

# 气溶胶辐射特性的观测研究<sup>\* 1</sup>

毛节泰 李成才

(北京大学物理学院大气科学系,北京,100871)

## 摘 要

利用一个简化的辐射平衡模式,讨论了气溶胶直接辐射强迫和气溶胶辐射特性以及与地面反射率之间的关系。模式分析表明,增加气溶胶层以后,地气系统对太阳辐射的反射率可能增大,也可能减少,取决于气溶胶的单散射反射率 $\omega_0$ 、不对称度因子 $g$ 与地面反射率 $\alpha_g$ 之间的配置,但与气溶胶光学厚度 $\delta$ 没有直接的关系。气溶胶光学厚度值仅和反射率变化的幅度成正比。

从辐射平衡模式的结果可知,为了定量地研究气溶胶直接辐射强迫作用,需要有系统的有关气溶胶辐射特性的观测资料。从地面和空间对中国地区气溶胶的辐射特性开展了观测研究,包括从地面用太阳光度计测量气溶胶的光学厚度、用浊度计测量气溶胶的散射系数、黑碳仪测量气溶胶的吸收系数,并且利用 MODIS 资料反演气溶胶的光学厚度。地面太阳光度计观测的气溶胶光学厚度用于检验卫星遥感的气溶胶光学厚度值,对中国东部地区,遥感的结果是可以接受的,主要是由于这一地区存在较低的地表反射率;但对中国北方植被条件不很好的地区,在遥感反演时对地面反射率的估计可能偏低,如做适当的修改还有可能提高遥感反演的精度。从地面直接测量气溶胶的散射系数和吸收系数算出的气溶胶单散射反射率在 0.8 左右,需要有更多的观测,以便进一步查清这一问题。

**关键词:** 大气气溶胶, 气溶胶直接辐射强迫, 气溶胶单散射反射率, 气溶胶光学厚度

## 1 引 言

大气气溶胶通常是指悬浮于大气中的微小粒子,粒径范围可以从  $0.001 \mu\text{m}$  到几十微米,是地球-大气-海洋系统的重要组成部分。它通过直接辐射强迫和间接辐射强迫影响着地球大气的状态。近些年来,人类活动引起的大气气溶胶变化导致的气候变化问题成为科学家们关注的一个重要领域。

## 2 气溶胶的直接辐射强迫

在气候变化的研究中,广泛地使用着辐射强迫的概念。IPCC 对辐射强迫有着明确的定义<sup>[1]</sup>,它是指“若其他因素不变,大气环境或天文环境中某一因素的变化使地球对流层以下辐射收支产生的变化称为辐射强迫”。气溶胶的直接辐射强迫是指气溶胶对辐射散射和吸收造成的地球对流层以下辐射收支的变化。目前大部份气溶胶直接辐射强迫的研究都是针对气溶胶对太阳辐射(短波辐射)的散射和吸

收,但气溶胶对长波辐射也有一定的影响,虽然其数值要小得多。温室气体的辐射强迫都是以工业革命前为基准,指的是自从工业革命以来由于人类活动导致温室气体浓度的增加而造成的地气系统辐射平衡的改变。对于气溶胶的直接辐射强迫,原则上也应当是这样来估计。1992 年 Charlson 等<sup>[2]</sup>的文章中也提到工业革命前全球气溶胶的本底值可以用光学厚度 0.12 来估算。

与温室气体的辐射强迫相比,气溶胶的直接辐射强迫要复杂得多,这是由于气溶胶本身的复杂性造成的。(1) 气溶胶自身的特性就十分复杂。对于温室气体,例如  $\text{CO}_2$ ,它每个粒子都是相同的(少量同位素不考虑在内)。但对气溶胶来说,每个粒子的大小、形状、表面结构、化学组分以及其折射率等特性都不同,这就给研究带来巨大的困难。例如温室气体只要知道了它的浓度分布(无论是质量浓度或者是数密度浓度都可以,在知道了温度、压力等大气条件后,这二种浓度值可以方便地互相换算),就可

\* 初稿时间:2005 年 7 月 30 日;修改稿时间:2005 年 8 月 31 日。

资助课题:国家自然科学基金重大研究计划(40121120827,90211001/D0501)。

作者简介:毛节泰,1939 年生,教授,博士生导师。主要从事大气辐射、云物理与大气气溶胶的探测与研究。

以研究它们的辐射强迫。但对气溶胶来说,事情就没有那么简单。单单知道气溶胶的数密度或质量密度是远远不能满足辐射强迫研究的需要,而且就是这二个参数,在没有其他补充信息时,二者可能没有一定的联系。因此为了研究气溶胶的直接辐射强迫需要有比温室气体多得多的信息。但目前尚很难说已经有足够的观测数据能满足研究的需要。(2)和温室气体相比,气溶胶在大气中的停留时间要短很多,这造成了它在大气中分布的不均匀性和随时间的快速变化,这种分布和变化的复杂性只有水汽可以与之相比。(3)气溶胶直接辐射强迫的复杂性还在于它的作用不仅取决于气溶胶本身的特性,而且与其环境,主要是下垫面的反射特性有关,这一点和温室气体是很不相同的。温室气体主要是通过长波辐射来影响到地-气系统的辐射平衡,而地表(包括陆地和海洋长波射出率变化的范围较小为  $0.9 \sim 1.0$ <sup>[3]</sup>)。气溶胶主要通过短波辐射影响地-气系统的辐射平衡,而地表对短波辐射的反照率变化范围十分大,可以从  $0.02$  一直到接近  $1.0$ ,在这样大范围的变化中,同样一团气溶胶粒子,其物理、化学特性完全没有变化,它在某种下垫面条件下可能是使系统降温的,但当它移动到另外一种下垫面时就可能是增温的了。(4)气溶胶直接辐射强迫的大小与云的状况有关,而云又是大气中最不确定的组份之一。广义地说,云也是一种气溶胶,但在气溶胶直接辐射强迫的研究中习惯上是把云的作用给分出来,把它归结为气溶胶的间接辐射强迫。而所谓气溶胶的直接辐射强迫是指晴空条件下的气溶胶辐射强迫,在有云时气溶胶的直接辐射强迫就不提了,因为这时云的作用要远大于气溶胶。这在单独讨论气溶胶直接辐射强迫时可能没有特别的困难,但在气候研究中常常要知道某一地区某一时段中气溶胶直接辐射的平均效果,这时计算平均量就离不开云的分布了。这又是一个很难处理的问题。

Coakley 和 Cess<sup>[4]</sup> 1985 年提出了一个简化的辐射模型,用以分析气溶胶对地-气系统辐射平衡的作用。该模式假定在原地-气系统对太阳辐射反射的基础上再叠加上一层气溶胶层,研究这时对太阳辐射反射率的变化。被叠加上去的气溶胶层对太阳辐射有一定的反射率、吸收率和透射率,在考虑了与地面的多次反射后,Coakley 等得到了在不同下垫面反射率条件下,气溶胶层的反射能力和吸收能力与这层气溶胶层最终是使地气系统增温还是冷却的

判据。但这个模型没有利用目前通用的气溶胶辐射特性的参数——光学厚度  $\delta$ 、单散射反射率  $\bar{\omega}_0$  和对称度因子  $g$ ,因此有必要修改一下。

假设在原地球和大气(包括地面反射和分子散射)的基础上又叠加了一层气溶胶层。原来地球和大气的短波反射率为  $\alpha_g$ ,叠加中上去的气溶胶层的光学厚度为  $\delta$ ,单散射反射率为  $\bar{\omega}_0$ ,不对称度因子为  $g$ 。

有:  $\delta = k_{ex}H$ , 其中  $k_{ex}$  为气溶胶的消光系数,  $H$  为气溶胶层的标高;  $k_{ex} = k_{sc} + k_{ab}$ , 其中  $k_{sc}$  为气溶胶的散射系数,  $k_{ab}$  为气溶胶的吸收系数。其中散射可分为前向散射和后向散射,分别占的百分比为  $F$  和  $B$ ,  $F+B \equiv 1$ 。

$$k_{sc} = k_{sc}F + k_{sc}B$$

这里我们对不对称度因子的定义做适当的延伸,不对称度因子原来的定义是前半部散射光在入射光方向投影和与后半部散射光在同一方向轴上投影和的差值与总散射光之比<sup>[3]</sup>,这个参数主要是在讨论辐射场的光压时引入的,用于讨论辐射场动量的变化。但从能量角度讲,它并不好用。因此在这里做一些改动,把不对称度因子定义为前向散射和后向散射之差与总散射之比,这样就有

$$\begin{cases} F - B = g \\ F + B = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F = 0.5(1 + g) \\ B = 0.5(1 - g) \end{cases}$$

