

引用格式:Cheng Chunmei, Wei Yuchun, Li Yuan, *et al.* Atmospheric Correction of GF-1/WFV Image in Taihu Lake based on the 6S Model Pixel by Pixel[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 141-152.
[程春梅, 韦玉春, 李渊, 等. 太湖水体 GF-1/WFV 影像的 6S 逐像元大气校正[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 141-152.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.1.0141

太湖水体 GF-1/WFV 影像的 6S 逐像元大气校正

程春梅¹, 韦玉春², 李渊³, 涂乾光¹

(1. 浙江水利水电学院 测绘与市政工程学院, 浙江 杭州 310018;
2. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;
3. 浙江工商大学 旅游与城乡规划学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 水体光谱信息微弱, 常用的基于辐射传输模型的大气校正方法在水体中校正精度较差。基于覆盖太湖水体的 2016 年 4 月 29 日的高分一号宽幅相机影像 (GF-1/WFV) 和同步的实测光谱数据, 对 6S 辐射传输模型的输入参数进行敏感性分析, 逐像元计算观测几何, 使用分区气溶胶类型、分区暗像元和 Spline 插值确定的气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 进行 6S 逐像元大气校正。实验结果表明: 气溶胶模式对 6S 大气校正结果的影响最大, 与 FLAASH 方法相比, 逐像元计算观测几何和气溶胶参数的校正方法对大气校正精度有改进作用, 4 个波段的平均相对误差分别降低了 1.84%、7.78%、4.79% 和 17%。结合精确大气参数输入的 6S 逐像元大气校正方法可以改进水体表面遥感反射率的大气校正精度。

关键词: 高分一号; WFV; 大气校正; 6S; 太湖

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)01-0141-12

1 引言

使用遥感手段获取水体信息时, 由于大气分子和气溶胶等大气成分吸收与散射的影响, 卫星传感器接收到的水体离水辐射信号一般不多于大气层顶总辐射亮度的 10%^[1], 有效剔除大气影响是水色遥感定量反演的关键问题。目前水色遥感的大气校正方法主要有暗像元法^[2]、经验线性法^[3]以及直方图均衡化^[4]等基于图像特征的方法, Gordon 提出的基于 NIR 的一类水体标准大气校正方法、改进的 NIR-SWIR 混合校正方法^[5]以及辐射传输模型法等。对于二类水体, 在近红外波段清洁水体反射率为 0 的假设不成立, 且某些传感器没有设置短波红

外波段, 暗像元法和 NIR-SWIR 等方法并不适用。辐射传输模型方法依据电磁波在大气中的辐射传输原理来计算地物反射率, 依据同步大气参数, 如能见度、气溶胶参数等, 可在不同大气条件下以较高的精度获得真实地表反射率。其中 6S 模型^[6]考虑了目标物的海拔高度、地表非均匀状况和气体对辐射的吸收影响, 对分子和气溶胶散射作用的计算使用近似和逐次散射算法, 是一种运行速度较快, 操作相对简单, 应用较为广泛的大气校正方法。

水体光谱信息微弱, 辐射探测的误差较大, 6S 辐射传输模型在陆地大气校正中精度较高, 但对于水体的校正精度仍在改进和研究当中^[7-11]。Vermote 等^[6]认为 6S 大气校正模型在水色遥感中只适

收稿日期: 2018-10-07; 修订日期: 2020-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目“面向二类水体叶绿素 a 浓度遥感反演的光谱纯化研究”(41471283), 浙江省自然科学基金项目“基于多源卫星遥感的中国近海海洋锋面日变化研究”(LQ18D060002), 浙江省水利厅科技项目“基于遥感蒸散发的灌溉水有效利用系数测算研究”(RC1814)。

作者简介: 程春梅 (1987—), 女, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 主要从事水环境遥感研究。E-mail: ccm8711@163.com。

通讯作者: 韦玉春 (1965—), 男, 河北唐山人, 博士, 教授, 主要从事水色遥感及遥感图像处理研究。E-mail: weiyuchun@njnu.edu.cn。

用于做敏感性研究。另外,内陆湖泊水体的定量遥感反演往往需要高空间分辨率遥感数据,而当前针对高分数据的大气校正算法大多应用于陆地区域^[12-14],在水体区域讨论较少。例如,刘佳等^[15]的研究表明,除水体外,6S和FLAASH大气校正的结果相差不大,其中偏差最大的在蓝光波段,二者具有较好的可比性。因此,需要进一步研究6S大气校正模型在基于高分影像的水色遥感中的参数敏感性和精度。

6S辐射传输模型输入参数的敏感性研究表明,气溶胶类型以及组分是影响遥感反演水体反射信号精度的重要因素之一^[16],而气溶胶模式的假定是反演气溶胶光学厚度和大气校正的主要误差来源之一^[17]。由于内陆湖泊水体上空气溶胶特性复杂多变,使用默认参数会导致较大误差,因此根据水域特点进行参数敏感性分析,优化与选择大气参数,对于改进6S大气校正模型的区域应用非常重要。

以典型内陆湖泊水体太湖为研究区,使用2016年4月29日的高分一号宽幅相机影像(GF-1/WFV)和同步采样的地面实测数据,进行6S参数敏感性分析并遴选适用于太湖水体的大气参数。针对WFV影像特征,逐像元计算观测几何,考虑分区气溶胶类型,使用分区暗像元和Spline插值确定气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD),提出了一种基于6S辐射传输模型的逐像元大气校正方法,并与FLAASH大气校正进行了结果比较。研究结果对改进6S模型在湖泊水体的区域应用具有重要参考意义。

2 研究区和数据

2.1 研究区

太湖是我国第三大淡水湖泊,位于119°55.3′~120°53.6′E, 30°56′~31°33′N,地处江苏和浙江省交界处和我国经济发展最具活力的长三角地区。太湖面积2 427.8 km²,平均水深2.12 m,属于典型的亚热带东南季风气候区,夏季高温多雨,冬季温和少雨。近30 a来由于该地区经济持续快速增长导致环境问题显著,诸如蓝藻水华频发、水环境质量下降等,水质状态为中富营养化到重富营养化^[18]。2016年4月29日在太湖地区进行了野外采样,采样时间从上午9点至下午4点,17个有效样点的分布如图1所示。

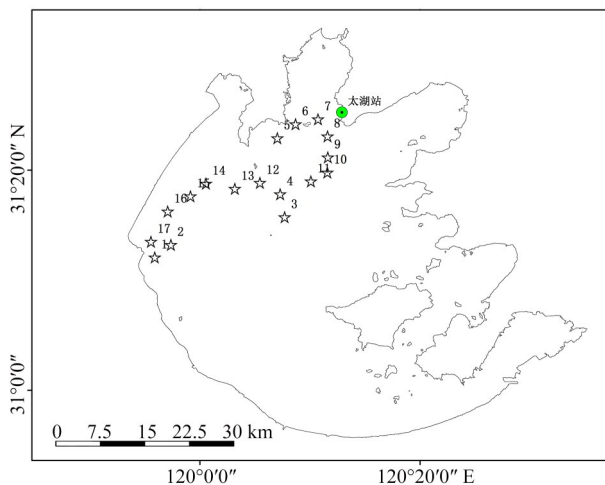


图1 太湖采样点位置图

Fig.1 Sampling distribution of Taihu Lake

2.2 光谱数据采集与处理

水体的野外光谱测量使用美国ASD (Analytical Spectral Devices)野外光谱辐射仪(ASD Field-Spec.)。为减少水体镜面反射和船体自身阴影的影响,测量采用二类水体水面以上光谱测量方法^[19],测量时距离水面0.5 m。测量的数据有标准灰板(反射率为30%)、水体和天空光的光谱辐亮度信息,每个对象采集10条光谱数据,选取每个样点重复测量的遥感反射率的中值作为该点的反射率。在测量得到的光谱曲线中,选择350~900 nm的数据计算遥感反射率^[19]。利用GF-1/WFV的光谱响应函数和地面实测光谱反射率值,按照式(1),模拟计算WFV各个波段的等效遥感反射率:

$$R_i = \sum_{\lambda_{s_i}}^{\lambda_{e_i}} R_{rs}(\lambda) \varphi_i(\lambda) / \sum_{\lambda_{s_i}}^{\lambda_{e_i}} \varphi_i(\lambda) \quad (1)$$

