

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.

1981—2013 年京津冀持续性霾天气的气候特征^{*1}

张英娟^{1,2} 张培群³ 王 冀¹ 曲恩杉⁴ 刘秋锋³ 李 刚⁵

1 北京市气候中心, 北京 100089

2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

3 国家气候中心, 北京 100081

4 The Hotchkiss School, Lakeville, CT 06039-2141, USA

5 北京中研世纪科技有限公司, 北京 100068

提 要: 近年来我国不断增多的霾天气的一个显著特征就是持续性增强, 为此, 本文利用 1981—2013 年京津冀霾日统计资料, 对京津冀持续性霾事件(定义为连续 2 d 及以上有烟或霾发生的天气)的基本时空分布特征和变化趋势进行了详细分析, 结果表明: 京津冀地区 1981—2013 年非持续性霾日数没有显著的变化趋势, 持续性霾日数及其所占百分率均呈显著增加趋势, 持续性霾日数的增加是总的霾天气增加的主要原因。持续性霾天气主要集中在北京、天津北部和河北西南部, 年平均持续性霾日数占到霾的年总日数一半以上。持续性霾高发区的范围呈现年代际增大趋势, 2000 年之后扩展趋势显著加速。

关键词: 京津冀地区, 持续性霾事件, 气候特征

中图分类号: P461

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 03. 006

Climatic Characteristics of Persistent Haze Events over Jingjinji During 1981—2013

ZHANG Yingjuan^{1,2} ZHANG Peiqun³ WANG Ji¹ QU Enshan⁴
LIU Qiufeng³ LI Gang⁵

1 Beijing Municipal Climate Centre, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

3 National Climate Centre, Beijing 100081

4 The Hotchkiss School, Lakeville, CT 06039-2141, USA

5 Beijing Zhongyan Technology Co. Ltd., Beijing 100068

Abstract: In the context of increasing haze days in China, a significant feature is that the persistence of haze weather is enhanced. Based on the statistical haze data over the Jingjinji (a region referred to Beijing along with Tianjin and Hebei Province) during the period 1981—2013, the climatic characteristics of spatial and temporal distribution of persistent haze events, which refer to the haze events lasting for 2 or more days, are analyzed. The result shows that the increase in both the frequency and days of persistent haze events is the main reason leading to the growth of total haze events while the variation of non-persistent haze days has no noticeable trend since 1981. The persistent haze events are mainly recorded in Beijing, the

* 首都蓝天行动培育专项(Z141100001014013)、公益性行业(气象)科研专项(CYHY201206024)和中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M01)共同资助

2014 年 9 月 18 日收稿; 2014 年 12 月 16 日收修定稿

第一作者: 张英娟, 主要从事气候预测、气候变化和模拟研究. Email: yingjuanzh99@163.com

通信作者: 张培群, 主要从事气候预测与气候变化研究. Email: zhangpq@ema.gov.cn

northern part of Tianjin and the southwest of Hebei Province, where the annual mean persistent haze days account for more than half of the total haze days in general. The areas affected by persistent haze events have expanded in an interdecadal increasing trend and the expansion has further accelerated since 2000.

Key words: Jingjinji Region, persistent haze event, climatic feature

引 言

霾是发生在大气近地面层中的一种较为严重的灾害性天气,霾发生时大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,造成空气普遍浑浊(中国气象局,2003),不仅使能见度恶化,带来严重水陆空交通问题,而且使空气质量下降,对人体健康造成严重危害,包括严重的呼吸道和心血管疾病以及肺癌(Xu et al, 2008; 白志鹏等,2006;Tie et al, 2009)。近年来我国中东部地区经常遭受霾天气影响,很多大城市霾天气明显增多,霾的问题日益成为人们关注的重点。前期的研究表明,我国霾天气主要分布在中东部地区,京津冀、长三角和珠三角是我国霾的多发区。1961年以来,全国平均年霾日数呈增加趋势,特别是20世纪80年代以后霾日数明显增加,且多发生在冬季(高歌,2008;胡亚旦等,2009;刘小宁等,2005;孙彧等,2013;王丽萍等,2006;伍红雨等,2011;宋连春等,2013)。经济迅速发展、城市化等人类活动增强所造成的大气气溶胶浓度的上升是霾日数增多的一个重要原因,风速、相对湿度等大尺度气象条件的变化,以及由此形成的近地层输送扩散条件的改变也与霾天气的发生频次密切相关(吴兑,2006;丁一汇,2014;吴兑等,2009;2010;2011;张利等,2011;宋连春等,2013;过宇飞等,2013)。

