

利用 Hyperion 高光谱数据的三波段法反演太湖叶绿素 a 浓度

杜聪^{1,2}, 王世新¹, 周艺¹, 阎福礼¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以 2004-08-19 太湖野外试验所获取的水质数据(叶绿素 a 浓度 $7.8 \sim 154.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 总悬浮物浓度 $65.0 \sim 190.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $N = 38$)和同步的 Hyperion 星载高光谱数据为研究对象, 利用三波段算法反演太湖水体的叶绿素 a 浓度. 通过分析太湖固有光学量的特点, 提出适用于太湖的 3 个特征波段的选择依据, 并对波段进行优化计算, 在此基础上建立了三波段统计模型, 最后对模型的反演精度进行分析与评价. 结果表明, Hyperion 的 B34(691.37 nm)、B37(721.90 nm)和 B50(854.18 nm)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($r = 0.934$), 模型的决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)分别为 0.872 和 $13.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其反演精度优于传统经验统计模型, 如比值模型($R^2 = 0.844$, $\text{RMSE} = 15.41 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)和一阶微分模型($R^2 = 0.831$, $\text{RMSE} = 16.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 研究结果证实了三波段法适用于内陆富营养化浑浊水体和 Hyperion 高光谱数据, 为今后更精确地反演内陆水体的叶绿素 a 浓度提供了参考依据.

关键词: 叶绿素 a; 三波段模型; Hyperion; 高光谱; 太湖

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2904-07

Remote Chlorophyll a Retrieval in Taihu Lake by Three-band Model Using Hyperion Hyperspectral Data

DU Cong^{1,2}, WANG Shi-xin¹, ZHOU Yi¹, YAN Fu-li¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To retrieve chlorophyll a (Chla) concentration in Taihu Lake by three-band model, a field study was conducted on August 19, 2004 to collect water samples ($N = 38$), which contained widely variable Chla ($7.8\text{--}154.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) and total suspended solids ($65.0\text{--}190.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ dry wt), and the synchronous Hyperion images was also acquired as remote sensing data. After obtaining the approximate range of wavelengths for the three bands by analyzing the inherent optical properties of Taihu Lake, the three-band models were spectrally tuned to select the bands for most accurate Chla estimation. Finally Hyperion B34 (691.37 nm), B37 (721.90 nm) and B50 (854.18 nm) were selected to establish a three-band model. The results show that strong linear relationship is found between analytically measured Chla and the three-band model ($r = 0.934$), which accounts for 87.2% of variation in Chla and allows estimation of Chla with a root mean square error (RMSE) of $13.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, whereas the traditional two-band models accounts for lower accuracies of Chla estimation (spectral ratio, $R^2 = 0.844$, $\text{RMSE} = 15.41 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, and reflectance first-derivative, $R^2 = 0.831$, $\text{RMSE} = 16.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). The findings prove that the three-band model is applicable for Chla retrieval in turbid, productive inland waters and by using Hyperion hyperspectral data.

Key words: chlorophyll a (Chla); three-band model; Hyperion; hyperspectral; Taihu Lake

当遥感技术成为水环境监测的有效工具之后^[1], 如何利用遥感数据来获取水体的叶绿素 a (Chla)浓度就一直是水质监测领域的重点. 虽然针对大洋一类水体的叶绿素 a 浓度反演早在 20 世纪 70 年代就已获得了成功并进行了业务化运行^[2, 3], 但对内陆二类水体的叶绿素提取却依旧困难重重. 其主要原因是内陆水体成分复杂, 特别是悬浮泥沙与黄色物质的增多影响了叶绿素对光谱的响应, 因而反演精度始终无法满足实用化的需求^[4].

目前, 针对内陆水体的叶绿素 a 浓度反演算法大致可分为 2 种, 一种是采用经验或半经验方法, 利用单波段反射率或双波段组合等形式建立与实测浓

度值之间的统计模型^[5~7]; 另一种是利用生物光学模型, 将测得的水中各种固有光学量作为模型参数进行方程组求解^[8]. 这 2 种算法均有其不足之处: 经验模型缺乏物理基础, 水质参数与遥感数据之间的事实相关性不能保证; 而生物光学模型假设水体叶绿素 a 浓度的单位吸收系数和荧光量子产率均为常数, 而实际上这 2 种固有光学量会因浮游植物的生理状态和组织结构的不同而发生很大的变化^[9], 因

收稿日期: 2008-11-26; 修订日期: 2009-02-13

基金项目: 中国科学院重大交叉项目 (KZCX1-YW-14-2); 国家自然科学基金项目 (40671141, 40701126)

作者简介: 杜聪(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水环境遥感, E-mail: ducong_temp@yahoo.com.cn

而这种方法也存在着一定的缺陷。

最近, Dall’Olmo 等^[10, 11]提出了一种三波段概念模型来反演内陆水体的叶绿素 a 浓度, 如式(1)。

$$\text{Chla} \propto [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3) \quad (1)$$

