

文章编号:1001-9014(2012)02-0132-05

## 湖泊藻类水体浮游植物色素遥感反演模型

金经纬<sup>1</sup>, 段洪涛<sup>2\*</sup>, 赵晨露<sup>2,3</sup>, 周琳<sup>2,3</sup>, 尚琳琳<sup>2,3</sup>, 姜广甲<sup>2,3</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092;

2. 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;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 2009年10月15~16日, 在巢湖蓝藻暴发期间进行实际采样和数据分析, 通过 Gons 和 Simis 算法对浮游植物色素吸收及其浓度遥感反演进行了研究. 结果表明, Gons 和 Simis 算法可以用于蓝藻水华未覆盖水体的遥感反演, 而在水华覆盖水体表面时算法失效; 在未覆盖水体时, Gons 算法 ( $RMSE = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ) 相对于 Simis 算法 ( $RMSE = 0.13 \text{ m}^{-1}$ ) 可以更好地反演浮游植物色素吸收; Simis 算法可以用于巢湖藻蓝素反演, 但模型参数需要重新率定. 总体来说, Gons 和 Simis 算法在巢湖取得了较好的结果, 有助于浮游植物色素遥感反演后续工作的进行.

**关键词:** 叶绿素; 藻蓝素; 色素吸收; 生物光学模型

**中图分类号:** X122 **文献标识码:** A

## Remote estimation of phytoplankton pigments in inland lake waters with algae

JIN Jing-Wei<sup>1</sup>, DUAN Hong-Tao<sup>2\*</sup>, ZHAO Chen-Lu<sup>2,3</sup>, ZHOU Lin<sup>2,3</sup>,  
SHANG Lin-Lin<sup>2,3</sup>, JIANG Guang-Jia<sup>2,3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of

Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on in situ data in Chao Lake from October 15<sup>th</sup> 2009 to October 16<sup>th</sup> 2009, two algorithms named Gons and Simis were used to estimate phytoplankton pigment (Chlorophyll-a, Chla; Phycocyanin, PC). Results showed that both Gons and Simis algorithms can be used in waters with algae, but not in waters while algal blooms formed. For the pigment absorption at 665 nm ( $a_{ph}(665)$ ), Gons can provide a better result than Simis. Simis algorithm can be used to estimate PC, while related parameters were re-calibrated. Therefore, it is necessary and significant to validate and develop the algorithms to estimate Chla and PC in Chao Lake.

**Key words:** chlorophyll; phycocyanin; pigments absorption; bio-optical algorithm

**PACS:** 07.07. Df

### 引言

据最新遥感调查结果(2005~2006年)显示,我国1 km<sup>2</sup>以上自然湖泊有2693个<sup>[1]</sup>. 随着经济的快速发展,湖泊富营养化日益严重. 富营养水体的重要特征就是藻类物质,特别是蓝藻大量繁殖<sup>[2]</sup>. 浮游植物色素(叶绿素 a 和藻蓝素)遥感反演模型研究

对于富营养化湖泊水质监测和蓝藻水华预测预警都具有重要意义. Gons 提出以反演 665 nm 处浮游植物色素吸收为基础的叶绿素 a 浓度反演算法,得到广泛应用<sup>[3,4]</sup>. 由于叶绿素 a 存在于所有真核藻类中,而可以证明蓝藻存在的指示性色素——藻蓝素,在以往的研究中较少涉及. Simis 等利用藻蓝素在 620 nm 附近具有独特的吸收峰,在 Gons 算法的基

收稿日期:2010-12-21,修回日期:2011-06-24

Received date: 2010-12-21, revised date: 2011-06-24

基金项目:中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-EW-QN308, KZCX2-YW-QN311);国家自然科学基金(41171271, 41171273)

**Foudantion items:** Supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (KZCX2-EW-QN308, KZCX2-YW-QN311) and National Natural Science Foundation of China(41171271, 41171273)

作者简介:金经纬(1988-),男,浙江人,主要从事环境监测研究. E-mail: jin-jingwei@163.com.

\* 通讯作者: E-mail: htduan@niglas.ac.cn.

