

## 安徽省霾污染的季节变化特征及其主导气象因子研究

陈凤娇<sup>1</sup>, 王体健<sup>2</sup>, 邱康俊<sup>1</sup>, 温华洋<sup>1</sup>, 刘惠兰<sup>1</sup>, 陆明明<sup>3</sup>, 石春娥<sup>4</sup>, 杨元建<sup>5</sup>

(1.安徽省气象信息中心,安徽合肥 230031;2.南京大学大气科学学院,江苏南京 210093;

3.黑龙江气象灾害防御技术中心,黑龙江哈尔滨 150030;

4.安徽省气象科学研究所安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,安徽合肥 230031;

5.南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,江苏南京 210044)

**摘要:** 基于1980~2010年期间63个国家级气象站的地面观测资料,对安徽省霾污染的季节变化特征及其相对湿度和风速等主导气象因子进行了研究.结果表明:①1995年前,安徽省的霾频次呈现出冬季>春季>秋季>夏季的季节变化特征;其后季节差异减小,霾天气趋于常年化.②近30年来,夏秋季霾频次逐年明显上升(1995年前后增加最明显),春冬季则表现出微弱的增长趋势.③霾发生时,四季的风向均表现出高东北风频次、多静风、低偏南风频次的分布特征;夏秋季霾发生时的风速明显减小,48.5%和54.5%的霾发生时的风速(14时)小于2m/s.④安徽省大部分区域的霾易生成于高相对湿度(>70%)环境下,但高污染的合肥和蚌埠,约71.2%和68.9%的霾生成于低相对湿度(<70%)下.⑤夏秋季,生成于不同相对湿度下的霾频次逐年显著增加(置信度95%),且发现小风日数(日均风速≤2m/s)显著增加也可能是夏秋霾增加趋势的原因之一.

**关键词:** 霾; 季节变化; 相对湿度; 风速

**中图分类号:** P427

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.07.007

**引用格式:** 陈凤娇,王体健,邱康俊,等.安徽省霾污染的季节变化特征及其主导气象因子研究[J].中国科学技术大学学报,2018,48(7):567-579.

CHEN Fengjiao, WANG Tijian, QIU Kangjun, et al. Seasonal variations in haze and its dominant meteorological factors in Anhui Province[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018,48(7):567-579.

## Seasonal variations in haze and its dominant meteorological factors in Anhui Province

CHEN Fengjiao<sup>1</sup>, WANG Tijian<sup>2</sup>, QIU Kangjun<sup>1</sup>, WEN Huayang<sup>1</sup>,  
LIU Huilan<sup>1</sup>, LU Mingming<sup>3</sup>, SHI Chun'e<sup>4</sup>, Yang Yuanjian<sup>5</sup>

(1. Anhui Meteorological Information Centre, Hefei 230031, China;

2. School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. Heilongjiang Meteorological Disaster Prevention Center, Haerbin 150030, China;

4. Anhui Institute of Meteorological Sciences, Key Laboratory for Atmospheric Sciences and Remote Sensing of Anhui Province, Hefei 230031, China;

5. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**收稿日期:** 2017-12-19; **修回日期:** 2018-06-05

**基金项目:** 国家自然科学基金(91544230,41575145,41621005,41805023),中国气象局气候变化专项(CCSF201726),安徽省自然科学基金(1808085MD99)资助.

**作者简介:** 陈凤娇,女,1989年生,博士.研究方向:大气遥感及大气探测.E-mail:cfj@mail.ustc.edu.cn

**通讯作者:** 杨元建,博士/副教授.E-mail:yyj1985@mail.ustc.edu.cn

**Abstract:** Based on the ground-based observations from 63 national stations from 1980 to 2010 in Anhui province, the seasonal variations in haze and its closely related meteorological factors (i. e., relative humidity and wind speed) were analyzed. Results show that: ① before 1995, the largest frequency for haze appeared in winter, followed by spring, autumn and summer; after that, the seasonal variations in haze frequency became less obvious. ② During the recent 30-year period, the haze frequencies in summer and autumn increased significantly, especially after 1995, while slight increases were observed both in spring and winter. ③ When haze occurred, the wind directions in four seasons all exhibited features of high frequencies of northeasterly wind and calm wind, and low frequency of Southerly wind. The wind speed in summer and autumn decreased noticeably under haze-weather conditions, and  $\sim 48.5\%$  ( $54.5\%$ ) of the haze in summer (autumn) occurred when the wind speed (14h) declined to below 2m/s. ④ Haze formations are more closely related to high relative humidity ( $>70\%$ ) conditions in most regions of Anhui province. However, in more polluted regions (e.g., Hefei and Bengbu),  $\sim 71.2\%$  and  $68.9\%$  of haze events are associated with low relative humidity conditions ( $<70\%$ ). ⑤ The frequencies of haze under different relative humidity conditions increased significantly in summer and autumn, with a confidence level of over 95%. The increases in the days of small wind speed ( $\leq 2$  m/s) are one possible factor for the increases in haze frequencies in summer and autumn.

**Key words:** haze; seasonal variability; relative humidity; wind speed

## 0 引言

霾,也称灰霾,是指大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空气中,使得大气水平能见度低于 10.0 km 的空气普遍混浊现象.近年来,随着人口增长、交通运输业和化工业的迅猛发展,京津冀、长三角及珠三角等地区的霾污染频发,霾日数呈逐年上升趋势<sup>[1-6]</sup>,霾引发的各类环境问题也日益突出.比如,霾天气伴随的有效视程的显著下降,影响汽车、船渡及飞机的正常运营<sup>[7]</sup>.同时,由于霾粒子尺度小( $0.003 \sim 10 \mu\text{m}$ ),化学成分复杂(矿物粉尘、硫酸盐、硝酸盐、黑炭等),很容易由呼吸道吸入肺泡,引发呼吸道疾病<sup>[8]</sup>.

自 20 世纪 60 年代末,国外学者就霾的时空分布及变化趋势进行了诸多研究<sup>[9-11]</sup>.而直至 21 世纪初,国内学者才开始开展对霾的化学成分和时空特征的研究,且研究区域主要集中在京津冀、长江三角洲及珠江三角洲等经济发达地区.如研究<sup>[1,5]</sup>发现珠三角霾天气主要出现在 10 月至次年 4 月,重污染区位于珠江口以西的珠三角西侧,霾的成分以细粒子为主,且二次有机碳占总有机碳的比例较高.长三角由于地域较广,霾的区域特征及其成因差异更加显著.研究<sup>[12]</sup>表明,长三角霾日高发区主要集中在上海西南部、南京-镇江一带、湖州-杭州-绍兴-金华一带、宁波西北部,且夏季霾日的年际增长趋势最为明

显,细颗粒物排放量的增加是霾出现频次增加的可能原因.相比之下,安徽省作为中国重要的农业产区,近年来霾天气频发,空气质量恶化,大气污染形势严峻,国内学者也开始重视该区域农业活动(秸秆燃烧)和城市发展致霾污染的研究<sup>[13-14]</sup>,而目前针对安徽省的霾季节变化特征的研究还甚少.

