本的 QAA 计算相关固有光学量,并利用实测数据选择最优版本的 QAA 进行水质参数反演^[28]。

基于 QAA 反演透明度(Z_{sd})主要分为如下 3 个步骤^[26]:

步骤 1 基于 QAA 估计吸收系数 $a(\lambda)$ 和后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 。QAA 利用辐射传输方程及经验关系建立了遥感反射率与 a 和 b_b 的关系^[27-28]。该算法通过在可见光范围内选择 1 个参考波长,使用多个经验和解析公式先后计算参考波长处的 a 和 b_b ,并借助颗粒物后向散射系数在不同波长处的经验函数关系,计算任意波长位置处的 a 和 b_b ^[29-30]。

为了评价 ZY1-02E AHSI 反演水质参数的能力,选取了第五版、第六版两个算法(QAA-V5^[29]和 QAA-V6^[30])和针对特定水体改进的两个算法(QAA-L09^[31]和 QAA-M14^[32])反演 a 和 b_b 。QAA-V5 以 555 nm 波长为参考波长,认为在 555 nm 波长处纯水的吸收系数在整个吸收系数中占主导地位。然而,在浑浊的内陆水体中,以 555 nm 波长为参考波长的 QAA-V5 具有一定的局限性,因此 QAA-V6 在 $R_{rs}(670)$ 不低于 0.0015 sr^{-1} 时,将参考波长移至 670 nm 处,并按照新的模型公式计算固有光学量,具体步骤见表 4。QAA-L09 以 710 nm 波长为参考

波长,忽略波长 710 nm 处悬浮物和浮游植物的吸收以及纯水的后向散射系数,令 $a(710)$ 近似等于 $a_w(710)$;QAA-M14 以 708 nm 波长为参考波长,重新建立了计算 $a(708)$ 的经验模型,保证在高浑浊水体情况下准确计算 a 和 b_b 。

步骤 2 基于吸收系数和后向散射系数计算漫衰减系数($K_d(\lambda)$),计算式如下:

$$K_d(\lambda) = (1+m_0\theta_s)a(\lambda) + \left(1-\gamma\frac{b_{bw}(\lambda)}{b_b(\lambda)}\right) \cdot m_1(1-m_2e^{-m_3a(\lambda)})b_b(\lambda) \quad (2)$$

式中: θ_s 为太阳天顶角(以度为单位); $b_{bw}(\lambda)$ 为纯水的后向散射系数; m_0 、 m_1 、 m_2 、 m_3 和 γ 分别取 0.005、4.26、0.52、10.8 和 0.265 的固定值。

步骤 3 基于遥感反射率和后向散射系数反演透明度,计算式如下:

$$Z_{sd} = \frac{1}{2.5\min(K_d^r)} \ln\left(\frac{|0.14-R_{rs}^r|}{0.013}\right) \quad (3)$$

式中: K_d^r 为水体在可见光范围内的最小漫衰减系数; R_{rs}^r 为 K_d^r 分别为对应波长下的遥感反射率。

算法 QAA-V6 反演吸收系数和后向散射系数的步骤见表 4。表 4 中 λ_0 为参考波长, a_w 为纯水的吸收系数, b_{bw} 为纯水的后向散射系数, η 为颗粒物散射光谱函数中的参数, r_{rs} 为刚好在水面以下的遥感反射率, u 为后向散射系数与吸收系数和后向散射系数之和的比值($b_b/(a+b_b)$)。

表 4 QAA-V6 算法反演吸收系数和后向散射系数的步骤^[30]

步骤	变量	QAA-V6
1	$r_{rs}(\lambda)$	$= \frac{R_{rs}(\lambda)}{T+\gamma QR_{rs}(\lambda)}, T = 0.52, \gamma Q = 1.7$
2	$u(\lambda)$	$= \frac{-g_0 + [(g_0^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda))]^{1/2}}{2g_1}, g_0 = 0.0895, g_1 = 0.125$
3	$a(\lambda_0)$	$= a_w(\lambda_0) + 10^{-1.146 - 1.366x - 0.469x^2}, x = \log\left(\frac{r_{rs}(443) + r_{rs}(490)}{r_{rs}(\lambda_0) + 5\frac{r_{rs}(667)}{r_{rs}(490)}r_{rs}(667)}\right), R_{rs}(670) < 0.0015 \text{ sr}^{-1},$ $\lambda_0 = 555 \text{ nm (与 QAA-V5 算法相同);}$ $= a_w(\lambda_0) + 0.39\left(\frac{R_{rs}(670)}{R_{rs}(443) + R_{rs}(490)}\right)^{1.14}, R_{rs}(670) \geq 0.0015 \text{ sr}^{-1}, \lambda_0 = 670 \text{ nm}$
4	$b_{bp}(\lambda_0)$	$= \frac{u(\lambda_0)a(\lambda_0)}{1-u(\lambda_0)} - b_{bw}(\lambda_0)$
5	η	$= 2.0\left(1 - 1.2\exp\left(-0.9\frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)}\right)\right)$
6	$b_{bp}(\lambda)$	$= b_{bp}(\lambda_0)\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^\eta$
7	$a(\lambda)$	$= \frac{(1-u(\lambda))(b_{bp}(\lambda) + b_{bw}(\lambda))}{u(\lambda)}$

