

宗晨,钱玮,包云轩,等,2019.江苏省夏季浓雾的时空分布特征及气象影响因子分析[J].气象,45(7):968-977. Zong C, Qian W, Bao Y X, et al, 2019. Temporal-spatial variations of summer heavy fog and its meteorological influence factors in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 45(7):968-977(in Chinese).

江苏省夏季浓雾的时空分布特征及 气象影响因子分析*

宗 晨^{1,2,3} 钱 玮² 包云轩^{1,2} 袁成松² 周林义² 崔驰潇^{1,2} 王宏斌²

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警和评估协同创新中心,南京 210044

2 中国气象局交通气象重点开放实验室/江苏省气象科学研究所,南京 210009

3 福建省气象服务中心,福州 350001

提 要: 利用江苏省 70 个国家基本站逐 10 min 连续观测资料,对江苏省夏季浓雾的时空分布特征及影响因子进行分析研究。结果表明:(1)夏季浓雾易在气温小于 29℃、风速低于 3 m·s⁻¹,且盛行偏东风的条件下形成;低温高湿的梅雨期是夏季浓雾在 6 月高发(42.4%)的可能原因。(2)夏季浓雾生消时间与秋、冬季显著不同,主要发生于 00—06 时,消散集中于 05—08 时,持续时间主要在 6 h 以内。(3)夏季浓雾以辐射雾为主,辐射雾、平流雾和锋面雾分别占 58.1%、35.5%和 6.4%。(4)夏季浓雾发生频次呈现从东北部沿海地区向西南部内陆地区递减的趋势,淮北地区夜间降温幅度高于苏南地区是出现这一现象的主要原因。(5)成雾前 6~24 h 出现的弱降水为近地层提供水汽,此后天气转晴,静稳的大气层结下有利于夏季浓雾的出现。

关键词: 浓雾,夏季,时空分布,影响因子

中图分类号: P49,P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.007

Temporal-Spatial Variations of Summer Heavy Fog and Its Meteorological Influence Factors in Jiangsu Province

ZONG Chen^{1,2,3} QIAN Wei² BAO Yunxuan^{1,2} YUAN Chengsong²
ZHOU Linyi² CUI Chixiao^{1,2} WANG Hongbin²

1 Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

3 Fujian Meteorological Service Center, Fuzhou 350001

Abstract: Based on the consecutive observational data per ten minute from 70 surface stations on the National Automatic Weather Observational Net during from 2013 to 2016 in Jiangsu Province, the temporal-spatial distribution patterns of summer heavy fog and its meteorological influence factors are analyzed. The results show that: (1) The heavy fog tends to be formed under the condition that the temperature is less than 29℃, the wind speed is slower than 3 m·s⁻¹ and prevailing in the easterly wind. The low temperature and high humidity during the Meiyu season are probably the causes for the summer heavy fog with a higher frequency (42.4%) in June. (2) The diurnal variation of summer heavy fog is significantly

* 江苏省气象局北极阁基金项目(BJG201703、BJG201606 和 BJG201701)及江苏省自然科学基金项目(BK20161073)共同资助
2018 年 8 月 13 日收稿; 2019 年 4 月 22 日收修定稿

第一作者:宗晨,主要从事交通气象、气象灾害监测预警与评估研究. Email:734198610@qq.com

通信作者:包云轩,主要从事交通气象、大气环境、气象与农业防灾减灾,以及遥感与资源环境研究. Email:baoyunxuan@163.com

different from the diurnal variations in autumn and winter. The heavy fog mainly appears from 00:00 BT to 06:00 BT and dissipates from 05:00 BT to 08:00 BT, and the duration is mainly within 6 hours. (3) Summer fog is mainly radiation fog. The radiation fog, advection fog and front fog account for 58.1%, 35.5% and 6.4% respectively. (4) The frequency of heavy fog presents a general decrease trend from the northeastern coastal region to the southwestern inland because the cooling rate in the north of the Huaihe River of Jiangsu is higher than that in the southern Jiangsu. (5) The weak rainfall of 6—24 h before the fog formation provides water vapor to the near-surface layer. After that, the weather clears with the stable atmosphere statically, which is beneficial to the appearance of summer heavy fog.

Key words: heavy fog, summer, temporal-spatial characteristics, influence factors

引言

雾是近地面大气中悬浮水滴或者冰晶微粒导致水平能见度降低至 1000 m 以下的天气现象(濮梅娟等,2008)。浓雾严重影响大气能见度,可对交通、运输和军事活动等造成一定的威胁(Gultepe et al, 2007)。同时,浓雾携带的污染物可能诱发各类疾病,给人类健康带来不利影响,因而准确预报雾的发生具有显著的社会和经济效益(Niu et al, 2010)。多年来国内外学者开展了大量研究,观注于雾的观测和生消机制的数值模拟研究,对雾的气候特征(吴彬贵等,2010;许爱华等,2016;田小毅等,2018)、宏微观物理特征(李子华等,2011a;2011b)及生消机制(黄彬等,2014;濮梅娟等,2018)等有较为全面的分析。其中对雾的气候特征是通过统计区域内的雾日数来研究其时空分布特征,得到的结果基本一致,即我国雾日有明显的年际、月际变化和空间分布特征,近几十年来我国年雾日数呈先增(1980年前)后减(1990年后)趋势(吴兑等,2011;孙彧等,2013;丁一汇和柳艳菊,2014);季节分布上我国大部分地区秋、冬季雾较多,春、夏季较少,而沿海地区雾在春、夏季较多(王丽萍等,2006;林建等,2008)。在雾与气象因子的关系研究方面,张人禾等(2014)指出冬季雾-霾天气的逐日演变同时受到水平风垂直切变等大气动力因子和与温湿度相联系的热力因子的影响。于华英等(2014)对南京雾日异常的月份进行研究,发现地表温度的下降和大气可降水量的增加是南京地区冬季连续出现雾日的主要原因。尹志聪等(2015)指出雾日数与降水量、相对湿度之间呈稳定的正相关关系。以上研究主要是对全年的雾或秋、冬季雾进行的气候统计研究,到目前为止针对夏季雾的研究甚少。但夏季浓雾过程并不少见,据笔者统计,仅

