

黄文声, 李真, 李权镐, 等. 2009 香港及珠三角地区 MODIS 高分辨率气溶胶光学厚度的反演 [J]. 环境科学学报, 29(7): 1372–1380

Wong M S, Nichol J, Lee K H, *et al*. 2009 Retrieval of aerosol optical thickness over Hong Kong and Pearl River Delta region using MODIS satellite data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(7): 1372–1380

# 香港及珠三角地区 MODIS 高分辨率气溶胶光学厚度的反演

黄文声<sup>1\*</sup>, 李真<sup>1</sup>, 李权镐<sup>2</sup>, 李占清<sup>2</sup>, 郭嘉熙<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 香港理工大学土地测量及地理资讯学系, 香港

<sup>2</sup> 美国马里兰大学地球系统科学综合研究中心, 帕克分校, 美国

收稿日期: 2008-10-24 修回日期: 2009-04-15 录用日期: 2009-05-26

**摘要:** 为了有效解决地区性和城市范围内的气溶胶分布并反演陆地上气溶胶的性质, 一种针对中分辨率成像光谱辐射计 (MODIS) 的气溶胶反演新算法应运而生. 本文首先通过改良的最小反射率技术 (MRT) 来确定季节性的地表反射率和利用瑞利通道辐射率中解析出大气上气溶胶的反射率来估计气溶胶的反射系数. 结果表明, MRT 地表反射率的图像和 MODIS 地表反射系数的产品 (MOD09) 有很好的契合度, 两者的相关系数高达 0.9. 此外, 考虑到不同气溶胶的光学性质和太阳观测组合对计算辐射传输的影响, 本研究还制定了全面广泛的差算表 (LUT). 由此产生的卫星 500m 分辨率的气溶胶光学厚度 (AOT) 和香港太阳光度计 (AERONET) 及 Microtops II 观测资料的相关系数  $r$  分别为 0.96 和 0.87 (相伴概率值  $p < 0.0001$ ). 该研究证明了城区高分辨率气溶胶反演的可行性, 还能帮助研究气溶胶的分布和城区大气瞬态污染的影响. 此外, MODIS 500m 分辨率的气溶胶光学厚度图像还可用于研究跨境气溶胶, 使定位珠江三角洲区域污染源变得可行.

**关键词:** MODIS 气溶胶; 表面反射率; 香港

文章编号: 0253-2468(2009)07-1372-09 中图分类号: X513 文献标识码: A

## Retrieval of aerosol optical thickness over Hong Kong and Pearl River Delta region using MODIS satellite data

WONG Man Sing<sup>1\*</sup>, NICHOL Janet<sup>1</sup>, LEE Kw on Ho<sup>2</sup>, LI Zhanqing<sup>2</sup>, KWOK Ka Hei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Land Surveying and Geoinformatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

<sup>2</sup> Earth System Science Interdisciplinary Center, University of Maryland College Park, United States

Received 24 October 2008 received in revised form 15 April 2009 accepted 26 May 2009

**Abstract** Aerosol retrieval algorithms for the MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite have been developed to estimate aerosol and microphysical properties of the atmosphere which help to address aerosol climatic issues at global scale. However, higher spatial resolution aerosol products for urban areas have not been well researched. In this study, a new aerosol retrieval algorithm for the MODIS 500m resolution data has been developed to retrieve aerosol properties over complex land, which helps to address the aerosol climatic issues for both local and regional areas. The results show that 500m Aerosol Optical Thickness (AOT) data from MODIS are highly correlated ( $r = 0.96$  and  $r = 0.87$ ) with AERONET and Microtops II sunphotometer observations in Hong Kong. This study demonstrates the feasibility of aerosol retrieval at “fine” resolution in urban areas, which can help study aerosol distribution and pinpoint pollution sources.

**Keywords** MODIS; aerosol; surface reflectance; Hong Kong

### 1 引言 (Introduction)

气溶胶反演就是将气溶胶信号从表面反射中区别出来, 通过卫星平台来实现气溶胶探测和监

视, 这项技术已经在过去的 20 年里得到了充分的发展. 尽管一些现有的气溶胶反演方法提供气溶胶在全球范围内的性质, 而由于大多数卫星传感器分辨率的限制, 气溶胶的更多空间细节特征仍处于未知

基金项目: 香港特别行政区政府研究基金资助项目 (No. PolyU 5253/07E)

Supported by the Hong Kong CERG Grant (No. PolyU 5253/07E)

作者简介: 黄文声 (1980—), 男, 博士; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: m.wong06@fu.brightmail.org

**Biography:** WONG Man Sing (1980—), male, Ph.D.; \* **Corresponding author;** E-mail: m.wong06@fu.brightmail.org

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

状况。此外, 在地表反射率较难辨别的区域里(如: 沙漠、干旱及半干旱地区和城市区域)用卫星遥感来反演气溶胶是比较复杂的。因此, 表面反射率的估计就成为气溶胶反演的一个关键因素。

Kaufman等(1998)最先提出暗背景密集植被(DDV)法, 并使用长波长通道算法来处理中分辨率成像光谱仪(MODIS)卫星图像, 但DDV算法只能适用于植被覆盖面积达到60%以上的地表反射率很低的区域, 该算法不能普遍适用于如沙漠、城区等明亮表面区域的气溶胶估算。Chu等(2003)的研究显示, MODIS collection 4算法得出的数据与气溶胶遥测网络(AERONET)的太阳光度计数据存在一些正偏差(Hoben *et al.*, 2002)。Remer等(2005)和Levy等(2004)指出, 使用DDV算法决定表面反射率时存在着某些固有的问题, 这意味着不准确的表面性质会导致气溶胶反演中出现误差。最近, Levy等(2007)改良了MODIS气溶胶反演算法中确定表面反射率的方法, 该算法(称为collection 5)考虑了基于植被覆盖率和散射角度结合的相互关系。尽管MODIS collection 5算法在气溶胶反演时的精确性和连贯性上有了重大进步(Miller *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2007), 然而, 在中国南部地区特别是香港和珠江三角洲区域反演气溶胶光学厚度还是被证实存在很大的误差。

