

浑浊 II 类水体叶绿素 a 浓度遥感反演(II): MERIS 遥感数据的应用

姜广甲^{1,2}, 周琳^{1,2}, 马荣华^{1*}, 段洪涛¹, 尚琳琳^{1,2}, 饶加旺^{1,2}, 赵晨露^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:基于 2004~2010 年太湖 4 次野外观测数据, 结合 MERIS 遥感资料, 评价两波段、三波段、改进三波段和四波段 4 个模型在浑浊 II 类水体叶绿素 a 浓度估算的精度, 并利用太湖(13 个有效样点)以及巢湖(21 个有效样点)进行模型验证。结果表明, 改进三波段模型反演叶绿素 a 浓度较高, 更适于浑浊 II 类水体叶绿素 a 浓度的遥感反演, 决定系数 R^2 在 0.34~0.94 之间变化, RMSE 变化范围为: 3.17~8.70 $\mu\text{g/L}$ 。分季节率定改进三波段模型参数, 并建立太湖水体春、夏、秋、冬季的模型输入参数查找表, 最终将改进三波段模型应用于 MERIS 遥感影像(8、9、10 波段), 获取太湖水体叶绿素 a 浓度的空间分布和年内、年际变化。

关键词:太湖; 叶绿素 a; 内陆水体; 比吸收系数

中图分类号:X87 **文献标识码:**A

Remote sensing retrieval for chlorophyll-a concentration in turbid case II waters (II): application on MERIS image

JIANG Guang-Jia¹, ZHOU Lin^{1,2}, MA Rong-Hua^{1*}, DUAN Hong-Tao¹, SHANG Lin-Lin^{1,2},
RAO Jia-Wang^{1,2}, ZHAO Chen-Lu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on four field cruises from 2004 to 2010 in Tai Lake, four models were investigated in the present study, including two-ratio-model (TRM), three-band-model (TBM), enhanced three-band-model (ETM) and four-band model (FBM) using *in situ* measurements and MERIS image data. The validation was performed using samples from Taihu ($n=13$) and Chaohu Lake ($n=21$). The results demonstrated that the ETM was the most appropriate to estimate chlorophyll a concentration in highly turbid waters with higher R^2 (0.34~0.94) and lower RMSE (3.17~8.70 $\mu\text{g/L}$). Furthermore, the lookup table of the modeling input parameters was determined for the four seasons in Taihu Lake. The resultant model was applied to MERIS images (8, 9 and 10 waveband) to detect the temporal and spatial variations of chlorophyll a concentration in Tai Lake.

Key words: Tai Lake, chlorophyll a, inland waters, specific absorption coefficient

PACS: 78.30.-j

引言

叶绿素 a 是反映湖泊富营养化水平的重要指

标^[1-3], 是富营养化湖泊水体水质监测的一个重要生理参数^[4-5]。遥感技术具有快速、便捷、同步、经济等优势, 已广泛应用于湖泊水体水质参数的定量监

收稿日期: 2012-03-19, 修回日期: 2012-10-26

Received date: 2012-03-19, revised date: 2012-10-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-YW-QN311, KZCX2-EW-QN308); 国家自然科学基金(40871168, 40801137)

Foundation items: Supported by Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (KZCX2-YW-QN311, KZCX2-EW-QN308), National Natural Science Foundation of China (40871168, 40801137)

作者简介(**Biography**): 姜广甲(1983-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事湖泊水色遥感研究. E-mail: gjjiang2011@gmail.com

* 通讯作者(**Corresponding author**): E-mail: mrhua2002@niglas.ac.cn

测^[6-7]. 卫星遥感传感器在水质参数遥感监测中取得了明显成效, 常用的传感器有: SeaWiFS、MODIS、MERIS、Landsat TM/ETM、SPOT HRV 等. 内陆水体光学特性复杂, 对传感器提出了更高的要求, 需要较高光谱分辨率、空间分辨率和时间分辨率^[8]. MERIS 是欧空局 2002 年 3 月 1 日发射的环境遥感卫星 (ENVISAT) 上搭载的一种传感器, 主要用于海洋海岸带的水色监测. 其波谱范围是 412 ~ 1050 nm, 星下点的空间分辨率为 300 m, 有 15 个波段, 波谱分辨率变化范围为 7.5 ~ 20 nm. 在空间分辨率、水色波段设置、辐射灵敏度等方面优势明显, 可用于内陆水体水质状况的遥感监测, 是目前最有优势的水色传感器之一^[9-10].

