

崔妍,赵春雨,2024. 辽宁省霾天气季节变化特征及其主导因子分析[J]. 气象,50(1):84-94. Cui Y,Zhao C Y,2024. Seasonal variation of haze weather and its dominant factors in Liaoning Province[J]. Meteor Mon,50(1):84-94(in Chinese).

辽宁省霾天气季节变化特征及其主导因子分析*

崔 妍 赵春雨

辽宁省气候中心,沈阳 110016

提 要: 利用辽宁省 51 个地面气象观测站的能见度、均一化相对湿度和天气现象资料,采用最优距离法和固定比例法对能见度资料进行一致性处理,重建了 1961—2020 年的辽宁省逐日霾资料,并利用该资料对辽宁省年和四季霾日时空变化特征和主导因子进行分析。结果表明,1961—2020 年辽宁省平均年霾日呈显著增加趋势[$2.1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],但 2015 年以来霾日显著减少;空间上,年和四季霾日呈现一致的分布特征,均存在 1 个高值中心(沈阳)和 2 个副高值中心(北票和锦州),年平均霾日分别为 139、52、46 d,辽东和辽西山区为霾日低发区,年平均霾日在 20 d 以内。风向和风速是霾日形成的重要气象因子,西南偏南风增加带来的暖湿气流对春季、夏季和秋季霾日的形成贡献较大,北风的减少则对冬季霾日的形成贡献较大。霾发生时辽宁省春季、夏季和秋季发生西南偏南风的频率分别由 11.4%、12.1%和 8.0%增加至 15.8%、19.8%和 13.5%,冬季则表现为北风发生频率的减少和静风发生频率的增加;霾发生时四季风速均较平均状况偏小,说明小风有利于霾的形成。辽宁省霾长期演变受到污染物排放、风力因子和环境政策等多种因素影响,1980—2003 年霾日的不断增加是污染物增多和风速减小共同导致的,2015 年以来的霾日减少则可能与大气污染防治引起的 $\text{PM}_{2.5}$ 减少有关,同时较少的小风日数也为霾日减少提供了有利的气象条件。

关键词: 霾,季节变化,主导因子

中图分类号: P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050802

Seasonal Variation of Haze Weather and Its Dominant Factors in Liaoning Province

CUI Yan ZHAO Chunyu

Liaoning Climate Center, Shenyang 110016

Abstract: Temporal and spatial variations of haze days in four seasons and dominant factors are analyzed based on meteorological data from 51 surface weather stations in Liaoning Province between 1961 and 2020. The results show that the annual haze days averaged in Liaoning Province have a significant increasing trend of 2.1 d per decade from 1961 to 2020 and a decreasing from 2015 to 2020. In terms of spatial distribution, there is a high-value center (Shenyang) and two sub-high-value centers (Jinzhou and Beipiao), where the annual haze days are respectively 139 d, 52 d and 46 d. Comparatively, the annual haze days in the mountain areas of western and eastern in Liaoning Province are the least, less than 20 days on average. Wind direction and wind speed are important meteorological factors for the formation of haze. The warm and humid air brought by the increase of south-southwesterly winds has a greater contribution to haze formation in spring, summer and autumn, while the decrease of northerly winds helps the formation of haze days in winter. The frequencies of south-southwest winds in spring, summer and autumn have increased from 11.4%, 12.1% and 8.0% to 15.8%, 19.8% and 13.5%, respectively. When haze occurs, the

* 中国气象局气候变化专项(CCSF202013)、辽宁省自然科学基金指导计划(2019-ZD-0859)和辽宁省气象局指导计划项目(ZD202342)共同资助
2022 年 10 月 29 日收稿; 2023 年 12 月 1 日收修定稿

第一作者:崔妍,主要从事气候和气候变化研究. E-mail: cuiyan_mail@foxmail.com

wind speeds in all four seasons are lower than the average, indicating that light wind is conducive to the formation of haze. The long-term evolution of haze in Liaoning Province is affected by pollutant emissions, wind factors and environment-manage policies. The growth of haze days from 1980 to 2003 was caused by the increased pollutants and decreased wind speeds. The reduction of haze days since 2015 is very likely related to the reduction of $PM_{2.5}$, which is achieved by air pollution control. At the same time, fewer light wind days also provide a favorable meteorological condition for the reduction of haze days.

Key words: haze, seasonal variation, dominant factor

引 言

霾是由气溶胶微粒导致的低能见度灾害性天气现象(中国气象局,2003;石春娥等,2021),可对社会生活和人体健康产生不良影响(殷永文等,2011;孙维哲等,2016;谢鹏等,2010)。近年来全国空气质量总体有改善,但霾天气仍时有发生(Lv et al,2020)。霾作为一种灾害性天气,其预报预测一直是气象部门的重要业务和服务领域之一,对霾天气的季节特征进行研究,探讨霾日形成和变化的影响因子,是进行霾日预测的前提和基础。

20 世纪 60 年代国外就出现了众多霾日时空特征和变化趋势方面的研究(Munn,1973;Malm,1992;Schichtel et al,2001)。国内,霾的早期研究主要致力于霾日的界定和判识,高歌(2008)采用天气现象中的霾日分析了中国霾日的气候特征,但由于霾观测受观测员主观影响较大,天气现象报表中的霾日资料地区差异特别明显,因此吴兑等(2014)建议采用能见度、天气现象和相对湿度来综合判断,增加霾日分析的科学性。赵普生等(2011)对采用日均和 14 时两种方法得到的霾日进行了比较分析,指出两种方法在分析霾日长期演变特征时都适用;采用 14 时法可能出现对霾天气的漏记,日均法则可识别长时间大范围的霾过程。李星敏等(2022)分别采用 2010 年行标和 2018 年国标对陕西霾进行判识,指出以霾持续 6 h 以上作为判定标准,两者得到的霾日数相当。自 2013 年 1 月中国中东部出现持续性强雾-霾事件之后,霾天气气候特征研究成果不断涌现,总体而言,中国雾-霾呈现东部多西部少的空间分布特征,京津冀、珠江三角洲和长江三角洲是中国霾事件高发区;时间上,从 20 世纪 80 年代以来霾日明显增加,且多发生在冬季(吴兑等,2010;宋连春等,2013;孔锋等,2017;蒋璐君等,2020;刘瑞翔等,2020)。造成霾日不断增加的原因除了人类活动导

致的污染物颗粒和气溶胶浓度增多外,风速、湿度以及近地面输送条件也与霾的形成及长期变化密切相关(胡亚旦和周自江,2009;宋连春等,2013)。此外,东亚冬季风、北极海冰、北大西洋海温以及西北太平洋关键区海温都与中国冬季霾日的年际和年代际变化关系显著(尹志聪等,2015;Yin et al,2015;吴萍等,2016;Wang et al,2015;严中伟等,2018)。