由于光亮表面的高反射率使地表和气溶胶的构成成分不易辨别, 这使得在这些区域进行气溶胶

反演非常具有挑战性。Hsu等(2004, 2007)最近提出了利用MODIS图像针对沙漠、干旱及半干旱地区和城市区域的深蓝算法。同时, 为了推断气溶胶的信息, 还搭建了基于最小反射率技术(MRT)的表面反射数据库(Herman *et al.*, 1997; Koelmeijer *et al.*, 2003)。实验结果得出的气溶胶光学厚度证实了其AERONET地面测量数据有很好的一致性(30%以内)。Lee等(2006)在韩国也利用类似的技术估计表面反射率并应用于气溶胶反演, 这项技术在光亮表面区域的气溶胶观测方面显示出一定的优越性。

由于粗糙空间分辨率的MODIS产品(10km)只对宽阔区域范围内的描述有意义, 而气溶胶监测经常要涉及到一些复杂区域。例如, 对香港城区(1095 km<sup>2</sup>)的研究中(图1), 就要求更多空间和光谱细节信息。李成才等提出了基于改良的MODIS collection 4算法的1km AOT, 并将其应用于对香港气溶胶反演的研究(Li *et al.*, 2005a; 李成才等, 2005b), 但该算法在光亮表面区域受到限制, 而且算法的验证是通过手持式太阳光度计于受限时期内测定, 在精确性方面存在一定的误差。为了能在一个比较详尽的层面上反演原本固有的气溶胶和绘制正在登陆的气溶胶的分布情况, 本文研究了一种结合改进MRT技术的气溶胶反演算法。

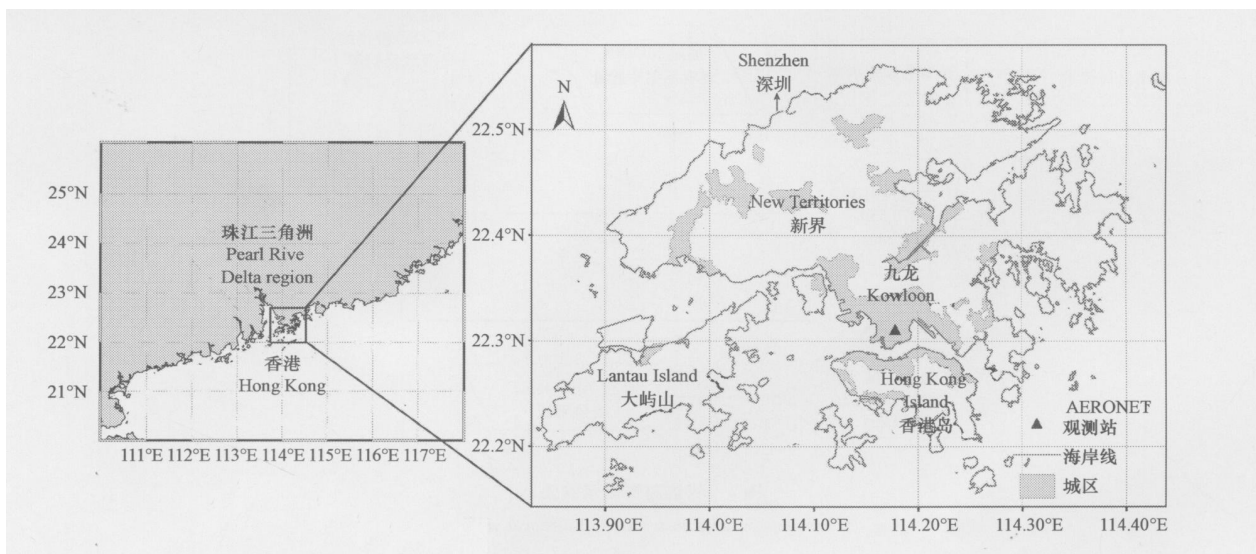


图1 香港和AERONET地面观测站的地图

Fig 1 Map of Hong Kong and AERONET station

## 2 方法 (Methodology)

### 2.1 数据来源

本次研究收集了 2007 年的 500m 分辨率的 TERRA MODIS level 1b 校准的反射率文件 (MOD02HKM) 和 MODIS level 2 气溶胶产品 (MOD04). 通过对比香港太阳光度计 (AERONET) 的数据以检验 AOT 的反演效果. AERONET 是地面太阳光度计的联合网络, 主要由用来测量气溶胶的 Cimel 太阳光度计组成, 该光度计每隔 15min 用多波段辐射计测量 1 次. 为了验证改良 MRT 技术估算的表面反射率, 还从 NASA Goddard Earth Science Distributed Active Archive Center (DAAC) 获取了 2007 年的 MODIS 表面反射率产品 (MOD09 8d 叠合的表面反射率图像) 进行比较 (Vemote et al., 2006).

### 2.2 研究方法

本文提出的气溶胶反算法的基本原理是通过表观反射率和瑞利路径辐射率解析出大气上界 (TOA) 的反射率, 进而来确定气溶胶的反射率. TOA 反射率  $\rho_{TOA}(\theta_0, \theta_s, \phi)$  的表述如下:

$$\rho_{TOA}(\theta_0, \theta_s, \phi) = \rho_{ATM}(\theta_0, \theta_s, \phi, \tau_{Aer}, \tau_{Ray}, p(\theta), \omega_0) + \frac{T_{Tot}(\theta_0) \cdot T_{Tot}(\theta_s) \cdot \rho_{Surf}(\theta_0, \theta_s)}{1 - \rho_{Surf}(\theta_0, \theta_s) \cdot n_{Hem}(\tau_{Tot}, g)} \quad (1)$$

式中,  $\theta_0$  为太阳天顶角 ( $^\circ$ ),  $\theta_s$  为卫星天顶角 ( $^\circ$ ),  $\phi$  为方位角 ( $^\circ$ ),  $\tau_{Aer}$ ,  $\tau_{Ray}$  和  $\tau_{Tot}$  分别为气溶胶光学厚度、瑞利光学厚度和总的光学厚度;  $p(\theta)$  是相位函数,  $\omega_0$  是单次散射反照率,  $g$  是非对称参数,  $\rho_{ATM}$  是大气路径反射率,  $T_{Tot}(\theta_s)$  是太阳的总辐射通量 ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $T_{Tot}(\theta_0)$  是卫星的总辐射通量 ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $\rho_{Surf}(\theta_0, \theta_s)$  是表观反射率,  $n_{Hem}(\tau_{Tot}, g)$  是半球反射率. 图 2 显示了本研究中气溶胶反演的工作流程.

