

段婧,楼小凤,陈勇,等. 基于航测的珠三角气溶胶垂直分布及活化特性. 应用气象学报,2019,30(6):677-689.

DOI: 10.11898/1001-7313.20190604

基于航测的珠三角气溶胶垂直分布及活化特性

段婧^{1)2)*} 楼小凤¹⁾²⁾ 陈勇³⁾ 高扬²⁾ 李霞⁴⁾ 周荣斌⁵⁾
毛辉⁶⁾ 卢广献²⁾ 汪会²⁾ 林俊君⁴⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

²⁾(中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081)

³⁾(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室,北京 100029)

⁴⁾(广东省气象局,广州 510080)

⁵⁾(广东省江门市气象局,江门 529000)

⁶⁾(广东省深圳市气象局,深圳 518040)

摘 要

2017年9月14—27日在珠江三角洲地区开展了6个架次飞机观测试验。利用飞行获取的气溶胶、云凝结核、云滴及常规气象探头观测资料,结合天气形势、气象条件及气团后向轨迹分析,研究了珠江三角洲地区深圳气溶胶数浓度及其谱的垂直分布特征,配合不同过饱和度条件下云凝结核浓度观测,分析了气溶胶活化特性。结果表明:在不同天气条件下,深圳低层气溶胶数浓度变化范围为 $500\sim 9000\text{ cm}^{-3}$;边界层内气溶胶分布相对均匀,谱型随高度变化与气象条件相关。将6个架次气溶胶观测资料根据数浓度及谱型分为3种类型:类型I为海洋型气溶胶,数浓度小,粒子尺度大,谱型呈双峰分布;类型III为大陆型气溶胶,数浓度高,粒子尺度小,谱宽较宽且呈三峰分布;类型II为海洋大陆影响型气溶胶,即受海洋和大陆共同影响,数浓度低于类型III高于类型I,谱型为双峰分布。拟合了包含海洋型及大陆型气溶胶的3个架次近地面云凝结核活化谱,计算了气溶胶在不同过饱和度条件下的活化效率。

关键词: 气溶胶数浓度;垂直分布;云凝结核;活化谱;活化效率

引 言

珠江三角洲(简称珠三角)及周边地区是近40年来我国经济快速发展的核心地带,带动了该地区城市群的加速建设。但随之而来的大气环境变化引起越来越多人的关注,特别是近年雾、霾天气的持续发生,不仅影响生产还引起了人们对健康和生活质量的特别关注。大气气溶胶可作为凝结核、冰核影响云与降水过程,并对大气辐射过程有重要影响,因其化学、物理特性也成为环境污染的主要因素。不同的大气环境,来源不同的大气气溶胶,其浓度和化学成分以及谱分布均有很大差异,表现出显著的时空分布特征。直径为 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 的细粒子,对

光散射及云降水的形成有重要作用^[1]。深入了解其物理、化学特性及时空分布特征,是正确认识雾、霾成因,进而研究气溶胶气候效应、云降水过程的重要基础。

在现有观测条件下,对气溶胶的直接观测研究多在地面完成,利用气溶胶监测或膜取样设备、气溶胶在线分析仪、黑碳仪、浊度仪及光度计等获取地面不同位置的气溶胶化学、物理和光学特征。遥感方法是目前间接了解气溶胶空间分布的主要手段,地面或空间的遥感设备可通过反演获取气溶胶光学特性的垂直分布,如通过地面激光雷达的遥感观测获取气溶胶的消光系数和退偏比,从而间接了解气溶胶的空间分布特征。依据这些观测方法和手段,利用地面激光雷达、卫星反演气溶胶光学厚度(AOD)

2019-07-15收到,2019-09-30收到再改稿。

资助项目:国家重点研究发展计划(2017YFC1501404),国家自然科学基金项目(41675137)

* 邮箱:duanjing@cma.gov.cn

产品及地面的直接或间接观测获取的气溶胶物理或化学特征开展研究,已在珠三角地区取得了大批成果^[2-18]。但卫星、地面观测和遥感手段都不能直接获取垂直空间上大气气溶胶粒子谱特征,而尺度分布可反映气溶胶的演化,同时也有研究表明:在形成云滴的过程中,气溶胶的尺度信息比化学成分更重要^[19]。

飞机携带观测探头是目前直接观测气溶胶粒子谱特征最有效和可行的办法。20世纪80年代为满足人工影响天气作业需求,在我国北方开展了一系列飞机观测试验,获取了北方气溶胶和云降水粒子的垂直分布特征^[20-29],而在我国南方直到2004年才开始利用飞机在珠三角地区进行空气污染物的观测^[30],当时飞机观测更多关注的是气体成分分布及气溶胶质量浓度的垂直分布特征。游积平等^[31]于2010年在珠三角地区上空开展了1个架次飞机观测,获得了气溶胶数浓度在该地区的垂直分布,初步了解了佛山、江门等地气溶胶随高度递减以及谱的多峰特征。但在珠三角地区仍未开展过系统的气溶胶飞机观测,因此,目前还没有直接获取的不同天气条件下气溶胶数浓度及粒径谱的空间观测结果。

2017年9月由中国气象局人工影响天气中心(以下简称国家人影中心)组织在珠三角地区针对台风外围云系开展广东台风外围飞机观测科学试验,目的是研究台风登陆前(近海)外围云系的气溶胶、云物理结构特征,包括基本气象要素、气溶胶、云微物理量的谱分布、云粒子图像的垂直及水平分布等。通过这次试验,获取了珠三角地区上空的气溶胶数浓度及谱分布数据。本文主要围绕珠三角核心区深圳的气溶胶垂直观测资料,分析气溶胶物理特性在低空的垂直分布,并结合天气形势、气象要素、地面气溶胶观测等分析其成因。

1 资料和方法

1.1 飞行试验和基本信息

深圳位于广东省南部,珠江口岸。1980年作为我国第1个经济特区开启了城市化和国际化的进程,并快速成为珠三角的新型大城市,是珠三角城市群重点城市之一,土地大量工业化和工业企业的发展,使得城市气溶胶不断增加,在本地释放、内地输送以及海盐等多种气溶胶相互作用下,深圳成为珠三角霾污染较严重的地区之一^[6]。

2017年9月国家人影中心在广东台风外围飞机观测科学试验期间,共飞行6个架次(图1),获取了珠三角地区上空气溶胶数浓度垂直分布。深圳机场是此次飞行任务的停靠机场,由于航路控制,低空0~3 km的观测集中在深圳机场及周边水平22 km范围内(即图1中的黑色圆圈以内),分别含机场北侧航路及南侧航路两支。因此,本文使用以深圳机场为中心、水平22 km范围为半径的飞机观测资料,按照3 km及以下每200 m计算了不同高度气溶胶数浓度,依次获取了深圳及周边0~3 km范围内气溶胶垂直探测廓线12条。