根据单散射反射率的定义:

$$\bar{\omega}_0 = \frac{k_{sc}}{k_{ex}} = \frac{k_{sc}}{k_{sc} + k_{ab}}$$

$$k_{sc} = \bar{\omega}_0 k_{ex}$$

$$k_{ab} = (1 - \bar{\omega}_0)k_{ex}$$

这层气溶胶层的反射率  $R$ 、吸收率  $A$  和透过率  $T$  分别有:

$$R = k_{sc}BH =$$

$$0.5\bar{\omega}_0(1 - g)k_{ex}H = 0.5\bar{\omega}_0(1 - g)\delta$$

$$A = k_{ab}H = (1 - \bar{\omega}_0)\delta$$

$$T = 0.5\bar{\omega}_0(1 + g)\delta + (1 - \delta)$$

可以看出,  $R + A + T \equiv 1$ 。

利用与 Coakley 和 Cess 相同的方法,在原地面和大气反射太阳辐射的基础上,叠加了一层气溶胶层,其短波反射率  $\alpha$  有

$$\alpha = R + \frac{T^2\alpha_g}{1 - \alpha_g R}$$

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_g \quad (1)$$

在经过一些近似(主要是省略掉高阶小量)以后,反

射率的变化为

$$\Delta\alpha = \bar{\omega}_0(1-g)\delta\left[\frac{1}{2\alpha_g} - \frac{2-\bar{\omega}_0(1+g)}{1-g}\right] \quad (2)$$

反射率的变化决定了地气系统的能量收支。如反射率增加,  $\Delta\alpha > 0$ , 则地气系统要降温, 反之则升温。

从式(2)中可以看到, 反射率变化的符号(是降温还是升温)取决于等式右边方括号中二项的大小。前一项反映地表的反射特性, 后一项则取决于气溶胶的特性。反射率变化的符号与光学厚度的大小无关, 但反射率变化的绝对值则是和  $\delta$  成正比, 也和  $\bar{\omega}_0$  和  $(1-g)$  成正比。

为了讨论气溶胶特性是怎样影响到地-气系统短波反射率的变化, 在图1中给出在不同  $\bar{\omega}_0$  和  $g$  值时式(2)方括号中后一项的数值, 并给出针对不同  $\alpha_g$  值时,  $1/2\alpha_g$  所对应值的等值线。

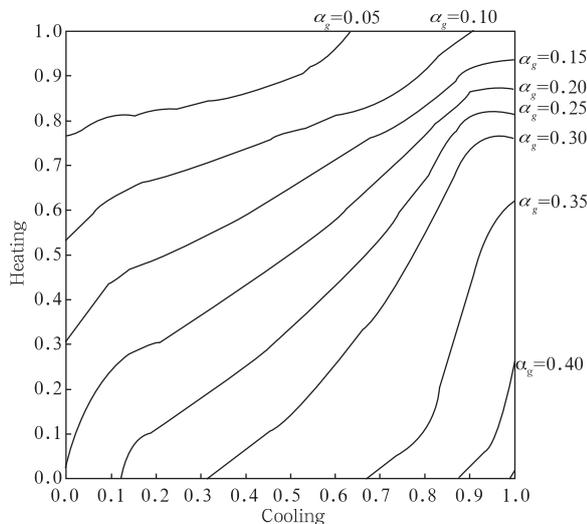


图1 式(2)中各个量之间的关系

Fig. 1 The correlation of the different parameter in formula 2

对一个地表反射率  $\alpha_g$ , 在图1中有一根曲线, 曲线左上方的区域是加热的, 曲线右下方的区域是降温的。若一般取  $g=0.65$  和  $\alpha_g=0.15$ , 当  $\bar{\omega}_0 < 0.5$  是升温的,  $\bar{\omega}_0 > 0.5$  是降温的。如  $g$  增大到  $0.75$ , 则降温和升温的分界点将增大至  $\bar{\omega}_0 = 0.68$ 。可以从物理上来分析一下为什么会出现这一结果。从图1中可知, 当  $g$  和  $\alpha_g$  固定, 随着  $\bar{\omega}_0$  的增大, 将从升温变为降温。随着  $\bar{\omega}_0$  的增大, 气溶胶层对太阳辐射的吸收减小, 散射增加, 这就把更多的太阳辐射能反射到太空, 使地-气系统温度下降; 同样, 当  $\bar{\omega}_0$  和  $\alpha_g$  固定, 随着  $g$  的增加, 地-气系统将从降温变为

升温。 $g$  的加大表明前向散射加大, 后向散射减小, 其结果是直接减小地-气系统对太阳辐射的反射, 更多的太阳辐射能进入地-气系统将导致系统升温。最后, 如果  $\bar{\omega}_0$  和  $g$  固定, 相对于不同的  $\alpha_g$ , 可以看到随着下垫面反射率的增加, 将使系统从降温变为升温。其原因可以这样理解, 随着  $\alpha_g$  变大, 地表把更多的太阳辐射能反射回气溶胶层, 气溶胶层有更多的机会吸收太阳辐射能, 从而使地-气系统升温。这一结果表明, 对同样特性的一团气溶胶, 当它处于海洋或植被条件较好的地区, 那里下垫面反射率较低, 它使该地区降温, 若这团气溶胶迁移到极地, 那里下垫面反射率较高, 它的作用就可能是升温的了。从这些分析可以联想到中国的情况。从一些测量结果可以看到, 中国上空气溶胶层不仅光学厚度大, 颗粒比较大,  $g$  值偏大, 而且吸收也比较强, 即  $\bar{\omega}_0$  值偏低。这样的气溶胶层对下垫面反射率较低时可能是以降温为主, 但当下垫面反射率升高了, 例如中国西北地区, 气溶胶的直接辐射强迫就可能是升温的了。这一点目前尚没有足够的观测资料做结论, 但却是需要尽快查清的。

### 3 地面测量气溶胶的辐射特性

从上面的讨论可以看到, 对气溶胶直接辐射强迫的研究需要有关气溶胶光学厚度、单散射反射率和对称度因子的数据。可以从地面和空间通过直接测量和遥感的方法来取得这些资料。

#### 3.1 地面太阳光度计测量整层大气气溶胶光学厚度

地面太阳光度计测量整层大气气溶胶的光学厚度是最通用的方法, 也常常被用作对比的参考值。太阳光度计测量整层大气气溶胶的光学厚度的原理十分简单<sup>[3]</sup>, 假设大气水平分层, 地面接收到的直接太阳辐射强度为:

$$S_\lambda = S_{0\lambda} e^{-\delta_0 m} \quad (3)$$

其中  $S_{0\lambda}$  为大气上界入射的该波长太阳分光辐照度,  $\delta_0$  是整层大气垂直光学厚度,  $m$  为大气质量数。如果光度计探测器输出电压与光强成正比, 则

$$V_\lambda = C_\lambda S_{0\lambda} e^{-\delta_0 m} \quad (4)$$

$C_\lambda$  为仪器的定标系数。在仪器定标后, 根据所测的电压值可算出大气的总光学厚度  $\delta_0$ , 在扣除空气分子的散射和吸收的影响后, 即可得到气溶胶的光学厚度  $\delta$ 。

为了保证光度计能准确地得出气溶胶光学厚度的数值,有两件事是需要特别注意的。其一是仪器的准确定标,并保持定标系数的长期稳定性。目前仪器定标的基本方法是长法定标。只要大气条件合适,长法定标可以得到足够高的精度,多次定标并进行相互比较是检验定标精度的基本方法。在准确定标以后,保证在观测期间定标系数的稳定也是一件重要的事情,这就要求建立一种监视系统,周期性地对仪器的定标系数进行监视。

太阳光度计观测中另外一个需要注意的问题是对日周光的修正。因为按定义,太阳光度计只测量太阳的直接辐射,但事实上仪器不可避免地也测到了太阳周围的日周光辐射(主要是气溶胶和大气的部分前向散射光)。由于测到的辐射量大于单纯的直接辐射,计算出的光学厚度就会偏小。这一现象在太阳光度计张角较大,气溶胶光学厚度较大和气溶胶颗粒较大,粒子的前向散射较大时更为明显。Deepak 和 Box<sup>[5]</sup>在 1978 年就分析过这一问题。对于中国的具体情况,气溶胶光学厚度和粒子大小都偏大,日周光订正是会很重要的。粗略计算表明,对张角为  $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$  的太阳光度计,当气溶胶光学厚度超过 0.5 以后就应当考虑日周光的订正,当气溶胶光学厚度达到 1.0 以后,不做订正的数据就不适用了。这方面还需要做许多具体的工作。

北京大学从 20 世纪 80 年代初就开始研制多波段太阳光度计,并进行了相当系统的观测<sup>[6,7]</sup>。90 年代末,结合中国地区气溶胶辐射特性的研究,又研制了十波段太阳光度计,在全国多点进行了 1 a 的同步观测。为保证观测资料的质量,对光度计的定标和仪器稳定性的监视都做了专门的工作<sup>[8]</sup>。图 2 给出光度计定标的结果,该仪器曾分别在河北兴隆(1000 m),安徽黄山(1800 m)和西藏当雄(4600 m)进行定标,并取得基本一致的结果。为了监视光度计长期稳定性,用 EG&G 公司的 R10 标准光源到各观测站做定期检验。图 3 给出检验的相对误差。从图中可以看到,这种检验不能代替定标(精度不够),但它可以监视仪器长期工作的稳定性。

