

文章编号: 1007 4619(2006)04 0559 09

混合光谱分解模型提取水体叶绿素含量的研究

肖 青^{1,2}, 闻建光², 柳钦火¹, 周 艺¹

(1 中国科学院 遥感应用研究所 遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

2 核工业北京地质研究院 遥感重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 遥感监测水体叶绿素含量是水质遥感研究的难点之一。本文通过研究不同叶绿素含量水体反射率的光谱特征, 确定了提取叶绿素 a 含量的最佳特征波段, 建立了太湖水体叶绿素 a 的混合光谱模型。研究发现, 混合光谱模型提取的水体叶绿素 a 百分比浓度与同步采样分析的叶绿素 a 浓度之间有良好的线性相关性。并基于 TM 和 HEPERON 图像利用此模型生成了叶绿素 a 浓度分布图。研究结果表明, 混合光谱分解模型可以作为遥感监测水体叶绿素 a 含量的定量模型。

关键词: 混合光谱分解; 叶绿素; 高光谱遥感

中图分类号: O433.1/TP79 **文献标识码:** A

Study on Spectral Unmixing Model and It's Application in Extracting Chlorophyll Concentration of Water Body

XIAO Qing^{1,2}, WEN Jian-guang², LIU Qin-huo¹, ZHOU Yi¹

(1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science Institute of Remote Sensing Applications CAS Beijing 100101, China)

2 Beijing Research Institute of Uranium Geology Beijing 100029 China)

Abstract Remote sensing (RS) data can be used to estimate the chlorophyll a concentration of water body, which has become a key issue of water quality monitoring. In this paper the field water reflectance spectra have been applied for monitoring the water quality of Taihu Lake according to reflectance spectra of water varying with concentrations of organic and inorganic sediments. After analyzing the spectra character we selected the optimal band range (670–710nm), and retrieved the chlorophyll a concentration by linear spectral unmixing model using known water and chlorophyll a endmember spectra of in situ water samples. TM and HEPERON image was processed and the distribution of chlorophyll a concentration was retrieved by linear spectral unmixing method. The result shows that a fine linear correlation exists between the abundance of chlorophyll a from the spectral unmixing model and the concentration of chlorophyll a from the analytical result in the laboratory and also shows that spectral unmixing model is a feasible model in the practical application for water quality monitoring.

Key words spectra unmixing; chlorophyll; hyperspectral remote sensing

1 引 言

20 世纪 70 年代初期, 遥感就以快速性、周期性等特点成为监测湖泊、内陆河等水体的有效技术手段。随着遥感传感器光谱分辨率的进一步提高及高

光谱技术的日益成熟, 势必推动遥感技术在水质监测中的深入应用, 为水质监测从定性阶段向量化阶段发展提供有利的技术支持。目前利用遥感数据进行水质参数反演的方法主要有经验方法、半经验方法和物理方法, 其中经验方法最常用。这些方法主要是针对低光谱分辨率宽通道遥感数据而设计的, 如 TM

收稿日期: 2005 08 15; 修订日期: 2005 10 25

基金项目: 中国科学院知识创新项目 CAS (KZCX3 SW-334)。

作者简介: 肖青 (1971—), 男, 高级工程师。2002 年毕业于中国科学院遥感应用研究所。研究领域: 遥感机理。

等。许多学者利用高光谱遥感数据对水质监测进行了研究^[1-3]。这些研究中所用的方法基本上还是延用低光谱分辨率数据的算法,没有在方法上体现成像光谱数据的优势,因此实际应用效果有限。

水体反射率光谱由于是多种水质参数综合作用的结果,本质上是一种混合光谱,如图 1 所示,在富营养化水体中,明显地反映出水体富含叶绿素 a 的反射光谱特性。混合光谱分解是根据成像光谱数据的特点而设计的,近年来在地质填图和土地利用分类中得以成功应用。在水质研究方面,Thien ann 利用 IRS IC 卫星数据和地面光谱数据估测德国 Mecklenburg 湖区的叶绿素 a 浓度,并比较了多种方法,结果显示,线性光谱分解法估算叶绿素 a 浓度效果最好,并绘制了叶绿素 a 的浓度分布图^[4],钱少猛等利用改进的混合像元分解法对滇池水污染遥感评价进行了研究,取得了一定的成效^[5-9]。但两者都未对模型采用的数据类型、模型反演的特征波段和求解的波段数进行过探讨,从而使估算的结果精度都不高。在混合光谱分解技术中,组分端元光谱的选取技术是一个主要问题。端元光谱由于它所代表的是混合光谱成分中各主要成分的光谱,因此认为端元光谱是比较“纯”的光谱。端元光谱可从多个途径获得,如从低分辨的图像^[7-8]、高空间分辨率图像中的纯像元^[9],也可以利用光谱仪直接进行测量,或者利用现有的光谱库^[10]。

