

上海夏季大气气溶胶观测和分析^{*}

张 维 邵德民 沈爱华 何珍珍

(上海市气象科学研究所)

沈志来 吴玉霞 任丽新 黄美元^{**}

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文介绍了 1986 年夏季上海大气气溶胶粒子观测结果,分析表明,该地区大气气溶胶绝大部分为细粒态;粒子谱分布符合 Junge 分布;粗、细粒子浓度及其对气溶胶质量的贡献大小与天气状况和气象因子关系较密切;降雨对气溶胶的冲刷作用与雨强有紧密关系。

关键词: 大气气溶胶; 粒子谱分布; 上海

一、引 言

大气气溶胶尺度分布虽然具有某些规律性,但是气溶胶的浓度变化无论在时间和空间方面都较为复杂.本文根据我们在上海近一个月的连续气溶胶观测得到的资料,结合有关气象因子进行了分析讨论.

测点设在上海龙华机场塔台的平台上(离地约 20m 高),测点处于市区西南角,其西南向附近有一水泥厂,西边为近郊区,东和东南边临近黄浦江.因此,对于了解上海工业城市气溶胶浓度情况,测点还是有一定的代表性.自 1986 年 6 月 19 日至 7 月 13 日,每天从 05 时到 19 时每隔一小时进行整点观测;6 月 30 日至 7 月 5 日进行了 24 小时整点观测,共取到资料 340 份.观测仪器采用日产 PM-730-D₂-P 型光学粒子计数器,利用粒子对光的散射效应,以粒子光学等效直径 $d=0.3\mu\text{m}$ 为下限,分 15 档自动记录^[1].取样的同时还进行了天气状况、风、温度和降雨量等观测.

二、资 料 分 析

1. 气溶胶浓度和谐分布 气溶胶产生过程的不同会形成细、粗粒态不同的气溶胶体系,我们所观测到的气溶胶粒子下限直径为 $0.3\mu\text{m}$.观测期间得到细粒态气溶胶

1988 年 5 月 31 日收到, 1988 年 11 月 22 日收到修改稿.

* 本文为 1986 年上海市环境保护科学研究所、中国科学院大气物理研究所和上海市气象科学研究所合作进行的“上海地区酸雨综合观测”中的一部分.

** 大气物理研究所邵虹、龚宴邦、戴淑玲等同志参加了观测工作.

($2\mu\text{m} > d > 0.3\mu\text{m}$) 的平均浓度为 $226/\text{cm}^3$ (表 1), 最大浓度达 $1934/\text{cm}^3$, 最小值为 $10/\text{cm}^3$, 浓度变化范围较大, 可相差两个量级; 粗粒态气溶胶 ($d > 2\mu\text{m}$) 的平均浓度为 $0.79/\text{cm}^3$, 最大值为 $17.3/\text{cm}^3$, 有时还观测不到粗粒态气溶胶, 所以大气气溶胶浓度中细粒态气溶胶占了绝大多数, 达总浓度的 99% 以上. 如果将气溶胶粒子视为球状, 换算成粒子的体积来比较对气溶胶的质量浓度贡献, 细粒态平均每立方厘米中体积为 $22.13\mu\text{m}^3$, 而粗粒态有 $27.57\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, 因此总的情况分析, 两者对气溶胶的体积浓度贡献相当. 从观测中不同浓度出现的相对频率分析 (表 2), 有 60% 样品的气溶胶浓度低于 $200/\text{cm}^3$, 样品中将近二分之一的气溶胶浓度为 $50-200/\text{cm}^3$, 粒子浓度大于 $500/\text{cm}^3$ 的仅占 8%.

表 1 大气气溶胶浓度 (上海, 1986 年 6—7 月) 单位: $1/\text{cm}^3$

气溶胶尺度 d (直径)	观测 次数	平均 浓度	日平均 浓度	日平均 最大浓度	日平均 最小浓度	极端 最大浓度	极端 最小浓度	平均体积浓度 $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$
$2\mu\text{m} > d > 0.3\mu\text{m}$	340	226	234	953	45	1934	10	22.13
$d > 2\mu\text{m}$	340	0.79	0.87	3.72	0.18	17.3	0	27.57
$d > 0.3\mu\text{m}$	340	227	235	954	46	1936	11	49.70

表 2 大气气溶胶粒子浓度的相对频率分布 (上海, 1986 年 6—7 月)

