

太湖水体时间序列叶绿素浓度与反射光谱特征分析

巩彩兰^①, 周颖^①, 尹球^②, 匡定波^①, 陈利雄^{①·③}, 胡勇^①

(^① 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083;

^② 上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 200010; ^③ 上海海事大学, 上海 201306)

摘要:对 2008 年 5 月到 2009 年 5 月采集的太湖水体反射光谱数据进行了异常数据检测、归一化等预处理后, 计算了常用于叶绿素浓度反演的特征参量, 包括荧光峰高度、荧光面积、特征波段比值、反射率微分; 并分析建立了这些特征参量与对应叶绿素浓度的相关模型。研究表明: 荧光面积、特征波段比值等与实测叶绿素浓度具有较好的相关性, 而蓝绿光波段反射率比值对内陆水体叶绿素浓度反映不明显。湖泊水体的光学特征能够较好反映蓝藻的不同生长状态, 太湖蓝藻随时间变化的规律大致可分为 5 月~11 月, 12 月~4 月两个阶段。本研究结果可为湖泊水体富营养化高光谱遥感监测的波段选择提供参考。

关键词:湖泊富营养化; 蓝藻; 叶绿素 a; 时序光谱

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.06.009

中图分类号: X122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)115-0042-05

Analysis of Time-series Chlorophyll-a Concentration and Reflectance Spectra Characteristics of Lake Taihu

GONG Cai-lan^①, ZHOU Ying^①, YIN Qiu^②, KUANG Ding-bo^①, CHEN Li-xiong^{①·③}, HU Yong^①

(^① Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academic of Sciences, Shanghai 200083;

^② Shanghai Center for Satellite Remote Sensing and Application, Shanghai 201100;

^③ Shanghai Maritime University, Shanghai 201306)

Abstract: Reflectance spectra data and water quality parameters were measured in Lake Taihu from May 2008 to May 2009. After anomaly detection, normalization and other pretreatment, several parameters used commonly in retrieval of chlorophyll concentration were calculated, including the height of fluorescence peak, area of the fluorescence curve, ratio of characteristic bands and derivative of reflectance spectra. The correlation models between these parameters and the chlorophyll concentration were established and analyzed. The study indicated that both the area of the fluorescence curve and the ratio of characteristic bands had a good correlation with the chlorophyll-a concentration but the blue-green band ratio did not work as well as in ocean. To some extent, the optical characteristics of lake water could reflect different growth state of the algae. The growth state of cyanophytes can be divided into two phases that one is from May to November and the other is from December to the next April in Lake Taihu. The study is valuable for band selection in lake eutrophication monitoring with hyper-spectral remote sensing data.

Key words: lake eutrophication; cyanophytes; chlorophyll-a; time-series spectrum

1 引言

受经济快速发展和全球气候变暖的影响, 内陆水体蓝藻暴发的频率和范围不断增加, 对周边人们的生活、生产用水, 以及水中鱼类等动物生长都有潜

在的危害, 湖泊生态环境遭到破坏, 湖泊水质问题已经引起政府和公众的普遍关注。传统的水质监测方法, 基于对固定测站定时取样分析, 具有信息准确, 分析精度高等优势, 但无法提供蓝藻暴发和持续时间, 以及蓝藻分布面积等信息, 如果开展对于大江大

收稿日期: 2010-11-12 修订日期: 2011-02-01

作者简介: 巩彩兰(1974~), 女, 山西阳泉人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为水环境遥感应用研究。

