

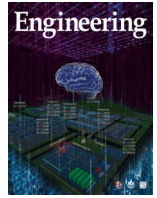


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research

Environmental Research—Article

人类活动对京津冀地区冬季霾相关气象条件的影响

徐影^a, 柳艳菊^{a,*}, 韩振宇^a, 周波涛^b, 丁一汇^a, 吴婕^c, 田童绯^d, 李柔珂^{a,e}, 汪靖^b

^a National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

^b Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

^c School of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China

^d Camford Royal School, Beijing 100093, China

^e Climate and Environment Modeling Lab, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 January 2020

Revised 23 March 2020

Accepted 28 March 2020

Available online 2 July 2020

关键词

气象条件

人类活动

霾

京津冀

摘要

本文利用20世纪气候检测归因计划的CAM5.1-1degree模式,综合考虑人类活动和自然强迫(All-Hist)以及单独考虑自然强迫(Nat-Hist)的两种数值模拟试验结果,对1961—2016年期间人类活动影响京津冀地区冬季霾事件相关气象条件的物理过程进行了分析和讨论。结果表明,考虑人类活动影响后,与京津冀冬季霾事件相关的动力和热力气象条件的变化均不利于污染物的扩散,进而有利于霾的形成和累积,其中动力条件主要包括东亚冬季风显著减弱、低层异常南风增强,热力条件包括地面气温明显升高、水汽输送增强和近地面地表逆温增强等。同时,也利用统计方法进一步分析了两种试验中动力和热力气象条件对京津冀霾日数变化的相对贡献,结果表明:人类活动对京津冀冬季霾日数增多的贡献大于自然强迫,其中动力气象因子对霾日产生的贡献更大,热力因子的贡献在两种情景下基本相同。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

天气条件是重污染事件发生的重要条件,大气对污染物的稀释扩散能力由于气象条件的不同会出现较大的差异[1]。目前,对于霾天气增多的气象/气候条件的研究大多基于霾日数变化与地面气象要素(温度、风速、相对湿度、降水、海平面气压等)的统计关系[2–13]。近些年来,影响中国天气、气候的东亚冬季风系统、ENSO(厄尔尼诺-南方涛动)事件[14–15]以及北极海冰[16–19]的变化对我国霾天气增多的影响逐渐得到关注。需要指出的是,气象-气溶胶反馈也发挥着重要作用。气溶胶可通过减少到达地表的太阳辐射降低近地面风速和边界层高度,

从而进一步加剧近地面霾污染程度[20]。

中国东部地区冬季霾污染的形成和累积也与气候变暖密切相关。吴萍等[21]的研究结果指出,由于气候变暖,冬季气温升高,近地面相对湿度减小,大气层结稳定度的增强以及东亚冬季风强度减弱是造成中国中东部地区冬季霾增加的主要原因。Zhang等[22]指出气候变暖导致的北京风速下降与北京局地霾污染气象条件的转差显著相关。此外,全球气候变暖背景下的天气条件使北京的霾更为频繁[23]。以往研究[24–26]表明,加速发展的工业化、现代化以及人为排放的温室气体和气溶胶等人类活动可以通过调节气象条件引发各种气象灾害。但人类活动究竟对霾天气及产生这类天气的气象条件是否产生了一定的影响?如

* Corresponding author.

E-mail address: liuyan@cmac.gov.cn (Y. Liu)

2095-8099/© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2021, 7(8): 1185–1192

引用本文: Ying Xu, Yanju Liu, Zhenyu Han, Botao Zhou, Yihui Ding, Jie Wu, Tongfei Tian, Rouke Li, Jing Wang. Influence of Human Activities on Wintertime Haze-Related Meteorological Conditions over the Jing-Jin-Ji Region. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.03.015>

果有,对这些影响能否进行量化,人类活动的贡献究竟有多大?关于这些问题,都是目前气候变化与污染关系研究的科学问题,也是备受政府决策部门和公众关注的重要问题。

随着气候模式水平和计算机能力的提高,利用模式进行人类活动对全球和区域尺度平均温度、极端温度和降水影响等方面的研究逐渐增多[27–33]。此外,气溶胶污染对气候异常的重要影响也引起了广泛关注。例如, Garrett 和 Zhao [34–35]研究了中纬度地区的人为污染如何导致北极冬季和春季强烈增暖。Zhao等[36]指出气溶胶污染可以扩大热带气旋的降水面积。此外, Yang等[37]发现珠江三角洲的人为污染对香港冬季地表气温的年代际变化有显著影响。Li等[25]利用观测和模式资料总结了人类活动对天气和气候的影响。利用气候模式开展与大气污染相关的研究,以往工作主要集中在评估模式对大气污染扩散条件的模拟能力[38]及对未来情景的预估研究[39]。

近两年由世界气候研究计划(WCRP)组织的20世纪气候检测归因计划(C20C + Detection and Attribution Project) [40]开展了大量考虑人类活动影响和自然强迫影响的检测与归因敏感性试验,与CMIP5[†]气候模式比较计划(<http://www.cesm.ucar.edu/experiments/cmip5.html>)相比,这个检测与归因计划的试验设计更适合研究人类活动对全球气候的影响。利用这些试验结果,目前已开展了人类活动对极端天气和气候事件影响方面的研究[41–48]。

然而,京津冀作为霾多发区域[26],人类活动(包括交通运输、工业生产、土地利用以及能源消耗等)对该地区霾污染气象条件影响的检测与归因研究还比较少。因此,本文将利用综合考虑人类活动和自然强迫的影响以及单独考虑自然强迫的影响两种模拟试验结果,来分析和讨论近年来人类活动对与京津冀冬季霾气象条件的影响,C20C计划的模拟试验结果为开展此项研究提供了坚实的基础。本文其他部分安排如下:第2节介绍本研究所采用的数据与方法;第3节分析人类活动对霾气象条件的影响;第4节研究动力和热力气象因子对霾气象条件的贡献程度;第5节给出本文的主要结论及有关讨论。

2. 数据与方法

2.1. 模式试验和数据

本文选用了参加20世纪气候检测归因计划中的CAM5.1-1degree模式的输出结果进行分析研究。CAM5.1-1degree模式是CESM1.0.3地球系统模式的大气部分,水

