

光学学报

基于无人机探测大柴旦地区近地层气溶胶特征

巫阳^{1,2,4}, 罗涛^{2,3,4*}, 刘常瑜^{2,3,4,5}, 张坤^{1,2,4}, 王菲菲^{2,3,4}, 刘娜娜^{2,4},
李学彬^{2,3,4}, 饶瑞中^{1,2,3,4}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

³中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

⁴先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

⁵安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601

摘要 通过改装多旋翼无人机(UAV)和搭载各类载荷以及联合地基观测设备对大柴旦地区大气、环境以及气溶胶参数进行测量。利用获得的数据资料,对该地区近地层气溶胶粒子数浓度(即单位体积空气中气溶胶粒子的数目)、消光系数以及气象要素等特征进行了分析。结果表明,在大柴旦地区,近地层气溶胶粒子数浓度日变化显著,呈现双峰形态,气溶胶粒子数浓度的变化范围为 $75\sim 220\text{ cm}^{-3}$,消光系数的变化范围为 $0.004\sim 0.038\text{ km}^{-1}$;当风速小于 6 m/s 时,气溶胶粒子数浓度与风速呈负相关关系;当风速大于 6 m/s 时,二者呈正相关关系;相对湿度对气溶胶粒子的影响较小,这可能是由于该地区以沙尘型气溶胶为主,吸湿性较弱。本研究基于多旋翼无人机探测平台,可以有效地获得近地层精细化大气、环境结构,有助于研究人员了解该地区气溶胶的结构、变化特征以及建立气溶胶模式,同时也为气溶胶及大气环境参数探测方法提供了技术支撑及思路拓展。

关键词 大气光学; 大气气溶胶; 无人机; 近地层; 气溶胶粒子数浓度; 气象要素

中图分类号 P412

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0601003

UAV-Based Characteristic Detection of Near-Surface Layer Aerosol over Da Qaidam Area

Wu Yang^{1,2,4}, Luo Tao^{2,3,4*}, Liu Changyu^{2,3,4,5}, Zhang Kun^{1,2,4}, Wang Feifei^{2,3,4},
Liu Nana^{2,4}, Li Xuebin^{2,3,4}, Rao Ruizhong^{1,2,3,4}

¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and
Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei,
Anhui 230026, China;

⁴Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

⁵School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract In this research, the atmospheric, environmental, and aerosol parameters of the Da Qaidam area are measured by a modified multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) carrying various types of loads and joint

收稿日期: 2021-08-05; 修回日期: 2021-09-13; 录用日期: 2021-10-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0213101)、国家自然科学基金面上项目(41875041)、安徽省杰出青年科学基金(2008085J19)

通信作者: *luotao@aiofm.ac.cn

ground-based observation equipment. Through the measurement data, this paper analyzes the characteristics of the aerosol particle in the near-surface layers over this area, including aerosol particle number concentration (the number of aerosol particles per unit volume of air), extinction coefficient, and meteorological elements. The results show that in the Da Qaidam area, the number concentration of aerosol particles in the near-surface layers varies significantly in a day and presents a double peak form. The concentration range is $75\text{--}220\text{ cm}^{-3}$, and the extinction coefficient range is $0.004\text{--}0.038\text{ km}^{-1}$. When the wind speed is lower than 6 m/s , the number concentration of aerosol particles is negatively correlated with the wind speed. When the wind speed is greater than 6 m/s , there is a positive correlation between them. Relative humidity has a small influence on aerosol particles, and a possible reason is that the dominant dust-type aerosol in this area is less moisture-absorbing. This research shows that refined atmospheric and environmental structures of the near-surface layers can be effectively detected by the multi-rotor UAV detection platform. This platform can help researchers understand the structure and change characteristics of the aerosol over this area and build aerosol models. It can also provide technical support and ideas for detection methods of aerosol, atmospheric, and environmental parameters.

Key words atmospheric optics; atmospheric aerosol; unmanned aerial vehicle; near-surface layer; number concentration of aerosol particles; meteorological element

1 引言

大气中的固态粒子或液滴分散所构成的悬浮体系被称作大气气溶胶,其对环境质量、辐射平衡、气候变化以及人体健康都有重要影响^[1-2]。在大气中,细颗粒物对人体健康和环境质量影响更大,其主要原因是粒径小(直径小于 $3\text{ }\mu\text{m}$)、有毒有害物质含量高且能够长时间停留于大气中进行远距离输送^[3-4]。同时,气溶胶的吸收与散射能够造成能量的衰减,在天文选址、激光大气传输等自适应光学领域也有着重要的影响^[5-6]。气溶胶的光学特性主要受其物理特征所决定,包括粒子数浓度、粒子谱分布、消光系数和复折射率等^[7]。我国各类地区的地形地貌、环境气候差别大,气溶胶在不同地区的物理特征大不相同,因此,进行不同地区气溶胶的探测分析对气候环境以及光学工程领域都有着重要意义。

近年来,众多学者针对气溶胶粒子数浓度及其所处的地理环境、天气环境开展了一系列研究。目前获得气溶胶参数的主要方法有地基测量、探空气球、飞机航测以及卫星遥感反演等。地基测量仪器主要有光学粒径谱仪、激光雷达和太阳辐射计等。耿蒙等^[8]用中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研发的多通道光学粒子计数器^[9](OPC)对新疆、天津以及合肥地区气溶胶粒子的物理化学特性进行了探测与分析;王菲菲等^[10]用 OPC 探究了沿海地区相对湿度与风速等相关气象要素对气溶胶变化的影响;Chen 等^[11]利用地基激光雷达以及宽范围粒径谱仪(WPS)对 2014 年北京 APEC 会议前中后期天气状况进行了观测;陈莎莎等^[12]基于微脉冲激光雷达数据,提出了一种基于气溶胶标高反演整层大气气溶胶光学厚度的算法;麻晓敏等^[13]利用地基激

光雷达系统对对流层气溶胶进行了探测、反演及统计分析,该雷达系统的集成度较高,能够有效探测到近地面的过渡区和盲区;赵忆睿等^[14]利用紫外多波长激光雷达对河北望都县进行了臭氧和气溶胶的垂直同步观测,发现三波长差分吸收反演算法的结果较双波长反演算法更好,并对该地区的典型污染个例进行了分析。另外,在高空探测方面,Zhang 等^[15]利用飞机搭载大气颗粒物、气溶胶光谱仪,对北京地区边界层气溶胶进行了探测分析;李军霞等^[16-17]利用飞机对山西地区、东北地区进行了气溶胶的航测实验;毛前军等^[18]用 CALIPSO 卫星数据中 2 级气溶胶产品,对 2009—2018 年全球典型区域的气溶胶光学特性(如气溶胶光学厚度、退偏振比及色比等参数)进行了统计分析。

这些探测技术有着实验成本高昂、仪器较大、便携性较差、不能有效地进行三维立体探测以及各类反演方法结果存在不确定性等方面的局限性,而无人机(UAV)灵活方便、能够自主操控、成本低、拓展性强,已经逐渐应用于大气探测、环境监测、遥感等领域^[19-21]。王东生等^[22]对多旋翼无人机探测技术与系留气艇进行了对比实验,Wu 等^[23]对多旋翼无人机探测平台在西藏拉萨地区的适用性进行了分析,验证了无人机平台的可靠性。在气溶胶垂直探测领域,Liu 等^[24]在 2018 年 2—3 月的 23 d 中,利用六旋翼无人机携带 TSI8530 粉尘仪、AE51 黑碳仪以及 TSI7575 室内空气质量检测仪对澳门地区 $\text{PM}_{2.5}$ 、黑碳(BC)以及温度湿度等参数进行垂直测量,从测量数据、大气后向轨迹以及稳定度等方面分析了边界层内污染物的垂直特征及变化规律;Shi 等^[25]利用四旋翼无人机携带 AE51 黑碳仪和 PDR1500 气溶胶检测仪探测了南京地区 BC 以及

