

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13213. Fu Chuanbo, Dan Li. 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.

重污染下我国中东部地区 1960~2010 年霾日数的 时空变化特征

符传博^{1,2} 丹利²

¹ 海南省气象台, 海口 570203

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

摘 要 对 1960~2010 年我国中东部地区霾日数的时空变化特征的分析结果表明: 1) 霾日数大值区主要分布在人口众多的四川盆地、北京—天津—河北地区、长江中下游地区以及广东—广西中部。2) 季节变化上, 霾日数冬季较多, 其中北京—天津—河北地区中部和西南部、四川盆地和东北地区东部和南部等地超过 20 d, 夏季最少。3) 霾日数气候趋势系数在北京—天津—河北地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区趋势系数高达 0.8。4) 霾日数呈现明显的上升趋势[3.69 d(10 a)⁻¹], 其气候趋势系数为 0.82, 通过了 99.9% 的信度检验。5) 我国中东部气溶胶光学厚度和对流层 NO₂ 的空间分布与年平均霾日数的分布基本一致, 近 51 年来能源消耗量的稳定上升趋势也表明, 人为因素导致的大气污染物排放量增加是引起霾天气出现频率上升的重要因素。

关键词 霾日数 气溶胶光学厚度 对流层 NO₂ 年际变化 中国中东部地区

文章编号 1006-9585 (2014) 02-0219-08

中图分类号 P427.1⁺22

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13213

Spatiotemporal Characteristics of Haze Days under Heavy Pollution over Central and Eastern China during 1960–2010

FU Chuanbo^{1,2} and DAN Li²

¹ Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203

² Key Laboratory of Regional Climate–Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The spatiotemporal characteristics of haze days over central and eastern China have been analyzed. The results show that the major haze values are distributed in the Sichuan Basin, the Beijing–Tianjin–Hebei area, the middle and lower reaches of the Yangtze River, and the central regions of Guangdong and Guangxi. The days with the heaviest and lightest amounts of haze occurred in winter and summer, respectively. The values of the haze days in the central and southwestern Beijing–Tianjin–Hebei megacity area, the Sichuan Basin, and the eastern and southern regions of Northeast China exceeded 20 d. In addition, the maximum climate trend coefficient of the Beijing–Tianjin–Hebei area and the Yangtze and Pearl river deltas was 0.8. The annual average haze days showed an obvious upward trend of 3.69 d (10 a)⁻¹ and a climate trend coefficient of 0.82, which passes 99.9% statistical significance. Moreover, the spatial distributions of aerosol optical depth (AOD) and tropospheric column NO₂ (TroNO₂) were consistent with the annual average haze days

收稿日期 2013-12-05 收到, 2014-01-07 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2010CB428502, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-EW-QN208, 国家自然科学基金项目 41275082, 财政部/科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006014

作者简介 符传博, 男, 1985 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事大气环境与气候模拟研究。E-mail: hnfuchuanbo@163.com

通讯作者 丹利, E-mail: danli@tea.ac.cn

over eastern China, and the energy consumption in China showed a stable upward trend during 1960–2010. These results indicate that the increase in air pollution disposal is a main contributing factor in the increase of haze days.

Keywords Haze day, Aerosol optical depth, Tropospheric column NO_2 , Annual variation, Central and eastern China

1 引言

霾和雾都是漂浮在大气中的粒子，但其组成和形成有明显区别。雾是指大量微小水滴或冰晶浮游在近地面空气中，使得地面水平能见度小于 1 km 的天气现象，而水平能见度介于 1~10 km 之间时称为轻雾；霾是指大量细微的干颗粒物等均匀地浮游在近地面空气中，使得地面水平能见度小于 10 km，造成空气普遍浑浊的天气现象（中国气象局，2003）。近年来，随着城市化进程的迅速发展，大气污染增加，尤其在城市空气污染严重的地区，灰霾天气更是频繁发生（吴兑，2012），这不仅造成交通事故增多，同时还严重威胁人们的健康（白志鹏等，2006），所以研究霾天气的时空变化特征意义重大。

我国学者早在 20 世纪 90 年代就对我国区域性雾的时空分布特点等做过研究（李子华等，1992；刘小宁等，2005；王丽萍等，2005；林建等，2008），而霾天气系统性的研究主要从 21 世纪初开始（吴兑，2003）。高歌（2008）总结了 1961~2005 年间中国霾日数气候特征及变化分析，得出全国平均年日数呈现明显的增加趋势，而人类活动造成的大气污染物增加及天气气候变化是长江中下游、珠江流域等地呈现增加趋势的原因之一。吴兑等（2010）研究了 1951~2005 年中国地区霾的时空分布特征，结果表明 20 世纪 80 年代以后霾日增加明显，而且与经济活动密切相关。Zhang et al.（2011）针对中国地区灰霾天气做了旋转经验函数正交分解（REOF）的地区分型。Liang et al.（2012）运用 WRF 模式研究了城市密度对雾的生消发展过程的影响。此外还有很多类似的研究（史军等，2010；伍红雨等，2011；孙彧等，2013）。

