封秋娟, 牛生杰, 李培仁, 等. 2019. 山西夏季气溶胶散射特征的飞机观测研究 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 482−492. Feng Qiujuan, Niu Shengjie, Li Peiren, et al. 2019. Aircraft measurements of the scattering properties of aerosols in Shanxi Province in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 482−492. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18020

# 山西夏季气溶胶散射特征的飞机观测研究

封秋娟[1,2]　牛生杰[1]　李培仁[2]　杨俊梅[2]　申东东[2]　李义宇[2]

1 南京信息工程大学中国气象局气溶胶—云—降水重点开放实验室，南京 210044
2 山西省人工降雨防雹办公室，太原 030032

**摘　要**　利用3个架次的积分浊度仪和PCASP-100X（Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe）机载观测资料，分析了2013年山西夏季空中有云、无云和少云3种不同条件下气溶胶散射系数的分布特征，讨论了气溶胶散射系数垂直变化与气溶胶数浓度、气象条件的关系，并结合HYSPLIT（Hybrid of Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory model）后向轨迹模型研究气溶胶的运动轨迹和可能的污染来源。结果表明：山西夏季空中气溶胶总散射系数变化范围为0～499 $Mm^{-1}$，晴空气溶胶数浓度和总散射系数明显大于有云和少云时。气溶胶总散射系数一般随高度的增加而递减。造成气溶胶总散射系数、数浓度偏高的原因有下垫面污染源多、风速小、相对湿度高以及逆温层的存在。550 nm波段气溶胶后向散射比大于0.1，粒径0.1～0.5 μm的气溶胶粒子对散射影响最大，说明山西空中细粒子污染比较严重。气溶胶总散射系数与数浓度有一定的相关性。引起气溶胶总散射系数、数浓度较高的气团传输路径主要为西南路径，局地排放的气溶胶大于远距离传输的气溶胶对散射系数的贡献。

**关键词**　气溶胶　散射特性　飞机观测　山西

**文章编号**　1006-9585(2019)04-0482-11　　**中图分类号**　X513　　**文献标识码**　A

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18020

# Aircraft Measurements of the Scattering Properties of Aerosols in Shanxi Province in Summer

FENG Qiujuan[1,2], NIU Shengjie[1], LI Peiren[2], YANG Junmei[2], SHEN Dongdong[2], and LI Yiyu[2]

1 *Key Laboratory for Aerosol−Cloud−Precipitation of China Meteorological Administration*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *Weather Modification Office of Shanxi Province*, *Taiyuan* 030032

**Abstract**　The aerosol total scattering coefficient and its relation to the aerosol number concentration and meteorological conditions on cloudy, sunny, and cloudless days were analyzed using the integrating nephelometer and PCASP(Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe)-100X of three aerosol detection flights over Shanxi Province in the summer of 2013. The movement tracks and possible sources of aerosol pollution were discussed using the HYSPLIT (Hybrid of Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model. The results showed that the range of aerosol total scattering coefficient varied from 0 $Mm^{-1}$ to 499 $Mm^{-1}$. The aerosol total scattering coefficient and aerosol number

**收稿日期**　2018-01-30；**网络预出版日期**　2018-05-18

**作者简介**　封秋娟，女，1982年出生，硕士研究生，主要从事大气物理与大气环境方面的研究。E-mail: fqj119818@163.com

**通讯作者**　牛生杰，E-mail: niusj@nuist.edu.cn

**资助项目**　国家自然科学基金项目41605109，山西省气象局重点科研项目SXKZDRY20165205，江苏省研究生培养创新工程项目KYLX16_0938，山西省气象局一般科研项目SXKYBDQ201510042

**Funded by**　National Natural Science Foundation of China (Grant 41605109), Key Project of Shanxi Meteorological Bureau (Grant SXKZDRY20165205), Postgraduate Training Innovation Project of Jiangsu Province (Grant KYLX16_0938), General Research Project of Shanxi Meteorological Bureau (Grant SXKYBDQ201510042)

concentration on sunny days were significantly higher than those on cloudy and cloudless days. The aerosol total scattering coefficient decreased with altitude. Given the multiple pollution sources in the underlying surface, low wind speed, high relative humidity, and existence of a temperature inversion layer, the aerosol total scattering coefficient and aerosol number concentration increased. The ratio of the backscattering coefficient of the 550 nm wavelength was larger than 0.1. The aerosol total scattering coefficient was mainly influenced by the particle size of 0.1−0.5 μm, indicating that a significant fraction of particulate matter in Shanxi Province was attributed to fine-grained particles. Furthermore, the air pathways, which caused the high aerosol total scattering coefficient and aerosol number concentration, are mainly from the southwest. The contribution of local near-surface sources to aerosol total scattering coefficient is greater than that of long-distance transmission.

**Keywords** Aerosols, Scattering properties, Aircraft measurements, Shanxi Province

## 1 引言

气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系（刘毅等，1999），气溶胶一方面吸收和散射太阳辐射，从而影响地—气系统的辐射收支，造成直接辐射强迫效应，另一方面气溶胶粒子作为云凝结核影响云的物理、化学特性，进而影响云的生消过程和降水效率，造成气溶胶的间接辐射效应，这两种过程都会引起气候变化。气溶胶光学性质的研究是气溶胶辐射特征以及气候效应研究的重要基础，散射系数是气溶胶光学性质的重要参数之一，它反映了气溶胶对辐射传输的影响。

国外对气溶胶散射特性的研究开始于20世纪80年代，美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration，NOAA）在阿拉斯加、夏威夷莫纳罗亚山（Mauna Loa）、萨摩亚群岛（Samoa）以及南极等大气监测基准站开始气溶胶散射性质的观测研究（Bodhaine，1983，1995）。Chan et al.（1999）利用积分浊度仪研究了大气能见度、PM10（空气动力学当量直径小于等于10 μm的颗粒物，即可吸入颗粒物）质量浓度与散射系数的相互关系。

近年来，我国在气溶胶散射特征方面有过许多研究，且主要集中在沙尘气溶胶（章秋英等，2008；陆辉等，2010；Niu and Zhang，2010；田磊等，2010；彭艳梅等，2014；王天舒和牛生杰，2017）、城市和郊区气溶胶（胡波等，2003；柯宗建和汤洁，2007；延昊等，2008；陈宇等，2009；苏晨等，2009；许建明等，2010；张勇等，2012；赵秀娟等，2013）、山区气溶胶（陈景华等，2011；袁亮等，2013）等领域。如王天舒和牛生杰（2017）利用积分浊度仪的观测资料分析了内蒙古东部背景、杨沙、沙尘暴、强沙尘暴等不同强度沙尘天气气溶胶散射系数的分布特征，指出散射系数能够很好地反映沙尘天气强度。柯宗建和汤洁（2007）利用积分浊度仪分析了北京上甸子秋冬季气溶胶散射系数的变化特征、散射系数与PM2.5（空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒物，即细颗粒物）质量浓度的关系，研究得出上甸子秋冬气溶胶散射系数平均值和标准差分别为179.7 $Mm^{-1}$和253.2 $Mm^{-1}$，阴天条件下散射系数明显高于晴天，散射系数与PM2.5质量浓度之间有较好的相关性，风场对气溶胶散射系数的影响显著。陈景华等（2011）利用光声黑碳仪对黄山顶大气气溶胶吸收和散射系数变化特征及其与气象因子的关系进行研究，结果表明相对湿度与吸收和散射系数有很强的正相关性，风速与散射吸收系数则呈负相关关系，湿清除使大气气溶胶的吸收和散射系数明显降低，黄山山顶吸收和散射系数的数值比平原地区的南京小1个量级。

