

北京地区大气温湿廓线对气溶胶垂直分布的影响

王伟齐¹, 王章军², 臧增亮³, 胡俊忠¹, 张诚杰¹, 庄全风²

(1.中国人民解放军 66199 部队, 北京 100041; 2.齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001; 3.国防科技大学 气象海洋学院, 南京 211101)

摘要: **目的** 分析北京地区大气温湿廓线对气溶胶垂直分布的影响。**方法** 利用北京地区 2017 年 9 月至 2018 年 8 月每日两次(08 时和 20 时)的气象探空、地面 PM_{2.5} 浓度和气溶胶激光雷达消光系数资料, 分析不同污染条件下大气温湿廓线与气溶胶消光系数廓线的关系。**结果** 地面 PM_{2.5} 浓度和 210 m 气溶胶消光系数的相关系数达到 0.77。春季、秋季和冬季污染条件下的近地面消光系数约是清洁条件下的 5 倍, 夏季污染条件下的近地面消光系数约是清洁条件下的 3 倍。相比清洁条件下, 污染条件下各季节的大气温度垂直递减率偏小, 并且低层大气相对湿度偏大。**结论** 大气温度廓线代表大气层结稳定性, 影响气溶胶的扩散高度, 而相对湿度廓线与气溶胶吸湿增长密切相关, 两者对气溶胶消光系数的垂直分布都有重要影响。

关键词: 气溶胶消光系数; 温湿廓线; PM_{2.5}; 污染条件

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.009

中图分类号: X823 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)06-0047-08

Effects of Atmospheric Temperature and Humidity Profiles on Vertical Distribution of Aerosols in Beijing

WANG Wei-qi¹, WANG Zhang-jun², ZANG Zeng-liang³, HU Jun-zhong¹, ZHANG Cheng-jie¹, ZHUANG Quan-feng²
(1. Unit 66199 of PLA, Beijing 100041, China; 2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266001, China; 3. Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

ABSTRACT: Objective To analyze effects of atmospheric temperature and humidity profiles on the vertical distribution of aerosols in Beijing. **Methods** The relationship between atmospheric temperature and humidity profiles and aerosol extinction coefficient profiles under different pollution conditions was analyzed with meteorological sounding, ground PM_{2.5} concentration and aerosol lidar extinction coefficient data twice (08:00 and 20:00) a day from September 2017 to August 2018 in Beijing. **Results** The correlation coefficients of ground PM_{2.5} concentration and aerosol extinction coefficient at 210 m was 0.77. The extinction coefficient of near ground in spring, autumn and winter was about 5 times of that under clean conditions; and that under summer pollution was about 3 times of that under clean conditions. Compared with the clean conditions, the vertical decline rate of atmospheric temperature in each season under the pollution conditions was smaller; and the relative humidity in the lower atmosphere was larger. **Conclusion** The atmospheric temperature profile represents the stability of atmospheric stratification and

收稿日期: 2019-01-07; 修订日期: 2019-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(41775123)

作者简介: 王伟齐(1991—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为气溶胶反演。

通讯作者: 臧增亮(1977—), 男, 副教授, 主要研究方向为气溶胶资料同化。

affects the height of aerosol diffusion. The relative humidity profile is closely related to the aerosol hygroscopicity growth. Both have important effects on the vertical distribution of aerosol extinction coefficient.

KEY WORDS: aerosol extinction coefficient; temperature and humidity profiles; PM_{2.5}; pollution conditions

随着我国城市化和工业化进程的发展,大气环境问题日益凸显,PM_{2.5}、PM₁₀等气溶胶颗粒物是目前大部分地区的主要污染物。尽管政府已经采取很多措施降低气溶胶颗粒物,但在不利的气象条件下,依然会出现比较严重的气溶胶污染事件^[1-3]。已有很多针对气象条件与气溶胶浓度之间关系的研究,张仁健等^[4]研究了北京地区气溶胶数浓度及其谱分布特征与相对湿度的关系。林俊等^[5]统计分析了上海地区不同粒径大气气溶胶的数浓度与温度、相对湿度和风速等气象因素之间的关系。

受制于气溶胶垂直分布观测手段的不足,研究大多针对地面的污染物和气象变量进行,但大气环境是三维的,特别是垂直方向的大气稳定度对气溶胶的扩散起重要作用,因此掌握气溶胶的垂直分布特征对于深入了解气溶胶污染过程十分重要^[6]。随着国内外激光雷达的应用,雷达廓线资料为研究气溶胶的垂直分布提供了依据。Raman等^[7]将中国喜马拉雅测得的37个气溶胶垂直分布数据与云和气溶胶偏振激光雷达(CALIPSO)数据对比,发现秋、冬两季的垂直分布结构基本相似,而春、夏两季在海拔低于3 km时差异明显。吕阳等^[8]选取北京地区2013年1月灰霾天气和2月晴好天气进行气溶胶垂直分布对比研究,发现晴好天气气溶胶的垂直分布不均匀,易出现垂直分层现象,而灰霾天气气溶胶主要集中在垂直高度1 km以下,基本无分层现象。许潇峰等^[9]分析了2013年12月华北地区一次典型大范围雾霾污染事件中气溶胶的分布特征,发现霾日和清洁日的消光系数在低层差异很大,随高度增加,差异减小。

