

基于 Hyperion 数据的太湖水体叶绿素 a 浓度遥感估算*

闻建光¹, 肖青^{1,2}, 杨一鹏³, 柳钦火¹, 周艺¹

(1:中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室,北京 100101)

(2:核工业北京地质研究院遥感重点实验室,北京 100029)

(3:中国环境监测总站,北京 100029)

摘要:通过对 2004 年 8 月 19 日太湖 Hyperion 高光谱遥感数据的处理和分析,文章首先采用比值和一阶微分处理技术进行了叶绿素 a 浓度的估算. 为了弥补此两种方法在模型的适用性和通用性方面的不足,本文尝试了利用混合光谱分析模型进行太湖水体叶绿素 a 浓度的提取和成图. 实验结果说明高光谱遥感数据 Hyperion 可以进行水体叶绿素 a 浓度的监测,并且作为高光谱处理技术之一的混合光谱分析技术是水体叶绿素 a 浓度估算的另一条佳径.

关键词:高光谱;Hyperion 数据;水质遥感;混合光谱分析;太湖

Remote sensing estimation of aquatic chlorophyll-a concentration based on Hyperion data in Lake Taihu

WEN Jianguang^{1,2}, XIAO Qing^{1,2}, YANG Yipeng³, LIU Qinhuo¹ & ZHOU Yi¹

(1:State Key Lab of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, P. R. China)

(2:Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, P. R. China)

(3:China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100029, P. R. China)

Abstract: Processed and analyzed the hyperspectral data - Hyperion on August 19th 2004, we estimated chlorophyll-a concentration using ratio and differential coefficient method in Lake Taihu. But these two models' applicability confined in single area and single phase. In this paper we used mixing spectral analysis model for extracting chlorophyll-a concentration and mapping the distribution of chlorophyll-a concentration. The result shows that the new style of remote sensing data Hyperion can be used for monitoring chlorophyll-a concentration, and that mixing spectral analysis is an optimal method for estimating water chlorophyll-a concentration.

Keywords: Hyperspectrum; Hyperion data; remote sensing of water quality; mixing spectral analysis; Lake Taihu

高光谱遥感技术的到来,对水质遥感监测的发展起了至关重要的作用,提高了水质遥感的定量化水平,使水质遥感监测从定性发展到了定量研究的阶段. 由于高光谱传感器获得的成像光谱影像,具有图谱合一的特征,即影像中每个像元既包含了确定地物成分的精细光谱信息,又蕴涵描述地物空间属性的精确的几何信息^[1],因此可以利用高光谱影像直接进行水质遥感参数的识别并圈定其空间分布范围.

在水质监测领域,已有很多学者利用遥感的方法进行了研究. 但大多数研究中主要是采用多波段遥感数据(如 Landsat/MSS/TM, SPOT/HRV, IRS-1C/LISS-III、SeaWiFS、MODIS 以及中巴资源卫星等)^[2-5],航空高光谱遥感数据(如 AVIRIS、CASI、AISA、HYMAP 以及中国的 OMIS 等)^[6-9]以及地面测量高光谱数据等^[10-12]. 对于多波段遥感数据由于波谱分辨率不够,航空高光谱数据由于监测范围窄,地面测量高光谱数据由于缺乏空间面分布特性,都未在水体叶绿素 a 浓度遥感估算中得到很好的应用. 同时对于卫星高光谱

* 中国科学院知识创新工程主要方向性项目(KZCX3-SW-334及KZCX3-SW-338)资助. 2005-08-10收稿; 2005-11-06收修改稿. 闻建光,男,1978年生,博士研究生;E-mail: horse_wjg@sina.com.

遥感数据(Hyperion)内陆水体叶绿素 a 浓度的遥感估算中的应用在国内外也尚未见到. 另外水质反演的方法又有多种,一些研究根据水体色调的不同对水质状况进行定性分类、分级^[13,14],更为常见的水质反演方法为经验统计法,即直接建立水质指标同遥感信息之间的统计关系,对水质指标进行估算^[10,11,15],还有一些研究基于神经网络^[16],建立遥感信息同实测数据间的响应关系. 但缺乏具有理论物理意义的分析方法方面的研究.

Hyperion 卫星遥感数据是目前唯一在轨的高空间与高光谱分辨率的高光谱成像仪. 可广泛应用于地质调查与找矿、土壤退化与动态监测、精准农业和森林防护以及水资源监测等方面. 本文将采用太湖 Hyperion 卫星遥感数据建立太湖水体叶绿素 a 浓度的遥感定量模型,在经验回归分析的基础上,采用了混合光谱分析的方法进行叶绿素 a 浓度的估算,并绘制太湖水体叶绿素 a 浓度分布图.

1 Hyperion 遥感数据及其对实验区的覆盖

Hyperion 高光谱成像仪是美国 NASA 研制的新一代卫星遥感传感器,于 2000 年 11 月,由 Earth Observing-1 (EO-1) 地球观测卫星搭载升空. 太阳同步轨道,轨道高度 705 km,倾角 98.7°. 主要是为了接替 Landsat7 而研制的,因此其轨道设置几乎与 Landsat 7 相同,两个传感器对同一地区的成像仅相差 1min. 其主要的技术参数如表 1 所示.