气溶胶时空分布不均匀性以及由此产生的辐射强迫非均匀性，增加了大气气溶胶在气候变化研究中的不确定性，因此研究气溶胶辐射特性的空间分布对预测其气候效应至关重要。受观测手段的限制以上研究仅对地面气溶胶散射特征进行了观测，对空中气溶胶散射特征的研究还比较缺乏。本文依托山西人工增雨飞机，搭载积分浑浊度仪、气溶胶粒子探头，对有云、无云和少云3种不同条件下的空中气溶胶散射系数进行了统计和分析，重点分析了气溶胶散射系数的高空垂直分布与气溶胶数浓度、气象条件的关系，并且利用气溶胶后向散射比研究气溶胶粒子大小的分布。本研究工作为进一步研究空中气溶胶光学特性和气候效应积累了资料。

## 2 观测方法与飞行概况

### 2.1 观测仪器

飞机观测安装的仪器包括：美国TSI（Trust Science Innovation）公司生产的TSI-3563型积分浊度仪、美国DMT（Droplet Measurement Technologies）公司生产的PCASP（Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe）-100X气溶胶粒子探头、温度湿度探头、北斗地空通讯系统等，仪器均安装在飞机两侧机翼的下方。积分浊度仪可以提供450 nm、550 nm和700 nm的大气气溶胶总散射系数和后向散射系数，可以对大气气溶胶的散射特性进行连续自动观测，定标简单方便，分辨率为$5\times10^{-8}$ $Mm^{-1}$，在观测中设定每10 s输出一次结果。PCASP-100X用于探测大气中气溶胶粒子，其量程为0.1～3 μm，分为30个通道，通道间隔不均匀，从小粒子区的0.01 μm到大粒子区的0.2 μm。

### 2.2 飞行概况

2013年8月19日、8月20日和8月28日在太原及其周边地区进行气溶胶的探测飞行，共取得了3架次较好的观测资料。飞机从太原武宿机场起飞，表1是飞行探测情况，观测时间为夏季的傍晚和夜间，最高飞行高度达到4409 m，飞行区域位于山西太原盆地和忻定盆地，观测期间以晴和多云天气为主。

### 2.3 观测点地理位置及周围环境

图1给出了3个架次飞行轨迹图。从图1看出3个架次的大致飞行线路是从太原武宿机场起飞后直接爬升，到达指定观测区域后以300 m左右为间隔盘旋下降，完成观测后返回太原。8月19日观测区域位于山西太岳山北面的山区，山中多泉，山林茂密，空气清新。8月20日观测区域位于太原盆地南部文水附近的城镇上空，此处污染源多，污染严重。8月28日在忻定盆地东南部忻州和定襄之间的城市和农村盘旋飞行。

从环流形势看（图略），2013年8月19日500 hPa山西受西太平洋副热带高压影响，观测区域500 hPa位于高压中心，700 hPa、850 hPa位于高压脊的西伸副热带高压的中心点，地面位于高压西部，观测区高空分布卷云、积云。2013年8月20日500 hPa副热带高压往东收缩，山西位于副热带高压北部边缘，700 hPa位于副热带高压北部边缘，850 hPa位于副热带高压西部，地面位于高压西部，水汽输送较8月19日旺盛，观测区晴天无云。2013年8月28日500 hPa、700 hPa山西位于高空槽后，850 hPa处于低涡后部，高空风大，地面位于低压后部，观测区域分布少量的淡积云。

## 3 气溶胶总散射系数分析

### 3.1 统计分析

表2为3个架次高空3个波段气溶胶总散射系数平均值、最小值、最大值和标准差的统计结果，从表可以看出波长越小对应的总散射系数就越大。空中气溶胶总散射系数最大值为499 $Mm^{-1}$，最小值为0 $Mm^{-1}$，总散射系数标准差、平均值的变化范围分别为11.6～111.5 $Mm^{-1}$、16～155 $Mm^{-1}$。8月20日无云气溶胶总散射系数的平均值、最大值分别是8月19日有云、8月28日少云总散射系数平均值、最大值的2～5倍。

表3给出了3个架次探测的气溶胶粒子数浓度的统计结果。从PCASP气溶胶探头探测的气溶胶数浓度结果看，8月19日有云、8月28日少云气溶胶数浓度的平均值分别为535.4 $cm^{-3}$、919.9 $cm^{-3}$，8月20日无云气溶胶数浓度平均值为3585.0 $cm^{-3}$，8月20日气溶胶数浓度明显大于8月19日和8月28日。

由表2、表3可以看出，气溶胶数浓度和总散射系数在无云条件下明显大于有云和少云条件下，

**表1 2013年8月19日、8月20日和8月28日在太原及其周边地区进行气溶胶的探测飞行的飞行概况**

**Table 1 Summary of the aerosol detection flights over Taiyuan and its surrounding area on 19 August 2013, 20 August 2013, and 28 August 2013**

| 日期 | 时间 | 飞行高度/m | 飞行区域 | 天气类型 |
|---|---|---|---|---|
| 2013-08-19 | 16:54至18:30 | 973～3796 | 太原、介休 | 有云 |
| 2013-08-20 | 22:35至23:50 | 782～3813 | 太原、文水 | 晴天、无云 |
| 2013-08-28 | 17:56至20:13 | 780～4409 | 太原、定襄、忻州 | 少云 |