近年来我国不断增多的霾天气表现出一个显著特征就是持续性增强,一旦出现霾,往往持续数日甚至更长时间,对人体健康造成更为严重的危害,其影响更大。如2013年1月全国出现数次大范围的持续性雾和霾天气过程,并形成了规模空前的复合污染形势(张人禾等,2014;孟晓艳等,2014;王自发等,2014;穆泉等,2013;杨欣等,2014;张金良等,2013;李兰等,2014;魏哲等,2014;关月等,2013)。

目前对持续性霾的研究还比较少,较多研究限于个例研究(张人禾等,2014;赵桂香等,2011;唐宜西等,2013;曹伟华等,2013;刘梅等,2014;李峰等,2014),而对其整体气候特征及长期演变特征缺乏更深入的研究。京津冀城市群是华北地区城市群的主

体,赵普生等(2012)对京津冀区域的霾天气特征分析发现,京津冀地区夏季和冬季霾日数相对较高,霾日高值区主要位于城市区域,其中北京、天津、保定、石家庄、邯郸和邢台等地最为明显。范引琪等(2008)通过分析发现,1980—2003年京津冀地区能见度呈下降趋势,其中夏季下降趋势最显著;吴兑等(2014b)对环首都圈霾和雾的长期变化特征也进行了研究。这些都是将所有霾日作为总体进行分析的结果,其中持续性霾的特征又如何,其在年霾日增加趋势中的贡献有多大?都是需要进一步研究的科学问题。本文将对京津冀地区持续性霾的气候特征及其长期演变趋势进行深入系统分析,了解持续性霾的气候变化特征,为霾的预测研究提供理论依据。

1 资料和方法

本文所用资料来源于国家气象信息中心,2014年最新整理更新的雾霾专题数据集(V1.0)(余子等,2013),该数据集包含了中国基本、基准气象站、一般气象站观测的雾霾天气现象(包含雾、轻雾、霾三类)日值、每日四个标准时次(世界时00、06、12和18时)的定时能见度、相对湿度、风等观测值,数据集已经进行了界限值(或允许值)、内部一致性和空间一致性的质量控制。

由于实际观测中对霾和雾的识别存在一定的困难,需借助一些辅助标准进行判别,但目前全国没有统一的辅助判别标准,直接使用地面观测的天气现象资料分析霾日可能不够客观。因此在进行霾的气候分析时,国际上通常按照统一的定量标准,使用天气现象、能见度和相对湿度来综合判断,如用相对湿度90%来区分轻雾与霾(丁一汇,2014;Schichtel et al, 2001;Doyle et al, 2001;赵普生等,2011;吴兑等,2014a)。为此,本研究也借鉴了这一思路,同时考虑到雾和霾在观测中存在一定的误判可能性,会造成霾日观测的“空测”和“漏测”,因此对资料集的霾日又进行了订正。空测指本不是霾日,记为了霾日,依据是观测规范,霾的条件是能见度在10 km以下,因此将资料集中,白天三个观测时次能

能见度 ≥ 10 km的剔除;漏测指本该是霾日,没有记为霾,依据观测规范,对于轻雾和雾日,如果白天三个观测时段能见度在1~10 km之间,日最大相对湿度在80%以下,实际上并不符合轻雾或雾的条件,但是符合霾的条件,因此将这部分定为漏测,订正回霾日。

选取京津冀地区资料序列长、完整性良好的104个台站(其中北京16个,天津11个,河北77个)开展研究,各站资料长度为1981—2013年共33 a,气候态取为1981—2010年共30 a。

根据气象行业标准《霾的观测和预报等级》(中国气象局,2010),从有烟或霾发生到结束,称为一次霾事件;将连续2 d及以上有烟或霾发生,定为一次持续性霾事件。霾发生天数为1 d的,为非持续性

霾事件。

2 持续性霾的气候态特征

2.1 空间分布

从多年平均的发生频次、年总日数和持续时间来看,京津冀霾事件空间分布具有明显的地域特征(图1)。所有霾事件发生频次(图1a)和年总日数(图1c)空间分布特征具有较高的一致性,霾事件的多发区主要集中在北京、天津和河北的西南部地区,平均每年超过24次(相当于每月发生2次以上霾事件),每年总的霾日数超过30 d,其中一个高频次中心位于北京昌平地区,多年平均霾事件发生频次为