中国中东部地区是我国人口主要集中地，包括北京—天津—河北地区、长江三角洲地区（以下简称长三角地区）、珠江三角洲地区（以下简称珠三角地区）和四川盆地地区（经纬度见图 1）等，城市化和工业化的迅速发展使得大气污染物的过分排放，灰霾等大气污染事件的频繁发生已经引起政府和公众的广泛关注（吴兑，2012），本文主要利

用我国中东部地区 329 个气象站点 1960~2010 年地面水平能见度、相对湿度等数据，还有 MODIS 卫星反演的中国中东部气溶胶光学厚度（Aerosol Optical Depth, AOD）资料和 OMI 卫星反演的对流层 NO_2 （Tro NO_2 ）资料，以及全国能源消耗、民用汽车保有量等资料，讨论了我国中东部地区霾日数的时空变化特征及其可能相关原因。

2 资料及分析方法

2.1 资料

本文所用的资料是由国家气象信息中心提供的全国 756 个国家基准站地面观测资料，包括地面水平能见度、相对湿度、气温等，是我国最完整的地面气象观测资料，而且均通过了国家气象中心气象资料室的质量检验。在综合考虑站点资料的时间序列长度和连续性的基础上，共挑选出我国中东部地区 329 个气象站点（地理分布见图 1）。此外还用到了 MODIS 卫星反演的中国中东部 AOD 资料和

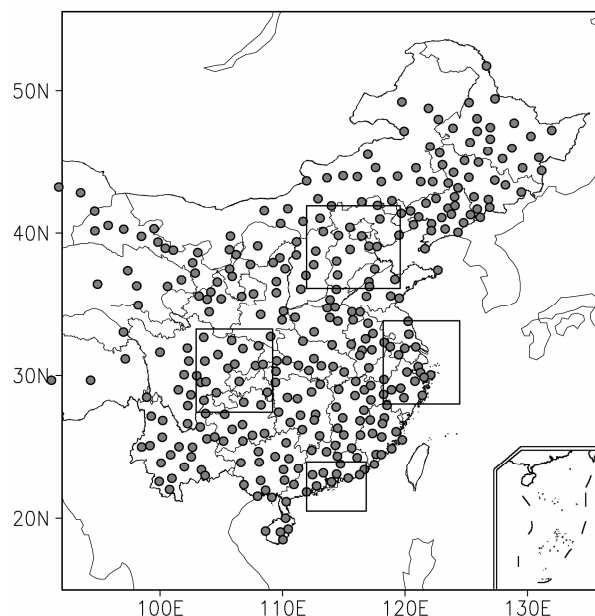


图 1 中国中东部地区 329 个气象观测站（4 个方框分别为北京—天津—河北地区、长三角地区、珠三角地区和四川盆地城市群区域位置）

Fig. 1 Locations of 329 weather stations over central and eastern China (four rectangles denote Beijing–Tianjin–Hebei, Yangtze River Delta, Pearl River Delta, and Sichuan Basin urban agglomerations)

OMI 卫星反演的对流层 NO_2 (TroNO_2)资料(肖钟湧等, 2011), 分辨率分别为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)和 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度), 以及中国统计局全国能源消耗总量、石油消耗量和民用汽车保有量等资料。

2.2 分析方法

目前国内外利用地面水平能见度资料, 同时辅助上相对湿度阈值来区分雾日和霾日的方法已经被广泛应用于讨论雾霾天气的研究中(Schichtel et al., 2001; 吴兑等, 2006; 吴兑等, 2010)。本文使用每天 14:00 的实测值, 以地面水平能见度小于 10 km 的观测资料来区分霾日和雾日, 观测资料必须同时满足以下 3 个条件: 14:00; 露(代码 01)、霜(02)、结冰(03)、烟幕(04)、霾(05)、轻雾(10)、雾(42); 相对湿度小于 90%的资料记为一个霾日, 相对湿度大于 90%的记为一个轻雾日。如果能能见度小于 1 km, 用同样的条件分别记为霾日和雾日。以相对湿度 90%为临界条件对雾(轻雾)、霾进行划分, 当相对湿度达到 90%以上时认为是雾, 小于 90%认为是霾。这样既可把雾中被误报的霾分离出来, 又可把霾中被误报的雾分离出去(吴兑, 2008)。水平能见度资料在 1980 年之前根据其数值大小将能见度分为 10 个等级, 但是自 1980 年起, 能见度资料则改为能见度距离, 根据能见度等级的规定, 等级 6 其能见度数值在 4~10 km 之间, 所以 1980 年以前能见度资料在等级 6 及其以下则认为能见度小于 10 km。本文主要利用上述方法, 提取出 1960~2010 年霾日进行分析。

此外, 为了了解气象要素的长期趋势变化, 计算了气象要素的时间序列与自然数序列之间的相关系数(施能等, 1995), 称为气候趋势系数, 并进行统计检验。本文在对我国中东部地区霾日数的长期变化进行讨论时, 还用到了回归分析、11 年二项式平滑、相关分析等统计方法(魏凤英, 2007)。

3 结果分析

3.1 霾日数的空间分布

从图 2 可以明显看出, 霾日数大值区主要分布在四川盆地、北京—天津—河北地区、长江中下游地区、东北地区南部和东北部, 以及广东西部和广西东北部, 其中最高值出现在北京—天津—河北地区西南部, 高达 90 d 以上。其次是华北中部和四川

