

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.008

基于高分六号卫星遥感影像的太湖 叶绿素 a 质量浓度反演

潘鑫,杨子,杨英宝,孙怡璇,孙浦韬,李藤藤

(河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100)

摘要: 针对太湖叶绿素 a 浓度反演大多采用低中分辨率遥感数据,缺少基于高分辨率遥感数据研究的现状,采用高分六号卫星遥感影像,运用波段比值模型、归一化差异叶绿素指数(NDCI)模型和三波段模型定量反演了太湖蓝藻的叶绿素 a 质量浓度,并采用 2018 年 10 月 28 日、2019 年 4 月 6 日和 2019 年 6 月 3 日的高分六号卫星遥感影像对 3 种模型的反演精度进行了验证。结果表明,采用 NDCI 模型的平均相对误差、均方根误差和平均绝对误差最小,NDCI 模型具有更好的精度和稳定性,更适合高分六号卫星遥感影像在太湖叶绿素 a 质量浓度反演方面的应用。

关键词: 叶绿素 a 质量浓度;高分六号卫星;遥感反演方法;太湖

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)01-0050-07

Mass concentration inversion analysis of chlorophyll a in Taihu Lake based on GF-6 satellite data

PAN Xin, YANG Zi, YANG Yingbao, SUN Yixuan, SUN Putao, LI Tengting

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Low resolution satellite imageries are mostly used in the mass concentration inversion analysis of chlorophyll a in Taihu Lake, with insufficient high resolution satellite images. Based on the GF-6 satellite data, this study quantitatively retrieved the mass concentration of chlorophyll a in Taihu Lake with the band ratio (TBR) model, the normalized difference index of chlorophyll (NDCI) model and the three-band semi-analysis (TBS) model. The inversion accuracy of the three models was verified by using the GF-6 satellite image data on October 28, 2018, April 6, 2019, and June 3, 2019. The results show that the average relative error, root mean square error and mean absolute error of the NDCI model are the minimum. Therefore, the NDCI model has better accuracy and stability, and is more suitable for the application of GF-6 satellite in the inversion of chlorophyll a mass concentration in Taihu Lake.

Key words: mass concentration of chlorophyll a; GF-6 satellite; remote-sensing inversion method; Taihu Lake

目前国内外使用较多的叶绿素 a 浓度反演模型主要有 3 种:经验模型、生物光学模型以及半经验/半分析模型,3 种模型各有其优势及局限性。祝令亚^[1]以太湖为研究区,采用 MODIS 数据,用波段组合算法建立了叶绿素 a 浓度的反演模型。温新龙等^[2]以太湖为例,基于环境一号卫星 CCD 数据,利用波段组合算法,发现基于 CCD 数据第 4 波段与第 3 波段反射率比值的二次模型具有良好的叶绿素 a 浓度反演效果。朱利等^[3]基于环境一号卫星多光谱数据,建立了分地区季节经验模型反演叶绿素 a 浓度。李旭文等^[4]基于 Landsat TM 数据和地表实测数据建立了经验模型,并对梅梁湖区蓝藻生物量进行了估算,证明叶绿素 a 浓度和 DVI(差异植被指数)的相关性较高。李素菊等^[5]基于波段比值(the band ratio,TBR)模型及一阶微分模型进行了巢湖流域浮游植物叶绿素含量和反射率光谱特征关系的研究。李铜基等^[6]基于数理统计方法,结合实测数据,建立了以色素质量浓度 0.7 mg/m³为分界点时地表反射率与叶绿素 a 浓度的关系。段洪涛

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407903);国家自然科学基金青年科学基金(41701487);国家自然科学基金(42071346);中央高校基本科研业务费专项(2019B02714)

作者简介: 潘鑫(1989—),男,副教授,博士,主要从事定量遥感研究。E-mail:px1013@163.com

通信作者: 杨英宝,教授。E-mail:yyb@hhu.edu.cn

引用本文: 潘鑫,杨子,杨英宝,等.基于高分六号卫星遥感影像的太湖叶绿素 a 质量浓度反演[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):50-56.

PAN Xin, YANG Zi, YANG Yingbao, et al. Mass concentration inversion analysis of chlorophyll a in Taihu Lake based on GF-6 satellite data [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(1): 50-56.

