

基于环境一号卫星高光谱遥感数据的巢湖水体叶绿素 a 浓度反演*

杨煜, 李云梅, 王桥, 王彦飞, 金鑫, 尹斌, 张红
(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要: 三波段模型是基于生物光学模型构建的叶绿素 a 浓度反演半分析模型, 是目前反演内陆富营养化浑浊水体叶绿素 a 浓度效果较好的方法. 本文通过星地同步实验, 分析巢湖水体各组分光谱特征, 分别基于地面实测数据与环境一号卫星高光谱遥感数据建立三波段模型反演巢湖水体叶绿素 a 浓度. 结果表明, 由于特征波段在不同数据源的位置不同, 导致了两个模型波段选择及反演精度的差异. 因此, 只有在充分考虑遥感数据的光谱特征的前提下, 分析遥感信息理论和实际图幅影像有效结合在一起的地物信息, 才能进一步优化三波段模型的波段选择, 实现遥感数据定量反演水体叶绿素 a 浓度的目标.

关键字: 叶绿素 a; 遥感; 巢湖; 环境一号卫星

Retrieval of chlorophyll-a concentration by Three-band model in Lake Chaohu

YANG Yu, LI Yunmei, WANG Qiao, WANG Yanfei, JIN Xin, YIN Bin & ZHANG Hong

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, P. R. China)

Abstract: Three-band model is a semi-analytical model based on some assumptions of bio-optical model properties, which is an excellent model for chlorophyll-a. The goal of this study is to analyze the feature of the reflectance spectrum by the data collected on the surface of the Lake Chaohu and to synchronized images of the satellite HJ-1. The different location of feature bands turns out that two models have several differences in the retrieval resolutions. Three bands of two models are 669nm/699nm/735nm and B73 (680.49–685.08nm)/B74 (685.08–689.74nm)/B81 (719.04–724.17nm) respectively. Only when taking the full considerations of the feature of remote sensing data and analyzing both remote sensing theory and image, we can optimize choices of the three bands and archive the target of quantitative retrieving the chlorophyll-a by remote sensing image.

Keywords: Chlorophyll-a; remote sensing; Lake Chaohu; satellite HJ-1

巢湖是我国第五大淡水湖泊, 位于安徽省中部, 紧邻工业发达的合肥市和巢湖市, 位置介于东经 117°16'54"–117°51'46"、北纬 30°25'28"–31°43'28"之间. 近年来, 随着周边城市经济快速发展、人口急剧膨胀, 巢湖水环境所承受的压力日益加剧, 废水废渣的大量排放导致湖泊富营养化日益严重. 每年 6–10 月西巢湖大面积暴发蓝藻水华, 不仅破坏了湖泊生态环境, 造成大量鱼虾死亡, 水质恶劣, 而且作为周边城市的水源地, 严重影响到人们正常的生产生活秩序, 带来了不可估量的经济、生态损失. 因此, 利用卫星遥感信息进行巢湖水表大面积藻类空间分布及动态的定量分析, 无疑是非常必要和重要的^[1].

湖泊富营养化的直接表现是藻类物质的大量繁殖, 而叶绿素 a 在藻类物质中所占比例稳定, 且易于在实验室测定, 因此, 叶绿素 a 含量是作为反映湖泊富营养化程度的重要指标. 当前, 针对地面实测高光谱数据所开发的一系列半经验反演模型, 如波段比值模型^[2]、一阶微分模型^[3]等都在巢湖叶绿素 a 浓度遥感反演中取得了较广泛的应用. 李素菊等于 2001 年使用地面实测高光谱数据建立 690nm 反射率的一阶微分模型和 R_{705nm}/R_{680nm} 的波段比值模型估测了巢湖水体叶绿素 a 浓度, 相关系数分别为 0.66 和 0.70^[4]; 胡雯等于

* 国家科技支撑计划“十一五”项目“基于环境一号等国产卫星的大型水体环境遥感监测应用技术与软件开发”(2008BAC34)和国家自然科学基金“面向湖泊水色遥感的多源数据融合与生成研究”项目(40971215)联合资助. 2009-08-17 收稿; 2010-01-12 收修改稿. 杨煜, 女, 1984 年生, 硕士研究生; E-mail: njnuyangu@126.com.

