

文章编号: 1007-4619(2006)02-0242-07

基于高光谱遥感反射比的太湖水体 叶绿素 a 含量估算模型

焦红波, 查 勇, 李云梅, 黄家柱, 韦玉春

(南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210097)

摘 要: 旨在寻找叶绿素 a 的高光谱遥感敏感波段并建立其定量估算模型。通过对太湖水体的连续监测, 获得了从 2004 年 6 月到 8 月 3 个月的太湖水体高光谱数据和水质化学分析数据。利用实测的高光谱数据分析计算太湖水体的离水辐亮度和遥感反射比; 然后, 通过相关分析寻找反演叶绿素 a 浓度的高光谱敏感波段, 进而建立反演太湖水体叶绿素 a 浓度的高光谱遥感定量估算模型, 并用相关数据对模型进行精度分析。研究发现, 水体的遥感反射比光谱在 719nm 和 725nm 存在两个峰, 其中 719nm 处的峰更明显且稳定。通过模型的对比分析, 发现用这两个峰值处的遥感反射比参与建模可以提高叶绿素 a 的估算精度; 并且认为由反射比比值变量 R_{719}/R_{670} 所建立的线性模型对叶绿素 a 浓度的估算精度最理想。

关键词: 高光谱遥感; 太湖; 叶绿素 a; 估算模型

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Modelling Chlorophyll-a Concentration in Taihu Lake from Hyperspectral Reflectance Data

JIAO Hong-bo, ZHA Yong, LI Yun-mei, HUANG Jia-zhu, WEI Yu-chun

(College of Geographic Sciences, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210097, China)

Abstract: The study aims to search for the hyperspectral remote sensing bands most sensitive to chlorophyll-a concentration. Through repeated measurements in Taihu Lake, a large quantity of hyperspectral reflectance data and water quality data of the Lake were obtained from June to August of 2004. Those data acquired in unfavorable or abnormal monitoring conditions were removed from the dataset. The remaining ones were analyzed to calculate water-leaving radiance and reflectance of water in Taihu Lake. Chlorophyll-a concentration was then regressed against the reflectance data to identify the most sensitive hyperspectral bands. The established regression model was then used to estimate chlorophyll-a concentration in the Lake. Finally, accuracy of the model was assessed using other independent data. The result generated with the given monitoring method indicates that there are two reflectance peaks at 719nm & 725nm. Of them, the one at 719nm is more enhanced and stable. Through comparative analysis it is found that hyperspectral reflectance at these two peaks can improve the accuracy of estimating chlorophyll-a. Moreover, the accuracy of estimation is the highest using the ratio R_{719}/R_{670} as the independent variable in the linear model.

Key words: hyperspectral remote sensing; Taihu Lake; chlorophyll-a; estimation model

收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-03-16

基金项目: 国家 863 计划资助项目“环境遥感监测软件系统与业务运行示范”(2003AA131060); 国家自然科学基金项目“湖泊水质高光谱遥感监测的机理模型研究”(40571110); 南京师范大学引进人才科研启动基金资助项目“太湖流域水体污染遥感监测研究”(2004105XQ2B47)。

作者简介: 焦红波(1978—), 男, 现为南京师范大学硕士研究生, 专业为地图学与地理信息系统, 主要从事环境遥感研究。E-mail: hbjiao@sohu.com。

1 引言

太湖流域包括无锡、苏州、湖州等 38 个市县,相通连的大小河流有 220 多条。太湖位于太湖流域的中心,地跨江浙两省,水域面积 2338.1km^2 ,平均水深 2m 左右,为我国第三大淡水湖。太湖兼有调蓄、灌溉、航运、旅游、养殖等功能,被称之为该地区的一颗灿烂明珠。然而近十几年来,随着人口急剧增加,经济持续高速发展,人类活动的影响在该地区愈显剧烈,自然资源受到严重破坏。特别是由于工农业废水和生活污水几乎未经处理即排入湖体,给太湖造成了严重污染,生态环境发生变化。近几年来,随着人们环保意识的不断增强,太湖成了各级领导关注的重点,投入大量的人力、物力和财力进行太湖生态环境整治,为“两河三湖”国家环境整治工程之一。