2.3 ZY1-02E AHSI 影像处理

对原始的 ZY1-02E AHSI 影像数据进行大气校正和水体提取等预处理,使用 ENVI 的 FLAASH 模块进行大气校正^[33],选择 940 nm 为水汽反演波段,选择乡村(Rural)模型和 2 波段(2-Band(K-T))方法进行气溶胶反演^[34]。

基于地表反射率影像,计算归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI),根据 NDWI 影像的统计直方图,选择阈值进行沙河水库和金海湖的水体提取^[35]。

FLAASH 大气校正结果是地表反射率,需要进一步计算得到水质参数反演中常用的水体遥感反射率。由于图像中水体在短波红外波段存在噪声无法进行天空光残差校正,因此将图像水体遥感反射率近似为 $\rho(\lambda)/\Pi$ 。该方法可能导致图像遥感反射率存在绝对值偏差。本研究选择由光谱形状主导的反演模型以减小遥感反射率绝对值的影响^[10]。

2.4 水质参数反演精度评价

为了评估不同模型应用于 ZY1-02E AHSI 影像的反演效果,使用同步测量匹配采样点的叶绿素 a 浓度和透明度对图像反演结果进行精度评价。匹配采样点需要保证实测点位和图像像素在时间和空间上具有较好的一致性;在对 ZY1-02E AHSI 图像的反演结果中选取以实测采样点为中心的 3×3 像素窗口,该窗口内的像元值标准差与均值的比值不超过 0.4,表示该像素点的一致性较好;实测数据的采集时间在影像获取时间的 3 h 以内^[36],表示该实测数据的时间一致性较好。根据该一致性原则进行筛选,沙河水库和金海湖分别有 5 个和 14 个匹配点位。

采用拟合度 R^2 、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)评价指标,以实测叶绿素 a 浓度和透明度为真值,评价图像反演结果的精度。RMSE 和 MRE 的计算公式分别为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}, \quad (4)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_i - X_i|}{X_i}. \quad (5)$$

式中: N 表示采样点的数量; X_i 和 Y_i 分别对应各采样点水质参数(叶绿素 a 浓度和透明度)的实测和反演值。

3 结果

3.1 ZY1-02E 高光谱数据大气校正结果

使用同步获取的实测遥感反射率对 ZY1-02E

AHSI 图像的大气校正结果进行评价。相较于遥感反射率的绝对值大小,水质参数反演往往更依赖于反射率光谱的形状特征,因此在评价图像大气校正结果时主要对比图像遥感反射率与实测反射率的光谱形状^[37]。

在沙河水库和金海湖各选取 1 个采样点,分别为点 P_1 和点 P_2 ,在可见光至近红外波段范围(400~900 nm),对比实测反射率 R_{rs}^m 和 ZY1-02E AHSI 图像反射率 R_{rs}^c 的光谱,如图 2 所示。相较于实测遥感反射率,在获取图像反射率 R_{rs}^c 时,忽略天空光影响的近似估计造成的图像水体遥感反射率存在整体的高估偏差,通过波段间的差值和归一化可以减小此影响。此外,图像反射率 R_{rs}^c 在波长 < 500 nm 的蓝紫光波段和波长 > 705 nm 的近红外波段受噪声影响,波动剧烈,但波长在 500~705 nm 波段范围实测反射率 R_{rs}^m 与图像反射率 R_{rs}^c 的光谱形状具有较好的一致性,该波段范围是水质参数反演的常用波段。

