

太湖水体 3 种典型水质参数的高光谱遥感反演*

张 兵¹, 申 茜², 李俊生¹, 张 浩², 吴 迪¹

(1: 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100080)

(2: 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 以富营养化污染严重的太湖为研究区, 设计并实施了 2 次太湖航空遥感综合实验, 获取了太湖 7 条航带、冬夏两个时相的航空高光谱遥感图像; 通过 6 次太湖地面试验, 采集了多时相的太湖水体固有光学量和表观光学量数据, 分析了它们的空间分布规律, 建立了单位固有光学量数据库; 面向叶绿素、悬浮物和黄色物质 3 种典型水质参数, 发展了基于生物光学模型和单位固有光学量数据库的水质参数反演分析方法; 利用航空高光谱遥感器 WHI 图像和航天高光谱遥感器 CHRIS 图像对这些方法进行了检验, 获得了较好的水质参数图像反演结果。

关键词: 太湖; 水质参数; 高光谱遥感; 分析方法; 固有光学量; 表观光学量

Retrieval of three kinds of representative water quality parameters of Lake Taihu from hyperspectral remote sensing data

ZHANG Bing¹, SHEN Qian², LI Junsheng¹, ZHANG Hao² & WU Di¹

(1: *Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P.R.China*)

(2: *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China*)

Abstract: Lake Taihu, which has been in serious eutrophic pollution status, was selected to be the study area. In Lake Taihu, two-time experiments of airborne hyperspectral remote sensing were carried out, covering seven airborne strips over Lake Taihu in both winter and summer. Besides of the two times of experiments, the *in-situ* inherent and apparent optical properties of Lake Taihu water were measured and analyzed for additional four times. The specific inherent optical property database of Lake Taihu was built. Based on the database and bio-optical model, analytical approaches were developed to retrieve chlorophyll, total suspended matter, and yellow substance. To validate these analytical approaches, airborne hyperspectral remote sensor WHI image and spaceborne hyperspectral remote sensor CHRIS image were used to retrieve water quality parameters, and the results were good.

Keywords: Lake Taihu; water quality parameters; hyperspectral remote sensing; analytical approach; inherent optical property; apparent optical property

内陆水体光学特性复杂, 它不仅受浮游植物的影响, 而且还受到无生命悬浮物和黄色物质的影响, 在水比较浅的情况下, 还要考虑水底物质对水体光学性质的影响^[1-2]。与已经步入实用化阶段的海洋水色遥感相比, 内陆水体的遥感监测始终是一个难点^[3]。

常规的宽波段多光谱遥感数据无法捕捉内陆水体复杂多变的光谱特征, 因而利用宽波段多光谱遥感数据监测内陆水质参数的精度往往不高。而光谱分辨率达到 10nm 级的高光谱遥感数据能够捕捉到复杂多变的内陆水体的光谱特征, 从而可以提高内陆水质监测的精度^[2,4]。因而, 高光谱遥感为发展高精度的水质参数遥感反演模型带来了契机, 在内陆水体水质监测中具有非常重要的意义。

水质参数遥感反演通常有 3 种方法, 即经验方法、半经验方法和分析方法^[5]。经验/半经验方法是通

* 中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-YW-14-2)和国家 863 项目(2007AA12Z138)联合资助。2008-11-03 收稿; 2008-12-03 收修改稿。张兵, 男, 1969 年生, 博士, 研究员; E-mail: zb@ceode.ac.cn.

过建立遥感数据与同步水面监测数据之间的统计关系得到的, 由于每次实验条件和环境影响因素都有些差异, 基于统计的相关性模型常常不稳定, 可重复性差, 难于对比和推广. 分析方法基于水中光辐射传输机理, 具有明确的物理意义, 算法的普适性也更好, 代表了水质遥感监测模型算法的发展趋势^[2,5-6].

目前, 分析方法主要包括代数法、矩阵反演法和非线性优化法^[7]. 矩阵反演法以水体的单位固有光学量作为输入参数, 单位固有光学量经常取常数^[8], 这会带来误差. 代数法和非线性优化法一般都要建立水质参数和水体固有光学量之间的经验关系^[9-10], 这一方面带来了误差, 可能降低水质参数反演的精度, 另一方面方法建立中使用的经验关系一般也不具有区域和季节上的适用性.

为了提高内陆水质监测的精度, 本文以高光谱遥感数据为数据源, 以富营养化污染严重的太湖为研究区, 在获取并分析太湖水体固有光学特性和表观光学特性的基础上, 针对叶绿素、悬浮物和黄色物质三种典型水质参数, 建立基于生物光学模型和单位固有光学量数据库的内陆水质监测分析方法, 并利用航空和航天高光谱遥感图像检验水质监测分析方法.

1 数据获取和分析

1.1 实验设计与实施

实验数据获取是水质参数反演方法建立和验证的基础. 本文设计了空地综合遥感实验方案(图 1).

