

基于太湖气溶胶类型分区的环境一号卫星 CCD 大气校正*

金鑫¹, 李云梅^{1**}, 王桥², 王彦飞¹, 尹斌¹, 张红¹, 吴传庆²

(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: 由两颗卫星组成的环境卫星星座系统所提供的 CCD 数据具有较高的时间分辨率, 使其在内陆湖泊水环境遥感监测中具有较大的应用潜力, 对其有效的大气校正方法的研究则是其定量化参数反演的前提。基于准同步的 MODIS 数据辅助, 根据气溶胶的差异性, 将太湖划分为北部湖区、其他湖区两块区域, 利用辐射传输模型, 研究太湖环境一号 CCD 数据大气校正的方法, 并对 2009 年 4 月 17、21、25 日数据进行大气校正。研究结果表明, 该大气校正方法直接使用较为成熟的 MODIS 各类产品, 克服了传统大气校正中依赖于现场同步测量大气参数的缺陷, 能够快速、有效地完成环境一号 CCD 数据的大气校正。基于气溶胶类型对太湖进行分区后, 所求算的遥感反射率精度高于 6S 模型和暗像元等大气校正方法得到的结果。

关键词: 环境一号卫星 CCD; 大气校正; MODIS; 气溶胶类型分区; 太湖

Atmospheric correction of satellite HJ-1 CCD image based on aerosol distribution in Lake Taihu

JIN Xin¹, LI Yunmei¹, WANG Qiao², WANG Yanfei¹, YIN Bin¹, ZHANG Hong¹ & WU Chuanqing²

(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: HJ-1 satellite system has two optical CCD sensors, which can support real-time data for environment monitoring because of its high temporal resolution, so that there is great potential in inverting inland lake water quality parameters by this system. To effectively monitoring water quality by CCD images, corresponding methods on atmospheric correction should be developed. Using quasi-synchronous MODIS images as an ancillary datum, Lake Taihu was divided into two parts, that is, northern part and the other part. Then, radiative transfer model was used to develop the atmospheric correction method for satellite HJ-1 CCD images. The satellite HJ-1 CCD images on April 17th, 21st, and 25th of 2009 were processed through this atmospheric correction method. Result shows that this method that is no longer depending on simultaneous measurement of atmospheric parameters, has overcome the defects of traditional atmosphere corrections by directly using MODIS products. Satellite HJ-1 CCD image data can be processed more quickly and efficiently by this method. Devised by aerosol types, the corrected remote sensing reflectance is more accurate than that by using other methods such as 6S model and dark-object method.

Keywords: Satellite HJ-1 CCD; atmospheric correction; MODIS; aerosol distribution; Lake Taihu

2008 年 9 月成功发射的环境一号 A、B 卫星都搭载了多光谱 CCD 相机, 其幅宽 360km (HJ-1A、HJ-1B 两台组合 ≥ 700 km), 空间分辨率 30m, 波段范围 0.43 - 0.52 μm (Band1)、0.52 - 0.60 μm (Band2)、0.63 - 0.69 μm (Band3)、0.76 - 0.90 μm (Band4), 轨道高度 650km, 卫星过境时间 10:30AM, 重返周期 2d, 大致类似于美国 Landsat TM 研究表明^[1-2], 此波段设置能应用于内陆水环境遥感监测。而环境一号卫星的幅宽更

* 国家科技支撑计划“十一五”项目“基于环境一号等国产卫星的大型水体环境遥感监测应用技术与软件研发”(2008BAC34B05)和国家自然科学基金项目“面向湖泊水色遥感的多源数据融合与生成研究”(40971215)联合资助。2009-08-04 收稿; 2010-01-13 收修改稿。金鑫, 男, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: jinxin1986@163.com.

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

大,可以实现更大范围的环境监测;且由两颗卫星组成的星座系统大大提高了遥感数据的时间分辨率.因此,环境一号 CCD 数据在内陆和近岸二类水体的水环境监测中具有更大潜力.

