

长江三角洲城市群霾的演变特征及影响因素研究

史 军^{1*}, 崔林丽² (1.上海市气候中心, 上海 200030; 2.上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 201199)

摘要: 重建了长江三角洲 1961~2007 年霾气候数据序列, 分析了霾日数的时空变化特征及城乡差异, 并探讨了大气污染以及地面和近地层气象条件对霾发生的影响。结果表明, 利用湿度—能见度指数参与霾气候序列重建的方法具有一定的合理性和科学性。过去 47a 间, 长江三角洲霾日数总体上呈逐渐增多的趋势, 并且四季霾日数都增加。空间上, 整个长江三角洲霾日数基本上都呈增加趋势, 并以杭州和南京增加最多。近 30a 来长江三角洲大城市、中等城市和城镇乡村站间霾日数变化具有明显差异。地面气象要素中风速和最长连续无降水日数与霾发生具有较好的对应关系。在霾天气过程和对应的清洁过程, 近地层温度、位势高度和风场也都具有明显的差异。长江三角洲霾变化趋势与我国京津冀、珠江三角洲等地的变化一致。区域大气污染物排放量的增加, 尤其是细颗粒物的增加是霾出现频率增加的可能原因, 全球气候变化以及区域城市化造成的气象条件改变也有利于霾日的增加。

关键词: 霾; 演变特征; 影响因素; 大气污染; 气象条件; 长江三角洲

中图分类号: X131.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)12-2113-10

Characteristics and influencing factors of haze in the Yangtze River Delta region. SHI Jun^{1*}, CUI Lin-li² (1. Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Center for Satellite Remote Sensing and Application, Shanghai 201199, China). *China Environmental Science*, 2013,33(12): 2113~2122

Abstract: The long-term hazy days from 1961 to 2007 were reconstructed and the spatial and temporal characteristics of the haze in the Yangtze River Delta (YRD) region were analyzed. The impacts of surface and near-surface meteorological conditions and air pollution on the haze occurrences were also considered using the methods of climate statistics, remote sensing and GIS analysis. The results indicated that the reconstructed hazy days with the consideration of humidity and visibility were fairly consistent with the measured records. From 1961 to 2007, the number of hazy days in the YRD region increased significantly, especially in Hangzhou and Nanjing. In the recent 30 years, the annual hazy days and their variations were different among large cities, medium-sized cities and towns and villages in the YRD region. Air pollution, surface wind speed and monthly longest consecutive dry days were closely correlated with the occurrence of hazy days in the YRD region. The removal processes of the occurrences of haze in the region were also influenced significantly by near-surface temperature, geo-potential height and wind field. The variation trends of hazy days in the YRD region were consistent with those in Beijing-Tianjin-Hebei region and Pearl River Delta. The possible reason of increasing hazy days was the increasing emissions of air pollutants, especially the increase of fine particles. The changed meteorological conditions caused by global climate change and regional urbanization were also the reasons of the increasing hazy days.

Key words: haze; characteristics; influencing factors; air pollution; meteorological conditions; Yangtze River Delta

霾是一种大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中, 使水平能见度小于 10km, 对视程造成障碍的天气现象^[1]。此外, 霾还能诱发鼻炎、支气管炎、小儿佝偻病等多种疾病^[2~4]和降低农作物产量和品质^[5~6]。

自 20 世纪 70 年代开始, 国外学者先后对霾的来源、组成、时空分布特征、长期变化趋势^[7~8]及其气候效应^[9~10]作了比较深入的研究。我国学者也开展了一些全国性或区域性的霾气候特

征、成因等研究^[2,11~18]。作为我国四大霾严重地区之一^[3], 长江三角洲霾日数近年来有明显上升趋势^[14,17]。

然而, 在气象系统的台站观测业务中, 全国对

收稿日期: 2013-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001283); 中国清洁发展机制基金赠款项目(2012043); 上海市自然科学基金项目(09ZR1428800); 上海市气象局研究型项目(YJ201207)

* 责任作者, 高级工程师, shij@climate.sh.cn

霾没有统一的辅助判别标准^[19],各地气象部门虽然制订了一些用相对湿度来区分霾和雾的指导性指标,但人为因素较大,地区差异也很明显,造成资料的可比性较差^[20].直接利用地面气象站点观测记录的霾天气现象资料会大大降低研究的科学性^[19].而且,以往对霾的研究多是针对特定过程的气象条件和污染物浓度变化^[18],较少开展长时间序列的霾城市化效应分析,而从地面和高空天气气象条件、区域大气污染等方面对霾发生频次的综合影响研究就更少.鉴于此,本文利用长江三角洲气象站点 1961~2007 年期间的能见度和相对湿度资料,重建了长江三角洲霾气候数据序列,分析了长江三角洲霾日数的长时间序列时空变化特征及城乡差异,并探讨了大气污染和气象条件对霾发生的影响和贡献.

1 资料与方法

1.1 数据资料

长江三角洲 36 个气象站 1961~2007 年期间逐日 3 次(08:00, 14:00, 20:00)能见度和日平均相对湿度数据、报表记录的逐日霾观测数据以及上海宝山站 1990~2011 年逐日气温、气压、相对湿度、风速和降水资料,该数据来自于上海市气候中心、江苏省气候中心、浙江省气候中心以及安徽省气候中心;上海市 2000 年 6 月 5 日~2011 年 12 月 31 日逐日 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 平均质量浓度和空气污染指数(API)、南京市和杭州市 2000 年 6 月 5 日~2007 年 12 月 31 日逐日 API 数据,其中前者来自于上海市环境监测中心,后者来自于中华人民共和国环境保护部数据中心.

