基于MODIS的烟台近海水体叶绿素浓度分布

马万栋[1],王 桥[1],吴传庆[1],殷守敬[1],邢前国[2],施 平[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: 利用实测光谱数据及水体叶绿素浓度数据建立了基于MODIS数据的叶绿素反演模型,并利用MODIS L1B数据对研究区的叶绿素浓度进行了反演。通过分析烟台近海水体叶绿素浓度分布得出,烟台近海水体叶绿素浓度由沿岸向海延伸,叶绿素的浓度逐渐增加;通过不同月份的叶绿素浓度分布状况发现,夏季水体叶绿素浓度含量最高,冬季最低。

关键词: MODIS; 烟台近海; 叶绿素; 遥感反演
中图分类号: X87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-6002(2014)05-0149-06

The Chlorophyll-a Distribution of Yantai Coastal Waters Based on MODIS Data

MA Wan-dong[1], WANG Qiao[1], WU Chuan-qing[1], YIN Shou-jing[1], XING Qian-guo[2], SHI Ping[2]
1. Satellite Environment Centre, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China
2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Abstract: The retrieval model of chlorophyll-a is built according to the in situ spectral data and chlorophyll-a concentration. Moreover, the MODIS L1B data is applied to map the chlorophyll-a distribution of Yantai coastal waters. The distribution map of chlorophyll-a is analyzed according to monthly chlorophyll-a concentration distribution. From the chlorophyll-a distribution map, we could conclude that the chlorophyll-a concentration of near-land waters is higher than that of external waters, the nearer to the land, the higher chlorophyll-a concentration. Moreover, the chlorophyll-a concentration in summer is the highest among all the seasons in 2009 and the lowest chlorophyll-a in waters is in winter.

Key words: MODIS; Yantai coastal waters; chlorophyll-a; remote sensing retrieval

海洋水色遥感是一种被动遥感技术,通过搭载于遥感平台上的传感器,获取水体在可见光和近红外光谱波段的海面离水辐射信息,从而得到上层海洋光学特性和海洋水体组分信息。随着新型传感器的研发,水色遥感从定性分析发展到定量应用,并在全球碳循环、海洋初级生产力、海洋渔业、近海环境监测与管理等多个领域展现了广阔的应用前景。

水体中叶绿素浓度是浮游生物分布的指标,是衡量水体初级生产力和富营养化作用的最基本指标,也是海洋水色遥感反演的主要水质参数之一。水体组分中叶绿素浓度的遥感反演取决于叶绿素的吸收和后向散射特性[1],许多学者建立了大量叶绿素反演算法[2-5]。Stumpf和Tyler[3]研究结果表明,AVHRR和CZCS的近红外和红波段比值算法可以区分浮游植物藻华,对混浊河口地区浓度大于10 mg/m^{3}的叶绿素含量可以进行有效估算,反演偏差小于30%。Gons等[6]利用704、672 nm处的遥感反射率及吸收和散射系数反演大范围(3~185 mg/m^3)的叶绿素浓度,该算法后来被应用到MERIS影像中反演叶绿素浓度[7]。MODIS是第一个设置荧光通道的传感器,其14波段为荧光通道,利用13、14、15 3个波段可以探测678 nm处的叶绿素荧光信号[8]。MODIS传感器的B_{13}、B_{14}、B_{15}的中心波长(667、678、748 nm)分别对应叶绿素在红波段的吸收谷(B_{13}、B_{15})和叶绿素的荧光峰(B_{14})。郑小慎等[9]利用MODIS叶绿素产品分析了黄海和东海叶绿素浓度季节和年际变化特征;马翱慧等[10]利用MODIS数据对南海北部叶绿素浓度进行了时空遥感分析,获取了南海北部水体叶绿素浓度的时空分布特征;徐

收稿日期: 2013-11-07; **修订日期:** 2014-02-21
基金项目: 水体污染控制与治理重大专项(2014ZX07508);国家自然科学基金(NSFC41271349);环保公益项目(201409100-04)
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

