

文章编号: 1001 - 9014(2009)05 - 0346 - 04

基于短波红外波段的 类水体 MODIS 影像大气校正算法

王峰^{1,2}, 周艺¹, 阎福礼¹, 杨硕^{1,2}, 杜聪^{1,2}

(1. 中国科学院遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:提出了一种基于短波红外 (SWIR, short wave infrared) 波段离水反射率为 0 的 类水体大气校正算法. 采用 MODIS 的 1.240 μm 和 1.640 μm 两个 SWIR 波段的反射率计算出了可见光及近红外 (NIR, near infrared) 波段气溶胶散射反射率, 进而反演得到了这些波段的离水反射率. 应用该算法对中国东部近海及湖泊的 类水体进行了大气校正, 并与实测数据和常用的大气校正算法进行了比较分析, 结果表明该算法能够有效地去除大气的影

关键词: MODIS; 大气校正; 类水体; 短波红外

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

ATMOSPHERIC CORRECTION ALGORITHM FOR MODIS IMAGERY OVER CASE WATERS BASED ON SWIR

WANG Feng^{1,2}, ZHOU Yi¹, YAN Fu-Li¹, YANG Shuo^{1,2}, DU Cong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An atmospheric correction algorithm based on zero water leaving reflectance in short wave infrared (SWIR) bands for case waters was presented. It used two SWIR bands of MODIS (1.240 μm and 1.640 μm) to extrapolate the aerosol scattering reflectances of visible and near infrared (NIR) bands. Then water leaving reflectances in visible and NIR bands could be retrieved. This algorithm was tested over coastal waters and lakes in the east part of China. The correction results were compared with both in situ measurement data and those by other atmospheric correction algorithms. The results show that the algorithm removes the effects of atmosphere effectively.

Key words: MODIS; atmospheric correction; case waters; short wave infrared (SWIR)

引言

所谓大气校正是指在应用遥感数据前, 对遥感数据进行处理以去除大气的影

响, 还原地表真实数据的过程^[1]. 在水色遥感领域, 大气散射占传感器接收到的大气顶层 (TOA) (top of atmosphere) 总信号的 80% ~ 90%, 因此大气校正对水色遥感研究尤为重要^[2]. 类水体 (case water) 一般包括内陆与近海水体, 这些水体是人类生产、生活的重要水源之一, 也是区域生态环境的重要组成部分. 与海洋类水体 (case water) 不同, 这类水体一般含有较

收稿日期: 2008 - 06 - 02, 修回日期: 2009 - 06 - 28

基金项目: 国家 863 计划 (2006AA06Z419); 中科院重大交叉项目 (KZCX1 - YW - 14 - 2); 国家自然科学基金 (40671141, 40701126); 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室开放基金项目

作者简介: 王峰 (1981-), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事环境遥感研究

Received date: 2008 - 06 - 02, revised date: 2009 - 06 - 28

种方法是假设在某一区域内气溶胶类型或者光学厚度基本不变,找到并求出该区域内 类水体上空的气溶胶参数,然后将其用到相邻的 类水体,达到大气校正的目的^[6].上述两种算法在部分内陆和近海 类水体取得了一定的效果,但是都存在一定的不足,如前者的经验模型仅考虑了 SS对水体光谱的贡献,却忽略了叶绿素 的贡献;而后者对于周围无 类水体分布的湖泊则无能为力.在我国,部分内陆和近海水体泥沙含量较高、富营养化严重,SS和 CDOM含量较高,不同地区水体光谱差异较大,部分湖泊在某些月份全湖均为 类水体,前述的 类水体大气校正方法均不适合这些水体.实现对这些 类水体的大气校正成为迫切需要解决的实际问题.本文基于 类水体在 SW IR波段离水反射率为 0的特点,在 MOD IS标准海洋大气校正算法(STD)(standard ocean atmospheric correction)的基础上提出了一种 类水体大气校正算法(SWR)(atmospheric correction based on SW IR);以中国东部湖泊和近海 类水体为例,对该算法大气校正的结果进行了分析和讨论,并与实测数据和常用的大气校正算法进行了比较分析.

