

## 巢湖水体 POC 浓度遥感反演算法与验证

吴静汇<sup>1,2</sup>, 段洪涛<sup>1\*</sup>, 张玉超<sup>1</sup>, 马荣华<sup>1</sup>

(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. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 基于 2013 年巢湖实测数据, 根据颗粒性有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 浓度与叶绿素 a 之间的高度相关性, 采用 Gons 和 Simis 算法估算浮游植物色素吸收  $a_{ph}(665)$ , 继而实现对 POC 浓度间接反演。结果表明, Gons 和 Simis 算法可用于蓝藻水华未覆盖内陆水体 POC 浓度的估算; Gons 算法 ( $RMSE_{rel} = 21.90\%$ ) 相对于 Simis 算法 ( $RMSE_{rel} = 23.81\%$ ) 可以更好地反演 POC 的浓度。Gons 和 Simis 算法在巢湖 POC 反演中取得了较好的结果, 可以结合 MERIS 卫星用于巢湖水体 POC 估算。也可以为内陆湖泊水体碳循环研究提供技术和数据支撑, 具有重要的科学研究意义。

**关键词:** 颗粒有机碳; 叶绿素 a; 色素吸收; 生物光学模型

**中图分类号:** X122 **文献标识码:** A

## A novel algorithm to estimate POC concentrations in Chaohu Lake, China

WU Jing-Hui<sup>1,2</sup>, DUAN Hong-Tao<sup>1\*</sup>, ZHANG Yu-Chao<sup>1</sup>, MA Rong-Hua<sup>1</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on in situ data from Chaohu Lake, a novel algorithm was developed to estimate POC concentrations in eutrophic lakes. This two-step algorithm examined changes in absorption  $a_{ph}(665)$  and associated to POC concentrations through a measured relationship between  $a_{ph}(665)$  POC determined in extensive measurements in this large eutrophic lake. Two different  $a_{ph}(665)$  algorithms were explored. While both provided good estimates of POC concentrations, Gons algorithm ( $RMSE_{rel} = 21.90\%$ ) was superior to that of Simis ( $RMSE_{rel} = 23.81\%$ ). This approach was developed for medium-spectral resolution satellite sensors, such as MERIS or Sentinel 3-OLCI. The application of this approach will provide new insights to our understanding of the aquatic carbon cycle in inland waters.

**Key words:** particulate organic carbon (POC), chlorophyll, aquatic carbon cycle, pigments absorption, bio-optical algorithm

**PACS:** 07.07.Df

### 引言

湖泊是内陆水体的自然单元之一, 是陆地地表水碳元素重要的汇集地<sup>[1]</sup>。湖泊水体中的有机碳包括溶解有机碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC) 和颗粒有机碳, 其中 POC 的角色尤为重要, 因为它控制

了 DOC 和溶解无机碳 (Dissolved Inorganic Carbon, DIC) 的循环<sup>[2-3]</sup>, 并且贯穿于整个生态系统的生物传递—动力—物理化学作用过程中。

内陆水体表层 POC 源和汇复杂多变, 导致了 POC 浓度的高度时空不均匀性, 使得卫星遥感成为研究 POC 动力学强有力的工具。目前已有应用

收稿日期: 2014-11-24, 修回日期: 2015-10-08

基金项目: 国家自然科学基金 (41431176)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41431176)

作者简介 (Biography): 吴静汇 (1994-), 女, 安徽巢湖人, 硕士, 主要研究领域为湖泊水色遥感. E-mail: wujinghui199444@126.com

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

Received date: 2014-11-24, revised date: 2015-10-08

CZCS、MODIS、MERIS、SeaWiFS、GOGI 等水色遥感卫星构建不同算法来估算大洋 I 类水体的 POC 分布<sup>[2, 6-7]</sup>, 主要方法有: ①基于叶绿素 a 和颗粒物浓度的 POC 反演算法<sup>[8]</sup>; ②基于固有光学特性实现 POC 反演的“两步走”算法<sup>[4]</sup>; ③直接建立遥感反射率不同波段比值与 POC 浓度之间的经验关系等<sup>[5, 9]</sup>; ④其它如使用多光谱方法等来确定 POC 浓度的算法<sup>[10]</sup>. 然而海岸带和内陆湖泊等 II 类水体光学活性物质彼此独立变化, 大洋 I 类水体 POC 算法对于物质来源和光学特性复杂的 II 类水体并不完全适用<sup>[11]</sup>.

目前 II 类水体 POC 估算算法较少, 且主要围绕海岸带水体开展<sup>[12]</sup>, 内陆湖泊水体方面的工作才刚刚开始. 本研究以富营养化湖泊—巢湖为研究区, 主要分析其水体中 POC 浓度与叶绿素、悬浮物浓度等水色物质之间的关系, 并结合 POC 的来源、组成及其与生物传递过程的联系, 深入剖析 POC 与水体固有光学特性之间的内在关系, 尝试开发一种具有较高精度、较强适用性, 并可应用到 MERIS 传感器或 Sentinel 3-OLCI 传感器上的内陆富营养化水体 POC 浓度遥感反演算法.

