



Research  
Climate Change—Review

## 华北地区持续性强霾事件发生的环境与动力条件

丁一汇<sup>a,\*</sup>, 吴萍<sup>a,b,c</sup>, 柳艳菊<sup>a</sup>, 宋亚芳<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Climate Center, Beijing 100081, China

<sup>b</sup> Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

<sup>c</sup> College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 July 2016

Revised 8 November 2016

Accepted 11 November 2016

Available online 13 March 2017

#### 关键词

华北地区

持续性强霾事件

环境条件

动力条件

### 摘要

本文是近期针对华北地区霾的长期变化特征、持续性强霾事件发生的环境和动力条件方面研究的一个总结。华北地区近 50 年来霾日呈现明显的上升趋势,尤其是进入 21 世纪以来,霾日增加明显。同时,持续性强霾事件的发生频次也呈现类似的上升趋势。华北地区霾污染事件频发可以归因于不利的气象环境条件和人为排放的大量污染物的共同作用。气象环境条件方面主要表现为:在气候变暖的大背景下,华北地区冬季气温的持续上升、地面风速的减小以及大气稳定度的加强均对霾日的增加有显著影响。厄尔尼诺 (El Nino) 年冬季,东亚大槽偏弱,冷空气活动弱,华北地区盛行异常偏南风,有利于霾天气的形成;而拉尼娜 (La Nina) 年冬季,东亚大槽偏强,冷空气活动强,华北地区盛行异常偏北风,不利于霾天气的形成。华北地区持续性强霾事件主要发生在平直西风和高压脊型两类环流形势下,对流层中低层为持续而深厚的下沉气流,使大气边界层厚度减少、污染物扩散能力减弱,有利于霾天气的维持和加剧。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the 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

近年来,中国东部的区域持续性强霾污染事件多发频发,京津冀、珠三角和长三角等城市经济带尤为显著[1–3],其中最典型且影响最大的地区为京津冀区域[4]。霾天气的频繁发生目前已成为京津冀严重的环境问题之一。

从造成霾频发的原因来看,除了与近年来中国经济的快速发展和城市化进程加快造成的大量污染物的排放有关外,人类活动导致的气候变暖所引起的气候条件的变化很可能也是原因之一[3,5–7]。大气对污染物的稀释扩散能力随气象条件的不同而具有很大差异,尤其是在

不同的大尺度环流背景场下,局地气象条件及边界层结构等都可能发生变化,从而对大气污染的发生产生显著的影响[8–13]。因而研究环流条件以及相关的环境和动力因子与霾形成的关系是认识霾事件,尤其是持续性强霾事件发生的途径之一。本文是根据近期关于华北地区持续性强霾事件的环境和动力条件方面的研究结果进行的一个总结。

## 2. 华北地区霾日的时空分布特征

华北地区是我国霾多发区。从年均霾日的空间分布来看[图1(a)][3],霾多发区主要集中在北京、天津和河

\* Corresponding author.

E-mail address: [dingyh@cma.gov.cn](mailto:dingyh@cma.gov.cn)

