*J. Lake Sci.*(湖泊科学),2010,**22**(3):391-399
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

# 因子分析法在水质参数反演中的应用*

施　坤,李云梅**,王　桥,杨　煜,金　鑫,王彦飞,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**:2008 年 11 月、2009 年 4 月,分别对太湖水体以及 2009 年 6 月对巢湖水体进行野外实验. 对太湖水体遥感反射率进行因子分析,并利用遥感反射率的不同因子,对叶绿素和总悬浮物浓度进行反演,并对反演因子的普适性进行验证. 利用第一因子反演太湖春季叶绿素浓度,平均相对误差为 22.1%,均方根误差为 3.48g/L,利用该方法反演巢湖、太湖秋季水体的叶绿素浓度没有取得较好的效果;利用第二因子反演太湖春季总悬浮物浓度,平均相对误差为 13.9%,均方根误差为 11.33mg/L,利用该因子反演巢湖、太湖秋季水体的总悬浮物浓度同样取得较好效果. 结果表明:利用遥感反射率的第一因子对叶绿素浓度进行反演,该方法不具有普适性;利用遥感反射率的第二因子对总悬浮物浓度进行反演能取得较好的结果,此方法具有一定的普适性.
**关键词**:太湖;巢湖;因子分析;水色;总悬浮物;叶绿素

## Application of factor analysis method in water quality parameters inversing

SHI Kun, LI Yunmei, WANG Qiao, YANG Yu, JIN Xin, WANG Yanfei, YIN Bin & ZHANG Hong
(*MOE Key Laboratory of Virtual Geographic Environment*, *Nanjing Normal University*, *Nanjing* 210046, *P. R. China*)

**Abstract**: Field experiments were conducted on Lake Taihu in November 2008 and April 2009, and on Lake Chaohu in June 2009. The water remote sensing reflectance was analyzed by factor analysis method. Furthermore, Chlorophyll and total suspended matter concentration were inversed using different factors of remote sensing reflectance, and universality of inverted factor was verified too. Chlorophyll concentration of Lake Taihu in spring was inversed by the first factor, and relative error and root-mean-square error are 22.1% and 3.48g/L, respectively. However, this method failed in inversing of autumn of Lake Taihu and Lake Chaohu. Concentration of total suspended matter was inversed by the second factor, and relative error and root-mean-square error were 13.9% and 11.33mg/L, respectively. This method was suitable in Lake Chaohu and autumn of Lake Taihu. Applicability of the first factor of remote sensing reflectance to inverse chlorophyll concentration was limited, and applicability of the second factor of remote sensing reflectance to total suspended matter concentration was certain universal.
**Keywords**: Lake Taihu; Lake Chaohu; factor analysis; water color; total suspended matter; chlorophyll

遥感反射率是湖泊水色的综合反映,是水体光学活性物质吸收和散射互相作用的结果,包含了湖泊中叶绿素、总悬浮物、有色可溶性有机物浓度等光学活性物质的信息. 很多学者运用遥感反射率对光学活性物质进行定量研究,Clark[1]、O'Reilly[2]、马荣华等[3]、李素菊等[4]、孙德勇等[5]、徐京萍等[6]运用遥感反射率较好地提取了不同研究区的叶绿素浓度;Tassan[7]、Binding[8]、唐军武等[9]、宋庆君等[10]、吕恒等[11]成功地运用遥感反射率提取了总悬浮物浓度. 遥感反射率与散射系数成正比,而与水体的吸收系数成反比,其变化受散射系数与吸收系数的比值控制. 对吸收有贡献的光学活性物质有藻类颗粒物、非藻类颗粒物、有色可溶性有机物. 太湖水体吸收和散射的空间变化以及主导因素,相关学者已经做了大量研究[12-21]. 不同的水体影响和控制遥感反射率变化的主导因子不同,从而导致很多遥感反演算法具有很强的区域性,比如 OC4V4 算法能够很好的应用到大洋一类水体的叶绿素反演中,然而对于近海岸和内陆湖泊等二类水体却得不到较好的

* 国家自然科学基金项目(40971215)和国家自然科学基金重点项目(40730527)联合资助. 2009-08-03 收稿;2009-12-11收修改稿. 施坤,男,1985 年生,博士研究生;E-mail:ahnushikun@yahoo.com.cn.
** 通讯作者;E-mail:liyunmei@njnu.edu.cn.

结果[22]. 对于太湖等内陆湖泊水体相对大洋等一类水体的光学特性具有很强的区域性,不同的季节其遥感反射率具有不同的主导因子,因而很多学者开发了分季节的叶绿素、总悬浮物浓度的反演算法. 叶绿素、总悬浮物浓度反演算法具有区域性和季节性的根本原因是影响遥感反射率变化的因子具有很强的区域性和季节性,导致其不同的研究者在不同时间和研究区对总悬浮物和叶绿素浓度的反演,总要进行波段的选择和验证. 如果要找到总悬浮物浓度或者叶绿素浓度反演的普适性因子,在进行反演时就没有必要做波段的选择和分析工作.