在长江三角洲地区,共有 138 个国家基准/基本气象站和一般气象站,但对 1961~2007 年期间各站逐日 3 次能见度和日平均相对湿度数据分析发现,很多站点在 20 世纪 60~70 年代(安徽和浙江多为 1962~1979 年;江苏多为 1963~1979 年)能见度资料缺测,所以首先从上述 138 个站点中挑选出 1961~2007 年期间逐日 3 次能见度和日平均相对湿度数据序列完整的站点共 36 个,用于霾气候数据序列的重建.

此外,还有美国国家地球物理数据中心(NGDC)提供的 1992~2007 年 DMSP/ OLS 稳定夜间灯光遥感数据、美国国家环境预报中心(NCEP)/美国国家大气研究中心(NCAR)提供的中国东部 2001~2011 年逐日 2.5×2.5°再分析资料以及《中国城市统计年鉴》^[21]中的非农人口数据.

1.2 研究方法

1.2.1 长江三角洲霾气候数据序列重建 鉴于霾在相对湿度变化时,能见度稳定不变或变化不显著;而雾在相对湿度变化时,能见度也随之变化,所以单一采用相对湿度来区分霾和雾是不完整的,应该增加能见度判据,即用能见度对传统的霾的判别指标(相对湿度)进行订正.根据目前我国南方大多数台站霾的判别指标,将霾的相对湿度上限确定为 90%;雾的相对湿度下限确定为 70%,即当相对湿度>90%时,记为雾;当相对湿度<70%,记为霾;当相对湿度在 70%~90%时,计算湿度—能见度指标.基于视程障碍物浓度与能见度的平方成正比,本文参考李崇志等^[20]研究结果,采用 2 次曲线形式计算湿度—能见度指数,见式(1).

$$u = 90 - \frac{v^2}{5} \quad (1)$$

式中: u 为湿度—能见度指数,%; v 为能见度,km;当相对湿度< u 时,记为霾;当相对湿度 $\geq u$ 时记为雾.

基于各站日均相对湿度和能见度,并结合式(1)对各站霾和雾进行判别,生成长江三角洲 36 个气象站 1961~2007 年期间霾日数序列,并根据能见度生成各等级(轻度:5< v <10km;中度:2< v ≤5km;重度: v ≤2km)霾日数序列.文中日均能见度是利用气象站逐日 3 次能见度数据取平均值来计算.在 1961~1979 年期间,我国气象站能见度是以级别为单位记录的,故采用本课题组前期研究方法^[22]将逐日 3 次能见度级别转化为对应的能见距离中值,然后再计算日均能见度.

1.2.2 长江三角洲霾的演变特征分析 利用气候统计诊断技术,主要是趋势法和回归法,分析长江三角洲年和四季霾日数的变化、各等级(轻度、

中度和重度)霾日数年代际变化和空间变化.由于区域气象站点空间分布不均,有些省(市)站点较多,而有些省(市)站点较少,为此,文中以研究区覆盖的各省(市)的面积为权重来计算整个长江三角洲年、四季及各等级霾日数的时间序列,具体来说,上海、江苏、浙江和安徽的权重分别为 0.03、0.37、0.45 和 0.15.

基于 1992~2007 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据,并参考《中国城市统计年鉴》^[21]中的非农人口数,按照>50 万、10~50 万和<10 万对长江三角洲气象站点进行了大城市站、中等城市站和城镇乡村站(包括农村站和城镇站)类型划分.在本文,大城市站包括南京、上海、杭州、常州、南通、芜湖、宁波和温州站,中等城市站包括滁县、靖江、溧阳、嘉兴、慈溪、金华、衢州、丽水、临海和洪家站,其余站点为城镇乡村站.然后,分析 1961~2007 年长江三角洲大城市、中等城市和城镇乡村站霾日数的年际变化,并根据大城市站与城镇乡村站逐年霾日数的差值估算长江三角洲城市化对霾日数的贡献.

1.2.3 长江三角洲霾发生的影响因素分析 基于重建的长江三角洲省会城市(上海、南京和杭州)逐日霾气候数据,进行了霾日和非霾日的划分,并利用省会城市逐日 API 数据和上海逐日 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 的平均质量浓度,分析了霾日与非霾日长江三角洲省会城市空气质量差异以及上海霾日与非霾日 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 质量浓度差异及年际变化,明确了长江三角洲大气污染对霾天气出现的影响.

利用上海宝山站 1990~2011 年逐日地面气象要素(包括气温、气压、相对湿度、风速和降水)以及重建的逐日霾数据,分析了霾日与非霾日地面气象要素的差异,并根据长江三角洲省会城市 2000 年 6 月 5 日~2011 年 12 月 31 日逐日霾重建数据和当日空气质量,挑选区域典型霾天气过程和时间内相近的清洁过程(表 1),对比分析了 925hPa 温度、位势高度、相对湿度、垂直速度和风场在霾天气过程和清洁过程的差异,明确地面和近地层气象要素对霾发生的影响.

表 1 挑选的典型霾天气过程和清洁过程时间段
Table 1 Typical hazy processes and corresponding cleaning processes in this study

时间	霾天气过程	清洁过程
2003-12	22~25 日	26~27 日
2004-11	17~20 日	25~26 日
2007-01	18~19 日	7~8 日
2011-12	13~14 日	8~9 日

2 结果与讨论

2.1 长江三角洲霾气候数据序列的重建 将长江三角洲 36 个气象站重建的霾日数(重建值)与地面天气现象记录的霾日数(报表记录值)进行对比验证,结果表明(表 2 和图 1),霾气候数据序列的重建值与记录值之间存在较好的一致性.就多年平均霾日数的差值而言,上海市的重建值与记录值差 3.2d,江苏省差 10.3d,浙江省差 9.6d,安徽省差 1.3d;就过去 47 年间重建值与记录值序列的相关系数而言,上海市为 0.83,江苏省为 0.75,浙江省为 0.81,安徽省为 0.50.在所有 36 个站中,有 32 个站的重建值与记录值序列的相关系数在 0.001 水平上显著相关,3 个站在 0.01 水平上显著相关(表 2).

