

袁东敏, 马小会. 2017. 2016年12月16~21日重度霾过程及大气环流异常 [J]. 气候与环境研究, 22(6): 757-764. Yuan Dongmin, Ma Xiaohui. 2017. The severe haze process in 16-21 December 2016 and associated atmospheric circulation anomalies [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(6): 757-764, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17029.

2016年12月16~21日重度霾过程及大气环流异常

袁东敏¹ 马小会^{2,3}

1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

3 中国气象局京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089

提 要 针对2016年12月16~21日华北黄淮及周边地区的重度霾过程开展了诊断分析,发现全球、区域大气环流异常和局地气象条件是此次重度霾形成的重要原因之一。在此次过程中,受重度霾影响的面积为 $71 \times 10^4 \text{ km}^2$,霾持续时间达到6 d,过程最高小时细颗粒物(PM_{2.5})浓度超过 $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。东大西洋/西俄罗斯和西太平洋波列(中高层)和北极涛动(近地面)均表现为显著的正位相型分布,综合调控了华北黄淮局地的环流场和气象条件,有利于霾的发生。华北、黄淮上空的异常反气旋能够有效抑制垂直运动,减弱水平风速。与之对应,近地面层为明显的弱低压区和偏南暖湿气流。从局地气象条件看,地面小风速、高湿度以及浅薄的边界层是促使本次重度霾发生的重要因子。

关键词 霾 污染 大气环流 气候变化和变率

文章编号 1006-9585(2017)06-0757-08

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17029

The Severe Haze Process in 16-21 December 2016 and Associated Atmospheric Circulation Anomalies

YUAN Dongmin¹ and MA Xiaohui^{2,3}

1 *Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

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

3 *Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089*

Abstract The severe haze occurred over North China and Huanghuai area in 16-21 December 2016 was analyzed and the atmospheric circulation anomalies were diagnosed to reveal one of the important causes. The coverage of this severe haze was $71 \times 10^4 \text{ km}^2$, and the duration was six days. The highest measured hourly PM_{2.5} concentration was above $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The East Atlantic/West Russia and West Pacific teleconnections (mid-upper level) and Arctic Oscillation (near surface) were in their positive phases and affected local atmospheric circulations and meteorological conditions, which were favorable for the occurrence of haze. The anti-cyclone over North China and Huanghuai area effectively confined the vertical motion and weakened the surface wind speed. Meanwhile, there existed an obvious weak low pressure system near the surface with warm and humid southerly winds. From the perspective of local meteorological conditions, the weak surface wind and high humidity condition as well as the shallow boundary layer were most important contributors to the

收稿日期 2017-02-26; 网络预出版日期 2017-05-11

作者简介 袁东敏,女,1984年出生,硕士,工程师,主要从事短期天气分析和气象影视等研究工作。E-mail: dongmin_yuan@163.com

资助项目 国家电网公司科技项目 52010115002,中国气象局公共气象服务中心业务服务专项基金 M2017009,国家自然科学基金青年基金 41405136

Funded by Science and technology project of State Grid Corporation of China (Grant 52010115002), Business and service special funding of Public Meteorological Service Center, CMA (Grant M2017009), National Natural Science Foundation of China (Grant 41405136)

occurrence of the severe haze in 16–21 December 2016.

Keywords Haze, Pollution, Atmospheric circulation, Climate Change and variability

1 引言

近些年, 中国的霾污染日益加重, 对交通、航运、旅游和农业等产生了不利影响, 也阻碍了社会经济的可持续发展。随着中国经济的快速发展, 霾已经不完全是自然现象, 背后有大量与人类活动相关的气溶胶粒子参与 (王跃思等, 2013), 这些细颗粒物对呼吸系统、心血管、心理健康和生殖能力都会产生不利影响 (Simon, 2013; Chen et al., 2013)。针对霾成因的科学研究是当前的热点, 属于大气科学和环境科学的交叉领域。可以说, 现在的霾既是一种天气现象, 也是一种污染现象 (缪育聪等, 2015)。污染物排放强度大是霾高发、重发的物质基础和根本原因。当前, 中国东部的大气气溶胶质量浓度背景值长期处于偏高的状态 (张小曳等, 2013), 大气的环境容量已经或接近饱和, 这就导致霾发生所需要的颗粒物条件非常容易达到。