该模型以生物光学模型为基础, 使用 3 个特征波段的组合利用统计的方法反演叶绿素 a 浓度。与传统的经验模型相比, 它具有严谨的理论推导和清晰的物理涵义; 同时, 模型中不涉及任何固有光学参数, 因而比生物光学模型更容易应用和推广。该模型已在一些内陆湖泊和海湾中得到了应用, 如 Gitelson 等^[12]和徐京萍等^[13]分别利用三波段模型在美国 Chesapeake 湾和吉林新庙泡湖进行叶绿素 a 反演, 均取得了较好的效果。但由于这些应用仅限于地面实测光谱数据, 该模型对于遥感数据的适用性还需作进一步检验。

EO-1 卫星搭载的 Hyperion 高光谱传感器是目前唯一在轨的高空间分辨率(30m)、高光谱分辨率(242 个波段)的成像光谱仪, 能很好地满足内陆水体的监测需要, 是当前内陆水质遥感的理想数据源。本研究基于 Hyperion 星载高光谱传感器数据, 通过分析太湖固有光学量的特点, 利用三波段算法反演太湖水体的叶绿素 a 浓度, 以检验该算法对于太湖以及 Hyperion 数据的适用性, 并为今后三波段法的广泛应用提供研究基础。

1 数据获取与预处理

1.1 水质数据获取

水质数据采用先野外试验采集水样, 后由实验室分析的方法获取。本次野外试验是 2004-08-19 专门针对 Hyperion 设计的卫星同步实验。样点分布在太湖富营养化最严重的梅梁湾和梅梁湾至湖心的主航道附近水域, 共获得 38 个测点(图 1)。试验的内容主要包括水样采集, 风速、水温和透明度的测定, 以及 GPS 点位测量。采集的水样冷藏保存后在实验室内进行叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度(TSS)等水质参数的测定。其中, 叶绿素 a 采用 90% 的热乙醇萃取, 利用分光光度计进行测量, 最后通过公式计算得到其浓度^[14]。此外, 为了分析水体的固有光学量, 还测量了叶绿素 a、无机悬浮物和黄色物质 400 ~ 750 nm 处的吸收系数。

1.2 Hyperion 数据预处理

本研究采用的 Hyperion 影像为 Hyperion L1R 数据产品, 卫星过境时间与地面试验同步。L1R 数据产品包括 70 个可见-近红外波段(VNIR)和 172 个短波

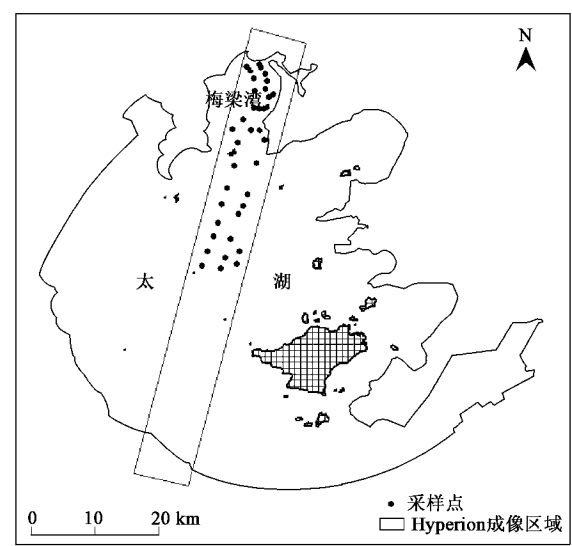


图 1 2004-08-19 日太湖采样点位置及 Hyperion 成像区域

Fig.1 Location of samples and the imaging area of Hyperion in Taihu Lake on Aug. 19, 2004

红外波段(SWIR), 共计 242 个波段。其中有 198 个波段经过了辐射定标处理, 且 VNIR 有 2 个波段与 SWIR 重叠, 因此实际可以使用的独立波段只有 196 个, 波长范围 426.82 ~ 2 395.5 nm, 波段间隔约 10 nm^[15]。虽然 L1R 产品已经经过了辐射定标, 但仍需要进行一系列预处理才能得到所需的反射率数据。首先需要对 Hyperion 影像进行辐射校正, 将像元值转化为绝对辐射值^[15]; 然后进行大气校正以消除大气的影响, 为了保证校正的精度, 本研究采用 MODTRAN-4 软件进行校正处理, 通过调整气溶胶光学厚度和水汽参数, 进行辐射传输模拟, 最终确定其大气校正参数, 其校正结果与水体实测光谱的相关系数在 0.90 以上^[16]; 使用 1:50 000 地形图进行几何精纠正, 纠正的平均误差为 0.50 个像素; 最后将辐射值转化为光谱反射率。同时为了消除噪声, 还对图像进行了 5 × 5 的低通滤波处理, 使图像的环境噪音等效差异^[17] < 0.1%, 可以很好地满足内陆水质监测的精度要求。

2 结果与分析

2.1 数据集描述

太湖属于典型的富营养化浑浊水体。从本试验所获取的水质参数(表 1)中可以看到, 某些样点的叶绿素 a 浓度很高, 且不同样点间浓度差异极大(7.8 ~ 154.3 μg·L⁻¹); 由于受到风浪的影响, 水体浑浊, 透明度最高不超过 29 cm, 而总悬浮物均值达到了 110.3 mg·L⁻¹; 此外, 水体中黄色物质的吸收作用

也很明显.

