

81-87

海洋水色遥感资料红光波段的大气纠正*

陈楚群

(中国科学院南海海洋研究所 广州 510301)

P731.14

P715.7

摘要 通常的大气纠正方法不考虑对红光波段进行大气纠正,文章在阐述海洋水色遥感资料大气纠正基本原理和方法的基础上,提出了简单可行的方法,对红光波段与其它波段一同进行大气纠正,并用C语言完成了该纠正方法的程序编制和调试,使海洋水色遥感资料的大气纠正更加完善,有利于更好地对近岸海区开展海洋水色遥感应用研究。

关键词 水色遥感, 红光波段, 大气纠正

分类号 P715.7

海洋, 水色

海洋水色遥感是利用传感器获取海面离水辐亮度的可见光和近红外光谱信息来研究海洋的新兴技术,是海洋遥感的重要研究领域。在海洋生态研究、海洋环境监测、海洋灾害预报和海洋渔业管理等许多方面具有十分广阔的应用前景。并成为研究水团、沿岸流、上升流等海洋现象的有效手段之一。

第1代海洋水色传感器——海岸带水色扫描仪(Coastal Zone Colour Scanner, 简称CZCS)是装载在雨云7号(Nimbus-7)卫星上的多光谱行式扫描辐射计^[1]。从可见光到红外共设置了6个波段。其中1—4波段主要用于海洋水色遥感。它们的中心波长分别为443, 520, 550和670nm,波段带宽均为20nm。CZCS的扫描刈幅宽度约1600km,星下点的空间分辨率为825m。CZCS在1978年至1986年近8年的运行中,获取了大量海洋水色遥感资料。由于当时索取CZCS资料的途径不畅等原因,我国利用CZCS资料进行海洋水色遥感的研究很少。目前,第2代海洋水色传感器^[2]已开始投入使用,如日本于1996年8月发射的“海洋水色与温度传感器”(Ocean Colour and Temperature Sensor, 简称OCTS。因卫星故障,此传感器已于1997年6月30日失效);美国NASA于1997年8月发射“海视宽视野传感器”(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor, 简称SeaWiFS)。SeaWiFS从可见光到红外共设置了8个波段。8个波段的中心波长分别为412, 443, 490, 510, 555, 670, 765和865nm。1—6波段波带宽度为20nm, 7, 8二波段波带宽度为40nm。其扫描刈幅宽度约2800km,星下点的空间分辨率为1100m。

随着第2代海洋水色传感器的投入使用、国际上海洋水色遥感研究热潮的兴起和海洋水色遥感资料获取途径的畅通,为我国海洋水色遥感研究提供了有利的时机。

由于海水的光谱信号很弱,在卫星传感器所接收到的辐射量中,来自海水的辐射量不

1997-05-28收稿; 1997-09-08收修改稿。

* 本研究得到中国科学院留学基金资助(批准号: Y960102)。

足全部辐射量的 20%, 而超过 80% 的辐射量是由大气等非海水辐射产生的。大气纠正就是从卫星传感器所接收到的总辐亮度中去除这些由大气产生的辐亮度。因此, 大气纠正对海洋水色遥感显得尤为重要, 是海洋水色遥感的关键技术之一。

对海洋水色遥感资料的大气纠正已有较多的研究成果^[3-10]。在已有的方法中, 大多不考虑对海洋水色遥感资料里的红光波段作大气纠正。本文在阐述海洋水色遥感资料大气纠正基本原理和方法的基础上, 提出了对红光波段与其他波段一同进行大气纠正的简单可行的方法, 并用 C 语言完成了纠正方法的程序编制和调试, 使海洋水色遥感资料的大气纠正更加完善, 更有利于海洋水色遥感资料在近岸海区研究中的应用。

1 大气纠正的原理和方法

卫星传感器在海面上空接收到的某波段 λ_i 的总辐亮度 $L_T(\lambda_i)$ ^[1], 包括来自海水水面的离水辐亮度 $L_w(\lambda_i)$ 、瑞利(Rayleigh)散射辐亮度 $L_R(\lambda_i)$ 、大气气溶胶散射辐亮度 $L_A(\lambda_i)$ 和太阳光或天空光的闪射光辐亮度 $L_G(\lambda_i)$, 即:

$$L_T(\lambda_i) = t(\lambda_i) L_w(\lambda_i) + L_R(\lambda_i) + L_A(\lambda_i) + L_G(\lambda_i) \quad (1)$$