本研究基于以上考虑,试图找到总悬浮物浓度或者叶绿素浓度反演的普适性因子,首先对太湖春季的遥感反射率进行因子分析,探究遥感反射率因子与总悬浮物浓度、叶绿素浓度之间的关系,确定遥感反射率不同因子在水质反演中的适用性,并结合太湖秋季和巢湖夏季数据,对遥感反射率不同因子反演水质参数的普适性进行分析,从而为太湖水体遥感反演算法的改进提供理论支持.

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区及样点分布

2008 年 11 月和 2009 年 4 月分别对太湖 52 个、26 个样点进行观测,于 2009 年 6 月对巢湖 32 个样点进行观测(图 1). 测量的参数包括水体中总悬浮物浓度、叶绿素浓度、遥感反射率. 其中,遥感反射率在野外直接观测,总悬浮物浓度、叶绿素浓度、总悬浮物的吸收系数等参数通过室内分析获得.

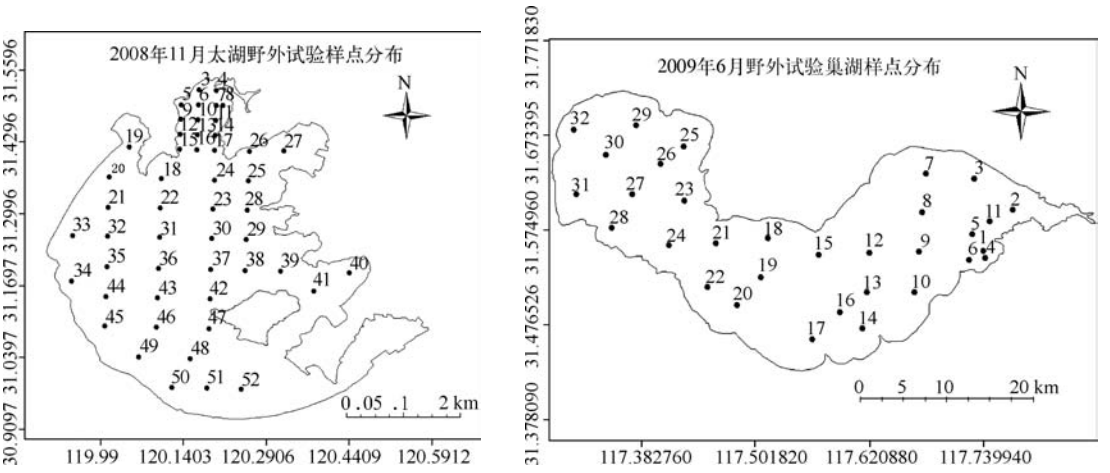



图 1 太湖和巢湖样点分布

Fig. 1 Sampling sites of Lake Taihu and Lake Chaohu

### 1.2 参数的测定

总吸收系数(去除纯水的吸收)利用 Wetlabs 公司生产的 AC-S 仪器测量[23],为了得到更为精确的吸收系数数据,需对吸收系数作温度和散射纠正,纠正方法见文献[23]. 总悬浮物浓度的测定采用重量法进行. 叶绿素浓度的测量采用常规的化学分析方法[21].

色素颗粒物的吸收系数利用分光光度计测量,先测总颗粒物的吸收系数,然后对总颗粒物进行漂白得到非色素颗粒物,再测定其吸收系数,两者之差即色素颗粒物的吸收系数,具体测量方法见文献[21].

光谱测量采用美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,其测量的波段范围在 350 - 1050nm 之间. 提取遥感反射率必须要观测的数据有:标准灰板(其反射率小于 0.3)、天空光、水体等的光谱辐亮度信息,每个对象都要采集十条以上的光谱数据,剔除异常光谱数据,剩余数据做均值处理.

为了避开水体对太阳的直射反射和船体等阴影对光场的破坏作用,采用一定的观测角度进行光谱测量,仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 $90° < \phi_v < 145°$,仪器与海面法线方向的夹角 $10 < \theta_v < 30°$. 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,将仪器在观测平面内向上旋转一个角度,

使得观测方向的天顶角与 $\theta_v$ 相同，测量天空光的辐射亮度. 遥感反射率提取的具体方法见文献[24].

在获得各个样点的水体遥感反射率后，观察光谱特征的变化，剔除光谱特征变化异常的数据，最后保留50个样本数据用于数据的分析.

### 1.3 数据分析

参数的因子分析、相关性分析、线性、非线性拟合、误差分析等利用 SPSS 3.0 完成. 在叶绿素和总悬浮物浓度反演的过程中，随机选择30个样本用做模型的构建，20个样本用做模型的验证和预测.