浓度 ($1/\text{cm}^3$)	0—50	50—100	100—200	200—300	300—400	400—500	500—600	600—700	700—800	800—900	900—1000	> 1000	合计
样品数	39	79	86	64	32	13	8	3	3	0	2	11	340
%	11.5	23.2	25.3	18.8	9.4	3.8	2.4	0.9	0.9	0	0.6	3.2	100

表 3 不同天气状况时的大气气溶胶浓度 (上海, 1986 年 6—7 月)

天气	观测 次数	平均浓度 ($1/\text{cm}^3$)		平均体积浓度 ($\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$)			
		$2\mu\text{m} > d > 0.3\mu\text{m}$	$d > 2\mu\text{m}$	$d < 2\mu\text{m}$	%	$d > 2\mu\text{m}$	%
雾	24	842.2	1.10	97.35	76.6	29.67	23.4
阴	83	220.2	0.58	21.96	52.8	19.61	47.2
雨	87	175.3	0.88	16.94	40.1	25.34	59.9
多云	103	163.2	0.58	14.03	37.2	23.72	62.8
晴天少云	43	147.0	1.25	14.67	25.6	42.60	74.4

按观测时刻当时的天气状况分类统计 (表 3), 细粒态气溶胶方面, 以有雾天时浓度最多, 雾天层结稳定, 使得近地面气溶胶粒子不易向上扩散, 且有雾时相对湿度较大, 使得一部分直径小于 $0.3\mu\text{m}$ 的吸湿性粒子长大成能观测到的大小, 因而平均浓度达到

842 / cm³, 雾天时基本上 (99.9%) 都是细粒态。雾滴属于液态气溶胶, 所以有雾时粗粒态平均浓度也有 1 / cm³ 左右。阴天由于大气层结相对来讲较稳定, 对流弱, 使得粒子浓度也较大, 平均浓度有 220 / cm³。而晴天少云时, 白天层结不稳定, 对流活动强, 所以细粒态浓度最小, 平均浓度仅 147 / cm³。分析各种天气观测到的粗、细粒子对气溶胶的体积浓度贡献大小发现, 有雾时细粒子对体积的贡献为粗粒子时的 3 倍; 阴天和雨天时, 粗、细粒子两者对气溶胶体积浓度的贡献相当; 晴天时则与雾天刚好相反, 粗粒子对气溶胶体积浓度的贡献为细粒子的 3 倍。因此随着天气的不同, 粗、细粒子对气溶胶体积的贡献有较大的差别。

气溶胶粒子 ($d > 0.3 \mu\text{m}$) 的平均谱呈幂指数递减分布 (图 1), 在双对数图上得到浓度 N 与粒子直径 d 的关系趋于线性分布 (相关系数 $r = -0.99$), 两者的关系可以下列形式表示

$$N(\Delta d) = A d^{-b} (\Delta d)$$

式中 N 为间隔 Δd 的粒子浓度 ($1 / \text{cm}^3$), d 为粒子直径 (μm), A 和 b 为系数。由于 $d < 2 \mu\text{m}$ 的细粒子和 $d > 2 \mu\text{m}$ 粗粒子两者形成的体系不同, 两者浓度随直径增大而指数递减的程度有所差别, 所以我们按细粒子和粗粒子两部分分段计算 A, b 值, 得到:

$$N(\Delta d) = 5.12 d^{-3.04} (\Delta d), (2 \mu\text{m} > d > 0.3 \mu\text{m}), \Delta d = 0.1 \mu\text{m};$$

$$N(\Delta d) = 9.70 d^{-3.16} (\Delta d), (d > 2 \mu\text{m}), \Delta d = 1 \mu\text{m}.$$

将计算谱与实测谱比较, 两者拟合得较好, 分布形式与 Junge 分布相似。气溶胶的平均体积谱在双对数图上, 细、粗粒子体积分布接近正态分布。

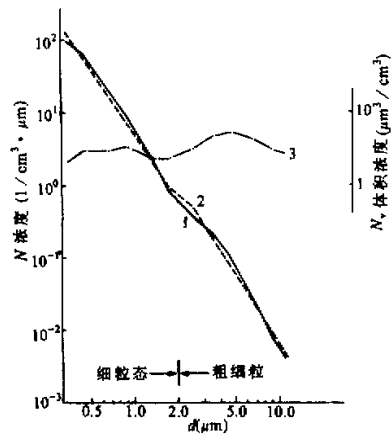


图 1 气溶胶平均谱
图中 1——粒子平均谱(观测值)
2——粒子平均谱(计算值)
3——体积平均谱

表 4 气溶胶粒子平均谱 $N(\Delta d) = A d^{-b} (\Delta d)$ 中的 A, b 值

天气	$2 \mu\text{m} > d > 0.3 \mu\text{m}, \Delta d = 0.1 \mu\text{m}$		$d > 2 \mu\text{m}, \Delta d = 1 \mu\text{m}$	
	A	b	A	b
雾	22.48	2.90	60.73	4.34
阴	3.93	3.29	5.41	2.96
多云	3.08	3.23	5.46	2.91
雨	4.04	2.94	11.48	3.22
晴天少云	3.56	2.87	27.02	3.56

