

文章编号: 1007-4619 (2002) 05-0352-05

利用 SeaWiFS 数据反演海岸地物光谱反射率

徐青山, 魏合理, 赵凤生

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 提出了一个利用 SeaWiFS 数据反演气溶胶光学厚度与沿岸地物光谱反射率的迭代算法。该算法借助于 6S 辐射传输模型, 利用水色卫星的近红外通道由水体像元首先反演出 $0.55\mu\text{m}$ 波段的气溶胶光学厚度, 在所选影像晴空无云的条件下假定沿岸陆地上空的大气条件与水体上空的大气条件相同, 然后再迭代计算出沿岸地物光谱反射率。给出了实际卫星数据计算的结果, 并对可能出现的非清洁水体与气溶胶时空变化引起的误差进行了数值模拟。

关键词: 地物光谱反射率; 气溶胶光学厚度; 卫星遥感

中图分类号: TP79/P71 **文献标识码:** A

1 引言

遥感技术的一个重要内容就是获取反映地物真实信息的地物光谱反射率, 它是利用卫星遥感技术对地物进行识别、分类、资源调查、环境污染监测等工作的主要依据。卫星接收的数据不仅含有丰富的地面信息而且包含有大气对太阳光的散射信息, 如何有效地去除大气的干扰信息是反演地物光谱反射率的关键。实时同步地测量大气参数进行卫星影像辐射校正的方法一是很难适用于人迹罕至的野外地区, 二是所测大气的范围也仅仅局限于“点”上, 三是无法处理历史数据; 不能发挥卫星遥感快速、大面积处理地表信息的优势。因此最有效的方法是直接从图像出发进行大气校正, 早期的基于图像的大气校正是利用卫星接收的清洁水体像元辐射作为大气程辐射^[1], 后来 Kaufman 等建议利用浓密的森林或植被这样的“暗目标”反演气溶胶光学厚度^[2], Chavez 则采用暗体减法^[3]; 这些算法的目的都是为了减小地面反射率的不确定性产生的误差。

海洋水色卫星 (SeaWiFS) 在可见与近红外有 8 个波段 ($0.412, 0.443, 0.49, 0.51, 0.55, 0.67, 0.765, 0.865\mu\text{m}$), 通道带宽 10nm , 星下点地面分辨率 1.1km 。入射至海面的太阳辐射射入海水, 一部分被海水吸收或直接反射, 透射入水的太阳光经水分

子、浮游生物、悬浮微粒等散射, 其中一部分由水面反射出来, 这部分称为离水辐射率。卫星接收的这部分信息只占总信息的 10% 左右, 而绝大部分是大气信息。而在陆地上空随地面类型的不同, 遥感器接收的总信息中所占的地面信息对不同的波段有较大的变化, 但大气信号相对较小。

海洋型气溶胶一般能很好地符合 Junge 谱分布, 且光学厚度通常较小; 清洁海水的吸收系数在可见光波段较小而在近红外区较大, 在近红外光谱区离水辐射可近似为零。对于 I 类水体的大气校正 Gordon 提出基于清洁水体的概念^[4,5], 指出在较清洁的大气条件下单次散射假定与清洁水体概念对于反演海洋上空的气溶胶光学厚度的精度在 10% 以内^[6]。

借助于 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 辐射传输模型^[7], 本文提出了一个反演海洋上空的气溶胶光学厚度与沿岸地物反射率的迭代算法。该方法利用水色卫星 $0.865\mu\text{m}$ 波段的水体像元首先反演出海洋上空的气溶胶光学厚度, 再认为沿岸陆地的大气条件与海洋上空的大气条件相同 (研究范围内晴空无云), 则由水体上空获取的大气参数再用于沿岸陆地反射率的迭代反演。

2 迭代方案

在忽略海面太阳耀斑及海水泡沫情况下, 卫星

收稿日期: 2001-04-10; 修订日期: 2001-06-06

基金项目: 中国科学院知识创新工程部分资助。

作者简介: 徐青山 (1965—), 男, 工程师。1986 年毕业于武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业, 现主要从事大气光学遥感工作。

接收的 λ 波段的水体辐射率 $L_{wc}(\lambda)$ 可表示为:

$$L_{wc}(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{ra}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda) \quad (1)$$