表 1 Landsat7 和 Hyperion 数据主要技术参数
Tab. 1 Major technological parameters of Landsat 7 and Hyperion

参数	Landsat 7	Hyperion
光谱范围	400 - 2400 nm	400—2500 nm
光谱分辨率	变化的,随通道不同有异	10 nm
幅宽	185 km	7.6 km
空间分辨率	30 m	30 m
光谱覆盖方式	离散	连续
波段数	7	220

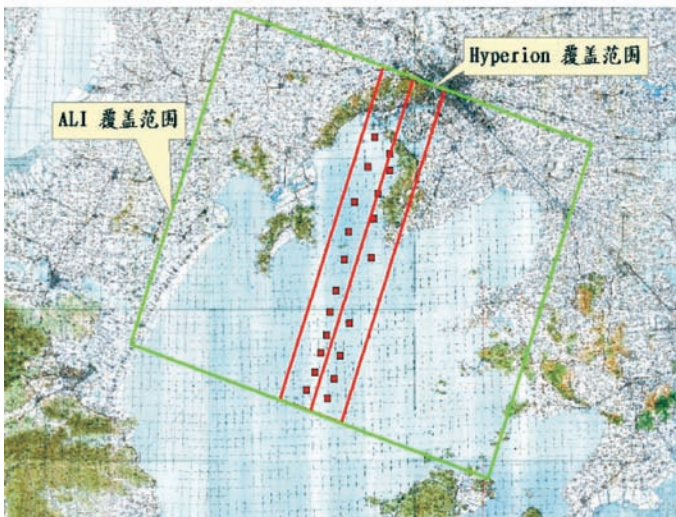


图 1 Hyperion 高光谱数据在太湖的覆盖范围

Fig. 1 Cover area of Hyperion data in Lake Taihu

本文研究的实验区为太湖,太湖地处长江三角洲,面积 36900 km²,为流域第一大湖,又是长江中下游五

大淡水湖之一(30°55'40" - 31°32'58"N, 119°52'32" - 120°36'10"E), 水面面积为 2338.1 km²[17]. 整个流域涉及上海市、江苏省、浙江省等省市. 太湖地区经济发达,人口密集. 在经济高速发展的同时,在资源、环境等方面也付出了巨大的代价,造成了生态系统的严重破坏和环境质量的下降,尤其是人类活动给太湖造成的水质污染,产生了水质性资源短缺及太湖生态环境的严重破坏. 许多学者利用遥感数据对太湖的水污染进行了研究:余丰宁等利用 1992 年 7 月 25 日的 TM 数据和当日的(准)同步湖泊多点观测资料,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[15]. 疏小舟等利用 1997 和 1998 年实测的高光谱数据利用波段 705 和 675 nm 的反射率的比值和叶绿素在 700 nm 附近的反射峰进行了叶绿素浓度的提取[10]. 还有一些学者也做了相关的研究分析[9,18,19]. 本文以 Hyperion 数据为基础数据,获取时间在 2004 年 8 月 19 日上午 10 点,其覆盖范围如图 1 所示. 同时以中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖站为技术依托,在卫星过境时间的当天,组织人员、船只,采集采样区选定采样点位的太湖表层水样(图 1),为了试验的需要航线附近还追加了一些采样点(在图中尚未表示),并记录采样点现场相关数据,采集的水样在实验室进行相关水化学参数分析(表 2).

表 2 太湖水体光场特性(部分)
Tab.2 Water optical properties in Taihu (part)

采样序号	透明度 (cm)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	Chl. a (μg/L)	TOC (mg/L)
1	18	94.2	1.07	0.17	5.51	18.49	11.24
2	18	97.3	2.76	0.36	7.94	97.65	9.52
3	15	92.1	2.62	0.35	7.30	87.89	9.41
4	13	105.8	2.16	0.40	7.35	97.04	8.69
5	15	134.8	2.53	0.38	7.60	89.84	8.61
6	18	117.6	1.69	0.35	7.02	65.62	7.93
7	12	120.9	1.58	0.27	6.62	67.21	7.70
8	12	112.7	1.53	0.25	6.25	66.40	8.24
9	18	87.9	2.40	0.31	7.51	52.59	9.06
10	18	110.9	1.50	0.21	6.03	35.15	7.49
11	14	125.5	1.20	0.22	5.73	37.11	7.41
12	26	102.9	1.26	0.09	4.11	23.4	46.53
13	28	97.9	1.83	0.10	3.77	19.53	6.29
14	23	127.2	1.26	0.11	3.88	7.81	6.51
15	24	129.5	1.33	0.14	3.87	11.72	7.02
16	26	114.9	1.16	0.25	6.54	54.68	7.31
17	23	130.9	2.07	0.32	7.63	76.17	7.09
18	24	116.3	2.04	0.31	7.63	60.54	7.98
19	24	108.5	2.08	0.30	7.74	89.84	7.61
20	16	190.2	1.58	0.23	6.59	39.62	6.86
21	22	110.2	1.23	0.17	5.29	25.39	7.59
22	29	85.8	1.18	0.14	5.30	29.30	7.45
23	27	73.1	1.28	0.11	3.99	23.44	6.66
24	29	86.7	1.23	0.11	3.93	17.58	6.67
25	28	96.2	1.11	0.11	3.94	17.58	6.41
26	27	91.9	0.75	0.12	4.07	11.72	6.70
27	24	119.6	1.17	0.11	4.20	17.58	6.50
28	24	134.7	1.95	0.18	4.07	11.72	6.23
29	27	133.1	1.42	0.14	4.01	9.76	6.52
30	24	121.4	1.25	0.15	3.93	13.67	5.91
31	28	100.6	0.73	0.13	4.26	9.77	6.95
32	27	88.1	1.08	0.14	4.66	23.44	6.65
33	25	96.9	1.00	0.15	5.43	41.01	7.38

