

文章编号: 1007-4619(2006)03-0306-06

针对 HY-1A CCD 数据处理的瑞利查找表

孙 凌¹, 张 杰², 郭茂华³

(1. 中国气象局 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 国家海洋局 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 国家海洋局 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘 要: 在海洋水色遥感中, 瑞利散射占大气顶 (TOA) 处测量信号的绝大部分, 作为大气修正的第一步, 必须精确计算瑞利散射的贡献, 并从总信号中去除。本文针对 HY-1A CCD 传感器的波段设置, 利用 6S 模型计算了不同情况下的瑞利反射率; 基于计算结果, 分析了瑞利反射率的特征, 包括大气类型的影响、波长的影响, 以及宽波段设置带来的波段平均效应的影响等; 构造了针对 HY-1A CCD 的瑞利反射率查找表, 并应用于实际卫星数据处理, 初步评估了方法的有效性。

关键词: HY-1A CCD; 瑞利反射率; 查找表; 6S

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Rayleigh Lookup Tables for HY-1A CCD Data Processing

SUN Ling¹, ZHANG Jie², GUO Mao-hua³

(1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites China Meteorological Administration (IRC/VES CMA), National Satellite Meteorological Center Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Shandong Qingdao 266061, China;

3. National Satellite Oceanic Application Center National Oceanic Administration Beijing 100081, China)

Abstract In ocean color remote sensing Rayleigh scattering dominates the signal measured at the top-of-atmosphere (TOA). Therefore as the first step in atmospheric correction, Rayleigh scattering item must be computed accurately and removed from the sensor measured total signal. According to the four bands of HY-1A CCD, Rayleigh reflectance under various conditions is computed using 6S model. Based on the computations, the Rayleigh reflectance features are analyzed, including the effect of atmospheric type, wavelength and band averaging resulting from the broad band width of this sensor. The HY-1A CCD Rayleigh lookup tables are generated, and applied to the remotely sensed data processing with the primary evaluation of its validity.

Key words HY-1A CCD; rayleigh reflectance; lookup tables; 6S

1 引 言

在海洋遥感领域, 大气顶处测量的信号中, 瑞利散射占绝大部分。例如, 在开阔大洋 (干净大气条件

下), 蓝波段的瑞利散射约占总信号的 80%, 而在近红外波段 (865nm) 可约占到 50%^[1]。因此, 进行海洋水色遥感, 必须精确计算瑞利散射信号, 并从传感器测量的总信号中予以去除, 这是大气修正的第一步。

对于具有朗伯特特性的均匀表面, 忽略大气与水

收稿日期: 2005-04-22; 修订日期: 2005-10-28

基金项目: 国家计委“HY-1 卫星地面应用系统”资助

作者简介: 孙 凌 (1977—), 女, 博士, 2005 年毕业于中科院海洋所物理海洋专业, 现主要从事海洋水色遥感研究, 已发表论文 8 篇,

E-mail: sunling@nsmc.cma.gov.cn

体间的连续反射和散射效应,以及海表面白帽和耀斑反射等因素,在大气窗口区,传感器测量的总反射率 ρ_t^{TOA} 可简化为:

$$\rho_t^{\text{TOA}}(\lambda) = \rho_w(\lambda) \times T_g^i(\lambda) \times T_{r+a}(\lambda) + \rho_{\text{am}}^{\text{TOA}}(\lambda) \quad (1)$$

$$\rho_{\text{am}}^{\text{TOA}}(\lambda) = [\rho_{\text{mix}}(\lambda) - \rho_r(\lambda)] \times T_g^i(\lambda) + \rho_r(\lambda) \times T_{g, \text{noH}_2\text{O}}^i(\lambda) \quad (2)$$

$$T_g^i(\lambda) = T_{g, \text{O}_3}(\lambda) \times T_{g, \text{H}_2\text{O}}(\lambda) \times T_{g, \text{O}_2}(\lambda) \quad (3)$$

$$T_{g, \text{noH}_2\text{O}}^i(\lambda) = T_{g, \text{O}_3}(\lambda) \times T_{g, \text{O}_2}(\lambda) \quad (4)$$