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区

巢湖(117°16'54" ~ 117°51'46"E, 31°25'28" ~ 31°43'28"N), 位于安徽省中部, 属长江下游左岸水系, 面积约 769.55 km<sup>2</sup>, 是我国第五大淡水湖(图 1). 巢湖形态呈鸟巢状, 以姥山岛为界分为东半湖和西半湖; 平均水深 2.69 m, 最大水深 3.77 m, 平均水位 8.37 m, 蓄水量 20.7 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup><sup>[13]</sup>. 目前, 巢湖水域生态环境恶化, 富营养化问题严重, 蓝藻水华频繁爆发, 是我国富营养化最为严重的湖泊之一.

表 1 巢湖主要水色参数浓度

Table 1 Bio-optical properties of water samples in Chaohu Lake

日期	20130511	20130904	20130916	合计	
样点数目	42	14	13	69	
POC/(mg/L)	Range( Min-Max)	1.35 ~ 8.45	2.58 ~ 7.7	2.44 ~ 4.46	1.35 ~ 13.65
	Mean ± stdev	2.94 ± 1.59	4.11 ± 1.41	3.32 ± 0.60	3.50 ± 1.86
$a_g(440)/(1/m)$	Range( Min-Max)	0.18 ~ 1.00	0.44 ~ 1.27	0.65 ~ 1.38	0.18 ~ 3.13
	Mean ± stdev	0.47 ± 0.19	0.71 ± 0.23	0.93 ± 0.19	0.72 ± 0.39
SPM/(mg/L)	Range( Min-Max)	10 ~ 58	—	20 ~ 58	10 ~ 204
	Mean ± stdev	33.14 ± 12.87	—	34.25 ± 10.64	56.91 ± 38.61
SPIM/(mg/L)	Range( Min-Max)	2 ~ 40	—	11 ~ 44	2 ~ 117
	Mean ± stdev	17.55 ± 9.45	—	28.29 ± 9.78	28.57 ± 19.98
Chla/( $\mu\text{g/L}$ )	Range( Min-Max)	10.13 ~ 89.87	22.74 ~ 83.45	20.11 ~ 56.12	10.13 ~ 100.54
	Mean ± stdev	22.73 ± 15.10	40.7 ± 19.14	33.19 ± 11.19	17.54 ± 29.68

## 1.2 数据获取和处理

### 1.2.1 采样时间

分季节分区域采集巢湖表层水样, 2013 年共设有 3 次航次: 5 月 11 ~ 14 日、9 月 4 日、9 月 16-17 日, 共采集 81 个有效样点水样, 用于实验室分析; 另外, 同步测量水体遥感反射比、后向散射系数等光学参数, 以及透明度、风速风向等水环境和气象参数.

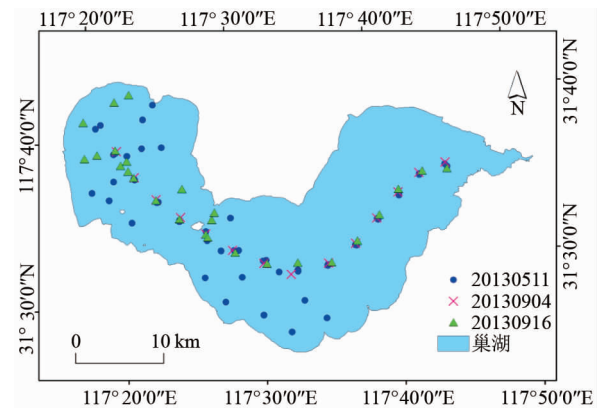


图 1 巢湖水体采样点位置分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling points in Chaohu Lake

### 1.2.2 参数测量

水体遥感反射比( remote sensing reflectance,  $R_{rs}$ )使用 ASD 公司生产的双通道地物光谱仪 Field Spec 931(波段为 350 ~ 1 050 nm)进行水面光谱测量; 后向散射系数利用 HS-6 后向散射仪测量. 用分光光度计( UV-2600)测量得到总颗粒物吸收系数  $a_p$ 、非色素颗粒物吸收系数  $a_d$ 、浮游植物色素吸收系数  $a_{ph}$ . 采用称重法测量悬浮物, 采用丙酮萃取法及分光光度计法测定叶绿素 a 浓度. POC 浓度测量采用称重法. 用 GF/F 在马弗炉中以 450°C 灼烧 4 h 后过滤水样, 后置于浓盐酸中 12 h 以除去样品中的无机碳. 酸化结束后在烘箱中 60°C 干燥 24 h, 称重

后包样,通过元素分析仪(EA3000)测定碳的百分含量,经计算得到各样点的 POC 浓度<sup>[14]</sup>.

