

## 环境一号卫星高光谱遥感数据的内陆水质监测适宜性——以巢湖为例\*

王彦飞<sup>1</sup>, 李云梅<sup>1\*\*</sup>, 吕恒<sup>1</sup>, 吴传庆<sup>2</sup>, 金鑫<sup>1</sup>, 尹斌<sup>1</sup>, 张红<sup>1</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: 环境保护部环境卫星应用中心, 北京 100029)

**摘要:** 环境一号星座的 A 星 (HJ-1A) 上搭载了超光谱成像仪 (HSI), 它是具有高光谱分辨率的全新国产遥感数据源, 为水质遥感特别是内陆水质遥感提供了新的高光谱数据。但 HSI 影像的处理方法尚不完善, 在广泛应用于水质遥感前对其进行质量研究和评价非常必要。本文针对 HSI 数据在巢湖水质监测应用方面的适宜性, 对信噪比和数据真实性、倾斜条纹去除方法、大气校正方法等方面分别进行了评价。结果表明, HSI 水体图像在 530–900 nm 波段范围内数据质量较为真实可靠; 6S 与 FLAASH 方法均能有效去除大气效应, 在 530–830 nm 范围内效果较好。

**关键词:** 环境一号; 高光谱; 大气校正; 适宜性评价; 条带去除; 巢湖

## Suitability assessment of lake water quality monitoring on waterbody images acquired by HJ-1A hyperspectral imager: a case study of Lake Chaohu

WANG Yanfei<sup>1</sup>, LI Yunmei<sup>1</sup>, LV Heng<sup>1</sup>, WU Chuanqing<sup>2</sup>, JIN Xin<sup>1</sup>, YIN Bin<sup>1</sup> & ZHANG Hong<sup>1</sup>

(1: *Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Education Ministry, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, P. R. China*)

(2: *Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, P. R. China*)

**Abstract:** The hyperspectral imager (HSI) is loaded on the HJ-1A satellite, which is a new source of home-made data with high spectral resolution and provides new remote sensing data for water quality, especially for lake water quality monitoring. Because the processing method of HSI images is underdeveloped, the quality evaluation and research for HSI images are necessary before it is extensively used in water-quality remote sensing. Suitability of lake water quality monitoring in Lake Chaohu by HSI image is assessed via data verifying, signal-to-noise computing, stripes removing and atmospheric correcting. The results show that HSI data of waterbody is reliable between wave bands 530–900 nm. Both 6S and FLAASH algorithm works well in atmospheric correction of HSI data, and the best range is at the 530–830 nm.

**Keywords:** HJ-1A satellite; hyperspectral; atmospheric correction; suitability assessment; stripe removing; Lake Chaohu

目前在内陆水环境遥感中应用的主要是多光谱数据, 高光谱数据如 AVIRIS、OMIS、CHRIS、Hyperion 等, 存在着价格昂贵、幅宽窄、返回周期长等问题, 难以在常规的水质监测中应用。“环境一号”星座 A 星搭载的“超光谱成像仪 (HSI)”, 在工作谱段 0.45–0.95  $\mu\text{m}$  之间拥有 115 个波段, 平均光谱分辨率为 5 nm, 空间分辨率为 100 m, 幅宽大于 50  $\times$  50  $\text{km}^2$ , 是目前比较先进的高光谱传感器。其能获取的光谱信息非常丰富, 重访周期、幅宽等也可满足内陆湖泊水质遥感需求, 加上能与同星搭载的多光谱传感器同步获取数据, 因此 HSI 数据应用于水质遥感监测具有独特的优势。

HSI 是空间调制型傅立叶变换高光谱成像仪, 其成像原理等与普通 CCD 相机不同<sup>[1,2]</sup>, 就目前看, 其图

\* 国家自然科学基金项目 (40971215)、博士点基金 (20093207110011) 和南京师范大学优秀博士论文培养计划 (12432116011036) 联合资助。2010-09-08 收稿; 2010-12-26 收修稿。王彦飞, 男, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: wyf06-01@163.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn.

