

文章编号: 1007-4619 (2005)01-0078-09

应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度

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: 遥感方法测定水体中叶绿素含量的核心问题是建立遥感数据和叶绿素含量的定量关系; 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, 从数量上揭示了位于 682nm 附近和 706nm 附近对叶绿素含量估测最重要的两个光谱特征, 分别通过比值 (R_{706}/R_{682} 、 R_{706}/R_{572})、微分、面积、峰高、峰谷距离以及反射峰位置等建立与叶绿素浓度的线性或非线性相关回归模型, 通过 R^2 、平均误差以及 RMS 误差等的分析对比, 认为比值和反射峰位置对叶绿素浓度有很好的指示作用, 是估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度的最好方法, 其中与反射峰位置的指数关系 R^2 达 0.9199, 与 R_{706}/R_{682} 的直接线性关系 R^2 达 0.9038。相对于 706nm 附近的峰谷距离、峰高以及反射峰面积而言, 反射峰的位置是指示叶绿素浓度最敏感的变量; 572nm 附近、682nm 附近以及 706nm 附近等三个波段对探测叶绿素 a 具有重要作用。

关键词: 光谱特征; 叶绿素; 太湖; 遥感

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

叶绿素是衡量湖泊富营养化的重要指标, 是湖泊水质监测的重要内容。常规水质监测是人工取样的实地进行, 这种方法费时费力, 且只能了解监测断面上的水质状况, 对于整个水体而言, 这些测点数据只具有局部和典型的代表意义。利用遥感快速、大范围和周期性的特点, 可以有效地解决这种点数据意义的局限性, 节省人力物力财力。遥感方法测定水体中叶绿素含量的核心问题是建立遥感数据和叶绿素含量的定量关系, 该关系由两个部分组成: (1) 水体叶绿素和水面光谱反射率的关系; (2) 大气中的水面和遥感器光谱反射率的关系。前者是后者研究的基础。在水体叶绿素和水面光谱反射率关系的研究方面, 尤其对于内陆湖泊水体的研究, 众多学者已经作了大量工作, 建立了不同的叶绿素遥感估测模型, 大致可以分为两类: (1) 理论/半分析模型^[1-5], 即首先根据水体光学特性确定吸收系数、后向散射系数以及表面反射率的理论关系, 然后根据实测的反射率计算实际吸收系数与后向散射系数, 联系叶绿素

的特征吸收系数以及后向散射系数, 最后得到叶绿素含量, 这也是湖泊光学的重要研究内容之一, 但由于这种方法需要测定湖泊水体的众多参数, 这些参数又随特定湖泊而变化, 因此实施这种方法比较困难, 预测精度也较低; (2) 经验/半经验模型, 即通过水体的实测光谱曲线, 选择不同波段处的叶绿素光谱特征的反射率值与实测的叶绿素浓度进行统计回归, 建立回归方程获取叶绿素浓度, 使用的参数主要有叶绿素特征吸收峰和反射峰所在波段的反射比^[6-10]、特征反射峰的位置^[6,7]、690nm 附近反射率的一阶微分值^[9,11,12]等, 但是不同的水体, 同一水体在不同的季节, 由于水中物质含量以及组成细胞的不同, 估测叶绿素浓度所使用的参数和方法就会有所差别, 建立的模型也不同, 其精度和适用性等都值得研究。

太湖是中国 5 大淡水湖之一, 同时也是中国富营养化较为严重的湖泊之一。实地测试的光谱曲线是太湖水体物质的综合反应, 影响因素大致可分为 3 类^[13]: (1) 黄色物质, 主要是由黄腐酸, 腐殖酸组成的溶解性有机物; (2) 悬浮物质, 主要是浮游植物死亡产生的有机碎屑以及陆生或湖体底泥再悬浮而产

收稿日期: 2003-07-15; 修订日期: 2004-01-15

基金项目: 中国科学院领域前沿项目(CXNIGLAS-A02-014), 中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金(NIGLAS2200445); 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)。

作者简介: 马荣华(1972—), 男, 山东费县人, 博士, 南京大学城市与资源学系地图学与地理信息系统专业毕业, 目前主要从事水质遥感、GIS 数据挖掘的认知理论研究, 发表论文 20 余篇。

生的无机、有机悬浮颗粒,对于太湖而言,底泥的再悬浮占了很大比重;(3)浮游植物,主要是各种浮游藻类。考察叶绿素的光谱特征需要统筹考虑上述 3 种物质的相互作用。本文通过太湖梅梁湾附近水体的实测光谱和水质采样分析,在光谱特征分析的基础上,运用不同方法,寻找估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度的最佳方法。

2 实验量测

2.1 样点位置

研究区域主要位于太湖梅梁湾水域,南北长约 14km,东西宽约 7km,平均水深 2m 左右,是无锡市赖以生存的水源地。无锡市有 4 大自来水厂,其中 3 大水厂取水于此,近年来,几乎每年四、五月份起都发生大面积的蓝藻水华现象,其优势种是微囊藻。实验样点分布如图 1。

2.2 光谱量测

光谱测量采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec[®]

