

北京采暖期间和采暖期前大气气溶胶物理特性的对比研究

游荣高 任丽新 *

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

1981年10月21日至11月3日(采暖期前), 11月24日至12月3日(采暖期间), 我们在北京香山植物园和北郊大气物理研究所气象塔, 用光学粒子计数器进行了近地面层大气气溶胶浓度与尺度谱分布的观测, 结果表明, 北京冬季采暖期间由燃煤产生的烟尘污染与天气条件密切相关。在晴空天气条件下, 烟尘污染并不严重; 而在阴天或多云天气条件下, 烟尘污染是相当严重的, 气溶胶瞬时浓度可高达 $1600 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。通过对尺度谱分布的分析, 发现采暖期间主要增加的是小粒子($r < 1 \mu\text{m}$)。

通过谱模式的比较指出, 在烟尘污染严重的冬季, 我们提出的三参数尺度谱分布模式($dN/dr = ar^b e^{-cr}$) 优于 Junge 谱模式和 Γ 谱模式。

关键词: 气溶胶; 烟尘污染; 采暖期; 北京

一、引 言

气溶胶的含量已作为评价大气环境质量的重要指标之一。北京是以燃煤为主要能源的大城市, 北京冬季寒冷, 取暖时间长, 燃煤排放的大量烟尘是北京冬季最主要的大气污染源。自70年代末以来, 中国科学院大气物理研究所在北京、长春、兴隆和香河等地进行了近地面和空中大气气溶胶物理特性的观测与研究^[1-4]。1981年10—12月中国科学院环境科学委员会在北京地区组织进行了两次规模较大的大气野外综合试验, 我们首次对北京地区冬季采暖期间和采暖期前气溶胶物理特性进行了深入的对比研究, 得到了一些新的结果。

二、仪器与实验

1981年10月21日至11月3日(采暖期前), 11月24日至12月3日(采暖期间), 我们用光学粒子计数器(日制PM-730), 在北京地区进行了近地面层大气气溶胶浓度和尺度谱分布的观测, 大气气溶胶总浓度是指在单位体积中, 粒径范围为 $0.3 - 10 \mu\text{m}$ 的总粒子数, 单位为 $\text{个}/\text{cm}^3$ (以下简称浓度)。光学粒子计数器的工作原理和测量范围, 见文献[1]。

在两次野外观测期间, 我们选择了两个采样点, 一个是北京中国科学院大气物理研

1990年2月6日收到, 3月10日收到修改稿。

* 刘向敏、李博、洪芳参加部分观测。

究所气象塔观测场(近郊区),另一个是北京香山植物园(远郊风景区),气象塔观测场采样管距地高度为8m,香山测点采暖期前为12m,采暖期间为9m.两个阶段共获得200多份气溶胶谱分布资料.

三、结果与讨论

1. 气溶胶浓度的日变化

北京地区采暖期前和采暖期间气溶胶浓度的日变化示于图1.由图1中的曲线1和曲线2看出,在晴朗天气条件下,采暖期间同采暖期前的浓度值相近,浓度的日变化规律相似.8:00和16:00左右浓度出现较大值,而在中午前后(约11时至13时)出现最低值.中午前后由于对流充分,垂直输送增强,气溶胶粒子易于向上输送,因而近地面层气溶胶浓度出现低值,而且变化也缓慢.这与长春^[2]、香河^[1]等地的浓度日变化规律相似,只是变化幅度不一样,这主要是局地因素和大气状况的差异所导致.

图1中曲线3和4分别表示在能见度较差的阴天或多云天气条件下采暖期前和采暖期间浓度的日变化.对比曲线3和4发现,在阴天或多云天气条件下,采暖期间的浓度(曲线4)比采暖期前的浓度(曲线3)大约高2—10倍.

2. 大气气溶胶浓度的日际变化

采暖期前,10月24日至26日,我们在气象塔观测场进行了三天二夜的连续观测,10月28日至30日在香山测点也进行了三天二夜的连续观测,11月24日至25日(处于采暖期间)在气象塔观测场进行了二天一夜的连续观测,12月2日至3日(处于采暖期间)在香山测站也进行了昼夜测量.

