

雷正翠,郑媛媛,刘银峰,等,2019.2018年常州一次罕见持续性雾-霾天气分析[J].气象,45(8):1123-1134. Lei Z C, Zheng Y Y, Liu Y F, et al, 2019. Causes analyses of a severe continuous fog-haze weather process in Changzhou in 2018[J]. Meteor Mon, 45(8):1123-1134(in Chinese).

## 2018年常州一次罕见持续性雾-霾天气分析\*

雷正翠<sup>1,2</sup> 郑媛媛<sup>2</sup> 刘银峰<sup>3</sup> 孙康远<sup>2</sup> 刘端阳<sup>2</sup> 何涛<sup>4</sup> 吴晶璐<sup>1</sup> 周文君<sup>5</sup>

1 江苏省常州市气象局,常州 213022

2 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210008

3 浙江省景宁县气象局,景宁 323500

4 江苏省常州市环境监测中心,常州 213001

5 江苏省盐城市气象局,盐城 224005

**提 要:** 利用常规气象观测资料、探空资料、污染物浓度及 AQI 资料、NCEP 再分析资料等,对 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日夜间常州持续 11 d 的强浓雾和严重霾天气过程进行了分析。结果表明:(1)此次雾-霾过程持续时间长、范围广、强度大、污染重。(2)中纬度地区高层持续纬向环流控制、中低层暖脊稳定存在,地面持续受均压场或弱倒槽顶部、弱冷锋前部影响,是这次持续性雾-霾过程的重要天气条件。(3)边界层内弱辐散、负涡度及弱的下沉气流是此次雾-霾天气得以长时间维持、发展的动力因子。近地层长时间水汽饱和且维持小风速利于雾-霾的长时间维持。(4)近地面高强度的贴地逆温长时间维持和持续较低的混合层高度是此次雾-霾形成、发展和长时间维持的重要热力条件。雾比霾的平均混合层高度明显偏低且霾等级越高混合层高度越低,混合层高度的变化先于能见度变化,对雾-霾临近预警有较好的指导作用。(5)弱冷空气渗透、风速适当增加、混合层高度的先期快速下降、负净辐射曝辐量绝对值的明显增大是雾爆发性增强的主要原因。

**关键词:** 持续雾-霾,气象要素,污染物,逆温层,混合层高度,爆发性增强

中图分类号: P458, P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.009

## Causes Analyses of a Severe Continuous Fog-Haze Weather Process in Changzhou in 2018

LEI Zhengcui<sup>1,2</sup> ZHENG Yuanyuan<sup>2</sup> LIU Yinfeng<sup>3</sup> SUN Kangyuan<sup>2</sup>

LIU Duanyang<sup>2</sup> HE Tao<sup>4</sup> WU Jinglu<sup>1</sup> ZHOU Wenjun<sup>5</sup>

1 Changzhou Meteorological Office of Jiangsu Province, Changzhou 213022

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210008

3 Jingning Weather Station of Zhejiang Province, Jingning 323500

4 Changzhou Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Changzhou 213001

5 Yancheng Meteorological Office of Jiangsu Province, Yancheng 224005

**Abstract:** Using conventional meteorological observation data, sounding data, pollutant concentration and AQI data, NCEP reanalysis data, the causes of a severe persistent fog-haze weather in Changzhou from November 24 to December 3, 2018 were analyzed. The results show that this fog-haze process lasted a long time with wide scope, large density and heavy pollution. The upper latitudinal circulation was dominant

\* 科技部国家大气污染专项项目(JFYS2016YFC0201903 和 JFYS2016YFC0203303)、江苏省“333 高层次人才培养工程”项目(BRA2016565)、江苏省自然科学基金项目(BK20160041)、江苏省气象局重点项目(KZ201902)和江苏省气象科学研究所北极阁基金项目(BJG201703)共同资助

2019 年 1 月 7 日收稿; 2019 年 6 月 5 日收修定稿

第一作者:雷正翠,主要从事天气预报技术研究. Email:lzc6903@sohu.com

通信作者:郑媛媛,主要从事天气预报研究. Email:zhengyy63@sina.com

in the upper latitudes during the fog-haze period, and the warm ridges in the middle and lower layers were stable. The surface was continuously affected by the uniform pressure field or the top of weak inverted trough or the front of weak cold front, which provided a favorable circulation background for the continuous occurrence and development of fog-haze. The weak divergence, negative vorticity and weak downdraft in the boundary layer were the dynamic factors for the development of fog-haze weather. Long-time moisture saturation and low wind speed were beneficial to the occurrence and development of fog and haze. The average mixing layer height of fog was obviously lower than that of haze. The higher the haze level, the lower the height of the mixed layer. The change of mixing layer height was prior to the change of visibility, which was a guidance for the early warning of the fog-haze. The infiltration of weak cold air, proper increase of wind speed, rapid decline of mixing layer height and significant increase in the absolute value of negative net radiation exposure were the causes for the explosion of fog.

**Key words:** continuous fog-haze, meteorological elements, pollutant, inversion layer, mixing layer height, explosive enhancement

## 引 言

随着我国城市化和工业化进程的加快,近年来我国雾-霾天气出现频率和强度有明显增加趋势,严重雾霾天气持续时间长且范围大,如京津冀、长三角、珠三角等城市群气溶胶污染日趋严重,雾-霾天气显著增多(郝建奇等,2017;姚青等,2018;刘端阳等,2014;刘梅等,2014;李浩文等,2017),近几年雾-霾天气多次成为国内十大天气气候事件,如:2013年“1月份4次雾、霾过程影响中东部地区”“10月罕见雾、霾天气导致东北数千所学校停课”(张格苗,2013);2014年“10月4次雾、霾过程覆盖中东部”(李一鹏,2014);2015年“入秋后北方雾、霾不断,东北多地空气质量指数爆表”(申敏夏,2015);2016年“今年最强霾过程拉响27城重污染红色预警”(王玫珏,2016),对城市大气环境、人体健康、交通安全以及工农业生产等都带来了日益显著的负面影响,已经引起社会的广泛关注。国内外专家学者对雾-霾天气从灾害风险评价(谢志祥等,2017)、变化规律分析(林建等,2008;王珊等,2014)、成因分析(焦圣明等,2016;严文莲等,2018;张恒德等,2011;苗爱梅等,2014;于文金等,2016)、污染物浓度变化特征(王博妮等,2016)、气溶胶光学特性(孙冉等,2017)等方面进行了一系列的研究,取得了丰硕的成果。对于持续性雾-霾,学者也从多个角度进行了研究,如刘端阳等(2014)研究了2012年6月中上旬淮河下游一次连续多日大范围雾-霾天气的雾、霾相互转换过