对于各种天气状况下的粒子平均谱也都是指数递减谱, b 值大都在 3 左右 (表 4), 其

中以多云和阴天这两类天气的粒子平均谱分布较为相似.平均体积谱的体积峰值直径,细粒子部分雾天为 $0.9\mu\text{m}$,晴天少云为 $0.55\mu\text{m}$,其它三类天气为 $0.45\mu\text{m}$;粗粒子部分峰值在 $3.5\text{--}5.5\mu\text{m}$,也都接近对数正态分布.

2. 气溶胶的日变化规律

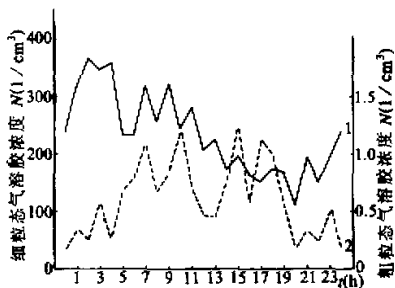


图2 气溶胶浓度平均日变化

图中1——细粒态,2——粗粒态

气溶胶浓度的日变化在相当程度上受到地方性的影响,在城市里还受季节性的影响.我们观测到上海6—7月份气溶胶浓度的平均日变化(图2),细粒态方面:白天在早晨出现一个极大(3时左右),傍晚有一个极小,19时左右).夏天上午大气层结相对来讲比较稳定,垂直气流较弱,因此上午细粒态气溶胶浓度明显要比下午多些(上午的平均浓度约为下午的1.5倍).早晨浓度达到峰值后,随着白天向上垂直输送的逐渐增强,近地面气溶胶浓度就逐渐减小.到下午19时浓

度达到最低值.从6天的夜间观测,得到晚上20时后,浓度又有逐渐增大趋势,这可能由于晚上活动少,大气层结也比较稳定,对流弱,使得近地面气溶胶浓度重新增多.但粗粒态气溶胶的日变化与细粒态有所不同,总的来说,傍晚、夜间和清晨,粗粒子浓度较小.上午和下午浓度较大,但在中午12时前后出现一个较明显的极小值,这与对流活动和粒子的沉降有关.层结稳定,对流很弱时,粗粒子容易沉降,所以粒子浓度较小.白天有对流时,粗粒子不易沉降,浓度增大.当中午对流旺盛时,向上垂直输送加强,因此近地面粗粒子浓度又相对减小了.

在观测期间,将一天中从早到晚基本上属于同一类天气的天数按天气进行分类,统计得到不同天气状况下气溶胶浓度的平均日变化(图3),以雾天的浓度日变化起伏较大,有雾天气时,从早晨日出前雾形成后浓度显著增加,这可能一方面由于层结稳定,一方面也与当时相对湿度大,使一部分原先 $d < 0.3\mu\text{m}$ 的吸湿性粒子长大到 $d > 3\mu\text{m}$ 有关.9时达到极大值,大浓度持续到中午11时,然后随雾消散,浓度迅速减小,到14时后达到极小值,其日变化规律与雾的生消有密切关系.雨天和多云阴天的浓度日变化较为相似,浓度变化起伏小,这大约与大气层结相对来讲较稳定有关,极大值出现在早晨6时,以后白天浓度变化不大.晴天少云天气的极大值出现在早晨7时左右,日出后对流活动加强,使浓度减小,午后对流较强,浓度达到最低值,傍晚对流减弱,17时左右出现一峰值,日变化较明显.但值得注意的是晴天少云天气在中午12时出现一小峰值,这与过去在普陀、宁波和大连等地观测到的巨盐核日变化在中午出现一峰值有类似之处^[2,3].