遥感技术具有实时性、动态性和宏观性的特点,其应用领域和应用深度都在不断发展。高光谱遥感利用很窄的电磁波波段从研究的目标物获取有关数据^[1],进而分析物体细节上、本质上的特征。所以利用高光谱遥感技术监测内陆水体的水质参数具有很大的发展空间。国内外许多学者都在这一领域开展过研究。李素菊等通过对巢湖的光谱测量和分析得出反射比值 R_{705}/R_{680} 和 690nm 处的反射比的一阶微分与叶绿素 a 浓度有较好的相关性,并建立了定量估算模型^[2]。疏小舟等通过对太湖反射光谱特性和藻类叶绿素浓度之间关系的研究,发现光谱反射比 R_{705}/R_{675} 和 700nm 附近反射峰的位置与叶绿素 a 浓度相关性较好^[3]。Hoogenboom 通过对 Ljsselmeer 湖泊 AVIRIS 数据的敏感度分析,得出估算叶绿素浓度的最佳波段组合为 R_{708}/R_{676} ^[4]。Fraser 对美国 22 个内陆湖的光谱反射比与叶绿素 a 和浑浊度的关系进行研究,发现反射比光谱的一阶微分与叶绿素 a 浓度的相关性最好^[5]。但这些研究都是垂直水面直接获取水体的光谱反射比,不能有效去除天空光以及水面太阳直射反射的影响。本研究通过同步进行太湖水质采样分析与用地物光谱仪按照一定的方法测量太湖水体的光谱信息,分析计算太湖水体的离水辐亮度和遥感反射比,通过相关分析寻找反演叶绿素 a 浓度的高光谱敏感波段,进而建立反演太湖水体叶绿素 a 浓度的高光谱遥感定量估算模型。

2 实验设计与数据获取

2.1 数据采集

从 2004 年 6 月到 8 月,每个月利用 5 天时间对太湖 21 个常规监测点进行了连续 3 个月的测试。监测内容包括水体光谱测试和水质采样分析。

光谱测试使用由美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices) 制造的 ASD 野外光谱辐射仪 (ASD Field Spec), 其光谱范围为 $350\text{--}1050\text{nm}$, 色散为 141nm , 光谱分辨率是 3nm , 有 512 个波段, 视场角为 7.5° 。待船停稳后, 在甲板开阔处 (距水面 1m 左右) 分别测试标准灰板、遮挡标准灰板、水体和天空光的光谱信息 (RAW DN 值), 以及对照标准白板的水体相对反射比, 以上 5 项各测 10 条光谱。同时记录风速、风向和 GPS 点位坐标。根据 2003 年国家环保总局发布实施的地表水和污水监测技术规范采集、存储水样, 在实验室内将样品进行抽滤、研磨、离心、定容后置于分光光度计上, 用 1cm 光程的比色皿分析叶绿素 a 浓度。

2.2 光谱测试方法

为有效避免船体对水体光场的破坏和太阳直射反射的影响, 更好的提取出反应水体信息的离水辐亮度 L_w 和遥感反射比 R_{rs} , 本文采用唐军武等提出的关于内陆二类水体水面以上光谱测量的方法^[6]。操作方法如下: 仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 $90^\circ \leq \Phi_v \leq 135^\circ$ (背向太阳方向), 仪器与水面法线方向的夹角 $30^\circ \leq \theta_v \leq 45^\circ$, 这样便可避免绝大部分的太阳直射反射, 同时减少船舶阴影的影响。天空光在水面的反射是不可避免的, 因此, 在仪器面向水体进行测量后, 必须将仪器在观测平面内向上旋转一个角度, 使得天空光辐亮度 L_{sky} 的观测方向天顶角等于水面测量时的观测角 Φ_v 。

