

基于 MODIS 数据的二类水体叶绿素反演算法理论与实现

万幼川¹ 黄家洁¹ 刘良明¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:在 NASA-MODIS 海洋组提出的二类水体叶绿素 a 的半分析算法的基础上,使用叶绿素荧光理论对其进行改进,建立了一个适用于我国的海洋叶绿素浓度反演模型,并选取 2003 年黄海区域的 MODIS 数据对算法进行了验证。

关键词:MODIS;二类水体;叶绿素;荧光;水色

中图法分类号:P237.3

相对于一类水体,二类水体与人类活动的关系更加密切。从卫星遥感资料来反演浮游植物叶绿素(主要是叶绿素 a)的浓度信息,可以对近岸、河口的水域进行大范围、长时期的实时监测。目前已发射了许多海洋水色卫星,其中装载于 EOS 系列的 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 传感器具有 36 个光谱通道,光谱分辨率较高,能迅速获取大范围海洋资料,同步性较好,可有效应用于海洋浮游植物叶绿素的反演。国内外对二类水体水色要素的反演算法主要可以概括为经验公式法和生物光学法两类。其中,生物光学算法主要包括四种方法:代数法(也称半分析法)、非线性优化法、主成分分析法和神经网络法^[1,2]。尽管利用海洋水色卫星数据反演二类水体的算法已经取得了许多进展,但是要建立全球通用的反演算法还存在一定的困难。本文在 Carder 等人提出的二类水体叶绿素浓度半分析算法的基础上,引入了荧光算法理论对其进行改进,并通过实测数据对两种算法的精度进行了比较分析。

1 Carder 算法

Carder 等人提出的半分析法是通过建立光谱特征与水中各组分浓度之间的生物光学模型来估算叶绿素浓度的^[3,4]。对于 MODIS 影像,选择

中心波长在 412 nm、443 nm、488 nm 和 551 nm 的 4 个波段,建立基于遥感反射率 $R_s(\lambda)$ 的模型,可由下式表示:

$$R_{rs}(\lambda) \approx C \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (1)$$

式中, $b_b(\lambda)$ 为海水及其组分的总后向散射系数; $a(\lambda)$ 为总吸收系数;常量 C 依赖太阳高度角。由于 $b_b(\lambda) \ll a(\lambda)$, 所以式(1)可简化为:

$$R_{rs}(\lambda) \approx C b_b(\lambda) / a(\lambda) \quad (2)$$

式中,

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (3)$$

式中, $b_{bw}(\lambda)$ 为水的后向散射系数,为常量(见表 1); $b_{bp}(\lambda)$ 为粒子的后向散射系数,可以表达为:

$$b_{bp}(\lambda) = X[551/\lambda]^Y \quad (4)$$

式中, X 为粒子后向散射数量; Y 描述了粒子后向散射的光谱形状。Lee 等给出了 X 和 Y 的经验值,通过经验值找到了对应于 MODIS 波段的 X 和 Y 的经验表达式:

$$X = -0.001\ 82 + 2.058 R_{rs}(551) \quad (5)$$

$$Y = -1.13 + 2.57 R_{rs}(443) / R_{rs}(488) \quad (6)$$

式(2)中, $a(\lambda)$ 可以写为:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_\phi(\lambda) + a_d(\lambda) + a_g(\lambda) \quad (7)$$

其中, $a_w(\lambda)$ 、 $a_\phi(\lambda)$ 、 $a_d(\lambda)$ 和 $a_g(\lambda)$ 分别代表水、浮游植物、岩屑和 CDOM(黄色物质)的吸收系数。 $a_w(\lambda)$ 见表 1, $a_\phi(\lambda)$ 可以表达为:

$$a_{\phi}(\lambda) = a_0(\lambda) \cdot \exp\left[a_1(\lambda) \tanh\left[a_2(\lambda) \ln\left(\frac{a_{\phi}(678)}{a_3(\lambda)}\right)\right]\right] * a_{\phi}(678)$$

(8)