2002 年将 *NDVI* 指数运用于 NOAA 卫星影像中监测巢湖叶绿素 a 浓度以查看蓝藻水华的分布状况^[5]; 苟尚培等于 2009 年根据巢湖水体实测数据建立了 R_{705nm}/R_{680nm} 的光谱反射率比值模型估算叶绿素 a 浓度, 相关系数为 0.75, 并将其运用到 MODIS 影像中进行反演, 检验得到相关系数为 0.5079^[6]. 然而, 有研究表明由于此类模型缺乏物理基础支持, 只能根据实验数据的不同反演一定范围内的水质参数值, 在一定范围之内, 模型有着很好的反演精度, 超出这个范围, 模型反演的误差将明显增大, 因而, 当叶绿素 a 浓度过高时, 此类模型不适合用来提取叶绿素 a 浓度信息^[7]. Gitelson 等曾基于植被、土壤等物质的光学传输机理提出了三波段式的半分析模型估算叶绿素含量^[8], Zimba^[9]、Dall' Olmo^[10] 等将该方法应用于水体叶绿素 a 浓度反演, 开发了适于污染严重的富营养化浑浊内陆水体的叶绿素 a 浓度反演模型, 大大提高了反演精度. Moses 等进一步将三波段模型与 MERIS、MODIS 影像结合反演叶绿素 a 浓度, 成功估算出一些内陆湖泊、近岸海域和河口的叶绿素 a 浓度^[11-12]. 国内的周冠华^[13]、李云亮^[14]、徐京萍^[15]、马金峰^[16] 等在太湖、新庙泡、珠江河口应用地面采集的光谱数据建立三波段模型反演了相应水体的叶绿素 a 浓度, 效果较好. 结果表明, 三波段模型在叶绿素 a 含量范围为 4.4 - 3078mg/m³ 的富营养浑浊内陆水体的反演中精度较高. 杜聪等^[17] 利用 Hyperion 卫星影像构建三波段模型反演太湖水体叶绿素 a 浓度, 认为 B34 (691.37nm)、B37 (721.90nm) 和 B50 (854.18nm) 组成三波段模型变量与叶绿素 a 浓度具有最高的相关系数, 其反演精度优于传统经验统计模型. 同时, Gitelson 等的研究也表明, 三波段模型中三个波段的选择往往会受到水色要素含量差异的影响而发生变化^[18]. 因此, 在不同的湖泊建立三波段模型, 需要针对其水色要素对遥感反射率的响应特征选择合适的波段, 从而提高叶绿素 a 浓度的反演精度.

我国于 2008 年发射了第一颗专用于环境监测的环境一号卫星 (HJ-1), 其上携带的超光谱成像仪, 具有连续的高光谱波段设置和较短的重返周期. 其中, 连续的高光谱波段设置能够反映内陆水体光谱的微小变化, 提高水色要素的反演精度; 而较短的重返周期有利于实现对水体的大规模实时监测. 因此, HJ-1 高光谱数据的应用满足了我国对环境大范围动态监测的需求. 然而受限于发射时间较短, 目前还未有与此相关的研究. 因此本研究将基于巢湖水体的光谱特征, 分析三波段模型反演巢湖水体叶绿素 a 浓度的最优波段, 并且将理论模型和实际图幅影像有效结合, 在充分考虑水体水质参数光谱特征的基础上实现巢湖水体叶绿素 a 浓度的同步卫星遥感反演, 从而实现 HJ-1 对内陆水体的有效监测, 这对于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.

1 材料与方法

1.1 采样时间及地点

本文以位于安徽省境内的巢湖为研究区, 于 2009 年 6 月 13 - 17 日在巢湖进行了星地同步实验. 通过 GPS 布点, 使用美国 ASD 公司生产的野外光谱仪 (波段范围为 325 - 1075nm) 采集了共 32 个点位的水体表面反射率光谱数据, 光谱数据采集方法参见文献 [19]. 通过室内实验, 同步实测了各个点位的叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和色素、非色素、黄质的吸收系数. 其中, 叶绿素 a 浓度测定采用热乙醇法^[20], 悬浮物浓度测定采用称重法^[21], 各组分吸收系数采用定量滤膜法^[22]. 实验样点分布见图 1. 去掉受天气影响或水面白帽影响而使反射率数据过饱和的第 1 号和 29 号点位, 利用剩余的 30 个点位进行数据分析和模型构建.

对于所有样点, 叶绿素 a 浓度最高值出现在位于西巢湖近岸的第 32 号点, 达 192.88mg/m³; 而最低值出现在位于东巢湖的第 5 号点, 是 31.25mg/m³ (图 2). 叶绿素 a 浓度均值为 62.43mg/m³. 对于所有样点, 悬浮物浓度为 17.8 - 63.55mg/L, 均值为 43.61mg/L. 因此, 巢湖叶绿素 a 浓度和悬浮物浓度都较高, 是一个浑浊的富营养化二类水体.

1.2 HJ-1 高光谱遥感数据获取及处理

HJ-1 高光谱遥感数据的空间分辨率为 100m, 时间分辨率为 96h, 光谱平均分辨率为 5nm, 共 115 个波段. 在此次星地同步实验中, 于 6 月 13 日获取一景高光谱影像.

