

霾天气影响下的京津冀气候变化特征与成因

窦以文^{1,2}, 丹利^{2*}, 胡保昆¹, 史君卿³ (1.北京市气象信息中心, 北京 100089; 2.中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3.北京农业职业学院, 北京 100093)

摘要: 利用 1961~2016 年京津冀 90 个国家级气象站的霾数据集、日平均相对湿度、14:00 能见度、日平均气温、日累计降水、日平均风速、辐射等数据, 采用 MASH 方法、线性趋势分析方法、曼-肯德尔(Mann-Kendall)法以及相关分析等方法研究了京津冀地区霾天气影响下的气候变化特征。结果表明: 京津冀地区年平均霾日数呈明显的增长趋势, 增长率为 5d/10a 以上, 大中城市年平均霾日数明显高于其他地区, 霾日数突变增多发生在 1992~1993 年, 在国家大气污染防治专项资金注入以后年平均霾日数增长趋势减缓; 京津冀地区霾日和非霾日年平均气温呈上升趋势, 年平均能见度呈下降趋势; 年平均降水日数总体趋势减少, 但是霾日降水日数逐年增加, 而非霾日呈现减少趋势, 两者呈现对称相反关系; 京津冀霾日和非霾日年平均风速均呈逐年下降趋势; 霾日数具有随着 GDP、能源消耗的增加逐年递增趋势。京津冀地区霾日和非霾日年平均总辐射和散射辐射都是逐年下降, 霾日比非霾日下降趋势更加明显, 年平均总辐射比散射辐射下降明显; 年平均霾日数与年平均总辐射、年平均风速、年平均降水呈负相关, 但是与年平均气温、GDP、能源消耗呈正相关。

关键词: 京津冀; 霾气; 温降; 水; 风速

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)02-0506-08

Characteristics and causes of climate change under haze weather in Beijing, Tianjin and Hebei. DOU Yi-wen¹, DAN Li^{2*}, HU Bao-kun¹, SHI Jun-qing³ (1.Beijing Meteorological Information Centre, Beijing 100089, China; 2.Key Laboratory of Regional Climate—Environment research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3.Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing 100093, China). *China Environmental Science*, 2019,39(2): 506~513

Abstract: Based on the daily datasets of haze, relative humidity, visibility at 14:00, air temperature, wind speed and radiation from 90 national meteorological stations in the Beijing-Tianjin-Hebei region (BTH) during 1961~2016, the climate change in BTH on haze days was analyzed by using the methods of MASH, linear regression, correlation analysis and Mann-Kendall. The results suggested that: the annual mean haze days in BTH showed an obvious enhanced trend, the increase was above 5d/10a, and the haze days in the middle and large cities were obviously higher compared to other areas. The sharp increase of haze days began in 1991~1992. The annual mean haze trend was slowed down under the initiation of special funds for the air pollution prevention and control. The daily mean temperature of haze and non-haze days showed an upward trend in BTH, whereas annual visibility decreased. The overall trend of annual precipitation decreased in BTH. The annual precipitation days of haze daily increased, while it showed a decreasing trend in non-haze days. The annual mean wind of haze and non-haze days in BTH decreased. The haze day increased with the enhanced GDP and energy consumption. The annual mean total radiation and scattering radiation of haze and non-haze days had been declining in BTH. The declined trend of haze days is more obvious in contrast with non-haze days, and the annual mean total radiation is decreased remarkable than the scattering radiation. The annual mean haze days were negatively correlated with annual mean values of radiation, wind speed and precipitation, but positively correlated with annual mean variables of temperature, GDP and energy consumption.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei; haze; surface air temperature; precipitation; wind speed

京津冀地区位于华北平原北部,北靠燕山山脉,南面为华北平原,西倚太行山,东临渤海湾,西北和北面地形较高,南面和东面地形较为平坦。由西北向的燕山-太行山山系构造向东南逐步过渡为平原,呈现出西北高东南低的地形特点。国内外学者对京津冀一带的气候变化做了较多的研究,他们发现华北地区或单一地区降水日数减少,降水总量减少,平均气温上升,平均风速减少趋势^[1-7]。由于经济规模的迅速

扩大和城市化进程的加快,中国大陆东部和南部霾天气日趋严重^[8-9]。霾天气时,气压降低、空气中可吸入颗粒物骤增、空气流动性差,有害细菌和病毒向周围扩散的速度变慢,导致空气中病毒浓度增高,疾病

收稿日期: 2018-07-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0602501);国家自然科学基金资助项目(41630532);北京市气象局科技项目(BMBKJ201401004)

* 责任作者, 研究员, danli@tea.ac.cn

传播的风险很高.霾影响最大的就是人的呼吸系统,造成的疾病主要是呼吸道疾病(支气管炎、肺炎甚至肺癌)、脑血管疾病、鼻腔炎症等^[10-14].随着京津冀整体发展定位^[15],研究京津冀地区整体的气候变化情况对京津冀空间协同发展、城镇化健康发展具有重要意义.研究霾天气特征和华北地区或单一地区气候变化文献较多,但是未见京津冀霾日和非霾日不同条件下气候变化及其起因方面的文章.

