

北方局地夏末气溶胶光学特性 综合观测分析*

李 放 刘锦丽 吕达仁

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

本文对中国北方相近地理经度不同纬度的三个试验点(内蒙草原生态定位站、北京、新乡)夏末季节大气气溶胶特性进行了地面粒子计数和整层光学遥感等综合观测。分析结果表明,这三个试验点地面和整层气溶胶数浓度通常有内蒙较小,北京居中,新乡最大的特征。文中提出了浓度比这个参量,它可以定量描述地面源气溶胶对整层大气气溶胶的相对贡献。据此分析可知内蒙地面源较弱,与该地区人类活动稀少相对应。由浓度比推测,新乡除近地面城市空气污染较严重外,滨临的黄河河面水汽蒸发作用也是促成气溶胶浓度增大的原因。

关键词: 气溶胶; 光学厚度; 粒度谱分布; 浓度比。

一、引 言

大气气溶胶是全球变化的一个重要因子。它直接参与凝云致雾过程,影响着地球辐射收支平衡。它还参与臭氧的非均相反应,影响着臭氧平衡^[1]。此外,它在地物遥感过程中是一项重要的订正量。空间遥感器探测到的地球表面多通道信号受到大气气体分子及大气气溶胶吸收和散射,极限情况下这种吸收和散射作用可使信号消失。如,我国辽宁省本溪市曾一度时间大气污染严重,气溶胶浓度过大,成为第一例从地面遥感图中消失的城市。大气分子散射问题在本世纪初就已经基本解决,目前最主要的研究集中在气溶胶和云的光学特性上。近年来这方面的研究非常活跃^[1-3]。然而,大气气溶胶体系又是一个非常复杂的多相开放系统。现在通常采用的研究方法是定点现场采样和区域光学遥感方法。国内从80年代初起,已有人在现场采样或粒子计数分析方面做了不少工作^[4,5],主要注重于环境污染和酸雨成因范围。在气溶胶光学遥感原理的研究方面,也做了大量有益的探索^[6,7],主要着重地基遥感中。但较少把现场采样及粒子计数和区域遥感方法结合起来研究。国外除采用上述方法外,还发展了实验室内模拟气溶胶生成和探测原理研究,以及外部空间基对地的气溶胶遥感。可是采用较多的最为主要的方法仍然是现场采样和地基光学遥感^[1]。考虑到国内较少把这两种方法结合起来使用,本文试图在这方面做些工作,利用太阳光谱仪实验测得我国北方内蒙、北京、新乡三个典型观测站上空的大气气溶胶光学厚度,应用Phillips-Twomey法反演出气溶胶粒度谱。使

1993年12月28日收到,1994年5月9日收到修改稿。

* 本课题为国家自然科学基金资助项目。

用粒子计数器测量地面不同时间、温度、湿度下的气溶胶总数浓度和粒度谱。其结果可作为各站或相近地理环境的基础资料以备大气气溶胶建模及辐射传输大气订正等研究参考选用。

二、实验及结果

1. 观测地点、时间和仪器

在我国北方选择三个观测站, 第一站为位于内蒙锡林浩特市附近的中国科学院内蒙古草原生态系统定位站(海拔 1250 m, 116°24'E, 43°27'N), 观测时间为 1993 年 8 月 12 日至 19 日; 第二站为北京北郊中国科学院大气物理研究所(海拔 55 m, 116°39'E, 39°36'N), 观测时间 1993 年 8 月 25 日至 9 月 4 日; 第三站在河南新乡某机场(海拔 75 m, 117°E, 35°17'N), 观测时间 1993 年 9 月 11 日至 23 日。

观测仪器选用 PIS-A 型太阳光谱仪, 波长范围 400—1038nm, 光谱分辨率 1.25 nm, 用于遥感整层大气气溶胶光学厚度。使用 PM-730-D₂-P 型尘埃粒子计数器记录地面气溶胶粒子浓度及粒度谱分布。同时用 DHM2 型通风干湿表记录地面温度和湿度变化。