但在水色遥感中,传感器所记录的信号 90% 左右是由大气散射等原因造成的^[3],因此要实现在水体各组分精确反演,必须进行有效的大气校正.国内外学者针对水体的大气校正已经进行了大量的研究,1978 年,Gordon 等首次提出了水色遥感大气校正的基本思想,1980 年 Gordon 清洁水体的标准算法被用于 CZCS 影像处理中,后来该算法不断改进,由单次散射发展为多次散射,已经被成功用于大洋一类水体 SeaWiFS 和 MODIS 数据的大气校正中,其反演误差小于 5%^[4,8];唐军武等^[3]基于清洁水体目标利用 MODIS 数据对 CBERS 数据进行了交叉辐射校正,为 CBERS 数据水体定量化遥感应用提供了技术基础.李俊生等^[9]改进了 Gordon 水色遥感大气校正算法,提出了一种基于同步 MODIS 数据辅助的 CBERS 数据内陆水体大气校正算法,也取得了比较好的效果.王海君^[10]利用 6S 辐射传输模型、暗像元、基于 Gordon 大气校正模型的改进算法等多种方法对太湖地区 TM 数据进行大气校正,并评价了各种方法的优劣.由于环境一号于 2008 年 9 月发射,因此,目前还没有专门针对该卫星数据的内陆水体大气校正研究成果发表.此外,前人的研究大多假设整个研究区上空的气溶胶是一致的,但是,太湖地区受陆源因素影响导致气溶胶散射差异性较大,基于整个湖区气溶胶均匀分布的假设不一定合理.因此,本研究将太湖划分为北部湖区以及其他湖区,并利用 MODIS(Terra,下同)数据辅助进行环境一号 CCD 数据的大气校正,以提高大气校正精度.

1 算法原理

Gordon 多次散射算法要求对研究区可能的气溶胶类型有一定的了解,并且建立气溶胶类型查找表.但是,由于缺乏内陆湖泊水体上空气溶胶类型方面的长期监测数据,目前还不可能建立太湖上空气溶胶类型查找表,因此本研究不考虑大气分子与气溶胶之间的相互作用,是在 Gordon 瑞利单次散射的基础上进行近似计算的^[7].在水体-大气系统条件下,卫星遥感器接收到的总信号 $L_t(\lambda)$ 为:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + TL_g(\lambda) + tL_{wc}(\lambda) + tL_w(\lambda) + tL_b(\lambda) \quad (1)$$

式中, $L_r(\lambda)$ 为大气分子瑞利散射, $L_a(\lambda)$ 为大气分子气溶胶散射, $L_g(\lambda)$ 为太阳耀斑辐射, $L_{wc}(\lambda)$ 为白帽辐射, $L_w(\lambda)$ 为离水辐亮度, $L_b(\lambda)$ 为来自水底的反射辐射, t 为大气漫射透过率, T 为大气直射透过率.

在靠近太阳耀斑区域, $TL_g(\lambda)$ 这一项的值非常大且受波浪的随机波动影响,难以准确计算,因而实际上这一块图像数据是无效的;在远离太阳耀斑的区域, $TL_g(\lambda)$ 的值非常小可以忽略^[3].对于从天顶方向观测获得的遥感影像数据,当数据中没有突变值时,可以忽略太阳耀斑的影响.此外,对于较浑浊的二类水体而言,来自底部的反射辐射率可以忽略不计^[10].因此,当不考虑太阳耀斑以及底质影响时,卫星接收到的总辐亮度为^[3]:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + tL_{wc}(\lambda) + tL_w(\lambda) \quad (2)$$

其中,瑞利散射 $L_r(\lambda)$ 在 Gordon 业务化算法中已经得到比较精确的结果,可按式(3)近似计算:

$$L_r(\lambda) = \frac{1}{4\pi\mu} (F_0(\lambda) \times t_{o_3}(\lambda) \times \tau_r(\lambda)) \times [P_r(\psi_\perp) + (\rho(\mu) + \rho(\mu_0)) \times P_r(\psi_\parallel)] \quad (3)$$

式中, $F_0(\lambda)$ 为大气层外太阳辐照度; $t_{o_3}(\lambda)$ 为臭氧吸收后的透过率,与臭氧层光学厚度有关; $\tau_r(\lambda)$ 为大气瑞利光学厚度,与实地大气压有关; $P_r(\psi_\perp)$ 和 $P_r(\psi_\parallel)$ 分别为入射光与反射光的瑞利相位函数,两者与太阳及卫星的天顶角、方位角有关; ρ 为非涅耳反射率,与水体的折射率有关; μ 为卫星天顶角的余弦; μ_0 是指太阳天顶角的余弦.

湖面泡沫产生的白帽辐射 $L_{wc}(\lambda)$ 可按式(4)近似计算^[11]:

$$L_{wc}(\lambda) = \rho_{wc} F_0(\lambda) \cos\theta_0 t_0(\lambda) / \pi \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{当 } W = 4\text{m/s 时, } \rho_{wc} = 0 \\ \text{当 } 4 < W \leq 7\text{m/s 时, } \rho_{wc} = 2.2 \times 10^{-5} \times 1.2 \times 10^3 \times (0.62 + 1.56 \times W^{-1}) \times 10^{-3} \times W^2 - 4 \times 10^{-4} \end{cases}$$

式中, ρ_{wc} 为白帽反射率, θ_0 为太阳天顶角, W 为风速, t_0 为太阳方向的漫射透射率, 与瑞利光学厚度及臭氧光学厚度有关.

