

王博妮, 濮梅娟, 田力, 等. 2016. 江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究. 气象, 42(2): 192-202.

江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究^{*}

王博妮¹ 濮梅娟² 田 力³ 张振东¹ 吴建军⁴

1 江苏省气象服务中心, 南京 210008

2 江苏省气象台, 南京 210008

3 河南省气象服务中心, 郑州 450003

4 江苏省气象科学研究所, 南京 210008

提 要: 文章对 2012 年 6 月至 2014 年 6 月期间发生于江苏省沿海高速公路的浓雾过程(能见度 ≤ 0.5 km)进行统计分析, 探讨了低能见度浓雾的气候特征、气象要素变化以及主要环流形势背景。研究结果表明:(1) 低能见度浓雾月分布次数有显著差异, 3—6 月、12 月至次年 2 月雾发生次数最高, 春、冬季高于夏、秋季; 03:00—05:00 为低能见度生成的高峰时段, 08:00 左右为消散峰值时段。(2) 能见度低于 0.5 km 后, 如果相对湿度继续增大到 97% 左右, 温度处于 0~4℃、风速在 0~2 m·s⁻¹、风向在 ENE—SSE, 能见度可能继续下降到 0.2 km 以下。(3) 对 150366 个样本的环流背景统计分析表明, 中北部路段的低能见度天气大多数是由锋前雾引起的, 主要出现在中低层暖区域内, 地面为冷锋前部弱气压场的环流条件下。全路段大面积低能见度天气由辐射雾和平流雾造成, 辐射雾天气形势主要是高层为下沉气流, 配合地面受弱高压或高压南下; 平流雾出现在中低层暖性系统, 地面位于入海高压后部或低压倒槽东侧, 低层盛行偏东风或东南风。(4) “象鼻型”先期振荡现象适用于沿海高速公路低能见度预报过程, 尤其对能见度稳定维持 0.2 km 以下的浓雾过程有很好的预警和监测作用。

关键词: 沿海高速公路, 浓雾, 气候特征, 先期振荡

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.02.007

Climate Characteristics and Impact Factors of Low-Visibility Heavy Fog on Jiangsu Coast Expressway

WANG Boni¹ PU Meijuan² TIAN Li³ ZHANG Zhendong¹ WU Jianjun⁴

1 Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

3 Henan Meteorological Service Centre, Zhengzhou 450003

4 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008

Abstract: This paper analyzed the dense fogs with low visibility (≤ 0.5 km) that occurred from June 2012 to June 2014 on the Jiangsu Coast Expressway, and investigated the climate characteristics, meteorological elements and main circulation situation of these dense fogs with low visibility. The results indicated that there are significant differences in the monthly frequency of the dense fogs. Fogs occur frequently from March to June, and also from December to the next February. The frequency of the dense fog in spring and winter is higher than that in summer and autumn. The peak of the low visibility usually appears during 03:00—05:00 BT in the early morning, and dissipates at around 08:00 BT. If the visibility is lower than

^{*} 国家自然科学基金项目(41575135、40975085 和 41340042)、江苏省气象局预报员专项(JSYBY201305)、江苏省气象局青年基金(Q201409)、江苏省气象服务中心自立课题“沿海高速公路(江苏段)雾的特征分析及其预报方法研究”以及河南省气象局面上项目(Z201515)共同资助

2015 年 3 月 25 日收稿; 2015 年 12 月 14 日收修定稿

第一作者: 王博妮, 主要从事交通气象预报服务与大气环境研究. Email: bnsmile@163.com

0.5 km, the relative humidity increases to 97%, temperature is 0—4℃, wind speed decreases to less than $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and wind direction is between ENE and SSE, then the visibility can further decrease to less than 0.2 km. The statistical analysis of the circulation background based on 150366 samples indicates that the low visibility in the northern and central section of the expressway is closely related to prefrontal fog. This section is located in the forefront of the cold front, and the warm sector exists in the mid-low level part. The low visibility of the whole expressway is due to the advection fog and radiation fog. The radiation fog exists in the downdrafts of upper air, and the weak pressure field or the high pressure moves to the south on the surface. The advection fog is in the region of thermal advection in the mid-low troposphere and behind the high-pressure system entering the sea or at the east side of the inverted trough, while southeast and east winds are blowing on the surface. Before the dense fog (the visibility < 0.2 km) comes, there is a large-amplitude oscillation with obvious “trunk-like” fluctuating forefront in terms of the visibility on the Jiangsu Coast Expressway. This feature provides a basis for monitoring and warning of the dense fog with visibility below 0.2 km.

Key words: coast expressway, dense fog, climate characteristics, fluctuating forefront

引言

由于高速公路具有技术等级高、设施完善、出入受限、车辆行驶速度快等特点,浓雾诱发的高速公路交通事故往往是灾难性的(Lewis et al, 2004; Gultepe et al, 2007; Niu et al, 2010)。因此,高速公路一旦出现浓雾,必须采取限制车速,甚至是封闭道路等措施。大量研究表明,当雾天能见度降低到 0.5 km 以下时,会对公路交通产生影响;能见度降低到 0.2 km 以下时,会对公路交通产生显著影响;能见度降低到 0.05 km 以下时,会对公路交通产生十分严重的影响。2012 年 6 月 3 日江苏省沿海高速公路盐城段因突发团雾,双向车道相继发生 7 起共约 60 辆车追尾事故,造成了 11 人死亡,30 多人受伤。浓雾天气已成为高速公路上重大交通事故的主要诱因之一。

南京交通气象研究所与江苏省高速公路联网中心合作,率先对江苏省内 16 条高速公路开展交通气象预报服务和研究工作。目前以沪宁高速公路为对象展开了大量交通气象方面的研究,已对沪宁高速公路浓雾实时监测特征、能见度演变规律以及局地性团雾等进行了大量探讨(袁成松等, 2003; 冯民学等, 2003; 贾晓刚等, 2006; 严明良等, 2011; 包云轩等, 2013; 丁秋冀等, 2013; 王博妮等, 2014)。然而,江苏省沿海高速公路交通气象自动站建站晚,交通气象基础数据匮乏,预报基础薄弱。此外,江苏沿海高速公路南北跨度长达 318 km,东靠黄海,途径南通、盐城和连云港三市,是江苏省“四纵四横四联”高速公路主骨架中“纵一”段,分别具有江苏淮北、江淮

之间和沿江地区的局地气候特征,雾引发的低能见度天气呈现出频发、突发、季节规律性不明朗等特点,预报难度大。从 2012 年 6 月开展交通气象预报服务至今,预报及研究人员对该高速公路浓雾预报技术的开发和研究还处于探索阶段。

