

# 用 MODIS 反演北京城市地区地表反照率 精度以及算法改进

王开存 王建凯 王普才 陈洪滨

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029

**摘 要** MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 地表反照率的精度在乡村地区已经得到了检验, 但是至今没有在城市地区的有关研究。地表反照率的精度在很大程度上取决于大气订正的精度, 作者利用 2002 年以来的北京 AERONET (国际气溶胶检测网络) 站点 Cimel 气溶胶观测资料对反射率进行大气订正, 通过对比来评价 MODIS 地表反照率算法中大气订正的精度。结果发现, MODIS 大气订正在蓝光波段具有明显的过度订正现象, MODIS 大气订正后地表反射率平均偏低 0.03。MODIS 地表反照率在冬季有约 75% 的缺测, 这是因为冬季严重的空气污染使得 MODIS 云检测得到晴空观测较少。MODIS 使用三参数双向反射率函数 (BRDF) 要求 16 天以内至少有 3 次以上的晴空观测 (MODIS 算法中要求 7 次)。通过分析 MODIS 反演得到的三参数, 发现虽然它们的绝对值具有明显的季节变化, 但是它们的比值是十分稳定的, 这样使 BRDF 函数降低到只需要一个参数, 有效降低了对晴空观测次数的要求, 这一思想可以应用到热带等晴空日数较少的地区。

**关键词** 地表反照率 城市地区 气溶胶 双向反射率函数 北京

**文章编号** 1006-9895 (2008) 01-0067-08

**中图分类号** P404

**文献标识码** A

## The Accuracy of MODIS Albedo over Beijing Urban Area and Its Algorithm Improvement

WANG Kai-Cun, WANG Jian-Kai, WANG Pu-Cai, and CHEN Hong-Bin

*Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** Although many studies on rural areas have been published, there is no validation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) albedo over urban areas available. The accuracy of albedo retrievals depends on the atmospheric correction. This paper evaluates the accuracy of MODIS atmospheric correction by comparing with the atmospheric correction using Beijing Aerosol Robotic Network (AERONET) Cimel aerosol and water vapor measurements. The results show that the reflectance in MODIS blue band is over-corrected and MODIS surface blue reflectance is 0.03 less than that corrected by AERONET Cimel aerosol information. The heavy aerosol loading makes less clear sky in winter, which results in 75% albedo retrievals missed in winter. MODIS surface albedo retrieval uses three-parameter semiempirical Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF), which means that at least three clear-day measurements during the 16-day period are needed to perform the retrieval. It is found that the ratios of the three parameters are stable throughout a year though their absolute values demonstrate distinc-

**收稿日期** 2006-07-17, 2006-11-27 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40520120071、40675017, 中国科学院海外杰出青年学者基金项目 2003-2-9, 遥感科学国家重点实验室开放基金 SK050012

**作者简介** 王开存, 男, 1977 年出生, 助理研究员, 博士, 研究方向: 陆面特征遥感以及地气相互作用的估计等。

E-mail: wangkaicun@mail.iap.ac.cn

tively seasonal variation. Based on this result, the authors propose to use one parameter BRDF to retrieve albedo when the number of clear-sky measurement days is less than 3 during the 16-day period. This method can be used in the area where clear sky measurements are small.

**Key words** albedo, urban area, aerosol, BRDF, Beijing

## 1 引言

城市以建筑物和道路等代替了原来的土地使用状况,引起了局地气候环境的重要变化<sup>[1, 2]</sup>。Pielke Sr.<sup>[3]</sup>认为这是驱动全球气候变化的一个重要因子,但一直没有得到足够的重视。正确理解城市 and 城市化对气候变化的影响需要多学科相结合的模式模拟。但是现今的全球气候系统模拟受以下两个方面的制约:(1)在全球或区域气候模式中对城市环境的描述很不够,(2)由于城市的复杂结构,许多必要的城市特征信息很难获得,比如地表反照率、地表温度等等。也就是说现在的气候模式中大部分没有包含城市地表分类或描述太过简单。卫星遥感观测为获取城市特征提供了手段和条件,最近的研究也表明卫星观测资料能够有效提高气候模式中城市的模拟<sup>[4~6]</sup>,地表反照率是其中一个重要的参量。

