

梁卫, 吴俊杰, 邹海波, 2021. 南昌昌北机场雾的分类特征与统计分析[J]. 气象, 47(10):1255-1265. Liang W, Wu J J, Zou H B, 2021. Classification characteristics and statistical analysis of fogs at Nanchang Changbei Airport[J]. Meteor Mon, 47(10):1255-1265(in Chinese).

南昌昌北机场雾的分类特征与统计分析^{*}

梁 卫¹ 吴俊杰² 邹海波³

1 中国民用航空华东地区空中交通管理局江西分局气象台, 南昌 330114

2 中国民用航空飞行学院, 四川广汉 618307

3 江西省气象科学研究所, 南昌 330046

提 要: 利用南昌昌北机场人工和自动观测数据、中国气象局提供的常规地面观测和探空资料以及中国环境监测总站提供的南昌市 9 个站的逐小时空气质量指数(AQI)数据, 对 2013 年 9 月至 2017 年 9 月南昌昌北机场的 76 次雾过程进行分类统计, 结果表明: 昌北机场的雾主要出现在 11—5 月, 多生成于 04—10 时, 消散于 06—14 时, 持续时间多在 4 h 以内, 以雨雾居多, 其次是辐射雾, 再次是平流辐射雾, 而平流雾最少。昌北机场的雾与空气质量密切相关, 雾生成前 AQI 大都有上升趋势, 多数为 54~100, 雨雾时 AQI 最大, 常有轻度到重度污染。雨雾多发于秋、冬、春季的低空暖湿切变线与地面倒槽之间, 多在连续小雨或毛毛雨后出现, 生成前地面能见度长时间维持低位, 生成后波动不大, 能见度多为 600~800 m。辐射雾多发于深秋至次年初春的弱高压中, 常在雨后云层打开后的早间生成, 日出后逐渐消散, 逆温层底越高持续时间越长; 雾生成前地面湿度递增, 生成后能见度多在 200~600 m。平流辐射雾多发于早冬和春季的入海高压后部弱暖平流中, 生成前地面湿度突增, 生成后能见度多在 200~700 m。平流雾多发于春、夏季低空切变线以南地面鞍型场中, 常在切变线北抬、雨停后出现, 能见度多在 400~600 m。

关键词: 雾, 分类特征, 气象要素, AQI, 环流形势

中图分类号: P426, V355

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.10.008

Classification Characteristics and Statistical Analysis of Fogs at Nanchang Changbei Airport

LIANG Wei¹ WU Junjie² ZOU Haibo³

1 Meteorological Observatory, Jiangxi Air Traffic Management Bureau, Nanchang 330114

2 Civil Aviation Flight University of China, Sichuan, Guanghan 618307

3 Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330046

Abstract: Based on the artificial and automatic observed data at Nanchang Changbei Airport, the conventional surface observations and sounding data provided by China Meteorological Administration, and the hourly air quality index (AQI) data of 9 stations in Nanchang from China National Environmental Monitoring Centre, 76 fog events from September 2013 to September 2017 at Changbei Airport are classified and statistically analyzed. The results show that the fogs of Changbei Airport mainly occur in November to May, they mostly form in the period 04:00—10:00 BT, and dissipate in 06:00—14:00 BT, mostly lasting less than 4 hours. Rain fog occurs most, followed by radiation fog and advection-radiation fog, and advection fog appears the least. The fogs of Changbei Airport are closely related to the air quality. The AQI

^{*} 民航运行安全院士专家工作站建设项目(0252104)、民航空管科技项目(0121702)和江西省重点研发计划项目(20171BBG70004)共同资助

2020 年 1 月 22 日收稿; 2021 年 8 月 13 日收修定稿

第一作者: 梁卫, 主要从事航空气象预报研究. E-mail: 332308254@qq.com

通讯作者: 吴俊杰, 主要从事航空气象研究. E-mail: sysu_126@126.com

often has an upward trend before fog occurs, with the value ranging within 54–100. The AQI in rain fogs is the largest, often accompanied by mild to severe pollution. Rain fogs mainly occur between the low-level warm and wet shear lines and the inverted trough on surface in autumn, winter and spring. They often form after continuous light rain or drizzle. The visibility maintains at a low level, mostly 600–800 m, for a long time before the fogs are formed, and keeps stable. Radiation fogs usually occur in the weak high pressure from late autumn to early spring of the next year. They often form in the morning after rain stops and the sky clears, and gradually dissipates after sunrise. They last longer if the bottom of inversion layer is higher. Radiation fogs form after the gradual increase of humidity, and the visibility is mostly 200–600 m. Advection-radiation fogs mainly occur in the weak warm advection behind the high pressure moving east to the sea in early winter and spring. They form generally after the rapid increase of humidity, and the visibility is mostly 200–700 m. Advection fogs usually occur in the surface saddle pressure field south of the low-level shear line in spring and summer. They are generated after the end of rain induced by a north lift of the shear line, and the visibility is mostly 400–600 m.