1 算法原理与公式

1.1 标准海洋大气校正算法(STD)

在水体上空,避开太阳耀光污染^[7]的遥感影像的 TOA反射率可以用下式^[8]表示:

$$t(i) = r(i) + a(i) + t(v, i)w(i), \quad (1)$$

$$t(v, i) = \exp\left[-\left(\frac{r(i)/2 + \alpha_z(i)}{\cos v}\right)\right], \quad (2)$$

式(1)中 i 表示 MOD IS波段序号, i 为传感器第 i 波段的中心波长(单位: μm), $t(i)$ 为 TOA反射率, $r(i)$ 为大气分子散射反射率(可以通过查找表插值计算出来), $a(i)$ 为大气气溶胶散射反射率, v 为卫星天顶角, $w(i)$ 为离水反射率(载有水体各种有用的信息), $t(v, i)$ 为漫射透过率;式(2)中 $r(i)$ 为大气分子光学厚度, $\alpha_z(i)$ 为臭氧光学厚度.大气校正的目的就是从式(1)中分离出 $a(i)$,并算出 $w(i)$.

MOD IS的 STD算法认为 $0.765\mu\text{m}$ 和 $0.870\mu\text{m}$ 两个波长的 $w(i)$ 为 0,这对 类水体通常是成立的,通过式(1)可以计算出 $a(0.765)$ 和 $a(0.870)$,然后采用式(3)和式(4)可以计算出各波段的大气校正因子和常数 c .

$$(i, 0) = \frac{a(i)}{a(0)}, \quad (3)$$

$$(i, 0) = \exp[c(i_0 - i)], \quad (4)$$

式中, 0 代表中心波长为 $0.870\mu\text{m}$ 波段, $(i, 0)$ 为 i 波段的大气校正因子, c 为常量,用于外推其它波段大气校正因子.将式(3)变换并代入式(1)得:

$$t(v, i)w(i) = t(i) - r(i) - (i, 0)a(0), \quad (5)$$

将 $(i, 0)$ 和 $a(0)$ 代入式(5)即可计算出各波段的 $w(i)$,从而达到大气校正的目的.

1.2 基于 SW IR波段 类水体大气校正算法(SWR)

高浓度的 SS和 CDOM使得 类水体在 NR波段的散射能力增强,导致 NR波段的 $w(i)$ 不能认为是 0,所以 STD算法无法用于 类水体;而水在 SW IR波段的吸收系数是 NR波段的 10^4 倍以上,太阳辐射在该波段仅能穿透到水下几个微米^[9],这使得 SW IR波段的 $w(i)$ 可以认为是 $0^{[10]}$,即使在混浊的 类水体中仍然成立.本文假设 MOD IS中心波长为 $1.240\mu\text{m}$ 和 $1.640\mu\text{m}$ 的两个 SW IR波段的 $w(i)$ 为 0,通过式(1)求出 $a(1.240)$ 和 $a(1.640)$,并令 $1.640\mu\text{m}$ 波段代替式(3)和式(4)中的 0 , $1.240\mu\text{m}$ 代替 i ,求出各波段大气校正因子 ${}^{\text{SWIR}}(i, 0)$ 和常数 c^{SWIR} ,上角标 SWIR用以区分前面采用 NR波段计算得到的对应参数, ${}^{\text{SWIR}}0$ 表示中心波长为 $1.640\mu\text{m}$ 波段.将 ${}^{\text{SWIR}}(i, 0)$ 和 $a(0^{\text{SWIR}})$ 替换式(5)中的 $(i, 0)$ 和 $a(0)$,即可计算出各波段的 $w(i)$,达到对 类水体大气校正的目的.

2 结果与讨论

2.1 SWR算法大气校正结果

采用 SWR算法和 STD算法分别对 2003年 10月 27日我国东部近海和内陆湖泊的 MOD IS影像进行大气校正,所得结果见图 1.