针对上述情况,本文利用沿海高速公路江苏段沿线布设的自动气象站 2012 年 6 月至 2014 年 6 月期间的逐分钟气象资料,对江苏沿海高速公路能见度 < 0.5 km 的浓雾过程进行统计分析,旨在揭示浓雾过程的气候特征、气象要素变化条件以及影响沿海高速公路的主要环流特征等关键气象信息,从而为沿海高速公路低能见度浓雾的预报预警提供技术参考。

1 资料与方法

本文选用 2012 年 6 月至 2014 年 6 月期间江苏沿海高速公路沿线布设的 16 套环境气象自动监测站(AWMS)的逐分钟气象数据,气象要素包括能见度、湿度、风速、风向、雨量和温度等。选取能见度低于 0.5 km、相对湿度大于 95%、浓雾过程持续时间大于 30 min、降雨量小于 10 mm 且两站及两站以上站出现浓雾天气作为一个样本(次数)处理。

2 江苏沿海高速公路低能见度浓雾气候特征

2.1 月变化特征

雾引发的低能见度天气是交通气象预报业务中

的难点和重点。过去由于未建立专门的高速公路气象监测系统,对高速公路能见度的研究资料主要依据地面常规天气观测资料,难以获得长期稳定的高时间分辨率公路气象监测数据。此外,所用数据来源于基准站,在空间上也难以代替高速公路这种特殊环境。本文利用沿海高速公路沿线布设的高时间分辨率数据,统计分析该高速公路上低能见度浓雾的月、日、季节变化等规律。

从江苏沿海高速公路 2012 年 6 月至 2014 年 6 月期间各站雾日统计次数的逐月变化和季节变化来看,低能见度出现的峰值段是 1、3—4、6、9、10 和 12 月,其中 3—4 月和 6 月变化最为明显(图 1a)。从季节变化柱状图来看(图 1b),沿海高速公路低能见度发生次数呈现出春、冬季多于夏、秋季的态势,这与内陆地区低能见度在秋、冬季节高发存在差异,主要原因是沿海高速公路春季受平流雾影响较多。和魏建苏等(2010)所发现的江苏沿海地区雾日数具有春季和初冬季多,夏、秋季节少的分布规律是吻合的,但与侯伟芬等(2004)所发现的浙江沿海海雾主要出现在春季的结论有所区别,其原因可能是本研究所研究的沿海高速公路雾过程兼具陆雾和海雾的特点。

3—6 月低能见度次数增多的原因可能有以下几点:(1) 每年 5 月底至 6 月中下旬,江苏省及周边省(市)进入夏收夏种的秸秆焚烧高峰期,这种生物质燃烧排放及形成的二次气溶胶颗粒物悬浮在空

中,造成江苏出现不同程度的霾天气,当空气中相对湿度大于 95 % 时,气溶胶颗粒被水滴吸附和包裹,经过散射、反射等物理过程形成浓雾,致使能见度下降(孙或等,2013;严文莲等,2014;刘梅等,2014)。(2) 江苏进入春季后,大气环流发生调整,沿海地区多呈偏东和东南风向,在这种风向作用下,有利于将黄海、东海的暖湿气流输送到沿海相对较冷的下垫面,形成平流雾。如果海上存在海雾,亦易于在偏东风和东南风作用下输送至沿海地区(马翠平等,2014;周福等,2015;赵玉广等,2015)。(3) 6 月中下旬江苏处于梅雨期,空气湿度很大,在雨日间歇晴好天气的凌晨时段,辐射降温作用有利于辐射雾生成。

12 月至次年 2 月,冷空气活动频繁,锋面冷却效应明显,加之沿海地区水汽充沛,冷锋前平流降温叠加辐射降温形成低能见度天气。在本次研究中,11 月低能见度次数较低,通过对近三年 11 月发布的交通气象低能见度预警和临近次数统计表明,11 月低能见度预警和临近次数发布不多。虽然 11 月天气静稳,有利于雾、霾的产生,但对交通气象产生重要影响的低能见度天气并不多。7 和 8 月低能见度过程偏少,是因为夏季大气环流调整,影响江苏的系统变化强烈且迅速,这一时段主要是受短时强降水、台风以及副热带高压控制下的高温天气为主,低能见度过程发生的次数较少。

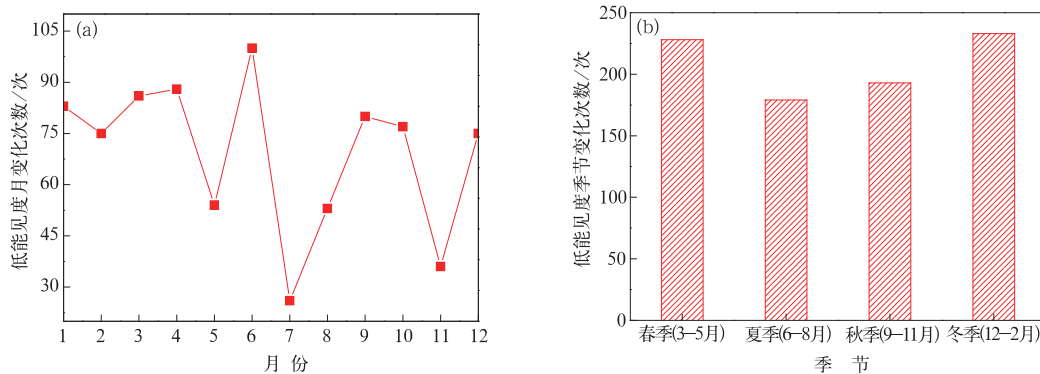


图 1 江苏沿海高速公路 2012 年 6 月至 2014 年 6 月期间低能见度的月变化(a)与季节变化(b)

Fig. 1 Monthly (a) and seasonal (b) variations for low visibility on the Jiangsu Coast

Expressway from June 2012 to June 2014

2.2 日变化特征

对江苏省沿海高速公路段低能见度日变化进行统计发现,该高速公路低能见度天气在一天当中任

何时次都有可能出现,但在进入午夜后,低能见度出现的次数逐渐增多;日出后,由于太阳辐射增强,低能见度出现的次数逐渐减少(图 2)。一般来说,傍晚前后雾开始形成,主要以轻雾为主;此后,随着夜间

