

富营养化水体颗粒有机碳浓度的遥感估算 及动态变化特征

姜广甲^{1,2}, 苏文³, 马荣华^{2*}, 段洪涛², 蔡伟叙¹,
黄楚光¹, 阳杰¹, 余威¹

- (1. 国家海洋局南海环境监测中心, 广东 广州 510300;
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. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广东 广州 510310)

摘要: 基于 2011 年 5 次太湖水体现场测量数据, 分析富营养化水体颗粒有机碳 (POC) 对遥感反射比的影响, 构建了 POC 含量的遥感定量估算模型, 并结合 MERIS 遥感影像资料, 揭示了太湖水体 POC 浓度的时空变化特征。结果表明, 太湖水体中的 POC 对 560~709 nm 波段范围内的遥感反射比影响显著; 基于海洋水环境特征构建的 POC 浓度遥感估算模型不适用于太湖水体; 通过分析富营养化水体的光学特性以及 POC 对遥感反射比的影响, 发现 MERIS 传感器红 (620 nm)、近红外 (709 nm) 波段遥感反射比的比值与 POC 浓度具有较好的相关关系 ($R^2 = 0.75$, $n = 132$, $RMSE = 33.27\%$, $P < 0.05$), 适于太湖水体 POC 浓度的遥感估算。

关键词: 太湖; POC; 碳循环; 叶绿素 a; II 类水体

中图分类号: X87 文献标识码: A

Remote estimation and temporal-spatial variability of particulate organic carbon concentrations in eutrophic inland water

JIANG Guang-Jia^{1,2}, SU Wen³, MA Rong-Hua^{2*}, DUAN Hong-Tao², CAI Wei-Xu¹,
HUANG Chu-Guang¹, YANG Jie¹, YU Wei¹

- (1. South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China;
2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
3. South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China)

Abstract: Based on five field cruises in 2011 from Taihu Lake, the effect of particulate organic carbon (POC) assembles on remote sensing reflectance of water was performed to develop a new POC estimation algorithm for eutrophic inland waters. The optical model was used with monthly MERIS data to assess the temporal and spatial variability of surface POC reservoirs in Taihu Lake. The results demonstrated that the particulate organisms highly controlled the remote sensing reflectance of water in the range of 560~709 nm in this lake. The approaches from ocean color did not provide good estimates of POC concentrations in Taihu Lake, a more optically complex water dominated by inorganic detritus. By investigating the optical properties of the eutrophic water, we found that POC was distinctly correlated to the remote sensing reflectance ratio ($R_{rs}(620)/R_{rs}(709)$) with high $R^2 = 0.75$ and low $RMSE = 33.27\%$, the correlation of which provided a good estimate of POC concentrations in Taihu Lake.

Key words: Taihu Lake, POC, carbon cycle, chlorophyll a, Case II waters

PACS: 78.30.-j

收稿日期: 2014-01-07, 修回日期: 2015-02-02

Received date: 2014-01-07, revised date: 2015-02-02

基金项目: 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目 (2014SKL006); 国家 863 计划课题 (2014AA06A509); 国家自然科学基金重点基金 (41431176); 研究所一三五重点突破课题 (ZDTP20140203)

Foundation items: Supported by State Key Laboratory of Lake Science and Environment (2014SKL006), National 863 Program (2014AA06A509), National Natural Science Foundation of China (41431176), and the 135-Program (ZDTP20140203)

作者简介 (Biography): 姜广甲 (1983-), 男, 山东泰安人, 博士, 工程师, 主要从事水环境遥感研究. E-mail: gjjiang2011@gmail.com

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

引言

湖泊水体中的有机碳主要以溶解有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)和颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)的形式存在,其产生和传输利用成为生态系统物质转化和能量流动的关键环节^[1].其中,POC在湖泊碳循环和湖泊生态系统中举足轻重,在一定程度上控制着水体中溶解有机碳、胶体有机碳以及溶解无机碳的行为^[2],与生物的生命过程、初级生产力等密切相关,是评价湖泊水体生产力的重要参量^[3].

水体中POC含量受来源、水动力条件、初级生产力、光照及生物活动的影响,在水平、垂直方向和不同季节的分布差异显著^[4].POC含量的传统监测方法受限于财力和人力资源,并且样点的代表性较差,不能从整体上掌握POC浓度的时空分布情况.水色遥感技术的快速发展及其相关研究的不断深入,在水环境的动态监测中已广泛应用^[5].海洋水体中,POC浓度的遥感估算方法主要是基于POC与后向散射系数^[6]、漫衰减系数^[2]以及蓝绿波段比值^[7-8]之间的相关关系.最近的研究表明,基于蓝绿波段的归一化碳指数方法(Normalized difference carbon index, NDCI)提高了墨西哥湾POC浓度的遥感估算精度^[9].而对于内陆水体,其光学特性极为复杂,水体中的悬浮泥沙和有色溶解有机物对水体的表现反射率贡献较大^[10],影响了POC浓度与浮游植物碳含量之间的定量关系,因此,利用遥感技术监测内陆水体中颗粒有机碳浓度的时空分布状况以及研究颗粒有机碳的动力变化过程,有助于推动水色遥感的发展与应用,并将为深入研究内陆水体在全球气候变化中的作用奠定方法论基础.

