

文章编号:1001-9014(2011)04-0531-06

浑浊 II 类水体叶绿素 a 浓度遥感反演(I): 模型的选择

周琳^{1,2}, 马荣华^{1*}, 段洪涛¹, 姜广甲^{1,2}, 尚琳琳^{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:受高浓度悬浮物的影响, 浑浊 II 类水体叶绿素 a 浓度高精度定量反演一直是研究难点之一. 利用 2004 年到 2010 年太湖 4 次实测光谱数据和水质参数, 分别建立了两波段、三波段、改进三波段及四波段的叶绿素 a 估算模型; 选择最优模型, 利用巢湖 2009 年的实测数据进行独立验证. 结果表明, 四波段模型最适合高浑浊水体, 线性相关性较好, 决定系数 R^2 在 0.57~0.95 之间, 反演精度较高, RMSE 在 2.39~6.74 $\mu\text{g/L}$ 之间.

关键词: 浑浊水体; 叶绿素 a; 半分析模型; 遥感

中图分类号: X87 文献标识码: A

Remote sensing retrieval for chlorophyll-a concentration in turbid case II waters(I): the optimal model

ZHOU Lin^{1,2}, MA Rong-Hua^{1*}, DUAN Hong-Tao¹, JIANG Guang-Jia^{1,2}, SHANG Lin-Lin^{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 School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There is a little trouble to retrieve chlorophyll-a concentration (Chl-a) through remotely-sensed imageries in turbid waters, which contains many suspended sediments largely affecting the signature of water-leaving radiance due to phytoplankton pigment. Based on the *in situ* measurements during the period of 2004~2010, the two-band, three-band, enhanced three-band and four-band models were, respectively, regionally parameterized for the application in Tai Lake. Then the four parameterized models were validated by the *in situ* data in Chao Lake, almost the same water environment as in Tai Lake. The strongest linear relationship between Chl-a and the four-band model (R^2 varying in the range of 0.57 and 0.95, RMSE in the range of 2.39 and 6.74 $\mu\text{g/L}$) shows that the four-band model is the best for both the Tai Lake and the Chao Lake.

Key words: turbid water; chlorophyll-a; semi-analytical model; remote sensing

PACS: 78.-30.-j

引言

人们对富营养化湖泊蓝藻水华危害的认识^[1]越来越深刻. 叶绿素是衡量湖泊富营养化的一个重要指标, 通常利用叶绿素浓度进行水体富营养化程度的监测评定^[2]. 大洋等 I 类水体光学特性的物质组成较为简单(主要是叶绿素及其衍生物), 叶绿素

的遥感反演模型较为稳定, 精度较高; 内陆湖泊等 II 类水体的物质组成较为复杂, 除受浮游植物色素影响外, 还受悬浮颗粒以及黄色物质等影响, 这些物质的存在使 II 类水体的光学特性远比 I 类水体复杂得多^[3]. 简单的两波段或两波段比值模型^[4](the Two-Band Ratio Model, TRM) 等不能满足 II 类水体叶绿素 a (Chl-a) 浓度反演的精度要求; 三波段模型^[5-7]

收稿日期: 2010-10-02, 修回日期: 2011-04-12

Received date: 2010-10-02, revised date: 2011-04-12

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); 国家水专项项目(2008ZX07101-006)

作者简介: 周琳(1985-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事湖泊水色遥感模型研究, E-mail: zhl_0535@163.com.

* 通讯作者: E-mail: mrhua2002@niglas.ac.cn.

(the Three Band Model, TBM) 综合考虑了水体的吸收和后向散射特性, 部分消除了黄色物质和非色素颗粒物的影响, 提高了反演精度, 但无法完全消除无机颗粒在近红外波段的影响, 因此 TBM 在较为浑浊的湖泊等 II 类水体中的应用受到一定的限制; 于是提出了四波段模型^[8] (the Four Band Model, FBM) 和改进三波段模型^[9] (Enhanced Three-Band Model, ETM). 以长江中下游蓝藻暴发频繁、水体较为浑浊的太湖和巢湖为试验研究区, 通过 2004 ~ 2010 年的多次现场实测数据, 试图给出 TRM、TBM、FBM 以及 ETM 等 4 个最常用模型的适用条件和判断标准, 为这些模型在 MERIS 和 MODIS 等卫星遥感影像中的应用提供理论支撑和技术依据.