图2给出了不同天气条件下,采暖期前和采暖期间气溶胶浓度的日际变化.从图2看出,无论采暖期前还是采暖期间气溶胶浓度都有明显的24小时周日变化规律,浓度的最低值不是出现在夜间而是在白天中午前后.无论气象塔或香山,采暖期间(曲线2和4)的日际变化同采暖期前(曲线1和3)都有较大的差异.这种差异主要表现在夜间,采暖期间上半夜的浓度明显地高于下半夜.这是上半夜燃煤采暖产生的烟尘所致.而采暖期前上半夜的浓度低于下半夜.另外,从曲线4可看到,雾对浓度有明显地影响.12月3日由于早晨出现轻雾,即使在远郊香山风景区,瞬时浓度也高达1790个/cm³.

表1给出了北京地区采暖期前和采暖期间气溶胶夜间平均浓度的变化.由表1可以得到如下几点:(1)对于香山和气象塔测点,采暖期前,在多数情况下上半夜(18:00

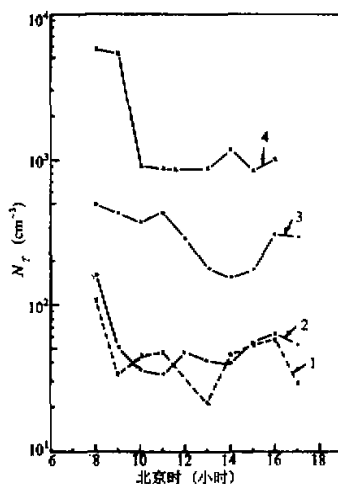


图1 大气气溶胶浓度的日变化

- (1) 采暖期前,晴空,能见度大于30km(1981年10月22日).
- (2) 采暖期间,晴空,能见度20—25km(1981年12月1日).
- (3) 采暖期前,多云,能见度7km(1980年8月1日).
- (4) 采暖期间,阴,能见度4km(1981年11月29日).
- (1)、(3)、(4)气象塔测点(2)香山

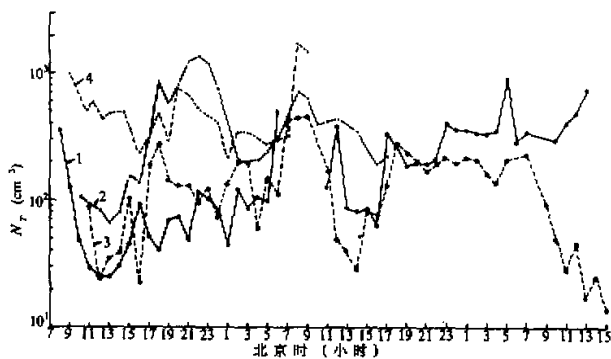


图2 大气气溶胶浓度的日际变化

- (1) 示气象塔, 采暖期前, 10月24日至26日, 晴空, 能见度30km,
- (2) 示气象塔, 采暖期间, 11月24日至25日, 其中24日晴空, 能见度20km, 25日阴有小雪, 能见度4km,
- (3) 示香山, 采暖期前, 10月28日至30日, 晴空, 能见度30km,
- (4) 示香山, 采暖期间, 12月2日至3日, 晴空, 能见度10—15km

表1 北京地区气溶胶夜间平均浓度的变化(1981年)

	日 期	测 点	平均浓度 (个 μm^3)		
			18:00—24:00	01:00—07:00	18:00—07:00
采暖期前	10月24日—10月25日	气象塔	77.2	161.7	116.2
	10月25日—10月26日	气象塔	270.2	430.6	350.4
	10月28日—10月29日	香 山	140.6	189.7	165.2
	10月29日—10月30日	香 山	221.4	197.6	210.4
采暖期间	11月24日—11月25日	气象塔	987.4	272.3	657.4
	12月2日—12月3日	香 山	522.0	307.1	414.6