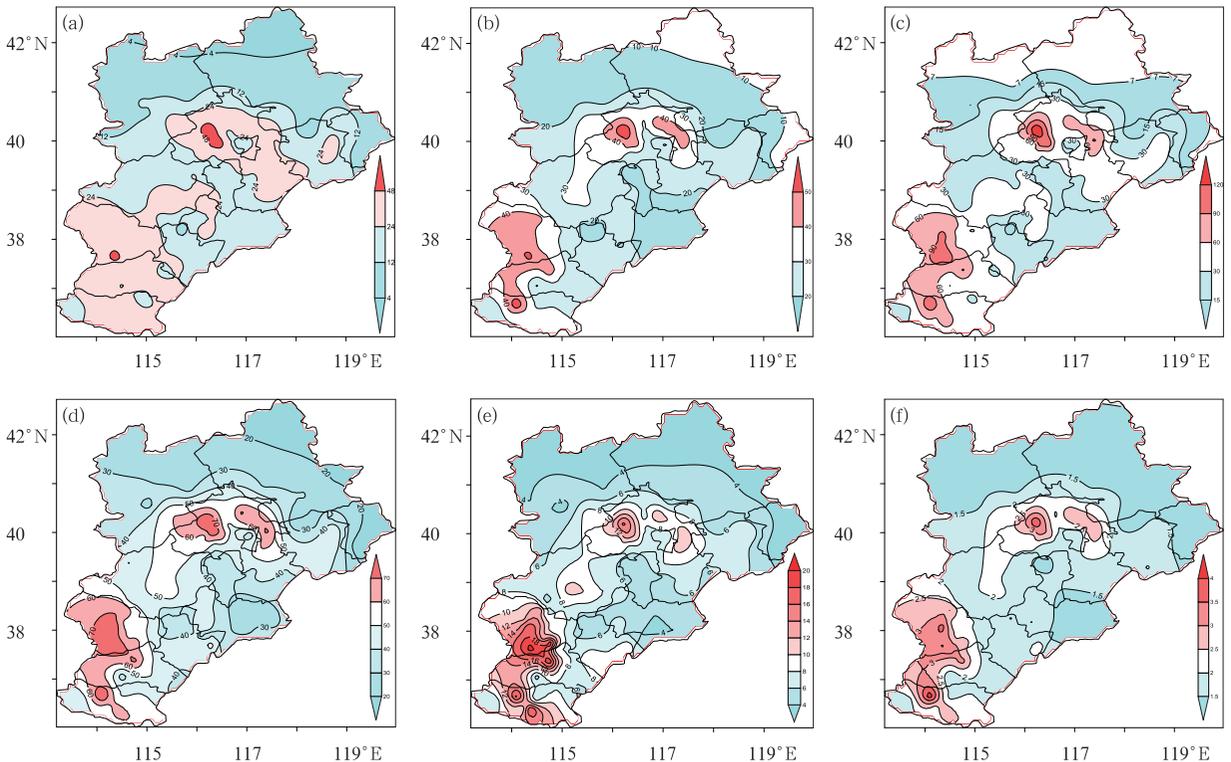


图1 1981—2010年多年平均霾事件发生频次、年总日数和持续时间分布

- (a) 所有霾事件年频次(单位:次), (b) 持续性霾事件年频次所占百分率(单位:%),
 (c) 所有霾事件年总日数(单位:d), (d) 持续性霾事件年总日数所占百分率(单位:%),
 (e) 霾事件最长持续日数(单位:d), (f) 霾事件平均持续日数(单位:d)

Fig. 1 The frequency, annual days and lasting days of haze events and persistent haze events during 1981—2010

- (a) annual frequency of total haze events (unit: times), (b) percentage of the annual frequency of persistent haze events (unit:%), (c) annual days of total haze events (unit: d), (d) percentage of annual days of durative haze events (unit:%), (e) days of longest-lasting haze events (unit: d), (f) average lasting days of haze events (unit: d)

63.6 次·a⁻¹,年总日数高达155.3 d;另外一个高频次中心位于河北西南部地区,频次为40~50次·a⁻¹。在霾的多发区,持续性霾的贡献比例很高,从频次上看(图1b),北京大部地区持续性霾事件占到所有霾事件的30%以上,河北西南部地区持续性霾事件的比例高达40%以上;从年霾日数来看(图1d),持续性霾在北京和河北西南部地区所占比例均超过50%,部分地区达到60%~70%以上;而在霾的少发区,持续性霾的比例也很低。北京、天津北部及河北西南部地区以持续性霾天气为主,而河北北部及东部地区以非持续性霾天气为主。可见,霾发生频次高,总日数多的地区主要由持续性霾天气造成。从霾事件持续时间来看(图1e和1f),河北南部地区霾事件持续时间相对较长一些,最长持续时间发生在河北的赞皇,一次霾事件最长持续达21 d,北京最长持续时间不超过15 d,天津为11 d。整个京津冀地区霾事件的平均持续时间为1~4 d,北京城区、天津北部和河北西南大部平均霾事件在2~4 d,河北