Pro FR 便携式分光辐射光谱仪,波长范围 350—2500 nm,采样时间 10 次/秒,波长精度: ± 1 nm, 350—1050nm 范围内光谱分辨率 3.5nm,其他范围内 10nm; 1m 长标准光纤探头, 25° 前视场。测量时间在 2003 年 3 月 27 日 13—15 点以及 6 月 15 日 10—15 点,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;借助白板量测,仪器自动将水体的向上辐射率转化为水体的反射率,每个样点至少测量 10 次,取平均,采样间隔为 1nm; 3 月 27 日对 7 个点进行了光谱测量,6 月 15 日对 14 个点进行了光谱测量。

2.3 水质分析

取表层水进行实验室分析,分析的内容包括悬浮物以及叶绿素 a(按有关湖泊调查规范^[14]进行)。另外,在进行光谱量测的同时,进行了水体透明度(采用直径为 30cm 的白色赛克圆盘进行测量)以及水温量测。3 月 27 日对 7 个点进行了水质采样分析,6 月 15 日共对 22 个点进行了水质采样分析。

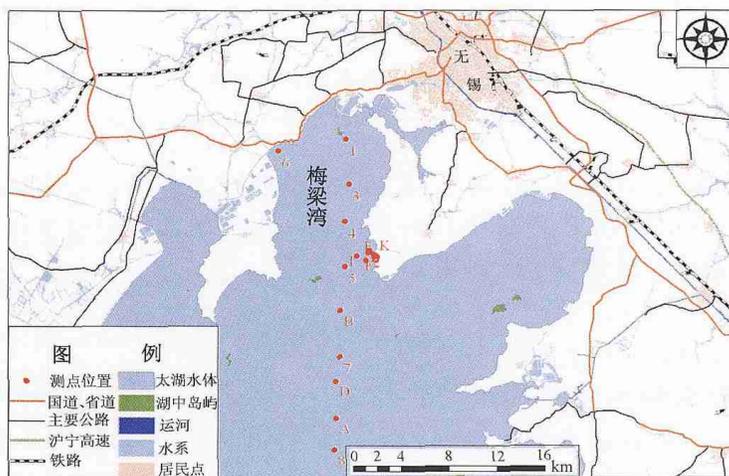


图 1 部分样点位置分布图

Fig.1 Location and distribution of most of sample points

3 结果与分析

3.1 光谱特征

光谱测量结果如图 2 所示。为便于比较,图 3 仅列出了 6 月 15 日进行过光谱测试的样点的水质分析结果,叶绿素 a 含量 C_{chl} , $\mu\text{g}/\text{l}$ 从 7.77—71.58 $\mu\text{g}/\text{l}$,沿着样

点纵剖面从湖心到湖边逐渐增加。本文仅对可见光范围内(380—760nm)的光谱曲线进行分析。

根据采样时间,把图 2 的光谱曲线分为两组:蓝线组(2003-06-15)和红线组(2003-03-26)。前者在 680nm 附近具有明显的吸收峰,700nm 附近具有明显的反射峰,后者在上述两个波段处的吸收峰和反射峰不明显;但两组曲线均在 570nm 附近处出现最大反射率值。重点考察第一组曲线,682nm 附近出

现较为明显的反射谷且呈肩状,肩宽平均 7.2nm,范 围为 678.8—686nm,平均反射率 0.085;706nm 附

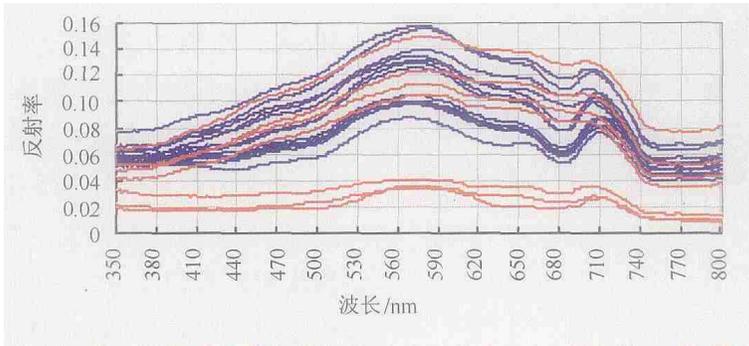


图 2 太湖梅梁湾部分采样点的光谱曲线

Fig-2 Spectral reflectance curves of sample points in Meiliang bayou, Taihu lake

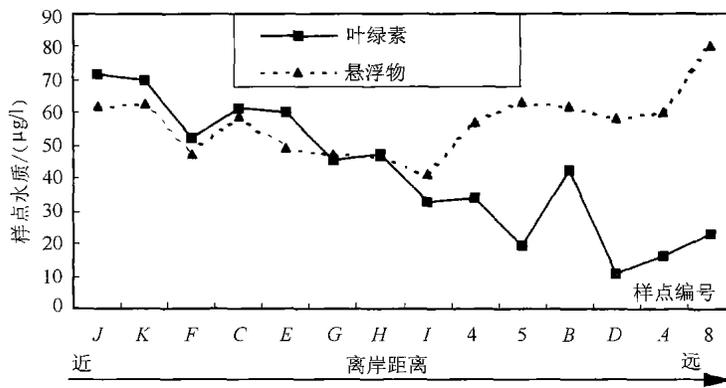


图 3 部分样点水质分析结果

Fig.3 Analysis result of water quality of some samples

近出现较为明显的反射峰值且呈肩状,肩宽平均 5.4nm,范围为 703.7—709.1nm,平均反射率 0.104; 572nm 附近出现最大反射率值,呈肩状,肩宽平均 12.5nm,范围为 565.3—577.8 nm,平均反射率 0.125;详细描述见表 1,光谱特征产生的原因分析见表 2。表中谷高、峰高和面积的定义如下:(1) 663nm 附近处的点和 706nm 附近处的点的连线到谷

