

基于 HJ-1A 卫星超光谱数据的太湖叶绿素 a 浓度及悬浮物浓度反演

杨婷^{1,2}, 张慧^{1,3 *}, 王桥^{3,4}, 赵巧华²

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044; 3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 4. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要: 通过对 2010 年 5 月 2 日太湖 HJ-1A 卫星超光谱影像的几何纠正和 6S 模型辐射校正, 以及水体实测光谱数据和影像光谱数据分析, 将太湖 28 个水体采样点光谱数据分别进行归一化处理和一阶微分处理后, 选取和水质参数相关系数最大的波段或波段组合建立反演模型, 获得太湖叶绿素 a 浓度以及悬浮物浓度的空间分布图。研究表明, 超光谱影像 B73 波段 (682.785nm) 处的归一化光谱数据和叶绿素 a 浓度相关性最高, 泥沙遥感参数 (S_r) 和悬浮物浓度相关性最高, 与水体实测光谱数据的相关性分析结果相同, 模型预测值和实测值的平均相对误差均在 30% 之内, 水质空间分布图与实地调查结果一致, 因此, HJ-1A 卫星超光谱数据可以借鉴水体实测光谱数据不同水质参数敏感波段的分析结果, 很好地应用于水质定量遥感。

关键词: HJ-1A 卫星; 超光谱数据; 反演模型; 叶绿素 a 浓度; 悬浮物浓度; 定量遥感

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3207-08

Retrieving for Chlorophyll-a Concentration and Suspended Substance Concentration Based on HJ-1A HIS Image

YANG Ting^{1,2}, ZHANG Hui^{1,3 *}, WANG Qiao^{3,4}, ZHAO Qiao-hua²

(1. Environmental Protection Administration, Nanjing Institute of Environmental Science, Nanjing 210042, China; 2. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 4. Satellite Environmental Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on geometry correction using ERDAS software and radiation correction using 6S model for HJ-1A hyper-spectrum image (HSI) on May 2 in 2010 and the analysis of spectrum for water data and spectral data of hyper-spectrum image, this paper processes original spectrum data of 28 sample points using method of normalization and method of first-order derivation. Single-band and band combination are selected to establish inversion models of the concentration of chlorophyll-a and solid suspensions. Choosing the model with biggest correlation coefficient, the spatial distribution map of the concentration of chlorophyll-a and solid suspensions content in Taihu Lake is acquired. The research results show: Band-73 of hyper-spectrum image which has been normalized shows the biggest correlation coefficient of the concentration of chlorophyll-a, remote sensing sediment parameter shows the biggest correlation coefficient of the concentration of solid suspensions, the result is consistent with analysis of spectral data of hyper-spectrum image. Average relative errors of predicted and measured values are within 30 percent. Spatial distribution map of water quality is consistent with the result of field surveys. Therefore, based on reference of the analysis of sensitive band of spectrum for water data, HJ-1A hyper-spectrum image can give quantitative estimation of water quality parameters in Taihu Lake.

Key words: HJ-1A; hyper-spectrum image (HSI); inversion models; chlorophyll-a concentration; solid suspensions concentration; quantitative estimate

悬浮物、叶绿素 a 是水质监测的重要参数,也是影响湖泊真光层深度和初级生产力的重要因子^[1,2]。常规的监测方法耗时费力,遥感技术由于其宏观、动态等特点在水质监测中具有重要的应用价值^[3]。当前水质反演模型的研究主要集中在专题制图仪 (TM)、法国 (SPOT)、高级星载热发射和反射辐射仪 (ASTER)、中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和星载高光谱传感器 (HYPERION) 等国外影像数据的信息构建模型^[4~10] 方面。TM、SPOT、ASTER 虽然

空间分辨率较高,但时间和光谱分辨率都较低; MODIS 虽然时间分辨率较高,但空间分辨率较低; HYPERION 虽然空间和光谱分辨率较高,但其时间

收稿日期: 2011-01-04; 修订日期: 2011-04-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07528-005); “十一·五”国家科技支撑计划重点项目 (2008BAC34B07-03, 2008BAC34B01-2); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项

作者简介: 杨婷 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境遥感监测与预警, E-mail: yangtingoon@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhnies@126.com; zhanghui@nies.org

分辨率较低,并且幅宽很窄,这些因素都制约着遥感数据源在水体实时、动态监测的要求。

目前,针对超光谱数据,已经有多种模型反演水色要素^[11-14],主要有利用水质特征波段进行波段组合的单波段模型、比值模型、归一化模型、一阶微分模型和三波段模型等半经验、半分析模型。由于可用于水体水色要素反演的高分辨率传感器极少,同时,卫星数据的信噪比较低,传感器通道设置不多,这几类模型在超光谱遥感影像上的运用研究才刚刚开始。阎福礼等^[15]研究了基于高分辨率影像 Hyperion 数据进行波段比值、差值和 NDVI 反演水色要素。王桥等^[16]基于环境减灾-1A 卫星超光谱数据,采用三波段模型定量提取了巢湖地区夏季水体叶绿素 a 浓度信息。