平分辨率是 $1.25^{\circ} \times 0.9375^{\circ}$ (经度和纬度),垂直分辨率为30层。动力学方程基于CAM5.1模式有限元内核所构建,陆面模式为CLM4.0,是CESM1.0.3中的陆面模型。

利用CAM5.1-1degree模式在C20C + D & A计划下完成的两个基准情景下的模拟试验,其中一个试验使用观测到的边界条件[包括观测到的温室气体浓度、硫酸盐气溶胶(或有害气体溶胶)、黑碳气溶胶、沙尘气溶胶、海盐气溶胶、臭氧、地表覆盖/使用、海表温度(SST)和海冰浓度(SIC)]来驱动CAM5.1模式,得到包括所有观测的外界强迫下的真实历史情景(后文简称为All-Hist);另一个是非现实情景,试验中除了太阳辐射量和火山强迫与All-Hist相同外,温室气体浓度、气溶胶和臭氧浓度的数值使用的是1855年估计数值,这些数值在模拟过程中保持不变,SST则是根据多个CMIP5模式模拟的历史变化(仅受自然强迫的历史变化驱动)而来,海冰浓度是根据观测到的温度与冰的关系进行调整,使其与较冷的温度保持一致,此试验中的土地利用/覆盖变化与All-Hist试验保持一致,代表没有人类活动干扰下的历史情景(后文简称为Nat-Hist)。每种情景下的试验都进行了400个样本的集合,开始日期分别为1959年、1996年和2010年的1月1日,所有模拟均从相同的初始状态开始,只考虑了三维温度场的微小的均匀干扰[40]。值得注意的是,从1959年1月1日开始的一些模拟实际上是在1958年开始的,具体见表1。

两种情景下的模拟试验输出数据包括:逐日和逐月的温度、降水、气压、风速、湿度和高度场等多个要素[‡]。

2.2. 方法

根据已有研究结果,与京津冀地区冬季霾日频数气候变率显著关联的气象条件主要有动力和热力两类,其中,动力因子包括东亚冬季风和近地面风速等,热力因子包括地面气温、湿度以及逆温等。因此本文试图从这几个因子入手,对比现实情景下(All-Hist)和非现实情景下

表1 CAM5.1-1degree模式的模拟试验

Scenario	Simulations	Period covered
All-Hist	50	1959/01/01 – 2017/12/31
	50	1996/01/01 – 2017/12/31
	300	2010/01/01 – 2017/12/31
Nat-Hist	50	1959/01/01 – 2017/12/31
	300	1996/01/01 – 2017/12/31

[†] <http://www.cesm.ucar.edu/experiments/cmip5.html>.

[‡] <http://portal.nersc.gov/c20c/>.

(Nat-Hist) 上述这些因子的变化, 来考察人类活动是否对造成京津冀地区冬季霾气象条件产生了影响。关于模式在全球范围内模拟能力的评估可参考 Risser 等[47]的研究工作。分析时, 本文将两种情景下模拟出的气象条件在时空演变上表现出的差异认为是主要由人类活动影响所导致的。

本文研究的区域为京津冀地区 ($36^{\circ}\sim 42.5^{\circ}$ N, $113^{\circ}\sim 120^{\circ}$ E), 站点分布及 1961–2016 年京津冀地区 56 个冬季 (当年 12 月至次年 2 月) 霾日总数分布见图 1。从图 1 可以看出, 京津冀西部和南部及环首都地区都是霾日偏多的地区, 近 56 年冬季部分地区霾日总数超过 500 d 以上, 平均每个冬季约有 10 d 的霾天气。这里霾日的判定主要利用国家气象信息中心提供的逐日天气现象观测资料, 并满足以下判定条件: 当天定时值 (北京时 02、08、14、20 时) 能见度出现小于 10 km 的记录, 当天相应时次相对湿度小于 90%, 当天有霾天气现象记录且未出现降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等其他能导致低能见度的事件。

此外, 考虑到 2013 年以后气象观测仪器的更换, 根据 Pei 等[49]的方法将 2013 年 1 月 1 日之后的自动观测能见度数值做了订正处理, 即原自动观测值除以 0.766。图 2 给出了 1961–2016 年京津冀地区冬季霾日数的逐年演变 (平均值为 4.6 d)。从中选出冬季霾日数 ≥ 5 d 的 16 个典型年 (1980 年、1981 年、1982 年、1998 年、1999 年、2001 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年、2010 年、2011 年、2013 年、2014 年、2015 年和 2016 年) 进行具体分析, 以便更好地分析京津冀地区冬季霾气象条件与人类活

