

北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征*

李 放 吕达仁

(中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘 要 利用 1977~1985 年北京地区太阳直接辐射谱资料, 分析获得了气溶胶光学厚度谱特性, 使用 PIS 光谱仪从 1993 年 3 月到 1995 年 3 月, 持续观测了北京地区晴天和少云天气的太阳直射光谱, 得到了至今较为长期系统的城市大气气溶胶光学性能及特征。研究表明: (1) 气溶胶光学厚度有春夏季大, 秋冬季小的统计规律; (2) 能见度分级后, 同一能见度下气溶胶光学厚度各季节之间的差别大为减小, 地面能见度对整层光学厚度表现出了较强的约束作用, 文中给出了统计关系; (3) 气溶胶光学厚度有逐年增高的趋势, 1977 年至 1994 年间增长了约三分之二。

关键词 气溶胶 光学厚度 直接辐射 能见度

1 引言

在气候变化模拟和环境遥感的辐射传输计算中, 大气气溶胶是重要影响因素之一。因其时空变化复杂及人们认识上的局限性, 气溶胶目前仍然是辐射传输中一个较大的不确定因素, 影响着预测结果的精度。由于气溶胶的增加关系到地气系统的热平衡, 可能影响到全球长期的气候状况。因此对气溶胶的研究越来越受到人们的重视^[1]。这方面已做了大量的观测研究工作, 王炳忠曾根据各地日射台站的直射表资料, 给出了大气光学质量 $m=2$ 时的大气透明度^[2]。较好的显示了透明度的地域变化特征, 可是这种全色光透明度, 很难用于辐射传输模式计算。赵柏林根据 Elterman 等人的大气垂直减量与地面能见度的关系^[3], 假定粒子谱为 Junge 分布, 并固定其分布指数为 4 时, 分析了我国部分地区能见度及透明度分布情况, Elterman 关系式随地域不同有多大变化尚待观测验证。毛节泰用多波段太阳辐射计对大气透明度和浑浊度做了观测^[4]。邱金桓等人用激光雷达和光度计做了综合探测, 着重研究春季的情形^[5]。然而分析表明, 以往光学厚度研究的不足之处是气溶胶光学厚度没有配以能见度指标, 使资料间比较以及使用产生困难。

大气气溶胶光学特性确定需要长期连续的观测实验作基础。本文对 1977~1985 年北京地区宽带太阳直射谱资料进行了分析, 根据实时大气浑浊度记录进行能见度分类, 水汽影响采用实测值进行扣除, 得到了各能见度下大气气溶胶光学厚度谱。加上我们采用 PIS 太阳光谱仪从 1993 年 3 月~1995 年 3 月在这个地区进行大气光学特性的连续观测资料, 以及能见度记录, 对该地区的气溶胶光学特性有了进一步的认识。研究表明, 能见度分级后的气溶胶光学厚度季节变化很小, 已临近探测不确定性范围。而通常意义

1995-08-09 收到, 1995-10-24 收到修改稿

* 本课题为国家自然科学基金和中国博士后科学基金联合资助项目

上的光学厚度各季节平均值较大差异是由各季节内不同能见度的几率分布所决定。文中还把年平均五种能见度下的光谱光学厚度与 LOWTRAN 模式作了对比。由光学厚度谱反演出了气溶胶粒子谱分布。最后还初步估计了北京地区气溶胶光学厚度的年度变化趋势, 可望为建立较为准确的辐射传输用气溶胶模式提供依据。

2 资料背景和观测方法

2.1 宽带光谱资料

北京地区 1977~1985 年的辐射资料取自文献[6]。该资料观测所用仪器为前苏联产萨维诺夫-雅尼谢夫斯基型相对日射表, 配上截至波长为 λ_c 的不同滤光片, 即可获得太阳直接辐射宽带谱。波长范围 $0.40 \sim 0.98 \mu\text{m}$ 。该日射表由国家气象局标定, 精密度优于 2%。观测是在太阳视面 5° 视角内无云的天气条件下进行的。我们选取了每日 11:00~13:00 的资料为统计样本 (共 373 组), 原因是: (1) 该时段处于一日中间, 通常为中等垂直输送强度阶段^[4], 接近日平均水平, 有较好的时间代表性; (2) 这一时段太阳天顶角小, 观测得到的气溶胶光学厚度基本为观测点上空的大气特性, 地域代表性较好。由宽带辐射资料回插气溶胶光学厚度谱的方法详见文献[7], 这里简述由浊度参数导出能见度的方法。