西南地区的武安,平均持续时间最长,为4.41 d。

2.2 季节变化

京津冀霾事件主要发生在冬季,其次为春、秋季,夏季霾事件发生日数最少(图2),这与前人结论一致(高歌,2008;胡亚旦等,2009;孙彧等,2013;宋连春等,2013)。冬季,北京和天津的大部地区、河北的中部和南部地区平均霾日超过10 d,其中北京城区、天津北部和河北西南部,霾日达到20 d以上,部分地区超过30 d;而北京北部、天津南部、河北北部和东部沿海地区,霾日不到10 d。春和秋季的霾日分布特征比较接近,北京城区、天津北部和河北西南部霾日偏多,超过10 d,部分地区在20 d以上;而其余大部地区霾日偏少,不足10 d。夏季京津冀地区整体霾日很少,但在北京城区、河北西南部分地区存在超过10 d的区域。

值得注意的是,北京地区四季霾日均为高值区,变化不明显,只是在冬和春季高值区面积较夏、秋

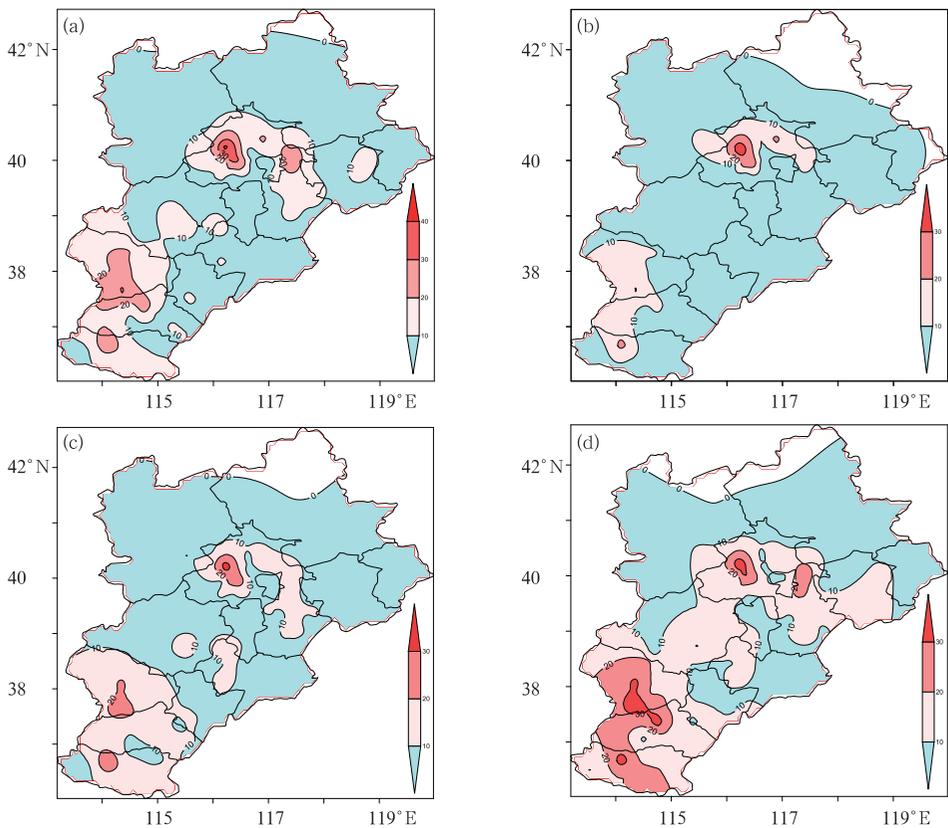


图2 1981—2010年京津冀地区霾日的季节空间分布(单位:d)

(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

Fig. 2 Seasonal spatial distribution (unit: d) of haze days over Jingjinji during 1981—2010

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

季要大。冬季由于为采暖季,燃煤排放颗粒物较多,同时易受大陆高压控制,大气层结较稳定,易于低层大气中气溶胶粒子富集形成霾天气。

3 持续性霾的长期演变特征

3.1 持续性霾事件的时间演变

对京津冀地区年平均霾日数的演变分析发现(图3),所有霾事件的年平均霾日数呈明显上升趋势[趋势系数 $4.1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],这主要是由于持续性霾事件的增加引起的,而非持续性霾事件的年平均霾日数呈平稳变化趋势[趋势系数 $-0.01 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,图3中红色线]。持续性霾事件的年平均霾日数与霾总日数的上升趋势基本一致,并且20世纪90年代之后持续性霾日数与霾总日数具有相同的年际变化特征,相关系数为0.96(通过了0.001的显著性检验)。

进一步计算历年持续性霾日数占霾总日数的百分比发现(图3中浅蓝色线),持续性霾日的所占百分率的总体上升趋势更为显著[趋势系数 $4.5\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]。20世纪90年代之前该百分率小于50%,表明非持续性霾日数大于持续性霾日数,而在90年代之后持续性霾日数持续显著增加,至2013年,该百分率达到最大,为71%。

