

# 基于生物光学模型的巢湖悬浮物浓度反演

金鑫<sup>1</sup>, 李云梅<sup>1</sup>, 王桥<sup>2</sup>, 张红<sup>1</sup>, 王彦飞<sup>1</sup>, 尹斌<sup>1</sup>, 吴传庆<sup>2</sup>, 朱利<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

**摘要:**根据 2009 年 6 月巢湖 32 个样点实测的遥感反射率、悬浮物浓度、吸收系数及散射系数等数据, 分析巢湖水体各组分的吸收、散射等固有光学特性, 确定悬浮颗粒物单位散射系数、后向散射概率等固有光学参数, 构建基于生物光学模型的悬浮物浓度反演模型, 并利用准同步获取的环境 1 号卫星 CCD 影像数据反演巢湖悬浮物浓度. 结果表明, 555 nm 处悬浮颗粒物单位散射系数的平均值为  $0.48 \text{ m}^2/\text{g}$ , 以 555 nm 为参考波长, 建立指数衰减模型对悬浮颗粒物单位散射系数进行参数化, 模型的决定系数可以达到 0.99; 此外, 在 760 ~ 900 nm (Band4) 范围内, 后向散射概率不具有波长依赖, 其值稳定在 0.051. 利用所得到的表现及固有光学量构建巢湖水体遥感反射率模型, 反演巢湖悬浮物浓度, 得到实测值与反演值之间的相对误差随着浓度的增加而呈现下降的趋势, 平均相对误差为 17.25%, 由此表明该方法适用于反演悬浮物浓度较高的湖泊水体; 利用两景环境 1 号卫星 CCD 影像数据反演得到的巢湖悬浮物浓度主要在 0 ~ 100 mg/L 之间变化, 其中 6 月 13 日巢湖悬浮物浓度 > 40 mg/L 的水域占到总面积的 54.37%, 而 6 月 15 日巢湖 61.62% 的水域悬浮物浓度 > 40 mg/L, 且这 2 d 巢湖悬浮物的分布与当时的气候变化一致.

**关键词:**环境 1 号卫星; 生物光学模型; 巢湖; 固有光学量; 悬浮物浓度

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-2882-08

## Estimating of Suspended Matter Concentration Based on Bio-optical Model in Chaohu Lake

JIN Xin<sup>1</sup>, LI Yun-mei<sup>1</sup>, WANG Qiao<sup>2</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, WANG Yan-fei<sup>1</sup>, YIN Bin<sup>1</sup>, WU Chuan-qing<sup>2</sup>, ZHU Li<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Remote sensing reflectivity ( $R_{rs}$ ), total suspended matter (TSM), absorption and scattering properties of 32 sampling sites *in situ* were measured in June 2009. The inherent optical properties (IOPs), such as absorption and scattering properties of different components in Chaohu Lake, were analyzed according to these data. And specific scattering coefficient of suspended matters and the backscattering ratio which were the indispensable inherent optical parameters were identified. Then an inversion model based on bio-optical model was constructed and quasi-synchronous HJ-1 CCD images were used to inverse the concentration of suspended matters in Chaohu Lake. Results showed that, the average specific scattering coefficient of suspended matters at the wavelength of 555 nm was  $0.48 \text{ m}^2/\text{g}$ . A power model about specific scattering coefficient of suspended matters was constructed by choosing 555nm as a reference wave band with determination coefficient of 0.99. In addition, the backscattering ratio didn't rely on the wavelength from 700nm to 900nm (Band 4), and its value is stable at 0.051. A remote sensing reflectivity model was constructed by IOPs and apparent optical properties (AOPs) to obtain TSM in Chaohu Lake. The trend of relative error between measured values and inversed values decreased with the concentration of TSM increasing. And the average relative error value was 17.25% by using this model. This showed that this method was applicable to inverse TSM in inland lake with high concentration suspended matters. Based on two CCD image data of HJ-1 satellite, the inversion of suspended matter concentration mainly changed between 0 and 100 mg/L in Chaohu Lake. The suspended matter concentration higher than 40 mg/L covered 54.37% area of Chaohu Lake in June 13 and that of 61.62% in June 15. As well as, the distribution of suspended matter concentration inversed by using two HJ-1 CCD images of Chaohu Lake kept correspondence with climate changes at that time.