由图 1(a)可以看出,我国东部的近海和内陆水体均显现出高 SS特征的黄色或黄绿色,为较混浊的 类水体.图 1(c)显示,SWR算法显著地去除了 类水体上空大气的影响,得到了有效的水体遥感反射率($R_{rs}(i) = w(i) / [t(v, i)]$).图 1(d)显示,STD算法在高度混浊的 类水体区域(见图 1(d)中的箭头处)完全为无效值,同时其在内陆湖泊和近海较混浊 类水体区域反演的遥感反射率均低于 SWR算法的结果,这是由于 STD算法将 类水

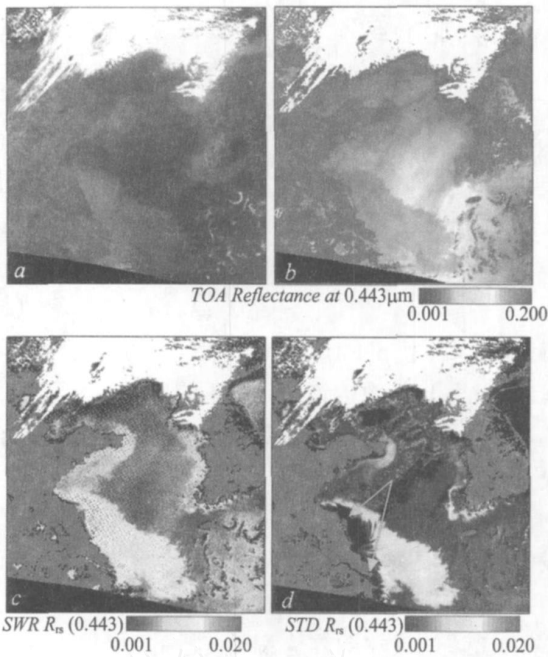


图 1 中国东部 2003 年 10 月 27 日, (a)MODIS 彩色合成影像 (b)0.443 μm TOA 反射率影像 (c)采用 SWR 算法得到的水体 0.443 μm 遥感反射率影像 (d)STD 算法大气校正后的水体 0.443 μm 遥感反射率 (sr^{-1}) 影像

Fig 1 (a)MODIS color composite image of Oct 27 2003 (b) TOA reflectance at 0.443 μm (c)water remote sensing reflectance (sr^{-1}) at 0.443 μm corrected by SWR (d)water remote sensing reflectance at 0.443 μm corrected by STD algorithms

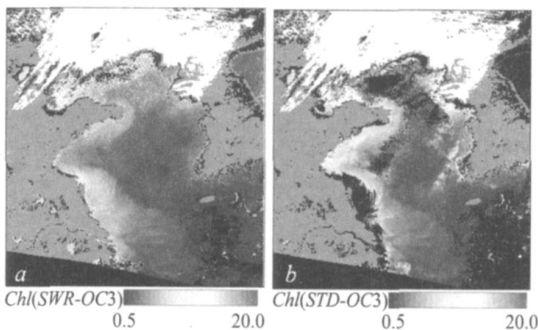


图 2 采用 SWR-OC3 和 STD-OC3 反演得到的叶绿素浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 影像 (a) SWR-OC3 (b) STD-OC3

Fig 2 Images of chlorophyll- a concentration ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) retrieved by SWR-OC3 and STD-OC3 (a) SWR-OC3 (b) STD-OC3

体中高浓度的 SS 在 NR 波段的散射贡献错认为气溶胶在 NR 波段的散射贡献,使得通过 a_{443} (0.870) 外推得到可见光波段的 a_{667} 相对真实值偏大,从而导致其在类水体算得的遥感反射率偏低甚至为负值.而 SWR 算法使用了吸收能力更强的 SWIR 波段,避免了高浓度 SS 带来的误差,能够反演有效的水体遥感反射率.

