

内陆水体叶绿素a遥感 信息提取的研究现状与进展

张运¹ 冯学智¹ 马荣华² 雍斌³

(1. 南京大学 地理信息科学系, 南京 200093;

2. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;

3. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 叶绿素是反映水体富营养化程度的一个重要参数, 遥感提取内陆水体叶绿素浓度是实现内陆水体富营养化动态监测的一个重要途径。内陆水体大部分属于二类水体, 受人类活动干扰较大, 富营养化严重, 其复杂的水体光学特性增加了叶绿素遥感信息提取的难度。目前内陆水体叶绿素遥感信息提取取得了一定的进展, 但提取的精度有待进一步提高, 模型的普适性与稳定性需进一步研究。文章总结了近年来内陆水体叶绿素遥感提取所用的遥感数据源及其提取方法; 分析了各遥感数据及提取方法的优缺点; 讨论了目前内陆水体叶绿素遥感信息提取存在的问题并对研究进行了展望。

关键词: 内陆水体; 叶绿素; 遥感; 信息提取

Advances in Inland Water Chlorophyll-a Extraction by Remote Sensing

ZHAGN Yun¹, FENG Xuezh¹, MA Ronghua², YONG Bin³

(1. Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing 200093, China;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Chlorophyll is an important parameter reflecting the degree of water eutrophication. Its extraction using remote sensing is an important way to monitor dynamic of water eutrophication. Since inland water normally serous interfered by human activities, most of them belong to case II water. Their optical properties are very complicated, which increase the difficulty to its chlorophyll extracting. At present, the chlorophyll extraction using remote sensing has been achieved prominent advancement. But the extraction precision still needs to be further improved. And the universality and stability of extraction model needs to be further enhanced. In this article, remote sensing data and method for inland water chlorophyll extraction has been summarized. Their advantages and disadvantages are also analyzed. At the end, the existing problems of chlorophyll extraction in inland water are discussed and some prospects about their further studies are inferred.

Key words: inland water; chlorophyll; remote sensing; information extraction

1 引言

叶绿素a是藻类重要的组成成分之一, 其浓度常常用于估测浮游植物的生物量和生产力, 是反映水体富营养化程度的一个重要参数。常规的监测方法通过野外采集水样, 再经过实验室分析来确定, 这种方法需要耗费大量的人力、物力, 而且受采样点的限制, 不能反映整个水体叶绿素浓度的分布和变化状况。遥感具有监测范围广、速度快、成本低和便于长期动态监测的优势, 随着传感器空间分辨率和光谱分辨率进一步地提高, 利用遥感技术监测水体叶绿素浓度具有常规方法无法比拟的优势。

水体按光学性质的不同可分为一类水体和二类水体^[1]。对于一类水体, 影响其光学特性的物质比较单一, 主要受叶

绿素的影响, 通过海洋水色卫星提取一类水体叶绿素的方法相对比较成熟。内陆水体大都属于二类水体, 其光学特性复杂, 不仅受到浮游植物的影响, 而且受到其他悬浮物的有机分子和黄色物质的影响; 对于浅水水体, 还要考虑水体底质对水体光学性质的影响。遥感提取一类水体叶绿素的标准方法对内陆水体并不适用。目前还没有一个专门的内陆水体水色遥感传感器, 人们通过各种陆地卫星传感器如TM、MODIS、NOAA/AVHRR等, 展开对内陆水体叶绿素a的提取研究, 使用的方法主要有经验方法、半经验方法和分析方法, 提取的精度还有待进一步提高。本文从内陆水体叶绿素遥感提取方法以及其所使用的遥感数据源两个方面展开论述, 分析目

基金项目: 国家科技支撑计划“水源地水质在线监测与蓝藻水华预测预警技术研究”(2007BAC26B01); 国家科技基础重点专项“中国湖泊水质、水量和生物资源调查”(2006FY110600)