程及成因。沈利娟等(2016)根据污染气体、气溶胶数浓度、气象要素及边界层探空数据等对2015年5月17—20日嘉兴市发生的一次持续性雾-霾过程进行了成因及其不同污染物的变化特征研究。陈朝平等(2015)对2014年1月22日至2月4日四川盆地一次持续性雾-霾天气过程的特点及环流背景进行了分析,指出此次持续14d的雾-霾天气过程发生在中高纬纬向型环流背景下,同时我国大部分地方处于地面高压内的均压场中,有利于雾-霾的形成和维持;大气混合层高度的变化对雾、霾之间的转换有很好的指示作用。刘瑞芳等(2017)利用高空探测、自动站观测、激光雷达等资料,对2013年12月17—25日发生在陕西关中的持续性雾-霾天气进行诊断分析,认为此次雾-霾天气具有明显的阶段性特征,前期的高低空配置有利于污染物的急剧累积,后期中高空气流较为平直,低层有弱暖平流,地面气压场较弱,有利于雾-霾天气的稳定维持;关中地区特殊的地形作用也是雾-霾天气易发的一个重要原因,等等。但是针对常州持续雾-霾的研究工作很少,2018年11月24日至12月3日夜间我国中东部包括江苏、安徽、上海、浙江、山东、河南、京津冀地区连续数日出现了罕见的大范围严重持续性雾-霾天气,影响范围广、持续时间长、强度大、污染重,给高速、航运、空运等交通运输、出行及公众健康带来了极其不利的影响,针对此次典型天气过程,以常州为例,基于污染物资料、NCEP再分析资料、常规气象资料、探空资料等,分析雾-霾过程中的天气形势、能见度与各主要气象要素及逆温层、混合层高度的关系

等进行雾的爆发性增强原因分析,以便深入认识区域性雾-霾的成因机制,为雾-霾预报预警和大气污染治理提供科学依据。

## 1 资料来源与说明

文中所用资料为 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日常州市地面资料(包括能见度、相对湿度、天气现象、降水量等要素)、NCEP/NCAR 再分析资料、常州市环境监测中心逐小时的污染物浓度及 AQI 数据。应常州市气象局要求,部队气象台探空站特提供 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日 02 时的探空资料。

气象观测站的辐射测量,包括太阳辐射与地球辐射两部分。地球上的辐射能来源于太阳,太阳辐射能量的 99.9%集中在 0.2~10  $\mu\text{m}$  的波段,太阳光谱在 0.29~3.0  $\mu\text{m}$  范围称为短波辐射,目前气象站主要观测这部分太阳辐射。地球辐射是地球表面、大气、气溶胶和云层所发射的长波辐射,波长范围为 3~100  $\mu\text{m}$ ,地球辐射能量的 99%波长大于 5  $\mu\text{m}$ 。净全辐射(辐射平衡):太阳与大气向下发射的全辐射和地面向上发射的全辐射之差值,也称为净辐射或辐射差额。曝辐量  $H$ :指一段时间(如一天)辐照度的总量或称累计量,单位为  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,取两位小数。负净辐射曝辐量指的是地球长波辐射曝辐量大于太阳短波辐射曝辐量,绝对值越大,说明净辐射曝辐量越大。

文中对于雾、霾的判定采用能见度仪观测值,并根据雾和霾的行业标准(中国气象局,2010)进行确定,根据行业标准,能见度为 200~50 m 时为强浓雾,当能见度<50 m 时为特强浓雾。考虑到雾和霾可相互转换,夜间到上午相对湿度较高时是雾,日出后气温上升,相对湿度减小,雾转换成霾,所以统称

为“雾-霾”天气进行研究。

## 2 雾-霾过程实况及特征

2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日夜间我国中东部地区出现了持续 11 d 的严重雾-霾天气,其中 11 月 25 日至 12 月 3 日江苏全省 71 个基本观测站日最小能见度 $\leq 200$ 、100、50 m 的站数分别为 21~66、14~66、3~60 个。11 月 25—29 日全省强浓雾—特强浓雾的范围尤其广、能见度特别低,强浓雾的站数有 40~66 个、特强浓雾的站数有 26~60 个,最低能见度为 15(句容 25 日)~24 m(丰县 26 日),其中 27 日最为严重,江苏所有基本观测站日最小能见度均<500 m,<50 m 的有 60 个,11 月 26 日起江苏全省高速公路实行特级管制(封闭)。期间江苏省还出现了持续性的中度—重度霾天气。为此在这次过程中江苏省气象台共发布了 11 个级别较高的大雾橙色或红色、霾橙色预警信号,江苏省也启动了重污染橙色预警。

11 月 24 日早晨至 12 月 3 日夜间常州地区连续 11 d 出现了罕见的持续性严重雾-霾天气(表 1),11 月 24 日早晨雾持续时间较短(首日),但是从 24 日后半夜开始直到 12 月 3 日常州每天都出现持续时间长达 7.5~15.2 h 的雾,其中 26 日夜间至 27 日上午、28 日夜间至 30 日上午雾出现时间早、消散晚,最早前一日 19 时就开始出现,直到次日 09—11 时后才逐渐消散,维持时间均长达 13 h 以上,尤其是 26 日夜间至 27 日上午能见度<100 m 的持续时间更是长达 11 h 以上。除 12 月 4 日、11 月 30 日未出现强浓雾(最小能见度为 286、280 m)外,其余 9 d 均出现了强浓雾,其中 25—29 日连续 5 d 出现最小能见度不足 50 m 的特强浓雾,可见此次过程

表 1 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日常州雾情况

Table 1 Fog situation from 24 November to 3 December 2018 in Changzhou

	11 月 24 日	11 月 25 日	11 月 26 日	11 月 27 日	11 月 28 日	11 月 29 日	11 月 30 日	12 月 1 日	12 月 2 日	12 月 3 日	12 月 4 日
最小能见度/m	197	36	31	35	43	34	280	84	173	76	286
开始时间/BT	06:40	03:30	23:50	19:20	21:50	19:10	19:00	01:10	18:00	20:50	21:20
结束时间/BT	07:10	11:00	10:40	10:30	07:40	08:40	09:20	12:30	01:00	07:20	00:40
持续时间/h	0.5	7.5	10.8	15.2	9.8	13.5	14.3	11.3	8	10.5	3.3

具有雾强度很强且维持时间很长的特征。

从能见度、相对湿度和污染物浓度数据来看,11月24日09—17时常州以轻微和轻度霾为主,夜间由于湿度增加,颗粒物吸湿增长,能见度下降,18—21时加重为中度霾,24日22时至25日03时加强为重度霾;此后几天持续出现大雾—浓雾—强浓雾—特强浓雾与霾的转换。在这次过程中共出现了22 h的中度霾、53 h的重度霾。污染物浓度也持续偏高,常州出现了75 h重度污染,5 h严重污染,其中25日00—12时、28日05时至29日12时分别维持12、32 h的重度污染、29日17时至30日13时出现持续时间21 h的重度—严重污染。期间 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 浓度持续偏高,最高分别达 $264$ 、 $346 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,可见也是一次重污染天气过程。

上述分析表明,本次雾-霾过程具有持续时间长、范围广、强度大、空气污染重等特征。

### 3 有利于持续雾-霾的天气形势

这次雾-霾过程持续时间长达11 d,而且雾-霾均很严重,在历史上是非常罕见的。为什么持续时间这么长?为什么这么强?

