

相对反射深度的秦皇岛海域叶绿素浓度反演

安颖^{1,2,4}, 丁静³, 蔺超², 刘志亮^{1,4*}

1. 河北科技师范学院海洋科学研究中心, 河北 秦皇岛 066004
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081
4. 河北省海洋动力过程与资源环境重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 海水中的叶绿素浓度是描述海洋初级生产力、获知浮游植物丰度及变化规律、评估环境质量、预报生态灾害的主要参数。国内外卫星遥感叶绿素产品的通用反演模型是利用不同波段上遥感反射光谱的强度比值来构建的 $OC_x(x=2\sim6)$ 算法, 应用在一类水体中, 全球尺度上的平均相对误差在 35% 左右。但对于固有光学特性复杂且具有较大区域差异性的二类水体, OC_x 算法误差较大甚至失效。现有研究成果表明, 光谱的相对高度有利于特征波段信息提取及水色信号信噪比的提高。但基于相对高度构建反演模型, 目前尚存在波段单一、应用面窄等问题。在我国近岸水体中, 相对高度模型的构建方法及应用效果尚需进一步研究和验证。在对秦皇岛近岸海域的叶绿素浓度和表观光学参量进行原位测量的基础上, 对高光谱数据进行了规范化处理, 选取了特征波段并利用特征波段的相对反射深度构建了反演模型。模型反演值与实测值的相关系数为 0.883 58, 平均相对误差为 28.33%; 将模型与 OC_x 等算法进行比较, 平均相对误差均降低了 27%~50%; 模型验证估算值的平均相对误差为 31.17%。在此基础上, 对我国海洋卫星 HY-1C 水色水温扫描仪的多光谱数据及实测叶绿素浓度进行了相关分析, 并基于 443 及 520 nm 处的相对反射深度建立了反演模型, 模型估算值的平均相对误差比同期 L2B 产品降低了 53.44%。结果表明, 基于相对反射深度构建反演模型, 可充分利用叶绿素特征波段信息、降低数据敏感性、提高水色要素的信噪比, 进而大幅提高模型的反演精度及稳健性。对于水色要素的高光谱及多光谱反演模型构建、水体光学参量测量、卫星产品普及应用、初级生产力估算、生态环境监测、水动力过程研究等领域具有重要的科学意义及较强的应用价值。

关键词 相对反射深度; 高光谱; 叶绿素浓度反演; 卫星遥感; 秦皇岛海域

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)04-1083-09

引言

海水中的叶绿素浓度是表征海洋初级生产力、衡量浮游植物丰度及生物量、评估环境承载量、分析水动力过程、监测海洋生态环境质量的主要参数^[1]。叶绿素浓度的反演模型主要采用理论分析法、半分析法及经验法来构建^[2]。其中, 理论分析法依据光在水体中的传输特性, 建立遥感反射率与水色各要素固有光学参量之间的关系, 反演模型物理意义明确、普适性强; 半分析法通过选择特征波段并利用经验信息

对理论分析方法进行简化, 可操作性强、反演精度较高。但是, 分析法与半分析法都需要对水色要素的固有光学参量进行测量^[3], 实时性差且不易实施。与上述两种方法相比, 经验模型直接建立特征波段的遥感反射光谱与叶绿素浓度之间的统计回归关系, 易于实施、运算速度快, 是进行叶绿素反演估算的重要手段^[1-3]。

国内外卫星遥感中生成叶绿素产品的通用经验反演模型是 $OC_x(x=2\sim6)$ 算法^[4]。 OC_x 算法基于不同波段上遥感反射光谱的强度比值来构建。其中, OC_2 算法是波段比方法, 直接采用蓝波段与绿波段遥感反射率的比值进行叶绿素浓度

收稿日期: 2021-06-02, 修订日期: 2021-12-07

基金项目: 国家重点研究计划课题(2019YFC1407903), 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室开放基金项目(SKLAO2021001A01), 河北省重点研发计划项目(21373301D, 19273301D), 中国科学院仪器研发专项(YJKYYQ20190047), 河北科技师范学院科学研究基金项目(2019YB001)资助

作者简介: 安颖, 1969年生, 河北科技师范学院海洋科学研究中心副教授 e-mail: ananying@126.com

* 通讯作者 e-mail: zhliu3897@hevttc.edu.cn

反演；OC3—6 算法是最大波段比方法，即通过选择紫、蓝、蓝绿、绿波段与绿、红波段之间遥感反射率比的最大值构建反演模型^[4]。OC_x 算法应用在一类水体中，全球尺度上的平均相对误差在 35% 左右^[1]。但是，二类水体中，有色溶解有机物 (coloured dissolved organic matter, CDOM) 和非藻类颗粒 (non-algal particle, NAP) 含量较高，遥感反射光谱与一类水体有较大差别；同时，CDOM、NAP 与叶绿素浓度也不再具有共变特征。因此，基于光谱强度比的 OC_x 算法产生非常大的估算误差，甚至失效^[1, 4]。迄今为止，提高近岸二类水体叶绿素浓度的反演精度仍是一个国际难题。

叶绿素浓度反演精度主要受卫星传感器辐射定标、大气校正、白帽及耀斑剔除、数字舍入误差及反演模型构建方法制约。近年来，叶绿素浓度 $< 0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时，水色指数法 (color index, CI) 精度高、算法稳健性强，成为 OC_x 的替代算法^[5]。与 OC_x 算法不同，CI 法是利用图 1 所示反射光谱的相对高度构建的。由于基线 BC 自蓝波段连至红波段，可有效滤除由仪器、大气校正及遥感反射率计算过程中产生的各种直流及线性噪声。此外，与光谱绝对高度相比，相对高度对随机噪声的敏感度更低。