由图 1 可见,与记录值相比,1961~2007 年间长江三角洲典型站点霾日数重建值很少在较短时间内出现大的波动,符合天气现象变化的一般特征.这也说明,本文所提出的霾气候数据重建方法具有一定合理性和科学性.

2.2 长江三角洲霾日数的变化特征

2.2.1 霾日数的年际变化 1961~2007 年期间,长江三角洲霾日数总体上呈逐渐增多的变化趋势(图 2).霾日数在 2004 年最多(区域平均为 52.8d),而在 1964 年最少(0.4d).过去 47a 间,霾日数以 10.5d/10a 的线性趋势显著增加,其中在 1991~2007 年期间,霾日数以 21.8d/10a 的线性趋势显著增加.

长江三角洲四季霾日数在 1961~2007 年期间也都呈现出增加趋势(图略),其中冬季霾日数在过去 47a 间以 3.7d/10a 的线性趋势逐渐增加,春季和秋季霾日数在 1961~1978 年期间增加较少,而在 1978~2007 年期间分别以 3.5d/10a 和

4.5d/10a 的线性趋势显著增加.夏季霾日数在 1978~2007 年期间以 2.6d/10a 的线性趋势显著增加.1961~1978 年期间维持在 0d/a 附近,而在 1978~2007 年期间显著增加.

表 2 1961~2007 年期间多年霾日数重建值与记录值对比
Table 2 Comparisons between reconstructed and measured hazy days during 1961~2007

站名	上海市						江苏省		
	闵行	宝山	嘉定	崇明	徐家汇	松江	盱眙	大丰	南京
差值(d/a)	0.8	-0.7	9.1	2.0	-1.5	5.0	16.2	12.6	-1.9
相关系数	0.93	0.52	0.91	0.8	0.9	0.94	0.81	0.61	0.91

站名	江苏省						浙江省		
	东台	靖江	南通	吕泗	常州	溧阳	东山	嘉兴	杭州
差值(d/a)	-0.5	10.6	-6.9	-0.7	1.7	14.8	36.4	2.8	55.1
相关系数	0.78	0.64	0.89	0.39	0.95	0.83	0.67	0.76	0.7

站名	浙江省								
	平湖	慈溪	舟山	金华	宁波	石浦	衢州	丽水	仙居
差值(d/a)	0.5	-3.5	-1.1	-2.6	1.5	8.2	-8.2	9.5	2.5
相关系数	0.88	0.9	0.96	0.75	0.83	0.87	0.87	0.32	0.84

站名	浙江省					安徽省			
	温州	临海	洪家	大陈	玉环	滁县	芜湖	宁国	屯溪
差值(d/a)	-7.6	6.5	-5.3	-3.7	-11.5	-0.1	-2.6	2.7	-0.3
相关系数	0.91	0.71	0.96	0.85	0.91	0.44	0.4	0.65	0.52

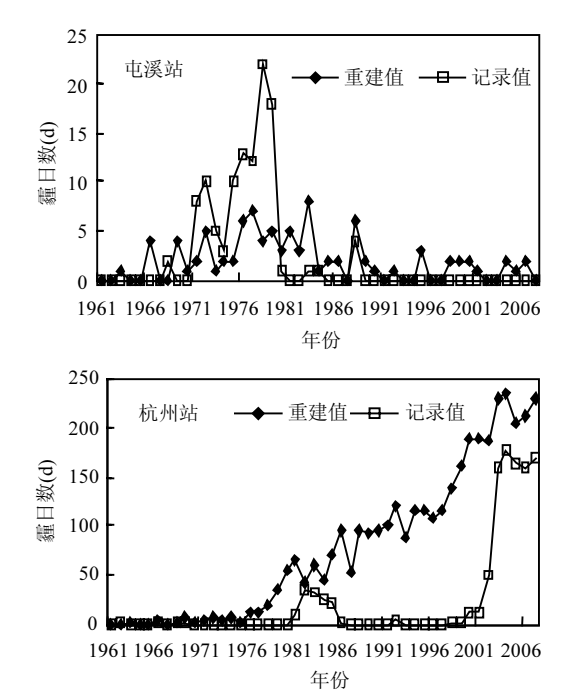


图 1 1961~2007 年期间典型站点霾日数重建值与记录值对比
Fig.1 Comparison between measured and reconstructed hazy days in typical stations during 1961~2007

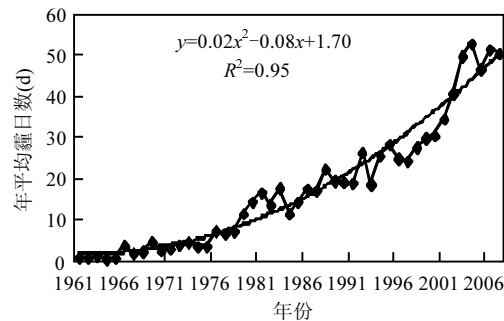


图 2 1961~2007 年长江三角洲霾日数的年际变化
Fig.2 Inter-annual variations and trends of hazy days in the YRD region during 1961~2007