其中: R_i 代表传感器第*i*通道的光谱反射率, λ_{s_i} 是通道*i*的起始波长, λ_{e_i} 是通道*i*的终止波长, $R_{rs}(\lambda)$ 是波长 λ 处的实测光谱反射率,间隔为1 nm, $\varphi_i(\lambda)$ 是波段*i*在波长 λ 处的光谱响应函数,来自中国资源卫星应用中心网站。计算的遥感反射率和模拟的等效遥感反射率如图2所示。

2.3 GF-1/WFV影像预处理

获取了与野外实验同步的2016年4月29日太湖地区WFV3传感器影像,卫星过境时间为北京时间11:26,云覆盖率为3%,影像质量良好。对该影像分别进行几何纠正、影像裁剪和辐射定标等预处理,作为大气校正的输入数据。以研究区地形图为基准,校正模型为二次多项式,内插方法为最邻近内插法,纠正后的误差控制在1个像元范围以内。

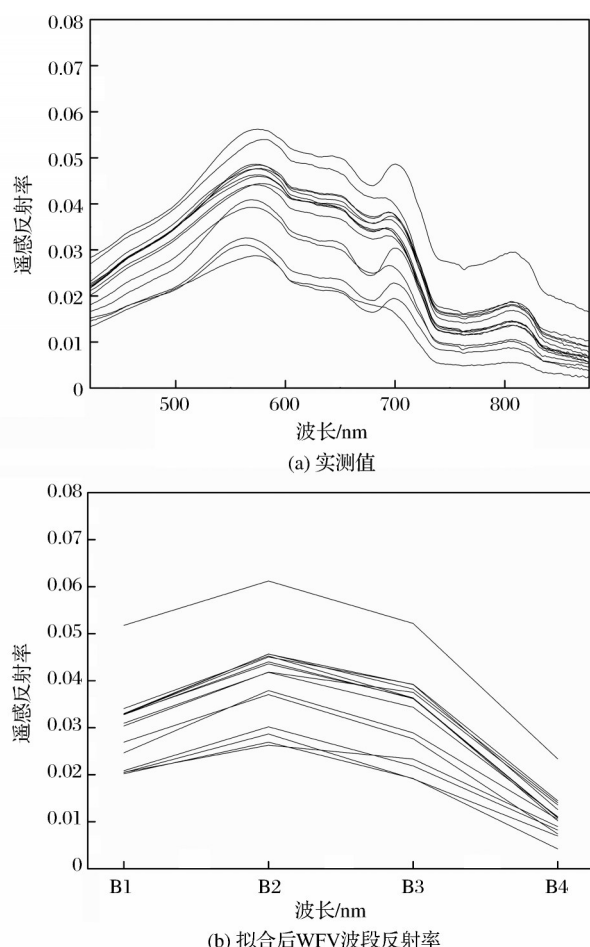


图2 实测遥感反射率和拟合后WFV波段反射率

Fig.2 The in situ remote sensing reflectance and the simulated WFV band reflectance

对几何校正后的影像进行裁剪,得到覆盖太湖水体的影像。

根据绝对定标系数和辐射定标公式,对GF-1/WFV图像进行定标,将卫星载荷观测值DN转化成辐亮度 L 。WFV数据的辐射定标公式为: $L(\lambda) = \text{Gain} \times \text{DN} + \text{Offset}$,其中 $L(\lambda)$ 为转换后辐亮度, Gain 为波段增益, DN 为卫星载荷观测值, Offset 为偏移量。WFV相机辐射定标参数,包括4个波段的增益、偏移量参数及定标公式,均从中国资源卫星应用中心网站获取。

对定标后的辐亮度数据进行表观反射率的计算,计算公式如下:

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi \cdot L \cdot d^2}{E_{\lambda} \cos \theta_s} \quad (2)$$

其中: ρ_{TOA} 为表观反射率; L 为辐亮度; d 为日地相对距离,其值在1左右,随日期略微变动,取日地平均距离为1; θ_s 为太阳天顶角; E_{λ} 为波段平均太阳辐射值,可根据GF-1/WFV传感器的光谱响应函数和

对应区间的太阳光谱函数来计算,本文采用刘佳等^[15]的计算结果。

2.4 结果评价

为了评价大气校正的效果,使用均方根误差(RMSE, Root Mean Square Error)和平均相对误差(ARE, Average Relative Error)作为评判标准来检验不同大气校正方法得到的结果值与ASD实测的遥感反射率是否一致。计算方法如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (y - y')^2}{n}} \quad (3)$$

$$\text{ARE} = \frac{\frac{|y - y'|}{y} \times 100\%}{n} \quad (4)$$

其中: y 是ASD实测的遥感反射率, y' 是遥感图像经过大气校正后得到的遥感反射率, n 是样点数目。

3 6S大气校正参数敏感性分析

3.1 大气模式的影响

大气组分中除水汽(H_2O)和臭氧(O_3)外一般变化不大。本文对比了两种标准大气模式:中纬度夏季(H_2O 和 O_3 含量分别为 2.93 g/cm^2 和 0.319 cm-atm)、中纬度冬季(H_2O 和 O_3 为 0.853 g/cm^2 、 0.395 cm-atm),以及3种自定义的大气模式:包括2016年4月29日的全球地基气溶胶监测网AERONET太湖站(图1中绿色点)的观测结果A1(H_2O 和 O_3 为 1.75 g/cm^2 、 0.317 cm-atm),已有文献中使用的大气模式A2(H_2O 和 O_3 为 1.54 g/cm^2 、 0.34 cm-atm)^[10]和A3(H_2O 和 O_3 为 2.93 g/cm^2 、 0.293 cm-atm)^[11]。

使用中心像元的观测几何、太湖地区常用的大陆型气溶胶^[11,17]类型,2016年4月29日AERONET太湖站观测的气溶胶浓度。由于AERONET上无法提供550 nm处的AOD,因此使用AERONET提供的440、500、675和870 nm 4个通道处的AOD值,进行二项式拟合^[20],插值得到550 nm处的AOD,计算结果为1.0023。

对比5种不同的水汽和臭氧含量的大气模式对大气校正的结果影响,计算结果表明,不同的 H_2O 和 O_3 含量对蓝、绿、红波段的校正结果影响不大,校正后的遥感反射率的极差在0.07%以内;对近红外波段的校正影响略大,校正后的遥感反射率最大偏差为0.11%。由于大气模式对大气校正的结果影响有限,本研究使用中纬度夏季的大气模式进行后续分析。

3.2 气溶胶参数的影响

6S中预定义了7种缺省的气溶胶模式,均由4种基本类型的气溶胶粒子(沙尘类、海洋类、水溶类、煤烟类)按不同比例混合组合。本文对比分析了3种标准气溶胶模式,包括大陆型(沙尘性70%,水溶性29%,海洋性0,煤烟性1%)、城市型(沙尘性17%,水溶性61%,海洋性0,煤烟性22%)、海洋型(沙尘性0,水溶性5%,海洋性95%,煤烟性0),以

及已有文献中春夏季太湖使用的3种不同的气溶胶模式^[10,21],包括M1(0.50%、40%、10%)、M2(10%、56%、10%、24%)、M3(48%、50%、0.2%)。