### 1.4 因子分析方法

因子分析就是用少数几个因子来描述许多指标或因素之间的联系，以较少几个因子反映原数据的大部分信息的统计方法，而各个因子之间是彼此不相关的. 因子分析具有以下特点：因子变量的数量远少于原有数据指标变量的数量，对因子变量的分析能够减少分析中的计算量；因子变量不是对原有变量的取舍，是根据原始变量的信息进行重新组构，它能够反映原有变量大部分的信息；因子变量之间不存在线性相关关系，对变量的分析比较方便；因子变量具有命名解释性，即该变量是对某些原始变量信息的综合和反映. 在因子分析的过程中采用主成分分析的方法确定因子变量.

本研究对野外实测的遥感反射率进行因子分析，确定主要因子，并建立各个因子与叶绿素和总悬浮物浓度之间的关系，从而为因子进行命名解释，确定遥感反射率变化的主导因子. 因子分析的主要步骤为：

设有 $n$ 个样本，每个样本的遥感反射率都有 $m$ 个波段，记为 $R_{rs}$.

第一步，对 $R_{rs}$ 进行标准化变换. 首先计算每个波段所有样点的平均值，然后计算每个波段所有样点的方差，最后对遥感反射率进行标准化处理，得标准化矩阵 $R_{rs}^*$. 为了表达方便仍记为：

$$R_{rs}=\begin{pmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{nm} \end{pmatrix};\ R_{ij}=(R_{ij}-\overline{R}_j)/\sigma_j$$

式中，$\overline{R}_j$ 为均值，$\sigma_j$ 为方差；$i=1,2,3\cdots n$；$j=1,2,3\cdots m$.

第二步，计算各个波段遥感反射率的相关系数矩阵 $r$.

第三步，用相关系数矩阵进行主成分分析，计算 $r$ 的特征值 $\lambda_i$ 和特征向量 $a_i$，$i=1,2,3\cdots,m$.

第四步，确定主成分个数，称 $\lambda_k/\sum_{i=1}^{p}\lambda_i$ 为第 $k$ 个主成分的累计信息贡献率. 本研究选取主成分的原则是：当前 $k$ 个主成分的累计贡献率超过95%时，取前 $k$ 个主成分代替原来的 $m$ 个波段.

第五步，求因子载荷，因子载荷是每个因子与原来各个波段之间的相关系数，相关系数越大则说明该因子与该波段处的遥感反射率关系密切. 根据因子载荷矩阵再计算经旋转后各因子的载荷矩阵，并计算各个因子的得分. 因子分析的具体详细的过程可见参考文献[25].

## 2 结果与分析

### 2.1 太湖水体遥感反射率的变化特征

实测的太湖水体遥感反射率的变化特征（图2）表明，太湖水体的遥感反射率在空间上具有较大的差异，可以解释为叶绿素和总悬浮物浓度空间分布的差异，叶绿素的浓度在4.6－79.7mg/m$^3$之间，总悬浮物的浓度在15.6－244mg/L之间. 太湖水体所有样点在不同波段处遥感反射率的标准差较大的值出现在650－700nm之间（图3），该波段范围的遥感反射率所具有的特征正是叶绿素a吸收特征所产生的结果，而对于其他波段叶绿素a并不具有典型的吸收特征，表现出散射的规律特征，标准差相对较低.

在550－585nm左右的反射峰值是由于叶绿素a和胡萝卜素吸收较弱加上细胞的散射综合作用而导致的，可以用此波段来估算叶绿素浓度[26]；在600－630nm波段，由于藻蓝素藻清蛋白的吸收，遥感反射率下降[26]；670nm的反射谷是由于浮游植物对红光的强烈吸收造成的[26]；710nm左右的反射峰值，其存在与否是判断水体是否含有叶绿素的依据，况且该峰的位置随着叶绿素浓度的变化而变化，该峰值出现的原因是由于水体和叶绿素a的吸收在该波长处达到最小值所致[26]；在760nm处的反射率有的样点呈现峰值，而有

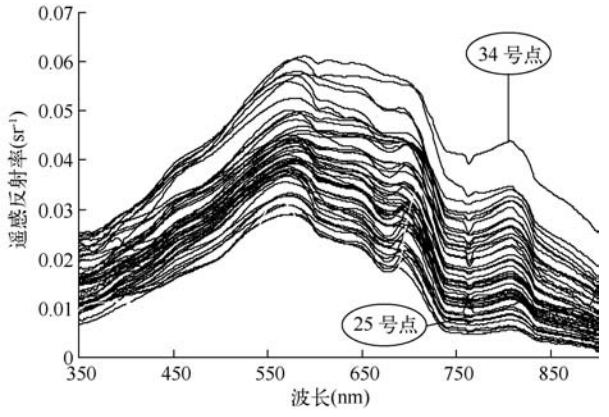



图 2 太湖水体反射光谱曲线

Fig. 2 Spectrum of the remote sensing reflectance in Lake Taihu

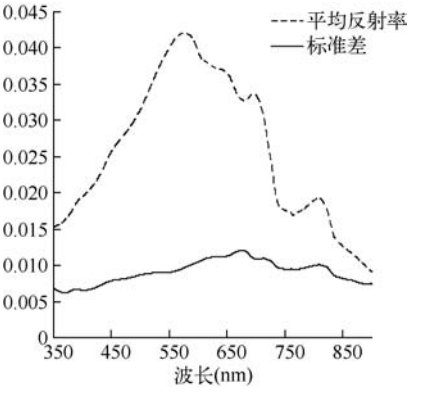



图3 太湖水体遥感反射率的平均值和标准差

Fig. 3 The mean and standard deviation of remote sensing reflectance in Lake Taihu

