

近海Ⅱ类水体的 MODIS 影像大气校正方法

刘良明¹ 张红梅¹ 张 丰¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:利用光谱辐射传输理论对 Gordon 大气校正算法进行了修正,提出用解析的方法分离红外波段 748 nm 和 869 nm 的离水辐射量与气溶胶的贡献,实现对近海Ⅱ类水体的大气校正,使之更适用于我国高悬浮泥沙和高气溶胶浓度海区。海上准同步实测数据表明,本文算法的校正精度比传统方法高,且能适用于影像中找不到理想Ⅰ类水体的情况,解决了近海水色数据大气校正问题。

关键词:水色遥感; MODIS; 大气校正; 近海Ⅱ类水体

中图法分类号:P237.3

海洋水色数据大气校正就是将大气顶处传感器接收到的信号转换为海表真实反射率的过程,它是水色遥感定量研究的基础。目前,用于海洋水色数据大气校正的软件有美国 NASA 提供的水色遥感数据处理软件 SeaDAS。SeaDAS 是基于 Gordon 大气校正算法,用于处理全球大洋水体水色数据的软件。由于近海海区一般具有高悬浮泥沙含量和高气溶胶浓度的特点,特别是我国近海海域,因此,SeaDAS 运用到近海水色数据处理时会出现一些问题,其大气校正模块不适合处理相对浑浊的近海水体^[1]。为了有效地利用卫星遥感资料研究近海水体,需要探索适合近海区的大气校正模型。本研究根据近海海域的特定条件和 MODIS 数据的特点,利用光谱辐射传输理论,对 Gordon 提出的 MODIS 大气校正算法进行了改进,开发了适合于近海Ⅱ类水体的 MODIS 影像大气校正方法。

1 大气校正理论与方法

根据光谱辐射传输理论,考虑大气分子与气溶胶之间的多次散射,大气顶处卫星传感器接收到的某一光谱波段的总反射率可以表达为:

$$\rho_t(\lambda_i) = \rho_r(\lambda_i) + \rho_a(\lambda_i) + \rho_{ra}(\lambda_i) + t_s(\lambda_i, \theta_v) \rho_w(\lambda_i) + t_s(\lambda_i, \theta_v) \rho_{wc}(\lambda_i) + t_d(\lambda_i, \theta) \rho_g(\lambda_i) \quad (1)$$

式中, $\rho_r(\lambda_i)$ 为瑞利散射的贡献; $\rho_a(\lambda_i) + \rho_{ra}(\lambda_i)$ 为

考虑大气分子与气溶胶之间的多次散射的气溶胶散射的贡献; $\rho_g(\lambda_i)$ 为海表镜面反射太阳直射光的贡献(包括太阳耀斑); $\rho_{wc}(\lambda_i)$ 为海表面上的个别浪端白泡沫反射的太阳光和天空光的贡献; $\rho_w(\lambda_i)$ 为离水辐射的贡献; $t_s(\lambda_i)$ 为大气漫透射率; $t_d(\lambda_i)$ 为直射太阳光通过大气的透射率

水色遥感数据的大气校正就是要消除式(1)中的海面白冠 $\rho_{wc}(\lambda_i)$ 、海面耀斑 $\rho_g(\lambda_i)$ 、大气瑞利散射 $\rho_r(\lambda_i)$ 、大气气溶胶散射 $\rho_a(\lambda_i) + \rho_{ra}(\lambda_i)$ 的影响,得到离水辐射反射率。

1.1 标准的 Gordon I 类水体大气校正

海洋Ⅰ类水体是指水体光学性质由浮游植物及其分解物支配的水体,一般指开阔大洋水体^[2]。其大气校正方法如下。

1.1.1 消除 $\rho_{wc}(\lambda_i)$ 、 $\rho_g(\lambda_i)$ 和 $\rho_r(\lambda_i)$ 的影响

一般传感器接收的数据中, $\rho_g(\lambda_i)$ 项都很小,当该值较大时,需要先对数据作耀斑掩膜,以去除受耀斑影响的像元。由于 MODIS 传感器未设观测倾角,所以 $\rho_g(\lambda_i)$ 项需要处理^[3]。白冠反射项 $\rho_{wc}(\lambda_i)$ 主要受风所引起的海面波的斜率影响,为风速的函数^[4]。

