引文格式：周志诚,梁思,闵天. 基于暗像元拟合的ZY1E AHSI东湖水体大气校正真实性评价[J]. 地理空间信息, 2026, 24(7): 65-69. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2026.07.012

基于暗像元拟合的ZY1E AHSI东湖水体大气校正真实性评价

周志诚，梁　思*，闵　天
（湖北省航测遥感院，湖北 武汉 430074）

摘　要：以武汉东湖为实验区，基于资源一号02星（ZY1E）搭载的高光谱成像仪（AHSI）数据实现了Acolite-暗目标光谱拟合（DSF）大气校正方法的适配，并在400~900 nm光谱范围内对遥感反射率（R_{rs}）产品进行了星地一致性验证。结果表明，影像反演的R_{rs}光谱曲线形态与地面观测结果总体吻合，尤其在560~600 nm范围内呈现一致的反射峰，红边区域也展现出典型的光谱起伏特征，说明整体辐射定标与大气校正流程具备良好的可靠性与一致性。在蓝绿光波段，R_{rs}存在系统性负偏差且离散程度较高，红光波段的一致性最佳。在红边至近红外区域，结果对光谱响应函数的准确性和波长配准精度极为敏感，易表现为比例性偏差。该方法可为ZY1E AHSI提供可复核的R_{rs}基线产品，有望进一步抑制蓝光波段系统偏差、提升红边区域光谱一致性，从而为内陆水环境遥感监测提供更稳定、可比的数据支撑。

关键词：ZY1E；AHSI；Acolite-DSF；R_{rs}；真实性评价
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）07-0065-05

Authenticity Evaluation of ZY1E AHSI East Lake Water Body Atmospheric Correction Based on Dark Spectrum Fitting

ZHOU Zhicheng, LIANG Si, MIN Tian
(Hubei Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Wuhan 430074, China)

Abstract: Taking East Lake in Wuhan City, Hubei Province as the experimental area, based on the advanced hyperspectral imager (AHSI) onboard the Ziyuan-1E (ZY1E) satellite, we developed an atmospheric correction workflow by adapting the Acolite-dark spectrum fitting (DSF) method to AHSI data, enabling the generation of remote sensing reflectance (R_{rs}) products within the 400~900 nm spectral range. The results show that the spectral patterns of satellite-derived R_{rs} are generally consistent with the field observations, especially within the 560~600 nm range, a consistent reflection peak is presented. The red border area also exhibits typical spectral fluctuation characteristics, indicating that the overall radiometric calibration and atmospheric correction procedures have good reliability and consistency. Nevertheless, the blue-green spectral bands exhibit a systematic underestimation and greater dispersion, whereas the red band provides the closest match between satellite and in-situ data. In the red-edge and near-infrared bands, the retrievals are highly sensitive to the accuracy of spectral response function and wavelength alignment, resulting in proportional deviations in several cases. Overall, the Acolite-DSF can provide verifiable R_{rs} baseline products to ZY1E AHSI, with the prospect of mitigating blue band underestimation and enhancing red-edge spectral consistency, thereby supporting more robust and intercomparable inland water environment remote sensing applications.

Key words: ZY1E, AHSI, Acolite-DSF, R_{rs}, authenticity evaluation

高光谱遥感技术凭借连续、窄波段的成像特征，可为内陆水体水质参数反演与水生生态环境监测提供重要的数据基础[1]。资源一号02星（ZY1E）搭载的高光谱成像仪（AHSI）能实现从可见光到短波红外的光谱连续覆盖，大幅增强了我国水环境遥感领域的观测能力[2-3]。然而，水体信号在传感器入瞳处的占比普遍低于10%，水体信号的有效提取依赖于高精度的大气校正过程[4-5]。针对内陆水体复杂的水汽条件，国内外学者提出多条大气校正技术路线，即以暗目标为约束的半经验算法[6]（Acolite-DSF）、基于辐射传输模拟的查找表/机器学习算法[7]（C2RCC）、基于多项式分解的物理拟合方法[8]（Polymer）以及结合近红外/短波波段[9]与多角度信息的气溶胶联合估计等。相较于多光谱数据，高光谱数据在大气校正中对带内响应函数的