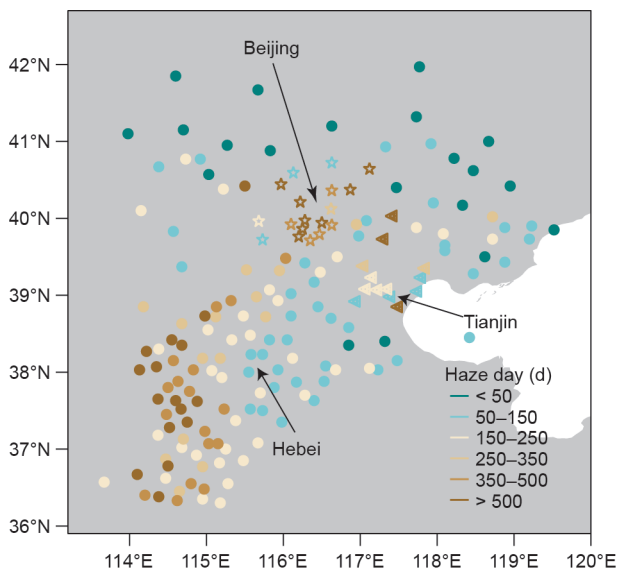


图 1. 京津冀地区站点及 1961–2016 年冬季霾日总数分布 (单位: d)。

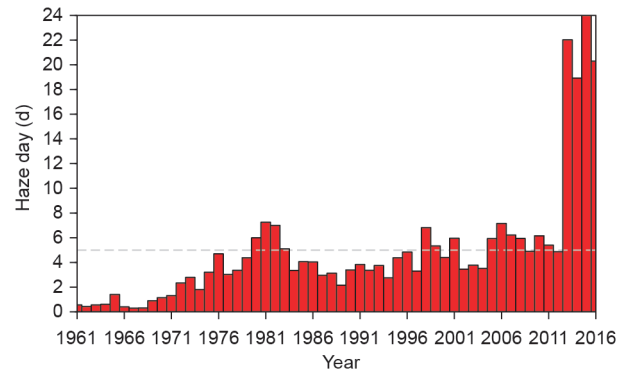


图 2. 1961–2016 年京津冀地区冬季霾日发生次数时序图 (单位: d), 虚线表示霾日数 5 日平均线。

动的关系。从图 2 可以明显看出, 京津冀地区冬季霾日数 ≥ 5 d 的年份都出现在 1980 年后, 特别是在 2013 年以后, 冬季霾日数呈现出突然增加的趋势, 冬季霾日数可达 20 d 以上。造成这种现象的原因除与我国经济快速发展导致的排放增加有关外, 与天气气候条件的变化也密切相关, 主要表现为东亚冬季风减弱、近地面风速减弱、地面气温升高、大气相对湿度降低以及大气稳定性和逆温增加等[21,50–52]。

3. 人类活动对京津冀地区冬季霾气象条件的影响

3.1. 动力条件

东亚冬季风是北半球冬季最为活跃的环流系统之一, 对我国的天气和气候有着重要的影响。东亚冬季风主要成员包括低层风场上亚洲东岸引导极地冷空气南下的西北气流、海平面气压场上的西伯利亚高压和 500 hPa 位势高度上中国大陆东岸至日本上空的东亚大槽等。强东亚冬季风常带来较强的冷空气和偏北大风, 有利于污染物的稀释和扩散。反之, 弱东亚冬季风与冬季霾污染增多密切联系[25]。因此, 地面风速与霾天气的发生密切联系。这里选取 500 hPa 高度场在 ($25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ N, $110^{\circ}\sim 130^{\circ}$ E) 区域的平均值来代表东亚季风的强度, 文中将该区域平均的 500 hPa 高度场经过标准化处理后将其结果乘以 -1, 以此来定义东亚冬季风指数。东亚冬季风指数越大表示冬季风越强, 反之亦然[21,53]。

3.1.1. 东亚冬季风

东亚大槽是北半球冬季对流层中层重要的环流系统。图 3 给出了考虑了人类活动强迫的现实情景 (All-Hist) 与非现实情景 (Nat-Hist) 下京津冀地区冬季 500 hPa 高度场

变化时序图。考虑人类活动强迫的现实情景 (All-His) 下, 京津冀地区冬季高度场明显偏高, 特别是在 20 世纪 90 年代以后这种差别更为显著, 说明人类活动对对流层中层高度场的影响十分明显。此外, 两种情景下京津冀地区冬季高度场有着较为一致的阶段性变化, 即 20 世纪 60~70 年代为高度场降低期, 其后则经历了近 20 年的高度场波动性增高期。从 21 世纪开始, 高度场的变化进入一个较为平稳的时期, 变化幅度较小。对比京津冀冬季霾日偏多年冬季的高度场变化, 可以清楚看到, 人类活动影响下, 霾日偏多年京津冀基本处在高度场正距平控制下。高度场的变化, 一方面会伴随有风场的调整, 另一方面通过气流的上升冷却和下沉增温作用影响地面气温的变化。关于风场和气温的变化将在以下章节详细分析。

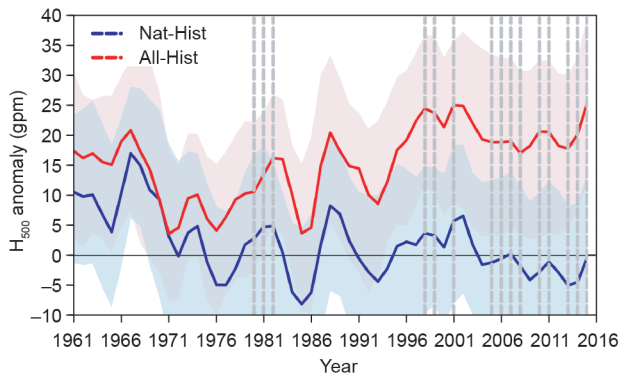


图3. 现实情景 (All-Hist, 红色线) 与非现实情景 (Nat-Hist, 蓝色线) 下京津冀地区冬季 500 hPa 高度场变化时序图 (滑动平均) (相对于 Nat-Hist 情景下 1981–2010 年平均值的距平)。阴影区表示 100 个样本的 25%~75% 的范围, 实线表示 100 个样本的中值, 灰色点线为霾日偏多年份。1 gpm = 9.8 J·kg⁻¹

进一步分析东亚冬季风指数变化时序图 (图 4) 可以发现, 20 世纪 80 年代之前, 两种情景下, 东亚冬季风的强度都有增强的趋势且 Nat-Hist 情景下东亚冬季风强度总体要强于 All-Hist 情景下的结果。此后, All-Hist 情景下东亚冬季风强度减弱明显; Nat-Hist 情景下东亚冬季风强度则表现出逐渐加强的趋势。从 20 世纪 80 年代中期开始, All-Hist 情景下东亚冬季风年代际减弱趋势非常明显, 这与观测结果基本一致[20,54]。此外, 霾日偏多的年份基本上都处在东亚冬季风减弱期。这表明在人类活动影响下, 东亚冬季风的减弱更为明显, 冷空气不活跃且势力偏弱, 大气停滞-静稳日偏多, 大气扩散颗粒物的能力偏弱。与此同时, 这一时期中国经济进入快速发展阶段, 城市人口、工业生产及机动车辆排放到大气中的气溶胶粒子大量增加, 因而也进一步加剧了京津冀地区霾天气的发生与发展。

