

# 水体叶绿素含量的遥感定量模型

余丰宁<sup>1</sup> 李旭文<sup>2</sup> 蔡启铭<sup>1</sup> 陈宇炜<sup>1</sup>

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008;

2:江苏省环境信息中心,南京 210013)

**提要** 利用 1992 年 7 月 25 日陆地卫星 TM 数据与该日(淮)同步湖面多点观测资料,对太湖北部水体叶绿素含量与不同波段遥感值的关系进行了定量分析,发现 TM3 与 Chl-a 含量有负幂次关系, TM4、TM7 则分别与 Chl-a 含量有较好的正、负线性相关性;据此选择 TM3、TM4 和 TM7 等多个敏感波段值作为自变量,通过对它们的线性和非线性变换,进行叶绿素定量指标的组和筛选试验;并依据太阳入射辐射的变化提出对遥感定量指标进行时相和纬度订正的通用方法;在此基础上,建立了叶绿素含量的遥感定量模型。利用这一模型计算得到的 1992 年 10 月 29 日太湖梅梁湾水域多点叶绿素含量很好地拟合了实测结果。统计分析和验证结果表明,本文选定的水体叶绿素含量遥感定量指标的相关性好、显著水平高,而且进行了时相和纬度订正,当天气条件相似时,该模型可应用于其它湖区和其他时相的遥感定量分析。

**关键词** 叶绿素含量 遥感 定量模型 太湖

## 1 引言

进入 80 年代以来,由于湖泊所承受的人口压力和开发强度迅速增加,我国许多大型湖泊都面临着富营养化日趋加剧的危机,藻类大量繁殖甚至形成水华灾害。利用卫星遥感信息进行大面积范围内藻类空间分布及动态的定量分析,无疑是非常必要和重要的手段。

遥感定量分析和模型通过在典型地区建立遥感信息与地面要素场之间的联系,可迅速高效地提供大面积范围内生态环境要素的数据<sup>[1~4]</sup>。叶绿素光谱较复杂,对应其不同的吸收峰和反射峰,可以有多元的定量指标。目前已有的藻类遥感定量模型,一般都借鉴陆地绿色植物的遥感定量方法,以 TM4(对应叶绿素的近红外反射峰)和 TM3(对应叶绿素吸收峰)两个波段的差值(TM4-TM3)或比值(TM4/TM3)作为定量指标,没有充分提取 TM 数据中包含的水体叶绿素的有效信息。本文利用 1992 年 7 月 25 日陆地卫星 TM 数据和该日(淮)同步湖泊多点观测资料,对太湖北部水体叶绿素 a 含量与不同波段遥感值的关系进行了定量分析,在此基础上,选择多个敏感波段,进行叶绿素 a 含量遥感定量指标的组筛,并提出对遥感定量指标进行时相和纬度订正的通用方法,由此建立了水体叶绿素 a 含量的统计定量模型并得到了很好的验证结果。

\* 国家自然科学基金(39500027)和江苏省社会发展研究基金(BS95035)资助项目。

收稿日期:1995-12-14;接收日期:1996-03-20。

作者简介:余丰宁,女,1961 年 11 月生,硕士,副研究员。现主要从事物理湖泊学和数值模型研究。

## 2 藻类叶绿素与 TM 数据的关系

### 2.1 藻类(水华)及其光谱特征

藻类属低等浮游植物,靠细胞中的叶绿素进行光合作用,其光谱特征类似于陆地植物<sup>[5]</sup>,除在可见光区(0.55 $\mu\text{m}$ 处)有绿色反射峰外,最突出的特征是在0.7~1.1 $\mu\text{m}$ 的近红外区具有强烈反射,随着叶绿素含量和组成不同,反射峰值和位相有所变化,另外,在2.0 $\mu\text{m}$ 左右的中红外区还有一定的吸收作用。而藻类所处的环境水体则对入射辐射有很好的吸收性,尤其强烈吸收红外辐射。故藻类和水体之间的光谱差异很大,在红外辐射区对比尤为突出。通常情况下,只有当藻类飘浮接近于水面时,这种对比才能清楚地显示出来。而在太湖以及我国南部的绝大多数湖泊中均以蓝藻为绝对优势藻种,这种藻有一微气囊,在趋光性的驱使下漂浮于水面,因此,从水面光谱观测和遥感信息中都能反映出湖泊水体藻类生物量或叶绿素含量的情况。

