

# 利用 MODIS 数据进行 QuickBird-2 卫星海岸带 图像大气校正研究

彭妮娜 易维宁 麻金继 方勇华

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 大气校正是遥感信息定量化过程的一个重要环节,而在大气校正中起关键作用的是气溶胶光学厚度,气溶胶的模式和大气漫射透过率;但在浑浊的水体上空,这些参量很难用卫星图像反演得到,从而提出了基于同步 MODIS 数据辅助 QuickBird-2 卫星图像进行海岸带大气校正算法,该方法由 MODIS 图像的水体像元反演出混浊水域上空气溶胶光学特性,与 MODIS 气溶胶产品相比相对误差小于 10%;同时,借助 6S 辐射传输模型,并考虑了高分辨率图像临近像元效应,对 QuickBird-2 卫星海岸带图像进行大气校正。给出了我国沿海地区 QuickBird-2 卫星图像大气校正的结果,并对反演误差进行了分析。

**关键词** 大气校正;气溶胶反演;二类水;查找表

**中图分类号** TP7 **文献标识码** A

## Atmospheric Correction of QuickBird-2 Imagery for Turbid Water Coastal Areas Using MODIS Data

Peng Nina Yi Weining Ma Jinji Fang Yonghua

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

**Abstract** Atmospheric correction is an important part of the Quantitative Remote Sensing, and the most important key for atmospheric correction is Aerosol retrieval including Aerosol optical depth, Aerosol type and atmospheric diffuse transmission. But to retrieve the aerosol optical character over the turbid waters is difficult by using satellite image itself. So we advanced an atmospheric correction algorithm of QuickBird-2 imagery for turbid water coastal areas using synchronous measuring MODIS data. This algorithm is to retrieve the atmospheric properties of turbid water coastal areas based on MODIS water pixel. The relative error between the retrieval result and the MODIS aerosol product is less than 10%. On the other hand, by using the 6s Radiation Transfer Model and taking account of the adjacency effect for high spatial resolution imagery, Atmospheric correction has been applied to QuickBird-2 imagery for turbid water coastal areas. The atmospheric correction results and the analysis of retrieval errors have been given.

**Key words** atmospheric correction; retrieval of atmospheric properties; case II water; look up table

## 1 引 言

QuickBird-2 卫星是由美国数字全球公司于 2001 年 10 月 18 日发射的高分辨率商业卫星系列中的第 3 颗。传统的大气校正方法是在卫星过境时在地面同步测量试验区的大气参量,然后利用大气辐射传输模型对卫星数据进行大气校正,显然,这种方法只适用于少量的试验区,无法用于大量的卫星数

据的大气校正;业务化运行的大气校正算法要求从遥感数据本身来反演大气参量,进而完成大气校正,这就需要针对大气辐射特性设置用于反演大气参量的波段,而 QuickBird-2 卫星缺乏用于反演大气参量的波段,给 QuickBird-2 卫星海岸带图像数据的大气校正带来了困难。同时,信噪比和光谱分辨率很高而且波段丰富的 MODIS 数据,不仅可以免费

收稿日期: 2007-06-07; 收到修改稿日期: 2007-08-25

**作者简介:** 彭妮娜(1980—),女,博士研究生,主要从事大气辐射校正、遥感光谱与图像分析及目标探测识别等方面的研究。E-mail: ninapeng@aiofm.ac.cn

**导师简介:** 易维宁(1956—),女,研究员,主要从事地物波谱特性、大气辐射校正和遥感表征模型等方面的研究。  
E-mail: yiwn@aiofm.ac.cn

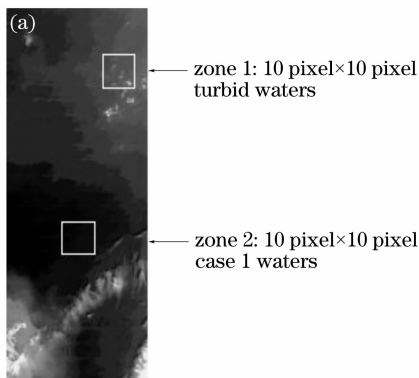
获取,而且,总能找到与 QuickBird-2 卫星同步的,覆盖同一地区的卫星数据,因此,本文提出基于同步 MODIS 数据辅助 QuickBird-2 卫星图像进行海岸带大气校正算法<sup>[1~3]</sup>,该方法由 MODIS 图像的水体像元反演出混浊水域上空气溶胶光学特性,借助 6S 辐射传输模型,并考虑了临近像元效应,对 QuickBird-2 卫星海岸带图像进行大气校正,无需地面实测数据,具有很高的适用性。