大范围雾-霾天气总是在特定的天气形势条件下发生的。11月24日至12月3日500 hPa平均高度场(图1a)显示,这次过程期间在俄罗斯东部—鄂霍次克海西北部附近有一低涡稳定存在,没有明显的冷平流南下。我国中东部地区以纬向环流为主,持续受西北偏西或西到西南气流控制,天空云量少,有利于夜间辐射降温,同时这种较平直的纬向环流还可阻挡高纬度地区冷空气的大规模渗透南下。850 hPa上,江苏始终维持温度脊,中低层大气增温明显,11月下旬常州平均气温异常偏高(较常年偏高 $2.3^{\circ}\text{C}$ ),中低层暖性结构的长期维持,有利于层结稳定和逆温层的形成,是雾-霾天气发生和稳定维持的主要原因之一。

从海平面平均气压场来看(图1b),我国西部和北部连续多日受稳定少动的冷性高压控制,无明显冷空气补充。江苏持续受均压场或弱倒槽顶部、弱冷锋前部影响(其中均压场影响时间占绝大多数),等压线较稀疏,地面基本呈静风或小风状态,不利于水汽和污染物粒子的水平扩散,其中24日早晨江苏

处在弱冷锋的前部(冷空气11时后才影响常州),有利于锋前雾的出现(启动机制)。11月24日至12月1日夜间天空状况基本以晴到少云为主,2日虽白天云量多,但夜间云量也较少,以辐射雾为主;3日夜冷空气逐渐南下,4日03时冷空气主体影响常州,3日20时出现降水,21:30开始出现雾,随后能见度逐渐下降,23:20达最低(286 m),4日00:50上升到1 km以上,因此3日夜常州处在冷锋前部,出现的雾为锋前雨雾。3日夜间到4日受较强冷空气和较强降雨影响,持续雾-霾天气才得以结束。

中纬度较平直的高空环流、中低层的暖脊、持续稳定少动的地面均压场这种高低空的配置是长时间雾-霾天气维持的典型天气形势,为本次雾-霾天气的持续发生发展提供了有利的环流背景。

### 4 有利于持续性强浓雾的水汽和热动力条件及污染物分析

这次雾过程强度大,连续9 d出现大范围的能见度 $<200 \text{ m}$ 的强浓雾,连续5 d出现能见度 $<50 \text{ m}$ 的特强浓雾,而且霾也很严重,出现了53 h的重度霾。

通过各气象要素与能见度的相关性分析,得到相对湿度、气温、风速、露点与能见度之间的相关系数分别为 $-0.77$ 、 $0.56$ 、 $0.43$ 、 $-0.12$ ,因此首先重点分析风速、气温、相对湿度等与能见度的关系。

风速是影响污染物水平输送的重要因子,边界层内的水平风速大小是判断大气水平输送能力的一个重要参数。从逐日地面图可知,在持续性雾-霾期间,常州除24日前期和27日后期受弱冷锋影响、12月1—3日受倒槽顶部影响外,其余时间均受均压场控制,弱的气压梯度决定了地面风速小(图2),期间多静风( $<0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )或小风( $<2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),平均风速为 $1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风速 $<2$ 、 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的分别占88.3%、22.1%,其中浓雾期间除两个时次风速为 $2.4$ 、 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 外,其余均小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,较小的风速不利于污染物的水平扩散,也使得雾-霾长时间维持。

从整个过程的地面风向来看,主导风向为偏北、偏东风,其中偏北风占比最高约26.7%、偏东风其

次占比约 20.4%，静风也较多；24 日夜间至 26 日上午地面盛行东北风或偏东风，将海上的水汽平流输送至我国中东部地区，自 24 日夜间起地面相对湿度长时间维持 95% 以上的高湿状态(图 2、表 2)(每日持续时间在 5~19 h,除 24 日外,有 9 d 持续时间均在 10 h 以上,最长维持时间达 19 h 之久),11 月 24 日至 12 月 3 日平均相对湿度为 89.1%，相对湿度 >90% 的占 69.6%；从温度露点差  $T-T_d$  来看(图略),24 日 00 时至 12 月 3 日 20 时水汽长时间处于饱和状态,240 h 内有 175 h 处于饱和状态(占比达

72.9%)，另外从表 3 可以看出,在此期间饱和层/湿层厚度较大,可见长时间的近地面层高湿度和水汽饱和有利于浓雾甚至强浓雾的形成和长时间维持以及污染物吸湿增长,这也是持续雾-霾产生和维持的原因之一。

周文君等(2016)研究表明,在持续雾-霾期间边界层内较弱的物理量场如弱正散度及负涡度是雾-霾天气得以维持发展的动力因子。利用 NCEP/NCAR 再分析资料分析了常州地区涡度、散度、垂直速度的变化情况(图 3),从图中可以看到,在整个

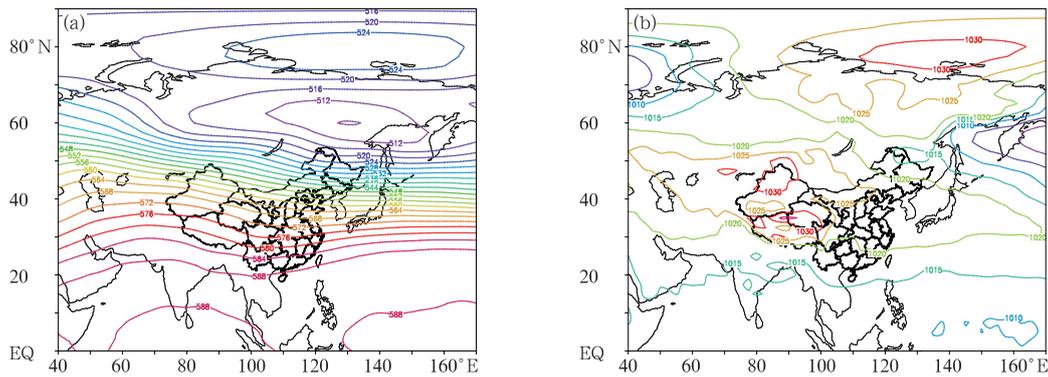


图 1 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日(a)500 hPa 平均高度场和 (b)海平面气压平均场环流形势

Fig. 1 The circulation situation from 24 November to 3 December 2018  
(a) 500 hPa mean height field, (b) mean sea level pressure field

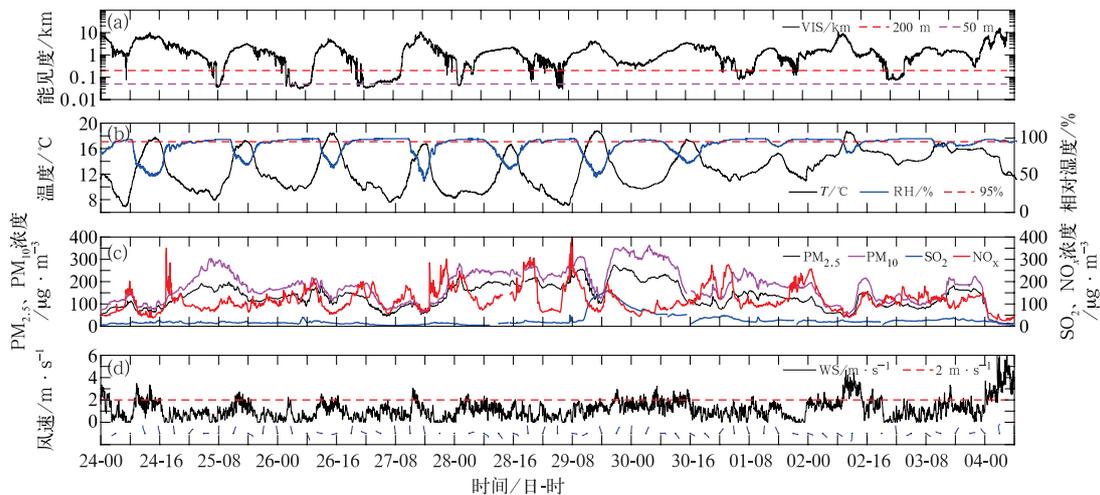
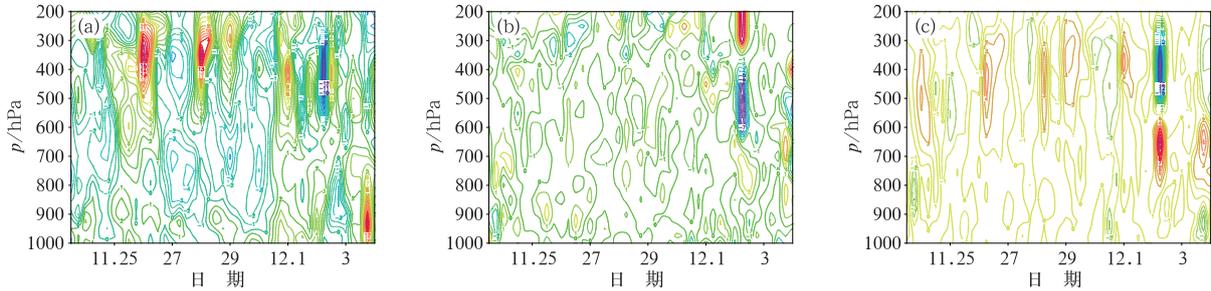