尽管雾-霾研究已经有了不少成果,但针对辽宁地区的分析仍然比较少见。研究时段多以年尺度或者冬季开展(宋连春等,2013;丁一汇和柳艳菊,2014;Ding and Liu,2014;罗玉等,2021),很少对季节尺度的霾日特征进行分析。同时,相关研究资料缺少对自动观测后的能见度偏差进行订正,相对湿度资料也未经过严格的均一化检验和订正。因此,本文利用 1961—2020 年辽宁省 51 个地面气象观测站资料和国家气象信息中心最新发布的均一化相对湿度资料,采用最优距离法和固定比例法对能见度进行一致性处理,重建了 1961—2020 年的辽宁省逐日霾资料,并利用该资料对辽宁地区霾日的季节特征和主导因子进行分析,为进一步开展不同季节霾天气的预报预测提供理论依据。

1 资料和方法

1.1 资 料

本文所用资料包括 1961—2020 年辽宁省 51 个地面气象观测站的逐日相对湿度、能见度、天气现象以及风速风向资料;其中逐日能见度、天气现象和风速风向资料来源于辽宁省气象信息中心,已经过严格质量控制;相对湿度资料来源于国家气象信息中心制作的《中国国家级地面气象站均一化相对湿度日值数据集(V1.0)》。此外,本文还使用了 1980—2020 年辽宁省逐年原煤消费总量资料(辽宁省统计年鉴,https://tjj.ln.gov.cn/tjj/tjxx/xxcx/tjnj/in-

dex.shtml)和 2015—2020 年 PM_{2.5} 历史观测数据(中国空气质量在线分析平台, <https://www.aqistudy.cn/historydata/>)。

1.2 方法

1.2.1 能见度订正方法

1949 年以来我国能见度观测主要经历了 3 次变化。1980 年之前能见度观测依据规范以等级方式记录,1980 年之后执行新的《地面气象观测规范》(中国气象局,2003),以千米记录(丁一汇和柳艳菊,2014;Ding and Liu,2014)。理论上,能见度等级可以被换算为其区间内的任意值,一些研究中将其换算为中间值(王业宏等,2009),但能见度等级对应的距离在等级区间内并非均匀分布,因此使用中间值进行替换可能导致较大的偏差(Wu et al,2012)。本文选择最优距离进行替换,首先根据能见度等级对照表,将 1980—2013 年的能见度距离转为等级,然后将每个等级的能见度距离平均值作为该等级最优距离,最后将 1961—1979 年的能见度等级按照最优距离换算成能见度距离(Chen and Wang,2015)。2014 年之后,能见度开始由人工观测转为自动观测,由于两者定义与原理不同,自动观测能见度通常较人工观测偏小,其理论值约为人工观测值的 76%(李浩和孙学金,2009)。樊高峰等(2017)对比分析了浙江省 4 个地区的人工和自动观测能见度资料,自动和人工观测的系数在 0.68~0.86,平均为 0.77。因此本研究也采用 0.77 系数对自动和人工观测的能见度进行一致性处理(pei et al,2018),将自动观测能见度($V_{\text{自动}}$)修正至人工观测($V_{\text{人工}}$):

$$\frac{V_{\text{自动}}}{V_{\text{人工}}} = \frac{(1/k) \times \ln(1/0.05)}{(1/k) \times \ln(1/0.02)} \approx 0.77$$

式中 k 为消光系数。

1.2.2 相对湿度均一性检验和订正方法

由于观测仪器变化、观测方式改变、气象台站迁移,气候数据不可避免会存在一些不连续点(断点)。均一性检验和订正的目的就是为了消除这些人为因素导致的资料不连续。本文使用的相对湿度数据集采用客观分析与主观判断相结合的技术思路,以国家气象信息中心收集整理中国地面台站历史沿革信息为主要依据,使用最大惩罚 t 检验(PMT)和最大惩罚 F 检验(PMFT)方法对资料非均一性进行检验,采用分位数订正法(QM)对资料进行订正(朱亚妮等,2015)。均一性检验和订正通常分为 3 个步

骤,首先是构建参考序列,参考序列必须具备气候代表性,通常由待订正站点周围的若干个台站资料建立;第二步是使用 PMT/PMFT 检验方法初步确定待订正站点的不连续点;第三步是结合待订正站点的台站迁站、仪器变更等沿革信息对初步确定的不连续点进行主观判断,确定最终的不连续点;最后采用 QM 对资料进行订正。全国共检出和订正不连续点 2006 个,涉及 1640 个站点,而辽宁省共订正站点 22 个(朱亚妮等,2015)。

1.2.3 霾日判别方法

根据《霾的观测和预报等级》(中国气象局,2010)、吴兑(2008)和吴兑等(2014),将日均能见度 < 10 km,相对湿度 $< 90\%$,并排除浮尘、扬沙、沙尘暴等明显造成视程障碍的天气现象定义为一个霾日(崔妍等,2015)。特别需要指出的是,在辽宁省各地区报表中,烟幕出现频次较高,观测中烟幕容易与霾混淆,因此不将烟幕进行排除(赵普生等,2011)。

将辽宁省 51 个站点进行空间平均得到全省平均霾日,采用最小二乘法估计其变化趋势。为更好地分析霾日和原煤消耗量之间的关系,对序列进行了标准化处理,标准化距平序列由原始序列减去平均值除以标准差而得。

2 结果

2.1 辽宁省四季霾日时空特征

2.1.1 辽宁省霾日长期演变特征

图 1 给出了辽宁省 51 个站点平均霾日的年际变化曲线。由图可见,1961—2020 年辽宁省霾日呈显著增加趋势,平均每 10 年增加 2.1 d。从其阶段性变化看,辽宁省年霾日大致可分为 3 个阶段,1980 年之前辽宁省霾日呈缓慢增加趋势 [$1.4 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],1980—2015 年霾日急剧增加,增加率为 1980 年之前的 1.7 倍左右 [$2.4 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],2015 年之后霾日不断减少,2015—2020 年辽宁省平均霾日为 12.8 d,已经接近 1980 年之前的水平(图 1a)。与华北和安徽地区(石春娥等,2016)一致,2008—2012 年辽宁省也出现了霾日阶段性下降的变化特征,但辽宁省下降更早一些(从 2003 年开始),该阶段辽宁省年霾日的减少主要是由沈阳霾日的减少造成,而沈阳霾日的减少则可能与沈阳市 2002 年开始实施