我国于 2008 年 9 月发射了第 2 颗专用于环境监测的环境减灾-1A、1B(HJ-1A、1B)卫星,HJ-1A 卫星上携带的超光谱成像仪具有 $\pm 30^\circ$ 侧摆能力,96 h 内可以对全球任意地区进行重访观测;以较短的重返周期和较多的波段设置满足了大范围动态监测水环境的需求^[16]。因此,开发 HJ-1A 卫星超光谱成像仪数据提取叶绿素 a 及悬浮物信息的模型,为遥感水质监测带来新的活力,对于推动内陆湖泊遥感监测、推进国产卫星及遥感技术在水环境监测中的应用具有重要意义。

本研究通过实测太湖水体水质参数,探求同步测量光谱数据以及环境减灾-1A 卫星超光谱成像仪数据与实测叶绿素 a 浓度以及悬浮物浓度之间的关系,并将实测光谱值分析结果与超光谱成像仪数据进行对比分析,进一步验证了环境减灾-1A 卫星超光谱成像仪数据在水质遥感监测中的可行性。

1 材料与方法

1.1 采样时间及地点

2009 年 4 月 29 日~5 月 2 日,天气晴朗,能见度良好,天空无云,水面平静。在太湖进行了星地同步实验。通过 GPS 布点,采集了共 28 个点位的的水体表面反射率光谱数据,并通过室内实验,同步实测了各个点位的叶绿素 a 浓度和悬浮物浓度,叶绿素 a 浓度值在 $2.34 \sim 56.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间;悬浮物浓度值在 $4.28 \sim 65.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。实验样点分布见图 1。

光谱测量采用美国 ASD 公司生产的 Field Spec Pro FR 便携式分光辐射光谱仪(波段范围为 $350 \sim 2500 \text{ nm}$)进行水面上光谱测量。测量在船上进行,测量时间内天空基本无云,水面平静,标准光纤探头

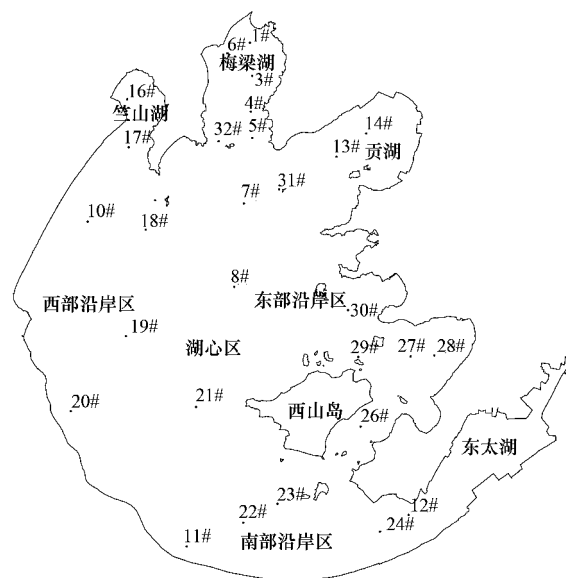


图 1 太湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling stations in Taihu Lake

距离水面 1.2 m 左右,观测方位角为 135° 左右(设太阳入射的方位角为 0°),观测天顶角为 40° 左右,测量时先导出离水辐射率 L_w ,水表面上总的入射辐照度 $E_d(0+)$,再通过式 $R_{rs} = L_w / E_d(0+)$ 求得遥感反射率 R_{rs} 。这种测量方法有效地剔除了噪音特别是天空光信息的干扰,具有很高的精度。每个采样点至少测量 10 次,取平均值作为该点的反射光谱。

悬浮物浓度采用灼烧称重法测定。叶绿素 a 的测定采用分光光度法,用 GF/C 滤膜过滤水样,然后将滤膜置于冰箱中冷冻 48 h 以上,取出用 90% 的热乙醇萃取,然后在岛津 UV2401 分光光度计上测定 665 nm、750 nm 处吸光度,并加入 1 滴 1% 稀盐酸酸化,换算得到叶绿素 a 浓度值。

1.2 卫星数据获取及处理

HJ-1A 卫星超光谱成像仪遥感数据的空间分辨率为 100 m,时间分辨率为 96 h,光谱平均分辨率为 5 nm,共 115 个连续波段,光谱范围覆盖 450 ~ 950 nm,观测幅宽 50 km,12 bit 量化,平均信噪比高达 100。

1.2.1 HJ-1A 影像的几何校正

在太湖星地同步实验过程中获取了一幅超光谱影像(2009 年 5 月 2 日)。本研究以一幅已经进行过精纠正的 2000 年的太湖流域 TM 数据(投影为 UTM,椭球体为 WGS84)为参考影像,在 ERDAS 9.2 支持下对 HJ-1A 超光谱影像进行几何精纠正,图像重采样采用最近邻近点法,这样可以避免光谱信息