图 2 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日常州能见度(a),温度、相对湿度(b), $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  浓度(c)和风向、风速(d)的演变情况

Fig. 2 Evolutions of visibility (a), temperature, relative humidity (b),  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  (c) and wind (d) in Changzhou from 24 November to 3 December 2018

表 2 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日常州相对湿度  $\geq 95\%$  持续情况

	11 月							12 月		
	24 日	25 日	26 日	27 日	28 日	29 日	30 日	1 日	2 日	3 日
开始时间/BT	24 日 04	25 日 00	25 日 23	26 日 20	27 日 22	28 日 20	29 日 22	1 日 00	1 日 18	2 日 15
结束时间/BT	24 日 08	25 日 11	26 日 11	27 日 11	28 日 08	29 日 08	30 日 08	1 日 13	2 日 08	3 日 09
持续时间/h	5	11	13	16	11	13	11	14	15	19

图 3 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日常州的涡度(a, 单位:  $s^{-1}$ )、散度(b, 单位:  $s^{-1}$ )、垂直速度(c, 单位:  $Pa \cdot s^{-1}$ )时间-高度剖面图Fig. 3 Time-height profiles of vorticity (a, unit:  $s^{-1}$ ), divergence (b, unit:  $s^{-1}$ ), vertical velocity (c, unit:  $Pa \cdot s^{-1}$ ) at Changzhou from 24 November to 3 December 2018

持续雾-霾期间, 850 hPa 以下正负涡度、散度均交替出现, 但数值一般为  $0 \sim 2 s^{-1}$ ; 垂直速度也很小, 基本介于  $-1 \sim 0 Pa \cdot s^{-1}$ 。可见持续雾-霾期间, 近地面层的动力条件很弱, 大气湍流运动弱, 不利于水汽和污染物的垂直向上扩散, 从而导致污染物浓度高, 有利于雾-霾的维持。

逆温层的存在是雾-霾天气持续的重要条件之一, 近地层出现逆温, 不利于污染物的垂直扩散, 逆温层的持续时间、强度和厚度对污染物垂直扩散有直接影响。逆温强度越强, 大气层结越稳定, 越有利于雾-霾的维持。花丛等(2015)研究指出逆温强度与能见度呈负相关关系, 在雾-霾过程中, 逆温层底高度较低、厚度较大且雾过程逆温层底高度较霾过程低、厚度较霾过程小或者接近。图 4 给出了 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日常州的温度廓线变化。整个过程期间 02 时的探空曲线基本都存在明显的贴地逆温, 逆温层顶高度较低, 一般出现在 925 hPa 以下, 持续的逆温层通过“锅盖”效应使得水汽和污染物在边界层内聚集和维持并形成浓雾和霾。虽然逆温层结不厚, 但是逆温幅度较大、逆温强度较强, 导致了雾-霾持续时间长; 还可得出, 26 日夜间至 30 日早晨逆温强度较强, 与此相对应常州 26 日夜间至

27 日上午出现了 12 h 的强浓雾—特强浓雾、28 日出现了 11 h 的重度霾, 也导致在此期间出现了 64 h 的重度—严重污染过程。由探空站 02 时的探空数据(表 3)可知, 26 日在 1100~1002 hPa 存在强度为  $0.03^{\circ}C \cdot hPa^{-1}$  的逆温; 27 日的逆温出现在 1011~1006、990~963 hPa, 强度分别为  $0.64$ 、 $0.17^{\circ}C \cdot hPa^{-1}$ ; 28 日的逆温出现在 1020~1000、984~956 hPa, 强度分别为  $0.14$ 、 $0.25^{\circ}C \cdot hPa^{-1}$ ; 29 日在 700 hPa 以下出现了多层逆温, 其中 1021~1017 hPa 逆温强度为  $1.28^{\circ}C \cdot hPa^{-1}$ ; 12 月 2 日在 900 hPa 以下也出现了多层逆温, 其中 1015~1007 hPa 之间逆温强度为  $0.5^{\circ}C \cdot hPa^{-1}$ 。直至 3 日夜里较明显降水和 4 日冷空气南下, 逆温层结被破坏, 雾-霾天气缓解。

混合层高度表征污染物在垂直方向被热力和动力湍流输送所能到达的高度, 是影响污染物扩散的重要参数。当混合层高度较低时, 污染物在垂直方向上受到限制, 容易造成较高的污染浓度。混合层高度越低, 越不利于污染物的垂直扩散, 同时有助于近地面层水汽的集聚, 促进气溶胶粒子吸湿增长, 污染物浓度迅速增大。一般情况下, 混合层高度有明显的日变化, 白天大气湍流作用不断增强, 混合层高

表 3 2018 年 11 月 26 日至 12 月 2 日常州探空站 02 时逆温和湿层分布  
 Table 3 Temperature inversion and wet layer distribution at the sounding station in Changzhou  
 at 02:00 BT from 26 November to 2 December 2018

日期	出现层次/hPa	最大逆温幅度/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hPa}^{-1}$	饱和层/湿层高度/hPa
11 月 26 日	1100~1002	0.03	925
11 月 27 日	1011~1006,990~963	0.64	990
11 月 28 日	1020~1000,984~956	0.25	994
11 月 29 日	1021~1017,1017~1000,1000~972,910~903,841~824,763~738	1.28	1017/1000
12 月 2 日	1015~1007,1007~1000,1000~980,949~928,928~925,925~922	0.5	949/928

