

结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量*

马荣华, 戴锦芳

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 实地测试太湖水体的反射光谱, 实验室分析水样, 运用相关分析法探求叶绿素、悬浮物的光谱特征波段, 估测叶绿素和悬浮物含量; 对比 Landsat ETM 波段, 运用不同的函数曲线对相应的波段组合进行回归拟合, 建立相应的估测模型, 选取精度最好的两个分别对太湖的叶绿素和悬浮物含量进行估测. 结果表明: (1) 对多光谱遥感而言, Landsat TM/ETM 是定量获取叶绿素和悬浮物的较好的数据源, 但不是最适合的数据源; (2) 通过 ETM3 与叶绿素建立一定的函数关系来估测叶绿素含量具有较高的精度, 其中利用算术组合 ETM3/ETM1 估测叶绿素的精度最高; (3) ETM4 与悬浮物具有较高的相关性, 其中利用算术组合 ETM4/ETM1 估测悬浮物含量的精度最高; (4) Landsat ETM 卫星影像中, 不同尺寸的像元窗口影响水质参数的估测精度; 对叶绿素估测而言, 7×7 或者 5×5 窗口比较适合, 对悬浮物估测而言, 一般不超过 3×3 .

关键词: 叶绿素; 悬浮物; 光谱; 遥感; 太湖

Quantitative Estimation of Chlorophyll-a and Total Suspended Matter Concentration with Landsat ETM Based on Field Spectral Features of Lake Taihu

MA Ronghua & DAI Jingfang

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: The spectra were measured with hand-spectral instrument in Lake Taihu, and the water samples were collected in situ and analyzed in the lab. The correlations between chlorophyll-a (CHL) and total suspended matter (TSM) and the measured spectra reflectivity were analyzed, on the basis of which, CHL and TSM concentrations were estimated by using the combination of the field bands, respectively. Then by the comparison of the bands of Landsat ETM, the most practicable ones were selected, which would be validated for the estimation of CHL and TSM content by using the Landsat ETM images. Finally, lots of regression models were discussed to deduce the estimation models. Two of the most precise ones were used to estimate the CHL and TSM concentrations. The conclusion are as follows: (1) Landsat TM/ETM is one of the appropriate data resources in the multi-spectral remote sensing, but it isn't the most appropriate, (2) it is more precise to estimate CHL content with the third band of ETM by some certain function. In addition, it is also better to estimate CHL content with the combination of ETM3 and ETM1, (3) the correlation between ETM4 and TSM is also very close, and the most precise band to estimate TSM is ETM4/ETM1, (4) the image window size has an effect on the precision to estimate the water quality parameters, and 5×5 or 7×7 is more appropriate to estimate CHL content, while 3×3 or less is more appropriate to estimate TSM content.

Keywords: Chlorophyll; Total suspended matter; Spectrum; Remote sensing; Lake Taihu

水体中的某些水质参数引起水体表面光学特性的改变, 这种变化可以通过遥感光谱信号反应出来, 因而通过遥感可以量测水质参数的物质含量^[1,2]; 主要方法有: 理论方法、经验方法和半分析方法, 但由于卫星遥感的波段宽度与某些水质参数诊断性光谱宽度的不一致性, 导致了发展理论方法的困难, 因此目前以经验和半分析方法为主^[3,4]. 不同水体、同一水体在不同的季节所表现的光谱特征有着细微的差别, 遥感估测水质参数的经验模型也随之不同, 使用的卫星遥感数据源主要包括 NOAA/AVHRR、SeaWiFS、Landsat MSS/TM、SPOT、IRS-1C、ERS-1 SAR、ERS-2 SAR 以及 CASI 等. 诸多研究把水体水质参数的光谱特征与

* 中国科学院领域前沿项目 (CXNIGLAS-A02-014)、江苏省自然科学基金青年科技创新人才学术带头人项目 (BK2004422)、中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金 (S220445) 共同资助. 2004-05-25 收稿; 2004-09-16 收修改稿. 马荣华, 男, 1972 年生, 博士, E-mail: rhma@niglas.ac.cn.