利用卫星大气顶辐射观测,可以反演得到地表反照率。太阳短波辐射在大气中的传输受气溶胶、水汽、臭氧和 CO<sub>2</sub> 等气体以及大气分子的散射吸收的影响,因此,首先需要对卫星观测大气顶反射率进行大气订正。而地表反射太阳辐射的能力与太阳位置和观测角度有关,即双向反射率函数(BRDF)。

MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 利用其反演得到的大气产品,比如气溶胶、水汽和臭氧等资料,进行大气订正<sup>[7]</sup>,其中气溶胶的影响对可见光波段是主要的<sup>[8]</sup>。验证实验表明 MODIS 反演气溶胶特性在城市上空具有较大的不确定性<sup>[9, 10]</sup>,比如 MODIS 反演气溶胶光学厚度与地基光度计的观测的误差为 0.21 (均方根误差)。因此,本文的第一个目的是研究利用 MODIS 反演的气溶胶信息进行大气订正会带来多大的地表反射率的误差。安装在中国科学院大气物理研究所 AERONET (国际气溶胶检测网络 AErosol RObotic NETwork) Cimel 提供了长期连续高质量的气溶胶和水气信息,利用 6S 大气辐射传输模式<sup>[11]</sup>

进行大气订正,然后与 MODIS 的大气订正进行对比,研究其不确定性。

MODIS 陆地反照率算法假定地表反照率在 16 天以内不变,利用多次卫星观测(不同角度)拟合 BRDF 的参数<sup>[12]</sup>,对 BRDF 进行积分即可得到反照率。MODIS 选用三参数半经验 BRDF<sup>[12]</sup>,因此要求在 16 天的时间内至少要有 3 次晴空。这种要求并不是很高,但研究发现北京城区冬季地表反照率缺测很多<sup>[13]</sup>。当有云或空气污染重的情况下,MODIS 不进行反演,因为只有晴空时卫星观测才能很好地反应地表状况。冬季北京地区空气污染比较严重,在这种情况下,16 天以内要有 3 天足够晴空的要求就很难满足。因此,本文的第二个目的将试图降低反照率算法对晴空次数的要求。

## 2 MODIS 地表反照率反演算法简介

现行的 MODIS 地表反照率算法首先是在云检测的基础上,对晴空大气顶地表反射率进行大气订正。订正必需的参数如气溶胶、水汽以及臭氧等参数利用 MODIS 其它通道观测信息反演得到,所用的大气辐射传输模式为 6S<sup>[11]</sup>。大气订正后的地表反射率来拟合三参数半经验 BRDF:

$$R(\theta, \vartheta, \phi, \Delta) = f_{\text{iso}}(\Delta) + f_{\text{vol}}(\Delta)K_{\text{vol}}(\theta, \vartheta, \phi) + f_{\text{geo}}(\Delta)K_{\text{geo}}(\theta, \vartheta, \phi), \quad (1)$$

其中,  $f_{\text{iso}}(\Delta)$ 、 $f_{\text{vol}}(\Delta)$ 、 $f_{\text{geo}}(\Delta)$  为需要拟合的三个参数,  $\Delta$  表示波长,  $K_{\text{vol}}$  和  $K_{\text{geo}}$  是与太阳天顶角 ( $\theta$ )、卫星天顶角 ( $\vartheta$ ) 以及太阳和卫星方位角之差 ( $\phi$ ) 有关的核函数<sup>[12]</sup>。

