

刘瑞翔,刘端阳,姚雷,等,2020.近十年连云港市霾变化特征及其气象条件分析[J].气象,46(7):959-970. Liu R X, Liu D Y, Yao L, et al, 2020. Analysis on the variation characteristics and meteorological conditions of haze in Lianyungang City in recent decade[J]. Meteor Mon, 46(7):959-970(in Chinese).

近十年连云港市霾变化特征及其气象条件分析*

刘瑞翔^{1,2} 刘端阳^{2,3} 姚雷^{1,2} 朱云凤¹ 颜佳任¹

1 江苏省连云港市气象局,连云港 222000

2 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210008

3 江苏省气象台,南京 210008

提 要: 利用连云港市气象和环境监测数据,分析 2008—2018 年该地区霾的变化特征及其与气象要素的关系,中-重度霾发生的天气背景和污染物源地特征。主要得到以下结论:连云港主城区霾日数从 2011 年起逐年显著增加,2013—2015 年达峰值,之后逐年减少;冬季霾出现最为频繁,其中 1 月重度霾日数最多;1~2 m·s⁻¹ 风速最利于该地区霾的形成;WNW、WSW 和 SSW 三个风向下连云港主城区霾出现的频率最高,受地形和工业布局等因素影响,在自海上来的偏东风下该地区霾出现的频率也较高。相对湿度在 70%~80% 时,霾出现频率最高,但更高相对湿度更利于中-重度霾形成。PM_{2.5} 浓度与能见度、风速和相对湿度等气象要素的相关性均大于 PM₁₀。根据地面环流形势,可将连云港地区霾的天气背景分为低压倒槽型、锋前型、高压前部型、高压后部型和均压场型 5 种,其中均压场型占比最大,达 35.8%。逆温层结对中-重度霾的形成有较好指示作用,08 时和 20 时逆温出现的频次和强度均大于 14 时。轨迹聚类分析表明,不同天气型下中-重度霾对应气团的源地、路径和移动距离均有明显差异。

关键词: 霾,统计特征,气象条件,PM_{2.5},后向轨迹

中图分类号: P49, X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.008

Analysis on the Variation Characteristics and Meteorological Conditions of Haze in Lianyungang City in Recent Decade

LIU Ruixiang^{1,2} LIU Duanyang^{2,3} YAO Lei^{1,2} ZHU Yunfeng¹ YAN Jiaren¹

1 Lianyungang Meteorological Office of Jiangsu Province, Lianyungang 222000

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210008

3 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

Abstract: Based on the meteorological and environmental observation data, the variation characteristics and meteorological conditions of haze in Lianyungang City were analyzed during 2008—2018. The synoptic backgrounds and pollutant sources of moderate and heavy haze events in this region were also emphatically discussed. The results indicated that the number of haze days in Lianyungang main urban area increased significantly from 2011, which reached the peak from 2013 to 2015, and then decreased year by year. The haze days appeared most frequently in winter while the number of heavy haze days in January ranked the most. The wind speed 1—2 m·s⁻¹ was most conducive to the formation of moderate and heavy haze. The frequencies of haze hours ranked higher under the wind directions of WNW, WSW and SSW in Lianyungang main urban area, and the frequency of haze hours under easterly wind from the sea was also higher

* 连云港市大气环境科技创新团队基金、连云港市科技计划项目(SH1422)、国家重点研发计划(2016YFC0201901)和江苏省预报员专项(JSYBY201810)共同资助

2019 年 3 月 5 日收稿; 2020 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者:刘瑞翔,主要从事气象灾害评估与监测研究. E-mail: nuistlrx@qq.com

duing to factors like terrain features and industrial layout. The haze appeared at a highest frequency with the relative humidity between 70% and 80%, while higher relative humidity was more conducive to the formation of moderate and heavy haze hours. The correlation coefficients of $PM_{2.5}$ concentration and meteorological factors such as visibility, wind speed and relative humidity were higher than that of PM_{10} . The surface circulation backgrounds of moderate and heavy haze events can be divided into five types, which were low pressure or inverted trough type, prefrontal type, front of high pressure type, back of high pressure type and uniform pressure field type, among which the uniform pressure field type accounted for the largest proportion of 35.8%. The inversion layer played an important role in the formation of moderate and heavy haze events, and the average intensity and frequency of inversion at 08:00 BT and 20:00 BT were both higher than that at 14:00 BT. Analysis of trajectory clustering showed that the source, path and moving distance of air masses corresponding to moderate and heavy haze events under different weather types were of significant differences.

Key words: haze, statistical characteristic, meteorological condition, $PM_{2.5}$, backward trajectory

引 言

《霾的观测和预报等级》(中国气象局,2010)将霾定义为大量细微的干尘粒均匀浮游在空中,使水平能见度小于 10 km 的大气浑浊现象。霾通常出现在近地层,不仅能造成视程障碍,影响交通安全,对人体健康的危害也十分严重。

随着城市化快速推进和工业的迅速发展,大气污染问题日益凸显,霾一度成为学者们研究的热点问题。吴兑(2006;2008)较早给出了区分雾和霾的概念模型,指出许多台站业务中区分雾和霾的相对湿度标准偏低,导致大量霾被记录成轻雾或雾,并建议将湿度判别标准提高至 90%~95%。从 20 世纪中期到 21 世纪初,我国年均雾日数明显减少,而霾日数则有增多趋势(丁一汇和柳艳菊,2014;张英娟等,2015;潘玮等,2017;窦以文等,2019)。尹志聪等(2015)和吴萍等(2016)指出东亚冬季风减弱和冬季气温升高是导致我国中东部地区霾日增多的重要原因,张浩等(2019)基于此开展了冬季霾的预测研究。许多学者还对不同地区霾的演变特征开展了深入讨论,得到许多有意义的结论(韩永清等,2017;翁之梅等,2016;Wei et al,2016;胡晓等,2018)。霾出现的有利气象条件包括一定的风速和相对湿度条件、有利的边界层逆温或等温层结,以及较低的混合层高度等(刘端阳等,2014a;戴竹君等,2016;田磊等,2018)。近几年秋冬季,我国中东部地区持续性雾和霾事件多发,影响范围广、污染程度高,学者们从气象因子、颗粒物浓度特征等多角度分析了此类高影

响污染事件的成因,为雾和霾的预报提供了大量理论基础(张人禾等,2014;Wang et al,2016;陈英英等,2017;Liu et al,2018;涂小萍等,2019)。

近年来,秋冬季持续性雾和霾事件仍频繁出现,给生态环境、日常生活和交通运输造成严重影响。连云港市位于江苏省东北部,目前关于江苏省其他地区霾特征的分析已有不少(赵子菁等,2015;Peng et al,2016;周文君等,2016;钱俊龙等,2018),但对比已有研究可知,受气候特点和工业布局等因素制约,不同地区有利于霾出现的气象因子差异明显,目前着眼于连云港地区霾特征的分析还较少。本文将对该地区近十年来霾的变化特征开展统计分析,同时讨论中-重度霾发生的天气背景、有利气象条件和污染物源地等特征,以期在当地霾的预报和治理提供部分理论依据。

