

MERIS 影像水环境遥感大气校正算法评价——以鄱阳湖叶绿素 a 浓度反演为例*

曾 群^{1,2}, 张海东², 陈晓玲³, 田礼乔^{3**}, 李文凯², 王国良³

(1: 华中师范大学学报编辑部, 武汉 430079)

(2: 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

(3: 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: MERIS 是 2002 年发射的在轨运行近 10 年的 ENVISAT-1 卫星上搭载的主要传感器之一, 在波段设置和辐射灵敏度等方面有非常突出的优势, 能够较好地运用于 II 类水体叶绿素 a 浓度反演, 但 II 类水体的大气校正仍然是亟待解决的一个关键问题. 以我国第一大淡水湖——鄱阳湖为研究区域, 采用 FLAASH、6S、BEAM 和 QUAC 共 4 种大气校正算法对 2005 和 2011 年具有同步实测光谱数据的鄱阳湖 ENVISAT-1 卫星 MERIS 影像进行大气校正处理, 并对 12 种叶绿素 a 浓度反演模型的波段组合因子进行大气校正效果的对比分析. 结果表明: (1) 4 种大气校正中, 大气校正结果精度由高到低表现为 FLAASH>6S>BEAM>QUAC, 平均相对误差分别为 31.13%、31.88%、69.48% 和 42.64%; 决定系数 (R^2) 分别为 0.60、0.57、0.38 和 0.24; (2) 在 12 种叶绿素 a 浓度反演模型的波段组合因子中, FLAASH 得到的结果最优, 其次是 6S, BEAM 和 QUAC 最差, 在 FLAASH 算法中, 由 665、708 和 753 nm 3 个波段遥感因子 ($(R_{rs}(510)/[R_{rs}(443)/R_{rs}(560)])$) 组成的模型精度最高, 平均相对误差为 25.12%, R^2 为 0.74. 建议采用 FLAASH 大气校正结果组成这个波段组合进行鄱阳湖叶绿素 a 浓度反演.

关键词: 水色遥感; 大气校正; 叶绿素 a; MERIS; FLAASH; 6S; BEAM; QUAC; 鄱阳湖

Evaluation on the atmospheric correction methods for water color remote sensing by using MERIS image: A case study on chlorophyll-a concentration of Lake Poyang

ZENG Qun^{1,2}, ZHANG Haidong², CHEN Xiaoling³, TIAN Liqiao^{3**}, LI Wenkai² & WANG Guoliang³

(1: Editorial Department of Journal, Central China Normal University, Wuhan 430079, P.R.China)

(2: School of Urban and Environment Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, P.R.China)

(3: State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, P.R.China)

Abstract: MERIS is the sensor of ENVISAT-1 satellite in orbit nearly 10 years, which was launched in 2002. The band setting and radiation sensitivity of MERIS could well be applied to chlorophyll-a concentration inference, but the atmospheric correction in Case II water is still a key problem. Taking the Lake Poyang, the biggest freshwater lake in China as a case, the results of ENVISAT-1 satellite MERIS images using FLAASH, 6S, BEAM and QUAC atmospheric correction algorithms in 2005 and 2011 with simultaneous *in-situ* spectral data was evaluated. The band combination factor of 12 chlorophyll-a retrieval models were also assessed. Results show that: (1) the order of atmospheric correction accuracy from high to low are FLAASH, 6S, BEAM, QUAC, with the mean relative error of 31.13%, 31.88%, 69.48% and 42.64%, respectively; and the determination coefficients (R^2) of 0.60, 0.57, 0.38 and 0.24, respectively. (2) Among the band-combined chlorophyll-a retrieval models, FLAASH is the best one, followed by 6S, BEAM and QUAC. As for FLAASH algorithm, the three bands ($(R_{rs}(510)/[R_{rs}(443)/R_{rs}(560)])$) model is

* 国家自然科学基金项目(41571344, 41331174)、中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-201514)和 2015 测绘地理信息公益性行业科研专项(201512026)联合资助. 2015-07-25 收稿; 2016-03-02 收修改稿. 曾群(1971~), 女, 博士, 副教授; E-mail: zengqun@mail.ccnu.edu.

** 通信作者; E-mail: tianliqiao@whu.edu.cn.

the most accurate one, the MRE is 25.12%, the determination coefficient is 0.74. This band combination of FLAASH atmospheric correction results is recommended for the chlorophyll-a inference in the Lake Poyang.

Keywords: Water color remote sensing; atmospheric correction; chlorophyll-a; MERIS; FLAASH; 6S; BEAM; QUAC; Lake Poyang

和许多发展中国家一样,中国的水污染已经成为一个非常严重的环境问题,并且给人类的健康带来了很大的风险^[1]. 由于自然环境的变化和人类活动的影响,中国的一些大湖正在遭受越来越严重的富营养化(如太湖、巢湖)^[2-4],并且导致严重的环境问题和社会问题. 鄱阳湖作为我国第一大淡水湖,具有涵养水源、调蓄洪水、调节气候和保护土壤等生态功能^[5]. 随着社会经济的快速发展,近年来鄱阳湖也有着水体富营养化的趋势^[6-7]. 叶绿素 a 浓度不仅是重要的水色参数之一,也是中国环境监测总站推荐的湖泊(水库)营养化评价指标之一. 因此,鄱阳湖水体叶绿素 a 浓度的监测对于水质、水环境的监控以及社会经济可持续发展有重要的现实意义.