MODIS 采用 Liang<sup>[14]</sup>发展的算法来进行窄波段反照率向宽波段的转换,得到三个宽波段反照率 [包括短波反照率  $\alpha_{\text{short}}$  (0.7~3.0  $\mu\text{m}$ )、可见光反照率  $\alpha_{\text{vis}}$  (0.4~0.7  $\mu\text{m}$ ) 和近红外反照率  $\alpha_{\text{nir}}$  (0.7~3.0  $\mu\text{m}$ ) ]:

$$\alpha_{\text{short}} = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 - 0.0015, \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{vis}} = 0.331\alpha_1 + 0.424\alpha_3 + 0.246\alpha_4, \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{nir}} = 0.039\alpha_1 + 0.504\alpha_2 - 0.071\alpha_3 + 0.105\alpha_4 +$$

$$0.252\alpha_5 + 0.069\alpha_6 + 0.101\alpha_7, \quad (4)$$

其中, 等式右边的下标代表 MODIS 前 7 个通道。

### 3 资料和研究区域

本文使用 2000~2005 年 MODIS 1 km 分辨率 BRDF 参数产品, 以及 MODIS 大气订正地表反射率产品, 这些产品都可以下载得到<sup>[15]</sup>。北京 AERONET 站的 Cimel 安装在中国科学院大气物理研究所楼顶。该站自 2002 年 1 月开始正式运行, 资料可以从国际 AERONET 站点下载得到<sup>[16]</sup>。

为了研究城区的情况, 我们把研究区域取为 (39.84°N~39.95°N, 116.33°E~116.44°E), 这一区域为北京市中心区, 取这一区域的平均值代表北京城区。

### 4 结果

图 1 给出利用 Cimel 观测到的气溶胶信息 (光学厚度、单次散射反照率等) 进行大气订正后得到的北京城区 (39.84°N~39.95°N, 116.33°E~116.44°E) (下同) 地表反射率与未订正的大气顶反射率的对比 (观测资料为北京城区 2002~2004 年晴空资料)。可以看到大气订正后, 可见光波段的三个通道反射率有明显减小, 这种减小在波长最短的蓝光波段 (0.459~0.479 μm) 最为明显。我们以往的研究<sup>[8]</sup>表明, 在可见光波段, 大气的主要影响为气溶胶的散射和吸收、大气分子散射以及臭氧的吸收。大气分子和臭氧的影响比较容易计算, 因此对可见光波段的大气订正主要的困难在于有效地订正气溶胶的影响。在红外波段, 近红外通道 2 (0.841~0.876 μm) 反射率在大气订正前后几乎没有变化, 波长大于 1 μm 的红外通道 5、6、7 大气订正后反射率有小量的增加, 这主要是水汽吸收的作用<sup>[8]</sup>。

MODIS 应用暗背景法反演得到的气溶胶信息进行大气订正, 在反演气溶胶时要求地表在 10 km 内有足够的浓密植被或者水体, 根据中红外波段对气溶胶几乎是透明, 而气溶胶的影响主要集中在可见光波段, 利用经验的可见光反射率与红外反射率的经验关系<sup>[17]</sup>, 比如  $\rho_{0.47} = 0.25\rho_{2.13}$  和  $\rho_{0.66} = 0.5\rho_{2.13}$ , 来计算可见光波段反射率, 然后与大气顶观测到可见光波段的反射率进行比较就可以得到气溶胶的影响的信息, 在对气溶胶类型假定的基础

上, 可以得到气溶胶光学厚度等信息。这种对暗背景 (浓密植被或水体) 的要求在城市区域经常会很难得到充分的满足, 并且有研究表明上述经验公式在中国地区, 特别是城市地区不能很好地适用<sup>[18]</sup>。因此, 实际的验证实验表明 MODIS 反演的北京上空气溶胶光学厚度具有较大的误差<sup>[9]</sup>。