作者简介: 张运(1976~), 男, 博士, 主要从事地理信息系统和遥感的应用研究。

前存在的问题并对其发展作了展望。

2 叶绿素的光谱特征及遥感提取的原理

叶绿素a组分含量的不同对应于水体一定波长范围反射率的显著不同,这是水体叶绿素a遥感信息提取的基本原理,其核心是通过分析水面上反射光谱特征,找出水体反射率与叶绿素a浓度之间的定量关系,其基础是分析不同叶绿素a浓度水体的光谱特征。

水体中的各种光学活性物质对光辐射的吸收和散射性质决定了水体的光谱特征。叶绿素a普遍存在于藻类物质中,藻类光谱反射率与色素的光学活性、细胞的几何形态、藻类细胞外表组成等参数有关。水体中因叶绿素a含量的不同,其光谱反射峰的具体位置和数值均有不同,叶绿素a在蓝紫光波段(400~500nm)和675nm附近均存在吸收峰^[2]。当水体叶绿素a浓度较高时,由于叶绿素a的强吸收,水体光谱反射率在这两个波段处出现谷值。在550~570nm波段处,由于叶绿素和胡萝卜素弱吸收和细胞散射的作用,水体反射光谱表现出反射峰^[3,4],该反射峰值与色素组成有关,可以作为叶绿素定量标志。在红光波段(680nm)叶绿素a表现出最大吸收;在近红外波段(700nm附近),由于植物色素的荧光效应,其光谱特征表现出反射峰,并且随着叶绿素a浓度的增加,反射峰的位置不断向长波方向移动,该反射峰是含藻水体最显著的光谱特征,通常是判断水体含藻的依据,其位置和数值是叶绿素浓度的重要指示。

3 内陆水体叶绿素a提取的遥感数据源

自1978年10月NASA发射的第一台海岸带水色扫描器CZCS(Coastal Zone Color Scanner)投入使用至今,目前针对海洋水色遥感的传感器已有10多颗^[5]。这些水色传感器主要针对光学特性相对简单的海洋一类水体。这类水体的主要特征是悬浮物和黄色物质含量很少,水体的光学特性主要由浮游植物(叶绿素)决定,其叶绿素a浓度的反演算法相对比较成熟,已经成为海洋水色卫星遥感提取一类水体叶绿素的标准算法^[6]。由于受到人类活动的影响,内陆水体大多属于二类水体,其光学特性远比海水复杂得多。与众多的海洋水色遥感卫星相比,目前还没有一个专门用于内陆水体水色遥感的传感器,内陆水体水色遥感研究所使用的传感器大多以海洋水色卫星和陆地资源卫星为主。

3.1 多光谱遥感数据

内陆水体叶绿素a遥感信息提取常用的多光谱遥感数据包括陆地卫星Landsat的MSS、TM、ETM数据、EO-1卫星的ALI数据、气象卫星NOAA的AVHRR数据、法国的SPOT HRV数据、印度遥感卫星IRS-1C数据等。在众多的多光谱遥感数据中,陆地卫星Landsat数据在内陆水体遥感