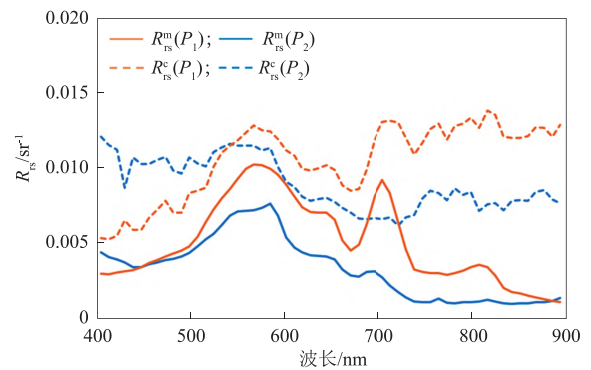


图 2 沙河水库(P_1)和金海湖(P_2)的实测反射率 R_{rs}^m 与 ZY1-02E AHSI 反射率 R_{rs}^c 光谱对比

3.2 叶绿素 a 浓度反演结果

根据 ZY1-02E AHSI 影像数据的中心波长设置,将京津冀地区 12 个湖库(包括星地同步实验的沙河水库和金海湖)获取的 510 组实测遥感反射率等效模拟 ZY1-02E 高光谱数据,基于等效模拟的遥感反射率计算光谱指数,与同步采集的实测叶绿素 a 浓度进行反演模型的训练建模。将训练得到的叶绿素 a 浓度反演模型应用至沙河水库和金海湖的 ZY1-02E AHSI 影像,以沙河水库和金海湖两个研究区的星地同步实测叶绿素 a 浓度为真值进行检验。使用水面实测反射率光谱模拟图像数据进行建模,使用图像数据进行检验,这是水质参数反演中常用的策略^[14-15]。叶绿素 a 浓度反演模型及精度评价结果见表 5。

在所有的半经验模型中,基于归一化叶绿素指

数(Normalized Difference Chlorophyll Index, NDCI)的叶绿素 a 浓度反演模型精度最高,反演模型的 R^2 为 0.90, ZY1-02E AHSI 图像反演结果的 RMSE 和 MRE 分别为 11.98 mg/m^3 和 21.70%。

图 3 为沙河水库和金海湖共 19 个采样点的实测水质参数与对应的 ZY1-02E AHSI 图像反演结果

散点图。图 3 中有一个特殊点偏离 1:1 线较为严重,可能是局部水体的藻类浓度不均匀造成的,其余的点均位于 1:1 线附近,剔除该特殊点后的 ZY1-02E AHSI 图像反演结果的 R^2 、RMSE 和 MRE 分别为 0.96、 5.67 mg/m^3 和 20.80%。

表 5 基于不同光谱指数建立的叶绿素 a 浓度反演模型和 ZY1-02E AHSI 图像反演结果精度评价

光谱指数 x	半经验模型反演		ZY1-02E 图像反演		
	反演模型	R^2	R^2	RMSE/(mg/m^3)	MRE/%
$R_{rs}(705)/R_{rs}(670)$	$10^{1.15\ln(x)+1.11}$	0.89	0.77	12.60	22.76
$(R_{rs}(705)-R_{rs}(670))/(R_{rs}(705)+R_{rs}(670))$	$10^{2.37x+1.11}$	0.90	0.79	11.98	21.70
$(1/R_{rs}(644)-1/R_{rs}(679))R_{rs}(747)$	$-351.18x-13.08$	0.80	0.03	34.81	213.23
MCI(679, 705, 747)	$10^{124.42x+0.90}$	0.58	0.70	19.84	52.86
FLH(644, 670, 705)	$10^{-213.87x+0.85}$	0.64	0.73	15.07	38.90

