

应用实测光谱估算千岛湖夏季叶绿素 a 浓度^{*}

高玉蓉¹, 刘明亮¹, 吴志旭², 何剑波¹, 虞左明¹

(1: 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

(2: 淳安县环境保护监测站, 淳安 311700)

摘 要: 依据 2010 年 8 月的实测数据构建了千岛湖水体夏季叶绿素 a 浓度的实测光谱数据估算模型, 并进行了验证. 利用 ASD FieldSpec3 野外光谱仪获取高光谱数据, 计算水体离水辐亮度和遥感反射率. 通过寻找反演水体叶绿素 a 浓度的高光谱敏感波段, 采用单波段相关分析、波段比值、微分光谱、三波段模型、BP 人工神经网络等多种算法进行比较分析, 结果表明: 叶绿素 a 浓度与单波段光谱反射率的相关性不大; 596 nm 和 489 nm 波长处反射率比值、545 nm 处光谱一阶微分与叶绿素 a 浓度均呈较显著相关, 估测模型决定系数 R^2 分别为 0.782、0.590, $RMSE$ 分别为 0.89、1.98 $\mu\text{g/L}$; 三波段模型的反演结果优于传统的波段比值和一阶微分法, R^2 为 0.838, $RMSE$ 为 0.71 $\mu\text{g/L}$; 神经网络模型大大提高了叶绿素 a 浓度的反演精度, R^2 高达 0.942, $RMSE$ 为 0.63 $\mu\text{g/L}$. 本研究为今后在千岛湖水域的夏季相邻月份进行叶绿素 a 浓度大范围遥感反演研究奠定了基础.

关键词: 千岛湖; 叶绿素 a; 高光谱; 遥感; BP 人工神经网络

Chlorophyll-a concentration estimation with field spectra of summer water-body in Lake Qiandao

GAO Yurong¹, LIU Mingliang¹, WU Zhixu², HE Jianbo¹ & YU Zuoming¹

(1: *Hangzhou Institute of Environmental Science, Hangzhou 310014, P. R. China*)

(2: *Chun'an Environmental Monitoring Station, Chun'an 311700, P. R. China*)

Abstract: Based on the *in situ* data collected in August 2010, hyperspectral data models estimating summer chlorophyll-a concentration in Lake Qiandao are presented. A large quantity of hyperspectral reflectance data and water quality data of the typical area of the lake were obtained. Hyperspectral data were measured using ASD FieldSpec3, and were calculated for water-leaving radiance and reflectance of water. Different methods including band ratio model, the first derivative model, three-band-model and BP neural network model were used to estimate chlorophyll-a concentration. Results showed that single band reflectance model gave the worst estimation on chlorophyll-a concentration. Band ratio model with the ratio of reflectance 596 nm/489 nm and the first derivative model of reflectance near 545 nm gave better results with high determination coefficients of 0.782 and 0.590, respectively. By comparison, the three-band-model had higher estimation precision (coefficient of 0.838) than the band ratio model and the first derivative model. BP neural network model performed best with a high determination coefficient of 0.942. The root mean square error between measured and estimated chlorophyll-a concentrations using the four models was 0.89, 1.98, 0.71 and 0.63 $\mu\text{g/L}$, respectively. Therefore, three-band-model and BP neural network model was recommended to estimate chlorophyll-a concentration with remote sensing data for large area of Lake Qiandao in the summer.

Keywords: Lake Qiandao; chlorophyll-a; hyperspectral data; remote sensing; ANN-BP

千岛湖 (29°22' ~ 29°50'N, 118°34' ~ 119°15'E) 是位于亚热带北缘的特大型深水人工湖, 建于 1959 年, 其水位 108 m 时水域面积为 580 km^2 , 相应库容达 178.4 m^3 , 多年平均入库水量达 94.5 m^3 , 出库水量为

^{*} 国家自然科学基金项目 (40971252)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-QN312) 和杭州市环保局项目 (2010006) 联合资助. 2011-03-08 收稿; 2011-12-19 收修改稿. 高玉蓉, 女, 1980 年生, 硕士; E-mail: bbolive@163.com.

91.07 m³^[1]. 该水体是钱塘江的重要水源,其巨大的水资源量对保障钱塘江中下游的水域生态安全起着举足轻重的作用,甚至关系到长江三角洲地区社会经济的可持续发展. 随着流域社会经济的发展,入湖污染负荷逐年增加,1990s 中期以后水体富营养化进程出现加速迹象,蓝藻异常繁殖现象时有发生,蓝藻产生的次生代谢产物导致湖水与渔产品有明显的异味,直接影响千岛湖周边居民的生活与渔业生产. 因此,对千岛湖水域藻类的时空动态变化进行全面监测分析显得尤为重要.