遥感图像割裂开来,在水质参数含量的估测过程中,或者单独利用实测光谱进行含量估算,或者仅仅利用遥感图像的各种可能的波段组合通过一定的数学运算进行逐一挑选.为了提高遥感信息的实用性,必须把遥感信息理论和实际图幅影像有效结合在一起进行不同类型地物的信息分析^[5],包括光谱分析;在充分考虑水体水质参数光谱特征的基础上选择适合的波段或者波段组合建立相应的数学模型进行水质参数估测,可以推动遥感水质监测的深入应用,并可促进水质定量遥感的理论研究.

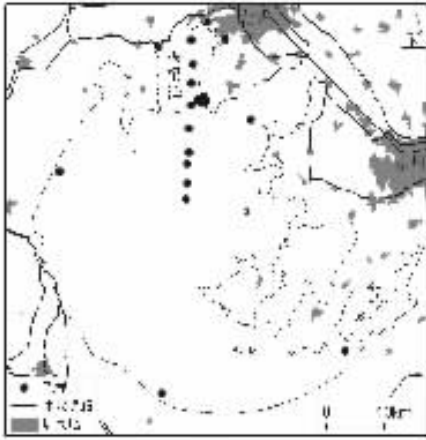


图1 样点位置分布图(不同日期内有重叠)
Fig.1 Spatial distribution of supervision point locations (Some superposition exits)

1 实验量测

实验借助中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖站的部分常规站点,并针对观测日期内的不同情况进行补充,用GPS精确定位(图1).光谱测量采用美国ASD公司生产的Field-Spec Pro FR便携式分光辐射光谱仪,测量时间内天空基本无云,风力1-2级,水面平静,无大面积蓝藻爆发.测量在船上进行,标准光纤探头距离水面1.2m左右,测量时垂直水面(图2).叶绿素a(CHL)的测定采用分光光度法,用0.45 μm的Whatman GF/C滤纸过滤,90%热乙醇提取,然后用7230分光光度计检测;悬浮物(TSM)用GF/C滤纸过滤,采用电子天平称重法测定.为了利用Landsat ETM卫星影像进行遥感估测,除2003年3月27日以及6月15日的测量结果外,还使用了太湖站2002年7月14日的11个样点的水质分析结果.

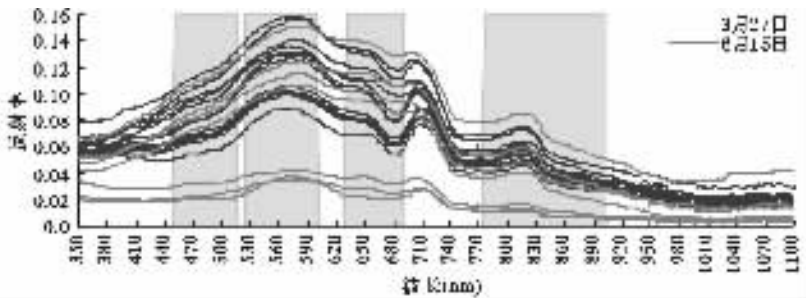


图2 2003年3月27日和6月15日的部分样点的光谱曲线以及它们与Landsat ETM的波段对比
Fig.2 Spectral reflectance curves of all the sample points and their corresponding with the bands of Landsat ETM. The red spectra were measured on 27 March 2003 and the blue on 15 June 2003

2 处理与分析

2.1 光谱分析

地物的光谱特征是现代遥感技术的重要组成部分^[5].为了对比分析不同采样时间、不同采样地点的反射波谱,找出指示CHL以及TSM含量的重要敏感性波段,优化波段组合,对每条实测光谱按照标准差进行标准化处理,然后与CHL以及TSM含量进行相关性分析(图3).

2.1.1 CHL的特征光谱波段以及与Landsat ETM的对应关系 540-557 nm(550 nm附近,对应Landsat ETM2波段)、711-721 nm(706 nm附近,无Landsat波段与之对应)以及666-693 nm(682 nm附近,对应Landsat ETM3波段)处的光谱反射率的大小受叶绿素a含量变化的影响最大,对探测叶绿素a具有重要作用,490-550 nm、605-620 nm、690-710 nm以及826-846 nm(836 nm附近,对应Landsat ETM4波段)对叶绿素含量的变化最敏感(即与叶绿素浓度的相关系数变化最迅速);682 nm附近的吸收谷和706 nm附近的反射峰是判断太湖水体是否含有叶绿素的重要标志.

