

# 基于三波段生物光学模型反演闽江下游叶绿素 a

谢婷婷<sup>1,2</sup>, 陈芸芝<sup>1,2\*</sup>, 卢文芳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>福州大学卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 福建 福州 350116;

<sup>2</sup>空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350116

**摘要** 叶绿素 a 可直观反映水体的营养化程度, 三波段生物光学模型能削弱二类水体中悬浮物与黄色物质等因素的影响, 准确估算叶绿素 a 的浓度。选用三波段因子法, 分析实测水体光谱特征, 确定三波段因子的大致位置, 并通过穷举法和相关性分析, 确定三个特征波段建立反演模型。结果表明, 当  $\lambda_1 = 661.63 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 693.54 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 757.35 \text{ nm}$  时, 三波段因子  $[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}(\lambda_3)$  与叶绿素 a 浓度具有较高的相关系数 ( $r = 0.830$ )。该模型的决定系数、均方根误差和平均绝对误差百分比分别为 0.859、 $2.446 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  和 32.169%, 其反演精度优于波段比值模型和反射峰模型。为闽江下游叶绿素 a 反演提供一定的理论依据和技术支持, 也为以后使用三波段因子法反演二类水体的叶绿素 a 浓度提供波段选择。

**关键词** 遥感; 叶绿素 a; 二类水体; 三波段生物光学模型; 波段选择

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071701

## Retrieval of Chlorophyll-a in Lower Reaches of the Minjiang River Via Three-Band Bio-Optical Model

Xie Tingting<sup>1,2</sup>, Chen Yunzhi<sup>1,2\*</sup>, Lu Wenfang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou, Fujian 350116, China

**Abstract** Chlorophyll-a (Chla) can intuitively reflect the degree of eutrophication of water, Chla concentration can be accurately estimated via the three-band bio-optical model because it can weaken the influence of factors such as suspended and yellow matter in case-II waters. Therefore, the approximate position of the three-band factor was determined by analyzing the spectral characteristics of the measured water body. Further, three characteristic bands and a retrieval model were established using the exhaustive method and correlation analysis. Results show that when  $\lambda_1 = 661.63 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 693.54 \text{ nm}$ , and  $\lambda_3 = 757.35 \text{ nm}$ , the three-band factor  $[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}(\lambda_3)$  exhibits a high correlation coefficient with the Chla concentration ( $r = 0.830$ ). The determination coefficient, root mean square error, and mean absolute percentage error of the model are 0.859,  $2.446 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , and 32.169%, respectively, furthermore, the accuracy is better than that of the band ratio and reflection peak models. These results can provide a theoretical basis and technical support for the Chla retrieval in the lower reaches of the Minjiang River and enable band selection for the subsequent retrieval of the Chla concentration in case-II waters using the three-band factor method.

**Key words** remote sensing; chlorophyll-a; case-II waters; three-band bio-optical model; band selection

**OCIS codes** 120.3688; 120.0280

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-11-01; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(2017L3012)、国家自然科学基金青年科学基金(41601444)、福建省自然科学基金面上项目(2019J01650)、中国博士后科学基金面上项目(2019M652245)

\* E-mail: chenyunzhi@fzu.edu.cn

# 1 引言

叶绿素 a 常被用来估计浮游植物的生物量和生产力,能直观反映出水体的营养化程度<sup>[1-2]</sup>。内陆水体属二类水体,光谱特征受叶绿素 a、悬浮物、黄色物质三大水色要素的共同影响<sup>[3]</sup>。反演叶绿素 a 浓度的模型因子方法主要有反射峰<sup>[4]</sup>、波段比值<sup>[5]</sup>和三波段因子法<sup>[6-7]</sup>等。反射峰法是利用叶绿素 a 荧光峰波段构建模型,波段比值法是利用与叶绿素 a 浓度有最大相关性的二波段比值因子构建模型,两种模型均为经验模型。经验模型主要是建立反演因子与水色参数含量之间的统计关系,而半分析模型侧重水体中光的辐射传输过程,但其中某些参数的获取仍采用经验模型的方法<sup>[8]</sup>。三波段因子法<sup>[9-10]</sup>建立的生物光学模型也称为半分析模型,能有效避免黄色物质和悬浮物等因素影响,因此广泛应用于二类水体中的叶绿素 a 浓度反演<sup>[11-13]</sup>。