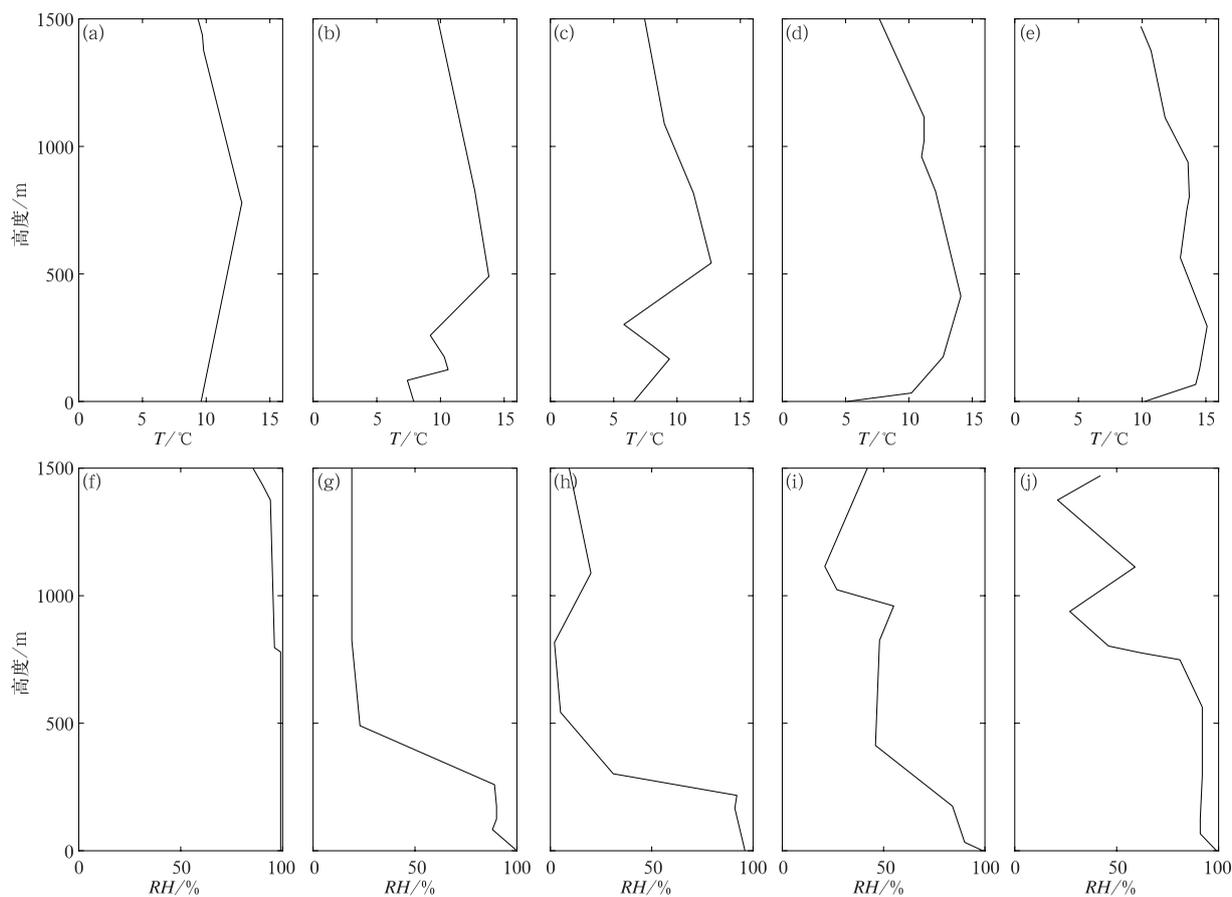


图 4 2018 年 11 月 26 日至 12 月 3 日 02 时常州温度(a,b,c,d,e)、相对湿度(f,g,h,i,j)廓线图

(a,f)11 月 26 日,(b,g)11 月 27 日,(c,h)11 月 28 日,(d,i)11 月 29 日,(e,j)12 月 2 日

Fig. 4 Profiles of temperature (a, b, c, d, e) and relative humidity (f, g, h, i, j) in Changzhou at 02:00 BT from 26 November to 3 December 2018

(a, f) 26 November, (b, g) 27 November, (c, h) 28 November, (d, i) 29 November, (e, j) 2 December

度不断增高;夜间湍流作用降低,混合层高度随之下降。本文采用 Nozaki(1973)提出的利用地面气象资料估算混合层高度的方法,简称罗氏法。公式如下:

$$h = \frac{121}{6}(6 - P)(T - T_d) + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \ln(Z/Z_0)}$$

式中, $h$  为混合层高度; $T - T_d$  为温度露点差; $P$  为 Pasquill 稳定度级别,根据太阳高度角、风速和云量进行判定,分为 A~F 六个级别, $P$  值依次取值 1~6; $U_z$  为高度  $Z$  处的平均风速; $Z_0$  为地表粗糙度; $f$  为地转参数。

图 5 给出了 11 月 24 日至 12 月 3 日能见度与

混合层高度的变化情况,在此期间混合层高度基本在 1.5 km 以下,平均混合层高度为 497.3 m,最低混合层高度为 79 m,出现在 26 日 09 时,此时能见度为 50 m。从图 5 还可以看出,混合层高度的变化与能见度的变化有一定的对应关系,能见度的下降比混合层高度的下降存在一定的滞后性,当混合层高度下降后,能见度会出现明显的下降趋势;混合层高度升高后,能见度也会有所上升。25—29 日上午连续 5 d 最低能见度均 < 50 m,期间混合层高度均较低,基本在 1 km 以下;29 日 19 时至 30 日 08 时再次出现了雾,混合层高度却明显升高,介于 663~1403 m,最低能见度也随之升高到了 280 m;而 12 月 1 日凌晨至中午雾出现期间,混合层高度均下降到 650 m 以下,期间对应的最低能见度也下降至 84 m。

此外,混合层高度越低,大气污染扩散能力越差,污染物浓度高,霾加重,出现霾期间平均混合层高度为 721.9 m,最低混合层高度为 135.7 m。分不同等级霾进行统计,得出轻微、轻度、中度、重度霾期间平均混合层高度分别为 936.4、804.7、700.6、683.8 m。

由此可见,持续较低的混合层高度也是此次雾-霾长时间维持的重要原因之一;雾比霾的平均混合层高度明显偏低,且混合层高度的变化对雾、霾的等级预报也有较好的指导作用。

通过各污染物浓度与能见度的相关性分析,得到  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_1$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  与能见度的相关系数分别为 -0.45、-0.52、-0.31、-0.04、-0.16。细粒子质量浓度是影响大气能见度的主要因素,细粒子在可吸入颗粒物中的富集是造成持续性污染和能见度连续下降的主要原因(姚青等,2012),从图 2 可以看出,在这次持续性严重雾-霾天气过程中, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  与能见度的变化趋势总体呈反相关关系,24 日 19 时至 25 日 03 时先后出现轻度—中度—重度霾, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度分别从 108、143  $\mu g \cdot m^{-3}$  上升至 174、235  $\mu g \cdot m^{-3}$ 。25 日 04—08 时出现大雾—浓雾—强浓雾—特强浓雾,期间  $PM_{10}$  的浓度从 241  $\mu g \cdot m^{-3}$  上升至 275  $\mu g \cdot m^{-3}$ 。此后随着能见度逐渐上升,直到 25 日 16 时  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度明显下降。随着夜间的来临,出现了大雾—强浓雾—特强浓雾,期间  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度明显上升,26 日 11 时分别上升至 164、209  $\mu g \cdot m^{-3}$ 。之后随着雾的消散, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度明显下降。此

后数日直到 12 月 3 日夜间, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度变化与能见度的变化与前面几日变化特点相似。12 月 3 日夜间到 4 日在较强降雨和冷空气的影响下,能见度才逐渐转好,空气质量得以快速改善( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度由 3 日 21 时的 156、210  $\mu g \cdot m^{-3}$  下降到 4 日 04 时的 11、12  $\mu g \cdot m^{-3}$ )。因此,当雾-霾增强时, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度一般是增大的,即雾-霾越强,污染物浓度一般也越强。

