

徐栋夫,曹萍萍,王源程,2020. 成都一次重污染过程的气溶胶光学特性垂直分布[J]. 气象,46(7):948-958. Xu D F, Cao P P, Wang Y C, 2020. Study of the vertical distribution of aerosol optical properties during a heavy pollution event in Chengdu[J]. Meteor Mon, 46(7):948-958(in Chinese).

成都一次重污染过程的气溶胶光学特性垂直分布^{*}

徐栋夫^{1,4} 曹萍萍^{2,4} 王源程³

1 成都市气象局,成都 611130

2 四川省气象台,成都 610072

3 成都市环境保护科学研究院,成都 610072

4 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072

提 要: 利用微脉冲激光雷达观测数据、PM_{2.5}浓度数据、地面气象观测资料和探空数据对成都2017年1月1—6日连续出现的重污染过程进行分析研究。结果表明:激光雷达反演的消光系数演变与PM_{2.5}浓度值变化对应一致,PM_{2.5}浓度升高,近地面消光系数增大;反之,则近地面消光系数减小。对于此次过程,在无冷空气影响时,混合层高度和相对湿度的日变化对消光系数廓线有明显影响,混合层高度降低,大气环境容量减小,相对湿度增加,气溶胶吸湿增长,消光系数增大,地面污染加重。天空状况对气溶胶垂直分布影响显著,晴天或多云天气,早晨强逆温使得水汽和大量气溶胶集中在逆温层顶以下区域,地面污染严重;中午混合层发展,使得混合层内的气溶胶均匀混合,气溶胶层变厚,近地面消光系数显著减小,地面污染减轻。在前一日为晴天或多云天气,当天为阴天时,早上气溶胶明显分为两层,一层在近地面,另一层在残留层顶附近;中午由于垂直湍流增强,一部分残留层气溶胶向下混合至混合层内,使得混合层内的气溶胶粒子增多,地面污染加重,消光系数明显增加。近地面强逆温层、混合层高度降低、残留层气溶胶向下混合、相对湿度增加均是导致地面污染加重的原因。

关键词: 激光雷达,气溶胶,消光系数,混合层高度

中图分类号: P402, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.007

Study of the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties During a Heavy Pollution Event in Chengdu

XU Dongfu^{1,4} CAO Pingping^{2,4} WANG Yuancheng³

1 Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 611130

2 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

3 Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072

4 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

Abstract: An event of heavy pollution in Chengdu during 1–6 January 2017 was analyzed in this study by using the data of micro-pulse lidar, the concentration of PM_{2.5}, surface meteorological observations and vertical soundings. The results show that the extinction coefficient calculated by the lidar data is highly consistent with the change of PM_{2.5} concentration. When PM_{2.5} concentration increases, the near-surface extinction coefficient increases. Conversely, the near-surface extinction coefficient decreases. For this particular case, when there is no influence of cold air, diurnal variations of mixing layer height and relative humidity have obvious influence on the profile of extinction coefficient. The decrease of mixing layer height and the increase of relative humidity result in the increase of extinction coefficient and the aggravation of

^{*} 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(省重点实验室2018-青年-23)资助

2019年3月15日收稿; 2020年2月28日收修定稿

第一作者:徐栋夫,主要从事大气环境气象观测和预报工作. E-mail: xudongfu_123@163.com

the pollution. The sky condition has a significant effect on the vertical distribution of aerosol. In sunny or cloudy days, the water vapor and a large number of aerosols concentrate in the area below the top of inversion layer because of the strong inversion in the morning. As the aerosol layer thickens, the near-surface extinction coefficient decreases significantly due to the evenly mixing of aerosols in the mixed layer with the development of mixed layer at noon. When the previous day was sunny or cloudy and the very day is overcast, the aerosol is obviously divided into two layers in the morning, one is near the ground and the other one is near the top of the residual layer. Part of residual layer aerosol is mixed downward into the mixed layer because the vertical turbulence at noon makes the extinction coefficient in the mixed layer increase significantly. The strong inversion layer near the surface, the decrease of the height of the mixed layer, the downward mixing of the residual aerosol layer and the increase of relative humidity are all responsible for the aggravation of the pollution.

Key words: lidar, aerosol, extinction coefficient, mixing layer height

引言

随着城市化进程的加快、城市人口的增长及工业化水平的不断提高,汽车尾气、工业排放和扬尘已成为城市气溶胶的主要来源,特别是可吸入颗粒物 $PM_{2.5}$ 可对人体健康造成严重威胁(毛节泰等,2002;车凤翔,1999;周骥等,2018)。气溶胶除了能吸收和散射太阳辐射从而直接改变地气系统辐射收支外,还能通过其消光作用使得能见度降低,导致霾发生概率增加,在区域污染的形成中发挥主导作用。目前关于气溶胶的研究已取得了明显进展,但气溶胶的气候环境影响和辐射强迫评估还存在不确定性,这很大程度上是由于对气溶胶的空间分布、化学组成、混合状态和散射吸湿增长特性了解程度不够造成的(张小曳,2007;倪敏等,2016;孙俊英等,2016)。加之气溶胶在大气中的形成和传输过程极其复杂,且具有寿命短、来源广泛、性质多变的特征(邓玉娇等,2016),因此利用各种手段开展气溶胶探测工作显得尤为重要,特别是气溶胶垂直分布的探测对于城市边界层、大气污染物扩散以及大气污染预报模式等方面的研究意义重大(Beniston et al,1990;刘琳等,2018)。

激光雷达由于其探测范围广、垂直分辨率高、探测精度高和持续探测能力,已成为研究大气边界层结构、气溶胶以及云层垂直分布的重要工具。激光雷达不仅能得到气溶胶的垂直分布情况,还能利用回波信号反演出混合层高度等重要信息。国内众多学者在激光雷达探测气溶胶分布特征方面做了许多工作。贺千山和毛节泰(2005)利用微脉冲激光雷达

