

奚立宗, 把黎, 庞朝云, 等. 祁连山北坡沙尘天气气溶胶特征的飞机观测. 应用气象学报, 2024, 35(3): 311-322.

DOI: 10.11898/1001-7313.20240305

祁连山北坡沙尘天气气溶胶特征的飞机观测

奚立宗 把黎* 庞朝云 李宝梓 黄山

(甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020)

摘要

了解沙尘天气下气溶胶的垂直分布特征对于进一步认识气溶胶-云相互作用及其天气、气候效应至关重要。基于 2023 年 9 月 6 日沙尘天气下的飞机观测数据, 分析祁连山北坡沙尘气溶胶的垂直分布特征。结果表明: 此次沙尘天气是在高空锋区及地面冷高压的共同作用下形成。受沙尘天气影响, 气溶胶粒径谱宽增宽; 气溶胶数浓度较背景可上升约 2~3 倍, 且气溶胶数浓度大值区呈悬垂状态分布, 粒子数浓度大值层位于 4000~4500 m 和 3000~4000 m 高度; 对沙尘气溶胶数浓度贡献最大的细粒子和粗粒子粒径分别为 1.2~1.8 μm 和 6.5~16.6 μm , 且气溶胶数浓度的增大在粗粒子段更为明显。气溶胶来源及输送层、以及气象要素垂直分布演变在气溶胶垂直分布及谱分布中发挥了重要作用。

关键词: 沙尘气溶胶; 飞机观测; 祁连山北坡; 垂直分布

引言

沙尘气溶胶通过改变地气辐射能量收支及云滴形成的基本元素, 对区域乃至全球天气、气候及大气环境产生深远影响^[1-3]。然而, 由于沙尘气溶胶-云相互作用的复杂性, 沙尘气溶胶-辐射-云反馈在预测气候变化方面存在很大不确定性^[4]。因此, 了解对对流层沙尘气溶胶的垂直分布、数浓度、有效直径等物理性质及来源信息对认识气溶胶-云相互作用及其天气、气候效应至关重要^[5-6], 有助于降低对其气候影响估计的不确定性。

获取气溶胶相关信息可通过地面直接观测, 包括气溶胶监测或膜取样设备、光度计等, 也可通过激光雷达遥感、卫星反演等手段^[7-9], 还可通过再分析数据^[10]。但地面观测、卫星和遥感手段及再分析数据均不能直接获取垂直空间上大气气溶胶粒子谱特征, 飞机携带观测探头仍是直接观测气溶胶粒子谱特征最有效和可行的办法^[11-12]。

游来光等^[13]对我国阿拉善沙漠及附近地区沙尘暴天气下沙尘气溶胶的飞机观测研究具有开创

性。牛生杰等^[14]对西北地区沙漠上空的沙尘气溶胶开展飞机观测研究, 指出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地区, 且不同地区气溶胶谱型存在差异。马新成等^[15]分析北京 3 次沙尘天气, 指出沙尘中细粒子的有效直径是人为源气溶胶粒子的 4~10 倍, 且逆温层对扬沙个例的垂直分布存在影响。董晓波等^[16]分析华北平原一次沙尘天气, 指出沙尘层使 0.4~3 μm 气溶胶数浓度显著增加。Cai 等^[17]分析黄土高原上空的气溶胶飞机观测数据, 发现边界层的气溶胶主要来自局地排放, 边界层以上的气溶胶主要为长距离输送的沙尘气溶胶。上述试验得到不同地区、下垫面及天气背景下沙尘气溶胶数浓度、粒径及分布、谱型存在差异, 而气象条件、大气边界层结构及气团输送的差异是造成气溶胶分布差异的重要因素。

由于飞行费用、飞行安全、空域限制等原因, 在西北半干旱区开展的气溶胶飞机观测研究较少^[18]。西北地区是东亚沙尘气溶胶的主要源区和输送通道^[19], 同时也是全球气候变化的敏感地带及生态环境脆弱区^[20-21], 地处西北腹地的祁连山在我国“两屏

2024-03-05 收到, 2024-04-08 收到再改稿。

资助项目: 甘肃省重点研发计划(22YF7FA041), 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J040), 甘肃省自然科学基金项目(23JRRA1576)

* 通信作者, 邮箱: bllnuist@hotmail.com

“三带”生态安全战略中发挥着青藏高原生态屏障和北方防沙带的作用^[22-23]。因此,在上述区域开展飞机观测研究,考察沙尘气溶胶分布、物理性质及其来源,对准确评估其气候效应、改善模式模拟能力十分重要。2017年西北区域人工影响天气能力建设项目立项,其中设计建设的新舟60国家高性能增雨探测飞机于2021年8月成功首飞,后续甘肃省人工影响天气办公室针对西北半干旱区沙尘天气开展了飞机观测试验。本文基于2023年9月6日沙尘天气的飞机探测数据,分析祁连山北坡沙尘天气下气溶胶的垂直分布特征及其成因。

1 数据和方法

1.1 飞机观测及相关信息

2023年9月6日受冷空气过境影响,祁连山北

坡河西走廊一带出现沙尘天气。冷空气移速快,20:00(北京时,下同)沙尘区前缘到达甘肃武威古浪县一带,沙尘影响区地面能见度为3~6 km,最低能见度出现在武威民勤县,不足100 m。23:00沙尘影响区南压至武威南部至白银北部一带,此时武威南部高山站点乌鞘岭(海拔高度为3045.1 m)北风风速增大至 $11.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且能见度下降至15 km,白银北部站点景泰(海拔高度为1630.9 m)能见度下降至20 km(图1)。

2023年9月6日甘肃省人工影响天气办公室在祁连山北坡河西走廊地区组织开展了1架次的飞行作业及探测试验。飞机于20:23从兰州中川机场起飞向北飞行,20:44垂直爬升至6500 m高度,到达武威古浪县上空后开始平飞,23:19飞机返航到达白银北部景泰县上空后开始下降,23:35飞机返回中川机场落地(图2)。

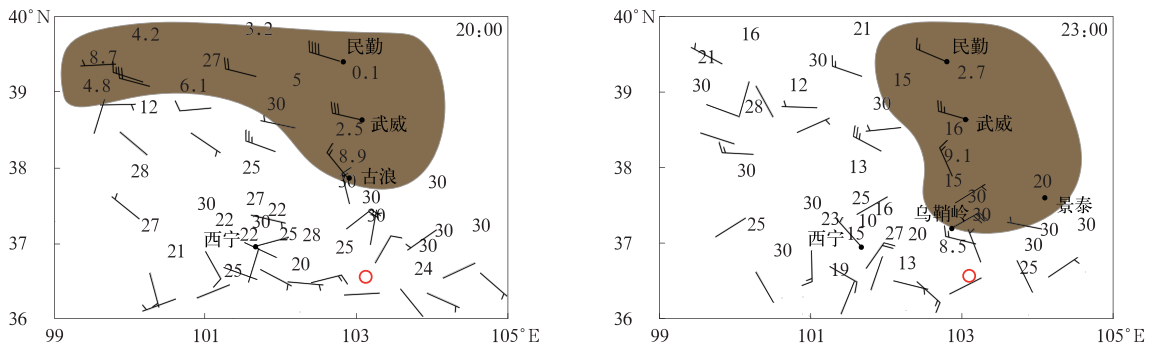


图1 2023年9月6日地面天气图(数字为能见度(单位:km),风羽为地面风,填色为沙尘区域,红圈为中川机场)

