

郝立生, 闵锦忠, 段英, 等. 衡水湖湿地气溶胶分布的飞机观测 [J]. 南京气象学院学报, 2008 31(1): 109-115

衡水湖湿地气溶胶分布的飞机观测

郝立生^{1,2}, 闵锦忠¹, 段英³,
王建恒², 吴志会³, 石立新³

(1 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 2 衡水市气象局, 河北 衡水 053000
3 河北省人工影响天气办公室, 河北 石家庄 050021)

摘要: 利用机载粒子探测系统 PMS (particle measurement system) 对华北衡水湖湿地进行了一次晴空气溶胶飞机探测, 研究结果表明: 衡水湖上空气溶胶粒子比城市、城镇上空气溶胶粒子小。在低层, 衡水湖上空气溶胶数密度比衡水市、枣强镇大; 在高层, 城市、城镇气溶胶数密度比衡水湖大许多。衡水湖地区气溶胶粒子直径绝大多数为 0.1~0.25 μm , 直径为 0.25~3.0 μm 的气溶胶粒子非常少。衡水湖上空与城市、城镇上空气溶胶特征和垂直分布不同。
关键词: PMS 资料; 衡水湖; 气溶胶; 分布特征
中图分类号: P421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)01-0109-07

Observational Research on Distribution of Aerosols
over the Hengshui Lake Area

HAO Li-sheng^{1,2}, MIN Jin-zhong¹, DUAN Ying³,
WANG Jian-heng², WU Zhi-hui³, SHI Li-xin³
(1. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China
2. Hengshui Meteorological Bureau, Hengshui 053000, China
3. Hebei Weather Modification Office, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract Based on the data observed by a airborne particle measurement system (PMS) under the condition of clear sky weather in summer over the Hengshui lake area, the distributive characters of aerosols have been analyzed. The results show that the size of aerosol particulates over Hengshui lake is smaller than those over Hengshui city and Zaoqiang town, and the size over the Hengshui lake area most ranges from 0.1 to 0.25 μm , and very a few from 0.25 to 3.0 μm . As for the number concentration of aerosols, the concentration at the low level over Hengshui lake is larger than those over the city and town, but rapidly decreasing with height, and at the middle-upper level it is smaller over Hengshui lake than those over the city and town. The aerosol characteristics and vertical distribution over the lake different from those over the city and town.
Key words PMS data; Hengshui lake; aerosol distributive character

0 引言

大气气溶胶是由大气和混合于其中的固体或液体颗粒物组成的体系。气溶胶颗粒物虽然含量很少, 但对大气中发生的许多物理化学过程都有重要的影响。例如, 气溶胶对太阳辐射的吸收和散射会

改变地球大气的反照率, 从而影响到地气系统的能量平衡; 大气气溶胶还起到云凝结核的作用, 大量的气溶胶颗粒有可能使云滴的数密度增加, 云滴的平均半径变小, 这有可能使云对太阳辐射的反射率增加或使云的维持时间加长, 甚至使降水减少。以上这些都会影响到地气系统的能量平衡, 从而对气候

收稿日期: 2006-11-10 改回日期: 2007-06-26
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40475003); 河北省自然科学基金资助项目 (D2005000593)
作者简介: 郝立生 (1966—), 男, 河北廊坊人, 博士生, 高级工程师, 研究方向为季风和气候变化, hls45415@163.com.

变化产生明显的影响^[1]。大气气溶胶粒子的直径多在 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 之间。目前, 由研究气溶胶总悬浮颗粒物 (TSP) 转向研究可吸入颗粒物 PM_{10} , 尤其是研究细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布、化学组成及环境健康效应。例如樊曙先等^[2]研究了南京市气溶胶 $\text{PM}_{2.5}$, 结果表明市区 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源是市区扬尘和建筑尘, 郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源是郊区扬尘和煤烟尘。

尽管气溶胶只是地球大气成分中含量很少的组成部分, 但由于其在许多大气过程中的重要作用而日益受到重视。大气气溶胶研究可以归纳为气溶胶的基本特征^[3-8]、气溶胶的气候效应^[9-13]、沙尘气溶胶^[14-18]、气溶胶的环境健康效应^[19-21] 4 个主要方面。