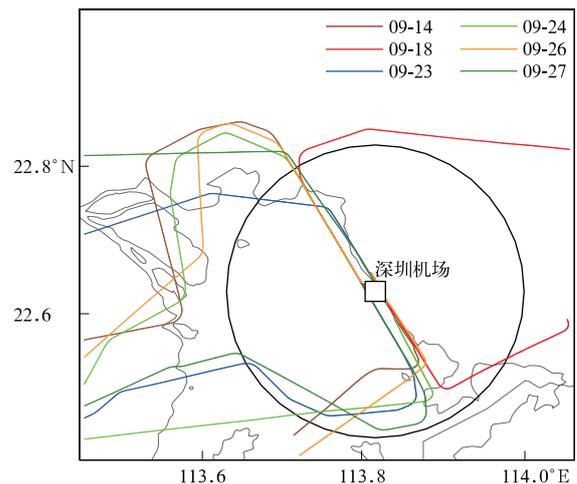


图1 2017年9月深圳机场6个架次飞行航路

Fig. 1 Six-flight paths around Shenzhen Airport in Sep 2017

1.2 机载设备

承担此次观测任务的新舟60人工影响天气作业及大气探测飞机,是国家东北人影工程建设的高性能飞机,于2015年12月开始试运行,搭载的设备可探测气溶胶、云降水粒子及气象要素等。本文使用了该飞机搭载的气溶胶探头(PCASP-100X)、云凝结核计数器(CCN-200)、云粒子谱探头(CDP-2)和气象综合探头(AIMMS-20)的观测资料。PCASP-100X,CCN-200及CDP-2来自美国DMT公司,AIMMS-20由加拿大Aventech公司生产。PCASP-100X观测气溶胶数浓度及粒子谱,利用米散射理论推算气溶胶粒径并分档计数,设间隔0.01~0.2 μm不等的30个观测档位,测量粒子范围为0.1~3 μm,包含积聚模态(0.1~2 μm)气溶胶粒子以及部分粗模态(大于1 μm)粒子,如硫酸盐、烟尘、有机碳和较小的矿物沙尘颗粒。CCN-200可测量

大气中 $0.75\sim 10\ \mu\text{m}$ 的云凝结核 (CCN) 粒子浓度, 粒子计数分 20 档, 过饱和度可调范围为 $0.07\%\sim 2\%$ 。试验中设置 CCN 过饱和度为 $0.2\%\sim 1.0\%$ 循环, 以 0.2 间隔每 $5\ \text{min}$ 调整 1 次过饱和度设置 ($0.2\%, 0.4\%, 0.6\%, 0.8\%, 1.0\%$)。CDP-2 用于测量气溶胶粗粒子 (如较大的矿物尘埃粒子) 以及直径范围在 $2\sim 50\ \mu\text{m}$ 的云滴, 设间隔 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 不等的 30 个观测档位。飞行期间环境空气的温度、压力、湿度、三维风及经纬度、高度等信息由 AIMMS-20 观测。上述所有仪器的采样时间均为 $1\ \text{s}$, 且经过标定后方投入观测使用。

1.3 资料处理

根据飞行情况, 飞行高度在 $3\ \text{km}$ 以下的的数据覆盖了深圳及周边 $22\ \text{km}$ 为半径的范围, 因此, 在水平方向上, 取深圳机场为中心, 地面向上每 $200\ \text{m}$ 计算不同高度的气溶胶数浓度, 计算过程中需要同时参考 CDP 探头确认云外观测为有效数据, 由此获得气溶胶垂直廓线 12 条, 其中深圳机场的北部及南部航线上各 6 条。云边界的判别条件是 CDP 探头的云滴数浓度 (N_c) 小于 $10\ \text{cm}^{-3}$, 以及观测的液态含水量小于 $0.001\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

1.4 气象资料和天气背景

配合飞机观测资料, 使用了地面气象观测的风场资料、可见光云图及地面、高空要素观测辅助分析云况和飞行时的天气背景情况 (表 1)。使用来自生

态环境部的地面城市污染物逐时 $\text{PM}_{2.5}$ 资料, 结合飞机获取的深圳南部及北部气溶胶数浓度观测结果, 分析深圳南、北部气溶胶的分布特征差异。另外, 利用美国国家海洋与大气管理局与澳大利亚气象局联合研发的单粒子拉格朗日综合轨迹模式 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, HYSPLIT) 模拟了飞机探测期间观测点不同高度 ($400\ \text{m}, 1200\ \text{m}$ 和 $2000\ \text{m}$) 气团在观测时间段的 $24\ \text{h}$ 后向轨迹, 依此分析相应位置气溶胶的来源、特性及远距离传输对气溶胶分布的影响。

2017 年 9 月 14—27 日共 6 个架次飞机观测试验, 观测时间覆盖中午前后到傍晚时间段 (表 1)。通过观测时段的 FY-2G 可见光云图 (图略) 可知, 有 3 次观测过程在南海海域有台风或热带低压出现。9 月 14 日深圳机场观测点位于台风杜苏芮 (1719) 中心北侧约 $500\ \text{km}$, 9 月 23 日南海海域有热带低压形成并逐渐北移, 低压中心距观测点超过 $500\ \text{km}$, 这两次过程均距离热带低压位置较远, 地面气象要素观测 (表 1) 表明: 地面均以偏东风为主, 风力较小 (约 $5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。9 月 24 日观测时南海热带低压位置更接近深圳机场, 位置较前两次过程偏西, 地面以偏东风为主, 但风力较大 (约 $12\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。而其他 3 次过程地面气压场较弱, 风力不大, 地面相对湿度条件较好, 不利于扩散, 有利于气溶胶吸湿增长。

表 1 2017 年 9 月飞机观测过程天气形势及地面气象条件

Table 1 Synoptic situation and surface weather condition for six flights in Sep 2017

飞行日期	垂直探测时间	天气形势	温度/ $^{\circ}\text{C}$	风向	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	相对湿度/ $\%$
09-14	13:34—13:45 17:27—17:33	副高南侧, 热带气旋北侧偏东气流	28.4	东风	5.1	66
09-18	12:05—12:13 14:04—14:11	高空东北气流, 地面弱高压后部	27.0	东东南	5.1	80
09-23	15:15—15:31 17:58—18:08	副高西侧东南气流, 地面低槽	27.2	东东南	5.1	87
09-24	11:52—12:21 13:59—14:05	副高西侧东南气流, 地面高压后部	25.0	东东南	11.8	92
09-26	13:28—13:44 15:22—15:28	副高南侧偏东气流, 地面弱低压场	25.0	东东南	1.5	89
09-27	11:25—11:31 13:07—13:18	副高南侧偏东气流, 地面弱脊控制	24.8	西南	1.0	94

2 结果分析

2.1 气溶胶粒子数浓度与半径垂直分布

气溶胶的垂直分布受边界层内湍流运动、风以

及边界层高度的影响: ①气溶胶通过边界层内的湍流运动向上输送。②气溶胶从源区根据风速、风向进行扩散、传输。③边界层高度与气溶胶粒子浓度呈反相关。边界层以内, 气溶胶受地面人为活动影响较大, 不同条件下其浓度有较大差异; 边界层以

上,污染物不易向上传输,远距离输送可能会对气溶胶有一定影响。图2给出了6个架次飞机观测的气溶胶数浓度垂直分布廓线(每次过程有两条廓线计算平均值)。结果表明:近地面气溶胶在低层随高度