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

雯佳等[11]利用实测光谱建立了河北近岸水体叶绿素的反演模型，并用MODIS数据进行了遥感反演，同时利用OC3标准算法对反演精度进行了分析，得到了较高的反演精度。丛丕福等[12]利用实测光谱模拟了MODIS波段设置，选取了667、678、551 nm 3个波段对辽东湾水体叶绿素进行了遥感反演，得到良好效果。有的学者把AISA数据和MODIS、MERIS等数据结合，对湖泊水体进行了经验、半经验、半自动的水质分类研究，取得良好效果[13-14]。Dall' Olmo等[15]提出了一种反演叶绿素浓度的半分析模型——三波段模型。三波段模型起初是用于陆地植被的色素含量[16]，后来被应用到混浊水体的叶绿素浓度反演。Gitelson等[17]利用三波段模型对混浊的水体Chesapeake湾叶绿素浓度进行了反演，结果表明，在混浊水体中叶绿素反演精度较高，并用MODIS和MERIS影像进行了验证，得到了较好的反演结果。

通过实测光谱和叶绿素浓度数据，拟建立基于MODIS影像的叶绿素反演模型，以分析研究区不同时期的叶绿素时空分布及变化趋势。

1 数据获取和处理

1.1 研究区概况

研究区位于烟台北部四十里湾海域(图1)，介于芝罘岛和养马岛之间，北有崆峒岛、担子岛，平均水深10 m左右，属半封闭型海域，是海水养殖的重要区域。研究区水体交换能力较差，海水受陆源径流和海水养殖等因素的影响较大。

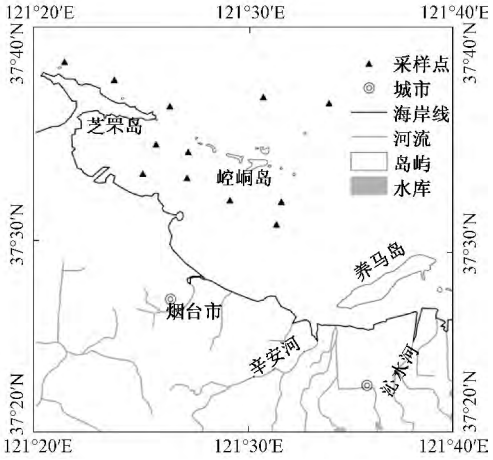


图1 烟台近海采样点分布图

1.2 遥感反射率计算

现场的水样及高光谱逐月数据为2008年11月—2009年10月从烟台近海海域环境调查船上获取。为有效避免船体对水体光场的破坏和太阳直射反射的影响，更好地提取离水辐射信息、计算水面以上遥感反射比(R_{rs})，现场高光谱数据采用唐军武等[18]提出的二类水体水面以上测量法。对现场实测的遥感反射率进行光谱重采样到10 nm，以供分析研究。图2是现场实测的不同站位的遥感反射率曲线。

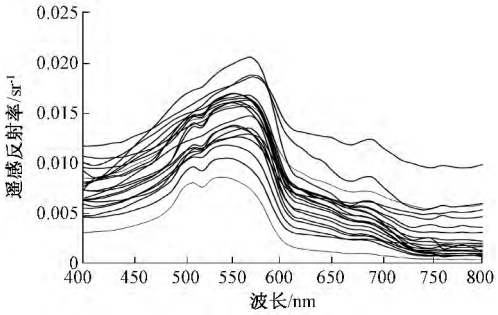


图2 不同月份、不同站位的遥感反射率曲线

1.3 MODIS数据处理

MODIS L1B数据直接从NASA官方网站下载。利用遥感软件对MODIS L1B数据进行裁剪、镶嵌及几何校正等预处理工作，最后对影像进行大气校正。MODIS L1B数据的处理流程见图3。

