

北京大气气溶胶光学特性的综合遥感和分析*

邱金桓 孙金辉 夏其林 张金定

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文根据激光和光度计的综合探测资料, 分析了1983年11月至1984年12月北京大气柱气溶胶光学厚度、谱分布、折射率以及粒子浓度的高度分布等气溶胶光学特性, 研究这些参数在不同季节下的变化规律, 着重研究春季的情形。

一、引 言

大气气溶胶含量的变化以及它所引起的辐射气候效应越来越引起气象学家的重视。决定大气气溶胶辐射传输特性的主要因子是大气气溶胶的总光学厚度、谱分布、折射率和粒子浓度的高度分布。这些参数的综合探测对于研究气溶胶的辐射气候效应很有意义的。七十年代以来, 许多学者采用不同手段探测北京大气气溶胶光学特性^[1-4], 但主要局限于研究大气透明亮、气溶胶谱分布和消光系数的空间分布。近几年, 越来越多的学者认为, 就研究大气气溶胶的辐射气候效应而言, 气溶胶折射率是比谱分布更加重要的一个物理量。邱金桓等人分析了天空亮度对气溶胶和地表的光学特性的敏感性, 提出了一个综合遥感气溶胶谱、折射率和地表反照率的光学遥感方法^[5]。该法只适于晴天情形, 无法探测云天下气溶胶特性, 且没有涉及如何探测气溶胶浓度的空间分布问题。为此, 我们进一步研究采用光度计和激光雷达主被动式的综合遥感手段探测大气气溶胶的光学特性, 即采用光度计测量天空亮度以遥感气溶胶谱和折射率, 其原理和做法详见我们的另两篇论文^[6, 6], 采用激光雷达探测气溶胶消光系数的空间分布及折射率虚部。本文主要分析我们的遥感结果。

二、观测仪器和实验

实验于1983年11月至1984年12月在北京北郊大气物理研究所办公楼的房顶上进行。实验采用波长为6943 Å的红宝石激光雷达, 其脉冲能量约为1.5 J, 重复频率约为每秒一次, 夜间的垂直探测距离可达22 km, 白天约为8 km^[7]。实验采用的光度计具有3 m rad的视场角, 滤光片的中心波长为6943 Å。

* 本文于1985年9月17日收到, 1986年3月3日收到修改稿。

三、计 算 方 法

本文采用长法由光度计观测资料确定大气柱气溶胶光学厚度,采用非线性回归方法从天空亮度资料推算的小于 30° 的体积散射函数反演大气柱气溶胶谱分布^[6]。折射率的确定采用两种方法,晴天情形下,我们从光度计观测的天空亮度资料推算大约 10° 的气溶胶散射相函数和大约 40° 的气溶胶加权相函数,进而反演气溶胶折射率的实部和虚部^[6],云天情形下,我们从激光雷达的回波信息推算大气气溶胶的消光系数和后向散射系数之比值 K_a ,再由 K_a 值反演气溶胶折射率虚部^[8]。

水平观测时,雷达方程的求解采用 Klett 方法^[9]。假设消光系数与后向散射系数之比值与距离 R 无关,则 Klett 解为

$$\sigma(R) = \exp(S - S_m) / [\sigma_m^{-1} + 2 \int_R^{R_m} \exp(S - S_m) dR'] \quad (1)$$

上式中, $\sigma(R)$ 为消光系数, $S = S(R) = \ln[R^2 P(R)]$, $P(R)$ 为激光回波强度, $S_m = S(R_m)$, $\sigma_m = \sigma(R_m)$ 。确定了消光系数,从雷达方程可推导后向散射系数 $\beta(R)$ 如下:

$$\beta(R) = \frac{R^2 P(R)}{C_A} \exp \left[2 \int_0^R \sigma(R') dR' \right] \quad (2)$$