1 资料和方法

1.1 资料来源

研究所用资料包括:(1) 2008—2018 年国家基本气象站连云港站气象观测数据,包括能见度、相对湿度、降水和风向风速等;(2) 连云港市环境监测站 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 颗粒物浓度数据;(3) 美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration,NOAA)开发的,用于后向轨迹模式的全球资料同化系统(Global Data Assimilation System,GDAS)数据。连云港市气象和环境监测站点分布如图 1 所示。

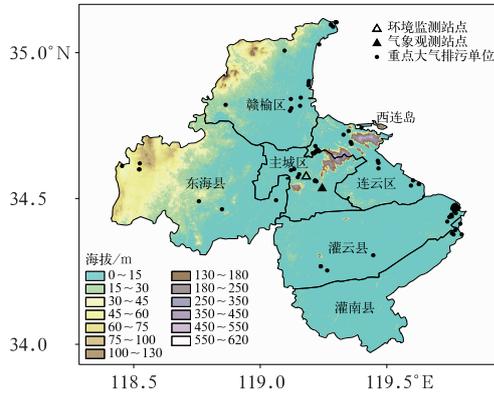


图1 连云港市气象、环境站点和重点大气排污单位分布

Fig. 1 Locations of meteorological and environmental stations and enterprises of air pollution discharge in Lianyungang City

1.2 资料处理

2014年之前,连云港市各气象站每天仅开展08、14和20时的人工能见度观测,2014年开始启用自动能见度仪逐小时观测。根据2013年对比观测资料,得到人工和能见度仪观测数据的线性关系为 $L_{人工}=1.4005L_{能见度仪}$ (单位:km),其相关系数 $R=0.889$,基于这一线性关系,本文将2014—2018年的自动能见度仪观测数据转化为人工能见度,从而保证数据连续性。同样,在识别霾时用到的 $PM_{2.5}$ 浓度数据自2013年起开始监测,基于2013—2018年数据得到 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 颗粒物质量浓度关系为 $C_{PM_{2.5}}=0.605C_{PM_{10}}-1.9$ (单位: $\mu g \cdot m^{-3}$),相关系数 $R=0.8642$,2013年之前的 $PM_{2.5}$ 浓度由此公式推算得到。

本文对于霾的识别基于《霾的观测和预报等级》(中国气象局,2010),排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、吹雪等天气现象,并结合能见度、相对湿度和 $PM_{2.5}$ 浓度综合识别霾时次。若能见度小于10 km,当相对湿度小于80%时,判别该时次为霾,即为1个霾时次;相对湿度介于80%~95%时,引入 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 的阈值进行综合判断。吴兑等(2014)在对比单时次法、日均值法、14时值法等霾日判别方法时指出,采用单时次法得到的霾日样本最为全面,本研究在判别霾日时即采用此方法,即当天08、14或20时任一时刻达到霾的判别标准,当天即标记为一个霾日。根据能见度 L 将霾分为4个等级: $5 km \leq L < 10 km$ 为轻微霾, $3 km \leq L < 5 km$

为轻度霾, $2 km \leq L < 3 km$ 为中度霾, $L < 2 km$ 为重度霾,霾日的等级则根据当天最低能见度判断。

2 主城区霾特征分析

2.1 霾随时间变化特征

2.1.1 霾日数的年变化特征

刘端阳等(2014b)在分析1980—2012年江苏各城市霾日的统计特征时指出,江苏北部和沿海城市霾日数呈显著增加趋势。统计表明,2008—2018年连云港主城区年均霾日数为154.5 d,年均中-重度霾日数为27.6 d。由图2可知,2011年之前,连云港主城区总霾日数和中-重度霾日数变化均相对平稳,之后逐年迅速增加。2013—2015年是近十年来该地区霾日出现最频繁的3年,年内总霾日数均超过200 d,中-重度霾日数也达50 d以上。从不同等级霾日数看,统计时段内,各年份轻微霾日数变化相对平稳,而另外3个等级的霾日数自2011年起快速增加,对霾总日数增加的贡献远大于轻微霾。

霾的年际变化与经济发展、城市化水平等联系密切。统计时段内(图略),2014年之前,连云港市生产总值、机动车保有量逐年快速增多,能源消耗也呈显著上升趋势,为霾天气增多提供了有利的排放条件。得益于近年来相关管控措施和能源结构优化,2014年起,连云港市工业烟尘排放量逐年缓慢下降,但与前期相比,仍处在较高排放水平,霾日数的变化趋势与其较为一致。2018年总霾日数虽较前

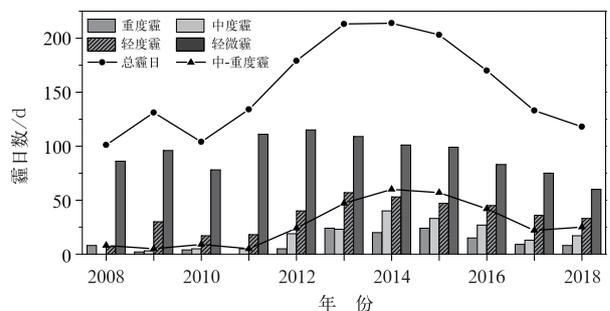


图2 2008—2018年连云港主城区不同等级霾日数的年变化

Fig. 2 Annual number of haze days at different grades in Lianyungang main urban area during 2008—2018

一年有所减少,但中-重度霾日仍频繁出现,甚至略多于 2017 年,霾的管控和治理仍值得关注。

2.1.2 霾日数的月分布特征

从霾日数的月分布特征看(图 3),7—9 月连云港主城区霾日数明显较其他月份少,冬季霾日出现最频繁。中-重度霾日也多集中在秋冬季,其中以 12 月和 1 月最多。1 月重度霾日数明显多于其他月份,11—12 月次之。夏季降水集中、气温高,大气垂直交换作用强,有利于污染物的沉降、扩散,霾日较少出现;而秋冬季天气形势相对静稳且易形成逆温层结,对污染物的积聚和霾天气的形成十分有利,霾天气多发。

值得注意的是,6 月连云港地区总霾日和中-重度霾日数均较多,其总霾日数仅少于 12 月。严文莲等(2014)分析 2012 年 6 月江苏地区一次污染天气时指出,秸秆焚烧造成大量的气溶胶粒子悬浮在空气中,是霾出现的重要原因。连云港地区 6 月霾日数偏多与夏收时节秸秆焚烧关系密切,但从逐年 6 月霾日数分布可以看出(图略),从 2015 年起,随着“禁烧”政策及机械化还田等工作的普及,秸秆焚烧现象开始大幅减少,6 月霾日数也随之下降,到 2018 年 6 月,霾日数达统计时段内最少,且无中-重度霾出现。

2.1.3 霾时次的日分布特征

图 4 为连云港主城区出现的所有霾时次和中-重度霾时次在 08、14 和 20 时的样本分布图。由图 4a 可知,08 时出现的霾时次在总样本中占比最

大,为 37.8%,14 时次之,而 20 时出现的霾时次占比最少,总体上,三个时刻霾时次出现的比例相差不大。与之相比,中-重度霾时次在 08 时和 20 时出现的比例明显增大,而 14 时出现的中-重度霾样本占比明显减少。这是由于午后相对湿度降低,能见度升高,不利于中-重度霾形成;另一方面,与早晚相比,中午前后气温升高,大气垂直交换作用强于早晚,不利于污染物积聚。