等^[7]以查干湖区域为研究区,基于叶绿素荧光峰(700 nm)和叶绿素吸收峰(670 nm)的反射率比值与叶绿素 a 浓度的对数关系建立了使用高光谱数据的经验回归模型。刘忠华^[8]基于单波段叶绿素 a 浓度模型对太湖流域西部进行了研究,表明叶绿素 a 浓度在 712 nm 波长处与地表反射率的相关性最强。关于单波段模型,Rundquist 等^[9]基于对大量实测数据的研究,认为叶绿素 a 浓度在 690 nm 波长处与地表反射率的相关性较高。赵碧云等^[10]基于不同波段反射率与叶绿素 a 浓度的相关性建立了针对 TM 遥感数据的叶绿素 a 水质反演模型,并研究了滇池流域的水质,证明 TBR 模型可以消除部分大气对反演结果的影响,一定程度提高了反演精度。上述研究表明,经验模型局部反演精度较高,且模型构建方法简单,但实测数据的质量对其反演结果影响较大,在不同空间和时间尺度的适用性不强。

在叶绿素 a 浓度的生物光学模型研究中,Gordon 等^[11]提出了具有代表性的生物光学模型基本公式,但该模型中的各部分参数定量表征复杂;李云梅等^[12]等建立了基于模拟数据的生物光学模型,并且成功进行了太湖流域的叶绿素 a 浓度反演;Lee 等^[13]提出了 QAA(quasi-analytical algorithm),主要应用于二类水体叶绿素 a 浓度的估算。Li 等^[14]则提出了叶绿素 a 浓度反演分析 IIMIWI 模型。生物光学模型的参数受到水体组成成分的影响较大,在时间和空间尺度上的普适性同样有待提高。

Dall’Olmo 等^[15]提出了基于半经验/半分析模型的三波段(three band semi-analysis, TBS)模型,Le 等^[16]研究表明,近红外波段吸收系数受浑浊水域悬浮物浓度的影响,须引入第 4 个波段以消除悬浮物浓度造成的影响,并将三波段算法发展成为四波段模型。黄昌春等^[17]利用具有较大时空差异性的水体组分和光学特性数据集对现有叶绿素 a 浓度的半分析模型和生物光学模型进行了检验,三、四波段模型总体反演精度高。徐祎凡等^[18]以太湖为研究区,利用 TBS 算法构建了基于地球静止海洋彩色成像仪数据(GOCI)的太湖叶绿素 a 浓度反演模型。Zhang 等^[19]在研究中指出,季节变化会引起水体组分变化,导致算法具有局限性,提出了一种软分类方法对常用的半分析模型进行了实验,通过分类来提高反演精度。

目前叶绿素 a 浓度遥感反演大多基于中低分辨率遥感数据,精度有待提高。本文采用我国首颗具有红边波段的高分六号(GF-6)卫星遥感影像进行了太湖流域叶绿素 a 质量浓度反演研究,并进行了不同反演模型的精度分析,以寻求基于高分六号卫星遥感影像反演叶绿素 a 质量浓度的最佳模型。

1 叶绿素 a 质量浓度反演方法简介

本文选用基于经验模型和半经验/半分析模型进行叶绿素 a 质量浓度的反演。基于经验模型的叶绿素 a 质量浓度反演模型有 TBR 模型和归一化差异叶绿素指数(normalized differential chlorophyll index, NDCI)模型,基于半经验/半分析模型的叶绿素 a 质量浓度反演模型有 TBS 模型,3 种模型计算公式分别为

$$\rho(\text{Chl-a}) = A + B \frac{R_a}{R_b} \tag{1}$$

$$\rho(\text{Chl-a}) = A + B \frac{R_c - R_d}{R_c + R_d} \tag{2}$$

$$(R_e^{-1} - R_f^{-1}) R_g \propto \rho(\text{Chl-a}) \tag{3}$$

式中: $\rho(\text{Chl-a})$ ——叶绿素 a 质量浓度; A 、 B ——常数; R_a 、 R_b 、 R_c 、 R_d 、 R_e 、 R_f 、 R_g ——参与计算的遥感反射率。

为了评价叶绿素 a 质量浓度反演模型的精度,采用平均值偏差(DMC)、标准差偏差(DSD)、平均绝对误差(AE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)为精度评价指标。

2 研究区概况和研究数据

2.1 研究区概况

太湖流域的地理位置为 30°55′40″N~31°32′58″N、119°52′32″E~120°36′10″E,属于亚热带季风气候区,降水充足,年平均降水量 1 177 mm,多年平均天然年径流量 160.1 亿 m³。太湖流域的地形特点为四周高、中间低、西部高、沿海的东部地区低。太湖流域河网密布,湖泊众多,总面积大于 0.5 km²的湖泊共计 189 个,其中太湖富营养化最严重的地区是梅梁湾^[20]。这些湖泊可以调节河川径流,同时具有灌溉等多种功能,丰富的湖泊资源成为太湖流域经济社会发展的基础条件。太湖是太湖流域内面积最大的湖泊,是我国第二大淡水湖,面积 2 338 km²,多年平均蓄水量 44.28 亿 m³。