叶绿素是藻类的重要组成部分,其浓度的多寡是表征光能自养生物量的重要指标,也是反映水体富营养化程度的一个重要参数^[2]. 利用遥感方法监测水体叶绿素 a 浓度具有范围广、速度快、成本低和便于进行长期动态监测的优势,克服了常规监测手段存在的离散性、瞬间性和局地性等诸多缺点^[3,4],能实现对水库大面积水域进行全面快速的观察. 由于物理方法的理论基础不够完善,经验方法建模精度较低,使得半经验方法成为最常见的建模手段^[5],国内外学者对此开展了一系列估测水体叶绿素浓度的研究. 疏小舟等^[1]通过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,当叶绿素浓度大于 5 μg/L 时,光谱反射比 R_{705}/R_{675} 和 700 nm 附近反射峰的位置与叶绿素浓度相关性较好;马荣华等^[6]和张运林等^[7]利用太湖实测光谱和水体固有光学特性均获得与疏小舟等相近的研究结果,得出 682 nm 和 706 nm 是叶绿素 a 浓度估测最重要的两个光谱特征;苟尚培等^[8]用实测光谱数据建立 R_{705}/R_{680} 波段比值模型估测了巢湖水体叶绿素浓度,相关系数达 0.75,并应用到 MODIS 影像;宋开山等^[9]构建查干湖叶绿素 a 浓度单波段、波段比值、微分光谱和神经网络模型,发现神经网络的反演精度较高. 国外 Fraser^[10]对美国 22 个内陆湖的光谱反射率与叶绿素进行研究,发现反射率光谱的一阶微分与叶绿素浓度的相关性较好;Hunter 等^[11]通过分析英国两个内陆富营养湖泊的光谱特性与叶绿素 a 和藻蓝蛋白的关系,提出以 670 nm 和 710 nm 波段的反射率比值来估算叶绿素 a 浓度,结果比其它的半分析模型更好;Dall'Omo 等^[12]将 Gitelson 等^[13]基于陆地植被色素含量所提出的三波段遥感反射率模型应用于水体叶绿素 a 浓度的估测,随后 Gitelson 等^[14]利用该模型在美国 Cheapeake 湾进行叶绿素 a 浓度反演,取得较好效果;Daniel 等^[15]通过对近高山湖泊 MERIS 数据的敏感度分析,利用神经网络模型,获取了中营养和贫营养水体的叶绿素浓度.

目前对湖泊、水库富营养化遥感监测的研究很多,并取得了显著进展. 然而,实际应用依旧困难重重,其主要原因是内陆湖泊、水库水体成分复杂,悬浮泥沙、黄色物质及光学浅水的底质反射影响了叶绿素对光谱的响应,特别是浅水型湖泊深受水体动力学过程的影响,使得反演精度始终无法满足实用化的需求^[16]. 千岛湖作为特大型人工深水水库,是当前内陆湖泊(水体)水质遥感的理想研究对象,然而对此类水域的相关研究则鲜有报道. 本文以千岛湖水域为研究对象,通过分析夏季湖区水体反射光谱特征与叶绿素 a 浓度之间的关系,探讨水体叶绿素 a 浓度定量反演的机制和模型,寻找基于实测光谱估测夏季千岛湖水体叶绿素 a 浓度的最佳方法,为今后利用遥感数据对千岛湖水域叶绿素 a 浓度进行反演提供建模基础.

1 试验方法与数据获取

1.1 数据采集

根据千岛湖形状、地理特点和水质差异,采样路线自西北往东南方向(从安徽入境断面到新安江大坝),覆盖了水库的河流区、缓冲区和湖泊区水域,共计 28 个采样点(图 1),该研究区域水质有明显的梯度差异,具有典型性.

于 2010 年 8 月 19—20 日进行连续测试,采用 GPS 实现精确定位,采集水样,并同步测量各采样点水体透明度和反射光谱. 光谱测量使用美国 ASD 公司的 FieldSpec[®] 3 Hi-Res 野外光谱仪,可在 350~1050 nm 波长范围内进行连续测量,采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm,视场角为 25°,标准板选经严格标定的 30% 的标准灰板. 光谱测量时间为 10:00—14:00,天气基本晴朗无云,湖面平静. 待船停稳后,分别测试标准灰板、水体和天空光的光谱信息,各测 20 条光谱. 同步记录风速、风向、湖面状况和天空状况. 叶绿素 a 样品使用 5 L 采水器采集距表层 50 cm 湖水,在野外采样后立即返回实验室用 Whatman GF/C 进行过滤预处理、冷冻干燥,用丙酮—分光光度计法进行测量.