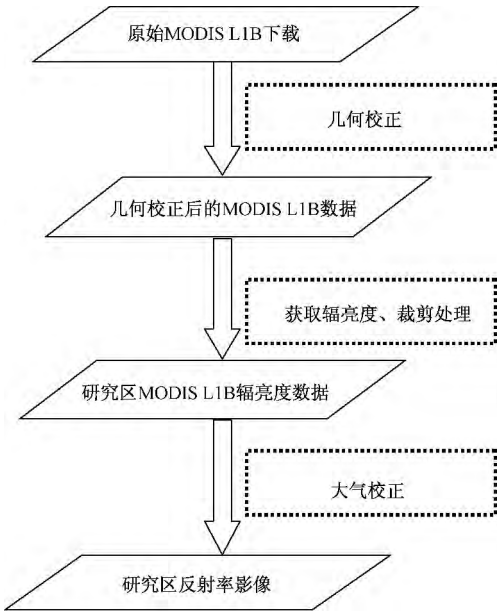


图3 MODIS影像数据处理流程图

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 反演模型建立

2.1 模拟 MODIS 的三波段模型

依据三波段模型的原理及 MODIS 的波段设置，根据叶绿素的吸收和荧光特性，选取 662 ~ 672 nm（叶绿素吸收波段）、673 ~ 683 nm（叶绿素荧光区域）及 743 ~ 753 nm 3 个波段对原始光谱进行重采样，建立模拟 MODIS 的三波段模型（图4），其决定系数是 0.406 5，利用该模型反演叶绿素浓度，*RMSE* 为 0.78 μg/L，相对误差为 52.8%。

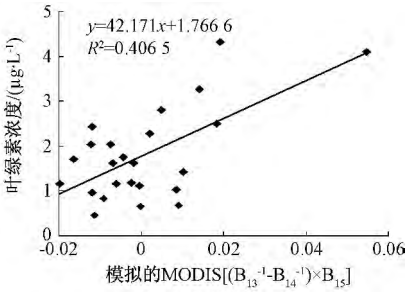


图 4 模拟 MODIS $[(B_{13}^{-1}-B_{14}^{-1})\times B_{15}]$ 同实测叶绿素浓度的相关关系

利用模拟的 MODIS 波段建立的三波段模型反演叶绿素，其决定系数、*RMSE* 和相对误差都较大，究其原因，可能与叶绿素的光谱响应波段及 MODIS 传感器的波段设置有关。

2.2 MODIS 的三波段模型

利用 MODIS 的 B_{13}、B_{14} 和 B_{15} 波段依据三波段模型的原理建立 MODIS 的三波段模型。依据三波段模型的原理，选取 MODIS L1B 的 B_{13}、B_{14}、B_{15} 波段的辐射亮度影像，利用 ENVI 的波段运算功能，计算 $[(B_{13}^{-1}-B_{14}^{-1})\times B_{15}]$ 值。利用同步实测叶绿素浓度同 $[(B_{13}^{-1}-B_{14}^{-1})\times B_{15}]$ 建立相关关系，发现实测叶绿素浓度同 MODIS 影像的三波段比值存在线性相关关系（图5），其决定系数为 0.347 3，利用建立的线性反演模型反演实测站位的叶绿素浓度，其 *RMSE* 为 0.58 μg/L，相对误差为 34.7%。

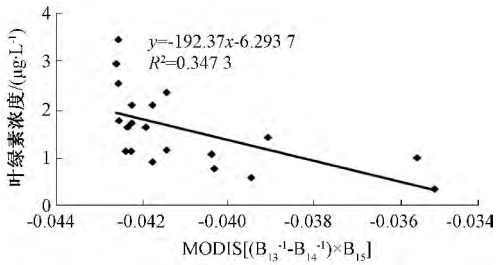


图 5 MODIS $[(B_{13}^{-1}-B_{14}^{-1})\times B_{15}]$ 同实测叶绿素浓度的相关关系

2.3 比值模型

根据实测现场光谱数据模拟了 MODIS 的 B_{14} 和 B_4，并利用其比值同实测叶绿素浓度建立了相关关系（图6），其决定系数为 0.799 3，利用该比值模型反演叶绿素浓度，*RMSE* 为 0.32 μg/L，相对误差为 18.7%。