2016 年 12 月 16~21 日, 京津冀及周边地区共有接近 30 个城市启动了空气重污染红色预警, 采取停产限产、停工限行等措施, 大幅降低了污染物的排放量。在如此严厉的限排措施下, 华北、黄淮及周边地区依然出现了严重的霾过程, 其中有 13 个省 (直辖市) 出现重度霾, 影响面积达到 $268 \times 10^4 \text{ km}^2$, 超过中国 1/4 的国土面积。极端不利的气象条件是此次重度霾发生的主要原因之一, 因此有必要针对此次过程及其相关的气象条件、大气环流进行深入分析。从局地条件看, 小风速、高湿度和强逆温是霾发生发展的有利条件 (花丛等, 2015), 近些年达到发生阈值的难度也在下降 (Yin et al., 2015)。在雾—霾天气持续期间, 地面弱风场的维持主要源于冷空气势力弱、常不能影响到地面 (廖晓农等, 2014; 孙彧等, 2016)。从全球和区域大气环流来看, 东亚冬季风偏弱及伴随的环流调整为霾的发生提供了稳定的大气条件 (张人禾等, 2014; Yin et al., 2015; Li et al., 2016)。此外, 东大西洋/西俄罗斯 (EA/WR)、西太平洋 (WP) 和欧亚 (EU) 等遥相关可以通过调控华北平原上空的反气旋异常对华北平原冬季霾产生显著的影响 (Yin et al., 2017)。更详细的分析指出当冬季底层风减弱, 中低

层逆温层发展、中层东亚大槽减弱及高层东亚急流北移时, 华北地区容易爆发大范围的霾 (Chen and Wang, 2015)。Wang et al. (2015) 的研究更是指出北极海冰的减少通过调控欧亚大陆大气环流异常, 进而加剧我国东部冬季霾污染。污染排放是内因, 气象条件是外因。霾, 尤其是大范围重度霾的发生, 往往需要内外因的配合。在 2016 年 12 月 16~21 日的这次重度霾过程中, 污染排放在一定程度上受到抑制, 气象条件的作用被突出了, 针对相关大气环流的诊断分析有利于更加清楚地认识不利气象条件的作用和机制。需要注意的是, 虽然 12 月是霾过程比较易发的时段, 但达到如此强度、范围和时长的过程, 也是较为少见的。因此, 本文在分析环流形势时, 为了剔除气候平均态的干扰, 采用的是距平场, 以此来突出本次过程的异常环流信号。

2 数据

(1) 2016 年 12 月 15~22 日中国地面观测数据, 包括能见度、温度、相对湿度和风速等要素, 以及北京观象台的探空观测数据; (2) 2016 年 12 月 15~22 日 NCEP/NCAR 再分析资料中的逐日高度场、风场、相对湿度、表面气温、海平面气压场和表面抬升指数等, 以及各要素的气候平均值; (3) 2016 年 12 月 15~22 日北京、天津、石家庄、太原、西安和郑州等地的逐小时大气成分 (包括细颗粒物 PM_{2.5}、SO₂ 和 NO₂) 观测数据; (4) 由 NOAA/CPC 提供的 2016 年 11~12 月逐日的北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 指数。

3 重度霾过程变化特征

12 月中旬之前, 2016 年中国出现了 7 次大范围、持续性的重度霾过程, 其中有 6 次过程的最高小时 PM_{2.5} 浓度出现在华北地区。这 7 次霾天气过程均出现在秋冬季, 持续时间为 3~4 d (图 1)。12 月 16~21 日, 华北、黄淮及周边地区再一次遭受了严重的霾过程, 受影响面积达到 $268 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中重度霾影响面积为 $71 \times 10^4 \text{ km}^2$ (接近前 7 次过程影响面积的总和), 持续时间达到 6 d (较前几

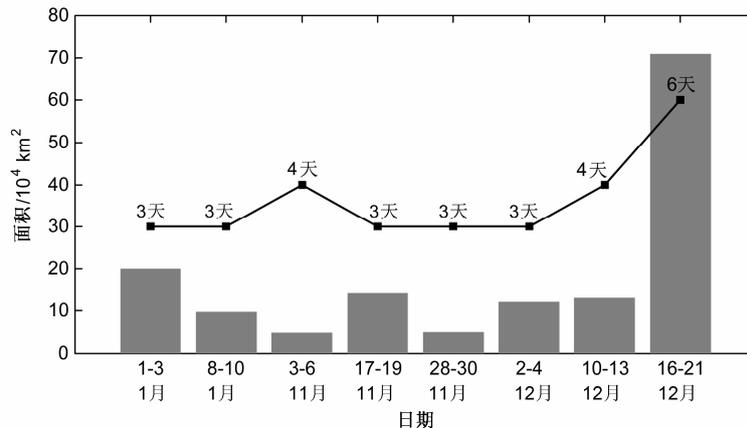


图1 2016年中国主要霾过程的重度霾面积(柱形)和持续天数(折线)

Fig. 1 Areas affected by severe haze episodes (bars) and the number of haze-lasting days (lines) during the main haze processes in China 2016

