

宽带消光法反演气溶胶光学厚度与 AERONET 北京站探测结果的对比研究

宗雪梅 邱金桓 王普才

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 该文简要介绍了遥感气溶胶光学厚度的宽带消光法, 重点比较与分析了 2001~2002 年间北京地区宽带消光法和全球气溶胶探测网(AERONET)气溶胶光学厚度的探测结果。对比结果表明, 两类探测结果在无云晴天的条件下具有很好的吻合, 二者的相关系数达到 90% 以上。另外, 作者还针对宽带消光法反演月平均气溶胶光学厚度问题, 提出了一个减小云对反演结果影响的方法, 即月平均光学厚度约束法, 并与全球气溶胶探测网探测结果做对比分析。二者结果的一致性表明该约束方法的有效性。

关键词 宽带消光法 气溶胶光学厚度约束法 气溶胶光学厚度

文章编号 1006-9895(2005)04-0645-09

中图分类号 P41

文献标识码 A

A Comparison Study of Aerosol Optical Depths Retrieved from Broadband Extinction Method and Aerosol Robotic Network Observation

ZONG Xue-Mei, QIU Jin-Huan, and WANG Pu-Cai

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The broadband extinction method for retrieving aerosol optical depth is introduced. Aerosol optical depths derived from the broadband extinction method and aerosol robotic network observation during 2001-2002 are compared and analyzed. The comparison results show that two kinds of detection are in good agreement in fine days and the relative coefficients exceed 90%. Furthermore, in order to solve the problem of cloud contamination in retrieving monthly-average aerosol optical depth from broadband extinction method, a method to minimize the cloud effects known as monthly-average aerosol optical depth restriction method is proposed, and the comparison with aerosol robotic network observation shows the feasibility of this method.

Key words broadband extinction method, aerosol optical depth restriction method, aerosol optical depth

1 引言

近年来, 气溶胶的气候响应成为全球变化研究的一个热点问题, 受到越来越广泛的重视^[1, 2]。在 2001 年 IPCC 报告中指出^[3], 气溶胶的直接和间接辐射强迫评估现在还具有很大的不确定性, 一个重要的原因是我们对气溶胶的性质(组分、谱分布以

及总含量等)还缺乏足够的了解和认识。因此, 如何获得气溶胶物理、化学、光学特性的长期、可靠、系统的资料在全球气候变化的研究中具有很大的意义。此外, 大气气溶胶在环境污染、空间遥感大气订正中也是一个很重要的因子。就气溶胶的光学特性而言, 气溶胶光学厚度对气候变化、环境变化、空间遥感大气订正等研究都是一个关键的物理量。

收稿日期 2003-12-15, 2004-04-05 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40175008、40175009、40333029

作者简介 宗雪梅, 女, 1972 年出生, 博士生, 主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: zongxm@mail.iap.ac.cn

目前,使用较多而且公认比较可靠的确定气溶胶光学厚度的方法是利用窄波段的太阳光度计观测资料反演气溶胶光学厚度的 Langley 方法(也称光谱消光法)。但是,世界范围内长期进行太阳光度计观测的台站还较少,气溶胶光学厚度的资料还十分缺乏。然而,全球有大量的宽带太阳辐射观测台站,积累了长期的辐射观测资料,如果能从这些辐射资料可靠地反演出气溶胶光学厚度,无疑是对气溶胶光学性质研究的一个重要贡献,也为全球气候变化提供了有价值的气溶胶光学厚度资料。基于这一考虑,20 世纪 70 年代以来,一些学者致力于研究从宽带太阳辐射气象台站常规测量资料提取大气气溶胶光学厚度的方法。Unsworth 和 Monteith 提出了反演宽带气溶胶光学厚度(Broadband Aerosol Optical Depth, 简称 BAOD)的方法^[4]。1995 年以来,邱金桓^[5~7]、Gueymard^[8]和罗云峰等^[9]更进一步发展了利用同种反演光谱气溶胶光学厚度的方法——宽带消光法。宽带消光法应用的一个重要问题是其反演结果的精度。采用可靠的 Langley 方法的全球气溶胶探测网(Aerosol Robotic Network, 简称 AERONET)^[10]探测结果,为我们对比分析这一问题提供了可靠的数据资源。

AERONET 是以美国宇航局 NASA 为首建立的全球气溶胶光学特性监测网络,目的是利用地基太阳光度计获取全球具有代表性区域的探测气溶胶光学特性参数的基准资料,用于验证和评估卫星反演的气溶胶光学特性参数的精度。整个网络统一采用法国 CIMEL 公司 20 世纪 90 年代发明生产的多波段太阳直射辐射计,实现了仪器、校验和处理过程的标准化。因此, AERONET 资料有很高的精度,广泛应用于各种方法获得的气溶胶光学特性的验证。本文主要就北京站点的 AERONET 和宽带消光法的气溶胶光学厚度的探测结果作一详尽的比较,为宽带消光法的进一步推广应用打下基础。此外,在宽带消光法应用中,云对气溶胶光学厚度反演的影响是一有待解决的重要问题。为此,本文还提出了一个减小云对反演结果影响的方法,即月平均光学厚度约束法。