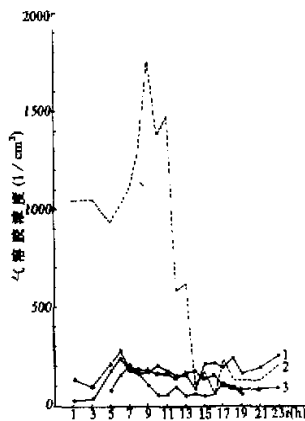


图3 各种天气情况下气溶胶日变化

图中1——雨天,2——雾天,

3——多云阴天,4——晴天少云

3. 气溶胶浓度与风向、风速的关系 气溶胶浓度受风的影响较大,按测站观测气溶胶时刻的风向、风速统计,得到各风向的气溶胶浓度(表 5),SW 和 N-NE 风的平均浓度较大,而 SE 风测到的浓度最小,仅 $109/\text{cm}^3$,约为 SW 风粒子浓度的三分之一。原因是吹西南风时,测站处于附近水泥厂的下风向,受该厂排放物的污染较严重,使浓度大大地增加;N-NE 风时,测站处于市区的下风向,受人口稠密的市区污染影响,也使浓度增大。这些受局地污染影响的粒子中,以细粒子浓度为主,占 99.8%,但粗、细粒子两者对气溶胶体积贡献差不多。SE 风是由郊区和江面吹来,污染物较少些,浓度也就小。静风时由于层结稳定,粒子不易扩散,所以浓度较大,基本上属细粒子范畴。就对气溶胶体积的贡献而言,细粒子为粗粒子的 2 倍。

表 5 各风向时的气溶胶平均浓度 ($1/\text{cm}^3$)

风向	E	SE	S	SW	W	NW	N	NE	静风
样品数	58	47	59	31	34	21	18	32	26
平均浓度	146	109	230	310	204	239	283	277	470

表 6 不同风速时的大气气溶胶浓度(上海,1986年6—7月)

风速 v m/s	样品数	平均浓度 ($1/\text{cm}^3$)		平均体积浓度 $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$			
		$2\mu\text{m} > d > 0.3\mu\text{m}$	$d > 2\mu\text{m}$	$d < 2\mu\text{m}$	%	$d > 2\mu\text{m}$	%
$v < 2$	76	417.1	0.66	43.05	67.5	20.76	32.5
$5 > v > 2$	128	230.6	0.71	20.82	43.7	26.82	56.3
$v > 5$	122	110.2	0.91	10.98	25.1	32.83	74.9

气溶胶浓度与风速的关系也较为密切,一般认为小风时不利于气溶胶粒子的扩散,粒子浓度大;风速增大,会将粒子分散到更高的高度上,使浓度减小。但从表 6 和图 4 中看出,风速增大时粒子浓度的减少是在细粒子部分,对于粗粒子部分则刚好相反,风速增大时粗粒子的浓度也增大。根据不同风速时的气溶胶粒子平均谱,可粗略地计算风速增大时相对于小风时粒子浓度的增减率。从风速大于 2m/s 时不同粒径气溶胶浓度(n_i)与风速小于 2m/s 时相对应粒径粒子浓度(n_0)的比(n_i/n_0)得出(图 5),细粒子部分浓度比值都小于 1,但浓度比值达到最小不是在细粒子较小尺度($d < 0.5\mu\text{m}$)的粒子部分,对于 $5 > v > 2\text{m/s}$ 中等风速时,其浓度比值 n_1/n_0 最小是出现在 $1.2 > d > 0.8\mu\text{m}$ 粒子,即以这部分粒子浓度的减小率最大,比小风时相应的浓度减少 61%; $v > 5\text{m/s}$ 大风时, n_2/n_0 浓度比值最小出现在 $1.0 > d > 0.5\mu\text{m}$ 粒子,这部分粒子浓度要比小风时减小 80%以上。相对来讲,风速增大对于 $d < 0.5\mu\text{m}$ 较小粒子浓度减少的程度却并不是最大的, $5 > v > 2\text{m/s}$ 中等风和 $v > 5\text{m/s}$ 大风时的 $d < 0.5\mu\text{m}$ 粒子浓度比 $v < 2\text{m/s}$ 小风时的浓度只分别减少了 40%和 70%。 $d > 2\mu\text{m}$ 粗粒子部分,浓度比值 > 1 ,即大于 2m/s 风速时的粗粒子浓度都要比 $v < 2\text{m/s}$ 小风的浓度大,而且风速愈大,粗粒子浓度增大得愈多。在 $8 > d > 2\mu\text{m}$ 粒子浓度的增大率又与粒径成正相关趋势。分析原因,可能由于风速增大,伴随湍流的增强,使小粒子向上输送,而这些向上输送扩散的小粒子中多半为 $d < 1.2\mu\text{m}$ 的粒子。另外风速增大时会吹起地面上的尘埃粒子,这些尘埃粒子一般较大属于粗粒子,所以风大使粗粒子浓度增加。对气溶胶体积的贡献方面,风速 $v < 2\text{m/s}$ 时,细粒子的贡献为