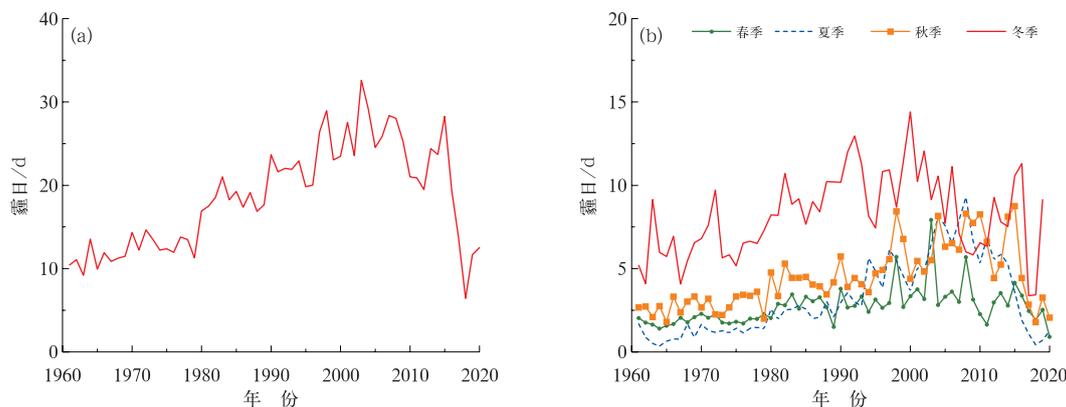


图 1 1961—2020 年辽宁省(a)年和(b)四季霾日年际变化

Fig. 1 Interannual variability of (a) annual and (b) four-season haze days averaged in Liaoning Province during 1961—2020

的“东搬西建”战略有关,“东搬西建”对铁西区老旧国有企业实行整体搬迁和改造,改造后的老城区重点发展第三产业,极大改善了环境质量。该战略实施期间沈阳霾日从 20 世纪初的 $130 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 减少至 2013 年的 $20 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。

四季霾日变化与年基本一致,但又各具特点。春季、夏季和秋季霾日在 1980 年之前明显较少,分别以 0.17 、 0.34 、 $0.30 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率缓慢增加,春季和秋季霾日增加率未通过 0.05 显著性水平检验。之后春季霾日比较稳定,除 1998 年、2003 年和 2008 年霾日较多外,整体无明显变化趋势。夏季和秋季霾日则在 1980—1993 年缓慢增加,1994 年之后急剧增加;夏季霾日在 2008 年达到峰值后缓慢减少,2015 年之后迅速减少;秋季霾日则在 2015 年之前一直处于高位,之后与夏季霾日一样迅速减少;1980—2015 年夏季和秋季霾日分别以 $1.4 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $1.1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率显著增加。冬季霾日与其他季节略有不同,2000 年之前呈现稳定增加趋势,在 2000 年达到峰值后不断减少,2008 年开始连续增加,2015 年之后又开始下降。1961—2000 年冬季霾日以 $1.6 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率增加,而 2001—2019 年则以 $1.9 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (未通过 0.05 显著性水平检验)的速率减少。总体而言,辽宁省年和四季霾日在整个时段呈增加趋势,1980 年之前均比较少且缓慢增加,1980—2015 年明显增加,2015 年之后迅速减少(图 1b)。

2.1.2 辽宁省霾日空间分布特征

空间上,辽宁省年和四季霾日基本呈现一致的分布特征,均表现为中部平原多,辽东和辽西山区少

(图 2)。具体来看,辽宁省年平均霾日在 $0.5 \sim 139 \text{ d}$;年平均霾日在沈阳南部(沈阳)存在 1 个高值中心 (139 d),朝阳东部(北票)和锦州西南(锦州)存在 2 个副高值中心,年平均霾日分别为 52 d 和 46 d ;中部平原和辽东湾北部地区年平均霾日在 $20 \sim 40 \text{ d}$;辽东和辽西山区则在 20 d 以内(图 2a)。从各季节来看,首先各季节的空间分布与年分布基本一致,高值中心和副高值中心在四季均存在;其次,春季和夏季霾日普遍较少,全省 80% 以上的地区霾日在 5 d 以下,秋季 5 d 以上霾日范围明显扩大,冬季除辽东和辽西地区外,全省一半以上地区霾日超过了 5 d , 10 d 以上的霾日范围也由秋季的 8% (4 个站) 扩大至 31% (16 个站);最后从高值中心强度看,从春季至冬季,高值中心强度不断增强,沈阳从春季 30 d 增加至冬季 50 d ,北票和锦州分别从 6 d 和 7 d 增加至 26 d 和 21 d (图 2b~2d)。

从季节霾日占比看(图 3),辽宁省各地区霾日高发季节是冬季和秋季,春季和夏季霾频次较低。冬季辽宁省 65% 的地区(33 个站)霾日占比在 40% 以上,多分布在中部平原和辽东地区,抚顺清原高达 73%;秋季霾日占比多在 20%~40%;夏季中部平原和辽东地区霾日占比在 20% 以内,辽西和辽南地区在 20%~40%;春季除部分沿海站点外,其余大部分地区霾日占比均在 20% 以内。