从 1998 年开始,利用所研制的太阳光度计在北京、青海、广东、浙江、西藏等地做了系统的气溶胶光学厚度观测<sup>[9~12]</sup>,所得资料不仅用于该地区气溶胶辐射特性及其变化规律的研究,而且为校验卫星反演的气溶胶光学厚度提供了数据。

用太阳光度计除了观测太阳直接辐射得到气溶

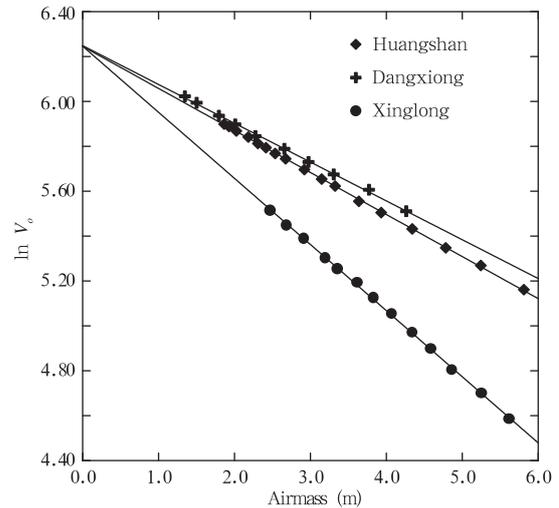


图 2 在 3 个不同高度用长法对太阳光度计定标结果  
Fig. 2 Result of Langley calibration for sun-photometer in three different locations

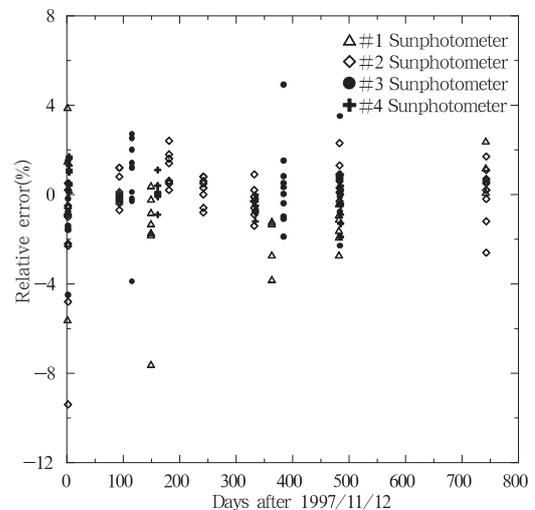


图 3 用标准灯的 4 台太阳光度计定标系数的长期变化(从 1997 年 11 月 12 日开始)  
Fig. 3 Relative error of standard lamp calibration for all four sun-photometers from 12 Nov 1997

胶光学厚度以外,还可以测量日周光和太阳所在地平纬圈的天空散射光,用以反演散射相函数及气溶胶折射率等许多重要的参数。我们在 1987 年就提出了通过逐次迭代的方法从测量的天空亮度分布得到一次散射的天空亮度分布的方法<sup>[13]</sup>,并进一步反演气溶胶散射的相函数和折射率<sup>[14]</sup>,取得了很好的结果。

### 3.2 浊度计和黑碳仪地面测量气溶胶的辐射特性

在研究气溶胶直接辐射强迫时,气溶胶的单散射反射率是一个十分关键的参数,它反映了在总的气溶胶消光中,散射和吸收作用各占了多大的比重。

这个量没有直接的测量方法,只能通过测量气溶胶的散射系数和吸收系数来计算,也可以通过各种遥感方法来反演。但相对于遥感方法而言,测量气溶胶的散射和吸收系数还算是一种直接的方法,而且常用于对遥感反演结果的检验。

直接测量气溶胶散射系数的方法首推积分浊度计(Nephelometer)。Beutell 等<sup>[15]</sup>首先在 1943 年提出了这种装置的原理,Middleton<sup>[16]</sup>又对它进行了详细的讨论。其原理可查阅大气物理教材<sup>[3]</sup>。我们使用 M9003 型积分浊度计,这是一种单波段的装置,用于测量 532 nm 波长气溶胶散射系数。由于仪器已设置了零点校准和灵敏度校准,零点校准可以设置在每天午夜自动做一次,灵敏度校准要用标准气体,例如 CO<sub>2</sub> 或 F22,每 10 d 到 30 d 人工校准一次。只要注意每天的零点和每次灵敏度校准的结果没有太大的波动,仪器所测的气溶胶散射系数就是可信的。

吸收系数的测量是远比散射系数困难的课题。早年都是把气溶胶颗粒采集在滤膜上,再用光学的方法进行测量。在 20 世纪 80 年代,我们就研制了用积分屏方法测量气溶胶吸收系数和当量碳的装置<sup>[17]</sup>。在该方法中将气溶胶样品采集在孔径为 0.4 μm 的 Nuclepore 滤膜上,再将滤膜放入由两组毛玻璃组成的积分池中,测量滤膜上的气溶胶粒子对光的衰减。为了保证这种衰减确实是由于气溶胶的吸收而不是由于其散射所造成的,必须调整积分池的结构,使它对散射作用完全不敏感。为了检验这一点,可以在滤膜上采集足够数量对所测波长没有吸收的气溶胶粒子进行试验。对可见光波段可采用分析纯的 NaCl 粒子。图 4 显示当滤膜上 NaCl 重

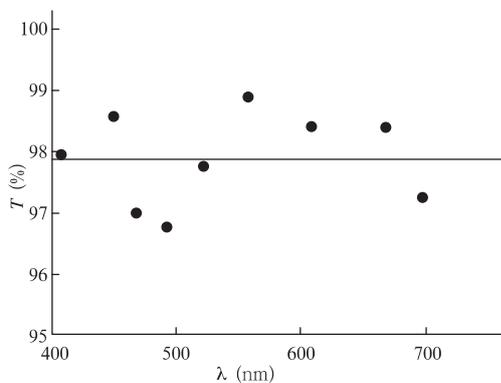


图 4 积分池对粒子散射效应的消除结果  
Fig. 4 The removed of the scattering effect by the integrating plate

量已达到 0.8 mg 时,将它置入积分池中只造成不到 3% 的光的衰减,表明该积分池确实能很好地消除散射的影响,通过吸收池所测到的光衰减是由于气溶胶粒子的吸收所造成的。积分池虽然可以解决散射过程的干扰,但并不能解决由于气溶胶粒子被采集在滤膜上而改变的在空气中原来的分散状态。要解决这个问题要利用声光法的仪器<sup>[18]</sup>,目前这类设备已成为测量气溶胶吸收系数的标准方法,常用于和其他仪器的校验工作。

从 2003 年开始,我们引进了用于测量气溶胶吸收系数和黑碳浓度的黑碳仪(AE-16 Aethalometer),这是一种单波段的设备,测量 880 nm 波段的气溶胶粒子的吸收系数,并推算黑碳浓度。其原理是把气溶胶粒子采集到纤维滤膜上,测量粒子对光的衰减。仪器利用纤维滤膜的多次散射效应减小粒子散射造成光衰减对测量的干扰。由于测量过程中已设置了参考光束和测量光束,每组测量都测暗电流,因此从透过率的测量来讲仪器是完全可以保证测量的可靠和精度<sup>[19]</sup>。唯一的缺点是单靠纤维中的多次散射并不能完全解决散射对测量的干扰,另外把粒子采集到膜上也改变了它们在大气中分散的状态,因此用黑碳仪测出的气溶胶吸收系数和黑碳浓度还有必要与其他仪器进行校验。我们用光声法仪器测得的气溶胶吸收系数与黑碳仪的结果进行了比较,发现所测的吸收系数系统偏大 5%。为了检验黑碳仪测量中散射的影响,将黑碳仪的观测结果与多角度气溶胶吸收仪(MAAP)进行了比较,发现黑碳仪测量的黑碳浓度系统偏大 10%,表明黑碳仪中所用的纤维膜还不能完全消除散射的影响。看来适当的修正是必要的。

但总体来说,积分浊度计和黑碳仪配合还是可以对气溶胶的散射系数和吸收系数进行有效的监测,综合这两份资料,就可以得到气溶胶单散射反射率的信息。在过去 2 年多期间,我们在北京、临安等地进行了系统的测量<sup>[11,19]</sup>,得到了有关气溶胶辐射特性的一批数据。图 5 是 2003 年 6 月至 12 月在北京测得的气溶胶单散射反射率的分布,总的平均值为 0.793。

### 3.3 散射相函数和气溶胶粒子谱的观测

气溶胶的辐射特性除了散射系数、吸收系数和单散射反射率外,一个很重要的参数是散射相函数,常用对称度因子  $g$  来表示。散射相函数一般用所测的气溶胶粒子谱,用米散射理论计算而得。计算过程肯定会带来许多误差,例如关于球形粒子的假

设和对粒子折射率的假定。直接测量相函数和不对称度因子都很困难,现在有些积分浊度计提供了测量总的散射系数(散射角  $3^{\circ}\sim 177^{\circ}$ )和后向散射系数(散射角  $90^{\circ}\sim 177^{\circ}$ ),这为直接测量  $g$  值提供了很大的方便。