**Key words:** HJ-1 satellite; bio-optical model; Chaohu Lake; inherent optical properties (IOPs); suspended matter concentration

利用遥感技术监测水质参数通常有 3 种方法: 经验方法、半分析方法和分析方法. 近年来, 基于水体生物光学模型的半分析方法越来越受到重视<sup>[1~4]</sup>. Dekker 等<sup>[5]</sup>利用 TM 数据对于内陆水体进行了生物光学模型反演水质参数的尝试; Komick 等<sup>[6]</sup>利用生物光学模型反演加拿大西部海岸的叶绿素 a, 以改进 MODIS 数据的 OC3M 产品; 李云梅

等<sup>[7,8]</sup>采用 Gordon 分析模型反演太湖的悬浮物、叶绿素浓度, 得到了较好的效果.

收稿日期: 2010-01-05; 修订日期: 2010-02-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BAC34B05); 国家自然科学基金项目 (40971215); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07527-006)

作者简介: 金鑫 (1986 ~ ), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境遥感、水质遥感, E-mail: jinxinking1986@163.com

生物光学模型构建的关键因素是确定水体中悬浮颗粒物单位散射系数、后向散射概率等固有光学特性.刘炜等<sup>[9]</sup>对于黄东海的研究发现,总悬浮物单位散射系数随波长变化很小;孙德勇等<sup>[10]</sup>利用实测的散射、后向散射系数计算得到太湖水体后向散射概率呈现指数衰减的趋势;Bowers 等<sup>[11]</sup>对爱尔兰附近海域的研究则得到后向散射概率与波长的依赖性较弱的结论.从前人的研究可以看出,不同水体各组分的差异,导致悬浮颗粒物单位散射系数、后向散射概率等固有光学参数的取值存在着时空差异性.巢湖水体组分与太湖<sup>[12]</sup>、黄海、东海等水体组分存在差异,但目前对于巢湖水体的固有光学特性研究还不够深入,对巢湖水色参数进行生物光学反演还存在一定困难.

本研究根据 2009 年 6 月对巢湖 32 个样点观测得到的数据资料,建立基于固有光学特性的半分析模型,并利用我国 2008 年 9 月发射的环境 1 号 CCD 影像数据反演巢湖的悬浮物浓度,探讨环境 1 号 CCD 影像数据在内陆湖泊水体半分析算法中的应用潜力,以期为巢湖水环境监测和管理提供科学的依据.

1 材料与方 法

1.1 野外实验

于 2009 年 6 月 13 ~ 16 日在巢湖进行采样,共布设了 32 个采样点(图 1),实测水面反射光谱、散射系数等水体表观及固有光学量.反射光谱测量采用 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,其波段范围是 350 ~ 1 050 nm.使用标准采样器从水面至水下 30 cm 处采集水样,为避免水样变质,采集的水样在 0 ~ 4℃ 下避光保存并于当天送至实验室进行分析.

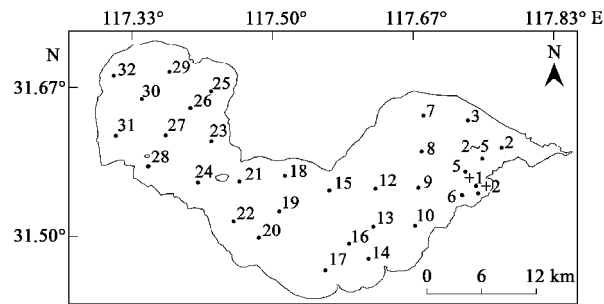


图 1 巢湖采样点位示意  
Fig. 1 Distribution of sampling sites in Chaohu Lake

1.2 水质参数测定

总悬浮物浓度测定使用 0.45 μm 的 GF/F 滤膜,

先进行烧膜处理(去除膜上原附有的有机质及水分).将冷却后的膜进行称量,用来过滤水样.量取一定体积的水样,利用过滤器进行过滤,残留在膜上的物质就是总悬浮物.烘干称量后,用含有总悬浮物的膜的质量减去膜质量得到总悬浮物的质量,利用总悬浮物的质量除以水样的体积,得到总悬浮物浓度.

1.3 固有光学量测定

悬浮颗粒物的吸收采用定量滤膜技术(QFT)测定:用直径 47 mm 的 GF/F 滤膜(Whatman 公司)过滤 200 ~ 400 mL 水样,用分光光度计测定滤膜上颗粒物的吸光度,用同样湿润程度的空白滤膜做参比,并且以 750 nm 处吸光度为零点进行校正,得到总悬浮物的光谱吸收系数.利用 NaClO<sub>3</sub> 对总悬浮物颗粒物进行漂白处理,得到非藻类颗粒物,再利用定量滤膜技术测定非藻类颗粒物的吸收系数.藻类颗粒物吸收系数由总悬浮颗粒物吸收系数减去非藻类颗粒物吸收系数获取.CDOM 吸收系数测定:采用 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤已经过滤除去总悬浮物的水样,得到 CDOM 水样,利用分光光度计测量 CDOM 的吸光度,计算各波长的吸收系数,并以 750nm 的吸光度作散射校正<sup>[13]</sup>.

