

太湖水体藻类叶绿素浓度高光谱遥感监测研究

刘剋, 黄家柱, 张强

(南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室, 210097, 江苏, 南京)

[摘要] 为了更好地监测太湖水体富营养化状况, 我们利用高光谱地物波谱辐射计, 通过垂直水面法和倾斜测量法得到太湖水体 3~10 月份的波谱信息。利用这些数据, 分析了太湖水体藻类的叶绿素(主要是 chl_a)与水体反射光谱特征的关系, 建立了藻类叶绿素高光谱遥感模型, 并分析了模型精度。研究发现: 两种测量法数据精度差别不大; 叶绿素在 700 nm 附近反射峰的位置、高度与叶绿素浓度有较好的对应性; 利用 700 nm 左右反射峰/685 nm 左右吸收峰附近波段的比值, 建立了和叶绿素的线性关系, 在较短的时间区间(月)内, 有很好的相关性。

[关键词] 太湖, 叶绿素, 高光谱, 遥感, 水质

[中图分类号] Q948, **[文献标识码]** A, **[文章编号]** 1001-4616(2005)03-0097-05

Study on Hyperspectral Monitoring of Concentrations for Chlorophyll_a of Alga in Taihu Lake

Liu Ke, Huang Jiazhu, Zhangqiang

(GIS Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, China)

Abstract: For the sake of the better monitoring to the eutrophic water body of Taihu lake, By aboved₂ water method and incline measurements, obtained 9 months'spectrum datas of Taihu lake with field portable spectrum radiometer. On the base of the analyzing and comparing of hyperspectral reflectance, the study was conducted to establish the correlation between hyperspectral data and algal chlorophyll concentration, and had analysed of the model's precision, the result show that :the precision difference of datas is small, the 700 nm neighborhood reflecting wave is corresponded with algal chlorophyll concentration ;using the relation between the ratio of the wave peak\data near 700 nm/the wave valley\data near 685 nm and algal chlorophyll concentration, we get the linear equation, there is a good relation between the radio and algal chlorophyll concentration in a short period of time (one month).

Key words: Taihu lake, chlorophyll, hyperspectral, remote sensing, water quality

0 引言

太湖是我国第三大淡水湖,流域面积达 3.65 万 km²,是环湖地区城镇居民生活饮用水、工业用水、农业用水、渔业用水的重要水源,也是水上航运的通道。太湖流域经济的高速发展和水资源的不合理开发、利用,导致了太湖水体的污染,进一步危及了区域经济的可持续发展。水体污染一般用富营养化状况来表示,水体富营养化的一个重要特征是藻类物质的大量繁殖,叶绿素在藻类物质中所占的比例比较稳定,并且易于在实验室测量,因此叶绿素浓度常作为反映水体营养化程度的一个重要参数。常规的水质监测是通过采集水样、过滤、萃取以及分光光度计等^[1]。根据分析数据采用单一参数或多参数的综合法进行评价,比较费时费力,并对太湖总体的水质状况难以全面了解,遥感技术作为一种区域性水环境调查和监测手段,日

收稿日期: 2005-12-20.

基金项目: 863 计划课题(2003AA131060)、江苏省教育厅自然科学基金资助项目(2004105TSJB141)。

作者简介: 刘剋, 1974—, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统、遥感的学习与应用研究。E-mail: liuke1176@sina.com

通讯联系人: 黄家柱, 1945—, 教授, 博士生导师, 主要从事地理信息系统的教学与研究。E-mail: huangjiazhu@njnu.edu.cn

益受到重视.但是,叶绿素遥感一般只是通过实验研究水体反射光谱特征与叶绿素浓度之间的关系建立叶绿素算法^[1,2],对于内陆水体,水体中悬浮物质、黄色物质等的光学效应的干扰,以及藻类及其它污染物质特性的地域性、甚至季节性的差异,使得常规的遥感水质监测比较困难.近年来,随着地物波谱辐射计的发展,利用其高光谱性质,可能能够提高内陆水体藻类叶绿素监测精度.本文正是利用地物波谱辐射计,应用两种针对内陆水体的测量方法在 2004 年 3~10 月对太湖水体进行测量,并对所得到的光谱数据进行处理和分析,初步研究了太湖含藻类水体的高光谱反射率特性及其与藻类叶绿素浓度之间的关系.