Key words: fog, classification characteristic, meteorological element, air quality index (AQI), atmospheric circulation

引 言

天气原因是引起航班延误的重要因素,据中国民用航空局 2016 年和 2017 年的统计分析,中国因天气因素导致的航班不正常率高居首位,分别为 56.52% 和 51.28%,在影响飞行的天气现象中,秋、冬季的低能见度天气是导致航班延误的主要原因之一。而据美国交通部交通统计局的统计结果,2004–2014 年,65%~75% 的航班延误或取消与天气有直接关系,其中 31% 是由低云造成的低能见度,其次是雷雨造成的(占 24%);而在低能见度天气中雾最为常见。对于航空业而言,雾天会造成运输成本的显著增加,Valdez(2000)通过大量计算分析总结发现,如果能提前 30 min 预报雾,相应的航班延误量能减少 20%~35%,美国每年能因此减少 5 亿~8.75 亿美金的经济损失。

雾通常是局地或者区域范围出现的天气现象,不同地区出现的不同类型的雾,其消机制都不相同,天气要素等也表现出不同的变化特征。在雾的分类诊断研究方面,Willett(1928)从雾的形成机理和表现特征方面将雾分为气块雾和锋面雾,其中气块雾又分为平流雾、辐射雾和海雾。Middleton(1941)认为非饱和空气主要通过三种方式(水汽蒸发、冷却以及空气团混合)达到饱和而形成雾,其中水汽蒸发形成的雾有雨雾、锋面雾和蒸汽雾,冷却作用形成的雾有上坡雾、辐射雾、平流雾等,空气团混

合雾主要是由空气水平混合所造成,此类雾较少出现。之后国内外相关研究大都在上述两种分类方法上进行扩展,主要集中在辐射雾、平流雾、平流辐射雾和锋面雾(包括雨雾)(向波等,2003;Tardif and Rasmussen,2007;严文莲等,2010;沈澄等,2013;袁炯和陈志豪,2013;许爱华等,2016;田小毅等,2018;朱承瑛等,2018;宗晨等,2019)。在雾的影响因子研究方面,学者们普遍认为地面风、相对湿度、气温、气压等常规气象要素对雾的形成和维持有重要影响(李秀连等,2008;谢清霞等,2016;鲁燕等,2016;胡伯彦等,2017)。也有学者(闫敬华和徐建平,2001;康志明等,2005;沈澄等,2013;Zhang et al,2014;曾婷等,2017;严文莲等,2018;崔驰潇等,2018;张涛等,2019;周述学等,2020)从环流异常、物理量参数、边界层结构、前期降水情况等入手,分析它们与雾的关系。近年来,有学者(黄玉仁等,2000;吴兑等,2008;田心如等,2012;2014)认为气象因素不能完全解释雾的变化特征,生态环境特别是大气成分(各种颗粒物)对雾的形成和维持有重大影响,但是他们的研究多集中于气候上的显现,对具体雾的形成过程中气溶胶的演变特征研究较少。

我国雾的研究具有明显的地域特点,主要针对北方和西南地区的辐射雾、沿海的海雾以及华南的污染雾展开。关于江西省雾的研究相对较少,李玉芳等(1999)指出江西的雾大部分是冷却雾(辐射雾、平流雾和平流辐射雾),许彬等(2001)分析了这三种

雾的形成和落区存在明显差异,与它们相关最好的气象要素是地面风速、云量以及浅层湿度条件。杨华等(2015)统计了 53 年的江西省雾日数分布指出,雾日数的空间分布与江西地形地貌密切相关,出现最多的季节为冬季,其次为春季和秋季。许爱华等(2016)分析了江西省区域性平流雾的天气形势和气象要素,给出了平流雾逆温层、温湿条件、低层风场及影响系统的统计特征和判识指标及概念模型。上述研究主要关注省内大范围的雾,且以个例研究为主,缺乏对不同类型雾的对比探讨,同时还缺乏对雾及其影响因子(特别是污染物浓度)的定量统计分析。

