

# 光学遥感大气气溶胶特性\*

黎洁 毛节泰

(北京大学地球物理系)

## 提 要

本文提出一种光学遥感大气气溶胶特性的新方法。由多波段望远光度计观测的太阳直接辐射和太阳所在地平纬圈天空亮度的相对分布值,同时反演出气溶胶散射相函数,整层大气的光学厚度随波长的变化,进而用“库”方法反演出气溶胶粒子的尺度谱和折射率的实部和虚部。对比平行观测的结果表明,光学遥感方法所得的结果是可信的。本文同时也讨论了北京地区大气气溶胶的光学参数在不同季节的变化。

## 一、引 言

大气气溶胶在大气环境中起着非常重要的作用。它对云雾形成过程起着决定性的作用,是云雾粒子形成中必不可少的凝结核;气溶胶对大气中的辐射过程也有明显的影响,它吸收并散射太阳辐射,影响着地球大气的热平衡状况,是影响气候变化的一个重要因子。人类活动所引起的大量粒子还造成了严重的环境污染问题。粉尘、酸性粒子和有机致癌物粒子还严重地威胁着人类的健康。

近年来我国对大气气溶胶的研究受到了相当的重视,由于北方干旱地区生态环境的破坏,地表扬尘,沙漠与黄土高原春季的尘暴已成为一种向大气中输送大量粒子的重要源地。加之我国的燃料体系主要是燃煤,大都未经彻底的消烟除尘即向大气中排放大量的烟尘。此外,交通运输、建筑和农业生产也人为地向大气排放了大量的粒子。因此在我国,尤其是北方地区,大气气溶胶造成的环境污染相当严重。

大气气溶胶的光学遥感在我国也已有许多工作,并发展了一批新的反演理论。遥感的内容包括大气气溶胶的粒子谱和折射率。但至今很少有人把遥感的结果与直接测量的结果进行对比。因此对遥感的结果是否合用,总还存有一些疑问,以致光学遥感方法虽有其优点,却迟迟未能运用到实际工作中去。本文试图在这方面作些探索,将遥感的结果与实测结果进行比较。为此利用地面粒子谱直接取样品测尺度谱,并利用积分屏法测量粒子的吸收系数及折射率虚部,用以比较。

虽然光学遥感大气气溶胶的方法已有不少发展,但大都要求仪器能进行亮度绝对量的测量。这给仪器的设计和外场应用都带来不少困难。本文提出的方法希望能免除这一困难,而通过亮度相对量的测量即能解决反演的要求。这对今后实际应用将是很有益的。

## 二、实验装置

光学遥感法中所用的主要仪器是北京大学地球物理系研制的多波长望远光度计<sup>[1]</sup>。

\* 本文于1987年9月26日收到,1988年3月16日收到修改稿。本文属国家自然科学基金资助课题。

它的七片滤光片中心波长为 0.532, 0.633, 0.828, 0.845, 0.989 和 1.05  $\mu\text{m}$ 。我们将光度计与 Apple II 计算机进行了联机, 使观测自动化。其总体结构如图 1。

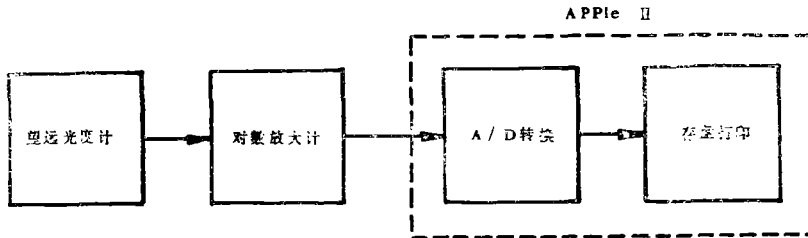


图 1 仪器总体结构图

用这一系统观测了太阳直接辐射和太阳所在地平纬圈天空的相对亮度分布。观测是在北京大学物理大楼楼顶进行的。观测期间从 1986 年 9 月到 1987 年 4 月。所有观测均是在晴朗无云的天气进行。