2.2 霾的气象要素特征

2.2.1 霾发生时风向和风速特征

受工业布局等因素影响,不同地区利于霾出现的风向特征有明显差异,如西北风下无锡市霾出现的比例最高,而南京地区中-重度霾出现时多为东北

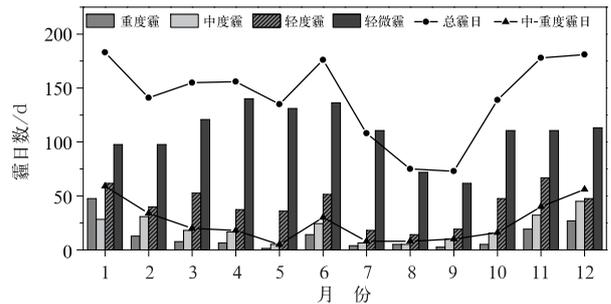


图 3 2008—2018 年连云港主城区不同等级霾日数的月分布特征

Fig. 3 Monthly distribution of haze days at different grades in Lianyungang main urban area during 2008–2018

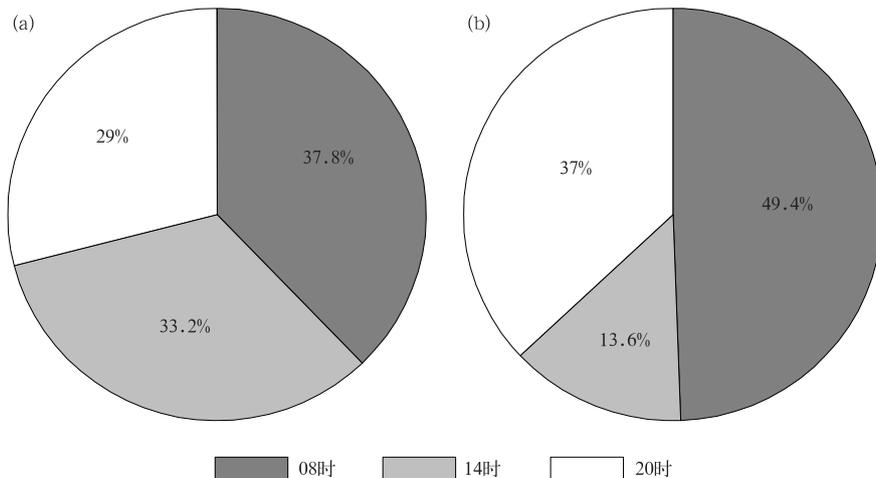


图 4 2008—2018 年连云港主城区不同时间出现的所有霾时次(a)和中-重度霾时次(b)占比

Fig. 4 Proportions of haze (a), moderate and heavy haze (b) hours at different times in Lianyungang main urban area during 2008–2018

风(过宇飞等,2013;赵子菁等,2015)。为排除盛行风向的影响,首先计算某风向下霾出现的频次,再统计得到该风向在统计时段内出现的总频次,二者的比值即为该风向下霾出现的频率。由图 5 可知,WNW、WSW 和 SSW 三个风向下连云港主城区霾出现的频率较高,其中 WNW 风向下霾出现的频率最高,达 34%;此外,SW 和偏 W 风场下霾出现的频率也高于 30%。

通常认为,来自海上的偏东气流相对洁净,不利于连云港地区霾的形成。但统计表明,就连云港主城区而言,ENE、NE 和偏东风向下霾出现的频率并不是最低的,其中 ENE 风向下霾出现的频率达 21.1%。由图 1 可知,海州湾近海地区大气排污单位密集,且主城区位于其西侧,偏东风下霾的出现可能与上游化工企业对应的污染物输送有关;此外,源地为山东半岛的污染物沿南下冷高压前侧东路冷空气向连云港地区输送,也易形成霾天气。另外,连云港主城区东侧多山地,偏东风过山沉降,也较利于污染物积聚。由图 5 还可知,WNW、W 和 SW 风向下中-重度霾出现的频率较高,其中 WNW 风向对应霾频率最高,占 5.8%;同样,与总霾时次类似,ENE 风向下中-重度霾出现的频率也偏高,而 SE 和 N 风

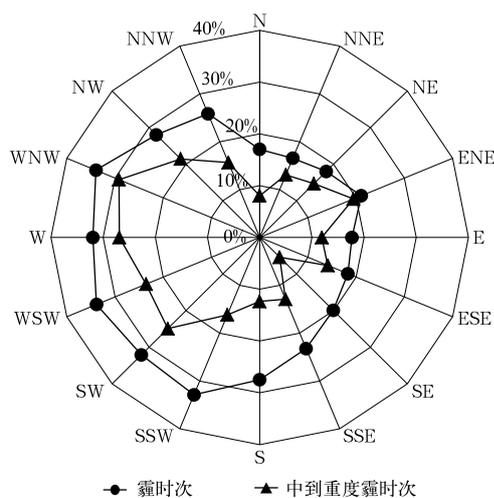


图 5 2008—2018 年连云港主城区不同风向下霾和中-重度霾时次出现的频率
(中-重度霾频率扩大 5 倍)

Fig. 5 Frequencies of haze, moderate and heavy haze hours under different wind directions in Lianyungang urban area during 2008—2018
(Frequencies of moderate and heavy haze hours expand 5 times)

向下中-重度霾出现的频率则明显小于其他风向。

统计表明,静风条件下连云港主城区霾和中-重度霾出现的频率分别为 25.5% 和 3.9%。该地区霾出现时平均风速为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中-重度霾对应的平均风速略小,约为 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结合图 5 还可知,无论是在霾总样本还是在中-重度霾样本中,静风下霾出现的频率均不是最高的。从图 6 可以看出,在霾总样本中, $1 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速出现的频次高于其他风速段,而 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速在中-重度霾中出现较多。在霾和中-重度霾时次中, $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速均对应霾频率峰值,说明并不是风速越小越有利于霾的形成,较大风速不利于污染物在边界层积聚,而一定的小风速条件则有利于颗粒物的垂直混合和水平交换。

2.2.2 相对湿度和颗粒物浓度特征

近地相对湿度是影响霾的重要因子之一,且在一定湿度条件下霾和雾粒子可以相互转换,即当大气湿度接近饱和时,霾粒子可吸湿形成雾滴,当湿度下降时,雾滴脱水后也可转化为霾粒子(吴萍等,2016)。由不同湿度条件下霾时次占比可知(图 7),

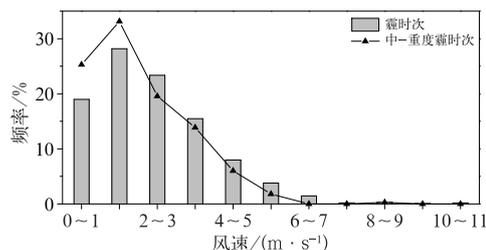


图 6 2008—2018 年连云港主城区不同风速在霾和中-重度霾样本中出现的频率

Fig. 6 Frequencies of haze, moderate and heavy haze hours at different wind speeds in Lianyungang main urban area during 2008—2018