底的高度为谷高;(2)682nm 附近处肩状谷的最右点和 750nm 附近处反射曲线斜率开始变化的点的连线到最大峰值处的高度为峰高;(3)682nm 附近处肩状谷的最右点和 750nm 附近处反射曲线斜率开始变化的点的连线与光谱曲线围成的面积为叶绿素光谱反射面积;具体描述如图 4 所示。

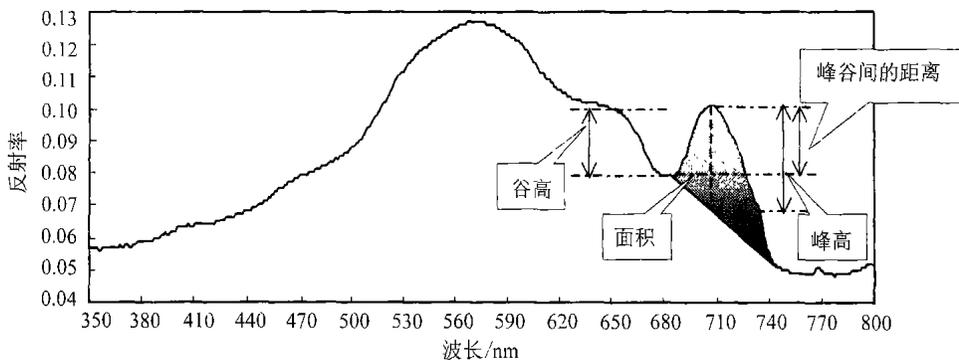


图 4 谷值、峰值以及面积的确定

Fig-4 Sketch map of how to determine value of trough, peak and area

表 1 第 1 组曲线重要光谱特征定量描述

Table 1 Quantitative description of spectra features of the first group curves

点号	肩状谷					肩状峰						峰谷间 的距离/nm	最大反射峰	
	范围/nm	平均/nm	宽度/nm	反射率	谷高/nm	范围/nm	平均/nm	宽度/nm	反射率	峰高/nm	面积/nm ²		范围/nm	反射率
A	680—689	684.5	9	0.105	0.005	697—705	701	8	0.110	0.0138	0.5790	0.005	565—568	0.139
B	680—687	683.5	7	0.085	0.019	704—709	706.5	5	0.104	0.0273	0.9210	0.019	567—573	0.136
C	680—683	681.5	3	0.06	0.019	706—712	709	6	0.081	0.0265	0.9325	0.021	559—577	0.100
D	682—690	686	8	0.098	0.002	697—702	699.5	5	0.101	0.0108	0.4620	0.003	564—585	0.132
E	677—685	681	7	0.066	0.02	706—712	709	6	0.088	0.0281	0.9880	0.022	563—579	0.105
F	678—684	681	6	0.063	0.018	707—712	709	5	0.087	0.0285	0.9910	0.024	562—579	0.100
G	678—684	681	6	0.063	0.015	706—710	708	4	0.083	0.0267	0.9310	0.020	563—576	0.099
H	678—686	682	8	0.080	0.017	705—711	708	6	0.107	0.0337	1.1590	0.027	571—572	0.131
I	678—686	682	8	0.079	0.019	705—709	707	4	0.101	0.0310	1.0500	0.022	567—577	0.127
J	678—685	681.5	7	0.06	0.017	708—713	710.5	5	0.089	0.0329	1.1500	0.029	554—577	0.101
K	678—687	682.5	9	0.055	0.013	706—712	709	6	0.077	0.0274	0.9370	0.022	563—571	0.089
4	677—683	680	6	0.152	0.016	706—709	707.5	3	0.179	0.0340	1.2530	0.027	576—587	0.181
5	679—688	683.5	9	0.111	0.012	701—706	703.5	5	0.123	0.0233	0.8475	0.012	567—583	0.158
8	681—687	684	6	0.118	0.008	698—705	701.5	7	0.126	0.0193	0.7580	0.008	573—585	0.156
平均	678.8 —686	682.4	7.2	0.085	0.014	703.7 —709.1	706.4	5.4	0.104	0.02595	0.9256	0.0186	565.3 —577.8	0.125

表 2 可见光范围内太湖梅梁湾水体的光谱特征及其原因

Table 2 Spectra characteristic of water and its interpretation in Meiliang bay, Taihu lake