辐射降温趋于明显、水汽凝结增强和逆温等形成,能见度开始下降,逐渐转为中浓雾;在凌晨时段,中浓雾有可能转为浓雾(能见度介于0.05~0.2 km),甚至强浓雾(能见度<0.05 km)(周贺玲等,2011)。从图2中可以看出,一天当中低能见度天气主要出现在00:00—07:00,低能见度浓雾在03:00—05:00达到了生成时刻的高峰时段,这一时段温度迅速下降,往往最低温度出现,有利于低层水汽凝结形成辐射雾,该时段内车辆应尽可能避免在高速公路上行驶。雾的消散峰值段为06:00—08:00,低能见度天气消散的高峰值出现在08:00左右。总体来说,一天当中,午夜至07:00左右低能见度发生的次数最多,在中午前后至傍晚前这段时间低能见度相对较少,08:00左右太阳初升,地表辐射增强,水汽迅速蒸发,能见度开始逐步回升。

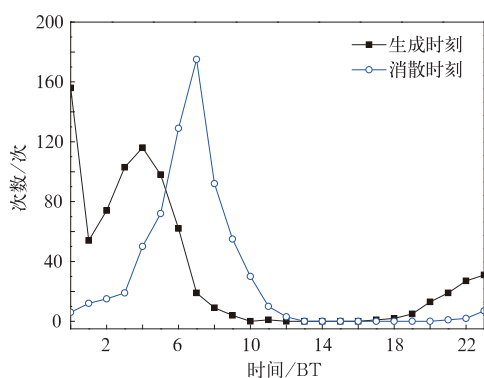


图2 江苏沿海高速公路2012年6月至2014年6月期间低能见度的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of low visibility on the Jiangsu Coast Expressway from June 2012 to June 2014

图3为江苏沿海高速公路16个监测站2012年6月至2014年6月期间浓雾过程统计分析。结果表明,南部路段站点(东台收费站出口、东台服务区、雪岸、如皋服务区、刘桥互通)低能见度天气发生的次数普遍较低,平均约为40次;中部段站点(滨海服务区、射阳服务区、盐城东、大丰互通、大丰服务区、白驹)低能见度天气发生过程基本呈两峰两谷的形势,滨海服务区站和大丰互通站的低能见度发生过程在35次左右,其他站低能见度天气发生过程约为70次;北部段站点(灌云北收费站、灌云服务区、灌河大桥北侧、六套、滨海)的低能见度天气发生过程均在45次以上,其中六套站低能见度天气发生过程为94次,是整个路段低能见度发生过程最多的站点。这种现象可归因于六套站位于盐城市六套乡,

南枕中山河、西接大运河,乡内河流数量众多、水汽量充沛、小气候特征明显,很容易发生区域性团雾引发的低能见度天气。能见度低于0.5 km的高发站点主要位于沿海高速公路的中北段。

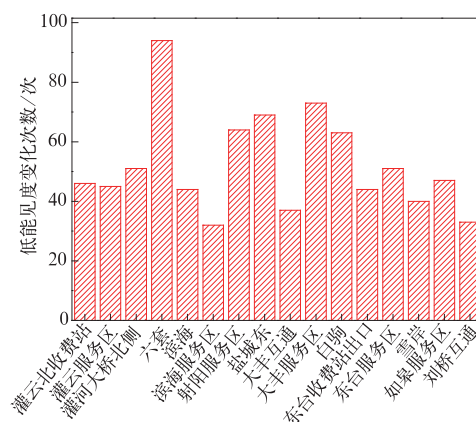


图3 江苏沿海高速公路2012年6月至2014年6月期间各站点低能见度变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of low visibility at various monitoring stations along the Jiangsu Coast Expressway from June 2012 to June 2014

3 江苏沿海高速公路低能见度成因与气象条件

高速公路上能见度的变化,直接影响行车安全。因此很有必要进一步观察高速公路上主要气象要素的变化,揭示低能见度的成因并推断出不同级别的能见度变化趋势,以采取对应的交通管制对策。通过对江苏省沿海高速2012年6月至2014年6月期间历史资料进行质量控制后,满足条件的样本有150366个。分析发现在能见度低于0.5 km后,在一定的气象条件下,继续减小到0.05~0.2 km的频率达到了0.05以上(图4a)。其中,0.1 km左右的能见度,发生的频率最大,达到了交通气象临近发布指标(能见度<0.2 km)。从图4b可以看出,低能见度雾发生时温度主要在一3~28℃,其中0~4℃雾发生的频率最大,表明大多数雾都是以水汽凝结,辐射降温引起的暖雾(丁秋冀等,2013);当温度大于30℃时雾出现频率接近于0,主要是因为温度过高,空气中水汽压偏小,相对湿度较低,无法满足成雾的气象条件。图4c为相对湿度的频率分布图,从图中可以看出相对湿度变化跳跃性不大,在能见度低于0.5 km时,相对湿度均大于95%,这是由于

本次研究过程中选取的能见度都是低于 0.5 km 的,不存在霾天气,97%左右的相对湿度发生频率最大。

图 4d 为基于高速公路自动站逐分钟风速资料计算得到的风速频率图。由图可见,能见度低于 0.5 km 的雾天气主要是发生在风速低于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,其中风速在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内时发生频率达到了 0.7 以上,大部分发生在风速为 $0.5\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下。对于辐射雾而言,一定强度的风速产生的湍流混合作用,既能使冷却作用扩展到适当的

气层中,又不影响下层空气的充分冷却和水汽的存留,有利于的雾的形成和维持;对于平流雾来说,一定强度的风速可以源源不断地输送暖湿空气,而且产生的湍流作用可以使雾达到一定的厚度(黄彬等, 2014)。风向分布来看(图 4e),沿海高速公路低能见度浓雾多发生在风向处于 ENE—SSE,即当风向为偏东风和东南风时,浓雾发生的频率最大,主要原因为该风向条件下黄海和东海上的水汽易于输送到内陆,为雾的形成提供了水汽条件。

