

# 基于加密探空观测的成都市一次重霾污染过程中 大气边界层气溶胶垂直结构分析

曹蔚<sup>1,2</sup>, 赵天良<sup>1\*</sup>, 徐祥德<sup>3</sup>, 张小曳<sup>3</sup>, 郑小波<sup>4</sup>, 杨富燕<sup>4</sup>,  
夏俊荣<sup>1</sup>, 曹乐<sup>1</sup>, 邱玉琚<sup>1</sup>, 谷晓平<sup>4</sup>

(1. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室 气候与环境变化国际合作联合实验室 气象灾害预报预警与评估协同创新中心 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 2. 贵州省气候中心, 贵州 贵阳 550002; 3. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 4. 贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 基于 2017 年 1 月 4 日至 7 日成都市一次重霾污染过程的系留汽艇探测的低层大气气象要素和大气颗粒物垂直探空加密观测资料, 分析了大气边界层结构及气溶胶垂直分布。结果表明, 此次重霾污染期间, 大气边界层昼夜变化特征基本消失。稳定边界层结构出现 25 次, 对流边界层结构仅出现 3 次, 大气边界层结构趋于稳定, 边界层高度普遍在 700 m 以下。霾污染发生、维持及消散阶段大气边界层气溶胶垂直结构具有明显差异。霾污染发生阶段, 大气边界层气溶胶粗、细粒子主要集中在 300 m 高度以下, 近地面层大气气溶胶粒子累积触发霾污染事件; 霾维持阶段, 大气颗粒物粒子浓度数垂直方向趋于一致, 大气边界层稳定结构中存在的强的大气垂直混合作用; 在霾消散阶段, 较高处的气溶胶粒子浓度最先下降, 且下降幅度最大, 表明对流层自由大气作用对霾污染消散具有影响。大气边界层风速的增大加剧了大气传输扩散。温度与大气颗粒物浓度在近地层呈负相关关系, 在 100 m 高度以上呈正相关关系。大气边界层低层偏冷, 高层偏暖的稳定大气热力层结减弱了大气污染物的垂直扩散。相对湿度的增加有利于气溶胶粒子的吸湿增长和液相化学反应, 加剧了霾污染。

**关键词:** 霾污染; 大气气溶胶; 垂直分布; 大气边界层; 四川盆地

中图分类号: P593; X513 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2020)03-0344-09  
DOI: 10.19700/j.0379-1726.2019.05.009

## Observation analysis of aerosol vertical structures in boundary layer during a heavy haze event in Chengdu based on intensive sounding measurements

CAO Wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Tian-liang<sup>1\*</sup>, XU Xiang-de<sup>3</sup>, ZHANG Xiao-ye<sup>3</sup>, ZHENG Xiao-bo<sup>4</sup>, YANG Fu-yan<sup>4</sup>,  
XIA Jun-rong<sup>1</sup>, CAO Le<sup>1</sup>, QIU Yu-jun<sup>1</sup> and GU Xiao-ping<sup>4</sup>

1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative In-novation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Guizhou Climate Center, Guiyang 550002, China;
3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
4. Guizhou Institute of Mountainous Climate and Environment, Guiyang 550002, China

**Abstract:** The vertical distributions of aerosol number concentrations and boundary layer structures were intensively measured using a kite balloon during a heavy haze event from January 4 to 7, 2017, in Chengdu, southwest China. This study analyzed the aerosol vertical distribution and atmospheric boundary layer structures based on those measurements. The analysis showed that during heavy haze pollution, the diurnal changes in the atmospheric boundary layer basically disappeared with the stable boundary layer structure 25 times and with the

收稿日期(Received): 2019-04-21; 改回日期(Revised): 2019-05-24; 接受日期(Accepted): 2019-07-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2016YFC0203304); 国家自然科学基金(91544109, 91644223)

作者简介: 曹蔚(1993-), 女, 硕士研究生, 环境工程专业。E-mail: caowei9836@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): ZHAO Tian-liang, E-mail: tlzhao@nuist.edu.cn; Tel: +86-18651827337

convective boundary layer structure only 3 times. The boundary layer structure tended to be stable. The vertical distribution of aerosol particles varied distinctly during the beginning, persistent, and dissipation stages of the heavy haze event. During the beginning stage, aerosol particles decreased vertically with height and atmospheric particles accumulated in the surface layer, thereby triggering the haze event; in the persistent phase, the aerosol number concentration was kept almost consistent vertically below 1000 m, thereby indicating strong vertical mixing in the stable boundary layer; in the haze dissipation phase, the concentrations of aerosol particles decreased earlier at the higher levels, thereby reflecting the influence of the free atmosphere on the dispersion of the stable boundary layer with haze pollution. Based on the analysis of the influence of the dynamic and thermal factors of the boundary layer on the aerosol number concentrations, we found that strong wind intensified the aerosol diffusion in the atmosphere. The air temperature and atmospheric particle concentrations were negatively correlated at the near surface and positively correlated above the height of 100 m with the enhancement of thermal stability weakening the vertical mixing of aerosols. The increase in relative humidity was conducive to the hygroscopic growth and liquid phase chemical reactions of aerosol particles, thereby exacerbating the haze pollution.