三波段生物光学模型最初被用于估算植被的色素含量<sup>[14]</sup>,Dall'Olmo 等<sup>[15]</sup>证明了该模型可以估算二类水体中叶绿素 a 的浓度。该模型以生物光学理论为基础,选用三波段因子法,确定了 3 个特征波段并运用统计的方法反演叶绿素 a 浓度。在二类水体中,由于悬浮物与黄色物质的影响,叶绿素 a 对光谱的响应较弱,反演困难较大<sup>[16-17]</sup>。而三波段生物光学模型利用三波段因子的特定运算减小二类水体中悬浮物与黄色物质等因素的影响,能更加精确的估算叶绿素 a 浓度。宋挺等<sup>[18]</sup>在太湖水域建立了三波段因子为 $[R_{rs}^{-1}(679) - R_{rs}^{-1}(708)]R_{rs}(767)$ 的叶绿素 a 浓度反演模型;李亭亭等<sup>[19]</sup>选用三波段因子 $[R_{rs}^{-1}(665) - R_{rs}^{-1}(705)]R_{rs}(740)$ 作为模型变量,反演了鄱阳湖北湖区叶绿素 a 浓度,且反演精度较高;毕顺等<sup>[20]</sup>选用 $[R_{rs}^{-1}(665) - R_{rs}^{-1}(708.75)]R_{rs}(753.75)$ 三波段生物光学模型对洱海的叶绿素 a 浓度进行了准确的估算,其平均相对误差为 12.37%,低于波段比值模型(16.04%)和荧光峰高度(FLH)模型(13.5%)。

本文使用闽江下游实测水体的光谱数据,确定三波段因子 $[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}(\lambda_3)$ 的最佳组合,构建了叶绿素 a 浓度反演模型,为使用三波段因子法反演二类水体中的叶绿素 a 浓度提供了一定的理论依据和技术支持。

## 2 研究区域及数据

### 2.1 研究区域

闽江是福建省最大的河流,干流长约 577 km,

总流域面积为 60992 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。本研究选用闽江下游闽侯白沙以东至入海口以西为研究对象,其地理范围为 25°57'N~26°13'N,119°1'E~119°35'E,如图 1 所示。其气候类型为亚热带海洋性季风气候,周边土地以林地、城镇建设用地为主。

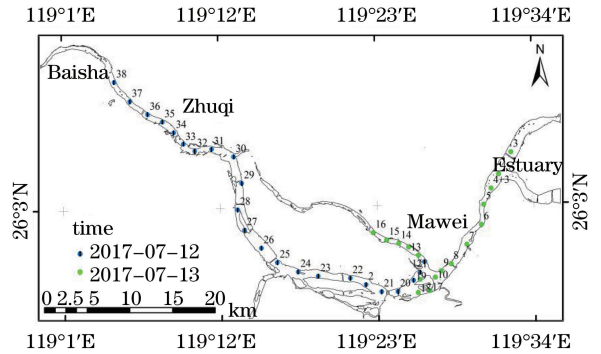


图 1 研究区域

Fig. 1 Research area

### 2.2 数据获取

2017 年 7 月 12 日、13 日 10:00—15:00 分别对闽江下游设置 22 个、18 个采样点,对每个采样点进行光谱测量,同步使用 GPS 记录每个采样点的 WGS-84 坐标并采集水样。采样时天气良好、水面平静。所用的光谱测量仪器为国产 ISI921VF-512 野外地物光谱辐射计,可在 380~1080 nm 波长范围内连续测量,采样间隔为 1 nm,光谱分辨率为 2 nm。在水面上进行测量<sup>[22]</sup>,同步水质采样在光谱测量点水面之下 20~30 cm 处,叶绿素 a 浓度使用实验室 L5S 紫外可见分光光度计测定,悬浮物浓度使用重量法(GB 11901-89)测定。

表 1 是统计得到的闽江下游的采样点水质参数,可以看出,叶绿素 a 浓度的区间范围在 1.81~28.5 mg·m<sup>-3</sup>,平均值为 11.48 mg·m<sup>-3</sup>,标准差为 6.78 mg·m<sup>-3</sup>;悬浮物(SS)浓度为 12~37 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为 22.75 mg·L<sup>-1</sup>,标准差为 6.49 mg·L<sup>-1</sup>,这表明水中除了叶绿素 a,还有较高浓度的悬浮物。在地面同步实测环节中,会出现由测量不确定性导致的测量误差,针对此类问题,对光谱数据进行平滑和归一化处理,可排除采集样本中数据噪声对反演精度的影响<sup>[23]</sup>。噪声越大,反演精度越差。

表 1 实测采样点水质参数统计结果

Table 1 Statistical results of the optical water quality parameters measured

Concentration	<i>n</i>	<i>X</i> <sub>min</sub>	<i>X</i> <sub>max</sub>	<i>X</i> <sub>avg</sub>	<i>X</i> <sub>sd</sub>
Chla / (mg·m <sup>-3</sup> )	40	1.81	28.5	11.48	6.78
SS / (mg·L <sup>-1</sup> )	40	12	37	22.75	6.49