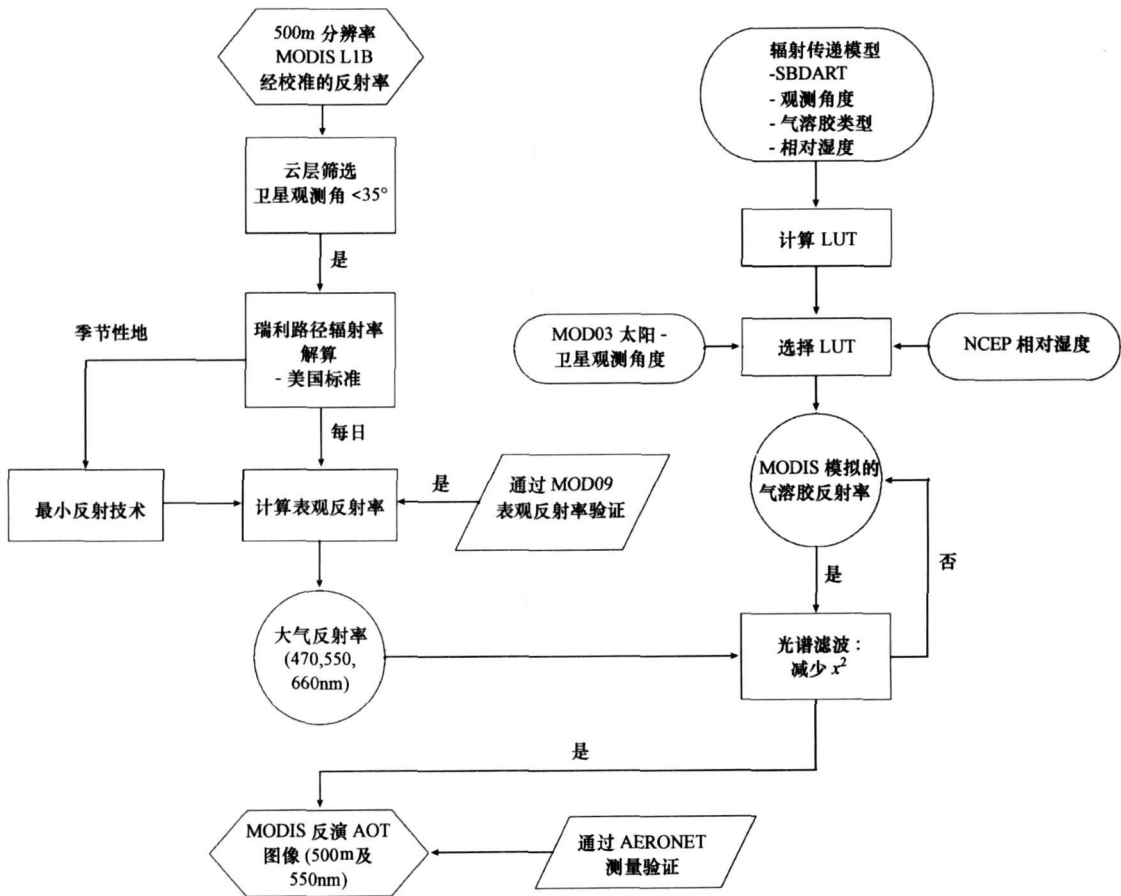


图 2 气溶胶反演示意图

Fig. 2 Schematic diagram for aerosol retrieval in the study

### 2.3 瑞利和表面反射率

瑞利路径辐射率的确定是基于计算瑞利光学

厚度和相位函数的光谱关联性质. 公式 (2) 用于计算瑞利散射光学厚度 (Bucholtz 1995).

$$\tau_{Ray}(\lambda) = A \lambda^{-B+C\lambda+D/\lambda} \times \frac{p(z)}{p_0} \quad (2)$$

式中,  $A, B, C, D$  是总的瑞利散射横截面常数和标准大气散射系数下的总瑞利容积常数.  $p(z)$  是与海拔相关的压强 (Pa), 这由带参数的大气压力方程决定.

$$p(z) = p_0 \exp\left[\frac{-29.87g \times 0.75z}{8.315(T_{surf} - g \times 0.75z)}\right] \quad (3)$$

式中, 高分辨率的数字海拔模型 (DEM) 用于估计高度  $z$  和为每个像素点计算压强  $p(z)$ .  $g$  是重力加速度 ( $9.807\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ),  $T_{surf}$  是地表温度,  $p_0$  是海面相关的压强 (Pa),  $T_{surf}$  及  $p_0$  都是从香港天文台获取的.

改良 MRT 的基本方案是提取在一段时间范围内最小的地表反射率值. 为了克服地表覆盖季节性的变化, 从每个季节的至少 30 张晴空图像中提取最小反射率图像. 然后, 找出第二小反射率值用于防止噪音、阴影等造成的非正常低值反射率. 研究中注意到第二小反射率值能很好地与地表反射情况吻合. 此外, 采用云层筛选方法来确定云层污染物, 这对于香港这样的多云地区非常重要. 本文利用试错法 (trial and error) 对云进行筛选, 高的、薄的云可同时筛选出来. 如果出现以下情况: 1) 表观反射率 (at 470nm) > 0.2; 2) 表观反射率 (at 550nm) > 0.2; 3) 表观反射率 (at 660nm) > 0.2; 4) 归异化植被指数 NDVI < -0.5 云会被筛选出来. 卫星观测角小于 35° 的天底图像会被利用, 以减小因不同种类区域的双向反射造成的角度影响.