PM_{2.5} 的垂直结构,结合 XLS-II 型系留气艇所获得的常规气象参数(温度、湿度等)对 BC 的垂直剖面进行了特征分类,并且评估了污染物对辐射强迫和加热速率的影响。

本研究基于多旋翼无人机,自主设计平台并搭载光学气溶胶粒径谱仪及常规气象参数仪等载荷,结合地基观测设备对大柴旦地区气溶胶、气象参数进行了探测。探究了该典型区域的气溶胶粒子数浓度、消光系数以及气象参数的特征,该研究对后续该地区的大气环境、辐射及气溶胶建模等方面的研究具有参考意义,同时也拓展了气溶胶探测方法,为大气环境探测研究提供新的思路。

2 实验概况

2.1 实验地点

2020 年 8 月,中国科学院合肥物质科学研究院在青海省海西蒙古族藏族自治州大柴旦地区(95.3407°E,37.7428°N)进行了外场实验,其中包括无人机探空、地基观测实验等。该地区位于青海省西北部,柴达木盆地边缘,属于典型的内陆高原荒漠气候,海拔约 3200 m,日照时间充足,干旱少雨,空气干燥。

2.2 实验仪器

实验中利用无人机作为飞行平台,通过携带气溶胶粒径谱仪以及温湿传感器等载荷,测量了近地层气溶胶垂直廓线等;利用地基气象站以及微脉冲激光雷达测量了地面常规气象参数、消光系数等。

2.2.1 无人机平台

测量实验使用六旋翼无人机作为飞行器,在无人机上方,使用长约 1 m 的碳纤维直杆连接 GPS 传感器以及气象参数传感器,实验中无遮挡物,在保证信号强度的同时减小气流对测量数据的影响;通过在无人机下方设置碳纤维吊舱并搭载光学气溶胶粒径谱仪,可以有效降低平台重心并确保无人机的飞行安全。载荷设备与无人机连接处均采用螺丝以及泡沫填充缝隙,这样可减小飞行过程中振动对实验数据的干扰。

在实验场地同一位置进行了 3 d 共 11 个航次的飞行实验,该地区偶有干扰且处于高原地区,电池耗电快,导致各航次升限略有不同。其中,2020 年 8 月 14 日航次 1、2 的最大升限为 300 m,航次 3、5 的最大升限为 400 m,航次 4 的最大升限达到了 450 m,2020 年 8 月 18 日和 8 月 20 日各航次升限均为 300 m;飞机以 1 m/s 的速度匀速上升,达到最

大升限后悬停 15 s,随后以 1 m/s 的速度匀速下降。

表 1 为无人机主要性能参数。无人机的型号为 DJI MATRICE 600 PRO。

表 1 无人机主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of UAV

Parameter	Value
Working temperature /°C	-10~40
Working frequency /GHz	2.400~2.483
Takeoff weight /kg	15.5
Hovering accuracy /m	±0.5 (vertical), ±2 (horizontal)
Maximum ascent speed /($m \cdot s^{-1}$)	5
Maximum decent speed /($m \cdot s^{-1}$)	3
Maximum horizontal flight speed /($m \cdot s^{-1}$)	18 (windless environment)
Diagonal distance (including paddle) /mm	1133
Maximum flight altitude /m	4500

2.2.2 载荷(传感器)

经纬度及高度数据使用 GT-1 型 GPS 高空定位模块进行采集;气象参数系统主要由温湿压传感器集成;温度范围为 -90~50 °C,误差在 0.4 °C 以内;湿度范围为 0%~100%,误差在 5% 以内;气压范围为 $(5 \sim 1060) \times 10^2$ Pa,误差在 100 Pa 以内。

利用美国 Handix Scientific (Boulder, Colorado)公司研发生产的光学气溶胶粒径谱仪(POPS)测量大气气溶胶粒子的物理参量。首先由内置的抽气泵将样本大气和鞘气抽入仪器的光学腔,随后利用采光镜采集样本大气中的颗粒物经过激光束时产生的散射光,将聚焦到光电倍增管的光信号转换成电压,最后通过 Mie 散射理论计算得到颗粒物的粒径。这里将 130~3000 nm 半径范围内的粒子分为 16 档,采样频率控制在 1 Hz。实物及工作原理如图 1 所示。该仪器具有超轻便和高性能等优点,是无人机平台观测气溶胶各类参数的理想工具。

本研究中 GPS 及气象参数数据通过接收机实时传输,POPS 数据存入自带内存。每次航测实验结束后,借助配套软件以及预处理软件将数据导出并整理。

本研究以 30 m 高度为间隔对数据进行等间隔处理,以提高各个参数数据的匹配程度。

2.2.3 地基观测设备

地基观测设备主要由能见度仪、气象站、微脉冲激光雷达组成。

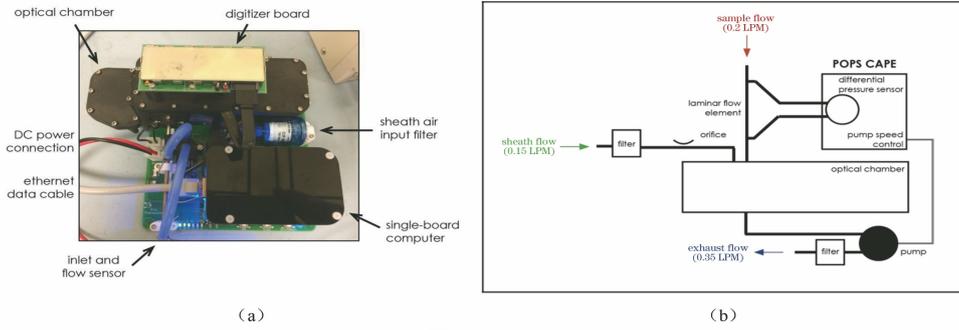


图 1 POPS 仪器图和工作流程^[26]。(a) POPS 核心组件;(b)工作流程图

Fig. 1 Picture of POPS instrument and working flow chart^[26]. (a) Overview of POPS core components; (b) working flow chart

能见度测量使用美国 Belfort 公司生产的 Model 6400 型能见度传感器,该仪器基于前向散射的原理,能够测量 6 m~80 km 范围内的能见度;地面气象参数测量使用芬兰维萨拉公司生产研发的 WXT536 型常规气象参数监测仪,以超声波技术为核心,实现了对大气压力、相对湿度、温度、风速和风向等参数的实时测量;微脉冲激光雷达(MPL)由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制,选用 Nd:YAG 激光器,工作波长为 532 nm,空间分辨率为 30 m,单次测量时间为 5 min,探测范围约为 5~15 km。

3 分析与讨论

3.1 分析方法

3.1.1 气溶胶粒子微物理参量

大气气溶胶粒子的微物理参量包含气溶胶粒子数浓度、有效半径等,可以用来表征大气气溶胶粒子的大小、浓度等。

气溶胶粒子数浓度可表示为

$$N = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} n(r) dr, \quad (1)$$

式中: N 表示单位体积内大气中的粒子总数,单位为 cm^{-3} ; $n(r)$ 表示气溶胶粒子数浓度谱分布函数; r 表示粒子半径; r_{\max} 与 r_{\min} 分别表示粒子半径的最大值和最小值。