像应用于水色遥感主要面临的问题不仅包括不易确定质量稳定的水色波段、条纹噪音大等,而且更重要的是大气校正问题能否得到解决.在水体影像中,大气影响通常超过 80%,水体信息是弱信号<sup>[3-4]</sup>,因此要实现水色要素的定量反演,需要大气校正来除去水体影像中大气的影.目前大气校正的方法主要分为基于统计学的方法和基于物理的辐射传输模型法<sup>[5-6]</sup>.基于统计学的方法不需要大气参数和几何条件,简单易行,但是精度受限于影像上的特征地物的选择,无法得到真实反射率用于定量遥感;而辐射传输模型计算反射率需要较多的大气参数和几何条件,但能精确地消除大气的影响,更适合水色遥感定量反演.常用的辐射传输模型有 6S<sup>[7]</sup>和 MODTRAN<sup>[8]</sup>,以及基于 MODTRAN 的 ACORN<sup>[9]</sup>、ATREM<sup>[10]</sup>、FLAASH<sup>[11-12]</sup>等.应用这些模型方法对环境卫星高光谱影像做大气校正的效果如何,尚需要进行研究评价.

本文以一景巢湖环境一号高光谱影像为研究对象,进行信噪比估算,数据真实性和条纹噪音剔除方法评价,并将 6S 和 FLAASH 两种方法进行大气校正后的光谱与实测光谱做对比评价,以期研究结果能为环境一号卫星高光谱数据在水质遥感监测应用方面提供借鉴.

## 1 数据获取

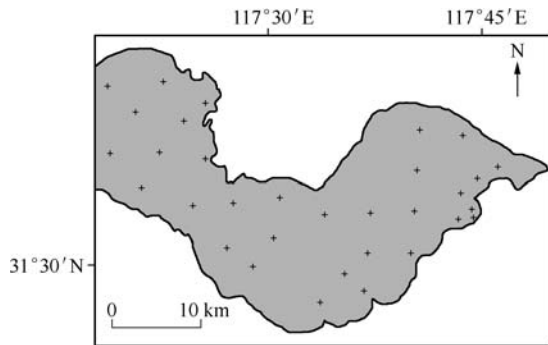


图 1 巢湖采样点点位(+为样点)

Fig. 1 Monitoring stations of Lake Chaohu  
(+ is sample station)

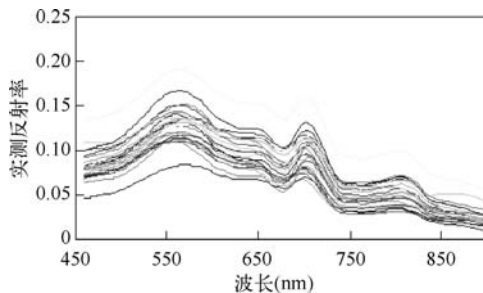


图 2 采样点重采样后的光谱曲线

Fig. 2 Field spectra of water surface resampled  
to HSI bands

本文的研究区是位于安徽省中部的巢湖,是富营养化严重的大型湖泊,属 II 类水体.2009 年 6 月 13-17 日在巢湖进行了星地同步实验,同步获取了卫星影像和地面实测光谱数据.获取的同步影像是 2009 年 6 月 13 日巢湖地区的环境一号超光谱(HSI)数据,从环保部卫星环境应用中心获取,格林尼治时间 2:52 成像.在使用前先进行了预处理,使用给定的定标系数做辐射定标,以经过几何校正的 TM 影像为参考影像进行几何精校正,纠正后几何误差小于 1 个像元.

地面实测数据使用 ASD 公司的 FieldSpec HandHeld 野外光谱辐射仪获取,其光谱范围为 350-1075 nm,光谱数据间隔为 1 nm;地面采样共布设 32 个样点(图 1),采样时间集中在 10:00-14:00,采样时间内巢湖地区天气稳定,无大风浪,水质变化较小.水面光谱数据采集与处理采用的是“水面以上测量”<sup>[13]</sup>,然后转换为地物反射率<sup>[14]</sup>.图 2 是按照 HSI 的波段设置重新采样后得到的实测反射率光谱.

## 2 HSI 水体图像数据成像质量评价

HSI 水体图像数据的真实性、稳定性等直接影响到其在水质遥感方面的应用能力,因此就 HSI 数据质量进行评价研究非常有必要,下面将从信噪比、数据真实性和条带噪音去除方面进行评价研究.

