

# 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\*

严中伟<sup>1</sup> 裴琳<sup>2</sup> 周天军<sup>1</sup> 朱江<sup>1</sup>

YAN Zhongwei<sup>1</sup> PEI Lin<sup>2</sup> ZHOU Tianjun<sup>1</sup> ZHU Jiang<sup>1</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所,中国科学院大学,北京,100029

2. 中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089

1. *Institute of Atmospheric Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China*

2018-04-23 收稿,2018-08-22 改回.

严中伟,裴琳,周天军,朱江. 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. 气象学报, 76(5):816-823

**Yan Zhongwei, Pei Lin, Zhou Tianjun, Zhu Jiang. 2018. Unusually clear sky in Beijing during winter 2017 and the underlying large-scale climatic anomalies; With implication for "haze-climate" study. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(5):816-823**

**Abstract** Haze over Beijing has received widespread attention in recent years. However, Beijing notably witnessed unusually few haze days in the winter 2017. In 2018, Pei et al proposed an observation-based mechanism linking the number of persistent haze events (PHE) in Beijing with large-scale climatic anomalies in surrounding regions, suggesting an important role of the sea surface temperature anomalies (SSTA) in a key region in the northwestern Pacific (K-region). This letter accordingly compares the large-scale winter climatic anomalies in 2017 with those in 2016, when Beijing encountered with the most serious haze in the observational history. In the winter 2016, the K-region was warmer than usual, giving rise to more frequent anomalous southerlies in North China and more stable atmospheric vertical structure, and hence more haze in Beijing. In the winter 2017, the K-region was cooler than usual with opposite atmospheric anomalies around, and hence less haze in Beijing. The analysis demonstrates that haze over Beijing is influenced by large-scale climatic anomalies. Current status of "haze-climate" studies in China is discussed and future research priorities are highlighted.

**Key words** Beijing haze, East Asian winter monsoon, Extreme anomalous southerly, Sea surface temperature anomaly in the Northwestern Pacific, "Haze-climate" prediction

**摘要** 近年北京霾问题受到广泛关注。2017年冬季北京霾日显著偏少,同样令人瞩目。Pei等2018年提出一种影响北京持续性霾事件多寡的大尺度气候和环流背景机制,指出西北太平洋关键区(K区)海表温度距平起重要作用。文中据此对比分析2017和2016年冬季情形发现:2016年冬季K区偏暖,东亚冬季风系统偏弱,华北地区多异常偏南风距平,低层大气偏稳定,导致霾日偏多;而2017年情形恰好相反。这说明北京霾也受制于大尺度气候异常。进而简述现有研究存在的问题,就如何推进“霾气候”预测研究提出若干建议。

**关键词** 北京霾,东亚冬季风,极端南风异常,关键区海温,“霾气候”预测

**中图法分类号** P427.1+22 P46

\* 资助课题:国家重点研发计划(2016YFA0600404)、国家自然科学基金项目(41475078)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(IU-MKY41475078)、北京市科技计划课题(Z161100001116065)、河北省气象与生态环境重点实验室开放研究基金项目(Z201605H)。

作者简介:严中伟,主要从事极端气候事件研究。E-mail: yzw@tea.ac.cn

通讯作者:裴琳,主要从事霾气候变化研究。E-mail: lpei@ium.cn

## 1 引言

近几十年来北京冬季持续性霾事件呈增多趋势(张英娟等,2015;Pei, et al,2018)。2013年1月14—25日中国中东部发生的持续性重霾污染,波及中国十几个省、市;同期北京大气污染物浓度达历史极值(Wang, et al,2014;Zhang, et al,2014;Gao, et al,2015),首次发布空气污染红色警报,举世瞩目。然而,2017年冬季北京霾日却显著偏少,同样引发社会各界关注。中国工程院曾专门组织研究,探讨是否近年来的相关污染物减排措施起了决定性作用。从污染物排放源来看,控制排放无疑有助于减轻北京重霾污染(Liu, et al,2005;Zhang, et al,2013;Wang, et al,2014;Huang, et al,2014;Tang, et al,2015)。