2 方法

首先简要介绍从宽波段太阳辐射资料反演遥感气溶胶光学厚度的宽带消光法,接着提出一个减小

云对宽带消光法反演结果影响的方法。

2.1 宽带消光法

宽带消光法的基本思想是从全波段的太阳直接辐射信息中导出某一个波长气溶胶光学厚度。经理论分析与数值模拟相结合研究,邱金桓认为这一波长为 700 nm^[5],后来进一步的模式计算发现在平均的意义上这一更优的波长应为 750 nm^[6],而在更普遍适用和可靠的意义上,它是 750 nm 附近变化的一个等效波长^[7]。

平面平行大气中,不考虑前向散射光,地面上太阳直射表接收到的太阳直接辐射为

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_a(\lambda, \theta_0) T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) \exp[-\tau_a(\lambda) m_a(\theta_0)] T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda, \quad (1)$$

其中, $S_0(\lambda)$ 是大气上界的太阳光强, λ 表示波长, θ_0 是太阳天顶角, $m_a(\theta_0)$ 是气溶胶的空气质量, $\tau_a(\lambda)$ 是大气气溶胶光学厚度, λ_1 和 λ_2 分别是太阳直射表的光谱响应的下限和上限,一般为 0.3 μm 和 4 μm , T_a 是气溶胶透过率函数, T_m 是分子透过率函数,可由 MODTRAN 模式计算。从太阳直接辐射信息可以获得 BAOD 如下:

$$\tau_{\text{BAOD}} = -\frac{1}{m_a} \ln \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_a(\lambda, \theta_0) T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda} = -\frac{1}{m_a} \ln \frac{t_{a+m}}{t_m}, \quad (2)$$

$$t_{a+m} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_a(\lambda, \theta_0) T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda} = \frac{S}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

$$t_m = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

其中, t_{a+m} 和 t_m 分别是气溶胶大气和分子的宽带透过率。

从 BAOD 可导出等效波长 λ_E 的概念,两者的关系由下式给出:

$$\tau_{\text{BAOD}} = \tau_a(\lambda_E), \quad (5)$$

波长 λ 的气溶胶光学厚度则由下式计算:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{BAOD}(\lambda_E/\lambda)^\alpha, \quad (6)$$

其中, α 为 Angstrom 波长指数。

反演中所用到的物理量由邱金桓^[7]发展的关于等效波长与分子的宽带透过率参数化模式和杨景梅等^[11]关于大气柱水汽含量的参数化方法求得。

2.2 减少云影响的一个约束方法——月平均气溶胶光学厚度约束法

气象台站的太阳辐射表探测结果通常以小时和天累积辐射的形式记录。由于云分布在时空上的高度易变性, 在累积的辐射信息中往往包含云的贡献。因此, 在宽带消光法应用中如何减少云对气溶胶光学厚度反演结果的影响是重要的。我国云的白天观测一天只有 3 次。考虑到云分布的不均匀性和变化快的特点, 如果只选择云量观测为零的时刻计算 AOD(Aerosol Optical Depth), 在某些台站或某些月份就可能无法获得足够多的 AOD 资料, 进行有代表性的月或年平均的 AOD 统计。因此, 有必要发展一种方法把云这个影响因子考虑进去, 来适当选择 AOD 值。为此, 基于宽带消光法和 AERONET 探测的月平均气溶胶光学厚度的比较, 本文提出了一个应用月平均气溶胶光学厚度进行迭代选择 AOD 值方法, 以减小云对月平均的 AOD 统计的影响。在这一方法中, 我们引入一个限制因子 f_c 来减小云效应, 其选择 AOD 判据如下:

$$\tau_a \leq \tau_{a,m} f_c, \quad (7)$$

$$f_c = C_a + C_b \exp(-5C_F), \quad (8)$$

$$C_F \leq C_{up}, \quad (9)$$

其中, $\tau_{a,m}$ 是月平均的气溶胶光学厚度, C_F 是小时云量百分比, C_{up} 是小时云量上限百分比, 即利用月平均气溶胶光学厚度约束法来选择 AOD 时, 对小时云量百分比的限制值, 可以取 $C_{up} = 0.8C_m$, C_m 是月平均云量百分比, C_a 、 C_b 是经验系数, 我们在计算时取 $C_a = 1.0$, $C_b = 4.0$ 。则 f_c 的变化在 1.07~5.0 之间, 表明当云量从 0 变化到 100% 的时候, AOD 的上限从 $\tau_{a,m}$ 的 5.0 倍减小到 1.07 倍。云量越大, 对 AOD 的限制越大, 这一点对于减少云对气溶胶光学厚度反演结果的影响是重要的。对于云量上限百分比的限制表明, 当一个月几乎都是晴天的时候, 即 $C_m = 0$, 则 $C_{up} = 0$, AOD 数据基本上取自晴天的探测结果。当一个月几乎都是云天的时候, 即 $C_m = 100\%$, 则 $C_{up} = 80\%$, 云覆盖高达 80% 天气的 AOD 结果可以用于 $\tau_{a,m}$ 统计, 只要它满足判据(7)式。

月平均气溶胶光学厚度约束法是一个迭代算法, 计算过程如下:

第一步, 假设一个月平均气溶胶光学厚度值, 如 $\tau_{a,m} = 1.0$ 。

第二步, 按照(7)式选择宽带消光法计算的 AOD 做月平均 AOD 计算。

第三步, 判断计算值与假定值的差值, 如果小于某一阈值, 则 AOD 的计算值即为所求的解。如果不小于这一阈值, 则把计算值赋给假定值, 重复第二步。直到获得解为止。一般迭代三至四次即可获得稳定的收敛解。

3 对比结果分析

我们在 AOD 的宽带消光法反演中使用的是 2001 年、2002 年北京气象台站逐时太阳直接辐射资料。进行对比验证的是 AERONET 北京站(观测地点: 中国科学院大气物理研究所办公楼房顶)level 2.0 气溶胶光学厚度资料, 是经过云影响消除处理、有质量保证的资料, 数据资料从 2001 年 3 月 7 日到 5 月 16 日、2002 年 4 月 3 日到 12 月 2 日。本节先进行晴天无云条件下宽带消光法和 AERONET 探测的 750 nm 气溶胶光学厚度的比较, 再把应用本文提出的月平均气溶胶光学厚度约束选择方法确定的月平均光学厚度与 AERONET 结果进行比较分析。

3.1 晴天资料比较分析

为了排除云对直接辐射计的影响, 选取了地面观测资料中总云量全为 0 的 3 天(即 2001 年 3 月 13 日、3 月 14 日和 4 月 3 日)做对比分析, 结果见图 1。3 月 13 日虽然为晴天, 但是 08 时、14 时、20 时(北京时间, 下同)三个时刻的水汽压都比较大, 分别为 5.9 hPa、7.4 hPa、7.6 hPa, 说明空气中存在大量的水汽分子。从能见度来看, 08 时和 20 时的能见度仅为 4 km, 14 时的能见度为 10 km, 都较低, 所以气溶胶光学厚度值一天都较大。能见度在一定程度上说明了大气混浊程度, 在这一天能见度呈先增大后变小的趋势。相应地, 宽带消光法反演的 AOD 先变小后增大, 中午时刻 AOD 较小。宽带消光法和 AERONET 探测的 AOD 日变化具有很好的一致性, 特别是中午时刻的结果。最大偏差出现在 15~16 时, 也仅为 0.102, 相对误差小于 10%。3 月 14 日的能见度均在 12 km 以上, 所以

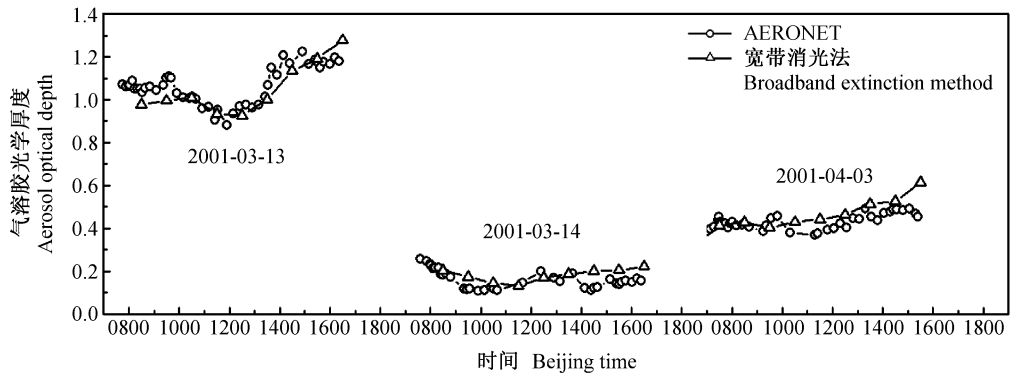


图 1 从宽带消光法和 AERONET 测量资料导出的 2001 年 3 天晴天 AOD 日变化图
Fig. 1 Aerosol optical depth (AOD) variation retrieved from broadband extinction method and AERONET for three clear days in 2001

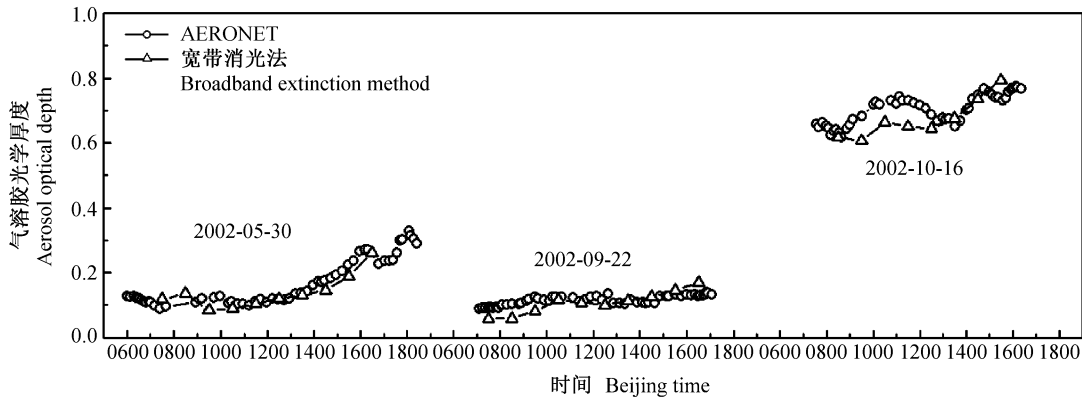


图 2 从宽带消光法和 AERONET 测量资料导出的 2002 年 3 天晴天 AOD 日变化图
Fig. 2 AOD variation retrieved from broadband extinction method and AERONET for three clear days in 2002

