

基于 CBERS-1 影像监测太湖叶绿素 a 浓度的季节分布状况

周连成^{1,2}, 陈 军^{1,2*}, 孙记红^{1,2}, 付 军^{1,2}

1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071

2. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071

摘 要 叶绿素 a 浓度是衡量湖泊富营养化程度的重要指标。采用太湖 2003 年 10 月 27 日和 28 日的水质实验数据, 构建了太湖叶绿素 a 浓度反演模型。然后将该模型应用于 2006 年 4 月 5 日、4 月 28 日、5 月 16 日、8 月 5 日、10 月 30 日和 2007 年 7 月 5 日的 6 期 CBERS-1 影像数据, 研究与探讨了太湖叶绿素 a 浓度在上述时间尺度上的变化状况。通过研究可知, 太湖叶绿素 a 浓度在夏季较低, 而在秋季和冬季较高, 基本上能反映浮游植物年际生长的 4 个过程; 与以往的研究对比分析可知, 基于 CBERS-1 影像数据反演获取的叶绿素 a 浓度比实际浓度总体偏高, CBERS-1 数据影像在水色遥感中的应用仍然有待进一步的研究与探索。

关键词 叶绿素 a; 遥感; 季节分布模式; 太湖

中图分类号: P237.9

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)02-0530-05

引 言

浮游植物是湖泊生态系统中最主要的初级生产者, 是水生物的重要生命物质基础, 是食物链的首要环节。进入湖泊的氮、磷等营养元素, 通过初级生产者的同化作用, 转化为自身组织, 进而为浮游动物和鱼类等生命体提供营养物质, 推动整个湖泊生态系统的循环与运转。太湖是江苏地区重要的饮用水源, 兼具渔业、航运、防洪、娱乐等重要功能, 对于该地区的经济发展和社会稳定起到举足轻重的作用^[1]。自从 1998 年太湖蓝藻水华大量暴发以来, 太湖营养化程度持续恶化, 浮游植物的种群结构与生物量也均有了明显的变化, 严重影响了太湖生态系统的平衡和沿湖居民的日常生活^[2]。

遥感技术应用于太湖水体的藻类污染监测最早可以追溯到 20 世纪 90 年代^[3]。其主要思想为, 通过利用实测的藻类生物量和一定波段反射率的相关数据, 建立简单的藻类反演模型, 并将该模型应用于遥感影像。随着研究的深入, 叶绿素 a 浓度的反演成为实现藻类监测的主要内容, 国内外学者对叶绿素 a 浓度的光谱特征和反演算法均开展了广泛的应用性研究。雷坤等利用 CBERS-1 的 CCD 数据和准同步数据, 结合水质成分的光谱特征, 建立了太湖叶绿素 a 浓度和总氮

的遥感信息模型, 并将该模型应用于太湖水质浓度反演。研究结果表明, 利用 CBERS-1 的 CCD 数据进行湖泊表层水体水质指标监测具有重要的现实意义和应用前景^[4]; 顾亮等利用太湖水域 MODIS 遥感数据的各波段反射率组合计算值, 与实测的叶绿素 a 浓度进行相关性分析, 研究与探讨基于 MODIS 数据的太湖叶绿素 a 浓度反演模型。研究结果表明, 利用 MODIS 第 3 和 17 波段反射率组合可以较好地实现对叶绿素 a 浓度的反演^[5]; 焦红波等利用水质分析数据和高光谱数据, 研究与探讨叶绿素 a 浓度的高光谱敏感反演模型。研究结果表明, 水体的遥感反射峰信息参与建模将有利于提高叶绿素 a 浓度的估算精度^[6]。

通过对比分析太湖水质监测方法的研究现状可知, 国内外专家学者更倾向于对叶绿素 a 浓度瞬时空间尺度上的浓度分布状况进行探讨, 而时间尺度上的浓度变化状况受关注较少。然而, 太湖水质浓度变化状况及其监测方法的研究不仅是一个空间尺度上的问题, 也是一个时间尺度上的问题。因此, 时间尺度内叶绿素 a 浓度变化状况的研究对于水质状况监测及其治理具有重要的理论和应用意义。本研究主要利用 2006~2007 年的 6 景 CBERS-1 的 CCD 数据, 并结合 2003 年 10 月的太湖水质实验数据, 研究与探讨了太湖叶绿素 a 浓度在该时间尺度范围内的变化状况, 旨在挖掘太湖叶绿素 a 浓度随时间变化信息及其监测方法。