此外,诸多研究指出霾的形成、维持和消散与多种气象要素密切相关.一般而言,大气逆温、静风或小风速、弱垂直输送的天气条件有利于霾天气的维持<sup>[15-19]</sup>.而不同区域霾生成的天气条件存在差异.如昆山市霾天气易出现在偏东风情形下,而上海地区霾天气则多出现在西北风情形下<sup>[20]</sup>.Miao 等<sup>[21]</sup>通过数值模式模拟发现局地大气环流(风)和边界层结构对京津冀的霾天气有显著影响,特别是秋冬季边界层高度较低,易触发霾天气.石春娥等<sup>[22]</sup>指出东亚季风强度的变化是近 30 年来安徽省县城霾日数变化的可能驱动因子.又如,雄安新区的重污染过程主要出现在秋、冬两季,污染程度与相对湿度呈正相关,与风速和温度呈负相关<sup>[23]</sup>.已有研究<sup>[24]</sup>表明,形成雾和霾的气溶胶粒子都是吸湿性增长的,霾是在相对湿度小于 90% 的情形下形成,但雾是空气中的水汽达到(或接近)饱和时形成,在一定条件下雾和霾是可以相互转化的.丁一汇等<sup>[25]</sup>讨论了大气湿度在雾-霾转变中的作用,发现霾日的相对湿度在 69% 左右,比之前的阈值要低,意味着霾粒子更不易

向雾滴转变,这说明相对湿度可能是导致霾日增多的重要环境因子.而在全球变暖的背景下,中国大部分区域的近地面平均相对湿度呈现下降趋势,大气变干<sup>[26-28]</sup>,这必然会对霾的发生发展产生影响.而目前针对安徽省干霾和湿霾的研究还甚少.

综上,本文将利用 1980~2010 年安徽省国家气象观测站的水平能见度、相对湿度、风向风速及天气现象观测资料,对安徽省霾频次的季节变化特征、季节变化趋势及其主导的气象因子(风向、风速和相对湿度)的关系进行研究,旨在充分认识安徽省霾天气的季节变化规律及其差异的气象成因,为该地区的霾预报预警提供观测和理论依据.

## 1 资料和方法

世界气象组织和不同国家的气象机构大都利用水平能见度和相对湿度对霾日进行重建,但对于这两类气象要素采用日均值,还是小时值(14 时,北京时,LT),仍存在颇多争议<sup>[29-32]</sup>.吴兑等<sup>[32]</sup>和石春娥等<sup>[22]</sup>采用“日均能见度低于 10 km 和日均相对湿度低于 90% 为一个霾日(排除其他可造成视觉障碍的天气现象)”和“14 时能见度低于 10km 和相对湿度低于 90% 为 1 个霾日(排除其他可造成视觉障碍的天气现象)”这两种算法,对京津冀晋地区和安徽省霾日重建,发现两种重建算法得到的霾日空间分布及变化趋势基本保持一致;但对于安徽省,第二种算法得到的年霾日数与观测记录的变化趋势的一致性更高.因此,本研究将采用第二种算法重建安徽省的霾日.

本研究所用的基数据是安徽省气象信息中心提供的全省 81 个国家站的 1980 年 1 月 1 日~2010 年 12 月 31 日的逐日气象资料,涉及的气象要素包括水平能见度、相对湿度、降水量、风向、风速以及天气现象.除天气现象(日值)外,本研究中其他气象要素均使用的是 14 时的观测资料.本研究还使用了国家统计局提供的安徽省污染年排放量数据作为辅助资料.

值得注意的是,近年来随着气象观测站周围土地利用的改变、观测环境日益恶化,安徽省多个国家站不得不因此而迁址<sup>[33-37]</sup>.而台站迁移,造成的资料非均一性,直接影响相对湿度和能见度及霾日的变化趋势研究<sup>[36]</sup>.为了减少台站迁移对安徽省霾频次季节变化特征和趋势研究的影响,本研究首先剔除了安徽省 81 个国家站 1980~2010 年间迁站距离

超过 25km 的台站.在此基础上,保证台站数据的完整性(有效样本(非缺省值)占总探测样本)在 90% 以上、剔除海拔较高的光明顶站和九华山站,最终筛选出 63 个国家站,如图 1 所示.

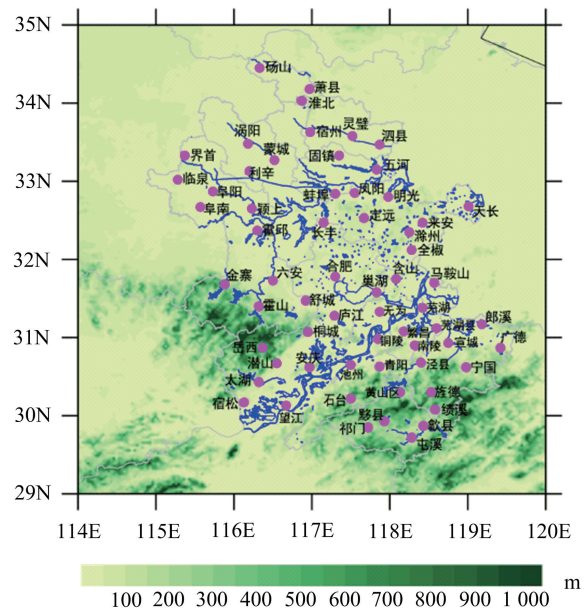


图 1 安徽省水系(蓝线)及海拔高度(填色,单位:m)和筛选出的 63 个国家站位置(粉色点)的空间分布图

Fig.1 The distribution of terrain height (unit: m) in Anhui, and the locations of 63 nation stations (pink dot)

## 2 结果

### 2.1 霾的年平均分布特征

图 2 分别给出了近 30 年平均的能见度、低能见度(能见度 $<10\text{km}$  则记为低能见度事件)频次和霾频次的空间分布,其中霾(低能见度)频次的计算方法是霾(低能见度)日与总有效探测日数之比.由图 2(a)可知,安徽省能见度空间分布呈现南北高中间低的分布型;沿淮以北和皖南山区年平均的能见度较高,超过 20km;江淮地区的能见度较低,大多数测站的能见度在 15km 左右,其中合肥和蚌埠能见度最低,分别为 12.3km 和 12.2km.低能见度频次(图 2(b))的大值区集中分布在以合肥(56%)为中心的江淮地区和以南陵(45%)为中心的沿江流域;而低能见度频次的低值区主要集中在沿淮以北的宿州(3.6%)、临泉(4.6%)、蒙城(5.2%)、砀山(6.4%)和皖南山区的歙县(8.0%)、黟县(8.6%)和屯溪(8.8%).霾频次(图 2(c))的高低值空间分布与低能见度频次的分布型类似,江淮地区霾频次的 3 个高值中心依次为合肥(37.5%)、蚌埠(22.7%)和巢湖



(20.2%);沿江流域霾频次的高值中心依次为南陵(24.8%)、池州(20.7%)。皖南山区地形的阻挡作用,使得污染物逐渐堆积,有利于沿江流域霾天气的形成。虽然低能见度的出现不仅与霾天气有关,还与降雨、降雪和扬沙等其他可造成视程障碍的天气现象有关,但低能见度和霾天气相似的空间分布型,说明安徽地区低能见度与霾事件息息相关。因此,图2(d)进一步给出了霾事件占低能见度事件的比例。由图

可知,皖北地区虽然霾频次较低,但低能见度事件很大程度上是霾过程导致的,如萧县(49%)、涡阳(44%)、砀山(30%)、宿州(27%);对于江淮中部的合肥、蚌埠和巢湖,低能见度频次高且霾事件所占比例均较高,分别达到67%,64%和56%;沿江流域的南陵、望江和池州的霾比例也可达到54%,53%和51%。说明霾污染是造成上述区域低能见度的重要原因。