表 1 2004-08-19 太湖采样点水质参数统计描述¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of the optical water quality parameters measured on Aug. 19, 2004

参数	N	min	max	mean	标准差
Chla/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	38	7.8	154.3	51.5	39.5
透明度/cm	38	12.0	29.0	22.0	5.2
TSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	38	65.0	190.2	110.3	23.8
$a_{\text{CDOM}}(440)/\text{m}^{-1}$	38	0.7	2.2	1.4	0.4

1) $a_{\text{CDOM}}(440)$ 表示 CDOM 在 440 nm 的吸收系数

从叶绿素 a 浓度与总悬浮物浓度的散点图(图 2)中可以看出,两者线性无关($R^2 = 0.003$),说明叶绿素 a 不是影响水体光学特性的唯一要素;从采样点的 Hyperion 反射率曲线(图 3)也可以看出光谱呈现明显的内陆水体特征,从而证实了采集的水样为典型的二类水体^[1].

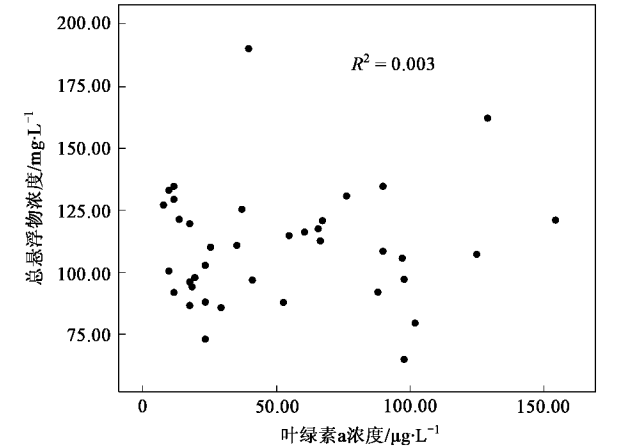


图 2 叶绿素 a 与总悬浮物浓度散点图

Fig.2 Scatter plot of measured TSS and Chla

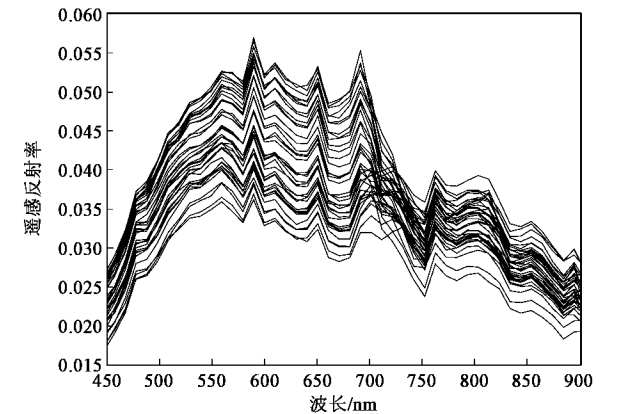


图 3 太湖采样点的 Hyperion 遥感反射率曲线

Fig.3 Remote sensing reflectance curves of samples in Taihu Lake

在二类水体中反演叶绿素 a 的最大困难在于悬浮物与黄色物质的吸收作用非常明显(尤其在蓝绿

波段),掩盖了叶绿素 a 对光谱的响应.因此,要精确地反演叶绿素 a,就必须消除悬浮物和黄色物质影响.而三波段算法正是运用了 3 个特征波段的特定运算来消除无机悬浮物与黄色物质的吸收系数以及总后向散射系数来做到这一点的.

2.2 三波段算法原理

根据水体光学的基本理论,水体的光谱反射率 R 与 2 个固有光学量(总吸收系数 a 和总后向散射系数 b_b)之间存在如式(2)的定量关系^[18].

$$R(\lambda) \propto K \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \tag{2}$$

式中 K 可以视为一个不受波长 λ 影响的参数,仅依赖于水体光场的几何分布.对于二类水体而言,水体的吸收不仅包含纯水,还受到叶绿素 a、无机悬浮物(tripton)以及黄色物质(CDOM)的影响.因此,总吸收系数 a 可以分解为上述 4 种成分的吸收系数之和,如式(3).

$$a = a_{\text{water}} + a_{\text{Chla}} + a_{\text{tripton}} + a_{\text{CDOM}} \tag{3}$$