的丢失,投影选择 UTM 投影,椭球体选择 WGS84,控制点尽量均匀分布,总误差 RMS 控制在 0.5 个象元之内。

1.2.2 HJ-1A 影像的大气校正

大气校正是遥感影像辐射校正的主要内容,是获得地表真实反射率必不可少的一步,对定量遥感尤为重要。本研究中的 HJ-1A 超光谱影像在辐射定标之后,利用 ENVI 软件中的 EFFORT Polishing 的工具对表观反射率测定和适度修正时进行了经验平面域最优化反射率转换,使波谱曲线更加近似于真实地物的波谱曲线。本次研究采用 6S 大气校正模型,该模型适于可见光~近红外(0.25~4 μm)的多角度数据^[17,18],考虑了地表非朗伯体情况,解决了地表 BRDF 与大气相互耦合的问题,借助较为精确的近似方程以及 SOS(successive order of scattering)算法,提高了瑞利散射和气溶胶散射的计算精度,且计算时间快^[19]。在利用 6S 软件进行大气校正时需要输入的主要参数有:太阳天顶角、卫星天顶角、太阳方位角、卫星方位角,也可以输入卫星轨道与时间参数来替代;大气组分参数,包括水汽、灰尘颗粒度等参数,若缺乏精确的实况数据,可以根据卫星数据的地理位置和时间,选用 6S 提供的标准模型来替代,本次因缺乏大气实测数据,选用标准大气模型中纬度夏季模型;气溶胶组分参数,包括水分含量以及烟尘、灰尘等在空气中的百分比等,本次选用城市模型来描述标准大气的气溶胶组分;气溶胶的大气路径长度,本次用能见度参数表示;观测目标的海拔高度及传感器高度;光谱条件,可以直接输入光谱波段范围,也可以将遥感器波段作为输入条件。

6S 软件在有关参数输入完毕后会计算出各种大气参数,同时也给出了大气校正系数 x_a 、 x_b 、 x_c ,大气校正后的反射率 ACR(atmospherically corrected reflectance)可以用下式获得:

$$y = x_a \times L_i - x_b \quad (1)$$

$$ARC = y / (1.0 + x_c \times y) \quad (2)$$

式中 $L_i [W \cdot (m^2 \cdot Sr \cdot \mu m)^{-1}]$ 为第 i 波段上测的辐亮度值,可由遥感影像经过辐射定标求得^[20]。

2 结果与分析

2.1 光谱特征分析

图 2 为 350~950 nm 范围内的太湖采样点实测遥感反射率光谱曲线,体现了一个比较好的随浓度相关特性,即表现在大部分曲线没有交叉,平行性比较好。图 2 中可见光谱的最大值在绿谱段,约在 560

nm 处;值得注意的是,在 680 nm 附近有波谷,在 705 nm 附近有个波峰,这是内陆湖泊水体与海洋水体的主要区别。从图 2 中的光谱反射曲线可以看出,水体藻类特征显著,400~500 nm 波长范围内,叶绿素吸收作用明显,反射率较低。由藻类色素引起的 560 nm 附近和 705 nm 附近的反射峰十分明显^[21],同时,600 nm 附近和 680 nm 附近有明显的反射谷。其中,560 nm 附近的反射峰是由于藻类叶绿素和胡萝卜素弱吸收和细胞的散射作用形成的;而 705 nm 附近的反射峰是水体藻类最显著的光谱特征,在水体反射光谱曲线上,该峰值存在与否通常是判断水体是否含有藻类叶绿素的依据,多数学者认为这是由于叶绿素 a 的荧光作用产生的^[22]。Gitelson 等^[23]通过研究指出,随着叶绿素 a 浓度的增加,叶绿素荧光峰向长波方向移动。而 600 nm 附近的反射谷是由于藻青蛋白的吸收形成的;680 nm 附近的反射谷是藻类叶绿素在红光波段强烈吸收的结果。由悬浮物引起的 780~810 nm 附近的小反射峰是水体悬浮无机质存在的重要光谱特征,该反射峰只在悬浮物浓度 $> 0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时存在,且是反演悬浮物浓度的主要波段。因此,根据光谱特征分析,太湖水体遥感反射率光谱呈现典型的富营养化二类水体遥感反射率光谱特征。