2013—2016年夏季,江苏省就出现99次浓雾过程,占全年浓雾次数的23.6%,分别略低于春、冬季的26.4%和27.4%。夏季浓雾导致的交通事故也时有发生,2012年6月3日05:30左右,江苏盐城境内高速公路上发生特大交通事故,因浓雾导致能见度低,连续发生车辆追尾事故,造成11人死亡19人受伤(王骏勇等,2012);2013年6月13日03时,沈海高速公路盐城境内再次因突发浓雾,发生重大交通事故(罗鹏,2013)。地处我国江淮流域汛期的“夏雾”,由于突发性、局地性强且气象部门和服务部门对其重点关注较少,往往令预报部门措手不及。因此,夏季浓雾的发生规律及其预警预报亟待深入研究。

本文采用高时空分辨率的连续地面观测数据来统计雾的发生频率,时间分辨率达到分钟级别,这比传统方法使用一日四次的观测数据来统计雾日数更为适合深入研究雾的生消过程。对于江苏地区来说,着眼于夏季浓雾的研究是个比较新的研究课题,本文对江苏省夏季浓雾的时空分布特征、浓雾形成期间的气象要素特征及其影响因子进行分析,旨在系统阐释江苏地区夏季浓雾发生的天气、气候规律,为该地区夏季浓雾的预警预报提供科学依据。

1 资料与方法

本文使用的数据资料主要包括:中国气象局交通气象重点开放实验室提供的2013—2016年江苏省70个国家自动气象站的观测资料(站点分布见图1),时间分辨率为10 min,包括能见度、雨量、气温、相对湿度及10 m高度风向风速等气象要素数据(均经过严格的质量控制和检验);由江苏省基础地理信息中心提供的1:50000江苏省电子地图,包括江苏省各市、县矢量图等。

采用气候学上常用的四季定义,将发生在6—8

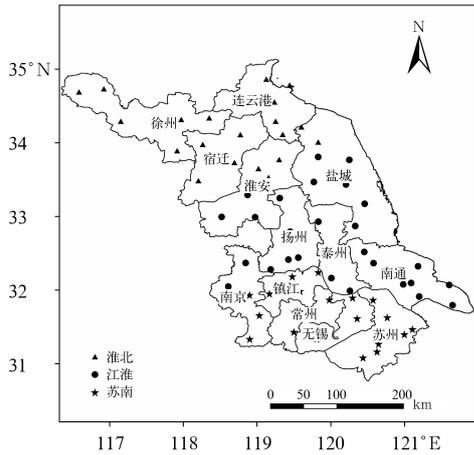


图 1 江苏省自动气象观测站分布

Fig. 1 Distribution of automatic weather stations in Jiangsu Province

月的雾定义为夏季雾。根据《雾的预报等级》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2011), 规定能见度在 200~500 m 时为浓雾, 在 50~200 m 时为强浓雾, 本文研究的是夏季的浓雾和强浓雾。将邻近三个以上站点同一时段能见度低于 500 m 且浓雾过程持续时间大于 1 h, 成雾站点无降水的低能见度过程作为一个浓雾过程处理。参照国际上使用相对湿度 90% 区分雾与霾 (Schichtel et al, 2001; Doyle and Dorling, 2002), 把能见度首次降到 500 m 以下且相对湿度大于 90% 的时刻, 作为浓雾过程的生成时刻; 把能见度回升到 1000 m 以上且相对湿度降至 90% 以下的时刻, 作为浓雾过程的消散时刻。

气温、相对湿度和风速的变化幅度计算是通过计算站点 1、3、6 h 时间间隔的气温、相对湿度和风速的变化幅度, t 时刻的变化幅度用 $\Delta x_t = x_t - x_{t-k}$ ($k=1, 3, 6$) 表示。降水量等级根据中国气象局颁布的《降水量等级》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2012), 定义日降水量在 0.1~9.9 mm 为小雨, 10.0~24.9 mm 为中雨, 25.0~49.9 mm 为大雨, 日降水量 ≥ 50.0 mm 为暴雨。

2 夏季浓雾的时空分布特征

2.1 夏季浓雾的时间变化特征

2.1.1 年际和月际变化特征

从夏季浓雾发生的频数来看(图 2a), 这 4 年

中, 夏季浓雾年平均发生次数达到 25 次, 其中 2013 和 2016 年夏季浓雾发生较少, 2014 和 2015 年夏季浓雾发生较多, 这可能与 2014 和 2015 年夏季超强厄尔尼诺事件有关(袁媛等, 2016), 江苏地区在此期间平均气温相比其他年份略低, 夏季降水量和相对湿度相比其他年份略高。从夏季浓雾的月际变化来看(图 2b), 6 月是江苏省夏季浓雾的高发月份, 浓雾发生频率高于 7、8 月, 4 年期间 6 月共出现 42 次浓雾过程, 而 7 和 8 月 4 年累计发生次数均不到 30 次, 浓雾过程相对较少, 特别是 2013 和 2016 年的 7 和 8 月, 月平均发生次数分别为 5 和 4 次。这可能与这两年 7—8 月江苏省出现持续高温天气有关, 以南京为例, 2013 年 7—8 月 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的高温日数有 35 d, 高温极值为 40.1°C , 2016 年 7—8 月 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的高温日数有 19 d, 极值为 38.5°C , 而 2014 和 2015 年 7—8 月 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的高温日数均为 9 d。7—8 月江苏省基本上处在副热带高压控制下, 高温晴热, 空气需要更大的比湿才能饱和, 因而难以形成浓雾, 而 6 月江苏省通常处在梅雨期, 连绵的阴雨天气使地面空气长期处在高湿状态, 为浓雾的形成提供了充沛的水汽条件, 另外 6 月的气温相比 7、8 月较低, 近地面的雨水蒸发也可以带来降温, 雨后天气转晴暖形势有利于浓雾天气的形成。