对于 CCD 相机的多波段数据, 大气漫射透射率(t) 主要受大气分子散射、臭氧吸收等因素的影响^[3], 可按式(5)计算:

$$t = t_r \times t_o, \quad (5)$$

其中, t_r 为大气分子散射的透射率, 与大气的瑞利光学厚度有关; t_o 为臭氧吸收的透射率, 与臭氧光学厚度有关.

对于大洋一类水体, Gordon 假设 MODIS 近红外波段第 15 波段 (744 - 755nm) 和第 16 波段 (857 - 872nm) 对应的离水辐亮度为 0. 而太湖水体的光学特性不仅受到叶绿素 a 的影响, 而且受到悬浮物和黄色物质的影响. 在近红外波长区域, 叶绿素 a 和黄色物质的吸收系数近似为 0, 但叶绿素 a 和悬浮物的后向散射系数大于 0, 而且随着波长的增长缓慢减小, 就使得太湖水体在近红外波段的离水辐亮度大于 0. 因此认为 Gordon 关于大洋一类水体的假设不适用于太湖水体. 而在短波红外波长区域, 叶绿素 a 和悬浮物的后向散射系数已经非常小, 除非水体中悬浮物或叶绿素 a 的浓度极高, 否则可以认为短波红外波长区域的太湖水体的离水辐亮度为 0, 即认为没有大气影响时, MODIS 第 5 (1230 - 1250nm) 和第 6 (1628 - 1652nm) 波段的太湖水体的离水辐亮度为 0 (图 1), 而在 1350 - 1400nm、1830 - 1930nm 之间, 由于噪声的影响, 使得离水辐亮度在这两部分出现较大的峰值.

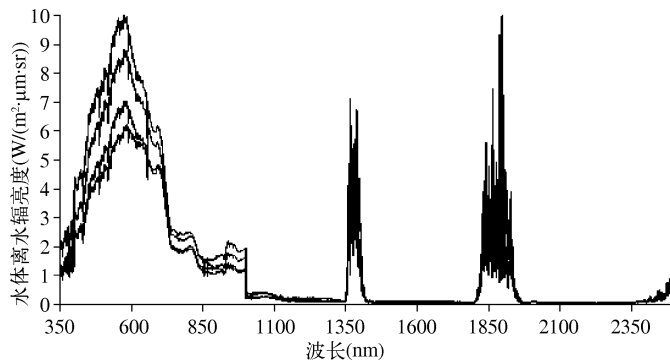


图 1 实测太湖水体离水辐亮度

Fig. 1 Water-leaving radiance of Lake Taihu measured *in situ*

利用 MODIS 第 5、6 波段的辐亮度数据, 可以计算得到气溶胶类型参数 n , 并计算环境一号 CCD 数据各波段气溶胶光学厚度以及气溶胶散射辐射量.

本研究中获取的 MODIS 和环境一号 CCD 数据的成像时间相差大致在半小时之内, 因而假设环境一号 CCD 数据的气溶胶类型在小范围内不变, 因此气溶胶散射相函数和单次散射反照率随波长的变化不大, 由单次气溶胶辐亮度公式, 两个波段气溶胶散射之比近似为:

$$\frac{L_a(\lambda_i)}{L_a(\lambda_j)} = \frac{F'_0(\lambda_i)\tau_a(\lambda_i)}{F'_0(\lambda_j)\tau_a(\lambda_j)} \quad (6)$$

其中, $F'_0(\lambda)$ 为经过臭氧吸收订正的大气层外太阳辐照度, 与臭氧层光学厚度有关. 令 $\varepsilon(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\tau_a(\lambda_i)}{\tau_a(\lambda_j)}$, 则:

$$\frac{L_a(\lambda_i)F'_0(\lambda_j)}{L_a(\lambda_j)F'_0(\lambda_i)} = \varepsilon(\lambda_i, \lambda_j) \quad (7)$$

对于某一气溶胶类型而言, $\varepsilon(\lambda_i, \lambda_j)$ 近似为常数, 根据大量气溶胶观测的结果, 在气溶胶粒子的 Junge

谱假设条件下,一个合理的假设是 $\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-n}$,则:

$$\varepsilon(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\tau_a(\lambda_i)}{\tau_a(\lambda_j)} = \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i}\right)^n \quad (8)$$

因此,只要知道两个波段的 $L_a(\lambda_i)$ 和 $L_a(\lambda_j)$,便可以求算气溶胶类型参数 n .

