

石春娥, 邓学良, 余金龙, 等. 2017. 安徽省雾、霾、晴空天气的气象条件对比分析 [J]. 气候与环境研究, 22 (2): 242–252. Shi Chun'e, Deng Xueliang, Yu Jinlong, et al. 2017. Comparisons of meteorological conditions on fog, haze, and clear days in Anhui Province, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 242–252, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16045.

安徽省雾、霾、晴空天气的气象条件对比分析

石春娥¹ 邓学良¹ 余金龙² 张浩¹ 杨元建¹

¹ 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, 合肥 230031

² 安徽省气象台, 合肥 230031

摘 要 使用 2008~2012 年逐日地面观测资料, 揭示了安徽不同地区雾、霾、晴空天气气象条件的差异, 指出不同地区要根据本地特点建立雾、霾预报指标和预报方法。3 类天气差异最大的地面气象要素是能见度和相对湿度。根据 3 种天气前一日和当日能见度和相对湿度分布特征, 全省站点可以分为 3 类: 1) 从雾、霾到晴空, 能见度递增、相对湿度递减, 且差异显著, 如合肥站; 2) 雾、霾天的能见度和相对湿度均很接近, 但与晴空天差别较大, 如阜阳站; 3) 能见度在雾、霾天无明显差别, 但相对湿度在雾、霾天差异显著, 如安庆站。地级市测站雾后即霾的可能性较大 (大于 50%), 县城测站雾后即霾的可能性较低 (低于 25%)。垂直方向, 雾时相对湿度随高度下降很快, 850 hPa 中位值已降到 20% (安庆) 和 45% (阜阳) 以下, 霾时相对湿度随高度下降缓慢, 850 hPa 中位值仍在 60% 左右; 另外, 霾天边界层中上部风切变较小, 雾天和晴空天边界层中上部都存在较大的风切变。

关键词 雾 霾 气象条件 边界层 安徽

文章编号 1006-9585 (2017) 02-0242-11

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16045

Comparisons of Meteorological Conditions on Fog, Haze, and Clear Days in Anhui Province, China

SHI Chun'e¹, DENG Xueliang¹, YU Jinlong², ZHANG Hao¹, and YANG Yuanjian¹

¹ Anhui Institute of Meteorological Sciences, Key Laboratory for Atmospheric Sciences and Remote Sensing of Anhui Province, Hefei 230031

² Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

Abstract Based on differences in meteorological conditions on fog, haze, and clear days, the authors concluded that the forecasting methods and index of fog and haze should be set up for different regions based on local conditions. Among the surface meteorological parameters, visibility and relative humidity showed the most evident differences in the above-mentioned three weather conditions. According to the visibility and relative humidity at 2000 LST in the preceding day and 1400 LST on the current day, all studied sites in Anhui Province were divided into three categories: 1) From fog, haze to clear days, the visibility increased and relative humidity decreased evidently (e.g. Hefei); 2) Visibility and relative humidity both were very close on fog and haze days, but were evidently different from those on clear days (e.g. Fuyang); 3) Visibility showed insignificant differences between fog and haze days, while relative humidity showed evident differences between fog and haze days (e.g. Anqing). More than 50% of fogs were followed by haze at urban sites; while

收稿日期 2016-03-01; **网络预出版日期** 2016-07-26

作者简介 石春娥, 女, 1970 年出生, 博士, 研究员, 主要从事区域大气物理化学研究。E-mail: shichune@sina.com

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206011, 安徽省自然科学基金 1608085MD84, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题 LAPC-KF-2011-05, 华东区域气象科技协同创新基金 QYHZ201401

Funded by Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest of China (Grant GYHY201206011), Anhui Provincial Natural Science Foundation (Grant 1608085MD84), Special fund of the State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (Grant LAPC-KF-2011-05), East China Regional Meteorological Center joint project of science and technology innovation (QYHZ201401)

less than 25% of fogs were followed by haze at countryside sites. In the vertical, the relative humidity decreased rapidly with height during fog days, with the median value lower than 20% at 850 hPa at Anqing station and lower than 45% at Fuyang station; however, it decreased slowly during haze days with the median value of around 60% at 850 hPa at both stations. In addition, the wind shear from the middle to upper boundary layer was smaller on haze days than on fog and clear days.

Keywords Fog, Haze, Meteorological conditions, Boundary layer, Anhui

1 引言

雾和霾都是发生在边界层内的低能见度天气现象。雾是大量微小水滴或冰晶浮游空中,使水平能见度低于 1.0 km 的天气现象。作为一种灾害性天气,雾早就受到气象工作者的重视,但是对雾的研究主要集中在单次雾过程的诊断和模拟,或者与气候变化联系起来,分析某一地区一定时段内雾发生频次的变化,即使数值天气预报模式已经发展得相当完善,要准确预报雾仍然极具挑战(石春娥等, 2013; Steeneveld et al., 2015)。数值试验表明,不论是一维雾模式与中尺度气象模式相结合的客观定量预报,还是基于中尺度气象模式的多要素诊断预报,雾跟“近似雾”,或者说“重度霾”都难以区分,因而出现雾的空报率过高、ETS 评分(Equitable threat scores)偏低的结果(石春娥等, 2013)。

霾是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 10.0 km 的空气普遍混浊现象(中国气象局, 2007),其本质是细粒子气溶胶污染,因而,具有空气质量的指示意义(吴兑, 2013)。工业化、城市化导致中国大陆都市霾天气自 20 世纪 80 年代后迅速增多,尤其是中国的东部地区(吴兑等, 2010)。由于霾的生成条件跟雾极其相似,如小风、静稳、高湿,且二者能相互转换(杨军等, 2010),因此,近年来,社会大众、新闻媒体经常把这两个天气现象放在一起,合称为“雾霾”。“霾”或“雾霾”已成为各级政府、新闻媒体普遍关注热点问题,逐渐被归入严重的灾害性天气当中,并引起大气科学工作者的广泛关注(王喜全等, 2011, 2013; 王自发等, 2014; 王跃思等, 2014; 石春娥等, 2014; 高怡和张美根, 2014; 刘瑞婷等, 2014; 张人禾等, 2014)。这些研究主要侧重于天气条件,如输送条件、扩散条件对典型霾(或雾霾)事件的影响,加深了对中国霾天气变化趋势、形成机制的理解,而探讨雾和霾形成气象条件的共性与差异的研究尚不多见。