次过程偏长近1倍)。这次过程是2016年影响范围最广、持续最久、强度最强的霾天气过程。虽然重度霾主要出现在华北、黄淮,但其范围也波及到东北地区中南部、四川盆地和西北地区东部等地(图略)。16日,霾天气首先出现在华北、黄淮地区,其中河北西南到东北部一线的日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最早超过 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。山东、江苏和山西的部分地区的日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也已经超过 $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。16~19日,霾区域持续扩大,日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围向北推进到东北地区中南部,向南推进到长江以北。日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的霾甚至向南影响到广西。从19日开始,整个华北、黄淮地区的日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$,并有部分区域大于 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。经过4 d的积累,霾过程在20日达到最强,不仅存在大范围日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域,超过 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域也推进到长江以南。21日,霾的影响范围明显减小,收缩到华北、黄淮等地。

从能见度(图2)和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(图3)的时间变化可以发现,16~21日霾存在逐渐加重的趋势,但前期(16~18日)日变化比较明显,傍晚到夜间霾加重,早晨至上午能见度和污染物浓度略有好转,而后期能见度持续偏低, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续增高。激光雷达监测显示,华北地区上空霾平均厚度在500 m左右,最高厚度接近1 km(图略)。逐小时观测的 $\text{PM}_{2.5}$ 峰值浓度出现在石家庄,超过 $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (图3a)。除此之外,各省会城市的 NO_2 和 SO_2 浓度也处于明显偏高的状态,与高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加之后加重了污染的危害程度。值得注意

的是,在整个霾过程中太原的 SO_2 浓度明显超过其他城市。从污染物浓度看,河北(以石家庄为代表)是污染最严重的省份, $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 (除太原外)浓度都是最高的。北京的污染主要体现为高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 ,但 SO_2 的浓度相对较低。21日夜间开始,随着地面风速加大,能见度迅速上升,污染物也随之消散。对比之下,污染物消散(21日夜间)的速度明显快于前期(16~21日白天)累积的速度。

4 气象条件和大气环流异常

污染排放是霾发生的物质基础,不利气象条件是重要原因。得益于提前发布的空气重污染红色预警,12月16~21日京津冀及周边地区的污染排放在一定程度上受到抑制。从局地气象条件看,地面小风速和高湿度(图2)以及底层强逆温(图4)是促使霾发生发展的重要因子。能见度与表面风速、相对湿度之间的相关系数分别是0.55和-0.68,均通过99.99%的信度检验。持续的小风速(1 m/s左右)抑制了大气中颗粒物在水平方向上的扩散,高湿的环境则促进了颗粒物吸湿增长,导致能见度显著下降。从变化趋势上看,前期风速和相对湿度的日变化导致能见度在持续下降的大趋势中也表现出显著的日变化,后期相对湿度持续大于70%则带来能见度的持续下降,并达到本次过程的最低值(图2)。强逆温层的发生发展阻止了颗粒物的垂直扩散,可以将大气中的颗粒物限制在浅薄的边界层。以北京为例,16日08:00(北京时间,下同)

就已经有逆温出现，逆温强度（925 hPa 和地面温度差）为 6 °C，随后逆温持续存在了 132 h，直到 21 日 20:00 才被破坏（图 4）。16~18 日，逆温强度也存在显著的日变化，与污染物浓度的日变化相

对应。20 日的霾最严重，08:00 和 20:00 的逆温强度分别为 9 °C 和 8 °C，持续存在强逆温。

北极涛动是北半球冬季中高纬度主要的环流模态之一，当 AO 处于正位相时，华北黄淮的表面

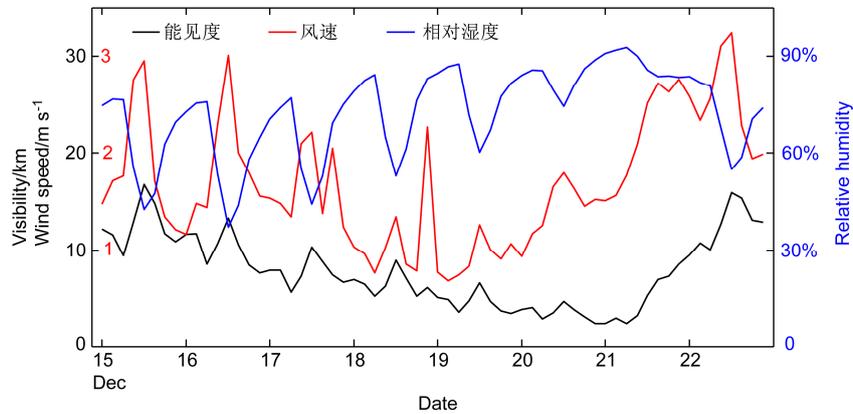


图2 2016年12月15~22日重度霾区域(30°N~42°N, 110°E~122.5°E)能见度、地面风速和相对湿度的逐3小时变化
Fig. 2 Variations of area-mean visibility, surface wind speed, and surface relative humidity in the severe haze area (30°N~42°N, 110°E~122.5°E) during 15~22 Dec 2016