假设在比较清洁的水体, $L_w(\lambda_{1240}) \approx 0, L_w(\lambda_{1640}) \approx 0, L_r(\lambda_{1240})$ 和 $L_r(\lambda_{1640})$ 已知,且忽略水面直接反射,白帽影响已修正,则:

$$L_a(\lambda_{1240}) = L_t(\lambda_{1240}) - L_r(\lambda_{1240}) - tL_{wc}(\lambda_{1240}) \quad (9)$$

同理可得,
$$L_a(\lambda_{1640}) = L_t(\lambda_{1640}) - L_r(\lambda_{1640}) - tL_{wc}(\lambda_{1640}) \quad (10)$$

其中, $L_t(\lambda)$ 从 MODIS 数据上直接读取, $L_r(\lambda), L_{wc}(\lambda)$ 根据式(3)、式(4)近似计算,从而可以得到气溶胶类型参数 n :

$$n = \ln \frac{L_a(\lambda_{1240}) F_0'(\lambda_{1640})}{L_a(\lambda_{1640}) F_0'(\lambda_{1240})} / \ln \left(\frac{\lambda_{1640}}{\lambda_{1240}} \right) \quad (11)$$

将环境一号 CCD 数据各波段的等效波长以及臭氧修正的大气顶层辐照度数据代入式(12),从而得到环境一号 CCD 数据各波段对应的气溶胶散射:

$$L_a(\lambda_i) = L_a(\lambda_{1240}) \varepsilon(\lambda_i, \lambda_{1240}) F_0'(i) / F_0'(\lambda_{1240}) \quad (12)$$

则水面离水辐亮度可由式(13)计算:

$$L_w(\lambda) = \frac{L_t(\lambda) - L_r(\lambda) - L_a(\lambda) - tL_{wc}(\lambda)}{t} \quad (13)$$

进而计算得到水色要素反演算法常用的归一化离水辐亮度 L_{wn} :

$$L_{wn}(\lambda) = L_w(\lambda) / [t_0(\lambda) \cos \theta_0] \quad (14)$$

则遥感反射比 R_{rs} :

$$R_{rs}(\lambda) = L_{wn}(\lambda) / \bar{F}_0 \quad (15)$$

同步 MODIS 数据辅助的环境一号 CCD 数据大气校正流程见图 2.

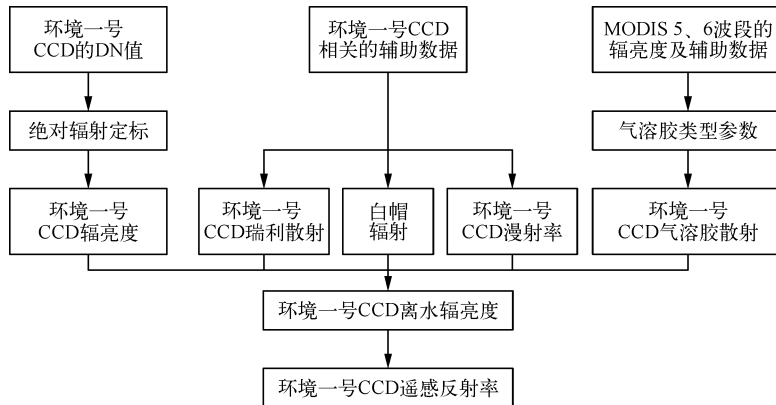


图 2 环境一号 CCD 数据太湖水体大气校正技术流程

Fig. 2 Flow chart of atmospheric correction of HJ-1 CCD in Lake Taihu

2 数据获取与预处理

2.1 地面实测数据

本研究以太湖为研究区,太湖水体较为浑浊,其光学特性不仅与一类水体差异显著,而且与近岸二类水体有较大区别,是典型的内陆二类水体湖泊. 2009年4月中下旬在全太湖共布设54个采样点(图3),利用ASD便携式光谱仪对采样点进行光谱数据的采集,同步测量各点的风速、大气压等气象要素信息.



图3 太湖采样点分布图

Fig. 3 Distribution of sampling sites in Lake Taihu

2.2 影像数据

本次研究使用的环境一号 CCD 数据,为 2009 年 4 月 17 日、4 月 21 日、4 月 25 日与地面实测数据准同步的三景影像数据,太湖上空无云,数据质量良好,并利用经过地形图校正的 TM 数据进行几何精校正. 与环

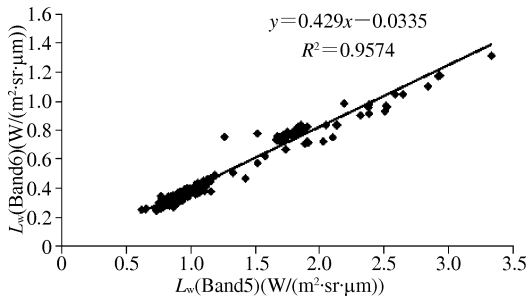


图4 MODIS 第5、6波段辐亮度之间的相关关系

Fig. 4 The relationship between radiance values of band 5 and band 6 of MODIS data

境一号 CCD 数据准同步的 MODIS 数据从 NASA 网站上直接下载获取,数据级别为 Level 1B. 利用 ENVI 软件对 MODIS 数据进行辐射校正、几何校正等预处理,并且去除 MODIS 数据的“蝴蝶结”效应. 由于 MODIS 在第 5 波段产生条带,目前还没有较好的方法去除条带,因此利用李俊生等^[9]剔除噪声点的方法,对受条带影响的数据进行剔除. 分析 MODIS 第 5、6 波段水体辐亮度数据之间的散点图发现(图 4),第 6 波段辐亮度随着第 5 波段辐亮度增大而增大,去除少数几个异常数据后,大部分样点的数据都具有较好的相关性. 说明此次研究的 MODIS 数据效果较好,受到噪声条带影响较小.