1 观测水体方法

1.1 观测原理

水体现场表观光谱的测量从方法上可分为两类^[3]:剖面测量法和水表面以上测量法,两种方法相对独立.剖面法(Profiling method)一般只能用于水深大于 10 m 水体,表面法(Above-water method)是采用与陆地光谱测量近似的仪器,在经过严格的定标的前提下,通过合理的观测几何安排和测量积分时间设置,得到相关观测量.在二类水体,适合遥感监测的有效方法是水面法.

针对地物波谱辐射计的水面测量法在水色遥感测量方面还存在争议^[1,3].我们在太湖的 3~5 月份采取垂直水面测量法,6~10 月份在采用垂直测量法的同时,也采取倾斜测量法,来获取波谱数据.唐军武等认为^[3]:利用光谱仪进行水面以上光谱测量(Above-Water Measurement)与分析,其目的是利用便携式瞬态光谱仪和标准板,导出离水辐射率、归一化离水辐射率、遥感反射率和水面以下辐照度比等参数.为避开太阳直射反射(sunglint, Specular reflection)和船舶阴影对光场的破坏,在现场船舶上的观测几何最好按一定方式设定,在数据处理中,可以用算法来实现对太阳耀斑光污染的消除.有些参数用 FieldSpec 或普通仪器很难获得,因此选择适当的观测几何,来避免太阳耀斑等光污染的大部分影响,所以现场的观测几何是相当重要的.根据 Fougne 等、Hooker 等^[3,4]多次对比试验表明,采取 $[30^\circ < \theta < 45^\circ, 90^\circ < \phi < 135^\circ]$ 观测几何,可以减小耀斑的影响(如图 1 所示).

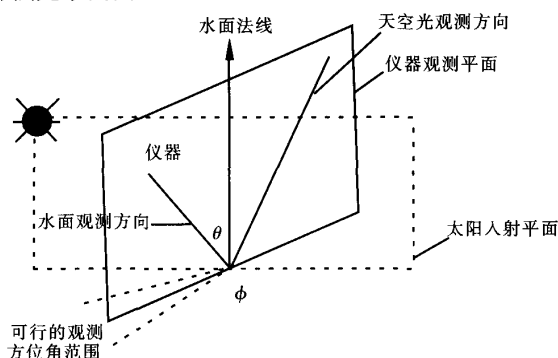


图 1 光谱仪水面以上观测几何

1.2 数据采集

采集时间和无锡市环境监测中心的常规监测同步进行,每个月初 1~5 号测量,采样点为太湖常规监测的 22 个点位(如图 2 所示).仪器距离水面约 1 m 处进行,使用 ASD 公司的 FieldSpec 地物波谱辐射计,该仪器测定的光谱范围为:282~1090 nm,512 个波段,光谱采样间隔为 1.41 nm,光谱分辨率为 3 nm,有效波段范围为 360~860 nm.每个点位测量 10 次,利用严格定标的灰板参照,测量指标为:灰板信号值(DN),遮挡太阳光灰板信号值(晴天),水体信号值,天空光信号值.同时,记录水面信息,进行风向、风速的测量,利用差分 GPS 定位.

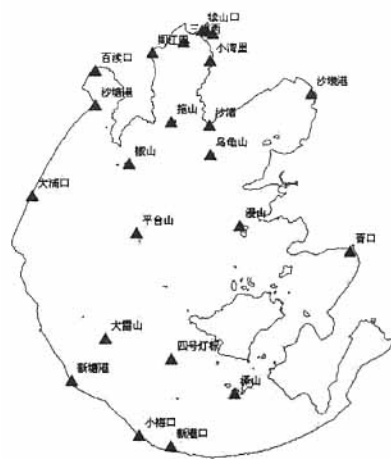


图 2 太湖监测点位图

2 两种测量方法的水体光谱特性

2.1 垂直水面测量法

一般认为,对光谱的一阶微分处理可以去除部分线性或接近线性的背景噪声光谱对目标光谱(非线性)的影响^[5],FieldSpec 光谱辐射计采集的是离散型数据,为了便于对测量结果分析,每

条反射率曲线都利用其在 400 ~ 750 nm 波段的平均反射率进行归一化,归一化的方法较多^[3,4,7],我们选用的归一化反射率计算式为^[1]:

$$R_w(\lambda_i) = \frac{L_w(\lambda_i)/L_R(\lambda_i)}{\int_{400}^{750} L_w(\lambda) d\lambda / \int_{400}^{750} L_R(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