然而,霾作为一种天气现象,其发生、发展很大程度上取决于大气对污染物的稀释扩散条件,受区域大气环流影响进而与大尺度气候背景有关(王跃思等,2013)。例如:2013年1月中国中东部持续性重霾期间,东亚冬季风环流系统较弱,中国中东部由异常偏南风控制,近地面风速减小并且出现强逆温,大气层结异常稳定而致污染物难以扩散(Zhang, et al,2014);2014年10月21—26日北京重霾,同样缘于异常偏南风输送污染物的环流背景(Zhu, et al,2016)。分析表明,华北一带发生持续性霾的主要环流背景包括对流层平直西风气流或高压脊前西北气流,配合低空西南风气流将污染物和水汽输送到京津冀地区;对流层持续而深厚的下沉气流有助于大气边界层厚度降低并产生逆温,导致大气垂直扩散能力和大气环境容量下降(Wu, et al,2017)。

从长期气候变化的角度来看,某些大尺度气候变化格局或有助于特定区域更频繁地发生霾天气。20世纪80年代中期以来东亚冬季风减弱被普遍认为是北京冬季霾日增多的一个重要原因(Niu, et al,2010;Huang, et al,2012;Chen, et al,2015;Li, et al,2016;吴萍等,2016)。近年来不少研究者开始探索北京霾与更大尺度气候变化的联系(Wang, et al,2015;Zou, et al,2017)。Cai等(2017)结合PM<sub>2.5</sub>浓度观测和15个CMIP5气候模式的逐日模拟,发现大气温室效应增强导致的全球变暖有助于

华北平原出现静稳天气,从而增加冬季强霾事件发生频率和持续时间。

Pei等(2018)基于长期观测分析提出:20世纪以来西北太平洋一关键区(后面简记为K区)冬季海温显著变暖,所激发的环流异常有助于东亚冬季风减弱,特别表现在华北一带更频繁地出现异常南风。这可能是近几十年北京冬季持续性霾趋频的一个较为直接的大尺度气候变化背景。作为特例,2016年冬季北京重度霾频发,是1980年以来冬季持续性霾日数最多的一年;而2017年冬季北京霾日明显减少。本研究利用更新资料进一步确定1980—2017年北京冬季霾日数与华北异常南风及K区海温的关系,对比揭示2016、2017年冬季大尺度气候及环流背景的差异,以便了解2017年北京冬季霾日减少的大尺度背景,通过讨论现有研究中存在的问题,提出推进“霾气候”预测领域的若干研究建议。

## 2 数据

采用的观测资料包括1980—2017年冬季北京地区20个常规气象站的逐日能见度、湿度及天气现象,2017年冬季指2017年12月至2018年2月。对于单一站点,冬季霾日定义采用日均值法(吴兑等,2014),即同时满足日均能见度小于10 km,相对湿度小于90%且天气现象中有“霾”,并排除降水、沙尘等影响视程的天气现象。北京地区冬季霾日则定义为当天有一个及以上站点为霾日。值得注意的是,北京地区20个地面气象观测站的能见度观测方法从2013年开始逐步由人工观测变为仪器探测。文中采用Pei等(2018)的方法对能见度序列做了均一化处理,进而沿用该文定义更新了1980年以来的北京霾日序列。

此外还用到逐日、逐月NCEP/NCAR大气再分析数据(Kalnay, et al,1996),时段为1980年至2018年2月,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ,变量包括经向风、纬向风、位势高度、相对湿度、气温等。区域极端南风距平日数的定义依据Pei等(2018),覆盖北京的“华北”区域取为( $30^{\circ}$ — $50^{\circ}$ N, $105^{\circ}$ — $125^{\circ}$ E)。

全球海表温度资料来源于HadISST v1.1(Rayner, et al,2003),时间段为1980年至2018年2月,分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。根据Pei等(2018)定义的西