由于海洋水色传感器具有侧视扫描装置, 能避免太阳光或天空光引起的辐亮度的影响, 式(1)中 $L_G(\lambda_i)$ 可以忽略不计。因此, 对海洋水色遥感资料的大气纠正主要是去除瑞利散射辐亮度($L_R(\lambda_i)$)和气溶胶散射辐亮度($L_A(\lambda_i)$)的影响, 从总辐亮度值($L_T(\lambda_i)$)中求得海水水面的离水辐亮度($L_w(\lambda_i)$)。 $L_w(\lambda_i)$ 可由下式求得:

$$t(\lambda_i) L_w(\lambda_i) = L_T(\lambda_i) - L_R(\lambda_i) - L_A(\lambda_i) \quad (2)$$

式中 $t(\lambda_i)$ 是海面到卫星传感器之间的大气传递衰减系数。

1.1 瑞利(Rayleigh)散射辐亮度的计算

海水水面离水辐射光进入大气后, 由大气中的分子等粒径远小于光波波长的粒子引起的散射称为瑞利散射。影响瑞利散射的因素很多, 如大气中的吸收气体和瑞利光学厚度, 大气圈外入射的太阳光光通量及光波波长, 光波的散射相位角, 太阳天顶角和高度角^[11], 卫星天顶角和高度角等等。

在计算瑞利散射时, 须先确定入射光和反射光的瑞利相位函数, 入射光的瑞利相位函数为:

$$P_R(\gamma^i) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma^i) \quad (3)$$

式中 γ^i 为入射光的散射相位角。按下式计算:

$$\cos \gamma^i = \cos \theta_0 \cos \theta - \sin \theta_0 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_0) \quad (4)$$

式中 θ_0 , φ_0 分别为太阳的天顶角和方位角; θ , φ 分别为卫星的天顶角和方位角。

反射光的瑞利相位函数则定义为:

$$P_R(\gamma^r) = \frac{3}{4} [1 + (2\mu\mu_0 + \cos \gamma^r)^2] \quad (5)$$

式中 μ_0 , μ 分别为太阳天顶角和卫星天顶角的余弦; γ^r 为反射光的散射相位角, 按下式计算:

$$\cos \gamma^{\dagger} = -\cos \theta_0 \cos \theta - \sin \theta_0 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_0) \quad (6)$$

式中 θ_0, φ_0 分别为太阳的天顶角和方位角; θ, φ 分别为卫星的天顶角和方位角。

对于反射光的瑞利散射强度取决于菲涅耳(Fresnel)反射率。菲涅耳反射率按下式计算:

$$\rho(x) = 1 - 2xy m \left[\frac{1}{(x + my)^2} + \frac{1}{(mx + y)^2} \right] \quad (7)$$

式中 x 为太阳或卫星天顶角的余弦(μ_0 或 μ), $y = \frac{1}{m} \sqrt{(m^2 + x^2 - 1)}$; m 为水的折射系数。

根据(3)至(7)式,海洋水色遥感资料中某一波段的瑞利散射的辐亮度强度由下式计算:

$$L_R(\lambda) = \frac{1}{4\pi\mu} [F_0(\lambda) T_{oz}(\lambda) \tau_R(\lambda)] \{P_R(\gamma^{\dagger}) + [\rho(\mu) + \rho(\mu_0)] P_R(\gamma^{\dagger})\} \quad (8)$$

式中 $F_0(\lambda)$ 是指大气圈外入射的太阳光中波长为 λ 的光通量,其值随着地日距离的季节性变化而变化。 $T_{oz}(\lambda) = \exp[-\tau_{oz}(1/\mu + 1/\mu_0)]$, $\tau_{oz}(\lambda)$ 是吸光气体的光学厚度, $\tau_R(\lambda)$ 是瑞利光学厚度。

1.2 气溶胶散射辐亮度的计算

由大气中的气溶胶颗粒引起的散射称为气溶胶散射。气溶胶散射辐亮度计算一般是在假定海水对红光波段为完全的吸光体,即 $L_w(\lambda_0) = 0$ 的基础上,先计算出气溶胶散射的大气纠正因子,再按下式计算出各波段的气溶胶散射辐亮度:

$$L_A(\lambda_1) = L_A(\lambda_0) \varepsilon(\lambda_1, \lambda_0) \frac{F_0(\lambda_1) T_{oz}(\lambda_1)}{F_0(\lambda_0) T_{oz}(\lambda_0)} \quad (9)$$

