

张瑜, 银燕, 石立新, 等. 华北地区典型污染天大气气溶胶飞机探测个例分析[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1432-1438.

# 华北地区典型污染天大气气溶胶飞机探测个例分析

张瑜<sup>1-2</sup>, 银燕<sup>1\*</sup>, 石立新<sup>3</sup>, 段英<sup>3</sup>, 吴志会<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学 大气物理与大气环境重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 中国人民解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101; 3. 河北省人工影响天气办公室, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 利用 2005 年 10 月 17 日华北地区一次典型污染天气条件下的飞机探测资料, 对石家庄和邯郸气溶胶的微物理特征进行了对比分析, 初步讨论了该天气条件下大气气溶胶污染的微观特征和可能原因。结果表明, 观测当天石家庄和邯郸地区的气溶胶粒子浓度很高, 边界层内气溶胶平均数浓度为  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  量级, 最高值出现在近地面附近, 达到  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  量级; 边界层以上的数浓度基本都在  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  量级, 属于空气污染比较严重的一次过程。造成污染的原因是该日晴天风小, 大气湍流较弱, 不利于污染物扩散和稀释。基于美国国家海洋和大气局(NOAA)后向轨迹模式(HYSPLIT4)对颗粒物进行溯源和追踪分析, 发现造成气溶胶浓度较高的气块传输路径主要为西北和偏西路径, 境外源主要来自蒙古国, 境内源主要来自我国西部, 途经甘肃、宁夏、陕西及山西后进入河北。

**关键词:** 气溶胶; 垂直分布; 水平分布; 后向轨迹模式

文章编号: 1000-0534(2012)05-1432-07 中图分类号: P412.24 文献标志码: A

## 1 引言

随着工业化的发展和城市扩建, 由人类活动向大气中排放的污染物有明显的增加趋势。气溶胶已经成为城市大气的主要污染物, 其中  $\text{PM}_{2.5}$  粒径小, 可以通过呼吸进入人体的下呼吸道, 沉积在肺泡里, 甚至可以穿过肺泡进入血液, 对人体特别是处在肺部功能生长发育期的儿童和老年人有严重危害。另外, 直径在  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  的气溶胶粒子在水汽、湿度条件合适的情况下, 极易产生雾, 影响大气能见度, 妨碍交通运输, 影响太阳辐射; 气溶胶还与其他环境问题如臭氧层的破坏、酸雨的形成及光化学烟雾事件的发生密切相关<sup>[1-2]</sup>。

20 世纪 70 年代后期, 机载测粒系统 PMS (Particle Measuring System) 开始在世界各地逐步推广和使用, 该仪器可获得的气溶胶、云的微物理数据(如数浓度、平均直径、液态水含量和粒子尺度分布等)。通过仪器获得的资料除了研究气溶胶和云的微物理特征外, 还可为雷达和卫星等遥测提供必要的直接观测数据, 同时为数值模式服

务<sup>[3-6]</sup>。自 1981 年该仪器引入我国, 近 20 年来国内学者们利用 PMS 测粒系统在很多省份开展了大量的气溶胶外场观测试验, 研究气溶胶的微物理特征及其与大气环境、气象条件的关系。张蕾等<sup>[7]</sup>对 2005 年 9 月 25 日北京市及其周边地区一次飞机探测 PMS 气溶胶分析表明, 该日北京地区气溶胶污染很严重, 边界层内气溶胶细粒子数浓度为  $5\ 000 \text{ cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.3 \mu\text{m}$ 。污染气溶胶的来源主要有: (1)通过远距离输送从戈壁沙漠传输过来的粒子, 粒径范围为  $0.5 \sim 4 \mu\text{m}$ ; (2)从北京南部地区传输过来; (3)北京本地污染源排放。范焯等<sup>[8]</sup>对 2004 年 8-9 月间北京地区气溶胶飞机探测资料的分析表明, 气溶胶平均浓度为  $10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.21 \sim 0.31 \mu\text{m}$ , 气溶胶粒子谱呈单峰分布。张佃国等<sup>[9]</sup>对 2003 年夏、秋季在北京及周边地区进行的不同天气状况下 6 次气溶胶粒子飞机探测分析表明, 粒子平均浓度的最大值为  $3.46 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ , 最大粒子浓度为  $5.26 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ , 粒子平均最大直径为  $1.392 \mu\text{m}$ , 最大直径为  $2.75 \mu\text{m}$ ; 粒子平均浓度的最小值为  $25.7 \text{ cm}^{-3}$ 。

