

文章编号: 1007-4619(2006)02-0169-07

用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度

李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 陆皖宁

(南京师范大学 江苏省地理信息科学重点实验室, 江苏 南京 210097)

摘 要: 水体叶绿素浓度是水质评价的一个重要指标。建立水体光学传输的分析模型, 进而用分析模型反演水体叶绿素浓度, 对于提高遥感反演水质参数的精度和实用性具有重要意义。作者于 2004 年 6 月初对太湖 18 个点位进行了同步水体波谱实测和水体取样分析。由这 18 个点位的实测数据, 利用 Gordon 模型建立了 $R(0^-)$ 的模拟模型, 并进而用优化函数的方法反演水体叶绿素浓度。反演值与实测值的相关系数达到 0.99, 当叶绿素浓度高于 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 时, 反演的相对误差小于 20%。进而用该模型反演 2005 年 7 月太湖 7 个点位的叶绿素浓度, 反演值与实测值的相关系数为 0.94, 其中, 有 6 个点位的反演值相对误差小于 60%。

关键词: 分析模型; 水体; 叶绿素浓度; $R(0^-)$

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

Inversing Chlorophyll C oncentration of Taihu Lake by Analytic Model

LI Yun-mei HUANG Jia-zhu WEI Yu-chun LU Wan-ning

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210097, China)

Abstract: Chlorophyll concentration is an important index for evaluating water quality. To make the inversion of remote sensing more accurate and more reality, it is significant to build analytic model for simulating water $R(0^-)$, and by the analytic model to inverse chlorophyll concentration. 18 points in Taihu lake were chosen and at those points the spectra of the water and water chlorophyll concentration were measured at the same time in June 2004. The simulation model of $R(0^-)$ was built using Gordon model and the chlorophyll concentration was inversed using optimization method. The correlation of measured and inversed $R(0^-)$ is 0.99. When the chlorophyll concentration is higher than $30\text{mg}/\text{m}^3$, the relative error of inversed value is less than 20%. Then, the chlorophyll concentration is inversed by this model for seven measured samples in July 2004. The correlation of measured and inversed $R(0^-)$ is 0.94. And the relative error of the majority points is less than 60%.

Key words: analytic model; water; chlorophyll concentration; $R(0^-)$

1 引 言

太阳辐射到达气-水界面, 一部分被反射, 另一部分则折射进入水体内部, 这部分入射光在水面下被多种分子散射和吸收。由于水体中所含成分, 如

浮游植物、溶解性有机物、悬浮颗粒物等的不同, 导致水体对不同波长光的吸收和散射不同, 并引起反射率、向上辐照、颜色等表观参数的改变。遥感监测水体水质参数正是基于水体中所含不同成分的光学特性不同, 寻找不同成分的特征波段, 并根据传感器所接收到的信息, 反演水体中不同成分的浓度及其

收稿日期: 2004-09-30; 修订日期: 2005-06-10

基金项目: 国家 863 项目 (AA131060), 国家自然科学基金项目 (40571110), 江苏省教育厅资助项目 (2004105TSJB141), 南京师范大学引进人才科研启动基金资助项目 (2004105XGQ2B47)。

作者简介: 李云梅 (1966—), 女, 博士, 浙江大学环境与资源学院农业遥感与信息技术专业毕业, 主要从事水质遥感研究, 发表论文 20 余篇。

空间分布等信息。利用遥感传感器记录的辐射值或光谱反射率估测水质通常有三种方法,即经验方法、半经验方法和机理模型方法^[1]。经验方法是通过建立遥感数据与地面监测的水质参数之间的统计关系外推水质参数值,由于水质参数与遥感数据之间的事实相关性不能保证,所以该方法的结果缺乏物理依据。半经验方法是将已知的水质参数光谱特征与统计模型相结合,选择最佳的波段或波段组合作为相关变量估算水质参数值的方法,这种方法具有一定的物理意义,是目前最常用的方法。机理模型的方法则主要是基于水体组分与固有光学量、固有光学量与表观光学量之间的关系,模拟水中光场分布,进而反演水质参数。机理模型以水体光学传输的机理为理论基础,因此,是水质遥感监测的一种重要方法^[2-3]。其中,以水体后向散射与水体中吸收与散射的比值模拟水体反射的模型被称为分析模型。分析模型自 1975 年由 Gordon 提出后,已成为一类有代表性的机理模型。但是,由于分析模型的方法需要对水体组分的固有光学特性进行测量,因此,建立算法的难度较大,目前,国内对于水质参数的估算大部分使用的是经验和半经验模型,对于分析模型还很少涉及。本文尝试利用 Gordon 模型,对太湖的水体反射波谱进行模拟,并反演水体的叶绿素浓度。