Fig. 1 Ground mapping on 6 Sep 2023(the number denotes visibility(unit:km), the barb denotes ground wind, the shaded denotes dust area, the red circle denotes Zhongchuan Airport)

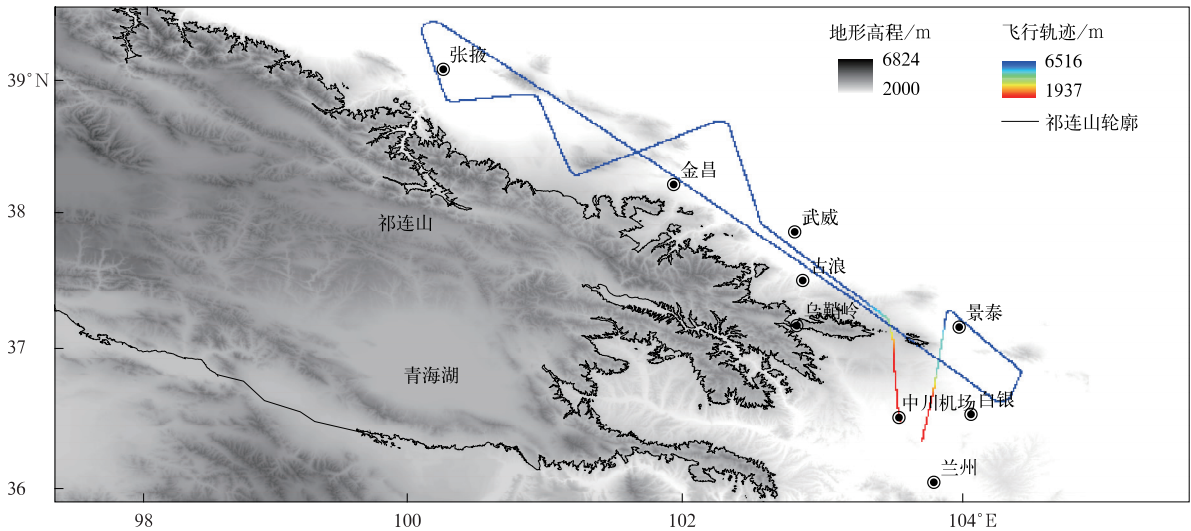


图2 2023年9月6日飞机飞行轨迹和飞行区概况

Fig. 2 Flight path and flight area of aircraft on 6 Sep 2023

1.2 机载仪器和数据处理

执行探测任务的新舟 60 增雨飞机是西北区域人工影响天气能力建设项目设计建设的集催化作业、云宏微观探测及实时通信与综合集成显示功能于一体的国家高性能人工增雨飞机^[24]。本文使用飞机上搭载的气溶胶粒子探头(passive cavity aerosol spectrometer probe, PCASP)、云粒子谱探头(fast cloud droplet probe, FCDP)、飞机综合气象测

量系统(aircraft integrated meteorological measurement system, AIMMS)的观测数据。其中 PCASP 用于观测大气中 0.1~3 μm 的气溶胶粒子,设置间隔为 0.01~0.2 μm 不等的 30 个粒径档进行探测, FCDP 用于观测大气中 1~50 μm 的云滴,设置间隔为 1.5~3 μm 不等的 20 个粒径档进行探测, AIMMS 用于观测大气中的温度、气压、湿度、风、经纬度等信息(表 1)。

表 1 新舟 60 增雨飞机搭载主要探测设备

Table 1 Detection equipment information of MA60 aircraft

探头名称	分档数量	测量范围	探测粒子类型
PCASP	30	0.1~3 μm	气溶胶
FCDP	20	1~50 μm	霾、云滴
AIMMS			温度、气压、湿度、风、经纬度

气溶胶数浓度、云滴数浓度、有效直径、云液态水含量的计算方式参见文献^[25]。考虑到 PCASP 通道 1 受较大误差影响^[26],且 FCDP 通道 1 与 PCASP 通道 1 观测范围重合,将 PCASP 和 FCDP 第 1 档探测数据剔除。

飞机入云的判断标准是云滴数浓度大于 10 cm⁻³,且液态水含量大于 0.001 g·m⁻³^[27-28]。基于上述标准结合飞行轨迹(图 2)及观测全时段时序图(图 3),判断飞机在爬升阶段尚未进入沙尘区,下降阶段进入沙尘区,且上升阶段存在云层,高度为

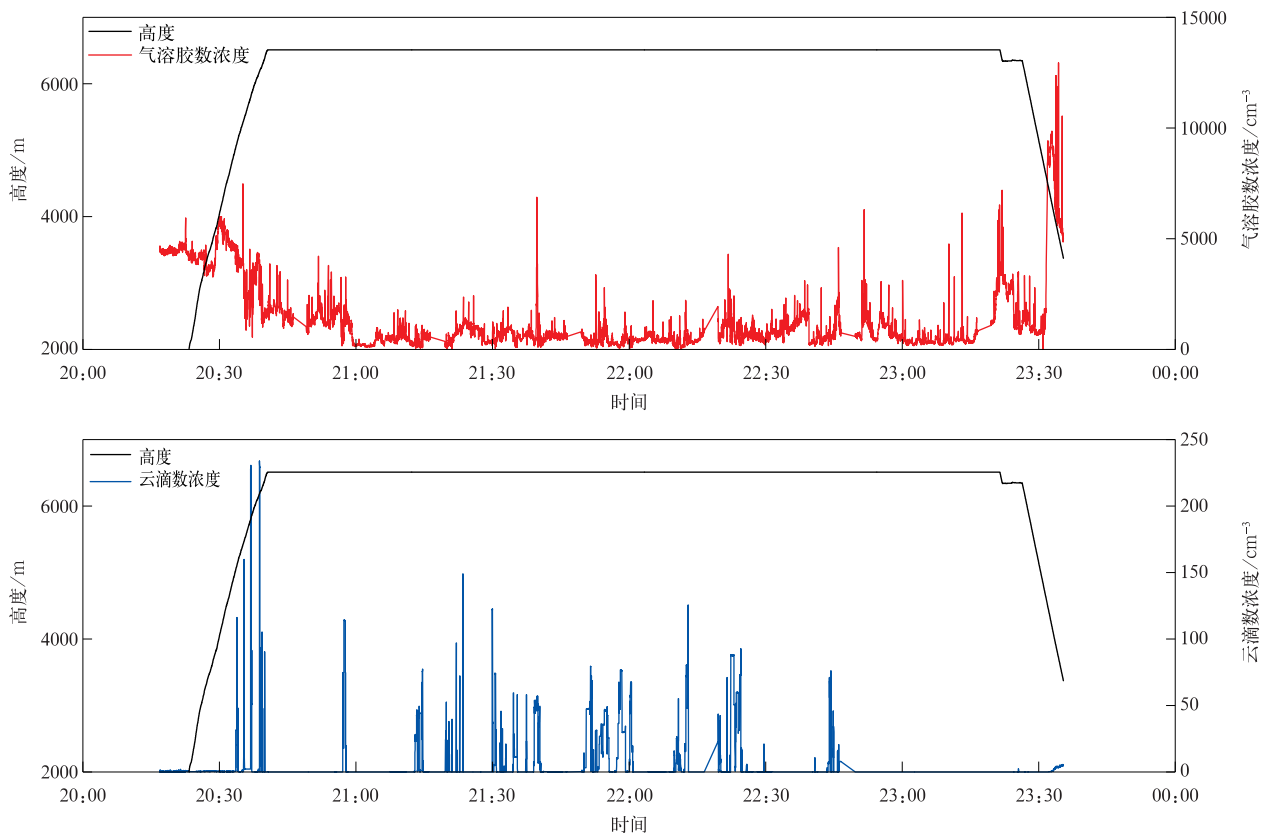


图 3 飞行观测全时段的气溶胶数浓度和云滴数浓度

Fig. 3 Aerosol number concentration and cloud droplet number concentration for the whole period of flight observation