变化并不显著,除9月24日外,平均数浓度在0.75~1.5 km以上随高度迅速递减,总的来看,6个架次飞机观测的混合层高度约为0.75~1.5 km。

近地面层气溶胶与人类活动关系最为密切。根

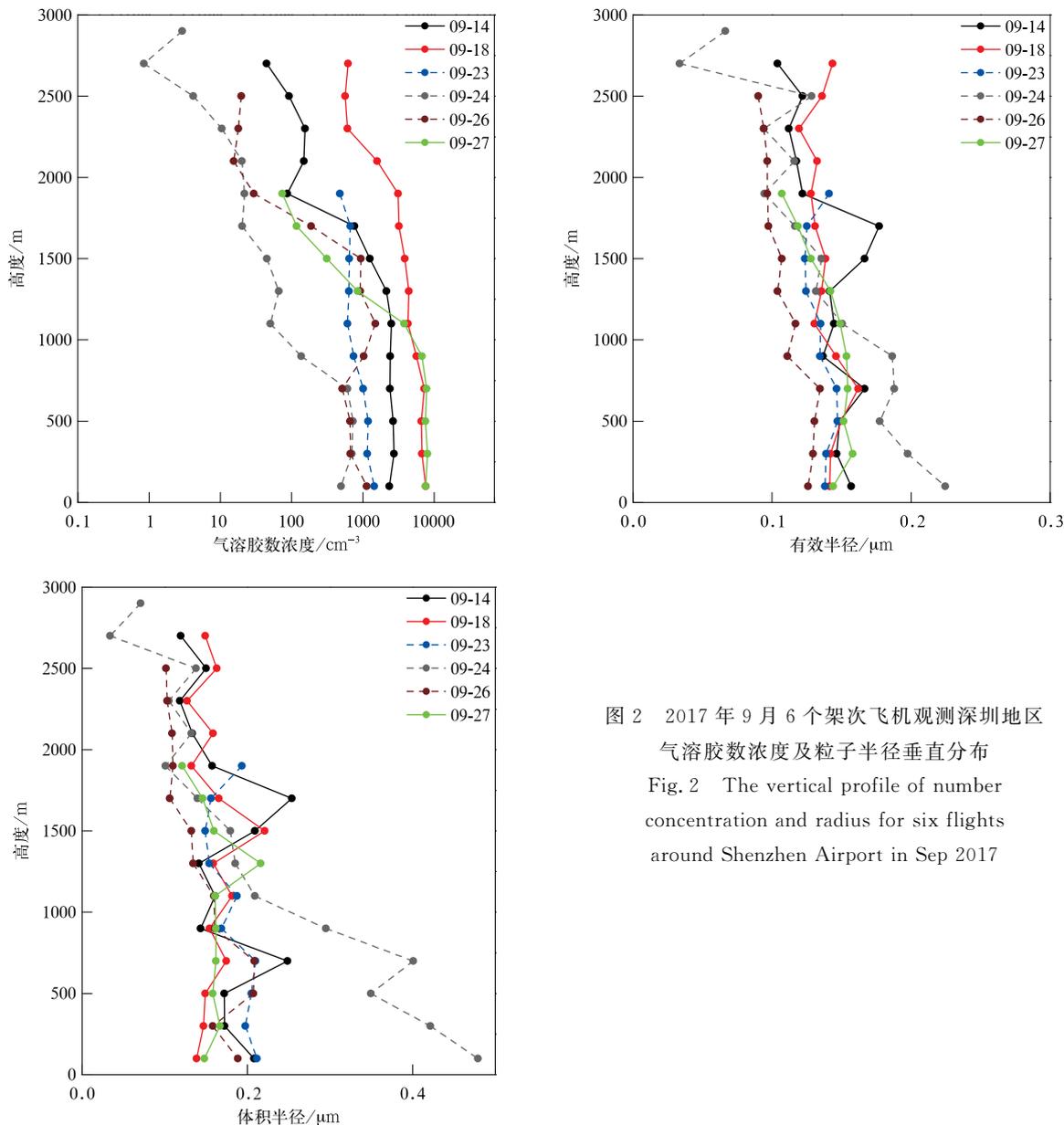


图2 2017年9月6个架次飞机观测深圳地区气溶胶数浓度及粒子半径垂直分布
Fig.2 The vertical profile of number concentration and radius for six flights around Shenzhen Airport in Sep 2017

据近地面气溶胶的分布情况,计算了6个架次飞机观测1.5 km以下的平均气溶胶数浓度和有效半径及体积半径(表2)。将近地面气溶胶浓度分为3类,类型I、类型II和类型III分别表征近地面气溶胶数浓度范围为低于 500 cm^{-3} , $500 \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$ 和 1000 cm^{-3} 以上。

类型I(9月24日)观测位置天气受南海热带低压影响,处于地面高压后部,为大风天气(11.8 m ·

s^{-1}),风向为东南,相对湿度较大(92%)。大风加速了地面的气溶胶传输和扩散,是地面气溶胶浓度出现低值的主要原因。观测到近地面气溶胶数浓度平均值为 353 cm^{-3} 。强大的东南风带来大量南海海洋气溶胶颗粒,使该类型的气溶胶粒径均大于其他类型(图2),体积半径达 $0.315 \mu\text{m}$,接近海盐气溶胶尺度,且其浓度与风速有显著的正相关^[32-33]。

形成类型III的地面天气系统为地面南海低压北

表 2 2017 年 9 月深圳近地层(1.5 km 高度以下)气溶胶数浓度与半径的平均值及标准差

Table 2 Mean value and standard deviation of aerosol number concentration and its radius(below 1.5 km height) in Sep 2017

飞行日期	气溶胶数浓度/cm ⁻³	有效半径/μm	体积半径/μm
09-14	2306±465	0.151±0.011	0.182±0.037
09-18	5807±1454	0.143±0.010	0.166±0.027
09-23	927±314	0.136±0.009	0.185±0.025
09-24	353±307	0.174±0.032	0.315±0.116
09-26	919±313	0.120±0.012	0.169±0.030
09-27	5352±3246	0.148±0.010	0.167±0.021

侧(9月14日)、地面弱高压后部(9月18日)及地面弱脊控制(9月27日)。地面系统较弱,风速不大,风力为微风及以下,气溶胶数浓度平均值均在1000 cm⁻³以上。其中9月27日地面弱脊控制下,空气辐散下沉,天气晴好,少云且风速很小,不利于污染物的扩散,近地层气溶胶数浓度平均值达到5352 cm⁻³的高值。3个架次飞机观测粒子体积半径平均为0.172 μm,均有城市气溶胶特征^[33],但粒子尺度大于华北地区观测的平均值(0.15 μm^[26]),也比2010年在珠三角的飞机观测气溶胶平均半径0.1 μm高^[31]。区别是当时观测地点位于佛山、江门及周边,接近广州并更靠近内陆地区。

类型II为地面低槽(9月23日)或弱低压(9月26日)控制,风力为微风及以下,气溶胶数浓度平均值为500~1000 cm⁻³。风向为东东南,但风速远小于类型I,粒子体积半径平均值为0.177 μm,介于类型I和类型III之间,更接近类型III。

总的来看,低层气溶胶数浓度在不同天气条件下平均值为500~9000 cm⁻³,变化范围较大。所有样本中有50%的个例近地面气溶胶数浓度平均值低于1000 cm⁻³,低于我国部分城市2005—2013年近地面的飞机观测结果^[26-27,34-37]。北京、河北、山西和四川等地区观测结果显示:近地面气溶胶平均数浓度即使在较为洁净的天气条件下,也几乎都高于1000 cm⁻³。说明在特定的天气条件下,深圳地区的低层气溶胶数浓度比内陆城市低,其低层大气比内陆城市更加清洁。

2.2 气团来源对气溶胶分布的影响

深圳处于海陆交界的特殊地理位置,气溶胶谱型受南海海洋气溶胶影响较大,与海洋相互作用、彼此影响。利用HYSPLIT模拟飞机探测期间观测点不同高度(400 m,1200 m和2000 m)气团在观测时段24 h的后向轨迹(图3),结果表明:9月18日3个高度气溶胶粒子均来源于东部及东北部的陆地气