本文利用京津冀 90 台站天气现象霾记录、日平均相对湿度、14 时能见度、日平均气温、日累计降水、日平均风速、辐射和京津冀地区国内生产总值、能源消费总量、大气污染防治专项资金等数据研究京津冀地区 1961~2016 年霾天气影响下的气候变化特征.

2 数据与方法

本文所有的资料主要来源于国家气象信息中心和北京市气象信息中心提供的京津冀 90 台站(图 1)天气现象霾记录、日平均相对湿度、14:00 能见度、日平均气温、日累计降水、日平均风速、辐射等,资料时间从 1961 年 2016 年.

能见度资料在 1980 年前大多数采用等级人工观测记录,1980 年(3 个站是从 1961 年开始)至 2014 年(观象台和门头沟是 2013 年,其他有 2015 年、2016 年)采用的是单位为 km 的人工观测,之后采用的是自动观测,同时视程障碍现象也改为自动判识.本文采用了秦世广等^[16]的方法把 1980 年前等级资料和“km”资料进行了统一,同时对自动观测与人工观测资料也进行了统一.自动人工资料的统一主要是自动观测资料=人工观测资料×0.75,最后全部转化为“km”资料.表 1 为能见度级别、能见度级别、距离范围和距离估算值对应关系表.

霾日定义有很多种,主要是吴兑定义的 2010 年《霾的观测和预报等级》(QXT113-2010)和地面气象观测规范(2003 年版)等^[17-18].本文采用国家气象信息中心提供的霾数据集.霾日数平均值为选择站点有霾日数总和除以站点数;非霾日平均值为选择站点非霾日数总和除以站点数.

京津冀地区生产总值(GDP)和能源消费总量的数据来源于北京统计局、天津统计局、河北统计局官方网站提供的数据.数据的时间为 2005 年至 2016 年.大气污染防治专项资金的数据来源于财政部官

网,时间为 2013 年至 2016 年.

日平均气温、日累计降水和日平均风速是利用 MASH(Multiple Analysis of Series for Homogenization)^[19]方法得到观测数据集.霾日、年平均气温、年平均风速、年平均能见度采用线性趋势方法分析,并用 *T* 检验其显著性(*P* 值与显著性水平作比较来判断是否拒绝原假设,当 *P*<显著性水平时,拒绝原假设,否则接受原假设.).站点数据转化为空间数据采用克里金插值(Kriging)方法.霾日数突变检验采用曼-肯德尔(Mann-Kendall)法^[20].

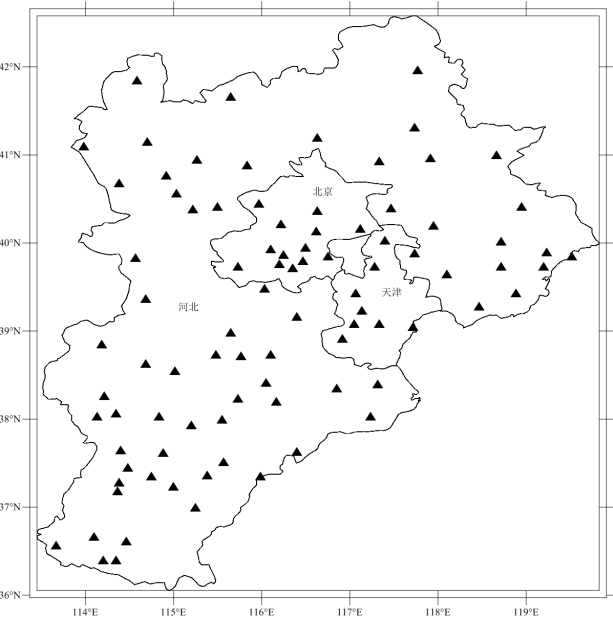


图 1 京津冀 90 气象台站分布
Fig.1 Distribution of 90 meteorological stations in BTH

表 1 能见度级别、距离范围和距离估算值对应关系
Table 1 The level, distance range and the estimated values of the visibility

能见度级别	能见度距离范围(km)	能见度距离估算值(km)
0	<0.05	0.025
1	0.05~0.2	0.1
2	0.2~0.5	0.31
3	0.5~1.0	0.73
4	1.0~2.0	1.42
5	2.0~4.0	2.73
6	4.0~10.0	6.72
7	10.0~20.0	13.23
8	20.0~50.0	27.80
9	≥50.0	50.97

3 结果分析

3.1 京津冀霾日数分析

1969 年以前京津冀霾日日数较少,而且每年霾日数维持在 2~3d 左右,从 1970 年至 1982 年每年霾日数以 0.7d 的趋势增长,1983 年至 1990 年霾日数逐年减少,从 1991 年至 2007 年霾日数每年以 0.5d 的速率增长,2008 年奥运会至 2009 年霾日数逐年减少,从 2010 年到 2014 年年平均霾日数增加到 48d,2014 年达到最大值,人为排放是造成京津冀地区污染的主要原因^[21].2015 年、2016 年霾日数下降,主要是由于国家大气污染防治专项资金投入使得霾日数减小(图 2 和图 3).年平均霾日数呈明显的增长趋势,增长率为 5d/10a 以上,显著性通过了 $\alpha=0.001$ 的 t 检验.这一结果与符传博等^[22]的研究结果一致.