2 Hyperion 数据的预处理

首先对 Hyperion 数据做预处理,将灰度值转换为水体的反射率. 所用的数据是 Hyperion 发射三年后获取的,由于传感器性能的衰减,其辐射定标系数已经不是很准确. 并且由于 Hyperion 数据的信噪比只有 50 上下,对于水体而言更低,因此利用 ACORNH 和 ATREM 等自动大气校正程序,以及利用 modtran 结合大气参数进行计算,效果都不是很理想,有时还会引入新的误差. 鉴于 Hyperion 成像光谱数据的质量和其它辅助数据条件的限制,采用基于图像统计信息的经验线性回归模型^[20]来实现大气校正(图 2). 由于原方法主要是针对陆地的,基本上将水体作为暗目标来处理,因此得到的水体反射率不是很准确. 我们将原来的方法加以改进,引入了实测的水体反射率. 公式如下

$$\rho(\lambda) = \frac{\rho_{\text{high}} - \rho_{\text{low}}}{L_{\text{high}} - L_{\text{low}}} \times L_s(\lambda) + \frac{L_{\text{high}}\rho_{\text{low}} - L_{\text{low}}\rho_{\text{high}}}{L_{\text{high}} - L_{\text{low}}}$$

其中, $\rho(\lambda)$ 是水体反射率, L_s 是传感器瞳孔处的辐射亮度, ρ_{low} 和 ρ_{high} 分别为图像中已知的最低和最高的反射率目标的反射率, L_{low} 和 L_{high} 是图像分别对应 ρ_{low} 和 ρ_{high} 统计出来的最小和最大辐射亮度值. 此种大气校正的方法,变量较为简单,但可以很好地消除大气辐射的影响. 缺点是式中变量要求有均一目标的反射率以及需要从图像中获取均一目标物的辐射亮度. 因此要有野外实地的测量数据,同时对图像空间分辨率也有一定的要求. 利用水体在红外波段低反射率的特性,进行水陆分离,提取 Hyperion 高光谱遥感数据所覆盖的水域. 经过大气校正和水陆分离处理后得到的是具有地表相对反射率的遥感图像. 同时还采用多项式进行了 Hyperion 数据的几何纠正,其精度控制在 0.5 个像元之内.

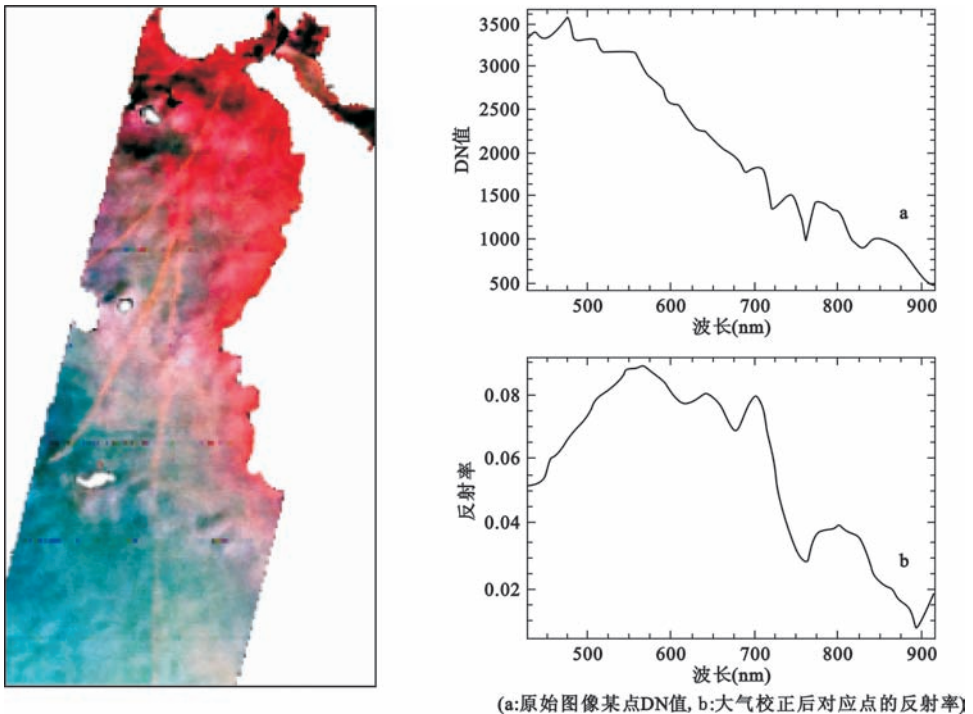


图 2 Hyperion 数据预处理结果

(a: 原始图像某点 DN 值; b: 大气校正后对应点的反射率)