式中, $a_{\phi}(678)$ 为 678 nm 处浮游植物的吸收系数; a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 见表 1。由于光谱形状的相似性, $a_d(\lambda)$ 和 $a_g(\lambda)$ 在 MODIS 通道不能进行光谱分离, 所以 a_d 项实施时与 a_g 结合起来, 由 a_g 表示。结合的 CDOM 和岩屑吸收项可写为:

$$a_g(\lambda) = a_g(400) \exp[-0.011(\lambda - 400)] \quad (9)$$

式中, $a_g(400)$ 为 400 nm 处黄色物质的吸收系数。

表 1 算法中的常数
Tab. 1 Parameters for Algorithm

λ/nm	$b_{\text{bw}}/\text{m}^{-1}$	a_w/m^{-1}	a_0	a_1	a_2	a_3
412	0.003 341	0.004 80	2. 20	0. 75	-0. 5	0. 011 2
443	0.002 406	0.007 42	3. 59	0. 80	-0. 5	0. 011 2
488	0.001 563	0.016 32	2. 27	0. 59	-0. 5	0. 011 2
551	0.000 929	0.059 10	0. 42	-0. 22	-0. 5	0. 011 2

由式(2)~式(9)可以看出, $R_{rs}(\lambda)$ 可以写为常量 C 、 $a_{\phi}(678)$ 和 $a_g(400)$ 的函数。使用 $R_{rs}(\lambda)$ 的比值来消除常量 C :

$$\frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(443)} = \frac{b_b(412)}{b_b(443)} \frac{a(443)}{a(412)}$$

(10)

$$\frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(551)} = \frac{b_b(443)}{b_b(551)} \frac{a(551)}{a(443)}$$

(11)

在上两式中, 右边的项都可写为 $R_{rs}(\lambda)$ 、 $a_{\phi}(678)$ 和 $a_g(400)$ 的函数。 $R_{rs}(\lambda)$ 的值可以由输入给出, 所以可以得到两个方程, 联立这两个方程并消除未知数 $a_g(400)$, 可得到关于未知数 $a_{\phi}(678)$ 的方程 $f(a_{\phi}(678))=0$ 。通过数值分析方法求解此方程, 得到 $a_{\phi}(678)$ 的值。

当 $a_{\phi}(678) < 0.03/\text{m}$ 时, 采用式(12)就可以得出叶绿素浓度值[chla]:

$$[\text{chla}] = P_0 * [a_{\phi}(678)]^{P_1}$$

(12)

Carder 针对亚热带到热带水体开发了一个数据库, 得出 P_0 和 P_1 的结果为 56.8 和 1.03。可见, 这种指数关系并不明显。实际中, 通常使用一个线性关系来表达, P_0 和 P_1 分别取为 51.9 和 1.00。

当 $a_{\phi}(678) > 0.03/\text{m}$ 时, 即叶绿素浓度较高时, 由于此时一般的黄色物质浓度也较高, 会影响叶绿素浓度的估算, 使得半分析算法得到的结果不准确。因此在 Carder 算法中, 使用了 Aiken 等给出的二波段经验算法来求解叶绿素 a 浓度的经验值[chla]_{emp}^[3,4]:

$$\lg[\text{chla}]_{\text{emp}} = 0.281\ 8 - 2.783\ \lg\left(\frac{R_{rs}(488)}{R_{rs}(551)}\right) + 1.863\left[\lg\left(\frac{R_{rs}(488)}{R_{rs}(551)}\right)\right]^2 + 2.387\left[\lg\left(\frac{R_{rs}(488)}{R_{rs}(551)}\right)\right]^3$$

(13)

2 荧光算法

中国沿海属于高浓度泥沙含量的大陆架海水。在这类海水中, 由于含有大量的泥沙, 海面向上的反射光的信息中以泥沙信息为主, 由叶绿素吸收和反射的特征波长的信息被淡化, 因此, 通常在大洋使用的蓝、绿光比值法反演海面叶绿素浓度往往失效。另一种反演海面叶绿素浓度的方法是荧光线高度法。研究表明, 荧光线高度法更适合于沿岸带海区叶绿素浓度高或者当赤潮出现时的海水的叶绿素反演。由于高浓度的叶绿素或者有赤潮时, 水表面的吸收和水面反射的特征信息大大增加, 尤其在可见光的红外区域, 使得荧光线高度法有可能在这类海水的海面叶绿素浓度的反演中得到应用^[5]。

