蒋璐君,刘熙明,张弛,2020.江西省近50年霾天气时空分布特征及成因分析[J].气象,46(5):695-704. Jiang L J, Liu X M, Zhang C, 2020. Spatio-temporal characteristics of haze and its forming reason in Jiangxi Province during the past 50 years[J]. Meteor Mon, 46(5):695-704(in Chinese).

江西省近50年霾天气时空分布特征及成因分析*

蒋璐君[1] 刘熙明[1] 张 弛[2]

1 江西省气象科学研究所,南昌 330096

2 江西省气象台,南昌 330096

提 要: 利用1964—2013年江西省83个站逐日霾观测资料,运用线性倾向估计等统计方法,分析江西省近50年霾时空变化特征及其与气候要素的关系。结果表明:江西霾日数呈赣中北部多、赣南少的特点,赣中的萍乡—宜春—抚州—上饶一带以及赣北北部的九江中部、景德镇北部地区是霾天气多发区,年均霾日数在30 d·a^{-1}以上。冬季霾日数最多,萍乡—宜春—鹰潭地区中北部、南昌—九江的中部以及上饶东部地区超过20 d·a^{-1},春季和秋季次之,夏季最少。12月是霾日数最多的月份,接近全年霾日数的2成。江西省霾日数呈年际增长的趋势,增长率为11 d·(10 a)$^{-1}$,气候趋势系数为0.78,通过0.01的显著性水平检验。霾日数与平均风速和大风日数均呈负相关,而与静风日数呈正相关。近50年平均风速和大风日数呈下降趋势,静风日数呈上升趋势,这可能导致空气中污染物不易扩散而形成更多的霾天气。江西省降水日数呈减少趋势[−6.3 d·(10 a)$^{-1}$],气温呈增暖趋势[0.15℃·(10 a)$^{-1}$],霾日数与气温和降水日数分别呈正、负相关。

关键词: 江西,霾,年际变化,统计分析

中图分类号: P467,P49 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.010

Spatio-Temporal Characteristics of Haze and Its Forming Reason in Jiangxi Province During the Past 50 Years

JIANG Lujun[1] LIU Ximing[1] ZHANG Chi[2]

1 Jiangxi Institute of Meteorological Science, Nanchang 330096

2 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096

Abstract: The spatio-temporal distribution characteristics of haze and the climatic background were analyzed by using the daily haze observations from 83 meteorological stations from 1964 to 2013 and the statistical method of linear regression. The results showed that haze days are significantly more in central and northern Jiangxi than in southern Jiangxi. The annual haze days more than 30 d appear in central Jiangxi, including Pingxiang, Yichun, Fuzhou and Shangrao, and also in northern Jiangxi, including central Jiujiang and northern Jingdezhen. The haze days are maximum in winter, followed by autumn and spring, and the minimum in summer. The central and northern parts of Pingxiang, Yichun and Yingtan and the central part of Nanchang and Jiujiang as well as the eastern part of Shangrao have more than 20 haze days per year. The haze days are the most in December, nearly 20% of annual haze days. The haze days in Jiangxi Province present a significant increasing trend with the increase rate 11 d per decade from 1964 to 2013 and the climatic trend coefficient is 0.78, which has passed the significance test at 0.01 level. The correlation

* 国家自然科学基金项目(41265003和41765001)及江西省科技计划项目(20151BBG70045)共同资助

2018年12月3日收稿; 2020年2月29日收修定稿

第一作者:蒋璐君,主要从事天气动力学研究. Email:jlj0628@163.com

通讯作者,刘熙明,主要从事城市气象和大气边界层物理研究. Email:jx_liuximing@126.com

coefficient between the haze days and the mean wind speed and strong wind days is negative, but is positive between haze days and calm days in Jiangxi. In the past 50 years, the annual averaged wind days and stong wind days show a downward trend, while the calm days show an upward trend, which may cause the accumulation of pollutants in the air to form more haze weather. The correlation coefficient between haze days and precipitation days is mainly negative and the precipitation days show a decreasing trend in Jiangxi, with the rate of around -6.3 d·(10 a)$^{-1}$. The correlation coefficient between haze days and temperature is positive and the temperature shows an increasing trend in Jiangxi, with the rate of around 0.15℃·(10 a)$^{-1}$.

Key words: Jiangxi, haze, interannual variation, statistical analysis

引 言

霾是一种对视程造成障碍的天气现象,大量微小尘粒、烟粒等均匀地悬浮在大气中,使水平能见度小于 10 km,造成空气普遍浑浊(中国气象局,2003)。霾发生造成的能见度恶化和大气污染物的堆积,不仅增加交通拥堵,而且导致呼吸系统和心血管疾病的发生,严重威胁人们健康(白志鹏等,2006;Chang et al,2009)。随着我国经济规模的迅速扩大,城市化和能源消费的迅速增长,中国很多大城市面临着严重的区域大气污染引起的能见度下降问题(吴兑,2012)。目前,我国霾严重的地区主要位于环渤海地区、华东的长三角地区、华南的珠三角地区和四川盆地(Che et al,2009;Tie et al,2006;Fu et al,2008;吴兑等,2008)。吴兑等(2006)利用气象台站资料、MODIS 卫星资料、气溶胶细粒子资料研究了珠三角洲霾导致的能见度下降问题,指出霾能导致能见度恶化,且能见度恶化主要和细粒子有关。童尧青等(2007)利用多年地面气象观测资料分析了南京霾天气的气候特征及其成因,指出霾日数总体呈上升趋势,较小的风速、较高的相对湿度是霾天气得以出现的有利条件,颗粒物增加可能是霾天气增加的主要原因。就霾的长期变化趋势而言,我国平均年霾日数呈明显的增长趋势,尤其是经济发展和工业水平相对领先的大城市区域(高歌,2008;牛彧文等,2010)。因此,国内外从霾的观测识别(吴兑,2005;2006;陈英英等,2017;张浩等,2019)、物质成分(段菁春等,2006;范雪波等,2010)、气候变化特征(孙彧等,2013;Schichtel et al,2001;翁之梅等,2016;石春娥等,2016)及其成因(史军等,2010;郭蕊等,2016;杨晓亮等,2018;周文君等,2016;吴萍等,2016)等方面开展了大量研究工作。Wu et al(2005)研究发现不利的天气条件(如飓风)和较弱的水平运动会导致气溶胶颗粒在低层堆积,使广州出现较高的气溶胶浓度和较低的能见度。吴兑等(2010)分析研究了中国大陆 1951—2005 年霾的长期变化趋势,指出 20 世纪 80 年代以后中国霾日明显增加,这与经济活动密切相关,12 月和 1 月霾天气日数明显偏多,占全年的 30%。