### 1.2.3 数据集选取

部分样点由于受藻华等因素的影响,会引起较大的误差,对水华覆盖的样点和异常点进行了剔除. POC 模型分析中有效样点数为 69 个,其中 49 个(约 2/3)用于建模,其余 20 个用于验证(见表 1).

### 1.2.4 模型精度评价

在对模型估算值和实测值进行相关性分析时,基于绝对误差  $\alpha = Y_i - X_i$  和相对误差  $\beta = (Y_i - X_i) / X_i$  引入评价算法的四个指标:均方根误差 RMSE( $\alpha$  的均方根)、相对均方根误差( $\beta$  的均方根)、平均标准差 MNB( $\beta$  的算术平均值)和标准均方根误差 NRMS( $\beta$  的标准差)<sup>[23]</sup>. 其中, MNB 衡量的是系统误差,而 NRMS 评估随机误差.

### 1.3 Gons 和 Simis 算法介绍

Gons 和 Simis 算法是针对富营养化内陆水体浮游植物色素吸收及其浓度反演的经典算法<sup>[15-16]</sup>. Gons 算法通过计算浮游植物在 665 nm 波段的吸收  $a_{ph}(665)$  反演叶绿素<sup>[17]</sup>; Simis 在 Gons 算法的基础上,引入了修正因子  $\gamma$  来估算  $R_{rs}$  和色素吸收之间的关系,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 的估计值与测量值之比<sup>[18]</sup>.

## 2 结果和讨论

### 2.1 POC 与水色参数的关系

叶绿素 Chla、SPM 和 CDOM 浓度作为光学活性物质,是影响湖泊水色的三要素;因此,分析 POC 与这三者的关系(见表 1). 首先,通过对 POC 与悬浮物浓度( $N = 55, p < 0.000 1$ )相关性分析(图 2a),发现:POC 和 SPM 相关性一般( $r = 0.445 8$ )与 SPIM 关系较差( $r = 0.262 8$ ),但与 SPOM 关系相对较好( $r = 0.395 8$ ),说明 POC 主要受有机颗粒物影响. 另 SPM 与 SPOM 相关性高( $r = 0.853 3$ ),与 SPIM 相关性相对较低( $r = 0.616 1$ ),这揭示巢湖水体由

于富营养化严重,藻类浓度高,颗粒物主要由 SPOM 主导.

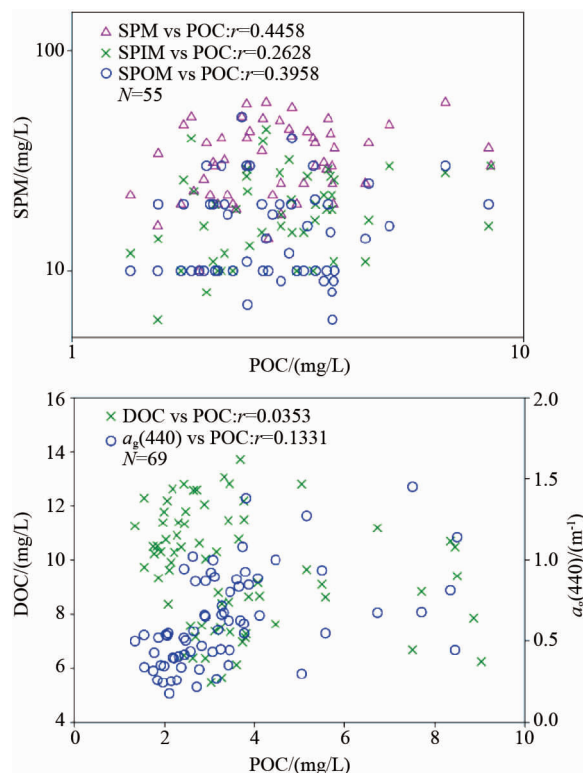


图 2 (a) 实测 POC 与悬浮物浓度相关性, (b) 实测 POC 与 DOC 和  $a_g(440)$  相关性

Fig. 2 The correlation of POC concentrations with (a) suspended matters and (b) DOC &  $a_g(440)$

对 POC 与 DOC 之间的相关性进行分析(图 2b),虽然 POC 的生产量与 DOC 的释放量呈较好的正比关系<sup>[19]</sup>,但由于 POC 来源众多,且 DOC 的变化亦受多种因素影响,两者之间几乎没有相关关系( $r = 0.035 3, N = 69, p < 0.1$ ). 另外,POC 与  $a_g(440)$  的关系亦很微弱( $r = 0.133 1, N = 69, p < 0.2$ ).