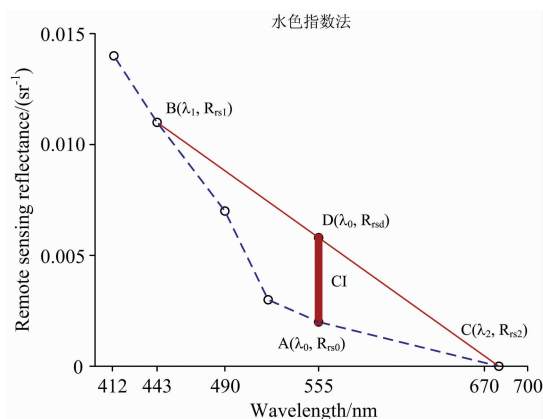


图 1 水色指数法
Fig. 1 Ocean color method

光谱相对高度的另一个用途是可以进行信息提取。图 2 所示的基线荧光高度法 (fluorescence line height, FLH)^[6]，利用红光段叶绿素的荧光峰高度与叶绿素浓度强相关的光谱特性，通过构建荧光峰中心点 A 相对于基线 BC 的相对高度 FLH，提高了光谱信息中叶绿素的信噪比。从而使 FLH 方法在沿岸海域叶绿素浓度高或者当赤潮出现时，实现高精度的叶绿素估算。

虽然 CI 及 FLH 方法采用的波段、相对高度构建方法及适用范围具有较大差异，但其提高叶绿素信息信噪比的机理相同，且均使反演精度得到了大幅度提高。这对于光学特性复杂、区域性强的二类水体中叶绿素浓度的反演，具有重要的指导意义。目前，基于相对高度构建反演模型，还存在波段单一、应用面窄等问题，对于我国近岸复杂水体，其构建方法及应用效果尚需进一步研究和验证。

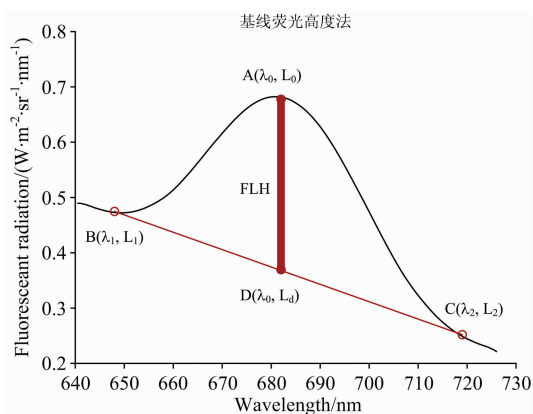


图 2 基线荧光高度法
Fig. 2 Fluorescence line height method

在对秦皇岛近岸海域的叶绿素浓度和表观光学参量进行原位测量的基础上，对船载高光谱数据进行了光谱分析，提出了一种基于相对反射深度的叶绿素反演方法，并与传统算法进行了比较及数据验证。结果表明，相对反射深度更适用于二类水体中的模型构建，叶绿素浓度估算精度达到国际上反演模型精度要求 ($< 35\%$)；在此基础上，对我国海洋卫星 HY-1C 的色水温扫描仪 (China Ocean Color & Temperature Scanner, COCTS) 的多光谱数据进行了波段选择、相对反射深度确定及反演模型构建与数据验证，与叶绿素产品相比，估算精度也有大幅提高。这一研究对于提高水色要素的反演精度，进而实现精准的初级生产力估算、生态环境监测、水动力环境分析等具有重要的科学意义和应用价值。

1 实验部分

1.1 实验区域

2020 年 7 到 8 月，在秦皇岛海域 119.35°E — 119.88°E ， 39.67°N — 39.98°N 范围内展开了两次、累计 6 天的原位测量实验。沿海岸线设计了 8 个断面，40 个站位。调查站位分布如图 3 所示。其中，7 月份原位测量站位为 1-1 到 5-3，共获得 23 组数据；8 月实验站位为 40 个。

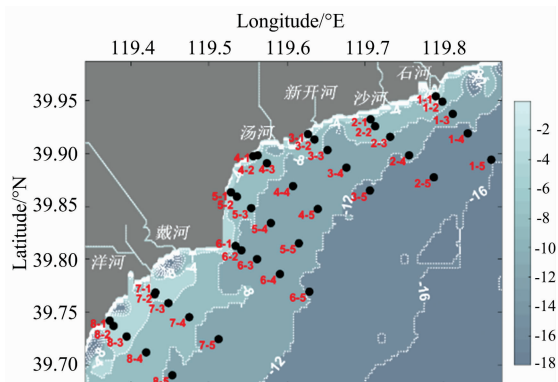


图 3 原位测量站位
Fig. 3 In situ measurement stations

1.2 叶绿素浓度测量及标定

利用 OCT-multipara-07 多参数水质仪对图 3 所示站位水体剖面的叶绿素浓度进行了测量。为了保证测量数据的准确性, 7月航次中, 在 3-4, 3-5, 4-4 和 4-5 站位分别采集了表、中、底层水样, 经低温保存后移至实验室测得了叶绿素浓度, 并对多参数水质仪的数据进行了数据标定。标定过程如下:

首先, 依据 NASA 海洋调查规范, 将采集的水样在实验室用孔径 $0.2 \mu\text{m}$ 的水系滤膜进行抽滤、萃取后用分光光度计测量吸光度并计算叶绿素浓度;

其次, 利用线性拟合的方法^[7]及水样化学分析实测数值对多参数水质仪的叶绿素浓度进行标定。

受测量环境及仪器精度影响, 多参数水质仪的测量值均为水样化学分析实测值的 2 倍。标定后, 多参数水质仪的标定值与实验室实测值之间的关系如图 4 所示。显著性水平 0.01 时, 两者之间的相关系数 (related coefficient, R) 为 0.966 8, 标定值的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 $0.0829 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均相对误差 (mean relative error, MRE) 为 4.26%。

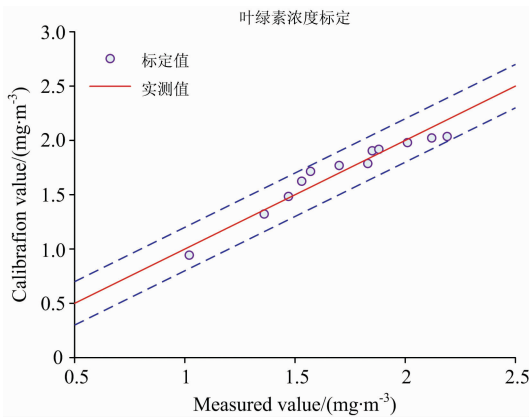


图 4 叶绿素浓度标定

Fig. 4 Calibration of chlorophyll concentration

1.3 船载高光谱数据测量

利用荷兰 AVANTES 公司的 AvaField-1 地物光谱仪 (300~1100 nm) 对实验海域的海水辐照度反射率进行了测量。测量过程严格依据 GB12763.1~7—1991《海洋调查规范》、GB17378—2007《海洋监测规范》和《海洋光学调查技术规程》进行。

