基于实测光谱的烟台四十里湾水体叶绿素a遥感反演

马万栋[1],吴传庆[1],殷守敬[1],邢前国[2]
1. 环境保护部卫星环境应用中心,北京 100094
2. 中国科学院烟台海岸带研究所,山东 烟台 264003

摘 要: 水体叶绿素a含量是二类水体水色遥感反演的主要参数之一。通过分析烟台近海水体实测反射光谱曲线,选取了特征波段及波段组合,建立了研究区叶绿素a含量遥感反演模型。通过对比不同反演模型可知:三波段模型是烟台近海水体叶绿素a遥感反演的最优模型,决定系数为0.660 8,均方根误差(*RMSE*)为0.59 μg/L;其次是归一化荧光高度模型和反射峰面积模型,决定系数分别为0.621 3和0.558 9,*RMSE*分别为0.62 μg/L和0.67 μg/L。

关键词: 海岸带水体;叶绿素a;反演模型;烟台
中图分类号: X823;O433.1;X87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-6002(2015)04-0135-06

Chlorophyll-a Retrieval of Yantai Sishili Bay Based on In-Situ Spectral Characteristics

MA Wan-dong[1],WU Chuan-qing[1],YIN Shou-jing[1],XING Qian-guo[2]
1. Satellite environment centre,Ministry of Environmetal Protection,Beijing 100094,China
2. Yantai institute of coastal zone research,Chinese Academy of Sciences,Yantai 264003,China

Abstract: The chlorophyll-a concentration in waters is one of the most important parameters in water color remote sensing. In order to retrieve chlorophyll-a concentration of Yantai coastal waters,The spectral characteristics of chlorophyll-a are analyzed according to the remote sensing reflectance curves. Some retrieval models of chlorophyll-a are built based on selected bands or band combination. We analyze those different retrieval models and compare them. In the end,the conclusion is achieved that three-band model is the optimal one with a determination coefficient of 0.6608 and a *RMSE* error of 0.59 μg/L. The following ones are the normalized fluorescence height model,with a determination coefficient of 0.621 3,*RMSE* error of 0.62 μg/L,and the reflectance peak area model,with a determination coefficient of 0.558 9,*RMSE* error of 0.67 μg/L.

Key words: coastal waters;chlorophyll-a;retrieval model;Yantai

水体中叶绿素a(chla)是藻类生物的重要组成成分之一,是表征水体光学自养生物量的重要指标,其含量高低与水体藻类的种类、数量、日照状况等密切相关。水体中叶绿素a含量是估测浮游植物生物量和初级生产力的重要参数,也是反映水体富营养化的重要指标[1],而且在藻类物质中所占比例比较稳定,易于在实验室测量。水体中叶绿素a含量是水环境遥感监测的主要项目之一,也是内陆及近岸水体水色反演的主要水质参数之一。

在海洋水色遥感领域,为了研究方便,通常海水被分为一类水体和二类水体。一类水体主要指大洋水体,光学性质的变化主要由浮游植物及其附属物决定;二类水体主要指近岸水体及内陆水体,光学性质的变化不仅受浮游植物及其附属物的影响,而且也受其他物质(如外生的粒子和外生的有色可溶有机物)的影响。水体组分中叶绿素a含量的遥感反演取决于叶绿素a的吸收和后向散射特性。由于藻类在蓝波段有较强的吸收,而在绿波段有较强的后向散射,经典的表层水体叶绿素a含量反演采用蓝绿波段比值算法[2-4],该算法已经非常成熟,而且具有较高的反演精度。但是对于海岸带及内陆水体等二类水体,由于受悬浮物颗粒物及黄色物质吸收和后向散射交叉影

收稿日期: 2014-05-13;**修订日期:** 2015-03-09
基金项目: 环保公益项目"基于遥感技术的沿海港口总体规划环评生态承载力评价方法研究"(201409100-04);863计划项目"机载大气和水环境污染监测技术和设备应用示范"(2014AA06A508);国家自然科学基金项目"基于时序遥感影像异常检测的土地覆盖变化检测方法研究"(41401413)
作者简介: 马万栋(1977-),男,山东陵县人,博士,高级工程师。
通讯作者: 吴传庆