**Key words:** haze; atmospheric aerosol; vertical distribution; atmospheric boundary layer; Sichuan Basin

## 0 引言

随着经济和城市化进程的快速发展,我国大气环境污染问题日趋严重<sup>[1-2]</sup>。大气气溶胶作为大气的重要组成部分,其浓度和粒径的变化对大气环境和气候变化都有着重要影响<sup>[3-5]</sup>。大气气溶胶粒子浓度大量增加导致霾污染的发生,降低大气能见度,危害人体健康<sup>[6-7]</sup>。大气边界层作为贴近下垫面的大气,是人类生存的主要环境大气层,大气边界层结构变化将影响大气污染物的扩散能力<sup>[8-10]</sup>。大气边界层顶的气溶胶垂直混合较弱时,会阻碍气溶胶粒子向自由大气的垂直扩散,边界层内气溶胶水平传输也较弱,易造成地面气溶胶累积<sup>[11-12]</sup>,形成霾污染。

目前,我国大气气溶胶垂直分布和边界层结构的研究主要集中在华北平原、珠江三角洲和长江三角洲等重霾污染地区。边界层大气动力、热力结构和湍流特点对气溶胶的垂直分布特征有重要影响<sup>[13-14]</sup>。大气边界层内强逆温结构、下沉气流和地表较弱风速使得大气污染物在地表累积,这是造成重霾的重要因素之一<sup>[15]</sup>。珠江三角洲地区霾污染的出现<sup>[16-17]</sup>、北京地区和华北平原的重污染过程<sup>[18-19]</sup>,均受较低边界层高度和逆温结构的静稳天气影响。

霾污染天气已经成为影响我国大气环境质量和人民身体健康等方面的严重灾害,污染控制需要区域的联合防治<sup>[20]</sup>。四川盆地处于我国西南部,作为我国四大霾污染严重的地区之一,同时也被认为是

全球 PM<sub>2.5</sub> 污染较严重的地区之一<sup>[21]</sup>,其独特盆地地形、下垫面特征和大气温湿结构对大气边界层气溶胶垂直分布的影响作用成为亟待研究的科学问题。

成都市位于四川盆地西侧,具有典型的盆地地区城市代表性,研究表明,近些年来成都市的空气污染越来越严重,其中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 被列为成都市的首要污染物<sup>[21]</sup>,出现霾天气时其混合层高度一般较低<sup>[22]</sup>,不利的气象条件和污染物的累积是造成气溶胶污染加重的原因<sup>[23]</sup>。目前对于四川盆地区域性空气污染的研究多基于地面站的观测、卫星和雷达的反演,缺乏边界层结构及污染物垂直结构的观测研究,开展成都市大气边界层内气溶胶颗粒物污染垂直结构特征的观测和分析,将有助于了解四川盆地地区霾污染过程的大气边界层气溶胶变化特征及其机理。本次研究基于2017年1月在成都市出现的一次重霾污染,拟运用系留汽艇搭载的仪器对大气边界层气象要素、气溶胶的探空观测和地面观测得到的资料,分析重霾污染过程中大气边界层结构变化及其气溶胶垂直分布特征,以认识四川盆地地区霾污染过程中大气边界层和气溶胶变化特征。

## 1 材料与方 法

### 1.1 观测站点与观测仪器

2017年1月1日至20日期间,在成都市温江区气象观测站(103°51'E, 30°45'N, 海拔约539 m)开展了大气边界层气象要素和颗粒物粒径谱垂直观测实验,加密的观测频率为每天8次,每日的观测时间

分别为北京时间 02:00、05:00、08:00、11:00、14:00、17:00、20:00 和 23:00。成都市 1 月 4~7 日的日出时间为 08:02 左右,日落时间为 18:17 左右,昼长约 10.25 h。在本文每天 8 个时段加密观测中,将 11:00、14:00 和 17:00 的观测定义为白天时段,其余 5 个在日落后日出前的观测时间定义为夜晚时段。由于高空中较大的风速会限制系留汽艇上升的高度,故这次重霾污染期间共进行了 28 次观测,探空高度在 850~1750 m 之间。为统一研究标准,我们(剔除了高度大于 1000 m 以上的数据)将 1 月 4 日 14 时至 1 月 7 日 05 时霾污染期间白天和夜晚时段 1000 m 高度范围内的观测值分别进行平均,分析此次重度污染过程的大气边界层颗粒物数浓度、气象要素的垂直分布以及其昼夜变化特征。

垂直气象要素探测采用了 Vaisala 气象探测仪(仪器来自芬兰),主要观测要素包括:温度、相对湿度、气压、风速、风向和水汽混合比等。颗粒物监测采用国产华盛昌 DT-9880M 空气质量检测仪,该检测仪对直径大于 0.3  $\mu\text{m}$  的气溶胶粒子分为 6 个通道(0.3~0.5  $\mu\text{m}$ 、0.5~1  $\mu\text{m}$ 、1~2.5  $\mu\text{m}$ 、2.5~5  $\mu\text{m}$ 、5~10  $\mu\text{m}$  和 >10  $\mu\text{m}$ )进行累计计数,单次采样时间为 32 s,采样流量为 2.83 L/min。地面气象要素数据来自成都市温江站,地面  $\text{PM}_{2.5}$  及  $\text{PM}_{10}$  数据使用了中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn/>)发布的成都市小时平均值。本次探测实验主要观测的要素及其测量范围见表 1。

## 1.2 颗粒物数据处理

用 DT-9880M 空气质量检测仪测得气溶胶粒子个数,求粒子数浓度的公式如下。

$$N = \frac{n}{\frac{1000}{60} \times q \times t} \quad (1)$$

式中,  $N$  表示气溶胶粒子数浓度,单位为个/ $\text{cm}^3$ ,

$n$  表示气溶胶粒子数,单位为个,  $q$  表示采样流量,单位为 L/min,  $t$  表示单次采样时间,单位为 s。

假设大气气溶胶浓度随高度的增加遵循指数下降分布规律,当它衰减到近地面浓度的 1/e 时,这时的气溶胶层高度称之为大气气溶胶标高<sup>[24]</sup>。气溶胶标高是衡量气溶胶垂直变化结构的重要参量<sup>[25]</sup>。大气气溶胶浓度指数下降分布规律的公式如下。

$$N_a(z) = N_a(0) \times e^{(-z/H_p)} \quad (2)$$

式中,  $H_p$  即为气溶胶标高,  $Z$  是大气高度,  $N_a(0)$  是地面气溶胶数浓度,  $N_a(z)$  是高度  $z$  处的气溶胶数浓度。