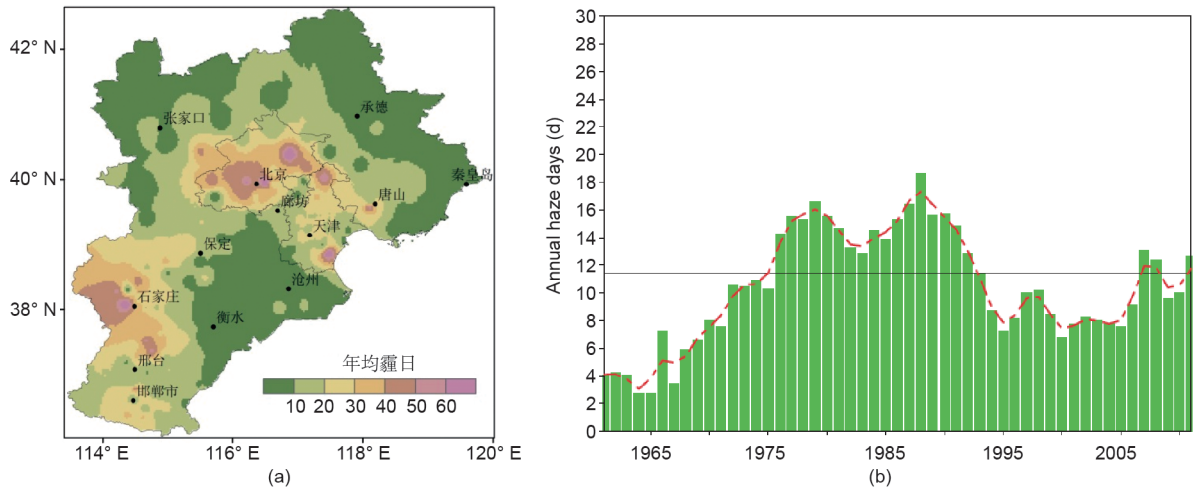


图1. 华北地区年均霾日的空间分布(a)和时间变化序列(b)。引自文献[3]。

北的西南部等经济比较发达、人口比较密集的地区，年均发生霾的频次超过30天，北京城区、天津北部、石家庄、邢台及唐山等地区年均霾日可达50天以上。华北地区霾发生频次在1979年之前是明显快速上升的，在1976—1991年这15年达到高峰，平均每年约为14~15天，以后一直下降，但从2005年又开始上升[图1(b)][3]。从季节分布上来看，霾主要发生在冬季，其次是春、秋季，夏季霾发生频次最少[5,11]。

近年来我国不断增多的霾天气表现出持续性增强的显著特点，一旦出现霾，往往持续数日甚至更长时间，对人体健康造成严重危害。Wu等[14]对1981—2013年华北地区持续性霾事件进行了识别，发现华北地区持续性霾天气大多发生在秋季和冬季，大部分可持续3天及以上，并呈上升趋势。张英娟等[15]定义连续2天及以上有烟或霾发生则为一次持续性霾事件，她们也发现近30年华北地区持续性霾日呈上升趋势，尤其是北京、天津和河北的西南部地区，持续性霾日显著增加(图2)，持续性霾日的增加是总的霾天气增加的主要原因。持续性霾高发区的范围也呈现年代际增大趋势，2000年后扩展的趋势显著加速。

### 3. 华北地区霾日发生的环境条件

一般来说，霾天气形成的条件主要有两个：一是大气中污染物总量较多；二是大气层结稳定，风力较小。当空气中的污染物含量较多时，如果大气层结比较稳定，污染物不能很快扩散出去，就会形成霾天气。可以说，霾天气增加的原因包括人类活动和气候变化两方面。与华北地区冬季霾日呈上升的趋势类似，近地面气

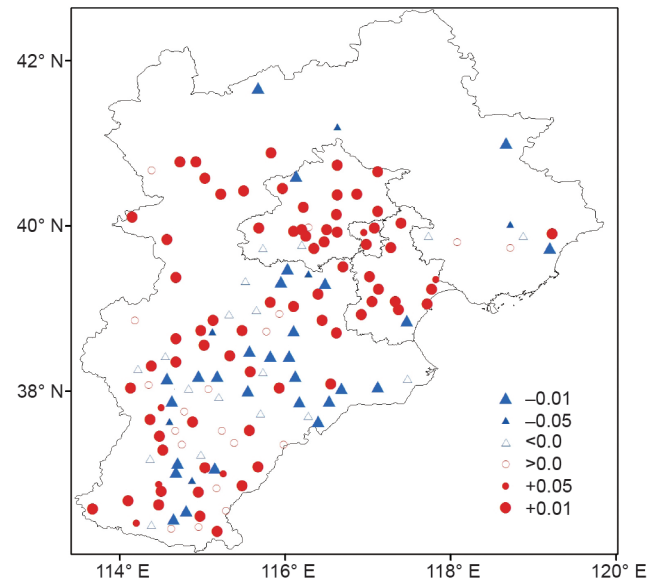


图2. 1981—2013年华北地区持续性霾发生频次的变化趋势(根据文献[15]改绘；圆形符号表示霾发生频次呈增加趋势，三角符号表示霾发生频次呈减少趋势，小的实心符号表示上升或下降趋势通过0.05水平的显著性检验，大的实心符号表示上升或下降趋势通过0.01水平的显著性检验，空心符号表示上升或下降趋势未通过显著性检验)。