3 数据处理与分析

3.1 水体离水辐亮度和遥感反射比的计算

按照以上观测几何, 在避开太阳直射反射、忽略或避开水面泡沫的情况下, 光谱仪测量的总的水体光谱信息为^[6]:

$$L_{sw} = L_w + L_{sky} \quad (1)$$

式中, L_{sw} 为总的水体信息; L_w 为离水辐亮度; L_{sky} 为

天空漫散射光,不带有任意水体信息,须去掉; r 为气-水界面对天空光的反射比,取决于太阳位置、观测几何、风力风向和水面粗糙度等因素。按照上面的观测方法,在平静水面 r 取 2.2% ,风速为 5m/s 左右时 r 取 2.5% , 10m/s 左右的风速时可取 $2.6\% - 2.8\%$ 。所以由(1)式可得水体的离水辐亮度为:

$$L_w = L_{sw} - rL_{sky} \quad (2)$$

通过测量标准灰板的反射可以得到水体表面入射总辐照度 $E_d(0^+)$,公式为:

$$E_d(0^+) = L_p * \pi / \rho_p \quad (3)$$

式中, L_p 为标准灰板的测量值; ρ_p 为标准灰板的反射比,我们选用经过严格定标的 30% 的灰板。由(2)式、(3)式便可求出水体的遥感反射比 R_{rs} :

$$R_{rs} = L_w / E_d(0^+)$$

根据以上计算方法,首先对每个指标测量的 10 条光谱数据显示,去除由于毛细波的太阳直射反射造成的数值较高的曲线,保留数值较低的曲线进行平均。然后将平均处理后的值代入上面的公式,得到水体的离水辐亮度和遥感反射比。

3.2 水体遥感反射比特征分析

对计算得到的三个月的遥感反射比光谱数据进

行筛选,去除上午 10 点以前和下午 4 点以后以及阴天光照条件差时测量的数据,去除异常(水面有气泡、水体被船搅浑或水面被蓝藻完全覆盖)数据,最后选定 25 条数据。再从选出的 25 条数据中选择 17 条用于模型的回归分析,其余 8 条用于模型验证。这 25 条遥感反射比光谱曲线如图 1,具有典型的内陆水体特征。在 $400 - 500\text{nm}$ 范围,由于叶绿素 a 在蓝紫光波段的吸收及黄色物质在该范围的强烈吸收,水体的反射比较低;在 $550 - 580\text{nm}$ 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,可以作为叶绿素定量标志;在 $620 - 630\text{nm}$ 波段,由于藻蓝素藻青蛋白的吸收,反射比降低;在 670nm 处,由于叶绿素对红光的吸收,出现较低的反射比^[7];在 685nm 附近有明显的荧光峰,这是由于浮游植物分子吸收光后,再发射引起的拉曼效应——即进行水分子破裂和氧分子生成的光合作用,激发出的能量荧光化的结果^[8]; 700nm 附近反射峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特征,其存在与否被认为是判定水体是否含有藻类叶绿素的依据,出现原因是由于水和叶绿素 a 在该处的吸收系数达到最小所致^[9]。在 760nm 处存在的较明显的反射峰尚需要进一步地分析其产生原因。