水中颗粒物散射系数通过 Wetlabs 公司的光谱吸收和衰减仪(AC-S)获得<sup>[14]</sup>,AC-S 在可见光波段范围共有 85 个光谱通道,光谱分辨率为 4 nm,测量精度为 0.01 m<sup>-1</sup>.

2 悬浮物生物光学反演模型构建

水体的遥感反射率随着光照条件变化而变化,且与水体组分有关,它是入射太阳光与水体固有光学特性相互作用的结果.对于特定的太阳光照条件,遥感反射率不仅可以通过现场的测量获得,还可以由吸收、散射等固有光学特性计算得到.Tzortziou 等<sup>[15]</sup>以及 Doxaran 等<sup>[16]</sup>认为遥感反射率与固有光学量之间的关系可由式(1)表示:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{t(1 - \rho_{aw})}{n^2} \times \frac{f}{Q} \times \frac{b_{bt}(\lambda)}{a_t(\lambda) + b_{bt}(\lambda)}$$

(1)

式中, $R_{rs}$ 为 ASD 实测的水面以上遥感反射率; $a_t$ 为总吸收系数; $b_{bt}$ 为总后向散射系数; $n$ 是水体的折射系数,取值为 1.34; $t$ 是气-水界面的 Fresnel 透射系数,取值为 0.98; $\rho_{aw}$ 是气-水界面辐照度反射率,取值为 0.05; $f$ 为受太阳高度角和水体散射影响的参数, $Q$ 为光场分布参数.其中  $n$ 、 $t$ 、 $\rho_{aw}$  为常数<sup>[15]</sup>,只有  $f$  和  $Q$  的值会随着外界条件的改变而改变.

水体的吸收是纯水、CDOM、浮游植物以及悬浮颗粒物共同作用的结果,随着研究水体的类型、区域和时间的不同而表现出差异性.水体的吸收可以简化为以下的线性叠加:

$$a_t(\lambda) = a_w(\lambda) + a'_{ph}(\lambda) \times C_{Chl-a} + a'_d(\lambda) \times TSM + a'_{CDOM}(\lambda) \times a_{CDOM}(\lambda_0) \quad (2)$$

式中,  $a_w(\lambda)$  为纯水的吸收系数<sup>[17]</sup>;  $a'_{ph}(\lambda)$  为浮游植物的单位吸收系数,  $C_{Chl-a}(\lambda)$  为叶绿素 a 浓度;  $a'_d(\lambda)$  为悬浮颗粒物的单位吸收系数, TSM 为悬浮物浓度;  $a'_{CDOM}(\lambda)$  为 CDOM 的单位吸收系数,

$$\frac{R_{rs}(\lambda)}{t(1 - \rho_{aw})/n^2} = \frac{f}{Q} \times$$

$$\frac{0.5 \times b_w(\lambda) + \bar{b}_{bp}(\lambda) \times b'_p(\lambda) \times TSM}{a_w(\lambda) + a'_{ph}(\lambda) \times C_{Chl-a} + a'_d(\lambda) \times TSM + a'_{CDOM}(\lambda) \times a_{CDOM}(\lambda_0) + 0.5 \times b_w(\lambda) + \bar{b}_{bp}(\lambda) \times b'_p(\lambda) \times TSM} \quad (4)$$

由图 2 巢湖水体吸收系数光谱曲线可以看出, 750 nm 以后藻类颗粒物、非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收都降至 0, 此时纯水的后向散射也降至非常小<sup>[19]</sup>, 且远小于悬浮颗粒物后向散射, 因而可以忽略, 此时影响水体遥感反射率的数据只有悬浮颗粒物后向散射以及纯水的吸收.

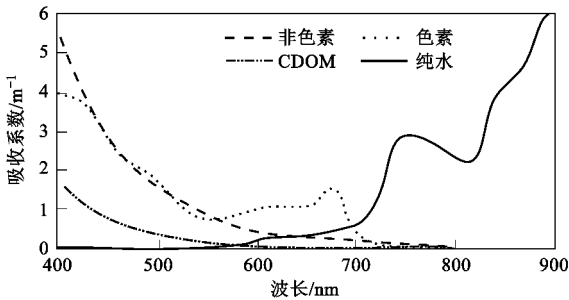


图 2 巢湖水体吸收系数

Fig. 2 Absorption coefficient in Chaohu Lake

令  $r_{rs} = \frac{R_{rs}(\lambda)}{t(1 - \rho_{aw})/n^2}$ , 则式(4)可变为:

$$r_{rs} = \frac{f}{Q} \times \frac{\bar{b}_{bp}(\lambda) \times b'_p(\lambda) \times TSM}{a_w(\lambda) + \bar{b}_{bp}(\lambda) \times b'_p(\lambda) \times TSM} \quad (5)$$