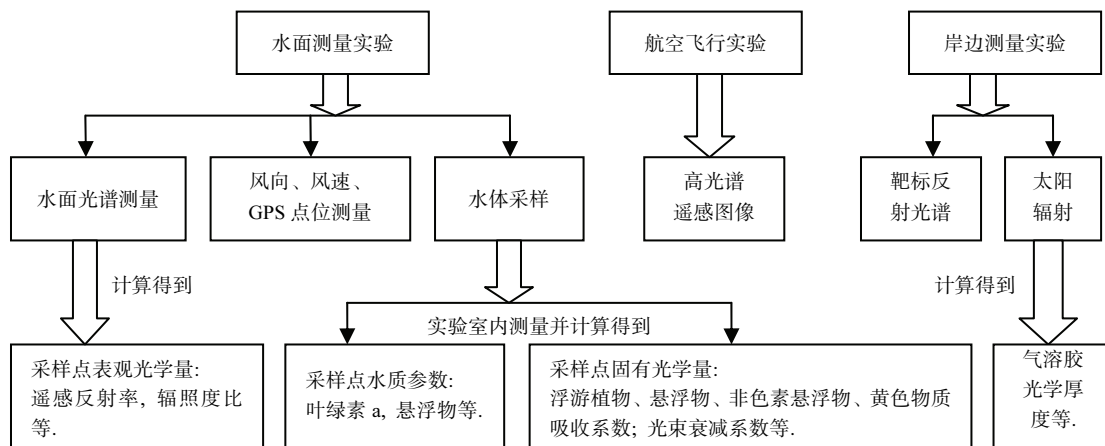


图 1 空地综合遥感实验方案

Fig.1 Plan of the airborne and in-situ remote sensing experiments

综合遥感实验主要包括 3 个部分: 水面测量实验. 航空飞行实验和岸边测量实验. 水面测量实验是综合实验的主体, 包括 3 个部分: 水体采样, 水面光谱测量和风速、风向、GPS 点位等辅助信息的测量. 水面光谱测量使用 ASD 便携式野外光谱仪 FieldSpec® Pro FR(波长范围 350–2500nm)和 FieldSpec® Pro VNIR(波长范围 350–1000nm), 采用“水面以上法”测量水面光谱^[12-13]. 水面采集的水样要尽快送到实验室进行分析处理, 进而获得水质参数和水体固有光学量等数据. 利用电子天平称重的方法测量悬浮物浓度; 利用岛津 UV2401PC 型分光光度计测量叶绿素 a 浓度; 并利用定量滤膜技术测量固有光学量^[11]. 航空飞行实验用于获取航空高光谱遥感图像. 本文选择中国科学院上海技术物理研究所研制的宽视场高光谱成像仪 WHI 进行航空飞行实验, 其主要技术指标光谱范围为 0.41–0.99 μm ; 波段数 124; 光谱分辨率 $\leq 5\text{nm}$; 光谱采样间隔为 1.8nm; 瞬时视场角为 1.5mrad; 总视场角为 42°.

根据太湖形状特点和各湖区的水质情况, 同时考虑到航空飞行实验的方便, 设计了 7 条飞行航线, 覆盖了水面 50 个采样点. 其中在污染严重的梅梁湾进行加密测量, 设计了 4 条航线和 16 个采样点; 在太湖中部和南部湖区设计了 3 条航线和 34 个采样点. 飞行航线和采样点的分布如图 2 所示. 设计飞行航高 3000m, 得到的 WHI 图像的空间分辨率约为 1.8m.

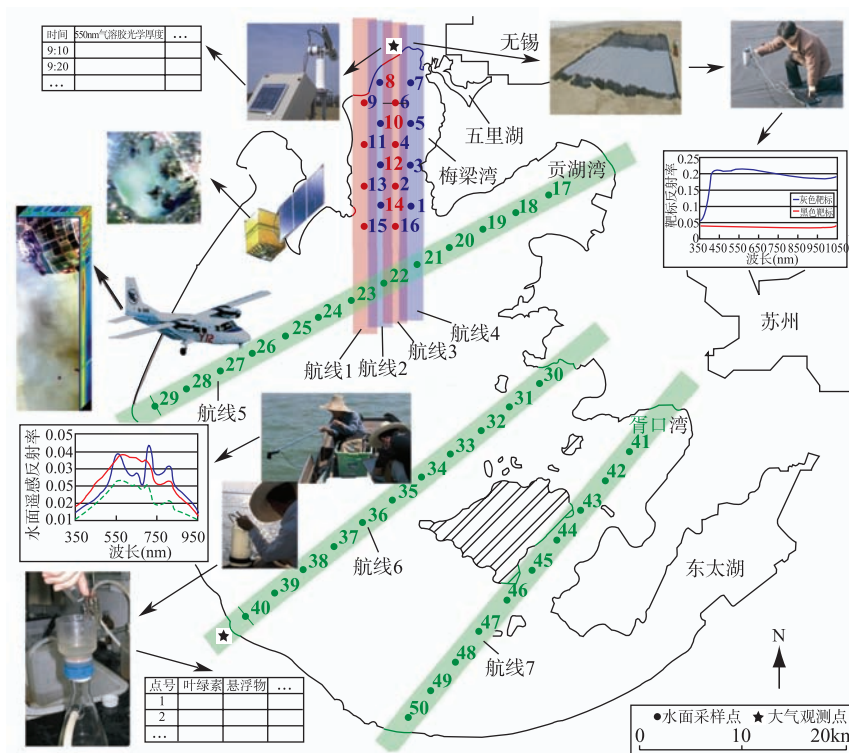


图 2 空地综合遥感实验站点、航线设计与实验场景

Fig.2 Sampling stations design, air route design, and some working photos of the spaceborne, and in-situ remote sensing experiments

岸边测量实验包括太阳辐射测量和靶标反射光谱测量。太阳辐射测量用于获取太湖上空气溶胶光学厚度,使用自动跟踪太阳分光光度计 CE318。为了分析太湖上空气溶胶特性的空间差异,在太湖北岸和南岸各设计了一个观测站点,利用两台 CE318 同时进行观测。靶标用于航空高光谱遥感器 WHI 的地面辐射定标,在太湖北岸飞行航线上铺设黑色和灰色靶标,飞行实验时同步测量其光谱反射特性。

首先于 2005 年 10 月 10 日在太湖梅梁湾开展了预先实验,然后分别在 2006 年 1 月、2006 年 7 月、2006 年 10 月、2007 年 1 月和 2007 年 4 月开展了 5 次遥感综合试验,其中,2006 年 1 月 9 日和 2006 年 7 月 31 日在太湖开展了航空飞行实验,同时在岸边进行了靶标反射光谱测量。

1.2 太湖水体光学特性分析

1.2.1 固有光学特性分析 在 5 次太湖综合实验中,使用岛津 UV-2401PC 型分光光度计直接测量的固有光学量(IOPs)有: CDOM(Colored Dissolved Organic Matter)吸收系数 $a_{\text{cdom}}(\lambda)$ 、总悬浮物吸收系数 $a_{\text{p}}(\lambda)$ 、非色素悬浮物吸收系数 $a_{\text{d}}(\lambda)$ 、光束衰减系数 $c(\lambda)$ 。利用这些测量的 IOPs 进一步计算得到浮游植物色素吸收系数 $a_{\text{ph}}(\lambda)$ 和总悬浮物散射系数 $b_{\text{p}}(\lambda)$ 。5 次实验获取的 $a_{\text{ph}}(\lambda)$ 、 $a_{\text{cdom}}(\lambda)$ 、 $a_{\text{d}}(\lambda)$ 和 $b_{\text{p}}(\lambda)$ 的均值如图 3 所示。