虽然对特定季节或是特别污染天气背景下气溶胶垂直分布特征进行了较多研究,但对于长时间范围

内不同污染条件下气溶胶的垂直分布及其与气象条件的关系研究仍较少。文中利用2017年9月至2018年8月08时和20时北京地区的激光雷达廓线资料反演气溶胶消光系数,并结合探空观测的气象数据和环保部发布的PM_{2.5}浓度数据,对不同污染条件下气溶胶垂直分布和大气温湿廓线进行分析,探索其影响机制。

1 数据分析处理

1.1 激光雷达数据

本研究使用的激光雷达数据来自山东省科学院海洋仪器仪表研究所自主研发的多波长气溶胶激光雷达^[10-11],该设备在北京进行持续观测实验,积累了2017年9月至2018年8月的全年观测数据。

激光雷达接收到距离z处的后向散射信号可以表示为:

$$P(z) = P_0 C z^{-2} [\beta_m(z) + \beta_a(z)] \exp \left[-2 \int_0^z [\alpha_m(z') + \alpha_a(z')] dz' \right] \tag{1}$$

式中:z为探测距离;P表示高度z处的大气回波信号功率;P₀为激光发射功率;C为系统常数;β为后向散射系数;α为消光系数;下标a、m分别代表气溶胶、大气分子。利用激光雷达接收的回波信号可以反演气溶胶光学参数等信息,本研究采用的532 nm气溶胶消光系数利用Fernald算法^[12]反演获得。利用Fernald反演算法计算气溶胶消光系数时,标定高度z_c以下高度(后向积分)和z_c以上高度(前向积分)的消光系数表达式分别为:

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(z) + \frac{X(z) \cdot \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz' \right]}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} X(z') \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z'') dz'' \right] dz' \tag{2}$$

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(z) + \frac{X(z) \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_{z_c}^z \alpha_m(z') dz' \right]}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(z_c)} - 2 \int_{z_c}^z X(z') \exp \left[-2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_{z_c}^z \alpha_m(z'') dz'' \right] dz' \tag{3}$$

式中: X(z)=P(z)·z·z,分子消光系数α_m可由理论计算得到,S_m、S_a分别为分子和气溶胶的消光散射比,S_m=α_m/β_m=8π/3,S_a的取值取决于发射激光的波长、

气溶胶的尺度谱分布、折射指数和地理位置,取值范围一般在10~100 sr之间,可以根据不同观测地点、不同天气情况而事先给定,文中反演532 nm波长的

消光系数时, 将 S_a 取值 50 sr。相比于气溶胶或云粒子, 大气分子的性质比较稳定。标定高度 z_c 的设定可选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度 (大气介质仅被视为分子), 如视大气状况选定在 10 km 或其他高度。在参考高度, 气溶胶消光系数临界值可由 $1+\beta_a(z_c)/\beta_m(z_c)=1.01$ 确定。

为匹配探空观测时间, 研究选取激光雷达每天 08 时和 20 时的消光系数廓线, 从 210 m 开始进行数据对比分析。

1.2 探空气象数据

美国国家气候数据中心整合了一套全球范围内的高质量探空站点数据集-IGRA(the Integrated Global Radiosonde Archive)^[13]。IGRA 数据集包括 11 个数据来源整合的全球 1538 个探空站经过质量控制的探空数据。在垂直层次上, 该探空数据集包括标准等压面、特性层以及风层的资料^[14]。探测要素包括位势高度、气温、露点温度差、相对湿度、风向和风速等。文中收集了 2017 年 9 月至 2018 年 8 月北京站的探空观测数据。

1.3 空气质量数据

$PM_{2.5}$ 浓度观测资料来自于全国空气质量实时发布平台, 目前该平台提供全国 375 个城市 1649 个监测站的空气质量实时监测数据, 数据信息包括 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的逐小时浓度值, 以及空气质量指数 AQI。文中收集了研究期间北京市官网站的空气质量数据, 该站距离激光雷达观测站和探空站的距离均小于 10 km, 能够较好地代表局地的污染状况。

除了空间上匹配外, 还要进行时间上的匹配。探空观测仅在北京时 08 时和 20 时进行, 本研究将激光

雷达资料和 $PM_{2.5}$ 数据在相应时刻进行匹配。

2 结果与讨论

2.1 气溶胶消光系数特征分析

由地面 $PM_{2.5}$ 浓度和激光雷达 210 m 气溶胶消光系数的基本统计量可知, 相比于 1 年 730 个 (每天 2 次) 样本而言, 两者的有效样本量均比较高, 均达到 85% 以上。 $PM_{2.5}$ 浓度最小值仅为 $1.000 \mu g/m^3$, 最大值达到 $298.000 \mu g/m^3$, 平均值为 $54.402 \mu g/m^3$ 。近地面气溶胶消光系数的变化幅度也比较大, 最小值仅为 $0.004 km^{-1}$, 最大值达 $3.296 km^{-1}$, 平均值为 $0.395 km^{-1}$ 。