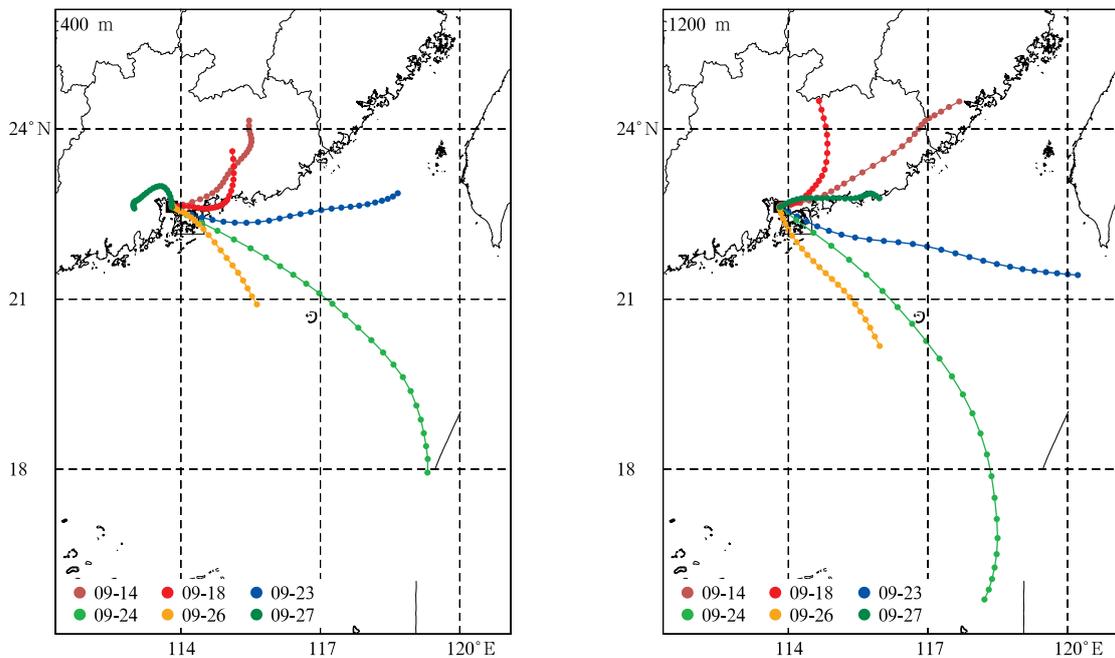
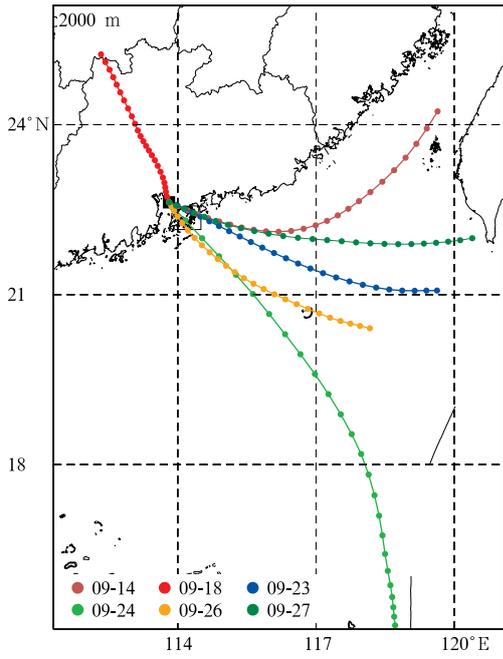


图 3 2017 年 9 月 6 个架次飞机观测 400 m,1200 m 和 2000 m 高度 24 h 后向轨迹

Fig. 3 24-hour backward tracks for six flights at 400 m, 1200 m and 2000 m heights in Sep 2017



续图 3

团输送,因此,该次过程的气溶胶数浓度分布为显著的大陆型特征;9月14日及27日过程在1200 m及以下的粒子来源也是东侧和西北侧的大陆,上述3次过程对应类型Ⅲ,表征的是大陆型气溶胶垂直分布及谱特征,即数浓度谱较宽,呈三峰分布,边界层内垂直混合较均匀。9月24日对应类型Ⅰ气溶胶分布,从后向轨迹看,整层轨迹均来自南海海洋,且为所有个例中传输速度最快的轨迹,故气溶胶数浓度为较典型的海洋型气溶胶分布及谱特征,即粒子尺度大,数浓度低。另外9月23日、26日个例为类型Ⅱ,其后向轨迹也来源于深圳南侧的南海区域,其中23日的影响气团更加偏北。3类气溶胶数浓度与

2012年在南海海平面观测获得的气溶胶总数浓度分布一致^[38],气团来源接近陆地且偏北的主要为大陆性气溶胶,数浓度更高,远离陆地且来向偏南的主要为海洋型气溶胶,数浓度较低。

2.3 气溶胶粒子谱垂直分布特征

飞机观测的优势是在飞行轨迹中实时获取高时间分辨率的气溶胶总浓度,同时获取数浓度谱。除了在深圳周边 22 km 范围获取的不同高度的气溶胶总数浓度廓线外,还同时计算了各层数浓度谱。图 4 给出了 6 个架次飞机观测以 200 m 为间隔 0~3 km 不同高度平均气溶胶数浓度谱。结合天气形势及观测点的温度、相对湿度垂直特征分析,可以了解气溶胶在边界层内的混合情况。总体来看,气溶胶数浓度谱在垂直方向上多峰分布,类型Ⅲ的 3 次过程为三峰分布,峰值位于 0.15 μm,0.2~0.25 μm 以及 0.3 μm,较其他两个类型气溶胶谱宽更宽,垂直混合更为均匀。9月14日、18日和27日的边界层厚度分别约为 1.8 km,2.3 km 和 1.1 km。其余两类气溶胶谱(类型Ⅰ和类型Ⅱ)均为双峰分布,峰值位于 0.15 μm 和 0.2 μm。其中类型Ⅰ(9月24日)边界层厚度最小约为 1 km,大风使温度和湿度在边界层内垂直混合均匀,气溶胶扩散充分,总体数浓度小。9月23日和26日(类型Ⅱ)的边界层厚度分别约为 2 km 和 1.5 km。其中9月26日由于近地面有较明显的两层逆温,相对湿度在 1~1.5 km 有高值区,逆温使气溶胶在边界层顶处累积,同时配合同高度较高的相对湿度,促进了粒子的吸湿增长,因此当天的谱分布在 1~1.5 km 呈双峰且高于地面气溶胶浓度值。

