

利用 MODIS 资料遥感香港地区 高分辨率气溶胶光学厚度

李成才^{1, 2} 毛节泰¹ 刘启汉²

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京大学暴雨与旱涝灾害教育部重点实验室, 北京 100871

2 香港科技大学海岸与大气研究中心, 香港九龙

摘 要 在美国国家航空和宇航局(NASA)利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感大气气溶胶业务算法的基础上, 提出了一个 1 km 高分辨率气溶胶光学厚度反演方法, 并应用于香港地区的反演。与地面太阳光度计的长期对比相对偏差大约为 20% 以内, 显示这一方法在香港地区的试用具有较高的精度。将该产品应用于空气污染个例, 并与香港地区 14 个站的地面污染物 PM₁₀(直径在 10 μm 以下的气溶胶颗粒物)质量浓度的变化进行了比较, 结果显示气溶胶光学厚度产品可以用来描绘城市尺度的气溶胶污染分布, 提供了更好地研究大气环境污染的新信息。

关键词 MODIS 气溶胶光学厚度 高分辨率 大气污染

文章编号 1006-9895(2005)03-0335-08

中图分类号 P421

文献标识码 A

Remote Sensing of High Spatial Resolution Aerosol Optical Depth with MODIS Data over Hong Kong

LI Cheng-Cai^{1, 2}, MAO Jie-Tai¹, and Alexis Kai-Hon LAU²

1 *Department of Atmospheric Science, School of Physics, Ministry of Education Key Laboratory of Severe Storm and Flood Disasters, Peking University, Beijing 100871*

2 *Center for Coastal and Atmospheric Research, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong*

Abstract Based on the operational arithmetic of remote sensing aerosol optical depth (AOD) with the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) published by National Aeronautics and Space Administration (NASA) of the United States, an AOD retrieval method with 1 km resolution MODIS data is developed, and it is used for obtaining the AOD over Hong Kong. Comparing these products with long-term sunphotometer observations it is found that the relative error of the products is about 20%, which indicates that this method applied in Hong Kong has quite enough precision to capture the urban aerosol distribution. Then an air pollution case is presented, and the high-resolution AOD distributions and absolute values are compared with the 10 km resolution level 2 products from NASA and mass concentration of PM₁₀ (particulate matter with the diameter less than 10 μm) observed at 14 stations in Hong Kong. The results show that the satellite products can be used for describing the urban-scale aerosol distribution and can provide lots of new information on better understanding atmospheric environment pollution.

Key words MODIS, aerosol optical depth (AOD), high spatial resolution, air pollution

收稿日期 2003-09-10, 2004-06-09 收修定稿

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目 G1999045700 和国家自然科学基金委员会与香港研究资助局联合科研资助 NSFC/RGC-HKUST 36

作者简介 李成才, 男, 1969 年出生, 博士学位, 讲师, 现为香港科技大学访问学者, 主要从事大气辐射与遥感、大气环境方面的研究。

E-mail: ccli@pku.edu.cn

1 引言

大气气溶胶因其气候效应和环境效应引起科学家们的广泛关注。它以直接辐射强迫和间接辐射强迫两种主要方式影响着气候系统的变化。近年,随着经济的发展在许多发展中国家的城市地区大都面临非常严峻的大气污染问题。大气污染物主要包括空气中可吸入气溶胶颗粒物以及二氧化硫、氮氧化物、臭氧等有害气体。气溶胶颗粒因为对可见光的消光(散射和吸收)作用可致地面能见度的下降,给城市景观和市民生活造成直接的影响。直径在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下的可吸入气溶胶颗粒物(PM₁₀)可对人体健康造成直接的危害。在地面建立观测站对污染物进行连续观测可以直接得到反映污染物的浓度时间变化的较为准确的信息,但是由于观测仪器、设施昂贵,这种方法只能在有限的站点进行,难以给出污染物来源和变化趋势的宏观分布状况。利用卫星遥感可以弥补这些不足。利用 MODIS 资料反演气溶胶产品是近年来国内外快速发展的一项卫星遥感技术^[1~3]。NASA 发布的气溶胶产品具有 10 km 星下点分辨率,对于全球气候研究和区域尺度的气溶胶污染物输送有重要应用价值^[4]。在复杂地形情况下,气溶胶空间变化大,更高分辨率产品成为研究区域大气污染的迫切需要。本文在香港地区利用地面太阳光度计和卫星遥感相结合的方法,确定了气溶胶类型,采用美国国家航空和宇航局(NASA)的“暗背景”方法^[5]确定了地表反射率,最后反演了气溶胶光学厚度的高分辨率(星下点 1 km)分布。

