

杭州临安一次严重大气污染过程的气温与污染物特征

王 维¹, 侯 平¹, 严淑娴², 王宇胜²

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300, 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 为了研究严重污染过程大气温度与污染物的特征, 选取杭州临安近 3 a 中一次严重大气污染过程, 利用 MTP5 温度廓线仪数据和空气质量监测数据进行统计分析, 探索气温和污染物变化特征。结果表明: ①逆温现象主要集中在清晨和傍晚, 全天温差超过 7.0 °C 未出现逆温现象, 逆温底高和顶高通常为 400 和 700 m。②逆温厚度最大值为 700.0 m, 平均逆温厚度为 359.9 m。逆温温差最大值为 3.7 °C, 平均逆温为 0.7 °C。逆温温差与逆温厚度极显著相关 ($R^2=0.914$, $P<0.01$)。③细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 和可吸入颗粒物 (PM_{10}) 是主要污染物。该次严重污染期间, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度分别超过 115 和 250 $\mu g \cdot m^{-3}$; 二氧化硫、一氧化碳、臭氧、二氧化氮等 4 种气体在这次污染过程中始终处在优良状态。④ $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 与逆温底高具有极显著正相关, 逆温顶高与 2 种颗粒物质量浓度不存在显著相关。造成污染的原因之一是逆温底高度下降, 垂直方向上颗粒物扩散受阻而产生大量聚集。图 6 表 2 参 32

关键词: 污染气象学; 大气边界层; 逆温; 区域污染

中图分类号: X511; S716

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)06-0997-10

Atmospheric temperature and pollutants on heavy pollution days in Lin'an, Hangzhou

WANG Wei¹, HOU Ping¹, YAN Shuxian², WANG Yusheng²

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To determine the atmospheric temperature and pollutant characteristics during periods of heavy pollution, a statistical analysis using data collected by MTP5 Temperature Profiler and Air Quality Monitoring System was made during serious air pollution incidents in Lin'an over the three years from 2015–2018. A correlation analysis was also conducted, which used statistical time series analysis. Results of the analysis showed that (1) temperature inversions were concentrated in the evening and early morning. When temperature differences between early morning and evening were over 7 °C all day, daytime temperature inversions did not appear. Inversion heights were usually 400 m at the base and 700 m at the top. (2) As for inversion thickness, the maximum was 700 m with an average of 359.9 m. The maximum temperature difference of an inversion was 3.7 °C with average of 0.7 °C. The range of temperature had a highly significant correlation with inversion thickness ($R^2=0.914$, $P<0.01$). (3) Particulate matter $PM_{2.5}$ and PM_{10} were the major pollutants. The concentration of $PM_{2.5}$ exceeded 115 $\mu g \cdot m^{-3}$ and PM_{10} exceeded 250 $\mu g \cdot m^{-3}$. Four gases, SO_2 , CO, O_3 , and NO_2 , always had good quality during the pollution occurrences. (4) The base height of the inversion had highly significant correlations with $PM_{2.5}$ ($P<0.01$) and PM_{10} ($P<0.01$) concentrations; however, no significant correlations were found for the top of the inversion. Thus, the cause of pollution was determined to be a decrease in the temperature inversion and the mass accumulation of particulate matter in the vertical direction. [Ch, 6 fig. 2 tab. 32 ref.]

收稿日期: 2017-11-25; 修回日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31100325); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ17C160004)

作者简介: 王维, 从事生态环境研究。E-mail: lvshuyingnong@163.com。通信作者: 侯平, 教授, 博士, 从事生态环境研究。E-mail: houpingg@263.net

Key words: pollution meteorology; atmospheric boundary layer; inversion; regional pollution

污染事件发生与大气边界层密切相关^[1-7]。20世纪初,边界层理论的提出为这一领域研究奠定了理论基础^[8]。1940年,中国学者提出的湍流应力方程,丰富了大气边界层研究内容^[9]。20世纪中后期,西方学者提出了局地大气边界层自由对流、大气温度层结等概念^[10],陈隆勋等^[11]提出大气边界层湍流场结构。进入21世纪,激光雷达和红外技术的运用提高了大气边界层温度研究的精度,发现区域大气污染与逆温出现导致的气流停滞有着密切关系^[12-18],强而厚的逆温层和低的逆温层高度将污染物压缩至地面^[19-24],可通过大气边界层温度监测为雾霾的预报提供依据^[25-28]。由此,大气边界层温度与污染物的关联性成为研究热点问题^[29-30]。本研究以杭州市临安区一次严重污染过程作为案例,分析期间近地大气边界层温度变化、逆温产生过程与空气污染出现的关系。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

杭州临安(30°15'N, 119°43'E),海拔100~150 m,位于浙江省西北部,隶属于杭州市。为亚热带季风性气候,盛行东南季风,年均降水量1 613.9 mm,年平均降水日158.0 d,无霜期年平均237.0 d。临安境内地势自西北向东南倾斜,北、西、南三面环山,东西100 km,南北50 km,总面积3 126.8 km²。西北、西南部山区平均海拔在1 000 m以上,东部河谷平原海拔在50 m以下,东西海拔相差1 770 m^[31]。城区空气首要污染物为可吸入颗粒物(PM₁₀)和细颗粒物(PM_{2.5})。二氧化硫(SO₂),二氧化氮(NO₂),PM₁₀和PM_{2.5}年均日均值分别为8, 31, 81和45 μg·m⁻³。2016年空气质量优良天数为312 d,优良率85.2%。

1.2 研究方法

空气质量数据来自中国环境监测总站“全国空气质量实时发布平台”。收集了2015年12月20-25日6 d的临安区人民政府、临安四中2个站点的PM_{2.5}, PM₁₀, 二氧化硫(SO₂), 二氧化氮(NO₂), 一氧化碳(CO)和臭氧(O₃)等逐时数值。评价标准为GB 3095-2012《环境空气质量标准》和HJ 633-2012《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》。气温数据由MTP5-HE微波遥感温度廓线仪测定,收集频率为5 min·次⁻¹,接收数据20个·次⁻¹,共收集温度数据34 560个。其工作原理是由一个辐射仪和微波吸收天线,分别发出与吸收微波,测试微波变化,并计算出气温廓线,廓线从地面开始隔50 m测得1个气温数据,点直至1 000 m高处,整个过程由全功能软件完成。