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

响[5-7]，蓝绿波段比值算法不能精确地反演二类水体叶绿素a含量[8-9]。目前许多学者已经建立了大量二类水体叶绿素a含量反演算法[10-14]，依据不同类型的遥感传感器，通过选取不同波段或波段组合对叶绿素a含量进行了反演，得到了较高的反演精度，同时对反演精度进行了分析和评价，确立了不同传感器的最佳波段或波段组合[15-24]。

由于二类水体活性组分的吸收和散射相互影响，叶绿素a含量反演算法都具有较强的区域性和季节性，且反演精度都很低。该文通过实测烟台近海水体叶绿素a含量及水体反射光谱曲线，分析了水体反射光谱曲线，并选取特征波段或组合建立了烟台近海水体叶绿素a含量反演模型。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

研究区位于烟台四十里湾海域(图1，采样点a位于排污口附近海域，采样点b位于养殖区外部海域，采样点c位于养殖区内部海域)，该海域介于烟台市莱山区北部芝罘岛和养马岛之间，北有崆峒岛、担子岛，平均水深10 m，属半封闭型海域。

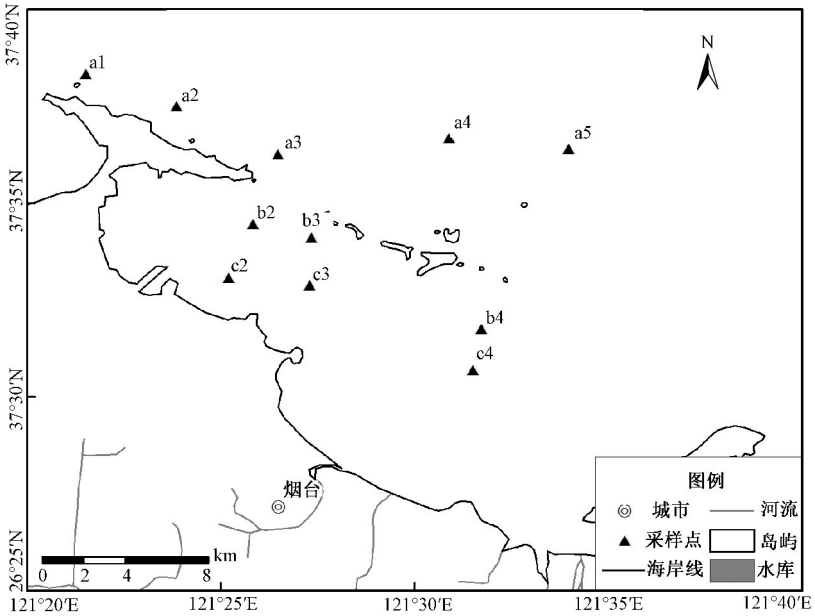


图1 烟台四十里湾采样点分布图

研究区水体交换能力较差，海域环境质量受陆源径流和海水养殖等因素的影响较大。2003—2012年烟台四十里湾叶绿素a月平均质量浓度为4.2～13.9 μg/L，其中夏季叶绿素a质量浓度最高，平均值为10.1 μg/L，较大值出现8—9月，主要分布在崆峒岛以南海域；春、秋季差别不大，平均值为7.3 μg/L；冬季最低，平均值为4.7 μg/L。

1.2 数据获取及处理

实测叶绿素a含量和高光谱数据来自2008年11月至2009年10月烟台四十里湾海域环境调查航次。利用美国YSI6920型多参数水质监测仪获取叶绿素a含量，仪器经过严格的定标和校正，同时对获取的数据进行质量控制。高光谱数据采用美国USB4000 VIS-NIR型光谱仪测量获取，测量过程采用唐军武等[25]提出的二类水体水面以上测量法。在光谱分析过程中，对实测的遥感反射率数据以10 nm为间隔进行光谱重采样，然后开展光谱分析和研究。现场实测不同采样点的遥感反射率曲线如图2所示。

2 烟台近海水体叶绿素a含量遥感反演

2.1 三波段模型

近年来，国外学者提出了一种反演叶绿素a含量的三波段模型[26-27]。目前，国内许多学者利用三波段模型反演叶绿素a含量，得到了较好的反演精度[28-29]。三波段模型中第一波段要求对叶绿素a吸收最敏感，限制在660～690 nm之间；为消除非色素悬浮物及黄色物质对叶绿素a吸收的影响，第二波段要求对叶绿素a的吸收不敏感，同时保证非色素悬浮物和黄色物质在第一波段及