瑞利光学厚度在全球范围都是比较稳定的,它主要依赖于离地表面的高度。某一波段的瑞利散射的贡献由下式计算:

$$\rho(\lambda_i) = \frac{1}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v} t_{\text{at}}(\lambda_i) \tau_r(\lambda_i) \omega_r$$

$$P_r(\theta_v, \phi_v, \theta_s, \phi_s; \lambda_i) \quad (2)$$

$$P_r(\theta_v, \phi_v; \theta_s, \phi_s; \lambda) = P_r(\theta_-) + [r(\cos\theta_v) + r(\cos\theta_s)]P_r(\theta_+) \quad (3)$$

式中, $P_r(\theta_{\pm})$ 为瑞利散射相位函数; ω_r 为瑞利单次散射反照率, 在非水汽和氧气吸收带的波段可近似为 1^[5]; t_{oz} 是臭氧的透射率; $r(\cos\theta_v)$ 、 $r(\cos\theta_s)$ 为水-汽界面菲涅尔反射率。

1.1.2 消除气溶胶散射 $\rho_a(\lambda_i) + \rho_{na}(\lambda_i)$ 的影响

根据 Gordon 等人的研究, 气溶胶与大气分子之间的多次散射正比于单次散射^[6], 二者之间关系可表示为:

$$\rho_a(\lambda_i) + \rho_{na}(\lambda_i) = K[\lambda_i, \rho_{as}(\lambda_i)]\rho_{as}(\lambda_i) \quad (4)$$

式中, $\rho_{as}(\lambda_i)$ 为气溶胶单次散射反射率; K 为经验常数, 它与气溶胶类型有关^[6]。

对清洁的大洋水体(即 I 类水体), NIR 波段的离水辐射率近似为 0。所以, 对于 NIR 波段, 先消除 $\rho_{wc}(\lambda_i)$ 、 $\rho_g(\lambda_i)$ 和 $\rho_r(\lambda_i)$, 有:

$$\begin{aligned} \rho_c(\lambda_i) &= \rho_t(\lambda_i) - \rho_r(\lambda_i) - t_s \cdot \rho_{wc}(\lambda_i) - t_d \cdot \\ \rho_g(\lambda_i) &= \rho_a(\lambda_i) + \rho_{na}(\lambda_i) \end{aligned} \quad (5)$$

设 MODIS 传感器有 ch15 和 ch16 两个 NIR 波段, 其中心波长分别为 748 nm 和 869 nm。因此把这两个波段的像元值代入

$$\epsilon(\lambda_s, \lambda_l) = \frac{K[\lambda_l, \rho_{as}(\lambda_l)]}{K[\lambda_s, \rho_{as}(\lambda_s)]} \left[\frac{\rho_a(\lambda_s) + \rho_{na}(\lambda_s)}{\rho_a(\lambda_l) + \rho_{na}(\lambda_l)} \right] \quad (6)$$

可以得到 $\epsilon(\lambda_s, \lambda_l)$ 的值。将中等精度的 ϵ 指数外推方法运用于 MODIS 数据^[3], 有:

$$\epsilon(\lambda_i, 869) = e^{c(0.869 - \lambda_i)} \quad (7)$$

式中, c 为常数。把 $\lambda_i = 748$ nm 代入式(7), 可以求得常数 c 。再将 λ_i 分别取 412、443、488、531、551、667 nm, 则可以求出对应的 MODIS 8、9、10、11、12 和 13 波段的 $\epsilon(\lambda_i, 869)$ 。然后把求得的 $\epsilon(\lambda_i, 869)$ 代入式(6), 可以求得对应的 MODIS 各波段的 $\rho_a(\lambda_i) + \rho_{na}(\lambda_i)$ 。

1.1.3 求取归一化离水辐射反射率 $\rho_{wn}(\lambda_i)$

在求出 $\rho_g(\lambda_i)$ 、 $\rho_{wc}(\lambda_i)$ 、 $\rho_r(\lambda_i)$ 和 $\rho_a(\lambda_i) + \rho_{na}(\lambda_i)$ 后, 代入式(1)中可求出 $t_s(\lambda_i)$ 、 $\rho_w(\lambda_i)$ 的值, 从而可以求出各个波段的离水辐射反射率 $\rho_w(\lambda_i)$ 。

