

崔雅琴, 张佃国, 王洪, 等. 2019. 2015 年济南地区雾霾天气过程大气物理量特征初步分析 [J]. 大气科学, 43(4): 705-718. Cui Yaqin, Zhang Dianguo, Wang Hong, et al. 2019. Preliminary analysis of atmospheric physical quantity characteristics during haze weather in Jinan area in 2015 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 705-718. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1808.17175

2015 年济南地区雾霾天气过程大气物理量特征初步分析

崔雅琴² 张佃国¹ 王洪¹ 刘泉¹ 张骞³ 张洪生¹

¹ 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

² 山东省气象信息中心, 济南 250031

³ 山东省气象台, 济南 250031

摘 要 文中对比分析了 2015 年 29 个雾、霾及雾霾混合天气过程中, 章丘探空站 L 波段探空雷达和山东省气象局院内德国 14 通道地基微波辐射计观测的温度资料。对观测数据实施了质量控制, 检验了精度和可信度, 统计分析了宏观物理参量特征和日变化规律。针对雾、霾及雾霾天气过程各选取了一个个例进行分析, 分析了大气中 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO 含量的变化情况, 分析了相对湿度、液态水路径和综合水汽含量等的变化情况。结果表明: 两种观测数据一致性较好, 拟合优度高于 0.97; 贴地逆温层存在一定的季节变化, 悬垂逆温层存在一定的差异, 逆温层的变化、污染参量变化与雾霾的形成有密切关系; 不同天气背景对大气物理参量有较大的影响, PM₁₀、AQI (空气质量指数) 和 CO 均在相同时间段出现峰值, 有明显的起伏; CO 峰值雾霾天气中尤为明显, 由早到晚随时间峰值逐渐增大, 雾天和霾天峰值较小, 雾霾天气明显大于雾天或霾天。

关键词 质量控制 日变化 大气物理参量

文章编号 1006-9895(2019)04-0705-14

中图分类号 P423

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1808.17175

Preliminary Analysis of Atmospheric Physical Quantity Characteristics during Haze Weather in Jinan Area in 2015

CUI Yaqin², ZHANG Dianguo¹, WANG Hong¹, LIU Quan¹, ZHANG Qian³, and ZHANG Hongsheng¹

¹ Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

² Shandong Meteorological Information Center, Jinan 250031

³ Shandong Provincial Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract This study analyzed the temperature data in the course of 29 mixed fog, haze weather in 2015 from L-band sounding radar at the Zhangqiu sounding station and temperature data from the German 14-channel RPG-HATPRO-G3 microwave radiometer located at the Shandong Meteorological Bureau. The quality analysis of these observation data was performed to determine their accuracy and reliability. In particular, the macro physical characteristics and diurnal variation of the physical parameters in haze weather were analyzed. The changes of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃, CO in the

收稿日期 2017-05-27; 网络预出版日期 2018-04-11

作者简介 崔雅琴, 女, 1980 年出生, 高级工程师, 主要从事地面气象观测资料的处理和分析、人工影响天气与大气气象观测资料分析研究。E-mail: 55940281@qq.com

通讯作者 张佃国, E-mail: zdg131415@sohu.com

资助项目 山东省气象局面上项目 2016sdqxm09

Funded by Shandong Meteorological Situation Project (Grant 2016sdqxm09)

atmosphere were analyzed for each case of fog, haze, and haze. The changes of relative humidity, liquid water path, and water vapor content were analyzed. The results indicate that data from the two observation instruments have good consistency, with a goodness of fit higher than 0.97 under fog and haze conditions. There are seasonal variations in the surface inversion layer and some differences in the physical parameters of the overhanging inversion layer. The changes in the temperature inversion layer and pollution parameters are closely related to the formation of fog and haze. Different weather backgrounds are determined to have considerable influence on the physical atmospheric parameters, with obvious fluctuations in the PM_{10} , AQI (air quality index), and CO values, which peak during the same time period. The CO peak in fog and haze weather is particularly obvious, CO peak with a gradual increase from the morning to night. The CO peak of the fog and haze days is smaller, and fog and haze weathers are obviously larger than the fog or haze.

Keywords Data quality control, Diurnal variation, Atmospheric physical parameters

1 引言

德国RPG地基微波辐射计采用被动式微波遥感技术,通过亮温来反演10 km高度范围内温、湿度、水汽和液态水等廓线,高时间分辨率,可全天候连续观测,极大弥补了常规定时(08时、20时,北京时,下同)观测的缺憾。伴随科技发展,地基微波辐射计已在多个研究领域得到广泛应用,大气环境是重要研究领域之一。为提升观测资料的正确性和可信度,对微波辐射计观测资料进行了一些对比试验,实施了质量控制,取得了较好效果(范根昌等,2015;黄治勇等,2015;吴庆梅等,2015;朱雅毓等,2015;杨富燕等,2016;张佃国等,2017)。Olivero(1984)研究了地面微波辐射测量技术的观测精度,讨论了它的应用领域和未来发展;Wei et al.(1989)利用微波辐射计观测资料,开展了亚特兰大风暴研究,揭示了降水云系中云液态水路径的变化规律;Dominique et al.(2006)利用地基微波辐射计、云雷达和风廓线仪等观测资料开展了大气温度、湿度和云廓线的对比研究。李力等(2016)利用微波辐射计对南京2013年12月霾天大气温、湿结构进行了观测分析。郭丽君和郭学良(2016)利用美国地基微波辐射计对2009~2013年北京持续性大雾类型、垂直结构及物理成因进行了综合分析。吴庆梅等(2014)分析了北京地区一次回流暴雪过程的锋区特征,发现与锢囚锋联系的中低空暖湿空气在回流干冷空气上爬升造成锋生,是北京地区出现暴雪的主要原因。何晖等(2009)通过分析地基探测资料,比较了雾分布区域、温湿度、风速及液态水边界层分布特征。张志红和周毓荃(2010)研究了降水过程云液态水和降水演变特征,揭示了低层液态水分布与地面降水的

产生有直接关系。雷恒池等(2001)利用微波辐射计研究了降雨前水汽和云液态水特征,找出了云滴向雨滴转化的孕育区、人工增雨最佳作业区。赵从龙等(1991)分析了对流层水汽和液态水特征,讨论了水汽总量和云中液态水的反演方法。东高红等(2013)结合常规气象资料,利用微波辐射计研究了暴雨过程中尺度涡旋系统特征,表明了强降水前低层大气水汽密度和液态水的变化。刘亚亚等(2010)讨论了地基微波辐射计遥感反演温度、相对湿度和云液态水廓线的方法,认为神经网络(BPNN)反演的廓线与微波辐射计自带RadiomeNN的相比更加接近实际。德力格尔等(2002)采用动力气象学原理计算了青海高原东北部春季水汽输送、辐合、辐散情况,利用微波辐射计进行了空中水资源潜力分析。崔雅琴等(2016)结合新一代多普勒雷达观测,利用地基微波辐射计观测的温度和液态水数据,个例分析了济南短时强降水天气过程逆温层特征和液态水等参量的空间变化,揭示了降水前后各参量的变化特征和规律。因此,微波遥测技术成熟,数据可靠性高,在研究云降水物理参量特征、雾霾生消机制等方面有广泛应用。2014年至今,山东省人工影响天气办公室利用德国14通道RPG地基微波辐射计进行了科学试验,获取了有价值的观测资料,并对湿度数据做了数据可靠性分析,实施了数据质量控制。但利用地基微波辐射计观测资料研究雾、霾及雾霾天气物理参量特征在山东境内尚属空白。本文利用2015年雾霾天气过程的微波辐射计数据和济南市大气环境参量观测资料,研究雾霾天气过程中边界层温度的变化特征及大气环境参量的时间分布,该研究具有重要的意义。

2 观测仪器简介与数据分析方法

地基微波辐射计于 2014 年 8 月安装在山东省气象局的人影楼 (36.68°N, 116.96°E)。该微波辐射计根据波谱理论、谱线相关性及实践结果, 选择最优的 7 个湿度通道和 7 个温度通道, 采用多通道并行滤波接收技术快速、精确稳定获取数据; 并用当地多年历史探空资料, 结合红外仪和地面气象站观测, 通过神经网络和回归算法反演 0~10 km 高度范围内温度、湿度和液态水等信息, 配合方位仪可以进行高时间分辨率全天空和全天候扫描。

张秋晨等 (2017) 对比分析了该设备的相对湿度、绝对湿度和液态水等信息的准确性, 结果显示拟合优度均在 0.84 以上, 验证了数据的可靠性。文中选取济南市章丘探空站一日两次 (08 时、20 时)、垂直分辨率为 50 m 的探空数据, 并对对应提取 2015 年雾霾天气过程地基微波辐射计的观测资料, 实施一致性分析, 检验微波辐射计观测温度数据的精度和可靠性。

