

文章编号: 1007 4619(2006)04 0456 07

利用 TERRA 和 AQUA 共同反演陆地上空的气溶胶光学厚度

牛 峰, 李成才, 毛节泰

(北京大学 物理学院大气科学系, 北京 100871)

摘 要: 利用 TERRA 和 AQUA 共同反演气溶胶光学厚度和地表反射率特征, 对其原理及方法进行了详细的讨论。通过 Terra 和 Aqua 两颗卫星对同一地点的不同角度的观测, 结合多个光学通道的信息, 反演了北京地区光学厚度及地表反射率信息。反演的气溶胶光学厚度同地面观测的结果相比具有很好的一致性。同时, 对地表反射率及气溶胶波长指数等也进行了讨论和对比, 结果显示, 对北京地区, MODIS 1 通道地表反射率和 7 通道地表反射率的比在 0.66 左右, 3 通道和 7 通道的比在 0.28 左右。相比于 NASA 暗背景全球反演算法中 1、3 通道和 7 通道的比为 0.50 和 0.25 的处理方法, 反演得到的气溶胶光学厚度结果也较好。

关键词: TERRA; AQUA; 双视角; 气溶胶光学厚度 (AOD); 气溶胶波长指数

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

A Synergic Application of TERRA and AQUA on Retrieving Aerosol Optical Depth over Land

NIU Feng LI Cheng cai MAO Jie tai

(Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract MODIS instruments aboard on Terra and Aqua are used to synchronously retrieve aerosol optical depth (AOD) and surface reflectance properties and the main principles and methods to derive aerosol products from satellites are discussed in detail. The aerosol optical depth and surface reflectance over Beijing are obtained by applying the multi-channel measurements from Terra and Aqua in their different observing angles to the same surface site. The satellite retrieval results are well consistent with surface sun-photometer observations. The retrieved results of surface reflectance and aerosol Ångström exponent are discussed by comparing them with surface measurements and literature results. Our results show that in Beijing region the reflectance ratio is about 0.66 of MODIS channel 1 over channel 7 and about 0.28 of MODIS channel 3 to channel 1. Compared with the data used by dark dense vegetation background algorithm proposed by NASA for global retrieval i.e. 0.50 and 0.25 on the two channels, the final AOD results from our method are more consistent with the surface sun-photometer observations.

Key words TERRA; AQUA; bi-angle approach; aerosol optical depth (AOD); aerosol Ångström exponent

1 引 言

大气气溶胶在地球辐射平衡中扮演很重要的角

色。气溶胶不但散射和吸收太阳辐射 (气溶胶的直接辐射强迫), 而且还会影响云的形成及性质 (气溶胶的间接辐射强迫)。近年来, 人类活动产生的气溶胶越来越受到重视。然而至今对于气溶胶对气候

收稿日期: 2005-07-07; 修订日期: 2005-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90211001 40075002 40575001) 资助。

作者简介: 牛 峰 (1980—), 男, 2002 年毕业于北京大学物理学院大气科学系, 2002—2005 年在北京大学物理学院大气科学系攻读硕士学位, 2005 年秋季入美国马里兰大学气象系攻读博士学位。主要从事气溶胶卫星遥感工作。E-mail: fniu@hotmail.com.

影响的认识还具有很大的不确定性。大气气溶胶在对流层中较短的存活时间和多种多样的气溶胶源及空间分布,使得较精确的全球尺度的气溶胶数据的获得比较困难。只有卫星遥感才能获得空间和时间分辨率符合全球变化研究要求的气溶胶数据。然而,通过卫星来反演气溶胶性质并不是容易的,尤其对于较高的地表反射率上空,例如陆地。当地表反射率较高时,气溶胶散射的太阳辐射相对于地表反射就会很小,使得反演变得困难。Kaufman 等^[1]提出了暗背景下的气溶胶光学厚度(AOD)反演算法,Flowerdew 和 Haigh^[2]提出利用双视角的反演算法。唐家奎(Tang JK)等^[3]试验了利用 TERRA 和 AQUA 两颗卫星的资料反演气溶胶光学厚度的方法(SYNTAM),并取得了覆盖北京及周边地区的结果。本文在 Flowerdew 和 Haigh 提出的 K 因子近似基础上,利用 TERRA 和 AQUA 两颗卫星的数据,也实现了双角度反演气溶胶的光学厚度、地表反射率和气溶胶的波长指数,并着重研究了利用这种方法反演得到的气溶胶波长指数 α 和地表反射率的适用性。