### 2.4 气溶胶反演

使用 Santa Barbara DISORT 辐射传输 (SBDART) 编码构造 LUT (Ricchiuzzi *et al.*, 1998), 以此作为计算 AOT 的一种方法, 于不同太阳-卫星观测角和相对湿度 (RH) 下计算气溶胶反射率. SBDART 的输入数据主要包括 3 类, 分别是大气数据、气溶胶数据和地表数据. 本研究使用了气溶胶的光学特性数据库中一些气溶胶模式 (Hess *et al.*, 1998). 每个气溶胶模式区别于其各自的微观物理特性和光学特性, 诸如粒子尺寸分布、合成的折射指数等. 常见的气溶胶模式主要分为以下几类: 1) 大陆无污染 (CC) 模式; 2) 大陆平均 (CA) 模式; 3) 大陆污染 (CP) 模式; 4) 沙漠尘土 (DD) 模式; 5) 海洋无污染 (MC) 模式; 6) 海洋污染 (MP) 模式.

为了构造 LUT, 在考虑上述 6 个气溶胶模式、9 个太阳天顶角 ( $0^\circ \sim 80^\circ$ ,  $\Delta = 10^\circ$ )、17 个观测天顶角 ( $0^\circ \sim 80^\circ$ ,  $\Delta = 5^\circ$ )、18 个相对太阳/卫星方位角

( $0^\circ \sim 170^\circ$ ,  $\Delta = 10^\circ$ )、8 个相对湿度值 (RH = 0%、50%、70%、80%、90%、95%、98% 和 99%) 和 3 个通道 (分别为 470 550 660 nm) 的基础上, 编制总计 396576 个组合来计算假设的 AOT 值. 图 3 显示了从 SBDART 结果中得出的一个 LUT, 其计算结果是取太阳天顶角  $30^\circ$ , 卫星天顶角  $10^\circ$ , 方位角  $150^\circ$  和相对湿度值 50%.

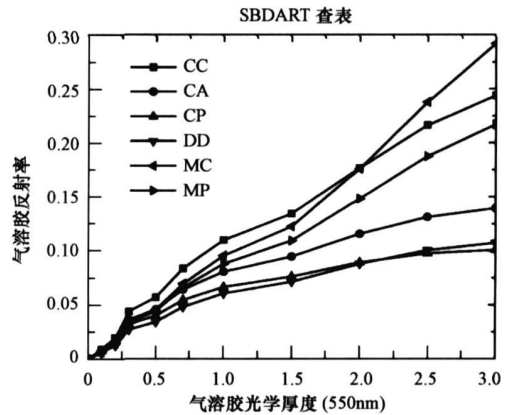


图 3 气溶胶反射率关于 AOT 的函数  
Fig. 3 Aerosol reflectance as a function of AOT

反演的第 1 步是通过利用特定的 RH 差算 LUT 表. RH 值可以从国家环境预测中心 (NCEP) 模型中获得 (Costa *et al.*, 1999). 第 2 步是对 LUT 的组合进行插值以合适卫星测量的组合. 上面两步可以减少读入计算机内存的 LUT 的数量. 第 3 步, 假定气溶胶反射率由卫星在 470nm 通道中估计的气溶胶反射率确定的. 最后, 卫星观测的气溶胶反射率与一组正确组合 LUT 中查找到的假定气溶胶反射率进行对比. 该对比将采用一项最佳光谱形状匹配技术以最小系统误差选择适当的气溶胶模式 (Kaufman *et al.*, 1998; Costa *et al.*, 1999; Torricella *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2007). 最佳光谱形状匹配算法表示如下:

$$x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\alpha_{er}^i(\lambda_i) - \alpha_{er}^j(\lambda_i)}{\alpha_{er}^j(\lambda_i)} \right)^2 \quad (3)$$

式中, 误差项  $x^2$  描述为 MODIS 测量的气溶胶反射率与气溶胶模式模拟得到的反射率之间的残差.  $\alpha_{er}^i(\lambda_i)$  是 MODIS 测量的气溶胶反射率,  $\alpha_{er}^j(\lambda_i)$  是气溶胶模式模拟得到的反射率,  $n$  是通道数量 = 3 (分别为 470 550 660 nm).  $x^2$  的最小残差经由每个像素点上 6 种气溶胶种类的选择所得. 因此, 最合适气溶胶种类的选择和相应的 AOT 值也都源于每个像素点.

### 3 结果 (Results)

#### 3.1 表观反射率验证

最小反射率图像分季节获取用于估计表观反射率. 通过对比 MOD09图像来确认 MRT 图像. 由于 MOD09的分辨率为 1km, 而 MRT的分辨率为 500m, 所以 MRT 图像需要重采样至 1km. 季节平均 MOD09图像和 MRT图像的直观对比结果如图 4所示. 从图 4可以看出, 秋季有一些破碎的云层覆盖在 MOD09图像上, 因此, 珠三角的西北区域(图 4a)常能观测到较高的表观反射率, 而较长波长通道(550和 660nm)的 MRT图像和 MOD09图像则显现出高度的相似性(图 5). 相关分析结果显示, 秋季和冬季观测结果表现出显著的相关性 ( $r > 0.9$ ,  $p < 0.0001$ ), 而春季的观测结果表现出不显著的相关性 ( $r > 0.8$ ,  $p < 0.0001$ ). 研究发现, MOD09和 MRT

的表观反射率之间的差异在 550和 660nm 波长时小于 0.01, 而这种差异在 470nm 波长时较为明显 (0.02~0.03). 这些在 MRT中高估的表观反射率可能会导致 AOT值产生 0.2~0.3的差异. 这样的估计大致假定 MOD09图像是真实的地表反射率, 但事实上 MOD09图像也存在误差 (Vermote *et al.*, 2006). 因此, 由 MRT表观反射率引起的 AOT值的不确定性可能会在 0~0.2范围内, 这种波动在较短波长(470nm)中比较明显, 在较长波长中(550和 660nm)则较轻微. 本文同时利用实地表观反射率测量与 MRT结果比较, 通过 51个测量点(图 6)与 MRT图像进行比较. 结果显示, 两者之间的相差平均在 2%以内, 这体现了 MRT技术在 AOT反演的可行性. 由于 MRT技术提供的分辨率为 500m, 高于 MOD09的 1km 分辨率, 故能更好的监测气溶胶及了解其在城市分布情况.