常规的叶绿素 a 逐点采样方法不仅受诸多条件限制,而且仅仅能够提供空间上的点状信息,不能同步提供整个水域叶绿素 a 浓度的空间分布情况,遥感具有视点高、视域广、数据获取快和可重复覆盖、连续观测的特点,能够对叶绿素 a 浓度进行有效监测. 常用的水色传感器 MODIS 和 SeaWiFS 具有较高的信噪比,但是 1100 m 的空间分辨率限制了其在较小水域面积中的应用,而 Landsat TM/TM+ 虽然有 30 m 的空间分辨率,但是其有限的光谱设置和较低的信噪比依然不能很好地解决在浑浊、动态水域的叶绿素 a 浓度反演问题. 中等分辨率成像光谱仪(Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument; MERIS)是 ENVISAT-1 上搭载的主要传感器之一,空间分辨率为 300 m,地面刈幅宽为 1150 km,与 MODIS、Landsat 传感器相比,在波段设置和辐射灵敏度等方面都有较大的优势,是目前最有优势的能用于叶绿素 a 浓度反演的水色传感器之一^[8].

水体区域作为一种暗目标信号,其有效辐射信号(离水辐亮度)仅占传感器总信号的 10% 左右(大洋 I 类水体)^[9]. 对于水色遥感而言,首要问题在于大气校正. Gordon 提出的大气校正方法在 I 类水体得到广泛应用^[10],但不适用于沿海和内陆 II 类水体区域. 欧洲空间局(European Space Agency, ESA)发展的 MERIS 数据处理软件 BEAM 内嵌的 II 类水体大气校正算法能否适合中国浑浊水体区域还需要进一步验证. 目前,在鄱阳湖叶绿素 a 浓度反演研究中,只有冯练等^[11]通过一种新的经验算法对鄱阳湖叶绿素 a 浓度进行过相应的研究,但并没有从大气校正的角度来对鄱阳湖叶绿素 a 浓度进行深入探讨.

本文采用 FLAASH、6S、BEAM 和 QUAC 共 4 种不同的大气校正算法,以鄱阳湖为研究区域,对 2005 和 2011 年两景具有同步实测光谱数据的 MERIS 影像进行处理并对比分析,来综合评判 4 种算法的优缺点和适用性,以期对鄱阳湖水域叶绿素 a 浓度的动态监测提供基础支撑.

1 研究区域及数据预处理

1.1 研究区域

鄱阳湖(28°22′~29°45′N, 115°47′~116°45′E)位于江西省北部、长江南岸,是我国最大的淡水湖(图 1). 有着典型的过水性、吞吐型、季节性内陆湖泊的特征^[12],鄱阳湖上承赣江、抚河、信江、饶河和修水“五河”之水,下接长江,经调蓄后由湖口注入长江. 近年来由于工业废水和生活用水的排放,鄱阳湖水质越来越差,水体富营养化趋势进一步加剧^[12-13].

1.2 数据源

1.2.1 实测数据 2005 年 7 月 4 日和 2011 年 7 月 24 日,对鄱阳湖进行 2 次野外观测,获取 20 个站位(图 1)的光谱数据和水质数据等现场实测数据. 水体光谱测量采用美国 Ocean Optics 公司的 HR2000 光纤光谱仪,该光谱仪的波段范围 200~1100 nm,共 2048 个波段,最高光谱分辨率为 0.035 nm(FWHM). 采样当天,天空晴朗无云,水面少有微风. 数据以 12 b 格式存储,积分时间可调(3 ms~65 s),视场角可调. 采用 NASA 和 SIMBIOS 推荐的观测几何参数,即仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 θ_v 和仪器与海面法线方向的夹角 θ_w ($\theta_v = 135^\circ$, $\theta_w = 40^\circ$),对水体进行水面以上法光谱测量,并推导出水体遥感反射率($1/\text{sr}$).

1.2.2 影像数据 本文采用的卫星遥感数据为 MERIS 影像,对于水体光学特征复杂的鄱阳湖而言,能更好地

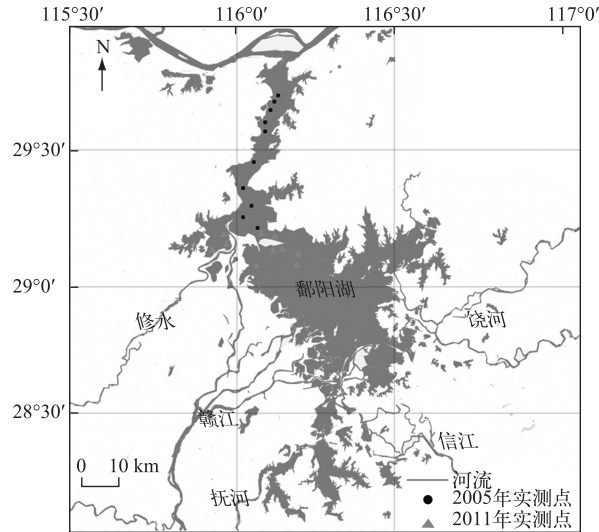


图1 鄱阳湖 2005 年 7 月 4 日和 2011 年 7 月 24 日 MERIS 影像及同步采样站点分布
Fig.1 Location of sampling sites in Lake Poyang on July 4th 2005 and July 24th 2011