遥感影像的预处理主要包括水体提取、几何校正和大气校正. 因而本文运用图形处理软件 ENVI 人工数字化提取巢湖水域, 并去除湖中小岛; 采用一幅已经过几何精纠正的 TM 影像为参考图进行几何校正; 运用 6S 大气校正软件逐波段实现对该高光谱遥感影像的大气校正.

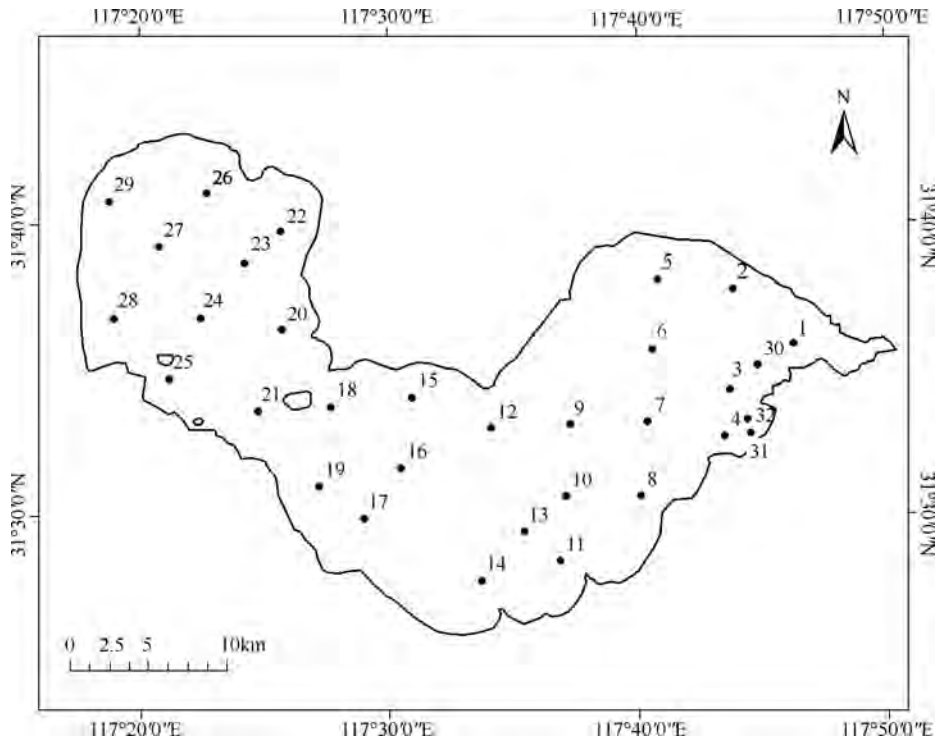


图 1 巢湖野外实验样点分布

Fig. 1 Sampling stations in Lake Chaohu

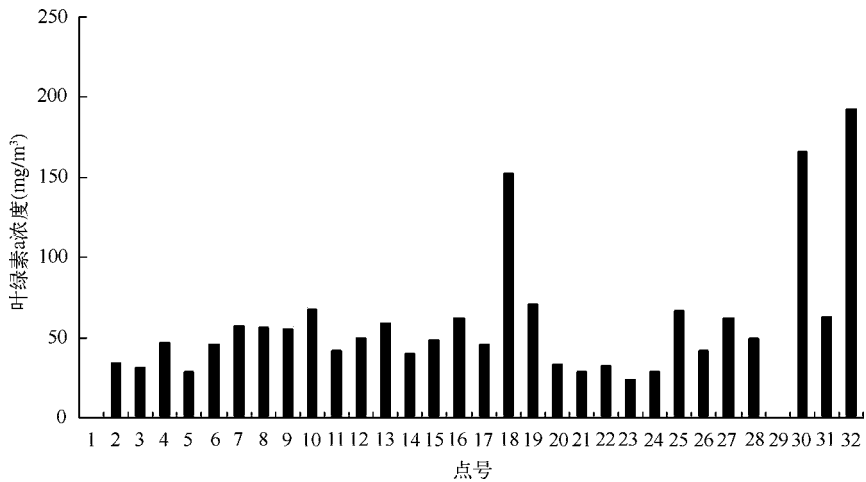


图 2 各点位叶绿素 a 浓度示意

Fig. 2 Concentration of chlorophyll-a in 30 points

30 个点位的影像原始 DN 值数据(图 3a)、6S 大气校正后遥感反射率数据(图 3b)和地面实测高光谱遥感反射率数据(图 3c)的比较见图 3,对应高光谱波段为 650-817nm。比较大气校正前后的数据差异,发现校正后的数据在 680nm 附近出现了吸收峰、在 700nm 附近出现了荧光峰,这与相同波段内地面实测高光谱遥感反射率数据的光谱特征呈现了一致性,然而校正后数据中的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造成,也可能是受到传感器通道设置的影响. 地面实测高光谱遥感反射数据在 750nm 以后变化不大,没有表现出较强的波段依赖性,而校正后的 HJ-1 高光谱遥感反射率数据在这段范围内仍出现了数个波峰、波谷,这与校正前的数据具有一致性. 因而 750nm 以后的峰值和谷值可能是影像源数据带来的误差,经过大气校正后仍未能消除,不足以反映水色要素的光谱特征信息.

