

河北海域叶绿素 *a* 浓度遥感反演业务化算法

杨 斌, 田力, 徐雯佳, 许志辉

(河北省遥感中心, 河北 石家庄 050021)

摘 要: 构建了一种适用于河北海域二类水体的叶绿素 *a* 浓度遥感反演业务化模型。将 MODIS 1B 数据第一波段反射率与河北海域叶绿素 *a* 浓度实测数据进行相关分析, 通过回归拟合建立遥感反演模型, 并选择不同时间、不同区域的实测数据对模型精度与稳定性进行了检验。结果表明: 模型相关系数为 0.73, 平均相对误差 31.4%~35.9% 之间, 模型适用于河北海域叶绿素 *a* 浓度业务化遥感监测, 这对于监测河北海域赤潮和富营养化状况具有重要的现实意义。

关键词: 河北海域; 叶绿素 *a* 浓度; 遥感; MODIS; 定量反演

中图分类号: P734; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)02-0060-07

1 引言

叶绿素 *a* 的浓度与水体中藻类的种类和数量等有密切关系, 可以反映浮游植物现存量, 是评价和监测海洋水质的重要参数^[1], 特别是河北秦皇岛海域每年暴发的微微藻褐潮, 持续时间长, 覆盖范围广, 与叶绿素 *a* 浓度具有较高的相关性^[2-3], 越来越多的研究表明, 利用海水中叶绿素 *a* 含量的变化可以作为监测赤潮是否发生的一个指标^[4-6], 监测叶绿素 *a* 浓度对于掌握赤潮和海水富营养化状况显得尤为重要。

当前针对一类水体的水色遥感反演算法相对比较成熟, 以波段组合为基础的经验统计算法具有较高的反演精度, 主要算法包括分析算法^[7]、半分析算法^[8]、经验算法^[9]等。这些算法是建立在实测数据基础上的水色遥感反演算法, 仅适用于一类水体, 对于二类水体误差较大, 大多数算法对于我国海区不完全适用, 所以对于不同的海域和不同的数据源应该采用不同的反演算法, 对于二类水体建立特定海域的反演模型是必要的。Brivio 等应用 TM 影像利用辐射传输模型, 对意大利 Garda 湖的叶绿素 *a* 浓度变化进行了研究^[10]。Sabine Thiemann 等通过分

析 Mecklenburg Lake 区的不同时相的高光谱数据特征, 建立了基于半经验和多时相的透明度和叶绿素 *a* 浓度的遥感反演模型^[11]。Carder 等应用 MODIS 数据, 以 675 nm 的浮游植物吸收系数和 400 nm 的黄色物质吸收系数为变量, 建立了大洋水体叶绿素 *a* 浓度的半分析算法^[12]。赵文静等利用 2004—2012 年在南海获得的 9 个航次的实测 Chl *a* 数据, 对 NASA 标准业务化算法 OC3 算法进行修正, 修正后算法精度由 56% 提高到 38%^[13]。丛丕福等指出 MODIS 红光附近特征波段 (667 nm 和 678 nm) 比传统蓝绿光波段 (440 nm 和 550 nm) 更能反映辽东湾海域叶绿素特征, 并利用该波段建立了具有区域特色的叶绿素 *a* 遥感反演模型^[14]。张彦喆等建立了基于 MODIS 数据 NDPI 指数的渤海海域叶绿素 *a* 反演模型, 反演值与建模数据相对误差 28%, 但未对模型适用性做进一步讨论^[15]。目前, 关于叶绿素 *a* 浓度遥感反演, 国内学者在中国各海区已进行了大量研究, 但大多数只是针对局部海区或短时期内的研究, 对整个海区叶绿素 *a* 浓度时间序列的总体研究不多。针对二类水体的反演算法仍处于研究和发展之中, 适用性较高的业务化算法更是少见。

本文利用 2009—2015 年河北海域叶绿素 *a* 浓

收稿日期: 2016-07-01; 修回日期: 2016-07-22。

基金项目: 河北省海洋局基础类项目 (2012995548, 2014045570)。

作者简介: 杨斌 (1984—), 男, 工程师, 硕士, 现从事海洋遥感的理论和应用研究。E-mail: yangbin_hbrs@163.com

度实测数据和MODIS遥感数据,对现有的经验模型进行改进,并开展模型精度分析与稳定性检验研究,旨在建立一种适用于河北海域的叶绿素 a 浓度业务化反演模型,为河北海域水色环境、赤潮监测及预警、海水富营养化研究提供参考。