我们在过去几年利用振荡石英微天平气溶胶多级采样器在北京、内蒙、青海、广东、甘肃和浙江等多处进行了气溶胶粒子谱的观测,积累了一批资料。振荡石英微天平气溶胶多级采样器利用石英振荡晶体作为气溶胶粒子的采集器,当石英振荡晶体上气溶胶的沉积量增加,石英振荡晶体的振荡频率下降。测量频率的变化便可以算出沉积在晶片上气溶胶的质量浓度。多级采样器共分 10 级,各级的切断直径分别为 25,12.5,6.3,3.2,1.6,0.8,0.4,0.2,0.1 和  $0.05\ \mu\text{m}$ 。因此利用该仪器可测很宽范围中气溶胶粒子的质量谱分布。在假设了气溶胶粒子的密度后(假设密度为  $2\ \text{g}/\text{cm}^3$ ),还可以算出数密度谱。图 6

给出 2002 年在浙江临安站所观测的气溶胶质量谱和数密度谱。

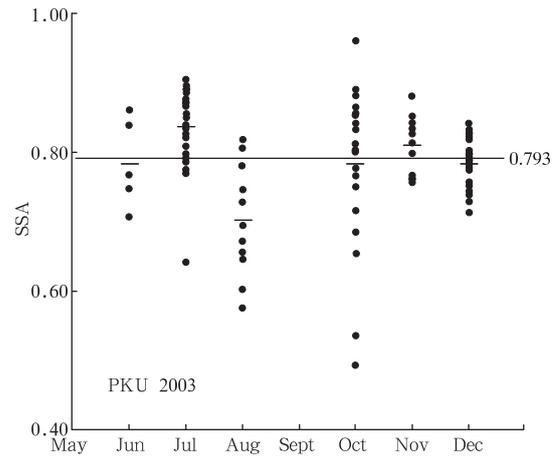


图 5 北京地区气溶胶单散射反射率监测结果  
Fig. 5 The observe result of the single scattering albedo in Beijing

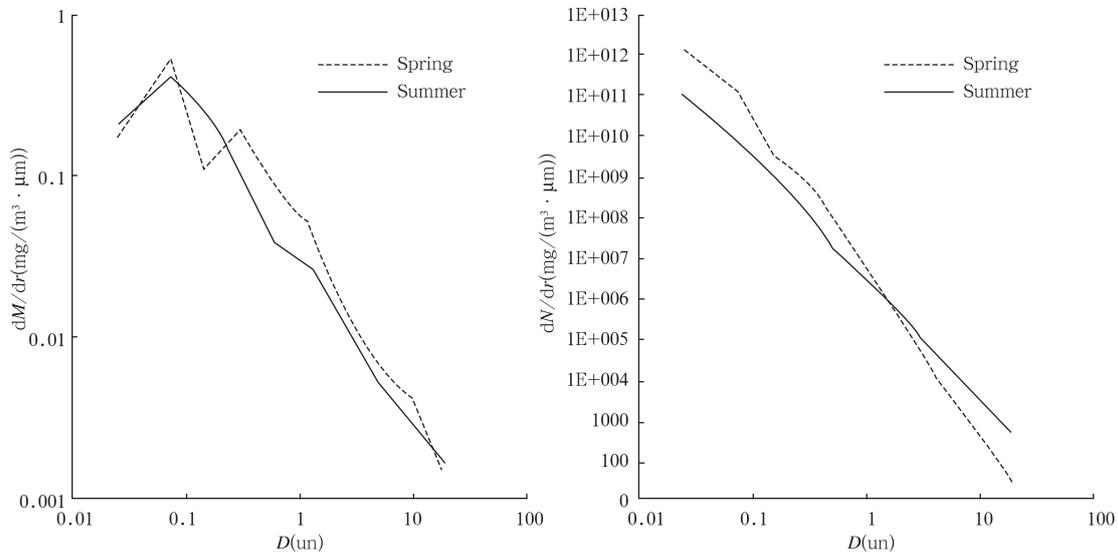


图 6 临安冬季和夏季平均气溶胶质量密度谱(a)和数密度谱(b)  
Fig. 6 Summer and winter average size distribution of aerosol in Linan

#### 4 利用卫星遥感气溶胶光学厚度的分布

利用卫星遥感是获取大范围气溶胶辐射特性的不可替代的方法,虽然目前所得的资料是以气溶胶光学厚度为主,但随着新的卫星遥感探测器的启用,多波段、多角度、多时次、多偏振方向遥感信息的使用,完全有可能获取全球范围气溶胶的各种辐射特性参数。

卫星遥感气溶胶辐射特性的原理并不复杂,卫

星探测器所测到地球大气系统某一方向发出的辐射包括两部分,第 1 部分是大气层中分子和气溶胶粒子的散射(包括多次散射),第 2 部分是太阳辐射透过大气射到地面,再由地面反射射向卫星,这部分辐射还需要考虑大气层和地面的多次反射。综合考虑这两部分的辐射,卫星测到的地气系统反射率一般可写成

$$R_v = R + \frac{T^{m_1} T^{m_2} \alpha_g}{1 - R\alpha_g} \quad (5)$$

这里  $R_v$  是卫星观测到的表观反射率,  $R$  是大气层的反射率,  $T$  是大气层的垂直透过率,  $m_1, m_2$  是取决于太阳天顶角和卫星观测天顶角的大气质量,  $\alpha_g$  为地面反射率。注意式(5)和式(1)是非常相似的, 实际上两式所考虑的物理过程也是一样的。仔细分析式(5)的各项可以发现, 卫星测到的表观反射率取决于 4 组变量, 形式上可写为:

$$R_v = f(\theta, \phi, \theta_0, \phi_0; \delta; \alpha_g; n(r), m) \quad (6)$$

其中  $\theta, \phi, \theta_0, \phi_0$  是卫星观测的天顶距、方位角和太阳的天顶距和方位角, 被称为几何因子;  $\delta$  为大气的厚度, 包括空气分子和气溶胶的厚度;  $\alpha_g$  为下垫面的反射率;  $n(r), m$  为气溶胶的粒子谱和复折射率, 可以称它为气溶胶的微物理参数, 它取决于对气溶胶模型的选择。

在决定表观反射率的 4 组变量中, 几何因子可以直接计算, 光学厚度和地面反射率 2 个参数经常是遥感的目标, 气溶胶模型则是最难确定的参数, 通常我们只能做一些简单的假设, 从有限的可选模型中选择一种。

但即使在气溶胶模型选定之后, 从卫星测到的一个表观反射率也只能反演出一个未知量, 因此在光学厚度和地面反射率这两个参数之间只能选择一个, 而另一个需要知道。根据遥感目的不同, 选择哪个参量作为未知量是不同的, 在气溶胶遥感时我们选择光学厚度为未知量, 这时地面反射率应当已知, 而在遥感应应用部门, 他们选择地面反射率为未知量, 那么光学厚度应当是已知的。这当然是一种无奈的做法, 如果卫星能测到更多的参数, 也就可以反演得到更多的未知量, 下面将会讨论的多角度、多波段等方法就可以部分地解决这个问题。

对目前应用最广的利用一个表观反射率的观测数据反演气溶胶光学厚度而言, 地面反射率和气溶胶模型必须设法确定。在早期的工作中, 用 NOAA 卫星的 AVHRR 可见光通道资料反演海洋上空的气溶胶光学厚度<sup>[20]</sup>。因为海水(应当说是清洁的海水)的反射率很低(0.02~0.05)而且稳定, 因此可以用一些简单的假设指定海水的反射率。另外海洋上空气溶胶模型也比较好确定。因此 NASA 很早就开始洋面上空气溶胶光学厚度的反演, 并每周一次公布洋面上空平均气溶胶光学厚度分布的资料。

#### 4.1 MODIS 之前的工作

直到 2000 年 Terra 所携带的 MODIS 设备上天之前, 关于陆地上空气溶胶光学厚度的反演工作

一直没有解决好。1998 年开始的中国地区气溶胶辐射特性研究课题使用了 2 种方案来利用当时可以获得的卫星资料反演中国地区的气溶胶光学厚度<sup>[21~23]</sup>, 其一是选择中国境内 25 个湖泊的水面作为目标物, 利用静止卫星 GMS-5 可见光通道所测的表观反射率来反演气溶胶光学厚度, 其出发点是水面的反射率会比较稳定。另一种方法是利用 TOMS 所测的紫外通道(360 nm)的表观反射率数据来反演气溶胶光学厚度, 因为在紫外波段, 地表反射率都很低, 不管是植被密集的地区还是无植被地区, 可以简单地假定一个地表反射率值进行反演。当然, 所有这些反演过程中也都会遇到气溶胶模型的选择问题。