通过对巢湖 2013 年实际测量数据进行分析,发现 POC 与叶绿素  $a$  浓度之间呈现出明显的线性函数相关关系( $r = 0.723 2, N = 69, p < 0.000 1$ )(见图 3a);进一步分析发现,POC 浓度与浮游植物色素吸

表 2 巢湖主要水色参数浓度之间相关性分析

Table 2 Pearson correlation coefficients among biogeochemical variables in Chaohu Lake

	POC	Chla	SPM	SPOM	SPIM	$a_g(440)$	$a_{ph}(440)$	$a_d(440)$
POC	1							
Chla	0.723 2	1						
SPM	0.445 8	0.106 0	1					
SPOM	0.395 8	0.102 4	0.853 3	1				
SPIM	0.262 8	0.051 1	0.616 1	0.115 2	1			
$a_g(440)$	0.133 1	0.240 7	0.338 1	0.264 8	0.244 5	1		
$a_{ph}(440)$	0.672 3	0.679 9	0.399 6	0.440 5	0.097 6	0.269 9	1	
$a_d(440)$	0.287 6	0.067 6	0.781 9	0.648 1	0.511 4	0.180 0	0.161 7	1

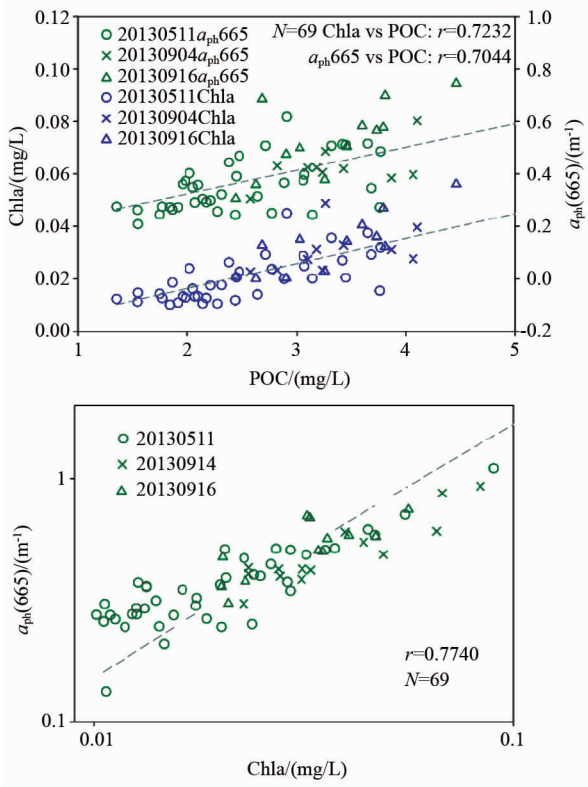


图3 比较(a)POC与实测Chla浓度、 $a_{ph}(665)$ , (b)Chla与 $a_{ph}(665)$ 的相关性  
 Fig. 3 Comparison of the correlation of (a) measured POC with measured Chla concentrations and  $a_{ph}(665)$  (b) measured Chla concentrations with measured  $a_{ph}(665)$

收  $a_{ph}(665)$  相关关系高 ( $r = 0.7044, N = 69, p < 0.0001$ )、而与碎屑吸收  $a_d(440)$  的相关性差 ( $r = 0.2876, N = 69, p < 0.3$ )。这主要由于巢湖水体富营养化严重,藻类大量富集,POC 主要来源于浮游植物及其新陈代谢产物,非生命有机碎屑只是 POC 组成的次要部分<sup>[20]</sup>。根据叶绿素  $a$  及其吸收与 POC 的密切关系,可以尝试通过已有叶绿素浓度算法间接反演 POC 浓度。和叶绿素  $a$  浓度,算法精度高,适用范围广,因此,可以尝试直接建立 Gons 和 Simis 算法中反演得到的特定波长浮游植物色素吸收  $a_{ph}(\lambda)$  与 POC 浓度的关系,构建 POC 浓度反演算法,提高模型精度。

## 2.2 POC 算法构建

### 2.2.1 模型参数率定

将数据代入 Gons 算法式(1)和 Simis 算法式(2)中,发现  $a_{ph}(665)$  实测数据和模型反演结果关系并不理想(图4):Gons 算法和 Simis 算法决定系数分别是  $R^2 = 0.5764$  和  $R^2 = 0.6149$ ,算法估算的  $a_{ph}(665)$  值均比实测  $a_{ph}(665)$  结果普遍偏低。可能

产生误差的原因如下:(1)由于 Gons 和 Simis 算法假设了 709 nm 波段的浮游植物吸收微乎其微,以及  $a_{ph}(665)$  全部由叶绿素吸收造成,其他色素吸收影响忽略不计,这可能导致  $a_{ph}(665)$  随着色素浓度的增加而被低估;(2)对 CDOM 和非藻类悬浮物吸收的忽略可能会导致  $a_{ph}(665)$  的高估;(3)由于内陆水体物质来源繁多,光学特性复杂,已发表的 Gons 和 Simis 算法校正因子  $p$  和  $\gamma$  的经验值并不完全适用于巢湖,因此需要进行参数的重新率定<sup>[33]</sup>。