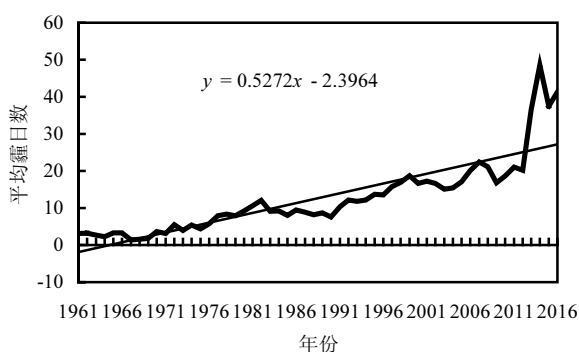


图2 京津冀 1961~2016 年平均霾日数逐年变化曲线

Fig.2 The year-to-year change of haze days averaged over BTH during 1961~2016

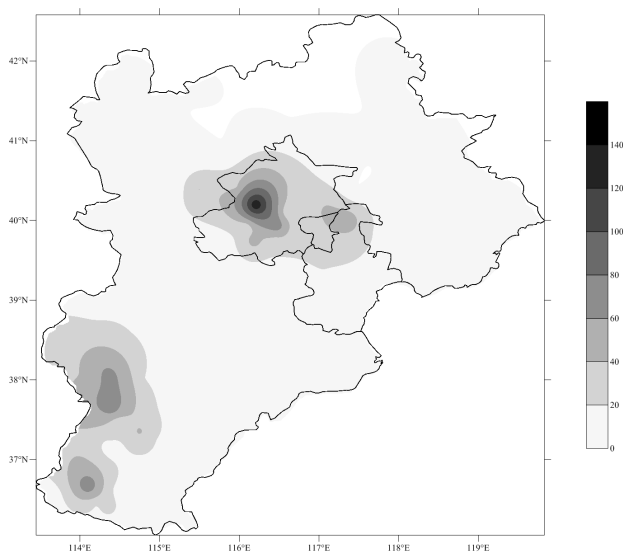


图3 京津冀 1961~2016 年平均霾日空间分布(d)

Fig.3 The spatial pattern of annual mean haze days in BTH during 1961~2016, units: day

从图 3 可以看出,1961~2016 京津冀地区年平均霾

日数分布很不均匀,北京、石家庄、邯郸等地区年平均霾日明显高于其他地区,与赵普生等^[23]的结果基本一致,这与城市经济发展、人口增长、污染物排放、太行山山脉的阻挡和背风坡气流下沉作用以及华北平原偏南气流的弱辐合作用等有直接的关系^[24-25].

从图 4 可以看出,1971 年以来,京津冀霾日数呈现明显的增加趋势,在 1975 年大大超过 0.05 显著性水平($u_{0.05}=1.96$)临界线,在 1976 年超过 0.001 显著性水平($u_{0.001}=2.56$).根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,霾日数增多是在 1991~1992 年开始突变.从图 2 和图 3 的 UB 曲线可以看到由于大气污染防治专项资金 2013 年、2014 年、2015 年、2016 年分别投入 50 亿元、98 亿元、106 亿元、112 亿元使得平均霾日数从 2015 年出现明显的降低,对改善大气环境起到了一定的作用.

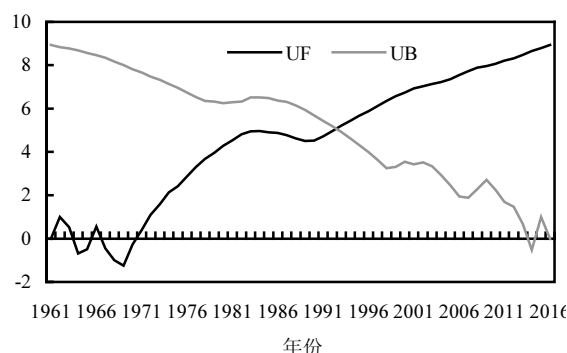


图4 京津冀平均霾日数曼-肯德尔统计曲线

Fig.4 The Kendall curve of haze days in BTH

3.2 京津冀地区气温和能见度变化

京津冀地区 1961~2016 年多年平均气温 11℃,从图 5 可以看出,年平均气温南部高于北部,城区高于郊区,从西北向东南呈现升高趋势^[26].京津冀地区整体温度是上升趋势,北京、天津、石家庄、唐山、邯郸等城市热岛效应比较明显^[27-30].从图 6 可以看出京津冀地区能见度北部高于南部,从图 5 和图 6 颜色对比可以看到,两者的中心点比较集中,由此可以看到年平均能见度与年平均气温有较高的相关性.