基础上,提出了藻蓝素的遥感反演算法<sup>[5]</sup>. 以我国五大淡水湖之一的巢湖为研究对象,针对 MERIS 传感器波段设置,基于 Gons 和 Simis 算法,评价主要浮游植物色素-叶绿素和藻蓝素的遥感反演精度,并尝试在实测数据的基础上,对 Gons 和 Simis 算法相关参数进行重新率定,建立适合巢湖水体的叶绿素和巢湖遥感反演模型. 这对于富营养化水体浮游植物色素遥感定量反演以及 MERIS 数据的应用具有重要科学意义.

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区

巢湖位于长江、淮河两大河流之间(117°16'54"~117°51'46"E,31°25'16"~31°43'28"N),多年平均水位为 8 m,库容  $2.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,岸线总长 184.66 km,面积 769.55  $\text{km}^2$ ,平均水深 2.89 m,最深处达 3.67 m. 近年来,由于周边经济的快速发展,巢湖水体呈现明显的富营养化趋势,蓝藻水华泛滥成灾,特别是西部湖区由于靠近城市污水排放口,尤为严重.

### 1.2 数据描述

2009 年 10 月 15~16 日,在巢湖进行了实际采样,获得有效样点 37 个,如表 1 所示,其中 ASD 光谱测量采用水表面以上测量法. 各物质的吸收测量采用定量滤膜法,利用分光光度计测定滤膜上总颗粒物吸收系数  $a_p$ ,然后将滤膜漂白后测定非色素颗粒物的吸收系数  $a_d$ ,浮游植物色素吸收系数  $a_{ph}$  为  $a_p$  减  $a_d$  的差值. 叶绿素 *a* 经丙酮萃取后用分光光度法测定浓度,悬浮物浓度的测量采用称重法.

### 1.3 算法描述

Gordon 等人在 1998 年提出了水色遥感的基本辐射传输方程<sup>[6]</sup>,

$$R_{rs} = \frac{ft}{Qn^2} \frac{b_b}{a + b_b}, \quad (1)$$

其中总吸收系数  $a(\lambda)$  主要由浮游植物色素吸收( $a_{ph}$ )、非色素颗粒物吸收( $a_d$ )、黄色物质吸收( $a_g$ )和纯水吸收( $a_w$ )组成; $b_b$ 是水体的总后向散射系数;

$f/Q$ ,是太阳方位角函数,一般认为等于 0.0945<sup>[6]</sup>,而  $t/n^2$  代表水体界面常数,约等于 0.54<sup>[7]</sup>. 大多数研究认为, $b_b$ 在近红外波段近似相等,因此,由式(1)可得

$$a(\lambda_1) = \frac{R_{rs}(\lambda_2)}{R_{rs}(\lambda_1)} \times [a(\lambda_2) + b_b] - b_b, \quad (2)$$

其中  $\lambda_1$  在反演叶绿素时对应 665 nm 波段,藻蓝素时对应 620 nm;而  $\lambda_2$  一直对应着 705 nm.

Gons 根据式(2),提出了针对叶绿素 *a* 的遥感反演算法<sup>[8]</sup>. 该方法适用于 MERIS 的波段设置,基本方程为

$$b_b(778.75) = 1.61 \times \frac{R_{rs}(778.75)}{0.082 - 0.6 \times R_{rs}(778.75)}, \quad (3)$$

$$a_{ph}(665) = \frac{R_{rs}(709)}{R_{rs}(665)} \times (a_w(709) + b_b) - b_b - a_w(665), \quad (4)$$

$$[Chla] = \frac{a_{ph}(665)}{a_{ph}^*(665)}, \quad (5)$$

其中, $b_b$ 为后向散射系数, $R_{rs}$ 为遥感反射比, $a_{ph}$ 为浮游植物色素吸收系数, $a_w$ 为纯水的吸收系数, $a_{ph}^*$ 为浮游植物色素的比吸收系数, $[Chla]$ 为叶绿素 *a* 的浓度, $p$ 为修正因子,在 1.06 左右,可以减小假定后向散射为常数所引起的误差<sup>[8]</sup>. 纯水在 709 nm ( $a_w(709)$ )和 665 nm ( $a_w(665)$ )的吸收系数分别为  $0.70 \text{ m}^{-1}$ 和  $0.40 \text{ m}^{-1}$ . 对于中等滋育度及富营养水体,浮游植物色素在 665 nm 的比吸收系数经验值为  $0.016 \text{ m}^{-1}/(\mu\text{g/L})$ .