图 2 比较了利用 Cimel 实测的气溶胶资料进行大气订正后的北京城区地表反射率与 MODIS 算法大气订正后的地表反射率 (观测资料为北京城区 2002~2004 年晴空资料)。可以看出, MODIS 订正后的蓝光反射率要比利用 Cimel 实际观测资料订正的反射率平均低 0.03, 二者的差值随反射率的增加而增加。这说明对于蓝光通道, MODIS 大气订正存在明显的过度订正。图 2 还显示这种过度的问题随波长增加而减小。过度订正对于通道 3 (0.55 μm) 有明显的降低, 对红光 (0.65 μm) 两种订正方法得到的地表反射率相差很小。利用线性拟合来拟合两种大气订正方法得到的蓝光波段地表反射率:

$$\rho_{\text{CIMEL}} = 1.486\rho_{\text{MODIS}} + 0.00461. \quad (5)$$

图 3 显示了北京城区 2000~2005 年短波反照率 (0.4~3.0 μm)、可见光反照率 (0.4~0.7 μm)、近红外反照率 (0.7~3.0 μm) 的时间序列。为了便于比较, 在计算地表反照率时假定太阳天顶角为 45°。图 3 显示反照率具有明显的季节变化, 夏季较大, 秋季较小。表 1 表示了季节平均北京城区地表反照率的季节平均值, 可以看出北京城区地表反照率要比常用大气中尺度模式 MM5 中假定的这三个通道的城区反照率均为 0.18 要小很多<sup>[19]</sup>。可以看出地表反照率在冬季缺测比较严重 (约 75% 的缺测)。

表 1 经过订正后 [公式 (5)] 的北京城区 MODIS 短波、可见光以及近红外反照率季节平均

Table 1 The seasonal averages of the atmospheric short-wave, visible-light and near-infrared reflectances corrected using Eq. (5) over Beijing urban areas

季节	短波反照率	可见光反照率	近红外反照率
春	0.14	0.11	0.18
夏	0.14	0.10	0.18
秋	0.12	0.09	0.16
冬	/	/	/