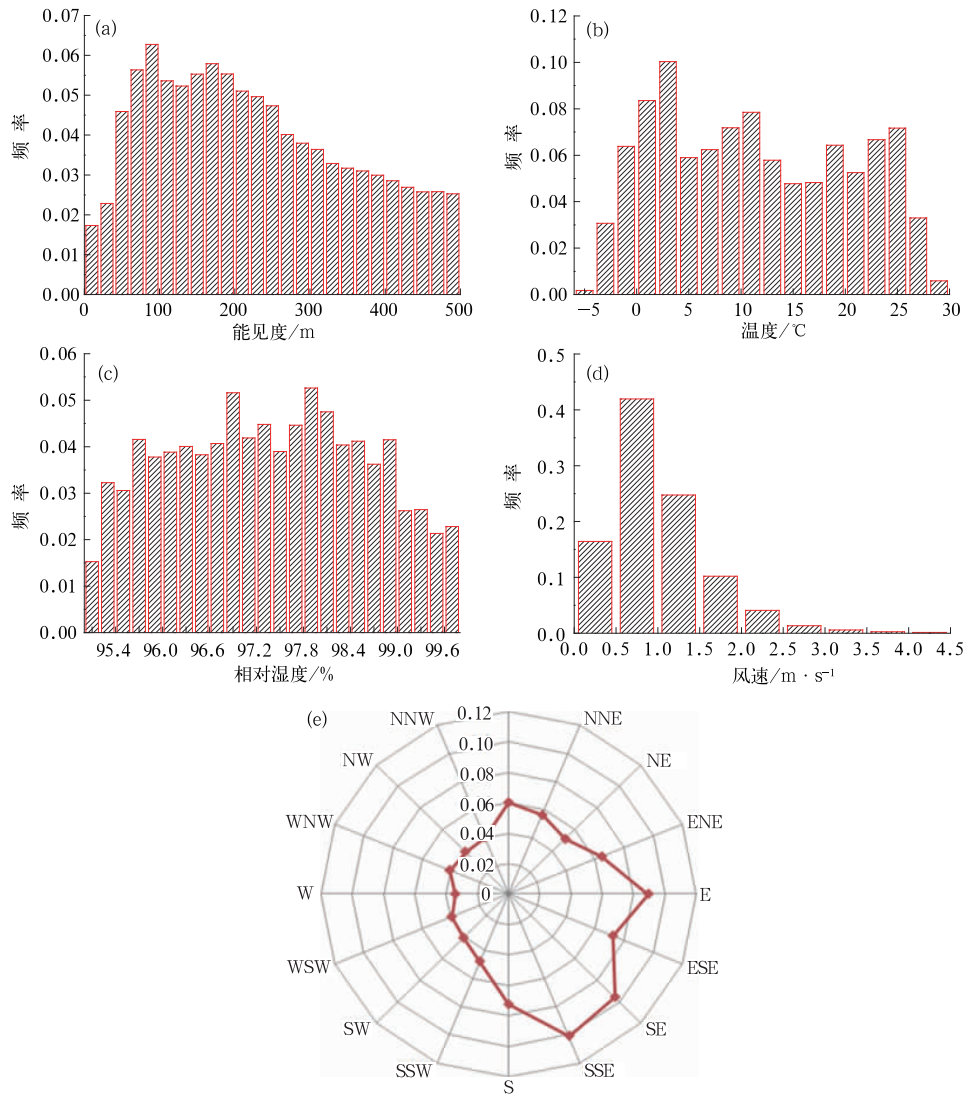


图 4 2012 年 6 月至 2014 年 6 月期间江苏沿海高速公路主要气象要素的频率分布

(a)能见度, (b)温度, (c)相对湿度, (d)水平风速, (e)风向

Fig. 4 Probability distribution of major meteorological elements on the Jiangsu Coast Expressway from June 2012 to June 2014

(a) visibility, (b) temperature, (c) relative humidity, (d) surface wind speed, (e) wind direction

综上所述可知,沿海高速公路能见度低于0.5 km时,在发布交通气象预警预报后,如果相对湿度继续增大到97%左右、温度在 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 、风速变化在 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、风向在ENE—SSE,能见度就很有可能继续下降到0.2 km以下,需要做好提前发布交通气象临近预报的准备。

4 江苏沿海高速公路能见度预警指标:“象鼻型”先期振荡的特征

袁成松等(2007)认为,低能见度浓雾形成前通常会出现“象鼻型”的先期振荡,主要指浓雾主体出现前能见度存在大幅先期振荡前兆,如果能能见度迅速下降到0.3 km以下,维持10 min左右后迅速回升,在能见度变化图谱中形成类似于“象鼻”形状的振荡形态。它具有突发性强和持续时间短的特征,能见度值不是很低,是浓雾形成的前奏。统计分析沿海高速公路逐分钟能见度资料,发现这种“象鼻型”的先期振荡形态普遍存在,对交通气象发布临近预报服务有很大的参考价值。本文以2013年12月4日江苏省所出现的大面积浓雾天气中,以沿海高

速公路如皋站的能见度变化为例进行说明“象鼻型”先兆在预报业务中的实际应用。

图5为2013年12月4日沿海高速公路如皋站能见度、温度和相对湿度的变化图谱。4日凌晨(图5)江苏大部分地区能见度低于0.2 km,局部地区能见度不足0.05 km。由图5a可知如皋站从01:00起能见度就低于2 km;在03:46—04:02时间段能见度低于1 km,最低时为0.603 km;04:03开始能见度又回升到1 km以上,随后就缓慢下降;04:35能见度突发性迅速下降,谷值为0.143 km,维持10 min后能见度又快速回升到0.5 km以上,完成了“象鼻型”先期振荡。该过程约有50 min能见度维持在 $0.5\sim 0.9\text{ km}$ 。05:25能见度快速下降,05:40—08:22能见度稳定维持在0.1 km以下;08:49能见度快速上升到0.2 km以上,交通气象临近预报解除。

配合12月4日温度和相对湿度变化图谱来看(图5b),雾体形成前相对湿度在93%以上,相对湿度随着能见度的下降呈缓慢上升,在雾体成熟阶段维持在97%左右;在09:00左右相对湿度随着能见度的上升迅速下降。相对湿度与能见度和温度呈明

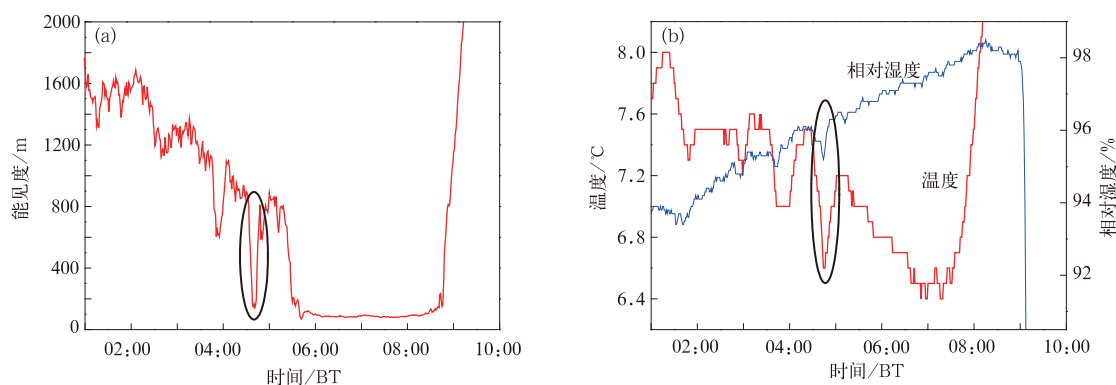


图5 2013年12月4日江苏沿海高速公路如皋站气象要素随时间的变化

(a)能见度, (b)温度和相对湿度

Fig. 5 Meteorological elements collected from Rugao Station on Jiangsu Coast Expressway on 4 December 2013