1.2 光谱测试方法

水体遥感反射率采用唐军武等提出的关于内陆 II 类水体水面以上光谱测量的方法^[17],利用便携式瞬态

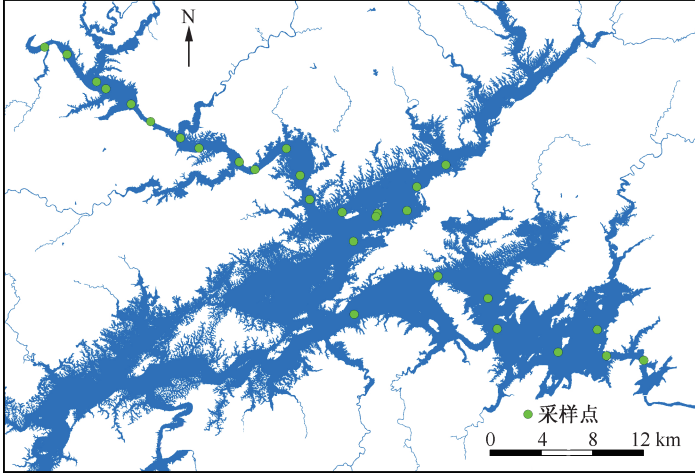


图 1 千岛湖采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Qiandao

光谱仪和标准板,导出离水辐照率、遥感反射率和水面以下辐照度比等参数.为避开太阳直射反射的影响和船舶阴影对光场的破坏,在现场船舶上的观测几何按如下方式:仪器与水面法线方向的夹角为 $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$,仪器观测评价与太阳入射平面的夹角为 $90^\circ \leq \varphi \leq 135^\circ$ (背向太阳),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向内向上旋转一个角度,使得天空光辐亮度的观测方向天顶角等于水面测量时的观测角.

由于水表面毛细波的作用,一部分太阳直射光被随机地反射进入到仪器视场使得测量的辐射率增大,需要进行残余太阳反射修正.通常采用连续进行多次测量,剔除较大值曲线,取低值法可消除直射反射的影响.

2 数据的处理与分析

2.1 水体离水辐亮度和遥感反射率的计算

水面以上的光谱辐亮度信号组成是:

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

式中, L_{sw} 是总信号; L_w 是进入水体的光被水体散射回来进入仪器的离水辐亮度; rL_{sky} 是天空光在水面反射以后进入观测仪器的信号,没有任何水体信息, r 是气水界面反射率; L_t 是海面白帽的信号; L_g 是水面波浪对太阳直射光的随机反射,没有任何水体信息.在避开太阳直射反射、忽略或避开水面泡沫的情况下, L_t 和 L_g 可不作计算; r 取决于太阳位置、天空光辐射分布、风速、风向等因素,通常取 0.02 ~ 0.06 之间.本文根据 Mobley^[18] 的研究,一般在晴天、低风速、 40° 观测角时,取 0.028,由此可得水体离水辐亮度为:

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

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 选用经过严格定标 30% 的标准灰板.由 (2) 式、(3) 式便可求出水体的遥感反射率 (R_{rs}):

$$R_{rs} = [L_w - rL_{sky}] \rho_p / \pi L_p \quad (4)$$

根据以上计算方法,首先对每个指标测量的 20 条光谱数据取低值后进行平均,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率.

2.2 水体光谱特征分析

夏季千岛湖水面的光谱测量结果(图2)表明,光谱反射率表现出内陆水体的一般特征:在400~500 nm范围内,由于叶绿素a、黄色物质在蓝紫光波段强烈吸收作用,水体的反射率较低;540 nm附近具有明显的反射峰,是由于叶绿素和胡萝卜素弱吸收和细胞的散射作用所致,该反射峰值与色素组成有关,可以作为叶绿素的定量标志;620 nm附近呈现谷值或呈肩状,主要是由于藻青蛋白的吸收系数较大;670 nm附近出现叶绿素a的又一小吸收峰,但不明显;690 nm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.在730~900 nm的长波部分,反射率迅速降低,是由于纯水在红外波段范围内的吸收作用所致.