由于气溶胶的存在, 使得气候变化存在极大的不确定性^[22]。因此, 关于气溶胶气候效应的研究一直是气溶胶研究的重点领域, 对不同下界面上空的气溶胶物理特征的研究是确定气溶胶气候效应的基础。气溶胶的基本特征研究一直是大气物理研究的重要课题。近年来, 随着研究资料的不断积累和研究手段的不断进步, 其内容也在不断拓展。自 20 世纪 60 年代以来, 国外大气气溶胶粒子的飞机探测研究愈来愈多^[20]。国内也于 80 年代开始进行飞机探测研究, 杨军等^[3]对辽宁地区大气气溶胶分布观测研究表明, 混合层顶上下粒子数浓度具有不同的垂直分布特征, 粒子谱受不同形成机制影响, 表现为多峰分布, 水平方向上气溶胶粒子数浓度存在显著变化, 温度层结和相对湿度对气溶胶粒子的浓度和谱分布均有明显影响。牛生杰等^[16]利用飞机探测资料对西北沙漠地区沙尘气溶胶物理特性研究表明, 高空沙尘气溶胶数浓度与下垫面状况密切相关, 沙漠地表上空的粒子数浓度高于植被覆盖较好的地区。O'Dowd 等^[6]分析了海洋上气溶胶的特性, 得到了云滴数和气溶胶浓度的关系。黄梦宇等^[9]利用机载粒子探测系统 PM S 资料, 研究了华北气溶胶对云的影响。贺千山等^[4]分析了混合层高度和近地面气溶胶分布的相互关系。以上研究结果表明, 总体上 5 km 以下粒子总数代表了大气气溶胶粒子的绝大部分, 粒子数浓度随高度增加呈指数减小。观测还发现, 大气气溶胶不仅存在垂直分布上的不均匀性, 而且对于不同的下界面, 其上空的气溶胶物理特性也是复杂多样的。因此, 有必要针对不同的地理区域作进一步的观测研究。

以上这些研究大部分集中在市区、海洋、沙漠、山区等, 而对湿地气溶胶分布特征研究较少。衡水

湖地区是国家级湿地保护区, 位于华北平原中部的衡水市境内, 总面积 268 km^2 , 湖区面积 120 km^2 , 其中深水面积 78 km^2 。对该地区气溶胶分布特征进行分析, 可以了解华北平原湿地气溶胶分布特点, 从而为进一步研究湿地气溶胶对云物理影响和对气候影响提供依据。

1 探测仪器和飞行方法

2005 年 6 月 22 日上午, 河北省人工影响天气办公室专门组织了一次对华北衡水湖地区 (衡水湖、衡水市、枣强镇) 大气气溶胶分布规律的飞机探测飞行。承担这次大气探测的 Cheyenne (夏延) III A 飞机最大飞行高度 8 000 m, 机载气溶胶探头 PCA SP-100X 探测范围 $0.1 \sim 3.0 \mu\text{m}$, 分为 15 档, 非等距, 探测参数见表 1。

表 1 PCA SP-100X 探头探测参数
Table 1 Detection parameters of PCA SP-100X

通道号	最小直径 / μm	最大直径 / μm	中值直径 / μm	探测宽度 / μm
1	0.10	0.12	0.11	0.02
2	0.12	0.14	0.13	0.02
3	0.14	0.17	0.16	0.03
4	0.17	0.20	0.19	0.03
5	0.20	0.25	0.23	0.05
6	0.25	0.30	0.28	0.05
7	0.30	0.40	0.35	0.10
8	0.40	0.50	0.45	0.10
9	0.50	0.70	0.60	0.20
10	0.70	0.90	0.80	0.20
11	0.90	1.20	1.05	0.30
12	1.20	1.50	1.35	0.30
13	1.50	2.00	1.75	0.50
14	2.00	2.50	2.25	0.50
15	2.50	3.00	2.75	0.50