2 地基和卫星遥感相结合确定气溶胶类型的方法

城市上空的气溶胶光学厚度同时反映了大气污染的污浊程度,一般说来,气溶胶质量浓度在垂直方向呈指数分布,垂直方向总积分质量可与地面浓度成线性关系。气溶胶光学厚度与垂直方向总积分质量大致也成线性关系^[2],高分辨率的卫星遥感通过反演气溶胶光学厚度提供了监测城市大气污染的可能性。卫星遥感气溶胶存在分辨率与信噪比的矛盾。卫星遥感的气溶胶产品,如光学厚度的水平分布和变化趋势,在污染物宏观分析方面一般比绝对精度较高的单点测量对研究城市大气污染更有意义,所以在“信噪比”降低不是太多的情况下,我们

希望获取更多的空间分辨信息(如 1 km 分辨率)。在香港地区我们试验了这种方法。由于香港地形变化复杂:在 40~50 km 的范围内分布着高山、低谷、海岸、港口、商业和居民区,在这种地形下,获取更丰富的空间分布信息,可能比“空间平均”提高“信噪比”来提高气溶胶产品的反演精度但降低了空间分辨率更有意义。

在华南地区,由于四季地表植被比较密集,可以比较好地符合暗背景的条件。气溶胶类型在 MODIS 气溶胶反演过程中比较重要。NASA 的算法中将整个中国东部地区作为不是沙尘情况就是城市工业型气溶胶的处理显然比较粗,考虑到所关注的范围为一个城市或一个区域,我们以太阳光度计长期的地面观测和卫星遥感相结合来确定气溶胶季节变化的类型。另一方面,气溶胶光学厚度反演过程中源于地表反照率和气溶胶模型带来的误差难以直接估计,卫星遥感也需要同时有地面太阳光度计观测进行对比和校准。

在确定气溶胶类型时,利用了太阳光度计的地面真值、卫星观测的表观反射率数值和地表反射率以及辐射传输方程的计算。假定太阳光度计观测的 550 nm 的光学厚度为 τ ,卫星观测的表观反射率在通道 1 和通道 3 分别为 A_1 、 A_3 。随机假定气溶胶的 3 种体积比浓度:沙尘性(Dust-like) x_1 ,水溶性(Water-soluble) x_2 和海洋性(Oceanic) x_3 。 x_1 、 x_2 和 x_3 均大于或等于 0.0,并且总和小于或等于 1.0。煤烟性(Soot)的比例就为 $1.0 - (x_1 + x_2 + x_3)$ 。现在的问题是结合辐射传输方程和两个通道卫星观测的结果相当于得到两个方程,但是有 3 个未知数。所以,我们通过假定一段时间内气溶胶类型不变,以地面和卫星的多组观测来求解,具体的求解过程采用 Monte Carlo 方法^[6]。

先以 6S 模式分别计算 MODIS 通道 1 和通道 3 的卫星反射率 A'_1 、 A'_3 ,当满足以下条件时,

$$(A'_1 - A_1)^2 + (A'_3 - A_3)^2 < \epsilon, \quad (1)$$

记录下 x_1 、 x_2 和 x_3 相应的数值。利用观测期内的 m 次观测,每次观测得到 n 次满足条件的结果,当总试验次数 $n \times m$ 达到一定量时, x_1 、 x_2 和 x_3 的统计结果就代表了本段时间内比较正确的气溶胶类型。实际计算过程中发现适当的 ϵ 数值与太阳光度计的观测精度有关,当观测数据质量较差时,不得不放大 ϵ 的数值以取得一定量的结果。本文的 ϵ 取

表 1 标准辐射大气(SRA)气溶胶模型中 4 种基本气溶胶模型^[7]
Table 1 The aerosol models of the 4 basic components in the standard radiative atmosphere^[7]

	沙尘性 Dust-like	水溶性 Water-soluble	海洋性 Oceanic	煤烟性 Soot
中值半径 Median radius $r_M/\mu\text{m}$	0.500	0.0050	0.30	0.0118
标准差 Standard deviation σ	2.990	2.990	2.51	2.00
550 nm 复折射指数 Complex refractive index at 550 nm	$1.53+8.00\times10^{-3}\text{i}$	$1.53+6.00\times10^{-3}\text{i}$	$1.38+4.26\times10^{-9}\text{i}$	$1.753+0.44\text{i}$

值为 0.0002, 大致对应辐射传输模式计算与卫星观测大约 5% 的相对偏差。

反演气溶胶类型的随机试验过程分两步进行, 第一步, 我们使用了在香港地区的地面太阳光度计和卫星资料, 采用了完全随机的方法进行长时间大量的计算, 结果发现两个结论:

- (1) 水溶性气溶胶比例应该较大(60%~90% 以上), 才能得到符合条件的结果;
- (2) 煤烟性气溶胶比例应该较小(<2%), 才能得到符合条件的结果。

公式(2)是我们在辐射传输模式 6S^[10]中使用的多模态对数正态分布的表达式:

$$\frac{dN}{d\ln r} = \frac{N_0}{\ln\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(r/r_M)]^2}{2(\ln\sigma)^2}\right\}, \quad (2)$$