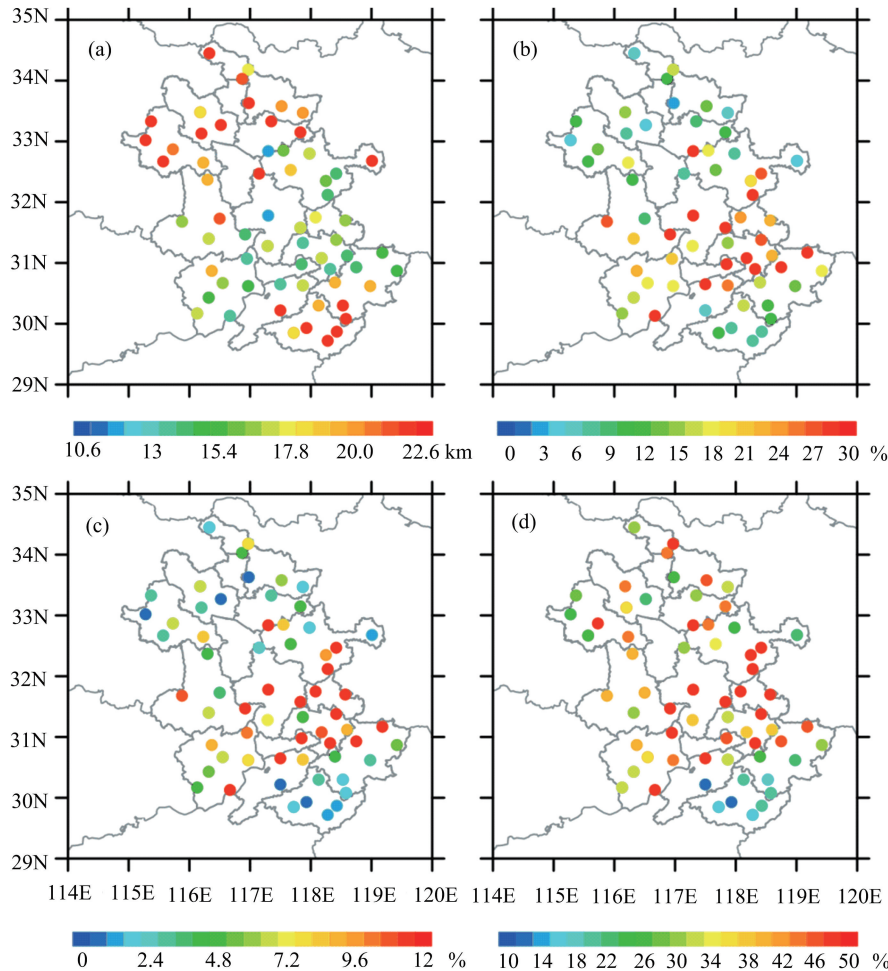


图 2 1980~2010 年安徽省平均能见度(a),低能见度频次(b),霾日频次(c)和低能见度事件中霾天气占的频次(d)

Fig.2 The spatial pattern of mean visibility (a), the frequency of low visibility (b),

the frequency of haze (c) and the ratio of haze events to low visibility events (d) during 1980~2010in Anhui

## 2.2 霾的季节变化特征

根据北半球四季的气候划分方法,划分春季为3~5月(March, April, May, 简称MAM),夏季为6~8月(June, July, August, 简称JJA),秋季为9~11月(September, October, November, 简称SON),冬季为12月、1月和2月(December, January, February, 简称DJF)。图3给出了近30年来安徽省四季霾频次的空间分布。由图可知,安徽省的霾频次

存在较明显的季节变化特征,一般而言,霾的高发季节是冬季和秋季,而春夏季的霾频次较低。冬季和秋季安徽省分别有11个和10个测站的霾频次高于16%,其中,合肥站的霾频次最高,接近40%;而对于春季和夏季,均仅有7个测站的霾频次高于16%,其中,合肥站的霾频次接近35%。安徽省秋冬季的霾频次更高,这可能是由于秋冬季盛行的偏北风容易把北方高浓度气溶胶向安徽输送,导致秋冬



季在安徽各地出现高浓度气溶胶污染,加之秋冬季多静稳天气的条件下易产生低能见度事件,即霾天气<sup>[38]</sup>.但春季(冬季)与夏季(秋季)的霾频次究竟哪个季节更高,还存在一定的区域差异.对于江淮地区的大部分测站呈现出夏季霾频次高于春季的季节变化特征,如巢湖(合肥、全椒)夏季霾频次达到 20.2%(35.6%,17.7%),春季仅为 18.0%(34.9%,14.0%).而对于淮北和沿江以南的大部分测站则表现出春季霾频次高于夏季的特征,如淮北的砀山(涡阳)春季的霾频次更高,较夏季的 0.7%(4.4%),春季可达到 1.8%(6.1%);沿江以南的黟县(歙县)春季霾频次为 1.6%(1.6%),夏季仅为 0.4%(0.4%).

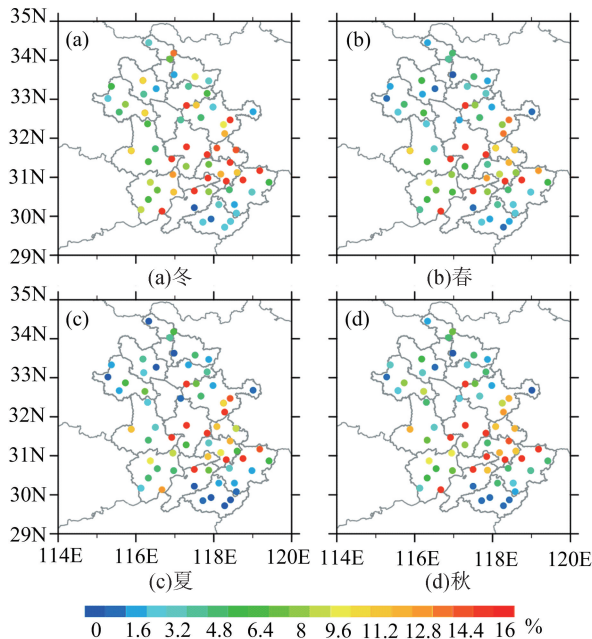


图 3 1980~2010 年安徽省霾频次的季节变化空间分布图  
Fig.3 The spatial pattern of haze frequency during 1980~2010 in Anhui Province

图 4(a)给出了 1980~2010 年安徽省四季霾频次的逐年变化曲线.由图可知,1995 年之前,霾频次的季节差异明显,呈现出冬季>春季>秋季>夏季的季节变化特征,冬夏季的霾频次差异可达 5%.1995 年之后,霾的多发季节从冬季蔓延至秋季,呈现出冬季>秋季>春季>夏季的季节变化特征,但霾频次的季节性差异逐渐缩小,冬夏季的霾频次差异缩小到 2%左右.从霾频次的季节变化趋势来看,近 30 年来冬季的霾频次一直维持在较高的水平,逐年频次主要集中在 9%~11%之间,但从 1980 至 2010 年间冬季霾频次增加不显著,特别是 1995 年至 2010 年,冬季霾表现出减小趋势.从安徽省近年