式中 $L_r(\lambda)$ 是大气 Rayleigh 散射, $L_a(\lambda)$ 是大气气溶胶散射, $L_{ra}(\lambda)$ 是分子与气溶胶相互作用散射^[8], $t(\lambda)$ 是漫射传输比。 L_r 和 L_a 可由下式表示:

$$L_x(\lambda) = \omega_x(\lambda) \tau_x(\lambda) F'_0(\lambda) P_x(\theta, \theta_0, \lambda) / 4\pi \quad (2)$$

式中:

$$\begin{aligned} p_x(\theta, \theta_0, \lambda) &= \{ P_x(\theta_-, \lambda) + [\rho(\theta) \\ &+ \rho(\theta_0)] P_x(\theta_+, \lambda) \} / \cos \theta \\ \cos \theta_{\pm} &= \pm \cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta \cos(\phi - \phi_0) \\ F'_0(\lambda) &= F_0(\lambda) \exp[-\tau_{0z}(\lambda)(1/\cos \theta_0 + \\ &1/\cos \theta)] \end{aligned}$$

θ_0, ϕ_0 和 θ, ϕ 是太阳天顶角、方位角和观测天顶角、方位角, ω_x 是单次散射反照率, $P_x(\theta, \lambda)$ 是散射相函数, x ($x = r$ 或 a) 表示大气分子或气溶胶。 $\tau_{0z}(\lambda)$ 是臭氧光学厚度, $\rho(\theta)$ 是入射角为 θ 界面的反射率, $F_0(\lambda)$ 是大气外的太阳辐照度。

现以 $L_{wc}^{(n)}(0.865)$ 表示第 N 次计算得到的水面到大气顶的 $0.865\mu\text{m}$ 波段的辐射率, 则表达式为:

$$L_{wc}^{(n)}(0.865) = L_r(0.865) + L_a^{(n)}(0.865) + L_{ra}^{(n)}(0.865) + t^{(n)}(0.865)L_w^{(n)}(0.865) \quad (3)$$

海洋气溶胶一般可近似为 Junge 谱分布, 不同波段的气溶胶光学厚度之间有如下的关系:

$$\tau_a(\lambda') = \tau_a(\lambda)(\lambda/\lambda')^\alpha \quad (4)$$

式中 α 为一常数。

由(1), (2), (3), (4)式可得:

$$\begin{aligned} & \frac{L_{wc}(0.865) - L_r(0.865) - L_{ra}(0.865) - t(0.865)L_w(0.865)}{L_{wc}^{(n)}(0.865) - L_r(0.865) - L_{ra}^{(n)}(0.865) - t^{(n)}(0.865)L_w^{(n)}(0.865)} \\ &= \frac{\tau_a(0.55)}{\tau_a^{(n)}(0.55)} \quad (5) \end{aligned}$$

对于清洁的海洋水体, $L_w(0.865)$ 近似为零, 因而在上式可认为:

$$\begin{aligned} t(0.865)L_w(0.865) &\approx 0 \\ t^{(n)}(0.865)L_w(0.865) &\approx 0 \end{aligned}$$

再忽略 $0.865\mu\text{m}$ 波段的气溶胶与分子相互作用散射, 则由(5)式可写出迭代关系式:

$$\tau_a(0.55) \approx \frac{L_{wc}(0.865) - L_r(0.865)}{L_{wc}^{(n)}(0.865) - L_r(0.865)} \cdot \tau_a^{(n)}(0.55) \quad (6)$$

将计算的 $\tau_a(0.55)$ 作为新的初始值进行辐射传输计算, 重复以上步骤, 直到:

$$|L_{wc}(0.865) - L_{wc}^{(n)}(0.865)| / L_{wc}(0.865) < \epsilon$$

成立(ϵ 是预先给定的小值), 即可认为 $\tau_a(0.55)$ 为要求的值。

现假定沿岸地物为朗伯体且与水体具有相同的大气条件, 则卫星接收的沿岸地物的辐射率同理可写出:

$$L_{sc}(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{ra}(\lambda) + t(\lambda)L_s(\lambda) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} L_{sc}^{(n)}(\lambda) &= L_r(\lambda) + L_a^{(n)}(\lambda) + L_{ra}^{(n)}(\lambda) \\ &+ t^{(n)}(\lambda)L_s^{(n)}(\lambda) \quad (8) \end{aligned}$$