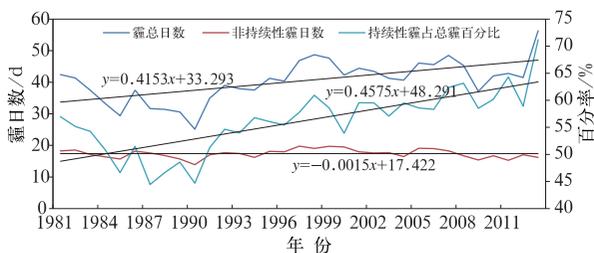


图3 1981—2013年京津冀霾总日数、非持续性霾日数及持续性霾所占百分比的时间变化曲线

Fig. 3 Temporal variation curves of total haze days, non-persistent haze days and percentage of persistent haze days over Jingjinji during 1981—2013

从各季节来看,京津冀霾事件主要发生在冬季,其次为春、秋季,夏季霾事件发生日数最少,这与前文中空间的分布是一致的,尤其在20世纪80年代到90年代中期(图4)。春季霾日在20世纪90年代略多于秋季,21世纪以来与秋季相当。夏季霾日在1997年后有一明显上升趋势,近几年来霾日波动

较大,与春、秋季接近。1981—2010年夏季霾总日数的增加趋势最明显,为 $2.9 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其次为秋季,为 $0.9 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,春和冬季霾发生总日数变化趋势不显著,有略微增加趋势,分别为 0.42 和 $0.35 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (图4a)。

持续性霾日四季都呈现出增加趋势,其中夏季增加最明显,为 $2.3 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,且同总霾日一样在1997年后增加显著(图4a和4b);而非持续性霾日除了夏季略微增加 $0.6 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 外,冬季为减少趋势,春季和秋季变化不显著(图4c)。

3.2 霾变化趋势的空间分布

前文分析中发现,京津冀地区平均霾总日数与持续性霾有着一致的上升趋势、非持续性霾则呈微弱的下降趋势的特征,这样的特征是否具有空间分布上的一致性?为此,我们计算了京津冀地区1981—2013年各站霾日变化趋势的空间分布。图5分别给出了持续性霾事件的霾日以及持续性与非持续性霾日差的变化趋势。从图中可见,霾总日数(图略)和持续性霾日数(图5a)呈现上升趋势的台站占全部台站的比例均为52%,上升趋势最显著地区分布在北京、天津和河北西南部,河北中东部地区有弱的下降趋势。非持续性霾日数呈现上升趋势的台站占全部台站的48%(图略),较持续性霾上升趋势的站点少,其中上升显著的地区集中在京津地区;而下降趋势台站占全部测站的52%,主要集中在河北的东南部地区,下降最显著的地区为河北的滦州,为 $8.2 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

非持续性和持续性霾日差值的变化趋势分布(图5b)更加突出反映了京津冀地区霾变化趋势的差异。可以发现持续性霾日较非持续性霾日增加的台站数占到了全部台站的67%,主要区域位于京津地区以及河北西南的石家庄、邢台、邯郸,最显著的位于天津的蓟县和宝坻。减少趋势的台站数占全部台站的33%,主要位于河北东南部的廊坊、沧州、衡水地区,最显著地区为易县。由上分析可知,除河北东南部地区持续性霾呈减少趋势外,京津冀地区有三分之二区域是呈增加趋势,京津和河北西南部的上升趋势最为显著。

1981—2013年,京津冀大部持续性霾事件存在总体一致的上升趋势,而非持续性则为微弱的下降趋势,这种特点在不同年代是否存在变化?图6给出了1981—2013年期间持续性霾日数的年代际距

平变化。分析发现,非持续性霾在 20 世纪 80 年代主要集中在河北的东部地区,中心位于河北的衡水; 20 世纪 90 年代非持续性霾正距平面积明显增加,大部分地区霾均为正距平;2000 年之后,河北东部以及京津地区的非持续性霾日增加(图略)。

从京津冀持续性霾年代际变化特点发现,在 20 世纪 80 年代主要持续性霾的高值区位于河北东南部地区(沧州、衡水);而在 20 世纪 90 年代则在石家庄地区存在明显的高值中心;2000 年之后,在京津冀地区形成了两个明显的高值中心,其中一个中心位于京津地区(北京和天津的西部),另外一个中心位于河北西南的邯郸地区。

不同年代持续性霾日占总霾日的百分率的空间分布,可以从一个侧面反映持续性霾天气高发区的年代际变化。前文中分析发现京津冀地区总体上持续性霾所占百分率越来越大,但在空间分布上是否是一致的增加? 由图 6d,6e,6f 可见,在 20 世纪 80 年代持续性霾百分率 50% 以上的高值区(表示该地区为持续性霾的高发区)主要位于河北南部的石家庄和北京西南的门头沟地区;而到 20 世纪 90 年代,百分率高值范围不断扩大,北部的高值中心由北京逐渐扩展至天津地区,而南部的百分率高值中心不断向东南方向扩展;2000 年之后这种扩展趋势更加显著,其中河北南部的百分率超过 70% 高值区域包括石家庄、邢台、邯郸地区,北部的北京、天津中心区的范围也在增加,中心值可达 80% 左右。表明持续性霾高发区的范围呈现年代际加速增大趋势。