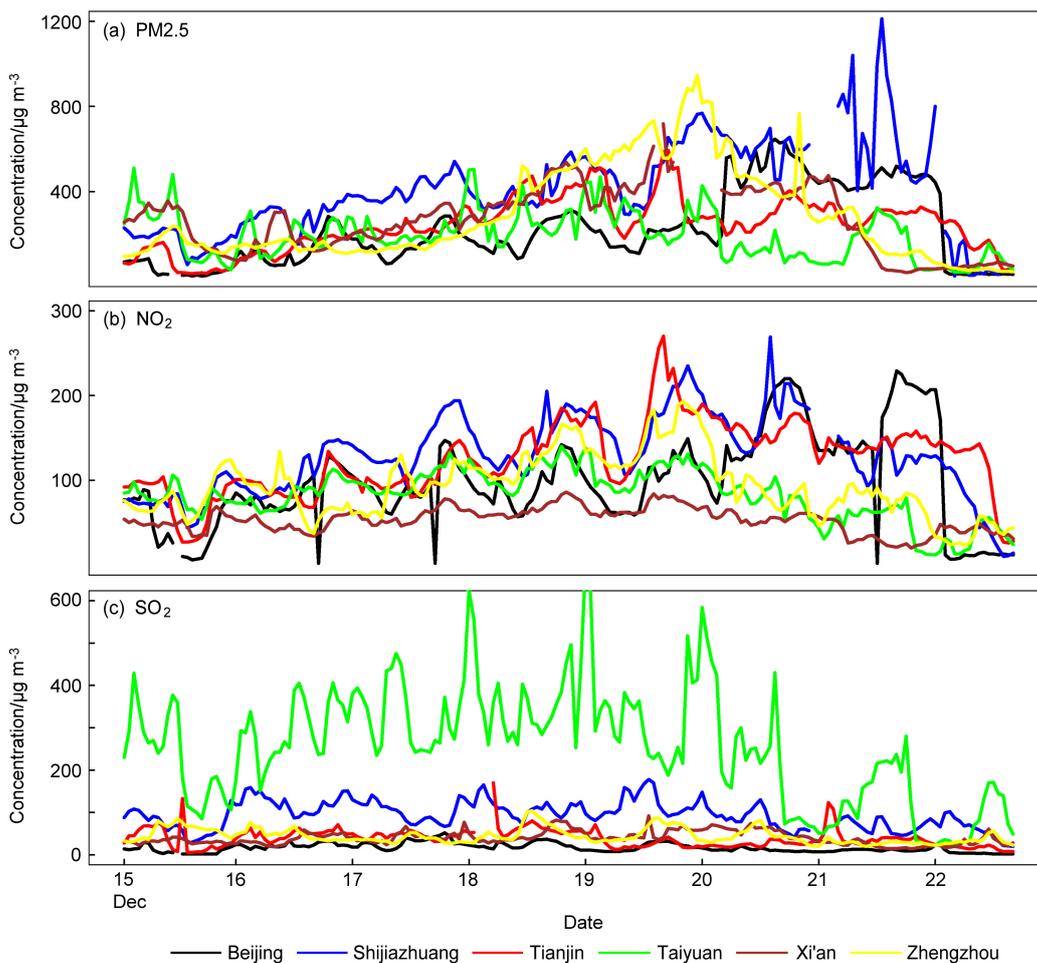


图3 2016年12月15~22日重度霾区域省会城市(a) PM2.5、(b) NO₂和(c) SO₂浓度的逐小时变化
Fig. 3 Hourly variations of (a) PM_{2.5}, (b) NO₂, and (c) SO₂ in the provincial capitals located in the severe haze area during 15~22 Dec 2016