基于中心像元卫星观测几何,标准的中纬度夏季大气模式,AERONET插值获得的AOD(1.0023),使用6种不同粒子组成的气溶胶模式对WV数据校正后进行大气校正。任意选择太湖水体中3个样点,对比不同气溶胶模式校正后的遥感反射率如图3所示。

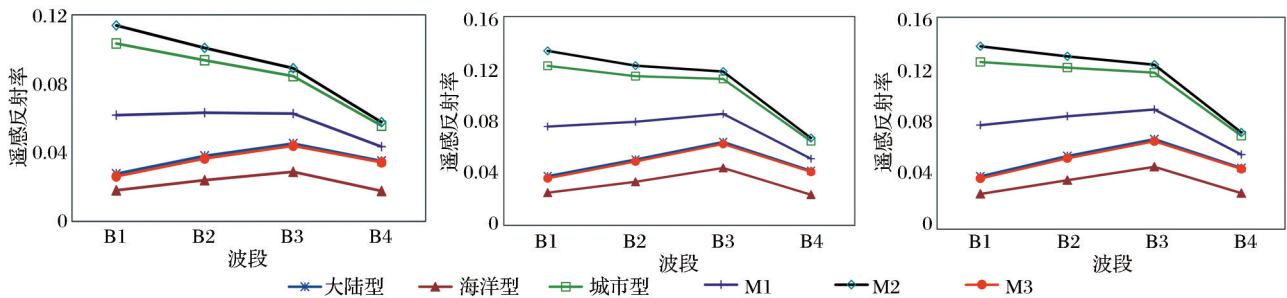


图3 3个样点不同气溶胶模式校正后的遥感反射率

Fig.3 The remote sensing reflectance corrected by different aerosol types at three points

由图3看出,不同气溶胶模式校正后的遥感反射率相差较大,说明不同的粒子比例组合对大气校正的结果影响较大,这与已有的研究结论一致^[16-17]。从光谱形态来看,海洋型、M3和大陆型校正后的光谱曲线与二类水体光谱相似:蓝波段由于水体吸收值较低,且蓝绿波段反射率低于近红波段。城市型、M1和M2型对蓝波段校正结果较差。与实测光谱(图2)对比来看,海洋型气溶胶校正后的各波段

反射率值最接近实测光谱,B1波段反射率在0.02~0.03附近,且B4波段反射率低于0.02,显著优于其他几种模式的校正结果。

使用已有文献中常用的大陆型气溶胶^[11,17],中纬度夏季大气模式,中心像元的观测几何,分析不同的AOD对大气校正结果的影响。AOD范围从0.5~1.2以0.1递增,不同AOD值校正后任意3个样点的遥感反射率如图4所示。

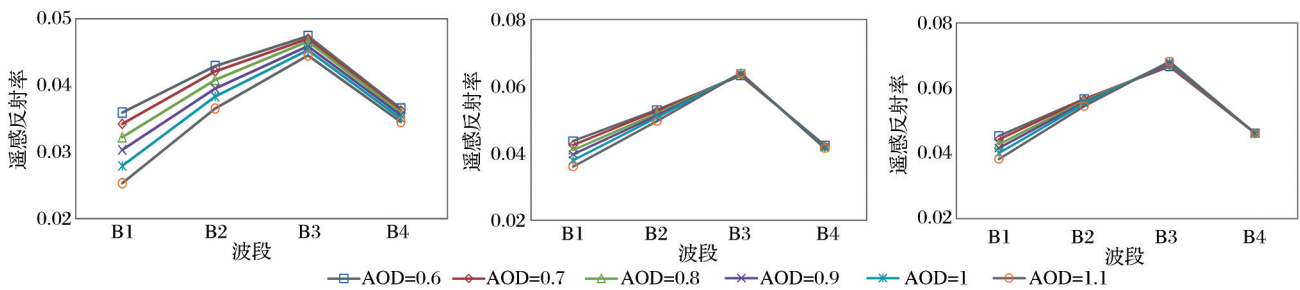


图4 3个样点不同AOD校正后的遥感反射率

Fig.4 The corrected remote sensing reflectance of three points using different AOD

由图4看出,不同AOD的变化对波长较短的波段影响较大,校正后反射率在蓝波段和绿波段的反射率最大差异达1.06%和0.64%,而在近红外波段的反射率差异仅为0.09%。使用不同AOD值进行大气校正得到遥感反射率差异较大,对于面积较大的二类湖泊水体,必须考虑AOD空间分布的不均匀性。

3.3 观测几何的影响

对于整景WV影像和裁剪后的太湖影像,分

别获取4个角点(左上、右上、左下、右下)的观测几何(表1)。由表看出,对于原始影像,太阳天顶角和方位角极差为2.96°和10.29°,卫星天顶角极差达到17.63°。对于裁剪后的太湖区域,太阳天顶角和方位角极差为0.84°和3.39°,卫星天顶角极差为2.64°。

假定大气模式为中纬度夏季、大陆型气溶胶,AOD为1.0023,使用表1中4个角点以及影像中心像元的观测几何,分别进行6S大气校正。遥感反射

表 1 原始影像和裁剪后影像 4 个角点的观测几何

Table 1 The observed geometry at the four corners in the original and clipped image

ID	原始影像			裁剪后影像		
	太阳天顶角/°	太阳方位角/°	卫星天顶角/°	太阳天顶角/°	太阳方位角/°	卫星天顶角/°
1	19.33	152.61	17.89	18.71	155.70	9.10
2	18.50	159.87	0.26	18.45	158.06	6.46
3	17.30	149.58	17.89	18.11	154.67	8.95
4	16.37	157.36	0.26	17.87	157.39	8.14

率计算结果表明,使用中心像元观测几何替代各像元观测几何进行校正,会导致 4 个点在蓝、绿、红和近红波段分别出现 0.14%、0.13%、0.10%、0.24% 的最大误差。对于宽视场的 WFV 数据,观测几何的差异会产生校正误差,逐像元计算观测几何可以改进大气校正的效果。对于太湖 4 个角点,使用中心像元观测几何替代样点像元的观测几何,6S 校正出的遥感反射率的最大偏差为 0.12%。

以上分析表明,6S 辐射传输模型的不同参数设置对大气校正结果影响不同,其中大气模式中水汽和臭氧含量的变化,对校正后的水体遥感反射率影响不大。气溶胶模式对大气校正影响最为明显,海洋型气溶胶校正结果更接近实测光谱。不同 AOD 值对短波反射率影响较大。观测几何对幅宽较大的 WFV 影像大气校正结果存在一定影响。

4 6S 逐像元大气校正方法

4.1 6S 大气校正原理

假设陆地表面为均匀朗伯体、大气垂直均匀变化的条件下,卫星传感器所接受的大气层顶表现反射率可表示为:

$$\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi) + T(\mu_s)T(\mu_v)\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi) / [1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)S] \quad (5)$$

其中: ρ_{TOA} 是大气层顶表现反射率; ρ_0 是大气的路径辐射项等效反射率; ρ_s 为地表二向反射率; $\mu_v = \cos(\theta_v)$, $\mu_s = \cos(\theta_s)$, θ_v 和 θ_s 分别为观测天顶角和太阳天顶角; ϕ 为太阳与传感器之间的相对方位角; S 为大气下界的半球反射率; $T(\mu_s)$ 和 $T(\mu_v)$ 分别为向下和向上整层大气透射率。

6S 模型的输入参数包括卫星几何参数、大气模式、气溶胶模式、光谱条件和地表反射率。输出参数为校正系数 x_a , x_b 和 x_c , 再使用公式(6)就可以计算地表反射率。

$$y = x_a \times L - x_b, R_{rs} = y / (1 + x_c \times y) / \pi \quad (6)$$

4.2 逐像元计算观测几何

由于 WFV 是宽幅相机,其幅宽为 800 km,图像

边缘像元与中心点像元的观测几何角度存在较大差异,因此需要计算每个像元的观测角度。整景影像中心像元的太阳天顶角和方位角、卫星天顶角和方位角从卫星自带参数中查找(其中 xml 文件中提供的天顶角其实为高度角)。