由于海洋表面相对陆地表面来说要简单得多,而且,在对水体观测时,大气信号所占比重更可达到总信号的 90% 以上,所以,目前海洋上空的气溶胶反演精度远高于陆地上空气溶胶反演的精度,但是,对于海岸带,环境和海水受到人类活动的影响比较大,故海岸带的海水大多是浑浊的水,针对目前混浊水域上空气溶胶光学特性反演方法还不成熟的特点,给出了基于 MODIS 图像混浊水域上空气溶胶光学特性反演的方法,在晴空无云的条件下,假设一定范围内的海岸带上空的大气和水体上空的大气一致。在借助 6S 辐射传输模型进行大气校正时,首先在朗伯假设条件下,计算出地表反射率,然后利用大气点扩散函数计算出临近像元的加权平均反射率,最后扣除临近像元的影响得到真实的地表反射率<sup>[4~6]</sup>。

## 2 基于 MODIS 短波红外波段的特性反演海岸带气溶胶光学特性

### 2.1 反演原理

基于卫星图像反演 I 类水区域上空的气溶胶特



性的方法,除了 Tarné 提出的<sup>[7]</sup>基于查找表反演的方法外,还有 Gordon 和 Wang 等<sup>[8~12]</sup>提出的 I 类水区域的海色反演过程中的副产品:气溶胶光学厚度和模式。其主要思路是假设近红外波段的离水辐射率为零,然后用 Wang 等<sup>[13]</sup>提出的多次散射和单次散射成线性关系,求出可见光波段的单次散射辐射亮度,从而反演出气溶胶光学特性。由于海岸带水体不满足近红外波段的离水辐射率为零的假设条件,故这种方法不能用来反演海岸带的气溶胶光学特性。根据 Gordon 和 Wang 提出的 I 类水区域的海色反演过程中大气校正的原理,如果能找到有对大气透过率高、对气溶胶较为敏感同时又对下垫面不太敏感的 MODIS 通道,那么利用这些通道就可以反演出混浊水体区域上空的大气气溶胶光学特性。

图 1(a)是 2002 年 5 月 28 日的渤海湾区域的 MODIS 图,其中图 1(a)上面的区域 1 是一个典型的 10 pixel x 10 pixel 的混浊水区域;下面的区域 2 是一个典型的 10 pixel x 10 pixel 的 I 类水区域。图 1(b)是图 1(a)中两个区域内表观反射率与 MODIS 前 16 个波段的中心波长的关系。由于选择的两个区域比较靠近,故可以认为这两个区域上空的大气气溶胶特性相同。从图 1(b)中,可以得出:在 MODIS 波段 5、6 和 7 三个波段处,I 类水体和混浊水体的表观反射率几乎是相同的,即在 MODIS 波段 5、6 和 7 处,混浊水体和 I 类水体的反射率也是基本相同的,且均符合暗目标的条件。

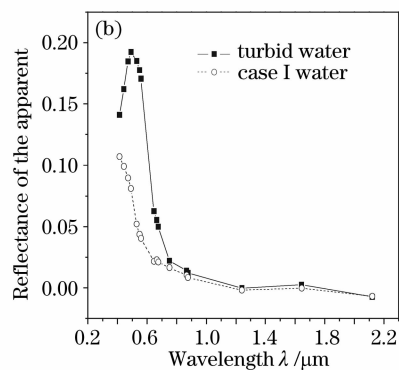


图 1 图 1(a) MODIS 图,(b)为(a)中两区域的表观反射率和波长的关系

Fig. 1 Modis data and spectrum curve of case I water and case II water

所以,MODIS 短波红外(SWIR)波长(如 1240 nm、1640 nm 和 2130 nm)有如下特征:(1)有较高的大气透过率;(2)混浊水体在这些波段符合暗目标的条件;(3)对气溶胶的光学特性还是较为敏感的;此外,利用它们还可以用较为简单的方法识别出云、海洋