虽然雾和霾都属于低能见度天气现象,但雾和霾对人们生活的影响又不一样,雾的危害主要体现在低能见度对交通运输的影响,而霾的危害主要体现在对人体健康的影响。因此,在天气预报业务中,明确区分雾和霾仍然十分必要。虽然雾与霾属于不同的天气现象,但其在生成条件方面又有很多共性,因而增加了准确预报的难度。本文目的是通过对安徽代表性城市雾、霾、晴空前一天、当天地面气象要素和温度、湿度、风向垂直分布特征进行统计分析,进一步弄清城市雾、霾形成环境的区别,为开展全省霾天气预报业务奠定基础。

2 资料与方法

2.1 资料

所用资料包括安徽 78 个地面测站 2008~2012 年逐日常规观测资料,包括能见度、相对湿度、风向风速、气温、天气现象;阜阳、安庆 2008~2012 年逐日 08:00、20:00 (北京时间,下同)的探空资料;欧洲数值预报中心(ECMWF)分析场。

2.2 分析方法

根据已有研究,安徽霾的分布具有明显时空分布特征(邓学良等, 2015; 石春娥等, 2016)。首先,利用各测站 2008~2012 年逐日 14:00 能见度计算各站能见度之间的相关系数,应用分层聚类的方法(Gao et al., 2011),对全省进行分区;然后,根据站间能见度变化的一致性,每个子区确立一个代表性测站,并根据能见度及资料情况确定部分重点城市。最后,根据分区结果,对每个子区重点城市和代表性城市雾、霾、晴空天气前一天 14:00、20:00 和当天 08:00、14:00 的能见度、相对湿度、风向风速、温度日较差等进行统计分析,并利用阜阳、安庆的探空资料,结合欧洲数值预报中心数值预报结果,分析雾、霾、晴空天 08:00 温度、湿度、风向风速分布的异同,以期通过分析不同地区雾、霾形成前后地面气象要素的统计规律,进一步了解内陆省份雾、霾形成机制的差异。统计量包括:均值,中位值,一、三四分位值,最大值、最小值等。

至于天气分类,根据天气现象记录,如果某一天观测记录有雾,这天就算一个雾天。排除雾天和其他有视程障碍的天气,根据日均能见度和平均相对湿度,确定是否霾日,即参考吴兑等(2010)介绍的第2种方法,日均能见度低于10 km,日均相对湿度低于90%算霾天(邓学良等,2015);去掉有视程障碍天气,且日均能见度大于10 km,即为晴空天。

3 分区结果及代表性站点的选取

与 Gao et al. (2011) 的结果类似,存在个别测站较早地被分离出去,这可能与当地地形有关,如岳西站(海拔431 m),考虑到子区地理上的连续性,最后把全省分为6个子区,分别为淮北北部、沿淮东部、江淮之间、大别山区、沿江江南、皖南南部(图1),各子区内站点间能见度相关系数都通过了置信度99%的显著性检验。分区结果与根据温度、水分条件及寒暑特点得到的安徽省二级气候区划结果大致相似(安徽省气象局,2012),但又略有区别,主要是细节上的差异,气候区划在沿江和沿淮淮北分得更细,如气候区划中,沿淮淮北分为4个副区,沿江地区分为东西2个副区,本文的淮北北部和沿淮东部分别对应气候区划中沿淮淮北东西各2个副区,本文淮北北部子区对应着气候区划的淮北北部区西部副区(I1区)和淮河两岸过渡区临阜副区(II3区),沿淮东部子区对应淮北北部区东部副区(I2区)和淮河两岸过渡区沿淮副区(II4区);本文的沿江江南与气候区划中沿江2个副区的位置略有差异,覆盖范围偏南一些,大别山区也偏南一些,江南南部的范围要小一些。各子区内平均霾日数、平均能见度等存在显著差异(表1)。离散度(Coefficient of Divergence,记为 C_{OD})值越小说明能见度分布越均匀,值越大说明站点间能见度差异越大。相关系数(r)越大说明站点间能见度变化趋势越一致。表1中平均 r 和平均 C_{OD} 是所有站点两两之间对应值的平均,某两站点之间 r 和 C_{OD} 的计算公式如下:

$$r_{jk} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}}, \quad (1)$$

$$C_{OD,jk} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2}, \quad (2)$$

其中, x_{ij} 、 x_{ik} 代表第*i*天*j*、*k*站点的能见度, N 是总天数,本研究中为1827 d。

表1 分区及统计结果

Table 1 Results of clustering and statistical analysis

子区名称	r		C_{OD}		区域平 均霾日 数/d	区域平 均能见 度/km
	平均值	最大值	平均值	最小值		
淮北北部	0.70	0.74(蒙城县)	0.19	0.18(蒙城县)	84.0	14.6
沿淮东部	0.69	0.76(蚌埠)	0.22	0.18(定远县)	175.2	12.8
江淮之间	0.67	0.72(巢湖)	0.23	0.19(和县)	157.5	13.2
大别山区	0.68	0.73(怀宁县)	0.15	0.14(太湖县)	89.0	12.7
沿江江南	0.72	0.77(宁国县)	0.22	0.21(芜湖县)	150.9	12.8
江南南部	0.70	0.73(绩溪县)	0.16	0.15(黟县)	18.0	16.8

由表1可见,沿淮东部平均霾日数最高(175 d),其次是江淮之间和沿江江南(超过150 d),而江南南部平均霾日数最低(18 d),淮北北部和大别山区的平均霾日数居中,相应地,沿淮东部、大别山区、沿江江南平均能见度较低(12.8 km),江南南部平均能见度最高(16.8 km)。根据统计结果及资料情况,确立3个重点城市:合肥(年均霾日数136.2 d)、阜阳(年均霾日数40.2 d)和安庆(年均霾日数36.8 d);各子区的代表性测站分别为:蒙城县、蚌埠、巢湖、怀宁县、宁国县和绩溪县,即各区内平均相关系数最高的测站。这些站点2008~2012年雾、霾、晴空天的总天数见表2。

表2 重点城市和各代表性站点2008~2012年雾、霾、晴空天的总天数

Table 2 Total numbers of fog, haze, and clear days at each representative station during 2008–2012

站点	天数/d		
	雾	霾	晴空
阜阳	98	201	513
合肥	90	681	159
安庆	45	184	625
蚌埠	103	479	162
巢湖	35	110	773
蒙城县	121	25	743
怀宁县	78	115	516
宁国县	236	117	317
绩溪县	35	26	683