对比太湖水体藻类密度不同的三种情况<sup>[6]</sup>,用SE590光谱仪测得的水面反射光谱曲线(图1)可见:

(1) 水体藻类的密度与近红外(约0.7~0.9 $\mu\text{m}$ 处)反射峰值有明显关系,在该波段,水体吸收辐射,而藻类强烈反射。因此,水面反射率随着藻类密度的增加而增大。

(2) 水体藻类的密度与可见光区的绿色(0.55 $\mu\text{m}$ )反射峰值之间也有相关关系,但由于太湖是中—富营养型浅水湖泊,除藻类叶绿素以外,多种可溶性有机物、黄质、悬浮质等都对水色有影响,因此基本不含藻的水体,也有绿色反射峰。故这一波段的反射率不能灵敏反映水体叶绿素情况。

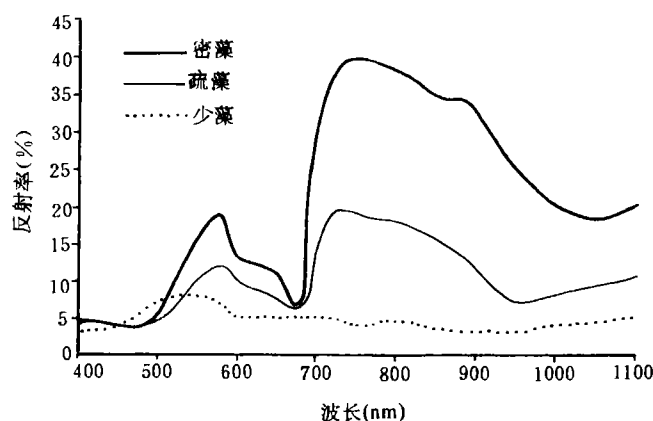


图1 藻类密度不同的水体反射光谱对比

Fig. 1 Reflectance spectra of water surfaces with different concentration of algae

(3) 在可见光0.68 $\mu\text{m}$ 附近,藻类对入射光有明显的吸收。由于清洁水体本身也有强烈吸收,浮游藻类的吸收作用有时不能显著地从水面反射率上反映出来。但是当水体含有一定量的泥沙等固体颗粒悬浮质时,在0.6~0.7 $\mu\text{m}$ 的波段内,泥沙等悬浮质对入射光的强烈散射作用,将显著增加这一波段的水面反射率。图2显示了冬季无藻类时含泥沙不同的南漪湖水面反射光谱<sup>[5]</sup>,可见在0.6~0.7 $\mu\text{m}$ 处有一反射峰且峰值随着泥沙含量增加而增大。因

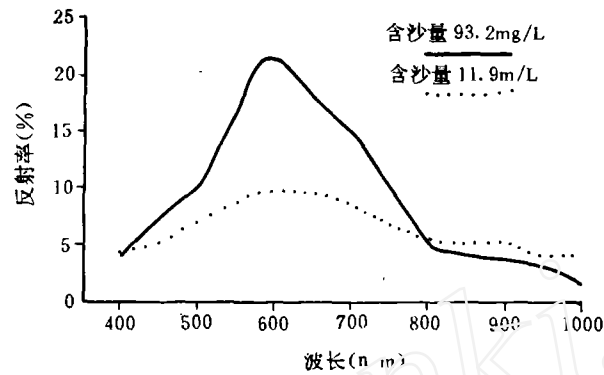


图2 含泥沙不同的水体反射光谱对比

Fig. 2 Reflectance spectra of water bodies with different concentration of suspended solids

此,当水体本身含有一定泥沙时,有漂浮藻类的水面,由于藻类的吸收作用,其反射率在 $0.68\mu\text{m}$ 附近将明显低于周围水面。

由此可知, $0.7\sim 0.9\mu\text{m}$ 和 $0.65\sim 0.7\mu\text{m}$ 两个波段的反射率对藻类叶绿素的含量将有一定的指示意义。