在利用 25 个湖面作为目标物反演气溶胶光学厚度工作中会碰到几个问题。第 1 是这些湖面的反射率如何确定? 最后是选用清洁日的方法, 即每个月选择一个最清洁的日子(表观反射率最低), 假设清洁日气溶胶光学厚度为 0.1, 由此算出该湖的反射率, 并应用到这个月用以反演计算气溶胶的光学厚度。用上述方法算出的湖面反射率是否确实适用由下面 2 种考虑来检验: (1) 反演出的湖面反射率在 1 a 中应有合理的变化规律; (2) 在有太阳光度计观测的点, 最后反演的厚度应当合理。第 2 个问题是气溶胶模型应怎样选择? 因为是反演中国广大地区的气溶胶光学厚度, 所以首选是 SRA 模型中大陆气溶胶模型。但也用多波段太阳光度计所测的光学厚度随波长变化的规律进行了检验, 最后显示选用大陆型气溶胶模型还是合理的。第 3 个问题是反演气溶胶光学厚度的正确性如何检验? 课题组织了在 5 个湖(北京的密云水库、安徽的巢湖、广东的新丰江水库、青海的青海湖以及西藏的纳木错)附近太阳光度计的观测, 用以检验卫星反演气溶胶光学厚度。比较结果显示, 至少在季度平均值上两者的符合程度是可以接受的。据此, 最后用 25 个点的反演资料给出 4 个季度中国气溶胶光学厚度分布的图像<sup>[8, 22]</sup>。图 7 给出利用 25 个湖面反演的中国气溶胶光学厚度的季节分布。这个工作的水平并不很高, 这个结果存在一定误差, 其原因一是 25 个点对中国广大地区来说是太少了一点, 而且因为要依赖湖面, 在空间分布上也不理想; 另一个原因是反演精度并不高, 因此只能得到季节的平均分布。

在利用 25 个湖面反演气溶胶光学厚度分布的同时, 也用 TOMS 360 nm 资料反演。如前所说, 在

紫外波段地表反射率较低,有利于反演工作。图 8 给出用 TOMS 资料反演北京地区气溶胶光学厚度

与上甸子站太阳光度计观测结果的对比及反演得到北京地区气溶胶光学厚度的季节变化。

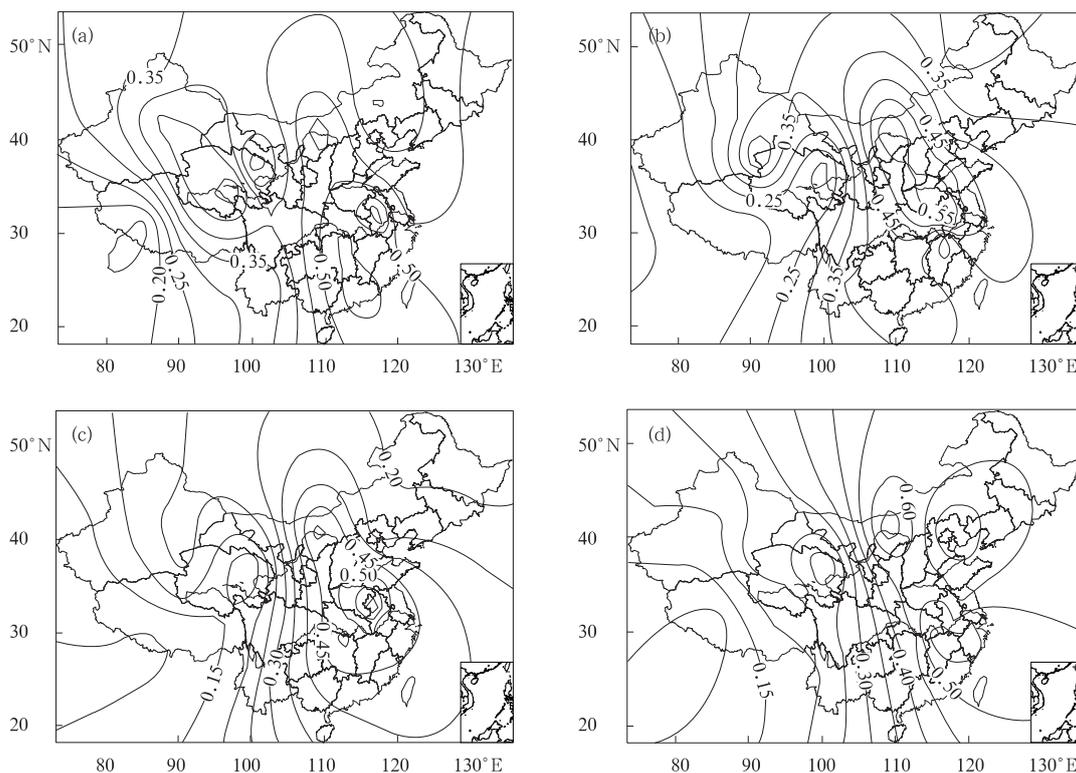


图 7 用 25 个湖反演中国地区气溶胶光学厚度季度分布 (A,b,c,d 分别为春、夏、秋、冬四季)

Fig. 7 The season distribution of the aerosol optical depth over China based on 25 lakes retrieval (a, b, c, d for spring, summer, autumn and winter)

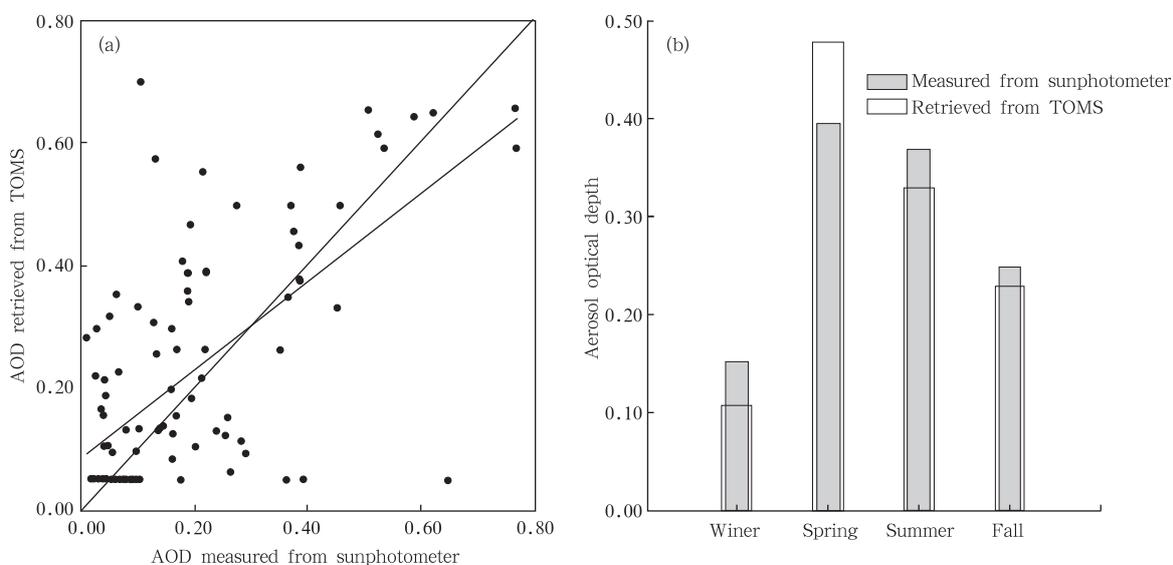


图 8 利用 TOMS 资料反演气溶胶光学厚度和太阳光度计观测结果的对比(a) 及 4 个季度的平均光学厚度(b)

Fig. 8 The comparison of the aerosol optical depth with sun-phothmeter and retrieval by TOMS data (a) and the seasen average (b)

#### 4.2 利用 MODIS 资料反演气溶胶光学厚度

2000 年 8 月 Terra 上的 MODIS 正式工作以来,由 Kaufman 等<sup>[24]</sup>开始的暗背景反演大陆上空气溶胶光学厚度的方法就成为这一领域最重要方法。暗背景反演方法的基本依据是根据 Kaufman 等在美国多处飞机观测的结果认为对植被条件较好的暗背景条件下,MODIS 第 1,3 通道的地表反射率和第 7 通道的地表反射率之间有简单的线性关系。由于 7 通道波长较长( $2.13 \mu\text{m}$ ),大气散射的影响不大,卫星测到的表观反射率就是地面反射率。这样,用 MODIS 7 通道所观测的表观反射率可以容易地算出 1,3 通道的地表反射率。这就解决了卫星反演气溶胶光学厚度中最困难的一个问题。当然在卫星反演气溶胶光学厚度时还有一个困难就是气溶胶模型的选择问题。Kaufman 等的方法中通过同时对 2 个通道进行反演的方法来解决。因为对某种气溶胶模型,所用的 2 个通道( $0.49$  和  $0.66 \mu\text{m}$ )的光

学厚度比应当有一定的值。当所用的气溶胶模型不正确,反演得到的光学厚度之比也不对,据此可对气溶胶模型进行调整。根据暗背景反演方法,NASA 每天在网上提供全球绝大多数地区气溶胶光学厚度的反演结果,空间分辨率为  $10 \text{ km}$ 。

我们的工作首先是要检验这一份数据对中国大陆是否适用,为此在北京、浙江临安和香港开展太阳光度计的观测<sup>[11,25,26,27]</sup>,以便和 MODIS 反演结果进行检验。检验的结果表明用暗背景方法反演的  $10 \text{ km}$ 分辨率的气溶胶光学厚度对中国东部地区植被条件较好的地区还是适用的。图 9 是在北京、临安和香港的相关图。在此基础上得到中国东部地区气溶胶光学厚度分布,并把这一资料用于分析不同地区气溶胶分布的特性及研究区域间气溶胶的输送问题<sup>[28~33]</sup>。图 10 为中国东部地区气溶胶光学厚度的年平均分布。