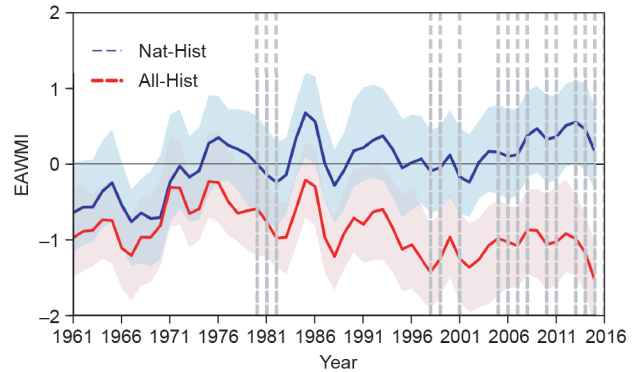


图4. 现实情景 (All-Hist, 红色线) 与非现实情景 (Nat-Hist, 蓝色线) 下东亚冬季风指数变化时序图 (滑动平均) (相对于 Nat-Hist 情景下 1981–2010 年平均值的距平)。阴影区表示 100 个样本的 25%~75% 的范围, 实线表示 100 个样本的中值, 灰色点线为霾日偏多年份。

3.1.2. 近地面风速的变化

东亚冬季风的强弱直接影响近地面风速的大小, 近地面风力条件是污染物颗粒稀释扩散的主要动力条件。图 5 的结果表明, 20 世纪 80 年代中期以来影响京津冀地区的近地面纬向风 (925 hPa) 在人类活动强迫情景 (All-Hist) 和非现实情景 (Nat-Hist) 下均表现出明显减小趋势, 且其演变趋势较为一致。但考虑人类活动强迫情景 (All-Hist) 下, 近地面纬向风减小趋势更加明显[图 5 (a)]。对近地面经向风的分析表明, 南风在人类活动强迫情景 (All-Hist) 下的模拟结果明显较非现实情景 (Nat-Hist) 下偏强[图 5 (b)]。这说明在人类活动强迫下, 南风明显增强, 从而更有利于京津冀南部及以南地区的污染物向北输送, 不利于近地面附近的污染物向区域外扩散。上述分析表明在人类活动影响下, 与东亚冬季风减弱相伴随的低层西风减弱、南风加强是造成霾天气增加的原因之一。

3.2. 热力条件

3.1 节分析表明, 人类活动确实对与霾相关的动力气象条件产生了一定的影响。本小节将主要分析人类活动强迫对与霾相关的热力气象因子的影响。

3.2.1. 气温的变化

图 6 为京津冀地区在现实情景 (All-Hist, 红色线) 与非现实情景 (Nat-Hist, 蓝色线) 下冬季地面气温变化时间序列图。可以看出, 与东亚冬季风的年代际变化一致, 在 All-Hist 情景下, 京津冀地区冬季气温在 20 世纪 80 年代中期也发生了一次年代际变化, 80 年代中期之前东亚冬季风偏强, 京津冀地区气温相对偏低, 20 世纪 90 年代之后, 京津冀地区冬季气温逐渐进入一个相对偏高阶段, 之后东亚冬季风偏弱 10 年左右。从图 6 中还可以看出, 在

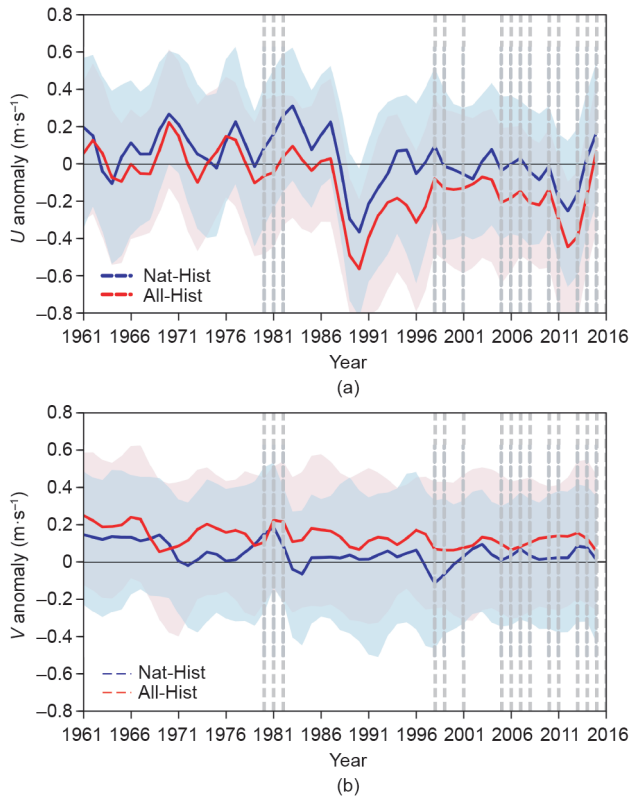


图5. 京津冀地区All-Hist (红色线)与Nat-Hist (蓝色线)情景下冬季地面纬向风(U) (a)和经向风(V) (b)时序变化图(滑动平均)(相对于Nat-Hist情景下1981–2010年平均值的距平)。阴影区表示100个样本的25%~75%的范围,实线表示100个样本的中值,灰色点线为霾日偏多年份。

20世纪90年代初期,霾天气发生较少的年份,京津冀地区冬季气温明显偏低,随后温度突然上升,21世纪初期一直保持温度较高的状态,相应霾日偏多的年份也逐渐增加。对比Nat-Hist情景下的京津冀地区冬季温度的变化可看出,从20世纪70年代开始,京津冀地区冬季的温度基本没有发生明显的变化,基本维持在平均水平附近。

3.2.2. 相对湿度的变化

相对湿度是霾形成的重要条件之一,与其他季节相比,在冬季,京津冀地区降水日数明显偏少[13],相对湿度的作用主要表现为对雾霾形成过程的增湿作用[55]。在现实情景(All-Hist)和非现实情景(Nat-Hist)下,京津冀地区的相对湿度有着较为相似的演变特征(图7)。从20世纪80年代中后期至20世纪90年代中期,两种情景下相对湿度均表现出明显的年代际增湿特征。此后,相对湿度突然减小,进入相对偏低的阶段(也即雾少霾多的阶段)[51]。同时也看出,在All-Hist情景下,相对湿度增加明显大于Nat-Hist情景,表明人类活动可能使得京津冀地区的相对湿度增加更明显,这种相对湿度的增加在一定