北太平洋关键区为(25°—40°N, 120°—155°E), 简称 K 区。主要用到历年冬季 K 区平均海表温度距平(SSTA)的时间序列。

### 3 结果

#### 3.1 冬季北京霾日与华北异常南风及西北太平洋 K 区海温距平的联系

由图 1 可见,1980 年以来北京冬季霾日数与华北极端南风距平日数序列变化相当一致,相关系数达 0.62;而极端南风距平日数则与西北太平洋 K 区

海温序列显著相关,相关系数达 0.43;均超过  $\alpha = 0.01$  显著性  $t$  检验。

根据 Pei 等(2018)提出的一种海温变化致霾机制:K 区偏暖导致异常暖高压环流,有助于华北一带出现南风距平,标志着该区域冬季风减弱,极端情形下出现的南风气流可输送水汽及污染物至北京一带;同时华北一带上空更多地受下沉气流控制,大气边界层高度降低,更易于形成静稳天气而不利于污染物的垂直扩散,从而有助于北京持续性霾的发生(图 2)。

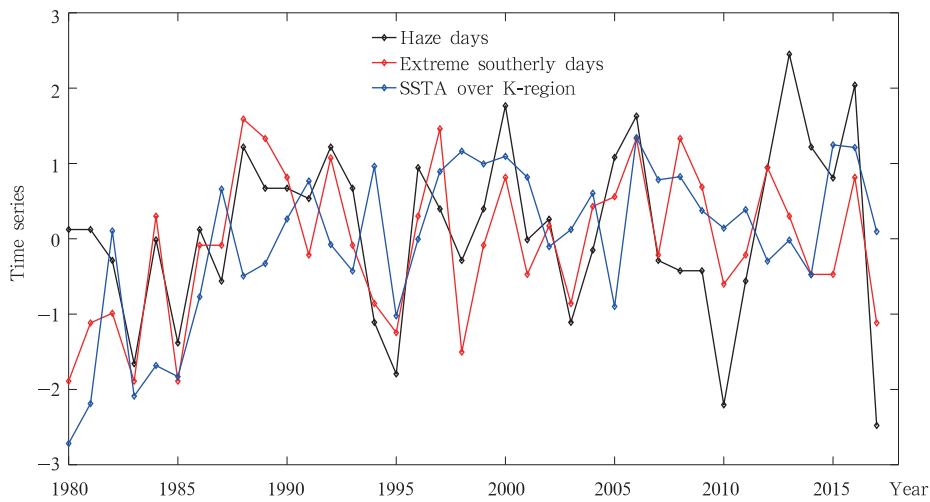


图 1 1980—2017 年冬季北京霾日数、华北极端异常南风日数、西北太平洋 K 区区域平均海温距平的标准化序列  
(气候态为 1981—2010 年平均)

Fig. 1 Normalized time series of winter haze days, extreme southerly days and SSTA over the K-region from 1980 to 2017  
(with reference to climatological mean over the period 1981–2010)

#### 3.2 2016—2017 年冬季大尺度气候及环流背景对比分析

通过统计 1980—2017 年北京地区冬季霾日序列得到,2017 年冬季北京霾日数仅 19 d,是历年来的最少记录。相比而言,2016 年冬季 52 个霾日则是仅次于 2013 年冬季(最高 55 个霾日)的历年次高记录。根据图 2 计算了 K 区海温、华北南风异常指数等多种环流指标,对比呈现于图 3。

可见,2017 年冬季西北太平洋 K 区海温异常偏低(图 3a)。按照 Pei 等(2018)的理论推断,可通过海-气相互作用导致东亚冬季风环流系统偏强,东亚

大陆高压偏强而中国大部分地区大气偏干(图 3c);北京及周边受异常低压系统后部的西北气流控制,且西伯利亚高压偏强(图 3e),有助于极地干冷空气影响华北;中高层东亚大槽偏强,以经向环流为主,高空急流位置偏南,可致冷空气频繁影响华北(图 3g);低层大气为异常冷低压系统(图 3i,k),有利于污染物垂直扩散,导致 2017 年冬季北京霾日异常偏少。

