王素, 黄刚, 胡开明, 等. 2020. 1980～2014年中国中东部持续性霾天气的多尺度变化特征 [J]. 气候与环境研究, 25(1): 103−112. WANG Su, HUANG Gang, HU Kaiming, et al. 2020. An Analysis of the Multi-scale Variations of Persistent Haze Events in Central and Eastern China from 1980 to 2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(1): 103−112. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19049

1980～2014年中国中东部持续性霾天气的多尺度变化特征

王素[1,2] 黄刚[1,2] 胡开明[2,3] 王林[4]

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心，北京 100190
4 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室，北京 100029

摘　要　对1980～2014年中国中东部地区324个台站的持续性霾天气的时空变化和相关气象影响因子进行分析，结果表明：中东部地区年平均持续性霾事件和其在所有霾事件的贡献比例逐年增加，增长率分别为0.79 (10 a)$^{-1}$和2.7% (10 a)$^{-1}$。主要表现为3个大值区：华北平原地区（包括山西省、京津冀地区）、长江三角洲和四川盆地东部，增加最显著的区域位于黄淮地区，增长率分别为6.3 (10 a)$^{-1}$、13.95 d (10 a)$^{-1}$。1月是持续性霾事件的高发月，月均2.56 d。夏季和秋季持续性霾事件增加最为明显，增长率分别为0.38 (10 a)$^{-1}$和0.46 (10 a)$^{-1}$。不利的气象条件，如静风日数的增加，风速和大风日数的减少，以及不利的环流形势，如东亚冬季风的减弱，都可能造成持续性霾天气的增加和异常维持。

关键词　持续性霾事件　非持续性霾事件　霾日数
文章编号　1006-9585(2020)01-0103-10　　**中图分类号**　P49　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19049

An Analysis of the Multi-scale Variations of Persistent Haze Events in Central and Eastern China from 1980 to 2014

WANG Su[1,2], HUANG Gang[1,2], HU Kaiming[2,3], and WANG Lin[4]

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Center for Monsoon System Research*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190
4 *Key Laboratory of Regional Climate−Environment for Temperate East Asia*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

Abstract　The spatial and temporal variations of persistent haze events and their related impact factors were analyzed by using 324 stations in the central and eastern China during 1980−2014. The results show that the annual average frequency of persistent haze events and their contributions to total haze events increase year by year, with growth rates of 0.79 (10 a)$^{-1}$ and 2.7% (10 a)$^{-1}$, respectively. It is represented by three large-value areas: The North China Plain (including Shanxi

收稿日期　2019-04-04；**网络预出版日期**　2019-11-26
作者简介　王素，女，1994年出生，硕士研究生，主要从事霾气候学研究。E-mail: wangsu@mail.iap.ac.cn
通讯作者　黄刚，E-mail: hg@mail.iap.ac.cn
资助项目　中国科学院战略性先导科技专项XDA20060501，国家自然科学基金41425019、41831175和41721004
Funded by　Strategic Leading Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (Grant XDA20060501), National Natural Science Foundation of China (Grants 41425019, 41831175, and 41721004)

Province, Beijing–Tianjin–Hebei region), the Yangtze River Delta, and the eastern Sichuan Basin. The most significant increase appears mainly in Huang-Huai area, with a growth rate of 6.3 (10 a)$^{-1}$ and 13.95 d (10 a)$^{-1}$. At the same time, persistent haze events show obvious seasonal and monthly changes. January is the highest incidence month with 2.56 d, meanwhile high frequency appears in summer and autumn, with a growth rate of 0.38 (10 a)$^{-1}$ and 0.46 (10 a)$^{-1}$. Unfavorable meteorological conditions, such as increasing windless days, decreasing wind speed and gale days, and adverse circulation situations, such as the weakening of the East Asian winter monsoon, have resulted in an increase in persistent hazy days and its abnormal maintenance.

Keywords Persistent haze event, Non-persistent haze event, Haze days

1 引言

《霾的观测和预报等级》（QX/T 113-2010）规定，霾是大量极细微的尘粒等均匀地浮游在空中，使空气混浊，水平能见度小于10 km的天气现象。近年来，随着中国经济的快速发展和城市化进程的加速，大气污染问题愈发显著，重霾事件频发，影响了经济持续健康发展。以霾为表征的低能见度事件，更成为影响人民群众身体健康的环境风险因素之一，由于可能造成严重的呼吸道、肺癌、哮喘和心血管疾病(郭锋等, 2014; 谢元博等, 2014; 张英娟等, 2015)，受到了广泛关注。

自我国早期研究霾污染的论文(Wu et al., 2005; 吴兑等, 2006)相继发表以来，对霾天气的研究已经取得了诸多进展。其时空分布特征、气象影响因子、污染影响因子、气溶胶粒子谱分析、数值模拟等方面都得到了大量研究结果(吴兑, 2012)。前期研究表明，我国年平均霾日数呈现增加的趋势，其中西北和东北部为少发区，京津冀、长江三角洲和珠江三角洲地区为多发区(吴兑等, 2004, 2010; 高歌, 2008; Han et al., 2016; 潘玮等, 2017)。冬季是霾事件易发季节，占年所有霾事件数的1/3(吴兑等, 2010; 孙彧等, 2013)。研究表明霾天气的出现，能源消耗是内因，人为排放污染是出现污染天气的本质(吴兑等, 2006; 张小娟等, 2014; Han et al., 2016)。而气象条件和边界层结构的变化作为外因，通过降水、风速、环流等条件的变化，起到加重（减轻），以及延长（缩短）霾天气的持续时间的作用(胡亚旦和周自江, 2009; Ding et al., 2017)。