表1中  $n$  为实测样点数,  $X_{\min}$  为该数据的最小值,  $X_{\max}$  为数据最大值,  $X_{\text{avg}}$  为数据的平均值,  $X_{\text{sd}}$  为数据的标准差。

### 3 研究方法

#### 3.1 三波段生物光学模型

根据水体光学的基本理论,水体的光谱反射率 ( $R_{\text{rs}}(\lambda)$ ) 与固有光学量之间存在的定量关系可表示为<sup>[24]</sup>

$$R_{\text{rs}}(\lambda) \propto \gamma \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}, \quad (1)$$

式中,“ $\propto$ ”表示成正比例,  $\gamma$  为常数,与水体的光场分布、水体光学特性有关,  $a(\lambda)$  为水体总吸收系数,  $b_b(\lambda)$  为水体总后向散射系数,  $\lambda$  为波长。在二

类水体中,水体总吸收系数不仅受纯水(water)的影响,同时还受叶绿素 a (Chla)、无机悬浮物(tripton)以及黄色物质(CDOM)的共同影响,可表示为

$$a(\lambda) = a_{\text{water}}(\lambda) + a_{\text{CDOM}}(\lambda) + a_{\text{Chla}}(\lambda) + a_{\text{tripton}}(\lambda). \quad (2)$$

水中叶绿素 a 浓度与其吸收系数存在一定的正比关系,即  $C_{\text{Chla}} \propto a_{\text{Chla}}$ ,  $C_{\text{Chla}}$  为叶绿素 a 的浓度,因此只需将叶绿素 a 的吸收系数从其他固有光学量中分离出来,就能估算出水中叶绿素 a 的浓度。为了分离出  $a_{\text{Chla}}(\lambda)$ , 首先利用波长为  $\lambda_1$  处遥感反射率的倒数  $R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1)$  建立与  $a_{\text{Chla}}(\lambda)$  的函数关系,  $\lambda_1$  的位置应选择叶绿素 a 浓度对浮游植物色素吸收最敏感的区域,以便反演更精确的叶绿素浓度。

$$R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1) \propto \frac{1}{\gamma} \frac{a_{\text{water}}(\lambda_1) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_1) + a_{\text{Chla}}(\lambda_1) + a_{\text{tripton}}(\lambda_1) + b_b(\lambda_1)}{b_b(\lambda_1)}. \quad (3)$$

为最大程度排除  $R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1)$  受到  $a_{\text{CDOM}}(\lambda_1)$ 、 $a_{\text{tripton}}(\lambda_1)$ 、 $b_b(\lambda_1)$  的影响,引入波长  $\lambda_2$ 。波长  $\lambda_2$  位置的选择要求:1)  $\lambda_2$  的  $a_{\text{Chla}}$  要远小于  $\lambda_1$  处;2)  $\lambda_1$  的无机悬浮物与黄色物质的吸收系数和与  $\lambda_2$  相近,即  $a_{\text{tripton}}(\lambda_1) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_1) \approx a_{\text{tripton}}(\lambda_2) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_2)$ ;3)  $\lambda_2$  的  $b_b$  要与  $\lambda_1$  接近,然后通过计算  $R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1)$ 、 $R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_2)$  的差值可以排除黄色物质吸收、非色素颗粒物吸收的影响,可表示为

$$R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1) - R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_2) \propto \frac{1}{\gamma} \frac{a_{\text{water}}(\lambda_1) - a_{\text{water}}(\lambda_2) + a_{\text{Chla}}(\lambda_1)}{b_b(\lambda_1)}. \quad (4)$$

因为纯水的吸收系数为常数,所以(4)式中的  $R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1) - R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_2)$  仅受到  $a_{\text{Chla}}(\lambda_1)$ 、 $b_b(\lambda_1)$  和辅助参数  $\gamma$  的影响。为消除  $b_b(\lambda)$  和辅助参数  $\gamma$  的影响,引入波长  $\lambda_3$ 。 $\lambda_3$  位置的选择要求:1)  $\lambda_3$  的  $a_{\text{CDOM}}$ 、 $a_{\text{Chla}}$ 、 $a_{\text{tripton}}$  都近似为零,水体吸收以纯水  $a_{\text{water}}$  为主;2)  $\lambda_3$  的水体后向散射  $b_b$  与  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  都近似相等;3)  $\lambda_3$  的纯水吸收  $a_{\text{water}}$  远大于水体的后向散射  $b_b$ ,因此可将(1)式简化为

$$R_{\text{rs}}(\lambda_3) \propto \gamma \frac{b_b(\lambda_3)}{a(\lambda_3)}. \quad (5)$$