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第二波段的吸收之和相差不大，因此第二波段限制在 690 ~ 740 nm 之间；此外，水体的后向散射对叶绿素 a 的吸收影响较大，需要排除此干扰因素，因此第三波段的吸收系数要接近纯水的吸收，一般选择近红外波段。

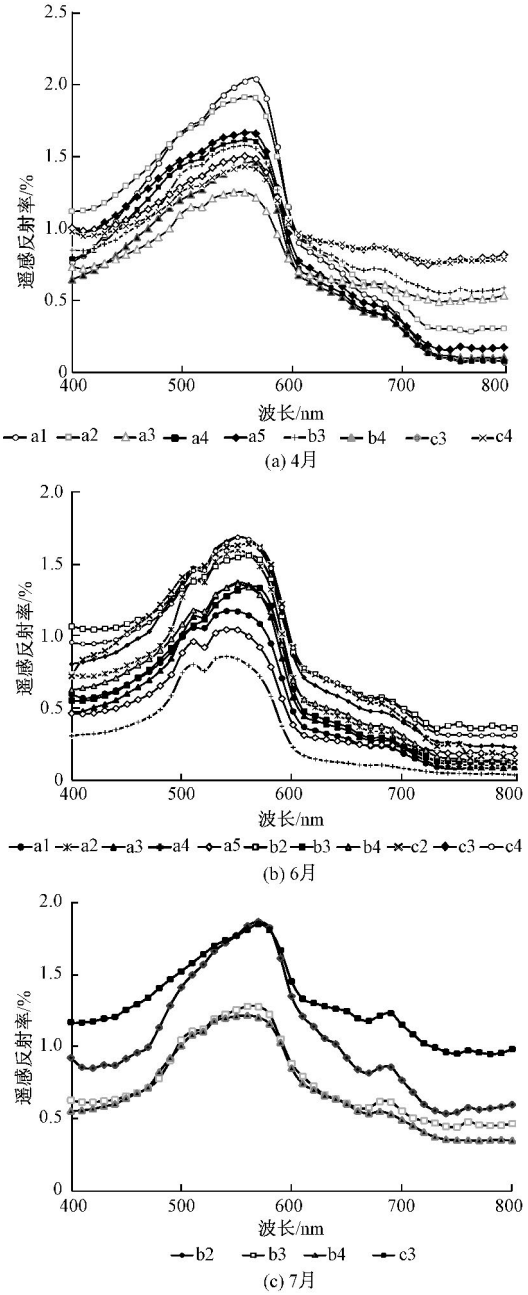


图 2 不同月份、不同采样点的遥感反射率曲线

利用三波段模型对研究区水体叶绿素 a 含量进行了反演。根据三波段模型的原理及叶绿素 a 的光学属性，结合实测的遥感反射率光谱曲线，选取 670、690、730 nm 3 个波段的遥感反射率（Rrs_{670}、Rrs_{690}、Rrs_{730}）建立三波段模型。研究结果表明，叶绿素 a 含量和实测数据的三波段模型有较好的线性相关关系（图 3），决定系数（R^2）为 0.660 8。根据建立的三波段模型，对研究区叶绿素 a 含量进行了反演，其均方根误差（*RMSE*）为 0.59 μg/L，相对误差为 36.7%。