温也呈上升趋势，而地面风速相反，呈明显的下降趋势(图3)[7]。气温的增加会造成大气持水量增加，有利于霾粒子的吸湿增长，同时地面风速的减小不利于污染物的扩散[5]，因此，气温的增加和风速的减小为霾频次的增加提供了有利的气候条件。定义日最大风速小于或等于 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为弱风日，日最大风速大于 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为强风日，发现华北地区弱风日数与强风日数基本呈相反的变化趋势，弱风日数基本是增加的，而强风日数是减少的(表1)[7]，这对空气污染物的扩散是十分不利的，有利于霾天气的发生。其中对华北地区冬季霾日增加趋势影响最显著的是日最大风速为 $7\sim 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的日数减少。

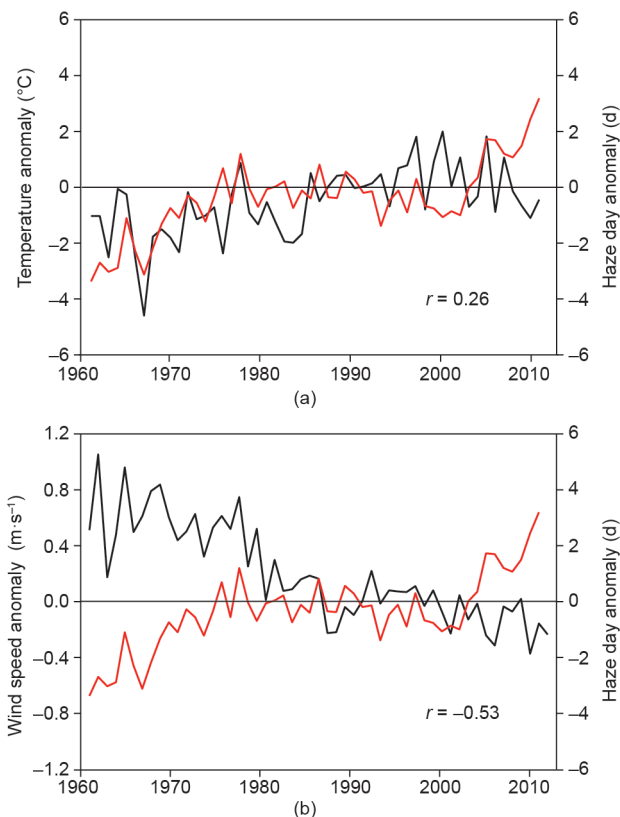


图3. (a)1961—2012年华北地区冬季气温(黑线)和霾日(红线)距平的时间变化曲线( $r$ 表示冬季霾日与近地面气温的相关系数); (b)1961—2012年华北地区冬季地面风速(黑线)和霾日(红线)距平的时间变化曲线( $r$ 表示冬季霾日与地面风速的相关系数)[7]。

表1 华北地区冬季霾日与不同风力等级日数的相关关系[7]

	最大风速 ( $v_{f,max}$ ) 等级	相关系数
弱风( $v_{f,max} \leq 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v_{f,max} \leq 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>0.08</b>
	$2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < v_{f,max} \leq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>0.32<sup>a</sup></b>
	$3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < v_{f,max} \leq 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>0.32<sup>a</sup></b>
	$4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < v_{f,max} \leq 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>0.29<sup>b</sup></b>
	$5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < v_{f,max} \leq 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>0.06</b>
强风( $v_{f,max} > 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < v_{f,max} \leq 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>-0.09</b>
	$7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < v_{f,max} \leq 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>-0.40<sup>a</sup></b>
	$8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < v_{f,max} \leq 9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>-0.32<sup>a</sup></b>
	$9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < v_{f,max} \leq 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>-0.34<sup>a</sup></b>
	$v_{f,max} > 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	<b>-0.25<sup>b</sup></b>

加粗表示该等级风速日数呈上升趋势; 下划线表示该等级风速日数呈下降趋势。

<sup>a</sup>表示相关系数通过0.05水平的显著性检验。

<sup>b</sup>表示相关系数通过0.01水平的显著性检验。

大气层结稳定度的变化影响空气的垂直交换能力, 大气层结越稳定越有利于形成霾天气。由1961—2012年冬季大气热力不稳定指数 $A$ 和霾日距平的时间变化曲线(图4)[7]可以看出,  $A$ 指数与霾日存在显著的负相关关系, 2002年之后 $A$ 指数均为负距平, 大气处于相对稳定的状态, 而冬季霾日也是从2002年前后开始快速增加。