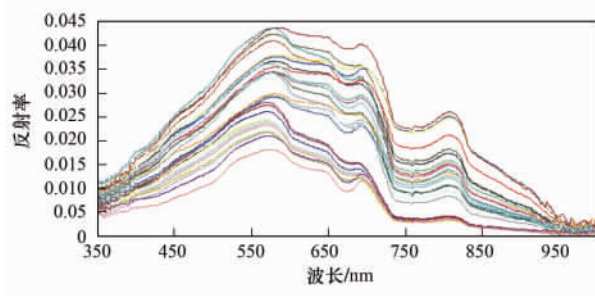


图 2 太湖水体采样点实测遥感反射率

Fig. 2 Spectral remote sensing reflectance of Taihu Lake

对 HJ-1A 卫星超光谱遥感数据预处理完成后影像波段 B66~B98 的光谱曲线如图 3,对应高光谱谱段为 650~820 nm。与相同谱段内地面实测高光谱遥感反射率数据相比,红光波段内叶绿素 a 的反射谷、荧光峰等特征都十分明显,但是荧光峰位置较地面实测荧光峰要前置 1~2 个波段。导致荧光峰前置的原因可能是由于光谱分辨率的不同,也可能是受遥感器通道设置的影响;地面实测超光谱数据在 750 nm 以后变化不大,呈线性趋势,而 HJ-1A 卫星超光谱数据在这段范围内仍出现了数个波峰、波

谷,因此,750 nm 以后峰值和谷值的形成可能是由于大气的影 响,不足以反映叶绿素 a 的反射率信息.

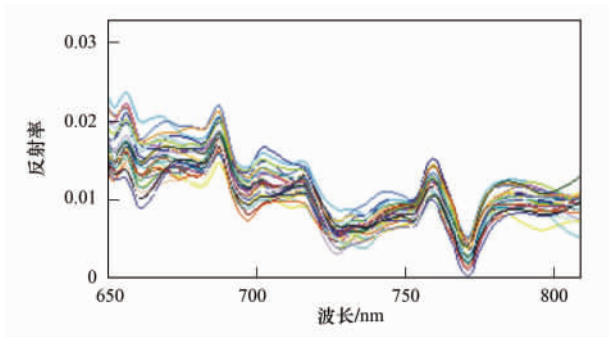


图3 预处理完成后的采样点 HJ-1A 超光谱影像反射率
Fig.3 Reflectance after atmospheric correction

2.2 超光谱数据反演叶绿素 a 浓度

本研究首先对太湖实测光谱数据进行了遥感反射率的提取,并进一步做了归一化和一阶微分处理,分别得到了归一化反射率及一阶微分反射率,将随机选取的 20 个采样点的实测叶绿素 a 浓度值与 3 种处理后的反射率值均进行了相关性分析,最终找

出一阶微分反射率值的 682 nm 波段处的反射率值与叶绿素 a 浓度值有最大正相关关系,Pearson 相关系数达到了 0.975.

根据采样点位的经纬度信息,在 HJ-1A 卫星超光谱影像中提取各点位反射率信息,同样进行归一化和一阶微分处理,分别得到了归一化反射率及一阶微分反射率,从 28 个采样点中随机选取三分之二的点位进行建模,剩余三分之一留作模型验证,因此,20 个点位用于建模,8 个点位用于检验.将随机选取的 20 个采样点的实测叶绿素 a 浓度值与 3 种处理后的反射率值均进行了相关性分析,研究结果表明,归一化反射率值与叶绿素 a 浓度值的相关性最高,最高相关出现在 B₇₃ 波段,中心波长为 682.785 nm,Pearson 相关系数达到了 -0.89,敏感波段的选取与实测光谱值的分析是一致的,所以,选择超光谱数据的 B₇₃ 波段的归一化反射率建立叶绿素 a 浓度反演模型.所建模型的各参数值见表 1,其中自变量为 B₇₃ 波段的归一化反射率,因变量为叶绿素 a 浓度值.

表 1 叶绿素模型汇总与估测参数
Table 1 Model summary and parameter estimates

方程	模型综述					模型参数		
	<i>R</i> ²	<i>F</i>	df1	df2	<i>P</i>	Constant	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂
线性	0.794	61.629	1	16	0.000	188.251	-181.191	
二次	0.894	63.127	2	15	0.000	834.425	-1 649.146	823.945
指数	0.526	17.744	1	16	0.001	12 271.853	-7.321	
对数	0.526	17.744	1	16	0.001	8.15E-005	1 511.573	

从表 1 中所建的 4 个模型分析来看,指数和对数模型的拟合度都不高,只有 0.526,线性模型的拟合度要优于指数和对数模型,达到了 0.794,但二次非线性模型的拟合度更优,达到了 0.894,在显著性水平 <0.001 条件下相关性达到了最好,所以,叶绿素 a 浓度的反演模型就选用一元二次非线性模型.由表 1 中可得,所建模型为:

Chl-a = -1 649.146*x* + 823.945*x*² + 834.425

(1)

式中,因变量 Chl-a 为叶绿素 a 浓度值,自变量为超光谱数据 B₇₃ 波段归一化反射率值.