从图 3 中可以分析太湖水体 IOPs 的季节变化规律。浮游植物吸收系数在冬季较低,在春夏秋季较高,与叶绿素 a 含量成正比,符合藻类的季节生长规律。非色素悬浮物吸收系数在冬季较高,在春夏秋季较低,与非色素悬浮物浓度成正比。CDOM 吸收系数四季变化不大。总悬浮物散射系数在冬季较高,在春夏秋季较低,与总悬浮物浓度成正比,总悬浮物浓度也主要受风浪影响。

1.2.2 单位固有光学特性分析 单位固有光学量(SIOPs)是水体各组分的吸收和散射系数与其浓度的比值。在基于生物光学模型的水质参数反演分析方法中,SIOPs 是最基本和最重要的输入参数^[8]。浮游植物单位

吸收系数($a'_{ph}(\lambda)$)的光谱形状比较复杂, 一般用 675nm 的 $a'_{ph}(675nm)$ 值来表示 $a'_{ph}(\lambda)$ 的大小. 非色素悬浮物单位吸收系数($a'_d(\lambda)$)可以用负指数模型表示, $a'_d(\lambda) = a'_d(\lambda_0) \exp(-S_{ad}(\lambda - \lambda_0))$. 5 次试验数据拟合得到的 S_{ad} 的平均值是 0.0125. $a_{cdom}(\lambda)$ 经常用负指数来拟合, $a'_{cdom}(\lambda) = \exp(-S_{acdom}(\lambda - \lambda_0))^{1.4}$. 5 次试验数据拟合得到的 S_{acdom} 的平均值是 0.0131. 悬浮物单位散射系数($b'_p(\lambda)$)可以用负指数模型表示, $b'_p(\lambda) = b'_p(\lambda_0) \exp(-S_{bp}(\lambda - \lambda_0))$. 5 次试验数据拟合得到的 S_{bp} 的平均值是 0.00177. 此外, 5 次试验数据拟合得到的悬浮物后向散射比例系数(\tilde{b}_{bp})的平均值是 0.051.

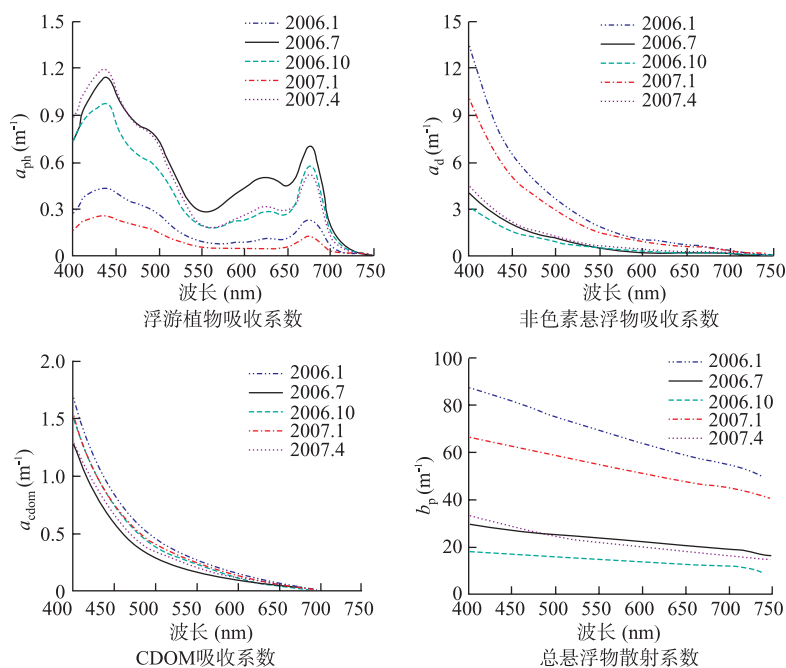


图 3 5 次太湖实验获取的 $a_{ph}(\lambda)$ 、 $a_{cdom}(\lambda)$ 、 $a_d(\lambda)$ 和 $b_p(\lambda)$ 的均值

Fig.3 Average values of $a_{ph}(\lambda)$, $a_{cdom}(\lambda)$, $a_d(\lambda)$ and $b_p(\lambda)$ measured in five times of Lake Taihu experiments

1.2.3 单位固有光学量数据库 在 SIOPs 时空分布规律分析的基础上, 建立以季节和区域为索引的 SIOPs 数据库, 作为水质参数反演分析方法的输入参数. 对于太湖 SIOPs 数据库, 根据区域地理环境和水体光学特性相接近的原则在空间上分为 6 个湖区, 分别是梅梁湾、贡湖湾、北部湖心区、南部湖心区、东部沿岸区、东太湖区. SIOPs 数据库记录了各季节各湖区的平均 SIOPs 参量, 包括 $a'_d(440nm)$ 、 S_{ad} 、 $a_{cdom}(\lambda)$ 、 S_{acdom} 、 $b'_p(440nm)$ 、 S_{bp} 、 $a'_{ph}(675nm)$ 、 $a'_{ph}(\lambda)/a'_{ph}(675nm)$, 利用这些参数可以计算得到任意波段的 SIOPs: $a'_d(\lambda)$ 、 $a'_{cdom}(\lambda)$ 、 $b'_p(\lambda)$ 和 $a'_{ph}(\lambda)$. 此外 SIOPs 数据库还记录了悬浮物后向散射比例系数 \tilde{b}_{bp} , 利用 \tilde{b}_{bp} 和 $b_p(\lambda)$ 相乘可以计算得到悬浮物后向散射系数 $b_{bp}(\lambda)$. 由于 $a_{ph}(\lambda)/a_{ph}(675nm)$ 是随波长变化的数组, 而其他参量都不随波长变化, 因此建立 SIOPs 数据库时需要建立 2 个表, 其中 1 个表存放随波长变化的参量 $a_{ph}(\lambda)/a_{ph}(675nm)$; 另 1 个表存放不随波长变化的其他参量. 2 个表通过区域和季节进行关联.

1.2.4 表观光学特性分析 内陆水体固有光学特性具有季节性变化规律, 而这种规律的外在表现就是表观光学量的季节性变化规律. 太湖四季水体典型遥感反射率光谱如图 4 所示.

太湖水体遥感反射率有 8 个最明显的特征波长, 分别是 570nm 附近的反射峰、632nm 附近的反射谷、652nm 附近的反射峰、678nm 附近的反射谷、700nm 附近的反射峰、732nm 附近的反射率拐点、807nm 附近的反射峰, 831nm 附近的反射率拐点. 其中, 570 和 700nm 附近的反射峰波长位置与叶绿素含量成正比.