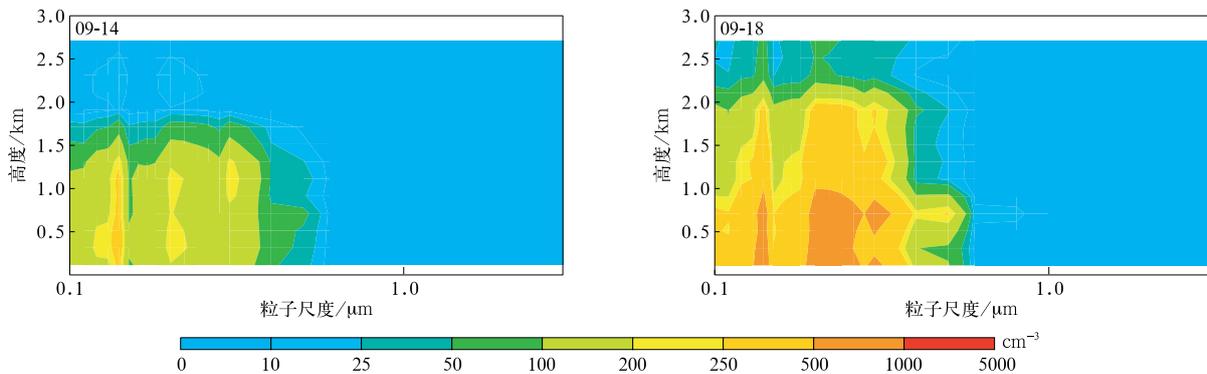
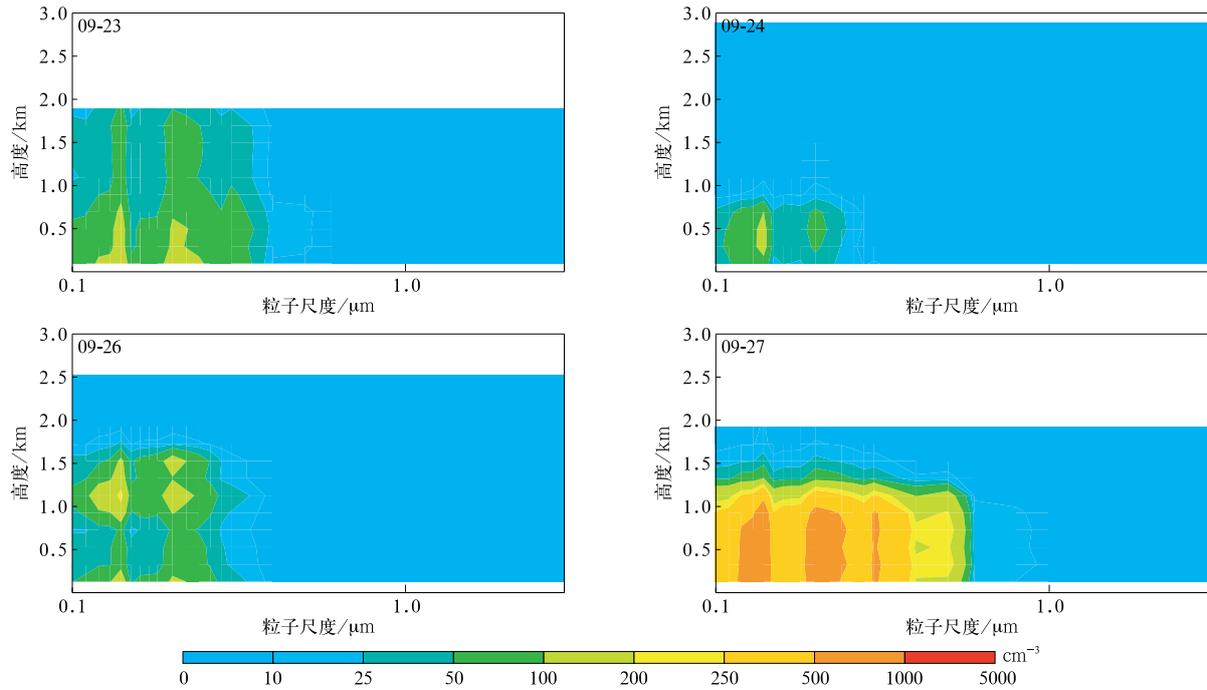


图 4 2017 年 9 月 6 个架次飞机观测深圳低空气溶胶数浓度谱垂直分布

Fig. 4 The low-level number concentration distribution for six flights around Shenzhen Airport in Sep 2017



续图 4

通过图 4 气溶胶谱在垂直方向上的变化可以看到,大多数气溶胶都集中在近地面层(低于 1.5 km)。因此,图 5 给出了 6 个架次飞机观测近地面层气溶胶数浓度谱。类型 III 的 3 次过程在近地面有相似的

数浓度谱分布特征,0.1~0.3 μm 有较多细粒子;类型 II 的 2 次过程在小粒子端也有很好的一致性,但 9 月 26 日谱宽略窄,在大于 0.3 μm 的尺度上,数浓度小于 9 月 23 日。特别不同的是 9 月 24 日的浓度

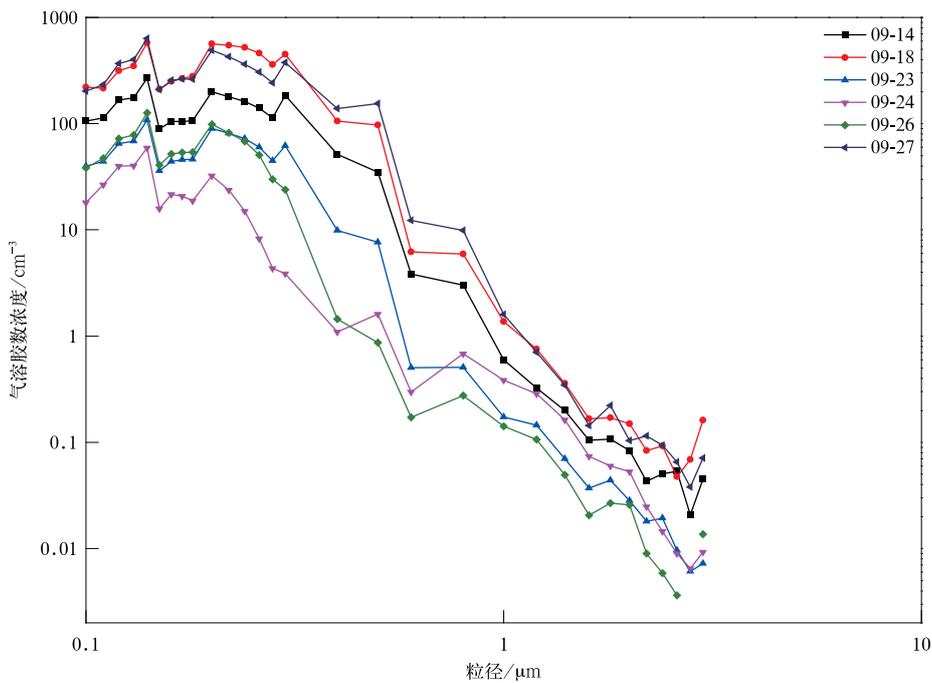


图 5 2017 年 9 月 6 个架次探测深圳机场近地面层(1.5 km 高度以下)气溶胶数浓度谱特征
 Fig. 5 The aerosol number concentration spectrum(below 1.5 km height) of six flights around Shenzhen Airport in Sep 2017

谱,在小粒子端数量不高,但尺度大于 $0.6\ \mu\text{m}$ 的高于其他飞行过程,这与前面分析的体积半径平均尺度达 $0.315\ \mu\text{m}$ 吻合,表明9月24日气溶胶的理化特性显著不同于其他过程,有典型的海洋型气溶胶特征。

2.4 深圳机场南部与北部气溶胶垂直分布差异

由于飞机起降有固定的航线要求,6个架次飞机观测取得了深圳南部及北部各6条廓线(图1)。本节利用分布在深圳机场周边的12条廓线分析深圳机场南、北部气溶胶垂直分布的差异,并探讨其差异产生的原因。图6将上述12条气溶胶数浓度垂直分布廓线进行对比,图中相同颜色表示同一个飞行过程,实线表示廓线位于深圳机场北部,虚线表示廓线位于深圳机场南部。气溶胶数浓度廓线6个架次的对比结果表明:气溶胶廓线数值在深圳南部和北部有整体性差异,说明气溶胶浓度与位置有关,其来源可能与本地排放联系紧密。从整层看,有4个架次飞机观测深圳北部气溶胶浓度高于南部,只有9月26日和27日两次过程深圳南部气溶胶浓度高于北部;但从近地面100 m高度的结果看,仅27日南部气溶胶浓度较高。为了进一步分析深圳南部、北部气溶胶浓度差异的原因,生态环境部的地面城市污染逐时 $\text{PM}_{2.5}$ 资料被用来与飞机观测对比分析