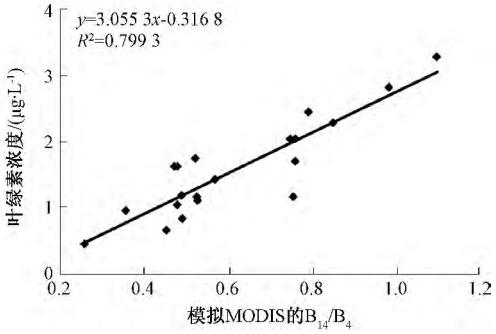


图 6 模拟 MODIS 的 B_{14}/B_4 同实测叶绿素浓度的关系

依据模拟 MODIS 数据比值模型波段范围，同时对比 MODIS 传感器的波段设置，选取 MODIS 的 B_{14} 和 B_4 作为建立比值模型的 2 个波段，对 MODIS 影像做波段比值运算，得到 MODIS 的比值影像。研究发现，比值影像同叶绿素浓度之间存在明显的线性相关关系（图7），其决定系数为 0.722 2，利用比值模型反演研究区叶绿素浓度，*RMSE* 为 0.50 μg/L，相对误差为 25.8%。

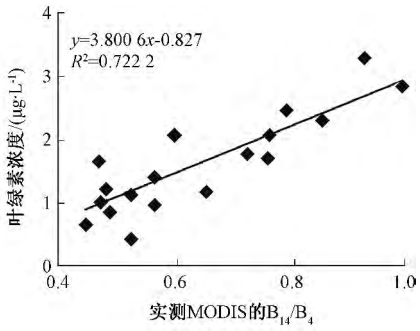


图 7 MODIS 的 B_{14}/B_4 同实测叶绿素浓度的关系

2.4 模型精度评价及展望

通过对比研究模拟 MODIS 的三波段模型和比值模型，发现模拟 MODIS 的比值模型是研究区最优的反演模型，其决定系数为 0.799 3，利用建立的线性比值模型反演水体中叶绿素浓度，其 *RMSE* 为 0.32 μg/L，相对误差为 18.7%，不同反演模型的对比情况见表 1。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 不同叶绿素反演模型精度评价

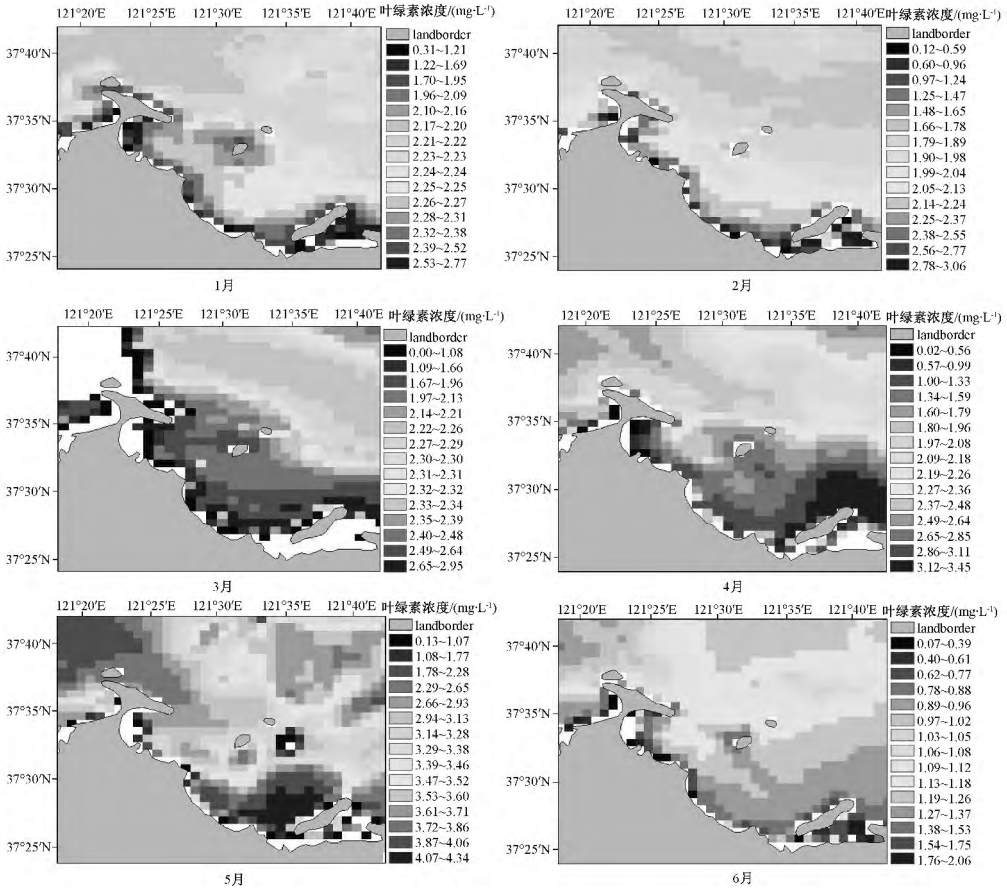
类型	项目	R^2	$RMSE/(\mu g \cdot L^{-1})$	相对误差/%
三波段模型	模拟 MODIS	0.4065	0.78	52.8
	MODIS	0.3473	0.58	34.7
比值模型	模拟 MODIS	0.7993	0.32	18.7
	MODIS	0.7222	0.50	25.8