4 结果分析

4.1 地面气象要素统计特征

各重点城市和子区代表性测站雾、霾、晴空

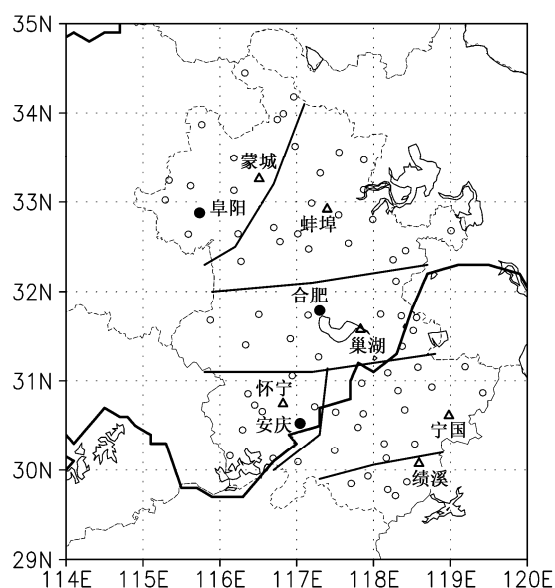


图1 安徽省人工气象站位置和分区结果(实心圆为重点城市位置, 三角形为各代表性测站位置, 空心圆为其他测站位置)

Fig. 1 Map of meteorological stations and sub-regions in Anhui Province based on visibility. Solid circles represent important cities, triangles indicate representative sites of each sub-region, and circles represent other sites

天前一日和当日地面基本气象要素(风向风速、相对湿度、温度日较差和能见度等)的统计结果表明, 各地雾、霾天前一日和当日的风速都比较低, 一般低于 4 m/s, 可以说, 雾、霾与晴空天前一日和当日风向、风速的统计特征无显著差异, 统计特征差异较大的气象要素是相对湿度和能见度。总体上, 各地 08:00 都符合“从雾天、霾天到晴空天, 能见度递增、相对湿度递减, 且差异显著”的规律, 然而 14:00 的情况则不同。因此, 将重点介绍这 3 种天气前一天 20:00 和当日 14:00 能见度和相对湿度的分布特征。根据前一天和当日能见度和相对湿度在雾、霾、晴空天的变化趋势及差异程度, 所分析的站点大致可以分为 3 类, 图 2、3 给出了 3 类代表性站点雾、霾、晴空天前一日 20:00 和当日 14:00 相对湿度和能见度的统计结果。

第一类, 以合肥为代表。在前一日和当日, 都满足“从雾、霾到晴空, 能见度递增、相对湿度递减”的规律, 同类天气的相对湿度和能见度的中位值与均值都比较接近, 中位值(或均值)几乎都位

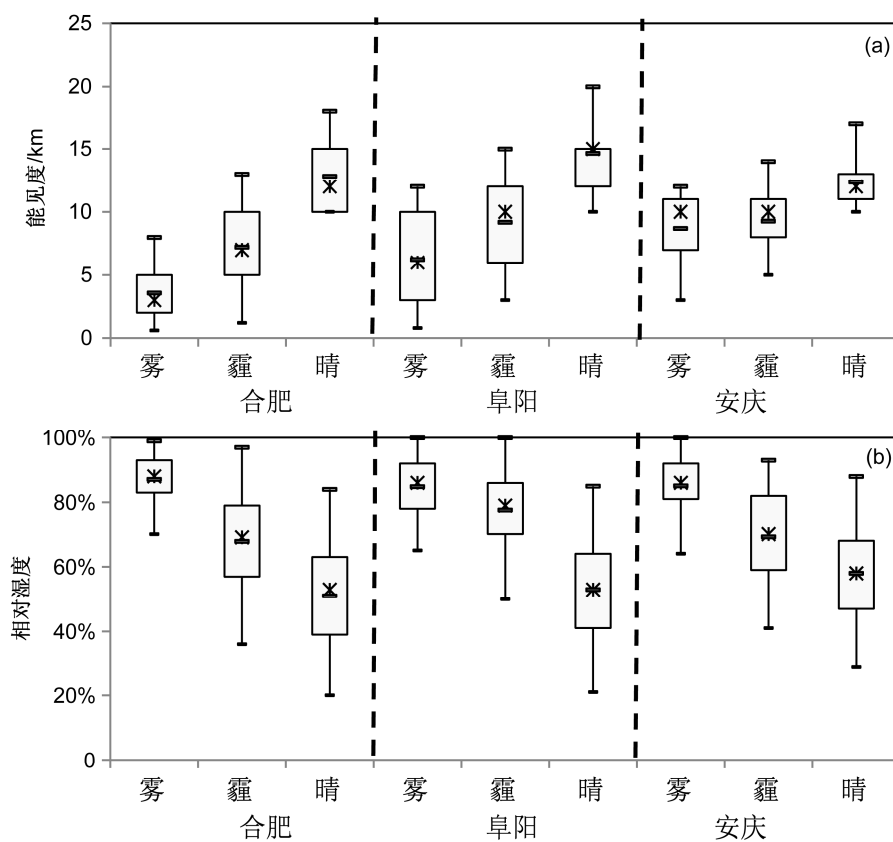


图2 2008~2012年合肥、阜阳和安庆雾、霾、晴空天前一日 20:00 能见度、相对湿度分布的箱线图(上下两个横线分别表示最大值和最小值; 长方形中的星号表示中值, 横线表示均值; 长方形的下、上边分别为第一、三四分位值)

Fig. 2 Box-plots of ground level visibility and relative humidity at 2000 LST on preceding days of fog, haze, and clear days in Hefei, Fuyang, and Anqing during 2008–2012 (the upper —: maximum; the lower —: minimum; — within the rectangles: mean; * within the rectangles: median; the upper and lower borders of the rectangles: the 25th and 75th percentiles)

于样本数值范围的中间位置（即离上下四分位的距离接近相等），但不同天气的中位值（或均值）间有较大差异，这一类测站还有蚌埠，都属于霾的高发区。首先看前一日的情况，由图 2 可以看出，能见度在雾天的上四分位低于霾天的下四分位，晴空天的最低值高于霾天的上四分位；相对湿度在雾天的下四分位高于霾天的上四分位，晴空天的上四分位也接近霾天的下四分位。根据最大、最小值及上、下四分位的位置，可以看出雾前一日 20:00 能见度普遍低于 10 km，75% 低于 5 km，霾天前一日的能见度也比较低，75% 以上的霾天前一日 20:00 能见度低于 10 km，但只有 25% 低于 5 km；晴空天前一日的能见度一般都比较低。如果以 75% 的样本（或者上下四分位）能区分为接受标准，雾、霾与晴空日 08:00 的相对湿度存在显著差异，如雾天 08:00 的相对湿度都在 90% 以上，霾天气 08:00 的相对湿度上四分位在 90% 附近，接近雾天的最低值，而霾天的下四分位与晴空天的上四分位接近。当天 14:00 与前一日 20:00 的情况类似。但当日 14:00，雾与霾、霾与晴空天相对湿度的变化范围重合部分较多（图 3），如雾天相对湿度的下四分位低于 60%，而