主要运用统计学中的时间序列分析方法,对测量期间从地面至1 000 m高空中气温变化情况进行分析。由于气温数据量大,采用计算机程序识别逆温状态,筛选出相应特征数据,并通过数据格式转化找出逆温底高、逆温顶高以及对应的气温、逆温厚度和温差等数据。再结合对应时间段内6种污染物变化情况,寻找逆温生成过程与污染演化过程的关系。用SigmaPlot 12.5作图呈现这次严重污染期间气温廓线图。逆温层厚度: $\Delta H = H_2 - H_1$, 其中: H_1 和 H_2 分别为逆温层底高、顶高(m);逆温层温度差: $\Delta T = T_2 - T_1$, 其中 T_1 和 T_2 分别为逆温层底部、顶部温度(℃)^[32]。

2 结果与分析

2.1 天气条件及空气质量情况

表1是这次大气污染过程的天气状况。主要特征是阴或小雨、低温和微风,不利于空气扩散。空气湿度大有利于氧化氮类、氧化硫类和氧化碳类气体与水分子结合生成悬浮小颗粒物。

表2是空气质量的日变化过程。主要特征是:连续3 d轻度污染后衍化为1 d的重度污染,随后削弱至中度,之后变为良好,整个过程6 d。主要污染物为PM_{2.5}和PM₁₀。其他指标处在较低状态。

逆温可分为3个阶段,如图1~3所示。第1阶段:逆温初始期20日21:00至21日9:00,出现拉长的逆温现象;第2阶段:21日12:00至24日18:00,持续了约40 h的逆温过程,其间22日全天出现持续逆温状态,白天地面气温与空中气温持续升高,距地面高度1 000 m范围内气温基本相同,且距地面高度700 m处气温持续升高,20:00后距地面高度500 m以下的温度降到8.0℃,但700 m高度处气温依然超过10.0℃,出现了该次最强烈的逆温温差和最大逆温厚度。连续的逆温使得空气的扩散受阻,

表 1 天气情况

Table 1 Weather conditions

观测日期	天气状况	$T_{最高}/^{\circ}\text{C}$	$T_{最低}/^{\circ}\text{C}$	风向风力
2015-12-20	小雨转阴	10.0	5.0	东北风 ≤ 3 级
2015-12-21	阴	12.0	6.0	东风 ≤ 3 级
2015-12-22	小雨	13.0	8.0	北风 ≤ 3 级
2015-12-23	阴转小雨	12.0	8.0	东北风 ≤ 3 级
2015-12-24	小雨	10.0	6.0	东北风 ≤ 3 级
2015-12-25	阴转多云	11.0	2.0	北风 ≤ 3 级

表 2 空气质量情况

Table 2 Air quality situation

观测日期	空气质量指数	空气质量等级	$\text{PM}_{2.5}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$\text{PM}_{10}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$\text{SO}_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$\text{CO}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$\text{NO}_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$\text{O}_3/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$
2015-12-20	120	轻度污染	90.9	128.8	11.4	1.278	57.9	84
2015-12-21	109	轻度污染	81.8	140	10.4	1.385	68.2	76
2015-12-22	104	轻度污染	77.1	115.5	9.5	1.418	67.1	78
2015-12-23	248	重度污染	167.9	294.8	14.1	1.955	78.2	78
2015-12-24	152	中度污染	106.9	187.6	12.1	1.717	65.1	88
2015-12-25	67	良	41.6	77.5	10.2	1.211	45.9	106

酿成了 23 日严重雾霾。第 3 阶段：24 日 20:00 以后，逆温逐步消散，25 日恢复正常态。

2.2 大气温度廓线演变

每日气温层结变化描述如下：20 日全天温差为 10.0 ℃，最高温度 12.0 ℃，最低温度 2.0 ℃。当天逆温主要集中在清晨和夜间 2 个时段。第 1 阶段(0:00–9:00)共经历 9 h，温差小于 1.0 ℃，逆温下限与上限分别为 400 和 700 m，平均厚度为 350 m。第 2 阶段，自 21:00 出现逆温状态，温差小于 1.0 ℃，逆