月均值地面 $PM_{2.5}$ 浓度、210 m 气溶胶消光系数和地面相对湿度的时间序列如图 1 所示, 可以看出, 地面 $PM_{2.5}$ 浓度和 210 m 气溶胶消光系数的时间序列有很好的的一致性。对相同时刻匹配后 $PM_{2.5}$ 浓度和 210 m 气溶胶消光系数数据进行相关分析显示, 两者的相关系数达到 0.77。值得注意的是, 夏季 (6—8 月) 的地面 $PM_{2.5}$ 浓度明显偏低, 但 210 m 气溶胶消光系数却未明显偏低, 甚至在 7 月份有较明显的增大。这主要是由于夏季边界层高度比较高, $PM_{2.5}$ 浓度扩散的高度也比较高, 造成地面 $PM_{2.5}$ 浓度偏低, 但夏季近地层水汽湿度较大, 特别是在 7 月份 (见图 1c), $PM_{2.5}$ 吸湿增长致使消光特性增强^[15]。冬季 (12、1 和 2 月) 的 210 m 气溶胶消光系数偏低, 但地面 $PM_{2.5}$ 浓度却未明显偏低。冬季往往有贴地逆温层存在, 由于 $PM_{2.5}$ 和水汽常集中在该逆温层以下, 导致地面 $PM_{2.5}$ 浓度偏高; 210 m 可能已经处于贴地逆温层以上, $PM_{2.5}$ 浓度较低, 相对湿度也较小, 故气溶胶消光系数偏低。北京冬季 08 时和 20 时贴地逆温层出现

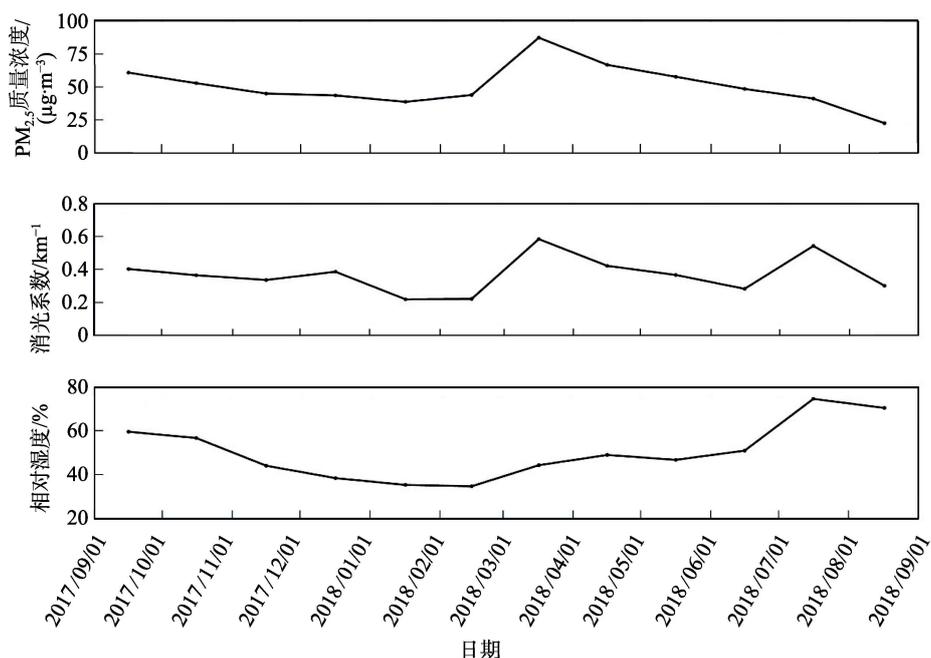


图 1 月均值地面 $PM_{2.5}$ 浓度、210 m 气溶胶消光系数和地面相对湿度的时间序列

频数和逆温层顶高度的统计特征见表1,可以看出,08时和20时大部分情况下均存在贴地逆温层,其中贴地逆温层顶高度最小值为21 m,最大值可达500 m以上,平均高度均低于210 m。

表1 北京冬季08时和20时贴地逆温层出现频数和逆温层顶高度的统计特征

	出现频数	最小值/m	最大值/m	平均值/m
08时	57 (90)	21.00	578.00	180.28
20时	46 (90)	21.00	569.00	106.28