(a) visibility, (b) temperature and relative humidity

显的反相关变化(王博妮等,2014),温度的下降也说明了辐射降温有利于雾的形成。在能见度发生“象鼻型”先期振荡时,温度和相对湿度都有不同程度的下降,并在短暂的下降后又迅速回升,与能见度的“象鼻型”变化情况相当吻合。其主要原因为:浓雾

形成前,温度迅速下降,在水汽凝结形成雾滴的过程中,辐射降温和潜热释放同时存在;当水汽凝结过程达到一定强度时,能见度就会下降很低,当潜热释放大于辐射降温时,温度呈现起伏上升态势,而温度回升又使得近地层空气从饱和变得不饱和态,进而能

能见度上升,之后紧接着温度再下降,雾逐渐增浓(袁成松等,2007;濮梅娟等,2013)。由于有利于成雾的稳定气象条件没有改变,辐射降温过程仍然存在,把先期振荡产生的升温效应“抵消”后,低能见度浓雾才稳定的形成并维持。

“象鼻型”先期振荡不仅在大面积浓雾预报中有很好的应用,而且对区域性浓雾的判断也有很好的警示作用。在交通气象预报中,当预报员看到有利于成雾的天气形势时,可根据能见度的“象鼻型”先期振荡监测特征,及时发布交通气象预警和临近预报服务,可大幅提高交通气象服务的时效性。

5 影响沿海高速公路浓雾过程的环流特征

低能见度浓雾总是发生在一定的天气形势下,通过对江苏沿海高速公路150366个浓雾样本个例的环流背景进行分析,发现影响沿海高速公路低能见度浓雾天气的低层环流形势有高压后部、均压场、弱高压、锋前和锋面附近、低压倒槽或低压右上方等。沿海高速公路地理位置的特殊性很容易导致局部路段(中北路段、南部路段)和大面积全路段出现低能见度天气。根据以往沿海高速公路雾天气的环流背景分析,归纳和分析出不同路段浓雾形成的环流背景场特征,可初步实现将现有的大范围区域预报逐渐向路网预报和精细化预报的转变。

5.1 锋前雾引起沿海高速公路中北部路段低能见度天气的环流背景

影响中北部路段的地面气压场大部分是锋前型浓雾,主要是发生在冷锋还没有侵入到地面的暖区内,或者是弱冷空气渗透到前期有暖平流控制的区域。当从河套到华北地区有冷锋南下时,冷空气会先期渗透到淮北地区,锋面带来的冷平流使得沿海高速公路中北部路段受冷锋前部冷空气扩散效应引起冷却降温,同时中低层有暖性系统配合,大气层结稳定,进而形成浓雾(吴彬贵等,2010)。以2012年10月20—21日江苏中北部低能见度过程为例。成雾前期10月20日20:00,500 hPa江苏省有短波槽过境,徐州地区此前刚下过雨,夜里转受西北风控制,其他地区处在西南偏西气流中,850 hPa上江苏

南部有暖脊存在,有利于形成稳定的大气层结,地面图上江苏处在弱低压控制内,冷锋在河套西南部。10月21日08:00高空短波槽东移南压到沿江苏南地区,沿江以北地区受西北气流控制,天气转晴辐射降温明显;地面等压线稀疏,天气静稳,地面风小湿度高(图6a)非常有利于中北部路段浓雾形成,沿江和苏南地区受偏西气流影响,云系较多,仍以阴天为主,因此受到浓雾影响的路段只有中北部。图6b为10月21日04:00江苏省的能见度分布,可以看出沿淮和淮北地区能见度低于0.2 km,局部地区能见度不足0.05 km,其他地区能见度为1.5~2.0 km。

从徐州站10月20日20:00至21日08:00的温度层结分析(图6c),20日20:00地面到0.1 km左右有一段高度明显的逆温,近地层温度层结也很稳定,这为徐州乃至淮北地区后期雾的形成和发展起到一定作用。入夜后随着辐射和平流降温效应,淮北地区雾开始增浓,能见度逐步下降,在01:00左右时部分站点能见度不足0.05 km。21日08:00从地面到925 hPa高度上都存在逆温,和前一时次相比,逆温层厚度有所增高,但强度没有增强,究其原因是在21日08:00左右,太阳辐射增强,逆温强度被削弱,能见度逐渐转好。根据露点温度变化曲线来看,在20日20:00之后随着能见度的降低,温度下降,露点温度差减小,在21日08:00 925 hPa以下,空气趋于饱和,露点温度差稳定维持在1℃左右,日出后气温升高,露点温度差增大,能见度上升。由此可见,此类环流形式下,逆温层的存在和近地层温度下降给雾的形成提供有利条件。从沿海高速公路北部部分站点的能见度变化图谱可以看出(图6d),从00:00开始能见度就迅速下降到0.5 km以下,到06:00左右开始能见度逐渐上升到0.5 km以上,其中能见度低于0.2 km的时段稳定持续约4 h,为此,沿海高速公路指挥调度中心在低能见度阶段实行灾害防御应急措施二级管制,车辆限速 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,并严格限制进入高速公路的车辆。一般来说,锋前雾突发性强,生成区域和时间较难预测,但对沿海高速公路上个例进行统计后发现,此类环流背景下受雾影响的路段多发生在沿海高速公路中北部,即灌云收费站至滨海站,该段周边水体较多,水汽条件得以保证,在风速较小和层结稳定条件下,非常有利于雾的生成。