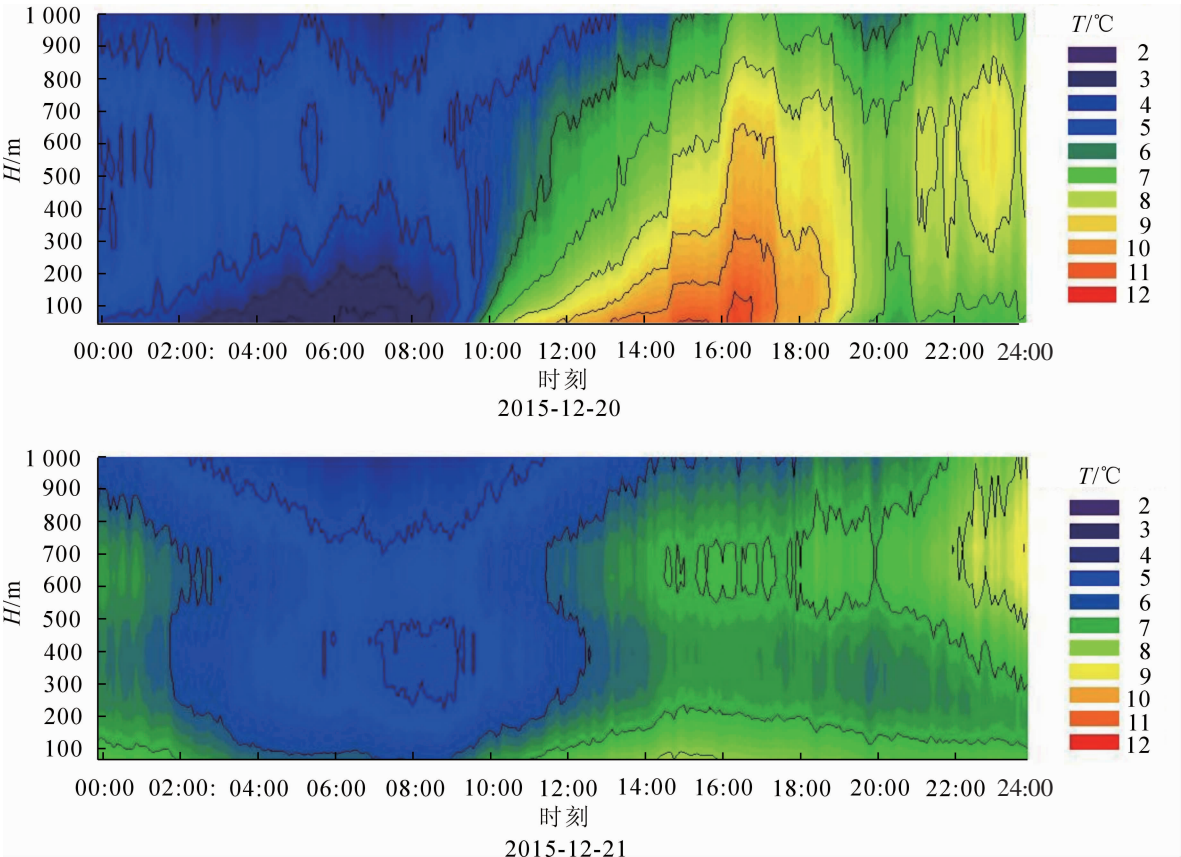


图 1 2015 年 12 月 20–21 日气温廓线图
Figure 1 Temperature profile on December 20–21, 2015

温下限与上限为 300 和 800 m，平均厚度为 450 m。

21 日全天温差为 5.0 ℃，最高温度为 9.0 ℃，最低温度为 4.0 ℃。全天逆温集中于 2 个时段：第 1 阶段(0:00–3:00)共经历 3 h，温差小于 0.5 ℃，逆温下限与上限处于 400 和 900 m，平均厚度 300 m。该阶段内 800 m 以上温度低于 5.0 ℃，200 m 以下平均气温度 7.0 ℃。第 2 阶段自 14:00 以后，温差小于 0.5 ℃，逆温厚度不足 100 m。18:00 起逆温高度处于 550~750 m，逆温厚度超过 200 m，温差平均为 0.8 ℃。20:00 后逆温范围不断扩大，逆温厚度逐渐增加，逆温中心温度超过 9.0 ℃。

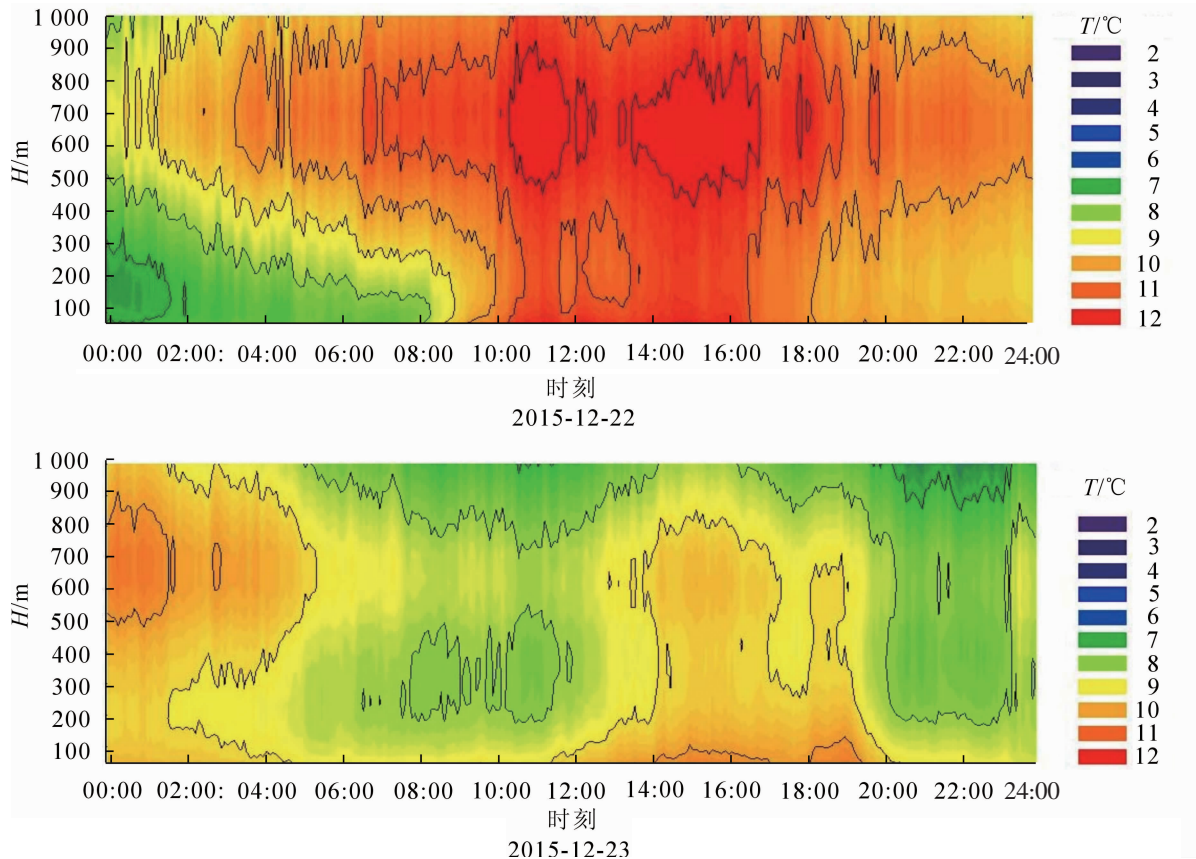


图 2 2015 年 12 月 22–23 日气温度廓线图

Figure 2 Temperature profile on December 22–23, 2015

22 日全天出现逆温现象，温差为 7.0 ℃，最高温度 13.0 ℃，最低温度 6.0 ℃。0:00–6:00 时间段内，200 m 以下平均气温 7.0 ℃，700 m 处气温 10.0 ℃。8:00–16:00 距地面高度 200 m 处气温逐渐升高，平均气温 12.0 ℃。700 m 处气温自 7:00 以后超过 11.0 ℃且不断升高，逆温厚度从 50 m 增加到 500 m，温差最高达 4.0 ℃。10:00–17:00 距地面 1 000 m 高度内气温基本相同且超过 11.0 ℃，全过程温差超过 1.0 ℃。17:00–19:00 地面气温不断下降且低于 10.0 ℃，700 m 处气温仍高于 12.0 ℃且气温不断降低。19:00 后 700 m 处温度逐渐低于 12.0 ℃，逆温厚度逐渐减小为 200 m，1 h 后距地面高度 200 m 处气温下降至 10.0 ℃，700 m 处气温下降至 11.0 ℃，范围继续缩小。