注:括号内的数字为整个冬季的天数

选取冬、夏季节各一个样本进行说明。如图2所示,2018年1月19日08时地面PM_{2.5}浓度为89 μg/m³,

达到轻度污染水平,但210 m气溶胶消光系数仅为0.21 km⁻¹。2018年8月20日08时,地面PM_{2.5}浓度为29 μg/m³,210 m气溶胶消光系数却达到0.32 km⁻¹。由当时的气溶胶消光系数廓线和大气温湿廓线可以看出,1月19日08时在210 m高度以下有明显的贴地逆温层,抑制了PM_{2.5}浓度的垂直扩散,使地面PM_{2.5}浓度偏大^[16]。210 m高度位置在贴地逆温层顶部,相对湿度也比较小,导致气溶胶消光系数偏小。8月20日08时在210 m高度以下无逆温层,空气垂直对流比较充分,且地面至210 m高度,大气相对湿度一直在80%以上,PM_{2.5}吸湿增长明显,导致气溶胶消光系数偏大。

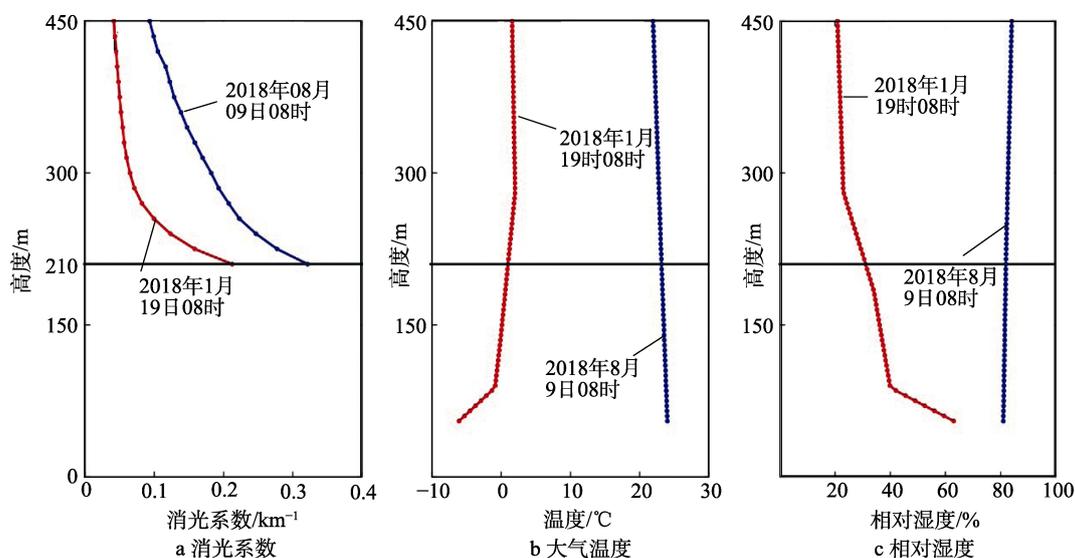


图2 气溶胶消光系数、大气温度和相对湿度廓线

2.2 大气温湿廓线对气溶胶消光系数垂直分布的影响

季节平均的气溶胶消光系数垂直分布如图3所示,可以看出,在大气底层,春季和夏季的消光系数相对较大,冬季的消光系数最小,这应该和相对湿度有关。同时,相对湿度对边界层以上消光系数的影响也很大,造成垂直分布的波动较大。特别是当有云存在时,云的消光系数要比气溶胶的消光系数大得多^[17]。2018年3月30日08时气溶胶消光系数廓线和大气温湿廓线如图4所示,可以看出,气溶胶消光系数的垂直分布特征与相对湿度在垂直高度上的变化趋势结果相近。图4a、c的消光系数和相对湿度均从地面开始减小,在1000 m高度附近达到最小值,然后相对湿度开始增大。当相对湿度增加到50%时,气溶胶消光系数开始缓慢增大。当相对湿度增加到80%时,气溶胶消光系数开始迅速增加,在2000 m高度均达到最大值,说明在2000 m高度附近可能存在云区。此外,春季的气溶胶消光系数垂直分布波动较大,还受外来输送的沙尘气溶胶影响。2018年3

月28日20时气溶胶消光系数廓线和大气温湿廓线如图5所示,可以看出,此时大气垂直相对湿度均小于35%,且温度廓线没有逆温存在,但气溶胶消光系数在800 m高度以上存在一个明显的高值区。当天北京