2.1.1 能见度

辐射资料集^[6]中含有波长指数 α 取 1.3 时的 Angstrom 大气混浊度系数 β 记录, 根据 McClatchey 和 Sellby 近似公式^[8], 对于能见度大于 5 km 时有

$$d_{\text{vis}} = \frac{0.08499 - \beta(0.55)^{-\alpha} + \sqrt{[\beta(0.55)^{-\alpha} - 0.08499]^2 + 0.004533}}{0.0005745}.$$

这里 d_{vis} 为能见度, 以 km 为单位, 可以估算不同 β 对应下的地面能见度值。能见度分类见表 1。由试差法知这类资料绝大部分能见度在 5 km 以上, 个别 β 值大于 0.4 (能见度小于 5 km) 时, 同属于 II 类。

表 1 能见度分类

能见度等级	I	II	III	IV	V	VI
相应视程 / km	2	5	10	20	30	> 35

2.1.2 水汽扣除

从总光学厚度扣除大气分子 Rayleigh 散射和臭氧吸收的方法详见文献[9], 这里简要说明水汽扣除方法。根据辐射资料实时记录的地面水气压 p_w 值, 由 Cole 公式可以估算出可降水量 W ^[10], 得

$$W = 0.125 \exp(0.295 p_w^{0.5} - 0.803).$$

依据 Leckner 关系式^[11], 水汽含量为 w 时, 因为水汽吸收波长为 λ 的辐射而产生的光学厚度 $\tau_{w\lambda}$ 可表示为

$$\tau_{w\lambda} = -0.2385 k_{w\lambda} w m / (1 + 20.07 k_{w\lambda} w m)^{0.45},$$

其中 $k_{w,i}$ 为水汽波谱吸收系数^[10], m 为大气质量, 可由时间记录计算。宽带波长 $(\lambda_i, \lambda_{i+1})$ 区间内的平均水汽光学厚度为

$$\overline{\tau_{w,i}} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{w,\lambda} d\lambda.$$

这样就可进行实时水汽吸收影响扣除, 得到气溶胶光学厚度谱。

2.2 PIS 光谱仪辐射资料

PIS 光谱仪是一台便携式 512 元硅探测阵列光谱仪器, 波长范围 0.40~1.04 μm , 光谱分辨率为 1.25 nm, 光谱响应时间 10 ms, 视场角 2.5°。仪器重复性误差小于 2%。仪器采用长法进行标定, 选择天气较为稳定的秋高气爽季节, 一般选 10 月份。标定时得到的 0.55 μm 处气溶胶光学厚度随大气质量的变化曲线其线性度很好, 偏差不超过 3%。我们从 1993 年 3 月至 1995 年 3 月在北京市北郊大气物理研究所主楼顶持续进行地面观测实验。选择晴天或少云天气, 在视场角 5° 立体角内无云为原则。选取 11:00~13:00 即中午前后为观测时段 (共 1064 组资料)。能见度按照世界气象组织仪器和观测方法委员会 (CIMO) 推荐的气象能见度目测方法确定^[12]。

由地面接收的太阳直接辐射可以得到整层大气光学厚度。气体分子的 Rayleigh 散射以及臭氧等气体的吸收扣除同文献[9]。对水汽含量我们提出一种逐次迭代扣除方法, 即初始量从 0.1 cm 逐次递增, 直至水汽的 β 带和 $\rho\sigma\tau$ 带消去为止。因而, 这种观测还可以给出整层大气柱中水汽含量的瞬间值。从整层大气光学厚度谱减去气体分子散射和吸收部分, 则可获得气溶胶光学厚度。