—24:00)的平均浓度值低于下半夜(01:00—07:00),而在采暖期间则相反,上半夜的平均浓度值高于下半夜。(2)采暖期间,在北京近郊气象塔测点,上半夜的气溶胶平均浓度是下半夜的3.6倍,这是因为燃煤产生的烟尘主要集中在上半夜,而在远郊风景区香山植物园上半夜的平均浓度仅是下半夜的1.7倍左右,这表明北京近郊的污染比远郊风景区严重。(3)采暖期间,在近郊气象塔测点整夜(18:00—07:00)的平均浓度是远郊香山测点的1.6倍左右,这表明在平均情况下,近郊冬季采暖期间燃煤污染是严重的。

3. 采暖期前和采暖期间大气气溶胶浓度对比及其与天气条件的关系

表2给出了北京地区在不同天气条件下采暖期前和采暖期间气溶胶浓度值,从表2看出,香山和气象塔测点的结果都表明,在高气压控制能见度较好的晴空天气条件下,采暖期间的日平均浓度与采暖期前相比,浓度值增加不多,有时还低一点,它们的值比较接近,例如,12月1日(处于采暖期间),为一次强冷空气过程后的晴空天气,这一

表 2 1981 年采暖期前和采暖期间气溶胶浓度

测点	日期	时间	天气条件	浓度 (个 μm^3)			平均 次数	
				平均值	最大值	最小值		
采暖期前	气象塔	10月21日	09—17	小雨后, 多云间晴, 能见度 20km	40.4	86.9	25.2	9
		10月22日	08—17	晴空, 能见度 >30km	48.9	109.2	21.4	9
		11月3日	09—17	晴空, 能见度 25km	65.2	108.3	28.1	8
		10月23日	08—17	晴空, 能见度 20km	83.7	280.8	28.2	10
		10月24日	08—17	晴空, 能见度 30km	86.4	368.4	24.8	10
		10月25日	11—17	晴空, 能见度 30km	171.1	383.5	64.4	7
		10月24日—10月25日	18—06	夜间	116.2	508.4	41.2	13
		10月25日—10月26日	18—07	夜间	350.4	928.7	192.6	14
	香山	10月28日	10:50—17	晴空, 能见度 30km	72.5	188.9	22.5	7
		10月29日	08—17	晴空 (晨雾) 能见度 30km	169.9	472.1	29.5	9
		10月30日	09—15	晴空, 能见度 $\geq 30\text{km}$	39.8	97.1	14.2	7
		10月28日—10月29日	18—07	夜间, 晴	165.2	428.0	59.3	14
		10月29日—10月30日	18—07	夜间	210.4	289.3	140.9	13
采暖期间	气象塔	11月24日	10—17	晴空, 能见度 20km	128.1	162.1	64.3	8
		11月25日	08—17	阴 (有小雪), 能见度 4km	429.0	743.0	190.7	8
		11月26日	08—13	雪后第一天, 碧空 能见度 27km	89.9	185.0	57.0	6
		11月27日	08—17	晴空, 能见度 27km ~ 10km	343.9	614.3	55.0	9
		11月28日	08—17	晴空多云, 能见度 3—4km	774.7	1022.3	604.3	9
		11月29日	08—17	阴, 能见度 4km	1077.3	1565.3	856.7	9
		11月24日—11月25日	18—07	夜间	657.4	1380.4	199.5	13
	香山	12月1日	08—17	晴空, 能见度 20—25km	57.8	161.2	32.5	10
		12月2日	08—17	晴, 能见度 10—15km	542.1	1021.3	230.6	10
		12月2日—12月3日	18—07	夜间, 晴	414.6	766.0	224.8	14

天在香山测得的最低浓度为 33 个 $/\text{cm}^3$, 日平均浓度为 58 个 $/\text{cm}^3$, 它的日平均浓度值与采暖期前 10 月 30 日(晴空天气)的日平均浓度 40 个 $/\text{cm}^3$ 相比, 也只是稍高一些, 比采暖期前 10 月 28 日(晴空天气)的日平均浓度 73 个 $/\text{cm}^3$ 还要低一些; 气象塔测点也有类似的结果. 例如采暖期前, 10 月 22—24 日均为晴空天气, 它们的日平均浓度分别为 49 个 $/\text{cm}^3$ 、84 个 $/\text{cm}^3$ 、86.4 个 $/\text{cm}^3$. 采暖期间 11 月 26 日(晴空天气)的日平均浓度为 90 个 $/\text{cm}^3$. 它的值比采暖期前 10 月 22 日的平均浓度值稍高一些, 与 23 日和 24 日的日平均浓度值近于相等.