2.2.2 各等级霾日数的年代际变化 1961~2007 年期间,长江三角洲总霾日数和轻度霾日数都是从 20 世纪 70 年代(1971~1980 年)开始快速增加(表 3);中度霾日数是从 20 世纪 80 年代(1981~1990 年)开始快速增加;重度霾日数则是从 20 世纪 90 年代(1991~2000 年)开始明显增加,并且各级霾日数都是在 21 世纪初(2001~2007 年)最多.总霾日数、轻度霾日数和中度霾日数都是在 20 世纪 60 年代最少,重度霾日数在 20 世纪 90

年代前平均都接近 0d/a。

表 3 各等级霾日数的年代际变化(d)
Table 3 Inter-decadal variations of hazy days (d)

年份	总霾日数	轻度霾日数	中度霾日数	重度霾日数
1961~1970	1.9	1.7	0.1	0.0
1971~1980	6.5	5.9	0.7	0.0
1981~1990	16.9	13.7	3.2	0.0
1991~2000	25.5	18.7	6.5	0.3
2001~2007	46.6	34.9	11.1	0.6

2.2.3 霾日数的空间变化 1961~2007 年期间,长江三角洲霾日数除在安徽屯溪略有减少外,在其他地区都呈增加趋势(图 3),并在杭州和南京增加最多,线性趋势分别为 52.2、45.9d/10a,而在江苏吕泗增加最少.轻度霾日数在长江三角洲绝大多数地区都呈增加趋势,在杭州和南京增加最多,在吕泗增加最少(图略).中度霾日数除在上海宝山、安徽屯溪和滁县略有减少外,在其他地区均呈增加趋势,以杭州增加最多(21.5d/10a).重度霾日数在过去 47a 间除在江苏盱眙和安徽宁国略有减少外,在其他地区也都呈增加趋势,并以杭州增加最多(1.2d/10a).

长江三角洲霾日数在过去 47a 间呈增多趋势,并且四季霾日数都是以冬季最多而夏季最少,这与我国京津冀、珠江三角洲等地霾变化的研究结果一致,如刘爱君等^[2]分析表明,1961~2000 年广州霾日数总体呈上升趋势,并以秋冬季霾日数最多;郭军^[23]对天津霾统计分析发现,霾日数具有明显的年际变化,2000 年以来霾日达到历史最高值,并且霾多发于冬半年;王丽涛等^[24]对石家庄、邢台、北京、天津、太原、郑州 6 个代表性城市分析也表明,该地区霾污染的季节变化非常显著,冬季最严重,其次是夏秋季.长江三角洲霾日数增加的年际变化特征也被一些对整个中国区域的研究证实,如高歌^[15]分析表明,1961~2005 年期间,我国东部大部地区平均年霾日数呈增加趋势,尤其是长江中下游、珠江流域及河南西部等地,霾日增加幅度大,趋势显著;胡亚旦等^[25]对我国霾气候特征分析也表明,霾激增的区域集中在华北中南部、长江中下游和华南地区,

2000 年后线性增速普遍超过了 3d/10a.空间上,整个长江三角洲霾日数基本上都呈增加趋势,区域同步性明显,与对我国华北地区^[24]和华东地区^[17]的研究结果也一致。

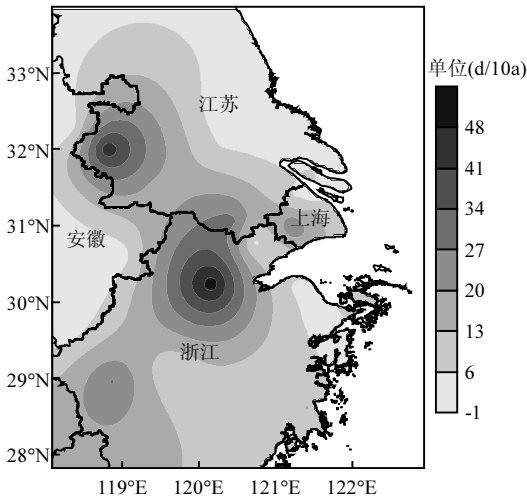


图 3 1961~2007 年期间长江三角洲霾日数空间变化
Fig.3 Spatial trends of hazy days in the YRD region during 1961–2007

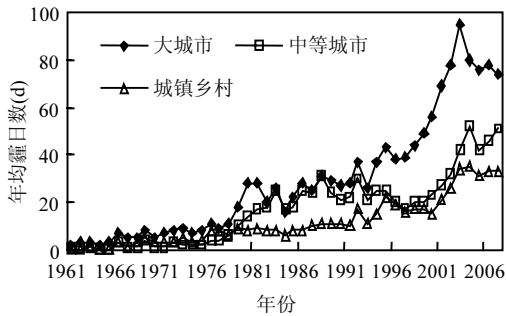


图 4 1961~2007 年期间长江三角洲大城市、中等城市和城镇乡村站点霾日数的年际变化
Fig.4 Inter-annual variations of hazy days in large cities, medium-sized cities and towns and villages in the YRD region

2.2.4 霾日数的城乡差异 1961~2007 年期间,长江三角洲大城市、中等城市和城镇乡村站霾日数分别以 16.8、9.6 和 6.5d/10a 的线性趋势显著增加(图 4),其中在 1978 年以前,大城市、中等城市 and 城镇乡村站年均霾日数都相差很小,而在 1978~2007 年期间,站点间年均霾日数的差值快

速增加.平均而言,在1961~1978年期间,大城市站比城镇乡村站年均霾日数多3.2d,而在1978~2007年期间,大城市站比城镇乡村站年均霾日数多25.6d.利用1978~2007年期间长江三角洲大城市站逐年霾日数减去当年城镇乡村站霾日数,获得区域霾日数的城市化贡献率,结果表明,过去30a间,城市化对长江三角洲霾日数的贡献为14.1d/10a,其中在1996~2007年期间,城市化对霾日数的贡献为24.7d/10a(图4).