霾天相对湿度的上四分位接近 60%，晴空天相对湿度的上四分位值接近霾天的中位值。另外，合肥 75% 的雾天 14:00 能见度低于 10 km，考虑到安徽雾以辐射雾为主，说明合肥雾后即霾的可能性非常大。

第二类以阜阳为代表。这类测站同类天气的相对湿度和能见度的中位值与均值也都比较接近，但霾天和晴空天并不都符合“中位值（或均值）位于样本数值范围的中间位置”。前一天，从雾、霾到晴空，能见度递增、相对湿度递减，若以 75% 的样本能区分为接受标准，雾、霾天前的相对湿度和能见度差别都不显著，如霾天前能见度的下四分位值与雾天前的中位值接近，雾天相对湿度的下四分位值与霾天的中位值接近，但雾、霾天与晴空天前差别显著（图 2）。当日 14:00，能见度和相对湿度的中位值在雾、霾天很接近，但与晴空天相比，差异显著（图 3）。从 3 种天气下统计特征的差异程度看，相对湿度在雾、霾天的差异不及第一类明显，但与晴空天的差异仍然很明显。若仍以 75% 的样本能区分为接受标准，前一日 20:00 和当日 14:00 的相对湿度和能见度在晴空天与雾、霾天都存在显著差

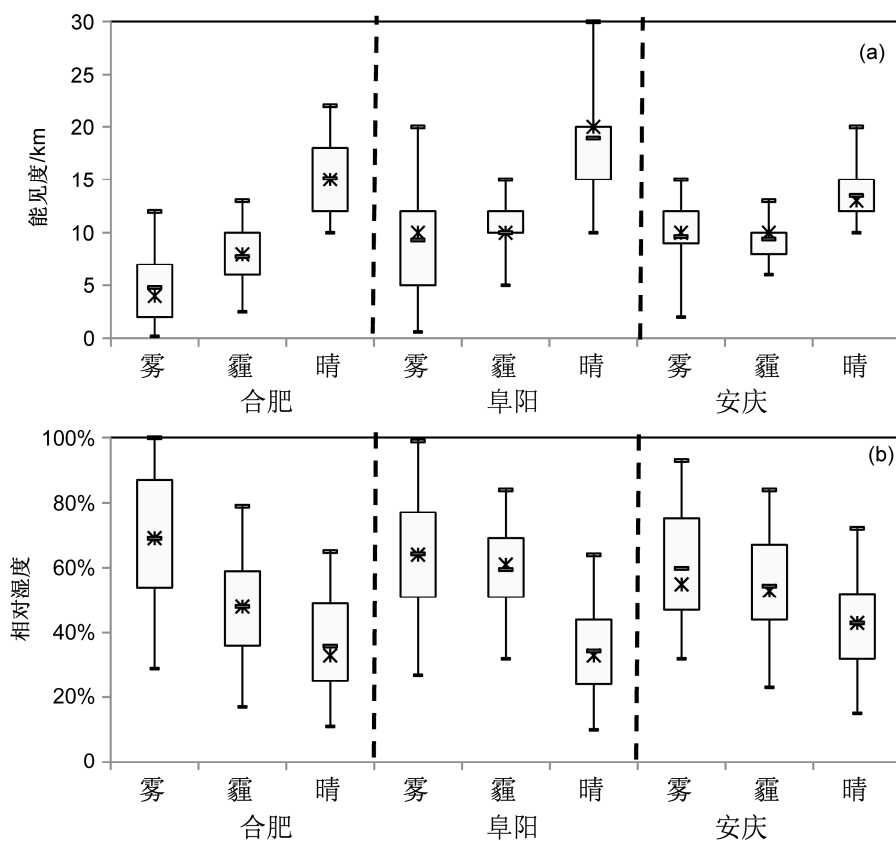


图 3 2008~2012 年合肥、阜阳和安庆雾、霾、晴空天 14:00 能见度和相对湿度统计结果（说明同图 2）

Fig. 3 Box-plots of ground level visibility and relative humidity at 1400 LST on days of fog, haze, and clear in Hefei, Fuyang, and Anqing during 2008-2012

异,但在雾、霾天无显著差别。另外,由图 3 可见,阜阳雾天 14:00 的能见度中位值在 10 km 以下,说明有一半的机会雾后即霾。根据能见度和相对湿度在不同天气差异的相似性,这一类的测站有蒙城县,与阜阳同属于淮北北部片区。

第三类以安庆为代表。前一日 20:00 和当日 14:00 都不满足“从雾、霾到晴空,能见度递增”的规律,能见度的中位值基本上都不在样本数值范围的中间位置。前一日和当日 14:00 的能见度在雾、霾天均无明显差别,但明显低于晴空天;前一日 20:00 相对湿度随雾、霾、晴空递减,且雾、霾天差异显著,但当日 14:00 雾、霾天相对湿度差异不显著(图 3)。如图 2 所示,相对湿度在雾天前的下四分位与霾天前的上四分位比较接近,而晴空天的上四分位与霾天的中位值比较接近。根据 3 类天气下相对湿度差异的相似性看,这一类的测站有怀宁、宁国、绩溪,分别属于江淮西部(大别山区)和江南。这一类地区,雾、霾天的相对湿度差异较大,能见度差异不大。另外,从图 3 还可看出,虽然安庆雾天 14:00 能见度中位值也在 10 km 以下,说明有一半的几率雾后即霾,但总体上雾日 14:00 能见度高于霾日 14:00 能见度,这与第一、二类不同。

另外,还有巢湖站,如果根据前一天的情况,可以归为第二类,如果根据当天的情况,则归为第三类。根据雾天 14:00 能见度分布,县城测站雾后即霾的比例较城市测站低,一般低于 25%。也有测站,雾天 14:00 能见度下四分位值高于 10 km,如蒙城县、绩溪县、宁国县,说明这些地方雾后很少有霾。