2.1.2 日变化特征

雾生消时刻有明显的日变化特征, 其日变化与太阳辐射的日变化有密切关系 (Tardif and Rasmussen, 2007)。从江苏省夏季浓雾生消时刻的日变化曲线(图 3a)可以看出, 一日之中浓雾主要发生在后半夜至次日 06 时之前, 主要集中在 00—06 时, 占总次数的 78.6%; 发生在 17—24 时的浓雾约占总次数的 17.7%, 其他时段仅占 3.7%。值得注意的是, 发生在 17—20 时的浓雾过程成雾前 3 h 地面相对湿度已达到 90% 以上, 这可能是由于这些过程傍晚近地层的相对湿度较大, 水汽接近饱和, 若天气转为晴暖, 在日落降温时空气易达到饱和, 继而凝结成雾。雾的消散时间较为集中, 主要在 05—08 时, 约占总次数的 76.6%(图 3a), 这个时间段太阳逐渐升起, 地表辐射增温, 空气的垂直对流运动增强, 雾体易于消散。从浓雾的持续时间来看(图 3b), 浓雾持续时间主要在 6 h 以内, 占总次数的 79.3%, 维持 6~8 h 的占总次数的 11.1%, 维持 8~10 h 的占总次数的 6.0%, 维持 10 h 以上的浓雾占总次数的 3.6%。以往的研究表明, 江苏省秋、冬季浓雾一般

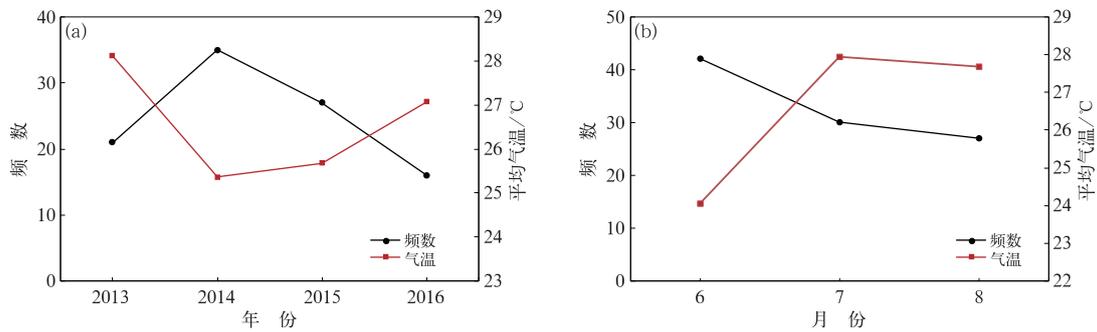


图 2 2013—2016 年江苏省夏季浓雾总次数的年际变化(a)和月变化(b)
 Fig. 2 Interannual change (a) and monthly change (b) of summer heavy fog in Jiangsu Province during 2013—2016

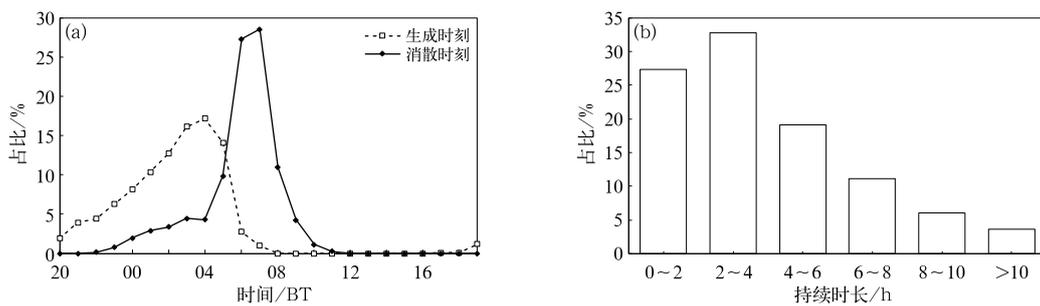


图 3 2013—2016 年江苏省夏季浓雾生消时刻的日变化(a)及其持续时间分布(b)
 Fig. 3 Diurnal variation (a) and its maintenance time (b) of summer heavy fog in Jiangsu Province during 2013—2016

在半夜至凌晨发生,持续时间从几到数十小时不等,多消散于次日 08 时后(李子华等,2011b;焦圣明等,2016;濮梅娟等,2018)。由此可见,江苏省夏季浓雾相比于秋、冬季,其发生时间多在下半夜,且消散时刻较为集中(08 时前),所以浓雾的持续时间相对较短。

2.2 夏季浓雾的空间分布

图 4 是 2013—2016 年江苏省夏季浓雾年均发生次数的空间分布。从图中可以看出,江苏省夏季浓雾的空间分布有明显的地域性差异,浓雾发生频次基本呈现从东北部沿海地区向西南部内陆地区逐渐减少的趋势。浓雾发生的高值区主要在淮安、连云港一带,年均夏季浓雾次数高达 9 次以上,另外仪征、江都和如皋站的浓雾次数也在 9 次以上,统计分析全省这 4 年的平均相对湿度发现(图略),这三个地区的相对湿度均略高于周围地区,另外以仪征站为例,统计仪征站有雾而周边六合、句容和丹徒站无雾的 11 次浓雾个例的 18—24 时的平均相对湿度,

发现仪征站的平均相对湿度高于周围站点的个例数占总个例数的 90.9%,其他两个高值站点也有类似结果,这说明水汽条件充足是这些地区浓雾较多的原因之一;次高值区在盐城至泰州一带,浓雾发生的

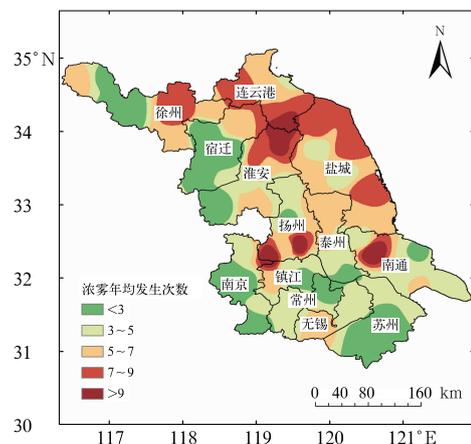


图 4 2013—2016 年江苏省夏季浓雾年均发生次数的空间分布
 Fig. 4 Spatial distribution of annual average occurrence frequency of summer heavy fog in Jiangsu Province during 2013—2016