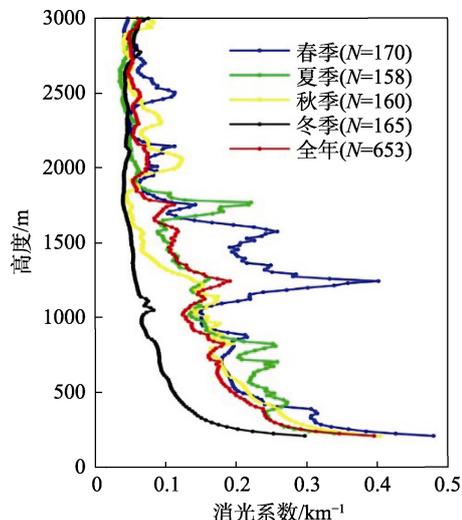


图3 季节平均的气溶胶消光系数垂直分布

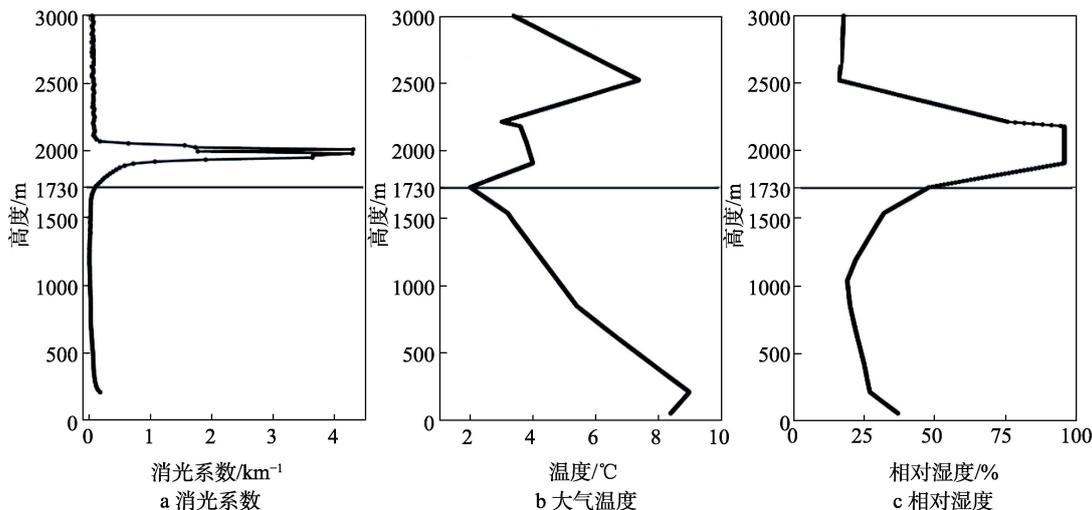


图 4 2018 年 3 月 30 日 08 时受云影响的气溶胶消光系数、大气温度和相对湿度廓线

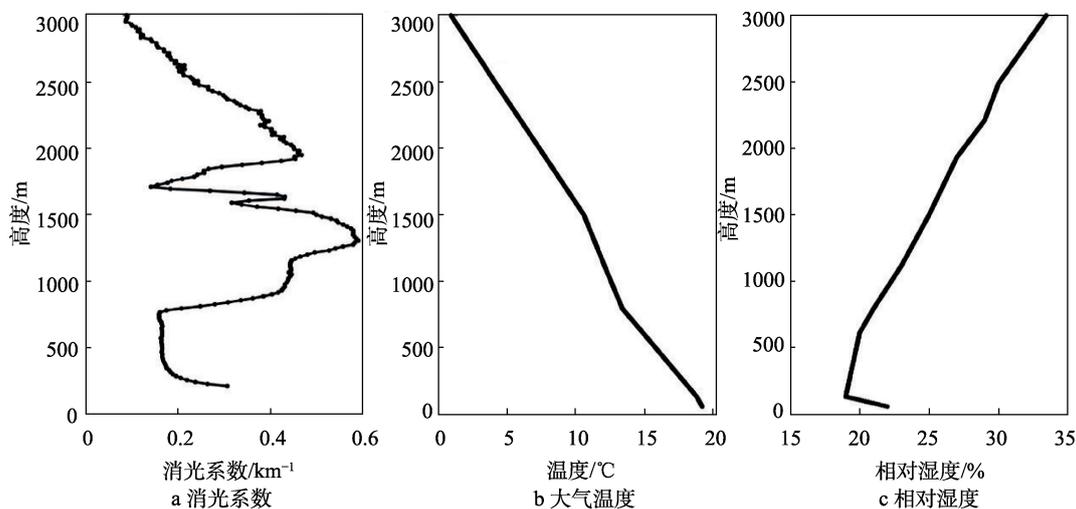


图 5 2018 年 3 月 28 日 20 时受沙尘影响的气溶胶消光系数、大气温度和相对湿度廓线

市气象台发布了沙尘蓝色警报,说明该消光系数高值区可能就是由沙尘造成的。

为了降低云对气溶胶消光系数廓线的影响,对每条气溶胶消光系数廓线及其对应的大气相对湿度廓线进行云剔除。首先寻找气溶胶消光系数和相对湿度均存在峰值的区域,然后判断此区域的相对湿度是否大于 80%,如果大于 80%,则将消光系数开始快速增长的起始高度作为云底高,否则不作处理,最后将云底高以上数据全部剔除。如图 4 中的 1730 m 高度即为云底高,做云剔除时,将 1730 m 高度以上的气溶胶消光系数和大气温湿廓线数据剔除。此外,对于云区较低,不易区分消光系数的变化是由云还是气溶胶引起的,就将整个廓线剔除,所以经过云剔除后的样本量略有减少。各季节的受云影响样本的平均气溶胶消光系数廓线和大气温湿廓线如图 6 所示,可以看出,夏季有云样本最多,冬季有云样本最少。此外,通过比较有云样本不同季节的大气相对湿度廓线,可以看出,夏季的云多为低于 1500 m 的云,而其他三