2.3 宽带资料和 PIS 光谱资料结果的一致性

从宽带资料导出的光学厚度和从 PIS 光谱仪得到的光学厚度, 是否因处理方法上的不同会产生差异, 现在对此作简要分析。我们先由光谱资料“退化”为宽带资料, 再分别求出光学厚度进行比较。以北京 1993 年 8 月 27 日 PIS 光谱仪观测资料为例。将其光谱波段 (0.40~1.04 μm) 划分为与辐射资料集^[6]中相同的八个波段, 用波长积分得到的宽带资料可求取气溶胶光学厚度^[7]。图 1 显示了四组分别由 PIS 光谱资料和其宽带资料获得气溶胶光学厚度谱。可以看出, 除了在等效波长 0.42 μm 处 (因端点辐射资料质量低) 误差较大外, 其余各点偏差均在 2% 以内。这表明对于同样强度的地面太阳直接辐射, 用宽带谱方法和 PIS 光谱仪方法得到的大气气溶胶光学厚度是一致的。

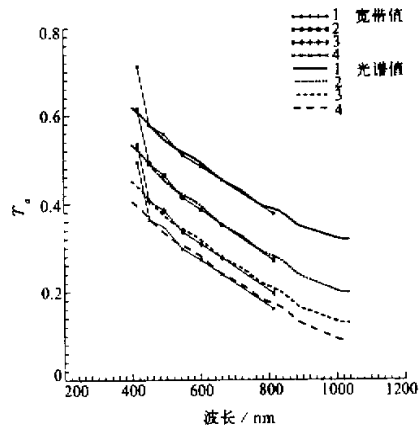


图 1 PIS 光谱资料与模拟宽带资料得到的气溶胶光学厚度谱比较

3 结果和分析

3.1 月变化

图 2 给出了 1978, 1984, 1985 年北京地区波长 $0.55\ \mu\text{m}$ 处气溶胶光学厚度的月变化。这三年观测资料相对比较完整 (但 12 月份资料仍短缺, 1985 年仅从 3 月份开始有资料记录)。图中的统计规律已很明显。其中的离散标记符号代表各年实测光学厚度, 误差棒给出了标准偏差范围。光滑曲线表示多项式拟合的光学厚度逐月均值变化趋势。显然, 峰值基本位于 4、5、6、7 月间, 即光学厚度在春夏诸月大, 秋冬月份小, 与文献[4, 5]观测结果类似。这是由于春夏月份地面气溶胶源较强, 且垂直输送强烈, 而秋冬月份境外洁净冷气团下沉天气系统出现较多的结果。

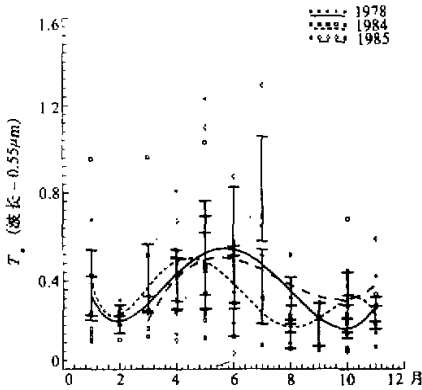


图 2 气溶胶光学厚度月变化

图 3 给出了 1993 年 3 月~1995 年 3 月北京地区的光学厚度季节平均值的结果。其中实线给出了不能见度时, 波长为 $0.55\ \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度季节变化趋势, 以及变动范围。可以看出春夏季较大, 秋冬季较小, 与前述宽带资料的结果规律相同 (见图 2)。图 3 中虚线表示各季节概率加权平均能见度, 简称几率能见度。显而易见, 几率能见度季节变化与光学厚度季节变化正好反位相, 两者负相关。

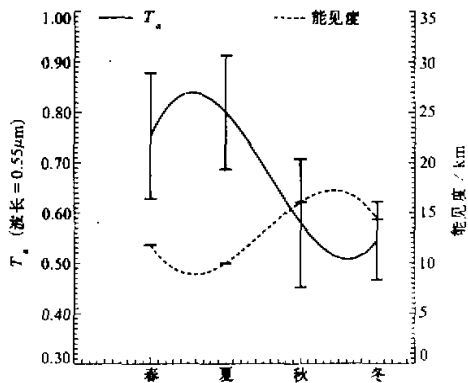


图 3 气溶胶光学厚度 (波长 $0.55\ \mu\text{m}$) 和几率能见度的季节变化 (1993 和 1994 两年平均结果)