注: 冬季由于缺测点太多没有统计。

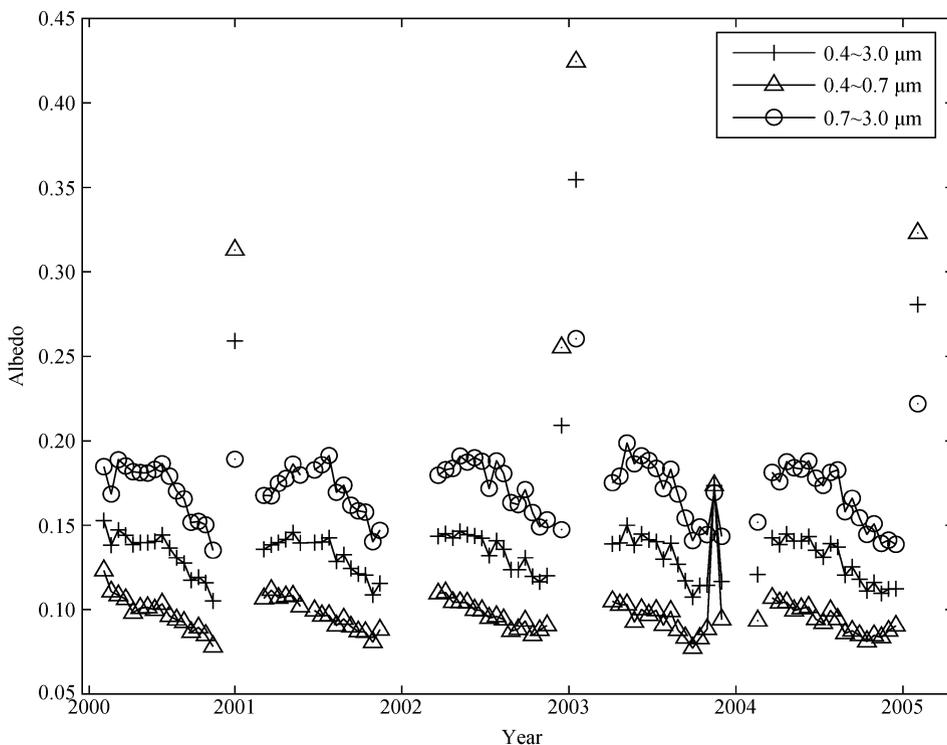


图 3 经过订正的[公式 (5)]北京城区 MODIS 短波、可见光以及近红外反照率

Fig. 3 The time series of the MODIS short-wave (0.4-3.0 μm), visible-light (0.4-0.7 μm), and near-infrared (0.7-3.0 μm) surface reflectances calibrated using Eq. (5) over Beijing urban areas

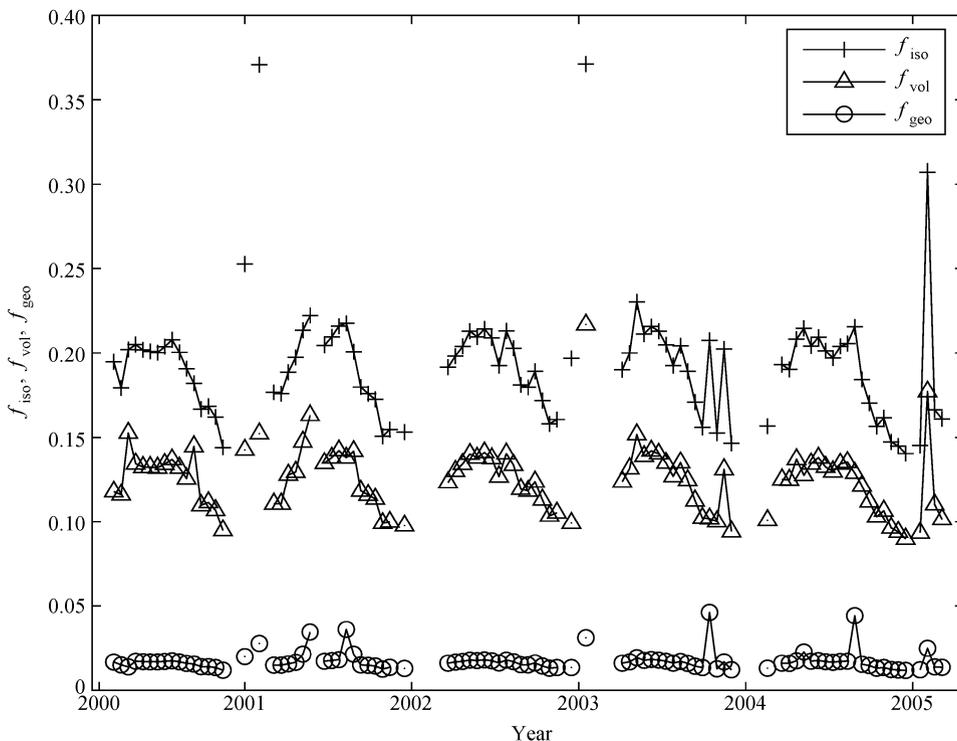


图 4 北京城区 MODIS 反演的半经验双向反射率的三个参数。资料为近红外波段 (通道 2, 0.841~0.876 μm)

Fig. 4 The time series of the three semi-empirical parameters in Eq. (1) over Beijing urban areas. The data are for near infrared band (MODIS band 2, 0.841-0.876 μm)