其中, N 为粒子数, r 为粒子半径, N_0 为粒子数总数。4 种气溶胶的中值半径 r_M 、标准差 σ 和复折射指数如表 1 所示, 从中可知水溶性气溶胶具有最小的中值半径, 当体积比浓度一定的情况下, 水溶性气溶胶具有最多的粒子数密度。

煤烟性(soot)气溶胶的折射率虚部是其他类型的 3~8 个量级, 具有最大的吸收性, 对入射辐射和地面反射回的辐射吸收作用大, 会使卫星接收到的表观反射率下降。我们反演的煤烟性气溶胶的比例与典型工业城市型气溶胶的基本组分相比截然不同, 倒是与大陆型气溶胶的 1% 的吸收性气溶胶成分更接近。

因此, 我们从初步随机试验的结果得出基本结论: 香港地区的气溶胶成分以细粒子水溶性成分为主, 吸收性成分所占比例较低, 与传统工业城市气溶胶中煤烟性(soot)比例较高不同。“水溶性成分为主”的结论与有关学者在香港地区进行的气溶胶地面观测相符^[8, 9]。具体化学组分的确定最后应该

由详细的地面观测结果来校准。

第二步, 在第一步反演气溶胶类型的基础上, 在随机试验的同时加入一些主观约束条件, 将煤烟性气溶胶的比例限制在 0.00~0.02, 将水溶性的比例限制为 0.50~1.00, 沙尘性气溶胶的比例限制为 0.00~0.40。在这样一个主观约束加随机算法的基础上, 利用 2001 年共 44 组地面观测和卫星遥感资料, 经过 88000 次辐射传输模式的计算, 得到 9331 组合乎要求的结果, 平均后基本组分和标准差如表 2 所示, 其中水溶性比例全年平均为 70%, 而煤烟性比例只有 0.5%。需要强调, 这样一个反演结果完全建立在光学观测和辐射传输模式的计算的基础上, 与实际的化学成分比例可能有较大的偏差。

表 2 香港地区气溶胶类型反演结果
Table 2 The derived components of aerosol model for Hong Kong

	沙尘性 Dust-like	水溶性 Water-soluble	海洋性 Oceanic	煤烟性 Soot
组分比例 Volume component	0.13	0.70	0.15	0.005
标准差 Standard deviation	0.10	0.12	0.11	0.004

3 多维变量查算表的建立

利用前面得到的气溶胶类型和 6S 模式的计算, 建立了反演气溶胶光学厚度的查算表。各个变量取值如表 3 所列。

在前期的试验中, 大气水汽总量取 3.0 cm, 大气臭氧总量取 350 DU 固定值, 经过改进的算法将水汽、臭氧的吸收和散射对不同波长透过率的影响按照经验公式进行了订正。

表 3 利用 6S 辐射传输模式建立查算表所用参数变量

Table 3 The parameters used in setting up the LUTs with 6S radiative transfer model

变量 Variables	个数 Number	取值范围 Value range
通道 Channels	2	MODIS 通道 1(620~670 nm), 通道 3(459~479 nm) MODIS channel 1(620~670 nm), channel 3(459~479 nm)
太阳天顶角 Solar zenith angles	10	0, 12, 24, 36, 48, 54, 60, 66, 72, 88
卫星天顶角 Satellite zenith angles	16	0, 4, 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46, 52, 58, 64, 70, 76, 82, 88
卫星观测方位角与太阳方位角之差 The azimuth difference of satellites and the sun	31	0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 90, 96, 102, 108, 114, 120, 126, 132, 138, 144, 150, 156, 162, 168, 174, 180
地面反射率 Surface reflectance	5	通道(Channel) 1: 0.000, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100 通道(Channel) 3: 0.000, 0.0125, 0.025, 0.0375, 0.050
光学厚度 AOD	5	0.00, 0.05, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0

4 高分辨率(1 km)气溶胶光学厚度的长期检验

图 1 为 2001~2003 年在香港科技大学具备太阳光度计观测记录的所有日期 MODIS 卫星反演与太阳光度计观测的对比。地面太阳光度计观测与卫星遥感结果两者的线性关系为 $Y=0.93X-0.05$ ，共 101 个数据点，相关系数 R 为 0.78，均方根偏差 RMSE 为 0.12。图 1 中两条虚线代表 $\Delta\tau=\pm0.05\pm0.2\tau$ 的误差范围，即 NASA 发布的 10 km 气溶胶光学厚度的误差范围，可以看到 90% 以上的结果在这个范围内。通过比较可见，卫星遥感的气溶胶光学厚度的高分辨率分布，虽然在数值上由于地表反射率、气溶胶类型的确定等种种原因还存在一定误差，但是这一产品基本达到 NASA 的 Level 2 产品的精度^[7]，可以用来分析城市大气污染的分布和变化趋势，这也正是获取高分辨率气溶胶产品的主要目的。