的样点却呈现谷值,其产生的具体原因至今并不清楚. 在 750nm 以后遥感反射率变化规律较为一致,由于浮游植物、有色可溶性有机物、非藻类颗粒物的吸收几乎为 0,遥感反射率基本上反映的是总悬浮物的散射特征,而总悬浮物的散射光谱在各个波段变化都较为规律所致. 总悬浮物是太湖水体主要散射体[26],因而在 750nm 以后反映的主要是总悬浮物的浓度信息,比如 34 号样点总悬浮物浓度较高,其值为 244mg/L,在 750nm 处的反射率要比其他样点都高,由于其较高的浓度使得在其他波段处叶绿素的反射特征不明显,而 25 号点总悬浮物浓度较低,其值为 15.6mg/L,在 750nm 以后具有极低的遥感反射率.

### 2.2 太湖水体遥感反射率的因子分析

对太湖水体遥感反射率进行因子分析,得到三个主要因子,其中第一因子可以解释太湖水体遥感反射率变化的 85% 左右,第二因子可以解释太湖水体遥感反射率变化的 10% 左右,第三因子可以解释太湖水体遥感反射率变化的 4%,前两个因子累计可以解释太湖水水体遥感反射率的 95%,是太湖水体遥感反射率的主要因子. 由于第三个因子对太湖水体遥感反射率的变化解释只能占 4%,其贡献相对较小,因此本研究主要集中在前两个因子上. 本研究只考虑前两个因子.

太湖水体遥感反射率的三个因子在不同波段处遥感反射率的载荷见图 4,也就是三个因子与不同波段处遥感反射率之间的相关系数,也包含了太湖水体总悬浮和各个波段遥感反射率之间的相关系数,叶绿素浓度与各个波段相关系数(取相关系数的相反数). 第一因子和叶绿素浓度与不同波段处遥感反射率之间的相关性具有很强的一致性,在 350 - 450nm 都随着波长的增加而上升,在 450 - 750nm 有一较高峰值,在 750nm 以后随着波长的增加而下降,太湖水体叶绿素浓度与第一因子的相关系数为 0.89,与第二因子的相关系数为 0.06,与第三因子的相关系数为 -0.12;而第二因子和各个波段的遥感反射率之间的相关系数与总悬浮物浓度与各个波段遥感反射率的相关系数具有很强的一致性,在 350 - 750nm 相关系数都很低,但在 750nm 以后相关系数开始上升,达到最大值,在短波波段两者曲线存在不一致性,这主要是由于有色可溶性有机物、非藻类颗粒物等在

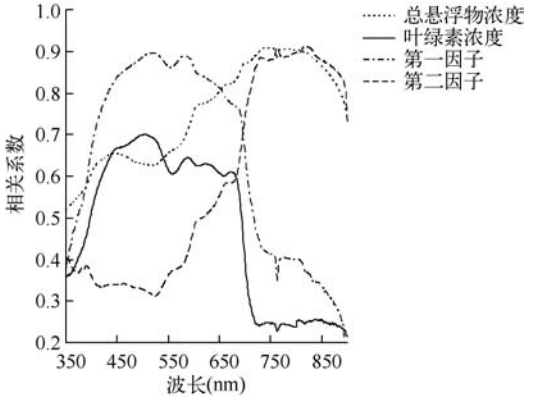



图 4 反射率因子、水质参数与不同波段反射率的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient between remote sensing reflectance and water quality parameters and factors

短波波段的强吸收从而导致两者的曲线存在差异，在 750nm 后两者的曲线高度一致，主要是由于在 750nm 后吸收几乎为 0，遥感反射率主要反映总悬浮物的信息，总悬浮物浓度与第二因子的相关系数为 0.95，与第一因子的相关系数为 0.34，与第三因子的相关系数为 -0.12（图 4）.

由此可见太湖水体第一因子可以解释为叶绿素的吸收作用，对遥感反射率的变化贡献达 85%，第二因子可以解释为总悬浮物的散射作用，对遥感反射率变化的贡献达 10% 左右，其他 5% 可以解释为有色可溶性有机物等吸收作用而产生的.

### 2.3 基于因子分析的总悬浮物浓度反演

悬浮物是我国近岸海水环境和内陆湖泊水环境质量检测的重要参数，也是水体中重要的光学活性物质之一，其浓度的大小直接影响着真光层深度、水体透明度、水色等光学性质，从而进一步影响着水体的初级生产力和生物量[27].