## 1.3 大气边界层参数计算

利用垂直温度廓线和 Richardson 数(理查森数,以下简称  $Ri$ )廓线来区分稳定边界层(stable boundary layer, SBL)结构和对流边界层(convective boundary layer, CBL)结构。当近地面 200 m 高度内的垂直位温递减率和近地面 100 m 高度内的总体  $Ri$  都为负值时为对流边界层结构,不能同时满足这两个条件时为稳定边界层结构<sup>[26]</sup>。

通常采用  $Ri$  法来估算稳定边界层高度(stable boundary layer height, SBLH)。  $Ri$  的计算方法如下:

$$Ri(z) = \frac{g(z-z_0) \times [\theta(z) - \theta(z_0)]}{\theta(z) \times v(z)^2} \quad (3)$$

式中,  $z$  是垂直高度,  $g$  是重力加速度,  $\theta$  是位温,  $v$  是高度  $z$  处的风速,  $z_0$  选取近地层 30 m 高度。从式(3)中可以看出总体  $Ri$  值的大小与该高度层的顶部和底部的位温温差及相应的风切变相关。 $Ri$  值越小,即位温温差小,风切变大。垂直方向上  $Ri$  第一次大于给定  $Ri$  的临界值  $Ri_c$  时的高度被定义为稳定边界层高度<sup>[27]</sup>,当  $Ri < Ri_c$  时,气溶胶粒子的垂直混合较为活跃,当  $Ri > Ri_c$  时,不利于气溶胶粒子的垂直输送。 $Ri_c$  的取值范围在 0.15~1 之间<sup>[28-29]</sup>,本研究中选用的  $Ri_c$  值为 1。

表 1 气象和大气污染物探空观测仪器技术参数

Table 1 Technical parameters of equipment used to observed meteorological conditions and air pollutants

观测要素	仪器	测量范围	精度	备注
高度	TTW111 绞车	0~3000 m	-	
气压		500~1080 hPa	±0.1 hPa	
气温		-50~60 °C	±0.1 °C	
相对湿度	系留气球探空, Vaisala TTS111 探空仪	0~100%	±0.1%	
风速		0~20 m/s	±0.1 m/s	
风向		0~360°	±1°	
气溶胶数浓度	DT-9880M	>0.3 $\mu\text{m}$ (六通道)	±5%	采样间隔 32 s 采样流量 2.83 L/min

注:“-”表示没有此项参数说明;备注项未填写的代表无

对于对流边界层结构,可采用 Holzworth(霍尔兹沃思)方法来判断对流边界层高度(convective boundary layer height, CBLH)<sup>[30-31]</sup>。从地面温度沿干绝热线向上与垂直温度廓线相交处的高度即为对流边界层高度。利用气象要素垂直观测资料可以估算出大气边界层高度,包括稳定边界层高度和对流边界层高度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重霾污染过程

观测期间,成都地区出现了严重的持续性霾天气。2017年1月4日,地面观测到的 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 质量浓度出现明显突增,5日 $PM_{2.5}$ 每小时平均值超过 $300 \mu g/m^3$ , $PM_{10}$ 每小时平均值达到 $480 \mu g/m^3$ ,7日,污染水平开始减弱并逐渐结束。1月4日14时至1月7日23时的成都市地面 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 的每小时均值变化及其同期气象要素变化分别如图1、图2所示,4日14时至5日14时, $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 质量浓度小时均值较高,霾污染发展旺盛,1月5日15时至18时期间, $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 的质量浓度出现下降,但仍维持在重度污染水平,到1月7日,地面风速增大,大气污染物扩散加剧,大气水平能见度增大,7日12时能见度达到10 km,之后此次重霾污染过程基本结束。

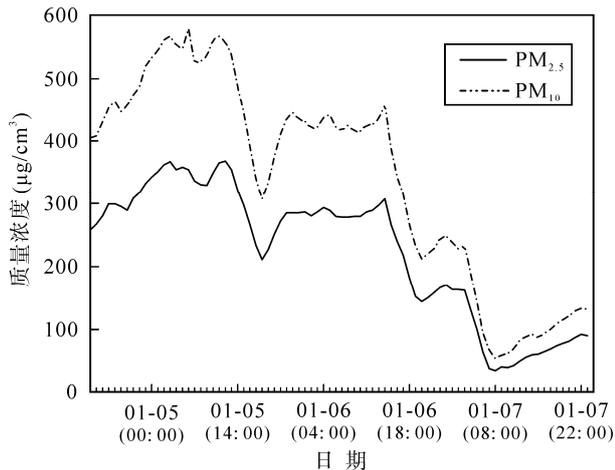


图1 2017年1月4日至7日成都市地面 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 变化

Fig.1 Temporal variations of surface  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  mass concentrations from January 4 to 7, 2017, in Chengdu  
横坐标每个小刻度代表间隔1 h  
each small scale in the abscissa represents an interval of 1 h

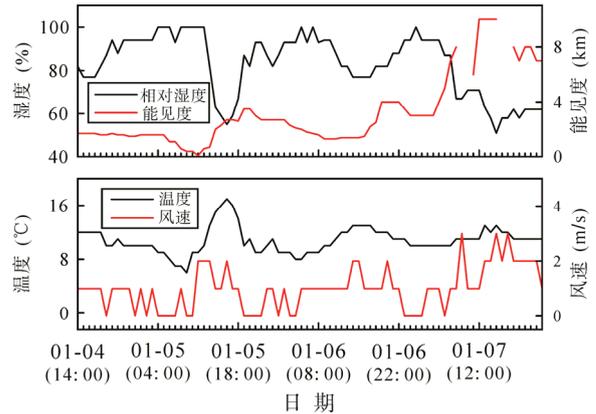


图2 2017年1月4日14时至7日23时成都地面气象要素随时间变化

Fig.2 Temporal variations of meteorological elements from 14: 00 on January 4 to 23: 00 on January 7, 2017, in Chengdu  
横坐标每个小刻度代表间隔1 h  
each small scale in the abscissa represents an interval of 1 h