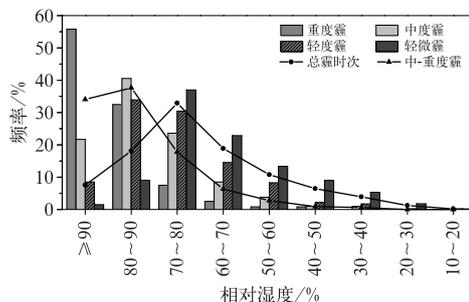


图 7 2008—2018 年连云港主城区不同等级霾时次在各相对湿度下出现的频率

Fig. 7 Frequencies of haze hours at different grades with diverse relative humidity in Lianyungang main urban area during 2008—2018

相对湿度在 60%~90% 时,连云港主城区霾出现的频率较高,占霾样本的 70%,70%~80% 湿度条件下霾出现的频率最高。此外,71.7% 的中-重度霾时次出现时对应的湿度大于 80%,而一半以上重度霾出现时相对湿度在 90% 以上。随着湿度增大,气溶胶粒子吸湿增长,其粒子尺度和质量浓度不断增大,消光系数明显增强,使能见度降低,利于中-重度霾形成。

连云港主城区霾出现时,PM_{2.5} 颗粒物的平均质量浓度为 102.6 μg·m⁻³,占 PM₁₀ 平均浓度的 63%。从图 8 可以看出,随着霾等级的加重,这两种颗粒物的平均浓度均不断增大,说明颗粒物浓度与能见度关系密切,其相关性将在下文讨论。值得关注的是,随着霾等级的加重,PM_{2.5} 与 PM₁₀ 平均浓度的比值显著增大。对于轻微霾,PM_{2.5} 在 PM₁₀ 粒子中的占比为 60.3%,到重度霾时,这一比例达 70.5%。白永清等(2016)在分析武汉地区 PM_{2.5} 与能见度关系时,也指出细粒子对能见度的影响更为显著,即 PM_{2.5} 对低能见度的贡献大于 PM₁₀ 粒子。

2.2.3 气象要素与颗粒物浓度相关性分析

表 1 给出了能见度、风速和相对湿度 3 个气象因子与颗粒物浓度间的相关系数,除相对湿度与 PM₁₀ 浓度的相关系数外,其他各系数均通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验。由表 1 可以看出,能见度与风速呈显著正相关,与相对湿度和颗粒物浓度呈负相关,即风速越大,能见度越高,而湿度越大,颗粒物浓度越高,能见度越低。风速与相对湿度呈显著负相关,且风速减小时,污染物稀释、扩散作用减弱,PM₁₀ 和 PM_{2.5} 颗粒物浓度增大。赵晨曦等(2014)在分析北京地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度与气象条件的关系时,指出 PM₁₀ 浓度与气象因子间的相关系数大于 PM_{2.5},即气象因子对大颗粒物浓度的影响更显著;

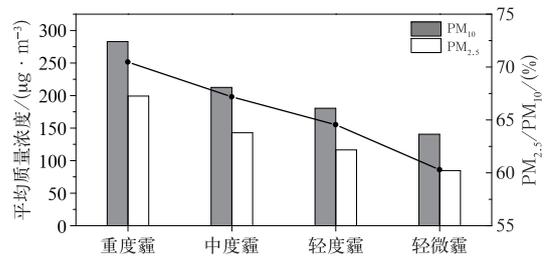


图 8 2008—2018 年连云港主城区不同等级霾对应 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 粒子的平均质量浓度

Fig. 8 The average mass concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5}, proportions of PM_{2.5} and PM₁₀ for haze hours at different grades in Lianyungang main urban area during 2008—2018

但从表 1 可以看出,与北京地区不同,连云港主城区霾发生时,PM_{2.5} 浓度与能见度、风速和相对湿度的相关性均大于 PM₁₀ 浓度。

3 天气形势及逆温条件分析

大尺度天气背景往往决定着污染物在大气中的扩散条件,进而影响霾天气的形成。尹志聪等(2015)和吴萍等(2016)指出东亚冬季风强度与我国中东部地区霾日数呈显著负相关。为进一步分析霾出现时的天气背景,本节以连云港主城区为例,重点普查该地区中-重度霾对应的环流背景及逆温等特征。统计表明,中-重度霾出现时,连云港地区 500 hPa 多为西北到偏西气流或高压脊控制,低层多为高压活动,气象条件静稳。根据连云港市与地面天气系统的相对位置,可将该地区中-重度霾对应的天气形势分为低压倒槽型、锋前型、高压前部型、高压后部型和均压场型 5 种,分别选取一次典型天气个例(表 2),分析其环流背景特征,具体如图 9 所示。

2010 年 11 月 7 日,连云港主城区出现一次典型

表 1 2008—2018 年连云港主城区颗粒物浓度及各气象要素间相关系数

Table 1 Correlation coefficients between particle concentration and meteorological elements in Lianyungang main urban area during 2008—2018

气象要素	能见度	风速	相对湿度	PM ₁₀ 浓度	PM _{2.5} 浓度
能见度	1				
风速	0.1257*	1			
相对湿度	-0.4551*	-0.2758*	1		
PM ₁₀ 浓度	-0.3957*	-0.0849*	-0.0077	1	
PM _{2.5} 浓度	-0.5952*	-0.1497*	0.1162*	0.7529*	1

注: * 为通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验。

Note: * passed the significance level test of 0.01.

表2 2008—2018年不同地面天气型下连云港主城区典型中-重度霾天气个例的要素特征
Table 2 Characteristics of typical moderate and heavy haze cases under different types of surface weather circulation in Lianyungang main urban area during 2008—2018

时间	能见度/km	PM _{2.5} , PM ₁₀ 质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	霾等级	高空天气形势	地面天气型	占比/%
2010年11月7日08时	0.15	151,253	重度	500 hPa 高空槽、700 和 850 hPa 切变线	低压型	13.0
2013年2月28日20时	2.5	112,211	中度	500 和 700 hPa 西风气流、850 hPa 切变线	锋前型	10.0
2012年11月26日08时	2.0	103,155	中度	500 hPa 西风气流、700 和 850 hPa 西北气流	高压前部型	21.1
2013年2月24日08时	1.5	206,245	重度	500 hPa 西北气流、700 和 850 hPa 高压脊后部西南气流	高压后部型	20.2
2015年12月31日14时	2.9	150,243	中度	500、700 和 850 hPa 均为西北气流	均压场型	35.8

重度霾过程,08时能见度不足200 m。7日08时,我国东北到河套地区500 hPa为西风槽活动,连云港位于槽前西南到偏西气流中(图9a),700和850 hPa为冷式切变线活动(图略,下同),由于无暖湿气流配合,未形成降水。此时,地面对应槽前低压活动,连云港处在其西南风场中(图9b),且风速较小。从气团轨迹看,低层气团主要来自江苏中部和苏皖交界处。另外,此时正值秋收,外源输送加上当地秸秆焚烧,共同导致此次重度霾过程。低压或倒槽地面形势在中-重度霾对应的天气型中占13%左右,且在各月均有出现,其中6月出现频次最多。