收稿日期: 2010-05-10, 修订日期: 2010-08-25

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2008BAC34B03)和中国海陆地质地球物理系列图项目(GZH200900504)资助

作者简介: 周连成, 1975 年生, 青岛海洋地质研究所高级工程师

e-mail: gisqd@vip.sina.com

* 通讯联系人 e-mail: chenjun820711@163.com

1 实验区域与实验数据

太湖位于长江三角洲中下游地区,是我国五大淡水湖之一。太湖面积为 2 338 km²,平均水深大约 1.89 m,是国内外二类水体的重要研究对象^[7]。太湖水质受人类活动影响较大,近年来,随着经济和社会的发展,太湖水质日益恶化。自 20 世纪 80 年代首次大规模藻类水华爆发以来,水华现象频繁发生,微囊藻(*Microcystis* spp.)等植物在生长过程中释放出来的有毒肽类物质,严重影响了其他水生动植物的正常发育与繁殖活动^[8]。

本研究采用的数据包括:2003 年 10 月 27 日和 28 日的水质光谱和水质浓度实验数据(图 1 和图 2)一套,2006 年 4 月 5 日、4 月 28 日、5 月 16 日、8 月 5 日、10 月 30 日和 2007 年 7 月 6 日 CBERS-1 卫星的 CCD 相机影像数据六景。太湖水质浓度及其光谱数据采用船舶走行的形式获取,实验站点坐标采用手持 GPS 机记录获得。水质样本采用尼克森采水器装取水气界面以下 30 cm 左右处的水样。获取的水样立即放入冷藏箱中,并于下午带回实验室。叶绿素 a 浓度利用丙酮萃取方法提取,上述水质参数的测量操作严格遵守湖泊水质参数测量的有关规范^[9]。

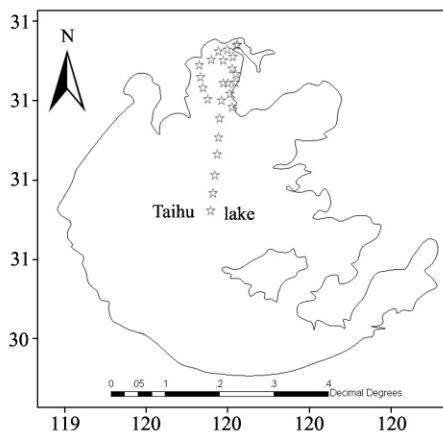


Fig 1 Experimental stations

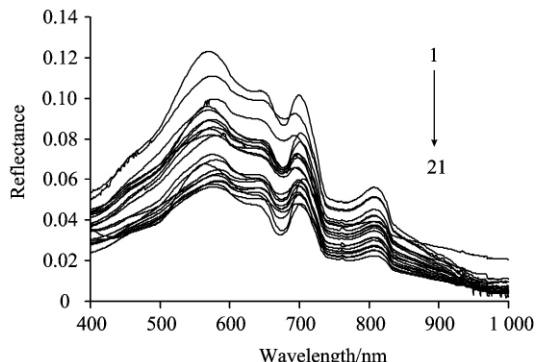


Fig 2 Spectral curves

2 研究方法

2.1 大气校正

传感器和水体目标之间的大气介质对被动遥感信号具有很强的散射和衰减作用,以至传感器所探测到的信号,在蓝光波段,80%以上是来自大气散射的贡献,而离水辐亮度信号仅占总信号的 10%左右,绿光波段的比重将更小^[10]。水色遥感的弱信号特征和大气噪声过大,以至遥感的非接触性大尺度观测优势大打折扣。因此,选择合适的大气校正算法是水质参数遥感反演成败的关键。