这次探测飞行选择了 600、1 200、3 000、7 000 m 4 个高度层, 航线为石家庄 $\rightarrow$ 高邑 $\rightarrow$ 衡水市 $\rightarrow$ 枣强镇 $\rightarrow$ 衡水湖 $\rightarrow$ 高邑 $\rightarrow$ 石家庄 (图 1)。6 月 22 日 10 时 05 分, 飞机从石家庄民航机场起飞, 向南飞行到高邑, 然后向东转向衡水飞行, 高度 1 200 m, 10 时 45 分至衡水市上空, 然后沿衡水市 $\rightarrow$ 枣强镇 $\rightarrow$ 衡水湖分别在 1 200、600、3 000、7 000 m 高度层飞行 4 周, 11 时 48 分完成探测, 从



图 1 衡水湖大气探测飞行航迹

Fig 1 Flight tracks over the Hengshui lake area

冀州向西飞行到高邑转向北, 回石家庄机场。在衡水湖地区进行探测飞行时间为 10 时 45 分—11 时 48 分, 历时 1 h 3 min。

6 月 22 日当天, 衡水湖地区天气晴朗无云。

2 探测结果分析

2.1 衡水湖地区气溶胶垂直分布

图 2 给出了飞机在衡水湖地区 (衡水湖、衡水市、枣强镇) 上空飞行时间和垂直轨迹及对应探测到的气溶胶数密度分布。从衡水湖地区气溶胶分布和飞机垂直轨迹分析可知, 在 600 m 高度气溶胶数密度平均为 5 000 个 / cm^3 , 在 1 200 m 高度气溶胶数密度平均为 4 000 个 / cm^3 , 从 600 m 到 1 200 m, 数密度随高度增加而有所减少。在 3 000 m 高度, 气溶胶数密度平均为 1 700 个 / cm^3 , 比 1 200 m 高度处明显减少。在 7 000 m 高度处, 气溶胶数密度量级为 10^1 个 / cm^3 , 与 3 000 m 高度处相比显著减少。可见, 在 3 000 m 以上大气中, 气溶胶数密度随高度增加而迅速减小, 气溶胶数密度较大值主要分布在 3 000 m 高度以下的大气中。

图 3 是衡水湖地区 (衡水湖、衡水市、枣强镇) 总的气溶胶数密度随高度的垂直分布情况。从图上

可以看到, 气溶胶总体数密度在 3 000 m 高度以下大气中比较大, 平均可达 4 000 个 / cm^3 左右; 在 3 000~6 000 m 高度层大气中, 数密度平均为 1 000 个 / cm^3 左右; 在 6 000 m 高度以上大气中, 数密度仅为 $10^0 \sim 10^1$ 个 / cm^3 。可见, 衡水湖地区气溶胶数主要集中在 3 000 m 以下的大气中, 在 3 000 m 以上, 数密度随高度增加迅速减小, 与图 2 结果一致。

2.2 湖区和城市、城镇气溶胶垂直分布

为了了解衡水湖地区 (衡水湖、衡水市、枣强镇) 不同下界面上空气溶胶的差异, 对衡水湖、衡水市和枣强镇上空的气溶胶垂直分布进行对比分析。

在图 2 上, 根据飞行时间对应的地点, 对衡水湖、衡水市和枣强镇上空空气溶胶分析, 在 600 m 高度层, 很难识别三地气溶胶数密度的差别; 在 1 200 m 高度层, 根据飞行时间对应的飞机位置分析, 枣强镇上空空气溶胶数密度要大些; 在 3 000 m 高度层, 衡水湖上空空气溶胶数密度小于衡水市和枣强镇上空空气溶胶数密度; 在 7 000 m 高度层, 三地气溶胶数密度都非常小, 但衡水市上空数密度要比衡水湖上空的大很多, 枣强镇上空数密度也比衡水湖上空的大些。