个季节的云多为高于 1500 m 的云。这主要是由于夏季大气中水汽充分,对流凝结高度和抬升凝结高度均比较低,易出现低云,而其他季节,尤其是冬季,大气中水汽含量较低,多为中高云。

2.3 不同污染条件下气溶胶消光系数垂直分布特征分析

为更好比较清洁和污染条件下气溶胶垂直分布与大气温湿廓线的关系,将匹配的数据按 $PM_{2.5}$ 浓度分为两类:一类是 $PM_{2.5}$ 小时浓度小于 $50 \mu g/m^3$ 对应的样本,代表清洁条件;一类是 $PM_{2.5}$ 小时浓度大于等于 $50 \mu g/m^3$ 对应的样本,代表污染条件。不同条件下各季节的平均气溶胶消光系数廓线和大气温湿廓线如图 7 所示。整体上看,各个季节的气溶胶消光系数均从地面开始迅速减小,夏季减小的速率较慢,而冬季减小较快。这主要是由于夏季的大气边界层较高,污染物扩散得高,而冬季的大气边界层高度较低,污染物扩散得低。

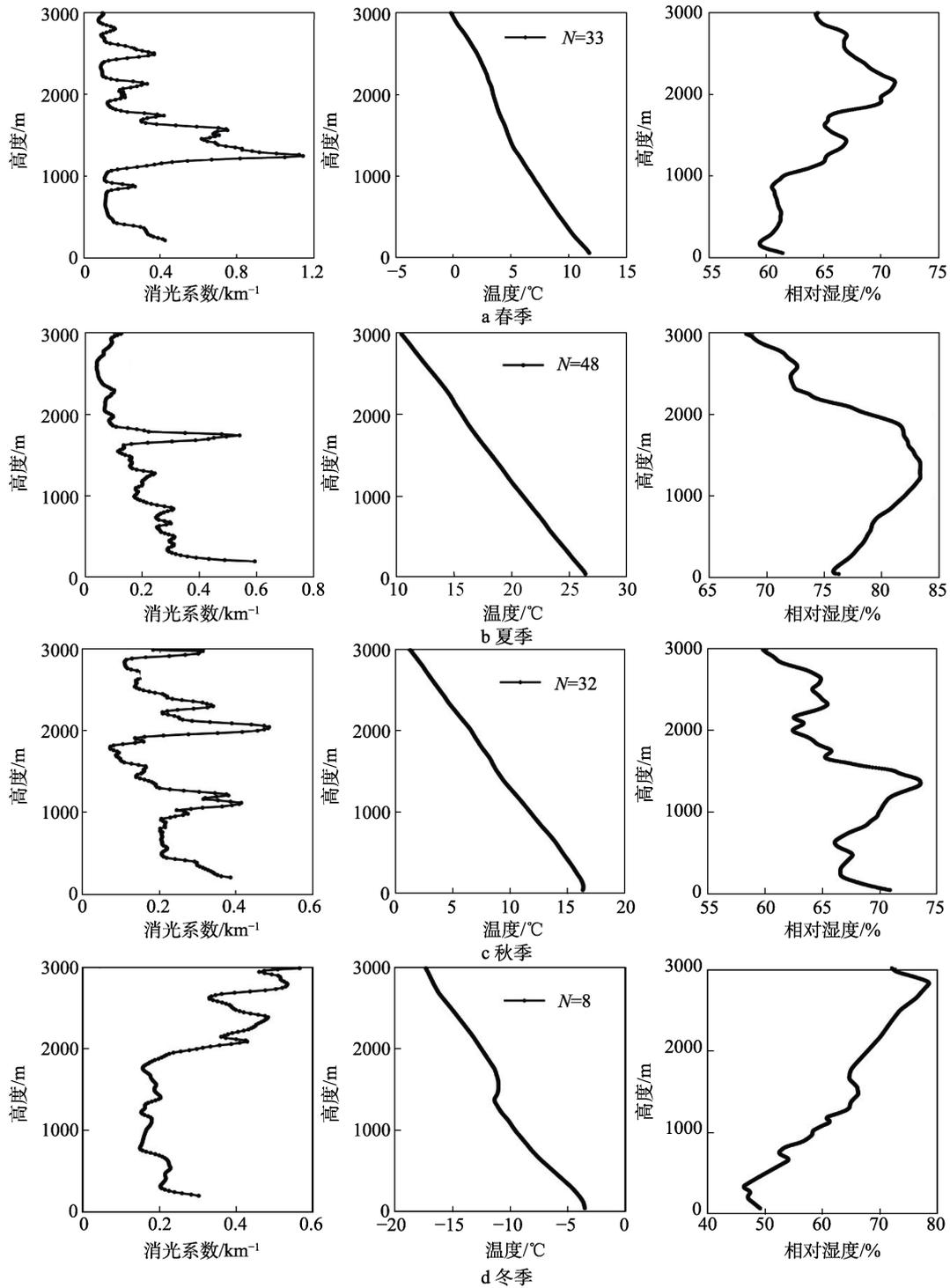


图6 受云影响样本的平均气溶胶消光系数、大气温度和相对湿度廓线

比较图7中清洁和污染条件下气溶胶消光系数的廓线,可以看出,春季、秋季和冬季污染条件下的近地面消光系数约是清洁条件下的5倍,夏季污染条件下的近地面消光系数约是清洁条件下的3倍。这主要是由于夏季大气水汽含量较大,在PM_{2.5}吸湿增长后,其折射指数和粒子的众数半径也随之改变,导致气溶胶消光系数在污染和清洁条件下的差异变小。此外,相较清洁条件下,污染条件下各季节

的大气温度垂直递减率均偏小,而低层(1000 m以下)大气相对湿度均偏大。大气温度垂直递减率越小,说明大气层结越稳定,抑制对流发展,进而影响PM_{2.5}的垂直扩散,导致地面PM_{2.5}浓度增大,反之亦然。低层大气相对湿度较大,PM_{2.5}吸湿增长,当空气湿度较大而未发生沉降作用时,PM_{2.5}吸水悬浮在低空不易扩散,从而造成PM_{2.5}高浓度污染^[17]。

