

卫星海洋水色遥感的辐射模式研究*

潘德炉 李淑菁 毛天明

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

提要 海洋水体向上的辐射由水中多种成分的浓度所决定, 同时辐射的强度十分微弱并随着时间和空间在变化。因此, 海洋水色遥感需要从水体和大气辐射传递机理出发, 研究到达卫星遥感器的辐射模式, 以达到模拟仿真卫星水色遥感图像和卫星图像质量预测的目的。本研究通过叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等海洋水色的主要因子, 分别从可见光波段和荧光波段对辐射的贡献出发, 发展了海洋水体离水辐射率模式。在卫星水色遥感机理的基础上, 同时运用 Iqbal, Gordon 和 Sturm 等的大气辐射模式和太阳耀光模式, 使卫星海洋水色遥感的辐射模式系统化, 模拟仿真了我国 1990 年 9 月 3 日发射的 FY-1B 卫星两个海洋水色通道的全轨道辐射图像, 同时利用从德国柏林大学气象中心接收到的 1990 年 9 月 23—25 日卫星图像进行验证。结果认为, 本文所发展的模式可应用于卫星图像质量的预测和水色信息的提取。

关键词 水色遥感 辐射模式

卫星海洋水色遥感主要用于海洋水色因子叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质的定量探测。在卫星遥感过程中, 来自遥感目标(水体)的辐射量甚低, 卫星上水色扫描仪所接收到的辐射能量中 85% 来自大气的干扰。通过遥感资料的预处理来排除大气干扰的模式在国际上已有深入的研究(Gordon, 1990)。经大气校正所保留的甚低的离水辐射率并不是来自单一物质的贡献, 而是来自叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等不同水色成分的共同贡献。再加之海洋水体本身是一个运动着的活动体, 其辐射量随环境变化而瞬变, 如风、浪和流的影响。在不同环境下水体中的三种物质各自与离水辐射率单一的定量关系在国内已有所发展(Pan et al., 1988; Pan, 1993), 但三种物质共同与离水辐射率的定量关系模式至今尚是空白。

本文从辐射机理入手, 以发展海洋水体离水辐射率模式为重点, 以大气、大气-水和水体次表面的辐射传递方程为基础, 进行海洋水色遥感的辐射模式研究。

1 卫星水色遥感机理

来自大气外层的太阳光通过大气的瑞利和气溶胶散射, 其中一部分返回到卫星水色扫描仪, 一部分朝前直射和漫散射到达海面。到达海面的直射光, 其中一部分由于镜面反射有可能穿过大气到达卫星水色扫描仪, 另一部分经水面折射穿过水面, 在水次表

* 国家自然科学基金资助项目, 49493400, 49376275。潘德炉, 男, 出生于1945年12月26日, 研究员。

在模式研究中得到了德国GKSS研究中心Doerfler博士的指导, 德国柏林大学气象所的 Wornecke 教授提供了 FY-1B的全轨道实际接收到的卫星资料, 谨志谢忱。

收稿日期: 1995年11月9日, 接受日期: 1996年5月2日。

面, 又受到水色因子如叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等颗粒的散射, 后向散射部分经水面折射离开水面, 穿过大气到达卫星水色扫描仪, 进入水次表面的另一部分继续向下到达真光层深度, 或到达海底又部分反射, 经折射回到扫描仪。综上所述, 可能到达卫星水色扫描仪的辐射量 ($W / m^2 \cdot \mu \cdot sr$) 可由下式描述:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{sr}(\lambda) + L_u(\lambda) + L_b(\lambda) \quad (1)$$

$L_t(\lambda)$ 为水色扫描仪接收到的总辐射; $L_r(\lambda)$ 为来自大气瑞利散射; $L_a(\lambda)$ 为来自大气的气溶胶散射; $L_{sr}(\lambda)$ 为来自海面太阳反射; $L_u(\lambda)$ 为离水辐射; $L_b(\lambda)$ 为来自水体底部的反射。

通常, 可见光不可能到达海洋的底部, 所以 (1) 式中的最后一项 $L_b(\lambda)$ 可以忽略 (pan, 1989)¹⁾。因此, 只要分别求得 $L_r(\lambda)$, $L_a(\lambda)$, $L_{sr}(\lambda)$, $L_u(\lambda)$ 就可以通过模拟计算得到水色扫描仪的总辐射量 $L_t(\lambda)$ 。