瑞利散射和气溶胶散射是导致离水辐亮度信号失真的主要作用因素。瑞利散射主要来源于大气固有成份对太阳光子的衰减和散射作用,可通过解考虑多次散射的辐射传输方程获得^[11]。气溶胶具有时空多变性,具有对遥感信号的影响作用难以估算的特性。传统的大气校正算法主要分为以同步气象数据为基础的辐射传输方法和以观测目标反射机理为基础的暗像元算法。暗像元算法具有快捷、方便且不依赖于同步气象数据的特点。在可见光波段,山体、建筑物、云等大型地物目标的阴影反射率近似为 0。本研究主要利用大型地物目标的阴影的光学特性,实现对 CBERS-1 数据的大气校正。暗像元大气校正算法如下(推导过程见参考文献^[12])

$$L_a(\lambda) = L_t(\lambda) - L_r(\lambda) \quad (1)$$

$$L_{as}(\lambda) = \frac{\omega_x \tau_x F'_0 P_x(\theta_x)}{4\pi} \quad (2)$$

$$E_d = \frac{[1 - \exp(-\tau \sec \theta_z)] E_0}{2} \quad (3)$$

$$\tau = \tau_r + \tau_{O_3} + \tau_a \quad (4)$$

$$\tau_r = 0.008524\lambda^{-4}(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \quad (5)$$

$$\tau_{O_3} = 0.03 \exp[-277(\lambda - 0.6)^2] \quad (6)$$

$$\tau_a = \frac{4\pi L_t(\lambda) - \tau_r F'_0 P_r(\theta_z)}{0.97 F'_0 P_a(\theta_z)} \quad (7)$$

式中, $x=r, a$; F'_0 为经过臭氧双带吸收的大气层外太阳辐射照度; P_x 为散射像函数; L_r 为瑞利散射贡献的辐亮度; E_d 为到达水面的漫射辐照度; τ 为大气总光学厚度; L_t 为传感器接收到的总辐亮度; E_0 为大气层外太阳辐照度; ω_x 为单次反照率; θ_x 为卫星高度角; θ_z 为太阳高度角; R_w 为离水反射率; L_a 为气溶胶散射贡献的辐亮度; τ_r 为瑞利散射光学厚度; τ_{O_3} 臭氧吸收光学厚度; λ 为波长; τ_a 为气溶胶光学厚度; R_d 为暗像元的反射率。