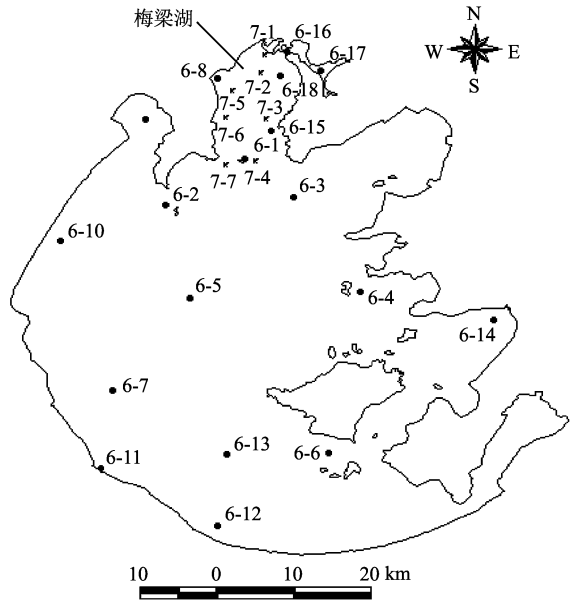
2 研究方法

利用同步进行的水体波谱实测数据和水体取样分析数据,修正 Gordon 模型的部分参数,并利用太湖水体的固有光学特性,建立水体反射波谱的模拟模型,进而用求解优化函数的 Powell 模型,反演水体叶绿素浓度。

2.1 实验方法

2.1.1 同步水体波谱实测

2004 年 6 月 1—4 日在太湖选取 18 个点位,7 月 26 日在太湖梅梁湖湖区选取 7 个点位(图 1),测量水面波谱,并同时采集水样,用常规的实验室分析方法测量叶绿素 a 浓度。测量在晴朗无云的天气进行,其中水面波谱的测量时间为 10:00—16:00。6 月份的测量点位与太湖水质监测的固定站点一致,太湖水质监测固定测站共有 21 个,由于天气的原因,只进行了其中 18 个点位的同步监测。7 月同步监测的目的是为了掌握太湖梅梁湖湖区夏季叶绿素



注:6-* 为 6 月份采样的点位,7-* 为 7 月份的采样点位

图 1 观测样点的空间分布

Fig 1 Location and distribution of sample point

的变化情况,因此所有监测点在该湖区选取,并且在一天内完成测量工作。

测量的光谱仪为美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,该仪器的波段范围为 350—1050nm,光谱分辨率为 2nm。为了减少水体镜面反射的影响以及船舶阴影对光场的破坏,采用如图 2 所示的角度进行观测。图中,观测方位角 ϕ 为 135° 左右(设太阳入射的方位角为 0°),观测天顶角 θ 为 40° 左右^[4,5]。在每一测点测量以下 4 个参数:仪器对着水面测量的辐亮度、仪器对着天空

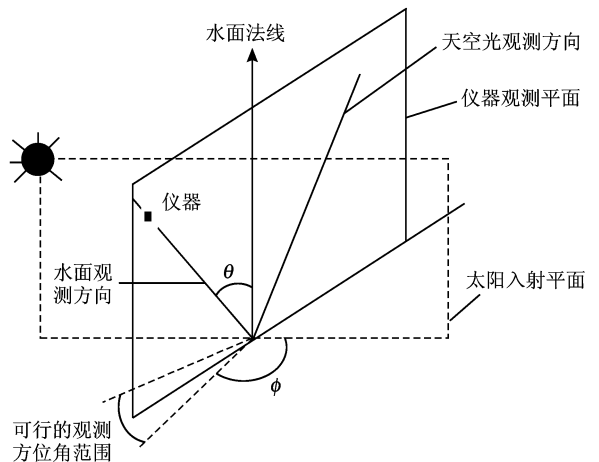


图 2 水体光谱的观测几何

Fig 2 Viewing geometry of water spectrum

测量的辐亮度、仪器对着漫反射参考板测量的辐亮度和仪器对着遮挡太阳光后的漫反射参考板测量的辐亮度。仪器对着水面测量时,测量的积分时间设为 172ms 连续测量 10 条光谱曲线,所测数据为单条光谱曲线,不作任何平均。测量所用标准板的反射率为 30%。