海水水体表面的辐照度比, 也称海表辐照度反射率为^[8]

$$r(\lambda, 0_+) = \frac{E_u(\lambda, 0_+)}{E_d(\lambda, 0_+)} = \frac{L_u(\lambda, 0_+)}{L_d(\lambda, 0_+)} \quad (1)$$

式(1)中, $E_u(\lambda, 0_+)$ 为光在海表面的上行辐照度, $E_d(\lambda, 0_+)$ 为光在海表面的总入射辐照度, 而 $L_u(\lambda, 0_+)$ 和 $L_d(\lambda, 0_+)$ 分别是光在海表面上行与入射的辐亮度。只考虑海面以上, 式(1)可简写为

$$r(\lambda) = \frac{E_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} = \frac{L_u(\lambda)}{L_d(\lambda)} \quad (2)$$

将海面入射光分为太阳光和天空散射光两部分, 水面以上的上行辐亮度为

$$L_u(\lambda) = L_w(\lambda) + \rho L_{\text{sky}}(\lambda) + \Delta \quad (3)$$

式(3)中, $L_w(\lambda)$ 是离水辐亮度, 产生于太阳光与海水相互作用时的后向散射, 包含了水色要素的光学信息; $\rho L_{\text{sky}}(\lambda)$ 是天空散射光在海面反射回光谱仪的天空光辐亮度, ρ 是水气界面的菲涅尔反射率; Δ 是耀斑、白帽等外界干扰, 处理中用数据多次平均可使其忽略不计。

因此, 忽略外界干扰的船载光谱仪接收到的离水辐照度反射率为

$$r_{\text{st}}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{L_d(\lambda)} = \frac{L_u(\lambda)}{L_d(\lambda)} - \rho \frac{L_{\text{sky}}(\lambda)}{L_d(\lambda)} = r(\lambda) - \rho r_{\text{sky}}(\lambda) \quad (4)$$

式(4)中, $r(\lambda)$ 是海水的总辐照度反射率, $r_{\text{sky}}(\lambda)$ 是天空散射光的辐照度反射率。考虑观测几何 (40° , 135°)、晴天、平均风速 ($< 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 等因素, ρ 取 0.028^[8]; $r(\lambda)$ 依据海洋光学调查规范中的观测几何进行测量, 测量时避开了船的阴影, 并在同一位置进行了 20 次重复测量以降低外界信号干扰; $r_{\text{sky}}(\lambda)$ 采用遮蔽太阳直射光的方法测量。将标定后的标准白板放在船上空旷处, 架高水平放置, 避开周边环境的反射、散射光, 遮住白板上方的太阳光, 重复测量白板反射光 20 次并取平均值。

1.4 方法

1.4.1 高光谱数据特征及其规范化处理

依据式(4), 得到离水辐照度反射率共计 63 组。实测离水辐照度反射率如图 5 所示, 最大反射峰出现在 570 nm, 是典型的二类水体反射光谱。

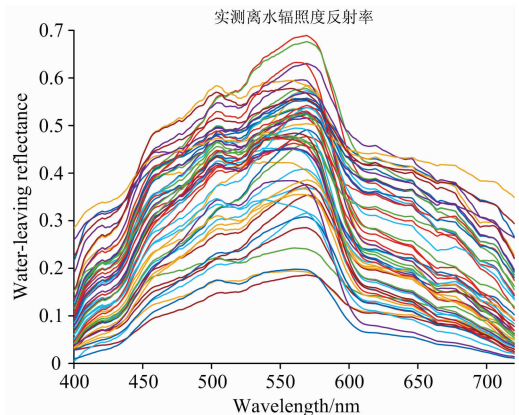


图 5 实测离水辐照度反射率光谱

Fig. 5 Measured water-leaving reflectance spectra

与叶绿素相对应的波段特征^[2-4], 主要有在 440 和 670 nm 处出现的反射谷及 570 和 700 nm 处出现的反射峰。一类水体中, 叶绿素浓度与离水辐照度反射率在上述几个特征波段的光谱强度显著相关。但二类水体中含量较高的 CDOM 和 NAP、较浅的水深使得水体光学特性极其复杂, 实测的叶绿素浓度与光谱强度及其比值均不具有相关性。

为了比较光谱特征, 将离水辐照度反射率进行了规范化处理。即先将实测数值减去 300 nm 处的反射率值后, 再将光谱进行归一化。规范化的离水辐照度反射率如图 6 所示。

由图 6 可知, 实测数据的叶绿素特征波段的中心波长及

宽度基本相同,一致性较好。将特征波段划分为反射谷波段 B435(421~458 nm)和 B664(646~679 nm)、反射峰波段 B573(526~609 nm)和 B706(695~713 nm)。

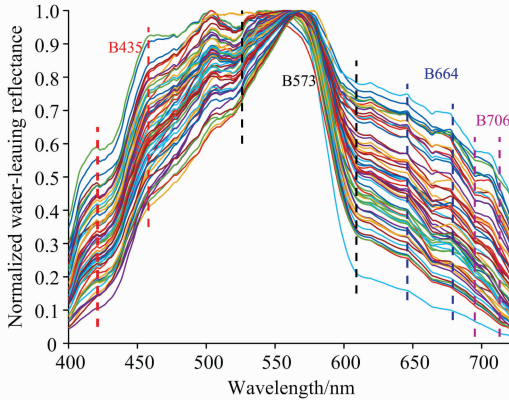


图 6 规范化的离水辐照度反射率光谱

Fig. 6 Normalized water-leaving reflectance spectra

1.4.2 基于绝对高度的反演模型构建机理

OC x ($x=2\sim 6$)算法利用遥感反射率的强度,即绝对高度进行反演,叶绿素浓度反演值 c_{CHL} 为

$$c_{\text{CHL}} = 10^x \quad (5)$$

其中

$$x = \sum_{i=0}^3 a_i X_{\text{OC}x}^i \quad (6)$$

式(6)中, a_i 为拟合系数,不同卫星采用不同的拟合系数。

当

$$X_{\text{OC}6} = \log \left\{ \frac{\max[R_{\text{rs}}(\lambda_1), R_{\text{rs}}(\lambda_2), R_{\text{rs}}(\lambda_3), R_{\text{rs}}(\lambda_4)]}{\text{mean}[R(\lambda_5), R(\lambda_6)]} \right\} \quad (7)$$