3.3 能见度分类

如果我们把气溶胶光学厚度按观测时地面能见度进行分类 (见表 1), 可发现很有意义的现象, 即同一能见度下, 各季节光学厚度均值间差别较小。图 4a、b、c、d 给出了几个年份能见度分级后季节平均气溶胶光学厚度曲线, 图中标出了每个能见度下各季节平均离总平均的偏差范围。可以看出, 能见度分级后, 同一能见度下光学厚度在不同季节间的波动不大。标准差通常小于 13%。这种统计结果说明, 地面能见度虽然是近地面层的大气混浊度指标, 由于气溶胶绝大部分集中在近地层, 所以近地层的气溶胶浓度基本上支配了光学厚度的大小。以致于同一能见度下其光学厚度的季节差别已不显著。这

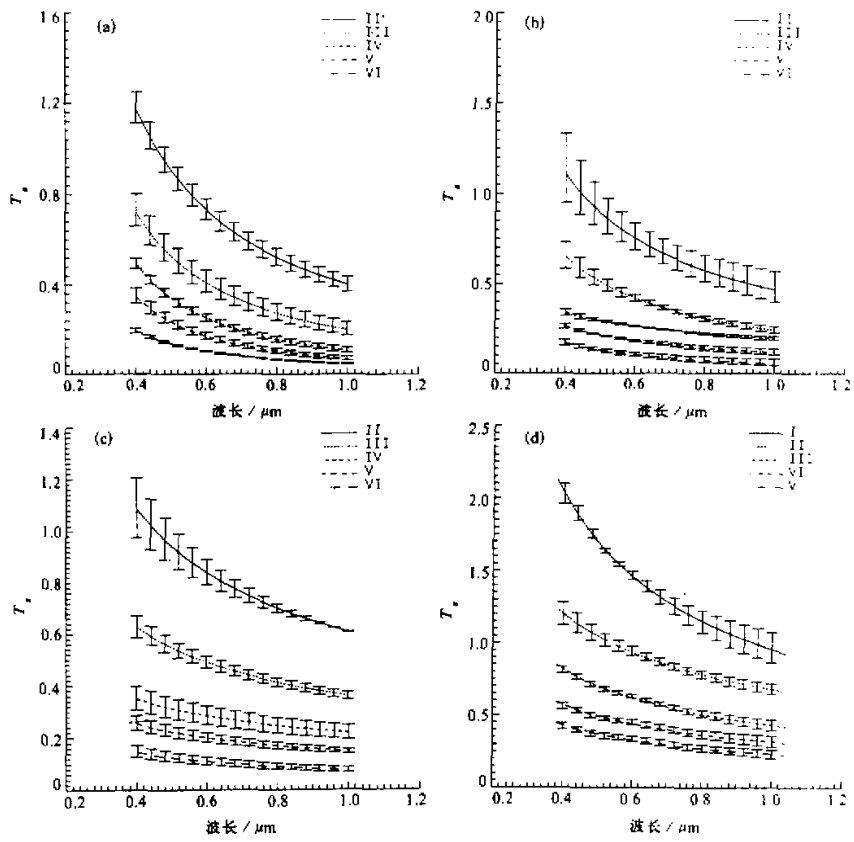


图4 能见度分级下的四季平均气溶胶光谱光学厚度,
其中误差棒表示同一能见度下各季节变动标准差
(a) 1978年; (b) 1984年; (c) 1985年; (d) 1993和1994两年平均