从图 7 中可以看到,霾日和非霾日年平均气温从 1961 年到 2016 年总体趋势是增长的.霾日的年平均能见度在 8.6km 左右,波动不大;非霾日年平均能见度总体呈下降趋势.从图 8 可以看到,非霾日天气的年平均气温距平从 1961 年至 2016 年曲线是波动

不大,维持在 0°C 左右,1997 年以前维持在负距平,1997 年以后是正距平比较多,总体来看年平均气温是上升的;霾日的年平均气温每年变化很大,总体呈上升趋势.霾日年平均能见度距平维持在 -1km 左右.从 2013 年开始在国家加大大气污染防治专项资金投入的情况下年平均能见度明显增加.在 1991~1992 年前霾日的平均温度在 $2\sim 6^{\circ}\text{C}$,说明霾日主要发生在冬季等低温情况下,而 1991~1992 年以后霾日的年平均温度在 10°C ,说明夏季的霾日明显增加,与图 4 的突变分析是一致的.

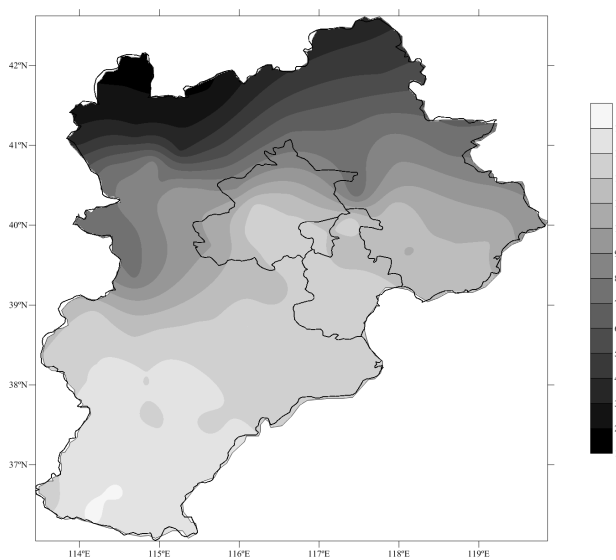


图 5 京津冀 1961~2016 年平均气温空间分布($^{\circ}\text{C}$)

Fig.5 The spatial pattern of annual mean temperature in BTH during 1961~2016 ($^{\circ}\text{C}$)

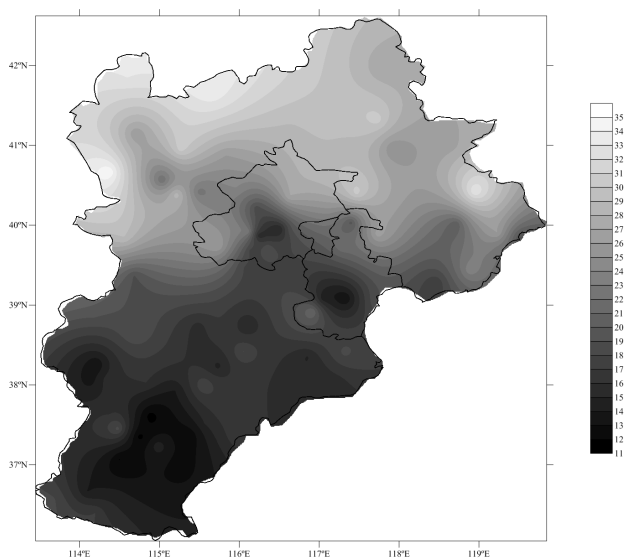


图 6 京津冀 1961~2016 年平均能见度空间分布(km)

Fig.6 The spatial pattern of annual mean visibility in BTH during 1961~2016, units: km

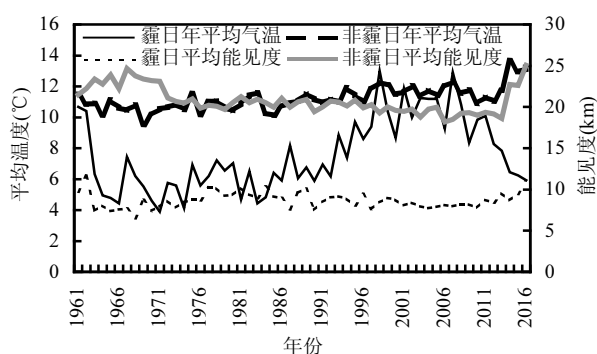


图 7 京津冀 1961~2016 年霾日和非霾日平均气温和能见度变化曲线

Fig.7 The annual mean temperature and visibility of haze and non-haze days in BTH during 1961~2016, units:km

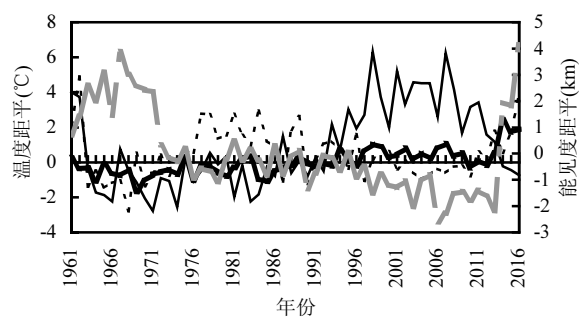


图 8 京津冀 1961~2016 年霾日和非霾日平均气温和能见度距平曲线

Fig.8 The anomaly of annual mean temperature and visibility of haze and non-haze days in BTH during 1961~2016

——霾日年平均气温距平 - - - - -霾日年平均能见度距平
- - - - -非霾日年平均气温距平 ——非霾日年平均能见度距平

3.3 京津冀地区降水变化

京津冀地区 1961~2016 年年平均降雨量在 $337.5\sim 778.7\text{mm}$,最小和最大年平均降雨量在 1965 年和 1964 年,分别为 641.2mm 和 778.7mm ,多年平均降雨量为 511.5mm .从图 9 可以看出,降水空间从南向北和从东向西逐渐减少,北京、天津以及河北东部承德、唐山、秦皇岛等沿渤海地区、西南部河北平山、涉县靠近太行山一带年平均降雨量较多,北部、西北部张家口地区和石家庄地区年平均降雨量偏少.

