

基于 MODIS 模拟的辽东湾叶绿素 a 的遥感反演模型

丛丕福¹, 曲丽梅¹, 王臣立², 刘长安¹, 杨新梅¹

1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 中国文化遗产研究院, 北京 100029

摘要: 叶绿素a浓度对于水质和富营养化评价、赤潮探测及海洋生产力研究有重要意义。利用卫星遥感反演获取叶绿素a浓度弥补了传统采样方法的数据离散化、耗时长且费用高的缺陷, 可以实时和全面地观测大尺度海洋叶绿素a分布。通过实测光谱模拟卫星波段, 可以在一定程度上削减大气干扰, 有助于准确地确定特征波段和建立遥感反演模型。本文以辽东湾为研究区, 利用现场实测光谱模拟了MODIS波段, 并在光谱特征分析基础上进行叶绿素a的特征波段选择, 通过比较单波段和波段比值法等算法, 建立了2个具有区域特色的叶绿素a遥感反演模型, 并进行了模型验证。结果表明: 在辽东湾海域, 运用红光附近特征波段667和678 nm来反映叶绿素特征比传统蓝绿光波段(440和550 nm)似乎更能削弱其它水体组分的干扰, 突出辽东湾水体的特点。利用667、678和551 nm的三波段模型要比单纯考虑667和678 nm波段比值的模型要好一些, 该模型r为0.856, 标准差为0.19。模型验证预测值和实测值的相关系数为0.93($p < 0.01$), 表明了模型良好的预测能力。模型具有明显的区域特色, 结果是否具有普适性, 还需进一步验证。

关键词: MODIS; 叶绿素 a; 辽东湾; 遥感反演

中图分类号: X55

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2057-04

叶绿素a的浓度是评价海洋水质、富营养化程度和探测渔场及研究海洋初级生产力^[1-3]的重要参数。卫星遥感具有及时、准确、动态和大面积覆盖的特点, 能够弥补传统采样方法的数据离散化、耗时长且费用高的缺陷, 因而已逐渐成为研究大时空尺度海洋现象的有效手段^[4]。叶绿素a的卫星遥感反演是海洋遥感研究最多的领域^[5-7], 现在用于海洋叶绿素a反演的算法有好多种^[8-10], 国内相关研究也有很多^[11,12]。但总体来说, 目前的研究存在两方面问题: 一是叶绿素a的遥感反演算法对于大洋一类水体来说, 比较成熟, 叶绿素a的半经验算法和标准经验方法对一类水体效果较好, 但对光学特性比较复杂的近海二类水体(如我国近岸水体)误差较大, 很难应用^[13], 因此针对具体近海海区要建立特定的经验模型才能有效反演; 二是目前二类水体大气校正制约近海海洋遥感的瓶颈, 此问题目前还没很好地解决, 因此如果直接从卫星数据入手研究遥感模型建立, 大气校正问题会产生很大影响。此外, MODIS是美国TERRA和AQUA卫星上的搭载的主要传感器之一, 可以获得目标物的诊断性光谱特性^[14], 能够提高常规水质遥感多参数估算的精度, 每日运行且成本低廉、获取方便。如何从MODIS各波段数据中, 提取出合适的参数, 满足海洋环境立体监测的需要, 目前成为海洋遥感研究者关注的一个热点。

因此本文以辽东湾为研究区, 利用野外实测光谱模拟MODIS波段, 从而避开大气影响, 通过分析光谱特征, 从理论上确定了可用于叶绿素a反演的MODIS的特征波段, 然后通过比较单波段和波段比值法等, 建立了叶绿素a的反演模型, 该方法可为MODIS的开发应用和叶绿素的相关研究提供参考。

1 数据收集获取

辽东湾海域曾在1998年暴发特大赤潮, 近几年赤潮暴发也比较频繁。因此本次研究区就选在辽东湾。收集现场调查数据时间分别为2002年6月1日、7月9日、9月5日和6日, 天气晴朗。调查站位共有46个, 数据包括叶绿素a、浮游植物、营养盐和悬浮物等参数。叶绿素按照海洋监测规范采用分光光度法分析。光谱测量采用VF-921B光谱仪进行。