基于遥感技术估算水体中叶绿素 a 浓度的数据源有实测光谱数据和卫星遥感资料两种^[5, 11]. 目前, 针对不同的湖泊水体, 野外测试获取了大量的实测光谱, 利用实测光谱数据建立经验模型反演水体中叶绿素 a 浓度的研究相对成熟^[7], 但经验模型缺乏物理依据, 鲁棒性较差^[12-13], 而基于水体表观光学特性和固有光学特性的半分析方法是当前研究的热点^[5]. 例如, 周琳等^[14] (2011) 利用太湖实测光谱数据构建叶绿素 a 浓度反演的半分析模型, 发现三波段模型 (Three-Band Model, TBM) 和改进方法即四波段模型 (Four-Band Model, FBM) 和改进三波段模型 (Enhanced Three-Band Model, ETM) 适于高浑浊水体叶绿素 a 浓度的遥感估算, 并在巢湖水体中得到了验证.

以太湖实测水体固有光学量和表观光学量为数据基础, 利用半分析模型估算太湖水体中的叶绿素 a 浓度, 探讨分析模型的适用性, 并将模型应用于 MERIS 影像, 以获取太湖水体叶绿素 a 浓度的时空分布状况. 结合 MERIS 遥感影像波段设置, 构建适于太湖水体不同季节的最优模型参数查找表, 为太湖水体叶绿素 a 浓度的遥感监测业务化运行提供了技术支撑以及为内陆水体的卫星遥感监测奠定方法基础.

1 数据与方法

1.1 实测数据获取与处理

分别于 2004 年 10 月 18 日 ~ 29 日、2007 年 6 月 10 日 ~ 18 日、2008 年 10 月 6 日 ~ 17 日和 2010 年 4 月 23 日 ~ 5 月 12 日对太湖水体进行 4 次采样, 共获得 244 个有效样点 (图 1). 测量期间天气晴朗, 风速小于 3 m/s. 现场测量遥感反射比、后向散射系

数、水深、水温、风速和风向等, 实验室内测定水样的叶绿素 a 浓度 (CHL), 数据描述与参数测量方法均与文献^[14]保持一致. 此外, 还使用了太湖湖泊生态系统国家野外观测研究站提供的 2008 年 4 月 24 日的 12 个样点的水质分析结果.

浮游植物色素比吸收系数 ($a_{ph}^*(\lambda)$) 的计算公式为: $a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda) / CHL (m^{-1} / \mu g/L)$. 利用不同季节的实测数据, 通过计算同一季节浮游植物色素比吸收系数的所有样点均值得到不同季节的 $a_{ph}^*(\lambda)$, 用于太湖水体叶绿素 a 浓度遥感反演模型的构建.

测定水体遥感反射率时, 所用光谱仪为美国 ASD 公司生产的 FieldSpec Pro Dual VNIR 野外双通道光谱仪, 可在 350 ~ 1050 nm 波段范围内连续测量, 测量方法采用水面之上测量法^[15], 同时测定水体、灰板以及天空光光谱, 通过计算得到水体遥感反射率. 根据 MERIS 遥感影像的波段响应, 将实测光谱重采样, 即得模拟的 MERIS 数据. 重采样规则见式 (1)^[16] 所示.

$$R_i = \sum_{\lambda_{wi}}^{\lambda_{hi}} \frac{L_{wn}(\lambda)}{F_0(\lambda)} \varphi_i(\lambda) / \sum_{\lambda_{wi}}^{\lambda_{hi}} \varphi_i(\lambda) \quad , \quad (1)$$

其中, R_i 代表波段 i 的遥感反射率; λ_{wi} 是波段 i 的起始波长, λ_{hi} 是波段 i 的终止波长; $L_{wn}(\lambda)$ 为波长 λ 处的归一化离水辐亮度; $F_0(\lambda)$ 是日地平均距离处大气层外太阳辐照度; $\varphi_i(\lambda)$ 为波段 i 在波长 λ 处的光谱响应函数.

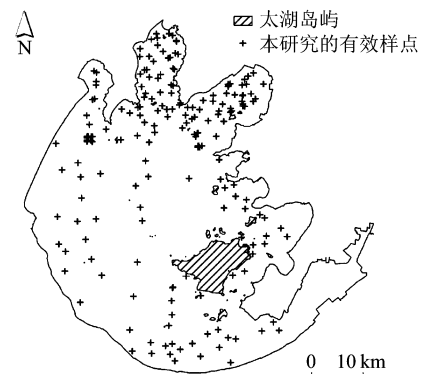


图 1 太湖有效样点分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling points in Tai Lake

1.2 遥感数据处理

选取 2004 ~ 2009 年天气状况较好的 MERIS L1B 全分辨率数据用作太湖水体叶绿素 a 浓度反演的影像资料. 该数据集共有 6 景 (过境日期: 2004 年

11月8日,2007年11月11日,2008年4月24日,2008年8月7日,2008年10月16日和2008年12月6日),其中2008年4月24日和2008年10月16日的两期MERIS影像与实测数据同步,用于模型应用及评价. MERIS影像经过几何校正、云检测等预处理后,经过(Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum,6S)大气校正得到水体遥感反射率数据,用以构建太湖水体叶绿素a浓度的遥感估算模型.