2 TERRA 和 AQUA 卫星介绍

TERRA 和 AQUA 是美国国家宇航局于 1999 年发射的地球观测系统卫星 EOS AM (TERRA) 和 2002 年发射的地球观测系统卫星 EOS PM (AQUA)。其上都载有中等分辨率成像光谱仪 MODIS 它是一台多波段的辐射计,从可见光至热红外共有 36 个波段,分布在 0.4—14 μm 的电磁波谱范围内。MODIS 仪器的地面分辨率在不同的通道分别为 250m, 500m 和 1000m, 视幅宽度为 2330km。本文用于气溶胶反演的波段为 1—7 波段, 波长范围见表 1。对于北京地区, TERRA 和 AQUA 日间的过

表 1 MODIS 1—7 通道波长范围、信噪比及分辨率

Table 1 Bandwidths, Signal to noise ratio and spatial resolution of MODIS channel 1—7

通道	光谱范围 /nm	信噪比 $NE\Delta T$	分辨率 /m
1	620—670	128	250
2	841—876	201	250
3	459—479	243	500
4	545—565	228	500
5	1230—1250	74	500
6	1628—1652	275	500
7	2105—2135	110	500

境时间分别为北京时间 10:30 和 13:30 左右。

3 反演原理

3.1 地表反射率及 K 因子近似

对于特定的区域,地表反射率不仅和波长有关,而且和太阳光的入射方向和观测方向的几何结构有关。然而很多对地观测卫星的应用需要把地表假设为朗伯体来处理。Flowerdew 和 Haigh^[4]于 1995 年从理论上提出并验证了一种近似,即对多波段卫星,可以不再假定朗伯体的表面,而是假定在可见和近红外波段,波长对地表双向反射率比的影响是可以忽略的,即对于给定区域的两个方向上的地表反射率存在固定的关系:

$$K = \frac{r_1(\lambda)}{r_2(\lambda)} \quad (1)$$

式中, $r_1(\lambda)$, $r_2(\lambda)$ 为某二个方向反射率, K 为反射率之比,其值只随几何结构引起的地表反射率的变化而变化,不随波长而变。Veefkind 和 Leeuw^[5]利用此假设实现了使用 ATSR-2 (Along Track Scanning Radiometer 2) 数据反演气溶胶光学厚度双视角的算法。ATSR-2 具有两个角度的观测能力,分别是 $52^\circ-55^\circ$ 和 $0^\circ-22^\circ$ 范围,可以在 2min 内对同一区域进行两个角度的观测。TERRA 和 AQUA 虽然不是多角度对地观测卫星,但是由于轨道和过境时间不同,同样可以实现对某一区域从不同角度观测。观测时间间隔大约为 2—4 个小时,由于短时间内地表状况变化不大,因此也可以看作近实时的双角度观测,应用 K 因子近似,即:

$$K = \frac{TERRA_i}{AQUA_i} \quad (2)$$

式中, i 为通道数, K 为常数。

3.2 Ångström 指数和气溶胶模型

Ångström 指数反映了气溶胶类型的信息。根据 Ångström 的研究^[6],在可见和近红外波段,大气气溶胶光学厚度随波长的变化可以用下式表示:

$$\tau_{\text{aer}} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (3)$$

式中, β 为浑浊度系数,反映大气气溶胶粒子的浓度, α 为 Ångström 波长指数,反映了气溶胶粒子谱的分布特征,与大气气溶胶的平均半径有关, λ 为波长,以 μm 为单位。通常情况下 $0 < \alpha < 2$, α 越小说明气溶胶粒子尺度越大,反之, α 越大说明气溶胶粒子尺度越小。