图 2 为应用大气校正所得到的遥感反射率反演得到的叶绿素浓度影像 (OC3 算法). 由图 2-(b) 可见 STD-OC3 在渤海中部和江苏省东部沿海的类水体反演的叶绿素浓度均为无效值,而 SWR-OC3 在上述水体均反演得到有效的叶绿素浓度. 在内陆湖泊、沿岸近海水域, SWR-OC3 反演的叶绿素浓度低于 STD-OC3 的结果,这是因为在这类较混浊的类水体 SWR 算法修正了 STD 算法在蓝光波段的过度校正,减小了 $R_{rs}(0.488) / R_{rs}(0.551)$ 的比值,使得反演结果更具合理性.

值得注意的是 SWR 算法在处理水体表面覆盖有大面积水生植物的情况时会产生较大的误差,这是由于水生植物在 SWIR 波段具有较强的反射能力,一旦其覆盖在水体表面隔绝了水在 SWIR 波段对太阳辐射的吸收,就会导致 SWIR 波段的离水反射率不能被近似认为 0,对于这种水体可以采用临近无水生植物覆盖的水体的大气校正因子和气溶胶反射率对这些像元进行大气校正.

2.2 精度对比

太湖作为我国东部较大的内陆湖泊之一,受到河流带入泥沙和富营养化的影响,其 SS 和 CDOM 含量较高,是典型的类水体.为了检验并比较分析本文算法的结果,我们选择了 2003 年 10 月 27 日在太湖开展实测类水体光谱实验期间卫星过境时的实测数据 (经度 120.1686 E, 纬度 31.2326 N),与卫星反演数据进行比较 (见图 3),其中 RUD 算法是一种常用的类水体大气校正算法^[6],实测光谱是采用 ASD 野外光谱辐射仪 (ASD Field Spec) 测定,实测叶绿素浓度是在实验室采用分光光度法测定的.

由图 3 可见 STD 算法得到的光谱与实测光谱的差异较大,其波长为 0.412 μm 的遥感反射率为负值. SWR 算法和 RUD 算法均能反演得到有效的遥感反射率,光谱曲线与实测光谱基本一致.为了更好地比较 3 种大气校正算法的结果,我们计算了 3 种算法所得遥感反射率的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和叶绿素浓度的相对误差 (relative error, RE),结果见表 1. SWR 的 RMSE 为 0.0029,低于 RUD 算法的 0.0035,说明 SWR 算法得到的光谱曲线优于 RUD 算法的结果,这是因为 SWR 算法能够计算出自身类水体像元的气溶胶参数并用于大气校正,而 RUD 算法只能借助临近的洁净或较洁净水体像元的气溶胶参数进行大气校正.一旦两个像元距离较远或者由于风、气溶胶排放

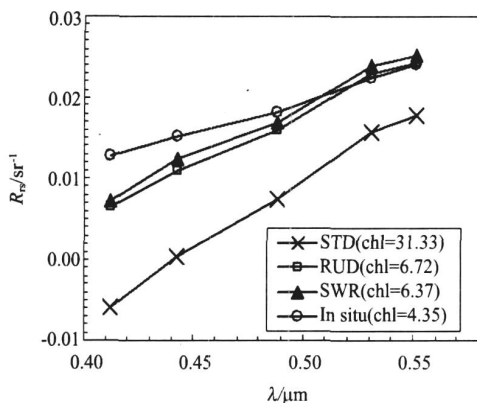


图3 2003年10月27日实测(in situ)遥感反射率(R_{rs}) (sr^{-1})和叶绿素a浓度(chl) ($mg \cdot m^{-3}$)与遥感影像大气校正后(STD、RUD、SWR)的 R_{rs} (sr^{-1})和chl ($mg \cdot m^{-3}$) (OC3算法)对比

Fig 3 Comparison of in situ measurements of remote sensing reflectance (R_{rs}) (sr^{-1}) and chlorophyll-a (chl) ($mg \cdot m^{-3}$) on Oct 27 2003 with R_{rs} (sr^{-1}) and chl ($mg \cdot m^{-3}$) (OC3 algorithm) from three atmospheric correction algorithms (STD, RUD, SWR)

表1 三种大气校正算法所得遥感反射率的均方根误差和叶绿素浓度的相对误差

Table 1 RMSE of the remote sensing reflectance and RE of chlorophyll-a concentration by three atmospheric correction algorithms

大气校正算法	RMSE*	RE**
STD	0.0124	620.2%
RUD	0.0035	54.5%
SWR	0.0029	46.4%

* RMSE = $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{反演值} - \text{实测值})^2}{n}}$, n表示用于计算的波段数.

