

Temporal and Spatial Distribution of Summer Haze-Fog and Its Increase in Eastern China from 1980 to 2012

Jingyi Qiu¹, Lifang Sheng¹, Yang Zhou¹, Wencai Wang¹, Qian Liu², Xiaodong Li¹, Qing Chen¹

¹College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Center for Monsoon and Environment Research, School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

Email: shenglf@ouc.edu.cn

Received: Nov. 13th, 2017; accepted: Nov. 28th, 2017; published: Dec. 6th, 2017

Abstract

Summertime haze-fog phenomena in eastern China region (east of 110°E and south of 42°N) are more frequent than in western region. The frequency and annual growth rate of haze-fog in the region north of 30°N were obviously higher than those in the southern region. It was found that the extensive reduction of windy days in the north region was the main cause of the rapid increase of haze-fog, besides the pollution emissions. Comparisons of the atmospheric circulations in the persistent haze-fog weather days indicated that the common feature is the small wind near the ground both in the northern and southern regions. In addition, the circulation in the northern region was featured by the systematic southward airflow with dual effects of aerosol and water vapor transport. Areas affected by haze-fog in the southern region are under the control of closed and weak high pressure, and influenced by the systematic northward wind, which may transport pollutants from the northern region.

Keywords

Summer, Northern Region, Southern Region, Haze-Fog, Windy Day

1980-2012年夏季中国东部雾霾时空分布特征及增长原因初探

邱静怡¹, 盛立芳^{1*}, 周扬¹, 王文彩¹, 刘骞², 李晓东¹, 陈青¹

¹中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

*通讯作者。

文章引用: 邱静怡, 盛立芳, 周扬, 王文彩, 刘骞, 李晓东, 陈青. 1980-2012年夏季中国东部雾霾时空分布特征及增长原因初探[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(6): 739-750. DOI: 10.12677/ag.2017.76075

²中山大学大气科学学院, 季风与环境研究中心, 广东 广州
Email: shenglf@ouc.edu.cn

收稿日期: 2017年11月13日; 录用日期: 2017年11月28日; 发布日期: 2017年12月6日

摘要

中国夏季雾霾天气分布呈现东多西少的特征, 主要分布在 110°E 以东, 42°N 以南的东部地区。以 30°N 为界, 北方雾霾的发生频次及年际增长率明显高于南方。除了污染排放的原因, 大风日的大范围减小是导致北方雾霾快速上升的主要原因。对比南北方持续性雾霾天气过程的大气环流形势, 雾霾发生时近地面小风是其共同特征。此外, 北方雾霾区为系统性偏南气流, 它具有气溶胶和水汽输送的双重作用。南方雾霾区存在于闭合的弱高压中, 受系统性北向气流控制, 易于被输送来自北方的污染物。

关键词

夏季, 北方, 南方, 雾霾, 大风日

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雾和霾是两类天气现象, 但并不是两类完全独立的天气现象, 两者可以进行相互转化, 也可以同时存在。根据世界气象组织[1]定义, 它们都是由大量极为细小的颗粒物悬浮在空气中使得水平大气能见度降低的天气现象。因此, 将雾和霾结合在一起, 可以避免对雾和霾区分时可能产生的误差。

近 10 年来由于大气污染物排放持续加剧, 中国东部霾高发时段由冬季延伸至春、秋、夏季, 其呈现出大气环境恶化的“强信号”特征[2]。空间分布方面, 大部分研究表明, 全国平均年雾霾日东多西少, 其中长江中下游、华北和华南是我国雾霾的多发区, 华北、黄淮等东部季风区雾霾现象频发、重发[3] [4] [5] [6]。从时间演变来看, 我国年雾霾日呈现出明显上升的趋势, 冬季是雾霾日最多季节, 秋季、春季次之, 夏季最少[7] [8]。值得注意的是, 丁一汇等统计发现夏季霾日增长率在 2000 年以后快速增长, 明显高于其他季节[9]。此外, 多项统计表明京津冀地区夏季霾日增加最为明显, 快于其它三季[10] [11]。在此基础上, 其他学者探讨了风力条件、降水条件及季风环流的变化对雾和霾的影响, 还有学者在雾和霾的数值模拟及气溶胶特性方面也开展了相关研究, 这都为了解我国雾霾天气特征和制定相关的治理措施提供了科学依据[12]。

廖宏等研究发现, 与冬季风相比, 除了季风减弱影响污染物水平输运和垂直对流扩散, 夏季风特有的水汽输送条件对气溶胶的吸湿增长有着特别的影响[13]。曹子淇等研究发现, 在华北平原上夏季雾霾的发生与强烈的厄尔尼诺和拉尼娜事件有良好的关系, 在拉尼娜事件之后的夏季, 雾霾多发, 而在厄尔尼诺事件之后的夏季, 雾霾少发[14]。廖晓农等研究发现北京地区夏季发生持续性雾霾天气时, 气溶胶区域输送、环境大气保持对流性稳定、空气的高饱和度是其发生的重要条件, 其中, 夏季雾霾过程低层没有逆温, 但是北京上空一直维持较大的对流抑制能量, 它同样限制了污染物的垂直扩散[15]。

目前,关于夏季雾霾的气候特征分析不是很多,尤其是全国范围的夏季雾霾气候特征及变化趋势研究很少。在这种背景下,以雾霾频发的中国东部地区为研究对象,分析中国东部区域夏季雾霾的时空分布特征以及背后的气候原因,以期为夏季雾霾的短期气候预测提供科学支撑。

2. 资料和方法

2.1. 数据

全球地面气象站定时观测资料由中国气象局提供。本文选取的时间范围为 1980 至 2012 年,选取的气象要素包括每日四次(北京时间 02、08、14、20 时)的水平能见度(以下简称能见度)和天气现象。并对全国所有站点资料进行质量控制,将每月有能见度和天气现象记录不足 5 日的站点剔除,并且选取 1980~2012 年夏季 6~8 月连续无缺测的站点,其中,中国东部地区(110°~125°E, 18°~42°N)的连续站点共计 212 站,这些站点覆盖了中国东部地区全境且站点之间没有较大空白区域,认为这些站点的观测可以有效代表中国东部地区的区域特征。