锋前型环流在连云港主城区中-重度霾天气型中约占10%,此类霾过程多与冷空气南下时对应的输入型污染有关,且主要出现在冬季,其持续时间通常较其他几类环流背景下的霾过程短,多属“过境污染”。以2013年2月28日中度霾过程为例,500 hPa层,连云港位于东北冷涡底部偏西气流中(图9c),850 hPa为冷切活动,其等高线与等温线几乎垂直,冷平流明显。从地面形势看(图9d),蒙古到华北为大陆冷高压控制。当日20时,高压锋前位于山东半岛南部,连云港位于锋前。受冷空气南下伴随的输入性污染影响,连云港主城区能见度降至3 km以下,PM_{2.5}质量浓度达112 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2012年11月26日08时,连云港主城区能见度仅2 km,PM_{2.5}浓度达103 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,达中度霾等级。此时,该地区处于500 hPa东北冷涡底部偏西气流中(图9e)。与锋前型环流类似,高压前部型环流对应的中-重度霾也多出现在冬季,且上游同样为强大的冷高压控制,中低层有较强冷平流。区别在于锋前型环流下,连云港地区处于高压前侧不连续风场中,而高压前部型环流下该地区多为一致的偏北风场(图9f),此时锋面已东移入海。此类环流在中-重度霾天气型中占21.1%,仅次于均压场型。

高压后部型环流在中-重度霾天气型中占比为20.2%,与高压前部型环流占比相当。此类形势下霾天气出现时,500 hPa多为西北气流或高压脊控制(图9g),700 hPa形势类似,850 hPa为反气旋活动,且常伴有暖脊配合,有利于静稳层结建立。从地面形势看,连云港地区位于入海高压后部偏南风场中(图9h),有利于污染物从江苏中南部、长三角等城市化水平高、工业相对密集地向该地区输送。2013年2月24日的重度霾过程即出现在高压后部型天气背景下,受霾天气影响,当日08时连云港主城区能见度仅为1.5 km,PM_{2.5}质量浓度达200 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。

均压场是连云港地区霾天气形成的主要天气系统之一,在中-重度霾天气型中占比也远高于其他各类,达35.8%。此类环流下霾出现时,连云港地区位于500 hPa西北气流或高压脊控制中(图9i),850 hPa为反气旋,地面处于冷高压中心,等压线稀疏,对应微风或静风(图9j),有利于污染物在本地积聚。2015年12月31日的中度霾过程即出现在均压场天气型下,受其影响,当日午后能见度不足3 km,PM_{2.5}质量浓度达150 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

对于不同地面形势下的霾时次,中低层冷平流强弱也有明显不同,如在锋前型和高压前部型天气背景下,850 hPa冷平流较强,而其他几类则无明显冷平流。但对比图9内各天气型可知,其共有的特征是500 hPa均无明显冷平流活动,其等高线与等温线接近平行。此外,对于持续性霾天气过程的不同阶段,其对应的地面形势场是可以相互转换的。如2013年12月4—6日持续性霾过程期间,随着地面冷高压东移,连云港地区的地面形势先后经历了高压前部、均压场和高压后部三种类型,且各时段均达中-重度霾等级。

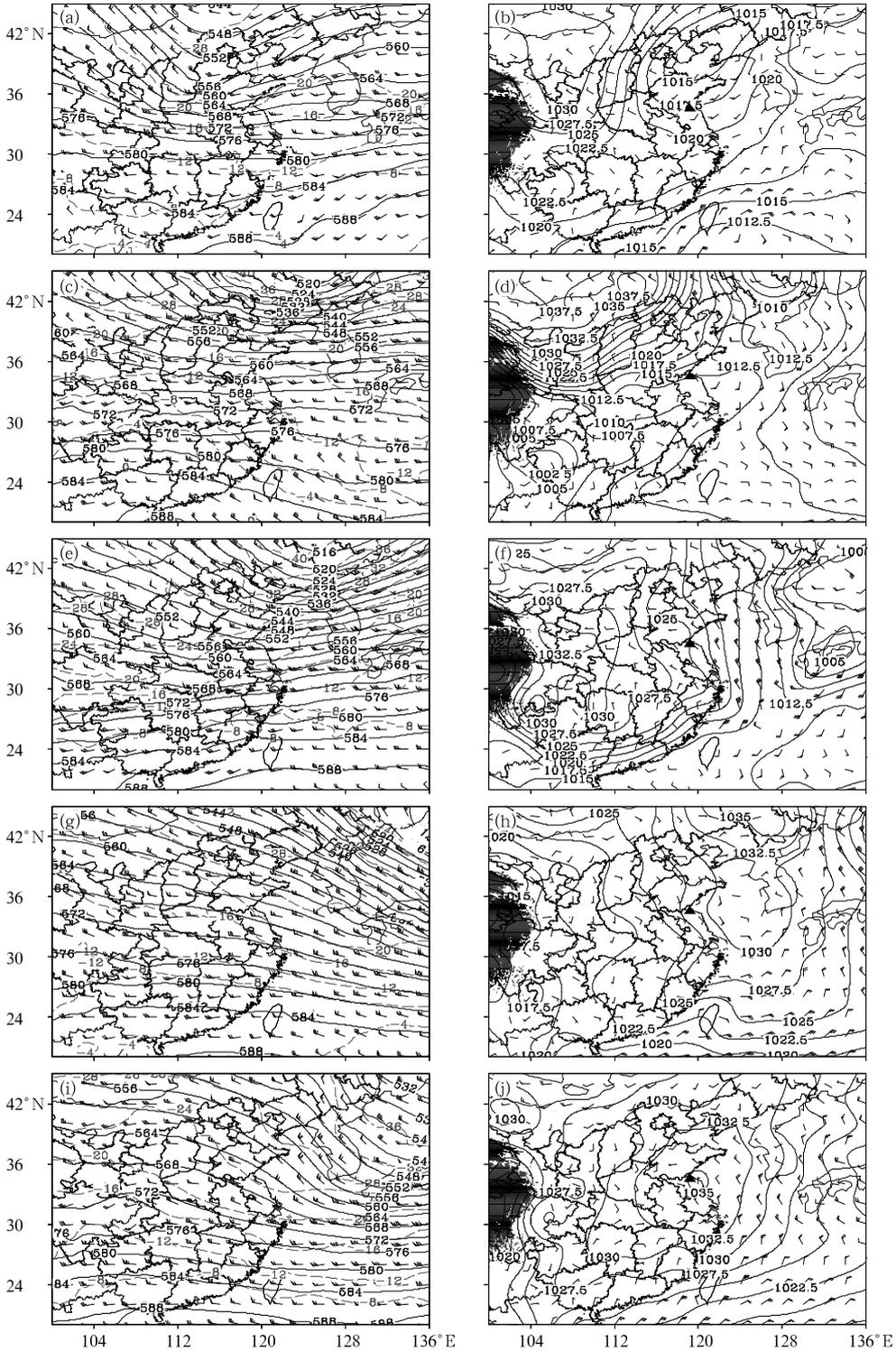


图 9 低压倒槽型(a,b)、锋前型(c,d)、高压前部型(e,f)、高压后部型(g,h)及均压场型(i,j)中-重度霾时次对应的(a,c,e,g,i) 500 hPa 等位势高度场(实线,单位:dagpm)、风场、等温线(长虚线,单位:°C)、(b,d,f,h,j)海平面气压场(实线,单位:hPa)、风场 (a,b)2010 年 11 月 7 日 08 时,(c,d)2013 年 2 月 28 日 20 时,(e,f)2012 年 11 月 26 日 08 时, (g,h)2013 年 2 月 24 日 08 时,(i,j)2015 年 12 月 31 日 14 时 (阴影表示高原,▲为连云港主城区位置)