目前江西省关于霾的气候特征、影响因子研究还很少,随着城市化、工业化进程的迅速发展,人类活动导致的大气污染增加,致使江西省近年来霾天气现象逐渐增多,所以加强霾的监测和评估、研究霾天气的时空变化特征及其影响因子变得十分重要。本文利用 1964—2013 年江西省 83 个站点逐日地面水平能见度、相对湿度、气象要素等观测数据,分析了江西省近 50 年霾日的时空分布特征及其与气候要素的关系,对于江西地区霾的预报及其影响评估有重要的意义,也为治理大气环境污染提供一定的参考标准。

1 资 料

为使分析结果具有代表性和准确性,本文从江西省地面气象观测站中选取资料年代较长,完整性较好的 83 个站点的地面观测资料进行时空特征和变化统计分析,资料包括相对湿度、水平能见度、风速、风向、气温、天气现象等,序列长度为 50 年(1964—2013 年)。由于 1980 年以前能见度的观测数据是按照等级的形式记录,本文在统计霾日时将 1980 年之前的能见度按照能见度等级换算表换算成相应的能见度值(单位:km),再对霾的气候特征进行统计分析。在霾日判别上,选择吴兑等(2010)提出的"霾日统计方法"中的日均法为霾判别依据,即定义当日平均能见度小于 10 km,且日均相对湿度小于 90%,并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘、烟幕等天气现象导致能见度降低的事件为

一个霾日，在日值的基础上再进行月值、季值、年值的统计。

本文利用最小二乘法进行线性倾向估计，即建立一元线性回归方程计算线性回归系数（气候倾向率）来表征霾日数和风速等要素的年际变化趋势，通过计算霾日数与影响因子的相关系数（气候趋势系数）来判断分析两者的相关程度（正、负相关），并对相关系数进行显著性水平检验，判断变化趋势的程度是否显著。依据上述资料和方法，计算了 1964—2013 年江西省 83 个站点 50 年的霾日数，并运用线性倾向估计等方法对江西省霾日的时空变化特征及其与气候要素的关系进行分析研究。

2　结果分析

2.1　霾日数的空间分布

图 1 为江西省 50 年平均霾日分布。从图中可以明显看出，多年平均年霾日数呈现明显的空间差异，霾日数的大值区主要分布在赣中的萍乡—宜春—抚州—上饶一带以及赣北北部的九江中部、景德镇北部地区（年均霾日数＞30 d・a^{-1}），霾日数低值区则位于赣南南部（年均霾日数＜10 d・a^{-1}）。其中年均霾日数超过 40 d・a^{-1}的站点有 21 个，超过 50 d・a^{-1}的站点有 14 个，超过 60 d・a^{-1}的站点有 9 个，霾最严重的站点是位于江西省东北部的余江县，年均霾日数高达 100.6 d・a^{-1}，其次为樟树、安义、萍乡和新余，年均霾日数分别达到 92.7、83.7、71.7、68 d・a^{-1}。年均霾日数小于 10 d・a^{-1}的站点有 17 个，霾出现最少的站点为赣南的崇义县，年均霾日只有 0.3 d・a^{-1}，其次为赣南的定南、安远、龙南和寻乌县，其年均霾日数分别为 1.9、2.1、3.1 和 3.6 d・a^{-1}。由上可见，江西省霾日数在空间上分布不均匀，地域差异比较明显，呈现经济发达的主要城市及其周边霾日数较多，偏远地区、山区霾日数较少，赣中北部多，赣南少的特点。

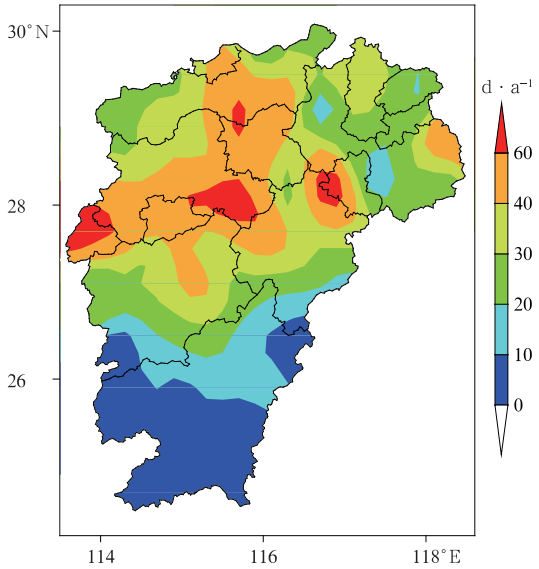

图 1　1964—2013 年江西省平均霾日数分布

Fig. 1　Distribution of average annual haze days in Jiangxi Province from 1964 to 2013

2.2　霾日数的季节变化特征

江西省霾日数呈现出明显的季节变化（图 2）。一年中冬季霾日数出现得最多，春季和秋季次之，夏季霾日数出现的最少，冬季霾日数要明显大于夏季。江西省霾主要出现在 27°N 以北的地区，四个季节霾日出现最多的站点均为鹰潭市的余江县，樟树和安义次之。冬季除了赣南南部的 19 个站点以外，江西省大部分地区霾日数都在 6 d・a^{-1}以上，超过 20 d・a^{-1} 的地区有萍乡—宜春—鹰潭地区中北部、南昌—九江的中部以及上饶东部地区。春季和秋季江西省霾日数的分布特征与冬季类似，即萍乡—宜春—鹰潭地区中北部、南昌—九江中部、上饶东部地区也是霾日数的大值区，只不过在量值上有所减少，主要分布为 10～20 d・a^{-1}，27°N 以北的其他大部分地区主要集中为 6～10 d・a^{-1}。夏季无论是霾日数的大值区还是大值区的范围均有明显程度的减小，只在萍乡—宜春—鹰潭地区中北部、南昌—九江中部、上饶东部地区有 10 d・a^{-1}左右的分布，27°N 以北的其他大部分地区霾日数都在 6 d・a^{-1}以下，赣南大部分地区基本维持在 2 d・a^{-1}以下。这可能与夏季降水多，对污染物的冲刷作用有关，即有利于污染物的稀释和扩散；而冬季天气形势比较稳定，气温较低，有利于污染物的堆积。