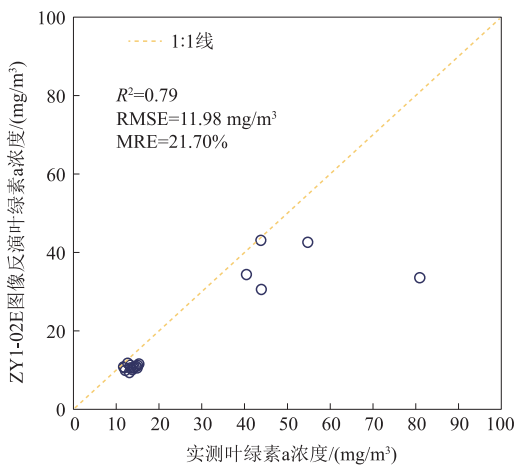


图 3 沙河水库和金海湖实测叶绿素 a 浓度与同步 ZY1-02E AHSI 图像反演结果对比

上述模型的精度评价表明,基于 NDCI 模型在 ZY1-02E AHSI 高光谱影像上的叶绿素 a 浓度反演精度最高。基于该模型,对沙河水库和金海湖进行

叶绿素 a 浓度反演,得到叶绿素 a 浓度的空间分布如图 4 所示。图 4 中显示:沙河水库西部的叶绿素 a 浓度相对较低,约为 25 mg/m^3 ;叶绿素 a 浓度由西向东不断升高,在东部地区叶绿素 a 浓度达到最高,约为 50 mg/m^3 。由于沙河水库的西部为上游,东部为下游,且大坝位于水库的最东侧,通常处于关闭状态或排放少量水,这可能导致污染物在该区域聚集造成该区域较高的叶绿素 a 浓度。相较于沙河水库,金海湖的叶绿素 a 浓度总体较低,且空间分布均匀,其值不超过 25 mg/m^3 。沙河水库与金海湖的叶绿素 a 浓度存在一定差异,可能与两个水体的地理位置和水深有关。沙河水库位于北京市近郊区的昌平区,来自周围居民区排放的污染物较多,且平均水深仅 2.4 m,纳污能力有限;而金海湖位于北京市远郊区的平谷区,周围居民区很少,且平均水深为 16.7 m,纳污能力较强,叶绿素 a 浓度相对较低。

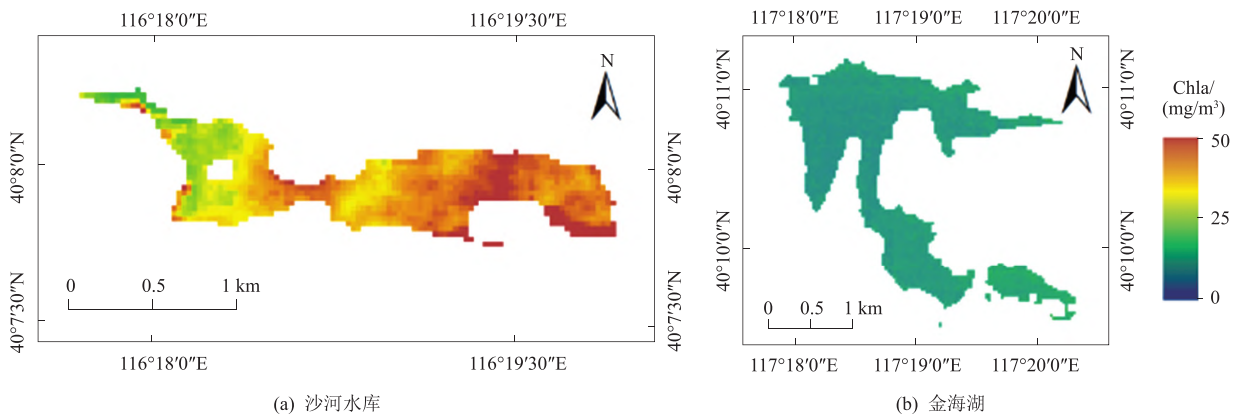


图 4 基于 ZY1-02E AHSI 图像反演的沙河水库和金海湖叶绿素 a 浓度 (Chla) 分布图

3.3 透明度反演结果

对沙河水库和金海湖的 ZY1-02E AHSI 图像应

用不同版本的 QAA 反演水体透明度,以同步实测透明度为真值进行精度验证评价,结果见表 6。

表6 使用不同版本QAA的ZY1-02E AHSI图像反演透明度的精度评价结果

QAA版本	R^2	RMSE/m	MRE/%
V5	0.91	0.77	81.56
V6	0.93	0.18	13.90
L09	0.93	0.64	54.27
M14	0.93	0.48	40.73

不同版本QAA的透明度反演精度表明,基于QAA-V6的透明度反演半分析模型在ZY1-02E高光谱影像反演中取得了最高的精度, R^2 、RMSE和MRE分别为0.93、0.18 m和13.90%,对ZY1-02E AHSI图像反演的透明度结果与实测数据的散点图具有较好的一致性,如图5所示。

基于QAA-L09和QAA-M14的透明度反演精度相对较差,基于QAA-V5的透明度反演精度最低。这说明在透明度反演半分析模型中,随着算法QAA中的参考波长向长波方向移动,模型反演精度有所提高。

将基于QAA-V6的半分析模型应用于沙河水库和金海湖的ZY1-02E AHSI图像进行透明度反演,水体透明度空间分布如图6所示。图6中,沙河

水库西部的透明度不超过1 m,由西向东透明度不断升高,可能是水库东部大坝附近的水体较深导致较高的透明度。相较于沙河水库,金海湖的整体透明度约为1 m,且空间分布均匀。造成两个水体透明度差异的原因与叶绿素a浓度的空间分布差异的原因类似,沙河水库位于北京市近郊区且平均水深较浅,而金海湖位于北京市远郊区且平均水深较深。

