

台湾海峡 MERIS 数据大气校正研究

陈芸芝, 汪小钦, 高中灵

(福州大学 福建省空间信息工程研究中心, 空间数据挖掘和信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350002)

摘要: 根据 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer, 中等分辨率成像光谱仪) LIB 产品特点, 以台湾海峡为研究区域, 开展 MERIS 数据大气校正研究。在阐述水色遥感数据大气校正原理的基础上, 首先进行水体像元提取和辅助参数空间内插, 获取大气校正所需的数据集。接着进行耀斑反射率计算和校正并利用加倍法精确计算瑞利散射。最后针对台湾海峡水体为清洁到轻度浑浊, 提出先区分水体类别, 再分别利用 epsilon 指数外推法进行一类水体气溶胶散射计算, 和利用神经网络法计算二类水体离水反射率即 ρ_w 的方法。对大气校正的结果进行 ρ_w 负值像元数统计和光谱分析表明, 该方法不仅降低 ρ_w 为负值的像元数, 而且使大气校正后水体的光谱曲线同现场数据保持较好的一致性。

关键词: MERIS 数据; 大气校正; 台湾海峡
中图分类号: P714 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2008)03-0062-06

MERIS 是欧空局 2002 年 3 月 1 日发射的环境遥感卫星 (ENVISAT) 上搭载的一种传感器, 主要用于海洋和海岸带的水色监测。MERIS 传感器在可见光至近红外光谱范围内 (390 ~ 1 040 nm) 设置 15 个波段, 带宽在 3.75 ~ 20 nm 之间, 在可见光波段平均带宽为 10 nm。针对悬浮泥沙监测, 增设了 620 nm 波段, 而叶绿素荧光峰波段的设置也更为合理。其数据量化级数达到 16bit, 并具有不同的分辨率模式以适应不同的应用需求, 如高分辨率模式 (300 m × 300 m) 可用于海岸带研究, 低分辨率模式 (1 200 m × 1 200 m) 可用于大范围的海洋监测。MERIS 用于大气校正的两个波段为 12 和 13 波段, 中心波长分别为 778.75 nm (带宽 15 nm)、865 nm (带宽 20 nm), 不仅有效避开水汽和氧气的吸收带, 而且能较大程度提高大气校正的精度。有关 MERIS 的具体参数设置可参见其产品手册^[1]。与之前常用的 SeaWiFS 和 MODIS 数据相比, MERIS 在光谱分辨率、辐射分辨率及空间分辨率均有较大的提高。MERIS 将成为开展水色遥感尤其是二类水体的又一重要数据源。

水色传感器接收到的总辐射中大气信号约占 90%, 而能够反映水体生物光学特性的水体信号仅占 5% ~ 15%, 因此, 对于水色遥感数据的应用, 大气校正是一个很重要的前提。在 ENVISAT 发射之前, Moore 等^[2] 就利用 CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) 数据来模拟 MERIS 数据, 开展 MERIS 数据二类水体大气校正及悬浮泥沙浓度提取的算法研究。而 Schroeder 等^[3] 则将神经网络算法应用到 MERIS 数据大气校正及悬浮泥沙提取过程, 其开发的算法目前可以插件形式集成到

MERIS 数据专用软件 BEAM 中, 这些研究为推广 MERIS 数据的应用研究奠定很好的基础。但在中国, 水色遥感数据大气校正的应用研究主要围绕 MERIS 之前的数据源例如 MODIS, SeaWiFS 等开展, 大气校正尤其是二类水体大气校正主要围绕珠江口、长江口、黄渤海等区域开展^[4,5], 对台湾海峡的研究及监测较少。由于中国海区水体的复杂性, 其它海区的算法很难推广到台湾海峡区域。

台湾海峡对于中国, 具有重要的政治、经济和军事意义, 台湾海峡环境监测一直深受重视, 作者从台湾海峡水域特点, 利用最新的水色遥感数据 MERIS LIB 数据, 开展其大气校正的算法研究, 为利用 MERIS 数据开展水质遥感监测奠定基础。

1 MERIS 数据大气校正原理

到达卫星水色扫描仪的总辐射量, 即大气顶辐射值 $L_t(\lambda)$ 可由 (1) 式表示^[4]:

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

其中, $L_r(\lambda)$ 为大气分子的 Rayleigh 散射, $L_a(\lambda)$ 为气溶胶散射, $L_{ra}(\lambda)$ 为分子与气溶胶之间的相互作用

收稿日期: 2006-07-31; 修回日期: 2008-01-03

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2004AA639800); 福建省自然科学基金资助项目 (W0650008); 福州大学科技发展基金资助项目 (2006-XY-12)

作者简介: 陈芸芝 (1982), 女, 福建连江人, 硕士, 助理研究员, 主要从事环境与资源遥感, 电话: 0591-87892306, E-mail: chenyunzhi@fzu.edu.cn

用, $L_g(\lambda)$ 为太阳耀斑的贡献, MERIS 由于没有设计传感器倾角, 必须计算这部分的贡献, T 为光束直射透过率, $L_w(\lambda)$ 为离水辐射值, t 为大气漫射透过率, $L_{wc}(\lambda)$ 为白帽的贡献, $L_{wc}(\lambda)$ 由于贡献值不大, 计算方面又存在一定的困难, 忽略不计。 $L_b(\lambda)$ 为海底的反射辐射率, 光线通常不能到达海底, 因此 $L_b(\lambda)$ 忽略不计。经过上述分析, 可以确定 MERIS 大气校正的公式如(2):

$$L_w(\lambda) = \frac{L_t(\lambda) - L_r(\lambda) - L_a(\lambda) - L_{ra}(\lambda) - TL_g(\lambda)}{t} \quad (2)$$

由于在水体-生物光学模型中更常用到的是反射率而不是辐射率, 可以利用式(3)进行两者的转换:

$$\rho(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = \pi L(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Delta\phi) / F_0(\lambda) \mu_s \quad (3)$$

其中, $F_0(\lambda)$ 为大气圈外太阳光中波长的光通量, $\mu_s = \cos\theta_s$, θ_s 为太阳天顶角, θ_v 为卫星天顶角。

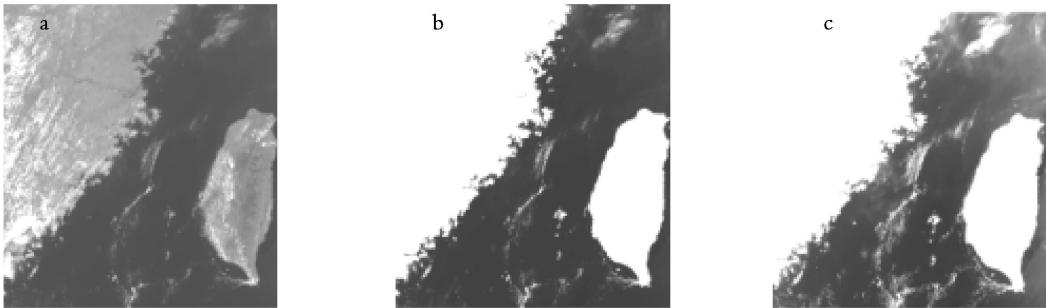


图1 研究所用数据及预处理结果

Fig. 1 Used data and result of pre processing

a. 研究所用 MERIS 数据(R8G14B5); b. 提取水体(第 10 波段); c. 去除云(第 10 波段)

a. MERIS data used in this study (R8G14B5); b. water body retrieved(band 10); c. cloudy area removed(band 10)

3 MERIS 数据大气校正

首先进行耀斑反射率计算, 对耀斑贡献使传感器信号达到饱和的像元直接予以剔除, 其次进行瑞利散射计算, 通过假设大气校正两个波段 778. 75, 865 nm 波段离水反射率为 0, 利用 epsilon(简称 e) 指数外推法计算 708. 75 nm 波段离水反射率, 根据计算的结果判断进行水体类型, 而后采用不同的方法计算其余各个波段的气溶胶反射率, 进而计算得到离水反射率。

3.1 耀斑计算及校正

MERIS 没有设计传感器倾角, 影像中的像元不同程度地受到耀斑的影响, 需要进行耀斑反射率的计算和校正。太阳耀斑反射率 ρ_g 的计算依据是 Cox & Munk 模型(式 4), 折算到大气顶时, 还应乘以太阳直射透过率 $T(\lambda)$ (式 5), 详细计算过程见 MERIS