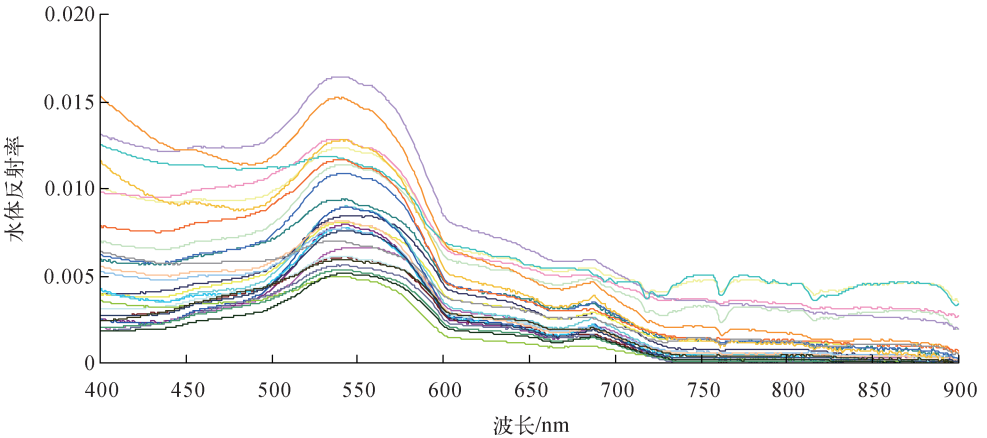


图2 夏季千岛湖水体采样点的光谱曲线

Fig. 2 Spectral reflectance curves of sampling sites in summer in Lake Qiandao

值得注意的是,与典型的内陆富营养化水体相比,夏季千岛湖在光谱特征上具有显著差异.首先,遥感反射率最大值不超过0.02,在量值上偏小,670 nm附近波形较平缓,由藻类色素引起的吸收峰不明显;反射光谱无论是波形特征还是反射率大小与马荣华等和李素菊等^[6,16,19]多年来对太湖、巢湖等水体观察到的光谱特征值有较大差距.其次,各个峰谷位置存在非常大的差异,反映了千岛湖水质较好、水色组分浓度较低.

光谱微分技术是对反射光谱进行数学模拟和计算不同阶数的微分差以迅速确定光谱弯曲点及最大最小反射率的波长位置,是处理高光谱遥感数据的一种重要方法.一般认为,通过对光谱曲线进行一阶导数处理可以消除测量环境中部分线性变化因素的影响,有助于客观分析光谱曲线的形态变化^[20].由于光谱仪采集的是离散型数据,光谱数据的一阶微分近似计算公式为:

$$R(\lambda_i)' = [R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})] / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}) \quad (5)$$

式中, λ_{i+1} 、 λ_i 和 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.

对应不同观测点叶绿素a浓度的反射光谱的一阶导数曲线表明,不同含叶绿素a浓度的水体光谱的一阶导数曲线形态相似,但是在某些波段存在明显差异(图3).尤其是不同曲线在687 nm附近出现0值的位置向长波方向移动,对应为光谱曲线上反射峰向长波方向平移,这与杜嘉等^[20]于2008年做的松花湖实验中出现的由叶绿素引起的反射峰位置“红移现象”相一致.

2.3 叶绿素a浓度分析

同步采集的水样分析结果显示(图4),夏季千岛湖水域的叶绿素a浓度在3.8~46.0 $\mu\text{g/L}$ 范围内,街口的叶绿素a浓度最高,为46.0 $\mu\text{g/L}$,其余点位浓度差异较小(3.8~12.0 $\mu\text{g/L}$),且浓度均比较低,与光谱

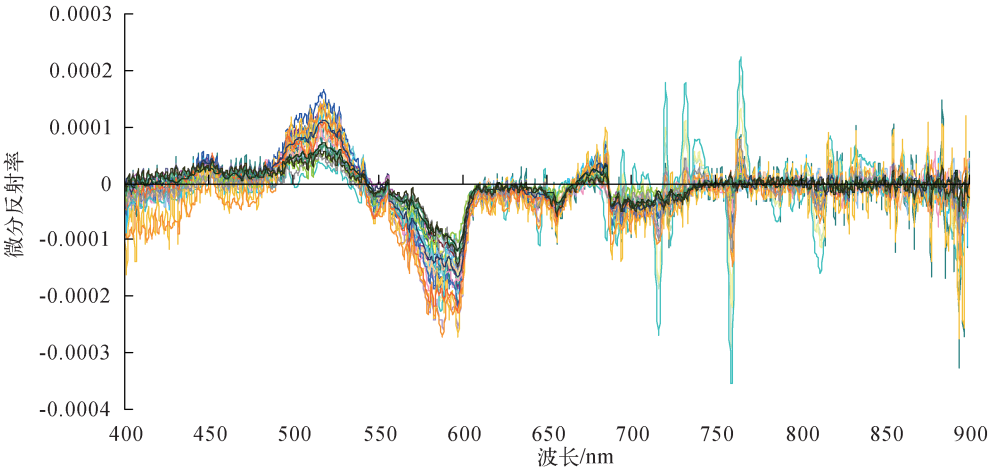


图 3 反射率—阶导数曲线
Fig. 3 First derivative curve of reflectance

分析一致. 从叶绿素 a 浓度和反射率的散点图分析中发现, 街口属于极离散点, 为合理建模我们剔除街口后, 随机选择 19 个样本用于模型的回归分析, 其余 8 个样本用于模型验证.

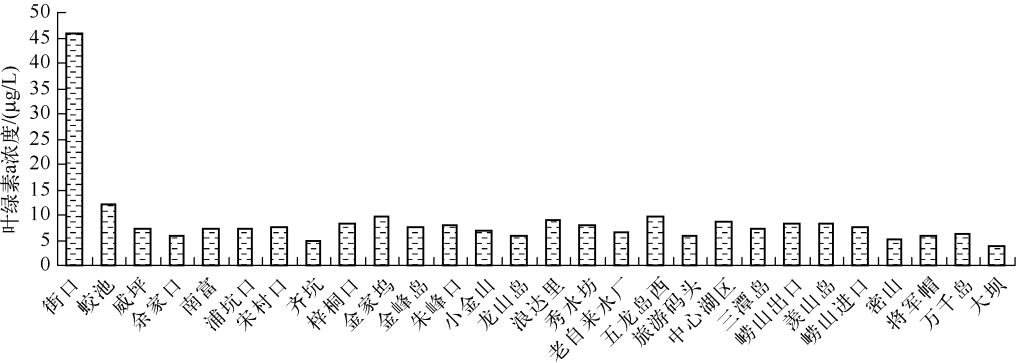


图 4 夏季千岛湖水体采样点的叶绿素 a 浓度
Fig. 4 Chlorophyll-a concentration of each sampling site of Lake Qiandao in summer