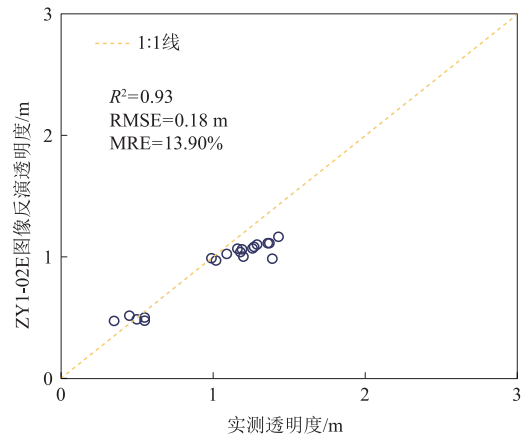


图5 沙河水库和金海湖实测透明度与同步ZY1-02E AHSI图像反演结果对比

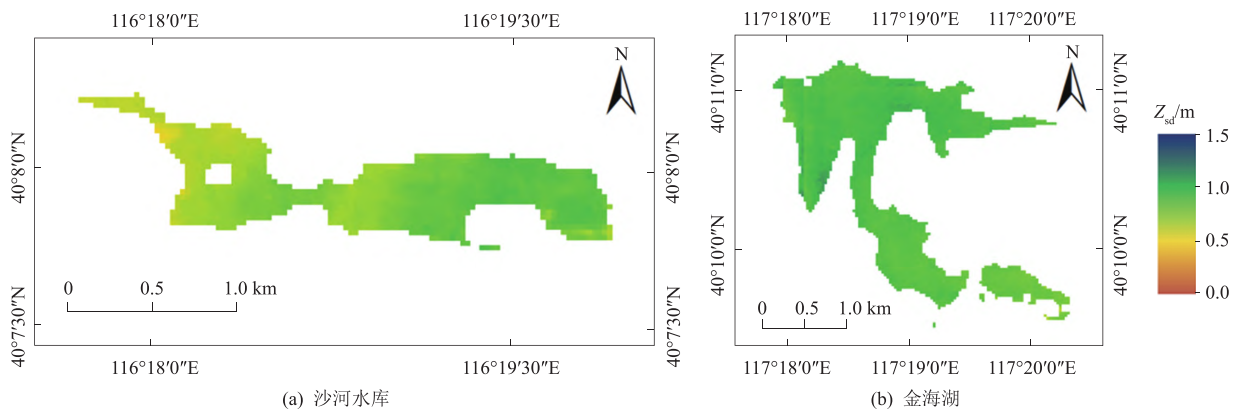


图6 基于ZY1-02E AHSI图像反演的沙河水库和金海湖透明度(Z_{sd})分布图

4 讨论

本文的研究结果表明,ZY1-02E高光谱数据在典型内陆水体叶绿素a浓度和透明度反演中取得了较好的效果,使用京津冀地区大量实测数据构建的叶绿素a浓度反演半经验模型对京津冀其他湖库具有一定的适用性,以QAA-V6为基础的透明度反演模型对太湖同样具有较高的反演精度^[38]。目前,研究中仍存在一些不确定性和局限性有待进一步分析解决。

4.1 ZY1-02E卫星产品在水质监测中的优势

ZY1-02E卫星产品在 inland 水体水质监测中展

现出了以下优势:

1) 高光谱的波段优势。ZY1-02E AHSI影像数据拥有166个波段,在可见光波段的光谱分辨率可达10 nm。与多光谱卫星相比,ZY1-02E AHSI能够捕捉到内陆水体水质参数的光谱特征,如叶绿素a的强吸收作用在波长670 nm处的反射谷和在波长705 nm处的反射峰特征等。

2) 高光谱卫星组网提高数据时间分辨率。我国于2020年9月27日发射环境减灾二号A星(HJ-2A)和B星(HJ-2B),于2022年12月9日发射高分五号01A卫星(GF5-01A)。ZY1-02E可与ZY1-02D、GF5-02、GF5-01A、HJ-2A、HJ-2B共6颗搭载

有高光谱传感器的卫星组网,理论上可实现 1 周的时间分辨率,大大提升水环境动态监测能力。

3)更高的信噪比。ZY1-02E 高光谱影像有 166 个波段,波段数量为 GF5 和 GF5-02 卫星高光谱影像的一半,通过将 2 个波段融合为 1 个波段可提高信噪比^[9]。