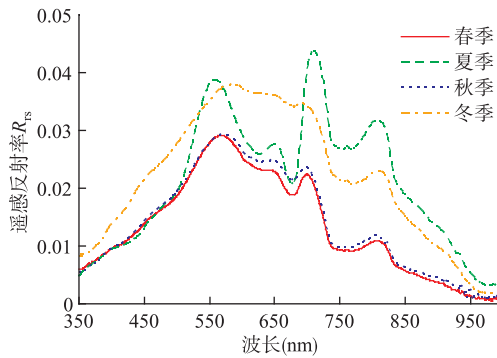


图 4 太湖四季水体的典型遥感反射率光谱
Fig.4 Representative reflectance spectra of Lake Taihu water in the four seasons

1.3 气溶胶类型计算

利用实验数据计算太湖夏季和冬季气溶胶四种组分比例因子, 作为太湖气溶胶的自定义类型. 由于太湖地区不会有海洋性粒子存在, 因此定义另外 3 个组分(沙尘粒子、水溶性粒子和煤烟粒子)比例因子分别为: x 、 y 、 $1-x-y$. 在 2006 年 1 月和 7 月太湖实验中, 获取了与某些采样点水面反射率光谱测量准同步的 MODIS 数据. 根据 MODIS 的波段响应函数, 将水面遥感反射率光谱等效为 MODIS 各波段的反射率. 给定 x 、 y 的初值, 利用 6S 计算得到水面等效反射率光谱对应的大气层顶辐亮度. 当计算的大气层顶辐亮度数据和 MODIS 图像对应的辐亮度数据的差值最小的时候, x 、 y 、 $1-x-y$ 就是气溶胶组分比例因子^[15]. 计算结果见表 1.

表 1 太湖地区冬季和夏季的气溶胶类型

Tab.1 Aerosol types above Lake Taihu in winter and summer

太湖	沙尘粒子	水溶性粒子	煤烟粒子	海洋性粒子
冬季	0.50	0.29	0.21	0
夏季	0.48	0.50	0.02	0

2 水质参数反演分析方法构建

基于生物光学模型的水质参数反演分析方法主要有 3 类: 代数方法、矩阵反演方法和非线性优化方法^[7]. 目前, 代数方法中需要建立水体固有光学量和水质参数的经验关系^[16], 这个经验关系往往是不稳定的, 对于不同区域和不同季节的水体, 经验关系中的系数会发生变化. 而且, 对于某些水体, 有时无法建立固有光学量和水质参数的经验关系, 从而导致代数法无法使用. 非线性优化方法用来反演水体的固有光学量^[9], 进一步反演水质参数的浓度时也要建立固有光学量和水质参数的经验关系. 与代数法和非线性优化方法相比, 矩阵反演算法以单位固有光学量为输入参数, 从而建立了固有光学量和水质参数的理论关系. 但是对于内陆水体, 单位固有光学量不是常数, 而是随季节和区域变化的.

针对这些问题, 本文提出了一个解决方案: 将矩阵反演方法建立在单位固有光学量数据库基础上, 从而提高了水质监测方法的区域和季节适用性, 提高了水质参数反演精度. 在此基础上, 对生物光学模型进行变形, 建立了非线性优化法和代数法, 它们也是建立在单位固有光学量数据库上的, 因而同样具有良好的区域和季节适用性.

2.1 矩阵反演方法

内陆水体中最常用的生物光学模型如下所示^[5]:

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

其中, $R(0-)$ 是刚好在水面以下辐照度比, f 是一个与光场分布有关的参数, a 是水体总的吸收系数, b_b 是水体总的后向散射系数.

将上式中的吸收系数和散射系数都用单位固有光学量和水质参数的乘积表示, 同时将 $R(0-)$ 用遥感反射率 R_{rs} 表示, 得到:

$$\frac{R_{rs}(\lambda)}{(1-r(\theta_v)) * (1-r(\theta_s)) / n^2} =$$

$$\frac{f}{Q} \frac{b_{bw}(\lambda) + \tilde{b}_{bp}'(\lambda)C_s}{a_w(\lambda) + a'_{ph}(\lambda)C_{chl-a} + a'_d(\lambda)C_s + a'_{cdom}(\lambda)a_{cdom}(\lambda_0) + b_{bw}(\lambda) + \tilde{b}_{bp}'(\lambda)C_s} \quad (2)$$

其中, θ_v 是观测天顶角, $r(\theta_v)$ 是水-气界面反射率, θ_s 是太阳天顶角, $r(\theta_s)$ 是气-水界面反射率, n 是水体折射指数, Q 是水下上行辐照度与辐亮度的比值, C_{chl-a} 是叶绿素浓度, C_s 是悬浮物浓度, \tilde{b}_{bp}' 是悬浮物后向散射比例系数, a_w 是纯水吸收系数, b_{bw} 是纯水后向散射系数。

上面方程中有 4 个参数, 分别是 C_s 、 C_{chl-a} 、 $a_{cdom}(\lambda_0)$ 、 f/Q 。如果 f 、 Q 的值可以确定下来, 方程中就只有 C_s 、 C_{chl-a} 、 $a_{cdom}(\lambda_0)$ 3 种水质参数是未知数了, 把方程改写成矩阵的形式, 从而利用 3 个和 3 个以上的波段就可以解算出 3 种水质参数的浓度值, 这就是矩阵反演方法。 f 和 Q 的值可以由经验公式计算得到^[17-18]。

2.2 非线性优化法

矩阵反演方法要求首先确定生物光学模型中除水质参数浓度外的一些参数, 如水面以下上行辐照度和辐亮度的比值 Q 、模型系数 f 等。这些参数受观测几何、水面粗糙度、水体二向反射、大气状况等多种因素影响, 在不同地点和不同时间都会取不同的值^[19]。利用经验公式确定这些参数会带来误差, 假设不同地点和不同时间的这些参数取相同的值会带来更大的误差。

为了克服矩阵反演方法的缺陷, 提高水质监测的精度, 将方程(2)中的 4 个参数 C_s 、 C_{chl-a} 、 $a_{cdom}(\lambda_0)$ 和 f/Q 都作为未知数。利用 4 个以上的波段带入方程(2), 建立方程组, 利用非线性优化的方法解出这 4 个未知数。