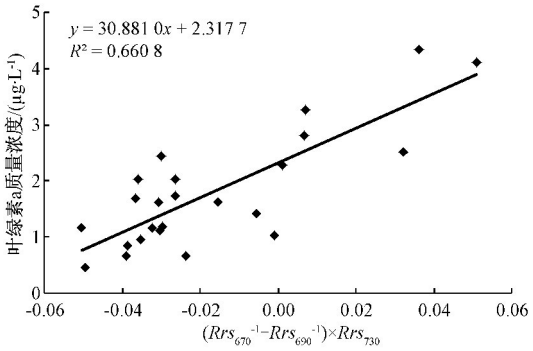


图 3 三波段模型同叶绿素 a 质量浓度的相关关系

2.2 比值模型

利用波段比值 Rrs_{725}/Rrs_{675} 和 Rrs_{748}/Rrs_{667} 同叶绿素 a 质量浓度进行了相关性研究（图 4）。从图 4 可见：叶绿素 a 质量浓度和波段比值 Rrs_{725}/Rrs_{675} 的决定系数是 0.314 9，利用建立的反演模型反演叶绿素 a 含量，*RMSE* 为 0.84 μg/L，相对误差为 52.0%；叶绿素 a 质量浓度同波段比值 Rrs_{748}/Rrs_{667} 的决定系数是 0.300 9（图 4），利用建立的波段比值模型反演叶绿素 a 质量浓度，*RMSE* 为 0.85 μg/L，相对误差为 54.4%。

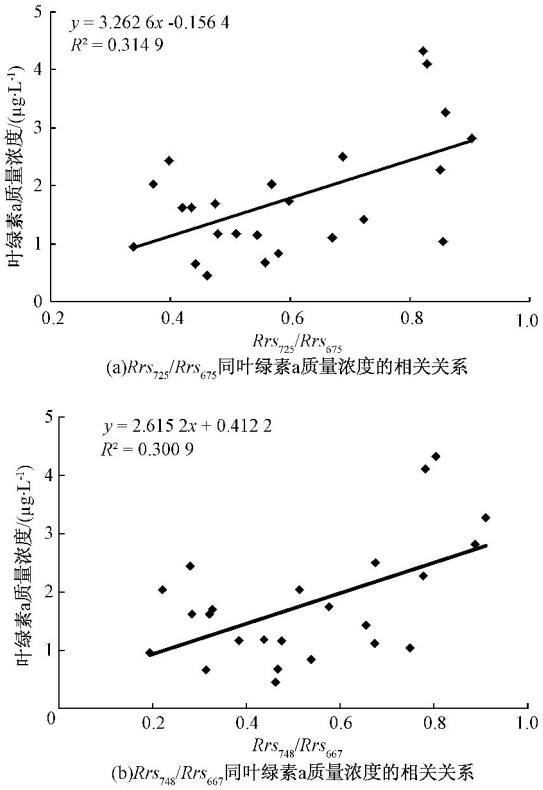


图 4 不同波段比值同叶绿素 a 质量浓度的相关关系

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3 荧光算法

2.3.1 荧光峰高度法

根据研究区实测的反射光谱曲线，选取690 nm处的遥感反射率和叶绿素a质量浓度进行了相关研究。通过研究发现，随着叶绿素a质量浓度增加，荧光峰逐渐明显，但总体来说，荧光特征都不是非常突出。研究结果表明，叶绿素a质量浓度同Rrs_{690}的决定系数是0.555 1(图5)，利用建立的反演模型反演叶绿素a质量浓度，*RMSE*为0.68 μg/L，相对误差为40.8%。

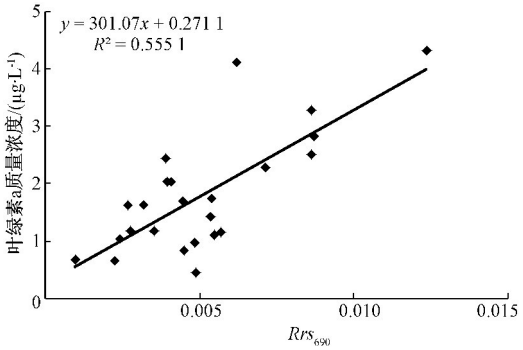


图5 叶绿素a含量同Rrs_{690}的相关关系

2.3.2 荧光线高度法

基线荧光高度法的基本原理是使用荧光峰左右两侧通道的离水辐亮度的连线为基线，计算荧光通道的离水辐亮度与基线之间的距离，建立叶绿素a质量浓度同荧光线高度之间的相关关系。通过研究发现，荧光线高度和叶绿素a质量浓度之间的决定系数为0.346 6(图6)，利用建立的荧光线高度模型反演叶绿素a质量浓度，*RMSE*为0.82 μg/L，相对误差为46.5%。由于研究区叶绿素a质量浓度均低于5 μg/L，从实测反射光谱曲线上看荧光峰并不十分明显，因此利用荧光线高度建立的反演模型反演叶绿素a质量浓度精度较低。