观测了北京气溶胶时空变化,提出一种反演混合层高度的方法,并用该方法反演了晴天混合层高度,研究了混合层高度和近地面气溶胶分布的相互关系,结论表明利用激光雷达监测城市混合层是可行和优越的。丁辉等(2015)使用安徽寿县激光雷达资料,采用3种方法反演了当地混合层高度,并与探空资料反演的混合层高度进行了对比分析,结果表明由梯度法反演得到的混合层高度与探空资料确定的混合层高度相关度最高。潘鹄等(2010)基于激光雷达数据分析了上海一次霾过程,并结合地面气象数据分析了此次霾天气形成的气象原因,研究指出较弱的太阳辐射以及静风、小风是导致霾天气发生的重要原因,边界层高度变化决定着霾天气发生的强度。邓涛等(2013)利用激光雷达对广州一次霾过程进行了观测,分析边界层结构演变对气溶胶消光系数廓线分布的影响,指出气溶胶消光系数廓线变化可以很好地反演边界层结构的演变。孙乃秀等(2018)利用兰州大学观测站的激光雷达、太阳光度计等综合观测资料分析了气溶胶物理特性和垂直分布特征,指出研究时期内气溶胶主要为局地沙尘与人为污染混合气溶胶,吸收性明显,且气溶胶的抬升主要受白天热力湍流作用影响。此外,激光雷达还被广泛用于沙尘观测研究(郭本军等,2008;张杰和唐从国,2012;郭伟等,2016)。

成都地区地处四川盆地西部、川西高原东侧,平原、丘陵、山地地形地貌并存,气候特殊,导致冬季大气污染频发(郝丽萍等,2007;Liao et al,2017),已成为制约城市可持续发展的重要问题。由于探测手段有限,以往关于成都地区气溶胶的研究大多是基于卫星遥感和地面观测资料(李成才等,2003;吴蓬萍

和周长春,2016),应用持续垂直探测资料分析气溶胶垂直分布特征和混合层高度演变的研究较少。2017年1月1—6日,成都出现了一次持续的重污染过程,是近几年最为严重的重污染过程之一。本研究利用激光雷达资料反演气溶胶消光系数和混合层高度,分析此次污染过程中气溶胶光学特性垂直结构演变与混合层高度变化的关系,并结合地面气象观测和气象探空数据探讨了气象条件对气溶胶垂直分布的影响,以期在成都地区大气环境研究和大气污染防治提供参考。

1 资料与方法

本文采用的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据是成都市环境监测中心站提供的逐小时监测资料。成都地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值为成都境内7个国家环境空气质量监测网自动监测站点(大石西路、金泉两河、君平街、梁家巷、三瓦窑、沙河铺和十里店站)的平均值。气象数据来源于成都市气象台资料,主要包括地面气象观测站数据和温江L波段秒级探空数据。

气溶胶探测设备为北京怡孚和融科技有限公司生产的微脉冲米散射偏振激光雷达(EV-Lidar),架设于成都市气象局。激光器发出的激光波长为532 nm,最小垂直分辨率为15 m,最大探测距离为30 km,每3 min采集一组数据,探测盲区为60 m以下。该设备架设于距地约70 m的楼顶上,故第一层有效探测数据在130 m左右。该型号激光雷达观测数据已在一些研究中得到应用(巫俊威等,2018)。激光雷达原始数据进行反演之前首先经过背景噪声订正、后脉冲订正和重叠因子订正等预处理。基于Fernald(1984)反演方法,得到大气气溶胶在532 nm波长的消光系数垂直分布廓线。采用梯度法反演混合层高度,即将激光雷达距离订正信号对高度的一阶导数最小值所在的高度定义为混合层顶高(Flamant et al,1997)。本文所用资料均已经过质量控制。

2 气象要素和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化特征分析

2017年1月1—6日成都出现连续的重污染过程。此次污染过程天气以阴天为主,有间断的多云到晴天气,6日下午开始受干冷空气影响,污染过程

趋于结束。整个污染过程从积累、加剧到清除阶段均无降雨。从温江地面气象站观测数据来看,除1月1日下午、2日、5日以外,其余时间总云量均为10成。其中2日总云量仅为2成,晴;1日下午、5日总云量在4~6成,为多云天气(图1a)。12月30日至1月1日上午、1月3日、4日,云量多,气温日较差小,最高温度在10~11℃,最低气温在7~8℃;1月2日、5日,云量少,气温日较差大,最高气温分别为14.8和15.9℃(整个过程最高值),最低气温分别为-0.1℃(整个过程最低值)和2.9℃。相对湿度存在明显的日变化特征,夜间相对湿度高,基本都在90%以上(30日凌晨除外);白天湿度降低,最小值出现在15—16时。12月28—29日,相对湿度日变化最为明显,最小相对湿度在40%~45%;30日凌晨受弱冷空气影响,相对湿度相对较小,仅为80%左右。30日傍晚开始,相对湿度整体呈上升趋势;1—6日,平均相对湿度高,夜间相对湿度均在90%以上,白天最低相对湿度基本都在60%以上(2日、5日最低在50%左右)。7日,受干冷空气影响,云量多、温度低,但相对湿度迅速降低(图1b)。

此次污染过程可以被分为3个阶段,第一阶段为2016年12月28日00时至31日00时,第二阶段为2016年12月31日01时至2017年1月3日00时,第三阶段为2017年1月3日01时至6日14时(图2)。第一阶段为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度缓慢累积阶段:28日和29日出现明显的日变化特征, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在中午开始下降,傍晚开始上升,呈现出2个波谷。29日夜间到30日凌晨受弱冷空气影响,相对湿度相对较低, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有一个下降过程,30日06时开始缓慢上升。其中12月29日21时出现该阶段浓度峰值,为 $141 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

第二阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速上升,呈现出双波峰、波谷特征。31日01时至1日10时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续上升,由 $113 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 上升至 $222 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 累计增长 $109 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。1月1日和2日具有明显的日变化特征,主要特征为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度白天或中午开始整体呈下降趋势,傍晚开始上升。2个峰值分别出现在1日11时($222 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)和2日07时($237 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),2个谷值分别出现在1日18时($140 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)和2日17时($103 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),波峰波谷差值分别为82和134 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

第三阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速上升且达到本次过程峰值,并持续维持高浓度值。1月3日01时至5日

03 时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度由 $171 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 上升至 $367 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 累计增长 $196 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在 5 日 04 时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略微下降后, 于 12 时达到本次过程浓度峰值

($368 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。5 日下午 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现了显著下降, 于 18 时到达谷值 ($211 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 随后浓度又上升至 $290 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 并维持至 6 日 14 时。6 日