太湖位于长江三角洲南部(30°55'~31°32'N, 119°53'~120°36'E),湖泊水面面积为2338.1 km²,平均水深1.9 m,是典型的大型内陆浅水富营养化湖泊^[11-12].以太湖为研究区,探讨富营养化水体中颗粒有机碳浓度的遥感估算方法,并结合MERIS遥感影像数据,揭示太湖水体POC浓度的时空变化特征.

1 数据与方法

1.1 样点布设

分别于2011年1月、3月、5月、8月和11月在太湖布设样点采集表层水样,测量水体的遥感反射

光谱、透明度、风速风向、水深等数据,同时记录水环境状况(图1).由于蓝藻水华水域影响了POC浓度的遥感估算,根据 $R_{rs}(745)/R_{rs}(665) > 3.0$ 的原则^[13]剔除藻华水域采样点(共5个),参与模型运算的样点共计132个.采样点信息见表1.

1.2 遥感光谱数据与后向散射数据采集

采用水面之上测量法测定水体遥感反射比^[14],具体步骤见文献^[5].根据MERIS卫星传感器的波段响应函数,将实测光谱重采样为模拟的MERIS数据,重采样规则与文献^[15]保持一致.测量水体后向散射系数使用的仪器是HydroScat-6后向散射仪(美国Hobilabs公司,HS-6)^[16],具体的参数设置和操作步骤与文献^[17]保持一致,通过计算得到水体中总悬浮物的后向散射系数(b_{bp}, m^{-1}).

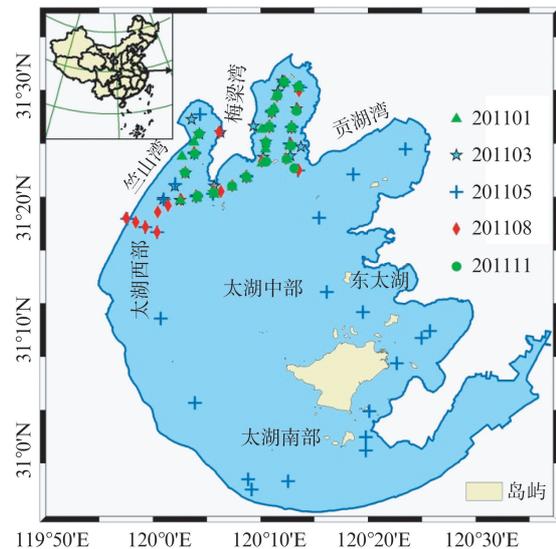


图1 太湖采样点分布(在5次采样中,梅梁湾、竺山湾区域的样点重合)

Fig. 1 Geographical distribution of water samples in Taihu Lake

表1 太湖采样点信息

Table 1 Sampling campaigns in Taihu Lake

指代词	采样区域	采样时间	采样个数
201101	梅梁湾、竺山湾	2011年1月22日—1月23日	18
201103	梅梁湾、竺山湾	2011年3月24日—3月25日	26
201105	整个太湖	2011年5月1日—5月8日	49
201108	梅梁湾、竺山湾	2011年8月31日—9月2日	28
201111	梅梁湾、竺山湾	2011年11月1日—11月2日	11

1.3 水质参数和水体组分吸收系数测量

采用电子天平称重法测定悬浮物浓度($c_{TSS}, mg \cdot L^{-1}$)和有机悬浮物浓度($c_{OSS}, mg \cdot L^{-1}$);叶绿素a浓度($c_{Chla}, \mu g \cdot L^{-1}$)的测量采用分光光度法;

用 Whatman GF/C 过滤水样后,加入 pH 7.0 Tris 缓冲液研磨,然后在荧光分光光度计中测量计算得到藻蓝素浓度(c_{PC} , $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$);经高温灼烧(450 °C)后的 Whatman GF/F 滤膜过滤水样,利用 EA 3000 的元素分析仪测定 POC 浓度(c_{POC} , $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$).

实验室内利用分光光度计法测定水体中颗粒物和有色溶解有机物(Chromophoric dissolved organic matter, CDOM)的吸收系数.颗粒物的吸收采用定量滤膜技术(QFT)测定^[18],即利用 Whatman GF/F 过滤水样后用分光光度计测量颗粒物的吸收系数($a_p(\lambda)$, m^{-1}),经甲醇浸泡后测量非色素颗粒物的吸收系数($a_d(\lambda)$, m^{-1}),两者之差即可得到色素颗粒物的吸收系数($a_{\text{ph}}(\lambda)$, m^{-1});使用 10% 的盐酸浸泡后的 Whatman Nuclepore 滤膜(孔径为 0.22 μm)过滤水样得到滤液,用分光光度计测定 CDOM 吸收系数($a_g(\lambda)$, m^{-1}).

1.4 遥感数据处理

基于中欧合作项目“龙计划”三期项目,共获取 2011 年全年的 MERIS(空间分辨率 1 000 m)1b 影像数据,共计 11 景(由于全云覆盖,8 月份无 MERIS 影像).获取 MERIS 影像数据的日期为:1 月 9 日、2 月 24 日、3 月 10 日、4 月 20 日、5 月 1 日、6 月 27 日、7 月 24 日、9 月 3 日、10 月 9 日、11 月 21 日和 12 月 10 日.其中,5 月 1 日的影像与实测样点相匹配(共计 12 个采样点),用于卫星遥感影像产品的精度验证.