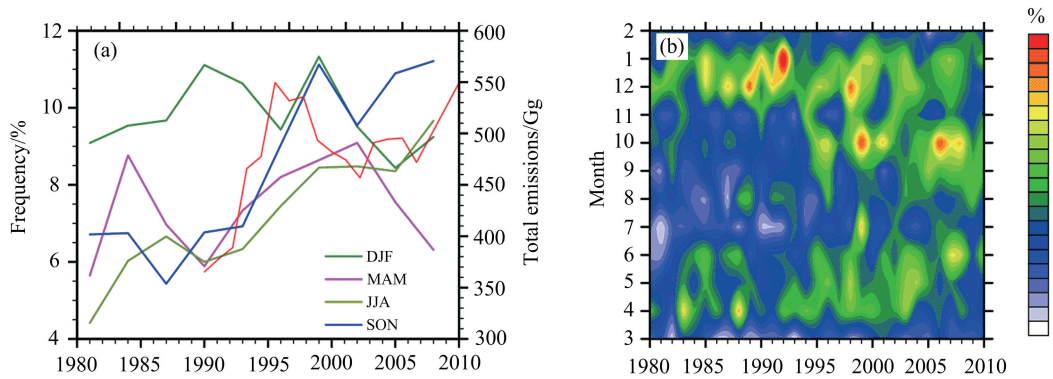
来的污染排放来看(图 4(a)红色线),安徽省总的年排放量从 1990 年到 1995 年迅速增加,此后至 2001 年排放呈减少趋势,从 2002 年开始又呈增加趋势,而对应的霾频率的变化并不是完全一致,这说明气象条件等要素等对霾的形成会起一定的调节作用.聂兵等<sup>[39]</sup>的研究表明,冬季平均降水于 1988 到 1996 年间发生数次突变,其中以 1996 年最为明显,突变前降水变化幅度较小,突变后降水增加明显,2010 年达到显著性水平,极可能是 1996 到 2010 年之间冬季降水的明显增加对霾的清除作用,使得此阶段霾有所减少.而夏秋季的霾频次则表现出明显的上升趋势,1995 年之前,秋季(夏季)的霾频次在 6.5%(6%)左右,1995 年之后霾频次显著增长,2000 年左右达到最大值,增长到 11%(8%);春季则表现出微弱的增长趋势.进一步地,图 4(b)给出了安徽省逐年逐月的霾频次变化图.我们可以清楚 F 看到,1995 年之前的 7 月、8 月和秋季的霾频次维持在较低的水平,一般低于 6%;其后的 10 月出现了稳定的霾频次高值中心(>14%).这进一步地说明霾的多发时段由冬季蔓延至秋季,安徽省霾发生趋于常年化,这是需要值得注意的问题.小风日数是日平均风速 $\leq 2.0$  m/s 的天数,它是反映静稳天气的指标之一.通常情况下,小风日数越多,大气越稳定,越有利于霾的形成.陶寅等<sup>[40]</sup>研究发现,1981~2010 年间安徽省四季平均风速和小风日数的变化趋势呈现明显的季节差异,小风日数在夏季和秋季增加趋势明显大于春季和冬季,对比霾频次的变化趋势来看,夏季和秋季的霾频次增加趋势也明显高于春季和冬季.综上,由于秋季的小风日数在这期间增加的趋势比冬季的大,加之 90 年代后期到 2010 年秋季降水一直在减少而冬季降水在增加<sup>[39]</sup>,在这种情况下,秋季霾频次的增加趋势明显比冬季大,并在量级上达到或超过冬季,从而形成了这期间秋季多霾的现象.

### 2.3 风向风速对霾的影响

风向和风速决定了污染物的输送和扩散条件.风向直接决定着给局地带来干洁还是污染的空气,而风速大小直接决定着大气污染物扩散的快慢.本节将探讨风向风速对安徽省霾的影响.为了对比霾发生与否时风向的差异,我们分别计算了 1980~2010 年安徽省四季平均状态及霾发生时的主导风向,计算方法是选取各测站的 16 个风向,包括北风(N)、东北偏北风(NNE)、东北风(NE)、东北偏东风

(ENE)、东风(E)、东南偏东风(ESE)、东南风(SE)、东南偏南风(SSE)、南风(S)、西南偏南风(SSW)、西南风(SW)、西南偏西风(WSW)、西风(W)、西北偏西风(WNW)、西北风(NW)、西北偏北风(NNW)、北风(N)和静风(C)中出现频次最高的风向,如图 5 所示.沿淮以北和江淮地区 14 时主导风向的季节变化较明显,沿淮以北冬季的主导风向为东北偏东风,春夏季则多出现东南风;江淮地区,冬季主要为西北风,春夏季则多为偏东风.霾发生时,各区域的主导风向发生改变.对于沿淮以北地区(如涡阳和蒙城),冬季的主导风向由东北偏东风转化为西北偏西风,

西北风分量的增多,有利于北方燃煤和西北沙漠沙尘等气溶胶的输送.对于江淮地区(合肥、含山、六安、霍山),秋季的主导风向由偏东风转变为静风,静风的情形不利于污染物的扩散,导致霾频发.值得注意的是,对于皖南山区的测站四季的主导风向以及霾发生时的主导风向均为静风,虽然静风风速有利于污染物的堆积,但由于皖南山区本地排放少,静风也不会造成很高频次的霾;对于沿江流域的大多数测站四季的主导风向以及霾发生时的主导风向均为东北风,季节性差异不明显.



安徽省逐年污染源排放量为红色线,单位为 Gg, 1Gg=10<sup>9</sup>g.

图 4 1980~2010 年安徽省四季霾频次的 3 年滑动平均的变化序列及安徽省逐年污染源排放量(a), 以及逐年逐月的霾频次的变化图(b)

Fig.4 The three-year moving average frequency of haze in four seasons and the annual total emissions of pollutions (a) and the seasonal-annual variations of average haze frequency (b) during 1980~2010 in Anhui province

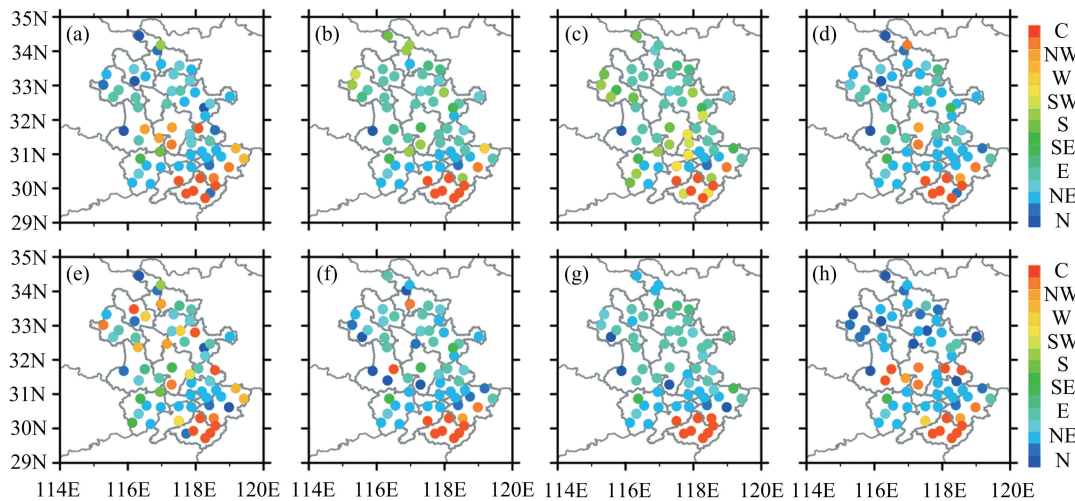


图 5 1980~2010 年安徽省四季 14 时的主导风向(上)和发生霾发生时的主导风向(下):冬(a,e),春(b,f),夏(c,g)和秋(d,h)

Fig.5 The dominant surface wind direction (14h) in four seasons (up panel), and the dominant wind direction during haze weather in four seasons (bottom panel) during 1980~2010 in Anhui Province: winter (a,e), spring (b,f), summer (c,g), and autumn (d,h)

进一步地,图 6 给出了 1980~2010 年安徽省 63 个测站四季(14 时)和霾发生时的风向频率图.风

向频率的计算方法是某风向出现的次数占总探测次数的比例.对于安徽省而言,秋季和冬季的东北风分

频次最高,分别达到 12.19%和 10.86%;春季和夏季东北风频次有所减小,仅为 9.5%和 8.7%,夏季主要以西南季风为主.从冬季开始,西南风的频次先增加后减小,冬春夏秋季的西南风的频次依次为 4.3%, 5.6%, 7.7%和 3.5%.与平均状况不同,霾发生时(蓝线),四季的风向均以偏北风向为主,具体表现为高东北风频次、多静风、低偏南风频次的分布特征,这

也侧面反映出北方高浓度的污染传输对安徽局地霾天气的发生有贡献.此外,春季、夏季和秋季霾发生时的东北风、静风频次都显著增加.如春季和夏季静风的频次仅在 5%左右,而霾发生时的静风频次可达到约 8%;春季和夏季的 NE 频次为 9.5%和 8.7%,而霾发生时的频次可分别达到 13.7%和 13.6%.