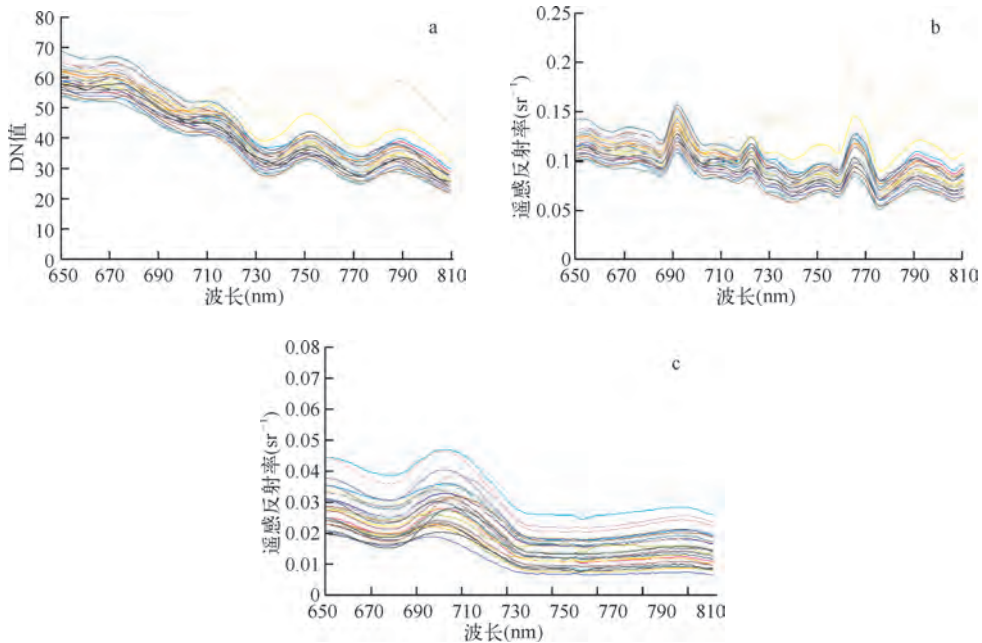


图 3 HJ-1 校正前后高光谱数据与实测地面高光谱数据比较

Fig. 3 Reflectance after atmospheric correction versus original reflectance data

2 结果与分析

2.1 水体组分光学特性分析

18[#]样点处地面实验得到的各组分吸收系数及后向散射系数曲线图表明,非色素颗粒物吸收系数变化趋势和黄质吸收系数类似,都随着波段的增加呈指数衰减,两者分别在 650nm 和 550nm 以后开始接近于零值(图 4). 而色素吸收在 580nm 以前其数值远小于非色素吸收系数,因此,580nm 以前,总吸收系数是由非色素和黄质的吸收系数所主导,同样是随波段增加呈现指数衰减的趋势,在 440nm 和 500nm 处的色素特征吸收峰表现不明显;580nm 以后,总吸收系数变化趋势开始由色素吸收系数所主导,尤其是 675nm 附近叶绿素 a 的吸收峰直接导致了总吸收系数在此处有一个较大的峰值,但其后,色素的吸收也开始出现随波长增加而逐渐变小的趋势;710nm 以后,随着水体中色素、非色素和黄质的吸收趋于零值,同时纯水的吸收随波段线性增加,总吸收系数开始趋于与纯水的吸收特征相似,其值也逐渐接近. 此外,图 4 还表明后向散射系数是随着波段的增加而逐渐减小的,700nm 以后,总后向散射小于 0.1.

2.2 基于地面实测高光谱数据的模型构建

三波段模型的具体形式为:

$$(R_{rs}(\lambda_1)^{-1} - R_{rs}(\lambda_2)^{-1}) \times R_{rs}(\lambda_3) \propto Chl. a \quad (1)$$

根据建模原理, λ_1 应该取值为色素吸收对遥感反射率影响最大且黄质、非色素颗粒物的吸收与总后向散射对遥感反射率的影响较小的位置,即红光波段内的叶绿素 a 吸收峰处; λ_2 应该位于 λ_1 附近且叶绿素 a 的吸收较小处,位于红光波段内的叶绿素 a 荧光峰能满足 λ_2 的选择要求; λ_3 的选择条件为总吸收系数远大