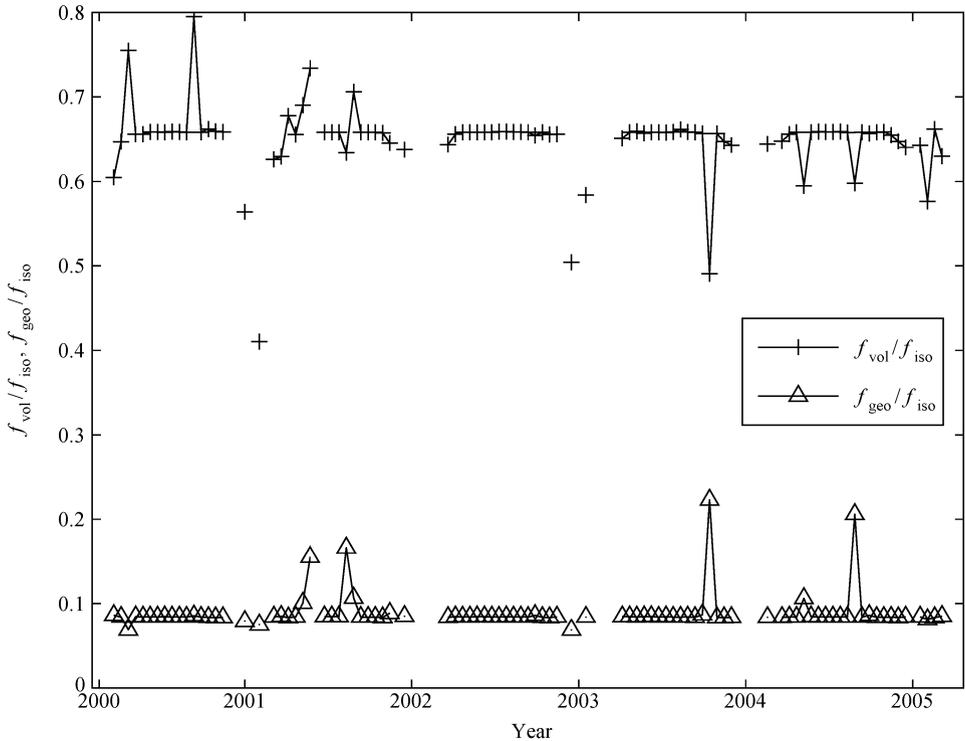


图5 同图4, 但为三个参数之比

Fig. 5 The same as Fig. 4, but for the ratios of the three semi-empirical parameters

图4以通道2为例(其他通道相似),显示了北京城区MODIS半经验BRDF函数的三个参数随时间的变化,它们具有比较明显的季节变化,可是,我们注意到三个参数具有相似的季节变化特征。图5显示 $f_{\text{vol}}(\Delta)/f_{\text{iso}}(\Delta)$ 和 $f_{\text{geo}}(\Delta)/f_{\text{iso}}(\Delta)$ 是一个比较稳定的值。这主要是因为城市结构是决定城市BRDF的形状的主要因子,而城市结构季节变化是很小。图5显示,这两个比值会有一些突然变化,这主要对应于城市有积雪存在,反照率有突然增加的情况。这就为我们简化MODIS BRDF函数提供了可能,把公式(1)改成如下形式:

$$R(\theta, \vartheta, \phi, \Delta) = f_{\text{iso}}(\Delta) \left[ 1 + \frac{f_{\text{vol}}(\Delta)}{f_{\text{iso}}(\Delta)} K_{\text{vol}}(\theta, \vartheta, \phi) + \frac{f_{\text{geo}}(\Delta)}{f_{\text{iso}}(\Delta)} K_{\text{geo}}(\theta, \vartheta, \phi) \right]. \quad (6)$$

这样,公式(6)右边中括号内的项就是一个只与太阳和卫星观测角度有关的量,它表示了城市BRDF的形状。这样,公式(6)只有一个参数 $f_{\text{iso}}(\Delta)$ 需要反演。因此,在16天周期内,最少只需要一次观测就可以得到地表反照率,这大大降低了对晴空观测次数的要求。我们对MODIS数据分析显示16天内一次晴空观测的要求是容易满足的。