Fig. 2 Pre-processed result of Hyperion data

(A: Radiance of one point in original data; B: Reflectance of one point in atmosphere corrected data)

3 基于 Hyperion 数据的水体叶绿素 a 遥感监测

由于水体本身是一种微弱的信息,而且其反射率在长波波段(大于 1000 nm)极低,因此本文选择了 Hyperion 遥感数据的可见光和近红外共 49 个波段进行处理,首先对该图像数据进行最小噪声滤波(MNF),纯像元指数(PPI)分析,N 维可视化,最后进行光谱分类和识别. 图 3 显示了从中提取的几种纯净像元光谱曲线. 从图中我们可以发现:太湖水体的光谱反射率呈现典型的内陆水体光谱特征. 符合富营养化水体反射率光谱曲线特征,在 750 nm 之前,反射率曲线表现出三个明显的反射峰和两个吸收谷,依照叶绿素 a 有效反应的特征波段,可以找到 665-710 nm,即藻类叶绿素的吸收峰区和反射峰区为藻类叶绿素指示最明显的特征光谱波段^[12].

3.1 经验的比值模型

单波段较难全面地反映叶绿素 a 浓度的分布情况,但在一些特征波段,隐约能指示叶绿素 a 浓度的高低分布,如反射峰的位置和反射率的高低与叶绿素 a 浓度有一定的关系. 波段比值能够突出一些吸收和反射的波谱特征,对减少外界的因素干扰有利^[1],据前人研究成果,近红外波段的反射峰和红光波段的吸收谷比值与叶绿素 a 浓度之间有一定的关系^[12,15]. 选择了近红外和红光波段的反射率比值,对应图像上的 701.55 nm 和 681.21 nm. 利用实验室分析的化学成分结果,选择地面有效的 33 个测量点,作为回归方程系数的求解,然后利用此式进行叶绿素 a 浓度的估算,估算式子为:

$$Chl. a(mg/L) = 0.325 \frac{R(701.55nm)}{R(681.21nm)} - 0.311$$

此式的决定系数是 0.325 和 -0.311,将叶绿素 a 浓度的估算结果与实验室分析结果作图分析(如图 4),横坐标为比值分析结果,纵坐标为实验室分析结果,理想的结果是两者数据相等,即图像中的点应集中分布在 $Y = X$ 直线上,若偏离此直线较远则说明存在较大的区别,说明估算结果不理想. 图 4 显示了两组数据的对比,直线为 $Y = 0.9593X$,两种结果的相关系数为 0.9367,均方根误差为 0.00523 mg/L. 比值估算叶绿素 a 浓度结果分布如图 5.

3.2 一阶微分数据用于叶绿素 a 浓度估算

对原始数据进行一阶微分处理,可以去掉部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱的影响,对于离散型遥感图像数据,采用下式进行计算^[1].

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

式中: $\lambda_{i+1}, \lambda_i, \lambda_{i-1}$ 为相邻波段波长, $R(\lambda_i)$ 为波段 λ_i 的一阶微分反射光谱, $R(\lambda_{i+1})$ 和 $R(\lambda_{i-1})$ 是原始图像波长分别为 λ_{i+1} 和 λ_{i-1} 的反射光谱值.

计算结果与实地采样的点叶绿素 a 浓度之间的相关系数如图 6 所示. 正相关系数最大值出现在 701.55 nm 波段,其相关系数为 0.9344,利用此波段进行叶绿素 a 浓度的估算,其估算式为:

$$Chl. a(mg/L) = 0.058R'(701.55nm) + 0.0704$$

$R'(701.55)$ 为该波段处的一阶微分值,0.0587 和 0.0704 是此式的决定系数. 利用此式估算的叶绿素 a

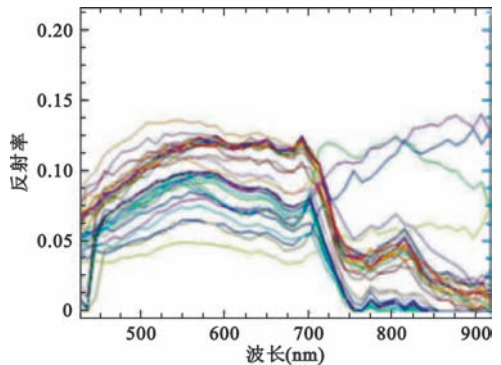


图 3 Hyperion 数据提取的纯净像元反射率曲线
Fig. 3 Pure pixel reflectance curves gained from Hyperion data

图 4 比值分析结果与实验室分析结果
叶绿素 a 浓度对比

Fig. 4 Comparison of Chl. a concentration between ratio analysis and lab analysis result