AOD 的值较小,二者相比较的结果也非常接近。4 月 3 日在 15~16 时宽带消光法计算的 AOD 明显比观测结果大,差值为 0.129,这是因为 AERONET 上的资料是光度计 10~20 min 连续观测,经过检验和质量控制,然后反演出来的资料,在 15~16 时可用的观测值比较少,对小时平均而言不具有代表性。而宽带消光法计算利用的直接辐射值是一个小时的累计量,在记录直接辐射值时不可能完全排除云,尤其是高空薄云对仪器的影响,故而出现较大的 AOD 值。从日平均 AOD 来看,宽带消光法反演的 3 天日平均 AOD 分别为 1.050、0.181、0.470,而 AERONET 探测的 AOD 分别为 1.065、0.161、0.434,二者日平均 AOD 非常一致。总体来看,不管是比较大的 AOD 还是比较小的 AOD,宽带消光法计算的 AOD 与 AERONET 上观测得到的 AOD 二者十分接近。

图 2 比较了 2002 年 5 月 30 日、9 月 22 日和 10

月 16 日(总云量全为 0 的晴天)宽带消光法和 AERONET 探测的气溶胶光学厚度日变化,二者的结果非常接近。10 月 16 日,宽带消光法反演 AOD 比 AERONET 的 AOD 观测值偏小,在 08~09 时和 13~14 时,二者的结果非常接近,而在这两个时刻之间出现较大的偏差,这里可能存在云的影响。08 时和 14 时的无云记录并不能排除在这 2 个时刻之间有云的存在。从日平均 AOD 分析,宽带消光法反演 3 天的 AOD 分别为 0.138、0.108、0.674,而 AERONET 探测的 AOD 分别为 0.168、0.115、0.704。二者的结果也非常一致。

通过对 AERONET 的资料进行处理,获得与宽带消光法计算 AOD 一致的小时平均值,我们对宽带消光法计算的 AOD 和 AERONET 的 AOD 观测值作相关分析。处理方法是取相应的在这一个小时内的所有 AOD 观测资料的平均值作为小时平均值。图 3 和图 4 分别是 2001 年和 2002 年晴天的相

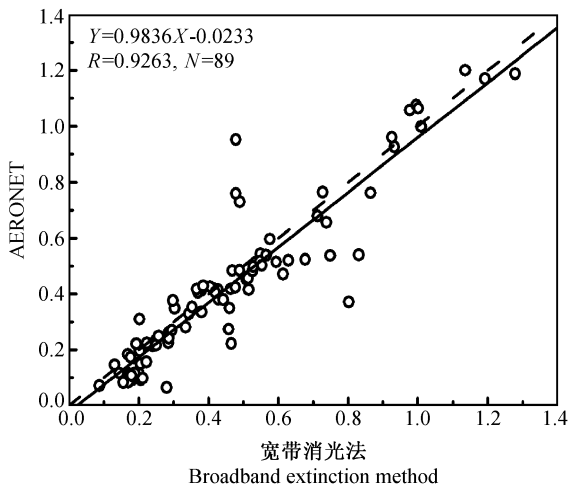


图 3 宽带消光法反演得到的 AOD 和 AERONET 测量的 AOD 的比较(2001 年晴天)。实线：拟合线(Y: AERONET 探测的 AOD, X: 宽带消光法反演的 AOD, R: 相关系数, N: 样本数); 虚线：理想线(即 $y=x$); 圆圈：两种方法得到的 AOD 数据点

Fig. 3 Comparison of AOD retrieved from broadband extinction method and AERONET (for clear days of 2001). Solid line: fitting line (Y: AOD measured in AERONET, X: AOD retrieved by Broadband Extinction Method, R: correlation coefficient and N: sample number); dashed line: ideal line ($y=x$); circles: AOD data points obtained by AERONET and Broadband Extinction Method

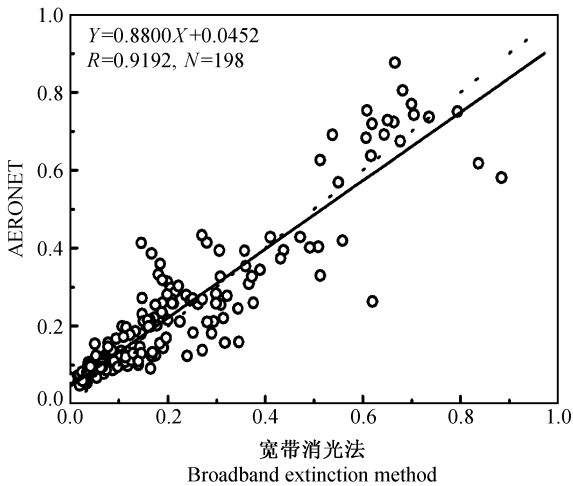


图 4 同图 3, 但为 2002 年晴天

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for clear days of 2002

关分析结果。从图 3 和 4 可以看出，宽带消光法和 AERONET 探测的日平均 AOD 的相关性非常好，相关系数都达到 90% 以上，在 2002 年，二者在某些时刻有较大的偏差，这与云探测记录以外的时间里可能有云存在有关。