4.2 利用 ZY1-02E AHSI 影像数据反演叶绿素 a 浓度和透明度的不确定性

基于 ZY1-02E AHSI 影像数据反演水质参数的过程中存在一些不确定性因素,其中一个重要因素为大气校正和水体遥感反射率校正引起的误差。

本研究使用 ENVI 的 FLAASH 模块对 ZY1-02E AHSI 影像进行大气校正,由于 ZY1-02E AHSI 数据的辐射定标系数是基于陆地目标获取,且水体的反射率信号较弱,导致 ZY1-02E AHSI 影像数据的大气校正结果在蓝紫光波段、近红外和短波红外波段存在较大的噪声。由于无法进行精确的水体遥感反射率校正,忽略天空光成为图像遥感反射率存在绝对偏差的主要原因,这种偏差导致 ZY1-02E 影像数据的水质参数反演存在不确定性。基于 NDCI 的叶绿素 a 浓度反演模型通过波段间差值和归一化计算,避免了图像遥感反射率绝对偏差的影响,利用图像遥感反射率的光谱形状实现了较高精度的叶绿素 a 浓度反演^[22]。透明度反演半分析模型需要通过吸收系数和后向散射系数计算漫衰减系数,吸收系数和后向散射系数分别由遥感反射率光谱的形状和绝对值主导^[37],而漫衰减系数和透明度主要受吸收系数的影响,即该模型削弱了图像遥感反射率偏差带来的影响。但大气校正中仍存在不确定性,忽略天空光会造成水质参数反演过程中的误差累积,下一步需要发展面向 ZY1-02E AHSI 水体影像数据的高精度大气校正算法。

4.3 反演模型和精度验证数据的局限性

基于 ZY1-02E AHSI 影像数据在沙河水库和金海湖反演叶绿素 a 浓度和透明度取得了较好的反演精度,但在建模和精度验证方面仍存在局限性。

1)叶绿素 a 浓度反演模型的局限性。由于构建叶绿素 a 浓度反演半经验模型的数据均来自中国华北的京津冀地区内陆水体,该模型可能无法适用于京津冀地区之外的其他水体。因此,未来还需要在更多水体采集实测数据,进一步优化叶绿素 a 浓度反演模型,提高模型的适用性。

2)验证数据的局限性。由于 ZY1-02E 卫星刚刚发射不久,本研究仅将北京市的金海湖和沙河水库获取的 22 个实测同步数据用于对 ZY1-02E AH-

SI 影像反演结果的精度评价。不同内陆水体的光学特性差异较大,未来需要在更多水体获取实测数据及同步 ZY1-02E AHSI 影像,进一步检验 ZY1-02E AHSI 影像在内陆水体水质参数的反演效果。

5 结语

本文使用 2022 年投入运行的 ZY1-02E 高光谱影像数据,在北京市沙河水库和金海湖初步实现了内陆水体的叶绿素 a 浓度和透明度反演,并基于野外同步实验获取的数据分析反演精度,初步评价了 ZY1-02E AHSI 影像数据在内陆水体水质参数反演中的优势和局限。结果表明,基于 NDCI 构建的叶绿素 a 浓度反演半经验模型的精度最高,拟合度、均方根误差和平均相对误差分别为 0.79、11.98 mg/m³ 和 21.70%;基于 QAA-V6 的透明度反演半分析模型的精度最高,拟合度、均方根误差和平均相对误差分别为 0.93、0.18 m 和 13.90%。ZY1-02E AHSI 影像数据在内陆水体的大气校正结果表明,由于噪声的影响无法进行天空光校正导致存在整体绝对偏差,但是在 500~720 nm 波段与实测遥感反射率的光谱形状具有较好的近似性,对叶绿素 a 浓度和透明度的反演精度影响较小。归一化叶绿素光谱指数通过波段间的差值和归一化,减小了大气校正绝对误差的影响;同样,水体的吸收系数主要受光谱形状的影响,由吸收系数主导的透明度半分析模型则利用了该信息。因此,ZY1-02E 高光谱影像数据在典型内陆水体水质参数反演初步应用中展现出了一定的潜力,下一步需要对更多水体、反演更多水质参数来更全面地评估该高光谱数据的应用效果。

参 考 文 献

- [1] 张兵,李俊生,申茜,等.长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展[J].遥感学报,2021,25(1):37-52.
- [2] 李辉,高学睿,谢治国,等.陕西省黄土高原地表水体遥感监测与时空演变特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(3):19-27.
- [3] 张兵,李俊生,申茜,等.地表水环境遥感监测关键技术与系统[J].中国环境监测,2019,35(4):1-9.
- [4] 刘新旭,任苏明,王富强,等.黄河三角洲湿地蒸散发量估算及时空演变规律分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(3):35-43.
- [5] GHOLIZADEH M H, MELESSE A M, REDDI L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 16(8): 1298.