在积分屏法实验中, 首先用 Nuclepore 滤膜取样。膜的孔径为 0.4  $\mu\text{m}$ , 膜直径为 25 mm。采样后滤膜上气溶胶粒子的吸收特性, 用两片毛玻璃屏夹着进行测量<sup>[2]</sup>。在进行天空亮度观测及滤膜取样的同时, 还用 PC-2 QCM 气溶胶粒子分级取样器测量了地面粒子的质量谱。

### 三、光学遥感的计算方法

光学遥感的计算是要从观测的太阳所在地平纬圈天空亮度分布得到气溶胶的散射相函数和整层大气的光学厚度, 以便进一步推算粒子的谱分布和折射率。

在晴空条件下, 大气可以认为是一种平面分层介质, 可以用辐射传输方程计算天空散射辐射的分布。如果仅考虑一次散射, 则太阳所在地平纬圈上离太阳方位角为  $\phi$  处的天空亮度可写为<sup>[3]</sup>:

$$I(\tau_0, \mu_0, \phi) = \frac{\omega_0}{4} S_{0\lambda} e^{-\tau_0/\mu_0} P(\mu_0, \phi) \frac{\tau_0}{\mu_0} \quad (1)$$

其中  $\tau_0$  为观测点的光学厚度,  $\mu_0 = \cos \theta_0$ ,  $\theta_0$  为太阳天顶距,  $\omega_0$  为单散射反射率,  $\pi S_{0\lambda}$  为大气上界分光辐照度,  $P(\mu_0, \phi)$  为大气层平均相函数。

由(1)得:

$$P(\mu_0, \phi) = \frac{I(\tau_0, \mu_0, \phi)}{\frac{\omega_0}{4} S_{0\lambda} e^{-\tau_0/\mu_0} \frac{\tau_0}{\mu_0}} \quad (2)$$

由于相函数具有归一性

$$\int_{4\pi} P(\omega) d\omega = \int_{4\pi} \frac{I(\tau_0, \mu_0, \phi)}{\frac{\omega_0}{4} S_{0\lambda} e^{-\tau_0/\mu_0} \frac{\tau_0}{\mu_0}} d\omega = 1 \quad (3)$$

可得:

$$P(\mu_0, \phi) = 2 I(\tau_0, \mu_0, \phi) / \int_0^{2\pi} I(\tau_0, \mu_0, \phi) d\phi \quad (4)$$

对于太阳直接辐射有

$$I_S(\tau_0, \mu_0, \phi_0) = \pi S_0 e^{-\tau_0/\mu_0} \quad (5)$$

(2)式和(5)式相比有

$$\tau_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I(\tau_0, \mu_0, \phi)}{I_S(\tau_0, \mu_0, \phi_0)} \cdot P(\mu_0, \phi) \quad (6)$$

在地面观测不同波长的散射辐射, 则有

$$\begin{cases} P_\lambda(\mu_0, \phi) = 2 I_\lambda(\tau_{0\lambda}, \mu_0, \phi) / \int_0^{2\pi} I_\lambda(\tau_{0\lambda}, \mu_0, \phi) d\phi \\ \tau_{0\lambda} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_\lambda(\tau_{0\lambda}, \mu_0, \phi)}{I_S(\tau_{0\lambda}, \mu_0, \phi_0)} P_\lambda(\mu_0, \phi) \end{cases}$$

这样, 只要有了太阳所在地平纬圈天空一次散射亮度的相对分布, 就可以同时计算出  $P_\lambda(\theta)$  和  $\tau_{0\lambda}$ 。但由于观测的亮度中还包括有多次散射和地面反射等因素的影响, 必须从观测数据中扣除这些因素的影响, 才能得到正确的相函数和光学厚度值。为此采用逐次迭代法求解辐射传输方程, 以扣除多次散射的影响<sup>[4]</sup>。具体过程如下:

如果已知相函数, 整层大气光学厚度和地面反射率, 用逐次迭代法可算出天空亮度的分布, 其中包括一次散射  $I_1$ , 二次散射  $I_2 \cdots \cdots$ 。近似地可有

$$I(\tau, \mu, \phi) = I_1 + I_2 + I_3 + 1.5 \tau_0 \bar{I}_1 \quad (7)$$

其中

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_1(\tau, \mu, \phi) d\phi \quad (8)$$

可以将(7)式改写为

$$I(\tau, \mu, \phi) = I_1(1 + \eta) \quad (9)$$

$$\eta = \frac{I}{I_1} - 1 \quad (10)$$

$\eta$  为多次散射与一次散射的比值。利用  $\eta$  的计算值可以从测量的地平纬圈天空亮度中扣除多次散射的影响, 从而估计出散射相函数及大气垂直光学厚度。具体计算时先假设测量值即为一次散射之值, 从(4)和(6)式中求出相函数和  $\tau_0$ , 利用辐射传输方程计算出  $\eta$ , 利用  $\eta$ , 对测量值进行订正, 重新计算  $P$  和  $\tau_0$ 。这样反复迭代, 即可求出真实的相函数和光学厚度值。在上面的计算中, 各个波长都独立进行。因此, 测量了不同波长的天空散射辐射资料, 即可算出不同波长的相函数及光学厚度。在光学厚度分别为 0.5, 1, 2, 3,  $\phi \sim 10^\circ$  时, 多次散射在总散射中所占比例分别约为 37%, 70%, 96%, 99%。数值试验表明, 所用的反演方法在光学厚度大至 3 时仍能有效地用以推算大气的散射相函数和光学厚度。

光学遥感的第二步是要从相函数和光学厚度光谱进一步推算大气气溶胶粒子尺度谱及其折射率的变化。在此使用“库”方法。即选取不同的粒子谱, 在不同的折射率实部和虚部的数值下, 利用米散射公式计算出一组相函数和光学厚度的数据, 把它作为一个数据库贮存在计算机中, 然后用实测的结果与各种情况依次进行比较, 选取符合得最好的一组即为实测气溶胶相对应的特征。这一方法的局限性是显而易见的, 但也有其优点。在计算机容量允许时, 将库设计得较为完善, 则还是可以得出合理的结果的。在我们所用的库中, 假设了 7 种粒子谱分布, 15 个折射率实部值, 15 个折射率虚部值。敏感性试

验表明,对各种假设的情况,库方法都能给出合理的结果。

#### 四、结果及分析

利用上面的方法可以测出大气气溶胶的散射相函数,整层大气光学厚度,大气气溶胶粒子折射率的实部和虚部。上面这些特性都包括它们随波长的变化。另外还可算出大气气溶胶粒子的尺度谱。以下分别讨论在这段观测中所得的一些结果。

##### 1. 光学遥感法观测的结果

图 2 给出一个例子,可以看到散射相函数随波长的变化。从图中可以看到,随着波长的增加,相函数变得平坦,即前向散射逐渐减小,而后向散射的相对比重有所增加。这一现象可以用米散射理论进行解释。