### 2.2 趋稳的大气边界层结构

1月4日至7日期间,共有28次大气边界层垂直观测实验。基于本文1.3节的大气边界层结构划分标准,在这次重霾污染过程观测实验中,属于稳定边界层的占了25次,属于对流边界层的只有3次。在这次冬季重霾污染过程中,成都市大气边界层明显呈现趋于稳定结构的特征,即大气稳定边界层结构出现的概率要远大于对流边界层结构,冬季重霾污染过程中稳定边界层结构几乎全天可见(参见图3)。这可能与四川盆地大地形影响效应有关,反映了盆地大地形对大气边界层和区域空气质量的影响和作用<sup>[32]</sup>。

从图3可以看到此次重霾污染期间垂直加密实验资料估算得到的稳定边界层高度和对流边界层高度,以及地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化情况。重霾污染期间边界层的特征为,仅有的3次对流边界层结构均出现在14:00,其高度分别为682 m、564 m和622 m。反观稳定边界层高度,除有一个时次的稳定边界层高度为720 m之外,其余稳定边界层高度均维持在500 m以下,其中1月5日08:00和1月6日02:00这2个时次稳定边界层高度低于100 m。根据徐桂荣等<sup>[33]</sup>2007年冬季在成都市温江区进行探空观测的结果表明,在106次观测结果中仅出现2次对流边界层结构,其高度分别为220 m和750 m,而稳定边界层高度在10~700 m之间。他们的发现与我们的观测结果基本上一致。由于成都市冬季的大气边界层高度较青藏高原及其下游地区其他城市明

显偏低<sup>[33]</sup>, 有利于污染物堆积, 所以容易出现重霾天气。

由于大气边界层高度通常昼高夜低, 可导致PM<sub>2.5</sub>质量浓度出现白天较低和夜晚较高的昼夜变化特征。成都这次重霾污染过程大气边界层高度和地面PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化相关分析也证实这种现象(参见图3), PM<sub>2.5</sub>质量浓度和边界层高度的相关系数 $R^2 = -0.43$ ,  $P < 0.02$ 通过了置信度为95%的显著性检验。PM<sub>2.5</sub>质量浓度与边界层高度呈显著负相关关系, 表明稳定边界层结构和低边界层高度有利于污染物累积。

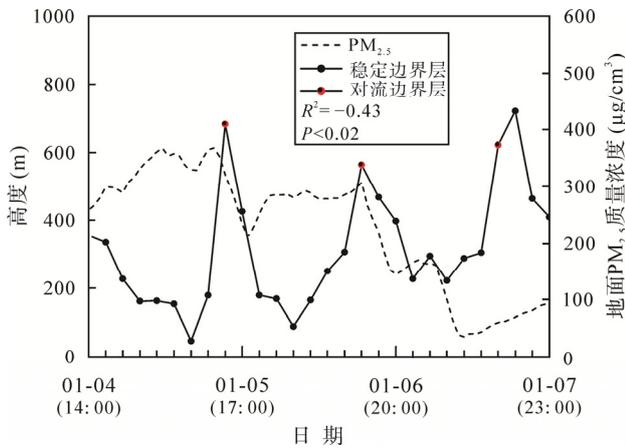


图3 2017年1月4日14时至2017年1月7日23时成都大气稳定边界层高度、对流边界层高度和地面PM<sub>2.5</sub>变化  
Fig.3 Changes in the heights of the stable boundary layer and convection boundary layer as well as the ground PM<sub>2.5</sub> during the observations from 14: 00 on January 4 to 23: 00 on January 7, 2017, in Chengdu  
横坐标每个小刻度代表间隔3 h  
each small scale in the abscissa represents an interval of 3 h

图4是重度污染期间白天和夜晚平均的 $Ri$ 垂直廓线, 依照本文1.3节中对稳定边界层高度的判断标准, 计算得出白天和夜晚的稳定边界层高度分别为338 m和167 m, 表明稳定边界层高度白天明显高于夜晚, 且在不同高度上夜晚 $Ri$ 值都大于白天, 表明了这次冬季重霾污染过程中夜间的大气边界层结构比白天更为稳定。

### 2.3 颗粒物粒径谱垂直变化

将观测到的粒子分为粒径为0.3~2.5  $\mu\text{m}$ 的细粒子和粒径大于2.5  $\mu\text{m}$ 的粗粒子进行分析。图5为重度污染期间, 系留气艇观测获得的1000 m高度内白天和夜晚平均PM<sub>0.3-2.5</sub>和PM<sub>>2.5</sub>数浓度的垂直分布廓线。从图5可知, 气溶胶粒子数浓度的垂直分布具有明显的昼夜差异。白天, 颗粒物的数浓度垂直分布, 虽然在不同高度层有些波动, 并有随高度

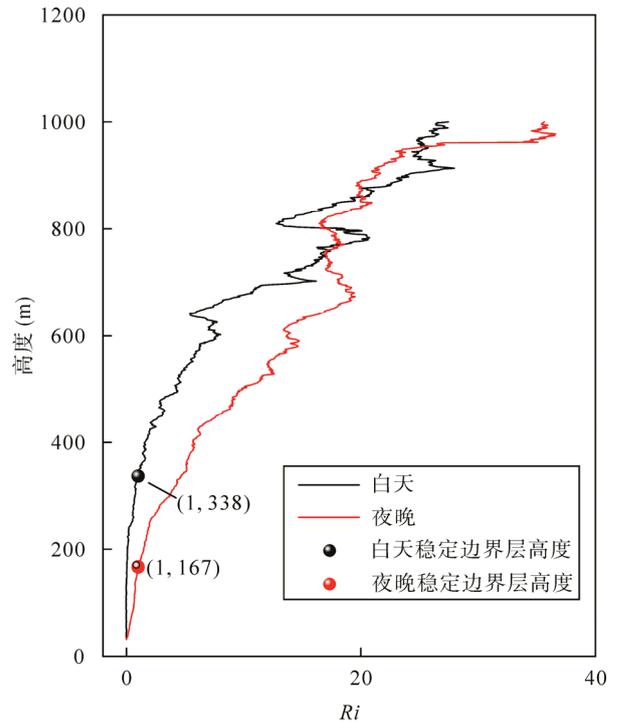


图4 成都市2017年1月4日14时至2017年1月7日05时白天和夜间观测时次平均 $Ri$ 值垂直廓线  
Fig.4 Vertical profiles of the average Richardson numbers at daytime and nighttime in Chengdu from 14: 00 on January 4 to 05: 00 on January 7, 2017