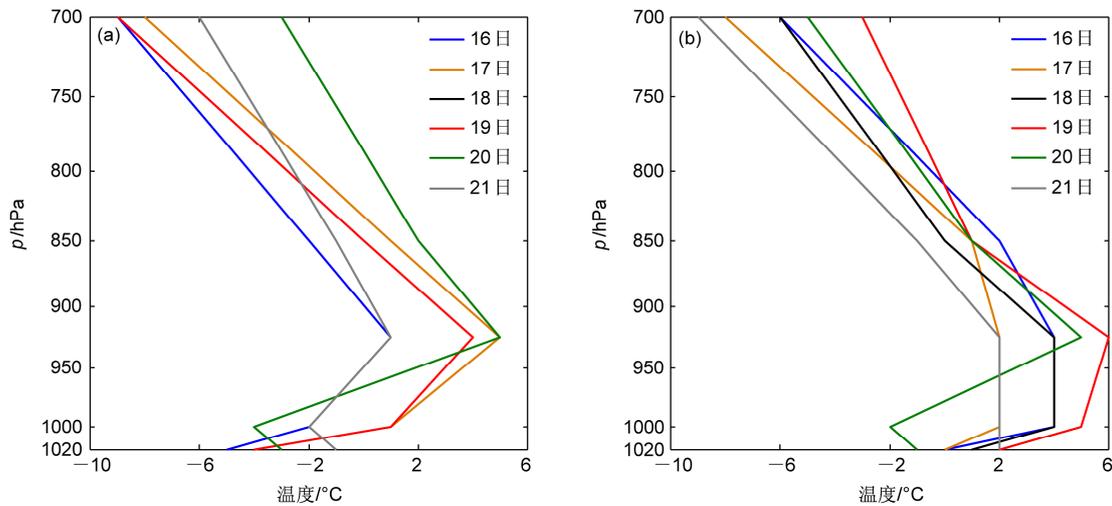


图 4 北京观象台 12 月 16~21 日 (a) 08:00 和 (b) 20:00 温度垂直扩线
Fig. 4 Vertical profiles of temperature in Beijing observatory at (a) 0800 LST and (b) 2000 LST during 16~21 Dec 2016

风速为负距平,有利于霾的发生(尹志聪等, 2015)。16~21 日,海平面气压场为典型的 AO 正位相型(图 5),且 AO 指数从 12 月 7 日开始持续为正(图 6)。在这样的形势下,冷空气被提前地、连续地限制在极区,不易南推到华北黄淮地区,导致地表面温度偏高。华北黄淮地区是明显的弱低压区,周围空气携带颗粒物向华北黄淮有比较弱的辐合。亚洲大陆为海平面气压场负距平(温度正距平显著),西太平洋为正距平(温度距平小),导致陆地和海洋之间的气压差(温度差)减小,诱发出由海洋吹向陆地的异常风场(图 7)。一方面减弱了华北黄淮地区的地面风速,抑制了颗粒物的水平扩散;另一方面带来了大量的水汽(图 8),有利于颗粒物的吸湿增长。同时,华北黄淮地区的表面抬升指数为显著的负距平,通过 95%信度检验,表示该区域底层大气异常稳定,垂直运动非常弱,颗粒物集聚在非常浅薄的边界层内(图 7)。

EA/WR 是大陆性波列,正位相型包括位于欧洲和华北地区的正异常中心和位于西北大西洋中部和里海以北的负中心(Barnston and Livezey, 1987)。WP 遥相关型则处于海洋和大陆的交汇处,正位相型包括堪察加半岛的负中心和东南亚及西太平洋的正异常中心(Barnston and Livezey, 1987)。EA/WR (WP) 遥相关型的大气环流能够将大西洋和欧亚大陆(热带太平洋)的信号传播到东亚地区,进而对东亚冬季气候产生显著的调控作用。在冬季,EA/WR 和 WP 正位相可以通过增强华北平原

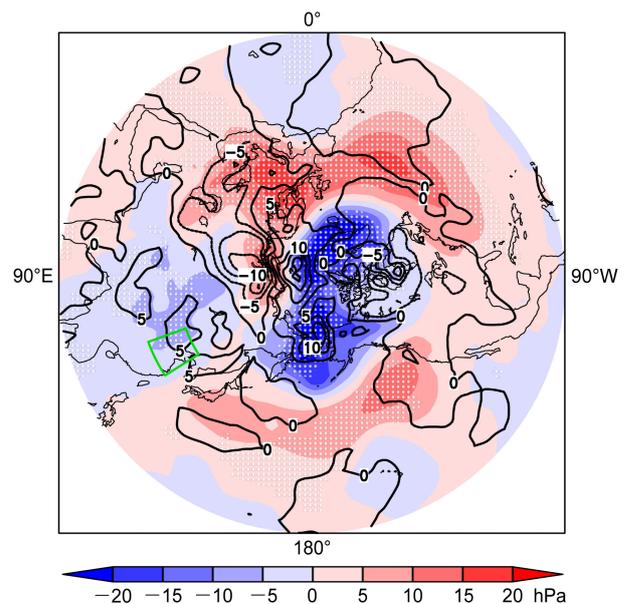


图 5 2016 年 12 月 16~21 日海平面气压(阴影)和表面气温(等值线,单位: °C)距平(白点表示海平面气压通过 95%信度检验,绿框为重度霾区域)