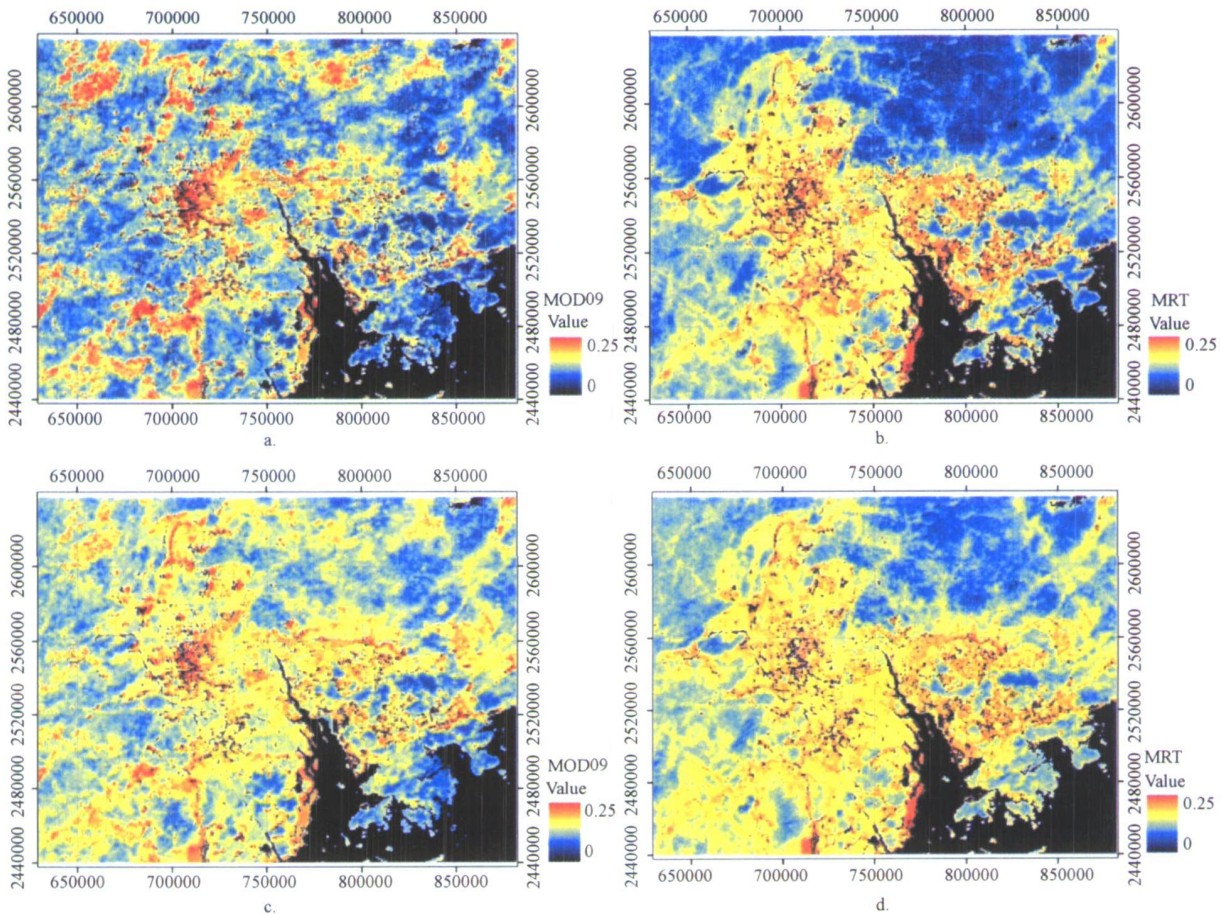


图 4 秋季地表反射率图像 ( a 470nm 波长下的 MOD09, b. 470nm 波长下的 MRT, c 550nm 波长下的 MOD09, d 550nm 波长下的 MRT)  
 Fig 4 Surface reflectance maps in fall season ( in UTM grid coordinate system; a MOD09 at 470nm, b. MRT at 470nm, c. MOD09 at 550nm, d. MRT at 550nm)