种较小差别已知是垂直结构季节性差异引起,但其统计影响并不大,而图3中的光学厚度的季节变化主要是能见度的几率分布引起的。

表2给出了1978、1984、1994年的能见度分级条件下,波长0.55 μm的大气气溶胶光学厚度的季节统计结果。从中可以看出,相同能见度下气溶胶光学厚度的季节变化范围较小,表中 $\overline{|\Delta|}$ 为平均绝对偏差; $\overline{\delta}$ 为平均相对偏差; $\delta_{\max}$ 是最大相对偏差。宽带辐射资料得到的光学厚度季节变化偏差平均小于13%,最大不超过22%;PIS光谱仪获得的光学厚度偏差平均小于7%,最大不超过12%。表2给出了这种能见度分级约束下的气溶胶光学厚度季节变动范围,可供大气辐射传输计算时参考。

3.4 年度变化

虽然分析气溶胶年际变化目前的资料积累还嫌太少,但我们仍可利用现有资料粗略

表 2 能见度分级下的季节平均气溶胶光学厚度 (波长 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$)

		能见度					
		I	II	III	IV	V	VI
1978 年	春		0.8888	0.4405	0.3037	0.2132	0.1278
	夏		0.8271	0.5403	0.3255	0.2400	0.1170
	秋			0.4603	0.2836	0.1916	0.1126
	冬		0.7244	0.4038	0.2499	0.1556	0.1116
	平均		0.8134	0.4612	0.2907	0.2001	0.1173
	$ \Delta $		0.0594	0.0395	0.0240	0.0265	0.0053
	$\bar{\delta} / \%$		7.3	8.6	8.2	13	4.5
1984 年	春		1.0286	0.4926	0.2902	0.1938	0.1340
	夏		0.8022		0.2819		0.1126
	秋		0.7905	0.4852	0.2752	0.2068	0.0904
	冬		0.9195	0.4098	0.2690	0.1934	0.1286
	平均		0.8852	0.4625	0.2791	0.1980	0.1164
	$ \Delta $		0.0889	0.0352	0.0070	0.0059	0.0149
	$\bar{\delta} / \%$		10	7.6	2.5	3.0	13
1994 年	春	1.6578	1.0310	0.6574	0.4790	0.3016	
	夏		0.9457	0.7208	0.4347		
	秋	1.5541	0.9826	0.5850	0.4614	0.3761	
	冬	1.5526	0.9075	0.6128	0.4293	0.3383	
	平均	1.5882	0.9667	0.6252	0.4511	0.3389	
	$ \Delta $	0.0464	0.0401	0.0451	0.0191	0.0253	
	$\bar{\delta} / \%$	2.9	4.1	7.0	4.2	7.5	
	$\delta_{\max} / \%$	4.4	6.7	12	6.2	11	

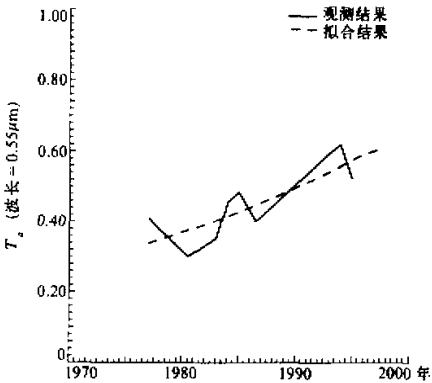


图 5 气溶胶光学厚度的年变化
($\lambda = 0.55 \mu\text{m}$, 1980~1981 年的资料取自文献[4], 1986~1987 年资料取自文献[14])

估计一下气溶胶光学厚度的变化趋势。图 5 给出了不分能见度, 全年平均波长 $0.55 \mu\text{m}$ 处气溶胶光学厚度逐年变化情况, 时间跨度从 70 年代中后期到 90 年代中期。可以看出, 相邻年份有一定起伏。总趋势在增大。图 5 中虚线给出了拟合变化趋势,

$$\tau_{a,0.55} = 0.0132153y - 25.7888,$$

其中 $\tau_{a,0.55}$ 表示波长 $0.55 \mu\text{m}$ 处年平均光学厚度, y 表示年份。由此可知, 气溶胶光学厚度自 1977 年到 1994 年的 18 年间大约增长了约三分之二。随着都市人口增加和工业生产的增长, 人为气溶胶粒子浓度在不断加大^[13], 光学厚度随之增加。但是在过去十几年粒子的本底浓度是否有