则由式(5)可以得到的悬浮物浓度, 如式(6):

$$TSM = \frac{r_{rs}(\lambda)}{f/Q - r_{rs}(\lambda)} \times \frac{a_w(\lambda)}{\bar{b}_{bp}(\lambda) \times b'_p(\lambda)} \quad (6)$$

由式(6)可知, 利用生物光学模型方法求解悬浮物浓度, 必须知道  $f$ 、 $Q$ 、 $\bar{b}_{bp}$  以及  $b'_p$  的取值. 其中,  $f$  和  $Q$  的值随着外界条件的改变而改变,  $\bar{b}_{bp}$ 、 $b'_p$  是水体的固有光学特性, 随着水体的不同而不同.

## 2.1 $f$ 、 $Q$ 值的计算

$a_{CDOM}(\lambda_0)$  为 440 nm 处的 CDOM 的吸收系数.

水体的后向散射主要受悬浮颗粒物的影响, 如果忽略 CDOM、藻类颗粒物散射, 则水体的后向散射系数可以表示为:

$$b_{bt}(\lambda) = 0.5 \times b_w(\lambda) + \bar{b}_{bp}(\lambda) \times b'_p(\lambda) \times TSM \quad (3)$$

式中,  $b_w$  为水体的散射系数<sup>[18]</sup>,  $b'_p(\lambda)$  为悬浮颗粒物的单位散射系数,  $\bar{b}_{bp}(\lambda)$  为颗粒物后向散射概率, TSM 为悬浮物浓度.

将式(2)、式(3)代入式(1)中, 则式(1)变为:

$f$  值可以通过  $0.975 - 0.0629\mu_0$  计算得到<sup>[20]</sup>.

$\mu_0$  为水面下入射太阳光的折射角余弦值; 根据各采样点的具体时间和纬度以及当天赤纬即可计算出各采样点的太阳高度角, 从而进一步算出  $\mu_0$  及  $f$ . 经计算得出  $f$  的值在 0.35 ~ 0.53 之间变动, 均值为 0.44.

$Q$  值受不同的水体、太阳角度、大气状况和海面粗糙度等条件的影响<sup>[21]</sup>. 不少研究发现,  $Q$  值的变化范围在 3 ~ 6, 太阳天顶角越大时  $Q$  值越大<sup>[22]</sup>. 而对于浑浊的水体取值为  $\pi$  能取得较为合理的结果<sup>[23]</sup>. 综合前人的研究认为  $Q$  的值通常在 1.7 ~ 7.0 之间变化. 本研究中使用  $E_u/L_u$  来计算  $Q$  的值<sup>[8]</sup>, 得出  $Q$  的值在 2.9 ~ 5.6 之间变动, 均值为 3.9. 前人研究表明,  $f/Q$  的值大致在 0.08 ~ 0.15 之间变动, 此次研究结果显示,  $f/Q$  的值 0.08 ~ 0.13 也在这个范围内变动<sup>[24]</sup>, 因此认为本研究结果是合理的. 本研究  $f/Q$  的值取所有样点的平均值 0.11 进行计算.

## 2.2 悬浮颗粒物单位散射系数参数化

Gordon 等<sup>[25]</sup>认为典型的一类水体中, 悬浮物单位散射系数为  $1 \text{ m}^2/\text{g}$ ; Babin 等<sup>[26]</sup>以 555 nm 波段为参考波长, 进行悬浮物单位散射系数研究, 研究表明悬浮物单位散射系数随不同水体变化很大, 其值在  $0.2 \sim 1 \text{ m}^2/\text{g}$  之间变动. 对于不同波段处悬浮物单位散射系数, Antti 等<sup>[27]</sup>认为悬浮物单位散射系数可以通过指数模型进行建模; 本研究通过实测悬浮物单位散射系数发现, 其单位散射系数也呈衰减趋势, 可以使用指数衰减模型来表示:

$$b'_p(\lambda) = b'_p(\lambda_0) \times \left[ \frac{\lambda_0}{\lambda} \right]^n \quad (7)$$