### 2.1 基于图像自身的信噪比估算评价

HSI 高光谱数据波段划分较细,每个波段的信噪比均不同,对图像质量造成的影响也不一样,本文在巢湖研究区选取了一片较均匀的水体,用以估算 HSI 水体图像各波段的信噪比.从水体图像的成像原理看,在湖心一个小范围内,无其他地物的干扰,可以认为在此小区域内的水体都是均匀的,因此临近像元的离水辐亮度应当较一致.而图像中的噪音一般是随机分布的,会造成图像上邻近像元间的辐亮度差异.换言之,如

果地物均一区域的图像辐亮度变化较大,则意味着图像含有的噪音较大,图像不稳定.基于以上分析,本文引入变异系数来评价不同波段图像辐亮度的稳定程度<sup>[16]</sup>,定义为标准差与平均值之比:

$$Stdev = \left( \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right) / n \quad (1)$$

$$C \times V = (Stdev \times 100\%) / \bar{X} \quad (2)$$

式中, $C \times V$ 为变异系数, $Stdev$ 为图像辐亮度标准差, $X_i$ 为图像上每点的辐亮度, $\bar{X}$ 为图像辐亮度的平均值, $n$ 为样本个数,在此, $n = 8051$ .变异系数是表征离散分布程度的一个归一化量度,能够比较高光谱数据中平均值不同的各波段的变化程度.

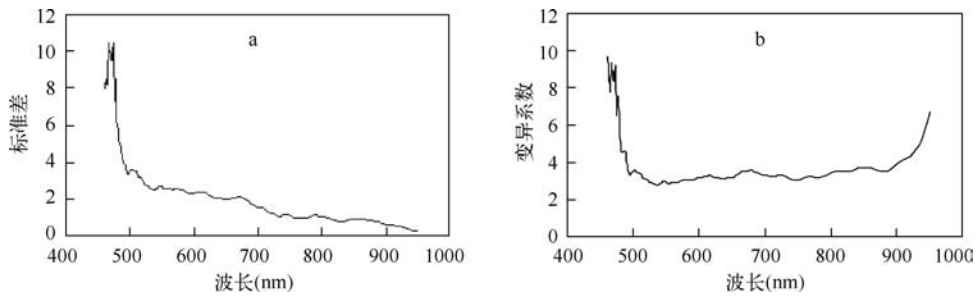


图3 HSI 水体图像中选定区域的标准差(a)与变异系数(b)

Fig.3 Standard deviation(a) and coefficient of variation(b) of the special area of HSI image

从图3a看出,随波段增长,标准差逐渐减小,在530 nm以后变得平缓,这意味着图像辐亮度绝对数值的变化随波段增加而逐渐减小.但变异系数的大小更能表征平均值不相同的各波段的相对变化,表征图像的“稳定性”.530 nm以前和900 nm以后的波段变异系数分别增大至7和5(图3b),因此可以认为这些波段的图像辐亮度不稳定,变化较大,说明噪音也在快速增加,这与辐射传输模拟对比分析中得到的误差范围相印证,说明在蓝紫光波段散射严重、水体反射率较低,图像质量偏低,应用于水色遥感会有较大误差<sup>[17]</sup>.总体认为,环境卫星高光谱影像中530-900 nm波段数据较稳定,530 nm以前与900 nm以后波段图像不稳定,信噪比偏低.

### 2.2 与辐射传输模拟数据的对比分析

HSI 光谱仪采用傅立叶干涉方式成像,这种成像方式与普通的光栅成像方式不同,辐射定标较难、精度偏低<sup>[15]</sup>.因此本文首先比较图像辐亮度与用实测数据模拟的辐亮度,检验其水体影像数据的真实性,质量是否适合于水质参数的定量反演.利用在研究区采集的地面实测数据,经过6S辐射传输模型计算模拟出32个采样点的在星表观辐亮度<sup>[7]</sup>,参数设置见表1.

表1 大气校正的参数设置

Tab.1 Parameters of the atmospheric correction

| 传感器高度  | 地面高程 | 像元大小  | 日期时间           | 大气模型  | 气溶胶模型 | 能见度    |
|--------|------|-------|----------------|-------|-------|--------|
| 650 km | 7 m  | 100 m | 2009.6.13 2:52 | 中纬度夏季 | Rural | 4.6 km |

为了分析 HSI 图像辐亮度真实性,选择最接近图像成像时刻的采样点,将6S辐射传输模型模拟辐亮度与图像导出的辐亮度相对比,结果如图4a;所有32个样点的模拟辐亮度与影像上对应样点辐亮度的相关系数分布频率如图4b.