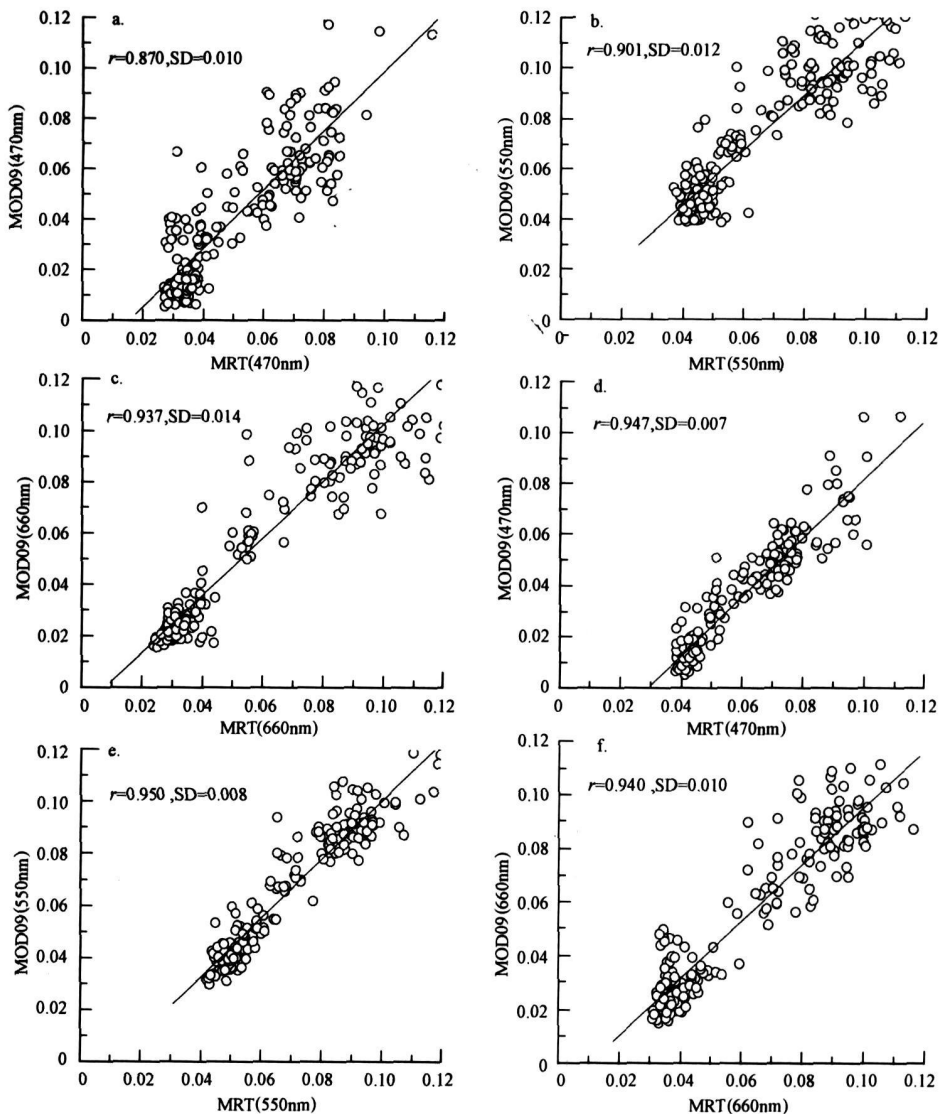


图 5 地表反射率散布图 (MRT 与 MOD09 的比较) (a 470nm 春季; b 550nm 春季; c 660nm 春季; d 470nm 秋季; e 550nm 秋季; f 660nm 秋季)

Fig 5 Scatter plots between MRT and MOD09 surface reflectance (a 470nm in spring b 550nm in spring c 660nm in spring d 470nm in autumn e 550nm in autumn; f 660nm in autumn)

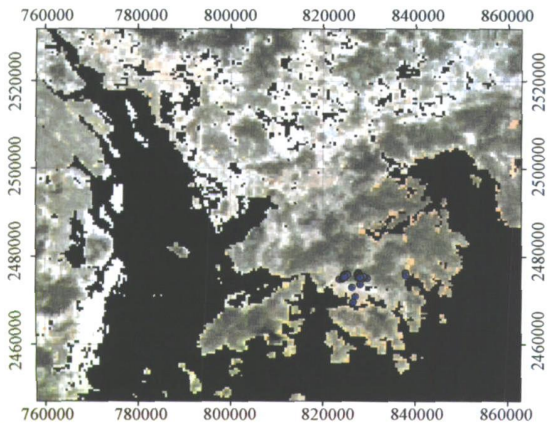


图 6 实地地表观反射率分布图

Fig 6 Distribution of fifty-one in-situ measurements

### 3.2 AERONET 测量值验证

由于粗糙的分辨率和宽阔的地域覆盖, MODIS 图像只能用于整个区域范围内大气污染状况的描绘. 而气溶胶反演在更高分辨率 (500m) 上有明显的优势. 为评估该方法的性能, 用 AERONET 2007 年的测量值来检验 MODIS 500m 反演的 AOT (图 7a), 同时, MOD04 collection 4 和 5 AOT 数据将与 AERONET 数据进行对比 (图 7b). 如图 7 所示, MODIS 500m AOT 数据和 AERONET 数据显示出很好的一致性, 其相关系数为 0.962, 相伴概率值  $p$  小于 0.0001, 这一数据高于 MOD04 collection 5 ( $r=0.913, p < 0.0001$ ) 和 MODIS collection 4 ( $r=0.877,$