式中, ρ_w 为由于水体后向散射而自海表面出射的离水反射率 ($\rho_w = L_w / L_d(0^+)$); $\rho_{\text{am}}^{\text{TOA}}$ 为到达传感器的大气固有反射率; T_{r+a} 为瑞利 + 气溶胶混合大气的散射透过率(包括直射和漫射,包括气溶胶吸收); T_g^i 为总气体吸收透过率; $T_{g, \text{noH}_2\text{O}}^i$ 为不考虑水汽时的总气体吸收透过率; ρ_r 为不考虑吸收气体时,纯瑞利大气的反射率; ρ_{mix} 为不考虑吸收气体时,瑞利 + 气溶胶混合大气的反射率。 λ 为波长。以上表达式中省略了角度。

目前,业务化的水体大气修正算法都采用了查找表技术,如, SeaWiFS、MODIS、MERIS 和 OCTS 等^[1-4],这省却了卫星数据处理时的计算量。中国第一颗海洋卫星“海洋一号”上搭载的 HY-1A CCD 相机具有蓝、绿、红和近红外 4 个波段,星下点分辨率为 250m。虽然该 CCD 相机是一个宽波段传感器,但是其信号较强,具有良好的动态范围和辐射灵敏度,在空间分辨率上也很有优势。然而,能否利用其进行有效的量化应用,取决于是否有适当的大气修正处理。目前,还没有人开展过此项工作。本文主要讨论大气修正中非常重要的瑞利反射率 ρ_r 的计算。

2 瑞利反射率模拟

作为大气固有反射率中的重要一项,瑞利散射依赖于波长、观测几何和大气压等。针对 45 个太阳天顶角 θ_0 ($0^\circ - 88^\circ$, 以 2° 为间隔)、43 个观测天顶角 θ_v ($0^\circ - 84^\circ$, 以 2° 为间隔)、37 个相对方位角 $\Delta\phi$ ($0^\circ - 180^\circ$, 以 5° 为间隔)和 4 种大气类型(中纬度夏季、中纬度冬季、1962 年美国标准大气和热带大气)进行了针对 HY-1A CCD 波段系统光谱响应函数的瑞利反射率计算。波段 1-4 的波长范围分别取 403-557nm, 510-628nm, 589-724nm 和 700-1000nm。

大气辐射传输计算采用通用的 6S 模型。其中,瑞利计算采用了 Vermote 和 Tanre^[5] 提出的针对水平瑞利散射大气的解析表达式进行求解,该方法通

过对矢量连续散射项法 VSOS (Vector Successive Orders of Scattering) 的结果进行半经验拟和而引入了瑞利散射的极化处理,去极化因子采用了 Young 的 0.0279^[6]。

3 模拟结果分析

为了描述方便,中纬度夏季、中纬度冬季、1962 年美国标准大气和热带大气分别用 midsum、midwin、us1962 和 tropic 表示,波段 1-4 分别用 B₁、B₂、B₃ 和 B₄ 表示。

3.1 大气类型的影响

其他条件相同时,瑞利反射率由大到小依次是 midwin、tropic、midsum 和 us1962。以 midwin 与 us1962 为例,定义绝对偏差 = $\rho_{\text{midwin}} - \rho_{\text{us1962}}$, 相对偏差 = $(\rho_{\text{midwin}} - \rho_{\text{us1962}}) / \rho_{\text{midwin}}$ 。当 $\theta_0 \leq 60^\circ$ 、 $\theta_v \leq 60^\circ$ 和 $\Delta\phi \leq 180^\circ$ 时,波段 1-4 的绝对偏差范围分别是 $3.21 \times 10^{-4} - 1.09 \times 10^{-3}$, $1.43 \times 10^{-4} - 5.88 \times 10^{-4}$, $8.0 \times 10^{-5} - 3.49 \times 10^{-4}$ 和 $3.0 \times 10^{-5} - 1.39 \times 10^{-4}$; 相对偏差范围分别是 $4.05 \times 10^{-3} - 4.79 \times 10^{-3}$, $4.63 \times 10^{-3} - 4.97 \times 10^{-3}$, $4.78 \times 10^{-3} - 4.98 \times 10^{-3}$ 和 $4.87 \times 10^{-3} - 4.95 \times 10^{-3}$ 。