在测量水面波谱的同时,记录各测点的 GPS 坐标和当时的风向风速。

2.1.2 水体波谱数据的处理

观察所测数据,剔除异常值后用求平均值的方法求出所测的各辐亮度值,进而计算 $R(0^-)$ [$R(0^-)$ 为刚好位于水面下方的反射率]。以下所涉及的数据处理均是在 400—750nm 的波段范围。 $R(0^-)$ 的计算方法如下:

离水辐亮度的提取

在前述的观测方位下,由于避开了太阳直射反射,因此光谱仪测量的水体光谱数据 L_{sw} 可表示为:

$$L_{sw} = L_w + rL_{sky}$$

式中, L_w 为离水辐亮度,是水体经气水界面反射出的光谱信息; L_{sky} 为天空漫散射光,不带有任水体信息, $r = r(W, \theta_v, \phi_v, \theta_0, \phi_0)$ 为气水界面对天空光的反射率, $r = 2.1\% - 5\%$, r 的大小取决于太阳位置 (θ_0, ϕ_0)、观测几何 (θ_v, ϕ_v)、风速风向 (W) 或水面粗糙度等因素,唐军武等^[4]的研究认为,在平静水面,可取 $r = 0.022$,在 5m/s 左右风速条件下, $r = 0.025$,在 10m/s 左右风速条件下, r 介于 0.026—0.028 之间,在本研究中,风速一般小于 5m/s 因此取 $r = 0.022$ 。

$R(0^-)$ 的提取

刚好处于水面以下的反射率(辐照度比) $R(0^-)$ 定义为:

$$R(0^-) = E_u(0^-) / E_d(0^-)$$

式中, $E_u(0^-)$ 、 $E_d(0^-)$ 分别为刚好位于水面下方的向上、向下辐照度。 $R(0^-)$ 可通过以下计算获得: $E_u(0^-) = QL_u(0^-)$, 其中 Q 为光场分布参数,受不同的水体、太阳角度、观测角度影响而不同, Q 可由太阳高度角进行计算^[6],通常在 1.7—7 之间变化,在此,为了确定 Q 的取值,首先进行遥感反射率的粗略估算,一般而言,除了高浓度泥沙水体,水体的遥感反射率小于 0.051^[4],将不同的 Q 值代入遥感反射率计算公式计算后,认为当 Q 取值为 1.7 时,遥感反射率的估算结果比较合理,因此,本研究中取 $Q = 1.7$, $L_u(0^-)$ 为刚好位于水面下方的向上辐亮度, $L_u(0^-) = (n^2/t)L_w$, 其中, t 是气水界面的

Fresnel 透射系数,通常取 $t = 0.98$, n 是水的折射指数,通常取 $n = 1.34$; $E_d(0^-) = (1 - \rho_{aw})E_d(0^+)$, ρ_{aw} 为气水表面的辐照度反射率,在 0.04—0.06 之间,在此,参照文献^[7]取 $\rho_{aw} = 0.05$, $E_d(0^+)$ 为水面入射辐照度。

2.2 水体反射率模拟模型的建立及其反演

首先,用分析模型的方法建立水体 $R(0^-)$ 的模拟模型,其次,用求解优化函数的方法反演水质参数。该方法分为两个步骤:第一步:建立水体遥感信息的前向模拟模型。由前向模型,根据水体所含成分的固有光学特性,如叶绿素的吸收系数、悬浮物的散射系数等,模拟水体中的光场分布,进而模拟 $R(0^-)$ 等遥感信息。第二步:建立水质参数反演的后向模型。由后向模型,利用不同的反演算法如代数法、非线性优化法、神经网络法和矩阵反演法等,结合所建立的前向模型,反演水质参数如叶绿素、悬浮物等的浓度。

2.2.1 前向模拟模型的建立

利用 Gordon 模型建立前向模型^[8]。该模型可表示为:

$$R(0^-) = \frac{f b_b}{a + b_b} \quad (1)$$

式中, $R(0^-)$ 是刚好处于水面以下的反射率, f 为常数,取值范围为 0.2—0.56, a 为总的吸收系数, b_b 为总的后向散射系数。由于水体的吸收主要受纯水、叶绿素、黄色物质(溶解性有机质)、悬浮物影响,因此

$$a = a_w + a_{chl} + a_{tsm} + a_{yellow} \quad (2)$$

式中, a_w , a_{chl} , a_{tsm} , a_{yellow} 分别为纯水、叶绿素、悬浮物、黄色物质的吸收系数。由于叶绿素、黄色物质的后向散射非常微弱,因此,仅考虑纯水和悬浮物的后向散射,即

$$b_b = b_{b_w} + b_{b_{tsm}} \quad (3)$$

式中, b_{b_w} , $b_{b_{tsm}}$ 分别为纯水和悬浮物的后向散射系数。

本项研究中, Gordon 模型中的各参数按以下方法计算和取值:

(1) 纯水的吸收和后向散射系数参照文献^[9]取值。

(2) 叶绿素吸收系数:不同藻类的形状、大小及色素细胞组成等的不同,导致其光谱吸收特性也不同^[10]。藻类叶绿素吸收系数可由下式求出^[11]:

式中, $a_{chl}(\lambda)$ 为波长 λ 处的叶绿素吸收系数

(m^{-1}); C 为叶绿素浓度 ($mg \cdot m^{-3}$); $a_{chl}^*(\lambda)$ 为叶绿素比吸收系数 ($mg \cdot m^{-2}$), 随藻类不同而发生变化。俞宏等的研究认为, 太湖冬夏季藻类品种不同, 导致其冬夏季叶绿素比吸收系数也不同, 并于 1994 年 6 月和 11 月实测了太湖藻类叶绿素的比吸收系数^[11], 本研究采用 1994 年 6 月实测的比吸收系数。

(3) 黄色物质吸收系数: 黄色物质指被微生物和浮游生物分解后产生的溶解性有机质。黄色物质具有其独特的吸收特征并对水体总的吸收光谱产生重要影响^[12]。从紫外到可见光波段, 黄色物质的吸收系数可由下式表示:

$$a_{yellow}(\lambda) = a_{yellow}(\lambda_0) \exp[s(\lambda_0 - \lambda)] \quad (5)$$

式中, $a_{yellow}(\lambda)$ 是波长 λ 处的黄色物质吸收系数 (m^{-1}), $a_{yellow}(\lambda_0)$ 是波长 λ_0 处的吸收系数 (m^{-1}), λ_0 是初始波长, 通常为 440nm, s 为常数 (nm^{-1}), 与波长无关。俞宏等实测了太湖不同月份的黄色物质吸收系数, 得到了不同月份的 s 与 $a_{yellow}(440)$ 值, 本研究中取其 6 月份的实测值, $s = 0.013nm^{-1}$, $a_{yellow}(440) = 0.352m^{-1}$ 。

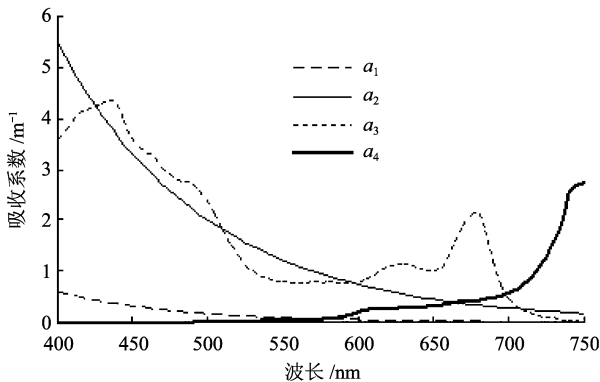
(4) 悬浮物吸收系数: 悬浮物包括有机碎屑、悬浮泥沙等。相对于水体的弱信息而言, 悬浮物具有较强的吸收和散射特性。Bagheri 等的研究认为悬浮物的吸收可由下式表示^[13]:

$$a_{tsm}(\lambda) = a_{tsm}(\lambda_0) \exp[s'(\lambda_0 - \lambda)] \quad (6)$$

式中, $a_{tsm}(\lambda)$ 是波长 λ 处的悬浮物吸收系数 (m^{-1}), $a_{tsm}(\lambda_0)$ 是波长 λ_0 处的吸收系数 (m^{-1}), λ_0 是初始波长, 通常为 440nm, s' 为常数 (nm^{-1}), 与波长无关。参照俞宏等的研究, 取 $a_{tsm}(\lambda_0) = 3.665m^{-1}$, $s' = 0.010nm^{-1}$ 。