从图 10 可以看出,非霾日无降水日数远远高于霾日无降水日数,霾日无降水日数逐年增加,而非霾日无降水日数呈现减少趋势,年降水日数的减少使得气溶胶停留在大气中的时间延长,这在一定程度上加剧霾日数增加^[22],霾日数与降水日数呈现负相关.2015 年和 2016 年霾日年平均降水日数减少,而非

霾日年平均降水日数增加,可能与国家加大大气污染防治专项资金有关。

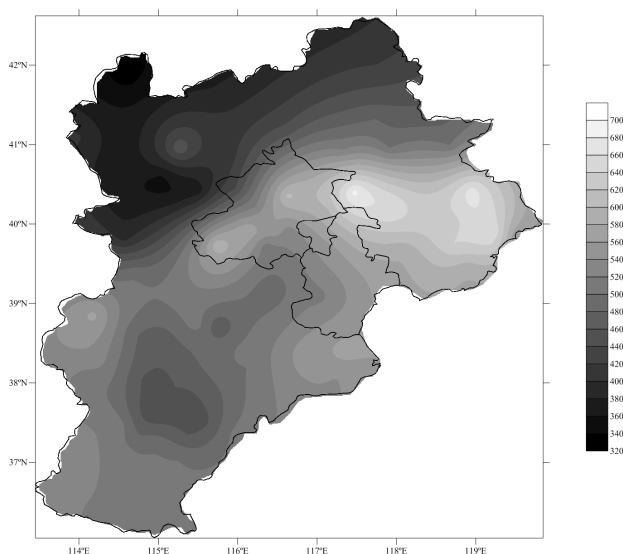


图9 京津冀 1961~2016 年平均降水空间分布(mm)

Fig.9 Spatial pattern of annual mean precipitation in BTH during 1961~2016 (mm)

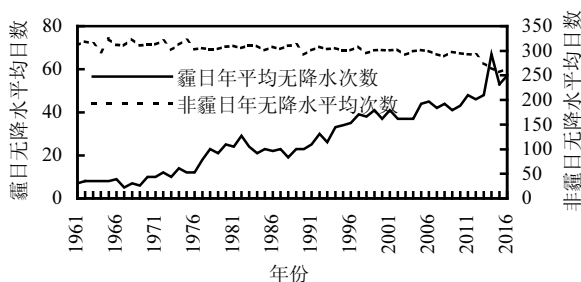


图10 京津冀 1961~2016 年霾日和非霾日年平均无降水日数分布

Fig.10 Annual mean days without precipitation of the haze and non-haze days in BTH during 1961~2016

3.4 京津冀地区风速变化

从图 11 可以看到,京津冀地区 1961~2016 年年平均风速在 2.0~3.2m/s 之间,最小和最大年平均风速在 2003 年和 1969 年,多年年平均风速为 2.4m/s.西北部、南部和沿海地区年平均风速偏大,保定、承德、邯郸、唐山等地区相对于张家口、沧州、邢台等地区年平均风速偏小。

从图 12 年平均风速变化曲线可以看出,年平均风速呈现明显减小趋势,霾日相对于非霾日年平均风速的曲线波动较大,霾日小于非霾日年平均风速,霾日和非霾日年平均风速减少率为 0.26m/(s·10a)和 m/(s·10a),其显著性通过了 $\alpha=0.001$ 的 t 检验.因风速

逐年减少,不利于颗粒物的扩散,从而促进了霾的形成,因此京津冀地区 1961~2016 年霾日呈逐年增加趋势。

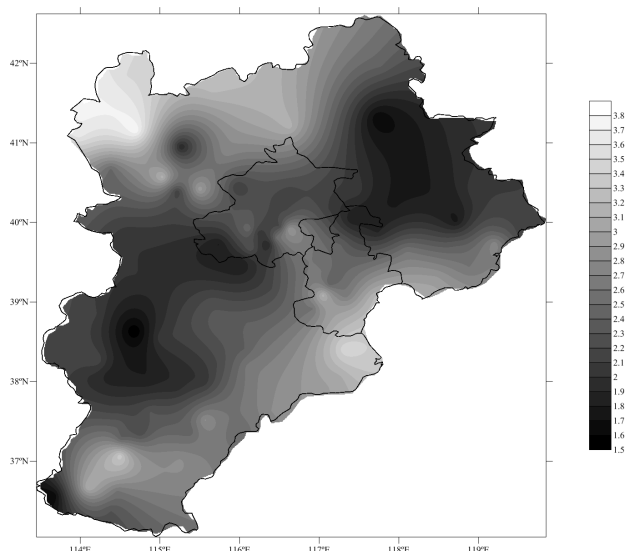


图11 京津冀 1961 年至 2016 年平均风速空间分布(m/s)