(图7)。根据生态环境部的地面观测布点位置,选取了距离南部和北部航线最近的站点分别代表地面气溶胶的含量。因为 $\text{PM}_{2.5}$ 给出的是质量浓度,将其与飞机获取的近地面(100 m)气溶胶数浓度对比(图7)。结果表明:除了9月14日外,地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均是深圳北部高于南部。因此,大多情况下,深圳北部的气溶胶浓度高于南部,这可能是因为北部更接近大陆城市群,而南部受海洋性气溶胶影响较大。需要特别注意的是,图7中9月14日和27日 $\text{PM}_{2.5}$ 深圳南部、北部质量浓度与飞机观测100 m处低空的气溶胶数浓度相反。9月14日深圳南部气溶胶质量浓度高于北部,而数浓度则北部较高;9月27日相反,北部质量浓度高而数浓度低。较高质量浓度匹配低的数浓度,有两种可能原因:其一是由于气溶胶有更宽的谱,即更多的大粒子,而大粒子是质量浓度的主要贡献者;其二,也是由飞机设备未能探测到小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的细粒子较多引起的。对比9月14日和27日南北两部的气溶胶数谱分布(图略),也可印证之前的假设。9月14日有较高质量浓度的南部并没有出现比北部更宽的谱,但在小粒子端发现有更高的数浓度,由于气溶胶的数浓度谱连续分布,这可能隐含了未探测到的低于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的细粒子较多。同样9月27日也有类似的特征。

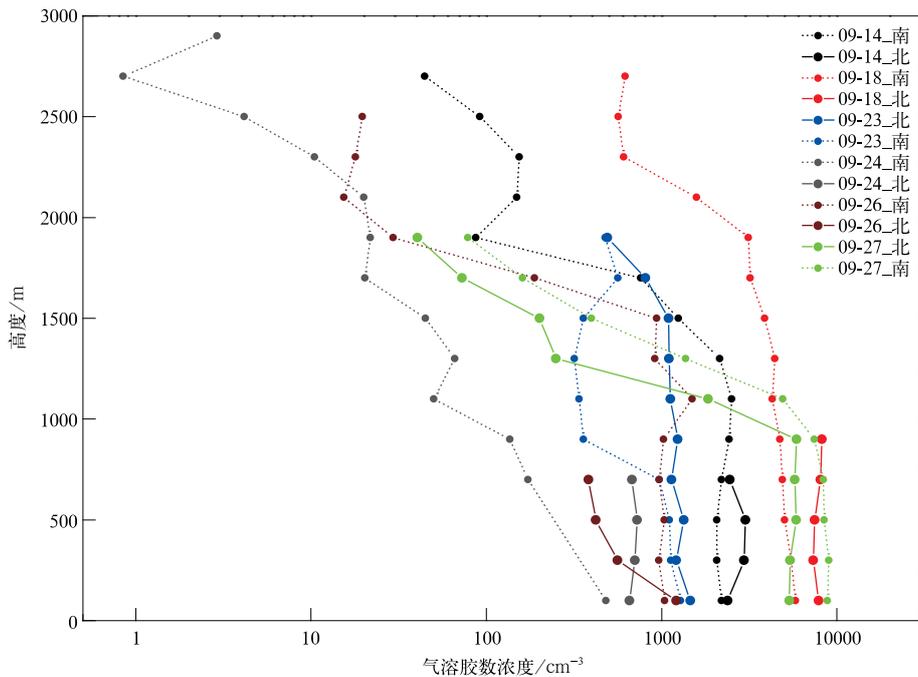


图6 2017年9月深圳南、北部气溶胶数浓度垂直分布

Fig. 6 The vertical profile of aerosol number concentration of six flights in southern and northern parts of Shenzhen in Sep 2017

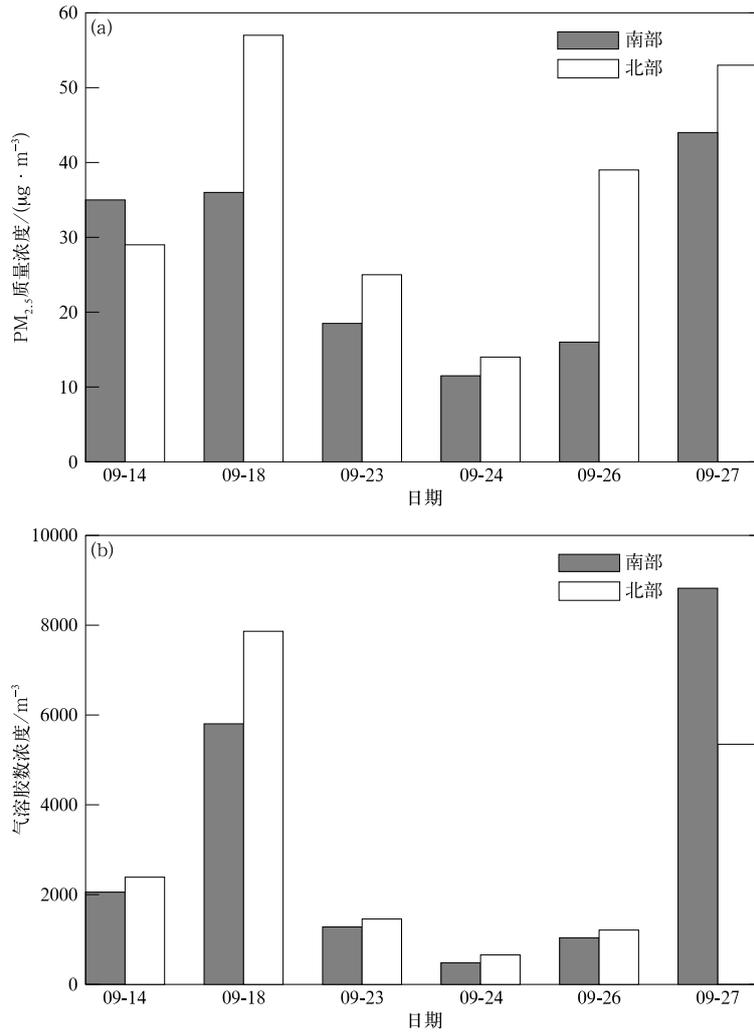


图 7 2017 年 9 月 6 个架次飞机观测深圳南部、北部地面 PM_{2.5} 质量浓度(a)和近地面(100 m)气溶胶数浓度(b)

Fig. 7 The surface PM_{2.5} mass concentration(a) and low-level(100 m) aerosol number concentration(b) for six flights in southern and northern parts of Shenzhen in Sep 2017

2.5 云凝结核活化谱及气溶胶活化效率

2.5.1 云凝结核活化谱

描述 CCN 浓度时,最重要的是其活化谱。在大量测量的基础上提出了许多关于 CCN 浓度的经验公式,其中最常用的是对于过饱和度 S 的幂定律,即

$$N_{\text{CCN}}(S) = CS^k, \quad (1)$$

式(1)中, N 单位为 cm^{-3} ,过饱和度 S 用百分数表示, C 表示 $S=1\%$ 时的粒子的浓度, C 和 k 参数中隐含着气溶胶粒子群尺度或化学成分的信息。

图 8 是根据观测得到的不同过饱和度下 CCN

的数值以及对活化谱的拟合结果,根据资料的完整程度,选取 9 月 18 日、9 月 23 日和 9 月 27 日 3 次过程进行分析。不同过程间活化谱也存在较明显差异。对活化谱参数进行拟合,结果见表 3。分析表明 CCN 的浓度随着过饱和度的增大而增加,9 月 23 日 C 明显小于 9 月 18 和 9 月 27 日,说明 23 日 CCN 含量远低于其他两次过程,这与该架次飞机观测对应的天气和气溶胶来源情况密切相关;同时 23 日 k 也远小于其他 2 次过程。通过与其他地区相关研究(表 3)比较可以看到,深圳 CCN 特征兼有大陆型特征,但不同于严重污染城市, C 除与石家庄差距