盆地, 年平均霾日数为 60~80 d 之间, 东北地区南部和东北部为 40 d 左右, 长江中下游和广东—广西地区基本在 15~30 d 之间。这些地区是我国人口分布最为密集的区域, 城市规模大, 经济发达, 同时城市污染也最为严重, 以煤、石油等生物化石燃料为主的能源消费不断增加造成大气污染日趋严重, Wu et al. (2012) 的研究表明这些地区地面水平能见度近 50 年来均有不同程度的下降, 且以大城市最为明显。可见霾日数的分布与城市规模、工业化程度密切相关, 霾日数值分布较高的区域, 其城市发展规模均较大。这一特点与高歌(2008)、吴兑等(2010)、孙彧等(2013)的研究较为一致。

3.2 四季霾日数的空间分布及季节变化

图 3 表明我国中东部霾日数有明显的季节变化, 霾日数最多出现在冬季, 春季和秋季次之, 最少是夏季。我国霾日数大值区主要分布在 38°N 以南, 102°E 以东的地区, 冬季我国中东部 102°E 以东的地区霾日数基本到在 5 d 以上, 超过 20 d 的地区有北京—天津—河北地区中部和西南部、四川盆地和东北地区东部和南部等地。春季和秋季我国中东部地区霾日数的分布与冬季较为类似, 北京—天津—河北地区中部和西南部、四川盆地和东北地区东部和南部等地也是其大值分布区, 但是量值上有所减小, 主要分布在 10~20 d 之间, 局地可达 20 d 以上。另外春季在内蒙古西部、陕西西部和青海等地霾日数也有 5~10 d 的分布, 这可能与该地区春季沙尘天气频发有关(张莉和任国玉, 2003; 范一大等, 2005)。夏季霾日数的大值区范围有明显缩小, 只有在四川盆地和北京—天津—河北地区有 10 d 左右的分布, 局地可达 15 d。这可能与夏季降水量增多, 对大气污染物冲刷作用加强有关。而冬季气温较低, 城市中用煤量, 用电量相比夏季要多, 大气污染排放加剧, 使得冬季霾日数明显增加。综上, 我国中东部地区霾日数的季节变化明显。冬季是霾日数分布最多的季节, 主要分布在人口较为密集是北京—天津—河北地区中部和西南部、四川盆地和东北地区东部和南部等地。春季和秋季大值中心有所下降, 但是在内蒙古中部以西、陕西西部和青海等地霾日数在春季明显增加。夏季霾日数大值区范围最小, 只有在四川盆地和北京—天津—河北地区有明显分布。

从图 4 可以看出, 霾日数月季变化较为明显。霾日数的最大值出现在 1 月, 为 3.10 d, 随后明显

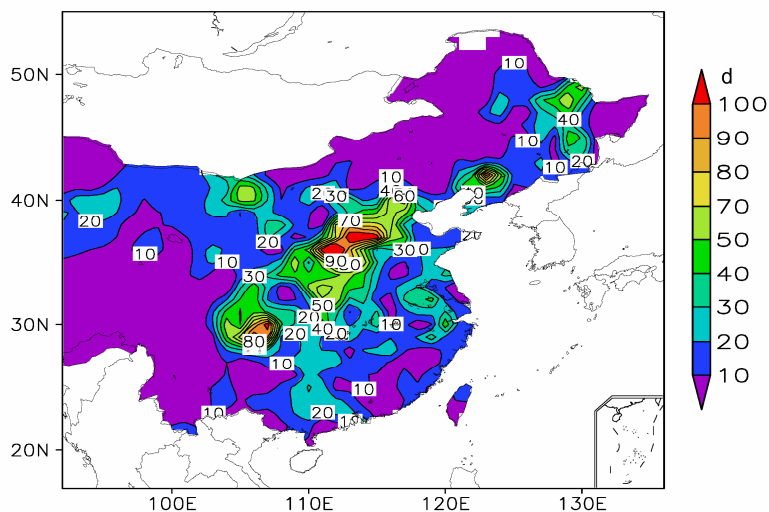


图 2 1960~2010 年中国中东部地区平均霾日数分布

Fig. 2 The distribution of annually mean haze days over central and eastern China during 1960–2010