4.2 相对湿度垂直分布特征

上文的分析表明,作为内陆省份,安徽的雾、霾天的地面气象条件非常相似,这解释了为什

么应用中尺度模式结果进行雾的诊断预报试验中空报率较高的事实(Zhou and Du, 2010; 石春娥等, 2013)。考虑到雾、霾都是边界层内的天气现象,且安徽雾以辐射雾为主,一般产生于凌晨,消散于日出之后,利用安庆和阜阳 08:00 探空资料进一步分析雾、霾、晴空天各标准层温度、湿度、风速的分布特征。为了直观,又为避免季节影响,大气层结用每一层的位温与地面位温差值表示。为使统计结果能更精准地反映有雾时的廓线特征,用于统计的雾天必须 08:00 观测有雾(能见度低于 1 km)。分析表明,3 种天气下边界层内的风速廓线无显著差异。虽然从 3 种天气 08:00 的位温分布看,850 hPa 以下 3 种天气下的大气层结有差异,但安庆和阜阳表现不一,如安庆和阜阳(相对湿度的统计结果分别见图 4、图 5 和表 3)都是有雾时大气层结最稳定,这与已有的研究结论一致,即辐射雾往往产生于稳定的大气层结(Gultepe et al., 2007),安庆是晴空时最接近不稳定,而阜阳是霾天最接近不稳定。从相对湿度看,3 种天气下,850 hPa 以下其廓线差异较大,是 3 种要素中差异最大的。

由图 4 可见,从地面到 1000 hPa,安庆都是雾天相对湿度最高,超过 90%;霾天居中,80%~90%之间,中位值和均值都在 80%~90%之间;晴空天最低,第三四分位值在 80%以下,中位值和均值都在 70%附近。再往上,雾天相对湿度随高度递减很快,到 850 hPa,第三四分位值已降到 60%以下,中位值和均值都在 20%~30%附近,700 hPa 第三四分位已降到 20%以下了,中位值低于 10%,这显示了辐射雾上面是一个“干层”的特点。霾天和晴空天相对湿度随高度下降缓慢,尤其是霾天,即使在 850 hPa 高度,其中位值和均值仍然在接近 60%。晴空天 850 hPa 的相对湿度比雾天高,中位值和均值分别为 35.7%和 40%(表 3)。

表 3 2008~2012 年安庆和阜阳雾、霾、晴空天 08:00 不同高度相对湿度中位值和均值

Table 3 Median and mean values of relative humidity at different height at 0800 LST on fog, haze, and clear days in Anqing and Fuyang during 2008–2012

站点	天气类型	600 hPa 相对湿度		700 hPa 相对湿度		850 hPa 相对湿度		925 hPa 相对湿度		1000 hPa 相对湿度	
		中位值	均值	中位值	均值	中位值	均值	中位值	均值	中位值	均值
安庆	雾	2.6%	8.6%	4.3%	8.0%	19.5%	28.1%	56.5%	53.3%	92.0%	92.1%
	霾	12.4%	18.6%	23.0%	34.1%	58.7%	53.3%	69.7%	62.9%	83.3%	82.2%
	晴	15.2%	27.1%	19.7%	32.9%	35.7%	40.5%	51.9%	48.4%	70.9%	67.6%
阜阳	雾	11.0%	19.2%	22.5%	34.3%	42.4%	46.8%	71.8%	64.5%	91.0%	89.6%
	霾	23.2%	33.7%	39.7%	43.1%	60.3%	56.4%	71.6%	66.0%	86.0%	84.1%
	晴	9.3%	20.0%	11.1%	21.2%	17.7%	25.0%	26.0%	31.6%	48.4%	48.8%

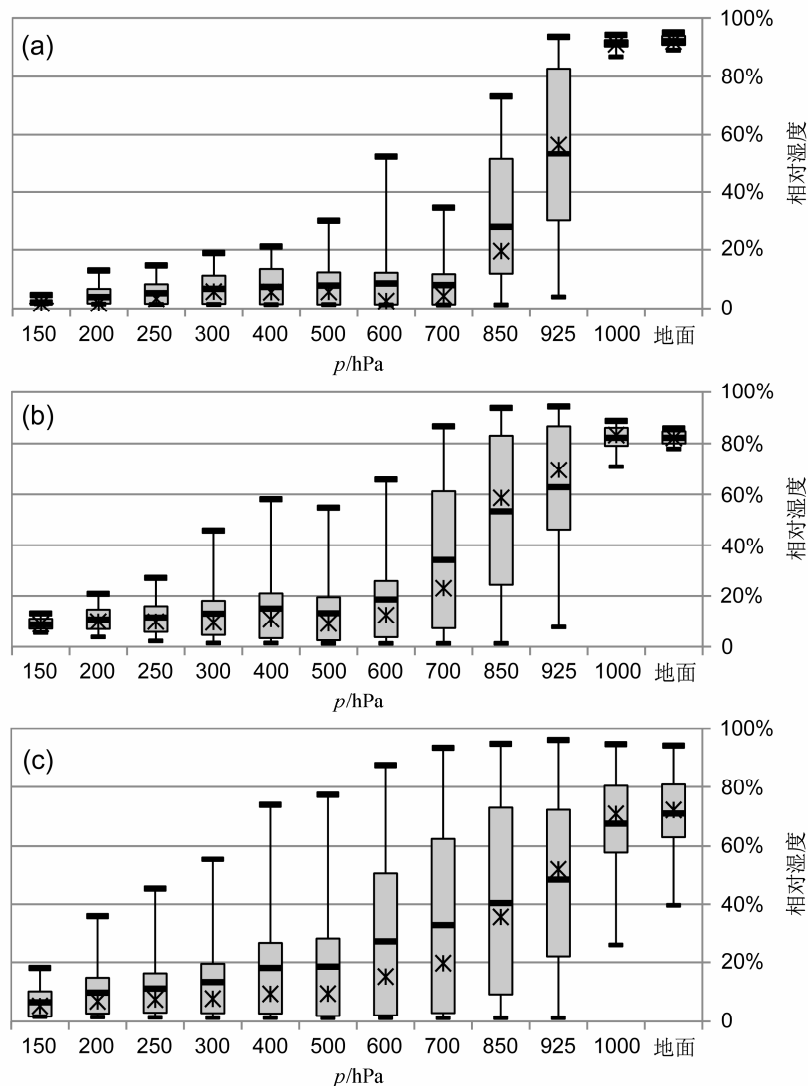


图4 2008~2012年安庆(a)雾、(b)霾、(c)晴空日08:00不同高度相对湿度箱线图

Fig. 4 Box-plots of relative humidity at different levels at 0800 LST on days of fog, haze, and clear in Anqing during 2008–2012