2 水体光谱特征分析

图1是对实测水体光谱曲线进行处理分析后得到的不同站位光谱曲线图。可以看到, 除了个别站位外, 绝大部分站位曲线形状非常相似。他们光谱谱峰比较窄, 峰值位于570 nm左右, 随波长增大, 遥感反射率迅速减小。660 nm左右出现次峰值, 685 nm左右出现荧光峰, 800 nm左右出现明显泥沙后向散射峰。辽河有诸多河流入海, 携带大量的悬浮泥沙和陆源悬浮物, 我们与其他海域水体比较后认为该类曲线具有明显二类水体特征。

基金项目: 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放研究基金(SOED0707); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室资助项目(No.200806); 908国家重大专项滨海湿地成果集成“中国滨海湿地”(908~ZC~II~03); 908专项评价项目“海岛生态系统评价”(908-02-04-08)

作者简介: 丛丕福(1972年生), 男, 副研究员, 博士, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: transco@sohu.com

收稿日期: 2009-09-26

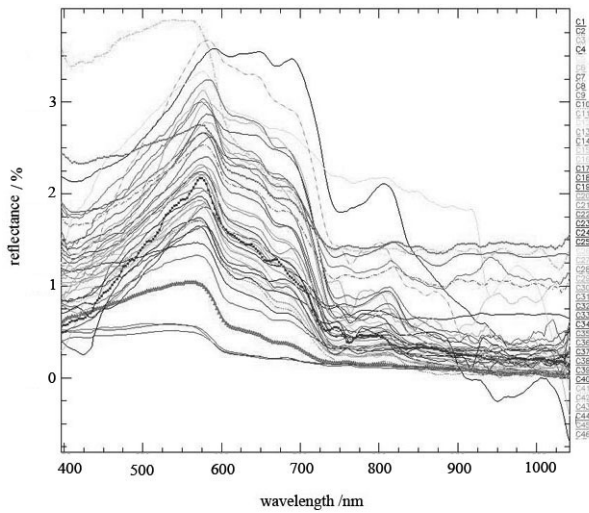


图 1 各站水体光谱曲线图

Fig.1 Water spectrum in different sampling stations

3 MODIS 波段模拟

3.1 MODIS 波段模拟方法

MODIS 集成了 AVHRR 和 TM 的优点, 共有 36 个光谱波段, 光谱分辨率在很多波段高达 10 nm。利用现场光谱模拟 MODIS 波段可以排除大气干扰, 有助于相对准确地提取特征和建立模型。根据实测光谱可通过下式模拟计算 MODIS 的反射率:

$$R = \int_{\lambda_1}^R R_{\lambda} d\lambda / \int_{\lambda_1}^R d\lambda = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} R\lambda / \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \quad (1)$$