项目来源：部省合作试点资助项目（2023ZRBSHZ025）。
第一作者简介：周志诚（1974—），本科，正高级工程师，从事遥感数据处理、应用技术体系建设、自然资源监测监管等技术研究与应用服务推广工作，E-mail：179978287@qq.com。
通信作者：梁思（1985—），硕士研究生，高级工程师，从事遥感影像数据处理和应用研究工作，E-mail：442493532@qq.com。

表征与带内积分、波长一致化以及跨波段空间—光谱配准一致性更敏感[10]。Acolite-DSF通过“暗谱拟合”减少对先验气溶胶模型的依赖，在海岸带、河口与内陆湖泊等水体上表现出良好的适应性，在多光谱平台上的应用较为成熟[11]，并已拓展至部分高光谱平台试验性研究[12]；但其在ZY1E AHSI数据上的性能，尤其是在我国内陆典型城市湖泊中的适用性，仍有待通过系统的星地同步观测进一步验证与评估。

作为典型的大型城市湖泊，武汉东湖位于长江中游亚热带季风区[13]，湖岸曲折、湾汊众多，受风生流与人类活动共同作用，时空异质性显著。水体光学性质受季节与颗粒通量驱动，时空变异性显著[14]，具体表现为从近岸至湖心稳定的透明度梯度以及在汛期或大风期易形成并向外扩张的浑浊带。暖季藻类生长使可见光尤其是蓝绿光波段对大气校正误差更敏感[15-16]。岸线建设与植被导致“邻近效应”[17]，在红边与近红外波段易出现岸带混入与条带化偏差，需配合精细水体掩膜、岸线缓冲剔除与云/薄霾筛选[18]。综上所述，东湖兼具内陆水体代表性与复杂性，是ZY1E AHSI等高光谱卫星数据大气校正真实性检验的理想实验区。本文在东湖场景下，对Acolite-DSF适配ZY-1E AHSI的水体大气校正流程进行实证验证与误差谱诊断，并提出面向应用的改进路径与方法学可追溯的误差边界，为高光谱卫星大气校正和真实性检验提供科学借鉴。

1 数据来源与研究方法

1.1 卫星与地面观测

本文以东湖为研究对象（图1），选取2024年7月5日、8月16日、9月24日和10月23日4期ZY1E AHSI高光谱影像作为主要遥感数据源。在卫星过境同期（±3 h）开展水面之上法地面光谱测量，光谱覆盖范围为350~2 500 nm，共获取65条地面采样光谱。对原始光谱数据进行质量控制与异常值剔除（如“邻近效应”导致的近红外波段反射率异常升高等情况），最终保留43条有效同步光谱，用于星—地辐射定标与反演结果的真实性验证。

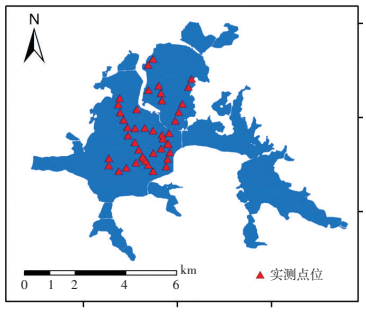


图1 研究区与地面实测点位分布示意图

本文采用SVC HR-1024光谱仪按NASA/IOCCG推荐的水面之上测量流程[19]，在卫星过境同期对东湖水体开展同步光谱原位观测。现场需实施暗电流扣除与标准白板定标，以确保离水辐亮度与入射辐照度测量的准确可追溯。遥感反射率的计算公式为：

$$R_{rs}=\rho_p(L_u-\rho_f\times L_{sky})/(\pi L_{pla}) \quad (1)$$

式中，L_u、L_{sky}、L_{pla}分别为光谱仪在指向水体、天空、标准参考板时的辐亮度测量值；ρ_f为气—水界面反射率，晴朗、微风条件下取值为0.028；ρ_p为标准参考板的反射率，本文所用参考板的反射率约为10%。