由(7), (8)式得:

$$L_s(\lambda) = \frac{L_{sc}(\lambda) - [L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{ra}(\lambda)]}{L_{sc}^{(n)}(\lambda) - [L_r(\lambda) + L_a^{(n)}(\lambda) + L_{ra}^{(n)}(\lambda)]} \cdot L_s^{(n)}(\lambda) \quad (9)$$

因大气气溶胶光学厚度 $\tau_a(0.55)$ 已由 $0.865\mu\text{m}$ 波段求出并在地面反射率反演的辐射传输计算中使用, 故上式方括号内表示的数据与下式 $F_s(\lambda)$ 在各迭代步骤中相等。辐射率 $L(\lambda)$ 与反射率 $R(\lambda)$ 的关系定义为:

$$R(\lambda) = \pi L(\lambda) / F_s(\lambda) \quad (10)$$

$F_s(\lambda)$ 是地面光谱辐照度。显然(9)式可写为:

$$R_s(\lambda) = \frac{L_{sc}(\lambda) - [L_r(\lambda) + L_a^{(n)}(\lambda) + L_{ra}^{(n)}(\lambda)]}{L_{sc}^{(n)}(\lambda) - [L_r(\lambda) + L_a^{(n)}(\lambda) + L_{ra}^{(n)}(\lambda)]} \cdot R_s^{(n)}(\lambda) \quad (11)$$

同样将计算的 $R_s(\lambda)$ 作为新的初始值重复迭代, 直到:

$$|L_{sc}(\lambda) - L_{sc}^{(n)}(\lambda)| / L_{sc}(\lambda) < \epsilon$$

成立(ϵ 是预先给定的小值)。

3 反演精度的数值模拟

我们取中纬度冬季、海洋型气溶胶模式; 下垫面取朗伯面, 海面海拔高度为海平面; 太阳天顶角与方位角分别为 $50^\circ, 160^\circ$, 观测天顶角与方位角分别为 $0^\circ, 90^\circ$ 。气溶胶光学厚度在 $0.55\mu\text{m}$ 的真值为 0.28 , 计算辐射传输的方法采用法国大气科学实验室 (Laboratoire d'Optique Atmospherique) 开发的模拟太阳光谱区传感器信号的辐射传输软件 6S。

表 1 给出了在 $0.865\mu\text{m}$ 波段, 不同的海面反射率情况下反演气溶胶光学厚度的误差。从表 1 可以看出: 在 $0.865\mu\text{m}$ 波段, 海面反射率的变化对反演气溶胶光学厚度的影响很大, 因此选择清洁的 I 类水体对于提高气溶胶光学厚度的反演精度十分重要。

表 1 气溶胶光学厚度的反演误差

Table 1 Error in retrieved $\tau_a(0.55)$

反射率/%	1×10^{-2}	1×10^{-1}	2×10^{-1}	3×10^{-1}
气溶胶光学厚度 $\tau_a(0.55)$	0.278	0.264	0.247	0.229
方差/%	0.57	5.88	11.95	18.19

表 2 模拟了 $0.55\mu\text{m}$ 波段气溶胶光学厚度增大 50% 或减小 50% 等情况下对反演地面反射率的影响。从表 2 中可以看出随着气溶胶光学厚度的误差加大,对可见光波段的反射率反演影响加大,而对近红外波段的影响相对较小。气溶胶光学厚度变化 10% 对反演地面各波段光谱反射率产生的误差也在

10% 以内;气溶胶光学厚度变化 25% 对 $412\text{--}490\text{nm}$ 波段地面反射率的反演误差在 20% 以内,对 $510\text{--}865\text{nm}$ 波段误差在 10% 以内。

通常情况下陆地上空气溶胶光学厚度总是大于海洋上空的气溶胶光学厚度。本算法中对气溶胶光学厚度的反演误差可能来源于选取了不清洁的水体,所造成的误差使得气溶胶光学厚度计算值偏大;而在认为陆地上空大气条件与海洋上空大气条件相同的假设中有可能造成气溶胶光学厚度比真实情况偏小,所以在保证所选取的水体为清洁海水的情况下对地面光谱反射率的反演误差就来自于气溶胶光学厚度在计算中可能出现的偏小而产生的误差。