2.2 研究数据

2.2.1 高分六号卫星遥感影像

高分六号卫星是我国高分专项系列中发射的第一颗具有红边波段的国产卫星^[21],于 2018 年 6 月 2 日在酒

泉卫星发射中心成功发射并入轨运行,属于太阳同步卫星,其轨道高度为 645 km。高分六号卫星搭载了 2 台全色多光谱相机、4 台多光谱相机,有 8 个波段,空间分辨率为 16 m。相对于高分系列的其他卫星,高分六号卫星新增了 4 个波段,其中有 2 个红边波段、1 个紫光波段和 1 个黄光波段。红边波段更有利于利用植物的“陡坡效应”,可以有效地监测植被信息,适合于环境监测以及植被监测,在水体富营养程度方面的监测还有待研究。

本文采用的遥感数据是高分六号卫星宽幅传感器获取的太湖地区 2018 年 10 月 28 日、2019 年 4 月 6 日和 2019 年 6 月 3 日的 3 幅影像,图像像素大小为 16 m×16 m,为经过预处理的 L1A 级数据。高分六号卫星遥感影像的预处理主要包括传感器校正和大气校正两个过程。传感器校正又被称作辐射定标过程,其目的主要是消除传感器自身在遥感影像中造成的误差,这一步只是得到比较准确的大气顶层的辐射亮度,因为地表反射的太阳辐射在经过大气传输后仍然会有所改变,因此还需要进行大气校正。经过大气校正后的反射率误差很小,可用于叶绿素 a 质量浓度的反演。

2.2.2 实测数据

实测数据包括 1 期 24 个采样点的叶绿素 a 质量浓度和实测水面光谱反射率,以及 5 个自动监测站的 3 期叶绿素 a 质量浓度数据。24 个采样点的采样日期为 2018 年 4 月 25—26 日;3 期自动监测站的采样日期分别为 2018 年 10 月 28 日、2019 年 4 月 6 日和 2019 年 6 月 3 日,监测站分别为大雷山、漫山、西山西、焦山和漾西岗。

实测的样点数据被分成两个部分:第一部分使用具有实测水面光谱反射率以及叶绿素 a 质量浓度的采样点数据,用来建立叶绿素 a 质量浓度计算模型,称为建模数据,共计 24 个;第二部分使用不具备实测水面光谱反射率,只包含叶绿素 a 质量浓度的样点数据,用来检验模型的反演精度,称为检验数据,共计 15 个。

a. 叶绿素 a 质量浓度测定。采用分光光度法在实验室中测定,对采集的水样使用 GF/C 滤膜过滤,将抽滤水样的体积记为 V_1 。然后将滤膜放到冰箱中冷冻,48 h 后取出,再用热乙醇萃取,后在岛津 UV2401 分光光度计上测定 665 nm 和 750 nm 处吸光度,并计算 2 个吸光度的差 A_1 ,再加入稀盐酸酸化测定酸化后的提取液在 665 nm 和 750 nm 处的吸光度差 A_2 ,提取液的最终定容体积记为 V_2 ,根据下式换算得到叶绿素 a 质量浓度:

$$\rho(\text{Chl-a}) = 27.9(A_1 - A_2) \frac{V_2}{V_1}$$

(4)

b. 水体光谱采集。采用 ASDHandHeld2 便携式地物光谱仪采集太湖清洁水体和蓝藻水华水面光谱。光谱范围为 350~1 075 nm,光谱分辨率为 1 nm。光谱采集过程中仪器距离水面约 1 m,采用倾斜测量的方式进行^[22],获得的实测水面反射率光谱曲线见图 1。

3 反演模型的构建与精度评价

3.1 高分六号卫星的波段模拟

实测反射率采样当天没有高分六号卫星过境,所以只能进行波段模拟,通过模拟波段反射率来建立卫星反射率和叶绿素 a 质量浓度之间的相关关系。高分六号卫星传感器有 8 个波段,波段范围为 450~890 nm,在对高分六号卫星进行叶绿素 a 敏感波段分析的过程中,无法直接用实测遥感反射率(R_{rs})与高分六号卫星遥感反射率(R_{GF-6})进行替换。因此,需要根据高分六号卫星的光谱响应函数,先对实测遥感反射率做波段等效,波段等效计算公式为

$$R_{\text{mea2}} = \frac{\sum_{\lambda=450\text{ nm}}^{910\text{ nm}} R_{\text{rs}\lambda} f_{\lambda}}{\sum_{\lambda=450\text{ nm}}^{910\text{ nm}} f_{\lambda}}$$