1.5 遥感模型

在海洋水体中,POC 浓度的遥感估算模型主要有 3 种:Two-step 模型^[6],波段比值模型^[7-8]和 NDCI 模型^[9].为了对比分析富营养化水体中构建的 POC 含量的遥感估算模型,利用太湖样点数据评价以上三种模型的适用性.海洋水体中三种

POC 浓度遥感模型的形式如下:

Two-step 模型:

$$c_{\text{POC}} = a_1 \times b_{\text{bp}}(590)^{b_1}, b_{\text{bp}}(590) = a_2 \times R_{\text{rs}}(560) + b_2, \quad (1)$$

其中, a_1 、 b_1 、 a_2 和 b_2 为拟合系数.

波段比值模型:

$$c_{\text{POC}} = a \times (R_{\text{rs}}(490)/R_{\text{rs}}(560))^b, \quad (2)$$

其中, a 和 b 为拟合系数.

NDCI 模型:

$$\begin{aligned} \text{Log}(c_{\text{POC}}) &= a_1 \times N^3 + a_2 \times N^2 + \\ &a_3 \times N + a_4, N = [R_{\text{rs}}(560) - R_{\text{rs}}(443)] / \\ &[R_{\text{rs}}(560) + R_{\text{rs}}(443)] \end{aligned}, \quad (3)$$

其中, a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 为拟合系数.

2 结果

2.1 太湖水体水质参数浓度变化特征

不同航次太湖水体水质参数(c_{POC} 、 c_{PC} 、 c_{Chla} 、 c_{TSS} 和 c_{OSS})的浓度均值差异显著(表 2). POC 浓度 201108 的均值最大,并且具有最大的变异系数(0.42),说明该月份 POC 浓度的空间差异较大;其次是 201111 期 c_{POC} 均值,但 201108 期和 201111 期的 c_{Chla} 均值基本相同,均大于其他采样期,且 c_{PC} 具有相似的变化趋势.201103 和 201105 两期的 c_{POC} 均值差别不大,但均低于其他采样期;同时,两期数据具有较小的 c_{PC} 和 c_{Chla} 均值.对于悬浮物浓度来说, c_{TSS} 均值的最大值出现 201105 期,约为 201111 期的 2.2 倍,其次是 201108 期,201101 和 201103 差别不大;对比不同采样有机悬浮物占总悬浮浓度的比例($R = c_{\text{OSS}}/c_{\text{TSS}}$)发现,201111、201101 和 201108 期 R 值差别不大,分别为 0.34、0.33 和 0.32,201105 期悬浮物的有机部分最少,只占 17%.

表 2 5 次采样中太湖水体水质参数的均值

Table 2 Averaged values of water variations during the five sampling campaigns in Tai Lake

样期	$c_{\text{POC}}(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$		$c_{\text{PC}}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$		$c_{\text{Chla}}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$		$c_{\text{TSS}}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$c_{\text{OSS}}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	
	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数
201101	2 042.57 ± 774.92	0.38	3.28 ± 9.07	2.77	17.49 ± 7.24	0.41	21.45 ± 6.36	0.30	7.10 ± 3.23	0.45
201103	1 558.06 ± 380.59	0.24	0.80 ± 0.47	0.59	16.41 ± 11.79	0.72	24.09 ± 10.49	0.44	5.24 ± 1.90	0.36
201105	1 653.19 ± 792.70	0.48	0.92 ± 0.48	0.52	13.08 ± 10.02	0.77	43.47 ± 27.56	0.63	7.24 ± 3.03	0.42
201108	4 842.50 ± 2 038.64	0.42	29.23 ± 38.08	1.30	24.88 ± 13.64	0.55	39.11 ± 11.60	0.30	12.34 ± 5.82	0.47
201111	3 290.69 ± 1 263.00	0.38	21.86 ± 27.08	1.24	24.37 ± 15.81	0.65	19.58 ± 2.82	0.14	6.69 ± 2.92	0.44
全部样点	2 476.43 ± 1 722.44	0.70	8.67 ± 22.11	2.55	17.62 ± 12.22	0.69	33.91 ± 21.02	0.62	7.82 ± 4.30	0.55

2.2 太湖水体 POC 浓度的遥感估算模型

2.2.1 POC 浓度对遥感反射比的影响

水体中的颗粒有机碳是有机悬浮物的一部分,

同属于悬浮颗粒物的有机部分,因此影响了水体的离水辐亮度或者遥感反射比^[19].5 次现场实验中,POC 浓度的变化范围为:789.47 ~ 9 524.79 $\text{mg} \cdot$

m^{-3} , 均值为 $2\,476.43 \pm 1\,722.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 为分析不同 POC 浓度在不同的 MERIS 遥感影像波段对水体遥感反射比的影响, 确定 POC 的起始浓度为 $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 考虑到现场 POC 浓度的方差约为 $2\,000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 故选取的 POC 浓度梯度为: $1\,000, 3\,000, 5\,000, 7\,000$ 和 $9\,000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