但是在本次过程中 26 日夜间至 27 日早晨出现了浓雾对污染物的湿清除现象。26 日 20 时相对湿度上升至 96%,常州地区出现大雾,能见度快速下降,22 时为浓雾,23 时加强为强浓雾,27 日 00 时已达特强浓雾级别,且特强浓雾—强浓雾维持到 27 日 10 时,在此过程中,雾维持时间为 15.2 h,其中能见度 < 100 m 的持续时间长达 11 h 以上。26 日 20 时—27 日 11 时相对湿度介于 96%~99%,98%~99% 的相对湿度维持了 14 h 以上,在此期间  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度由 26 日 20 时的 146、186  $\mu g \cdot m^{-3}$  下降到 27 日 05 时 45、70  $\mu g \cdot m^{-3}$ ,主要是由于水汽长时间饱和、污染物吸湿增长达到一定程度后,以污染物为凝结核的雾滴所受到的重力大于浮力时下落至地面,湿沉降的作用导致空气质量明显好转,说明长时间维持的浓雾—强浓雾对气溶胶粒子具有一定的湿清除作用(康汉青等,2009)。

## 5 强浓雾爆发性增强成因分析

所谓强浓雾爆发性增强(朱承瑛等,2018),是指在很短时间内(一般 < 30 min)雾突变为强浓雾(能见度 < 200 m),或跃增为特强浓雾(能见度 < 50 m)。

在 11 月 24—29 日连续性严重雾-霾过程中也多次呈现出强浓雾爆发性增强特征,主要出现在 24 日 06:55—06:59、25 日 07:35—07:36、26 日 02:32—02:39、26 日 22:03—22:11、28 日 01:14—01:29、29 日 05:15—05:19(图 6)。本文基于各气象要素分钟级资料选取爆发性增强分别出现在早晨日出前后的 24 日和出现在夜间的 26 日进行具体分析(图 6a,6c)。

11 月 24 日有弱冷空气南下影响常州,06 时常州处在弱冷锋前部的均压场中,天气形势有利于锋前雾的出现;06:43 常州站能见度为 1097 m,8 min 后下降至 275 m,06:54 有所上升,之后雾迅速加

强,06:59 能见度下降至 77 m,4 min 内能见度下降了 512 m。常州观测站资料可见,04:48 之前为 S 风,04:48—06:52 转为 N、NW 风,表明有弱冷空气渗透,有利于水汽凝结;此外雾迅速增强期间的 06:46—06:53 风速为  $0.4\sim 0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而之前的 06:35—06:45 和之后的 06:54—06:59 风速均在 0

$\sim 0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,由此可见,风速提前小幅增大使得湍流运动加强对雾的增浓甚至爆发性增强有促进作用(Choullarton et al,1981);计算结果显示在强浓雾爆发前 05—06 时混合层高度已开始下降,由 558.23 m 下降至 188.54 m,强浓雾爆发时为 119.16 m,表明混合层高度先期迅速下降有利于雾的爆发性增强。

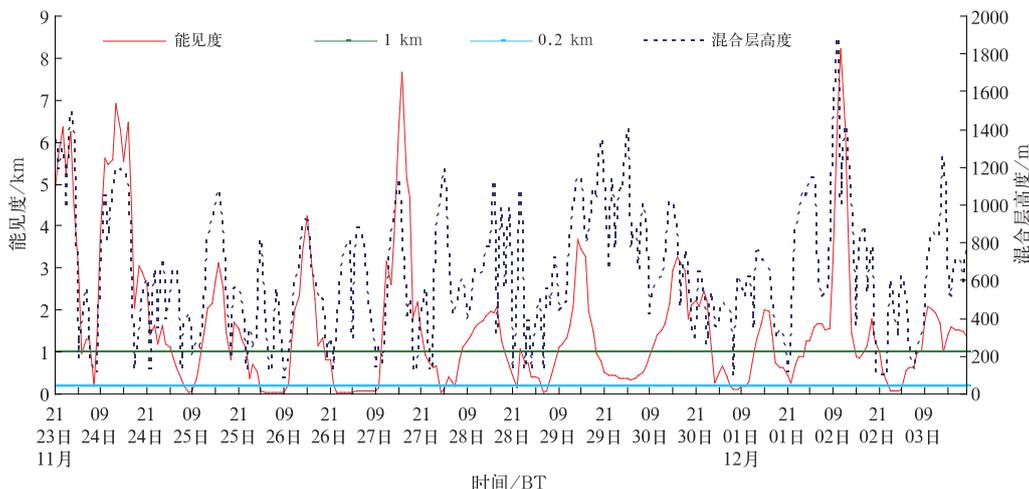


图 5 2018 年 11 月 24 日至 12 月 3 日常州能见度和混合层高度

Fig. 5 Evolution of visibility and mixing layer height in Changzhou from 24 November to 3 December 2018

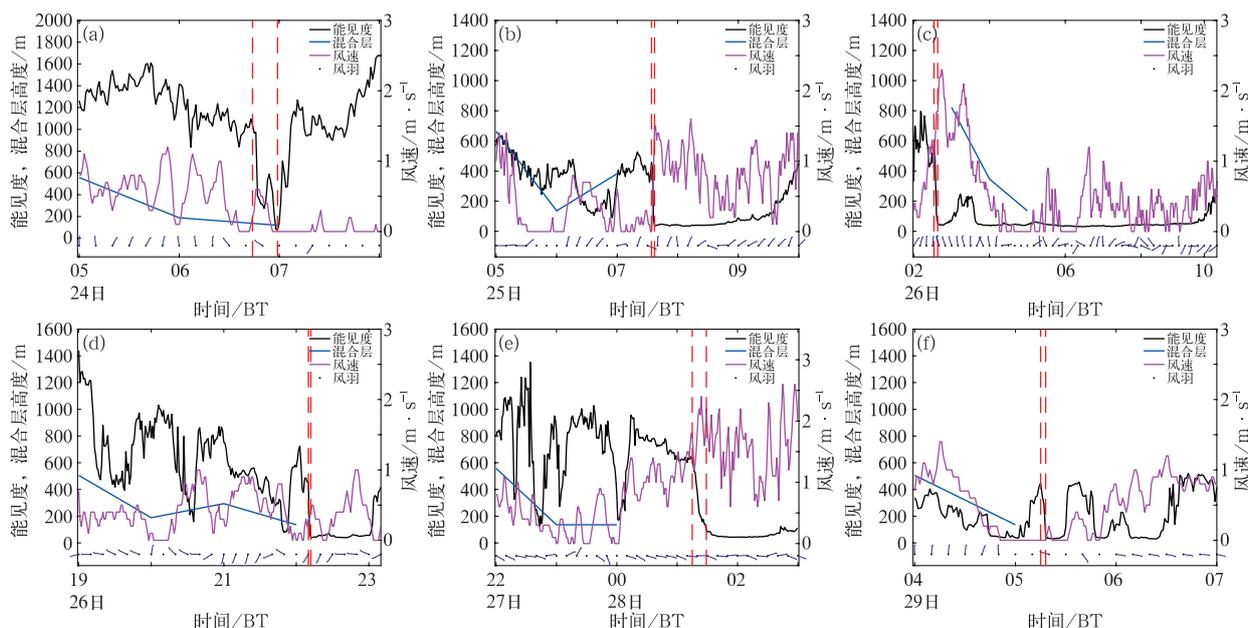


图 6 2018 年 11 月(a)24 日 05—08 时,(b)25 日 05—10 时,(c)26 日 02—10 时,(d)26 日 19—23 时,(e)27 日 22 时至 28 日 03 时,(f)29 日 04—07 时常州能见度、风速风向分钟变化