2.2 气象因子对霾形成的影响

风速和风向对污染物输送和扩散起着重要作用,对某一地区而言,风向可以决定给该地区带来的是污染还是清洁空气,风速则决定了向区域外输送

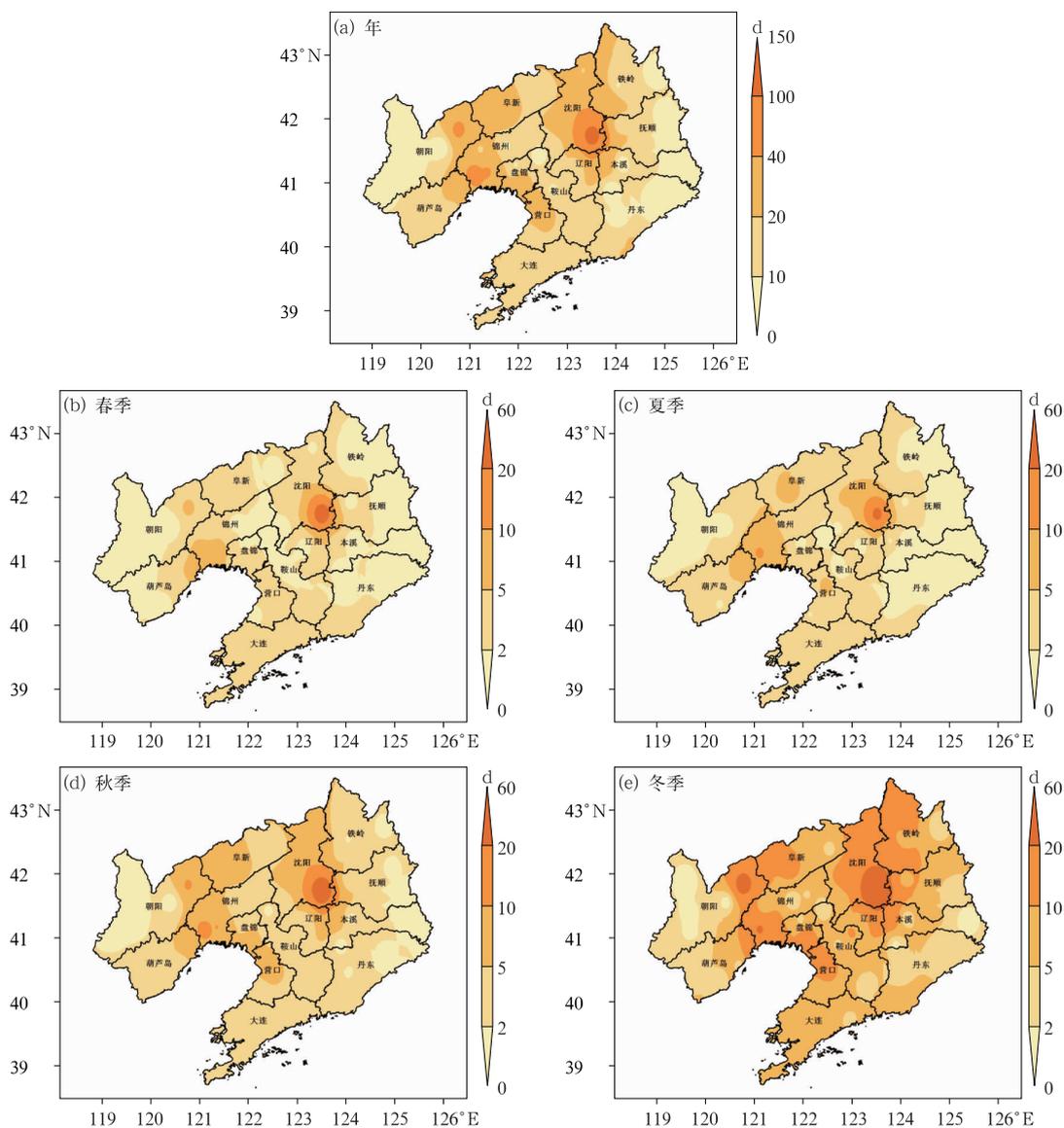


图 2 1961—2020 年辽宁省(a)年和(b~e)四季霾日空间分布

Fig. 2 Distribution of the averaged (a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) autumn and (e) winter haze days in Liaoning Province during 1961—2020

污染物的能力(陈凤娇等,2018)。为探讨风速和风向对辽宁省霾形成的影响,本节分析了辽宁省四季平均主导风向以及霾发生时的主导风向。由于霾日判定时采用的条件是日均能见度和相对湿度,而风向观测则是定时观测,因此在进行主导风向统计时,将各测站、各季节定时观测风向作为一个总样本,样本中出现频次最高的风向即为季节主导风向,而所有霾日样本中出现频次最高的风向为霾日主导风向。

2.2.1 风向对霾形成的影响

图 4 给出了 1961—2020 年辽宁省四季平均状

况和霾日发生时的风玫瑰图。可以看出,就平均状况而言,除静风外,辽宁省春季和夏季以偏南风为主导,春季西南偏南风频次最高(11.4%),其次为南风(9.3%);夏季南风频次最高(12.5%),其次为西南偏南风(12.1%);秋季北风和南风分量相当,北风和西南偏南风频率分别为 8.8%和 8.0%;冬季则基本以偏北风为主,北风和西北偏北风频率分别为 10.0%和 9.0%,东北偏北风和西北风也达到 7%以上。此外,静风频率也从春季的 12.1%增加至冬季的 19.7%,增加了 62.8%,这可能也是辽宁冬季霾日频发的原因之一。与平均状况相比,霾日发生

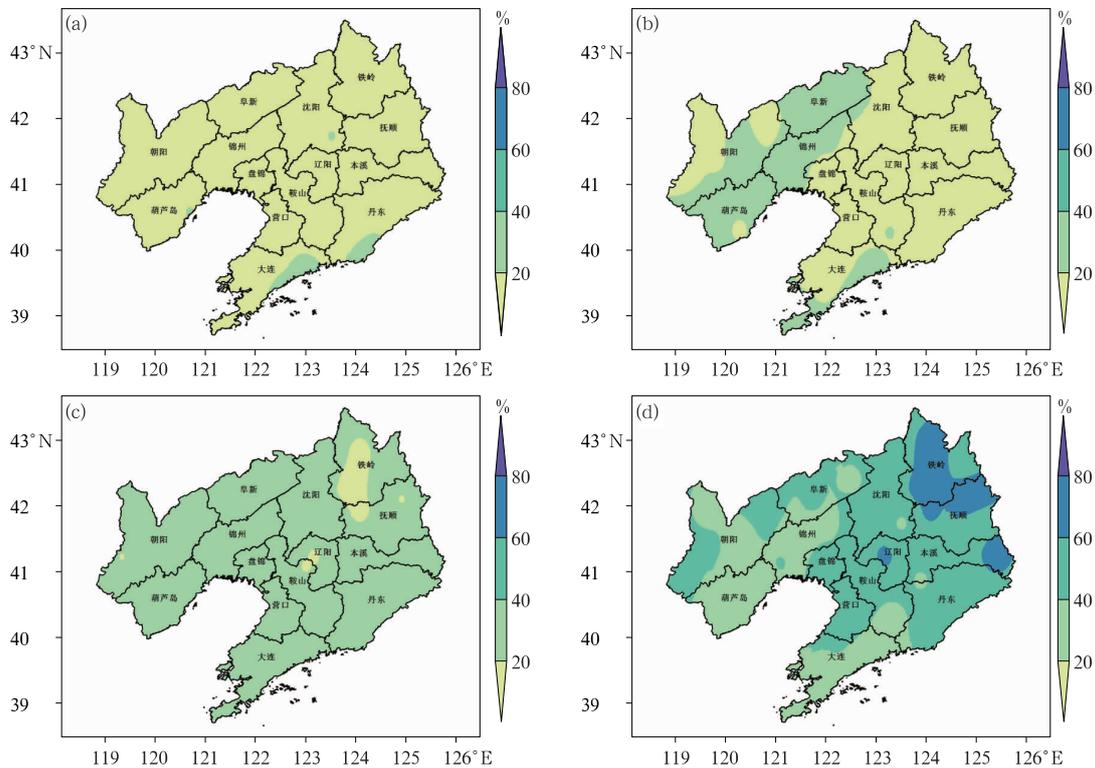


图 3 1961—2020 年辽宁省(a)春季,(b)夏季,(c)秋季和
(d)冬季霾日占比空间分布

Fig. 3 Distribution of the proportion of the averaged
(a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter haze days
in Liaoning Province during 1961—2020