式中 $\varepsilon(\lambda_1, \lambda_0)$ 称为大气纠正因子。并在假设气溶胶的粒径频率分布和折射系数在整个图幅范围中不变的前提下,将这一因子应用于整幅图像。估算大气纠正因子的值是计算气溶胶散射辐亮度的关键。对式(9)变换可得到大气纠正因子的估算公式:

$$\varepsilon(\lambda_1, \lambda_0) = \frac{F_0(\lambda_0) T_{oz}(\lambda_0) L_A(\lambda_1)}{F_0(\lambda_1) T_{oz}(\lambda_1) L_A(\lambda_0)} \quad (10)$$

先介绍对 CZCS 波段 1, 2, 3 的大气纠正因子的计算^[1, 3-7]。假定海水对红光波段为完全吸光体,即 $L_w(\lambda_0) = 0$, 依式(2)有:

$$L_A(\lambda_0) = L_T(\lambda_0) - L_R(\lambda_0) \quad (11)$$

由于高叶绿素含量或高悬浮泥沙含量等非清洁海水水体对红光波段并不是完全的吸光体,对于这些非清洁海水水体而言 $L_w(\lambda_0)$ 不为 0, 式(11)中的 $L_A(\lambda_0)$ 包含有 $L_w(\lambda_0)$ 的值。式(11)只适用于图幅中清洁海水的像元,因此式(11)应表示为:

$$L_{CA}(\lambda_0) = L_{CT}(\lambda_0) - L_{CR}(\lambda_0) \quad (12)$$

CZCS 波段 2(520nm)与波段 3(550nm)在清洁海水区的离水辐亮度 L_{CW} 相对恒定,可按式(13), (14)先分别求得这 2 个波段的离水辐亮度 L_{CW} :

$$L_{CW}(520) = 0.495 \cos \theta_0 \exp\{-[0.5\tau_R(520) + \tau_{oz}(520)] / \cos \theta_0\} \quad (13)$$

$$L_{CW}(550) = 0.280 \cos \theta_0 \exp\{-[0.5\tau_R(550) + \tau_{oz}(550)] / \cos \theta_0\} \quad (14)$$

然后计算出这 2 个波段的气溶胶散射辐亮度:

$$L_a(\lambda_i) = L_T(\lambda_i) - L_R(\lambda_i) - t(\lambda_i) L_{CW}(\lambda_i) \quad (15)$$

式中 $\lambda_i = 520\text{nm}$ 或 550nm ; $t(\lambda_i)$ 是大气传递衰减系数。

将式(12)至(15)求得的值代入式(10),便可计算出这 2 个波段的大气纠正因子 $\varepsilon(\lambda_i, \lambda_0)$ 。

CZCS 波段 1 的大气纠正因子采用外推法由波段 2,3 的大气纠正因子估算:

$$\varepsilon(443) = \left(\frac{670}{443} \right)^{N(443)} \quad (16)$$

式中 $N(443) = 1/2\{\log[\varepsilon(520)]/\log(670/520) + \log[\varepsilon(550)]/\log(670/550)\}$

利用算式(12)~(16)便可计算出“清洁水体”像元的大气纠正因子,并将此大气纠正因子应用于整幅图像,从而根据式(9)求出波段 1—3 的气溶胶散射辐亮度。

对于 OCTS 和 SeaWiFS 各波段的大气纠正因子的计算^[8-10]可参照 CZCS 的方法进行。如采用外推法计算出 1—7 波段的大气纠正因子:

$$\varepsilon(\lambda_i, \lambda_0) = (\lambda_0 / \lambda_i)^n \quad (17)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, 7$; n 为常数,还可以根据气溶胶光学厚度做近似计算:

$$\varepsilon(\lambda_i, \lambda_0) \approx \tau_a(\lambda_i) / \tau_a(\lambda_0) \quad (18)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, 7$; $\tau_a(\lambda_i)$ 为第 i 波段的气溶胶光学厚度。

在求得 OCTS 和 SeaWiFS 各波段的大气纠正因子后,根据式(9)求出波段 1—7 的气溶胶散射强度。

1.3 离水辐亮度的计算

将上述方法计算所得的海洋水色遥感资料各波段的瑞利散射辐亮度 ($L_R(\lambda_i)$) 和气溶胶散射辐亮度 ($L_a(\lambda_i)$) 的值代入式(2),便可求得海水水面的离水辐亮度 ($L_w(\lambda_i)$)。从而完成对海洋水色遥感资料的大气纠正。式(2)中 $t(\lambda_i)$ 为大气传递衰减系数,按下式计算:

$$t(\lambda_i) = \exp\left\{-\left[\frac{\tau_R(\lambda_i)}{2} + \tau_{oz}(\lambda_i)\right] / \cos\theta\right\} \quad (19)$$