在气溶胶反演中,选取不同的气溶胶类型也就决定了不同的 Ångström 指数。本文的算法中,如果选用固定的气溶胶类型,则 α 为固定值,也即假设 TERRA 和 AQUA 分别过境时,气溶胶类型没有变化。由于 TERRA 和 AQUA 的过境时间相差相对较小,因此认为“短时间内气溶胶类型的变化不大”具有一定的合理性。但事实上,以北京地区为例,根据姜忠^[7]等的分析,气溶胶大粒子的日变化比较复杂,大小粒子数浓度的平均日变化也不一致,因此必然影响到粒子谱的分布,从而使得把 α 定为常数并不能反映实际情况。

Remer等^[8]提出了动态气溶胶模型,该模型中的城市型和生物燃烧型气溶胶的各组分的比率并不固定,而是随光学厚度的变化而变化。如果采用这种气溶胶模型,则 α 会根据气溶胶光学厚度的变化而调整,也即会根据 TERRA 和 AQUA 过境时的不同情况调整气溶胶模型,因此更加合理。

3.3 反演算法

在以上假定及已知气溶胶类型的情况下(以固定类型气溶胶为例),结合两颗卫星多通道数据(太阳及卫星方位角等已知信息不再列出),表观反射率可以看作是 α , β 和地表反射率 r 的函数,选用 3 个通道,可以列出以下方程:

$$R(\alpha, \beta_{\text{TERRA}}, r_{\text{TERRA}1}) = R_{\text{TERRA}1} \quad (4)$$

$$R(\alpha, \beta_{\text{AQUA}}, r_{\text{AQUA}1}) = R_{\text{AQUA}1} \quad (5)$$

$$R(\alpha, \beta_{\text{TERRA}}, r_{\text{TERRA}2}) = R_{\text{TERRA}2} \quad (6)$$

$$R(\alpha, \beta_{\text{AQUA}}, r_{\text{AQUA}2}) = R_{\text{AQUA}2} \quad (7)$$

$$R(\alpha, \beta_{\text{TERRA}}, r_{\text{TERRA}3}) = R_{\text{TERRA}3} \quad (8)$$

$$R(\alpha, \beta_{\text{AQUA}}, r_{\text{AQUA}3}) = R_{\text{AQUA}3} \quad (9)$$

式中, R 为表观反射率; R_{TERRA} , R_{AQUA} 分别为 TERRA 和 AQUA 观测到的表观反射率; 数字 1 2 3 代表 3 个不同的通道; α 为 Ångström 指数, β 为浑浊度系数。

利用 K 指数近似,

$$\frac{r_{\text{TERRA}1}}{r_{\text{AQUA}1}} = \frac{r_{\text{TERRA}2}}{r_{\text{AQUA}2}} = \frac{r_{\text{TERRA}3}}{r_{\text{AQUA}3}} = \frac{r_{\text{TERRA}}(2.1\mu\text{m})}{r_{\text{AQUA}}(2.1\mu\text{m})} = K \quad (10)$$

波长 $2.1\mu\text{m}$ 的通道受气溶胶影响较小^[11], 可以认为, K 等于两颗卫星观测的 $2.1\mu\text{m}$ 通道的表观反射率之比。

利用方程 (10), 可以使方程 (4)–(9) 中的 $r_{\text{AQUA}1}$, $r_{\text{AQUA}2}$, $r_{\text{AQUA}3}$ 消去, 未知数数量减少为 6 个: α , β_{TERRA} , β_{AQUA} , $r_{\text{TERRA}1}$, $r_{\text{TERRA}2}$, $r_{\text{TERRA}3}$, 这样方程 (4)–(9) 就有 6 个方程, 6 个未知数, 理论上可以