监测中应用最为广泛。自从1972年Landsat 1成功发射,就有一些学者通过MSS数据来评价和预测湖泊水库的叶绿素的浓度。Ritchie^[6]通过MSS数据对悬浮物浓度较高的内陆水体研究表明,当水体中的悬浮物浓度过高时,由于MSS的波段设置较宽,叶绿素在其吸收区的反射率特征被悬浮颗粒物的反射率所掩盖。因此,MSS数据不能用于监测悬浮物浓度较高水体中的叶绿素a含量。20世纪80年代TM在轨运行后,其空间分辨率、光谱分辨率和辐射分辨率均得到了提高,TM数据在叶绿素等水质遥感监测研究中得到了更多的关注。Allee等^[7]通过不同时相的TM数据估测美国Bull shoals水库表面的叶绿素浓度,认为藻类组成的不同是叶绿素提取模型有效性的主要限制因素。由于TM并不是专门的水质传感器,其波段设置较宽,很多水质参数的特征光谱不能得到充分反映。并且,内陆水体受人类活动影响严重,叶绿素分布的空间差异非常大,变化周期也很快,在对其叶绿素浓度进行提取和监测时需要遥感数据具有较高的空间和时间分辨率。在空间分辨率上TM能够满足内陆水体叶绿素提取的要求,但其时间分辨率为16天,如果再加上天气的影响,其较长的时间周期与内陆水体叶绿素a监测的要求还有较大的差距。SPOT、IKONOS、Quickbird数据较TM数据,其最大的优势是空间分辨率大大提高。这些数据虽然具有甚高的空间分辨率,由于它们仅具有4个光谱波段,受光谱分辨率的限制,还不足以作为遥感监测水质的工具。Cairn^[8]的研究表明,SPOT数据与水体的叶绿素浓度存在一定的相关,但相关性太低,不足以满足水体叶绿素提取的要求。在光谱分辨率上,理想的水色传感器其光谱带宽的最低要求是20nm。多光谱遥感数据波段宽度一般都大于100nm,且在光谱上不连续,不能覆盖整个可见光到红外光的光谱范围(400~2400nm),其波段设置远宽于叶绿素a的诊断光谱宽度,在区分叶绿素问题上还存在缺陷,其叶绿素提取的精度还需进一步提高。另外,二类水体离水辐射率量值跨度较大,这就要求传感器要具有较高的灵敏度和信噪比,考虑到云或水汽的影响,还要求传感器要有较宽的动态范围。

3.2 高光谱遥感数据

高光谱遥感传感器可分为成像光谱仪和非成像光谱仪。其光谱分辨率通常小于10nm,具有数十至数百个波段,其较高的光谱分辨率在可见光和近红外波段足以探测出水体中组分的吸收和散射特征,为叶绿素等水体参数的反演提供了重要的数据源。目前,水体叶绿素提取所用的高光谱数据主要有:美国的AVIRIS数据、MODIS数据和Hyperion数据、欧空局的Envisat MERIS数据、加拿大的CASI数据、芬兰的AISA数据、日本的ASTER和GLI数据以及中国上海光机所的OMIS成像光谱数据。其中,MODIS、MERIS、GLI增

设了中心波长在680nm和660nm附近的窄波段测量荧光峰,可以避免其他物质吸收和散射对叶绿素提取的影响,适用于叶绿素浓度较高的水体。

MODIS具有从可见光到热红外的36个波段,一天可接收2次,具有较高的时间分辨率,并且在410~2100nm波谱之间提供了大气、云和水汽的测量,有利于较精确的大气纠正,可以提高叶绿素浓度提取的精度,在内陆水体叶绿素提取有较大的应用价值,比较适合大范围水体的动态监测^[9]。

MERIS波谱范围为412~1050nm,星下点地面分辨率为300m,时间周期为2~3天,并且设置了用于大气校正的3个近红外波。MERIS数据以其较多的光谱波段、中尺度的地面分辨率、较高的时间分辨率、较优的波段设置成为内陆水体叶绿素提取的重要数据之一。

Hyperion在可见光与短波红外之间提供了220个光谱波段,地面分辨率高达30m,其较高的光谱分辨率和地面分辨率对内陆水体叶绿素的提取有着很高的研究价值。闻建光等^[10]的研究表明Hyperion可以满足内陆水体叶绿素提取的精度要求。