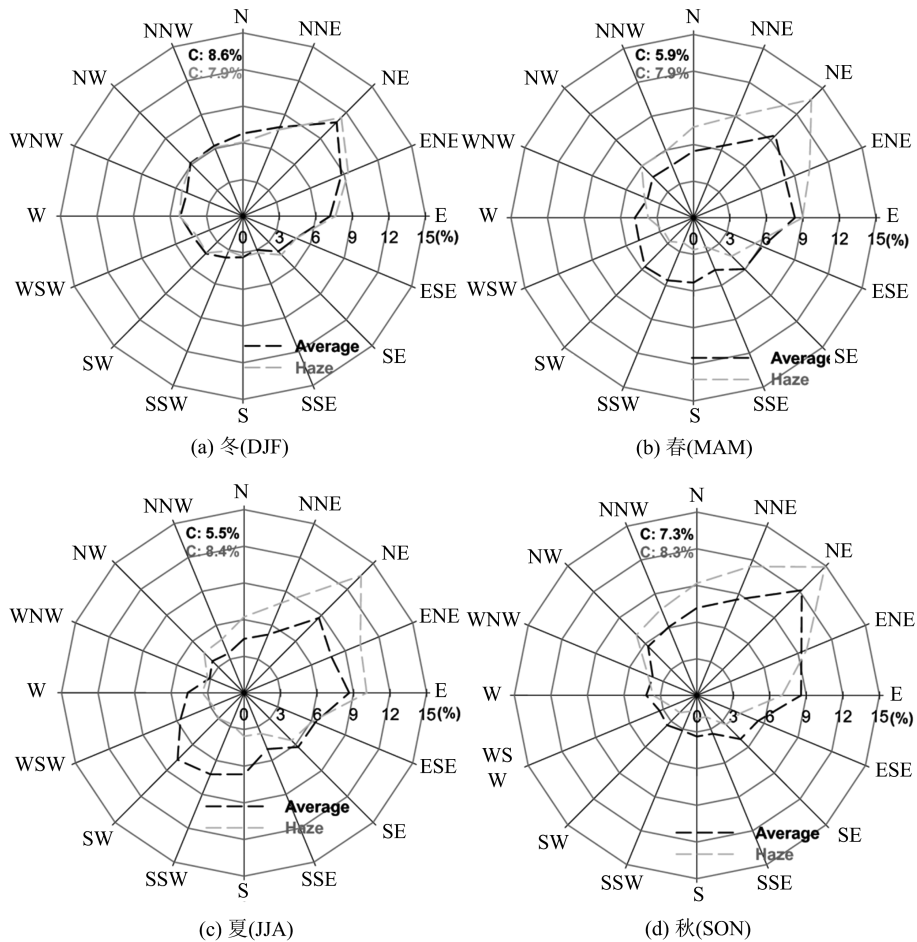


图 6 1980~2010 年安徽省四季(14 时)的风向频率(黑线)和发生霾时的风向(灰线)频率图  
 Fig.6 The frequency of wind direction (14h) in four seasons (black line), and during haze weather (gray line) in four seasons during 1980~2010 in Anhui Province

进一步地,图 7 给出了 1980~2010 年安徽省四季(14 时)和霾发生时的风速的概率密度分布图(probability distribution function,简称 PDF).从图中可以看出,就整个安徽省而言,无论有无霾天气过程,四季的风速主要集中在 0~6m/s 之间,在 3m/s 达到频次峰值.对于冬季(图 7(a))和春季(图 7(b)),较平均风速(红线),霾发生时的风速并没有显著减小,而夏季(图 7(c))和秋季(图 7(d))霾发生时,风速明显减小,14 时的风速小于 2m/s 的分别占总霾日数的 48.5%和 54.5%.结合已有研究<sup>[14, 38]</sup>可

以推断,夏秋季的较小风速使污染物(如秸秆燃烧产生的污染物)不容易扩散,大量的污染物堆积易形成霾天气;而冬季和春季的弱风速并不有利于霾的生成,这可能是由于冬春季较高的风速(多为偏北风)反而有利于周边区域污染物(如北方燃煤等)的输送,从而形成霾天气.

#### 2.4 相对湿度对霾的影响

相对湿度(RH)与霾的形成密切相关.吸湿性气溶胶可通过吸湿增长,散射和吸收更多的太阳辐射,影响大气能见度,形成霾天气<sup>[24,25]</sup>.已有研究用相对



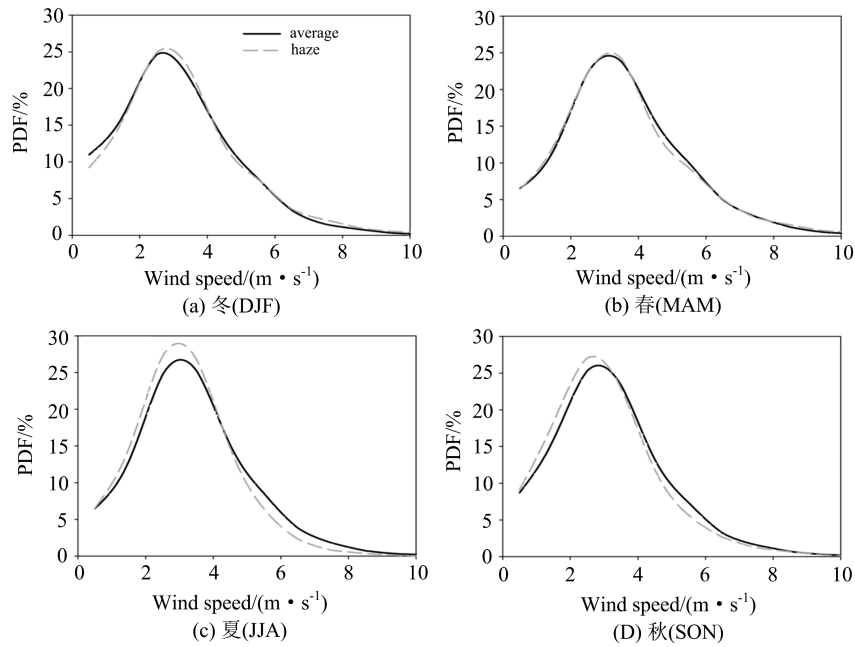


图 7 1980~2010 年安徽省四季的风速频率(黑色实线)和发生霾时的风速(灰色虚线)频率图

Fig.7 The PDF of wind speed (14h) in four seasons (black-solid line), and during haze weather in four seasons (gray-dashed line) during 1980~2010 in Anhui Province

湿度阈值(80%)来区分干霾( $RH < 80\%$ )和湿霾( $90\% > RH > 80\%$ )<sup>[29]</sup>.图 8 给出了不同相对湿度区间( $RH < 50\%$ ,  $50\% < RH < 60\%$ ,  $60\% < RH < 70\%$ ,  $90\% > RH > 70\%$ )内霾日占总霾日的频次(相对频次).由图可知,安徽省大部分测站大致 8%~32%的霾发生在相对湿度低于 50%的情形下(图 8(a)),其中,合肥(高污染)、祁门、蚌埠(高污染)和临泉站的频次最大,分别达到 31.9%, 31.1%, 30.2%, 25.9%.4%~20%的霾发生在相对湿度介于 50%~60%之间的情形(图 8(b)),江淮中部有频次大值,如池州(19.3%)、巢湖(17.2%)、铜陵(17.0%).大约 12%~28%的霾发生在相对湿度介于 60%~70%之间的情形(图 8(c)),其中沿江流域有频次大值.28%~80%左右的霾发生在相对湿度高于 70%且低于 90%的情形(图 8(d)),较其他相对湿度情形下的比例明显更高,说明安徽省大部分区域的霾易生成于高相对湿度背景下;其中皖北地区的界首(76.6%)、阜南(76.3%)、利辛(72.4%)有频次大值,这些区域的霾频次虽然较低(图 2(c)),但高相对湿度环境有利于上述区域霾的形成;沿江流域的霾频发(图 2(c)),且霾发生时 28%~44%的霾生成于高于 70%且低于 90%的相对湿度情形下,说明吸湿增长是该区域霾生成的重要途径.而对于高污染的合肥和蚌埠,仅 27.8%和 31.1%的霾发生

在 70%~90%的相对湿度情形下,剩下 71.2%和 68.9%的霾生成于 70%~90%的相对湿度的环境下,说明合肥和蚌埠的霾以干霾为主.