23 日全天存在逆温现象，温差为 5.0 ℃，最高气温 11.0 ℃，最低气温 6.0 ℃。1:00–4:00 近地面温度 10.0 ℃，距地面高度 700 m 气温 11.0 ℃。4:00–12:00 时间段内 300 和 700 m 高度处气温均不断下降，并依然存在温差超过 2.0 ℃的逆温现象。12:00 后近地面温度开始逐渐升高至 11.0 ℃。700 m 处气温也开始升高到 10.0 ℃。20:00 以后距地面 200 m 以上区域的气温下降至 8.0 ℃，200 m 以下范围内气温下降至 9.0 ℃。

24 日全天温差为 6.0 ℃，最高气温 10.0 ℃，最低气温 4.0 ℃，逆温时段主要集中在 11:00 前。0:00–8:00 距地面高度 100 m 处气温为 8.0 ℃，600~700 m 处平均气温 8.0 ℃，200~500 m 处平均气温 7.0 ℃，逆温厚度 100 m，温差小于 1.0℃。8:00–14:00 距地面 100 m 处气温逐渐升高至 10.0 ℃，700 m 处气温为

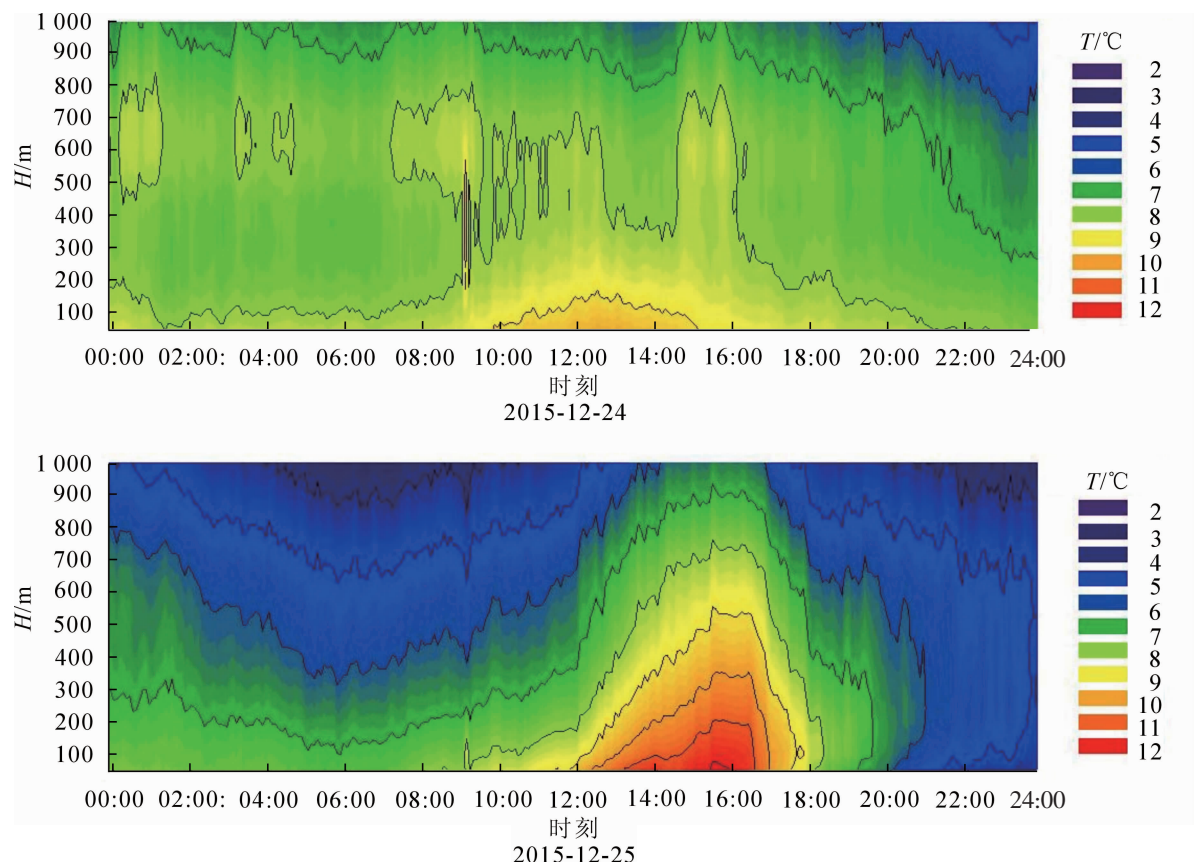


图 3 2015 年 12 月 24–25 日气温廓线图
Figure 3 Temperature profile on December 24–25, 2015

8.0 ℃，600 m 处个别时段出现气温为 10.0 ℃。25 日未出现明显逆温现象，温差为 8.0 ℃，最高气温 12.0 ℃，最低气温 4.0 ℃。

2.3 逆温温差与逆温厚度关系

图 4 为 2015 年 12 月 20–25 日临安区逐时逆温温差与逆温厚度变化情况。逆温厚度最大值为 700 m，平均逆温厚度为 359.9 m。逆温温差最大值为 3.68 ℃，平均逆温为 0.71 ℃。逆温温差最大值与逆温厚度最大值均出现在 22 日 8:00。逆温温差与逆温厚度存在极显著相关($R^2=0.914$, $P<0.01$)。