2 辐射传递模式

2.1 大气程辐射和太阳耀光模式 大气程辐射包括大气的瑞利散射和气溶胶散射两部分。无论是瑞利或气溶胶的贡献, 不仅要考虑一次散射返回到扫描仪的辐射部分, 同时还要考虑一次散射光经海面漫反射到达扫描仪的部分。由下式计算 (Gordon et al. 1989):

$$L_x = F_s \tau_x \omega_x P_x / (4\pi \cos \theta_v) \quad (2)$$

式中, 下标 x , 当 $x = r$ 表示瑞利散射, $x = a$ 表示气溶胶散射; L_x 为瑞利或气溶胶的辐射; F_s 为太阳的照度; τ_x 为瑞利或气溶胶的光学厚度; θ_v 为扫描仪的高度角; ω_x 为一次散射比; P_x 为瑞利散射或气溶胶朝着扫描仪方向的散射因子, 是太阳和扫描仪高度角及方位角的函数 (Gordon et al., 1989)。

太阳光在海面的菲涅耳反射, 即太阳耀光 L_{sr} , 主要受到由于风速所引起的海面波的斜度影响 (Cox, 1954)。

2.2 离水辐射率模式 离水辐射包括两个部分: 一部分太阳直射光经折射穿过水面, 在水次表面向下传输中受到水色因子, 如叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质粒子的散射, 其中后向散射部分向上经折射离开水面出射。另一部分在日光的激励下, 海水中的叶绿素会发出一种荧光而离开水面出射, 所以离开水面的总的离水辐射率为:

$$L_w = L_{ws} + L_{wf} \quad (3)$$

式中, L_{ws} 为可见光离水辐射率; L_{wf} 为荧光离水辐射率。以下分别推导求 L_{ws} 和 L_{wf} 的模式, 太阳光经水面折射到水次表面向下传输的照度 E_{wd} 为:

$$E_{wd} = F_s t_d(\theta_s) T_d \quad (4)$$

式中, θ_s 为太阳高度角; $t_d(\theta_s)$ 为大气向下总透过率 (Iqbal, 1983); $T_d(\theta_s)$ 由大气向水次表面传输的透过率, 即水-气透过率 (Angstrom, 1930), 由下式计算:

$$T_d(\theta_s) = (1 - \rho_a) \cos \theta_s \quad (5)$$

式中, ρ_a 为水面各方向太阳光镜面反射率的平均, 通常取 0.06。经水面折射返回扫描仪辐射为:

$$L_{ws} = [E_{wd} \cdot R \cdot T_u(\theta_v) \cdot t_u(\theta_v)] / Q \quad (6)$$

1) Pan Delu et al., 1989, IGARSS' 89, Library of Congress, 89-84217, Canada, pp.2 633—2 626.

式中, R 为可见光向上的反照率; Q 为直射光照度向漫散射辐射率的转换因子, 在郎伯巴面下为 π , 在海面通常取 4.5; $t_u(\theta_v)$ 为大气向上总透过率; $T_u(\theta_v)$ 为水次表面向大气传输的透过率, 由下式计算:

$$T_u(\theta_v) = [1 - \rho(\theta_v)] / n^2 \quad (7)$$

式中, n 为水体的折射因子, 通常取 $n = 1.33$; $\rho(\theta_v)$ 为扫描高度角向上太阳光镜面反射率平均, 可以通过双向传输模式得到:

$$R = (k - a) / (k + a) \quad (8)$$

式中, k 和 a 为次表面水体总的散射系数和吸收系数, 可以把它分为 4 种不同水体成分的贡献, 即纯水、叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质, 由下式表示:

$$a = a_w + C_c a_c + C_s a_s + C_g a_g \quad (9)$$

$$K = K_w + C_c K_c + C_s k_s + C_g k_g \quad (10)$$

其中, a_w 和 K_w 为纯水时的吸收系数和散射系数, a_c , a_s , a_g 和 K_c , k_s , k_g 分别为在单位浓度下的叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质的吸收系数和散射系数 (mg/m^3), C_c , C_s , C_g 为水体中叶绿素浓度、悬浮泥沙浓度和黄色物质的浓度 (mg/m^3).

在可见光 $\lambda_1 - \lambda_2$ 范围内, 水体中叶绿素等色素所吸收的总辐射照度, 由下式计算:

$$E_{af} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_d [1 - R(\lambda)] \frac{C_c a_c(\lambda)}{a_t(\lambda)} d\lambda \quad (11)$$

式中, $\lambda_1 = 400\text{nm}$; $\lambda_2 = 675\text{nm}$.