(2) 式中, C_A 为仪器常数。除了大气水平均一的情形, σ_m 的准确确定是困难的。先看(1)式, R 越小, 该式右边分母的第二项越大, σ_m 对分母的影响越小, 消光系数对 σ_m 越不敏感, 解越可靠。再看(2)式, 当 $R \rightarrow 0$ 时, $\int_0^R \sigma(R') dR' \rightarrow 0$, $\beta(R) \approx \frac{R^2 P(R)}{C_A}$, 因此, 也正是较小 R 值的 $\beta(R)$ 对消光系数的误差不敏感。根据 Klett 解的上述特点, 也考虑到非共轴激光雷达的盲区和非重合区的存在, 本文采用斜率法确定水平方向平均消光系数作为 $R_m = 7 \text{ km}$ 的 σ_m 值, 分别由(1)和(2)式计算 $\sigma(R)$ 和 $\beta(R)$, 再确定 K_a 值如下:

$$K_a = \frac{1}{M - N + 1} \sum_{i=N}^M \sigma(R_i) / \beta(R_i), 700 \text{ m} = R_N < R_{N+1} < \cdots < R_M = 1000 \text{ m}$$

由于较小 R 值的 $\sigma(R)$ 和 $\beta(R)$ 解对边界条件 σ_m 的敏感性较弱, 正如表 1 所示的, 采用上述方法所确定的 K_a 值是比较稳定的。对于 1984 年 4 月 18 日 8:46 时刻的探测资料, 采用斜率法所确定的平均消光系数为 0.408, 取 $R_m = 7 \text{ km}$, 当 σ_m 在 0.4 至 4 的一个数量级范围内变化时, K_a 值的变化小于 1%, 而当 σ_m 在 0.1 至 0.4 范围内取值时, K_a 值的变化小于 3%, K_a 解对 σ_m 是很不敏感的。

表 1 K_a 对 σ_m 值的敏感性

σ_m	4	1	0.7	0.4	0.1	0.08	0.06	0.04
K_a	62.9	62.7	62.5	62.3	60.6	59.9	58.7	56.0

垂直观测时, 考虑到分子散射效应, 气溶胶消光系数采用如下公式计算^[10]:

$$\sigma(z) = \frac{P(z)z^2K_a \exp\left[-2\left(K_a - \frac{8\pi}{3}\right)\int_0^z \beta_m(z')dz'\right]}{C_A - 2K_a \int_0^z P(z')z'^2 \exp\left[-2\left(K_a - \frac{8\pi}{3}\right)\int_0^{z'} \beta_m(z'')dz''\right]dz'} - K_a \beta_m(z) \quad (3)$$

(3)式中, $\beta_m(z)$ 为 z 高度的分子后向散射系数。

本文采用周诗健等人建议的方法^[11], 由光度计和激光雷达综合探测资料以确定垂直方向 K_a 值, 并采用周秀骥等人提出的一个关于 K_a 值的近似表达式以确定折射率虚部^[12]。

四、结果和讨论

从 1983 年 11 月至 1984 年 12 月, 我们应用光度计一共进行了 83 天实验。激光探测主要集中在 1984 年春季和夏季进行, 且在晴天条件下, 一般同时进行光度计和激光实验。下面从表 2 至表 7 以及图 1 至图 5 分析我们的实验结果。

表 2 气溶胶光学厚度月平均值 $\bar{\tau}_a$ 及其均方偏差 $\Delta\tau_a$ 。

年 份	1983		1984									
月 份	11	12	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\bar{\tau}_a$	0.218	0.274	0.255	0.318	0.508	0.465	0.314	0.292	0.281	0.193	0.229	0.240
$\Delta\tau_a$	0.057	0.071	0.083	0.097	0.167	0.113	0.085	0.091	0.080	0.069	0.061	0.072

1. 大气气溶胶光学厚度

表 2 列出了从 1983 年 11 月至 1984 年 11 月 6943 Å 波长大气柱气溶胶光学厚度的月平均值及其均方根偏差(1984 年 2 月资料缺)。如表 2 所示, 北京大气柱气溶胶光学厚度较大, 峰值出现在春季, 4, 5 月份的平均光学厚度分别高达 0.508 和 0.465, 秋季光学厚度偏小。这个特点与毛节泰等人的观测结果是相吻合的^[2], 但与地面上气溶胶浓度的变化趋势不尽相同。相据邱金桓的研究^[13], 从 1954 年至 1982 年, 一般是在冬季, 由于取暖期间气溶胶污染的加剧, 北京水平能见度最差, 近地面气溶胶粒子浓度较大, 而春季水平能见度反而较好, 与整个大气柱气溶胶光学厚度的变化趋势恰恰相反。后面, 我们将进一步分析出现上述差异的主要原因。