5 在香港地区的应用个例

5.1 反演结果

图 2(见彩图)为利用 2001 年 9 月 15~17 日 MODIS Level 1B 资料反演的 550 nm 气溶胶光学厚度。在周围海域由于珠江口水域泥沙含量不确定没有反演海上气溶胶分布。陆地地区的白色区域对应有云或地表反射率较高而没有获得数据点的区域。气溶胶类型按照表 2 的结果。地面反射率直接按照 NASA 的业务算法中给出的多光谱地表反射率关系^[4]，暗背景选择阈值为 $2.1\mu\text{m}$ 近红

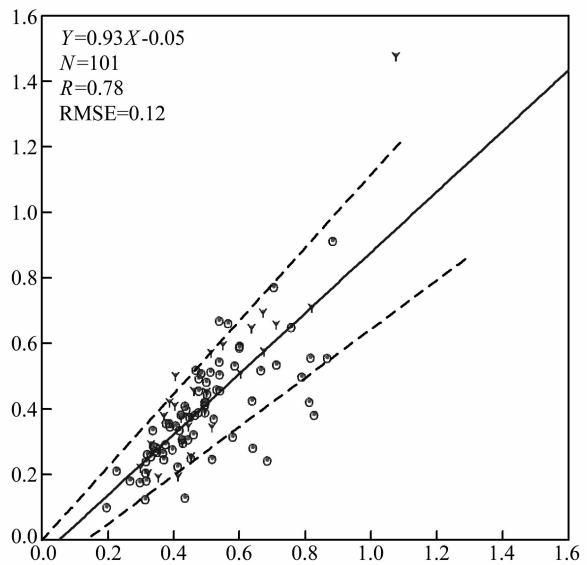


图 1 JP22001~2003 年 MODIS 卫星反演(1 km)与太阳光度计观测在香港科技大学的对比。横坐标: MODIS 资料反演得到的 1 km 分辨率气溶胶光学厚度; 纵坐标: 太阳光度计观测的 550 nm 气溶胶光学厚度。 R 为相关系数, RMSE 为均方根偏差。图中带 O 的数据来自卫星 Terra, 带 Y 的数据来自卫星 Aqua; 实线代表卫星与地面观测的拟合线, 虚线代表误差偏离拟合线 20% 的范围

Fig. 1 The comparison between MODIS derived 1 km AOD and ground-based sunphotometer observed AOD at the HKUST (X-axis: AOD in 1 km resolution on 550 nm derived from MODIS, Y-axis: AOD on 550 nm observed from sunphotometer, the correlation coefficient R is equal to 0.78, and the root mean square error(RMSE) between the two data sets is only about 0.12). The data points marked with an ‘O’ stand for the satellite data are from Terra, and with a ‘Y’ are from Aqua. The solid line corresponds to the regression line between the surface observation and satellite retrieval, and the dashed lines correspond to the range with a relative error of 20% to the solid line

外通道反射率小于 0.15。从 9 月 15 日反演结果(图 2a)可以清楚地看到,在香港地区 40~50 km 的陆地范围内,气溶胶光学厚度变化范围从 0.3 到 1.2。大值区域包括与深圳西部常常连成一片的九龙半岛的西北部、维多利亚港两岸的尖沙嘴、西环、中环等繁华商业区。九龙东部显著低于西部。山区低于海岸、山谷。9 月 16 日的结果(图 2b),气溶胶光学厚度骤然减小,范围为 0.3~0.5 左右。较大值区域分布在海岸、商业区、居民区。与一般情地面污染物浓度监测的经验相符。到了 9 月 17 日(图 2c)又恢复了上升的趋势。

5.2 与 MODIS Level 2 产品和太阳光度计观测的比较

图 3(见彩图)是与图 2 相对应的,来源于 NASA 业务反演的气溶胶 Level 2 的 10 km 星下点分辨率产品。整体上反映的气溶胶分布与我们利用 1 km 的反演结果是相一致的。由于图 3 包含整个珠江三角洲区域,气溶胶的区域传输特征就体现得更加清楚。

9 月 15 日(图 3a),可以看到整个广东东部比较“清洁”,实际上此时台风百合(NARI)的中心位于台湾东部海面,台风天气的大尺度系统使得广东东部、香港地区主要刮北风。九龙半岛西部、大屿山高值气溶胶光学厚度是受到西北方向广州区域大值中心的影响。9 月 16 日(图 3b),台风强度加强,广东东部的清洁空气侵入香港地区,导致当日气溶胶光学厚度迅速下降。9 月 17 日(图 3c),台风已经在台湾岛登陆强度减弱,西北方向的气团对香港地区影响加强。九龙地区、香港岛气溶胶光学厚度分布直接受到北部深圳方向的影响,而大屿山一带相对于 15 日来说,受到的影响要小得多。总的来看 1 km 分辨率和 Level 2 反映的趋势是一致的,绝对数值也比较接近。1 km 分辨率产品对于描绘区域输送较小的天气下的局地排放污染物分布有其优势,而分析区域性输送,Level 2 产品配合相应的气象资料已经可以看到比较清晰的过程。