次数在 7 次左右;徐州中北部、宿迁西南部等内陆地区和苏南地区夏季不易发生浓雾天气,除宜兴外,浓雾发生频次都在 5 次以下。经分析,东北部沿海地区夏季浓雾次数多于西南部内陆地区的可能原因有:一是江苏地区进入夏季后多盛行偏东风和东南风,该风向将黄海、东海的暖湿空气吹向沿海地区,为沿海地区浓雾的形成提供了充足的水汽条件;二是苏南地区夏季常受副热带高压进退影响,天气形势不稳定,易发生强对流天气,不利于浓雾的形成与维持。

3 夏季浓雾的环流特征及气象要素特征

3.1 环流特征

雾的形成通常受多种因素共同作用的影响,如大多数平流雾过程中也同时存在辐射作用影响。根据浓雾形成时的主导因素,江苏地区夏季出现的浓

雾过程主要分为辐射雾、平流雾和锋面雾,其中平流雾包括纯平流作用引起的平流雾以及平流和辐射作用引起的平流辐射雾。对该地区发生的大范围区域性浓雾过程进行分类,结果发现江苏省夏季浓雾以辐射雾为主,其中辐射雾占 58.1%,平流雾占 35.5%,锋面雾占 6.4%。

雾天气过程发生在一定的大尺度环流形势下。对 2013—2016 年江苏省夏季浓雾对应的地面天气形势归类(表 1),统计结果表明,夏季浓雾出现时地面天气形势主要有高压前部均压型、入海高压后部型、东北低压西伸控制型、高压后部型、高压后部均压型和低压倒槽型等 6 种地面天气形势。辐射雾出现时的地面天气形势一般为高压前部均压型、入海高压后部型和东北低压西伸控制型,占比分别为 19.4%、29.0%和 9.7%;平流雾出现时的地面天气形势主要为高压后部型和高压后部均压型,占比分别为 22.6%和 12.9%;锋面雾出现时的地面天气形势一般为低压倒槽型,占比为 6.4%。

表 1 2013—2016 年江苏省不同类型浓雾的地面天气形势统计

Table 1 Surface synoptic situation of different types of heavy fog in Jiangsu Province during 2013—2016

雾的类型	辐射雾			平流雾		锋面雾
环流分型	高压前部均压型	入海高压后部型	东北低压西伸控制型	高压后部型	高压后部均压型	低压倒槽型
占比/%	19.4	29.0	9.7	22.6	12.9	6.4

3.2 气象要素特征

3.2.1 气温和相对湿度变化特征

表 2 是 2013—2016 年江苏省夏季浓雾形成过程中气温和相对湿度的频率分布情况。从表中可以看出,浓雾发生时气温范围在 13~29℃,其中 94.1%的浓雾集中形成于 17~27℃气温条件下,当气温超过 27℃,浓雾发生频率迅速减小至 1.8%,而 29℃以上没有浓雾形成,说明 29℃是江苏省夏季浓雾形成的临界温度,温度过高导致饱和和水汽压过高,空气中的水汽难以达到成雾条件。相对湿度是反映地面空气饱和程度的物理量,从表 2 中可以看出,浓

雾过程中的相对湿度集中在 94%~100%,其中相对湿度达 96%以上的频率为 77.9%。

为进一步分析江苏夏季浓雾形成前气温和相对湿度的变化情况,现以浓雾发生最多的如皋站为例,分析了如皋站 41 次浓雾过程成雾前的降温幅度和相对湿度变化情况(图 5)。个例顺序按成雾时间的早晚排列,其中个例 1~个例 17 的成雾时间为 21 时至次日 01 时,个例 18~个例 41 成雾时间均在 01 时之后。由图 5a 可知,如皋夏季浓雾出现在大幅降温的情况下较少,6 h 降温幅度达到 3.6℃以上的仅有 6 次,且浓雾均发生在 01 时之前,而成雾前 3 h 的降温幅度在 0.1~3.5℃,其中只有 1 次浓雾过程

表 2 2013—2016 年江苏夏季浓雾形成过程中气温和相对湿度的频率分布

Table 2 Frequency distribution of temperature and relative humidity of summer heavy fog formation in Jiangsu Province during 2013—2016

气温 $T/^\circ\text{C}$	$13 \leq T < 15$	$15 \leq T < 17$	$17 \leq T < 19$	$19 \leq T < 21$	$21 \leq T < 23$	$23 \leq T < 25$	$25 \leq T < 27$	$27 \leq T < 29$
频率/%	1.7%	2.4%	7.3%	20.3%	34.8%	22.4%	9.3%	1.8%
相对湿度 $f/\%$	$90 \leq f < 92$	$92 \leq f < 94$	$94 \leq f < 95$	$95 \leq f < 96$	$96 \leq f < 97$	$97 \leq f < 98$	$98 \leq f < 99$	$99 \leq f < 100$
频率/%	4.8%	4.9%	5.1%	7.3%	13.5%	23.9%	19.1%	21.4%

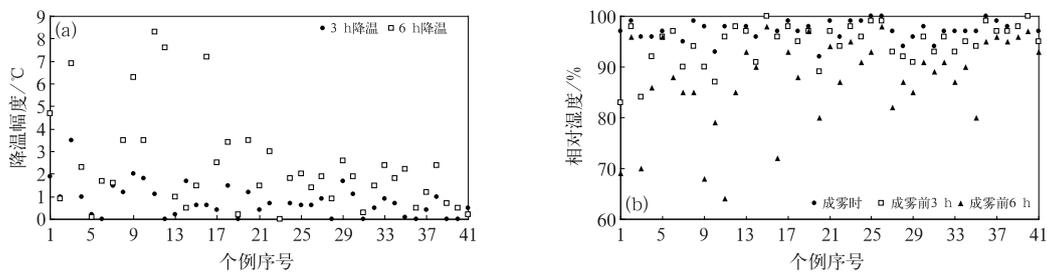


图 5 2013—2016 年如皋站夏季浓雾形成前 6 h 和 3 h 的降温幅度(a),
成雾前 6 h 和 3 h 及成雾时的相对湿度(b)