为了排除云存在的可能影响，图 5 和图 6 进一步比较了每个观测日 08~09 时、14~15 时两个时

间宽带消光法计算的 AOD 与 AERONET 探测的 AOD。从图 5、6 中可以看出，除了个别点有偏差以外，二者的结果是非常接近的。图 5 中偏差比较大的点是 4 月 25 日、27 日，5 月 7 日，7 月 9 日，9 月 18 日，10 月 9 日，11 月 4 日、5 日，最大偏差为 0.287；图 6 中偏差较大的点在 4 月 30 日，6 月 17 日，7 月 8 日，9 月 1 日、17 日、18 日，10 月 9 日，11 月 9 日、11 日、15 日，最大偏差为 0.343。虽然在这些观测时刻云量都为零，但是因为太阳直接辐射是小时累积量，所以不能保证在这一个时间段之内，没有云的产生和消亡，导致辐射观测值偏小，出现宽带消光法计算的 AOD 大于 AERONET 探测的 AOD 的情况。另外，这些偏差点中较多点都是宽带消光法计算的 AOD 小于 AERONET 探测

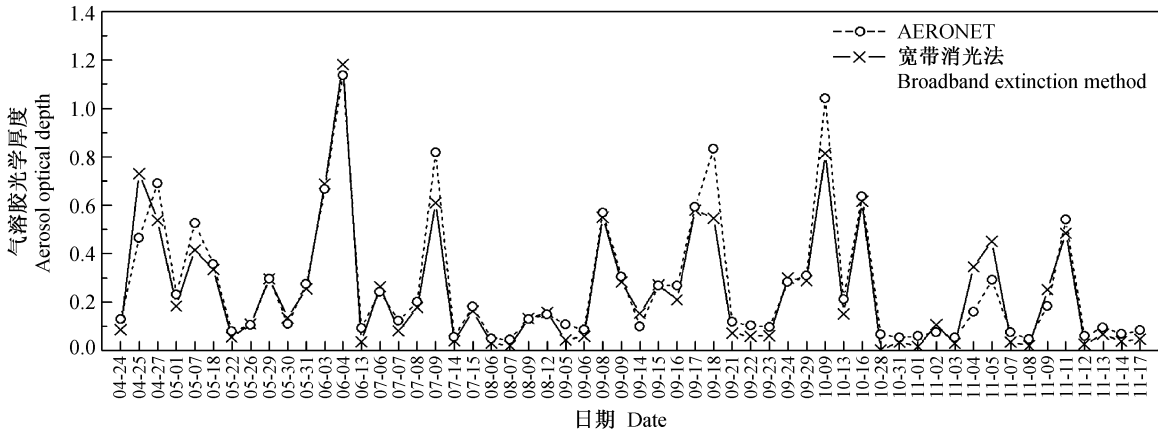


图 5 2002 年各观测日 08~09 时宽带消光法与 AERONET 探测 AOD 的比较

Fig. 5 Comparison of AOD retrieved from broadband extinction method and AERONET from 0800 Beijing Time (BT) to 0900 BT every day in 2002

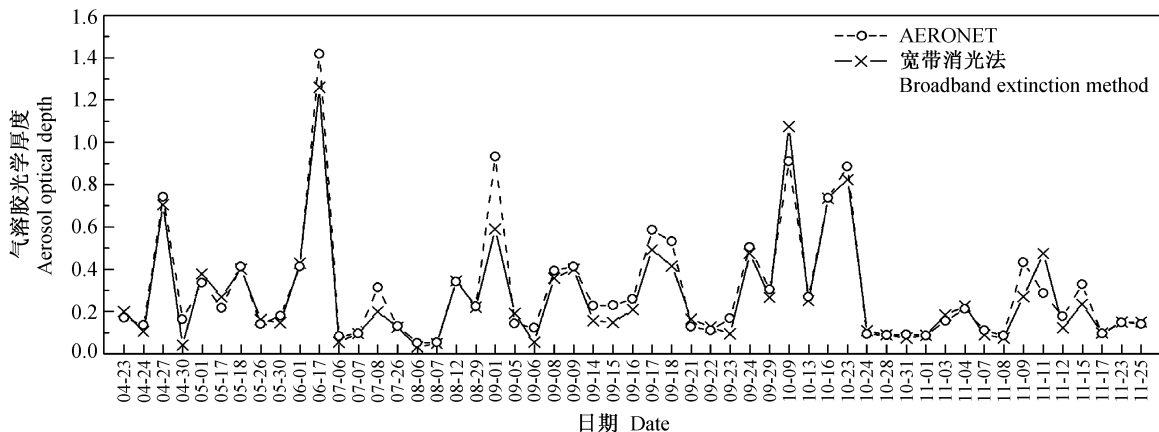


图 6 2002 年各观测日 14~15 时宽带消光法与 AERONET 探测 AOD 的比较

Fig. 6 Comparison of AOD retrieved from broadband extinction method and AERONET from 1400 BT to 1500 BT every day in 2002