MODIS 荧光线高度算法的具体公式如下^[6,7]:

$$\text{FLH} = L_w(678) + (L_w(748) - L_w(667)) \cdot \frac{\lambda_{15} - \lambda_{14}}{\lambda_{15} - \lambda_{13}}$$

(14)

式中, $L_w(667)$ 、 $L_w(678)$ 、 $L_w(748)$ 分别指 13、14、15 波段的离水辐射率; λ_{13} 、 λ_{14} 、 λ_{15} 分别是这 3 个波段的波长。有时, 荧光峰会落在基线以下, 需要在 FLH 上加一个辐射常数 $0.05\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}\ \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 保证结果的非负性。这一常数是根据历史上的全球观测资料中的最低值设定的^[6,7]。

根据实验室研究和现场实测结果分析, 荧光强度会有 8 倍的变化。光照强度和营养物浓度会引起这一变化, 从时间尺度上看, 这种变化可持续数 s 到几 h。Borstad 等人分析了几年的观测资料注意到, FLH 和叶绿素浓度之间的关系系数可以有 8 个等级的变化, 他们也注意到某一特定分析区会相当好。总的说来, 每 mg 的叶绿素会引起 FLH 从 $0.01 \sim 0.08\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}\ \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的变化。根据 Fisher 和 Kronfeld 的研究, 假定叶绿体吸收的能量中荧光化的能量占总能量份额的 0.03, 在饱和光合作用条件下, 每单位叶绿素的荧光量到叶绿素浓度的转换比率为 $0.05\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}\ \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。通过这个关系, 就可求出叶绿素浓度值[chla]_{FLH}^[6,7]。

3 实验与分析

在 Carder 算法中, 由于采用了一个经验公式, 使得算法缺乏一定的理论基础, 并且精度较

差。因此,本文提出了一种改进算法,将叶绿素荧光理论应用于 Carder 算法中,代替原先使用的经验公式。算法机理是:首先使用 Carder 半分析算法求得 $a_{\phi}(678)$ 。当 $a_{\phi}(678) < 0.015$ 时,使用式(12)求解叶绿素浓度 $[chl]_{sa}$;当 $a_{\phi}(678) > 0.03$ 时,使用叶绿素荧光算法求解叶绿素浓度 $[chl]_{FLH}$ 。在从半分析到荧光光线高度算法时,叶绿素浓度结果要有一个平稳的过渡。这要使用两个算法靠近过渡边界时返回的叶绿素浓度值的加权平均来获得。当半分析算法返回的 $a_{\phi}(678)$ 的值在 $0.015/m \sim 0.03/m$ 之间时,可以根据下式来计算叶绿素浓度值 $[chl]$:

$$[chl] = w[chl]_{sa} + (1 - w)[chl]_{FLH}$$

(15)

式中, $[chl]_{sa}$ 为 Carder 半分析算法获得的值; $[chl]_{FLH}$ 为荧光算法获得的值,权值为:

$$w = (0.03 - a_{\phi}(678))/0.015$$

本文选取的实验数据为中国黄海区 2003 年 4 月 16 日 MODIS 的 8、9、10、12、13、14、15 波段的 1A 级数据,中心波长分别为 412 nm、443 nm、488 nm、551 nm、667 nm、678 nm、748 nm,分别进行 Carder 算法和改进算法的验证与分析。

首先,使用阈值法去除云,使用海陆标识屏蔽陆地,然后采用 Gordon 等人提出的大气校正算法^[8]得到各个波段的离水反射率 $L_w(412)$ 、 $L_w(443)$ 、 $L_w(488)$ 、 $L_w(551)$ 、 $L_w(667)$ 、 $L_w(678)$ 、 $L_w(865)$,前四个波段的离水反射率再除以 π ,转化为遥感反射率值 $R_{rs}(412)$ 、 $R_{rs}(443)$ 、 $R_{rs}(488)$ 、 $R_{rs}(551)$ 。最后利用上述算法实现叶绿素浓度的反演。