2016 年冬季情形正好相反:K 区海温明显偏高(图 3b),导致东亚冬季风环流系统偏弱,中国大部分地区偏湿,华北受异常南风距平控制(图 3d,f),

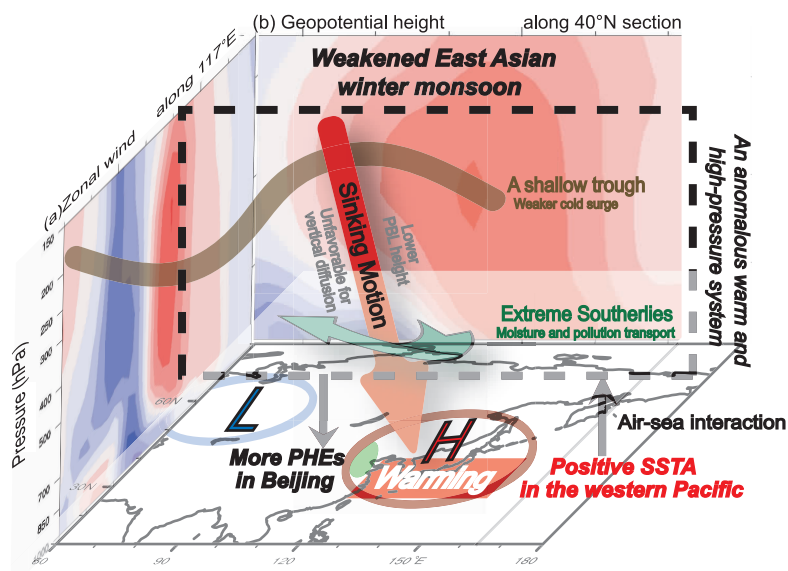


图2 西北太平洋K区偏暖-东亚冬季风系统减弱华北异常南风-北京持续霾事件增多之联系机制(引自Pei等(2018))

Fig. 2 Schematic diagram summarizing the dynamic connection between the increased SSTa in the K-region and the increasing persistent haze events in Beijing through weakening the East Asian winter monsoon system and frequent anomalous southerly episodes (Pei, et al, 2018)

极端情形下的南风气流可将暖湿空气和污染物向北输送至北京;同期中高层东亚大槽偏浅,东亚急流位置偏北,以纬向环流为主,削弱了中高纬度冷空气对华北的影响(图 3h);低层大气为异常暖高压(图 3j、l),大气层结稳定,不利于污染物垂直扩散。这一系列事实与 Pei 等(2018)所分析的物理机制高度吻合。

#### 4 讨论——推进“霾气候”预测研究

本研究结果表明,北京的霾不单纯是局地现象,其发生同时受制于大尺度环流型异常。北京冬季霾日在 2017 年极少、而 2016 年极多,二者所对应的关键区海温及冬季风系统多要素距平分布格局几乎完全反相,凸显大尺度海温距平的重要意义。由于大洋海温距平相比大气现象具有更好的可预测性,当前气候系统模式对于海温变化的预测能力强于大气环流,将局地霾与海温相联系,有助于开展针对局地霾气候的预测研究。然而,某些区域的霾情还可能受到海洋变率之外的其他气候因子影响。例如,中国南方冬季霾日变化可能更显著地受秋季北极海冰的影响(Wang, et al, 2015, 2016)。

事实上,已有越来越多的研究发现,中国区域霾

与全球范围很多大尺度气候要素变化有关,如厄尔尼诺(Li, et al, 2017; Zhao, et al, 2018a)、北极海冰(Wang, et al, 2015)、大陆雪盖(Zou, et al, 2017)、各种大气环流遥相关等(Yin, et al, 2016; Liang, et al, 2017)。然而,这些气候联系都有不确定性,限制了其业务应用价值。随着近年来政府决策层对于跨年乃至年代尺度“霾气候”预测的需求日益增加,学术界亟需厘清关键问题,推进该领域研究。下面给出三个方面的优先研究方向。

##### (1) 霾资料和定义的不确定性

霾是综合性天气现象,涉及多种天气条件,必须保障各种相关资料可靠才能确切表述霾。如能见度观测从早年的人工观测到近年的仪器探测,其时间序列就存在系统偏差,须经均一化处理才能确切反映实际变化。相对湿度的观测也存在较大的非均一性,包括人工观测转自动观测、迁站和时次变化等(朱亚妮等,2015)。以往不同作者用的资料及定义不同,所得霾气候指标序列甚至可呈现相反的长期趋势(吴兑等,2009; Ding, et al, 2015; Yin, et al, 2016)。由此获得的霾气候“规律”当然具有很大不确定性。因此,需要加强霾气候指标的资料均一化