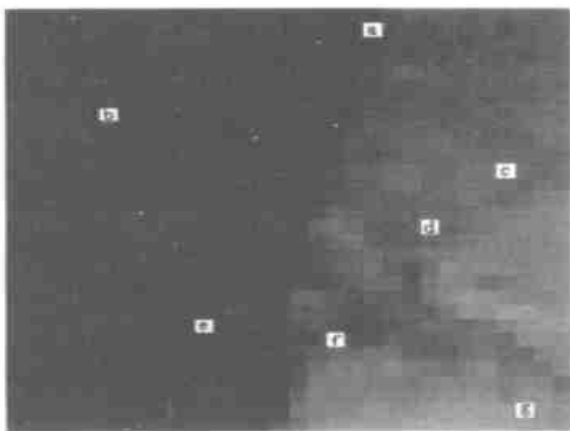
表 2 地物光谱反射率的反演误差

Table 2 Error in retrieved reflectance

气溶胶光学厚度 $\tau_a(0.55)$		减小 50%	减小 25%	减小 10%	增加 10%	增加 25%	增加 50%
方差 /%	412nm	34.13	19.34	7.95	6.08	18.00	36.35
	443nm	24.63	14.81	6.79	2.99	11.2	24.26
	490nm	18.54	10.49	4.01	3.79	7.61	20.63
	510nm	15.16	8.38	8.44	1.95	6.67	11.91
	550nm	10.73	6.26	2.09	0.96	3.38	8.37
	670nm	7.81	6.97	2.49	2.23	3.10	8.42
	765nm	3.50	2.99	1.59	0.49	1.97	1.36
	865nm	0.69	0.85	0.99	0.80	0.33	0.68

4 SeaWiFS 数据应用分析

我们使用的 SeaWiFS 数据是中国东南海域 1998-12-26 卫星过顶的数据,所取范围为晴空无云的 30×30 像元(图 1),4 个顶点的纬度和经度坐标为: $(25.037^\circ, 120.816^\circ)$, $(24.990^\circ, 121.145^\circ)$, $(24.756^\circ,$

图 1 30×30 像元 $0.865\mu\text{m}$ 波段 SeaWiFS 影像图Fig.1 The SeaWiFS image with 30×30 pixels at $0.865\mu\text{m}$ band

$120.747^\circ)$ $(24.710^\circ, 121.075^\circ)$ 。计算辐射传输的方法采用 6S 算法,取中纬度冬季、海洋型气溶胶模式;下垫面取朗伯面,海面海拔高度为海平面,沿岸地面海拔高度取为 10m。根据卫星接收的海水像元辐射率随波长增大辐射率减小的规律分割出海水像元。近岸的海水像元被剔除,将每行清洁海水像元计算的气溶胶光学厚度取平均用于该行陆地像元反射率的反演。

图 2、图 3、图 4 分别给出了 SeaWiFS $0.865\mu\text{m}$, $0.55\mu\text{m}$, $0.443\mu\text{m}$ 通道反射率等值线图。由图 2 可以看出近红外波段的反射率等值线图显示了十分清晰的水陆界线,在岸边形成较为陡峭的台阶状。图 3 是 $0.55\mu\text{m}$ 波段的反射率等值线图, $0.55\mu\text{m}$ 是叶绿素的反射峰,由于近岸水体一般含有较为丰富的有机悬浮物,因而可以看出其反射率明显大于清洁水体反射率。图 4 是 $0.443\mu\text{m}$ 波段的反射率等值线图, $0.443\mu\text{m}$ 存在一个叶绿素强烈的吸收峰,因而沿岸二类水体与清洁水体反射基本一致。