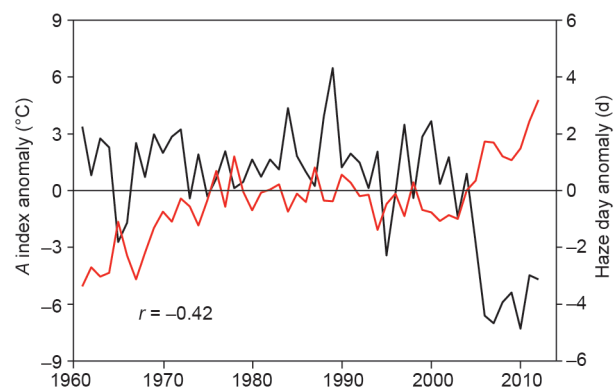


图4. 1961—2012年华北地区冬季 $A$ 指数(黑线)和霾日(红线)距平的时间变化曲线( $r$ 表示冬季霾日与 $A$ 指数的相关系数)[7]。

这表明21世纪以来, 稳定的大气导致空气的垂直方向交换能力变弱, 大量的污染物被限制在浅层大气, 并逐渐累积成霾。

## 4. 华北地区霾日发生的环流和动力条件

### 4.1. 环流特征

华北持续性强霾事件可分为两类: 平直西风型和高压脊型[14]。当平直西风型霾事件发生时, 华北地区处于平直西风环流中, 中高纬度的冷空气向华北地区输送较弱。当高压脊型霾事件发生时, 华北地区处于高压脊前西北气流控制。

在持续性强霾事件发生时, 华北地面气压为负距平控制, 东面海洋为正距平控制[图5(a)][16], 造成偏北风减弱、气温升高。华北地区在对流层低层以弱的偏西风和西南风距平为主[图5(b)][16]。偏西风和西南风气流有助于将周边地区的污染物向华北地区输送, 并且由于北部燕山的阻挡, 使得污染物不易向外扩散而聚集在该地区, 污染物浓度加大。同时, 西南风也有利于将低纬度海洋的暖湿水汽输送到华北, 为霾粒子的吸湿增长提供了充足的水汽条件, 有利于霾天气的发生和维持。

从气温的垂直变化(图6)[16]来看, 持续性强霾事件发生时, 对流层低层气温均上升, 尤其850~1000 hPa气温上升更加明显, 造成对流层低层产生逆温, 大气层结相对稳定, 污染物的垂直扩散能力减弱, 从而导致霾天气长时间维持。

另外, 翟盘茂等[17]和袁媛等[18]研究发现强El Nino事件导致的大气环流异常是导致中国东部冬季重度霾天气频发的重要原因之一。从气候尺度研究1961—2012年厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)事件造成的冬季大尺度环流异常特征对霾天气产生的可能影响来看, El Nino