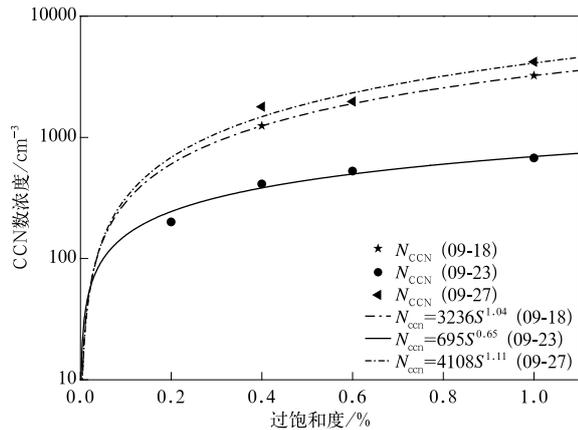


图8 2017年9月深圳地区近地面100 m处CCN活化谱
Fig.8 Activation spectrums of CCN in 100 m height in Shenzhen in Sep 2017

较大以外,与其他城市相当。 k 高于对比地区的观测结果。这也和气溶胶本身的尺度和化学成分的空不确定有很大关系。

2.5.2 气溶胶活化效率

利用观测结果得到的气溶胶数浓度与对应的不同过饱和度下的CCN数浓度进行比较,可以得到,不同过饱和度条件下CCN与气溶胶的比值。该比值表明一定数量的气溶胶中能活化为CCN的百分比,定义为气溶胶活化为CCN的能力即活化效率^[27]。在上述分析活化谱的基础上,可以给出深圳地区不同过饱和条件下气溶胶活化效率的参数化结果,气溶胶活化效率随过饱和度变化的拟合方程见图9。

表3 拟合的CCN活化谱参数以及与其他观测的比较

Table 3 Comparison of parameters C and k for different continental atmospheric regimes

观测地点	时间	C/cm^{-3}	k	类型	出处
澳大利亚帕克斯	1958年春	2000	0.4	大陆型	文献[39]
美国布法罗		3500	0.9	城市型	文献[40]
美国圣迭戈	1976年秋	2500	0.7	污染	文献[41]
巴西亚马逊	2002年秋	2220	1.28	污染	文献[42]
中国石家庄	2005—2007年	16821	0.71	污染	文献[43]
韩国济州岛	2006—2009年	4194	0.47	岛屿	文献[44]
中国内蒙古	2010年	1615	1.42	污染	文献[45]
中国黄山	2012年秋	8895	0.41		文献[46]
中国深圳	2017-09-18	3236	1.04		本文
中国深圳	2017-09-23	695	0.65		本文
中国深圳	2017-09-27	4108	1.11		本文

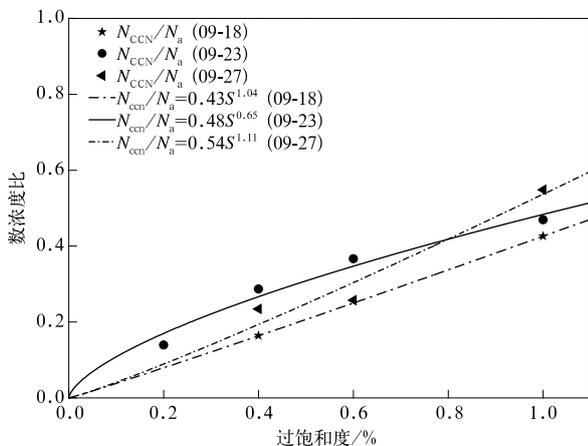


图9 不同过饱和度条件下2017年9月深圳地区近地面100 m处气溶胶活化效率
Fig.9 Ratio of number concentration between CCN and aerosol in different supersaturation in Shenzhen in Sep 2017

3 结论

本文基于2017年9月在深圳上空6个架次飞机观测获取的气溶胶、云及相关气象参数的资料,计算了12组分布在观测点南部、北部的气溶胶数浓度及其谱分布数据,结合天气、气象要素、地面颗粒物观测及气团后向轨迹分析等手段,探讨了珠三角低空气溶胶垂直分布特征及其活化特性。结果表明:

1) 深圳及周边地区低层气溶胶数浓度变化范围较大,在不同天气条件下为 $500 \sim 9000 \text{ cm}^{-3}$ 。50%样本个例在近地面层(不超过1.5 km高度)气溶胶数浓度平均值低于 1000 cm^{-3} ,低于内陆城市观测值。因此,在特定的天气条件下,其低层大气比内陆城市更加清洁。边界层内气溶胶分布相对均

匀,谱型随高度变化与气象条件相关。

2) 根据气溶胶数浓度及谱型将观测样本分为3类。类型I为海洋型气溶胶,数浓度小,粒子尺度大,谱型呈双峰分布;类型III为大陆型气溶胶,数浓度高,粒子尺度小,谱宽较宽且呈三峰分布;类型II为海洋大陆型影响气溶胶,受海洋和大陆共同影响,数浓度低于类型III高于类型I,谱型为双峰分布。

3) 深圳南部、北部气溶胶多为北高、南低,主要原因是其北部更接近珠三角内陆城市群,而南部受海洋影响较大。

4) 分析了2017年9月18日、23日和27日3次过程的近地面(100 m)CCN活化谱及气溶胶活化效率。拟合了CCN的活化谱参数,在9月23日清洁的海洋气溶胶条件下 $C=695 \text{ cm}^{-3}$, $k=0.65$; 9月27日污染条件下 $C=4108 \text{ cm}^{-3}$, $k=1.11$ 。