2.3 代数法

在矩阵反演方法的基础上, 利用水体某些组分的固有光学量光谱特征, 减小未知数的数量, 从而可以利用一个或者两个波段以数学公式的形式计算得到某种水质参数的浓度, 这种方法为代数法。

利用 750nm 以后浮游植物、非色素悬浮物和 CDOM 的吸收系数都降至 0 的特点, 建立了两种新的代数法。

由于 750nm 以后浮游植物、非色素悬浮物和 CDOM 的吸收系数都降至 0, 纯水的后向散射系数 b_{bw} 也降至非常小, 而且远小于悬浮物后向散射系数 b_{bp} , 因而可以忽略。此时方程(2)可以简化为

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{f}{Q} \frac{\tilde{b}_{bp}'(\lambda)C_s}{a_w(\lambda) + \tilde{b}_{bp}'(\lambda)C_s} \quad (3)$$

其中, $r_{rs}(\lambda)$ 为刚好在水面以下遥感反射率:

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{(1-r(\theta_v))(1-r(\theta_s))/n^2} \quad (4)$$

(1) 近红外双波段反演 C_s : 方程(3)中只有 2 个未知数, C_s 和 f/Q , 利用 2 个波段的数据便可以计算得到 C_s 值^[20]。

$$C_s = \frac{r_{rs}(\lambda_1)a_w(\lambda_1)b'_{bp}(\lambda_2) - r_{rs}(\lambda_2)a_w(\lambda_2)b'_{bp}(\lambda_1)}{\tilde{b}_{bp}'(\lambda_1)b'_{bp}(\lambda_2)(r_{rs}(\lambda_2) - r_{rs}(\lambda_1))} \quad (5)$$

(2) 近红外单波段反演 C_s : 对于某些遥感器, 750nm 以后也许只有一个波段, 此时就需要首先根据经验或者经验公式得到 f/Q 的值, 这样, 方程(3)中就只有 1 个未知数 C_s 了, 利用一个波段的 $R_{rs}(\lambda)$ 数据就可以计算得到 C_s 值, 即

$$C_s = \frac{r_{rs}(\lambda_1)}{\frac{f}{Q} - r_{rs}(\lambda_1)} \frac{a_w(\lambda_1)}{\tilde{b}_{bp}'(\lambda_1)} \quad (6)$$

由于本文建立的两种代数法使用 750nm 以后的近红外波段光谱数据, 因此它们只能适用于悬浮物浓度比较高的水体, 因为悬浮物浓度低的水体在近红外波段的反射率非常低, 不宜参与反演运算。

3 基于高光谱图像的水质参数反演

3.1 水质监测流程

利用高光谱遥感图像反演内陆水质参数需要完成的处理操作主要有 6 个, 依次是: 辐射校正、几何校正、阈值分割和掩膜、大气校正、水草水华识别和水质参数反演, 其流程如图 5 所示。

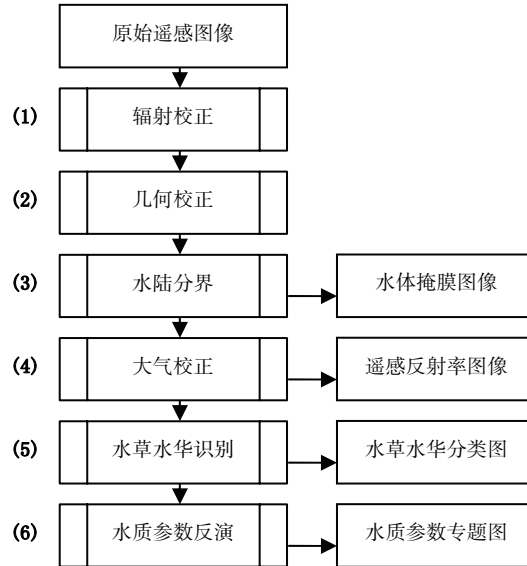


图 5 遥感图像反演内陆水质参数的操作流程

Fig.5 Process of retrieving inland water quality parameters from remote sensing image

辐射校正和几何校正是遥感图像处理的通用流程。水陆分界是水体遥感的特殊操作, 用于提取水体研究区域。根据水体和陆地光谱计算得到水体掩膜图像, 其中水体为 1, 陆地为 0。大气校正对于水质参数遥感反演至关重要。水体反射率比较低, 传感器接收的来自水体的信号中很大的部分是来自大气散射, 因此利用遥感数据监测水质首先要对遥感图像进行精确的大气校正, 得到离水辐亮度或遥感反射率图像^[21-22]。来自水草和水华的遥感数据无法用于反演水面以下的水质参数, 因此首先要将水草和水华提取出来, 做成水华和水草专题图, 然后利用非水华和非水草的遥感图像反演水质参数^[3]。

3.2 基于航空高光谱 WHI 反演内陆水质参数

由于在 2006 年 7 月 31 日航空高光谱飞行试验时, 地面靶标测量出现问题, 无法为航空高光谱传感器进行场地辐射定标。因此, 本文下面仅使用 2006 年 1 月 9 日的 WHI 图像。

3.2.1 预处理 本文利用机载的 POS AV510 的定姿定位数据对航空高光谱图像进行几何纠正, 考虑到高光谱图像数据量巨大, 提出了快速的几何纠正方法。

在机载飞行的同时进行地面靶标的光谱测量, 同时利用太阳分光光度计(CE318)对大气光学特性进行观测。基于反射率法完成成像光谱仪的场地定标, 得到每个波段的辐射定标系数 $gain(\lambda)$ 和 $offset(\lambda)$ ^[23-24]。

本文基于大气辐射传输模型 6S 来完成遥感数据的大气校正。气溶胶光学厚度由与飞行实验同步的太阳光度计测量并计算得到, 气溶胶类型选择太湖冬季自定义类型^[15]。6S 可以输出 3 个大气校正系数 xa 、 xb 和 xc , 还可以输出下行直射辐照度 E_{dir} 和下行漫射辐照度 E_{dif} , 假设天空光均匀分布, 从而得到遥感反射率:

$$R_{rs} = (xa \cdot L_t - xb) / (1.0 + xc \cdot (xa \cdot L_t - xb)) / \pi - r_{sky} E_{dir} / \pi / (E_{dir} + E_{dif}) \quad (7)$$

其中, L_t 是传感器接收到的辐亮度信号; r_{sky} 是气水界面反射率, 可以由 Fresnel 公式计算得到。

“系统”定标(仪器+算法)在水色遥感中具有特殊的作用^[25]. 其原因在于: 1)陆地定标的信号范围往往不是水色遥感中应用的信号范围; 2)除非遥感器的线性度很高, 否则低端信号无法直接应用. 本文选择光谱获取时间与航空图像相差 2min 的 W51 点作为系统定标点, 计算得到每个波段的辐射定标系数 $gain(\lambda)$, 然后以获取时间相差 17min 的 W47 点作为检验点. 从系统定标的检验结果来看, 平均相对误差为 2.06%, 满足 II 类水体水质参数反演要求.