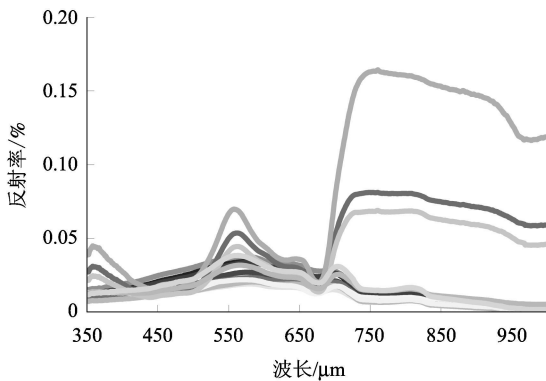


图 1 实测的太湖水体反射率曲线

Fig 1 The reflectance of water body measured in Taihu Lake

对于水体而言,反射率与各种主要水质参数反射率之间的关系并不是线性的,但是对于浑浊的水体,如果水体内部散射较弱,且将水面当作陆地表面来处理时,线性混合光谱分解模型还是有一定的可行性的,只是在反演水质参数时端元的定义和选取都与传统意义上的端元选取有很大差别而已。同

时,由于水体的反射率较低,各种水质参数引起的水质反射率变化也较弱。本文基于太湖水质特点,对于水质参数线性混合分解的端元选取方式和方法进行了分析,同时对于原始数据进行了归一化、一阶微分以及包络线去除等处理,分析了太湖水体的光谱特征,并以此分析提出了叶绿素 a 混合光谱分解模型,利用叶绿素 a 浓度的最佳波段对模型进行了反演,结果显示利用混合光谱分解模型对叶绿素 a 浓度提取是较为理想的。

高光谱遥感可以提供众多的细分光谱波段,但是如何应用这些众多的波段信息还需要进行深入的研究。本文中所采用的线性混合光谱分解技术本质上是一种多维(光谱维)信息的压缩,可以视为利用高光谱分辨率遥感数据反演水质参数的一个有益尝试。

2 线性混合光谱模型

对于水体而言,由于水具有透光性,光在水中传播,会与各种水质粒子进行碰撞,从而造成光线在水体内部的多次散射,因此线性光谱混合模型不像在陆地表面一样具有较强的适用性。

线性混合光谱的模型为:假定一个混合目标的反射光谱是各类组分目标光谱的线性组合,则混合目标的光谱反射率可以表示为各类组分的反射光谱和它们的丰度的函数。通过线性光谱分离,可以确定每类组分所占比率。得到的模型如下:

$$\begin{cases} R_i = \sum f_k r_{ki} + \epsilon_i & (1) \\ \sum f_k = 1 & (2) \\ 0 \leq f_k \leq 1 & (3) \\ RMSE = \left[\frac{\sum (\epsilon_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} & (4) \end{cases}$$

式中, R_i 为第 i 波段的光谱反射率; f_k 为对应第 k 个组分端元光谱所占的分量值; r_{ki} 为第 k 个端元组分所在 i 波段的光谱反射值; ϵ_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^[11-13],由于悬浮物质含量较高,因此水体的透光性很差,如表 1 实测数据显示只有 30—40 cm,因此水体内部的散射较弱。

同时根据表 1 的化学分析结果可以看出,除各别点外(11号点),叶绿素 a 以外的太湖各种水质参数分布较为均一。基于以上两点,本文将太湖水面

表 1 各采样点水体光学特性表(2003年 10月 28日)

Table 1 The optical parameters of water in the sample site

序号	D_{tran} /km	SS /(mg/l)	COD _{Mn} /(mg/l)	Chl a /($\mu g/l$)	TN /(mg/l)	TP /(mg/l)	TOC / 10^{-6}
1	38	40.52	6.08	16.96	2.32	0.192	4.80
2	36	38.44	5.17	2.20	1.93	0.189	7.51
3	35	44.92	5.48	19.42	2.27	0.191	5.87
4	60	19.64	5.33	27.01	3.94	0.207	8.66
5	43	28.08	4.86	22.04	2.74	0.195	7.08
6	38	34.96	5.50	4.24	2.75	0.227	6.78
7	42	30.56	7.09	38.89	4.80	0.225	10.47
8	40	30.72	6.75	33.06	4.99	0.229	6.55
9	53	19.96	7.79	47.46	5.34	0.231	8.89
10	46	22.80	7.17	38.92	3.93	0.232	6.89
11	33	86.00	20.48	180.26	7.15	0.552	7.89
12	36	63.88	11.16	123.26	5.35	0.353	7.25
13	50	27.32	7.34	25.17	3.24	0.225	7.90
14	30	73.40	21.76	230.59	6.34	0.457	7.33
15	38	59.16	11.29	91.51	4.08	0.305	7.11

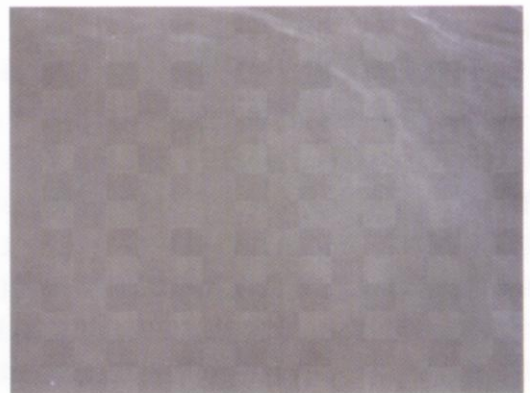
等同于陆地表面,并将叶绿素含量较低和较高的水体的反射率光谱作为端元光谱建立了混合光谱,并分别利用地面测量数据和星载数据 HYPERION 和 TM 数据进行了水质参数混合光谱分解试验。