2.2 叶绿素 a 浓度反演模型

TM2 波段信号与叶绿素 a 浓度相关性较大,常被应用于叶绿素 a 浓度的反演;叶绿素 a、悬浮物和可容有机物质等

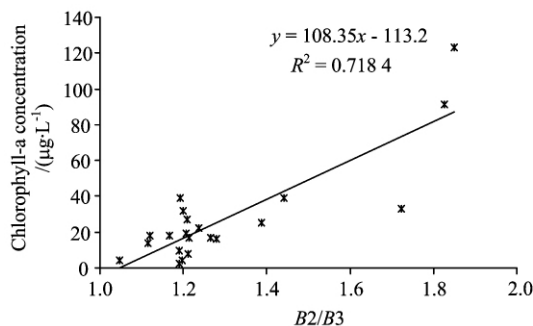


Fig 3 Chlorophyll-a concentration retrieval algorithms based on B2/B3

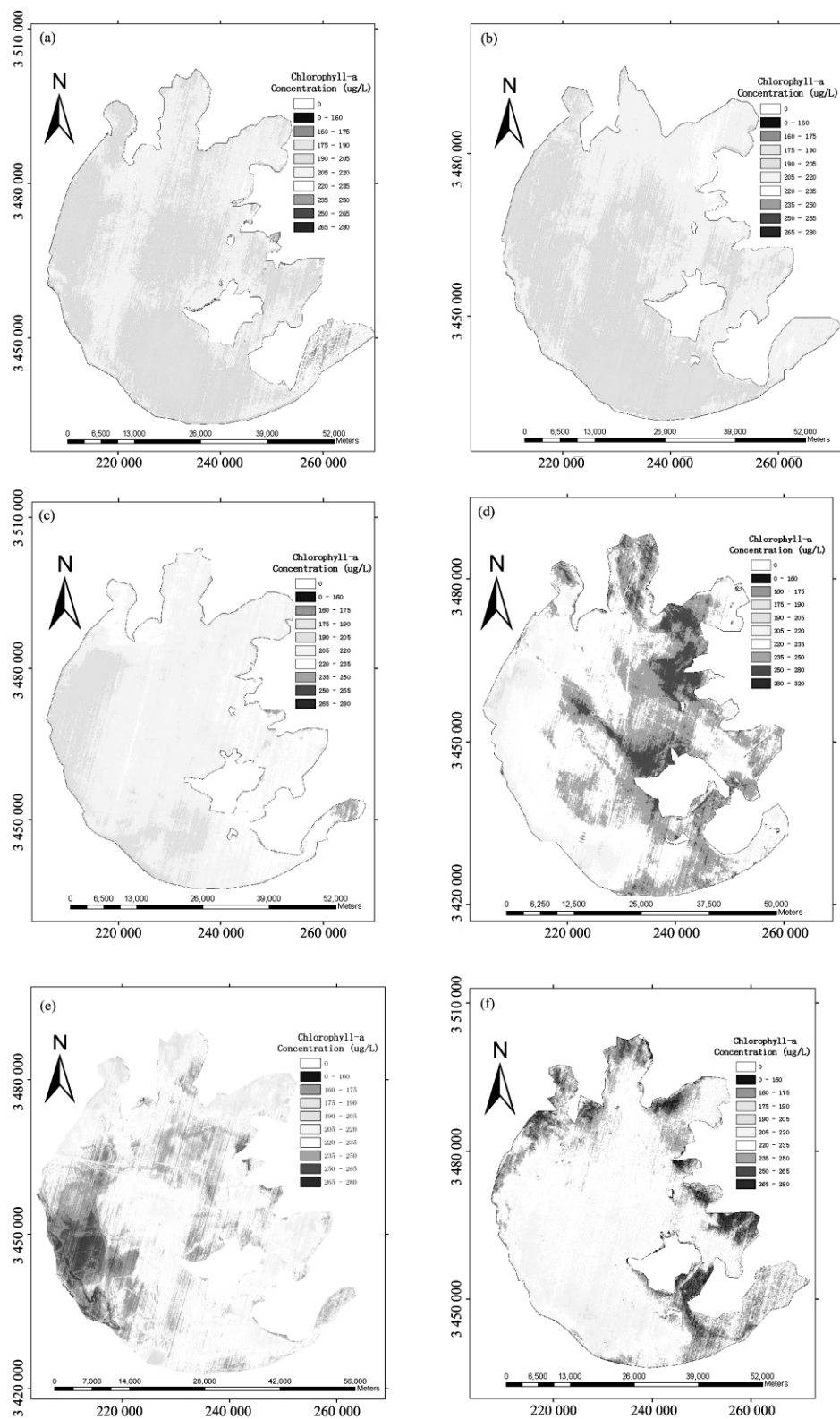


Fig 4 Seasonal distribution pattern of Chlorophyll-a concentration in Taihu Lake

- (a): Chl-a concentration on 5 April, 2006; (b): Chl-a concentrauon on 28 April, 2006;
 (c): Chl-a concentration on 16 May, 2006; (d): Chl-a concentration on 5 July, 2007;
 (e): Chl-a concentration on 5 August, 2006; (f): Chl-a concentration on 30 October, 2006

多要素光学性质在 TM3 波段存在严重的耦合, TM3 波段较难被应用于某单一水质成分的反演, 但是随着悬浮泥沙浓度的增加, TM3 波段反射率与悬浮泥沙浓度之间的相关性逐渐增强, 因此, TM3 波段常被应用于悬浮泥沙浓度较高水体的水质状况监测^[13]。另外, 波段比能有效地剔除波段中的部分耦合信息, TM2/TM3 常被应用于叶绿素 a 浓度的反演^[14,15]。CBERS-1 的 CCD 相机的波段设置与 Landsat/TM 基本一致^[16], 鉴于此, 本研究采用 CCD 相机的绿光波段和红光波段的比值 ($B2/B3$) 作为叶绿素 a 浓度的反演参数。本研究采用了 23 个实测数据对构建了叶绿素 a 浓度反演模型, 遥感参数采用 $B2/B3$, 模型如图 3 所示。在构建叶绿素 a 浓度反演模型之前, 首先利用 CBERS-1 的 CCD 相机的光谱响应函数对光谱曲线进行积分, 将 ASD 光谱仪测得的光谱数据转换为 CCD 相机光谱响应模式下的光谱反射率。由图 3 可知, 叶绿素 a 浓度与 $B2/B3$ 的比值具有良好的线性关系, 其相关系数达 0.718 4。