随着霾天气的增加，一个越来越显著的问题是重霾天气持续时间变得更长，污染程度更高。由于人体持久暴露在不良环境中，持续性霾事件会对人体健康带来更大的威胁(谢元博等, 2014)，因此对重大持续性霾事件个例的分析较多。如2013年1月我国中部、东部大部分地区出现的持续性霾天气，由于能见度低、范围广、持续时间长，以空前的复合污染，严重威胁了人们的生产生活和经济的健康发展。研究发现，化石燃料燃烧排放的大量NO_x一次污染物向颗粒态的快速转化，是本次强霾事件加重的内部促发因子，东亚冬季风减弱，平流层增温，近地面风速减弱是主要外部条件(石春娥等, 2013; 王跃思等, 2014; 张人禾等, 2014)。同时，多数研究集中于对区域性持续性霾天气的个例分析。例如，张英娟等(2015)、Ding et al.(2017)研究发现京津冀地区1981～2013年非持续性霾变化不明显但持续性霾日数呈现增加趋势；范引琪和李春强(2008)发现夏季能见度趋势最显著。石春娥等(2018)发现1980年以来安徽持续性霾过程增多，2000年后明显增多。也有部分文章探讨了气象条件与重大持续性霾事件之间的相关关系(吴兑等, 2014; Ding et al., 2017; 孔锋等, 2017)。

中东部地区是我国经济发展最为迅速，人口最为集中，灰霾事件发生最为频繁的地区，研究该地区持续性霾天气的变化具有重要意义。本文尝试对中国中东部的持续性霾事件的时空分布及气象影响因子进行深入分析，希望能对全面了解霾日数的变化及治霾措施提供理论依据。

2 资料及分析方法

2.1 资料

本文所用资料来自国家气象信息中心提供的1967～2014年中国2472站点地面日观测资料（包括温度、10 m风速、相对湿度和降水量）；中国地面气候资料天气现象日值数据集的天气现象（包括雾、轻雾、烟幕等），和地面气候资料定时值数据集一天4次（协调世界时00:00、06:00、12:00和18:00）的能见度资料，均通过了质量检验。李雄

（2010）研究发现资料跨越1980年只在部分地区连续可靠，因此选择了1980～2014年作为研究时段，同时，根据数据的连续性和站点的一致性，最终共挑选出我国中东部地区（42°N以南、100°E以东）共324个站点（地理分布如图1）。

同时采用1980～2014年NCEP-DOE Reanalysis 2(https://www. esrl. noaa. gov/psd/data/gridded/data. ncep. reanalysis2. pressure. html[2019-04-13])再分析资料，来源于NOAA/OAR/ESRL PSD，它是NCEP Reanalysis的改进版本，修复了物理过程的错误并更新了参数化方案(Kalnay et al., 1996)，空间分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度），主要选用风场、温度场、相对湿度场、海平面气压和位势高度场的逐月数据。

2.2 分析方法

目前国内外对霾还没有一个统一的判定标准。多数研究用能见度资料辅助相对湿度区分雾（轻雾）和霾(Schichtel et al., 2001; Doyle and Dorling, 2002; 吴兑等, 2010; 丁一汇和柳艳菊, 2014)。目前3种常用的判定方法中，被国际广泛采用的是以14:00实测能见度＜10 km，日平均相对湿度＜90%，天气代码为01（露）、02（霜）、03（结冰）、04（烟幕）、05（霾）、10（轻雾，mist）、42（雾）(Doyle and Dorling, 2002; Che et al., 2007; 范引琪和李春强, 2008)。本文沿用这一思路。同时，根据气象局标准《霾的观测和预报等级》(中国气象局, 2010)，一次霾事件指从有烟幕或霾发生到结束，一次持续性霾事件称为连续2 d及以上的霾事件。由此得到了中国中东部霾事件的时空分布。

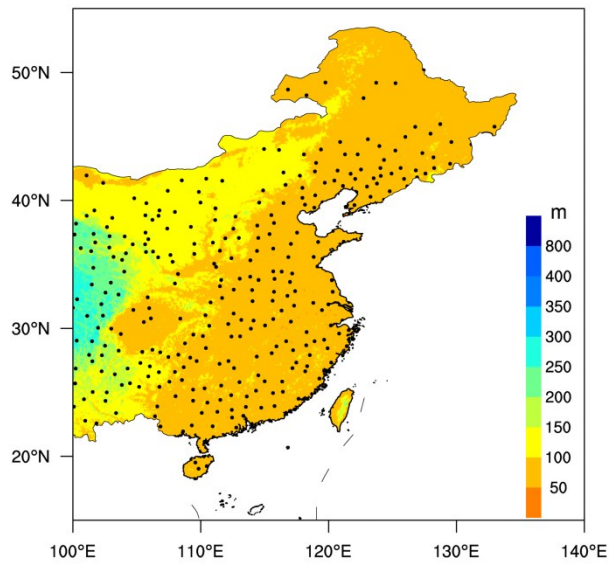

图1 中国中东部324个气象站点

Fig. 1 Locations of the 324 weather stations across central and eastern China

为了了解其长期变化趋势，计算了气候趋势系数，分别计算其月季、四季和年代际变化。同时利用Pearson相关比较了霾日与影响因子之间的关系，用t检验进行显著性分析。

3 结果分析

3.1 年平均持续性霾天气的空间分布

从霾事件多年平均分布图上来看，霾事件多发区多集中于6个区域，分别为北京—河北—山西地区、四川盆地、长江中下游地区、广东西部和广东东北部、辽宁省，以及江西北部，且高值区都集中于长江流域以北。中国中东部存在3个明显的大值区，分别位于华北平原（主要位于山西省和京津冀地区）、长江三角洲的安徽省附近和四川盆地东部，是所有霾事件（图2b）也是持续性霾事件（图2a）的多发区，且两种事件的多年平均分布情况具有很高的空间一致性。我国西北部地区和内蒙古地区是霾事件的低发地区，年平均持续性霾次数不足1次，贡献比率（图2c）也很低（＜5%）。四川盆地川渝交接处的城市群霾事件发生率最高，平均为37.13次，同时持续性霾污染最为严重，年平均持续性霾天气达到了18.45次，贡献比例高于69%。山西省霾事件高发区集中在北部，最高年频次达44次，而持续性霾事件主要集中于东部，对全年霾日贡献超过50%。长三角地区霾事件频发，但持续性事件多集中于安徽地区，贡献未达50%。另外广东、福建、山东等地年平均霾事件22～28次，持续性霾的贡献较小，基本都低于30%。湖南、江西交界处和广西省东部虽然霾事件发生率较低，但存在两个年均霾事件相对高值区，对应持续性霾的贡献率分别高于50%和45%。