时,为 OC6 算法。其中,

$$R_{\text{rs}}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (8)$$

为遥感反射率。将海面视为朗伯体时,遥感反射率与辐照度反射率的关系为

$$R_{\text{rs}}(\lambda) = r_{\text{st}}(\lambda)/\pi \quad (9)$$

OC x 算法选择不同的波段进行叶绿素浓度反演。除 OC6 外,OC3~5 算法均不采用 λ_6 波段。其中,OC4 算法中

$$X_{\text{OC}4} = \log \left\{ \frac{\max[R_{\text{rs}}(\lambda_1), R_{\text{rs}}(\lambda_2), R_{\text{rs}}(\lambda_3)]}{R(\lambda_5)} \right\} \quad (10)$$

而 OC5 算法则取

$$X_{\text{OC}5} = \log \left\{ \frac{\max[R_{\text{rs}}(\lambda_1), R_{\text{rs}}(\lambda_2), R_{\text{rs}}(\lambda_3), R_{\text{rs}}(\lambda_4)]}{R(\lambda_5)} \right\} \quad (11)$$

虽然不同卫星上传感器采用的波段不同,但 $\lambda_{1\sim 4}$ 通常取自紫、蓝、蓝绿及绿波段,典型值为 412, 443, 490 及 510 nm; λ_5 和 λ_6 通常取绿波段的 555 nm 及红波段的 670 nm^[4]。

1.4.3 基于相对高度的反演模型构建机理

由图 1 及图 2 可知,水色指数 CI 及荧光高度 FHL 均为 A 点到基线的垂直距离,即线段 AD 的长度。因此,相对高度

$$dH = |AD| = \left| H_A - \left[\frac{H_C - H_B}{\lambda_C - \lambda_B} (\lambda_C - \lambda_A) + H_C \right] \right| \quad (12)$$

式(12)中, H_A , H_B , H_C 及 λ_A , λ_B 和 λ_C 分别为 A, B, C 点的光谱强度值及波长。

1.4.4 基于相对反射深度的高光谱数据反演机理

海面之上的辐照度反射率与海水中的固有光学量之间的关系为^[9-10]

$$r_{\text{st}}(\lambda) = Q \{ g_1 u(\lambda) + g_2 [u(\lambda)]^2 \} \quad (13)$$

其中,

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (14)$$

是水体中固有光学参量吸收系数 $a(\lambda)$ 与后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 的函数。式(14)中, $b_b(\lambda)$ 为水、色素颗粒及 NAP 的后向反射系数之和; $a(\lambda)$ 为水、CDOM、色素颗粒及 NAP 的吸收系数之和;辐照度转换因子 Q 是与光照条件、体散射函数、光场余弦、海面特性有关的系数; g_1 和 g_2 取经验常数。

由式(13)和式(14)可知,辐照度反射率在每个波长上的强度值是水、色素颗粒、NAP、CDOM 等水色要素在该波长上的辐照度反射率之和。一类水体中, NAP 及 CDOM 浓度低,叶绿素浓度与辐照度反射率相关系数高,依据反射谱绝对高度构建的反演模型拥有较高的精度;而二类水体中,绝对高度易受其他水色要素影响,反演算法精度低、稳健性差。

分析各水色要素的光谱特征可知,各要素特征波段位置、谱线形状、谱线宽度有较大的差异。如,纯水的反射峰在 400~450 nm, 峰值高且宽度较窄; CDOM 和 NAP 的反射峰在 550~670 nm^[11], 是高度较低的宽峰;而叶绿素存在 443 nm 反射谷、683 nm 荧光峰等钟形谱线。这些先验知识,为光谱信息的分解与提取提供了理论依据。

以紫、蓝波段在 400~460 nm 内的光谱为例,反射光谱主要由 CDOM 吸收、叶绿素与水的吸收及后向散射产生。受悬浮颗粒后向散射影响,二类水体中,此波段海水的反射光谱呈缓慢上升趋势^[12];而 CDOM 的吸收峰在 410 nm 附近,随后呈指数衰减^[13];叶绿素则是在 440 nm 附近有吸收峰、宽度约为 70 nm 左右。因此,如图 6 中 B435 所示,反射光谱在此波段出现倾斜的凹陷,而凹陷在 435 nm 处的深度值与叶绿素浓度之间具有较强的相关性。此时,若取 435 nm 处的相对深度代表叶绿素信息,不但可以抑制海水及 CDOM 产生的干扰,提高信噪比及反演精度;同时,当 CDOM 浓度发生变化时,还可降低算法对光谱变化的敏感性,使模型稳健性增强。因此,对于二类复杂水体,构建基于相对高度的反演模型是能够直接提高反演精度的有力手段。

为此,提出一种基于相对反射深度(relative reflection depth, RRD)的反演模型构建方法。将相对反射深度定义为辐照度反射率在特征波段 B435(421~458 nm)、B664(646~679 nm)、B573(526~609 nm)和 B706(695~713 nm)中的相对高度。其中,反射谷波段的相对高度称为相对反射谷深度,反射峰处的相对高度称为相对反射峰深度。RRD 的计算公式为式(12);基线定义为特征波段左右两个端点的连接线。据此,得到相对反射谷深度 RRD_{435} , RRD_{664} 和相对反射

峰深度 RRD_{573} , RRD_{706} , 如图 7 所示。

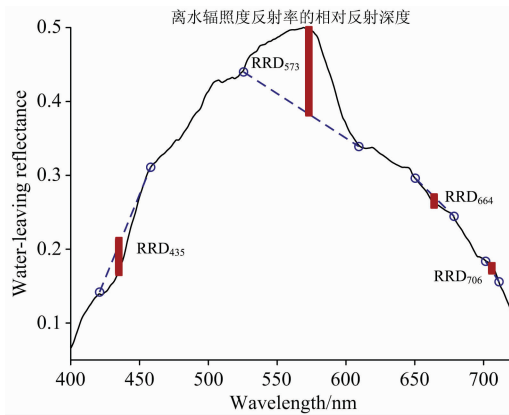


图 7 相对反射深度

Fig. 7 Relative reflection depths

将相对反射深度及其比值与实测叶绿素浓度值进行了相关性分析, 显著性水平 0.01 时, 叶绿素浓度对数值与 RRD_{706} , RRD_{435} , RRD_{573}/RRD_{664} 有较高的相关系数, 分别为 0.456 9, 0.391 9 和 0.384 5, 可作为基于 RRD 构建反演模型的主要参量。