比较准同步点的图像光谱与模拟光谱,二者形态非常相近,数值相差不大.所有样点 HSI 图像辐亮度光谱与模拟辐亮度光谱在所有波段范围内的相关系数频率分布如图4b,平均相关系数达到0.985.参照信噪比估算时的波段范围,分段计算模拟辐亮度与影像上对应点辐亮度的相关系数,在530 nm以前波段模拟辐亮

度与图像辐亮度的相关系数是 0.24, 530–900 nm 波段范围是 0.99, 900 nm 后波段范围是 0.90. 从谱形和相关系数两方面来看, HSI 数据整体上反映了水体光谱特点并与理论计算数据很相近, 真实性较高.

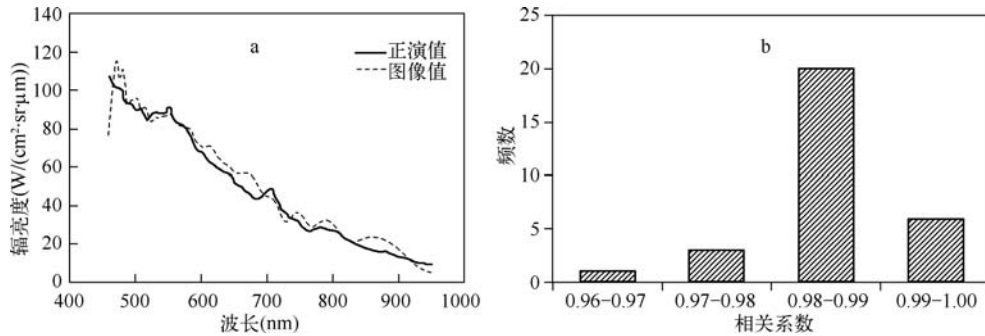


图 4 准同步点模拟辐亮度与影像辐亮度(a), 所有样点相关关系频率分布(b)

Fig. 4 Simulated radiance and corresponding radiance of HSI image(a), frequency distribution of correlation coefficient between simulated and image radiance(b)

### 2.3 条带噪声去除方法评价

HSI 水体图像存在明显的条带噪声, 其产生的可能原因是光谱成像仪 CCD 焦平面探测器各像元对光强和光谱响应度存在多种不均匀性以及系统内定标的一些微小错误等<sup>[18]</sup>. HSI 水体图像条带噪声在蓝光波段条纹尤其严重, 随着波长的增加条纹现象逐渐减弱. 条带噪声的存在降低了 HSI 图像精度, 干扰了地物应有的纹理信息, 给后续处理带来了极大的不便. 因此, 寻找适用的条带噪声消除方法是 HSI 图像应用的前提.

从 HSI 影像上看, 图像中的倾斜条纹以固定的间隔出现, 属于高频信息, 水体呈面状则是低频信息. 据此特点可以考虑采用傅立叶变换的方法将 HSI 图像转换成频率域图像, 分别提取条纹和水体信息. 为了减少运算步骤和节省时间, 采用快速傅立叶变换方法(FFT)消除条纹: 首先采用 FFT 方法把图像转换为一系列不同频率的二维的正弦、余弦波<sup>[19]</sup>; 在生成的傅立叶图像中, 利用信号与噪声占有不同的频率成分来设计滤波器消除噪声; 再经过反变换就得到已消除条纹的空间域图像.

目前 FFT 变换在一些商业遥感软件中已经内置, 本文选用的是 ENVI 中的 FFT 模块. 将上述 FFT 的方法应用于本次获取的高光谱影像的条纹去除, 效果如图 5 所示, 原图像中的倾斜于图像的粗条纹已经去除, 表明傅立叶方法在不破坏原有低频信息(水体)的条件下, 能够有效过滤掉高频信息(条纹), HSI 图像基本恢复了应有的纹理信息.