2.3 长江三角洲霾发生的影响因素

2.3.1 大气污染对霾发生的影响 对长江三角洲省会城市霾日与非霾日的空气质量对比分析表明(图略),霾日的空气质量以良和轻微污染日数较多,在上海、南京和杭州分别占总霾日数的80.9%、88.9%和93.7%,其次是空气质量为轻度污染的日数,霾日时空气质量为优的日数在上述三个城市分别只占总霾日数的1.7%、3.8%和1.8%.在非霾日,空气质量以良和优的日数较多,在上海、南京和杭州分别占总非霾日数的89.4%、90.5%和95.6%,其次是空气质量为轻微污染的日数,非霾日空气质量为轻度污染以及更高污染等级的日数在三个城市分别只占1.6%、1.0%和0.5%.

对上海市2001~2011年霾日与非霾日 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 年均质量浓度对比分析发现(图5),霾日 PM_{10} 年均质量浓度明显高于非霾日.同期 SO_2 和 NO_2 年均质量浓度霾日均高于非霾日(图略).同时,过去11a间3种污染物年均质量浓度都呈下降趋势,且在霾日的下降速率都大于非霾日.统计表明,2001~2011年间,上海 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 年均质量浓度在霾日比非霾日分别高1.3、1.1和0.8倍,且三种污染物在霾日与非霾日的平均质量浓度都是在2003年相差最大.霾日与非霾日的 PM_{10} 质量浓度在2002年相差最小, SO_2 在2010年相差最小,而 NO_2 在2009年相差最小.

长江三角洲大气污染物排放量的增加可能是引起霾出现频率增加的原因.2007年,上海、江苏和浙江能源总消费量分别是1990年能源总消费量的3.1、3.6和5.6倍^[26],尤其是在杭州和南京,随着工业的发展和机动车辆猛增,城市悬浮颗

粒物总量增加,汽车尾气排放也越来越多,霾日数在1961~2007年期间增加最多,如杭州2011年全市工业企业原煤消费量从2000年的8.1万t增加到13.6万t,焦炭、柴油和电力消费量也分别增加了1.4、1.1和3.2倍,社会机动车辆拥有量则从2000年的40万辆增加到208万辆,其中市区机动车辆拥有量从2000年的9万辆增加到82万辆,增加了8倍^[27-28].刘爱君等^[2]对广州霾天气成因分析也表明,霾日数年际变化规律多与大气中的污染物浓度有关,在珠江三角洲城市群,API与霾的发生有着密切的联系,霾的出现往往对应着较高的API,尤其是当 $API > 100$ 时,经常有霾天气与之相对应^[29].王建国等^[30]对济南市1951~2006年霾日数的变化分析表明,污染物 PM_{10} 的浓度与霾的发生有密切关系.

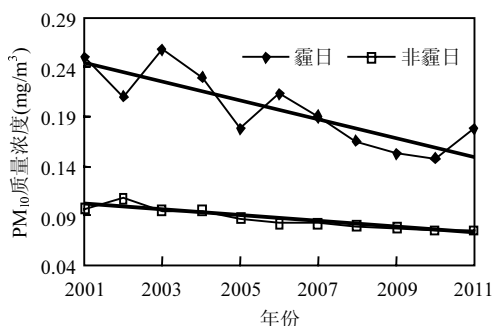


图5 上海市2001~2011年霾日与非霾日 PM_{10} 质量浓度年际差异及变化

Fig.5 Inter-annual variations of mass concentrations of PM_{10} in hazy days and non-hazy days in Shanghai
粗实线为线性趋势线

对京津冀、长江三角洲和珠江三角洲等地的研究进一步表明,霾日数的增加很可能是由细颗粒物的增加导致的,如樊文雁等^[31]对北京雾、霾日细粒子质量浓度垂直梯度变化分析表明,霾日细粒子污染表现为时空分布十分均匀的城市群区域污染特征且污染物积累.童尧青等^[14]对南京地区霾天气成因分析也表明,大气颗粒物尤其是细颗粒物污染加剧,很可能是南京霾天气频发的一个重要原因.吴兑等^[32]对广州地区研究也表明,广州能见度的恶化主要与细粒子有关, PM_{10} 季均

值有一半超过国家二级标准的日均值浓度限值,而 $\text{PM}_{2.5}$ 季均值全部超过美国国家标准的日均值浓度限值($65\mu\text{g}/\text{m}^3$),即广州气溶胶污染主要是细颗粒物污染。

在特定的物理化学条件下,大气污染物可以相互作用形成新的污染物,甚至产生无法预知的恶劣环境条件^[33]。大气复合污染中同时存在高浓度的一次排放和二次转化的气态及颗粒污染物,这为细颗粒表面非均相反应提供了充足的反应物,而气态污染物在细颗粒表面的非均相反应可改变大气氧化性及颗粒物的化学组分、物化性质和光学性质,从而对霾的形成起到促进的作用^[34]。王丽涛等^[24]对河北及周边地区霾进行了区域尺度的模拟表明,该地区霾的出现与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等二次颗粒物的形成有非常密切的关系。An 等^[35]对华北平原研究也表明,气溶胶表面的非均相反应对气态亚硝酸(HONO)、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度起主要贡献,在有利的气象条件下和在氮氧化物和颗粒物排放较高的工业区域, HONO 源会加重区域空气污染、削弱能见度并增加霾发生次数。