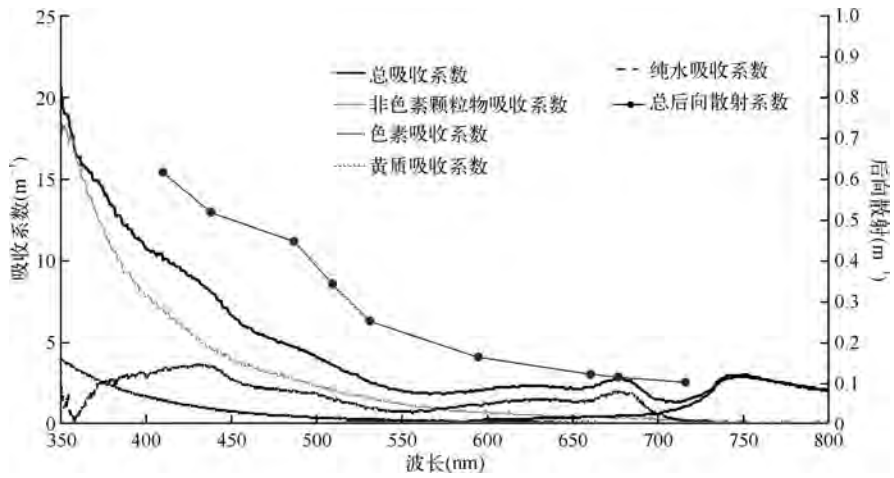


图 4 18# 点位各组分吸收系数及后向散射曲线

Fig. 4 The curve of absorption and backscattering in Point 18

于后向散射系数且不受叶绿素、非色素颗粒物和黄质吸收的影响,即遥感反射率主要受纯水吸收的作用^[10]. 对 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 这三个最优波段的确定使用特征波段范围内迭代的方法进行优化选择.

根据波段要求,结合上述对巢湖水体光谱特征的分析, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的取值范围分别是:650 – 690nm、690 – 710nm 和 710 – 750nm. 运用地面实测 30 个点位数据在三个波段选择范围内分别进行迭代:从 λ_1 开始,将 λ_2 、 λ_3 波段固定为 700nm 和 730nm,在 λ_1 的迭代范围内进行迭代,在结果中选取均方根误差最小、相关性最大的波段作为 λ_1 的输出波段,加入到 λ_2 的迭代中,完成 λ_2 的迭代后继续迭代 λ_3 ,直至将三个波段迭代完成,再一次迭代 λ_1 ,若结果波段与第一次迭代相同,则已选出的三个波段为最优波段,否则,继续迭代,直至出现相同的迭代结果.

迭代过程见图 5. 最终确定 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为 669nm、699nm 和 735nm.