3 反演分析方法构建

3.1 单波段分析

对所有采样点的光谱反射率做归一化处理, 与叶绿素 a 浓度进行相关分析, 寻找最大相关波段和预测水平. 夏季(8 月份)千岛湖叶绿素浓度与各个波段水体归一化反射率之间的相关系数表明, 470 ~ 500 nm 对应蓝光波段的吸收峰, 呈负相关, 最大绝对值出现在 489 nm, 为 -0.65, 正相关最大值出现在 596 nm, 为 0.54, 在 670 ~ 710 nm 间出现另一个反射峰, 峰值较小(图 5). 可见, 单波段光谱反射率与叶绿素浓度的相关系数普遍较小, 因此, 对于夏季千岛湖水体, 仅仅利用单波段不宜建立反演叶绿素

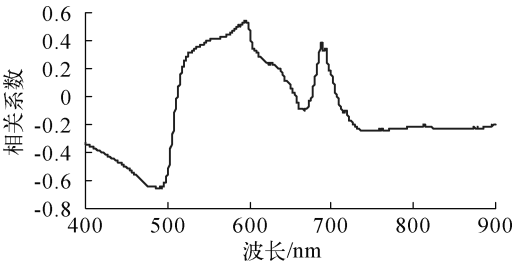


图 5 归一化反射率和夏季叶绿素 a 浓度的相关性分析
Fig. 5 Correlation analysis between normalized reflectance and chlorophyll-a concentration in summer

浓度的定量模型,与许多学者的结论一致^[6,9].与刘英等分析的 701 nm 处相关系数达 0.907 差别较大^[21],原因可能有:一、同样是千岛湖区域,刘英等采用的是垂直测量法,并利用直接测量得到的水体相对反射率光谱进行分析^[21],而本文采用的是唐军武等^[17]提出倾斜观测的表面法,并利用 NASA SeaWiFS 的规范用离水辐亮度和水体表面入射总辐照度求出遥感反射率,这样可以避开太阳直射、反射和船舶阴影对光场的破坏,去掉天空漫散射光,分离携带水体信息的离水辐亮度与不带任何水体信息的水表面反射信息,获取更真实的水体信息;二、由于经验或半经验方法只是根据反射率实验数据的不同建立与实测浓度值之间的统计模型,缺乏物理基础支持,因此不同气象条件和不同时间条件等因素的影响,都会带来较大的差异.

3.2 波段比值法分析

采用反射率可以部分消除水表面光滑度和微波随时间和空间变化的干扰,并在一定程度上减小其他污染物的影响^[8].在水体叶绿素遥感中,波段比值法可通过扩大叶绿素吸收峰与反射峰或荧光峰之间的差异,提取叶绿素浓度信息^[2,5].本文在分析夏季千岛湖水体反射光谱特征的基础上,选择 596 nm 和 687 nm 反射峰波段和 489 nm 的吸收峰波段进行模型分析.这一结果与张运林等^[7]给出的 R_{706}/R_{682} 相关性好,与宋开山^[9]给出的 R_{700}/R_{580} 的结果不一致.这主要是由于在内陆湖泊等 II 类水体中,悬浮物等其他物质与叶绿素共同存在,使得水体的光学特性更为复杂.

以叶绿素反射峰 596 nm 和吸收峰 489 nm 两个波段的反射率比值作为自变量,叶绿素 a 浓度为因变量建立回归方程;同时用波段比值法回归模型对叶绿素 a 浓度预测值与实测值之间的关系进行线性回归,结果表明该模型具有一定的实用性(图 6),可以考虑用来估算叶绿素 a 浓度.

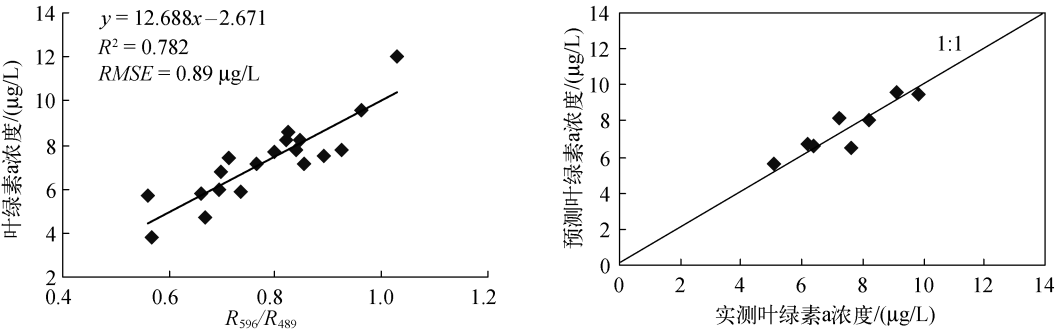


图 6 波段比值法 (R_{596}/R_{489}) 估测模型及模型的验证

Fig. 6 Estimate model using band ratio method (R_{596}/R_{489}) and model evaluation