2. 反演方法

Shaw 等人在 1973 年曾提出^[3], 根据测量透过大气层的太阳直接通量密度谱, 可以获得大气气溶胶粒子的光学厚度值。这种方法现在已被广泛用来研究大气气溶胶的光学特性和反演其粒度谱分布^[3,7]。目前通常认为气溶胶的光学厚度波谱变化是通过微粒的衰减作用产生, 主要是由粒子大小分布来决定。如果假定大气中的微粒可足够准确地用已知折射率的等效球体来模拟, 则大气气溶胶光学厚度 $\tau(\lambda)$ 和其粒度谱分布的积分方程可表示为

$$\tau(\lambda) = \int_0^\infty \int_0^\infty \pi r^2 Q_e(r, \lambda, m) n_0(r, z) dz dr, \quad (1)$$

其中 $n_0(r, z)dz$ 为高度 z 处, 半径在 r 到 $r+dr$ 范围的气溶胶粒子数密度; m 为气溶胶微粒的复折射率; λ 为入射波长; $Q_e(r, \lambda, m)$ 为 Mie 氏消光效率因子。

King 等人对(1)式在整层大气高度积分, 得

$$\tau(\lambda) = \int_0^\infty K_e(r, \lambda, m) n(r) dr. \quad (2)$$

这里 $n(r)$ 为整层大气气溶胶的粒度分布:

$$n(r) = \int_0^\infty n_0(r, z) dz,$$

$$K_e(r, \lambda, m) = \pi r^2 Q_e(r, \lambda, m),$$

$\tau(\lambda)$ 为整层大气气溶胶的光学厚度。则(2)式为目前常用的气溶胶粒度谱遥感方程即第一

类 Fredholm 积分方程, 求解该方程就能从太阳直接辐射谱信息物理特征量的测量中反演出大气柱气溶胶粒度谱分布。将粒度谱 $n(r)$ 分为慢变函数 $f(r)$ 和快变函数 $h(r)$ 两部分, 即 $n(r) = f(r)h(r)$, 结合 Phillips-Twomey 约束线性反演方程, 有

$$\vec{f} = (A^T A + \gamma H)^{-1} A^T \vec{\tau}.$$

这里 A , A^T 为系数矩阵及其转置; γ 为 Lagrange 光滑因子; H 为光滑矩阵; $\vec{f}$, $\vec{\tau}$ 为列向量。

迭代求解过程如下:

$$\vec{f}^{(n+1)} = (A^{(n)T} A^{(n)} + \gamma^{(n)} H)^{-1} A^{(n)T} \vec{\tau},$$

$$A_{ij}^{(n)} = \int_{r_j}^{r_{j+1}} K_i(r, m) h_j^{(n)}(r) dr,$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad (\text{波长通道数}),$$

$$j = 1, 2, \dots, M; \quad (\text{粒度区间数}),$$

其中

$$K_i(r, m) = \pi r^2 K_e(r, \lambda_i, m),$$

$$h_j^{(n)}(r) = h_j^{(n-1)}(r) f_j^{(n-1)}(r),$$

$$\gamma^{(n)} = b \sum (A^{(n)T} A^{(n)})_{ii} / N,$$

收敛判据:

$$(\sum (f_j^{(n)} - 1)^2 / M)^{1/2} < \delta.$$

本文选取 $\delta = 0.02$, $b = 0.5$. 初始快变函数 $h_j^{(0)}(r)$, 可由先验知识选取适当的 Junge 分布; 慢变函数 $f_j^{(n)}(r)$ 由 n 阶解向量线性插值求取。最后得到稳定解 $h_j^{(n)}(r)$ 就是要求气溶胶粒度分布谱 $n(r)$, 其详细过程见文献[7]。

观测样本的选取: 内蒙观测期间地面能见度大多数范围在 40km 左右; 北京观测期间能见度在 5—25km 间变化, 能见度 20km (如 8 月 27 日) 的天气出现的频率较高; 新乡能见度范围在 1—10km, 这期间能见度 5km (如 9 月 12 日) 的天气出现较多。考虑到能见度代表性, 兼顾各种数据互相配合的完整性, 我们选取以下典型几天作为代表样本。

图 1 给出了内蒙 1993 年 8 月 15 日的太阳光谱仪遥感的整层大气气溶胶光学厚度谱观测结果。天气状况晴, 能见度 40km, 地面北风 0—1 级。可以看出中午以前和中午以后光学厚度稍低, 正中午光学厚度谱线有回升现象。