1.2 大气校正

由于Acolite软件平台尚未原生支持ZY1E卫星数据，本文在不改变DSF核心算法框架的基础上，完成了对该传感器与数据通道的最小化适配扩展。在传感器配置层新增ZY1E_AHSI参数集，明确设定各通道的名义中心波长与半高全宽（FWHM）参数，并基于高斯型光谱响应函数（SRF）的近似权重实现带内光谱加权处理。本文开发了ZY1E L1B/L1R级数据的读取与元数据解析模块，能准确提取辐射定标系数、太阳与观测几何参数（包括太阳天顶角、观测天顶角等）、逐像元地理定位信息（经纬度）和数据质量掩膜。该模块可将传感器数字量化值或表观反射率转换为Acolite所需的标准化L1级输入数据。

针对内陆水体的光学特性，本文对DSF算法中的关键参数进行了优化调整。通常DSF算法假设30 km×30 km范围内的气溶胶光学厚度（AOT）和气溶胶类型是固定的。基于该假设，将气溶胶选择的空间维度调整为1 000像元×1 000像元，以更好地适应ZY1E的空间分辨率与观测特性；还严格限定有效水体掩膜范围、设置近岸缓冲区以减弱陆地“邻近效应”的影响[18]，并优先利用近红外与短波红外（SWIR）波段约束气溶胶光学特性参数。在此基础上，重新定义了暗像元的AOT确定标准，并使用至少2 000个AOT直线模型的截距进行大气光谱拟合。截距通常代表波长与大气光谱之间的偏移量，反映大气散射和吸收的基础特性。为进一步提升算法的适应性，在配置层预留了逐列中心波长调整接口，为后续可能的耀斑与“邻近效应”校正提供技术扩展空间。最终算法输出L2级R_{rs}产品，并同步提供包含中心波长、波段宽度、波段名称等信息的元数据层以及反映反演质量的质量控制层，形成完整的大气校正结果数据集。

1.3 光谱响应模拟与星地匹配

由于ZY1E AHSI的各通道仅给出名义中心波长$\lambda_0^{(k)}$与FWHM，因此本文采用高斯函数$G(\lambda;\lambda_0^{(k)},\mathrm{FWHM}^{(k)})$

近似表示各通道的光谱响应函数，并在卷积窗口内对其归一化，即满足：

$$\int G(\lambda)\mathrm{d}\lambda = 1 \tag{2}$$

在此基础上，对地面实测的连续光谱 $R_{rs}(\lambda)$ 进行带内加权平均，从而获得与卫星传感器波段一致的等效遥感反射率 $\widetilde{R_{rs}}(\lambda_0^{(k)})$，即

$$\widetilde{R_{rs}}\left(\lambda_0^{(k)}\right) = \frac{\int R_{rs}(\lambda)G(\lambda;\lambda_0^{(k)},\mathrm{FWHM}^{(k)})\mathrm{d}\lambda}{\int G(\lambda;\lambda_0^{(k)},\mathrm{FWHM}^{(k)})\mathrm{d}\lambda} \tag{3}$$

为减弱水体短时变化对星地一致性评估的影响，本文设定星地匹配时间窗口为卫星过境时刻前后3 h。为降低定位误差和次像元异质性带来的影响[20]，以地面测站对应的中心像元为基准，在影像上提取3×3邻域窗口。异常值剔除（反射率≤0或≥1/π）后，对剩余像元采用MAD方法进行离群值检测与剔除，并以稳健中位数为该窗口的空间代表值，获得逐波段影像反射率 $R_{rs}^{img}\left(\lambda_0^{(k)}\right)$。