2.1.2 TSM 的特征光谱波段以及与 Landsat ETM 的对应关系 350 - 415 nm、772 - 889 nm (对应 Landsat ETM4 波段)以及 893 - 909 nm (对应 Landsat ETM4 波段)处的光谱反射率与悬浮物含量的相关系数最大 (绝对值在 0.6 - 0.8 之间),说明光谱反射率受悬浮物含量的变化的影响很大,是预测悬浮物含量的重要波段. 悬浮物的光谱反射率受到其含量、类型、悬浮颗粒的大小以及遥感器的观测角等因素的影响,其中悬浮物浓度、颗粒大小和矿质组成是主要的影响因素^[6,7].

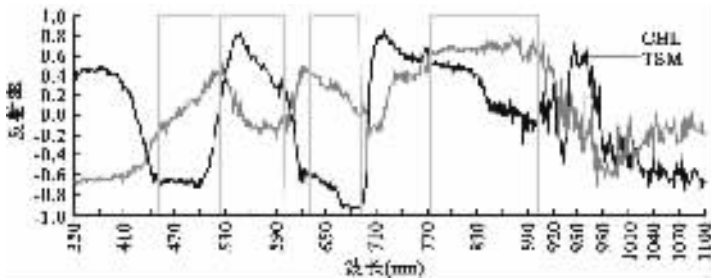


图3 叶绿素悬浮物含量与实测光谱反射率的相关关系以及
Landsat ETM 的波段对比

Fig.3 Correlations between CHL, TSM and field spectral reflectivity,
and their corresponding with bands of Landsat ETM

2.2 影像选择与处理

2003年3月26日的有效水质样点较少,不足以与卫星影像进行关联分析;客观原因不能获取2003年6月15日的Landsat ETM卫星影像;因此选取了与水质采样准实时的2002年7月13日的Landsat ETM卫星影像,影像获取当天天空非常晴朗,风力小于2级.然后通过1:50000地形图进行几何精校正,误差在0.5个像元之内,使用非监督分类法提取水体,利用最深像元技术进行大气校正.

3 含量估测

3.1 基于实测光谱的浓度估测

706 nm处的反射峰位置(λ_{max706} , nm)以及706 nm附近处的反射峰与682 nm附近处的吸收谷的反射率之比(R_{706}/R_{682})与叶绿素浓度(C_{CHL} , $\mu\text{g/L}$)具有极强的相关性,是基于实测光谱估测叶绿素浓度的最好方法^[8],分别如式(1)和(2).

$$\ln(C_{CHL}) = -109.20 + 0.16 \times \lambda_{max706}, R^2 = 0.920 \quad (1)$$

$$C_{CHL} = -121.86 + 130.84 \times \frac{R_{706}}{R_{682}}, R^2 = 0.920 \quad (2)$$

悬浮物的光谱特征不像叶绿素那样明显,但其散射作用使水体的反射率在全谱可见光和近红外波段都有所增大^[9],根据这一特性,分别对可见光范围350 - 760 nm、近红外范围760 - 1100 nm、可见光近红外范围350 - 1100 nm以及可见光近红外范围350 - 1100 nm和1420 - 1770 nm的平均反射率与悬浮物、叶绿素含量进行相关分析,结果表明:(1)悬浮物含量(C_{TSM} , mg/L)与反射光谱的反射率高度相关,而叶绿素的含量与反射光谱的反射率的关系甚微;(2)与其它范围的光谱波段相比较,350 - 1100 nm范围内光谱的平均反射率($R_{350-1100}$)与悬浮物含量的相关程度最高,相关系数为0.800,其中760 - 1100 nm范围的光谱波段(与悬浮物含量的相关系数达到0.791)对悬浮物含量估测起着重要作用.对 $R_{350-1100}$ 以及 C_{TSM} 进行回归分析,结果如(3)式.