另外,对于式(12)中浮游植物的吸收系数与叶绿素浓度之间的关系,利用 2003 年春季我国黄海的实测数据进行线性回归,如图 1 所示,可以得

到 P_0 和 P_1 分别为 37.007 和 1.00。

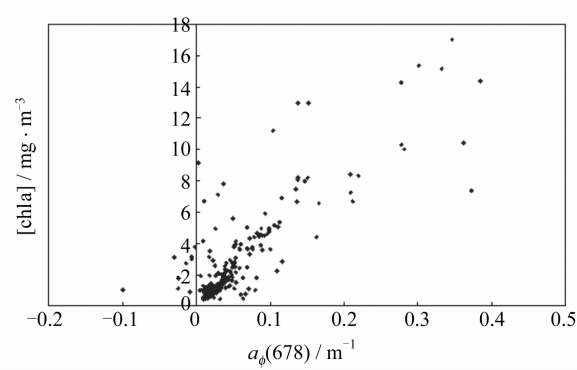


图 1 2003 年春季黄海海域实测叶绿素浓度与 678 nm 处浮游植物吸收系数之间的关系

Fig. 1 Relation of $[chl]$ and $a_{\phi}(678)$ of Yellow Sea

实验结果如图 2 所示。图 2(a)为使用 MODIS 海洋组 Carder 算法得到的结果,图 2(b)为假定每单位叶绿素的荧光量到叶绿素浓度的转换系数为 $0.05 W \cdot m^{-2} sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 时,使用此改进算法得到的结果。从计算结果来看,黄海区域叶绿素浓度的范围总体为 $0 \sim 12 mg/m^3$,其中沿岸大部分区域的叶绿素浓度在 $1 \sim 8 mg/m^3$,离岸较远的大部分区域的叶绿素浓度分布在 $0.05 \sim 1 mg/m^3$ 。在近岸区域,图 2(b)得到的结果明显总体高于图 2(a)的结果。另外,图中有一部分区域为高悬浮泥沙海水区域,经测定,泥沙浓度一般高于 $20 mg/L$,图中反映这部分的叶绿素浓度非常低,没有很好地体现该区域浮游植物的分布状况,并且与其他区域的过渡较差,这是由于该区域中海面的上行反射光信息中以泥沙含量为主,由叶绿素吸收和反射的特征波长的信息不明显。结果表明,此算法对于高悬浮泥沙区域失效。

采用 2003 年 3~4 月黄海区域的实测数据对该结果进行验证,结果见图 3。

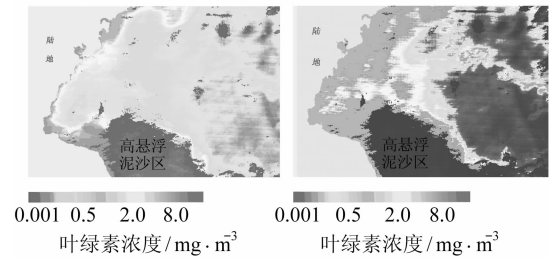


图 2 黄海叶绿素浓度分布图

Fig. 2 Chlorophyll Concentration of Yellow Sea

由图 3 可以看到,Carder 算法反演结果的平均绝对误差为 1.503,平均相对误差为 69.1%;改

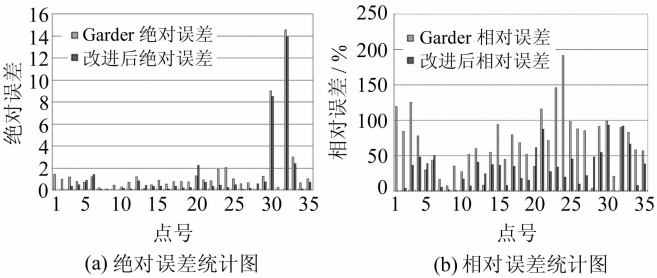


图 3 Carder 算法和改进算法实测值与计算值误差分析

Fig. 3 Errors of Semi-analytical Algorithm and the Improved Algorithm

进后,算法反演结果的平均绝对误差为 1.081,平均相对误差为 32.5%。由于实测数据与实验所

用的 MODIS 数据在时间上相差较远,浮游植物的空间分布会有一些的变化,这对估算的精度会造成一定的影响。但总的来说,使用改进后算法对叶绿素浓度的反演精度有明显的提高。