2.4 逆温高度与污染物变化

图 5 呈现的是这一过程中临安区人民政府和临安四中 2 个测点逐时 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度与逆温高度变化情况。逆温过程特征为：20 日逆温顶高平均高度为 600 m，逆温底高从距离地面 50 m 上升至

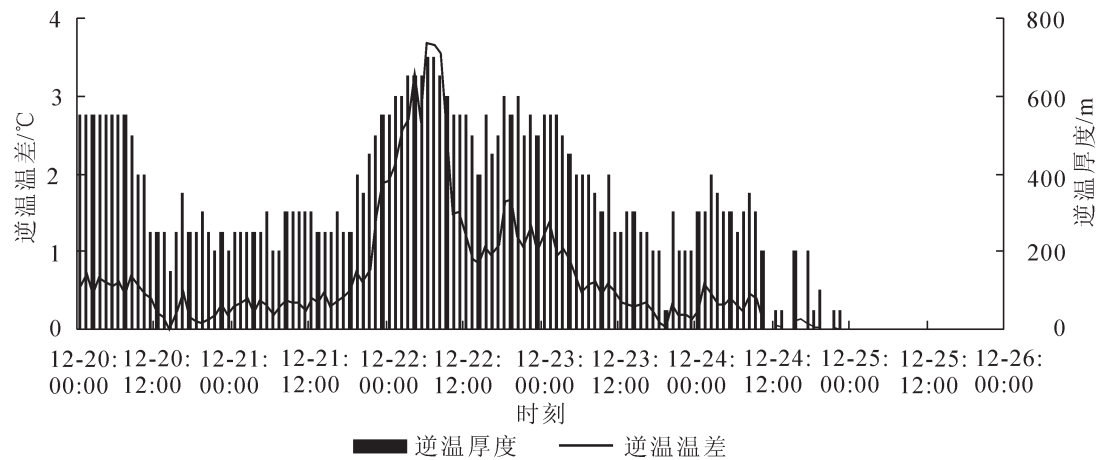


图 4 逆温厚度与逆温温差变化
Figure 4 Variation between inversion thickness and inversion temperature difference

300 m, 全天 2 种颗粒物质量浓度变化不大。21 日 18:00 后逆温顶高距地面高度由 600 m 上升至 700 m, 逆温底高从 300 m 下降至 50 m。22 日逆温顶高平均高度 700 m, 逆温底高平均高度 150 m。23 日 1:00 逆温顶高下降为距地面 600 m, 逆温底高从距离地面 150 m 上升至 450 m, 伴随逆温底高上升 2 种颗粒物质量浓度不断升高。20:00 后逆温底高逐渐下降至距地面 200 m, 2 种污染物质量浓度波动下降。24 日 16:00 时后逆温逐渐消散; 25 日基本不存在逆温现象, 2 种颗粒物质量浓度处于较低水平。

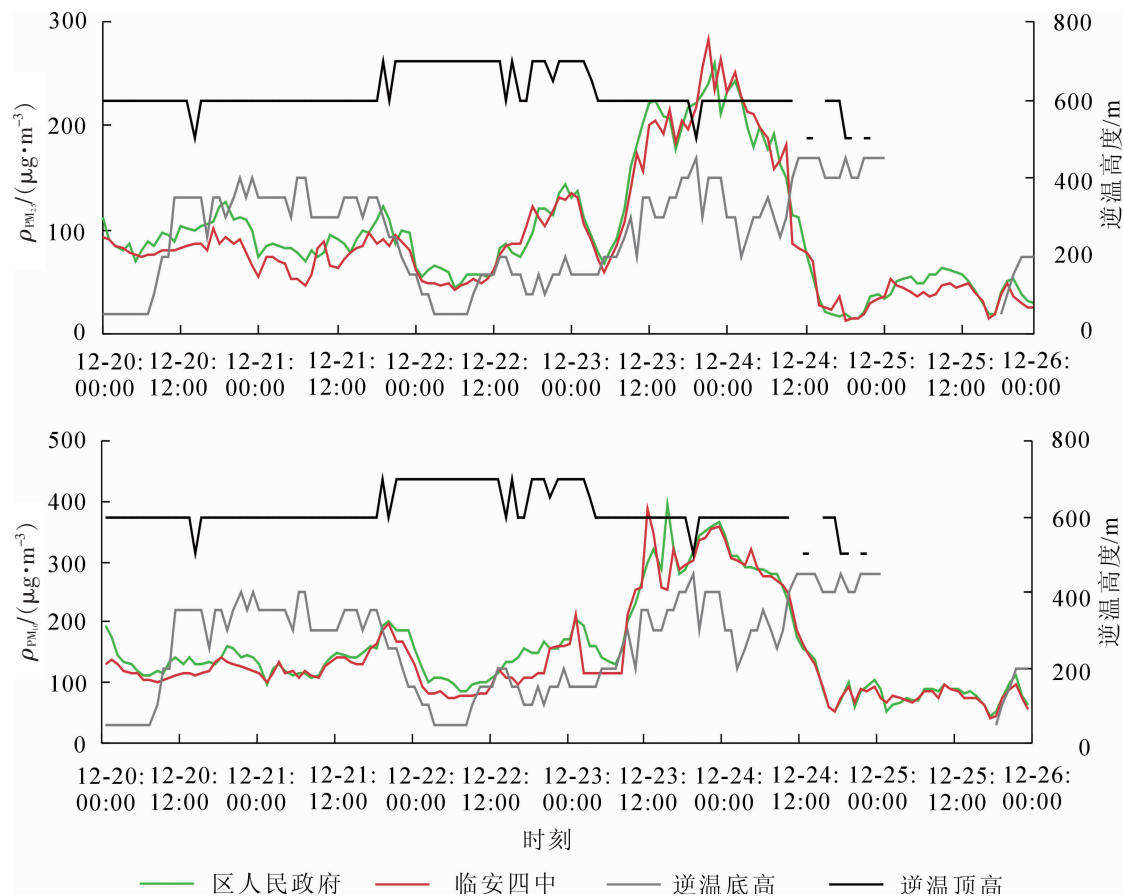


图 5 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度与逆温高度变化
Figure 5 Changes between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentration and temperature inversion