## 2.2 水体叶绿素含量与 TM 数据的关系

太湖水体明显含藻的时期在5~10月,利用1992年7月25日在太湖北部梅梁湾(南北长约15km,东西宽约7km)湖区16个点实测的叶绿素含量(Chl-a)资料,配合该日各观测点的TM数据,分析了Chl-a与各波段遥感值的相互关系及回归曲线(图3),表1给出了各回归拟合曲线方程以及各波段TM值与Chl-a的相关指数(其中TM1、TM2和TM3与Chl-a有负幂次关系,故先将各点的Chl-a作一定的负幂次变换,然后再与TM序列对应,所求得的线性相关系数作为Chl-a与该波段TM的相关指数,即表中带\*的各数值)。由此发现除TM5外,其它各波段的遥感值均与Chl-a含量有一定的关系。对照藻类及绿色植物反射光谱和TM遥感波段设置分析得到:

表1 各波段TM值与Chl-a关系的回归拟合方程及相关指数

Tab.1 Regressive equations and relation coefficients indicating the relationship between Chl-a and TM data of each band

波段	拟合方程	相关指数
1	$\text{TM1} = 96.3295(\text{Chl-a})^{-0.05444}$	0.7680*
2	$\text{TM2} = 40.8294(\text{Chl-a})^{-0.0686}$	0.7183*
3	$\text{TM3} = 35.1944(\text{Chl-a})^{-0.0962}$	0.7685*
4	$\text{TM4} = 29.4319 + 26.8552(\text{Chl-a})$	0.6456
5	$\text{TM5} = 15.2934 - 4.5826(\text{Chl-a})$	-0.2626
7	$\text{TM7} = 8.0334 - 8.6622(\text{Chl-a})$	-0.7477

(1) 第2波段TM2( $0.52\sim 0.60\mu\text{m}$ )对应着藻类的绿色反射峰,Chl-a叶绿素含量高时,反射应增加,但由于水体自身水色的影响以及大气的干扰,这一波段的数据不能有效反映水体的叶绿素含量;

(2) TM3( $0.63\sim 0.69\mu\text{m}$ )在一定程度上能反映叶绿素a在可见光区 $0.68\mu\text{m}$ 附近的吸

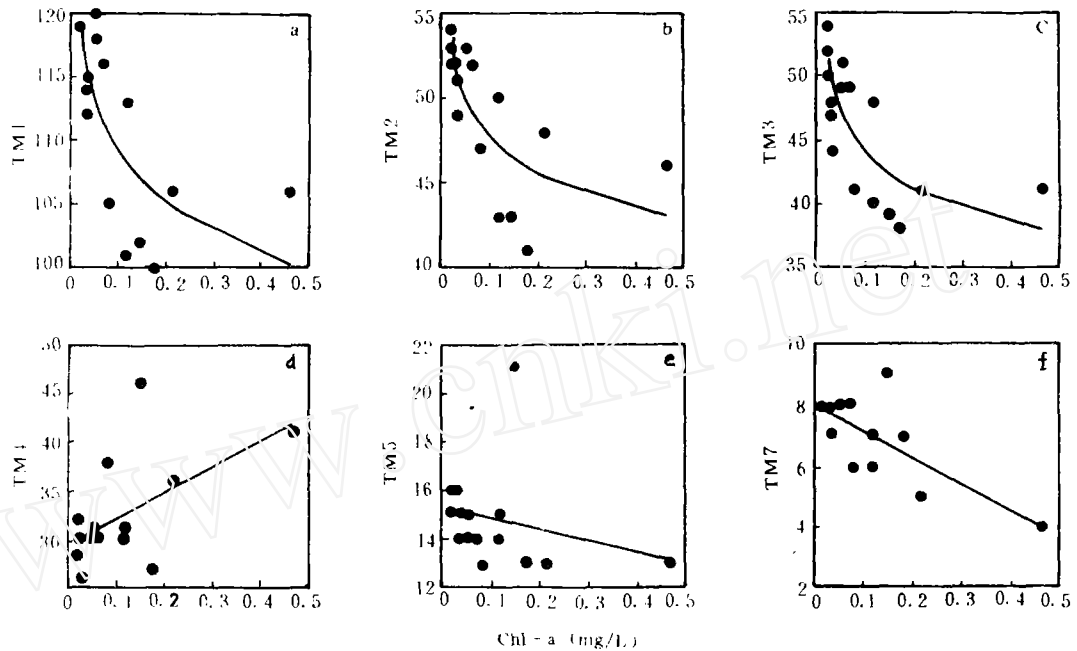


图3 Chl-a含量与TM各波段遥感值的关系拟合曲线

Fig.3 Imitative diagrams indicating the relationship between Chl-a concentration and remote sensing data of each TM band