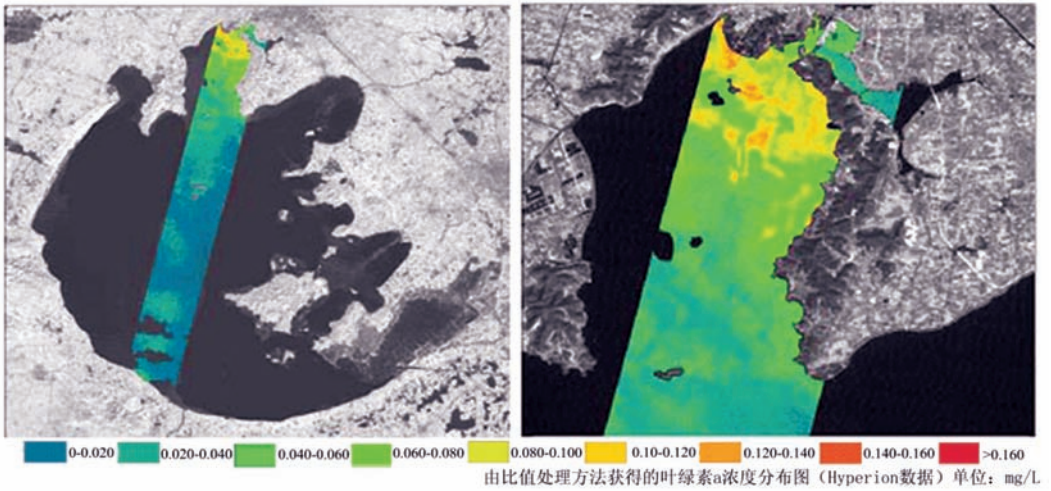


图5 太湖及梅梁弯叶绿素 a 浓度比值分析结果

Fig. 5 Chl. a concentration in taihu and meiliangwan areas based on ratio analysis results

浓度与实验室分析结果的相关系数为 0.9615, 图6 显示了两组数据的对比, 图中直线为 $Y=0.9762X$, 均方根误差为 0.00454 mg/L. 一阶微分估算叶绿素 a 浓度结果分布如图7.

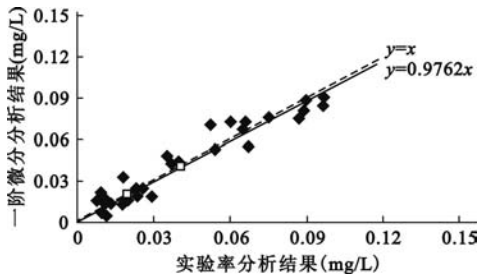


图6 微分分析结果与实验室分析结果
叶绿素 a 浓度对比

Fig. 6 Comparison of Chl. a concentration between
differential coefficient and lab analysis result

可见对原始遥感数据一阶微分后进行叶绿素 a 浓度的估算结果精度要高于比值的估算结果, 其原因是一阶微分可以部分消除大气吸收和散射的影响, 降低了噪声. 同时一阶微分结果突出了地物的波谱特征, 较大相关系数出现在类似于植被“红边”位置, 符合富含叶绿素 a 的水体波谱特征, 与理论分析相符.

3.3 混合光谱分析模型

传统的比值和微分方法进行的叶绿素 a 浓度的估算只能是针对单一的环境和时间进行的, 受地域和时间的影响很大, 对模型的适用性和通用性提出了挑战. 本文引用了地质行业应用较为成熟的混合光谱分析模型, 尝试在水环境领域中的应用.

瞬时视场角内水面像元的辐射强度受各水质参数的端元组分辐射强度的影响, 依据非相干光的辐射强度可加性^[21], 水面像元的辐射强度应该是各水质参数的端元组分的辐射强度之和, 通过求解, 可以确定每类端元组分所占比率 (或称为丰度). 如果一个像元内只包含一种水质参数组分, 则称这个像元为端元像元 (端元组分). 设反射率是线性可加的, 得到模型如下:

$$\begin{cases} R_i = \sum f_k r_{ki} + \xi_i \\ \sum f_k = 1, 0 \leq f_k \leq 1 \\ RMS = \left[\sum (\xi_i)^2 / N \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases}$$

其中: R_i 为第 i 波段的水体光谱反射率; f_k 为对应第 k 个水质参数组分光谱所占的分量值; r_{ki} 为第 k 个水质参数组分所在第 i 波段的光谱反射率; ξ_i 为第 i 波段对应的误差值. $RMSE$ 是均方根误差, N 是用于模型反演的采样点数.

太湖水质的分析结果显示^[17], 对于 8 月份测量的水体反射率光谱, 藻类叶绿素 a 是主要的影响因素.