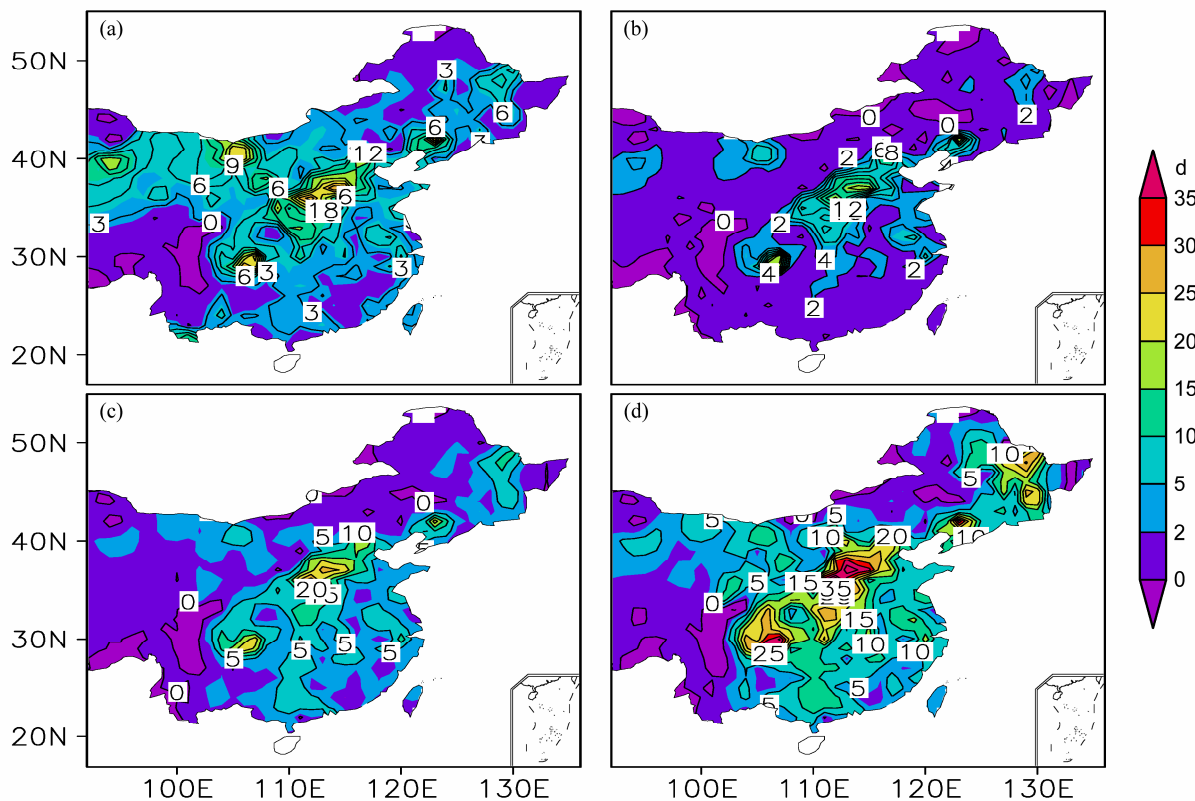


图 3 1960~2010 年中国中东部地区霾日数 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季季节平均分布

Fig. 3 The distributions of seasonal mean haze days over central and eastern China in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter during 1960–2010

下降,并在 8 月达到最小值,为 0.62 d。秋季又呈现出明显的上升趋势。总体而言,我国中东部地区霾日数最大值出现在冬季,最小值出现在 8 月,而且霾日数的变化幅度较大。

3.3 霾日数的趋势变化空间分布

从图 5 可见,我国内蒙古中西部、东北地区中部到西部地区、青海、甘肃、四川西部等地霾日数

有下降的趋势,这可能与近年来这些地区沙尘天气减少有关(张莉和任国玉, 2003; 范一大等, 2005)。而我国人口较多的东北地区东部和南部、北京—天津—河北地区、四川盆地、长江中下游地区、珠江流域和福建等地区霾日数呈现明显的增加趋势,而且大部分地区均通过了 99% 的信度检验。从气候趋势系数分布来看,趋势系数达到 0.8 的地区主要有

北京—天津—河北地区、长三角地区和珠三角地区，四川盆地也有 0.6 的气候趋势系数，霾日数上升最为显著。这些地区是我国人口最为密集的地区，城市规模大，人口众多，经济发达，以煤、石油等生物化石燃料为主的能源消费不断增加造成大气污染物粒子排放的日益增多，对这些地区霾天气的发生频率有明显的促进作用（刘爱君等，2004；史军等，2010）。

3.4 霾日数的年际变化

图 6a 表明，我国中东部地区霾日数呈现明显的阶段性上升趋势，20 世纪 60 年代至 70 年代中期是缓慢上升时期，60 年代初霾日数基本在 11 d 左右，到了 70 年代中期缓慢上升至 20 d 左右。70 年代末至 90 年代末是平稳变化时期，霾日数基本维持在 15 d 上下。2000 年后是较快上升时期，2010 年达到近 51 年来的最大值，为 34.09 d。霾日数的年际变化特征与高歌（2008）、孙彧等（2013）的研究基本一致。2000 年以后我国能源消耗总量和民用汽车保有量均呈现快速上升的趋势，2007 年以后

超过了 35×10^8 t 标准煤，而民用汽车保有量也超过 5000 万辆，可见 2000 年后霾日数的快速上升与能源消耗加快密切相关。年平均霾日数有 3.69 d ($10 \text{ a})^{-1}$ 的上升趋势（表 1），其气候趋势系数为 0.82，通过了 99.9% 的信度检验。4 个季节的气候趋势系数分别为 0.56、0.81、0.86 和 0.78，均通过了 99.9% 的信度检验。图 6b 给出了我国中东部地区 4 个人口最为密集的城市群区域年平均霾日数年际变化趋势，4 个城市群区域年平均霾日数均高于中国中东部平均值（表 2），其平均值从大到小分别为北京—天津—河北地区（37.81 d）、四川盆地（35.92 d）、长三角地区（16.61 d）和珠三角地区（11.79 d），