注：时间为北京时间，下同。

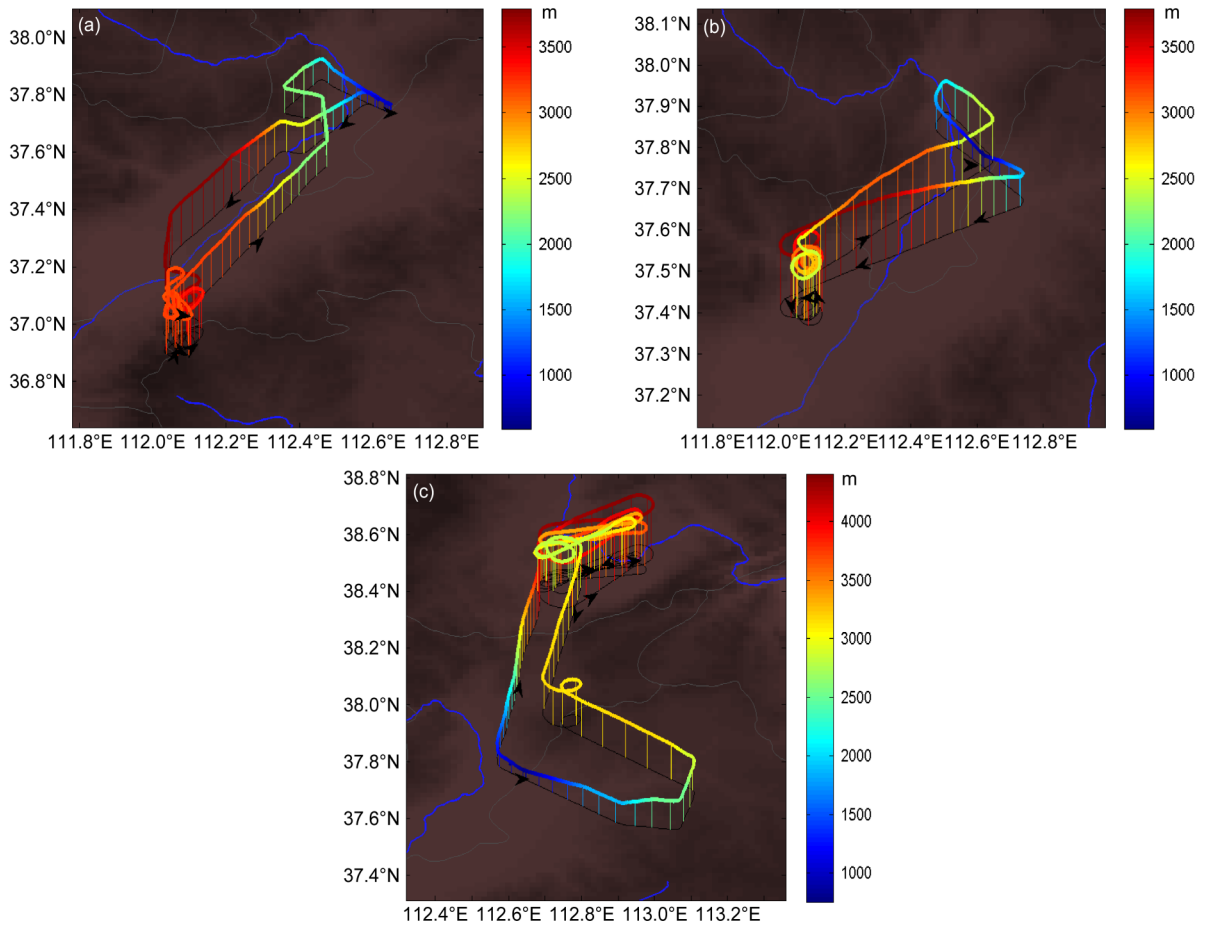


图1　2013年（a）8月19日、（b）8月20日、（c）8月28日气溶胶的探测飞行轨迹，彩色代表海拔高度

Fig. 1　Flight tracks of the aerosol detection aircraft on (a) 19 August 2013, (b) 20 August 2013, and (c) 28 August 2013. The color bar shows the altitude

**表2　3个架次气溶胶探测飞行中450、550、700 nm气溶胶波长波段总散射系数统计**

**Table 2　Statistics of the scattering coefficients of the 450, 550, and 700-nm wavelengths during the three aerosol detection flight**

| 日期 | 波长/nm | 总散射系数/$Mm^{-1}$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 标准差 |
| 2013-8-19 | 450 | 39 | 121 | 0.4 | 28.5 |
| | 550 | 26 | 76 | 0.1 | 18.4 |
| | 700 | 17 | 57 | 0 | 11.6 |
| 2013-8-20 | 450 | 155 | 499 | 25.8 | 111.5 |
| | 550 | 102 | 318 | 18.0 | 68.5 |
| | 700 | 64 | 191 | 11.0 | 39.8 |
| 2013-8-28 | 450 | 35 | 195 | 0.3 | 31.6 |
| | 550 | 23 | 142 | 0.1 | 22.9 |
| | 700 | 16 | 104 | 0 | 16.4 |

**表3　3个架次气溶胶探测飞行中气溶胶的数浓度统计表**

**Table 3　Statistics of the aerosol number concentrations during the three aerosol detection flights**

| 日期 | 气溶胶数浓度/$cm^{-3}$ | | |
|---|---|---|---|
| | 最大值 | 最小值 | 平均值 |
| 2013-08-19 | 1372.4 | 13.2 | 535.4 |
| 2013-08-20 | 8205.7 | 524.9 | 3585.0 |
| 2013-08-28 | 2531.3 | 36.9 | 919.9 |

可能云的作用使大气气溶胶散射系数明显降低。

### 3.2　垂直分布特征及与气象条件的关系

图2～4给出了3个架次飞机上升过程中观测到的气溶胶总散射系数、气溶胶数浓度随高度垂直分布，同时给出了L波段高空气象探测系统给出的温度、湿度、风向和风速的垂直廓线。从图2看到，8月19日探测垂直范围为973～3796 m，气溶胶的