图 3 为江西省 50 年 83 个站月平均霾日数变化。由图可见，平均霾日数的月季变化比较明显，基本呈“V”型分布。10 月至次年 2 月的非汛期为霾日的高发期，霾日数的最大值出现在 12 月，为 5.5 d・a^{-1}，占全年的 17.4%，1 月次之，为 5.1 d・a^{-1}，占全年的 16.1%，3—9 月汛期霾日数明显减少，7 月达到最低值，为 0.6 d・a^{-1}，仅占全年霾日数的 1.9%。这与全国其他地区的季节变化特征类似（廖国莲等，2011）。总体来说，江西省冬季霾日数最多，占全年霾日数的 42.6%，秋季次之，占全年霾日数的 28.4%，

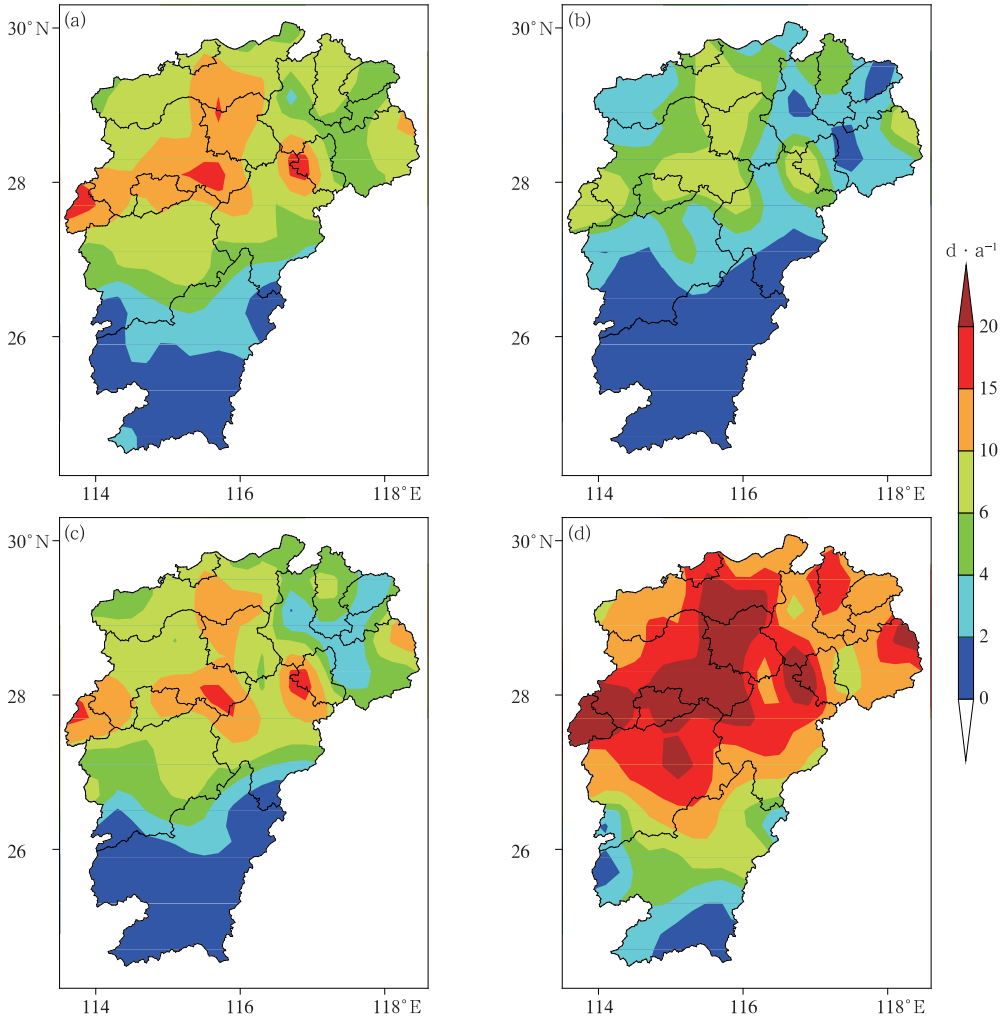

图 2 1964—2013 年江西省霾日数春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)平均分布

Fig. 2 Seasonal distribution of average haze days in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) in Jiangxi Province from 1964 to 2013

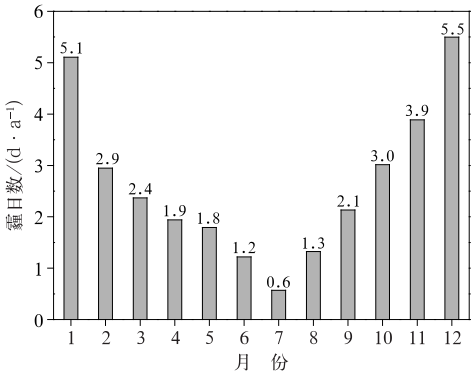

图 3 1964—2013 年江西省各月霾日数

Fig. 3 Average monthly haze days in Jiangxi Province from 1964 to 2013

春季比秋季略少(19.2%),夏季最少(9.8%)。

2.3 霾日数的变化趋势分布

图 4 为江西省霾日数的趋势变化空间分布。1964—2013 年整个江西省霾日数呈增长的趋势,霾日数增加趋势明显的站点主要集中于赣中北部的萍乡—宜春—鹰潭地区中北部、南昌—九江的中部以及上饶东部地区,霾日增长率在 15 d·(10 a)$^{-1}$以上,与霾日的大值区相对应。在变化趋势通过 0.01 显著性水平检验的站点中,霾日数增长率最大的 5 个站点分别是新余、南昌、余江、玉山和崇仁,增长率分别为 32.0、31.1、46.5、32.4、88.6 d·(10 a)$^{-1}$。霾日增长率最低的 5 个站点分别是弋阳、定南、庐山、吉安和永新,增长率分别为 0.3、0.4、0.5、0.5、0.9 d·(10 a)$^{-1}$。