5050~6200 m,下降阶段无云。因此,选择垂直阶段云下 PCASP 及 FCDP 探测数据用于分析沙尘天气下气溶胶垂直分布演变。

1.3 其他数据

本文采用环境监测站数据用于地面颗粒物质量浓度分析。多种再分析数据在祁连山地区适用性的检验表明,ERA5 再分析数据的多个物理量表现较优^[29],因此本文采用 ERA5 逐小时数据诊断天气形势。

沙尘气溶胶轨迹模拟采用 HYSPLIT-4(hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory)模

式,该模式为拉格朗日-欧拉混合计算、用于模拟大气污染物输送、扩散轨迹的专业模式,其中平流和扩散利用拉格朗日算法跟踪空气团的运动计算得到^[30]。

2 沙尘及天气概况

2.1 天气形势

图4为2023年9月6日20:00 500 hPa和地面天气图。由图4a可见,500 hPa 中高纬为一槽一脊的形势,冷涡位于乌拉尔山附近,中心强度为 -24°C ,

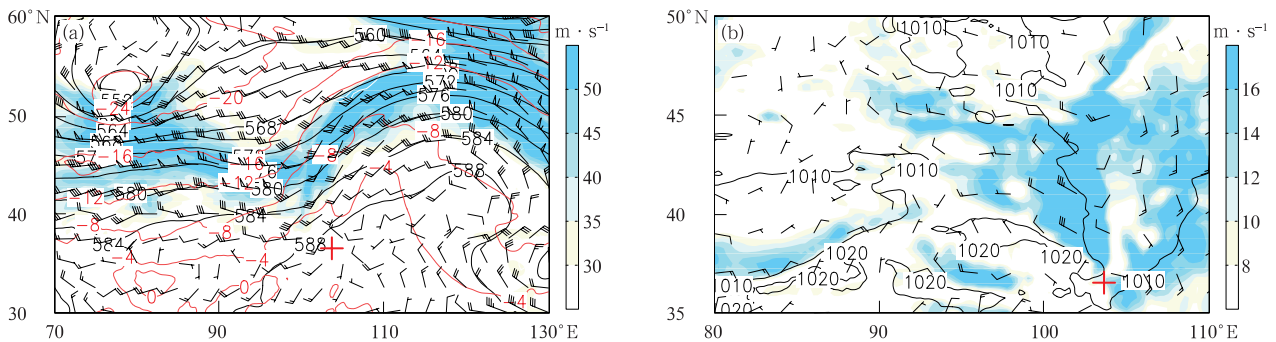


图4 2023年9月6日20:00 500 hPa 位势高度(黑线,单位:dagpm)、温度(红线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、水平风场(风羽)、风速(填色)(a)和地面等压线(黑线,单位:hPa)、水平风场(风羽)、风速(填色)(b)(+为中川机场)

Fig. 4 500 hPa geopotential height(the black line, unit: dagpm), temperature(the red line, unit: $^{\circ}\text{C}$), wind field(the barb), wind speed(the shaded)(a) and ground isobar(the black line, unit: hPa), wind field(the barb), wind speed(the shaded)(b) at 2000 BT 6 Sep 2023(+ denotes Zhongchuan Airport)

其底部及前部存在风速超过 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西风急流轴,祁连山区、甘肃河西及陇中处在高空冷槽的底前部,高空风速显著增大,高空锋区强度达到 $2^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。地面图(图4b)上,地面冷高压压至祁连山北坡—甘肃中部,高压中心强度达到 1020 hPa,地面风速显著增大,内蒙古西部及河西走廊沿祁连山北坡一带地面风速普遍超过 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,局地超过 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。结合图1沙尘区可知,此次沙尘天气是在高空锋区及地面冷高压的共同作用下形成。

2.2 地面颗粒物质量浓度变化

选择2023年9月6日20:49—20:51和23:20—23:25两个时间段分析飞机在祁连山北坡武威上空平飞且在云外观测的气溶胶数浓度,并与武威环境

监测站逐时地面颗粒物质量浓度进行对比。20:00武威站 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度大幅上升,21:00达到峰值,分别为 $1150\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $282\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,随后回落;24:00 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别降至 $87\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $41\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。飞机北飞时,高空气溶胶数浓度由 769 cm^{-3} 上升至 4210 cm^{-3} ,向南返航时高空气溶胶数浓度由 7184 cm^{-3} 下降至 897 cm^{-3} 。由此可见,在武威境内飞机观测的高空气溶胶数浓度与地面颗粒物质量浓度变化趋势一致,但该变化趋势也可能受飞机航线的影响。此外,地面质量浓度峰值出现的时间早于高空数浓度峰值,这反映了高低空粒子在尺度和浓度分布上的差异。

3 飞机观测结果

3.1 气溶胶粒子垂直分布

分析云外探测数据可进一步了解此次沙尘天气下气溶胶粒子的垂直分布情况。此次垂直探测过程中并无逆温层存在,受沙尘天气影响,气溶胶粒子在

整个粒径段均表现为数浓度增多、粒子尺度增大。

图 5 为飞机上升和下降阶段 PCASP 和 FCDP 探测的气溶胶数浓度和有效直径的垂直分布。由图 5 可知,PCASP 量程范围(0.1~3 μm)简称细粒子段,沙尘过境前,气溶胶数浓度在 3700 m 高度以下随高度变化不明显,约为 4000 cm⁻³,3700 m 高度以上数浓度随高度升高增大至 6000 cm⁻³;粒子有效直径