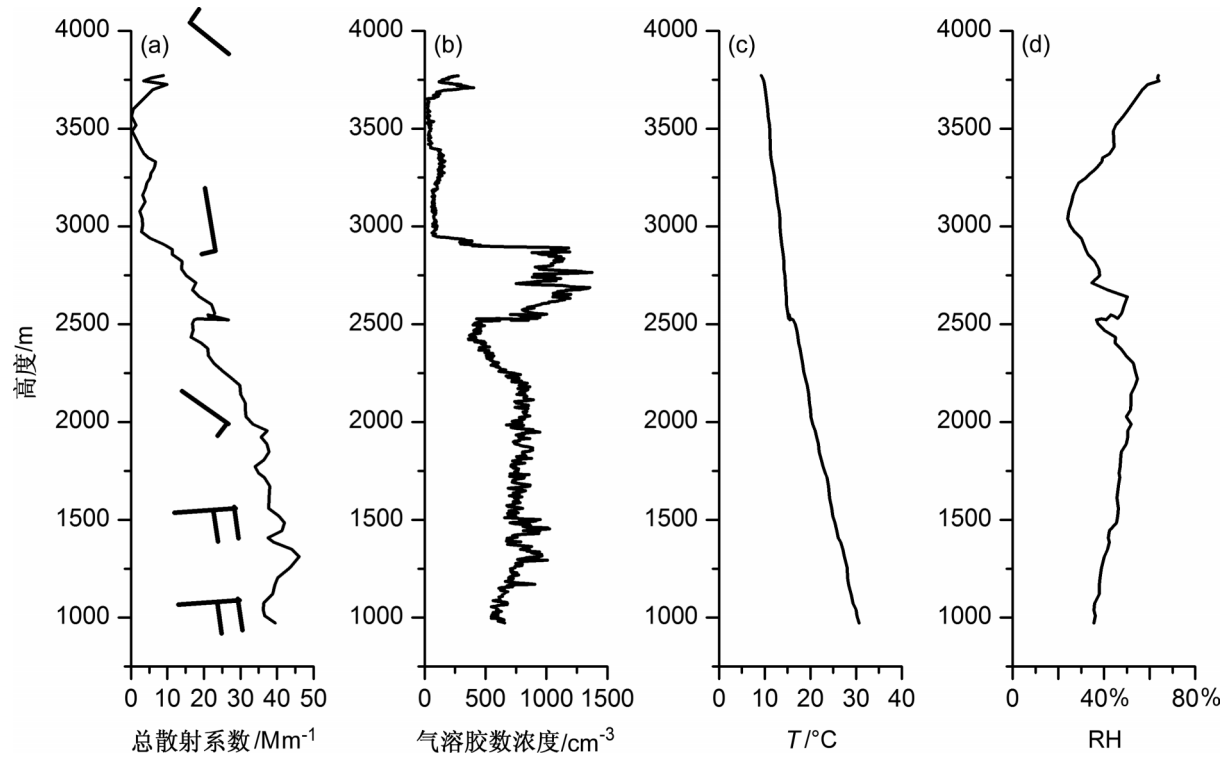


图2 2013年8月19日飞机上升阶段观测到的（a）气溶胶总散射系数及风向和风速、（b）气溶胶数浓度、（c）温度（*T*）、（d）相对湿度（RH）的垂直分布

Fig. 2 Vertical distributions of (a) the scattering coefficients with wind direction and wind speed, (b) number concentrations of aerosol particles, (c) temperature (*T*), and (d) relative humidity (RH) during the ascent stage on 19 August 2013

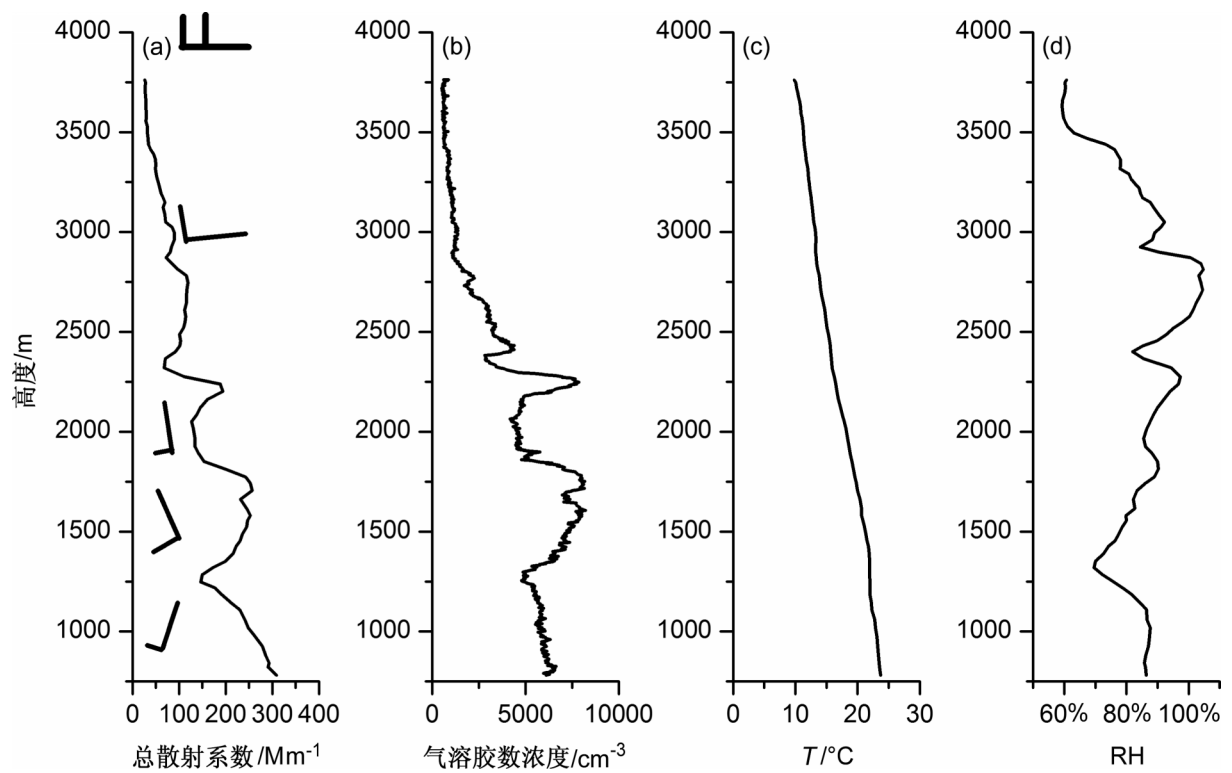


图3 同图2，但为2013年8月20日

Fig. 3 Same as Fig. 2, but during the ascent stage on 20 August 2013

数浓度、总散射系数随高度增高出现两次峰值，第一次峰值在1300 m高度左右，地面人类活动对低层气溶胶的数浓度、总散射系数具有一定的影响，由刚起飞太原周边污染物在边界层聚集造成；第二次峰值在2500 m高度左右，这是由于250～2700 m高度存在一较强逆温层（TIL），在逆温层底部出现了气溶胶聚集区厚约500 m，此高度气溶胶数浓度最大值为1354.6 $cm^{-3}$且高于低层，总散射系数在逆温层底部出现一峰值后随高度增加而减小；3000 m以上气溶胶数浓度和总散射系数都较小，最大值分别为167.2 $cm^{-3}$、9.87 $Mm^{-1}$。

图3的垂直探测范围为782～3813 m，晴空条件下从地面到2300 m气溶胶数浓度、总散射系数维持在比较高的水平，气溶胶数浓度、总散射系数最大值分别为8205.7 $cm^{-3}$、253 $Mm^{-1}$，2300 m以下风向为偏南风，风速为2～4 m/s，风速小且随高度变化不明显，不利于气溶胶扩散；2300 m以上风速增大，风向发生变化，气溶胶数浓度、总散射系数明显减小，这说明高空风也会影响气溶胶的散射特性。