的 AOD, 这可能是宽带消光法散射光订正模式误差所致, 即当空气中存在较多的大粒子时, 可以有很强前向小角散射光, 低估的订正可导致 AOD 的计算值偏低。08~09 时宽带消光法反演的 AOD 平均值为 0.245, AERONET 探测的 AOD 平均值为 0.267, 仅相差 0.022, 14~15 时宽带消光法反演 AOD 的平均值为 0.277, AERONET 探测的 AOD 平均值为 0.302, 相差 0.025, 二者的相对误差都仅为 8.37%。

3.2 应用 AOD 约束选择方法确定的月平均气溶胶光学厚度分析

在气候变化研究中, 一般关心的是月、年平均的气溶胶光学厚度。下面, 我们应用 2002 年宽带消光法计算的气溶胶光学厚度和 AERONET 探测的月平均的气溶胶光学厚度进行对比分析。如上所述, 晴天情况下, 宽带消光法计算的气溶胶光学厚度与 AERONET 探测的月平均的气溶胶光学厚度有很好的吻合, 但是 2002 年在 AERONET 观测期间, 08 时、14 时和 20 时三个时刻云记录均为零的日子只有 25 天, 有些月份甚至没有这种日子, 所以我们在宽带消光法应用中引入 AOD 选择方法, 将非晴天的 AOD 值尽可能用于确定月平均的气溶胶光学厚度。在分析这一选择方法时, 我们考虑了云量百分比上限 C_{up} 分别为 0、10%、20%、30%、40%、50%、60%、 $0.8C_m$ 等 8 种情况下的宽带消光法的气溶胶光学厚度计算结果, 并与 AERONET 观测的月平均的气溶胶光学厚度进行比较(结果见图 7、图 8 和表 1)。

从图 7 和图 8 可以看出, 宽带消光法反演的 AOD 与 AERONET 的 AOD 计算结果的相关性仍然很好, 相关系数很高, 即使天空中云量很多, 达到 $0.8C_m$ 的情况下, 我们也可以利用 AOD 约束方法挑选出较合适的气溶胶光学厚度值用于分析研究。这一约束法的应用在增加数据量的同时, 仍然保持了与 AERONET 探测很好的相关性。图 7、8 还显示出, 当 AOD 较小时, 离散程度较小; AOD

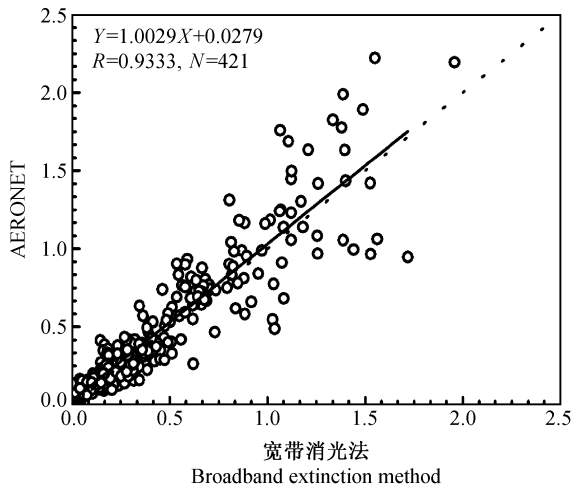


图 7 $C_{up}=0$ 时月平均 AOD 约束法比较图。实线: 拟合线(Y : AERONET 探测的 AOD, X : 宽带消光法反演的 AOD, R : 相关系数, N : 样本数); 点线: 理想线(即 $y=x$); 圆圈: 两种方法得到的 AOD 数据点

Fig. 7 Comparison of monthly average AOD restriction method ($C_{up}=0$). Solid line: fitting line (Y : monthly AOD measured in AERONET, X : monthly AOD retrieved form broadband extinction method, R : correlation coefficient and N : sample number). Dot line: ideal line ($y=x$). Circles: monthly AOD data points obtained by AERONET and broadband extinction method

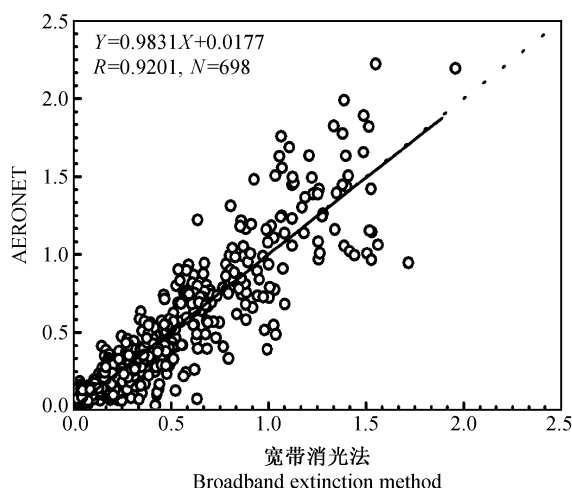


图 8 同图 7, 但为 $C_{up}=0.8C_m$ 时

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for $C_{up}=0.8 C_m$

较大时, 离散程度明显增大, 所以这种气溶胶光学厚度的选择方法在 AOD 较小时应用性应该更好。

表 1 给出了云量上限百分比 C_{up} 分别为 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、 $0.8C_m$ 等 8 种情况下, 利用 AOD 约束选择法计算的月平均气溶胶光学厚度与 AERONET 的 AOD 计算结果作了比较。