和陆地像元。故基于 MODIS 这三个短波红外波段的特征,可以反演出海岸带的气溶胶光学特性。

### 2.2 反演方法

从上面的分析可知,MODIS 第 5、6 和 7 通道满足下垫面基本符合暗目标的条件,故可以启用这

三个通道采用基于暗目标查找表的方法来反演大气气溶胶光学特性。但是,这三个通道对于气溶胶的散射特性不是很敏感,故用通常的基于暗目标的查找表方法来反演是不可行的,因而定义两个新的函数分别用来反演气溶胶的光学厚度和模式。

$$\epsilon_{\text{ms}}(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\rho_{\text{atm}}(\lambda_1) - \rho_{\text{ray}}(\lambda_1)}{\rho_{\text{atm}}(\lambda_2) - \rho_{\text{ray}}(\lambda_2)}, \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{diff}}(\lambda_1, \lambda_2) = \gamma(\lambda_1) - \gamma(\lambda_2), \quad (2)$$

其中  $\gamma(\lambda) = \frac{\rho_{\text{atm}}(\lambda)}{\rho_{\text{ray}}(\lambda)} \times 100$ ,  $\rho_{\text{atm}}(\lambda)$  和  $\rho_{\text{ray}}(\lambda)$  分别是波长为  $\lambda$  时的大气总的表观反射率和大气分子的瑞利散射表观反射率(不含气溶胶或气溶胶光学厚度为零)。函数  $\epsilon_{\text{ms}}(\lambda_1, \lambda_2)$  是用来判断气溶胶模式的,而函数  $\gamma_{\text{diff}}(\lambda_1, \lambda_2)$  是用来反演气溶胶光学厚度的。对于晴朗的 MODIS 海岸带水域地区的图像,选用第五通道和第六通道分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 即 1240 nm, 1640 nm。用双层辐射传输代码计算其辐射亮度,并求得这两个函数随气溶胶光学厚度变化的关系曲线。计算过程选择的气溶胶模式是 MODTRAN 中常用的四个与海洋有关的气溶胶模式——海洋模式、对流层模式、沿海模式和海上型气溶胶模式,其相对湿度选四个,即 50%、70%、90% 和 99%,这样就相当于有 16 个气溶胶模式;大气模式选择美国标准模式。

### 3 大气校正原理

在辐射传输过程中到达地面的总辐射能量主要是经过大气衰减的太阳直接辐射  $E_s$  和下行天空漫射光  $E_d$  之和。其中  $E_s = (E_0/D_2) \cos \theta \exp(-\tau \sec \theta)$ ,  $E_0$  为太阳常数;  $D$  为日地距离;  $\tau$  为光学厚度;  $\theta$  为太阳天顶角。假设天空辐照度各向同性和地面朗伯面反射,且天空晴朗无云,忽略大气的折射、湍流和偏振,则地物表面反射辐射亮度  $L_{\text{rx}}$ :

$$L_{\text{rx}} = \frac{R_{\text{ga}} [E_0(\lambda) \cos \theta_z \exp(-\tau_\lambda \sec \theta_z) + E_{\text{da}}]}{\pi}, \quad (3)$$

式中  $R_{\text{ga}}$  为地物表面反射率;  $\tau_\lambda$  为光学厚度;  $\theta_z$  为太阳天顶角;  $E_{\text{da}}$  为天空光漫射到地表面的光谱辐照度。