将(4)式、(5)式相乘即可消除辅助参数  $\gamma$  和水体后向散射  $b_b(\lambda)$  的影响,得到

$$[R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1) - R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_2)] R_{\text{rs}}(\lambda_3) \propto C_{\text{Chla}} \quad (6)$$

因此只需找到满足上述条件的 3 个特征波段  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ ,使用(6)式组成模型变量,就可运用统计

方法建立水体表观光学量与叶绿素 a 浓度的定量反演模型。

#### 3.2 模型精度检验

使用决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差百分比 (MAPE) 3 个指标对叶绿素 a 反演模型进行精度评估。其中,  $R^2$  越大模型估算效果越好, RMSE 和 MAPE 越小模型估算效果越好。各指标计算公式为

$$R^2 = \frac{X_{\text{SSR}}}{X_{\text{SST}}} = \frac{\sum_i^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (7)$$

$$X_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, \quad (8)$$

$$X_{\text{MAPE}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|}{n} \times 100\%, \quad (9)$$

式中, SSR 为回归平方和, SSE 为残差平方和,  $\bar{y}$  为实测叶绿素 a 浓度值  $y_i$  的平均值,  $\hat{y}_i$  为模型估算的叶绿素 a 浓度值,  $i$  为样本的序号,  $n$  为样本数。

## 4 结果与分析

#### 4.1 反射光谱特性分析

图 2 为实测采样点的遥感反射率曲线,可以看出,光谱呈现显著的内陆水体特征,即有明显的波峰

与波谷,且在近红外波段的遥感反射率的值不为0,证明了闽江下游为典型的二类水体。实测的遥感反射率值在0.3%~3.8%之间,其平均值与类似研究中的结果相同。不同叶绿素a浓度的遥感反射率曲线体现出复杂的光学特性,由于叶绿素、可溶性有机物的强吸收作用,在400~500 nm范围内的遥感反射率相对较低;在550~580 nm范围内出现反射峰,这主要是由于叶绿素在该波段范围内吸收较弱以及细胞的散射作用;在660 nm附近由于叶绿素a的强吸收作用出现波谷值,同时因为叶绿素a的荧光特性形成一个明显的反射峰。由于叶绿素a的荧光强度与叶绿素a浓度有着较高的相关性<sup>[25]</sup>,所以该峰值是判断水中是否含有叶绿素a的重要依据<sup>[26]</sup>。从图中带有叶绿素a浓度标签的三条曲线可知,当叶绿素a浓度不断增大,叶绿素a荧光峰的高度逐渐增高,且其位置也逐渐向红外波长方向移动,这一现象与李莉等学者研究结果相同<sup>[27]</sup>;遥感反射率曲线从700 nm处迅速减小,直至800 nm附近出现一个小的反射峰,这主要是因为水中悬浮物的后向散射作用;由于900 nm之后反射率光谱出现较大噪声,因而不选用该段光谱参与定量遥感反演。

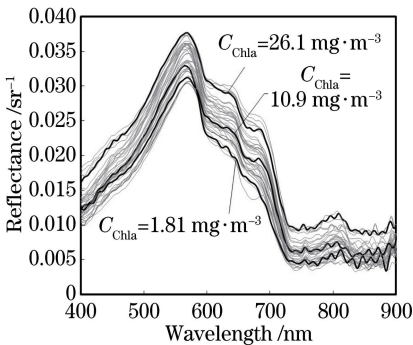


图2 不同叶绿素a浓度的遥感反射率曲线  
Fig. 2 Remote sensing reflectance curves of different Chla concentrations

将各波段遥感反射率与叶绿素a浓度进行相关性分析,结果如图3所示。在400~570 nm范围内,叶绿素a浓度与各波段遥感反射率的相关性为负值,570 nm以后各波长反射率与叶绿素a浓度的相关系数均为正。在整个研究波长内,存在两个相关系数较高的区域:一个是600~670 nm较宽的范围,另一个是680~710 nm较窄的范围,在694.92 nm位置处,该波长的反射率与叶绿素a浓度的相关性最大,相关系数为0.735,进一步说明了叶绿素a的荧光特性。

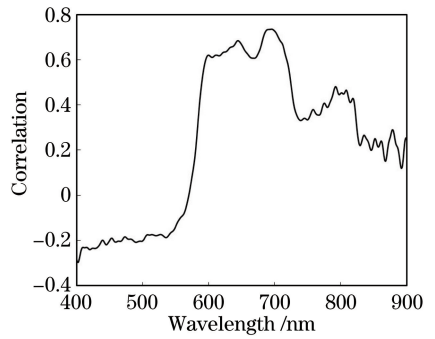


图3 叶绿素a浓度与各波长反射率的相关性  
Fig. 3 Correlation between Chla concentration and reflectance of each wavelength