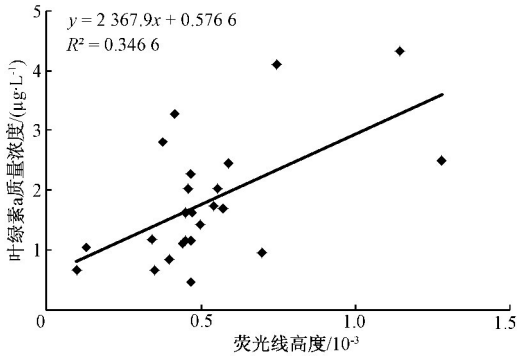
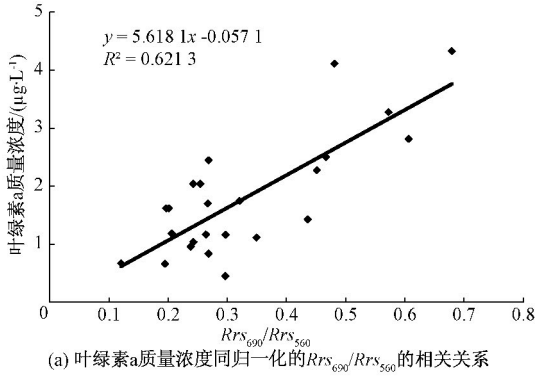


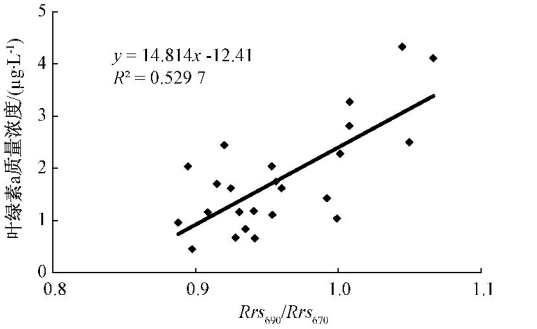
图6 叶绿素a质量浓度和荧光线高度的相关关系

2.3.3 归一化荧光高度法

归一化荧光高度法是将680 nm处的荧光峰强度最大值Rrs_{max}归一到560 nm的反射峰或675 nm的吸收峰最小值。结合研究区实测的反射光谱曲线，选取Rrs_{690}作为Rrs_{max}进行叶绿素a归一化荧光算法研究，发现叶绿素a质量浓度同归一化的Rrs_{690}/Rrs_{560}之间的决定系数是0.6213【图7(a)】，利用建立的模型反演叶绿素a质量浓度，*RMSE*为0.62 μg/L，相对误差为39.1%。同时还验证了叶绿素a质量浓度同波段比值Rrs_{690}/Rrs_{670}的相关关系。研究表明，叶绿素a质量浓度同归一化的Rrs_{690}/Rrs_{670}之间的决定系数为0.5297【图7(b)】，利用建立的反演模型反演叶绿素a质量浓度，*RMSE*为0.69 μg/L，相对误差为42.9%。



(a) 叶绿素a质量浓度同归一化的Rrs_{690}/Rrs_{560}的相关关系



(b) 叶绿素a质量浓度同归一化的Rrs_{690}/Rrs_{670}的相关关系

图7 叶绿素a质量浓度同归一化荧光高度的相关关系

2.4 反射峰面积法

依据叶绿素a的吸收和后向散射特性，结合研究区实测的反射率光谱曲线，选取荧光峰Rrs_{690}附近的2个吸收谷Rrs_{670}和Rrs_{730}连线作为基线计算反射峰面积(*NPA*)，即

$$NPA = \int_{670}^{730} Rrs_{\lambda}\,d\lambda - \frac{(Rrs_{670} + Rrs_{730}) \times (730 - 670)}{2}$$

式中Rrs_{λ}是不同含量的叶绿素a在波长λ处的遥感反射率。通过研究叶绿素a质量浓度和反射

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

峰面积的关系，发现两者之间的线性关系最为显著(图 8)，决定系数为 0.558 9，利用建立的反射峰面积模型反演研究区叶绿素 a 质量浓度，*RMSE* 为 0.67 μg/L，相对误差为 39.9%。