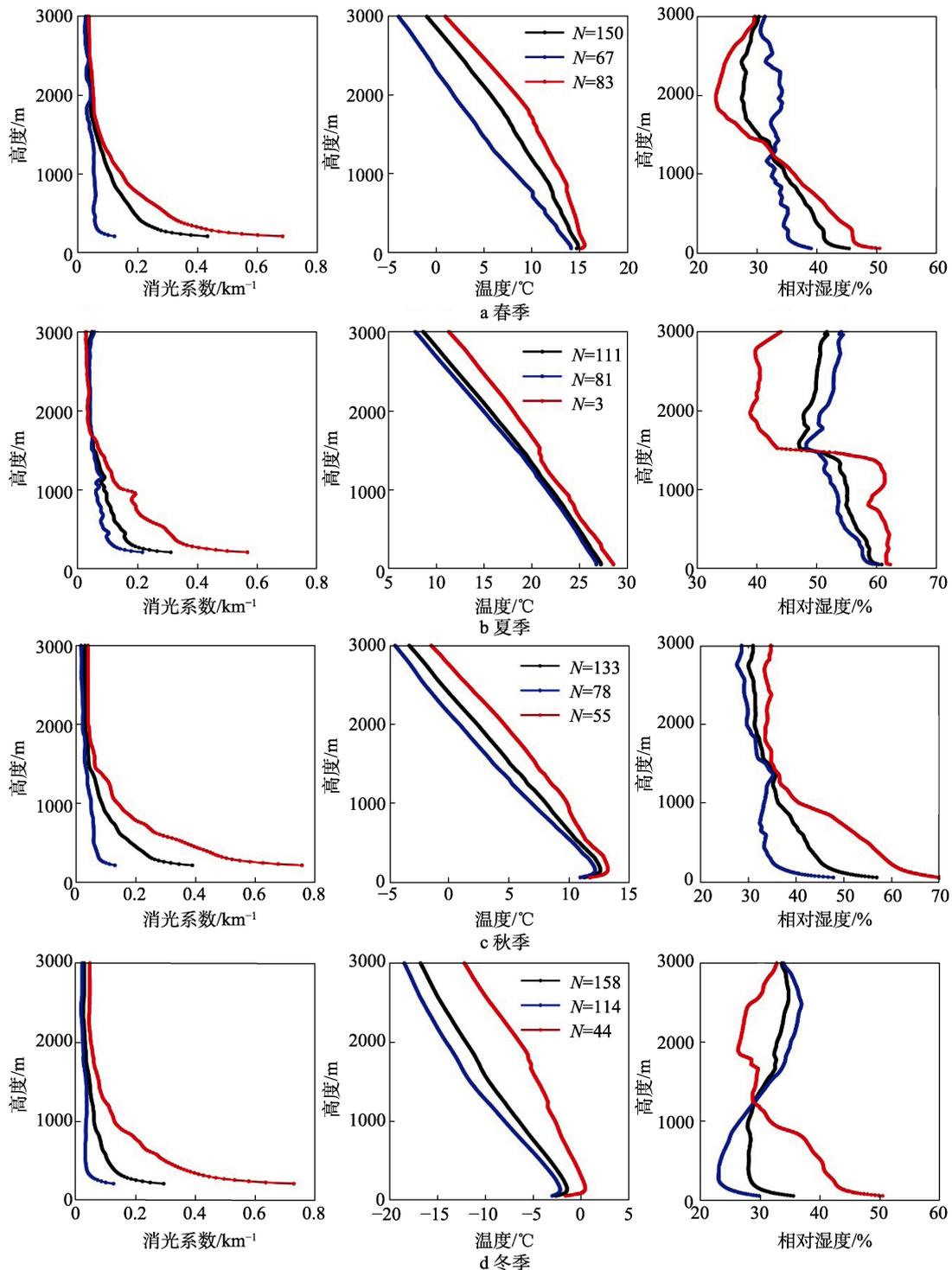


图 7 平均气溶胶消光系数廓线和大气温度和相对湿度廓线

3 结论

文中利用 2017 年 9 月至 2018 年 8 月 08 时和 20 时北京地区的气溶胶消光系数和探空数据,通过匹配 PM_{2.5} 浓度数据,分析了大气温湿廓线对不同污染条件下气溶胶垂直分布的影响,得到如下结论。

1) 地面 PM_{2.5} 浓度和 210 m 气溶胶消光系数的时间序列有很好的—致性,两者的相关系数达到 0.77。

2) 受近地层大气温度层结和相对湿度影响,夏季地面 PM_{2.5} 浓度偏低,冬季 210 m 气溶胶消光系数偏低。

3) 春季、秋季和冬季污染条件下的近地面消光系数约是清洁条件下的 5 倍,夏季污染条件下的近地面消光系数约是清洁条件下的 3 倍。相比清洁条件下,污染条件下各季节的大气温度垂直递减率偏小,并且低层大气相对湿度偏大。

4) 大气温度廓线代表大气层结稳定性,影响气

溶胶的扩散高度,而相对湿度廓线与气溶胶吸湿增长密切相关,两者对气溶胶消光系数的垂直分布都有重要影响。

参考文献:

- [1] 黄玉虎,李媚,曲松,等.北京城区PM_{2.5}不同组分构成特征及其对大气消光系数的贡献[J].环境科学研究,2015,28(8):1193-1199.
- [2] 王伟齐,臧增亮,宋彬,等.北京地区不同时段平均PM_{2.5}浓度与MODIS气溶胶光学厚度相关性分析[J].环境科学学报,2016,36(8):2794-2802.
- [3] 王静,施润和,李龙,等.上海市一次重雾霾过程的天气特征及成因分析[J].环境科学学报,2015,35(5):1537-1546.
- [4] 张仁健,王明星,戴淑玲,等.北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究[J].气候与环境研究,2000,5(1):85-89.
- [5] 林俊,刘卫,李燕,等.大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析[J].气象与环境学报,2009,25(1):1-5.
- [6] 丁国安,陈尊裕,高志球,等.北京城区低层大气PM₁₀和PM_{2.5}垂直结构及其动力特征[J].中国科学:地球科学,2005,35(s1):31.
- [7] RAMAN S, NARENDRA S. LiDAR Observations of the Vertical Distribution of Aerosols in Free Troposphere: Comparison with CALIPSO Level-2 Data over the Central Himalayas[J]. Atmospheric Environment, 2014, 99: 227-238.