发挥 MERIS 在波段设置和辐射灵敏度方面的优势. 并且在国内外已经有很多的专家学者利用 MERIS 影像评估内陆和沿海水质的案例^[7]. 综合考虑云覆盖卫星数据质量与获取时间、太阳光照条件变化、实测数据质量等因素, 选取 2005 年 7 月 4 日和 2011 年 7 月 24 日 MERIS 两景鄱阳湖区域无云 MERIS 影像进行大气校正. 从欧洲空间局网站 <http://eopi.esa.int/esa/esa/> 可以获得更多关于 MERIS 传感器及相关信息. 获取的 MERIS 影像为原始 DN 值, 在大气校正处理前, 采用公式(1)进行辐射定标处理:

$$L_{\lambda} = gain \cdot DN + offset \quad (1)$$

式中, L_{λ} 为 MERIS 影像波段的光谱辐射亮度 ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$), $gain$ 和 $offset$ 分别为绝对定标增益和偏移系数, 可以从头文件中获得, DN 为原始影像灰度值.

2 MERIS 影像大气校正处理方法

2.1 FLAASH 大气校正

FLAASH 是光学成像研究所-波谱科学研究所 (Spectral Sciences Inc.) 在美国空军研究实验室 (U.S. Air Force Research Laboratory) 支持下开发的大气校正模块. 波谱科学研究所 1989 年大气辐射传输模型开发初期就广泛从事 MODTRAN 的研究工作, 已成为大气辐射传输模型开发过程中不可缺少的一员. FLAASH 能适用于高光谱遥感数据和多光谱遥感数据处理^[12, 14-15].

选择 ENVI(4.8) 软件中的 FLAASH 大气校正模块对两景 MERIS 影像进行大气校正. 校正前需要将影像存储格式由 BSQ(波段顺序格式) 转换成 BIP(波段逐像元交叉顺序) 或 BIL(波段逐行交叉顺序). 其中, FLAASH 大气校正模块所需的中心经纬度、传感器高度、飞行时间、地面分辨率等具体参数均可在头文件 (.hdr) 中获得. 大气模型选择农村型, 气溶胶模型根据查找表获得, 大气能见度是从同步的实测 MICROTOS II 太阳光度计获取的 550 nm 波段的气溶胶光学厚度转换得到(表 1).

2.2 6S 大气校正

6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) 辐射传输模型考虑了气体吸收分子和气溶胶散射, 在太阳—地物—传感器的光线传输路径中, 对光线受大气的影晌进行不同的描述, 其中包括 7 种大气模式和 3 种用户自定义大气模式、8 种气溶胶模式和 4 种用户自定义气溶胶模式. 在遥感观测的太阳—目标—传感器这种模式中, 无论是使用卫星或是飞机, 获取数据的过程中都不可避免地受到大气的影晌. 6S 就是为了模拟这种地气系统中的太阳辐射, 计算卫星入瞳处的辐射能量, 通过这种模拟就可以知道大气对太

表 1 FLAASH 大气校正输入参数

Tab.1 The input parameters of FLAASH atmospheric correction model for MERIS

卫星参数	传感器类型	MERIS	
几何参数	观测日期	2005 年 7 月 4 日	2011 年 7 月 24 日
	传感器高度	768 km	768 km
	空间分辨率	300 m	300 m
	过境时间(UTC)	02:53:33	02:41:08
	中心经纬度	29.79°N, 114.34°E	28.79°N, 118.26°E
大气参数	大气模式	中纬度夏季	中纬度夏季
	气溶胶模式	农村型	农村型
	能见度	28 km	30 km
地物高度		12.68 m(鄱阳湖多年平均水位)	12.68 m(鄱阳湖多年平均水位)

阳辐射的影响大小,由此来进行大气校正^[16-17].

6S 大气校正参数和 FLAASH 输入参数类似,如:卫星参数(传感器类型、传感器高度和波段范围)、几何参数(太阳、卫星天顶角和方位角)、大气参数(大气模式和能见度)和观测目标高度等(表 2)。

表 2 6S 大气校正输入参数

Tab.2 The input parameters of 6S atmospheric correction model for MERIS

	传感器类型	MERIS	
几何参数	传感器高度	768 km	768 km
	太阳天顶角、方位角	102.82°、21.89°	108.63°、22.67°
	卫星天顶角、方位角	284.65°、21.48°	284.44°、20.69°
大气参数	观测日期	2005 年 7 月 4 日	2011 年 7 月 24 日
	气溶胶模式	农村型	农村型
	大气模式	中纬度夏季	中纬度夏季
观测目标高度		12.68 m(鄱阳湖多年平均水位)	12.68 m(鄱阳湖多年平均水位)