(5)

式中: λ ——波长; $R_{\text{rs}\lambda}$ ——波长 λ 处的遥感反射率; f_{λ} ——波长 λ 处的高分六号卫星的光谱响应函数;

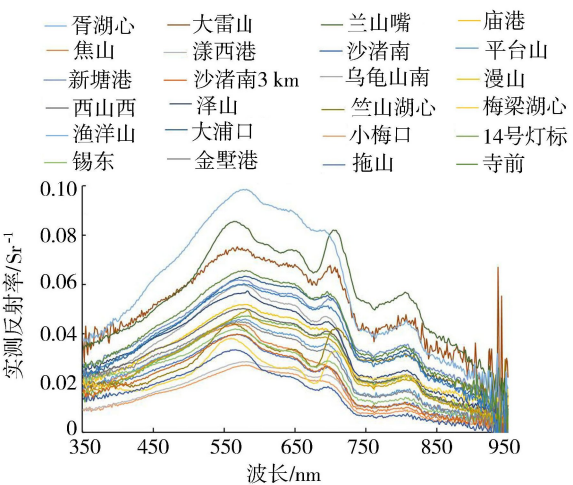


图1 太湖水体实测反射率光谱曲线
Fig.1 Measured reflectance spectral curve of Taihu Lake water

450 nm、910 nm——高分六号卫星最短、最长波长。高分六号卫星的光谱响应函数如图 2 所示(图中 B1 ~ B8 分别表示高分六号卫星的 8 个波段)。根据高分六号卫星的光谱响应函数建立的实测数据等效波段反射率如 3 所示。

与图 1 太湖水体的实测反射率光谱曲线进行比较,高分六号卫星在 550 nm 与 700 nm 附近出现反射率的峰值,其对应的波段为 B2 与 B5,实测反射率的峰值出现在 560 nm 以及 710 nm 附近,分别处于 B2 波段和 B5 波段的范围内。高分六号卫星在 660 nm 处出现反射率吸收峰,对应的波段为 B3 波段,实测反射率的吸收峰出现在 670 nm 附近,处于 B3 波段范围内,可见,高分六号卫星模拟波段的反射率特征和实测波段的反射率特征一致,可以替代实测数据反射率进行敏感波段的选择。

3.2 反演模型构建

3.2.1 TBR 模型

采用 24 组实测叶绿素 a 质量浓度数据和对应采样点的光谱数据来选择 TBR 模型最佳波段,将卫星波段范围内每个等效波段的反射率分别除以其余所有等效波段的反射率,用得到的比值与叶绿素 a 质量浓度计算相关系数,取相关性最大的 2 个波段作为最佳波段,求得高分六号卫星的最佳波段为 B2(波段 1)和 B5(波段 2)。高分六号卫星的 TBR 指数与叶绿素 a 质量浓度的关系见图 4 (图中 TBR 指数表示高分六号卫星第 2 波段和第 5 波段反射率的比值)。

3.2.2 NDCI 模型

NDCI 模型最佳波段选择方法同 TBR 模型,得到高分六号卫星的最佳波段为 B2(波段 1)和 B5(波段 2)。高分六号卫星的 NDCI 指数与叶绿素 a 质量浓度的关系见图 5 (图中 NDCI 指数表示高分六号卫星第 2 波段和第 5 波段反射率之差除以二者之和)。

3.2.3 TBS 模型

采用 24 组实测的叶绿素 a 质量浓度数据和对应采样点的光谱数据来选择 TBS 模型最佳波段,按照最优波段选择的方法,将实测的水面光谱反射率替换成高分六号卫星的模拟波段,求得高分六号卫星的最佳波段为 B3 (波段 1)、B6(波段 2)和 B2(波段 3)。高分六号卫星 TBS 指数与叶绿素 a 质量浓度的关系如图 6 所示。