Fig. 6 Minutely variation curves for visibility, wind speed, wind direction in Changzhou at 05—08 BT 24 (a), 05—10 BT 25 (b), 02—10 BT 26 (c), 19—23 BT 26 (d), 22 BT 27—03 BT 28 (e) and 04—07 BT 29 (f) November 2018

在24日00:20至雾爆发性增强期间,气温稳定下降,但在雾爆发性增强时气温有小幅增加,这是由于雾凝结潜热释放造成的,这种现象在成雾时一般都存在。另外长波辐射对雾的爆发性增强也有重要作用,24日06:00净辐射曝辐量为 $-0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,之后逐渐加大,06:47—06:59增强至 $-0.16 \sim -0.18 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,06:57—07:00达最大值 $-0.18 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,之后随着日出净辐射曝辐量逐渐变为正值。可见弱冷空气的渗透、风速的小幅增大、混合层高度的先期快速下降、负净辐射曝辐量绝对值的明显增大是24日早晨雾爆发性增强的原因。

26日03:04、05时混合层高度分别为822.29、346.98、135.73 m,伴随着混合层高度的迅速下降,26日02:32能见度为567 m,02:36降至114 m,02:39降至48 m,7 min内下降了519 m,03:03之后上升到100 m以上,03:37再次下降至84 m,特强浓雾—强浓雾维持至09:53。从风向来看,26日01:54前为偏E风,01:54—04:17转N或NE风,说明有弱冷平流的影响,有助于雾的快速增强;从风速来看,02:13—02:49风速从之前的 $0 \sim 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到了 $0.5 \sim 2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,能见度从767 m下降到39 m,可见扰动的适当增强有助于雾滴的富集,从而导致强浓雾爆发性增强。另外长波辐射对雾的爆发性增强也有重要作用,26日02:02—02:33净辐射曝辐量逐渐增大,但值较小,在 $-0.09 \sim -0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,之后继续加大,02:34—03:00增强至 $-0.16 \sim -0.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,与02:37—03:00的100 m以下低能见度相对应。弱冷平流的输送、风速的适当增大、混合层高度的快速下降、负净辐射曝辐量绝对值的明显增大是26日凌晨雾爆发性增强的原因。

总的来说,弱冷空气的渗透(风向转变为偏N风)、风速的适当增大、混合层高度的先期快速下降、负净辐射曝辐量绝对值的明显增大是本次连续雾-霾天气过程中雾爆发性增强的原因。

## 6 结 论

利用常规气象观测资料、探空资料、污染物浓度及AQI资料、NCEP再分析资料等,对2018年11月24日至12月3日常州出现的一次严重的持续性

雾-霾天气进行了成因分析,得出了以下结论:

(1) 中纬度较平直的高空环流、中低层的暖脊、持续稳定少动的地面均压场,这种高低空的配置是长时间雾-霾天气维持的典型天气形势,为本次雾-霾天气的持续发生发展提供了有利的环流形势。

(2) 边界层内弱辐散、负涡度及弱的下沉气流是此次雾-霾天气得以维持发展的动力因子;近地层水汽长时间饱和( $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$ 的时间达72.9%)、高湿(平均相对湿度89.1%)且风速较小(平均风速 $1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )利于雾和霾的发生、发展及维持。

(3) 近地面高强度的贴地逆温长时间维持和持续较低的混合层高度使得大气中上下的湍流热量和动量交换减弱,有利于污染气溶胶的积累和雾霾的形成、发展和长时间维持。雾比霾的平均混合层高度明显偏低(雾和霾期间平均混合层高度分别为497.3、721.9 m),霾等级越高混合层高度越低(轻微、轻度、中度、重度霾期间平均混合层高度分别为936.4、804.7、700.6、683.8 m),且混合层高度的升降超前于能见度变化,对雾、霾的等级预报也有较好的指导作用。

(4) 当雾-霾增强时,PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的浓度一般是增大的,即雾-霾越强,污染物浓度一般也越强。但长时间维持的浓雾—强浓雾对气溶胶粒子具有一定的湿清除作用。

(5) 弱冷空气渗透、风速适当增大、混合层高度先期快速下降、负净辐射曝辐量绝对值的明显增大是本次连续雾-霾天气过程中雾爆发性增强的原因。

## 参考文献

- 陈朝平,杨康权,冯良敏,等,2015.四川盆地一次持续性雾霾天气过程分析[J].高原山地气象研究,35(3):73-77. Chen C P, Yang K Q, Feng L M, et al. 2015. Analysis of a duration haze event in Sichuan Basin[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 35(3): 73-77 (in Chinese).
- 郝建奇,葛宝珠,王自发,等,2017.2013年京津冀重污染特征及其气象条件分析[J].环境科学学报,37(8):3032-3043. Hao J Q, Ge B Z, Wang Z F, et al. 2017. Characteristics and meteorological conditions analysis of severe haze events over Beijing-Tianjin-Hebei Area[J]. Acta Sci Circum, 37(8): 3032-3043 (in Chinese).
- 花丛,张碧辉,张恒德,2015.2013年1—2月华北雾、霾天气边界层特征对比分析[J].气象,41(9):1144-1151. Hua C, Zhang B H, Zhang H D. 2015. Analysis on boundary layer characteristics in fog and haze processes in North China from January to February