这三天我们在香港科技大学(22.337°N, 114.269°E)进行的太阳光度计观测在 550 nm 的结果分别为 0.43, 0.41 和 0.50, 距离该地最近的 1 km 分辨率卫星遥感结果为 0.60, 0.33 和 0.44, 差值为 0.17, 0.08 和 0.06。第一天差值较大,我们发现原因是第一天太阳光度计观测的时间滞后 1 小

时 20 分钟,对比后边的图 4,可以发现从 9 月 15 日这一天上午开始,地面 PM10 气溶胶质量浓度急剧减小,可能因为污染物较为急剧的时间变化造成不完全同步的卫星遥感和地面太阳光度计观测的差异较大。第 2 天、第 3 天的偏差在卫星遥感的精度范围内(20%)。

5.3 与地面污染物浓度的比较

香港地区拥有 14 个空气质量地面监测站。图 4 为香港塔门(TapMun)在这段时间地面监测到的 PM10 质量浓度的变化,点线上的点代表小时平均的 PM10 质量浓度数据点。塔门位于香港东北的一个小岛,远离香港市区,在这个站的监测结果基本体现香港地区的背景浓度的变化。卫星遥感的时间在图 4 中以三条虚竖线表示,而图中三条实竖线对应地面太阳光度计观测的时间。从图 4 可见,9 月 15~16 日之间地面浓度有一个显著的下降过程,与卫星遥感的气溶胶光学厚度反映的变化趋势是一致的。

图 5 中的数字为香港地区地面环境监测站在前面对应的 3 次卫星遥感时间监测到的 PM10 质量浓度的小时平均数据。小时平均的地面观测结果与卫星遥感的气溶胶光学厚度分布是一致的。9 月 15

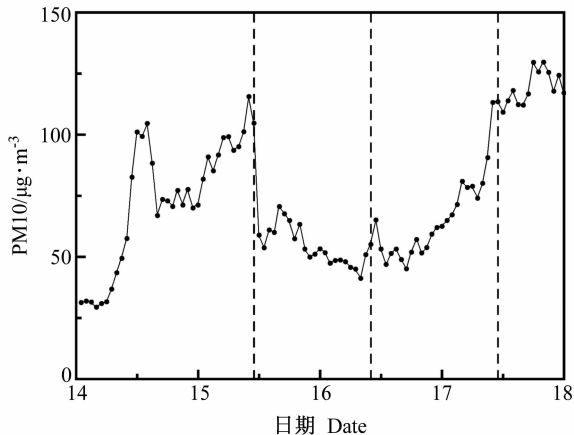


图 4 2001 年 9 月 14 日 00 时~18 日 00 时(北京时间)香港塔门(TapMun)PM10 质量浓度地面监测结果。点实线:PM10 质量浓度的小时变化;竖实线:太阳光度计观测时间;竖虚线:卫星观测时间

Fig. 4 The time series of the PM10 mass concentration at TapMun of Hong Kong from 0000BT(Beijing Time) 14 September to 0000BT 18 September 2001. The solid line marked with dots corresponds to the variation of the hourly PM10 mass concentration, and the vertical solid lines mark the sunphotometer observation time, and the vertical dashed lines mark the satellite overpassing time

日气溶胶光学厚度的特点是大屿山和九龙西部较大;在地面 PM10 数值上,最大值 $184 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和次大值 $123 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 都与之相对应。9 月 16 日卫星遥感和地面观测 PM10 数值在整个香港地区都较小。9 月 17 日,气溶胶光学厚度在九龙半岛的中

部和港岛贯穿香港地区南北方向除了几处山峰外都较高,地面观测 PM10 浓度给出同样的分布。

因此,可以认为卫星遥感的气溶胶光学厚度的高分辨率分布,虽然在数值上由于地表反射率、气溶胶类型的确定等种种原因还存在一定误差,但是这一产品可以用来分析城市大气污染的分布和变化趋势,这也正是我们试图获取高分辨率气溶胶产品的目的所在。

通过比较可见,卫星遥感将弥补由于地面观测站分布较为稀疏的不足,可以提供气溶胶污染物较大范围的空间覆盖和变化趋势以及有关气溶胶源和输送的信息。

图 6 为香港地区地面环境监测站监测的 PM10 质量浓度与对应的高分辨率 (1 km) 卫星遥感 550 nm 波段的气溶胶光学厚度 AOD 的相关性分析,图中包括香港地区的全部可用站点 (2001 年 9 月 15~17 日 3 天共 38 组数据,包含图 5 中没有列出的站点),卫星数据取距离地面监测站 3 km 范围内的气溶胶光学厚度的平均。小时平均的地面观测结果与卫星遥感的气溶胶光学厚度分布相关系数为 0.77。气溶胶消光系数垂直分布的变化以及湿度对