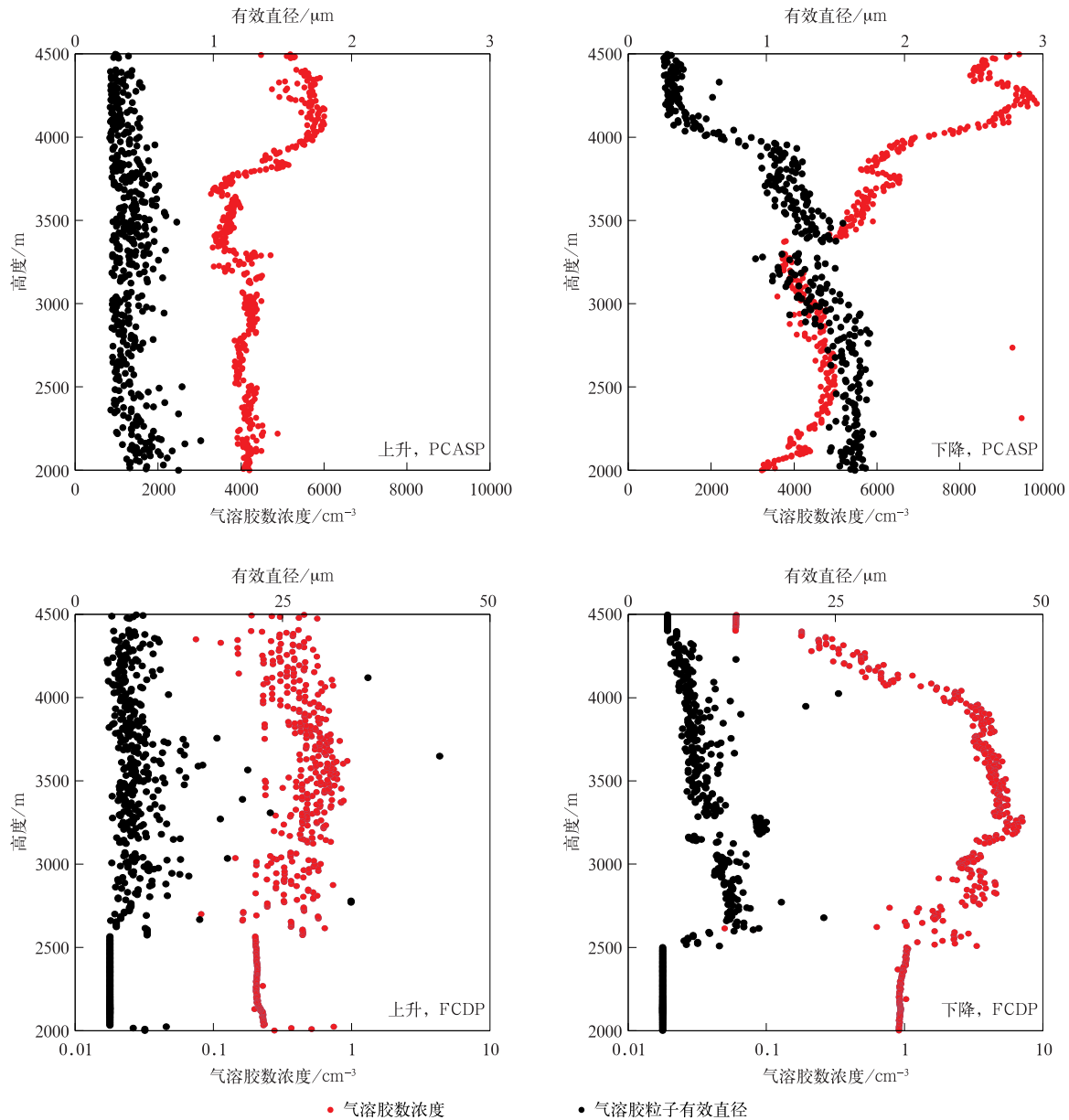


图 5 2023 年 9 月 6 日飞机上升和下降航迹 PCASP 和 FCDP 探测的气溶胶数浓度和有效直径垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of aerosol particle number concentration and effective diameter detected by PCASP and FCDP for ascending and descending tracks of aircraft on 6 Sep 2023

在垂直方向上并无明显变化,主要为 $0.3\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 。沙尘过境后,气溶胶数浓度在 $4000\sim 4500\ \text{m}$ 高度显著增多,且气溶胶数浓度由 $6005\ \text{cm}^{-3}$ 增大至 $12934\ \text{cm}^{-3}$,粒子有效直径的变化主要在 $4000\ \text{m}$ 高度以下,粒径显著增大至 $1.2\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 。

FCDP 量程范围内($1\sim 50\ \mu\text{m}$)简称粗粒子段,沙尘过境前,气溶胶数浓度随高度变化不明显,约为 $0.2\sim 0.9\ \text{cm}^{-3}$,粒子有效直径在垂直方向上并无明显变化,主要为 $3\sim 13\ \mu\text{m}$ 。沙尘过境后,气溶胶数浓度在 $3000\sim 4000\ \text{m}$ 高度显著增多,气溶胶数浓度由 $0.9\ \text{cm}^{-3}$ 增大至 $7.0\ \text{cm}^{-3}$,粒子有效直径略增大至 $6.5\sim 16.6\ \mu\text{m}$ 。结合2.2节地面颗粒物质量浓度与同时段高空数浓度的对比分析可知,沙尘天气下粗粒子在总数浓度中的占比较少,但这部分粒子可能对地面颗粒物质量浓度起主要作用。

对比沙尘过境前后气溶胶粒子在整个粒径段的变化可以看到,气溶胶粒子从低浓度小粒径向高浓度大粒径转变。观测时段内,沙尘过境后贡献最大的细粒子和粗粒子的粒径分别为 $1.2\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 和 $6.5\sim 16.6\ \mu\text{m}$,且气溶胶数浓度大值位于 $4000\sim 4500\ \text{m}$ 和 $3000\sim 4000\ \text{m}$ 高度,与起沙前相比,粒子平均数浓度在细粒子段和粗粒子段分别增大2倍和3.5倍,平均粒径分别增大3倍和1.5倍。

西北地区沙尘气溶胶的观测和数值模拟研究结果并不一致:牛生杰等^[31]在内蒙古、宁夏等地基于激

光空气动力学气溶胶粒子谱仪开展近地面气溶胶数浓度观测,得到上述地区的背景气溶胶数浓度为 $15\sim 23\ \text{cm}^{-3}$,沙尘天气下的气溶胶数浓度为 $48\sim 288\ \text{cm}^{-3}$;王研峰等^[32]在甘肃、宁夏开展了一次层积云天气下的气溶胶飞机观测,研究指出大气逆温层结对气溶胶的垂直分布有重要影响,气溶胶数浓度随高度升高呈减小趋势,近地层气溶胶数浓度可达 $8183\ \text{cm}^{-3}$,而粒径随高度增高减小或变化不大;孙建华等^[33]通过模拟北方3—4月3次沙尘天气过程得到起沙中贡献最大的粒子直径为 $2\sim 11\ \mu\text{m}$ 和 $11\sim 22\ \mu\text{m}$ 。由于探测仪器、研究重点及方法不同,对西北地区气溶胶的研究结果存在差异。以文献^[32]分析结果作为西北地区背景气溶胶的代表,同时结合本文起沙前气溶胶垂直观测结果,认为沙尘天气下气溶胶数浓度较背景气溶胶数浓度上升约2~3倍,沙尘粒子直径分布的差异可能与季节、下垫面及研究手段等因素有关。

3.2 气溶胶粒子谱分布

图6为沙尘天气下气溶胶数浓度谱垂直分布的演变情况。由图6可见,在细粒子段,沙尘过境前气溶胶粒子谱整层呈三峰分布,峰值分别位于 0.14 、 $0.2\ \mu\text{m}$ 和 $0.4\ \mu\text{m}$ 。沙尘过境后,粒子谱大值区向右拓宽, $3700\ \text{m}$ 高度以上峰值分别位于 0.18 、 $0.22\ \mu\text{m}$ 和 $0.4\ \mu\text{m}$ 。在粗粒子段,沙尘过境前,气溶胶粒子谱整层呈双峰分布,峰值分别位于 $3\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 。