研究,首先需要从资料和定义层面减小“预测目标”的不确定性。

## (2) 霾气候规律的不确定性

基于观测诊断可获得很多统计显著的霾气候关

系或规律。然而气候系统非线性决定了各要素间动力学联系在统计上是非平稳的。比如上述 K 区海温异常对北京霾的关联在近几年是显著的,尤其对2016、2017年的影响截然不同;但从历史上看,也

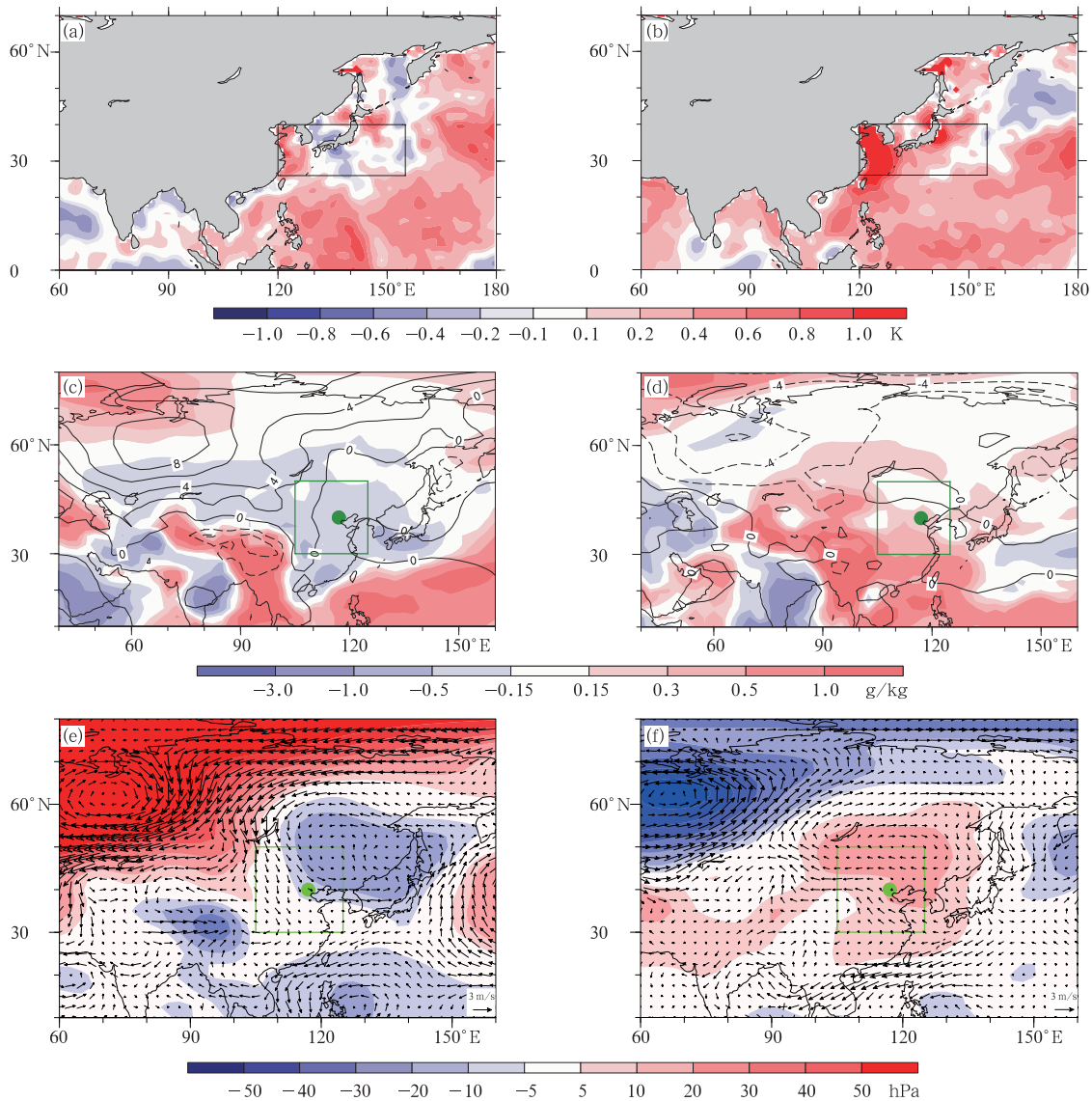
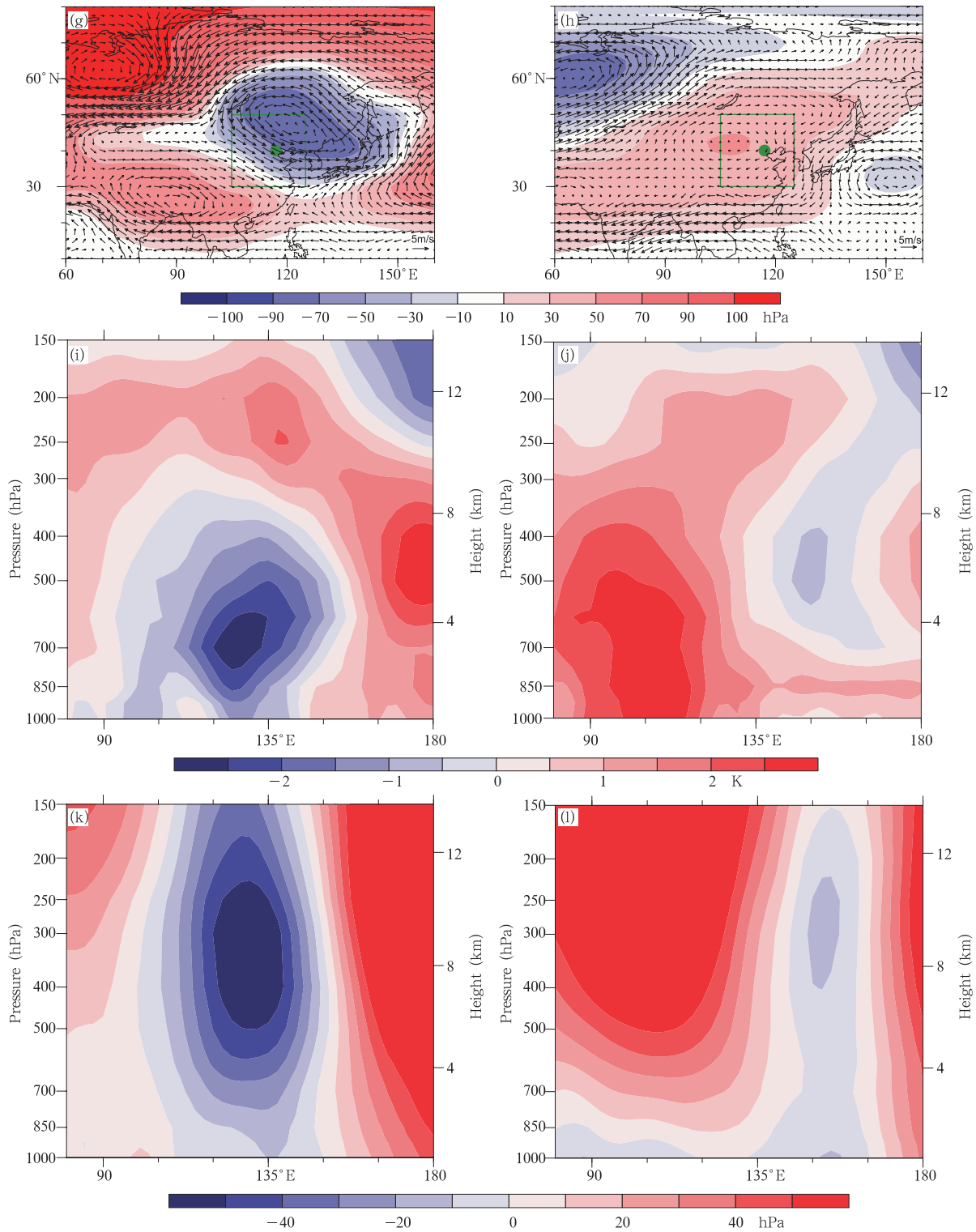