太湖 6 月份水体中各组分的吸收系数见图 3。

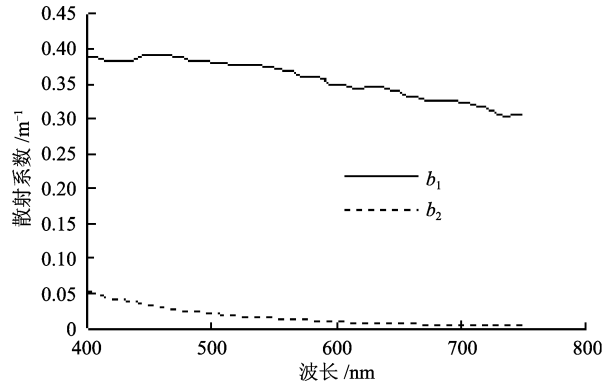
(5) 悬浮物散射系数: 悬浮物的形状、颗粒大小



a_1, a_2, a_3, a_4 分别是 10 号样点黄色物质, 悬浮物, 叶绿素, 纯水的吸收系数

图 3 吸收系数

等都对其散射特性有显著的影响。悬浮物的散射特性可由 Mie 散射求算, 太湖湖体中悬浮物的散射特性详见参考文献 [14]。本研究中悬浮物的后向散射系数见图 4 (后向散射系数与散射系数之比一般为 0.03—0.05, 参照 Dekker 等的研究^[15], 取其比值为 0.03)。



b_1, b_2 分别是 10 号样点悬浮物、纯水的后向散射系数 (其中, 纯水的数值放大了 10 倍)

图 4 散射系数

Fig 4 Scattering coefficient

(6) f 值由向下辐照的各向异性以及水体内的散射过程所决定。Dekker 等^[15] 在荷兰 Frisian 湖的研究中, 发现除少数采样点的 f 值小于 0.33 外, 其余点的值为 $f = 0.39 \pm 0.03$, 在国外的研究中, 通常将 f 取值为 0.33^[16], 本研究中, $f = 0.33$ 。

2.2.2 后向反演模型的建立

利用求解优化函数的 Powell 法进行反演。该方法的详细算法见参考文献 [17]。首先构造优化函数

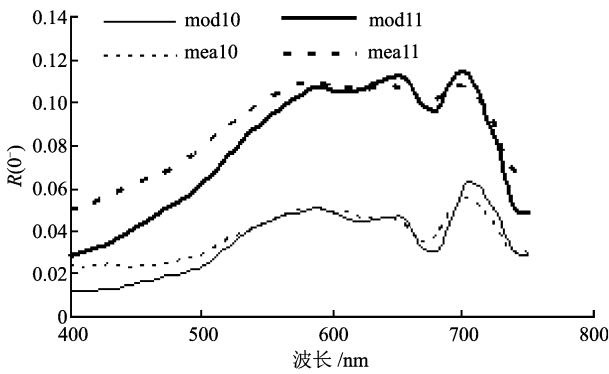
$$F = \sum_{j=1}^m \frac{[R_m(j) - R_c(j)]^2}{R_m(j)} + \sum_{i=1}^n [(x_i - x_{i,b})^2 w_i]^2 \quad (7)$$

式中, $R_m(j)$ 是实测的 $R(0^-)$, $R_c(j)$ 是模型计算出的 $R(0^-)$, m 是实测数据的个数, n 是欲反演的参数的个数, $x_{i,b}$ 是相应的参数的边界值, 当 $x_{i,min} < x < x_{i,max}$ 时, $w_i = 0$, 否则, w_i 取固定值, 本模型中, $w_i = 1$ 。固定其余参数, 只变动叶绿素和悬浮物浓度, 使 F 达到最小, 最后可反演出叶绿素和悬浮物浓度。

3 结果与分析

3.1 $R(0^-)$ 的模拟

根据前述模型参数的取值, 模拟各样点的 $R(0^-)$ 。模型模拟的精度用均方根差 RMSE 评价, 18 个样点的均方根差均小于 0.05。图 5 给出了 10



mea10, mea11, mod10, mod11 分别为 10, 11 号样点的实测值和模拟值。10 号样点, 叶绿素、悬浮物浓度分别为 157 mg/m^3 和 32 g/m^3 ; 11 号样点, 叶绿素、悬浮物浓度分别为 35 mg/m^3 和 58.5 g/m^3

图 5 $R(0^-)$ 模拟结果

Fig 5 $R(0^-)$ Simulated result

号和 11 号样点的模拟值和实测值。从图中可以看出, 波长大于 600 nm 后, 拟合的精度较高。事实上, 10 号样点在 $400-750 \text{ nm}$ 波长范围, 其 RMSE 值为 0.0095 , 在 $400-595 \text{ nm}$ 波段范围, 其 RMSE 值为 0.0066 , 在 $600-750 \text{ nm}$ 波长范围, 其 RMSE 值为 0.0047 , 11 号样点在 $400-750 \text{ nm}$ 波长范围, 其 RMSE 值为 0.0130 , 在 $400-595 \text{ nm}$ 波长范围, 其 RMSE 值为 0.0150 , 在 $600-750 \text{ nm}$ 波长范围, 其 RMSE 值为 0.0094 。