图 2 是北京 1993 年 8 月 27 日观测的整层大气气溶胶光学厚度谱。天气状况, 晴, 能见度 20km, 地面西北风 1—2 级。光学厚度谱线在中午时分也有回升现象, 谱线斜率较之内蒙要大。

图 3—5 是新乡 1993 年 9 月 12 日至 13 日观测结果。天气晴, 能见度小于 10km, 地面西南风 1—2 级。图 3 是整层大气气溶胶光学厚度谱。可以看到, 由于能见度较之内蒙和北京低, 相应气溶胶光学厚度也较大。图 4a, b 分别是地面气溶胶粒度谱白天

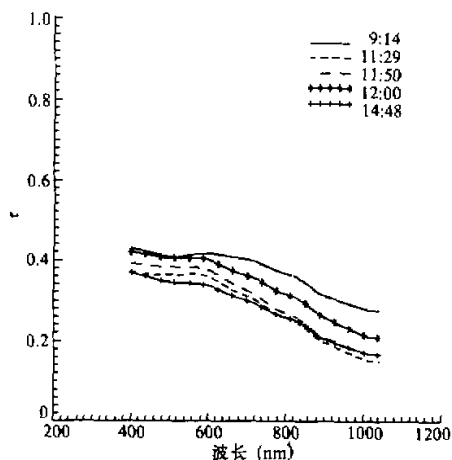


图1 内蒙1993年8月15日整层
大气气溶胶光学厚度谱

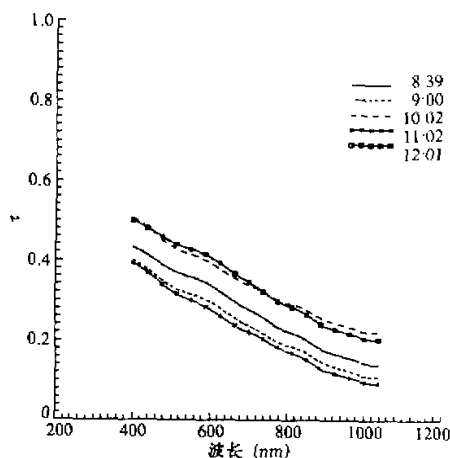


图2 北京1993年8月27日整层
大气气溶胶光学厚度谱

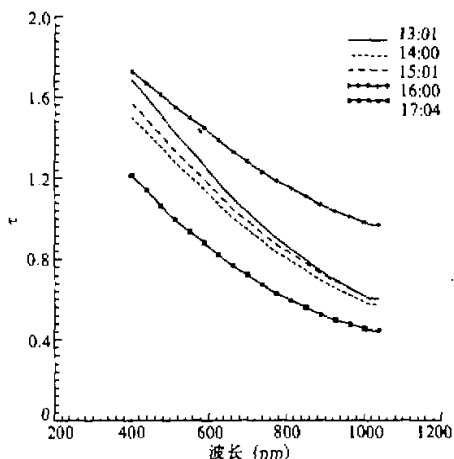


图3 新乡1993年9月12日整层
大气气溶胶光学厚度谱

和晚上的变化曲线,可以清楚地看到白天粒度谱形状的变化也较晚上大,变化集中在上午12点以前半径为 $0.2\sim 1.0\mu\text{m}$ 之间,这对气溶胶形成和发展过程研究有较大的参考价值。图5是地面温度、湿度和气溶胶浓度一昼夜变化曲线。可以看出,两天的数浓度周期性变化较明显,夜里变化较白天平缓些。

