

内陆水体反射波谱测量方法研究*

刘 剋

(重庆师范大学地理科学学院,重庆 400047)

摘 要 利用野外光谱仪,通过垂直水面和倾斜测量两种测量方法得到太湖9个月份的水体波谱信息,分别对这两种不同的测量方法,利用和其对应的数据处理手段和数据分析方法进行了数据精度的分析,并和常规水质取样结果结合,进一步得到比较理想的水体叶绿素与高光谱遥感的相关关系模型,并对模型精度进行了分析。结果表明,两种测量方法所得数据的质量相差不大,基于二者所测数据进行的模型分析,均达到较高的精度。

关键词 野外光谱仪 高光谱 遥感 水质

中图分类号 P407.4

文献标识码 :A

文章编号 :1672-6693(2006)04-0071-05

Study on the Measurement of Reflectance Spectrum of Inland Water

LIU Ke

(College of Geography Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract A field portable spectrum radiometer was adopted in the research, spectrum data of 9 months' water samples from Taihu were obtained by upright water surface and incline water surface measurements. The precision of data obtained was analyzed by using the corresponding datum treating method and analytical method, and combined with the routine sampling and measuring of water, a satisfactory relative model of water chlorophyll concentration and hyperspectrum remote sensing was established. It shows that there is little disparity of the qualities of data obtained from these two kinds of measurements and these two kinds of measurements both have achieved high precision.

Key words fieldspec radiometer hyperspectrum remote sensing water quality

近年来,随着地物波谱辐射技术的迅速发展,利用高光谱分辨率有可能大大提高叶绿素遥感的精度^[1],从而减小水体中其它污染物质,如无机悬浮物质和有机溶解性物质(黄色物质)光学效应的干扰,以及在一定程度上可能减小藻类及其它污染物质特性的地域性、甚至季节性的差异。在进行实测光谱时,野外波谱仪现场表观光谱的测量从方法上可分为两类^[2]:剖面测量法和水面以上测量法。在二类水体,目前唯一有效的方法是表面法。表面法中在已知的文献中大体依据测量角度和原始数据的处理方法不同可以分为两种:有一定倾角的测量方法和垂直测量法。有学者认为采用前者可以避免外界尤其是阳光耀斑的影响^[2]。后者则作为一种传统的测量法,其测量方法简单,数据处理明了。

本文主要依照这两种测量法,得到太湖9个月的波谱信息,并利用同步的无锡市环境监测中心的水质化学数据,进行水体叶绿素浓度的模型分析。测量方法的不同,测量过程中受到外界的影响程度也不同,从而关系到数据质量的好坏,直接影响到分析结果的正确性以及精度。因此,本文讨论的重点是,利用两种测量法所得的数据,分别进行叶绿素的模型研究,进而得到两种测量法在数据测量、处理和模型分析中的精度差异,同时探讨外界的影响所造成的数据精度问题。

1 观测几何与测量方法

1.1 观测几何及原理

由于针对野外波谱仪的表面测量法在水色遥感

* 收稿日期 2006-04-19 修回日期 2006-08-15

资助项目:重庆师范大学青年基金(No. 06XLQ004)

作者简介:刘剋(1974-)男,河南周口人,讲师,硕士,研究方向为高光谱遥感。

测量方面存在争议^[1,2]。笔者在太湖的 3~10 月份采取垂直水体测量法和与水面法线有一定倾角的通过计算得到相关指标的方法。唐军武等认为^[2] :利用光谱辐射计进行水面以上光谱测量(Above-Water Measurement)与分析方法,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,为避开阳光直射反射(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是按以下方式设定(以下角度都是以光线矢量的走向为依据):在数据处理中,可以用算法来实现对阳光耀斑的消除。有些参数用 FieldSpec 或普通仪器很难获得。采用选择适当的观测几何,来避免阳光耀斑等的大部分影响。所以现场的观测几何是相当重要的。根据 Fournie (1999 年)、Hooker (2000 年)^[2,6,8] 等人多次比对试验表,采取 $30^\circ < \theta < 45^\circ$, $90^\circ < \varphi < 135^\circ$ 观测几何,可以减小耀斑的影响(见图 1)。