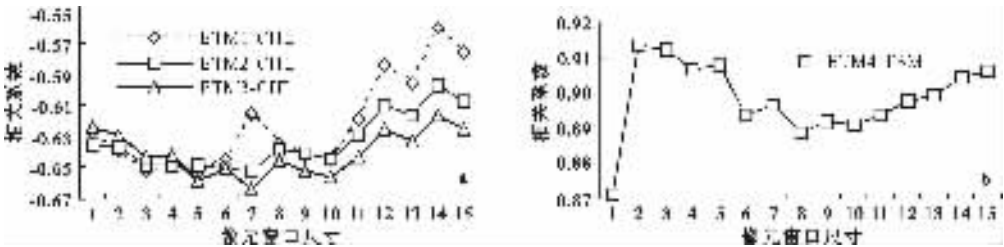
$$C_{TSM} = 10.56 + 707.07 \times R_{350-1100}, R^2 = 0.639 \quad (3)$$

3.2 基于 Landsat ETM 的浓度估测

3.2.1 分析窗口的像元尺寸 单波段或波段组合分析中,分别使用 1×1 、 2×2 、 3×3 、 \dots 、 15×15 窗口中的像元平均值与所需的实测水质参数建立相关关系,比较后确定用来估测水质参数含量的最佳窗口,这样一方面可以消除噪声影响,另一方面可以降低影像配准引起的误差,另外还可以降低或消除实地采样与卫星过

境不实时而引起的数值匹配与关联误差. 与光谱分析相对应, 不论是单波段还是波段组合, 仅使用 Landsat ETM 1-4 波段. 不同尺寸窗口像元的定义类似商业软件如 ERDAS 或 ENVI 中的 Focal 或 Kernel 窗口的定义.

3.2.2 单波段分析 首先对 Landsat ETM 1-4 波段的图像进行上述 15 种不同尺寸窗口像元值变换, 然后分别与 TSM、CHL 进行相关分析(图 4). 在所有的 4 个波段中, 与 CHL 相关系数最好的是 ETM3, 其次是 ETM2, 然后是 ETM1, 最后是 ETM4, 上述 4 个波段的 15 个窗口的平均相关系数分别是 -0.640 、 -0.633 、 -0.622 以及 -0.009 . 图 4(a) 表示平均相关系数的绝对值大于 0.6 的 3 个波段的 15 个窗口的像元值与 CHL 的关系. 结果表明, 除 ETM1 的 7×7 窗口外, 3 个波段不同窗口的变化趋势是一致的; 总体而言, 5×5 、 6×6 、 \dots 、 10×10 窗口都与 CHL 具有很好的相关关系, 其中 ETM3 波段的 7×7 窗口为最好, 相关系数为 -0.664 ; 从 10×10 窗口开始, 与 CHL 的相关度随着像元窗口尺寸的增大而减小. 与 TSM 相关程度最好的是 ETM4, 相关系数为 0.898 , 其余的 3 个波段的相关系数都小于 0.600 , 因此只关心 ETM4 波段. 图 4(b) 表明, 从 2×2 窗口到 8×8 窗口, 相关系数逐渐减小, 然后开始逐渐增大, 但没有超过与 5×5 窗口的相关系数值, 因此对单波段的 TSM 估测来讲, 从 2×2 到 5×5 是比较适合的像元窗口, 其中 2×2 为最佳, 相关系数达到 0.914 .



图中 1 表示 1×1 , 2 表示 2×2 , \dots , 15 表示 15×15

图 4 ETM1-4 中 15 种不同尺寸窗口像元与 CHL 以及 TSM 含量的关系

Fig. 4 Correlations between CHL and TSM concentrations and different pixel window sizes from 1 by 1 to 15 by 15 of the strong correlative single bands. 1 denotes 1 by 1, and 2 denotes 2 by 2 \dots 15 denotes 15 by 15