3 地面测量数据线性混合光谱模型

本文结合太湖水质特殊情况,在分析了地面实测水体高光谱数据和各采样点实验室分析的水体叶绿素 a 浓度后,选择了叶绿素 a 含量最低的采样点 2(浓度为 $0.00220mg/l$ 见图 2)的水体反射率作为纯水的端元光谱,叶绿素 a 含量最高的采样点 14(浓度为 $0.23059mg/l$ 见图 2)的水体反射率作为叶绿素 a 的端元光谱。水体反射率的测量参照唐军武所介绍的方法^[14]。

3.1 模型反演水体叶绿素 a 丰度光谱特征波段的选择

混合光谱分解模型反演,目的是用来分解混合光谱,以确定组成混合光谱的每种光谱端元组分的成分(丰度),用端元组分的光谱特征计算每个组成成分的相对丰度。端元组分的光谱特征波段的选择直接影响到模型反演结果的精度,而叶绿素 a 浓度的最佳波段的选取依赖于叶绿素 a 的浓度^[12]。太湖水体藻类叶绿素 a 浓度较高,具有富营养化水体



(a)



(b)

图 2 采样点 2(a)和采样点 14(b)水体照片

Fig. 2 The photo of sample site 2(a) and 14(b)

反射率的光谱特征(见图 1)。在 420—500nm 范围内,由于叶绿素 a 在蓝紫光波段的吸收峰及黄色物质在该范围的强烈吸收作用,水体的反射率较低;540—600nm 范围的反射峰是由于叶绿素和胡萝卜素弱吸收及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;在 624nm 出现谷值或呈现肩状,是由于藻青蛋白吸收峰在 624nm 处的吸收系数较大;675nm 附近是叶绿素 a 的吸收峰,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;700nm 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,其出现原因是由于水和叶绿素 a 的吸收系数之和在该处达到最小。在 810nm 附近出现的反射峰是水体中沉积物引起的,是水中沉积物存在的指示^[13]。图 1 中三个采样点位置的藻类密度高,聚集形成“水华”漂浮于水面,所以反射光谱表现出类似于植被的特征。

通过对比藻类密度不同的水体反射率光谱特征可知^[1]: (1)水体藻类密度与可见光区绿色反射峰(540—600nm)有一定的相关关系。但由于太湖含有一定量的黄色物质和悬浮物在该波段对水色也有一定的影响,基本不含藻类的水体也有一定的反射峰,故这一波段不能灵敏地反映叶绿素的浓度。(2)在可见光 675nm 附近的吸收峰处,藻类和此波段纯净水体都强烈吸收,故有时藻类吸收不能明显地表露出来。但由于含有悬浮物质在该波段的强散射,将明显增加这一波段的水体反射率。因此,当水体本身含有一定的悬浮物质时,有漂浮藻类的水面,

由于藻类的吸收作用,致使水体反射率在 675nm 附近将明显低于周围藻类密度少的水体。因此对叶绿素含量有一定的指示意义。(3)在近红外(700—750nm)附近强烈的反射峰区,对叶绿素浓度有明显的指示意义,该区由于水体的强吸收及藻类的强散射反射,因此水体反射率随藻类密度的增加而增大。

因此,对藻类叶绿素含量指示最明显的特征光谱出现在 665—750nm 即藻类叶绿素的吸收峰区和反射峰区。

3.2 模型反演

在光谱分析中要获得较好的结果,数据处理的方法很重要。一般地,需要对原始数据进行一些相关处理,其目的是寻找能反映待测指标明显特征的某些波段(特征波段)处的数据。常用的处理方法有:对光谱数据作归一化处理;对光谱数据作一阶、二阶微分或积分处理;去包络线处理等。本文分别从以上三个方面对水体的反射率进行了处理,并以此为基础,进行与叶绿素 a 浓度的相关分析。

图 3 显示了四种数据与叶绿素 a 之间的相关系数,对于原始数据在近红外 700—750nm 叶绿素 a 强烈的反射区,与叶绿素 a 的正相关系数比较大,在 716nm 附近达到最大值。归一化处理和一阶微分处理分别依据式(5)和式(6)进行。

$$R_N(\lambda_i) = \frac{R(\lambda_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=420}^{750} R(\lambda_i)} \quad (5)$$

式中, $R_N(\lambda_i)$ 是归一化后的水体反射率, $R(\lambda_i)$ 是原始水体反射率, n 是 420—750nm 波段之间的波段数。