时,春季、夏季和秋季均表现为北风偏少而南风偏多的特征,西南偏南风频率分别由 11.4%、12.1%和 8.0%增加至 15.8%、19.8%和 13.5%,西南风可以带来海上的水汽(高松影等,2020),增加局地相对湿度,促进吸湿性气溶胶的吸湿增长,有利于霾的形成(吴兑,2006),说明对于春季、夏季和秋季,由西南风带来的水汽对辽宁省霾天气的形成具有较大贡献。而对于冬季,霾日时的风向主要表现为北风频率的减少和静风频率的增加,北风和西北偏北风频率由平均状况的 10.0%和 9.0%分别减少为 6.9%和 4.8%,静风频率由 19.8%增加至 22.0%。静风不利于区域污染物向外扩散,尤其对于辽宁省中部城市群,冬季正好是当地采暖季,燃煤所排放的颗粒物不断排入大气,增加了大气中的气溶胶粒子,静风抑制了粒子的扩散从而增加了霾日出现的概率(陈凤娇等,2018;张英娟等,2015)。同时,北风带来的冷空气减少使得大气水平运动和垂直运动均不活跃,不利于污染物颗粒的清除和稀释(图 4d)。

2.2.2 风速对霾形成的影响

除了风向,风速也可能对霾的形成产生影响。图 5 给出了 1961—2020 年辽宁省四季和霾日风速的概率密度分布。由图可见,就平均状况而言,辽宁省风速主要分布在 $0\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,约占全部风速的 96%左右,春季在 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 达到峰值,夏季、秋季和冬季则约在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右达到峰值。与平均值相比,夏季霾日风速并无明显变化,但对于春季和冬季,霾发生时风速明显减小, $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的风速概率由 65.2%和 79.8%分别增加至 75.7%和 86.3%, $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的则分别由 22.2%和 39.4%分别增加至 28.1%和 51.8%;秋季霾日风速也有所减小,并且主要是由 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的风速贡献。总体而言,相对于平均状况,春季、秋季和冬季较小的风速增加了霾日发生的概率,较小的风速使得污染物不易扩散,容易在当地堆积从而形成霾天气(吴兑,2008)。

2.3 辽宁省霾日演变的主导因子

上文分析了风向、风速对霾日形成的影响,总体而言,高西南偏南风频次、多静风和小风等气象条件有利于霾日的发生。为进一步分析气象因素和污染物排放在霾长期演变中的作用,图 6 给出了 1980—2020 年辽宁省霾日与原煤消耗总量、小风(风速 $\leq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)日数和 $\text{PM}_{2.5}$ 的逐年变化,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 资料长度为 2015—2020 年。由图可见,1980—2020 年辽宁省原煤消耗总量整体呈显著增加趋势,2010 年之前逐年增加,2011—2017 年原煤消耗量不断减少,2018 年以来又有所增加。就全省而言,1980—2003 年,霾日和原煤消耗量基本呈现较为一致的趋

势变化,随着原煤消耗的增加,霾日也不断增加,相关系数可达 0.76;在这一时期,小风日数也呈现一致的增加趋势,其与霾日的相关系数为 0.64;这说明在 2003 年之前,辽宁省霾日的不断增加是燃煤增多和风速减小共同导致的。2003—2015 年,原煤消耗仍然波动增加,霾日却呈减少趋势,这一阶段的霾日变化可能与沈阳实施“东搬西建”战略有关,“东搬西建”战略实施期间沈阳霾日从 20 世纪初的 $130 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 减少至 2013 年的 $20 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。2015 年之后,辽宁省霾日显著减少,该阶段辽宁省大气污染防治行动取得明显成果, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不断减小,同时较强的风速和较少的小风日数也对该阶段霾日减少提供了有利的气象条件。