图 5 给出了图像中由每行清洁海水像元计算的气溶胶平均光学厚度与标准偏差,从图 5 中可以看

出该处的大气气溶胶随空间变化很小,所研究范围内的
内的大气均匀状况良好。

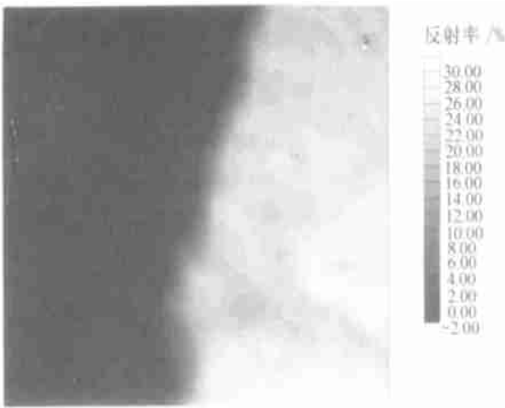


图 2 0.865 μm 波段 SeaWiFS 反射率等值线图
Fig.2 The isoline of reflectance at SeaWiFS
0.865 μm band

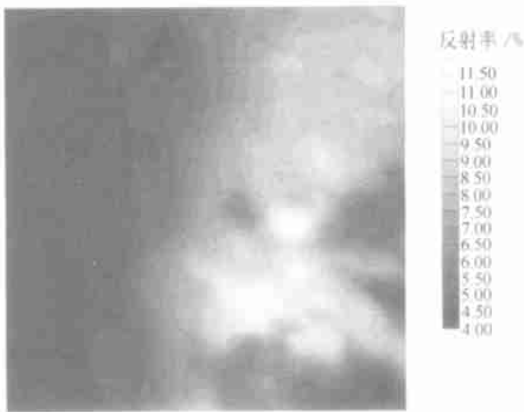


图 3 0.55 μm 波段 SeaWiFS 反射率等值线图
Fig.3 The isoline of reflectance at SeaWiFS
0.55 μm band

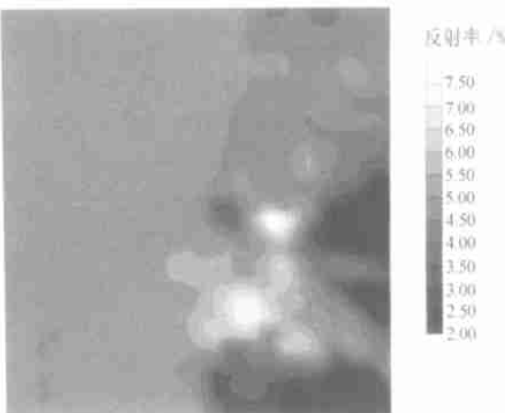


图 4 0.443 μm 波段 SeaWiFS 反射率等值线图
Fig.4 The isoline of reflectance at SeaWiFS
0.443 μm band

光谱特点,在可见光波段反射很小,在 700—800nm
反射迅速增加。图 7 曲线 e、b 是清洁海水的光谱曲线,
在 670nm 其反射率也近似为零。曲线 a 是海岸
线上的像元反射率,是水陆复合像元的可能性较大。

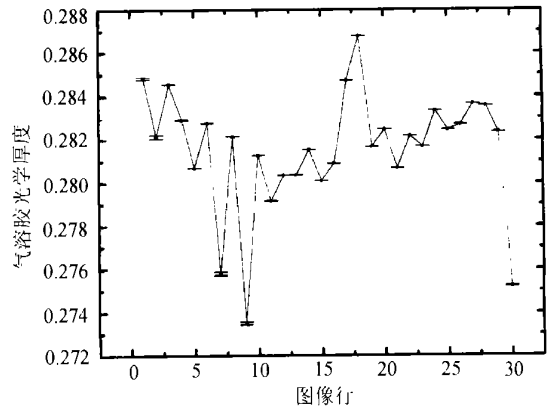


图 5 图像中每行气溶胶平均光学厚度与标准偏差
Fig.5 The average aerosol optical thickness and the
standard deviation

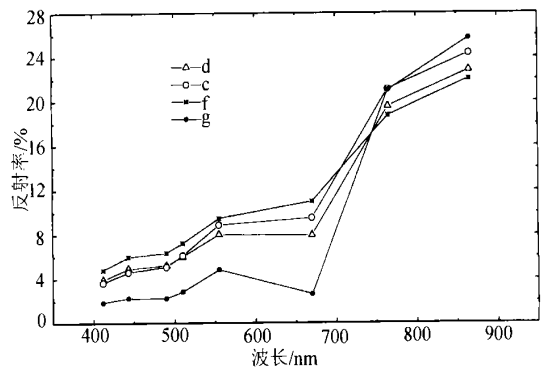


图 6 图 1 所标示陆地像元 SeaWiFS 8 波段反射率曲线
Fig.6 The reflectance curve of land surface as
Fig.1 mark