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

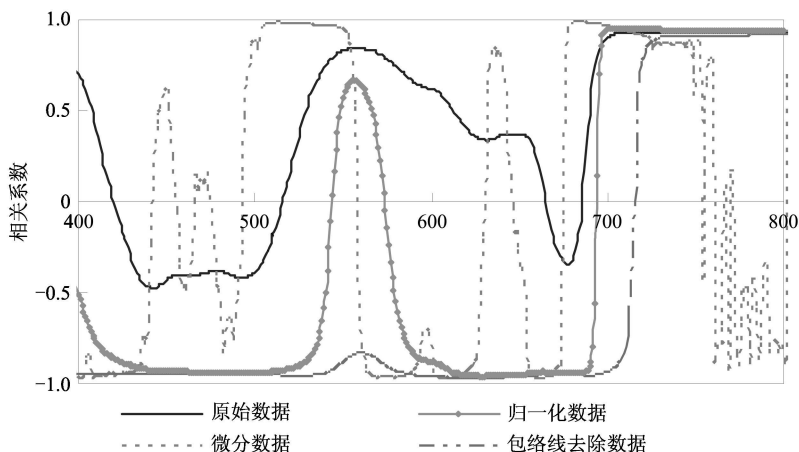


图 3 处理结果数据与叶绿素 a 浓度之间的相关系数

Fig. 3 The correlation coefficients between Chl a and the data processed with different algorithm

式中, λ_{i+1} , λ_i , λ_{i-1} 为相邻波长, $R(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的一阶微分反射光谱。

在叶绿素 a 特征光谱特征波段内, 归一化数据负相关系数绝对值最大出现在 680nm 附近, 正相关系数最大点出现在 708nm, 分别对应于叶绿素 a 的强吸收与强反射区。与疏小舟、尹球等所采用的 705nm 相关系数最大的光谱波段类似^[3]。而微分数据正相关系数最大值则出现在 683nm 波段, 该波段恰好是植被意义上的“红边”。对于包络线去除数据与叶绿素 a 浓度之间的相关系数, 结果表明叶绿素 a 在特征光谱波段区域负相关最大值出现在 690nm 处, 对应于叶绿素 a 的强吸收峰位置, 相关系数绝对值达到了 0.95 以上。经过处理后的数据与叶绿素 a 浓度之间的相关关系与原始数据和叶绿素 a 浓度之间的相关关系相比, 在特征波段范围内, 有了显著的提高。

根据以上对太湖水体藻类叶绿素特征波谱的分析和各处理数据与叶绿素 a 浓度的相关分析, 在特征光谱波段区域 665—750nm 内, 分别选择了原始数据、归一化数据和一阶微分数据以及包络线去除数据与叶绿素 a 浓度具有较好相关性的波段

(图 3), 并用单特征波段因子、两特征波段因子比值、多特征波段因子以及多特征波段因子比值四种组合波段反射率作为混合光谱分解模型反演的变量, 求解叶绿素 a 的百分比浓度(丰度), 其反演结果与实验室同步采样水质分析所得的叶绿素 a 浓度具有较好的线性相关性。图 4 显示了四种数据利用最佳的反演丰度求得的与实验室分析结果的叶绿素 a 浓度线性相关性。表 2 列出了所有方法反演结果的叶绿素 a 百分比浓度的均方根误差(RMSE)。

3.3 利用不同时期测量的太湖水体反射数据进行叶绿素 a 浓度反演

为了充分验证混合光谱分解模型的可行性和适用性, 本文选取了 2003 年 10 月 27 和 28 日测量数据, 2000 年 7 月 18 日数据以及 1998 年 8 月 26 日数据, 利用混合光谱分解模型进行叶绿素 a 浓度的反演。三年的数据采集于不同的地点和不同的月份, 藻类长势不同, 水体中富含叶绿素 a 的浓度差别也比较大, 数据具有一定的时间差异性和空间差异性。图 5 显示了 1998 年和 2000 年采集的水体反射率光谱曲线(a 1998 年数据, b 2000 年数据)。