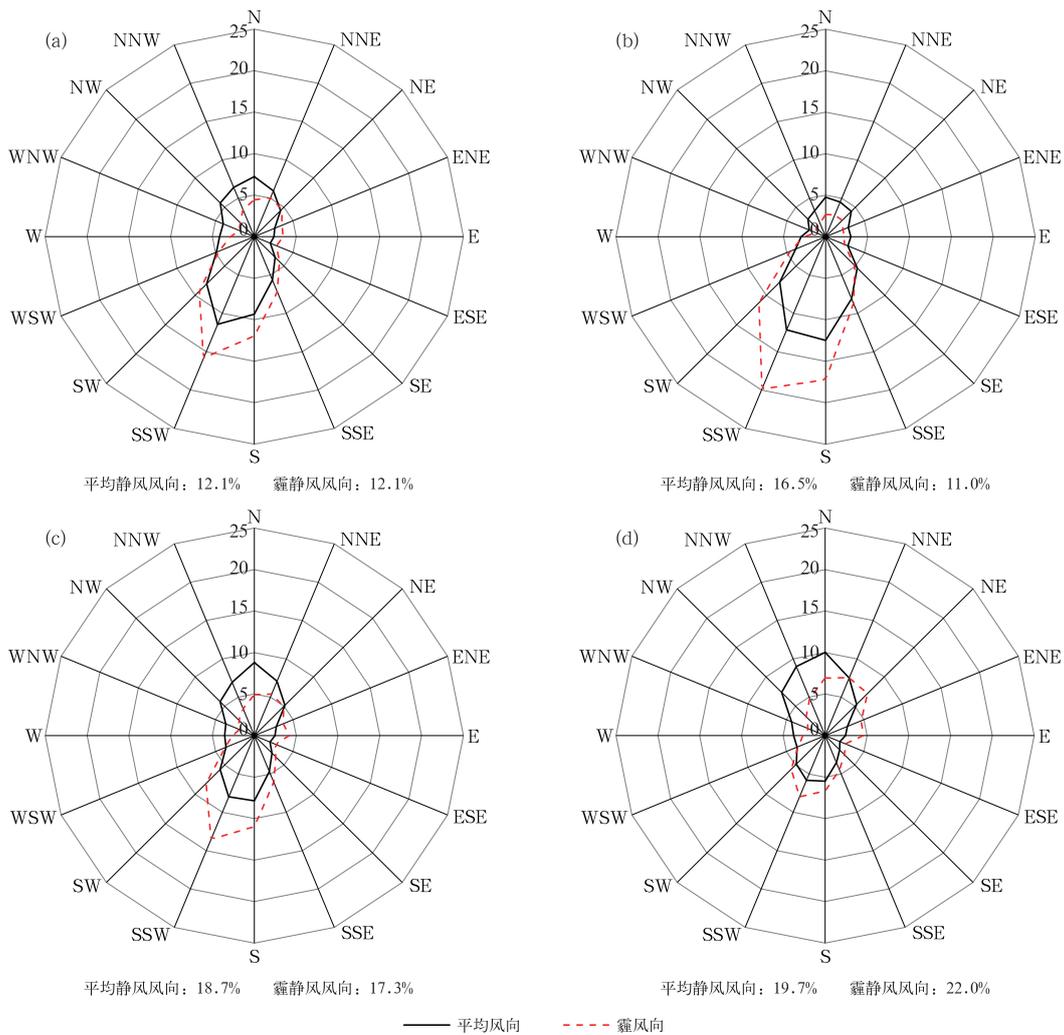


图 4 1961—2020 年辽宁省 (a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季和 (d) 冬季风向频率和霾发生时风向频率(单位: %)

Fig. 4 Frequency of wind direction and during haze weather in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter in Liaoning Province during 1961—2020 (unit: %)

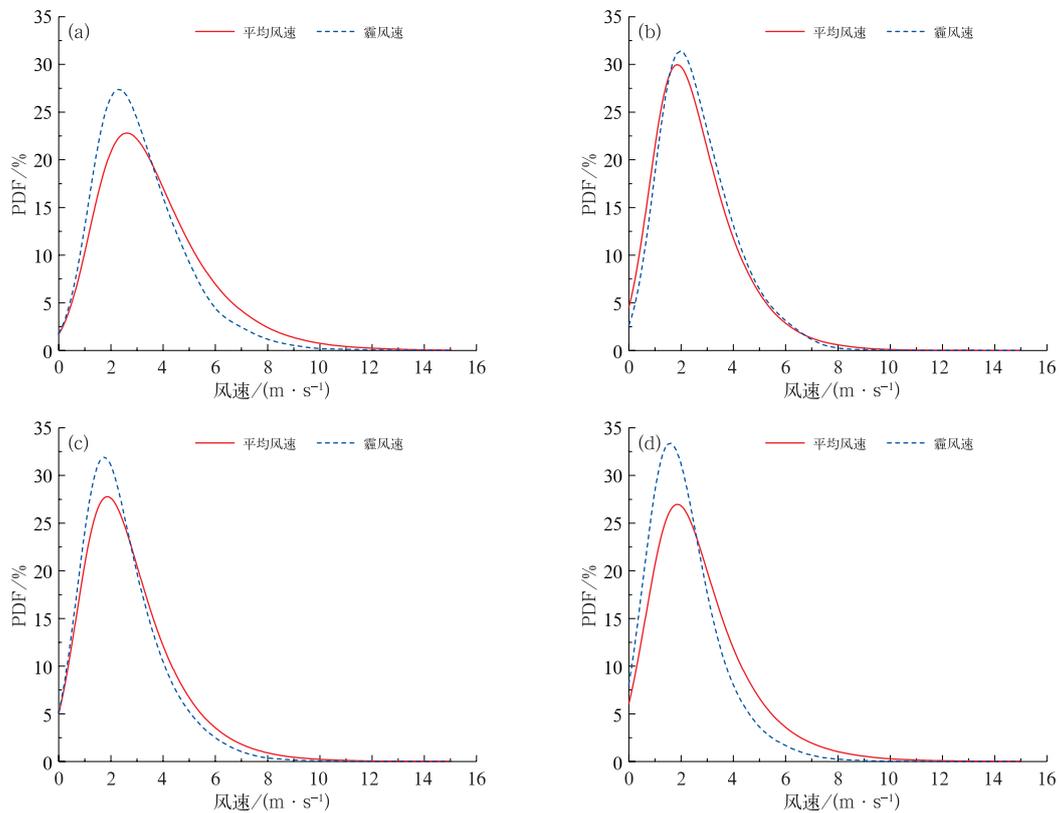


图 5 1961—2020 年辽宁省(a)春季,(b)夏季,(c)秋季和

(d)冬季风速概率密度和霾发生时风速概率密度

Fig. 5 Probability distribution function of surface wind speed and during haze weather in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter in Liaoning Province during 1961—2020

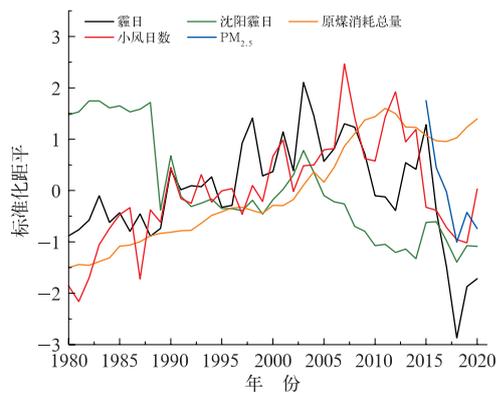


图 6 1980—2020 年辽宁省霾日、原煤消耗总量、小风(风速 $\leq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)日数和 $\text{PM}_{2.5}$ 的年际变化
Fig. 6 Interannual variatin of haze days, coal consumption, days with wind $\leq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $\text{PM}_{2.5}$ in Liaoning Provice during 1980—2020

3 结论和讨论

本文利用 1961—2020 年辽宁省 51 个气象观测

站的一致性能见度资料、均一化相对湿度资料以及天气现象重建了辽宁省霾日序列,基于该序列对辽宁省不同季节的霾日时空特征进行分析,讨论了风向风速对霾形成的影响,最后探讨了辽宁省不同阶段霾变化的主导因子,结果表明:

(1)过去 60 年辽宁省霾日呈显著增加趋势,但 2015 年以来霾日显著减少。1961—2020 年辽宁省年霾日以 $2.1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率显著增加,霾日变化大致可分为 3 个阶段,1980 年之前为缓慢增加期,1980—2015 年为急剧增加期,2015—2020 年为减少期,急剧增加期的变化率约为缓慢增加期的 1.7 倍。春季霾日整体上无明显变化,夏季和秋季霾日在 2008 年之前逐渐增加,之后波动减少,冬季霾日在 2000 年达到峰值后波动减少;年和四季霾日在 2015 年之后均明显减少。空间上,年和四季呈现一致的分布特征,表现为中部平原多、辽东和辽西山区少的分布型,同时年和四季均存在 1 个高值中心和 2 个副高值中心,年霾日分别为 139 d(沈阳)、52 d(北票)和 46 d(锦州)。各季节霾日比例上,辽