本文研究采用的大气资料来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA-Interim 全球逐日再分析资料,包含风场、温度、湿度、位势高度以及边界层厚度数据等,垂直方向为 500 hPa 以下共 17 层的等压面数据,水平空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,资料起止时间为 1980~2012 年夏季 6~8 月。

TEMIS (Tropospheric Emission Monitoring Internet Service)是欧洲空间局(European Space Agency)用户数据计划中的一部分,本文使用了 TEMIS 所提供的 SO_2 柱浓度数据。需注意的是,卫星观测和反演的污染物柱浓度资料代表的是污染物排放到大气中后,经过一系列大气中的物理和化学过程的最终分布状态,这与实际排放是有一定差异的[16]。

2.2. 方法

采用日均值法记录雾霾日,剔除降水、雪暴、吹雪、烟幕、浮尘、扬沙、沙尘暴等非雾霾的视障现象,定义当地日均能见度小于 10 km 的事件作为一个雾霾日[16]。该方法能较好的表征长时间、大范围的雾霾天气过程,同时可以更好的与大气环流特征相结合。

采用线性回归、滑动平均方法进行雾霾日趋势变化分析,此外计算了某些变量之间的相关系数,置信度水平取 $\alpha = 0.01$ 。

3. 夏季中国东部雾霾的时空分布特征

3.1. 雾霾日空间分布特征

本文统计了夏季多年平均(1980~2012 年)的雾霾日数空间分布(图 1),其分布呈现东多西少的特征,雾霾高发区主要集中在 110°E 以东的中国东部地区和四川盆地,以及受沙尘影响明显的南疆地区。雾霾发生频次最高的区域主要集中在华北、黄淮、江淮、江南北部以及西南地区东部,夏季年均雾霾日可超过 10 天,这些地区均是中国大陆东部经济比较发达的地区。

通过计算 110°E 以东的中国东部地区各个站点雾霾日的增长趋势,并将通过置信度检验的站点绘图,可以更加准确的定量描述雾霾的时空分布特征(图 2)。在中国东部 212 个地面气象站中,有 138 个站点雾霾日呈现明显的增加趋势。其中,30°N 以北的地区共计 83 站,占比 60%,值得注意的是,雾霾日增长率大于 0.5 d/a 的站点共计 30 个,全部分布在 30°N 以北的地区,且大都位于平原或山麓平原地区。我们统计了排名前 10 的站点(表 1),增长最快的 10 站中,安徽省占 3 站,安徽蚌埠站增长最快,达 1.2 d/a;雾霾日增长最慢的中国大陆站点是辽宁沈阳站,增长率为-1.4 d/a。

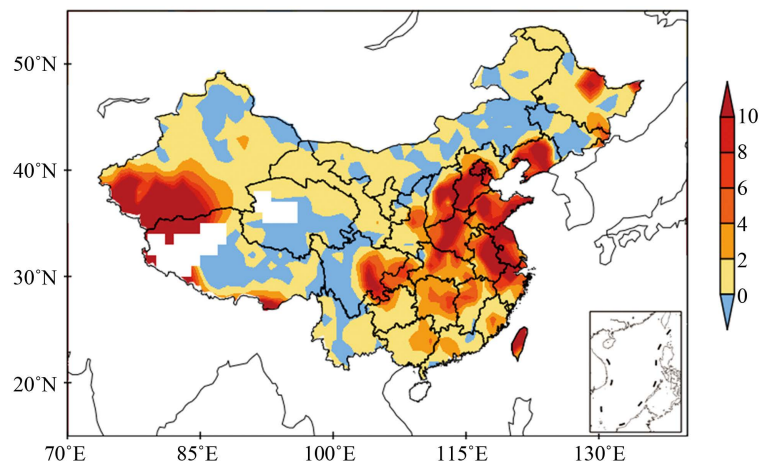


Figure 1. Climatological mean of summertime haze-fog days in China for the period of 1980-2012 (units: d/a)

图 1. 1980~2012 年夏季全国雾霾日平均分布(单位: d/a)

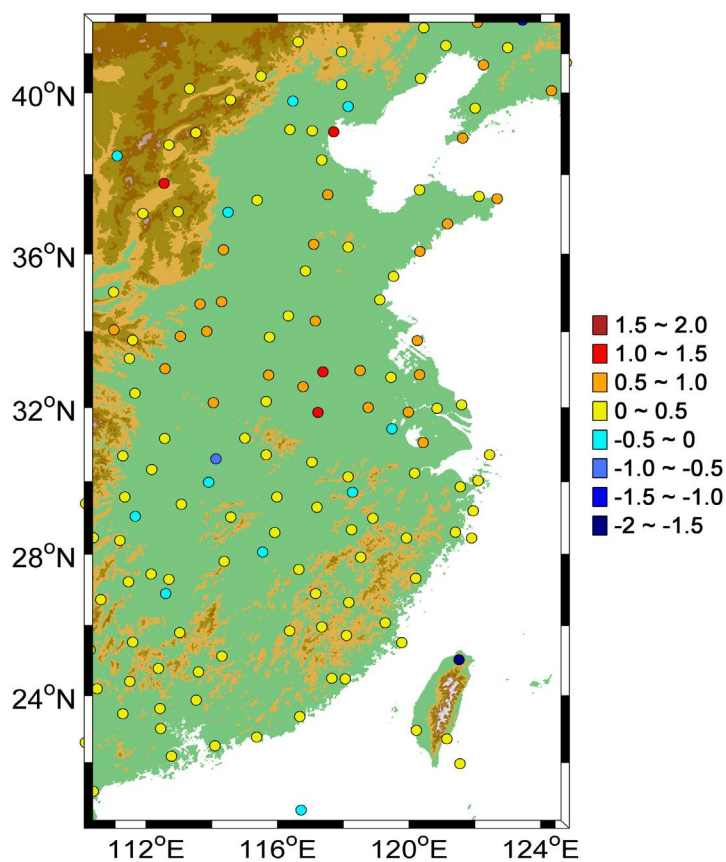


Figure 2. Growth rate of summertime haze-fog days in continuous observation site for the period of 1980-2012 (units: d/a)

图 2. 1980~2012 年夏季连续站雾霾日增长率分布(单位: d/a)