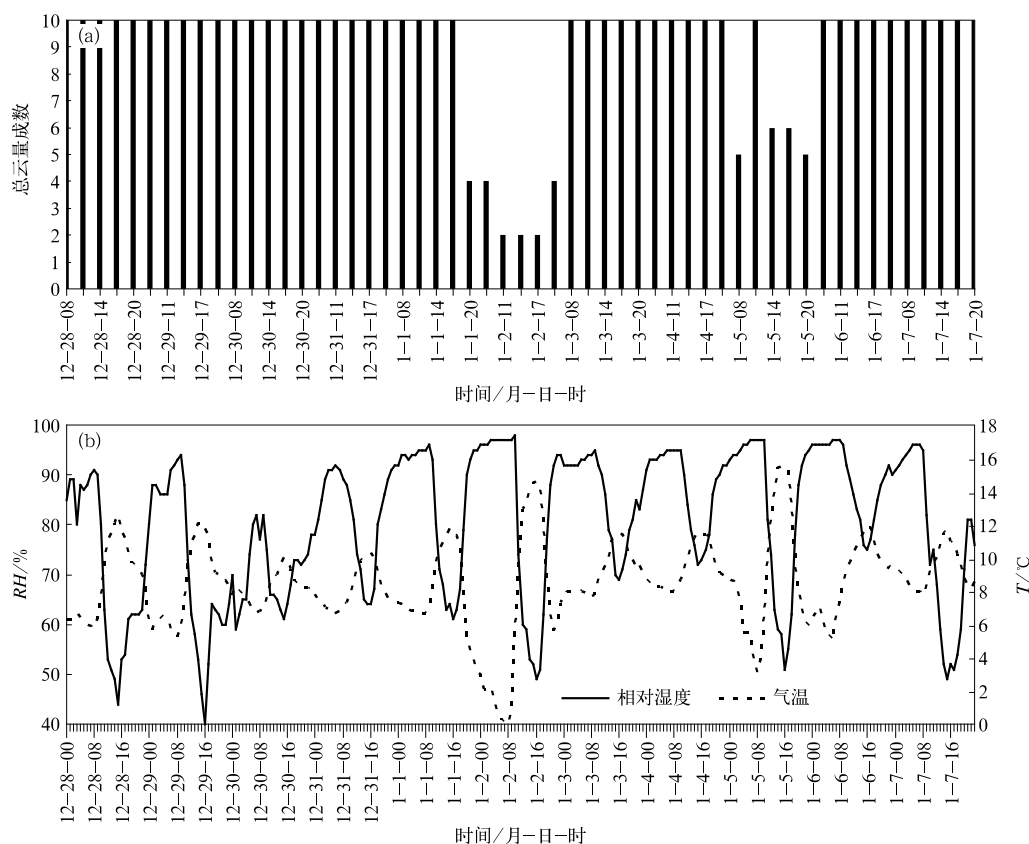


图 1 2016 年 12 月 28 日至 2017 年 1 月 7 日温江站总云量(a)、相对湿度和气温(b)随时间的变化

Fig. 1 Variation of the total cloud cover (a), relative humidity and temperature (b) at Wenjiang Station from 28 December 2016 to 7 January 2017

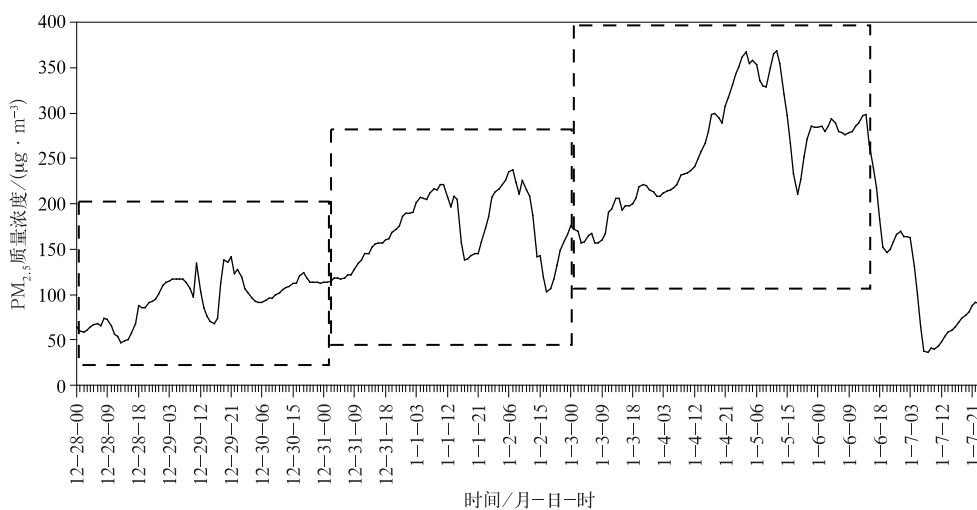


图 2 2016 年 12 月 28 日至 2017 年 1 月 7 日成都地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随时间的变化

Fig. 2 Temporal variation of the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in Chengdu from 28 December 2016 to 7 January 2017

14 时后,受冷空气影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速下降,本次重污染过程趋于结束。

3 气溶胶光学特性垂直分布

气溶胶分布不仅受人为排放影响,同时还受混合层高度、相对湿度等自然环境要素影响。消光系数是大气中气溶胶成分对太阳辐射衰减的综合描述。消光系数越大,能见度越低,表示污染越严重(排除洁净的雾影响)。由图 3a 可见,2016 年 12 月 28 日混合层高度较高(在 1000 m 以上),消光系数较小,只有近地面很薄一层消光系数在缓慢增大,最大值在 2 km^{-1} 以下。29 日中午前,混合层高度减小至 800 m 左右,消光系数迅速增大,近地面消光系数达到 3 km^{-1} 左右;29 日中午随着混合层的发展,消光系数减小,晚上随着混层高度降低,消光系数开始增大。29 日夜间至 30 凌晨受弱冷空气影响,混合层高度有所上升,随后减小。直到 31 日上午,混合层高度维持在 1100 m 左右,近地面消光系数维持在较小的值,气溶胶扩散高度低。31 日中午,混合层高度开始下降,相对湿度相对于前两日增加,最小值在 60% 以上,消光系数增大,污染层明显变厚,并在混合层顶高度附近出现了极值,污染物开始积累,本次污染过程开始。

由图 3b 和 3c 可见 2017 年 1 月 1 日,混合层高度维持在 600 m 左右,近地面消光系数到达 3.5 km^{-1} 以上,污染层厚度也逐渐增加;1 日午后随着混合层高度增加,消光系数有所减小,污染有所缓解;日落后混合层高度迅速下降,到 2 日凌晨减小至 400 m 左右,相对湿度大,维持在 90% 以上,气溶胶吸湿增长,与大气水分共同导致消光作用增加,消光系数迅速增大,近地面大于 4 km^{-1} 值的高度到达 300 m 左右,近地面污染加重,对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现一次快速增长过程。2 日午后,天空晴朗,混合层高度显著增加,由 400 m 升高至 1500 m 左右,近地面消光系数迅速减小,气溶胶随混合层高度增加向上扩散,在混合层顶出现消光系数极值,对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速下降,污染有所改善。3 日凌晨混合层高度降低,近地面消光系数增大。3 日早上边界层分为两层,低层为稳定边界层,上层为残留层。气溶胶亦分为两层,在近地面和残留层顶分别出现消