$\Delta\phi = \phi_s - \phi_v$, ϕ_s 为太阳方位角, ϕ_v 为卫星方位角。

2 MERIS 数据预处理

本次研究所用的数据是 2004 年 7 月 11 日获取的台湾海峡区域的 MERIS L1B 数据, 经过地理校正和辐射定标, 包含有 15 个波段的大气顶端辐射量, 以及产品标记文件 L1_flags 以及 36×36 控制点集的各种参数, 包括经度、纬度、太阳高度角、太阳方位角、卫星高度角、卫星方位角、东西方向的风速、南北方向的风速、大气压强、臭氧浓度、相对湿度等。

从彩色合成后的影像(图 1a)可以看出, 影像有云覆盖。利用 L1_flags 和用于云检测的第 10 波段大气顶辐射值, 进行了水体提取(图 1b)和云去除(图 1c), 在此基础上, 对相应区域的控制点集各参数进行空间内插, 得到大气校正所需的所有数据集。

耀斑计算文档 atbd_2_13^[6]。

$$\rho_g = \frac{\pi r(\omega)}{4 \cos\theta_s \cos\theta_v \cos^4\beta} P(Z'_x, Z'_y) \quad (4)$$

其中, $r(\omega)$ 为菲涅耳反射因子, 取值 0. 022, β 为波浪小平面法线天顶角。 $P(Z'_x, Z'_y)$ 为小平面镜面反射入射辐射量的概率。

$$T(\lambda) = \exp\left[-(\tau_r(\lambda) + \tau_{oz}(\lambda))\right] \left[\frac{1}{\cos\theta_s} + \frac{1}{\cos\theta_v}\right], \quad \rho_g = T(\lambda) \rho_{gi}, i = 1, 2, \dots, 15 \quad (5)$$

$\tau_r(\lambda)$ 、 $\tau_{oz}(\lambda)$ 分别为第 i 个波段的等效瑞利光学厚度及等效臭氧光学厚度(式 6)。

$$\tau_r(\lambda) = \tau_{r0}(\lambda) (P/P_0), \quad \tau_{oz}(\lambda) = \alpha_{oz}(\lambda) L_{oz} = \alpha_{oz}(\lambda) U_D / 1\,000 \quad (6)$$

$\tau_{r0}(\lambda)$ 为标准大气压 P_0 时特定波段的等效瑞利光学厚度, $\alpha_{oz}(\lambda)$ 为特定波段的等效臭氧的单位吸收系数, 计算这两者需要考虑到 MERIS 各波段的光谱响应函数, 并利用该函数进行积分运算^[7], P 为海表面

的实际气压, U_b 表示以 Dobson 为单位的臭氧浓度。

耀斑的校正根据两个阈值 $glint_thr_low$ 和 $glint_thr_high$ 对耀斑贡献等级进行划分, 分为低、中、高 3 个不同的层次, 分别采用剔除像元、减去大

气顶耀斑反射率和忽略不计 3 种方法进行校正。 $glint_thr_low$ 取值为 0.000 5, $glint_thr_high = 0.2\rho(865)$, $\rho(865)$ 为 865 nm 波段大气顶反射率。耀斑校正结果见图 2。



图 2 耀斑校正结果(865nm)

Fig.2 Result of glint correction(865nm)

- a. 耀斑校正前大气顶反射率; b. 耀斑反射率; c. 耀斑贡献等级分布; d. 耀斑校正后大气顶反射率
a. top of atmosphere (TOA) reflectance before glint correction; b. glint reflectance;
c. distribution of glint contribution ranking; d. TOA reflectance after glint correction