- 2013[J]. Meteor Mon, 41(9):1144-1151(in Chinese).
- 焦圣明,朱承瑛,朱毓颖,等,2016. 江苏地区一次罕见持续性强浓雾过程的成因分析[J]. 气象学报, 74(2):200-212. Jiao S M, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2016. A discussion on the reason for a rare persistent heavy fog event in Jiangsu Province[J]. Acta Meteor Sin, 74(2):200-212(in Chinese).
- 康汉青,朱彬,樊曙先,2009. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J]. 气候与环境研究, 14(5):523-530. Kang H Q, Zhu B, Fan S X, 2009. Size distributions and wet scavenging properties of winter aerosol particles in North Suburb of Nanjing[J]. Climatic Environ Res, 14(5):523-530(in Chinese).
- 李浩文,张阿思,步巧利,等,2017. 2015 年干季佛山一次重空气污染过程形成机理研究[J]. 环境科学学报, 37(8):3044-3053. Li H W, Zhang A S, Bu Q L, et al, 2017. Investigation of the formation mechanism of a heavy air pollution episode in the dry season of 2015 in Foshan[J]. Acta Sci Circum, 37(8):3044-3053(in Chinese).
- 李一鹏,(2014-12-30). 2014 年国内外十大天气气候事件评选结果揭晓 [EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201412/t20141230\\_270922.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201412/t20141230_270922.html). Li Y P, (2014-12-30). Results of selection of Top Ten Weather and Climate events at Home and abroad in 2014[EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201412/t20141230\\_270922.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201412/t20141230_270922.html)(in Chinese).
- 林建,杨贵名,毛冬艳,2008. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J]. 气候与环境研究, 13(2):171-181. Lin J, Yang G M, Mao D Y, 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns[J]. Climatic Environ Res, 13(2):171-181(in Chinese).
- 刘梅,严文莲,张备,等,2014. 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制分析[J]. 气象, 40(7):835-843. Liu M, Yan W L, Zhang B, et al, 2014. Analysis on persistence and intensification mechanism of fog and haze in Jiangsu in January 2013[J]. Meteor Mon, 40(7):835-843(in Chinese).
- 刘瑞芳,陈小婷,姚静,等,2017. 陕西关中持续性雾霾天气的气象条件分析[J]. 中国农学通报, 33(1):82-88. Liu R F, Chen X T, Yao J, et al, 2017. Meteorological conditions for persistent fog and haze process in Guanzhong Area, Shaanxi[J]. Chin Agric Sci Bull, 33(1):82-88(in Chinese).
- 刘端阳,濮梅娟,严文莲,等,2014. 淮河下游连续雾-霾及转换成因分析[J]. 中国环境科学, 34(7):1673-1683. Liu D Y, Pu M J, Yan W L, et al, 2014. Study on the formation and the cause of the fog-haze transformation in the lower reaches of Huaihe River [J]. China Environ Sci, 34(7):1673-1683(in Chinese).
- 苗爱梅,李苗,王洪霞,2014. 一次持续性雾霾天气过程的阶段性特征及影响因子分析[J]. 干旱气象, 32(6):947-953. Miao A M, Li M, Wang H X, 2014. Characteristics in stages of a long-lasting fog and haze weather and influence factors analysis[J]. J Arid Meteor, 32(6):947-953(in Chinese).
- 沈利娟,王红磊,李莉,等,2016. 嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析[J]. 环境科学, 37(8):2871-2880. Shen L J, Wang H L, Li L, et al, 2016. Observation analysis on the characteristics of meteorological elements and pollutants during a continuous fog and haze episode in spring in Jiaxing City[J]. Environ Sci, 37(8):2871-2880(in Chinese).
- 申敏夏,(2015-12-30). 2015 国内外十大天气气候事件评选结果揭晓 厄尔尼诺“李小龙”受关注“雾-霾”“阅兵蓝”入榜[EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201512/t20151230\\_300981.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201512/t20151230_300981.html). Shen M X, (2015-12-30). Results of selection of Top Ten Weather and Climate events at Home and abroad in 2015[EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201512/t20151230\\_300981.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201512/t20151230_300981.html)(in Chinese).
- 孙冉,王鸿宇,马骁骏,等,2017. 上海一次典型雾霾过程中不同天气现象的气溶胶光学特性及转化机制[J]. 环境科学学报, 37(3):814-823. Sun R, Wang H Y, Ma X J, et al, 2017. Aerosol optical properties and formation mechanism of a typical air pollution episode in Shanghai during different weather condition periods [J]. Acta Sci Circum, 37(3):814-823(in Chinese).
- 王博妮,濮梅娟,苗茜,2016. 江苏地区连续性雾霾天气的污染物浓度变化和特征分析[J]. 大气科学学报, 39(2):243-252. Wang B N, Pu M J, Miao Q, 2016. Analysis of the characteristics and variation of pollutant concentrations for a long-lasting fog and haze event in the Jiangsu Area[J]. Trans Atmos Sci, 39(2):243-252(in Chinese).
- 王玫珺,(2016-12-29). 2016 年国内外十大天气气候事件揭晓[EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201612/t20161229\\_359631.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201612/t20161229_359631.html). Wang M J, (2016-12-29). Results of selection of Top Ten Weather and Climate events at Home and abroad in 2016[EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201612/t20161229\\_359631.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201612/t20161229_359631.html)(in Chinese).
- 王珊,修天阳,孙扬,等,2014. 1960—2012 年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析[J]. 环境科学学报, 34(1):19-26. Wang S, Xiu T Y, Sun Y, et al, 2014. The changes of mist and haze days and meteorological element during 1960—2012 in Xi'an[J]. Acta Sci Circum, 34(1):19-26(in Chinese).
- 谢志祥,秦耀辰,李亚男,等,2017. 基于 PM<sub>2.5</sub> 的中国雾霾灾害风险评估[J]. 环境科学学报, 37(12):4503-4510. Xie Z X, Qin Y C, Li Y N, et al, 2017. Evaluation of haze press risk in China based on PM<sub>2.5</sub> [J]. Acta Sci Circum, 37(12):4503-4510(in Chinese).
- 严文莲,朱承瑛,朱毓颖,等,2018. 江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J]. 气象, 44(7):892-901. Yan W L, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2018. Study on a wide range of explosive heavy fog in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 44(7):892-901(in Chinese).
- 姚青,韩素芹,蔡子颖,2012. 天津一次持续低能见度事件的影响因素分析[J]. 气象, 38(6):688-694. Yao Q, Han S Q, Cai Z Y, 2012. Analysis of related factors for a case of low horizontal visibility

- in Tianjin[J]. Meteor Mon, 38(6): 688-694(in Chinese).
- 姚青, 刘敬乐, 蔡子颖, 等, 2018. 天津一次雾-霾天气过程的近地层温湿结构和湍流特征分析[J]. 环境科学学报, 38(10): 3856-3867.
- Yao Q, Liu J L, Cai Z Y, et al, 2018. Analysis of temperature and moisture structure and turbulence characteristics of a smog and haze weather process in Tianjin[J]. Acta Sci Circum, 38(10): 3856-3867(in Chinese).
- 于文金, 吴雁, 黄亦露, 等, 2016. 河北省雾霾波动变化特征及成因研究[J]. 大气科学学报, 39(4): 554-561. Yu W J, Wu Y, Huang Y L, et al, 2016. The variation and genesis of haze in Hebei Province[J]. Trans Atmos Sci, 39(4): 554-561(in Chinese).
- 张格苗, (2013-12-31). 2013 年国内外十大天气气候事件评选结果揭晓 [EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201312/t20131231\\_235247.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201312/t20131231_235247.html).
- Zhang G M, (2013-12-31). Results of selection of Top Ten Weather and Climate events at Home and abroad in 2013[EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201312/t20131231\\_235247.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201312/t20131231_235247.html)(in Chinese).
- 张恒德, 饶晓琴, 乔林, 2011. 一次华东地区大范围持续雾过程的诊断分析[J]. 高原气象, 30(5): 1255-1265. Zhang H D, Rao X Q, Qiao L, 2011. Diagnostic and analysis of consecutive fog process on large-scale in east China region[J]. Plateau Meteor, 30(5): 1255-1265(in Chinese).
- 中国气象局, 2010. QX/T 113—2010 霾的观测和预报等级[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2010. QX/T 113—2010 Observation and Forecasting Levels of Haze [S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 周文君, 平海波, 刘端阳, 等, 2016. 江苏盐城地区一次持续雾-霾天气过程的综合分析[J]. 气象, 42(7): 838-846. Zhou W J, Ping H B, Liu D Y, et al, 2016. Analysis of the sustained fog-haze event in Yancheng[J]. Meteor Mon, 42(7): 838-846(in Chinese).
- 朱承瑛, 朱毓颖, 祖繁, 等, 2018. 江苏省秋冬季强浓雾发展的一些特征[J]. 气象, 44(9): 1208-1219. Zhu C Y, Zhu Y Y, Zu F, et al, 2018. Some characteristics of the development of heavy fog in autumn and winter in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 44(9): 1208-1219(in Chinese).
- Choularton T W, Fullarton G, Latham J, et al, 1981. A field study of radiation fog in Meppen, West Germany[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 107(452): 381-394.
- Nozaki K Y, 1973. Mixing depth model using hourly surface observations[R]. Report 7053, USA: USAF Environment Technical Applications Center.