由于叶绿素 a 浓度与其吸收系数直接成正比,即 $\text{Chla} \propto a_{\text{Chla}}$,因此只要将叶绿素 a 的吸收系数从其它固有光学量中分离出来,即使式(2)的右侧只保留 a_{Chla} 和常数,就可以反演出叶绿素 a 的浓度.为了实现上述目的,分别选取 2 个波段 λ_1 和 λ_2 ,计算其光谱反射率的倒数之差,如式(4).

$$R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2) \propto \frac{1}{K} \left(\frac{a(\lambda_1)}{b_b(\lambda_1)} - \frac{a(\lambda_2)}{b_b(\lambda_2)} \right) \tag{4}$$

假设 λ_1 和 λ_2 的后向散射系数相近,即 $b_b(\lambda_1) \approx b_b(\lambda_2)$,则上式可以简化为:

$$R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2) \propto \frac{1}{K} \frac{a(\lambda_1) - a(\lambda_2)}{b_b} \tag{5}$$

对于上述公式中的 $a(\lambda_1) - a(\lambda_2)$,只要 λ_1 和 λ_2 选择适当,使得 λ_1 叶绿素 a 吸收系数远大于 λ_2 的吸收系数,即 $a_{\text{Chla}}(\lambda_1) \gg a_{\text{Chla}}(\lambda_2)$;同时两者的无机悬浮物与黄色物质的吸收系数之和相近,即 $a_{\text{tripton}}(\lambda_1) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_1) \approx a_{\text{tripton}}(\lambda_2) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_2)$,就可以去除其它物质对吸收系数的影响.因此当满足上述条件后,式(5)可以进一步化简为:

$$R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2) \propto \frac{1}{K} \frac{a_{\text{Chla}}(\lambda_1) + a_{\text{water}}(\lambda_1) - a_{\text{water}}(\lambda_2)}{b_b} \tag{6}$$

式(6)即为从总吸收系数 a 中分离之后,叶绿素 a 吸收系数与光谱反射率之间的表达式关系.但

要完全分离出 a_{Chla} , 还需要从公式中去除 b_b 和 K 的影响. 为此, 选取第 3 个波段 λ_3 , 使得在 λ_3 上水体的叶绿素 a、无机悬浮物和黄色物质的吸收系数接近于 0, 即 $a_{\text{Chla}}(\lambda_3) + a_{\text{tripton}}(\lambda_3) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_3) \approx 0$. 此时, $a(\lambda_3) \approx a_{\text{water}}(\lambda_3)$. 同时又要使该波段的后向散射系数与前 2 个波段相当, 且吸收系数远大于后向散射系数, 即 $b_b(\lambda_3) \approx b_b$, $a(\lambda_3) \gg b_b(\lambda_3)$. 满足上述条件的式(2)可以表示为式(7).

$$R(\lambda_3) \propto K \frac{b_b(\lambda_3)}{a(\lambda_3) + b_b(\lambda_3)}$$
$$\approx K \frac{b_b}{a_{\text{water}}(\lambda_3)} \propto K \cdot b_b \quad (7)$$

将式(6)和(7)相乘, 便得到完全分离出 a_{Chla} 的表达式, 如式(8).

$$[R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3) \propto a_{\text{Chla}}(\lambda_1) \quad (8)$$

因此, 只要找到满足上述条件的 3 个特征波段 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 , 运用式(8)组成模型变量, 就可以运用统计方法寻找反射率与浓度之间的正比关系, 从而反演出叶绿素 a 浓度.

2.3 特征波段分析

从三波段算法的原理可以看出, 检验 3 个特征波段(λ_1 、 λ_2 和 λ_3)是否存在以及如何确定这些波段的位置是三波段模型反演的关键. 为此, 首先需要从水中各成分的固有光学量随波长的变化关系上判断 3 个波段的存在依据. 由于本试验没有测量水体的后向散射系数, 因此只能根据吸收系数上进行判断. 图 4 所示是 2004-08-19 的 38 个样点 3 种主要成分(叶绿素 a、无机悬浮物和黄色物质)在 400 ~ 750 nm 的吸收系数测量均值及纯水的吸收系数光谱(纯水的吸收系数采用 NASA 海洋光学规范的推荐值^[19, 20]). 从中可以看出, 叶绿素 a 在 440 nm 和 675 nm 左右上存在 2 个吸收峰, 且其吸收系数在 700 nm 后趋向于 0; 无机悬浮物与黄色物质的吸收系数曲线较为规则, 呈现负指数曲线的形态, 两者在 730 nm 处近似为 0. 纯水的吸收系数随波长的增加而增大, 并在 700 nm 后迅速上升. 从整个吸收光谱上看, 各成分的吸收系数特征明显, 只要波段选择适当, 就可以满足三波段模型对波段设置的需求(不考虑后向散射系数的需求). 波段设置条件与相应的分析与建议见表 2 所示.