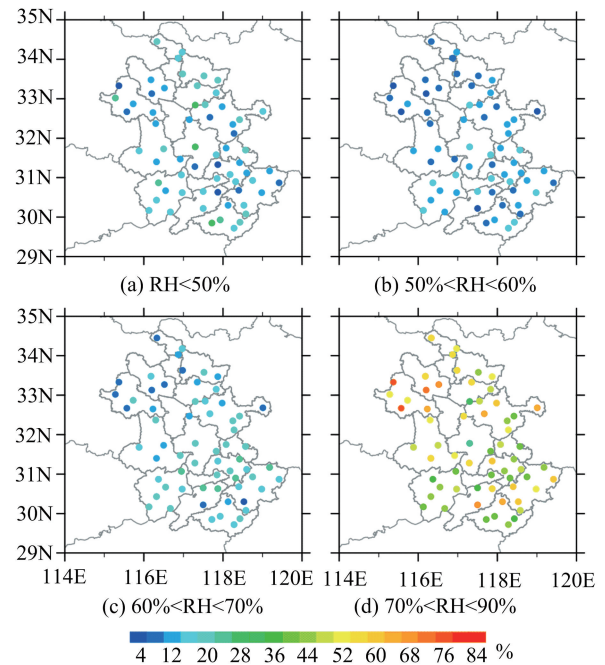


图 8 1980~2010 年安徽省不同相对湿度情形下霾日占霾日总次数的比例

Fig.8 The spatial pattern of the frequency of haze event in different RH ranges during 1980~2010 in Anhui Province

进一步地,图 9 给出了四季和霾天气时(14 时)

安徽省相对湿度的概率密度分布图.由图可知,就整个地区而言,冬季(图 9(a),黑色实线)相对湿度主要分布在 5%~95%之间,春季、夏季和秋季的相对湿度较高,主要分布在 10%~95%之间.四季平均状态的相对湿度概率密度表现出双峰值的分布形态,其中最大的峰值依次出现在 30%(冬)、40%(春)、60%(夏)、50%(秋).较平均状况,霾发生时(灰线)

的相对湿度升高且分布形态变为单峰,四季相应的概率密度峰值出现在 60%(冬)、75%(春)、80%(夏)、80%(秋).冬季霾发生时的相对湿度,主要集中在 20%~80%之间;而春季、夏季和秋季霾发生时的相对湿度更高,主要分布在 20%~90%之间,其中相对湿度高于 70%的概率密度总和分别达到 49.3%,63.7%,49.2%.

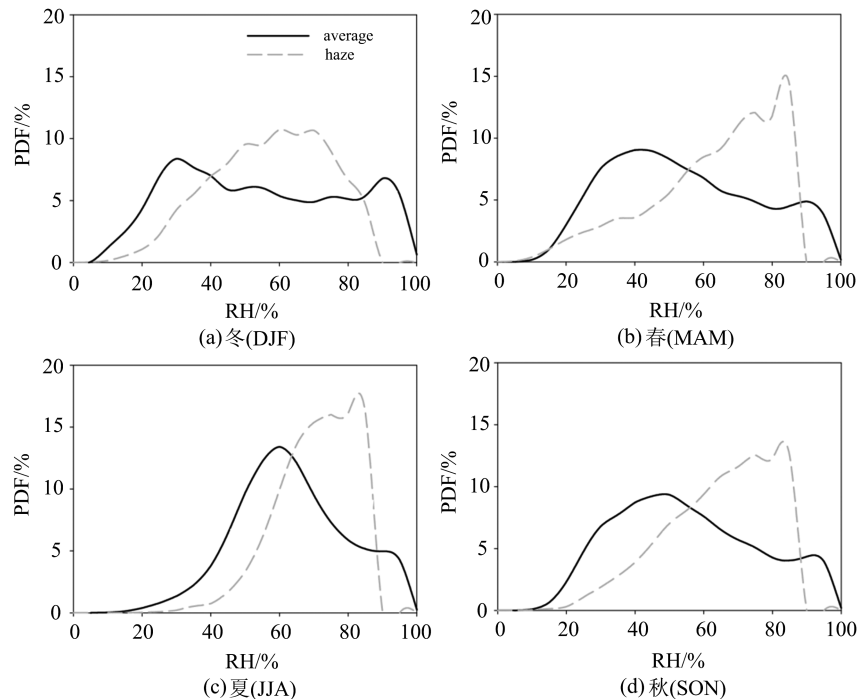


图 9 1980~2010 年安徽省四季(14 时,黑色实线)和发生霾事件时(灰色虚线)的相对湿度概率密度分布  
Fig.9 The PDF of RH (14h, black-solid line) in four seasons, and during haze weather in four seasons (gray-dashed line) during 1980~2010 in Anhui Province

为了探讨逐年逐季不同相对湿度下霾频次变化趋势的差异,我们计算了 1980~2010 年安徽省逐年逐季不同相对湿度下霾频次变化(某相对湿度下的霾出现次数与总天数之比),如图 10.从图中我们可以看到,霾频次在相对湿度低于 50%(图 10(a))和 50%~60%之间(图 10(b))的四季差异最明显,冬季频次最高,而夏季最小.而相对湿度介于 60%~70%之间和 70%~90%之间时,霾频次的季节变化差异减小.从不同相对湿度下霾频次的逐年变化趋势来看(表 1),1980~2010 年期间夏秋季不同相对湿度下霾频次均逐年显著增加(置信度=95%),而冬春季霾频次的逐年变化趋势不明显.这与夏秋季的总霾频次(图 4)增加的结果是一致的.这可能是由于近年来风速减弱和小风日数逐渐显著增加<sup>[34]</sup>,这有利于污染物的堆积,导致霾频发.而相比之下,冬春季虽然也有相同的风速减弱现象<sup>[34]</sup>,但小风日数

增加得没有夏秋增加得明显是这阶段不同相对湿度情形下霾频次的变化趋势不显著的可能原因.此外,表 2 给出了 1980~2010 年安徽省 14h 平均相对湿度的变化趋势,可以看到只有夏秋季相对湿度出现了显著的减少趋势,冬春季相对湿度的减小趋势不显著.结合已有研究结果<sup>[25-28]</sup>来看,在全球变暖的背景下,从长期趋势来看江淮地区,由于实际比湿的上升率小于气温的上升率,导致近年来近地面平均相对湿度呈下降趋势,大气变干,大气环境相对湿度持续减小,意味着霾粒子更不易向雾滴转变,有利于霾的形成.因此,安徽省夏秋季相对湿度的减小,可能是 1980~2010 年夏秋季霾显著增多的另一重要气象因子.虽然冬春季的相对湿度也有减小趋势,但不显著,这也与冬春季霾不明显的增加趋势的结果是一致的.