Fig. 5 Cooling range of 6 h and 3 h before the formation of summer heavy fog (a)
and relative humidity before 6 h, 3 h and when summer heavy fog occurred (b)
at Rugao Station during 2013—2016

3 h 降温达到 3.5℃(成雾时间为 22 时),其余均在 2.0℃以下。从相对湿度的变化情况看(图 5b),成雾前 6 h 相对湿度已达 90%以上的浓雾过程有 21 次,相对湿度在 80%~90%的有 14 次,在 80%以下的仅有 7 次;成雾前 3 h 相对湿度均在 83%以上,其中 90.2%的浓雾过程成雾前 3 h 相对湿度已达 90%以上,成雾前 3 h 至成雾时相对湿度无明显增大,这表明夏季浓雾形成前地面已处于较高的相对湿度环境下。

3.2.2 风速和风向特征

图 6 是 2013—2016 年江苏省夏季浓雾发生期间风速、风向频率的分布情况。从图 6a 中可以看出,浓雾主要集中在发生在风速低于 3 m·s⁻¹的静稳或弱风天气下,发生频率为 98.2%,随着风速增大,浓雾发生概率显著降低,风速>3 m·s⁻¹时浓雾发生概率不足总数的 2%,仅有极个别站点能达到 4~5 m·s⁻¹。这表明江苏省夏季浓雾的形成较依赖于低风速条件,较低的风速有利于湍流混合作用,水汽在微风中易于在近地面聚集,有利于雾的形成和维持,而风速增强到一定强度时,近地面的动力交换作

用增强,浓雾易消散。从风向的分布情况来看(图 6b),江苏省夏季浓雾发生时风向较为集中,风向主要集中在东北(NE)—东南(SE),即浓雾多发生在偏东气流影响下,尤其来自海上的偏东风是形成夏季浓雾必不可少的条件,这主要是因为夏季成雾时江苏地面多处于黄、渤海高压的后部,较强偏东风有利于水汽从黄海和东海输送至陆地,从而易于在沿海及周边地区形成浓雾。

4 夏季浓雾形成的影响因子分析

4.1 影响因子的主成分分析

为分析夏季浓雾天气的影响因子,利用主成分分析法分析成雾前 3 h 降温、增湿和风速,成雾前 6 h 累积降水量,前一日 20 时至次日 08 时平均气温、平均相对湿度、平均风速,当日最高气温等 8 个因子对浓雾形成的影响。表 3 给出了各影响因子的总方差分解,可以看出前 4 个主成分的特征值大于 1.0,其贡献率分别为 28.16%、20.38%、15.05%和

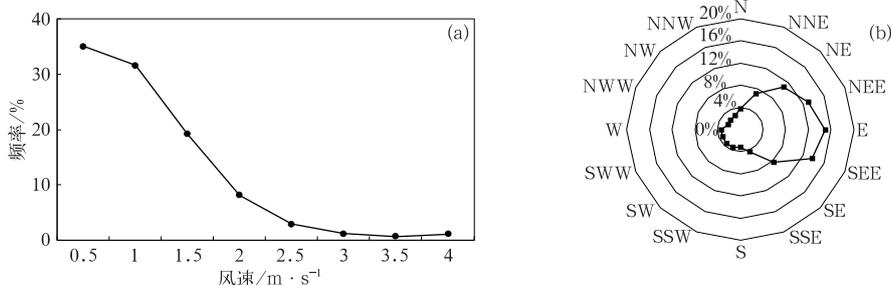


图 6 2013—2016 年江苏省夏季浓雾期间风速(a)与风向(b)的频率分布

Fig. 6 Frequency distributions of wind speed (a) and wind direction (b) of summer
heavy fog formation in Jiangsu Province during 2013—2016

13.49%，前 4 个主成分的累计方差贡献率达到 77.08%，即前 4 个主成分基本能概括 8 个因子所覆盖的信息，因此选用前 4 个成分为主成分。

表 4 为影响因子的前 4 个主成分旋转后的载荷矩阵。从表中可以看出，第一主成分在成雾前 3 h 降温 and 成雾前 3 h 增湿上有较大载荷，且载荷值都

大于 0.9，表明成雾前的降温和增湿作用是影响夏季浓雾形成的关键因素。第二主成分在 20 时至次日 08 时平均气温和当日最高气温因子上有较大载荷，表明热力条件影响较大。第三主成分和第四主成分载荷较大的分别为 20 时至次日 08 时平均相对湿度和成雾前 6 h 累积降水量。

表 3 主成分的特征值和贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution rates of the principal components

主成分	1	2	3	4	5	6	7	8
特征值	2.25	1.63	1.20	1.08	0.79	0.60	0.32	0.12
贡献率/%	28.16	20.38	15.05	13.49	9.91	7.45	3.93	1.63
累计贡献率/%	28.16	48.54	63.59	77.08	86.99	94.44	98.37	100

注：数字 1~8 表示主成分 1~8。

Note: Numbers 1-8 indicate principal components 1-8.

表 4 因子旋转载荷矩阵

Table 4 Factor rotation load matrix

因子名称	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
成雾前 3 h 降温	0.934*	-0.042	-0.102	0.033
成雾前 3 h 增湿	0.930*	-0.024	-0.052	-0.036
成雾前 3 h 风速变化	0.407	0.190	0.154	-0.673
成雾前 6 h 累积降水量	0.216	0.203	0.155	0.766*
20 时至次日 08 时平均气温	0.196	0.838*	-0.104	0.126
20 时至次日 08 时平均相对湿度	0.084	-0.220	0.815*	0.109
20 时至次日 08 时平均风速	0.307	-0.270	-0.725	0.088
当日最高气温	-0.270	0.865*	0.085	-0.062

注：* 表示在不同主成分中载荷值较大的影响因素。

Note: * indicates the factor that has a large load value in different principal components.