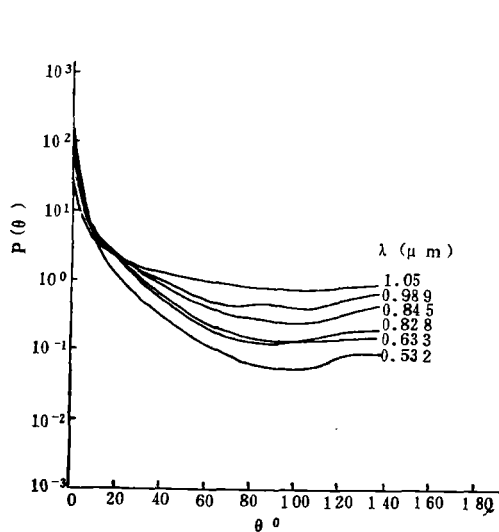


图 2 用遥感法算出的大气气溶胶散射相函数随波长的变化

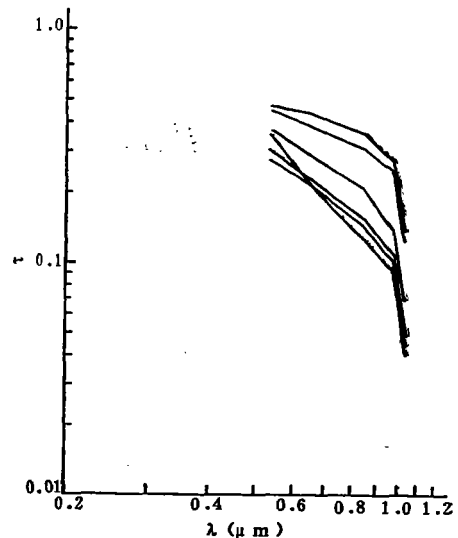


图 3 用光学遥感法算出大气气溶胶光学厚度  $\tau$  随波长变化

图 3 给出一个例子,可以看出整层大气光学厚度随波长的变化。而表 1 则总结了这 7 个月中大气光学厚度的平均值。从图中可以看到  $\tau_0$  随波长而减小。这一结果与许多以前

表 1 整层大气气溶胶光学厚度月平均值

时 间	波 长 ( $\mu\text{m}$ )						平均次数
	0.532	0.633	0.828	0.845	0.989	1.05	
1986.9	0.330	0.267	0.262	0.206	0.131	0.059	5
1986.10	0.345	0.286	0.280	0.212	0.153	0.087	11
1986.11	0.438	0.382	0.370	0.301	0.224	0.109	15
1986.12	0.448	0.395	0.385	0.311	0.227	0.108	5
1987.2	0.417	0.342	0.335	0.233	0.154	0.075	5
1987.3	0.462	0.413	0.403	0.340	0.260	0.126	5
1987.4	0.363	0.288	0.373	0.193	0.128	0.061	3
平 均	0.400	0.339	0.344	0.256	0.182	0.089	

的测量结果是一致的。表 1 的数据表明北京地区一般九、十月  $\tau_0$  值最小, 三月份最大。采暖期  $\tau_0$  值也较大。这些结果表明上面提出的反演方法所得的结果是合理的。

图 4 给出在整个观测期间折射率虚部的分布。表 2 给出所观测的 7 个月及采暖和非采暖期折射率实部和虚部随波长的变化。从图中可以看到, 粒子折射率虚部有一个从小到大再变小的趋势, 而在采暖期(12—2 月)中数值最大。这和这一期间粒子中含碳量增加相对应, 从表 2 的数据中可以看到, 对各个波长和不同观测时间, 折射率实部的变化并不明显, 其值在 1.49—1.62 之间变动, 而折射率虚部变化则比较大, 对某一波长(例如  $\lambda=0.532 \mu\text{m}$ )(图 4), 可从小于 0.01 变化到大于 0.07。即使是月平均值, 也有相当幅度的变化。另外折射率虚部随波长也有较规律的变化。图 5 给出 5 次观测的结果, 表明一般而言, 折射率虚部随波长增加有递减的趋势。