波长/nm	特征	可能原因
400—500	反射率较低	叶绿素、类胡萝卜素以及溶解性有机物质的吸收 ^[1,6]
440 附近	反射谷,本研究不明显	叶绿素吸收 ^[10,15] ,在贫营养的湖泊水体中,此处的反射谷特征十分明显 ^[10]
490 附近	反射谷	类胡萝卜素吸收 ^[16,17]
572 附近	最大反射峰	藻类色素的低吸收,无机悬浮物质和浮游植物细胞壁的散射,特殊物质(如类胡萝卜素)浓度的增加 ^[6,18,19]
620—630	反射率降低	藻青蛋白的吸收 ^[6,16,20]
682 附近	反射谷,其位置从 663nm 开始,在 682nm 附近该反射谷达到最低点	叶绿素 a 在红波段的最大吸收,叶绿素吸收和细胞壁散射均衡,对藻类密度和叶绿素浓度的反射的敏感度最低,当叶绿素浓度到达一定程度时,此处的反射几乎与叶绿素无关,主要依靠无机悬浮物质的浓度 ^[17,20—22]
706 附近	反射峰,其位置从 681nm 开始,在 706nm 附近峰值达到最高,与叶绿素浓度密切相关	(1)浮游植物色素的荧光效应 ^[23—26] ,(2)水和叶绿素 a 的吸收系数之和在该处最小 ^[6,27—29] ,可作为是否有叶绿素的依据 ^[30]
750 附近	在 706nm 附近出现的反射曲线的斜率开始发生变化	水在 NIR 范围内强吸收,该处的反射依赖于有机和无机悬浮物质的浓度,对藻类色素的反应最不敏感 ^[31]

3.2 叶绿素浓度估测

3.2.1 不同方法的浓度估测

(1) 比值法

根据表 1、表 2 的光谱特征描述,选择可见光范围内 572nm 处的反射率最大值(R_{572})、近红外 706nm 处的反射率峰值(R_{706})以及红外 682nm 处的反射率谷值(R_{682}),分别做比值,即 R_{706}/R_{682} 、 R_{706}/R_{572} ,然

后把叶绿素 a 浓度 (C_{chla}) 作为因变量,分别进行不同形式的回归分析,选取 R^2 最大的回归方程作为最终结果,如式(1)、式(2),二者关系如图 5;两个方程在形式上与 Gitelson^[6]的结果是一致的,但其常数项不同,这主要是由不同水体不同的光学特性引起的。

$$C_{chla} = -121.8580 + 130.8369 \times \frac{R_{706}}{R_{682}} \quad (1)$$

$$C_{chla} = 113.8678 + 352.1817 \times \ln \left(\frac{R_{706}}{R_{572}} \right) \quad (2)$$

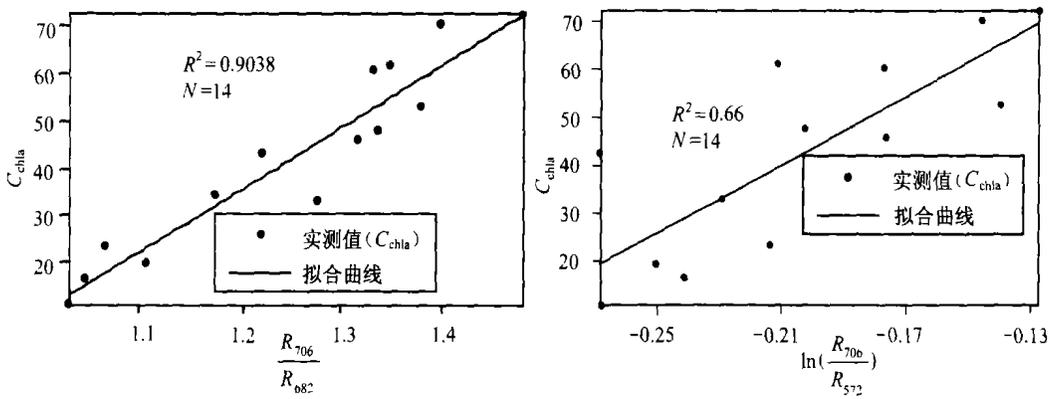


图 5 叶绿素 a 的浓度与反射比 R_{706}/R_{682} 以及 R_{706}/R_{572} 的关系

Fig.5 Regression analysis between chlorophyll-a and reflectance ratios R_{706}/R_{682} and R_{706}/R_{572}

(2) 反射峰位置法

706nm 附近处反射峰的位置与 C_{chla} 存在紧密的关系, C_{chla} 增加, 峰高随之增加, 位置也向着长波方向移动; 通过分析, 建立了如式(3)和式(4)所示的关系方程, 拟合曲线如图 6, 分别验证了 Gitelson^[6] 以及疏小舟^[8] 的分析结果, 两式的拟合度 R^2 表明式(4)优于式(3), 说明太湖梅梁湾附近水体的叶绿素浓度