阜阳的相对湿度分布与安庆类似(图5),但比安庆略低。从地面到1000 hPa,都是雾天相对湿度最高,90%左右;霾天居中,中位值和均值都略大于80%;晴空天最低,中位值和均值都在50%~60%附近。再往上,相对湿度的变化范围(即图中矩形的长度)比安庆大,随高度下降速度比安庆缓慢;雾天相对湿度随高度递减很快,到850 hPa,中位值和均值都在40%~50%之间,700 hPa,中位值和均值在30%上下;霾天和晴空天相对湿度随高度下降缓慢,尤其是霾天,850 hPa,其中位值和均值都在60%左右,700 hPa,中位值和均值都在40%左右;晴空天850 hPa和700 hPa的相对湿度都比雾天低,850 hPa的中位值和均值在20%附近,700 hPa的中

位值和均值在10%~20%附近。

用欧洲数值预报中心数值预报的结果得到合肥雾、霾、晴空天湿度廓线也有类似特征。

4.3 边界层内不同高度风向转变

边界层的垂直风切变是影响污染物扩散的一个重要因子(雷孝恩,1983)。对安庆和阜阳的雾、霾、晴空天边界层下部925 hPa和1000 hPa之间风的来向之差进行统计,其表示边界层下部风向改变幅度,类似地计算了边界层上部(850 hPa和925 hPa)风的来向的变化,即上下两层风的来向之差,正值表示风向随高度增大,来向右偏,符合边界层埃克曼层的风向分布规律。考虑到近地层(即边界层下部)风向可能受地形和周边建筑物的影响,图

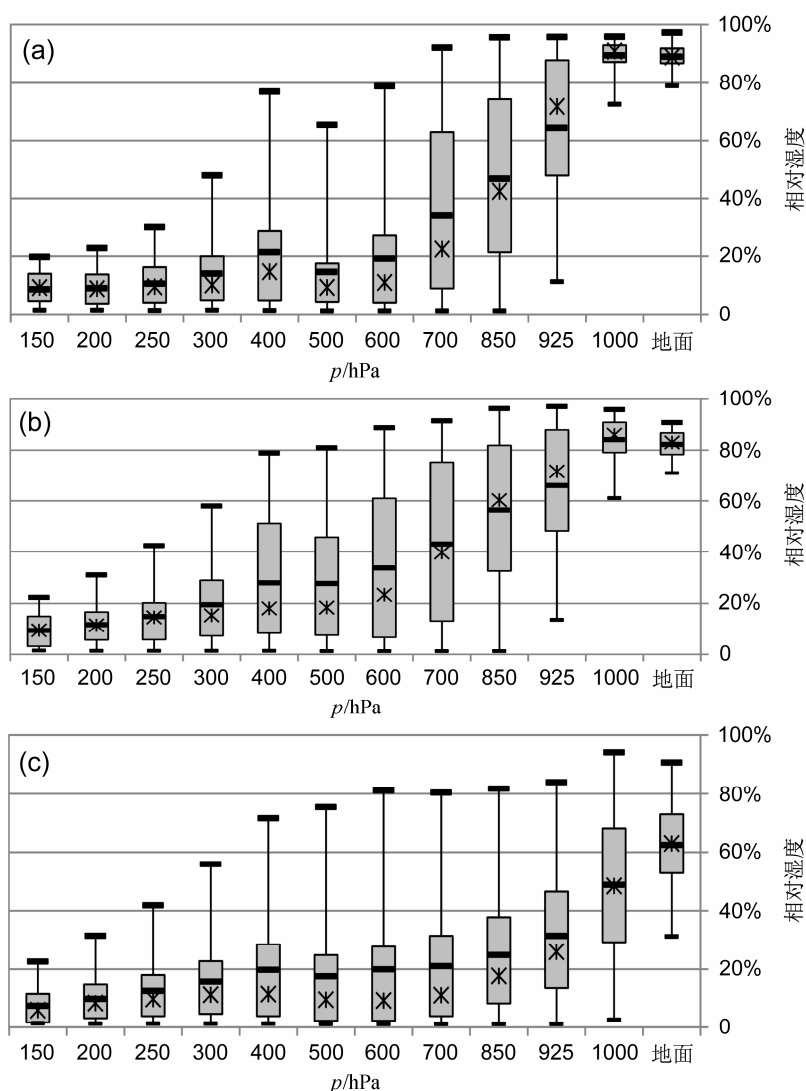


图5 同图4, 但为阜阳

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for Fuyang

6 仅给出了 850 hPa 和 925 hPa 风向变化角度的频率分布。

安庆 08:00 有雾的天数较少, 仅 32 d, 边界层上部风向转变角度的峰值在 -10° , 其次在 -20° (图 6a), 而边界层下部风向转变角度比较离散, 峰值在 -20° (图略); 晴空日边界层上下部风向转变角度的峰值基本重合, 都在 10° 附近, 接近正态分布; 霾日边界层下部变化角度峰值在 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 上部变化角度峰值在 0° 。

阜阳 08:00 有雾的天数也较少 (68 d), 风向改变角度比较分散, 边界层下部风向改变角度的峰值为 10° , 上部集中在 -30° 至 10° 。晴空日, 上下部两个峰值不重合, 下部峰值在 30° , 上部峰值在 0° 。霾日, 上下部两个峰值不重合, 下部峰值在 0° , 上

部峰值在 -10° 。

阜阳和安庆的统计结果都表明, 3 类天气中, 霾天边界层内的风向转变 (风切变) 最小。雾天边界层内风向转变角度较大, 说明雾时常存在差动温度平流 (指上下层温度平流的差异), 在应用轨迹分析与聚类分析相结合的方法分析合肥市雾时大尺度输送特征时, 也发现差动温度平流的作用 (魏文华等, 2012)。霾天 925~850 hPa 之间风向切变总体上较雾天小, 说明霾天边界层中上部的湍流更弱、扩散条件更差。