- [6] 余哲修,徐沛,罗唯学,等. 基于 HJ-1A 高光谱数据的滇池悬浮物浓度估测研究[J]. 西南林业大学学报, 2020, 40(4): 94-104.
- [7] 殷子瑶,李俊生,范海生,等. 珠海一号高光谱卫星的于桥水库水质参数反演初步研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(2): 494-498.
- [8] LIU Y N, ZHANG J, ZHANG Y, et al. The advanced hyperspectral imager; aboard China's GaoFen-5 satellite [J]. IEEE geoscience and remote sensing magazine, 2019, 7(4): 23-32.
- [9] ZHONG Y F, WANG X Y, WANG S Y, et al. Advances in spaceborne hyperspectral remote sensing in China[J]. Geospatial information science, 2021, 24(1): 95-120.
- [10] LIU Y, XIAO C C, LI J S, et al. Secchi disk depth estimation from China's new generation of GF-5 hyperspectral observations using a semi-analytical scheme [J]. Remote sensing, 2020, 12(11): 1849.
- [11] GU Q H, LI Q L, ZHOU M. Water quality monitoring of the Yangtze Estuary by using GF-5 hyperspectral image [C]//2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). IEEE, 2019: 1-5.
- [12] LU L, GONG Z N, LIANG Y N, et al. Retrieval of chlorophyll-a concentrations of class II water bodies of inland lakes and reservoirs based on ZY1-02D satellite hyperspectral data[J]. Remote sensing, 2022, 14(8): 1842.
- [13] 刘瑶,李俊生,肖晨超,等. 资源一号 02D 高光谱影像内陆水体叶绿素 a 浓度反演[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 168-178.
- [14] LIU Y, LI J S, XIAO C C, et al. A classification-based, semianalytical approach for estimating water clarity from a hyperspectral sensor onboard the ZY1-02D satellite[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2022, 60: 1-14.
- [15] ZHU P H, LIU Y, LI J S. Optimization and evaluation of widely-used total suspended matter concentration retrieval methods for ZY1-02D's AHSI imagery[J]. Remote sensing, 2022, 14(3): 684.
- [16] WANG S L, LI J S, ZHANG B, et al. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index[J]. Remote sensing of environment, 2018, 217: 444-460.
- [17] ZHANG Y L, QIN B Q, LIU M L. Temporal-spatial variations of chlorophyll a and primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, China from 1995 to 2003[J]. Journal of plankton research, 2007, 29(8): 707-719.
- [18] ZIBORDI G, VOSS K. Protocols for satellite ocean color data validation; in situ optical radiometry [Z]. IOCCG Protocols document(US), 2018.
- [19] LEE Z P, SHANG S L, LIN G, et al. On the modeling of hyperspectral remote-sensing reflectance of high-sediment-load waters in the visible to shortwave-infrared domain [J]. Applied optics, 2016, 55(7): 1738-1750.
- [20] MOBLEY C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements [J]. Applied optics, 1999, 38(36): 7442-7455.
- [21] MOSES W J, GITELSON A A, BERDNIKOV S, et al. Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS; the azov sea case study [J]. IEEE geoscience and remote sensing letters, 2009, 6(4): 845-849.
- [22] MISHRA S, MISHRA D R. Normalized difference chlorophyll index; a novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters [J]. Remote sensing of environment, 2012, 117: 394-406.
- [23] GITELSON A A, DALL'OLMO G, MOSES W, et al. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: validation [J]. Remote sensing of environment, 2008, 112(9): 3582-3593.
- [24] GOWER J, KING S, BORSTAD G, et al. Detection of intense plankton blooms using the 709 nm band of the MERIS imaging spectrometer [J]. International journal of remote sensing, 2005, 26(9): 2005-2012.
- [25] LETELIER R M, ABBOTT M R. An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) [J]. Remote sensing of environment, 1996, 58(2): 215-223.
- [26] LEE Z P, SHANG S L, HU C M, et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility [J]. Remote sensing of environment, 2015, 169: 139-149.
- [27] LEE Z P, CARDER K L, ARNONE R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. Applied optics, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [28] REN J L, ZHENG Z B, LI Y M, et al. Remote observation of water clarity patterns in Three Gorges Reservoir and Dongting Lake of China and their probable linkage to the Three Gorges Dam based on Landsat 8 imagery [J]. Science of the total environment, 2018, 625: 1554-1566.
- [29] LEE Z P, LUBAC B, WERDELL J, et al. An update of the quasi-analytical algorithm (QAA_v5) [EB/OL]. International ocean color group software report, 2009: 1-9. [2023-01-01]. https://ioccg.org/groups/Software_OCA/QAA_v5.pdf.