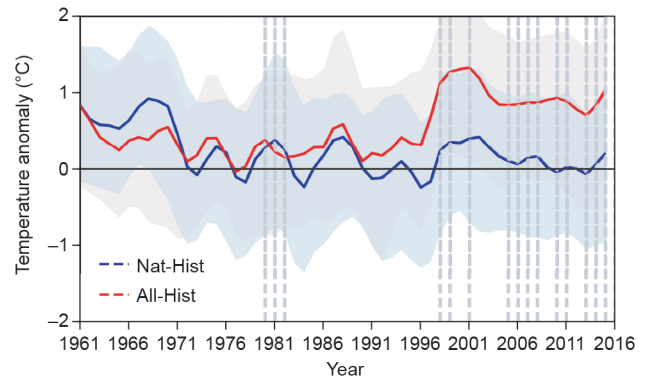


图6. 现实情景(All-Hist,红色线)与非现实情景(Nat-Hist,蓝色线)下京津冀地区冬季地面气温时序变化图(相对于Nat-Hist情景下1981–2010年平均值的距平)。阴影区表示100个样本的25%~75%的范围,实线表示100个样本的中值,灰色点线为霾日偏多年份。

程度上会使得北方干燥大气中颗粒物的吸水性增加,导致霾天气增多。

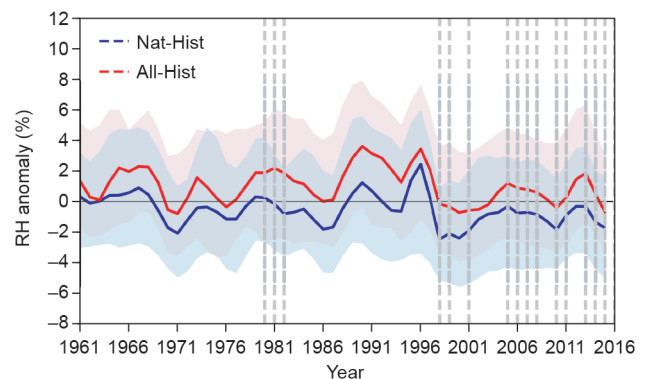


图7. 现实情景(All-Hist,红色线)与非现实情景(Nat-Hist,蓝色线)下京津冀地区冬季地面相对湿度时序变化图(相对于Nat-Hist情景1981–2010年平均值的距平)。阴影区表示100个样本的25%~75%的范围,实线表示100个样本的中值,灰色点线为霾日偏多年份。

3.2.3. 逆温的变化

霾天气的强弱除了与对流层中低层大气层结不稳定性有关外,也与近地面的逆温状况有关。为了分析大气近地面的逆温状况,图8给出了现实情景(All-Hist,红色线)与非现实情景(Nat-Hist,蓝色线)下京津冀冬季温度垂直变化剖面图。在All-Hist情景下,对流层中层气温表现出较为一致的逐渐增强趋势,特别是从20世纪90年代中后期开始,对流层气温的增加有逐渐向高层发展的趋势。21世纪以来,中层气温增加更加明显,增温幅度达 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。而在非现实情景下(Nat-Hist)情景下,除20世纪60~70年代外,对流层中层大气并没有表现出持续的、明显的增暖现象,这说明在全球变暖背景下,低层大气的热力状况不利于污染物的扩散,逆温特征不明显。

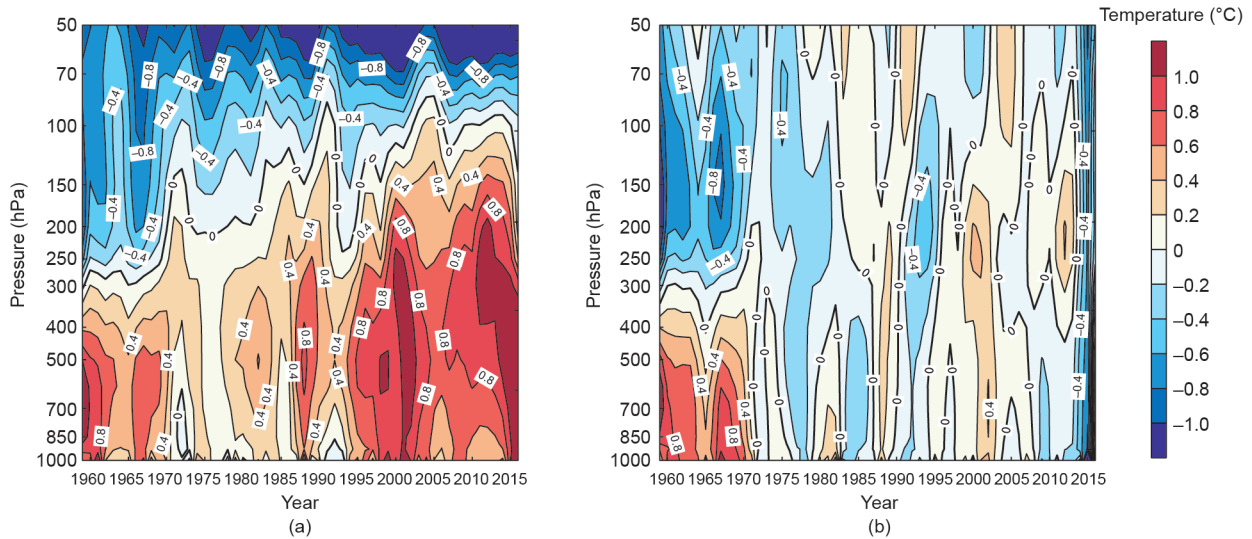


图8. 现实情景 (All-Hist) (a) 与非现实情景 (Nat-Hist) (b) 下京津冀冬季温度垂直变化剖面图 (相对于Nat-Hist情景下1981–2010年平均值的距平)。引自Wang等[9]。

4. 动力和热力气象条件对霾日数的贡献

上述分析表明, 大气的动力和热力作用都会对雾霾天气的发生有重要影响。虽然与人类活动有关的气溶胶与霾天气有密切联系[50], 但人类活动影响下的气象条件对雾霾天气的贡献有多大是一个需要进一步研究的问题。这一节分别对现实情景 (All-Hist) 和非现实情景 (Nat-Hist) 下的动力和热力气象条件对霾产生的贡献进行分析。