1.3 模型校准

周琳等^[14](2011)利用太湖水体的实测光谱数据,分别建立了两波段(TRM)、三波段(TBM)、改进三波段(ETM)和四波段(FBM)模型估算叶绿素a浓度,如式(2)~式(5)所示,假设条件与限制条件请参照文献[14].

$$\text{TRM: CHL} \propto \frac{\alpha_w(\lambda_2)}{\alpha_{ph}^*(\lambda_1)} \times \frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)} + \frac{\alpha_w(\lambda_1)}{\alpha_{ph}^*(\lambda_1)}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{TBM: CHL} \propto & \frac{\alpha_w(\lambda_3)}{\alpha_{ph}^*(\lambda_1)} \times [R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] \\ & \times R_{rs}(\lambda_3) + \frac{\alpha_w(\lambda_2) - \alpha_w(\lambda_1)}{\alpha_{ph}^*(\lambda_1)}, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ETM: CHL} \propto & \frac{\alpha_w(\lambda_3) - \alpha_w(\lambda_2)}{\alpha_{ph}^*(\lambda_1)} \times [R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - \\ & R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] / [R_{rs}^{-1}(\lambda_3) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] \\ & \times R_{rs}(\lambda_3) + \frac{\alpha_w(\lambda_2) - \alpha_w(\lambda_1)}{\alpha_{ph}^*(\lambda_1)}, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FBM: CHL} \propto & \frac{\alpha_w(\lambda_4) - \alpha_w(\lambda_3)}{\alpha_{ph}^*(\lambda_1)} \times [R_{rs}^{-1}(\lambda_1) \\ & - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] / [R_{rs}^{-1}(\lambda_4) - R_{rs}^{-1}(\lambda_3)] \\ & + \frac{\alpha_w(\lambda_2) - \alpha_w(\lambda_1)}{\alpha_{ph}^*(\lambda_1)}. \quad (5) \end{aligned}$$

以模拟MERIS数据和MERIS遥感影像为基础,利用决定系数(determination coefficient, R^2)、均方根误差(Root Mean Square Error—RMSE)和总体相对误差(Relative Error—RE)评判4种模型的优劣,如式(6)和式(7)所示,

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (d_m - d_p)^2}{n}}, \quad (6)$$

$$\text{RE} = \frac{1}{n} \sum \frac{|d_m - d_p|}{d_m} \times 100\% \quad (7)$$

其中, d_m 和 d_p 分别表示叶绿素a浓度的实测值和模拟值, n 表示样点数.

模型中涉及的数据统计、线性拟合等数据处理均在MATLAB(R2010a)软件中完成.

1.4 模型参数优化

4种模型均可用线性关系来描述,即: $\text{CHL} = \alpha f(R_{rs}) + \beta$,可通过非线性拟合得到回归系数 α 和 β .

而对于某一模型,如TRM,分别假设:

$$\varepsilon = a_w(\lambda_2) / a_{ph}^*(\lambda_1) \quad (8)$$

$$\eta = a_w(\lambda_1) / a_{ph}^*(\lambda_1) \quad (9)$$

在TRM的假设条件中,斜率 ε 、截距 η 与第一波段的浮游植物的比吸收系数 a_{ph}^* 以及三个波段的纯水的吸收系数 a_w 有关^[14],其中, a_{ph}^* 为不同期采样数据计算得到的均值.因此可建立实测得到的斜率和截距的模拟值(ε, η)与拟合得到的(α, β)进行参数优化.

1.5 模型检验

利用2011年1月22~23日太湖采样点数据(13个有效样点数据)以及2009年10月15~16日在巢湖采集的21个有效样点数据对最优模型进行验证.

2 结果

2.1 模型校准

根据采样时间先后顺序,依次把太湖2004、2007、2008和2010年数据标记为A、B、C、D,共计4组,另外E组是A、B、C、D这4组所有数据的总和.基于模拟MERIS数据,4个估算模型在不同组数据中的校准结果表明(表1),ETM模型在各组数据中的应用效果最佳, R^2 值相对较高(0.34~0.94之间变化),而RMSE和RE相对较小;特别当ETM模型应用于E组数据(所有样点数据)时, R^2 为0.72,均大于其它模型精度.在实测光谱数据中应用效果最好的四波段模型^[14],但在模拟MERIS数据中应用效果最差, R^2 最大值仅为0.2.就不同组数据而言,A组数据(2004)4个模型的反演精度不高, R^2 最大值小于0.50,其中两波段模型估算精度最高;B组数据(2007)反演精度均在0.85左右(FBM模型除外),反演精度较高;C组(2008)4个模型中ETM反演精度最高($R^2 = 0.92$),其次是TBM模型,再者TRM,FBM精度最差;D组数据在各组数据中估算效果最好,决定系数最大值达0.94;利用4种模型估算太湖水体所有样点的叶绿素a浓度(E组),发现只有ETM模型估算精度较高,其余各模型反演精度较差.此外,4个模型的最优波段组合具有一定的规律,第一波段主要集中在MERIS数据的波段8,第二波段主要集中在波段9,而第三波段主要集中在波段10.因此,本文选择的最优模型为改进三波段