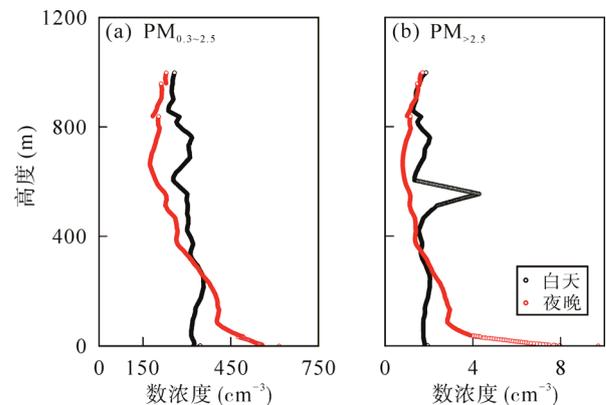


图5 重度污染期间白天和夜间观测时次平均PM<sub>0.3-2.5</sub>(a)和PM<sub>>2.5</sub>(b)的垂直廓线(2017年1月4日14时至2017年1月7日05时)

Fig.5 Vertical distributions of aerosol number concentrations of PM<sub>0.3-2.5</sub> (a) and PM<sub>>2.5</sub> (b) during daytime and nighttime from 14: 00 on January 4 to 05: 00 on January 7, 2017

增加略微减少的趋势, 但低层气溶胶粒子数浓度与高层的相差不大。PM<sub>>2.5</sub>数浓度垂直分布在500~600 m高度层出现突增, 此处的相对湿度较大, 在90%以上, 可能是由该高度层出现云雾滴残留所致, PM<sub>>2.5</sub>数浓度在其他高度层变化不大。但是在夜晚, 气溶胶数浓度垂直廓线却出现了明显的分层现象, 颗粒物在100 m以下的近地面层大量累积。虽然

$PM_{0.3-2.5}$  和  $PM_{>2.5}$  数浓度都有随高度增加而减少的特征,但是在 100 m 高度内,粒子数浓度的减速最明显。在 100~400 m 高度层粒子数浓度减少的速率略有减慢,在 400 m 以上高度, $PM_{0.3-2.5}$  和  $PM_{>2.5}$  数浓度的减少速度较为平稳。在不同高度处, $PM_{0.3-2.5}$  数浓度均远远大于  $PM_{>2.5}$ ,占比超过 95%,说明这次成都冬季重霾污染事件中大气边界层主要受高浓度细粒子主导。

这次成都市冬季重霾污染过程发生、维持和消散 3 个阶段大气边界层气溶胶垂直结构的时间变化见图 6,由于细粒子占主导,且粗、细粒子浓度相差两个数量级,我们重点讨论  $PM_{0.3-2.5}$  数浓度的变化,其主要特征包括以下 3 个方面。

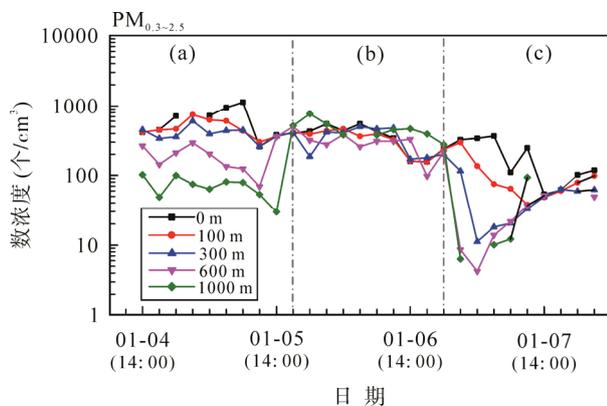


图 6 2017 年 1 月 4 日 14 时至 2017 年 1 月 7 日 23 时霾污染发生(a)、维持(b)及消散(c)阶段不同高度气溶胶细粒子数浓度随时间变化(纵坐标为对数坐标)

Fig.6 Temporal variations of aerosol number concentrations at the different vertical layers during the beginning (a), persistent (b), and dissipation (c) stages of the heavy haze event from 14:00 on January 4 to 23:00 on January 7, 2017 (the y-coordinate is the logarithmic coordinate  
横坐标每个小刻度代表间隔 3 h  
each small scale in the abscissa represents an interval of 3 h

(1) 在 4 日 14 时至 5 日 14 时重霾污染发生阶段(图 6a),大气边界层气溶胶粗、细粒子主要集中在 300 m 高度以下,即近地面层大气气溶胶粒子数浓度大量累积。在 300 m 高度以上,数浓度垂直分布呈现随高度明显递减,到高层 1000 m 处气溶胶粗、细粒子均处于较低水平。城市较强的人为污染物排放及其在近地面的大量累积是造成这次成都重霾事件的主要诱因。

(2) 5 日 17 时至 6 日 20 时重霾污染的维持阶段(图 6b),大气边界层 1000 m 以下各个高度的气溶胶数浓度,尤其是细粒子数浓度趋于一致。这表明在这一阶段出现了较强的大气垂直扩散,将近地面的