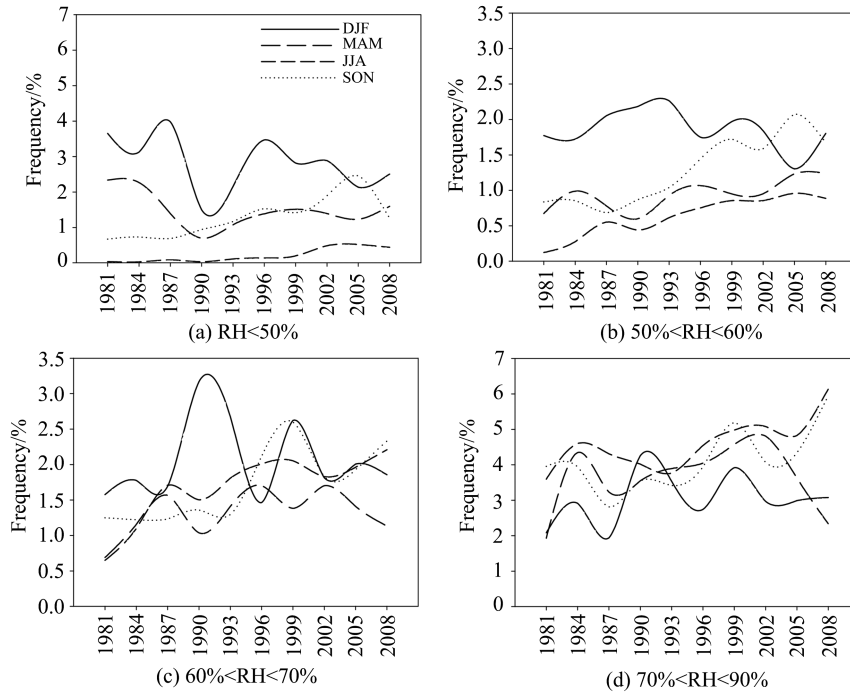


图 10 1998~2010 年安徽省四季 3 年滑动平均的不同相对湿度情形下霾频次

Fig.10 The three-year moving average frequency of 14h(LT) haze event in different RH ranges during 1980~2010 in four seasons in Anhui Province

表 1 1998~2010 年安徽省四季不同相对湿度情形下霾频次的变化趋势

Tab.1 The trends of haze frequency in terms of different RHs during 1980~2010 in four seasons in Anhui Province %/年

	RH < 50%	50% < RH < 60%	60% < RH < 70%	70% < RH < 90%
DJF	-0.04	-0.01	0.003	0.03
MAM	-0.02	0.02*	0.02	0.02
JJA	0.02*	0.03*	0.05*	0.06*
SON	0.05*	0.05*	0.04*	0.07*

【注】\*\* 代表置信度在 95% 以上。

表 2 1980~2010 年安徽省 14h 平均相对湿度的变化趋势

Tab.2 The trends of RH at 14h during 1980~2010 in four seasons in Anhui Province %/年

DJF	MAM	JJA	SON
-0.02	-0.18	-0.1*	-0.2**

【注】\*\* 和 \* 分别代表置信度在 98% 和 85% 以上。

观测地面站的水平能见度、相对湿度、风速风向及天气现象观测资料,对安徽省霾频次的季节变化特征、季节变化趋势以及其与风速风向、相对湿度的关系进行了研究,主要结论如下:

安徽省能见度的空间分布呈现南北高中间低的分布型:沿淮以北和皖南山区年平均的能见度较高,超过 20km;江淮地区的能见度较低,一般在 15km 左右,其中合肥和蚌埠有能见度的最低值,分别为 12.3km 和 12.2km.霾频次的高低值空间分布与能见度正好相反,江淮地区霾频次的 3 个高值中心依次为合肥(37.5%)、蚌埠(22.7%)、巢湖(20.2%);沿江流域霾频次的高值中心依次为南陵(24.8%)、池州(20.7%)。皖北地区虽然霾频次较低,但低能见度事件很大程度上是霾过程导致的,如萧县、涡阳、砀山和宿州的霾导致低能见度的比例分别达到 49%, 44%, 30%, 27%。

对于整个安徽省而言,1995 年前,霾频次呈现出冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的季节变化特征;其后,霾的多发季节从冬季蔓延至秋季,10 月出现霾频次的稳定的高值中心(>14%),季节差异逐渐减小,霾的出现趋于常年化.秋季霾频次的显著增多可能与近年来小风日数的增加趋势比冬季的大有关.从季节变化趋势来看,夏秋季的霾频次表现出明显的上

### 3 结论

本文基于 1980~2010 年安徽省 63 个国家气象



升趋势,1995年之前,秋季(夏季)的霾频次在6.5%(6%)左右,之后霾频次显著增长,2000年左右达到最大值,增长到11%(8%);春季则表现出微弱的增长趋势;冬季霾频次主要集中在9%~11%之间,且逐年变化不明显,特别是1995年至2010年,冬季霾表现出减小趋势,这可能是1996年前后冬季降水事件增加<sup>[38]</sup>导致对霾的清除引起的。

风对霾的影响研究表明,安徽省霾发生时四季的风向均表现出高东北风频次、多静风、低偏南风频次的分布特征。春夏秋霾发生时的东北风、静风频次都显著增加,而冬季东北风频次仅微弱增加。霾发生时主导风向的区域性差异明显:冬季沿淮以北地区(如涡阳和蒙城)的主导风向为西北偏西风,西北风分量的增多,有利于北方燃煤和西北沙漠沙尘等气溶胶的输送;秋季江淮地区(合肥、含山、六安、霍山)霾发生时的主导风向为静风,静风的情形不利于污染物的扩散,导致霾频发;沿江流域的大多数测站四季的主导风向为东北风,且季节差异不明显。风速对霾的影响研究表明,夏秋的风速在霾发生时明显减小,14时的风速小于2m/s的分别占总霾日数的48.5%和54.5%。

相对湿度对霾的影响研究表明,全年安徽省霾易生成于高相对湿度(>70%)背景下,所占总霾日的比例可达28%~80%。值得注意的是,对于高污染的合肥和蚌埠,约71.2%和68.9%的霾生成于低于70%的相对湿度的环境下,说明合肥和蚌埠地区以干霾为主。霾频次在相对湿度低于50%和50%~60%之间的季节性差异最明显,冬季频次最高,而夏季最小。而相对湿度介于60%~70%之间和70%~90%之间时,霾频次的季节差异减小,逐年逐季的变化趋势表明,1980~2010年安徽省夏秋季不同相对湿度下霾频次均逐年显著增加(置信度=95%),而冬春季霾频次的逐年变化趋势不明显。在全球变暖背景下,1980~2010年安徽省夏秋季相对湿度正逐年显著减小,而相对湿度的降低有利于气溶胶粒子向霾转化(而非雾),进而加剧了安徽省夏秋季的霾频次。

#### 参考文献(References)

- [1] DENG X J, TIE X X, WU D, et al. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(7): 1424-1435.
- [2] CHE H Z, ZHANG X Y, LI Y, et al. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981-2005[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 97(3): 235-242.
- [3] 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 Xiaojing, LI Fei, et al. Temporal and spatial variation of haze during 1951-2005 in Chinese mainland[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(5): 680-688.
- [4] ZHAO P S, ZHANG X L, XU X F, et al. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Research, 2011, 101(3): 711-718.
- [5] 王明洁,朱小雅,陈申鹏. 1981~2010年深圳市不同等级霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(9): 1563-1568.  
WANG Mingjie, ZHU Xiaoya, CHEN Shengpeng. Characteristics of haze weathers with different level in Shenzhen during 1981~2010[J]. China Environmental Science, 2013, 33(9): 1563-1568.
- [6] 温康民,史军,马井会. 1961-2013年长江三角洲地区霾日季节特征及变化分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 621-629.  
WEN Kangmin, SHI Jun, MA Jinghui. Seasonal characteristics and change of haze days over the yangtze river delta region during 1961~2013[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4): 621-629.
- [7] 田小毅,袁成松,吴震. 高速公路上霾雾演变及其对能见度的影响[J]. 气象科技, 2010, 38(6): 673-678.  
TIAN Xiaoyi, YUAN Chengsong, WU Zhen. Evolvement of haze-fog weather and influences on visibility along expressway[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(6): 673-678.
- [8] 殷永文,程金平,段玉森,等. 上海市霾期间PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>污染与呼吸科,儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1894-1898.  
YIN Yongwen, CHENG Jinping, DUAN Yusen, et al. Correlation analysis between the PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> which were taken in the hazy day and the number of outpatient about breathing sections, breathing sections of pediatrics in Shanghai [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2011, 32(7): 1894-1898.
- [9] ELRIDGE R G. Climatic visibilities of the United States [J]. Journal of Applied Meteorology, 1966, 5: 227-282
- [10] MUNN R E. Secular increases in summer haziness in the Atlantic provinces [J]. Atmosphere, 1973, 11: 156-161.