模型,所对应的最优波段为 MERIS 遥感数据的第 8、9 和 10 波段.

表 1 4 个模型在模拟 MERIS 数据中的应用

Table 1 Application of four models on the simulated MERIS data

模型	组别	MERIS 波段				估算模型 $y = \alpha x + \beta$		R^2	RMSE/ ($\mu\text{g/L}$)	RE/ (%)
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	α	β			
TRM	A	7	9	-	-	39.43	-23.64	0.47	2.85	18.65
	B	8	9	-	-	60.82	-45.87	0.85	5.12	7.40
	C	8	12	-	-	132.90	-31.19	0.75	10.87	54.85
	D	8	9	-	-	28.21	-19.33	0.93	2.94	53.34
	E	7	12	-	-	67.18	-10.95	0.40	12.81	108.12
TBM	A	7	9	10	-	109.19	15.87	0.43	2.94	20.58
	B	8	9	12	-	145.36	13.69	0.85	5.09	27.82
	C	8	9	10	-	258.78	24.97	0.87	7.92	26.50
	D	8	9	10	-	84.31	8.93	0.94	2.68	69.80
	E	8	9	12	-	139.01	16.10	0.59	10.60	93.13
ETM	A	7	9	10	-	54.76	15.38	0.34	3.17	22.20
	B	8	9	12	-	81.91	12.95	0.84	5.27	27.96
	C	8	9	10	-	126.95	23.33	0.92	6.30	29.17
	D	8	9	10	-	55.55	9.13	0.94	2.57	83.24
	E	8	9	12	-	86.67	15.64	0.72	8.70	96.23
FBM	A	7	9	12	10	0.10	13.05	0.19	3.52	34.32
	B	7	9	10	12	0.17	11.63	0.04	12.98	146.55
	C	8	9	12	10	0.02	5.00	-	16.45	52.75
	D	7	9	10	12	0.15	8.23	0.20	9.65	260.83
	E	7	9	12	10	-0.05	16.75	0.00	18.41	255.81

2.2 模型参数优化

针对最优模型 ETM,分别假设:

$$\varepsilon = [a_w(\lambda_3) - a_w(\lambda_2)] / a_{ph}^*(\lambda_1) \quad (10)$$

$$\eta = [a_w(\lambda_2) - a_w(\lambda_1)] / a_{ph}^*(\lambda_1) \quad (11)$$

根据表 1 计算得到各组别 ETM 的 α 和 β ,分别建立 α 与 ε 、 β 与 η 之间的线性关系. 结果表明, α 与 ε 、 β 与 η 有较好的相关关系,满足模型假设条件. 通过模型的参数优化可利用不同季节的浮游植物色素比吸收系数($a_{ph}^*(\lambda)$)和不同波长处的纯水吸收系数($a_w(\lambda)$)估算出不同季节的模型输入参数,以提高叶绿素 a 浓度遥感监测的业务化运行能力.

$$\alpha = 0.47 \times \varepsilon + 34.42 \quad (R^2 = 0.82) \quad (12)$$

$$\beta = 0.44 \times \eta + 6.11 \quad (R^2 = 0.99) \quad (13)$$

2.3 模型检验

根据水体的固有光学量计算得到的 ε 和 η 代入式(12)和式(13)中,得到模型的输入参数 α 和 β ,因此:

对于太湖验证点来说,

$$\text{CHL} = 63.72 \times (1/R_{rs}(\text{band8}) - 1/R_{rs}(\text{band9})) / (1/R_{rs}(\text{band10}) - 1/R_{rs}(\text{band9})) + 11.80 \quad (14)$$

对于巢湖验证点来说,

$$\text{CHL} = 78.37 \times (1/R_{rs}(\text{band8}) - 1/R_{rs}(\text{band9})) / (1/R_{rs}(\text{band10}) - 1/R_{rs}(\text{band9})) + 14.64 \quad (15)$$