而在能见度差的阴天或多云天气条件下, 采暖期间由燃煤引起的烟尘气溶胶粒子浓度明显地增加. 例如 11 月 29 日, 气象塔测点的日平均浓度高达 1077 个 $/\text{cm}^3$, 大约是采暖期前晴空天气条件下浓度值的 10—20 倍左右.

以上结果表明, 冬季采暖期间燃煤产生的烟尘污染程度与天气条件密切相关, 在晴空天气条件下, 近地面大气污染并不严重, 而在能见度差的阴天或多云天气条件下大气污染是相当严重的, 这是一个十分有实际意义的结果.

这种现象的出现, 我们认为在阴天或多云天气条件下, 由于对流较弱, 燃煤产生的烟尘不易输送到高层, 因而近地面层的烟尘污染气溶胶浓度明显增高, 而在晴空天气条件下, 对流强, 垂直输送加强, 由燃煤产生的烟尘不易堆积在近地面层, 而被输送到自由大气中, 所以, 近地面层的烟尘污染气溶胶浓度没有明显增高.

10 月 19 日至 21 日, 北京出现了连续三天的锋前暖区降水, 21 日 09—17 时为连续性降水过程后的多云间晴天气, 在这个时段内测得的日平均浓度只有 40 个 $/\text{cm}^3$ (见表 2), 气溶胶浓度很低, 这是降水过程使大气“净化”的结果.

从表 2 可以看出, 香山(远郊风景区)的浓度一般都比近郊气象塔的浓度低, 在两次观测期间内浓度最低值均出现在香山, 如 10 月 30 日的最低浓度为 14 个 $/\text{cm}^3$, 日平均浓度为 40 个 $/\text{cm}^3$, 这表明北京香山风景区比较干净.

由表 2 可归纳出北京采暖期间在不同天气条件下平均浓度的变化范围是: 在晴空天气条件下(能见度大于 20km)约为 58—130 个 $/\text{cm}^3$; 中等天气条件下(能见度 10—15 km)约为 300—500 个 $/\text{cm}^3$; 阴天或多云天气条件下(能见度低于 5km)约为 700—1077 个 $/\text{cm}^3$.

4. 大气气溶胶尺度谱分布特征

(1) 尺度谱分布随时间的变化

图 3 给出了采暖期前和采暖期间大气气溶胶粒子尺度谱分布随时间的变化. 图中 dN/dr 表示单位粒子半径间隔内每立方厘米空气中的粒子数, r 为粒子半径. 我们分两种典型天气条件和上午、中午、下午三个时段讨论白天气溶胶尺度谱分布随时间的变化规律. 上午时段的平均谱指 08 时至 10 时的三次观测的平均谱; 中午时段的平均谱指 11 时至 14 时的四次平均谱; 下午时段平均谱指 15 时至 17 时的三次平均谱.

从图 3a 可看出, 采暖期前在能见度较好的晴空天气条件下, 在 $0.3—10\mu\text{m}$ 粒径范围内, 上午的分谱浓度大于下午和中午, 中午的值最低, 这表示无论小粒子还是大粒子都是上午的粒子数比下午和中午多. 由图 3a 还可进一步看出, $r < 1\mu\text{m}$ 的小粒子随不同时段的变化是很明显的, 上午的小粒子数明显地比下午和中午多, 中午的小粒子数