高浓度颗粒物带到了大气边界层内,使高层和低层的细粒子浓度基本一致。通过这一观测事实表明,尽管四川盆地这次重霾污染持续期间大气边界层趋于稳定(参见图 3),但大气边界层内却出现较强的大气垂直混合作用,可能与大气边界层和气溶胶相互作用有关,此次霾污染过程的大气边界层观测事实值得深入分析。

(3) 6 日 23 时重霾污染开始消散阶段(图 6c)。这个阶段大气边界层气溶胶粒子数浓度急剧下降,其中细粒子数浓度下降更为明显。大气边界层中较高高度的大气气溶胶粒子浓度最先开始下降,而且下降幅度更大,这表明此次重霾污染过程的消散是从大气边界层较高处开始。这可能是这阶段大气边界层与对流层自由大气相互作用,导致大气静稳边界层条件消失对流增大,从而加强了大气气溶胶传输扩散和重霾污染消散。

## 2.4 大气边界层与颗粒物垂直变化的关系

从颗粒物数浓度的垂直分布特征来看,若将系留汽艇升空前测到的地面颗粒物数浓度数据作为地面数浓度  $N_a(0)$ ,用本文 1.2 节的式(2)可以求得气溶胶标高  $H_p$  值,结果见表 2。气溶胶标高  $H_p$  值的总体特征为白天大于夜晚,这主要是由于白天边界层较高,气溶胶粒子的垂直扩散较强,而夜晚大气边界层稳定,气溶胶粒子在低层大量堆积,故  $H_p$  值相对较低。此外,还可以看出白天  $PM_{0.3-2.5}$  的  $H_p$  值小于  $PM_{>2.5}$ ,而夜晚粗、细粒子的标高特征则与白天相反。这是因为白天  $PM_{>2.5}$  数浓度垂直分布变化范围较小,从近地面到 1000 m 高度左右的数浓度值相差不大,所以白天  $PM_{>2.5}$  的标高较高。夜晚由于受逆温层影响, $PM_{>2.5}$  在近地面的数浓度几乎是 1000 m 高度处的 5 倍,因此夜晚  $PM_{>2.5}$  的标高较低。

表 2 重度污染期间(2017 年 1 月 4 日 14 时至 2017 年 1 月 7 日 05 时)气溶胶标高拟合值

时间	拟合参数	$H_p$ (m)
白天	$PM_{0.3-2.5}$	1086
	$PM_{>2.5}$	1335
夜晚	$PM_{0.3-2.5}$	1018
	$PM_{>2.5}$	774

此次重度污染期间,地面 0~1000 m 内 5 个不同高度处颗粒物数浓度与大气边界层相对湿度、温度

和风速的相关系数如表 3 所示, 此处我们重点讨论  $PM_{0.3-2.5}$  (原因见 2.3)。风速与气溶胶浓度的关系能表示边界层动力因子对气溶胶污染传输的影响, 各个高度上  $PM_{0.3-2.5}$  数浓度与风速均呈负相关关系, 并都通过了置信度为 95% 以上的显著性检验, 即风速越大, 颗粒物的数浓度越低。风速的增大加剧了大气的传输扩散, 其影响作用对较细颗粒更为明显。温度在近地层与颗粒物数浓度均呈现负相关关系, 而在 100 m 以上的高度颗粒物浓度与温度呈正相关关系。这可能是当低层温度越低高层温度越高时, 大气热力稳定性越强, 更利于大气污染物的累积, 所以出现这种低层和高层相关性反位相特征。颗粒物数浓度与相对湿度呈正相关关系, 表明在重霾污染期间, 相对湿度增加有利于气溶胶粒子的吸湿增长和液相化学反应, 加重了颗粒物浓度。

表 3 重霾污染期间(2017年1月4日14时至2017年1月7日05时)不同高度层  $PM_{0.3-2.5}$  数浓度与气象要素的相关性

Table 3 Correlation coefficients for  $PM_{0.3-2.5}$  number concentrations and meteorological parameters at five different heights over January 4 to 7, 2017

高度	$PM_{0.3-2.5}$		
	风速	温度	相对湿度
0 m	-0.46***	-0.59***	0.45**
100 m	-0.62***	0.14	0.50***
300 m	-0.40**	0.32*	0.53***
600 m	-0.53***	0.59***	0.13
1000 m	-0.64***	0.22	0.58***

注: \*\*\*表示通过置信度为 99% 的显著性检验; \*\*表示均通过置信度为 95% 的显著性检验; \*表示通过置信度为 90% 的显著性检验

### 3 结论

(1) 此次重霾污染期间, 大气边界层昼夜变化特征基本消失。稳定边界层结构出现的频次远大于对流边界层结构, 大气边界层结构趋于稳定, 期间边界层平均高度白天为 338 m, 夜晚为 167 m, 边界层高度明显偏低, 表现出大气边界层结构的盆地区域性特征。

(2) 此次重霾污染过程中,  $PM_{0.3-2.5}$  和  $PM_{>2.5}$  数浓度量级差异较大,  $PM_{0.3-2.5}$  数浓度峰值超过  $PM_{>2.5}$  数浓度的  $10^2$  倍, 说明这次成都冬季重霾污染事件中大气边界层主要受高浓度细粒子主导。

(3) 重霾过程的发生、维持及消散阶段大气边界层气溶胶垂直结构具有明显差异。在霾发生阶段,

气溶胶粒子数浓度随高度递减明显; 在霾持续阶段, 尽管大气边界层结构趋于稳定, 但仍存在较强的大气垂直混合作用, 使得大气垂直方向的粒子浓度数趋于一致, 这是一个值得深入分析的重霾污染过程观测现象; 在霾消散阶段, 较高处的气溶胶粒子浓度最先下降, 且下降幅度最大。表明城市污染物排放堆积, 大气边界层垂直结构和自由大气作用对霾污染发生、维持和消散具有不同的影响作用。