4.2 影响浓雾形成的主要因子分析

4.2.1 前期降温的影响

在浓雾形成过程中长波辐射冷却作用促使地面和低层大气降温，对雾的形成和维持至关重要。降温幅度是一定时间间隔内气温递减的幅度，能直观有效地反映浓雾形成过程中的辐射冷却作用的强弱。表 5 给出了 2013—2016 年江苏省夏季不同成雾时段的成雾站点成雾前 1、2 和 3 h 降温幅度情况，对于所有个例，成雾站点成雾前 1、2 和 3 h 的降温幅度平均值（最大值）分别为 0.40℃（3.00℃）、0.84℃（4.50℃）和 1.34℃（6.20℃）。从成雾前的降温速率来看，成雾站点成雾前 3 h 的小时平均降温速率为 0.45℃·h⁻¹，比 2 和 1 h 的小时平均降温速率分别高出 0.03 和 0.05℃·h⁻¹。从不同成雾时段的平均降温幅度情况来看，1、2 和 3 h 的平均降温幅度都随着成雾时段的延后而减小，如成雾时段为 19—20 时的 1、2 和 3 h 平均降温幅度分别为 0.87、

1.60 和 2.00℃，而成雾时段为 03—04 时的 1、2 和 3 h 平均降温幅度分别为 0.29、0.44 和 0.67℃。

图 4 表明江苏省夏季浓雾的空间分布有明显的区域性差异，现从夜间降温的角度解释浓雾出现这一空间分布的可能原因。图 7 给出了江苏淮北、江淮和苏南地区在夏季夜间不同时刻的日均降温幅度。从图中可以看到，淮北、江淮和苏南地区的 1 和 3 h 降温幅度有相似的变化特征，各地区的 1 和 3 h 降温幅度均随时间的推移而逐渐减小。从不同地区来看，淮北地区整体的 1 和 3 h 降温幅度均高于江淮和苏南地区，其中 3 h 降温幅度淮北地区的降温幅度与江淮和苏南地区的差异在 20 时达到最大，分别高出江淮和苏南地区 0.45 和 0.49℃，在 04 时达到最小，分别比江淮和苏南地区高 0.18 和 0.13℃，说明淮北地区的夜间降温作用大于江淮和苏南地区。

为进一步分析各地区降温幅度的差异。图 8 给出了江苏地区 20 时的 3h 降温幅度的空间分布。可

表 5 2013—2016 年江苏省夏季成雾站点成雾前的降温幅度(单位:℃)
Table 5 Cooling range of fogging stations before fogging (unit: ℃) in Jiangsu Province of summer during 2013—2016

成雾时段	1 h 降温幅度			2 h 降温幅度			3 h 降温幅度		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
19—20 时	3.00	-0.20	0.87	4.50	-0.20	1.60	5.50	-0.30	2.00
20—21 时	1.90	-0.20	0.50	3.70	-0.40	1.28	5.00	-0.40	1.96
21—22 时	1.60	-0.20	0.43	3.00	-0.30	1.07	6.20	-0.40	2.05
22—23 时	1.10	-0.30	0.32	2.50	-0.50	0.71	3.30	-0.70	1.25
23 时至次日 00 时	1.10	-0.10	0.32	2.10	-0.30	0.69	4.10	-0.30	1.15
00—01 时	1.40	-0.20	0.30	2.50	-0.30	0.60	3.40	-0.40	1.04
01—02 时	2.20	-0.30	0.31	2.70	-0.40	0.62	4.20	-0.50	1.07
02—03 时	0.70	-0.20	0.28	1.00	-0.20	0.53	1.70	-0.20	0.87
03—04 时	0.90	-0.10	0.29	1.80	-0.10	0.44	2.10	-0.20	0.67
所有个例	3.00	-0.30	0.40	4.50	-0.50	0.84	6.20	-0.70	1.34

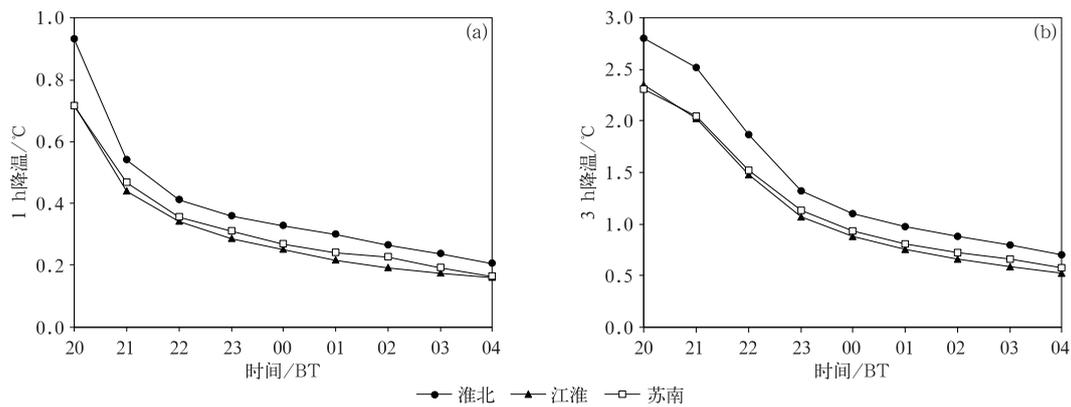


图 7 2013—2016 年淮北、江淮和苏南夏季夜间不同时刻的日均降温幅度变化
(a)1 h 降温, (b)3 h 降温

Fig. 7 Variation curves of daily average temperature drop at different times in Huaibei, Jianghuai and South of Jiangsu during 2013—2016
(a) 1 h temperature drop, (b) 3 h temperature drop

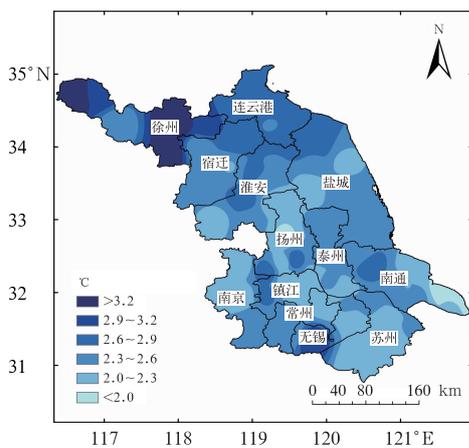


图 8 2013—2016 年江苏地区 20 时的 3 h 降温幅度的空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of 3 h cooling range at 20:00 BT in Jiangsu Province during 2013—2016