从地基微波辐射计观测资料中读取、筛选、提取、计算和整理的贴地逆温和悬垂逆温参量变化特征数据, 包括逆温层的底高、顶高和温度。对每月逆温出现的频率、厚度、逆温温差和强度进行计算统计, 逆温特征分布详见图 1。

逆温层厚度 (ΔH):

$$\Delta H = H_2 - H_1, \quad (1)$$

其中, H_1 为逆温层底高 (单位: m), H_2 为逆温层顶高 (单位: m)。

逆温层温度差 (ΔT):

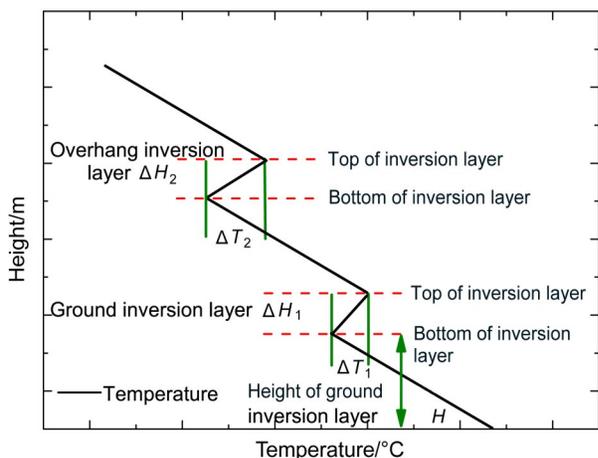


图 1 逆温特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature inversion characteristics

$$\Delta T = T_2 - T_1, \quad (2)$$

其中, T_1 为逆温层底部温度 (单位: °C), T_2 为逆温层顶部的温度 (单位: °C)。

逆温强度 (I , 单位: °C (100 m)⁻¹) 定义为在逆温层内每升高 100 m 的温度逆增值:

$$I = (\Delta T / \Delta H) \times 100. \quad (3)$$

为了便于研究, 本文采用刘增强等 (2007) 的对逆温强度划分的等级标准。大气环境参量选取 2015 年雾、霾及雾霾天气背景下济南市泉城广场站点 (36.66°N, 117.02°E) 的观测资料, 并对观测数据进行了平滑处理。

3 天气背景宏观特征分析

表 1 给出了济南地区 2015 年 29 个雾、霾天气过程背景信息。为方便分析, 文中把存在该种天气现象的自然日视为一个雾日或霾日及雾霾日。统计表明, 2015 年有 19 个霾日、7 个雾日和 3 个雾霾日。雾、霾天气过程发生发展, 受多种因素制约和影响, 冷平流移经暖湿下垫面是影响济南地区雾、霾及雾霾形成的主要因素, 占 45%; 西南暖湿平流影响, 雾、霾发生的占 31%; 偏东暖湿平流影响比例仅为 26%; 雾霾过程最少, 仅有 12 月 23、24、25 日三天。

4 地基微波辐射计数据质量控制与误差分析

地基微波辐射计包括 V 波段氧气窗口 (51.26~58.00 GHz) 的 7 个温度通道和 K 波段水汽窗口 (22.24~31.40 GHz) 的 7 个湿度通道。7 个温度通道对应 7 个接收机的频率分别为: 51.26 GHz、52.28 GHz、53.86 GHz、54.94 GHz、56.66 GHz、57.30 GHz 和 58.00 GHz, 7 个湿度通道对应 7 个接收机的频率分别为: 22.24 GHz、23.04 GHz、23.84 GHz、25.44 GHz、26.24 GHz、27.84 GHz 和 31.40 GHz。利用神经网络算法反演大气温、湿度和液态水等的廓线信息。地基微波辐射计共有 92 个高度层, 即 0~10 m、10~25 m、25~100 m、100~0.5 km、0.5~1.3 km、1.3~2.0 km、2.0~2.5 km、2.5~3.8 km、3.8~4.6 km、4.6~6.0 km 和 6.0~10.0 km, 其对应水平分辨率为 10 m、15 m、25 m、30 m、40 m、60 m、90 m、100 m、150 m、

表1 济南地区2015年29个雾、霾天气过程基本信息

Table 1 Basic information of the 29 haze weather processes in Jinan area in 2015

个例序号	发生日期	天气过程	雾、霾及雾霾形成原因
1	1月9日	霾	偏东暖湿平流
2	1月10日	霾	偏东暖湿平流
3	1月13日	霾	冷平流移经暖湿下垫面
4	1月15日	霾	偏东暖湿平流
5	1月25日	雾	冷平流移经暖湿下垫面
6	2月3日	霾	偏东暖湿平流
7	2月15日	雾	冷平流移经暖湿下垫面
8	3月13日	霾	冷平流移经暖湿下垫面
9	10月20日	霾	西南暖湿平流
10	11月10日	雾	偏东暖湿平流
11	11月11日	霾	偏东暖湿平流
12	11月12日	雾	偏东暖湿平流
13	11月13日	霾	冷平流移经暖湿下垫面
14	11月14日	雾	西南暖湿平流
15	11月16日	雾	冷平流移经暖湿下垫面
16	11月29日	霾	冷平流移经暖湿下垫面
17	11月30日	雾	西南暖湿平流
18	12月09日	霾	冷平流移经暖湿下垫面
19	12月10日	霾	冷平流移经暖湿下垫面
20	12月14日	霾	冷平流移经暖湿下垫面
21	12月19日	霾	西南暖湿平流
22	12月20日	霾	西南暖湿平流
23	12月21日	霾	西南暖湿平流
24	12月22日	雾/霾	冷平流移经暖湿下垫面
25	12月23日	雾/霾	冷平流移经暖湿下垫面
26	12月24日	雾/霾	冷平流移经暖湿下垫面
27	12月25日	雾	西南暖湿平流
28	12月30日	霾	西南暖湿平流
29	12月31日	霾	西南暖湿平流

200 m和300 m。章丘探空站数据用于检验微波辐射计观测的温度廓线正确性，L波段常规探空使用10个标准层和若干个特性层的数据资料，其中标准层包括：1000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa、250 hPa、200 hPa和100 hPa。为了使章丘探空数据和微波辐射计数据具有可比性，选择08时和20时两个观测时刻的数据，并挑选出相同高度层的数据进行对比分析。

利用线性函数 $y=ax+b$ 进行08时温度相关特征分析（图2a），结果显示，拟合函数为 $y=1.15138x+2.48104$ ，截距标准差为0.674，斜率标准差为0.026，相关系数为0.97374。图2b给出了20时利用 $y=ax+b$ 线性函数进行相关分析的情况，结果显示，拟合函数为 $y=0.97374x+1.17511$ ，截距标

准差为0.264，斜率标准差为0.010，相关系数为0.99248。综上分析，两个时刻观测数据一致性非常高，相关系数均高于0.97，20时比08时相关系数更大，说明微波辐射计观测数据具有一定的可靠性。为了详细定量描述微波辐射计和探空数据之间的相关性，针对2015年雾、霾天气观测资料，做了08时和20时0~1.8 km观测数据误差计算分析（图2c、d），偏差（BIAS）和均方根误差（RMSE）公式如下：

$$\text{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ai} - x_{bi}), \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ai} - x_{bi})^2}{n}}, \quad (5)$$