水体色素所吸收的辐射经光合作用生化反应后激励所产生的辐射照度为 (Doerffer, 1980):

$$E_{ef} = 0.5 E_{af} F_{ef} \quad (12)$$

式中, F_{ef} 为荧光效应系数, 取平均值为 0.003.

激励发出的荧光量在光谱带的分布呈正态高斯分布, 标准偏差为 $\delta = 10.6\text{nm}$, 相当于半功率点宽度 25nm , 分布中心 $\lambda_0 = 685\text{nm}$, 在某一波长 λ_j 下荧光的分布系数为:

$$g(\lambda_j) = (2\pi\lambda^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(\lambda_j - \lambda_0)^2}{2\lambda^2}\right] \quad (13)$$

由于太阳的光谱平均穿透深度与荧光光谱的平均水下出射深度不同, 于是有必要建立不同波带范围内的深度加权因子, 即平均消光深度 Z_{ex} 在 $\lambda_1 - \lambda_2$ 范围用色素吸收进行加权:

$$Z_{ex} = \frac{\sum_{\lambda_i=1}^n C_c a_c(\lambda_i)}{\sum_{\lambda_i=1}^n K_i(\lambda_i) C_c a_c(\lambda_i)} \quad (14)$$

通过 Z_{ex} 由下式计算得到达水面荧光照度为:

$$F_u(\lambda) = \frac{E_{ef} g(\lambda)}{Z_{ex} \cdot K_t(\lambda)} \quad (15)$$

经水气界面出射水面到达扫描仪的荧光辐射率为:

$$L_{wf} = F_u(\lambda) \cdot T_u(\theta_v) \cdot t_u(\theta_v) / Q \quad (16)$$

式中, $T_u(\theta_v)$ 为水气透过率。

3 模式的验证和结果讨论

为了验证所发展的离水辐射率模式及水色遥感的系列化模式的正确性和可靠性, 选择了我国 1990 年 9 月 3 日发射的 FY-1B 卫星的甚高分辨率辐射计 VHRSR 海洋水色通道的数据进行验证。其方法, 首先运用以上辐射模式产生 FY-1B 1990 年 10 月 23—25 日的全轨道辐射仿真模拟图像, 然后与同时实际接收到的图像资料相比较。

1990 年 10 月 23 日 FY-1B 卫星海洋通道 (480—530nm) 以经纬度 (15°W, 0°N) 的辐射仿真模拟图像见图 1。图 2 是从各地面站实际接收到的由德国柏林气象中心拼接的 1990 年 10 月 23—25 日 FY-1B 海洋通道 (480—530nm) 的全轨道卫星原始图像。

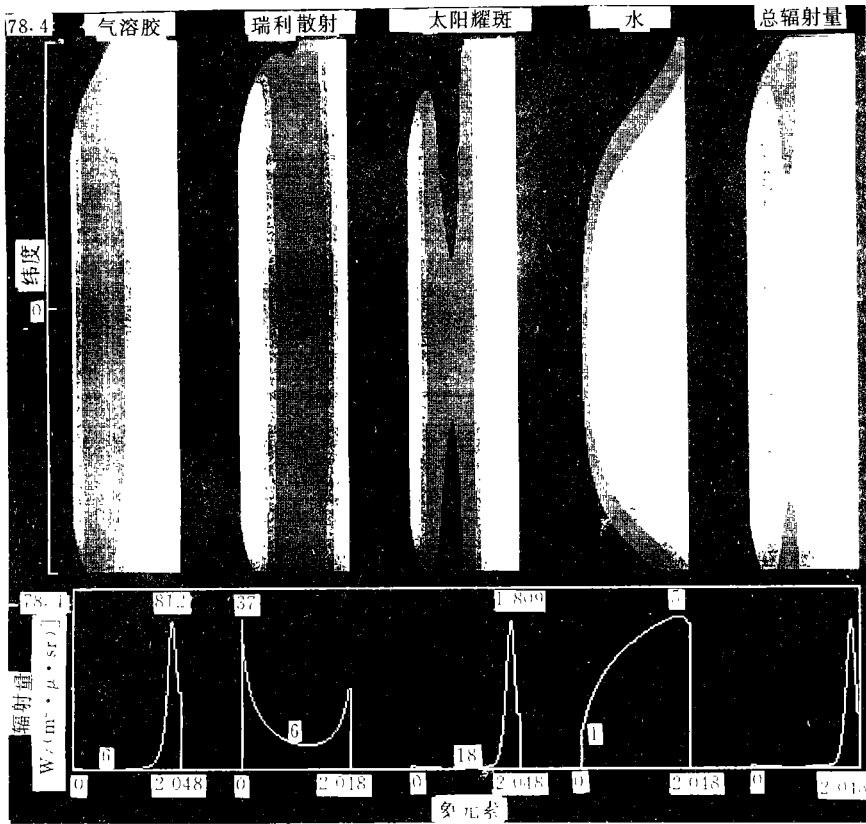


图 1 由模式计算得到的 1990 年 10 月 23 日的 FY-1B 480-530nm 通道全轨道模拟图像

Fig.1 The simulated FY-1B channel 480-530nm image of a complete orbit on Oct.23, 1990 driven by the models