利用实测数据,对两个模型参数  $p$  和  $\gamma$  进行率定,分为修正为: $p = 2.232, \gamma = 0.601$ (图5)。校正后 Gons 算法和 Simis 算法估算  $a_{ph}(665)$  与实测  $a_{ph}(665)$  精度有显著提高,决定系数分别为  $R^2 = 0.786$  和  $R^2 = 0.685$ ,RMSE<sub>rel</sub> 分别降为 37.88% 和 27.13%。

### 2.2.2 模型构建

利用巢湖 49 个样点数据集和新得到的校正参数,分别得到针对 POC 的 Gons 和 Simis 算法,其中(图6):

$$\text{Gons 算法: } POC = 5.4933 \times a_{ph}(665) + 0.7229 \quad (R^2 = 0.786, N = 49, p < 0.0001) \quad (1)$$

$$\text{Simis 算法: } POC = 4.448 \times a_{ph}(665) + 1.1725 \quad (R^2 = 0.656, N = 49, p < 0.0001) \quad (2)$$

校正方式的差异导致 Gons 和 Simis 算法对  $a_{ph}(665)$  反演结果不同,Gons 算法精度相对较高。总体来说,两者均可应用于内陆富营养化水体 ( $Chla < 100 \mu g/L, POC < 20 \text{ mg/L}$ )。

### 2.2.3 模型验证和精度评价

选择未参加模型训练的其余 1/3 (20 个) 数据集对模型进行验证,发现 2 个模型均适用于巢湖水体,其中:Gons 算法决定系数  $R^2 = 0.7356$ ,MNB = 7.06%,NRMS = 21.16%,RMSE<sub>rel</sub> = 21.90% (图7a); Simis 算法决定系数  $R^2 = 0.672$ ,MNB = 7.74%,NRMS = 22.97%,RMSE<sub>rel</sub> = 23.81% (图7b)。两个算法估算值均具有较高精度,但总体而言,Gons 算法的反演效果要优于 Simis 算法。

分析了两者的差异,主要原因是:(1)Gons 算法利用指数  $p$  对水体  $b_b$  在近红外波段为常数进行了有效修正;(2)Simis 算法通过斜率  $\gamma$  反映 665 nm 波段对浮游植物色素的反演吸收和实测吸收的比值,没有考虑  $b_b$  在 665 nm 和 705 nm 不一致造成误差,而  $b_b$  在  $a_{ph}(\lambda)$  反演中有较大作用。因此,最终推荐精度更高的 Gons 算法用于巢湖水体 POC 反演。

### 2.3 与已有算法的比较

POC 的研究目前主要集中在大洋 I 类水体,大



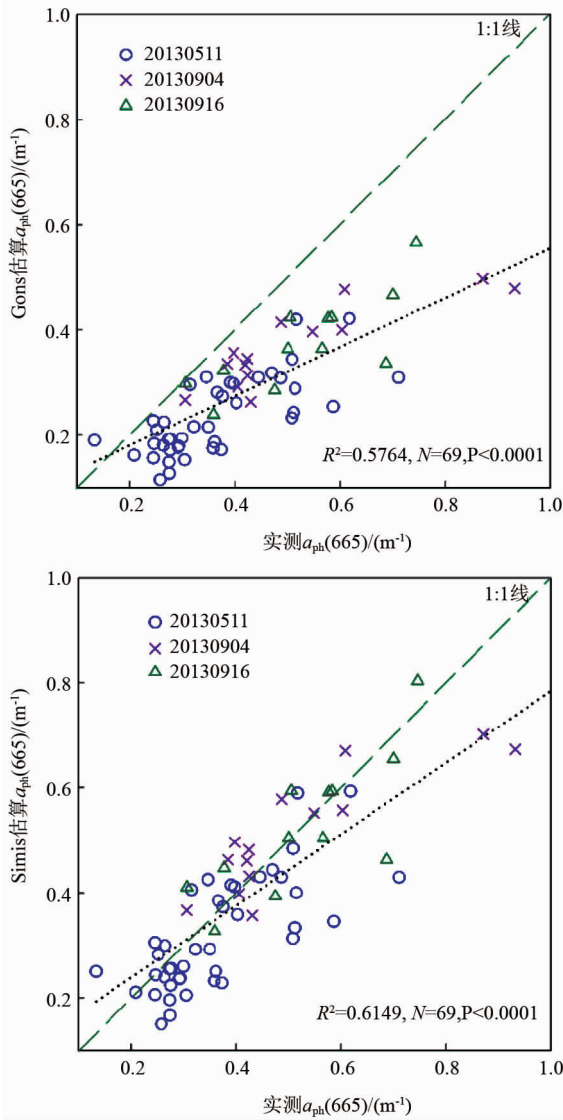


图4 巢湖实测吸收  $a_{ph}(665)$  与未校正模型反演  $a_{ph}(665)$  相关性 (a) Gons 算法, (b) Simis 算法  
 Fig. 4 Relationships between measured  $a_{ph}(665)$  and estimated  $a_{ph}(665)$  from uncorrected (a) Gons, (b) Simis algorithms