由图像 4 个角点的经纬度进行插值处理得到每个像元的经纬度,再结合卫星过境时间,按下式逐像元计算太阳天顶角 θ 和太阳方位角 A ^[22]:

$$\cos \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (7)$$

$$\cos A = (\cos \theta \sin \varphi - \sin \delta) / \sin \theta \cos \varphi \quad (8)$$

其中: φ 为像元的地理纬度, δ 表示太阳赤纬角, t 表示太阳时角。

根据相机视场角插值获得观测天顶角。WFV 影像的 xml 文件中提供了整景影像中心像元的传感器的扫描角度,将其插值到整幅影像的不同位置。根据下式中传感器扫描角与观测天顶角的相互关系^[23],逐像元计算观测天顶角的值。

$$\sin \theta = \frac{R_0 + h}{R_0} \sin \alpha \quad (9)$$

其中:扫描角为 α ,观测天顶角为 θ , R_0 为地球半径, h 为卫星高度。由于卫星方位角对定量应用影响不大,直接使用中心像元的卫星方位角值。

4.3 逐像元计算气溶胶参数

气溶胶来源复杂且其类型处于不断地变化中,不同的气溶胶类型对辐射的影响不同^[24]。由于太湖面积较大,其不同湖区气溶胶类型差异较大^[11,25],目前尚未有适用的气溶胶类型的确定方法。本文参照金鑫等^[26]的思路对太湖进行分区的气溶胶模型建立,即将太湖按照辐亮度的差异分为北太湖和其他湖区两个部分。其中北太湖受到沿岸陆地影响,考虑为大陆型气溶胶,其他湖区可考虑为海洋型气溶胶。

参考已有文献中的方法^[27],使用分区暗像元和 Spline 插值的方法计算太湖各个区域的 AOD。传统暗像元大气校正算法认为研究区域上空的 AOD 呈均匀分布状态,但对于气溶胶类型复杂的二类湖泊水体,暗像元算法的均匀性假设将不再适用。本

研究将太湖划分为9个子区域,每个子区域内根据近红外波段最小值确定暗像元,再计算该像元的AOD,最后使用Spline插值方法获取整个太湖的AOD。图5给出了太湖地区的9个子区域划分,查找出的各区暗像元的位置和计算出的AOD值,以及Spline插值后太湖全区的AOD。

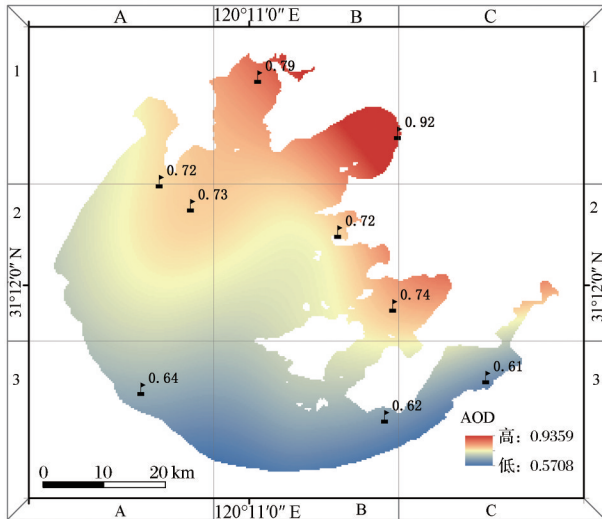


图5 基于分区暗像元和Spline插值的太湖AOD分布

Fig.5 The AOD distribution of Taihu Lake based on dark pixels in partitioned areas and Spline interpolation

基于分区暗像元和Spline插值方法确定的太湖AOD最大值为0.9359,最小值为0.5708,平均值为0.6909,标准差为0.0278,其数值范围与太湖多年平均气溶胶光学厚度(AOD)保持一致^[28-29]。图5体现了太湖AOD的空间异质性:北部竺山湾和贡湖湾AOD值最大,东太湖AOD值最小,整个区域AOD分布差异较大,使用统一的AOD值进行大气校正会造成一定误差。

目前常用的AOD获取方法有MODIS气溶胶产品、AERONET观测和暗像元反演等。其中MODIS气溶胶产品分辨率较低、容易受到云的影响和出现空值。2016年4月29日AERONET太湖站(图1)观测数据计算出的550 nm处的AOD为1.0023,代表站点所在的北部湖区的AOD值。使用未分区的暗像元方法反演出的太湖AOD为0.6147,其结果的真实性和分区暗像元的反演结果。

4.4 逐像元6S大气校正

为了提高计算效率,首先利用6S模型计算不同观测几何(太阳天顶角、太阳方位角和卫星天顶角)、气溶胶类型和AOD情况下的校正系数 x_a , x_b 和 x_c ,建立针对这5个因素的查找表。设定6S模型的基本

参数:几何条件为自定义,时间为4月29日;大气模式为中纬度夏季;气溶胶模式为用自定义;目标物高为-0;卫星观测高度为-645;使用GF-1/WFV的传感器波段范围450~520 nm、520~600 nm、630~690 nm、760~900 nm。假设地表均一且为朗伯体,无方向效应,选择6S自带的湖水类型作为地表模型。

变化参数的取值范围为:太阳天顶角从 $0^\circ \sim 80^\circ$ 以 10° 的步长变化,共有9个值;太阳方位角从 $0^\circ \sim 360^\circ$,以 20° 的步长变化,共19个值;卫星天顶角从 $0^\circ \sim 80^\circ$ 以 10° 的步长变化,共有9个值;卫星方位角为头文件中自带的282.283度。气溶胶类型分别取值为1(大陆型)、2(海洋型)、3(城市型);AOD从0.5~1.2以0.1的步长变化,共8个值。利用IDL将上述参数组合代入6S模型循环计算,得到GF-1/WFV 4个波段在不同太阳天顶角、太阳方位角、卫星方位角、气溶胶类型和AOD下的大气校正系数 x_a , x_b 和 x_c 的查找表。输出内容依次为太阳天顶角、太阳方位角、卫星方位角、气溶胶类型、AOD以及对应的校正参数。 $^{\circ}$ ”

根据裁剪后影像的观测角度范围,缩小查找表范围,即查询低于影像输入参数最小值和高于最大值的第一条记录。逐像元计算的观测角度、气溶胶类型和AOD,对查找表进行插值^[30],计算当前像元对应波段的大气校正系数 x_a , x_b 和 x_c 。根据6S反射率计算公式,计算该像元的地表反射率。逐像元6S大气校正的过程如图6所示。

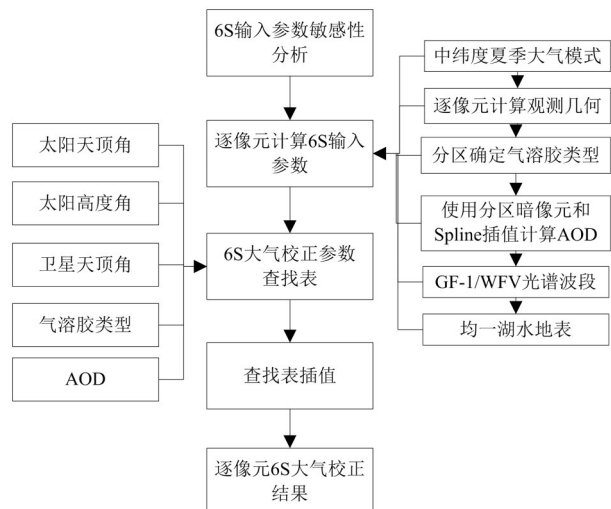


图6 逐像元6S大气校正流程图

Fig.6 Atmospheric correction flow chart by the 6S pixel-by-pixel method

5 结果与讨论

5.1 大气校正结果

使用中纬度夏季大气模式,逐像元计算观测几何、气溶胶类型和AOD,对太湖水体进行6S大气校正。校正前后的太湖WFV影像(真彩色合成图)以及水体光谱曲线(影像中红框处的点)如图7所示。由校正前后的影像图看出,经过大气校正之后反射率的遥感影像图像更清晰。由光谱曲线看出,与TOA相比,校正后反射率值普遍降低,尤其降低了蓝绿波段的大气影响。校正后的遥感反射率曲线体现了湖泊水体的特征:绿波段(Band2)的反射率较高,而在蓝波段(Band1)和近红外波段(Band4)由于水体吸收的影响反射率较低。含藻水体在红波