机载成像光谱仪CASI、AVIRIS、OMIS具有数百个光谱波段,其地面空间分辨率高达1~20m,特别适合内陆水体叶绿素的提取。欧洲学者曾利用航空遥感作过大量水质监测的研究。Hamilton等^[11]利用AVIRIS数据研究美国Tahoe湖的叶绿素浓度,通过修正的沿海地区彩色扫描仪(CZCS)从AVIRIS图像上提取湖水叶绿素浓度并与采样的湖水样品分析结果比较,发现两者非常一致。Kallio等^[12]通过AISA数据对芬兰15个不同富营养化湖泊的叶绿素a浓度进行提取,取得了较好的成果。Harma^[13]利用AISA数据模拟MODIS和MERIS数据研究这两种数据在水环境监测中的可用性时发现:MERIS以705nm为中心的波段9很适合作为估算叶绿素a的浓度,但是利用模拟的MODIS数据得到的算法精度并不高。国内疏小舟等^[14]应用我国自行研制的OMIS成像光谱仪估算太湖叶绿素浓度,结果表明成像光谱仪能够提高水体藻类叶绿素定量遥感的精度。众多研究表明机载高光谱遥感提取内陆水体叶绿素浓度的精度远高于其他星载传感器数据提取的精度。但是机载成像光谱仪存在着覆盖范围小,监测成本高的缺点,这也限制了其在内陆水体遥感监测中的应用。

内陆水体叶绿素浓度的提取和监测要求传感器不仅具有较高光谱分辨率,同时还要具备较高的空间和时间分辨率。星载高光谱遥感数据具有较高的光谱分辨率,但其空间分辨率和时间分辨率普遍较低。其中Hyperion的光谱分辨率和空间分辨率都较高,但其刈幅很窄,时间分辨率低,在内陆水体叶绿素连续监测上还略显不足。

4 提取方法

目前,海洋等一类水体叶绿素遥感信息提取方法比较成熟,已经进入业务化运作。受水体复杂的光学特性的影响,其方法并不适用于内陆水体的叶绿素提取。内陆水体的叶绿素遥感信息提取需要根据内陆水体的不同特征分别研究其叶绿素的遥感提取方法。目前,常用的方法可以分为三类:分析的方法、经验的方法和半经验的方法。从其发展历史来看,20世纪80年代以前以分析方法为主,20世纪80~90年代以经验方法为主,20世纪90年代后以半经验方法为主。

4.1 分析的方法

Gordon等^[15]从物理机制出发,利用生物光学模型描述水质参数与离水辐亮度之间的关系,同时通过辐射传输方程模拟太阳光经过水和大气时被散射和吸收情形,建立了水表面下的辐照度比值与吸收系数和后向散射系数之间的数学关系。在已知水体各个组分的散射特性和吸收特性条件下,可以根据其浓度模拟出不同组分水体的地面反射光谱或大气顶部的反射光谱,反之则可以通过反演方法反演水体中的叶绿素等物质的浓度。该方法目前已成为经典的水质参数反演方法。Kondratyev^[16]研究了生物光学模型的方法对Ladoga湖的叶绿素浓度进行了反演;Lahet^[17]通过建立三要素反射模型反演西班牙北部的Ebro湖的叶绿素浓度,取得了较理想的结果。Hoogenboom等^[18]分析水体中各个组分的相互作用机制,以物理分析的方法从水下辐照度来提取叶绿素a浓度。Donald^[19]通过实测数据与实验分析结果建立了近表水下遥感反射率的正向物理模型,根据实测的水下遥感反射率,利用反向模型来反演叶绿素a的浓度。国内学者李云梅^[20]等通过Gordon模型建立了R(0-)模拟模型,应用优化函数的方法反演太湖水体叶绿素浓度,结果表明,当叶绿素浓度高于30mg/m³时,反演的相对误差小于20%。分析的方法具有较好的通用性,不需要大量的地面实测数据的支持,通过遥感反射率或辐亮度就可以计算出水中叶绿素的浓度。但是,该方法的使用前提是必须已知水体的表现光学特性和固有光学特性。而内陆水体的光学特性复杂,这些参数的精确测量非常困难,并且分析模型的假设条件的简化使目前分析模型反演得到的叶绿素浓度精度普遍不是很高。