而最长持续性霾（图2d）天气集中出现在四川盆地、山西省及辽宁地区，最长达23 d a^{-1}。中国中东部年平均持续性霾事件为2.79次，所有霾事件为14.74次。空间表现为容易出现霾事件的地区也更容易出现持续性霾天气。我国长江流域以南地区虽然霾事件时有发生，但是相较之下连续性霾天气对所有霾事件日数的贡献较小。

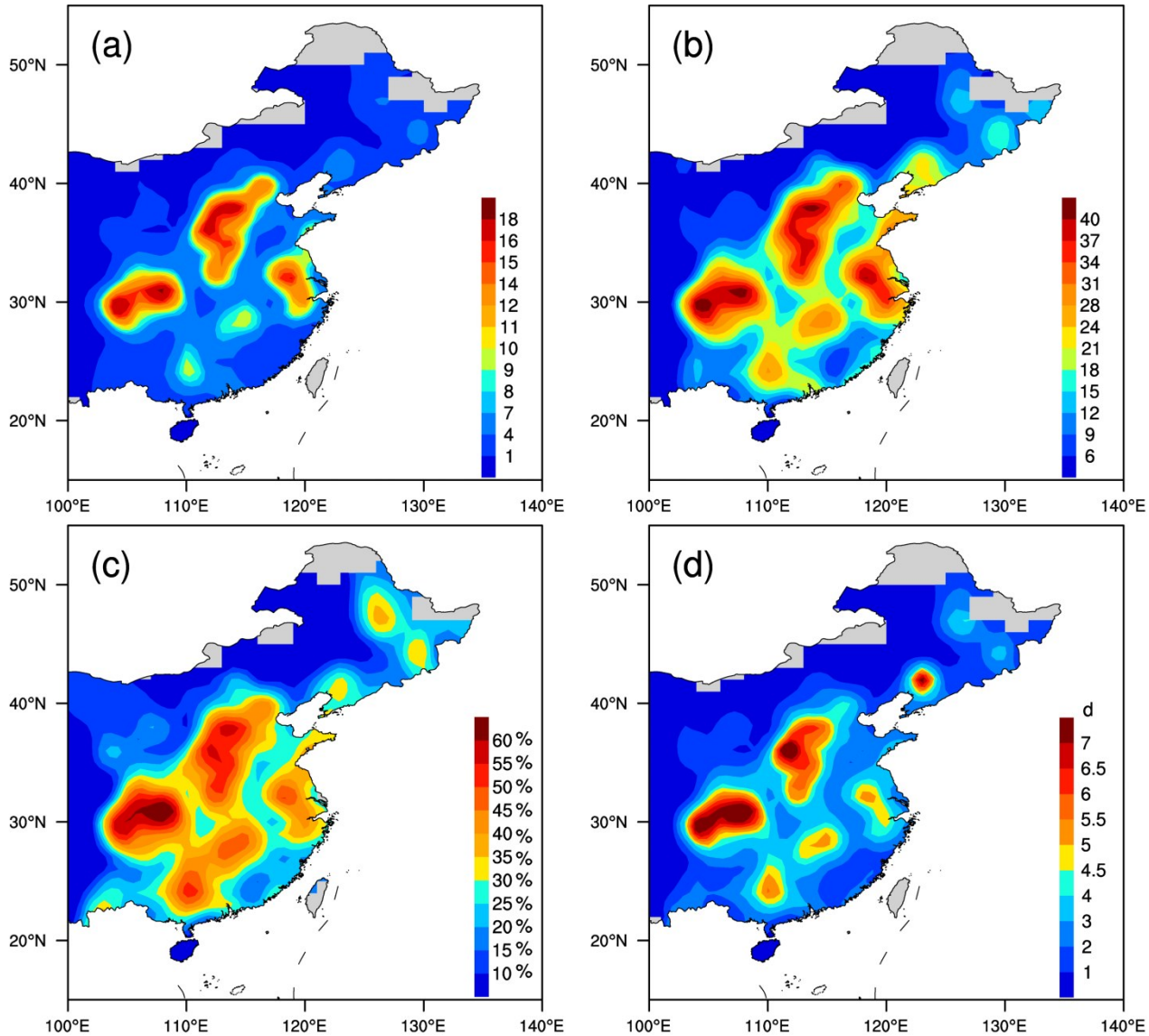

图2 1980~2014年中国中东部地区（a）持续性霾事件年发生频次、（b）所有霾事件年频次、（c）持续性霾事件年日数占所有霾事件日数百分比和（d）年平均霾事件最长持续日数

Fig. 2 (a) Annual frequency of persistent haze events, (b) annual frequency of total haze events, (c) percentage of persistent haze days in the total haze days, and (d) average longest-lasting duration of haze events across central and eastern China during 1980−2014

3.2 持续性霾事件变化趋势的空间分布

图3a给出了持续性霾日的变化趋势空间分布情况。由图可知，持续性霾事件在全国呈现上升趋势的站点为208个，占总台站个数的64.20%，其中52.94%的站点通过了0.05的显著性检验，呈现为显著增加的站点主要位于36°N以南。上升最显著的区域主要是黄淮地区（河南—安徽—江苏），平均为6.3 (10 a)$^{-1}$。呈现下降趋势的站点为94个，其中39%通过了0.05的显著性检验。下降地区主要为东北东南部、河南南部、甘肃、青海和内蒙古西部以及其他部分区域，其中河北省南部、京津冀地区虽然是历史高值区，近些年持续性事件却呈现显著下降趋势，其中下降最显著的站点位于北京和辽宁省沈阳市，分别为−7.03 (10 a)$^{-1}$和−9.08 (10 a)$^{-1}$。最长持续日数的变化趋势（图3b）与之类似，显示为增长的站点为202个，其中50%通过了0.05的显著性检验，最长持续日数明显增加的区域也是持续性霾事件增长最明显的区域。而显示出明显降低趋势的站点仅为总站点的37%，两者空间分布一致分布类似。