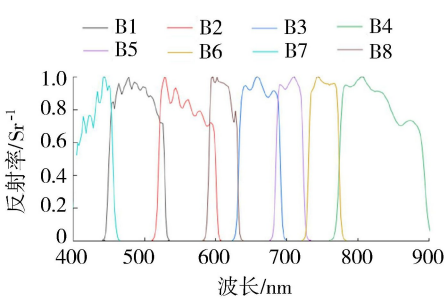


图 2 高分六号卫星光谱响应函数曲线
Fig.2 Spectral response function curve of GF-6 satellite

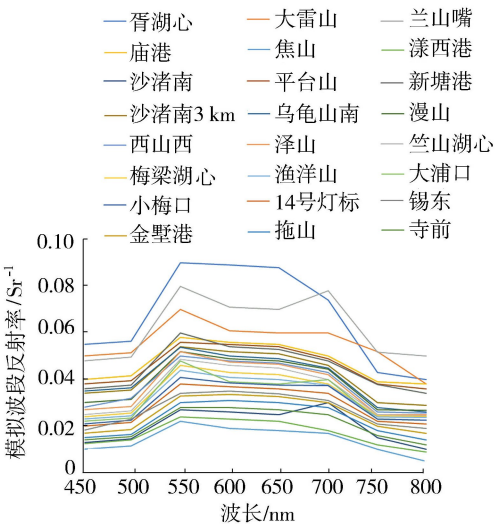


图 3 高分六号卫星模拟波段反射率
Fig.3 Simulated band reflectance of GF-6 satellite

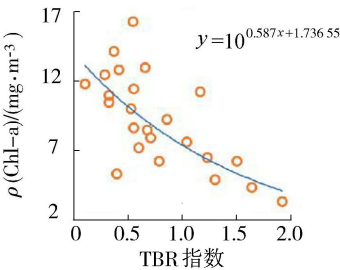


图 4 高分六号卫星 TBR 指数与
叶绿素 a 质量浓度的关系
Fig.4 Relation between TBR index and
chlorophyll a mass concentration of
GF-6 satellite

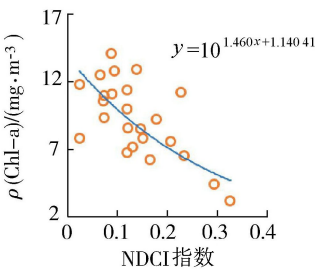


图 5 高分六号卫星 NDCI 指数与
叶绿素 a 质量浓度的关系
Fig.5 Relation diagram of NDCI index
and chlorophyll a mass concentration
of GF-6 satellite

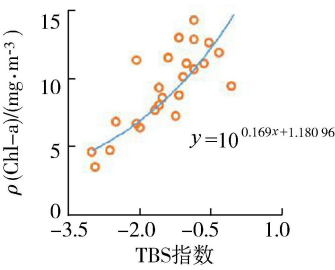


图 6 高分六号卫星 TBS 指数与
叶绿素 a 质量浓度的关系
Fig.6 Relation diagram of TBS index
and chlorophyll a concentration
of GF-6 satellite

TBS 指数计算公式为

$$I_{TBS} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{B3}} - \frac{1}{\varepsilon_{B6}} \right) \varepsilon_{B2}$$

(6)

式中: I_{TBS} ——TBS 指数值; ε_{B2} 、 ε_{B3} 、 ε_{B6} ——高分六号卫星第 2、3、6 波段的反射率。

3.3 反演结果的定性比较

选取 2019 年 4 月 6 日高分六号卫星遥感影像,采用 3 种模型来进行太湖叶绿素 a 质量浓度的反演,影像的假彩色合成和 3 种模型提取的叶绿素 a 质量浓度分布如图 7 所示。

从图 7 可以看出,太湖中叶绿素 a 质量浓度较高的区域一般分布在南部沿岸区、竺山湖与西部沿岸区的交界处和东太湖。其中 NDCI 模型和 TBR 模型叶绿素 a 质量浓度反演的结果比较相似,而在南部沿海岸区 TBS 模型反演的高质量浓度叶绿素 a 的量要比 NDCI 模型和 TBR 模型多。

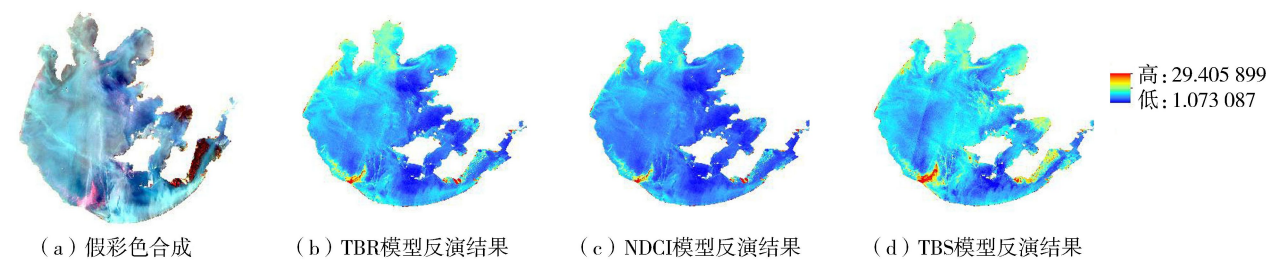


图 7 太湖叶绿素 a 质量浓度的分布(单位:mg/m³)