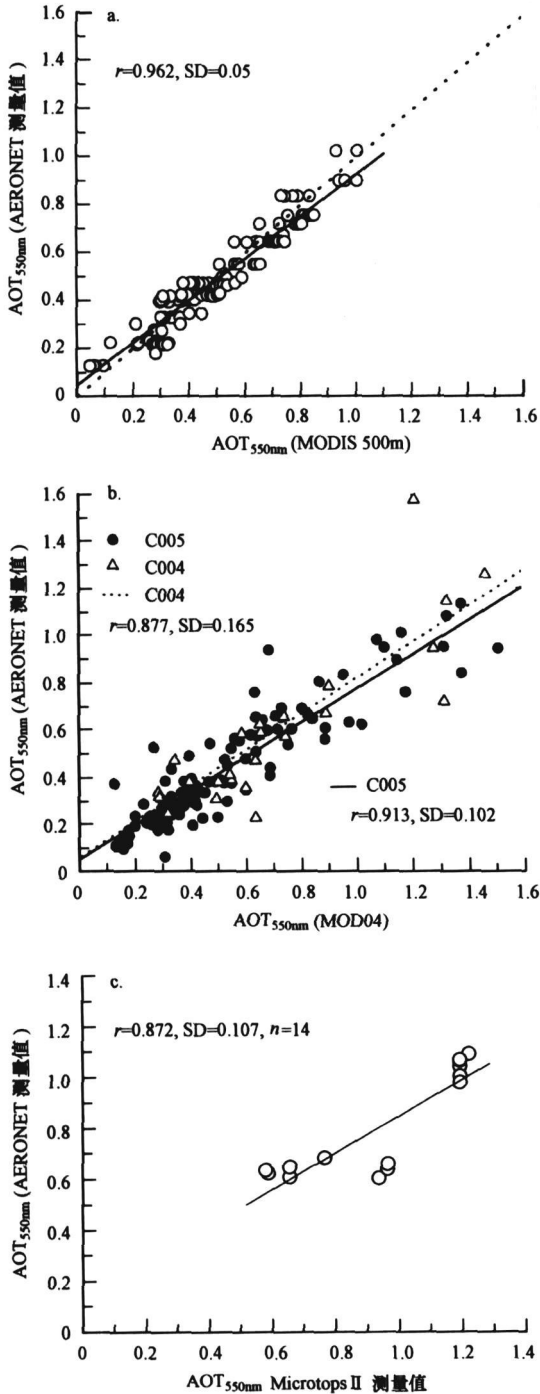


图7 AOT 散布图与相关系数 (a MODIS 500m AOT 和 AERONET 测量值之间; b MOD04 collection 4 和 5 AOT 和 AERONET 测量值之间; c MODIS 500m AOT 和 Microtops II 测量值之间)

Fig. 7 Scatter plots of AOT and correlation coefficients (a between MODIS 500m AOT with AERONET measurements; b between MOD04 collection 4 and 5 AOT with AERONET measurements; c between MODIS 500m AOT with Microtops II measurements)

$p < 0.0001$ ) 与 AERONET 所得到的系数. 另外, MODIS 500m 图像 (图 7a) 中线性拟合方程的斜率接近 1, 比图 7b 的方程表现出色. 尽管 MODIS 500m AOT 和 AERONET 数据显示出很强的相互关系, 但还是趋向于低估 AOT 值 (0~0.05). 本文结果发现, AOT 值的不确定性远低于由 MRT 表观反射率引起的 AOT 值的不确定性 (0~0.2). 此外, 本文的方法能准确地反映出城区和植被密集区域的 AOT 值, 这有助于改进像香港这样的复杂地形区域的 AOT 反演.

### 3.3 Microtops II 测量及数据验证

本研究同时利用 Microtops II 太阳光度计在不同地表上对 AOT 进行量度, 透过 14 点的测量数据 (分别在 2007 年 11 月 11 日、28 日和 12 月 14 日) 与 MODIS 500m AOT 数据进行比较, 发现其相关系数为 0.872 (图 7c), 相伴概率值  $p$  少于 0.0001. 分别设置 14 点的采样位置在不同地表上, 如城市、树林和草地等. 这个结果虽然比 AERONET 的结果稍微逊色, 但其相关系数显示 MODIS 500m AOT 反演方法适合香港的复杂地形.

图 8a 显示的是 2007 年 10 月 20 日的 RGB 颜色合成图, 图 8b 是 MODIS MOD04 collection 5 算法得到的 550nm 波长下的 AOT, 图 8c 显示的是用 MODIS 500m 数据反演的香港和珠三角区域的 AOT 分布图, 分辨率为 500m. 本研究利用归一化植被指数 NDVI 区分出乡间及城区范围, 发现乡间的 AOT 值介于 0~0.6 的范围内, 而城区的 AOT 值相对较高, 在 0~1.6 范围之内 (图 8c). 研究中发现城区的 AOT 值因人为污染的原因而较高, 而乡间的 AOT 值相对较小. 香港北部尤其是靠近深圳边界的地方受到来自珠三角区域工业的跨境污染, 观察到这里的 AOT 值为 1.0. 如图 8c 所示, 广州区域观测到严重的空气污染, 这是由工厂和发电站排放废气引起的, 而且秋天风速低 ( $\leq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 污染物质常会滞留在珠三角区域. 相反, MODIS collection 5 算法的结果 (图 8b) 就显得较为粗糙 (分辨率 10km), 所以对绘制城区的气溶胶分布效果不太理想.

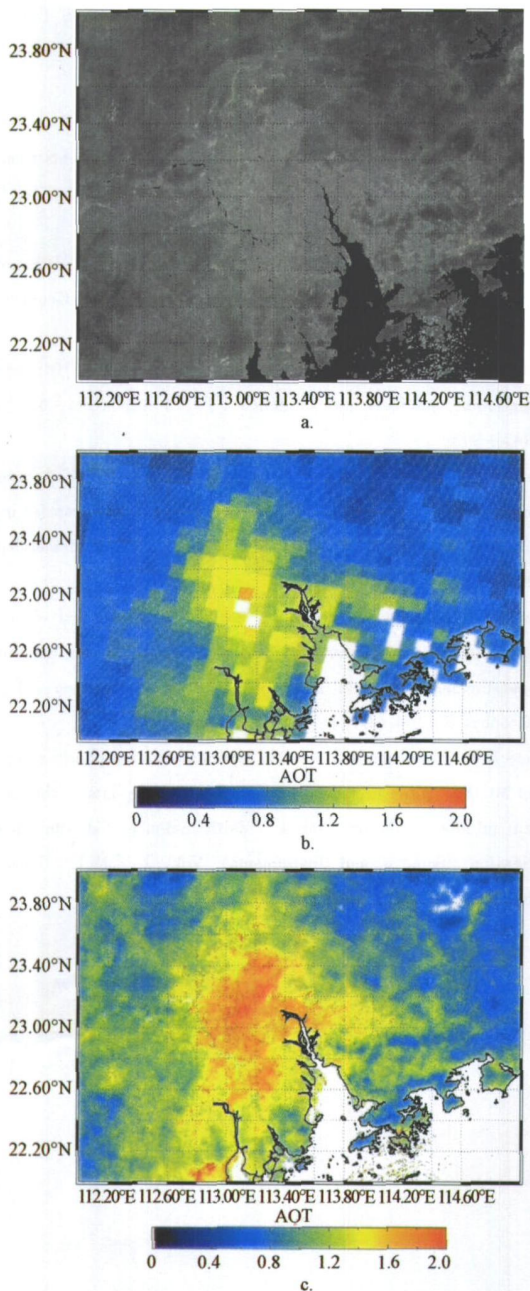


图 8 MRT 地表反射率图与 AOT 反演图 (a 2007 年 10 月 20 日的 RGB 颜色合成图; b MODIS MOD04 collection 5 算法得到的 550nm 波长下的 AOT; c 该研究获得的 500m 分辨率下香港和珠三角的 AOT)