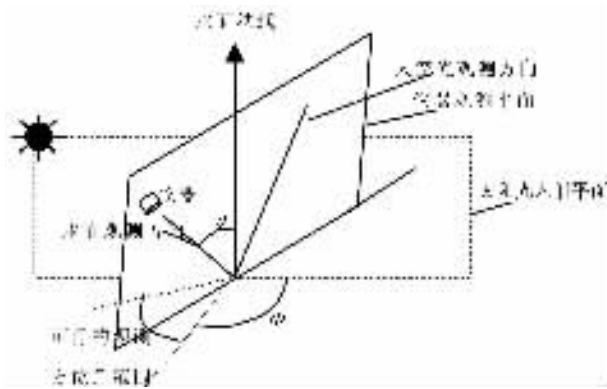


图 1 水体光谱观测几何

而尹球等^[1]则采用垂直测量法,直接使观测几何为水面法线的正相反方向进行,这样测量的过程不需要考虑倾斜角度的问题,主要是通过对数据的处理来消除和减弱误差。

1.2 数据采集

数据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 21 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 地物光谱辐射计,该仪器测定的光谱范围为 282~1 090 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。垂直测量法,每个点位测量 10 次,积分时间取 136 ms,而有一定倾角的测量方法每个点也测量 10 次,积分时间取 136 ms,利用严格定标的灰板参照,测量指标

为灰板信号码值(DN),遮挡阳光灰板信号码值(晴天),水体信号码值,天空光信号码值。同时,记录水面信息如浪高等,进行风向、风速的测量,利用差分 GPS 定位。

在实际的测量过程中,不管采用哪种方法,都要尽量避免现场环境的影响,如船体等,一般选取船体的向阳面,尽量绕开船体波纹的影响,同时不要让船体影响水体的自然状况,如果有条件可以利用长竿使仪器远离船体。

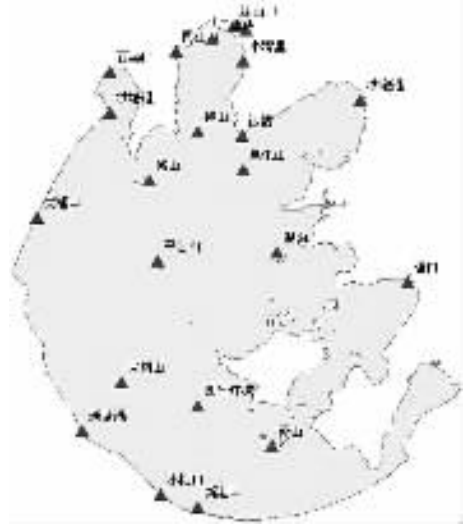


图 2 太湖水体监测点位图

2 两种测量方法的数据预处理

2.1 垂直水体测量法

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^[3],FieldSpec 光谱辐射计采集的是离散型数据,为了便于对不同测量结果进行比较,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^[1,5,6],笔者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 所示)。在 420~500 nm 范围内,由于 Chl_a 在蓝紫光波段的吸收峰及黄色物质的强烈吸收作用,水体的反射率较低,也未出现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 ;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^[5] ;675 nm 附近是 Chl_a 的又一吸收峰 ,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 Chl_a 浓度的指示^[7]。同时 ,也有学者直接测量基于标准反射板的相对反射率 ,而利用其他方法进行数据的归一化处理^[4,5]。

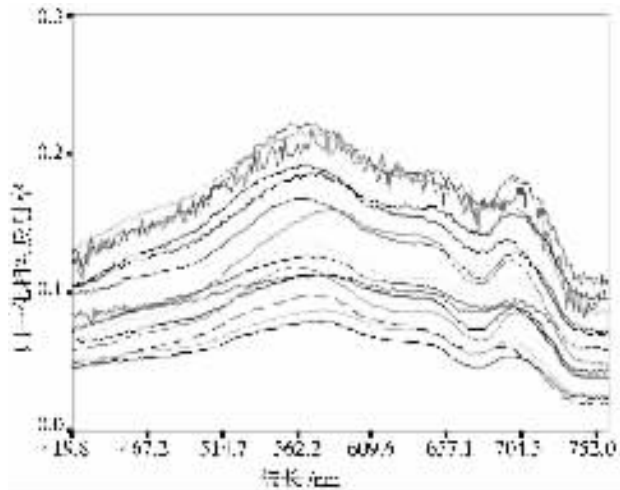


图 3 垂直水面测量法所得的 10 月份相对水体反射率

2.2 有一定倾角的测量法

由于需要进一步计算才能够得到相关指标 ,在此 ,以 10 月份的采用有一定倾角的测量法得到的数据为例进行讨论。下面对该方法所需要用到的一些参数作一说明。

在避开阳光直射反射、忽略或避开水面泡沫的情况下 ,光谱辐射计测量的水体光谱数据为^[2,6]

$$L_{sw} = L_w + rL_{sky} \quad (2)$$

其中 L_w 为离水辐射亮度 ; L_{sky} 天空漫散射光 ; r 为气水界面对天空光的反射率 ,其取值存在一定争议 ,平静水面可取 $r = 0.022$,在 5 m/s 左右风速的情况下 , $r = 0.025$,在 10 m/s 左右风速的情况下 r 可取 0.026 ~ 0.028。