2017 年,南昌昌北机场年旅客吞吐量突破 1000 万人次,是江西省联动各地的重要交通枢纽。昌北机场位于南昌市区以北,东面紧邻鄱阳湖水系,西面有梅岭国家森林公园和九岭山脉(图 1),水汽丰沛,出现雾的频率较大,近年来,昌北机场航班量激增,雾对飞行的影响也显著加剧,一定时间的雾过程会造成大量航班积压,等能见度好转至起降标准以上后,航班密度空前增大,给飞行、空中交通管制以及机场地面服务等都会带来极大的压力与挑战。因此,做好雾的预警预报工作具有十分重要的现实意义。本文旨在一定程度上弥补以往工作的一些不足,将雾进行分类和对比统计分析,找出昌北机场各类雾的表现特征,寻求相应的预报思路和预报着眼

点,以期今后的雾预报积累一定的参考资料。

1 资料与方法

1.1 资料简介

目前,国家基本气象站取消了能见度的人工观测,以自动观测仪测定代替人工观测,探测环境及仪器观测原理的变化等对观测结果影响较大,而机场的主导能见度观测采用人工观测方式,该数据被航空公司作为飞机能否放行的主要依据,同时人工观测的项目还包括云况和天气现象。昌北机场自 2013 年 9 月 1 日开始采用人工观测结合民航气象自动观测系统(AWDS)进行 24 h 有人值守的观测,根据相关规定,逐小时发布例行天气报告(包括地面风、主导能见度、天气现象、云、气温、露点温度、修正海平面气压等要素),当两次例行观测之间各气象要素中的一种或几种达到规定标准时,增加特殊天气报告的发布,同时还需在观测簿纪要栏中实时记录主导能见度、天气现象和云况等的演变情况。本文使用昌北机场 2013 年 9 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日发布的例行和特殊天气报告数据、纪要栏记录数据,中国气象局提供的常规地面观测资料及探空资料,以及 2014 年 5 月 13 日至 2017 年 9 月 30 日中国环境监测总站提供的南昌市 9 个站的逐时空气质量指数(AQI)数据;全文均为北京时,同时将 9 个站的 AQI 数据做平均,定义为南昌市的 AQI。

1.2 雾的分类

本文根据日常分类方法,参考 Tardif and Rasmussen(2007)、许爱华等(2016)的研究结果,将南昌市昌北机场 24 h 内出现能见度低于 1 km(其中间断不超过 12 h)的雾记录为一次雾过程。由降水造成的雾,定义为雨雾;高空图上 925 hPa 有暖平流(偏南风 and 等温线有夹角),且地面观测图上显示前 12 h 内为阴天(总云量在 7 成以上),除去雨雾过程,定义为平流雾;高空图上 925 hPa 和 850 hPa 均无明显暖平流,且前 12 h 内地面观测晴天、阴晴相间或非满天云天气,定义为辐射雾;高空图上 925 hPa 有暖平流,且前 12 h 内地面观测晴天、阴晴相间或非满天云天气,定义为平流辐射雾。

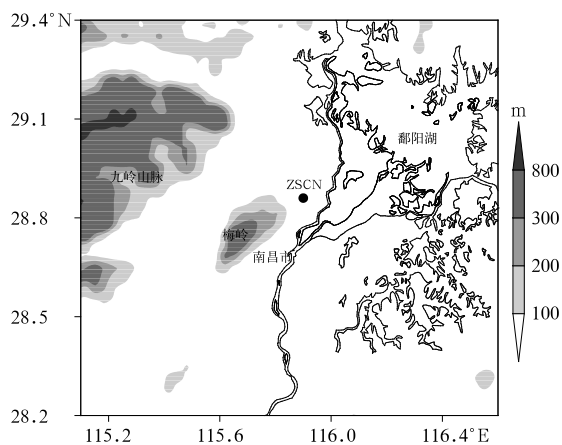


图 1 南昌昌北机场地理位置示意图
(ZSCN: 昌北机场, 阴影: 山区海拔高度, 线条区域: 水系)