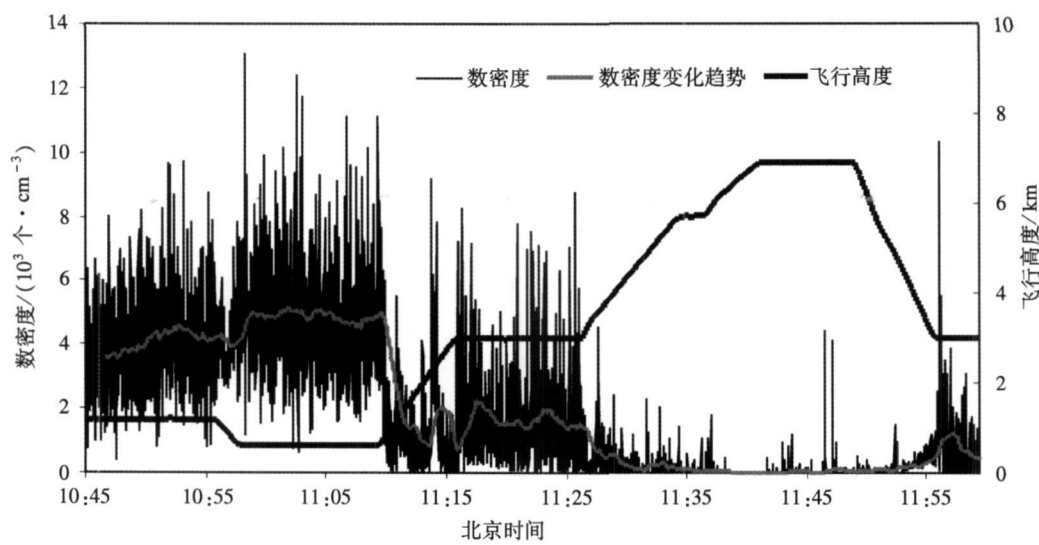


图 2 飞行时间、垂直轨迹和气溶胶数密度分布

Fig 2 Temporal variations of flight height and the particle number concentration of aerosols

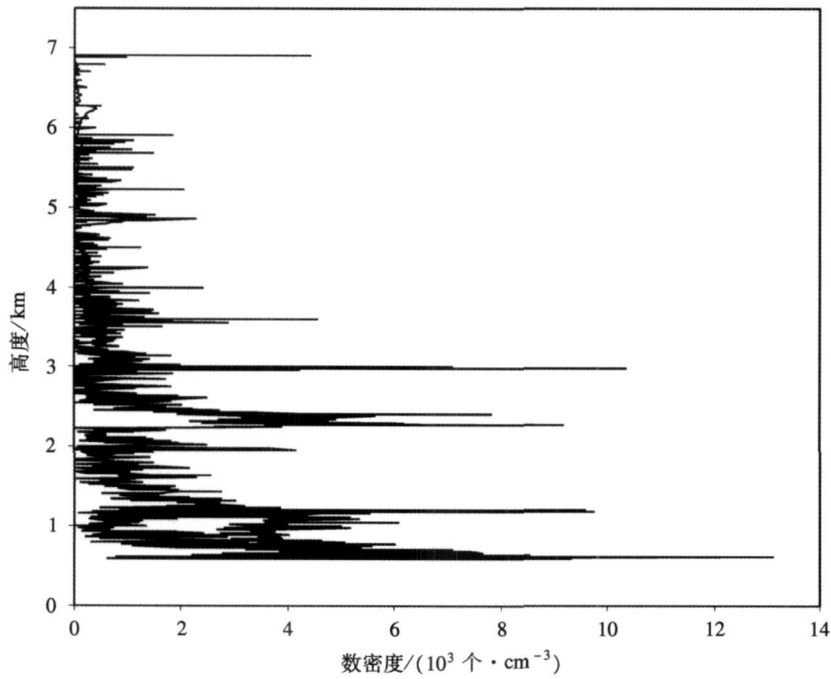


图 3 衡水湖地区气溶胶总体数密度的垂直分布

Fig 3 Vertical distribution of the total number concentration of aerosols over the Hengshui lake area