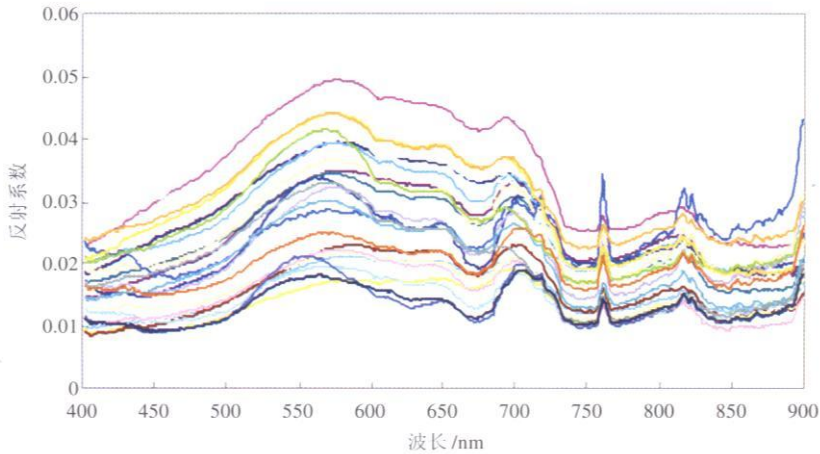


图 1 太湖水体反射光谱曲线

Fig 1 Reflectance curves of water in Taihu Lake

4 模型确定与验证

4.1 叶绿素 a 敏感波段分析

对 25 个用于模型分析的点,首先对每条反射比曲线用其从 420nm 到 750nm 的遥感反射比均值做

归一化处理^[2],然后用处理后的结果和叶绿素 a 浓度做相关分析(图 2),寻找遥感反射比与叶绿素 a 浓度之间的最大相关波段和预测水平。

从图 2 中可以看出,在 500nm 和 670nm 附近出现较高的负相关,从 700nm 之后开始出现较高的正相关,说明在这些波段附近的遥感反射比与叶绿素

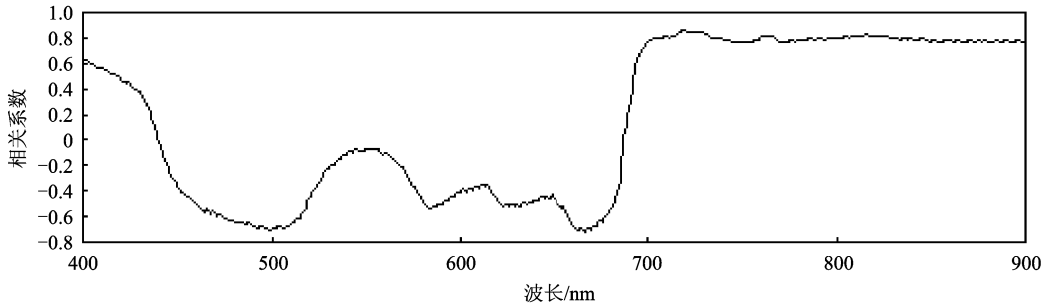


图 2 归一化反射比和叶绿素 a 浓度的相关性分析

Fig 2 Correlation analysis between normalized reflectance and chlorophyll-a concentration

a浓度的相关性比较大。其中 500nm 附近较高的负相关与叶绿素 a 对蓝紫光的吸收有关,而 670nm 附近较高的负相关和 700nm 之后较高的正相关分别对应叶绿素 a 的吸收峰和反射峰。通过对负相关系数和正相关系数排序,最后确定选择 667nm 和 670nm 两个较高负相关波段以及 719nm 和 725nm 两个较高正相关波段进行模型分析。这一结果与其他学者给出的比值变量 R_{705}/R_{680} 、 R_{705}/R_{675} 、 R_{708}/R_{676} 以及 R_{706}/R_{679} 等采用的波段存在差异^[2-4,10]。我们选择的 667nm 和 670nm 与其他学者选择的 675nm, 676nm, 679nm 以及 680nm 有偏离,但基本都位于 670nm 所在的谷底附近;但我们选择的 719nm 和 725nm 则较明显地偏离了其他学者给出的 705nm, 706nm 和 708nm。之所以出现这样的差别,究其原因大概有两点:其一,大多数研究是基于垂直水面进行观测的方法获取水体反射比信息,而本研究中使用了具有一定倾斜角度的观测方法,并从所获取的水体信息中分离出离水辐射度,进而求出遥