式中,  $\lambda_0$  为参考波长(555 nm);  $b'_p$  为悬浮物单位散射系数, 可通过悬浮物散射系数同悬浮物浓度的比值获取;  $n$  为随波长变化的指数. 通过拟合得到  $n$  的值为 0.792, 其值与刘炜等<sup>[9]</sup>在黄海、东海中的研究结论有显著差异, 但与 Sun 等<sup>[13,14]</sup>在太湖的研究结果 0.729 相似, 表明  $n$  的值随不同的水体发生不同的变化; 利用该指数模型计算得到的巢湖水体在 814 nm 的  $b'_p$  为 0.357 6 m<sup>2</sup>/g, 而 828 nm 的  $b'_p$  为 0.352 8 m<sup>2</sup>/g, 这个值与 Zhang 等<sup>[12]</sup>利用指数模型得到的太湖研究结论相近. 经研究发现,  $b'_p$ (555) 的值大致在 0.43 ~ 0.57 m<sup>2</sup>/g 范围内变动, 均值为 0.48 m<sup>2</sup>/g, 因此本次研究取  $b'_p$ (555) 为 0.48 m<sup>2</sup>/g 代入式(7)计算其他波长处的单位散射系数. 利用 555nm 处的悬浮物单位散射系数参数化反演模型得到的 400 ~ 800 nm 之间悬浮物单位散射系数与实测值之间的决定系数为 0.99, 参数化模型的稳定性以及精度都较高, 由此表明巢湖水体悬浮物单位散射系数的参数化反演效果很好.

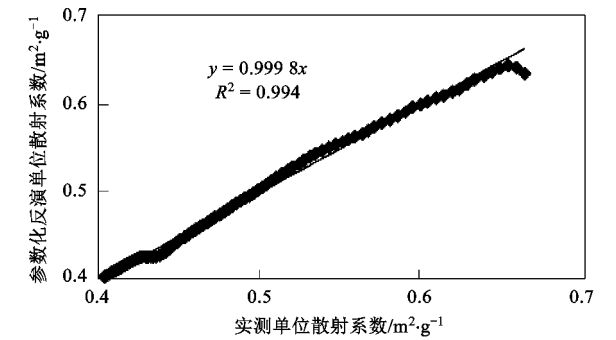


图3 悬浮颗粒物单位散射系数参数化反演值与实测值之间的关系  
Fig.3 Relationship between measured and inversed specific scattering coefficient

2.3 悬浮颗粒物后向散射概率

Ulloa 等<sup>[28]</sup>假设指数为常数, 从理论上推导出悬浮颗粒物后向散射概率与波长无关; Twardowski 等<sup>[29]</sup>使用有限的现场测量数据表明悬浮颗粒物后向散射概率对波长的依赖性很弱; Chami 等<sup>[30]</sup>对沿岸水体的研究表明 490 ~ 555 nm 附近, 悬浮颗粒物后向散射概率大致在 0.08 附近; Petzold 等<sup>[31]</sup>对几种典型水体的悬浮颗粒物后向散射率进行研究, 其中圣地亚哥港湾的混浊水体结果为 0.019, 沿海海域水体的为 0.013, 清洁的开阔海洋水体的为 0.044; Kirk 等<sup>[32]</sup>认为对许多沿岸和中混浊水体而言 0.019 较为适合; Whitmire 等<sup>[33]</sup>则认为混浊河水的悬浮颗粒物后向散射概率大约为 0.059; 刘炜

等<sup>[9]</sup>对于黄东海的研究结论表明悬浮颗粒物后向散射概率较稳定. 本研究根据式(5)得到  $\bar{b}_{bp}$  的表达式为:

$$\bar{b}_{bp}(\lambda) = \left( \frac{a_t \times r_{rs}(\lambda) \times Q/f}{1 - r_{rs}(\lambda) \times Q/f} - b_{bw} \right) / b_p \quad (8)$$

式中,  $b_{bw}$  为纯水后向散射系数<sup>[2]</sup>,  $b_p$  为悬浮颗粒物的散射系数.

经分析发现, 在 380 ~ 760 nm 之间水体各组分的固有光学特性的变化较为复杂, 水体悬浮颗粒物后向散射概率曲线波动较大; 但是到了 760 nm 之后, 水体中只剩下纯水的吸收系数以及非藻类颗粒物的后向散射系数, 此时巢湖各个样点的悬浮颗粒物后向散射概率随波长变化较小(图4), 各个样点 760 ~ 800 nm 之间的均值稳定在 0.046 ~ 0.054 的范围内, 巢湖所有采样点悬浮颗粒物后向散射概率的平均值大致为 0.051, 此结论与 Zhang 等<sup>[12]</sup>对太湖的研究结果较为接近, 但是该结论与马荣华<sup>[34]</sup>、Sun<sup>[14]</sup>等的结论有所不同, 可能是由于  $\bar{b}_{bp}$  的获取方式有所差异导致的. Kevin 等<sup>[35]</sup>认为近红外波段水体的遥感反射率主要是由纯水的吸收造成, 其他的固有光学特性基本不变. 因此本研究也认为 760 ~ 900 nm (Band4) 之间悬浮颗粒物后向散射概率随波长的趋势较为稳定, 是一个定值, 因此可以将 760 ~ 800 nm 之间各个波长处悬浮颗粒物后向散射概率的平均值 0.051 作为整个 Band4 波段的悬浮颗粒物后向散射概率进行处理分析.