1.2 改进的 II 类水体大气校正

由于 II 类水体近红外谱段 748 nm 和 869 nm 的离水辐射率不为 0, 如果使用上述 I 类水体大气校正方法处理 II 类水体数据, 则会导致对气溶胶贡献的过高估计。有两类方法对 I 类水体的大气校正方法进行修正, 使其适用于更浑浊海水: 一是在 NIR 波段建立耦合的水文-大气光学模式, 根据水体后向散射在近红外波段之间的关系迭代

计算近红外波段的气溶胶特性^[1]; 二是 Gordon 等人认为气溶胶的水平分布通常比较均匀, 可假设气溶胶类型在小范围内(50~100 km)基本不变(即光学厚度不变), 借用邻近洁净水体的大气条件来计算浑浊海水的气溶胶辐射率, 实现对 II 类水体的大气校正^[7]。

本文结合 Gordon 大气校正理论和 Arnone 的研究结果^[8], 通过求解代数方程, 分离出 II 类水体 NIR 波段的气溶胶散射贡献和离水辐射贡献, 从而实现对 II 类水体遥感数据其他波段的大气校正。

Arnone 根据大量实验发现^[8], MODIS 在 NIR 波段的离水辐射率之间存在线性关系:

$$L_w(748) = 0.121 \ 2L_w(667) \quad (8)$$

所以有:

$$L_w(869) = 0.043 \ 2L_w(667) \quad (9)$$

$$L_w(748) = 2.806L_w(869) \quad (10)$$

进一步转换为离水反射率得:

$$\rho_w(748) = 2.806 \frac{F_0(869)}{F_0(748)} \cdot \rho_w(869) \quad (11)$$

式中, $F_0(748)$ 、 $F_0(869)$ 分别为 748 nm、869 nm 波段的平均太阳照度。

又根据 Gordon 等人的研究^[6], 有:

$$\rho_a(748) + \rho_{na}(748) \approx A[\rho_a(869) + \rho_{na}(869)] \quad (12)$$

式中, A 为一与气溶胶类型有关的量, 其经验取值在 1.00~1.12 之间。 A 值的确定是一个很关键的问题, 这里采用的方法是: 在图像中选择一包含有稍清洁水体和浑浊水体的区域, 例如图 2(a) 中的矩形区, 用公式(5)计算出各像元的 $\rho_c(748)$ 和 $\rho_c(869)$, 并计算 $\rho_c(748)/\rho_c(869)$, 根据这个比值来确定 A 的值^[9]。本文中 A 取 1.05。

把式(11)和式(12)代入下式:

$$\begin{cases} \rho_c(748) = [\rho_a(748) + \rho_{na}(748)] + t_s(748)\rho_w(748) \\ \rho_c(869) = [\rho_a(869) + \rho_{na}(869)] + t_s(869)\rho_w(869) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\rho_c(748)$ 、 $\rho_c(869)$ 为经过瑞利、海面白冠和海面反射太阳光修正的传感器接收的辐射反射率; $t_s(748)$ 、 $t_s(869)$ 为漫射透过率。这样可解算出稍清洁水体各像元的 $\rho_a(869) + \rho_{na}(869)$ 和 $\rho_a(748) + \rho_{na}(748)$ 的值, 再将 869 nm 波段气溶胶辐射量外推到 412、443、488、531、551 和 667 nm 波段, 则可求出该像元在这些波段的离水反射率。假定气溶胶在小范围内不变, 则可以求出影像中其他像元的气溶胶贡献:

$$\rho_a(\lambda) = \rho_{acw}(\lambda)$$

$$\frac{P_a(\theta_{-\lambda}) + [r(\theta_v) + r(\theta_s)]P_a(\theta_+, \lambda)}{P_a(\theta_{-cw}, \lambda) + [[r(\theta_{uw}) + r(\theta_{sw})]P_a(\theta_{+cw}, \lambda)]}$$
$$\frac{\cos\theta_{uw}\cos\theta_{sw}}{\cos\theta_v\cos\theta_s} \quad (14)$$