2 数据采集与处理

本文以河北省近海海域为研究区域。采用的遥感数据是国家卫星海洋应用中心MODIS地面接收站接收的MODIS 1B数据。根据采样时间和卫星过境时间,筛选出与采样日期准同步的晴空下的遥感数据。本文使用的MODIS 1B数据为1 km分辨率的MOD021KM产品数据,大气校正采用基于直方图的暗像元法,每个波段减去该波段反射率的最小值,以去除大气层辐射的影响^[16]。对大气校正后的MODIS数据进行几何校正,使用ENVI中的Georeference MODIS模块进行几何校正,校正后的位置精度达到0.5个像元。

叶绿素 a 浓度数据均为现场测量数据,部分数据由秦皇岛海洋环境监测中心站提供。测量时间分别为2009年8—10月、2010年5—10月、2011年5—10月、2012年5—9月、2013年10月、2014年5月和2015年6月。样本数据共计105个,分布于整个河北海域,空间分布均匀、时间序列长、数值范围

广。其中,选择2009—2013年中的77个实测数据作为建立模型数据;选择2009—2013年中的11个实测数据作为模型精度验证数据;选择2014—2015年的17个实测数据作为模型稳定性检验数据。样点分布见图1。

3 模型结果与应用

3.1 优化前反演模型

由于研究水体、遥感数据和建模方法各不相同,现有的反演模型大多在适用性上具有一定的局限性。尤其是二类水体(近海),由于其自身的光学特性相对复杂,现有的叶绿素 a 浓度遥感监测模型区域性强,普适性不高。为了建立适用于河北海域叶绿素 a 浓度反演模型,在分析水体光谱特征与实测叶绿素 a 浓度关系的基础上,开展了基于MODIS数据的叶绿素 a 浓度反演模型研究。

模型所依据的基础数据来自2010年5—10月和2011年5月河北秦皇岛海域47个采样点叶绿素 a 实测数据和光谱测量数据。样本数值范围 $[1.0 \sim 4.75 \text{ mg/m}^3]$,标准差 0.9 mg/m^3 。光谱测量结果显示,河北海域在 $550 \sim 580 \text{ nm}$ 和 $675 \sim 695 \text{ nm}$ 处存在两个反射峰,对应MODIS波段的中心波长为 551 nm 和 678 nm ;在 $425 \sim 500 \text{ nm}$ 和 $650 \sim 670 \text{ nm}$