Fig. 5 Spatial patterns of sea level pressure (SLP, shading) and surface air temperature (contours, units: °C) in 16~21 Dec 2016 [white dots indicate SLP anomalies exceeding the 95% confidence level (*t* test) and the green box indicates the severe haze area]

上空的反气旋异常,抑制华北平原上大气中颗粒物的水平和垂直扩散,进而导致冬季霾日数增加(Yin et al., 2017)。16~21 日,在 500 hPa 位势高度异常分布中,EA/WR 和 WP 两个波列的正位相能够非常清晰地被识别出来,并且每个异常中心都通过

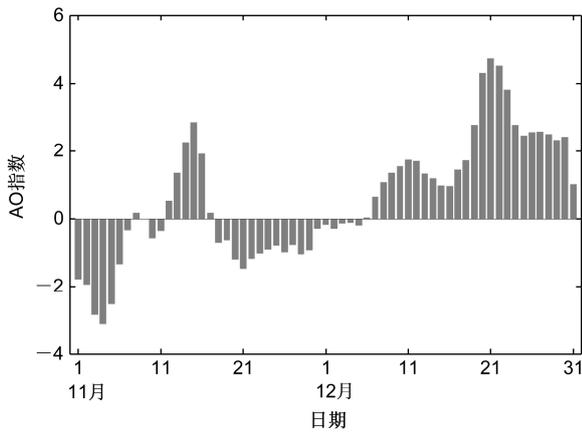


图 6 2016 年 11~12 月逐日的 AO 指数
Fig. 6 Daily Arctic Oscillation (AO) indices from Nov to Dec in 2016

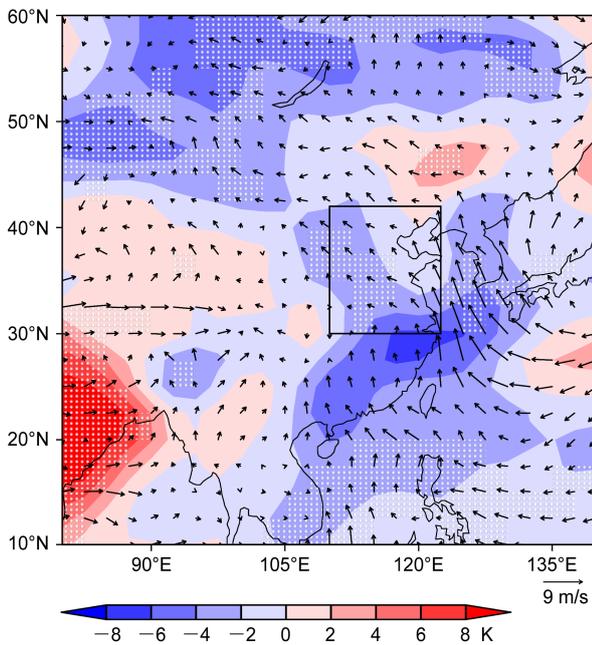


图 7 2016 年 12 月 16~21 日表面抬升指数 (阴影) 和表面风 (箭头) 距平 (白点表示表面抬升指数通过 95% 信度检验, 矩形为重度霾区域)
Fig. 7 Spatial patterns of lifted index (shading) and surface wind (arrows) anomalies during 16~21 Dec 2016 [white dots indicate surface lifted index anomalies exceeding the 95% confidence level (*t* test) and the green box indicates the severe haze area]

95%的信度检验 (图 9)。同时, WP 正位相与东亚急流的强度密切相关。200 hPa 上, 东亚急流明显偏弱, 且位置偏北, 意味着东亚, 尤其是华北黄淮地区的冷空气活动明显偏弱, 有利于霾的发生。华北黄淮上空的异常反气旋在 850 hPa (图 8) 和 500 hPa (图 9) 均有很清晰的表现, 不仅能够有效地抑制底层的垂直运动, 而且其后部暖湿的偏南风异常