从污染角度看, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的发生随逆温而来, 又随逆温消散而去, 并且伴随逆温过程而积累。 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化特征是: 总体处在 24 h 平均 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 二级国家标准之上。20–22 日夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 的空气质量分指数 (IAQI) 为 150, 个别时段指数达到 200, 凌晨和傍晚指数相对较高; 23 日污染质量浓度达到全过程峰值, 临安四中站为 $284 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 区人民政府站为 $259 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 25 日迅速下降至 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下。

PM_{10} 的变化特征是: 2 个测点的质量浓度变化相差不大, 总体处在 24 h 平均 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 二级国家标准之上。20–22 日空气质量分指数为 150~200, 夜间达 200。之后 2 个测点质量浓度波动上升, 23 日达到整个过程峰值, 临安四中站为 $389 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 区人民政府站为 $395 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 25 日迅速下降至 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下。

图 6 呈现的是临安区人民政府和临安四中 2 个测点逐时气体污染物质量浓度与逆温高度变化情况。20 日中午临安区人民政府站二氧化硫质量浓度达到当日峰值 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 临安四中站为 $14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 25 日 19:00 临安区人民政府站出现峰值 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 整个过程二氧化硫质量浓度均低于国家 24 h 平均 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的一级标准。在一天中早晨质量浓度逐渐升高, 中午达到峰值, 夜晚降低。

一氧化碳质量浓度在 22 日 23:00 达全过程峰值, 临安区人民政府站为 $1.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 临安四中站为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。23 日 19:00 临安区人民政府站出现峰值为 $2.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 临安四中站点为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。全过程在国家一级标准内。

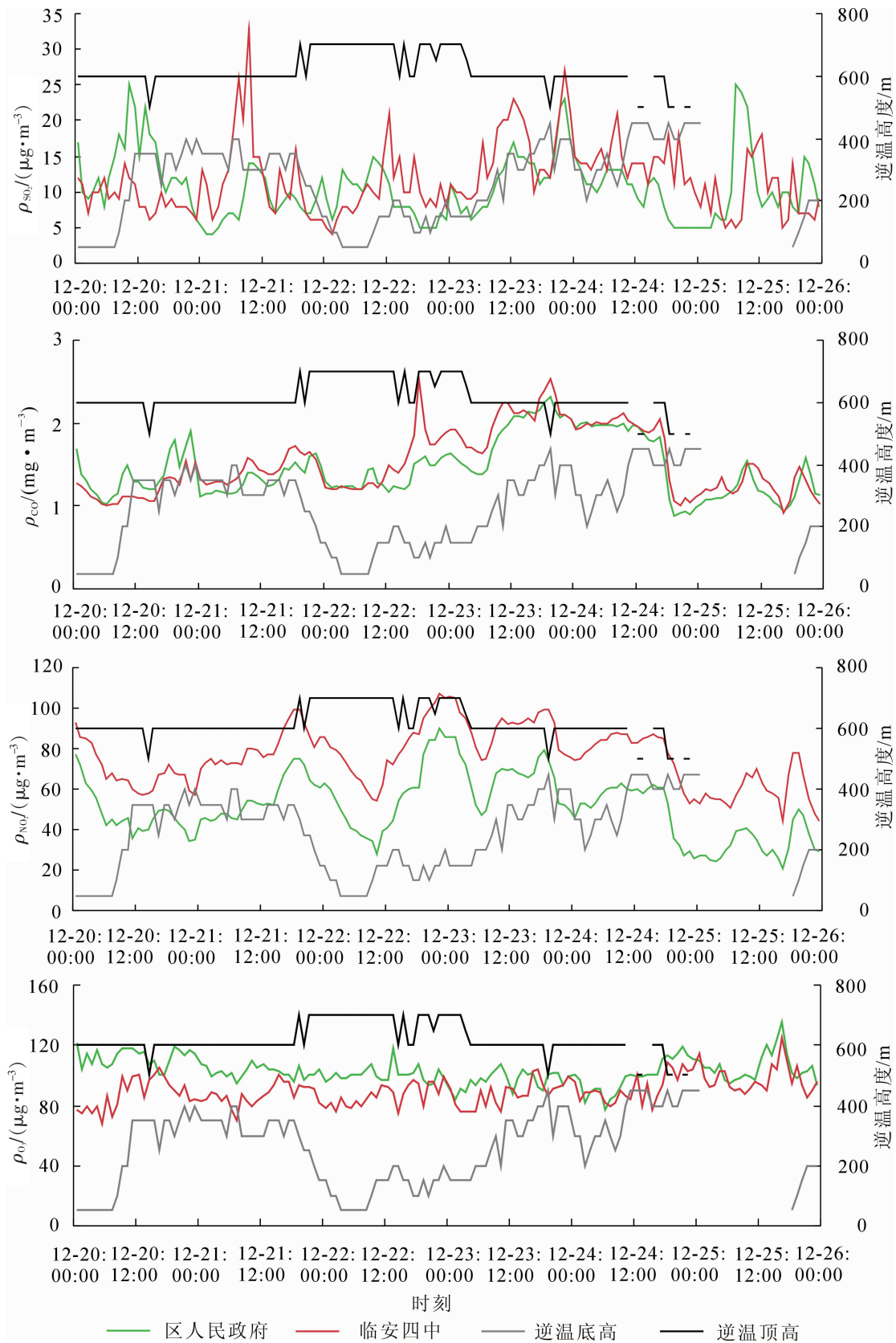


图 6 气体污染物质量浓度与逆温高度变化

Figure 6 Changes between gas pollutant concentration and temperature inversion

二氧化氮质量浓度 21 日 19:00 到达全天峰值，临安区人民政府站为 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，临安四中站为 $99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。22 日 18:00 临安区人民政府站和临安四中站质量浓度分别为 71 和 $105 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。全过程在国家一级标准内。