4.2 经验的方法

经验方法通过对航空航天遥感数据、与其(准)同步的地面实测水质分析数据进行相关统计分析,选择最优波段或波段组合与地面实测水质数据进行统计分析进而估算水质参数。早在20世纪80年代初,该方法在水体叶绿素监测中就得到了广泛的应用^[21]。Verdin^[22]通过大气纠正后的MSS数据与实测数据分析得出叶绿素a浓度与MSS6存在很好的指数关系。Dekker^[23]定量研究了TM数据6个波段值与叶绿素浓度间的关系,指出指数模式要优于线性模式。经验的方法提

取内陆水体叶绿素浓度在特定的水域研究中取得了一定的成功。例如: Fraser^[24]对美国22个内陆湖的光谱反射比与叶绿素a的关系进行研究,发现反射比光谱的一阶微分与叶绿素a浓度的相关性最好。Kevin^[25]等提出了以672nm和704nm波段的反射率比值来提取叶绿素a浓度,以消除环境因子对叶绿素提取的影响。经验模型具有简单易用的特点。但遥感数据与水质参数之间的事实相关性不能保证,算法具有显著的时间和空间特殊性,不同湖泊不同季节需要建立各自的模型。

4.3 半经验的方法

20世纪90年代以后,随着高光谱技术的发展,非成像光谱仪在水体参数反演中得到广泛应用。根据非成像光谱仪测量的水质参数光谱特征,选择估算水质参数的最佳波段或波段组合,然后应用一定的数学方法建立遥感数据和水质参数间的定量关系。国内学者在这方面展开了大量的研究。马荣华^[26]利用太湖梅梁湾附近水体的实测光谱和水质采样实验室分析,结果表明:682nm和706nm是叶绿素a含量估测最重要的两个光谱特征;比值和反射峰位置是估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度的最好方法;反射峰的位置是指示叶绿素浓度最敏感的变量。疏小舟等^[27]通过太湖反射光谱特性和藻类叶绿素浓度之间关系的研究,发现当叶绿素浓度大于5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时,光谱反射比 $R_{705\text{nm}}/R_{675\text{nm}}$ 和700nm附近反射峰的位置与叶绿素浓度相关性较好,其结论与马荣华的研究结果相近。祝令亚等^[9]应用MODIS监测太湖水体叶绿素a浓度的研究表明:MODIS的波段1、2的比值组合 R_2/R_1 与叶绿素a浓度实测值相关性最好,相关系数达到了0.903,适于反演叶绿素a浓度。王艳红等^[28]同样应用MODIS数据提取太湖的叶绿素浓度,提取的方法是先根据叶绿素浓度对太湖进行分区,再对每个分区分别建立叶绿素浓度提取模型,发现MODIS的1,3,4,10~14的反射率及其组合更加适合太湖水体的叶绿素浓度提取。可见,在应用半经验方法提取内陆水体叶绿素浓度的研究中,不同的学者,即使是对同一个研究区,采用相同的数据类型,得到的模型和结论也不尽相同,模型的普适性较差。但综合学者的研究成果来看,682nm附近的吸收谷和706nm附近的反射峰是提取内陆水体叶绿素的两个重要波段。

5 待解决的关键问题及展望

遥感在内陆水体监测应用中有着很大的潜力,通过遥感提取内陆水体叶绿素浓度的研究取得了很大的进展。但由于受一些理论和方法的限制,目前仍存在着一些问题,具体表现在:(1)信息提取的精度不高,以经验、半经验的方法为主,缺乏物理依据;(2)信息提取模型受空间和时间的限制大,可移植性差。具体表现在:同一个模型换一个水体不再适用,即使是对同一个水体,换个季节,模型也不能直接应

用。究其原因主要是受以下三个方面的影响:(1)水体在不同季节所表现的光谱特征不完全相同;(2)水体光谱受叶绿素浓度的影响,不同浓度的叶绿素其主要光谱特征存在着差异;(3)内陆水体严重受人类活动的影响,水质的空间差异大,不同区域的水体其光谱特征存在着较大的差别。今后的研究可进一步围绕这两个问题在以下几个方面展开。