明显的增加, 有待今后进一步研究。

为了对北京地区近几年气溶胶光学特性与能见度的关系有定量了解, 表 3 给出了 1993 和 1994 两年平均各能见度下光学厚度谱拟合的 Angstrom 参数。若气溶胶光学厚度用 τ_a 表示, 则 Angstrom 式可写为

$$\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha},$$

其中 β 和 α 分别为浊度因子和波长指数 (波长单位取 nm), 可以看出浊度因子随能见度增高而减小, 也表现出反相关关系; 波长因子随之减小, 意味着大粒子比例有增加趋势。有了这五种能见度下的气溶胶光学厚度谱, 可用插值法求出其他能见度下的光学厚度值, 供大气辐射传输模式使用。

表 3 能见度分类下的光谱光学厚度 τ_a 拟合 Angstrom 参数

能见度	I	II	III	IV	V
β	217.485	83.3055	50.5592	30.5000	22.0845
α	0.816599	0.702488	0.68779	0.662241	0.657818

3.5 与 LOWTRAN 中的气溶胶模式比较

目前使用较多的辐射传输模式如 FASCOD2, MODTRAN 等, 在气溶胶模块处理方面都与 LOWTRAN 辐射模式相同^[15]。美国空军地球物理所研究的 LOWTRAN 7 模式在我国也有较多的用户。为了检验其中气溶胶模块的地域性差异, 我们把在北京地区 1993~1994 两年累计观测到的各种能见度下气溶胶光学厚度与 LOWTRAN 7 中城市气溶胶模式相同能见度下的光学厚度进行比较。见图 6 所示。可以看出, 中等能见度下差别较小, 但低能见度下 LOWTRAN 模式过高估计气溶胶光学厚度, 在 0.55 μm 处最高高出约 65%, 而在高能见度又过低估计也可达 30%。此外, 北京地区气溶胶光学厚度的波长变化率较小, 表明大粒子成分比 LOWTRAN 模式含量要高^[11]。这些差异提醒国内 LOWTRAN 用户在使用时应予以足够的重视。

3.6 粒子谱分布

气溶胶光谱光学厚度包含有粒子谱分布信息。可用线性约束反演获得粒子谱分布。由于 Phillips-Twomey 方法不特别指定谱分布类型, 我们选用了这种方法^[9]。图 7 显示了由 1993 和 1994 两年平均, 在能见度分级下的光学厚度反演得到的大气柱气溶胶粒子谱分布。可以看出, 随着能见度增大, 粒子数浓度相应减小。曲线族在粒子半径小于

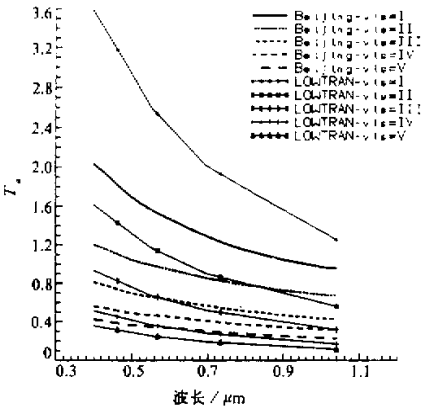


图 6 气溶胶光谱光学厚度观测值 (1993 和 1994 两年平均) 与 LOWTRAN 模式计算结果比较

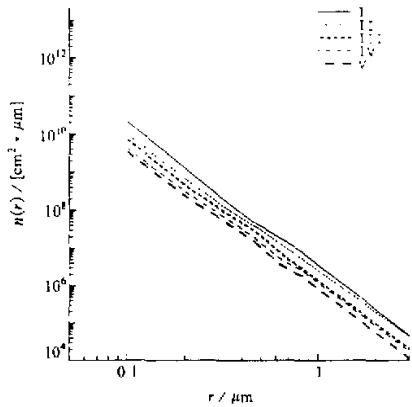


图 7 1993 和 1994 两年平均能见度分级下的气溶胶粒子谱分布

0.3 μm 基本是对数线性模态, 而在大于 0.3 μm 时曲线上凸, 因此可以用一个双模谱型函数, 既 Junge 分布加对数正态分布来拟合, 谱型函数用 $n(r)$ 表示:

$$n(r) = A \left(r^{-B} + \frac{C}{r} \times e^{-D(\ln r - E)^2} \right).$$

表 4 给出了谱型参数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 值以及拟合误差。从表 4 可以看出, 随着能见度增大, 表示气溶胶粒子数浓度的因子 A 依次减小; 第一模态的 Junge 分布指数 B 变化不大; 第二模态的对数正态分布权重 C , 以及方差因子 D 的变化规律不甚明显, 几何平均半径 E 在 0.3~0.4 μm 间变动, 随能见度增大有减小趋势。

表 4 能见度分级下的气溶胶粒子谱分布谱型参数

能见度	A	B	C	D	E	拟合误差 / %
I	1983701.00	3.992	2.225	6.221	0.420	0.1280
II	1881984.88	3.687	1.405	5.341	0.340	0.0773
III	1277690.25	3.722	2.352	20.454	0.340	0.0499
IV	948262.38	3.653	1.167	6.430	0.320	0.0399
V	693030.75	3.694	1.041	8.009	0.320	0.0690

4 讨论

在空间和航空对地表的量化遥感中, 大气订正是重要的环节之一, 完全了解探测时刻的大气条件 (介质状况) 对实用来说可能性很小, 比较现实可行的方法是对大气条件进行分类, 据此供给相应地区和季节的平均大气订正值。本文对北京地区大气的地面能见度进行了分类, 显然, 不同能见度下气溶胶光学厚度差别很大, 以往的观测研究较少有这方面的信息, 使得资料之间的对比和选用极为不便。以本文表 2 为例, 由于历史原因, 从 1978 年和 1984 年宽带辐射资料导出的气溶胶光学厚度没有能见度为 I 的资料, 这就使资料的完整性和代表性有所降低。反过来说, 配有能见度分级的光学厚度资料可以反映出资料的代表性程度。当然, 能见度分级方法也有待于改进, 将另文讨论。如本文的宽带资料能见度采用 McClatchey 经验式导出也是权宜之计。表 2 中 1994 年资料少量能见度在 V 级以上都归结为 V 级, 因为样本少不足以分为一类。尽管如此, 我们提议今后的气溶胶观测研究应配有能见度记录。有了能见度指标, 可在一定统计意义上内插出光学厚度值。我们已经汇总了气溶胶光学特性中长期变化的季节和年度平均结果, 有了基本的气溶胶模式框架, 可为大气订正参考。

关于地面能见度与整层光学厚度的关系, 图 4 和表 2 给出了实验统计规律。能见度分类大大缩小了光学厚度的变动范围。这个结果一方面说明远离平均值的“反常”气溶胶垂直分布结构(如地面能见度大, 光学厚度却不小)的情形比例较少, 不占主流。但另一方面, 同一能见度光学厚度季节统计平均偏差可至 13%, 这又告诉我们地面能见度对整层光学厚度的约束限度, 说明垂直结构季节间的确有一定的差异, 目前的资料水平还无法给出这种差异的规律。

对于气溶胶的气候效应以及气溶胶表面非均相反应等方面研究需求, 仅有整层气溶胶光学厚度和粒子谱分布是不够的。还需要垂直分布信息。国内从 70 年代初就有激光雷达探测气溶胶的资料。虽然长期系统的资料分析结果很少, 我们仍可利用吕达仁等人的天气状况分类方法及激光雷达资料^[10], 给出典型天气条件下气溶胶光学厚度的垂直分布, 以供选择使用。这是下一步要做的工作。

5 结论

(1) 北京地区大气气溶胶光学厚度的季节变化主要是由地面能见度几率分布决定, 通常光学厚度有春夏季大, 秋冬季小的规律;

(2) 当加入了能见度分级后, 相同能见度下气溶胶光学厚度并未表现出显著的四季变化。各季节标准差不超过 13%, 表明能见度是一个重要的约束指标。建议今后的气溶胶光学厚度观测应同时配有地面能见度记录作参考, 以便于资料的对比和使用;