收稿日期: 2011-01-18; 定稿日期: 2011-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030962); 科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706036); 江苏省“333 人才工程”项目; 江苏省高校优势学科建设工程项目共同资助

作者简介: 张瑜(1981-), 女, 吉林磐石人, 助教, 主要从事大气气溶胶、云降水研究。E-mail: zy22104@163.com

\* 通讯作者: 银燕, E-mail: yinyan@nuist.edu.cn

表 1 PMS 机载测粒系统主要探测仪器  
Table 1 The specification of the main detection instrument of PMS

设备名称	简称	探测范围	用途
气溶胶粒子探头	PCASP-100X	0.1~3 $\mu\text{m}$ , 共 15 个档	探测气溶胶粒子
前向散射滴谱扩展量程探头	FSSP-100-ER	1.0~95.0 $\mu\text{m}$ , 4 个量程, 各分 15 个档	探测云粒子
二维灰度粒子探头	OAP DGA-2, OAP DGB-2	17.75~1567.75 $\mu\text{m}$ , 共 62 个档	获取二维粒子图像
GPS 卫星全球定位系统	—	—	精确获取探测平台方位
King LWC 热线含水量仪	—	—	获取液态含水量

在有雾的天气条件下, 气溶胶粒子浓度在近地层基本随高度的增加而减小, 粒子尺度变化较为复杂。随着气溶胶研究的不断深入和发展, 以及各地开展的大量观测试验, 许多新方法、新理论不断的涌现<sup>[10-19]</sup>。

本次研究选取 2005 年 10 月 17 日河北地区一次晴天条件气溶胶飞机探测资料(PMS 资料), 分析不同城市气溶胶粒子垂直分布、水平分布和谱分布的变化特征, 并初步讨论该日气溶胶数浓度较高的原因。

## 2 观测仪器和天气概况

探测使用夏延 III A 飞机作为探测平台, 飞机上装载的探测仪器有全球定位系统 GPS、温湿度探头、机载微波辐射计、红外线热线含水量仪及粒子测量系统 PMS 等。整套 PMS 系统由 4 个主探头和有关资料收集设备组成(各探头具体探测范围和用途参见表 1)。仪器每 1 s 采集一次数据, 粒子直径单位:  $\mu\text{m}$ , 数浓度单位:  $\text{cm}^{-3}$ 。

散射探头包括 PCASP 和 FSSP 探头, 其探测原理是根据米散射理论, 依散射光强的大小推算粒子尺寸。PCASP-100X 探头用于大气气溶胶粒子的探测, 只有 1 个量程, 测量范围在 0.10~3.00  $\mu\text{m}$  之间, 整个量程分为 15 个间隔不完全相等的通道, 最小分辨率为 0.02  $\mu\text{m}$ , 每秒采样体积为 1  $\text{cm}^{-3}$ 。FSSP-100-ER 探头主要用于测量云粒子, 共有 4 个量程(Rang=0, 1, 2, 3), 每个量程又分成 15 个等间隔的通道, 测量范围为 1~95  $\mu\text{m}$ , 该探头最小分辨率为 1  $\mu\text{m}$ , 每秒采样体积为 1  $\text{cm}^{-3}$ 。

二维光阵探头包括 2D-C 和 2D-P 探头, 测量量程为 17.75~1567.75  $\mu\text{m}$ , 共 62 个档, 其探测原理是依靠内部的一个由 64 个光阵元件组成的光阵, 当粒子进入激光束时, 其阴影挡住光电元件, 光电元件后部的放大器输出编码代表粒子的挡光程

度。对整个光阵元件取样, 一系列的扫描信号构成粒子的二维图像。

2005 年 10 月 17 日观测期间, 河北地区受弱西风小槽影响, 并处在高压底部, 对流层中下层受西北气流控制, 天空状况和能见度都较好, 地面水平能见度为 7 km, 风速为 2  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (取自地面观测站资料)。

## 3 结果分析

为了了解 2005 年 10 月 17 日晴天天气下出现气溶胶污染的原因, 本文对气溶胶数浓度、尺度的垂直、水平分布和谱分布进行分析, 结合气象条件和城市工业布局, 并借助美国海洋局后向轨迹模式分析石家庄和邯郸上空污染气溶胶的来源和传输路径。

### 3.1 飞行过程

图 1 给出了 2005 年 10 月 17 日飞机作业的飞行轨迹, 探测主要在河北南部地区进行, 在石家庄和邯郸上空 800, 1 200 和 3 000 m 分别进行了探测。飞机于 15:54(北京时, 下同)从正定机场起飞, 16:54 到达邯郸上空, 17:54 到达石家庄上空,