光系数极大值,在稳定边界层顶出现极小值,残留层顶向上随高度增加迅速降低。3 日中午混合层高度降低至 600 m 左右,早上残留层的一部分气溶胶混合到低层,近地面消光系数增大。4 日至 5 日上午,混合层高度由 600 m 逐渐减小至 400 m 左右,大部分时间相对湿度维持在 90% 以上(有 12 h 低于 90%,最低为 69%),气溶胶吸湿增长,消光系数明显增加,其值在 4 km^{-1} 以上的区域明显变大,重污染层达到了 400 m 左右的高度,对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值迅速增长,达到本次过程峰值。5 日午后,云量减少,地面受热迅速增温,混合层迅速发展,高度升高至 950 m 左右,有一部分气溶胶向上扩散,近地面消光系数有所减小,重污染层厚度也明显减小,维持在 200 m 以下。夜间随着混合层高度的降低,相对湿度增加,气溶胶吸湿增长,近地面消光系数开始增大,重污染层厚度也逐渐变厚。6 日午后开始,受干冷空气影响,混合层高度有所升高,相对湿度下降,消光系数大值区分为两层,一部分污染物向上扩散,剩余污染物则随冷空气向南扩散,对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速下降,本次重污染过程结束。

2017 年 1 月 1—6 日整个过程,近地面气溶胶退偏比均在 0.1 以下,主要是因为本次过程地面相对湿度高,气溶胶吸湿后趋于球形,退偏比低,可以认为该次污染过程的气溶胶粒子主要是人为气溶胶(宋跃辉等,2012)。此次重污染过程经历了缓慢积累、迅速增长、短暂减弱、再迅速增长、清除的过程。激光雷达反演的消光系数演变与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值变化对应一致, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高,近地面消光系数增大;反之,近地面消光系数减小。在污染物缓慢积累阶段,气溶胶主要集中在近地面很薄的一层,混合层高度在 1000 m 以上;重污染时段内,混合层高度降低,维持在 400~600 m,重污染层厚度明显增大,气溶胶集中在地面至 300~400 m 气层内。其中,在无冷空气影响时,混合层高度和相对湿度的日变化对消光系数影响显著。白天云量较少时,混合层高度抬升,大气环境容量增大,相对湿度减小,近地面消光系数减小,对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低,污染有短暂的缓解;夜间混合层高度降低,大气环境容量减小,相对湿度增加,气溶胶吸湿增长,消光系数增大,对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高,污染加剧。

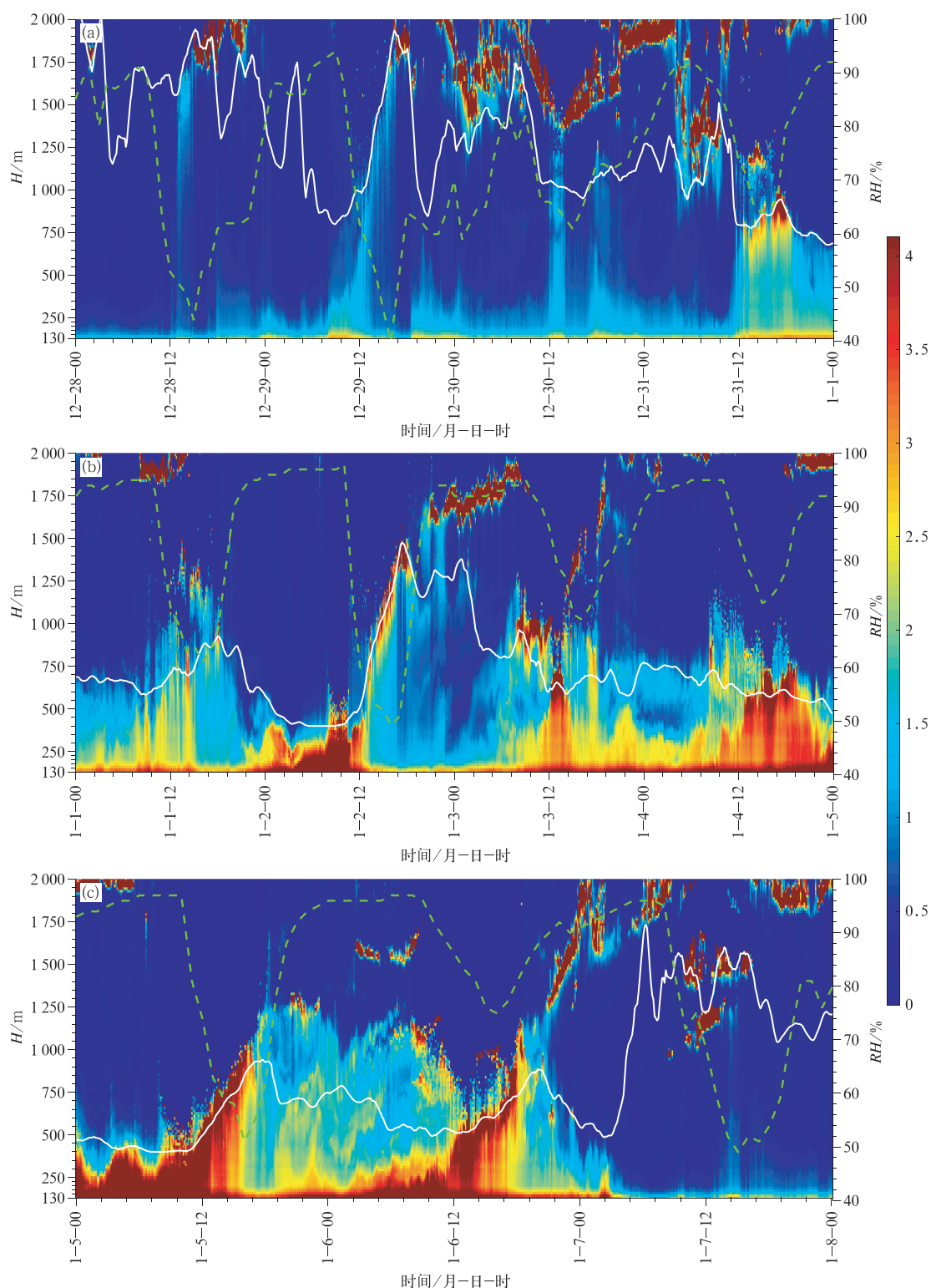


图 3 消光系数(填色,单位: km^{-1})、混合层高度(白色曲线,单位:m)和相对湿度(绿色虚线,单位:%)
 (a)2016 年 12 月 28 日 00 时至 2017 年 1 月 1 日 00 时,(b)2017 年 1 月 1 日 00 时至 5 日 00 时,
 (c)2017 年 1 月 5 日 00 时至 8 日 00 时