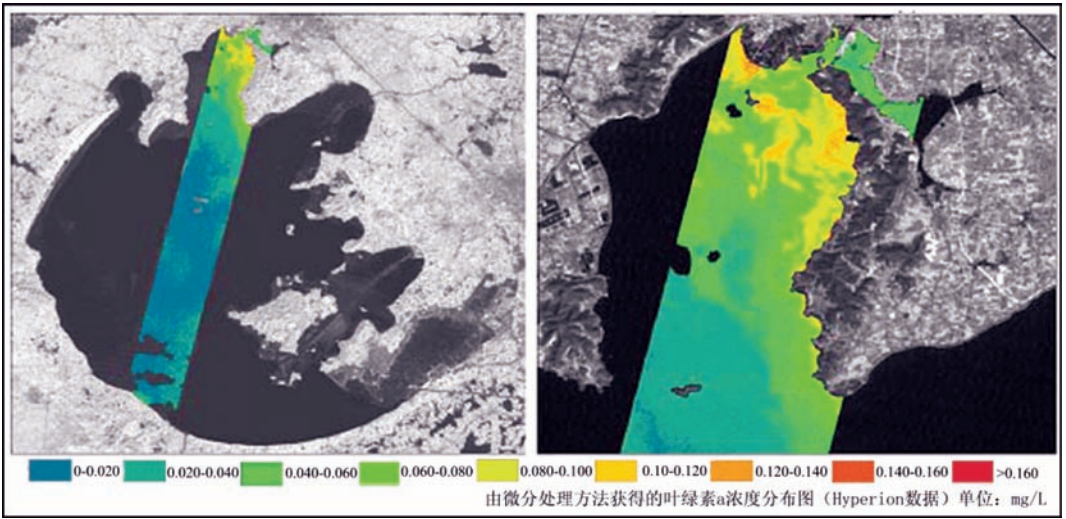


图 7 太湖及梅梁弯叶绿素 a 浓度微分分析结果

Fig. 7 Chl. a concentration in taihu and meiliangwan areas based on analysis results

另外,混合光谱分析模型用于太湖叶绿素 a 浓度提取还基于如下约束:(1)对于 SS、CODMn、TN、TP 等水质参数,在藻类特征波段对水体反射率的贡献相对较少(表 2),分布要求均一且各参数间无相互作用。(2)考虑的是水表面反射率,且各光子能量只与水表面唯一一种水质参数作用进入传感器。因此,我们主要考虑的两种端元是:水和叶绿素 a。

如何选取以上两种端元地物对问题的求解至关重要,端元光谱的选取目前有多种方法^[22-25]。鉴于我们持有的实验区数据,这里采用经验数据与图像数据结合的办法选取了水体和叶绿素 a 的端元光谱:对于水体,通过纯净像元的提取,获得了图像中叶绿素 a 浓度极低的像元为水体端元像元,获得水体的端元组分反射率曲线;对于叶绿素 a,由于 Hyperion 所覆盖的实验区没有高浓度的叶绿素 a 存在区域,则直接利用以往实地测量的高浓度(0.23059mg/L)的叶绿素 a 区域的反射率作为叶绿素 a 的端元反射率曲线,图 8 显示了两种端元组分的反射率。

由于受大气影响,未采用全部波段来进行模型的求解,而是采用能指示叶绿素 a 浓度,而又受悬浮物,黄色物质等杂质影响很小的特征波段 681.20 nm,691.37 nm,701.55 nm 三个波段进行模型的求解,求解结果的果叶绿素 a 和水丰度见表 3。

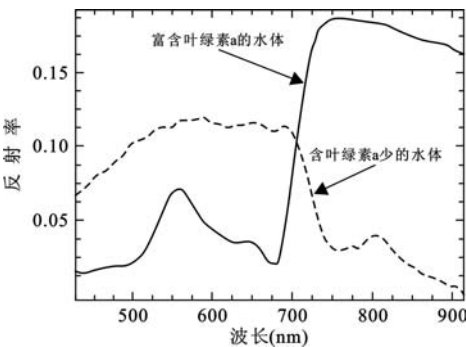


图 8 叶绿素 a 和水体的端元反射率组分

Fig. 8 End-members of Chl. a and water

表 3 混合光谱分解结果(部分)

Tab. 3 Result of mixing spectral analysis (part)

测点	chl. a(μg/L)	chl. a(%)	Water(%)
M01	18.49	0.080652	0.919348
M06	97.65	0.247975	0.752025
M09	87.89	0.243628	0.756372
M10	97.04	0.248402	0.751598
M11	89.84	0.22076	0.77924
M13	65.62	0.198538	0.801462
M14	67.21	0.178735	0.821265
M15	66.40	0.170895	0.829105

实际中, 由于水体光谱反射率与叶绿素 a 浓度之间并非是线性关系, 而是呈非线性关系, 随着叶绿素 a 含量增加, 特征反射谷和峰值的增速加快, 单纯地使用线性分析模型, 将低估水体叶绿素 a 浓度(图 9)。根据表 3 中的实验数据, 得到一条指数关系的叶绿素 a 丰度和实验室分析结果的校正关系式:

$$\text{Chl. a (mg/L)} = 0.0093e^{9.8323x}$$

两者之间的相关系数为 0.9705, 直线为 $Y=0.9904X$ (图 10)。

以混合光谱分解为技术手段, 并采用叶绿素 a 丰度和实验室分析结果的校正关系式得到的估算叶绿素 a 浓度结果的均方根误差为 0.00709mg/L。混合光谱分解估算叶绿素 a 浓度结果分布如图 11。