3.2 观测几何的影响

其他条件相同时,天顶角增大,瑞利反射率增大;当观测天顶角或者太阳天顶角为 0° 时,相对方位角对瑞利反射率没有影响;当天顶角不为 0° 时,相对方位角增大,瑞利反射率减小。

3.3 波长的影响

其他条件相同时,瑞利反射率从大到小依次是 B₁、B₂、B₃ 和 B₄。图 1 给出了在 midwin 大气条件下,瑞利反射率随波段和天顶角的变化。

3.4 波段平均效应的影响

宽波段传感器需采用光谱响应函数进行积分,具有波段平均的效应。为了评估其影响,采用标称中心波长进行了瑞利反射率计算,波段 1-4 分别取 460nm, 560nm, 650nm 和 825nm。定义波段等效后的反射率 ρ_{ave} 与采用中心波长计算的反射率 ρ_{wl} 间的绝对偏差 = $\rho_{\text{ave}} - \rho_{\text{wl}}$, 相对偏差 = $(\rho_{\text{ave}} - \rho_{\text{wl}}) / \rho_{\text{ave}}$ 。

除了波段 2, 波段等效后的结果大于中心波长

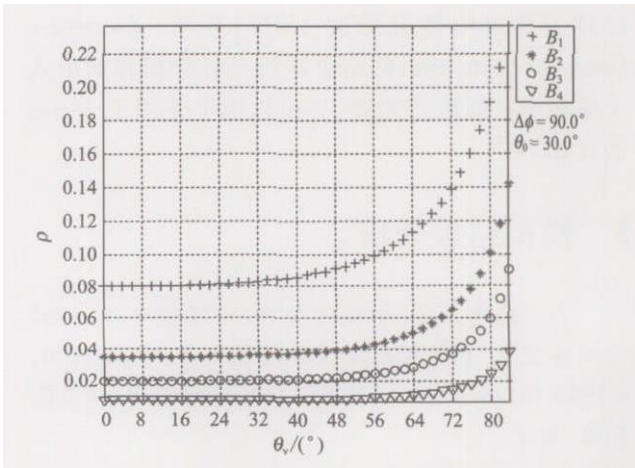


图 1 midwin大气下,瑞利反射率随波段和天顶角的变化

Fig 1 Rayleigh reflectance varying with band and zenith angle under midwin atmospheric type

的结果。随着天顶角的增加,对于 4 个波段,两种反射率之间的绝对偏差的绝对值基本呈增大趋势,相对偏差的绝对值基本呈减小趋势。以 midwin 为例,当 $\theta_0 \leq 60^\circ$ 、 $\theta_v \leq 60^\circ$ 和 $\Delta\Phi \leq 180^\circ$ 时,波段 1-4 的绝对偏差范围分别是 $9.26 \times 10^{-4} - 2.12 \times 10^{-3}$, $-3.52 \times 10^{-3} - -8.0 \times 10^{-4}$, $6.5 \times 10^{-5} - 2.35 \times 10^{-4}$ 和 $1.19 \times 10^{-4} - 5.24 \times 10^{-4}$; 相对偏差范围分别是 $7.85 \times 10^{-3} - 1.38 \times 10^{-2}$, $-2.80 \times 10^{-2} - -2.77 \times 10^{-2}$, $3.21 \times 10^{-3} - 4.03 \times 10^{-3}$ 和 $1.83 \times 10^{-2} - 1.94 \times 10^{-2}$ 。

结果表明,当天顶角 $\leq 60^\circ$ 时,波段 2 和波段 4 的相对偏差分别大于 2.7% 和 1.8%, 波段 1 的相对偏差也可以达到 1.3%, 波段 3 的相对偏差小于 0.5%。因此,计算瑞利反射率不应使用中心波长,特别是波段 2 和波段 4。