Fig. 1 The geographical location of
Nanchang Changbei Airport

(ZSCN: Nanchang Changbei Airport,
shadow: altitude of mountains, line: river)

2 雾特征分析

2.1 年变化特征

通过分析统计得到了 76 次雾过程,主要出现在 11—5 月,3 月是峰值月(图 2)。其中雨雾出现最多,共有 35 次,在一年四季均有可能发生,这和雨雾受影响因素(静稳环流形势、下雨开始时间、雨滴大小、雨滴密度、污染物浓度等)极为复杂有一定关系,雨雾的发生主要集中在 10—11 月和 1—5 月,而夏季气温较高,此时的雨雾大多受短时的密集型大雨滴影响形成;辐射雾 24 次,只发生在秋、冬、春季,主要集中在 11—1 月和 3 月;平流辐射雾 14 次,发生在 11—1 月及 3—6 月;平流雾仅 3 次,发生在暖湿平流旺盛的春、夏季。

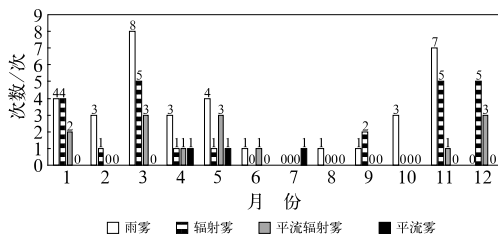


图 2 2013 年 9 月至 2017 年 9 月南昌昌北机场各月四类雾的频次分布
Fig. 2 Monthly frequency of four types of fogs at Nanchang Changbei Airport from September 2013 to September 2017

2.2 日变化特征

结合图 3、表 1 和表 2 可以看出,总体而言,雾开始时间大多发生在 04:00—10:00,集中在 06:00—14:00 消散,持续时间主要在 4 h 以内(占比为 69.7%),且开始时间越早,持续时间越长,特别是前一日夜间开始的雾,常于第二天 08:00 以后消散,大多数过程在 04:00—10:00 雾最浓。雨雾一天中任何时段均有可能发生,总体而言,主要在 06:00—09:30 生成,在 08:40—12:15 消散,持续时间最短为 5 min,最长为 10 h 14 min,大多在 4 h 以内(占比为 85.7%),其中又以 0~2 h 最多,而最浓时间集中在 06:00—10:00,大多数(22 次)雨雾过程最浓时间与开始时间相同,且过程能见度变化不大。辐射雾具有明显的日变化,主要在 04:00—08:00 生成,于

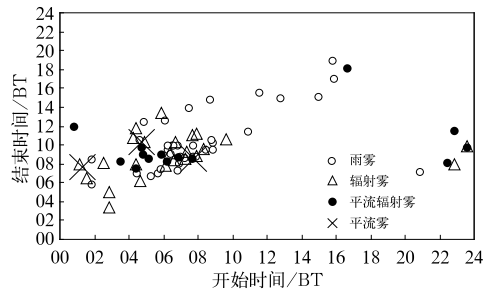


图 3 2013 年 9 月至 2017 年 9 月南昌昌北机场四类雾开始时间和结束时间散点图
Fig. 3 Scatter diagram of the occurrence and dissipation time for four types of fogs at Nanchang Changbei Airport from September 2013 to September 2017

表 1 2013 年 9 月至 2017 年 9 月南昌昌北机场四类雾持续时间(单位:次)
Table 1 The duration of four types of fogs at Nanchang Changbei Airport from September 2013 to September 2017 (unit: time)

持续时间/h	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	>10
雨雾	17	13	1	3	0	1
辐射雾	9	6	3	4	1	1
平流辐射雾	3	4	3	0	2	2
平流雾	1	0	1	1	0	0
合计	30	23	8	8	3	4

表 2 同表 1,但为最浓时间
Table 2 Same as Table 1, but for the densest time

最浓时间/BT	00—02	02—04	04—06	06—08	08—10	10—12	12—24
雨雾	0	1	5	14	8	1	6
辐射雾	3	2	7	8	3	1	0
平流辐射雾	0	1	3	7	1	0	2
平流雾	0	0	2	1	0	0	0
合计	3	4	17	30	12	2	8