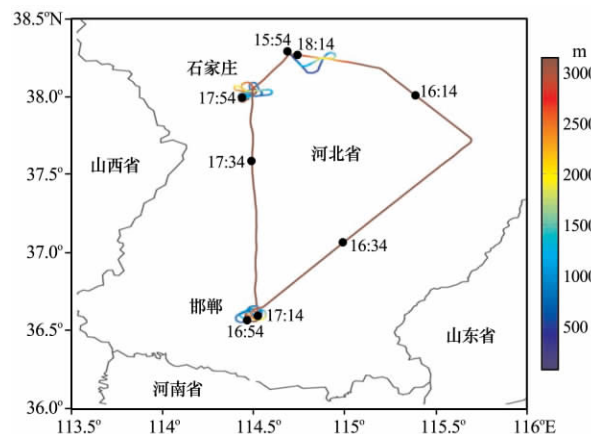


图 1 2005 年 10 月 17 日飞机探测飞行轨迹  
Fig. 1 The flying track of aircraft with height on October 17, 2005

18:14 返回机场,完成该次探测。飞行航线为无极—深泽—邯郸—邢台—石家庄。

### 3.2 气溶胶粒子垂直分布特征

气溶胶数浓度和平均直径是研究气溶胶微物理特征的重要参数之一,为了便于研究气溶胶垂直分布特征,选取飞机下降阶段的探测数据为分析对象。图 2 给出了 PCASP 探头观测到石家庄和邯郸

上空的气溶胶数浓度、平均直径以及温度、湿度随高度的垂直分布(注:飞机飞至邯郸上空的最低探测高度为 600 m)。

从图 2 中可看到,气溶胶数浓度随高度呈递减趋势,在 600 m 高度下,两地气溶胶数浓度均为  $10^4$  量级。石家庄气溶胶数浓度的最大值出现在近地面附近,为  $31\ 500\ \text{cm}^{-3}$ ,平均数浓度为  $8\ 720$

