

我国海区 SeaWiFS 资料大气校正*

毛志华 黄海清 朱乾坤 潘德炉

(国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室 国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

提要 利用光谱辐射传输理论,结合海上同步实测资料,开发出我国海区 SeaWiFS 资料大气校正模型。经卫星资料处理结果比对,本模型在一类水体,基本消除了 412nm 和 443nm 波段离水辐射率小于 0 的现象;在二类水体,利用临近一类水体的大气条件进行了有效的大气校正;同时建立了 670nm、765nm、865nm 波段的大气校正模型,这三个波段适用于高浓度悬浮泥沙的信息提取。本模型用于处理我国海区的 SeaWiFS 资料比美国 NASA 模型更适合我国海区特定的大气和海洋环境,为 SeaWiFS 资料海洋水色信息提取和我国海洋一号(HY-1)及风云一号(FY-1C)卫星资料的大气校正研究提供了技术基础。

关键词 SeaWiFS, 光谱辐射传输理论, 大气校正

中图分类号 P714

美国国家宇航局(NASA)于 1997 年 9 月成功发射海洋水色卫星(SeaStar),星上装载海洋宽视场扫描仪(SeaWiFS),国家海洋局第二海洋研究所接收并向全国有关单位分发该卫星资料,为我国的可见光遥感研究提供了良好的资料源。由于美国 NASA 提供的 SeaWiFS 资料处理软件(SeaDAS)在处理我国海区 SeaWiFS 资料时存在一些问题,其大气校正模块不适合我国海区的特定条件。为了使卫星遥感资料更好地应用于我国海洋研究,需要开发适合我国海区的大气校正模型和其他研究模式(孙效功等,2000;李宝华等,1999;夏达英等,1999)。本研究根据我国海区特定条件(高悬浮泥沙含量,高气溶胶浓度),利用光谱辐射传输理论,开发出适合局部海区的大气校正模型。

1 资料

本文研究采用 SeaWiFS 遥感资料。实测资料来自 1998 年 5 月 21 日—5 月 27 日准同步测量,采用剖面反射辐射计系统(Satlantic SPMR/SMSR)测量表面和剖面光学参数,同时测量水体叶绿素 *a* 浓度和悬浮泥沙含量等。在这次测量中,5 月 27 日一天内完成的 5 个站位(T03、T04、T05、T06、T07)资料非常理想,有关参数见表 1。为了能比较完整地分析水体光学特性,将 T03—T07 断面进行了扩展,从 T03 站位扩展到长江口的 1 号站位,主要增加二类水体的范围;从 T07 站位扩展到靠近日本的 7 号站位,主要增加一类水体的范围。

2 方法

根据光谱辐射传输理论,在假定单次大气散射情况下,卫星传感器接收到的辐射率可

* 国家 863 项目资助,818-Q-02、818-11-02 号。毛志华,男,出生于 1966 年 2 月,博士,副研究员, E-mail: zh_mao@mail.hz.zj.cn

线性分解为大气和海洋各辐射分量(潘德炉等, 1997):

表 1 T 断面参数

Tab 1 The parameters of the T profile

站位	位 置		测量时间	水深 (m)	风速 (级)	海况 (级)	测点距离 (km)
	E	N					
1	121. 850°	31. 224°					0
T03	122. 456°	31. 006°	14□ 50—14□ 55	12	4	3	40
T04	122. 600°	31. 006°	13□ 40—13□ 45	14	4	3	48
T05	122. 849°	31. 051°	11□ 50—12□ 10	38	4	3	61
T06	122. 993°	31. 029°	10□ 55—11□ 00	48	3	2	70
T07	123. 203°	31. 006°	09□ 30—09□ 50	55	4	3	81
7	125. 492°	31. 603°					176

注: 有关参数引自潘德炉等, 1998 年 10 月, SeaWiFS 海洋水色遥感应用技术研究报告专集; 光学测量与数据处理理由国家海洋局海洋技术研究所的陈清莲、唐军武等提供

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + t(\lambda)L_g(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda) \quad (1)$$

式中, $L_t(\lambda)$ 为卫星接收到的辐射率; $L_r(\lambda)$ 为瑞利辐射率; $L_a(\lambda)$ 为气溶胶辐射率; $L_g(\lambda)$ 为太阳耀斑辐射率; $L_w(\lambda)$ 为离水辐射率; $t(\lambda)$ 为来自海洋通过大气到达卫星的透射系数。