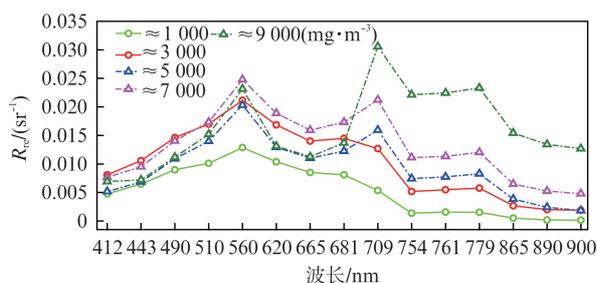


图2 不同 POC 浓度与模拟 MERIS 数据的遥感反射比之间的关系

Fig.2 Comparison of POC concentrations and remote sensing reflectance from simulated MERIS data

基于模拟的 MERIS 数据讨论 POC 浓度对水体遥感信号的影响(图2), 以明显反射峰为分割点, 发现在 $412 \sim 560 \text{ nm}$ 以及 $709 \sim 900 \text{ nm}$ 波段范围内, 遥感反射比的波谱形状变化相似, 表现为: 在 $412 \sim 560 \text{ nm}$ 范围内, $R_{rs}(\lambda)$ 随波长的增大而增加; 而在 $709 \sim 900 \text{ nm}$ 波段范围内 $R_{rs}(\lambda)$ 呈现先下降后增加再下降的变化趋势, 在 779 nm 处有个较小的反射峰, 并且随 POC 浓度的增大 $R_{rs}(\lambda)$ 逐渐增加. 在 $560 \sim 709 \text{ nm}$ 波段范围内, $R_{rs}(\lambda)$ 随 POC 含量的变化而呈现不同的变化趋势, 即当 POC 浓度小于 $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, $R_{rs}(\lambda)$ 随波长的增大而递减, 而当 $c_{\text{POC}} \geq 5\,000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 遥感反射比呈“V”字型变化, 在 665 nm 处出现了反射谷.

2.2.2 POC 浓度的遥感估算模型

通过分析 POC 浓度对水体遥感反射比的影响, 发现 POC 浓度对 $560 \sim 709 \text{ nm}$ 波段范围内的遥感反射比影响显著(图2). 因此, 利用该波段范围内的遥感反射比构建遥感定量模型可以区分太湖水体不同的 POC 浓度.

太湖蓝藻水华频繁暴发, 蓝藻在太湖水体浮游生物群落中占主导优势^[20]. 藻蓝素(藻青蛋白)是蓝藻的标志性色素^[21-22], 并且在 620 nm 处对光有很强的吸收, 因此可作为藻蓝素遥感定量反演的敏感波段^[23]. MERIS 遥感数据的第 9 波段(中心波长为 709 nm) 对叶绿素 a 浓度的变化比较敏感, 可以作为浮游藻类形成水华的标志性

波段^[24]. 因此, 我们构建经验算法估算太湖水体的 POC 浓度, 即建立 $R_{rs}(620)/R_{rs}(709)$ 与的 c_{POC} 定量关系.

利用 5 期的实验数据, 构建太湖水体 POC 浓度的遥感定量模型, 经过拟合统计, 发现对数形式结果最好. 其形式表达为:

$$c_{\text{POC}} = -4\,633 \times \ln[R_{rs}(620)/R_{rs}(709)] + 4\,152.45 \quad (R^2 = 0.75, n = 132, \text{RMSE} = 33.27\%, P < 0.05) \quad (4)$$

2.2.3 POC 浓度遥感估算模型的对比

基于太湖水体的生物光学数据, 建立 POC 含量与 $b_{\text{bp}}(590)$ 、 $R_{rs}(490)/R_{rs}(560)$ 和 NDCI 之间的相关关系, 用于评价针对海洋水体构建的 POC 含量遥感估算模型(表3). 结果表明, POC 与以上三个参量的相关关系较差, 三种算法的决定系数 R^2 均小于 0.40, 且 $\text{RMSE} > 45.0\%$, 因此, 基于海洋水体环境构建的 POC 浓度遥感估算模型不适用于太湖水体.

表3 利用太湖现场数据评价 POC 浓度的遥感估算模型
Table 3 Summary of the remote sensing – based POC algorithms tuned using data sampled from Taihu Lake

名称	模型形式
Two-step 模型	$\text{POC} = 2\,502.41 \times b_{\text{bp}}(590)^{0.28}$
	$b_{\text{bp}}(590) = 10.17 \times R_{rs}(560) + 0.18$ $R^2 = 0.04, \text{RMSE} = 72.21\%, n = 132, P = 0.13$
波段比值模型	$\text{POC} = 1\,061.72 \times [R_{rs}(490)/R_{rs}(560)]^{-1.40}$ $R^2 = 0.23, \text{RMSE} = 65.32\%, n = 132, P = 0.23$
	$\text{Log}(\text{POC}) = -8.79 \times N^3 + 12.66 \times N^2 - 4.06 \times N + 3.52$ $N = [R_{rs}(560) - R_{rs}(443)]/[R_{rs}(560) + R_{rs}(443)]$ $R^2 = 0.34, \text{RMSE} = 45.55\%, n = 132, P = 0.32$

2.3 太湖水体 POC 浓度遥感估算模型的应用

对比分析准同步 MERIS 遥感影像的估算 POC 浓度与现场 POC 含量之间的相关关系, 以验证 POC 浓度遥感估算算法的精度(图3). 结果表明, 卫星遥感影像估算结果与实测值保持了较好的一致性, 两者具有较好的相关关系 ($R^2 = 0.64$, $\text{RMSE} = 13.6\%$, $n = 12$, $P < 0.01$), 说明该模型可用于预处理后的 MERIS 遥感影像.