3.2 瑞利散射计算

瑞利散射计算主要有单次散射近似计算和数值求解精确的矢量辐射传输方程(Exact Radiative Transfer Equation, ERTe)两种方法。单次散射的计算比较简单, 缺点是误差大。针对 SeaWiFS 和 MODIS 等传感器, 大部分研究是利用 SeaDAS 软件中对应的精确瑞利散射的查找表^[8]实现瑞利散射的精确计算, 但该软件没有针对 MERIS 数据的查找表。国内何贤强等^[9]利用加倍法求解下垫面为水面的平面平行分层大气矢量辐射传输方程, 成功自主地开发出计算精确瑞利散射的软件包, 将其用于生成我国海洋一号卫星(HY-1)水色水温扫描仪(COCTS)精确瑞利散射查找表, 其精度优于 0.5%^[9]。本次研究利用该方法, 生成了 MERIS 瑞利散射查找表。考虑到压强引起的瑞利光学厚度变化, 在实际计算时, 要根据下式对瑞利散射值进行校正(式 7):

$$\frac{L_R(\lambda)}{L_{R_0}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \frac{[1 - \exp(-\tau_R(\lambda)/\cos\theta_s)]}{[1 - \exp(-\tau_{R_0}(\lambda)/\cos\theta_s)]} \quad (7)$$

$L_{R_0}(\lambda)$ 为查找表程序计算的结果, $L_R(\lambda)$ 为实际的精确瑞利散射值。

由于精确瑞利散射计算是基于臭氧层在大气分子层之上, 要计算大气顶端的瑞利散射值, 需要将计算出来的 $L_R(\lambda)$ 要经过臭氧订正(式 8)。

$$L_R(\lambda)' = L_R(\lambda) T_{O_3}(\lambda),$$

$$T_{O_3}(\lambda) = \exp\left[-\tau_{O_3}(\lambda) \left(\frac{1}{\cos\theta_s} + \frac{1}{\cos\theta_v}\right)\right] \quad (8)$$

最后, 将瑞利散射辐射值转化为瑞利散射反射率, 得到实际气压的大气顶精确瑞利散射的反射率。图 3 为精确瑞利散射与单次瑞利散射的对比, 相对误差计算如式(9)。

$$\text{相对误差} = \frac{L_R(\lambda)_{\text{单次}} - L_R(\lambda)_{\text{精确}}}{L_R(\lambda)_{\text{精确}}} \times 100\% \quad (9)$$

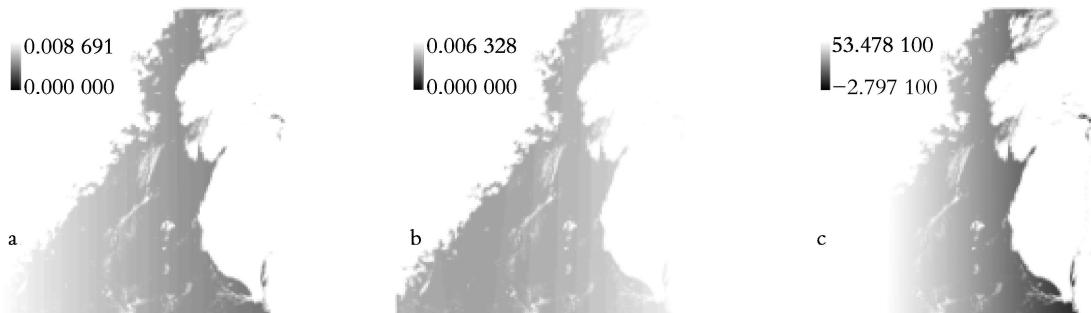


图 3 精确瑞利散射与单次瑞利散射计算结果比较(865nm 波段)

Fig.3 Comparison between exact Rayleigh scattering calculation and single Rayleigh scattering calculation

- a. 单次瑞利散射; b. 精确瑞利散射; c. 相对误差分布
a. result of single Rayleigh scattering calculation; b. result of exact Rayleigh scattering calculation; c. distribution of relative error

3.3 气溶胶散射及离水反射率计算

气溶胶散射一直是大气校正的难点问题,气溶胶很难用一种固定的模型来描述。水体性质不同,气溶胶计算方法也不同。I 类水体气溶胶的经验计算方法通常是基于近红外波段即 778, 865 nm 波段离水辐射率为 0 的基础之上,而 II 类水体气溶胶方法则没有统一的模式。台湾海峡水体为清洁到轻度浑浊。考虑到气溶胶散射对大气校正结果的影响不如瑞利散射显著,其中清洁水体部分即 I 类水体的气溶胶单次散射采用中等精度 e 指数外推的方法^[10]。当水体浑浊度增加时, e 指数外推的方法不再适用,取而代之的是 II 类水体气溶胶散射计算方法。考虑到神经网络方法具有较好的容错特性,而台湾海峡的水体性质相对中国其它海区较接近于欧洲的水体,因此对 II 类水体,利用 BEAM 软件的 FUB-WeW-Water 插件进行大气校正,其离水辐射率的计算是利用四个独立的神经网络进行计算,已