3.3　持续性霾天气的时间演变

3.3.1　持续性霾天气的年际变化

为了解持续性霾事件的长期演变特征，我们分析了1980～2014年持续性、非持续性霾事件（持续时间为1 d）的时间演变情况，并给出每年持续性霾事件在所有霾事件中所占比例（图4）。由图4可知，中东部地区2种霾事件都呈现增加趋势，都表现为2014年的激增，其中所有霾事件增长率为0.79 (10 a)$^{-1}$，持续性霾事件增长率为0.90 (10 a)$^{-1}$，非持续性霾事件为0.71 (10 a)$^{-1}$。总体来说，非持续性霾发生频率更高，平均发生10.49 a^{-1}，而持续性霾平均发生4.25 a^{-1}。持续性霾在2000年以前呈

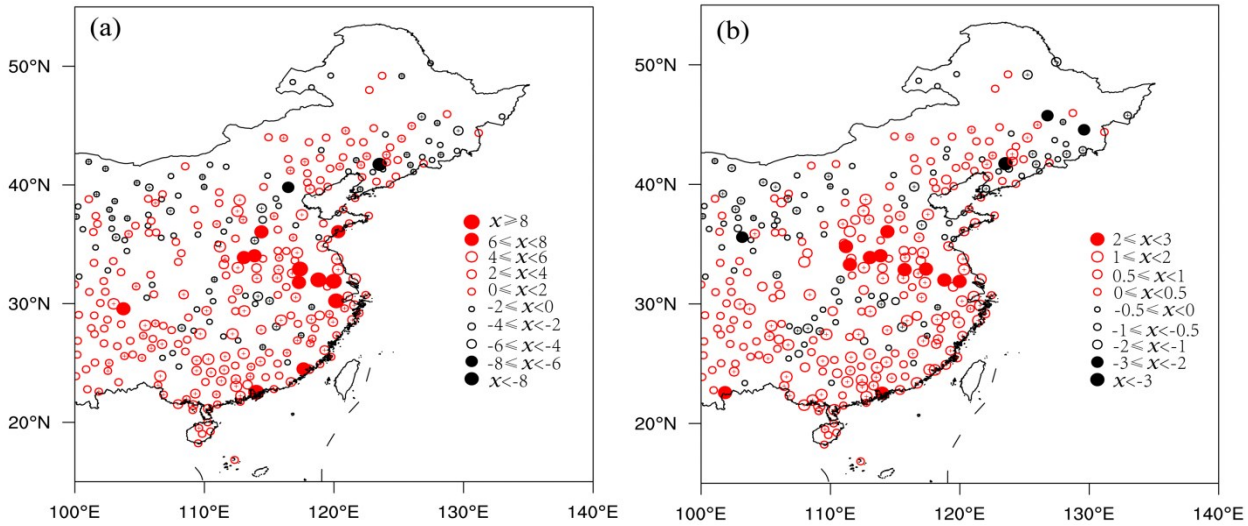

图3　1980～2014年中国中东部地区持续性霾事件（a）发生频次的变化趋势[单位：(10 a)$^{-1}$]及（b）最长持续日数的变化趋势[单位：d (10 a)$^{-1}$]。红色代表上升，黑色代表下降，圆点代表通过0.05的显著性检验

Fig. 3　The trend coefficients of spatial distribution of (a) the annual frequency of persistent haze events and (b) the longest-lasting duration of persistent haze days across central and eastern China during 1980−2014 (red represents the increasing trend and black represents the decreasing trend; the solid circles pass the significance test at 0.05 level)

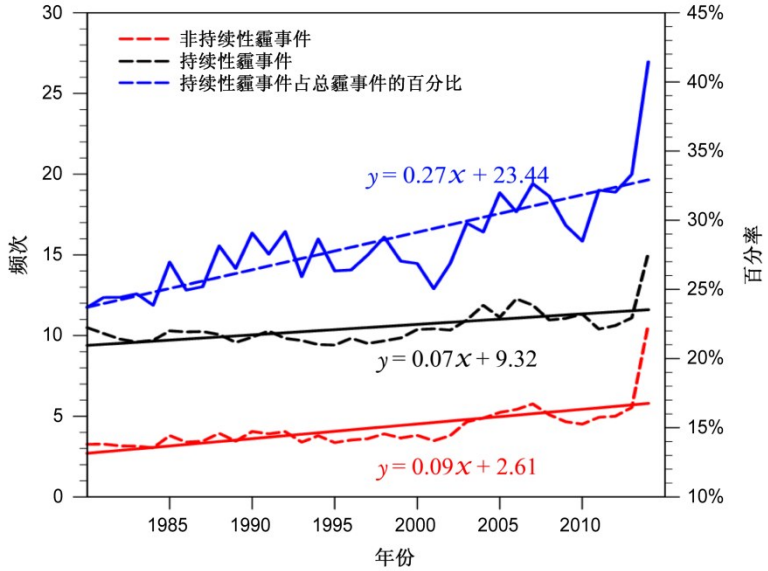

图4　1980～2014年中国中东部地区持续性霾事件和非持续性霾事件年发生频次、持续性霾事件发生频次占总霾事件发生频次百分比的时间演变

Fig. 4　The temporal variations of annual frequency of persistent haze events, non-persistent haze events, and the percentage of persistent haze events in the total haze events across central and eastern China during 1980−2014

现弱减小趋势，而非持续性霾事件呈现弱增加趋势，2000年之后两者都呈现波动上升，在2014年迅速增加。持续性霾事件所占百分率总体上升趋势更加明显[趋势系数达2.71 (10 a)$^{-1}$]，从20世纪80年代的23.70%增加至2014年的41.45%。但由于该百分比未超过50%，说明非持续性霾事件更容易发生。该结论与前人研究基本一致。2000年以后我国能源消耗与人均汽车保有量快速上升，随着燃煤等能源消耗的迅速增加，霾日数迅速上升(孙彧等, 2013; 符传博和丹利, 2014; 符传博等, 2016)。同时，与之对应，持续性霾日数对所有霾日数的贡献也逐年增加，上升趋势最为明显，平均贡献率为14.17%，贡献增长趋势为2.6% (10 a)$^{-1}$，在2014年达到最大，为40.16%。