2.3.2 地面气象条件对霾发生的影响 利用上海宝山站 1990~2011 年逐日气温、气压、相对湿度、风速和降水资料以及同期重建霾日数据,分析了地面气象要素在霾日与非霾日的差异,结果表明,地面风速在霾日与非霾日之间具有一定的差异。霾日时日平均风速为 0~2m/s 出现的频率最高,其次是 2.1~4.0m/s,日平均风速>6.1m/s 的天气没有出现霾日(图 6)。在非霾日,日平均风速为 2.1~4.0m/s 出现的频率最高,其次是日平均风速为 0~2m/s 和 4.1~6.0m/s,日平均风速>6.1m/s 出现的频率仅为 1.4%。也就是说,霾日风速基本都在 4.0m/s 以下,占全部霾日的 96.5%。气温、气压和相对湿度在霾日与非霾日之间都没有明显差异。

霾日出现与否与连续无降水日数也具有一定的联系。对 1990~2011 年间上海宝山 1~12 月平均最长连续无降水日数和霾日数分析表明(图略),在过去 11 年间,月均霾日数和月均最长连续无降水日数具有较好的一致性。在秋冬季节霾日数和月均最长连续无降水日数都较多,而在春季

和夏季霾日数和月均最长连续无降水日数都相对较少。对霾日数与最长连续无降水日数统计分析表明,月均霾日与最长连续无降水日数的相关系数为 0.68。

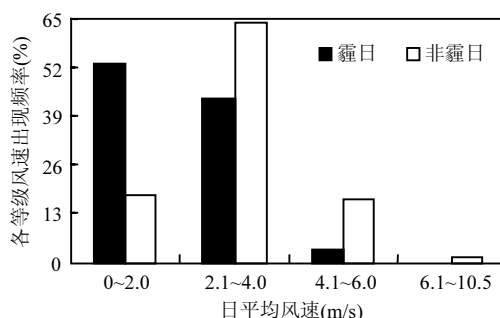


图 6 上海市 1990~2011 年霾日与非霾日各等级风速出现频率

Fig.6 Frequencies of wind speeds in hazy days and non-hazy days in Shanghai during 1990~2011

气象条件是影响大气污染物分布的主要因素之一,其中风是边界层内影响污染物扩散的重要动力因子:风向决定着大气污染物的输送方向,风速则影响着大气污染物的扩散稀释快慢,特别是低层风向、风速直接影响污染物的聚散及浓度空间分布,因此风是影响霾天气形成和发展的首要气象因素。风速较大时,有利于大气污染物水平输送,同时湍流也较强,有利于垂直方向的输送和扩散,因而出现霾的机率很小;反之,静小风则不利于污染物的扩散稀释,易形成霾^[14,36]。刘爱君等^[2]对广州市研究也表明,霾日数月和季节的分布规律多受天气形势和气象条件控制。连续无降水日数与霾发生也具有一定的联系,这是因为大气中的一些颗粒主要靠湿沉降去除,充沛的雨水对空气中悬浮的灰尘和粉尘等粒子起冲刷作用,不利于霾的形成。长江三角洲春夏季降水日数多,大气对流活动旺盛,有利于近地层污染物(尤其是细颗粒污染物)扩散稀释,从而霾较少发生。

长江三角洲城市化和工业化的发展造成下垫面属性改变和城市人口的增多,也使得城市大气边界层的物理结构发生变化。近 30a 来,长江三角洲建设用地显著增加,而且建设用地的增加主

要是通过减少原有耕地来实现的^[17].城市规模扩大、人口增加、植被减少和建筑物密度增加,都会导致城市热岛增强和空气湿度降低,为霾形成提供了理化基础.唐伍斌^[37]对桂林市霾天气研究认为,城市热岛效应导致的大气气溶胶浓度增大,促进了霾天气的发生.另一方面,城市高楼大厦增大了地面摩擦系数,阻挡了风的水平流动,使风流经城区时明显减弱,静风现象增多,不利于大气污染物向城区外围扩展稀释,为城区和近郊区霾的产生提供了地面条件.研究表明,1959~2005 年期间,长江三角洲风速降低明显,北部和南部年平均风速分别以每 10a 0.21,0.13m/s 的速率极显著降低^[38],风速降低,不利于污染物颗粒的扩散,造成霾日增加.高楼建设过程中产生的粉尘等也使得城市扬尘和悬浮颗粒物增多,有利于霾形成.

2.3.3 近地层大气环流对霾发生的影响 对长江三角洲典型霾天气过程和时间上相近的清洁过程,分析其在 925hPa 温度场、位势高度场、相对湿度场、垂直速度场和风场的差异,结果表明,霾天气过程和清洁过程在温度场、位势高度场和风场都具有较明显的差异,而在相对湿度场和垂直速度场没有呈现出显著差异.

在典型霾天气过程,我国东部都处于 925hPa 温度正距平区域,其中长江三角洲温度正距平值在多数区域介于 2.5~3.5℃之间;而在对应清洁过程,我国东部整个都处于 925hPa 温度负距平区域,负距平中心位于江西东北部与安徽、浙江交界处,长江三角洲温度负距平值在多数区域都介于 -3.0~-4.0℃之间(图略).同时,我国华东地区在典型霾天气过程多处于 925hPa 位势高度负距平区域,长江三角洲位势高度距平值在多数区域介于 0.0~0.3×10⁻¹gpm 之间;而在对应清洁过程,我国东部都处于 925hPa 位势高度正距平区域,长江三角洲位势高度距平值在多数区域介于 3.0×10⁻¹~4.0×10⁻¹gpm 之间(图略).由图 7 可以看出,在典型霾天气过程,长江三角洲及其西部地区为距平气旋控制,且风速较低,气旋形成的上升气流将来自西南方向的污染物悬浮在空中,从而易形成霾;而在清洁过程,长江三角洲以及整个我国东部很一致地吹北风,且风速较大,加速污染

物扩散和稀释.