综合以上分析, 可以得出 3 个波段所处的大致位置: λ_1 应选择在 a_{Chla} 处于极大值的红光吸收峰附近(如 $\lambda_1 = 675 \text{ nm}$); 而 λ_2 选择在与此相邻的荧光峰

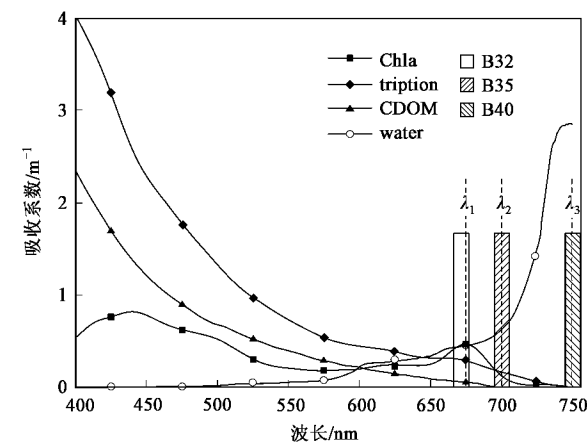


图 4 2004-08-19 太湖水体各主要成分的吸收系数光谱
Fig.4 Absorption spectra of Chla, tripton, CDOM and pure water in Taihu Lake, Aug. 19, 2004

波段(如 $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$); λ_3 则应位于纯水的吸收主导水体光学特性的近红外波段(如 $\lambda_3 = 750 \text{ nm}$). 对于 Hyperion 数据, 上述 3 个波段分别对应于 Hyperion 的 B32、B35、B40. 当然, 特征波段的选择还受到后向散射系数的影响, 但从前人的研究结果上看, 后向散射系数随波长的增加而递减, 且当 $\lambda > 650 \text{ nm}$ 时其值可以近似为常数^[21], 因而对上述结果没有太大影响.

表 2 三波段模型的波段设置分析(不考虑后向散射系数)

Table 2 Requirements of special bands setting in the 3-bands model (not including b_b)	
条件	分析与建议
$a_{\text{Chla}}(\lambda_1) \gg a_{\text{Chla}}(\lambda_2)$	λ_1 应取吸收系数极大值, $\lambda_2 \geq 700 \text{ nm}$
$a_{\text{tripton}}(\lambda_1) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_1) \approx a_{\text{tripton}}(\lambda_2) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_2)$	λ_1 与 λ_2 的位置应相接近
$a_{\text{Chla}}(\lambda_3) + a_{\text{tripton}}(\lambda_3) + a_{\text{CDOM}}(\lambda_3) \approx 0$	λ_3 应取 730 nm 后的近红外波段

2.4 波段优化计算

通过对特征波段的分析, 可以判断出 3 个波段所处位置的大致情况. 但为了利用三波段模型精确地反演叶绿素 a 浓度, 需要确定 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的最佳位置, 使变量 $[R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3)$ 与叶绿素 a 浓度的 Pearson 相关系数(r)达到最佳. 为此, 本研究采用循环迭代法来实现波段的优化计算. 具体步骤(表 3)如下.

第一步, 设置初始值, 即根据特征波段的分析结果设定 3 个波段迭代的初始位置以及波段迭代范围. 对于 Hyperion 数据, 令 $\lambda_1^0 = 671.02 \text{ nm}$ (B32)、 $\lambda_2^0 = 701.55 \text{ nm}$ (B35)、 $\lambda_3^0 = 752.43 \text{ nm}$ (B40). 其中 λ_i^j

表 3 三波段迭代优化过程¹⁾
Table 3 Process of three-band model tuning

迭代数	λ_1/nm	λ_2/nm	λ_3/nm	最佳波段/nm	$r_{\max}$
0	671.02	701.55	752.43		
	671.02	(426.82 ~ 925.41)	752.43	721.90	0.927 1
1	671.02	721.90	(426.82 ~ 925.41)	833.83	0.928 1
	(426.82 ~ 925.41)	721.90	833.83	691.37	0.933 7
2	691.37	(426.82 ~ 925.41)	833.83	721.90	—
	691.37	721.90	(426.82 ~ 925.41)	854.18	0.934 1
	(426.82 ~ 925.41)	721.90	854.18	691.37	—
3	691.37	(426.82 ~ 925.41)	854.18	721.90	—
	691.37	721.90	(426.82 ~ 925.41)	854.18	—
	(426.82 ~ 925.41)	721.90	854.18	691.37	—
结果	691.37	721.90	854.18		0.934 1

1) “—”表示本次迭代的最大相关系数与上一次相同

表示 λ_i 的第 j 次迭代 ($i = 1, 2, 3$). 3 个波段的迭代范围均选择在 426.82 ~ 925.41 nm (B8 ~ B57, 即 Hyperion 的 VNIR 波段).