利用浮游藻类指数法(Floating Algae Index)即 $\text{FA I} > 0.03$ 的阈值标准^[25] 剔除蓝藻覆盖水域对 POC 浓度估算的影响. 东太湖水域覆盖大量的沉水和浮水植被, 属于光学浅水水域, 很大程度上影响了 POC 含量的估算结果, 故不考虑东太湖水域^[26]. 图像中的空白区域代表有云覆盖区域或者

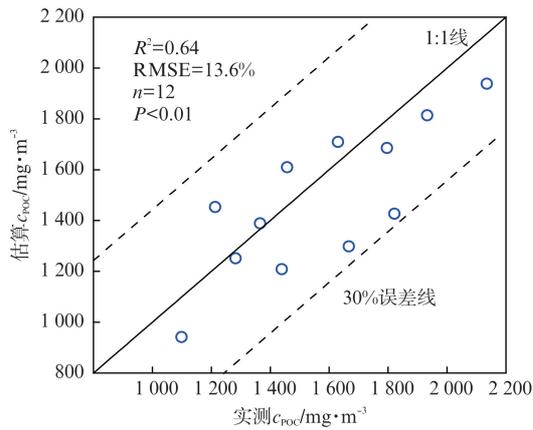
图3 实测 c_{POC} 与估算 c_{POC} 之间的关系

Fig. 3 Relationship between measured and estimated POC concentrations in Taihu Lake

是蓝藻覆盖区域.太湖近岸水域的 POC 浓度出现较大幅度的变化,主要原因是:风速风向影响了蓝藻水华漂移路径,使得蓝藻水华在近岸水域大量积聚;陆地像元对水体像元的遥感反射比也有一定的影响.

基于不同时相的 MERIS 遥感影像获取了太湖水体 POC 含量的时空分布状况(图 4),POC 浓度在 $0 \sim 6000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内变化.整体上看,2011 年 4 月 20 日太湖水体 POC 浓度均值较高,大部分水域在 $3000 \sim 4000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间变化.太湖西部水域与竺山湾、梅梁湾和贡湖湾 3 个湾口的 POC 浓度高于其他水域,主要与该水域高频次暴发蓝藻水华有关^[12].

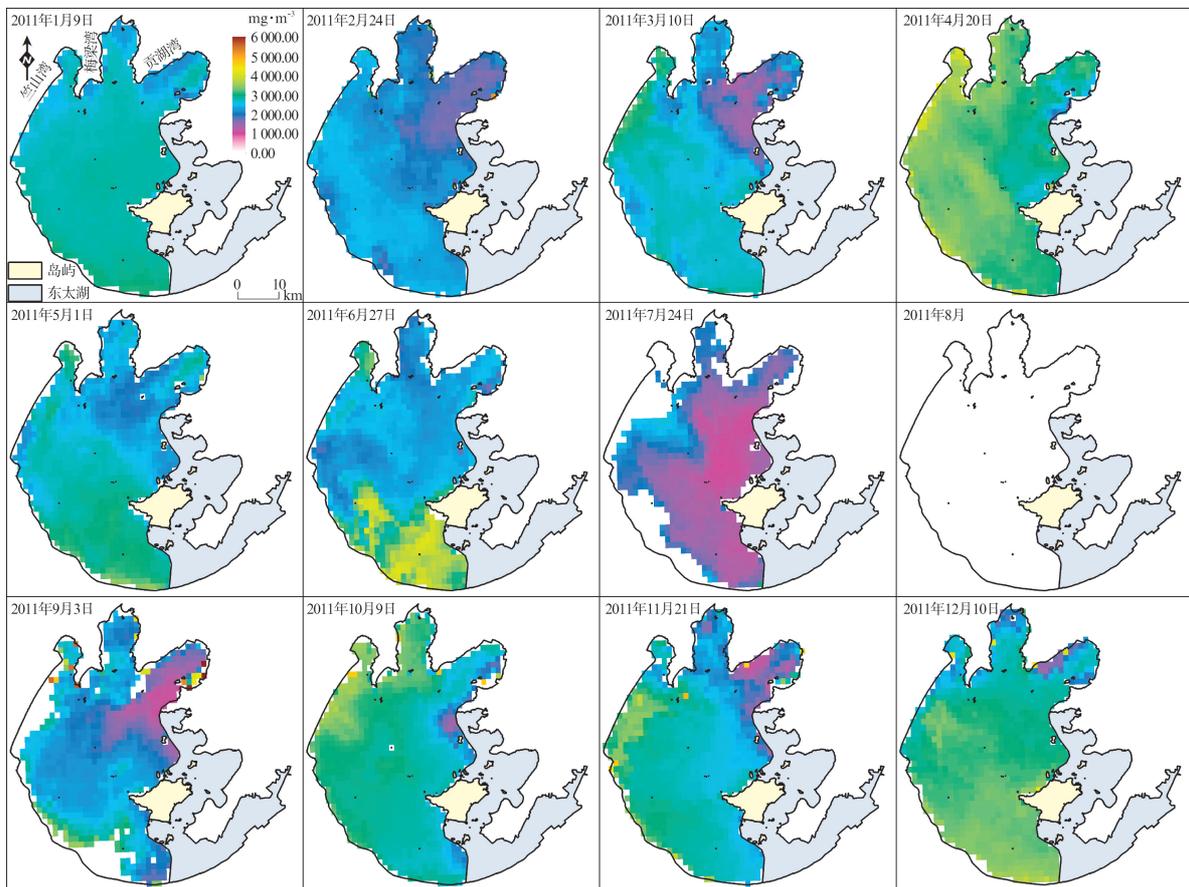


图4 2011 年太湖水体 POC 含量的时空分布

Fig. 4 Geographical and temporal distributions of POC concentrations in Taihu Lake in 2011