$L_r(\lambda)$ 和 $L_a(\lambda)$ 由下式计算(Gordon *et al.*, 1987):

$$L_x(\lambda) = \frac{F_s(\lambda) \tau_x(\lambda) w_x(\lambda) \rho_x M}{4\pi} \quad (2)$$

式中, $L_x(\lambda)$ 为瑞利辐射率($L_r(\lambda)$)或气溶胶辐射率($L_a(\lambda)$); $F_s(\lambda)$ 是经太阳—地球距离校正后的辐照度; $\tau_x(\lambda)$ 是光学厚度; $w_x(\lambda)$ 是单次散射反照率; M 是大气光学质量; ρ_x 是太阳以三种不同的通道散射到卫星的概率因子, 由下式计算:

$$\rho_x = P_x(\theta^-) + [\rho(\theta_s) + \rho(\theta_v)] P_x(\theta^+) \quad (3)$$

其中, θ_s 为太阳高度角; θ_v 为卫星高度角; $\rho(\theta)$ 为菲涅耳反射率; $P_x(\theta^-)$ 是前向散射相位函数; $P_x(\theta^+)$ 是后向散射相位函数。瑞利散射相位函数为:

$$P_r(\theta^\pm) = \frac{3}{4} \left(1 + \cos^2 \theta^\pm \right) \quad (4)$$

海洋气溶胶的散射相位函数采用一种 Henyey-Greenstein 函数来确定:

$$P_a(\theta^\pm) = \frac{a(1-g_1^2)}{\left[1 + g_1^2 - g_1^2 \cos \theta^\pm \right]^{1.5} + \frac{(1-a) \left[1 - g_2^2 \right]}{\left[1 + g_2^2 - 2g_2 \cos \theta^\pm \right]^{1.5}}} \quad (5)$$

式中, $a = 0.983$; $g_1 = 0.82$; $g_2 = -0.55$ 。

太阳光在海面的菲涅耳反射, 主要受到由于风速所引起的海面波的斜度影响。反射到卫星的太阳耀斑辐射率计算模式为:

$$L_g(\lambda) = \frac{F_s \rho_{at}(\lambda) p_w}{4 \cos \theta_v \cos \theta_N} \quad (6)$$

式中, p_w 为给定太阳位置 θ_s 、 ϕ_s 在 θ_v 、 ϕ_v 方向上见到太阳耀斑的概率, 为风速的函数; θ_N

为相对于海表面坡度最低点的角,可对卫星产生一个反射角。可见光穿过大气的总透射率可表示为直接透射率 t_d 和漫射透射率 t_s 之和:

$$t(\lambda) = t_d + t_s \quad (7)$$

$$t_d = t_r t_{aa} t_{oz} t_{wv} t_{ox} \quad (8)$$

$$t_s = t_{ox} t_{wv} t_{ox} t_{aa} \left[\frac{1 - t_r^{0.95}}{2} + t_r^{1.5} p_a (1 - t_{as}) \right] \quad (9)$$

(7) —(9) 式中, t_r 为瑞利散射透射率; t_{aa} 为气溶胶透射率; t_{oz} 为臭氧透射率; t_{wv} 为水汽透射率; t_{ox} 为氧气透射率; t_{as} 为一次散射后气溶胶透射率; p_a 为气溶胶前向散射系数。

对一类水体, SeaWiFS 设置了二个大气校正通道(765nm 和 865nm), 这二个波段的离水辐射率被假定为 0, 由于 $L_r(\lambda)$ 和 $L_g(\lambda)$ 可精确计算, 因此, 可以计算出这二个波段的气溶胶辐射率, 并推算出 Angstrom 指数 n 。对 765nm 波段需要进行 $O_2 A$ 带吸收校正(Ding *et al.*, 1995)。

$$S(\lambda_7, \lambda_8) = \frac{L_a(\lambda_7)}{L_a(\lambda_8)} = \varepsilon(\lambda_7, \lambda_8) \cdot \frac{F_s(\lambda_7)}{F_s(\lambda_8)} = \left(\frac{\lambda_8}{\lambda_7} \right)^n \cdot \frac{F_s(\lambda_7)}{F_s(\lambda_8)} \quad (10)$$

$$L_a(\lambda) = \left(\frac{\lambda_8}{\lambda} \right)^n \cdot \frac{F_s(\lambda)}{F_s(\lambda_8)} \cdot L_a(\lambda_8) \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) \quad (11)$$