1 数据与方法

1.1 实测数据

于 2004 年 10 月、2007 年 6 月、2008 年 10 月和 2010 年 4 月对太湖水体进行四次采样, 获得样点 387 个. 太湖存在大量的光学浅水区, 其底质对遥感反射比有一定的贡献和影响^[10], 部分样点的水面有蓝藻水华覆盖, 影响了水体的光谱测量, 采样水体难以反应叶绿素的真实浓度. 去掉这两类样点后, 剩余 244 个有效样点, 用于构建模型的区域化参数和模型比选; 2009 年 10 月在巢湖获得有效样点 21 个, 用于模型的验证与评价, 见图 1.

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, 同时采集水样, 放入冷藏箱保存, 带回实验室测量分析后获得叶绿素 a 浓度 (分光光度法^[11])、总悬浮物 (SPM) 浓度、无机悬浮物 (SPIM) 浓度、有机悬浮物 (SPOM) 浓度 (称量法) (见表 1) 以及浮游植物色素吸收 a_{ph} 、非藻类色素吸收 a_d (定量滤膜技术获取^[12])、有色溶解有机质 CDOM (Colored Dissolved Organic Matter) 吸收 a_g (分光光度计法测定^[13]). 水体光谱测量采用水面以上测量法^[14], 所用仪器为美国 ASD 公司生产的 Field-Spec Pro FR 便携式分光辐射光谱仪. 所有的光学仪器在使用前进行定标.

1.2 模型分析

TRM、TBM、ETM 以及 FBM 四种模型见表 2, 它们均有不同的假设与限制条件, 其中 FBM 的最为苛刻, TRM 的自由度最大, 四个模型均与固有光学量吸收系数和后向散射系数有关.

表 2 中, $R_{rs}(\lambda_i)$ 为第 i 波段的反射率值; $a_w(\lambda_i)$ 、 $a_{ph}(\lambda_i)$ 、 $a_d(\lambda_i)$ 和 $a_g(\lambda_i)$ 分别是第 i 波段的

表 1 太湖和巢湖有效样点的水质参数统计

Table 1 Statistics of water quality parameters in Tai Lake and Chao Lake

湖泊	太湖				巢湖
采样日期	2004 年 10 月	2007 年 06 月	2008 年 10 月	2010 年 04 月	2009 年 10 月
有效样本/N	45	35	85	79	21
叶绿素 a /($\mu\text{g/L}$)	最大值	22.54	55.24	148.30	46.98
	最小值	4.98	2.37	3.35	0.13
	均值	13.12	12.39	23.99	8.69
总悬浮物 /(mg/L)	最大值	169.47	107.00	94.80	162.73
	最小值	13.08	10.32	7.80	9.90
	均值	60.14	34.23	36.22	41.37

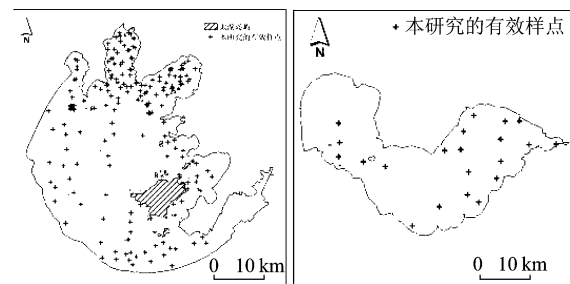


图 1 太湖和巢湖有效样点分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling points taken in Tai Lake and Chao Lake

纯水、浮游植物色素、非色素颗粒 (也称无机悬浮颗粒) 和 CDOM 的光谱吸收系数; $b_b(\lambda_i)$ 为第 i 波段的后向散射系数, 其中 $i=1, 2, 3, 4$.