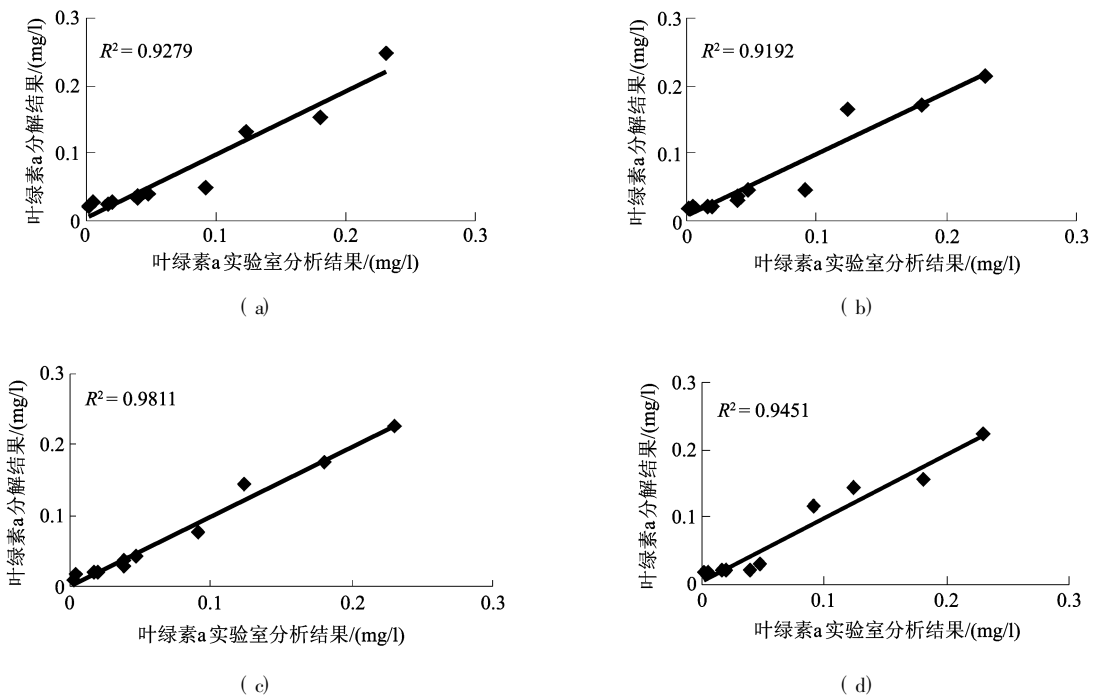


图 4 反演结果与实验室分析所得的叶绿素 a 浓度之间的线性相关性

- (a) 原始数据反演结果与 chl a 浓度关系;
- (b) 归一化数据反演结果与 chl a 浓度关系;
- (c) 一阶微分数据反演结果与 chl a 浓度关系;
- (d) 包络线去除数据反演结果与 chl a 浓度关系

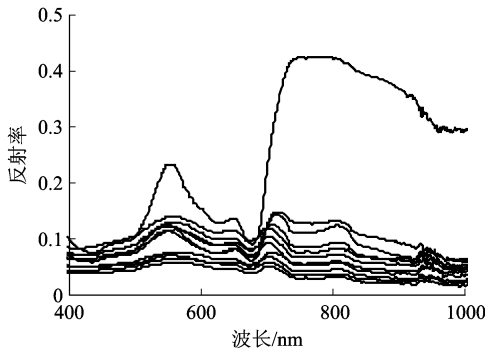
Fig 4 The correlation between the retrieved chl a concentration and in lab measurements

- (a) Retrieved by reflectance via lab measured
- (b) Retrieved by normalized data via lab measured
- (c) Retrieved by differential data via lab measured
- (d) Retrieved by continue removed via lab measured

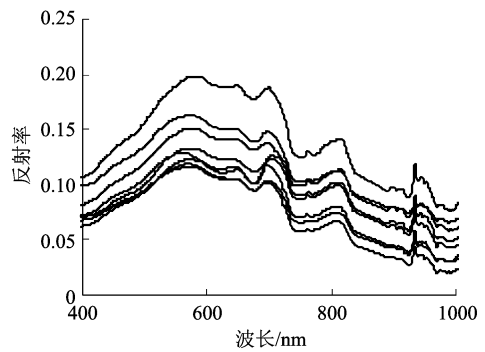
表 2 混合光谱分解结果叶绿素 a 丰度均方根误差 RMSE %

Table 2 The RMSE of chl a concentration retrieved by spectral unmixing algorithm

	变 量	原始数据	归一化数据	一阶微分数据	包络线去除数据
RMSE	单特征波段因子	—	0.0987	0.05282	0.1019
	两特征波段因子比值	0.1179	0.0800	—	0.1124
	多特征波段因子	0.1247	0.1118	0.0512	0.0946
	多特征波段因子比值	0.1250	0.1250	—	0.1215



(a)



(b)

图 5 1998年 (a)水体和 2000年 (b)水体反射率光谱曲线

Fig 5 The reflectance curve of water measured in 1998(a) and 2000(b)

依据初始模型,用于模型反演的数据采用垂直测量的原始水体反射率数据的一阶微分,依据它们的特征波谱波段范围(665—750nm),选取叶绿素 a 的吸收峰和反射峰附近之间的波段范围(690—710nm)的 21 个波段进行模型计算。

对于 1998 和 2000 年的数据,选择了 1998 年的第 7 个采样点(叶绿素 a 浓度达到了 0.318mg/l)的水体反射率作为高叶绿素 a 浓度水体的端元光谱,选取了叶绿素 a 浓度只有 0.00985mg/l 的 2000 年的采样点 1 的水体反射率作为纯水体的端元光谱,进行叶绿素 a 浓度的反演。对于 2003 年采用的是

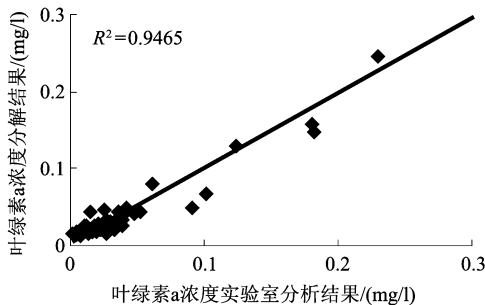


图 6 混合光谱分解结果与实验室分析结果相关性

Fig 6 The correlation between the spectral unmixing and the in lab measurement

含叶绿素 a 较低的第 2 采样点水体反射率作为纯水的端元光谱,含叶绿素 a 浓度高的第 14 采样点水体反射率为高叶绿素 a 水体的端元光谱,以此进行混合光谱分解。最终分解结果与实验室分析的叶绿素 a 浓度之间的线性拟合度为 0.9465。均方根误差为 0.01575mg/l(如图 6)。结果可见,混合分解反演的叶绿素 a 浓度与实验室分析结果量级相当,较好地模拟了实测情况(图 7)。