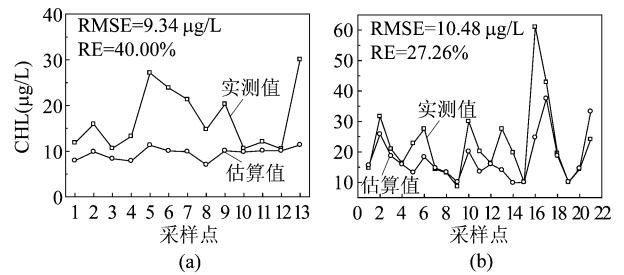


图 2 模拟 MERIS 数据的叶绿素 a 浓度估算模型验证 (a) 太湖, (b) 巢湖

Fig. 2 Validation of chlorophyll a estimation using simulated MERIS data (a) Tai Lake, and (b) Chao Lake

图 2 给出太湖和巢湖水域 ETM 估算叶绿素 a 的验证结果,发现太湖叶绿素 a 浓度的预测值与实测值变化趋势相似,但预测值低于现场测量值,其 $\text{RMSE} = 9.34 \mu\text{g/L}$, $\text{RE} = 40.00\%$; 将 ETM 模型应用于巢湖时,实测值与预测值变化趋势基本一致,并且两者相差不大,其 $\text{RMSE} = 10.48 \mu\text{g/L}$, $\text{RE} = 27.26\%$. 总体来说,ETM 模型应用效果较好,适合内陆湖泊水体叶绿素 a 浓度的估算.

由于 2008 年 4 月份无浮游植物色素比吸收系数数据,假定 $a_{ph}^*(\lambda)$ 值在同一波长、同一季节的变化较小,因此可利用 2010 年 4 月份的 $a_{ph}^*(\lambda)$ 代替. 同时,2008 年 10 月的两次实验数据,计算得到 2 期数据的 ETM 模型的输入参数,并分别应用于 2008 年 4 月 24 日和 2008 年 10 月 16 日的 MERIS 遥感影像,以实现太湖水体叶绿素 a 浓度的空间反演. 模型表达为:

2008 年 04 月 24 日:

$$\text{CHL} = 44.186 \times (1/R_{rs}(\text{band8}) - 1/R_{rs}(\text{band9})) / (1/R_{rs}(\text{band10}) - 1/R_{rs}(\text{band9})) + 8.006 \quad (16)$$

2008 年 10 月 16 日:

$$\text{CHL} = 87.154 \times (1/R_{rs}(\text{band8}) - 1/R_{rs}(\text{band9})) / (1/R_{rs}(\text{band10}) - 1/R_{rs}(\text{band9})) + 16.347 \quad (17)$$

太湖叶绿素 a 浓度的实测值与 MERIS 影像的估算值对比发现(图 3),图 3(a)中,除个别点之外,叶绿素 a 浓度估算结果与实测值浓度较为接近 ($\text{RMSE} = 7.72 \mu\text{g/L}$),部分点在一定程度上高估了叶绿素 a 浓度,第 7 点的叶绿素 a 估算值出现负值,可能是该点的叶绿素浓度较低,水体其他组分掩盖了叶绿素 a 的信息;图 3(b)中,叶绿素 a 浓度的预测值与实测值变化趋势一致, RMSE 仅为 $4.94 \mu\text{g/L}$.

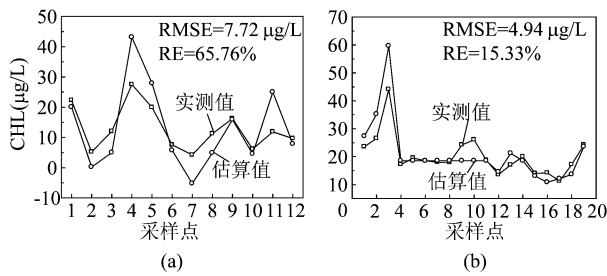


图3 太湖 MERIS 遥感数据的叶绿素 a 浓度估算模型验证 (a)2008 年 04 月 24 日, (b) 2008 年 10 月 16 日
Fig. 3 Validation of chlorophyll a estimation using MERIS image in Tai Lake (a) April 24, 2008, and (b) October 16, 2008

L, 部分样点叶绿素 a 浓度出现高估现象. 其中, 4 ~ 11 号点的叶绿素 a 浓度估算值基本不变, 可能有两个原因引起, 一是由于大气校正过程中出现误差或者是该处有薄云覆盖, 影响了模型的估算精度^[17]; 二是从实测叶绿素 a 浓度之间相差不大, 影响光谱特征的光学物质含量相似, 导致水体光谱具有相似特征^[18]. 另外, 2008 年 4 月份水体固有光学参数选取的是经验值, 还需要大量的数据验证, 导致叶绿素 a 浓度估测值与实测值有一定的差距. 总的来说, 太湖水体叶绿素 a 浓度的估算值与实测值变化趋势一致, 说明可直接利用经验参数和实测水体的固有光学量, 结合 MERIS 遥感影像数据, 获取水域叶绿素 a 浓度的时空分布状况(图 4).