#### 4.2 三波段因子的确定

由三波段因子法的原理可知,确定3个特征波段( $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 和 $\lambda_3$ )的位置是三波段生物光学模型反演的关键。结合上述反射光谱分析与已有研究结果,将 $\lambda_1$ 的波段范围设置为660~690 nm,因为在此范围内浮游植物具有较高的吸收系数,李云梅等<sup>[28]</sup>的研究结果也表明该范围内的叶绿素a对浮游色素吸收较为敏感; $\lambda_3$ 的引入是为消除辅助参数 $\gamma$ 和水体总后向散射的影响,研究结果表明近红外730~800 nm范围符合 $\lambda_3$ 波段的要求<sup>[29]</sup>;而 $\lambda_2$ 位置应与 $\lambda_1$ 波段相邻,且 $R_{rs}^{-1}(\lambda_1)$ 、 $R_{rs}^{-1}(\lambda_2)$ 的差值可以减少黄色物质吸收、非色素颗粒物吸收的影响,因此,将 $\lambda_2$ 波段的范围设置为690~730 nm。

为了找到 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 和 $\lambda_3$ 的最佳位置,对指定范围内的 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 和 $\lambda_3$ 波段使用穷举法进行了波段组合,并根据(6)式对所有可能的波段组合进行了测试<sup>[30]</sup>。其中, $\lambda_1$ 在实测光谱660~690 nm范围内有23个波段, $\lambda_2$ 在实测光谱690~730 nm范围内有30个波段, $\lambda_3$ 在实测光谱730~800 nm范围内有50个波段,总共有34500( $23 \times 30 \times 50 = 34500$ )种波段组合。图4显示了每一种波段组合与叶绿素a浓度之间的相关性,其中相关性 $r$ 值最大处( $r = 0.830$ )出现在 $\lambda_1 = 660.24$  nm, $\lambda_2 = 693.54$  nm, $\lambda_3 = 758.74$  nm处。

图5呈现了 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 和 $\lambda_3$ 的最佳位置,观测选出的三波段因子可以发现: $\lambda_1 = 660.24$  nm位于由藻类叶绿素在红光波段处的强吸收而形成的反射谷处,此处的叶绿素a浓度对浮游植物色素吸收最敏感; $\lambda_2 = 693.54$  nm位于叶绿素a的荧光峰处,该波段的色素颗粒物的吸收相对 $\lambda_1$ 处的要小得多; $\lambda_3 = 758.74$  nm位于散射较小的近红外波段处,水体吸收以纯水 $a_{water}$ 为主。本试验所得的三波段最佳位置与应用于太湖、鄱阳湖和洱海等区域<sup>[18-20]</sup>的不同,这主要是因