与 706nm 附近处反射峰的位置是一种非常好的指数关系, 这与疏小舟^[8] 所得的结论是一致的。结果表明, 通过反射峰的位置可以较为准确的确定太湖梅梁湾附近水体的叶绿素浓度。

$$C_{chla} = -3631.8759 + 5.2012 \times \lambda_{max706} \quad (3)$$

$$\ln(C_{chla}) = -109.2012 + 0.1597 \times \lambda_{max706} \quad (4)$$

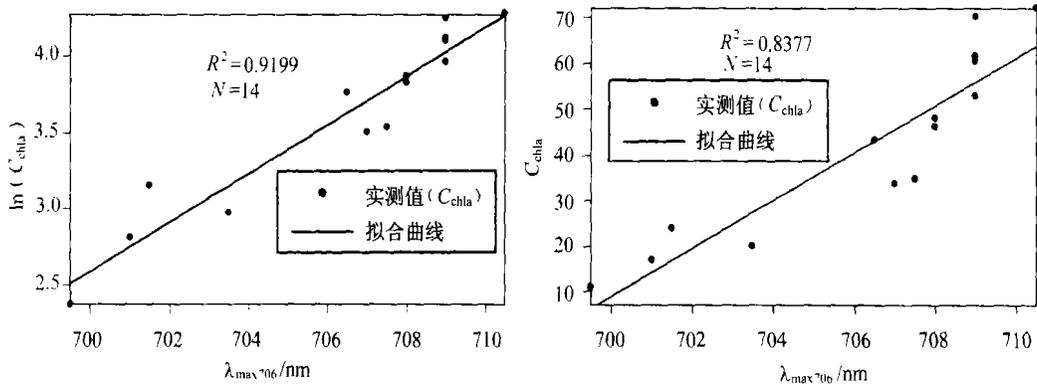


图 6 叶绿素 a 的浓度与 706nm 附近反射峰位置的关系

Fig.6 Relationship between chlorophyll-a and position of reflectance peak near 706nm

(3) 峰谷距离法

706nm 附近处的反射峰和 682nm 附近处的反射谷均是由叶绿素的吸收或反射引起的, 可以建立叶绿素浓度与谷低到峰顶之间的距离 ($D_{peak706-682}$) 的关系, 选取 R^2 最大的回归方程作为最终结果, 如(5)式, 拟合曲线如图 7。结果表明, 红外、近红外波段处的叶绿素光谱曲线的反射峰和反射谷之间的距离可以近似的反映叶绿素含量。

$$\ln(C_{chla}) = 6.3944 + 0.6687 \times \ln(D_{peak706-682}) \quad (5)$$

(4) 微分法

根据有关文献^[9, 11, 12] 的研究, 对可见光范围内

的光谱数据按照式(6)进行微分。根据计算, 反射率一阶微分变化最大的波段位于 693.5nm 附近。因此可以分析 694nm 波段处光谱反射率的一阶微分与 C_{chla} 的关系, 多种统计分析表明它们与叶绿素浓度存在较为明显的指数关系, 表达式如(7)式, 关系图如图 8(原始数据导出时的有效位数精度问题造成了图 8 部分微分后的点成直线分布), 该结果与相关文献的研究结果有所不同, 原因另作分析。

$$R(\lambda_i)' = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (6)$$

$$\ln(C_{chla}) = 2.4993 + 643.7124 \times R'_{694} \quad (7)$$

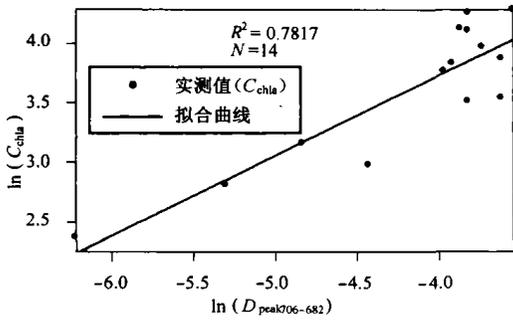


图 7 叶绿素 a 的浓度与峰谷距离的关系

Fig.7 Relationship between chlorophyll-a and distance from reflectance peak near 706nm to absorbance vale near 682nm

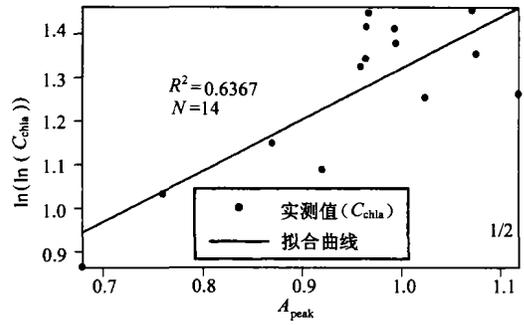


图 9 叶绿素 a 的浓度与 706nm 附近反射峰面积的关系

Fig.9 Relationship between chlorophyll-a and area of reflectance peak near 706nm

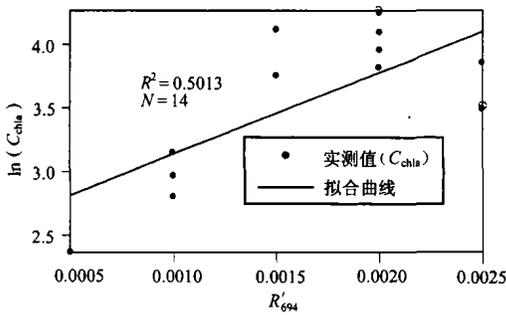


图 8 叶绿素 a 的浓度与 694nm 附近光谱反射率一阶微分的关系

Fig.8 Relationship between chlorophyll-a and the first-derivative reflectance near 706nm