在假设条件的限制下, TRM、TBM、ETM 和 FBM 仅涉及纯水和浮游植物的吸收系数, 参数的物理意义不够明确^[1]. 对 $a_{ph}(\lambda_1)$ 可进一步分解为

$$a_{ph}(\lambda_1) = a_{ph}^*(\lambda_1) \times \text{CHL} \quad (1)$$

式中, $a_{ph}(\lambda_1)$ 和 $a_{ph}^*(\lambda_1)$ 分别为叶绿素 a 在 λ_1 处的吸收系数和比吸收系数, CHL 为叶绿素 a 浓度. 于是上述 4 个模型可以分别转换为

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

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

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

表 2 TRM、TBM、ETM 和 FBM 的具体限制条件^[4,9]
Table 2 Restrictive conditions of TRM、TBM、ETM and FBM^[4,9]

模型	两波段 (TRM)	三波段 (TBM)	改进三波段 (ETM)	四波段 (FBM)
公式基本形式	$R_{rs}(\lambda_2)/R_{rs}(\lambda_1)$	$[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] \times R_{rs}(\lambda_3)$	$[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] \times [R_{rs}^{-1}(\lambda_3) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]^{-1}$	$[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] \times [R_{rs}^{-1}(\lambda_4) - R_{rs}^{-1}(\lambda_3)]^{-1}$
公式具体形式	$a_w(\lambda_2) \times [a_w(\lambda_1) + a_{ph}(\lambda_1)]^{-1}$	$(a_{ph}(\lambda_1) + a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)) \times a_w(\lambda_3)$	$[a_{ph}(\lambda_1) + a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)] \times [a_w(\lambda_3) - a_w(\lambda_2)]^{-1}$	$[a_{ph}(\lambda_1) + a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)] \times [a_w(\lambda_4) - a_w(\lambda_3)]^{-1}$
λ_1 假设条件	$a_{ph}(\lambda_1) \gg b_b(\lambda_1),$ $a_{ph}(\lambda_1) \gg a_d(\lambda_1) + a_g(\lambda_1)$	叶绿素吸收最为敏感的波段	同 TBM	同 TBM
波段范围 /nm	660 ~ 00	660 ~ 685	660 ~ 685	660 ~ 685
λ_2 假设条件	$a_{ph}(\lambda_1) \gg a_{ph}(\lambda_2),$ $a(\lambda_2) \approx a_w(\lambda_2)$	$a_d(\lambda_1) + a_g(\lambda_1) \approx a_d(\lambda_2) + a_g(\lambda_2)$ $a_{ph}(\lambda_1) \gg a_{ph}(\lambda_2)$	同 TBM	同 TBM
波段范围 /nm	700 ~ 780	690 ~ 730	690 ~ 730	690 ~ 730
λ_3 假设条件	-	$a(\lambda_3) \gg b_b(\lambda_3),$ $a(\lambda_3) \approx a_w(\lambda_3)$	$a(\lambda_3) \approx a_w(\lambda_3) + a_d(\lambda_3),$ $a_d(\lambda_3) \approx a_d(\lambda_2), b_b(\lambda_2) \approx b_b(\lambda_3)$	$a(\lambda_3) \approx a_w(\lambda_3) + a_d(\lambda_3)$
波段范围 /nm	-	720 ~ 780	720 ~ 780	720 ~ 780
λ_4 假设条件	-	-	-	$a_d(\lambda_3) \approx a_d(\lambda_4)$ $b_b(\lambda_3) \approx b_b(\lambda_4)$
波段范围 /nm	-	-	-	740 ~ 780

$$\text{FBM: CHL} \propto \frac{a_w(\lambda_4) - a_w(\lambda_3)}{a_{ph}^*(\lambda_1)} \times [R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] / [R_{rs}^{-1}(\lambda_4) - R_{rs}^{-1}(\lambda_3)] + \frac{a_w(\lambda_2) - a_w(\lambda_1)}{a_{ph}^*(\lambda_1)} \quad (5)$$