感反射比,因此能够有效地避免船体对水体光场的破坏和太阳直射反射的影响,并去除天空杂散光,反映的是更纯粹的水体信息;其二,通过对计算得到的遥感反射比光谱和直接测量得到的水体相对反射比光谱在 650—750nm 范围内的对比分析(图 3),发现计算得到的水体遥感反射比光谱(图 3(b))在 719nm 和 725nm 处存在两个峰(图中画直线处),其中 719nm 处的峰更明显且稳定,而这两个峰在直接测量得到的水体相对反射比光谱(图 3(a))上是反映不出来的。同时 700nm 附近的峰值波长会随着叶绿素 a 浓度的变化而变化。若把 25 个点在 700nm 附近的峰值波长和对应点的叶绿素 a 浓度生成散点图(图 4),则从图中可以看出随着叶绿素 a 浓度的升高峰值波长会向长波方向移动(红移),因此认为在 700nm 峰值附近选择某单一波段的反射比预测叶绿素 a 浓度会存在较大误差。所以本文认为选择 719nm 和 725nm 处的遥感反射比值估算叶绿素 a 浓度效果会更好。这与相关分析得出的结论是一致的。

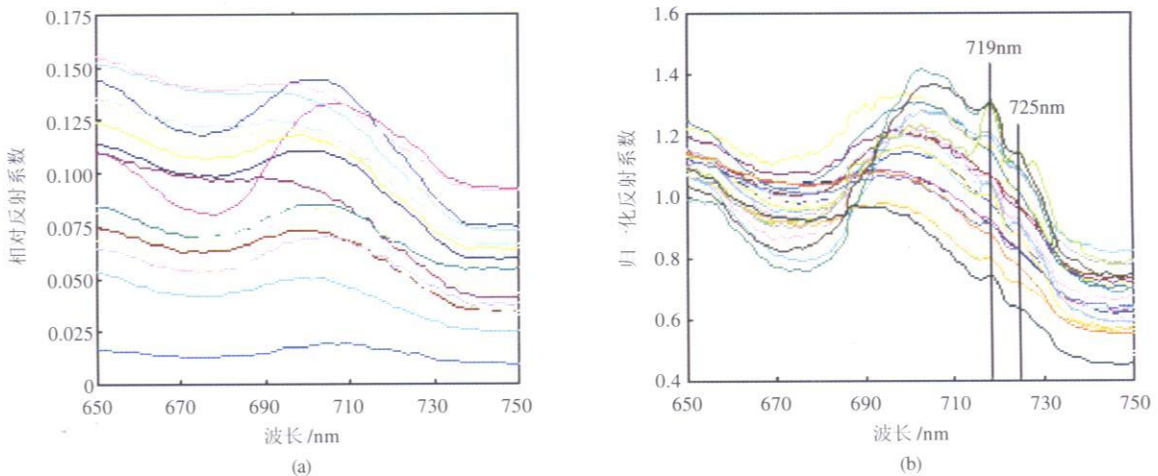


图 3 归一化遥感反射比与相对反射比的局部分析

Fig 3 Detailed analysis between normalized remote sensing reflectance and relative reflectance over certain wavelength ranges

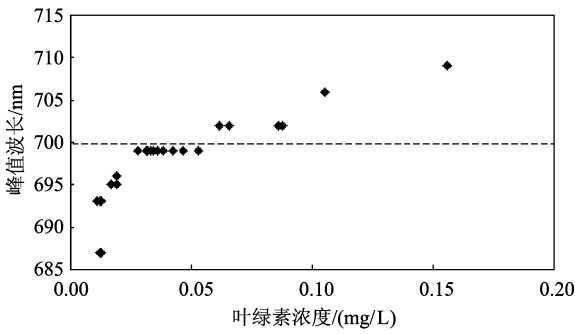


图 4 700nm 附近峰值波长与叶绿素 a 浓度

Fig 4 Wavelength of peak reflectance near 700nm and chlorophyll-a concentration

4.2 模型分析

首先从 25 个点中随机抽取 17 个点参与模型的回归分析,根据 Pulliainen 等人的研究,对水体光谱辐亮度的不同波段做比值处理可以部分消除大气影响,也可以消除在空间上和时间上水面粗糙度变化