Fig. 3 The extinction coefficient (colored, unit: km^{-1}), mixing layer height (white line, unit: m) and relative humidity (green dashed line, unit: %) (a) from 00:00 BT 28 December 2016 to 00:00 BT 1 January 2017, (b) from 00:00 BT 1 to 00:00 BT 5 January 2017, (c) from 00:00 BT 5 to 00:00 BT 8 January 2017

4 不同天空状况下气溶胶光学特性

在排放源相对稳定的情况下,气溶胶分布和变化受气象条件影响明显。此次重污染过程中出现了阴、多云、晴等不同天空状况,以天空状况为分类标准利用探空温度、湿度廓线和反演的消光系数廓线分析不同天空状况下气溶胶光学特性。

1月2日总云量为2成,是晴天;5日总云量为5~6成,为多云。从08时探空数据来看(图4b和4d),近地面均有一强逆温层,2日、5日温度分别为7.9和4.4℃;逆温强度分别为6.9和3.3℃·(100 m)⁻¹;逆温均从地面开始,逆温层顶分别位于114 m(114~163 m为等温层)和133 m的高度;在逆温层内相对湿度高,维持在90%以上。从08时消光系数廓线来看(图4a和4c),近地面消光系数大,分

别在160 m(2日)和130 m(5日)左右高度达到极值(分别为14.6和14.7 km⁻¹),然后随高度增加迅速减小。消光系数极值出现高度与逆(等)温层顶高度基本一致,说明由于近地面强逆温层的存在,导致水汽和大量气溶胶集中在逆温层内,地面污染严重,气溶胶消光作用强,消光系数大。14时由于混合层发展,混合层高度升高,使得混合层内的气溶胶均匀混合,气溶胶层变厚,近地面消光系数明显减小,地面污染减轻;在混合层顶高度(2日、5日分别为1000、700 m左右)出现一个相对大值区,极值分别为2.9和4.2 km⁻¹。从20时探空廓线来看(图略),20时地面已有辐射逆温出现,但是逆温强度较小,明显小于08时;近地面相对湿度也较小,维持在60%~80%,不足以使得气溶胶消光作用明显增强。因此20时消光系数廓线形态与14时相似,近地面消光系数较14时变化不大,但经过午后的垂直湍流

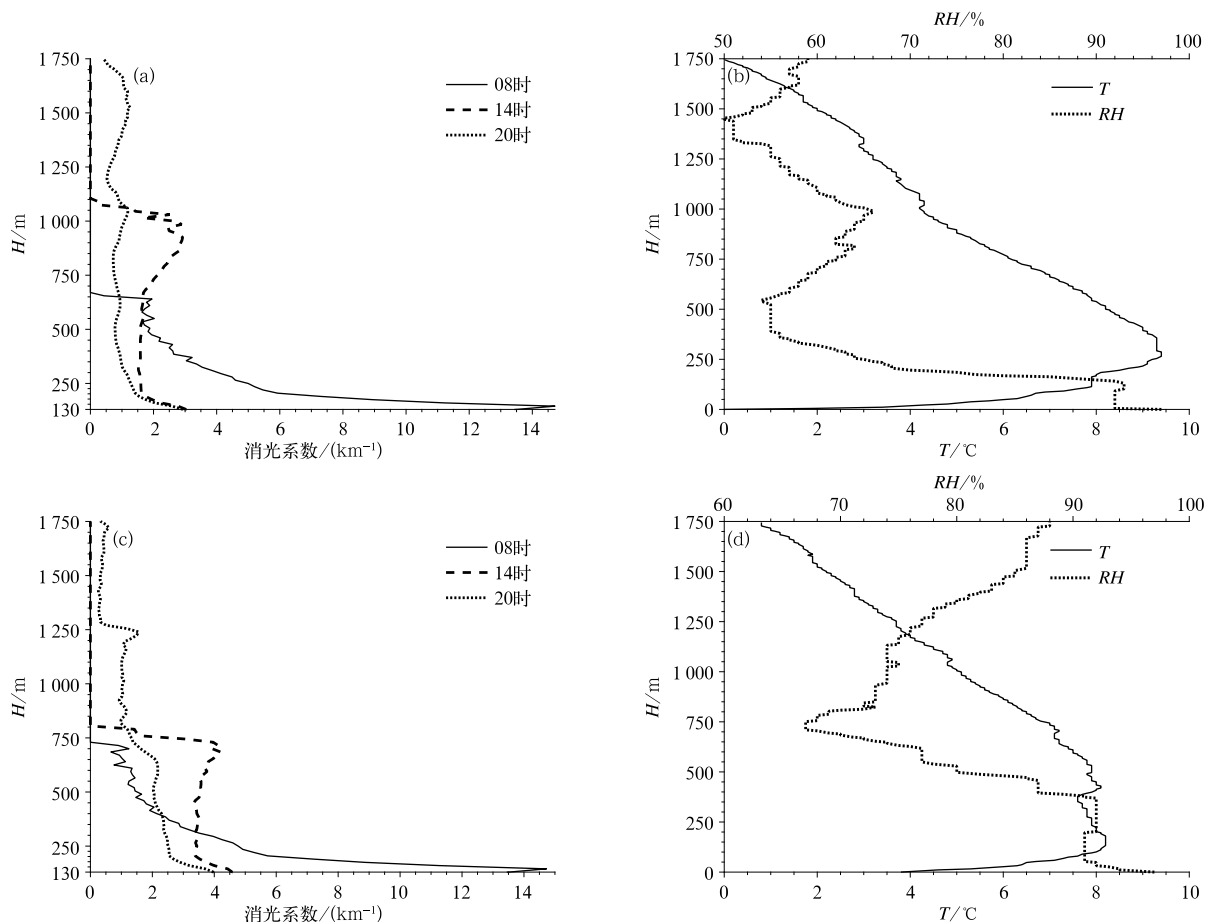


图4 2017年1月2日(a,b)和5日(c,d)为晴天或多云天气时的消光系数廓线(a,c),以及08时温江站温度、湿度廓线(b,d)

Fig. 4 Extinction coefficient profile in sunny or cloudy days (a, c) and the 08:00 BT temperature and humidity profile at Wenjiang Station (b,d) on 2 (a, b) and 5 (c, d) January 2017