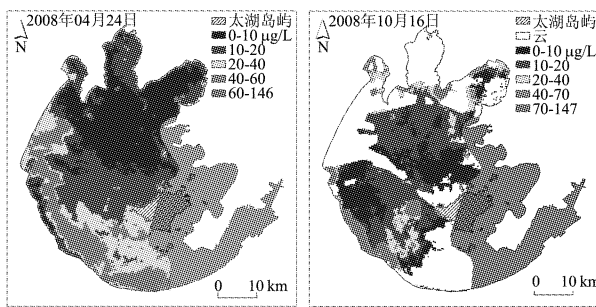


图4 基于 MERIS 遥感影像的 2008 年 04 月 24 日和 10 月 16 日的叶绿素 a 浓度空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of chlorophyll a concentration using MERIS images on 24 April and 16 October 2008

2.4 模型应用

利用多期实验数据, 建立不同波长处叶绿素 a 比吸收系数 ($a_{ph}^*(\lambda)$) 和纯水吸收系数 ($a_w(\lambda)$) 的查找表, 利用式 (12) 和式 (13) 即可得到 ETM 模型的输入参数, 结合 MERIS 影像数据, 探寻浑浊 II 类水体的叶绿素 a 浓度时空变化规律.

表 2 给出计算得到的太湖不同季节的最优模型 ETM 的参数值斜率 α 和截距 β . 基于 4 景 MERIS 遥感影像, 利用表 2 提供的模型输入参数, 估算太湖水体叶绿素 a 浓度, 以评价分析太湖水体叶绿素 a 浓度的时空分布状况见图 (5).

表 2 应用到 MERIS 数据的 ETM 模型参数值查找表
Table 2 Lookup table of parameters of the ETM model applying to the MERIS data

季节	斜率 α	截距 β
太湖 - 春	44.186	8.006
太湖 - 夏	62.670	11.594
太湖 - 秋	87.154	16.347
太湖 - 冬	63.717	11.797

太湖水体叶绿素 a 浓度时空变化显著. 以 2008 年为例, 4 月份太湖西南部沿岸有大面积蓝藻水华, 高叶绿素 a 浓度主要分布在太湖南部以及蓝藻水华区域的周围(图 4); 而 8 月份叶绿素 a 浓度高值主要分布在竺山湾、梅梁湾和贡湖湾 3 个区域, 南部也有部分分布(图 5); 10 月份叶绿素 a 浓度大部分在 40 $\mu\text{g/L}$ 以下(图 4); 12 月份进入冬季, 叶绿素 a 浓度相应降低, 除竺山湾、梅梁湾和贡湖湾 3 个水域有较高浓度叶绿素 a 浓度分布外, 其他水域均小于 10 $\mu\text{g/L}$.

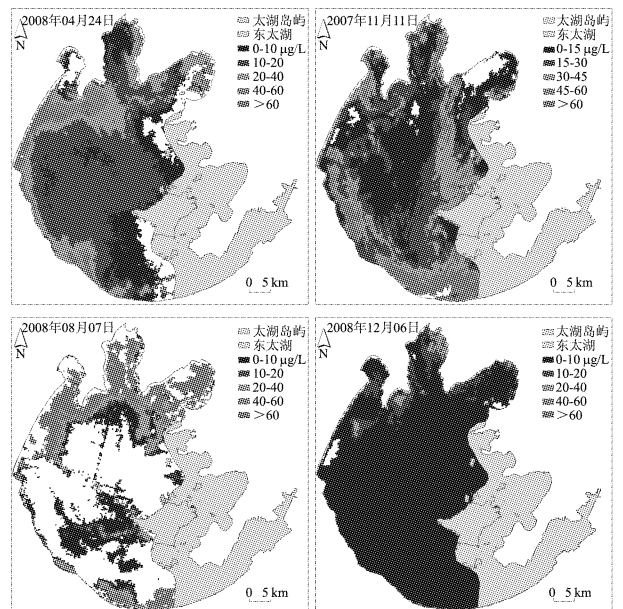


图5 太湖水体叶绿素 a 浓度的时空分布
Fig. 5 Temporal and spatial distribution of chlorophyll a concentration in Tai Lake

3 讨论

浑浊 II 类水体光学特性复杂, 其光谱特征受浮

游植物、悬浮泥沙和溶解有机物质的共同影响^[19], 针对 I 类水体的遥感算法已不适用于高度浑浊的 II 类水体^[5, 20]. 通过野外测试和室内实验, 获取了大量的水体光谱数据和固有光学参数, 有利于 II 类水体水色参数的高精度反演. 生物光学模型将水体表观光学量和固有光学量有机联系起来^[21], 是 II 类水体水色因子遥感估算的方法基础.