通过以上参数信息,利用 6S 模型可以得到 3 个参数(x_a 、 x_b 、和 x_c (表 3))及对应的公式(2)、(3)。计算出校正后的反射率,最后再转换成遥感反射率。

表 3 2005 年 7 月 4 日和 2011 年 7 月 24 日 MERIS 影像 6S 大气校正输出参数

Tab.3 The output parameters of 6S atmospheric correction model for MERIS

MERIS	2005 年 7 月 4 日			2011 年 7 月 24 日		
	x_a	x_b	x_c	x_a	x_b	x_c
Band1	0.02346	0.00231	0.00764	0.00508	0.21096	0.15904
Band2	0.00415	0.13091	0.12353	0.00438	0.13091	0.12353
Band3	0.00423	0.07887	0.08726	0.00446	0.07887	0.08726
Band4	0.00435	0.03744	0.05723	0.00459	0.03744	0.05723
Band5	0.00770	0.03463	0.04164	0.00813	0.03463	0.04164
Band6	0.00556	0.02516	0.04172	0.00588	0.02516	0.04172
Band7	0.00596	0.01463	0.03120	0.00630	0.01463	0.03120
Band8	0.00816	0.01618	0.02777	0.00862	0.01618	0.02777
Band9	0.02346	0.00231	0.00764	0.02477	0.00231	0.00764
Band10	0.05947	0.00095	0.00357	0.06280	0.00095	0.00357

$$y = x_a \cdot L - x_b \quad (2)$$

$$\rho = y / (1 + x_c \cdot y) \tag{3}$$

式中, L 为经过辐射定标后的大气层顶辐亮度 ($\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$), ρ 为校正后的反射率.

2.3 BEAM 大气校正

BEAM (Basic ERS & ENVISAT (A) ATSR and MERIS Toolbox) 是 ESA 提供的处理 (A) ATSR、MERIS 与 ASAR 数据的软件, 完全由 Java 语言编写可以实现 MERIS 数据基本的可视化分析处理功能, 并且为了用户方便灵活地使用处理 ENVISAT 的有关数据提供了 API 接口, 可以直接在 www.envisat.com 下载. BEAM 还提供了 MERIS 数据的神经网络大气校正算法, 得到水体的叶绿素、悬浮物质以及溶解有机物浓度. 本实验运用 BEAM 5.0 对 2005 年和 2011 年两景 MERIS 影像进行大气校正, 其校正流程见图 2.

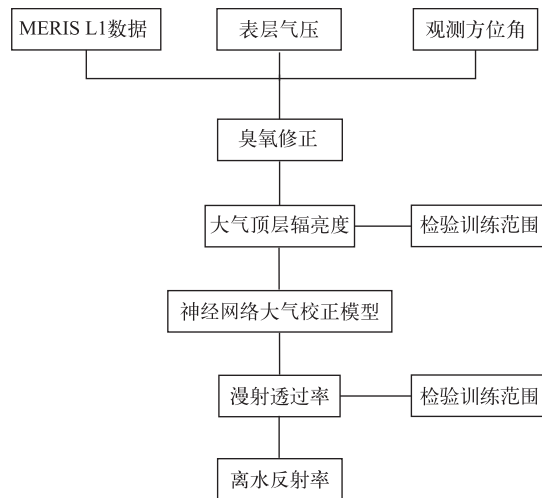


图 2 BEAM 大气校正流程图

Fig.2 The flow chart of BEAM atmospheric correction

2.4 QUAC 大气校正

QUAC 它可以不需要配套信息而是直接从影像 (观测像元光谱) 内获取大气补偿参数, 模型对大气参数的依赖性小, 实现比较容易. QUAC 模型虽在精度上不及 FLAASH, 但它对输入参数和仪器标定精度的依赖性小, 有其特定的适用性^[14-16].

在 ENVI 软件中, 通过 QUAC 工具可以自动从影像上收集不同物质的波谱信息, 获取经验值完成高光谱和多光谱的快速大气校正. 输入的数据可以是辐亮度值、表观反射率或者是无单位的 raw 数据, 并且存储格式和类型没有特殊要求, QUAC 大气校正流程见图 3, 但必须提供多光谱和高光谱传感器数据的每个波段的中心波长信息.

3 大气校正结果分析

3.1 大气校正结果

为了评价 4 种大气校正算法效果, 以卫星过境时间前后 3 h 为时间窗口, 选取实测光谱转换后的同步等效遥感反射率共计 20 个点来评价 4 种大气校正结果的精度.

总体来讲, FLAASH 和 6S 算法校正结果比较接近, 并且表现比较理想, 大气校正平均相对误差分别为 31.43% 和 32.02%, R^2 分别为 0.60 和 0.57. BEAM 大气校正结果整体偏低, 大气校正平均相对误差也最大, 达到 65.25%, R^2 为 0.38. QUAC 方法得到的平均相对误差为 42.93%, R^2 为 0.24, 大气校正结果并不理想 (图 4).