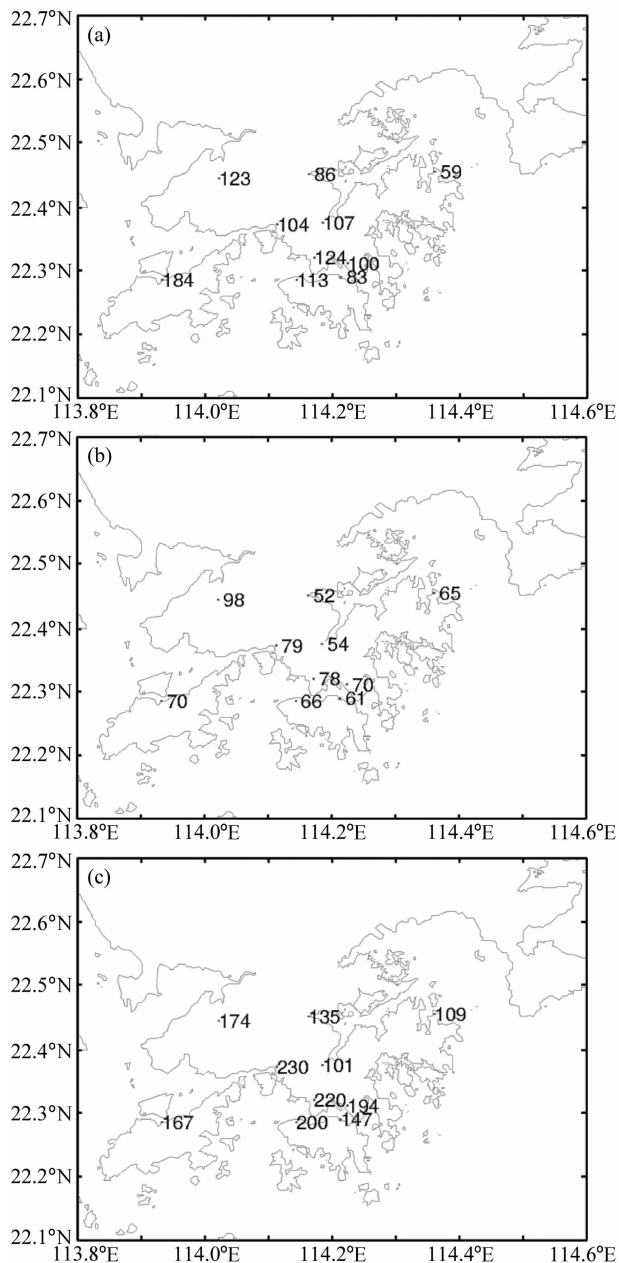


图 5 2001 年 9 月香港地区地面监测站的 PM10 质量浓度(用数字表示,单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$): (a) 15 日 0300 UTC; (b) 16 日 0200 UTC; (c) 17 日 0300 UTC

Fig. 5 The distribution of PM10 mass concentration from the surface air quality monitoring stations in Hong Kong (units: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) at (a) 0300 UTC 15 September 2001, (b) 0200 UTC 16 September 2001 and (c) 0300 UTC 17 September 2001

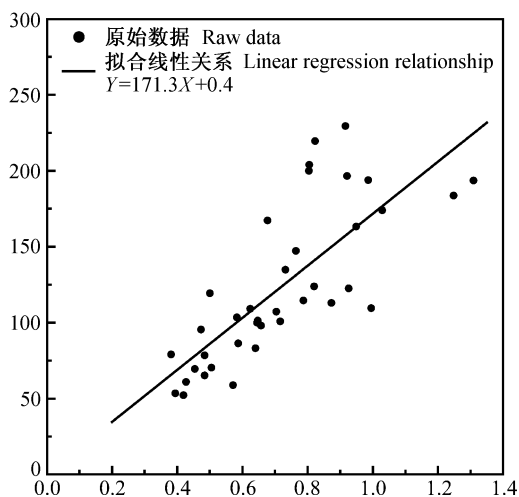


图 6 2001 年 9 月 15~17 日香港地区地面监测站 PM10 质量浓度与高分辨率卫星遥感的 550 nm 气溶胶光学厚度 AOD 的相关。横坐标: 1 km 分辨率的 MODIS 气溶胶光学厚度; 纵坐标: PM10 质量浓度, 单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Fig. 6 The regression relationship between MODIS-derived 1 km AOD and the surface PM10 concentration in the three days from 15 September 2001 to 17 September 2001 at all the air quality monitoring stations in Hong Kong. X-axis: AOD derived from MODIS with 1 km resolution, Y-axis: PM10 mass concentration in $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

消光系数的影响,都将造成二者相关系数的降低。目前,取得的大于 70% 以上的相关系数建立在未经垂直订正和湿度订正的原始数据上,表明该卫星遥感产品在反映地面污染物浓度的分布上具有很显著的潜力。