为了进一步分析衡水湖、衡水市和枣强镇上空的气溶胶分布情况,作三地气溶胶数密度空间分布(图 4)。衡水湖、衡水市和枣强镇三地上空气溶胶总体数密度都在 600、1 200、3 000 m 高度比较大,而在 7 000 m 高度时数密度很小。从样本数密度空间分布看,气溶胶数密度在空间分布很不均匀,也就是说,在同一高度层数密度的空间分布很不均匀,数密度大小差别很大。从图 4a 图 4b 分布形势看,衡

水市和枣强镇气溶胶数密度空间分布情况相似,600 m 高度气溶胶数密度大于 1 200 m,1 200 m 气溶胶空间分布很不均匀,有的样本数密度接近为 0 而衡水湖 1 200 m 高度气溶胶空间分布比衡水市和枣强镇均匀,样本数密度最小值也并不接近 0。

图 4d 是衡水湖地区(衡水湖、衡水市、枣强镇)不同高度层平均数密度随高度变化的廓线。从图 4d 可以看到,在 3 000 m 以上,衡水湖上空气溶胶

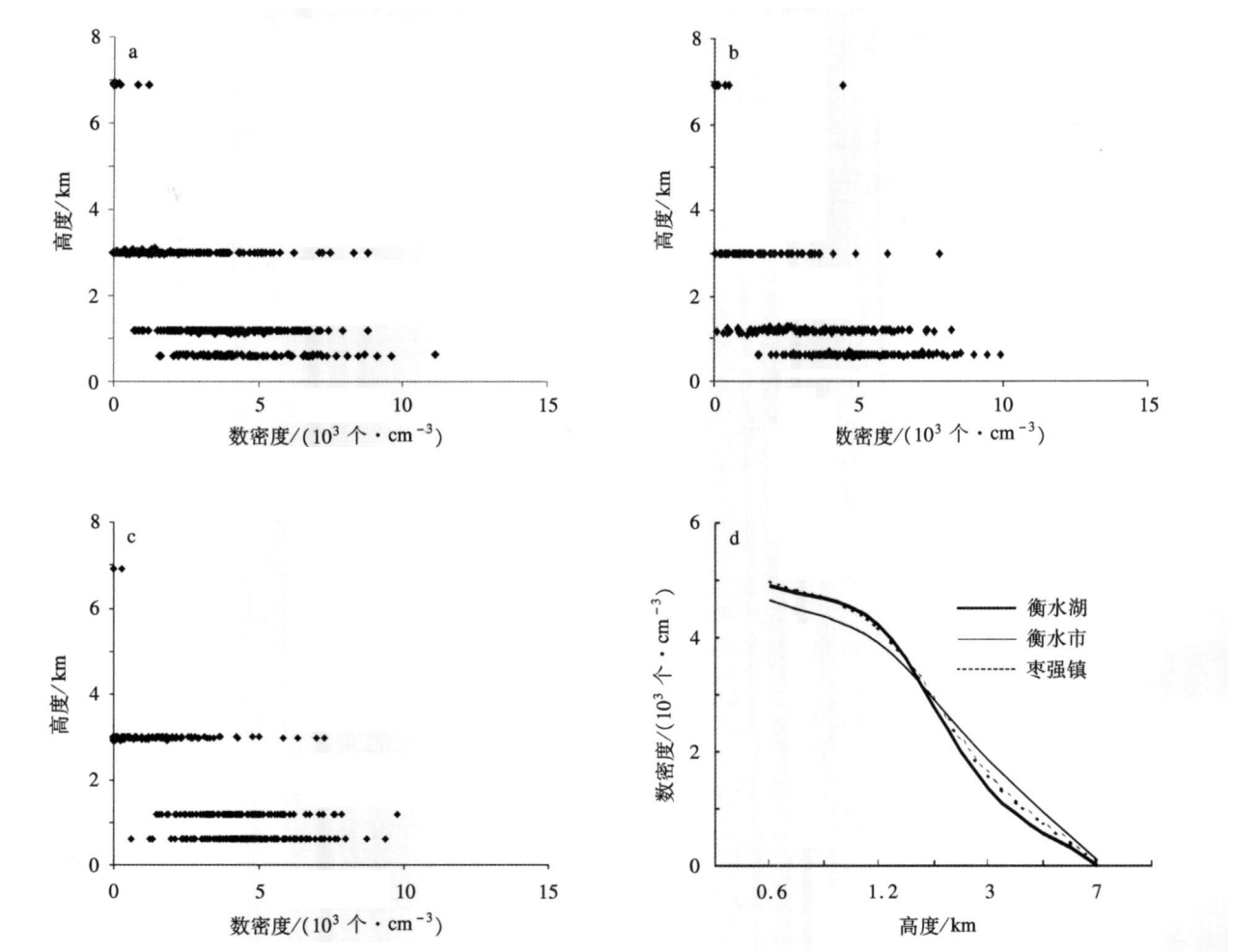


图 4 衡水湖地区气溶胶数密度的空间分布
a 衡水市; b 枣强镇; c 衡水湖; d 气溶胶垂直分布
Fig. 4 Distributions of number concentrations of aerosols over the Hengshui lake area
a Hengshui city; b Zaoqiang town; c Hengshui lake; d vertical distribution of the number concentration of aerosols

数密度随高度增加而迅速减小,而衡水市上空气溶胶数密度随高度增加减小比衡水湖上空减小缓慢,枣强镇上空气溶胶数密度随高度变化介于二者之间。在 600 m 和 1 200 m 高度,枣强镇和衡水湖上空气溶胶数密度比较接近,衡水市上空气溶胶数密度比衡水湖和枣强镇小,说明在低层,衡水湖和枣强镇上空气溶胶数密度大于城市上空的气溶胶数密度。枣强镇上空气溶胶数密度与衡水湖上空气溶胶数密度接近,可能是由于 600 m 和 1 200 m 西北风使衡水湖上空的气溶胶和枣强镇上空气溶胶混合的缘故。