东太湖及西山岛东南部的湖区是典型的草型湖区^[26], 水华非常少. 因此只需要将水草区域分类出来. 利用叶绿素光谱指数 CSI 就可以区分水草和水体:

$$CSI = (R_{rs}(\text{band}66) - R_{rs}(\text{band}60)) / (R_{rs}(\text{band}66) + R_{rs}(\text{band}60)) \quad (8)$$

式中, WHI 第 66 波段中心波长是 707nm; WHI 第 60 波段中心波长是 678nm. 水草的 CSI 判别阈值是 0.07, CSI 大于等于 0.07 的就是水草.

3.2.2 水质参数反演 在 2006 年 1 月的实验中, 太湖水体悬浮物浓度的测量值很高, 50 个采样点的平均值达到 130.18mg/L; 叶绿素浓度很低, 平均值只有 16.47mg/m³; CDOM 吸收系数也较小, $a_{cdom}(440\text{nm})$ 平均值只有 0.98. 实验结果表明, 对于太湖冬季遥感数据, 只有悬浮物浓度能够获得较高的反演精度.

本文采用代数法中的近红外单波段法, 由预处理后的 WHI 遥感反射率图像反演悬浮物浓度. 本文使用中心波长为 749.4nm 的 WHI 第 75 波段数据. 输入参数包括: 观测几何参数 θ_s 、 θ_v , 固有光学量参数 $a_w(\lambda)$; 单位固有光学量参数 $b'_p(\lambda)$ 和 \tilde{b}_{pp} . θ_s 、 θ_v 可以从 POS 文件中获取; θ_s 可以由经纬度和时间计算; $a_w(\lambda)$ 可以从文献中获得^[27], 单位固有光学量参数 $b'_p(\lambda)$ 和 \tilde{b}_{pp} 从本文建立的单位固有光学量数据库中获得.

水面试验 47 号点的采样时间和图像获取时间相差 17min, 可以用于评价悬浮物浓度的反演误差, 计算得到悬浮物浓度反演相对误差为 11.2%. 带有 47 号点的 WHI 条带图像计算得到悬浮物浓度分布图如下所示.

3.3 基于航天高光谱 CHRIS 反演内陆水质参数

3.3.1 预处理 预处理包括辐射校正、几何校正、水陆分界、大气校正. 从欧空局网站下载的 CHRIS 数据已经是经过辐射定标的辐亮度图像, 单位是 $\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$. CHRIS 影像中有明显的纵向条带噪声, 本文采用列均值平滑的方法来去除条带噪声^[28-29]. 去除条带之后, 对照 1:100000 数字地形图, 对 CHRIS 数据进行了几何精校正. 利用中心波长为 1022.5nm 的第 18 波段的阈值分割进行水陆分界, 阈值选择该波段灰度直方图两个峰之间的谷值. 每景 CHRIS 图像的幅宽大约是 $13\text{km} \times 13\text{km}$, 可以认为这么小的面积内的大气状况是一致的. 利用大气辐射传输模型 6S 对 CHRIS 进行大气校正^[3], 气溶胶光学厚度从 AERONET 网站下载, 气溶胶类型选择太湖冬季自定义类型^[15].

梅梁湾是典型的藻型湖区^[26], 水草非常少. 因此只需要将水华区域分类出来. 由于梅梁湾基本无水草, 所以利用 CSI 光谱指数就可以区分水华和水体:

$$CSI = (R_{rs}(\text{band}14) - R_{rs}(\text{band}12)) / (R_{rs}(\text{band}14) + R_{rs}(\text{band}12)) \quad (9)$$

CHRIS 第 14 波段的中心波长是 708nm, CHRIS 第 12 波段的中心波长是 682nm. CSI 水华判别阈值为 0.1, CSI 大于 0.1 的为水华区域. 利用 CHRIS 大气校正后的图像计算得到水华区域, 如图 7a 所示.

3.3.2 水质参数反演 本文采用改进的矩阵反演方法由 CHRIS 遥感反射率图像同时反演叶绿素 a、悬浮物浓度和黄色物质吸收系数. 通过分析发现 CHRIS 的第 10(中心波长 653nm)、11(中心波长 671nm)、12(中心波长 882nm)、13(中心波长 691nm) 和 14(中心波长 708nm) 波段的大气校正效果较好. 因而使用这 5 个波段参与矩阵反演运算. 矩阵反演的输入参数包括: 观测几何参数 θ_s 和 θ_v ; 固有光学量参数 $a_w(\lambda)$ 和 $b_{bw}(\lambda)$; 单位固有光学量参数 $a'_{ph}(\lambda)$ 、 $a'_d(\lambda)$ 、 $a'_{cdom}(\lambda)$ 、 $b'_p(\lambda)$ 和 \tilde{b}_{pp} . 反演得到的叶绿素 a、悬浮物浓度

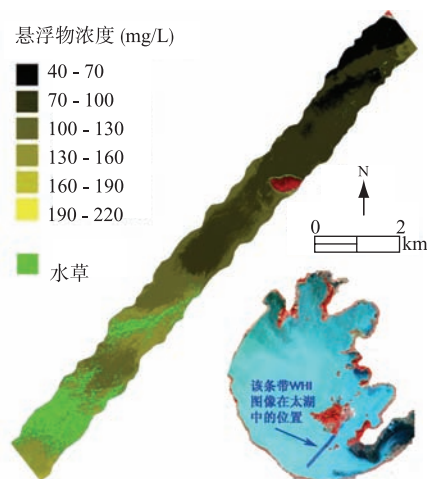


图 6 一个 WHI 条带图像反演得到的悬浮物浓度分布

Fig.6 Total suspended matter map retrieved from a strip of WHI image

和黄色物质吸收系数分布如图7b,c,d所示.