表 3 不同季节下气溶胶平均谱

季 节	$n(r)$
冬	$2.63 \times 10^{10} / [1 + (r/0.06)^4] + 3.47 \times 10^4 \exp[-1.3 \ln^2(r/1.7)]$
春	$1.04 \times 10^{10} / [1 + (r/0.059)^{3.5}] + 2.2 \times 10^4 \exp[-0.94 \ln^2(r/2.6)]$
夏	$6.4 \times 10^9 / [1 + (r/0.072)^{3.6}] + 2.04 \times 10^4 \exp[-1.2 \ln^2(r/2.1)]$
秋	$1.8 \times 10^9 / [1 + (r/0.099)^{3.65}] + 1.51 \times 10^4 \exp[-1.6 \ln^2(r/2.5)]$

2. 气溶胶谱分布

从图 1—3 以及表 3—4 可以看出不同季节下气溶胶谱特性。这些图表中,1983 年 12 月和 1984 年 1 月的平均谱标以“冬”,4 月和 5 月的标以“春”,6 月和 7 月的标以“夏”,9 月和 10 月的标以“秋”。

反演结果表明,广义 Junge 分布 + 对数正态分布较适于拟合我们的观测资料。图 1 中的 4 条曲线分别表示四个季节下平均谱,它们的函数表示列于表 3。从该图表可以看出:

1) 气溶胶谱一般为双模式谱,即广义的 Junge 分布 + 对数正态分布。在 $0.1 \leq r \leq 1 \mu\text{m}$ 区间内,谱形接近 Junge 分布。在大于 $1 \mu\text{m}$ 的大粒子区域,出现明显的次峰,次峰中心位置约在 1.7 至 $2.6 \mu\text{m}$ 之间变化。游荣高等人^[4]和任丽新等人^[14]的取样探测结果都证实了北京地区气溶胶谱分布在 $r > 1 \mu\text{m}$ 的大粒子方向存在明显的次峰。从图 1 看,北

表 4 Junge 谱 参 数 ν 值

季 节 \ 谱 区 间	0.1—1 μm	1—20 μm	0.1—20 μm
冬	2.95	2.19	2.55
春	2.46	1.32	2.03
夏	2.57	1.92	2.19
秋	2.61	2.02	2.32