该算法基于以下假设:后向散射  $b_b$ 不随波长变化,并可由近红外附近的单波段(这一波段的吸收可以由纯水的吸收近似)获取; $a(709) \approx a_w(709)$ ; $a(665) \approx a_{ph}(665) + a_w(665)$ ,即忽略了 CDOM 和非藻类颗粒物的吸收;浮游植物色素比吸收系数在指定波长处是一个常数.

Simis 在 Gons 算法的基础上,针对藻蓝素在 620 nm 附近具有吸收峰的特性,提出了藻蓝素的遥感反演算法<sup>[5]</sup>. 基本方程为

表 1 巢湖水体相关参数

Table 1 Statistics of water quality parameters of Chaohu lake

	所有 (n=37)			Gons						Simis					
	Min	Max	Ave	正常 (n=17)			异常 (n=19)			正常 (n=21)			异常 (n=15)		
	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave
Chla (g/l)	6.43	2343.60	288.49	6.43	62.11	23.63	8.84	2343.60	525.47	6.43	62.11	22.06	18.17	2343.60	661.49
TSS (mg/l)	12.50	295.00	69.88	0.15	6.18	1.82	0.27	342.25	51.81	0.15	6.18	1.85	0.52	342.25	65.10
$a_{ph}(620) (\text{m}^{-1})$	0.10	11.24	1.68	12.50	49.33	25.64	15.00	295.00	109.46	12.50	49.33	25.76	22.50	295.00	131.64
$a_{ph}(665) (\text{m}^{-1})$	0.13	21.64	3.50	2.50	19.00	10.90	6.50	265.00	79.52	2.50	19.00	10.91	7.00	265.00	97.80

$$\begin{cases} a_{ph}(665) = \left[ \frac{R_{rs}(709)}{R_{rs}(665)} \times (a_w(709) + b_b) - b_b - a_w(665) \right] \times \gamma^{-1}, & (6) \\ a_{ph}(620) = \left[ \frac{R_{rs}(709)}{R_{rs}(620)} \times (a_w(709) + b_b) - b_b - a_w(620) \right] \times \delta^{-1}, & (7) \\ a_{pc}(620) = a_{ph}(665) - \varepsilon \times a_{ph}(620) & (8) \\ [PC] = \frac{a_{pc}(620)}{a_{pc}^*(620)} & (9) \end{cases}$$

其中,  $a_{pc}$  为藻蓝素吸收系数,  $a_{pc}^*$  为藻蓝素的比吸收系数,  $[PC]$  代表藻蓝素浓度. 修正因子  $\gamma = 0.68$ , 表示引入修正因子前浮游植物色素在 665 nm 的估计值与测量值的比. 类似地,  $\delta = 0.84$ , 表示引入修正因子前藻蓝素在 620 nm 的估计值与测量值的比. 转换系数  $\varepsilon = 0.24$ , 表示叶绿素  $a$  在 620 nm 和 665 nm 的吸收之比. 另外,  $b_b$  的计算同式(3).

#### 1.4 数据分析

Gons 和 Simis 算法的一个重要前提是式(2)和式(3)成立, 而由于部分样点形成蓝藻水华, 漂浮在水体表面, 导致 778.75 nm 所在的近红外波段显著升高, 因此  $b_b(778.75)$  计算数值产生较大偏差,  $b_b$  在近红外波段也不再相等, 将会引起反演结果较大的错误. 图 1 是  $a_{ph}(665)$  实测值与 Gons 和 Simis 算法反演值的比值, 可以发现前半部分样点(1~18)模型反演结果较为准确, 19 号样点后的大部分样点反演结果有较大偏差, 而这些样点正是位于西部湖区, 蓝藻水华最为严重的区域. 因此, 为了确保模型的适用性, 有必要对采集样点进行分类. 按照 50% 的误差是可以接收的标准, 根据图 1 结果将所有样点分为两类: 比值大于 1.5 或者小于 0.5 的被认为是异常点(水华覆盖表面), 而小于 1.5 大于 0.5 的则为正常样点(藻颗粒水体, 未形成水华). 另外, 由于 19 号样点明显与所有样点差别太大(图 1), 视为特殊点删除, 没有包含在分析中.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $a_{ph}(665)$ 和叶绿素 $a$ 浓度反演