的干扰^[11]。对选出的两个正相关波段和两个负相关波段分别做比值处理,作为自变量,叶绿素 a 的浓度值作为因变量,进行模型回归分析,模型类型包括指数函数、对数函数、幂函数、线性和一元二次方程,分析结果见表 1。从表 1 中可以看出,基于遥感反射比值的模型中,对数函数好于幂函数,幂函数好于指数函数,如果仅考虑 R² 检验值,则一元二次模型好于线性模型,但从 F 检验值分析,那么线性模型应为最佳选择。

同时,我们对其他学者给出的预测精度较高的比值变量 R₇₀₅/R₆₈₀, R₇₀₅/R₆₇₅, R₇₀₈/R₆₇₆, R₇₀₆/R₆₇₉ 以及水色遥感器常用波段 490nm 和 550nm^[12, 13],结合本文采用的数据做了分析,并分别用本文选择的 719nm 和 725nm 替换其他学者选择的比值变量中的分子,形成混和变量,也加以分析,仅就预测精度较高的线性模型和本文选择的模型做比较,结果见表 2。发现当用本文选出的 719nm 和 725nm 替换其他学者给出的变量中分子形成新的变量时,模型精

表 1 叶绿素 a 与高光谱遥感反射比比值变量的线性与非线性拟合模型表

Table 1 Linear and non-linear regression models between chlorophyll-a concentration and ratioed hyperspectral remote sensing reflectances

自变量	模型类型	拟合模型方程	R ²	F
R ₇₁₉ /R ₆₆₇	对数函数	Y=0.1231 ln(x)+0.0344	0.8935	125.85
	指数函数	Y=0.0019e ^{2.6185x}	0.8392	78.28
	幂函数	Y=0.0274x ^{3.0933}	0.8903	121.79
	线性	Y=0.1077x-0.0754	0.8988	133.22
	一元二次	Y=-0.0159x ² +0.1456x-0.0968	0.8999	62.94
R ₇₁₉ /R ₆₇₀	对数函数	Y=0.1178 ln(x)+0.0325	0.8831	113.29
	指数函数	Y=0.0022e ^{2.4476x}	0.8289	72.66
	幂函数	Y=0.0261x ^{2.9651}	0.8828	112.81
	线性	Y=0.1005x-0.0699	0.8848	115.21
	一元二次	Y=-0.0226x ² +0.1558x-0.1017	0.8877	55.33
R ₇₂₅ /R ₆₆₇	对数函数	Y=0.1263 ln(x)+0.0505	0.8961	129.35
	指数函数	Y=0.0017e ^{3.1048x}	0.8523	86.55
	幂函数	Y=0.0411x ^{3.1735}	0.8939	126.40
	线性	Y=0.1274x-0.0799	0.9085	148.86
	一元二次	Y=0.0159x ² +0.0946x-0.0638	0.9089	69.86
R ₇₂₅ /R ₆₇₀	对数函数	Y=0.1208 ln(x)+0.0478	0.8874	118.18
	指数函数	Y=0.0019e ^{2.9033x}	0.8426	80.28
	幂函数	Y=0.0384x ^{3.0423}	0.8859	116.46
	线性	Y=0.1189x-0.0742	0.8949	127.78

注: x 为两个波段反射比的比值变量, Y 为叶绿素 a 浓度

表 2 自选变量、他选变量及混和变量的线性模型对比表

Table 2 Comparison of linear models with different variables chosen by others by myself and mixture