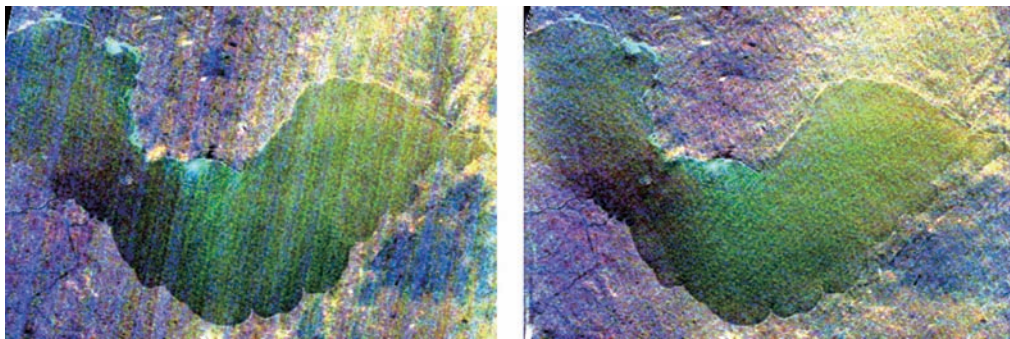


图 5 去除条纹前后的图像对比

Fig. 5 Comparison of images before and after remove stripes

### 3 大气校正及评价

#### 3.1 大气校正方法

高光谱数据用于地表参量定量分析,大气校正是非常重要的步骤.对于水色遥感而言,利用高光谱影像反演水质参数的精度很大程度上取决于遥感图像大气校正的精度,尤其当信噪比较低时,大气校正的细微误差都可能会对结果造成较大影响.本文选用两种典型的辐射传输模型软件——基于6S模型的大气校正软件和基于MODTRAN模型的FLAASH来对HSI水体图像进行大气校正评价.

6S大气辐射传输模型能对0.25–4.0 μm的波段范围进行大气校正.本研究使用自主编写的针对HSI数据处理内嵌6S大气校正模型的软件完成大气校正,其中主要参数的设置如表1.

FLAASH是一个从高光谱辐亮度影像计算地物反射率的大气校正工具,可精确地弥补大气效应.FLAASH嵌入了MODTRAN4辐射传输代码,可以为影像选择标准MODTRAN模型大气和气溶胶类型进行大气校正.FLAASH也包括临近像元效应校正、计算影像的平均能见度和云分类图以及波谱平滑,可对高光谱和多光谱传感器数据进行校正.如果影像包含合适波长的波段,水汽和气溶胶也可以提取<sup>[20]</sup>.而且,FLAASH能校正倾斜观测条件获取的影像,适合水色传感器的倾斜测量大气校正.

FLAASH大气校正的大气参数等与6S使用相同的设置(表1),FLAASH中Modtran参数见表2.

表2 FLAASH中使用的Modtran参数  
Tab.2 Modtran parameters of FLAASH model

| 气溶胶 Scale 高度 | CO <sub>2</sub> 混合比例 | Modtran 分辨率        | 多次散射模型         | DISCORT 流数量 | 斜视                    |
|--------------|----------------------|--------------------|----------------|-------------|-----------------------|
| 2 km         | 390 mg/kg            | 5 cm <sup>-1</sup> | Scaled DISCORT | 8           | 天顶 159.5°<br>方位角 7.8° |

高光谱数据大气校正后通常还需进行平滑处理,消除校正过程造成的噪声<sup>[21]</sup>.因此,在FLAASH中将光谱平滑设置为7波段平滑,同时也对6S模型校正的光谱进行同样处理.

#### 3.2 大气校正水体光谱比较与分析

各种地物在高光谱影像中都有独特的“谱”,大气校正能够去除高光谱影像中大气的干扰,恢复图像中地物本身的光谱,下面将大气校正后的水体高光谱影像上得到的反射率光谱与水面实地测量得到的光谱进行比较分析来评价大气校正效果.采样点中能与影像成像时间准同步(±1 h)的仅一点,对此准同步点经过6S和FLAASH大气校正后的光谱曲线与同步测量的光谱曲线比较如图6.