按照  $\pm 50\%$  的误差对 Gons 反演结果进行了分类, 如图 2 所示. 由图 2(a) 可知, 正常样点值基本上分布在 1:1 线附近, 具有较高的相关性; 而这些样点的叶绿素  $a$ 、总悬浮物等参数都相对偏低(表 1), 藻含量较少, 还没有形成水华覆盖水体表面, 与湖上野外试验观测到的结果基本一致. 而异常点反演结果与实测结果普遍偏差较远, 绝大部分样点  $a_{ph}(665)$  值被低估, 主要是由于这部分样点多数有蓝藻水华覆盖, 近红外波段形成类似植被的“陡坡”, 部分样

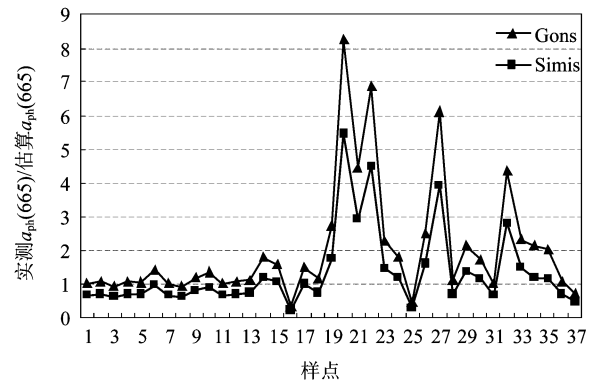
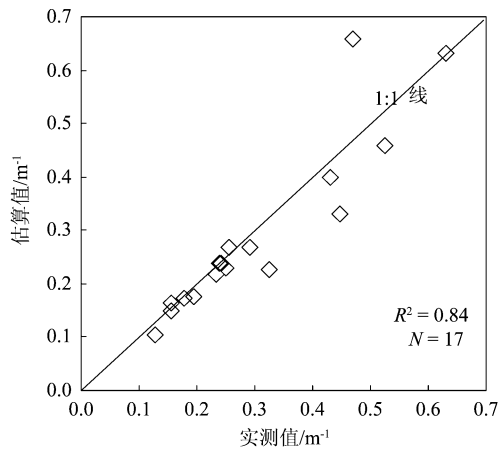


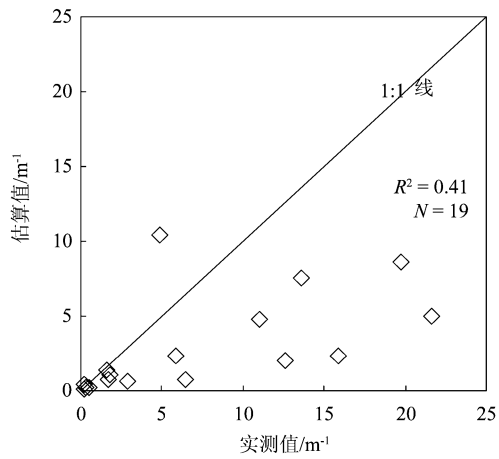
图 1 巢湖实测  $a_{ph}(665)$  和不同算法提取的  $a_{ph}(665)$  比值  
Fig.1 Ratios of  $a_{ph}(665)$  in situ to  $a_{ph}(665)$  derived from two algorithms

点叶绿素浓度达到 2000  $\mu\text{g/L}$  以上, 平均值 500  $\mu\text{g/L}$  以上(表 1), 导致基于水体辐射传输方程构建的反演模型失效, 不再适用. 同理, 对 Simis 反演结果也进行了相应的分类, 结果与 Gons 算法类似, 只是误差在  $\pm 50\%$  的正常样点多了 4 个, 见图 3.