3.2.3 组合波段分析 适当的波段选择与组合有利于提高对表面水质参数的反演能力. 根据叶绿素悬浮物实测波谱曲线特征与 Landsat ETM 波段的对应关系, 选择 [ETM2/ETM1] (B1), [ETM2/ETM3] (B2), [ETM3/ETM1] (B3), [ETM4/ETM1] (B4), [ETM4/ETM2] (B5), [ETM4/ETM3] (B6), $[(ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4)/4]$ (B7), $[(ETM1 + ETM2 + ETM3)/3]$ (B8), $[(ETM1 + ETM3)/2]$ (B9), $[(ETM2 + ETM3)/2]$ (B10), $[(ETM1 \times ETM3)^{1/2}]$ (B11), $[(ETM3 \times ETM4)^{1/2}]$ (B12) 等 12 种组合, 分别分析 15 种不同尺寸窗口像元值与叶绿素悬浮物的相关关系. 结果表明, 与 CHL 相关关系最好的是 B10, 其次是 B8, 然后是 B3, 上述 3 个波段的 15 个窗口的平均相关系数分别为 -0.745 、 -0.743 以及 -0.740 , 然后依次是 B11、B9、B7、B1、B5、B12、B6 以及 B2, 最差的是 B4, 15 个窗口的平均相关系数仅为 -0.105 . 12 个组合波段中, 仅前 5 个波段即 B10、B8、B3、B11 和 B9 的 15 个窗口的平均相关系数的绝对值大于 0.6. 图 5(a) 列出了上述 5 个波段的 15 个窗口的像元值与 CHL 的关系, 除 B3 的 5×5 窗口外(与 CHL 的相关系数为 -0.889), 5 个波段不同窗口的变化趋势是一致的; 其中与 CHL 相关关系最好的是 5×5 或 7×7 窗口; 从 10×10 窗口开始, 随着窗口尺寸的增加, 相关度却越来越小; 另外, 奇数像元尺寸的窗口与 CHL 的相关关系好于后面面临的偶数像元尺寸的窗口的相关关系. 与 TSM 具有最好相关关系的是 B4, 其次是 B5, 然后是 B6 和 B12, 上述 4 个波段的 15 个窗口的平均相关系数分别是 0.906 、 0.893 、 0.888 以及 0.814 , 另外, B2 和 B1 的平均相关系数也都大于 0.6, 其余的 6 个组合波段即 B7、B10、B8、B3、B11 和 B9 的平均相关系数都远小于 0.6. 图 5(b) 表明了相关系数大于 0.8 的 4 个波段的 15 个窗口像元与 TSM 的相关关系的变化, 其中 3×3 窗口与 TSM 的相关关系最好, 尤其是 B4 波段的 3×3 窗口; 8×8 窗口最差. 总体而言, 从 1×1 窗口到 8×8 窗口, 与 TSM 的相关度随着窗口尺寸的增加而减小, 然后逐渐增加.

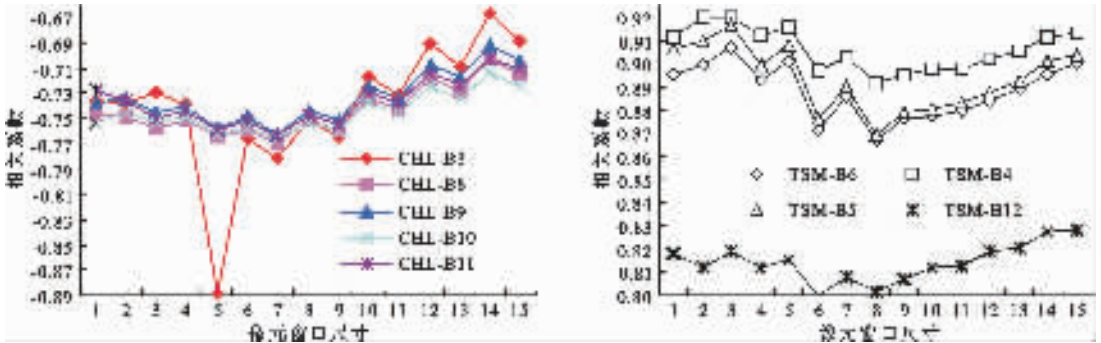


图5 组合波段中15个不同尺寸窗口像元与CHL以及TSM含量的关系

图中1表示1×1,2表示2×2,⋯,15表示15×15

Fig.5 Correlations between CHL and TSM concentrations and different pixel window sizes from 1 by 1 to 15 by 15 of the strong correlative combined bands. 1 denotes 1 by 1, and 2 denotes 2 by 2 ⋯ 15 denotes 15 by 15

3.2.4 浓度估测 分别选取相关程度最好的各尺寸窗口像元的单波段、组合波段与叶绿素、悬浮物(剔除粗差)进行回归分析,建立最佳的叶绿素、悬浮物含量估测模型,结果表明(表1):(1)对数或抛物线拟合可以提高叶绿素、悬浮物含量的估测精度;(2)ETM3和ETM4分别对CHL和TSM估测具有至关重要的作用,作适当函数变换后可以提高它们的估测精度,分别是估测CHL和TSM的最佳波段;另外,分别与ETM1波段的适当组合也是估测CHL和TSM的重要手段,其估测精度均高于单波段的估测精度;(3)估测CHL的最佳窗口像元尺寸是5×5或者7×7窗口,但估测TSM的最佳窗口较小,最大不超过3×3;(4)与本文3.1中的基于光谱特征的估测方法相比(公式(1),(2)),基于Landsat ETM的CHL估测精度差一些,但TSM的估测精度却高的多。