宁各地区冬季霾日比例较高,春季较低,中部和东部冬季霾日比例在 40% 以上,春季和夏季比例多在 20% 以内。

(2) 风向和风速是霾日形成的重要气象因子,西南偏南风增加带来的暖湿气流对春季、夏季和秋季霾日形成贡献较大,北风的减少则对冬季霾日形成贡献较大,较小的风速对各季节霾日的形成均比较有利。与平均状况相比,辽宁省春季、夏季和秋季霾发生时均表现为北风偏少而南风偏多的特征,西南偏南风的频率分别由 11.4%、12.1% 和 8.0% 增加至 15.8%、19.8% 和 13.5%;而对于冬季,霾发生时的风向主要表现为北风频率的减少和静风频率的增加。对风速而言,霾发生时四季风速均较平均状况均偏小,春季和冬季偏小更为明显,其 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下风速概率则分别由 22.2% 和 39.4% 增加至 28.1% 和 51.8%。

(3) 霾的长期演变受到污染物排放、风力因子和环境政策等多种因素影响。1980—2003 年辽宁省霾日的不断增加是燃煤导致的污染物增多和风速减少共同导致的,两者与霾日的相关系数分别为 0.76 和 0.64;2003—2015 年辽宁省霾日的减少可能与沈阳市实施的“东搬西建”战略有关;2015 年之后辽宁省霾日的显著减少则可能与大气污染防治导致的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不断减小有关,同时较少的小风日数也为霾日减少提供了有利的气象条件。

本文利用重建后的霾序列分析了辽宁省年和四季霾日空间分布特征和时间变化规律,研究了风向、风速对霾形成的影响,探讨了污染物排放、风力因子和环境治理对霾日阶段性变化的影响。但本文的分析仍具有一定的局限性和不确定性,比如由于资料限制,污染物排放仅考虑了原煤消耗量,气象因子也仅仅分析了风力条件这个单一气象因子。但霾日的形成和变化有着极其复杂的原因,不仅与气象条件、污染物排放有关,还与环境治理、减排措施、环流背景、地形地貌、上下游污染物传输扩散等多种因素有关,对于辽宁省这样的老工业基地,还可能受到国有企业改革、工业转型升级等因素影响。本文将辽宁全省作为一个整体,宏观上分析了其影响因子,尚未对更小尺度的市或县级区域进行分析,未来将针对辽宁省重点地区的霾日进行研究,更加精准地将霾日形成和变化的气象因子和其他人为因子分离出来。

参考文献

陈凤娇,王体健,邱康俊,等,2018.安徽省霾污染的季节变化特征及

其主导气象因子研究[J].中国科学技术大学学报,48(7):567-579. Chen F J, Wang T J, Qiu K J, et al, 2018. Seasonal variations in haze and its dominant meteorological factors in Anhui Province[J]. J Univ Sci Technol China, 48(7):567-579(in Chinese).

崔妍,赵春雨,王涛,等,2015.1961—2013 年辽宁省不同等级霾现象时空分布特征及其气候成因[J].环境科学学报,35(6):1629-1637. Cui Y, Zhao C Y, Wang T, et al, 2015. Temporal and spatial characteristics of haze days with different intensities and the climatic factors during 1961—2013 in Liaoning Province[J]. Acta Sci Circumstant, 35(6):1629-1637(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, 44(1):37-48(in Chinese).

樊高峰,任律,毛裕定,2017.基于人工与自动观测对比分析的霾日重建[J].中国环境科学,37(4):1254-1261. Fan G F, Ren L, Mao Y D, 2017. Reconstruction of haze day database based on the comparison between manual and automatic observation[J]. China Environ Sci, 37(4):1254-1261(in Chinese).

高歌,2008.1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J].地理学报,63(7):761-768. Gao G, 2008. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961—2005[J]. Acta Geogr Sin, 63(7):761-768(in Chinese).

高松影,赵婷婷,宋丽丽,等,2020.辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征[J].冰川冻土,42(2):439-446. Gao S Y, Zhao T T, Song L L, et al, 2020. Transporting characteristics of snowstorm water vapor over Liaoning Province in winter[J]. J Glaciol Geocryol, 42(2):439-446(in Chinese).

胡亚旦,周自江,2009.中国霾天气的气候特征分析[J].气象,35(7):73-78. Hu Y D, Zhou Z J, 2009. Climatic characteristics of haze in China[J]. Meteor Mon, 35(7):73-78(in Chinese).

蒋璐君,刘照明,张弛,2020.江西省近 50 年霾天气时空分布特征及成因分析[J].气象,46(5):695-704. Jiang L J, Liu X M, Zhang C, 2020. Spatio temporal characteristics of haze and its forming reason in Jiangxi Province during the past 50 years[J]. Meteor Mon, 46(5):695-704(in Chinese).

孔锋,代光烁,李曼,等,2017.中国不同历时霾日数时空变化特征及其与城镇化和风速的关联性研究(1961—2015)[J].灾害学,32(3):63-70,95. Kong F, Dai G S, Li M, et al, 2017. Research on spatiotemporal patterns change of different duration haze days and its relationship with urbanization and wind speed in China from 1961 to 2015[J]. J Catastrophol, 32(3):63-70,95(in Chinese).

李浩,孙学金,2009.前向散射能见度仪测量误差的理论分析[J].红外与激光工程,38(6):1094-1098. Li H, Sun X J, 2009. Theoretical analysis on measurement error of forward scattering visibility meter[J]. Infrared Laser Eng, 38(6):1094-1098(in Chinese).