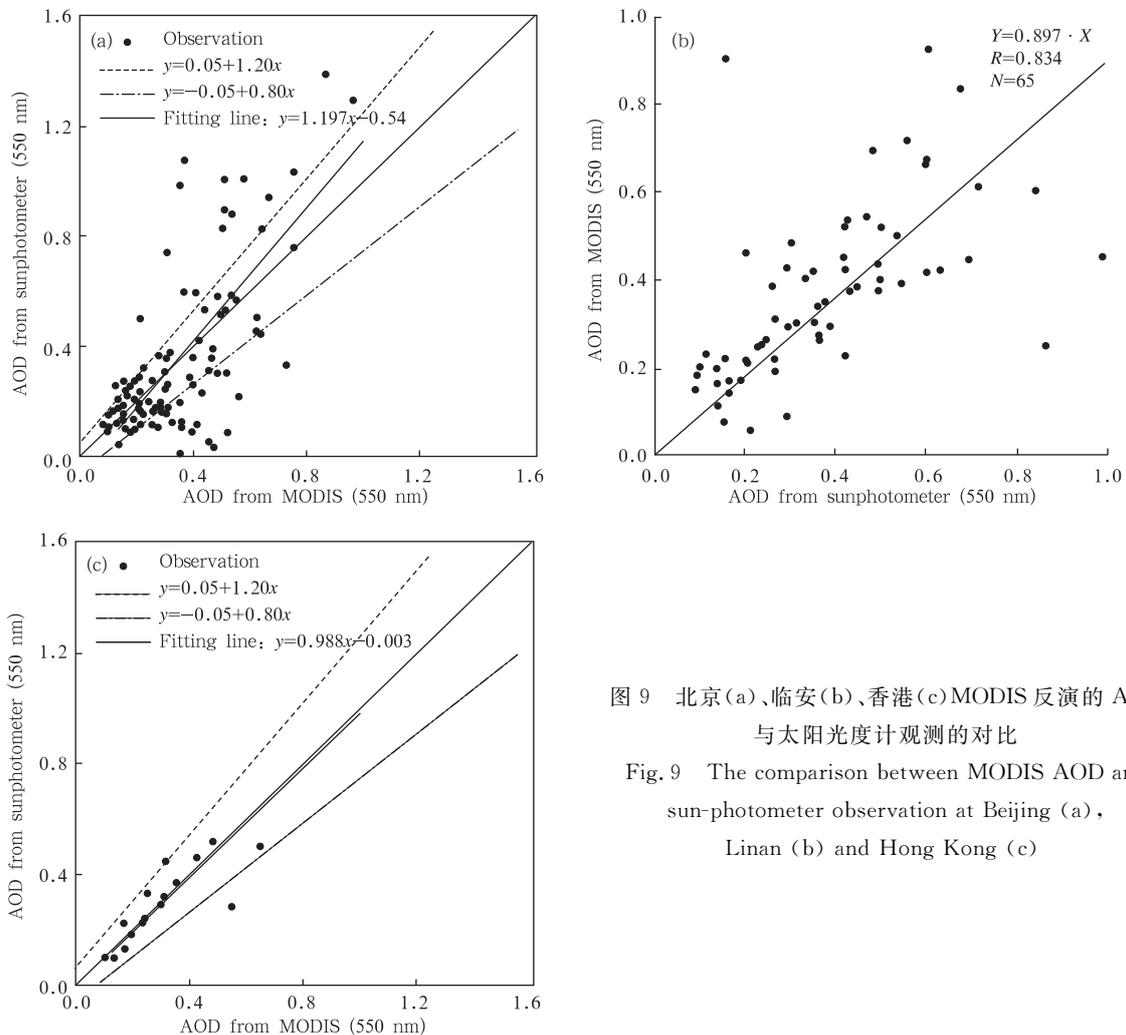


图 9 北京(a)、临安(b)、香港(c)MODIS 反演的 AOD 与太阳光度计观测的对比

Fig. 9 The comparison between MODIS AOD and sun-photometer observation at Beijing (a), Linan (b) and Hong Kong (c)

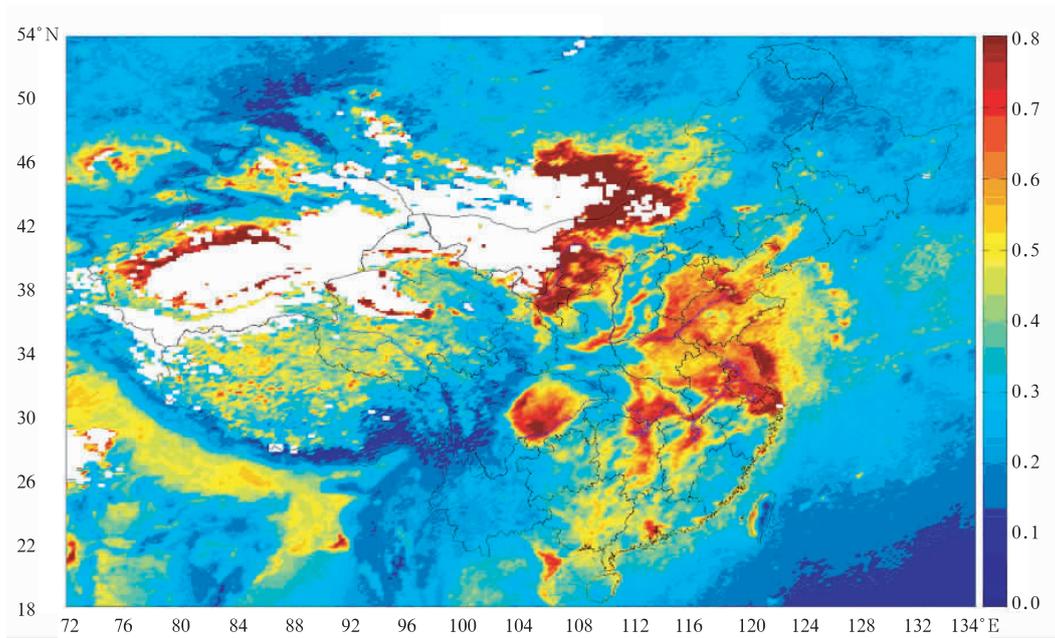


图 10 用 MODIS 资料反演的中国地区 2002 年平均气溶胶光学厚度分布  
Fig. 10 The annually averaged MODIS AOD over land area of China (2002)

NASA 提供的 MODIS 气溶胶产品的空间分辨率是 10 km, 这对研究城市的气溶胶污染是太低了。经研究 MODIS 1 km 分辨率的资料有可能做相应 1 km 分辨率的气溶胶光学厚度的反演工作<sup>[34]</sup>。在此基础上的反演产品已被应用到香港和北京等城市气溶胶分布的研究中。

虽然暗目标方法反演气溶胶光学厚度是相当成功的, 但对中国广大地区而言仍有改进的必要。一些明显的问题包括地面反射率的计算方法是否合适? 气溶胶模型应当如何确定? 对高反射率的情况反演工作应如何进行?

从 MODIS 7 通道的观测值推算 1 和 3 通道的地面反射率的方法是在美国用飞机观测所得的资料统计而得的, 对中国广大地区, 尤其是那些干旱和半干旱地区, 很可能是需要做适当的修正。从地面用太阳光度计和 MODIS 反演结果对比来看, 北京的结果也较差, MODIS 反演的光学厚度偏大, 这显示

可能地面反射率估计偏低了。为此我们用清洁日的方法检验了北京地区这 3 个通道下垫面反射率之间的关系。选择清洁日, 即大气特别清洁, 气溶胶光学厚度十分均匀的日子, 这时可人为地假定整个地区气溶胶光学厚度均为太阳光度计观测的值, 在假设了气溶胶模型以后, 就可以算出 1 和 3 通道的地面反射率, 再和对应的 7 通道反射率进行统计回归。表 1 给出几次统计的结果。从表中的结果来看, 1,7 通道的比例系数应取 0.64 左右, 3,7 通道的比例系数应取 0.29 左右。和 Kaufman 所取的 0.5 和 0.25 相比, 要增大一些。考虑到北京处于半干旱地区的边缘, 植被条件不很好, 这种增大也是合理的。

第 2 个需要改进的是气溶胶模型的选取问题。如果局限于 SRA 模型, 那么只有有限的几种模型可供选择, 但实际情况会复杂得多。Kaufman 等<sup>[35]</sup>也提出了动态气溶胶模型, 这是他们从不同光学厚度条件下气溶胶粒子谱有变化这个观测事实中总结出

表 1 用“清洁日”方法统计的北京地区 1 和 7, 3 和 7 通道地面反射率比

Table 1 The statistic result of the surface albedo ratio between channel 1/7 and 3/7 based on “clear day method”