1.3 模型评价

研究使用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和总体相对误差 (Relative Error, RE) 对 4 种模型的优劣进行评判。

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

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

式中, d_m 和 d_p 分别表示实测值和模拟值, n 表示样点数。

根据各自模型的表达及其限制条件, 编写 MATLAB 程序, 以 RMSE 最小为原则, 进行波段优化, 建立线性方程 $y = \alpha x + \beta$, 最终获得 TRM、TBM、ETM 和 FBM 的最优波段组合以及最优模型参数, 分析对比后选择适合太湖水体的最优模型, 然后应用于巢湖, 评价最优模型在其它相同类型湖泊的适用性。

2 结果

2.1 最优模型

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 等 4 组, 另外 E 组是 A、B、C、D 四组所有数据的总和。4 个模型在不同组数据中的应用结果见表 3。A 组数据应用表明, 4 个模型的精度普遍偏低, TBM 最好, 但 R^2 仅为 0.60; FBM 在 B ~ D 组的应用效果均为最好 ($R^2 > 0.85$); 在 E 组中, FBM 也为最好 (R^2 为 0.83), 说明 FBM 具有最大的适用性。对于不同组的数据, 不同模型的应用效果有所差别。4 个模型在 D 组数据中均表现出较好的适用性 ($R^2 = 0.95$); 然后依次是 B 组、C 组和 E 组, 而 A 组数据, 所有模型效果都普遍较差 (R^2 在 0.50 ~ 0.60 范围内)。值得注意的是, 4 个模型的最优波段均呈现出一定的规律。对于 A 组, 后三个模型 (TBM、ETM、FBM) 的第 1 波段 (λ_1) 均位于 660 ~ 663 nm 的范围内, 第 2 波段 (λ_2) 均在 700 nm 处, 第 3 波段 (λ_3) 为近红外波段, 范围较大; 对于 B、C、D、E 四组数据, 第 1 波段主要集中在 680 nm 附近, 第 2 波段同样主要集中在 690 nm 附近, 第 3 波段位置变化较大, 主要在 720 nm 之后; FBM 中, 第 4 波段更为靠近近红外波段, 位于 750 nm 以外。综上, 认为 FBM 是浑浊 II 类水体中叶绿素 a 浓度估算的最优模型。

在不同时空条件下, FBM 的最优波段 (λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4) 位置随水体的时空变化存在一定差异, 但变幅不大, FBM 的最优波段的变化范围、变幅及其平均位置见表 4。

表3 TRM、TBM、ETM 和 FBM 在 5 组数据中的结果
Table 3 Results of TRM、TBM、ETM and FBM

模型	组别	$\lambda_1/$ nm	$\lambda_2/$ nm	$\lambda_3/$ nm	$\lambda_4/$ nm	$y = \alpha x + \beta$		R^2	RMSE /($\mu\text{g/L}$)	RE /(%)
						α	β			
TRM	A	665	700	-	-	63.06	-50.58	0.57	2.55	17.59
	B	674	700	-	-	64.46	-55.69	0.89	4.50	33.57
	C	678	730	-	-	116.64	-39.44	0.79	9.96	52.73
	D	677	700	-	-	26.98	-21.72	0.95	2.46	45.11
	E	684	722	-	-	64.30	-29.15	0.53	11.35	91.03
TBM	A	663	693	725	-	171.02	11.83	0.60	2.47	16.80
	B	684	690	760	-	444.61	3.81	0.90	4.28	25.29
	C	685	706	758	-	343.58	23.84	0.89	7.04	28.78
	D	679	693	764	-	113.32	3.57	0.95	2.45	59.66
	E	685	692	775	-	427.10	6.31	0.69	9.14	91.51
ETM	A	661	690	758	-	210.32	14.63	0.52	2.71	19.20
	B	682	700	760	-	99.97	7.25	0.87	4.85	28.37
	C	680	718	762	-	101.95	43.28	0.92	6.18	25.63
	D	679	716	740	-	37.84	14.73	0.95	2.41	56.09
	E	685	693	767	-	166.67	8.06	0.80	7.31	110.61
FBM	A	660	690	732	757	60.02	15.81	0.57	2.58	17.84
	B	673	690	742	750	3.99	5.22	0.95	2.91	24.95
	C	680	711	720	762	102.31	27.75	0.92	6.28	26.12
	D	683	697	730	763	32.86	4.84	0.95	2.39	69.30
	E	685	697	734	768	33.86	8.92	0.83	6.74	78.03