3 实例分析与计算

在进行叶绿素 a 浓度反演之前, 必须对 CCD 相机数据进行大气校正。考虑到水体在可见光波段范围内难以获取反射率近似为 0 的暗像元。本研究在水陆分离之前, 从全景影像中搜索暗像元。以反射率最小者作为暗像元, 参照式 (1)~(7) 所示的暗像元大气校正算法, 进而获取 CBERS-1 影像的大气校正参数。

由于 CBERS-1 影像数据的不完备, 本研究仅选择了 2006 年 4 月、5 月、8 月、10 月和 2007 年 7 月数据作为研究对象。图 4 显示了太湖叶绿素 a 浓度在 2006 年 4 月 5 日、4 月 28 日、5 月 16 日、8 月 5 日、10 月 30 日和 2007 年 7 月 6 日的空间分布状况。蓝藻水华的形成过程大致分为 4 个阶段: 下沉越冬、复苏、生物量增加、上浮和累积。蓝藻复苏包括恢复活性、开始生长并向水体迁移的一系列过程, 这个过程主要受光照、营养盐浓度、底泥扰动等多种因素影响^[17]。由图 4 可知, 叶绿素 a 浓度在 2006 年 4 月 5 日、4 月 28 日和

5 月 16 日相对较低, 而在 8 月 5 日、10 月 30 日和 2007 年 7 月 6 日相对较高。在北半球上半年, 日照时间逐渐增加, 植物所需的太阳能日供给量逐步增多, 当日积温量满足藻类生长的需求阈值时, 太湖浮游植物将开始复苏。图 4 也反映了太湖藻类从复苏到迅猛增长, 再到沉底越冬的过程。在春夏交替时段, 叶绿素 a 浓度随时间平稳增长, 并且在夏秋交替的时段, 叶绿素 a 浓度增速最明显; 当进入秋季时, 日积温仍然满足藻类的进一步增长, 但是前期的藻类逐步死亡, 在该时间段, 叶绿素 a 浓度维持在高位, 但是增速明显放缓; 在秋冬交替时, 水体的叶绿素 a 浓度逐渐降低, 即藻类逐步进入下沉越冬期。

此外, 与以往的研究对比分析可知^[18], 基于 CBERS-1 影像数据反演获取的叶绿素 a 浓度比实际浓度总体偏高, 这说明了 CBERS-1 数据影像在水色遥感中的应用仍然有待进一步的研究与探索。

4 结 论

叶绿素 a 浓度是浮游植物分布的重要指示剂, 是衡量水体初级生产力和富营养化程度的基本指标。近年来, 随着经济和社会的发展, 太湖水质日益恶化。自 20 世纪 80 年代首次大规模藻类水华爆发以来, 太湖水质状况受到相关部门和专家学者的高度重视。本研究选择了太湖 2006 年 4 月、5 月、8 月、10 月和 2007 年 7 月的 6 期 CBERS-1 影像数据以及 2003 年 10 月太湖水质光学性质实验数据, 对太湖叶绿素 a 浓度进行了监测。通过本文的研究可以得到如下两点结论:

(1) 叶绿素 a 浓度在 2006 年 4 月 5 日、4 月 28 日和 5 月 16 日相对较低, 而在 8 月 5 日、10 月 30 日和 2007 年 7 月 6 日相对较高, 基本上体现了浮游植物年际生长的 4 个过程, 即: 下沉越冬、复苏、生物量增加、上浮和累积。

(2) 与以往的研究对比分析可知, 基于 CBERS-1 影像数据反演获取的叶绿素 a 浓度比实际浓度总体偏高, 这说明了 CBERS-1 数据影像在水色遥感中的应用仍然有待进一步的研究与探索。