表1 基于Landsat ETM的叶绿素、悬浮物遥感估测模型与误差描述(叶绿素:μg/L,悬浮物:mg/L)¹⁾

Tab.1 Models and errors of estimating CHL and TSM concentrations (CHL: μg/L, TSM: mg/L) based on Landsat ETM images. 11 samples mentioned in section 2.3 are used.

序号	因变量 (y)	自变量 (x)	最佳窗口 尺寸	系数 (a)	截距 (b)	R ²	最大绝对 误差	最小绝对 误差	最大相对 误差(%)	最小相对 误差(%)	平均 误差	RMS 误差
1	ln(C _{chl a})	ETM3	7×7	-0.054	6.676	0.551	30.82	1.30	129.62	12.98	8.41	12.23
2	C _{chl a}	ln(B3)	5×5	-167.550	-48.137	0.651	19.45	0.64	174.3	6.96	7.97	10.03
3	C _{TSM2}	(ETM4) ²	2×2	0.221	60.293	0.911	3.06	0.02	29.31	0.18	1.46	1.86
4	C _{TSM2}	B4	3×3	1799.554	-209.074	0.920	2.97	0.08	35.88	0.30	1.30	1.78

1) 每种模型均为 $y = ax + b$ 的形式

对2002年7月13日的Landsat ETM卫星影像(119/38景)分别应用估测精度最高的回归模型(表1中第2个和第4个)逐像元估测太湖CHL和TSM含量,结果如图6.同样按照文中的方法对2003年3月26日的卫星影像进行处理,然后应用上述模型分别估测CHL和TSM含量,结果表明,CHL和TSM估测的RMS误差分别为12.34μg/L和3.42mg/L,与2002年7月13日的(表1)相比,误差大了些,考虑到其它影响因素,是可以接受的。

4 讨论

叶绿素a在红波段的最大吸收^[9-12]使得实测光谱在682nm附近形成吸收谷^[8],这一位置恰好位于Landsat ETM的第3波段,与叶绿素形成很强的负相关关系,因此通过ETM3估测叶绿素含量会收到很好的效果.另外,叶绿素以及类胡萝卜素的吸收造成了实测光谱在490nm和440nm附近的两个次吸收谷^[13,14],位于Landsat ETM的第1波段,与叶绿素具有较强的负相关关系.因此,利用ETM3与ETM1的算术组合运算,尤其是利用具有适合窗口像元尺寸的ETM3/ETM1来估测叶绿素含量具有较高的精度.值得注意的是,

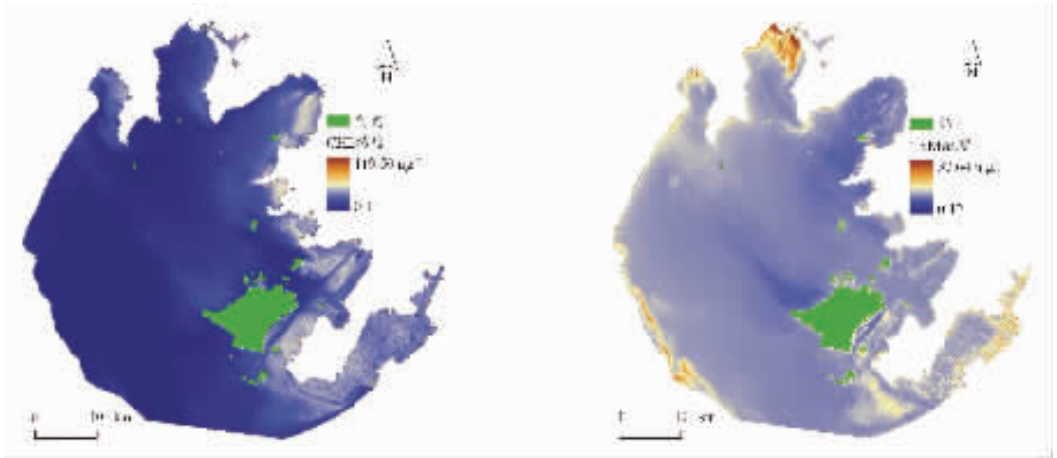


图 6 2002 年 7 月 13 日 119/38 景的太湖水体的叶绿素悬浮物含量估测空间分布

Fig. 6 CHL and TSM concentration estimated respectively by model No. 2 and 4 in Table 1 using Landsat ETM image with path 119 and row 38 on 13 July 2002