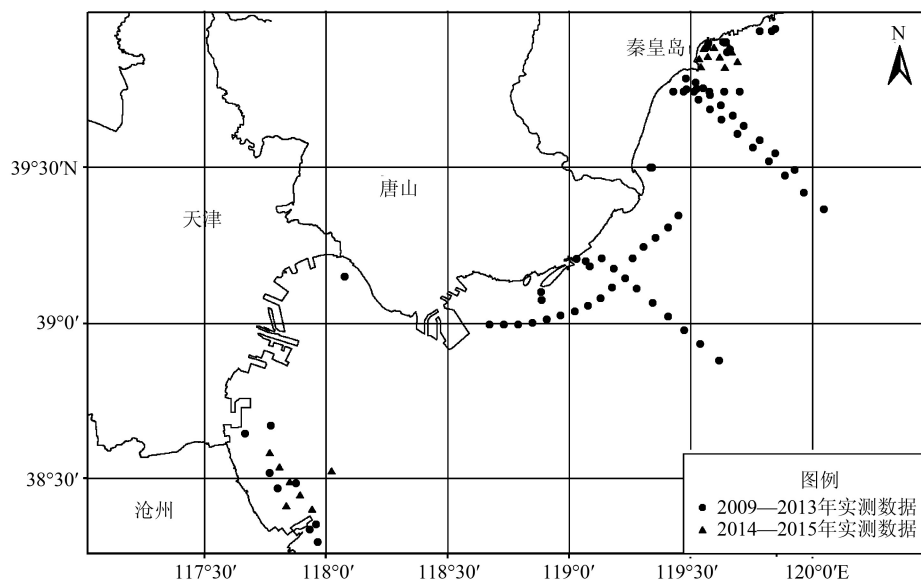


图1 叶绿素 a 浓度野外采样点位

处存在两个吸收峰,对应MODIS波段的中心波长为443 nm和667 nm。选择不同的波段组合与实测数据进行相关分析,最终选取了 $\ln r_1$ 作为最佳反演因子,构建了基于MODIS的叶绿素 a 浓度遥感监测模型(后面称为优化前模型)^[17]:

$$\text{Chl } a = e^{1.0413 \ln r_1 + 3.7139} \quad (1)$$

式中: r_1 为MODIS的MOD021KM产品数据大气校正后第一波段的反射率; Chl a 为叶绿素 a 浓度,模型相关系数为0.66。

该模型反演精度与NASA(美国国家航空与航天局)发布的SeaDAS 4.7(海洋数据分析系统)软件中的OC3标准经验算法^[18]相比,精度有了较大提高,但由于缺少后续数据的补充,模型适用性有待进一步提高。

3.2 优化后反演模型

随着实测数据的持续积累,在已有模型基础上,进一步对模型进行改进。本次用于构建改进型模型的叶绿素 a 浓度样本数据全部为2009—2013年现场实测数据,均匀分布于河北海域,共计77个。样本数值范围 $[0.29 \sim 7.99 \text{ mg/m}^3]$,标准差 1.88 mg/m^3 。将实测数据与预处理后的MODIS第1波段数据进行二次多项式拟合,结果见图2。

从图2中可以看出,预处理后的MODIS第1波段反射率与实测的叶绿素 a 浓度的相关性良好,经

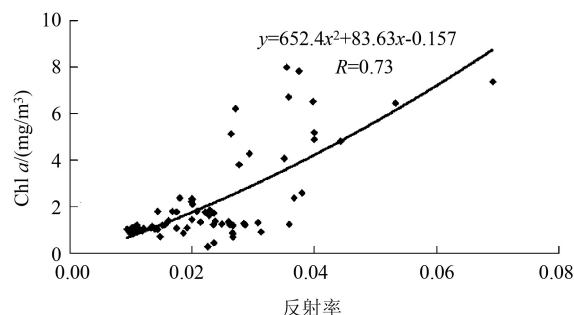


图2 实测叶绿素 a 浓度与MODIS band1反射率相关分析结果

过回归分析,最终得到如下反演模型(后面称为优化后模型):

$$\text{Chl } a = 652.45 \times r_1^2 + 83.633 \times r_1 - 0.157 \quad (2)$$

式中: r_1 为MODIS的MOD021KM产品数据大气校正后第1波段的反射率; Chl a 为叶绿素 a 浓度,模型相关系数为0.73,选择显著性水平 $\alpha = 0.05$,样本数 $n = 77$,相关系数临界值 $r_{0.05} = 0.224174$,表明 r_1 和Chl a 具有较强的相关性。

3.3 精度评价与稳定性检验

为了验证修正后模型的反演精度,将同步的MODIS数据分别代入式(1)和式(2),进行叶绿素 a 浓度反演,并与实测数据进行比较(见表1)。从表1可以看出,受样本数值范围小的影响,优化前模型

表1 验证数据与MODIS数据叶绿素 a 浓度反演结果

样点号	日期	采样海域	Chl a /(mg/m^3)			相对误差/%	
			实测值	优化前模型反演值	优化后模型反演值	优化前模型	优化后模型
1	2012/9/16	京唐港	1.05	0.85	1.24	19.3	17.8
2	2012/9/16	京唐港	0.79	0.59	1.45	25.4	84.0
3	2009/10/9	秦皇岛港	2.04	0.88	2.34	56.8	14.8
4	2010/8/6	京唐港	0.8	0.52	1.26	34.4	58.1
5	2011/5/1	山海关	2.68	0.75	1.94	71.9	27.5
6	2011/5/1	秦皇岛港	2.05	0.46	1.07	77.7	47.8
7	2011/5/3	北戴河	1.14	0.44	1.03	61.2	9.6
8	2012/6/16	滦河口	1.28	0.88	2.33	31.5	82.0
9	2012/9/15	曹妃甸	2.9	0.75	1.94	74.1	33.0
10	2012/9/15	大清河港	2.2	0.75	1.94	65.8	11.7
11	2010/10/15	黄骅	4.67	1.45	4.29	68.9	8.2
						平均相对 误差=53.4%	平均相对 误差=35.9%

