(5)273—276

第 19 卷第 4 期
2000 年 8 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 19, No. 4
August, 2000

航空成像光谱水质遥感研究*

疏小舟 汪骏发 沈鸣明 匡定波

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

X832

摘要 用 OMIS-Ⅱ航空成像光谱仪在太湖地区进行了地表水质遥感实验,研究了 OMIS-Ⅱ波段反射比 $R(21)/R(18)$ 与藻类叶绿素浓度的关系,由 OMIS-Ⅱ遥感图像估算了研究区域内的叶绿素浓度分布,并将遥感估算值与地面采样数据进行了比较.结果表明,OMIS-Ⅱ能够提高藻类叶绿素定量遥感的精度.

关键词 成像光谱仪,定量遥感,叶绿素.

航空 水质

REMOTE SENSING OF WATER QUALITY MONITORING USING AN AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER*

SHU Xiao-Zhou WANG Jun-Fa SHEN Ming-Ming KUANG Ding-Bo

(Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Airborne imaging spectrometer OMIS-Ⅱ was mounted on an airplane as a remote sensor to survey the water quality of Lake Taihu. A simple chlorophyll algorithm for OMIS-Ⅱ was created by using the reflectance ratio of the band 21 to band 18. Alga chlorophyll distribution in the study area was estimated from OMIS-Ⅱ images. Comparison between predicted and measured chlorophyll concentrations was given. The results show that OMIS-Ⅱ can increase the accuracy of quantitative remote sensing of alga chlorophyll and may be a powerful sensor for monitoring surface water quality.

Key words imaging spectrometer, quantitative remote sensing, chlorophyll.

引言

藻类叶绿素浓度监测是内陆水环境遥感的主要目标.基于对水体和藻类反射光谱特性研究,叶绿素估算精度比较高的遥感模型已有报道[1,2],但这些模型都要求遥感器在可见和近红外波段的光谱分辨率足以探测叶绿素的吸收特征(440nm 和 675nm)和反射特征(~700nm).对于内陆水环境遥感常用的数据,如 TM 等宽波段遥感器所获取的图像,其光谱分辨率无法满足要求.遥感器光谱分辨率成为决定叶绿素定量遥感精度的关键因素之一.成像光谱技术的发展使遥感器的工作波段增加到几十甚至几百个,光谱分辨率大大提高,成像光谱有可能在水环境遥感监测中得到重要应用[3,4].

OMIS-Ⅱ是中国科学院上海技术物理研究所研制的新一代航空成像光谱仪.仪器工作波段范围从可见到热红外,其中在 460-1100nm 的可见-近红外波段有 60 个通道,波段宽度约为 10nm;在短波红外及热红外波段另有 4 个通道(1.55-1.75μm,2.08-2.35μm,3.0-5.0μm,8.0-12.5μm).1998 年 8 月,首次利用这台成像光谱仪在藻类污染严重的太湖地区进行了飞行遥感实验,同时在地面进行了水面光谱测量和水质采样分析.在此基础上,本文研究了 OMIS-Ⅱ的水色分辨能力,以及在藻类叶绿素浓度遥感监测中的应用.

1 实 验

研究区域是太湖的西北部分湖区,包括五里湖、梅梁湖以及太湖主体的一部分.由于多条入湖运河引入的有机污染,梅梁湖水域属于太湖富营养化最为严重的水体,而太湖主体部分水质相对较好.实验包括飞行遥感和地面实验两个部分.遥感飞行时间为 1998 年 8 月 29 日上午 11:18 至 12:09,天气晴好.遥感飞行高度约为 1000m,刈幅约为 1.8km,地面分辨率约为 5m.三条航带基本上覆盖了全部预定实验区.为了对遥感图像进行地理定位,飞机上安装有 GPS 定位系

* 国家 863 计划基金(编号 308-13051)资助项目
稿件收到日期 2000-03-30,修改稿收到日期 2000-04-10

* The project supported by National 863 Plan of China.
Received 2000-03-30, revised 2000-04-10

统，遥感图像的每一扫描行数据中都包括了GPS定位仪所获取的飞行高度、速度、经纬度和时间等信息.地面实验包括在湖面进行的水体反射光谱测量和水质采样，以及在实验室确定其中的藻类叶绿素、悬浮物质的浓度和化学耗氧量(高锰酸盐指数).利用GPS定位仪确定采样点的地理坐标(经纬度).在每个采样点，同时测量了参考白板的反射强度，以便于将水面光谱辐射转化为水体的光谱反射率.测量仪器为GER1500型地物光谱仪，工作波段为300-1100nm，有512个波段，波段宽度约为1.6nm.水质采样分析工作是在太湖流域水环境监测中心的协助下完成的.