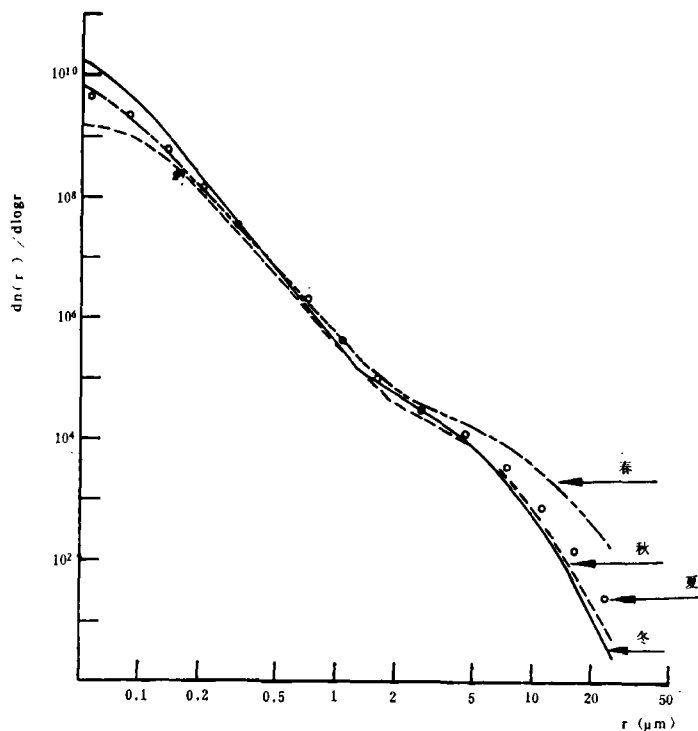


图 1 气溶胶谱分布

京大气柱中含有大量的大粒子, 春季更为突出。

2) 前面已提到, 春季 4、5 月间北京大气柱气溶胶光学厚度最大。从图 1 看, 北京冬季大气中小于 $0.6 \mu\text{m}$ 的小粒子最丰富, 春季期间大于 $1 \mu\text{m}$ 的大粒子最丰富。看来正是大粒子大量增多导致春季气溶胶光学厚度的明显增大, 这可能与春季北京常刮风沙有关。冬季小于 $0.6 \mu\text{m}$ 的粒子较丰富可能导因于北京取暖期间较严重的烟羽污染, 这些粒子大量堆积在地表上, 导致冬季的能见度最差。

图 2 中的 4 条曲线(a, b, c, d)分别为 1984 年 1 月 12 日 9:00 和 14:30 以及 4 月 5 日 13:28 和 4 月 28 日 10:00 4 个时刻的谱分布。下午的谱分布一般含有较多的大粒子, 许多学者观测到类似的现象^[2,3]。特别是 4 月份的两条谱曲线含有非常丰富的大粒子, 从当时华盖天空亮度特性也能定性看出这一点。根据辐射传输和 Mie 散射理论, 大粒子越多, 散射相函数的前向峰越突出, 小角华盖天空亮度越强, 且随散射角的衰减梯度越大。如图 3 所示, 当 $\theta > 15^\circ$ 时, 4 月 5 日 13:28 的散射相函数接近于理论计算的 $\nu=3$ 的 Junge 谱的相函数, 但当 $\theta < 5^\circ$ 时, 前者远比后者偏大, 偏大近一个数量级。显然, 只有大粒子的大量存在才能解释我们的观测资料。在 $\theta < 5^\circ$ 范围内, 冬季的相函数远比春季的偏小, 但也比 $\nu=3$ 的 Junge 谱的相函数偏大。

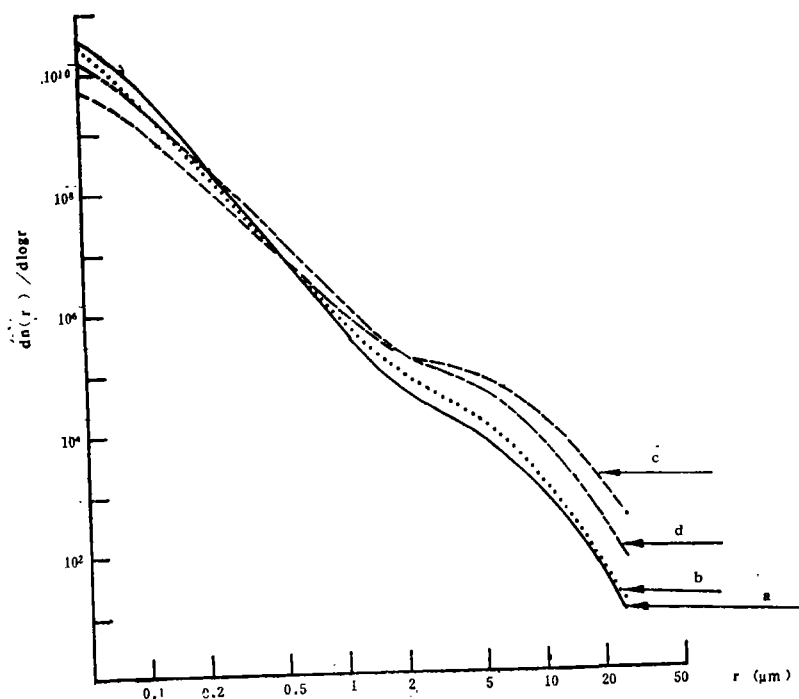


图 2 气溶胶谱分布

再如表 4 所示, 对于上述的春夏秋冬 4 个季节下的平均谱分布, 不同谱区间内谱形适于用不同的 Junge 谱参数加以描述, 在 0.1 至 $1 \mu\text{m}$ 区间内, 冬季谱很好符合 $\nu=3$ 的 Junge 谱, 春季的 ν 值最小。