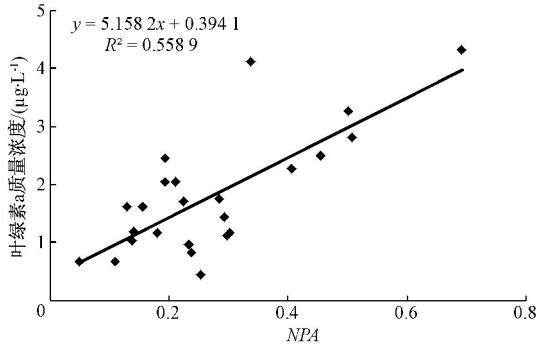


图 8 叶绿素 a 含量同反射峰面积的相关关系

2.5 叶绿素 a 质量浓度反演精度讨论

通过研究不同叶绿素 a 反演模型发现：利用实测光谱建立的三波段模型反演叶绿素 a 质量浓度，决定系数为 0.660 8，利用基于实测光谱建立的三波段模型反演叶绿素 a 质量浓度，*RMSE* 为 0.59 μg/L，相对误差为 36.7%；三波段模型考虑了叶绿素 a 的吸收及其他水色组分对叶绿素吸收和后向散射的影响，基于叶绿素 a 的固有光学特性建立的半分析模型。该叶绿素 a 反演模型减弱了水色组分中悬浮物和黄色物质的吸收和后向散射对叶绿素 a 吸收和后向散射的影响，同时考虑了纯水的后向散射，反演精度最高。反射峰面积模型综合考虑了叶绿素 a 的吸收和后向散射特性及周围环境状况对叶绿素 a 荧光效率的影响，利用反射峰面积法反演叶绿素 a 质量浓度，决定系数是 0.558 9，*RMSE* 是 0.67 μg/L，相对误差为 39.9%。此外归一化荧光高度模型也是叶绿素 a 质量浓度反演的常用模型，该模型考虑了叶绿素 a 的荧光峰和周围的吸收谷，利用该模型反演叶绿素 a 质量浓度，反演精度相对较高。反演精度最差的是比值模型，其决定系数为 0.300 9，*RMSE* 为 0.85 μg/L，相对误差为 54.4%。不同反演模型精度比较见表 1。

3 结论

水体的反射光谱中荧光峰特征是叶绿素 a 质量浓度遥感反演的基础，为叶绿素 a 遥感精确反演提供了可能。通过对比研究烟台近海水体不同叶绿素 a 遥感反演模型得出，三波段模型是烟台近海水体叶绿素 a 遥感反演的最优模型，决定系数为 0.660 8，*RMSE* 为 0.59 μg/L，其次是归一化荧光高度模型和反射峰面积模型，决定系数分别为 0.621 3 和 0.558 9，*RMSE* 分别为 0.62 μg/L 和 0.67 μg/L。

表 1 实测数据的不同叶绿素 a 模型反演精度比较

反演模型	R^2	*RMSE*/(μg·L⁻¹)	相对误差/%
三波段模型	0.660 8	0.59	36.7
反射峰面积模型	0.558 9	0.67	39.9
Rrs_{725}/Rrs_{675} 模型	0.314 9	0.84	52.0
Rrs_{748}/Rrs_{667} 模型	0.300 9	0.85	54.4
荧光峰高度模型	0.555 1	0.68	40.8
荧光线高度模型	0.346 6	0.82	46.5
Rrs_{690}/Rrs_{560} 模型	0.621 3	0.62	39.1
Rrs_{690}/Rrs_{670} 模型	0.529 7	0.69	42.9

参考文献：

[1] 段洪涛，张柏，刘殿伟，等. 查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 a 响应关系研究 [J]. 红外与毫米波学报，2006，25(5)：355-359.

[2] O'Reilly J E，Maritorena S，Mitchell B G，et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS [J]. Journal of Geophysical Research，1998，103(C11)：24 937-24 953.

[3] McClain C R，Feldman G C，Hooker S B. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series [J]. Deep-Sea Research Part II，2004，51(1-3)：5-42.

[4] Morel A，Prieur L. Analysis of variations in ocean color [J]. Limnology and Oceanography，1977，22(4)：709-722.