反演值多在 1.0 mg/m^3 左右,数值较均匀;而在增加了更多样本数据后,优化后模型反演值更加接近实测值,平均相对误差由优化前的 53.4% 提高到了 35.9%,除去 2 号和 8 号采样点,平均相对误差更是达到了 25.4%。分析原因,由于 2 号点和 8 号点当天的 MODIS 1B 数据存在薄云,大气校正结果不太理想,导致反演误差较大。

图 3 为叶绿素 *a* 浓度反演值与实测值相关分析结果。反演值与建模实测数据和验证实测数据的相关系数分别为 0.733 和 0.817 (见图 3),二者离散程度类似,当叶绿素 *a* 浓度大于 4 mg/m^3 时,模型反演值偏低,这可能与叶绿素 *a* 浓度的高数值样本数据偏少有关,但总体来说,修正后模型的反演精度有了进一步提高,更加适用于河北海域的叶绿素 *a* 浓度遥感监测。

为了验证模型对于河北海域不同时间和不同区域应用的稳定性,分别选取 2014 年 5 月 8 日河北沧州海域和 2015 年 6 月 3 日河北秦皇岛海域两期实测数据进行模型稳定性检验,结果见表 2 和表 3。经检验,优化后模型平均相对误差分别由优化前模型的 64.5% 和 78.5% 提高到了 31.4% 和 33.4%,这表明,该模型经过进一步改进,反演精度具有较高的稳定性,满足业务化要求。

3.4 叶绿素 *a* 浓度遥感反演

利用优化后反演模型和 MODIS 数据,对 2015 年 5—7 月秦皇岛海域微微藻褐潮暴发前后的叶绿素 *a* 浓度进行遥感动态监测。如图 4 所示,2015 年 5 月上旬,秦皇岛近岸海域 Chl *a* 数值开始升高;5 月中下旬,在北戴河和西浴场附近海域出现 Chl *a* 高

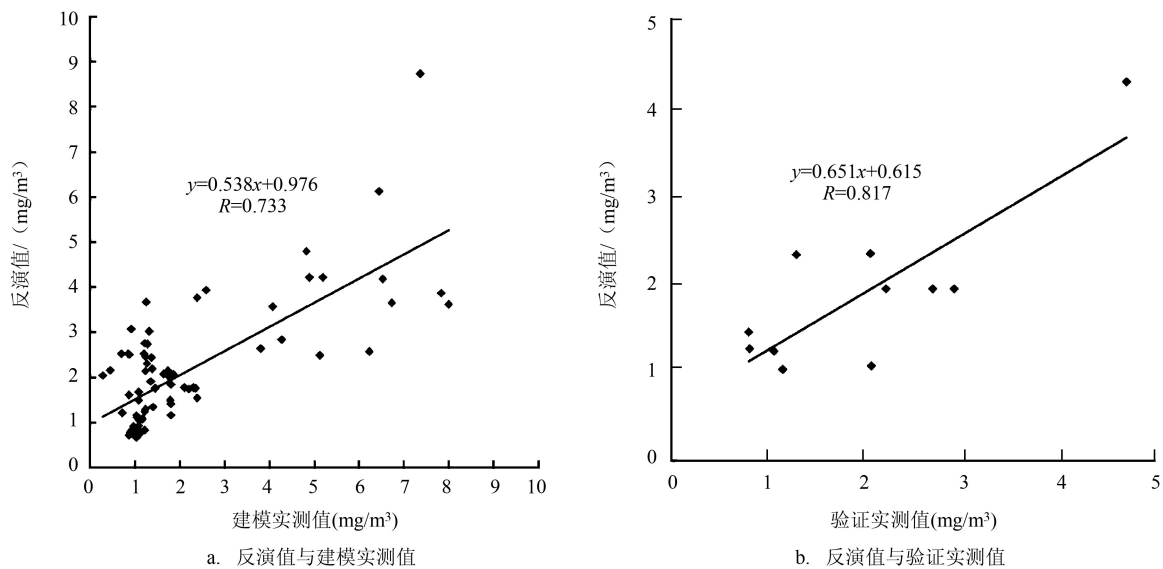


图 3 叶绿素 *a* 浓度反演值与实测值相关分析结果

表 2 叶绿素 *a* 浓度反演相对误差比较 (2014 年 5 月 8 日)