图4的垂直探测范围为780～4409 m，3300 m以下气溶胶数浓度和总散射系数随高度的增加逐渐减小，气溶胶数浓度和总散射系数最大值分别为2512.2 $cm^{-3}$、119 $Mm^{-1}$。3300～4200 m出现气溶胶数浓度的峰值，最大为1820.5 $cm^{-3}$，总散射系数变化不大为$10^1$ $Mm^{-1}$量级，相对湿度大于80%，较高的相对湿度和气溶胶数浓度对应较低的气溶胶总散射系数，说明气溶胶散射能力对相对湿度的响应与气溶胶颗粒物的化学组成有密切关系，结合观测时经过的下垫面分析这个高度层的气溶胶可能为沙尘、扬尘类气溶胶，对数浓度贡献大，但对水汽不敏感。

比较3个架次的气溶胶总散射系数和数浓度，气溶胶数浓度随高度的分布，低层气溶胶数浓度大，说明低层气溶胶主要来源于地面。晴空气溶胶数浓度、总散射系数明显高于有云和少云条件下。从3次飞行经过的下垫面看，8月19日飞行区域位于太岳山森林公园，空气干净、污染少，气溶胶数浓度、总散射系数偏低；8月20日观测区域位于文水，城市上空污染严重，同时高空风速偏小，气象条件有利于污染物的累积，气溶胶数浓度、总散射系数偏大；8月28日在忻州和定襄之间观测，下垫面污染严重，但高空风速达到16～20 m/s，风速大，大风迅速清除大气中的污染物，气溶胶数浓度、总散射系数小于8月20日。

### 3.3　后向轨迹模拟

为分析空中气溶胶的可能来源，运用NOAA空气资源实验室和澳大利亚气象局间联合研发的HYSPLIT（Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model）模式计算和分析大气污染物输

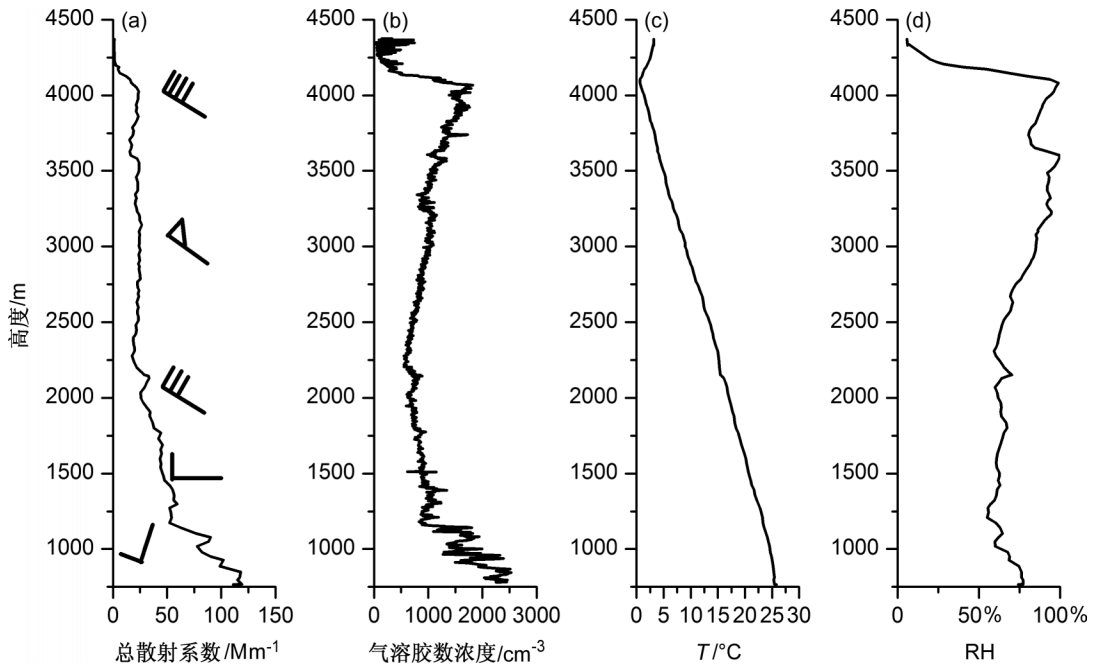


图4　同图2，但为2013年8月28日

Fig. 4　Same as Fig. 2, but during the ascent stage on 28 August 2013

送、扩散轨迹，选择盘旋观测飞行区域为轨迹终点。模式采用美国气象环境预报中心全球数据同化系统（NECP，GDAS）1°（纬度）×1°（经度）的气象场资料，考虑到边界层影响和气溶胶数浓度的垂直分布，轨迹起始点设在海拔高度1000、2500、3500 m（8月28日设置为4000 m），后向轨迹的运行时间设定为72 h。

图5为模拟的3次过程气团后向轨迹图。8月19日模拟的3个高度气团均来自不同的方向，其中1000 m（红色）显示北风盛行，气团从蒙古国一路南移穿过内蒙后，经过北京、河北到达山西，2500 m（蓝色）显示西北风盛行，气团从蒙古国