2个站臭氧质量浓度变化差异较大,临安四中站平均值优于临安区人民政府站;整个阶段内变化幅度较大。白天出现峰值,夜间降低,全过程在国家一级标准内。

临安四中站 PM_{10} 质量浓度与逆温底高极显著相关($R^2=0.326$, $P<0.01$), $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与逆温底高显著相关($R^2=0.101$, $P<0.05$);临安区人民政府站 PM_{10} 质量浓度与逆温底高显著相关($R^2=0.177$, $P<0.05$), $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与逆温底高显著相关($R^2=0.194$, $P<0.05$)。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度与逆温底高变化基本一致。逆温底高下降使得垂直方向上颗粒物不容易扩散,大量颗粒物聚集造成了严重空气污染事件发生。该结论与杜荣光等^[13]和简根梅等^[15]结论一致。逆温顶高高度为 550~700 m 且变化不明显,逆温顶高与 2 个测站 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度不存在显著相关性。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度超过 $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (对应 IAQI 为 150)和 PM_{10} 质量浓度超过 $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (对应 IAQI 为 150)。二氧化硫、一氧化碳、臭氧和二氧化氮的质量浓度平均值分别为 $10.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\sigma=4.52$), $1.5 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\sigma=0.35$), $102.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\sigma=8.93$), $51.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\sigma=15.65$)。全过程中前 3 种气体污染物质量浓度均低于空气质量分指数 50 对应的质量浓度值 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $5 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 二氧化氮质量浓度除个别时间点外也均低于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (对应 IAQI 为 50)。

3 结论

研究区逆温现象主要集中在清晨和傍晚,逆温底高和顶高通常为 400 和 700 m。该次雾霾是连续 3 d 轻度污染后衍化为 1 d 的重度污染,随后消弱至中度,之后变为良好,整个过程为 6 d。污染随逆温而来,又随逆温消散而去,并且伴随逆温过程而积累。

该次雾霾过程,逆温厚度最大值为 700.0 m,平均逆温厚度为 359.9 m。逆温温差最大值为 3.7°C ,平均逆温为 0.7°C 。逆温温差与逆温厚度极显著相关($R^2=0.914$, $P<0.01$)。

$\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 是主要污染物,该次严重污染期间,两者质量浓度分别超过 115 和 $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;二氧化硫、一氧化碳、臭氧和二氧化氮等 4 种气体在这次污染过程中始终处在较低的质量浓度状态。

$\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 与逆温底高具有极显著正相关,逆温顶高与 2 种颗粒物质量浓度不存在显著相关。造成污染的原因是逆温底高度下降,垂直方向上颗粒物扩散受阻而产生大量聚集。

4 参考文献

- [1] POPE R C, DOCKERY D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. *J Air Waste Manage Assoc*, 2006, **56**(6): 709 – 718.
- [2] LI Ke, CAI Wenju, LIAO Hong, et al. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change [J]. *Nat Clim Change*, 2017, **7**(4): 257 – 262.
- [3] WANG Xiaoping, MAUZERALL D L. Evaluating impacts of air pollution in China on public health: implications for future air pollution and energy policies [J]. *Atmos Environ*, 2006, **40**(9): 1706 – 1721.
- [4] 杨洋, 刘晓阳, 陆征辉, 等. 博斯腾湖流域戈壁地区大气边界层高度特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, **52**(5): 829 – 836.
YANG Yang, LIU Xiaoyang, LU Zhenghui, et al. Study on depth of atmospheric boundary layer in Gobi Desert regions of the Bosten lake basin [J]. *Acta Sci Nat Univ Pekin*, 2016, **52**(5): 829 – 836.
- [5] XU Mimi, XU Haiming, MA Jing. Responses of the East Asian winter monsoon to global warming in CMIP5 models [J]. *Int J Climatol*, 2016, **36**(5): 2139 – 2155.
- [6] WANG Huijun, CHEN Huopo, LIU Jiping. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China [J]. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2015, **8**(1): 1 – 9.
- [7] 王耀庭, 李威, 张小玲, 等. 北京城区夏季静稳天气下大气边界层与大气污染的关系[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(10): 1092 – 1098.
WANG Yaoting, LI Wei, ZHANG Xiaoling, et al. Relationship between atmospheric boundary layer and air pollution in summer stable weather in the Beijing urban area [J]. *Res Environ Sci*, 2012, **25**(10): 1092 – 1098.
- [8] SORBJAN Z. *Structure of the Atmospheric Boundary Layer* [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989: 227 – 227.
- [9] 颜大椿. 周培源湍流理论及其重大应用[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, **43**(9): 1011 – 1014.
YAN Dachun. Zhou Peiyuan's theories of turbulence and their important applications [J]. *Sci Sin Phys Mech Astron*,

2013, **43**(9): 1011 – 1014.