式中,下标 cw 代表稍清洁水体。

2 实验区与数据

为了对本文中提出的改进的Ⅱ类水体大气校正算法进行评价,下面进行实验验证。实验区域为中国黄海和东海北部长江口区域,此区域的近海海水的特点是高度浑浊,泥沙含量比较高。受陆地气溶胶的影响,此海洋区域气溶胶的影响不可忽略。实验采用的卫星资料是武汉大学 MODIS 卫星数据地面接收站接收的 2003 年 4 月份 MODIS 数据。实测资料采用中国卫星海洋应用中心提供的 2003 年春季黄东海航次采集的 4 月 6 日~4 月 23 日的实测光谱数据。

文中选择一幅云量较少的影像 ter200304160301 进行实验(卫星过境时间为 11:01),主要从改进算法大气校正结果与标准算法校正结果、改进算法与实测数据同步站点遥感反射率这两个方面的比较来验证本文改进算法的精度及可行性。

在改进算法与标准算法比较方面,改进算法修正了Ⅰ类水体标准算法对Ⅱ类水体作大气校正时气溶胶贡献估计过高,从而导致Ⅱ类水体的离水辐射小于 0 的情况。用标准算法和改进算法得到 443 nm 波段影像如图 1。可以看出,改正算法校正了Ⅰ类水体标准算法导致Ⅱ类水体的离水辐射小于 0 的情况。

将从影像提取的大气校正后的光谱数据与海

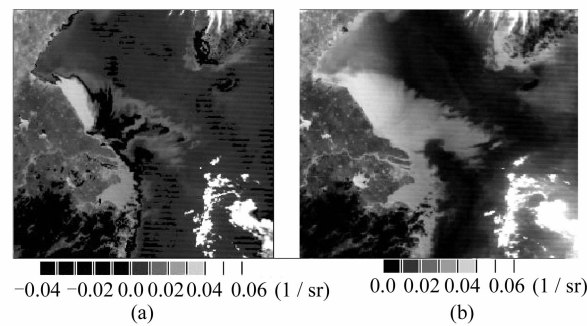


图 1 用标准算法和改进算法处理得到的 443 nm 波段影像的比较

Fig.1 Comparison of Image at 443 nm after Standard Atmospheric Correction and the Amendatory Atmospheric Correction

上实测光谱数据进行比较,选取与卫星过境时间为同一天的稍浑浊水体 HD65(123°00′16″E,29°59′57″N)与稍清洁水体 DHF67(123°40′39″E,30°00′19″N),如图 2。可以看出,两个站点在各个波段校正后,遥感反射率与实测光谱走势一致。

表 1 给出了各个波段的遥感反射率,HDF65 站点、HDF67 站点实测光谱与校正后影像光谱总相对误差分别为 24.9%、17.99%,这说明大气校正效果良好。

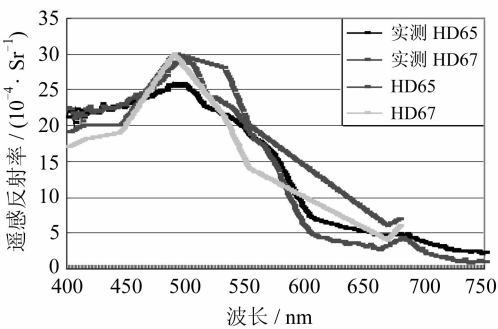


图 2 用改进的算法处理得到的遥感反射率与实测数据的比较

Fig.2 Comparison of Remote Sensing Reflectance Determined with Amendatory Algorithms and Measured Date