3.3.2 持续性霾天气的季节变化

由于资料的限制，2014年冬季由于只有12月的数据被略去。从（非）持续性霾事件的季节演变（图5）来看，持续性霾四季出现概率为冬季＞秋季＞春季＞夏季，平均出现次数分别为1.96、0.94、0.83和0.50，与前人对霾的研究结果一致。其中，夏季持续性霾呈现逐年增多的趋势，特别是2001年之后，增加趋势变得更为明显，为0.52 (10 a)$^{-1}$；秋季演变情况基本相同，2001年后增长趋势变为0.46 (10 a)$^{-1}$；春季持续性霾在1990年前呈现弱下降趋势，且数目超过了秋季持续性霾，之后稳定波动，在2001年前后开始呈现增加趋势，但平均数目小于秋季霾，为1.02。冬季持续性霾时间变化波动较大，1992前冬季持续性霾数目略大于其他三季之和，1993～2012年小于三季之和，但2013年异常大于三季持续性霾日数之和（差值大于1.23），造成了中国大部分地区严重的持续性冬霾时间，得到了广泛关注。冬季总体呈现增加趋势[增长率0.16 (10 a)$^{-1}$]，且2010年以后增加迅猛。

非持续性霾事件主要表现为春霾和冬霾，平均频次为3.81和2.79。且前期（20世纪80年代）冬霾大于后期（21世纪），并在2011年达到最低值。相比而言，夏霾和秋霾的增长速率更大，分别为

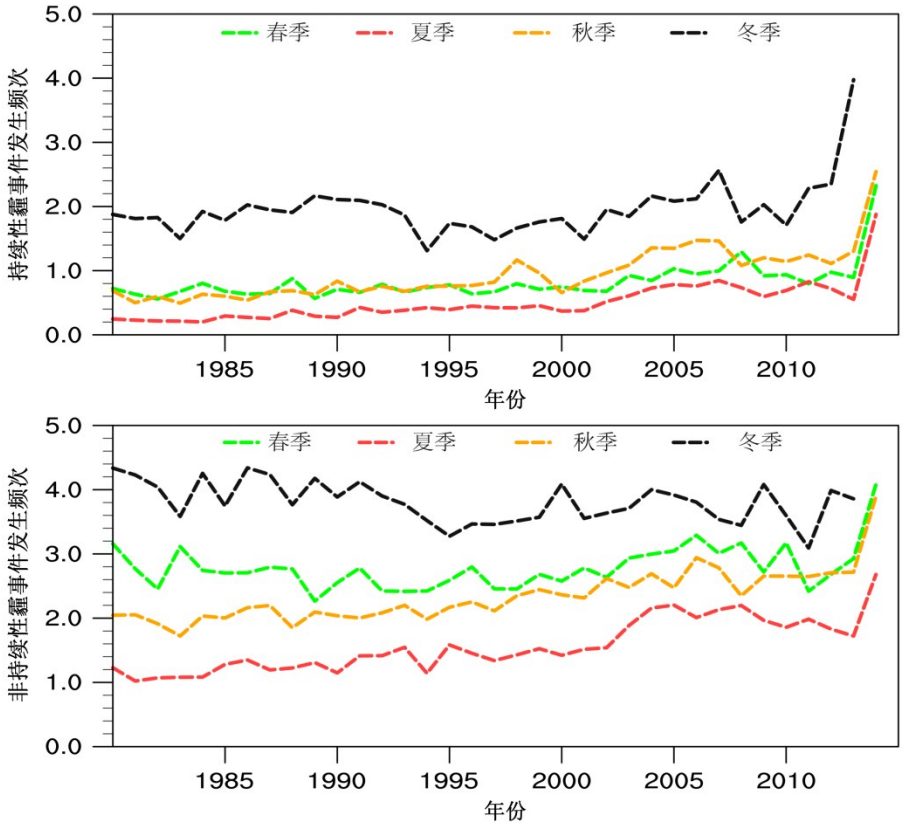

图5 1980～2014年中国中东部地区四季平均（a）持续性霾和（b）非持续性霾频次的时间演变

Fig. 5 The temporal variations of seasonal frequency of (a) the persistent haze events and (b) the non-persistent haze events across central and eastern China during 1980–2014

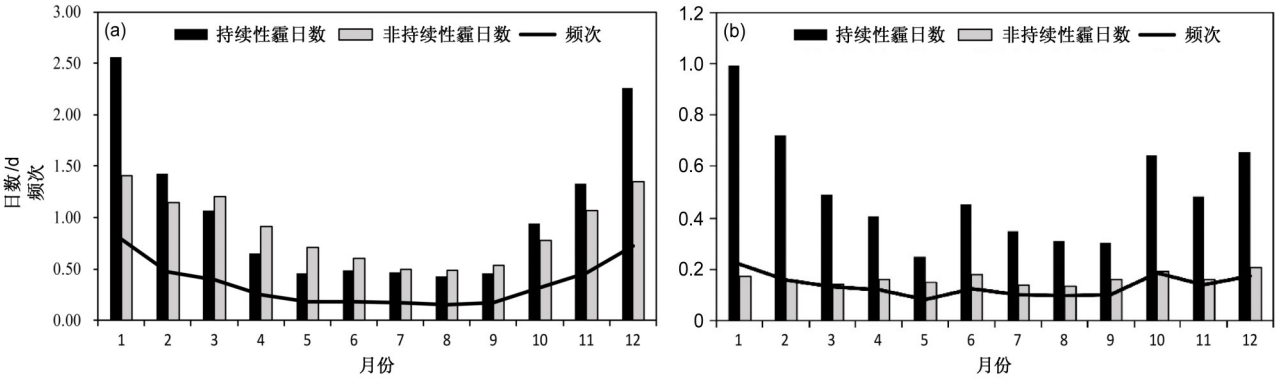

图6 1980～2014年中国中东部地区平均（非）持续性霾日数及频次的月平均变化：（a）月均值；（b）标准差

Fig. 6 The temporal variations of the monthly average percentage of persistent haze days and non-persistent haze days and frequency of persistent haze events across eastern China during 1980–2014

0.34 (10 a)$^{-1}$和0.32 (10 a)$^{-1}$。2013年虽然持续性霾事件激增，但是非持续性霾事件呈现为弱下降，2014年霾事件有显著增加，但增长原因需要后续的更多研究进行深入分析。