而在 3 000 m 及以上,衡水湖上空的气溶胶数密度明显比衡水市和枣强镇小,枣强镇上空气溶胶数密度也比衡水市上空的密度小,这可能是晴空天气条件下城市和城镇气温明显高于湖区气温,城镇易出现湍流,引起气溶胶垂直扩散大一些,结果使得低层高密度的气溶胶向高层扩散,使高空气溶胶

浓度增加。在 7 000 m 高度层,衡水湖、衡水市、枣强镇三地数密度都非常小,但衡水市和枣强镇上空的数密度明显大于衡水湖上空的数密度。

表 2 是衡水湖地区气溶胶粒子统计结果。衡水湖上空,在 600 m 高度层气溶胶数密度平均为 4 916 个/cm³,1 200 m 高度层数密度平均为 4 216 个/cm³,比 600 m 高度处有所减少,而 3 000 m 高度层气溶胶数密度平均为 1 350 个/cm³,比 600 m 和 1 200 m 减少很多,7 000 m 数密度平均仅为 8 个/cm³。衡水市上空,在 600 m 高度层气溶胶数密度平均为 4 660 个/cm³,1 200 m 高度处数密度平均为 3 902 个/cm³,3 000 m 气溶胶数密度平均为 1 839 个/cm³,7 000 m 数密度平均为 79 个/cm³,可以看出,3 000 m 和 7 000 m 数密度明显比衡水湖上空大许多。枣强镇上空,在 600 m 高度层,气溶胶数密度平均为 5 009 个/cm³,

1 200 m 高度层数密度平均为 4 184 个 / cm^3 , 3 000 m 高度层气溶胶数密度平均为 1 584 个 / cm^3 , 7 000 m 高度层数密度平均为 49 个 / cm^3 , 可以看出, 虽然枣强镇 3 000 m 和 7 000 m 高度层气溶胶数密度比衡水市上空数密度小, 但仍然明显比衡水湖上空气溶胶数密度大。

2 3 气溶胶粒子谱分析

表 2 为衡水湖湿地气溶胶粒子谱。从表中可以看到, 衡水湖、衡水市和枣强镇气溶胶粒子集中在 PCA SP-100X 的 1~ 5 通道, 到 6 通道时粒子数密度