表 1 校正后像元值与实测值的比较

Tab.1 Comparison of Measured Data and Image Data

波段/	HD65			HD67		
nm	实测值	像元值	相对误差	实测值	像元值	相对误差
412	0.002 135	0.002 0	0.063 232	0.002 067	0.001 7	0.211 56
443	0.002 273	0.002 1	0.075 704	0.002 283	0.001 9	0.046 176
488	0.002 575	0.003	0.165 049	0.002 772	0.002 9	0.046 176
531	0.002 147	0.002 8	0.304 145	0.002 179	0.002 1	0.036 255
551	0.001 878	0.002	0.064 963	0.001 917	0.001 4	0.269 692
667	0.000 463	0.000 6	0.295 896	0.000 321	0.000 4	0.246 106
678	0.000 478	0.000 7	0.464 43	0.000 412	0.000 5	0.213 592
总平均相对误差: 24.98%			总平均相对误差: 17.99%			

注:相对误差=|实测值-像元值|/实测值,像元值为大气校正后与实测站点对应的遥感反射率值。

3 结 语

- 1) 本文改进的针对近海Ⅱ类水体大气校正算法比标准的 GordonⅠ类水体大气校正算法更适合校正近海浑浊水体的遥感影像;
- 2) 根据与实测光谱数据的比较,本文提出的改进算法可以更有效地消除气溶胶的影响,从而提高了大气校正的精度。
- 改进的算法仍然延用了 Gordon 与 Arnone 的算法里的假设条件,并且未考虑气溶胶的吸收特性以及地球曲率等因素的影响,因而算法仍需

进一步完善,但是本文提出的改进算法已经能够有效消除 MODIS 近海影像数据的大气影响,其精度可以满足大多数海洋水色遥感应用的要求。

致谢:国家卫星海洋应用中心唐军武和王晓梅对本研究给予了支持和帮助,黄东海航次的实验队员在数据采集时付出了辛苦劳动,武汉大学 MODIS 卫星数据地面接收站提供了 MODIS 遥感数据,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

[1] 毛志华,黄海清. 我国海区 SeaWiFS 资料大气校正[J]. 海洋与湖沼, 2001,32(6):581-587

[2] 刘良明. 卫星海洋学导论[M]. 武汉: 武汉大学出版社,2005

[3] 刘玉洁,杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社,2001

[4] 潘德炉,李淑箐,毛天明,等. 海洋水色卫星的辐射模拟图像研究[J]. 海洋学报, 1997,19(6):43-55

[5] Deepek R M, Sunil N. High-Resolution Ocean Color Remote Sensing of Benthic Habitats: a Case

Study at the Roatan Island, Honduras[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2005,43(7):1 592-1 604

[6] Gordon H R. MODIS Normalized Water-Leaving Radiance Algorithm Theoretical Basis Document [OL]. <http://www.modis.whu.edu.cn/chinese/context/modisinfoOcean.php>, 1996

[7] 陈楚群. 海洋水色遥感资料红光波段的大气纠正[J]. 热带海洋, 1998,17(2):81-87

[8] Arnone R A, Gtould R W. Coastal Monitoring Using Ocean Color[J]. Sea Technology, 1998,39: 18-27

[9] Kevin G R, Fabrice O, Machteld R. Atmospheric Correction of SeaWiFS Imagery for Turbid Coastal and Island Waters[J]. Applied Optics, 2000, 39(6):897-912

第一作者简介:刘良明,教授,从事遥感数据应用、图像处理和分
析等研究。
E-mail:lm_liu69@sohu.com

Atmospheric Correction of MODIS Imagery for Turbid Coastal Waters

LIU Liangming¹ ZHANG Hongmei¹ ZHANG Feng¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: An amendatory algorithm is developed to correct the atmospheric effects for coastal waters by combining the Gordon’s atmospheric correction algorithm and the Arnone’s research results. Coastal waters can have significant reflectance in the 748 nm and 869 nm channels of MODIS or other instruments. The new method separates the water leaving radiance from the aerosol path radiance in these two channels by solving a set of simple algebraic equations, and the derived aerosol path radiance is then extrapolated to the expected channels. The result demonstrates that this atmospheric correction algorithm can achieve very high accuracy, and can be used to the areas where no case I waters existed or case I waters just covered by clouds.

Key words: ocean colour remote sensing; MODIS; atmospheric correction; coastal case Ⅱ waters

About the first author: LIU Liangming, professor, Ph. D. his research Interests include applications of remotely sensed data to earth science, GIS development, Image processing and analysis.
E-mail: lm_liu69@sohu.com