解出方程组。再结合 (3) 式, 可以得到光学厚度和 3 个波段的地表反射率。

然而, 上述所说的方程并不是真正的解析方程, 只能通过辐射传输模式来解。本文利用 6S 辐射传输模式, 分别建立了 3 个通道的查算表, 用最优化方法来计算 6 个未知量。查算表是针对每天的观测数据分别建立的。对某一天某个固定的位置, 太阳天顶角、卫星观测的天顶角以及与太阳相对的方位角都是已知的, 另外从两颗卫星 7 通道的表观反射率可以得到 (10) 式中的 K 值。为了建立查算表, 取 6 个未知量在一定的范围中变化, 例如对 α 就令其在 0.5–2.0 这一范围中变化, β_{TERRA} 和 β_{AQUA} 变化在 0–1.0 的范围内变化, 而地面反射率则变化在 0.05–0.35 的范围内。在这 6 个变量取定了一定的数值以后, 先用 α , β_{TERRA} 和 β_{AQUA} 通过 (3) 式算出这三个波长在两个卫星过境时刻的光学厚度, 再结合所选定的地表反射率, 利用 6S 软件算出相应的 6 个表观反射率。如果每个未知量的变化分为 10 档, 则 6 个变量将组合出 10^6 次, 即得到 10^6 组表观反射率值, 然后将观测值与这些数据进行比较, 按方差最小的原则选取最后的结果。为了将反演的结果与地面太阳光度计的观测值进行比较, 以观测点为中心选取直径为 10km 的圆形区域, 凡落在这区域中有效的 MODIS 数据(所谓有效就是排除了有云的像素)都进行反演, 然后用所有的结果进行平均, 用以和直接观测值进行比较。

4 结果及其讨论

本文选取 MODIS 的 1, 3 和 4 通道数据来反演光学厚度, 其中 1 和 3 通道是目前通用的反演气溶胶光学厚度的通道, 而 4 通道是另一个波长比较短的通道, 它对气溶胶比较敏感。气溶胶类型选取 Remer 和 Kaufman 的动态气溶胶模型中的城市型。地基观测数据为利用 Solar Light 公司的手持太阳光度计 (MICROTOS II 波段为 340nm, 500nm, 675nm, 870nm 和 1020nm) 观测的气溶胶光学厚度, 观测地点在北京大学物理楼 (东经 116.31° , 北纬 39.99°)。观测时间分别为 TERRA 和 AQUA 过境时间 10:30 和 13:30 前后半小时之内。

图 1 2 3 分别为 2005 年 4 月 20 日、24 日和 25 日的 AOD 卫星反演和地基观测的对比。结果表明, 地基观测和卫星反演的 AOD 具有很好的一致性, 包括在不同光谱波段上 AOD 随波长变化的特性都符合

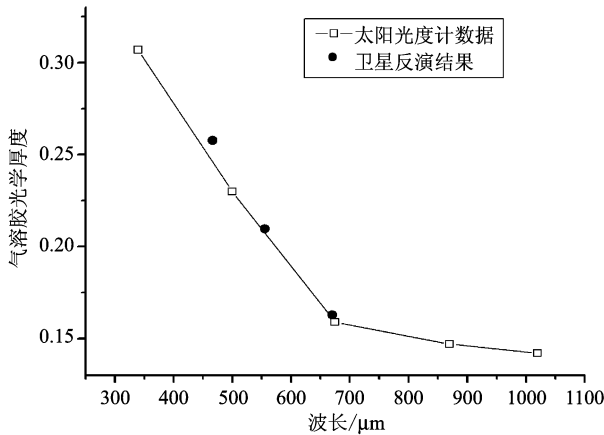


图 1 观测和反演 AOD 对比 (2005 04 20)