三波段模型综合考虑了水体中叶绿素的光谱特性以及悬浮物和黄色物质对叶绿素吸收和后续散射的影响，本应具有较高的反演精度，但是研究中三波段模型的反演精度均不高，究其原因，可能与研究区水体叶绿素浓度含量较低有关。研究区水体叶绿素浓度均在3.5 μg/L以下，致使水体叶绿素光谱特征不明显，水体中黄色物质和悬浮物的吸收和后向散射较强，减弱了水体中叶绿素吸收和后向散射，进而导致水体中叶绿素浓度反演精度降低。比值模型可充分考虑水体中悬浮物及黄色物质吸收和后向散射对叶绿素吸收和后向散射的影响，把该影响降至最低，而不受叶绿素浓度大小的限制，因此研究中比值模型在反演水体叶绿素浓度时，具有较高的反演精度。此外，模型还受叶绿素测量精度的影响，测量精度的高低直接影响反演模型的精度，今后应进一步加强水体叶绿素测量规范，严格水体叶绿素样品的采集、存储、实验室样品的处理等，以确保叶绿素的测量精度，进而提供反演模型的反演精度。

考虑到二类水体中悬浮物和黄色物质对叶绿素光谱特性的影响，为了提高二类水体中叶绿素浓度的反演精度，当水体中叶绿素浓度较低时，可使用MODIS比值模型反演水体中叶绿素浓度；当叶绿素浓度较高时，可考虑使用MODIS的三波段模型反演叶绿素浓度。

3 基于MODIS的叶绿素浓度反演

通过对比研究叶绿素浓度反演模型得知，MODIS比值模型是最优的反演模型，利用影像数据选用比值模型反演不同时期的叶绿素浓度，通过建立的比值反演模型，对MODIS L1B影像数据进行换算和处理后，利用建立的比值模型对研究区叶绿素浓度进行了反演，得到了研究区的叶绿素浓度分布图(图8)。