以看到,3 h 降温均有明显的南北差异,总体呈淮北向苏南递减的趋势。对比图 4 可以看出江苏各地的降温幅度与其夏季浓雾发生频次有较好的对应关系,淮北地区浓雾发生较多的徐州东部、淮安东北部至盐城、连云港一带同时也是降温较大的地区,3 h 降温幅度达到 2.6℃ 以上,其中最大降温幅度达 3.6℃(徐州市邳州站);徐州中部和宿迁西南部地区的降温幅度小于周边地区,浓雾发生频率也较低;江淮地区泰州至南通沿海一带 3 h 降温幅度大于周边地区,浓雾发生频率也高于周边地区;苏南地区除宜兴外,3 h 降温幅度均在 2.6℃ 以下,降温幅度小于其他地区,是苏南地区浓雾较少的原因之一。

4.2.2 前期降水的影响

从前文主成分分析可知,增湿也是夏季浓雾形成的关键因子。统计所有浓雾个例成雾站点成雾前

的累积降水等级可知,成雾站点成雾前 24 h 累积降水等级以无雨(44.0%)和小雨(37.5%)为主,中雨、大雨和暴雨分别占 8.5%、6.0%和 4.0%。从分时段累积降水等级看(表 6),对于成雾前出现降水的站点,成雾前 3~6、6~12 和 12~24 h 累积降水等级均以小雨为主,中雨、大雨和暴雨以上降水的百分比均在 5.0%或其以下,而成雾前 3 h 内无降水。此外,统计成雾前累积降水量的分布情况可知,成雾前累积降水量主要集中在前 6~24 h 时段(94.3%),而 6~24 h 累积降水量也以小雨为主(36.4%)。从以上分析可知,夏季浓雾形成前 6~24 h 发生的弱降水(小雨)为近地层提供水汽,此后天气转晴、地面长波辐射增强,静稳的大气层结下有利于夏季浓雾的出现。

表 6 2013—2016 年江苏省夏季成雾站点
成雾前各时段累积降水量出现在不同
降水等级的百分比(单位:%)

Table 6 Percentage of accumulated precipitation
in different periods at different precipitation grades
before the formation of heavy fog in Jiangsu Province
of summer during 2013—2016 (unit: %)

降水等级	无雨	小雨	中雨	大雨	暴雨以上
成雾前 0~3 h	100.0	0	0	0	0
成雾前 3~6 h	85.7	13.2	0.8	0.2	0
成雾前 6~12 h	67.1	26.5	4.3	1.8	0.3
成雾前 12~24 h	56.1	31.8	5.0	4.9	2.3

5 结论和讨论

利用江苏省 70 个国家基本站的观测资料,分析了江苏省夏季浓雾的时空分布特征及其气象影响因素,得到以下主要结论:

(1) 6 月相比 7、8 月是江苏省夏季浓雾的高发月份,6 月气温较低且处于水汽相对丰沛的梅雨期是夏季浓雾在 6 月高发的可能原因;一日之中浓雾主要发生于 00—06 时,消散主要集中在 05—08 时,持续时间主要在 6 h 以内,相比于秋、冬季浓雾,夏季浓雾消散时刻较为集中(08 时前),持续时间相对较短;空间分布上全省浓雾频次呈现从东北部沿海地区向西南部内陆地区递减的趋势,浓雾发生的高值区主要在淮安、连云港一带,苏南地区除宜兴外夏季较少发生浓雾天气。

(2) 江苏省夏季浓雾以辐射雾为主,主要发生在江苏地面位于高压前部和入海高压后部或受东北

低压西伸控制时;平流雾主要发生在江苏省地面位于高压后部时。浓雾易在气温小于 29℃、风速低于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且盛行偏东风的条件下形成,形成前期地面多处于较高的相对湿度条件下。

(3) 夏季浓雾影响因子的主成分分析结果表明,第一主成分为成雾前 3 h 降温和增湿,说明成雾前降温和增湿条件是影响夏季浓雾形成的关键因素,第二主成分为夜间平均气温和当日最高气温等热力条件,反映出夏季气温对浓雾形成有一定影响。

(4) 淮北地区夜间各时刻的平均降温幅度大于江淮和苏南地区,各地区夜间降温幅度的大小能较好地解释夏季浓雾的区域性分布,淮北大部分地区夜间降温幅度大于苏南地区,是淮北地区浓雾发生频率高于苏南地区的原因之一。

(5) 对于成雾前出现降水的浓雾过程,浓雾形成前 6~24 h 发生的弱降水为近地层提供水汽,此后天气转晴,静稳的大气层结下有利于夏季浓雾的出现。

需要指出的是,本文将夏季浓雾作为研究对象,目前主要对时空分布特征和影响因子进行了初步分析,得到了一些不同于春季和秋、冬季浓雾形成的气象因子特征,但对夏季浓雾形成和消散的物理机制尚未深入讨论,这将在下一步工作中继续研究。

参考文献

- 丁一汇,柳艳菊,2014. 近 50 年我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,44(1):37-48. Ding Y H, Liu Y J, 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity[J]. Sci China: Earth Sci, 57(1):36-46 (in Chinese).
- 黄彬,王靖,陆雪,等,2014. 黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征及生消机理分析[J]. 气象,40(11):1324-1337. Huang B, Wang Q, Lu X, et al, 2014. Mechanism of a sea fog event over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Meteor Mon, 40(11):1324-1337 (in Chinese).
- 焦圣明,朱承瑛,朱毓颖,等,2016. 江苏地区一次罕见持续性浓雾过程的成因分析[J]. 气象学报,74(2):200-212. Jiao S M, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2016. A discussion on the reason for a rare persistent heavy fog event in Jiangsu Province[J]. Acta Meteor Sin, 74(2):200-212 (in Chinese).
- 李子华,刘端阳,封洋,等,2011a. 中国雾水化学研究进展[J]. 气象学报,69(3):544-554. Li Z H, Liu D Y, Feng Y, et al, 2011a. Recent progress in the studies of the fog-water chemical characteristics in China[J]. Acta Meteor Sin, 69(3):544-554 (in Chinese).
- 李子华,刘端阳,杨军,等,2011b. 南京市冬季雾的物理化学特征[J].