2 结果与讨论

2.1 秦皇岛海域夏季叶绿素的时空分布

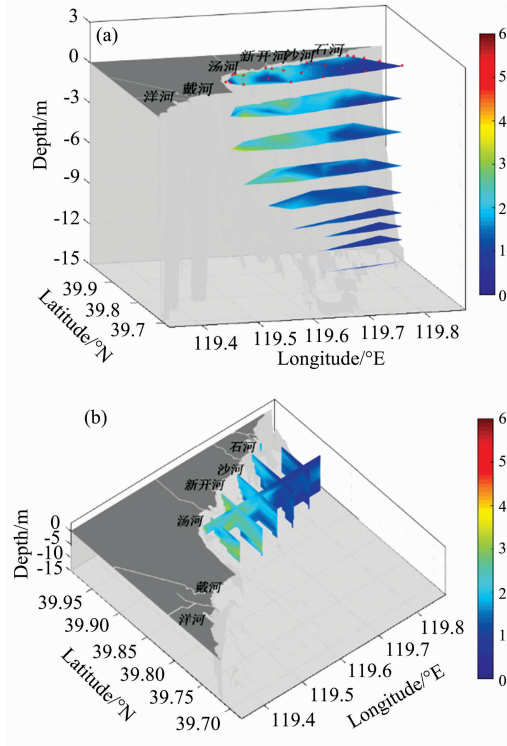


图 8 7 月叶绿素浓度分布

(a): 横剖面图; (b): 垂向剖面图

Fig. 8 Chlorophyll concentration distributions in July

(a): Cross sections; (b): Vertical sections

将标定后的叶绿素浓度在站位分布范围内进行了三维线性插值, 得到了 7 月和 8 月海面下的横剖面分布如图 8(a)、图 9(a)所示、垂向剖面分布如图 8(b)、图 9(b)所示。

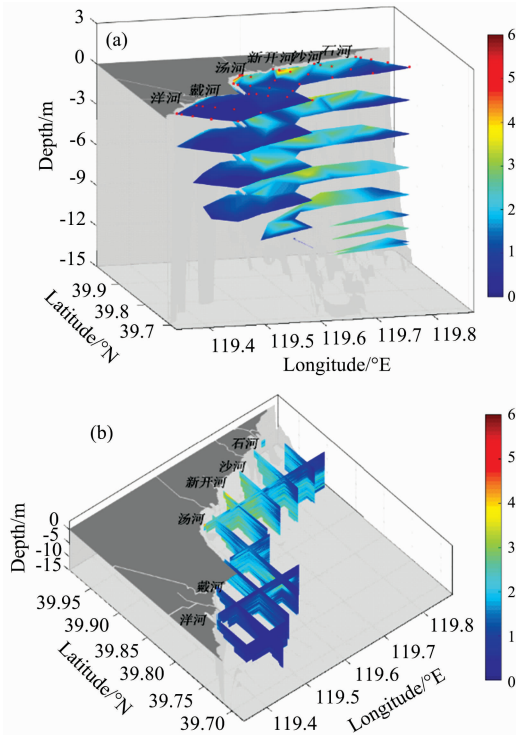


图 9 8 月叶绿素浓度分布

(a): 横剖面图; (b): 垂向剖面图

Fig. 9 Chlorophyll concentration distributions in August

(a): Cross sections; (b): Vertical sections

7 月到 8 月间, 叶绿素浓度变化范围为 $0.191 5 \sim 5.347 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 总平均值为 $2.036 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 表面平均浓度分别为 1.601 和 $1.363 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 与近年来秦皇岛海域外海调查结果^[14]基本一致。叶绿素浓度近岸高、远海低, 在近岸河口处出现了河水径流造成的浓度扩散的特征; 在金山嘴东北方向的中下层, 出现了高浓度水体, 与该海域内风生流、潮流及密度流等水动力环境的研究结果^[15]一致。

2.2 船载高光谱数据的叶绿素浓度 RRD 反演模型构建

7 月和 8 月份站位总数是 63 个, 剔除由船体晃动、光线不足等外部环境造成的无效数据, 剩余叶绿素浓度与光谱数据 57 组。利用其中 38 组数据进行基于相对反射深度的 RRD 模型构建, 并与 OC4, OC5, OC6 和 FLH 算法进行比较; 余下的 19 组数据用于验证。

RRD 模型的叶绿素浓度反演值为 $c_{\text{CHL}} = 10^x$ 。其中

$$x = -0.063 24 - 2.558 7 \left[\lg \left(\frac{RRD_{664}}{RRD_{573}} \right) \right]^2 -$$

$$3.347 2 \lg \left(\frac{RRD_{664}}{RRD_{573}} \right) + 3.058 8 RRD_{435} + 6.934 2 RRD_{706}$$

(15)

反演值与实测值比较的结果如图 10 所示。显著性水平 0.01 时, 两者之间的相关系数为 0.883 58, 均方根误差为

0.479 24 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均相对误差为 28.33%。

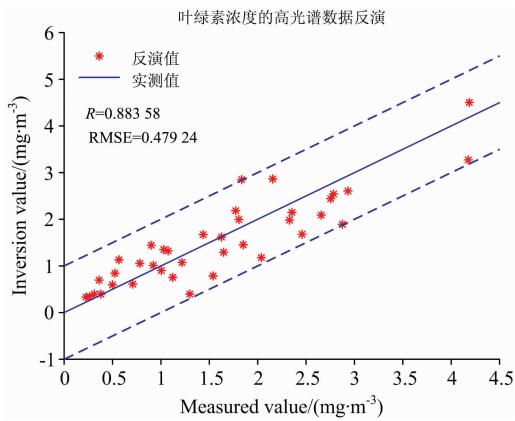


图 10 叶绿素浓度高光谱数据反演结果

Fig. 10 Inversion results of chlorophyll concentration using hyperspectral data

利用式(9)将辐照度反射率转换为遥感反射率,并分别选取 412, 443, 490, 510, 555 及 670 nm 为 $\lambda_1 \sim \lambda_6$, 以其为中心值取 ± 5 nm 波段范围内光谱均值后,依式(10),式(11)和式(7)分别进行了 OC4, OC5 和 OC6 算法反演;同时取 $\text{FLH} = \text{RRD}_{706} / \pi$ 确定了基于 FLH 的反演算法。各算法与 RRD 模型的反演结果如图 11 所示。