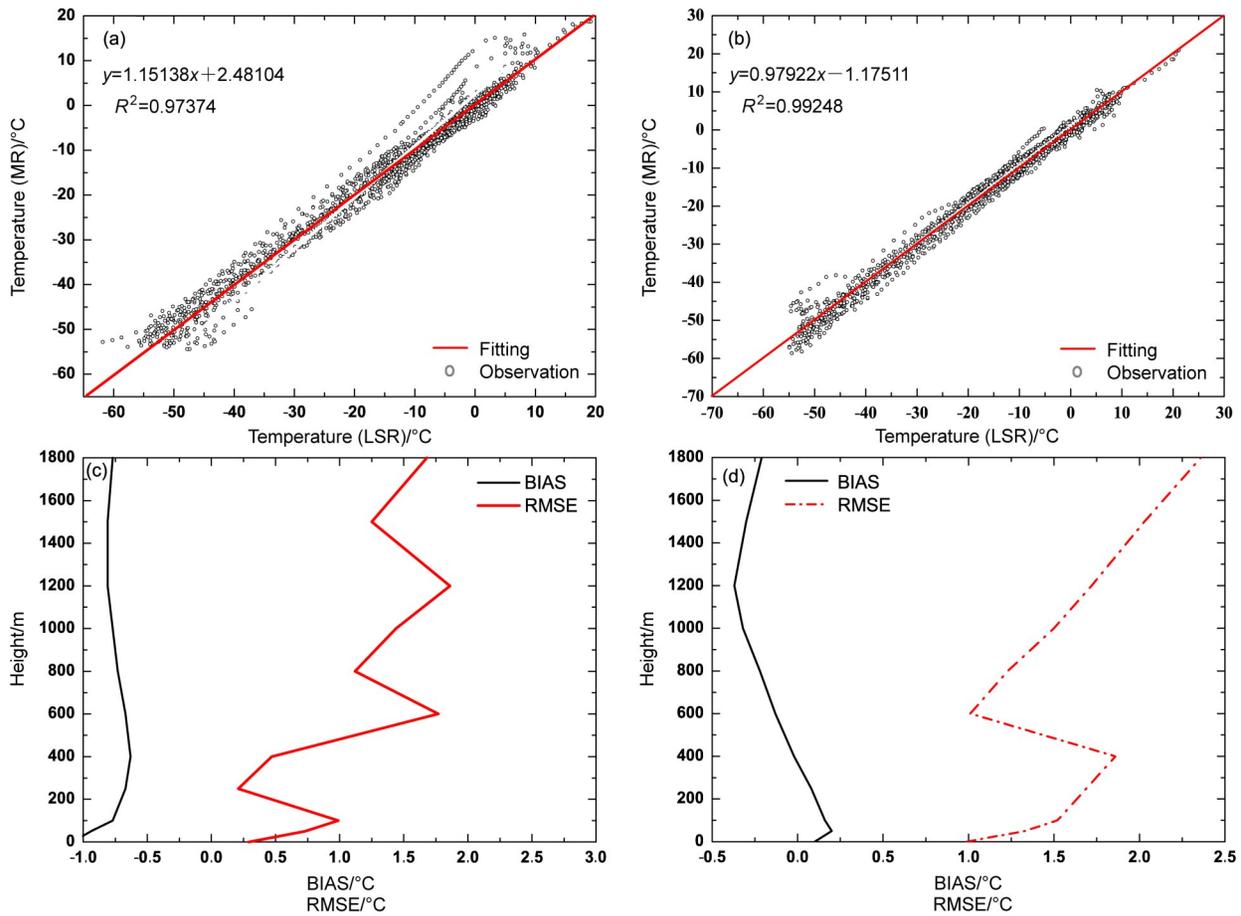


图2 微波辐射计和L波段探空雷达50~1800 m高度的50 m分辨率的温度 (a) 08时、(b) 20时相关性及 (c) 08时、(d) 20时误差分析
Fig. 2 (a) 0800 BJT (Beijing time), (b) 2000 BJT correlation and (c) 0800 BJT, (d) 2000 BJT error analysis of temperature in 50-m resolution from 50 m to 1800 m height by microwave radiometer (MR) and L-band sounding radar (LSR)

其中， x_a 为探空数据， x_b 为微波辐射计数据。由2015年雾霾天气背景下08时（图2c）和20时（图2d）数据误差可知，08时1.8 km以下为负偏差，20时0~200 m为正偏差；08时和20时200~1800 m均为负偏差，偏差均小于1.0°C；20时均方根误差均小于2.5°C，08时均方根误差较小，在0.24~2.0°C范围内。可见，两种设备误差较大，有较好的一致性。

5 逆温层参量分析

5.1 贴地逆温层

气温从地面开始随高度升高而增加，达到某高度后气温又开始随高度递减，该高度即为贴地逆温的层顶，层顶相对地面的高度即为贴地逆温层的厚度，该逆温层为贴地逆温层。

2015年29次雾、霾天气过程（表2）发生、发展与贴地逆温层有密切关系，仅有一次没有出现逆

温（主要是大尺度天气背景影响，为平流所致）。雾、霾天气过程存在贴地逆温层的现象多发生在冬、春、秋三季：冬季居多，所占比例为92.85%；春、秋季各有一次，发生在3月13日和10月20日。逆温层顶分布比较均匀，基本维持在200 m以下的大气层内，个别过程受天气系统影响顶高比较高，厚度比较厚，1月10日顶高可达900 m。逆温强度范围在0.43~1.77°C (100 m)⁻¹，其分布具有一定的季节差异，冬、秋季逆温强度较大，春季由于天气对流强度加强，逆温层变弱。冬季逆温层温度差比较大，最大温度差可达4.5°C。

5.2 悬垂逆温层

逆温层底距离地面的高度定义为悬垂逆温的底高，逆温层顶距离地面的距离为悬垂逆温层的顶高（图1）。2015年29次雾、霾天气过程（表3）仅有5次出现悬垂逆温层，且这5次天气过程均是在降水后出现的，说明悬垂逆温层与降水有密切关系。

表2 2015年雾、霾及雾霾天气过程的贴地逆温参量统计特征

Table 2 Statistical characteristics of parameters in ground inversion layer in the haze weather process in 2015

日期	天气过程	顶高/m	厚度/m	强度/ $^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$	温差/ $^{\circ}\text{C}$
1月9日	霾	400	400	1.125	4.5
1月10日	霾	900	900	0.444	4.0
1月13日	霾	100	100	1.2	1.2
1月15日	霾	100	140	1.32	1.32
1月25日	雾	200	200	1.0	2.0
2月3日	霾	160	160	1.56	2.5
2月15日	雾	100	100	1.8	1.8
3月13日	霾	600	600	0.43	2.6
10月20日	霾	160	160	1.375	2.2
11月10日	雾	160	160	1.25	2.0
11月11日	霾	190	190	1.37	2.6
11月12日	霾	180	180	1.5	2.7
11月13日	雾	100	100	1.1	1.1
11月14日	雾	100	100	0.9	0.9
11月16日	雾	125	125	1.2	1.5
11月29日	霾	160	160	1.75	2.8
11月30日	雾	130	130	1.23	1.6
12月9日	霾	100	100	1.0	1.0
12月10日	霾	100	100	0.7	0.7
12月14日	霾	130	130	1.54	2.0
12月19日	霾	160	160	1.375	2.2
12月20日	霾	170	170	1.29	2.2
12月21日	霾	130	130	1.23	1.6
12月22日	雾/霾	130	130	0.23	1.6
12月23日	雾/霾	190	190	0.95	1.8
12月24日	雾/霾	190	190	1.32	2.5
12月25日	雾	190	190	1.42	2.7
12月30日	霾	130	130	1.77	2.3
12月31日	霾	130	130	1.31	1.7

表3 2015年雾、霾天气过程的悬垂逆温参量统计特征

Table 3 Statistical characteristics of parameters in untouched inversion in the haze weather process in 2015

日期	天气过程	悬垂逆温			逆温强度/ $^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$	逆温温差/ $^{\circ}\text{C}$
		顶高/m	底高/m	厚度/m		
1月25日	雾	1500	700	800	0.156	1.25
2月15日	雾	1400	200	1200	0.23	2.8
11月12日	霾	1600	200	1400	0.17	2.4
11月13日	雾	1400	210	1190	0.19	2.2
12月9日	霾	1400	1000	400	0.125	0.5

逆温层顶高分布比较均匀, 变化范围在 1400~1600 m; 逆温层底高分布不均匀, 有较大的差别, 底高最高为 1000 m, 最小仅为 200 m; 逆温层厚度

有较大的差别, 最大厚度为 1400 m, 最小厚度为 400 m; 逆温强度较小, 在 $0.125\sim 0.19^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$; 逆温层温度差最大为 2.8°C , 最小为 0.5°C , 平均约

为2°C。

5.3 雾、霾及逆温层季节特征

表4中给出了2015年雾、霾天气及逆温层季节变化特征，统计分析了雾霾过程在逆温层出现时间的百分比（即为雾霾天数与逆温层出现天数的比值）。结果表明，一年中逆温天数秋、冬季最多为86天，

表4 2015年雾、霾及逆温层统计特征

Table 4 Statistical characteristics of fog, haze, and inversion layer in 2015

季节	逆温天数/d	雾、霾天数/d	百分比
春季	72	1	0.14%
夏季	68	0	0
秋季	86	9	10.47%
冬季	86	19	22.09%

注：百分比为雾霾天数/逆温天数。

春季次之为72天，夏季最少为68天；雾、霾天气的发生与四季逆温层出现天数没有明显的关系，雾、霾天气过程主要集中在冬、春和秋季，冬季为19次，秋季为9次，春季仅为1次，夏季由于降水多、温度高、对流强，没有出现雾、霾天气；雾、霾的春季发生率仅为0.14%，冬季发生率最大为22.09%，秋季次之为10.47%。