3.2. 雾霾日时间变化特征

由雾霾日平均值和变化趋势的空间分布(图 1、图 2)可以看出, 雾霾高发区主要集中在 110°E 以东的

Table 1. Rankings of the growth rate in summertime haze-fog days (units: d/a)**表 1.** 1980~2012 年地面气象站夏季雾霾日增长率排名(单位: d/a)

排名	增长最快		减少最快	
	站号	增长率(d/a)	站号	增长率(d/a)
1	安徽蚌埠	1.2	台湾台北	-1.9
2	安徽合肥	1.1	辽宁沈阳	-1.4
3	天津塘沽区	1.0	湖北武汉	-0.6
4	山西太原	1.0	广东东沙岛	-0.5
5	辽宁黑山	1.0	北京	-0.5
6	江苏盱眙	0.9	河北邢台	-0.3
7	江苏南京	0.8	江苏溧阳	-0.3
8	安徽寿县	0.8	江西樟树	-0.3
9	河南卢氏	0.8	湖南衡阳	-0.2
10	山东青岛	0.8	湖南常德	-0.1

中国东部地区,且以 30°N 为界,南北两侧雾霾日的增长趋势有较大差异。为了验证南方、北方雾霾增长的不同特征,本文将 110°E 以东的中国东部地区划分为北方(110°~125°E, 30°~42°N)、南方(110°~125°E, 18°~30°N)两个区域,分别探讨南北方雾霾的异同。研究统计了 1980~2012 年北方、南方夏季区域平均的雾霾日及其变化趋势(图 3),北方雾霾日的气候平均值为 7.1 d/a,南方为 2.7 d/a,北方明显多于南方。另外,近 30 年南北方地区雾霾均呈现显著上升趋势(通过 99%置信度检验),北方雾霾日的增长率为 2.4 d/10a,即每 10 年北方雾霾日增加 2.4 d,结果明显高于南方(南方增长率为 0.5 d/10a)。5 年滑动平均值结果表明,近 30 年南北方总体变化趋势较为一致,2000 年以前处于缓慢上升阶段,雾霾少发,低于 33 年平均值,2000 年以后快速上升,雾霾发生频次迅速攀升,并在之后的历史时期在正位向震荡。综上所述,南北方年际变化的趋势是一致的,但北方雾霾的均值和增长趋势均高于南方。

进一步统计北方、南方夏季各年代区域平均雾霾日及其增长趋势(表 2)。南北方 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代、21 世纪 00 年代区域平均雾霾日逐年代增长,其中,21 世纪 00 年代北方、南方地区平均雾霾日分别是 20 世纪 80 年代的 2.1 倍和 1.5 倍,可见中国东部地区雾霾整体增多,但增长速率南北方有差异。由年代内增长趋势(表 2)发现,北方雾霾日各个年代内均有显著增长(增长率均通过 99%置信度检验):80 年代增长率为 0.17 d/a;进入 90 年代后增长速率有所减缓,为 0.15 d/a;21 世纪后增长加速,增长率为 0.30 d/a,即雾霾日每年以 0.3 天的速度增长。南方地区,各个年代际内雾霾日的增长率均为正值,但未通过置信度检验,呈现不显著的上升趋势。

3.3. 雾霾日季节内变化特征

分别统计 1980~2012 年 6、7、8 月北方、南方区域平均雾霾日及其增长趋势(表 3)。北方地区,各月均呈现显著的上升趋势(通过 99%置信度检验),增长率分别为 0.8 d/10a、0.9 d/10a、0.8 d/10a。夏季年均雾霾日以 7 月最多为 2.5 d/a,其次是 8 月为 2.4 d/a,最少的是 6 月为 2.2 d/a。由此可见,北方季节内各月之间并无明显的差异,6、7、8 月年均值差异不大,均呈现上升趋势且增长率几乎没有差异。

对比南方地区,区域平均雾霾日以 6 月最多为 1.1 d/a,8 月次之为 1.0 d/a,7 月最少仅有 0.6 d/a,约是 6 月、8 月的 1/2、3/5。年际变率方面,6 月增长最快,为 0.3 d/10a,且通过了 99%置信度检验,7 月、

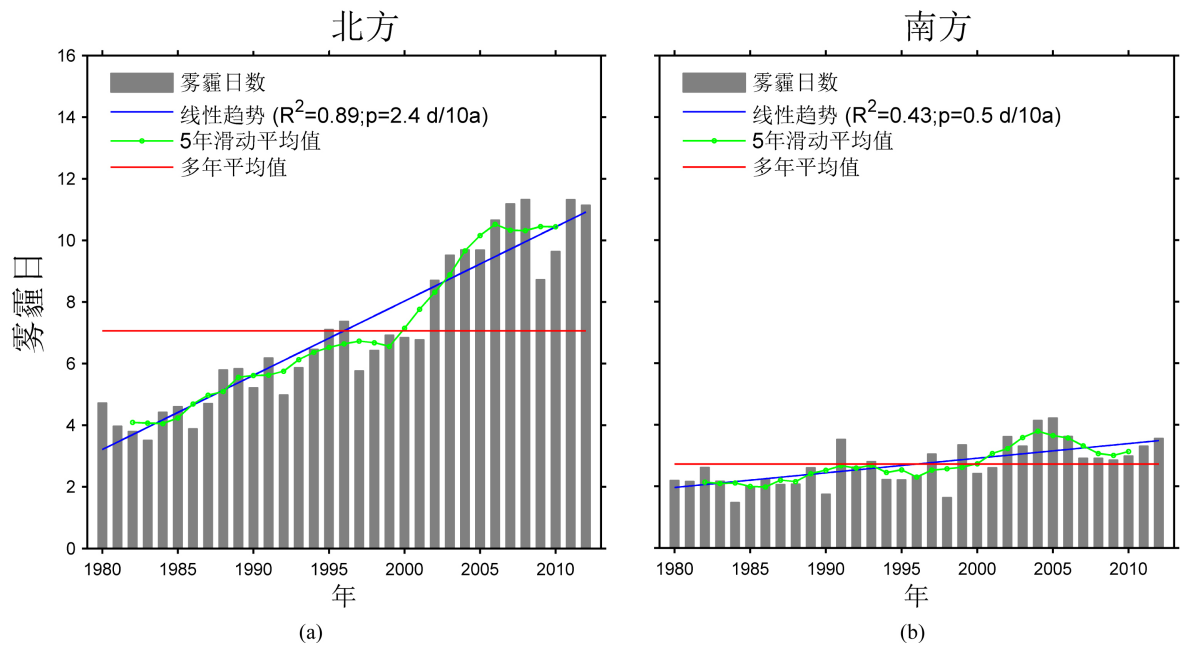


Figure 3. Time evolutions of summertime haze-fog days in (a) northern region and (b) southern region for the period of 1980-2012 (units: d/a)