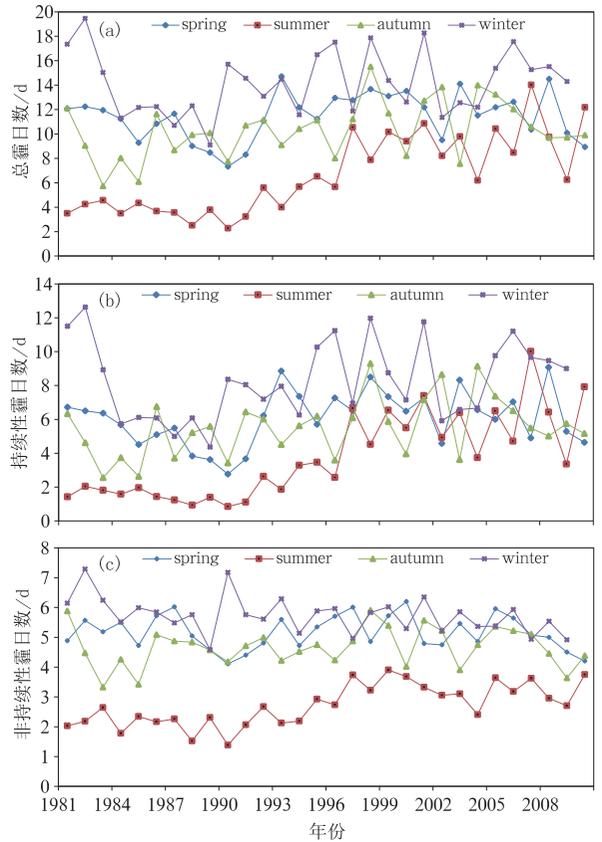


图 4 1981—2010 年京津冀地区霾日的季节变化曲线 (a)总霾日,(b)持续性霾日,(c)非持续性霾日

Fig. 4 Seasonal variation curves of haze days over Jingjinji during 1981—2010 (a) total haze days, (b) persistent haze days, (c) non-persistent haze days

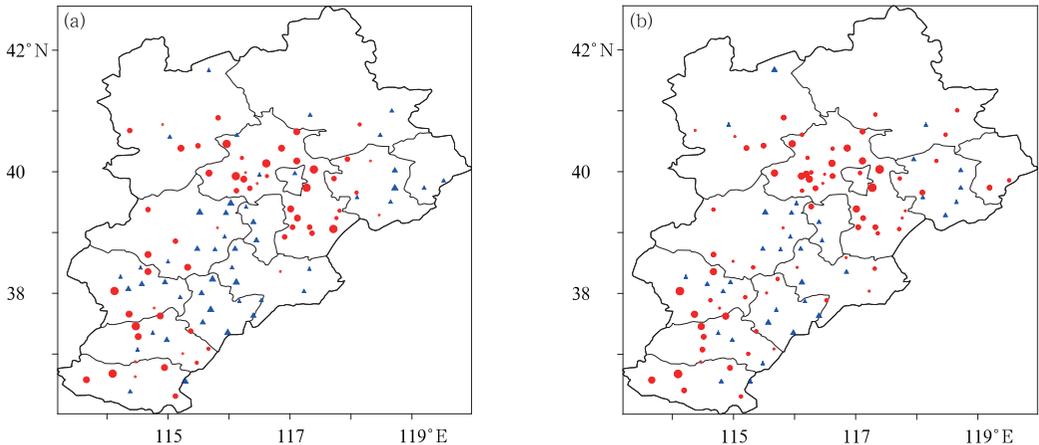


图 5 持续性霾日(a)、持续性与非持续性霾日差(b)的变化趋势

(红色表示上升,蓝色表示下降,大的实心符号表示趋势通过 0.01 的显著性水平检验,小的实心符号表示趋势通过 0.05 显著性水平检验,空心符号则表示趋势没有通过显著性检验)

Fig. 5 Varying trends of persistent haze days (a) and difference between the persistent and non-persistent haze days (b)

(Red color represents going-up while the blue means going-down; big solid circle/triangle means the trend has passed the 0.01 significance level test; small solid circle/triangle means the trend has passed the 0.05 significance level test; hollow circle/triangle means the trend has not passed the significance level test)