国内外诸多学者利用高光谱数据研发了许多悬浮颗粒物浓度的遥感算法模型，其中主要包括：Tassan 波段组合算法、单波段算法、近红外反射峰高算法、基于生物光学模型的方法. Tassan[7] 针对海岸带水体提出了一种波段组合模型用以反演悬浮颗粒物浓度，具体形式如下：$\lg(C_{TSM}) = a + b\lg\{[R_{rs}(555) + R_{rs}(670)][R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]^{c}\}$，式中 $a$、$b$ 和 $c$ 是经验参数. 该方法得到了广泛的应用和改进，唐军武等[9] 成功的将改进的方法用于我国黄海、东海二类水体的悬浮颗粒物浓度反演. 利用单波段算法和生物光学模型算法反演总悬浮物浓度的研究见参考文献[6,8,28-29].

然而这些研究基本上都基于单个波段或者波段组合，并未用到所有波段的信息，况且，由于研究区和季节的不同，反演所需要的波段必须重新选取. 本研究根据总悬浮物浓度与遥感反射率因子之间的关系，反演悬浮物的浓度，不需要再对多种不同的波段或波段组合进行验证，直接将第二因子作为参数反演的遥感信息指标.

遥感反射率第一因子和第三因子与总悬浮物浓度的相关系数都很低，而与第二因子的相关性很高，因此第二因子能够很好的表达悬浮物浓度的信息，总悬浮浓度与遥感反射率第二因子之间的关系，因此利用稳定性最好的线性关系，用第二因子来反演总悬浮物浓度（图 5）. 预测值与实测值之间的关系可见，预测值与实测值具有较好的拟合性，两者的比值基本上在 1 附近变化（图 6）.

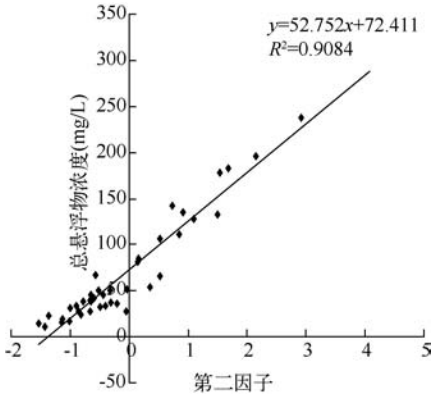



图 5 总悬浮物浓度与第二因子之间的关系

Fig. 5 Relationship between total suspended matter concentration and the second factor of remote sensing reflectance

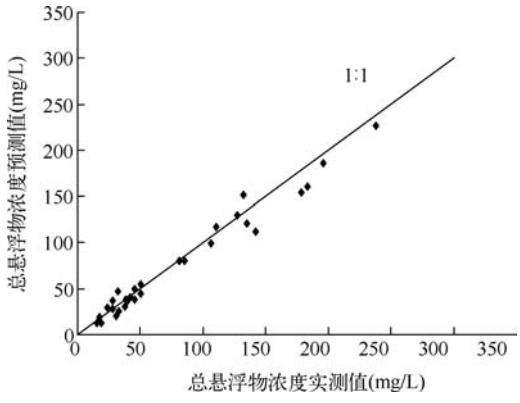



图 6 总悬浮物浓度实测值与预测值的散点图

Fig. 6 Scatter-plot of measured and predicted total suspended matter concentration

利用第二因子反演总悬浮物浓度，总悬浮物浓度的预测相对误差最小值为 0.29%，最大相对误差为45.4%，平均误差为 13.9%，均方根误差为 11.33mg/L，80% 预测样点的相对误差低于 20%，43% 预测样点的相对误差低于 10%，仅有 20% 生物预测样本的误差大于 20%，相对误差大于 20% 的样点悬浮

物浓度的是低于30mg/L的悬浮物浓度较低的样点,而对于悬浮物浓度较高的样点,模型的预测性较好,相对误差较低.遥感反射率第二因子能够很好地反映总悬浮物的散射信息,有效地去除色素颗粒物等的吸收影响,从而使得使用遥感反射率的第二因子反演总悬浮物浓度的精度相对较高,符合遥感反演精度要求.

利用巢湖、太湖秋季实验数据对总悬浮物浓度的反演因子的普适性进行验证.巢湖水体、太湖秋季水体总悬浮浓度与遥感反射率第二因子之间的关系(图7)表明,两者都呈线性关系.用第二因子反演总悬浮物浓度巢湖水体、太湖秋季水体预测值与实测值之间的关系(图8),可见预测值与实测值具有较好的拟合性,两者的比值基本上在1附近变化.