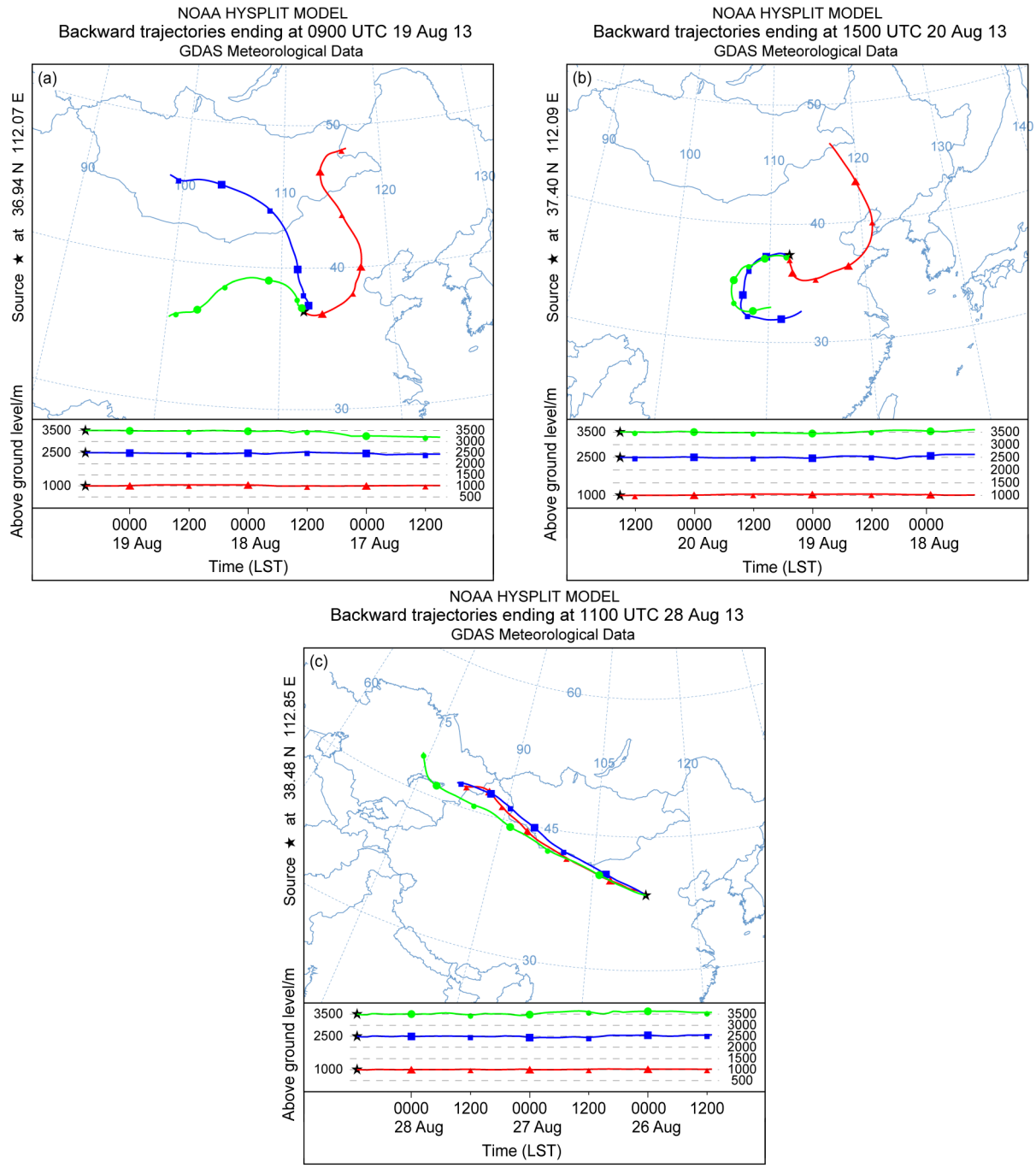


图5 2013年（a）8月19日、（b）8月20日、（c）8月28日飞行区域1000 m高度（红色）、2500 m高度（蓝色）、3500 m高度（绿色）气团72 h后向轨迹图

Fig. 5 The 72-h backward trajectories of air at 1000 (red), 2500 (blue), and 3500-m (green) height on (a) 19 August, (b) 20 August, and (c) 28 August 2013

进入中国境内，经过内蒙进入山西，3500 m（绿色）显示西风盛行，气团从青海经过甘肃、宁夏、陕西后进入山西，并向下输送。8 月 20 日 1000 m（红色）显示东北风盛行，气团由内蒙向辽宁方向运动，途径河北到达山西，2500 m（蓝色）、3500 m（绿色）传输距离较近，移动轨迹有一个明显的旋回，从陕西出发依次经过甘肃、河南到达山西。8 月 28 日 1000 m、2500 m 和 3500 m 气团移动轨迹基本一致，西北风盛行，气团是由新疆进入甘肃，途径内蒙、陕西到达山西，属长距离输送。

轨迹的长短代表气团传输距离的远近。比较 3 次过程气溶胶溯源和追踪分析发现，造成气溶胶散射系数、数浓度较低的气团传输路径主要为西北、偏西和偏北路径，风速大，输送距离长，利于污染物扩散；造成气溶胶散射系数、数浓度较高的路径为西南路径，来自于局地排放的污染，西南气流控制下传输距离短，对应风速小，有利于污染物累积。

## 4 后向散射比

后向散射比是体现气溶胶中细粒子含量的一个重要参量，是气溶胶的后向散射系数与气溶胶的总散射系数的比值。根据 Mie 散射理论，当粒子尺度参量增大时，前向散射与后向散射之比增大，即后向散射比的大小可以反映细粒子（粒子直径 $d<1.5$ μm）在气溶胶中所占的比例。图 6 为 3 个架次飞机爬升阶段观测到的后向散射比随高度的垂直分布，以 $\lambda$=550 nm 的后向散射比为例，2013 年 8 月 19 日有云、8 月 28 日少云高度 2800 m、3300 m 以下后向散射比变化平稳，变化范围分别为 0.104～0.164、0.108～0.194，对应总散射系数的高值区，高度 2800 m、3300 m 以上后向散射比波动大，变化范围分别为 0.012～0.335、0.052～0.412，对应总散射系数的低值区。2013 年 8 月 20 日无云后向散射比随高度的垂直分布波动小，最大为 0.165，最小为 0.092。这可能是受云的作用影响气溶胶细粒子组分，造成后向散射比波动很大。

根据 Mie 散射理论计算，当气溶胶后向散射比大于 0.1，气溶胶粒子大部分小于 1.5 μm。由表 4 看出，3 架次观测到高空小于 0.5 μm 气溶胶数浓度占总数浓度的 99% 以上。综合图 6、表 4 两者都说明山西夏季空中细粒子污染比较严重。随高度的增加 8 月 19 日有云、8 月 28 日少云后向散射比逐渐大于 8 月 20 日无云，对比空中气溶胶数浓度有云、少云时直径 0.1～0.2 μm 的细粒子占总数浓度的比例大于无云时（见表 4）。

## 5 散射系数和数浓度的关系

为了解有云、无云和少云不同天气条件下高空气溶胶散射系数与数浓度的关系，对气溶胶的散射系数和数浓度取 1 min 平均，得到 3 个架次飞行的有效样本分别为 91 个、75 个和 154 个，并对样本进行相关性分析。从图 7 比较看出，有云、无云和少云不同天气条件下气溶胶数浓度的变化趋势与散射系数的变化基本一致，当数浓度出现高值时散射系数也出现高值，当数浓度出现低值时散射系数同样达到低值。图 7 为有云、无云和少云时高空气溶

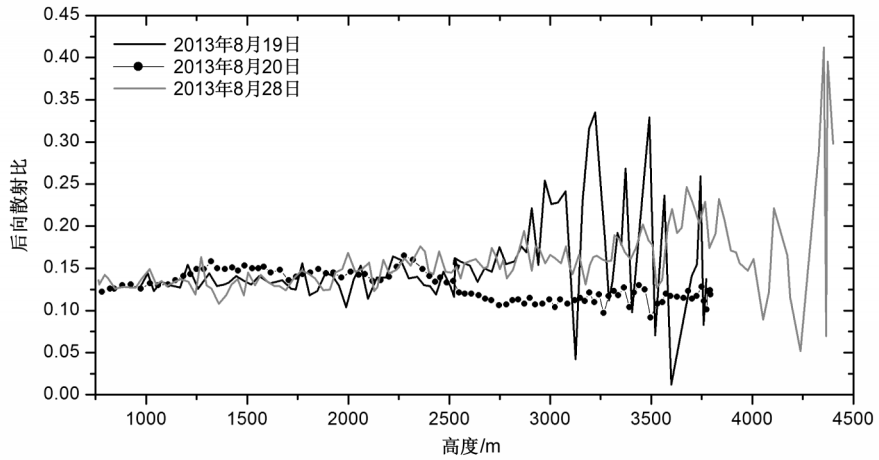


图 6 2013 年 8 月 19 日、8 月 20 日、8 月 28 日飞机上升阶段后向散射比的垂直分布

Fig. 6 Vertical distributions of the backscattering coefficient during the ascent stage on 19 August, 20 August, and 28 August 2013