?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

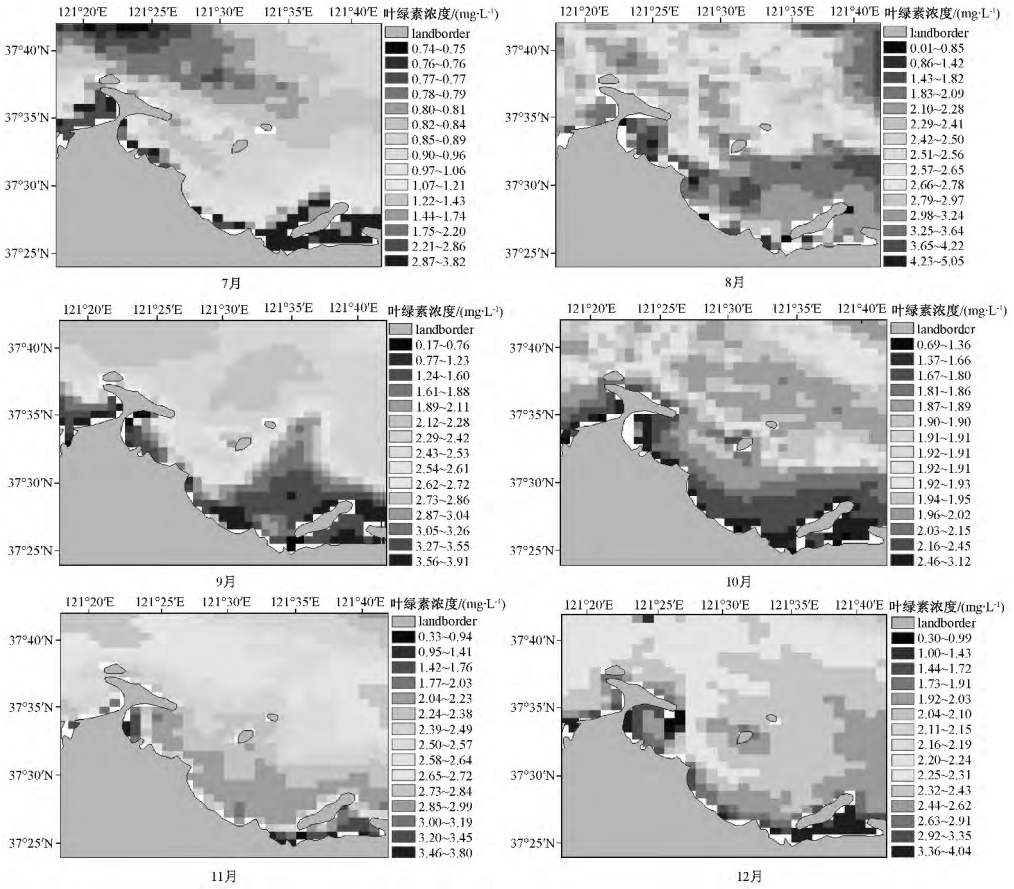


图 8　2009 年烟台近海叶绿素浓度逐月分布图

由图 8 可见，1 ~ 4 月水体叶绿素浓度相对最低，8 ~ 10 月水体叶绿素浓度相对最高。

4　结论

从不同月份的叶绿素浓度变化趋势可以看出，烟台四十里湾内部叶绿素浓度总体要高于外部海域，这与四十里湾的地理特征和海水动力条件相吻合，研究区的平均水深为 10 m 左右，水体的动力和交换能力较差。另外，由沿岸向海叶绿素的浓度由高到低逐渐变化，这与沿岸的污染和人类活动密切相关。

通过分析不同季节的叶绿素浓度分布状况发现，夏季各月份叶绿素浓度相对其他月份最高，叶绿素浓度最低的是冬季。此外，通过叶绿素浓度的逐月分布图还可看出在研究区的北部海域，芝罘岛和崆峒岛北部海域存在低值叶绿素的带状区域，其叶绿素浓度同周围海域相差较大，根据烟台近海海流特征，可能是渤海湾与黄海的沿岸水流交换带，这方面需要进一步研究确定。

参考文献：

[1] 张前前，类淑河，王修林，等. 浮游植物活体三维荧光光谱分类判别方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析，2004，24(10)：1 227-1 229.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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)：3 367-3 373.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[6] 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.

[7] 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.

[8] Hu C, Muller-Karger F E, Taylor C, et al. Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters [J]. Remote Sensing of Environment,2005,97(3):311-321.

[9] 郑小慎,魏皓,王玉衡. 基于水色遥感的黄、东海叶绿素a浓度季节和年际变化特征分析[J]. 海洋与湖沼,2012,43(3):649-654.

[10] 马翱慧,刘湘南,李婷,等. 南海北部海域叶绿素a浓度时空特征遥感分析[J]. 海洋学报(中文版),2013,35(4):98-105.

[11] 徐雯佳,杨斌,田力,等. 应用MODIS数据反演河北海域叶绿素a浓度[J]. 国土资源遥感,2012(4):152-156.

[12] 丛丕福,曲丽梅,王臣立,等. 基于MODIS模拟的辽东湾叶绿素a的遥感反演模型[J]. 生态环境学报,2009,18(6):2 057-2 060.

[13] Pulliainen J, Kallio K, Eloheimo K, et al. A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data [J]. Science of the Total Environment,2001,268(1/3): 79-93.

[14] Harma P, Vepsalainen J, Hannonen T, et al. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland [J]. Science of the Total Environment,2001,268(1/3):107-121.

[15] 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):1 938-1 941.

[16] 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.

[17] 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,2008,110(112):3 582-3 593.

[18] 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.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net