单波段而言, 4 种算法表现差异较大. 其中, FLAASH 算法中, 表现最好的是第 5 波段, 平均相对误差仅为 10.75%, R^2 为 0.82. 6S 算法中, 表现最好的是第 7 波段, 平均相对误差为 21.3%, R^2 为 0.74. BEAM 算法中, 表现最好的是第 6 波段, 平均相对误差为 57.92%, R^2 为 0.59. QUAC 算法中, 表现最好的是第 3 波段, 平

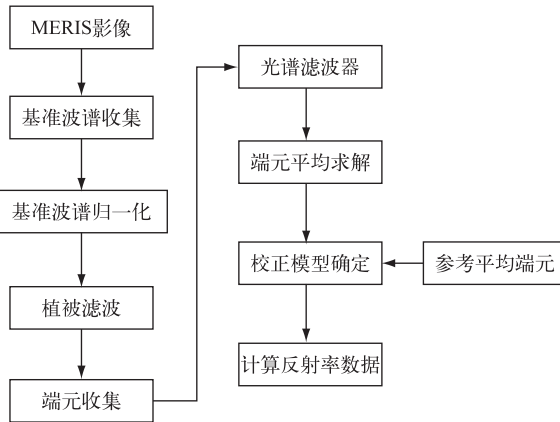


图 3 QUAC 大气校正流程图

Fig.3 The flow chart of QUAC atmospheric correction

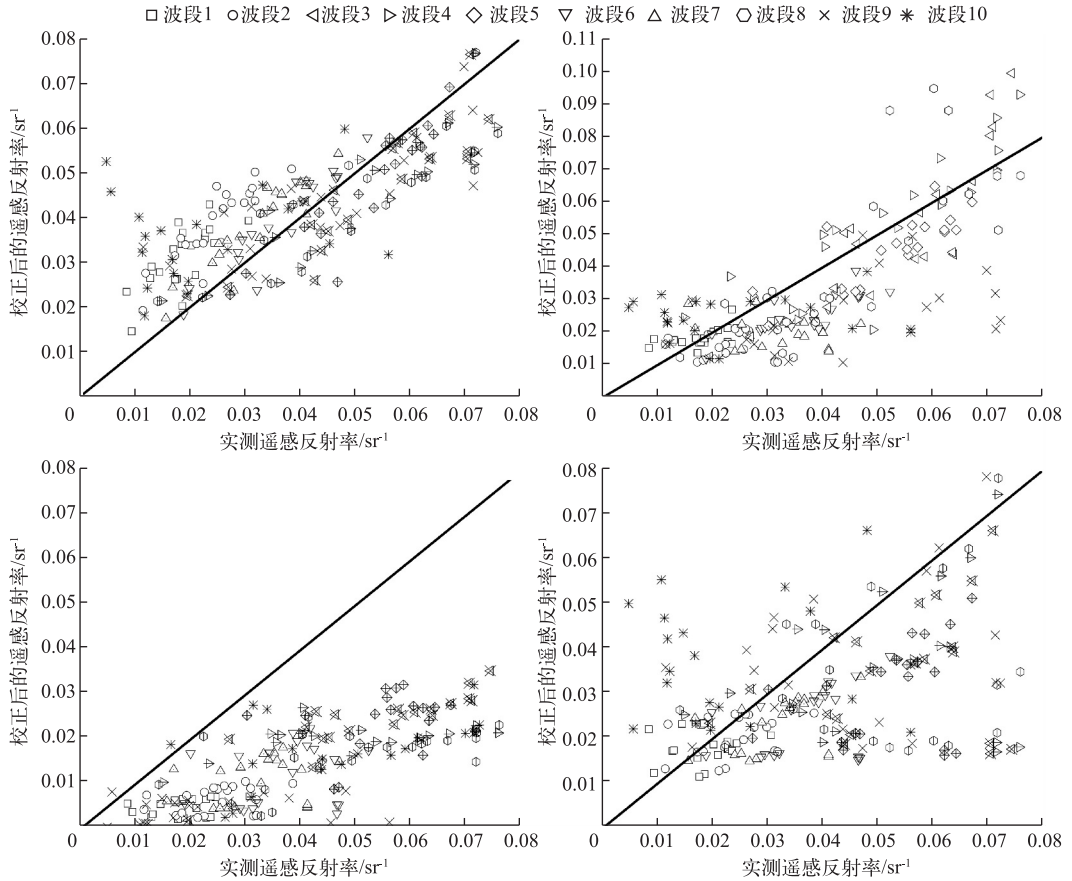


图 4 4 种大气校正算法结果比较

Fig.4 Comparison of the atmospheric correction results provided by methods

均相对误差为 30.2%, R^2 为 0.35。查看站位图可以发现,大气校正误差较大的点基本位于鄱阳湖水域的北部与长江交汇的地方,湖水与江水的交换可能是造成误差较大的原因之一。

3.2 叶绿素 a 浓度反演分析

在叶绿素 a 浓度反演上,国内外专家学者提出了一系列水体叶绿素 a 浓度遥感定量反演模型,而建立模型主要在于遥感因子的构建. 本文收集了 12 种叶绿素 a 浓度反演模型,来综合评价 4 种大气校正算法组成的遥感因子用于鄱阳湖叶绿素 a 浓度反演各自的优缺点(表 4).