式中, t 为 MODIS 的各个波段; R 为反射率; λ_1 、 λ_2 为 MODIS 各波段的起始波长。

3.2 模拟 MODIS 波段特征

据实测光谱计算后的模拟 MODIS 波段光谱曲线如下图 2 所示。

从图 2 明显看出, 该海域 MODIS 模拟曲线在

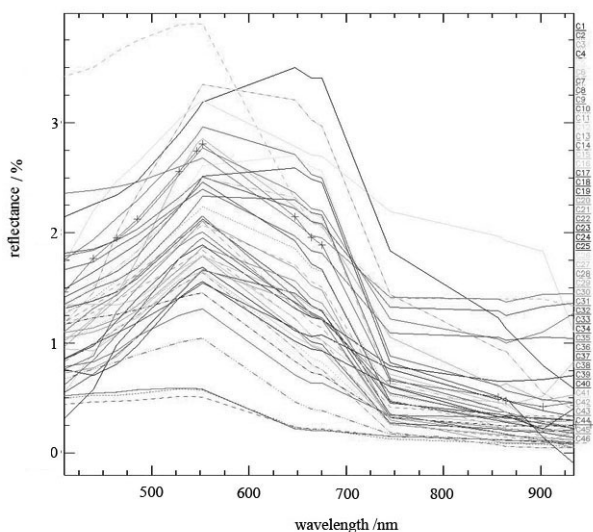


图 2 模拟的 MODIS 探测光谱曲线图

Fig.2 Simulated water spectrum with MODIS in different sampling stations

可见光和近红外波段大致呈两峰三谷: 在 551 nm 处存在第一个明显的反射峰, 该峰是叶绿素典型特征峰。在 675~680 nm (即 MODIS14 波段) 处有个低点的峰值; 而在 443 (9)、667 (13) 和 745 (15) nm 处均表现为强烈的吸收。

4 叶绿素 a 遥感反演模型建立

4.1 MODIS 特征波段选择

4.1.1 单波段

一般的单波段/波长的选择都集中于反射光谱的反射峰或吸收峰的位置, 如 440 nm 附近的蓝光吸收峰、675 nm 的叶绿素吸收峰和 550 nm、700 nm 左右的叶绿素反射峰等。因此根据前面 MODIS 模拟的结果, 我们这里分别选定 MODIS 第 b4(555nm)、b8(413 nm)、b9(443 nm)、b10(488 nm)、b12(551 nm)、b13(667 nm)和 b14(678 nm)波段进行分析。

4.1.2 比值法

叶绿素的经验算法通常用比值波段组合来增强光谱信号 (比值增强法) [15]。另外采用比值法还可以大大减少海洋反射率二向反射问题, 这也是现有的叶绿素的经验算法和半经验算法大都采用两波段比值法的原因, 如 SeaWiFS 的 OC2、OC3、OC4 算法 [16] 等。我们这里分别选定 b8/b4、b9/b4、b10/b4、b8/b12、b9/b12、b10/b12、b13/b14 进行分析。

4.2 遥感定量模型

根据前面所确定的特征波段, 从整个数据集中随机抽出 36 组数据分别进行分析, 采用逐步多元回归方法及曲线拟合等方法, 比较结果后发现其中两种模型比较适合:

(1) 模型 1

$$\text{chl}a_1 = 10^{40.461x+0.657} \quad (2)$$

其中 $x = \log[R(667) / R(678)]$ 。

(2) 模型 2

$$\text{chl}a_2 = 10^{38.8641x_1+0.598x_2+0.693} \quad (3)$$

其中, $x_1 = \log[R(667) / R(678)]$,

$x_2 = \log R(551)$

两个模型的相关系数和标准均方差分别如下表 1 所示。两个模型均在 0.001 置信水平上显著。

从结果看, 运用红光附近特征波段 667 和 678 nm 来反映叶绿素特征在辽东湾海域比传统蓝绿光

表 1 叶绿素 a 模型统计特征值
Table 1 Statistic value of chlorophyll a models

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.813	0.661	0.651	0.209 747 2
2	0.856	0.733	0.717	0.189 061 4

比值法要好一些。原因可能在于辽东湾海域属典型的二类水体, 浮游植物在 440 nm 附近的吸收峰被高浓度的悬浮物和 CDOM 所掩盖, 而在红光附近特征波段由于受悬浮物和 CDOM 的干扰要小得多, 使得在此波段浮游植物造成的反射率峰谷值非常明显, 用于反演叶绿素 a 结果要较理想。此外, 由结果看出, 考虑加入 551 nm 特征波段的模型 2 要比单纯考虑 667 和 678 nm 波段比值的模型 1 要好一些。

(3) 模型验证

考虑模型 2 较好, 这里只对它进行验证。把用来做验证的 10 个站点数据带入模型 2 中, 计算出叶绿素 a 值, 然后和实测值进行相关分析, 如下图 3 所示。预测值和实测值的相关系数为 0.93($p < 0.01$), 表明了模型良好的预测能力。