1.4　评价指标

为评估大气校正结果与地面观测的逐波段一致性，本文选用Bias、RMSE与 R^2 作为定量评价指标。在每个波段上，X_i 为地面实测 R_{rs}，Y_i 为大气校正后影像的 R_{rs}，N 为经质量控制与卫星过境前后3 h时间窗口筛选后的有效配对样本数量；$\bar{X}$ 与 $\bar{Y}$ 分别为 X_i 与 Y_i 的样本均值（sr^{-1}），各评价指标的计算公式为：

$$\mathrm{Bias} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Y_i - X_i) \tag{4}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Y_i - X_i)^2} \tag{5}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2}}\right)^2 \tag{6}$$

2　研究结果与分析

2.1　全谱一致性分析

由于水体对SWIR波段强吸收，水体信号在该波段微弱；蓝光波段虽对水色参量敏感，但易受瑞利散射与气溶胶残余、“邻近效应”与定标不确定度等影响而产生较大的大气校正误差[21]。综合考虑信噪比与水色敏感性，本文的星地一致性评估限定在400~900 nm波段范围内。东湖各测站在400~900 nm范围内的星地匹配光谱特征见图2。以中位数谱线表征总体典型水平，以站点间最小—最大值范围带刻画空间离散性，总体上两套光谱形态一致，在绿—黄光波段出现主峰，而后随波长增加逐渐衰减，并在红边区域（~700 nm）出现局部峰值；在蓝—绿光波段，影像中位数系统性低于地面中位数，偏差幅度约为0.002~0.004 sr^{-1}，且范围带显著增宽，表明该区间同时存在系统性负偏与较强的空间变异性；在红边区域，二者曲线出现局部发散，随后在近红外段逐渐收敛。在约780~820 nm波段，影像中位数略高于地面中位数，表现出轻微的高估趋势。这些特征与水色遥感的一般机理相符[22]，蓝光波段的负偏与较大离散度可能源于瑞利散射与气溶胶残余校正不足或“邻近效应”抑制不充分。红边区域差异则可能受窄带吸收区大气参数拟合误差、传感器带内响应、波长一致化偏差（如“微笑效应”）以及岸带混入等因素影响。总体来看，蓝光波段是误差与不确定性主控区间，而红边区域对大气校正模型设定和传感器响应匹配更敏感。

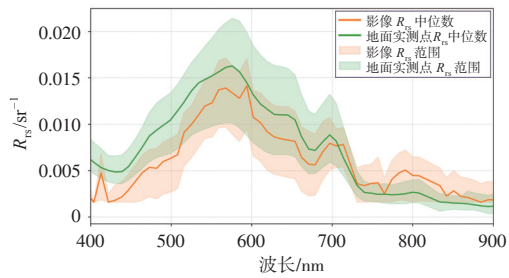


图2　星地匹配 R_{rs} 光谱

2.2　特征波段一致性分析

为检验蓝光、绿光、红光与红边4个关键波段的定量一致性，本文检验了490、560、665、705 nm的星地匹配散点与回归结果，可以看出（图3），4个波段均不同程度地落在1∶1线下方，表明影像大气校正结果相对于地面实测存在整体性低估，但一致性水平在不同波段间存在差异。蓝—绿光波段的相关性中等（R^2=0.640、0.524），RMSE分别为0.003 8、0.002 9 sr^{-1}，Bias分别为−0.003 7、−0.001 9 sr^{-1}，回归斜率显著小于1（约为0.50、0.39），说明同时存在系统性负偏（以加性项为主）与增益不足（乘性缩放偏小）。该结果与图2中蓝绿段中位数偏低、范围带更宽的结论一致，说明该区间受瑞利散射、气溶胶残余与“邻近效应”的影响较为显著。红光波段的一致性最佳（R^2=0.718），RMSE为0.002 3 sr^{-1}，Bias为−0.002 1 sr^{-1}，回归斜率约为0.70。与蓝—绿光波段相比，其随机离散明显减小，但仍存在一定的比例性偏差，同时伴随小幅负的加性项，说明红光波段大气校正结果与地面实测具备较好的线性一致性，但仍整体偏低且增益不足。红边波段的RMSE为0.001 7 sr^{-1}，但回归斜率（约为0.455）明显小于1，R^2 为0.521，说明主要误差来源为乘性缩放不足（增益偏低），而非单纯常量偏