Fig 1 The comparison of sun photometer observed AOD and MODIS derived AOD(2005-04-20)

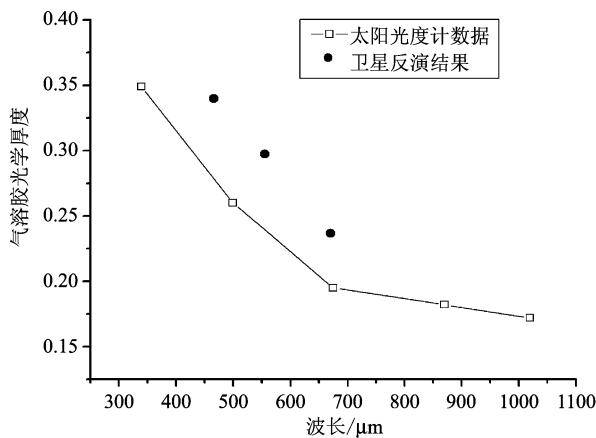


图 2 观测和反演 AOD 对比 (2005 04 24)

Fig 2 The comparison of sun photometer observed AOD and MODIS derived AOD(2005-04-24)

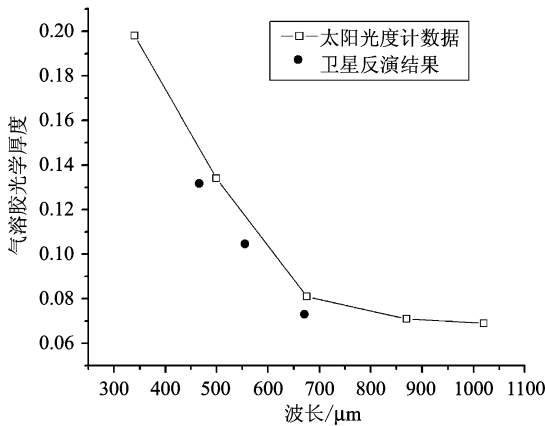


图 3 观测和反演 AOD 对比 (2005 04 25)

Fig 3 The comparison of sun photometer observed AOD and MODIS derived AOD(2005-04-25)

相当好。而图 2 显示的个例, 虽然和观测数据相差比图 1 大, 但变化趋势附合得很好, AOD 的绝对误差在 0.05 左右, 相对误差在 25% 左右, 误差仍然在卫星反演可接受的范围内。图 3 显示的是一次极为清洁的天气的个例, 550nm 波段的光学厚度在 0.1 左右。

另外, 还对 2005 年 5 月 7 日和 5 月 9 日进行了反演。将所有 5 次不同波长反演得到的结果和观测结果做成散点图, 如图 4 所示。其中将太阳光度计结果参考卫星波段进行了波长对数坐标下的线性差值。

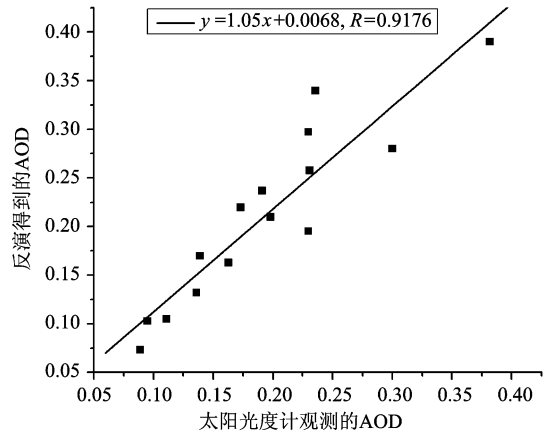


图 4 太阳光度计观测的气溶胶光学厚度与用两颗卫星资料反演结果的相关图

Fig 4 The correlation between sun photometer observed AOD and dual satellites derived AOD