4 瑞利反射率查找表

瑞利查找表的构造借鉴了 Wang^[11]的表达式:

$$\rho_r(\lambda, \theta_v, \theta_0, \Delta\phi) = \rho_r^{(0)}(\lambda, \theta_v, \theta_0) + 2 \sum_{m=1}^2 \rho_r^{(m)}(\lambda, \theta_v, \theta_0) \cos(m\Delta\phi) \quad (5)$$

其中, $\rho_r^{(m)}(\lambda, \theta_v, \theta_0)$ 为波长 λ 、太阳天顶角 θ_0 和观测天顶角 θ_v 下的 m 阶傅里叶系数; $\Delta\phi$ 为相对方位角。

针对不同的大气类型,将瑞利散射反射率的傅里叶系数 $\rho_r^{(m)}(\lambda, \theta_v, \theta_0)$ 存成查找表。其中,太阳天顶角从 $0^\circ - 80^\circ$,以 2° 为间隔;观测天顶角从 $0^\circ - 80^\circ$,以 2° 为间隔。使用时只需在太阳和观测天顶角上进行 2 维线性内插,得到特定太阳和观测天顶

角上的系数。

定义绝对误差 = $\rho_r - \rho_r^e$, 相对误差 = $(\rho_r - \rho_r^e) / \rho_r^e$ 。其中,上标 e 表示利用 (5) 式计算的结果,无上



图 2 2002-09-06 数据得到的 L_n 彩色合成图

(R/G/B 采用 B₃/B₂/B₁)

Fig 2 L_n color composing map derived from the data of 2002-09-06 (R/G/B adopting B₃/B₂/B₁)



图 3 2003-02-05 数据得到的 L_n 彩色合成图

(R/G/B 采用 B₃/B₂/B₁)

Fig 3 L_n color composing map derived from the data of 2003-02-005 (R/G/B adopting B₃/B₂/B₁)