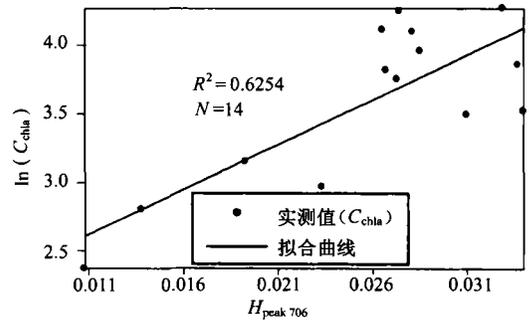


图 10 叶绿素 a 浓度与 706nm 附近峰高的关系

Fig.10 Relationship between chlorophyll-a and height of reflectance peak near 706nm

(5) 面积法

表 2 表明, 682nm 附近处和 750nm 附近处反射光谱具有特殊性。它们之间的连线与反射光谱曲线所围成的面积与浮游植物的浓度有关, 因此面积 (A_{peak}) 的大小可以反映 C_{chla} 的多少。面积的确定如图 4 所示, 它与叶绿素 a 含量的关系如图 9。结果表明, 本次实验范围内, 叶绿素与其光谱反射面积之间存在着较为复杂的指数关系, 表达式如(8)式, 说明光谱反射面积的多少不能直观的反映叶绿素浓度的高低。

$$\ln(\ln(C_{chla})) = 0.1456 + 1.1752 \times A_{peak}^{1/2} \quad (8)$$

(6) 峰高法

根据 706nm 附近出现反射率极大值的光谱特征, 建立峰高 ($H_{peak706}$, 按照图 4 确定) 与 C_{chla} 的关系, 结果如(9)式, 拟合曲线如图 10。式(9)表明, 叶绿素浓度与 706nm 附近的最大反射率存在一定的指数关系。

$$\ln(C_{chla}) = 1.8998 + 65.6298 \times H_{peak706} \quad (9)$$

3.2.2 方法对比

上述回归关系方程均符合 $y = ax + b$ 的形式, 但其中变量的意义各不相同, 回归系数也有差别, 回归模型预测值与实测值之间都存在一定的误差。表 3 表明, R_{706}/R_{682} 、 λ_{max706} 、 R_{706}/R_{572} 以及 $D_{peak706-682}$ 都与太湖梅梁湾附近水体的叶绿素浓度有着较好的线性或非线性关系, 其中 λ_{max706} 与叶绿素浓度的相关性最好, 其中指数关系的拟合度 R^2 为 0.9199, 线性拟合度 R^2 为 0.8377, 其次是 R_{706}/R_{682} , 线性拟合度 R^2 为 0.9038, 实测值与估测值之间的平均误差和 RMS 误差也表明利用 R_{706}/R_{682} 和 λ_{max706} 来估测叶绿素浓度具有较高的精度。706nm 处反射峰的面积、峰高以及 694nm 处反射率的一阶微分值与叶绿素浓度存在着一定程度的指数关系, R^2 在 0.6 左右, 实测值与估测值之间的平均误差和 RMS 误差较大, 因此通过它们估测叶绿素浓度的精度较差。上述现象的主要原因如下: (1) 706nm 附近处反射峰的位置不受地表辐照度、光谱测量角度等变化的影响, 受悬浮物质及黄色物质的影响也很小, 有利于提高叶绿素遥感的精度; (2) 比值法可以去除相同因素的

共同影响,另外,682nm 波段和 706nm 波段彼此靠近,受非色素悬浮物质以及黄色物质的影响相似,保持了较低的噪声,因此用比值法来估测叶绿素浓度具有较高的精度,其中又以 R_{706}/R_{682} 为最好;(3)由于水在近红外波段范围内的强吸收,在 706nm 附近出现的反射曲线的斜率开始发生变化的点即 750nm

表 3 太湖梅梁湾附近水体叶绿素 a 的浓度估测方法对比

Table 3 Comparison among methods to predict chlorophyll-a of water-body near Meiliang bayou, Taihu Lake

	因变量	自变量	R^2	最大绝对 误差/($\mu\text{g}/\text{l}$)	最小绝对 误差/($\mu\text{g}/\text{l}$)	平均绝对 误差/($\mu\text{g}/\text{l}$)	中误差/ ($\mu\text{g}/\text{l}$)
反射峰位置法 1	$\ln(C_{\text{chl}a})$	$\lambda_{\text{max}706}$	0.9199	13.86	0.64	4.68	5.98
比值法 1	$C_{\text{chl}a}$	R_{706}/R_{682}	0.9038	12.40	0.37	5.09	5.95
反射峰位置法 2	$C_{\text{chl}a}$	$\lambda_{\text{max}706}$	0.8377	14.14	0.05	6.49	7.73
峰谷距离法	$\ln(C_{\text{chl}a})$	$\ln(D_{\text{peak}706-682})$	0.7817	23.28	0.41	9.08	11.90
比值法 2	$C_{\text{chl}a}$	$\ln(R_{706}/R_{572})$	0.6600	23.33	0.18	9.97	11.96
面积法	$\ln(\ln(C_{\text{chl}a}))$	$A_{\text{peak}}^{1/2}$	0.6367	40.51	0.41	14.25	18.14
峰高法	$\ln(C_{\text{chl}a})$	$H_{\text{peak}706}$	0.6254	29.54	0.03	12.71	15.83
微分法	$\ln(C_{\text{chl}a})$	R_{694}	0.5013	29.20	0.13	14.58	17.94