段(Band3)的 $0.67\text{ }\mu\text{m}$ 附近有一个窄的吸收峰^[16],在 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 附近有一个荧光峰。4个波段经过大气校正之后,反射率显著降低,说明大气校正减弱了空气中水汽、臭氧和气溶胶等粒子对水体信号的干扰,恢复了水体本身的信号。

5.2 不同方法对比

使用ENVI 5.0软件的FLAASH模块进行大气校正,首先将定标后的大气顶部反射率转化成BIL格式,使用比例系数10将输入光谱数据的单位转换成 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \times \text{sr} \times \text{nm})$ 。FLAASH大气校正的参数为:软件自动判别影像的中心经度和中心纬度,成像日期和时间由传感器自带的文件中获取;设定传感器高度为645 km,地面海拔为0 km,像元大小为16 m,大气模型为中纬度夏季。气溶胶类型也使

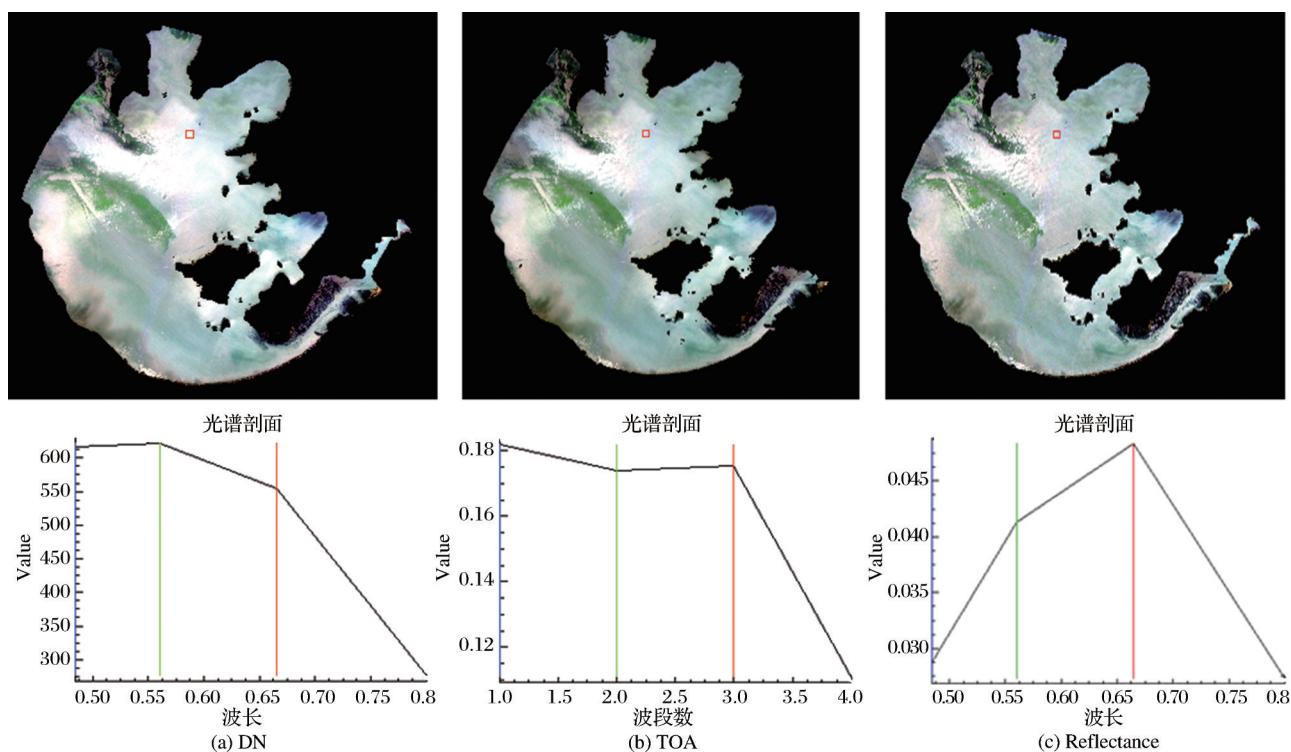


图7 大气校正前后遥感影像和遥感反射率

Fig.7 Remote sensing images (true color) and remote sensing reflectance before and after atmospheric correction

用海洋型,AOD使用AERONET插值后获取的1.0023,并参考文献[31]中的公式转换成能见度,结果为8.96 km。

比较17个样点的实测光谱、FLAASH校正结果和逐像元6S大气校正结果,结果如图8所示。由图看出,6S逐像元计算后精度与FLAASH的校正效果大体相当,其中6S逐像元校正后反射率与实测光谱更为接近。由于近红外波段水面遥感反射率

较低,且该波段传感器信噪比较差,其大气校正精度显著低于其他几个波段。

基于实测光谱,计算6S逐像元和FLAASH大气校正后所有样点在各个波段的均方根误差和平均相对误差,结果如表2所示。由表看出,6S逐像元校正后所有波段的校正精度均优于FLAASH方法,与FLAASH方法相比,4个波段的ARE分别降低了1.84%、7.78%、4.79%以及17%,所有波段的