3 讨论

3.1 POC 的来源分析

海洋水体中 POC 含量一般在几十到数百 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,包括生命部分与非生命部分^[27].生命部分包括微小型光合浮游植物以及细菌、真菌、噬菌体、

浮游动物、小鱼小虾、直至大到海洋哺乳动物;非生命部分也称为碎屑有机碳(nonbio-POC),包括陆源碎屑和海洋生物生命活动过程中产生的残骸和粪便等等^[28].

太湖为富营养化水体,初级生产力水平较高^[29],而蓝藻是太湖水体的优势门类^[20],影响了水

体的表现光学特性(如:620 nm 处有明显的反射谷)^[23]. 分别建立太湖水体 POC 浓度与叶绿素 a 和藻蓝素浓度之间的相关关系,以分析 POC 的来源. POC 含量与叶绿素 a 浓度具有显著的相关关系 ($R^2 = 0.51$, $n = 132$, $P < 0.05$),特别在叶绿素 a 浓度和 POC 含量均较大时,两者离散程度明显降低,见图 5(a);在藻蓝素浓度小于 $30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,样点出现聚集现象,但总体而言,POC 含量与藻蓝素浓度显著正相关 ($R^2 = 0.85$, $n = 132$, $P < 0.01$),见图 5(b). 说明太湖水体的颗粒有机碳主要来源于浮游藻类或者与浮游植物相关性较好的有机碎屑,同时说明蓝藻光合作用产生的碳对 POC 的贡献较大. c_{POC} 与 c_{Chla} 的线性关系中,POC 轴的截距还说明了除浮游植物碳对 POC 的贡献外,POC 还包含了其他生命部分和非生命部分.

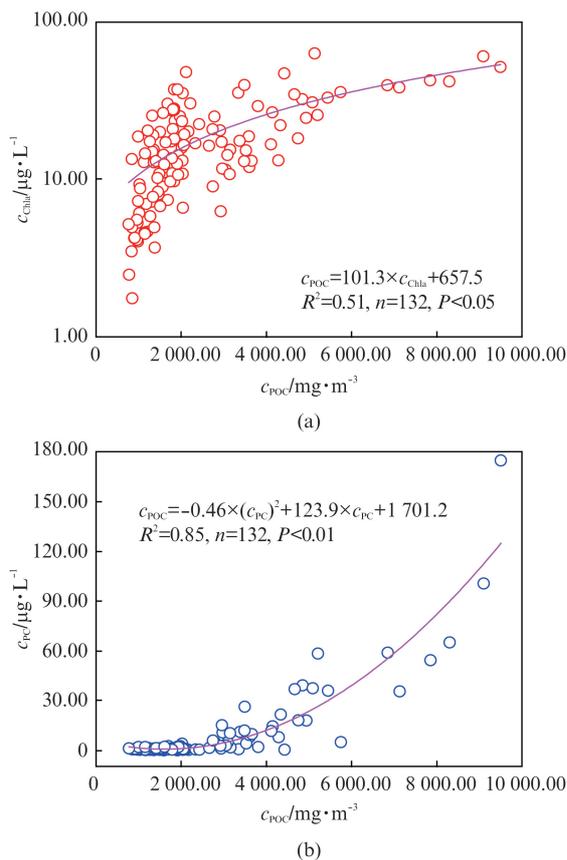


图5 POC 浓度与(a)叶绿素 a 浓度和(b)藻蓝素浓度之间的相关关系

Fig.5 Relationships for POC concentrations (a) chlorophyll a contents and (b) phycocyanin concentration

3.2 POC 含量遥感估算模型评价

基于海洋水体环境构建的 POC 遥感算法不适用于富营养化水平较高的内陆水体(表 3). 虽然海洋

I 类水体中 POC 主要来源于浮游藻类及与其相关的有机碎屑^[30],表面上与富营养化湖泊(II 类水体)中 POC 的来源相似,但是两者的光学特性差异显著. 例如, I 类水体的光学特性主要由浮游植物及其伴生物决定,而 II 类水体的光学特性不仅受浮游植物的影响,而且还取决于悬浮泥沙和黄色物质的含量^[19].

分析太湖水体组分的吸收(悬浮泥沙 a_d 、浮游植物 a_{ph} 和 CDOM a_g) 占水体总吸收(除纯水外)的比例,以确定影响水体光学特性的主导因子. 结果表明,不同样点三者比例变化较大,但太湖水体中悬浮泥沙的吸收占主导地位,均值在 43%,而浮游植物色素和 CDOM 的吸收均值基本一致,分别为: 28% 和 29%,因此,太湖水体的光学特性是以无机悬浮泥沙为主导,在一定程度上影响了 POC 浓度的估算精度. 说明水体光学特性的差异限制了区域模型的推广应用,在以后的研究工作中需要进一步考虑不同水域的遥感模型,为区域模型的推广应用提供案例.