日期 年/月/日	光度计 AOD 550 nm	Rch1-7			Rch3-7		
		未做大气订正	大陆型	城市型	未做大气订正	大陆型	城市型
2002/09/14	0.1516	0.468	0.604	0.639	0.098	0.275	0.286
2002/11/01	0.1349	0.483	0.634	0.678	0.156	0.295	0.323
2002/11/08	0.0475	0.518	0.641	0.658	0.195	0.299	0.311
平均			0.626	0.658		0.290	0.307

来的。动态气溶胶基本上还是沿用 SRA 的思路,每种实际的气溶胶都是由几种标准的气溶胶模型组合而成,但其中组合的比例与光学厚度有关。在利用动态气溶胶模型反演气溶胶的光学厚度时,首先用大陆型气溶胶模型进行反演得到一个光学厚度的值,再据此修改气溶胶模型。这样反复几次就能得到合适的值。我们试用了这一思路,其结果稍有改进,但改进并不明显。

自从 2002 年 Aqua 卫星开始工作以后,同时有 2 颗卫星携带有 MODIS 设备在进行工作,它们通过地面上某一点的时间相差 2~3 h,这为多时次、多角度反演大气气溶胶光学厚度的工作创造了极好的机会。唐家奎(Tang Jiakui)等<sup>[36]</sup>试验了利用 Terra 和 Aqua 2 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一些结果。但所用的辐射传输模型较为简单,不利于反演精度的提高。我们根据唐家奎等的思路,用完整的辐射传输模式计算代替了简化的计算。

唐家奎等的反演方法的基本思路:

(1) 气溶胶光学厚度随波长的变化可以用 Ångström 公式来表示

$$\delta(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (7)$$

对 2 颗卫星观测而言,由于观测时间相隔了将近 2 h, $\beta$  值可能有变化,但  $\alpha$  值不变,即气溶胶数量有变化,但气溶胶模型不变。

(2) 每个波段有各自的地表反射率值。对于 2 颗卫星观测,地表反射率也有变化,但它们的比值对不同波段来讲是相同的,即

$$\frac{\alpha_g(\lambda_1, t_1)}{\alpha_g(\lambda_1, t_2)} = \frac{\alpha_g(\lambda_2, t_1)}{\alpha_g(\lambda_2, t_2)} = \frac{\alpha_g(\lambda_3, t_1)}{\alpha_g(\lambda_3, t_2)} = \frac{\alpha_g(\lambda_7, t_1)}{\alpha_g(\lambda_7, t_2)} = K \quad (8)$$

(3) 反演气溶胶光学厚度用 MODIS 的 1, 3, 4 共 3 个通道,2 颗卫星可提供 6 个测量的表观反射率值。未知函数有 3 个波段的地表反射率值,2 个时刻的  $\beta$  值和一个  $\alpha$  值,也是 6 个。这样方程应当闭合。2 个时刻地表反射率的比值  $K$  可用 2 个时刻 7 通道的表观反射率求出。

这一方案中所用的 2 个假定是可以接受的,而本方案可以做到方程闭合,如果用更多通道还可以提供额外的信息,对提高反演精度还会有好处,困难是数值计算十分麻烦。我们做了一些试算,图 11 给出一些结果。

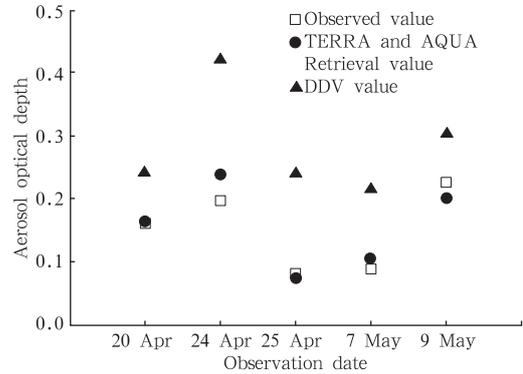


图 11 用二颗卫星的联合反演方法得到的光学厚度与暗目标方法的对比  
Fig. 11 Comparison of the retrieval result of the aerosol optical depth with the dark dense vegetation (DDV) method, SYNTAM method and observed by sun-photometer

从图中所给的 5 d 计算结果来看,用 2 颗卫星的联合反演方法明显地优于原来的暗背景反演方法。用暗背景反演得到的结果比太阳光度计所测的要偏大,其原因就是前面讨论过的对地面反射率的估计偏小了。用 2 颗卫星的联合反演方法的最大好处是能直接反演得到各通道的地面反射率和气溶胶光学厚度随波长变化的 Ångström 指数。利用所测的地面反射率可计算它与 7 通道地面反射率之比,从而可以研究对暗背景反演方法的改进。表 2 给出从这 5 d 计算得到的 1, 3 通道地表反射率与 7 通道反射率之比。可以看到这 5 d 的比值基本稳定,平均比值分别为 0.65 (对 1, 7 通道)和 0.28 (对 3, 7 通道)。这一结果和前面用清洁日方法统计的结果 (0.64 和 0.29) 是基本一致的。另外,用 2 颗卫星的联合反演方法可以得到 Ångström 指数与太阳光度计所得指数的符合程度也是很好的,其结果见表 3 (2005 年 4~5 月,北京)。

表 2 SYNTAM 反演的 1, 3 通道地表反射率和第 7 通道表观反射率的比  
Table 2 The surface albedo ratio between channel 1/7 and 3/7 based on SYNTAM

日期	4月20日	4月24日	4月25日	5月7日	5月9日
$\alpha_g(\lambda_1)/\alpha_g(\lambda_7)$	0.64	0.64	0.67	0.65	0.69
$\alpha_g(\lambda_3)/\alpha_g(\lambda_7)$	0.28	0.30	0.26	0.29	0.26

表 3 SYNTAM 反演得到的气溶胶 Ångström 指数和观测比较  
Table 3 Comparison of the Ångström index from SYNTAM and observed

日期	4 月 20 日	4 月 24 日	4 月 25 日	5 月 7 日	5 月 9 日
观测的 $\alpha$	1.23	0.95	1.32	1.67	1.48
反演的 $\alpha$	1.22	0.89	1.44	1.88	1.64

## 5 讨 论

对气溶胶的研究,目的在于改善我们对气溶胶对气候变化和大气环境作用的认识。也想进一步了解人为气溶胶在其中的作用。根据现有模式的结果可以估计气溶胶总的辐射强迫在量级上与温室气体相当,但符号相反,但它的不确定性很大。

决定气溶胶直接辐射强迫大小的特性是它的散射系数、吸收系数、散射相函数,以及它们随波长的变化,因此要得到这些参数随时间和空间变化的有代表性的资料。而得到这些资料的途径无非是直接的在线观测、遥感反演和数值模式计算。直接的在线观测包括在地面和空中(用飞机、气球)进行采样或直接的观测,其局限是在空间上是不连续的,在时间上也有很大的限制,但它在测量的可信度上是最高的,而且可测的量也是最丰富的,对有些量来说,它可能是唯一的方法。遥感观测包括地基遥感和空基遥感,它可以得到大范围和长时间系统的数据,但它的真实性需要用直接观测来检验,在经过必要的检验后,它是取得系统数据的最有力手段。数值模式计算虽然不是观测,但它有能力在已有的观测资料的基础上,根据已知的物理规律,得到一些尚无法直接观测到的数据,包括一些无法观测到的物理量或没有直接观测数据的点位或时段,它对保证资料的完整性和合理性都有重要意义。因此需要将上述 3 种途径有机地结合起来,才能得到能用于研究气候变化和大气环境质量问题所需的基础数据。

## 参考文献

- [1] 尹宏. 大气辐射学基础. 北京:气象出版社,1993. pp  
Yin Hong. The Fundamental of Atmospheric Radiation. Beijing: China Meteorological Press, 1993
- [2] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science, New Series*, 1992, 255(5043): 423-430
- [3] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国等. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003  
Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. *Atmospheric Physics*. Beijing: Peking University Press, 2003
- [4] Coakley J A Jr, Cess R D. The effect of atmospheric aerosols on climate change. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 1677-1692
- [5] Deepak A, Box M A. Forwardscattering corrections for optical extinction measurements in aerosol media I. monodispersions. *Applied Optics*, 1978, 17 (18): 2900-2908
- [6] 赵柏林, 王强, 毛节泰等. 光学遥感大气气溶胶和水汽的研究. *中国科学*, 1983, (10): 951-962  
Zhao Bailin, Wang Qiang, Mao Jietai, et al. Research on the optical remote sensing of the water vapor and atmospheric aerosols. *Science in China Ser. B (in Chinese)*, 1983, (10): 951-962
- [7] 毛节泰, 王强, 赵柏林. 大气透明度光谱和浑浊度的观测. *气象学报*, 1983, 41(3): 322-332  
Mao Jietai, Wang Qiang, Zhao Bailin. The observation of the atmospheric transparency spectral and turbidity. *Acta Meteor Snica (in Chinese)*, 1983, 41(3): 322-332
- [8] Zhang Junhua, Mao Jietai, Wang Meihua. Analysis of the aerosol extinction characteristics in different areas of China. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19(1): 136-152
- [9] 张军华, 王美华, 毛节泰. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正. *大气科学*, 2000, 24(6): 855-859  
Zhang Junhua, Wang Meihua, Mao Jietai. Error analysis and correction for multi-wavelength sun-photometer aerosol remote sensing. *Chinese J Atmospheric Sci (in Chinese)*, 2000, 24(6): 855-859
- [10] 张军华, 刘莉, 毛节泰. 地基多波段遥感西藏当雄地区气溶胶光学特性. *大气科学*, 2000, 24(4): 549-558  
Zhang Junhua, Liu Li, Mao Jietai. Remote sensing of aerosol optical properties with multi-spectral sun photometer in the Damsung region Tibetan Plateau. *Chinese J Atmospheric Sci (in Chinese)*, 2000, 24(4): 549-558
- [11] 刘桂青, 李成才, 朱爱华等. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究. *上海环境科学*, 2003, (增刊): 58-63  
Liu Guiqing, Mao Jietai, Li Chengcai, et al. Optical depth study on atmospheric aerosol in Yangtze River delta region. *Shanghai Environmental Sci (in Chinese)*, 2003, (Suppl): 58-63
- [12] 朱爱华, 李成才, 刘桂青等. 北京地区 MODIS 卫星遥感气溶胶资料的检验与应用. *环境科学学报*, 2004, 24(1): 86-90  
Zhu Aihua, Li Chengcai, Liu Guiqing, et al. Validation and application of MODIS remote aerosol information in Beijing. *Acta Scientae Circumstantiae (in Chinese)*, 2004, 24(1): 86-90
- [13] 毛节泰, 栾胜基. 大气散射相函数的计算. *大气科学*, 1985, 9