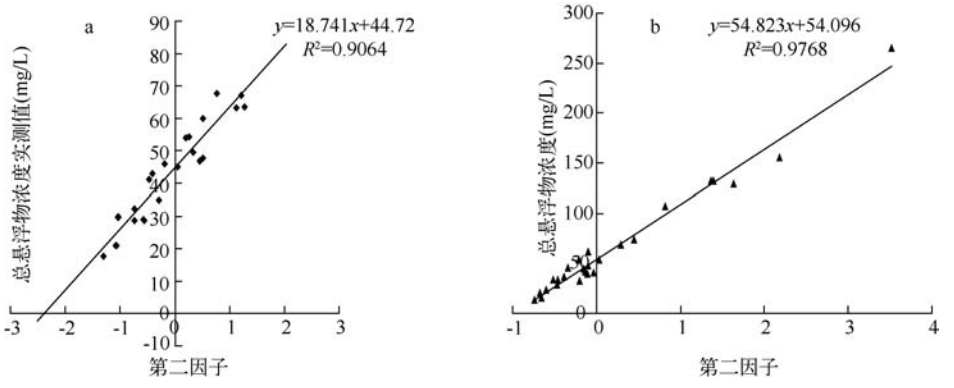



图7 巢湖(a)和太湖秋季(b)水体总悬浮物浓度与第二因子之间的关系

Fig. 7 Relationship between total suspended matter concentration and the second factor of remote sensing reflectance in Lake Chaohu(a)and in autumn Lake Taihu(b)

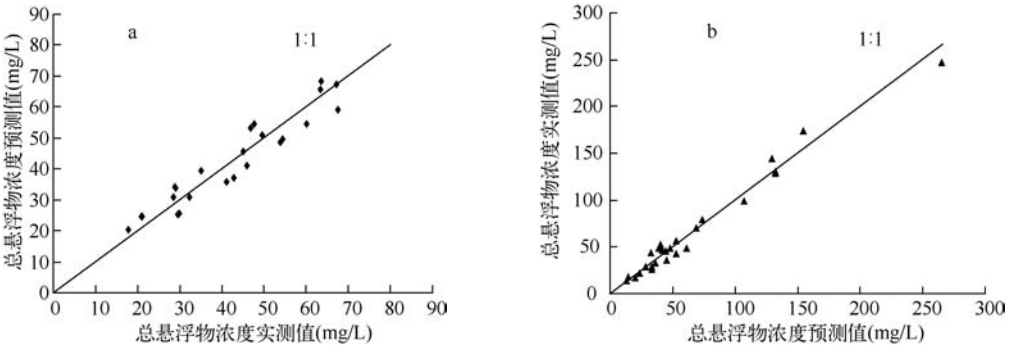



图8 巢湖水体(a)和太湖秋季水体(b)总悬浮物浓度实测值与预测值的散点图

Fig. 8 Scatter-plot of measured and predicted total suspended matter concentration in Lake Chaohu (a) and in autumn Lake Taihu (b)

利用第二因子反演巢湖、太湖秋季水体总悬浮物浓度,总悬浮物浓度反演的相对误差最小值分别为0.5%、0.9%,最大相对误差分别为18.8%、32%,平均误差分别为10.8%、12%,均方根误差分别为10.5mg/L、8.4mg/L,分别有50%、54%样点的相对误差低于10%.对于巢湖水体、太湖秋季水体,遥感反射率的第二因子也能够很好的反演其悬浮物的浓度,并取得较好的结果.可见,利用遥感反射率第二因子作为总悬浮物浓度的反演因子具有一定的普适性.

因此利用遥感反射率的第二因子反演总悬浮物浓度的反演模式为:

$$TSM = A \cdot PC2 + B$$

式中，$TSM$ 为总悬浮物浓度；$PC2$ 为遥感反射率经过因子分析的第二因子；$A$、$B$ 为回归参数.

### 2.4 基于因子分析的叶绿素浓度反演

国内外诸多学者通过地面实测高光谱数据构建了大量的提取内陆水体中叶绿素 a 浓度的遥感模型. 从模型构建方法上主要包括：波段比值因子法、反射峰位置法、反射率光谱微分法、三波长因子法. Gons 等[30]、Jiao 等[31]、段洪涛等[32]分别利用 $R(704)/R(672)$、$R_{rs}(719)/R_{rs}(667)$、$R(700)/R(670)$ 建立叶绿素浓度反演的波段比值算法. Gitlson 等[33]建立了反射峰位置和叶绿素 a 浓度的定量关系，从而根据反射率的位置来演叶绿素浓度. 利用光谱微分法和三波段算法来反演叶绿素浓度的研究见参考文献[34-40].

这些反演算法的出发点要不就是利用叶绿素的吸收特征来构造的，比如反射率光谱微分法、波段比值因子法、反射峰位置法等；要不就是最大限度的避免其他光学活性物质的吸收和散射的影响而构造的，比如三波段模型，总之在构建叶绿素浓度反演模型时，其反演因子的选择是尽一切可能反映叶绿素的信息而避开其他的信息，由于研究区和季节的不同，反演因子必须重新选取. 叶绿素浓度与遥感反射率第一因子的相关系数达 0.89，与其他因子的相关系数都很低，第一因子主要反演叶绿素的吸收特征，而较少的反映散射信息，因此本研究试图利用第一因子来反演叶绿素浓度，探究该因子在反演叶绿素浓度的适用性.