其中 $L_w(\lambda)$ 和 $L_R(\lambda)$ 分别为对应于某一波长 λ 的水面和标准板的反射强度. 太湖水体光谱反射率呈现出典型内陆水体的特征(如图 3). 在 420 ~ 500 nm 范围内,由于叶绿素 a 在蓝紫光波段的吸收及黄色物质的强烈吸收作用,水体的反射率较低,波谱显示明显的波谷或呈肩状. 540 ~ 580 nm 范围的反射峰是由于叶绿素和胡萝卜素弱吸收和细胞的散射作用形成的,该反射峰值与色素组成有关,可以作为叶绿素定量标志之一. 由于藻青蛋白吸收峰在 624 nm 处的吸收系数较大,该波长附近出现谷值或呈肩状^[6,7]; 675 nm 附近是叶绿素 a 的又一吸收峰,因此当藻类密度较高时,水体光谱反射率曲线在该处出现谷值. 700 nm 附近反射峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特征,其存在与否通常被认为是判定水体是否含有藻类叶绿素的依据之一,反射峰的位置和高度是叶绿素 a 浓度的指示^[8].

2.2 倾斜测量法

由于需要进一步计算才能够得到相关指标^[3,4],在此,以六月份的倾斜测量法得到的数据为例进行讨论,我们以遥感反射率作为最终的计算结果,计算得到的六月份太湖各点位的遥感反射率(如图 4)总体上和五月份通过垂直测量法所得到的归一化反射率大体相近,由于反射率的计算过程不同^[3],二者直接的数值大小的比较是没有意义的. 因此,不管是哪种测量方法,都说明了太湖的光谱特征突出的显示了其藻类的存在和分布特征,并且各个测点在 700 nm 附近的反射峰普遍都很明显.

3 结果分析

3.1 垂直水面测量法数据分析

图 5 为五月份叶绿素浓度与各个波段水体归一化反射率之间 PEARSON 相关系数图,在 460 nm ~ 500 nm 相关系数最小,其中最小值在 489.3 nm,其次负相关出现在 670 nm 附近,最小在 668.1 nm,为 -0.33,相关系数最大出现在 706 nm 附近,最大在 706.1 nm,为 0.7,其次最大出现在 590 nm、642 nm 附近,这些都与内陆水体叶绿素 a 的特征相符合.

同样对于太湖水体^[3],我们采用波段比值法,选择反射峰(705 nm 附近)和吸收峰(675 nm 附近)的位置以及相关系数最大和次最小所在的波段(706 nm 和 668 nm),分别对 5 月份太湖水体波谱信息与叶绿素的线性相关关系做一分析,在剔除掉 16 测点(閘江口)的 0.209 mg/L 的异常高外,线性拟合度很好,如表 1 所示万方数据

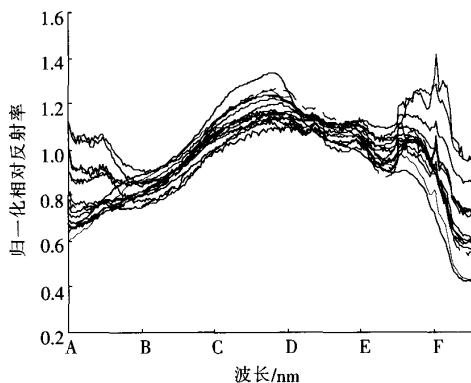


图 3 五月份垂直水面测量法所得的相对水体反射率
A 400.80300,B 464.07800,C 527.35400,
D 590.63000,E 653.90700,F 717.18300

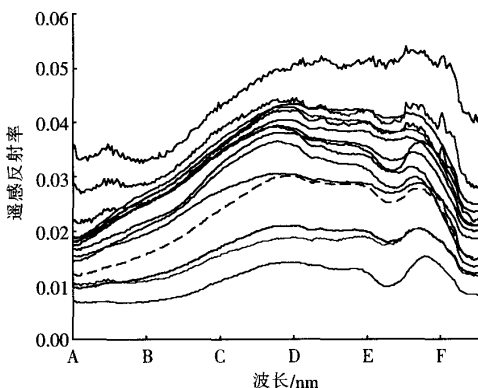


图 4 六月份遥感反射率

A 400.8026,B 464.0784,C 527.3541,
D 590.6304,E 653.9067,F 717.1831

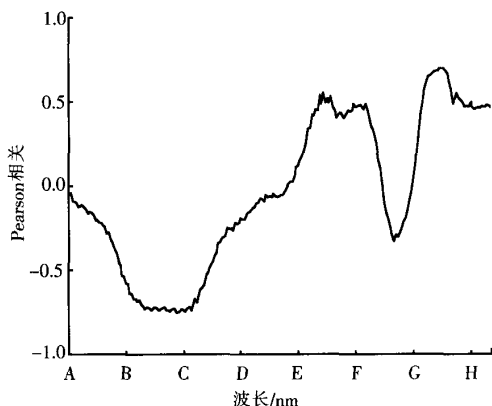


图 5 五月份藻类 chl_a 与各个波段之间 PEARSON 相关系数
A 400.80,B 448.26,C 495.72,D 543.17,
E 590.63,F 638.09,G 685.55,H 733.00

示.