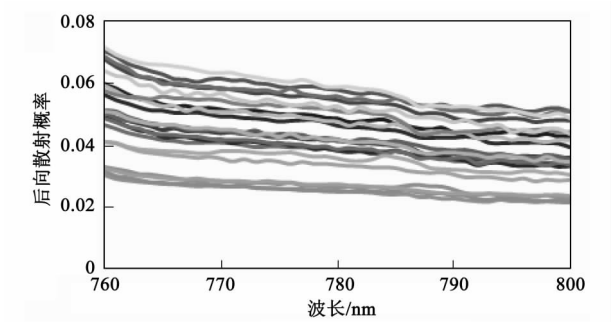


图4 悬浮颗粒物后向散射概率与波长的相关关系  
Fig.4 Relationship between wavelength and backscattering ratio

3 基于环境1号卫星数据的悬浮物浓度反演

3.1 环境1号影像数据介绍及其预处理

环境1号卫星(HJ-1)是我国专用于环境与灾害监测预报的卫星. HJ-1A、HJ-1B 星已于 2008 年 9 月发射升空, 经过一系列卫星轨道调整和技术测试

工作,数据已经正式发布.其中每颗星上都载有 2 台 CCD 相机,其可见光-近红外波段设置几乎与 Landsat ETM 相同,包括 3 个可见光波段(430 ~ 520 nm、520 ~ 600 nm、630 ~ 690 nm)、1 个近红外波段

(760 ~ 900 nm),像元分辨率为 30 m,2 台 CCD 相机拼接获得 700 km 幅宽的扫描影像数据,A、B 双星组成的卫星星座可以实现 48 h 的重返周期.环境 1 号卫星 CCD 相机的主要技术参数见表 1.

表 1 环境 1 号卫星与 Landsat 卫星可见光-近红外波段主要技术参数  
Table 1 Main parameters of HJ-1 satellite and Landsat from visible to near-infrared wavelength

| 性能参数                       | HJ-1                                                                                           | Landsat                                                                                        |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 可见光-近红外波段设置/ $\mu\text{m}$ | 0. 43 ~ 0. 52( Band1 )、0. 52 ~ 0. 60( Band2 )<br>0. 63 ~ 0. 69( Band3 )、0. 76 ~ 0. 90( Band4 ) | 0. 45 ~ 0. 52( Band1 )、0. 52 ~ 0. 60( Band2 )<br>0. 63 ~ 0. 69( Band3 )、0. 76 ~ 0. 90( Band4 ) |
| 空间分辨率/m                    | 30                                                                                             | 30                                                                                             |
| 幅宽/ km                     | 360( 2 台 CCD 组合 $\geq 700$ )                                                                   | 185                                                                                            |
| 重返周期/d                     | 2                                                                                              | 16                                                                                             |

此次实验共获取了两景环境 1 号卫星的 CCD 数据,分别为 6 月 13 日的 HJ-1A 和 6 月 15 日的 HJ-1B 的影像数据.

首先对影像数据进行几何精校正,并利用 6S 模型进行大气校正,同时为了消除噪音,降低影像数据配准引起的误差,减小实地采样与卫星过境不同步引起的数值匹配与关联误差,对影像数据进行  $5 \times 5$  的低通滤波的平滑处理,经过此处理提取出的遥感反射率作为遥感数据源可以得到更好的反演效果<sup>[36]</sup>.

实验观测时发现,巢湖部分区域有大面积蓝藻水华漂浮,这些区域水面出现绿色植物光谱特征,掩盖了水体的光谱信息,不适合用于悬浮物浓度的反演,因此,必须首先将其提取出来.由于环境 1 号卫星数据与 TM、CBERS 的波段设置范围相似,因此根据马荣华等<sup>[37]</sup>的研究结论,使用 RVI 指数对巢湖水体中影响悬浮物浓度反演的蓝藻水华覆盖区进行剔除.

3.2 基于环境 1 号数据悬浮物反演

为了验证利用生物光学模型及环境卫星 1 号 CCD 数据反演悬浮物浓度的可行性,根据环境 1 号 CCD 数据近红外波段( Band4 )的响应函数,对 760 ~ 900 nm 范围内固有光学特性参数及 ASD 实测的遥感反射率进行波段等效处理<sup>[38]</sup>,然后代入生物光学模型,并进行误差评价.