3 结果与分析

许勇等^[12]利用 MODIS 数据针对海州湾海域近海二类水体的大气校正研究发现,MODIS 数据第 5 波段的平均气溶胶辐亮度为 $2.42\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$,第 6 波段平均气溶胶辐亮度为 $0.90\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$.而本次研究中所计算出的太湖的 MODIS 数据第 5 波段的气溶胶辐亮度在 $0.62 - 3.34\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$ 的范围内变动,平均值为 $1.45\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$,第 6 波段气溶胶辐亮度在 $0.25 - 1.32\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$ 的范围内变动,平均值为 $0.59\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$,其值低于许勇的研究结果.利用 MODIS 的气溶胶光学厚度产品 MOD 04 得出太湖湖区 550nm 的气溶胶光学厚度为 $0.54 - 1.68$,平均值为 0.95 ,其值远大于胡秀清^[13]等关于青海湖湖区 550nm 气溶胶光学厚度的研究结论.这主要是由于太湖湖区处于中国东南部,此地区人口密集,经济发达,人类生活、生产排放的工业粉尘和烟尘等陆源因素导致太湖湖区大气上空比较浑浊,气溶胶类型较为复杂,属于典型的工业城市气溶胶^[14],使得太湖湖区 550nm 处的气溶胶光学厚度较大,气溶胶散射较严重,这就使得太湖湖区气溶胶散射值区别于近岸二类水体、内陆高原湖区,导致太湖湖区 MODIS 第 5、6 波段的辐亮度值也不同^[12].

由于太湖面积较大,其不同湖区气溶胶类型差异较大^[9-10].由 4 月 17 日、21 日、25 日等三幅不同日期太湖 MODIS 第 5 波段辐亮度数据(图 5)可以看出,分布在太湖北部湖区的梅梁湾、竺山湾等水域附近的采样点在 MODIS 第 5 波段的辐亮度数据明显高于太湖其他水域采样点的辐亮度值:以 4 月 25 日 MODIS 第 5 波段的辐亮度值为例,4 月 25 日北部湖区 MODIS 第 5 波段辐亮度值的范围大致为 $1.86 - 3.34\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$,平均值为 $2.69\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$,而其他湖区为 $1.26 - 2.05\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$,平均值为 $1.74\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$,以梅梁湾、竺山湾为主的太湖北部湖区的 MODIS 第 5 波段辐亮度值大致是太湖其他湖区该值的 1.47 - 1.74 倍.而其他湖区内部之间的差异并不显著,未表现出明显的分区规律.根据引起气溶胶散射的因素分析认为^[15]:梅梁湾、竺山湾等北部湖区三面被无锡市、常州市环绕,居民生活及工业生产排放出的粉尘、烟尘等导致其气溶胶颗粒物比其他湖区要多,气溶胶颗粒物对太阳辐射强烈散射,导致其气溶胶散射较其他湖区更严重,MODIS 第 5 波段的辐亮度也就更大;由地面实测数据可知,4 月 17 日、21 日、25 日三天太湖湖区的风向主要以偏北风为主,位于太湖北岸地区的无锡、常州等市区生产、生活排放出的大量粉尘、烟尘通过偏北风由市区方向吹至太湖上空,使得北部湖区的气溶胶颗粒物增加幅度明显,更进一步加剧了北部湖区的气溶胶颗粒物的散射,而其他湖区气溶胶颗粒物的扩散几乎没有受到来自太湖北岸的影响,气溶胶散射未出现显著的增加.因此将本次研究区划分为北部湖区及其他湖区分别加以计算研究.