两种方法大气校正后的图像光谱曲线与实测光谱曲线趋势上都较为一致,FLAASH校正后的光谱在细节上与实际光谱更为相近(图6).II类水体反射率在蓝光波段较低,悬浮物光谱反射率在550–700 nm和760–820 nm出现双峰<sup>[22]</sup>,近红外波段由于水体吸收造成的低反射率等基

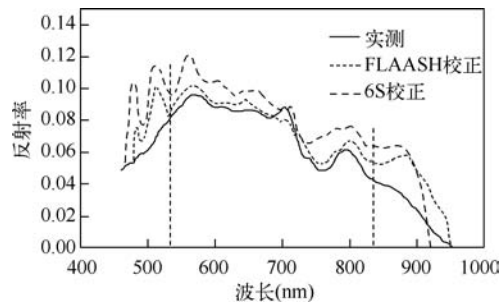


图6 实测光谱与6S和FLAASH校正后的结果对比

Fig.6 Comparison between measured and retrieved spectra by 6S and FLAASH

表3 HSI大气校正后光谱与实测光谱的相关系数  
Tab.3 Correlation coefficients(R) between corrected HSI spectra and the field measured spectra

| 波段         | 大气校正方法 | 最小值  | 最大值  | 平均值  |
|------------|--------|------|------|------|
| 460–930 nm | FLAASH | 0.68 | 0.89 | 0.79 |
|            | 6S     | 0.64 | 0.85 | 0.76 |
| 530–830 nm | FLAASH | 0.69 | 0.97 | 0.92 |
|            | 6S     | 0.73 | 0.97 | 0.91 |
| 460–530 nm | FLAASH | 0.27 | 0.79 | 0.62 |
|            | 6S     | 0.36 | 0.73 | 0.57 |
| 830–950 nm | FLAASH | 0.35 | 0.90 | 0.46 |
|            | 6S     | 0.74 | 0.90 | 0.83 |

本趋势在校正后的光谱中都得到了体现,足以反映Ⅱ类水体光谱的基本特征.两种方法大气校正后都做了波段平滑消除锯齿噪音,因此Ⅱ类水体的特征如700 nm附近反射峰等较窄的特征峰谷有时会被平滑掉,变得不够明显.

为比较两种大气校正方法所得的水面反射率光谱与水体实测光谱谱形上的相似性,计算所有样点的相关系数.根据数据稳定性和参照校正后的光谱曲线的差别,将HSI全波谱分为三个区间.用相关系数来表明真实的反射率光谱与HSI大气校正后的反射率光谱的相似性,计算出光谱之间的相关系数后,分别求出其最小值、最大值、平均值(表3).

综合比较,可以看到HSI数据在530-830 nm区间光谱形态符合的较好,校正后的结果与实测值相关性也较高,两种方法相关系数分别达到0.91和0.92,说明此区间校正效果较好;530 nm以前光谱趋势与实测明显不符,相关系数只有0.62左右,此区间HSI水体图像定标存在一定误差<sup>[23]</sup>且瑞利散射严重<sup>[5]</sup>,水体光谱信号弱,所以大气校正后的光谱曲线与实测相差较大,精度不高;830 nm之后两种方法的相关系数平均值分别是0.46和0.83,这是因为水体在近红外强烈吸收导致图像上水体辐亮度所占比例很低,大气校正过程中的很小不同就会造成结果的较大差异.根据水体各组分的光谱特征<sup>[22]</sup>,水色遥感中常用的波段通常是绿光到近红外,而本研究中水体图像校正质量较高的波段范围(530-830 nm)包含了Ⅱ类水体的各个特征区间,在此区间内HSI大气校正光谱与实测光谱形态相近,相关系数较高,能够较好的反映Ⅱ类水体的特征.

#### 4 结论

环境一号HSI数据的高光谱分辨率,是用于水质监测的宝贵的数据源.本文以环境一号HSI水体图像为研究对象,进行了信噪比和真实性评价、条纹剔除方法评价和大气校正评价等,对于促进该数据在水质监测等方面的应用有一定意义.研究结果认为,HSI水体影像在530-900 nm范围内质量较为真实可靠,在530-830 nm范围内大气校正效果较好,具体如下:

(1) 根据辐射传输模拟对比和图像信噪比估算,图像辐亮度在530-900 nm之间与模拟结果相关系数均在0.98以上,变异系数平均为3,数据质量较稳定可靠;530 nm之前与900 nm之后,二者趋势不相符,变异系数快速增大至7和5,意味着数据不稳定,噪音较多;结合已有研究<sup>[16]</sup>认为HSI水体图像在530-900 nm波段范围辐射数据质量较真实.