气溶胶粒子的有效半径可表示为

$$R_{\text{eff}} = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^3 n(r) dr}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 n(r) dr}, \quad (2)$$

式中: R_{eff} 表示气溶胶粒子的有效半径。粒子有效半径是评估气溶胶辐射效应的重要参数之一^[27]。

3.1.2 气溶胶消光系数算法

本研究使用的 MPL 可以测量 532 nm 的气溶胶后向散射信号。进行消光系数反演之前需要对 MPL 回波信号进行背景噪声订正、距离平方订正和几何因子订正^[28]。其中几何因子订正方法为:选取实验期间晴朗的一天,基于激光雷达进行水平测量,通过水平斜率法^[29]得到激光雷达的几何因子参数。经过订正之后,基于 Fernald^[30]法对回波信号进行消光系数反演,即

$$\alpha_a(R) = -\frac{S_a}{S_m} \alpha_m(R) + \frac{X(R) \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_R^{R_c} \alpha_m(R') dR' \right]}{\alpha_a(R_c) + \frac{S_a}{S_m} \alpha_m(R_c)} + 2 \int_R^{R_c} X(R') \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_R^{R_c} \alpha_m(R'') dR'' \right] dR', \quad (3)$$

式中: R 表示探测距离; $\alpha_a(R)$ 和 $\alpha_m(R)$ 分别表示高度 R 处的大气气溶胶和大气分子消光系数(km^{-1}); S_a 和 S_m 分别表示大气气溶胶和大气分子的后向消光散射比; $X(R)$ 表示高度 R 处 MPL 测量的实际回波信号; R_c 表示标高。一般选择对流层顶几乎没有气溶胶并且大气较为洁净的位置进行测量。

利用后向积分公式[(3)式]即可算出大柴旦地区垂直消光系数廓线,在反演过程中,一般认为气溶胶的尺度谱和成分不随高度变化,仅取决于气溶胶粒子数浓度变化,气溶胶的后向消光散射比为常数,在 20~70 之间变化^[31]。根据已有研究^[32-33],本文反演中气溶胶后向消光散射比 $S_a = 50$;另外,大气

分子后向消光散射比 S_m 是固定常数,为 $8\pi/3^{[1]}$ 。由于 MPL 的回波信号在近距离探测区域中有重叠效应,而订正精度相对较低^[34],本文选取 200 m 高度以上的数据进行处理分析。

3.2 结果分析

3.2.1 大柴旦地区近地面参数日变化特征

在 2020 年 8 月 18—20 日,利用 POPS 以及地面设备进行了地基测量。图 2 显示了大柴旦地区该时段气溶胶粒子数浓度、能见度、温度以及湿度的时序图。可以看出 4 种参数都有较明显的日变化特征。气溶胶粒子数浓度总体在 $80\sim 180\text{ cm}^{-3}$ 之间,在每晚 20:00 左右气溶胶粒子数浓度处于最低,随

后增大;在夜间以及清晨(00:00—06:00 左右)气溶胶粒子数浓度较稳定,起伏不大,在早晨到上午(06:00—10:00)气溶胶粒子数浓度随着时间的推移而增加,午后至傍晚(12:00—20:00)开始减小,在 20:00 左右达到最低值,形成日变化循环,呈现双峰特征。经初步推断分析可得出出现上述现象的原因是:大柴旦地区工业稀少,在早晨,热对流运动或湍流运动较弱,气溶胶粒子向上输送条件形成不充分,故气溶胶粒子数浓度较高;随着温度的升高,大气对流充分,加快了气溶胶粒子的扩散消除,气溶胶粒子数浓度逐渐降低;傍晚温度降低,昼夜交替时分,混合层高度降低,故气溶胶粒子数浓度再次呈上升趋势。

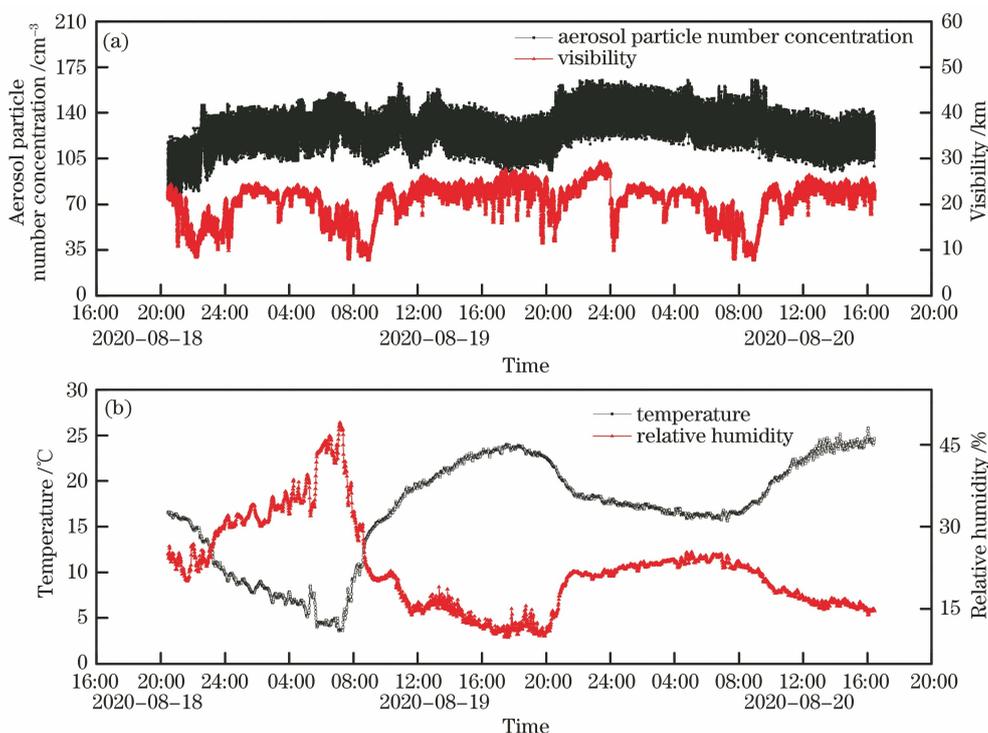


图 2 大柴旦地基气溶胶粒子数浓度、能见度、温度及相对湿度时序变化图(2020-08-18 至 2020-08-20)。

(a)气溶胶粒子数浓度和能见度;(b)温度和相对湿度

Fig. 2 Land-surface aerosol particle number concentration, visibility, temperature, and relative humidity in Da Qaidam (from 2020-08-18 to 2020-08-20). (a) Aerosol particle number concentration and visibility; (b) temperature and relative humidity

研究表明,能见度变化趋势对污染物的变化有较好的指示作用,Chen 等^[35]于 2009 年夏季在天津武清地区开展了观测实验,利用实验获得的能见度、相对湿度、气溶胶粒子数浓度、粒径大小等参数建立了能见度参数化模型。结果显示,在相对湿度低于 90% 时,气溶胶粒子数浓度的变大是能见度降低的主导因素;在相对湿度高于 90% 时,能见度降低主要是由于湿度增加。另外,利用参数化模型计算出的消光系数与实测消光系数较好地吻合,这验证了该模型的可靠性。刘兆东等^[36]探究了京津冀地区

不同相对湿度下污染物浓度对能见度的影响,在相对湿度低于 70% 时,PM_{2.5} 升高是能见度降低的主导因素;相对湿度在 70~85% 之间时,能见度降低是由相对湿度和浓度升高共同作用导致;相对湿度在 85% 以上时,PM_{2.5} 浓度与能见度的相关性减弱,能见度更多依赖相对湿度;相对湿度在 95% 以上时,水汽饱和状态下雾滴消光引起能见度下降,能见度下降与 PM_{2.5} 的关系不大。龙凤翔等^[37]在桂林地区进行了相关实验,结果显示中等湿度(相对湿度为 60%~70%)条件下颗粒物浓度对大气能见度