样点号	采样海域	Chl <i>a</i> / (mg/m^3)			相对误差/%	
		实测值	优化前模型反演值	优化后模型反演值	优化前模型	优化后模型
1	黄骅	4.37	1.29	3.71	70.4	15.0
2	黄骅	4.39	1.33	3.86	69.7	12.1
3	黄骅	3.99	0.92	2.46	77.0	38.5
4	黄骅	2.09	1.10	3.04	47.5	45.7
5	黄骅	4.70	1.32	3.82	71.9	18.7
6	黄骅	2.15	1.24	3.55	42.2	64.9
7	黄骅	4.18	1.13	3.15	73.0	24.6
					平均相对误差=64.5%	平均相对误差=31.4%

表3 叶绿素a浓度反演相对误差比较(2015年6月3日)

样点号	采样海域	Chl a/ (mg/m ³)			相对误差/%	
		实测值	优化前模型反演值	优化后模型反演值	优化前模型	优化后模型
1	秦皇岛	17.9	2.10	6.80	88.3	6.2
2	秦皇岛	5.49	1.70	5.30	69.0	3.5
3	秦皇岛	4.08	1.60	4.90	60.8	20.1
4	秦皇岛	4.35	1.60	4.80	63.2	10.3
5	秦皇岛	8.18	1.70	5.20	79.2	36.4
6	秦皇岛	20.8	2.10	6.70	89.9	67.8
7	秦皇岛	23.5	1.90	5.90	91.9	74.9
8	秦皇岛	10.9	1.80	5.80	83.5	46.8
9	秦皇岛	9.51	2	6.2	79.0	34.8
10	秦皇岛	12.8	2.5	8.5	80.5	33.6
					平均相对误差=78.5%	平均相对误差=33.4%