E-mail: gcl@mail.sitp.ac.cn

河全覆盖的地面监测,则相当费时费力。遥感技术具有空间覆盖范围广,时间分辨率高等优势,航空和卫星遥感技术用于水中浮游生物暴发的监测已有30多年历史。采用遥感技术进行蓝藻定量反演主要通过遥感数据与水体中的叶绿素a、藻蓝蛋白含量的定量关系来研究蓝藻的浓度分布。Gitelson采用高光谱的方法,研究了内陆水体中叶绿素a的生物光学模式^[1];Zhongping Lee在一类水体叶绿素a分析方法的基础上,建立了二类水体中叶绿素a光谱吸收的卫星遥感模式^[2];尹球等通过研究内陆水体反射光谱特征与藻类叶绿素浓度之间的关系,并利用建立的模型,反演了太湖、巢湖等内陆湖泊叶绿素浓度分布^[3-4];马荣华等基于实测光谱分析了太湖梅梁湾附近水体的叶绿素浓度^[5];乐成峰等利用2005年实测叶绿素a浓度数据和同步光谱数据,分析了太湖叶绿素a浓度的时空变化对反演模型的影响^[6];杨煜等比较了叶绿素a浓度一阶微分、波段比值和三波段反演模型,认为波段比值模型与三波段模型具有较好反演效果^[7];李云亮等利用TM数据与同步湖面采样数据,说明叶绿素a主要影响TM第3、第4波段^[8]。近年来,一些研究者开展了对藻蓝蛋白的遥感监测研究,Wheeler等利用Landsat的TM数据对Champlain湖和Vermont湖蓝藻进行了监测^[9];杨顶田等采用现场测量和卫星遥感手段对太湖水体中藻蓝蛋白的浓度进行光谱检测,获得了藻蓝蛋白的光谱提取生物光学模式^[10];Miller等通过分析时间序列遥感图像数据,试图区分有害藻种类型,并对水华暴发进行提前预报^[11];Zhang Y. L.等基于4个季节大量实测数据,建立了高精度叶绿素a浓度、藻青蛋白浓度的三波段反演模型,并成功应用MERIS遥感数据反演了二类水体的叶绿素浓度和藻青蛋白浓度^[12-13]。

本研究参照陆地植被的时间序列光谱特征分析

方法,通过系统的、时间序列的、覆盖水华生消过程的数据采集实验,首先测量常规水质数据,分析了叶绿素浓度的季节变化规律;对实测时序光谱数据进行归一化等预处理,分析反射光谱曲线特征,提取水华特征光谱参量,并建立叶绿素a浓度的光谱反演模型;最后以荧光峰位置为例分析了特征波段随叶绿素浓度的变化情况。本研究成果可应用于湖泊蓝藻生消过程高精度的遥感监测和蓝藻水华预测,对于湖泊蓝藻遥感动态监测的传感器提供波段设置参考。

2 数据获取与预处理

实验区覆盖除东太湖之外的所有太湖水体,测站选择与常规水质测量站点一致,所有测点均与常规水质测量同步进行。2008年5月至2009年5月进行了连续一年的水上光谱测量与同步水质采样分析,每次测量27个站点,测量和分析8个水质指标,包括水温、叶绿素浓度、总磷、总氮、氨氮、悬浮物浓度、溶解氧、化学需氧量。去掉因为天气因素等造成的不理想测点数据,共有252组光谱与水质指标配套的数据可用。

光谱测量采用GER1500地物光谱仪,可以获得300nm~1050nm的反射光谱。测量参考板选择反射率为35%的灰板,每次测量先测一个灰板辐射作为下行辐射量,再测10个目标辐射为上行辐射量,二者比值作为水面反射率。采集的水样冷藏带回实验室当天完成样品分析。

为了进一步降低测量过程光线变化、水面波动、测量人员本身因素等方面的影响,对获得的所有反射率光谱曲线进行预处理,采用归一化方法,即每条光谱曲线除以400nm~900nm反射光谱的平均值得到归一化反射光谱曲线^[14](图1)。本文所有光谱特征参量均基于归一化反射曲线进行。