- 气象学报, 69(4): 706-718. Li Z H, Liu D Y, Yang J, et al, 2011b. Physical and chemical characteristics of winter fogs in Nanjing[J]. Acta Meteor Sin, 69(4): 706-718(in Chinese).
- 林建, 杨贵名, 毛冬艳, 2008. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J]. 气候与环境研究, 13(2): 171-181. Lin J, Yang G M, Mao D Y, 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns[J]. Climatic Environ Res, 13(2): 171-181(in Chinese).
- 罗鹏. [2003-06-13]. 沈海高速盐城段发生20辆车相撞事故致2死1重伤[EB/OL]. <http://news2.jschina.com.cn/system/2013/06/13/017619987.shtml>. Luo P. [2003-06-13]. Two dead and one seriously injnred in a collision accident of 20 vehicles in Yancheng section of Shenhai Expressway[EB/OL]. <http://news2.jschina.com.cn/system/2013/06/13/017619987.shtml> (in Chinese).
- 濮梅娟, 马明明, 张雪蓉, 等, 2018. 江苏连续三次区域性浓雾形成过程的机理分析[J]. 气象科学, 38(2): 139-148. Pu M J, Ma M M, Zhang X R, et al, 2018. An analysis for three successive fogs formation mechanisms in Jiangsu[J]. J Meteor Sci, 38(2): 139-148 (in Chinese).
- 濮梅娟, 严文莲, 高兆堂, 等, 2008. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究[J]. 高原气象, 27(5): 1111-1118. Pu M J, Yan W L, Shang Z T, et al, 2008. Study on the physical characteristics of burst reinforcement during the winter fog of Nanjing[J]. Plateau Meteor, 27(5): 1111-1118(in Chinese).
- 孙瓖, 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).
- 田小毅, 朱承瑛, 张振东, 等, 2018. 长江江苏段江面雾的特征和预报着眼点[J]. 气象, 44(3): 408-415. Tian X Y, Zhu C Y, Zhang Z D, et al, 2018. Characteristics and forecasting focus for river fog in Jiangsu section of Yangtze River[J]. Meteor Mon, 44(3): 408-415(in Chinese).
- 王骏勇, 张展鹏, 夏鹏, 2012. 高速公路“团雾吃人”为何一再上演[N]. 新华每日电讯, 2012-06-18(4). Wang J Y, Zhang Z P, Xia P, 2012. Why did the highway “Dumpling fog eating people” repeatedly staged[N]. Xinhua Daily Telegraph, 2012-06-18(4) (in Chinese).
- 王丽萍, 陈少勇, 董安祥, 2006. 气候变化对中国大雾的影响[J]. 地理学报, 61(5): 527-536. Wang L P, Chen S Y, Dong A X, 2006. Impact of climate warming on fog in China[J]. Acta Geogr Sin, 61(5): 527-536(in Chinese).
- 吴彬贵, 解以扬, 吴丹朱, 等, 2010. 京津塘高速公路秋冬雾气象要素与环流特征[J]. 气象, 36(6): 21-28. Wu B G, Xie Y Y, Wu D Z, et al, 2010. Characteristics of meteorological elements and circulation in fog events along Beijing-Tianjin-Tanggu expressway[J]. Meteor Mon, 36(6): 21-28(in Chinese).
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等, 2011. 中国大陆1951—2005年雾与轻雾的长期变化[J]. 热带气象学报, 27(2): 145-151. Wu D, Wu X J, Li F, et al, 2011. Long-term variation of fog and mist in 1951—2005 in mainland China[J]. J Trop Meteor, 27(2): 145-151(in Chinese).
- 许爱华, 陈翔翔, 肖安, 等, 2016. 江西省区域性平流雾气象要素特征分析及预报思路[J]. 气象, 42(3): 372-381. Xu A H, Chen X X, Xiao A, et al, 2016. Analysis on the characteristics of meteorological factors and forecast ideas for regional advection fog in Jiangxi[J]. Meteor Mon, 42(3): 372-381(in Chinese).
- 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 Z C, Wang H J, Guo W L, 2015. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang-Huai Area[J]. Sci China: Earth Sci, 58(8): 1370-1376(in Chinese).
- 于华英, 牛生杰, 刘鹏, 2014. 2007年12月南京大雾频发的多尺度特征研究[J]. 热带气象学报, 30(1): 167-175. Yu H Y, Niu S J, Liu P, 2014. Multi-scale features of fog in December 2007 in Nanjing[J]. J Trop Meteor, 30(1): 167-175(in Chinese).
- 袁媛, 高辉, 贾小龙, 等, 2016. 2014—2016年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J]. 气象, 42(5): 532-539. Yuan Y, Gao H, Jia X L, et al, 2016. Influences of the 2014—2016 super El Niño event on climate[J]. Meteor Mon, 42(5): 532-539(in Chinese).
- 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 R H, Li Q, Zhang R N, 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. Sci China: Earth Sci, 57(1): 26-35 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2011. 雾的预报等级: GB/T 27964-2011[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2011. Grade of fog forecast: GB/T 27964-2011[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2012. 降水量等级: GB/T 28592-2012[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2012. Grade of precipitation: GB/T 28592-2012[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- Doyle M, Dorling S, 2002. Visibility trends in the UK 1950—1997[J]. Atmos Environ, 36(19): 3161-3172.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al, 2007. Fog research: a review of past achievements and future perspectives[J]. Pure Appl Geophys, 164(6/7): 1121-1159.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al, 2010. Fog research in China: an overview[J]. Adv Atmos Sci, 27(3): 639-662.
- Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al, 2001. Haze trends over the United States, 1980—1995[J]. Atmos Environ, 35(30): 5205-5210.
- Tardif R, Rasmussen R M, 2007. Event-based climatology and typology of fog in the New York City Region[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(8): 1141-1168.