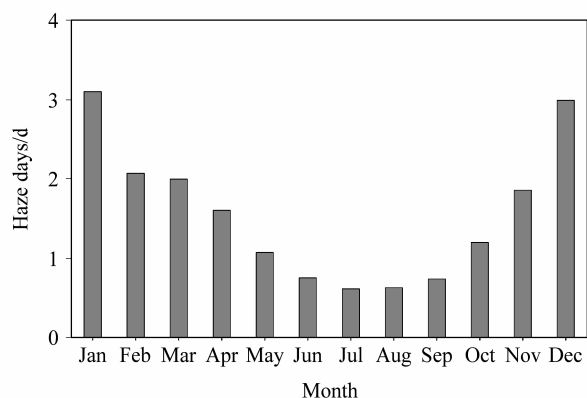


图 4 同图 3，但为月季变化

Fig. 4 Month-to-month variation of average haze days in central and eastern China during 1960–2010

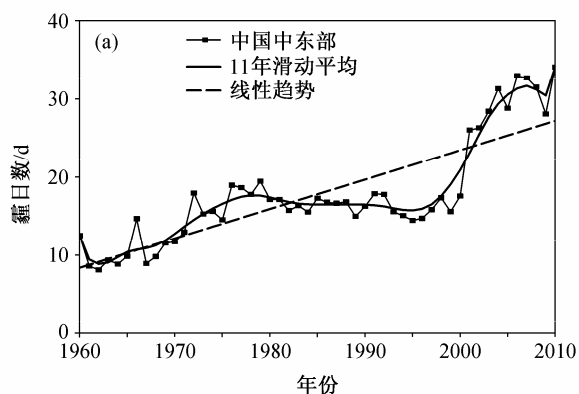


图 6 中国 (a) 中东部地区及 (b) 4 个城市群区域 1960~2010 年霾日数的年际变化

Fig. 6 Annual variations of average haze days in (a) central and eastern China and (b) four urban agglomerations during 1960–2010

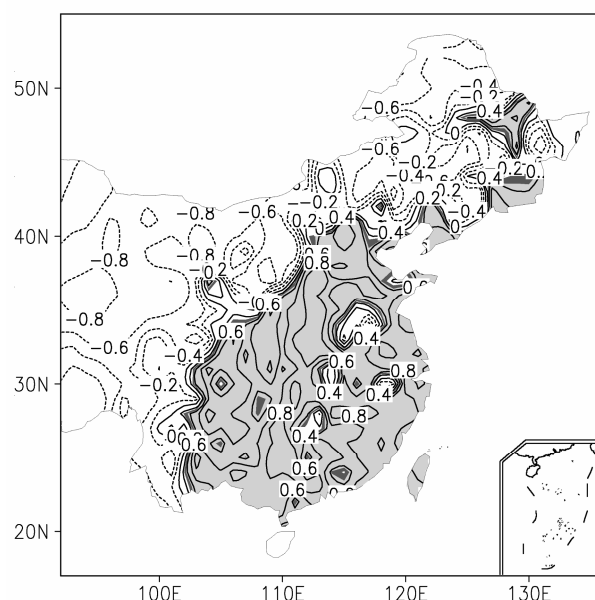
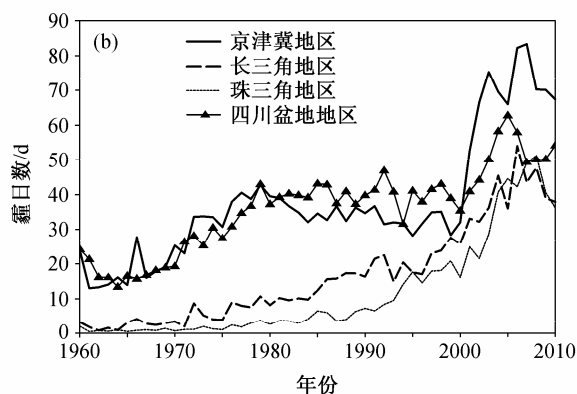


图 5 1960~2010 年中国中东部地区年平均霾日数的气候趋势系数分布（深灰色和灰色阴影分别通过 95% 和 99% 信度检验）

Fig. 5 The spatial distribution of trend coefficients of haze days over central and eastern China during 1960–2010 (dark gray and gray pass 95% and 99% confidence test, respectively)



而且上升趋势明显,而且4个区域近51年来霾日数均有明显的增加趋势,其中回归系数最高的为北京—天津—河北地区 $9.63\text{ d}(10\text{ a})^{-1}$,其他3个区域回归系数也都超过 $7\text{ d}(10\text{ a})^{-1}$,气候趋势系数均通过了99.9%的信度检验,上升极为显著。对照4个区域的变化趋势可以发现,四川盆地地区和北京—天津—河北地区在20世纪80年代以前有一个明显上升趋势,而80年代初到90年代末是平稳变化时期,2000年后上升趋势较为显著,这与中国中东部平均的变化特征一致。而长三角地区和珠三角地区在近51年来均表现为稳定的上升趋势,这可能与各个区域经济发展情况不同有关。总而言之,霾日数的线性上升趋势表明近年来中国中东部地区霾天气增长的速度很快,特别是4个经济发达城市群区域尤为明显,其中大气污染物排放量增加是引起霾现象出现频率发生变化的重要原因。