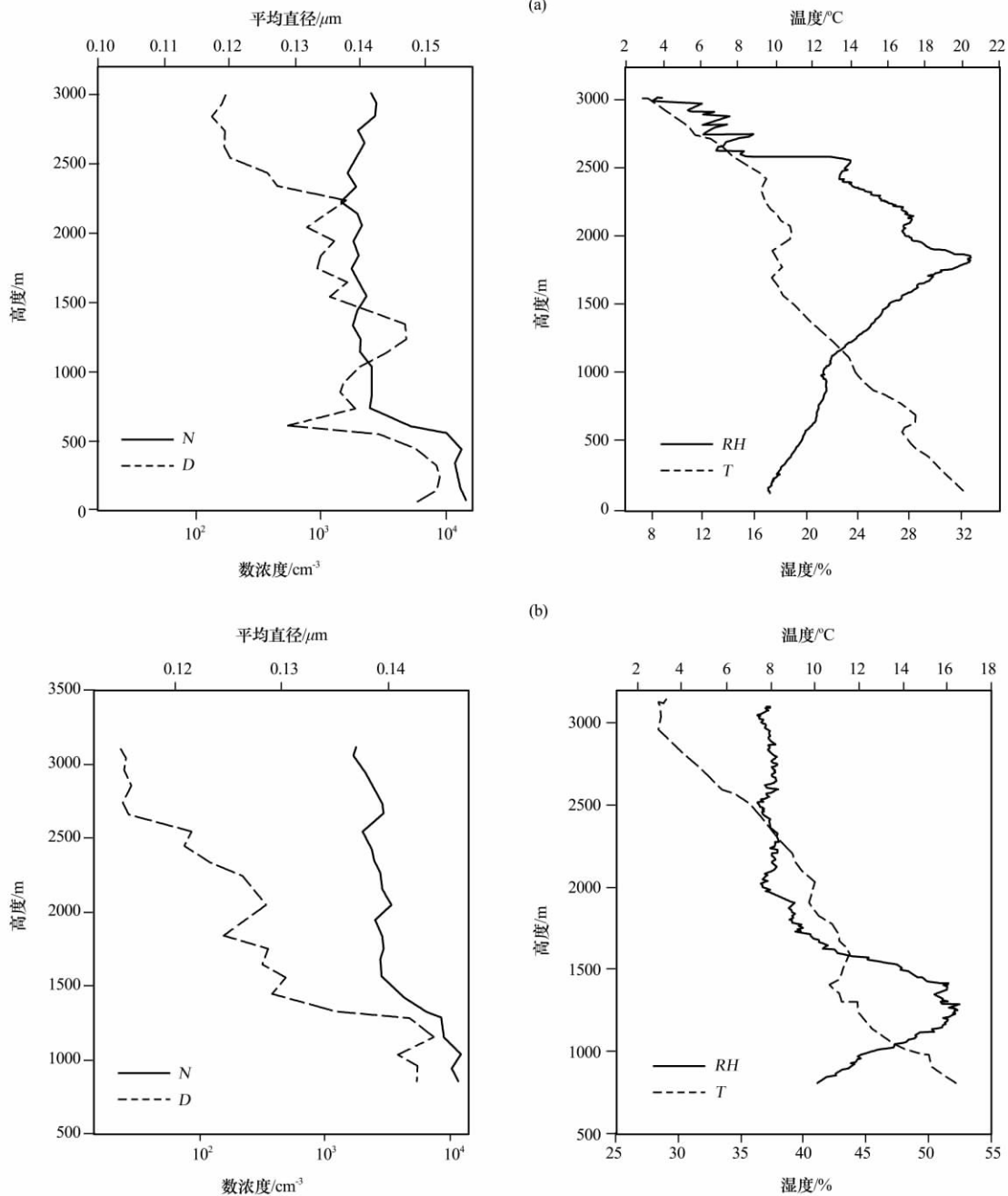


图 2 2005 年 10 月 17 日石家庄(a)、邯郸(b)上空气溶胶数浓度  $N$ 、平均直径  $D$ (左)及大气温度  $T$ 、湿度  $RH$  廓线(右)随高度的垂直分布  
取自 PCASP 探头

Fig. 2 The vertical distributions of number concentration and mean diameter of aerosol particle (left), temperature and humidity (right) profiles in Shijiazhuang (a) and Handan (b) from PCASP on October 17, 2005

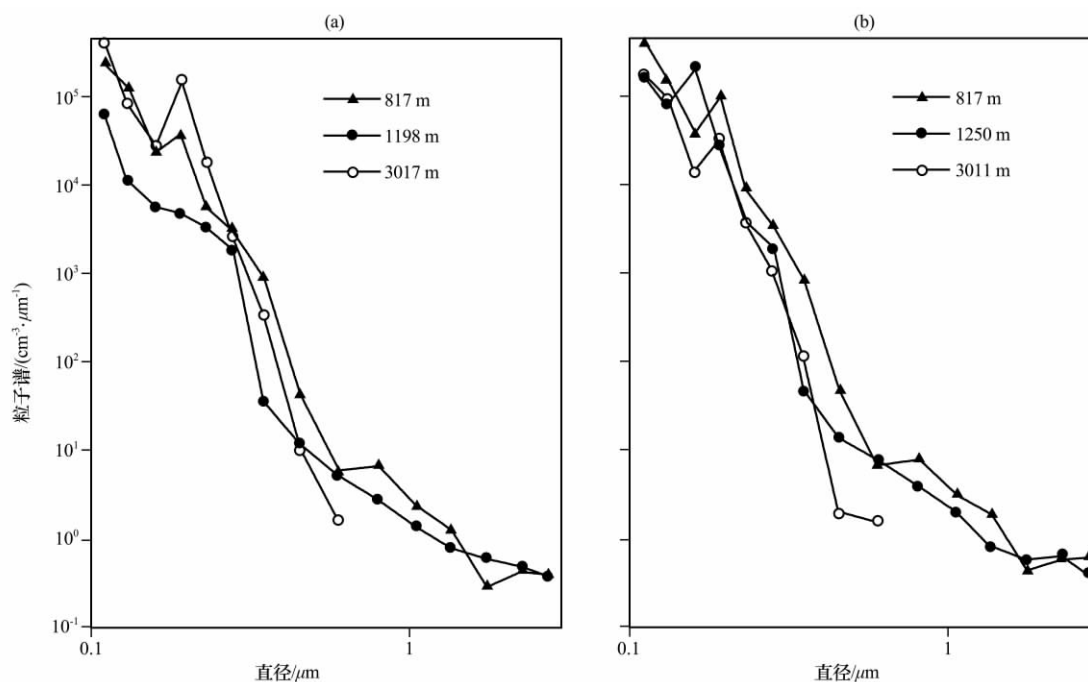


图 3 石家庄(a)和邯郸(b)气溶胶粒子平均谱分布

Fig. 3 Mean size distributions of aerosol particle in Shijiazhuang (a) and Handan (b)