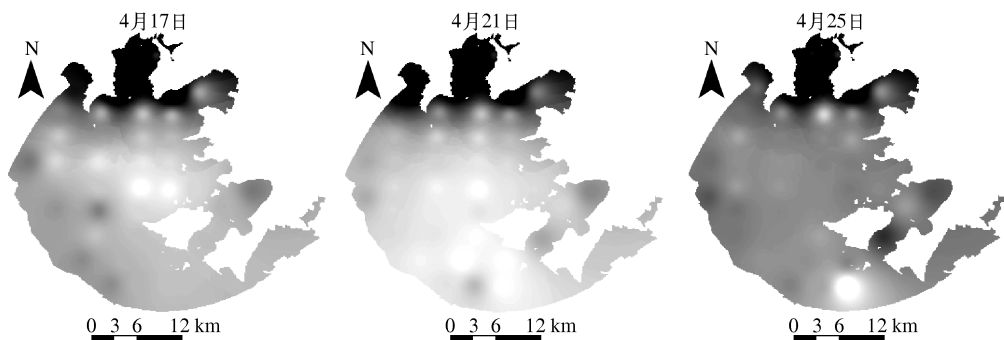


图 5 4 月 17 日、21 日、25 日太湖 MODIS 第 5 波段辐亮度值

Fig. 5 Radiance values of band 5 of MODIS in April 17, 21, 25 in Lake Taihu

按照北部湖区、其他湖区两个区域分别计算得出的 MODIS 第 5、6 波段辐亮度的平均值,代入式(11)计算两个区域的气溶胶类型参数,发现两个区域的气溶胶类型参数之间差异的确较大(表 2).因此,认为将太湖划分为北部湖区和其他湖区两个区域,分别进行研究是合理的.将得到的气溶胶类型参数带入式(12)得到环境一号 CCD 数据在各个波段的气溶胶散射值.

表2 气溶胶类型参数 n 及 MODIS 第 5、6 波段辐亮度值 ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$)
 Tab.2 The type of aerosol (n) and the radiance value of band 5 and 6 of MODIS

日期	北部湖区			其他湖区		
	n	L_w (Band5)	L_w (Band6)	n	L_w (Band5)	L_w (Band6)
4月17日	1.11	1.76	0.65	1.24	0.90	0.32
4月21日	0.90	1.66	0.65	0.84	0.93	0.37
4月25日	0.68	2.33	0.97	0.48	1.75	0.77

由式(12)得出的环境一号 CCD 数据各个波段气溶胶散射值代入式(13)-(15)中,得到经过 MODIS 数据辅助大气校正的环境一号 CCD 数据各个波段的离水辐亮度. 与环境一号 CCD 数据的原始辐亮度对比发现(表3),大气校正后各个波段的离水辐亮度与大气校正前总的辐亮度相比都有明显的下降(图6):以4月21日的数据为例,绝对降幅最大的是蓝光波段(Band1),下降幅度最高达 $51.74W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$,绝对降幅最小的是近红外波段(Band4),但是绝对值也下降了 $7.6W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$;相对降幅最大的同样是蓝光波段(Band1),下降幅度为64%,下降幅度最小的是红光及近红外波段,也大致下降了30%.且各波段数据之间的对比度都不同程度的有所增强;大气校正前各个波段在总的辐亮度中所占比例对比度较小,比例最高的蓝光波段只占到总的辐亮度的35.89%,比例最低的近红外波段要占到11.19%.不同波段数据之间的差异较小;经过大气校正后得到的各个波段的离水辐亮度之间差异较大,比例最高的蓝光波段占到总的离水辐亮度的33.79%,而最低的近红外波段只占到7.65%,各波段数据之间的对比明显.因此,该大气校正方法还可以起到去除图像噪声的目的,丰富内陆湖泊二类水体细节特征的作用,有利于环境一号 CCD 数据进行进一步的参数反演和监测.

表3 大气校正前后辐亮度比较
 Tab.3 Comparison of radiance before and after atmospheric correction

波段	大气校正前总的辐亮度 ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$) (所占比例)	大气校正后离水辐亮度 ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$) (所占比例)
Band1	80.14 (35.89%)	28.39 (22.96%)
Band2	67.08 (30.04%)	41.79 (33.79%)
Band3	51.08 (22.88%)	36.12 (29.19%)
Band4	25.01 (11.19%)	14.06 (7.65%)

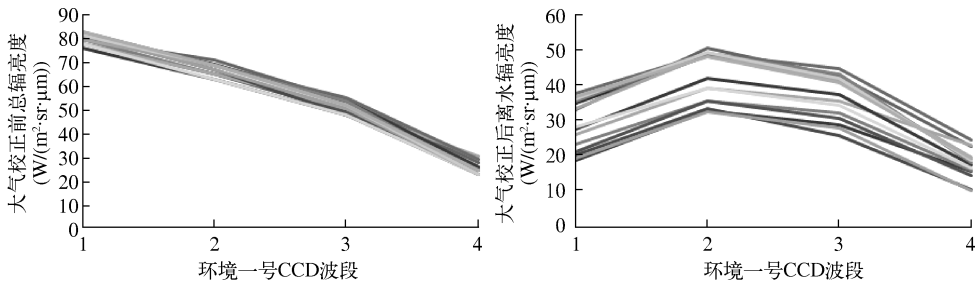


图6 大气校正前后辐亮度光谱曲线

Fig.6 Spectral of average radiance before and after atmospheric correction

为证明太湖气溶胶类型分区对于 MODIS 辅助大气校正的有效性,以及该方法对于提高太湖湖区大气校正精度的重要性,引入相对误差 (RE) 作为评价标准来说明大气校正后得到的遥感反射率的精度误差. RE 的计算公式为:

$$RE = \frac{|R_{mod} - R_{meas}|}{R_{meas}} \times 100\% \tag{16}$$

式中, R_{meas} , R_{mod} 分别为第 i 波段 ASD 实测遥感反射率^[16]和三种大气校正方法得到的遥感反射率。

将由 MODIS 第 5、6 波段得到的辐亮度值划分为北部湖区、其他湖区以及全湖三种类型,用于计算气溶胶参数类型。将得到的三种气溶胶参数类型代入式(12)-(15)中,计算大气校正后的遥感反射率,并将其与实测的光谱数据对比发现,未进行分区得到的遥感反射率与实测的遥感反射率之间的相对误差较大,而经过分区后得到的遥感反射率与实测的遥感反射率之间的相对误差有明显的减小。以 4 月 21 日的数据为例,未进行分区得到的遥感反射率的相对误差的最大值达到了 64.86%,平均的相对误差最大值出现在蓝光波段为 46.33%,平均相对误差最小的红光波段也达到了 27.05%;而经过分区后得到的遥感反射率的相对误差有了较大的提高,最大相对误差降到 55.69%,最小相对误差降到只有 1.49%,相对误差最大的近红外波段平均值为 26.48%,红光波段平均的相对误差更是降到了 18.96%。可见,基于太湖不同湖区的气溶胶类型分区进行大气校正是有必要的,有利于提高大气校正的精度。

为了比较该方法与其他常用方法大气校正的效果,采用 6S 模型^[17-19]以及暗像元方法^[20-21]对该环境一号 CCD 数据进行大气校正,并将分区后 MODIS 数据辅助的大气校正方法所得的遥感反射率与利用 6S 模型、暗像元方法所得到的遥感反射率进行对比。利用 6S 模型进行校正时,参数设置主要使用自定义形式,其中大气模式采用的是中纬度夏季模式,气溶胶模式采用张兵等^[21]得出的太湖夏季气溶胶组分的比例因子进行自定义,部分参数设置如:沙尘粒子 48%、水溶性粒子 50%、煤烟粒子 2%、海洋性粒子 0,下垫面假设为均一的、无二向散射的水体;而暗像元的选取采用陈楚群^[22]等基于 TM 影像的暗像元提取方法,首先统计环境一号 CCD 数据各波段的灰度直方图,当直方图中 4 个连续灰度值的像元频数之和超过影像像元总数的 0.03% 时,将其最小灰度值作为暗像元进行计算。

为了评价三种大气校正方法,使用均方根误差 (RMSE) 作为评判标准来检验三种大气校正方法得到的模拟值和 ASD 实测的遥感反射率值是否一致。RMSE 的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{meas} - R_{mod})^2} \quad (17)$$

式中, R_{meas} , R_{mod} 分别为第 i 波段 ASD 实测遥感反射率和三种大气校正方法得到的遥感反射率, N 为样本数。

表 4 三种大气校正方法均方根误差评价 (W/(m²·sr·μm))

Tab. 4 RMSE of three atmospheric correction methods

大气校正方法	Band1	Band2	Band3	Band4
6S 模型	0.004547	0.00432	0.007248	0.011989
暗像元	0.013508	0.018295	0.012572	0.006039
本文方法	0.004055	0.005104	0.005927	0.005868

环境一号 CCD 数据各个波段经过三种方法的大气校正后的遥感反射率均方根误差(表 4)表明,在蓝光 (Band1)、红光 (Band3)、近红外 (Band4) 三个波段,分区后基于 MODIS 数据辅助的大气校正方法所得的环境一号 CCD 的遥感反射率数据与 ASD 实测遥感反射率数据之间的均方根误差远小于另外两种大气校正方法,只在绿光波段 (Band2) 稍高于 6S 模型与实测遥感反射率之间的均方根误差,这可能是由于太湖水体的叶绿素含量较高,使得处于绿光波段的叶绿素反射峰的校正出现偏差导致的。根据 6S 辐射传输原理分析,现有的 6S 模型中未加入适合环境一号 CCD 数据的参数设置,且 6S 模型中要输入的一些自定义参数难以获得,只能是采用一些 6S 自带的参数进行设置,如选取标准大陆型气溶胶类型,而这种标准的气溶胶组分参数与实际大气参数还是有很大差别,给模型计算带来一定误差,很大程度上影响了模型校正的准确性。暗像元法进行大气校正的关键在于黑暗像元的选取、大气校正模型的选取及模型参数的取值。选取湖泊水体作为暗像元给程辐射的计算带来较大的偏差,使得计算结果出现明显的“过修正”。此外,模型参数的计算具有一定的经验性,精确的暗像元大气校正方法还有待进一步深入研究。而本文中使用的的大气校正方法直接使用较为成熟的 MODIS 各类产品,克服了传统大气校正中依赖于现场同步测量大气参数的缺陷,能够快速、有效地完成环境一号 CCD 数据的大气校正。因此,在现有的大气校正算法中,基于 MODIS 数据辅助的大气校

正方法对于环境一号 CCD 数据可以得到更为准确的结果.