影响较大,且细粒子占主导作用,并且风速与能见度之间也有良好的相关性。王继康等^[38]利用我国部分城市气象站点数据对相对湿度、能见度和 $PM_{2.5}$ 进行相关分析,结果表明相对湿度为 40%~80% 时, $PM_{2.5}$ 与能见度显著相关;北京地区在相对湿度为 20%~90% 时,能见度与 $PM_{2.5}$ 的相关性能够达到 0.9,在相对湿度超过 90% 后,相关系数明显下降,呈现雾的特征;广州地区在相对湿度超过 80% 时相关性就开始显著下降。综合已有研究表明,在低中湿度(相对湿度为 20%~70%)条件下气溶胶粒子对大气能见度的影响占主要作用,相对湿度和风速为次要作用;在高湿度(相对湿度大于 80%)条件下,水汽逐渐饱和,这是由雾引起能见度下降造成的。

在大柴旦地区,温度变化范围为 2~25 °C,昼夜温差大,该地区处于西北地区,与北京时间约有 2 h 时差,每天 06:00 左右温度处于最低,随后开始升温,约 16:00 左右处于当天最高温度。相对湿度与温度呈现良好的负相关性,由于 2020 年 8 月 19 日 06:00—08:00 时段温度较低,处于热量转换时刻,水汽含量增大,相对湿度在此阶段是整个实验过程中最大的,在 22%~27% 之间。其余时间该地区的相对湿度均在 20% 以下,该地区环境非常干燥。而能见度与温度和湿度的关系不明显,并且由于该地区的相对湿度较低,根据前人的研究,引起大气能见度变化的主要因素是气溶胶粒子数浓度。能见度在清晨(06:00—09:00)持续减小,在每日 09:00 左右

处于最小值,随后升高,在白天(10:00—20:00)和夜间(24:00—06:00)较为稳定且能见度较高,在 2020 年 8 月 19 日 20:00—24:00 时段,能见度升高并且达到了实验期间的最大值。能见度与气溶胶粒子数浓度每天的变化特征有一定的负相关性,当气溶胶粒子数浓度增大时,该时段能见度降低,当气溶胶粒子数浓度较为稳定时,能见度也比较稳定。

图 3 为 2020 年 8 月 18—20 日大柴旦地面气溶胶粒子数浓度与风速的关系图。可以看出,大柴旦地面的风速范围为 0~11 m/s,大多处于 1~5 m/s 左右,极少数超过 10 m/s;而气溶胶粒子数浓度范围为 80~180 cm^{-3} ;在几乎静风条件下,气溶胶粒子数浓度均处于该时段较高值,随着风速的增大,气溶胶粒子数浓度会呈现出降低的趋势。在大柴旦无人机各航次实验前,测量了起飞前 5 min 的地面浓度以及风速,图 4 表示了各航次起飞前 5 min 平均气溶胶粒子数浓度以及平均风速。可以看出,在 2020 年 8 月 14 日 5 个航次的飞机起飞前,风速在 0.32~3.5 m/s 范围内逐渐增大,气溶胶粒子数浓度也从 210 cm^{-3} 左右降低至 94 cm^{-3} 左右;而在 2020 年 8 月 18 日航次 1 与航次 2 中,飞机起飞前风速较大,都在 6.5 m/s 以上,气溶胶粒子数浓度反而随风速的增加而增大,航次 3 中飞机起飞前风速降至 3 m/s 左右,气溶胶粒子数浓度较前两个航次有所降低;在 2020 年 8 月 20 日的三个航次中,风速都稳定在 3~5 m/s,此时,气溶胶粒子数浓度随风速的增大而减小。

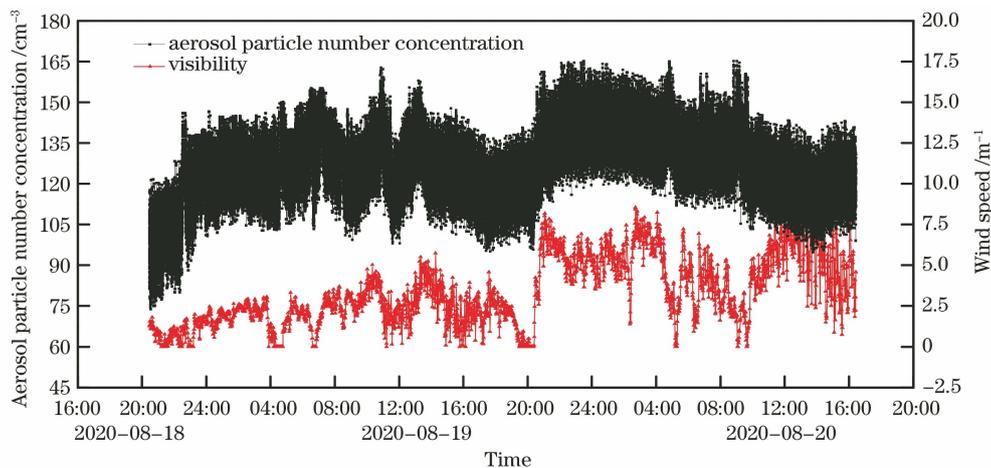


图 3 大柴旦地基气溶胶粒子数浓度和风速的时序变化图(2020-08-18 至 2020-08-20)

Fig. 3 Land-surface aerosol particle concentration and wind speed in Da Qaidam (from 2020-08-18 to 2020-08-20)

整体看来,在大柴旦地区,当近地面风速小于 6 m/s 时,气溶胶粒子数浓度与风速呈现负相关,风速越大,气溶胶消散越快,气溶胶粒子数浓度越低;