比较图 1 和图 2, 图像的辐射量空间分布相似, 并有以下共同特点。

(1) 太阳耀光的形状和分布基本相同, 太阳耀斑呈椭圆形, 耀光辐射由圆心的中心逐渐向四周扩散并有明显的辐射边界。无论在图 1 或图 2, 在太阳耀斑区内, 太阳的辐射掩盖了来自水体的辐射, 在该区域内根本无法提取海洋水色的信息。比较耀斑中心点由模式计算得到的瑞利、气溶胶、太阳耀光、水的出射和总辐射率的光谱分布曲线, 表

明离水辐射率与太阳耀光的辐射率相比较可以忽略不计, 在 FY-1B 的海洋水色通道波带

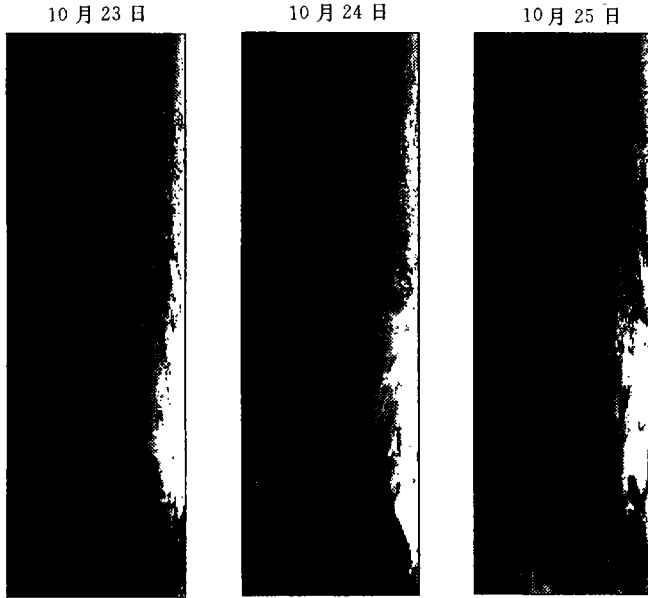


图2 1990年实际接收到的FY-1B 480-530nm通道全轨道卫星原始图像

Fig.2 The original. FY-1B channel 480-530nm image of a complete orbit recieved by the ground station in 1990

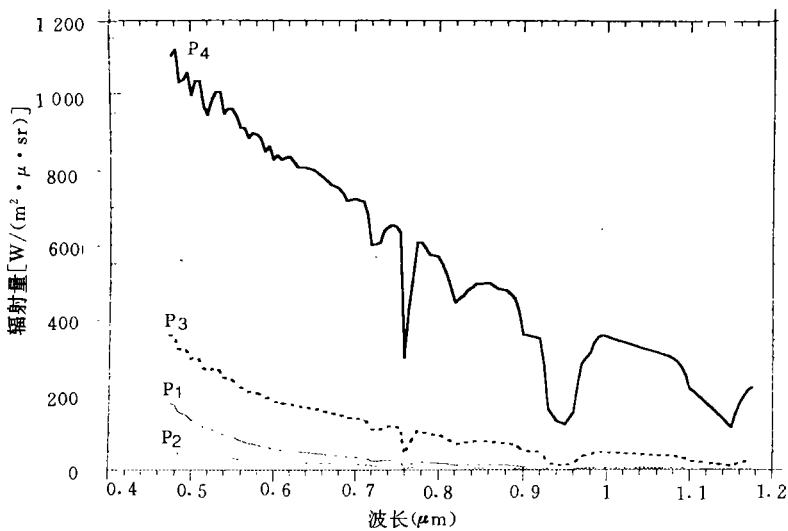


图3 模拟图像中典型象元点卫星扫描仪接收到的辐射率的光谱曲线

Fig.3 The radiance spectra of the typical pixels arriving at the satellite scanner.