太湖水体叶绿素浓度与遥感反射率第一因子之间的关系，分别用指数和多项式拟合两者之见的关系（图 9）. 利用第一因子建立的指数和多项式叶绿素反演模型的预测效果（图 10）. 利用第一因子反演叶绿素浓度的指数模型的最小相对误差为 0.7%，最大相对误差为 58.4%，平均相对误差为 22.1%，88% 样点的相对误差低于 30%，46% 样点的相对误差低于 20%，只有 12% 预测样点的相对误差在 58.4% - 30% 之间，均方根误差为 3.6g/L，误差较大的点分布在叶绿素浓度较低的点；多项式模型反演叶绿素浓度最小相对误差为5%，最大相对误差为 63.8%，平均相对误差为 21%，80% 样点的相对误差低于 30%，49% 样点的相对误差低于 20%，有 20% 预测样点的相对误差在 63.8% - 30% 之间，均方根误差为 3.48g/L.

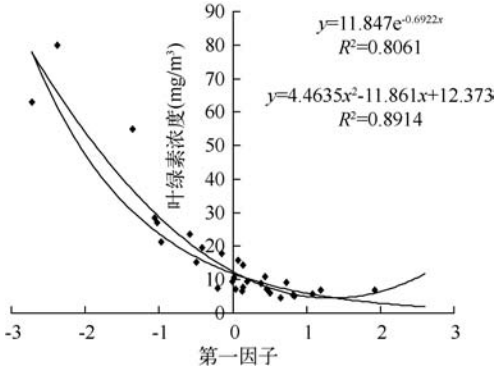



图 9 叶绿素浓度与第一因子的关系

Fig. 9 Relationship between Chl. a concentration and the first factor of remote sensing reflectance

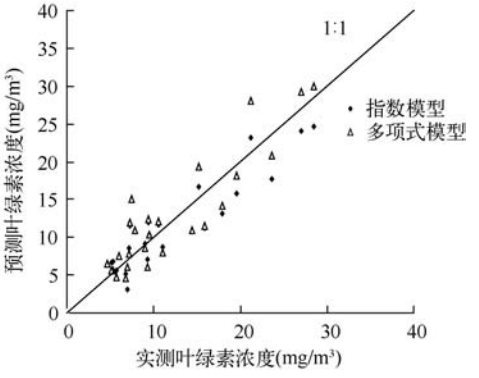



图 10 叶绿素浓度实测值与预测值的散点图

Fig. 10 Scatter-plot of measured and predicted Chl. a concentration

指数模型的最小相对误差以及最大相对误差都低于多项式模型，但是指数模型的平均相对误差要高于多项式模型，均方根误差要高于多项式模型，从整体来看多项式模型要优于指数模型的反演效果. 利用多项式模型反演叶绿素浓度的相对误差与色素颗粒物对总吸收的贡献率之间的关系（图 11）可知，色素颗粒物对总吸收的贡献越大，则利用遥感反射率第一因子反演叶绿素浓度的精度就越高，而对于色素颗粒物对总吸收的贡献不大的区域，利用第一因子反演叶绿素浓度可能得不到较好的结果.

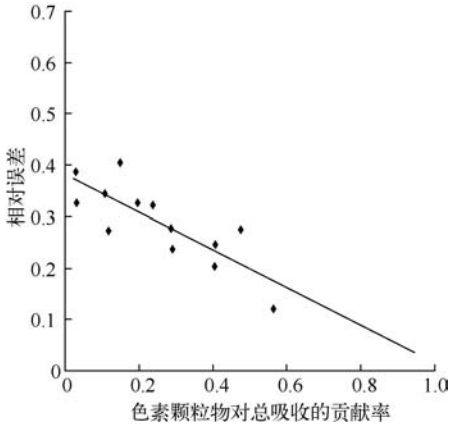



图 11 相对误差与色素颗粒物对总吸收的贡献率之间的关系

Fig. 11 Relationship between relative error and ratio of contribution to total absorption coefficient by pigment particle

为了验证利用遥感反射率反演叶绿素浓度的适用性,同样利用巢湖水体、太湖秋季水体遥感反射率的第一因子来反演巢湖水体、太湖秋季水体的叶绿素浓度.不管是太湖秋季水体还是巢湖水体利用第一因子反演叶绿素浓度都没有取得较好的效果.第一因子主要反映总吸收的信息,巢湖水体、太湖秋季水体色素颗粒物对总吸收系数在可见光范围内积分的平均贡献率分别为0.17、0.12,而太湖春季水体对总吸收的平均贡献率为0.27,所以巢湖水体、太湖秋季水体遥感反射率的第一因子并不能很好地反映叶绿素浓度的信息,因此巢湖水体、太湖秋季水体的遥感反射率第一因子不能很好地反演叶绿素浓度.

因此,利用遥感反射率第一因子反演叶绿素浓度的效果与研究区的色素颗粒物对总吸收的贡献有关,色素颗粒物对总吸收贡献率越大的水体,其反演效果较好,而色素颗粒物对总吸收贡献率较小的水体,可能得不到较好的效果,利用遥感反射率第一因子反演叶绿素浓度的普适性受到叶绿素浓度的限制.