收情况,叶绿素 a 含量越高,对入射光吸收越显著,TM3 值则较低,分析发现 TM3 与叶绿素含量呈负幂次关系,TM3 与 Chl-a 的相关系数达 0.7685(图 3c);

(3) TM4(0.76~0.90 $\mu\text{m}$ )对应了藻类叶绿素 a 的近红外反射峰,叶绿素 a 含量越高,对入射光反射越显著,TM4 值增高。因而,TM4 与叶绿素 a 含量呈较好的线性正相关,相关系数为 0.6466(图 3d);

(4) 绿色植物强烈反射红外辐射,但在 2.0 $\mu\text{m}$  附近的中红外区是一相对的吸收带,反映在遥感信息上,像元的 TM7 较低,可认为除了水体对入射光的吸收外,还有明显的藻类吸收,故 TM7 与叶绿素含量有较好的线性负相关,相关系数为-0.7477(图 3f);

(5) TM1、TM2 和 TM3 均与 Chl-a 呈负幂次关系(图 3a、b、c),且它们之间有很好的相关性,其两两相关系数达 0.96 以上,另外 TM1 和 TM2 易受大气的干扰。因此,宜选择以 TM3 表达 Chl-a 与可见光区遥感信息之间的关系。

由此选定 TM3、TM4、TM7 为水体叶绿素 a 含量定量分析的主要变量。

### 3 叶绿素含量的遥感定量模型

#### 3.1 定量指标

以 1992 年 7 月 25 日在太湖北部梅梁湾湖区(31°24'~31°32'E,120°8'~120°14'N)实测的 16 个点 Chl-a(mg/L)数据为因变量,首先以该日各测点的 TM3、TM4 和 TM7 三个波段的图像数据为自变量,进行了多种线性组合和多元回归分析,发现由于遥感自变量因子之间的自相关性很高,线性多元回归效果不好,又以 TM3、TM4、TM7 变量的比值变换、指数变

换、对数变换等多种非线性组合进行相关分析并筛选定量指标。最后选定叶绿素遥感定量指标为:

$$Z_0 = \left( \frac{TM_4}{TM_3 \times TM_7} \right)^2 \quad (1)$$

$Z_0$  与 Chl-a 的线性相关系数达 0.9576, 统计检验值  $F$  为 143.92, 具有很好的显著性。

### 3.2 定量指标的时相和纬度订正

CCT 记录的像元遥感数据  $DN_{ij}$  可表示为:

$$DN_{ij} = K \cdot R_{ij} \cdot \tau_{ij} \cdot \frac{H_{ij}}{\pi} \cdot DA_{ij}$$

式中  $R_{ij}$  为像元反射率, 对于浅水水体而言, 主要反映水及水中悬浮物的光学特性;  $H_{ij}$  为像元入射辐照度;  $\tau_{ij}$  为像元大气光谱透过率, 表示地物反射穿过大气层时的衰减;  $DA_{ij}$  为大气层辐射的遥感值, 决定于天空大气分子及气溶胶的散射;  $K$  为 TM 系统的比例系数, 对应于不同的波段有不同的  $K$  值。

由此可见, TM 数据所反映的是卫星下方地物的反射光强度, 而非反射率, 除综合反映水体及水中悬浮质的情况外,  $DN$  还将受到地面入射辐照度  $H$  的影响, 而入射光强度随时间、纬度而变化, 某一时刻到达大气上界的某一波段  $\Delta\lambda$  的太阳辐射强度为<sup>[7]</sup>:

$$S = S_{0,\Delta\lambda} \frac{r_0^2}{r^2} (\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega) \quad (2)$$

其中,  $S_{0,\Delta\lambda}$  为太阳辐射在  $\Delta\lambda$  波段内的光谱通量;  $r_0$ 、 $r$  分别为日地平均距离和实际日地距离;  $\varphi$  为纬度;  $\delta$  为地球公转轨道与赤道夹角;  $\omega$  为时角。