5.4 大气物理参量日变化特征

从图3和表5中可以分析济南地区2015年雾、霾及雾霾混合天气过程大气物理参量日变化特征，选取29个雾、霾及雾霾混合日（表2）的7个大气物理量平均值，物理量分别为O₃、NO₂、SO₂、PM_{2.5}、PM₁₀、CO的浓度、AQI（空气质量指数）。

图3a为雾天大气物理量的变化特征，分析可见，PM₁₀、PM_{2.5}浓度和AQI起伏比较大，PM₁₀浓

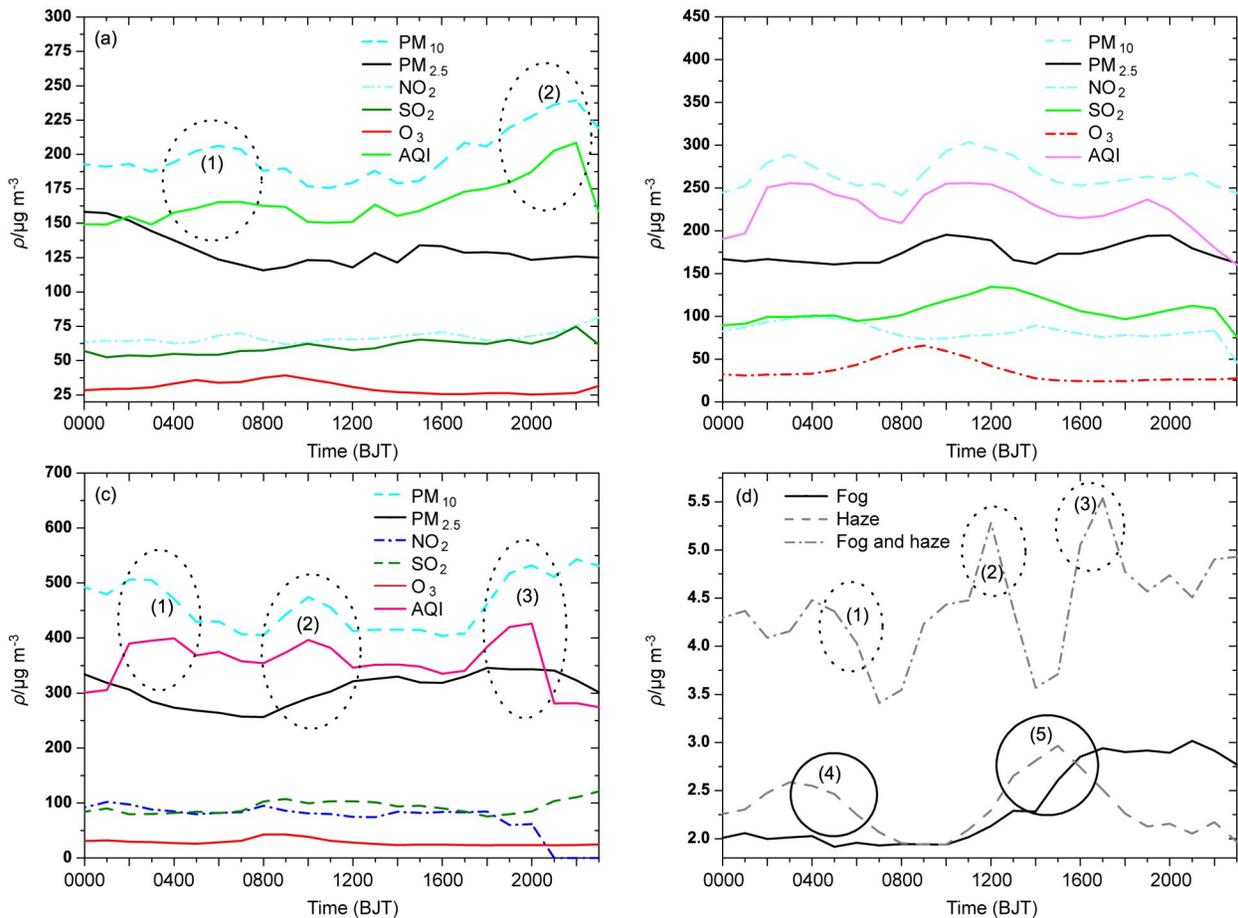


图3 2015年 (a) 雾、(b) 霾、(c) 雾霾混合天气过程大气物理量 (O₃、NO₂、SO₂、PM_{2.5}、PM₁₀的浓度、AQI) 的日变化特征以及 (d) 雾、霾、雾霾混合天气中CO的浓度的日变化特征

Fig. 3 Diurnal variations of atmospheric physics parameters [O₃, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ concentrations, AQI (air quality index)] during (a) fog weather, (b) haze weather, and (c) fog and haze weather in 2015. (d) CO concentration variations in fog weather, haze weather, and fog and haze weather in 2015

表5 不同天气背景下环境参量的信息统计

Table 5 Statistical characteristics of environmental parameters in different weather conditions

参数	雾天		霾天			雾霾天		
	06时	21/22时	03时	12/15时	21时	03时	12时	17/21时
PM ₁₀ 浓度/ $\mu\text{g m}^{-3}$	206.69	239.43	289.14	295.86	267.52	506.32	474.31	461.68
PM _{2.5} 浓度/ $\mu\text{g m}^{-3}$		158.22		195.44	194.6			
SO ₂ 浓度/ $\mu\text{g m}^{-3}$				134.47	83.2			
AQI	165.43	208.57	255.59	255.12	236.65	399.3	396.71	426.23
CO浓度/ $\mu\text{g m}^{-3}$		2.95	2.58	2.96		4.47	5.23	5.62

度和AQI分别在06时、22时出现两个峰值,分别为 $206.69 \mu\text{g m}^{-3}$ 、 165.43 和 $239.43 \mu\text{g m}^{-3}$ 、 208.57 ; PM_{2.5}浓度随时间有下降趋势,峰值出现在00时,峰值为 $158.22 \mu\text{g m}^{-3}$;其他物理量浓度没有明显的峰谷变化,且值较小,均在 $75 \mu\text{g m}^{-3}$ 以下。图3b给出了霾天物理量的日变化,分析可知,PM₁₀浓度和AQI分别在03时、12时和21时三个时刻出现峰值,峰值分别为 $289.14 \mu\text{g m}^{-3}$ 、 $295.86 \mu\text{g m}^{-3}$ 、 $267.52 \mu\text{g m}^{-3}$ 和 255.59 、 255.12 、 236.65 ,峰值大小没有量级的变化;SO₂、PM_{2.5}浓度峰值较小,分别出现在12时和21时两个时刻,峰值分别为 $134.47 \mu\text{g m}^{-3}$ 、 $83.2 \mu\text{g m}^{-3}$ 和 $195.44 \mu\text{g m}^{-3}$ 、 $194.6 \mu\text{g m}^{-3}$ 。从图3c雾霾天气参量变化情况分析可知,PM₁₀浓度和AQI峰值与霾天对应较一致,分别在03时、12时和21时三个时刻出现峰值,峰值分别为 $506.32 \mu\text{g m}^{-3}$ 、 $474.31 \mu\text{g m}^{-3}$ 、 $461.68 \mu\text{g m}^{-3}$ 和 399.3 、 396.71 、 426.23 ,峰值大于霾天。图3d为三种天气过程CO浓度变化特征,可见,雾霾天气CO浓度日变化分布不均匀,峰谷变化非常明显,分别在17时、12时和04时出现三个峰值,峰值分别为 5.62 mg m^{-3} 、 5.23 mg m^{-3} 和 4.47 mg m^{-3} ;雾天CO浓度随时间有上升趋势,峰值出现在傍晚以后,最大为 2.95 mg m^{-3} ;霾天有两个峰值,分别为 2.58 mg m^{-3} 、 2.96 mg m^{-3} ,夜晚值较大,白天较小。

可见,三种天气过程中,PM₁₀浓度、AQI和CO浓度均在相同时间段出现峰值,有明显的起伏;CO浓度在雾霾天气中尤为明显,并随时间峰值逐渐增大,雾天和霾天峰值较小,雾霾天气明显大于雾天或霾天。

6 个例分析

选取济南地区2015年出现雾、霾及雾霾天气

现象的3个天气过程,3个天气过程均在北方冷空气和南方暖湿气流共同作用背景下形成的。1月23~25日为一次雨夹雪转雾、霾的天气过程;25日为大雾天气过程;11月12日是一次霾转小雨天气过程;12月23日为雾霾混合天气过程。

6.1 雾天分析

图4给出了2015年1月25日济南地区大气物理量(O₃、NO₂、SO₂、PM_{2.5}、PM₁₀、CO)浓度、AQI的日变化特征。CO浓度比其他参量浓度均大,存在量级上的差别,SO₂、NO₂和O₃浓度比较小,在 $10\sim 50 \mu\text{g m}^{-3}$ 范围内;PM_{2.5}、PM₁₀浓度和AQI有比较大的变化,在大雾前处于低值区,伴随大雾的出现,浓度急剧上升,PM_{2.5}和PM₁₀浓度最大可达 $140 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