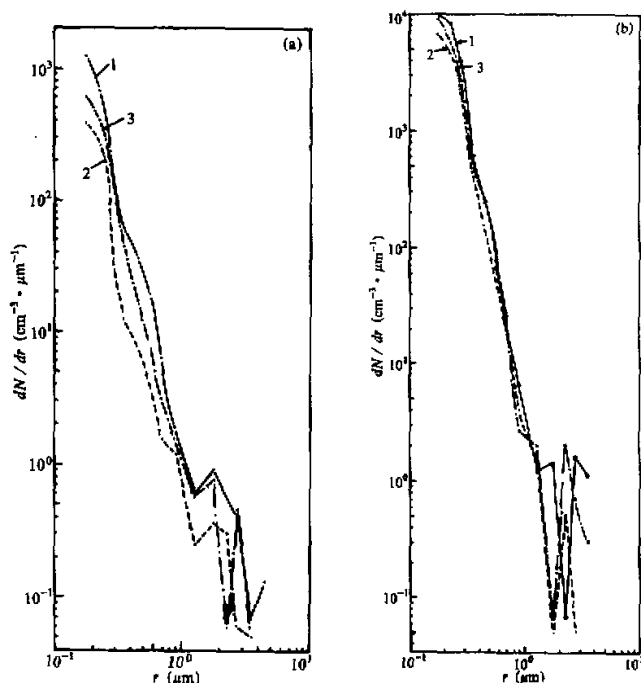


图3 谱分布随时间的变化

- (a) (1) 示气象塔, 采暖期前, 10月23日上午, 晴空, 能见度30km,
 (2) 示中午, 其余同(1), (3) 示下午其余同(1),
 (b) (1) 示气象塔, 采暖期间, 11月29日上午, 阴, 能见度4km,
 (2) 示中午, 其余同(1), (3) 示下午, 其余同(1)

最少; 而大粒子 ($r > 1\mu\text{m}$) 随不同时段的变化不如小粒子那样明显。这说明大粒子与小粒子的日变化规律有所不同。引起这种不同的原因, 可能同小粒子随相对湿度变化的依赖性要比大粒子更密切有关。因相对湿度在中午最低, 所以本仪器可测量的小粒子数在中午明显地减少。大粒子的变化可能更多地受重力沉降和其它因素的影响。总之, 影响气溶胶粒子变化的因素是极为复杂的。由图3b看出, 采暖期间, 在能见度较差的阴天, 尺度谱随时间的变化较小, 不如采暖期前晴空天气条件下的变化明显 (见图3a)。这表明燃煤采暖和天气条件对大气气溶胶尺度谱分布的时间变化规律有明显的影

响。比较图3a与图3b还可以看出, 在北京冬季采暖期间的阴天, 小粒子 ($r < 1\mu\text{m}$) 数是采暖期前晴空天气条件下的4—10倍左右, 其中 r 为 $0.175\mu\text{m}$ 处的小粒子数是采暖期前的7—17倍; 而 $r > 1\mu\text{m}$ 的大粒子只约为4倍。这可能说明, 北京冬季采暖期间由燃煤增加的粒子主要是小粒子 ($r < 1\mu\text{m}$)。实际大气中气溶胶含量和谱分布的变化是一个极其复杂的过程, 它受大气状态等多种因素的影响。

(2) 气溶胶平均尺度谱分布特征

图4给出了不同时段实测平均谱。由图4a看出, 在晴空天气条件下, 在半径 r 为

$1.75\mu\text{m}$ 附近有时有明显的次峰出现(曲线 1)。

图 4b 给出了气象塔和香山测点采暖期前和采暖期间的夜间平均谱。对比图 4b 中的曲线 3 和 4 可发现,在香山测点,采暖期间的小粒子($r < 1\mu\text{m}$)有明显的增加,而大粒子变化不明显。对比曲线 1 和 2 可发现,在气象塔测点,采暖期间的小粒子($r < 0.7\mu\text{m}$)和大粒子($r > 1\mu\text{m}$)都有明显的增加,但小粒子增加得多,采暖期间的小粒子($r < 0.7\mu\text{m}$)为采暖期前的 10 倍左右,而大粒子($r > 1\mu\text{m}$)只有采暖期前的 2—7 倍左右。这表明在夜间,采暖期间增加的粒子主要是小粒子。由上节图 3 表明,在白天采暖期间增加的粒子主要也是小粒子。