表4 FBM 最优波段变化

Table 4 Range of the best bands of FBM

模型	波段	变化范围/nm	变幅/nm	平均位置/nm
FBM	λ_1	660 ~ 685	25	676
	λ_2	690 ~ 711	21	697
	λ_3	720 ~ 742	22	732
	λ_4	750 ~ 768	18	760

2.2 最优模型的参数估计

针对最优模型 FBM, 即式(5), 假设

$$\varepsilon = [a_w(\lambda_4) - a_w(\lambda_3)]/a_{ph}^*(\lambda_1) \quad (8)$$

$$\eta = [a_w(\lambda_2) - a_w(\lambda_1)]/a_{ph}^*(\lambda_1) \quad (9)$$

在 FBM 中, 斜率 ε 、截距 η 与第一波段浮游植物的比吸收系数 a_{ph}^* 以及四个波段纯水的吸收系数 a_w 有一定的关系, 因此可以用这五个值来构建斜率和截距的模拟值. 由于 B 组数据的吸收系数缺失, 故未考虑 B 组数据. 根据表 3 计算得到各组别 FBM 的 α 和 β , 分别建立 α 与 ε 、 β 与 η 之间的线性关系如下

$$\alpha = 1.29 \times \varepsilon + 15.25 \quad (R^2 = 0.88) \quad (10)$$

$$\beta = 1.96 \times \eta + 1.08 \quad (R^2 = 0.93) \quad (11)$$

结果表明, α 与 ε 、 β 与 η 相关性较好, 并满足模型的假设条件.

2.3 最优模型在巢湖的应用

2009 年 10 月巢湖采样数据的范围与 B 组数据相对应. 取表 4 中 FBM 波段的平均位置为巢湖模型相应的波长位置, 同时利用巢湖的实测固有光学特

性数据, 计算 ε 和 η , 然后代入式(10)和式(11), 分别计算巢湖的 FBM 经验参数 α 与 β , 于是有

$$\text{CHL} = 63.57 \times (1/R_{rs}(676) - 1/R_{rs}(697))/(1/R_{rs}(760) - 1/R_{rs}(732)) + 16.32 \quad (12)$$

式(12)的应用表明, 除个别点外, 叶绿素 a 浓度的估算结果一般大于实测值 (RMSE = 12.69 $\mu\text{g/L}$, RE = 65%), 说明该模型在一定程度上高估了叶绿素 a 浓度, (见图 2). 另外, 式(12)中波段选取的是太湖的经验值, 与巢湖水体存在一定差别, 导致 FBM 模型在巢湖的应用效果一般. 但总的来说, 直接利用经验参数和实测吸收数据, 取得了相对理想的应用效果.

3 讨论

四个模型中, 除了 TRM 模型外, 对于 A 组数据, TBM 模型效果最好, 其余四组为 FBM 效果最好. 模型存在一定的精度差异, 是由于模型的构建和模型原理不同造成的. 文中提到的模型是考虑到叶绿素、悬浮物和有可溶性有机物等三大水色因子吸收作用的影响来减少误差, 其中 FBM 和 ETM 比 TBM 又多了一个假设条件, 以最大程度地消除了悬浮物的吸收和后向散射 b_b 的影响. 此处引入吸收系数验证模型的假设条件, 以 C 组数据为例进行分析. 具体的吸收系数参数如表 5 所示.