如前所述, 动力条件包括: 500 hPa 高度场 (H500)、东亚冬季风指数 (EAWMI)、近地面纬向风 (U) 和经向风 (V); 热力条件包括: 温度 (T_{as})、相对湿度和逆温。针对上述因子, 文中利用多元线性回归方法建立京津冀地区 1961–2016 年京津冀冬季霾日数的线性回归方程。为了检验各个气象因子的独立性, 文中计算了这些因子之间的相关系数。计算后发现, H500 与 EAWMI 之间存在显著负相关, 相关系数为 -0.91 。此外, H500 与 T_{as} 也呈显著正相关, 相关系数为 0.74 。因此, 在建立多元线性回归方程时不考虑动力因子 H500。其他因素之间也存在一定的相关性, 但相关系数较小。

现实情景下的线性回归方程为:

$$\text{Haze days} = -2.735\text{EAWMI} - 2.527U - 12.179V + 2.244T_{as} - 3.266$$

非现实情景下的线性回归方程为:

$$\text{Haze days} = 2.1777\text{EAWMI} + 4.1085U - 0.5391V - 4.2665T_{as} + 0.6966$$

其中, 霾日数单位为 d; EAWMI 单位为位势米 (gpm, $1 \text{ gpm} = 9.8 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$); 纬向风 (U) 和经向风 (V) 单位为

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 温度单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

图9给出了由上述两个回归方程计算得到的现实情景 (All-Hist) 和非现实情景 (Nat-Hist) 下动力和热力气象因子共同以及两个因子单独的京津冀冬季霾日多元线性回归的逐年变化曲线以及观测的京津冀冬季霾日数变化曲线。可看出两种情景 (表2) 下, 利用所有因子回归的京津冀冬季霾日数与观测值之间具有较好的一致性, 二者的相关系数分别为 0.48 和 0.37 (均通过了置信水平为 99% 的检验), 基本上能够反映观测到的京津冀冬季霾日数随着时间增加的变化趋势, 回归值对观测值方差的解释可达 22.5% 和 14.2%, 这一结果说明人类活动对京津冀冬季霾日的变化有明显的正贡献。当只考虑动力气象因子时, 二者的相关系数分别为 0.45 和 0.35 , 回归值对观测值方差的解释可达 20.1% 和 12.4%。需要注意的是, All-Hist 情景下动力因子的方差贡献明显较 Nat-Hist 情景下偏大。当只考虑热力因子时, 二者的相关系数均为 0.29 , 两种情景下的方差贡献基本相当。

从上述的统计分析结果可看出, 人类活动 (All-Hist 情景下) 对京津冀冬季霾日增多的贡献大于只考虑自然强迫, 其中动力气象因子对京津冀冬季霾日产生的贡献更大; 热力气象因子对霾日的贡献在两种情景下相差不大。

5. 结论与讨论

本文利用利用 20 世纪气候检测归因计划的 CAM5.1-1degree 模式的模拟结果, 即综合考虑人类活动和自然强迫 (All-Hist) 以及单独考虑自然强迫 (Nat-Hist) 的两种

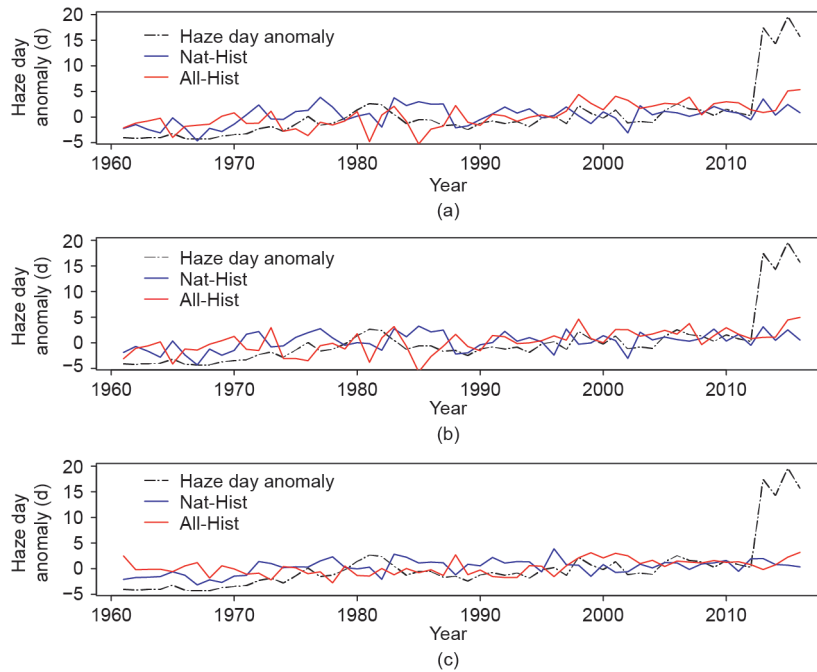


图9. 1961–2016年霾日数变化曲线（虚线；单位：d）以及利用气象动力和热力因子构建的霾日数变化多元线性回归曲线（实线；单位：d）。（a）所有因子；（b）动力因子；（c）热力因子。

表2 所有因子及动力和热力因子统计分析结果

Statistical analysis	All factors		Dynamical factors		Thermal factors	
	Nat-Hist	All-Hist	Nat-Hist	All-Hist	Nat-Hist	All-Hist
<i>F</i> test	*	*	—	*	**	—
Analytic variance	14.2%	22.5%	12.4%	20.1%	8.5%	8.4%
TCC	0.37	0.48	0.35	0.45	0.29	0.29

Single and double asterisks denote statistic results exceeding the 95% (*) and 99% (**) confidence level, respectively.