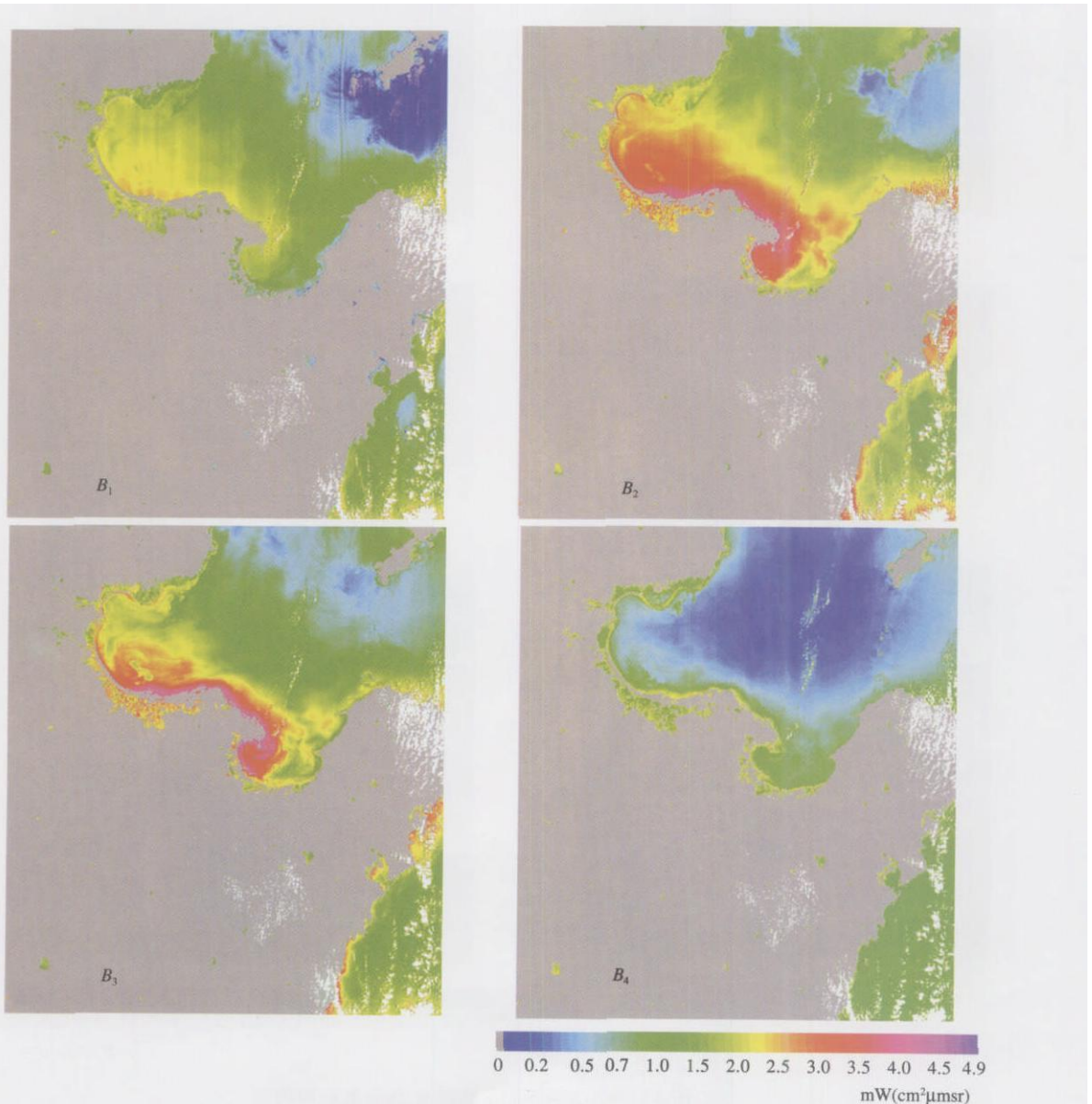
标表示辐射传输模型计算得到的真实值。在 4 种大气条件下,瑞利反射率估算的误差范围基本相同,波段 1 的绝对误差和相对误差范围分别是 -1.58×10^{-5} — 1.62×10^{-5} 和 -9.81×10^{-5} — 6.35×10^{-5} ;波段 2 的分别是 -3.92×10^{-6} — 2.89×10^{-6} 和 -1.02×10^{-4} — 6.38×10^{-5} ;波段 3 的分别是 -2.28×10^{-6} — 1.55×10^{-6} 和 -1.03×10^{-4} — 6.75×10^{-5} ;波段 4 的分别是 -9.10×10^{-7} — 3.79×10^{-6} 和 -1.05×10^{-4} — 4.92×10^{-4} 。