在(10) —(11) 式中, λ 为 SeaWiFS 各波段的中心波长, i 对应于 8 个波段; n 为 Angstrom 指数。

对二类水体, 765nm 和 865nm 波段的离水辐射率不为 0, 由于气溶胶在许多情况下水平分布比较均匀(Hoppel *et al.*, 1990), 可以借用邻近一类水体的大气条件(大气光学厚度值)来计算二类水体的气溶胶辐射率, 实现对二类水体的大气校正。

归一化的离水辐射率定义为(Gordon, 1987):

$$L_{wn}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{t(\lambda) [1 - \rho(\theta_s)] \cos \theta_s} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (12)$$

式中, $t(\lambda)$ 为大气透射率; $\rho(\theta_s)$ 为气-水菲涅耳反射率; R 为地球太阳的平均距离; r 为测量当天太阳地球的距离。

3 结果

3.1 同步测量点各辐射量结果

对 T03 和 T07 测点, 卫星接收到的辐射率(L_t) 和各辐射分量在 SeaWiFS 8 个波段的变化情况见图 1, 这些辐射分量分别为大气瑞利散射率(L_r)、气溶胶散射率(L_a)、海面太阳菲涅耳反射率(L_g)、海面离水辐射率(L_w) 和归一化离水辐射率(L_{wn})。

分析图 1 可以得出以下几点结果:

(1) 各辐射分量(L_r 、 L_a 、 L_g 、 L_w 、 L_{wn}) 与卫星接收到的总辐射率(L_t) 在各个波段变化不存在线性关系, 因此不能通过简单的系数关系进行大气校正。

(2) 瑞利辐射率(L_r) 和气溶胶辐射率(L_a) 随波长呈指数型下降, 在波段 1 的值都为最大, 其中瑞利辐射率在波段 1 占卫星接收到的辐射率 70% 左右, L_r 和 L_a 相加所占的比例超过 93%。

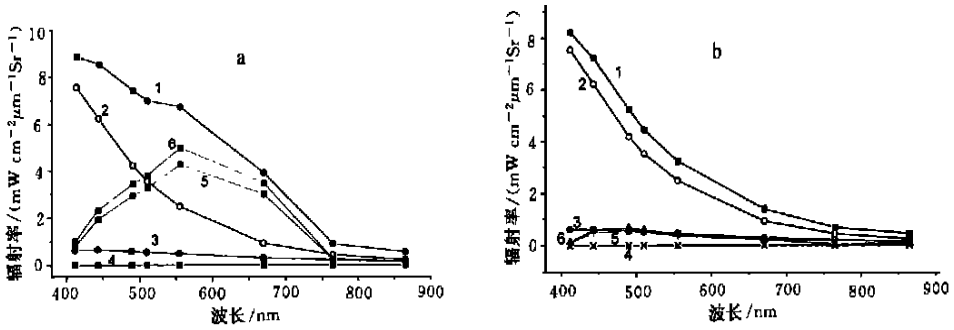


图1 测点T03(a)和T07(b)辐射率分布图

Fig. 1 Radiance components of station T03(a) and station T07(b)

1. L_t ; 2. L_r ; 3. L_a ; 4. L_g ; 5. L_w ; 6. L_{wn}

(3) 离水辐射率(L_w 、 L_{wn})峰值随不同的水域会发生移位,如在T03的峰值位于555nm,而在T07的峰值左移到490nm。

(4) 离水辐射率随波长变化与 L_t 的变化相差很大。在图1a中,离水辐射率从波段1占7%上升到波段5的60%,在波段6所占比例达到70%左右。各波段对大气校正的精度要求不一样,波段1的要求最高,大气辐射率10%的误差会引起离水辐射率超过1倍的误差;对波段6,即使不进行大气校正也只引起30%的误差。在图1b中,离水辐射率比图1a明显减小,如波段5中的 L_{wn} 只有T03测点的15%左右;在 L_t 所占的比例也明显减小,只有18%左右。因此,一类水体和二类水体的离水辐射率具有明显的差别。