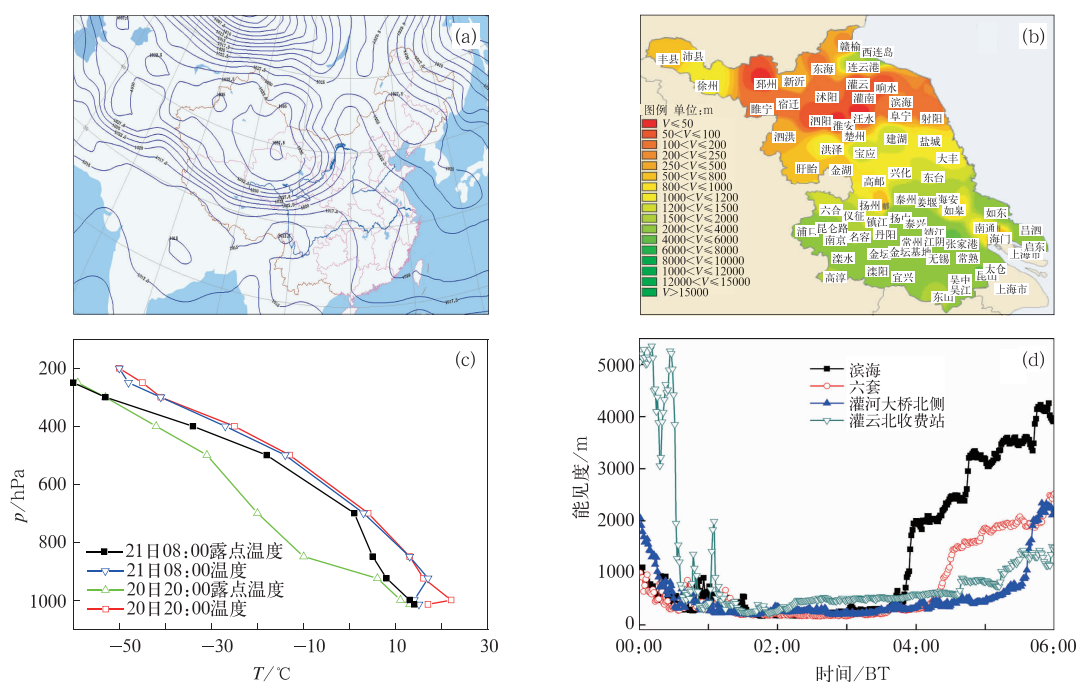


图 6 2012 年 10 月 21 日 08:00 地面气压场(a)和 04:00 江苏省能见度分布(b),
20 日 20:00 和 21 日 08:00 徐州站层结曲线(c),以及 21 日
00:00—06:00 北段部分站点能见度变化(d)

Fig. 6 The sea level pressure at 08:00 BT 21 October 2012 (a), visibility distribution in Jiangsu at 04:00 BT (b), temperature stratification curve at Xuzhou Station at 20:00 BT 20 and 08:00 BT 21 October 2012 (c), and visibility variation at the northern part of Jiangsu Coast Expressway from 00:00 to 06:00 BT 21 October 2012 (d)

5.2 辐射雾引起沿海高速公路大面积路段低能见度天气的环流背景

江苏省由辐射降温引发的大面积低能见度天气的环流特征是成雾前期高空有低槽过境,成雾时转受槽后强偏北气流控制,受冷平流影响,徐州、射阳和南京三个探空站的 ΔT_{24} 变温值均为负值,地面受南下高压或弱高压环流控制。以 2013 年 1 月 14 日江苏省大面浓雾过程为例,14 日 08:00,500 hPa 高度场上,江苏受西北气流控制,有利于夜间辐射降温 and 下沉增温;925 hPa 江苏处在反气旋环流东部,有暖温度脊配合,这种上下层的配置,有利于出现大面积的浓雾天气(图略)。地面图(图 7a)上江苏地区受单一冷性高压控制,多日无明显冷空气的补充,高压位置少动、等压线稀疏、地面基本呈静小风状态,此外在高压控制下,有利于夜间地表辐射降温,为雾的形成提供触发机制。从 14 日 08:00 全省能见度分布可以看出,江苏大部分地区被浓雾笼罩,徐州、

盐城、宿迁、淮安、扬州、泰州、南京以及南通等部分地区能见度不足 0.05 km,其中徐州能见度最低仅为 0.01 km(图 7b)。

图 7c 为射阳站探空曲线图,可以看出 14 日早晨中低空受一致的西北风场控制,晴空辐射降温 and 冷平流作用促使雾增强。950 hPa 有露点锋区存在,水汽被聚集在低层,下沉气流也在该区域附近形成逆温层,像干暖盖一样阻止上下层动量和水汽的垂直交换,使得大气层结更加稳定,此外低层较小的风速形成微弱的扰动使水汽饱和 and 逆温层扩展到一定的高度,在低层形成强度很大的浓雾(于庚康等, 2015)。选取沿海高速公路空间具有代表性的四个站点分析高速路上的能见度变化(图 7d),从图上可以看出能见度低于 0.1 km 的持续时间长达 8 h,直到 12:00 左右浓雾自江苏东南西北向减弱,能见度逐渐上升。此次低能见度天气具有范围大,持续时间长的特点,对高速公路、航空,水运的影响严重,沿海高速公路被迫封闭了 10 h。