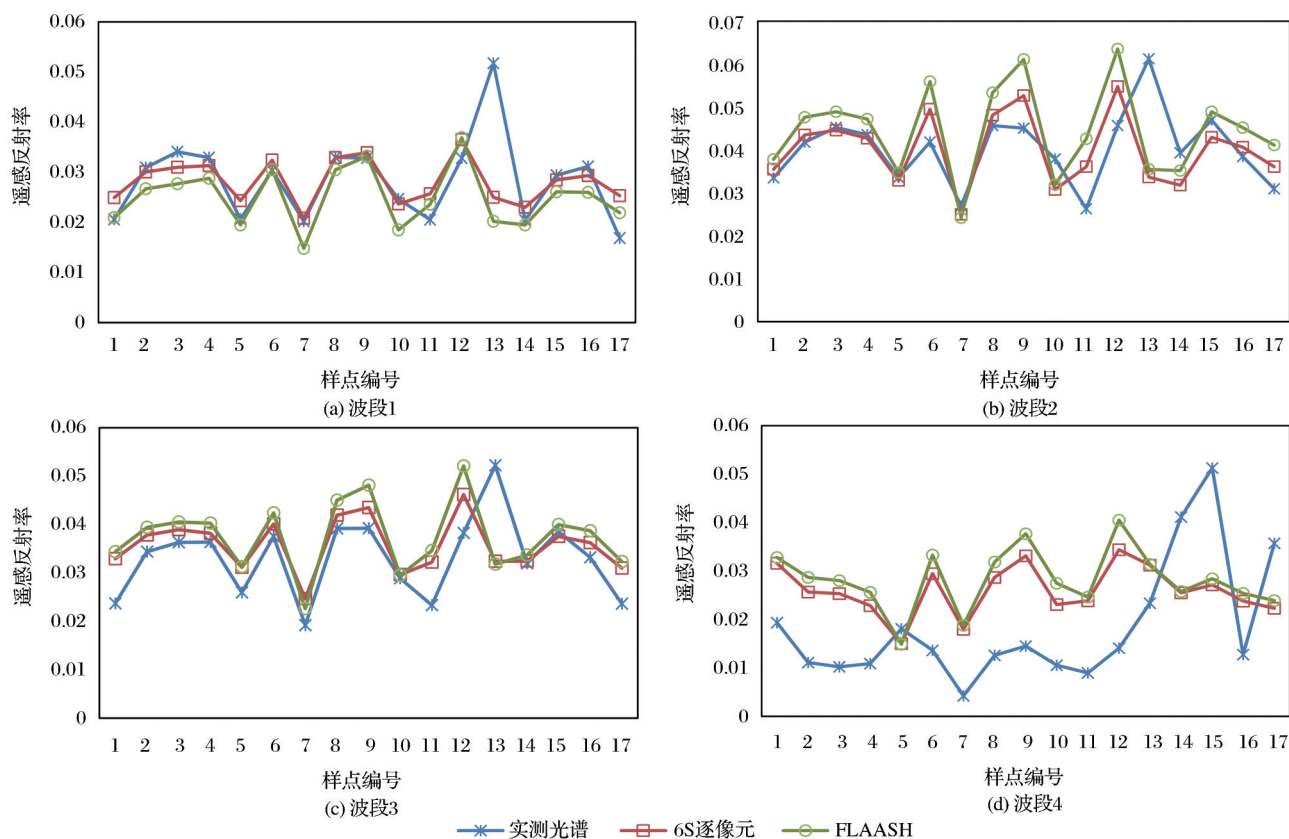


图8 6S和FLAASH大气校正结果与实测光谱对比

Fig.8 Comparison of 6S and FLAASH atmospheric correction results with measured spectra

ARE平均值降低了7.85%;RMSE的结果也均优于FLAASH,降低了0.01以内。结果表明,逐像元6S校正方法显著优于基于统一参数输入的FLAASH校正结果。

表2 6S和FLAASH大气校正方法的平均相对误差和均方根误差

Table 2 The AREs and RMSEs of the 6S and FLAASH atmospheric correction

	6S逐像元		FLAASH模型	
	ARE/%	RMSE	ARE/%	RMSE
波段1	13.65	0.007 2	15.49	0.008 5
波段2	13.8	0.008 5	21.58	0.011 0
波段3	16.35	0.006 8	21.14	0.008 4
波段4	108.3	0.014 9	125.3	0.017 0
平均值	38.02	0.009 4	45.87	0.011 2

两种校正结果的相对误差如图9所示。结果表明,使用统一参数输入的FLAASH校正得到的遥感反射率与实测的遥感反射率之间的平均相对误差大部分大于经过分区和逐像元计算后的6S校正得到的遥感反射率。可见,基于不同湖区的气溶胶类型分区和逐像元的大气校正能够提高大气校正

的精度。

5.3 讨论

太湖上空气溶胶组分复杂,较常使用的是大陆型气溶胶^[11]、城市型和大陆型的气溶胶^[17],或者城市型和工业型气溶胶^[32],但还没有确定的气溶胶类型。Higurashi等^[33]使用0.8的Angstrom指数 α 分界线来区分气溶胶类型,2016年4月29日AERONET观测的 α 系数为1.25,对应的是吸收性的“黑炭气溶胶”或者非吸收性的“硫酸盐气溶胶”。这是因为太湖受到长三角地区工业城市排放的大气污染物(如非吸收性的硫酸盐粒子)的影响^[34],且快到夏季从海洋上空输送的非吸收性硫酸盐粒子至太湖上空。虽然可以依据气溶胶指数 α 来判定气溶胶的类型,但不同类型气溶胶粒子的AOD值在大小上并不是严格区分的,即使是同一类型下的气溶胶,其AOD和气溶胶指数 α 也存在较大的偏差,这给判断气溶胶的组分带来困难。不同类型粒子比只是反映气溶胶类型的一个参数,还需要结合气溶胶的各种光学特性参数,辅助以其他分析手段进行综合处理^[24]。

对于6S模型,当不考虑气溶胶分区时,使用海

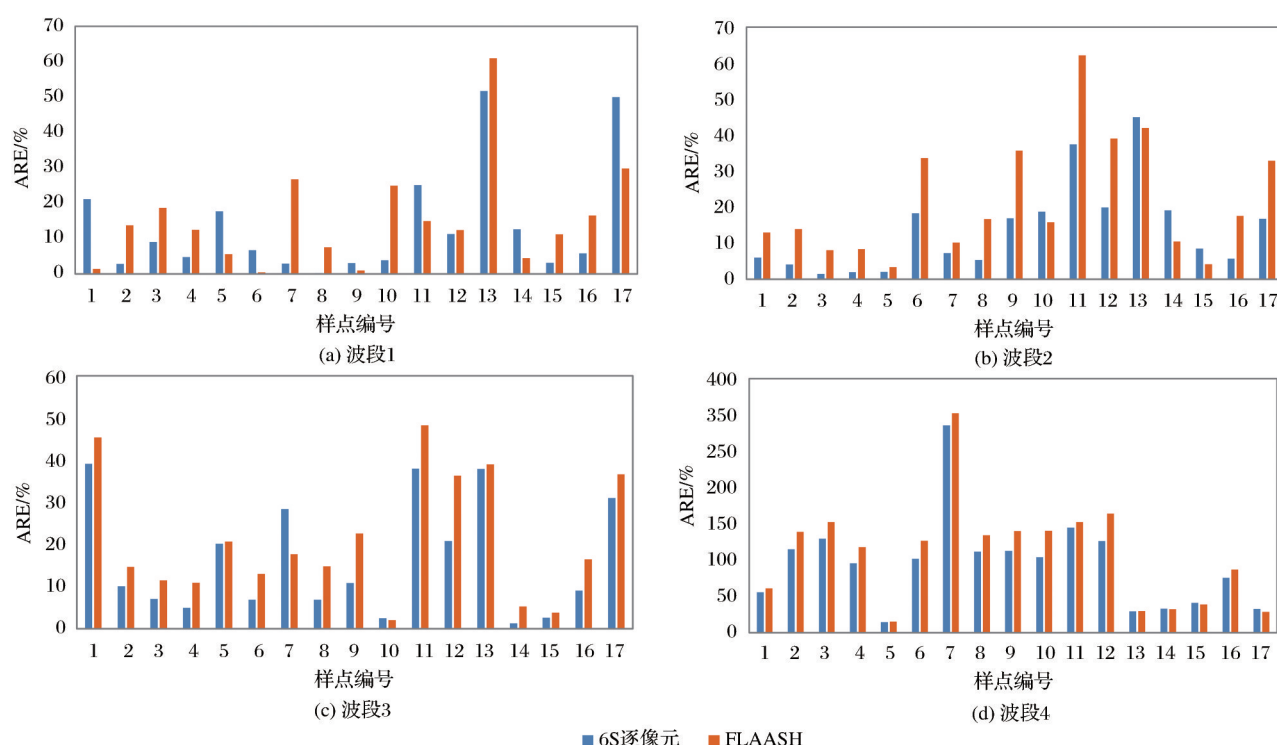


图9 6S 逐像元大气校正与 FLAASH 校正平均相对误差

Fig.9 AREs of atmospheric correction by 6S pixel by pixel model and FLAASH

洋型气溶胶的校正结果最好(图3)。对于 FLAASH 方法,假设 AOD 为 1.002 3(参照文献[31]中的公式转换成能见度 8.96 km),分别使用城市型或海洋型气溶胶类型进行大气校正,与实测光谱比较表明,海洋型气溶胶的结果优于城市型。一般认为,空间动力学直径 $>1 \mu\text{m}$ 的海盐气溶胶粒子随海洋气团进入陆地的过程中,在重力和湍流的作用下,其浓度会以指数形式衰减,从而迅速从大气中去除,其空间尺度大约为 10 km ^[35]。Willison 等^[36]研究指出,海洋气溶胶对离海岸 100 km 以外的大气气溶胶粗、细粒子的质量贡献分别为 $10\% \sim 20\%$ 和 $2\% \sim 3\%$ 。而本文的结果表明,基于 AERONET 观测值的大气模式和气溶胶浓度条件,海洋型气溶胶更适用于春季太湖 GF-1/WFV 影像的大气校正。这可能是由于 4 月底 5 月初太湖地区降雨量逐渐增多,相对湿度的增加,大气中水溶性的细粒子增加^[37];另外受到季风气候影响,气团从海洋向大陆运动,从海洋上空带来的大量的细粒子气溶胶^[38]。也有文献表明海洋型气溶胶适用于沿海的太湖地区^[39],本文采用海洋型气溶胶用于 6S 大气校正,结论与之一致。