原始值是不做任何约束情况下由宽带消光法计算的月平均 AOD 结果, 都比 AERONET 的 AOD 探测值大很多, 可见云对太阳直接辐射观测影响很大。按照前面介绍的月平均 AOD 约束法在不同的天气条件下, 选择合适的气溶胶光学厚度做月平均的结果与 AERONET 探测的 AOD 结果比较一致, 其中 5、7、9、10、11 月份的结果非常稳定, 与 AERONET 也比较一致, 在这些月份, 即使空中云量达到 $0.8C_m$, 我们都可以很好地计算出月平均值。而 6、8 月的结果差一些, 这是因为这两个月份没有一天是全晴天, 每天都有云覆盖, 云对太阳

直接辐射观测的影响以及对太阳光度计观测的影响都是不可忽略的,但是现在还没有一种较好的方法能排除云效应,我们所用的月平均 AOD 约束法,也只是在宽带消光法计算的基础上,尽可能排除受云影响的计算结果。6 月和 8 月的气溶胶月平均 AOD 值较大,这更进一步说明,在 AOD 比较小的时候,用宽带消光法更合适。总体来看,与 AERONET 探测资料对比,经过 AOD 月平均约束法订正的 5~11 月平均 AOD 结果误差在 20% 以内,而各个月平均 AOD 结果误差也在 30% 以内。存在一定的偏差可能与观测地点有所不同有一定的关系。

图 9 是相应的 5~11 月份经过月平均 AOD 约束法订正以后进行月平均 AOD 统计的样本数, 从图中可以看出, 6、8 月份样本数明显偏少, 分别为 10 和 31, 偏少的样本数使得统计结果不具有普遍意义, 所以与 AERONET 探测结果相比, 差别也较大。其他月份的统计样本较多, 而且随着云量的增加, 样本数也越来越多, 宽带消光法反演的月平均 AOD 与 AERONET 计算的月平均 AOD 的对比有很好的一致性。

对比 $C_{\text{up}}=0$ 与 AERONET 探测的 AOD 两组数据,发现 AERONET 探测的 AOD 结果有时偏大、有时又偏小。偏大说明 AERONET 探测中受到云的影响,把一些薄云光学厚度也观测进来了,因为观测中存在人的主观因素,比如,云天和晴天的判断是观测员目视判断的结果,其中的不确定性肯定会对 AOD 的探测结果有影响;结果偏小很可能是因为我们所用的月平均 AOD 约束法不能很好地完全排除云的影响,所以造成宽带消光法计算 AOD 偏大的缘故。

表 2 是 2002 年北京站经过月平均 AOD 约束和没有约束的年平均 AOD 结果的对比。

表 1 2002 年月平均 AOD 约束法结果比较表

Table 1 Comparison of monthly average AOD restriction results

月份	原始值		C_{up}							
Month	AERONET	Original Value	0	10%	20%	30%	40%	50%	60%	0.8C _m
05	0.2781	1.0018	0.2417	0.2696	0.2763	0.2754	0.2752	0.2714	0.2677	0.2710
06	0.6434	1.5328	0.7710	0.6631	0.7683	0.8243	0.7820	0.7455	0.7165	0.7165
07	0.3746	1.0026	0.4679	0.4532	0.4439	0.4091	0.4070	0.3994	0.3980	0.4020
08	0.5817	1.3740	0.3859	0.3908	0.4074	0.4422	0.4449	0.4187	0.4043	0.4187
09	0.3610	0.7228	0.3144	0.3162	0.3281	0.3325	0.3325	0.3325	0.3329	0.3325
10	0.5751	0.8008	0.5388	0.4795	0.4472	0.4352	0.4168	0.4111	0.4063	0.4352
11	0.1876	0.4041	0.1587	0.1626	0.1875	0.1866	0.1867	0.1867	0.1869	0.1902
平均值 Average	0.4288	0.9770	0.4112	0.3907	0.4084	0.4150	0.4064	0.3950	0.3875	0.3952