第二步, 计算 λ_2 的第 1 次迭代值 (λ_2^1), 即根据 λ_1 和 λ_3 的初始位置 ($\lambda_1^0 = 671.02 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3^0 = 752.43 \text{ nm}$), 寻找 λ_2 的最佳位置. 具体方法就是通过选取的波段迭代范围内不断调整 λ_2 , 计算 $[R^{-1}(671.02) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(752.43)$ 与叶绿素 a 浓度的相关系数, 选取其中最大值所对应的波段就作为 λ_2^1 . 计算结果显示, λ_2 的第 1 次迭代最优值 (λ_2^1) 为 721.90 nm (B37).

第三步, 计算 λ_3 的第 1 次迭代值 (λ_3^1), 即根据 λ_1 的初始位置 ($\lambda_1^0 = 671.02 \text{ nm}$) 和 λ_2 的第 1 次迭代结果 ($\lambda_2^1 = 721.90 \text{ nm}$), 计算 $[R^{-1}(671.02) - R^{-1}(721.90)] \times R(\lambda_3)$ 与叶绿素 a 浓度的相关系数. 结果显示, λ_3 的最佳位置 (λ_3^1) 为 833.83 nm (B48).

第四步, 计算 λ_1 的第 1 次迭代值 (λ_1^1), 即根据 λ_2 和 λ_3 的第 1 次迭代结果 ($\lambda_2^1 = 721.90 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3^1 = 833.83 \text{ nm}$), 计算 $[R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(721.90)] \times R(833.83)$ 与叶绿素 a 浓度的相关系数. 此时 λ_1 的最佳位置 (λ_1^1) 为 691.37 nm (B43). 至此, 3 个波段均已完成第 1 次迭代.

第五步, 重复第 2 ~ 4 步, 将上一轮迭代结果作为下一轮迭代的初始值, 进行新一轮波段优化计算, 直到各个最佳波段位置保持不变为止. 经过三轮迭代计算后发现, 第三轮优化后的最佳波段与第二轮完全一致 (即 $\lambda_1^2 = \lambda_1^3$ 、 $\lambda_2^2 = \lambda_2^3$ 、 $\lambda_3^2 = \lambda_3^3$). 至此, 可以得到最终确定的 3 个波段最佳位置: $\lambda_1 = 691.37 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 721.90 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 854.18 \text{ nm}$, 分别对

应着 Hyperion 的 B34、B37 和 B50 (波段参数见表 4 所示), 从而完成了整个波段优化计算过程.

表 4 三波段模型的波段参数

Table 4 Parameters of Hyperion bands in three-band model			
波段	Hyperion 波段号	中心波长/nm	波段宽度/nm
λ_1	B34	691.37	10.390 9
λ_2	B37	721.90	10.600 4
λ_3	B50	854.18	11.281 6

2.5 遥感反演模型

根据波段优化计算的结果, 得到基于 Hyperion 数据的三波段最佳位置组合: $[R^{-1}(691.37) - R^{-1}(721.90)] \times R(854.18)$. 将此作为模型变量对实测的 38 个样点进行回归分析, 以得到光谱反射率与叶绿素 a 浓度之间的正比关系. 经过一元线性回归, 求得叶绿素 a 浓度的 Hyperion 反演模型如下 (图 5):

$$\text{Chla} = 442.05 \times [R^{-1}(691.37) - R^{-1}(721.90)] \times R(854.18) + 89.11 \quad (9)$$

或

$$\text{Chla} = 442.05 \times (1/\text{B34} - 1/\text{B37}) \cdot \text{B50} + 89.11 \quad (9')$$

从图 5(a) 中可以看出, 模型变量与叶绿素 a 浓度的散点图呈现明显的线性关系, 线性回归后, 各散点均匀分布在回归方程两侧, 方程的决定系数 (R^2) 为 0.872 且均方根误差 (RMSE) 为 $13.93 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (仅为样本极差的 9.5%), 说明模型有较高的拟合度和反演精度. 图 5(b) 显示的是模型的预测值与叶绿素 a 实测浓度值之间的折线图对比. 除了个别点外, 两者十分吻合 (71% 的样点的相对误差 < 30%), 表明用该模型反演太湖水体叶绿素 a 浓度的结果较为理想.