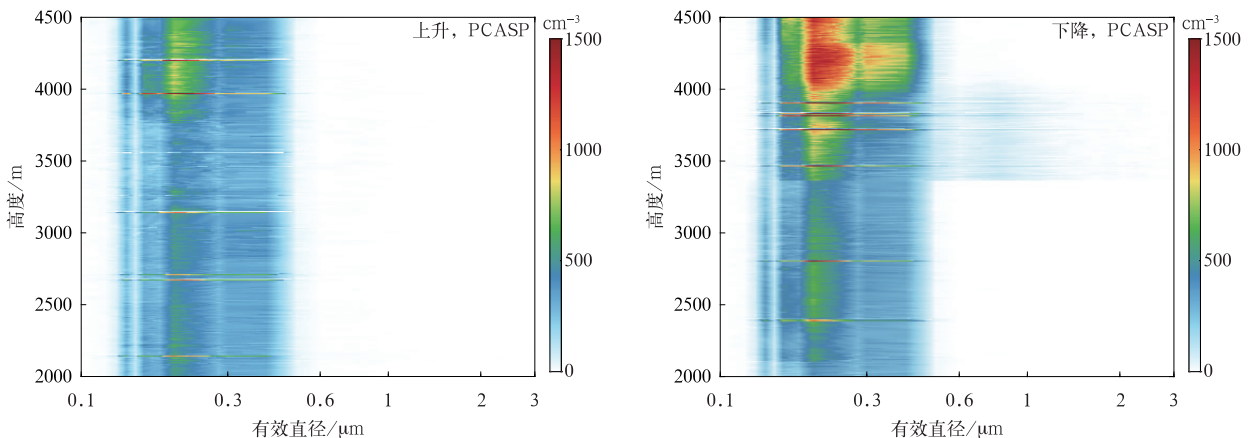
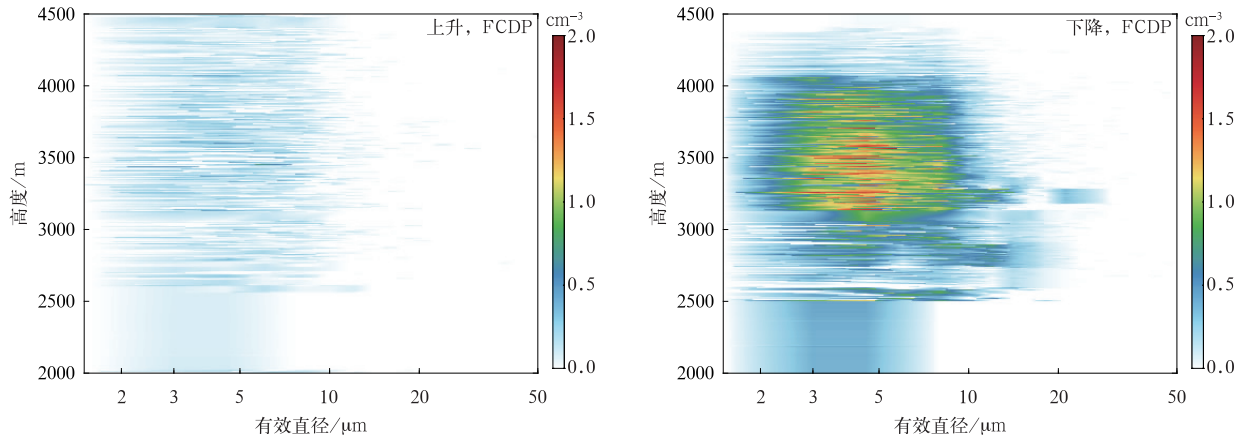


图6 2023年9月6日飞机上升和下降航迹PCASP和FCDP探测的气溶胶数浓度谱垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of aerosol particle number concentration spectra detected by PCASP and FCDP probes for ascending and descending tracks of aircraft on 6 Sep 2023



续图 6

沙尘过境后,气溶胶粒子谱整层呈三峰分布,粒子谱大值区也向右拓宽,在 3000~4000 m 高度峰值分别位于 8、12 μm 和 21 μm。

由此可见,沙尘天气下气溶胶粒径谱谱宽随时间变化增宽。粒径谱增大在细粒子段 4000~4500 m 高度及粗粒子段 3000~4000 m 高度更为明显,且数

浓度大值区呈悬垂状。从谱分布的演变看,此次沙尘天气下气溶胶传输层主要为 3000~4500 m 高度,且粗粒子较细粒子在传输层上沉降特征明显。

图 7 为不同高度平均气溶胶谱的分布。由图 7 可见,不同高度的气溶胶谱型具有相似特征。0.14~0.4 μm 气溶胶数浓度较高,随粒径增大数浓度下

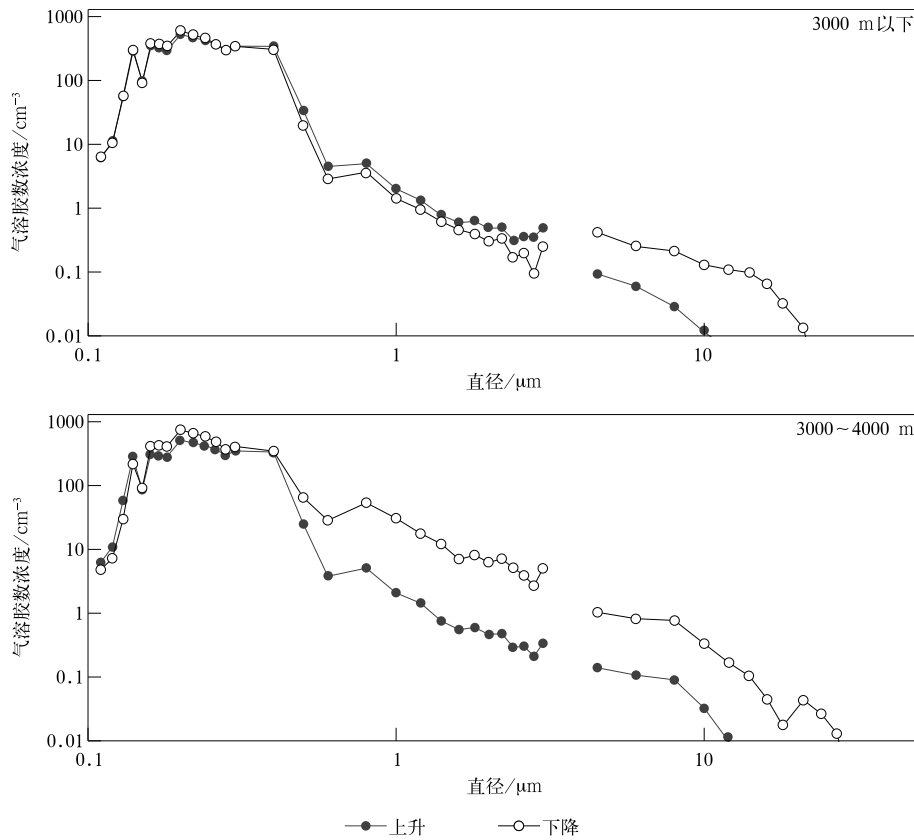
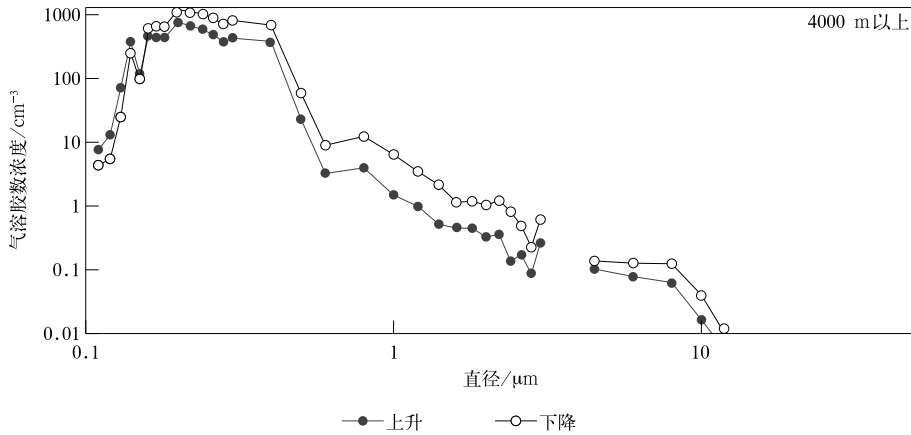