P1 中心行第1象元点(东边缘)的光谱曲线; P2 中心行第1024象元点(中间点)的光谱曲线;
P3 中心行第2048象元点(西边缘)的光谱曲线; P4 太阳耀斑中心点象元的光谱曲线。

范围内根本无法从总辐射图像中提取出水色信息来。

(2) 由于大气程辐射都有相似的图像边缘效应, 总辐射率向图像的两边缘方向逐渐增大, 其辐射率在图像的行方向呈马鞍形。挑选图 1 中图像的中心行的第 1、1 024 和 2 048 个象元点, 即起始行, 中间和行末象元点(P1, P2, P3)以及太阳耀斑中心象元点 P4, 由模式计算得到卫星扫描仪接收到的辐射率光谱曲线见图 3。由图 3 可见, P2 点的辐射量在海洋通道范围内只是 P4 点的 1/50 左右, 是图像西面边缘点 P1 的 1/3 左右, 是图像东面边缘点 P2 的 1/6 左右。在实际接收到的图像中, 以上 4 个象元点的周围 5×5 个象元的平均辐射率之间也存在着相似的关系(Pan et al. 1995)。

(3) 选择广阔大洋海区, 把叶绿素浓度、悬浮泥沙浓度和黄色物质浓度的准同步实测值作为输入产生模拟图像的三个水色条件因子, 把当时柏林大学气象中心提供的有关气象参数作为输入的模拟仿真的气象参数, 运用发展的模式模拟仿真水色遥感图像, 模拟得到辐射值与实际接收得到的二个海洋通道的图像辐射值之间, 在第一类水体的大洋水域的差异为 20%—40% 左右。这一差异与当前卫星遥感水色因子提取的精度大致相当(Pan, 1993)。

4 结语

以海洋水色主要的三个因子叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等对离水辐射率的共同贡献出发, 以水次表面可见光辐射传输理论为基础, 所建立的遥感离水辐射率模式正确。利用较稳定的大气外层的太阳光为光源, 通过大气到海面, 再由海面出射和反射经大气返回到卫星水色扫描仪的辐射机理, 分别用瑞利散射、气溶胶散射、太阳耀光和离水辐射来计算得到在卫星高度水色扫描仪所接收到的总辐射量的系列模式是可行的。经过我国 FY-1B 卫星的二个海洋水色通道实测资料的验证, 本文所发展的模式可以运用于海洋水色卫星发射前的图像模拟仿真, 以应用于预测图像的质量, 同时可应用于卫星发射后的水色因子的提取。

参 考 文 献

- Angstrom, A., 1930, *Geography Annal*, **2**, 3: 130—159.
Cox, C., 1954, *J. Mar. Res.*, **44**: 838—850.
Doerffer, R., 1980, *Boundary-Layer Meteorology*, **18**: 221—232.
Gordon, H. R., et al., 1989, *Applied Optics*, **28**: 1 320—1 326.
Gordon, H. R., 1990, *Applied Optics*, **29**: 3 228—3 236.
Iqbal, M., 1983, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press(Toronto, New York, London.), pp.85—155.
Leckner, B., 1980, *Sol. Energy*, **20** (2), 143—150.
Pan Delu et al., 1988, *Limnol. and Oceanol.* **33**(2): 227—244.
Pan Delu, 1993, *Environment'93*, The Commercial Press(H.K) Ltd, pp.74—84.
Pan Delu et al., 1995, *Acta Oceanol. Taiwannica*, **134**(2): 31—44.

STUDY ON RADIANCE MODELS FOR OCEAN COLOUR REMOTE SENSING

Pan Delu, Li Shujing, Mao Tianming

(*Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012*)

Abstract The radiance leaving from ocean water surface, which is very small and variable, is depended on the concentration of water constituents and the water properties. So, it is necessary to develop the models to calculate the radiance arriving at the satellite sensor in accurate based on the radiative transmission. This paper focused on the development of the models which are used to calculate the leaving water radiance, by means of the analysis of the radiative contribution of the main water constituents, such as chlorophyll, suspended sediment and yellow substance, respectively in the visible and fluorescent wavelength. On the basis of the mechanism of ocean colour remote sensing, the developed models here and the atmospherical path radiance and sun glitter models developed by Iqbal, Gordon and Sturm are formed a series of model for ocean colour remote sensing. The series of model have been applied to simulate the orbital radiance imagery of two ocean colour channels of Chinese satellite FY-1B launched on Sept. 3, 1990. The simulated imagery have been compared by the real imagery which received by Berlin University, Germany on the Oct. 23—25, 1990. The results showed that the developed models can be used to product the quality of satellite imagery before satellite orbiting and to the analysis of ocean colour satellite data.

Key words Ocean colour remote sensing Models of radiance