Fig. 7 Distribution of chlorophyll a mass concentration in Taihu Lake (units: mg/m³)

3.4 高分六号卫星和 MODIS 遥感影像反演结果对比

基于 MODIS 的 2019 年 4 月 6 日的遥感影像,采用 TBR、NDCI 模型进行太湖叶绿素 a 质量浓度的反演,继而与高分六号卫星的反演结果进行对比,结果见表 1 和图 8。从图 8 可以看出,MODIS 遥感影像反演的叶绿素 a 质量浓度整体偏低。从表 1 可以看出,MODIS 遥感影像反演的叶绿素 a 质量浓度的 DMC、DSD、AE、MRE、RMSE 均要大于高分六号卫星遥感影像的反演值,因此采用高分六号卫星遥感影像反演叶绿素 a 质量浓度是可靠的。

表 1 高分六号卫星与 MODIS 遥感影像反演精度对比

Table 1 Inversion precision comparison between GF-6 satellite and MODIS data

遥感影像	模型	DMC/%	DSD/%	AE/ (mg·m ⁻³)	MRE/%	RMSE/ (mg·m ⁻³)
GF-6	TBR	44.00	20.11	2.51	23.37	3.68
	NDCI	35.21	44.92	2.45	22.27	2.99
MODIS	TBR	84.20	61.78	6.40	84.00	6.47
	NDCI	69.81	65.30	4.09	52.41	4.50

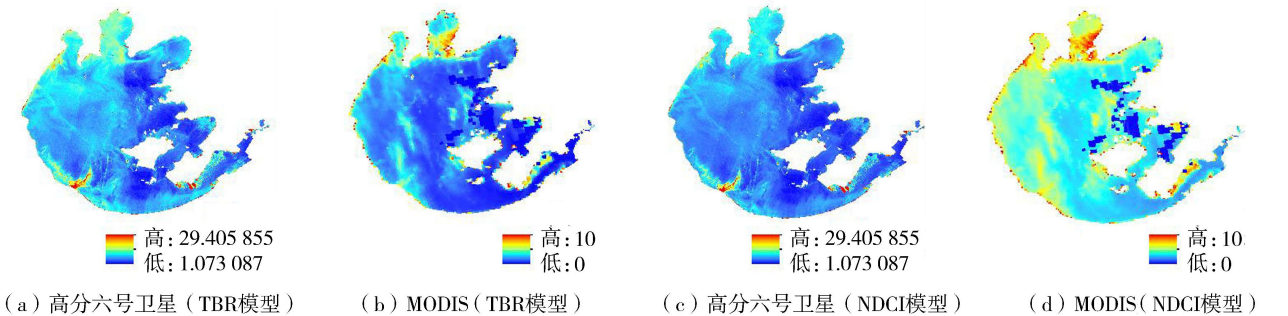


图 8 高分六号卫星与 MODIS 遥感影像反演结果对比(单位:mg/m³)

Fig. 8 Comparison of inversion results between GF-6 satellite and MODIS Data (units: mg/m³)

3.5 反演模型精度评价

未参与建模的样点数(检验数据)有 15 个,去除影像因薄云影响的 5 个数据,实际参与检验的数据为 10 个。采用 3 幅高分六号卫星遥感影像对 3 种反演模型进行精度评价,结果见表 2。

由表 2 可见,TBS 模型的 DMC 为 4.27%,效果最好,NDCI 模型的 DMC 为 5.19%,略低于 TBS

表 2 高分六号卫星遥感影像反演叶绿素 a 质量浓度的精度

Table 2 Inversion accuracy of chlorophyll a mass concentration from GF-6 satellite image

模型	DMC/%	DSD/%	AE/ (mg·m ⁻³)	MRE/%	RMSE/ (mg·m ⁻³)
TBR	14.18	43.37	4.80	38.16	8.00
NDCI	5.19	43.86	4.64	35.28	7.47
TBS	4.27	43.57	6.09	67.99	7.85