表1 中国中东部地区霾日数的年平均和四季变化趋势
Table 1 The annual and seasonal variation trends of haze days in central and eastern China

	平均值	均方差	回归系数/ $\text{d}(10\text{ a})^{-1}$	气候趋势系数	信度
年平均	17.80	6.76	3.69	0.82	99.9%
春季	4.67	1.62	0.60	0.56	99.9%
夏季	1.97	1.63	0.88	0.81	99.9%
秋季	3.79	2.49	1.43	0.86	99.9%
冬季	8.17	2.87	1.49	0.78	99.9%

3.5 我国中东部地区 AOD、TroNO₂ 与能源消耗时空变化

图7分别给出了MODIS卫星反演的我国中东

表2 中国4个城市群区域年平均霾日数的变化趋势
Table 2 The annual variation trends of haze days in four urban agglomerations

	平均值	均方差	回归系数/ $\text{d}(10\text{ a})^{-1}$	气候趋势系数	信度
北京—天津—河北	37.81	18.05	9.63	0.80	99.9%
长三角	16.61	13.97	8.62	0.93	99.9%
珠三角	11.79	14.55	8.22	0.85	99.9%
四川盆地	35.92	12.16	7.24	0.89	99.9%

部地区2000~2010年年平均的气溶胶光学厚度(AOD)与OMI卫星反演的对流层NO₂(TroNO₂)柱浓度的空间分布。从图中可以看出,我国中东部大部分地区AOD都有较大的数值的分布,其中以四川盆地、北京—天津—河北地区、长江中下游地区和广东—广西中部等地最为显著,部分地区AOD可达0.8以上。TroNO₂的空间分布与AOD基本一致,高值区主要分布在北京—天津—河北地区、河南、山东、长三角地区以及珠三角地区,局地TroNO₂高达 $20\times10^{15}\text{ mol cm}^{-2}$,四川盆地TroNO₂略偏低,这可能与特殊地形有关(肖钟湧等,2011)。总体而言,我国中东部地区AOD与TroNO₂的空间分布与年平均霾日数的分布基本一致,即霾日数分布较大的地区其AOD值与TroNO₂值都有较高分布,其中以北京—天津—河北地区、长三角地区、珠三角地区和四川盆地最为明显。图8是1960~2010年中国能源消耗量的变化趋势。60年代至90年代中期,能源消耗总量和煤炭消耗量均表现为稳定的增长趋势,而90年代末期有一个下降过程,随后表现为较快的增长过程,2007年后能源消耗总量超过 25×10^8

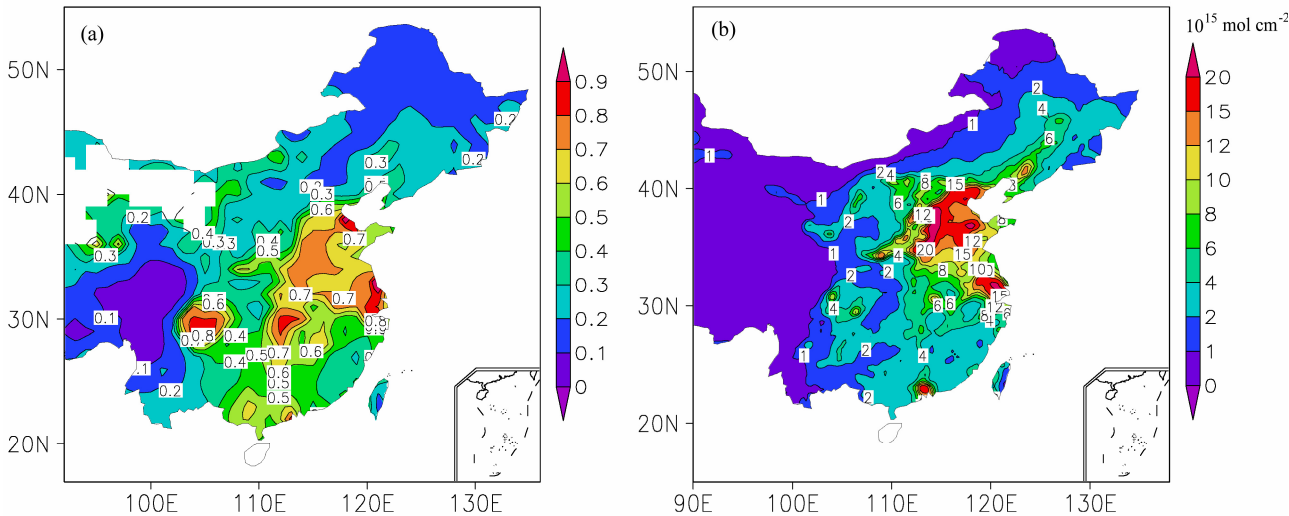


图7 中国中东部地区2000~2010年平均的AOD与2004~2010年平均的TroNO₂柱浓度空间分布
Fig. 7 Spatial distributions of aerosol optical depth (AOD) during 2000–2010 and tropospheric NO₂ (TroNO₂) column concentration during 2004–2010 over central and eastern China