- 李星敏,董自鹏,赵奎锋,等,2022.不同霾识别方法对陕西霾判识的影响[J].气象,48(5):647-657. Li X M, Dong Z P, Zhao K F, et al, 2022. Influence of different haze distinguishing methods on the results of haze identification in Shaanxi Province[J]. Meteor Mon, 48(5):647-657(in Chinese).
- 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).
- 罗玉,马振峰,李小兰,等,2021.四川盆地冬季霾日数的分布特征及其与气象条件和海温关系[J].高原气象,40(1):189-199. Luo Y, Ma Z F, Li X L, et al, 2021. Distribution characteristics of winter haze days in Sichuan Basin and their relationships with meteorological conditions and SST[J]. Plateau Meteor, 40(1):189-199(in Chinese).
- 石春娥,李耀孙,张浩,等,2021.安徽省不同等级雾和重度霾时空分布特征及地面气象条件比较[J].气象学报,79(5):828-840. Shi C E, Li Y S, Zhang H, et al, 2021. Comparisons of spatiotemporal distribution characteristics and surface meteorological conditions for fog and heavy haze events of different levels in Anhui Province[J]. Acta Meteor Sin, 79(5):828-840(in Chinese).
- 石春娥,王喜全,李元妮,等,2016.1980—2013年安徽霾天气变化趋势及可能成因[J].大气科学,40(2):357-370. Shi C E, Wang X Q, Li Y N, et al, 2016. The trend of haze in Anhui Province from 1980 to 2013 and the possible reasons[J]. Chin J Atmos Sci, 40(2):357-370(in Chinese).
- 宋连春,高荣,李莹,等,2013.1961—2012年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析[J].气候变化研究进展,9(5):313-318. Song L C, Gao R, Li Y, et al, 2013. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961—2012[J]. Progress Inquisit DE Mutat Climat, 9(5):313-318(in Chinese).
- 孙维哲,王焱,唐小哲,等,2016.雾霾对人群健康效应研究:现状与建议[J].中国公共卫生管理,32(2):166-169. Sun W Z, Wang Y, Tang X Z, et al, 2016. Effects of haze and fog on health of population: current situation and suggestions[J]. Chin J Public Health Manage, 32(2):166-169(in Chinese).
- 王业宏,盛春岩,杨晓霞,等,2009.山东省霾日时空变化特征及其与气候要素的关系[J].气候变化研究进展,5(1):24-28. Wang Y H, Sheng C Y, Yang X X, et al, 2009. Spatial-temporal variations of hazes in Shandong Province and its relationship with climate elements[J]. Adv Climate Change Res, 5(1):24-28(in Chinese).
- 吴兑,2006.再论相对湿度对区别都市霾与雾(轻雾)的意义[J].广东气象, (1):9-13. Wu D, 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city[J]. Guangdong Meteor, (1):9-13(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).
- 吴兑,吴晓京,李菲,等,2010.1951—2005年中国大陆霾的时空变化[J].气象学报,68(5):680-688. Wu D, Wu X J, Li F, et al, 2010. Temporal and spatial variation of haze during 1951—2005 in Chinese mainland[J]. Acta Meteor Sin, 68(5):680-688(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).
- 谢鹏,刘晓云,刘兆荣,等,2010.珠江三角洲地区大气污染对人群健康的影响[J].中国环境科学,30(7):997-1003. Xie P, Liu X Y, Liu Z R, et al, 2010. Impact of exposure to air pollutants on human health effects in Pearl River Delta[J]. China Environ Sci, 30(7):997-1003(in Chinese).
- 严中伟,裴琳,周天军,等,2018.2017年冬季北京霾日极少的大尺度气候和环流背景:兼论“霾气候”预测研究[J].气象学报,76(5):816-823. Yan Z W, Pei L, Zhou T J, et al, 2018. Unusually clear sky in Beijing during winter 2017 and the underlying large-scale climatic anomalies: with implication for “haze climate” study[J]. Acta Meteor Sin, 76(5):816-823(in Chinese).
- 殷永文,程金平,段玉森,等,2011.上海市霾期间PM_{2.5}、PM₁₀污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J].环境科学,32(7):1894-1898. Yin Y W, Cheng J P, Duan Y S, et al, 2011. Correlation analysis between the PM_{2.5}、PM₁₀ which were taken in the hazy day and the number of outpatient about breathing sections, breathing sections of pediatrics in Shanghai[J]. Environ Sci, 32(7):1894-1898(in Chinese).
- 尹志聪,王会军,郭文利,2015.华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征[J].中国科学:地球科学,45(5):649-655. Yin Z C, Wang H J, Guo W L, 2015. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang-Huai Area[J]. Sci China Earth Sci, 45(5):649-655(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).
- 赵普生,张小玲,徐晓峰,2011.利用日均及14时气象数据进行霾日判定的比较分析[J].环境科学学报,31(4):704-708. Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, 2011. Comparison between two methods of distinguishing haze days with daily mean and 14 o'clock meteorological data[J]. Acta Sci Circumstant, 31(4):704-708(in Chinese).

- 中国气象局,2003. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社:21-27. China Meteorological Administration, 2003. Specifications for Surface Meteorological Observation[M]. Beijing:China Meteorological Press:21-27(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:1-8. China Meteorological Administration, 2010. Observation and forecasting levels of haze:QX/T 113—2010[S]. Beijing:China Meteorological Press:1-8(in Chinese).
- 朱亚妮,曹丽娟,唐国利,等,2015. 中国地面相对湿度非均一性检验及订正[J]. 气候变化研究进展,11(6):379-386. Zhu Y N, Cao L J, Tang G L, et al, 2015. Homogenization of surface relative humidity over China[J]. Progress Inquisit Mutat Climat, 11(6):379-386(in Chinese).
- Chen H P, Wang H J, 2015. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012[J]. J Geophys Res Atmos, 120(12):5895-5909.
- 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.
- Lv Z F, Wang X T, Deng F Y, et al, 2020. Source-receptor relationship revealed by the halted traffic and aggravated haze in Beijing during the COVID-19 lockdown[J]. Environ Sci Technol, 54(24):15660-15670.
- Malm W C, 1992. Characteristics and origins of haze in the continental United States[J]. Earth-Sci Rev, 33(1):1-36.
- Munn R E, 1973. Secular increases in summer haziness in the Atlantic provinces[J]. Atmosphere, 11(4):156-161.
- Pei L, Yan Z W, Sun Z B, et al, 2018. Increasing persistent haze in Beijing: potential impacts of weakening East Asian winter monsoons associated with northwestern Pacific sea surface temperature trends[J]. Atmos Chem Phys, 18(5):3173-3183.
- Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al, 2001. Haze trends over the United States, 1980—1995[J]. Atmos Environ, 35(30):5205-5210.
- Wang H J, Chen H P, Liu J P, 2015. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 8(1):1-9.
- Wu J, Fu C B, Zhang L Y, et al, 2012. Trends of visibility on sunny days in China in the recent 50 years[J]. Atmos Environ, 55:339-346.
- Yin Z C, Wang H J, Guo W L, 2015. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang-Huai Area[J]. Sci China Earth Sci, 58(8):1370-1376.

(本文责编:何晓欢)