同时, 还将三波段模型与其它常用的经验模型之间进行了反演精度的对比. 通过穷举法计算 3 种

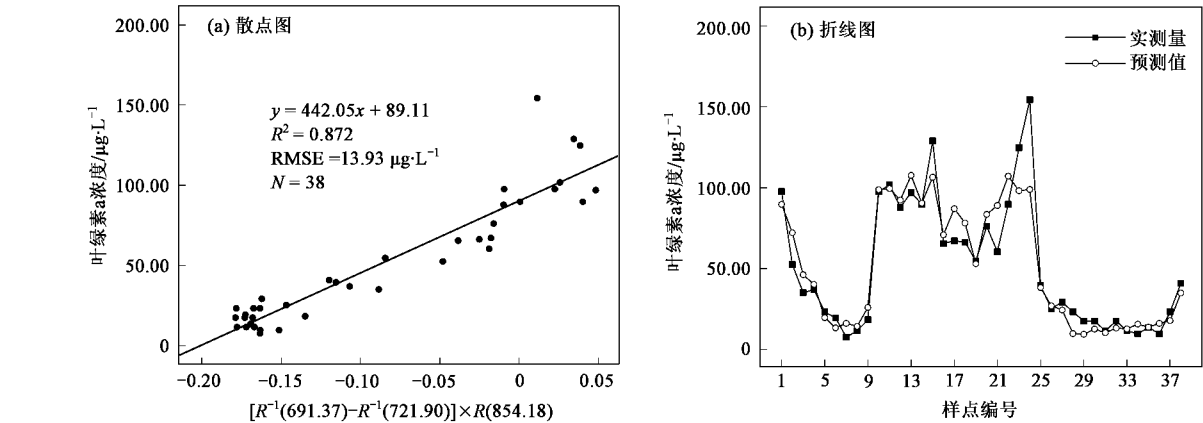


图 5 叶绿素 a 浓度实测值与 Hyperion 三波段模型预测值的对比

Fig. 5 Comparison of Chla measurements and the predict values of Hyperion three-band model

表 5 叶绿素 a 浓度 Hyperion 反演模型精度对比

Table 5 Precision comparison of Chla retrieval models using Hyperion data

模型	变量	<i>N</i>	<i>R</i> ²	RMSE/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	平均绝对误差/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	平均相对误差/%
单波段	$R(701.55)$	38	0.559	25.91	18.78	50.71
比值	$R(721.90)/R(681.20)$	38	0.844	15.41	10.09	26.75
一阶微分	$[R(701.55) - R(691.37)]/(701.55 - 691.37)$	38	0.831	16.00	11.01	28.29
三波段	$[R^{-1}(691.37) - R^{-1}(721.90)] \times R(854.18)$	38	0.872	13.93	9.22	23.72

常用模型(单波段、比值、一阶微分)与叶绿素 a 浓度之间的最大相关系数,选取各个模型的最佳波段作为模型变量与叶绿素 a 浓度建立线性回归模型,并计算各种精度指标与三波段模型进行比较.结果见表 5 所示.从比较结果可以看出,单波段模型的精度最低,比值、一阶微分等双波段模型次之,而三波段模型的精度最高,是各种模型中的最佳反演模型.

图 6 为应用上述三波段模型计算得到的

2004-08-19太湖叶绿素 a 浓度分布.图 6 中显示了 Hyperion 成像区域(幅宽为 7.6 km)内的叶绿素 a 分布情况.从中可以清晰地看出,由于受风浪影响,当日承载叶绿素 a 的浮游藻类基本集中于太湖北部的梅梁湾水域,且在岸边堆积形成比较明显的近岸藻华[图 6(b)].除此之外,其余水域叶绿素 a 浓度较低,水质较好.可见,Hyperion 影像可以较好地反映太湖水质状况的空间分布特征.

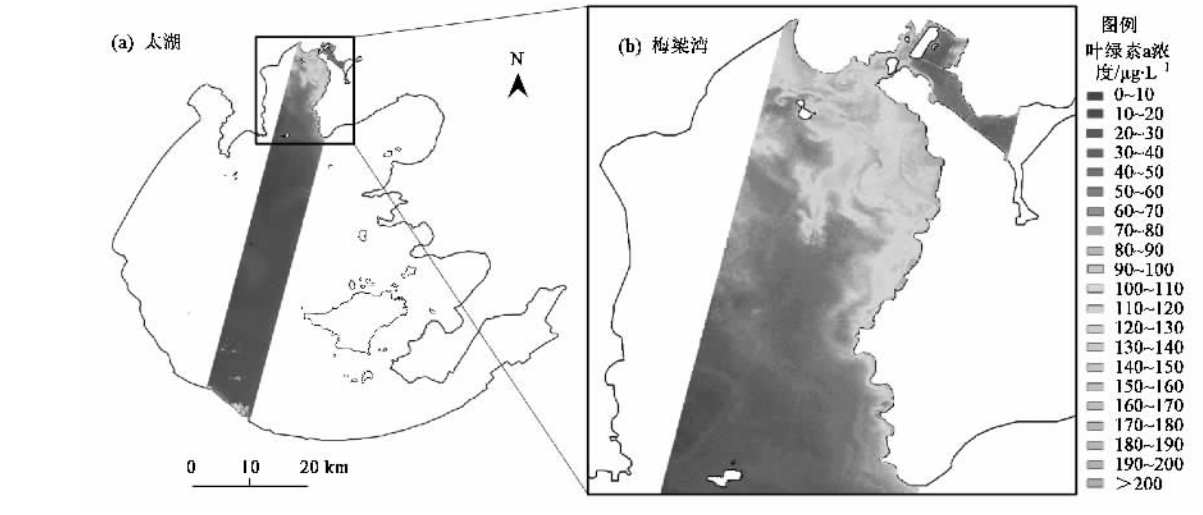


图 6 利用 2004-08-19 Hyperion 数据反演得到的太湖叶绿素 a 浓度分布图

Fig. 6 Distribution of Chla in Taihu Lake retrieved by using Hyperion data, Aug. 19, 2004