$\text{cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.14 \mu\text{m}$ , 数浓度比 2005 年 9 月 25 日北京市高污染天气下气溶胶平均数浓度<sup>[7]</sup>高出 1.7 倍左右, 污染较为严重; 边界层以上的气溶胶数浓度变化很小, 基本为  $10^3$  量级。石家庄在地面上空 500 m 高度附近存在逆温层, 厚度约为 250 m(图 2a); 邯郸上空 1 250 m 高度附近出现逆温层, 厚度约为 300 m(图 2b)。从数浓度垂直分布廓线可清楚地看出, 逆温层的存在阻碍了粒子的垂直输送, 导致气溶胶粒子在逆温层底累积。气溶胶平均直径在  $0.11 \sim 0.155 \mu\text{m}$  之间, 呈波状分布, 总趋势随高度减小; 相对湿度对粒子直径有很大影响, 湿度增大, 粒子直径增大; 反之, 粒子直径则减小。

图 3 给出了石家庄和邯郸上空气溶胶粒子谱分布(取自 PCASP 探头)。从图 3 中可看出, 粒子谱曲线呈波状起伏, 基本呈单峰结构, 主峰值位于  $0.11 \mu\text{m}$  处。800 m 高度层附近, 邯郸的气溶胶数浓度高于石家庄, 尤其是  $0.2 \mu\text{m}$  的粒子较为明显。在 1 200 m 高度层附近, 邯郸上空粒径为  $0.16 \mu\text{m}$  处出现极值, 且直径  $< 0.2 \mu\text{m}$  的粒子浓度明显比石家庄高出 1 个量级。在 3 000 m 高度层附近, 粒子谱宽均  $< 1 \mu\text{m}$ , 石家庄上空的粒子数浓度高于邯郸, 直径  $< 0.2 \mu\text{m}$  的粒子较为明显。

### 3.3 气溶胶粒子水平分布特征

图 4 给出了飞机在石家庄和邯郸上空平飞探测

的气溶胶粒子数浓度、平均直径的水平分布情况。16:54(图 4a)飞机进入邯郸市东北部上空, 在 800 m 高度附近进行平飞探测, 得到气溶胶平均数浓度为  $8\ 813 \text{ cm}^{-3}$ , 最大值为  $25\ 600 \text{ cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.14 \mu\text{m}$ , 气溶胶数浓度和直径明显增大; 17:01—17:06(图 4b)在邯郸市东北部 1 200 m 高度附近水平探测, 得到气溶胶平均数浓度为  $8\ 680 \text{ cm}^{-3}$ , 最大值为  $18\ 940 \text{ cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.14 \mu\text{m}$ ; 17:12—17:24(图 4c)飞机在邯郸市东北部 3 000 m 高度附近水平探测, 气溶胶平均数浓度为  $6\ 057 \text{ cm}^{-3}$ , 最大值为  $16\ 100 \text{ cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.15 \mu\text{m}$ 。17:47(图 4d)飞机进入石家庄上空, 17:51—17:53 出现气溶胶浓度和直径大值区, 此时飞机位于石家庄东部, 探测到气溶胶平均数浓度为  $7\ 299 \text{ cm}^{-3}$ , 气溶胶数浓度最大值达到  $20\ 800 \text{ cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.14 \mu\text{m}$ 。17:54—17:59(图 4e)飞机在石家庄东部上空 1 200 m 高度附近探测, 得到气溶胶平均数浓度为  $9\ 970 \text{ cm}^{-3}$ , 最大值为  $20\ 400 \text{ cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.15 \mu\text{m}$ 。18:00—18:09(图 4f)飞机位于石家庄东部上空 3 000 m 高度, 探测到气溶胶平均数浓度为  $8\ 130 \text{ cm}^{-3}$ , 最大值为  $17\ 600 \text{ cm}^{-3}$ , 平均直径为  $0.15 \mu\text{m}$ 。

上述 800, 1 200 和 3 000 m 高度平飞探测显示, 该日大气气溶胶污染十分严重, 气溶胶高浓度

值出现在石家庄市东部和邯郸东北部上空, 数浓度最大值达到  $10^4$  量级, 平均数浓度均达到  $10^3$  量级, 粒子直径在  $0.15 \mu\text{m}$  左右。由于气溶胶粒子浓度受地理位置、地形、地表性质、人类居住情况及距