2.3 超光谱数据反演悬浮物浓度

太湖的悬浮物主要是泥沙,对许多泥沙光学特性的研究表明,对泥沙浓度最为敏感的波长为 550 nm 和 670 nm^[24,25].随着泥沙浓度增高,泥沙反射峰向红端偏移.当泥沙达到一定浓度后,550 nm 波段附近会出现饱和,而 670 nm 更适合于高泥沙浓度的

探测.所以悬浮物的反演选取泥沙遥感参数 *S_r* = (*R*₅₅₀ + *R*₆₇₀)/(*R*₅₅₀/*R*₆₇₀) 进行分析.

本研究首先分别求取了实测光谱值的遥感反射率、归一化反射率以及一阶微分反射率值的泥沙遥感参数,通过分析,发现 556 nm 处的反射率值建立的泥沙遥感参数与悬浮物浓度值的相关性最高,因此这里选取了 550 nm 附近的 556 nm 用于建立泥沙遥感参数,*S_r* = (*R*₅₅₆ + *R*₆₇₀)/(*R*₅₅₆/*R*₆₇₀) 并分析了 *S_r* 与悬浮物浓度的相关关系,最终发现归一化反射率值的泥沙遥感参数 *S_r* 与悬浮物的相关性最高,Pearson 相关系数达到了 0.914.

分别求取超光谱数据的遥感反射率、归一化反射率以及一阶微分反射率的泥沙遥感参数 *S_r*,选取小卫星 B₃₉ 波段和 B₇₀ 波段计算,对应的中心波长分别为 555.725 nm 和 669.285 nm,*S_r* = (*B*₃₉ + *B*₇₀)/(*B*₃₉/*B*₇₀),通过分析,得知遥感反射率的泥沙遥感参数与悬浮物值的相关性最高,Pearson 相关系数达

到了 0.896,借鉴实测光谱值分析结果,得知泥沙遥感参数 S_r 能够很好地反演悬浮物质.因此,最终选取遥感反射率的泥沙遥感参数 S_r 与悬浮物值进行分析.所建模型的各参数值见表 2,其中自变量为 S_r ,因变量为 SS.

从表 2 中所建的 4 个模型分析来看,指数和对

表 2 悬浮物模型汇总与估测参数
Table 2 Model Summary and Parameter Estimates

方程	模型综述					模型参数		
	R^2	F	df1	df2	P	Constant	b1	b2
线性	0.803	65.376	1	16	0.000	-15.649	477.235	
二次	0.819	33.856	2	15	0.000	1.593	101.196	1790.570
指数	0.664	31.624	1	16	0.000	4.559	17.043	
对数	0.664	31.624	1	16	0.000	0.219	3.96E-008	

数模型的拟合度都不高,只有 0.664,线性模型的拟合度要优于指数和对数模型,达到了 0.803,但二次非线性模型的拟合度更优,达到了 0.819,在显著性水平 <0.001 条件下相关性达到了最好,所以,悬浮物浓度的反演模型选用一元二次非线性模型.由表中可得,所建模型为:

$$SS = 101.196x + 1790.570x^2 + 1.593 \quad (2)$$

式中,因变量 SS 为悬浮物值,自变量为超光谱数据

遥感反射率泥沙遥感参数 S_r .

3 讨论

综合以上分析,结果表明,实测光谱数据水质参数敏感波段的选取,对环境超光谱数据具有很好的借鉴作用,2 种光谱数据与叶绿素 a 浓度以及悬浮物浓度相关性最高的波段以及 Pearson 相关系数如表 3 所示.

表 3 实测光谱与 HJ-1A 光谱敏感波段比较
Table 3 Comparison of sensitive bands between measured spectrum and HJ-1A

项目	叶绿素 a 浓度		悬浮物浓度	
	波段/nm	Pearson 系数	波段/nm	Pearson 系数
实测光谱	682	0.975	$(R_{556} + R_{670}) / (R_{556} / R_{670})$	0.914
HJ-1A 光谱	682.785	-0.89	$(R_{555.725} + R_{669.285}) / (R_{555.725} / R_{669.285})$	0.896

将这 2 种模型运用到 HJ-1A 卫星超光谱遥感影像中进行叶绿素 a 以及悬浮物信息提取,并用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE) 2 个指标以及模型的决定系数(R^2)进行精度检验.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{mod,i} - x_{obs,i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$RE = \frac{x_{mod} - x_{obs}}{x_{obs}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, x_{mod} 表示叶绿素 a 浓度或悬浮物浓度反演值, x_{obs} 表示叶绿素 a 浓度或悬浮物浓度实测值.平均相对误差是对每个误差取绝对值后的平均相对误差. R^2 表示趋势线的估计值与对应的实际数据之间的拟合程度,是取值范围为 0 ~ 1 的数值,当趋势线的 R^2 等于 1 或接近 1 时,其可靠性最高.2 种模型的验证结果如表 4 所示.