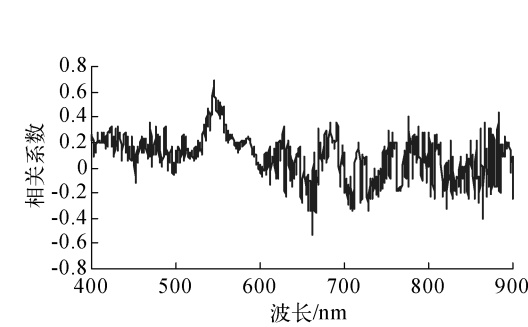


图 7 光谱反射率一阶微分与叶绿素的相关性

Fig. 7 Correlation between Chl. a and first-derivative reflectance

演^[12-14].模型形式为:

3.3 反射光谱微分分析

Fraser^[10]和高艳等^[22]发现,通过对光谱反射率进行微分转化,有助于对叶绿素 a 浓度进行定量遥感.本文通过计算各波段微分值与叶绿素 a 浓度间的相关系数(图 7),发现 545 nm 处的相关系数最大,为 0.681.因此,以 545 nm 处的一阶微分值为自变量,叶绿素 a 浓度为因变量建立回归方程;同时用该模型估算叶绿素 a 浓度预测值与实测值之间的关系,结果表明模型验证结果较理想(图 8),但与波段比值法相比,其估测效果一般.

3.4 三波段模型分析

三波段模型最早在 2003 年被应用于植被遥感中,后来被许多学者成功应用于水体叶绿素浓度的反

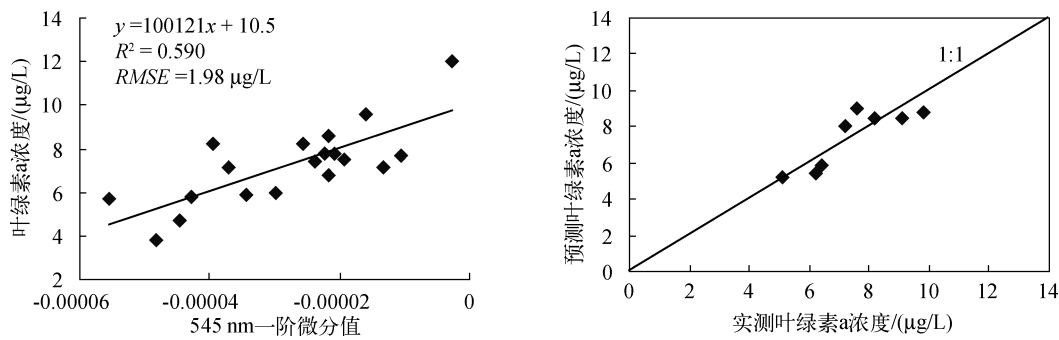


图 8 一阶微分估测模型及模型验证

Fig. 8 Estimate model using first-derivative spectral reflectance and model evaluation

$$Chl. a \propto R(\lambda_3) [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \tag{6}$$

式中, $R(\lambda_i)$ 为波段 λ_i 的遥感反射率. λ_1 应选择对叶绿素 a 吸收最敏感的区域; λ_2 处应是对叶绿素 a 吸收最不敏感的区域, 且 λ_2 处的悬浮物和黄色物质的吸收系数与 λ_1 处的非常接近. 因此, $R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)$ 可以排除黄色物质、非色素颗粒物吸收干扰; 为进一步消除后向散射和辅助参数的影响, 引入 λ_3 , λ_3 处应是各成分吸收最小的区域, 同时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. 通过 3 个波长的组合可以极大程度地减少水体其他组分对反演叶绿素 a 的干扰, 增强叶绿素 a 信息在光谱上的反映.

从三波段算法的原理可以看出, 检验 3 个特征波段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. Dall’Olmo 等^[12] 认为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的取值范围分别为 660 ~ 690、700 ~ 750、 ≥ 730 nm. 基于此设定, 本研究采用循环迭代法, 利用实测叶绿素 a 浓度与估算叶绿素 a 浓度的 RMSE 最小原则, 来确定 3 个波段的具体位置. 结果表明, RMSE 最小值对应的三波段因子为: $[R^{-1}(670) - R^{-1}(701)]R(730)$. 将此作为模型自变量, 叶绿素 a 浓度为因变量建立回归方程; 同时用该模型估算叶绿素 a 浓度的预测值与实测值之间的关系, 结果表明该模型能很好地提高精度(图 9), 用于反演千岛湖叶绿素 a 浓度的结果较为理想.