洋水体 POC 的来源主要是藻类及其衍生物,外源输入很少;内陆湖泊等 II 类水体,物质来源复杂,除了水体本身巨量的藻颗粒外,流域外源物质以及水体底部物质,都有较大贡献.利用巢湖数据,针对现有的大洋水体 POC 模型进行验证,发现效果普遍较差,无法用于内陆湖泊水体 POC 反演(表3).在海洋中  $b_{bp}$  与 POC 表现出较好的幂指数关系,但巢湖后向散射影响因素复杂,  $b_{bp}(590)$  与 Chla 浓度相关性较差,与 SPM 和 SPIM 的相关性亦不明显,因此在巢湖等富营养化湖泊难以用后向散射系数进行反演.而对于蓝绿波段组合来说,本身无法用于内陆水

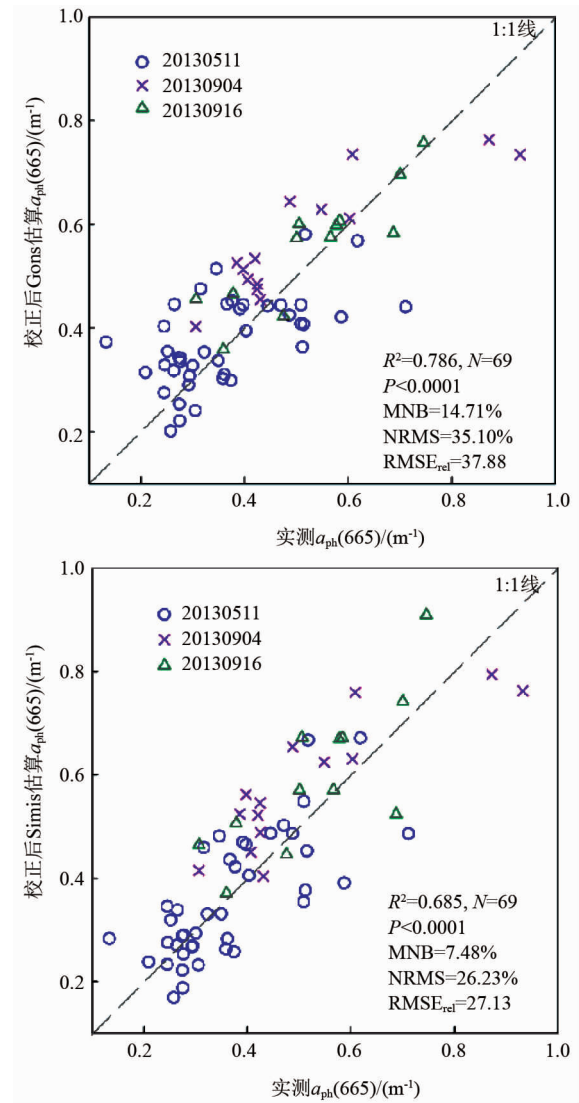


图5 巢湖实测吸收  $a_{ph}(665)$  与校正后模型反演  $a_{ph}(665)$  的相关性 (a) Gons 算法, (b) Simis 算法  
 Fig. 5 Relationships between measured  $a_{ph}(665)$  and estimated  $a_{ph}(665)$  from corrected (a) Gons, (b) Simis algorithms

体,因此效果偏差可以想象.构建的 Gons 和 Simis 算法通过反演  $a_{ph}(665)$  估算 POC 浓度,考虑了内陆水体复杂的光学特性,避开了 CDOM 和碎屑颗粒的影响,因此精度较高.

表3 POC 算法和应用到 2013 年巢湖数据的结果  
 Table 3 POC algorithms and results when applied to Chaohu Lake data in 2013

算法	表达式	来源
算法 1 $b_{bp}(590)$	$POC = 2.7405b_{bp}(590)^0.7286$ $R^2 = 0.1, N = 69, P = 0.0001$	Stramski et al. 1999, 2008
算法 2 $R_{rs}$ Radio	$POC = 0.4434 \times (R_{rs}(490)/R_{rs}(555))^{-4.565}$ $R^2 = 0.48, N = 69, P = 0.0783$	Allison et al., 2010a