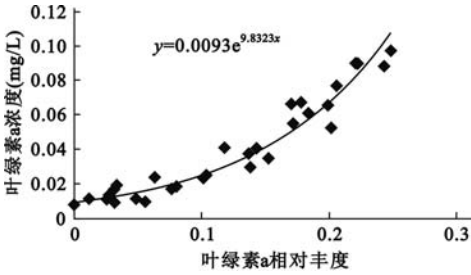


图 9 叶绿素 a 相对丰度与浓度之间的相关关系
Fig. 9 Correlation between abundance and concentration of Chl. a

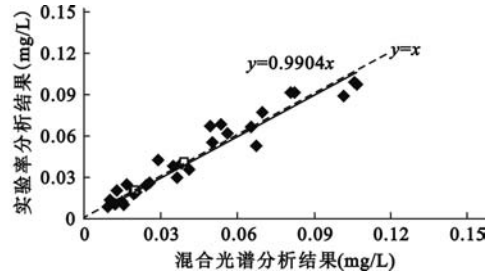


图 10 混合光谱估算结果与实验室分析结果
叶绿素 a 浓度对比
Fig. 10 Comparison of Chl. a concentration between
mixing spectral analysis and lab analysis result

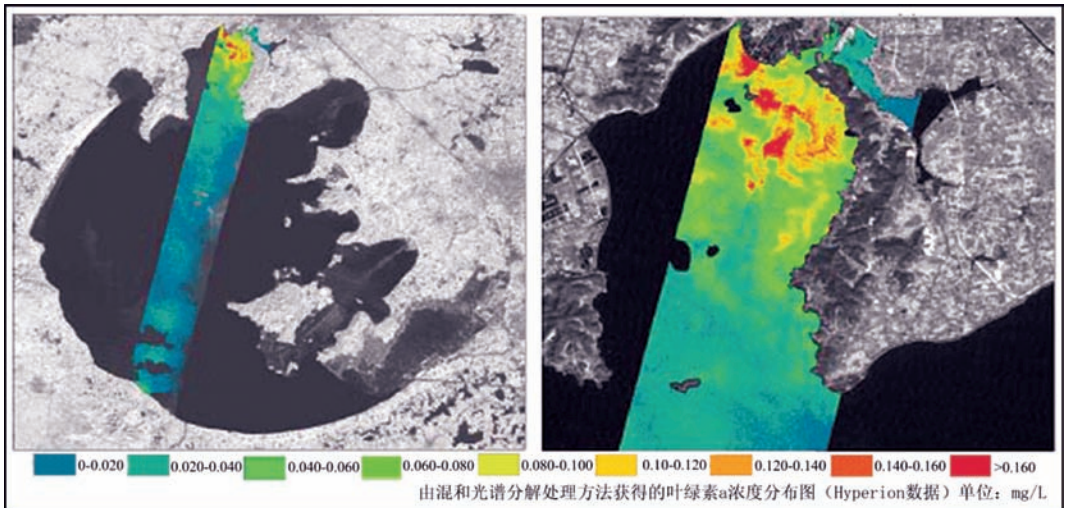


图 11 太湖及梅梁湾叶绿素 a 浓度混合光谱分析结果

Fig. 11 Mixing spectral analysis Result of Chl. a concentration in Lake Taihu and Meiliangwan

采用混合光谱分解的结果显示的叶绿素 a 浓度等级对比度比比值分析和微分分析要好, 对于叶绿素 a 浓度分布的细节显示更为清晰。另外值得注意的是, 比值和微分的处理结果浓度估算偏低, 主要是由于受 700 nm 附近反射峰随叶绿素 a 浓度增大向长波方向移动的影响^[10] (图 12), 使比值结果和微分结果小于理论的特征波段比值或微分结果, 而引起结果偏低。

4 结论

利用 Hyperion 卫星高光谱遥感数据,采用了统的经验方法:比值和一阶微分处理,以及混合光谱分解方法进行了叶绿素 a 浓度的估算,并对各种方法进行了均方根误差的估算(表 4). 通过分析可以得出以下几点认识:

表 4 Chl. a 浓度估算相关系数 R 和均方根误差 RMSE(mg/L)

Tab.4 Correlation coefficient and root mean square errors of Chl. a concentration estimation

模型方法	变 量	R	RMSE
传统经验方法	701.55 和 681.21 nm 比值	0.9367	0.00523
	一阶微分 701.55 nm	0.9615	0.00454
混合光谱分解	681.205nm,691.37nm 和 701.55nm	0.9705	0.00709

(1)利用 Hyperion 数据进行水体叶绿素 a 浓度的估算是可行的. 文中采用比值和一阶微分处理方法可以得到叶绿素 a 浓度的较好估算,并且利用一阶微分处理的数据进行叶绿素 a 浓度估算结果精度高于比值方法估算结果.

(2)混合光谱分析方法可以摆脱比值和微分方法受地域和时间的限制,适用性广. 利用混合光谱分析方法进行叶绿素 a 的百分比浓度估算,并利用实验室分析结果作非线性校正,可以得到较好的结果精度. 其相关系数比经验方法要高,说明对叶绿素 a 浓度变化估算的整体趋势要佳. 但由于采用的是经过大气校正的原始数据,受原始数据质量以及混合光谱分解中端元光谱获取的影响,均方根误差不及传统的比值和微分方法. 进一步的工作是加强对水质遥感机理的研究,改进混合光谱分析模型,改进端元光谱获取的方法等方面的研究.