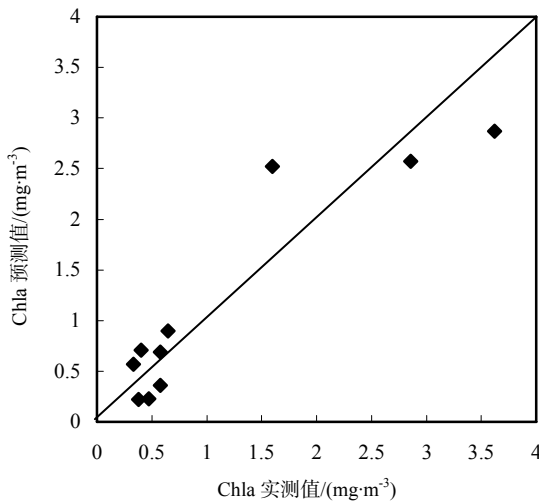


图 3 模型 2 计算预测值和实测值的比较

Fig. 3 Predicted value versus in situ measured value of the model 2

5 结论

(1) 在辽东湾, 在红光波段附近的 667 nm 和 678 nm 是建立叶绿素 a 遥感反演模型的重要波段。传统认为对于叶绿素 a 反演, 尤其是一类水体, 一般以 440 和 550 nm 处波段应用较多, 其中为排除悬浮物等干扰, 又应用 490 nm 或 510 nm 附近波段, 而红光波段由于反射率较低, 采用较少。但从我们的研究来看, 667 nm 和 678 nm 处似乎更能削弱其它水体组分的干扰, 突出辽东湾水体的特点, 这点通过后来建立的叶绿素遥感反演模型得以证实。

(2) 在利用现场光谱模拟 MODIS 波段基本排除大气干扰条件下, 利用 MODIS 的 551 nm、667 nm 和 678 nm 三波段组合建立的叶绿素 a 遥感反演模型最理想。除了利用 667 nm 和 678 nm 处这两个波段比值外, 再加入 551 nm 波段效果明显优于只用这两个波段的算法。三个波段算法模型验证的预测

值和实测值的相关系数为 0.93($p < 0.01$), 表明了模型良好的预测能力。

(3) 本文所建立三波段叶绿素 a 遥感反演模型与传统标准 MODIS 算法所用特征波段不大一样, 具有明显的区域特色, 结果是否具有普适性, 直接用于卫星数据效果如何, 还需进一步研究验证。

参考文献:

- [1] 陶益, 毛献忠, 段余杰, 等. 深圳荔枝湖富营养化综合治理工程效果研究[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 879-883.
TAO Yi, MAO Xianzhong, DUAN Yujie, et al. Treatment effect of eutrophication restoration project for Lichee Lake in Shenzhen[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2008, 29(4): 879-883.
- [2] 王文宇, 周成虎, 邵全琴, 等. RS / GIS 支持下的柔鱼中心渔场时空动态迁移研究[J]. 高技术通讯, 2003, 13(11): 90-93.
WANG Wenyu, ZHOU Chenghu, SHAO Quanqin, et al. An application of RS/GIS on study on the migration dynamics of ommastrephes bartrami[J]. High Technology Letters, 2003, 13(11): 90-93.
- [3] 丛丕福, 王臣立, 曲丽梅, 等. 海洋初级生产力的卫星遥感估算模型[J]. 生态环境学报, 2009, (18)3: 1016-1019.
CONG Pifu, WANG Chenli, QU Limei, et al. Remotely sensed estimation models of ocean primary production[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 3(18): 1016-1019.
- [4] 唐世林, 陈楚群, 詹海刚, 等. 南海真光层深度的遥感反演[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(1): 9-15.
TANG Shilin, CHEN Chuqun, ZHAN Haigang, et al. Retrieval of euphotic layer depth of South China Sea by remote sensing[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(1): 9-15.
- [5] MOORE T S, CAMPBELL J W, DOWELL M D. A class-based approach to characterizing and mapping the uncertainty of the MODIS ocean chlorophyll product[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(11): 2424-2430.
- [6] MERONI M, ROSSINI M, GUANTER L, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2037-2051.
- [7] 付东洋, 潘德炉, 丁又专, 等. 台风对海洋叶绿素 a 浓度影响的定量遥感初探[J]. 海洋学报, 2009, 31(3): 46-56.
FU Dongyang, PAN Delu, DING Youzhan, et al. Quantitative study of effects of the sea chlorophyll-a concentration by typhoon based on remote-sensing[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(3): 46-56.
- [8] GITELSON A A, DALL'OLMO G, MOSES W. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3582-3593.
- [9] O'REILLY J E, MARITORENA S, MITCHELL B G, et al. Ocean color chlorophyll algorithms for Sea WIFS[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(c11): 24937-24953.
- [10] CANNIZZARO J P, CARDER K L. Estimating chlorophyll a concentrations from remote-sensing reflectance in optically shallow waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(1): 13-24.
- [11] 许大志, 曹文熙, 王桂芬. 南海北部水体叶绿素 a 浓度反演的生物光学模型[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(2): 15-21.