分析表 4,2 个模型的平均相对误差(RE_{mean})均在 30% 以内,且这 2 个模型的均方根误差(RMSE)均远小于太湖水体实测平均叶绿素 a 浓度以及平均

悬浮物浓度, R^2 也均达到了 0.85 以上,根据验证结果,这 2 个模型能够有效地定量反演太湖水体叶绿素 a 浓度以及悬浮物浓度.用建模的 20 个采样点以及剩余 8 个样点均用于验证,验证结果如图 4 和图 5.

表 4 太湖水体叶绿素 a 浓度模型与悬浮物模型评价
Table 4 Evaluation of suspended solids model and chlorophyll-a model

项目	R^2	RMSE	$RE_{max}/\%$	$RE_{min}/\%$	$RE_{mean}/\%$
Chl-a 模型	0.89	4.01	67.20	5.62	27.48
SS 模型	0.87	7.02	55.56	0.37	22.21

由图 4 和图 5 分析可知,叶绿素预测模型以及悬浮物预测模型的验证精度分别达到了 0.89 和 0.87,模型精度达到了水质参数的反演要求,可以发现其中叶绿素 a 浓度实测值当中有 2 个显著的极值,本研究中未将这 2 个值当做异常值进行剔除,因为在实验样点设计中,样点较少,但基本均匀分布于整个太湖,此 2 点代表了竺山湖的水质状况,实地取样时,对该地区的叶绿素 a 浓度值进行了多次测

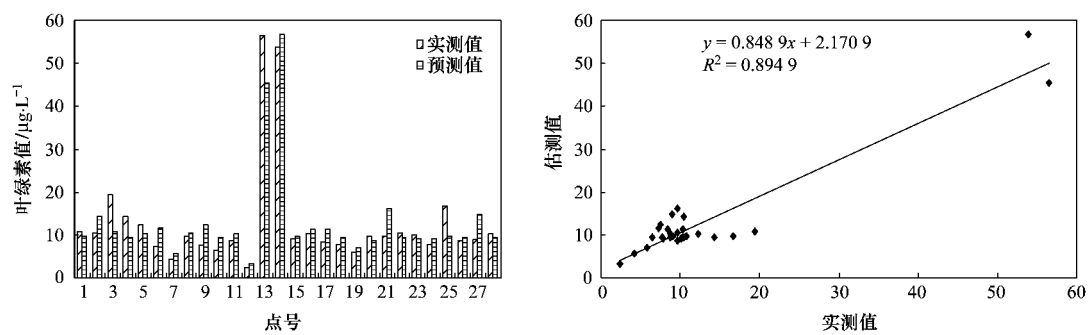


图 4 叶绿素模型验证结果 (Chl-a 模型)
Fig. 4 Result of chlorophyll-a model

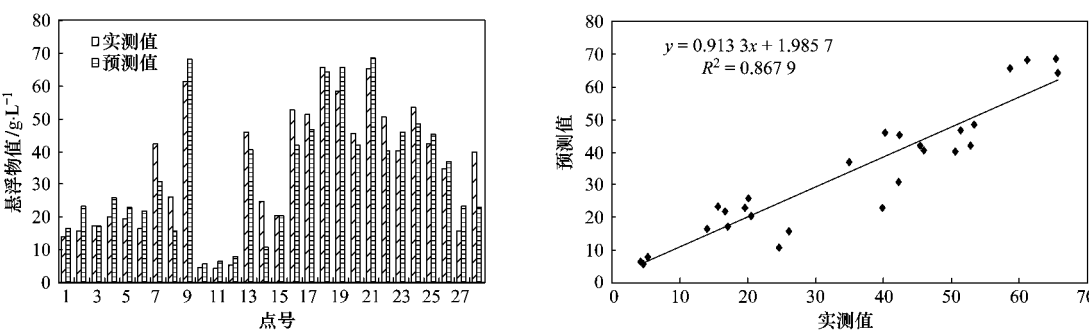


图 5 悬浮物模型验证结果 (SS 模型)
Fig. 5 Result of solid suspensions model

量取平均,其中一个用于建模,另一个用于验证,2个模型在遥感影像上的反演效果如图 6 和图 7.

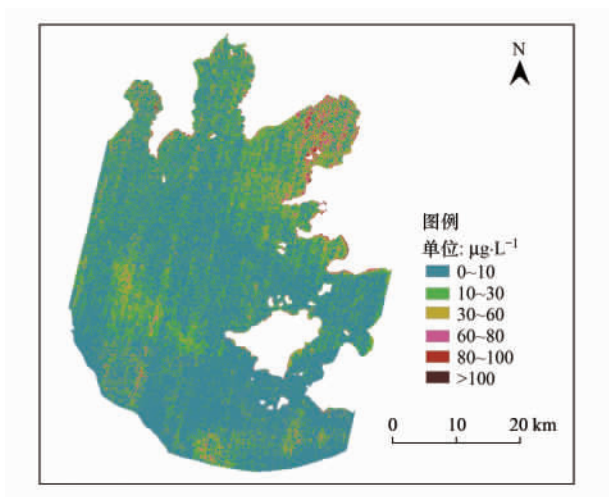


图 6 太湖叶绿素 a 反演图
Fig. 6 Water quality of chlorophyll-a in Taihu Lake

环境小卫星超光谱影像数据的前 15 个波段存在着明显的纵向条纹,剩余波段也存在一定程度的纵向条纹,但较前 15 波段要好,在水体等背景均一地物位置,条带现象则更加明显,条带和噪声的存在