充分考虑了各种大气及海洋的情况,并进行了大量的辐射传输模拟,结果已通过大量的实地调查数据进行验证,由于该方法具有较强的适用性,目前已被用于生成 MERIS 二级数据产品。输入 MERIS L1B 原始数据及相关的参数,即可得出 1~ 7, 9 波段的(8 波段为叶绿素荧光峰,不计算在内)离水反射率 ρ_w ,该方法主要针对 II 类水体,不适用于 I 类水体。借鉴 Moore 等^[2],首先对 I, II 类水体类型进行判别(式 10):

$\rho_w(708.75) > 0.001$, 为 II 类水体, 否则为 I 类水体 (10)

其中, $\rho_w(708.75)$ 采用 e 指数外推法计算得到的 708.75 nm 波段的离水反射率,对判断为 II 类水体的区域,采用 BEAM 软件计算结果进行修正。

同样地,其余 7 个波段,即 1~ 7 波段,根据判断出来的水体类型分布,分别采用相应的大气校正的结果(图 4)。

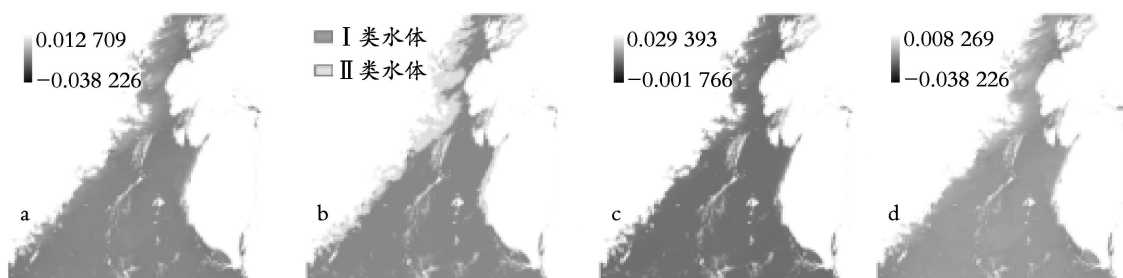


图 4 大气校正结果(708.75 nm)

Fig. 4 Result of atmospheric correction(708.75 nm)

a. ρ_w (I 类算法); b. 水体类别分布; c. ρ_w (II 类算法); d. ρ_w

a. ρ_w (calculated by case I algorithm); b. distribution of water types; c. ρ_w (calculated by case II algorithm); d. ρ_w

4 大气校正结果分析

首先,离水反射率 ρ_w 为负值可直接说明大气校正失效。通过统计不同大气校正方法计算出的 ρ_w 为负值的像元个数来对大气校正的结果进行分析。在 1~ 5 波段,采用 I 类算法进行大气校正,导致 II 类水域出现很多 ρ_w 负值像元,而 II 类算法即神经网络算法的应用,则明显减少其个数。但 II 类算法对 I 类水域并不适用,尤其是在 620, 665 nm 波段,由于该算法本身对 I 类水域的限制,以及台湾海峡水体与欧洲水体光谱在这两个波段的差异相对较大

的可能,导致该算法计算出的 ρ_w 负值像元数远远超过 I 类算法。因此,本文提出先区分水体类型,再分别采用相应算法进行大气校正的方法,可以减少 ρ_w 为负值的概率。由表 1 还可以看出,尽管不适用于 I 类水域,但神经网络算法还是表现出较强的容错性,这点可以从 1~ 5 以及 9 波段, II 类算法在 I 类水域计算出的 ρ_w 负值像元数少于 I 类算法得以体现。但该算法对样本依赖性强,因此,收集本土数据集,对于采用神经网络法进行大气校正很重要。中波段 9 出现大量的负 ρ_w 值像元的原因暂时不明确。