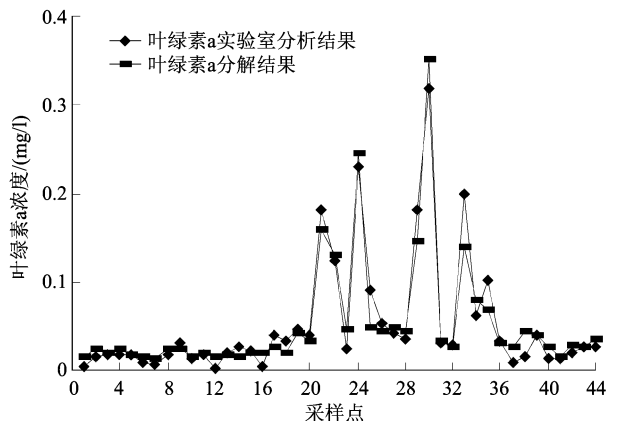


图 7 混合光谱分解结果与实验室分析结果对照

Fig 7 A comparison of chl a concentration between unmixing result and in lab measurement

4 模型在卫星图像上的应用——叶绿素 a 浓度分布图的生成

4.1 TM 数据

本文利用 TM5 数据进行了叶绿素浓度的提取。该图像成像时间为 2003 年 10 月 28 日上午 10 点。TM 图像进行了几何校正、大气校正、水体提取等预处理。

传统的经验方法中采用 TM 4、TM 3 作为变量进行的叶绿素 a 浓度反演中已经取得了一定的成效^[18-20]，本文也采用了此两波段的比值作为变量，结合采样点信息建立了回归方程：

$$Chl(a) (mg/l) = 0.10049 \times TM4 / TM3 - 0.015776$$

利用这一模型对 TM 遥感图像数据计算得到了太湖水域的叶绿素 a 含量，同时我们采用了混合光谱分解的方法进行 TM 图像的处理，结果如图 9 所示。

从图 8 的 (a)，(b) 对比可以看出，统计法与混合光谱分解的结果相一致。相对而言，混合光谱分解得到叶绿素 a 浓度层次更鲜明，叶绿素浓度变化的过渡性更明显。两种方法相比最大的差别是在含水草区域 (图 8 每个图右下)，叶绿素的计算有很大差别。经分析认为比值法中用的两个波段对水生植被敏感 [TM 3 (叶绿素吸收) 和 TM 4 (叶绿素高反射)]，并且水草突出水面的部分对反射率的贡献相

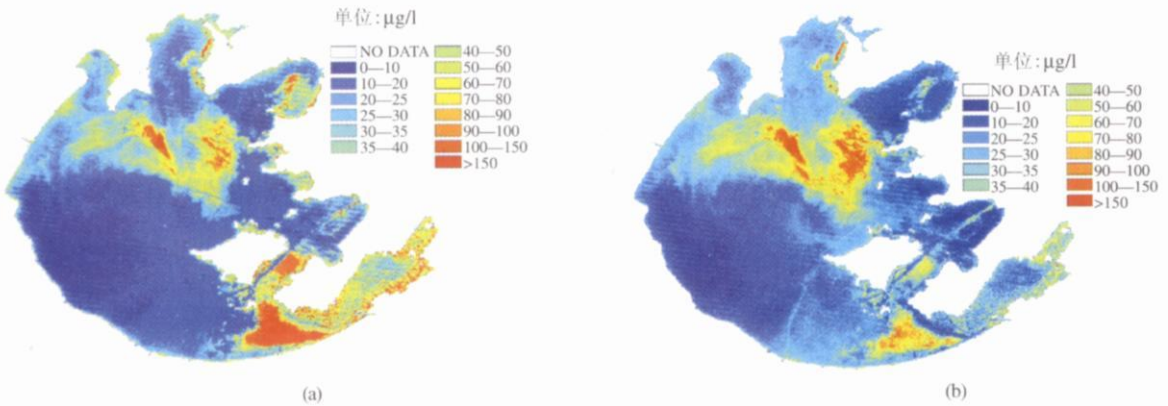


图 8 比值统计回归(a)和混合光谱(b)分解结果得到的太湖叶绿素 a 不同浓度分布图
Fig.8 The distribution Chl a concentration in Taihu Lake computed by ration method(a) and spectral un-mixing(b) using TM data