自变量	线性模型	R ²	自变量	线性模型	R ²
* R ₇₀₅ /R ₆₇₅	Y=0.102x-0.0847	0.8257	#R ₇₁₉ /R ₆₆₇	Y=0.1077x-0.0754	0.8988
* R ₇₀₈ /R ₆₇₆	Y=0.0984x-0.0785	0.8247	#R ₇₁₉ /R ₆₇₀	Y=0.1005x-0.0699	0.8848
* R ₇₀₆ /R ₆₇₉	Y=0.1031x-0.0846	0.8252	#R ₇₂₅ /R ₆₆₇	Y=0.1274x-0.0799	0.9085
* R ₇₀₅ /R ₆₈₀	Y=0.1091x-0.0908	0.8085	#R ₇₂₅ /R ₆₇₀	Y=0.1189x-0.0742	0.8949
R ₇₁₉ /R ₆₇₅	Y=0.0984x-0.0679	0.8661	R ₇₂₅ /R ₆₇₅	Y=0.1167x-0.0724	0.8777
R ₇₁₉ /R ₆₇₆	Y=0.0975x-0.0673	0.8690	R ₇₂₅ /R ₆₇₆	Y=0.1155x-0.0717	0.8800
R ₇₁₉ /R ₆₇₉	Y=0.1003x-0.0694	0.8585	R ₇₂₅ /R ₆₇₉	Y=0.1189x-0.0739	0.8687
R ₇₁₉ /R ₆₈₀	Y=0.1046x-0.0724	0.8526	R ₇₂₅ /R ₆₈₀	Y=0.1241x-0.0772	0.8625
R ₇₀₈ /R ₄₉₀	Y=0.0728x-0.0614	0.5988	R ₇₀₈ /R ₅₅₀	Y=0.11x-0.0616	0.2895
R ₇₁₉ /R ₄₉₀	Y=0.0772x-0.0588	0.6775	R ₇₁₉ /R ₅₅₀	Y=0.133x-0.0722	0.4211
R ₇₂₅ /R ₄₉₀	Y=0.1426x-0.0658	0.3840	R ₇₂₅ /R ₅₅₀	Y=0.0893x-0.0604	0.6694

注:带 * 的为其他学者选择的变量,带 # 的为本文选择的变量,其他为混和变量

度都会有不同程度的提高,并且完全由本文选择的波段组成的比值变量建立的线性模型精度是最高的。这一结果也说明本文选出的波段在一定程度上提高了叶绿素 a 浓度的估算精度。

4.3 叶绿素 a 高光谱遥感估算模型的精度分析

利用剩余的 8 个点,对表 1 中拟合精度较高的线性模型进行预测精度分析,分析指标有拟合 R²、预测 R² 和平均相对误差(表 3)。本着拟合 R² 和预测 R² 相对较高而平均相对误差较小的原则,把每个模型的三个评价指标排序求和,最后选择和值最小、自变量为 R₇₁₉ /R₆₇₀ 的线性模型为最佳模型。把 8 个点由此模型估算的叶绿素 a 浓度和实测数据对比分析(图 5)可以看出,除了一个点外,其余点的预测值和实测值都可以达到很好的逼近。说明该模型具有一定的实用性。

表 3 叶绿素 a 高光谱遥感估算模型的精度分析表

Table 3 Accuracy analysis of hyperspectral remote sensing models for estimating chlorophyll-a

自变量	拟合模型方程	拟合 R ²	预测 R ²	平均相对误差 %
R ₇₁₉ /R ₆₆₇	Y=0.1077x-0.0754	0.8988	0.7889	23.5345
R ₇₁₉ /R ₆₇₀	Y=0.1005x-0.0699	0.8848	0.8169	19.4227
R ₇₂₅ /R ₆₆₇	Y=0.1274x-0.0799	0.9085	0.7762	26.8635
R ₇₂₅ /R ₆₇₀	Y=0.1189x-0.0742	0.8949	0.8126	23.7610