3.3 太湖水体 POC 浓度的动态变化分析

将构建的 POC 遥感估算算法应用于 MERIS 卫星遥感影像,揭示了 2011 年太湖水体 POC 含量的时空动态变化过程,其年平均含量为 $1931.83 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 4). 从整体上看,2011 年太湖水体不同水域的 POC 含量差异显著(图 6),太湖西部、太湖南部和太湖中心水域的 POC 含量明显高于 3 个湖湾(梅梁湾、竺山湾和贡山湾),其中太湖中部水域的 POC 浓度最高,而贡山湾最低. 梅梁湾、竺山湾和贡山湾水域的 POC 浓度之间差别不大,均值在 $1200 \sim 1400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间变化,低于年平均含量,而太湖西部、南部和中部水域的 POC 含量均值均大于 $1600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,并且差异较小. 从变异系数上分析,竺山湾变异系数最大(0.62),并且 3 个湾口水域的变异系数大于其他水域,说明 3 个湾口 POC 含量的空间变化更为显著.

图 7 显示了不同月份、不同水域太湖水体 POC 含量均值的变化特征,最高浓度出现在 2011 年 5 月份的梅梁湾、竺山湾和贡山湾水域. 而在其他月份,POC 浓度最高出现在太湖的西部和南部. 太湖不同水域的 POC 浓度均值在不同月份差异显著,POC 的最大值出现在 5 月份的竺山湾水域 ($> 3000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). 不同水域 POC 浓度均值随时间呈高低起伏变化,均值变化范围为: $1000 \sim 3500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 6 个水域的 POC 含量均值最小值出现在 2 月 24 日,

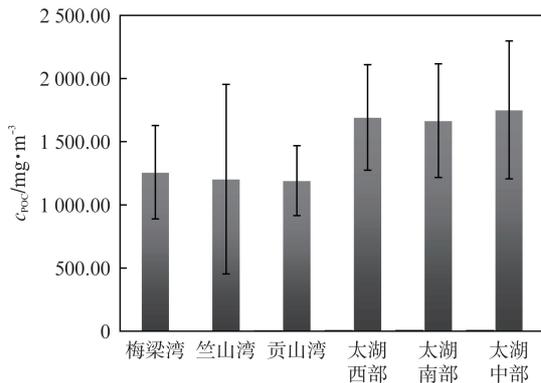


图6 不同水域 POC 含量均值的变化特征
Fig. 6 Changes in mean POC contents for different sections of Taihu Lake

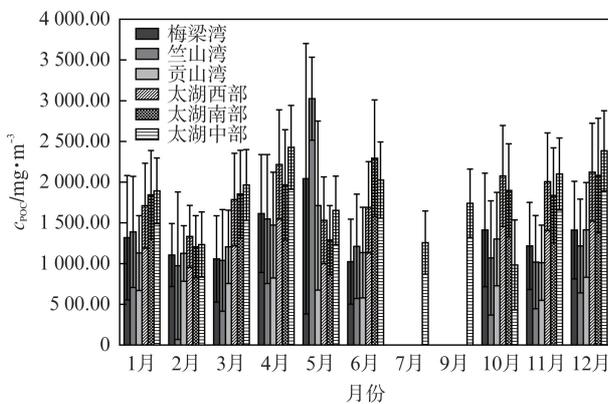


图7 不同月份不同水域太湖水体 POC 浓度均值的变化特征
Fig. 7 Monthly variations in mean POC concentrations in different water regions in Taihu Lake

到4月20日,各水域的POC含量均值逐渐增大.5月1日,不同水域POC含量均值出现不同的变化趋势:太湖西部和太湖南部水域POC浓度均值呈下降趋势,而其他水域逐渐增大,并且在竺山湾水域达到最大值.在6月27日,3个湖湾(梅梁湾、竺山湾和贡山湾)POC含量下降显著,而其他水域明显增大.在7、9两个月份只有太湖中心水域有数据,且9月的POC浓度高于7月.从10月9日到11月21日,除太湖中心水域POC含量变化剧烈外,其他水域变化不明显.

4 结论

利用大量的生物光学数据,分析富营养化水体中POC含量的遥感光谱响应特征,发现POC对MERIS的红(620 nm)和近红外(709 nm)波段的影响具有显著差异;POC浓度与藻蓝素浓度具有显著的相关关系,说明太湖水体中的POC主要来源于浮

游藻类,特别是蓝藻的贡献较大($R^2 = 0.85$, $n = 132$, $P < 0.01$),但太湖水体的光学特性以无机悬浮泥沙为主导,导致海洋水体POC浓度的遥感估算模型不适用于太湖水体.结合富营养化水体的特点以及POC的光谱响应特征,构建了适于太湖水体的POC浓度遥感估算算法($c_{\text{POC}} = -4\ 633 \times \ln[R_{\text{rs}}(620)/R_{\text{rs}}(709)] + 4\ 152.45$, $R^2 = 0.75$, $n = 132$, $\text{RMSE} = 33.27\%$, $P < 0.05$),经精度验证,该算法适用于太湖水体,并应用于2011年MERIS卫星遥感影像,揭示了太湖水体POC含量的时空分布状况,发现太湖西部、太湖南部和太湖中心水域的POC含量较高,而梅梁湾、竺山湾和贡山湾较低,且三者差别不大.下一步的工作重点是分析不同水体的光学特性,构建区域化的POC浓度遥感估算模型.