Fig. 9 Distribution of (a, c, e, g, i) geopotential height (solid line, unit: dagpm), wind and temperature (dotted line, unit: °C) at 500 hPa; (b, d, f, h, j) sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind for the surface circulation background of low pressure or inverted trough type (a, b), prefrontal type (c, d), front of high pressure type (e, f), back of high pressure type (g, h) and uniform pressure field type (i, j) (a, b) 08:00 BT 7 November 2010, (c, d) 20:00 BT 28 February 2013, (e, f) 08:00 BT 26 November 2012, (g, h) 08:00 BT 24 February 2013, (i, j) 14:00 BT 31 December 2015 (shaded area: Tibetan Plateau, ▲: location of Lianyungang main urban area)

逆温层对霾天气有很好的指示作用,逆温强度越强,逆温层厚度越厚,越有利于污染物堆积。目前,已有不少基于典型霾个例的逆温特征分析(谢真珍等,2015;严文莲等,2014),但就其统计特征的分析还较少。关于逆温强度的计算,本研究借鉴花丛等(2015)的定义,即存在单层或多层逆温时,定义特定高度以下所有逆温层顶和逆温层底温差之和为逆温强度。统计时段内,在连云港主城区 490 个中-重度霾时次中,700 hPa 以下存在逆温的霾时次共 335 个,占 68.4%。中-重度霾时次对应的平均逆温强度为 1.8℃。从霾等级看,重度霾时次对应的平均逆温强度较中度霾时次强。由于午后中低层回温作用,08 时和 20 时出现的逆温时次明显多于 14 时,其对应的平均逆温强度也较 08 时和 20 时弱,仅为 1.4℃;此外,午后出现的霾时次对应逆温层底较高,均高于 1 000 hPa。

4 污染物源地分布特征

混合单粒子拉格朗日积分轨迹(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT)是由美国 NOAA 开发,用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的模型。为探究连云港市霾的污染物源地特征,利用该模型对 2008—2018 年主城区中-重度霾时次进行 72 h 后向轨迹追踪,并基于地面形势场开展聚类分型,分型结果如图 10 所示。石春娥等(2008)通过研究指出 1 000 m 左右高度对应江苏地区边界层中上部,结合前文连云港市霾时次对应的逆温底和顶高特征,本研究选取 500 m 高度为轨迹起始点。

由图 10a 可以看出,连云港主城区霾发生时对应气团轨迹的类型较多,其中西北到偏西、偏南路径

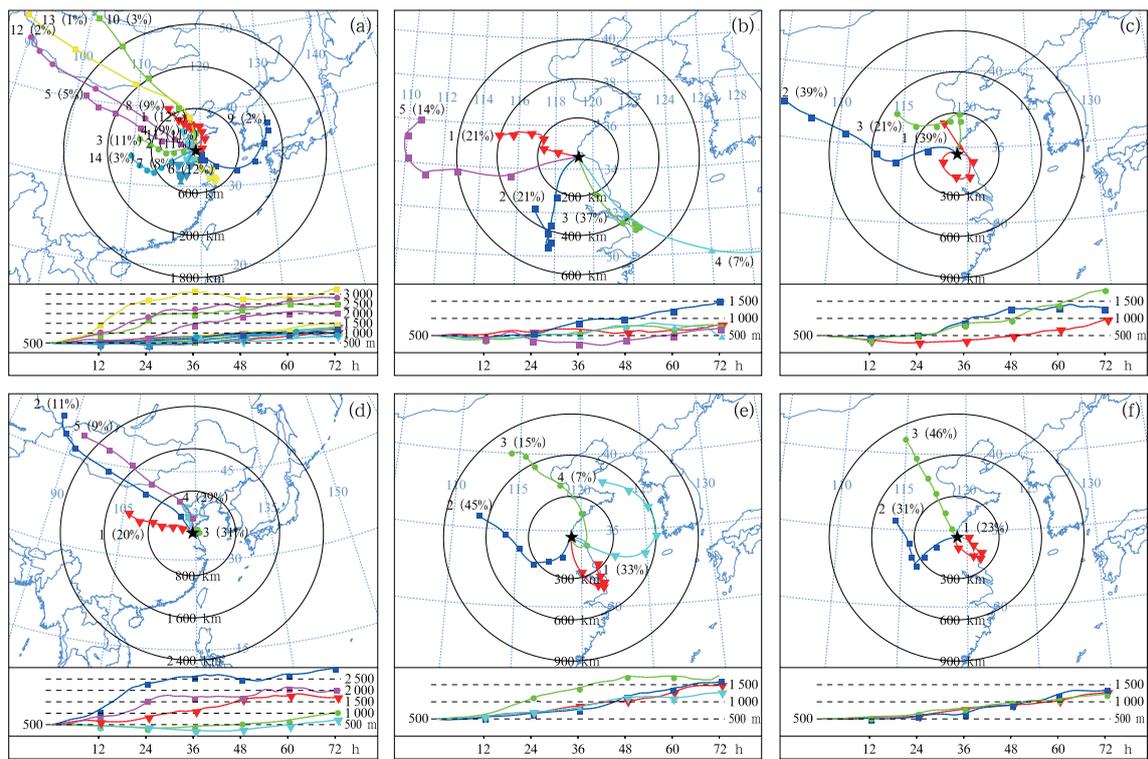


图 10 2008—2018 年连云港主城区中-重度霾总样本(a)、低压倒槽型(b)、锋前型(c)、高压前部型(d)、高压后部型(e)和均压型(f)地面形势对应的中-重度霾后向轨迹 (★为轨迹追踪终点)

Fig. 10 Backward trajectories of moderate and heavy haze hours for the total samples (a), the surface circulation background of low pressure or inverted trough type (b), prefrontal type (c), front of high pressure type (d), back of high pressure type (e) and uniform pressure field type (f) in Lianyungang main urban area during 2008—2018 (★: the end point of trajectories)