3. 粒度谱分布函数拟合

根据前述反演方法,从图1—3气溶胶光学厚度谱反演获得的整层大气气溶胶粒度谱,我们发现可以用幂分布(即Junge分布)加上对数正态分布结合的双模态来描述,分布函数形式为

$$n(r) = A\{r^{-B} + c / \text{rexp}[-D\log^2(r/E)]\}.$$

非线性拟合后各参数见表1。

表1中第八列为半径在 $0.1\sim 3.0\mu\text{m}$ 范围内的整层大气柱单位面积内的粒子总数(用 n' 表示)。即

$$n' = \int_{0.1}^{3.0} n(r) dr.$$

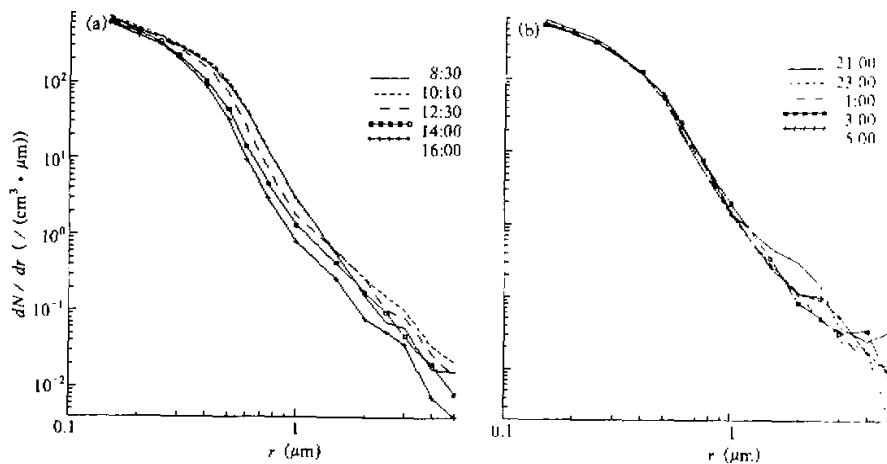


图 4 新乡 1993 年 9 月 12—13 日地面气溶胶粒度谱

表 1 北方局地夏末季节几个典型天气的大气气溶胶粒子谱分布参数

地区	时间	A($\times 10^6$)	B	C	D	E	$n'(\times 10^6)$ ($1/cm^2$)	N ($1/cm^3$)	$N/n'(\times 10^{-6})$ ($1/cm$)
内蒙	9:14	0.3659	3.783	59.203	88.072	0.438	0.8914	11.54	0.1295
	10:13	0.3614	3.755	41.600	41.817	0.344	0.8410	9.50	0.1130
	11:01	0.2096	4.013	78.996	49.404	0.331	0.8124	7.88	0.0970
	11:29	0.0172	5.243	1513.409	136.696	0.420	0.7990	7.78	0.0974
	11:50	0.0171	5.265	1492.541	124.715	0.420	0.8297	9.14	0.1101
	12:00	0.3267	3.609	81.162	26.647	0.299	0.7182	9.23	0.1285
	14:48	0.2663	3.931	53.178	86.935	0.420	0.8365	9.45	0.1130
北京	8:39	0.2070	4.140	145.594	24.596	0.250	1.1570	181.3	1.567
	9:00	0.1588	4.304	160.019	25.699	0.250	1.1714	170.2	1.453
	10:02	0.6248	3.802	23.749	11.694	0.208	1.5793	157.0	0.9942
	11:02	0.1103	4.474	244.664	28.749	0.250	1.1507	119.4	1.038
	12:01	0.4000	3.868	74.852	21.763	0.250	1.2893	120.1	0.9263
新乡	13:01	1.5241	3.953	34.571	36.857	0.282	4.9834	365.0	0.7325
	14:00	1.4765	3.886	30.500	34.919	0.222	4.2427	355.1	0.8370
	15:01	1.5534	3.860	31.235	30.793	0.270	4.2886	351.8	0.8203
	16:00	3.6861	3.423	5.541	24.253	0.300	4.1942	331.0	0.7892
	17:04	1.1321	3.956	26.662	31.315	0.275	3.6793	312.0	0.8480

表中第十列为气溶胶浓度比, 即地面数浓度 N (粒子计数器测量结果) 与整层粒子总数 n' 之比, 它是一个有量纲的值 ($1/cm$)。其物理意义为: 地面均匀混合层中单位高度内