致谢

在实验过程中得到了赵晨露、饶加旺、王泽人、王长凤、齐琳、苑惠丽、林珊和项文华等人的帮助,在此一并感谢!非常感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊—流域数据集成与模拟中心 湖泊—流域科学数据共享平台”提供的卫星遥感数据.

References

- [1] Amon R M W, Benner R. Bacterial utilization of different size classes of dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**: 41–51.
- [2] Gardner W D, Mishonov A V, Richardson M J. Global POC concentrations from in-situ and satellite data[J]. *Deep-Sea Research II*, 2006, **53**: 718–740.
- [3] LIU Zhan-Fei, PENG Xing-Yue, XU Li, et al. Particulate organic carbon (POC) in Taiwan Strait during two cruises in summer 1997 and winter 1998[J]. *Journal Of Oceanography in Taiwan Strait* (刘占飞, 彭兴跃, 徐立, 等. 台湾海峡. 1997年夏季和1998年冬季两航次颗粒有机碳研究. *台湾海峡*), 2003, **19**(1): 95–101.
- [4] LIN Jing. Distributions of dissolved organic carbon and particulate organic carbon in the Changjiang estuary and its adjacent area[D]. Shanghai: East China Normal University (林晶. 长江口及其毗邻海区溶解有机碳和颗粒有机碳的分布. 上海: 华东师范大学), 2007: 1–16.
- [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: 31–32.
- [6] Stramski D, Reynolds R A, Kahru M, et al. Estimation of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing[J]. *Science*, 1999, **285**: 239–242.
- [7] Stramski D, Reynolds R A, Babin M, et al. Relationship 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.

- [8] Allison D B, Stramski D, Mitchell B G. Empirical ocean color algorithms for estimating particulate organic carbon in the Southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: C10044.
- [9] 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**: 50–61.
- [10] Jiang G J, Ma R H, Duan H T, et al. Remote determination of chromophoric dissolved organic matter in lakes, China[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, Online.
- [11] QIN Bo-Qiang, HU Wei-Ping, CHEN Wei-Min, et al. *Process and mechanism of environmental changes of Lake Taihu*[M]. Beijing: Science Press (秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社), 2004: 2–8.
- [12] 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**: 3522–3528.
- [13] Simis S, Peters S, Gons H. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**: 237–245.
- [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.
- [15] 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.
- [16] HOBI Labs. Backscattering Sensor Calibration Manual (Revision N). Available online at: <http://www.hobilabs.com> (accessed October 30, 2008), 2008.
- [17] Ma R H, Pan D L, Duan H T, et al. Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China: backscattering[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, **30**(9): 2321–2335.
- [18] Mueller J L, Fargion G S, McClain C R. Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation (Marlyland: Greenbelt) Revision 4. 2003.
- [19] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(4): 709–722.
- [20] Chen Y W, Qin B Q, Teubner K, et al. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: Microcystis-dominance in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(1): 445–453.
- [21] Ruiz-Verdu A, Simis S G H, de Hoyos C, et al. An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 3996–4008.
- [22] MA Rong-Hua, KONG Wei-Juan, DUAN Hong-Tao, et al. Quantitative estimation of phycocyanin concentration using MODIS imagery during the period of cyanobacterial blooming in Taihu Lake[J]. *China Environmental Science* (马荣华, 孔维娟, 段洪涛, 等. 基于 MODIS 影像估测太湖蓝藻暴发期藻蓝素含量. 中国环境科学), 2009, **29**(3): 254–260.
- [23] Duan H T, Ma R H, Hu C M. Evaluation of remote sensing algorithms for cyanobacterial pigment retrievals during spring bloom formation in several lakes of East China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **126**: 126–135.
- [24] Gower J, King S, Borstad G, et al. The importance of a band at 709 nm for interpreting water-leaving spectral radiance[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, **34**(3): 287–295.
- [25] Hu C M. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: 2118–2129.
- [26] Ma R H, Jiang G J, Duan H T, et al. Effective upwelling irradiance depths in turbid waters: a spectral analysis of origins and fate[J]. *Optics Express*, 2011, **19**: 7127–7138.
- [27] SONG Jin-Ming, XU Yong-Fu, HU Wei-Ping, et al. *Biogeochemistry of carbon in China seas and lakes*[M]. Beijing: Science Press (宋金明, 徐永福, 胡维平, 等. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学, 北京: 科学出版社), 2008: 1–38.
- [28] LIU Zi-Lin, PAN Jian-Ming, CHEN-Zhong-Yuan. Contribution of phytoplankton standing stock for the particulate organic carbon in the Southern Ocean[J]. *Marine Sciences* (刘子琳, 潘建明, 陈忠元. 南大洋浮游植物现存量对颗粒有机碳的贡献. 海洋科学), 2004, **28**(5): 44–49.
- [29] Zhang Y L, Qin B Q, Liu M L. Temporal-spatial variations of chlorophyll a and primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, China from 1995 to 2003[J]. *Journal of Plankton Research*, 2007, **29**(8): 707–719.
- [30] Krasakopoulou E, Karageorgis A P. Spatial and temporal distribution patterns of suspended particulate matter and particulate organic carbon in the Saronikos Gulf (eastern Mediterranean, Greece)[J]. *Geo-Marine Letters*, 2005, **25**: 343–359.