将太阳光度计观测数据和反演结果线性拟合, 得到的斜率为 1.05 相关系数为 0.9176 显著相关。为了进一步验证反演结果, 将 5 组数据反演的地表反射率进行对比, 结果见表 2。

虽然不同日期卫星观测反演得到的地表反射率受多种因素的影响, 简单的对比并没有意义, 但是在相对较短的一段时间内, 地表状况变化不大, 卫星和太阳方位的变化也不大, 反演得到的地表反射率数值比较接近应该是合理的。表 2 的数据对比也显示了这一点。

表 3 中卫星反演和太阳光度计观测的气溶胶指数 α 数值比较接近, 相对偏差都在 20% 以内, 从另一个方面说明了反演结果的合理性。

将反演得到的 1 与 3 通道的地表反射率和 7 通道的表观反射率比较 (7 通道的表观反射率即该通道的地表反射率), 可以发现与 Kaufman 等^[1]暗背景算法中采用的 1 与 3 通道地表反射率和 7 通道表观反射率的 1/2 和 1/4 比例关系有较大出入, 如表 4 所示。1 与 3 通道的地表反射率和 7 通道的表观反射率的平均值分别为 0.66 和 0.28。

得很好, 而后者反映了气溶胶粒子尺度分布的重要信息。图 1 显示的是一次较好的数据对比, 数据吻合得

表 2 卫星反演的地表反射率不同日结果的对比

Table 2 The comparison of satellite derived surface reflectance data on different days

日期	2005 04 20	2005 04 24	2005 04 25	2005 05 07	2005 05 09
ρ_1	0.069	0.078	0.081	0.066	0.072
ρ_3	0.030	0.036	0.031	0.029	0.026
ρ_4	0.046	0.060	0.063	0.057	0.057

注: ρ_1 , ρ_3 和 ρ_4 分别为 1、3和 4通道的地表反射率。

表 3 卫星反演与太阳光度计观测得到的气溶胶波长指数 α 的对比Table 3 The comparison of Ångström exponent α results from satellite retrievals and sun photometer observations

日期	2005 04 20	2005 04 24	2005 04 25	2005 05 07	2005 05 09
太阳光度计	1.23	0.95	1.32	1.67	1.48
卫星反演	1.22	0.89	1.44	1.88	1.64

表 4 反演的 1 与 3 通道地表反射率和第 7 通道表观反射率的比

Table 4 The ratio of surface reflectance on visible channels 1 and 3 to apparent reflectance on near infrared channel 7

日期	2005 04 20	2005 04 24	2005 04 25	2005 05 07	2005 05 09
ρ_1/ρ_7	0.64	0.64	0.67	0.65	0.69
ρ_3/ρ_7	0.28	0.30	0.26	0.29	0.26

注: ρ_7 为第 7 通道的表观反射率。

Kaufman 等通过模式模拟发现^[9], 对于多种地表状况(叶面积指数和植被覆盖率变化范围都很大), ρ_3/ρ_7 能够保持在 0.25 左右, 而 ρ_1/ρ_7 则会随地表状况而变化。对密集植被的暗目标($\rho_7 < 0.1$), ρ_1/ρ_7 略小于 0.50。对土壤和植被混合的亮目标, ρ_1/ρ_7 大于 0.50。例如, 在地表植被覆盖为 50%, $\rho_7 < 0.25$ 叶面积指数在 0.05 和 5 之间变化时, ρ_1/ρ_7 在 0.60 附近。本文中北京地区 5 天的数据, 第 7 通道的表观反射率都在 0.1 以上, 而反演得到的 ρ_3/ρ_7 在 0.26—0.30 之间, ρ_1/ρ_7 在 0.64—0.69 之间, 同 Kaufman 等的定性结论较为符合。