表 2 大气气溶胶折射率月平均值

波 长	0.532		0.633		0.828		0.845		0.989		1.05		平均 次数
	$n_r$	$n_i$	$n_r$	$n_i$	$n_r$	$n_i$	$n_r$	$n_i$	$n_r$	$n_i$	$n_r$	$n_i$	
1986.9	1.524	0.015	1.550	0.014	1.520	0.015	1.560	0.014	1.573	0.020	1.600	0.009	5
1986.10	1.538	0.020	1.546	0.017	1.531	0.018	1.553	0.015	1.565	0.020	1.585	0.014	11
1986.11	1.503	0.031	1.550	0.040	1.536	0.036	1.538	0.022	1.563	0.013	1.564	0.017	15
1986.12	1.525	0.052	1.554	0.040	1.526	0.044	1.564	0.039	1.563	0.032	1.566	0.029	5
1987.2	1.528	0.036	1.508	0.024	1.550	0.025	1.559	0.024	1.540	0.024	1.570	0.021	5
1987.3	1.530	0.023	1.565	0.028	1.493	0.026	1.610	0.022	1.578	0.022	1.583	0.005	5
1987.4	1.530	0.030	1.610	0.030	1.610	0.025	1.620	0.015	1.610	0.015	1.610	0.015	3
非采暖	1.533	0.016	1.557	0.019	1.541	0.018	1.565	0.014	1.574	0.019	1.592	0.013	19
采 暖	1.517	0.034	1.546	0.035	1.530	0.034	1.557	0.025	1.562	0.020	1.568	0.018	30

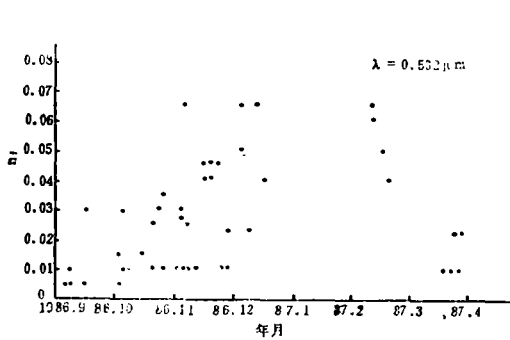


图 4 光学遥感方法测得气溶胶折射率虚部的变化

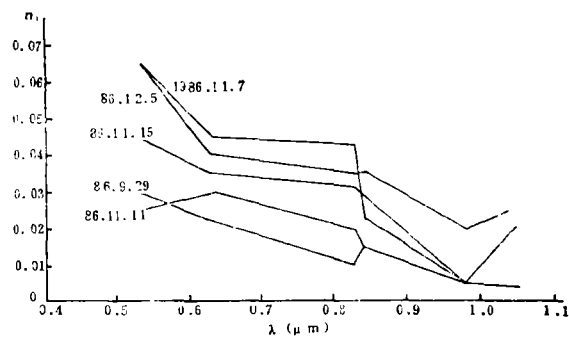


图 5 光学遥感方法测出气溶胶折射率虚部随波长的变化

## 2. 对比观测的结果

为了检验光学遥感法所得结果的可信程度, 用其它方法同时测量了大气气溶胶的一些参数, 以供互相比对。这里包括用 *PC-2 QCM* 气溶胶粒子取样器直接测量地面粒子的质量谱和用积分屏法测量了粒子的吸收系数, 并计算了折射率的虚部。虽然直接测量和光学遥感测量在空间尺度上很不相同, 前者测的是近地层的样品, 而后者测量的是整

层大气的样品,但在目前条件下也只能做到这一步。对比观测结果表明,两者的符合程度相当令人满意。这只能理解为在所测的条件下,近地层的大气气溶胶特性随高度变化不大(在混合层内均匀混合),而其浓度则变化比较大,因此整层大气气溶胶的特性主要是由它来确定的。

图 6 为几次对比观测中气溶胶粒子谱。可以看出两者符合很好。地面测量的是质量谱,但在假设密度为常数时,可以容易地转换为尺度谱。从图中可以看出谱型的一致性是可以的,但绝对浓度并不完全一致,为此需要对粒子密度作适当的调整。实际上图 6 的曲