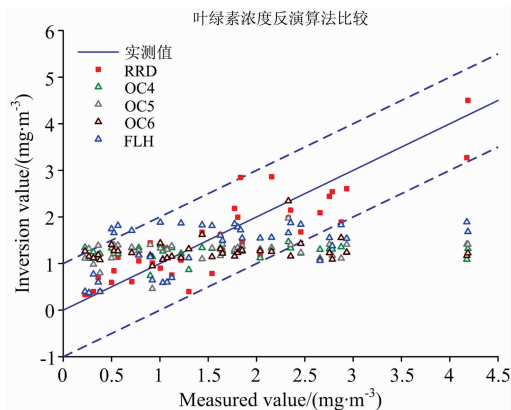


图 11 叶绿素浓度反演算法比较

Fig. 11 Comparison of inversion algorithms for chlorophyll concentration

在置信水平 0.05 时,各算法反演值与实测值的相关系数、均方根误差及平均相对误差如表 1 所示。

表 1 反演算法比较

Table 1 Comparison of inversion algorithms

指标	R	RMSE	MRE/%
RRD	0.883 58	0.479 24	28.33
OC4	0.154 8	1.053 6	81.36
OC5	0.301 9	1.018 6	77.89
OC6	0.158 6	1.052 6	77.46
FLH	0.513 1	0.893 5	55.55

由图 11 及表 1 可知,秦皇岛海域中,OC_x 算法反演值与实测值相关系数较小,均方根误差 > 1 、平均相对误差约为 77%~81%,反演精度较低;FLH 算法误差虽低于 OC_x 算法,但比 RRD 模型高出 27%。

FLH 算法及 OC_x 算法在叶绿素浓度 $< 0.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,均出现高估现象,说明模型在叶绿素浓度较低时易受高浓度 CDOM 的影响;而在叶绿素浓度 $> 1.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时则出现了低估且数值基本恒定,说明模型对叶绿素浓度变化不敏感,处于失效状态。二类水体中,黄、绿波段的遥感反射率高于蓝波段,与一类水体的光谱有较大差异性,同时水色要素混叠,叶绿素信息的信噪比低,导致依据光谱绝对高度的 OC_x 算法误差较大甚至失效;而当浓度较低时,荧光效应不明显,FLH 算法难以达到较高精度。叶绿素反演算法比较的结果表明,RRD 模型对于二类水体中水色要素分离、提高叶绿素浓度信噪比的效果极为显著。

用剩余的 19 组数据对 RRD 反演模型式(15)进行了验证。结果如图 12 所示。显著性水平 0.01 时,估算值与实测值之间的相关系数为 0.582 97,均方根误差为 0.930 39 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,平均相对误差为 31.17%。此结果符合国际上叶绿素浓度反演误差 $< 35\%$ 的模型构建标准,进一步证明了 RRD 算法的可行性。因此,对于二类水体,依据相对反射深度构建反演模型不但可以使叶绿素浓度的反演精度大幅提高,也有望成为其他水色要素反演的重要手段,对于复杂水体光学特性研究具有重要意义。

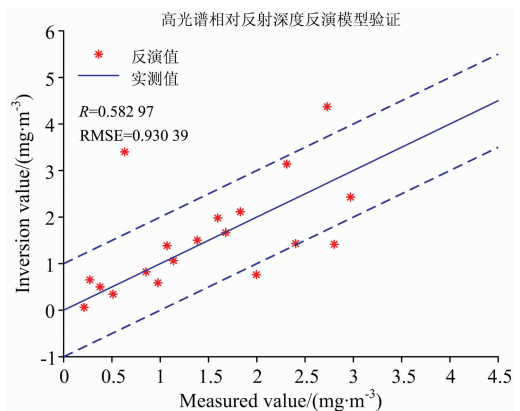


图 12 高光谱相对反射深度反演模型验证

Fig. 12 Validation results of relative reflection depths inversion model for hyperspectral data

2.3 叶绿素浓度的卫星数据 RRD 反演模型构建及验证

我国海洋卫星 HY-1C/D 采用上、下午双星组网,其上搭载的 COCTS 可获取西北太平洋,即渤海、黄海、东海、南海和日本海区域的海水光学特性、叶绿素浓度、悬浮泥沙含量、CDOM、海表温度等数据,覆盖周期为 0.5 d,星下点地面像元分辨率 $\leq 1100 \text{ m}$ 。在我国国家海洋卫星应用中心 7 月 20 日—25、8 月 30 日—9 月 2 日 COCTS 数据中,共得到覆盖了调查海域的 L2A 及 L2B 产品各 5 组。其中, L2A 产品包括 412, 443, 490, 520, 565, 670 及 750 nm 的遥感反射率, L2B 产品包含依据上述波段遥感反射率反演的叶绿素浓

度值。

将 L2B 产品中的 8 月 30 日的叶绿素浓度在图 3 所示外海调查区域进行了线性插值，叶绿素浓度分布如图 13(a) 所示，同一天实测的表层叶绿素浓度分布则如图 13(b) 所示。图 13 中红色点分别表示像元覆盖点及站位信息。由图 13 可知，卫星覆盖的像元点多且密集，覆盖面积远大于船载测量，充分体现了卫星遥感范围大、实时快速、成本低的特点。