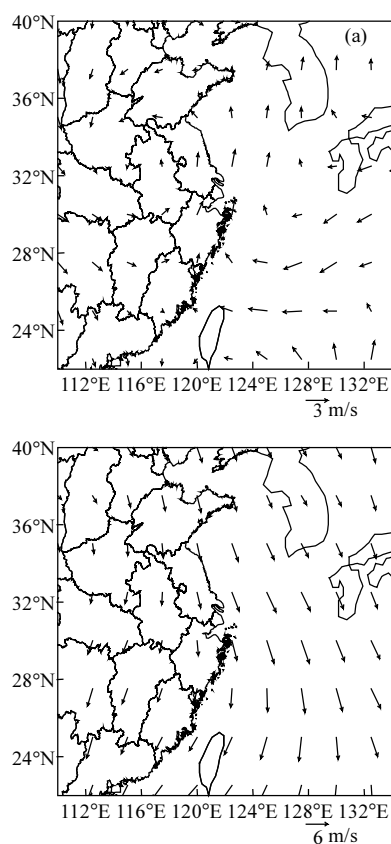


图7 长江三角洲典型霾天气过程和清洁过程 925hPa 风场距平合成

Fig.7 Vector wind anomalies at 925hPa in haze and cleaning processes in the YRD region

在全球气候变化背景下,霾形成的天气气候条件也朝着有利于霾发生的方向变化.统计分析表明,1959~2010 年期间,欧亚经向环流指数以 0.6/10a 的线性趋势显著减弱,欧亚纬向环流指数则以 0.8/10a 的线性趋势增强.经向环流减弱和纬向环流增强,不利于极地和高纬度地区的较强冷空气南下和大风、强寒潮天气出现,从而削弱大气中污染物的扩散,有利于秋冬季节霾生成.吴兑等^[39]对珠江三角洲的研究也表明,纬向环流不显著的年份,气流南北交换显著,伴随冷空气的大风等天气有利于污染物扩散,而纬向环流显著的年份,冷空气跨越南岭、到达珠江三角洲的机会较小,污染物易于堆积.此外,全球变暖导致我国北

方地区持续性暖冬和干旱加重,漂浮在空中沙尘微粒增加,有时会漂移到长江三角洲地区形成霾,如 2007 年 4 月 2 日上海出现 API 指数高达 500 的重度污染和霾天气.全球气候变化也进一步影响到降水格局的变化,如王大钧等^[40]研究表明,1961~2000 年除新疆、西藏、内蒙古中部、青海西部和四川西部地区外,我国绝大部分地区雨日呈减少趋势,雨日少有利于气溶胶颗粒在大气中存留,更易发生霾.

3 结论

3.1 基于站点日均能见度和相对湿度资料,利用湿度—能见度指数参与霾和轻雾(或雾)的判别,重建了长江三角洲霾气候序列,结果表明,霾日数重建值与记录值的历年变化存在较好的一致性,但重建值更符合天气现象变化的一般特征,故本文提出的霾气候数据序列重建方法是合理的.

3.2 1961~2007 年期间,长江三角洲年均霾日数和四季霾日数总体上呈逐渐增多的变化趋势,其中轻度霾和中度霾日数分别从 20 世纪 70 和 80 年代开始快速增加,重度霾日数从 20 世纪 90 年代开始明显增加.空间上,霾日数在整个长江三角洲基本上都呈增加趋势,并以杭州和南京增加最多.

3.3 长江三角洲霾日数的变化呈现出明显的城乡差异.1961~2007 年期间,长江三角洲大城市、中等城市和城镇乡村站霾日数分别以 16.8、9.6 和 6.5d/10a 的线性趋势显著增加,进一步分析表明,在 1978~2007 年和 1996~2007 年期间,城市化对长江三角洲霾日数的贡献分别为 14.1 和 24.7d/10a.

3.4 大气污染对霾天气的出现具有较为明显的影响.长江三角洲霾日时空气质量以良和轻微污染较多,而在非霾日以良和优天数较多.过去 11a 间,PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 年均质量浓度在霾日都明显高于非霾日.地面风速在霾日与非霾日之间也存在一定的差异.月霾日数与连续无降水日数也具有较好的对应关系.

3.5 在霾天气过程,长江三角洲处于 925hPa 温

度正距平和位势高度负距平区域,在 925hPa 风场长江三角洲及其西部为距平气旋控制且风速较小;而在对应的清洁过程,长江三角洲近地层为温度负距平和位势高度正距平,我国东部一致地为北风且风速大,从而有利于污染物扩散和稀释.