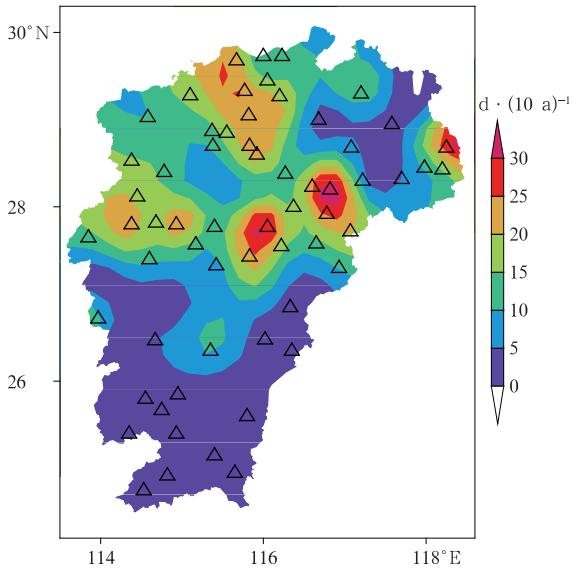

图 4　1964—2013 年江西省霾日数的年际变化空间分布
（带△的站点通过了 0.01 显著性水平检验，下同）
Fig. 4　Spatial distribution of linear trends in annual haze days in Jiangxi Province from 1964 to 2013
(Stations with △ have passed the significance test at 0.01 level, the same below)

50 年间江西省霾日数四个季节年际变化趋势（图 5）表明，不同站点霾日的变化趋势具有明显的季节性差异。从图中可以发现，秋、冬季霾日数的变化幅度最大，而夏季变化幅度最小，结合霾日的季节分布和霾日变化趋势分布可知，对于赣中北部的萍乡—宜春—鹰潭地区中北部、南昌—九江的中部以及上饶东部霾日大值区，绝大部分站点在各个季节均表现为明显的增长趋势，尤其是秋、冬季霾日增长率>4 d·(10 a)$^{-1}$，而赣南的霾日低值区在四个季节增长趋势不是很明显，普遍集中在 2 d·(10 a)$^{-1}$以内。

2.4　霾日数的年际变化特征

结合 1964—2013 年 50 年平均霾日数的年际变化（图 6a）以及平均霾日数的四季年际变化（图 6b），可以看出年均霾日数整体呈现上升趋势，20 世纪 60—90 年代是缓慢上升期，60 年代初霾日数基本维持在 3 d·(10 a)$^{-1}$左右，到 90 年代初迅速上升至 50 d·(10 a)$^{-1}$左右，90 年代至 2000 年以前是平稳变化时期，2000 年以后又呈现较快上升时期，2006 年达到近 50 年以来的最大值，为72.5 d·(10 a)$^{-1}$，2006 年以后年均霾日数又呈现下降趋势。从图中还可发现，20 世纪 80 年代中期以后，年均霾日数均高于江西省平均值。年均霾日数呈现 11 d·(10 a)$^{-1}$的上升趋势，其气候趋势系数为 0.79，通过了 0.01 显著性水平检验。图 6b 为霾日数四季年际变化。由图可知，1964—2013 年四个季节的霾日数整体呈现波动增长的趋势。在 20 世纪 80 年代以前，四个季节的霾日数均较少，1980 年以后，冬季的霾日数迅速增加明显超过其他三个季节。1964—2013 年，四个季节的霾日数整体表现为冬季最多，秋季次之，夏季最少，但在 2004 年以后秋季的霾日数增长最为明显，甚至在 2005 年和 2006 年超过了冬季的霾日数。这表明江西省霾天气虽是冬季事件，但随着城市的发展，四个季节的霾日数差异在减小，各个季节霾天气的发生频次均在增加。四个季节的气候趋势系数分别是 0.77、0.65、0.74 和0.63，均通过了 0.01 显著性水平检验。

2.5　霾日变化的影响因子

霾的形成主要由于两方面的原因，一是大气中的污染物，二是大气层结比较稳定。大气中污染物的来源主要是地面灰尘、汽车尾气、工业排放和冬季取暖（张浩等，2010；高健等，2012）。近年来随着江西省城市化进程的加快，使得汽车数量、能源消耗总量、工业排放大大增加，从 1989—2013 年江西省民用汽车拥有量、能源消耗总量（图 7a）、工业 SO_2 排放量（图 7b）的年际变化可知，民用汽车拥有量和能源消耗总量呈年际增长的趋势，随之能源消耗产生的污染物和汽车尾气的排放量也增加，工业 SO_2 排放量在 1989—1994 年、2002—2006 年呈增长趋势，与之对应，霾也呈增长趋势，尤其是 2002—2006 年随着 SO_2 的迅速增加，霾日数显著增加，这些都可能是江西省霾日数增加的主要原因。此外，不利的气象条件导致污染物堆积也将引发霾天气。

图 8 是 1964—2013 年江西省近地面有霾台站的年平均风速的年际变化及其与平均霾日数的相关性。从图 8a 中可以发现，江西省年平均风速呈现年际减弱的趋势，减弱趋势为−0.3 m·(s·10 a)$^{-1}$，说明大气污染扩散水平在降低，导致霾形成的有利因素增加。由于近地面风速是影响污染物扩散的重要因子，可以反映大气稳定度的变化，与大气中污染物的稀释扩散密切相关。通过分析年平均霾日数与近地面年平均风速的相关性可知（图8b），两者的相