(3) 实际观测的气溶胶光学厚度与 LOWTRAN 的城市气溶胶光学厚度比较表明, 在低能见度下 LOWTRAN 的估值偏高约 65%, 高能见度下偏低大约 30%。由此可见, 急需建立我国自己的城市气溶胶模式;

(4) 北京地区气溶胶光学厚度长期变化有增高的趋势, 自 1977 年到 1994 年间, 气溶胶年平均光学厚度增长了约三分之二。

参 考 文 献

- 1 Stowe L. L., Hittenberger R. and Deepak A., 1990, Report of the expert on space observation of tropospheric aerosols and complementary measurements, WCRP-48, WMO/TD-No.389.
- 2 王炳忠、潘根梯, 1982, 我国的大气透明状况, 气象学报, 40 (4), 443~452.
- 3 赵柏林、张凡菲、高国明, 1986, 我国大气气溶胶光学厚度的特性, 气象学报, 44 (2), 235~241.
- 4 毛节泰、王强、赵柏林, 1983, 大气透明度和浑浊度的观测, 气象学报, 41 (3), 322~332.
- 5 邱金桓、孙金辉、夏其林、张金定, 1986, 北京大气气溶胶光学特性的综合遥感分析, 气象学报, 44 (2), 235~241.
- 6 左大康、杨淑宽, 1989, 中国地理基础数据-野外定位试验站卷 (第 2 集): 辐射观测数据集, 科学出版社, 223~227.
- 7 李放、吕达仁, 1995, 珠穆朗玛峰地区大气气溶胶光学特性, 大气科学, 19 (6), 755~763.
- 8 McClatchey, R. A. and J. E. Selby, 1972, Atmospheric transmittance from 0.25 to 38.5 μm : computer code LOWTRAN-2. Air Force Cambridge Research Laboratories, AFCRL-72-0745, Environ. Res. Paper 427.
- 9 李放、刘锦丽、吕达仁, 1995, 北方局地夏末气溶胶光学特性综合观测分析, 大气科学, 19 (2), 235~242.
- 10 Iqbal M., 1983, *An introduction to solar radiation*, Academic Press, 107~168.
- 11 Leckner, R., 1978, The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface—elements of a model, *Sol.*

- Energy*, 20(2), 143~150.
- 12 国家气象局气候监测应用管理司译, 1992, 气象仪器和观测方法指南, 第5版, 气象出版社, 236~251.
- 13 Twomey, S., 1977, *Developments in Atmospheric Science 7: Atmospheric Aerosols*, Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam-Oxford-New York.
- 14 黎洁、毛节泰, 1989, 光学遥感大气气溶胶特性, *气象学报*, 47(4), 450~456.
- 15 Kneizys F. X. et al., 1988, Atmospheric transmittance / radiance: computer code LOWTRAN 7, AFGL-TL.
- 16 吕达仁、魏重、林海、谷淑芳、施秉钊、马惠英、张东光, 1977, 低层大气消光系数分布的激光探测, *气象科学*, 2(1), 99~205.

The Mid-Long Term Features of Atmospheric Aerosol Optical Depths over Beijing Area

Li Fang and Lu Daren

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

Abstract The spectral optical depths of atmospheric aerosols in the urban area of Beijing are deduced from the direct solar radiation data from 1977 to 1985. In addition, the successive high spectral resolution observations of the radiation with a PIS spectrometer are conducted from March 1993 to March 1995 under clear and partly cloudy conditions in the same area. The features of aerosol optical properties are described for an unprecedented long period. The results show that (1) aerosol optical depths (AOD) are thick in spring-summer, and thin in autumn-winter; (2) with the classification of the surface visibility the seasonal difference of the AOD is greatly reduced for the same kind of visibility, and the amplitude of the AOD is limited by the visibility; (3) there is a tendency of year by year increase of the AOD, and on the yearly averaged basis the AOD in 1994 has increased by two thirds of that in 1977.

Key words atmospheric aerosol optical depth direct solar radiation visibility