浮游植物色素吸收具有明显的光谱特征, 在 660 ~ 685 nm 处有强烈的吸收峰, 是叶绿素 a 浓度遥感反演的关键波段. 叶绿素 a 浓度的变化会影响浮游植物色素吸收峰的数值和位置^[14], 即随叶绿素 a 浓度增加, 峰值逐渐增大, 并且向长波方向移动, 出现明显的“红移”现象. 4 个模型中, 通过设定模型的假设条件与限制条件来简化生物光学模型, 但模型中使用的波段均在 660 ~ 780 nm 范围内, 同时第一波段均为浮游植物色素吸收最为敏感的波段, 因此, 有效波段的选择是高精度估算叶绿素 a 浓度的关键.

受传感器波段设置的限制, 利用实测光谱数据和遥感影像数据评价 4 个模型时将产生不同的最优模型. 周琳等^[14] (2011) 基于实测光谱数据评价了 4 种模型在湖泊水体中的适用性, 认为四波段模型(FBM)为最优模型. 而利用模拟的 MERIS 数据得到的最优模型是改进三波段模型(ETM), 而 FBM 应用效果最差. 利用不同数据获取的最优模型的差异主要原因在于波段范围的选择方面. 在最初模型的推导过程中存在一些假设条件, 为得到较理想的叶绿素 a 反演精度, 在模型波段最佳位置选择时往往会移动自变量位置来弥补这些近似条件所带来的误差. 而 MERIS 数据的波段范围固定, 不能通过移动波段位置来减少误差, 而 MERIS 的第 11 波段是氧气吸收波段不能参与运算, 第三、四波段的选择范围只有第 10 和第 12 波段, 从而影响模型精度. 最优模型 ETM 采用的波段是 MERIS 的 8、9、10 波段, 既消除了高浑浊水体中无机颗粒物在近红外波段的吸收影响, 同时又避开了第 11 波段的影响, 因此利用 MERIS 遥感数据获取的最优模型是 ETM 模型. 实测光谱数据得到模型平均波长与 MERIS 波段设置之间有较大差距(表 3), 3 个模型中 ETM 模型的波段限制条件更接近于 MERIS 的波段设置, 而适用于实测光谱数据的最优模型 FBM 与 MERIS 波段设置之间差距最大. MERIS 的波段设置导致了 FBM 的应用效果较差, 而优化模型 ETM 得到的波段是 MERIS 的 8、

9、10 波段, 实测数据和模拟 MERIS 遥感数据得到的波段范围近似相等. 经过验证, 模拟 MERIS 数据得到的最优模型 ETM 应用于 MERIS 影像精度高, 适于 II 类水体叶绿素 a 浓度的遥感反演.

表 3 实测光谱数据的平均波长与 MERIS 波段设置的比较

Table 3 Comparison of average wavelength of field spectra and MERIS wavebands

模型	波段	实测光谱数据 平均波长/nm	MERIS 波段	对应波段 范围/nm	对应中心 波长/nm
TBM	λ_1	679	8	677.5 - 685	681.25
	λ_2	695	9	703.75 - 713.75	708.75
	λ_3	749	10	750 - 757.5	753.75
ETM	λ_1	677	8	677.5 - 685	681.25
	λ_2	700	9	703.75 - 713.75	708.75
	λ_3	761	10	750 - 757.5	753.75
FBM	λ_1	676	8	677.5 - 685	681.25
	λ_2	696	9	703.75 - 713.75	708.75
	λ_3	732	10	750 - 757.5	753.75
	λ_4	760	12	771.25 - 786.25	778.75

4 结论

利用实测光谱数据得到的最优模型(四波段模型, FBM)不适合 MERIS 的波段设置. 基于模拟 MERIS 遥感数据和实测水体固有光学参量, 重新评价了两波段模型两波段(TRM)、三波段(TBM)、改进三波段(ETM)和四波段(FBM)模型对太湖水体叶绿素 a 浓度的估算精度, 发现 ETM 模型适于 II 类水体叶绿素 a 含量的估算, 是基于 MERIS 影像数据反演叶绿素 a 浓度的最优模型, 相应的 MERIS 的最佳波段为第 8、9 和 10 波段.