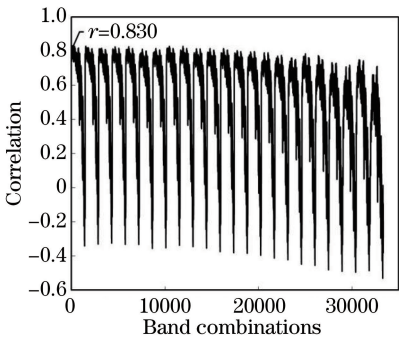


图4 各波段组合与叶绿素 a 浓度的相关性

Fig. 4 Correlation between band combinations and Chla concentration

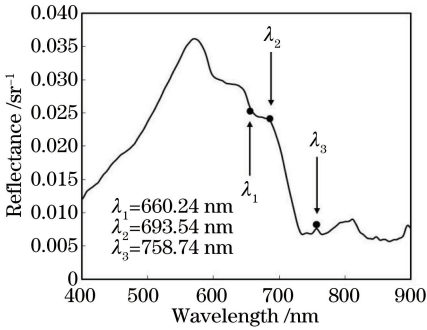


图5 最大相关性的波段位置

Fig. 5 Positions of bands of the maximum correlation

为不同水体中叶绿素 a、悬浮物和黄色物质的浓度含量不同,导致光学特性存在差异。因此,如何建立通用的三波段模型是今后需要深入研究的课题。

### 4.3 反演模型与精度评价

本次研究共计40个采样点,为保证测试样本分

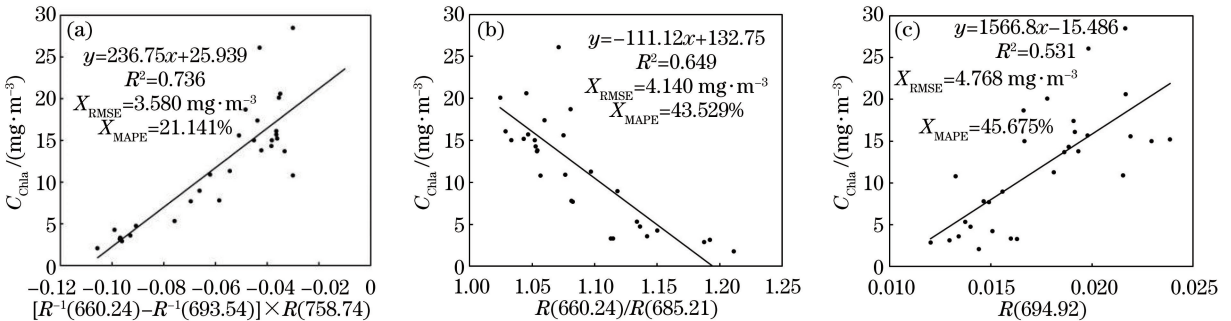


图6 模型变量与实测叶绿素 a 浓度的散点图。(a)三波段生物光学模型;(b)比值模型;(c)反射峰模型

Fig. 6 Scatter plots of model variables and measured Chla concentration. (a) Three-band bio-optical model; (b) ratio model; (c) reflection peak model

图7为三种模型预测与实测叶绿素 a 浓度的散点图,图中虚线为预测值,实线为实测值。其中三波段生物光学模型的  $R^2$  为 0.859, RMSE 为  $2.446 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , MAPE 为 32.169%; 波段比值模型的  $R^2$  为 0.756, RMSE 为  $3.002 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , MAPE

布的合理性、值域范围的一致性,先将采样数据按叶绿素 a 浓度递增的方式排列后均匀选取,得到 30 个采样点数据用来建模,剩下 10 个采样点用以模型验证。选择由  $\lambda_1 = 660.24 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 693.54 \text{ nm}$ ,  $\lambda_3 = 758.74 \text{ nm}$  组合的最佳三波段因子作为模型变量对实测样点进行回归分析。经过一元线性回归,求得叶绿素 a 浓度的三波段生物光学反演模型为

$$X_{\text{Chla}} = 25.939 + 236.75[R^{-1}(660.24) - R^{-1}(693.54)] \times R(758.74). \quad (10)$$

为了分析三波段生物光学模型的反演精度,分别建立叶绿素 a 浓度反演的比值模型和反射峰模型。通过穷举法确定与叶绿素 a 浓度最大相关系数处的比值因子  $R(660.24)/R(685.21)$  和反射峰因子  $R(694.92)$ ,建立叶绿素 a 浓度线性回归模型分别为

$$X_{\text{Chla}} = 132.75 - 111.12 \times [R(660.24)/R(685.21)], \quad (11)$$

$$X_{\text{Chla}} = 1566.8 \times R(694.92) - 15.486. \quad (12)$$

由图6可知,三波段因子与叶绿素 a 浓度的散点图呈现明显的线性关系,方程  $R^2$  为 0.736, RMSE 为  $3.580 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , MAPE 为 21.141%,这证明了模型有着较高的拟合度和精度。波段比值因子和反射峰因子与叶绿素 a 浓度的散点图也呈现线性关系,反射峰模型的  $R^2$  最小, RMSE 与 MAPE 最大,证明三波段生物光学模型的拟合度与精度最高,波段比值模型次之,反射峰模型最低。

为 31.861%; 反射峰模型的  $R^2$  为 0.559, RMSE 为  $4.037 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , MAPE 为 40.929%。由此可知,三波段模型的  $R^2$  最大, MAPE 小于反射峰模型,大于比值模型,但 RMSE 小于波段比值和反射峰模型。反射峰模型以  $R(694.92)$  为模型变量,只考虑

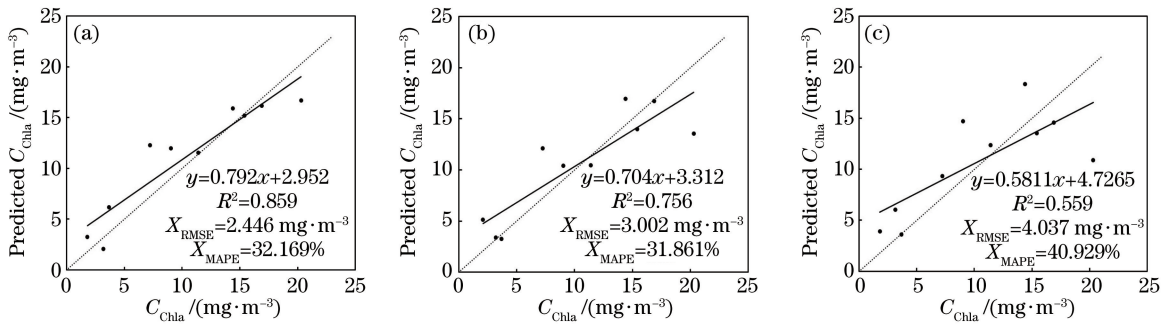


图 7 模型预测与实测叶绿素 a 浓度散点图。(a)三波段生物光学模型；(b)比值模型；(c)反射峰模型

Fig. 7 Scatter plots of Chla concentration in model predicted and measured. (a) Three-band bio-optical model; (b) ratio model; (c) reflection peak model