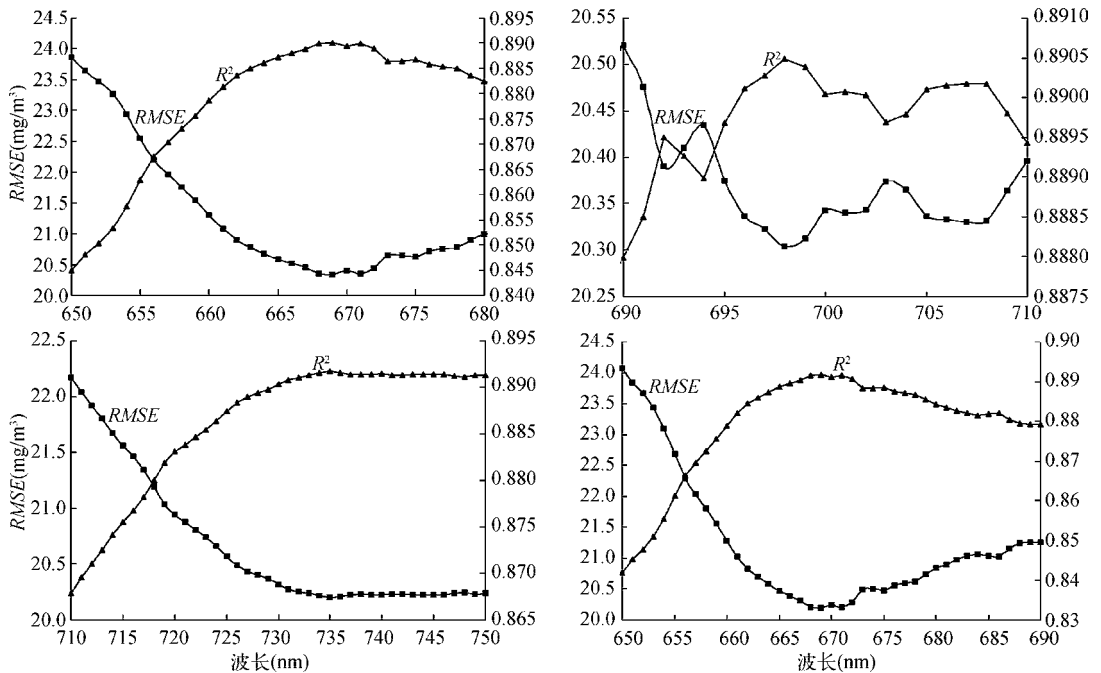


图 5 三波段模型迭代过程

Fig. 5 Four steps of three-band model tuning

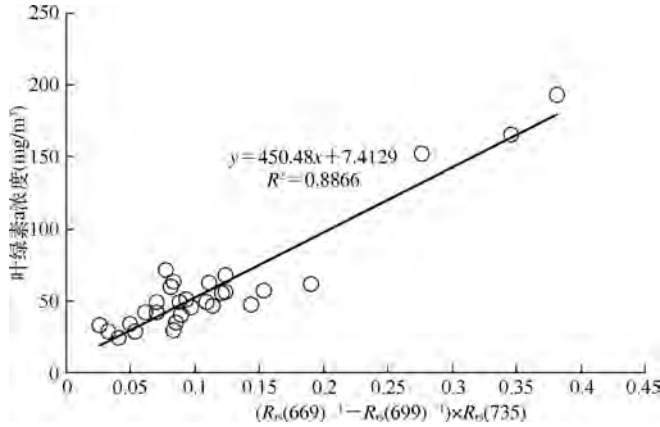


图 6 模型 $(R_{rs}(\lambda_{669})^{-1} - R_{rs}(\lambda_{699})^{-1}) \times R_{rs}(\lambda_{735})$ 反演效果

Fig. 6 Retrieving result of the model $(R_{rs}(\lambda_{669})^{-1} - R_{rs}(\lambda_{699})^{-1}) \times R_{rs}(\lambda_{735})$

以 $(R_{rs}(\lambda_{669})^{-1} - R_{rs}(\lambda_{699})^{-1}) \times R_{rs}(\lambda_{735})$ 为自变量, 叶绿素 a 浓度为因变量建立线性模型:

$$Chl. a = 450.48 \times [(R_{rs}(\lambda_{669})^{-1} - R_{rs}(\lambda_{699})^{-1}) \times R_{rs}(\lambda_{735})] + 7.4129 \quad (2)$$

使用统计方法作为检验反演值和实测值是否一致的评判标准. 统计标准引用 2 种方法, 即均方根误差 (RMSE) 和相对误差 (RE), 表达式如下:

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

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

其中, $Chl. a_{mod}$ 表示叶绿素 a 浓度反演值, $Chl. a_{obs}$ 表示叶绿素 a 浓度实测值. 平均相对误差的是对各相对误差取绝对值后的平均.

通过计算, 模型估测的最大相对误差为 54%, 最小相对误差为 2%, 平均相对误差为 21%. 均方根误差为 13.42 mg/m^3 , 远低于叶绿素 a 浓度的平均值, 说明三波段模型可以应用于巢湖的叶绿素 a 浓度估算.

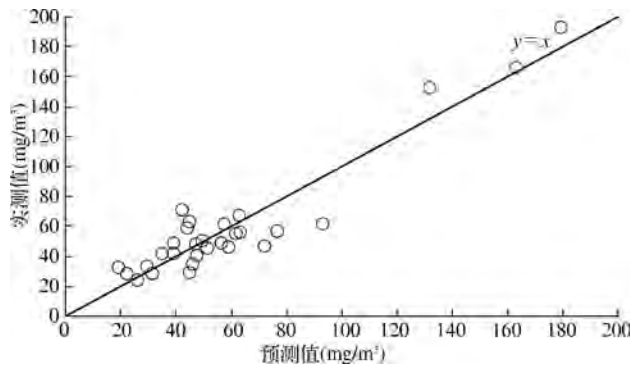


图 7 地面实测高光谱数据建模反演精度示意

Fig. 7 Predicted Chl. a concentration by model built by data collected in the experiment versus measured Chl. a concentration

2.3 基于 HJ-1 高光谱数据的模型构建

将模型(2)直接应用于高光谱影像反演叶绿素 a 浓度,发现反演结果出现了负值,并且叶绿素 a 浓度估值都偏小,说明需要利用高光谱影像数据,重新构建模型. 在前述分析巢湖水体光学特征的前提下,基于 HJ-1 高光谱数据,同样运用迭代方法选取三波段模型的最优波段. HJ-1 高光谱影像对应波段范围如表 1. 据此, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的迭代范围分别是: $B66 - B73$ 、 $B74 - B79$ 、 $B80 - B86$.