基于大量的实测水体固有光学参量数据, 计算得到不同季节太湖水域不同波长处浮游植物色素比吸收系数的经验值, 建立了 ETM 模型的输入参数查找表, 并利用太湖和巢湖实测数据进行验证. ETM 模型估算太湖水体叶绿素 a 浓度的精度较高, 有利于在复杂光学条件的水体中估算叶绿素 a 浓度. 将 ETM 模型应用于 MERIS 遥感影像, 从而获取了太湖水体叶绿素 a 含量的时空分布状况, 为内陆浑浊水体叶绿素 a 浓度遥感监测的业务化运行提供了方法基础和有力例证.

致谢

实验过程中得到了王泽人、王长凤、齐琳、苑惠丽、林珊、项文华等人的帮助, 在论文的书写和修改中得到了苏文同学的帮助, 在此一并感谢!

REFERENCES

- [1] Ritchie J C, Cooper C M, Schiebe F R. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **33**(2): 137 - 148.
- [2] Zhang Y, Koponen S, Pulliainen J, et al. Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the Gulf of Finland using combined optical data and microwave data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**(2-3): 327 - 336.
- [3] YIN Qiu, SHU Xiao-Zhou, XU Zhao-An, et al. Analysis on the ultra-spectral characteristics of water environmental parameters about lake [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (尹球, 疏小舟, 徐兆安, 等. 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(6): 427 - 430, 435.
- [4] Kutser T. Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(6): 2179 - 2189.
- [5] MA Rong-Hua, DUAN Hong-Tao, TANG Jun-Wu, et al. Remote Sensing of Lake Water Environmental [M]. Beijing: Science Press (马荣华, 段洪涛, 唐军武, 等. 湖泊水环境遥感, 北京: 科学出版社), 2010: 2 - 6.
- [6] Giardino C, Pepe M, Brivio P A, et al. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **268**(1-3): 19 - 29.
- [7] PAN De-Lu, MA Rong-Hua. Several key problems of lake water quality remote sensing [J]. *Journal of Lake Sciences* (潘德炉, 马荣华. 湖泊水质遥感的几个关键问题. *湖泊科学*), 2008, **20**(2): 139 - 144.
- [8] MA Rong-Hua, TANG Jun-Wu, DUAN Hong-Tao, et al. Progress in lake water color remote sensing [J]. *Journal of Lake Sciences* (马荣华, 唐军武, 段洪涛, 等. 湖泊水色遥感研究进展. *湖泊科学*), 2009, **21**(2): 143 - 158.
- [9] Bezy J L, Delwart S, Rast M. MERIS - a new generation of ocean-colour sensor onboard Envisat [J]. *ESA Bull-Eur. Space*, 2000, **103**: 48 - 56.
- [10] GAO Zhong-Ling, WANG Xiao-Qin, CHEN Yun-Zhi. The characteristic and applications of MERIS [J]. *Ocean Technology* (高中灵, 汪小钦, 陈云芝. MERIS 遥感数据特性及应用. *海洋技术*), 2006, **25**(3): 61 - 65.
- [11] DUAN Hong-Tao, ZHANG Bai, LIU Dian-Wei, et al. Relationship between fluorescence peak spectral features and Chlorophyll-a in Lake Chagan [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 355 - 359.
- [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] XU Jing-Ping, ZHANG Bai, SONG Kai-Shan, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in lake Xinniao based on a semi-analytical model [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(3): 197 - 201.
- [14] ZHOU Lin, MA Rong-Hua, DUAN Hong-Tao, et al. Remote sensing retrieval for chlorophyll-a concentration in turbid case II waters (I): the optimal model [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (周琳, 马荣华, 段洪涛, 等. 浑浊 II 类水体叶绿素 a 浓度遥感反演 (I): 模型的选择. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(6): 531 - 536.
- [15] TANG Jun-Wu, TIAN Guo-Liang, WANG Xiao-Yong, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method [J]. *Journal of Remote Sensing* (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. *遥感学报*), 2004, **8**(1): 37 - 44.
- [16] YANG Gui-Jun, LIU Qin-Huo, HUANG Hua-Guo, et al. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1): 15 - 21.
- [17] YIN Qiu, GONG Cai-Lan, KUANG Ding-Bo, et al. Method of satellite remote sensing of lake water quality and its applications [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (尹球, 巩彩兰, 匡定波等. 湖泊水质卫星遥感方法及其应用. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(3): 198 - 202.
- [18] ZHOU Guan-Hua, LIU Qin-Huo, MA Rong-Hua, et al. Inversion of chlorophyll-a concentration in turbid water of Lake Taihu based on optimized multi-spectral combination [J]. *Journal of lake sciences* (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 a. *湖泊科学*), 2008, **20**(2): 153 - 159.
- [19] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color [J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(4): 709 - 722.
- [20] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [D]. *Doctorate Thesis Earth and Life Sciences, Amsterdam: Vrije University*. 1993: 10 - 13.
- [21] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationship between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. *Applied Optics*, 1975, **14**(2): 417 - 427.