混合,晚上垂直湍流减弱后,混合层顶的消光系数极值消失,消光系数整体减小,气溶胶垂直分布更为均匀。

3日、6日总云量为10成,是阴天。从08时探空数据来看(图5b和5d),近地面均有一个相对弱的逆温层,3日、6日温度分别为1.5和0.8℃,逆温层厚度分别为81和70m,相对湿度高,维持在80%~95%。由图5a和5c的08时消光系数廓线显示,气溶胶明显分为两层,消光系数在近地面出现极值(3日、6日分别为3.7和5.7 km⁻¹),随后随高度减小,分别在500 m(3日)和850 m(6日)左右出现极小值(分别为0.9和1.3 km⁻¹),往上随高度增加而增加,在残留层顶(3日、6日分别为1000和1100 m左右)出现极大值(分别为5.1和3.8 km⁻¹),再往上随高度增加迅速降低。由于为阴天,14时混合层

高度较低,3日、6日分别为600和550 m左右,但地面气温有所升高,垂直湍流相对08时有所增加,一部分残留层气溶胶向下混合至低层,使得混合层高度以下消光系数明显增加,并均匀混合,地面污染加重。20时近地面无明显逆温层,相对湿度变化较小,对近地面气溶胶消光作用影响并不显著,因此近地面消光系数变化不大(6日20时受冷空气影响略有减小),向上随高度增加整体呈减小趋势。

4日总云量为10成,是阴天。08时近地面有一个弱的逆温层,逆温温度为0.9℃,逆温层厚度为84 m,相对湿度高,700 m以下区域的值在85%~95%(图6b)。图6a显示08时气溶胶垂直分布与前一日20时相似,消光系数随高度增加而减小,近地面出现极大值4.7 km⁻¹,分别在350和650 m(混合层高度)出现两个极值,混合层高度以上迅速减

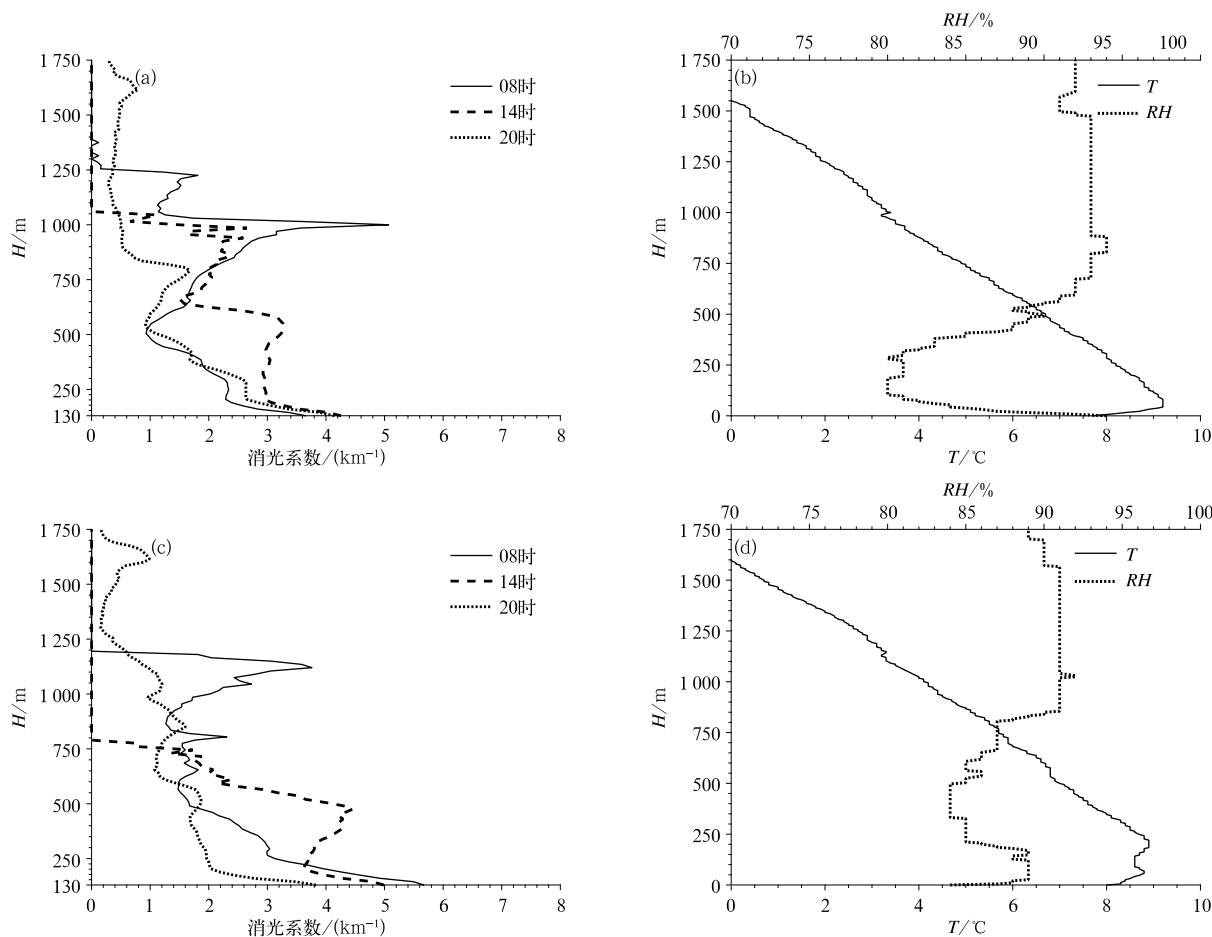


图5 2017年1月3日(a,b)和6日(c,d)前一日为晴天或多云,当日为阴天时的消光系数廓线(a,c),以及08时温江站温度、湿度廓线(b,d)

Fig. 5 Extinction coefficient profile when the previous day was sunny or cloudy and the very day was overcast (a, c) and the 08:00 BT temperature and humidity profile at Wenjiang Station (b, d) on 3 (a, b) and 6 (c, d) January 2017