5.1 遥感数据源

内陆水体大部分属于二类水体,普遍存在富营养化问题,含有大量的悬浮物、叶绿素和黄色物质等,光学特性极为复杂。为了能够区别这些物质的影响,要求传感器具有较高的光谱分辨率。另外,内陆水体面积相对较小,水质差异性较大,叶绿素分布不均,在几十米的范围内往往就有很大的变化,这就要求传感器具有较高的空间分辨率。严重的人类活动干扰造成了内陆水体水质参数变化非常快速,特别是蓝藻频繁爆发的水体,即使是一天的时间尺度,其叶绿素浓度也有很大的差异,为了满足动态监测的要求,遥感传感器必须具有较高的时间分辨率,最好能达到以天为单位。水体的反射率较低,光谱信号很弱,再加上大气的影晌,进入传感器的辐亮度非常小,因此,传感器还要具有较高的辐射分辨率,从而保证水质参数的细微变化都能在遥感影像上体现出来。对内陆水体叶绿素提取最佳的数据就是针对内陆水体的特点研究设计专门针对内陆水体的新型传感器,这类传感器需要具有较高的灵敏度、信噪比以及较高的光谱分辨率和时空分辨率。

5.2 大气校正

水体典型的光学特征是其反射率低,光谱信号很弱,传感器接收到的总辐射值中90%以上的信息来自大气瑞利散射、气溶胶以及太阳反射,水体本身的信息不足10%。即使是很小的大气校正误差也会大大影响叶绿素提取的精度。因此,大气校正对叶绿素浓度等水色参数提取显得尤为重要。目前常用的大气校正方法可分为两类。一类是基于辐射传输的大气校正法。该方法建立在辐射传输理论上,需要的参数多,其校正精度取决于对大气参数的精确估算,而这些大气参数的获取非常困难。目前国内学者大多采用标准的大气模型和气溶胶模型,或者根据经验来估测气溶胶等关键参数。另一类是基于图像的大气校正法,应用最广的就是暗像元法。该方法假设清洁水体离水辐射率为零来获取大气参数,并且将大气性质作均一化处理。由于内陆水体大都属于二类水体,其近红外波段离水辐射不为零,不能像一类水体水色反演中将清洁水体的在近红外波段的离水辐射率假设为零来获取大气参数;另外,对于内陆水体,大气气溶胶受人类活动影响严重,其分布并不均一。因此,对内陆水体叶绿素浓度进行提取时该类大气校正法并不适用。需要进一步研究发展适合内陆水体遥感的大气校正算法,最佳的办法是在传感器的设计中专门设置大气校正通道,用于监测气溶胶等大气参数。

5.3 水体光学特性

分析的方法建立在光学传输物理过程之上, 具有严格的物理意义, 理论上可以达到非常高的精度。其前提是需要充分测量水体的表观光学特性和固有光学特性。目前我们对内陆水体表观光学特性和固有光学特性之间的理论关系研究得还不够深入, 对内陆水体中的叶绿素、悬浮物、黄色物质等水色参数的吸收、散射、衰减特性了解得不多, 这也造成了应用分析的方法提取内陆水体叶绿素浓度的精度较低, 限制了该方法的应用。需要进一步详细分析不同特征内陆水体的光学特性, 确定其叶绿素、悬浮物、黄色物质等水质参数的吸收、散射和衰减系数; 加大对内陆水体光学特性的研究以提高分析方法提取叶绿素精度。

5.4 水体底质对水体辐射的影响

内陆水体中存在着大量的浅水水体, 光在水体传输过程中必然会受到其水体底质的影响, 通过水面测量得到的离水辐射值包含了水底底质对水体反射的贡献, 从而降低了内陆水体叶绿素提取的精度。因此, 需要对内陆水体底质类型进行采样研究, 测量不同类型水体底质对离水辐射率和遥感反射率的贡献, 以提高叶绿素提取的精度。■