图5给出了2015年1月25日济南降雪后大雾天气地基微波辐射计观测参量的日变化。由相对湿度(图5a)可以看出,大雾出现前(11时)为多云天气,从地表至2 km高度相对湿度分布均匀,呈现有规律地均匀递减,地表为饱和状态,相对湿度为100%,2 km高度处相对湿度降至52%;大雾时段相对湿度变化比较剧烈,出现了A、B、C三个急剧变化区域,A、B区域相对湿度不均匀变化,低层呈现下降趋势,高层呈现迅速上升趋势,C区域从地面到高空相对湿度均为下降的情况,地面相对湿度降至95%,2 km高度降至40%。图5b是2015年1月25日济南降雨后大雾天气液态水路径(微波辐射计探测路径上单位面积液态水含量的积分)日变化情况,分析可知,多云天气向大雾天气转变,液态水路径有明显地下降,液态水路径由最大值 620 g m^{-2} 下降至 40 g m^{-2} 。图5c是2015年1月25日济南降雨后大雾天气综合水汽含量(微波辐射计探测路径上单位面积水汽及液态水含量的积分)日变

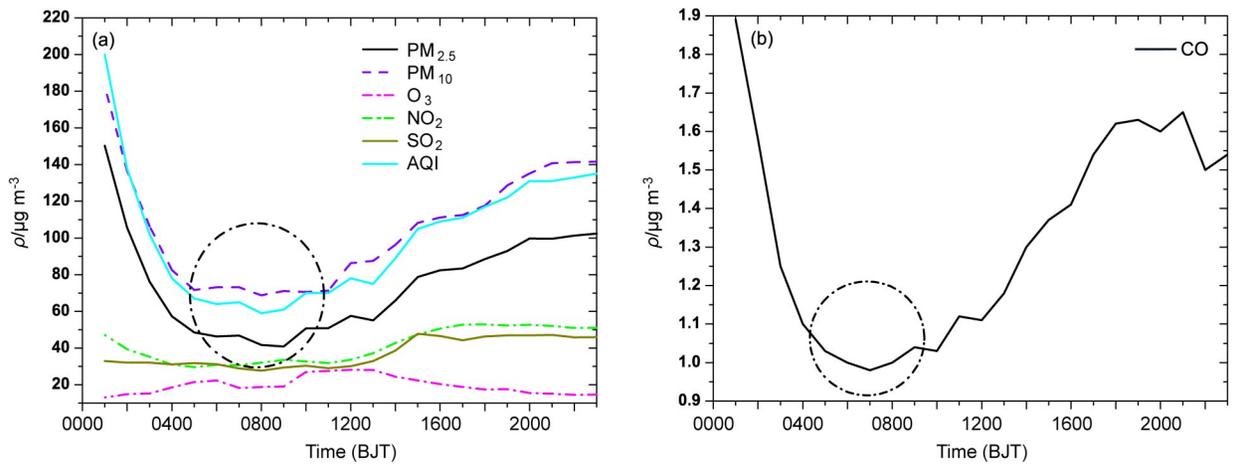


图4 2015年1月25日济南地区 (a) O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度、AQI, (b) CO浓度的日变化特征
Fig. 4 Diurnal variations of (a) O_3 , NO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$, PM_{10} concentrations, AQI (air quality index), (b) CO concentration in Jinan on 25 January 2015

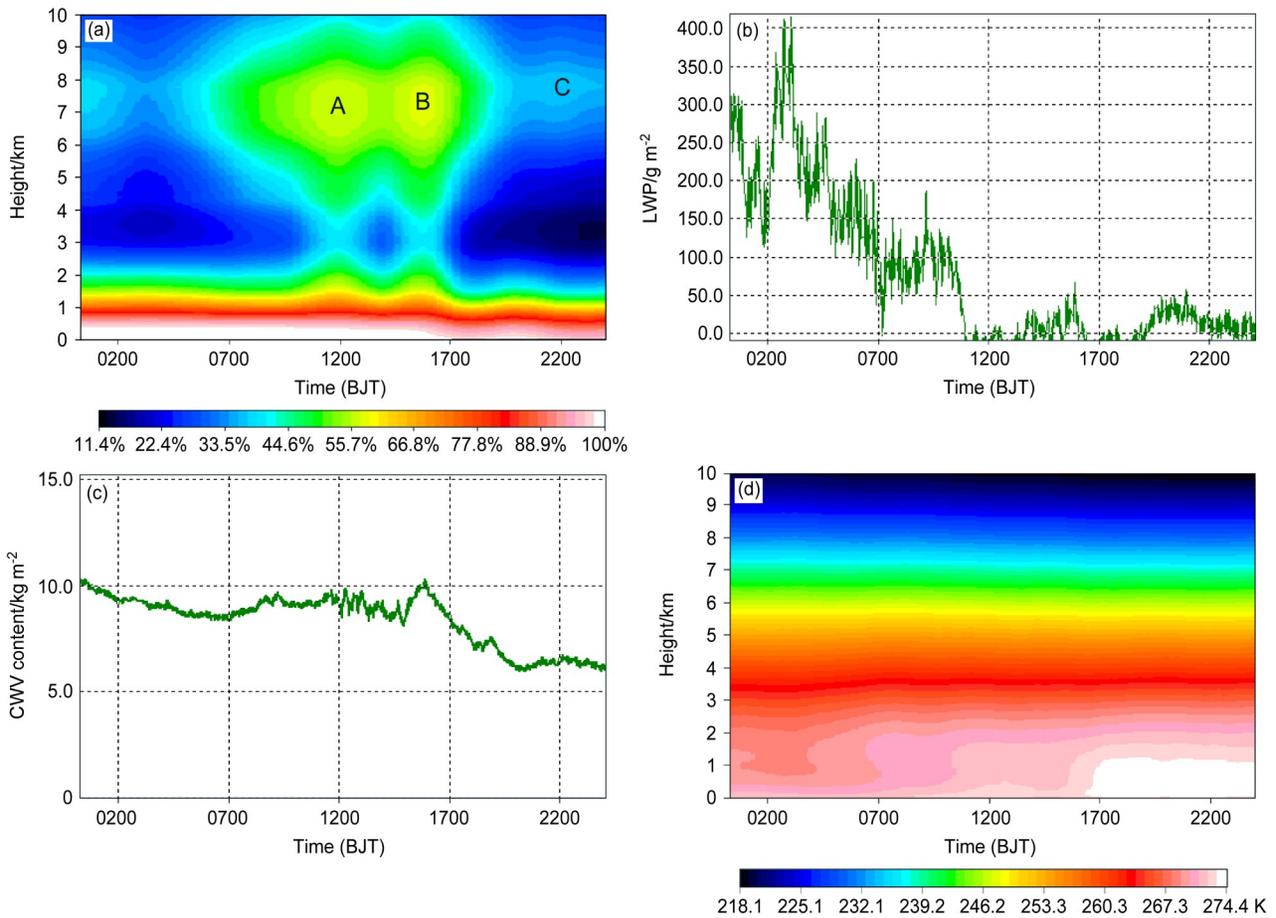


图5 2015年1月25日济南降雪后大雾天气地基微波辐射计观测的 (a) 相对湿度、(b) 液态水路径、(c) 综合水汽含量、(d) 温度廓线演变特征
Fig. 5 Evolutions of (a) relative humidity, (b) liquid water path (LWP), (c) comprehensive water vapor (CWV) content, (d) temperature profile obtained from ground microwave radiometer in fog weather after snow in Jinan on 25 January 2015

化情况, 分析可知, 多云和雾天综合水汽含量差别不大, 分布比较均匀。图5d给出了2015年1月25日济南降雨后大雾天气温度廓线的时间演变特征,

分析可见, 雾形成前后边界层温度廓线特征有明显的变化, 雾形成前, 在200 m高度以下出现贴地逆温层, 伴随大雾的形成, 贴地逆温逐渐增强, 高层

开始出现悬垂逆温层, 逆温强度越来越强, 随雾的消散, 贴地逆温层和悬垂逆温层减弱消失。

6.2 霾天分析

图6给出了2015年11月12日济南地区大气物理量 (O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO) 浓度、AQI的日变化特征, 分析可知, CO 浓度较大, 与其他参量浓度比较存在量级上的差别; NO_2 和 O_3 浓度比较小, 在 $25\sim 100\ \mu\text{g m}^{-3}$ 范围内变化; $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度和AQI有比较大的变化, 伴随霾的出现, 浓度急剧上升, 有较大变化, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度最大可达 $450\ \mu\text{g m}^{-3}$ 。