气候数值模式的试验结果，对近年来人类活动对与京津冀地区冬季霾事件相关的气象条件的影响进行了分析和讨论，主要结论为：

（1）考虑人类活动影响后，与京津冀冬季霾事件相关的动力条件明显不利于霾的扩散，其中主要包括东亚冬季风明显减弱、对流层低层异常南风增强、近地面风速减弱。

（2）考虑人类活动影响后，与京津冀冬季霾事件相关的热力条件包括地面气温明显增加、水汽输送增强和湿度增加、逆温增强等均明显利于霾的形成和累积。

（3）利用多元回归对影响京津冀霾日的动力和热力气象因子的相对贡献的分析表明，人类活动对京津冀霾日增多的贡献大于自然强迫，其中人类活动影响下动力气象因子对京津冀霾日产生的贡献大于自然强迫；热力气象因子对霾日的贡献在两种情景下相差不大。

上述分析主要是定性诊断人类活动对与霾相关气象条件的影响，未来还将进一步利用最优指纹法等多种统计工

具对人类活动对霾气象条件的贡献进行进一步的定量检测和归因研究。同时，还可对其他影响霾发生的气象因子进行分析；本研究只选取了一个模式的多个样本，后续研究可进一步利用多模式多样本的结果进行分析。

除了气象条件之外，气溶胶排放源[56]、臭氧[57]以及植树造林[58]等其他因素也与我国的霾变率有关。因此，进一步探索这些因子的贡献将有助于更好地了解我国霾天气的形成。

致谢

我们感谢世界气候研究耦合模式比较计划（CMIP）组提供的多个模式的模拟结果以及美国能源部气候模式诊断与比较计划为模式结果的存储提供了便利。本项目得到了国家重点研发计划（2017YF0603703和2017YF0605004）以及大气污染公关总理基金（DQGG0104）的共同

资助。

Compliance with ethics guidelines

Ying Xu, Yanju Liu, Zhenyu Han, Botao Zhou, Yihui Ding, Jie Wu, Tongfei Tian, Rouke Li, and Jing Wang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Wu D. Formation and evolution of haze weather. *Environ Sci Technol* 2011;34(3):157–61. Chinese.
- [2] Gao G. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961–2005. *Acta Geogr Sin* 2008;63(7):761–8. Chinese.
- [3] Hu Y, Zhou Z. Climatic characteristics of haze in China. *Meteorol Mon* 2009;35(7):73–8. Chinese.
- [4] Wu D, Wu X, Li F, Tan H, Chen J, Cao Z, et al. Temporal and spatial variation of haze during 1951–2005 in Chinese mainland. *Acta Meteorol Sin* 2010;68(5):680–8. Chinese.
- [5] Song L, Gao R, Li Y, Wang G. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961–2012. *Adv Clim Change Res* 2013;9(5):313–8. Chinese.
- [6] Wang S, Xiu T, Sun Y, Meng X, Xu J. The changes of mist and haze days and meteorological element during 1960–2012 in Xi'an. *Acta Sci Circumstantiae* 2014;34(1):19–26. Chinese.
- [7] Wang J, Zhao Q, Zhu Z, Qi L, Wang J, He J. Interannual variation in the number and severity of autumnal haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region and associated atmospheric circulation anomalies. *Dyn Atmos Oceans* 2018;84:1–9.
- [8] Wang J, Zhu Z, Qi L, Zhao Q, He J, Wang J. Two pathways of how remote SST anomalies drive the interannual variability of autumnal haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Atmos Chem Phys* 2019;19(3):1521–35.
- [9] Wang J, Liu Y, Ding Y, Wu P, Zhu Z, Xu Y, et al. Impacts of climate anomalies on the interannual and interdecadal variability of autumn and winter haze in North China: a review. *Int J Climatol*. Epub 2020.
- [10] Zhao C, Wang Y, Shi X, Zhang D, Wang C, Jiang JH, et al. Estimating the contribution of local primary emissions to particulate pollution using high-density station observations. *J Geophys Res-Atmos* 2019;124:1648–61.
- [11] Zhang K, Zhao C, Fan H, Yang Y, Sun Y. Toward understanding the differences of PM_{2.5} characteristics among five China urban cities. *Asia-Pac J Atmos Sci*. In press.
- [12] Fan H, Zhao C, Yang Y. A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014–2018. *Atmos Environ* 2020;220:117066.
- [13] Sun Y, Zhao C, Su Y, Ma Z, Li J, Letu H, et al. Distinct impacts of light and heavy precipitation on PM_{2.5} mass concentration in Beijing. *Earth Space Sci* 2019;6:1915–25.
- [14] Yin Z, Wang H, Yuan D. Interdecadal increase of haze in winter over North China and the Huang-Huai Area and the weakening of the East Asia winter monsoon. *Chin Sci Bull* 2015;60(15):1395–400. Chinese.
- [15] Gao H, Li X. Influences of El Niño Southern Oscillation events on haze frequency in eastern China during boreal winters. *Int J Climatol* 2015;35:2682–8.
- [16] Wang H, Chen H, Liu J. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China. *Atmos Oceanic Sci Lett* 2015;8(1):1–9.
- [17] Wang H, Chen H. Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: roles of climate change. *Atmos Chem Phys* 2016;16(6):4205–11.
- [18] Zou YF, Wang YH, Zhang YZ, Koo JH. Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China. *Sci Adv* 2017;3(3):e1602751.
- [19] Chen Y, Zhao C, Ming Y. Potential impacts of Arctic warming on Northern Hemisphere mid-latitude aerosol optical depth. *Clim Dyn* 2019;53:1637–51.
- [20] Yang X, Zhao C, Guo J, Wang Y. Intensification of aerosol pollution associated with its feedback with surface solar radiation and winds in Beijing. *J Geophys Res-Atmos* 2016;121:4093–9.
- [21] Wu P, Ding Y, Liu Y, Li X. Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central – eastern China. *Acta Meteorol Sin* 2016;74(3):352–66. Chinese.
- [22] Zhang X, Zhong J, Wang J, Wang Y, Liu Y. The interdecadal worsening of weather conditions affecting aerosol pollution in the Beijing area in relation to climate warming. *Atmos Chem Phys* 2018;18(8):5991–9.
- [23] Cai W, Li K, Liao H, Wang H, Wu L. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change. *Nat Clim Change* 2017;7:257–62.
- [24] Fu C. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon. *Global Planet Change* 2003;37:219–29.
- [25] Li ZQ, Lau WKM, Ramanathan V, Wu G, Ding Y, Manoj MG, et al. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Rev Geophys* 2016;54(4):866–929.
- [26] Li K, Liao H, Cai WJ, Yang Y. Attribution of anthropogenic influence on atmospheric patterns conducive to recent most severe haze over eastern China. *Geophys Res Lett* 2018;45(4):2072–81.
- [27] Zhang X, Zwiers FW, Hegerl GC, Lambert FH, Gillett NP, Solomon S, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature* 2007;448(7152):461–5.
- [28] Zhang X, Wan H, Zwiers FW, Hegerl GC, Min SK. Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. *Geophys Res Lett* 2013;40(19):5252–7.
- [29] Wan H, Zhang X, Zwiers F, Min SK. Attributing northern high-latitude precipitation change over the period 1966 – 2005 to human influence. *Clim Dyn* 2014;45(7–8):1713–26.
- [30] Fischer EM, Knutti R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nat Clim Change* 2015;5(6):560–4.
- [31] Xu Y, Gao X, Shi Y, Botao Z. Detection and attribution analysis of annual mean temperature changes in China. *Clim Res* 2015;63(1):61–71.
- [32] Sun Y, Zhang X, Ren G, Zwiers FW, Hu T. Contribution of urbanization to warming in China. *Nat Clim Change* 2016;6(7):706–9.
- [33] Kim YH, Min SK, Stone DA, Shiogama H, Wolski P. Multi-model event attribution of the summer 2013 heat wave in Korea. *Weather Clim Extremes* 2018;20:33–44.
- [34] Garrett TJ, Zhao C. Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes. *Nature* 2006;440(7085):787–9.
- [35] Zhao C, Garrett TJ. Effects of Arctic haze on surface cloud radiative forcing. *Geophys Res Lett* 2015;42(2):557–64.
- [36] Zhao C, Lin Y, Wu F, Wang Y, Li Z, Rosenfeld D, et al. Enlarging rainfall area of tropical cyclones by atmospheric aerosols. *Geophys Res Lett* 2018;45(16):8604–11.
- [37] Yang X, Zhao C, Zhou L, Li Z, Fan T, Yang S. Wintertime cooling and a potential connection with transported aerosols in Hong Kong during recent decades. *Atmos Res* 2018;211:52–61.
- [38] Wu J, Xu Y, Zhou B. Evaluation of air stagnation in China by CMIP5 models. *Chin J Geophys* 2017;60(4):1293–304. Chinese.
- [39] Han Z, Zhou B, Xu Y, Wu J, Shi Y. Projected changes in haze pollution potential in China: an ensemble of regional climate model simulations. *Atmos Chem Phys* 2017;17(16):10109–23.
- [40] Stone DA, Risser MD, Angéil OM, Wehner MF, Cholia S, Keen N, et al. A basis set for exploration of sensitivity to prescribed ocean conditions for estimating human contributions to extreme weather in CAM5.1-1degree. *Weather Clim Extremes* 2018;19:10–9.
- [41] Risser MD, Stone DA, Paciorek CJ, Wehner MF, Angelil O. Quantifying the effect of interannual ocean variability on the attribution of extreme climate events to human influence. *Clim Dyn* 2017;49(9–10):3051–73.
- [42] Risser MD, Wehner MF. Attributable human-induced changes in the likelihood and magnitude of the observed extreme precipitation during Hurricane Harvey. *Geophys Res Lett* 2017;44(24):12457–64.
- [43] Mukherjee S, Aadhar S, Stone D, Mishra V. Increase in extreme precipitation events under anthropogenic warming in India. *Weather Clim Extremes* 2018;20:45–53.
- [44] Paciorek CJ, Stone DA, Wehner MF. Quantifying statistical uncertainty in the attribution of human influence on severe weather. *Weather Clim Extremes* 2018;20:69–80.
- [45] Sun L, Allured D, Hoerling M, Smith L, Perlwitz J, Murray D, et al. Drivers of 2016 record Arctic warmth assessed using climate simulations subjected to Factual and Counterfactual forcing. *Weather Clim Extremes* 2018;19:1–9.
- [46] Wehner M, Stone D, Shiogama H, Wolski P, Ciavarella A, Christidis N, et al. Early 21st century anthropogenic changes in extremely hot days as simulated