- [10] NIEUWSTADT F T M. On the solution of the stationary, baroclinic Ekman-layer equations with a finite boundary-layer height [J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 1983, **26**(4): 377 – 390.
- [11] 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制[J]. 气象学报, 2004, **62**(5): 634 – 646.
- CHEN Longxun, ZHOU Xiuji, LI Weiliang, *et al.* Characteristics of the climate change and its formation mechanism in china in last 80 years [J]. *Acta Meteorol Sin*, 2004, **62**(5): 634 – 646.
- [12] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008, **19**(1): 1 – 9.
- WU Dui, LIAO Guolian, DENG Xuejiao, *et al.* Transport condition of surface layer under haze weather over the pearl river delta [J]. *J Appl Meteorol Sci*, 2008, **19**(1): 1 – 9.
- [13] 杜荣光, 齐冰, 郭惠惠, 等. 杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响[J]. 气象与环境学报, 2011, **27**(4): 49 – 53.
- DU Rongguang, QI Bing, GUO Huihui, *et al.* Characteristics of atmospheric inversion temperature and its influence on concentration of air pollutants in Hangzhou, Zhejiang Province [J]. *J Meteorol Environ*, 2011, **27**(4): 49 – 53.
- [14] 张霏燕, 黄哲, 查贲, 等. 杭州 AQI 的分布特征及其与气象条件相关性分析[J]. 浙江气象, 2016, **37**(3): 27 – 32.
- ZHANG Feiyan, HUANG Zhe, ZHA Ben, *et al.* The distribution characteristics of AQI in Hangzhou and its correlation analysis with meteorological conditions [J]. *J Zhejiang Meteorol*, 2016, **37**(3): 27 – 32.
- [15] 简根梅, 朱韶峰. 杭州市逆温与大气污染的关系[J]. 浙江气象科技, 1997, **18**(3): 44 – 46.
- JIAN Genmei, ZHU Shaofeng. The relationship between temperature and air pollution in Hangzhou [J]. *J Zhejiang Meteorol*, 1997, **18**(3): 44 – 46.
- [16] ZHANG Renhe, LI Qiang, ZHANG Ruonan. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. *Sci China Earth Sci*, 2014, **57**(1): 26 – 35.
- [17] 毛敏娟, 刘厚通, 徐宏辉, 等. 多元观测资料融合应用的灰霾天气关键成因研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(3): 806 – 813.
- MAO Minjuan, LIU Houtong, XU Honghui, *et al.* The key factor research of haze with the combined application of the multi element data [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2013, **33**(3): 806 – 813.
- [18] 周涛, 汝小龙. 北京市雾霾天气成因及治理措施研究[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2012(2): 12 – 16.
- ZHOU Tao, RU Xiaolong. Research on the causes and measures of haze weather in Beijing [J]. *J North China Electr Power Univ Soc Sci*, 2012(2): 12 – 16.
- [19] 过宇飞, 刘端阳, 周彬, 等. 无锡市霾天气特征及影响因子研究[J]. 气象, 2013, **39**(10): 1314 – 1324.
- GUO Yufei, LIU Duanyang, ZHOU Bin, *et al.* Study on haze characteristics in Wuxi and its impact factors [J]. *Meteorol Mon*, 2013, **39**(10): 1314 – 1324.
- [20] 洪也, 马雁军, 王喜全, 等. 辽宁中部城市群灰霾天气的外来影响: 个案分析[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(8): 2115 – 2122.
- HONG Ye, MA Yanjun, WANG Xiquan, *et al.* External influences in the haze episode in the central city group of Liaoning: a case study [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2115 – 2122.
- [21] 潘本锋, 汪巍, 李亮, 等. 我国大中型城市秋冬季节雾霾天气污染特征与成因分析[J]. 环境与可持续发展, 2013, **38**(1): 33 – 36.
- PAN Benfeng, WANG Wei, LI Liang, *et al.* Analysis of the reason of formation and the characteristic of pollution-about fog or haze at key cities in autumn and winter in China [J]. *Environ Sustainable Dev*, 2013, **38**(1): 33 – 36.
- [22] 王璟, 伏晴艳, 王汉峥, 等. 上海市一次罕见的连续 11 天空气污染过程的特征及成因分析[J]. 气候与环境研究, 2008, **13**(1): 53 – 60.
- WANG Jing, FU Qingyan, WANG Hanzheng, *et al.* Study on an infrequent multi-day air pollution episode in Shanghai [J]. *Clim Environ Res*, 2008, **13**(1): 53 – 60.
- [23] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学,

- 2014, **44**(1): 15 – 26.
- WANG Yuesai, YAO Li, WANG Lili, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2014, **44**(1): 15 – 26.
- [24] 王跃思, 王莉莉. 大气霾污染来源、影响与调控[J]. 科学与社会, 2014, **4**(2): 9 – 18.
- WANG Yuesai, WANG Lili. Sources, influences, and control policies of atmospheric haze pollution [J]. *Sci Soc*, 2014, **4**(2): 9 – 18.
- [25] 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.
- WANG Jing, SHI Runhe, LI Long, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a heavy air pollution episode in Shanghai [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1537 – 1546.
- [26] 夏敏洁, 周文君, 裴海瑛, 等. 基于 L 波段雷达探空资料的南京低空逆温特征[J]. 大气科学学报, 2017, **40**(4): 562 – 569.
- XIA Minjie, ZHOU Wenjun, PEI Haiying, *et al.* Characteristic analysis of lower-level temperature inversion over Nanjing based on L-band radar data [J]. *Transac Atmos Sci*, 2017, **40**(4): 562 – 569.
- [27] 黄景, 徐伟萍, 金小城. 台州低空逆温层特征分析[J]. 气象与环境科学, 2016, **39**(2): 113 – 118.
- HUANG Jing, XU Weiping, JIN Xiaocheng. Characteristics analysis of low-altitude temperature inversion layer over Taizhou [J]. *Meteorol Environ Sci*, 2016, **39**(2): 113 – 118.
- [28] 郑庆锋, 史军. 上海地区大气贴地逆温的气候特征[J]. 干旱气象, 2011, **29**(2): 195 – 200, 2.
- ZHENG Qingfeng, SHI Jun. Temperature inversion characteristics of lower atmosphere over Shanghai [J]. *J Arid Meteorol*, 2011, **29**(2): 195 – 200, 2.
- [29] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 584 – 588.
- TONG Yaoqing, YIN Yan, QIAN Ling, *et al.* Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area [J]. *China Environ Sci*, 2007, **27**(5): 584 – 588.
- [30] 刘爱君, 杜尧东, 王惠英. 广州灰霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 2004, **30**(12): 68 – 71.
- LIU Aijun, DU Yaodong, WANG Huiying. Climatic characteristics of haze in Guangzhou [J]. *Meteorol Mon*, 2004, **30**(12): 68 – 71.
- [31] 孙小平, 陈云蔚, 王涛. 临安大雪天气气候特征分析及预报方法探索[J]. 浙江气象, 2013, **34**(4): 25 – 29.
- SUN Xiaoping, CHEN Yunwei, WANG Tao. Analysis of weather characteristics and prediction method of snow weather in Lin'an [J]. *J Zhejiang Meteorol*, 2013, **34**(4): 25 – 29.
- [32] 张佃国, 王洪, 崔雅琴, 等. 山东济南地区 2015 年大气边界层逆温特征[J]. 干旱气象, 2017, **35**(1): 43 – 50.
- ZHANG Dianguo, WANG Hong, CUI Yaqin, *et al.* Analysis of atmospheric boundary layer inversion characteristics based on microwave radiometer observations in Ji'nan in 2015 [J]. *J Arid Meteorol*, 2017, **35**(1): 43 – 50.