3.3.3 持续性霾天气的月季变化

图6a展示了（非）持续性霾日数及频次的月季变化。由图可知，持续性霾日数最高的两个月为1月（月平均日数为2.56 d）和12月（月平均日数为2.26 d），相应频次也是最高的。非持续性霾日数变化与之相同。3～9月非持续性霾事件出现频次高于持续性事件，其他月份出现几率相比较低，在12月持续性霾日数达到了非持续性霾日数的1.26倍。图6b展示了中东部月平均的标准差分布，可见1月持续性霾日数的变化最为显著，其次为2月和12月。而5月相比其他月份偏弱。另外在6月和10月虽然平均持续性霾日数较低，但是标准差较大，说明变化较为明显。相较之下非持续性霾日数变化不显著。

4 持续性霾日增长的气象成因分析

已经发现风速、相对湿度、温度都会显著影响霾的分布(张人禾等, 2014; Ding et al., 2017; Wu et al., 2017)。一个直接的过程是，当局地污染浓度保持不变，近地面风速减小，温度升高，相对湿度增加都会导致霾的出现。而风速，由于其局地性强，作用时间快，对污染起到了直接搬运作用，可以快速改善局地空气质量。为了了解中国中东部地区近35年持续性霾日数年际变化的气象成因，表1给出了相对湿度、地面温度、平均地面风速、静风日数（日平均分速≤3 m/s）和大风日数（日平均风速≥10 m/s）与年总持续性霾日数的相关关系。

表1 中国中东部地区年均持续性霾日数与有关气象要素之间的相关关系

Table 1 The correlation coefficients between annual persistent haze days and relevant meteorological factors across central and eastern China

	平均值	气候倾向率(10 a)	相关系数	信度检验
相对湿度	65.80%	－0.94%	－0.49	99.90%
地面温度	11.95 ℃	0.32 ℃	0.42	99.90%
地面风速	2.22 m/s	－0.09 m/s	－0.43	99.90%
静风日数	274.70 d	14.20 d	0.61	99.90%
大风日数	18.12 d	－4.60 d	－0.52	99.90%

由表1可知，相对湿度、温度、风速和静风（大风）日数都与持续性霾日数显著相关，通过了0.05的显著性检验。且在年际尺度上，相对湿度与地面风速都和持续性霾日数呈负相关，相关系数分别为－0.49与－0.43。年平均相对湿度和地面风速都呈减小趋势，气候倾向率分别为－0.94% (10 a)$^{-1}$、－0.09 m s^{-1} (10 a)$^{-1}$，说明相对湿度和风速的减小有利于持续性霾事件的出现。温度增长率为0.32 ℃ (10 a)$^{-1}$，与持续性霾日数呈正相关（相关系数为0.42）。温度的增加会加重蒸发量与大气持水量，利于污染粒子的吸湿性增长(胡亚旦和周自江, 2009)，从而增加持续性霾的发生。

大风日数和静风日数的变化可以在一定程度上表征大气稳定度的变化(宋连春等, 2013)。1980～2014年间，中东部地区静风日数和大风日数基本

呈现相反的变化趋势。年平均静风日数为274.70，增加趋势明显，达到了14.2 (10 a)$^{-1}$，与持续性霾日数相关系数为0.61；而大风日数平均为18.12，减少明显，为−4.60 (10 a)$^{-1}$，与持续性霾日数相关系数为−0.52。静风条件下，往往可能伴有逆温层的出现，不利于污染物的扩散和垂直风切变的出现，气溶胶粒子可以长久的存在于空气中，导致持续性霾的出现。同时，维持一段时间的霾天气，若缺少大风的搬运，局地污染持续控制近地面层，使差的空气质量得以维持。因此近35年来静风日数的剧烈增加，大风日数的减少都不利于霾的扩散，这与前人对霾是研究结果相符合(Ding et al., 2017)。

5 2014年1月的气候异常特征

大气环流对霾的形成、输送和维持都起到了重要的作用。前人研究发现，持续性霾事件的发生多湿受到大尺度环流系统和行星尺度系统的影响。由前文已知，一年之中，1月持续性霾日数最多且变化最显著。而根据1月持续性霾日数演变情况（图7d）可知，2014年其持续性霾日数远远超过了2013年。为了了解其中气候因子起到的作用，图6给出了2014年1月对流层中层（500 hPa）和近地面层气象场的距平分布。

由1月海平面气压场显示（图7a），中国大陆主要被低气压所占据，而临近东海面有异常高压存在，导致了2014年1月东亚冬季风偏弱，中国绝大部分地区被偏南风所控制，也使得温度较常年偏高（图7c），相对湿度比常年异常减小。同时，在500 hPa高度上，异常高压维持在中国大陆，在渤海、京津冀地区存在高压中心，东亚大槽的减弱不利于槽后的北方冷空气南下，而是在俄罗斯地区由平直西风带直接输送到海洋上，使得中国地区地面风异常减弱。这种高低层的配合，使得南方暖湿空气可以更多的随低压东部的偏南风输送到中国北部地