污染源的远近程度及气象条件的影响, 所以结合观测当天的气象条件、城区内工业分布来讨论气溶胶出现高浓度的原因。

(1) 此次探测属于晴天小风天气, 不利于污

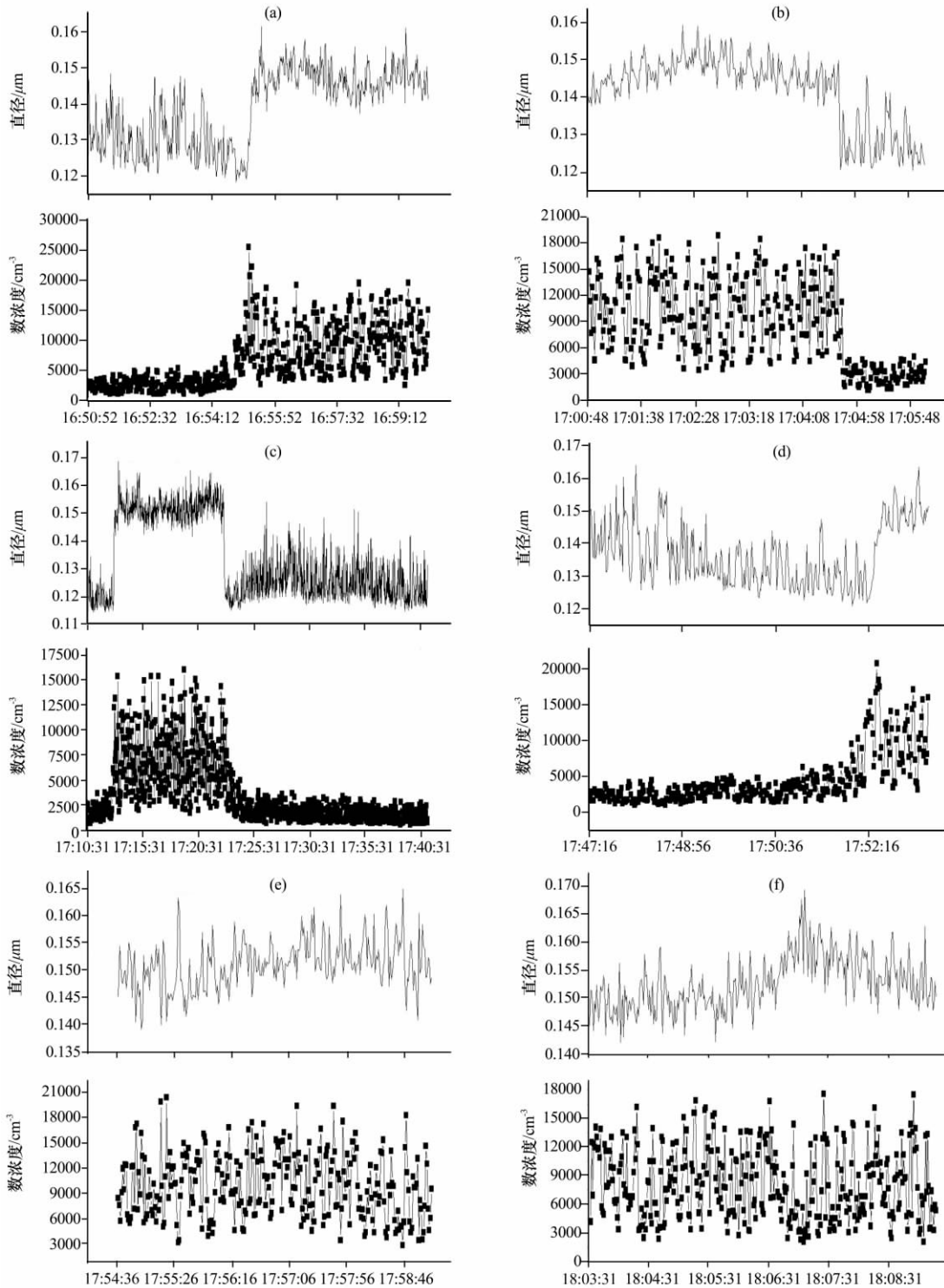


图 4 邯郸(a~c)和石家庄(d~f)气溶胶粒子平均直径、数浓度的水平分布

(a)、(d) 800 m, (b)、(e) 1200 m, (c)、(f) 3000 m

Fig. 4 Horizontal distributions of mean diameter and number concentration of aerosol particle in Handan (a~c) and Shijiazhuang (d~f)