- (1): 107~111  
Mao Jietai, Luan Shengji. Determination of scattering phase function of the atmosphere. *Chinese J Atmospheric Sci (in Chinese)*, 1985, 9(1): 107-111
- [14] 黎洁, 毛节泰. 光学遥感大气气溶胶特性. *气象学报*, 1989, 47(4): 450~456  
Li Jie, Mao Jietai. Inverse of the property of atmospheric aerosols by optical remote sensing. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 1989, 47(4): 450-456
- [15] Beutell R R, Brewer A W. Instruments for the measurement of the visual range. *J Sci Instrum*, 1943, 26: 357-359
- [16] Middleton W E K. *Vision through the atmosphere*. Univ of Toronto Press, 1952
- [17] 栾胜基, 毛节泰. 大气气溶胶吸收系数的测量. *气象学报*, 1986, 44(3): 321~327  
Luan Shengji, Mao Jietai. The measurement of the absorption coefficient of atmospheric aerosol. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 1986, 44(3): 321-327
- [18] Moosmuller II, Arnott W P, Rogers C F, et al. Photoacoustic and filter measurements related to aerosol light absorption during the Northern Front Range Air Quality Study (Colorado 1996/1997). *J Geophys Res*, 1998, 103(13): 28149-28157
- [19] 娄淑娟, 毛节泰, 王美华. 北京地区不同尺度气溶胶中黑碳含量的观测研究. *环境科学学报*, 2005, 25(1): 17~22  
Lou Shujuan, Mao Jietai, Wang Meihua. Observational study of black carbon aerosol in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 2005, 25(1): 17-22
- [20] Stowe L L, Ignatov A M, Singh R R. Development, validation, and potential enhancements of the second-generation operational aerosol product at the national environmental satellite, data, and information service of NOAA. *J Geophys Res*, 1997, 102(14): 16923-16934
- [21] 毛节泰, 刘莉, 张军华. GMS-5 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究. *气象学报*, 2001, 59(3): 352~359  
Mao Jietai, Liu Li, Zhang Junhua. GMS-5 remote sensing of aerosol optical thickness over Chaohu Lake. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2001, 59(3): 352-359
- [22] 张军华, 斯召俊, 毛节泰等. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度. *大气科学*, 2003, 27(1): 23~35  
Zhang Junhua, Si Zhaojun, Mao Jietai, et al. Remote sensing optical depth over china with GMS-5 satellite. *Chinese J Atmospheric Sci (in Chinese)*, 2003, 27(1): 23-35
- [23] 张军华, 毛节泰, 王美华. 利用 TOMS 资料遥感沙尘暴的研究. *高原气象*, 2002, 21(5): 457~465  
Zhang Junhua, Mao Jietai, Wang Meihua. Remote sensing dust storm using TOMS data. *Plateau Meteorol (in Chinese)*, 2002, 21(5): 457-465
- [24] 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 Geophysical Research*, 1997, 102(14): 17051-17067
- [25] 毛节泰, 李成才, 张军华等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊): 127~135  
Mao Jietai, Li Chengcai, Zhang Junhua, et al. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations. *J Appl Meteorol Sci (in Chinese)*, 2002, 13(Suppl): 127-135
- [26] 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(19): 2094~2100  
Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Kaihan, et al. Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in Eastern China with MODIS products. *Chinese Sci Bull (in Chinese)*, 2003, 48(22): 2488-2495
- [27] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, et al. Global monitoring of air pollution over land from the Earth observing system—Terra moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). *J Geophys Res*, 2003, 108(21): 4661
- [28] 李成才, 刘启汉, 毛节泰. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染. *应用气象学报*, 2004, 15(6): 641~650  
Li Changcai, Mao Jietai, Liu Kaihan, et al. An aerosol pollution episode in Hong Kong with remote sensing products of MODIS and Lidar. *J Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2004, 15(6): 641-650
- [29] 徐祥德, 周丽, 周秀骥等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域. *中国科学*, 2004, 34(10): 958~966  
Xu Xiangde, Zhou Li, Zhou Xiujie, et al. Influencing domain of peripheral sources in the urban heavy pollution process of Beijing. *Science in China*, 2005, 48(D4): 565-575
- [30] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 遥感大气气溶胶及气溶胶产品的应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(增刊): 108~117  
Li Changcai, Mao Jietai, Alexis Kaihan Lau. Remote sensing aerosol with MODIS and the application of MODIS aerosol products. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 2003, 39(Supl): 108-117
- [31] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 用 MODIS 遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 1~7  
Li Changcai, Mao Jietai, Alexis Kaihan Lau. Characteristics of aerosol optical depth distributions over sichuan basin derived from MODIS data. *J Appl Meteorol Sci (in Chinese)*, 2003, 14(1): 1-7
- [32] 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, 46(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 Sci Bull (in Chinese)*, 2003, 48(18): 2010-

- 2017
- [33] 李成才, 毛节泰, 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(5): 869~880
- Li Changcai, Mao Jietai, Alexis Kaihon Lau. et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products. Chinese J Atmospheric Sci (in Chinese), 2003, 27(5): 869-880
- [34] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度. 大气科学, 2005, 29(3): 335~342
- Li Changcai, Mao Jietai, Alexis Kaihon Lau. Remote sensing of high spatial resolution aerosol optical depth with MODIS data over Hong Kong. Chinese J Atmospheric Sci (in Chinese), 2005, 29(3): 335-342
- [35] Lorraine A Remer, Yoram J Kaufman. Dynamic aerosol model: Urban/industrial aerosol. J Geophysical Res, 1998, 103(12): 13859-13871
- [36] Tang Jiakui, Yong Xue, Tong Yu, et al. Aerosol optical thickness determination by exploiting the synergy Terra and Aquq MODIS (SYNTAM). Remote Sensing of Environment, 2005, 94: 327-334

## OBSERVATION STUDY OF AEROSOL RADIATIVE PROPERTIES OVER CHINA

Mao Jietai Li Chengcai

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

### Abstract

A simple radiation balance model was used to simulate the variation of the aerosol direct radiative forcing with aerosol optical properties and surface reflectance. The results indicate when an aerosol layer is added into the original simple earth-atmosphere system, the apparent solar reflectance of the system may increase or decrease depending on the different combinations of aerosol single scattering albedo ( $SSA, \omega_0$ ), asymmetry factor ( $g$ ) and surface reflectance ( $\alpha_g$ ), but not directly related with aerosol optical depth ( $\tau$ ). The aerosol optical depth is proportional to the absolute value of the change of the apparent reflectance. The results also demonstrate that comprehensive observation data about aerosol radiative properties are very essential to quantitatively research on aerosol direct radiative forcing. In the recent years, we have investigated the aerosol radiative properties over China from space and in situ methods. The works include in situ measurements of aerosol optical depth by ground sun-photometers, measurements of aerosol scattering coefficient by nephelometers, measurements of aerosol absorption coefficient by aethalometers, and retrieval of aerosol optical properties by MODIS data. The results from sun-photometer observations are used to validate the MODIS standard products. For the region in Eastern China, the satellite remote sensing results can be acceptable mostly due to existing of the dark reflectance in this region. However, for the region without dense vegetation the surface reflectance results are possibly underestimated. Appropriate modification to the surface reflectance estimation may improve the accuracy of aerosol products. The value of SSA calculated from direct surface measurements of aerosol scattering and absorption in heating instruments is about 0.8. More observation is needed to further comprehensively investigate the question.

**Key words:** Atmospheric aerosols, Aerosol direct radiative forcing, Aerosol single scattering albedo, Aerosol optical depth.