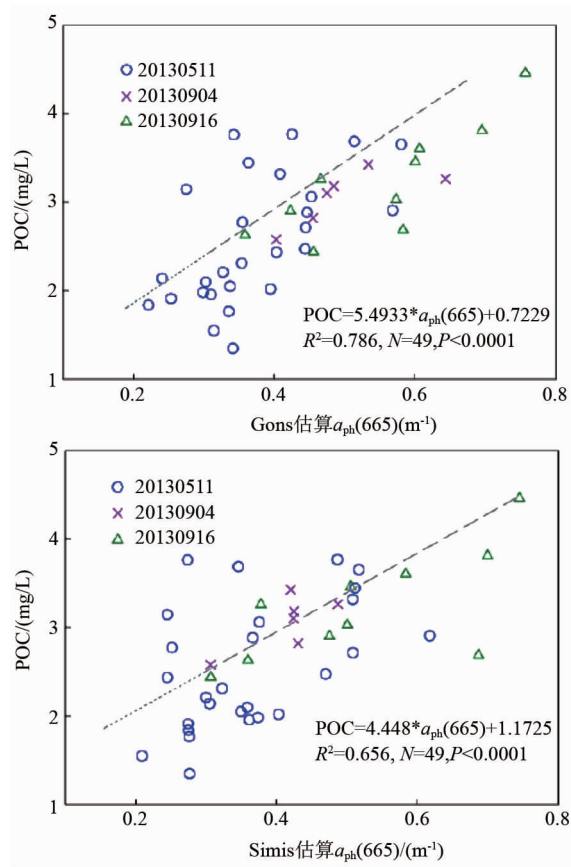


图 6 基于模型的 POC 反演结果 (a) Gons; (b) Simis  
Fig. 6 (a) Gons and (b) Simis algorithms estimated  $a_{ph}$  (665) inverted POC

算法	表达式	来源
算法 3 $N$	$\text{Log}(\text{POC}) = -19.2 \times N^3 + 61.7 \times N^2 - 23.7 \times N + 2.8172$ $N = (R_{rs}(555) - R_{rs}(443)) / (R_{rs}(555) + R_{rs}(443))$ $R^2 = 0.50, N = 69, P < 0.0001$	Son et al., 2009
算法 4 Gons	$\text{POC} = 5.153 \times a_{ph}(665) + 0.9056 (p = 232)$ $R^2 = 0.786, N = 49, P < 0.0001$	Gons et al. 1999, 2002
算法 5 Simis	$\text{POC} = 4.0262 \times a_{ph}(665) + 1.247 (\gamma = 0.601)$ $R^2 = 0.656, N = 49, P < 0.0001$	Simis et al., 2005a

### 3 结论

对巢湖中 POC 与水色参数之间的关系进行了探究,利用 Gons 和 Simis 算法构建了一种富营养化湖泊中 POC 浓度的估算算法. 在没有藻华覆盖的情况下,可通过 Gons 和 Simis 算法估算的  $a_{ph}(665)$  来反演 POC 浓度,对算法参数进行率定之后,精度  $\text{RMSE}_{\text{rel}}$  可分别达到 21.90% 和 23.81%; Gons 算法相对于 Simis 算法可以更好地反演 POC 的浓度,推荐在数据集相同的富营养化湖泊中使用. 通过与其他估算大洋水体 POC 算法的比较,该方法对于内陆水体 POC 的估算具有较高精度、较强适用性,并可