图 7 2023 年 9 月 6 日不同高度平均气溶胶谱分布

Fig. 7 Mean aerosol spectral distribution at different altitudes on 6 Sep 2023



续图 7

降。统计可知,在整个粒径段,细粒子数浓度占总浓度的 99.9% 以上,粗粒子数浓度不足 0.1%,低层粗粒子占比略有上升;在沙尘过境后,气溶胶数浓度的增大在粗粒子段更明显,且随高度降低粒子数浓度向大粒径段偏移。

3.3 气溶胶来源及传输

综上所述,沙尘天气下气溶胶垂直分布及谱分布存在差异,且气溶胶传输层在细粒子段主要集中在 2000~2500 m 高度,在粗粒子段主要集中在 1000~2000 m 高度。其原因可能与气溶胶粒子在传输过程中的沉降作用有关,也可能与气溶胶粒子的不同来源有关。

为了分析气溶胶粒子的来源及传输特征,利用 HYSPLIT 模式模拟 2023 年 9 月 6 日西北中部地区气团 48 h 后向轨迹,模拟开始时间为 22:00,模拟高度分别为 500、2000 m 和 3000 m,结果见图 8。由图 8 可见,在 500~2000 m 高度,气溶胶粒子主要来自新疆古尔班通古特沙漠,在 2000~3000 m 高度,气溶胶粒子主要来源于内蒙古巴丹吉林沙漠。

由上述分析可见,不同来源的气团是造成此次沙尘天气下气溶胶垂直分布及谱分布差异的可能原因。根据前文分析,0.14~0.4 μm 细粒子段气溶胶数浓度高,以往研究表明小于 0.3 μm 的沙尘粒子由于布朗聚合可在大气中保留,从而实现远距离输送^[34],西北地区沙尘气溶胶向东输送过程中,夏季在垂直方向上可被抬升至 5000 m 以上高度^[35],模拟结果与此一致。

除了分析气团来源及传输特征外,还需分析气

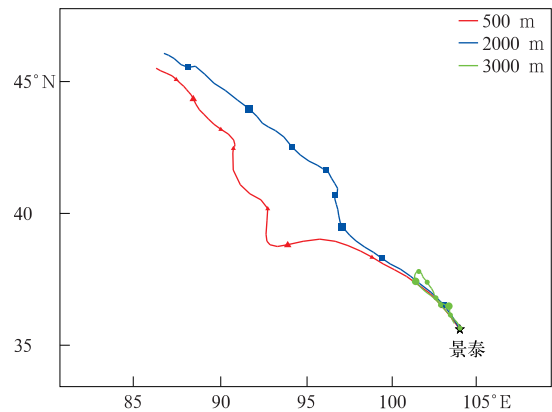


图 8 2023 年 9 月 6 日不同高度气团 48 h 后向轨迹

Fig. 8 Backward tracks of air mass in 48 h at different altitudes on 6 Sep 2023

象要素演变的作用。图 9 为中川机场上空各物理量的垂直剖面。由图 9 可以看到,高空风速随时间逐渐增大,500 hPa 高度以上风速超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 17:00 700 hPa 以下存在西北向大风速带;14:00 对流层中高层存在速度为 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升运动,且 20:00 最大垂直上升速度增大至 $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 700 hPa 高度以上均为垂直上升运动区,中心位于 500 hPa 高度。以上表明,对流层中层的垂直上升运动及近地层的西北向大风速对气溶胶的垂直分布及谱分布起重要作用。

综上所述,此次沙尘天气下气溶胶粒子垂直分布及谱分布的特点与气溶胶来源及输送层有关,且气象要素垂直分布演变也发挥了重要作用。

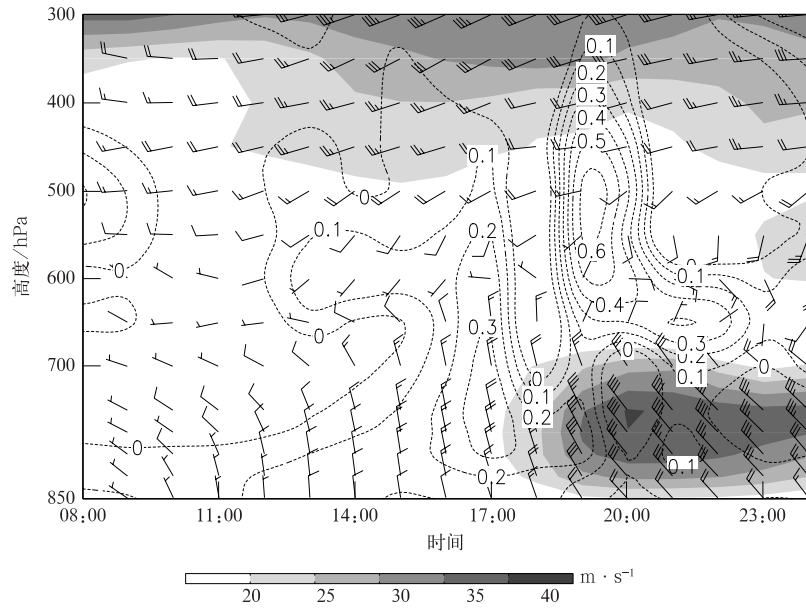


图9 2023年9月6日08:00—23:00风速(填色)、水平风场(风羽)、垂直速度(虚线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,正值表示上升运动)垂直剖面

Fig. 9 Vertical profile of wind speed(the shaded), horizontal wind field(the barb), vertical velocity(the dashed line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, the positive value denotes rising) from 0800 BT to 2300 BT on 6 Sep 2023

4 小 结

针对2023年9月6日西北地区的沙尘天气,在祁连山北坡开展了飞机探测及作业飞行,取得了气溶胶垂直探测数据。本文基于此开展沙尘天气下气溶胶垂直分布研究,得到主要结论如下:

1) 此次沙尘天气受高空锋区及地面冷高压的共同影响。受沙尘天气影响,祁连山北坡武威环境监测站 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的峰值质量浓度分别达到 $1150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $282 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2) 受沙尘天气影响,气溶胶粒子在整个粒径段均表现为数浓度增加、粒子尺度增大。沙尘主要是直径为 $1.2 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 和 $6.5 \sim 16.6 \mu\text{m}$ 的粒子,且在 $4000 \sim 4500 \text{ m}$ 和 $3000 \sim 4000 \text{ m}$ 高度存在气溶胶数浓度大值区。与起沙前相比,粒子平均数浓度在细粒子段和粗粒子段分别增大2倍和3.5倍,平均粒径分别增大3倍和1.5倍。