参考文献:

[1] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color [J]. *Limnol & Oceanogr*, 1974(22): 709-722.
[2] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
[3] Gitelson A, Laorawat S, Keydan G P, et al. Optical properties of dense algae cultures outdoors and its application to remote estimation of biomass and pigment concentration in *Spirulina platensis* [J]. *Journal of Phycology*, 1995, 31(5): 828-834.
[4] Yacobi Y Z, Gitelson A, Mayo M. Remote sensing of chlorophyll in lake Kinneret using high spectral resolution radiometer and Landsat TM: Spectral features of reflectance and algorithm development [J]. *Journal of Plankton Research*, 1995, 17(11): 2155-2173.
[5] 李四海, 王宏, 许卫东. 海洋水色卫星遥感研究与进展 [J]. *地球科学进展*, 2000, 15 (2) :190~196.
[6] Ritchie J C, Schiebe F R, Cooper C M, et al. Landsat MSS studies of chlorophyll in sediment dominated lakes[J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '92*, 1992, 2: 1514-1517.
[7] Allee R J, Johnson J E. Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll-a and secchi disc depth of Bull reservoir, Arkansas, US[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(6): 1057-1072.
[8] Cairns S H, Dickson K L, Atkinson S F. An examination of measuring selected water quality trophic indicators with SPOT satellite [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63(6):263-265.
[9] 祝令亚, 王世新, 周艺, 等. 应用MODIS监测太湖水体叶绿素a浓度的研究[J]. *遥感信息*, 2006 (2) : 25~28.
[10] 闻建光, 肖青, 杨一鹏, 等.基于Hyperion数据的太湖水体叶

绿素a浓度遥感估算[J]. *湖泊科学*, 2006, 18 (4) : 327~336.
[11] Hamilton M K, Davis C O, Rhea W J, et al. Estimating chlorophyll content and bathymetry of Lake Tahoe using AVIRIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*,1993(44): 217-230.
[12] Kallio K, Kutser T. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons [J]. *The Science of the Total Environment*, 2001(268): 59-77.
[13] Harma P, Vepsalainen J, Hannonen T, et al. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland [J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, 268: 107-121
[14] 疏小舟, 汪骏发, 沈鸣明, 等. 航空成像光谱水质遥感研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2000, 19 (4) : 273~276.
[15] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(2): 417-427.
[16] Kondratyev K Y. Water quality remote sensing in the visible spectrum [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(5): 957-979.
[17] Lahet F, Ouillon S. A Three-component model of ocean colour and its application in the Ebro River Mouth area [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000(72): 181-190.
[18] Hoogenboom H J, Dekker A G, Dehaan J F. Retrieval of chlorophyll and suspended matter in inland waters from CASI data by matrix inversion [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1998, 24(2): 144-152.
[19] Donald C, Strombeck N. Estimation of radiance reflectance and the concentrations of optically active substances in Lake Malaren, Sweden, based on direct and inverse solutions of a simple model [J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, 268: 171-188.
[20] 李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度[J]. *遥感学报*, 2006, 10 (2) : 169~175.
[21] Sathyendranath S, Morel A. *Remote Sensing Applications in Marine Science and Technology* [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1983.
[22] Verdin J P. Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with Landsat Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51(3): 343-353.
[23] Dekker A G, Peters S W M. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14: 799-822.
[24] Fraser R N. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll-a among Nebraska Sand Hills lakes [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1579-1589.
[25] Kevin G R, Herman J G, Machteld R, et al. Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3575-3585.
[26] 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.
[27] 疏小舟, 尹球, 匡定波.内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. *遥感学报*, 2000, 4 (1) : 41~45.
[28] 王艳红, 马荣华, 邓正栋. 基于分区的太湖叶绿素a遥感估测模型[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35 (1) : 86~91.