作为判断叶绿素存在与否的 706nm 附近的反射峰^[8,10,15], Landsat ETM 没有波段与之对应, 然而它对提高叶绿素的遥感估测能力十分重要, 应该在有关传感器波段的设置上得到重视。

在实测光谱曲线上, 没有十分明显的光谱特征与悬浮物含量的高低相对应; 但由于其在近红外波段的反射作用增强, 使得在 772 - 889 nm 以及 893 - 909 nm 的波段上形成较强的正相关关系, 这一位置恰好位于 Landsat ETM 的第 4 波段, 因此可以使用 ETM4 来估测悬浮物的含量。在可见光和近红外波段, 随着悬浮物含量的增加, 水体的反射率也随之增加, 这一结论通过它们之间的相关关系得到了验证, 因此利用实测光谱在可见光或/和近红外波段的平均反射率也可以估测悬浮物的含量。

遥感影像上显示梅梁湾内部蓝藻较多, 但估测结果 (图 6) 表明此处的叶绿素含量 (最低 $0.16\mu\text{g/L}$, 最高 $64.67\mu\text{g/L}$, 平均 $10.54\mu\text{g/L}$) 不是很高, 最高处位于湖的边缘区即与陆地交接处 (最高处的像元数较少, 图 6 的尺寸也较小, 因此图 6 没有显示出来), 空间分布上好象不一致; 但悬浮物含量估测的空间分布与实际十分吻合, 特别是蓝藻漂浮区, 图 6 清楚的表明了这一点, 也说明遥感图像获取时期内的悬浮物主要为有机悬浮颗粒, 但总存在一定的误差。造成叶绿素和悬浮物估测误差的主要原因有: (1) 2002 年 7 月份梅梁湾水域蓝藻爆发且正处于生长期, 而遥感影像的获取时间与水样采集时间不一致, 相隔 1 天多, 客观上二者的叶绿素浓度存在差距; (2) 遥感影像直观反映漂浮的蓝藻分布, 实验室分析结果反映的是水体中的叶绿素及悬浮物含量, 水样提取时那些漂浮的蓝藻并没有完全进入取水器; (3) 实测是点式采样, 遥感估算的是某一距离范围内的平均值; (4) 大气校正引起一定的误差。另外, 蓝藻爆发区水体叶绿素含量与蓝藻数量的关系需作进一步研究。东太湖大部分水体较为清澈, 水生植被较多, 处于中营养水平, 而图 6 表明此处叶绿素含量以及悬浮物含量稍高, 造成这一现象的主要原因除上述的 (3) 和 (4) 以外, 还包括: (1) 湖中过多过密的网围养殖等人工设施影响了影像的辐亮度, 从而造成了估测值误差; (2) 较为清澈的水体使得 ETM 波段的穿透力增强, 湖底反射增加, 特别是水生植被对影像辐亮度的贡献增加, 引起了估测值和实测值之间的误差。一般来说, 风浪等引起太湖底泥的扰动使得湖心区悬浮物含量较高, 但采样的前后几天, 风速很小, 不足以或较少引起湖底泥沙等物质的悬浮, 故湖心区悬浮物估测值较低。太湖不同湖区水质差别较大, 卫星遥感影像辐亮度的影响因素也不尽相同, 考虑分区的估测模型可能有利于提高水质参数的估测精度, 但样点的不足使我们放弃了分区估测。另外, 在水质监测中, 获取符合要求的实时的实测数据非常困难, 发展对实测数据依赖性较低的模型算法有利于提高水质遥感监测的实用能力。