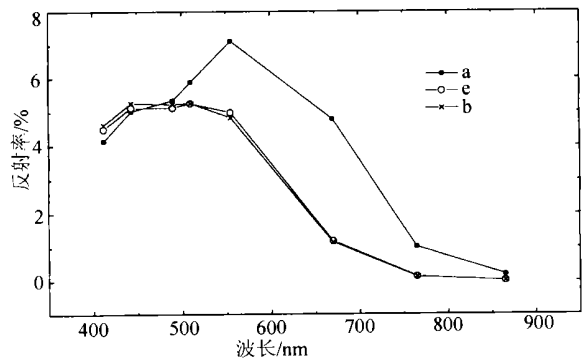


图 7 图 1 所标示海水像元 SeaWiFS 8 波段反射率曲线
Fig.7 The reflectance curve of the ocean water as
Fig.1 mark

图 6、图 7 给出了图 1 所任意标注的各像元反射
率曲线。图 6 给出的几条光谱曲线较为符合植被的

5 结 论

根据沿岸地物近水的特点,本文采用海洋上空反演的气溶胶光学厚度用于地面反射率的反演,对每一个地面像元由卫星接收时的太阳天顶角、方位角,观测天顶角、方位角和计算的大气气溶胶光学厚度根据 6S 辐射传输模型逐像元迭代计算地物光谱反射率。数值模拟显示在反演地面光谱反射率时气溶胶光学厚度的误差在 10%以内,则对地面光谱反射率的反演误差也在 10%以内,气溶胶光学厚度变化 25%对 412—490nm 波段地面反射率的反演误差在 20%以内,对 510—865nm 波段误差在 10%以内。

致谢 作者对国家海洋局卫星海洋应用中心唐军武博士提供 SeaWiFS 定位表示感谢。

参 考 文 献 (References)

- [1] Ahern F J, Goodenough D G *et al.* Use of Clear Lakes as Standard Reflectors for Atmospheric Measurements [A]. Proc. 11th Int. Symp.

- On Remote Sensing of Environ. [C]. Ann Arbor, MI, 1977.
- [2] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-IR Satellite Imagery [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1998, **9**(8): 1357—1381.
- [3] Chavez P S Jr. An Improved Dark-object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data [J]. *Remote Sensing of Environ.*, 1988, **24**(3): 459—479.
- [4] Gordon H R. Retrieval of Atmospheric Effects from Satellite of the Oceans [J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(10): 1631—1636.
- [5] Gordon H R, Clark D J. Clear Water Radiances for Atmospheric Correction of Coastal Zone Color Scanner Imagery [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(24): 4175—4180.
- [6] Gordon H R, Wang M. Retrieval of Water-leaving Radiance and Aerosol Optical Thickness over the Oceans with SeaWiFS: A Preliminary Algorithm [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(3): 443—452.
- [7] Tanre D, Deroo C, Duhaut P *et al.* The Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) [R]. User Guide. Laboratoire d'Optique Atmospherique, U. S. T. de Lille, 59655 Villeneuve d'aseq, France, 1986.
- [8] Deschamps P Y, Herman M, Tanre D. Modeling of the Atmospheric Effects and its Application to the Remote Sensing of Ocean Color [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23): 3751—3758.

Retrieval of Reflectance Along Coastal Zone with SeaWifs

XU Qing-shan, WEI He-li, ZHAO Feng-sheng

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In this study, we present an iterative algorithm for the determination of aerosol optical thickness and the surface reflectance along coastal zone from SeaWiFS measurement. The outgoing radiances and the path radiance were inferred from 6s atmospheric radiative transfer code. Numerical experiments with SeaWiFS measurement were carried out to investigate the sensitivity of the algorithm. The iterative algorithm is applied to determine the surface reflectance in the East Ocean zone of China from SeaWiFS data.

Key words: reflectance; aerosol optical thickness; remote sensing