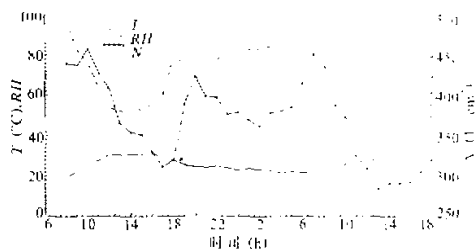


图5 新乡 1993 年 9 月 12—13 日地面
温、湿度和气溶胶浓度变化

的 N 值通常要比北京大近 3 倍, 上述浓度比却相近, 这说明新乡近地层以上的气溶胶浓度仍很大。

三、讨 论

1. 整层大气气溶胶光学厚度谱和粒子谱分析

内蒙气溶胶光学厚度如图 1 所示, 从早晨到下午光学厚度有逐步减小趋势。但中午往往有回升, 即再度增高的现象, 这与中午光化学反应及垂直输送过程较强有关。北京的观测结果也有此类现象, 如图 2 所示。仔细分析又会发现, 北京气溶胶光学厚度在短波段与内蒙相近, 但光学厚度随波长变化的斜率较大。新乡的光学厚度谱斜率更大 (见图 3), 这在平稳天气系统下暗示地面能见度较差^[3,8]。我们观测时的能见度记录也证实了这一点。这从一个侧面反映了气溶胶地面状况与整层特征之间的密切关系。

从反演的气溶胶粒度谱看 (见表 1), 内蒙站的气溶胶第二模态平均几何半径约在 $0.3\text{--}0.4\mu\text{m}$ 之间, 北京地区在 $0.25\mu\text{m}$ 左右, 新乡在 $0.2\text{--}0.3\mu\text{m}$ 之间。这对气溶胶的主要来源和生成机理研究有一定的参考价值。通过综合分析观测结果可知, 地面和整层气溶胶粒子浓度通常有内蒙较小, 北京居中, 新乡最大的特征。

2. 地面粒子谱分布与整层遥感粒子谱分布的关系

粒子计数器测得的地面气溶胶粒度谱仅代表了地—气交界面处的微小粒子分布情况, 它只是整层大气气溶胶体系中的一个重要组成部分。如果垂直输送足够充分, 垂直方向混合相当均匀, 可以出现资料^[6]中报道的整层大气气溶胶谱型和地面测得谱型相类似的现象。然而, 这种系统并不多见。整层气溶胶在几何平均半径为 $0.2\text{--}0.4\mu\text{m}$ 处有一对数正态分布峰值, 而地面粒度谱此峰值在 $0.6\mu\text{m}$ 左右甚至更大位置出现。在我们观测的资料中几乎没有这两种谱型相近的结果。这一方面说明观测期间气溶胶垂直输送并不强烈。另一方面表明该地区大气气溶胶不仅仅是地面源产生, 或者说起支配作用部分并非来自地—气界面处。表 1 中的 N/n' 值表示了地面气溶胶数浓度与整层粒度谱积分浓度之间的相对比的关系。根据这种浓度比分析可知地面源对整层气溶胶浓度贡献大小。新乡的地面粒子计数浓度 N 和整层气溶胶浓度 n' 较之内蒙和北京大许多倍, 说明

的气溶胶数浓度与整层大气气溶胶数浓度之比。若再乘以大气厚度 H , 其结果一定程度上反映了地面数浓度与整层平均数浓度之间的相对大小关系。但不乘也不影响作相对比较。从表 1 中 N/n' 值可见, 内蒙的这种浓度比值较小, 表明地面气溶胶在整层中的比例较少。北京和新乡的这种浓度比值较大, 且彼此较为接近。由粒子计数器观测结果分析表明, 新乡

该地区污染较严重, 此外, 更进一步由 N/n 分析可知, 新乡地区近地层以上气溶胶浓度仍然较大。可能是它滨临黄河, 河面蒸发的水汽对上部气溶胶的形成有一定促进作用。比较三个观测点浓度比, 可以推知内蒙的近地面气溶胶源较弱, 北京和新乡的较强。