## 3 参考文献

[1] Clark GL, Ewing GC, Lorenzen CJ. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. *Science*, 1970, **167**:1119-1121.

[2] O'Reilly J, Maritorena S, Mitchell BG *et al*. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWIFS. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**:24937-24953.

[3] 马荣华,戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁附近水体叶绿素浓度. 遥感学报,2005,**9**(1):78-86.

[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):228-234.

[5] 孙德勇,李云梅,乐成峰等. 应用水表面下辐照度比估测太湖夏季水体叶绿素 a 浓度. 湖泊科学,2007,**19**(6):744-752.

[6] 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.

[7] Tassan S. Local algorithm using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. *Applied Optics*, 1994,**33**(12): 2369-2378.

[8] Binding CE, Bowers DG, Mitchelson-Jacob EG. An algorithm for the retrieval of suspended sediment concentrations in the Irish Sea from SeaWiFS ocean colour satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(19): 3791-3806.

[9] 唐军武,王晓梅,宋庆君等. 黄、东海二类水体水色要素统计反演模式. 海洋科学进展,2004,**22**(B10):1-7.

[10] 宋庆君,马荣华,唐军武等. 秋季太湖悬浮物高光谱估算模型. 湖泊科学,2008,**20**(2):196-202.

[11] 吕 恒,李新国,江 南. 基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖悬浮物遥感定量模型. 湖泊科学,2005,**17**(2):104-109.

[12] 乐成峰,李云梅,查 勇等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析. 环境科学,2008,**29**(9):2448-2455.

[13] 黄昌春,李云梅,孙德勇等. 太湖水体漫衰减系数特征及其对水生态环境影响分析. 环境科学,2009,**30**(2):348-355.

[14] 孙德勇,李云梅,乐成峰等. 太湖水体散射特性与其悬浮浓度关系模型. 环境科学,2007,**28**(12):2688-2694.

[15] 秦伯强,胡维平,陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理. 北京:科学出版社,2004:1-2.

[16] 张运林. 太湖水体生物-光学特性及其生态学意义[博士论文]. 南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所,2005:5.

[17] 张运林,秦伯强,杨龙元. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物的空间分布及光学行为. 湖泊科学,2006,**18**(4):319-326.

[18] 张运林,秦伯强,马荣华等. 太湖典型草、藻型湖区有色可溶性有机物的吸收及荧光特性. 环境科学,2005,**26**(2):142-147.
[19] 张运林,秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析. 水科学进展,2007,**18**(3):415-423.
[20] 张运林,秦伯强,杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性. 生态学报,2006,**26**(12):3969-3979.
[21] 孙德勇,李云梅,黄家柱等. 太湖梅梁湾夏季水体组分光谱吸收特性. 生态学报,2008,**28**(2):749-760.
[22] Lubac B, Loisel H. Variability and classification of remote sensing reflectance spectra in the eastern English Channel and southern North Sea. *Remote Sensing of Environment*, 2007,**110**:45-58.
[23] Moore C, Barnard A, Hankins D *et al.* Spectral absorption and attenuation meter (ac-s) user's guide, revision A. America: WET Labs Inc, 2004:5-20.
[24] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[博士论文]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,1996:6.
[25] 王苏斌. SPSS 统计分析. 北京:电子工业出版社,2007:290-300.
[26] 焦红波,查　勇,李云梅等. 基于高光谱要高反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型. 遥感学报,2006,**10**(2):242-248.
[27] 孙德勇,李云梅,王　桥等. 基于实测高光谱的太湖水体悬浮物浓度遥感估算研究. 红外与毫米波学报,2009,**28**(2):124-128.
[28] Yu-Hwan A, Jeong-Eun M, Sonia G. Development of suspended particulate matter algorithms for ocean color remote sensing. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2001,**17**(4): 285-295.
[29] Zhang B, Li JS, Shen Q *et al.* A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance. *Environment Monitoring and Assessment*, 2008, **145**: 339-347.
[30] Gons HJ. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters. *Environment Science Technology*, 1999, **33**(7): 1127-1132.
[31] Jiao HB, Zha Y, Gao J *et al.* Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Tai, China using *in situ* hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4267-4276.
[32] 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. 环境科学,2006,**27**(3):503-507.
[33] Gitelson AA. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 3367-3373.
[34] 疏小舟,尹　球,匡定波等. 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.
[35] Fraser RN. Hyper-spectral remote sensing of turbidity and chlorophyll a among Nebraska Sand Hills lakes. *International Journal of Remote Sensing*, 1998,**19**(8): 1579-1589.
[36] 吕　恒,李新国,周连义等. 基于反射光谱的太湖北部叶绿素 a 浓度定量估算. 湖泊科学,2006,**18**(4):349-355.
[37] Dall'Olmo G, Gitelson A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Applied Optics*, 2005, **44**(3): 412-422.
[38] 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.
[39] 徐京萍,张　柏,宋开山等. 近红外波段二类水体悬浮物生物光学反演模型研究. 光谱学与光谱分析,2008,**28**(10):2273-2277.
[40] 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.