Fig.11 Spatial pattern of annual mean wind in BTH during 1961~2016 (m/s)

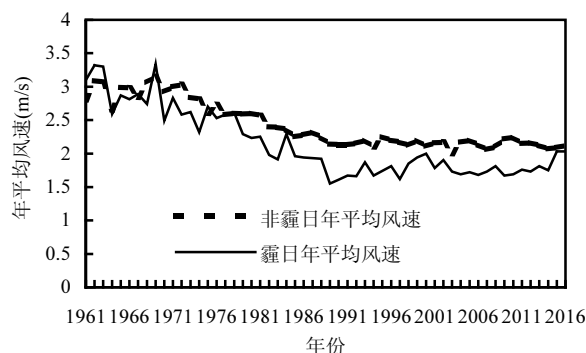


图12 京津冀 1961~2016 年霾日和非霾日年平均风速变化曲线(m/s)

Fig.12 Annual mean wind of haze and non-haze days in BTH during 1961~2016 (m/s)

3.5 京津冀地区辐射变化

从京津冀 1961~2016 年霾日非霾日总辐射逐年变化曲线图 13 可以看出,京津冀地区霾日总辐射年平均曲线是波动幅度比较大的,而非霾日相对较小,京津冀地区多年平均霾日和非霾日的总辐射分别为 1369.4MJ/m²、1424.8MJ/m².无论是霾日还是非霾日京津冀地区年平均总辐射是下降的,霾日和非霾日总的下降趋势为 78MJ/(m²·10a)、31MJ/(m²·10a).,通过风场分析,可知近几年日平均风速呈减少趋势,

对气溶胶颗粒起稳定作用,经过气溶胶对太阳辐射的综合作用,使京津冀地区年平均总辐射下降.2008年以后霾日和非霾日年平均总辐射呈现增加趋势,可认为政府对雾霾治理后,大气中气溶胶颗粒总体减少,增加了大气透明度,使年平均总辐射呈现增加趋势.

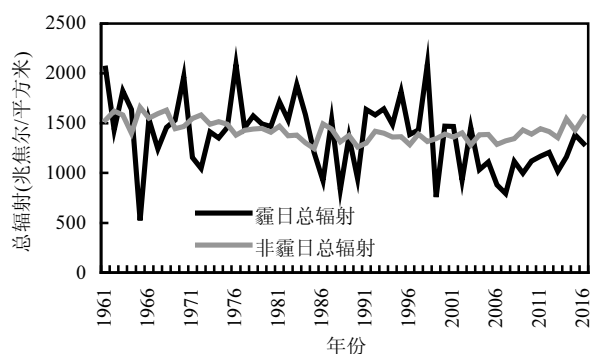


图 13 京津冀 1961~2016 年霾日非霾日总辐射逐年变化曲线

Fig.13 The annual mean total radiation of the haze and non-haze days in BTH during 1961~2016

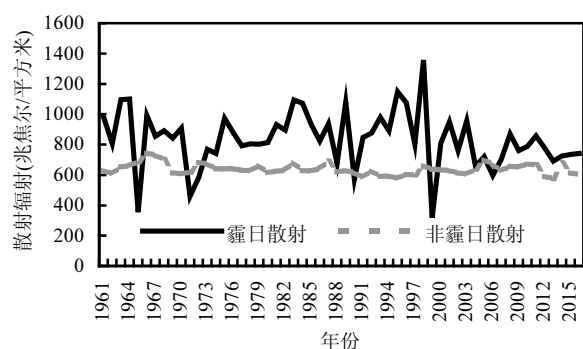


图 14 京津冀 1961~2016 年霾日非霾日散射辐射曲线

Fig.14 The annual mean scattering radiation of the haze and non-haze days in BTH during 1961~2016

从图 14 可以看出,京津冀地区霾日年平均散射辐射曲线是波动幅度比较大的,而非霾日相对较小,京津冀地区多年平均霾日和非霾日的散射辐射分别为 $836.3\text{MJ}/\text{m}^3$ 、 $638.6\text{MJ}/\text{m}^3$.无论是霾日还是非霾日京津冀地区年平均辐射是下降的,总的下降趋势为 $16(\text{m}^3 \cdot 10\text{a})$ 、 $6\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot 10\text{a})$.其原因与总辐射相同.

3.6 因子关联性分析

年平均霾日数与 GDP、能源消耗、年平均总辐射、年平均风速、年平均气温、年平均降水、年平均能见度的相关系数分别为 0.8、0.7、-0.39、-0.69、0.70、-0.19、-0.36,年平均能见度通过了 0.1 显著性

水平检验,其它均通过 0.001 显著性水平检验.这表明年平均霾日数与年平均总辐射、年平均风速、年平均降水呈负相关,与年平均气温、GDP、能源消耗呈正相关.年平均霾日数的增加与 GDP 和能源消耗的发展存在密切相关,随着 GDP 和能源消耗增长而增长;年平均总辐射、年平均风速和年平均降水的减少导致年平均霾日数的增加;由于年平均霾日数的增加导致空气流动减弱,从而使得年平均能见度降低和年平均气温的上升.