(4) 大气边界层动力-热力因子和湿度条件影响大气颗粒物垂直分布。风速的增大加剧了大气传输扩散, 其影响作用对较细颗粒( $PM_{0.3-2.5}$ )更为明显。温度与大气颗粒浓度在近地层呈负相关关系, 在 100 m 以上的高度呈正相关关系, 表明大气边界层低层偏冷, 高层偏暖的稳定大气热力层结减弱了大气污染物的垂直扩散。相对湿度的增加有利于气溶胶粒子的吸湿增长和液相化学反应, 加剧了重霾污染。

南京信息工程大学大气物理学院多位老师及同学共同参与了四川盆地站点的室外观测工作; 温江区气象局工作人员在观测期间提供热情帮助; 各位审稿专家给出了指导建议, 作者在此一并致谢。

### 参考文献(References):

- [1] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, Luo Y F. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. Science, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [2] Zhang R J, Han Z W, Shen Z X, Cao J J. Continuous measurement of number concentrations and elemental composition of aerosol particles for a dust storm event in Beijing[J]. Adv Atmos Sci, 2008, 25(1): 89-95.
- [3] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, Smith D J T. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: Estimation of secondary organic carbon concentrations[J]. Atmos Environ, 1999, 33(17): 2771-2781.
- [4] Seinfeld J H, Pandis S N, Noone K. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change[J]. Environ Sci Policy Sustain Dev, 1998, 40(7): 26-26.
- [5] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 刘端阳, 李子华. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1425-1431.  
Yang Jun, Niu Zhong-qing, Shi Chun-e, Liu Duan-yang, Li Zi-hua. Microphysics of atmospheric aerosols during winter haze/fog events in Nanjing[J]. Environ Sci, 2010, 31(7): 1425-1431 (in Chinese with English abstract).
- [6] Wu D, Tie X X, Li C C, Ying Z M, Lau A K H, Huang J, Deng X J, Bi X Y. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study[J]. Atmos Environ, 2005, 39(35): 6568-6577.

- [7] Yu X N, Ma J, Zhu B, Wang H L, Yan S Q, Xia H. Effects of relative humidity and aerosol physicochemical properties on atmospheric visibility in northern suburb of Nanjing[J]. Environ Sci, 2015 (6): 1919–1925.
- [8] Feng Y R, Wang A Y, Wu D, Xu X D. The influence of tropical cyclone Melor on PM<sub>10</sub> concentrations during an aerosol episode over the Pearl River Delta region of China: Numerical modeling versus observational analysis[J]. Atmos Environ, 2007, 41(21): 4349–4365.
- [9] 周明煜, 姚文清, 徐祥德, 于海青. 北京城市大气边界层低层垂直动力和热力特征及其与污染物浓度关系的研究[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(增刊 I): 20–30.  
Zhou Mingyu, Yao Wenqing, Xu Xiangde, Yu Haiqing. Vertical dynamic and thermodynamic characteristics of urban lower boundary layer and its relationship with aerosol concentration over Beijing[J]. Sci China D, 2005, 35(S1): 20–30 (in Chinese).
- [10] Pasch A N, Macdonald C P, Gilliam R C, Knoderer C A, Roberts P T. Meteorological characteristics associated with PM<sub>2.5</sub> air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009–2010 Cleveland multiple air pollutants study[J]. Atmos Environ, 2011, 45(39): 7026–7035.
- [11] 马新成, 吴宏议, 嵇磊, 张蕾, 黄梦宇, 李宏宇, 杨道侠, 何晖, 张磊, 李睿劫, 刘力威, 韩光. 北京春季不同天气条件下气溶胶垂直分布特征[J]. 气象, 2011, 37(9): 1126–1133.  
Ma Xin-cheng, Wu Hong-yi, Ji Lei, Zhang Qiang, Huang Meng-yu, Li Hong-yu, Yang Dao-xia, He Hui, Zhang Lei, Li Rui-jie, Liu Li-wei, Han Guang. Vertical distributions of aerosol under different weather conditions in Beijing[J]. Meteorol Mon, 2011, 37(9): 1126–1133 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘思瑶, 濮江平, 周毓荃, 孙玉稳. 河北气溶胶浓度垂直分布特性研究[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(2): 41–45.  
Liu Si-yao, Pu Jiang-ping, Zhou Yu-quan, Sun Yu-wen. Study on the vertical distributive characters of aerosol concentration in Hebei[J]. Meteorol Environ Sci, 2016, 39(2): 41–45 (in Chinese with English abstract).
- [13] 丁国安, 陈尊裕, 高志球, 姚文清, 李毓湘, 程兴宏, 孟昭阳, 于海青, 黄锦恒, 王淑凤, 苗秋菊. 北京城区低层大气 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 垂直结构及其动力特征[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(增刊 I): 31–44.  
Ding Guoan, Chen Zunyu, Gao Zhiqiu, Yao Wenqing, Li Yuxiang, Cheng Xinghong, Meng Zhaoyang, Yu Haiqing, Huang Jinheng, Wang Shufeng, Miao Qiuju. Vertical structures of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> and their dynamical character in low atmosphere in Beijing urban areas[J]. Sci China D, 2005, 35(S1): 31–44 (in Chinese).
- [14] 谈哲敏, 方娟, 伍荣生. Ekman 边界层动力学的理论研究[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 543–555.  
Tan Zhe-min, Fang Juan, Wu Rong-sheng. Ekman boundary layer dynamic theories[J]. Acta Meteorol Sinica, 2005, 63(5): 543–555 (in Chinese with English abstract).
- [15] Zhao X J, Zhao P S, Xu J, Meng W. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain[J]. Atmos Chem Phys, 2013, 13(1): 903–933.
- [16] 蒋哲, 陈良富, 王中挺, 陶明辉. 珠江三角洲对流层气溶胶时空变化特征分析[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1835–1842.  
Jiang Zhe, Chen Liang-fu, Wang Zhong-ting, Tao Ming-hui. The analysis of spatiotemporal variation characteristics of tropospheric aerosol over the Pearl River Delta[J]. Chinese J Geophys, 2013, 56(6): 1835–1842 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘建, 范绍佳, 吴兑, 吴蒙, 廖志恒, 李浩文. 珠江三角洲典型灰霾过程的边界层特征[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1664–1674.  
Liu Jian, Fan Shao-jia, Wu Dui, Wu Meng, Liao Zhi-heng, Li Hao-wen. Boundary layer characteristics of typical haze process in the Pearl River Delta region[J]. China Environ Sci, 2015, 35(6): 1664–1674 (in Chinese with English abstract).
- [18] 郭丽君, 郭学良, 方春刚, 朱士超. 华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(4): 427–443.  
Guo Lijun, Guo Xueliang, Fang Chungang, Zhu Shichao. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China[J]. Sci China Earth Sci, 2015, 45(4): 427–443 (in Chinese).
- [19] 孙扬, 王跃思, 李昕, 安俊琳, 辛金元, 胡波. 北京地区一次持续重污染过程 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、CO 的垂直分布分析[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1616–1622.  
Sun Yang, Wang Yue-si, Li Xin, An Jun-lin, Xin Jin-yuan, Hu Bo. An analysis for vertical distribution of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> and CO in the atmosphere during a serious air pollution in Beijing[J]. Chinese J Geophys, 2006, 49(6): 1616–1622 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 李卫军, 张蕾, 王炜罡, 权建农, 曹国良, 王继志, 杨元琴, 张养梅. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178–1187.  
Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, Li Weijun, Zhang Qiang, Wang Weigang, Quan Jiannong, Cao Guoliang, Wang Jizhi, Yang Yuanqin, Zhang Yangmei. Factors contributing to haze and fog in China[J]. Chinese Sci Bull, 2013, 58(13): 1178–1187 (in Chinese with English abstract).
- [21] Qiao X, Jaffe D, Tang Y, Bresnahan M, Song J. Evaluation of air quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: Are China's air quality standards sufficient yet?[J]. Environ Monit Assess, 2015, 187(5): 250.
- [22] 颜玉倩, 朱克云, 张杰, 徐斌. 成都地区春季一次持续性灰霾天气过程特征及预测[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(1): 33–39.  
Yan Yu-qian, Zhu Ke-yun, Zhang Jie, Xu Cheng. Characteristics of a haze weather event and prediction during spring in Chengdu[J]. J Meteorol Environ, 2016, 32(1): 33–39 (in Chinese with English abstract).
- [23] 邓利群, 钱骏, 廖瑞雪, 佟洪金. 2009年8~9月成都市颗粒物污染及其与气象条件的关系[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1433–1438.