5 结论与讨论

本文应用分层聚类的方法对安徽全省进行分

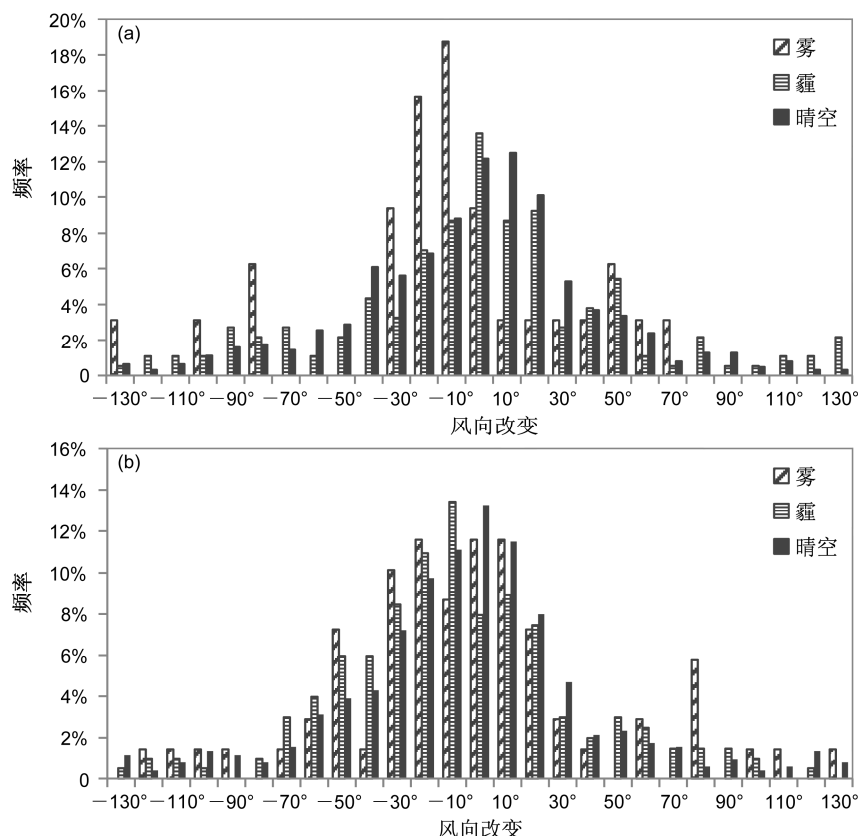


图 6 (a) 安庆和 (b) 阜阳雾、霾、晴空日 08:00 925~850 hPa 风向角改变的频率分布

Fig. 6 Frequency distributions of wind direction change between 925 hPa and 850 hPa at 0800 LST on fog, haze, and clear days during 2008–2012: (a) Anqing; (b) Fuyang

区, 挑选代表性测站, 通过对不同测站雾、霾、晴空天前一日及当日气象要素分布的统计分析, 揭示了不同地区这 3 类天气对应的气象要素的分布特征。3 种天气前一天及当日, 差异较大的要素是相对湿度和能见度。主要结论如下:

(1) 根据地面能见度和相对湿度随天气类型的变化及差异程度, 所分析的站点可以分为 3 类: 第一类, 从雾、霾到晴空, 能见度递增、相对湿度递减显著, 中位值有较大差异; 第二类, 能见度和相对湿度的中位值在雾、霾天很接近, 但与晴空天差别较大; 第三类, 能见度在雾、霾天无明显差别, 但相对湿度在雾、霾天差异显著。地级市测站雾后即霾的可能性较大 (大于 50%), 县城测站雾后即霾的可能性较低 (低于 25%)。

(2) 根据 08:00 的探空资料, 雾时大气层结最为稳定, 相对湿度随高度下降迅速, 霾时相对湿度随高度下降缓慢; 在地面, 雾时相对湿度最高, 而在 850~700 hPa 高度, 霾时相对湿度最高。霾天边界层内风切变较小, 雾天和晴空都存在稍大的风切

变。

雾和霾都属于低能见度天气现象, 但其变化特征和形成机理存在显著差异 (尹志聪等, 2015), 影响其生消的因子不仅有气象条件, 还有人类活动。如本文分析得出, 不同地区雾、霾、晴空天前一日和当天相对湿度与能见度分布特征均有差异, 这反映了人类活动的影响。在规模较大的城市, 如合肥、阜阳, 由于人类活动的影响, 大气中颗粒物浓度较高, 雾前一天 20:00, 能见度即已降低, 雾消散后往往跟着霾天气; 而江南的县城, 城市规模小、植被条件好, 大气颗粒物浓度相对较低, 雾后往往跟着能见度较好的晴天。

总体来看, 本文关于雾、霾形成的气象条件差异确实存在, 且符合一定的理论与实际。首先, 从雾、霾形成机理方面看, 雾、霾天相对湿度在垂直分布上存在显著差异: 雾上面的干层使得地面向上的长波净辐射通量较大, 近地面冷却率也增大, 有利于辐射雾的形成和发展; 而霾天较厚的湿层使得地面向上的长波净辐射通量较小, 冷却率也较小,

不利于地面降温, 阻碍辐射雾的形成。其次, 城市对雾、霾影响显著, 主要表现在 2 个方面: 一是城市热岛, 即城里的气温比郊区的气温高, 使雾的形成时间推后, 阻碍雾的形成, 这使得我国很多地方自 20 世纪 80 年代中期以来城市雾减少 (Shi et al., 2008; Li et al., 2012); 另一个是气溶胶, 气溶胶增多使雾中凝结核增加, 雾滴变小且不易沉降, 雾滴数浓度增加, 雾中能能见度下降, 气溶胶对长、短波辐射的影响还会使雾的持续时间延长 (Shi et al., 2008; Li et al., 2012)。城市中心地区气温上升, 一方面会使近地面空气变干 (干岛), 雾不易形成; 另一方面, 由于热岛环流的作用, 会把近地面的水汽和气溶胶粒子向上输送, 使边界层的中上部增湿, 形成较厚的高湿层 (如 60%), 这一点已得到数值模拟结果验证 (Kang et al., 2014), 由于气溶胶粒子的辐射效应, 边界层上部增多的气溶胶粒子会使大气层结向稳定方向发展, 导致持续性霾的形成。这也充分佐证近 20 年来我国东部城市地区雾日减少, 霾日增多。

此外, 本文分析得出当地雾、霾、晴空前一天地面能见度和相对湿度以及当天的相对湿度会存在显著差异, 垂直方向上, 虽然 3 种天气下, 风速和大气层结差异不够显著, 但相对湿度廓线存在较大差异, 这对提高雾、霾预报准确率有较好的参考价值。

参考文献 (References)