根据模型的限制条件, 第一波段是对叶绿素吸收最为敏感的波段, 根据吸收系数 a_{ph} 和实测叶绿素浓度值之间的相关性得出在 660 ~ 685 nm 之间最敏感的波段是 685 nm, 与 TBM 得到的 685 nm 一样, 与 FBM 和 ETM 的第一波段 680 nm 之间存在一定的差距, 但差距不大, $R^2(685) = 0.8385$, $R^2(680) = 0.8353$; 而第二波段的选择条件为 $a_d(\lambda_1) + a_g(\lambda_1) \approx a_d(\lambda_2) + a_g(\lambda_2)$ 和 $a_{ph}(\lambda_1) \gg a_{ph}(\lambda_2)$, 可是从表 5 中可以看出 λ_1 和 λ_2 之间的非色素颗粒物和有色溶解有机物的吸收系数之和相差很大, 不满足两者

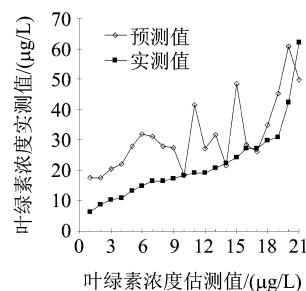


图2 2009 年 10 月巢湖数据的 CHL 估算模型验证
Fig. 2 Validation of FBM using the data of October 2009 at ChaoLake

表 5 2008 年 10 月太湖各模型最佳波段处的吸收系数对比
Table 5 Comparison of absorption coefficient of waters in Tai Lake in October 2008

模型 波段	TRM		TBM			ETM			FBM			
	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
最优波段/nm	678	730	685	706	758	680	718	762	680	711	720	762
$a_d/(\text{m}^{-1})$	0.167	0.040	0.145	0.088	0	0.161	0.064	0	0.161	0.077	0.060	0
$a_g/(\text{m}^{-1})$	0.033	0	0.022	0	0	0.029	0	0	0.029	0	0	0
$(a_d + a_g)/(\text{m}^{-1})$	0.199	0.040	0.167	0.088	0	0.190	0.064	0	0.190	0.077	0.060	0
$a_{ph}/(\text{m}^{-1})$	0.231	0.005	0.196	0.039	0	0.226	0.014	0	0.226	0.026	0.012	0
$a_w/(\text{m}^{-1})$	0.482	1.799	0.486	0.758	2.534	0.465	1.103	2.542	0.465	0.872	1.169	2.542
$b_b/(\text{m}^{-1})$	0.358	0.294	0.349	0.322	0.266	0.356	0.308	0.263	0.356	0.316	0.305	0.263

近似相等的条件, 叶绿素 a 在这两个波段的吸收系数存在 $a_{ph}(\lambda_1) > a_{ph}(\lambda_2)$ 的关系, 但并非远远大于, 从中可以看出第二波段的选择存在差异, 需要进一步分析研究; 在近红外波段中, 纯水的吸收占主要地位, 可以近似认为第三波段处的吸收系数约等于纯水的吸收系数, 符合条件的要求. 对于 FBM 而言, 第三波段的假设条件 $a(\lambda_3) \gg b_b(\lambda_3)$ 、 $a(\lambda_3) \approx a_w(\lambda_3)$ 和第四波段的假设条件 $a_d(\lambda_3) \approx a_d(\lambda_4)$ 、 $b_b(\lambda_3) \approx b_b(\lambda_4)$ 都基本上满足要求.