3. 消光系数的垂直分布

假设 $n^*(r, z)$ 为 z 高度的归一化谱分布, $N(z)$ 为粒子数密度, m 为折射率, $K(r, \lambda, m)$ 为消光因子, 则根据 Mie 散射理论有

$$\sigma(z) = N(z) \int_0^\infty \pi r^2 K(r, \lambda, m) n^*(r, z) dr$$

若 m 和 $n^*(r, z)$ 与高度 z 无关, 则 $\sigma(z)$ 正比于 $N(z)$, 前者可视为相对的粒子密度垂直分布。

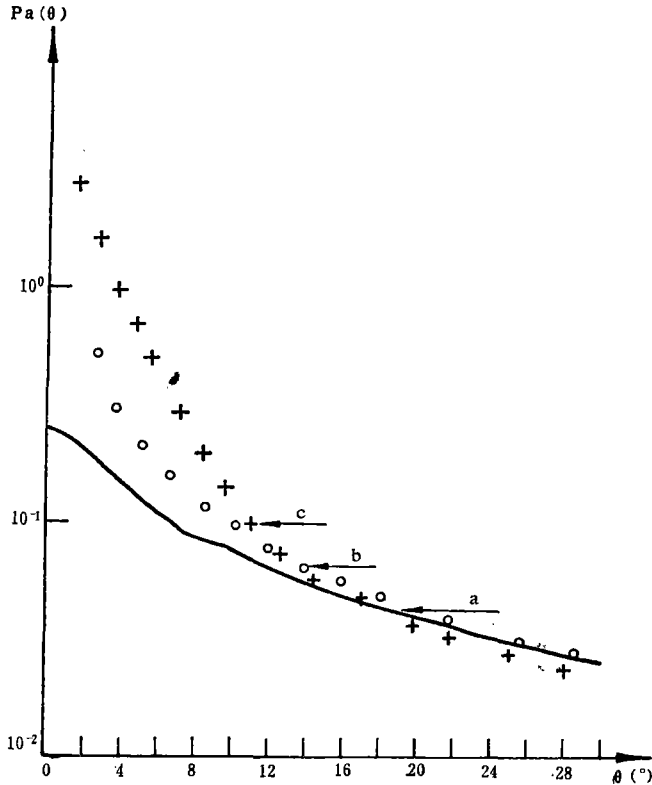


图 3 散射相函数

(a: $\nu=3, m=1.5-0.01i$; b: 1984, 1, 12, 9:26; c: 1984, 4, 5, 13:28)

图 4 中的曲线 a 是 1984 年 4 月 5 日 13:28 的消光系数分布, 混合层高度高达 3.2 km 左右, 在 3 km 高度附近, 存在消光系数极大峰, 那儿堆积着大量气溶胶粒子。从表 5 所示的气溶胶光学厚度 $\tau(z_1, z_2)$ 可以更清楚看出这个气溶胶云的存在。取 1 km 作步长, 从 2 km 至 3 km 高度的光学厚度最大, 约占整个大气柱光学厚度的 $\frac{1}{3}$, 从地面至 6 km 高度的光学厚度为 0.461, 由光度计测量的大气柱气溶胶光学厚度为 0.494, 后者略大于前者, 非常吻合。

4 月 26 日下午 2 点后, 我们发现天空渐渐变黄, 当时估计空中可能含有许多黄沙粒子, 于是采用激光雷达进行连续 4 天的观测, 其结果见图 4 的曲线 b 至 e。这些曲线表明, 约在 1.8 km 至 3 km 高度范围内, 消光系数分布都有一个极大峰。26 日下午 4 点, 峰值位置约在 1.8 km 高度。北京气象台观测资料 and 我们的激光探测结果都表明, 26 日下