- 安徽省气象局. 2012. 安徽省气象志: 气候变化与气候区划 [M]. 北京: 气象出版社, 375pp. Anhui Provincial Meteorological Bureau. 2012. Anhui Meteorological Records: Climate Change and Climate Divisions (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 375pp.
- 邓学良, 石春娥, 姚晨, 等. 2015. 安徽霾日重建和时空特征分析 [J]. 高原气象, 34 (4): 1158–1166. Deng Xueliang, Shi Chun'e, Yao Chen, et al. 2015. Research of reconstruction and characteristics of hazes in Anhui [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (4): 1158–1166, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00007.
- Gao H W, Chen J, Wang B, et al. 2011. A study of air pollution of city clusters [J]. Atmospheric Environment, 45 (18): 3069–3077, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.03.018.
- 高怡, 张美根. 2014. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 140–152. Gao Yi, Zhang Meigen. 2014. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 140–152, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13135.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. Pure and Applied Geophysics, 164 (6–7): 1121–1159, doi: 10.1007/s00024-007-0211-x.
- Kang H Q, Zhu B, Zhu T, et al. 2014. Impact of megacity Shanghai on the urban heat-island effects over the downstream city Kunshan [J]. Boundary-Layer Meteorology, 152 (3): 411–426, doi: 10.1007/s10546-014-9927-1.
- 雷孝恩. 1983. 风垂直切变对中距离扩散特征的影响 [J]. 大气科学, 7 (2): 171–178. Lei Xiao'en. 1983. Effect of wind vertical shear on diffusion characteristics in the mesoscale range [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 7 (2): 171–178, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1983.02.07.
- Li Z H, Yang J, Shi C E, et al. 2012. Urbanization effects on fog in China: Field research and modeling [J]. Pure and Applied Geophysics, 169 (5–6): 927–939, doi: 10.1007/s00024-011-0356-5.
- 刘瑞婷, 韩志伟, 李嘉伟. 2014. 北京冬季雾霾事件的气象特征分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 164–172. Liu Ruiting, Han Zhiwei, Li Jiawei. 2014. Analysis of meteorological characteristics during winter haze events in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 164–172, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13224.
- Shi C E, Roth M, Zhang H, et al. 2008. Impacts of urbanization on long-term variation of fog in Anhui Province, China [J]. Atmospheric Environment, 42 (36): 8484–8492, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.002.
- 石春娥, 吴照宪, 邓学良, 等. 2013. MM5 与 MM5-PAFOG 模式区域雾预报效果评估比较 [J]. 高原气象, 32 (5): 1349–1359. Shi Chun'e, Wu Zhaoxian, Deng Xueliang, et al. 2013. Validation and comparison of regional fog forecast by MM5 and MM5-PAFOG models [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (5): 1349–1359, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00126.
- 石春娥, 邓学良, 杨元建, 等. 2014. 2013 年 1 月安徽持续性霾天气成因分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 227–236. Shi Chun'e, Deng Xueliang, Yang Yuanjian, et al. 2014. Analyses on the causes of the persistent haze in Anhui Province in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 227–236, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13112.
- 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 Chun'e, Wang Xiquan, Li Yuanni, et al. 2016. The trend of haze in Anhui Province from 1980 to 2013 and the possible reasons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 357–370, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14319.
- Steenefeld G J, Ronda R J, Holtslag A A M. 2015. The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models [J]. Boundary-Layer Meteorology, 154 (2): 265–289, doi: 10.1007/s10546-014-9973-8.
- 王喜全, 杨婷, 王自发. 2011. 灰霾污染的跨控制区影响——一次京津冀与东北地区灰霾污染个案分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 690–696. Wang Xiquan, Yang Ting, Wang Zifa. 2011. Impact of dust-haze episode from one air pollution control region to the other-one case study [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 690–696, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.06.02.
- 王喜全, 孙明生, 杨婷, 等. 2013. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化

- [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 165–170. Wang Xiquan, Sun Mingsheng, Yang Ting, et al. 2013. Interdecadal change in frequency of dust-haze episodes in North China Plain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 165–170, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11094.
- 王跃思, 姚莉, 王莉莉, 等. 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 15–26. Wang Yuesi, Yao Li, Wang Lili, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China (Earth Sciences), 57 (1): 14–25, doi: 10.1007/s11430-013-4773-4.
- 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 3–14. Wang Zifa, Li Jie, Wang Zhe, et al. 2014. Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. Science China Earth Sciences, 57 (1): 3–13, doi: 10.1007/s11430-013-4793-0.
- 魏文华, 王体健, 石春娥, 等. 2012. 合肥市雾日气象条件分析 [J]. 气象科学, 32 (4): 437–442. Wei Wenhua, Wang Tijian, Shi Chun'e, et al. 2012. Analysis of weather conditions for fog in Hefei [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 32 (4): 437–442, doi: 10.3969/2012jms.0074.
- 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. Temporal and spatial variation of haze during 1951–2005 in Chinese mainland [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (5): 680–688, doi:10.11676/qxxb2010.066.
- 吴兑. 2013. 探秘 PM2.5 [M]. 北京: 气象出版社, 106pp. Wu Dui. Insights into PM2.5 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 106pp.
- 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 2010. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征 [J]. 环境科学, 31 (7): 1425–1431. Yang Jun, Niu Zhongqing, Shi Chun'e, et al. 2010. Microphysics of atmospheric aerosols during winter haze/fog events in Nanjing [J]. Environmental Science (in Chinese), 31(7): 1425–1431.
- 尹志聪, 王会军, 郭文利. 2015. 华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 45 (5): 649–655. Yin Zhicong, Wang Huijun, GuoWenli. 2015. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang-Huai area [J]. Science China (Earth Sciences), 58 (8): 1370–1376, doi: 10.1007/s11430-015-5089-3.
- 张人禾, 李强, 张若楠. 2014. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 27–36. Zhang Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. Science China (Earth Sciences), 57 (1): 26–35, doi: 10.1007/s11430-013-4774-3.
- 中国气象局. 2007. QX/T 48-2007 地面气象观测规范第 4 部分: 天气现象观测 [S]. 北京: 中国标准出版社, 10pp. China Meteorological Administration. 2007. QX/T48-2007 Specifications for surface meteorological observation. Part 4: Observation of weather phenomenon (in Chinese) [S]. Beijing: China Standard Press, 10pp.
- Zhou B B, Du J. 2010. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system [J]. Wea. Forecasting, 25 (1): 303–322, doi: 10.1175/2009WAF2222289.1.