下气团轨迹偏多,不同类型轨迹对应气团移动的距离有明显差异。此外,各类型轨迹对应气团到达连云港地区前均出现下沉运动,对污染物扩散起抑制作用。从各类型看,低压倒槽型中-重度霾时次对应的气团轨迹可分为 5 类(图 10b),其中东南路径占比最大,为 37%;该类气团源地为长三角等人口密集、工业化程度高地区,其排放的污染物沿倒槽东侧东南气流向北输送,为中-重度霾形成提供了有利的气溶胶条件。西北和西南路径占比相同,偏西路径占比偏少。值得关注的是,有 3 个中-重度霾时次对应的气团源地为海上。进一步分析表明,这 3 个霾时次均对应 2012 年 6 月 14—15 日重度霾过程,气团沿副热带高压外围从海上到达江苏南部,从陆上携带气溶胶粒子并继续向西北方向移动,最终经连云港地区,形成重度霾天气。锋前型(图 10c)和高压前部型(图 10d)中-重度霾时次对应气团的轨迹多为西北和偏西路径,与冷空气南下带来输入性污染有关,但气团源地有较大差异。以高压前部型为例,有 20%的中-重度霾时次对应气团源地为蒙古中部和河套以西地区,而 29%的气团源地为华北地区,此外还有 31%的中-重度霾时次对应气团源地为连云港本地及周边地区。高压后部型中-重度霾时次对应气团路径可分 4 类(图 10e),其源地分别对应河套、内蒙古中南部、渤海湾和江苏东南部地区。几类轨迹源地不同,但气团到达连云港前均沿高压外围由偏北路径转为高压后部偏南路径。均压场型中-重度霾时次对应的气团轨迹主要为西北路径(图 10f),占比达 77%,其中包含 31%的转折路径,此外还有 23%的气团轨迹较短,对应连云港本地及周边地区污染物排放造成的霾过程。

5 结 论

利用 2008—2018 年连云港市气象和环境监测数据,分析了该地区近十年来霾的变化特征及其与气象要素的关系,并重点讨论了中-重度霾发生的天气背景和污染物源地特征,主要得到以下结论:

(1) 统计时段内,连云港主城区年均霾日数为 154.5 d,年均中-重度霾日数达 27.6 d。自 2011 年起,霾日数逐年显著增加,其中 2013—2015 年霾日数均超过 200 d,2016 年开始下降。冬季霾总日数和中-重度霾日数均多于其他各季。6 月霾日数明显偏多,但主要集中在 2015 年之前。

(2) WNW、WSW 和 SSW 三个风向下连云港主城区霾出现的频率最高。此外,受地形和工业布局等因素影响,来自海上的偏东风下该地区霾出现的频率也较高。 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速最利于霾和中-重度霾形成,湿度在 70%~80%时,霾出现频率最高,但更高相对湿度更利于中-重度霾出现。随着霾等级的加重,PM_{2.5}与 PM₁₀平均浓度的比值显著增大,且 PM_{2.5}浓度与风速和相对湿度等气象要素的相关性均大于 PM₁₀。

(3) 连云港主城区中-重度霾对应的地面天气形势可分为低压倒槽型、锋前型、高压前部型、高压后部型和均压场型 5 类,其中均压场型占比最大,达 35.8%。持续性霾天气维持期间,其对应的地面形势场可以相互转换。逆温层结对中-重度霾形成有较好指示作用,08 时和 20 时逆温出现的频次和逆温强度均大于 14 时。

(4) 轨迹聚类分析表明,不同地面天气型下连云港地区中-重度霾对应气团的源地、路径和移动距离均有明显差异。其中,气团的源地既包括蒙古、河套和华北等较远地区,而与连云港本地及周边地区污染物排放相联系的短距离源地占比也较大。东南路径为低压倒槽型中-重度霾时次对应气团的主要路径,而西北路径在其余几类天气型气团轨迹中占比均较大。不同地面天气型下气团到达连云港地区前均出现下沉运动,对污染物扩散起抑制作用。

致谢:感谢连云港市环境监测站提供颗粒物浓度数据。

参考文献

- 白永清,祁海峡,刘琳,等,2016. 武汉大气能见度与 PM_{2.5}浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. 气象学报,74(2): 189-199. Bai Y Q, Qi H X, Liu L, et al, 2016. Study on the non-linear relationship among the visibility, PM_{2.5} concentration and relative humidity in Wuhan and the visibility prediction[J]. Acta Meteor Sin, 74(2): 189-199(in Chinese).
- 陈英英,熊守权,周毓荃,等,2017. 基于 FY-3/MERSI 卫星资料的霾判识方法研究[J]. 气象,43(11): 1431-1438. Chen Y Y, Xiong S Q, Zhou Y Q, et al, 2017. Study on identification index of haze spectrum by FY-3/MERSI satellite data[J]. Meteor Mon, 43(11): 1431-1438(in Chinese).
- 戴竹君,刘端阳,王宏斌,等,2016. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报,74(1): 133-148. Dai Z J, Liu D Y, Wang H B, et al, 2016. The classification study of the heavy haze during autumn and winter of Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 74(1): 133-148(in Chinese).
- 丁一汇,柳艳菊,2014. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系[J]. 中国科学:地球科学,44(1): 37-48. Ding Y