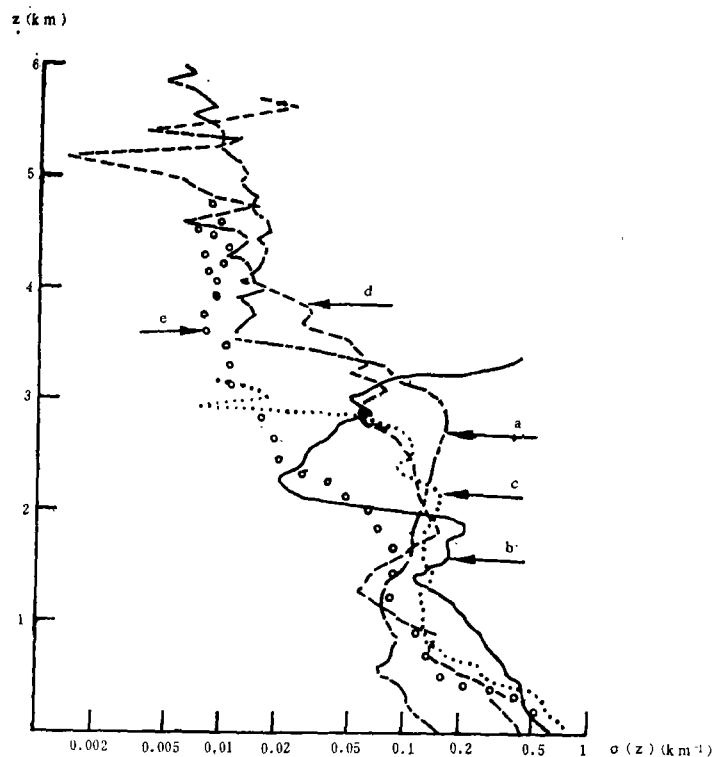


图 4 消光系数的垂直分布(1984 年 4 月)
(a:5日13:28, b:26日16:15, c:27日8:55, d:28日10:20, e:29日10:00)

表 5 不同高度范围内气溶胶光学厚度

Z_1-Z_2 (km)	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	0—6	0— ∞
$\tau(Z_1, Z_2)$	0.106	0.106	0.150	0.064	0.022	0.016	0.461	0.494

午存在有一蔽光高层云,曲线 b 在 3 km 以上消光系数陡增,表明该高层云约在 3.5 km 高度上。27 日至 28 日,消光系数峰区向上扩展,直至 3 km 高度,消光系数都很大。29 日上午 10 点,消光系数在 2 km 高度附近仍有一个极大峰,但已大大变小。1979 年 4 月 14 日至 15 日 Iwasaka 等人在日本曾用激光雷达探测一个亚洲沙暴过程^[15],发现在 2 km 及 6 km 两个高度附近存在尘埃云。我们的探测结果表明,北京春季 1.8 至 3 km 高度范围内,经常出现一气溶胶云,这可能与春季常刮风沙有关,使得大气柱气溶胶光学厚度较大。

再从图 5 可以看出,1984 年 4 月 18 日这一天,从上午至下午,地面上消光系数变小,1 km 高度以上消光系数明显增大,上午消光系数在边界层内呈多峰结构,1.8 km 高度的极大峰更突出,下午该峰区向上扩展,联系到下午的谱分布含有更多的大粒子,看来大粒子的抬升过程是存在的。至晚上 20:20,1 km 高度以上的消光系数又趋于变小。