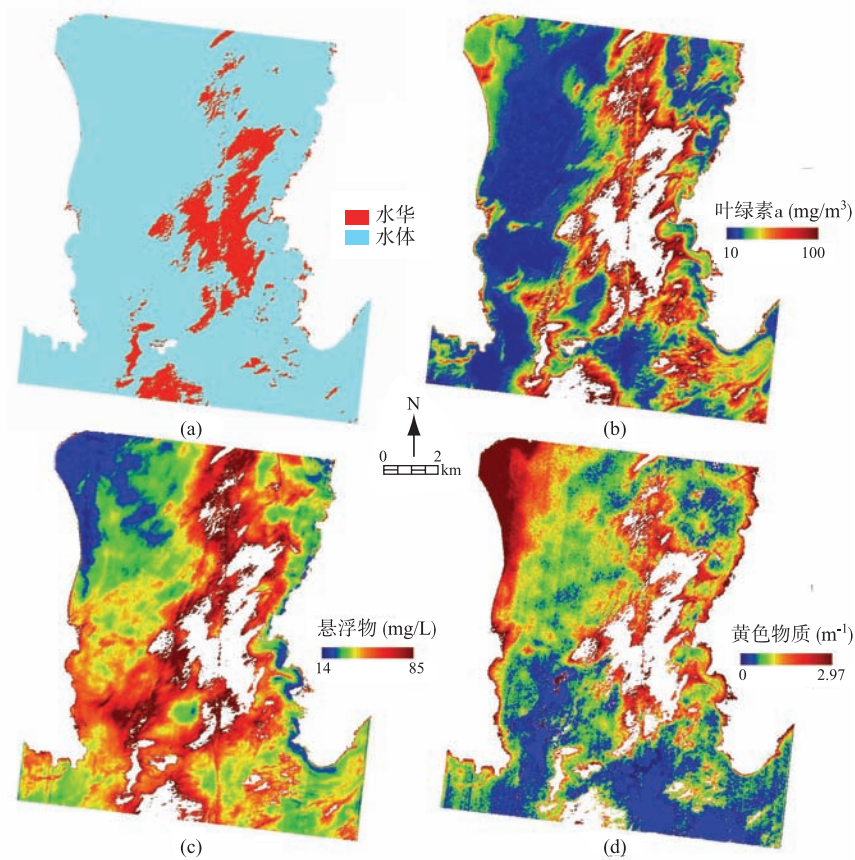


图 7 CHRIS 图像反演的太湖梅梁湾水华、叶绿素 a、悬浮物和黄色物质分布

Fig.7 Algae-bloom, chlorophyll-a, total suspended matter, and yellow substance maps of Meiliang Bay, Lake Taihu retrieved from CHRIS image

获取2005年10月18日这景CHRIS图像的时候, 没有在太湖梅梁湾开展同步采样试验, 因而无法直接判断水质参数反演的精度, 但是可以通过分析反演的水质参数分布图的值域范围和空间分布情况, 并对比2005年10月10日在梅梁湾测量的14个采样点的水质参数, 对水质参数反演结果进行评价. 利用CHRIS反演的3种水质参数分布图和水面14个采样点实测数据分别计算每种水质的均值、最小值和最大值, 如下表所示.

表 2 CHRIS 反演的 3 种水质参数和水面实测水质参数的统计值

Tab.2 Statistics of three water quality parameters retrieved from CHRIS image and in-situ measured

	叶绿素 a(mg/m ³)		悬浮物(mg/L)		$a_{cdom}(440nm)(m^{-1})$	
	CHRIS 反演	水面实测	CHRIS 反演	水面实测	CHRIS 反演	水面实测
均值	36.8	42.5	32.4	40.7	1.32	0.63
最小值	9.8	30.3	13.9	15.7	0.03	0.45
最大值	100	57.3	85.1	72.2	2.97	0.93

CHRIS反演的叶绿素a的均值和实测的均值非常接近, 反演的最小值比实测的最小值小, 反演的最大值比实测的值大, 这是由于CHRIS反演的是整个梅梁湾的叶绿素a浓度, 而叶绿素a浓度随空间变化比较大, 所以它的值域范围必然比14个采样点的宽. 从CHRIS反演的叶绿素a浓度分布图中可以看到水华周围

的叶绿素a浓度非常高,这是因为水华周围仍然会含有大量藻类. 叶绿素a浓度空间变化大的特点也可以从反演图中看出来. 这些都说明CHRIS反演的叶绿素a浓度的空间分布非常合理.

CHRIS反演的悬浮物浓度均值和实测的均值非常接近,反演的最小值也比实测的最小值小但相差不多;反演的最大值比实测的值大但相差不多,这是由于CHRIS反演的是整个梅梁湾悬浮物浓度,它的值域范围比14个采样点的宽;由于悬浮物浓度空间变化小,所以反演的最小值和最大值与实测值相差不多. 从CHRIS反演的浓度分布图中可以看到梅梁湾的西北角的悬浮物浓度比较低,这是由于靠近岸边湾口的风浪比较小,导致相对静水环境下的悬浮物浓度比较低. 这说明CHRIS反演的悬浮物浓度的空间分布非常合理.

CHRIS反演的 $a_{\text{cdom}}(440\text{nm})$ 的均值比实测的均值大了一倍,最小值严重偏小,最大值也严重偏大. 这些都说明CHRIS反演的 $a_{\text{cdom}}(440\text{nm})$ 的值域不太合理. 这主要是由于黄色物质吸收系数占水体总的吸收系数的比例较低,它的反演困难比较大. 从CHRIS反演的 $a_{\text{cdom}}(440\text{nm})$ 的分布图中可以看到近岸和水华周围的值明显比其他区域大,这是因为水华区域的藻类浓度比较高,藻类降解后会产生CDOM,也就是CDOM内源. 另外,在梅梁湾的西北角, $a_{\text{cdom}}(440\text{nm})$ 的值非常大,这是由于有2条河(直湖港、武进港)的水流向这个湾口,带来了大量的外源CDOM. 这说明CHRIS反演的 $a_{\text{cdom}}(440\text{nm})$ 的相对空间分布比较合理.