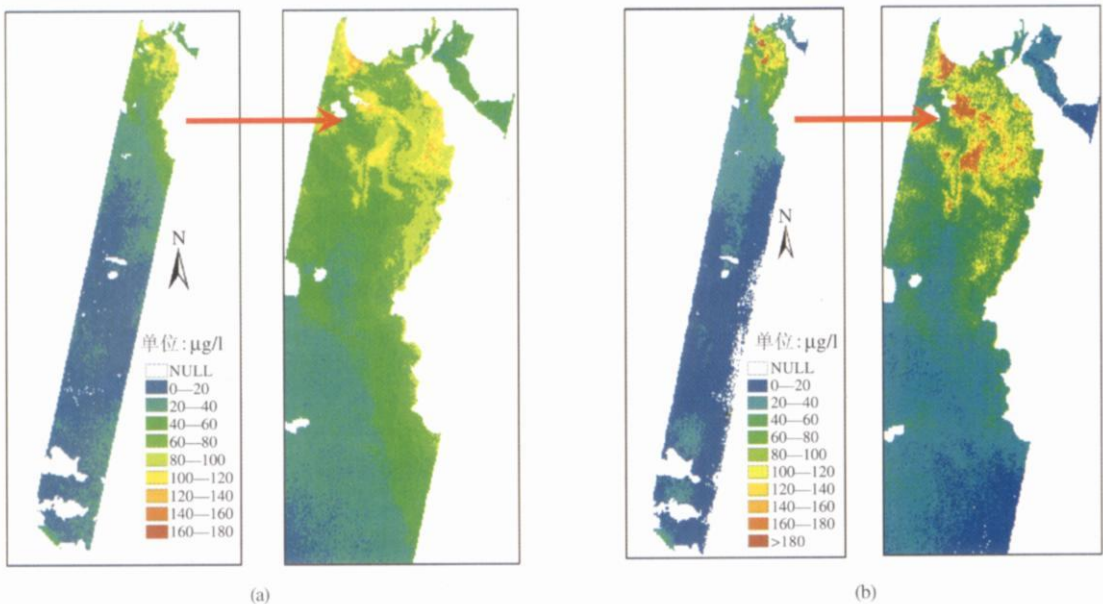


图 9 比值统计回归(a)和混合光谱(b)分解结果得到的太湖叶绿素 a 不同浓度分布图
Fig.9 The distribution Chl a concentration in Taihu Lake computed by ration method(a) and spectral un-mixing(b) using HYPERON data

对较大所致。此混合像元分解用到了 TM 中的 6 个波段, 对水草具有较好的抗干扰性。

4.2 Hyperion 数据

Hyperion 数据具有 10nm 的波谱采样间隔, 有足够的精度反映水体参数的主要特征, 空间分辨为 $30\text{m} \times 30\text{m}$, 与 TM 图像空间分辨率相当, 可以用于对成片分布的藻类叶绿素 a 浓度的监测, 因此利用 Hyperion 数据进行水体参数浓度的估算是可行的。但 Hyperion 数据信噪比较低, 影响了水体参数微弱信息提取的精度。

本文对 Hyperion 进行了大气校正和几何校正, 采用了传统的经验方法: 比值和一阶微分处理及混合光谱分解方法进行了叶绿素 a 浓度的估算 (图 9), 并对各种方法进行了均方根误差的估计 (表 3)。

表 3 Chl a 浓度估算拟合度 R^2 和均方根误差 RMSE ($\mu\text{g/l}$)
Table 3 The correlation and RMS of retrieving concentration of Chl a

	变 量	R^2	RMSE
传统经验方法	701/681nm	0.8774	5.2302136
	一阶微分 701nm	0.9284	4.53603
混合光谱分解	681nm, 691nm 和 701nm	0.9336	7.012694

原始数据受大气吸收和散射以及太阳高度角等因素影响较大, 经比值和对原始数据做一阶微分处理, 可以部分消除这些影响, 利于最后叶绿素 a 浓度的估算。经一阶微分处理后的数据进行叶绿素 a 浓度估算结果精度高于比值方法估算结果。

5 结 论

本文分析了太湖水体的光谱特征, 并以此分析提出了叶绿素 a 混合光谱分解模型, 尝试利用叶绿素 a 浓度的最佳波段对模型进行反演, 结果说明, 利用混合光谱分解模型对叶绿素 a 浓度提取是可取的。实验结果表明:

(1) 对原始数据作归一化、一阶微分和包络线去除等处理, 在分析太湖水体不同叶绿素 a 浓度的光谱特征基础上, 利用处理数据的单波段、两波段比值、多波段以及多波段比值四种方案进行混合光谱分解模型叶绿素 a 浓度反演是可行的, 与利用原始数据处理相比, 结果有了很大的改进。去包络线数据反演结果均方根误差为 0.0946, 归一化数据处理

最佳结果均方根误差为 0.0800 都低于 10%; 而经过一阶微分处理的数据最佳反演结果均方根误差只有 0.0512 在一定程度上提高了叶绿素 a 丰度反演的精度。

(2) 四种方案实验结果显示: 对于利用原始数据和归一化数据反演叶绿素 a 丰度的混合光谱分解模型, 用两波段因子比值反演最佳; 对于一阶微分数据和包络线去除数据, 利用特征波段 690—710nm 多波段因子反演最佳。

(3) 利用实测的高光谱数据, 结合图像进行的混合光谱分解提取叶绿素 a 浓度亦是可行的, 可较好地模拟实测的情况。

本文的工作是一种尝试, 从实质上讲, 所采用的方法与传统意义上的混合光谱分解模型有一些差异, 这体现在端元选取上。本文采用的端元并不是纯的叶绿素的反射率光谱, 而是富含不同浓度的叶绿素水体的反射率光谱。进一步的改进和研究工作将把重点放在考虑水体内部散射的非线性混合光谱分解模型算法, 增加混合光谱模型中的组分端元数目 (如悬浮泥沙等水质参数), 减少其他水质因素的影响, 优化端元光谱的提取方法研究以及用于反演混合光谱分解模型的最佳特征光谱波段的选择以及组合等方面。