朱爱华^[10]曾利用 MODIS 与太阳光度计的联合应用对北京地区地表反射率反演进行了研究, 利用清洁日的方法反演了北京地区几天的地表反射率。其做法是选取冷锋天气过后大气非常清洁的日子, 用暗目标法从 MODIS 资料反演的 AOD 分布图上可以看到在北京地区 AOD 的分布很均匀, 其值也都在 0.1—0.2 的范围之中。这时可假定这一天是清洁日, 在整个地区气溶胶的 AOD 均匀, 其值为在北京大学物理楼顶用太阳光度计观测的值。在假定了大气气溶胶模型以后, 利用 MODIS 观测的表观反射

率, 可以计算不同通道地表反射率分布, 然后统计 1 与 3 通道地表反射率与 7 通道地表反射率的比值。得到的结果如表 5 其中 AOD 一列是用太阳光度计测量的值, 未订正一列是没有做大气订正, 直接用卫星观测的表观反射率统计的比值。

R_{ch7} 和 R_{ch37} 分别为 1 与 3 通道和 7 通道的比值。将气溶胶类型确定为大陆型或城市型后, 经大气订正后 1 与 3 通道和 7 通道的地表反射率比值平均值分别为 0.61 和 0.28 左右, 跟本文的反演结果相近。在植被条件比较好的地区, 1 与 3 通道的地表反射率和 7 通道地表反射率之间有固定的比例是暗目标法反演气溶胶光学厚的基础, 因此对这一比例的深入研究是至关重要的。但是如果想得到更加准确的结论, 则需要进一步的统计和研究。

为了比较本文所用的反演方法和暗目标法反演的结果, 在图 5 中给出了这 5 天用此两种方法反演的第一通道的气溶胶光学厚度和用太阳光度计观测的光学厚度的比较。可以看出, 如果采用暗目标法来反演北京地区这 5 天的气溶胶光学厚度, 即对第一通道, 采用 $\rho_1/\rho_7 = 1/2$ 的关系, 则反演结果将会明显偏大。其原因为, 采用 1/2 的比率关系相当于

表 5 利用清洁日方法做出的北京地区 4 天的 1 与 3 通道和 7 通道地表反射率的比^[10]

Table 5 The ratio of surface reflectance on visible channels 1 and 3 to apparent reflectance on near infrared channel 7 over Beijing in 4 days of year 2002 from clean day method

日期	AOD	R_{chl-7}			R_{chl3-7}		
	550nm	未订正	大陆型	城市型	未订正	大陆型	城市型
2002 09 14	0.152	0.468	0.604	0.639	0.098	0.275	0.286
2002 10 02	0.013	0.456	0.523	0.526	0.155	0.213	0.215
2002 11 01	0.135	0.483	0.634	0.678	0.156	0.295	0.323
2002 11 08	0.048	0.518	0.641	0.658	0.195	0.299	0.311

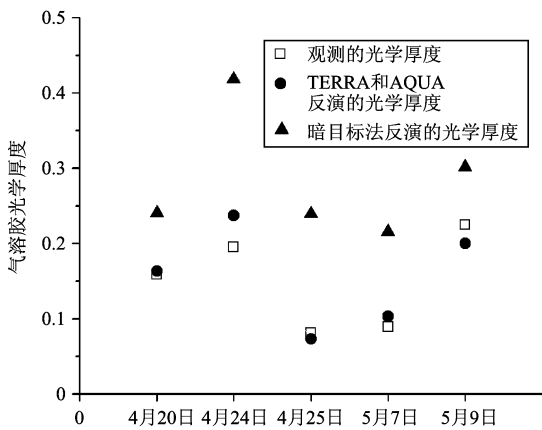


图 5 第 1 通道暗目标法和本文方法反演结果与太阳光度计观测值的对比 (2005 年)

Fig 5 The comparison between sunphotometer observed AOD and satellite derived AOD from dark background method and this paper (2005)

低估了地表反射率的数值, 即低估了地面对卫星接收的辐射的贡献, 而卫星接收的辐射是一定的, 因此导致高估了大气的贡献, 即高估了气溶胶光学厚度的数值, 使反演结果偏大。