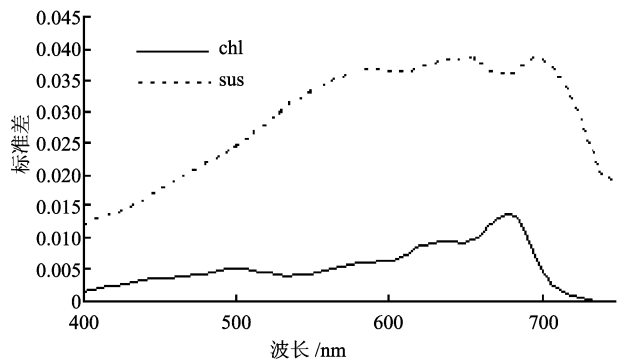
3.2 模型反演

利用节 2.2.2 中所建立的后向反演模型, 反演叶绿素浓度。模型反演的精度, 一方面与前向模型的拟合精度有关, 另一方面也与水面波谱对参数变化响应的灵敏度有关。因此, 在利用求解最优化函数的方法反演之前, 首先进行灵敏度分析, 再选择灵敏度高、模型拟合效果好的波段反演。

3.2.1 灵敏度分析

为了确定利用哪些波段的实测值进行反演, 首先分析叶绿素和悬浮物对 $R(0^-)$ 的影响的灵敏度: 在式 (1) 中, 将悬浮物的浓度固定为 42 g/m^3 (夏季太湖悬浮物浓度的平均值^[18]), 分别计算叶绿素浓度为 $10, 20, 30, \dots, 90 \text{ mg/m}^3$ 时的 $R(0^-)$, 并在同一波段上求 $R(0^-)$ 的标准差, 标准差随波长的变化见图 6; 同样地, 在式 (1) 中, 固定叶绿素的浓度为 22 mg/m^3 (6 月份实测均值), 分别计算悬浮物浓度为 $10, 20, 30, \dots, 90 \text{ g/m}^3$ 时的 $R(0^-)$, 并在同一波

段上求 $R(0^-)$ 的标准差, 标准差随波长的变化见图 6。对某一变量而言, 标准差越大, 说明该变量的变化对 $R(0^-)$ 的影响越大。从图 6 中看到, 在 $600-700 \text{ nm}$ 波段范围, 叶绿素浓度的变化, 引起了标准差的较大变化, 因此, 可以认为, 在该波段范围, $R(0^-)$ 对叶绿素浓度的变化比较敏感, 另外, 在 $600-700 \text{ nm}$ 波段范围, 由悬浮物浓度变化所引起的标准差变化也较大。结合节 3.1 对模型拟合精度的分析, 可以认为在 $600-700 \text{ nm}$ 波段范围, 模型的拟合精度较好, 而且 $R(0^-)$ 对叶绿素浓度和悬浮物浓度变化的敏感性也较强, 因此, 模型反演宜在 $600-700 \text{ nm}$ 波段范围进行。



— chl 悬浮物浓度为 42 g/m^3 , 叶绿素浓度为 $10, 20, 30, \dots, 90 \text{ mg/m}^3$
 --- sus 叶绿素浓度为 22 mg/m^3 , 悬浮物浓度为 $10, 20, 30, \dots, 90 \text{ g/m}^3$

图 6 叶绿素和悬浮物浓度变化时的 $R(0^-)$ 的标准差

Fig 6 Standard errand of $R(0^-)$ for different chlorophyll and suspended partical

3.2.2 叶绿素反演

利用 $600-700 \text{ nm}$ 波段水体 $R(0^-)$ 的实测值, 由节 2.2.2 所述的方法反演水体叶绿素浓度。反演值与实测值的相关关系见图 7。图中, 反演值与实测值的相关系数为 0.99 。就反演的精度而言, 当叶绿素浓度低于 30 mg/m^3 时, 反演的相对误差较大, 对于叶绿素浓度高于 30 mg/m^3 的点, 其相对误差均小于 20% 。分析其原因, 认为当叶绿素含量较低时, 水体在 $600-700 \text{ nm}$ 的反射率较低, 因此水面光谱较多地受到环境因素如大气、周边环境的影响, 导致反演的精度降低, 如反演误差最大的点为 6-8 号点, 误差达到了 60% , 其叶绿素含量实测值为 7 mg/m^3 , 反演值为 11.3 mg/m^3 。