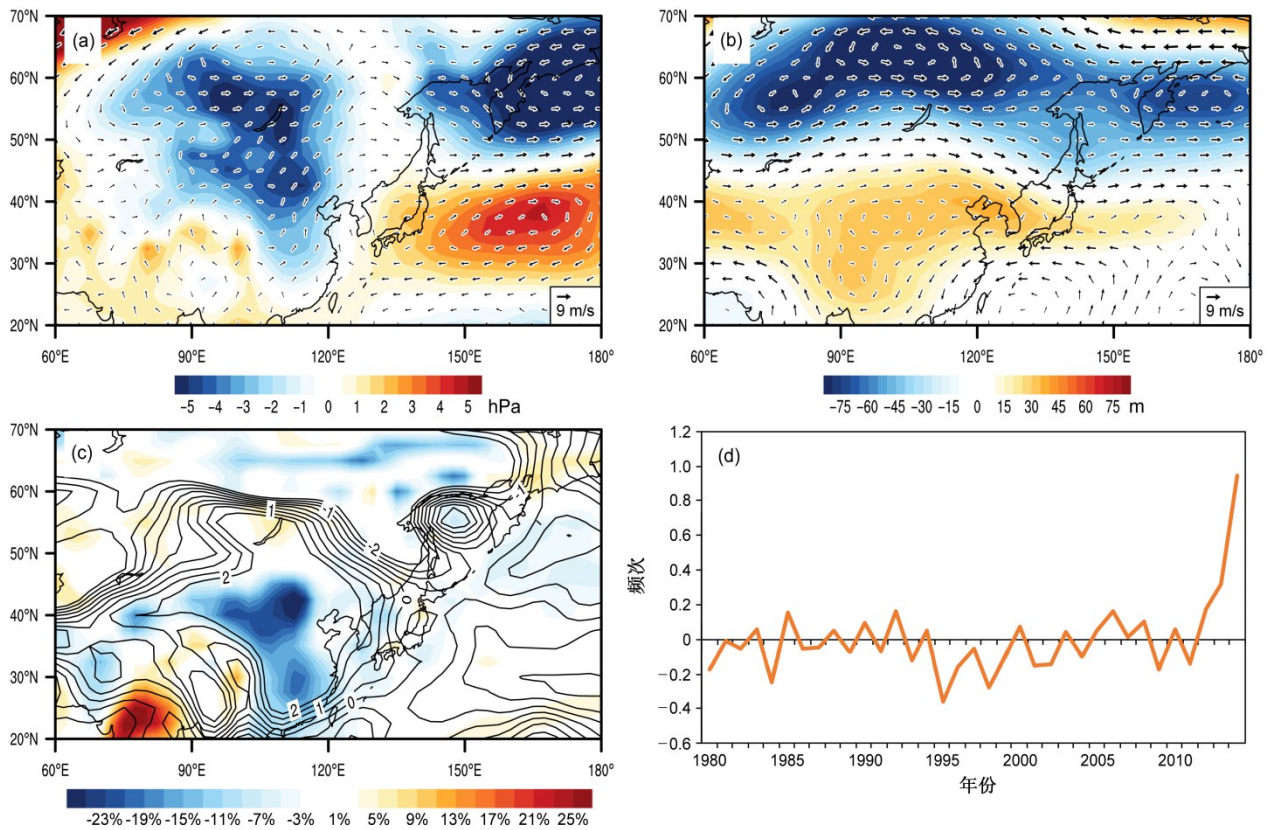

图7 2014年1月中国中东部地区（a）海平面气压场（阴影）和850 hPa风场（箭头）、（b）500 hPa位势高度场（阴影）和风场（箭头）、（c）近地面温度（黑色等值线，单位：℃）和相对湿度（阴影，%）的距平分布，（d）1980～2014年1月持续性霾事件频次的时间演变

Fig. 7 Composite anomalous distributions of (a) sea level pressure (shadings) and wind speed (vectors) at 850 hPa, (b) geopotential height (shadings) and wind speed (vectors) at 500 hPa, and (c) near-surface air temperature (black contours) and relative humidity (shadings, %), and (d) variations of the January frequency of persistent haze events across central and eastern China during 1980–2014

区，制造了霾出现的有利湿度条件，而地面风速的减小和温度的增加，抑制了对流发展，使得霾可以在低层聚集，造成了1月中国中东部地区持续性霾的异常维持。

6 结论

基于1980～2014年中国中东部地区324个气象台站的地面观测资料，通过对持续性霾天气的时空演变特征和有关气象要素和环流形势的分析，可以得到如下结论：

（1）我国中东部地区持续性霾日多发于东南部，主要呈现3个大值区，分别位于华北平原（主要是山西省和京津冀地区）、长江三角洲和四川盆地东部。而长江流域以南地区相较之下不易发生连续性霾天气。

（2）持续性霾日数呈现逐年增加趋势，增长率为0.79 (10 a)$^{-1}$，同时持续性霾日数的贡献比例逐年增加，达2.7% (10 a)$^{-1}$。上升最显著的区域主要是长江三角洲、山西省和河南省，下降最显著的地区为山东省、河南南部。

（3）持续性霾事件的变化呈现明显的季节特征，四季出现概率为冬季＞秋季＞春季＞夏季，1月出现频次最高。持续性霾天气夏季和秋季2001年后增加明显，分布为0.38 (10 a)$^{-1}$和0.46 (10 a)$^{-1}$。冬季在2010年以后霾日数增长明显。非持续性霾事件主要表现为春霾和冬霾。

（4）不利的气象条件会加剧持续性霾事件的出现和转移。持续性霾日数与相对湿度、平均风速、静风日数呈显著正相关关系，相关系数分别为－0.49、－0.43与0.61，而与大风日数呈显著负相关关系（相关系数为－0.52）。静风日数的增加，风速和大风日数的减少，都不利于污染物的扩散，近地层气溶胶污染积聚，从而造成了持续性霾天气的出现。

参考文献（References）

Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2007. Horizontal visibility trends in China 1981–2005 [J]. Geophys. Res. Lett., 34(24): L24706. doi:10.1029/2007GL031450

丁一汇, 柳艳菊. 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 [J]. 中国科学: 地球科学, 44(1): 37–48. 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 [J]. Science China Earth Sciences, 57(1): 36–46. doi:10.1007/s11430-013-4792-1

Ding Y H, Wu P W, Liu Y J, et al. 2017. Environmental and dynamic conditions for the occurrence of persistent haze events in North China [J]. Engineering, 3(2): 266–271.

Doyle M, Dorling S. 2002. Visibility trends in the UK 1950–1997 [J]. Atmos. Environ., 36(19): 3161–3172. doi: 10.1016/S1352-2310(02)00248-0

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 [J]. 高原气象, 27(6): 1392–1400. Fan Y Q, Li C Q. 2008. Visibility trends in Beijing, Tianjin and Hebei Province during 1980–2003 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27(6): 1392–1400.