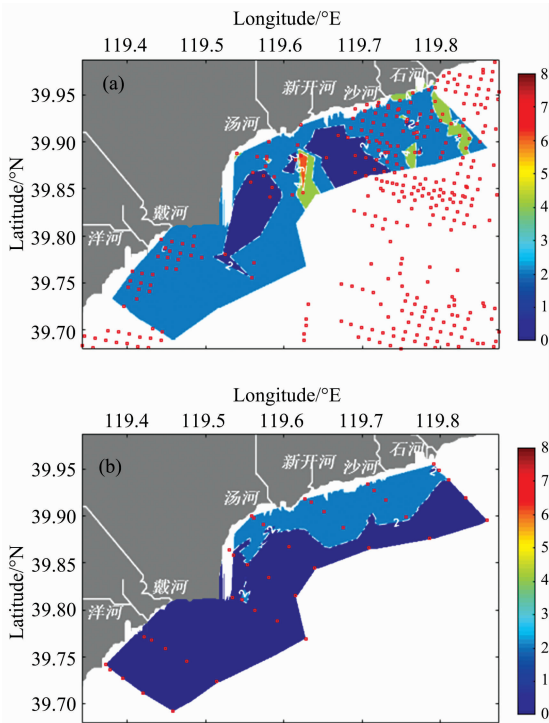


图 13 8 月 30 日叶绿素浓度分布

(a): 卫星数据; (b): 实测数据

Fig. 13 Chlorophyll concentration distributions on 30 August

(a): Satellite data; (b): Measured data

在 7 月和 8 月原位调查海域内，像元点对应的卫星遥感反射率及插值后的叶绿素浓度数据共 91 组。将各波段的遥感反射率及任意两波段的比值与叶绿素浓度进行了相关分析。显著性水平为 0.05 时，叶绿素浓度的对数值只与 520 nm 处的遥感反射率 R_{520} 及反射率比值 R_{443} 具有相关性，相关系数分别为 0.575 2 和 0.292 0。

与高光谱数据相比，多光谱数据携带的叶绿素特征信息较少。为了提高信噪比，构建相对反射深度。利用 443, 412, 490 nm 及 520, 412, 750 nm 依式 (12) 确定了相对反射深度 RRD_{443} 及 RRD_{520} ，如图 14 所示。其中 RRD_{443} 与叶绿素在 443 nm 处的特征反射谷相关，而 RRD_{520} 则可通过长基线滤除线性及直流噪声。

显著性水平为 0.01 时，RRD 与叶绿素浓度对数值之间的相关系数较高的是 RRD_{520} (0.513 5) 及 RRD_{443}/R_{520} (0.216 4)。取 91 组数据中的 62 组数据，用相关系数最高的参量 R_{520} ， RRD_{520} ， R_{443} 及 RRD_{443}/R_{520} 进行了反演模型构建。叶绿素浓度为 $C_{CHL} = 10^x$ ，而

$$x = -1.263 6 + 46.802 5R_{520} - 98.767 9RRD_{520} +$$

$$2.937 3R_{443} + 1.842 6 \frac{RRD_{443}}{R_{520}} \quad (16)$$

反演结果如图 15 所示。显著性水平 0.01 时，反演值与实测值的相关系数为 0.703 4，均方根误差为 0.425 27 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，平均相对误差为 24.56%。

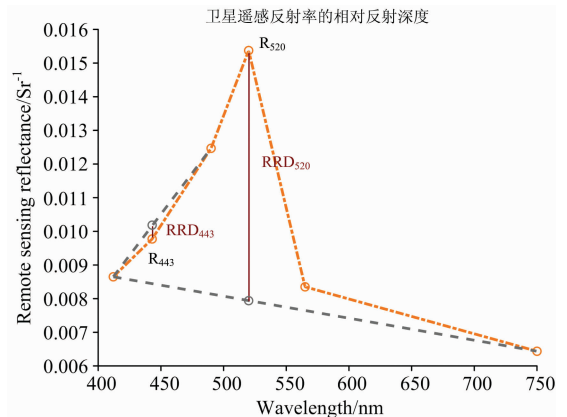


图 14 卫星遥感反射率的相对反射深度

Fig. 14 Relative reflection depths of satellite remote sensing reflectance

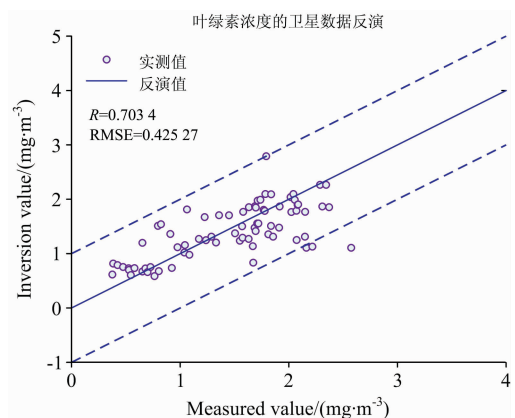


图 15 叶绿素浓度的卫星数据反演

Fig. 15 Inversion results of chlorophyll concentration based on satellite data

利用剩余 31 组数据对反演模型进行了验证，并与同期卫星遥感 L2B 产品中的叶绿素浓度进行了比较。比较和验证的结果如图 16 所示。显著性水平 0.01 时，实测叶绿素浓度数值与模型反演数值之间的相关系数为 0.674 49，均方根误差为 0.675 02 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，平均相对误差为 25.53%；而 L2B 产品的叶绿素浓度值与实测值之间的相关系数仅为 0.046 5，均方根误差为 2.839 6 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，平均相对误差高达 78.97%。

依据 RRD 确定的反演模型，使叶绿素浓度的平均相对误差降低了 53.44%，大幅提高了叶绿素浓度估算值的准确性。对于近岸二类水体，受红外波段离水反射率不为零影响，大气校正时在每个波段都会引入线性噪声；同时近岸海域复杂的气溶胶时空分布、仪器噪声、舍入误差、白帽及耀斑剔除等因素也使遥感反射率的精度受到较大限制。而相对