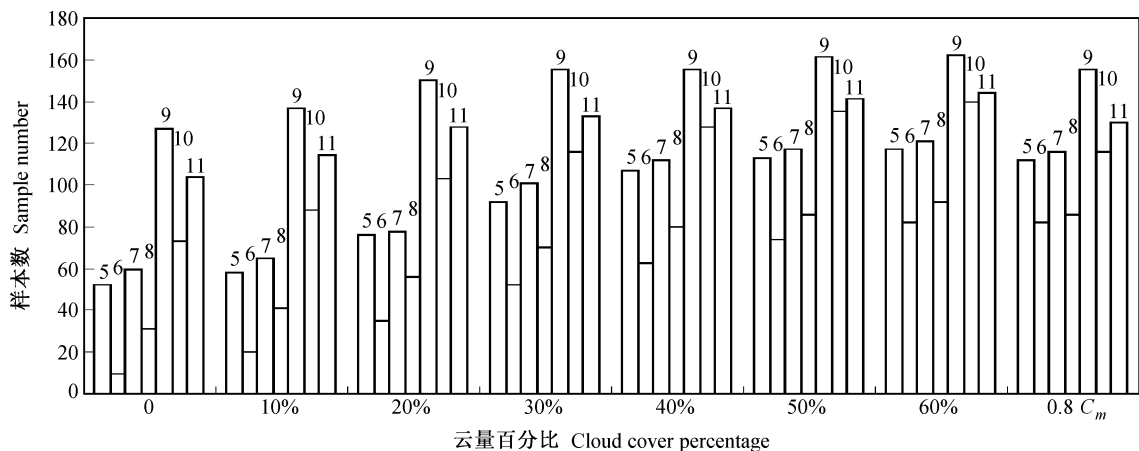


图9 不同月份(5~11月,与图中数字对应)不同云量条件下的样本数
Fig. 9 Sample number in different months (Numbers 5 ~ 11 denote May to Nov) and different cloud cover conditions

表2 北京有(无)月平均AOD约束的年平均AOD结果
Table 2 Annual average AOD results with or without monthly average AOD restriction in Beijing

北京 Beijing		C _{up}							
		0	10%	20%	30%	40%	50%	60%	0.8C _m
有约束	With restriction	0.3710	0.3602	0.3712	0.3722	0.3639	0.3568	0.3521	0.3575
无约束	Without restriction	0.3743	0.3660	0.4005	0.4097	0.4343	0.4556	0.4821	0.4316

从表2可以看出,北京晴天较多,月平均云量较小,所以,用月平均AOD约束法计算的年平均结果都与晴天状况接近。总体而言,宽带消光法计算的AOD经过月平均AOD约束法的筛选计算出来的月平均AOD值是在气候意义上是可信的,也是可用的。

4 结论

利用宽带消光法反演了北京地区2001年和2002年气溶胶光学厚度,并与AERONET的AOD探测资料做了对比分析。晴天的比较结果表明:2001年和2002年二者的一致性都很好,相关系数在90%以上。

当天空有云时,只要太阳周围无云,宽带消光法计算的AOD就不存在云的影响。但从累计的辐射资料难以直接判断太阳周围有云或无云。如果有一方法可以从云天的探测结果挑选无云影响的AOD数据,这对于获得更有代表性的月或年平均的气溶胶光学厚度的统计结果是有意义的,特别是对于云量较多的地区或季节。基于这一考虑,本文提出了一个月平均气溶胶光学厚度约束迭代方法。这一方法的要点是对气溶胶光学厚度的上限进行约

束,云量越多,约束越严。与AERONET的AOD探测资料对比结果表明,这种气溶胶选择方法在较大程度上增加了研究的样本数,而且能保持与AERONET的AOD探测值有较好的相关性,同时也排除了晴天中由于不可预知的云存在的影响而出现的异常AOD值。所以,月平均AOD约束法是一种行之有效的气溶胶光学厚度选择方法。

应用宽带消光法确定AOD,有些结果低于AERONET探测值,有些结果可能因为云对太阳直接辐射观测的影响,又高于AERONET探测值。从统计意义上来说,二者的比较结果很好。

参考文献(References)

- [1] 罗云峰,周秀骥,李维亮. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状. 地球科学进展, 1998, 13(6): 572~581
Luo Yunfeng, Zhou Xiuj, Li Weiliang. Advances in the study of atmospheric aerosol radiative forcing and climate change. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1998, 13(6): 572~581
- [2] Kaufman Y J, Tanre D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 2002, 419: 215~223
- [3] Penner J E, Andreae M, Annegarn H, et al. Aerosols, their direct and indirect effects. In *Climate Change 2001: The Sci-*

- entific Basis*, Chapter 5. Houghton J T, et al, Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [4] Unsworth M H, Monteith J L. Aerosol and solar radiation in Britain. *Quart J. Roy. Meteor. Soc.*, 1972, **98**: 778~797
- [5] 邱金桓. 从全波段太阳直接辐射确定大气气溶胶光学厚度 I. 理论. 大气科学, 1995, **19**(4): 385~394
Qiu Jinhuan. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole-spectral solar direct radiation. Part I: Theory. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19**(4): 385~394
- [6] Qiu Jinhuan. A method to determine atmospheric aerosol optical depth using total direct solar radiation. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 734~758
- [7] Qiu Jinhuan. Broadband extinction method to determine atmospheric aerosol optical properties. *Tellus*, 2001, **53B**: 72~82
- [8] Gueymard C. Turbidity determination from broadband irradiance measurements; a detailed multi-coefficient approach. *J. Appl. Meteor.*, 1998, **37**: 414~435
- [9] Luo Yunfeng, Lu Daren, Zhou Xiuji, et al. Characterisits of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 14501~14513
- [10] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 9791~9806
- [11] 杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究. 大气科学, 2002, **26**(1): 9~22
Yang Jingmei, Qiu Jinhuan. A method for estimating precipitable water and effective water vapor content from ground humidity parameters. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**(1): 9~22