表 1 HJ-1 高光谱数据波长范围
Tab.1 Wavelength range of HJ-1

B	起始波长 (nm)	中心波长 (nm)	终止波长 (nm)	B	起始波长 (nm)	中心波长 (nm)	终止波长 (nm)
66	650	652.09	654.18	77	699.24	701.66	704.08
67	654.18	656.305	658.43	78	704.08	706.54	709
68	658.43	660.575	662.72	79	709	711.495	713.99
69	662.72	664.9	667.08	80	713.99	716.515	719.04
70	667.08	669.285	671.49	81	719.04	721.605	724.17
71	671.49	673.725	675.96	82	724.17	726.77	729.37
72	675.96	678.225	680.49	83	729.37	732.01	734.65
73	680.49	682.785	685.08	84	734.65	737.33	740.01
74	685.08	687.41	689.74	85	740.01	742.725	745.44
75	689.74	692.095	694.45	86	745.44	748.195	750.95
76	694.45	696.845	699.24				

最终,迭代结果显示,三个最优波段相应是: $B73$ 、 $B74$ 和 $B81$. 反演模型为:

$$Chl. a = 959.88 \times [(B73^{-1} - B74^{-1}) \times B81] - 4.0858 \quad (5)$$

将模型(5)运用到 HJ-1 高光谱遥感影像中进行叶绿素 a 浓度反演,并在 ArcGIS 软件中根据叶绿素浓度进行分级制图,结果见图 8.

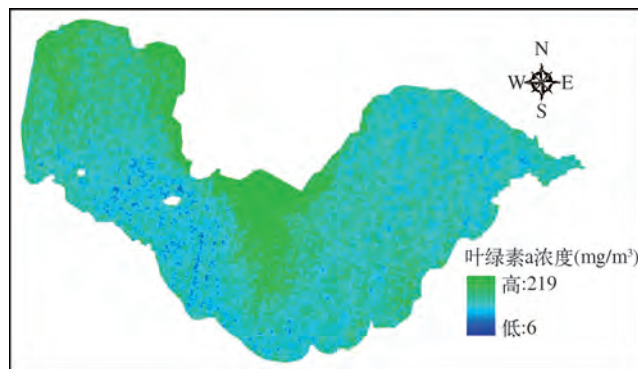


图 8 HJ-1 高光谱影像叶绿素 a 浓度反演示意

Fig. 8 Spatial distribution of chlorophyll-a concentration in Lake Chaohu retrieved by HJ-1 hyperspectral image

反演结果显示,在西巢湖北部沿岸,叶绿素 a 浓度较大,其中,在东西巢湖分界处,有大量的浮游藻类漂浮,造成叶绿素 a 浓度较高,最高达 $219\text{mg}/\text{m}^3$,是湖中浓度最大的区域;而西巢湖的南部及东巢湖叶绿素 a 浓度都相对较小,基本在 $60\text{mg}/\text{m}^3$ 以内,局部地区出现大于 $60\text{mg}/\text{m}^3$ 左右浓度的点位. 这个结果与星地同步实验过程中实测点位浓度及现场查看的结果是一致的.

将 30 个点位的叶绿素 a 浓度反演值与地面实测值比较,结果如图 9. 其中,均方根误差为 $22.99\text{mg}/\text{m}^3$,平均相对误差为 33%,最小相对误差为 5%,最大相对误差为 93%. 误差最大的三个样点叶绿素浓度分别为

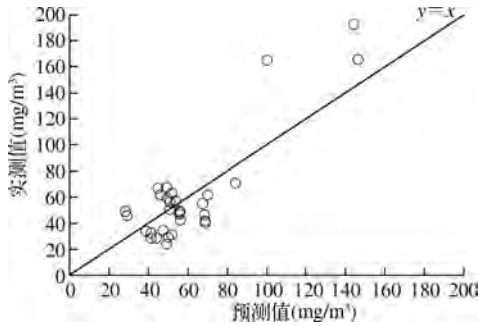


图9 巢湖30个点位反演精度

Fig. 9 Predicted Chl. a concentration versus measured Chl. a concentration

模型和一阶微分模型作为经验模型,建模过程中缺少对其它组分影响的弱化,导致叶绿素 a 浓度估算的误差增大,而三波段模型正是通过基于水体光谱的特征分析与水体各组分在特征波段贡献的全局考虑,近似推导生物光学模型,实现了对叶绿素 a 浓度的最优估测. 周冠华等同样利用太湖水体实测高光谱数据建立三波段模型,模型均方根误差仅为样本极大极小值差的 8%, R^2 为 0.84, 认为三波段模型有效地解决了高浓度悬浮物主导光学特性的水体叶绿素 a 浓度定量反演问题^[13]. 其模型选择的最优波段分别是 666nm、688nm 和 725nm, 这与本研究在巢湖选择的 669nm、699nm 和 735nm 三个最优波段有一定偏差, 主要是由于两个湖泊水体组分含量差异所导致. 因此, 三波段模型在各个湖区的外推性还有待进一步验证. HJ-1 数据建立模型的 R^2 为 0.73, 模型估算巢湖影像中 30 个点位的叶绿素 a 浓度, 有 60% 的样点相对误差小于 30%. 因此, 根据 HJ-1 影像数据建立的三波段模型可用于巢湖水体叶绿素 a 浓度的定量遥感反演, 效果较好.