表 1 5 月份波段比与 chl_a 浓度回归分析结果

垂直测量法	$Y = AX + B$	R	R^2	F	P	N
695 nm/675 nm	$Y = 0.252X - 0.248$	0.899	0.808	58.895	0.000	16
700 nm/675 nm	$Y = 0.206X - 0.198$	0.915	0.837	71.893	0.000	16
705 nm/675 nm	$Y = 0.188X - 0.174$	0.925	0.856	83.179	0.000	16
710 nm/675 nm	$Y = 0.184X - 0.161$	0.944	0.892	115.239	0.000	16
716 nm/675 nm	$Y = 0.092X - 0.066$	0.882	0.778	49.089	0.000	16
706 nm/668 nm	$Y = 0.180X - 0.164$	0.914	0.835	70.888	0.000	16

可见,在叶绿素反射峰和吸收峰所取波段进行的比值分析,和相关性分析得到的峰值、谷值取值进行比值分析,结果相差并不大.

3.2 倾斜测量法数据分析

Chl_a 浓度与计算得到遥感反射率之间 PEARSON 相关系数如图 6 所示. 相关系数变化很小,基本为负相关,不能反映与叶绿素的相关关系,可见,由于没有进行归一化处理,不能够根据遥感反射率进行与叶绿素的 PEARSON 相关分析.

同样,单波段与叶绿素的回归分析,理论上是能够进行遥感反射率和叶绿素的一元线性回归分析的,但是,我们没有能够得到有实际意义的结果. 利用波段比值法进行回归分析,其中十月份的如表 2 所示.

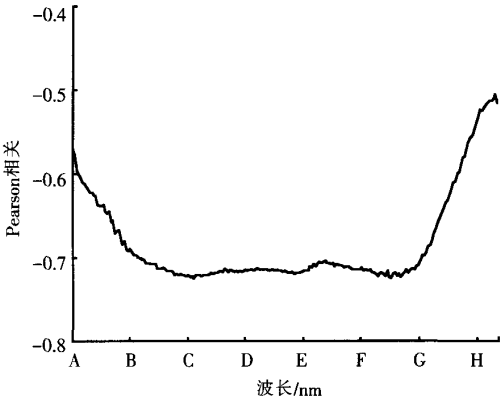


图 6 六月份 chl_a 与各波段之间 PEARSON 相关系数
A 400.80,B 448.26,C 495.72,D 543.17,
E 590.63,F 638.09,G 685.55,H 733.00

表 2 10 月份波段比与 chl 浓度回归分析结果

倾斜测量法	$Y = AX + B$	R	R^2	F	P	N
689 nm/675 nm	$Y = 0.316X - 0.32$	0.903	0.815	70.718	0.000	18
690 nm/675 nm	$Y = 0.186X - 0.185$	0.914	0.836	81.679	0.000	18
695 nm/675 nm	$Y = 0.164X - 0.161$	0.902	0.813	69.438	0.000	18
700 nm/675 nm	$Y = 0.122X - 0.115$	0.896	0.803	65.202	0.000	18
705 nm/675 nm	$Y = 0.105X - 0.092$	0.890	0.793	61.238	0.000	18
710 nm/675 nm	$Y = 0.094X - 0.74$	0.876	0.768	52.974	0.000	18

总体上,不管哪种测量方法,都能够很好的反映太湖水体藻类 chl_a 的总体情况,采取分月进行波段比和叶绿素的相关性分析,依据一元线性回归分析公式: $Y = AX + B$,月份的不同 A、B 相应变化,Y 为叶绿素浓度,X 为最佳波段比,分别就 3~10 月份进行分析,取得了很好的效果(其中:7~10 月垂直水面测量法模型和反演结果见表 3). 这种拟合度好的情况对于单月的模型是有效的,但是不一定能够精确的反演到别的月份的藻类叶绿素浓度. 分季节的模型,其藻类 chl_a 和波谱的拟合度不高,因为我们曾经利用 3~5 月份的直接测得的反射率做过分析,结果证明线性相关关系并不大,波谱异常的主要原因有:(1) 太湖湖体面积很大,入湖河流水质不一,而测点又主要入湖河口周围;(2) 测量时的外界因素如:天空光的变化,船体的影响等;(3) 当湖面风力较大,波浪周期,底泥的搅动以及水体里面的黄色物质等的影响.