反射深度对线性、直流及斑点噪声都有较强的抑制作用^[5], 可提高光谱利用率及信噪比, 是一种极具应用价值的卫星遥感叶绿素反演算法。

3 结 论

二类水体叶绿素浓度的反演精度还有很大的提升空间。通过在秦皇岛海域进行叶绿素浓度及表观光学参量的原位测量及数据分析, 提出了一种基于相对反射深度的高光谱叶绿素浓度经验模型构建方法与 OC_x 等算法进行了比较及数据验证。研究表明, RRD 反演模型可以充分利用叶绿素特征波段信息, 降低了模型对光谱强度变化的敏感性, 极大地降低了 NAP 和 CDOM 产生的干扰。与光谱绝对高度相比, 相对反射深度更适用于二类水体叶绿素浓度的反演。在此基础上, 建立了卫星多光谱数据的 RRD 反演模型, 并进行了验证。高光谱与多光谱 RRD 模型均使叶绿素浓度反演精度得到了大幅提高。RRD 模型简便易行, 是一种基于谱线形状的高精度、快速反演算法。不但适用于船载光谱仪的高光谱数据及卫星遥感多光谱数据, 对于水体剖面光学测量数据的反演及其他水色要素反演估算也具有广泛的应用价值, 对于卫星遥感生态环境监测、水体光学参量测量等具有重要的科学意义。

致谢: 所采用的 HY-1C 卫星数据获取自网站: <https://osdds.nsoas.org.cn>, 感谢国家卫星海洋应用中心提供的数据支持。

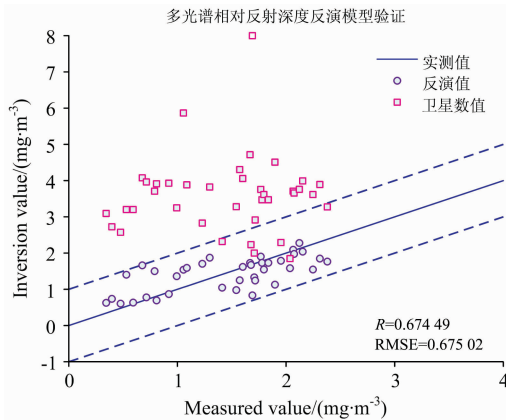


图 16 多光谱相对反射深度反演模型验证

Fig. 16 Validation results of relative reflection depths inversion model with multispectral data

References

- [1] Lavigne H, Zande D, Ruddick K, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 255(1-2): 112237.
- [2] Mendonasilva G, Eirasgarcia C A. *Oceanand Coastal Research*. 2021, 69: e21012.
- [3] Forenvironment S, Boston U, Massachusetts B, et al. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2016, 14: 432.
- [4] J E O, P J W. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 229: 32.
- [5] HaëNtjens N, Boss E, Talley L D. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2017, 122(8): 6583.
- [6] Al Shehhi M R, Gherboudj I, Ghedira H. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(10): 3751.
- [7] WU Xiao-fen, ZHOU Hui, CAO Min-jie, et al(吴晓芬, 周慧, 曹敏杰, 等). *Oceanologia Et Limnologia Sinica(海洋与湖沼)*, 2019, 50(2): 278.
- [8] Bernardo N, Alcantara E, Watanabe F, et al. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1655.
- [9] Werdell P J, McKinna L I W, Boss E, et al. *Progress in Oceanography*, 2018, 160: 186.
- [10] Deng L, Zhou W, Cao W, et al. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13155.
- [11] PANG Shu-na, ZHU Wei-ning, CHEN Jiang, et al(逢淑娜, 朱渭宁, 陈江, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(12): 180.
- [12] Neil C, Spyrakos E, Hunter P D, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 229: 159.
- [13] Konik M, Kowalczyk P, Zabocka M, et al. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2774.
- [14] LI Zheng-hao, CHEN Zhi-zhao, WANG Li-yan, et al(李正浩, 陈志钊, 王力彦, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2021, 41(2): 0201001.
- [15] ZHAO Qian, CHEN Yue, CHEN Yuan, et al(赵 骞, 陈 玥, 陈 元, 等). *Acta Oceanologica Sinica(海洋学报)*, 2019, 41(6): 23.

Inversion Method of Chlorophyll Concentration Based on Relative Reflection Depths

AN Ying^{1, 2, 4}, DING Jing³, LIN Chao², LIU Zhi-liang^{1, 4*}

1. Research Center for Marine Science, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China
2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
3. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China
4. Hebei Key Laboratory of Ocean Dynamics, Resources and Environments, Qinhuangdao 066004, China

Abstract Chlorophyll concentration in ocean waters is the main parameter for describing marine primary productivity, estimating phytoplankton abundance and variation, assessing environmental quality and forecasting ecological disasters. The general inversion model of chlorophyll products used by satellite remote sensing at home and abroad is the OC_x ($x=2\sim 6$) algorithms based on the intensity ratio of remote sensing reflection spectra in different bands. When applied to case-1 glasses of waters, the mean relative error on a global scale is about 35%. However, for case-2 waters with complex inherent optical properties and large regional differences, OC_x algorithms have large errors or even fail. The previous research results show that the relative spectral height is beneficial to extracting the feature information and improving the signal-to-noise ratio of ocean color. However, the inversion model based on relative height still has problems, such as single band selection and a narrow application range. In China coastal, the construction method and application effect of the relative height model need to be further studied and verified. Based on in-situ measured chlorophyll concentration data and apparent optical parameters in Qinhuangdao coastal waters, after normalizing hyperspectral data and selecting characteristic bands, the inversion model has been constructed based on relative reflection depths of characteristic bands in this paper. The related coefficient between the inversion and the measured values is 0.883 58, and the mean relative error is 28.33%. Compared with the OC_x algorithms, the average relative errors are reduced by more than 27%~50%. The model is verified, and the mean relative error is 31.17%. On this basis, correlation analysis was carried out on the multi-spectral data of HY-1C China Ocean Color & Temperature Scanner and the measured chlorophyll concentration, and the inversion model was established based on the relative reflection depths at 443 and 520 nm. The mean relative error of the model was reduced by 53.44% compared with that of the L2B product at the same time. The results show that the inversion model based on relative reflection depths can make full use of the information of chlorophyll characteristic bands, reduce the sensitivity to noise, and improve the signal-to-noise ratio of ocean color constituents, thus greatly improving the inversion accuracy and robustness of the model. This research has important scientific significance and substantial application value for constructing hyperspectral and multi-spectral inversion models of ocean color elements, measurement of water optical parameters, popularization and application of satellite products, estimation of primary productivity, ecological environment monitoring, hydrodynamic process research and other fields.

Keywords Relative reflection depths; Hyperspectral; Chlorophyll concentration inversion; Satellite remote sensing; Qinhuangdao coastal

(Received Jun. 2, 2021; accepted Dec. 7, 2021)

* Corresponding author