6 讨论

本文利用 EOS Terra 卫星的 MODIS Level 1B 资料和地面太阳光度计地基观测的结果相结合,确定了香港地区气溶胶类型的年平均结果和标准差,反演了气溶胶光学厚度在香港地区复杂地形下的高分辨率(1 km)分布。采用地面校准确定气溶胶类型的方法解决了这一在 MODIS 气溶胶光学厚度反演过程中可引起最大误差的难题。卫星遥感的光学厚度结合地形、工业交通和居民区分布因素,可以看出卫星反演的结果用来定性分析城市污染物分布是可信的。气溶胶高分辨率卫星遥感产品提供了城市大气污染监测的有效手段。从反演结果上看,高分辨率(1 km)的结果主要体现了气溶胶分布的空间变化,对于香港地区这样一个具有复杂地形的区域有较高的应用价值。

气溶胶类型的确定实际上主要是确定气溶胶粒子的光学特性、有效半径等一些信息,而气溶胶粒子的光学特性和有效半径,实际上对相对湿度等天气因素非常敏感,即使气溶胶化学组分不变,相对湿度的变化,也将导致气溶胶光学特性的改变。所以,年平均的气溶胶类型是一个较粗的处理方法。精确反演气溶胶光学厚度,气溶胶类型的确定应该建立在更多地面观测的基础上,进而导出气溶胶类型的季节变化。另外一个方法是在每日卫星遥感实时资料的基础上,利用更多的通道寻找新的突破。如果结合 MISR 等探测器的多角度观测信息,气溶胶类型的确定可迎刃而解。另外,目前采用的卫星和地面太阳光度计相结合的气溶胶类型反演方法受到地面反射率估算误差的影响,在其他高反射率背景地区的应用,理论上比在密集植被的地区误差要

大,减小误差的办法是进一步完善高反射率背景地面反射率的估算方法。

致谢 本文使用了 NASA GSFC 的 MODIS 数据以及香港环境保护署、澳门地球物理及气象局的污染物地面监测数据,在此致谢!

参考文献

- [1] King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1992, **30**: 2~27
- [2] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L, et al. Remote sensing of tropospheric aerosols from EOS-MODIS over land. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 17051~17067
- [3] King M D, Kaufman Y J, Tannre D, et al. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present and future. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, **80**: 2229~2259
- [4] 李成才, 毛节奏, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染. *大气科学*, 2003, **27**: 869~879
Li Chengcai, Mao Jietai, Alexis Kai-Hon Lau, et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**: 203~216
- [5] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, et al. Global monitoring of air pollution over land from MODIS. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D21), 4661, doi:10.1029/2002JD003179
- [6] 张军华. 地面和卫星遥感中国地区气溶胶光学特性. 北京大学物理学院大气科学系博士学位论文, 2000
Zhang Junhua. Remote sensing of aerosol optical characteristics over China from ground and satellite. Ph. D. dissertation (in Chinese), Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, 2000
- [7] Vermote E, Tanre D, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**: 675~686
- [8] Lee Y L, Sequeira R. Water-soluble aerosol and visibility degradation in Hong Kong during autumn and early winter, 1998. *Environmental Pollution*, 2002, **116**: 225~233
- [9] Lai L Y, Sequeira R. Visibility degradation across Hong Kong: its components and their relative contributions. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 5861~5872