参 考 文 献 (References)

- [1] She F N, Li X W, Chen Y W, et al. Quantative Analysis on Chlorophyll A Concentration in Taihu Lake Using Thematic Mapper Data [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8(3): 41—45. [余丰宁, 李旭文, 陈宇炜等. 水体叶绿素含量的遥感定量模型 [J]. 湖泊科学, 1996, 8(3): 41—45.]
- [2] Shu X Z, Yin 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, 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, 2000, 4(1): 41—45.]
- [3] Li S J, Wang X J. The Spectral Features Analysis and Quantitative Remote Sensing Advances of Inland Water Quality Parameters [J]. *Geography and Territorial Research*, 2002, 18(2): 26—30. [李素菊, 王学军. 内陆水体水质参数光谱特征与定量遥感 [J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(2): 26—30.]
- [4] Thimann 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 [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, 73: 227—235.
- [5] Qian S M, Lin Q Z, Chen X. An Improved Method of Spectral Unmixing of Remote Sensing Image and Its Application in Water Pollution Monitoring and Assessing [J]. *Geography and Geo-*

- Information Science* 2003 19(2): 36-38 [钱少猛, 蔺启忠, 陈雪. 改进的混合像元分解法用于快速水污染遥感评价研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2003 19(2): 36-38]
- [6] Lv C G, Wang Z W, Qian S M. A Review of Pixel Unmixing Models [J]. *Remote Sensing Information* 2003 (3): 55-58. [吕长春, 王忠武, 钱少猛. 混合像元分解模型综述 [J]. 遥感信息, 2003(3): 55-58]
- [7] Holben B N, Shimabukuro Y E. Linear Mixing Model Applied to Coarse Spatial Resolution Data from Multispectral Satellite Sensors [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993 14 (11): 2231-2240.
- [8] Atkinson P M, Cutler M E J, Lewis H. Mapping Subpixel Proportional Land Cover with AVHRR Images [J]. *International Journal of Remote Sensing* 1997, (4): 917-935
- [9] Puyou Lascassies F, Buzat P G, Gay M, et al. Validation of the Use of Multiple Linear Regression as a Tool for Unmixing Coarse Spatial Resolution Images [J]. *Remote Sensing of Environment* 1994 49: 155-166
- [10] Peddle D R, Hall F G, Ledrew E F. A Comparison of NDVI and Spectral Mixture Analysis for Estimating Biophysical Properties in Boreal Forest Terrain [J]. *IEEE* 1996: 230-231
- [11] Qin B Q, Hu W P, Chen W M, et al. The Evolution Process and Mechanism of Hydro Environment in Taihu Lake [M]. Beijing: Science Press, 2004 [秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖水环境演化过程与机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [12] Zhang W, Wang X J, Jiang Y G, et al. Study on Characteristics and Correlation Among Parameters of Eutrophication in Taihu Lake [J]. *Environmental Pollution & Control* 2002 24(1): 50-53 [张巍, 王学军, 江耀慈等. 太湖水质指标相关性与富营养化特征分析 [J]. 环境污染与防治, 2002 24(1): 50-53]
- [13] Liu R M, Wang X J, Zheng Y, et al. Medium Small Scale Spatial Structures of Water Quality Parameters in Taihu Lake [J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin* 2002 11(1): 32-35. [刘瑞民, 王学军, 郑一等. 太湖水质参数中小尺度空间结构特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2002 11(1): 32-35.]
- [14] Tang J W, Tian G L, Wang X Y, et al. The Methods of Water Spectra Measurement and Analysis Above Water Method [J]. *Journal of Remote Sensing* 2004 8(1): 37-44 [唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 [J]. 水面以上测量法 [J]. 遥感学报, 2004 8(1): 37-44]
- [15] Shimabukuro Y E, Smith J A. The Least squares Mixing Models to Generate Fraction Images Derived from Remote Sensing Multispectral Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1991 29(1): 16-20.
- [16] Ham a B, Vepsäläinen J, Hännönen T, et al. Detection of Water Quality Using Simulated Satellite Data and Semiempirical Algorithms in Finland [J]. *The Science of the Total Environment* 2001, 268: 197-221.
- [17] Thomas M Fisher. Shallow Water Bathymetry at Lake Tahoe from AVIRIS Data [D]. Master of Science in Air Ocean Sciences from the NAVAL Postgraduate School December 1999
- [18] Dekker A G, Peters S W M. The Use of the Thematic Mapper for the Analysis of Eutrophic Lakes: A Case Study in the Netherlands [J]. *Int J. Remote Sensing* 1993 14: 799-822
- [19] Mahab A L, Runquist D G, Han L H, et al. Estimation of Suspended Sediment Concentration in Water Using Integrated Surface Reflectance [J]. *Geocarto International* 1998 13(2): 11-15.
- [20] Chen C Q, Shi B, Mao Q W. Study on Modeling Chlorophyll Concentration of Surface Coastal Water Using TM Data [J]. *Journal of Remote Sensing* 1996 11(3): 168-175. [陈楚群, 施平, 毛庆文. 应用 TM 数据估算沿岸海水表层叶绿素浓度模型研究 [J]. 中国环境遥感, 1996 11(3): 168-175.]