迅速减少, 这说明直径 0.1~ 0.25 μm 的气溶胶粒子占绝大多数, 而直径在 0.25~ 3.0 μm 的气溶胶粒子非常少。另外, 从粒子直径看, 衡水湖上空气溶胶粒子直径较小, 衡水市和枣强镇上空气溶胶粒子直径稍大一点, 说明衡水湖上空气溶胶性质和城市、城镇上空气溶胶特性不一样。枣强镇上空气溶胶粒子平均直径介于衡水市和衡水湖之间, 这可能是由于观测当天高空吹西北风的缘故, 使衡水湖上空气溶胶吹向枣强镇上空, 改变了枣强镇上空城镇气溶胶的特性。

表 2 气溶胶粒子特征的探测统计

Table 2 Statistical features of aerosol particles for Hengshui city, Hengshui lake, and Zaoqiang town

地点	高度 / m	采样数	中值直 径 / μm	平均直 径 / μm	总数密度 / (个 $\cdot \text{cm}^{-3}$)	不同通道粒子谱 / (个 $\cdot \text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)														
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
衡水湖	600	109	0.16	0.14	4 916	3 326.7	1 064.4	450.5	48.77	21.03	1.11	2.57	0.14	0.46	0.02	0.01	0	0.01	0	0.01
	1 200	114	0.23	0.16	4 216	2 773.9	941.8	431.0	45.95	18.94	0.64	2.69	0.12	0.44	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01
	3 000	144	0.12	0.11	1 350	917.9	220.5	171.3	25.22	14.89	0.12	0.26	0	0.02	0	0	0	0	0	0
	7 000	37	0	0	8	3.7	2.4	1.2	0.20	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
衡水市	600	106	0.21	0.15	4 660	3 128.2	1 016.8	445.9	38.62	26.55	0.87	2.62	0.14	0.50	0.02	0.04	0.01	0.01	0	0.01
	1 200	223	0.24	0.17	3 902	2 561.9	852.6	408.7	45.77	21.72	4.50	5.24	0.64	0.73	0.05	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01
	3 000	196	0.13	0.11	1 839	1 234.0	361.5	215.3	18.31	8.91	0.18	0.53	0.01	0.05	0	0.01	0	0	0	0
	7 000	42	0.09	0.09	79	57.7	14.3	6.6	0.02	0.06	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0.02
枣强镇	600	141	0.19	0.16	5 009	3 340.7	1 117.5	480.1	42.65	23.37	0.59	3.22	0.18	0.51	0.02	0.03	0	0	0	0.01
	1 200	97	0.19	0.14	4 184	2 759.6	902.3	463.7	38.67	15.95	0.45	2.45	0.13	0.30	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0
	3 000	123	0.12	0.11	1 584	1 129.7	285.1	142.0	13.12	12.56	0.91	0.68	0.02	0.06	0	0.01	0	0	0	0
	7 000	125	0.01	0.01	49	35.8	8.2	5.2	0	0.02	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0

3 小结

(1)衡水湖地区(衡水湖、衡水市、枣强镇)大气气溶胶的高浓度主要分布在 3 000 m 以下大气中, 总体数密度可达 10^4 个 / cm^3 ; 而在 3 000~ 6 000 m 高度层大气中, 平均数密度为 $10^3 \sim 10^2$ 个 / cm^3 ; 在 6 000 m 以上的对流层高层, 气溶胶数密度非常小, 到 7 000 m 以上数密度仅为 10^0 个 / cm^3 。衡水湖湿地地区气溶胶主要分布在 3 000 m 以下的大气中, 在 3 000 m 以上, 数密度随着高度增加而迅速减小。