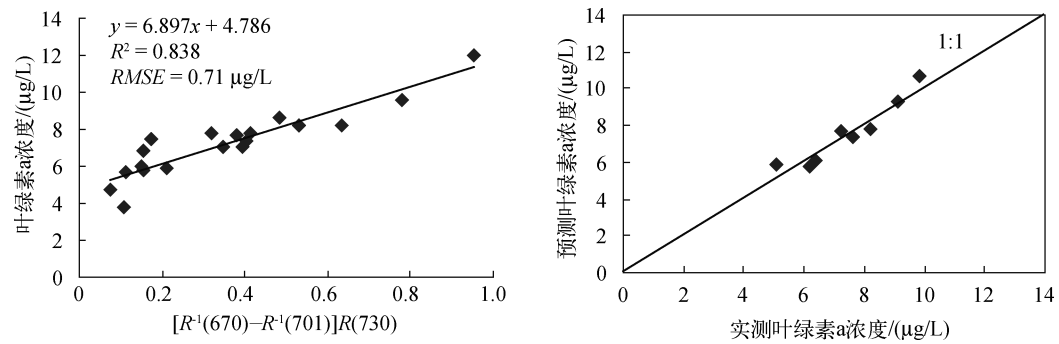


图 9 三波段 $[R^{-1}(670) - R^{-1}(701)]R(730)$ 估测模型及模型的验证

Fig. 9 Estimate model using three-band-model method $[R^{-1}(670) - R^{-1}(701)]R(730)$ and model evaluation

3.5 神经网络模型分析

一些学者通过研究认为人工神经网络可以实现光谱波段之间的优势互补, 且具有泛化能力强、预测性好、应用方便等优点, 应用高光谱估算模型可以提高反演精度、缩短运算时间^[23-24]. 本文采用 Matlab 平台上构建的 BP 神经网络模型, 共 3 层, 依次为输入层、隐藏层和输出层. 输入层为不同波段的光谱反射率数据集; 隐藏层函数设为 *tansig*, 包含若干神经元, 对输入层数据进行权重和偏置处理; 输出层函数设为 *purelin*,

经过累加和激发函数的运算,得到对应的水体实测叶绿素 a 浓度.

为获得更快的运算速度,将归一化处理后的遥感反射率作为输入层数据.同时,为防止模型的过度拟合,隐藏层中编写循环语句来选择神经元个数,最终确定的神经元个数为 16.在 27 个实测样本中随机抽取 19 个为训练样本,8 个为验证样本,设置网络学习迭代次数为 1000,反复调试训练后,模型数据的网络输出结果见图 10.结果表明,训练样本和验证样本的模拟精度分别为 0.942 和 0.913, $RMSE$ 分别为 0.63 和 0.71 $\mu\text{g/L}$,反演精度远远高于波段比值法、一阶微分法及三波段构建的回归模型.可见,对于复杂的湖泊水库 II 类水体,遥感数据的各个波段与实测叶绿素 a 浓度之间为非简单线性对应关系,利用模拟数据训练的人工神经网络模型能够很好地反映二者的关系,并且能够取得较好的拟合精度.

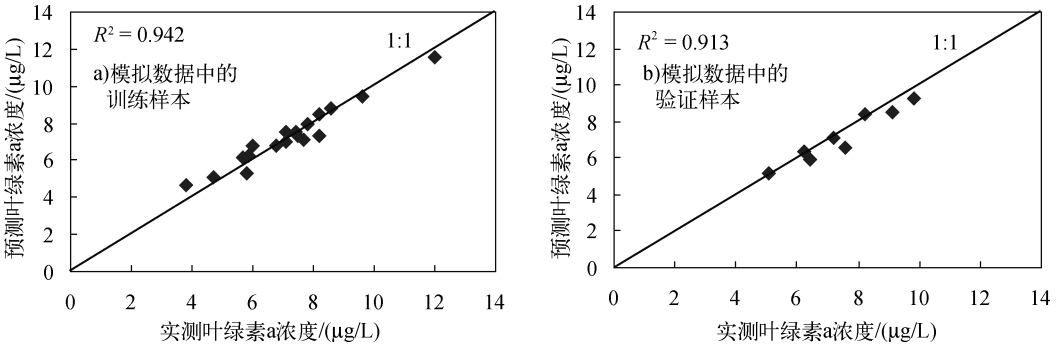


图 10 BP 神经网络的反演结果

Fig. 10 The inversion results of BP neural network

4 结语

1) 与典型的内陆富营养化水体相比,夏季千岛湖水体叶绿素含量相对较低,在光谱特征上表现出明显的差异.8 月份的采样显示水体遥感反射率在量值上偏小;由藻类色素引起的 2 处反射峰不明显;各个峰谷位置存在非常大的差异.反映了千岛湖水质较好、水色组分浓度比较低.