- by the C20C+ detection and attribution multi-model ensemble. *Weather Clim Extremes* 2018;20:1–8.
- [47] Risser MD, Paciorek CJ, Stone DA. Spatially dependent multiple testing under model misspecification, with application to detection of anthropogenic influence on extreme climate events. *J Am Stat Assoc* 2019;114(525):61–78.
- [48] Sha Y, Xu Y, Han Z, Zhou B. Possible effects of human activities on trends in precipitation over the Yangtze River basin from 1961 to 2016. *Chin J Atmos Sci* 2019;43(6):1265–79. Chinese.
- [49] Pei L, Yan Z, Sun Z, Miao S, Yao Y. Increasing persistent haze in Beijing: potential impacts of weakening East Asian winter monsoons associated with northwestern Pacific sea surface temperature trends. *Atmos Chem Phys* 2018;18:3173–83.
- [50] Zhang XY, Sun JY, Wang YQ, Li WJ, Zhang Q, Wang WG. Factors contributing to haze and fog in China. *Chin Sci Bull* 2013;58:1178–87. Chinese.
- [51] Ding YH, Liu YJ. 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* 2014;57:36–46.
- [52] Zhang X, Xu X, Ding Y, Liu Y, Zhang H, Wang Y, et al. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China. *Sci China Earth Sci* 2019;62(12):1885–902.
- [53] Yan HM, Duan W, Xiao ZN. A study of relation between East Asian winter monsoon and climate change during raining season in China. *J Trop Meteorol* 2003;19:367–76. Chinese.
- [54] He SP, Wang HJ. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability. *Chin J Atmos Sci* 2012;36:523–37. Chinese.
- [55] Zheng C, Zhao C, Zhu Y, Wang Y, Shi X, Wu X, et al. Analysis of influential factors for the relationship between PM_{2.5} and AOD in Beijing. *Atmos Chem Phys* 2017;17:13473–89.
- [56] Zhang Q, Zheng Y, Tong D, Shao M, Wang S, Zhang Y, et al. Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017. *Proc Natl Acad Sci USA* 2019;116(49):24463–9.
- [57] Li K, Jacob DJ, Liao H, Zhu J, Shah V, Shen L, et al. A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China. *Nat Geosci* 2019;12(11):906–10.
- [58] Long X, Bei N, Wu J, Li X, Feng T, Xing L, et al. Does afforestation deteriorate haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH), China? *Atmos Chem Phys* 2018;18(15):10869–79.