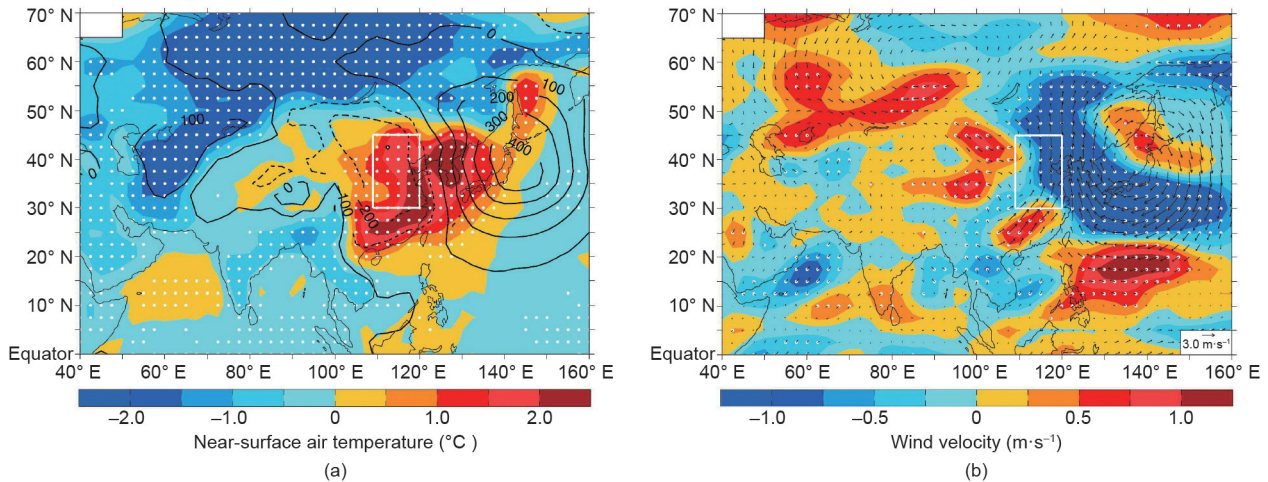


图5. 持续性强霾事件合成的海平面气压和近地面温度距平场[(a)等值线表示海平面气压距平, 单位: Pa; 阴影表示近地面温度距平, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ]以及风场距平[(b)阴影表示风速距平, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ][16]。

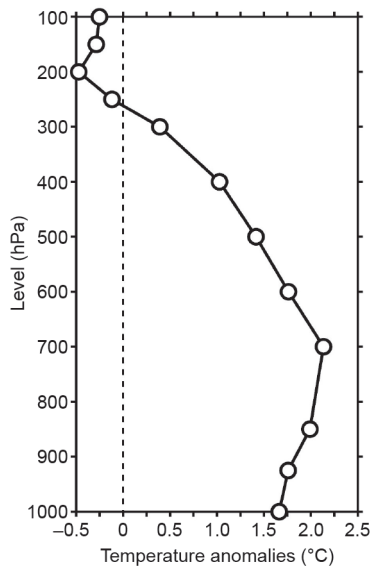


图6. 华北地区持续性强霾事件气温距平的垂直分布[16]。

年冬季, 欧亚中高纬度500 hPa以上为高度场负距平控制, 而东亚地区东部为高度场正距平控制[图7(a)], 表明东亚大槽偏弱, 东亚冬季风偏弱, 偏北风的输送和冷空气的活动均较弱, 有利于霾天气的发生; 而La Nina年冬季500 hPa高度场则呈现相反分布形势[图7(b)], 乌拉尔山地区为高度场正距平控制, 东亚东部为负距平控制, 东亚冬季风偏强, 污染物易扩散, 不利于霾天气的形成。

从850 hPa风场距平分布来看, El Nino年冬季[图8(a)], 菲律宾地区为异常反气旋环流, 其西北侧的异常西南风持续地输送到我国东部地区, 这不仅会减弱东亚冬季风强度, 不利于高纬度地区冷空气的南扩, 污染物的扩散能力降低, 同时偏南风距平有利于污染物和来自低纬度海洋的暖湿水汽输送到华北地区, 有利于霾天气的发生。而La Nina年冬季[图8(b)], 中国东部大部分地

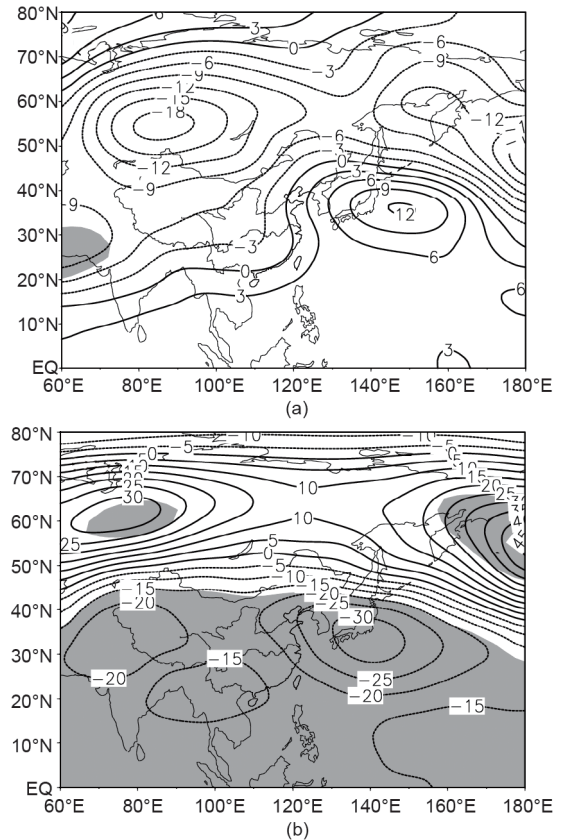


图7. El Nino年(a)和La Nina年(b)冬季500 hPa高度距平场。阴影表示通过0.05水平的显著性检验区域。

区均处于偏北风距平的控制下, 冷空气向南影响扩大, 冬季风偏强, 有利于污染物的扩散, 偏北风距平也不利于海洋暖湿水汽向我国华北地区输送, 从而不利于霾天气的发生。