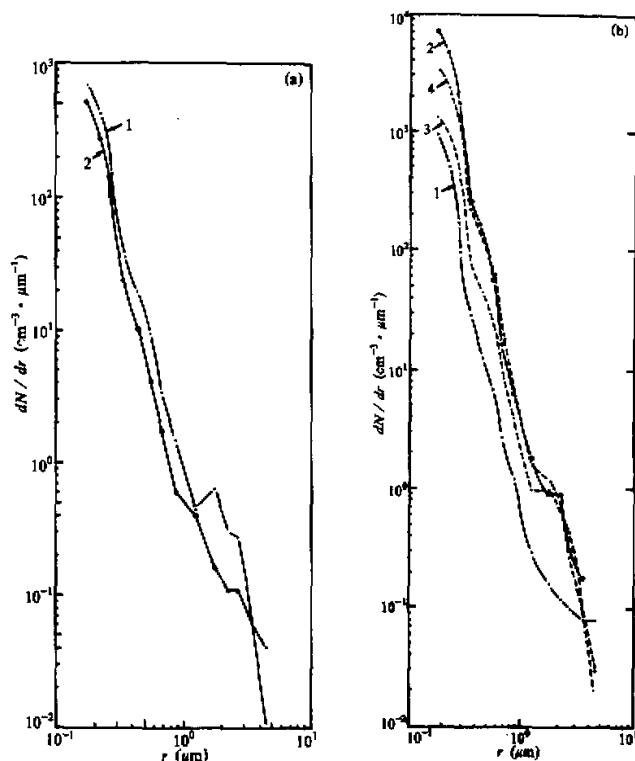


图 4 北京地区不同时段近地面层的实测平均谱

- (a) 气象塔采暖期前能见度为 30km 晴空条件下白天的平均谱: (1) 10 月 23 日 08 时—17 时 10 次平均谱;
(2) 10 月 24 日 08 时—17 时 9 次平均谱。
(b) 夜间平均谱: (1) 气象塔采暖期前 10 月 24 日 18 时—25 日 05 时 12 次平均谱; (2) 气象塔采暖期间
11 月 24 日 18 时—25 日 07 时 12 次平均谱; (3) 香山采暖期前 10 月 28 日 18 时—10 月 29 日 06 时;
(4) 香山采暖期间 12 月 2 日 18 时—12 月 3 日 06 时

图 5 给出了气象塔测点采暖期前和采暖期间多次平均的实测平均谱,它们可代表北京秋冬季近地层城市气溶胶平均尺度谱特征。由图 5 和图 4 都可看出,采暖期前和采暖期间实测平均谱分布特征都是在小粒子区谱近似为 Junge 谱,而在大粒子区谱偏离 Junge

谱较大。

5. 尺度谱分布模式比较

因采暖期间和采暖期前的实测平均谱在大粒子区 ($r > 1 \mu\text{m}$) 偏离 Junge 谱, 故采用我们提出的三参数尺度谱分布模式^[1]

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = ar^be^{-cr} \quad (1)$$

来描述采暖期前和采暖期间近地面层大气气溶胶粒子尺度谱分布, 式中 dN/dr 为单位粒子半径间隔内每立方厘米空气中的粒子数, r 是粒子半径, a, b, c 为待定谱分布参数, 用最小二乘法确定。