不管是 Gons 算法, 还是 Simis 算法, 浮游植物色素浓度的遥感反演都是先通过计算特征波长吸收(叶绿素  $a$ : 665; 藻蓝素: 620), 再比上相应色素的比吸收系数, 最终获得叶绿素  $a$  或者藻蓝素的浓度. 实验室实测数据中  $a_{ph}(665)$  一般认为全部是叶绿素的吸收造成, 其它色素吸收影响可以忽略不计; 而在算法(式(2))反演中, 665 nm 波长吸收  $a(665)$  实际上还有  $a_g$  和  $a_d$  等的吸收, 因此做了一定的校正. 式(4)和式(6)分别是 Gons 和 Simis 算法  $a_{ph}(665)$  的计算公式, 有一定差别. Gons 算法做的校正是利用  $p$  值, Simis 利用了  $\gamma$  值. 由于采用的校正方式的差异, 导致  $a_{ph}(665)$  反演结果的不同. 针对巢湖数据, 选用 Gons 和 Simis 算法中都正常的样点( $n = 16$ ), 比较两个算法的精度, 发现两个算法与实测数据都有很好的线性关系( $R^2 = 0.93$ ), 但显然 Gons 算法更为准确; Simis 算法 RMSE 是 0.13  $\text{m}^{-1}$ , Gons 算法只有 0.04  $\text{m}^{-1}$ . 导致两者算法差异的主要原因可能是: (1) Gons 算法是利用指数  $p$  进行校正, 对于基本算法中(式(2))关于水体  $b_b$  在近红外波段基本一致的假设进行了有效修正, 而  $b_b$  在  $a_{ph}(\lambda)$  的反演中具有较大作用<sup>[4]</sup>; Simis 算法是利用  $a_{ph}(665)$  实测吸收值和基本算法(式(2))反演结果进行了线性回归, 利用方程斜率  $\gamma$  做了一定校正, 但没有考虑  $b_b$  在 665 nm 和 705 nm 的不一致可能造成的误差. (2) 更为重要的原因是巢湖数据与 Simis 和 Gons 算法的实验数据有一点差别, 而这两个算法中  $p$  和  $\gamma$  都是通过



(a)



(b)

图2  $a_{ph}(665)$  实测值与 Gons 算法估算值散点图 (a) 正常点 (b) 异常点

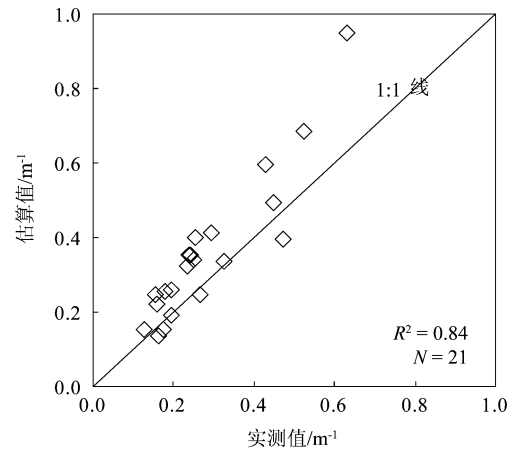
Fig.2 Scatter plots of  $a_{ph}(665)$  *in situ* versus  $a_{ph}(665)$  derived from Gons algorithms (a) normal sites (b) abnormal sites

实测数据模拟获得的. 因此, 在这里选择 Gons 算法用于  $a_{ph}(665)$  以及叶绿素 *a* 的反演, 精度相对较高.

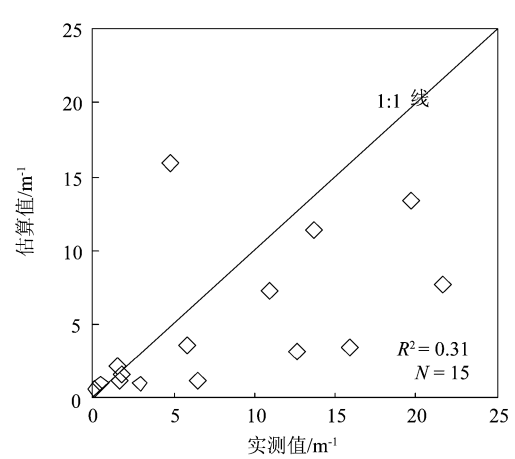
叶绿素 *a* 浓度的反演由式(5) 计算获得, 该式假设叶绿素在 665 nm 的比吸收系数 ( $a_{ph}^*(665)$ ) 不变. 但在许多研究中发现  $a_{ph}^*(665)$  由于受叶绿素打包效应等影响, 其值有较大的变化. 巢湖  $a_{ph}^*(665)$  变化范围在  $0.0070 \sim 0.0197 \text{ m}^{-1}/(\mu\text{g/L})$  之间, 平均值为  $0.0134 \text{ m}^{-1}/(\mu\text{g/L})$ ; 与 Gons 算法使用的  $0.0161 \text{ m}^{-1}/(\mu\text{g/L})$  有一定差别, 会造成叶绿素 *a* 反演精度的降低 ( $R^2 = 0.59$ ,  $\text{RMSE} = 11.14 \mu\text{g/L}$ ), 见图 4. 由图 4 可知, 通过采用每一个样点的实际比吸收系数, 叶绿素 *a* 浓度反演精度大幅提高 ( $R^2 = 0.96$ ,  $\text{RMSE} = 3.65 \mu\text{g/L}$ ).