2 遥感数据处理

考虑到遥感飞行的高度比较低(～1000m)，并且飞行时大气能见度非常好，因此在进行OMIS-Ⅰ遥感图像处理时，不再考虑大气吸收和散射作用的影响.对于各波段的灰度值图像，经过暗电流校正后，利用各波段的增益系数即得到相应的辐射强度.也可以根据成像光谱仪和地物光谱仪对同一地物辐射同时测量的结果，将图像其它部分的像元灰度转化为地表辐射强度.本文中采用后一种方法.由于地物光谱仪在测量地物辐射的同时也测量了标准板的反射，据此可以计算出地物的光谱反射率.如果在遥感飞行期间，地表的太阳辐照度没有明显的变化，则可以将成像光谱仪在可见和近红外各波段(地物光谱仪工作范围之内)的图像灰度数据转化为相应波段的反射率.

图1是藻类浓度比较低和非常高的两类典型水体的反射光谱曲线，前者的反射率远小于后者.1和2分别是利用GER1500地物光谱仪对这两类水体测量结果.3和4是OMIS-Ⅰ对这两类水体的成像光谱，分别选取了若干个相邻像元.由图1可见，虽然所用测量仪器光谱分辨率有所不同(GER1500波段宽度约为OMIS-Ⅰ的1/6)，但所反映的水体反射光谱主要特征是一致的.当湖水中有藻类生物时，藻类叶绿素会明显影响水体反射光谱.在可见和近红外波段内，叶绿素在440nm和675nm附近有两处吸收峰，在700nm附近有一个很突出的反射峰.在近红外波段，藻类细胞有机质有较强的反射，当藻类物质浓度很高时，这一现象极其显著.从图1的各条曲线中都可以一一观察到藻类叶绿素的吸收和反射对水体反射光谱特征的影响.

3 OMIS-Ⅱ叶绿素算法

叶绿素在440nm处的吸收特征在水体反射光谱曲线上很显著，在海洋叶绿素遥感中非常重要.但是，

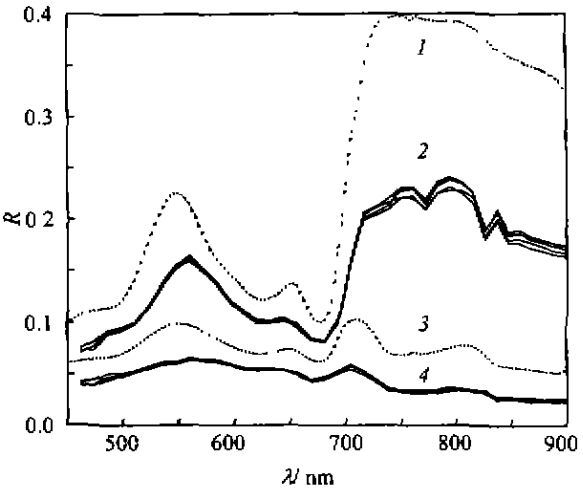


图1 GER1500测量的水面反射光谱及OMIS-Ⅰ成像光谱

1 叶绿素浓度高(水面测量)

2 叶绿素浓度高(航空遥感)

3 叶绿素浓度低(水面测量)

4 叶绿素浓度低(航空遥感)

Fig. 1 Spectral reflectance of surface water measured by GER1500 and OMIS-Ⅱ

1 High *Chl-a* (by GER1500)

2 High *Chl-a* (by OMIS-Ⅱ)

3 Low *Chl-a* (by GER1500)

4 Low *Chl-a* (by OMIS-Ⅱ)

该水体在波段的反射率也易受有机溶解性物质(所谓黄色物质)吸收作用的影响，而对于内陆水体，在很多情况下，黄色物质的浓度是比较高的，因此很少利用叶绿素的这一吸收特性进行叶绿素浓度遥感.悬浮物质对水体在可见到近红外波段的反射光谱都有影响，主要体现在悬浮的散射作用增大了水体的反射率.地表水土流失使内陆水中的悬浮物质浓度可能相当高，对水体反射率影响也非常显著.