- [8] 吕阳,李正强,尹鹏飞,等.结合地基激光雷达和太阳辐射计的气溶胶垂直分布观测[J].遥感学报,2013,17(4):1008-1020.
- [9] 许潇锋,刘晨璇,唐志伟,等.基于CALIPSO的华北地区气溶胶垂直分布特征[J].大气科学学报,2018,41(1):126-134.
- [10] WANG Z, DU L, LI X, et al. Development of Three-wavelength Polarization-raman Lidar and Application to Shipborne Measurements[C]// European Physical Journal Web of Conferences. New York, USA: EPJ Web of Conferences, 2016.
- [11] WANG Z, LI X, CHAO C. Observations of Marine Aerosol by a Shipborne Multiwavelength Lidar over the Yellow Sea of China[J]. Proc Spie, 2014, 9262: 926218-926218-6.
- [12] FERNALD F G. Analysis of Atmospheric Lidar Observations: Some Comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652.
- [13] 陈哲,高杰,杨旭.IGRA全球站点探空数据集及其资料质量状况分析[J].气象与环境学报,2013,29(5):106-111.
- [14] DURRE I, YIN X. Enhanced Radiosonde Data For Studies of Vertical Structure[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89(9): 1257-1261.
- [15] 陶金花,王子峰,徐谦,等.北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究[J].遥感学报,2015,19(1):12-24.
- [16] ZANG Z L, WANG W Q, YOU W, et al. Estimating Ground-level PM_{2.5} Concentrations in Beijing, China Using Aerosol Optical Depth and Parameters of the Temperature Inversion Layer[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1219-1227.
- [17] 宋秀瑜,曹念文,赵成,等.南京地区相对湿度对气溶胶含量的影响[J].中国环境科学,2018,38(9):3240-3246.