本模型计算得到的归一化离水辐射率(L_{wn})与实测离水辐射率(*in situ* L_{wn})和SeaDAS软件计算的离水辐射率(SeaDAS L_{wn})进行比较,结果见图2。SeaDAS软件不计算670nm、765nm和865nm的 L_{wn} 值,将这些值设置为0;实测光谱仪没有765nm和865nm的2个通道,将这2个 L_{wn} 值设置为0。

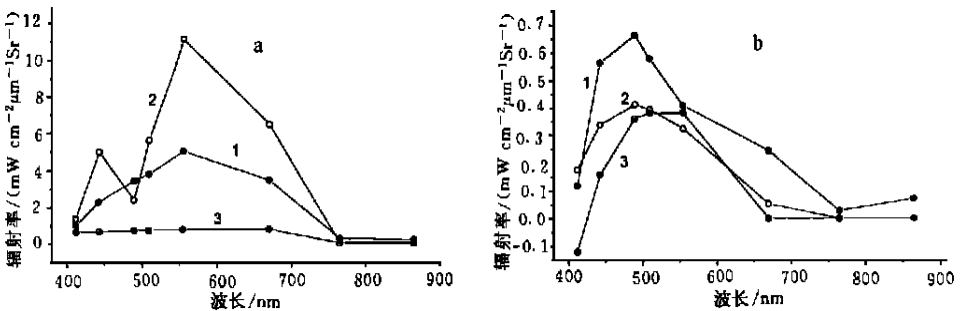


图2 二类水体测点T03(a)和一类水体测点T07(b)三种离水辐射率比较

Fig. 2 Comparison of three kinds of water leaving radiances of station T03 in case 2 water (a)

and station T07 in case 1 water (b)

1. L_{wn} ; 2. *in situ* L_{wn} ; 3. SeaDAS L_{wn}

在图2a中,二类水体的三种离水辐射率的差别非常大,SeaDAS得到的 L_{wn} 明显偏小,

这是由于该软件对二类水体不作处理, 只简单地将原始值乘上 0.001 得到。实测 L_{wn} 是根据水体中辐射率反推出来的, 490nm 的 in-situ L_{wn} 值很可能是错误值; 除 490nm 外, 实测 L_{wn} 与计算得到的 L_{wn} 在走势上基本一致, 只是实测 L_{wn} 值大了一倍左右。

图 2b 显示在一类水体的 T07 测点的三种 L_{wn} 比较结果。计算得到的 L_{wn} 与实测 L_{wn} 在各波段的变化走势基本一致, 峰值都位于 490nm 波段, 只是各波段的值都比实测值大了 1 倍左右; SeaDAS 计算的 L_{wn} 与实测值与在数值上相近, 但在 412nm 波段的值小于 0, 这显然不符合实际。

对其他测试点的结果分析表明, 本文所采用的大气校正模型得到的 L_{wn} 与实测资料在各波段的走势是一致的, 说明所采用的模型基本正确。而 SeaDAS 软件在二类水体不计算 L_{wn} , 使该值明显偏小, 比预计值小 5 倍左右; 在一类水体, 有许多测试点上 SeaDAS L_{wn} (412nm) < 0, 甚至在有些测试点上 SeaDAS L_{wn} (443nm) < 0, 这显然不符合实际。因此, 可以肯定 SeaDAS 软件所采用的大气参数条件不适合于我国海区。

3.2 T 断面大气校正结果比较

图 3a 显示经过大气校正得到的 T 断面 SeaWiFS 8 个波段归一化离水辐射率 (L_{wn} (412) 到 L_{wn} (865)) 分布, 单位是 $\text{mw cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ 。图 3b 显示 SeaDAS 软件处理结果产生的 5 个可见光波段 L_{wn} 值分布, 该软件不产生其他 3 个近红外波段的离水辐射率。