移。尽管总体离散度较小，比例性偏差仍限制了其定量一致性。结合图2中红边区域的局部发散，可推测该波段对带内响应和波长一致化过程更敏感，可能受到SRF高斯近似带来的权重偏差、潜在的谱“微笑效应”与Keystone Effect以及近岸混入或薄云薄霾等场景因素的共同影响。

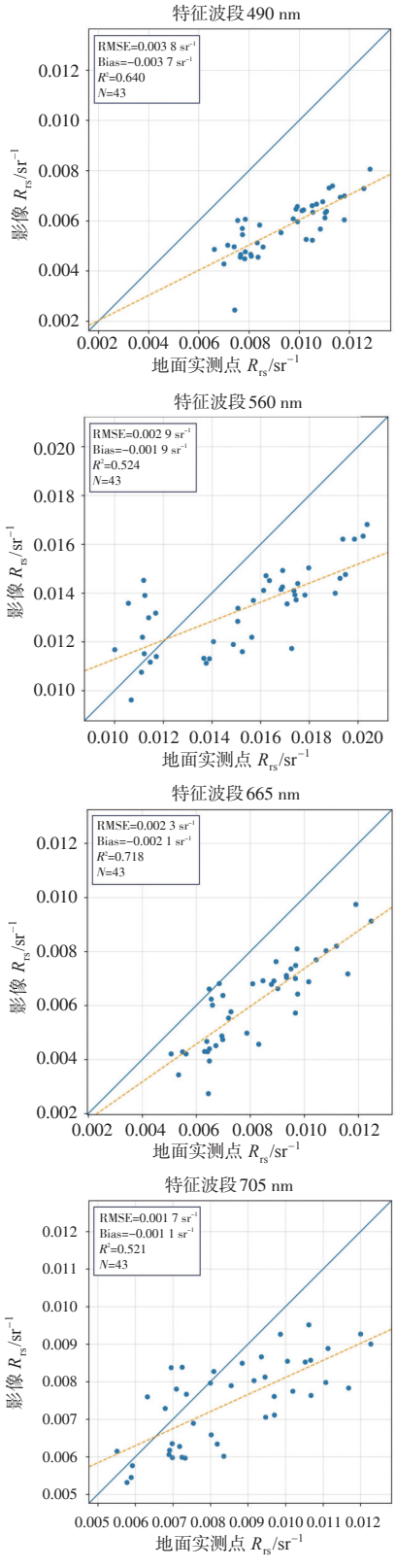


图3 特征波段星地匹配 R_{rs} 一致性散点图

2.3 误差随波长的分布与不确定度

星地匹配 R_{rs} 在400~900 nm范围内的Bias与RMSE随波长的变化趋势见图4，阴影部分表示基于站点维度Bootstrap重采样的95%置信区间。结合全谱对比结果和特征波段回归分析，本文在波段尺度上对星地一致性进行进一步的定量评估。蓝光波段的Bias呈显著负偏，约为−0.004 0~−0.002 0 sr^{-1}，且95%置信区间较宽，说明影像 R_{rs} 在该区间存在系统性低估与较高的离散度。该特征与前文的结果一致，可能与蓝光波段瑞利散射、气溶胶残余校正不足、“邻近效应”抑制不充分或暗像元选取偏差等因素有关。在红边—近红外波段的Bias由负转正，幅度约为 1×10^{-3} ~ 3×10^{-3} sr^{-1}，表现出一定程度的系统性高估。结合705 nm波段回归斜率偏低的结果，可推测红边区域更易受带内响应函数与波长一致化误差等因素的影响。RMSE在蓝光波段达到最高（约为 3×10^{-3}~4×10^{-3} sr^{-1}），而后随波长增加总体下降，在红边附近出现小幅局部峰值后回落至约 10^{-3} sr^{-1} 量级，表明蓝光波段的误差主要受系统偏差与随机散布的共同制约，而红边区域则对模型设定和传感器响应匹配更敏感。