- XU Dazhi, CAO Wenxi, WANG Guifen. A bio-optical model for retrieval of chlorophyll-a concentration in northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(2): 15-21.
- [12] CAO Wenxi, YANG Yuezhong, LIU Sheng, et al. Spectral absorption coefficient of phytoplankton and its relation to chlorophyll a and remote sensing reflectance in coastal waters of southern China[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(4): 342-350.
- [13] GITELSON A A, DALL'OLMO G, MOSES W, et al. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3582-3593
- [14] WERDELL P J, BAILEY S W, FRANZ B A, et al. Regional and seasonal variability of chlorophyll-a in Chesapeake Bay as observed by SeaWiFS and MODIS-Aqua[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(6): 319-1330.
- [15] 丛丕福, 牛铮, 曲丽梅, 等. 利用海洋卫星HY-1数据反演叶绿素a的浓度[J]. *高技术通讯*, 2005, 15(11): 106-110.
- CONG Pifu, NIU Zheng, QU Limei, et al. Retrieval of chlorophyll a concentration from ocean satellite HY-1[J]. *High Technology Letters*, 2005, 15(11): 106-110.
- [16] 李四海译. 海洋水色遥感原理与应用: 国际海洋水色协调工作组(IOCCG)报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 14-15.
- LI Sihai. The Mechanism and Application of Ocean Color Remote Sensing: Report of International Ocean Colour Coordinating Group(IOCCG)[M]. Beijing: Ocean Press, 2002: 14-15.

Remotely sensed retrieval model of chlorophyll a in Liaodong Gulf based on MODIS band simulation

CONG Pifu¹, QU Limei¹, WANG Chenli², LIU Changan¹, YANG Xinmei¹

1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. Chinese Academy of Cultural Heritage, Beijing 100101, China

Abstract: Chlorophyll *a* is important for water quality and eutrophication assessment, red tide detection as well as ocean primary production. Retrieving chlorophyll *a* by remote sensing can compensate for the deficiency of the traditional time-consume sampling method which acquire discrete data at high cost, and it provides information of ocean chlorophyll *a* nearly in real-time at large-scale. This paper simulate satellite band using field spectrum to remove atmospheric impact. It is helpful for the identification of characteristic bands and development of remote sensing retrieval model. Here Liaodong Gulf was selected as study area, Based on the field spectral data MODIS bands were simulated for identification of characteristic bands of chlorophyll *a*, We developed 2 area-specific remotely sensed retrieval models for chlorophyll *a* by comparison of single band and band ratio algorithms based on spectral feature analysisism, result of the model shows that in Liaodong Gulf the 667 and 678 nm bands work better than traditional blue and green bands of 440 and 550 nm in revealing chlorophyll *a* features. They seemed to weaken the impact of other water constituent better and reveal the water property in Liaodong Gulf. The retrieval model based on combination of 667, 678 and 551 nm bands is better than the two-band model of 667 and 678 nm bands. The correlation coefficient *r* of the model is 0.856 and standard error is 0.19. In model test the *r* between the derived value and the in situ value is 0.93($p < 0.01$), which show good performance of forecast. The model was area-specific and it needs further tested to identify whether it can be applied to other areas.

Key words: MODIS; chlorophyll *a*; Liaodong Gulf; remotely sensed retrieval