**表4　3个架次气溶胶探测飞行中不同粒径范围气溶胶的数浓度**

**Table 4　Aerosol number concentration in different size during the three aerosol detection flights**

| 日期 | 粒径范围/μm | 数浓度/cm$^{-3}$ | | | 各段粒子占总数浓度百分比 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 平均值 | 最大值 | 最小值 | |
| 2013-8-19 | 0.1～0.2 | 413.5 | 1259.3 | 10.8 | 77.0% |
| | 0.2～0.5 | 118.8 | 291.2 | 0.0 | 22.1% |
| | 0.5～1.0 | 3.9 | 16.0 | 0.0 | 0.7% |
| | 1.0～3.0 | 0.8 | 9.1 | 0.0 | 0.2% |
| 2013-8-20 | 0.1～0.2 | 1465.7 | 3982.5 | 206.6 | 53.1% |
| | 0.2～0.5 | 1277.3 | 3593.9 | 182.6 | 46.3% |
| | 0.5～1.0 | 14.0 | 40.3 | 0.0 | 0.5% |
| | 1.0～3.0 | 1.7 | 9.3 | 0.0 | 0.1% |
| 2013-8-28 | 0.1～0.2 | 572.9 | 1634.3 | 22.4 | 63.5% |
| | 0.2～0.5 | 320.9 | 905.4 | 5.3 | 35.6% |
| | 0.5～1.0 | 5.7 | 44.1 | 0.0 | 0.6% |
| | 1.0～3.0 | 2.1 | 13.4 | 0.0 | 0.3% |

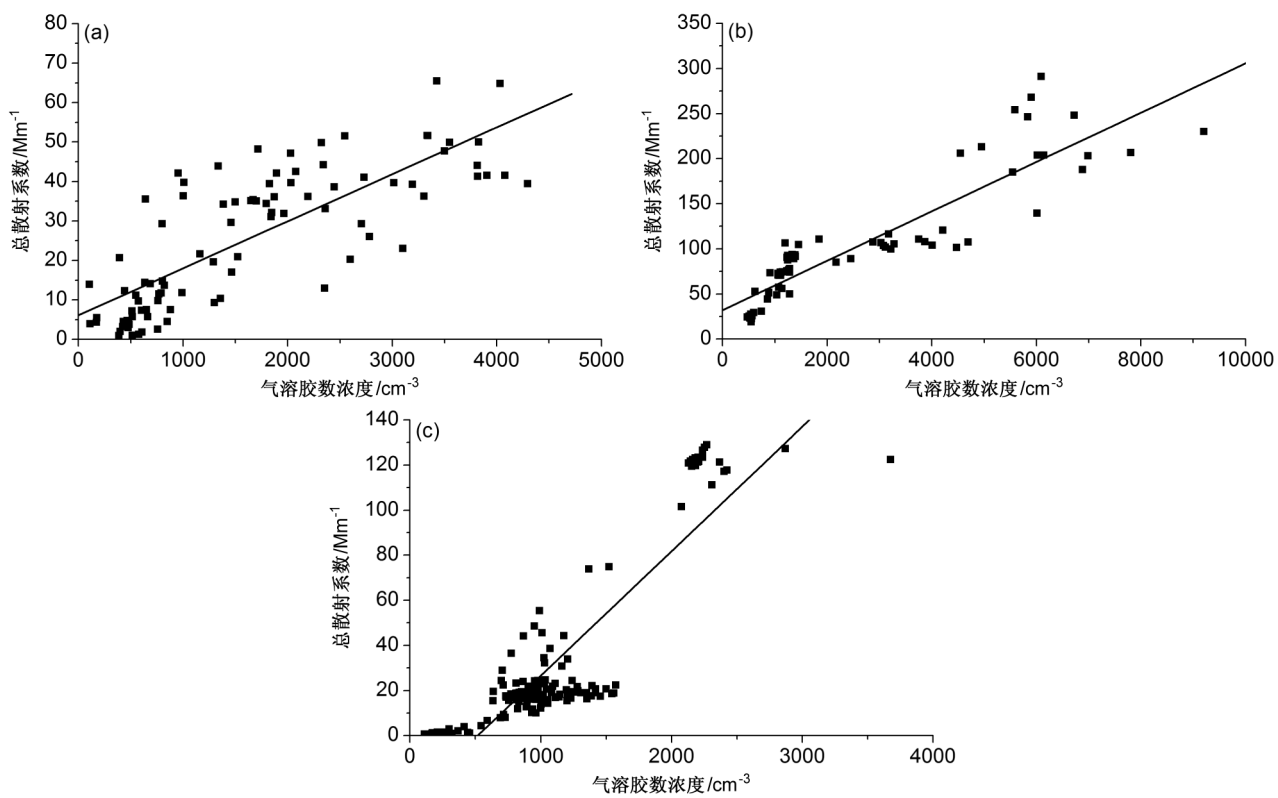


图7　2013年（a）8月19日、（b）8月20日、（c）8月28日气溶胶探测飞行中气溶胶散射系数与数浓度散点图

Fig. 7　Relationship between aerosol total scattering coefficient and aerosol number concentration during the aerosol detection flights on (a) 19 August, (b) 20 August, and (c) 28 August 2013

胶散射系数与数浓度散点图，散射系数和数浓度的相关系数分别为0.791、0.899和0.880，通过$\alpha=0.01$的显著性检验，说明有云、无云和少云时高空气溶胶散射系数和数浓度有一定的相关性。

## 6　结论

（1）对3次飞行过程的山西夏季空中气溶胶散射系数和数浓度统计发现，波长越小对应的总散射

系数就越大。气溶胶总散射系数变化范围为0～499 $Mm^{-1}$，标准差、平均值的变化范围分别为11.6～111.5 $Mm^{-1}$、16～155 $Mm^{-1}$。3次过程气溶胶数浓度平均值分别为535.4 $cm^{-3}$、3585.0 $cm^{-3}$、919.9 $cm^{-3}$。晴空气溶胶总散射系数、数浓度远大于有云和少云时。

（2）气溶胶总散射系数、数浓度一般随高度增加而逐渐减小。出现逆温层、下垫面污染严重、相对湿度大、风速小等情况会影响气溶胶散射特征的垂直分布。气团72 h后向轨迹图显示，8月20日气团传输路径主要为西南路径，传输距离短，气溶胶来自于局地排放的污染，8月19日、8月28日气团传输路径主要为西北、偏西和偏北路径，输送距离长。

（3）气溶胶后向散射比垂直廓线显示，后向散射比大于0.1，小于0.5 μm的气溶胶数浓度占总数浓度99%以上，说明山西夏季空中细粒子污染比较严重。比较3次过程的后向散射比发现，受云作用的影响气溶胶后向散射比波动大并影响细粒子的组分。气溶胶散射系数与数浓度有一定的相关性，相关系数分别为0.791、0.899和0.880，通过$\alpha$=0.01的显著性检验。

## 参考文献（References）

Bodhaine B A. 1983. Aerosol measurements at four background sites [J]. J. Geophys. Res., 88(C15): 10753−10768. doi: 10.1029/JC088iC15p10753.