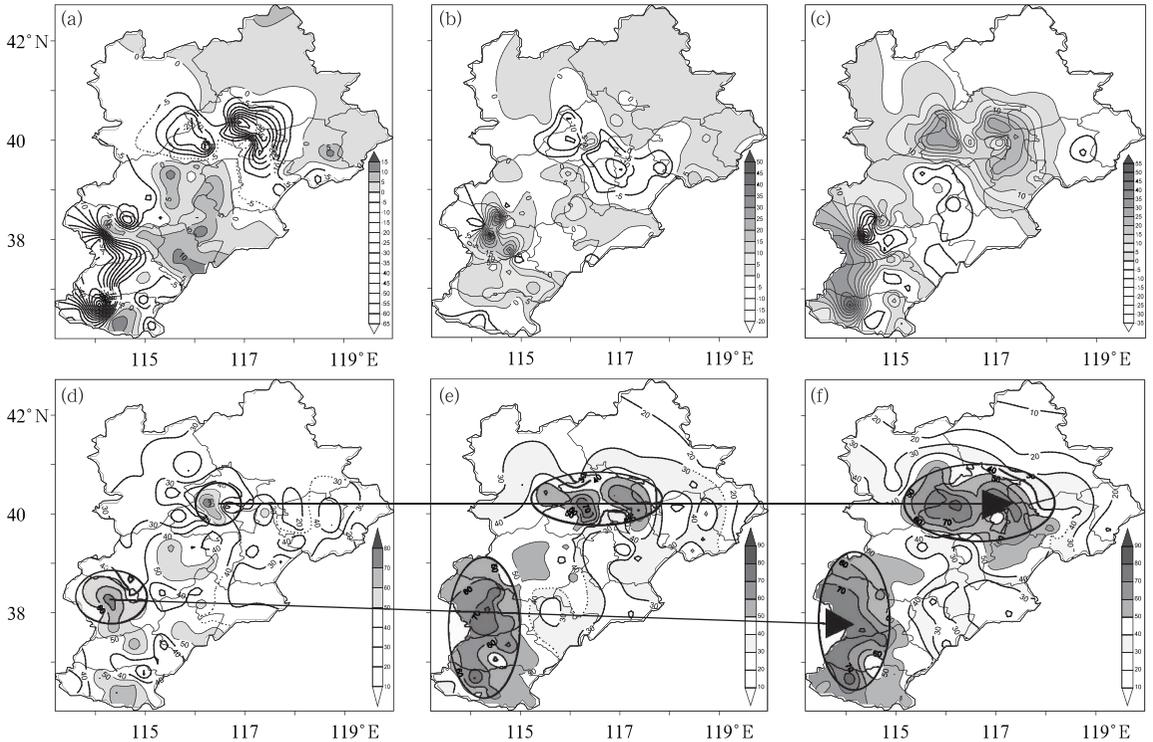


图 6 持续性霾日数年代际距平变化(a, b, c)以及持续性霾占霾总日数的百分率(d, e, f)

(a, d)1981—1990 年, (b, e)1991—2000 年, (c, f)2001—2013 年

Fig. 6 Variation of interdecadal anomalies of persistent haze days (a, b, c) and the percentage of persistent hazedays accounting for total haze days (d, e, f)

(a, d) 1981—1990, (b, e) 1991—2000, (c, f) 2001—2013

4 结论与讨论

通过对京津冀地区持续性霾事件的时空变化特征分析,可以得出如下结论:

(1) 从多年平均的气候态来看,持续性霾天气主要集中在北京、天津北部和河北西南部,其事件发生的频次比例占到总事件数的 30% 以上,部分地区超过 40%;年平均持续性霾日数占到霾的年总日数一半以上。京津冀霾事件的平均持续时间为 1~4 d,北京城区、天津北部和河北西南大部平均霾事件在 2~4 d,河北西南地区的武安,平均持续时间最长,为 4.41 d。

(2) 京津冀地区 1981—2013 年非持续性霾日数没有显著的变化趋势,持续性霾日数及其所占百分率均呈显著增加趋势。除河北东南部地区持续性霾事件呈减少趋势外,京津冀地区有三分之二区域是呈增加趋势,京津和河北西南部的上升趋势最为显著。

(3) 持续性霾高发区的范围呈现年代际加速增

大趋势,在 20 世纪 80 年代持续性霾高发区主要位于河北南部的石家庄和北京西南的门头沟地区;而到 20 世纪 90 年代,高发区范围不断扩大;2000 年之后这种扩展趋势更加显著。

本文初步分析了京津冀地区持续性霾天气的气候特征,发现京津冀霾日的增加是由于持续性霾的增加造成的,非持续性霾并没有显著的变化趋势。造成京津冀持续性霾日这种年代际变化的原因是什么?以及持续性霾日事件发生时的气象条件与环流背景又是什么样的?这些问题均需要我们对京津冀持续性霾事件做进一步深入分析研究,为京津冀霾的气候预测研究打下基础。