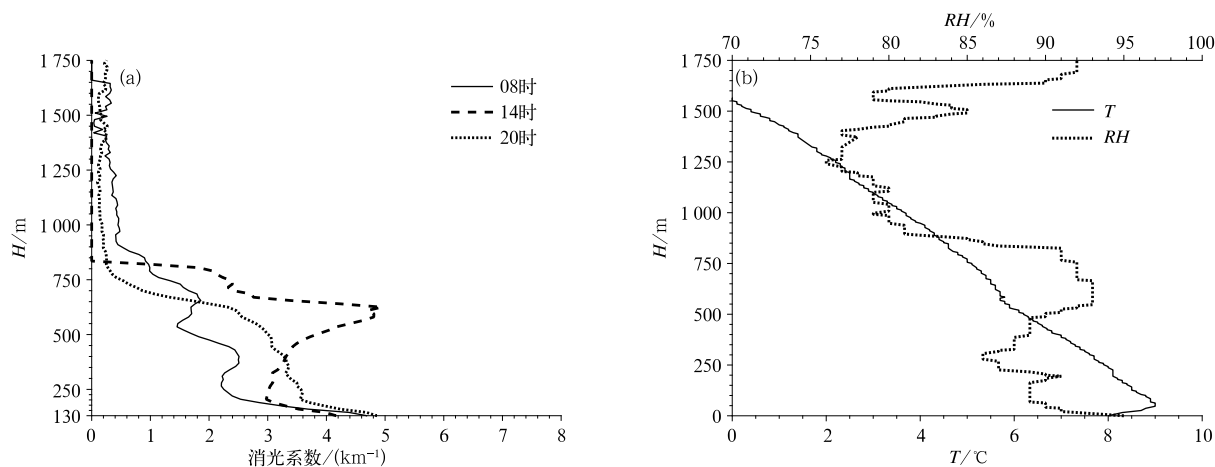


图6 2017年1月4日前一日和当日均为阴天时的消光系数廓线(a)和08时温江站温度、湿度廓线(b)

Fig. 6 Extinction coefficient profile when the previous day and the very day were overcast (a) and the 08:00 BT temperature and humidity profile at Wenjiang Station (b) on 4 January 2017

小。14时混合层高度降低至600 m左右,混合层以下的消光系数明显增加,在混合层顶出现极大值 4.9 km^{-1} ,混合层高度以上消光系数迅速减小。20时近地面仅有一弱逆温层,相对湿度变化小,对近地面气溶胶消光作用影响并不显著,导致20时消光系数廓线形态与14时分布类似。不同之处在于经过午后的垂直湍流混合后,混合层顶的消光系数极值消失,气溶胶垂直分布更为均匀。

综上所述,晴天或多云天气,早晨近地面易出现强逆温层,由于强逆温的存在,水汽和大量气溶胶集中在逆温层顶以下的区域,导致地面污染严重,并在逆温层顶附近出现消光系数极大值。中午受太阳辐射影响,垂直湍流明显加强,混合层发展,使得混合层内的气溶胶均匀混合,气溶胶层变厚,近地面消光系数显著减小,并在混合层顶高度附近出现一个相对大值区,而在混合层高度以上迅速减小。刚入夜的消光系数廓线形态与中午的相似,不同之处在于经过午后的垂直湍流混合,晚上垂直湍流减弱后,混合层顶的消光系数极值消失,消光系数整体减小,气溶胶垂直分布更为均匀。前一日为晴天或多云,当天为阴天时,早上气溶胶明显分为两层,一层在近地面,另一层在残留层顶附近(为前一日随垂直湍流向上扩散的部分气溶胶)。中午由于垂直湍流,一部分残留层气溶胶向下混合至混合层内,使得混合层内的气溶胶粒子增多,地面污染加重,消光系数明显增加,并使混合层内的气溶胶均匀分布。前一日和当

日均为阴天时,早上气溶胶垂直分布与前一日晚上相似,整体随高度增加而减小,没有明显的残留层气溶胶层,极值出现在近地面,但相对于晴天或多云天气同期的值明显偏小,随高度变化的幅度也小。

5 结 论

本文利用微脉冲米散射激光雷达观测数据、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据、地面气象观测和探空数据对成都冬季一次重污染过程进行分析研究,结果表明:

(1)激光雷达反演的消光系数演变与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值变化对应一致, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高,近地面消光系数增大;反之,近地面消光系数减小。污染物缓慢积累阶段,气溶胶主要集中在近地面很薄的一层,混合层高度在1000 m以上;重污染时段内,混合层高度降低,维持在400~600 m,气溶胶集中在地面至300~400 m气层内。

(2)在无冷空气影响时,混合层高度和相对湿度的日变化对消光系数影响显著。白天云量较少时,混合层高度抬升,大气环境容量增大,相对湿度减小,近地面消光系数减小,对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低,污染有短暂的缓解;夜间混合层高度降低,大气环境容量减小,相对湿度增加,气溶胶吸湿增长,消光系数增大,对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高,污染加剧。

(3)天空状况对气溶胶垂直分布影响显著,晴天或多云天气,早晨近地面易出现强逆温层,水汽和大

量气溶胶集中在逆温层顶以下区域,导致地面污染严重,并在逆温层顶附近出现消光系数极大值。中午垂直湍流明显加强,混合层发展,使得混合层内的气溶胶均匀混合,气溶胶层变厚,近地面消光系数显著减小,地面污染减轻,并在混合层顶高度附近出现一个相对大值区,在混合层高度以上迅速减小。

(4)前一日为晴天或多云,当日为阴天时,早上气溶胶明显分为两层,一层在近地面,另一层在残留层顶附近。中午由于垂直湍流,一部分残留层气溶胶向下混合至混合层内,使得混合层内的气溶胶粒子增多,污染加重,消光系数明显增加。前一日和当日均为阴天时,早上气溶胶垂直分布与前一日晚上相似,整体随高度增加而减小,没有明显的残留层气溶胶层,极值出现在近地面。