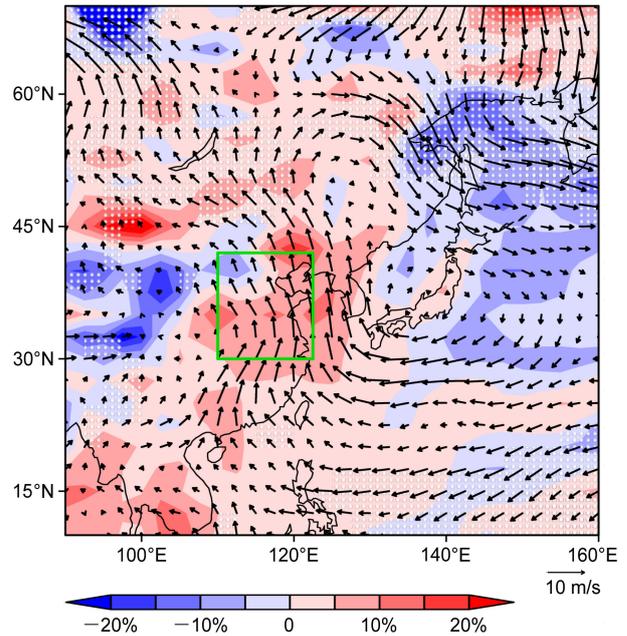


图 8 2016 年 12 月 16~21 日表面相对湿度 (阴影) 和 850 hPa 风场 (箭头) 距平 (白点表示 850 hPa 风场通过 95% 信度检验, 矩形为重度霾区域)
Fig. 8 Distributions of surface relative humidity (shading) and 850 hPa wind anomalies (arrows) in 16~21 Dec 2016 [white dots indicate 850 hPa wind anomalies exceeding the 95% confidence level (*t* test) and the green box indicates the severe haze area]

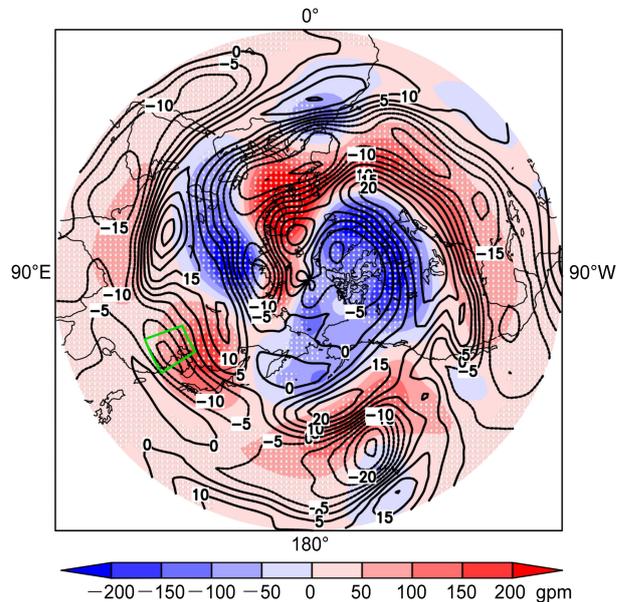


图 9 2016 年 12 月 16~21 日 500 hPa 高度场 (阴影) 和 200 hPa 纬向风 (等值线, 单位: m/s) 距平 (白点表示 500 hPa 高度场通过 95% 信度检验, 绿框为重度霾区域)
Fig. 9 Distributions of geopotential height at 500 hPa (shading) and zonal wind at 200 hPa (contours, units: m/s) anomalies in 16~21 Dec 2016 [white dots indicate geopotential height at 500 hPa anomalies exceeding the 95% confidence level (*t* test) and the green box indicates the severe haze area]

还能在减弱水平风速的同时, 增强向重度霾区域的水汽输送。大尺度的大气环流异常通过调控华北黄淮上空的反气旋异常, 为重度霾的发生提供了小风速、高湿度和强逆温的局地环境。

5 结论与讨论

2016 年 12 月 16~21 日, 华北、黄淮及周边地区遭受了严重的霾过程, 重度霾影响面积为 $71 \times 10^4 \text{ km}^2$, 持续时间达到 6 d, 过程最高小时 PM_{2.5} 浓度超过 $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在整个过程中, 霾存在逐渐加重的趋势, 但前期日变化比较明显, 后期能见度持续偏低, PM_{2.5} 浓度持续增高。除 PM_{2.5} 浓度高之外, 各省会城市的 NO₂ 和 SO₂ 浓度也处于明显偏高的状态, 叠加效应进一步加重了污染的危害程度。中高层大气中 EA/WR 和 WP 波列表现为显著的正位相型, 海平面气压则为典型的 AO 正位相型。在它们的综合影响下, 华北黄淮局地的环流场和气象条件极有利于霾天气的发生。华北黄淮上空显著的异常反气旋能够有效抑制垂直运动, 并减弱重度霾区域的水平风速。与之对应, 近地面层为明显的弱低压区和偏南风异常, 且逆温强烈发展。从局地气象条件看, 地面小风速和高湿度以及浅薄的边界层是促使本次重度霾发生的重要因子。