- H, Liu Y J, 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity[J]. *Sci China Earth Sci*, 57(1): 36-46 (in Chinese).
- 窦以文, 丹利, 胡保昆, 等, 2019. 霾天气影响下的京津冀气候变化特征与成因[J]. *中国环境科学*, 39(2): 506-513. Dou Y W, Dan L, Hu B K, et al, 2019. Characteristics and causes of climate change under haze weather in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. *China Environ Sci*, 39(2): 506-513 (in Chinese).
- 过宇飞, 刘端阳, 周彬, 等, 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究[J]. *气象*, 39(10): 1314-1324. Guo Y F, Liu D Y, Zhou B, et al, 2013. Study on haze characteristics in Wuxi and its impact factors[J]. *Meteor Mon*, 39(10): 1314-1324 (in Chinese).
- 韩永清, 孙兴池, 李静, 等, 2017. 雾霾天气个例气象条件对比分析[J]. *气象科技*, 45(1): 172-178. Han Y Q, Sun X C, Li J, et al, 2017. Comparative analysis of meteorological conditions for fog and haze cases[J]. *Meteor Sci Technol*, 45(1): 172-178 (in Chinese).
- 胡晓, 徐璐, 蒋飞燕, 等, 2018. 宁波地区不同季节不同强度霾天气变化特征[J]. *气象与环境学报*, 34(5): 31-38. Hu X, Xu L, Jiang F Y, et al, 2018. Seasonal characteristics of haze events with different intensity in Ningbo Area[J]. *J Meteor Environ*, 34(5): 31-38 (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).
- 刘端阳, 濮梅娟, 严文莲, 等, 2014a. 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, 2014a. 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).
- 刘端阳, 魏建苏, 严文莲, 等, 2014b. 1980—2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析[J]. *环境科学*, 35(9): 3247-3255. Liu D Y, Wei J S, Yan W L, et al, 2014b. Trends of urban haze in Jiangsu Province China over the past 33 years[J]. *Environ Sci*, 35(9): 3247-3255 (in Chinese).
- 潘玮, 左志燕, 肖栋, 等, 2017. 近50年中国霾年代际特征及气象成因[J]. *应用气象学报*, 28(3): 257-269. Pan W, Zuo Z Y, Xiao D, et al, 2017. Interdecadal variation of haze days over China with atmospheric causes in recent 50 years[J]. *J Appl Meteor Sci*, 28(3): 257-269 (in Chinese).
- 钱俊龙, 刘端阳, 曹璐, 等, 2018. 冷空气过程对江苏持续性霾的影响研究[J]. *环境科学学报*, 38(1): 52-61. Qian J L, Liu D Y, Cao L, et al, 2018. Study on the impact of cold air on persistent haze from December 14 to 24, 2016 in Jiangsu Province, China[J]. *Acta Sci Circumst*, 38(1): 52-61 (in Chinese).
- 石春娥, 翟武全, 杨军, 等, 2008. 长江三角洲地区四省会城市PM₁₀污染特征[J]. *高原气象*, 27(2): 408-414. Shi C E, Zhai W Q, Yang J, et al, 2008. Characteristics of PM₁₀ pollution at four provincial cities in Yangtze River Delta District [J]. *Plateau Meteor*, 27(2): 408-414 (in Chinese).
- 田磊, 裴琳, 陈宇罡, 等, 2018. 1970—2015年蚌埠地区霾日气候资料重建及时空变化特征[J]. *气象与环境学报*, 34(5): 39-46. Tian L, Pei L, Chen Y G, et al, 2018. Climatic data reconstruction of haze days and its temporal-spatial characteristics in Bengbu Area from 1970 to 2015[J]. *J Meteor Environ*, 34(5): 39-46 (in Chinese).
- 涂小萍, 姚日升, 高爱臻, 等, 2019. 浙江北部一次爆发式发展重度大气污染的气象特点和成因[J]. *环境科学学报*, 39(5): 1443-1451. Tu X P, Yao R S, Gao A Z, et al, 2019. Meteorological characteristics and outbreak causes of a heavy air pollution episode in northern Zhejiang Province [J]. *Acta Sci Circumst*, 39(5): 1443-1451 (in Chinese).
- 翁之梅, 李丽平, 杨万裕, 等, 2016. 浙江省冬季不同霾过程的后向气流轨迹及环流特征[J]. *气象*, 42(2): 183-191. Weng Z M, Li L P, Yang W Y, et al, 2016. Backward trajectory and circulation features in different haze processes in winter of Zhejiang [J]. *Meteor Mon*, 42(2): 183-191 (in Chinese).
- 吴兑, 2006. 再论都市霾与雾的区别[J]. *气象*, 32(4): 9-15. Wu D, 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. *Meteor Mon*, 32(4): 9-15 (in Chinese).
- 吴兑, 2008. 霾与雾的识别和资料分析处理[J]. *环境化学*, 27(3): 327-330. Wu D, 2008. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data [J]. *Environ Chem*, 27(3): 327-330 (in Chinese).
- 吴兑, 陈慧忠, 吴蒙, 等, 2014. 三种霾日统计方法的比较分析——以环首都圈京津冀晋为例[J]. *中国环境科学*, 34(3): 545-554. Wu D, Chen H Z, Wu M, et al, 2014. Comparison of three statistical methods on calculating haze days-taking areas around the capital for example [J]. *China Environ Sci*, 34(3): 545-554 (in Chinese).
- 吴萍, 丁一汇, 柳艳菊, 等, 2016. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系[J]. *气象学报*, 74(3): 352-366. Wu P, Ding Y H, Liu Y J, et al, 2016. Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China [J]. *Acta Meteor Sin*, 74(3): 352-366 (in Chinese).
- 谢真珍, 范秀莲, 王月林, 等, 2015. 淮安地区一次持续性雾霾过程阶段性特征及影响因子分析[J]. *气象与环境学报*, 31(5): 79-85. Xie Z Z, Fan X L, Wang Y L, et al, 2015. Phase characteristics of a persistent fog and haze process and its influencing factors in Huaian Area [J]. *J Meteor Environ*, 31(5): 79-85 (in Chinese).
- 严文莲, 刘端阳, 孙燕, 等, 2014. 秸秆焚烧导致的江苏持续雾霾天气过程分析[J]. *气候与环境研究*, 19(2): 237-247. Yan W L, Liu D Y, Sun Y, et al, 2014. Analysis of the sustained fog and haze event resulting from crop-burning residue in Jiangsu Province [J]. *Clim Environ Res*, 19(2): 237-247 (in Chinese).
- 尹志聪, 王会军, 袁东敏, 2015. 华北黄淮冬季霾年代际增多与东亚冬季风的减弱[J]. *科学通报*, 60(15): 1395-1400. Yin Z C, Wang H J, Yuan D M, 2015. Interdecadal increase of haze in winter over North China and the Huang-Huai Area and the weakening

- of the East Asia winter monsoon[J]. *Chin Sci Bull*, 60(15): 1395-1400(in Chinese).
- 张浩,石春娥,杨元建,2019. 基于东亚冬季风指数的安徽省冬季霾预测研究[J]. *气象*, 45(3): 407-414. Zhang H, Shi C E, Yang Y J, 2019. Prediction of winter haze days in Anhui Province based on East Asian winter monsoon index[J]. *Meteor Mon*, 45(3): 407-414(in Chinese).
- 张人禾,李强,张若楠,2014. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. *中国科学:地球科学*, 44(1): 27-36. Zhang R H, Li Q, Zhang R N, 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Sci China Earth Sci*, 57(1): 26-35(in Chinese).
- 张英娟,张培群,王冀,等,2015. 1981—2013年京津冀持续性霾天气的气候特征[J]. *气象*, 41(3): 311-318. Zhang Y J, Zhang P Q, Wang J, et al, 2015. Climatic characteristics of persistent haze events over Jingjinji during 1981—2013[J]. *Meteor Mon*, 41(3): 311-318(in Chinese).
- 赵晨曦,王云琦,王玉杰,等,2014. 北京地区冬春PM_{2.5}和PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 35(2): 418-427. Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, et al, 2014. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. *Environ Sci*, 35(2): 418-427(in Chinese).
- 赵子菁,魏永杰,张祥志,等,2015. 南京市霾天气与主要气象条件的
相关分析[J]. *中国环境科学*, 35(12): 3570-3580. Zhao Z J, Wei Y J, Zhang X Z, et al, 2015. The correlation analysis of Nanjing haze days and meteorological factors[J]. *China Environ Sci*, 35(12): 3570-3580(in Chinese).
- 中国气象局,2010. 霾的观测和预报等级: QX/T 113—2010[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2010. Observation and forecasting levels of haze: QX/T 113—2010 [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).
- Liu D Y, Yan W L, Kang Z M, et al, 2018. Boundary-layer features and regional transport process of an extreme haze pollution event in Nanjing, China[J]. *Atmos Pollut Res*, 9(6): 1088-1099.
- Peng H Q, Liu D Y, Zhou B, et al, 2016. Boundary-layer characteristics of persistent regional haze events and heavy haze days in eastern China [J]. *Adv Meteor*, 2016: 695015. DOI: 10. 1155/2016/6950154.
- Wang H L, Zhu B, Shen L J, et al, 2016. Regional characteristics of air pollutants during heavy haze events in the Yangtze River Delta, China[J]. *Aerosol Air Qual Res*, 16(9): 2159-2171.
- Wei J S, Zhu W J, Liu D Y, et al, 2016. The temporal and spatial distribution of hazy days in cities of Jiangsu Province China and an analysis of its causes[J]. *Adv Meteor*, 2016: 6761504. DOI: 10. 1155/2016/6761504.