表 1 不同大气校正方法计算出的 ρ_w 为负值的像元数
Tab. 1 Numbers of negative ρ_w pixels by different atmospheric correction methods

波段序号	中心波长 (nm)	区分水体类型计算出的 ρ_w 为负值的像元数	I 类算法计算出的 ρ_w 为负值的像元数	II 类算法计算出的 ρ_w 为负值的像元数
1	412.5	5 581	25 068	2 958
2	442.5	4 098	16 672	2 689
3	490	3 524	11 884	2 094
4	510	3 999	10 569	1 488
5	560	7 243	9 984	3 038
6	620	70 722	72 064	474 156
7	665	58 079	58 356	450 700
9	708.75	1 059 426	1 059 382	731 022

注: 参与大气校正的像元总数为 1 622 664, 其中 II 类水体像元总数为 223 658

由于没有现场同步测量的数据, 用于同大气校正后的水体光谱作比较的实测数据, 采用文献^[1]中列出的我国 2003 年春季黄、东海水色联合实验的现场数据, 该试验的数据质量有保证。尽管由于测量时间地点上存在的差异, 但各波段水体的反射率变化动态范围不会非常大, 因此进行比较分析还是具有一定的参考价值。在校正后的影像上, 选取代表清洁水体、浑浊水体的点, 分别同青岛港附近海域及长江口区域水体光谱实测值作比较, 见图 5(带“hd”字样的为现场观测点位数据。为方便比较, 实测数据 620 nm 波段反射率通过内插获得, 其余波段由于

中心波长与 MERIS 很接近, 直接引用原数据)。由图 5 可知, 清洁水体在光谱形状、反射率值上同现场数据比较吻合, 但反射率峰值出现在更短的波段, 而 510 nm 之前的波段 ρ_w 略高, 510 nm 之后的波段 ρ_w 略低。由图 5b, 除 P1, P7 及 P9 外, 其余各点的光谱曲线在形状及反射率大小方面同 hd59 站位实测光谱曲线很接近。P1 的光谱形状同 hd41 相似, 但反射率偏低。P7, P9 的反射率同 hd59 接近, 但峰值出现在波长较短的波段。总体来讲, 大气校正后水体的光谱曲线同现场实测数据还是保持了较好的一致性。

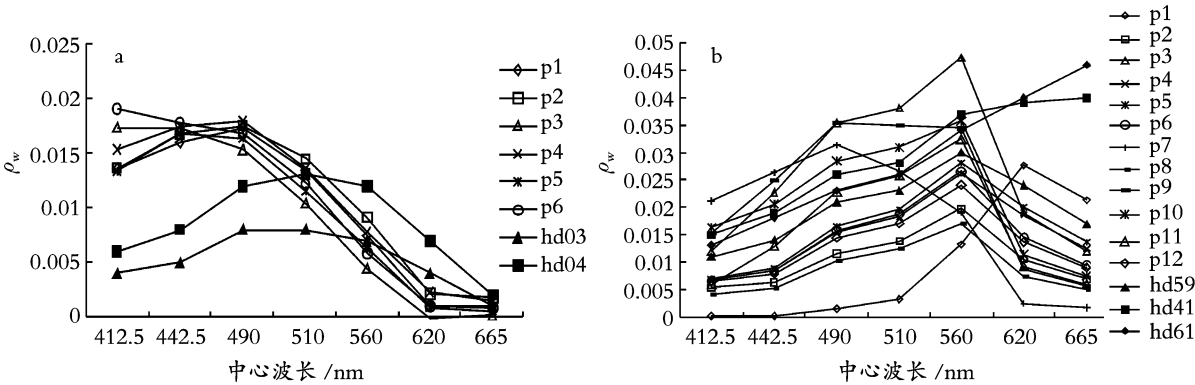


图 5 大气校正后的两类水体光谱与实测数据比较

Fig. 5 comparison between the spectra of two types of water after atmospheric correction and in situ data

a. 清洁水体光谱和实测数据; b. 浑浊水体光谱和实测数据

a. spectra of clear water vs. in situ data; b. spectra of turbid water vs. in situ data