获取较多的叶绿素 a 浓度信息,并未去除黄色物质与悬浮物浓度的影响,因此精度最低;波段比值模型以  $R(660.24)/R(685.21)$  为模型变量,既考虑了叶绿素 a 浓度信息,也考虑了削弱其他因素的影响,但是削弱的效果较差,因此精度高于比值模型低于三波段生物光学模型;三波段生物光学模型以三波段因子  $[R^{-1}(660.24) - R^{-1}(693.54)]R(758.74)$  为模型变量,获取较多的叶绿素 a 浓度信息,尽可能避免了其他因素的影响,模型精度最高。对比反演因子选择反射峰和波段比值的模型,三波段生物光学模型反演闽江下游叶绿素 a 浓度精度最高,适用性最好。

## 5 结 论

通过对闽江下游实测遥感反射率的分析,提出了一种适用于闽江下游叶绿素 a 浓度反演的三波段生物光学模型,并对模型反演的精度进行评价。研究表明:当  $\lambda_1 = 660.24 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 693.54 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 758.74 \text{ nm}$  时,叶绿素 a 浓度与所构建的三波段生物光学模型因子  $[R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)]R(\lambda_3)$  的相关系数最高, $r$  值为 0.830;与波段比值和反射峰模型相比,三波段生物光学模型的精度较高,模型的  $R^2$ 、RMSE 和 MAPE 分别为 0.859、 $2.446 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  和 32.169%,证明了该模型能有效降低黄色物质和悬浮物等因素的影响,提高二类水体叶绿素 a 浓度的反演精度。

## 参 考 文 献

- [1] Wang J L, Zhang Y J, Yang F, et al. Spatial and temporal variations of chlorophyll-a concentration from 2009 to 2012 in Poyang Lake, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(8): 4063-4075.
- [2] Xu Y F, Li Y M, Wang Q, et al. Eutrophication evaluation of three lakes and one reservoir using CCD images from the HJ-1 satellite [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(1): 81-93.  
徐祎凡, 李云梅, 王桥, 等. 基于环境一号卫星多光谱影像数据的三湖一库富营养化状态评价 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 81-93.
- [3] Chen Y L, Shen F. Influence of suspended particulate matter on chlorophyll-a retrieval algorithms in Yangtze River estuary and adjacent turbid waters [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 126-133.  
陈瑜丽, 沈芳. 长江口及邻近海域悬浮颗粒物对叶绿素 a 遥感反演算法的影响分析 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 126-133.
- [4] Gitelson A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(17): 3367-3373.
- [5] Jiao H B, Zha Y, Gao J, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Tai, China using in situ hyperspectral data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(19): 4267-4276.
- [6] Gitelson A A, Schalles J F, Hladik C M. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(4): 464-472.
- [7] Zhang Y, Liu M, Qin B, et al. Modeling remote-sensing reflectance and retrieving chlorophyll-a concentration in extremely turbid case-2 waters (lake Taihu, China) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 1937-1948.
- [8] Jia H L, Su W, Huang H M, et al. Dynamic change characteristics and its dominant influencing factors of secchi disk depth in coastal and inland waters [J].

- Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0301001.
- 贾后磊, 苏文, 黄华梅, 等. 海岸带和内陆水体透明度动态变化特征及其主导影响因素[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0301001.
- [9] Xu J P, Zhang B, Song K S, et al. Bio-optical model of total suspended matter based on reflectance in the near infrared wave band for case-II waters [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2273-2277.
- 徐京萍, 张柏, 宋开山, 等. 近红外波段二类水体悬浮物生物光学反演模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2273-2277.
- [10] Zhou G H, Liu Q H, Ma R H, et al. Inversion of chlorophyll-a concentration in turbid water of Lake Taihu based on optimized multi-spectral combination [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(2): 153-159.
- 周冠华, 柳钦火, 马荣华, 等. 基于半分析模型的波段最优化组合反演混浊太湖水体叶绿素 a[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 153-159.
- [11] Liu G, Li Y M, Lü H, et al. Remote sensing of chlorophyll-a concentrations in lake Hongze using long time series MERIS observations [J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3645-3656.
- 刘阁, 李云梅, 吕恒, 等. 基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3645-3656.
- [12] Huang Q H, He Z H, Liang H, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Baihua lake water based on hyperspectral data [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(1): 134-141.
- 黄启会, 贺中华, 梁虹, 等. 基于高光谱数据的百花湖叶绿素 a 浓度估算[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 134-141.
- [13] Li F, Xu J P, Ma R H, et al. Chlorophyll-a retrieval in inland waters based on a regional three-band model [J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(6): 1156-1170.
- 李方, 徐京萍, 马荣华, 等. 内陆水体叶绿素 a 浓度反演的区域化三波段模型研究[J]. 遥感学报, 2011, 15(6): 1156-1170.
- [14] Dall'Olmo G, Gitelson A A, Rundquist D C. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(18): 1. doi: 10.1029/2003GL018065.
- [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: erratum [J]. Applied Optics, 2005, 44(16): 3577-3592.
- [16] Du C, Wang S X, Zhou Y, et al. Remote chlorophyll a retrieval in Taihu lake by three-band model using Hyperion hyperspectral data [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2009, 30(10): 2904-2910.
- 杜聪, 王世新, 周艺, 等. 利用 Hyperion 高光谱数据的三波段法反演太湖叶绿素 a 浓度[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2904-2910.
- [17] Huang C C, Li Y M, Xu L J, 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.
- 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.
- [18] Song T, Zhou W L, Liu J Z, et al. Evaluation on distribution of chlorophyll-a content in surface water of Taihu Lake by hyperspectral inversion models [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(3): 888-899.
- 宋挺, 周文麟, 刘军志, 等. 利用高光谱反演模型评估太湖水体叶绿素 a 浓度分布[J]. 环境科学学报, 2017, 37(3): 888-899.
- [19] Li T T, Tian L Q, Li J, et al. Comparison study on the retrieval of chlorophyll in turbid waters based on Sentinel satellites: a case study of Poyang Lake [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2017, 51(6): 858-864.
- 李亭亭, 田礼乔, 李建, 等. 基于 Sentinel 卫星的浑浊水体叶绿素反演对比研究: 以鄱阳湖为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2017, 51(6): 858-864.
- [20] Bi S, Li Y M, Lü H, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Erhai based on OLCI data [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(3): 701-712.
- 毕顺, 李云梅, 吕恒, 等. 基于 OLCI 数据的洱海叶绿素 a 浓度估算[J]. 湖泊科学, 2018, 30(3): 701-712.
- [21] Gong S B, Gao A G, Lin J J, et al. Temporal-spatial distribution and its influencing factors of suspended particulate matters in Minjiang lower reaches and estuary [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(6): 826-836.
- 龚松柏, 高爱国, 林建杰, 等. 闽江下游及河口悬浮物时空分布特征及其影响因素[J]. 地球科学与环境

- 学报, 2017, 39(6): 826-836.
- [22] Tang J W, Tian G L, Wang X Y, 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.
- [23] Ai Y S, Shen Y L. Measurement uncertainty-aware quantitative remote sensing inversion to retrieve suspended matter concentration in inland water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0701002.  
艾烨霜, 沈永林. 顾及测量不确定性的水体悬浮物浓度遥感定量反演方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0701002.
- [24] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, et al. A semianalytic radiance model of ocean color [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1988, 93(D9): 10909-10924.
- [25] Zhang F, Guo J J, Li Z G, et al. Preliminary testing of chlorophyll-a concentration on offshore surface based on oceanographic lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051201.  
张锋, 郭金家, 李志刚, 等. 基于海洋激光雷达的近海表层叶绿素 a 浓度测量初步测试[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051201.
- [26] Yang Y, Li Y M, Wang Q, et al. Retrieval of chlorophyll-a concentration in the turbid and eutrophic Taihu lake [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(5): 5597-5603.  
杨煜, 李云梅, 王桥, 等. 富营养化的太湖水体叶绿素 a 浓度模型反演[J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(5): 5597-5603.
- [27] Li L, Yin Q, Gong C L, et al. Fluorescence characteristics of different chlorophyll a concentration in lake Taihu [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(1): 136-140.  
李莉, 尹球, 巩彩兰, 等. 太湖不同叶绿素 a 浓度水体荧光特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(1): 136-140.
- [28] Li Y M, Wang Q, Huang J Z, et al. Optical properties and water color remote sensing of Taihu Lake [M]. Beijing: Science Press, 2010.  
李云梅, 王桥, 黄家柱, 等. 太湖水体光学特性及水色遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [29] Shi K, Li Y M, Liu Z H, et al. Three-band inversion model of chlorophyll concentration in inland lakes based on different spectral leading factors [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(12): 42-50.  
施坤, 李云梅, 刘忠华, 等. 基于不同光谱主导因子的内陆湖泊水体叶绿素浓度三波段反演模型研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(12): 42-50.
- [30] Tian H J, Cao C X, Xu M, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in coastal waters with HJ-1A HSI data using a three-band bio-optical model and validation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(16): 5984-6003.