将固定的悬浮物后向散射概率、参数化反演的悬浮物单位散射系数等固有光学参数以及  $f$ 、 $Q$  代入式(6),可以的得到生物光学模型反演的悬浮物浓度,如式(9):

$$\text{TSM} = \frac{r_{rs}(\lambda)}{f/Q - r_{rs}(\lambda)} \times \frac{a_w(\lambda)}{\bar{b}_{bp} \times b'_p(\lambda_0) \times \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^n}$$

(9)

式中,  $\bar{b}_{bp}$  取 0.051,  $\lambda_0$  为 555 nm,  $b'_p(\lambda_0)$  为  $0.48 \text{ m}^2/\text{g}$ ;  $r_{rs}$ 、 $a_w(\lambda)$  和  $b'_p(\lambda)$  为等效处理后对应 Band4 的值.

使用相对误差(RE)作为检验反演值与实测值是否一致的评判标准.表达式为:

$$\text{RE} = \frac{|\text{TSM}_{\text{mod}} - \text{TSM}_{\text{obs}}|}{\text{TSM}_{\text{obs}}} \times 100\%$$

(10)

式中,  $\text{TSM}_{\text{mod}}$  表示总悬浮物浓度反演值,  $\text{TSM}_{\text{obs}}$  表示总悬浮物浓度实测值.

经计算,所有样点的实测值与反演值的平均相对误差为 17.25%,反演得到的悬浮物浓度与实测值之间的相关关系如图 5. 该结果表明,环境 1 号卫星 CCD 相机的波段设置可以用于构建生物光学模型反演悬浮物浓度.

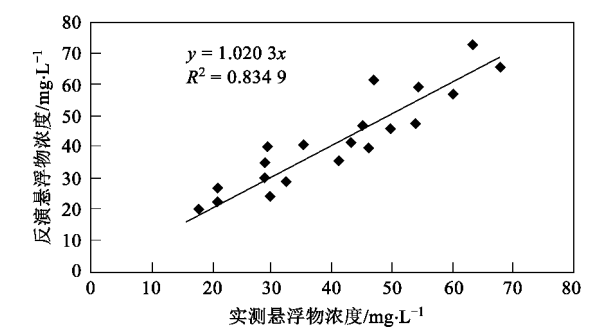


图 5 悬浮物浓度实测值与反演值的相关关系  
Fig. 5 Relationship between measured and inversed TSM concentration

为了进一步分析模型对不同悬浮物浓度的适用性,将悬浮物浓度分成 6 个等级考察反演值与实测值之间的相对误差,结果表明,相对误差主要呈现出随着实测悬浮物浓度的增加相对下降的趋势(图 6),即:悬浮物浓度越大,相对误差越小.相对误差最大值出现在 20 ~ 30 mg/L,反演效果较差,相对误