3 讨论

本研究基于 Hyperion 星载高光谱传感器数据, 利用三波段算法反演太湖水体的叶绿素 a 浓度, 根据太湖固有光学量的特点, 提出适用于太湖的 3 个特征波段的选择依据, 并对波段进行优化计算, 在此基础上建立三波段统计模型, 最后对模型的反演精度进行分析与评价. 研究的结果说明了利用三波段法反演太湖水体叶绿素 a 浓度的可行性, 该算法可以应用于 Hyperion 等高光谱遥感影像并具有较高的反演精度, 这为利用遥感影像进行内陆水体叶绿素 a 浓度的精确反演提供了一定的研究基础.

此外, 通过对比可以看出, 本研究所得到的三波段最佳位置 ($\lambda_1 = 691.37 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 721.90 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 854.18 \text{ nm}$) 与前人的结果有所不同^[12, 13], 这主要是由于不同水体的固有光学特性存在差异. 然而, 由于三波段法需要通过迭代优化才能获取最佳的反演效果, 因而 3 个波段的最佳位置对所在的数据集有着很强的依赖. 因此, 如何建立通用的三波段模型是今后需要深入研究的课题.

4 结论

(1) 利用基于 Hyperion 星载高光谱数据的三波段算法反演太湖水体的叶绿素 a 浓度, 结果显示模型的决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 分别为 0.872 和 $13.93 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明三波段算法适用于内陆富营养化浑浊水体和 Hyperion 高光谱数据.

(2) 对于 Hyperion, 当 $\lambda_1 = \text{B34}$ 、 $\lambda_2 = \text{B37}$ 、 $\lambda_3 = \text{B50}$ 时, 所构建的三波段模型因子 [$R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)$] $\times R(\lambda_3)$ 与叶绿素 a 浓度具有最高的相关系数 ($r = 0.934$).

(3) 与传统的统计模型相比, 三波段模型可以有效地提高叶绿素 a 浓度的反演精度. 这为今后更精确地反演内陆水体的叶绿素 a 浓度提供了参考依据.

致谢: 感谢美国国家航空航天局 (NASA) 和美国地质调查局 (USGS) 在提供 Hyperion 高光谱数据时提供的支持与帮助, 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统研究站协助采集水样并帮助分析化验水质参数.

参考文献:

- [1] 王学军, 马廷. 应用遥感技术监测和评价太湖水质状况[J]. 环境科学, 2000, **21**(6): 65-68.
- [2] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color[J]. Limnology and Oceanography, 1977, **22**(4): 709-722.
- [3] Gordon H R, Morel A. Remote assessment of ocean color for

interpretation of satellite visible imagery: A review. Lecture notes on coastal and estuarine studies [M]. New York: Springer-Verlag, 1983.

- [4] Bukata R P, Jerome J H, Kondratyew K Y, *et al.* Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995.
- [5] Gitelson A 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**(17): 3367-3373.
- [6] 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.
- [7] 段洪涛, 张柏, 宋开山, 等. 查干湖叶绿素 a 浓度高光谱定量模型研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 503-507.
- [8] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing[D]. Amsterdam, The Netherlands: Vrije University, 1993.
- [9] Bricaud A, Babin M, Morel A, *et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, **100**(C7): 13321-13332.
- [10] Dall'Omo G, Gitelson A A, Rundquist D C. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters[J]. Geophysical Research Letters, 2003, **30**(18): 1938, doi:10.1029/2003GL018065.
- [11] Dall'Omo G, Gitelson A A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results[J]. Applied Optics, 2005, **44**(3): 412-422.
- [12] Gitelson A A, Schalles J F, Hladik C M. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, **109**(4): 464-472.
- [13] 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[J]. 红外与毫米波学报, 2008, **27**(3): 197-201.
- [14] APHA, Section 10200-Plankton, in Standard methods for the examination of water and wastewater[S]. American Public Health Association, 1998.
- [15] Beck R. EO-1 User Guide V.2.3[EB/OL]. <http://eo1.usgs.gov> & <http://eo1.gsfc.nasa.gov>. 2003.
- [16] 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.
- [17] Brando V E, Dekker A G. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2003, **41**(6): 1378-1387.
- [18] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al.* A semianalytic radiance model of ocean color[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **93**(D9): 10909-10924.
- [19] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements[J]. Applied Optics, 1997, **36**(33): 8710-8723.
- [20] Kou L, Labrie D, Chylek P. Refractive indices of water and ice in the 0.65-to 2.5- μm spectral range[J]. Applied Optics, 1993, **32**(19): 531-5340.
- [21] Gons H J. Optical Teledetection of Chlorophyll a in Turbid Inland Waters[J]. Environmental Science Technology, 1999, **33**(7): 1127-1132.