08:00—10:30 消散,持续时间最短为 33 min,最长为 10 h 20 min,持续时间大多在 4 h 以内,多数过程在 04:00—08:00 雾最浓。平流辐射雾与辐射雾类似,日变化也十分明显,主要生成于 04:30—07:30,消散于 08:15—09:40,最浓时间集中在 06:00—08:00,持续时间最短为 19 min,最长为 12 h 37 min,持续时间以 6 h 以内居多,大于 8 h 的过程在四类雾中占比最大,对飞行影响较大。3 次平流雾均发生在 08:00 前,在 10:15 前结束,其中有 2 次过程持续在 5.5 h 以上,05:00 前后雾最浓。

2.3 能见度特征

统计发现,昌北机场能见度 <400 m(注:根据国际民航组织评估的跑道视程和能见度转换关系,昌北机场起飞能见度标准为 400 m,降落的能见度标准为 800 m)的雾基本出现在春季(3—5 月)、深秋(11 月)和冬季(1—2 月),夏季和早秋均大于 400 m,特别是夏季,能见度多在 800 m 以上,主要是突发强降水(雨滴大且密)造成的雾。

从各类雾发生期间能见度箱线图(图 4)可以看出:全部雾能见度基本集中在 200~700 m,中位数为 500 m。四类雾的能见度分布存在明显差异,雨雾集中在 600~800 m,中位数为 700 m;辐射雾能

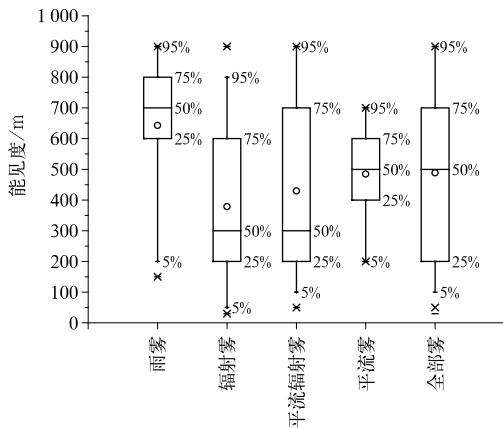


图 4 2013 年 9 月至 2017 年 9 月南昌昌北机场
各类雾发生期间能见度箱线图

(上、下短横线分别为最大和最小值,上、下×分别为
第 99% 和第 1% 分位数,空心圆表示平均值;下同)

Fig. 4 The box line diagram for visibility of several
types of fogs at Nanchang Changbei Airport from
September 2013 to September 2017

(strigulas at top and bottom: the maximum and minimum values,
crosses at top and bottom: the 99th and 1st percentiles,
hollow circle: the average; same as below)

表 3 2013 年 9 月至 2017 年 9 月南昌昌北机场
四类雾过程最低能见度(V)分布(单位:次)

Table 3 The minimum visibility in each process of four
types of fogs at Nanchang Changbei Airport from
September 2013 to September 2017 (unit: time)

雾过程	最低能见度		
	<400 m	400 m≤V<800 m	≥800 m
雨雾	4	21	10
辐射雾	20	3	1
平流辐射雾	11	2	1
平流雾	1	2	0
合计	36	28	12

能见度主要集中在 200~600 m,中位数为 300 m;平流辐射雾能见度集中在 200~700 m,中位数为 300 m;平流雾能见度集中在 400~600 m,中位数为 500 m。对比四类雾的过程最低能见度(表 3)可以看到,四类雾对飞机起降均有不同程度影响,雨雾最低能见度在 400~800 m 最多,800 m 以下次之,主要影响飞机降落,有较大比例的雨雾对飞机起降无影响;辐射雾和平流辐射雾最低能见度大多在 400 m 以下,对飞机起降有较大影响;平流雾最低能见度多在 400~800 m,主要影响飞机降落。

相比其他雾,雨雾需要一定时间的积累,统计发现,除突发强降水造成的雨雾外,其他雨雾发生前能见度均长时间(≥ 5 h)维持在 4 km 以下,发生前 2 h 能见度均降至 3 km 以下。雨雾的最低能见度与维持时间呈显著负相关($R=-0.7$,通过 0.001 显著性水平检验),即雨雾维持时间越长,最低能见度越差。

3 雾发生时要素场特征

选取与多年逐时能见度(21 761 个样本)相关性通过 0.01 显著性水平检验的风速(相关系数 $R=0.23$)、气温($R=0.23$)、相对湿度($R=-0.48$)、AQI 指数($R=-0.32$)、前期降水情况(前 3 d 内出现降水占比为 87%)、前一日露点温度与当日最低气温差以及逆温层等经验因子开展具体分析。