## 2.2 $a_{ph}(620)$ 和藻蓝素浓度遥感反演

藻蓝素浓度的反演主要通过计算 620 nm 处的藻蓝素吸收系数 ( $a_{pc}(620)$ ), 再除以藻蓝素比吸收



(a)



(b)

图3  $a_{ph}(665)$  实测值与 Simis 算法估算值散点图 (a) 正常点 (b) 异常点

Fig.3 Scatter plots of  $a_{ph}(665)$  *in situ* versus  $a_{ph}(665)$  derived from Simis algorithms (a) normal sites (b) abnormal sites

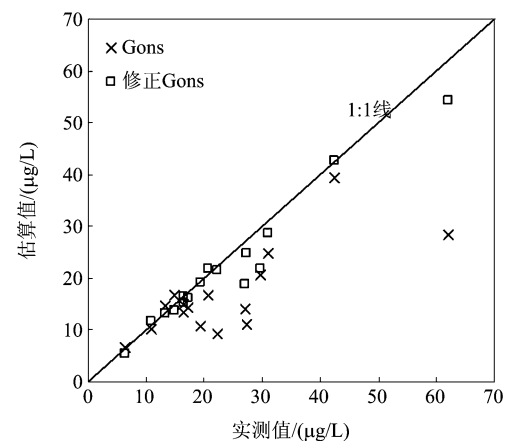


图4 叶绿素 *a* 浓度遥感反演结果

Fig.4 Scatter plots of Chl *a* *in situ* data versus estimated data derived from different algorithms

系数 ( $a_{pc}^*(620)$ ) 获得; 但不同于 Gons 算法, 藻蓝素反演要先获得 620 nm 处的浮游植物色素总吸收

( $a_{ph}(620)$ ). 因此,  $a_{ph}(620)$  反演的准确与否是获得真实藻蓝素浓度的关键因素. 数据表明,  $a_{ph}(620)$  实测值和 Simis 反演值两者关系比较理想 ( $R^2 = 0.88$ ), 但还存在一定误差, 部分样点估值较高.

由于 Simis 算法中  $a_{ph}(665)$  和  $a_{ph}(620)$  的反演结果都与实际结果有一定的差异, 为了更准确地获得相应参数, 有必要利用巢湖实测数据对  $\gamma$  和  $\delta$  进行率定, 获得适用于巢湖水体的浮游植物色素吸收反演算法, 结果如图 5(a) 所示. 巢湖  $\gamma$  和  $\delta$  与 Simis 算法都有一定差异,  $\gamma$  由原来的 0.68 调整为 0.915,  $\delta$  由原来的 0.84 调整为 1.0979. 利用校正参数重新计算  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{ph}(665)$  的 RMSE 由原来的  $0.13 \text{ m}^{-1}$  下降为现在的  $0.04 \text{ m}^{-1}$ ; 而  $a_{ph}(620)$  的 RMSE 由  $0.05 \text{ m}^{-1}$  下降为现在的  $0.04 \text{ m}^{-1}$ , 见图 5(b). 参数  $\varepsilon$  的构建需要利用实测藻蓝素数据进行最小二乘法线性拟合, 本次实验没有测量藻蓝素, 因此没有进行

校正; 同时巢湖藻蓝素比吸收系数由于相同原因, 也没有校正, 都采用了 Simis 算法中已有的参数. 经过参数校正后, 藻蓝素浓度普遍有一定下降, 在  $5.75 \sim 33.53 \mu\text{g/L}$  之间, 均值为  $13.08 \mu\text{g/L}$ .