1.4 红光波段的大气纠正

现有的大气纠正方法是基于海水对红光波段 (CZCS 的波段 4, OCTS 和 SeaWiFS 的波段 7,8) 为完全的吸光体,即在 $L_w(\lambda_0) = 0$ 的假定基础上进行的,故一般不考虑对红光波段做大气纠正。由于近岸海水中高叶绿素含量及高悬浮泥沙含量,使得近岸海水对红光波段并不是完全的吸光体,加之叶绿素的光谱“节点”因水体中悬浮泥沙的存在而往红光方向移动^[12]。为了更好地应用水色遥感资料研究近岸海水,考察研究近岸海水中海洋要素与红光波段之间的关系,获取更适合于近岸海水叶绿素浓度提取的遥感反演模型,对红光波段进行大气纠正就很有必要。为了获取红光波段的离水辐亮度值,有的采用各波段间比值的经验公式来估算红光波段的离水辐亮度值^[13],由于各波段辐亮度的比值随海水成分的不同而变化,故比值法缺乏普遍的适用性,且理论依据不足。严格来说,这种比值法并不是大气纠正方法。

由式(9), (10)可知,对于红光波段 ($i = 0$), $\varepsilon(\lambda_i, \lambda_0) = \varepsilon(\lambda_0, \lambda_0) = 1$ 。与其它波段一样,在假设气溶胶的粒径频率分布和折射系数在整个图幅范围内不变的前提下,在“清洁

海水”像元获得的红光波段的气溶胶散射辐亮度 $L_{CA}(\lambda_0)$ 值同样可适用于整幅图像。因此,本文以式(12)计算得到的图幅中各“清洁海水”像元气溶胶散射辐亮度 $L_{CA}(\lambda_0)$ 值的平均值 $L_A^m(\lambda_0)$ 作为整个图幅的气溶胶散射辐亮度值 $L_A(\lambda_0)$,再根据式(2)~(8),实现对红光波段的大气纠正:

$$t(\lambda_0)L_w(\lambda_0) = L_T(\lambda_0) - L_R(\lambda_0) - L_A^m(\lambda_0) \quad (20)$$

1.5 “清洁海水”像元的判别

确定“清洁海水”像元是计算大气纠正因子和红光波段气溶胶散射辐亮度 $L_A^m(\lambda_0)$ 值的重要环节。“清洁海水”像元的判别方法^[1]有人工经验判别法和计算机自动判别法两类。这里采用计算机自动判别的方法,判别标准采用 NASA 建议的标准。即图幅中同时满足下列 3 个条件的像元为“清洁海水”像元:

- (1) 太阳天顶角和卫星天顶角均大于 0.6 弧度;
- (2) 红光波段的总辐亮度 $L_T(\lambda_0) < 1.4$;
- (3) $0.9 < L_T(443) / L_T(520) < 2.0$ 。

2 大气纠正程序的设计

根据上述大气纠正的原理和算法,笔者编制了海洋水色遥感资料的大气纠正程序。本程序的设计思路是先判别确定“清洁海水”像元,进而求算大气纠正因子和红光波段的气溶胶散射辐亮度;再求算整个图幅各像元在各波段的离水辐亮度。程序设计框图如图 1。

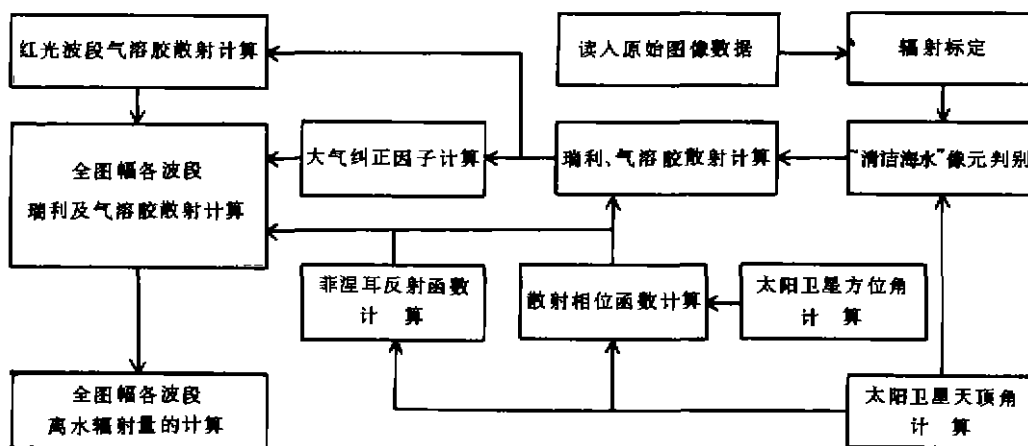


图1 海洋水色遥感资料大气纠正程序框图

Fig.1 Procedure of atmospheric correction for ocean color remote sensing data

本大气纠正程序的几个主要步骤包括:

- (1) 读入各波段原始图像灰度数据;
- (2) 计算各波段总辐亮度值;
- (3) 确定“清洁海水”像元;

- (4) 计算“清洁海水”像元的瑞利和气溶胶散射辐亮度;
- (5) 计算大气纠正因子;
- (6) 计算全图幅的瑞利和气溶胶散射辐亮度;
- (7) 计算各波段的离水辐亮度。

程序采用 Borland C++ 3.1 编制并已在 486 微机上调试通过。

图 1 中的辐射标定是指将记录在磁带上的海洋水色遥感资料中的某一波段的灰度值 $L(\lambda_i)$ 标定转换为该波段的总辐亮度值 $L_T(\lambda_i)$:

$$L_T(\lambda_i) = A_g(\lambda_i)C(\lambda_i) + B_g(\lambda_i) \quad (21)$$

式中 $A_g(\lambda_i)$ 和 $B_g(\lambda_i)$ 是辐射标定参数。

3 结 语

根据海洋水色遥感资料大气纠正的基本原理和方法,本文提出以“清洁海水”像元的红光波段气溶胶散射值的平均值作为整个图幅的红光波段气溶胶散射值的方法,将红光波段与其他波段一同进行大气纠正。弥补了现有大气纠正方法的不足。

这里介绍的方法假定海面是平坦的,没有考虑海面粗糙度的影响。据文献 [8],对 CZCS 而言,这一假设的误差随波长增长而变大,但一般不超过 1 个灰度值 (digital count)。因此,本文所述的大气纠正方法的精度可以满足大多数海洋水色遥感应应用研究的要求。

参 考 文 献

- 1 Williams S P, Szajna E F, Hovis W A. Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner (CZCS) Level 2 Data Product Users' Guide. NASA Technical Memorandum 86202. NASA, 1985
- 2 Hooker S B, Firestone E R. SeaWiFS Technical Report Series. NASA Technical Memorandum 104566, Vol. 1, 1992
- 3 Sturm B. CZCS data processing algorithms. ocean colour: theory and applications in a decade of CZCS experience. Netherlands, 1993, 95—116
- 4 Gordon H R, Clark D K. Clear water radiances for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery. Applied Optics, 1981, 20(24): 4175—4180
- 5 Gordon H R, Castano Diego J. Coastal Zone Color Scanner atmospheric correction algorithm: multiple scattering effects. Applied Optics, 1987, 26(11): 2111—2122
- 6 Gordon H R, Brown J W, Evans R H. Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner. Applied Optics, 1988, 27(5): 862—870
- 7 Gordon H R. Radiometric considerations for ocean color remote sensors. Applied Optics, 1990, 29(22): 3228—3236
- 8 Gordon H R, Wang Menghua. Surface-roughness considerations for atmospheric correction of ocean color sensors. Applied Optics, 1992, 31(21): 4247—4266
- 9 Gordon H R, Wang Menghua. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. Applied Optics, 1994, 33(3): 443—452
- 10 Wang Menghua, Gordon H R. A simple, moderately accurate, atmospheric correction algorithm for SeaWiFS. Remote Sensing Environment, 1994, 50(2): 231—239
- 11 Dickinson W C, Cheremisinoff P N. Solar Energy Technology Handbook (Part A). USA, 1980, 39—65

- 12 Ekstrand S. Landsat TM based quantification of chlorophyll-a during algae blooms in coastal waters. *Int. J. of Remote Sensing*, 1992, 13(10): 1913—1926
- 13 Parslow J S. An efficient algorithm for estimating chlorophyll from Coastal Zone Color Scanner data. *Int. J. of Remote Sensing*, 1991, 12(10): 2065—2072

ATMOSPHERIC CORRECTION FOR RED BAND OF OCEAN COLOUR REMOTE SENSING DATA

CHEN Chuqun

(South China Sea Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301)

Abstract The atmospheric correction of ocean colour remote sensing data generally does not consider the correction for the red band. On the basis of principle and methods of atmospheric correction of ocean colour remote sensing data, the paper proposes a simple and practical method of atmospheric correction for all the bands, which will improve the atmospheric correction and make a better application of ocean colour remote sensing data to coastal area. The programs for atmospheric correction are written in Borland C++.

Key words remote sensing, ocean colour, atmospheric correction