## 5 结论

因为城市结构的复杂性,很难观测到大气气候模式模拟所必需的参数(如地表反照率等)。卫星遥感反演为获得城市地表反照率提供了条件。而遥感反演资料的精度是反演资料定量应用的前提,虽然已经有一些关于地表反照率的检验研究发表,我们也对比了青藏高原西部改则地区的地表反照率观测和MODIS反演值<sup>[20]</sup>,发现MODIS地表反照率在乡村地区具有较高的精度。目前,仍然没有有关城市地区的MODIS地表反照率精度的研究发表。

大气订正和双向反射函数的拟合是MODIS地表反照率反演的两个重要步骤。城市地区因为人类活动排放出大量的气溶胶,气溶胶是影响太阳短波辐射的重要因素<sup>[21, 22]</sup>。气溶胶是影响卫星观测可见光反射率的主要因子,MODIS暗背景法反演得到的气溶胶信息进行大气订正,验证报告表明MODIS反演气溶胶在城市区域具有较大的误差<sup>[9]</sup>。因此,本文使用位于北京城区的AERONET站点Cimel实测的气溶胶信息(位于北京市朝阳区中国

科学院大气物理研究所楼顶) 来做大气订正, 与 MODIS 大气订正结果相比较。结果发现, MODIS 蓝光波段有比较明显的过度订正现象, 即 MODIS 大气订正后的蓝光波段反射率要比 Cimel 资料订正后的地表反射率平均低 0.03, 可能的原因包括 MODIS 气溶胶反演参数设置不正确, 比如单次散射反照率。我们在北美地区的研究也表明, MODIS 蓝光通道存在明显的过度订正现象<sup>[23]</sup>。徐祥德等<sup>[10]</sup>建议使用变分同化的方法来使用 MODIS 反演气溶胶资料, 因此, 我们认为在对 MODIS 大气顶反射率进行大气订正时可以同化使用全球 AERONET 气溶胶观测资料来改进 MODIS 大气订正的精度。

MODIS 地表反照率在冬季有约 75% 的缺测, 这主要是因为冬季空气污染比较严重, MODIS 云检测方案把重气溶胶污染与晴空区分开来, 使得晴空日数减少。MODIS 使用三参数半经验双向反射率函数, 这样在 16 天周期内就需要至少 3 次晴空观测才能进行反演。通过分析 MODIS 反演得到的三个参数, 我们发现虽然这三个参数的绝对值具有明显的季节变化, 但是他们的比值却十分稳定。这样城市地区双向反射分布函数的形状就能够经验地确定, 其结果就是使原来的三个参数降低到一个, 降低了对晴空观测次数的要求。这是因为城市地区地表双向反射函数的形状主要决定于城市结构<sup>[24]</sup>, 而城市结构在短期内的变化是很小的。因此在 16 天平均周期内, 观测次数小于 3 次的情况下, 可以使用一个参数的函数来补全资料。Moody 等<sup>[25]</sup>指出, 补全 MODIS 反照率资料是十分必要的, 因为全球大约有 50% 的资料反照率的反演结果因为缺乏足够的观测而质量低或根本就无法反演。