2) 基于光谱反射率与叶绿素 a 浓度之间的关系分析表明:叶绿素 a 浓度与单波段光谱反射率的相关性不高,不宜建立反演模型;596 nm 和 489 nm 波长的反射率比值,545 nm 的一阶微分能较好地用于叶绿素 a 浓度的反演,估测模型 R^2 分别为 0.782、0.590, $RMSE$ 分别为 0.89、1.98 $\mu\text{g/L}$,显著水平 $P < 0.01$;三波段模型的反演结果优于传统的波段比值法和一阶微分法, R^2 为 0.838, $RMSE$ 为 0.71 $\mu\text{g/L}$,其波段取值范围能对应于大多数多光谱和高光谱传感器的通道,在遥感影像反演中具有良好的应用前景;神经网络模型的估算精度最高, R^2 为 0.942, $RMSE$ 为 0.63 $\mu\text{g/L}$,该模型可以容纳更多的波段参与叶绿素 a 浓度的估算,并且大大提高了高光谱定量反演叶绿素 a 浓度的精度.这为今后利用遥感数据在千岛湖的夏季相邻月份进行叶绿素 a 浓度大范围遥感反演研究提供了基础.

3) 对于内陆水体,光学特性复杂且季节性变化明显,单纯利用表观光学特性的经验模型受地区和时间限制.同时,缺乏悬浮物及黄色物质固有光学特性等实测数据,无法准确分析其对水体光谱反射率的影响.因此,进一步研究需加强以生物光学模型为基础,结合辐射传输模型和经验方程实现水质参数的定量反演,以提高反演模型的精度和可靠性.

5 参考文献

- [1] 《新安江水电站志》编辑委员会.新安江水电站志.杭州:浙江人民出版社,1993:67-68.
- [2] 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.遥感学报,2000,4(1):41-45.
- [3] 刘 魁,黄家柱,张 强.太湖水体藻类叶绿素浓度高光谱遥感监测研究.南京师大学报,2005,28(3):97-101.
- [4] 刘堂友,匡定波,尹 球.湖泊藻类叶绿素 a 和悬浮物浓度的高光谱定量遥感模型研究.红外与毫米波学报,2004,23(1):11-15.

- [5] 周 艺,周伟奇,王世新等. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用. 水科学进展,2004,**15**(3):312-317.
- [6] 马荣华,戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度. 遥感学报,2005,**9**(1):78-86.
- [7] 张运林,秦伯强. 基于水体固有光学特性的太湖浮游植物色素的定量反演. 环境科学,2006,**27**(12):2439-2444.
- [8] 荀尚培,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,**209**(1):95-101.
- [9] 宋开山,张 柏,王宗明等. 吉林查干湖水体叶绿素 a 含量高光谱模型研究. 湖泊科学,2007,**19**(3):275-282.
- [10] Fraser RN. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll-a among Nebraska Sand Hills lakes. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(8): 1579-1589.
- [11] Hunter PD, Andrew NT, Laurence C *et al.* Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes. *Remote Sensing of Environment*, 2010, (4):2705-2718.
- [12] Dall'Olmio G, Gitelson AA. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters; experimental results. *Appl Opt*, 2005, **44**(3): 412-422.
- [13] Gitelson AA, Gritz Y, Merzlyak MN. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J Plant Physiol*, 2003, **160**(3):271-282.
- [14] Gitelson AA, Schalles JF, Hladik CM. Remote chlorophyll-retrieval in turbid, productive estuaries; Cheapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **109**: 464-472.
- [15] Daniel O, Thomas H. Chlorophyll retrieval with MERIS Case-2-regional in perialpine lakes. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**: 607-617.
- [16] 马荣华,段洪涛,唐军武等. 湖泊水环境遥感. 北京:科学出版社,2010:4-6.
- [17] 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.
- [18] Mobley CD. Light and water: Radiative transfer in natural waters. San Diego: Academic Press, 1994.
- [19] 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):228-234.
- [20] 杜 嘉,张 柏,宋开山等. 松花湖水体叶绿素 a 含量与反射光谱特征关系初探. 遥感技术与应用,2010,**25**(1):50-55.
- [21] 刘 英,王 珂,周 斌等. 千岛湖水体叶绿素浓度高光谱遥感监测研究初报. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2003,**29**(6):621-626.
- [22] 高 艳,周 丰,张 巍等. 小球藻和铜绿微囊藻的高浓度 Chl-a 高光谱定量模型. 湖泊科学,2007,**19**(3):261-268.
- [23] 王 繁,凌在盈,周 斌等. MODIS 监测河口水体悬浮泥沙质量浓度的短期变异. 浙江大学学报,2009,**43**(4):755-759.
- [24] 姚付启,张振华,杨润亚等. ANFIS 在植被叶绿素含量高光谱反演中的应用. 光谱学与光谱分析,2010,**30**(7):1834-1838.