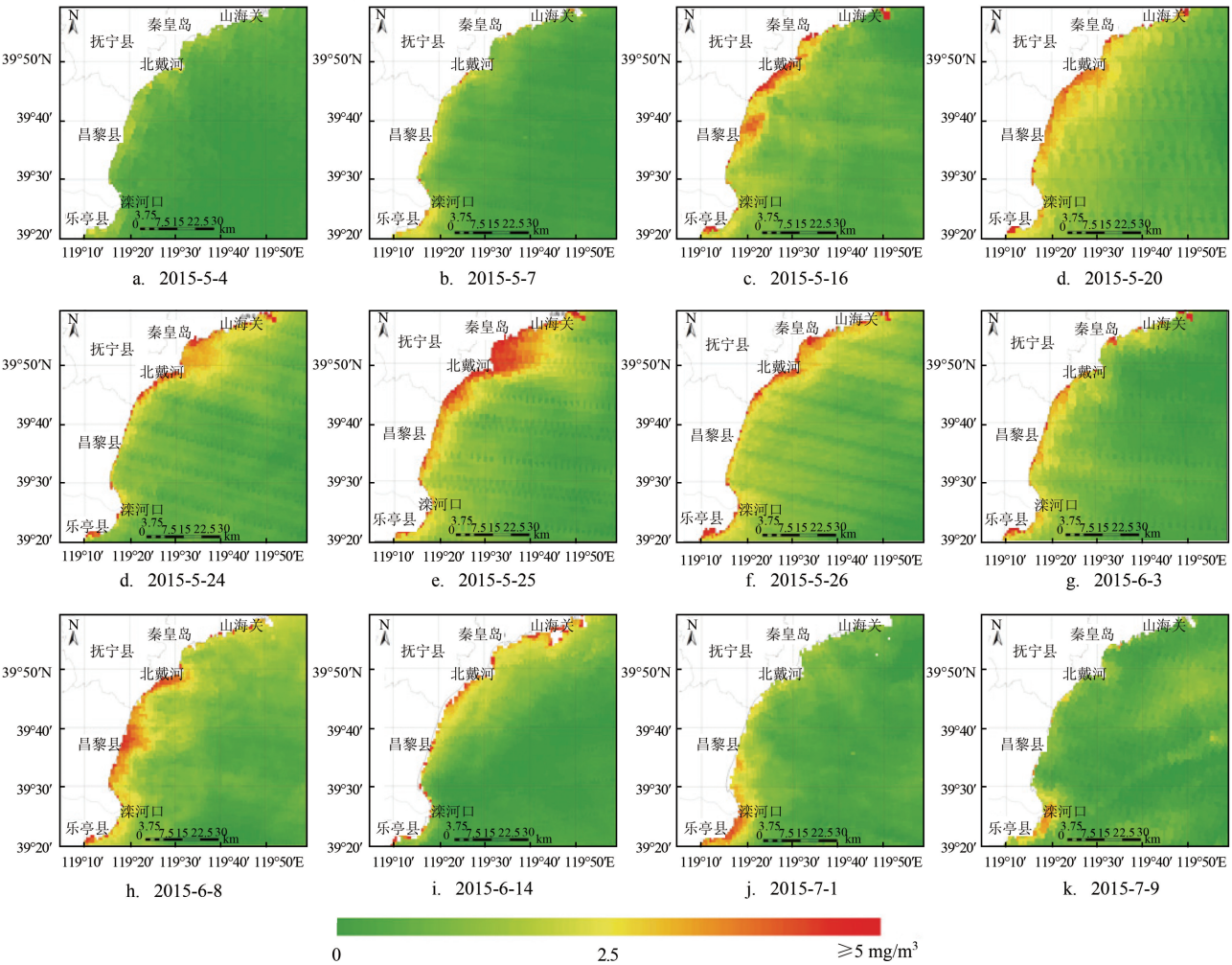


图4 秦皇岛海域叶绿素a浓度MODIS数据反演结果

值区($\text{Chl } a \geq 2.5 \text{ mg/m}^3$ 为高值区);6月上旬, $\text{Chl } a$ 高值区集中在北戴河和昌黎海域;6月中旬至7月, $\text{Chl } a$ 高值区逐渐减少。经秦皇岛海洋环境监测中心站实测,该时间段内的 $\text{Chl } a$ 高值区内的微微藻密度达到了 10^8 个/L 的量级,确定为褐潮^[9]。这表明,当微微藻褐潮发生时,海水中 $\text{Chl } a$ 的含量往往比正常海区高数倍乃至数十倍,通过监测叶绿素 *a* 浓度变化可以达到监测与预警赤潮的目的。

4 结论

(1) 本文针对二类水体水色要素遥感监测的难题,利用2009—2015年的实测数据,建立了MODIS数据的河北海域叶绿素 *a* 浓度反演模型,经验证,该模型平均相对误差在31.4%~35.9%之间,反演精度和稳定性均有了一定提高,满足业务化要求;

(2) 该模型适用于河北海域叶绿素 *a* 浓度业务化遥感监测,反演结果能够较好的表征河北海域叶绿素 *a* 浓度分布情况。利用该模型,可以获得长时间序列的河北海域叶绿素 *a* 浓度分布情况,可以用来分析海水水质变化规律,通过监测水色异常变化达到监测与预警赤潮的目的,具有较高的实际应用价值;

(3) 在今后的研究中,需要获得更多点位的同步数据用来修正和检验模型,并针对不同区域、不同季节,构建更加区域化、业务化和精细化的反演算法,为河北省海洋环境保护和海洋防灾减灾等提供丰富、高质量的遥感监测产品。