图7给出了2015年11月12日霾天气过程地基微波辐射计观测参量的日变化。由相对湿度(图7a)可以看出, 霾天气相对湿度较小, 在2 km高度约为65%, 受偏东风的影响, 在07时, 相对湿度突然增大, 低层迅速增至90%以上。分析图7b可知, 12日液态水路径分布很不均匀, 16时前非常小, 16时后液态水路径突然跳跃式增大, 最大为 $2000\ \text{g m}^{-2}$, 说明前时段主要是霾过程, 后时段出现多云和降雨过程。分析图7c可知, 20时前, 综合水汽含量分布比较均匀, 在 $20\ \text{g m}^{-2}$ 左右; 20时后, 出现了跳跃式增加, 最大可达 $70\ \text{g m}^{-2}$, 主要是受云层和降雨的影响所致。图7d给出了2015年11月12日济南霾天气过程温度廓线的时间演变特征, 分析可见, 霾形成前后边界层温度廓线特征有明显的变化, 霾形成前, 在200 m高度以下出现贴地逆温层, 伴随霾的形成, 低层贴地逆温逐渐减弱, 高层开始出现悬垂逆温层, 逆温强度越来越强, 随霾的消散, 高层悬垂逆温层和低层贴地逆温

减弱消失。

6.3 雾霾天分析

图8给出了2015年12月23日济南地区大气物理量 (O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO) 浓度、AQI的日变化特征。 NO_2 和 O_3 浓度日变化比较平缓, 数值较小, O_3 浓度平均值约为 $25.2\ \mu\text{g m}^{-3}$, NO_2 浓度平均值为 $81.6\ \mu\text{g m}^{-3}$, SO_2 浓度从 $60.5\ \mu\text{g m}^{-3}$ 增加到 $150\ \mu\text{g m}^{-3}$, 中午前后出现峰值区。 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度和AQI三个参量日变化随时间有减小趋势, 峰谷出现时段较一致, 峰值分别出现在凌晨和中午前后。 PM_{10} 浓度峰值分别为 $680.2\ \mu\text{g m}^{-3}$ 和 $601.5\ \mu\text{g m}^{-3}$; $PM_{2.5}$ 浓度峰值分别为 $564.2\ \mu\text{g m}^{-3}$ 和 $468.6\ \mu\text{g m}^{-3}$; AQI指数峰值均为500。 CO 浓度日变化不均匀, 峰谷相隔出现, 三个峰值分别出现在午夜、中午和傍晚, 且中午 CO 浓度最大为 $6.34\ \text{mg m}^{-3}$, 午夜次之为 $5.51\ \text{mg m}^{-3}$, 傍晚最小为 $4.02\ \text{mg m}^{-3}$, 具体原因还需进一步研究。

图9给出了2015年12月23日雾霾天气过程地基微波辐射计观测参量的日变化。由相对湿度(图9a)可以看出, 受冷暖气流交互影响, 雾霾天气相对湿度时空分布不均匀, 随时间变化有增大趋势, 近地层附近接近饱和状态, 出现两个相对湿度高值中心(4时和19时), 高层出现3个核心区。分析图9b可知, 液态水路径分布很不均匀, 11时前非常小, 11时液态水路径突然跳跃式增大, 出现一个较小的峰值, 最大为 $45\ \text{g m}^{-2}$, 15时又快速增加, 并趋于稳定, 峰值最大为 $115\ \text{g m}^{-2}$, 与相对湿度趋势对应效果较好, 说明湿度小主要是霾过程, 湿度大是雾霾混合过程。分析图9c可

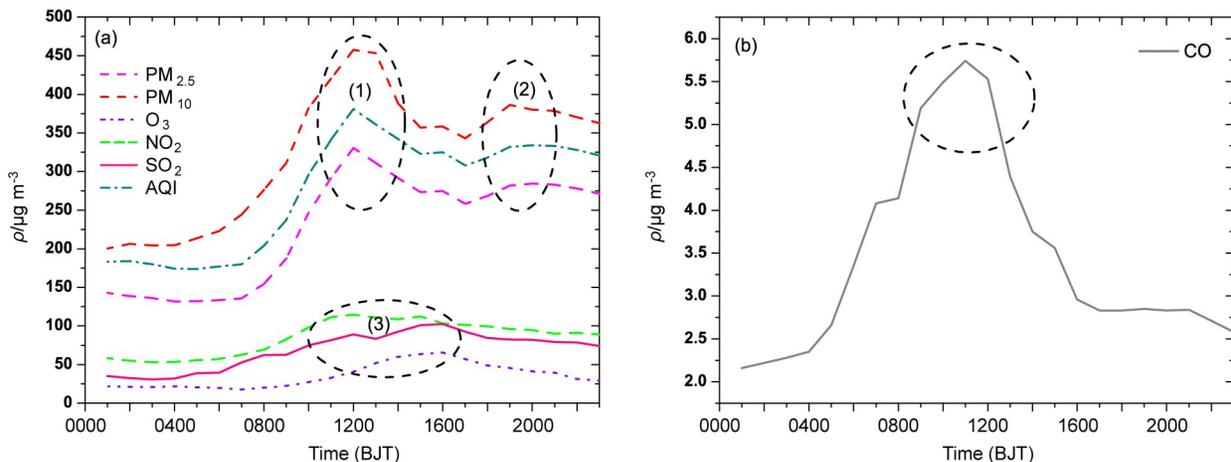


图6 2015年11月12日济南地区 (a) O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度、AQI, (b) CO 浓度的日变化特征

Fig. 6 Diurnal variations of (a) O_3 , NO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$, PM_{10} concentrations, AQI, (b) CO concentration in Jinan on 12 November 2015

知, 综合水汽含量分布与相对湿度相吻合, 出现两个峰值, 12时峰值为 14.5 kg m^{-2} , 21时峰值为 13.6 kg m^{-2} , 说明综合水汽含量也是预示雾霾发