图 3. 1980~2012 年夏季(a)北方和(b)南方区域平均雾霾日的时间演变(单位: d/a)

Table 2. Summertime haze-fog days in climatological mean and its growth rate in each of the years (units: d/a)

表 2. 各年代平均雾霾日及其增长率(单位: d/a)

		1980s	1990s	2000s
北方	平均雾霾日(d/a)	4.5	6.2	9.6
	雾霾日增长率(d/a)	0.17	0.15	0.30
南方	平均雾霾日(d/a)	2.2	2.6	3.3
	雾霾日增长率(d/a)	+	+	+

Table 3. Summertime haze-fog days in climatological mean and its growth rate in June, July, August

表 3. 1980~2012 年 6、7、8 月北方、南方区域平均雾霾日及其增长趋势

		6 月	7 月	8 月
北方	平均雾霾日(d)	2.2	2.5	2.4
	雾霾日增长率(d/10a)	0.8	0.9	0.8
南方	平均雾霾日(d)	1.1	0.6	1.0
	雾霾日增长率(d/10a)	0.3	+	+

8 月呈现不显著的上升趋势, 未通过置信度检验。由此可见, 南方季节内各月之间差异较明显, 夏季雾霾日的增长以 6 月雾霾日的增多为主。

综上所述, 中国夏季雾霾天气主要分布在 110°E 以东的中国东部地区, 且呈现增长趋势, 进入 21 世纪后, 增长速率明显加快。以 30°N 为界, 北方和南方地区雾霾时空分布差异较大: 首先, 北方地区雾霾的发生频次明显多于南方; 其次, 北方地区雾霾日的年际增长明显快于南方; 最后, 北方季节内 6、7、8 月未发现明显差异, 均呈现明显的上升趋势, 但南方雾霾的增长则以 6 月雾霾的增多为主。

4. 南北方夏季雾霾增长成因分析

雾霾天气的高频区主要集中在人口较为密集、经济发达的中国东部地区，人类排放的贡献不能忽视 [17]。此外，与环境流场、背景风场、相对湿度等气候背景因素的变化密不可分。因此，本文将结合污染排放和气象条件分析造成南方、北方地区雾霾时空分布差异的原因。

4.1. 污染排放对雾霾的影响

本文利用多年逐月大气 SO_2 柱浓度来代表污染物浓度的空间分布(图 4)和时间变化(表 4)。从空间变化的角度来看，中国东部地区北方的污染物浓度明显高于南方，华北地区是中国东部空气污染最严重的区域。此外，夏季平均污染物浓度的空间分布与雾霾日的空间分布十分相似，雾霾的多发区域基本都位于污染物浓度的大值区，这也说明排放对雾霾事件发生的重要作用。

从时间变化来看(表 4)，污染物浓度在夏季均呈现显著的上升趋势，北方和南方地区污染物浓度增长率分别为 $45.96 \times 10^{15} \text{ molecule/cm}^3$ 和 $33.15 \times 10^{15} \text{ molecule/cm}^3$ ，南北方污染排放的增长差距较小。值得注意的是，污染物浓度在夏季也存在月变化。南方地区污染物浓度的趋势变化与雾霾日的趋势变化较为一致，二者均在 6 月呈现明显的上升趋势，7、8 月呈现不明显的上升趋势。北方地区季节内排放增长和雾霾日增长差距较大，6、7、8 月雾霾日增长趋势几乎没有差异，但排放增长差异明显，6、7 月呈现显著的上升趋势，且 6 月增长速率是七月的 4.5 倍，而 8 月则呈现不显著的上升趋势。因此，结合图 4、表 4，

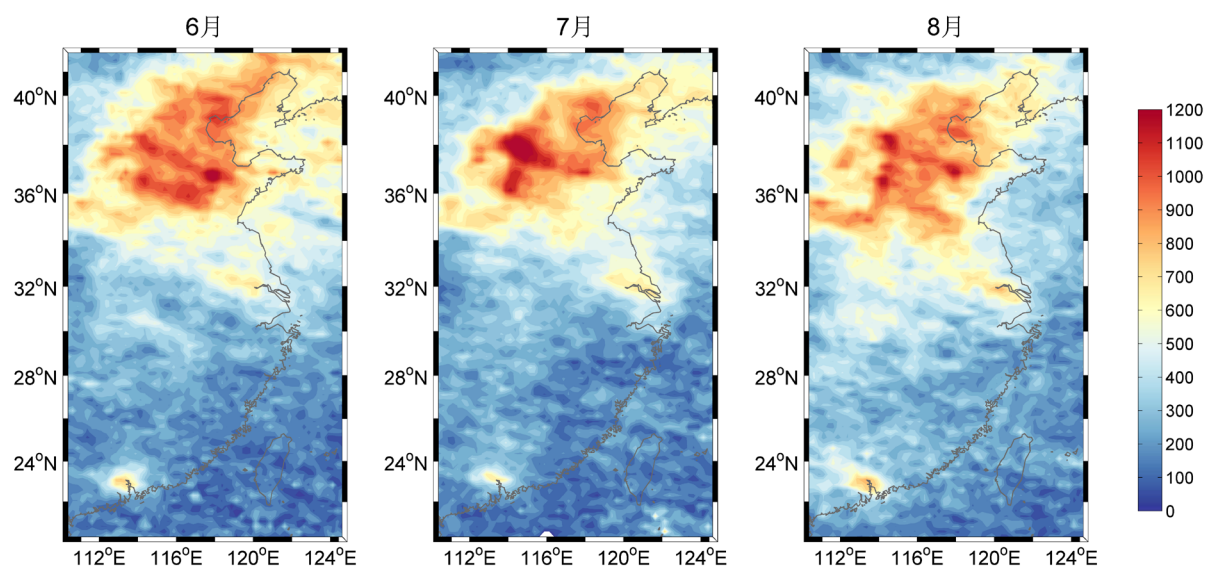


Figure 4. Climatological mean of summertime SO_2 concentration in Eastern China (units: molecule/ cm^3)