污染排放是霾发生的物质基础, 不利气象条件是重要原因。针对此次过程, 中华人民共和国环境保护部于 12 月 15 日提前发布了京津冀及周边地区重污染天气预警提示。随后, 有接近 30 个城市启动了空气重污染(或霾)红色预警, 接近 20 个城市启动了橙色预警。启动预警的城市均采取工业企业停产限产、工地停工、机动车限行等措施, 在一定程度上降低了污染物排放量。需要注意的是, 2016 年 12 月整月的霾都比较严重(图 1), 我们选取的是限排措施最严格, 但污染却最严重的一次过程进行分析。在这样的前提下, 极端不利气象条件的作用变得更加显著, 也更容易被清晰地诊断出来。EA/WR 和 WP 等遥相关型除了自身可以调控华北黄淮上空的局地环流和气象条件外, 还能够有效地将前期和远处的外强迫的影响传递到华北黄淮。本文仅针对霾过程本身和相关的气象条件、大气环流异常进行了诊断分析, 并没有涉及排放和气象条件之间的相互作用, 也没有针对前期外强迫的作用机制开展研究。除此之外, 2016 年 12 月霾显

著偏多的成因, 依然是一个值得关注的科学问题。例如, 2016 年冬季东亚冬季风偏弱, 气温偏暖是否会对霾偏多有一定的贡献? 2015/2016 年发生的强 El Niño 气候事件是否会延迟影响到 2016 年 12 月的霾? 这些没有涉及的问题对于加深对重度霾成因的理解是非常重要的, 也是下一步需要开展的工作。

参考文献 (References)

- Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (6): 1083–1126, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
- 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.*, 120 (12): 5895–5909, doi:10.1002/2015JD023225.
- Chen Y, Ebenstein A, Greenstone M, et al. 2013. Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110 (32): 12936–12941, doi:10.1073/pnas.1300018110.
- 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 Cong, Zhang Bihui, Zhang Hengde. 2015. Analysis on boundary layer characteristics in fog and haze processes in North China from January to February 2013 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 41 (9): 1144–1151, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.09.012.
- Li Q, Zhang R H, Wang Y. 2016. Interannual variation of the winter-time fog-haze days across central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon [J]. *International Journal of Climatology*, 36 (1): 346–354, doi:10.1002/joc.4350.
- 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 2014. 北京地区冬夏季持续性雾—霾发生的环境气象条件对比分析 [J]. *环境科学*, 35 (6): 2031–2044. Liao Xiaonong, Zhang Xiaoling, Wang Yingchun, et al. 2014. Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 35 (6): 2031–2044, doi:10.13227/j.hjlx.2014.06.001.
- 缪育聪, 郑亦佳, 王姝, 等. 2015. 京津冀地区霾成因机制研究进展与展望 [J]. *气候与环境研究*, 20 (3): 356–368. Miao Yucong, Zheng Yijia, Wang Shu, et al. 2015. Recent advances in, and future prospects of, research on haze formation over Beijing–Tianjin–Hebei, China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 20 (3): 356–368, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14255.
- Simon S. 2013. World health organization: Outdoor air pollution causes cancer [EB/OL]. 2013-10-17. <http://www.cancer.org/cancer/news/world-health-organization-outdoor-air-pollution-causes-cancer>.
- 孙彧, 牛涛, 乔林, 等. 2016. 华北地区雾和霾天气环流特征聚类分析 [J]. *气候与环境研究*, 21 (5): 601–613. Sun Yu, Niu Tao, Qiao Lin, et al. 2016. Cluster analysis of the circulation situation occurring during fog and haze weather in North China [J]. *Climatic and Environmental*

- Research (in Chinese), 21 (5): 601–613, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15119.
- Wang H J, Chen H P, Liu J P. 2015. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 8 (1): 1–9, doi:10.3878/AOSL20140081.
- 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 [J]. *中国科学院院刊*, 28 (3): 353–363. Wang Y S, Yao L, Liu Z R, et al. 2013. Formation of haze pollution in Beijing–Tianjin–Hebei region and their control strategies [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 28 (3): 353–363, doi:10.3969/j.issn.1000-3045.2013.03.009.
- 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 Zhicong, Wang Huijun, Yuan Dongmin. 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]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 60 (15): 1395–1400, doi:10.1360/N972014-01348.
- 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]. *Science China Earth Sciences*, 58 (8): 1370–1376, doi:10.1007/s11430-015-5089-3.
- Yin Z C, Wang H J, Chen H P. 2017. Understanding severe winter haze events in the North China Plain in 2014: Roles of climate anomalies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17 (3): 1641–1651, doi:10.5194/acp-17-1641-2017.
- 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 Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 57 (1): 26–35, doi:10.1007/s11430-013-4774-3.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾—霾成因及其治理的思考 [J]. *科学通报*, 58 (13): 1178–1187. Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (13): 1178–1187, doi:10.1360/972013-150.