对于太湖地区大气校正,已有的研究中大多针对的是中低空间分辨率的遥感影像,如 MODIS^[40]、

TM^[11] 和 HJ1^[26] 等,且这些研究较少考虑不同气溶胶粒子比重大气校正结果的影响。随着高空间分辨率遥感影像应用的普及,使用高分影像进行内陆水体的水色遥感应用将日益广泛。目前针对高分影像水色遥感产生了大量的大气校正算法^[12-15],但这些算法在水体区域的应用效果讨论较少。本文对太湖地区 GF1 影像的大气校正结果表明,海洋型气溶胶可以用于春季太湖数据,6S 逐像元模型可以改进校正精度。本文研究对于太湖水体的大气校正可以提供一定的应用参考。

6 结 语

使用太湖地区的 GF-1 WFV 影像和同步实测光谱数据,基于 6S 大气校正参数的敏感性分析结果,逐像元计算了观测几何,使用分区气溶胶类型,使用分区暗像元和 Spline 插值计算 AOD,提出了一种 6S 逐像元大气校正方法。实验结果表明,气溶胶模式对大气校正的影响最大,逐像元计算观测几何和气溶胶参数大气校正精度有所改进。与 FLAASH 方法相比,逐像元的 6S 模型校正后 4 个波段的平均相对误差分别降低了 1.84% 、 7.78% 、 4.79% 和 17% ,4 个波段的平均值降低了 7.85% 。本文提出的 6S 逐像元模型对于水体信息的大气校

正精度有所改进。

下一步需要使用多期星地同步数据对该校正方法进行进一步验证,构建针对太湖地区的高精度大气校正算法。同时,还需进一步扩展本算法的应用范围,针对不同的湖泊、河流和水库等水体信息选取适宜的大气参数,构建校正参数查找表,改进6S辐射传输模型在水色遥感大气校正中的适用性。

致谢:本文AERONET太湖站气溶胶光学厚度数据由中国科学院南京地理与湖泊研究所的马荣华研究员提供,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] Kirk J T O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [2] Kaufman Y J, Wald A, Lorraine L A, *et al.* Remote Sensing of Aerosol over the Continents with the Aid of a 2.2 m Channel [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997(35):1286-1298.
- [3] Shen Yan, Niu Zheng, Chen Fang, *et al.* Surface Reflectance Retrieval of Hyperion Hyperspectral Imagery based on the Empirical Line Calibration Method [J]. Geography and Geo-information Science, 2007, 23(1):27-30.[沈艳, 牛铮, 陈方, 等. 基于经验线性法的Hyperion高光谱图像地表反射率反演研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1):27-30.]
- [4] Richter R. A Spatially Adaptive Fast Atmospheric Correction Algorithm [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(6):1201-1214.
- [5] Wang M, Shi W. The NIR-SWIR Combined Atmospheric Correction Approach for MODIS Ocean Color Data Processing [J]. Optics Express, 2007, 15(24):15722-33.
- [6] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3):675-686.
- [7] Zhao Chunjiang, Song Xiaoyu, Wang Jihua, *et al.* An Algorithm based on 6S Model for Removing Atmospheric Effects from Satellite Imagery Pixel by Pixel [J]. Optical Technique, 2007, 33(1):11-15.[赵春江, 宋晓宇, 王纪华, 等. 基于6S模型的遥感影像逐像元大气纠正算法[J]. 光学技术, 2007, 33(1):11-15.]
- [8] Zhao Kai, Zhao Zhizhong, Xu Jianbo, *et al.* Atmospheric Correction of Remote Sensing Images in the Source Region of the Yellow River and Analysis of Its Effect [J]. Geography and Geo-information Science, 2012, 28(4):46-50.[赵凯, 赵之重, 徐剑波, 等. 黄河源区遥感数据的大气校正及其效果分析[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(4):46-50.]
- [9] Peng Nina, Yi Weining, Fang Yonghua. Atmospheric Correction of Satellite Imagery for Coastal Areas Using MODIS Data [J]. Journal of Atmosphere and Environmental Optics, 2007, 2(6):504-508.[彭妮娜, 易维宁, 方勇华. 利用MODIS数据进行海岸带卫星图像大气校正[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6):504-508.]
- [10] Zhou Yu. Atmospheric Correction Method for MODIS Imagery over Case II Water based on the Synchronous in Situ Spectra-A Case Study on Taihu Lake [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.[周宇. 基于同步实测水体光谱的MODIS图像二类水体大气校正. 南京:南京师范大学, 2013.]
- [11] Wang Haijun. Study on Atmospheric Correction Methods for Water Color in Taihu Lake [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2007.[王海君. 太湖水体遥感大气校正方法研究[D]. 南京:南京师范大学, 2007.]
- [12] Wang Zhongting, Li Xiaoying, Li Shenshen, *et al.* Quickly Atmospheric Correction for GF-1 WFV Cameras [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(3):353-360.[王中挺, 李小红, 李莘莘, 等. GF-1星WFV相机的快速大气校正[J]. 遥感学报, 2016, 20(3):353-360.]
- [13] Sun Ling, Yu Huiyong, Fu Qiaoyan, *et al.* Aerosol Optical Depth Retrieval and Atmospheric Correction Application for GF-1 PMS Supported by Land Surface Reflectance Data [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2):216-228.[孙林, 于会泳, 傅俏燕, 等. 地表反射率产品支持的GF-1/PMS气溶胶光学厚度反演及大气校正[J]. 遥感学报, 2016, 20(2):216-228.]
- [14] Hou Xuzhou. Atmospheric Correction and Its Evaluation of Gaofen-1 Remote Sensing Image [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2014.[侯旭洲. 高分一号卫星遥感影像大气校正与效果评价方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.]
- [15] Liu Jia, Wang Liming, Yang Lingbo, *et al.* GF-1 Satellite Image Atmospheric Correction based on 6S Model and Its Effect [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19):159-168.[刘佳, 王利民, 杨玲波, 等. 基于6S模型的GF-1卫星影像大气校正及效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19):159-168.]
- [16] Wang M, Antoine D, Deschamps P Y, *et al.* Atmospheric Correction for Remotely-Sensed Ocean-Color Products [M]. Canada: International Ocean-Colour Coordinating Group, 2010:15-58.
- [17] Pang Yixin, Hu Fangchao, Wang Liuhong, *et al.* Distribution of Aerosol Optical Depth in Taihu Lake and Its Application of Atmospheric Correction [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(3):361-366.[潘一新, 胡方超, 汪柳红, 等. 太湖地区气溶胶光学厚度的分布及其在大气校正中的应用[J]. 大气科学学报, 2013, 36(3):361-366.]
- [18] Wang Qiao, Zhang Bin, Wei Yuchun, *et al.* Remote Sensing Monitoring Experiment of the Water Environment in Taihu Lake and Its Software Realization [M]. Beijing: The Science Press, 2008:116-117.[王桥, 张兵, 韦玉春, 等. 太湖水体环境遥感监测实验及其软件实现[M]. 北京:科学出版社, 2008:116-117.]