模型,TBR 模型的 DMC 为 14.18%,说明 TBR 模型反演的叶绿素 a 质量浓度的平均值与实测的叶绿素 a 质量浓度的平均值误差较大。DSD 则是 TBR 模型较好,TBS 模型次之,NDCI 模型最差,3 种模型的 DSD 均在 43% ~44% 范围内,相差不到 1%,说明 3 种模型反演结果的分布较为接近。TBR、NDCI、TBS 模型的 MRE 分别为 38.16%、35.28% 和 67.99%,说明 TBR 模型和 NDCI 模型的反演结果较好,TBS 模型反演效果较差。

表 3 为高分六号卫星 3 幅验证遥感影像反演结果的 AE 和 MRE 平均绝对误差统计表。可以看出,在 3 种模型中,验证样点最大 MRE 为 86.76%,出现在 TBS 模型采用 2019 年 6 月 3 日卫星遥感影像的反演结果中;最小 MRE 为 22.27%,出现在 NDCI 模型采用 2019 年 4 月 6 日卫星遥感影像的反演结果中。

表 3 3 幅高分六号卫星遥感影像反演结果的 AE 和 MRE
Table 3 Statistical table of AE and MRE of three GF-6 satellite images

遥感影像日期	AE/(mg·m ⁻³)			MRE/%		
	TBR 模型	NDCI 模型	TBS 模型	TBR 模型	NDCI 模型	TBS 模型
2018 年 10 月 28 日	2.86	2.79	3.76	41.83	39.20	56.59
2019 年 4 月 6 日	2.51	2.45	4.35	23.37	22.27	60.64
2019 年 6 月 3 日	6.02	5.67	7.17	49.30	44.35	86.76

综合 3 幅遥感影像反演的平均结果来看,最大 MRE 和最大 AE 均出现在 TBS 模型中,最小 MRE 和最小 AE 出现在 NDCI 模型中。TBS 模型的 MRE 均超过了 50%,反演结果较差。TBS 模型对太湖地区的叶绿素 a 质量浓度预测值偏高,可能是太湖地区复杂的水质情况导致 TBS 模型的精度较差。对 2019 年 6 月 3 日的卫星遥感影像反演结果进行分析,3 种模型的 MRE 均超过了 40%,AE 均超过 5 mg/m³,NDCI 模型的结果比其他两个模型效果稍好,但也较为一般。这可能因为实测叶绿素 a 质量浓度数据都低于 15 mg/m³的限制,所以本文建立的模型可能更适用于叶绿素 a 低质量浓度的反演。对于 2018 年 10 月 28 的卫星遥感影像,TBR 和 NDCI 模型的 MRE 小于 TBS 模型。对 2019 年 4 月 6 日的卫星遥感影像,TBR 与 NDCI 模型反演结果的 MRE 接近,反演结果较为可靠。

4 结 论

a. TBR 模型与 NDCI 模型的最佳波段为第 2 波段和第 5 波段,TBS 模型的最佳波段为第 2 波段、第 3 波段和第 6 波段。

b. 3 种模型中,NDCI 模型的 MRE、AE 和 RMSE 均最小,基于高分六号卫星第 2 波段和第 5 波段构建的 NDCI 模型比其他模型具有更好的精度和稳定性,更适用于高分六号卫星遥感影像在太湖叶绿素 a 质量浓度反演方面的应用。

参考文献:

[1] 祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2006.

[2] 温新龙,景元书,李亚春,等. 基于环境一号卫星数据的太湖叶绿素 a 浓度反演[J]. 环境科学与技术,2014,37(10): 149-153. (WEN Xinlong, JING Yuanshu, LI Yachun, et al. Quantitative estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Taihu based on HJ-1 satellite images[J]. Environmental Science & Technology,2014,37(10):149-153. (in Chinese))

[3] 朱利,姚延娟,吴传庆. 基于环境一号卫星的内陆水体水质多光谱遥感监测[J]. 地理与地理信息科学,2010, 26(2):81-84. (ZHU Li,YAO Yanjuan,WU Chuanqing. Remote sensing monitoring on water quality of interior water body based on the HJ-1 satellite multi-spectral data[J]. Geography and Geo-Information Science,2010,26(2):81-84. (in Chinese))

[4] 李旭文,季耿善,杨静. 太湖梅梁湖湾蓝藻生物量遥感估算[J]. 国土资源遥感,1995(2):23-28. (LI Xuwen, JI Gengshan, YANG Jing. Estimating cyanophyta biomass standing crops in Meiliang Gulf of Lake Taihu by satellite remote sensing[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1995(2):23-28. (in Chinese))