(2)衡水湖上空与城市、城镇上空气溶胶特征和垂直分布不同, 衡水湖上空气溶胶粒子直径比城市、城镇上空气溶胶粒子小。在低层, 衡水湖气溶胶数密度比衡水市、枣强镇大且空间分布比较均匀; 在 3 000 m 以上, 衡水湖上空气溶胶数密度随高度迅速减小, 在高层非常小, 而城市、城镇高层气溶胶数密度比湖区大许多倍。衡水湖地区(衡水湖、衡水市、枣强镇)气溶胶粒子直径绝大多数为 0.1~

0.25 μm , 直径为 0.25~ 3.0 μm 的气溶胶粒子非常少。

(3)大气中气溶胶的分布规律, 除了与气溶胶排放源的分布特征有直接关系外, 同时还受大气层结状态影响, 不同气象条件下的气溶胶分布特征有显著的差异。以上结果是在晴空天气条件下探测获得的, 对于衡水湖地区不同气象条件下大气气溶胶的分布特征还需作进一步研究。

参考文献:

[1] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
[2] 樊曙先, 徐建强, 郑有飞, 等. 南京市气溶胶 $\text{PM}_{2.5}$ 一次来源解析 [J]. 气象科学, 2005, 25(6): 587-593.
[3] 杨军, 周德平, 宫福久. 辽宁地区大气气溶胶粒子的垂直分布特征 [J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(2): 196-203.
[4] 贺千山, 毛节泰. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究 [J]. 气象学报, 2005, 63(3): 374-384.
[5] 朱彬, 马力, 杨军, 等. 重庆冬季大气气溶胶的物理化学特征 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 662-668.

- [6] O'Dowd C D, Lowe J A, Smith M H. The relative importance of non-sea-salt sulphate and sea-salt aerosol to the marine cloud condensation nuclei population: An improved multi-component aerosol-cloud droplet parametrization[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1999, 125(556): 1295-1313.
- [7] Junker C, Jennings S G, Cachier H. Aerosol light absorption in the North Atlantic Trends and seasonal characteristics during the period 1989 to 2003[J]. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6(2): 1913-1925.
- [8] Uno I, Camichael G R, Street D, et al. Analysis of surface black carbon distributions during ACE-Asia using a regional-scale aerosol model[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D23): 8636, doi: 10.1029/2002JD003252.
- [9] Zhao C, Ishizaka Y, Peng Dayong. Numerical study on impacts of multi-component aerosols on marine cloud microphysical properties[J]. *J Meteor Soc Japan*, 2005, 83(6): 977-986.
- [10] Menon S, Hansen J N, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [11] Roberts D L, Jones A. Climate sensitivity to black carbon aerosol from fuel combustion[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: D16202, doi: 10.1029/2004JD004676.
- [12] Cook J, Highwood E J. Climate response to tropospheric absorbing aerosols in an intermediate general-circulation model[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2004, 130(596): 175-191.
- [13] Wang C. A modeling study on the climate impacts of black carbon aerosols[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: D03106, doi: 10.1029/2003JD004084.
- [14] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J]. *大气科学*, 2001, 25(2): 243-252.
- [15] 周荣卫, 刘红年, 蒋维楣. 中国地区沙尘气溶胶输送过程的数值模拟[J]. *气象科学*, 2004, 24(1): 16-25.
- [16] 牛生杰, 孙照渤. 春末中国西北沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测[J]. *高原气象*, 2005, 24(4): 604-610.
- [17] 刘菲, 牛生杰. 北方沙尘气溶胶光学厚度和粒子谱的反演[J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(6): 775-781.
- [18] 顾宇丹, 牛生杰. 贺兰山地区沙尘气溶胶瞬时谱分析及拟合[J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(4): 500-505.
- [19] 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(3): 360-368.
- [20] Isaac G A, Leitch W R, Strapp J W, et al. Summer aerosol profiles over Algonquin Park, Canada[J]. *Atmos Environ*, 1986, 20(1): 157-172.
- [21] Aganovski V, Ristovski Z, Hargreaves M, et al. Realtime measurement of bacterial aerosols with the UVA-PS: Performance evaluation[J]. *J Aerosol Sci*, 2003, 34(3): 301-317.
- [22] 延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划[J]. *气象科学*, 2006, 26(1): 110-117.