由于入射光强的变化直接影响两幅不同时相或地域遥感图像之间的可比性, 尤其在定量分析中, 必须进行时间相和纬度的订正, 才能得到有代表性的遥感定量模型。因此, 许多遥感模型用两个波段遥感数据的比值作为定量指标, 从而排除时间和纬度的影响(并部分排除大气的影响)。在此, 提出更为通用的方法, 对各波段的遥感值进行处理:

$$DN'_{ij} = DN_{ij} / S \quad (3)$$

由此得到的遥感数据在一定程度上能更好地反映地物的反射率特征。

故将(2)、(3)式, 引入(1)式对定量指标  $Z_0$  进行时间和纬度订正, 得到:

$$Z'_0 = \left( \frac{S_3 \cdot S_7}{S_4} \right)^2 \cdot \left[ \frac{1}{\rho^2} (\sin\varphi \sin\delta + B \cos\varphi \cos\delta) \right]^2 \cdot Z_0$$

其中,  $\varphi$  为像元所在的纬度;  $\delta$  为成像时的黄赤交角, 在夏至日和冬至日分别为 +、-  $23^\circ 27''$  在此之间根据成像日期线性内插;  $B = \cos\omega$ , 由于陆地卫星成像时间为当地时间 9:40 左右, 故  $B$  为常数;  $\rho = r/r_0$  为日地距离比, 其值在 0.9674 至 1.0344 之间变化, 可由成像日期内插得到;  $S_3$ 、 $S_4$  和  $S_7$  分别为第 3、4、7 波段的太阳光谱能量, 均为常数, 可略去。故经时相和纬度订正的叶绿素含量遥感定量指标为:

$$Z_1 = \left( \frac{TM_4}{TM_3 \times TM_7} \right)^2 \cdot \left[ \frac{1}{\rho^2} \sin\varphi \sin\delta + B \cos\varphi \cos\delta \right]^2$$

根据 15 个点的数据计算,  $Z_1$  与 Chl-a 的相关系数为 0.9577, 统计检验  $F$  为 144.0。

### 3.3 回归模型及其检验

以上述(准)同步观测的 Chl-a 含量(单位 mg/L)与遥感定量指标  $Z$  建立回归模型:

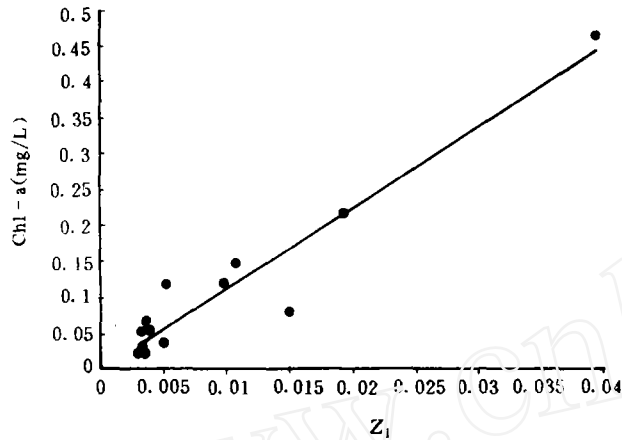


图4 1992年7月25日同步观测得到的Chl-a  
实测值与遥感定量指标的回归拟合  
Fig. 4 Regression condition of chl-a truth  
observation and selected remote sensing index  
based on in-situ measurements on July 25, 1992

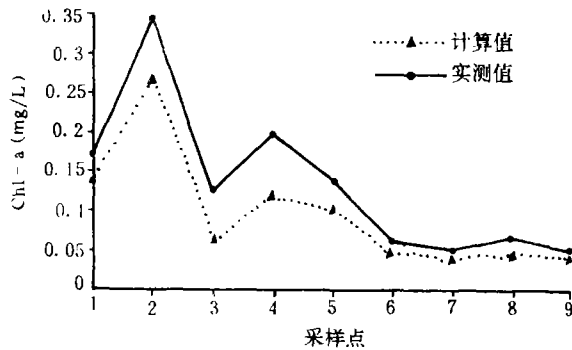


图5 1992年10月29日同步观测得到的  
Chl-a 实测值和模型计算值比较  
Fig. 5 Comparison of chl-a data obtained from  
truth observation and model estimation based  
on in-situ measurements on Oct. 29, 1992