生的一项参考指标。图9d给出了2015年12月23日济南雾霾天气过程温度廓线的时间演变特征, 分析可见, 霾形成前后边界层温度廓线特征有明

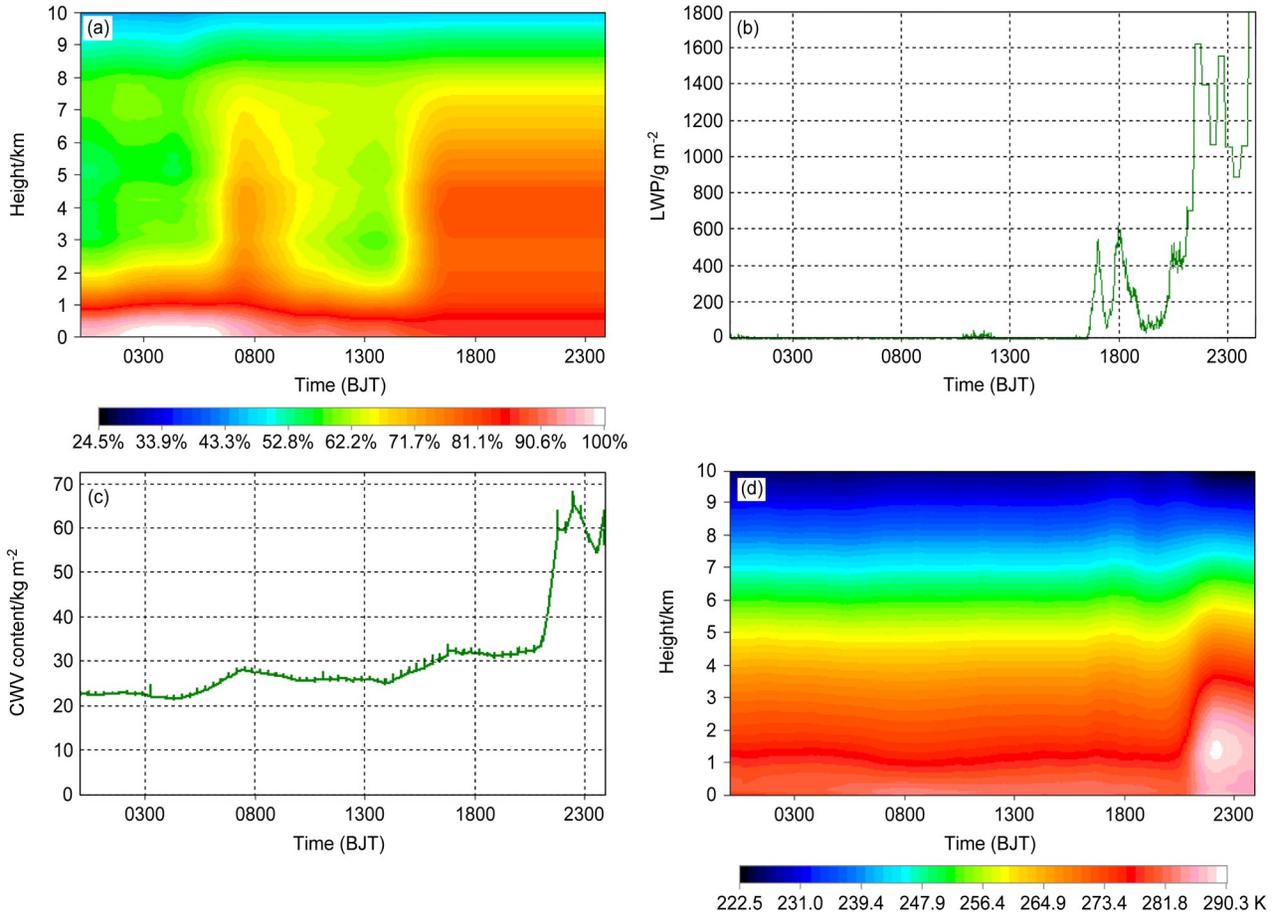


图7 2015年11月12日济南霾天气地基微波辐射计观测的 (a) 相对湿度、(b) 液态水路径、(c) 综合水汽含量、(d) 温度廓线演变特征
Fig. 7 Evolutions of (a) relative humidity, (b) liquid water path (LWP), (c) comprehensive water vapor (CWV) content, (d) temperature profile obtained from ground microwave radiometer in haze weather in Jinan on 12 November 2015

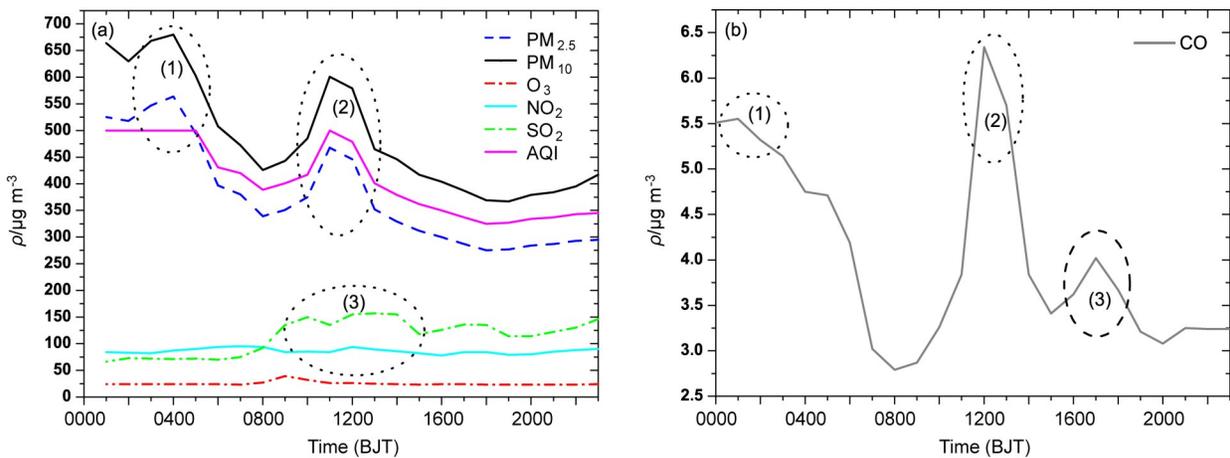


图8 2015年12月23日济南地区 (a) O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度、AQI, (b) CO浓度的日变化特征
Fig. 8 Diurnal variations of (a) O_3 , NO_2 , SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} concentrations, AQI, (b) CO concentration in Jinan on 12 November 2015

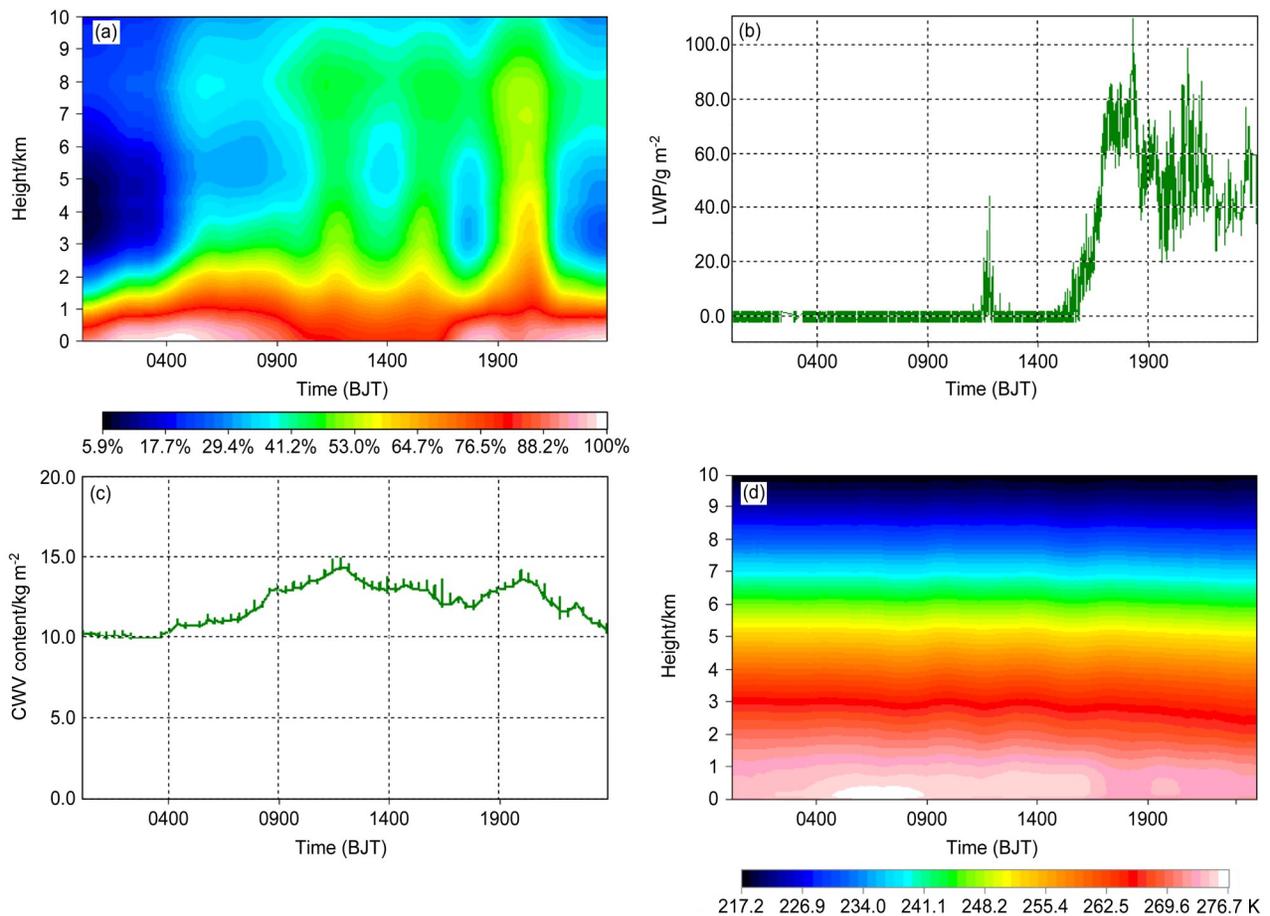


图9 2015年12月23日济南霾天气地基微波辐射计观测的(a)相对湿度、(b)液态水路径、(c)综合水汽含量、(d)温度廓线演变特征
Fig.9 Evolutions of (a) relative humidity, (b) liquid water path (LWP), (c) comprehensive water vapor (CWV) content, (d) temperature profile obtained from ground microwave radiometer in haze weather on 23 December 2015

显的变化，雾霾形成前，在1 km高度以下出现贴地逆温层，说明逆温层对雾霾颗粒的积累有一定的促进作用。

7 结论

结合章丘L波段探空对14通道地基微波辐射计探测温度资料进行质量控制，分析了微波辐射计在雾霾天气过程中所观测的温度、相对湿度、综合水汽含量和液态水路径的演变特征，结论如下：

(1) 雾霾天气过程，地基微波辐射计观测温度数据与L波段探空温度数据一致性非常好，利用 $y = ax + b$ 线性函数进行拟合，拟合优度均大于0.97。

(2) 贴地逆温强度范围在 $0.43 \sim 1.77^\circ\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$ ，其分布具有一定的季节差异，秋冬季逆温强度较大，春季由于天气对流强度加强，逆温层变弱；冬