图 4. 中国东部夏季 SO_2 浓度的空间分布(单位: molecule/ cm^3)

Table 4. Growth rate of summertime SO_2 concentration and haze-fog days

表 4. 北方、南方 SO_2 浓度和雾霾日的增长趋势

		6 月	7 月	8 月	夏季
北方	污染物浓度增长率(molecule/ $\text{cm}^3 \cdot \text{a}$)	109.5	24.6	+	45.96
	雾霾日增长率(d/10a)	0.8	0.9	0.8	2.4
南方	污染物浓度增长率(molecule/ $\text{cm}^3 \cdot \text{a}$)	84.6	+	+	33.15
	雾霾日增长率(d/10a)	0.3	+	+	0.5

南方地区污染排放与雾霾在空间分布、时间演变上基本一致,说明污染排放是造成南方雾霾的重要原因。北方地区污染排放与雾霾在空间分布上较一致,但不能解释北方雾霾的快速增长,我们仍需从其它方面寻找原因。

4.2. 表面风速对雾霾的影响

地面风力条件被认为是稀释扩散大气污染物的最直接因素之一[18]。为考察年际尺度地面风力条件对雾霾天气的影响,对中国东部地区雾霾日呈现明显上升趋势的站点进一步分析。分别统计了站点小风日(日均风速 $< 3 \text{ m/s}$)、大风日(日均风速 $> 5 \text{ m/s}$)的增长率,并将通过显著性检验的站点绘图(图 5)。可以发现,中国东部地区大部分站点的大风日在逐年减少,小风日在逐年增加,这与雾霾日的逐年增加有非常强的对应关系。此外,对比南北方区域发现,小风日每年增加幅度超过 0.4 天的站数占北方总站数的 34.1%,南方地区为 29.0%,南北方相差并不大。北方地区的大风日每年减小幅度超过 0.2 天的站点占北方总站数的 13.6%,南方为 6.4%,北方约为南方的 2.1 倍,北方大风日的减小范围较南方大。

进一步对比大风日和雾霾日的年代际气候增长率(表 5)发现:80 年代雾霾日每年增长 0.17 天,大风日减少 0.18 天;进入 90 年代后雾霾日增长速率有所减缓,相对应大风日的减小速率也有所减缓,分别为 0.15 d/a 和 -0.17 d/a ;21 世纪雾霾日和大风日均加速,增长率分别为 0.30 d/a 和 -0.2 d/a 。同时对比统计了北方小风日数、南方大风日数、南方小风日数的气候增长率,并未发现类似北方大风日和雾霾日的

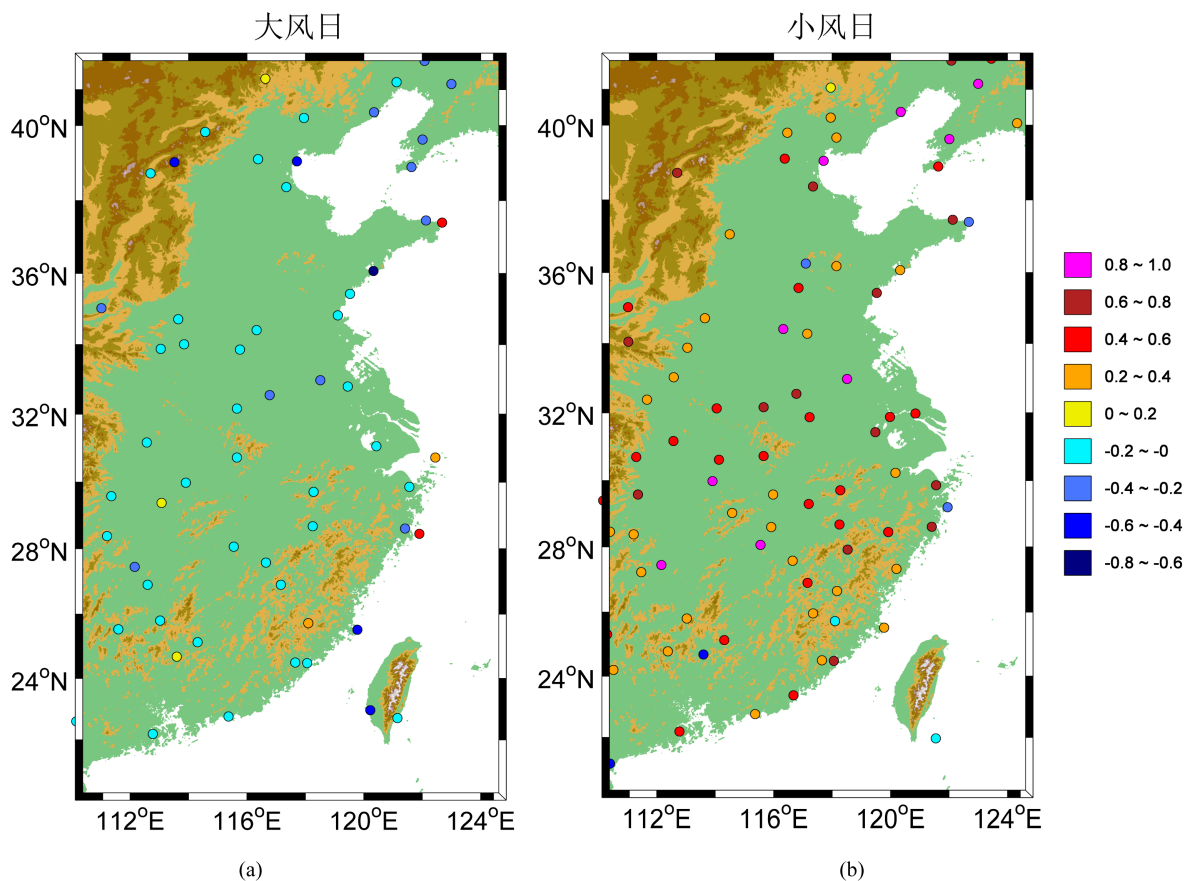


Figure 5. Growth rate of (a) large wind days and (b) small wind days in observation site for the period of 1980-2012 (units: d/a)