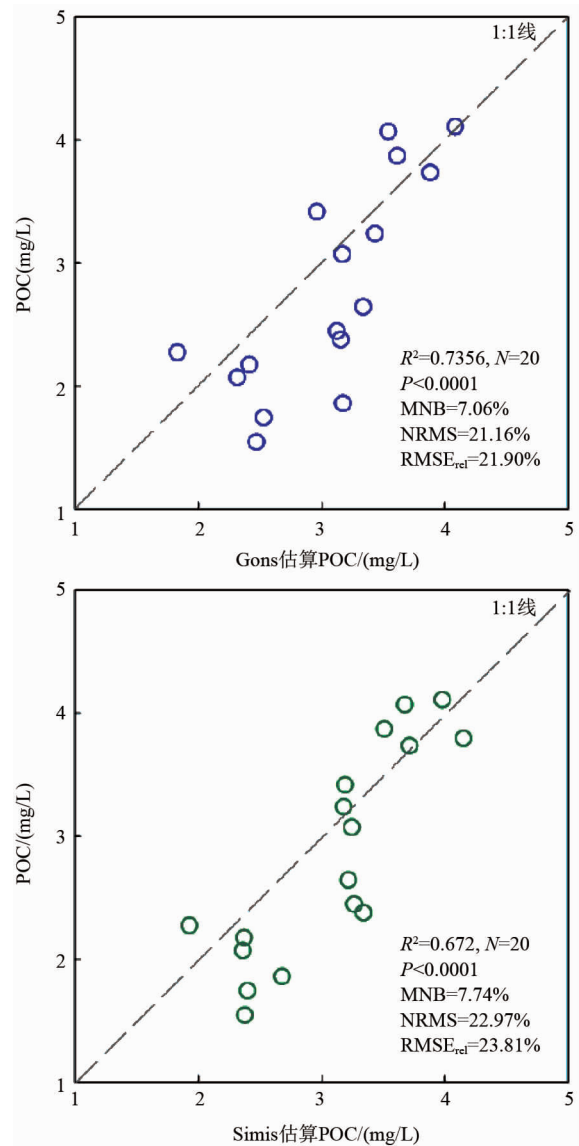


图 7 验证 (a) Gons 算法, (b) Simis 算法估算的  $a_{ph}(665)$  反演 POC 的准确性

Fig. 7 Validation of the result of (a) Gons and (b) Simis algorithms

进一步应用到水色卫星上,为探究内陆水体碳循环提供一个新的途径,具有较大的科学研究意义.

### 致谢

感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊-流域科学数据共享平台”提供数据支持,感谢 Steven Loisel 教授对英文摘要的提高,感谢姜广甲博士在论文撰写方面的指导,感谢薛坤、陶懋、易梅森、庞晓宇、李佐琛、李晶、卮兆骏等参与采样.

### References

[1] Bryhn A C, Hessen D O, Blenckner T. Predicting particulate pools of nitrogen, phosphorus and organic carbon in lakes

- [J]. *Aquatic Sciences*, 2007, **69**(4): 84–94.
- [2] Gardner W D, Mishonov A V, Richardson M J. Global POC concentrations from in-situ and satellite data[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2006, **53**(5-7): 18–40.
- [3] Malgorzata S. Particulate organic carbon in the global ocean derived from SeaWiFS ocean color[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, **56**(9): 1459–1470.
- [4] Stramska M. Variability of particulate organic carbon concentration in the north polar Atlantic based on ocean color observations with Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(C10): 1–16.
- [5] Allison D, Mitchell S M. Empirical ocean color algorithms for estimating particulate organic carbon in the Southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: 10–44.
- [6] Stramski D. Estimation of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing[J]. *Science*, 1999, **285**(5425): 239–242.
- [7] Mishonov A V, Gardner W D, Jo Richardson M. Remote sensing and surface POC concentration in the South Atlantic[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, **50**(22-26): 2997–3015.
- [8] Moore J K, Doney S C. Remote sensing observations of ocean physical and biological properties in the region of the Southern Ocean Iron Experiment (SOFeX)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(C6): 1–12.
- [9] Stramski D, Reynolds R A, Babin M, *et al.* Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans[J]. *Biogeosciences*, 2008, **5**: 171–201.
- [10] Son Y B, Gardner W D, Mishonov A V, *et al.* Multispectral remote-sensing algorithms for particulate organic carbon (POC): The Gulf of Mexico[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(1): 50–61.
- [11] Yamaguchi H, Montani S, Tsutsumi H, *et al.* Estimation of particulate organic carbon flux in relation to photosynthetic production in a shallow coastal area in the Seto Inland Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **47**(1-6): 18–24.
- [12] Hadjimitsis D, Clayton C. Field spectroscopy for assisting water quality monitoring and assessment in water treatment reservoirs using atmospheric corrected satellite remotely sensed imagery[J]. *Remote Sensing*, 2011, **3**(12): 362–77.
- [13] WANG Su-Min, DOU Hong-Shen. *Chinese lakes*[M]. Beijing: Science Press(王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社), 1998: 230.
- [14] Yentsch C S, Menzel D W. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence[J]. *Deep Sea Research*, 1963, **10**: 221–231.
- [15] Simis S G H, Peters S W M, Gons H J. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(1): 237–245.
- [16] 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.
- [17] Gons H J. Effect of a waveband shift on chlorophyll retrieval from MERIS imagery of inland and coastal waters[J]. *Journal of Plankton Research*, 2004, **27**(1): 125–7.
- [18] Simis S G H, Ruiz-Verdú A, Domínguez-Gómez J A, *et al.* Influence of phytoplankton pigment composition on remote sensing of cyanobacterial biomass[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **106**(4): 14–27.
- [19] Son Y B, Gardner W D, Mishonov A V, *et al.* Model-based remote sensing algorithms for particulate organic carbon (POC) in the Northeastern Gulf of Mexico[J]. *Journal of Earth System Science*, 2009, **118**(1): 1–10.
- [20] JIN Jing-Wei, DUAN Hong-Tao, ZHAO Chen-Lu, *et al.* Remote estimation of phytoplankton pigments in inland lake waters with algae[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*(金经纬, 段洪涛, 赵晨露, 等. 湖泊藻类水体浮游植物色素遥感反演模型. 红外与毫米波学报), 2012, **31**(2): 132–136.