粗粒子的 2 倍; 中等风速时, 两者贡献相当; 而 $v > 5\text{m/s}$ 大风时, 粗粒子的贡献为细粒子的三倍。

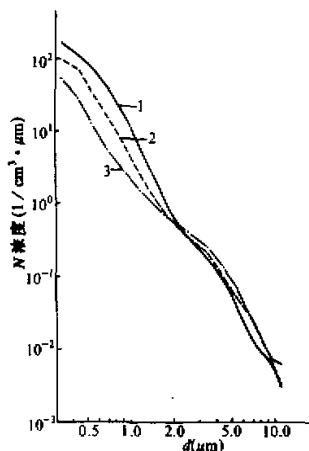


图 4 不同风速时的气溶胶平均谱

图中 1 — $v < 2\text{m/s}$,

2 — $5 > v > 2\text{m/s}$,

3 — $v > 5\text{m/s}$

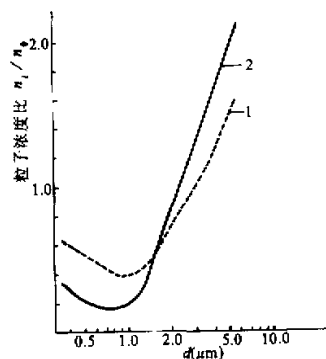


图 5 不同风速下气溶胶浓度比 (n_1/n_0)

图中 1 — $5 > v > 2\text{m/s}$ 时 n_1/n_0 曲线,

2 — $v > 5\text{m/s}$ 时 n_2/n_0 曲线

表 7 不同雨强时的大气气溶胶粒子浓度 (1986 年 6—7 月) 单位: $1/\text{cm}^3$

雨强 mm/h	样 品 数	浓 度 n_i	直径 $d(\mu\text{m})$															Σ
			0.3—	0.4—	0.5—	0.6—	0.8—	1.0—	1.2—	1.5—	2.0—	3.0—	4.0—	5.0—	6.0—	8.0—	>10.0	
			0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0		
1 < 1	58	n_1	87.3	56.0	29.3	13.7	6.56	3.32	1.86	1.04	0.56	0.29	0.17	0.084	0.022	0.009	0.0064	200
5 > I > 1	19	n_2	63.8	39.4	19.5	8.48	4.37	2.22	0.93	0.45	0.25	0.10	0.066	0.019	0.014	0.004	0.0063	140
I > 5	10	n_3	50.8	29.0	13.5	6.36	3.04	1.95	0.85	0.30	0.13	0.04	0.055	0.012	0.003	0.002	0.001	106
浓度比 n_3/n_1			0.58	0.52	0.46	0.46	0.46	0.59	0.46	0.29	0.23	0.14	0.32	0.14	0.14	0.22	0.17	0.53
浓度比 n_2/n_1			0.73	0.70	0.67	0.62	0.67	0.67	0.50	0.43	0.45	0.34	0.39	0.23	0.64	0.44	0.98	0.70

4. 雨水对气溶胶粒子的冲刷作用 将下雨时观测到的气溶胶浓度按所相对应时刻观测到的瞬时雨强(下雨时用塑料盆连续分段采取雨水,然后将与气溶胶观测相对应时刻所取到的雨量,按取样面积、取样时间计算出当时的雨强)分成三类(表 7),当雨强小于 1mm/h 的零星雨滴或毛毛雨时,观测到气溶胶的平均浓度为 $200/\text{cm}^3$,接近阴天的粒子浓度,看来零星雨滴或毛毛雨时,这种微量降水并不能起冲刷作用。雨强增大会使气溶胶浓度减小,对于不同大小直径气溶胶浓度减小的程度,从表 7 中可看出大致分成三类:即 $0.3 < d < 0.5\mu\text{m}$, $10.5 < d < 1.5\mu\text{m}$, $d > 1.5\mu\text{m}$ 。降水对于 $0.3 < d < 0.5\mu\text{m}$ 较小直径气溶胶部分也有一定的冲刷作用, $I < 1\text{mm/h}$ 时这部分气溶胶浓度有 $143/\text{cm}^3$, $I > 5\text{mm/h}$ 大雨时浓度为 $80/\text{cm}^3$,后者的浓度只比前者减少 44%, $5 > I > 1\text{mm/h}$ 的降水对这部分