- [19] Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong, *et al.* The Methods of Water Spectra Measurement and Analysis I: 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 I: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1):37-44.]
- [20] Li Long, Shi Runhe, Zhang Lu, *et al.* Data Fusion of MODIS AOD and OMI AOD over East China Using Universal Kriging [J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(10):1224-1233.[李龙, 施润和, 张璐, 等. 华东地区MODIS与OMI气溶胶光学厚度数据融合[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(10):1224-1233.]
- [21] Hu Fangchao, Wang Zhenhui, Zhang Bin, *et al.* Study on Method for Determining Atmospheric Aerosol Type Using Remote Sensing Experimental Data [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2):312-317.[胡方超, 王振会, 张兵, 等. 遥感试验数据确定大气气溶胶类型的方法研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2):312-317.]
- [22] Jacobson M Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling (2nd ed) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 317.
- [23] Liang S. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces [M]. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
- [24] Chen Hao, Gu Xingfa, Cheng Tianhai, *et al.* Characteristics of Aerosol Types over China [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(6):1559-1571.[陈好, 顾行发, 程天海, 等. 中国地区气溶胶类型特性分析[J]. 遥感学报, 2013, 17(6):1559-1571.]
- [25] Li Junsheng, Zhang Bin. Atmospheric Correction of CBERS Satellite Imagery with MODIS Data [J]. Science in China (Series E): Information Science, 2006, 36(Z1): 141-150.[李俊生, 张兵. MODIS 数据辅助中巴资源卫星图像大气校正研究[J]. 中国科学(E 辑): 信息科学, 2006, 36(增刊): 141-150.]
- [26] Jin Xin, Li Yunmei, Wang Qiao, *et al.* Atmospheric Correction of Satellite HJ-1 CCD Image based on Aerosol Distribution in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4):504-512.[金鑫, 李云梅, 王桥, 等. 基于太湖气溶胶类型分区的环境一号卫星 CCD 大气校正[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4):504-512.]
- [27] Chen Jun, Sun Jihong, Fu Jun. Using the Sub-area Dark Pixel and Spline Interpolation Approach to Estimate the Aerosol Optical Thickness on Taihu Lake [J]. Remote Sensing Information, 2011, 19(3):33-37.[陈军, 孙记红, 付军. 基于分区暗像元和 Spline 插值方法估算太湖气溶胶光学厚度[J]. 遥感信息, 2011, 19(3):33-37.]
- [28] Zhang Zhiwei, Wang Hongbin, Zhang Lei, *et al.* Analysis and Comparison of the Aerosol Microphysical Properties at Three AERONET Sites in China [J]. China Environmental Science, 2014, 34(8):1927-1937.[张志薇, 王宏斌, 张镭, 等. 中国 3 个 AERONET 站点气溶胶微物理特性分析及比较[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8):1927-1937.]
- [29] Han Yafang, Wu Lixin, Bai Yang, *et al.* Long-term Variation of Aerosol Optical Properties at Tai Lake's North Bank [J]. China Environmental Science, 2017, 37(7):2492-2503.[韩亚芳, 吴立新, 白杨, 等. 太湖北岸气溶胶光学特性长期变化特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7):2492-2503.]
- [30] Hu Shunshi, Zhang Lifu, She Xiaojun, *et al.* Design and Interpolation of a General Look-up Table for Remote Sensing Image Atmospheric Correction [J]. Journal of Remote Sensing, 2014(1):45-60.[胡顺石, 张立福, 余晓君, 等. 遥感影像大气校正通用查找表的设计与插值算法[J]. 遥感学报, 2014, 18(1):45-60.]
- [31] Zhao Xiujuan, Chen Changhe, Yuan Tie, *et al.* Lanzhou Aerosol Optical Depth in Winter and Their Relation with Visibility [J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(4):617-622.[赵秀娟, 陈长和, 袁铁, 等. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系[J]. 高原气象, 2005, 24(4):617-622.]
- [32] Rao Jiawang, Ma Ronghua, Duan Hongtao, *et al.* Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features: Results of In-site Measurements [J]. Environmental Science, 2012, 33(7):2158-2164.[饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 等. 太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析[J]. 环境科学, 2012, 33(7):2158-2164.]
- [33] Higurashi A, Nakajima T. Detection of Aerosol Types over the East China Sea near Japan from four Channel Satellite Data [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(17):1836.doi: 10.1029/2002GL015357.
- [34] Lee K H, Li Z, Man S W, *et al.* Aerosol Single Scattering Albedo Estimated across China from A Combination of Ground and Satellite Measurements [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112: D22515. doi: 10.1019/2007JD009077.
- [35] Wang Min, Hu Min. Mutual Transport between Marine and Continental Aerosols and Their Impact on Each Other's Environmental System [J]. Marine Environmental Science, 2000, 19(2):70-74.[王珉, 胡敏. 陆地与海洋气溶胶的相互输送及其对彼此环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(2):70-74.]
- [36] Willison M J, Clarke A G, Zeki E M. Chloride Aerosols in Central Northern England [J]. Atmospheric Environment, 1989, 23(10):2231-2239.
- [37] Shettle E P, Fenn R W. Models for the Aerosols of The Lower Atmosphere and The Effects of Humidity Variations on their Optical Properties [M]. Washington DC: United States Air Force, Air Force Geophysics Laboratory, Air Force Systems Command, 1979.
- [38] Zhang L, Liao H, Li J P. Impacts of Asian Summer Monsoon on Seasonal and Inter Annual Variations of Aerosols over Eastern China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D0):D00K05.doi:10.1029/2009JD012299.
- [39] Xu Hua, Gu Xingfa, Li Zhengqiang, *et al.* Atmospheric Correction Method for HJ-1 CCD Imagery over Waters based on Radiative Transfer Model [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(10):2798-2803.[许华, 顾行发, 李正强, 等. 基于辐射传输模型的环境一号卫星 CCD 相机的水体大气校正方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(10):2798-2803.]

[40] Li Guoyan, Zhang Zhongyuan, Zheng Yanfen, *et al.* Atmospheric Correction of MODIS and Its Application in Cyanobacteria Bloom Monitoring in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sci-*

ences, 2008, 20(2):160-166.[李国砚, 张仲元, 郑艳芬, 等. MODIS 影像的大气校正及在太湖蓝藻监测中的应用[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(2):160-166.]

Atmospheric Correction of GF-1/WFV Image in Taihu Lake based on the 6S Model Pixel by Pixel

Cheng Chunmei¹, Wei Yuchun², Li Yuan³, Tu Qiangang¹

(1.College of Geomatics and Municipal Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China;

2.Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China;

3.School of Tourism and Urban-rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The spectral information of water is weak, and the commonly used radiation transfer model has poor accuracy in atmospheric correction of water body. Based on the Gaofen-1 WFV image (GF-1/WFV) and the synchronous in situ spectra covering Taihu Lake on 29th, April, 2016, the sensitivity analysis of the input parameters in 6S model was first performed, and then the image was corrected using 6S model using the observation geometry calculated pixel-by-pixel, the partitioned aerosol type and the Aerosol Optical Depth (AOD) determined by the partitioned dark pixel and Spline interpolation. The experimental results show that the aerosol type has the greatest influence on the 6S atmospheric correction results. Compared with the FLAASH method, the 6S method using the observation geometry and aerosol parameters calculated pixel-by-pixel significantly improved the atmospheric correction accuracy, with the ARE (Average Relative Error) of the four bands reduced by 1.84%, 7.78%, 4.79%, 17%. The 6S atmospheric correction method pixel by pixel with the input of accurate atmospheric parameters can improve the correction accuracy of the remote sensing reflectance above water surface.

Key words: GF-1; WFV; Atmospheric correction; 6S; Taihu Lake