当风速大于 6 m/s 时,气溶胶粒子数浓度随着风速的增大而增大,二者呈现正相关,这可能是由于实验场地处于戈壁滩上,在高风速情况下,地面扬尘、灰

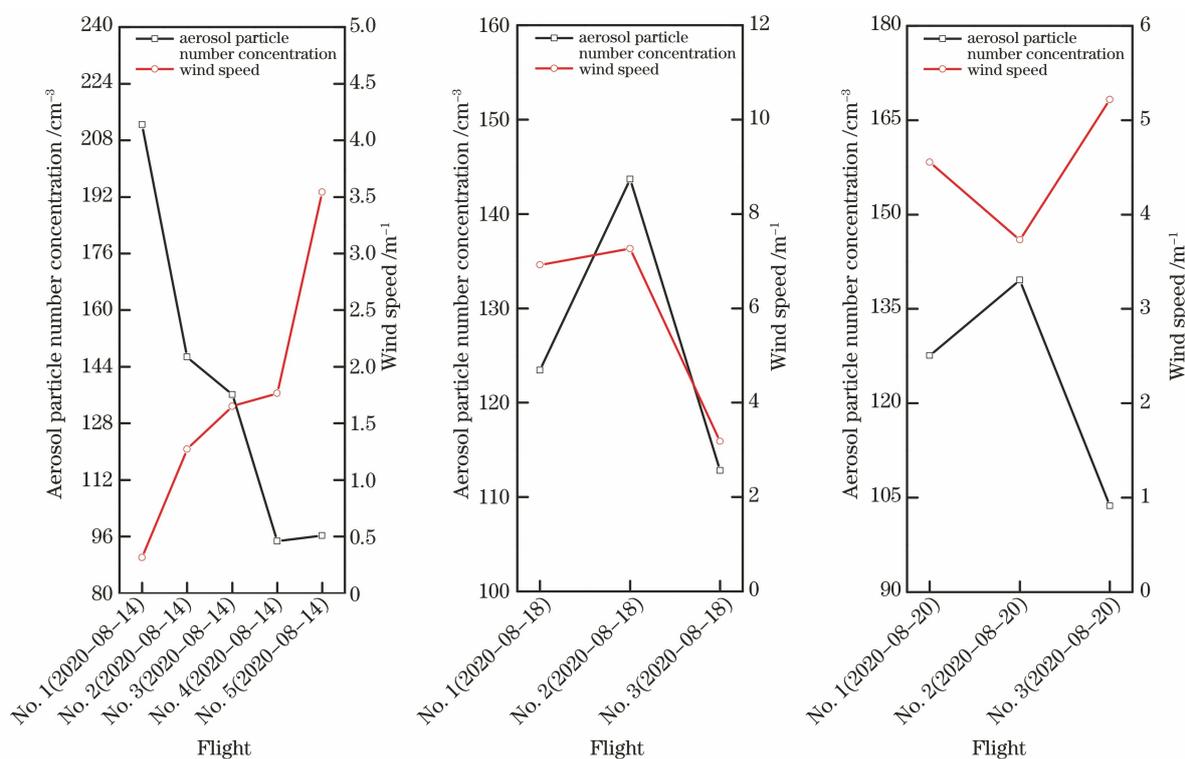


图 4 无人机各航次起飞前地面气溶胶粒子数浓度与风速的关系图

Fig. 4 Land-surface aerosol particle number concentration and wind speed before UAV takeoff of each flight

土等大粒子被大风吹起,导致气溶胶粒子数浓度增大。陈渭南等^[39]利用观测资料建立塔克拉玛干沙漠地区不同高度的起沙风速,在 2 m 高度的起沙风速约为 5 m/s,在 11 m 高度的起沙风速约为 7 m/s;朱好等^[40]利用浑善达克沙地、黄土高原以及戈壁地区的气象资料及沙尘暴资料计算出三种地区起沙的临界风速,其中浑善达克沙地起沙的临界风速约为 10 m/s,黄土高原南风情况下起沙的临界风速约为 10 m/s,西北风风向向下临界风速为 6 m/s,戈壁(甘肃张掖)地区起沙的临界风速也为 6 m/s;申彦波等^[41]利用观测的沙尘浓度、能见度、摩擦速度和风速间的关系估算了敦煌戈壁地区起沙的临界风速为 7 m/s。综合已有研究表明,本文结果与前人研究的结果较为一致,在大柴旦地区,近地面风速较小(小于 6 m/s)时,风速的增加会促进局地气溶胶的扩散、输运,从而降低近地层气溶胶粒子数浓度;而当风速大于起沙风速(~ 6 m/s)时,风速的增加会促使近地层沙尘气溶胶的产生,从而提高近地层气溶胶粒子数浓度。

3.2.2 大柴旦地区气溶胶粒子数浓度及其他参数垂直特征分析

利用无人机平台携带各类载荷在大柴旦地区进行无人机航测实验,各航次时间及地面天气情况如

表 2 所示。

图 5(a)~(d)分别表示了实验期间各航次的气溶胶粒子数浓度、消光系数、温度以及相对湿度的垂直廓线。从图 5(a)中可以看出,在 3 d 的飞行实验中,由于航次较多且各航次间隔时间较长,近地层气溶胶粒子数浓度会随着当天航行时间的推移而逐渐减小,这与地面气溶胶粒子数浓度日变化特征趋于一致。该地区近地层气溶胶粒子数浓度在 $75 \sim 220 \text{ cm}^{-3}$ 之间;后两日的气溶胶粒子数浓度明显小于第一日,天气状况显示 2020 年 8 月 16 日有降雨过程,降雨对气溶胶有一定的消除作用。在 2020 年 8 月 14 日、18 日(航次 1,2)以及 20 日中,气溶胶粒子数浓度在地面处于最大,随着高度的增加,气溶胶粒子数浓度整体处于振荡减小的趋势。只有在 2020 年 8 月 18 日航次 3 中,气溶胶粒子数浓度随高度的增加而增大,这是由于当天最后一次航行时温度下降较快,近地层湿度较大,近地层湍流能量降低不利于气溶胶扩散,使气溶胶粒子数浓度增加。从 2020 年 8 月 14 日航次 1 的数据可以明显看出在 120~180 m 处气溶胶粒子数浓度显著增大;图 5(b)是利用地基微脉冲激光雷达反演得到的各航次的气溶胶消光系数,可以看出,大柴旦近地层气溶胶消光系数也与气溶胶粒子数浓度一样,有较明显的

日变化趋势,并且与粒子数浓度廓线有良好的负相
关系,整体消光系数在 $0.004 \sim 0.038 \text{ km}^{-1}$ 之

间,消光系数随高度的增加而减小,约在 400 m 达
到峰值,随后开始增大,呈现出“<”的形状。

表 2 大柴旦无人机航测时间表及地面天气情况

Table 2 UAV flight schedule and meteorology in Da Qaidam

Region	Date	Flight	Time	Weather	Temperature / °C	Relative humidity /%	Wind speed / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Wind direction /($^{\circ}$)
Da Qaidam	2020-08-14	No. 1	09:21-09:37	Sunny	14.5	59.7	0.88	262.88
		No. 2	11:21-11:32	Sunny	15.5	58.2	1.32	61.49
		No. 3	11:38-11:49	Sunny, cloudy	16.1	62.1	1.48	66.70
		No. 4	15:11-15:22	Sunny, cloudy	22.5	29.5	1.78	254.78
	2020-08-18	No. 5	15:28-15:39	Sunny, cloudy	22.1	34.2	3.48	281.48
		No. 1	11:10-11:26	Sunny, cloudy	16.0	33.0	5.80	89.06
		No. 2	16:44-16:54	Sunny, cloudy	20.9	34.5	7.20	263.93
		No. 3	19:59-20:09	Sunny, cloudy	18.1	49.5	3.00	296.67
	2020-08-20	No. 1	16:39-16:50	Cloudy	24.3	31.3	4.50	171.85
		No. 2	17:11-17:21	Cloudy	24.5	32.4	3.50	154.12
		No. 3	19:57-20:08	Cloudy	23.0	45.1	5.00	135.35

图 5(c)、(d)分别为各航次温度与相对湿度的
垂直廓线。可以看出,该地区的温度日变化强烈,温
度范围为 $10 \sim 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度范围为 $30\% \sim 80\%$;
温度整体上随高度的增加而减小,相对湿度整体上
则随高度的增加而变大;温度、相对湿度随航次时间

的推移而变化,时间间隔越长,变化范围越大,且二
者的变化与地基测量的日变化较为一致。同时,相
对湿度垂直廓线与温度垂直廓线呈现负相关,温度
越高相对湿度越低,这在实验过程中均有体现,其中
在 2020 年 8 月 18 日航次 3 中,在 $0 \sim 100 \text{ m}$ 范围,