### 3 结论

利用 Gons 和 Simis 算法对巢湖浮游植物色素吸收及其浓度进行了研究. 在蓝藻水华覆盖水面的情况下, Gons 和 Simis 算法将会失效; 在未覆盖表面时, Gons 和 Simis 算法可以用于叶绿素和藻蓝素的反演; Gons 算法相对于 Simis 算法可以更有效地反演  $a_{ph}(665)$ , 但在反演叶绿素过程中, 由于巢湖水体叶绿素比吸收系数  $a_{ph}^*(665)$  与 Gons 算法中提供的值有一定差异, 必须进行修订, 才能提高叶绿素反演精度; Simis 算法在反演  $a_{ph}(665)$  和  $a_{ph}(620)$  时, 都有一定误差; 利用实测数据分别对  $\gamma$  和  $\delta$  参数进行了率定, 可以提高  $a_{ph}(665)$  和  $a_{ph}(620)$  的反演精度; 由于缺乏巢湖藻蓝素实测数据和比吸收系数, 因此 Simis 模型中的部分参数没有进行率定, 最后反演浓度可能会与实际浓度有一定的差异.

### REFERENCES

- [1] MA Rong-Hua, YANG Gui-Shan, DUAN Hong-Tao, *et al.* China's lakes at present: Number, area and spatial distribution[J]. *SCIENTIA SINICA Terrae* (马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. *中国科学: 地球科学*), 2010, **40**(9): 1-8.
- [2] Duan H T, Ma R H, Xu X, *et al.* Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(10): 3522-3528.
- [3] Duan H T, Zhang Y Z, Zhang B, *et al.* Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states for inland lakes in Northeast China from Landsat TM data and field spectral measurements[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(3): 767-786.
- [4] Gons H J. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1999, **33**(7): 1127-1132.
- [5] Simis S, Peters S, Gons H. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(1): 237-245.
- [6] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al.* A Semianalytic radiance model of ocean color[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93**(D9): 10909-10924.
- [7] Austin R W. Inherent spectral radiance signatures of the ocean surface[J]. *Ocean Color Analysis*, SIO Ref, 1974: 74-10.
- [8] Gons H J, Rijkeboer M, Ruddick K G. Effect of a waveband shift on chlorophyll retrieval from MERIS imagery of inland and coastal waters[J]. *Journal of Plankton Research*, 2005, **27**(1): 125-127.

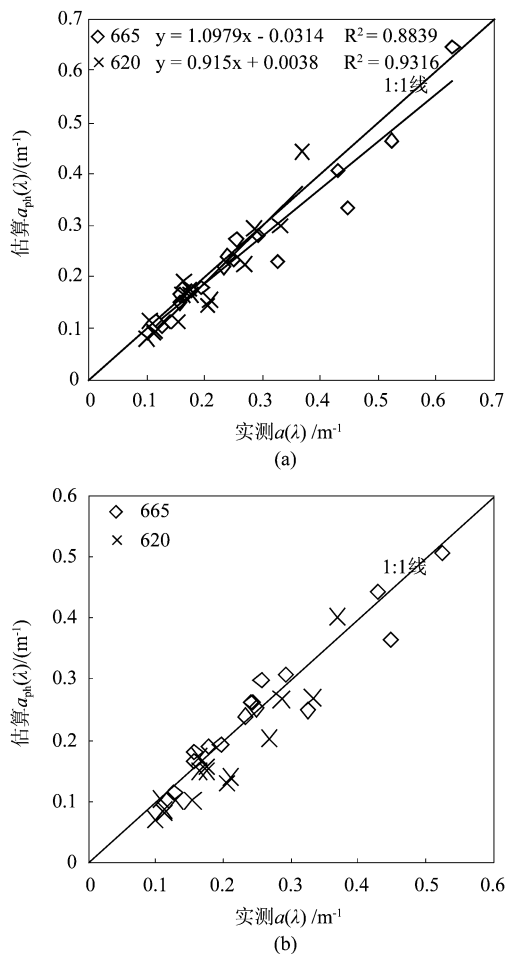


图5 巢湖水体的 Simis 算法 (a)  $\gamma$  和  $\delta$  参数校正, (b)  $a_{ph}(\lambda)$  校正  
Fig. 5 Simis algorithm in Chao lake (a)  $\gamma$  and  $\delta$  calibration, (b)  $a_{ph}(\lambda)$  calibration