季逆温层温度差相差比较大，最大逆温温差可达 4.5°C 。

(3) 悬垂逆温层顶高分布比较均匀，变化范围在1400 m至1600 m；逆温层底高分布不均匀，有较大的差别，底高最高为1000 m，最小仅为200 m；逆温层厚度有较大的差别，最大厚度为1400 m，最小厚度为400 m；逆温强度较小，范围为 $0.125 \sim 0.19^\circ\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$ ；逆温层温度差有5倍差距，最大为 2.8°C ，最小为 0.5°C ，平均约为 2°C 。

(4) 雾过程相对湿度较大，霾过程相对湿度较小，雾霾过程与大气垂直温度梯度变化有非常大的关系，当贴地逆温层消失，悬垂逆温层增强，有利于雾霾形成，反之，逆温层消失，则雾霾过程的消散。

(5) 三种天气过程中， PM_{10} 、CO浓度和AQI均在相同时间段出现峰值，有明显的起伏；CO浓度在雾霾天气随时间逐渐增大，雾天和霾天浓度较

小, 雾霾天气的浓度明显大于雾天或霾天。

参考文献 (References)

- 崔雅琴, 张佃国, 龚佃利, 等. 2016. 新探测仪器资料在短时强降雨过程中的应用 [J]. 气象科技, 44(6): 857-881. Cui Yaqin, Zhang Dianguo, Gong Dianli, et al. 2016. Application of new detecting instrument data in short-time heavy rainfall [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 44(6): 857-881. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2016.06.004
- 德力格尔, 黄彦彬, 李仑格. 2002. 青海省东北部地区春季空中水资源潜力分析 [J]. 高原气象, 21(6): 622-627. De Ligeer, Huang Yanbin, Li Lunge. 2002. Analyses on potential air water resources over northeast Qinghai in spring [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21(6): 622-627. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.06.014
- Dominique R, Nash J, Jeannet P, et al. 2006. The COST 720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign: TUC [J]. Meteor. Z., 15(1): 5-10. doi:10.1127/0941-2948/2006/0095
- 东高红, 韩素芹, 刘一玮, 等. 2013. 一次大暴雨过程中尺度涡旋系统特征分析 [J]. 暴雨灾害, 32(2): 97-104. Dong Gaohong, Han Suqin, Liu Yiwei, et al. 2013. Characteristic analysis on the mesoscale vortex system of an excessive heavy rain event [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 32(2): 97-104. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.02.001
- 范根昌, 肖辉, 吕峰, 等. 2015. 联合遥感技术对X波段雷达反射率的衰减订正 [J]. 高原气象, 34(5): 1465-1473. Fan Genchang, Xiao Hui, Lü Feng, et al. 2015. Study on X-band radar reflectivity attenuation correction using combined remote sensing technology [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(4): 1465-1473. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00125
- 郭丽君, 郭学良. 2016. 北京2009~2013年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因 [J]. 大气科学, 40(2): 296-310. Guo Lijun, Guo Xueliang. 2016. The type, vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009-2013 in the Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(2): 296-310. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.14275
- 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33(6): 1174-1186. He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(6): 1174-1186. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.05
- 黄治勇, 周志敏, 徐桂荣, 等. 2015. 风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用 [J]. 高原气象, 34(1): 269-278. Huang Zhiyong, Zhou Zhimin, Xu Guirong, et al. 2015. Monitoring application of hailstorm event with the observation of wind profile radar and ground-based microwave radiometer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(1): 269-278. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00130
- 雷恒池, 魏重, 沈志来, 等. 2001. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水 [J]. 应用气象学报, 12(S1): 73-79. Lei Hengchi, Wei Cong, Shen Zhilai, et al. 2001. Microwave radiometric measurement on water vapor and cloud liquid water before rainfall [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12(S1): 73-79. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.010
- 李力, 张蓬勃, 戴竹君, 等. 2016. 利用微波辐射计对南京2013年12月霾天气气温湿结构的探测分析 [J]. 气候与环境研究, 21(1): 8-16. Li Li, Zhang Pengbo, Dai Zhujun, et al. 2016. Using microwave radiometer data to detect and analyze the atmospheric temperature and moisture structure of the haze weather of Nanjing in December 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(1): 8-16. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15002
- 刘亚亚, 毛节泰, 刘钧, 等. 2010. 地基微波辐射计遥感大气廓线的BP神经网络反演方法研究 [J]. 高原气象, 29(6): 1514-1523. Liu Yaya, Mao Jietai, Liu Jun, et al. 2010. Research of BP neural network for microwave radiometer remote sensing retrieval of temperature, relative humidity, cloud liquid water profiles [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29(6): 1514-1523.
- 刘增强, 郑玉萍, 李景林, 等. 2007. 乌鲁木齐市低空大气逆温特征分析 [J]. 干旱区地理, 30(3): 351-356. Liu Zengqiang, Zheng Yuping, Li Jinglin, et al. 2007. Temperature inversion characteristics of low-air atmosphere of Urumqi City [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 30(3): 351-356. doi:10.3321/j.issn:1000-6060.2007.03.005
- Olivero J J. 1984. Microwave radiometric studies of composition and structure, ground-based techniques[M]/Vincent R A. Middle Atmosphere Program Handbook for MAP. Europe: ICSU, 43-55.
- Wei C, Leighton H G, Rogers R R. 1989. A comparison of several radiometric methods of deducing path-integrated cloud liquid water [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 6(6): 1001-1012. doi:10.1175/1520-0426(1989)006<1001:ACOSRM>2.0.CO;2
- 吴庆梅, 杨波, 王国荣. 2014. 北京地区一次回流暴雪过程的锋区特征分析 [J]. 高原气象, 33(2): 539-547. Wu Qingmei, Yang Bo, Wang Guorong. 2014. Analysis of the frontal characteristics of the backflow snowstorm process in Beijing area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(2): 539-547. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00194
- 吴庆梅, 张胜军, 刘卓, 等. 2015. 北京一次对流暴雨过程的干冷空气活动及作用 [J]. 高原气象, 34(6): 1690-1698. Wu Qingmei, Zhang Shengjun, Liu Zhuo, et al. 2015. Activities of cold-dry air and its impact on convective heavy rain process in Beijing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(6): 1690-1698. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00081
- 杨富燕, 张宁, 朱莲芳, 等. 2016. 基于激光雷达和微波辐射计观测确定混合层高度方法的比较 [J]. 高原气象, 35(4): 1102-1111. Yang Fuyan, Zhang Ning, Zhu Lianfang, et al. 2016. Comparison of the mixing layer height determination methods using lidar and microwave radiometer [J]. Plateau Meteorology, 35(4): 1102-1111. doi:10.17522/j.issn.1000-0534.2015.00045
- 张佃国, 王洪, 崔雅琴, 等. 2017. 山东济南地区2015年大气边界层逆温特征 [J]. 干旱气象, 35(1): 43-50. Zhang Dianguo, Wang Hong,

- Cui Yaqin, et al. 2017. Analysis of atmospheric boundary layer inversion characteristics based on microwave radiometer observations in Jinan in 2015 [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 35(1): 43–50. doi: 10.11755/j. issn. 1006-7639(2017) -01-0043
- 张秋晨, 龚佃利, 冯俊杰. 2017. RPG-HATPRO-G3 地基微波辐射计反演产品评估 [J]. *海洋气象学报*, 37(1): 104–110. Zhang Qiuchen, Gong Dianli, Feng Junjie. 2017. Analysis and evaluation of retrieval products of RPG-HATPRO-G3 ground-based microwave radiometers [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 37(1): 104–110. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.012
- 张志红, 周毓荃. 2010. 一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析 [J]. *气象*, 36(3): 83–89. Zhang Zhihong, Zhou Yuquan. 2010. Analyses of composite observations of cloud liquid water and precipitation on the evolution features [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36(3): 83–89. doi:10.7519/j. issn. 1000-0526. 2010.3.012
- 赵从龙, 蔡化庆, 宋玉东, 等. 1991. 对流层水汽和液态水的地基微波遥感探测 [J]. *应用气象学报*, 2(2): 201–207. Zhao Conglong, Cai Huaqing, Song Yudong, et al. 1991. Measurement of water vapor and cloud liquid water content in the troposphere by ground-based microwave remote sensing [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 2(2): 201–207.
- 朱雅毓, 王振会, 楚艳丽, 等. 2015. 地基微波辐射计亮温观测数据的综合质量控制与效果分析 [J]. *气象科学*, 35(5): 621–628. Zhu Yayu, Wang Zhenhui, Chu Yanli, et al. 2015. Comprehensive quality control and efficiency analysis on brightness temperature data by ground-based microwave radiometer [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 35(5): 621–628. doi:10.3969/2014jms.0031