#### 4.2. 动力条件

垂直运动对污染物的垂直扩散稀释作用是十分重要

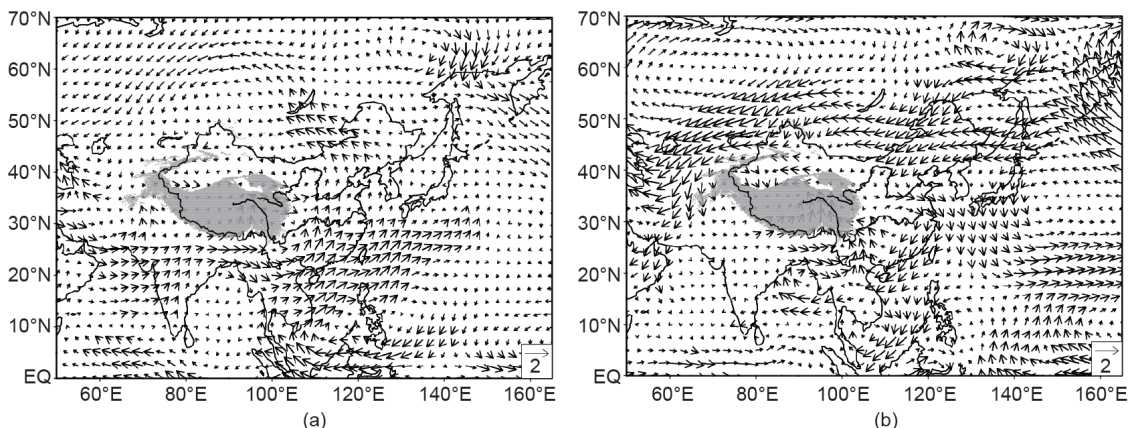


图8. El Niño年(a)和La Niña年(b)冬季850 hPa风场距平场。大箭头表示风场距平通过0.05水平的显著性检验。

的，它是影响霾发展和维持的一个关键动力因子之一。在两类霾事件发生期间，华北地区风场散度自上而下呈现“辐合-辐散-辐合”的三层结构[图9(a)、(b)]，这种上层辐合下层辐散的风场分布有利于气流产生下沉运动[图9(c)、(d)] [14]。持续性霾事件发生时近地层是浅薄的辐合层，这有利于周边区域的污染物向华北地区汇聚，而整个中低层大气均处于下沉气流的控制，表明霾事件发生时的大气是非常静稳的，这将会抑制污染物的

垂直扩散，对霾天气的维持和加剧是很有利的。

Wu等[14]进一步给出持续性强霾污染事件形成机制的概念图(图10)。在持续性强霾发生期间，华北地区处于纬向西风气流或脊前西北气流控制，边界层内为弱的西南风、东南风或偏西风，有利于向华北地区输送污染物和水汽。在纬向西风气流或脊前西北气流的环流形势下，华北地区对流层中低层易产生持续而深厚的下沉气流，致使边界层厚度减小、大气环境容量降低，从而