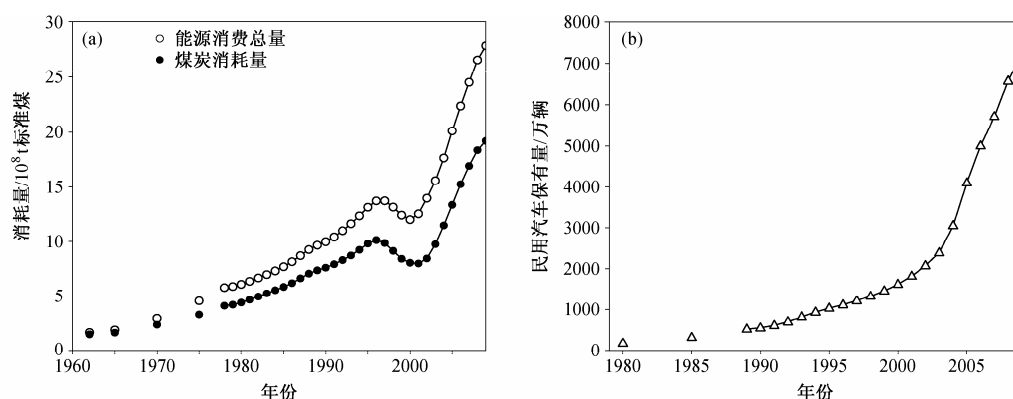


图 8 中国 (a) 1960~2010 年能源消耗变化和 (b) 1978~2010 年民用汽车保有量

Fig. 8 The annual variations of (a) energy consumption during 1960–2010 and (b) civilian car ownership during 1978–2010 in China

t 标准煤。这说明人为因素导致的大气污染物排放量增加是引起霾天气出现频率上升的重要因素。

4 结论

本文利用 1960~2010 年中国中东部地区 329 个气象站的地面观测资料,分析了霾日数的时空变化特征,同时结合 MODIS 卫星的 AOD 资料和 OMI 卫星的 TrONO_2 资料,以及我国能源消耗量和民用汽车保有量资料进行了成因分析,得出以下主要结论:

(1)我国中东部地区霾日数大值区主要分布在北京—天津—河北地区、四川盆地、长江中下游地区、东北地区南部和东北部,以及广东西部和广西东北部。这些地区是我国城市化程度较高的区域,说明霾日数的分布与城市地区工业化程度密切相关。

(2)霾日数有明显的季节变化,霾日数的最大值出现在 1 月,随后明显下降,并在 8 月达到最小值。冬季霾日数在北京—天津—河北地区中部和西南部、四川盆地和东北地区东部和南部等地超过 20 d,而夏季只有在四川盆地和北京—天津—河北地区有 10 d 左右的分布。

(3)霾日数气候趋势系数在东北地区东部和南部、北京—天津—河北地区、四川盆地、长江中下游地区、珠江流域和福建等地区有较大分布,其中北京—天津—河北地区、长三角地区和珠三角地区趋势系数达到 0.8,四川盆地也有 0.6 的气候趋势系数,霾日数上升最为显著。

(4)我国中东部地区霾日数呈现明显的阶段性上升趋势,特别是 2000 年后上升更为显著,年平均霾日数有 $3.69 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ 的上升趋势,其气候趋势系数为 0.82,通过了 99.9% 的信度检验。4 个人口

最为密集的城市群区域年平均霾日数均高于中国中东部平均值,其中北京—天津—河北地区回归系数最高,为 $9.63 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$,其他 3 个区域回归系数也都超过 $7 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ 。霾日数的线性上升趋势表明近年来中国中东部地区霾天气的速度增长很快,而大气污染物排放量增加是引起霾现象出现频率发生变化的重要原因。

(5)我国中东部地区 AOD 与 TrONO_2 的空间分布与年平均霾日数的分布基本一致,其中以北京—天津—河北地区、长三角地区、珠三角地区和四川盆地最为明显。近 51 年来能源消耗量和民用汽车保有量的稳定上升趋势也表明,人为因素导致的大气污染物排放量增加是引起霾天气出现频率上升的重要因素。

本文主要分析了我国中东部地区霾日数的时空变化,同时结合气溶胶光学厚度、对流层 NO_2 、能源消耗和民用汽车保有量等资料进行可能原因分析,但本文还存在一定的局限性和不足之处,霾天气的出现与污染物粒子的排放有很大关系,而局地天气因素和不同环流形势等对我国中东部地区污染物粒子的输送和扩散也有明显影响(蔡旭晖等, 2005; 王艳等, 2008),这些还有待于未来做进一步的探讨。

参考文献 (References)