4 结 论

(1) 叶绿素光谱特征与其含量有关,含量越高,特征越明显,主要表现在特征反射峰和反射谷的位置大小;对太湖梅梁湾附近水体而言,峰谷的中心位置与其它学者的发现稍有差别,分别位于 706nm 附近和 682nm 附近;此外,572nm 附近的波谱最大反射峰对估测叶绿素 a 的浓度也具有重要作用。

(2) 除估测叶绿素浓度常用的比值法、反射峰位置法以及微分法以外,本文又使用了峰谷距离法、面积法和峰高法;相对于 706nm 附近的峰谷距离、峰高以及反射峰面积而言,峰的位置是指示叶绿素浓度最敏感的变量。

(3) 叶绿素浓度与 706nm 附近反射峰的位置之间不仅有着很好的线性关系(R^2 达 0.8377),而且存在着极强的指数关系(R^2 达 0.9199),这验证了相关学者的研究结果;对太湖梅梁湾附近水体而言,指数模型是二者之间最好的关系模型;另外,706nm 附近处的反射峰与 682nm 附近处的反射谷的反射率之比(R_{706}/R_{682})与叶绿素浓度也具有很强的线性关系, R^2 达 0.9038;比值法和反射峰位置法是估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度的最佳方法。

(4) 限于样点数量以及采样时间季节,对太湖水体而言,文中的公式尚不具有广泛的通用性,需要

附近的点的反射率的变化相对较小,因此该点与 682nm 附近处的点的连线的坡度主要依赖于水中物质的散射,它不仅受水中浮游植物叶绿素 a 的影响,还受水中无机悬浮物质以及非色素有机悬浮物质的影响,导致峰高以及反射峰的面积不能精确地指示叶绿素浓度。

进一步验证和改进。

致谢 南京大学城市与资源学系冯学智教授、南京大学国际地球系统研究所田庆久教授、中国科学院南京地理与湖泊研究所季江高级工程师给予了大力支持和帮助,研究生金震宇和夏学齐、博士生张运林帮助光谱测试、采集水样,谨此致谢。

参 考 文 献 (References)

- [1] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1994.
- [2] Kopelevich O V, Meshericher E M. Improvement of the method of "inversion" of the spectral values of the luminance coefficient of the sea [J]. *Oceanology*, 1979, **19**: 621-634.
- [3] Pelevin V N. Estimation of the concentration of suspension and chlorophyll in the sea from the spectrum of outgoing radiation measured from a helicopter [J]. *Oceanology*. 1978, **18**: 278-282.
- [4] Kirk J T O. Volume scattering function, average Cosines and the underwater light field [J]. *Limnol. Oceanogr.* 1991, **36**: 455-467.
- [5] Gons H J. Optical teledetection of chlorophyll-a in turbid inland waters [J]. *Environ. Sci. Technol.* 1999, **33**: 1127-1132.
- [6] Gitelson A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration [J]. *Int. J. Remote Sensing*. 1992, **13** (17): 3367-3373.
- [7] Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyi F, et al. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality [J]. *Int. J. Remote Sensing*. 1993, **14**(7): 1269-1295.
- [8] Shu X Z, Yi Q, Kuang D B. Relationship between algal chlorophyll