图3 2017年(a,c,e,g,i,k)和2016年(b,d,f,h,j,l)冬季的环流背景

(a,b. 海温距平(单位:K,矩形框为K区);c,d. 海平面气压(等值线,单位:hPa)及1000 hPa比湿(色阶,单位:g/kg)距平;  
e,f. 850 hPa合成风(单位:m/s)及位势高度距平(单位:hPa);g,h. 500 hPa合成风(单位:m/s)及  
位势高度距平(单位:hPa);i,j. 沿40°N垂直剖面的气温距平(单位:K);k,l. 沿40°N垂直剖面  
的位势高度距平(单位:hPa);绿色矩形标示“华北”,绿色点为北京经纬度:40°N,117°E)

Fig. 3 Anomalous atmospheric circulation over East Asia and SSTA pattern over the western Pacific during the wintertime in 2017 (a, c, e, g, i, k) and 2016 (b, d, f, h, j, l)

(a, b. SSTA (unit: K) pattern over the western Pacific; c, d. sea level pressure (contour, unit: hPa) and relative humidity (unit: g/kg) anomalous at 1000 hPa; e, f. composite wind (unit: m/s) and geopotential height anomalous (unit: hPa) at 850 hPa; g, h. composite wind (unit: m/s) and geopotential height (unit: hPa) at 500 hPa; i, j. cross sections of temperature anomalous (unit: K) along 40°N; k, l. cross sections of geopotential height anomalous (unit: hPa) along 40°N; North China is marked by the green rectangle, Beijing (40°N, 117°E) is marked by the green dot)



续图 3

Fig. 3 Continued

并非每年情形都如此明确。极端异常南风日数仅是表征东亚冬季风系统强、弱的一个简化指标,虽然它

是影响华北冬季霾日的主要大气环流因子之一,但其变化并不能完全表征影响北京冬季霾情的气象条

件变化情况。低层西伯利亚高压、中高层东亚大槽、西风急流等关键大气环流要素均可影响特定区域霾情变化(Zhao, et al, 2018b)。如果资料和定义的不确定性是可改善的外在因素,那么这里的不确定性则是系统内在的。为此,需依靠日益增多的观测事实分析不断提升人们的认识水平,充分考虑霾气候问题的非线性特征。此外,参考基于大数据的机器学习,发展预测方法也是一个潜在的发展方向。

### (3) 气候模式预测

目前已有较为成熟的天气尺度区域污染预报模式,但要预测跨季、年及更长期的霾气候,尚缺乏足够的模式基础。鉴于霾事件与大尺度气候因子的联系,利用现有气候动力学模式预测相关的大尺度气候事件如厄尔尼诺、北极海冰、大洋涛动、大气遥相关型等大尺度气候异常,对于预测北京霾这样的局地气候现象具有重要参考意义。当然,这些大尺度气候异常自身的预测,也存在不确定性。近年来有研究提出可利用大集合样本的气候模拟试验来预估未来发生极端天气、气候事件的概率(Thompson, et al, 2017)。如果把北京霾作为某种极端事件,全球气候模式应可在长期霾气候预估领域发挥其特有的作用。另外,局地因素如城市化发展会加剧城区静风天气发生频率(Li, et al, 2011; Yan, et al, 2016);城市化伴随的大气污染本身也可反馈促进霾天气的形成和发展(Tao, et al, 2017)。要充分考虑上述局部因子的作用,需要发展与大气化学和传输过程耦合的高分辨率区域气候模式。

总之,面对近年来日益迫切的政府决策的科学支撑需求,学术界应该高度重视霾气候预测研究。本研究谨从2016、2017年冬季北京极端霾情之大尺度气候背景对比分析入手,提出上述三方面亟待加强的研究方向,希望起到抛砖引玉的作用。

### 参考文献

王跃思,姚利,刘子锐等. 2013. 京津冀大气霾污染及控制策略思考. 中国科学院院刊, 28(3): 353-363. Wang S Y, Yao L, Liu Z R, et al. 2013. Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies. Bull Chin Acad Sci, 28(3): 353-363 (in Chinese)

吴兑,吴晓京,李菲等. 2010. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化. 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. Acta Meteor Sinica, 68(5): 680-688 (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. 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. 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. 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. Acta Meteor Sinica, 74(3): 352-366 (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. 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. Meteor Mon, 41(3): 311-318 (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. 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. Adv Clim Change Res, 11(6): 379-386 (in Chinese)