4. 气溶胶折射率

表 6 表示由光度计探测的折射率实部 m_R 和虚部 m_I 的季节平均结果。冬季气溶胶折

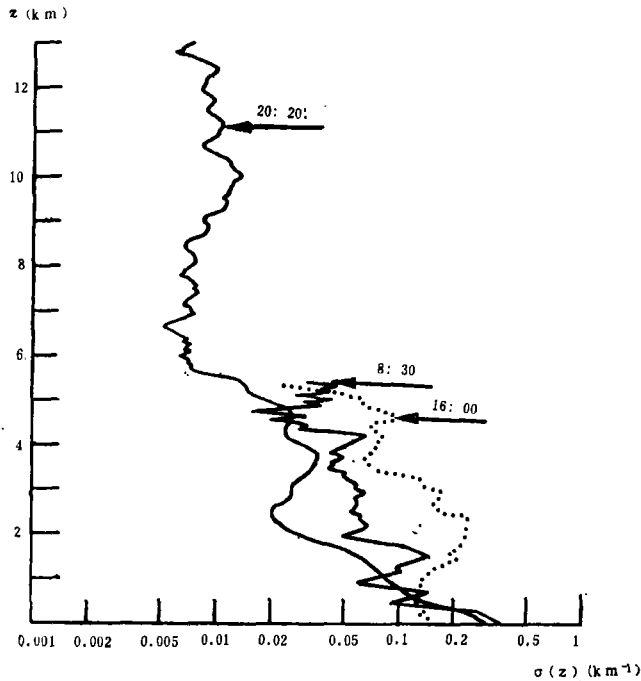


图 5 1984 年 4 月 18 日消光系数垂直分布

表 6 不同季节下折射率均值

季 节	冬	春	夏	秋
m_R	1.55	1.51	1.49	1.51
m_I	0.0572	0.0152	0.0128	0.0215

射率虚部的平均值为 0.0572, 远大于其它季节的结果, 夏季的虚部值最小。折射率实部的均值在 1.49 至 1.55 之间变化, 冬季的实部值较大。王明星曾指出^[16], 北京冬季取暖期间, 气溶胶污染主要来自于燃煤排放。前面的谱分布结果表明, 冬季气溶胶谱的变化主要表现在小于 $0.6 \mu\text{m}$ 的小粒子的增加上。又根据 Twitty 和 Weinman 的研究^[17], 煤烟和煤屑物质的折射率虚部的均值为 0.5。因此, 北京冬季大气气溶胶虚部值较大看来是合理的。春季谱分布中含有较多的大粒子, 其折射率虚部值远小于冬季的结果。

表 7 把光度计探测的整个大气柱气溶胶粒子的折射率虚部值 $m_I^{(3)}$ 和激光雷达探测的水平方向和垂直方向的气溶胶粒子的虚部值 $m_I^{(1)}$ 和 $m_I^{(2)}$ 作了比较。表中 RH 为地面的相对湿度。从该表可以看出:

1) 光度计和激光雷达同时观测的 7 组资料表明, 激光探测的水平方向的折射率虚部值一般较大, 光度计探测的结果一般最小, $m_I^{(1)}$, $m_I^{(2)}$ 和 $m_I^{(3)}$ 的均值分别为 0.0224, 0.0174 和 0.0137, 后两者只相差 0.0037, 比较接近。

2) 从上午至下午, 类似于从冬季至春季, 大粒子增多, 折射率虚部值变小, 表明北京

表 7 1984 年 4 月折射率虚部的探测结果

时 间	$m_i^{(1)}$	$m_i^{(2)}$	$m_i^{(3)}$	RH
5日 16:30	0.031	0.019	0.008	5
6日 9:09	0.040	0.028	0.032	50
6日 14:30	0.026	0.030	0.011	9
7日 14:27	0.033	0.014	0.009	31
13日 14:40	0.018			50
17日 15:54	0.026			22
18日 9:24	0.031			52
18日 15:30	0.027			28
19日 10:00	0.025			40
19日 14:20	0.015			34
26日 16:30	0			67
27日 10:00	0			78
28日 10:20	0.014	0.005	0.002	50
29日 10:00	0.012	0.009	0.022	36
29日 14:50	0.001	0.015	0.012	21