(5)近地面强逆温层、混合层高度降低、残留层气溶胶向下混合、相对湿度增加均是导致地面污染加重的原因。

参考文献

- 车凤翔,1999.中国城市气溶胶危害评价[J].中国粉体技术,5(3):4-10. Che F X,1999. Risk assessment on aerosol in Chinese cities [J]. China Powder Sci Technol,5(3):4-10(in Chinese).
- 邓涛,吴兑,邓雪娇,等,2013.一次严重灰霾过程的气溶胶光学特性垂直分布[J].中国环境科学,33(11):1921-1928. Deng T, Wu D, Deng X J, et al,2013. The vertical distribution of aerosol optical properties in a severe haze event[J]. China Environ Sci,33(11):1921-1928(in Chinese).
- 邓玉娇,胡猛,林楚勇,等,2016.基于FY3A/MERSI资料分析广东省气溶胶光学厚度分布[J].气象,42(1):61-66. Deng Y J, Hu M, Lin C Y, et al,2016. Analysis of aerosol optical depth in Guangdong based on FY3A/MERSI data[J]. Meteor Mon,42(1):61-66(in Chinese).
- 丁辉,牛生杰,张泽娇,2015.利用微脉冲激光雷达探测大气混合层高度和气溶胶垂直结构的初步研究[J].大气科学学报,38(1):85-92. Ding H, Niu S J, Zhang Z J,2015. Measurements of mixed layer height and aerosol vertical profiles using a micro pulse lidar[J]. Trans Atmos Sci,38(1):85-92(in Chinese).
- 郭本军,刘莉,黄丹萍,等,2008.激光雷达对一次沙尘天气探测与分析[J].气象,34(5):52-57. Guo B J, Liu L, Huang D P, et al,2008. Analysis of lidar measurements from a dust event[J]. Meteor Mon,34(5):52-57(in Chinese).
- 郭伟,卜令兵,贾小芳,等,2016.基于激光云高仪的北京沙尘气溶胶特征分析[J].气象,42(12):1540-1546. Guo W, Bu L B, Jia X F, et al,2016. Analyses on sand-dust aerosol properties with ceilometer in Beijing[J]. Meteor Mon,42(12):1540-1546(in Chinese).
- 郝丽萍,方之芳,李子良,等,2007.成都市近50a气候年代际变化特征及其热岛效应[J].气象科学,27(6):648-654. Hao L P, Fang Z F, Li Z L, et al,2007. The inter-annual climate change and heat island effect of Chengdu during the recent fifty years[J]. Sci Meteor Sin,27(6):648-654(in Chinese).
- 贺千山,毛节泰,2005.北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究[J].气象学报,63(3):374-384. He Q S, Mao J T,2005. Observation of urban mixed layer at Beijing using a micro pulse lidar[J]. Acta Meteor Sin,63(3):374-384(in Chinese).
- 李成才,毛节泰,刘启汉,2003.用MODIS遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征[J].应用气象学报,14(1):1-7. Li C C, Mao J T, Lau A K H,2003. Characteristics of aerosol optical depth distributions over Sichuan Basin derived from MODIS data[J]. J Appl Meteor Sci,14(1):1-7(in Chinese).
- 刘琳,白永清,林春泽,等,2018.华中区域空气质量数值预报系统评估及气溶胶辐射效应的模拟研究[J].气象,44(9):1179-1190. Liu L, Bai Y Q, Lin C Z, et al,2018. Evaluation of regional air quality numerical forecasting system in central China and its application for aerosol radiative effect[J]. Meteor Mon,44(9):1179-1190(in Chinese).
- 毛节泰,张军华,王美华,2002.中国大气气溶胶研究综述[J].气象学报,60(5):625-634. Mao J T, Zhang J H, Wang M H,2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. Acta Meteor Sin,60(5):625-634(in Chinese).
- 倪敏,郑军,马嫣,等,2016.气溶胶的辐射强迫作用研究进展[J].环境科学与技术,39(10):73-78,112. Ni M, Zheng J, Ma Y, et al,2016. Research progress in radiative forcing of aerosol[J]. Environ Sci Technol,39(10):73-78,112(in Chinese).
- 潘滔,耿福海,陈勇航,等,2010.利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程[J].环境科学学报,30(11):2164-2173. Pan H, Geng F H, Chen Y H, et al,2010. Analysis of a haze event by micro-pulse light laser detection and ranging measurements in Shanghai[J]. Acta Sci Circumstant,30(11):2164-2173(in Chinese).
- 宋跃辉,华灯鑫,李仕春,等,2012.微脉冲偏振激光雷达探测城市底层气溶胶[J].光子学报,41(10):1140-1144. Song Y H, Hua D X, Li S C, et al,2012. Detection of bottom aerosols in urban area using micro pulse polarization lidar[J]. Acta Photon Sin,41(10):1140-1144(in Chinese).
- 孙俊英,张璐,沈小静,等,2016.大气气溶胶散射吸湿增长特性研究进展[J].气象学报,74(5):672-682. Sun J Y, Zhang L, Shen X J, et al,2016. A review of the effects of relative humidity on aerosol scattering properties[J]. Acta Meteor Sin,74(5):672-682(in Chinese).
- 孙乃秀,张镭,徐丽丽,等,2018.黄土高原半干旱区典型日吸收性气溶胶综合观测分析[J].大气科学,42(2):323-338. Sun N X, Zhang L, Xu L L, et al,2018. Comprehensive observations and analysis of absorptive aerosols on typical days in the semi-arid

- region of the Loess Plateau[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(2): 323-338(in Chinese).
- 巫俊威, 罗磊, 杨东, 等, 2018. 成都夏季气溶胶消光特性研究[J]. *高原山地气象研究*, 38(3): 72-79. Wu J W, Luo L, Yang D, et al, 2018. Research on characteristics of aerosol extinction in summer of Chengdu[J]. *Plateau Mountain Meteor Res*, 38(3): 72-79 (in Chinese).
- 吴蓬萍, 周长春, 2016. 四川盆地秋季气溶胶与云的相关分析[J]. *高原山地气象研究*, 36(2): 59-63. Wu P P, Zhou C C, 2016. Analysis of correlation between aerosol and cloud in the Sichuan Basin in autumn[J]. *Plateau Mountain Meteor Res*, 36(2): 59-63 (in Chinese).
- 张杰, 唐从国, 2012. 干旱区一次春季沙尘过程的大气气溶胶垂直分布结构及其特征[J]. *高原气象*, 31(1): 156-166. Zhang J, Tang C G, 2012. Vertical distribution structure and characteristic of aerosol over arid region in a dust process of spring[J]. *Plateau Meteor*, 31(1): 156-166(in Chinese).
- 张小曳, 2007. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. *地球科学进展*, 22(1): 12-16. Zhang X Y, 2007. Aerosol over China and their climate effect[J]. *Adv Earth Sci*, 22(1): 12-16(in Chinese).
- 周骥, 孙庆华, 许建明, 等, 2018. 上海地区不同 PM_{2.5} 污染过程对炎症应激影响的差异性[J]. *气象*, 44(12): 1612-1617. Zhou J, Sun Q H, Xu J M, et al, 2018. Effects of different PM_{2.5} pollution processes on inflammatory stress in Shanghai Area[J]. *Meteor Mon*, 44(12): 1612-1617(in Chinese).
- Beniston M, Wolf J P, Beniston-Rebetez M, et al, 1990. Use of lidar measurements and numerical models in air pollution research [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 95(D7): 9879-9894.
- Fernald F G, 1984. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Appl Opt*, 23(5): 652-653.
- Flamant C, Pelon J, Flamant P H, et al, 1997. Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer [J]. *Bound-Layer Meteor*, 83(2): 247-284.
- Liao T T, Wang S, Ai J, et al, 2017. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. *Sci Total Environ*, 584/585: 1056-1065.