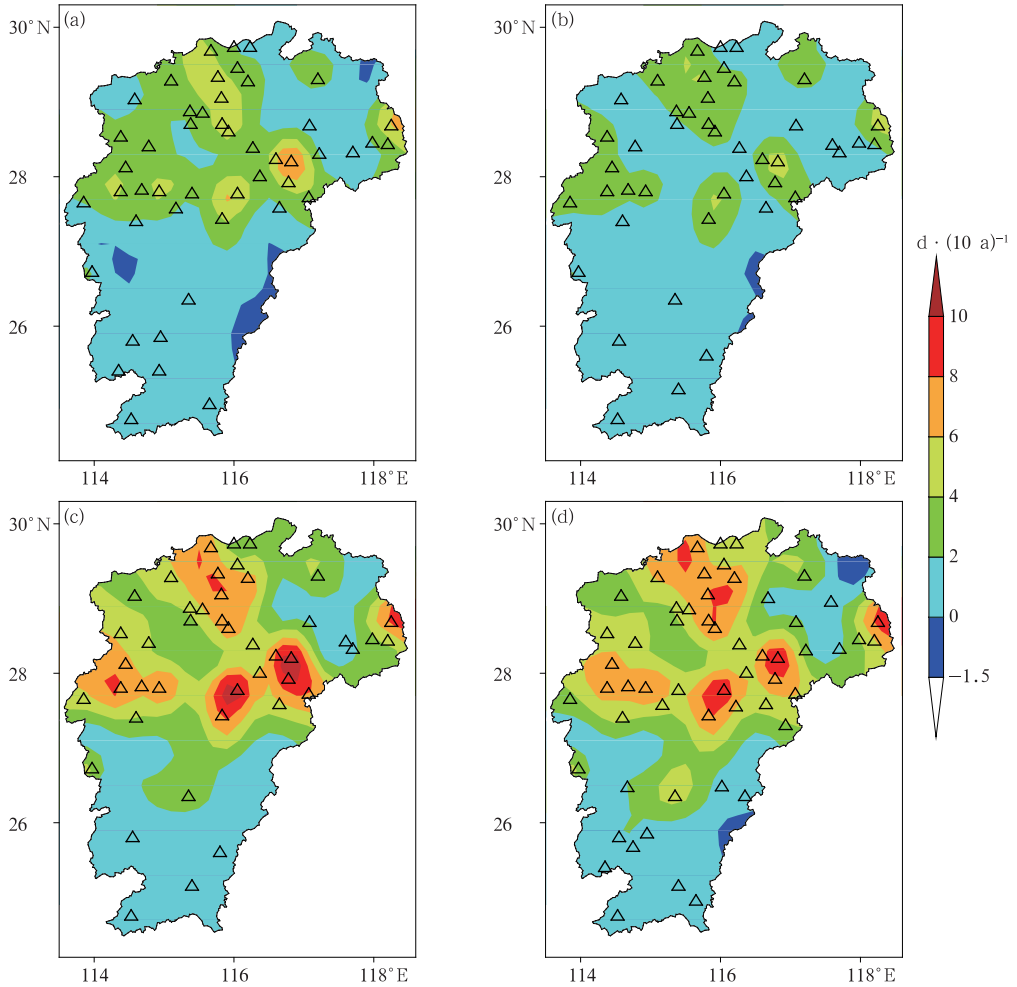

图 5 1964—2013 年江西省霾日数春季(a),夏季(b),秋季(c)和冬季(d)年际变化空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of linear trends in seasonal haze days in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) in Jiangxi Province from 1964 to 2013

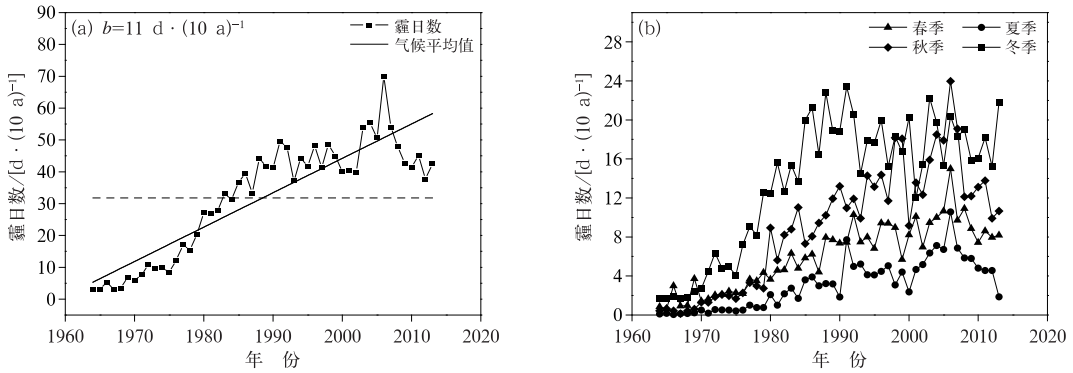

图 6 1964—2013 年江西省平均霾日数的(a)年际变化

(图中黑色实线为全省年霾日 50 年气候均值)和(b)四季年际变化

Fig. 6 Interannual variation of (a) average haze days

(Black line shows the average climate value of haze days in 50 years)

and (b) average haze days in the four seasons in Jiangxi Province from 1964 to 2013

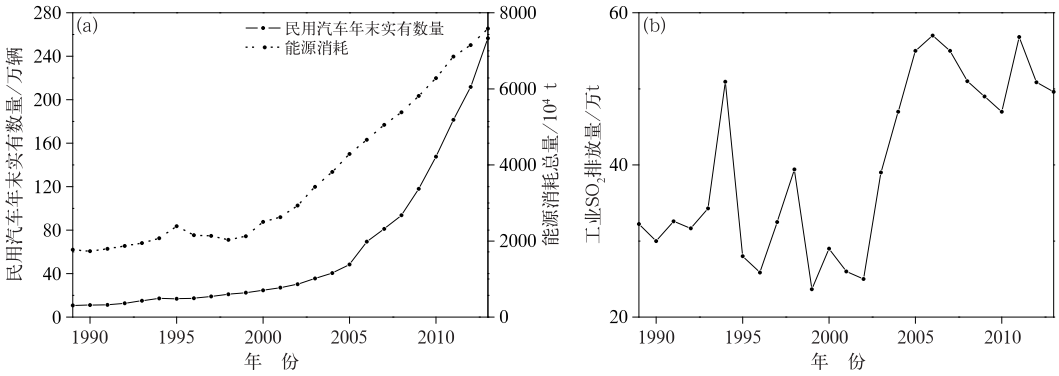

图 7　1989—2013 年江西省能源消耗总量和民用汽车年末实有数量(a)、工业 SO_2 排放量(b)年际变化

Fig. 7　Variation of interannual total energy consumption and the number of civilian vehicles (a), industrial SO_2 (b) in Jiangxi Province from 1989 to 2013