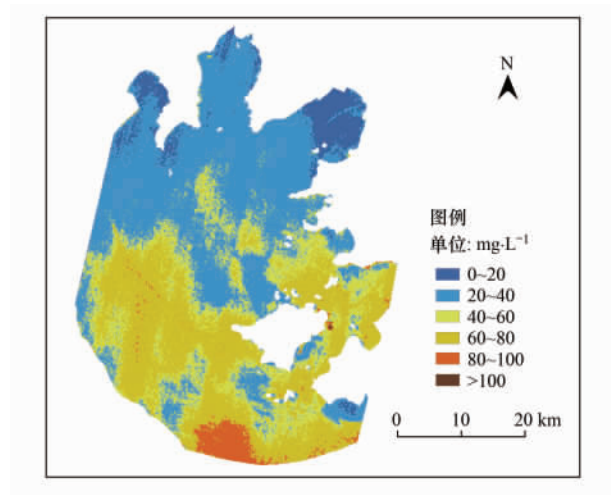


图 7 太湖悬浮物反演图
Fig. 7 Water quality of solid suspensions in Taihu Lake

对于水质参数反演存在一定影响. 本研究中已将前 20 波段去除,从图 6 和图 7 来看,反演结果仍受影像质量一定的影响,但就整个湖区而言,图中叶绿素 a 浓度以及悬浮物浓度的区域变化还是很明显,就叶绿素 a 浓度而言,东太湖以及湖心的浓度偏低,贡湖以及太湖南岸和西岸部分区域浓度偏高,与王世

新等^[26]MODIS 影像的太湖春季叶绿素 a 遥感监测结果一致. 据统计,近年来,3~5 月逐渐成为太湖蓝藻水华的初始出现期,6~9 月为蓝藻水华的频发期,此时的季节还处于春末夏初,太湖蓝藻水华还处于初始出现期,还未高频率大规模暴发,因此整体叶绿素 a 浓度不是很高. 从悬浮物浓度的反演结果来看,太湖北部的竺山湖、贡湖悬浮物浓度都较低,梅梁湖区浓度相对较高,湖心区大部分悬浮物浓度都较高,由于其水面开阔,风速较湖岸大,在风浪作用下底泥发生再悬浮使悬浮物浓度增高,最高区出现在南部沿岸区,西南区苕溪水系坡陡流急,是太湖主要水源之一,主流向北由小梅口、大钱口入太湖,河口区由于水交换强烈,因而西南区的悬浮物含量一直较高. 总体来看,整个湖区的悬浮物浓度都较高,原因可能是处于春末,降水较少,就本次研究的时间以及整个湖区的悬浮物等级区域分布状况,与环境保护部卫星应用中心公布的 TM 影像春季悬浮物浓度遥感监测结果是非常一致的. 值得关注的是,西苕溪入湖口处,叶绿素浓度和悬浮物浓度都很高,悬浮物尤为突出,除上述原因以外,根据实地调查,西苕溪上游有一较大石矿经由入湖口向湖区排水,其次该段跨湖大桥正在建设当中,施工的影响不可忽视,另外该区域船流量也较大,导致湖水搅动比较大,湖水特别浑浊,湖面有围网养殖区,实地测量的蓝绿藻和叶绿素值是整个湖区所有采样点中最高的,而且较其他采样点高很多,研究结果真实可信.

4 结论

(1)环境小卫星超光谱影像数据具有 115 个波段,通过对数据质量的分析,前 15 个波段具有非常严重的条带,基本无法利用,去除了前 20 个波段之后,剩余 95 个波段仍然能够较好地反映太湖水体的光谱特征,叶绿素 a 的反射谷、荧光峰以及悬浮无机质的反射峰等特征都十分明显,环境小卫星超光谱数据能够很好的应用于水质定量遥感.

(2)水面实测光谱 682 nm 波段与叶绿素 a 浓度相关性最好,与环境卫星超光谱数据 B_{73} (中心波长为 682.785 nm) 波段是一致的,实测光谱波段组合 $S_r = (R_{556} + R_{670}) / (R_{556} / R_{670})$ 与悬浮物浓度的相关性最好,这与超光谱数据 $S_r = (B_{39} + B_{70}) / (B_{39} / B_{70})$ 也是一致的(B_{39} 与 B_{70} 中心波长分别为 555.725 nm 和 669.285 nm),因此,无论是单波段还是波段组合,实地同步实测光谱数据对于星载高光谱影像水质参数反演敏感波段的选择都具有很好的借鉴

作用.