参数 b 与谱分布曲线的斜率有关, 参数 c 的引进能较好地描述大粒子区气溶胶尺度谱分布的特征, 参数 a 与总浓度和谐有关, 主要依赖于总浓度。

为了讨论三参数谱模式的实用性, 我们将它与著名的 Junge 谱模式和 Γ 谱模式进行

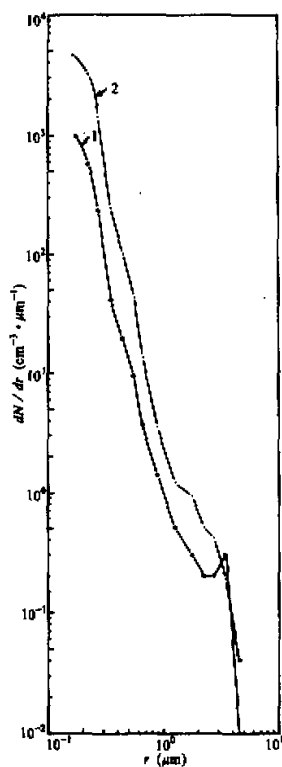


图5 北京气象塔近地面层多次平均的实测谱
(1) 采暖期前 10 月 21 日 09 时—26 日 06 时
(包含白天和夜间) 67 次的平均谱; (2) 采暖期
间 11 月 24 日 10 时—29 日 17 时 (白天) 49
次的平均谱

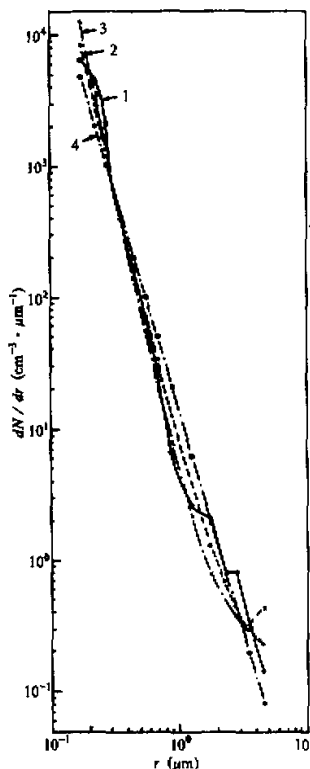


图6 三种谱模式的拟合谱与实测谱的比较
(1) 实测平均谱, (2) 三参数拟合谱,
(3) Γ 拟合谱, (4) Junge 拟合谱

表3 三种潜模式的拟合误差 (1981年)

	编号	时 间	实测平均 浓度 (个 /cm ³)	三参数潜模式			Jungl 潜模式			Γ 潜模式		
				拟合平均 浓度 (个 /cm ³)	ε_N (%)	ε_n (%)	拟合平均 浓度 (个 /cm ³)	ε_N (%)	ε_n (%)	拟合平均 浓度 (个 /cm ³)	ε_N (%)	ε_n (%)
采 暖 期 前	1	10月21日9时—11时	45	33	-26.1	44.0	22	-50.6	72.4	26	-42.3	76.2
	2	10月23日8时—17时	73	61	-15.8	42.4	46	-36.4	58.4	59	-19.5	45.6
	3	10月22日—25日	76	66	-13.8	34.5	51	-33.1	46.3	62	-18.4	37.3
	4	10月24日18时—25日6时	87	69	-20.8	43.7	55	-36.8	52.6	61	-29.5	51.2
	5	11月3日9时—17时	71	63	-10.7	33.0	35	-50.6	79.1	43	-39.1	83.6
	6	10月21日9时—26日6时	99	80	-18.7	43.6	67	-32.6	48.6	80	-19.4	44.0
	7	10月26日8时—13时	84	75	-10.6	59.6	47	-44.4	102.0	54	-35.5	113.1
	8	10月25日18时—26日7时	267	243	-8.9	39.9	178	-33.4	55.4	260	-2.6	40.2
	9	10月30日9时—15时	91	78	-14.6	43.9	66	-27.3	53.4	83	-9.2	41.4
	10	10月28日18时—29日7时	153	131	-14.6	47.5	122	-20.2	50.0	163	6.5	50.7
采 暖 期 间	11	10月28日—30日	129	110	-14.5	34.9	101	-21.6	37.8	133	3.1	38.0
	12	11月27日18时—28日7时	355	330	-7.1	42.1	203	-42.8	70.7	329	-7.0	42.2
	13	11月28日8时—17时	745	739	-0.8	33.7	493	-33.8	56.7	967	29.8	43.7
	14	12月2日8时—17时	164	141	-18.7	43.6	107	-34.7	54.4	140	-14.8	42.2
	15	12月3日0时—7时	295	307	4.0	46.0	207	-3.0	63.2	305	3.2	46.0
	16	12月2日18时—3日7时	392	387	-1.3	33.6	350	-10.7	34.4	547	39.7	52.5