由于以上几点原因，适用于内陆水体中藻类叶绿素的典型遥感算法可以归纳为两种：第一种是根据叶绿素在700nm附近的反射峰位置，确定叶绿素浓度[1]；第二种是由叶绿素在700nm处的反射峰和在675nm处吸收峰的反射比建立估算叶绿素浓度的算法[2].大量实验结果表明，随着水体中叶绿素浓度的增大，叶绿素反射峰的位置向长波方向移动，范围约在680nm-720nm之间，并且反射峰位置几乎不受悬浮物质和黄色物质的影响.对于OMIS-Ⅱ数据，由于其波段宽度为10nm左右，除了在叶绿素浓度很高和很低的极端情况外，要明显观察到叶绿素反射峰的移动是不可能的，这种算法不适用.但由图1中可见，OMIS-Ⅱ的光谱分辨率足以探测到叶绿素在675nm处的吸

收峰和在 700nm 附近反射峰对水体反射率相对大小的影响，当叶绿素浓度升高时，在叶绿素吸收峰（～675nm）和反射峰处（～700nm）反射率的相对差异愈加显著，因此有可能利用这两个波段处的反射比建立叶绿素浓度的遥感算法. 相应于这两个波段长的 OMIS-Ⅰ波段是第 18 和第 21 波段，中心波长分别为 669. 6nm 和 704. 8nm. 参照文献[2]中的叶绿素算法，根据地面的光谱测量数据和叶绿素浓度采样分析数据，线性拟合得到叶绿素浓度与 OMIS-Ⅱ波段反射比 $R(21)/R(18)$ 间的关系如下：

$$Chl(\mu g/L) = -291.2 + 257.7 \times \frac{R(21)}{R(18)}, \quad (1)$$

其线性拟合系数为 0. 93(见图 2).

OMIS-Ⅰ的第 21 和第 18 波段中心波长已经靠近近红外波段，受黄色物质吸收效应的影响比较小（黄色物质的影响主要是在短波长区），并且，以反射比作为变量，可以在一定程度上减小由于悬浮物质散射增大水体反射率的影响，提高叶绿素浓度估算精度. 在遥感图像预处理时，前面假设在遥感飞行时，地表太阳辐照度没有明显变化，由于在式(1)的模型中以反射比作为参数，因此上述假设引起的误差可以不考虑.

根据上述模型，可以由 OMIS-Ⅰ的第 21 波段和第 18 波段的遥感图像计算出叶绿素在遥感湖区的分布图. 图 3 是沿第一条航带中线的叶绿素浓度分布情况. 由 GPS 定位数据，第一行经纬度约为 E119°26. 465′N32°7. 384′，第 5000 行的经纬度约为 E119°32. 052′N32°11. 897′.

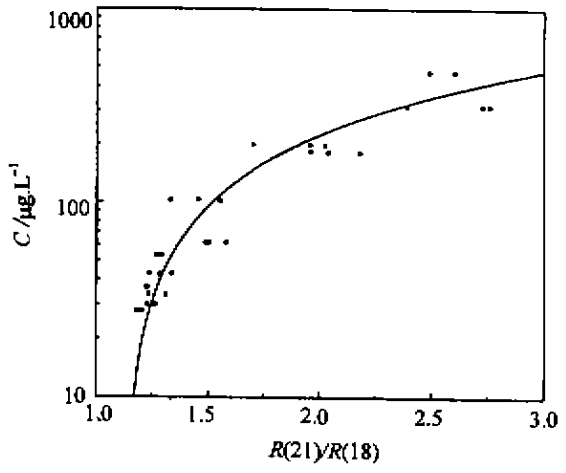


图 2　叶绿素浓度与 OMIS-Ⅱ波段反射比 $R(21)/R(18)$ 的关系

Fig. 2 Relationship between chlorophyll concentration and reflectance ratio of the 21st to 18th bands of OMIS-Ⅰ