- [11] MILLER M E, CANFIELD N L, RITTER T A, et al. Visibility changes in Ohio, Kentucky, and Tennessee from 1962 to 1969 [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 100(1): 67-71.
- [12] 史军, 崔林丽. 长江三角洲城市群霾的演变特征及影响因素研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33 (12): 2113-2122.  
SHI Jun, CUI Linli. Characteristics and influencing factors of haze in the Yangtze River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33 (12): 2113-2122.
- [13] 张浩, 石春娥, 邱明燕, 等. 合肥市霾天气变化特征及其影响因子 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30 (4): 714-721.  
ZHANG Hao, SHI Chune, QIU Mingyan, et al. Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30 (4): 714-721.
- [14] 杨元建, 傅云飞, 吴必文, 等. 秸秆焚烧对中国东部气溶胶时空格局的影响 [J]. *大气与环境光学学报*, 2013, 8 (4): 241-252.  
YANG Yuanjian, FU Yunfei, WU Biwen, et al. Impacts of agricultural fire on aerosol distribution over East China during summer harvest time [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8 (4): 241-252.
- [15] 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.  
WU Dui, LIAO Guolian, DENG Xuejiao, et al. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(1): 1-9.
- [16] 马井会, 张国琰, 耿福海, 等. 上海地区一次典型连续浮尘天气过程分析 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4): 584-593.  
MA Jinghui, ZHANG Guolian, GENG Fuhai, et al. Analysis of a typical dust event in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(4): 584-593.
- [17] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 PM<sub>2.5</sub> 污染与气溶胶光学特征分析 [J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 416-423.  
ZHAO Xiujuan, PU Weiei, MENG Wei, et al. PM<sub>2.5</sub> pollution and aerosol optical properties in fog and haze days during autumn and winter in Beijing area [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 416-423.
- [18] FU G Q, XU W Y, YANG R F, et al. The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2014, 14(11): 16123-16149.
- [19] 严文莲, 刘端阳, 孙燕, 等. 秸秆焚烧导致的江苏持续雾霾天气过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 2014, 19 (2): 237-247.  
YAN Wenlian, LIU Duanyang, SUN Yan, et al. Analysis of the sustained fog and haze event resulting from crop-burning residue in Jiangsu Province [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19 (2): 237-247.
- [20] 吴珂, 周卫兵. 1981~2010 年昆山市灰霾天气气候特征分析 [J]. *环境保护科学*, 2011, 37(5): 8-11.  
WU Ke, ZHOU Weibing. Analysis on climate characteristics of haze in Kunshan during 1981~2010 [J]. *Environmental Protection Science*, 2011, 37(5): 8-11.
- [21] MIAO Y C, HU X M, LIU S H, et al. Seasonal variation of local atmospheric circulations and boundary layer structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region and implications for air quality [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2015, 7: 1-25.
- [22] 石春娥, 王喜全, 李元妮, 等. 1980~2013 年安徽霾天气变化趋势及可能成因 [J]. *大气科学*, 2016, 40 (2): 357-370.  
SHI Chune, WANG Xiquan, LI Yuanni, et al. The trend of haze in Anhui Province from 1980 to 2013 and the possible reasons [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40 (2): 357-370.
- [23] 缪育聪, 刘树华. 雄安新区大气污染的气象特征分析 [J]. *科学通报*, 2017, 60: 2666-2670.  
MIAO Yucong, LIU Shuhua. Meteorological characteristics associated with air pollution in Xiong'an, China [J]. *Science China Press*, 2017, 60: 2666-2670.
- [24] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别 [J]. *气象*, 2006, 32(4): 9-15.  
WU Dui. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(4): 9-15.
- [25] 丁一汇, 柳艳菊. 近 50 年中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, 44(1): 37-48.  
DING Yihui, LIU Yanju. 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*, 2014, 44(1): 37-48.
- [26] 张红, 黄勇, 刘慧娟. 安徽省近 30 年气候变化的空间特征 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(12): 1935-1942.  
ZHANG Hong, HUANG Yong, LIU Huijuan. Spatial characteristics of climate changes in Anhui province during the past 30 years [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(12): 1935-1942.

- [27] SONG Y F, LIU Y J, DING Y H. A study of surface humidity changes in China during the recent 50 years [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 26(5): 541-553.
- [28] 吴萍, 丁一汇, 柳艳菊, 等. 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*, 2016, 74(3): 352-366.  
WU Ping, DING Yihui, LIU Yanju, et al. Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, 74(3): 352-366.
- [29] 吴兑. 霾与雾的识别和资料分析处理[J]. *环境化学*, 2008, 27(3): 327-330.  
WU Dui. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data [J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(3): 327-330.
- [30] 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.
- [31] 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*, 2014, 19(2): 219-226.
- [32] 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 Huizhong, WU Meng, et al. Comparison of three statistical methods on calculating haze days-taking areas around the capital for example [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(3): 545-554.
- [33] 杨元建, 石涛, 唐为安, 等. 气象台站环境的卫星遥感调查与评估: 以安徽代表气象站为例[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(6): 791-797.  
YANG Yuanjian, SHI Tao, TANG Weian, et al. Study of observational environment of meteorological station based remote sensing: Cases in six stations of Anhui Province[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(6): 791-797.
- [34] 杨元建, 石涛, 苟尚培, 等. 基于遥感资料研究合肥城市化对气温的影响[J]. *气象*, 2011, 37(11): 1423-1430.  
YANG Yuanjian, SHI Tao, XUN Shangpei, et al. Impact of Hefei urbanization on temperature observation based on remote sensing data [J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(11): 1423-1430.
- [35] 杨元建, 汪腊宝, 黄勇, 等. 城市化进程对气象探测环境代表性及气温和风的影响: 以寿县国家气候观象台为例[J]. *气象科技*, 2017, 45(1): 7-14.  
YANG Yuanjian, WANG Labao, HUANG Yong, et al. Impact of urbanization on meteorological observation and its environment representativeness: A case study of Shouxian National Climate Station [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2017, 45(1): 7-14.
- [36] LI Y B, TAO S, YANG Y J, et al. Satellite-based investigation and evaluation of the observational environment of meteorological stations in Anhui Province, China [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172(6): 1735-1749.
- [37] YANG Y J, WU B, SHI C, et al. Impacts of urbanization and station-relocation on surface air temperature series in Anhui Province, China [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2013, 170(11): 1969-1984.
- [38] 石春娥, 邓学良, 杨元建, 等. 2013年1月安徽持续性霾天气成因分析[J]. *气候与环境研究*, 2014, 19(2): 227-236.  
SHI Chune, DENG Xueliang, YANG Yuanjian, et al. Analyses on the causes of the persistent haze in Anhui Province in January 2013 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(2): 227-236.
- [39] 聂兵, 沈非, 徐光来, 等. 安徽省近 50 年降水时空变化分析[J]. *安徽师范大学学报: 自然科学版*, 2017, (6): 574-579.  
NIE Bing, SHENG Fei, XU Guanglai, et al. Analysis of temporal-spatial change in Anhui Province in recent 50 years [J]. *Anhui Normal University: Natural Science*, 2017, (6): 574-579.
- [40] 陶寅, 黄勇, 杨元建, 等. 城市化进程对安徽省风速的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(6): 519-526.  
TAO Yan, HUANG Yong, YANG Yuanjian, et al. Impact of urbanization on wind speed in Anhui Province [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(6): 519-526.