了比较, Junge 提出的尺度谱分布模式为

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = \left(\frac{c_1}{2.3} \right) r^{-(v+1)}, \quad (2)$$

Γ 谱分布模式为

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = r^{(1-3d_1)/d_1} \exp(-1/d_1 d_2). \quad (3)$$

(2) 式和 (3) 式中的 dN/dr , r 与 (1) 式的意义相同, c_1 和 v , d_1 和 d_2 分别为两个谱模式的待定谱分布参数, 用同样的实测平均谱资料, 按最小二乘法确定。

表 3 给出了三种谱模式的拟合误差, ε_n 是拟合谱的相对误差, 表示为

$$\varepsilon_n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|\hat{n}(r_i) - n(r_i)|}{n(r_i)}, \quad (4)$$

这里 $\hat{n}(r_i)$ 为拟合值, $n(r_i)$ 为实测值, 本文样本数 M 为 14。

表 3 中的 ε_N 为拟合浓度的相对误差, 表示为

$$\varepsilon_N = \frac{\hat{N}_T - N}{N_T}, \quad (5)$$

式中 $\hat{N}_T = \sum_{i=1}^M \hat{n}(r_i) \times \Delta r_i$, $\hat{N}_T$ 表示用谱模式拟合的气溶胶总浓度, N_T 为实测气溶胶总浓度。

从表 3 看出, 无论采暖期前还是采暖期间, 三参数谱模式浓度和尺度谱的拟合误差均小于 Junge 谱模式和 Γ 谱模式。例如 10 月 21 日三参数谱模式拟合谱的相对误差 ε_n 为 44%, 而 Junge 谱模式的谱误差 ε_n 为 72.4%, Γ 谱模式的谱误差 ε_n 为 76.2%。

从图 6 看出, 三参数谱模式的拟合谱比 Junge 谱模式和 Γ 谱模式的拟合谱更接近于实测谱。这表明在烟尘污染严重的北京冬季采暖期, 三参数谱模式仍然优于 Junge 谱模式和 Γ 谱模式。

四、结 论

1. 在高压控制的晴空天气条件下, 采暖期间气溶胶浓度同采暖期前接近, 而在阴天或多云天气条件下, 采暖期间近地面层的气溶胶粒子显著增加, 瞬时浓度可高达 1600 个/cm³, 日平均浓度也高达 1077 个/cm³。这表明在能见度差的阴天或多云天气条件下, 北京冬季采暖期间燃煤产生的烟尘污染是相当严重的, 但在晴空天气条件下, 由燃煤引起的污染并不严重。这一重要的观测事实, 对北京冬季大气质量的评价有着重要意义。

2. 通过大气气溶胶尺度谱的比较分析, 发现北京冬季采暖期间, 由燃煤产生的烟尘污染气溶胶粒子主要是小粒子 ($r < 1 \mu\text{m}$)。

3. 在烟尘污染严重的北京冬季, 我们提出的三参数尺度谱分布模式 ($dN/dr = ar^b e^{-cr}$), 仍然优于 Junge 谱模式和 Γ 谱模式。

参 考 文 献

- [1] 游荣高, 1981, 大气气溶胶浓度和尺度谱分布变化特征及尺度谱分布模式的研究, 科学探索, 第 1 卷第 3 期 11-22.
- [2] 游荣高, 任丽新, 1981, 大气气溶胶浓度与谱分布变化的研究, 长春遥感试验论文集, 吉林人民出版社, 56-60.
- [3] 游荣高, 洪钟祥等, 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, 第 7 卷, 第 1 期, 88-94.
- [4] 任丽新, 游荣高等, 1984, 0-30 公里大气气溶胶的垂直分布, 科学通报, 第 29 卷, 第 18 期, 1121-1124.