由卫星传感器接收到的光谱辐亮度  $L_{\text{ix}}$  是经过大气衰减后的地面辐亮度和大气本身的程辐射  $L_p$  之和,即  $L_{\text{ix}} = [L_{\text{rx}} \exp(-\tau_\lambda \sec \theta_v) + L_p]$ , 式中  $\theta_v$  为卫星传感器观测角,则地物表面反射率:

$$R_{\text{ga}} = \frac{\pi}{T_{\text{ua}}} \left[ \frac{L_{\text{ix}} - L_p}{E_0(\lambda) \cos \theta_z T_{\text{da}} + E_{\text{da}}} \right], \quad (4)$$

式中  $T_{\text{da}} = \exp(-\tau_\lambda \sec \theta_z)$ ,  $T_{\text{ua}} = \exp(-\tau_\lambda \sec \theta_v)$ 。

#### 3.1 遥感数据的定标

遥感数据定标是大气校正的前提,遥感器入口处波段  $i$  的辐射度  $L_i$  和遥感器输出的亮度值  $N_i$  之间存在线性关系。

$$N_i = A_i \times L_i + C_i, \quad (5)$$

式中  $L_i$  为遥感器入瞳处波段  $i$  的等效辐射度;  $N_i$  为遥感器波段  $i$  输出亮度值或经过相对校正后的亮度值;  $A_i$  为波段  $i$  的绝对辐射定标增益系数;  $C_i$  为波段  $i$  的绝对辐射定标偏移量。

#### 3.2 不考虑周围邻近像元的影响进行大气校正

首先忽略临近像元影响,朗伯假设条件下,根据(7)式计算地表反射率  $\rho_1$ :

$$L = L_p(\theta_v, \theta_s, \phi) + \tau_v(\theta_v) \frac{\rho_1}{\pi} \frac{E_g(0)}{(1 - \rho_1 S)}, \quad (6)$$

式中  $L_p$  为大气程辐射;  $\tau_v(\theta_v)$  为地-遥感器总大气透过率;  $\rho_1$  为朗伯假设条件下目标反射率(背景反射率视为与目标反射率相同);  $E_g$  为地面总辐照度;  $S$  为大气球面反照率;  $\theta_s$  为太阳天顶角;  $\theta_v$  为观测天顶角;  $\phi$  为相对方位角。

#### 3.3 考虑临近效应

$\rho_s$  为真实地面反射率,  $\tilde{\rho}_s$  为临近像元反射率加权平均值,  $T(\mu_v)$  (其中  $\mu_v = \cos \theta_v$ ) 为大气向上的总的透过率,  $t_d(\mu_v)$  为漫射透过率,  $\exp(-\tau/\mu_v)$  为直射透过率,  $f[r(x, y)]$  为大气点扩散函数。

$$\rho_1 = \rho_s \frac{\exp(-\tau/\mu_v)}{T(\mu_v)} + \tilde{\rho}_s \frac{t_d(\mu_v)}{T(\mu_v)}, \quad (7)$$

$$\rho_s = \frac{\rho_1 T(\mu_v) - \tilde{\rho}_s t_d(\mu_v)}{\exp(-\tau/\mu_v)}, \quad (8)$$

其中

$$t_d(\mu_v) = T(\mu_v) - \exp(-\tau/\mu_v),$$

$$\tilde{\rho}_s = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[r(x, y)] \rho(x, y) dx dy,$$

取校正像元为中心的  $2N \times 2N$  区域的离散形式,

$$\tilde{\rho}_s = \sum_{j=-N}^N \sum_{i=-N}^N f[r(i, j)] \rho_1(i, j). \quad (9)$$

### 4 QuickBird-2 卫星图像大气校正

利用 MODIS 数据对 QuickBird-2 卫星在 2005 年 4 月 4 日 03:01:48 到 03:01:55 我国沿海地区成像的图像进行大气校正。首先,找到与 QuickBird-2 卫星图像同步的(成像时间相差半小时以内)、覆盖同一地区的 MODIS 数据(2005 年 4 月 4 日 02:25 到 02:32),可以假设这两种遥感器在同一地区成像