图 5. 1980~2012 年中国东部站点(a)大风日和(b)小风日增长率分布(单位: d/a)

Table 5. Growth rate of summertime haze-fog days and large wind days in northern region (units: d/a)**表 5.** 1980~2012 年北方区域大风日及雾霾日增长趋势(单位: d/a)

	1980 s	1990 s	2000 s
大风日增长率(d/a)	-0.18	-0.17	-0.20
雾霾日增长率(d/a)	0.17	0.15	0.3

对应关系。此外,分别计算了 1980~2012 年夏季北方、南方雾霾日和大风日的相关系数,北方的相关系数为-0.54,呈现明显的负相关关系,南方的相关系数为-0.32,仅通过了 95%的置信度检验。

已知雾霾天气的发生、维持和消散同时受到大气动力因子和热力因子的影响[19]。为了考察其他气象因素对雾霾发生的影响,本文选取了 13 个可能影响雾霾生成的变量因子,单独考察 1980~2012 年每个气象因子的年际变化并计算与雾霾日的相关系数(图略),变量因子包括站点温度、站点相对湿度、925 hPa 温度露点差、850 hPa 相对湿度、850 hPa 温度、垂向假相当位温差(850 hPa~1000 hPa)、500 hPa 和 850 hPa 水平风垂直切变、1000 hPa 和 925 hPa 水平风垂直切变、大气低层平均垂直速度(1000 hPa~850 hPa)、850 hPa 经向风、850 hPa 纬向风、边界层厚度、A 指数。对比所有变量因子与雾霾日的相关性,北方地区大风日和雾霾日的相关性最强,为~0.54,大风日的减少代表着近地面风力在减小,即对大气污染物稀释扩散的能力在降低,进而影响雾霾天气。南方地区与雾霾发生相关性最高的气象因子为 1000 hPa 相对湿度和近地面温度露点差,分别为-0.56 和 0.53,高相对湿度、低温度露点差易发生阴雨天气[20],说明南方降水对雾霾的清除作用非常明显,但不能解释雾霾发生和发展,结合上文,污染排放的增加是导致南方雾霾增加的主要原因。

综上所述,夏季南方地区污染排放与雾霾在空间分布和时间变化上基本一致,说明南方雾霾的增加主要受到污染排放的影响。夏季北方大风日的大范围减小是导致北方雾霾日数快速上升的主要原因,结合地形,北方以平原为主,更易受到近地面风力条件的影响,此外,大量研究一致表明,风速的减小与东亚夏季风的减弱密不可分[21] [22]。

5. 雾霾发生环流形势分析

天气环流形式在雾霾天气的形成、发展、和维持起到了重要的作用,所以研究雾霾天气发生时的环流形式意义重大[23]。研究发现,3 天以上持续性天气事件的发生主要受到大尺度环流系统和行星尺度环流系统的影响[24]。因此,对 1980~2012 年持续 3 天及以上出现雾霾的天气作为一次持续雾霾天气过程,对南北方大气环流形势分别进行统计分析。北方、南方分别出现 24 次、10 次持续雾霾天气过程,且持续性雾霾发生规律与雾霾日的时空分布规律基本一致,北方雾霾天气过程比南方多,南方雾霾事件以 6 月居多,北方 6、7、8 月均匀分布。

分别对北方个例、南方个例的环流场进行合成,并分析 500 hPa 位势高度场、850 hPa 位势高度场、近地面风场以及 850 hPa 温、湿、风距平场(图 6、图 7)。

由北方雾霾个例合成的 500 hPa 位势高度场(图 6(a))显示,北方雾霾区上层纬向环流较平直,无明显槽脊,使得污染物不易扩散,持续堆积。对应 850 hPa 位势高度场(图 6(b)),北方雾霾区处于副热带高压的外围,受高压脊控制,脊内气候较弱,通常伴有辐散和下沉运动[23]。分析 850 hPa 湿度场、风场和温度场的距平分布(图 6(c)、图 6(d)),雾霾区为南向气流控制,温度、湿度较气候平均值均上升,说明这支南向气流具有暖湿特性,起着气溶胶和水汽输送的双重作用,配合高压控制的下沉气流,造成雾霾天气的发展和持续。同时结合近地面风场(图 6(e)),表面风速只有 1.5 m/s 左右,使得污染物不易扩散,持续堆积。因此,北方雾霾发生时,上下环流场配置,雾霾天气持续。