(2) 使用傅立叶变换可以有效分解HSI图像的高频和低频信息,去除HSI图像严重的倾斜条带噪音,经过FFT处理的影像,可用于水质遥感应用.

(3) 利用6S和FLAASH校正得到的反射率光谱都与实测光谱谱形相似,530-830 nm之间校正结果较好,平均相关系数分别达到0.91和0.92,而此区间正是水色遥感常用波段,较适用于水色遥感的定量反演.相比而言,FLAASH具有更高的处理效率,校正结果更接近实测光谱,更适宜于HSI图像的大气校正.

#### 5 参考文献

- [1] 相里斌,王忠厚,刘学斌等. “环境与灾害监测预报小卫星”高光谱成像仪. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 257-262.
- [2] 赵祥,陆婧,宫阿都等. HJ-1A星干涉成像光谱仪数据业务化光谱重建. 科学通报, 2010, 55(7): 610-617.
- [3] 李刚,刘铁根. 水色遥感大气校正方程的研究进展. 海洋技术, 2007, 26(3): 64-69.
- [4] 潘德炉,马荣华. 湖泊水质遥感的几个关键问题. 湖泊科学, 2008, 20(2): 140-143.
- [5] 申茜,张兵,李俊生等. 航天高光谱传感器CHRIS的水体图像大气校正. 测绘学报, 2008, 37(4): 476-481.
- [6] Liang SL. Quantitative Remote Sensing of Land Surface. Hoboken: John Wiley and Sons Inc, 2004: 196.
- [7] Vermote E, Tanre D, Deuze J L et al. 6s User Guide, Version 2, 1997.
- [8] Erk A, Anderson GP, Acharya PK et al. MODTRAN 4 use's manual. Air Force Research Laboratory, USA, 1999.
- [9] CACI. ACORN User Guide 2005 ([http://downloads.postcodeanywhere.co.uk/pdf/acorn\\_user\\_guide.pdf](http://downloads.postcodeanywhere.co.uk/pdf/acorn_user_guide.pdf)).
- [10] Boardman JW. Post-ATREM Polishing of AVIRIS Apparent Reflectance Data Using EFFORT: A Lesson in Accuracy Versus Precision. Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop. Bruges: JPL Publication, 1998: 97-121.
- [11] Matthew MW, Adler-golden SM, Berk A et al. Atmospheric Correction of Spectral Imagery: Evaluation of the FLAASH

- Algorithm with AVIRIS Data. SPIE Proceeding of Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX, 2003: 474-482.
- [12] Research Systems, Inc. FLAASH Module User's Guide, ENV I FLAASH Version 412, August, 2005.
- [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] 丁 静. 基于神经网络的二类水体大气修正与水色要素反演[学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2004: 82.
- [15] 姚乐乐, 赵 卫, 范士明. 空间调制光谱成像仪相对辐射校正方法研究. 中国空间科学技术, 2009, **29**(5): 48-53.
- [16] 张应华, 刘先省, 王 娟. 基于变异系数的多传感器数据判别方法. 河南大学学报(自然科学版), 2007, **37**(2): 188-200.
- [17] 徐希孺主编. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005: 231.
- [18] 常威威, 郭 雷, 刘 坤. OMIS 图像条带噪音消除方法研究. 光子学报, 2007, **36**(11): 2148-2152.
- [19] 韦玉春. 遥感数字图像处理教程. 北京: 科学出版社, 2007: 129.
- [20] 袁金国, 牛 铮, 王锡平. 基于 FLAASH 的 Hyperion 高光谱影像大气校正. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(5): 1181-1185.
- [21] 万庆宇, 谭克龙, 周日平等. 高光谱遥感应用研究. 北京: 科学出版社, 2006: 83.
- [22] 王 桥, 张 兵, 韦玉春等. 太湖水体环境遥感监测试验及其软件实现. 北京: 科学出版社, 2008: 116-117.
- [23] 高海亮, 顾行发, 余 涛等. 超光谱成像仪在轨辐射定标及不确定性分析. 光子学报, 2009, **38**(11): 2826-2833.