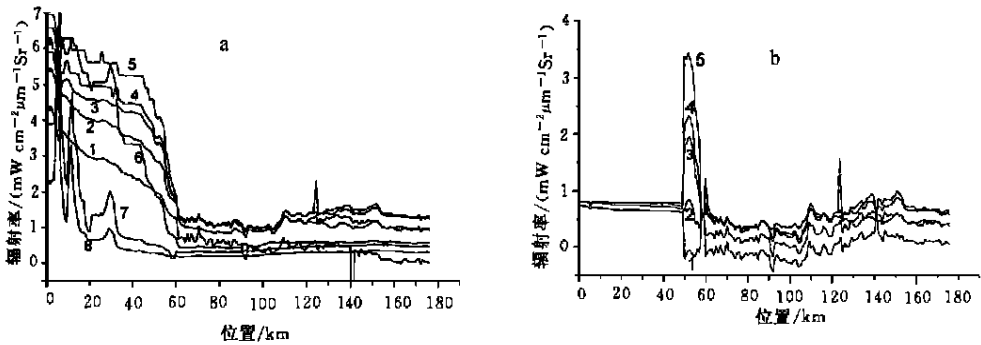


图 3 经大气校正产生的 T 断面 L_{wn} 值(a) 和 NASA 模型求得的 L_{wn} 值(b)

Fig. 3 The L_{wn} distribution of T profile by the atmospheric correction model (a) and by the NASA model (b)

1. L_{wn} (412); 2. L_{wn} (443); 3. L_{wn} (490); 4. L_{wn} (510); 5. L_{wn} (555); 6. L_{wn} (670); 7. L_{wn} (765); 8. L_{wn} (865)

比较图 3a 和图 3b, 可以得出以下结果:

(1) 一类水体 L_{wn} 与 NASA 模型 L_{wn} 的走势基本相同, 这说明大气校正模型在一类水体与 NASA 模型相近。

(2) 在一类水体, 基本消除了 NASA 模型存在的 L_{wn} (412) < 0 的现象, 在二类水体, 进行了比较有效的大气校正。因此, 大气校正模型比 NASA 模型更符合我国海区的实际情况。

(3) 在二类水体, L_{wn} 峰值基本位于波段 5, 在一类水体, 峰值左移到波段 4 或波段 3, 且 L_{wn} (490) 和 L_{wn} (510) 值非常接近。

(4) 在二类水体, 近红外的三个波段的 L_{wn} 都大于 0, 且 $L_{wn}(670)$ 的值超过三个可见光波段(412nm、443nm、490nm) 的值, $L_{wn}(765)$ 和 $L_{wn}(865)$ 的变化走势基本相同。

3.3 SeaWiFS 图像大气校正结果比较

图 4 是利用大气校正模型对 SeaWiFS 资料处理得到波段 5 的归一化离水辐射率 L_{wn} (555); 图 5 是由 SeaDAS 软件对同一天资料处理得到的 L_{wn} 分布图。



图 4 经大气校正的 L_{wn} 分布图

Fig. 4 The L_{wn} image produced by the atmospheric correction model

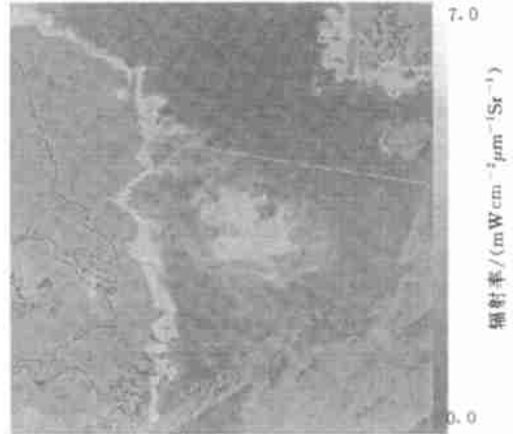


图 5 SeaDAS 软件处理的 L_{wn} 分布图

Fig. 5 The L_{wn} image produced by SeaDAS program

比较图 4 和图 5, 在一类水体, 二者在图像结构方面相差不大, 都比较清楚地显示出水体信息; 在二类水体, SeaDAS 软件不进行大气校正, 不能用于海洋水色信息提取, 而图 4 能清楚地显示出二类水体的结构。因此, 大气校正模型不但适合于一类水体, 同样适合于二类水体, 可以代替 NASA 模型处理我国海区的 SeaWiFS 资料, 为我国海区的水色信息提取提供有利条件。