符传博, 丹利. 2014. 重污染下我国中东部地区1960～2010年霾日数的时空变化特征 [J]. 气候与环境研究, 19(2): 219–226. Fu C B, Dan L. 2014. Spatiotemporal characteristics of haze days under heavy pollution over central and eastern China during 1960–2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19(2): 219–226. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13213

符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 2016. 1960～2013年华南地区霾污染的时空变化及其与关键气候因子的关系 [J]. 中国环境科学, 36(5): 1313–1322. Fu C B, Dan L, Tang J X, et al. 2016. Temporal and spatial characteristics of haze days and their relations with climatic factor during 1960–2013 over South China [J]. China Environmental Science (in Chinese), 36(5): 1313–1322. doi: 10.3969/j. issn. 1000-6923.2016.05.006

高歌. 2008. 1961~2005年中国霾日气候特征及变化分析 [J]. 地理学报, 63(7): 761–768. Gao G. 2008. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961–2005 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 63(7): 761–768. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2008.07.010

郭锋, 郑志刚, 田峰. 2014. 雾霾天气对哮喘病人呼吸功能和气道反应的影响 [J]. 中国伤残医学, 22(7): 111–112, 113. Guo F, Zheng Z G, Tian F. 2014. Effects of haze weather on respiratory function and airway response in asthmatic patients [J]. Chinese Journal of Trauma and Disability Medicine (in Chinese), 22(7): 111–112, 113. doi:10.13214/j.cnki.cjotadm.2014.07.098

Han R, Wang S X, Shen W H, et al. 2016. Spatial and temporal variation of haze in China from 1961 to 2012 [J]. Journal of Environmental Sciences, 46: 134–146. doi:10.1016/j.jes.2015.12.033

胡亚旦, 周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析 [J]. 气象, 35(7): 73–78. Hu Y D, Zhou Z J. 2009. Climatic characteristics of haze in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35(7): 83–78.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437–471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

孔锋, 代光烁, 李曼, 等. 2017. 中国不同历时霾日数时空变化特征及其与城镇化和风速的关联性研究(1961–2015) [J]. 灾害学, 32(3): 63–70, 95. Kong F, Dai G S, Li M, et al. 2017. Research on spatiotemporal patterns change of different duration haze days and its relationship with urbanization and wind speed in China from 1961 to 2015 [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 32(3): 63–

70, 95. doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.012

李雄. 2010. 1980年地面气象观测规范变更对能见度资料连续性影响研究 [J]. 气象, 36(3): 117−122. Li X. 2010. Effect of changing of ground weather monitoring specification in 1980 on visibility data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36: 117−122.

潘玮, 左志燕, 肖栋, 等. 2017. 近50年中国霾年代际特征及气象成因 [J]. 应用气象学报, 28(3): 257−269. Pan W, Zuo Z Y, Xiao D, el al . 2017. Interdecadal variation of haze days over China with atmospheric causes in recent 50 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 28(3): 257−269. doi:10.11898/1001-7313.20170301

Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al. 2001. Haze trends over the United States, 1980−1995 [J]. Atmos. Environ., 35(30): 5205−5210. doi:10.1016/S1352-2310(01)00317-X

石春娥, 邓学良, 杨元建, 等. 2014. 2013年1月安徽持续性霾天气成因分析 [J]. 气候与环境研究, 19(2): 227-236. Shi Chun'e, Deng Xueliang, Yang Yuanjian, et al. 2014. Analyses on the causes of the persistent haze in Anhui Province in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19(2): 227−236.

石春娥, 张浩, 杨元建, 等. 2018. 安徽省持续性区域霾污染的时空分布特征 [J]. 中国环境科学, 38(4): 1231−1242. Shi C E, Zhang H, Yang Y J, et al. 2018. The trend of persistent regional haze in Anhui Province and corresponding characteristics of aerosol pollution [J]. China Environmental Science (in Chinese), 38(4): 1231−1242. doi: 10.3969/j.issn.1000-6923.2018.04.003

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 [J]. 气候变化研究进展, 9(5): 313−318. Song L C, Gao R, Li Y, et al. 2013. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961−2012 [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9(5): 313−318. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.05.001

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变化特征 [J]. 气候与环境研究, 18(3): 397−406. Sun Y, Ma Z F, Niu T, et al. 2013. Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(3): 397−406. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12170

王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2014. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 44(1): 15−26. Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 57(1): 14−25. doi:10.1007/s11430-013-4773-4

吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 2004. 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 [J]. 环境科学学报, 34(1): 1−11. Wu D, Liao B T, Wu M, et al. 2004. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 34(1): 1−11. doi:10.13671/j.hjkxxb.2014.01.019

Wu D, Tie X X, Li C C, et al. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. Atmos. Environ., 39 (35): 6568−6577. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.07.061

吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. 气象学报, 64(4): 510−517. Wu D, Bi X Y, Deng X J, et al. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River Delta [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64(4): 510−517. doi:10.11676/qxxb2006.050

吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2010. 1951~2005年中国大陆霾的时空变化 [J]. 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 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68(5): 680−688.

吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. 环境科学学报, 32 (2): 257−269. Wu D. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 32(2): 257−269. doi:10.13671/j.hjkxxb.2012.02.011

Wu P, Ding Y H, Liu Y J. 2017. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing−Tianjin−Hebei region [J]. Adv. in Atmos. Sci., 34(4): 429−440. doi:10.1007/s00376-016-6158-z

谢元博, 陈娟, 李巍. 2014. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度PM2.5持续暴露的健康风险及其损害价值评估 [J]. 环境科学, 35 (1): 1−8. Xie Y B, Chen J, Li W. 2014. An assessment of PM2.5 related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days [J]. Environmental Science (in Chinese), 35(1): 1−8.

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 R H, Li Q, Zhang R N. 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 [J]. 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 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41(3): 311−318. doi: 10.7519/j. issn. 1000-0526.2015.03.006

张小娟, 陈娟, 郑小波, 等. 2014. 近50年来四川干能见度霾日数及消光系数时空变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 23(12): 1746. ZHANG Xiaojuan, CHEN Juan, ZHENG Xiaobo, et al. 2014. Temporal and spatial variations in dry visibility, haze day and extinction coefficients in recent 50 years over Sichuan Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 23 (12): 1746. doi:10.11870/cjlyzyyhj201412015

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 21−27. China Meteorological Administration. 2003. Standard of the Surface Observation about Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 21−27.