参 考 文 献

- [1] Andreae M O, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth Sci Rev*, 2008, 89(1/2): 13-41.
- [2] 吴兑. 华南气溶胶研究的回顾与展望. *热带气象学报*, 2003, 19(增刊I): 145-151.
- [3] Li C, Mao J, Lau K H, et al. Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products. *Chin Sci Bull*, 2003, 48(22): 2488-2495.
- [4] 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 利用MODIS卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染. *应用气象学报*, 2004, 25(6): 641-650.
- [5] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Spatial and seasonal variations of atmospheric organic carbon and elemental carbon in Pearl River Delta Region, China. *Atmos Environ*, 2004, 38(27): 4447-4456.
- [6] Wu D, Tie X, Li C, et al. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study. *Atmos Environ*, 2005, 39(35): 6568-6577.
- [7] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究. *应用气象学报*, 2008, 19(1): 1-9.
- [8] 黄健, 吴兑, 黄敏辉, 等. 1954—2004年珠江三角洲大气能见度变化趋势. *应用气象学报*, 2008, 19(1): 61-70.
- [9] Cheng Y F, Wiedensohler A, Eichler H, et al. Aerosol optical properties and related chemical apportionment at Xinken in Pearl River Delta of China. *Atmos Environ*, 2008, 42(25): 6351-6372.
- [10] 林云, 孙向明, 张小丽, 等. 深圳市大气能见度与细粒子浓度统计模型. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 252-256.
- [11] 谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究. *环境科学学报*, 2009, 29(6): 1146-1155.
- [12] Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region. *Sci China (Earth Sciences)*, 2009, 52(8): 1152-1163.
- [13] Deng X J, Jou X J, Wu D, et al. Effect of atmospheric aerosol on surface ozone variation over the Pearl River Delta region. *Sci China (Earth Sciences)*, 2011, 54(5): 744-752.
- [14] 孙天乐, 何凌燕, 黄晓锋, 等. 深圳市冬季黑碳气溶胶的粒径分布和混合态特征. *科学通报*, 2011, 56(21): 1703-1710.
- [15] 杨红龙, 李磊, 杨溯, 等. 深圳城市气溶胶物理光学特性的观测研究. *光子学报*, 2012, 41(12): 1427-1434.
- [16] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 257-269.
- [17] 陈林, 王莉莉, 吉东生, 等. 广州亚运会期间鼎湖山站大气污染特征. *应用气象学报*, 2013, 24(2): 151-161.
- [18] 林楚勇, 邓玉娇, 徐剑波, 等. 基于MODIS的广东省气溶胶光学厚度时空分布特征分析. *热带气象学报*, 2015, 31(6): 821-826.
- [19] Dusek U, Frank G P, Hildebrandt L, et al. Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles. *Science*, 2006, 312(5778): 1375-1378.
- [20] 游来光, 马培民, 胡志晋. 北方层状云人工降水试验研究. *气象科技*, 2002, 30(增刊I): 19-63.
- [21] 严采繁, 陈万奎. 层状云云滴尺度谱分布及其谱参数计算. *应用气象学报*, 1990, 1(4): 352-359.
- [22] 苏正军, 王广河, 刘卫国, 等. 青海省春季降水云的微物理特征分析. *应用气象学报*, 2003, 14(增刊I): 36-40.
- [23] 姚展予, 濮江平, 刘卫国, 等. 飞机探测云物理数据集的建立和应用. *应用气象学报*, 2004, 15(增刊I): 68-74.
- [24] 段婧, 毛节泰. 气溶胶与云相互作用的研究进展. *地球科学进展*, 2008, 23(3): 252-261.
- [25] Liu P, Zhao C, Liu P, et al. Aircraft study of aerosol vertical distributions over Beijing and their optical properties. *Tellus B*, 2009, 61(5): 756-767.
- [26] 马新成, 吴宏议, 嵇磊, 等. 北京春季不同天气条件下气溶胶垂直分布特征. *气象*, 2011, 37(9): 1126-1133.
- [27] Duan J, Chen Y, Guo X. Characteristics of aerosol activation efficiency and aerosol and CCN vertical distributions in North China. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 26(5): 579-596.
- [28] 陈鹏飞, 张蔷, 权建农, 等. 北京上空气溶胶浓度垂直廓线特征. *环境科学研究*, 2012, 25(11): 1215-1221.
- [29] 李军霞, 李培仁, 陶玥, 等. 山西春季层状云系数数值模拟及与飞机探测对比. *应用气象学报*, 2014, 25(1): 22-32.
- [30] Wang W, Ren L H, Zhang Y H, et al. Aircraft measurements of gaseous pollutants and particulate matter over Pearl River Delta in China. *Atmos Environ*, 2008, 42: 6187-6202.
- [31] 游积平, 高建秋, 黄梦宇, 等. 珠江三角洲地区大气气溶胶特征的飞机观测分析. *热带气象学报*, 2015, 31(1): 71-77.
- [32] Fitzgerald W J. Marine aerosols: A review. *Atmos Environ*, 1991, 25(3/4): 533-545.
- [33] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006: 275-290.

- [34] Qiang Z, Quan J, Tie X, et al. Impact of aerosol particles on cloud formation: Aircraft measurements in China. *Atmos Environ*, 2011, 45(3): 665-672.
- [35] 孙霞, 银燕, 孙玉稳, 等. 石家庄地区春季晴、霾天气溶胶观测研究. *中国环境科学*, 2011, 31(5): 705-713.
- [36] 李军霞, 银燕, 李培仁, 等. 山西夏季气溶胶空间分布飞机观测研究. *中国环境科学*, 2014, 34(8): 1950-1959.
- [37] 王维佳, 郭学良, 李宏宇, 等. 基于飞机观测的四川盆地初夏云下气溶胶特征. *干旱气象*, 2018, 36(2): 167-175.
- [38] 孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 等. 海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响. *环境科学*, 2016, 37(7): 2443-2452.
- [39] Twomey S, Squires P. The influence of cloud nucleus population on the microstructure and stability of convective clouds. *Tellus*, 1959, 11: 408-411.
- [40] Kocmond W. Investigation of Warm Fog Properties and Fog Modification Concepts. Annual Report, 1965.
- [41] Sax R I, Hudson J G. Continentality of the South Florida summertime CCN aerosol. *J Atmos Sci*, 1981, 38: 1467-1479.
- [42] Martins J A, Fábio L T G, Morales C A, et al. Cloud condensation nuclei from biomass burning during the Amazonian dry-to-wet transition season. *Meteor Atmos Phys*, 2009, 104: 83-93.
- [43] 段婧. 气溶胶对区域云和降水影响的研究. 北京: 北京大学, 2008.
- [44] Kim J H, Yum S S, Shim S, et al. On aerosol hygroscopicity, cloud condensation nuclei (CCN) spectra and critical supersaturation measured at two remote islands of Korea between 2006 and 2009. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(24): 12627-12645.
- [45] Yang J, Lei H, Lü Y. Airborne observations of cloud condensation nuclei spectra and aerosols over East Inner Mongolia. *Adv Atmos Sci*, 2017, 34(8): 1003-1016.
- [46] Fang S S, Han Y X, Chen K, et al. Parameterization and comparative evaluation of the CCN number concentration on Mt Huang, China. *Atmos Res*, 2016, 181: 300-311.

Aircraft Measurements of Aerosol Vertical Distributions and Its Activation Efficiency over the Pearl River Delta

Duan Jing¹⁾²⁾ Lou Xiaofeng¹⁾²⁾ Chen Yong³⁾ Gao Yang²⁾ Li Xia⁴⁾
Zhou Rongbin⁵⁾ Mao Hui⁶⁾ Lu Guangxian²⁾ Wang Hui²⁾ Lin Junjun⁴⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

³⁾ (State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

⁴⁾ (Guangdong Meteorological Bureau, Guangzhou 510080)

⁵⁾ (Jiangmen Meteorological Bureau of Guangdong Province, Jiangmen 529000)

⁶⁾ (Shenzhen Meteorological Bureau of Guangdong Province, Shenzhen 518040)

Abstract

Based on airborne observations over the Pearl River Delta from 6 flights during 14–27 September 2017, characteristics of low-level vertical distributions (below 3 km) of aerosol and cloud condensation nuclei (CCN) in northern and southern parts of Shenzhen (22 km) is studied. The vertical distribution of aerosol and CCN number concentration and aerosol number concentration spectrum are calculated and analyzed. The weather situation, meteorological conditions and air mass backward trajectory model are used to investigate the aerosol spatial features. Combined with CCN data under different supersaturations conditions, the activation characteristic of aerosol is obtained. Results show that low-level aerosol in Shenzhen varies from 500 to 9000 cm⁻³. About 50% sample points (≤ 1.5 km) of the aerosol average number concentration are lower than 1000 cm⁻³. As a coastal city, Shenzhen's aerosol concentration is lower than inland cities under some weather conditions, with a uniform aerosol distribution within the boundary layer.

Three aerosol types in Shenzhen are summarized according to the main impacting factors, which is ocean (I), land (III) and combined ocean-land (II). Comparing with type III of aerosol, type I has less number concentration and larger size. The aerosol spectrum of pattern I is bimodal distribution, while type III is trimodal distribution. The number concentration of type III is highest and the particle size type III is small. The number concentration of type II is between the type I and III, with a bimodal distribution. Aerosol in northern Shenzhen is higher than that in southern, as northern Shenzhen closed to city cluster of the Pearl River Delta suffering more anthropogenic aerosol impact than that of southern Shenzhen. Activation spectrums of CCN are fitted by 3-flight data including clean and polluted aerosol patterns. Parameters C and k of the empirical function $N_{\text{CCN}}(S) = CS^k$ are 695 and 0.65 under clean conditions (23 September 2017), and their counterparts under polluted conditions are 4108 and 1.11 (27 September 2017). The aerosol activation efficiency which is the ratio of number concentration between CCN and aerosol is calculated under different supersaturations conditions.

Key words: aerosol number concentration; vertical distribution; cloud condensation nuclei; activation spectrum; activation efficiency