3) 沙尘过境后,气溶胶粒径谱谱宽增宽,且数浓度大值区呈悬垂状。在粗粒子段,气溶胶粒子谱由双峰型向三峰型转变。气溶胶数浓度的增大在粗粒子段更为明显。

4) 在 $500 \sim 2000 \text{ m}$ 高度,气溶胶粒子主要来源

于新疆古尔班通古特沙漠,在 $2000 \sim 3000 \text{ m}$ 高度,气溶胶粒子主要来源于内蒙古巴丹吉林沙漠。对流层中层的垂直上升运动及近地层的西北向大风速在气溶胶垂直分布及谱分布中发挥重要作用。

本文基于一次发生在祁连山北坡沙尘天气下的飞机观测资料,分析沙尘气溶胶的垂直分布及谱分布特征,讨论沙尘气溶胶垂直分布的原因和相关气象因素及气团来源。然而祁连山区域云水资源丰富,沙尘气溶胶可通过间接和半直接效应对云微物理乃至降水产生影响^[36-37],由于云微物理数据稀缺及模式参数化方案不准确,祁连山区域沙尘气溶胶-云相互作用仍存在较大不确定性。因此,继续积累气溶胶及云微物理的观测数据、开展沙尘气溶胶-云相互作用研究是未来亟需开展的工作。

致 谢:感谢中国气象局人工影响天气中心张荣高级工程师及河北省人工影响天气中心董晓波高级工程师在数据处理及质量控制方面提供的指导与帮助。

参 考 文 献

- [1] Fan J W, Wang Y, Rosenfeld D, et al. Review of aerosol-cloud interactions: Mechanisms, significance, and challenges. *J Atmos Sci*, 2016, 73(11): 4221-4252.
- [2] 李占清. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 76-92.

- Li Z Q. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: An overview. *Trans Atmos Sci*, 2020, 43(1):76-92.
- [3] Mascioli N R, Evan A T, Ralph F M. Influence of dust on precipitation during landfalling atmospheric rivers in an idealized framework. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126(22). DOI: 10.1029/2021/JD034813.
- [4] IPCC. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [5] Roy A, Chatterjee A, Sarkar C, et al. A study on aerosol-cloud condensation nuclei (CCN) activation over eastern Himalaya in India. *Atmos Res*, 2017, 189(1): 69-81.
- [6] 李睿劼, 黄梦宇, 丁德平, 等. 基于 70 m^3 膨胀云室的暖云滴谱试验研究. *应用气象学报*, 2023, 34(5): 540-551.
- Li R J, Huang M Y, Ding D P, et al. Warm cloud size distribution experiment based on 70 m^3 expansion cloud chamber. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 540-551.
- [7] Liu Y, Huang J, Shi G, et al. Aerosol optical properties and radiative effect determined from sky-radiometer over Loess Plateau of Northwest China. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(22): 11455-11463.
- [8] 王天河, 孙梦仙, 黄建平. 中国利用星载激光雷达开展沙尘和污染研究的综述. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 144-158.
- Wang T H, Sun M X, Huang J P. Research review on dust and pollution using spaceborne lidar in China. *Trans Atmos Sci*, 2020, 43(1): 144-158.
- [9] 李婉, 赵胡箭, 王昌双, 等. 2003—2022 年东北地区气溶胶光学厚度变化特征. *应用气象学报*, 2024, 35(2): 211-224.
- Li W, Zhao H J, Wang C S, et al. Variation characteristics of aerosol optical depth in Northeast China from 2003 to 2022. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(2): 211-224.
- [10] 吴啸天, 王晓妍, 郑栋, 等. 不同类型气溶胶对长三角地区地闪活动影响. *应用气象学报*, 2023, 34(5): 608-618.
- Wu X T, Wang X Y, Zheng D, et al. Effects of different aerosols on cloud-to-ground lightning activity in the Yangtze River Delta. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 608-618.
- [11] 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 我国云降水物理飞机观测研究进展. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 641-652.
- Guo X L, Fu D H, Guo X, et al. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 641-652.
- [12] 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.
- Duan J, Lou X F, Chen Y, et al. Aircraft measurements of aerosol vertical distributions and its activation efficiency over the Pearl River Delta. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 677-689.
- [13] 游来光, 马培民, 陈君寒, 等. 沙尘天气下大气中沙尘粒子空间分布特点及其微结构. *应用气象学报*, 1991, 2(1): 13-21.
- You L G, Ma P M, Chen J H, et al. A case study of the aerosol characteristics in the lower troposphere during a dust storm event. *J Appl Meteor Sci*, 1991, 2(1): 13-21.
- [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. *高原气象*, 2005, 24(4): 604-610.
- Niu S J, Sun Z B. Aircraft measurements of sand aerosol over Northwest China Desert Area in late spring. *Plateau Meteor*, 2005, 24(4): 604-610.
- [15] 马新成, 毕凯, 田海军, 等. 北京地区沙尘天气气溶胶飞机观测特征. *气象科技*, 2016, 44(1): 95-103.
- Ma X C, Bi K, Tian H J, et al. Aircraft measurements of aerosol characteristics during dust events in Beijing. *Meteor Sci Technol*, 2016, 44(1): 95-103.
- [16] 董晓波, 麦榕, 王红磊, 等. 石家庄一次沙尘大气污染物与边界层相互作用. *中国环境科学*, 2021, 41(3): 1024-1033.
- Dong X B, Mai R, Wang H L, et al. An interaction study between atmospheric pollutants and boundary layer during a dust storm weather in Shijiazhuang. *China Environ Sci*, 2021, 41(3): 1024-1033.
- [17] Cai Z X, Li Z Q, Li P R, et al. Vertical distributions of aerosol microphysical and optical properties based on aircraft measurements made over the Loess Plateau in China. *Atmos Environ*, 2022, 270. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118888.
- [18] 马学谦, 郭学良, 刘娜, 等. 青藏高原中东部气溶胶特征的飞机观测. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 706-719.
- Ma X Q, Guo X L, Liu N, et al. Aircraft measurements on properties of aerosols over the central and eastern Qinghai-Tibet Plateau. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 706-719.
- [19] 陈思宇, 黄建平, 李景鑫, 等. 塔克拉玛干沙漠和戈壁沙尘起沙、传输和沉降的对比研究. *中国科学(地球科学)*, 2017, 47(8): 939-957.
- Chen S Y, Huang J P, Li J X, et al. Comparison of dust emissions, transport, and deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011. *Sci China (Earth Sci)*, 2017, 47(8): 939-957.
- [20] Huang J P, Ma J R, Guan X D, et al. Progress in semi-arid climate change studies in China. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(9): 922-937.
- [21] 宋艳玲. 全球干旱指数研究进展. *应用气象学报*, 2022, 33(5): 513-526.
- Song Y L. Global research progress of drought indices. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5): 513-526.
- [22] Yao T D. Tackling on environmental changes in Tibetan Plateau with focus on water, ecosystem and adaptation. *Sci Bull*, 2019, 64(7): 417.
- [23] 李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复. *科学通报*, 2019, 64(27): 2928-2937.
- Li X, Gou X H, Wang N L, et al. Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains. *Chinese Sci Bull*, 2019, 64(27): 2928-2937.
- [24] 张骁拓, 胡颖琼, 李宏宇, 等. 神舟 60 高性能增雨飞机机载任