从图 5 可以发现大量由 SeaWiFS 仪器本身产生的线状效应, 说明海洋水色遥感对仪器的稳定性要求非常高。图 4 是经过线状效应处理, 掩蔽了陆地信息, 叠加了海岸线得到的归一化离水辐射率图, 可用于海洋水色因子反演研究。

4 结论

4.1 本文所采用的大气校正模型得到的归一化离水辐射率与 T 段面 5 个站位实测资料在 SeaWiFS 各波段走势是一致的, 说明所采用的模型基本正确。

4.2 本模型比美国 NASA 模型更符合我国海区的实际情况。在一类水体, 本模型得到的 L_{wn} 与 NASA 模型的 L_{wn} 值走势基本相同, 但消除了 $L_{wn}(412) < 0$ 和 $L_{wn}(443) < 0$ 的现象; 在二类水体, 利用临近一类水体的大气条件进行了有效的大气校正, 改变了 NASA 模型对二类水体不作处理的缺点; 同时, 本模型实现了对 670nm、765nm、865nm 波段进行大气校正。

4.3 在二类水体, L_{wn} 峰值基本位于波段 5; 近红外的三个波段的 L_{wn} 都大于 0, 且 L_{wn}

(670) 超过三个可见光波段(412nm、443nm、490nm) 的值。在一类水体, 峰值从波段 5 左移到波段 4 或波段 3, 且 $L_{wn}(490)$ 和 $L_{wn}(510)$ 非常接近。

4.4 由于海洋的离水辐射率很小, 对海洋水色传感器性能要求非常高, 特别是信噪比和稳定性是今后水色传感器设计时需要特别考虑的二个指标。

参 考 文 献

- 孙效功, 方明, 黄伟, 2000. 黄、东海陆架区悬浮体运输的时空变化规律. 海洋与湖沼, 31(6): 581—587
- 李宝华, 傅克付, 曾晓起, 1999. 南黄海夏末叶绿素 a 的分布特征. 海洋与湖沼, 30(3): 300—305
- 夏达英, 李宝华, 吴永森等, 1999. 海水黄色物质荧光特性的初步研究. 海洋与湖沼, 30(6): 719—725
- 潘德炉, 李淑菁, 毛天明, 1997. 卫星海洋水色遥感的辐射模式研究. 海洋与湖沼, 28(6): 652—658
- Ding K, Gordon H R, 1995. Analysis of the influence of $O_2 A$ -band absorption on atmospheric correction of Ocean color imagery. Applied Optics, 34: 2068—2080
- Gordon H R, Castano D J, 1987. Coastal zone color scanner atmospheric correction algorithm: multiple scattering effects. Applied Optics, 26(11): 2111—2122
- Hoppel W A, Fitzgerald J W, Frick G M *et al.*, 1990. Aerosol size distributions and optical properties found in the Marine boundary Layer over the atlantic ocean. J Geophys Res, 95: 3659—3686

THE ATMOSPHERIC CORRECTION ALGORITHM OF SeaWiFS DATA IN CHINA SEAS

MAO Zhi-Hua, HUANG Hai-Qing, ZHU Qian-Kun, PAN De-Lu

(Key Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, Second Institute of Oceanography,
State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012)

Abstract A practical atmospheric correction algorithm for the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) is presented, which is based on the radiative transfer models and *in situ* data. The radiance received by the satellite were decomposed in four parts which are rayleigh scattering, aerosol scattering, sun glint radiance and water leaving radiance. The four components values obtained by the model were compared with models in SeaDAS software developed by NASA and *in situ* data. The difference of rayleigh scattering radiance between the model and the NASA's model is about 5 percent. The distribution patterns of aerosol scattering are similar to that of NASA's. The water leaving radiances of SeaWiFS six bands are near to the *in-situ* data. As the atmospheric conditions above case 1 water are used for case 2 water, the model can be used in processing SeaWiFS data of coastal areas where the NASA's model often fails in atmospheric correction. This model also solved the problem of the negative of the water leaving radiance of SeaWiFS 412nm and 443nm bands. The atmospheric correction model is more suitable in processing SeaWiFS data under the specific atmospheric and oceanic situations in China Seas than models in SeaDAS software. This is very useful in extracting ocean color information from SeaWiFS data and in studying the atmospheric correction models of FY-1C and HY-1 satellite data of China.

Key words SeaWiFS, Radiative transfer model, Atmospheric correction algorithm