5 HY-1A CCD 数据处理结果

为了评估所建查找表的有效性,选择 2002-09-

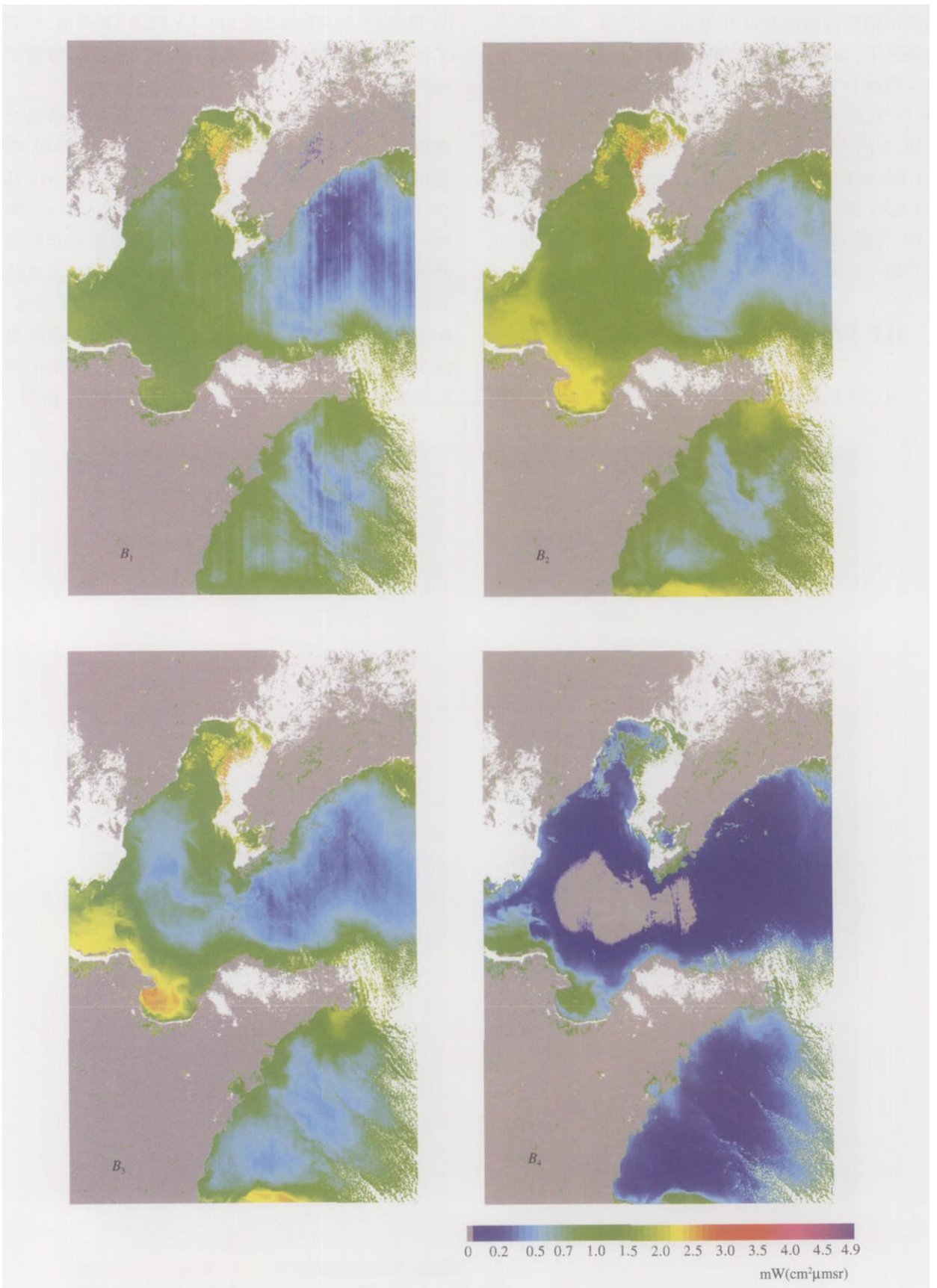
06 和 2003-02-05 的 2 景 HY-1A CCD 1B 产品,计算了各个像元的瑞利反射率并转化成辐亮度,得到了瑞利修正后的结果,即: $L_{rc} = L_t - L_r$ 。

图 2 给出了 2002-09-06 数据得到的 L_{rc} 彩色合成图(大气类型选 m idsum)。图 3 为 2003-02-05 数据得到的 L_{rc} 彩色合成图(大气类型选 m idw in),其中,辽东湾东侧和渤海湾南侧近岸的白色部分为海冰。图 4 为 2002-09-06 L_{rc} 结果对应的单波段伪彩色分割图。图 5 为 2003-02-05 L_{rc} 结果对应的单波段伪彩色分割图(辽东湾北部有部分薄冰未被检测到,在图像中呈橙黄色)。由图 4 可以看出,在渤海海峡和大连附近的水域(图像的右上部分,水体中的灰色像元)出现了部分 $L_{rc}(\lambda_1) < 0$ 的像素。由图 5



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
 图 4 2002-09-06 的单波段 L_{rc} 伪彩色分割图

Fig 4 L_{rc} single band pseudocolor segmentation map derived from the data of 2002-09-06



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
图 5 2003-02-05 的单波段 L_e 伪彩色分割图
Fig 5 L_e single band pseudocolor segmentation map derived from the data of 2003-02-05

可以看出,在渤海中部水域出现了大量 $L_{rc}(\lambda_4) < 0$ 的像素。为了探究负值出现的原因,进行了如下统计:

2002-09-06数据 进行瑞利修正处理的像素(即,未被陆、云掩模掉的像素)中共有 45个 $L_i < 0$,其中,波段 1为负的有 2个,波段 2有 9个,波段 3有 9个,波段 4有 25个。 $L_{rc} < 0$ 的像素共有 13610个,其中,波段 1有 13549个,波段 2有 31个,波段 3有 11个,波段 4有 21个。 $L_{rc}(\lambda_1) < 0$ 的像素集中在较清洁的水域。

2003-02-05数据 进行瑞利修正处理的像素中共有 2个 $L_i < 0$,其中,波段 1为负的有 1个,波段 4有 1个。 $L_{rc} < 0$ 的像素共有 264896个,其中,波段 1有 426个,波段 3有 1个,波段 4有 264469个。 $L_{rc}(\lambda_1) < 0$ 和 $L_{rc}(\lambda_4) < 0$ 的像素分布不尽相同,但都集中出现在相对较清洁的水域,而且与 2002-09-06的结果中对应波段具有较小 L_{rc} 值的像素分布类似。

初步可以认为:HY-1A CCD存在定标误差,这导致在较为清洁水域出现 $L_{rc} < 0$ 的现象;相对于其他波段,波段 1(蓝光)的定标误差较大,定标后的数值偏小;波段 4(近红外)随着时间的推移存在明显的退化现象,导致采用发射前定标系数定标后的数值偏小。定位数据的偏差也可能是产生负值的原因之一^[7],但就 2景数据中 $L_{rc} < 0$ 像元的分布特点看,其影响不是太大。当然,未考虑气体吸收的影响也会导致 L_{rc} 偏小,若进行气体吸收修正,可减少负值像元点数。

6 结 论

基于针对 HY-1A CCD波段设置的数据模拟与分析,发现瑞利反射率可以用与角度和波长有关的傅里叶级数近似,该近似计算的相对误差均在 10^{-4} 量级或更小。应用据此构造的瑞利查找表进行

HY-1A CCD数据处理的总体效果良好,但进一步的评估还有待进行,特别是需要首先确定该传感器 1B数据的定标精度。

需要指出的是,由于 HY-1A CCD的波段设置较宽,因此波段平均效应的影响较大。对于瑞利反射率计算,影响大小依次是波段 2、波段 4、波段 3(波段 1)。当天顶角 $\leq 60^\circ$ 时,计算时忽略波段平均效应,波段 2和波段 4的相对误差分别大于 2.7%和 1.8%,波段 1的相对误差也可以达到 1.3%,波段 3的相对误差小于 0.5%。因此,计算瑞利反射率时不应使用中心波长,特别是波段 2和波段 4。

参 考 文 献 (References)

- [1] Wang M. The Rayleigh Lookup Tables for the SeaWiFS Data Processing: Accounting for the Effect of Ocean Surface Roughness [J]. *Int J Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2693-2702.
- [2] NASA GSFC. SeaDAS 4.8. Available from <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/download.html>
- [3] Antoine D, Morel A. A Multiple Scattering Algorithm for Atmospheric Correction of Remotely Sensed Ocean Color (MERIS Instrument): Principle and Implementation for Atmospheres Carrying Various Aerosols Including Absorbing Ones [J]. *Int J Remote Sens*, 1999, 20(9): 1875-1916.
- [4] Fukushima H, Higurashi A, Mitomi Y, et al. Correction of Atmosphere Effect on ADEOS/OCTS Ocean Color Data: Algorithm Description and Evaluation of Its Performance [J]. *J Oceanogr*, 1998, 54: 417-430.
- [5] Vermote E, Tanré D. Analytical Expressions for Radiative Properties of Planar Rayleigh Scattering Media Including Polarization Contributions [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1992, 47(4): 305-314.
- [6] Vermote E, Tanré D, Deuzé J L, et al. 6S User Guide Version 2 [M]. Available from Website, 1997.
- [7] Sun L. Atmospheric Correction and Water Components Retrieval for HY-1A CCD [D]. Qingdao: PhD Dissertation of Institute of Oceanology, C. A. S., 2005. [孙凌. 针对 HY-1A CCD 的大气修正与水体组分反演 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所(博士学位论文), 2005.]