- 白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 2006. 灰霾的健康效应 [J]. 环境污染与防治, 28 (3): 198–201. Bai Zhipeng, Cai Binbin, Dong Haiyan, et al. 2006. Adverse health effects caused by dust haze—A review [J]. Environmental Pollution and Control (in Chinese), 28 (3): 198–201.
- 蔡旭晖, 张祯玺, 康凌, 等. 2005. 珠江三角洲东部低层大气流动与中尺度扩散特性 [J]. 热带气象学报, 21 (5): 497–505. Cai Xuhui, Zhang Zhenxi, Kang Ling, et al. 2006. A study on lower-layer atmospheric flows and meso-scale diffusion patterns over the eastern area of the Pearl River

- Delta [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (5): 497–505.
- 范一大, 史培军, 周俊华, 等. 2005. 近 50 年来中国沙尘暴变化趋势分析 [J]. 自然灾害学报, 14 (3): 22–28. Fan Yida, Shi Peijun, Zhou Junhua, et al. 2005. Research on change of dust storm in China in recent 50 years [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 14 (3): 22–28.
- 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): 762–768. Gao Ge. 2008. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961–2005 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 63 (7): 762–768.
- 李子华, 仲良喜, 俞香仁. 1992. 西南地区 and 长江下游雾的时空分布和物理结构 [J]. 地理学报, 47 (3): 342–251. Li Zihua, Zhong Liangxi, Yu Xiangren. 1992. The temporal–spatial distribution and physicals structure of land fog in southwest China and the Changjiang River basin [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 47 (3): 242–251.
- Liang Zhaoming, Gao Shouting, Sun Jisong. 2012. A numerical study of the urban intensity effect on fog evolution in the Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5 (3): 240–245.
- 林建, 杨贵名, 毛冬艳. 2008. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势 [J]. 气候与环境研究, 13 (2): 171–181. Lin Jian, Yang Guiming, Mao Dongyan. 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (2): 171–181.
- 刘爱君, 杜尧东, 王慧英. 2004. 广州灰霾天气的气候特征分析 [J]. 气象, 30 (12): 68–71. Liu Aijun, Du Yaodong, Wang Huiying. 2004. Climatic characteristics of haze in Guangzhou [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 30 (12): 68–71.
- 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 [J]. 应用气象学报, 16 (2): 220–230. Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang, et al. 2005. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (2): 220–230.
- Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al. 2001. Haze trend over the United States, 1980–1995 [J]. Atmos. Environ., 35 (30): 5205–5210.
- 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 2010. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析 [J]. 地理学报, 65 (5): 533–542. Shi Jun, Cui Linli, He Qianshan, et al. 2010. The changes and causes of fog and haze days in Eastern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 65 (5): 533–542.
- 施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征 [J]. 气象学报, 53 (4): 431–439. Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 1995. 4-phase climate change features in the last 100 years over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (4): 431–439.
- 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 Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, 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.
- 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2005. 中国雾区的分布及其季节变化 [J]. 地理学报, 60 (4): 689–697. Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. 2005. The distribution and seasonal variations of fog in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 60 (4): 689–697.
- 王艳, 柴发合, 王永红, 等. 2008. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究 [J]. 环境科学, 29 (5): 1430–1435. Wang Yan, Chai Fahe, Wang Yonghong, et al. 2008. Transport characteristics of air pollutants over the Yangtze Delta [J]. Environmental Science (in Chinese), 29 (5): 1430–1435.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第 2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 2007. Climate Statistical Diagnosing and Prediction (2nd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- 吴兑. 2003. 华南气溶胶研究的回顾与展望 [J]. 热带气象学报, 19 (S1): 145–151. Wu Dui. 2003. A review and outlook on the aerosol study over South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (S1): 145–151.
- 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 Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River Delta [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (4): 510–517.
- 吴兑. 2008. 霾与雾的识别和资料分析处理 [J]. 环境化学, 27 (3): 327–330. Wu Dui. 2008. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data [J]. Environmental Chemistry (in Chinese), 27 (3): 327–330.
- 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 Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, et al. 2010. Spatial and temporal variation of haze during 1951–2005 in Chinese mainland [J]. Acta Meteorologica 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 Dui. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 32 (2): 257–269.
- 伍红雨, 杜尧东, 何健, 等. 2011. 华南霾日和雾日的气候特征及变化 [J]. 气象, 37 (5): 607–614. Wu Hongyu, Du Yaodong, He Jian, et al. 2011. Climatic characteristics and variations of haze days and fog days in South China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (5): 607–614.
- Wu Jian, Fu Chuanbo, Zhang Liya, et al. 2012. Trends of visibility on sunny days in China in the recent 50 years [J]. Atmos. Environ., 55: 339–342.
- 肖钟湧, 江洪, 程苗苗. 2011. 利用 OMI 遥感数据研究中国区域大气 NO₂ [J]. 环境科学学报, 31 (10): 2080–2090. Xiao Zhongyong, Jiang Hong, Cheng Miaomiao. 2011. Characteristics of atmospheric NO₂ over China using OMI remote sensing data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 31 (10): 2080–2090.
- 张莉, 任国玉. 2003. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析 [J]. 气象学报, 61 (6): 744–750. Zhang Li, Ren Guoyu. 2003. Change in dust storm frequency and the climatic controls in northern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 744–750.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2011. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12 (2): 779–799.
- 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.