浮颗粒物单位散射系数、后向散射概率等固有光学特性的取值是合理的。

致谢:感谢乐成峰、黄昌春、夏歆、杨煜在巢湖实验中所作的贡献,感谢孙德勇、施坤在论文写作及修改中给予的帮助以及指导意见。

#### 参考文献:

- [1] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [D]. Netherlands: Vrije University, 1993.
- [2] Lee Z P, Carder K L, Mueller J L, *et al.* Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance [J]. *Appl Opt*, 1996, **35**(3): 453-462.
- [3] 张兵, 申茜, 李俊生, 等. 太湖水体 3 种典型水质参数的高光谱遥感反演[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 182-192.
- [4] 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[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(10): 2273-2277.
- [5] Dekker A G, Vos R J, Peters S W M. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes [J]. *Sci Total Environ*, 2001, **268**(1-3): 197-214.
- [6] Komick N M, Costa M P F. Bio-optical algorithm evaluation for MODIS for western Canada coastal waters: an exploratory approach using in situ reflectance[J]. *Rem Sens Environ*, 2009, **113**: 794-804.
- [7] 李云梅, 黄家柱, 陆皖宁, 等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测[J]. *海洋与湖泊*, 2006, **37**(2): 171-177.
- [8] 李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 等. 用分析模型方法反演水体叶绿素浓度[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(2): 169-175.
- [9] 刘炜, 李铜基, 朱建华, 等. 黄东海海区总悬浮物散射特性研究[J]. *海洋技术*, 2007, **26**(2): 42-46.
- [10] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰, 等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度关系模型[J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2688-2694.
- [11] Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Inherent optical properties of the Irish Sea determined from underwater irradiance measurements[J]. *Estuar Coast Shelf S*, 1996, **43**(4): 433-447.
- [12] Zhang B, Li J S, Shen Q, *et al.* A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance [J]. *Environ Monit Assess*, 2008, **145**(1-3): 339-347.
- [13] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, *et al.* Parameterization of water component absorption in an inland eutrophic lake and its seasonal variability: a case study in Lake Taihu[J]. *Int J Remote Sens*, 2009, **30**(13): 3549-3571.
- [14] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, *et al.* Light scattering properties and their relation to the biogeochemical composition of turbid productive waters: a case study of Lake Taihu[J]. *Appl Opt*, 2009, **48**(11): 1979-1989.
- [15] Tzortziou M, Subramaniam A, Herman J R, *et al.* Remote sensing reflectance and inherent optical properties in the mid Chesapeake Bay [J]. *Estuar Coastal Shelf S*, 2007, **72**(1): 16-32.
- [16] Doxaran D, Froidefond J, Samantha L, *et al.* Spectral signature of highly turbid waters; application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. *Rem Sens Environ*, 2002, **81**(1): 149-161.
- [17] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements [J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(33): 8710-8723.
- [18] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm) [J]. *Appl Opt*, 1981, **20**(2): 177-184.
- [19] Lee Z P, Carder K L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance [J]. *Rem Sens Environ*, 2004, **89**: 361-368.
- [20] Kirk J T O. Dependence of relationships between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude [J]. *Limnol Oceanogr*, 1984, **29**(2): 350-356.
- [21] 黄昌春, 李云梅, 孙德勇, 等. Q 值的影响因素分析及其参数化[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2059-2066.
- [22] Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters II Bidirectional aspects [J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(33): 6864-6879.
- [23] Gons H J. Optical teledetection of chlorophylla in turbid inland waters [J]. *Environ Technol*, 1999, **33**(7): 1127-1132.
- [24] Morel A, Mueller J L. Normalized water-leaving radiance and remote sensing reflectance: bidirectional reflectance and other factors [R]. *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III*, 2003. 32-59.
- [25] Gordon H R, Morel A Y. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review [A]. In: *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*; 4 [M]. New York: Springer Verlag, 1983. 114.
- [26] Babin M, Morel A. Scattering properties of Case 2 water particles [A]. In: *SHE Ocean Optics*; XV [C/CD]. Monaco: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000.
- [27] Herlevi A. Inherent and apparent optical properties in relation to water quality in Nordic Waters [R]. *Report Series in Geophysics*, 2002.
- [28] Ulloa O, Sathyendranath S, Platt T. Effect of the particle-size distribution on the backscattering ratio in seawater [J]. *Appl Opt*, 1994, **33**: 7070-7077.
- [29] Twardowski M, Boss E, Macdonald J B, *et al.* A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters [J]. *J Geophys Res*, 2001, **106**(C7): 14129-14142.
- [30] Chami M, Shybanov E B, Churilova G A, *et al.* Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) [J]. *J Geophys Res*, 2005, **110**(C11): 1-17.
- [31] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [M]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography Ref, 1972. 72-78.
- [32] Kirk J T O. Light & photosynthesis in aquatic ecosystems [M].

Cambridge University Press,1994.

[33]

Whitmire A L, Boss E, Cowles T J, *et al.* Spectral variability of the particulate backscattering ratio [ J ]. *Opt Express*, 2007, **15** ( 11 ):7019-7031.

[34]

马荣华,宋庆君,李国砚,等. 太湖水体的后向散射概率[ J ]. *湖泊科学*,2008,**20**(3):375-379.

[35]

Kevin G R, Vera D C, Park Y J, *et al.* Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters [ J ]. *Limnol Oceanogr*, 2006, **51** ( 2 ): 1167-1179.

[36]

吕恒,江南,罗澈葱. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 A 浓度定量反演[ J ]. *地理科学*. 2006,**26**(4):472-476.

[37]

马荣华,孔繁翔,段洪涛,等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[ J ]. *湖泊科学*,2008,**20**(6):687-694.

[38]

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[ D ]. 北京:中国科学院研究生院,2007.

## 《环境科学》荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号

2009 年 12 月 22 日“第四届中国期刊创新年会”公布了“新中国 60 年有影响力的期刊”评选结果,《环境科学》荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号. 此次评选,全国共有9 000多种参评期刊,最终有 161 种期刊入选. 该评选活动是中国期刊协会、中国出版科学研究所为纪念新中国成立 60 周年,表彰和鼓励在政治、经济、文化、科技和社会发展领域中起到重要作用的期刊而举办的.