同一个模型在不同组别的应用精度也存在差异, 主要是由于水体中叶绿素浓度的不同引起的. 图 3 为纯水、浮游植物色素、非色素颗粒、CDOM 的吸收系数和后向散射系数. 图 3 表明, 不同浓度叶绿素下各要素的吸收曲线存在差异, 浮游植物色素吸收曲线的峰谷的数值和位置发生了变化, 出现明显的“红移”, 特征变化较大, 这也直接影响了第一波段最优波长位置的选择. 非色素悬浮和 CDOM 的吸收曲线随波长的增长呈显著的指数递减趋势. 不同叶绿素 a 浓度下 650 ~ 730 nm 范围内的 a_d 与 a_g 之和的曲线如图 4 所示.

图 4 表明, 第一波段与第二波段两者之和近似相等的适应条件存在很大的差异, 但是叶绿素浓度较高的水体的差异性要比叶绿素浓度较低的水体的差异性小, 这也是叶绿素浓度较高的水体反演精度较好的原因之一.

上述分析表明, 模型第二波段的选择还存在较大的问题, 与模型假设条件还有一定的差距, 需要进一步完善分析. 当叶绿素浓度较低时, 浮游植物色素吸收的作用没有得到显著体现, 其它光学组分占主导地位, 进而影响了叶绿素反演模型的精度.

4 结论

对于高浑沌的 II 类水体而言, 当应用高光谱数据或者具有足够多的光谱波段选择时, 由于 FBM 能

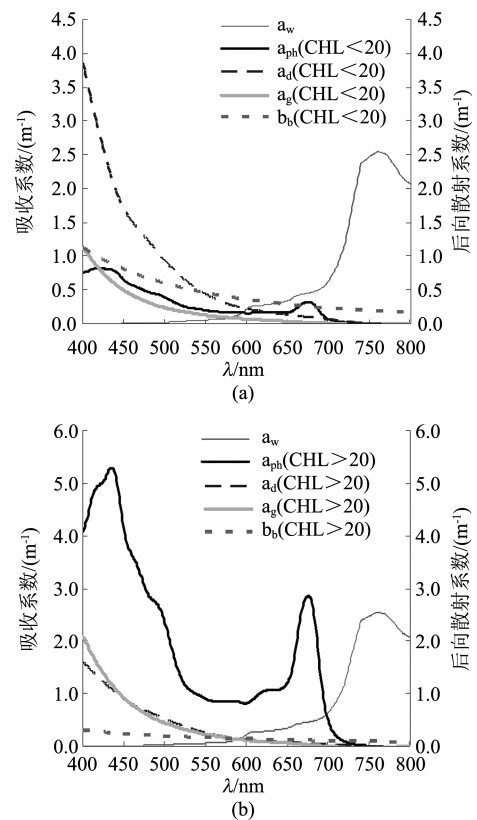


图 3 纯水、浮游植物色素、非色素颗粒、CDOM 的吸收系数和后向散射系数 (a) CHL < 20 $\mu\text{g/L}$ (b) CHL > 20 $\mu\text{g/L}$
Fig. 3 Absorption coefficients due to pure water (a_w), phytoplankton pigment (a_{ph}), colored dissolved organic matter (a_g), non-algal particles (a_d) and the backscattering coefficients (b_b) (a) CHL < 20 $\mu\text{g/L}$ (b) CHL > 20 $\mu\text{g/L}$

够有效减少悬浮泥沙和黄色物质的影响, 因此具有较高的叶绿素反演精度. 此时 FBM 的最优波段分别为 676、697、732 和 760 nm, 斜率 ε 、截距 η 与第一波段处叶绿素的比吸收系数和四个波段处纯水的吸收系数存在较好的线性关系, 给出了这种线性关系的定量方程, 进而为模型在类似湖泊水体的推广应用奠定了基础, 同时为 MODIS 和 MERIS 的应用在波段选择上提供了可供参考的依据.