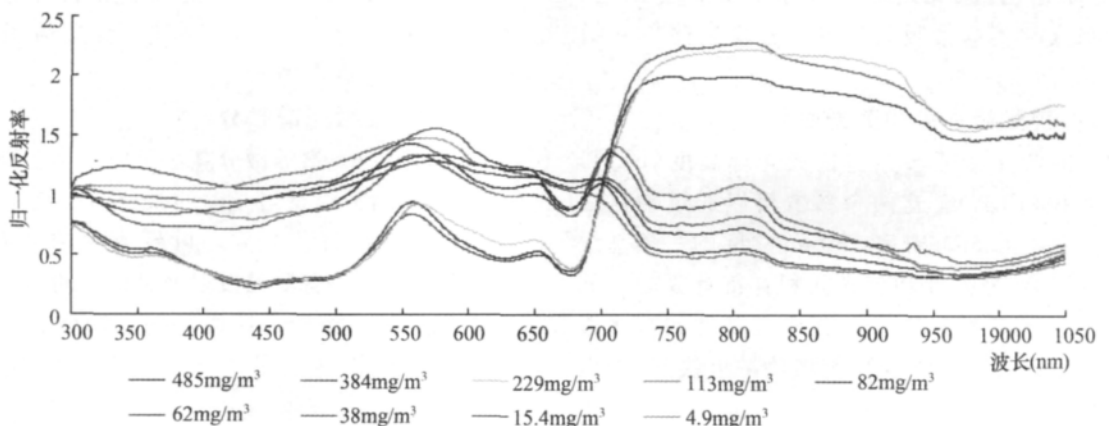


图1 不同叶绿素浓度对应归一化反射光谱曲线

3 采样点实测叶绿素浓度时间分布规律

首先分析从2008年5月至2009年5月的实测叶绿素浓度(图2),图中每个月份均含27个站点,柱状图从下到上分别表示:由低浓度到高浓度不同叶绿素浓度等级的测站个数占当月测站总数的比例。可以看出,冬季太湖各测站叶绿素浓度最低,12月~3月均未出现浓度大于100mg/m³的站点,1月份叶绿素浓度<10mg/m³的站点分布最多。2月份叶绿

素浓度<20mg/m³的站点分布最多,而5月~7月,9~10月均有较多叶绿素浓度>100mg/m³的站点出现。根据实测数据分析每个月份高浓度蓝藻分布站点个数,以及较低浓度蓝藻分布站点个数占每月观测站点总数的比例可见,太湖叶绿素浓度具有明显的时间变化规律,至少可以分为两个大的周期,即5月~11月可能出现蓝藻爆发期,而12月~次年4月蓝藻则有可能处于休眠期。

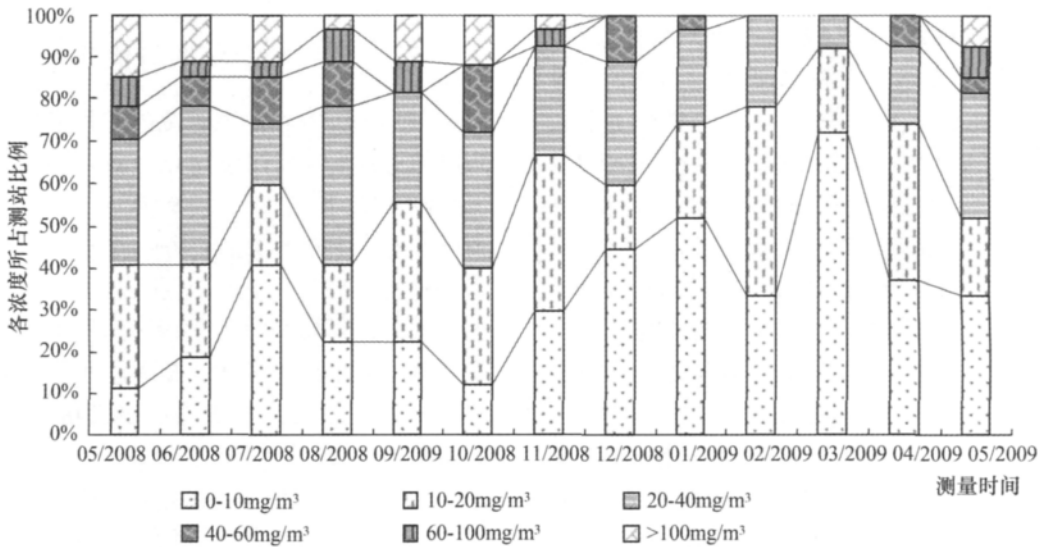


图2 各站点采样分析叶绿素浓度分级别累积柱状图

4 算法简介

分析所测各站点光谱反射率曲线可见,湖泊水体光谱曲线与叶绿素浓度有关的典型反射峰位置包括:710nm,660nm,550nm;典型吸收谷位置为680nm,620nm(图1),本研究根据实测蓝藻水体反射光谱特征,采用已有的较为常用的植被和蓝藻叶绿素光谱特征指数,包括荧光峰高度、荧光面积、蓝绿光比值、荧光峰与叶绿素吸收谷比值,以及叶绿素与藻蓝素吸收谷等。各算法简单介绍如下:

4.1 荧光峰高度和荧光面积

常用的荧光特征参数包括荧光峰高度(FLH)和荧光面积(FLA)。这两个参数可以通过构建在反射光谱曲线的660nm和730nm之间的一条基线来计算,具体荧光高度和荧光面积详细计算公式和原理图可参考有关文献^[15]。荧光峰高度和基线以上荧光面积很大程度上受浮游植物浓度决定,可以用来测量水中浮游植物生物量。荧光面积参数对于

克服由于水中叶绿素浓度过低或者过高,导致的荧光高度不明显非常重要。

4.2 波段比值

本次研究采用了4种波段比值(表1),由于采样时间不同,叶绿素浓度含量变化以及湖泊水体污染物质的复杂性等造成实测光谱的荧光峰位置和吸收谷位置并不固定,而是随不同测点不同观测日期发生变化(图1),本次研究采取的方法是通过编写程序寻找各典型反射峰和吸收谷的实际位置,然后进行比值、荧光峰高度、荧光面积等参数计算。

4.3 反射光谱微分

通过反射光谱的微分算法可以增强蓝藻色素的吸收和反射特征,反射光谱的微分曲线在650nm至700nm之间的峰值主要与叶绿素a浓度有关^[16]。本次研究计算了各测站反射光谱的一阶微分和二阶微分(图3),并统计一阶微分与二阶微分反射光谱的微分曲线上特征峰与叶绿素-a浓度的相关关系。

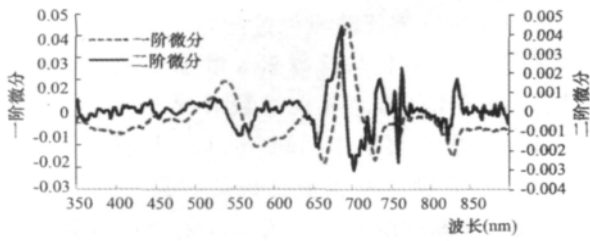


图3 反射光谱一阶微分和二阶微分曲线图

5 结果与讨论

5.1 叶绿素 a 浓度与荧光面积与荧光峰高度的相关分析

叶绿素浓度大于 $150\text{mg}/\text{m}^3$ 的水体表面漂浮有厚厚的蓝藻,其反射光谱曲线在 700nm 之后更加接近陆地植被反射光谱曲线的肩状特征(图 1),将这种高浓度测站数据与其他数据作为一组分析,极易出现特别异常点,影响模型精度。因此后面的分析均以低于 $150\text{mg}/\text{m}^3$ 的测站为数据源(样本量为 245 组)。

荧光特征是叶绿素的主要特征,因此本次研究重点分析了荧光面积与荧光峰高度与叶绿素 a 浓度的相关性。由图 5 可见,荧光面积与荧光高度均与叶绿素浓度具有较好的指数相关,相关系数、荧光面积与叶绿素 a 浓度相关性($R^2=0.68$)高于荧光高度与叶绿素 a 浓度的相关性($R^2=0.64$)(图 4)。

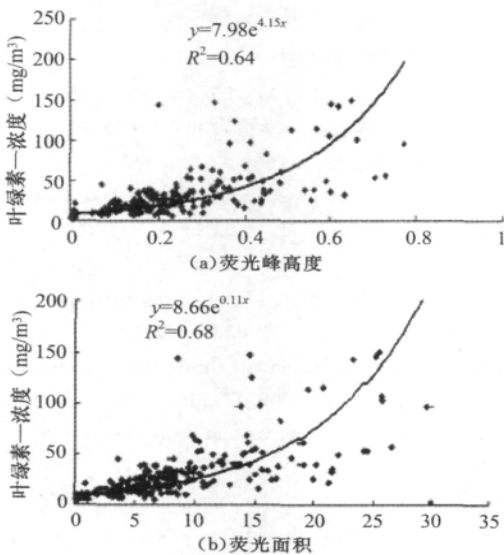


图4 叶绿素浓度与荧光特征散点图

5.2 叶绿素 a 浓度与波段比值的相关分析

采用波段寻优法,找到各站点反射率曲线特征波段及其对应的反射峰和吸收谷,计算表 1 所列波段比值,并与对应站点叶绿素 a 浓度相关分析,得到线性关系模型及相关系数如表 1, 710nm 与 680nm 作为叶