综上所述，蓝光波段是星地一致性误差与不确定度的主控区间，而红边波段对带内响应与波长一致化的敏感性更高。针对性改进可从两个方面展开：蓝光波段应优先强化暗像元与气溶胶约束，优化“邻近效应”和薄云掩膜处理；红边波段需侧重于SRF与波长一致化精化、潜在微笑/Keystone Effect校正和岸线缓冲。通过上述改进可有效降低全谱Bias，降低蓝光波段RMSE，并进一步提升红边波段的一致性。

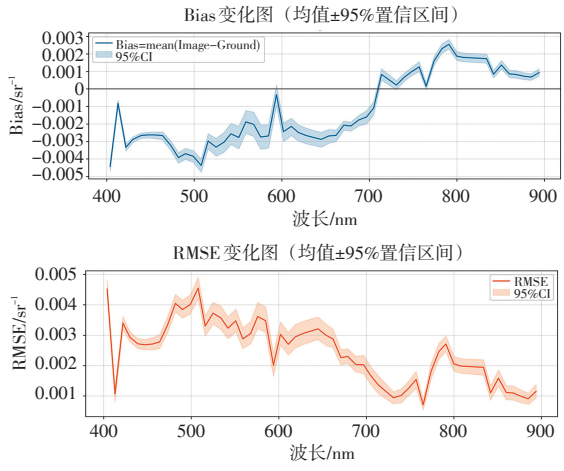


图4 星地匹配 R_{rs} 的误差谱

3 结 论

1）基于Acolite-DSF的大气校正在东湖取得了相对稳定且形态合理的 R_{rs} 光谱。影像 R_{rs} 的谱形与地面

观测一致，在560~600 nm处呈现典型峰值，而后随波长逐步衰减，并在红边附近出现与叶绿素荧光、红边效应相符的特征起伏，说明整体辐射定标与大气处理具有较好的可靠性与一致性。

2）不同谱段的误差特征存在显著差异。蓝—绿光波段普遍呈系统性负偏，且离散度加大；红光波段的一致性最佳（R^2较高、RMSE较小）；红边至近红外波段对带内响应、波长一致化更敏感，易表现为比例性偏差（增益不足/斜率偏低）。

3）后续研究可从3个方面进行优化：①在蓝光波段强化暗像元选择与气溶胶约束，严格实施近岸缓冲与薄云/云影掩膜，以削减残余散射与“邻近效应”带来的系统负偏与离散增大；②在红边波段以实测SRF替代高斯近似，并开展波长一致化，必要时叠加小幅乘性增益，以缓解比例性偏差；③在全谱段严格质量控制的前提下，实施逐波段稳健微校正，蓝—绿光波段以加性平移为主，红光、红边波段采用加性和乘性联合微调，并以星地配对与Bootstrap 95%置信区间形成闭环评估，持续监测与收敛误差。

Acolite-DSF已为ZY1E AHSI的水色R_{rs}提供了可复核的基线产品。通过对蓝光、红边等波段的定向改进，有望进一步降低系统偏差、提升线性一致性，从而为水环境监管与评估提供科学、稳定且可比的遥感水色数据支撑，服务精细化治理与决策。

参考文献

[1] 周艺,周伟奇,王世新,等. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用[J]. 水科学进展,2004,15(3):312-317