表 4 叶绿素 a 浓度反演的经验模型及文献来源

Tab.4 The empirical model of chlorophyll-a concentration and literature source

反演模型	遥感因子	研究区域	来源
Y1	$R_{rs}(709)/R_{rs}(665)$	亚速海(俄罗斯、乌克兰)	[18]
Y2	$R_{rs}(709)-R_{rs}(665)$	芬兰湾(芬兰)	[19]
Y3	$R_{rs}(412)/R_{rs}(665)$	伊利湖(美国、加拿大)	[20]
Y4	$R_{rs}(490)/R_{rs}(560)$	伊利湖(美国、加拿大)	[20]
Y5	$R_{rs}(412)/R_{rs}(665)+R_{rs}(412)/R_{rs}(665)^2$	伊利湖(美国、加拿大)	[20]
Y6	$R_{rs}(412)/R_{rs}(665)/R_{rs}(560)^2$	伊利湖(美国、加拿大)	[20]
Y7	$R_{rs}(510)/[R_{rs}(443)/R_{rs}(560)]$	绿湾(美国)	[21]
Y8	$[1/R_{rs}(665)-1/R_{rs}(709)] \cdot R_{rs}(754)$	塔甘罗格湾(俄罗斯)、太湖(中国)	[18,22]
Y9	$[R_{rs}(560)-R_{rs}(681)]/[R_{rs}(560)+R_{rs}(681)]$	鄱阳湖(中国)	[11]
Y10	$R_{rs}(753)/R_{rs}(665)-R_{rs}(753)/R_{rs}(709)$	滇池(中国)	[23]
Y11	$[1/R_{rs}(665)-1/R_{rs}(681)] \cdot R_{rs}(709)$	坦帕湾(美国)	[22]
Y12	$[1/R_{rs}(665)-1/R_{rs}(681)]/[1/R_{rs}(709)-1/R_{rs}(681)]$	坦帕湾(美国)	[22]

以同步实测遥感反射率组成的叶绿素浓度反演遥感因子数据为基础,与 4 种大气校正方法得到的遥感反射率进行对比可以得出,FLAASH 算法中,Y8 的效果最优,相对误差为 25.12%, R^2 为 0.74. 6S 算法中,效果最好的是 Y8,相对误差为 25.7%, R^2 为 0.51. 而不管怎样的波段组合,BEAM 中,Y8 的决定系数为 0.54,相对误差达到 135.27%. QUAC 中,效果最好的是 Y3,相对误差是 86.94%, R^2 为 0.28. QUAC 算法效果均不理想. 从叶绿素 a 浓度反演角度来说,FLAASH 大气校正算法的 Y8 组合因子最适用于鄱阳湖水域(表 5).

表 5 不同叶绿素 a 浓度反演的遥感因子大气校正精度比较分析*

Tab.5 The accuracy comparison of different chlorophyll-a concentration inversion of remote sensing factors

编号	FLAASH		6S		BEAM		QUAC	
	R^2	相对误差	R^2	相对误差	R^2	相对误差	R^2	相对误差
Y1	0.0657	20.13%	0.0961	37.47%	0.1252	34.46%	0.1215	52.05%
Y2	0.12	488.15%	0.15	873.72%	0.26	100.07%	0.15	407.72%
Y3	0.03	100.39%	0.44	26.64%	0.01	33.81%	0.28	86.94%
Y4	0.02	34.90%	0.34	44.87%	0.09	34.80%	0.00	105.89%
Y5	0.03	158.78%	0.44	52.75%	0.009	39.10%	0.26	373.02%
Y6	0.62	158.68%	0.44	45.20%	0.01	283.65%	0.28	310.89%
<u>Y7</u>	<u>0.69</u>	<u>25.95%</u>	0.03	42.43%	0.30	222.62%	0.09	48.55%
<u>Y8</u>	<u>0.74</u>	<u>25.12%</u>	<u>0.51</u>	<u>25.70%</u>	0.54	135.27%	0.01	89.58%
Y9	0.10	91.21%	0.58	96.84%	0.0015	87.13%	0.0039	275.8%
Y10	0.08	809.35%	0.001	1282.04%	0.21	80.04%	0.05	536.14%
Y11	0.04	555.33%	0.29	8279.27%	0.20	483.28%	0.01	692.26%
Y12	0.01	895.88%	0.01	1865.32%	0.01	366.21%	0.01	628.59%

* 下划线表示精度较高的大气校正模型以及对应的叶绿素 a 浓度反演因子.

3.3 误差分析

通过 2005 年和 2011 年 2 次共 20 个同步现场实测数据,对 FLAASH、6S、BAEM 和 QUAC 大气校正算法

的 MERIS 数据处理效果进行对比分析. 通过上述分析可以看出,FLAASH 和 6S 算法除了在前几个波段的校正值偏高,有高估现象,中间几个波段相对误差较小,精度较高. 而 BEAM 和 QUAC 算法都无法获得较好的大气校正效果. 对于鄱阳湖这样的高动态浑浊水体,可能存在以下几点原因:

1) 就算法本身来讲,FLAASH 和 6S 两种大气校正算法都不是针对水体目标开发的,因此在针对水体目标进行大气校正时,有必要进一步对算法进行改进.