归一化离水辐射率定义为

$$L_{w/N} = F_0 L_w / E_d(0^+) \quad (3)$$

其中 F_0 为平均大气层外阳光辐照度(Necker & Labs, 1984) ; $E_d(0^+)$ 是水表面上总的入射辐照度。 $E_d(0^+)$ 由测量标准板(Plaque)的反射而得 ,即

$$E_d(0^+) = E_s = L_p \pi / \rho_p \quad (4)$$

对于未经严格标定的光谱仪 ,可以直接按下列公式

进行测量(计算) 遥感反射率

$$R_{rs} = (S_{sw} - rS_{sky}) \rho_p / \pi S_p \quad (5)$$

其中 S_{sw} 、 S_{sky} 、 S_p 分别为光谱辐射计面向水体、天空和标准板时的测量信号码值(DN)。

通过上述计算得到的 10 月份太湖各点位的遥感反射率如图 4 所示 :总体上和同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 ,故直接对二者的数值大小进行比较是没有意义的 ,不过 ,遥感反射率更接近于实际的水体的发射率 ,而归一化的水体反射率则是完全的相对值。在 420 ~ 500 nm 范围内 ,水体的反射率较低 ,呈轻微的波谷状 ;540 ~ 580 nm 的反射峰普遍存在 ;675 nm 附近出现谷值说明了 Chl_a 的又一吸收峰的出现 ;700 nm 附近的反射峰由于 675 nm 附近的谷值的衬托凸现了含藻类水体最显著的光谱特征。不管是哪种测量方法 ,都说明了太湖作为二类水体 ,其光谱特征突出地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 ,位置偏后。

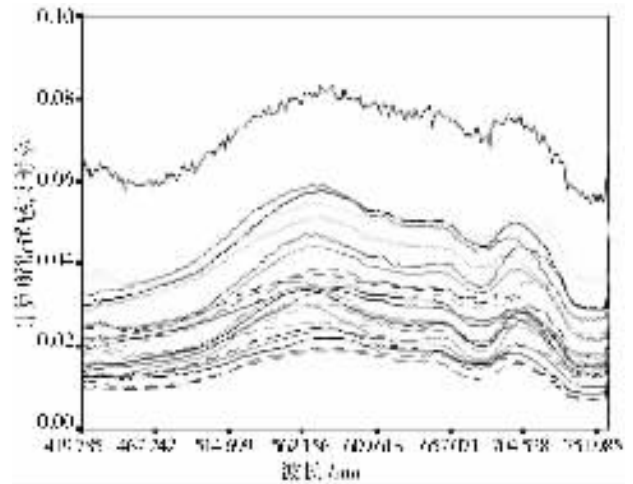


图 4 10 月份遥感反射率

2.3 二者精度的比较

需要说明的是 ,在实际测量过程中 ,如果有意识地把测量的角度适当变动(当然 ,应避免阳光直接反射入探头 ,从垂直方向到与水体法线呈 45° 范围) ,光谱曲线的线条性状的变化以整体的上下波动为主 ,但其波动很小 ,远远小于由于波浪的影响所造成的上下波动 ,但从这一点上面来看 ,垂直测量和有倾角的测量方法即使存在精度上的差别 ,也远小于环境的影响所造成的误差 ,这也和上面的二者预处理数据的差别有一定的吻合。也就是 ,采集数据精度的关键在于尽量避免和消除外在环境的影响。因此 ,有学者认为 ,在上午 10 点到下午 2 点 ,接近无风

的晴天测量结果比较好,这一点在笔者进行的实际测量过程中也得到印证,一般这个时间数据线性度较好,光谱曲线较平滑,数据精度较高,利于分析,下面的数据模型分析中会提及这一点。

3 两种测量方法的模型分析

太湖是一个大型浅水湖泊,水面面积 2 338 km²,平均水深 1.9 m,湖底平坦,风浪较大,容易导致底泥悬浮^[9]。鉴于上述情况,笔者认为:如果要进行太湖水体叶绿素(主要是水体叶绿素)的一元线性回归分析,以及模型的进一步建立,就要在时间和地域尺度上把所测的数据分开处理。

笔者分别利用3~10月份的数据进行了全年统一模型分析和分季度模型分析,都不能得到理想的结果。为了更好地比较两种测量法的数据差异,笔者分月采用 $Y = AX + B$ 的模型形式, A 、 B 依据月份的不同进行调整,模型中的 X 为不同波长比, Y 为叶绿素浓度。在实际的分析过程中,依据 700 nm 附近反射峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特征,反射