[5] 李素菊,吴倩,王学军,等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. 湖泊科学,2002(3):228-234. (LI Suju,WU Qian,WANG Xuejun, et al. Relationship between chlorophyll content and reflectance spectral characteristics of phytoplankton in Chaohu Lake[J]. Journal of Lake Sciences,2002(3):228-234. (in Chinese))

[6] 李铜基,陈清莲,朱建华,等. 黄东海秋季色素经验算法研究[J]. 海洋技术,2004(4):113-116. (LI Tongji, CHEN Qinglian, ZHU Jianhua, et al. Chlorophyll empirical algorithm of Yellow Sea and the East China Sea in autumn[J]. Marine Technology, 2004(4):113-116. (in Chinese))

- [7] 段洪涛,张柏,宋开山,等. 查干湖叶绿素 a 浓度高光谱定量模型研究[J]. 环境科学,2006(3):3503-3507. (DUAN Hongtao, ZHANG Bai, SONG Kaishan, et al. Hyperspectral remote sensing of chlorophyll-a in the Chagan Lake, China[J]. Environmental Science, 2006(3):3503-3507. (in Chinese))
- [8] 刘忠华. 基于高分数据的太湖重点污染入湖河流叶绿素 a 浓度遥感反演[D]. 南京:南京师范大学, 2012.
- [9] RUNDQUIST D C, HAN L, SCHALLES J F, et al. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(2): 195-200.
- [10] 赵碧云,贺彬,朱云燕,等. 滇池水体中叶绿素 a 含量的遥感定量模型[J]. 云南环境科学,2001(3):1-3. (ZHAO Biyun, HE Bin, ZHU Yunyan, et al. Study on the remote sensing model for chlorophyll-a in Dianchi Lake[J]. Yunnan Environmental Science, 2001(3):1-3. (in Chinese))
- [11] GORDON H R, BROWN J W, BROWN O B, et al. A semianalytic radiance model of ocean color[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1988, 93(10):10909-10924.
- [12] 李云梅,黄家柱,韦玉春,等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度[J]. 遥感学报,2006(2):169-175. (LI Yunmei, HUANG Jiazhu, WEI Yuchun, et al. Inversing chlorophyll concentration of Taihu Lake by analytic model[J]. Journal of Remote Sensing, 2006(2):169-175. (in Chinese))
- [13] LEE Z, 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.
- [14] LI L, SONG K, LI Y, et al. An inversion model for deriving inherent optical properties of inland waters: establishment, validation and application[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 135(4):150-166.
- [15] DALL'OLMO G, GITELSON A A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results[J]. Applied Optics, 2005, 44(3):412-22.
- [16] LE Chengfeng, LI Yunmei, ZHA Yong, et al. A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: the case of Taihu Lake, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6):1175-1182.
- [17] 黄昌春,李云梅,徐良将,等. 内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究[J]. 环境科学,2013, 34(2):525-531. (HUANG Changchun, LI Yunmei, XU Liangjiang, et al. Study on influencing factors and universality of chlorophyll-a retrieval model in inland water body[J]. Environmental Science, 2013, 34(2):525-531. (in Chinese))
- [18] 徐伟凡,陈黎明,陈炼钢,等. 基于 GOCI 数据的暴雨后太湖水体叶绿素 a 浓度遥感反演研究[J]. 水利水电技术,2020, 51(10):151-158. (XU Yifan, CHEN Liming, CHEN Liangang, et al. High temporal resolution remote monitoring of chlorophyll a concentration change after rainstorm based on GOCI data in Lake Taihu[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10):151-158. (in Chinese))
- [19] ZHANG F, LI J, SEHN Q, et al. Algorithms and schemes for chlorophyll-a estimation by remote sensing and optical classification for turbid lake Taihu, China[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(1):350-364.
- [20] 马孟泉. 基于 MODIS 影像的太湖蓝藻水华面积高精度计算方法及应用[D]. 南京:南京大学,2014.
- [21] 王旭. “长征”二号丁运载火箭成功发射“高分”六号卫星[J]. 中国航天,2018(6):14. (WANG Xu. Long March 2 DING carrier rocket successfully launched GF-6 satellite[J]. China Aerospace Science and Technology, 2018(6):14. (in Chinese))
- [22] 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(1):37-44. (TANG Junwu, TIAN Guoliang, WANG Xiaoyong, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: above water measurement [J]. Journal of Remote Sensing, 2004(1):37-44. (in Chinese))

(收稿日期:2020-11-06 编辑:熊水斌)