大气中大粒子和小粒子含有不同的成份。

3) 当相对湿度增大时, 气溶胶折射率实部和虚部值一般都变小。26日和27日相对湿度很大, 激光探测的折射率虚部值为零。

五、结 论

1. 北京春季气溶胶光学厚度较大, 秋季较小。
2. 气溶胶谱呈双模式特性, 0.1 至 $1\ \mu\text{m}$ 之间的谱分布比较符合 Junge 谱, 在 $1\ \mu\text{m}$ 以上, 通常出现次峰。冬季的谱分布含有较多的小于 $0.6\ \mu\text{m}$ 的粒子, 春季的谱分布含有非常丰富的大粒子。
3. 春季期间, 北京混合层的厚度较大, 可高达 $3\ \text{km}$ 左右, 在 1.5 至 $3\ \text{km}$ 高度附近, 经常出现消光系数的次峰, 表明那儿堆积有大量的粒子, 可能是导致春季大气柱光学厚度较大的一个重要原因。
4. 冬季大气气溶胶折射率虚部值较大, 夏季和春季较小。从冬季至秋季以及从上午至下午, 大粒子的比重倾向于增大, 折射率虚部值一般变小, 表明大气中大粒子和小粒子含有不同的成份, 小粒子中估计含有较多吸收性较强(虚部值较大)的碳粒子。夏季折射率实部和虚部都较小, 部分原因是由于较大的相对湿度。

参 考 文 献

- [1] 吕达仁等, 低层大气消光系数分布的激光探测, 大气科学, 1977, 3, 199—205.
- [2] 毛节泰等, 大气透明度光谱和浑浊度的观测, 气象学报, 41, 3, 322—331, 1983.
- [3] 邱金桓等, 消光——小角散射法遥感气溶胶谱分布的实验研究, 大气科学, 7, 1, 33—41, 1983.
- [4] 游荣高等, 边界层大气气溶胶浓度与尺度谱分布的时空变化, 大气科学, 7, 1, 88—94, 1983.
- [5] Qiu Jinhuan (邱金桓) and Zhou Xiuji (周秀骥), Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance—part I: theory, *Advances in Atmospheric Sciences* 3, 2, 162—171, 1986.
- [6] Qiu Jinhuan (邱金桓), Sun Jinhun (孙金辉), Xia Qilin (夏其林), Zhang Jinding (张金定), and Zhou Xiuji (周秀骥), Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance—part II: application, *Advances in Atmospheric Sciences* 3, 3, 341—348, 1986.
- [7] 孙金辉等, 激光探测平流层气溶胶层后向散射系数分布, 大气科学, 10, 4, 431—436, 1986.
- [8] Spinhirne, J. D. et al., Vertical distribution of aerosol extinction cross section and inference of aerosol imaginary index in the troposphere by lidar technique, *J. Appl. Meteor.*, 4, 426—438, 1980.
- [9] Klett, J. D., Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Appl. Opt.*, 2, 211—220, 1981.
- [10] Fernald, F. G., Analysis of atmospheric lidar observations: some comments, *Appl. Opt.*, 4, 652—654, 1984.
- [11] 周诗健等, 几种激光探测大气消光系数方法的比较, 大气科学, 5, 4, 444—449, 1981.
- [12] Zhou Xiuji, and Qiu Jinhuan, Characteristics of atmospheric extinction-to-backscattering ratio in ruby lidar measurements, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1, 2, 179—187, 1984.
- [13] 邱金桓, 北京等地气象能见度的变化特性分析, 大气科学, 10, 4, 437—442, 1986.
- [14] 任丽新等, 0—30公里大气气溶胶的垂直分布, 科学通报, 29, 18, 1121—1124, 1984.
- [15] Iwasaka, Y. et al., The transport and spacial scale of asian dust-storm clouds: a case study of the dust-storm event of April 1979, *Tellus*, 3, 189—196, 1983.
- [16] 王明星, 北京冬春季大气气溶胶来源的研究, 科学探索, 2, 13—20, 1983.
- [17] Twitty, J. T., and J. A., Weinman, Radiative properties of carbonaceous aerosols, *J. Appl. Meteor.*, 10, 725—731, 1971.

REMOTE SENSING AND ANALYSIS OF AEROSOL OPTICAL PROPERTIES IN BEIJING

Qiu Jinhuan Sun Jinhui Xia Qiling Zhang Jinding

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

According to lidar-radiometer sounding data, this paper presents and analyzes atmospheric aerosol optical properties in Beijing, including atmospheric columnar aerosol optical depth, its size distribution and refractive index, particle concentration vertical distribution and so on, and studies changing characteristics of these parameters in different seasons, especially in spring time.