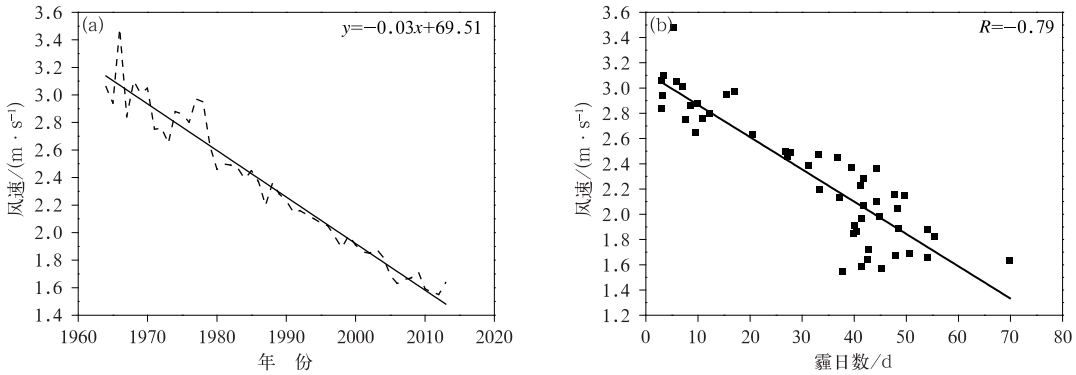

图 8　1964—2013 年江西省平均风速的年际变化(a)及其与平均霾日数的相关性(b)

Fig. 8　Interannual variation of average wind speed (a) and its correlation with average haze days (b) in Jiangxi Province from 1964 to 2013

关系数可达−0.79,表明这 50 年间,江西省平均霾日数与平均风速呈显著的负相关。至于年际风速减弱的问题,Xu et al(2006)通过分析指出:由温室气体引起的全球变暖而削弱的东亚季风区的年平均风速,使得近几十年该区域风速平稳的减弱,尤其是近几年地面风速显著减弱。除了城市化进程的加快,东亚冬季风导致近地面风速的年际减弱也是使得江西省霾日数年际增加的重要原因。由江西省各站霾日数与平均风速相关性(图 9a)可见,只有在上饶的婺源、弋阳和吉安的井冈山、永新、遂川及吉安几个站呈正相关外,全省大部分地区都呈显著的负相关。另外,还分析了与大气扩散条件有影响的小风日数(图 10a)、混合层高度(图 10b)与霾日数的相关性特征可发现,霾日数与小风日数呈正相关,与混合层高度呈负相关,相关系数分别为 0.812 和−0.57。

图 9b 和 9c 给出了江西省 50 年年平均霾日数与静风日数和大风日数的相关性特征。本文根据宋连春等(2013)定义的静风日最大风速 3 m·s^{-1},大风日最大风速 10 m·s^{-1},静风和大风日数均可在一定程度上表征大气的稳定程度。从图中可发现江西省除了吉安、九江、赣州三市有 3 个站以上年平均霾日数与静风日数呈负相关,其余大部分地区均呈正相关,而与大风日数基本上呈显著的负相关。根据数据分析,近 50 年来江西省的大风日数明显减少,而静风日数逐年增加,增长率为 15 d·(10 a)$^{-1}$,气候趋势系数分别为 0.91 和 0.57,均通过了 0.01 显著性水平检验。江西省年平均霾日数与大风日数的相关系数为−0.81,与静风日数的相关系数为0.56,均通过了 0.01 显著性水平检验。

表 1 给出了 1964—2013 年江西省气温、降水量的气候倾向系数(气象要素与时间的相关系数)、气候倾向率及其与霾日数的相关系数。由表 1 可知气温变化的气候趋势系数为 0.25,表现为增暖趋势,增温率是 0.15 ℃·(10 a)$^{-1}$,与霾日数的相关系数

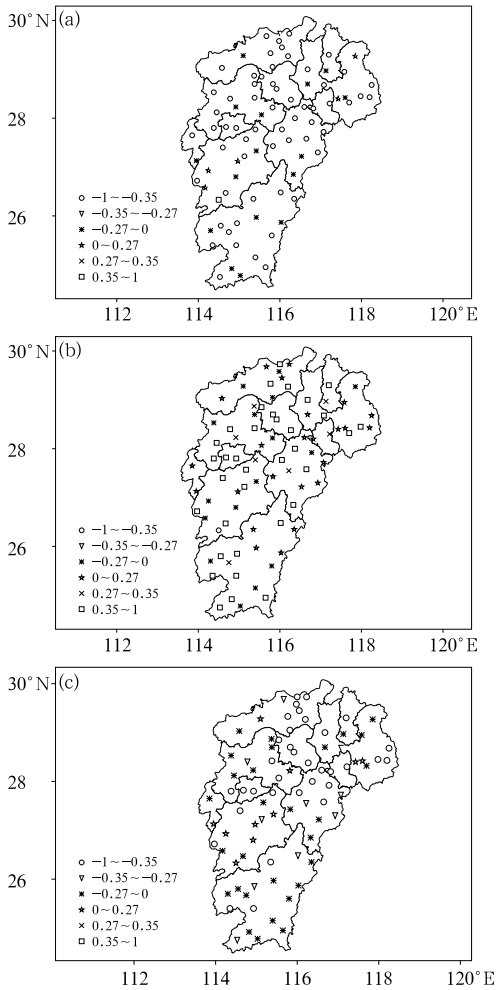

图9 1964—2013年江西省霾日数与平均风速(a)、静风日数(b)、大风日数(c)相关系数的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of correlation coefficient between the haze days and average wind speed (a), calm days (b) and strong wind days (c) in Jiangxi Province from 1964 to 2013