上文数据对比的难点在于找出时间和空间都比较吻合的卫星数据和地基观测数据。通常会出现具备地基数据而卫星数据因为云的出现而不能使用的问题。同样, 地基观测的时间也会同卫星过境的准确时间出现差异, 这可能导致数据误差。另外, 对于气溶胶波长指数, 根据王庚辰^[11]的研究, 只有在气溶胶粒子符合 Junge 分布的情况下, 气溶胶波长指数 α 才为常数。而实际上, 气溶胶粒子的这种精确的关系是很难存在的, 因此 α 并不是恒定不变的, 而是随着波长而变化。同时, 也由于气体或粒子对某些波段的吸收而影响不同波段的气溶胶光学厚

度等多种因素^[10], 从而影响到 α 使得各波段的 α 并不相同。这些也是造成反演误差的原因。

5 结 论

本文利用 TERRA 和 AQUA 反演了气溶胶光学厚度和地表反射率等信息。反演得到的气溶胶光学厚度与地基观测数据对比符合得较好。对地表反射率的对比也显示, 对北京地区将 1 与 3 通道和 7 通道地表反射率的比值调整到 0.66 和 0.28 左右比较合理。同时, 这种反演方法为以后在其他区域的反演提供了一种新的思路, 特别是对于高地表反射率地区具有特殊的价值。

参 考 文 献 (References)

[1] Kaufman Y J, Tanri D, Remer L A, et al. Operational Remote Sensing of Tropospheric Aerosol over Land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer [J]. *Journal of Geophysical Research* 1997, 102(D14): 17051-17067.

[2] Flowerew R J, Haigh J D. Retrieval of Aerosol Optical thickness over Land Using the ATSR-2 Dual look Satellite Radiometer [J]. *Geophysical Research Letters* 1996, 23(4): 351-354.

[3] Tang J, Xue Y, Yu T, et al. Aerosol Optical Thickness Determination by Exploiting the Synergy of TERRA and AQUA MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment* 2005, 94: 327-334.

[4] Roland J, Flowerew, Joanna Haigh D. An Approximation to Improve Accuracy in the Derivation of Surface Reflectances from Multi look Satellite Radiometers [J]. *Geophysical Research Letters* 1995, 22(13): 1693-1696.

[5] Veekind, Leeuw. Retrieval of Aerosol Optical Depth over Land Using two angle View Satellite Radiometry during TARFOX [J]. *Geophysical Research Letters* 1998, 25(16): 3135-3138.

[6] Ångström A K. The Parameters of Atmospheric Turbidity [J]. *Tellus* 1964, 16: 64-75.

- [7] Jiang Z, Shi G Y, Chen H S. Analysis on Aerosol Concentration of Beijing during 1998—2001 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(4): 495—502 [姜 忠, 石广玉, 陈焕森. 北京市 1998—2001 年大气气溶胶粒子数浓度分析. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 495—502]
- [8] Remer L A, Kaufman Y J. Dynamic Aerosol Model: Urban / Industrial Aerosol [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D12): 13859—13871
- [9] Kaufman Y J, Gobron N, Pinty B *et al*. Relationship between Surface Reflectance in the Visible and Mid IR Used in MODIS Aerosol Algorithm: Theory [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(23): 2116
- [10] Zhu A H. Research on Optical Property of Atmospheric Aerosols Based on Ground and MODIS Satellite Remote Sensing over Beijing [D]. Master thesis of Beijing University, 2003 [朱爱华. 地面和 MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学特性的研究 [D]. 北京大学硕士研究生论文, 2003.]
- [11] Wang G C. Optical depth of atmospheric aerosols and the valid range of Angstrom formula [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1982, 6(1): 52—57 [王庚辰. 大气气溶胶的光学厚度和 Angstrom 公式的使用范围 [J]. 大气科学, 1982, 6(1): 52—57]