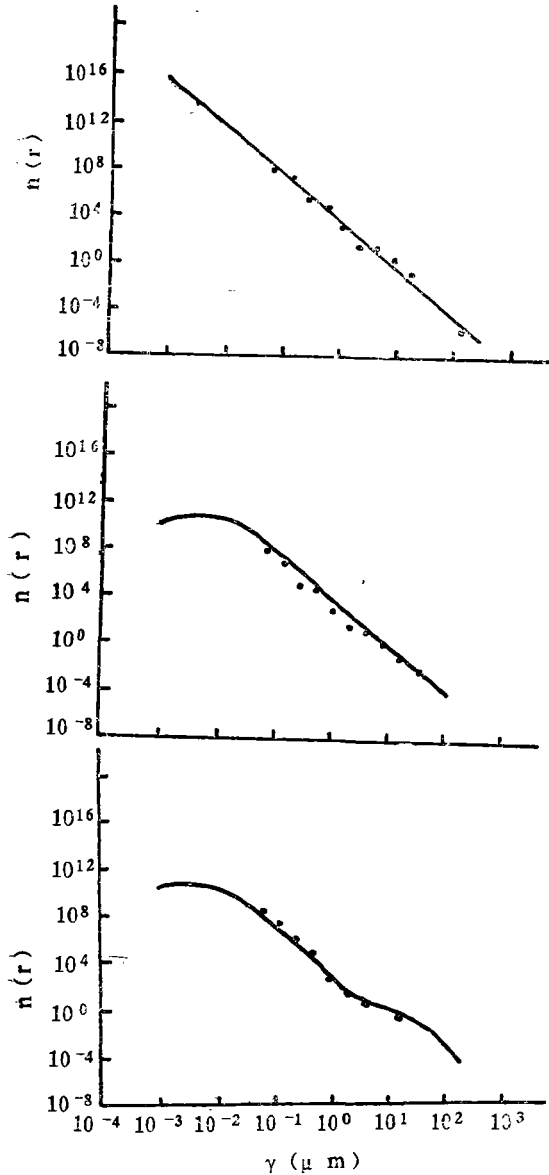


图 6 用光学遥感法算出大气气溶胶粒子谱 (—)与用实测得到粒子谱(·····)的比较

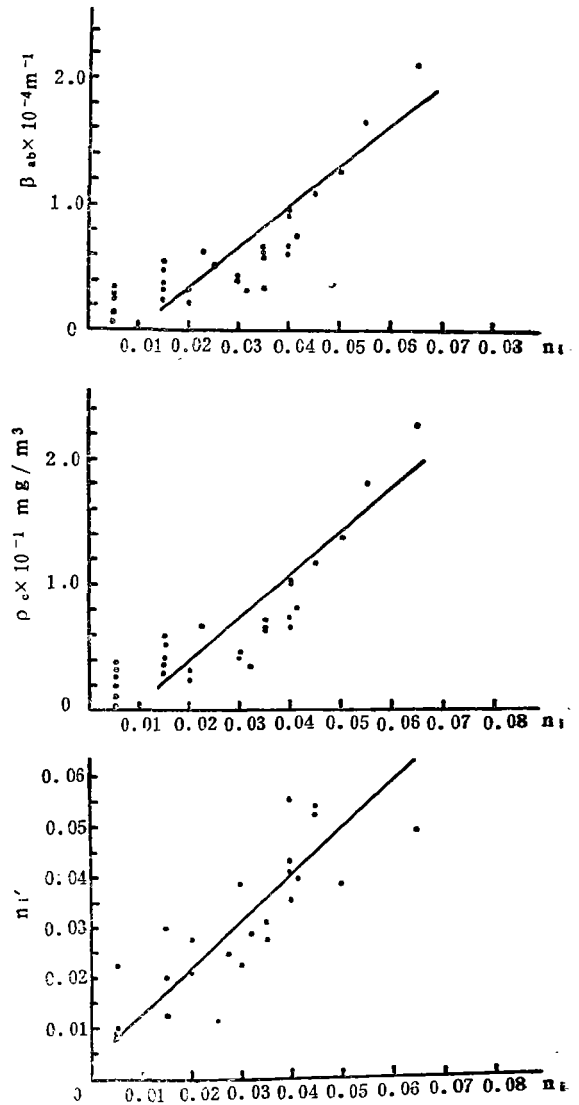


图 7 用光学遥感法测出的气溶胶折射率虚部  $n_i$  与用积分屏法测出的吸收系数 ( $\beta_{ab}$ ), 当量碳 ( $\rho_c$ ) 和折射率虚部 ( $n_i'$ ) 的相关图