为了验证模型的实用性, 采用 2004-07-26 于太湖梅梁湖实测的 7 个点位的的数据, 用上述方法对叶绿素含量进行反演。反演值与实测值的相关关系见图 8。

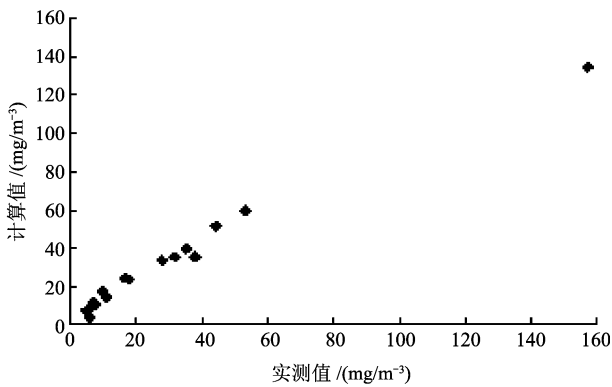


图 7 叶绿素实测值与反演值(2004年 6月)

Fig 7 Measured and inversed chlorophyll content (June 2004)

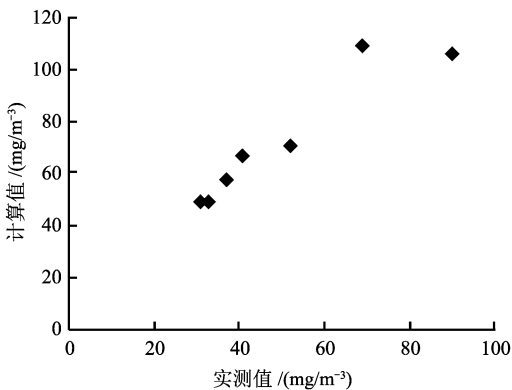


图 8 叶绿素实测值与反演值(2004年 7月)

Fig 8 Measured and inversed chlorophyll content (July 2004)

图 8 中反演值与实测值的相关系数为 0.94, 其相对误差分别为 36%, 17%, 63%, 57%, 54%, 48% 和 58%, 与 6 月份的模型反演相比, 反演精度降低。分析其原因, 是因为模型中所采用的黄色物质吸收系数、悬浮物吸收系数均为 1994-06-22 的实测值, 由于实测数据的缺乏, 无法用 7 月的实测吸收系数检验模型, 根据俞宏等的研究, 不同月份的吸收系数有较大的波动, 如黄色物质吸收系数 2 月份为 0.850m^{-1} , 4 月为 0.351m^{-1} , 6 月为 0.352m^{-1} ^[11], 因此, 相关吸收系数的波动是直接导致模型精度变化的主要原因之一, 而这些系数的波动所导致的模型反演精度变化的程度以及这些系数自身随季节、湖区的波动大小, 则需要更多的实验数据加以验证和分析。

4 结 语

国内利用遥感技术进行水质监测的研究已经很多^[1, 19], 但是, 利用水体固有光学特性建立分析模

型, 进而反演水质参数的研究还很少见, 主要是因为水体组分(如悬浮物、叶绿素等)的光学特性十分难以测量。本研究中, 利用了俞宏等对太湖水体组分光学特性的研究成果, 结合 2004 年 6 月对太湖 18 个点位水体波谱和化学分析的实测值, 建立了太湖水体 $R(0^-)$ 的模拟模型, 并对该模型进行了反演。模型反演的叶绿素浓度与实测叶绿素浓度的相关系数为 0.99, 当叶绿素浓度大于 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 时, 反演的相对误差小于 20%。利用该模型反演 7 月 26 日太湖梅梁湖湖区的 7 个点位的叶绿素浓度, 其中有 6 个点的反演值的相对误差小于 60%, 由以上研究可以认为, 建立分析模型反演太湖叶绿素浓度, 是一种值得尝试的方法。由于模型中部分参数, 如 fQ 等受环境条件(如风速、太阳高度角等)的影响较大, 而水体组分如叶绿素、黄色物质等的固有光学特性随着季节的变化, 也不同。因此, 对于分析模型的实用性, 以及如何提高模型的精度等方面还有待于更进一步的研究。我们认为, 要提高模型的实用性, 以及模拟和反演的精度可从以下方面作更进一步的研究: (1) 对太湖水体组分的光学特性进行更深入的研究, 如深入研究太湖不同藻类和悬浮物的光学特性, 并结合不同季节变化的特点, 建立适合于不同季节的光学模型; (2) 根据太湖不同湖区的水文特点, 分别确定模型参数。