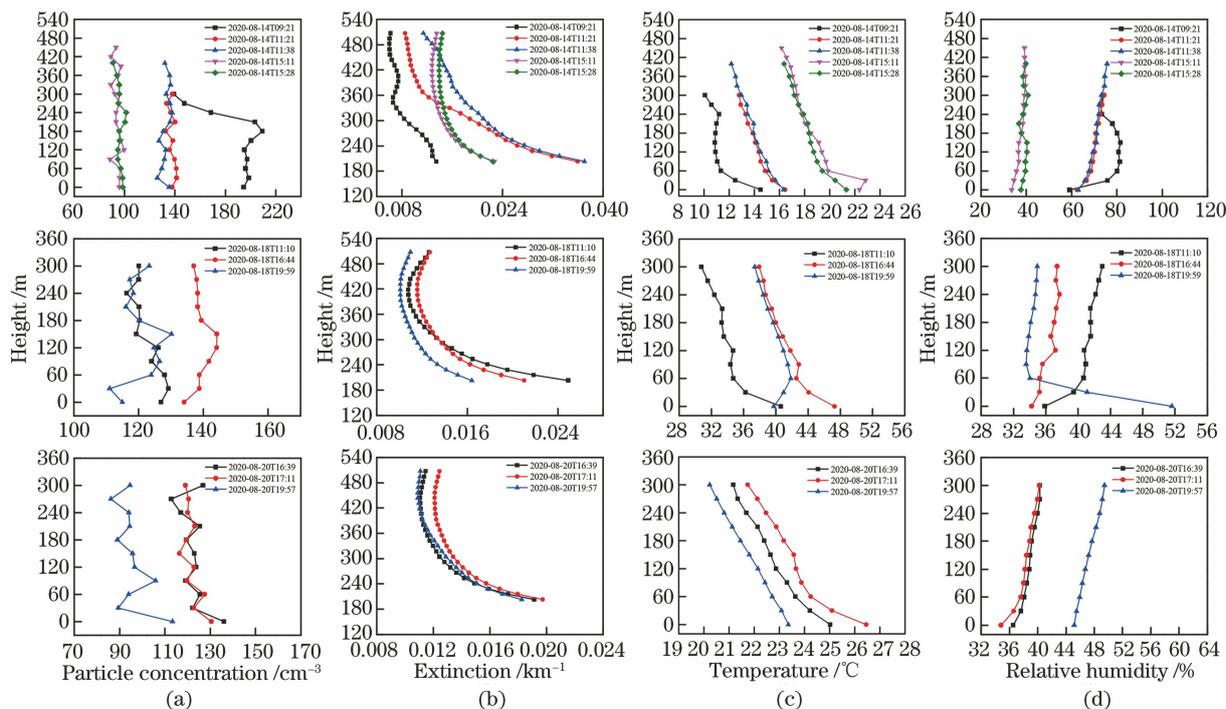


图 5 大柴旦气溶胶粒子数浓度、消光系数、温度及相对湿度垂直分布廓线。

(a)气溶胶粒子数浓度;(b)消光系数;(c)温度;(d)相对湿度

Fig. 5 Vertical distribution profiles of aerosol particle number concentration, extinction coefficient, temperature, and relative humidity in Da Qaidam. (a) Aerosol particle number concentration; (b) extinction coefficient; (c) temperature; (d) relative humidity

温度随高度的增加而升高,相对湿度减小,推断这是由于航次 3 时间为晚间 20:00 左右,处于昼夜交替阶段,近地面热量交换导致局部环流不稳定。同时可以观察到,2020 年 8 月 14 日航次 1 中出现了一次较强的近地层逆温过程,从温度廓线上可以看出 240 m 左右存在一个较强的逆温层,由于航次 1 的时间为 09:21,该时间段属于该地区早晨阶段,大气热对流较弱,受到该逆温层的限制,240 m 以下相对湿度较大,气溶胶运输扩散也受到抑制,240 m 以下

气溶胶粒子数浓度也较高。

实验期间 MPL 连续观测结果见图 6,其中右侧纵轴色标表示 MPL 实测回波光子数的信号值。可以明显看出,在近地层 0~500 m 范围内,气溶胶整体混合较为均匀。白天气溶胶明显增多,与日变化特征一致,整体较为均匀;同时 0.5~3 km 高度范围内有局地向上输送的气溶胶,也有外来源输入的气溶胶,形成了气溶胶均匀的混合层。

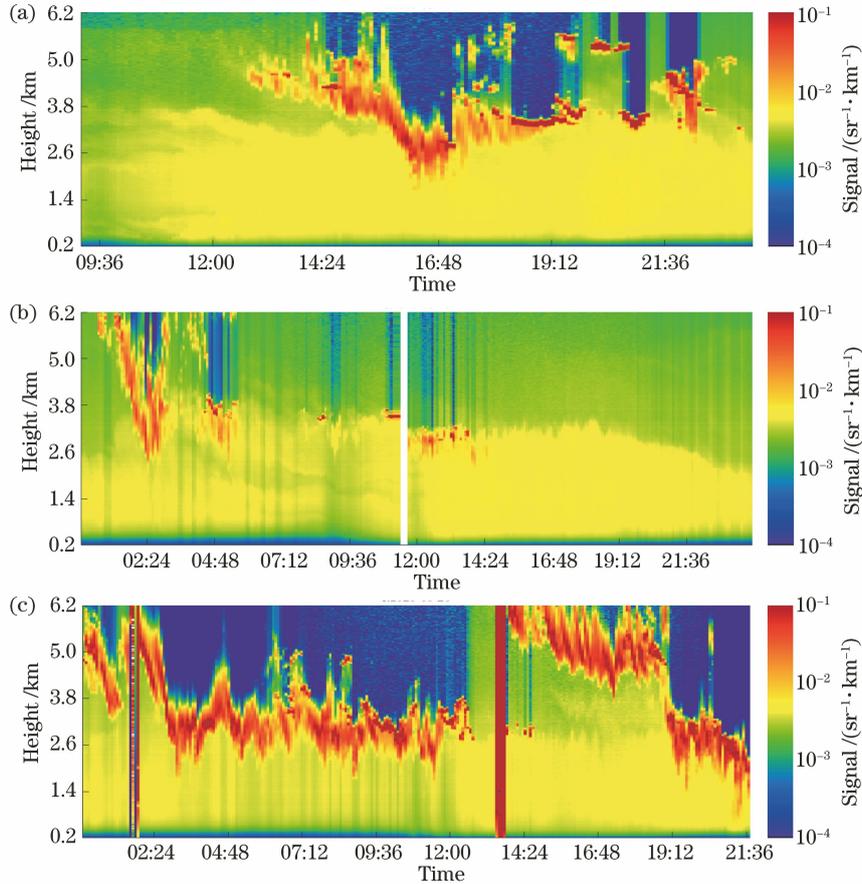


图 6 大柴旦地基微脉冲激光雷达实测图。(a) 2020-08-14;(b) 2020-08-18;(c) 2020-08-20

Fig. 6 Measured data of MPL in Da Qaidam. (a) 2020-08-14; (b) 2020-08-18; (c) 2020-08-20

3.2.3 气溶胶垂直差异特征分析

本节引入变异系数来进一步分析各高度层的气溶胶粒子数浓度分布情况。变异系数是衡量观测数据变异程度的一个统计量,为标准差与平均数的比值。在进行多个数据变异程度比较时,若数据单位与平均数相同,可以直接用标准差进行比较;而数据单位与平均数不同时,则需用变异系数进行比较。变异系数可以消除数据单位和平均数不同而导致的对多个资料变异程度比较的影响,其计算公式为

$$C_v = \frac{S_D}{M_N} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: S_D 表示标准差; M_N 表示平均值。

根据变异系数的含义,在各航次实验中,同一高度层内的气溶胶粒子数浓度的变异系数越小,表明该层的气溶胶水平分布均一性越好。图 7 表示了大柴旦地区变异系数的情况(地面以沙尘颗粒为主,故选取 60 m 及以上高度进行分析)。