4 结论

霾日条件下,京津冀地区的年平均气温、降水和风速具有明显的波动,霾日数呈明显的上升趋势,但是人工污染防治对大气环境有改善作用;而非霾日条件下,气候变化呈现较好的平稳性.京津冀地区年平均霾日数与气象条件有一定的相关性,具体情况如下所述:

4.1 京津冀地区年平均霾日数呈明显的增长趋势,增长率为 $5\text{d}/10\text{a}$ 以上.由于中大城市人口增长、污染物排放增加,北京、石家庄、邯郸等年平均霾日数明显高于其它地区.霾日数增多是在 1991~1992 年开始突变.在大气污染防治专项资金注入的情况下,年平均霾日数增长趋势减缓.

4.2 京津冀地区霾日和非霾日年平均气温呈上升趋势,年平均能见度呈下降趋势.霾日相对于非霾日年平均气温曲线波动较大,霾日年平均能见度比较平稳.北京、天津、石家庄、唐山、邯郸等城市热岛效应比较明显.通过年平均气温距平可以看出霾日相比非霾日上升趋势更加明显.从 1961 年至 2016 年近 55 年中,非霾日天气的年平均气温曲线波动不大,维持在 $11\sim 12^\circ\text{C}$ 左右;霾日的年平均气温每年变化很大,在 $2\sim 12^\circ\text{C}$ 之间.

4.3 虽然总体年平均降水日数减少,但是霾日降水日数逐年增加,而非霾日降水日数呈现减少趋势,两者呈现对称相反关系.

4.4 京津冀霾日和非霾日年平均风速均呈逐年下降趋势.相对而言,霾日年平均风速比非霾日下降趋势较大一些.

4.5 霾日数具有随着 GDP、能源消耗的增加逐年递增趋势.霾日和非霾日的京津冀地区年平均总辐射和散射辐射都是逐年下降,霾日比非霾日下降趋

势更加明显,年平均总辐射比散射辐射下降明显,由于霾日空间微粒对散射辐射有促进作用,使得霾日散射辐射大于非霾日散射辐射。

4.6 年平均霾日数与年平均总辐射、年平均风速、年平均降水呈负相关,与年平均气温、GDP、能源消耗呈正相关。

参考文献:

- [1] 郝立生,闵锦忠,史印山.1961~2008年华北地区降水变化内在特征分析[J]. 安徽农业科学, 2010,38(24):13269-13274,13324.
Hao Lisheng, Min Jinzhong, Shi Yinshan. Analysis of the intrinsic characteristics of precipitation change in North China from 1961 to 2008 [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 2010, 38(24):13269-13274,13324.
- [2] 付桂琴,赵春生,张杏敏,等.1961~2010年河北省地面风变化特征及成因探讨[J]. 干旱气象, 2015,33(5):815-821.
Fu Guiqin, Zhao Chunsheng, Zhang Xingmin, et al. Change characteristic and its forming cause of wind speed in Hebei Province during 1961~2010 [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 2015, 33(5):815-821.
- [3] 李 春,刘德义,黄 鹤.1958~2007年天津降水量和降水日数变化特征[J]. 气象与环境学报, 2010,26(4):8-11.
Li Chun, Liu Deyi, Huang He. Characteristics of precipitation and precipitation days from 1958 to 2007 in Tianjin [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 2010,26(4):8-11.
- [4] Li Z, Yan Z W. Application of multiple analysis of series for homogenization to Beijing daily temperature series (1960~2006) [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010,27(4):777-787.
- [5] Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960~2008 based on homogenized observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011,28(2):408-420.
- [6] Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. 2015. Changes of precipitation and extremes and the possible effect of urbanization in the Beijing metropolitan region during 1960~2012 based on homogenized observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32(9):1173-1185.
- [7] 吴 兑,吴晓京,李 菲,等.1951~2005年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 2010,68(5):680-688.
Wu Dui, Wu Xiao-jing, Li Fei, et al. Temporal and spatial variation of haze during 1951~2005 in Cinese mainland [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010,68(5):680-688.
- [8] 符传博,丹 利.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, 2014,19(2):219-226.
Fu Chuanbo, Dan Li. Spatiotemporal characteristics of haze days under heavy pollution over central and eastern China during 1960~2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2014, 19(2):219-226.
- [9] 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.
Gao Ge. The Climatic Characteristics and Change of Haze Days over China during 1961~2005 [J]. Acta Geographica Sinica, 2008,63(7):761-768.
- [10] 白志鹏,蔡斌彬,董海燕,等.灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治, 2006,28(3):198-201.
Bai Zhi-peng, Cai Bin-bin, Dong Hai-yan, et al. Adverse health effects caused by dust haze [J]. Environmental Pollution & Control, 2006, 28(3):198-201.
- [11] 楚建军,陈 平,李 虎,等.大气污染与肺癌关系的回归分析[J]. 环境与健康杂志, 1993,10(5):201-204.
Chu Jianjun, Chen Ping, Li hu, et al. The analysis of ridge regression about air pollution factors of the lung cancer [J]. Journal of Environment and Health, 1993,10(5):201-204.
- [12] Simkhovich B Z, Kleinman M T, Kloner R A. Air pollution and cardiovascular injury epidemiology, toxicology, and mechanisms [J]. J Am Coll Cardiol, 2008,52:719-726.
- [13] Xuexi Tie, Dui Wu, Guy Brasseur. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China, Atmospheric Environment, 2009,43(14):2375-2377.
- [14] 鲁晓春,李小鹰.空气污染与心血管疾病[J]. 中华老年医学杂志, 2015,34(6):583-586.
Lu Xiao-chun, Li Xiao-ying. Air pollution and cardiovascular disease [J]. Chinese Journal of Geriatrics, 2015,34(6):583-586.
- [15] 《京津冀协同发展规划纲要》[N]. 中共中央政治局,北京: 2015.
Outline of Beijing-Tianjin-Hebei Cooperative Development Plan [N]. Political Bureau of the CPC Central Committee, Beijing: 2015.
- [16] 秦世广,石广玉,陈 林,等.利用地面水平能见度估算并分析中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征[J]. 大气科学, 2010,34(2):449-456.
Qin Shiguang, Shi Guangyu, Chen Lin, et al. Long term variation of aerosol optical depth in China based on meteorological horizontal visibility observations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2010,34(2):449-456.
- [17] 吴 兑,陈慧忠,吴 蒙,等.三种霾日统计方法的比较分析--以环首都圈京津冀晋为例[J]. 中国环境科学, 2014,34(3):545-554.
Wu Dui, Chen Hui-zhang, Wu Meng, et al. Comparison of three statistical methods on calculating haze days-taking areas around the capital for example, China Environmental science, 2014,34(3):545-554.
- [18] Ding Y H, Liu Y J. 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, 2013,57(1):36-46.
- [19] Szentimrey T. Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH). Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data. Budapest, Hungary, WMO, WCDMP-No. 1999,41:27e Cl.
- [20] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社, 2007.
- [21] 缪育聪,郑亦佳,王 姝,等.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, 2015,20(3):356-368.
Miao Yu-cong, Zheng Yi-jia, Wang Shu, et al. Recent advances in, and future prospects of, research on haze formation over Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2015,20(3):356-368.
- [22] 符传博,丹 利,唐家翔,等.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, 2016,36(5): 1313-1322.
- Fu Chuan-bo, Dan Li, Tang Jia-xiang, et al. Temporal and spatial characteristics of haze days and their relations with climatic factor during 1960~2013 over South China [J]. China Environmental Science, 2016,36(5):1313-1322.
- [23] 赵普生,徐晓峰,孟 伟,等.京津冀区域霾天气特征 [J]. 中国环境科学, 2012,32(1):31-36.
- Zhao Pusheng, Xu Xiaofeng, Meng Wei, et al. Characteristics of hazy days in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei [J]. China Environmental Science, 2012,32(1):31-36.
- [24] 吴 兑.灰霾天气的形成与演化 [J]. 环境科学与技术, 2011,34(3): 157-161.
- Wu Dui. Formation and evolution of haze weather [J]. Environmental Science & Technology, 2011,34(3):157-161.
- [25] 吴 兑,廖碧婷,吴 蒙,等.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, 2014,34(1):1-11.
- Wu Dui, Liao Bi-ting, Wu Meng, et al. 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, 2014,34(1): 1-11.
- [26] 张永欣,宋 明,杨艳娟.1956~2011 年华北地区气温和降水变化特征 [J]. 安徽农业科学, 2013,41(2):726-728.
- Zhang Yong-xin, Song Ming, Yang Yan-jun. The Change Characteristic of Temperature and Precipitation in the North China during 1956 and 2011 [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013,41(2):726-728.
- [27] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982,108(455):1-24.
- [28] 周雅清,任国玉.华北地区地表气温观测中城镇化影响的检测和订正 [J]. 气候与环境研究, 2005,10(4):743-753.
- Zhou Ya-qing, Ren Guo-yu. Identifying and Correcting Urban Bias for Regional Surface Air Temperature Series of North China over Period of 1961~2000 [J]. Climatic and Environmental Research, 2005,10(4): 743-753.
- [29] 王 君,严中伟,李 珍,等.近 30 年城市化对北京极端温度的影响 [J]. 科学通报, 2013,58(33):3464-3470.
- Wang J, Yan Z W, Li Z, et al. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978~2008 [J]. Chinese Sci. Bull., 2013,58:4679-4686.
- [30] 严中伟,王 君,李 珍,等.基于均一化观测序列评估城市化的气候效应 [J]. 气象科技进展, 2014,4(3):41-48.
- Yan Zhong-wei, Wang Jun, Li Zhen, et al. Assessing Climatic Effects of Urbanization Based on Homogenized Daily Observations [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2014,4(3):41-48
- 作者简介:** 窦以文(1970-),男,安徽芜湖人,高级工程师,硕士,主要从事气象信息处理和气候变化研究.发表论文 14 篇.