4 讨论和结论

本文以太湖为试验区,设计了空地同步综合试验方案,获取了6次综合试验数据,包括2次航空高光谱图像数据. 获取了全太湖范围内50个采样点的水体固有光学量数据、表观光学量数据、水质参数数据,分析了太湖水体固有光学量的时空分布规律、表观光学量光谱特征和季节变化规律,建立了单位固有光学量时空分布数据库. 获取了太湖南岸和北岸的太阳辐射数据,改进了气溶胶光学厚度反演算法,确定了太湖夏季和冬季气溶胶类型. 规范了内陆水质遥感监测流程,将矩阵反演方法建立在单位固有光学量数据库的基础上,并发展了基于单位固有光学量数据库的非线性优化法和代数法. 利用航空高光谱遥感图像(WHI)和航天高光谱遥感图像(CHRIS)对这些方法进行了检验,获得了较好的结果.

本文发展的基于单位固有光学量数据库的内陆水质监测分析方法提高了水质监测方法的区域和季节适用性,从而提高了水质监测的精度. 而且,该方法很容易推广到其他水域,只需要获取对应该水域的季节性的单位固有光学量数据库,作为输入参数即可. 这将有助于推进利用遥感监测我国不同区域的湖泊、河流水质的实用化进程. 同时,也为我国2008年9月6日成功发射的环境一号卫星的高光谱遥感数据的应用奠定了方法上的基础.

尽管本文在内陆水质高光谱遥感监测中取得了一些研究进展,但是仍然存在一些不足,主要体现在以下几个方面:(1)本文目前仅利用6次实验数据建立了太湖单位固有光学量数据库,作为水质监测分析方法的输入参数,实验数据的代表性最终会影响水质监测的精度. 因此,需要在时间上进一步加密数据采集完善单位固有光学量数据库;(2)本文目前仅用2次实验数据来确定太湖地区冬夏气溶胶类型,这也需要获取更多时相的实验数据来检验并完善气溶胶类型;(3)本文目前认为一景CHRIS图像或WHI图像中的气溶胶光学厚度是均匀的,这只是一种近似. 为了提高大气校正的精度,需要基于水色遥感器自身信息的逐象元反演气溶胶光学厚度.

总之,本文在内陆水质高光谱遥感监测方面开展了有益的研究,为今后内陆水质遥感监测的进一步深入研究奠定了坚实的基础.

5 参考文献

- [1] Gordon HR, Morel A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review. New York: Springer Verlag, 1983: 1-114.
- [2] Dekker AG, Brando VE, Anstee JM *et al.* Imaging Spectrometry of Water. In: van der Meer FD, De Jong SM eds. Imaging Spectrometry: Basic Principles and Pros.
- [3] 李俊生. 高光谱遥感反演内陆水质参数分析方法研究——以太湖为例[博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [4] Kutser T, Herlevi A, Kallio K *et al.* A hyperspectral model for interpretation of passive optical remote sensing data from turbid

- lakes. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**: 47-58.
- [5] Dekker AG. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing[Ph.D Thesis]. Amsterdam, Netherlands: Vrije University, 1993: 1-240.
- [6] Forget P, Ouilon S, Lahet F *et al.* Inversion of reflectance spectra of nonchlorophyllous turbid coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **68**: 261-272.
- [7] IOCCG. Remote sensing of ocean colour in coastal and other optically-complex waters. In: Sathyendranath S ed. Reports of the International Ocean Colour Coordinating Group No. 3. IOCCG, Dartmouth, Canada, 2000: 47-73.
- [8] 李素菊. 利用分析方法建立湖泊水质参数反演算法研究——以安徽巢湖为例[博士学位论文]. 北京: 北京大学, 2003.
- [9] Lee Z, Carder KL, Peacock G *et al.* Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance. *Applied Optics*, 1996, **35**: 453-462.
- [10] Carder KL, Chen FR, Lee Z *et al.* Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(3): 5403-5421.
- [11] Mueller JL, *et al.* Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 4, Volume IV: inherent optical properties: instruments, characterizations, field measurements and data analysis protocols, National Aeronautical and Space Administration Report 21621, 2003: 1-74.
- [12] Mueller JL, *et al.* Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 4, Volume III: radiometric measurements and data analysis protocols. National Aeronautical and Space Administration Report 21621, 2003: 1-72.
- [13] 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.
- [14] Zhang YL, Zhang B, Wang X *et al.* A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **592**: 105-120.
- [15] 胡方超. 基于MODIS与太阳光度计联合遥感太湖地区大气特性[博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [16] Lee Z, Carder KL, Mobley CD *et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics*, 1999, **38**: 3831-3843.
- [17] Walker RE. *Marine Light Field Statistics*. Wiley series in pure and applied optics. New York: Wiley, 1994: 1-675.
- [18] Gons HJ. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland water. *Environment Science & Technology*, 1999, **33**(7): 1127-1132.
- [19] Morel A, Gentili B. Diffuse Reflectance of Oceanic Waters, II: Bi-directional Aspects. *Applied Optics*, 1993, **32**: 6864-6879.
- [20] 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. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **145**: 339-347.
- [21] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 1999: 1-150.
- [22] Gordon HR. Atmospheric Correction of Ocean Color Imagery in the Earth Observing System Era. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(14): 17081-17106.
- [23] 李俊生, 张兵, 张霞等. 机载成像光谱仪辐射定标研究. *遥感学报(增刊)*, 2003, **7**: 49-53
- [24] 张浩, 张兵, 李俊生等. WHI的场地外定标和二类水体的大气纠正. *测绘科学*, 2008, **33**(增刊): 9-11.
- [25] Evans RH, Gordon HR. Coastal zone color scanner system calibration: a retrospective examination. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(C4): 7293-7307.
- [26] 张运林. 大型浅水湖泊水体生物—光学特性及其生态环境意义[博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [27] Pegau S, Zaneveld JRV, Mitchell BG. 'Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume IV: Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations, Field Measurements and Data Analysis Protocols', NASA Tech. Memo, 2003-211621, Rev. 4, Vol. IV, Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center.
- [28] Garcia JC, Moreno J. Removal of Noises in CHRIS/PROBA images: application to the SPARC campaign data. Proc. of the 2nd CHRIS/Proba Workshop, 2004.
- [29] 李俊生, 张兵, 申茜等. 航天成像光谱仪CHRIS在内陆水质监测中的应用. *遥感技术与应用*, 2007, **22**(5): 593-597.