在大柴旦 2020 年 8 月 14—18 日的航次中,变异系数整体都是随着高度的增加而减小;整个实验过程中,变异系数多在 5%~15% 之间,但是可以明显看出 180~240 m 这一层内变异系数均超过了 10%,最大约 18%。这可能是由于 180~240 m 高

度层的大气活跃度较其余高度要强。其中,2020 年 8 月 14 日航次 1 中,变异系数随高度的增加而变大,3.3.2 节可以得出该日近地层有一次较强的逆温过程,逆温层以下气溶胶变异系数较小,逆温层及以上也对应着气溶胶粒子数浓度的强梯度层,气溶胶粒子数浓度变化较大,相应的变异系数也较大的结论。2020 年 8 月 18 日航次 3 中,近地面变异系

数较大,其余高度的变异系数较为稳定,这可能是由于临近傍晚,温度逐渐降低,大气活跃度降低,近地层出现了强稳定层,气溶胶粒子数浓度随高度具有较大的变化;2020 年 8 月 20 日整体变异系数的变化较大,而当时近地面风速处于起沙的临界风速,气溶胶源和垂直输送会造成气溶胶粒子数浓度不稳定。

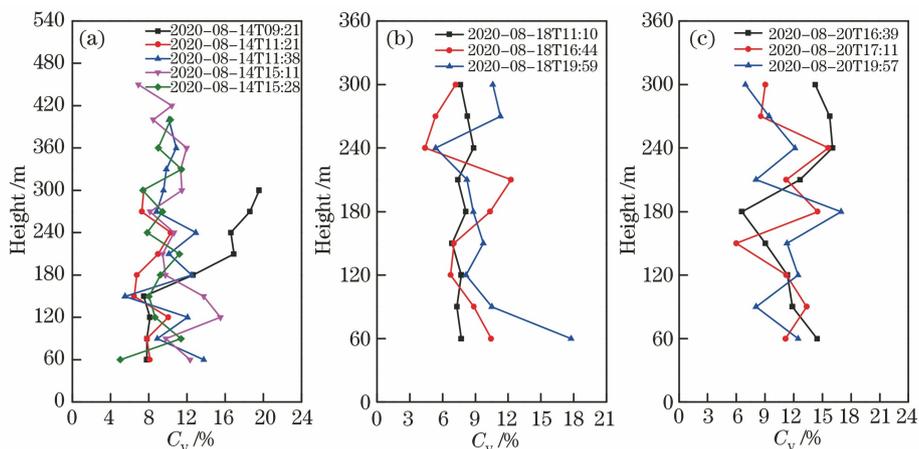


图 7 大柴旦气溶胶粒子数浓度的变异系数廓线。(a) 2020-08-14;(b) 2020-08-18;(c) 2020-08-20

Fig. 7 C_v of aerosol particle number concentration in Da Qaidam. (a) 2020-08-14; (b) 2020-08-18; (c) 2020-08-20

4 结 论

结合多旋翼无人机和地基观测数据,对大柴旦地区气溶胶粒子数浓度、消光系数和气象参数的特征进行了研究,得到的主要结论如下。

在大柴旦地区,近地面气溶胶粒子数浓度有明显的日变化特征,呈现双峰特征。近地面气溶胶粒子数浓度与风速存在较为明显的相关性。当近地面风速小于 6 m/s 时,气溶胶粒子数浓度与风速呈现负相关,风速越大,气溶胶消散越快,气溶胶粒子数浓度越低;当风速大于 6 m/s 时,气溶胶粒子数浓度会随着风速的增大而增大,呈现正相关,可初步推断该地区起沙的临界风速在 6 m/s 左右。

在垂直结构上,大柴旦地区 500 m 以下近地层气溶胶粒子数浓度处于 $75 \sim 220 \text{ cm}^{-3}$ 之间,地面的气溶胶粒子数浓度最大。随着高度的增加,气溶胶粒子数浓度整体处于振荡减小趋势。近地层气溶胶粒子数浓度的变异系数整体较小,在 $5\% \sim 15\%$ 之间,当出现较为稳定的近地逆温层时,气溶胶粒子数浓度及其变异系数的高度分布会产生显著变化。

通过微脉冲雷达也可以得出大柴旦近地层气溶胶有显著的日变化特征,并且气溶胶消光系数与粒子数浓度有良好的负相关关系的结论。整体消光系

数在 $0.004 \sim 0.038 \text{ km}^{-1}$ 之间,先减小后增大,在 $0.5 \sim 3 \text{ km}$ 处有明显的均匀混合层。

本研究对粒子近地层气溶胶粒子数浓度、消光系数、粒子谱以及常规气象参数进行了特征分析,对该地区的气象模式预报、环境决策支撑、大气辐射传输以及气溶胶模型的建立具有一定的参考意义。另外,本研究表明无人机平台搭载载荷可以有效测量近地层范围内多种大气和环境要素参数,并且有着小巧灵活、成本低、分辨率高、拓展性强等优势。利用无人机平台获取精确的大气近地层气溶胶、温湿压等特性,有助于了解、解释边界层(尤其是近地层)内气溶胶的发生和消散,以为相关部门提供决策支撑。研究中也发现该平台有不足之处:1)续航时间不够长,无法在高空进行长时间悬停观测;2)无人机有载重限制,无法搭载更大、更多类型的载荷,导致观测参数有限;3)空域申请、管制以及安全等因素也限制了无人机的飞行高度及航行时间。今后将进一步探究延长无人机的续航时间以及传感器的优化配置,力争在多点、长时、悬停测量的同时,尽可能获得更多大气环境参数。

参 考 文 献

- [1] Rao R Z. Modern atmospheric optics [M]. Beijing: Science Press, 2012: 87-94, 577-583.