绿素浓度的特征波段,其波段组合与叶绿素浓度均具有较好相关,二者反射率比值,归一化比值与叶绿素 a 浓度线性相关系数分别为 $R^2=0.61, R^2=0.60$ 。而且 710nm 的反射率峰值与代表藻蓝素吸收波段的 620nm 附近的吸收谷比值也与叶绿素 a 浓度具有较高相关($R^2=0.61$), 680nm 附近反射率的一阶微分与二阶微分与叶绿素 a 浓度相关系数分别为 $R^2=0.54, R^2=0.43$;而海洋叶绿素浓度反演常用的蓝绿光波段反射率比值与叶绿素 a 浓度相关系数较低, $R^2=0.35$ 。

表 1 各特征光谱波段比值与叶绿素 a 浓度线性模型及相关系数

特征波段比值(x)	模型表达式	相关系数的平方(R^2)
R_{710}/R_{680}	$\text{CChl-a}=80.961x-66.835$	$R^2=0.61$
$(R_{710}-R_{680})/(R_{710}+R_{680})$	$\text{CChl-a}=0.002x+0.0128$	$R^2=0.60$
R_{710}/R_{620}	$\text{CChl-a}=111.92x-82.293$	$R^2=0.61$
一阶微分峰值	$\text{CChl-a}=0.0002x+0.0037$	$R^2=0.54$
二阶微分峰值	$\text{CChl-a}=0.2 \times 10^{-4}x+0.001$	$R^2=0.44$
R_{554}/R_{490}	$\text{CChl-a}=-228.92x+199.54$	$R^2=0.35$

备注:R 表示反射率,R 的下标表示对应波长位置,本次计算波段位置随测点而变化;CChl-a 表示叶绿素 a 浓度

5.3 叶绿素特征波段变化特征

各浓度特征波长位置如图 5,以荧光峰对应波长位置为例,分析其随不同叶绿素浓度变化情况(见图 6),图中横轴表示叶绿素浓度,纵轴表示不同叶绿素浓度对应荧光峰出现波长范围所占比例。当叶绿素浓度小于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 时,有 50% 以上叶绿素荧光峰对应的波长落在 690nm 至 695nm ;当叶绿素浓度为 $50\text{mg}/\text{m}^3 \sim 100\text{mg}/\text{m}^3$ 时,荧光峰特征波段逐渐向长波方向移动,40% 以上测点荧光峰对应的波长位于 $705\text{nm} \sim 710\text{nm}$ 之间;当叶绿素浓度 $> 100\text{mg}/\text{m}^3$ 时,40% 的测点荧光峰特征波段位于 $710\text{nm} \sim 720\text{nm}$ 之间。因此,叶绿素 a 特征峰波段位置具有随浓度增加向长波方向移动的规律。

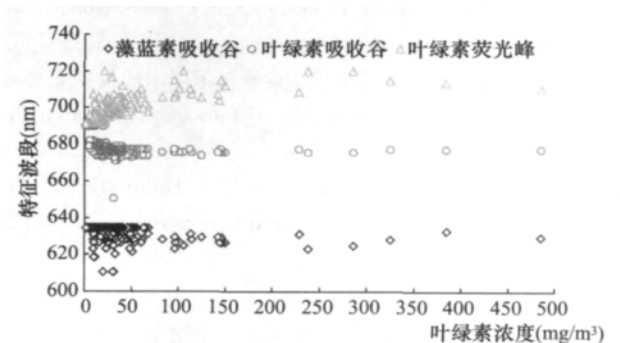


图5 不同叶绿素 a 浓度对应特征波段位置

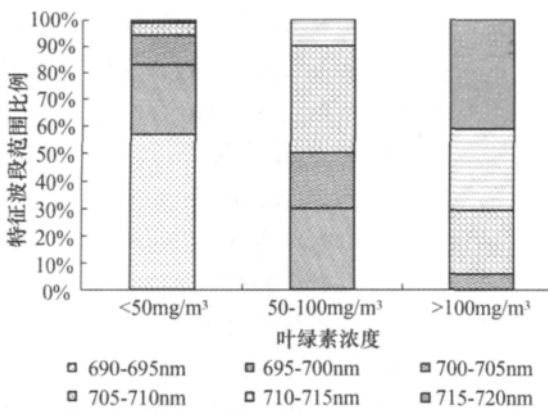


图6 不同叶绿素浓度对应荧光峰波长位置累积柱状图

6 结束语

太湖蓝藻叶绿素浓度分布具有明显的季节特征;内陆富营养化湖泊同海洋水体光谱反射特征类似,具有反映叶绿素浓度变化的典型波峰和波谷;各特征参量与叶绿素浓度具有较好相关性。不同之处