为0.13,表明气温与霾发生呈正相关。从表1还可知,降水日数呈微弱的减小趋势,气候倾向率为$-6.3\ \mathrm{d}\cdot(10\ \mathrm{a})^{-1}$,同霾日数的相关系数为−0.48,相关程度不是很显著。这可能因为降水日数的减少,导致对大气净化次数的减少,并削弱了大气中污染物的湿沉降作用。总体来说,风速、年降水日数的减少及气温的增加是霾日数增加的可能原因,这与廖玉芳等(2007)分析的湖南省霾出现频率增加的可能原因(年平均风速减少、年降水日数波动减少)一致。

表1 江西霾日数与气温、降水量的相关统计参数

Table 1 Statistics of haze days, temperature and precipitation in Jiangxi Province

气象要素	气候趋势系数	气候倾向率	与霾日数的相关系数
气温	0.25	$0.15\,^{\circ}\mathrm{C}\cdot(10\ \mathrm{a})^{-1}$	0.13
降水日数	−0.4	$-6.3\mathrm{d}\cdot(10\ \mathrm{a})^{-1}$	−0.48

3 结 论

本文利用1964—2013年江西83个台站逐日霾观测资料,运用线性倾向估计等统计方法,分析江西省近50年霾时空变化特征及其与气候要素的关系,得出以下结论。

(1)江西省霾日数分布具有明显的空间差异,霾日数的大值区主要分布在赣中的萍乡—宜春—抚州—上饶一带以及赣北北部的九江中部、景德镇北部地区,年均霾日数在$30\ \mathrm{d}\cdot\mathrm{a}^{-1}$以上,呈赣中北部多、赣南少的特点。

(2)江西省霾日数呈现明显的季节变化。冬季霾日数最多,占全年的42.8%,萍乡—宜春—鹰潭

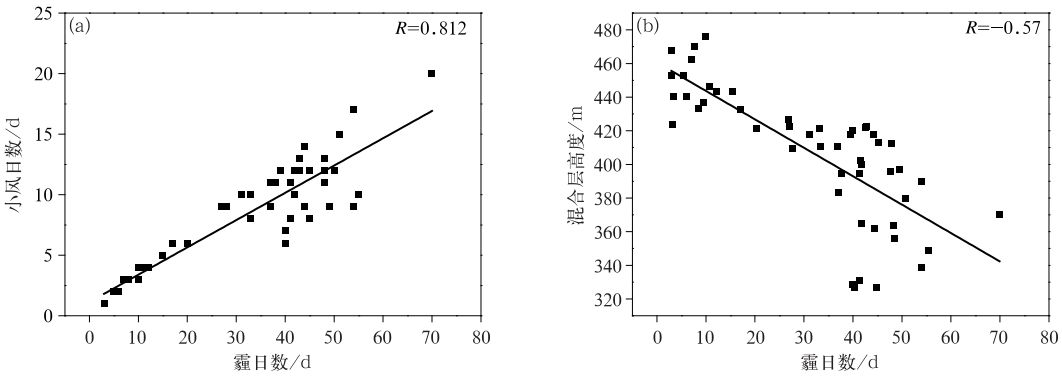

图10 1964—2013年江西省年平均霾日数与小风日数(a)和混合层高度(b)的相关性

Fig. 10 Correlation between the average haze days and light wind days (a) and the mixed-layer height (b) in Jiangxi Province from 1964 to 2013

地区中北部、南昌—九江的中部以及上饶东部等地区超过 20 d，其中霾日数的最大值出现在 12 月，为 5.5 d·a^{-1}。夏季霾日数最少，其中霾日数的最低值出现在 7 月，为 0.6 d·a^{-1}，春季和秋季霾日数次之。

(3)江西省霾日数呈年际增长的趋势，年均霾日数的增长率为 11 d·(10 a)$^{-1}$，气候趋势系数为 0.78，通过 0.01 的显著性水平检验。霾日数四季年际变化均呈波动增长的趋势，气候趋势系数分别是 0.77、0.65、0.74 和 0.63，均通过了 0.01 的显著性水平检验。

(4)江西省霾日数与平均风速、静风日数、大风日数分别呈负、正、负相关，年平均风速和大风日数呈年际减少、静风日数呈年际增加的趋势，表明动力输送条件减弱加剧了霾的发生。江西省降水日数呈减少趋势[−6.3 d·(10 a)$^{-1}$]，气温呈增暖趋势[0.15℃·(10 a)$^{-1}$]，霾日数与气温和降水日数分别呈正、负相关。

参考文献

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)：198-200. Bai Z P，Cai B B，Dong H Y，et al，2006. Adverse health effects caused by dust haze—a review[J]. Environ Pollut Control，28(3)：198-200(in Chinese).

陈英英，熊守权，周毓荃，等，2017. 基于 FY-3/MERSI 卫星资料的霾判识方法研究[J]. 气象，43(11)：1431-1438. Chen Y Y，Xiong S Q，Zhou Y Q，et al，2017. Study on identification index of haze spectrum by FY-3/MERSI satellite data[J]. Meteor Mon，43(11)：1431-1438(in Chinese).

段菁春，毕新慧，谭吉华，等，2006. 广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布[J]. 中国环境科学，26(1)：6-10. Duan J C，Bi X H，Tan J H，et al，2006. The particle diameter distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric particle during haze period in Guangzhou[J]. China Environ Sci，26(1)：6-10(in Chinese).

范雪波，吴伟伟，王广华，等，2010. 上海市灰霾天大气颗粒物浓度及富集元素的粒径分布[J]. 科学通报，55(13)：1221-1226. Fan X B，Wu W W，Wang G H，et al，2010. The concentration and size distribution of enriched elements of airborne particles in Shanghai as haze day[J]. Chin Sci Bull，55(13)：1221-1226(in Chinese).

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 Geogr Sin，63(7)：761-768(in Chinese).

高健，张岳，羽中，等，2012. 北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探[J]. 环境科学研究，25(11)：1201-1207. Gao J，Zhang Y，Yu Z，et al，2012. Study on the characteristics and formation of a multi-day haze in Beijing in october 2011[J]. Res Environ Sci，25(11)：1201-1207(in Chinese).