(3)本文的研究可为我国现阶段水质遥感监测主要以多波段遥感数据和以经验方法为主的状况提供另一条较好的水质遥感监测途径.

5 参考文献

[1] 蒲瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京:高等教育出版社, 2000:3 - 79.

[2] Dekker A G, Wos R J, Peters S W M. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective Analyses of TM and SPOT Sensor Data. *Int J Remote Sensing*, 2002, **23**(1):15 - 35.

[3] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRS - 1C satellite data in the Mecklenburg lake district, Germany. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **73**: 227 - 235.

[4] 陈晓翔, 丁晓英. 利用 SeaWiFS 数据估算珠江口海域表层叶绿素浓度的研究. 中山大学学报(自然科学版), 2004, **43**(1):98 - 101.

[5] 雷 坤, 郑丙辉, 王 桥. 基于中巴地球资源 1 号卫星的太湖表层水体水质遥感. 环境科学学报, 2004, **24**(3): 76 - 80.

[6] Kallio K, Kuster T, Koponen S, et al. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**: 56 - 77.

[7] Hans Hakvoort, Johan de Haan, Rob Jordans, et al. Towards airborne remote sensing of water quality in

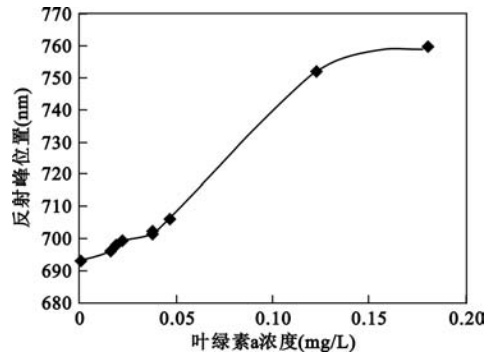


图 12 水体反射率曲线 700nm 附近反射峰位置随叶绿素 a 浓度的变化情况
Fig. 12 reflectance peak site of 700nm round affected by concentration of Chl. a

- The Netherlands – validation and error analysis. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2002, **57**: 171 – 183.
- [8] Sampsa Koponen, Jouni Pulliainen, Kari Kallio, *et al.* Lake Water Quality Classification With Airborne Hyperspectral Spectrometer and Simulated MERIS Data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **79**: 51 – 59.
- [9] 匡定波, 沈鸣明, 汪骏发等. 航空成像光谱水质遥感研究. *红外与毫米学报*, 2000, **19**(4): 273 – 276.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Xiao Qing, Wen Jianguang, *et al.* The evaluation of water eutrophication using spectrum reference at Taihu Lake. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004: 586 – 589.
- [13] 王小钦, 王钦敏, 刘高焕等. 水污染遥感监测. *遥感技术与应用*, 2002, **17**(3): 74 – 78.
- [14] 胡 雯, 杨世植, 翟武全等. NOAA 卫星监测巢湖蓝藻水华的试验分析. *环境科学与技术*, 2002, **25**(1): 16 – 18.
- [15] 余丰宁, 李旭文. 水体叶绿素含量的遥感定量模型. *湖泊科学*, 1996, **8**(3): 41 – 45.
- [16] 赵冬至, 曲 元, 张丰收等. 用 TM 图象估算海面叶绿素浓度的神经网络模型. *海洋环境科学*, 2001, **20**(1): 16 – 21.
- [17] 秦伯强, 胡维平. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004: 1 – 8.
- [18] 张 巍, 王学军. 太湖水水质指标相关性与富营养化特征分析. *环境污染与防治*, 2002, **24**(1): 50 – 53.
- [19] 刘瑞民, 王学军. 太湖水水质参数中小尺度空间结构特征. *长江流域资源与环境*, 2002, **11**(1): 32 – 35.
- [20] Farrand WH, Singer RB, Merenyi E. Retrieval of apparent surface reflectance from AVIRIS data: a comparison of empirical line, radiative transfer, and spectral mixture method. *Remote Sensing of Environment*, 1994, (47): 311 – 321.
- [21] 张 兵. 时空信息辅助下的高光谱数据挖掘. 中国科学院博士学位研究生学位论文, 2002: 14 – 44.
- [22] Atkinson P M, Cutler M E J and Lewis H. Mapping sub-pixel proportional land cover with AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **4**: 917 – 935.
- [23] Puyou-Lascassies P, Flouzat G, Gay M and Vignolles C. Validation of the use of multiple linear regression as a tool for unmixing coarse spatial resolution images. *Remote Sensing of Environment*, 1994, (49): 155 – 166.
- [24] Peddle D R, Hall F G and LeDrew E F. A comparison of NDVI and Spectral Mixture Analysis for estimating biophysical properties in boreal forest terrain. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1996: 230 – 231.
- [25] Shimabukuro Y E and Smith J A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multi-spectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, **29**(1): 16 – 20.