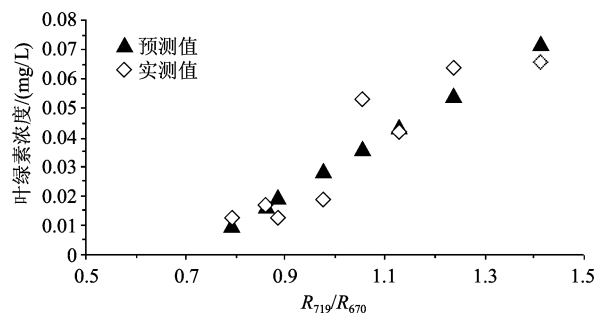


图 5 8 个点叶绿素 a 浓度实测值和预测值的对比

Fig 5 Eight points' comparison of chlorophyll-a concentration between practice and forecast

5 结 论

按照一定的观测方法,分别对标准灰板、水体和天空光进行光谱测试,计算水体的离水辐亮度和遥感反射比;通过相关分析,选出 667nm 和 670nm 两个负相关波段及 719nm 和 725nm 两个正相关波段参与模型分析;对计算得到的遥感反射比光谱和直接测量的相对反射比光谱进行对比分析,发现计算得到的遥感反射比光谱在 719nm 和 725nm 处存在两个峰,其中 719nm 处的峰更明显且稳定,不会因叶绿素 a 浓度的变化而偏移;然后通过模型的对比分析,发现用这两个峰值处的遥感反射比参与建模会提高叶绿素 a 的估算精度,最后,通过

对模型精度的对比分析,认为利用遥感反射比比值变量 R_{719}/R_{670} 所建立的线性模型对叶绿素 a 浓度的估算精度最理想。当然,本文结论的可靠性和普适性还需要通过大量的室内、室外实验做进一步的验证。

参 考 文 献 (References)

- [1] Pu R L, Gong P. Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 [浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.]
- [2] Li S J, Wu Q, Wang X J, et al. Correlations Between Reflectance Spectra and Contents of Chlorophyll-a in Chaohu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(3): 228-234. [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): 228-234.]
- [3] 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.]
- [4] Hoogenboom H J, Dekker A G, Althuis IJ A. Simulation of AVIRIS Sensitivity for Detecting Chlorophyll over Coastal and Inland Waters[J]. Remote Sens Environ, 1998, 65: 333-340.
- [5] Frater R N. Hyperspectral Remote Sensing of Turbidity and Chlorophyll-a Among Nebraska Sand Hills Lakes [J]. Int Remote Sensing, 1998, 19(8): 1579-1589.
- [6] Tang JW, Tian GL, Wang XY, et al. The Methods of Water Spectra Measurement and Analysis I: 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 I: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.]
- [7] Oron G, Gitelson A. Real-time Quality Monitoring by Remote Sensing of Contaminated Waterbodies: Waste Stabilization Pond Effluent[J]. Wat Res, 1996, 30(12): 3106-3114.
- [8] Zhao Y S, et al. The Principles and Methods of Remote Sensing's Application and Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003 [赵英时等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.]
- [9] Gitelson A. The Peak Near 700nm on Radiance Spectra of Algae and Water: Relationships of Its Magnitude and Position with Chlorophyll[J]. Int Remote Sensing, 1993, 13(17): 3367-3373.
- [10] Thiemann S, Kaufmann H. Lake Water Quality Monitoring Using Hyperspectral Airborne Data: a Semiempirical Multisensor and Multitemporal Approach for the Mecklenburg Lake District Germany[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 228-237.
- [11] Pulliainen J, Kallio K, Eloheimo K. A Semi-Operative Approach to Lake Water Quality Retrieval from Remote Sensing Data[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 79-93.
- [12] Iluz D, Yacobi Y Z, Gitelson A. Adaptation of an Algorithm for Chlorophyll-a Estimation by Optical Data in the Oligotrophic Gulf of Eilat[J]. Int J Remote Sensing, 2003, 24(5): 1157-1163.
- [13] Chauhan P, Mohan M, Samgi R K, et al. Surface Chlorophyll-a Estimation in the Arabian Sea Using IRS-P4 Ocean Color Monitor (OCM) Satellite Data[J]. Int J Remote Sensing, 2002, 23(8): 1663-1676.