References

- [1] LI Jun, LIU Cong-qiang, XIAO Hua-yun, et al(李 军, 刘丛强, 肖化云, 等). Ecology and Environment(生态环境), 2006, 15(3): 453.
- [2] ZHANG Yun-lin, QIN Bo-qiang, CHEN Wei-min, et al(张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 2004, 15(11): 2127.
- [3] LIU Jian-ping, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, et al(刘建萍, 张玉超, 钱 新, 等). Environmental Pollution and Control(环境污染与防治), 2009, 31(8): 79.
- [4] LEI Kun, ZHENG Bing-hui, WANG Qiao(雷 坤, 郑丙辉, 王 桥). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2004, 24(3): 376.
- [5] GU Liang, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, et al(顾 亮, 张玉超, 钱 新, 等). Environmental Science and Management(环境科学与管理), 2007, 32(6): 25.
- [6] JIAO Hong-bo, ZHA Yong, LI Yun-mei, et al(焦红波, 查 勇, 李云梅, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2006, 10(2): 242.
- [7] WU Chuan-qing, WANG Qiao, YANG Zhi-feng, et al(吴传庆, 王 桥, 杨志峰, 等). Environmental Monitoring in China(中国环境监测), 2007, 23(3): 52.

- [8] YANG Ding-tian, CHEN Wei-ming, JIANG Jing, et al(杨顶田, 陈伟民, 江 晶, 等). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 2003, 14(6): 969.
- [9] Mueller J L, Austin R W. Ocean Optics Protocols for SeaWiFS Validation, NASA Technical Memorandum 104566. Greenbelt, MD, NASA Goddard Space Flight Center, 1992.
- [10] Chomko R M, Gordon H R. Applied Optics, 1998, 37(24): 5560.
- [11] Gordon H R, Wang W. Applied Optics, 1994, 33(3): 443.
- [12] CHEN Jun, SUN Ji-hong, FU Jun(陈 军, 孙记红, 付 军). Remote Sensing Information(遥感信息), 2010. Waiting for Publication.
- [13] Dekker A G, Peters S W M. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14: 799.
- [14] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, et al. Journal of Geophysical Research, 1988, 93: 10909.
- [15] Dekker A G, Vos R J, Peters S W M. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(1): 15.
- [16] YANG Zhong-dong, GU Song-yan, QIU Hong, et al(杨忠东, 谷松岩, 邱 红, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2004, 8(2): 113.
- [17] TAN Xiao, KONG Fan-xiang, YU Yang, et al(谭 啸, 孔繁翔, 于 洋, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2009, 29(6): 578.
- [18] MA Rong-hua, KONG Fan-xiang, DUAN Hong-tao, et al(马荣华, 孔繁翔, 段洪涛, 等). Journal of Lake Sciences(湖泊科学), 2008, 20(6): 687.

Monitoring the Seasonal Distribution Pattern of Chlorophyll-a Concentration in Taihu Lake Based on CBERS-1 Imageries

ZHOU Lian-cheng^{1,2}, CHEN Jun^{1,2*}, SUN Ji-hong^{1,2}, FU Jun^{1,2}

1. The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Qingdao 266071, China
2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract Chlorophyll-a concentration is an important indicator for estimating the eutrophication degree of a lake. Taking advantage of the water qualities experimental data on 27 and 28 October, 2003, the paper constructs the chlorophyll-a concentration estimating model for Taihu Lake, China. And then, the study uses this chlorophyll-a concentration estimation model to estimate the seasonal distribution pattern of chlorophyll-a concentration from CBERS-1 imageries on 5 April, 28 April, 16 May, 5 August, and 30 October of 2006, and 5 July, 2007. According to the research results, it was found that the chlorophyll-a concentration is lower in summer and higher in autumn and winter, and could illuminate the four stages of phytoplankton growth in a year; Compared with the previous study reports, the chlorophyll-a concentration is higher than the actual concentration by estimating from the CBERS-1. There are still some problems for applying the CBERS-1 imageries to water qualities remote sensing, which should be improved by further study.

Keywords Chlorophyll-a; Remote sensing; Seasonal distribution pattern; Taihu Lake

(Received May 10, 2010; accepted Aug. 25, 2010)

* Corresponding author