[5] Sathyendranath S，Prieur L，Morel A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters [J]. International Journal of Remote Sensing，1989，10(8)：1 373-1 394.

[6] Carder K L，Hawes S K，Baker K A，et al. Reflectance model for quantifying chlorophyll a in the presence of productivity degradation products [J]. Journal of Geophysical Research，1991，96(C11)：20 599-20 611.

[7] Stramski D，Bricaud A，Morel A. Modeling the inherent optical properties of the ocean based on the detailed composition of the planktonic community [J]. Applied Optics，2001，40(18)：2 929-2 945.

[8] 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

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Environment,2007,109(4): 464-472.

[9] Gons H J. Optical Teledetection of Chlorophyll a in Turbid Inland Waters [J]. Environmental Science & Technology,1999,33(7): 1 127-1 132.

[10] Gower J F R,Doerffer R,Borstad G A. Interpretation of the 685nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence,absorption and scattering,and its observation by MERIS [J]. International Journal of Remote Sensing,1999,20(9): 1 771-1 786.

[11] Gitelson A A, Kondratyev K Y. Optical-models of mesotrophic and eutrophic water bodies [J]. International Journal of Remote Sensing,1991,12(3): 373-385.

[12] Vasilkov A,Kopelevich O. Reasons for the appearance of the maximum near 700 nm in the radiance spectrum emitted by the ocean layer [J]. Oceanology, 1982, 22(5):697-701.

[13] Dekker A G,Peters S W M. The use of the thematic mapper for the analysis of eutrophic lakes-a case study in the Netherlands [J]. International Journal of Remote Sensing,1993,14(5): 799-821.

[14] Han L H,Rundquist D C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: A case study in a turbid reservoir [J]. Remote Sensing of Environment, 1997,62(3): 253-261.

[15] Stumpf R P,Tyler M A. Satellite detection of bloom and pigment distributions in estuaries [J]. Remote Sensing of Environment,1988,24(3): 358-404.

[16] Gons H J, Rijkeboer M, Bagheri S, et al. Optical teledetection of chlorophyll a in estuarine and coastal waters [J]. Environmental Science & Technology, 2000,34(24): 5 189-5 192.

[17] Gons H J,Rijkeboer M,Ruddick K G. A chlorophyll-retrieval algorithm for satellite imagery (Medium Resolution Imaging Spectrometer) of inland and coastal waters [J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(9):947-951.

[18] Ruddick K G,Gons H J,Rijkeboer M,et al. Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties [J]. Applied Optics,2001,40(21): 3 575.

[19] 赵冬至,张丰收,杜飞,等. 不同藻类水体太阳激发的叶绿素荧光峰(SICF)特性研究 [J]. 遥感学报,2005,9(3): 265-270.

[20] 陈楚群,施平,毛庆文. 应用TM数据估算沿岸海水表层叶绿素浓度模型研究 [J]. 环境遥感,1996,11(3):168-176.

[21] Fraser R N. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll a among Nebraska sand hills lakes [J]. International Journal of Remote Sensing,1998, 19(8):1 579-1 589.

[22] Allee R J,Johnson J E. Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll a and Secchi disc depth of Bull Shoals Reservoir,Arkansas,USA [J]. International Journal of Remote Sensing,1999,20(6):1 057-1 072.

[23] Kallio K,Kutser T,Hannonen T,et al. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons [J]. Science of the Total Environment,The,2001,268(1-3): 59-77.

[24] Koponen S,Pulliainen J,Servomaa H,et al. Analysis on the feasibility of multi-source remote sensing observations for chl-a monitoring in Finnish lakes [J]. Science of the Total Environment,The,2001,268(1-3): 95-106.

[25] 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.

[26] Gitelson A A, Vina A, Ciganda V, et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops [J]. Geophysical Research Letters,2005,32(8): 403-406.

[27] Gitelson A A,Vina A,Arkebauer T J,et al. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies [J]. Geophysical Research Letters, 2003,30(5):1 248-1 251.

[28] 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 [J]. 湖泊科学,2008,20(2): 153-159.

[29] 徐京萍,张柏,宋开山,等. 基于半分析模型的新庙泡叶绿素a浓度反演研究 [J]. 红外与毫米波学报,2008,27(3): 197-201.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net