5 结论

(1)水质遥感监测有两种途径,一是通过实测光谱,二是通过卫星影像,二者可以相互补充;水质参数的光谱特征是水质遥感监测的基础和依据,凡是具有明显光谱特征的水质参数都可以通过遥感的手段进行定量测量。特征波段的适当组合运算可以提高叶绿素和悬浮物的估测精度。

(2)对多光谱遥感而言,Landsat TM/ETM 是定量获取叶绿素和悬浮物的较好的数据源(较便宜、较易获取、较高的估测精度),但不是最适合的数据源,两个原因:一是其波段宽度大大宽于相应的波谱特征宽度,许多波谱特征信息丢失,波谱的吸收和反射信息相互影响,另一个是在判断叶绿素是否存在的光谱特征处(706nm 附近)没有相对应的波段。

(3)Landsat ETM 波段中,ETM1-3 与叶绿素关系密切,尤以 ETM3 最为重要,通过 ETM3 与叶绿素建立一定的函数关系来估测叶绿素含量具有较高的精度,另外,它们之间的算术组合运算具有更高的估测精度,其中最好的是 ETM3/ETM1;ETM4 与悬浮物具有较高的相关度,其中利用 ETM4/ETM1 估测悬浮物含量的精度最高。基于遥感图像的估测中,悬浮物的估测精度高于叶绿素的估测精度。

(4)Landsat ETM 卫星影像中,不同尺寸的像元窗口影响水质参数的估测精度;对叶绿素估测而言,5×5 或 7×7 窗口为最佳,依具体波段而定;对悬浮物估测而言,最佳的像元窗口小一些,一般不超过 3×3。

致谢:南京大学城市与资源学系冯学智教授、国际地球系统科学研究所田庆久教授给予了大力支持和帮助,研究生金震宇和夏学齐帮助光谱测试,季江高级工程师、张运林博士帮助水样采集与分析,谨此致谢。

6 参考文献

- [1] Ritchie J C, Cooper C M. An algorithm for estimation surface suspended sediment concentration with Landsat MSS digital data. *Wat Res Bull*, 1991, **27**: 373-379.
- [2] Lathrop R G, Lillesand T M, et al. Testing the utility of simple multi-date thematic mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters. *Int J Remote Sens*, 1991, **10**: 2045-2063.
- [3] 齐 锋,王学军. 内陆水体水质监测与评价中的遥感应用. *环境科学进展*, 1999, **7**(3): 90-99.
- [4] 李素菊,王学军. 内陆水体水质参数光谱特征与定量遥感. *地理学与国土研究*, 2002, **18**(2): 26-30.
- [5] 周成虎,骆剑承,刘庆生等. 遥感影像地理解与分析. 北京:科学出版社, 2001: 41-42.
- [6] Han L H, Rundquist D C. The response of both surface reflectance and the underwater light field to various levels of suspended sediments: preliminary results. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1994, **60**(12): 1463-1471.
- [7] Peter F, Tommy L, Catherine O. Statistical analysis of hyper-spectral data from two Swedish lakes. *The Science of the Total Environment*. ,2001, **268**: 155-169.
- [8] 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. *遥感学报*, 2005, **9**(1): 78-86.
- [9] 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. *遥感学报*, 2000, **4**(1): 41-45.
- [10] 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 Sens*, 1992, **13**: 3367-3373.
- [11] Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyi F, et al. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *Int J Remote Sens*, 1993, **7**: 1269-1295.
- [12] Yacobi Y Z, Gitelson A, Mayo M. Remote sensing of chlorophyll in Lake Kinneret using high spectral resolution radiometer and Landsat TM: Spectral characteristics of reflectance and algorithm development. *J Plankton Res*, 1995, **17**: 2155-2173.
- [13] Gitelson A, Laorawat S, Keydan G P, et al. Optical properties of dense algal cultures outdoors and its application to remote estimation of biomass and pigment concentration in *Spirulina platensis*. *J Phycology*, 1995, **13**(5): 828-834.
- [14] Iluz D, Yacobi Y Z, Gitelson A. Adaptation of an algorithm for chlorophyll-a estimation by optical data in the oligotrophic Gulf of Eilat. *Int J Remote Sens*, 2003, **5**: 1157-1163.
- [15] Fischer J, Kronfeld V. Sun-stimulated chlorophyll fluorescence. 1: Influence of oceanic properties. *Int J Remote Sens*, 1990, **11**: 2125-2147.