Bodhaine B A. 1995. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the south pole[J]. J. Geophys. Res., 100(D5): 8967−8975. doi:10.1029/95JD00513.

Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, et al. 1999. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques[J]. Atmos. Environ., 33(19): 3237−3250. doi:10.1016/S1352-2310(99)00091-6.

陈景华, 银燕, 林振毅, 等. 2011. 黄山顶大气气溶胶吸收和散射特性观测分析[J]. 气候与环境研究, 16(5): 641−648. Chen Jinghua, Yin Yan, Lin Zhenyi, et al. 2011. An observational study of aerosol optical properties at the top of Huangshan Mountains[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16(5): 641−648. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.10.

陈宇, 银燕, 钱凌, 等. 2009. 南京北郊2007年10～12月大气气溶胶吸收和散射特性的观测[J]. 气候与环境研究, 14(6): 613−620. Chen Yu, Yin Yan, Qian Ling, et al. 2009. Observation of the absorption and scattering coefficients of atmospheric aerosols in the north suburb of Nanjing from October to December 2007[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(6): 613−620. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.06.04.

胡波, 张武, 张镭, 等. 2003. 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, 22(4): 354−360. Hu Bo, Zhang Wu, Zhang Lei, et al. 2003. A study on scattering properties of aerosol particle over Xigu district of Lanzhou[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22(4): 354−360. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.04.006.

柯宗建, 汤洁. 2007. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征[J]. 大气科学, 31(3): 553−559. Ke Zongjian, Tang Jie. 2007. An observation study of the scattering properties of aerosols over Shangdianzi, Beijing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(3): 553−559. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9895.2007.03.19.

刘毅, 王明星, 张仁健. 1999. 中国气溶胶研究进展[J]. 气候与环境研究, 4(4): 406−414. Liu Yi, Wang Mingxing, Zhang Renjian. 1999. The present status of aerosol research in China[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4(4): 406−414. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1999.04.09.

陆辉, 魏文寿, 刘明哲, 等. 2010. 塔克拉玛干沙漠腹地大气气溶胶散射特征研究[J]. 中国沙漠, 30(3): 660−667. Lu Hui, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, et al. 2010. Aerosol scattering properties in the hinterland of Taklimakan desert[J]. Journal of Desert Research, 30 (3): 660−667.

Niu S J, Zhang Q Y. 2010. Scattering and absorption coefficients of aerosols in a semi-arid area in China: Diurnal cycle, seasonal variability and dust events[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 46(1): 65−71. doi:10.1007/s13143-010-0007-2.

彭艳梅, 何清, 刘新春, 等. 2014. 沙漠与城市气溶胶散射系数变化比较[J]. 中国沙漠, 34(5): 1363−1368. Peng Yanmei, He Qing, Liu Xinchun, et al. 2014. Comparison of aerosol scattering coefficiens between desert and city[J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 34(5): 1363−1368.

苏晨, 张小玲, 刘强, 等. 2009. 上甸子本底站气溶胶散射系数变化特征的初步分析[J]. 气候与环境研究, 14(5): 537−545. Su Chen, Zhang Xiaoling, Liu Qiang, et al. 2009. Analysis of the characteristics of aerosol scattering coefficient at Shangdianzi background station[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(5): 537−545. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.05.09.

田磊, 张武, 史晋森, 等. 2010. 河西春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究[J]. 高原气象, 29(4): 1050−1057. Tian Lei, Zhang Wu, Shi Jinsen, et al. 2010. A preliminary study on scattering property of dust aerosol in Hexi corridor[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29(4): 1050−1057.

王天舒, 牛生杰. 2017. 内蒙古东部春季三类沙尘天气气溶胶散射系数及其与PM10、能见度相关性分析[J]. 大气科学, 41(1): 121−131. Wang Tianshu, Niu Shengjie. 2017. Dust aerosol scattering coefficient under three types of sand storm in Eastern Inner Mongolia in the Spring and its correlations with PM10 and visibility [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(1): 121−131. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15289.

许建明, 耿福海, 甄灿明, 等. 2010. 上海浦东地区气溶胶散射系数及影响因子[J]. 环境科学学报, 30(1): 211−216. Xu Jianming, Geng

Fuhai, Zhen Canming,et al. 2010. Aerosol scattering coefficients and the factors affecting them in Shanghai Pudong[J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 30(1): 211−216.

延昊, 矫梅燕, 赵琳娜, 等. 2008. 中国北方气溶胶散射和PM10浓度特征[J]. 高原气象, 27(4): 852−858. Yan Hao, Jiao Meiyan, Zhao Linna, et al. 2008. Characteristics of aerosol light-scattering and PM10 concentration in North China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27(4): 852−858.

袁亮, 银燕, 于兴娜, 等. 2013. 黄山夏季气溶胶光学特性观测分析[J]. 中国环境科学, 33(12): 2131−2139. Yuan Liang, Yin Yan, Yu Xingna,et al. 2013. Observational study of aerosol optical properties in summer in Mt. Huang[J]. China Environmental Science (in Chinese), 33(12): 2131−2139.

章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 2008. 半干旱区气溶胶散射特性研究[J]. 中国沙漠, 28(4): 755−761. Zhang Qiuying, Niu Shengjie, Shen Jianguo, et al. 2008. Observational study on aerosol scattering properties in semiarid area[J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 28(4): 755−761.

张勇, 银燕, 肖辉, 等. 2012. 石家庄春季大气气溶胶的散射特征[J]. 中国环境科学, 32(5): 769−779. Zhang Yong, Yin Yan, Xiao Hui,et al. 2012. An observation study of the scattering properties of aerosols over Shijiazhuang City in spring[J]. China Environmental Science (in Chinese), 32(5): 769−779. doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2012.05.001.

赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 2013. 北京地区秋季雾霾天PM2.5污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 34(2): 416−423. Zhao Xiujuan, Pu Weiwei, Meng Wei, et al. 2013. PM2.5 pollution and aerosol optical properties in fog and haze days during autumn and winter in Beijing area[J]. Environmental Science (in Chinese), 34 (2): 416−423.