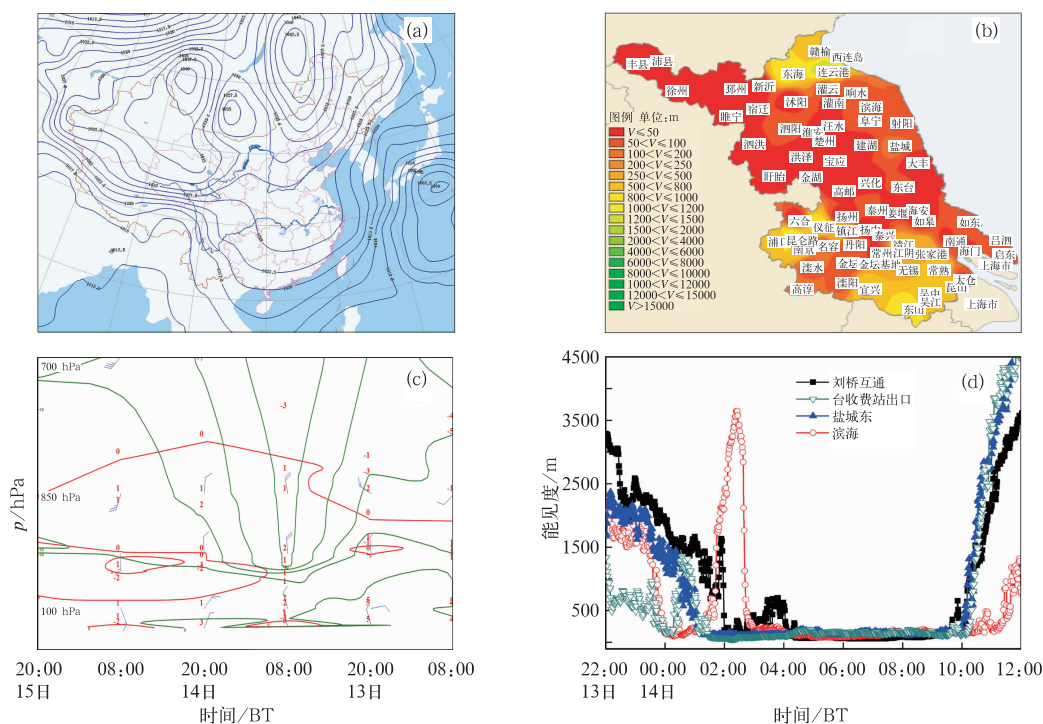


图 7 2013 年 1 月 14 日 08:00 江苏省地面气压场(a)和能见度分布(b),13 日 08:00 至 15 日 20:00 射阳站探空资料时间剖面图(红色: 温度,绿色: 露点温度)(c), 13 日 22:00 至 14 日 12:00 江苏省部分站点能见度变化(d)

Fig. 7 The sea level pressure (a) and visibility distribution (b) in Jiangsu at 08:00 on 14 January 2013, time cross section profile of sounding data at Sheyang Station from 08:00 BT 13 January to 20:00 on 15 January 2013 (red line: temperature, green line: dew point) (c) and visibility variation at some stations along the Jiangsu Coast Expressway from 22:00 BT 13 to 12:00 BT 14 January 2013 (d)

5.3 平流雾引起沿海高速公路低能见度天气的环境背景

影响江苏沿海高速公路的平流雾多数发生在春季,对样本中平流雾的地面实况形势归纳主要发生在入海高压后部、低压右上方,东伸低压倒槽前部等,其中最常见的是低压倒槽和入海高压后部。江苏处在低压倒槽前部,地面偏东风和东南风增大,有利于将海上的暖湿气流输送到冷的下垫面。平流雾具有突发性强、范围广、持续时间长等特征,对高速公路的影响甚是严重(王博妮等,2015)。以 2013 年 3 月 19 日平流雾为例,大雾发生前期(3 月 18 日 20:00),高空受纬向环流影响,不利于冷空气大规模南下,中低层受暖湿系统控制,大气层结稳定;地面图上江苏处在入海小高压的西侧,吹偏东风,风速在 $4\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,有利于暖湿平流输送(图略)。随后,位于西南地区的倒槽东移北抬并加强为低压,江苏

处在低压倒槽东侧,地面转为风速为 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 东南风,极有利暖湿气流经过江苏冷的下垫面,发生平流雾。3 月 19 日 08:00 北方有冷空气南下,冷空气前锋到达河套北部,弱冷空气的渗透使得雾区由东南部西扩到淮安,徐州等地区(图 8a)。在本次平流雾过程中,由于部分地区雾层较厚,整层湿度大,雾上层的空气团被抬升为低云,覆盖在雾区上层,所以从地面实况显示,江苏大部分地区天气以多云到阴为主。根据射阳站探空曲线分析(图 8c),19 日 08:00 随着高空槽东移和地面倒槽的东伸北抬,850 hPa 以下转为西南偏南气流,并有露点锋区存在,为雾的形成提供较高的暖湿环境,逆温强度较前一时次有所增强,一定强度逆温层的存在使得大气层结稳定,低层的气流不易向上发展和输送,为低能见度的形成提供有利条件。19 日 14:00,随着地面升温,近地层上升运动加强,逆温层减弱,能见度上升。但是受高空槽和低空弱切变的影响,江苏仍以

阴天为主,其中沿江苏南地区出现阵雨天气。

图8b为2013年3月19日07:00江苏省能见度变化图,从图中可以看出低能见度区域分布在江淮之间,沿海高速公路南部部分路段受到影响,其中如皋服务区和雪岸站的能见度低于0.2 km

(图8d)。综合多次平流雾过程,如果地面处于入海高压后部,低压右上方或东伸低压倒槽前部等,致使地面吹偏东风或东南风,即使天空云系较多,也要考虑到平流雾的产生。

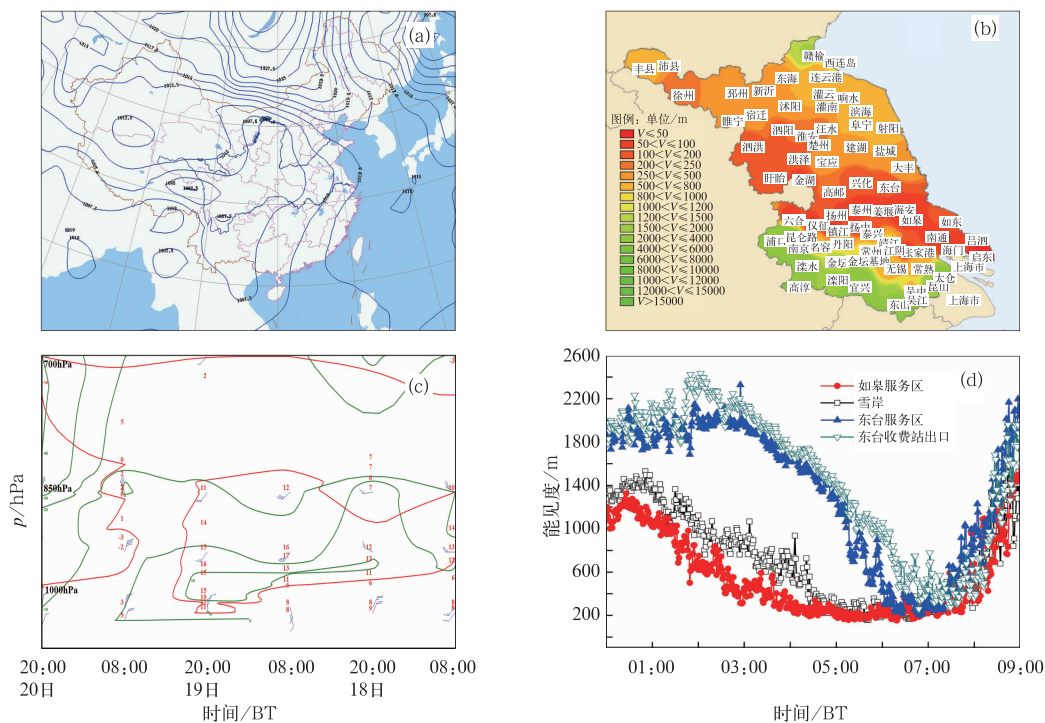


图8 2013年3月19日08:00江苏省地面气压场(a)和07:00能见度变化(b),18日08:00至20日20:00射阳站探空资料时间剖面图(红色:温度,绿色:露点温度)(c),19日00:00—09:00江苏省南段部分站点能见度变化(d)