参考文献

- 白志鹏,蔡斌彬,董海燕等. 2006. 灰霾的健康效应. 环境污染与防治, 28(3):198-201.
- 曹伟华,梁旭东,李青春. 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析. 气象学报, 71(5):940-951.
- 丁一汇. 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. 中国科学#地球科学, 44(1): 37-48.
- 范引琪,李春强. 2008. 1980—2003 年京、津、冀地区大气能见度变化

- 趋势研究. 高原气象, 27(6):1392-1400.
- 高歌. 2008. 1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析. 地理学报, 63(7):762-768.
- 关月, 何立富. 2013. 2013 年 1 月大气环流和天气分析. 气象, 39(4):531-536.
- 过宇飞, 刘端阳, 周彬, 等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究. 气象, 39(10):1314-1324.
- 胡亚旦, 周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析. 气象, 35(7):83-78.
- 李峰, 施红蓉. 2014. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析. 气象, 40(8):992-999.
- 李兰, 刘敏, 方思达, 等. 2014. 湖北省 2013 年 1 月特大霾过程的气象成因分析. 环境科学与技术, 37(5):16-20.
- 刘梅, 严文莲, 张备, 等. 2014. 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制分析. 气象, 40(7):835-843.
- 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 2005. 我国大雾的气候特征及变化初步解释. 应用气象学报, 16(2):220-230.
- 孟晓艳, 余予, 张志富, 等. 2014. 2013 年 1 月京津冀地区强雾霾频发成因初探. 环境科学与技术, 37(1):190-194.
- 穆稼, 张世秋. 2013. 2013 年 1 月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估. 中国环境科学, 33(11):2087-2094.
- 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. 气候变化研究进展, 9(5):313-318.
- 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候特征. 气候与环境研究, 18(3):307-406.
- 唐宜西, 张小玲, 熊亚军, 等. 2013. 北京一次持续霾天气过程气象特征分析. 气象与环境学报, 29(5):12-19.
- 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2006. 气候变化对中国大雾的影响. 地理学报, 61(5):528-536.
- 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策. 中国科学#地球科学, 44(1):3-14.
- 魏哲, 杨晶, 王丽涛, 等. 2014. 2013 年 1 月邯郸市严重霾天气的污染特征分析. 环境科学学报, 34(5):1118-1124.
- 吴兑. 2006. 再论都市雾与霾的区别. 气象, 32(4):9-15.
- 吴兑, 陈慧忠, 吴蒙, 等. 2014a. 三种霾日统计方法的比较分——以环首都圈京津冀晋为例. 中国环境科学, 34(3):545-554.
- 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 2014b. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. 环境科学学报, 34(1):1-11.
- 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.
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2011. 中国大陆 1951—2005 年雾与轻雾的长期变化. 热带气象学报, 27(2):146-151.
- 吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 2009. 雾和霾. 北京:气象出版社.
- 伍红雨, 杜尧东, 何分健, 等. 2011. 华南霾日和雾日的气候特征及变化. 气象, 37(5):607-614.
- 杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 2014. 北京 2013 年 1 月连续强霾过程的污染特征及成因分析. 中国环境科学, 34(2):282-288.
- 余予, 张志富, 冯明农. 2013. 国家气象信息中心雾霾数据集(V1.0), 国家气象信息中心内部资料.
- 张金良, 桑田, 赵宝新, 等. 2013. 2013 年 1 月灰霾期间太原市空气污染对儿科急诊量和门诊量的影响. 环境与健康杂志, 30(12):1071-1075.
- 张利, 吴润, 张武. 2011. 1955—2000 年中国能见度变化趋势分析. 兰州大学学报(自然科学版), 47:46-55.
- 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. 中国科学#地球科学, 44(1):27-36.
- 赵桂香, 杜莉, 卫丽萍, 等. 2011. 一次持续性区域雾霾天气的综合分析. 干旱区研究, 28(5):871-878.
- 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 2012. 京津冀区域霾天气特征. 中国环境科学, 32(1):31-36.
- 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. 环境科学学报, 31(4):704-708.
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范. 北京:气象出版社, 23.
- 中国气象局. 2010. 中华人民共和国气象行业标准:霾的观测和预报等级(QX/T 113-2010). 北京:气象出版社.
- Doyle M, Dorling S. 2001. Visibility trends in the UK 1950—1997. Atmos Environ, 36:3161-3172.
- Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al. 2001. Haze trends over the United States 1980—1995. Atmos Environ, 35:5205-5210.
- Tie X X, Wu D, Guy B. 2009. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China. Atmos Environ, 43(14):2375-2377.
- Xu H J, Wang X M, Poschl Ulrich, et al. 2008. Genotoxicity of total and fractionated extractable organic matters in fine air particulate matter (PM_{2.5}) in urban Guangzhou: Comparison between haze and non haze episode data. Environ Toxicol Chem, 27(1):206-212.