4 结论

(1) 根据 MODIS 第 5 波段的辐亮度差异分析发现,太湖不同湖区受到城市生产、生活排放烟尘影响,导致不同湖区气溶胶类型参数存在差异,因此将太湖湖区划分为北部湖区、其他湖区两个区域,并通过研究分区前后遥感反射率之间的相关关系,认为基于太湖气溶胶类型分区可以提高环境一号 CCD 数据大气校正的精度.对比分析 6S 模型以及暗像元大气校正方法,本研究所采用的大气校正方法,能够较好地反映湖泊内陆水体的光谱特性;本次研究同时表明,在内陆湖泊二类水体中采用修正的 Gordon 算法进行大气校正,也可以得到较好的结果.

(2) 由于没有研究区实时气溶胶数据进行动态气溶胶模型的研究,因此只能采用气溶胶单次散射近似,这个假设带来了一定的误差.未来如果能够进行长期观测获取气溶胶数据,将有望提高模型精度.

5 参考文献

- [1] 杨一鹏,王 桥,肖 青等. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 a 浓度定量遥感反演方法研究. 地理与地理信息科学, 2006, **22**(2):5-8.
- [2] 王学军,马 廷. 应用遥感技术监测和评价太湖水质状况. 环境科学, 2000, **21**(6):65-68.
- [3] 唐军武,马超飞. CBERS-02 卫星 CCD 相机资料量化反演水体成分初探. 中国科学(E 辑):信息科学, 2005, **35**(增刊 I):156-170.
- [4] Gordon HR. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the ocean. *Applied Optics*, 1978, **17**(13):1631-1636.
- [5] Gordon HR, Clark DK. Clear water radiances for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery. *Applied Optics*, 1981, **20**:4175-4180.
- [6] Gordon HR. Radiometric considerations for ocean color sensors. *Applied Optics*, 1990, **29**:3228-3236.
- [7] Gordon HR, Wang Menghua. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 1994, **33**(3):443-452.
- [8] Gordon HR. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D14):17081-17106.
- [9] 李俊生,张 兵. MODIS 数据辅助中巴资源卫星图像大气校正研究. 中国科学(E 辑):信息科学, 2006, **36**(增刊):141-150.
- [10] 王海君. 太湖水色遥感大气校正方法[学位论文]. 南京:南京师范大学, 2007:6.
- [11] Gong Shaoqi, Huang Jiazhu, Li Yunmei *et al.* Comparison of atmospheric correction algorithms for TM image in inland waters. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(8):2199-2210.
- [12] 许 勇,张 鹰. MODIS 辅助的北京一号卫星影像近海 II 类水体大气校正. 海洋科学进展, 2009, **27**(1):66-73.
- [13] 胡秀清,张玉香,张广顺. 中国遥感卫星辐射校正场气溶胶光学特性观测研究. 应用气象学报, 2001, **12**(3):257-266.
- [14] 王莉莉,辛金元. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性. 科学通报, 2007, **52**(4):477-486.
- [15] 盛裴轩. 大气物理学. 北京:北京大学出版社, 2003:25.
- [16] 孙 凌,王晓梅. MODIS 水色产品在黄东海域的真实性检验. 湖泊科学, 2009, **21**(2):298-306.
- [17] 阿布都瓦斯提·吾拉木,秦其明. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正. 北京大学学报(自然科学版), 2004, **40**(4):611-618.
- [18] 徐 萌,郁 凡. 6S 模式对 EOS/MODIS 数据进行大气校正的方法. 南京大学学报(自然科学版), 2006, **42**(6):582-589.
- [19] 吕 恒,魏小鸿. 太湖悬浮物浓度的 MODIS 数据定量反演提取. 地球信息科学, 2008, **10**(2):151-155.
- [20] 徐涵秋. Landsat 遥感影像正规化处理的模型比较研究. 地球信息科学, 2008, **10**(3):294-301.
- [21] 张 兵,申 茜. 太湖水体 3 种典型水质参数的高光谱遥感反演. 湖泊科学, 2009, **21**(2):182-192.
- [22] 陈楚群,施 平. 应用 TM 数据估算沿岸海水表层叶绿素浓度模型研究. 环境遥感, 1996, **11**(3):168-176.