时的大气状况是一致的。利用 MODIS 数据反演大气参量,然后将反演的大气参量代入大气辐射传输方程,从而完成 QuickBird-2 卫星图像的大气校正。如图 2 所示,为 2005 年 4 月 4 日 02:25 到 02:32 MODIS 卫星在东南沿海地区的 band 1 图像数据,其中方框标注的为目标地区。我们将提取这部分数据根据上述气溶胶光学特性反演方法,反演该地区的气溶胶光学厚度和气溶胶模式。

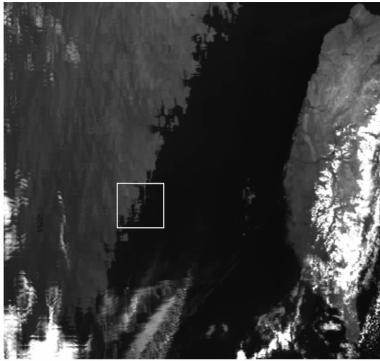


图 2 2005 年 4 月 4 日 02:25 到 02:32 MODIS

卫星在东南沿海地区 band 1 图像

Fig. 2 MODIS band 1 imagery in Southern China coastal areas in Apr. 4 2005 02:25~02:32

MODIS 具有通道多(36 个可见光和红外)、覆盖空间广(2330 km 横向扫描)等特点,可以提供有关遥感大气气溶胶、水汽、臭氧、云、地表植被、海色、浮游植物、生物地球化学等产品的丰富信息,其业务运行程序已经可以获取全球陆地除少数沙漠和高原地区以外的大面积地区的气溶胶分布。因此,我们将通过 MODIS 反演得到的气溶胶光学厚度同

MODIS 本身的气溶胶产品进行了比较。如图 3 所示,为 2005 年 4 月 4 日 02:25 到 02:32 MODIS 的气溶胶产品。

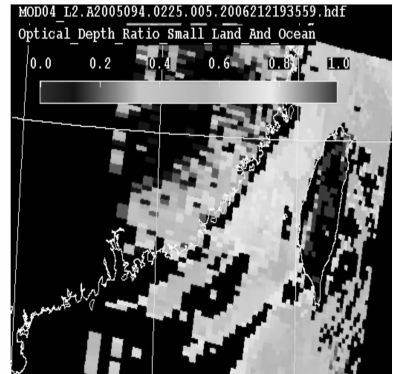


图 3 2005 年 4 月 4 日 02:25 到 02:32 MODIS 的气溶胶产品

Fig. 3 MODIS aerosol product in Southern China coastal areas in Apr. 4 2005 02:25~02:32

表 1 气溶胶光学厚度反演结果误差分析

Table 1 Analysis of retrieval errors

	MODIS product	Retrieval result	Relative error
Aerosol optical depth	0.28	0.31	<10%

图 4 显示了大气校正前和大气校正后的 QuickBird-2 卫星 band 1 图像的比较,我们可以看出,原先被大气程辐射和临近像元的影响模糊的细节显现出来,消除了邻近像元影响的大气校正图像其对比度增强,边缘等细节部分更加清晰,整体效果好,图 5 为 QuickBird-2 卫星红绿蓝波段的灰度合成图。



图 4 大气校正前和大气校正后的 QuickBird-2 卫星 band 1 图像比较

Fig. 4 QuickBird-2 band 1 imagery in Southern China coastal areas. (a) Before atmospheric correction, (b) after atmospheric correction

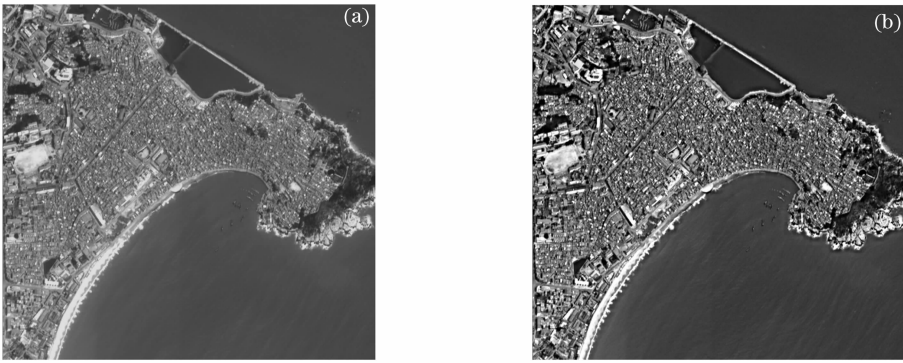


图 5 大气校正前和大气校正后的 QuickBird-2 卫星红绿蓝波段的彩色合成图  
 Fig. 5 QuickBird-2 color imagery in Southern China coastal areas. (a) Before atmospheric correction, (b) after atmospheric correction