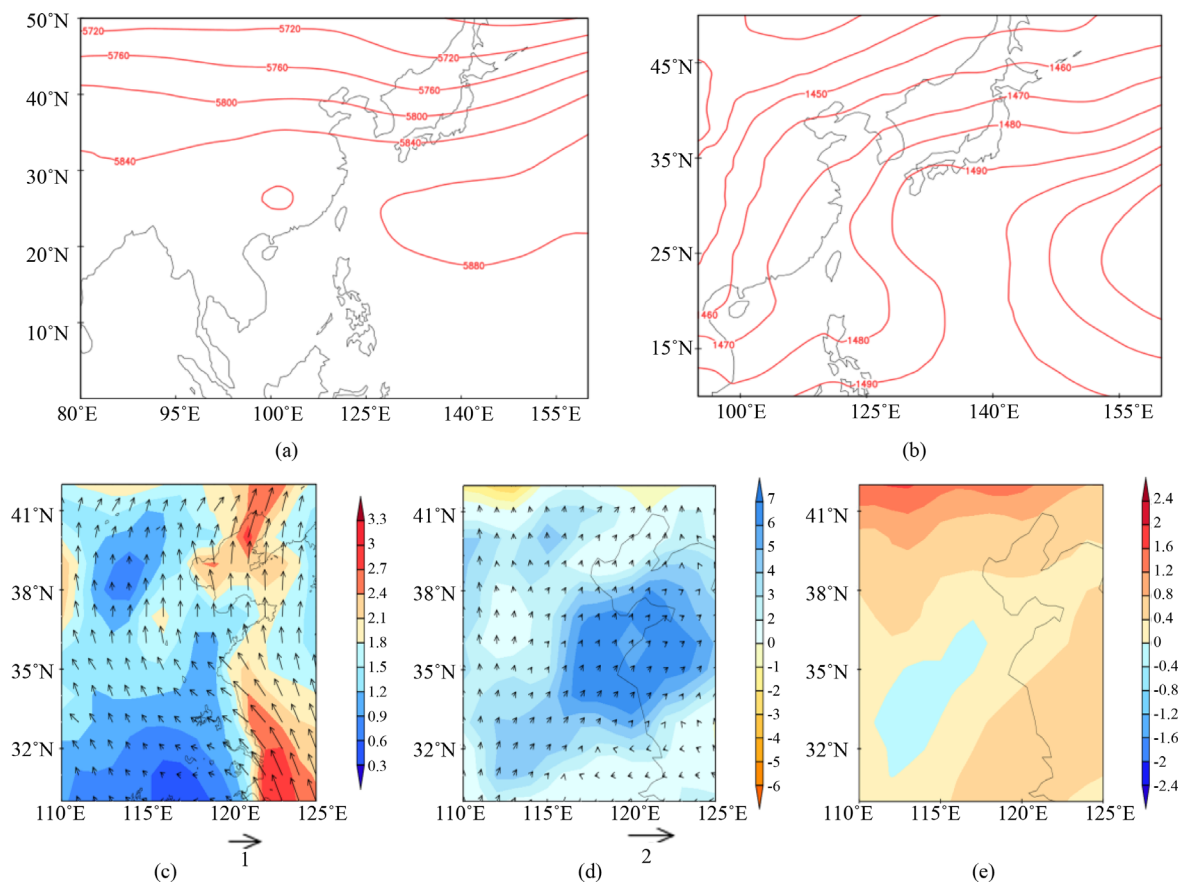


Figure 6. Atmospheric circulations in northern region. (a) 500 hPa geopotential heights field (units: gpm); (b) 850 hPa geopotential heights field (units: gpm); (c) 10 meter wind field (units: m/s); (d) 850 hPa relative humidity (shaded, units: %) and wind (vector, units: m/s) anomaly field; (e) 850 hPa temperature (units: °C) anomaly field

图 6. 北方雾霾个例合成的环流形式场。(a) 500 hPa 位势高度场(单位: gpm); (b) 850 hPa 位势高度场(单位: gpm); (c) 10 m 风场(单位: m/s); (d) 850 hPa 相对湿度(填色, 单位: %)和风(矢量, 单位: m/s)的距平场; (e) 850 hPa 温度距平场(单位: °C)

南方地区雾霾个例合成的 500 hPa 高度场(图 7(a))上, 南方雾霾区位于大槽底部的宽广地区, 西接副热带高压西南部。850 hPa 环流场(图 7(b)~图 7(d)), 雾霾区存在于闭合的弱高压中, 受北向气流控制, 极易输送北方的污染物, 湿度、温度较气候平均值下降, 说明北向气流具有干湿特性。同时结合地风场(图 7(e)), 北向风, 且风速很小, 不易于扩散。因此, 对流层低层系统性北风更易于输送来自北方的污染物, 从另一个侧面验证了南方雾霾发生与污染排放相关性最高, 但是要确定外源输送对南方雾霾的贡献还需要进一步的观测和分析工作。

6. 结论

本文使用地面气象站点观测资料和大气再分析资料, 研究了夏季中国东部雾霾天气的时空分布特点及可能原因, 得到以下主要结论:

1) 中国夏季雾霾天气分布呈现东多西少的特征, 主要分布在 110°E 以东, 42°N 以南的中国东部地区, 雾霾发生频次最高的区域主要集中在华北、黄淮、江淮、江南北部以及西南地区东部, 夏季年均日数大于 10 d。

2) 以 30°N 为界, 北方和南方地区雾霾时空分布差异较大。北方地区雾霾的发生频次明显多于南方;