5 结论

根据 MERIS L1B 数据大气校正的基本原理和方法, 针对台湾海峡水体, 提出区分水体类别, 再分别利用 e 指数外推法进行一类水体气溶胶散射计算, 和利用神经网络法计算二类水体离水反射率的方法。结果表明, 采用该方法计算出的 ρ_w 为负值的

像元数降低, 大气校正后水体的光谱曲线同现场数据保持较好的一致性。

致谢: 感谢欧空局为本次研究提供了 MERIS L1B 数据, 其用户帮助小组提供 MERIS 光谱响应函数并就算法文档中的问题认真解答; 唐军武博士在研究初期为笔者提供臭氧单位吸收系数表并解答有关等效瑞利光学厚度计算问题, 在此真诚感谢! 特别感谢何贤强博士, 利用笔者提供的 MERIS

波长、等效瑞利光学厚度等参数帮忙生成 MERIS 精确瑞利
散射查找表!

参考文献:

- [1] European Space Agency. MERIS Product Handbook [M]. Barcelona: PLD Communication Ltd, 2002, 25.
- [2] Moore G F, Aiken J, Lavender S J, *et al.* The atmospheric correction of water color and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in Case II Waters: application to MERIS[J]. **International Journal of Remote Sensing**, 1999, **20**(9): 1 713-1 733.
- [3] Schroeder T, Fischer J. Atmospheric correction of MERIS imagery above case 2 waters [A]. European Space Agency. ESA SP (549) [C]. Italy: European Space Agency, 2004. 169-174.
- [4] 韦钧, 陈楚群, 施平, 等. 一种实用的二类水体 SeaWiFS 资料大气校正方法[J]. 海洋学报, 2002, **24** (4): 118-126.
- [5] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[D]. 北京: 中国科学院遥感研究所, 1999.
- [6] Montangner F, Billat V. MERIS ATBD 2. 13_sun glint flag algorithm [EB/ OL]. http://envisat.esa.int/instruments/meris/pdf/atbd_2_13.pdf, 2005-06-23.
- [7] Gordon H R. Remote sensing of ocean color: a methodology for dealing with broad spectral bands and significant out of band response [J]. **Applied Optics**, 1995, **34**(36): 8363-8374.
- [8] Gordon H R, Brown J W, Evans R H, *et al.* Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus 7 Coastal Zone Color Scanner[J]. **Applied Optics**, 1988, **27**(5): 862-871.
- [9] 何贤强, 潘德炉, 朱乾坤, 等. 海洋水色及水温扫描仪精确瑞利散射计算[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 145-151.
- [10] Wang M, Gordon H R. A simple, moderately accurate, atmospheric correction algorithm for SeaWiFS[J]. **Remote Sensing of Environment**, 1994, 50: 231-239.
- [11] 丁静. 基于神经网络的二类水体大气修正与水色要素反演[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.

Atmospheric correction of MERIS data over the Taiwan Straits

CHEN Yun zhi, WANG Xiao qin, GAO Zhong ling

(Spatial Information Research Center of Fujian Province, Key Laboratory for Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Received: Jul. , 31, 2006

Key words: MERIS data; atmospheric correction; the Taiwan Strait

Abstract: Taking the Taiwan Straits as a test site, the study of atmospheric correction was carried out on MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) data according to the characteristics of MERIS L1B product. The principles of atmospheric correction were introduced in the first part of this paper. The first step of the study is to obtain the datasets for atmospheric correction by extracting water body pixels from the image and interpolating the auxiliary parameters. The glint reflectance was calculated and corrected, and exact Rayleigh scattering was calculated by adding-doubling method subsequently. Finally, based on the fact that water in the Taiwan Straits is from being clear to slightly turbid, a method was proposed to calculate aerosol scattering of case I water by using an epsilon exponent extrapolation algorithm and water leaving reflectance of case II water by a neural network algorithm accordingly, following water type discrimination. With analyzing the statistics of negative ρ_w pixel numbers and spectral signatures of the result, the conclusion can be drawn that the method proposed in this paper reduces the number of negative ρ_w pixels while keeping the spectral signatures of water body consistent with those of in situ data well.

(本文编辑: 刘珊珊)