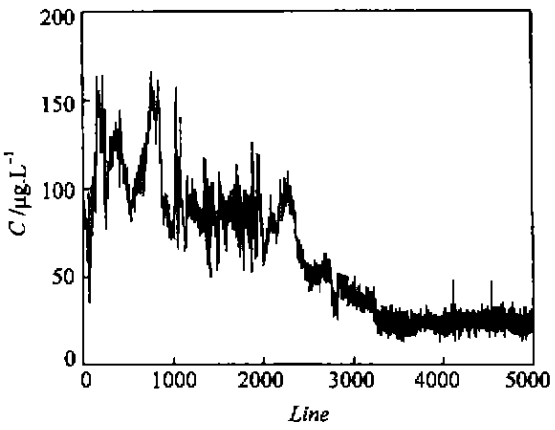


图 3　沿飞行航线的叶绿素浓度分布

Fig. 3 Chlorophyll concentration distribution along the flight line

为了验证本文的叶绿素遥感算法，将遥感估算结果与飞行前两天的地面采样分析数据进行比较. 根据 GPS 定位数据确定采样点在遥感图像中的相对位置，考虑到遥感图像 GPS 定位的误差，以及在这段时间间隔里湖水可能流动，遥感估算值选取在 50×50 像元窗口内的平均值. 比较结果如图 4 所示，估算值与测量值线性相关系数达到 0. 95，是比较一致的. 对于叶绿素浓度为 318 和 478μg/L 的采样点，估算的叶绿素浓度远低于采样值，这是因为水面出现了大量藻类密集漂浮的情况，这种情况下，采样的随机性相当大，用叶绿素浓度的概念描述这种近于两维平面上的分布是不合适的.

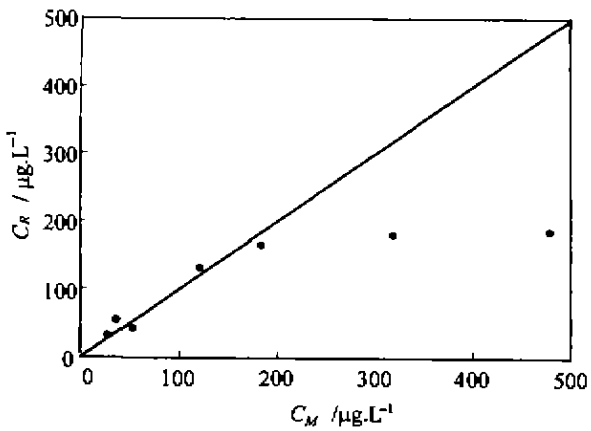


图 4　叶绿素浓度估算值（C_R）与地面测量值（C_M）的比较

Fig. 4 Comparison between predicted and measured chlorophyll concentrations distribution along the flight line

本文在进行叶绿素浓度估算时，未考虑藻类物种不同时的差别. 对于各种藻类，叶绿素所占的质量比基本相同，但是，不同藻类的结构可能有很大的差别，从而影响其个体在水中的分布形态. 多年以来，在太湖进行的藻类物种组成和分布的研究表明，太湖西北部水域中，蓝藻为最优势门类，并且其中绝大部分为微囊藻属[5]，微囊藻有特殊的空胞结构，其浓度很高时容易浮集于水面上，形成水华. 实验数据中叶绿素浓度极高（>300μg/L）的采样点均属于这种情况. 沉水性的藻类（如硅藻等）在水体中的分布一般比较均匀，如果遥感监测的水体中，这些藻类为优势种，叶绿素定量遥感应能达到更好的精度.

4 结语

航空成像光谱仪 OMIS-Ⅰ的光谱分辨率足以探测到水体中藻类叶绿素在 675nm 的吸收峰和 700nm 处的反射峰对水体反射光谱的影响，并且其波段反射比 $R(21)/R(18)$ 与水体中的藻类叶绿素浓度有很好的线性相关性. OMIS-Ⅰ的叶绿素遥感算法尚需进一步的实验数据加以完善，但初步的遥感实验研究结果表明，应用航空成像光谱仪遥感有可能提高内陆水体中藻类叶绿素遥感估算的精度.

REFERENCES

[1]Gitelson A, Garbuzov G, Szliagyi F, *et al*. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring inland waters quality. *Int. J. Remote Sensing*., 1993, **14**: 1269—1295

[2]Gitelson A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration, *Int. J. Remote Sensing*, 1992, **14**: 3367—3373

[3]Fraser R N. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll-a among Nebraska Sand Hill Lakes, *Int. J. Remote Sensing*., 1998, **19**: 1579—1589

[4]SHEN Ming-Ming, WANG Jian-Yu. Airborne imaging spectometer system, *J. Infrared Millim. Waves*(沈鸣明，王建宇. 实用机载成像光谱仪系统，红外与毫米波学报), 1998, **17**(1): 7—12

[5]CHEN Yu-Wei, GAO Xi-Yun, QIN Bo-Qiang. The summer phytoplankton species composition in northern part of west Taihu lake, *J. Lake Sciences*(陈宇炜，高锡云，秦伯强. 西太湖北部夏季藻类种间关系的初步研究，湖泊科学), 1998, **10**(4): 35—40