参 考 文 献 (References)

- [1] Li S J, Wang X J. The Spectral Features Analysis and Quantitative Remote Sensing Advances of Inland Water Quality Parameters[J]. Geography and Territorial Research, 2002, (2): 26-29. [李素菊, 王学军. 内陆水体水质参数光谱特征与定量遥感[J]. 地理学与国土研究, 2002, (2): 26-29.]
- [2] Haltrin V I. Self-Consistent Approach to the Solution of the Light Transfer Problem for Irradiances in Marine Waters with Arbitrary Turbidity, Depth, and Surface Illumination: A Case of Absorption and Elastic Scattering[J]. Applied Optics, 1998, 37(18): 3773-3784.
- [3] Forget P, Broche P, Naudin J J. Reflectance Sensitivity to Solid Suspended Sediment Stratification in Coastal Water and Inversion: a Case Study[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77: 92-103.
- [4] Tang J W, Tian G L, Wang X Y, et al. The Methods of Water Spectra Measurement and Analysis in 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——水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.]
- [5] Fargion G S, Mueller J L. Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation: Revision 2 [R]. NASA/TM-

2000-209960, 2000.

- [6] Gons H J. Optical Teledetection of Chlorophyll a in Turbid Inland Waters [J]. *Environ Sci Technol*, 1999, **33**(7): 1127- 1132.
- [7] Hoogenboom H J, Dekker A G, Alhuis A. Simulation of AVIRIS Sensitivity for Detecting Chlorophyll over Coastal and Inland Waters [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, **65**: 333- 340.
- [8] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed Relationships between the Inherent and Apparent Optical Properties of a Flat Homogeneous Ocean [J]. *Appl Opt*, 1975, **14**(2): 417- 427.
- [9] Pope R M, Fry E S. Absorption Spectrum (380- 700) of Pure Water. II. Integrating Cavity Measurements [J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(33): 8710- 8723.
- [10] Kirk J T O. Volume Scattering Function, Average Cosines and the Underwater Light Field [J]. *Limnol Oceanogr*, 1991, **36**(3): 455- 467.
- [11] Yu H, Cai Q M, Wu J L. Study on Optical Properties of Unpigmented Suspended Particles Yellow Substance and Phytoplankton Algae in Taihu Lake [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, **22**(1): 24- 33.
- [12] Hakvoort H, Haan J, Jordans R, et al. Toward Airborne Remote Sensing of Water Quality in the Netherlands-Validation and Error Analysis [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2002, **57**: 171- 183.
- [13] Bagheri S, Zetlin R, Dios R. Estimation of Optical Properties of Near Shore Water [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(17): 3393- 3397.
- [14] Cai Q M, Yang P. Study on Optical Properties of Unpigmented Suspended Particles Yellow Substance and Phytoplankton Algae in Taihu Lake [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1991, **22**(5): 458- 465. [蔡启铭, 杨平. 太湖悬浮质对湖面反照率及水体光吸收的影响 [J]. *海洋与湖沼*, 1991, **22**(5): 458- 465.]
- [15] Dekker A G. Analytical Algorithms for Lake Water TSM Estimation for Retrospective Analyses of TM and SPOT Sensor Data [J]. *Int J Remote Sensing*, 2002, **23**(1): 15- 35.
- [16] Alhuis I J A, Shimwell S. Modelling of Remote Sensing Reflectance Spectra for Suspended Matter Concentration Detection in Coastal Waters [J]. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 1995, **4**(1): 53- 59.
- [17] Forget P, Broche P, Naudin J J. Reflectance Sensitivity to Solid Suspended Sediment Stratification in Coastal Water and Inversion: a Case Study [J]. *Remote Sens Environ*, 2001, **77**: 92- 103.
- [18] Yang B. Utility Optimization Method and Program [M]. Harbin Shipping Industry Engineering University Press, 1994. [杨冰. 实用最优化方法及计算机程序 [M]. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1994.]
- [19] Qi F, Wang X J. Application of Remote Sensing Techniques in Monitoring and Assessing Inland Water Quality [J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, (3): 90- 99. [齐锋, 王学军. 内陆水体水质监测与评价中的遥感运用 [J]. *环境科学进展*, 1999, (3): 90- 99.]