[2] 付宇,韦玉春,王国祥. 水质参数的遥感反演和遥感监测[J]. 环境监控与预警,2010,2(6):27-30

[3] 李盛阳,刘志文,刘康,等. 航天高光谱遥感应用研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程,2019,48(3):9-23

[4] Huang C,Chen Y,Zhang S,et al. Detecting,Extracting,and Monitoring Surface Water from Space Using Optical Sensors: A Review[J]. Reviews of Geophysics,2018,56(2):333-360

[5] 马荣华,唐军武,段洪涛,等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学,2009,21(2):143-158

[6] Vanhellemont Q. Adaptation of the Dark Spectrum Fitting Atmospheric Correction for Aquatic Applications of the Landsat and Sentinel-2 Archives[J]. Remote Sensing of Environment,2019,225:175-192

[7] Brockmann C,Doerffer R,Peters M,et al. Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel-2 and -3 for the Retrieval of Ocean Color Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters[C]//Living Planet Symposium,2016,740:54

[8] Warren M A,Simis S G H,Martinez-Vicente V,et al. Assessment of Atmospheric Correction Algorithms for the Sentinel-2A Multi-spectral Imager over Coastal and Inland Waters[J]. Remote Sensing of Environment,2019,225:267-289

[9] Wang M,Shi W. The NIR-SWIR Combined Atmospheric Correction Approach for MODIS Ocean Color Data Processing[J]. Optics Express,2007,15(24):15722-15733

[10] Chander G,Mishra N,Helder D L,et al. Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for Cross-calibration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2012,51(3):1267-1281

[11] Maciel F P,Pedocchi F. Evaluation of ACOLITE Atmospheric Correction Methods for Landsat-8 and Sentinel-2 in the Río de la Plata Turbid Coastal Waters[J]. International Journal of Remote Sensing,2022,43(1):215-240

[12] Braga F,Fabbretto A,Vanhellemont Q,et al. Assessment of PRISMA Water Reflectance Using Autonomous Hyperspectral Radiometry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2022,192:99-114

[13] 黄祥飞,陈雪梅,伍焯田,等. 武汉东湖浮游动物数量和生物量变动的研究[J]. 水生生物学集刊,1984(3):345-358

[14] 朱洪江. 北方典型内陆湖泊有害藻类遥感监测[J]. 地理空间信息,2025,23(9):80-84

[15] 沈金祥,程先锋,孙晓莉,等. 基于时序Sentinel-2的杞麓湖蓝藻水华监测[J]. 地理空间信息,2025,23(2):82-85

[16] Kahru M. Using Satellites to Monitor Large-scale Environmental Change: A Case Study of Cyanobacteria[J]. Monitoring Algal Blooms: New Techniques for Detecting Large-scale Environmental Change,1997,43:45-47

[17] Sun X,Zhang Y,Shi K,et al. Monitoring Water Quality Using Proximal Remote Sensing Technology[J]. Science of the Total Environment,2022,803:149805

[18] Zhu X,Helmer E H. An Automatic Method for Screening Clouds and Cloud Shadows in Optical Satellite Image Time Series in Cloudy Regions[J]. Remote Sensing of Environment,2018,214:135-153

[19] Zibordi G,Voss K,Johnson B C,et al. Protocols for Satellite Ocean Color Data Validation: In Situ Optical Radiometry[J]. IOCCG Protocols Document,2019,3:67

[20] Foody G M. Sub-pixel Methods in Remote Sensing[M]. Dordrecht,Springer Netherlands,2004:37-49

[21] Tian J,Philpot W D. Relationship Between Surface Soil Water Content,Evaporation Rate,and Water Absorption Band Depths in SWIR Reflectance Spectra[J]. Remote Sensing of Environment,2015,169:280-289

[22] McCluney W R. Remote Measurement of Water Color[J]. Remote Sensing of Environment,1976,5:3-33