4 结 语

Carder 提出的二类水体叶绿素浓度反演算法用于我国海域的浮游植物叶绿素浓度的反演时,大部分区域能够达到反演精度的要求,对于我国黄海海域,在悬浮泥沙含量较少、并且叶绿素浓度不高于 2.0 mg/m³时,此算法结果较好。但是,由于我国黄海沿岸特殊的地质状况,沿岸部分水域中悬浮泥沙含量特别高,光学性质复杂,使得此算法存在着一定的缺陷,单纯使用这个算法来进行叶绿素浓度的估算,难以达到我国海洋水色遥感应用研究的要求。

虽然改进算法对于我国海域的叶绿素浓度的反演结果优于 Carder 算法,但是,此算法在悬浮泥沙高于 20 mg/L 时的叶绿素浓度反演还存在一定的局限性,如何提取泥沙部分叶绿素的信息,以及如何解决 Carder 算法和荧光强度算法的平稳过渡等问题,有待今后进一步研究。

致谢:感谢国家卫星海洋应用中心唐军武研究员和王晓梅同志在提供实测方面给予的帮助,感谢黄东海航次的试验队员在数据采集方面所付出的辛苦劳动,感谢武汉大学 MODIS 卫星数据地面接收站提供的 MODIS 遥感数据。

参 考 文 献

[1] 巩彩兰,樊伟. 海洋水色卫星遥感二类水体反演算法的国际研究进展[J]. 海洋通报,2002,21(2):77-83

[2] 任敬萍,赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景[J]. 海洋通报,2002,17(3):363-371

[3] Carder K L,Chen F R, Lee Zhongping, et al. Case 2 Chlorophyll a[C]. MODIS Ocean Science Team Algorithm Theoretical Basis Document 19, Petersburg, Florida, 2003

[4] Kutser T,Herlevi A, Kallio K, et al. A Hyperspectral Model for Interpretation of Passive Optical Remote Sensing Data from Turbid Lakes[J]. The Science of the Total Environment,2001,268:47-58

[5] 潘德炉,林寿仁,李淑菁,等. 海洋水色遥感在海岸带综合管理中的应用[J]. 航天返回与遥感,2001(2):34-39

[6] Abbott M R,Letelier R M. Chlorophyll Fluorescence (MODIS Product Number 20)[R]. Algorithm Theoretical Basis Document, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregonstate University, 2003

[7] Letelier R M,Abbott M R. An Analysis of Chlorophyll Fluorescence Algorithms for the Moderate Resolution Imaging Spectrometer(MODIS)[J]. Remote Sensing of Environment,1996,58:215-223

[8] Gordon H R, Voss K J. MODIS Normalized Water Leaving Radiance[OL]. <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd>, 1999

第一作者简介:万幼川,教授,博士生导师。现从事摄影测量与遥感方面的研究工作。
E-mail:wych@public.wh.hb.cn

Theory and Implementation of Chlorophyll Concentration Retrieval
Algorithm for Case 2 Water with MODIS

WAN Youchuan¹ HUANG Jiajie¹ LIU Liangming¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: For the case 2 chlorophyll, an algorithm proposed by NASA-MODIS ocean group is improved to retrieve the chlorophyll concentration with MODIS data of Yellow Ocean in 2003 and the result is verified.

Key words: MODIS; case 2 water; chlorophyll; fluorescence; ocean color

About the first author: WAN Youchuan, professor, Ph.D supervisor, majors in the research and application of photogrammetry and remote sensing.
E-mail: wych@public.wh.hb.cn