Fig. 8 The sea level pressure at 08:00 BT 19 March 2013 (a), visibility distribution in Jiangsu at 07:00 BT 19 March 2013 (b), time cross section profile of sounding data at Sheyang Station from 08:00 BT 18 to 20:00 BT 20 March 2013 (red line: temperature; green line: dew point) (c) and visibility variation at some stations located in the southern part of the expressway from 00:00 to 09:00 BT 19 March 2013 (d)

6 结 论

对江苏沿海高速公路2012年6月至2014年6月期间低能见度天气过程进行统计分析,分析探讨了沿海高速公路的气候特征、低能见度发生时的气象条件、能见度“象鼻型”先期震荡的应用以及成雾时主要的环流特征等方面进行了分析,研究表明:

(1) 江苏省沿海高速公路低能见度浓雾次数具有明显的日变化、月变化和季节变化。低能见度大部分时段出现在夜间至早晨,其中在03:00—05:00达到了生成高峰,在06:00—08:00达到了消散峰值

段。在3—4和6月出现的次数最高,春季和冬季多于夏季和秋季,这与内陆低能见度天气多出现在秋冬季不同。此外,对沿海高速公路各个站点的低能见度次数进行统计发现,中北段低能见度发生次数高于南部路段,其中六套站低能见度发生次数最高。

(2) 通过对150366个样本中主要气象要素变化频率进行统计发现,能见度低于0.5 km时,如果相对湿度继续增大到97%左右、温度在0~4℃、风速变化在0~2 m·s⁻¹、风向在ENE—SSE,能见度就很有可能继续下降到0.2 km以下,需要提前做好发布交通气象临近预报的准备。

(3) 能见度的“象鼻型”先期震荡在沿海高速公

路得到了很好的验证和应用,稳定的低能见度在形成前可能存在先期振荡情况,并与温度和相对湿度也有很好的对应关系,是能见度低于0.2 km形成的前兆。预报员可根据能见度这一形态变化,提前做好发布交通气象临近预报,提高预报的时效性。

(4) 造成江苏沿海高速公路中北段低能见度浓雾天气的环流形势主要与地面冷锋相联系,配合中低层暖区。而全路段大面积低能见度浓雾天气主要由辐射雾和平流雾造成,其中辐射雾地面有弱高压或南下高压控制,高空有偏北气流配合,辐射降温明显。平流雾的地面形势主要受入海高压后部和东伸低压倒槽影响,中低层配合有暖性系统。大面积雾具有范围广、持续时间长的特点,对高速公路的具有重要影响。

参考文献

- 包云轩,丁秋冀,袁成松,等. 2013. 沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟实验. 大气科学, 37(1): 124-136.
- 丁秋冀,包云轩,袁成松,等. 2013. 沪宁高速公路团雾发生规律及局地性分析. 气象科学, 33(6): 634-642.
- 冯民学,袁成松,卞光辉,等. 2003. 沪宁高速公路无锡段春季浓雾的实时监测和若干特征. 气象科学, 23(4): 435-445.
- 侯伟芬,王家宏. 2004. 浙江沿海海雾发生规律和成因浅析. 东海海洋, 22(2): 9-12.
- 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. 气象, 40(11): 1324-1337.
- 贾晓刚,焦圣明. 2006. 沪宁高速公路低能见度监测预警系统的研究. 中国交通信息业, 6: 69-71.
- 刘梅,严文莲,张备,等. 2014. 2013年1月江苏雾霾天气持续和增强机制分析. 气象, 40(7): 835-843.
- 马翠平,吴彬贵,李江波,等. 2014. 一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析. 气象, 40(6): 715-722.
- 濮梅娟,尚倩,李子龙,等. 2013. 一次浓雾宏观结构特征及快速消散的原因分析. 高原气象, 32(3): 770-777.
- 孙彧,马振峰,牛涛,等. 2013. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征. 气候与环境研究, 18(3): 397-406.
- 王博妮,于庚康,袁成松,等. 2014. 2009年初冬沪宁高速公路大雾过程成因分析. 气象科技, 42(3): 503-510.
- 王博妮,袁成松,陈鹏,等. 2015. 2013年初春一次平流雾过程对江苏交通的影响分析. 气象与环境科学, 38(1): 46-53.
- 魏建苏,朱伟军,严文莲,等. 2010. 江苏沿海地区雾的气候特征及相关影响因素. 大气科学学报, 33(6): 680-687.
- 吴彬贵,解以扬,吴丹朱,等. 2010. 京津唐高速公路秋冬雾气象要素与环流特征. 气象, 36(6): 21-28.
- 严明良,缪启龙,袁成松,等. 2011. 沪宁高速公路一次大雾过程的数值模拟及诊断分析. 高原气象, 30(2): 428-436.
- 严文莲,刘端阳,孙燕,等. 2014. 秸秆焚烧导致的江苏持续雾霾天气过程分析. 气候与环境研究, 19(2): 237-247.
- 于庚康,王博妮,陈鹏,等. 2015. 2013年初江苏连续性雾-霾天气的特征分析. 气象, 41(5): 622-629.
- 袁成松,卞光辉,冯民学,等. 2003. 高速公路上低能见度的监测与预报. 气象, 29(11): 36-40.
- 袁成松,梁敬东,焦圣明,等. 2007. 低能见度浓雾监测、临近预报的实例分析与认识. 气象科学, 27(6): 661-665.
- 赵玉广,李江波,李青春. 2015. 华北平原3次持续性大雾过程的特征及成因分析. 气象, 41(4): 427-437.
- 周福,钱燕珍,金靓,等. 2015. 宁波海雾特征和预报着眼点. 气象, 41(4): 438-446.
- 周贺玲,李丽平,乐章燕,等. 2011. 河北省雾的气候特征及趋势研究. 气象, 37(4): 462-467.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. Pure Appl Geophys, 164(6/7): 1121-1159.
- Lewis J M, Koracin D, Redmond K T. 2004. Sea fog research in the United Kingdom and United States. A historical essay including outlook. Bull Amer Meteor Soc, 85(3): 395-408.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview. Adv Atmos Sci, 27(3): 639-661.