在于叶绿素浓度特征波段位置随叶绿素浓度等因素影响变化较大,而且与叶绿素 a 浓度相关性较海洋水体低(海洋水体二者相关系数 $R^2 = 0.88$)^[16]。当湖泊叶绿素浓度大于 $150\text{mg}/\text{m}^3$ 时,光谱反射率曲线在近红外波段具有类似植被的典型肩状光谱特征,与较低叶绿素浓度水体光谱反射率曲线具有明显的差异,因此,用遥感图像反演湖泊叶绿素浓度需要寻找新的方法和模型。针对内陆水环境监测的遥感仪器波段设置可以参照海洋水色卫星,但是无论对波谱分辨率还是特征波段个数均有更高要求。太湖水体在蓝藻浓度较低的季节,反射光谱特征会受到悬浮物和其他有色溶解物影响,因此,为了提高叶绿素浓度遥感反演精度,需要开展湖泊水体其他物质对反射光谱的影响的定量研究。

致谢:感谢太湖流域管理局水文水资源监测局对于本研究的实验数据获取给予的大力支持和帮助

参考文献

- [1] Gitelson A. The peak near 700 nm on reflectance spectra of algae and water: Relationships of its magnitudes and position with Chl-a concentration[J]. *Int. J. Remote Sen.*, 1992(13): 67-73.
- [2] Lee Z P, Carder K L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote sensing reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 361-368.
- [3] 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[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(6): 427-430.
- [4] 尹球, 巩彩兰, 匡定波, 等. 湖泊水质卫星遥感方法及其应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(3): 198-202.
- [5] 马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度[J]. *遥感学报*, 2005, 9(1): 78-86.
- [6] 乐成峰, 李云梅, 孙德勇, 等. 太湖叶绿素 a 浓度时空分异及其定量反演[J]. *环境科学*, 2008, 29(3): 619-626.
- [7] 杨煜, 李云梅, 王桥, 等. 富营养化的太湖水体叶绿素 a 浓度模型反演[J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(5): 597-603.
- [8] 李云亮, 张运林. 基于 TM 影像的太湖夏季悬浮物和叶绿素 a 浓度反演[J]. *遥感信息*, 2008, (6): 22-27.
- [9] Wheeler S, Levine S, Morrissey L, et al. A comparison of satellite sensors for mapping cyanobacteria in lake Champlain, USA/CHN[C]//American Society of Limnology and Oceanography Annual Summer Meeting, 2005: 19-24.
- [10] 杨顶田, 潘德炉. 水体中藻蓝蛋白浓度的光谱检测[J]. *仪器仪表学报*, 2006, (7): 94-98.
- [11] MILLIE, D. F., SCHOFIELD, O. M., KIRKPATRIK, G. J., JOHNSEN, G., EVENS T. J.. Using absorbance and fluorescence spectra to discriminate micro-algae[J]. *European Journal of Phycology*, 2002(37): 313-322.
- [12] Zhang, Y. L., Liu, M. L., Qin, B. Q. et al. Modeling remotesensing reflectance and retrieving chlorophyll-a concentration in extremely turbid Case-2 waters (Lake Taihu, China)[J]. *IEEE T. Geosci. Remote*, 2009(47): 1937-1948.
- [13] Zhang, Y. L., Feng L. Q., Li J. S. et al. Seasonal-spatial variation remote sensing of phytoplankton absorption in Lake Taihu, a large eutrophic and shallow lake in China[J]. *J. Plankton Res.*, 2010(32): 1023-1037.
- [14] 巩彩兰, 尹球, 匡定波, 等. 黄浦江不同水质指标光谱响应模型研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(4): 282-286.
- [15] Yu-Hwan Ahh, Palanisamy Shanmugam. Derivation and analysis of the fluorescence algorithms to estimate phytoplankton pigment concentrations in optically complex coastal waters[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007(9): 352-362.
- [16] R. J. Murphy, A. J. Unerwood, T. J. Tolhurst, et al. Field-based remote-sensing for experimental intertidal ecology: Case studies using hyperspatial and hyperspectral data for New South Wales(Australia)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008(112): 3353-3365.