- 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 87-94, 577-583.
- [2] Liao K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. Guo C L, Zhou S J, Transl. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
廖国男. 大气辐射导论[M]. 郭彩丽, 周诗健, 译. 第二版. 北京: 气象出版社, 2004.
- [3] Gao M, Guttikunda S K, Carmichael G R, et al. Health impacts and economic losses assessment of the 2013 severe haze event in Beijing area[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 553-561.
- [4] Xue T, Liu J, Zhang Q, et al. Rapid improvement of PM_{2.5} pollution and associated health benefits in China during 2013—2017 [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2020, 50(4): 441-452.
薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013—2017年中国PM_{2.5}污染的快速改善及其健康效益[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(4): 441-452.
- [5] Rao R Z, Qiao Y L, Wei H L, et al. Research and application on optical properties of atmosphere in typical regions of China[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 401-408.
饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 等. 中国典型地区大气光学特性及其应用[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 401-408.
- [6] Han Y, Wang T J, Rao R Z, et al. Progress in the study of physic-optics characteristics of atmospheric aerosols[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(11): 7396-7407.
韩永, 王体健, 饶瑞中, 等. 大气气溶胶物理光学特性研究进展[J]. *物理学报*, 2008, 57(11): 7396-7407.
- [7] Levoni C, Cervino M, Guzzi R, et al. Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(30): 8031-8041.
- [8] Geng M, Li X B, Qin W B, et al. Research on the characteristics of aerosol size distribution and complex refractive index in typical areas of China[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0311001.
耿蒙, 李学彬, 秦武斌, 等. 典型地区大气气溶胶谱分布和复折射率特征研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0311001.
- [9] Li X B, Gao Y Q, Wei H L, et al. Development of optical particle counter with double scattering angles [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1528-1534.
李学彬, 高亦桥, 魏合理, 等. 双散射角光学粒子计数器的研制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1528-1534.
- [10] Wang F F, Li X B, Zheng X M, et al. Effect of relative humidity and wind speed on marine atmospheric aerosol particle size distribution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): 83-88.
王菲菲, 李学彬, 郑显明, 等. 相对湿度和风速对海洋大气气溶胶粒子谱的影响[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(S1): 83-88.
- [11] Chen Z Y, Zhang J S, Zhang T S, et al. Haze observations by simultaneous lidar and WPS in Beijing before and during APEC, 2014 [J]. *Science China Chemistry*, 2015, 58(9): 1385-1392.
- [12] Chen S S, Xu Q S, Xu C D, et al. Calculation of whole atmospheric aerosol optical depth based on micro-pulse lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0701002.
陈莎莎, 徐青山, 徐赤东, 等. 基于微脉冲激光雷达计算整层大气气溶胶光学厚度[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0701002.
- [13] Ma X M, Tao Z M, Shan H H, et al. Statistical distribution of extinction coefficients of tropospheric aerosols detected by lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101003.
麻晓敏, 陶宗明, 单会会, 等. 激光雷达探测对流层气溶胶消光系数的统计分布[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1101003.
- [14] Zhao Y R, Cao N W, Jia P C, et al. Simultaneous observation of ozone and aerosol by ultraviolet multi-wavelength lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 59(16): 1601001.
赵忆睿, 曹念文, 贾鹏程, 等. 紫外多波长激光雷达的臭氧和气溶胶同步观测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 59(16): 1601001.
- [15] Zhang Q, Zhao C S, Tie X X, et al. Characterizations of aerosols over the Beijing region: a case study of aircraft measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(24): 4513-4527.
- [16] Li J X, Yin Y, Li P R, et al. Aircraft measurements of aerosol spetial distribution properties in Shanxi Province in summer [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8): 1950-1959.
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[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(8): 1950-1959.
- [17] Mu J S, Zhu Y J, Shan Y, et al. Aircraft measurements of summer atmospheric particle number concentration and size distribution in Northeast China[J]. *Geochimica*, 2020, 49(3): 324-333.
牟江山, 朱玉姣, 单业, 等. 东北地区夏季大气颗粒物数浓度与粒径分布特征的航测研究[J]. *地球化*

- 学, 2020, 49(3): 324-333.
- [18] Mao Q J, Jin S S, Zhang H X. Research on aerosol optical properties of typical areas of the world based on CALIPSO satellite remote sensing data [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 2428002.
毛前军, 金穗穗, 张恒星. 基于 CALIPSO 卫星遥感数据的全球典型区域气溶胶光学特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(24): 2428002.
- [19] Witte B, Singler R, Bailey S. Development of an unmanned aerial vehicle for the measurement of turbulence in the atmospheric boundary layer [J]. *Atmosphere*, 2017, 8(10): 195.
- [20] Jacob J, Chilson P, Houston A, et al. Considerations for atmospheric measurements with small unmanned aircraft systems [J]. *Atmosphere*, 2018, 9(7): 252.
- [21] Wang Y, Sun J, Liu Y, et al. Application of multi-rotor unmanned aerial vehicle in meteorological service [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2018, 35(3): 40-42.
王洋, 孙姣, 刘羿, 等. 多旋翼无人飞行器在气象业务中的应用 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2018, 35(3): 40-42.
- [22] Wang D S, Peng Z R, Li B, et al. Vertical atmospheric structure observation technology based on multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) platform [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(6): 35-40.
王东生, 彭仲仁, 李白, 等. 基于多旋翼无人机平台的大气 PM_{2.5} 垂直结构观测技术 [J]. *装备环境工程*, 2019, 16(6): 35-40.
- [23] Wu Y, Luo T, Zhang K, et al. Applicability analysis of multi-rotor UAV to detect meteorological elements in the near-surface layer over the Tibetan Plateau [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11455: 114557C.
- [24] Liu B, Wu C, Ma N, et al. Vertical profiling of fine particulate matter and black carbon by using unmanned aerial vehicle in Macao, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136109.
- [25] Shi S S, Zhu B, Lu W, et al. Estimation of radiative forcing and heating rate based on vertical observation of black carbon in Nanjing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 144135.
- [26] Gao R S, Telg H, McLaughlin R J, et al. A lightweight, high-sensitivity particle spectrometer for PM_{2.5} aerosol measurements [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2016, 50(1): 88-99.
- [27] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- [28] Campbell J R, Hlavka D L, Welton E J, et al. Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at atmospheric radiation measurement program sites: instruments and data processing [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(4): 431-442.
- [29] Sasano Y, Shimizu H, Takeuchi N, et al. Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination [J]. *Applied Optics*, 1979, 18(23): 3908-3910.
- [30] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [31] Ackermann J. The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: a numerical study [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(4): 1043-1050.
- [32] Yang H, Liu W Q, Liu J G, et al. Urban planetary boundary layer aerosol monitoring by lidar at Beijing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1255-1259.
杨辉, 刘文清, 刘建国, 等. 激光雷达监测北京城区夏季边界层气溶胶 [J]. *中国激光*, 2006, 33(9): 1255-1259.
- [33] Chen T, Zhao Y J, Liu D, et al. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0514001.
陈涛, 赵玉洁, 刘东, 等. 微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0514001.
- [34] Xu C D, Ji Y F. Research and application of MPL-A1/T micro pulse lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(5): 337-343.
徐赤东, 纪玉峰. MPL-A1/T 型微脉冲激光雷达的研制与应用 [J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(5): 337-343.
- [35] Chen J, Zhao C S, Ma N, et al. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(11): 4935-4950.
- [36] Liu Z D, Wang H, Shen X Y, et al. Multiple regression analysis of winter visibility, PM_{2.5} concentration and humidity in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(4): 679-690.
刘兆东, 王宏, 沈新勇, 等. 京津冀及周边地区冬季能见度与 PM_{2.5} 浓度和环境湿度的多元回归分析 [J]. *气象学报*, 2020, 78(4): 679-690.
- [37] Long F X, Zhang Y L. Relationship between atmospheric visibility and particulate matter concentration and meteorological parameters in Guilin urban area [J]. *Journal of Meteorology and*

- Environment, 2020, 36(1): 21-27.
- 龙凤翔, 张瑀琳. 桂林城区大气能见度与颗粒物浓度和气象因子关系研究 [J]. 气象与环境学报, 2020, 36(1): 21-27.
- [38] Wang J K, Zhang H D, Gui H L, et al. Relationship between atmospheric visibility and $PM_{2.5}$ concentrations and distributions [J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 2985-2993.
- 王继康, 张恒德, 桂海林, 等. 能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度关系及其分布特征 [J]. 环境科学, 2019, 40(7): 2985-2993.
- [39] Chen W N, Dong Z B, Yang Z T, et al. Threshold velocities of sand-driving wind in the Taklimakan desert [J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(4): 360-367.
- 陈渭南, 董治宝, 杨佐涛, 等. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速 [J]. 地理学报, 1995, 50(4): 360-367.
- [40] Zhu H, Zhang H S. An estimation of the threshold friction velocities over the three different dust storm source areas in northwest China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(6): 977-984.
- 朱好, 张宏升. 中国西北不同沙源地区起沙阈值的对比分析与研究 [J]. 气象学报, 2010, 68(6): 977-984.
- [41] Shen Y B, Shen Z B, Du M Y, et al. Variational characteristics of some parameters and factors during dusty weather in spring of Dunhuang [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(4): 378-384.
- 申彦波, 沈志宝, 杜明远, 等. 敦煌春季沙尘天气过程中某些参量和影响因子的变化特征 [J]. 高原气象, 2003, 22(4): 378-384.