参考文献:

- [1] 中国气象局.地面气象观测规范 [M]. 北京:气象出版社, 2003: 21~27.
- [2] 刘爱君,杜尧东,王慧英.广州灰霾天气的气候特征分析 [J]. 气象, 2004,30(2):68~71.
- [3] 张保安,钱公望.中国灰霾历史渊源和现状分析 [J]. 环境与可持续发展, 2007,(1):56~58.
- [4] 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):198~200.
- [5] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a wide spread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001,107: 255~278.
- [6] Ramanathan V, Ramana M V. Atmospheric brown clouds: Long-range transport and climate impacts [J]. Environment Management, 2003:28~33.
- [7] Malm W C. Characteristics and origins of haze in the continental united-states [J]. Earth-Science Reviews, 1992,33(1):1~36.
- [8] Schichtel B A, Husar R B, Falke R S, et al. Haze trend over the United States, 1980~1995 [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35:5205~5210.
- [9] Quinn K, Bates T S. North American, Asian, and Indian haze similar regional impacts on climate [J]. Geophysical Research Letters, 2003,30(11):1555~1559.
- [10] Langmann B. A model study of smoke-haze influence on clouds and warm precipitation formation in Indonesia 1997/1998 [J]. Atmospheric Environment, 2007,41(32):6838~6852.
- [11] 吴 兑.再论都市霾与雾的区别 [J]. 气象, 2006,32(2):9~15.
- [12] 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.
- [13] 廖玉芳,吴贤云,潘志祥,等.1961~2006 年湖南省霾现象的变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 2007,3(5):260~265.
- [14] 童尧青,银 燕,钱 凌,等.南京地区霾天气特征分析 [J].中国环境科学, 2007,27(5):584~588.
- [15] 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.
- [16] 吴 蒙,范绍佳,吴 兑,等.广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(8):1409~1415.
- [17] 史 军,崔林丽,贺千山,等.华东雾和霾日数的变化特征及成因

- 分析 [J]. 地理学报, 2010,65(5):533-542.
- [18] 朱佳雷,王体健,邢 莉,等.江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(12):1943-1950.
- [19] 李 菲,吴 兑,王 婷,等.广州 2010 年亚运会会期的灰霾天气问题 [J]. 广东气象, 2008,30(2):19-21.
- [20] 李崇志,于清平,陈 彦.霾的判别方法探讨 [J]. 南京气象学院学报, 2009,32(2):327-332.
- [21] 国家统计局.中国城市统计年鉴 2000 [R]. 北京:中国统计出版社, 2001:1-10.
- [22] 史 军,吴 蔚.上海霾气候数据序列重建及其时空特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2010,19(9):1029-1036.
- [23] 郭 军.天津地区灰霾天气的气候特征分析 [J]. 城市环境与城市生态, 2008,21(3):12-15.
- [24] 王丽涛,潘雪梅,郑 佳,等.河北及周边地区霾污染特征的模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2012,32(4):925-931.
- [25] 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.
- [26] 国家统计局能源统计司编.中国能源统计年鉴 2008 [R]. 北京:中国统计出版社, 2008.
- [27] 杭州市统计局编.杭州统计年鉴 2001 [R]. 北京:中国统计出版社, 2001.
- [28] 杭州市统计局编.杭州统计年鉴 2012 [R]. 北京:中国统计出版社, 2012.
- [29] 黄 义,范绍佳,刘 吉.珠江三角洲城市群一次区域性灰霾过程气象特征分析 [C]//中国气象学会 2008 年年会大气环境监测、预报与污染物控制分会场论文集, 2008:585-593.
- [30] 王建国,王业宏,盛春岩,等.济南市霾气候特征分析及其与地面形势的关系 [J]. 热带气象学报, 2008,24(3):303-306.
- [31] 樊文雁,胡 波,王跃思,等.北京雾、霾天气细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测 [J]. 气候与环境研究, 2009,14(6): 631-638.
- [32] 吴 兑,邓雪娇,毕雪岩,等.细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降 [J]. 热带气象学报, 2007,23(1):1-6.
- [33] Inyang H I, Bae S. The aero-geochemistry of cities and regions [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007,130(1-3): 1-2.
- [34] 朱 彤,尚 静,赵德峰.大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用 [J]. 中国科学:化学, 2010,40(12):1731-1740.
- [35] An Junling, Li Ying, Chen Yong, et al. Enhancements of major aerosol components due to additional HONO sources in the North China Plain and implications for visibility and haze [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013,30(1):57-66.
- [36] 魏建苏,孙 燕,严文莲,等.南京霾天气的特征分析和影响因子初探 [J]. 气象科学, 2010,30(6):868-873.
- [37] 唐伍斌.近 50a 来桂林市灰霾天气的气候特征及热岛效应影响 [J]. 气象研究与应用, 2007,28(4):20-21.
- [38] 史 军,崔林丽,周伟东.1959 年~2005 年长江三角洲气候要素变化趋势分析 [J]. 资源科学, 2008,30(12):1803-1810.
- [39] 吴 兑,廖国莲,邓雪娇,等.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, 2008,19(1):1-9.
- [40] 王大钧,陈 列,丁裕国.近 40 年来中国降水量、雨日变化趋势及与全球温度变化的关系 [J]. 热带气象学报, 2006,22(3):283-280.

致谢: 衷心感谢美国国家大气科学研究中心铁学熙研究员在英文翻译上的热心指导和帮助;特别感谢两位匿名审稿人的耐心评阅和建设性的修改意见.感谢浙江省气象科学研究所杨续超博士在 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据方面提供的帮助.

作者简介: 史 军(1975-),男,山西天镇人,高级工程师,博士,主要从事气候变化与环境评估研究.发表论文 50 余篇.

《中国环境科学》2012 年度引证指标

根据《2013 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,《中国环境科学》2012 年度引证指标继续位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列,核心影响因子 1.657,学科排名第 1 位,在被统计的 1994 种核心期刊中列第 21 位;综合评价总分 72.0,学科排名第 3 位.《中国科技期刊引证报告》每年由中国科学技术信息研究所编制,统计结果被科技管理部门和学术界广泛采用.