较小气溶胶的冲刷作用弱些, 浓度仍有 $103/\text{cm}^3$, 只减少了 28%. 而降水对于 $d > 1.5\mu\text{m}$ 较大粒子的冲刷作用最为显著, $I > 5\text{mm/h}$ 大雨时, 气溶胶的浓度仅为 $I < 1\text{mm/h}$ 时浓度的四分之一, 即使是 $5 > I > 1\text{mm/h}$ 的中等降水, 也使 $d > 1.5\mu\text{m}$ 的粒子浓度减少了一半以上, 达 58%. 至于雨水对于 $1.5 > d > 0.5\mu\text{m}$ 部分气溶胶粒子的冲刷作用, $I > 5\text{mm/h}$ 和 $5 > I > 1\text{mm/h}$ 降水时的气溶胶浓度比 $I < 1\text{mm/h}$ 时的浓度减少 53% 和 35%. 可见雨强愈大, 对气溶胶粒子的冲刷作用愈大, 尤其是 $I > 5\text{mm/h}$ 的大雨对粒子的冲刷作用较为显著, 因此雨水对大气的净化作用与雨强有关. 但在同样大小的雨强 ($I > 1\text{mm/h}$) 情况下, 不同大小直径的气溶胶所受到的冲刷程度也有所不同, 相对来讲, 雨水对 $d > 1.5\mu\text{m}$ 大粒子的冲刷作用最为显著, 而对 $d < 0.5\mu\text{m}$ 较小粒子的冲刷作用就较弱. 雨水对 $d > 1.5\mu\text{m}$ 大粒子的冲刷作用大约要比对 $d < 0.5\mu\text{m}$ 较小粒子的冲刷作用大 1 倍左右.

三、几点看法

(1) 上海 6、7 月份 $d > 0.3\mu\text{m}$ 气溶胶粒子浓度每立方厘米有 10^3 个, 大多数的浓度值低于 $200/\text{cm}^3$, 基本上 (浓度的 99% 以上) 为细粒态气溶胶. 粗粒态气溶胶只有 $1/\text{cm}^3$ 左右. 但粗、细粒态对气溶胶体积浓度的贡献相当.

(2) 气溶胶粒子浓度与当时的天气状况有关, 以雾天时浓度最大, 晴天少云时浓度最小. 气溶胶粒子平均谱属于幂指数递减分布, 但由于粗、细粒子产生过程不同, 形成不同的气溶胶体系, 因而两者粒子浓度随直径增大而递减的程度有所不同.

(3) 气溶胶粒子浓度的日变化较为复杂, 雾天气溶胶粒子浓度的日变化与雾的生消关系非常密切, 日变化起伏较大; 晴天少云时对流活动强, 日变化也明显; 阴雨天气时层结稳定, 对流弱, 日变化小. 但各种天气状况下, 都是在早上出现浓度极大值, 且上午的浓度要比下午高.

(4) 气溶胶浓度除与风向关系较为密切之外, 与风速也有关, 风速增大, 使细粒子浓度减小, 粗粒子浓度增大. 相对来讲, 以粒径在 $1.2 > d > 0.5\mu\text{m}$ 这部分粒子浓度减小的程度最大. 风速愈大, 粗粒子浓度增加愈多, 对气溶胶质量浓度的贡献, 小风 ($v < 2\text{m/s}$) 时以细粒态占优势; 大风 ($v > 5\text{m/s}$) 时, 以粗粒态占优势.

(5) 零星小雨和毛毛雨不能对大气起净化作用, 大雨才能起到对大气气溶胶的冲刷作用, $I > 5\text{mm/h}$ 的大雨对粒子的冲刷作用尤为显著. 因此, 雨水对气溶胶的冲刷作用与降水强度有关, 在同样雨强 ($I > 1\text{mm/h}$) 情况下, 对粗粒子的冲刷作用要比细粒子大得多.

参 考 文 献

- [1] 王明星等, 1984, 大气气溶胶的粒子谱分布函数及其随高度的变化, 大气科学, 第8卷, 第4期, 435—442.
- [2] 何珍珍等, 1985, 我国东部 (30°N) 从海岛到陆地巨盐核观测, 大气科学, 第9卷, 第3期, 251—259.
- [3] 沈志来等, 1981, 我国近海和陆地巨型盐核的分布特点和变化规律, 气象学报, 第39卷, 第2期, 205—216.