4 结论

通过两种测量方法及其数据的分析,我们认为:两种测量方法所得到的波谱信息总体上相似,都能够很好的说明太湖水体藻类叶绿素的情况. 垂直水面测量法波谱信息丰富,在叶绿素吸收峰和反射峰的波段反映叶绿素信息明显好于其他波段,但波谱信息易受到外界因素的影响,仪器和标准版的严格定标,特别是标准版的定标是进行测量工作的基础. 而倾斜测量法数据相对稳定,但测量人员不好把握倾角,不可能做到各测点完全一致. 数据有效性较高,遥感反射率的线性度较好,但是其与叶绿素的 PEARSON 相关系数却不能够反映二者的关系,在叶绿素吸收峰和反射峰的各个波段与叶绿素的线性相关比较好,分月进行的叶绿素和波段比的一元线性模型比较有实际意义.

总体上,利用高光谱遥感技术进行太湖藻类监测有很好的实用性.通过光谱分析,可以客观的看出太湖的富营养化情况,比值法由于可以在一定程度上避免了悬浮物和黄色物质的影响^[3],被广泛应用到内陆水体的水质分析上面;同时证明了 700 nm 反射峰的位置和高度能够大体反映藻类叶绿素的含量.

表3 7~10月垂直水面测量法模型和反演结果及差值

点位	7 实测	7 预测	差值	8 实测	8 预测	差值	9 实测	9 预测	差值	10 实测	10 预测	差值
拖山	0.034	0.035	0.001							0.012	0.005	-0.007
椒山				0.031	0.042	0.011	0.027	0.048	0.021			
乌龟山	0.019	0.029	0.01	0.022	0.032	0.01				0.054	0.042	-0.012
漫山	0.012	0.017	0.005	0.012	0.020	0.008				0.014	0.015	0.001
平台山	0.012	0.009	-0.003	0.011	0.016	0.005	0.011	0.002	-0.009			
四号灯标				0.011	0.010	-0.001	0.017	0.012	-0.007	0.014	0.018	0.004
泽山	0.011	0.014	0.003	0.005	0.019	0.014				0.013	0.007	-0.006
大雷山	0.012	0.004	-0.008	0.013	0.026	0.013	0.016	0.016	0.000	0.016	0.028	0.012
閻江口	0.033	0.040	0.007	0.086	0.067	-0.019				0.029	0.040	0.011
百渎口	0.064	0.052	-0.008	0.156	0.180	0.024	0.124	0.115	-0.009	0.033	0.033	0.000
大浦口	0.047	0.053	0.006	0.094	0.055	-0.039				0.049	0.047	-0.002
新塘港				0.			0.018	0.015	-0.003	0.026	0.028	0.002
小梅口	0.01	0.011	0.001	0.017	0.028	0.011	0.022	0.026	0.004	0.016	0.016	0.000
新港口				0.011	0.012	0.001				0.018	0.025	0.007
沙塘港	0.042	0.045	0.0043							0.042	0.044	0.002
菱山口										0.033	0.026	-0.007
沙墩港	0.007	0.002	-0.005	0.088	0.109	0.021				0.014	0.014	0.000
胥口				0.013	0.026	0.013				0.006	-0.003	-0.009
三山西				0.105	0.056	-0.049						
沙堵	0.036	0.043	0.007	0.132	0.110	-0.22				0.013	0.021	0.008
小湾里	0.066	0.062	-0.004				0.024	0.025	0.001	0.09	0.088	0.002
五里湖	0.06	0.049	0.011	0.105	0.098	-0.007				0.087	0.082	-0.005

注:部分点位由于天气原因未测.

[参考文献]

- [1] 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, 2002, 6(1): 41—45.
- [2] Gitelson, A. Quantitative remote sensing methods for real time monitoring in land waters quality[J]. Int J Remoter Sens, 1993, 14(7): 1269—1295.
- [3] 唐军武,田国良,江小勇,等. 水体光谱测量与分析 I:水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37—44.
- [4] 汪小勇,李铜基. 双通道高光谱地物波谱仪测量水体的遥感反射率[J]. 海洋技术, 2003, 22(3): 20—24.
- [5] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [6] 李素菊,王学军. 巢湖水体悬浮物含量与光谱反射率的关系[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 66—68.
- [7] 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[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 228—234.
- [8] Gitelson, A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(17): 3367—3373.

[责任编辑:孙德泉]