** RE = $\frac{\text{反演值} - \text{实测值}}{\text{实测值}}$

源等因素的影响就会导致区域内气溶胶分布差异增大,这无疑会导致RUD算法精度的降低.

由叶绿素a的浓度数据可以看出STD-OC3反演的浓度最高为 $31.33 mg \cdot m^{-3}$,随后是RUD-OC3的 $6.72 mg \cdot m^{-3}$ 和SWR-OC3的 $6.37 mg \cdot m^{-3}$,三者相对实测值的相对误差分别为620.2%、54.5%和46.4%.由反演的光谱曲线及叶绿素a浓度可以看出:得益于SWR和RUD两种算法,有效地去除了大气的影响,OC3算法反演的叶绿素a浓度的相对误差显著地减小了,由STD-OC3的620.2%减小到SWR-OC3的46.4%和RUD-OC3的54.5%.SWR-OC3和RUD-OC3虽然显著地提高了反演叶绿素a浓度的精度,但是与实测值仍有较大的差距,这可能是由于类水体中高浓度的SS和CDOM对水体光

谱的影响造成的,但尽管如此SWR-OC3反演的结果仍然优于RUD-OC3的反演结果.

3 结论

本文提出了一种基于SWIR波段离水反射率为0的类水体大气校正算法.该算法能够有效地去除混浊的类水体上空大气的影响,修正了STD算法在对混浊类水体进行大气校正时得到的无效水体反射率,提高了内陆湖泊和近海混浊水体大气校正的精度.该算法不需要临近类水体的气溶胶参数,当类水体面积较大或者附近无类水体分布时该算法优势更加明显.

REFERENCES

- [1] PENG Guang-Xiong, HE Yu-Hua, LI Jing, et al Study on CBERS-2 s CCD image cross calibration and atmospheric correction[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭光雄,何宇华,李京,等.中巴地球资源02星CCD图像交叉定标与大气校正研究.红外与毫米波学报), 2007, 26(1): 22—25.
- [2] Antoine D, Morel A. A multiple scattering algorithm for atmospheric correction of remotely sensed ocean colour (MERIS instrument): principle and implementation for atmospheres carrying various aerosols including absorbing ones[J]. *Int J. Remote Sens.*, 1999, 20: 1875—916.
- [3] Hu C, Carder KL, Muller-Karger FE. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal waters: a practical method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 195—206.
- [4] Shamugam P, Ahn YH. New atmospheric correction technique to retrieve the ocean colour from SeaWiFS imagery in complex coastal waters[J]. *J. Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, 9: 511—530.
- [5] Amoné R A, Martinolich P, Gould Jr, et al *Coastal optical properties using SeaWiFS*, *Ocean Optics XI* [C]. Kailua-Kona, Hawaii, USA: SPIE, 1998.
- [6] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 897—912.
- [7] LIU Zhi-Gang, ZHOU Guan-Hua. Polarization of sun glint[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘志刚,周冠华.太阳耀光的偏振分析.红外与毫米波学报), 2007, 26(5): 362—365.
- [8] Gordon H R, Wang M H. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J]. *Applied Optics*, 1994, 33: 443—452.
- [9] Hale GM, Querry M R. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region[J]. *Applied Optics*, 1937, 12: 555—563.
- [10] Wang M H, Shi W. Estimation of ocean contribution at the MODIS near-infrared wavelengths along the east coast of the U. S.: Two case studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L13606.