Cai W J, Li K, Liao H, et al. 2017. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change. Nat Climate Change, 7(4): 257-262

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 Geophys Res, 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. Sci China Earth Sci, 57(1): 36-46

Gao M, Guttikunda S K, Carmichael G R, et al. 2015. Health impacts and economic losses assessment of the 2013 severe haze event in Beijing area. Sci Total Environ, 511: 553-561

Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system. Adv Atmos Sci, 29(5): 910-942

Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, et al. 2014. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. Nature, 514(7521): 218-222

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-470

Li Q, Zhang R H, Wang Y. 2016. Interannual variation of the wintertime fog-haze days across central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon. Int J Climatol, 36(1): 346-354

Li S L, Han Z W, Chen H P. 2017. A comparison of the effects of interannual arctic sea ice loss and ENSO on winter haze days:

- Observational analyses and AGCM simulations. *J Meteor Res*, 31(5): 820-833
- Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. 2011. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960–2008 based on homogenized observations. *Adv Atmos Sci*, 28(2): 408-420
- Liang J, Tang Y G. 2017. Climatology of the meteorological factors associated with haze events over northern China and their potential response to the quasi-biannual oscillation. *J Meteor Res*, 31(5): 852-864
- Liu J G, Diamond J. 2005. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 435(7046): 1179-1186
- Niu F, Li Z Q, Li C, et al. 2010. Increase of wintertime fog in China: Potential impacts of weakening of the eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading. *J Geophys Res*, 115(D7): D00K20
- 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. *Atmos Chem Phys*, 18(5): 3173-3183
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res-Atmos*, 108(D14): 4407
- Tang G, Zhu X, Hu B, et al. 2015. Impact of emission controls on air quality in Beijing during APEC 2014: Lidar ceilometer observations. *Atmos Chem Phys*, 15(21): 12667-12680
- Tao W, Liu J F, Ban-Weiss G A, et al. 2017. Potential impacts of urban land expansion on Asian airborne pollutant outflows. *J Geophys Res-Atmos*, 122(14): 7646-7663
- Thompson V, Dunstone N J, Scaife A A, et al. 2017. High risk of unprecedented UK rainfall in the current climate. *Nat Commun*, 8: 107
- Wang L T, Wei Z, Yang J, et al. 2014. The 2013 severe haze over southern Hebei, China: Model evaluation, source apportionment, and policy implications. *Atmos Chem Phys*, 14(6): 3151-3173
- Wang H J, Chen H P, Liu J P. 2015. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China. *Atmos Ocean Sci Lett*, 8(1): 1-9
- Wang H J, Chen H P. 2016. Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: Roles of climate change. *Atmos Chem Phys*, 16(6): 4205-4211
- Wu P, Ding Y H, Liu Y J. 2017. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Adv Atmos Sci*, 34(4): 429-440
- Yan Z W, Wang J, Xia J J, et al. 2016. Review of recent studies of the climatic effects of urbanization in China. *Adv Climate Change Res*, 7(3): 154-168
- Yin Z C, Wang H J. 2016. The relationship between the subtropical Western Pacific SST and haze over north-central North China Plain. *Int J Climatol*, 36(10): 3479-3491
- Zhang R, Jing J, Tao J, et al. 2013. Chemical characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing: Seasonal perspective. *Atmos Chem Phys*, 13(14): 7053-7074
- 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. *Sci China Earth Sci*, 57(1): 26-35
- Zhao S Y, Zhang H, Xie B. 2018a. The effects of El Niño-Southern oscillation on the winter haze pollution of China. *Atmos Chem Phys*, 18(3): 1863-1877
- Zhao S Y, Feng T, Tie X X, et al. 2018b. Impact of climate change on Siberian high and wintertime air pollution in China in past two decades. *Earth's Future*, 6(2): 118-133
- Zhu X W, Tang G Q, Hu B, et al. 2016. Regional pollution and its formation mechanism over North China Plain: A case study with ceilometer observations and model simulations. *J Geophys Res-Atmos*, 121(24): 14574-14588
- Zou Y F, Wang Y H, Zhang Y H, et al. 2017. Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China. *Sci Adv*, 3(3): e1602751