- 务系统集成设计. 气象科技进展, 2021, 11(5): 94-101.
- Zhang X T, Hu Y Q, Li H Y, et al. Integrated design of the airborne task system equipped for the high-performance MA60 seeding aircraft. *Adv Meteor Sci Tech*, 2021, 11(5): 94-101.
- [25] Li J X, Li P R, Ren G, et al. Aircraft measurements of aerosol distribution, warm cloud microphysical properties, and their relationship over the Eastern Loess Plateau in China. *Tellus B Chem Phys Meteor*, 2019, 71(1). DOI: 10.1080/16000889.2019.1663994.
- [26] 高茜, 刘全, 毕凯, 等. 基于航测的云底气溶胶活化率与过饱和度估算. 应用气象学报, 2021, 32(6): 653-664.
- Gao Q, Liu Q, Bi K, et al. Estimation of aerosol activation ratio and water vapor supersaturation at cloud base using aircraft measurement. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 653-664.
- [27] 刘春文, 郭学良, 段玮, 等. 云南省积层混合云微物理特征飞机观测. 应用气象学报, 2022, 33(2): 142-154.
- Liu C W, Guo X L, Duan W, et al. Observation and analysis of microphysical characteristics of stratiform clouds with embedded convections in Yunnan. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(2): 142-154.
- [28] 王泽林, 周旭, 吴俊辉, 等. 一次飞机严重积冰的天气条件和云微物理特征. 应用气象学报, 2022, 33(5): 555-567.
- Wang Z L, Zhou X, Wu J H, et al. Weather conditions and cloud microphysical characteristics of an aircraft severe icing process. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5): 555-567.
- [29] Huai B J, Wang J Y, Sun W J, et al. Evaluation of the near-surface climate of the recent global atmospheric reanalysis for Qilian Mountains, Qinghai-Tibet Plateau. *Atmos Res*, 2021, 250. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105401.
- [30] Bera B, Bhattacharjee S, Sengupta N, et al. Variation and dispersal of PM₁₀ and PM_{2.5} during COVID-19 lockdown over Kolkata metropolitan city, India investigated through HYSPLIT model. *Geosci Front*, 2022, 13(1). DOI: 10.1016/j.gsf.2021.101291.
- [31] 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. 大气科学, 2001, 25(2): 243-252.
- Niu S J, Zhang C C, Sun J M. Observational researches on the size distribution of sand aerosol particles in the Helan Mountain Area. *Chinese J Atmos Sci*, 2001, 25(2): 243-252.
- [32] 王研峰, 冷文楠, 庞朝云, 等. 西北地区气溶胶垂直分布及其对云微物理影响的飞机观测个例研究. 高原气象, 2023, 42(4): 1031-1043.
- Wang Y F, Leng W N, Pang Z Y, et al. A case study of aircraft observation of aerosol vertical distribution and its effect on cloud microphysics in Northwest China. *Plateau Meteor*, 2023, 42(4): 1031-1043.
- [33] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验. 气候与环境研究, 2003, 8(2): 125-142.
- Sun J H, Zhao L N, Zhao S X. An integrated numerical modeling system of dust storm suitable to North China and its applications. *Clim Environ Res*, 2003, 8(2): 125-142.
- [34] 张强, 王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应. 中国沙漠, 2005, 25(5): 675-681.
- Zhang Q, Wang S. On physical characteristics of heavy dust storm and its climatic effect. *J Desert Res*, 2005, 25(5): 675-681.
- [35] 贾瑞, 刘玉芝, 吴楚樵, 等. 2007—2017年中国沙尘气溶胶的三维分布特征及输送过程. 中国沙漠, 2019, 39(6): 108-117.
- Jia R, Liu Y Z, Wu C Q, et al. Three-dimensional distribution and transport process of dust aerosols over China from 2007 to 2017. *J Desert Res*, 2019, 39(6): 108-117.
- [36] 刘玉芝, 罗润, 祝清哲, 等. 东亚旱区气溶胶、云及其相互作用研究进展. 气象科技, 2023, 51(1): 124-133.
- Liu Y Z, Luo R, Zhu Q Z, et al. Advances in researches on properties and interactions of aerosols and clouds over drylands of East Asian. *Meteor Sci Technol*, 2023, 51(1): 124-133.
- [37] 杨慧玲, 肖辉, 洪延超. 气溶胶对云微观特性和降水影响的研究进展. 气候与环境研究, 2011, 16(4): 525-542.
- Yang H L, Xiao H, Hong Y C. Progress in impacts of aerosol on cloud properties and precipitation. *Clim Environ Res*, 2011, 16(4): 525-542.

Aerosol Characteristics of Dust Weather on North Slope of the Qilian Mountains

Xi Lizong Ba Li Pang Zhaoyun Li Baozi Huang Shan

(Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020)

Abstract

Understanding the vertical distribution characteristics of aerosols in dust weather is crucial for further discussion of aerosol-cloud interaction and its impacts on weather and climate. In response to a dust storm in Northwest China on 6 September 2023, Gansu Weather Modification Office conducts aircraft detection and operational flights on north slope of the Qilian Mountains, obtaining the vertical detection data of aerosols. The vertical distribution of aerosols in dust weather is analyzed, and causes of vertical distribution of dust aerosols, related meteorological factors and air mass sources are studied. Results show that the dust weather is formed under the combined action of the upper front area and the surface cold high pressure. Affected by the dust weather, the peak mass concentration of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ reaches $1150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $282 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, at Wuwei Environmental Monitoring Station on north slope of the Qilian Mountains. Under the influence of dust weather, aerosol particles across all size segment show an increase in number concentration and particle size. Most of the dust particles are $1.2\text{--}1.8 \mu\text{m}$ and $6.5\text{--}16.6 \mu\text{m}$ in size, and there is a large concentration of aerosol particle number at the height of $4000\text{--}4500 \text{ m}$ and $3000\text{--}4000 \text{ m}$. In addition, compared with the average concentration of particles in the fine particle segment and the coarse particle segment, the average concentration of particles increases by 2 times and 3.5 times, respectively. The average particle size increases by 3 times and 1.5 times, respectively. After the transit of sand and dust, the spectrum width widens, and the high-value region of the number concentration shows an overhanging state. In the coarse particle segment, the distribution of aerosol particle spectra changes from bimodal to trimodal. The increase in aerosol particle number concentration is more pronounced in the coarse particle segment and the lower layer. At the altitude of $500\text{--}2000 \text{ m}$ above the ground, aerosol particles mainly come from the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, while at the altitude of $2000\text{--}3000 \text{ m}$, aerosol particles mainly come from the Badain Jaran Desert in Inner Mongolia. In addition, the vertical upward movement in the middle layer and the strong northwest wind speed in the lower layer may play an important role in the vertical and spectral distribution of aerosols. Various sources and transport layers of aerosols, along with the vertical distribution evolution of meteorological elements, play an important role in the vertical distribution and spectral distribution of aerosols.

Key words: dust aerosol; aircraft observation; north slope of the Qilian Mountains; vertical distribution