(下转第30页)

- [18] 冶林茂. 新兴边缘学科: GPS 气象学[J]. 河南气象, 2004(2):44-45.
- [19] 海连洋,王腾军,赵明海,等. 地基 GPS 天顶对流层延迟与暴雨的相关性研究[J]. 北京测绘,2017(1):40-43.
- [20] 施闯,张卫星,曹云昌,等. 基于北斗/GNSS 的中国—中南半岛地区大气水汽气候特征及同降水的相关分析[J]. 测绘学报,2020,49(9):1112-1119.
- [21] 蒋光伟. 基于地基 GPS 的实时遥感水汽的理论与应用[D]. 西安:长安大学,2010.
- [22] 杨斯溟. 地基 GPS 反演大气可降水量在香港地区的应用研究[D]. 南昌:东华理工大学,2017.
- [23] 张永林,蔡昌盛. 基于再分析资料 ERA5 的对流层延迟估计方法及精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2020,40(1):62-65.
- [24] 徐晓华,李征航. GPS 气象学研究的最新进展[J]. 黑龙江工程学报,2002(1):14-18.
- [25] 张洛恺,杨力,李婧. 影响 GPS 遥感大气水汽含量的因素分析[J]. 全球定位系统,2013,38(4):75-79.
- [26] 杨洋,柯莉萍,聂祥,等. 毕节大气可降水量与暴雨关系研究[J]. 中低纬山地气象,2022,46(3):63-68.
- [27] 张且且,赵龙,周建华. 基于无电离层组合/非差非组合混合观测模型的精密单点定位[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第十一届中国卫星导航年会论文集:S05 空间基准与精密定位. [出版地不详]:[出版者不详],2020:65-71.
- [28] 施闯,周凌昊,范磊,等. 利用北斗/GNSS 观测数据分析“21·7”河南极端暴雨过程[J]. 地球物理学报, 2022,65(1):186-196.
- [29] 刘腾,袁运斌,张宝成. BDS/GLONASS 非组合精密单点定位模型与算法[J]. 地球物理学报,2017,60(4):1347-1358.
- [30] 杨柳. 精密单点定位反演大气水汽关键模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.

(编辑:马伟希)

(上接第 20 页)

- [30] LEE I P. Update of the quasi-analytical algorithm (QAA_v6) [EB/OL]. [2022-10-01]. http://www.ioccg.org/groups/Software_OCA/QAA_v6_2014209.pdf.
- [31] LE C F, LI Y M, ZHA Y, et al. Validation of a quasi-analytical algorithm for highly turbid eutrophic water of Meiliang Bay in Taihu Lake, China[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2009, 47(8):2492-2500.
- [32] MISHRA S, MISHRA D R, LEE Z P. Bio-optical inversion in highly turbid and cyanobacteria-dominated waters[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, 52(1):375-388.
- [33] FELDE G W, ANDERSON G P, COOLEY T W, et al. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm[J]. IEEE, 2003. DOI:10.1109/IGAKSS.2003.1293688.
- [34] KAUFMAN Y J, WALD A E, REMER L A, et al. The MODIS 2.1 μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1997, 35(5):1286-1298.
- [35] LIU Y P, XIAO C C. Water extraction on the hyperspectral images of Gaofen-5 satellite using spectral indices [J]. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2020, 43:441-446.
- [36] FENG L, HOU X J, LI J S, et al. Exploring the potential of Rayleigh-corrected reflectance in coastal and inland water applications: a simple aerosol correction method and its merits[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2018, 146:52-64.
- [37] SHANG S L, LEE Z P, LIN G, et al. Sensing an intense phytoplankton bloom in the western Taiwan Strait from radiometric measurements on a UAV[J]. Remote sensing of environment, 2017, 198:85-94.
- [38] YIN Z Y, LI J S, LIU Y, et al. Water clarity changes in Lake Taihu over 36 years based on Landsat TM and OLI observations[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2021, 102:102457.

(编辑:杜明侠)