- Deng Li-qun, Qian Jun, Liao Rui-xue, Tong Hong-jin. Pollution characteristics of atmospheric particulates in Chengdu from August to September in 2009 and their relationship with meteorological conditions[J]. *China Environ Sci*, 2012, 32(8): 1433–1438 (in Chinese with English abstract).
- [24] 秦武斌, 李学彬, 鲁先洋, 陈小威, 崔生成, 翁宁泉, 朱文越. 我国西北地区气溶胶垂直分布特征分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 123–130.
- Qin Wu-bin, Li Xue-bing, Lu Xian-yang, Chen Xiao-wei, Cui Sheng-cheng, Weng Ning-quan, Zhu Wen-yue. Aerosol vertical distribution characteristics in Northwest China[J]. *Acta Opt Sinica*, 2017, 37(3): 123–130 (in Chinese with English abstract).
- [25] 韩永, 饶瑞中, 王英俭. 沿海和内陆地区多波长光谱气溶胶标高的比较分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 33–37.
- Han Yong, Rao Rui-zhong, Wang Ying-jian. Multi-wavelength spectral aerosol scale height in inshore in contrast with that in inland[J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2009, 29(1): 33–37 (in Chinese with English abstract).
- [26] Eresmaa N, Karppinen A, Joffre S M, Räsänen J, Talvitie H. Mixing height determination by ceilometer[J]. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2005, 5(6): 12697–12722.
- [27] Voegele D H P, Holtslag A A M. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations[J]. *Bound-Layer Meteorol*, 1996, 81(3): 245–269.
- [28] Sørensen J H, Rasmussen A, Svensmark H. Forecast of atmospheric boundary-layer height utilised for ETEX real-time dispersion modelling[J]. *Phys Chem Earth*, 1996, 21(21): 435–439.
- [29] Esau I, Zilitinkevich S. On the role of the planetary boundary layer depth in the climate system[J]. *Anal Pyrol*, 2010, 4(1): 63–69.
- [30] Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, Joffre S, Rasmussen A, Tercier P. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height[J]. *Atmos Environ*, 2000, 34(7): 1001–1027.
- [31] Zilitinkevich S S, Baklanov A. Calculation of the height of stable boundary layers in practical applications[J]. *Bound-Layer Meteorol*, 2002, 105(3): 389–409.
- [32] 王式功, 张镭, 陈长和, 袁九毅. 兰州地区大气环境研究的回顾与展望[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(3): 189–201.
- Wang Shi-gong, Zhang Lei, Chen Chang-he, Yuan Jiu-yi. Retrospect and prospect for the studies of atmospheric environment in the Lanzhou area[J]. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 1999, 35(3): 189–201 (in Chinese with English abstract).
- [33] 徐桂荣, 崔春光, 周志敏, 张兵, 李跃清, 赵兴炳. 利用探空资料估算青藏高原及下游地区大气边界层高度[J]. *暴雨灾害*, 2014, 33(3): 217–227.
- Xu Gui-rong, Cui Chun-guang, Zhou Zhi-min, Zhang Bing, Li Yue-qing, Zhao Xing-bing. Atmospheric boundary layer heights estimated from radiosonde observations over the Qinghai-Tibet Plateau and its downstream area[J]. *Torrent Rain Disasters*, 2014, 33(3): 217–227 (in Chinese with English abstract).