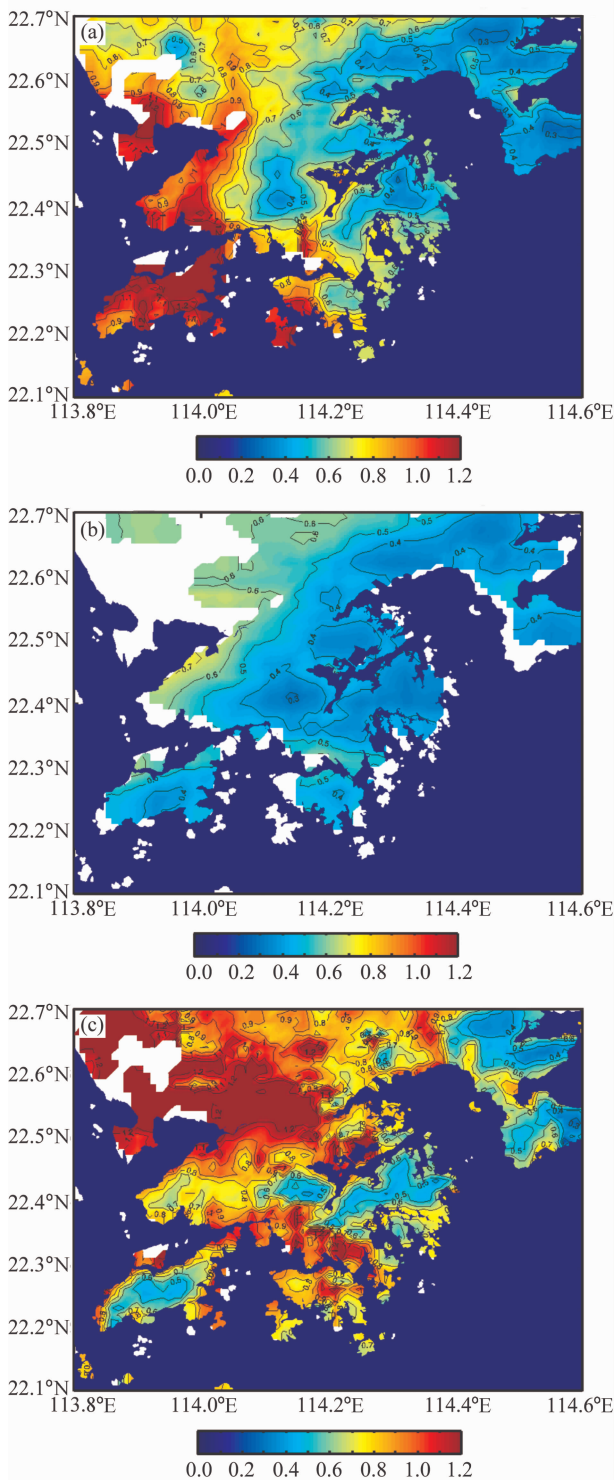


图 2 2001 年 9 月 MODIS 资料反演的 550 nm 气溶胶光学厚度分布 (色彩和等值线对应气溶胶光学厚度数值): (a) 15 日 0325 UTC; (b) 16 日 0230 UTC; (c) 17 日 0310 UTC

Fig. 2 The distribution of AOD at 550nm derived from MODIS 1km data (the superimposed contours correspond to the AOD values) at (a) 0325 UTC 15 September 2001, (b) 0230 UTC 16 September 2001 and (c) 0310 UTC 17 September 2001

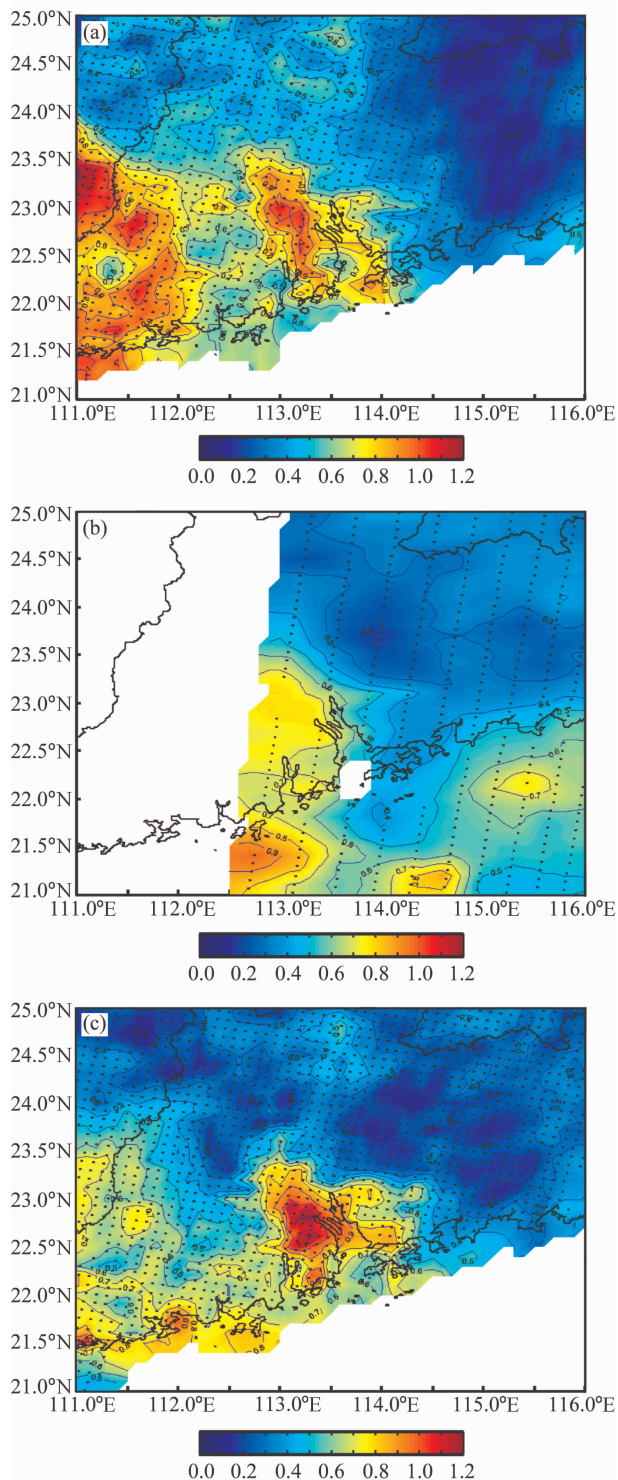


图 3 2001 年 9 月 MODIS Level 2 气溶胶光学厚度产品: (a) 15 日 0325 UTC; (b) 16 日 0230 UTC; (c) 17 日 0310 UTC

Fig. 3 The distribution of AOD at 550nm from MODIS Level 2 data derived by NASA at (a) 0325 UTC 15 September 2001, (b) 0230 UTC 16 September 2001 and (c) 0310 UTC 17 September 2001