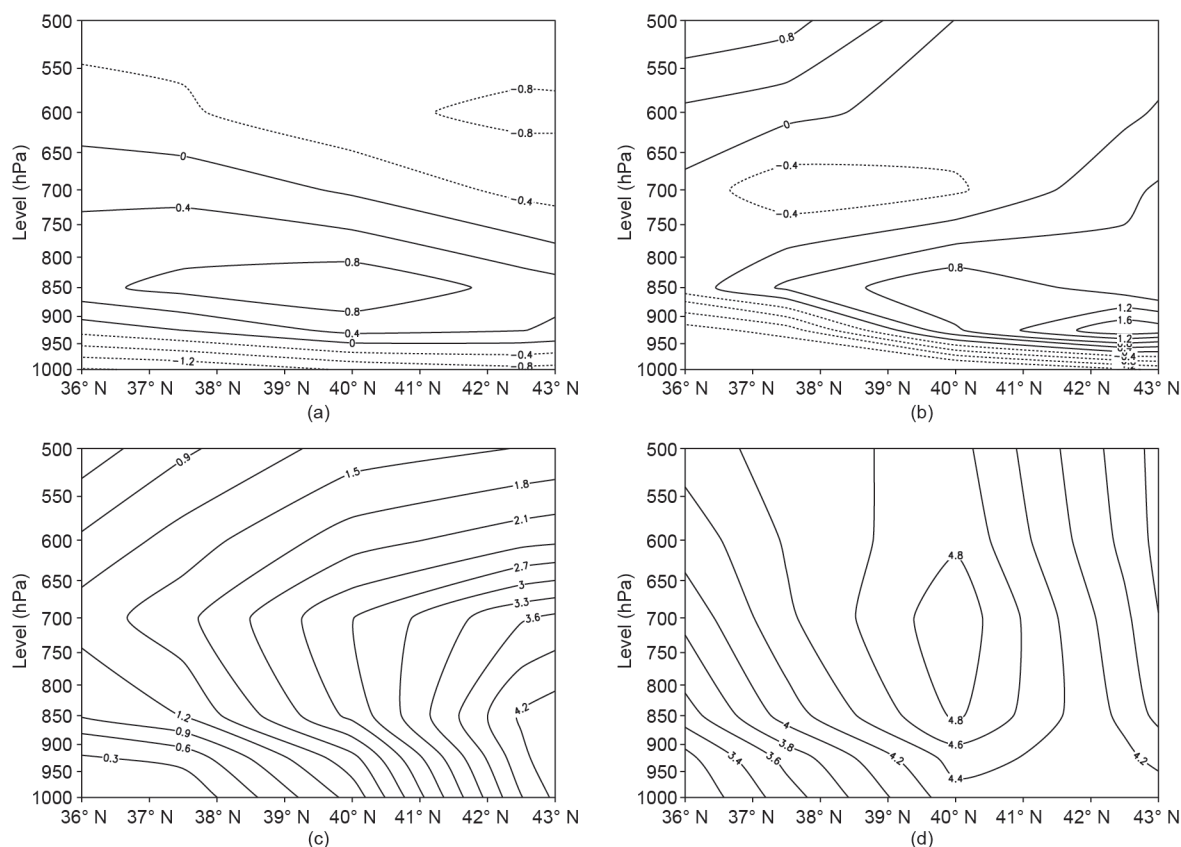


图9. 华北地区风场散度[(a)和(b)，单位： $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ]和垂直速度[(c)和(d)， $w = dp/dt, w > 0$ 表示下沉运动， $w < 0$ 表示上升运动，单位： $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ]的气压-纬度剖面图[(a)和(c)表示平直西风型，(b)和(d)表示高压脊型][14]。

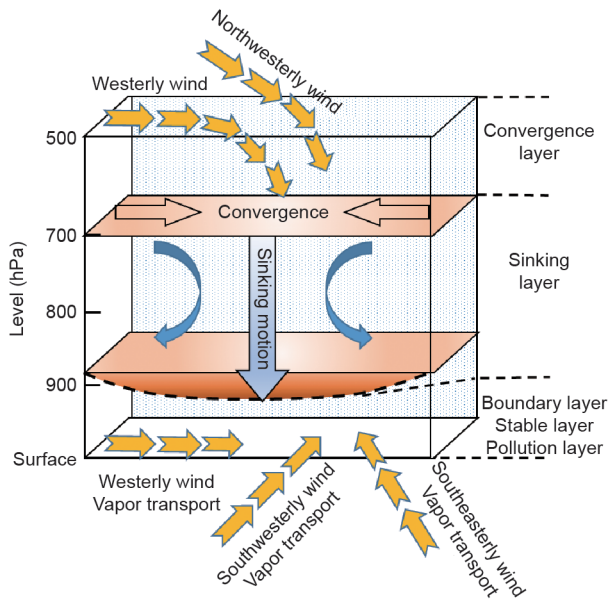


图10. 持续性霾事件形成的动力机制概念图[14].