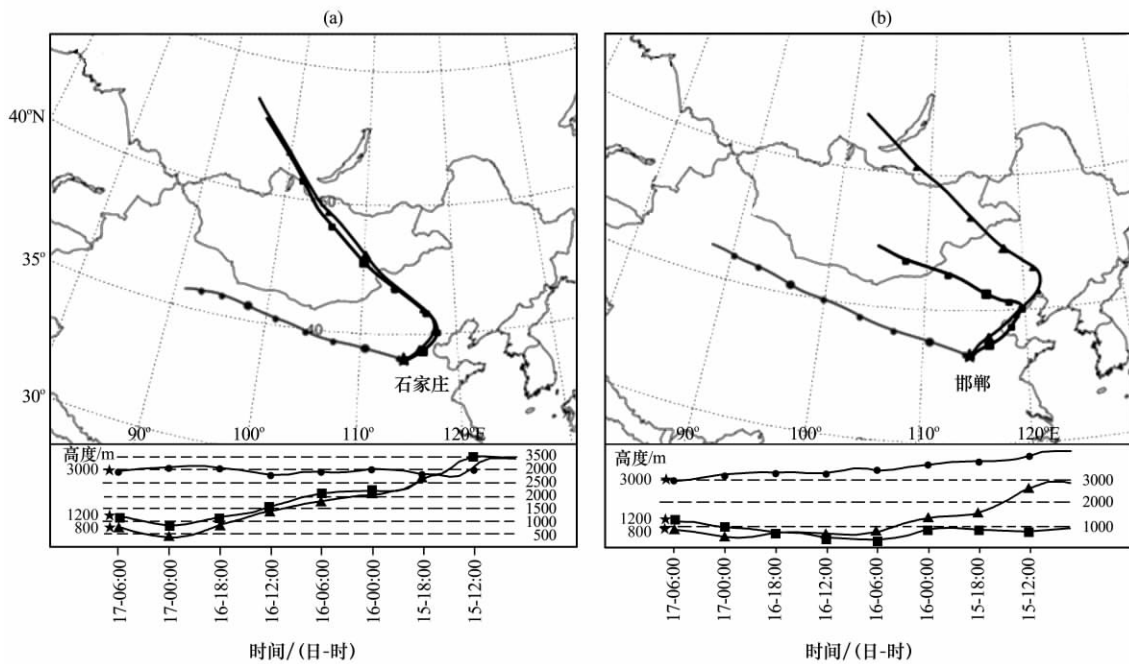


图 5 2005 年 10 月 17 日 15:00 飞机到达石家庄(a)和邯郸(b)上空的空气块后向轨迹

Fig. 5 The backward trajectory of aerosol pollution of aircraft arriving over Shijiazhuang (a) and Handan (b) at 15:00 on October 17, 2005

染物的扩散和稀释。

(2) 从观测时间段来看,此次飞行观测在傍晚,此时人们活动频繁,人为排放气溶胶量增加,加之大气湍流较弱,不利于污染物的扩散和稀释。

(3) 气溶胶主要来源于石家庄、邯郸本地的源排放。该次探测区域在石家庄东部和邯郸东北部地区,均处在城市工业区上空,钢铁厂、水泥厂、热电厂、化工厂、造纸厂及陶瓷厂等重工业和化工产业排放的废气是造成直径  $0.15 \mu\text{m}$  左右气溶胶高浓度的主要原因。

### 3.4 气溶胶颗粒物溯源和追踪分析

气溶胶移动路径与发生源地的位置、风力风向及中尺度环流系统有关。为了减少地理因素对空气块移动轨迹的影响,全面观察石家庄和邯郸上空气溶胶的来源,借助美国国家海洋和大气局(NOAA)后向轨迹模式(HYSPLIT4)进行了 48 h 溯源分析(HYSPLIT4 模型后向追踪只能保证 48 h 的准确性),追踪 2005 年 10 月 17 日 15:00 到达石家庄、邯郸上空 800, 1200 和 3000 m 高度的空气块轨迹(图 5),模拟的气溶胶传输路径,轨迹图上每隔 6 h 标记一个点。

从图 5 中可看出,石家庄和邯郸上空 3 个高度气溶胶空气块移动轨迹基本一致,均源于西北和偏西方向。800 m 和 1200 m 高度的气溶胶气块移动

轨迹有一个明显的旋回。气溶胶空气块从蒙古国进入中国境内,穿过内蒙古后,经过北京、天津进入河北,最后进入石家庄(图 5a)。这可能是受当时风向或者气流方向改变的影响。800 m 和 1200 m 到达邯郸上空的气溶胶空气块移动轨迹也有类似的状态,只是气块的出发地在内蒙古境内(图 5b); 3000 m 高度的气溶胶空气块移动路径均为偏西路径,途经甘肃、宁夏、陕西及山西后进入河北,最后到达石家庄和邯郸。