## 5 讨论与结论

海洋一类水体反演的气溶胶光学特性的精度较高,而近海岸和内陆二类水体光学特性比较复杂,反演的相对误差一般会比较高。本文利用 MODIS 图像反演的混浊水域上空气溶胶光学特性与 MODIS 气溶胶产品相比相对误差小于 10%,证明了反演算法的正确性和可行性;通过大气校正前后的 QuickBird-2 卫星海岸带图像的对比,可以看出,大气校正消除了大气程辐射和临近像元的影响,增强了对比度,边缘等细节部分变得更加清晰,也说明了该算法的正确性、可行性和实用性。结果表明,利用同步的 MODIS 数据辅助 QuickBird-2 卫星数据进行海岸带大气校正的效果较好,因此本文提出的大气校正算法具有一定的实用价值。

在利用 MODIS 图像反演混浊水域上空气溶胶光学特性过程中,我们发现可供选择的气溶胶模式太单一,影响了气溶胶光学特性的反演精度,所以,用于 MODIS 图像反演混浊水域上空气溶胶光学特性的方法有待提高,在今后的工作中需要增加适合我国海洋水域的气溶胶模式以提高反演精度。

随着高空间分辨率的商业卫星数据越来越多,高分辨率图像邻近效应的校正问题也是大气校正需要解决的关键问题,在本文中考虑的临近像元的影响,但是,由于高空间分辨,在临近像元范围选择上带来很大误差,在有些情况还会产生伪阴影,下面将进一步考虑高分辨率图像邻近效应的校正问题。

## 参考文献

1 Luis Guanter, Luis Alonso, José Moreno *et al.*. A method for the surface reflectance retrieval from PROBA/CHRIS data over

- land: Application to ESA SPARC campaigns [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(12): 2908~2917
- 2 Mary Pagnutti, Kara Holekamp, Robert E. Ryan *et al.*. Atmospheric correction of high spatial resolution commercial satellite imagery products using MODIS atmospheric products [C]. *IEEE, Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*, 2005 International Workshop, 2005. 115~119
- 3 李俊生,张兵,陈正超等. MODIS 数据辅助中巴资源卫星图像大气校正研究[J]. *中国科学 E 辑*, 2006, **36**: 141~150
- 4 Tsutomu Takashima, Kazuhiko Masuda. Atmospheric correction in the coastal zone on aster visible data allowing for the adjacency effect[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3122**: 116~127
- 5 Yi Weining, He Chaolan, Qiao Yanli *et al.*. Atmospheric correction of CBERS-02 CCD image[J]. *J. Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 703~708  
 易维宁,何超兰,乔延利等. CBERS-02 卫星 CCD 图像的大气订正[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(5): 703~708
- 6 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobin *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 999~1003  
 叶松,方勇华,孙晓兵等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 999~1003
- 7 D. Tarné, Y. L. Kanfman, M. Herman *et al.*. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 16971~16987
- 8 Gordon H. R.. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the ocean[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**: 1631~1636
- 9 Gordon H. R., Clark D. K.. Clear water radiances for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**: 4175~4180
- 10 Gordon H. R., Castano D. J.. Coastal zone color scanner atmospheric correction algorithm: multiple scattering effects[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**: 2111~2122
- 11 Gordon H. R., Brown J. W., Evans R. H.. Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 Coastal zone color scanner[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**: 862~871
- 12 Gordon H. R., Wang M.. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3): 443~452
- 13 Wang Menghua. Atmospheric correction of the second generation ocean color sensor[D]. Coral Gables, Fla: University of Miami, 1991