- concentration and spectral reflectance of inland water [J]. *Journal of Remote Sensing*. 2000, **4**(1): 41–45. [疏小舟,伊球,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.]
- [9] Li S J, Wu Q, Wang X J, et al. Correlations between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in Chaohu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*. 2002, **14**(3): 228–234. [李素菊,吴倩,王学军等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 228–234.]
- [10] Iluz D, Yacobi Y Z, Gitelson A. Adaptation of an algorithm for chlorophyll-a estimation by optical data in the oligotrophic Gulf of Eilat[J]. *Int. J. Remote Sensing*. 2003, **24**(5): 1157–1163.
- [11] Luoheng H, Donald C, Rundquist D C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir[J]. *Remote Sens Environ*, 1997, **62**: 253–261.
- [12] Rundquist D C, Han L, Schalles J F, et al. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690nm[J]. *Photogramm, Eng Remote Sens*. 1996, **62**: 195–200.
- [13] Yu H, Cai Q M. Optical properties of waters in Taihu Lake and parameterizing schemes [A]. In: Cai Qiming (eds.) Study on eco-environment in Taihu Lake (I) [C]. Beijing: Meteorology Press. 1998: 63–73. [俞宏,蔡启铭. 太湖水体的光学特性及其参数化方案[A]. 见:蔡启铭主编. 太湖环境生态研究(一)[C]. 北京:气象出版社,1998,63–73.]
- [14] Huang X F (eds.). Eco-investigation, observation and analysis of lakes. Beijing [M]. Standard Press of China. 1999, 77–99. [黄祥飞主编. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社. 1999,77–99.]
- [15] Gordon H, Morel A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery [M]. New York: Springer-Verlag. 1983.
- [16] Gitelson A, Laorawat S, Keydan G P, Vonshak A. Optical properties of dense algal cultures outdoors and its application to remote estimation of biomass and pigment concentration in *Spirulina platensis* [J]. *J. Phycolgy*. 1995, **31**(5): 828–834.
- [17] 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]. *J. Plankton Res*. 1995, **17**: 2155–2173.
- [18] Bennet A, Bogorad L. Complimentary chromic adaption in a filamentous blue-green alga [J]. *Journal of Cell Biology*. 1973, **58**: 410–435.
- [19] Schalles J F, Gitelson A, Yacobi Y Z, Kroenke A E. Chlorophyll estimation using whole seasonal, remotely sensed high spectral-resolution data for an eutrophic lake [J]. *J. Phycol*. 1998, **34**: 383–390.
- [20] Dekker A. Detection of the optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [D]. Free University, Amsterdam, The Netherlands. 1993.
- [21] Gitelson A, Szilagyi F, Mittenzwey K. Improving quantitative remote sensing for monitoring of inland water quality [J]. *Water Res*. 1993, **7**: 1185–1194.
- [22] Gitelson A, Mayo M, Yacobi Y Z, et al. The use of high spectral radiometer data for detection of low chlorophyll concentrations in Lake Kinneret [J]. *J. Plankton Res*. 1994, **16**: 993–1002.
- [23] Morel A, Prieur L. Anlysis of variation in ocean color [J]. *Limol. Oceanogr*. 1977, **22**: 709–722.
- [24] Gordon H. Diffusive reflectance of the ocean: the theory of its augmentation by chlorophyll-a fluorescence at 685nm [J]. *Applied Optics*. 1979, **18**: 1161–1166.
- [25] Carder K L, Steward R G. A remote sensing reflectance model of a red tide dinoflagellate off west Florida [J]. *Limol. Oceanogr*. 1985, **30**: 286–298.
- [26] Hoge F, Swift R. Ocean color spectral variability studies using solar induced chlorophyll fluorescence [J]. *Applied Optics*. 1987, **26**: 18–21.
- [27] Vasilkov A P, Kopelevich O V. The reason of maximum at about 700nm on radiance spectra of the sea[J]. *Oceanology*. 1982, **22**: 945–950.
- [28] Kishino M, Sugihara S, Okami N. Theoretical analysis of the in-situ fluorescence of chlorophyll-a on the underwater spectral irradiance [J]. *Bulletin de la Societe Franco-Japonaise d'Océanographie*, 1986, **24**: 130–138.
- [29] Gitelson A A, Kondrat 'ev K Y. On the Mechanism of Fomation of Maximum in the Reflectance Spectra Near 700nm and its application for remote monitoring of water quality [J]. *Transactions Doklady of the USSR Academy of Sciences; Earth Science Sections*. 1991, **306**: 1–4.
- [30] Fischer J, Kronfeld V. Sun-stimulated chlorophyll fluorescence. 1: Influence of oceanic properties [J]. *Int. J. Remote Sensing*. 1990, **11**: 2125–2147.
- [31] Han L, Rundquist D C, Liu L L, et al. The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment [J]. *Int. J. Remote Sensing*. 1994, **15**: 3707–3718.

Chlorophyll-a Concentration Estimation with Field Spectra of Water-body near Meiliang Bayou in Taihu Lake

MA Rong-hua · DAI Jin-fang

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: It is a key problem to analyze quantitatively the correlations between remote sensing data and chlorophyll-a concentration for measuring the chlorophyll-a content with remote sensing method and technology. Two field campaigns were made in March and June 2003, respectively. Reflectance spectra were measured with a portable FieldSpec FR spectroradiometer (ASD Inc.). Water samples for chlorophyll-a measurement were collected at the same time guided by some related standards of China. The features of the spectral reflectance were analyzed in detail with peak height, trough depth, area surrounded by peak, distance from peak to trough and peak shoulder width. And the same result as others is to discover the most important features near 682nm and near 706nm. The regressive linear/nonlinear fitting model were developed respectively between chlorophyll-a concentration and other factors as follows: 1st, the ratio of reflectance near 706nm to reflectance near 682nm (R_{706}/R_{682}); 2nd, the ratio of reflectance near 706nm to reflectance near 572nm (R_{706}/R_{572}); 3rd, the first derivative of reflectance near 690nm (R'_{694}); 4th, the position of reflectance peak near 706nm ($\lambda_{\max 706}$); 5th, the distance from reflectance peak near 706nm to trough near 682nm ($D_{\text{peak}706-682}$); 6th, the area surrounded by reflectance peak near 706nm (A_{peak}); and 7th, the height of reflectance peak near 706nm ($H_{\text{peak}706}$). By comparison of R^2 , average error and RMS error respectively, the results show that R_{706}/R_{682} , exponential fitting degree R^2 with 0.9199, $\lambda_{\max 706}$, linear fitting degree R^2 with 0.9038 can denote chlorophyll-a content and they are better to predict chlorophyll-a concentration of water-body near Meiliang bayou in Taihu. The position of reflectance peak near 706nm is the most sensitive factor to denote chlorophyll-a concentration by comparison of distance from reflectance peak to absorbance value, height of reflectance peak and area of reflectance peak. It is very important to predict chlorophyll-a content for the bands near 572nm, 682nm and 706nm.

Key words: spectral feature; chlorophyll-a; taihu lake; RS