大量污染物将聚积在更小厚度的边界层内，不易向上扩散，污染物浓度增加，有利于霾事件的持续和加剧。

## 5. 结论

本文对华北地区霾日的气候特征以及发生的环境条件和动力条件进行了总结，得到以下主要结论：

(1)华北地区霾频发地区主要集中在北京、天津及河北西南部，霾发生频次总体呈现出显著的上升趋势，尤其是进入21世纪以来，霾日增加明显。与霾日增加趋势类似，持续性霾事件也呈明显的增长趋势。

(2)在气候变暖的大背景下，华北地区冬季气温的持续上升对霾日的增加影响显著，地面风速的减小、强风日数的减少以及弱风日数的增加均使得霾发生频次增加。冬季气温的增加也有利于大气层结稳定度的加强，尤其是21世纪以来，华北地区大气层结稳定度明显加强，非常有利于霾的发生和维持。

(3)El Nino年冬季，东亚大槽偏弱，冷空气活动弱，异常偏南风有利于将污染物和来自低纬度海洋的暖湿水汽输送到华北地区，有利于霾天气的发生；La Nina年冬季环流形势则相反，东亚大槽偏强，冷空气活动强，异常偏北风不利于低纬度海洋的暖湿水汽输送到华北地区，从而不利于霾天气的形成。

(4)华北地区持续性强霾发生期间，华北地区处于纬向西风气流或脊前西北气流控制，华北大气边界层内主要以异常西南风为主，地面风速较小，有利于霾天气的形成。另外，华北地区对流层中低层产生的深厚而稳定

的下沉气流，使得大气边界层厚度减少、大气环境容量降低，大量的污染物和水汽不易向上扩散，为霾天气的维持和加剧提供了显著的动力条件。

## 致谢

本文由公益性行业科研专项(GYHY201406001)和国家自然科学基金资助项目(41401056)资助。

## Compliance with ethics guidelines

Yihui Ding, Ping Wu, Yanju Liu, and Yafang Song declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Chan CK, Yao X. Air pollution in mega cities in China. *Atmos Environ* 2008; 42(1):1–42.
- [2] 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 Sinica* 2010; 68(5):680–8. Chinese.
- [3] Ding Y, Liu Y. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in the recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. *Sci China Earth Sci* 2014;57(1):36–46.
- [4] Wang Y, Zhang J, Wang L, Hu B, Tang G, Liu Z, et al. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Adv Earth Sci* 2014;29(3):388–96. Chinese.
- [5] Hu Y. Temporal variability and spatial distribution of haze in China and its association with climate change [dissertation]. Lanzhou: Lanzhou University; 2009. Chinese.
- [6] Zhang P, Guan Z, Shao P, Jiang Y, He J. Interdecadal changes in wintertime hazy days in Jiangsu Province and their association with circulation anomalies and regional warming trends. *J Trop Meteorol* 2015;31(1):103–11. Chinese.
- [7] Wu P, Ding Y, Liu Y, Li X. Influence of the East Asia winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China. *Acta Meteorol Sinica* 2016;74(3):352–66. Chinese.
- [8] Flocas H, Kelessis A, Helmis C, Petrakakis M, Zoumakis M, Pappas K. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area. *Theor Appl Climatol* 2009;95(3):265–77.
- [9] Wang L, Zhang N, Liu Z, Sun Y, Ji D, Wang Y. The influence of climate factors, meteorological conditions, and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region during January 2013. *Adv Meteorol* 2014;2014(7):1–14.
- [10] Zhao X, Zhao P, Xu J, Meng W, Pu W, Dong F, et al. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain. *Atmos Chem Phys* 2013;13(11):5685–96.
- [11] Song L, Gao R, Li Y, Wang G. Analysis of China's haze days in the winter half-year and the climatic background during 1961–2012. *Adv Climate Change Res* 2014;5(1):1–6.
- [12] Zhang R, Li Q, Zhang R. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze events over eastern China in January 2013. *Sci China Earth Sci* 2014;57(1):26–35.
- [13] Fu G, Xu W, Yang R, Li J, Zhao C. The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years. *Atmos Chem Phys* 2014;14(21):11949–58.
- [14] Wu P, Ding YH, Liu Y. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Adv Atmos Sci* 2017;34(4):429–40.
- [15] Zhang Y, Zhang P, Wang J, Qu E, Liu Q, Li G. Climatic characteristics of persistent haze events over Jingjinji during 1981–2013. *Meteorol Mon* 2015;40(3):311–8. Chinese.
- [16] Chen H, Wang H. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012. *J Geophys Res-Atmos* 2015;120(12):5895–909.
- [17] Zhai P, Yu R, Guo Y, Li Q, Ren X, Wang Y, et al. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate. *Acta Meteor Sinica* 2016; 74(3): 309–21.
- [18] Yuan Y, Zhou N, Li C. Correlation between haze in North China and super El Niño events. *Chinese J Geophys* 2017; 60(1): 11–21.