2) 卫星数据与实测数据不完全同步. 在对鄱阳湖区域进行实测采样的过程中,实测数据时间不能和影像过境时间完全同步,加上鄱阳湖的高动态特征,尤其是靠近北部湖区,湖水与长江交换明显,使得水体情况变化大,对误差也有一定影响.

3) 鄱阳湖自身水体变化情况大,而 MERIS 影像的空间分辨率为 300 m,另外南北湖区跨度 100 多 km,气溶胶的复杂性以及空间尺度变化大的特点. 在大气校正过程中,选择的是固定的气溶胶光学厚度. 因此对于校正精度也存在一定的误差.

总的来说,鄱阳湖叶绿素 a 浓度较高区域主要分布在鄱阳湖区西部、东部及南部地区(图 5),与冯练等^[11]反演的鄱阳湖叶绿素 a 浓度分布基本一致. 叶绿素 a 浓度的分布主要是由于风速、湖心位置、入湖河流的流速及水量、藻类等共同作用的结果. 鄱阳湖西部,南部湖区由于水面宽度大,水体深度较浅^[24],加上岸边的芦苇分布以及湖北陆地植被干扰,因此叶绿素 a 浓度较高. 鄱阳湖中部水域湖水自净能力较强,北部湖区采砂活动频繁,泥沙含量高,湖泊北部叶绿素 a 浓度较低,南部叶绿素 a 浓度高^[13].

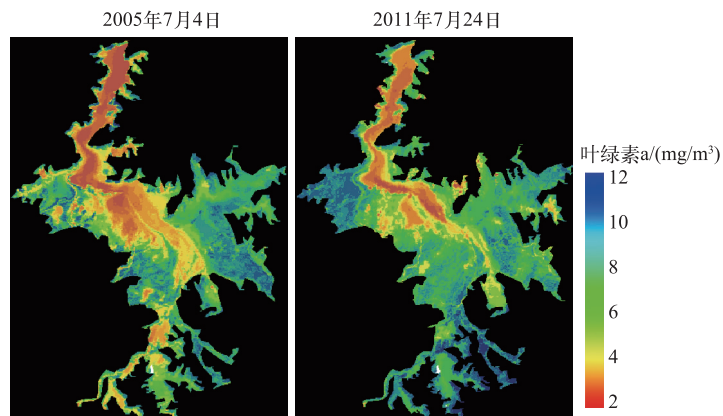


图 5 鄱阳湖 2005 年 7 月 4 日和 2011 年 7 月 24 日叶绿素 a 浓度反演结果

Fig.5 The maps of chlorophyll-a concentrations on July 4, 2005 and July 24, 2011 of Lake Poyang

4 结论

1) FLAASH、6S、BEAM 和 QUAC 4 种大气校正算法中,效果最好的是 FLAASH 算法,平均相对误差为 31.43%. 其次是 6S 算法,平均相对误差为 32.02%,最差的是 BEAM 和 QUAC 算法,平均相对误差分别为 65.25% 和 42.93%.

2) 虽然 FLAASH 和 6S 算法总体上的表现差异不是很大. 但是从单波段来说,FLAASH 算法优于 6S 算法. BEAM 虽然是专门用于处理 MERIS 数据的软件,但是在处理鄱阳湖这样的浑浊水体时,效果并不理想. QUAC 虽然在处理过程,运行效率方面有一定优势,但是精度太低仍然不适用于鄱阳湖水域.

3) 从叶绿素 a 浓度反演角度来说,对于 FLAASH 算法 Y8 模型的相对误差是 25.12%,决定系数是 0.74. 总体来说,建议采用 FLAASH 算法中 Y8 模型对鄱阳湖叶绿素 a 浓度进行反演. 虽然在 4 种大气校正算法中,FLAASH 能够获得相对较好的效果,由于鄱阳湖高动态的典型特点,加之水体中悬浮泥沙及黄色物质等都会对水体信号产生很大的影响,若想获得更为精确的水体光谱信息还需从大气校正方法方面做一定的改善和提高.