线都已假设  $d = 1 \mu\text{m}$  处浓度值为 1。

图 7 分别给出用光学遥感法所测的折射率虚部与用积分屏方法测的气溶胶吸收系数  $\beta_{\text{ext}}$ , 当量碳含量  $\rho_c$  与从积分屏法算出的折射率虚部  $n_i'$  之间的相关。图中给出的是  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$  的情形。这时, 两者的相关系数最高。但对其它波长, 相关系数一般都大于 0.75。从图 7 中可以看到,  $n_i$  和  $n_i'$  相关直线的斜率很接近 1, 表明这两种方法符合得很理想。但截距不等于 0。 $n_i'$  一般比  $n_i$  稍大一些。实际上用积分屏法测出吸收系数再算出折射率虚部本身就有一系列假定。这两种方法很难确定那一种方法一定好些。但在这次观测 30 组样品, 两者能有这样的符合程度, 表明这两种方法都有其合理性。

## 五、讨 论

本文提出了一种简单、经济可行的光学遥感大气气溶胶特性的方法。仅用一台多波长望远光度计与 Apple II 微机的联合系统, 就可以实现对天空亮度的快速测量。根据本文提出的反演方法, 利用观测太阳及太阳所在地平纬圈天空散射辐射的多波长亮度相对分布, 就可以同时反演出大气气溶胶相函数及光学厚度随波长的变化, 进而推算出粒子的尺度谱及折射率光谱。对比观测的结果表明光学遥感所得的结果是可信的。因而上述方法具有实用意义。如果观测期间同时取得地面气溶胶成份的资料加以比较, 则会更有意义。

这种方法也有其局限性, 一是只能在晴朗天气条件下才能应用。否则水平均匀的条件无法满足, 另外为了测量相函数有一定的精度, 观测时太阳高度角不能太高。因此不能用它来测定气溶胶特性的日变化。但由于这种方法简单, 只需要作相对亮度的观测, 对仪器要求较低, 而且一次能测出较多的物理量。如果能把它与通过测量太阳直接辐射推算大气光学厚度光谱的方法相结合, 则在应用中将发挥更大的作用。

## 参 考 文 献

- [1] 毛节泰、李建国, 气象能见度与望远光度计, 大气科学, 8, 2, 170—177, 1984.
- [2] 栾胜基、毛节泰, 大气气溶胶吸收系数的测量, 气象学报, 44, 3, 321—327, 1986.
- [3] 廖国男, 大气辐射导论, 周诗健等译, 气象出版社, 1985.
- [4] 毛节泰、栾胜基, 大气散射相函数的计算, 大气科学, 9, 1, 107—111, 1985.

## INVERSE OF THE PROPERTY OF ATMOSPHERIC AEROSOLS BY OPTICAL REMOTE SENSING

Li Jie Mao Jietai

(Department of Geophysics, Peking University)

### Abstract

A new approach was proposed for optical remote sensing of the atmospheric aerosols. A multiwavelength telephotometer was used to measure the direct solar radiation and the sky light on the solar almucatar. Both scattering phase function and the atmospheric optic depth were inverted simultaneously. A "data base matching" method was used to retrieve the size distribution and refractive indices of atmospheric aerosols. Simultaneous observation of optical remote sensing and sampling has been done to check the method. The agreement of the results shows that the approach proposed is reasonably correct and useful.