峰的位置和高度是 Chl_a 浓度的指示^[7];同时根据 700 nm 附近的反射峰和 680 nm 附近的吸收峰的位置,确定波谷和波峰的比值;另外,在个别月份,利用不同波段的 700 nm 附近的反射峰最大值和 680 nm 附近的吸收峰最小值进行对比。结果发现:分别利用 685 nm/675 nm、690 nm/675 nm、695 nm/675 nm、697 nm/675 nm、700 nm/675 nm、701 nm/675 nm、703 nm/675 nm、705 nm/675 nm、710 nm/675 nm、714 nm/675 nm、716 nm/675 nm 波段比和 Chl_a 的模型进行分析,在叶绿素浓度不高的月份选取低于 700 nm 波段作为分子进行比较,一般选取在 695 nm 左右作为分子进行比较;浓度较高的月份,如 8、9 月份,选取 710 nm 附近波段作为分子进行比较,能够得到理想的结果。这个结论也证明了:如果选取吸收峰和反射峰接近的波段比进行模型分析,能够得到很好的效果。但是,有一点必须说明,如果直接选取每个波段的吸收峰和反射峰的最小最大值进行比较,其精度并不会提高。下表1所示为10月份两种测量法所得的模型分析结果,可以证明上述说法。

表1 10月份两种测量法所得的模型分析结果

有一定倾角测量数据/nm	$Y = AX + B$	R	F	P	N
689/675	$Y = 0.316X - 0.32$	0.903	70.718	0.000	18
690/675	$Y = 0.186X - 0.185$	0.914	81.679	0.000	18
695/675	$Y = 0.164X - 0.161$	0.902	69.438	0.000	18
700/675	$Y = 0.122X - 0.115$	0.896	65.202	0.000	18
705/675	$Y = 0.105X - 0.092$	0.890	61.238	0.000	18
710/675	$Y = 0.094X - 0.74$	0.876	52.974	0.000	18
716/675	$Y = 0.092X - 0.066$	0.864	46.920	0.000	18
垂直测量数据/nm	$Y = AX + B$	R	F	P	N
686/675	$Y = 0.588X - 0.576$	0.851	44.742	0.000	19
690/675	$Y = 0.314X - 0.311$	0.962	209.900	0.000	19
695/675	$Y = 0.185X - 0.180$	0.956	181.486	0.000	19
700/675	$Y = 0.138X - 0.127$	0.953	166.728	0.000	19
705/675	$Y = 0.116X - 0.101$	0.945	141.004	0.000	19
711/675	$Y = 0.110X - 0.087$	0.931	110.098	0.000	19
716/675	$Y = 0.103X - 0.073$	0.876	55.892	0.000	19

同样,对其它月份数据做相同处理,得出结论:垂直测量法在此类模型分析中数据精度比有一定倾角的测量法高,二者在此类分析中有相同的变化趋势,也就是在同一时期,通过两种测量方法所得到的数据,模型精度最高点的波段比是接近相同的。

4 结论

对于两种测量法所得到的数据,在波谱曲线上,都能够证实 700 nm 反射峰的位置和相对高度是叶

绿素浓度的反映。

在数据测量的过程中,外界环境的影响大于测量倾角变化所造成的影响,尽量避免外界环境的影响是数据测量过程中首要注意的问题。选择在晴天、无风的上午 10 点到下午 2 点进行测量,数据精度较高,波谱曲线平滑性好。

利用测量数据和水质化学分析数据中的 Chl_a 进行一元线性回归分析,结果表明:利用 680 nm 附近吸收峰和 700 nm 附近反射峰附近的波段比,能够

得到较为精确的模型^[10]。垂直测量法所得数据精度稍大于有一定倾角的测量法所得数据。但是,需要指出的是:本次分析主要利用有一定倾角测量所得的数据,在仪器未进行严格定标的情况下,进而计算遥感反射率,再利用遥感反射率进行分析,而利用原始数据进行离水辐射率计算,再进一步得到遥感反射率的算法可能会使精度有一定的提高。另外,基于遗传算法和人工神经网络的数据分析,可能会有更准确的数据精度分析结果,笔者会在下一步的研究中给予重视。

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 4(1):41-45.
- [2] 唐军武,田国良. 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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(3):228-234.
- [6] 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.
- [7] GITELSON A. The Peak near 700nm on Radiance Spectra of Algae and Water: Relationships of its Magnitude and Position with Chlorophyll Concentration[J]. International Journal of Remote Sensing,1992,13:3367-3373.
- [8] HOOKER S B, ZIBORDI G, GLAZIN, et al. The Sea BOARR-98 Field Campaign[R]. NASA:Sea WiFS Postlaunch Technical Reports Series,1999.
- [9] 蔡启铭. 太湖环境生态研究(一)[M]. 北京:气象出版社,1998.
- [10] 刘剡. 内陆水体反射光谱数据处理方法研究[J]. 重庆师范大学学报(增刊) 2006 23:57-61.

(责任编辑 游中胜)