(3)叶绿素单波段反演模型以及悬浮物波段组合 S_r 模型,平均相对误差均在 30% 以内,均方根误差远小于太湖水体叶绿素 a 浓度以及悬浮物浓度平均值,因此,本研究建立的模型能够有效的反演太湖叶绿素 a 浓度以及悬浮物浓度.

(4)针对不同湖泊,或者同一湖泊的不同季节,水体反射光谱曲线特征不一致,在进行敏感波段分析时,敏感波段存在一定差异,使得水质反演的模型和参数的选择也存在一定的差异^[20],因此,水体各组分含量有所差异,水质参数及水体反射光谱季节变化明显,模型运用的外推性还有待于进一步研究.

致谢:感谢南京信息工程大学遥感学院赵巧华老师提供实测数据.

参考文献:

- [1] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响[J]. 水科学进展,2004,15(5):615-620.
- [2] 李云亮,张运林. 基于 TM 影像的太湖夏季悬浮物和叶绿素 a 浓度反演[J]. 遥感信息,2008,6(2):22-27.
- [3] 乐成峰,李云梅,孙德勇,等. 太湖叶绿素 a 浓度时空分异及其定量反演[J]. 环境科学,2008,29(3):619-626.
- [4] 王海君,李云梅. 用 ASTER 数据监测梅梁湖湖区蓝藻分布的方法[J]. 南京师大学报(自然科学版),2002,28(1):103-106.
- [5] 赵碧云,贺彬,朱云燕,等. 滇池水体中叶绿素 a 含量的遥感定量模型[J]. 云南环境科学,2001,20(3):1-3.
- [6] Brivio P A, Giardino C, Zilioli E. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(2-3):487-502.
- [7] Doxaran D, Froidefond J M. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1):149-161.
- [8] 张华,曾光明,李忠武,等. 内陆水环境污染监测的多时相遥感信息模型[J]. 中国环境科学,2005,21(5):63-68.
- [9] Hamilton M K, Davis C O. Estimating chlorophyll content and bathymetry of Lake Tahoe using AVIRIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44(2-3):217-230.
- [10] 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):26-29.
- [11] 周冠华,柳钦火,马荣华,等. 基于半分析模型的波段最优组合反演混浊太湖水体叶绿素[J]. 湖泊科学,2008,20(2):153-159.
- [12] 乐成峰,李云梅,孙德勇,等. 基于季节分异太湖叶绿素浓度反演模型研究[J]. 遥感学报,2007,11(4):473-480.
- [13] 韦玉春,黄家柱,李云梅,等. 夏季太湖叶绿素 a 浓度的高光谱数据检测模型[J]. 遥感学报,2007,11(5):756-762.

- [14] 李云亮,张运林,李俊生,等. 不同方法估算太湖叶绿素 a 浓度对比研究[J]. 环境科学,2009,**30**(3):680-686.
- [15] 阎福礼,王世新,周艺,等. 利用 Hyperion 星载高光谱传感器监测太湖水质的研究[J]. 红外与毫米波学报,2006,**25**(6):460-464.
- [16] 王桥,杨煜,吴传庆,等. 环境减灾-1A 卫星超光谱数据反演叶绿素 a 浓度的模型研究[J]. 航天器工程,2009,**18**(6):133-137.
- [17] 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):230-233.
- [18] 吕恒,江南,罗澈葱. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 a 浓度定量反演[J]. 地理科学,2006,**26**(4):472-476.
- [19] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S:an overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, **35**(3):675-686.
- [20] 刘三超,张万昌,蒋建军,等. 用 TM 影像和 DEM 获取黑河流域地表反射率和反照率[J]. 地理科学,2003,**23**(5):585-591.
- [21] 张云林,秦伯强,陈伟民,等. 太湖梅梁湾沿岸带水体生物学与光学特性[J]. 生态学报,2005,**25**(3):454-460.
- [22] 于德浩,王艳红,邓正栋,等. 基于实测光谱的叶绿素 a 估测模型[J]. 环境工程学报,2009,**3**(6):1148-1152.
- [23] Gitelson A A. Kondratyev K Y. Optical models of mesotrophic and eutrophic water bodies[J]. International Journal of Remote Sensing,1991, **12**(33):373-385.
- [24] 王繁,周斌,徐建明,等. 基于实测光谱的杭州湾悬浮物浓度遥感反演模式[J]. 环境科学,2008,**29**(11):3022-3026.
- [25] 温小乐,徐涵秋. 基于多源同步数据的闽江下游悬浮物定量遥感[J]. 环境科学,2008,**29**(9):2441-2447.
- [26] 王世新,焦云清,周艺,等. 应用 MODIS 监测太湖水体叶绿素 a 浓度季节变化研究[J]. 遥感信息,2008,**26**(1):47-53.