## 4 结论

通过对 2005 年 10 月 17 日气溶胶微物理特征的分析和高污染原因的初步讨论,得到以下主要结论:

(1) 10 月 17 日石家庄市、邯郸市污染严重,出现这种情况除了受局地工业源排放的影响外,与观测当天小风也密切相关,且观测时间在傍晚,人们活动频繁,人为排放气溶胶量增加。因此,造成观测当天气溶胶粒子的浓度较高。

(2) 气溶胶粒子谱曲线呈波状起伏,基本呈单峰结构,主峰值位于  $0.11 \mu\text{m}$  处。

(3) 基于美国国家海洋和大气局(NOAA)后向轨迹模式(HYSPLIT4),发现造成石家庄和邯郸上空气溶胶浓度较高的气块传输路径主要为西北和

偏西路径。

### 参考文献

- [1] 王明星. 气溶胶与气候[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 1-5.
- [2] 任丽新, 游高荣, 吕位秀, 等. 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(1): 67-73.
- [3] Knollenberg R G. The optical array: An alternative to scattering or extinction for airborne particle determination[J]. Appl Meteor, 1970, 9: 86-103.
- [4] Baumgardner D. A new technique for the study of cloud microstructure[J]. Atmos Oceanic Technol, 1986, 3: 340-343.
- [5] 马贤芳, 刘长海, 刘晓东, 等. 气溶胶对北京中尺度对流系统影响的数值试验[J]. 气象科学, 2010, 30(1): 21-26.
- [6] 陈丽, 银燕. 沙尘气溶胶对大气冰相过程发展的敏感性试验[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 208-213.
- [7] Qing Zhang, Chun Shengzhao, Tie Xuexi, et al. Characterizations of aerosols over the Beijing region: A case study of aircraft measurements[J]. Atmos Environ, 2006, 40: 4513-4527.
- [8] 范焯, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(1): 49-62.
- [9] 张佃国, 郭学良, 肖稳安. 北京及周边地区 2003 年夏秋季气溶胶和云滴分布特征[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 402-410.
- [10] 王体健, 李树, 庄炳亮, 等. 中国地区硫酸盐气溶胶的第一间接气候效应研究[J]. 气象科学, 2010, 30(5): 730-740.
- [11] 陈林, 石广玉, 秦世广, 等. 2008 年北京奥运会期间大气气溶胶物理特征分析[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(6): 665-672.
- [12] 孙玉稳, 段英, 吴志会. 石家庄秋季大气气溶胶物理特征分析[J]. 气象, 1990, 22(2): 40-43.
- [13] 杨军, 周德平, 官福久. 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): 197-203.
- [14] 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.
- [15] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 岭南山地气溶胶物理化学特征研究[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 877-885.
- [16] 张佃国, 樊明月, 肖稳安. 山东地区秋季飞机观测气溶胶特征的初步分析[J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(4): 61-66.
- [17] 赵秀娟, 陈长和, 袁铁, 等. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 617-622.
- [18] 李韧, 季国良. 敦煌地区大气气溶胶光学厚度的季节变化[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 84-87.
- [19] 胡波, 张武, 张镭, 等. 兰州市西固区冬季大气气溶胶粒子的散射特征[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 354-360.

## An Observational Study of Aerosol Property under Typical Polluted Weather Condition

ZHANG Yu<sup>1-2</sup>, YIN Yan<sup>1</sup>, SHI Li-xin<sup>3</sup>, DUAN Ying<sup>3</sup>, WU Zhi-hui<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China;

3. Hebei Provincial Office of Weather Modification, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** The microphysical properties of aerosol particles in Shijiazhuang and Handan, Hebei Province, China are analyzed based on aircraft measurements conducted under a typical polluted weather condition on October 17, 2005. The reasons for the heavy aerosol pollution are discussed. The results show that the particle number concentration over both areas are quite high, with the mean concentration in the boundary layer keeping at  $10^3 \text{ cm}^{-3}$ , and the maximum, which appeared close to the surface, reached  $10^4 \text{ cm}^{-3}$ . The aerosol particle concentration keeps greater than  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  above boundary layer. It is found that the relative weak wind and weaker turbulent mixing which lead to less efficient diffusion and dilution of aerosol particles are responsible for the pollutants accumulation. It is further found that the air pathways, which caused the high aerosol pollution, are mainly from northwest and west, with the sources of Mongolia or West China, passing through Gansu, Ningxia, Shanxi, then entering Hebei.

**Key words:** Aerosol; Vertical distribution; Horizontal distribution; The backward trajectory model