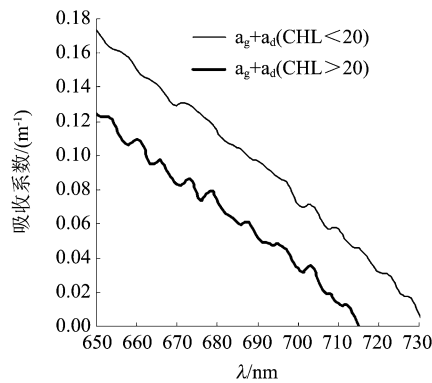


图4 不同叶绿素 a 浓度下的 a_d 与 a_g 之和的曲线图

Fig.4 The sum of a_d and a_g while $CHL < 20 \mu\text{g/L}$ and $CHL > 20 \mu\text{g/L}$

REFERENCES

- [1] Duan H T, MA R H, Xu X F, *et al.* Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (10): 3522 - 3528.
- [2] YIN Qiu, SHU Xiao-Zhou, XU Zhao-An, *et al.* Analysis on the ultra-spectral characteristics of water environmental parameters about lake[J]. *J. Infrared Millim. 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Dall'Olmo G, Gitelson A A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results[J].

Applied Optics, 2005, **44** (3): 412 - 422.

- [6] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, **160** (3): 271 - 282.
- [7] Zimba P V, Gitelson A. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems. Model tuning and accuracy optimization[J]. *Aquaculture*, 2006, **256** (1-4): 272 - 286.
- [8] Le C F, Li Y M, Zha Y, *et al.* A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113** (6): 1175 - 1182.
- [9] Yang W, Bunkei M, CHEN Jin, *et al.* An enhance three-band index for estimating chlorophyll-a in turbid case-II waters: case studies of Lake Kasumigaura, Japan, and Lake Dianchi, China[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, **7** (4): 655 - 659.
- [10] Ma R H, Tang J W, Dai J F. Bio-optical model with optimal parameter suitable for Taihu Lake in water color remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*. 2006, **27** (19): 4305 - 4328.
- [11] Huang X F. *Survey, observation and analysis of lake ecology* [M]. Beijing: Standards Press of China. (黄祥飞. *湖泊生态调查观测与分析*. 北京: 中国标准出版社), 1999: 77 - 99.
- [12] Cleveland J S, Weidemann A D. Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters[J]. *Limnol. Oceanogr.* 1993, **38** (6): 1321 - 1327.
- [13] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain[J]. *Limnol. Oceanogr.* 1981, **26** (1): 43 - 53.
- [14] 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, 田国梁, 汪小勇, 等. *水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法*. *遥感学报*), 2004, **8** (1): 37 - 44.

(上接 530 页)

- [6] ZHU Lin. Research on soil moisture data assimilation method based on remote sensing and ecological process model [D]. *Peking University Ph. D. Thesis* (朱琳. 基于遥感和生态过程模型的土壤水分数据同化方法研究. 北京大学博士学位论文), 2009.
- [7] Chen J M, Liu J, Clhlar J, *et al.* Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications[J]. *Ecol. Model.*, 1999, **124** (2-3): 99 - 119.
- [8] Ghulam A. Remote monitoring of farmland drought based on n-dimensional spectral feature space[D]. *Peking University Ph. D. Thesis* (阿布都瓦斯提·吾拉木. 基于 n 维光谱特征空间的农田干旱遥感监测. 北京大学博士学位论文), 2006.
- [9] Deng F, Chen J M, Plummer S, *et al.* Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery[J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2006, **44**

(8): 2219 - 2229.

- [10] GHULAM A, LI Zhao-Liang, QIN Qi-Ming, *et al.* A method for canopy water content estimation for highly vegetated surfaces-shortwave infrared perpendicular water stress index[J]. *Science in China D*: (阿布都瓦斯提·吾拉木, 李召良, 秦其明, 等. 全覆盖植被冠层水分遥感监测的一种方法: 短波红外垂直失水指数. *中国科学 D 辑*), 2007, **37** (7): 957 - 965.
- [11] Evensen G. Sequential data assimilation with a non-linear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99** (C5): 143 - 162.
- [12] Hu X, ZHANG F, Nielsen-Gammon J W. Ensemble-based simultaneous state and parameter estimation for treatment of mesoscale model error: A real-data study[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**: L08802.