Fig 8 MRT surface image and derived AOT images (a Color composite RGB image on 20<sup>th</sup> October, 2007; b. AOT at 550nm derived from MODIS MOD04 collection 5 algorithm; c. from this study with 500m over Hong Kong and the Pearl River Delta (PRD) region)

#### 4 结论 (Conclusions)

##### 1) 新的 MODIS 500m 数据的气溶胶反演算法可

结合改良的 MRT 来获取表观反射率图像, 其全面的 LUT 可兼顾到辐射转移模型中各种气溶胶模式、太阳卫星观测组合及相对湿度情况的因素。

2) MODIS 500m AOT 能较细致详尽地估计城区和植被密集区域的气溶胶情况. MRT 地表反射率的图像和 MODIS 地表反射系数的产品 (MOD09) 有很好的契合度, 两者的相关系数高达 0.9, 这说明 MRT 图像可有效地估计表观反射率。

3) 基于地面的 AERONET 测量结果, MODIS 500m 获得的 AOT 显示出很好的精确性 ( $r = 0.962$ ). 同时, 对不同地表上 Microtops II 量度的 AOT 也有很好的精确性 ( $r = 0.872$ ). 鉴于 MODIS 500m AOT 图像更高的精度和空间分辨率, 可用于研究跨境瞬态的气溶胶和地方人为产生的气溶胶分布。

责任作者简介: 黄文声 (1980—), 男, 博士, 博士后, 主要研究方向为空气污染和遥感应应用, 在国内外重要学术期刊上发表论文 23 篇, 其中被 SCI 收录的论文 15 篇。

#### 参考文献 (References):

- Bucholtz A. 1995. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere [J]. *Applied Optics*, 34: 2765—2773
- Chu A, Kaufman Y J, Ichoku C. 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land [J]. *Geophys Res Lett*, 29 (12): 1—4
- Costa M J, Cervino M, Cattani E, et al. 1999. Aerosol optical thickness and classification: Use of METEOSAT, GOME and modeled data [C]. *EOS-SPE International Symposium on Remote Sensing*, Russel: 268—279
- Hem an J R, Celarier E A. 1997. Earth surface reflectivity climatology at 340–380 nm from TOMS data [J]. *J Geophys Res*, 102: 28003—28011
- Hess M, Koepke P, Schult I. 1998. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 831—844
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I. 1998. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sens Environ*, 66 (1): 1—16
- Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. 2004. Aerosol properties over bright reflecting source regions [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 42 (3): 557—569
- Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. 2006. Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 44 (11): 3180—3195
- Kalnay E, Kanamitsu M., Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77 (3): 437—470



- Kaufman Y J, Tanr D. 1998 Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Collection 5 [R]. MOD04/MYD04. US NASA. 1-87 MOD04 product ATBD report
- Koelmeyer R B A, Haan J F, Stammes P. 2003 A database of spectral surface reflectivity in the range 335 - 772 nm derived from 5.5 years of GOME observations [J]. *J Geophys R*, 108: 28003-28011
- Lee K H, Kin Y J, Hoyningen-Huene W V, *et al*. 2006 Influence of land surface effects on MODIS aerosol retrieval using the BAER method over Korea [J]. *Intern J Remote Sens* 27 (14): 2813-2830
- Lee K H, Kin Y J, Hoyningen-Huene W, *et al*. 2004 Spatio-temporal variability of atmospheric aerosol from MODIS data over Northeast Asia in 2004 [J]. *Atmos Environ* 41 (19): 3959-3973
- Levy R C, Remer L A, Martins J V, *et al*. 2004 Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over ocean and land during CLAMS [J]. *J Atmos Sci* 62 (4): 974-992
- Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al*. 2007. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance [J]. *J Geophys R*, 112, D13211 doi 10.1029/2007JD007811
- Li C C, Lau A K H, Mao J T, *et al*. 2005a Retrieval validation and application of the 1-km aerosol optical depth from MODIS measurements over Hong Kong [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 43 (11): 2650-2658
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 2005 利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度 [J]. *大气科学*, 29 (3): 335-342
- Li C C, Mao J T, Lau A K H, *et al*. 2005b. Remote sensing of high spatial Resolution Aerosol Optical Depth with MODIS Data over Hong Kong [J]. *Chin J Atmos Sci* 29 (3): 335-342 (in Chinese)
- Li Z, Niu F, Lee K H, *et al*. 2007. Validation and understanding of MODIS aerosol products using ground-based measurements from the handheld sunphotometer network in China [J]. *J Geophys R*, 112, D22S07
- Mi W, Li Z Q, Xia X G, *et al*. 2007. Evaluation of the MODIS aerosol products at two AERONET stations in China [J]. *J Geophys R*, 112, D22S08
- Remer L A, Kaufman J Y, Tanr D, *et al*. 2005 The MODIS aerosol algorithm, products and validation [J]. *J Atmos Sci* 62 (4): 947-973
- Richiazzi P, Yang S R, Gautier C, *et al*. 1998 SBDARE: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (10): 2101-2114
- Torricella F, Cattani E, Cervino M, *et al*. 1999 Retrieval of aerosol properties over the ocean using global ozone monitoring experiment measurements Method and applications to test cases [J]. *J Geophys R*, 104 (D10): 12085-12098
- Vermote E F, El Saleous N Z. 2006 Operational atmospheric correction of MODIS visible to middle infrared land surface data in the case of an infinite lambertian target *Earth Science Satellite Remote Sensing Science and Instruments Vol 1* [M]. Germany: Springer, 123-153