5 参考文献

- [1] Liu ZD, Yu XG, Wang ZX. The current water pollution of Taihu drainage basin and the new management proposals. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(4): 467-474.
- [2] Yang L, Lei K, Wei M *et al.* Temporal and spatial changes in nutrients and chlorophyll-a in a shallow lake, Lake Chaohu, China; An 11-year investigation. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(6): 1117-1123.
- [3] Dong BL, Qin BQ, Gao G *et al.* Submerged macrophyte communities and the controlling factors in large, shallow Lake Taihu (China): Sediment distribution and water depth. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(3): 646-655.
- [4] Liu Y, Chen W, Li D *et al.* Cyanobacteria-/cyanotoxin-contaminations and eutrophication status before Wuxi drinking water crisis in Lake Taihu, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(4): 575-581.
- [5] Yu Jinxiang, Liu Yafei, Zhong Xiaolan. Study on water environment carrying capacity and main pollution sources of Poyang Lake. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, **3**(3): 90-93 (in Chinese with English abstract). [余进祥, 刘娅菲, 钟小兰. 鄱阳湖水环境承载力及主要污染源研究. 江西农业学报, 2009, **3**(3): 90-93.]
- [6] Mao Yuting, Zhou Xiaoyu, Wang Maolan. Study on the eutrophication status in Poyang Lake during lower water period. *Journal Nanchang University: Natural Science*, 2014, **38**(6): 595-599 (in Chinese with English abstract). [毛玉婷, 周晓宇, 王毛兰. 枯水期鄱阳湖水体富营养化状态评价. 南昌大学学报: 理科版, 2014, **38**(6): 596-599.]
- [7] Tong Huijie, Ge Bangjun. Giving full play to the advantages of satellite remote sensing to promote sustainable development. The Eleventh National Symposium on Remote Sensing Technology, 1999 (in Chinese with English abstract). [仝慧杰, 葛榜军. 发挥卫星遥感优势促进可持续发展. 第十一届全国遥感技术学术交流会, 1999.]
- [8] Gao Zhongling, Wang Xiaoqin, Chen Yunzhi. The characteristic and applications of MERIS. The Fifteenth National Symposium on Remote Sensing Technology Abstracts, 2005 (in Chinese with English abstract). [高中灵, 汪小钦, 陈云芝. MERIS 数据特性及应用. 第十五届全国遥感技术学术交流会论文摘要集, 2005.]
- [9] Tang JW, Gu Xingfa, Niu Shengli *et al.* Cross-radiation based water quality objectives of CBERS-02b CCD image and MODIS. *Science China: Series E: Information Sciences*, 2005, **35**(z1): 59-69 (in Chinese with English abstract). [唐军武, 顾行发, 牛生丽. 基于水体目标的 CBERS-02 卫星 CCD 相机与 MODIS 的交叉辐射定标. 中国科学: E 辑: 信息科学, 2005, **35**(z1): 59-69.]
- [10] Gordon HR, Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 1994, **33**(3): 443-452.
- [11] Feng L, Hu C, Han X *et al.* Long-term distribution patterns of chlorophyll-a concentration in China's largest freshwater lake: MERIS full-resolution observations with a practical approach. *Remote Sensing*, 2014, **7**(1): 275-299.
- [12] Zeng Qun, Zhao Yue, Tian Liqiao *et al.* Poyang Lake in China as a case. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **5**(5): 1320-1326 (in Chinese with English abstract). [曾群, 赵越, 田礼乔等. HJ-1A/1B 卫星 CCD 影像水环境遥感大气校正方法评价研究——以鄱阳湖为例. 光谱学与光谱分析, 2013, **5**(5): 1320-1326.]
- [13] Hu Chunhua, Zhou Wenbin, Wang Maolan *et al.* Inorganic nitrogen and phosphate and potential eutrophication assessment in Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2010, **5**(5): 723-728 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2010.0514. [胡春华, 周文斌, 王毛兰等. 鄱阳湖氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价. 湖泊科学, 2010, **5**(5): 723-728.]
- [14] Guo Yunkai, Zeng Fan. Atmospheric correction comparison of SPOT 5 image based on FLAASH and QUAC model. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012, **11**: 21-23 (in Chinese with English abstract). [郭云开, 曾繁. 基于 FLAASH 与 QUAC 模型的 SPOT 5 影像大气校正比较. 测绘通报, 2012, **11**: 21-23.]
- [15] Kruse FA. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO. Jpl Airborne Geoscience Workshop, 2004.
- [16] Wilson RT. Py6S: A Python interface to the 6S radiative transfer model. *Computers & Geosciences*, 2013, **51**(2): 166-171.
- [17] Zhao W, Tamura M, Takahashi H. Atmospheric and spectral corrections for estimating surface albedo from satellite data using 6S code. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **76**(2): 202-212.
- [18] Moses WJ, Gitelson AA, Berdnikov S *et al.* Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters — The Azov Sea case study. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**(138): 118-124.

- [19] Koponen S, Attila J, Pulliainen J *et al.* A case study of airborne and satellite remote sensing of a spring bloom event in the Gulf of Finland. *Continental Shelf Research*, 2007, **27**(2): 228-244.
- [20] Weghorst PL. MODIS algorithm assessment and principal component analysis of chlorophyll concentration in Lake Erie. Kent: Kent State University, 2008.
- [21] Gons HJ, Auer MT, Effler SW. MERIS satellite chlorophyll mapping of oligotrophic and eutrophic waters in the Laurentian Great Lakes. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(11): 4098-4106.
- [22] Lyu H, Li X, Wang Y *et al.* Evaluation of chlorophyll-a retrieval algorithms based on MERIS bands for optically varying eutrophic inland lakes. *Science of the Total Environment*, 2015, **530**: 373-382.
- [23] Yang W, Matsushita B, Chen J *et al.* Estimating constituent concentrations in case II waters from MERIS satellite data by semi-analytical model optimizing and look-up tables. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(5): 1247-1259.
- [24] Qi Shuhua, Gong Jun, Shu Xiaobo *et al.* Study on inundation extent water depth and storage capacity of Poyang Lake by RS. *Yangtze River*, 2010, **9**(9): 35-38(in Chinese with English abstract). [齐述华, 龚俊, 舒晓波等. 鄱阳湖淹没范围、水深和库容的遥感研究. 人民长江, 2010, **9**(9): 35-38.]