致谢: 本次研究叶绿素 *a* 浓度遥感反演得到了国家卫星海洋应用中心谢春华研究员的指导和帮助;所用野外实测数据得到了秦皇岛海洋环境监测中心站杨义明的指导和帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 段洪涛, 张柏, 宋开山, 等. 长春市南湖叶绿素 *a* 浓度高光谱估测模型研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 323-329.
- [2] 张永丰, 李欣阳, 张万磊, 等. 微微型藻华爆发海域硅酸盐与叶绿素 *a* 分布特征研究[J]. 生态科学, 2013, 32(4): 509-513.
- [3] 张勇, 张永丰, 张万磊, 等. 秦皇岛海域微微型藻华期间叶绿素 *a* 分级研究[J]. 生态科学, 2012, 31(4): 357-363.
- [4] 张水浸, 杨清良, 丘辉煌, 等. 赤潮及其防治对策[M]. 北京: 海洋出版社, 1994.
- [5] 王其茂, 马超飞, 唐军武, 等. EOS/MODIS 遥感资料探测海洋赤潮信息方法[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(1): 6-10.
- [6] 薛存金, 董庆. 多海洋参数赤潮MODIS综合监测[J]. 应用科学学报, 2010, 28(2): 147-151.
- [7] Gordon H R, Morel A Y. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review[M]. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [8] Carder K L, Chen F R, Cannizzaro J P, et al. Performance of the MODIS Semi-Analytical Ocean Color Algorithm for Chlorophyll-*a* [J]. Advances in Space Research, 2004, 33(7): 1152-1159.
- [9] 刘良明. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 206-207, 215-216.
- [10] Brivio P A, Giardino C, Zilioli E. Determination of Chlorophyll Concentration Changes in Lake Garda using an Image-Based Radiative Transfer Code for Landsat TM Images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(2-3): 487-502.
- [11] Thieme S, Kaufmann H. Lake Water Quality Monitoring Using Hyperspectral Airborne Data—A Semiempirical Multisensor and Multitemporal Approach for the Mecklenburg Lake District, Germany[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2-3): 228-237.
- [12] Carder K L, Chen F R, Lee Z P, et al. Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer Algorithms For Chlorophyll *a* and Absorption with Bio-Optical Domains Based on Nitrate-Depletion Temperatures[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C3): 5403-5421.
- [13] 赵文静, 曹文熙, 王桂芬, 等. 南海海域MODIS-Aqua叶绿素浓度产品的精度对比和区域性算法修正[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 3081-3090.
- [14] 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): 2057-2060.
- [15] 张彦喆, 郑小慎, 张波. 渤海海域叶绿素浓度的遥感反演研究[J]. 天津科技大学学报, 2010, 25(1): 51-53.
- [16] 祝令亚, 王世新, 周艺, 等. 应用MODIS监测太湖水体叶绿素 *a* 浓度的研究[J]. 遥感信息, 2006, (2): 25-28.
- [17] 徐雯佳, 杨斌, 田力, 等. 应用MODIS数据反演河北省海域叶绿素 *a* 浓度[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(4): 152-156.
- [18] 张春桂, 曾银东, 张星, 等. 海洋叶绿素 *a* 浓度反演及其在赤潮监测中的应用[J]. 应用气象学报, 2007, 18(6): 821-831.
- [19] 河北省海洋局. 2015年河北省海洋环境状况公报[R]. 石家庄: 河北省海洋局, 2016.

An operational chlorophyll-a retrieval algorithm by remote sensing in Hebei coastal sea

YANG Bin, TIAN Li, XU Wen-jia, XU Zhi-hui

(Center of Hebei Remote Sensing, Shijiazhuang 050021 China)

Abstract: An operational remote sensing retrieval model of chlorophyll-a concentration in Hebei coastal sea was established. A correlation analysis was calculated between the reflectance of MODIS 1B band 1 and actual-measured value of chlorophyll-a concentration, and an inversion model of remote sensing was established by regression. The modeled data was compared with the observed chlorophyll-a concentration in different time and regions to verify the accuracy and stability of the model. The results showed that the correlation coefficient between the modeled data and observed data was 0.73, and the average relative error was between 31.4% and 35.9%. The model can be effectively applied to retrieve chlorophyll-a concentration of surface water in Hebei coastal sea by using MODIS data. It has great realistic significance on red tide and eutrophication monitoring in Hebei coastal sea.

Key words: Hebei coastal sea; chlorophyll-a concentration; remote sensing; MODIS; quantitative retrieval