郭蕊，段浩，马翠平，等，2016. 河北中南部连续 12 d 重霾污染天气过程特征及影响因素分析[J]. 气象，42(5)：589-597. Guo R，Duan H，Ma C P，et al. 2016. Analysis on the characters and influencing factors of a 12 d heavy haze pollution weather process[J]. Meteor Mon，42(5)：589-597(in Chinese).

廖玉芳，吴贤云，潘志祥，等，2007. 1961—2006 年湖南省霾现象的变化特征[J]. 气候变化研究进展，3(5)：260-265. Liao Y F，Wu X Y，Pan Z X，et al，2007. Climatic characteristics of haze in Hunan Province during 1961−2006[J]. Climate Change Res，3(5)：260-265(in Chinese).

廖国莲，曾鹏，郑凤琴，等，2011. 1960—2009 年广西霾日时空变化特征[J]. 应用气象学报，22(6)：732-739. Liao G L，Zeng P，Zheng F Q，et al，2011. Spatial and temporal variations of hazes in Guangxi from 1960 to 2009[J]. J App Meteor Sci，22(6)：732-739(in Chinese).

牛彧文，顾骏强，浦静姣，等，2010. 浙江城市区域灰霾天气的长期变化[J]. 热带气象学报，26(6)：807-812. Niu Y W，Gu J Q，Pu J J，et al，2010. The long-term variation of haze weather in urban areas of Zhejiang[J]. J Trop Meteor，26(6)：807-812(in Chinese).

石春娥，王喜全，李元妮，等，2016. 1980—2013 年安徽霾天气变化趋势及可能成因[J]. 大气科学，40(2)：357-370. Shi C E，Wang X Q，Li Y N，et al，2016. The trend of haze in Anhui Province from 1980 to 2013 and the possible reasons[J]. Chin Atmos Sci，40(2)：357-370(in Chinese).

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 J，Cui L L，He Q S，et al，2010. The changes and causes of fog and haze days in eastern China[J]. Acta Geogr Sin，65(5)：533-542(in Chinese).

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]. Climate Change Res，9(5)：313-318(in Chinese).

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 Environ Res，18(3)：397-406(in Chinese).

童尧青，银燕，钱凌，等，2007. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学，27(5)：584-588. Tong Y Q，Yin Y，Qian L，et al，2007. Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing Area[J]. China Environ Sci，27(5)：584-588(in Chinese).

翁之梅，李丽平，杨万裕，等，2016. 浙江省冬季不同霾过程的后向气流轨迹及环流特征[J]. 气象，42(2)：183-191. Weng Z M，Li L P，Yang W Y，et al，2016. Backward trajectory and circulation features in different haze processes in winter of Zhejiang[J]. Meteor Mon，42(2)：183-191(in Chinese).

吴兑,2005.关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J].气象,31(4):3-7. Wu D,2005. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather[J]. Meteor Mon,31(4):3-7(in Chinese).

吴兑,2006.再论都市霾与雾的区别[J].气象,32(4):9-15. Wu D,2006. More discussions on the differences between haze and fog in city[J]. Meteor Mon,32(4):9-15(in Chinese).

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 Sci Circum,32(2):257-269(in Chinese).

吴兑,毕雪研,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 Sin,64(4):510-517(in Chinese).

吴兑,廖国莲,邓雪娇,等,2008.珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J].应用气象学报,19(1):1-9. Wu D,Liao G L,Deng X J,et al,2008. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta[J]. J Appl Meteor Sci,19(1):1-9(in Chinese).

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 Sin,68(5):680-688(in Chinese).

吴萍,丁一汇,柳艳菊,等,2016.中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系[J].气象学报,74(3):352-366. Wu P,Ding Y H,Liu Y J,et al,2016. Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China[J]. Acta Meteor Sin,74(3):352-366(in Chinese).

杨晓亮,杨敏,李江波,等,2018.一次太行山焚风对霾强度的影响分析[J].气象,44(2):313-319. Yang X L,Yang M,Li J B,et al,2018. Impact analysis of a Taihang Mountain fohn on haze intensity[J]. Meteor Mon,44(2):313-319(in Chinese).

张浩,石春娥,邱明燕,等,2010.合肥市霾天气变化特征及其影响因子[J].环境科学学报,30(4):714-721. Zhang H,Shi C E,Qiu M Y,et al,2010. Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors[J]. Acta Sci Circum,30(4):714-721(in Chinese).

张浩,石春娥,杨元建,2019.基于东亚冬季风指数的安徽省冬季霾预测研究[J].气象,45(3):407-414. Zhang H,Shi C E,Yang Y J,2019. Prediction of winter haze days in Anhui Province based on East Asian winter monsoon index[J]. Meteor Mon,45(3):407-414(in Chinese).

中国气象局,2003.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社:23. China Meteorological Administration,2003. Specification for Surface Meteorological Observation[M]. Beijing:China Meteorological Press:23(in Chinese).

周文君,平海波,刘瑞阳,等,2016.江苏盐城地区一次持续雾-霾天气过程的综合分析[J].气象,42(7):838-846. Zhou W J,Ping H B,Liu R Y,et al,2016. Analysis of the sustained fog haze event in Yancheng[J]. Meteor Mon,42(7):838-846(in Chinese).

Chang D,Song Y,Liu B,2009. Visibility trends in six megacities in China 1973－2007[J]. Atmos Res,94(2):161-167.

Che H Z,Zhang X Y,Li Y,et al,2009. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China,1981－2005[J]. Theor Appl Climatol,97(3/4):235-242.

Fu Q Y,Zhuang G S,Wang J,et al,2008. Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta,China[J]. Atmos Environ,42(9):2023-2036.

Schichtel B A,Husar R B,Falke S R,et a1,2001. Haze trends over the United States,1980－1995[J]. Atmos Environ,35(30):5205-5210.

Tie X X,Brasseur G P,Zhao C S,et al,2006. Chemical characterization of air pollution in Eastern China and the Eastern United States[J]. Atmos Environ,40(14):2607-2625.

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.

Xu M,Chang C P,Fu C,et al,2006. Steady decline of East Asian monsoon winds,1969－2000:Evidence from direct ground measurements of wind speed[J]. J Geophys Res:Atmos,111(D24):D24111.