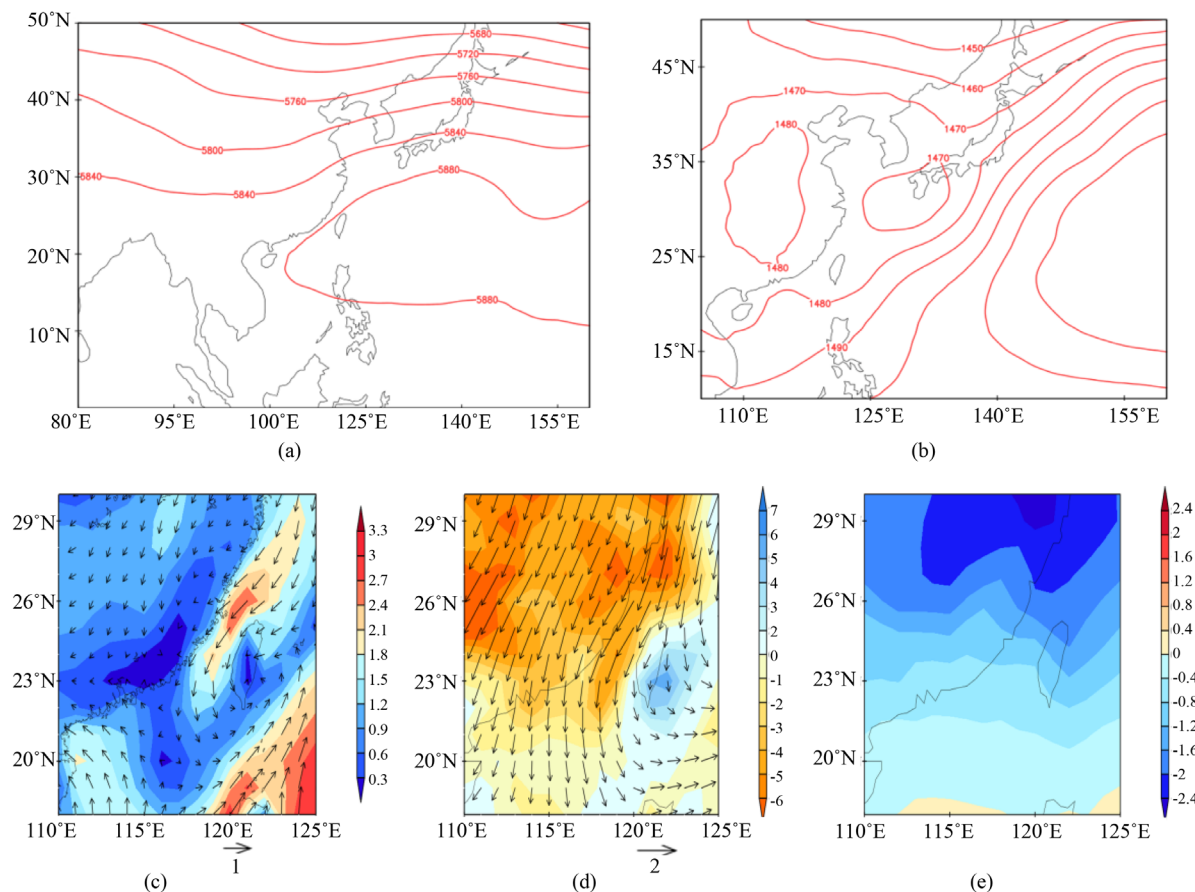


Figure 7. Atmospheric circulations in southern region. (a) 500 hPa geopotential heights field (units: gpm); (b) 850 hPa geopotential heights field (units: gpm); (c) 10 meter wind field (units: m/s); (d) 850 hPa relative humidity (shaded, units: %) and wind (vector, units: m/s) anomaly field.

图 7. 南方雾霾个例合成的环流形式场。(a) 500 hPa 位势高度场(单位: gpm); (b) 850 hPa 位势高度场(单位: gpm); (c) 10 m 风场(单位: m/s); (d) 850 hPa 相对湿度(填色, 单位: %)和风(矢量, 单位: m/s)的距平场; (e) 850 hPa 温度距平场(单位: °C)

北方地区雾霾日的年际增长明显快于南方。雾霾日增长率大于 0.5 d/10a 的站点共计 30 个, 全部分布在北方, 且北方区域平均增幅可达到 2.4 d/10, 远高于南方。6、7、8 月北方雾霾均呈现明显的上升趋势, 南方雾霾的增长则以 6 月最多。

3) 大风日的大范围减小是导致北方雾霾快速上升的主要原因, 南风雾霾的增加主要受到污染排放的影响。

4) 分析南北方持续性雾霾天气过程环流形势发现, 雾霾发生时近地面小风是其共同特征。此外, 北方对流层低层为系统性南向气流, 具有暖湿特性, 起着气溶胶和水汽输送的双重作用。南方雾霾区处于闭合的弱高压中, 对流层低层受系统性北向气流控制, 北向气流易于输送来自北方的污染物。但要确定外源输送对南方雾霾的贡献还需要进一步的观测和分析工作。

参考文献 (References)

- [1] World Meteorological Organization (2014) WMO-No.782 Aerodrome Reports and Forecasts.2014 Edition, World Meteorological Organization, Geneva, 71-72.
- [2] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 程兴宏, 孟莹莹, 丁国安. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”

- 影响下的年代际变异[J]. 科学通报, 2015(12): 1132-1143.
- [3] 宋连春, 高荣, 李莹, 王国富. 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, 2013, 9(5): 313-318.
- [4] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.
- [5] 高歌. 1961-2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 761-768.
- [6] Zhang, X., Wang, Y., Niu, T, Zhang, X., Gong, S., Zhang, Y. and Sun, J. (2012) Corrigendum to “Atmospheric Aerosol Compositions in China: Spatial/Temporal Variability, Chemical Signature, Regional Haze Distribution and Comparisons with Global Aerosols” Published in *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 779-799. *Atmospheric Chemistry & Physics*, **11**, 26571-26615. <https://doi.org/10.5194/acp-12-6273-2012>
- [7] 胡亚旦, 周自江. 中国霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 73-78.
- [8] Chen, H. and Wang, H. (2015) Haze Days in North China and the Associated Atmospheric Circulations Based on Daily Visibility Data from 1960 to 2012. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **120**, 5895-5909.
- [9] 丁一汇, 柳艳菊. 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, 2014(1): 37-48.
- [10] 范引琪, 李春强. 1980-2003 年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究[J]. 高原气象, 2008(6): 1392-1400.
- [11] 张英娟, 张培群, 王冀, 曲恩杉, 刘秋锋, 李刚. 1981-2013 年京津冀持续性霾天气的气候特征[J]. 气象, 2015, 41(3): 311-318.
- [12] 刘佳, 马振峰, 孙彧, 徐金霞, 孙蕊, 卿清涛. 1981-2014 年四川不同强度霾时空特征及气候成因研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4328-4339.
- [13] Zhang, L., Liao, H. and Li, J. (2010) Impacts of Asian Summer Monsoon on Seasonal and Interannual Variations of Aerosols over Eastern China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **115**, 223. <https://doi.org/10.1029/2009JD012299>
- [14] Cao, Z., Sheng, L., Liu, Q, Yao, X. and Wang, W. (2015) Interannual Increase of Regional Haze-Fog in North China Plain in Summer by Intensified Easterly Winds and Orographic Forcing. *Atmospheric Environment*, **122**, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.042>
- [15] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧. 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, 2014, 35(6): 2031-2044.
- [16] 刘骞. 冬夏季风期间中国东部雾霾的气候季节内变化[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2017.
- [17] 薛丽坤. 中国地区低对流层高层大气化学与长距离输送特征研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2011.
- [18] 胡亚旦. 中国霾天气的时空分布特征及其与气候环境变化的关系[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [19] 张人禾, 李强, 张若楠. 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, 2014, 44(1): 27-36.
- [20] 饶晓琴, 李峰, 周宁芳, 杨克明. 我国中东部一次大范围霾天气的分析[J]. 气象, 2008, 34(6): 89-96.
- [21] 江滢, 罗勇, 赵宗慈, 陶树旺. 近 50 年中国风速变化及原因分析[C]. 中国气象学会年会. 2007.
- [22] 陈练. 气候变暖背景下中国风速(能)变化及其影响因子研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [23] 孙彧, 牛涛, 乔林, 马振峰, 吴薇. 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, 2016, 21(5): 601-613.
- [24] 陈栋. 中国夏季暴雨的年代际变化特征及“鞍”型大尺度环流影响机理[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org