$$\text{Chl-a} = -0.00157 + 11.37456Z_1$$

其回归拟合情况见图4。

利用这一定量模型和1992年10月29日的TM遥感图像数据计算得到该日太湖梅梁湾水域的Chl-a含量,同时中国科学院太湖湖泊生态系统研究站进行了湖面采样,将9个采样点的实测Chl-a含量与计算值比较(图5),可见两者量级相当,趋势相同,相关系数达0.976。Chl-a遥感定量分析模型较好地拟合了实测情况。但由图中也可见,计算值偏低呈系统误差,这可能是由于湖体泥沙等悬浮值的变化、气象状况的变化或水样分析时的系统偏差所致。

#### 4 结语

选定的水体叶绿素a含量遥感定量指标相关性好,显著水平高,由此建立的定量模型与实况拟合较好。而且定量指标经过了时相和纬度订正,当天气条件相似时,模型可应用于其它湖区和其他时相的遥感定量分析。

研究中发现泥沙等悬浮质对可见光TM3波段有较大的影响,呈正相关,而叶绿素a在这一波段则有较明显的吸收,当水体泥沙含量很高、很低或分布很不均匀时,它对TM3的显著影响将会引起定量模型的较大误差。因此,需进一步研究泥沙和藻类对不同波段反射光强的贡献,探讨消除两者在反射光谱上相互干扰的方法,从而进行更精确的定量分析。

#### 参 考 文 献

- 1 P H 斯韦恩等. 遥感定量方法. 北京:科学出版社,1984. 45~90
- 2 Munday. J C. et al. Landsat test of diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurement. *Remote Sensing of Environment*, 1979., 8(2):169~183
- 3 黎 夏. 悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用. *环境遥感*, 1992, 7(2)

- 4 S Bagheri, *et al.* Chlorophyll-a estimation in New Jersey's coastal waters using Thematic Mapper Data. *Int J Remote Sensing*, 1990, 11(2)
- 5 中国科学院空间科学技术中心. 中国地球资源光谱信息资料汇编. 北京:能源出版社,1987
- 6 李旭文等. 太湖藻类的卫星遥感监测. 湖泊科学,1995,7(1):65~68
- 7 К. Я. 康德拉捷夫. 太阳辐射能. 北京:科学出版社,1962. 273~279

## QUANTITATIVE ANALYSIS ON CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION IN TAIHU LAKE USING THEMATIC MAPPER DATA

She Fengning<sup>1</sup> Li Xuwen<sup>2</sup> Cai Qiming<sup>1</sup> Chen Yuwei<sup>1</sup>

(1. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Nanjing 210008;

2. Jiangsu Institute of Environmental Information, Nanjing 210013)

### Abstract

The LANDSAT Thematic Mapper (TM) data on July 25, 1992 were used together with concurrent measurement of Chlorophyll-a concentration in the northern part of Taihu Lake to relate the TM data quantitatively to Chl-a. Firstly, the statistical relationships between TM data on each band at sample sites and measured Chl-a were analyzed. It is shown that the third band (TM3) data power-law decays with the increase of Chl-a, while the fourth band (TM4) and the seventh band (TM7) separately show the positive and negative linear correlations with the Chl-a concentration. These sensitive bands (TM3, TM4 and TM7) were selected as independent variables, whose optimum combinations were examined through their linearly and non-linearly alterations in order to obtain a new quantitative index for Chl-a estimation. Meanwhile, a method of revising this index to remove the influences of ground irradiation changes is presented in this paper. It is found that there is a close linear interrelation between the revised quantitative index and Chl-a concentration. Based on this interrelation, the final Chl-a estimation model was developed in this paper. The Chl-a values measured at several sample sites in Meiliang Bay on Oct. 29, 1992 were coincident with the calculated ones using this model. The statistical analysis and checking results show that this Chl-a estimation model can be applied to images of different dates and areas on similar weather condition because through irradiation amendment the factors of time and latitude have little interference with this model.

**Key Words** Chlorophyll-a concentration, Thematic Mapper data, quantitative model, Taihu Lake