比较地面实测高光谱数据和 HJ-1 高光谱遥感数据建立的三波段模型的波段选择, 发现最优波段位置出现偏移, 地面实测数据建立模型的三个波段是: 669nm、699nm 和 735nm, 而 HJ-1 数据建立模型的三个波段分别是 B73 (680.49–685.08nm)、B74 (685.08–689.74nm) 和 B81 (719.04–724.17nm). 引起这个差异主要的原因是两个数据源中红波段反射谷与荧光峰在大气校正后的遥感影像中的位置和地面实测高光谱遥感反射率中的位置有所偏差. 因此, 利用卫星影像构建叶绿素 a 反演模型时, 应综合考虑影像数据的光谱分辨率和大气校正效果对反演模型中参数选择的影响.

4 参考文献

- [1] 余丰宁, 李旭文, 蔡启铭等. 水体叶绿素含量的遥感定量模型. 湖泊科学, 1996, 8(3): 201-207.
- [2] Gitelson AA, Garbuzov G. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *Int J Remote Sensing*, 1993, 14(7): 1269-1295.
- [3] Rundquist DC, Han L, Schalles JF *et al.* Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690nm. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 1996, 62: 195-200.
- [4] 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. 湖泊科学, 2002, 14(3): 230-233.
- [5] 胡雯, 杨世植, 翟武全. 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): 16-17.
- [6] 苟尚培, 翟武全, 范伟. MODIS 巢湖水体叶绿素 a 浓度反演模型. 应用气象学报, 2009, 20(1): 95-101.
- [7] 吕恒, 江南, 李新国. 内陆湖泊的水质遥感监测研究. 地球科学进展, 2005, 20(2): 185-192.
- [8] Gitelson Anatoly A, Gritz Yuri, Merzlyak Mark N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160: 271-282.
- [9] Zimba Paul V, Gitelson Anatoly A. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Aquaculture*, 2006, 256: 272-286.
- [10] Dall'Olmo G, Gitelson AA. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentra-

192.9mg/m³、165.8mg/m³和 152.5mg/m³. 地面观测时, 这三个点位处有大量藻类漂浮, 由于卫星数据与地面观测不完全同步, 并且影像高光谱数据的空间分辨率为 100m, 其反映的是混合像元的光谱信息, 因此, 导致在这些样点反演的叶绿素 a 浓度偏低.

3 讨论与结论

本文分别利用地面实测高光谱数据和 HJ-1 高光谱遥感数据建立了叶绿素 a 浓度反演三波段模型. 其中地面实测数据建立的模型估算巢湖 30 个点位水体叶绿素 a 浓度的平均相对误差仅 21%, 决定系数 R^2 为 0.8688, 较于引言所述在巢湖建立的其他叶绿素 a 浓度反演模型其精度较高, 说明对于巢湖这种富营养化浑浊水体, 波段比值

- tion in turbid productive waters: experimental results. *Applied Optics*, 2005, **44**(3): 412-422.
- [11] Moses WJ, Gitelson AA, Berdnikov S. Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS—The Azov Sea case study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, **6**(4):845-849.
- [12] Moses WJ, Gitelson AA, Berdnikov S. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data—successes and challenges. *Environmental Research Letters*, 2009, **4**(4) (doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045005).
- [13] 周冠华,柳钦火,马荣华等. 基于半分析模型的波段最优化组合反演混浊太湖水体叶绿素 a. 湖泊科学,2008, **20**(2): 153-159.
- [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. 环境科学,2009, **30**(3):680-686.
- [15] 徐京萍,张 柏,宋开山等. 基于半分析模型的新庙泡叶绿素 a 浓度反演研究. 红外与毫米波学报,2008, **27**(3): 197-201.
- [16] 马金峰,詹海刚,陈楚群等. 珠江河口混浊高产水域叶绿素 a 浓度的遥感估算模型. 热带海洋学报,2009, **28**(1):15-20.
- [17] 杜 聪,王世新,周 艺等. 利用 Hyperion 高光谱数据的三波段法反演太湖叶绿素 a 浓度. 环境科学,2009, **30**(10):2904-2910.
- [18] Gitelson AA, Dall'Olmo G, Moses W *et al.* A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, 2008, (12):3582-3593.
- [19] 唐军武,田国良,汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I:水面以上测量法. 遥感学报,2004, **8**(1):37-44.
- [20] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨. 湖泊科学,2006, **18**(5): 550-552.
- [21] 黄祥飞,陈伟民,蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社,1999.
- [22] 戴永宁,李素菊,王学军. 巢湖水体固有光学特性研究. 环境科学研究,2008, **21**(5):173-177.