### 参考文献 (References)

- [1] 周淑贞, 束炯. 城市气候学. 北京: 气象出版社, 1994. 618pp  
Zhou Shuzhen, Shu Jiong. *Urban Climatology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1994. 618pp
- [2] 徐祥德, 汤绪. 城市化环境气象学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 284  
Xu Xiangde, Tang Xu. *An Introduction to Environmental Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 284pp
- [3] Pielke R A Sr. Land use and climate change. *Science*, 2005, **310**: 1625~1626
- [4] 孙继松, 王华, 王令, 等. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用. *大气科学*, 2006, **30** (2): 221~234  
Sun Jisong, Wang Hua, Wang Ling, et al. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 221~234
- [5] 孙继松, 舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究. *大气科学*, 2007, **31** (2): 311~320  
Sun Jisong, Shu Wenjun. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (2): 311~320
- [6] Jin M, Shepherd J M. Inclusion of urban landscape in a climate model: How can satellite data help? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2005, **86** (5): 681~689
- [7] Vermote E F, El Saleous N Z, Justice C O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results. *Remote Sens. Environ.*, 2002, **83**: 97~111
- [8] 王开存, 陈长和, 郭妮. 用 NOAA/AVHRR 探测地表反射率和 NDVI 的订正及误差分析. *应用气象学报*, 2003, **14** (2): 165~175  
Wang Kaicun, Chen Changhe, Guo Ni. Corrections to NOAA/AVHRR reflectances and NDVI and their error analysis. *Chinese Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2003, **14** (2): 165~175
- [9] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征. *科学通报*, 2003, **48**: 2094~2100  
Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan, et al. Distribution and seasonal variation of the aerosol optical depth over the Eastern China from MODIS. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **48**: 2094~2100
- [10] 徐祥德, 周秀骥, 翁永辉, 等. 星载 MODIS 资料与地面光度计探测气溶胶变分场. *科学通报*, 2003, **48** (15): 1680~1685  
Xu Xiangde, Zhou Xiujie, Weng Yonghui, et al. Study on variational aerosol fields over Beijing and its adjoining areas derived from Terra-MODIS and ground sunphotometer observation. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (18): 2010~2017
- [11] Vermote E F, Tanré D, Deuzé 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
- [12] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, **38**: 977~998
- [13] 杨娟, 陈洪滨, 王开存, 等. 利用 MODIS 卫星资料分析北京地区地表反照率时空分布及变化特征. *遥感技术与应用*,

- 2006, **21** (5): 403~406
- Yang Juan, Chen Hongbin, Wang Kaicun, et al. Analysis of the surface albedo distribution and variation in Beijing region by using the MODIS data. *Remote Sensing Technology and Application* (in Chinese), 2006, **21** (5): 403~406
- [14] Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I Algorithms. *Remote Sens. Environ.*, 2001, **76**: 213~238
- [15] <http://redhook.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome/plain.html>
- [16] <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- [17] Remer L A, Kuafman Y J, Taneré D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **62**: 947~973
- [18] 宗雪梅. 中国陆地上空气溶胶光学厚度遥感方法及其应用. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2005. 113pp  
Zong Xuemei. Study on the remote sensing methods to estimate aerosol optical depth over China region and their applications. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 113pp
- [19] Dandou A, Tombrou M, Akylas E, et al. Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D10102, doi: 10.1029/2004JD005192
- [20] Wang Kaicun, Liu Jingmiao, Zhou Xiuji, et al. Validation of the MODIS global land surface albedo product using ground measurements in a semidesert region on the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D05107, doi: 10.1029/2003JD004229
- [21] Chen Changhe, Wang Haixiao, Huang Jianguo, et al. Radiative effects of urban aerosols, and their influence on mixed layer development. *Chinese Science Bulletin*, 1994, **39** (1): 56~61
- [22] 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征. 科学通报, 2000, **45** (5): 549~554  
Luo Yunfeng, Lü Daren, Li Weiliang, et al. Variation of the atmospheric aerosols optical depth over China region during recent 30 years. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45** (5): 549~554
- [23] Wang Kaicun, Liang Shunlin, Zheng Tao, et al. Estimation of photosynthetically active radiation and albedo from GOES: Algorithm improvement and evaluation. *Remote Sens. Environ.*, 2007, in press
- [24] 王建凯, 王开存, 王普才. 三维城市地表反射率计算模式. 大气科学, 2007 (已接受)  
Wang Jiankai, Wang Kaicun, Wang Pucai. A three dimensional model to calculate surface reflectance over urban area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007 (in press)
- [25] Moody E G, King M D, Platnick S, et al. Spatially complete global spectral surface albedos: Value-added datasets derived from Terra MODIS land products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2005, **43** (1): 144~158