3. 地面温、湿度与气溶胶粒子数浓度的关系

气溶胶的生成过程和其环境相对湿度有密切关系。如图 5 所示, 早晨太阳出来直接或间接加热了空气, 气温升高, 相对湿度减小。大气中的“湿气溶胶”, 即悬浮的液相小粒子和包覆部分或因挥发而消失或表面水分蒸发而缩小, 致使半径大于某一定值的粒子总数减小, 因而出现了这种气溶胶总浓度与相对湿度正相关的变化规律。观测中有 70% 数据在早晨 7 点左右气溶胶总浓度出现较高的峰值。这可能与高湿度较低温度下有利于冷凝成核, 并长大成粒子的过程有关。白天粒子谱变化较强烈 (见图 4a), 白天上午谱形变化较大, 且多发生在粒子半径为 $0.2-1\mu\text{m}$ 范围; 夜间 (见图 5 和图 4b) 的地面气溶胶数浓度和谱型变化相对较平缓, 这对应于较平稳的湿度、温度曲线。在今后我们建立气溶胶模式中, 有待于量化描述这种对应关系。

四、结 论

通过对 1993 年夏末中国北方三个观测站三十多天大气气溶胶特性的综合观测结果分析, 可以得出以下初步结论:

- 1) 地面气溶胶总数浓度与空气湿度有值得重视的正相关关系, 建立气溶胶模式时务必予以考虑;
- 2) 地面粒度谱白天变化较夜间强烈, 白天上午谱形变化较大, 且多发生在粒子半径为 $0.2-1\mu\text{m}$ 范围;
- 3) 实验表明, 近地面气溶胶粒度谱型一般不象有文献报道的那样, 与整层粒度谱型相一致, 两者差别受垂直输送过程影响;
- 4) 文中提出的地面与整层气溶胶浓度比可以定量地反映地面对整层气溶胶的贡献, 据此可以进行气溶胶地面源相对强弱的比较;
- 5) 比较我国北方相近经度不同纬度三个观测站夏末季节的大气气溶胶资料, 可知地面和整层气溶胶数浓度顺序均为内蒙、北京、新乡依次增大。除了地面污染原因外, 新乡依傍的黄河蒸发作用也是促成该地区气溶胶浓度较高的地理原因之一。

参 考 文 献

- [1] Stowe, L. L., R. Hittenberger and A. Deepk, 1990, Report of the experts meeting on space observation of tropospheric aerosols and complementary measurements, WCRP-48, WMO / TD-No.389.
- [2] Kondratyev, K. Y., 1992, Remote sensing of the earth from space: Atmospheric correction, Springer-Verlag, 1-250.
- [3] King, M. D. et al., 1978, Aerosol size distributions obtained by inversion of spectral optical depth measurements, *J. Atmos. Sci.*, 35, 2153-2167.

- [4] 游荣高、洪钟祥、吕位秀等, 1983, 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.
- [5] 王明星, 1984, 大气气溶胶的粒度谱分布函数及其随高度的变化, 大气科学, 8(4), 435—442.
- [6] 黎 洁、毛节泰, 1989, 光学遥感气溶胶特性, 气象学报, 47(4), 450—456.
- [7] 李 放、吕达仁、刘锦丽, 1993, 近地层大气气溶胶垂直结构阶梯遥感, 中国博士后首届学术大会论文集, 国防工业出版社, 345—349.
- [8] Iqbal, M., 1983, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, 116—165.

Analyses of Composite Observations of Optical Properties of Atmospheric Aerosols in the Late Summer over Some Areas of North China

Li Fang, Liu Jinli and Lu Daren

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

Abstract

The composite observations—with a dust counter and solar spectrometer for optical remote sensing of atmospheric aerosol optical properties have been conducted in late summer in three places of North China; Innermongolia Grassland Ecosystem Research Station, Beijing and Xinxiang. The three places are at nearly the same longitude but different latitudes. The results show that the concentrations of aerosol particles both in the near surface layer and in the whole atmospheric layer carry obvious geographical characteristic. Namely, the two concentrations are most heavy in Xinxiang, median in Beijing and smallest in Innermongolia. A parameterized concentration ratio is presented in this paper for the first time, which can be used to quantify the relative contribution of the surface aerosol sources to the whole atmospheric column aerosols. It can be found that the surface aerosol source in Innermongolia is weaker because of less human activity. The reasons for heavy concentration of atmospheric aerosols in Xinxiang are its geographical position near by the Yellow River which evaporates an enormous amount of water into the atmosphere to facilitate the generation of aerosols as well as its serious urban air pollution.

Key words: aerosol; optical depth; particle size distribution; concentration ratio.