3.1 地面风特征

从地面风玫瑰图(图 5)可见,雨雾(图 5a)的风向以北风(28.0%)最多,对应风速以 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 居多(约占 15.0%), $4\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 次之(约占 12%);其次风向为北西北风(16.0%),主要对应风

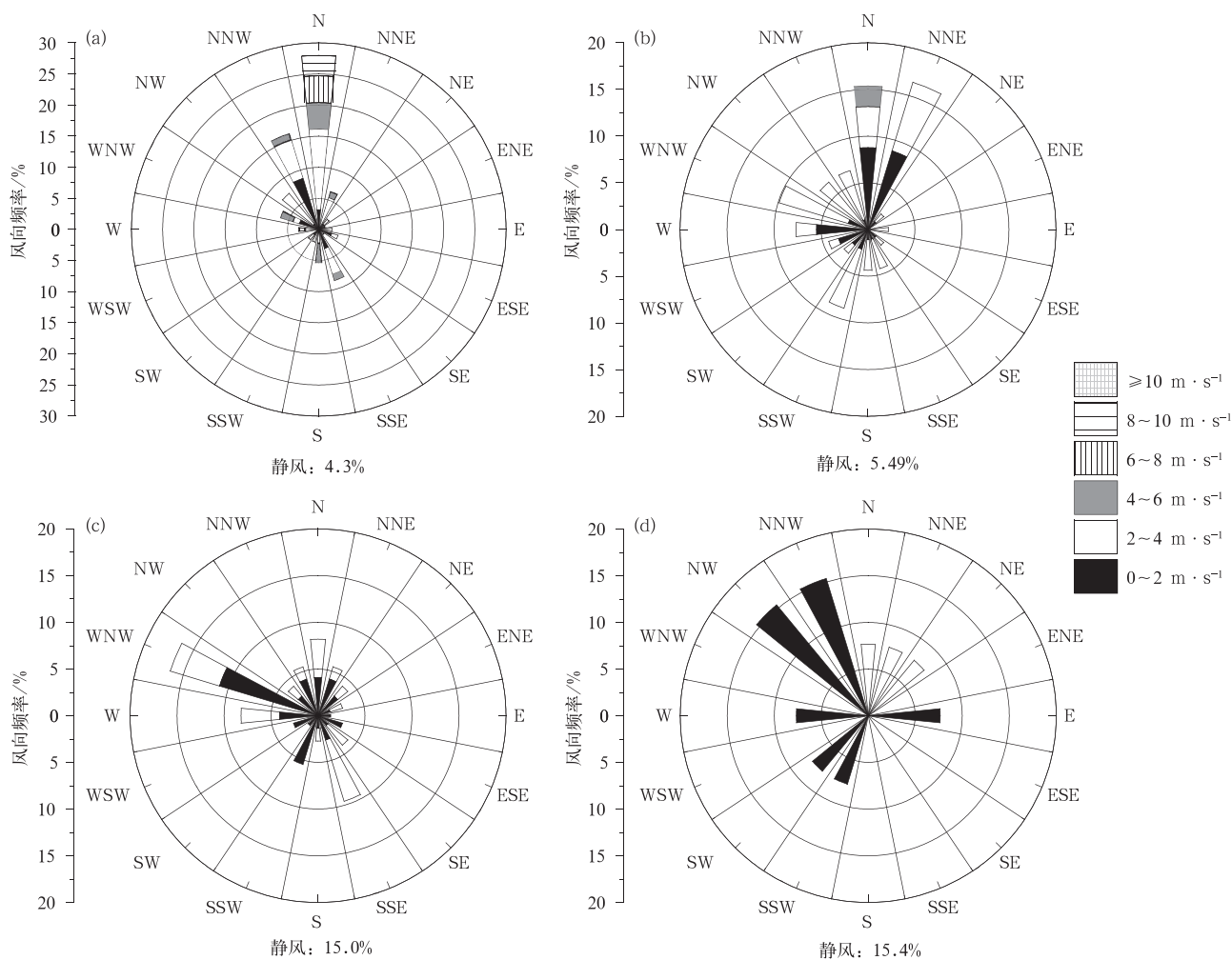


图 5 2013 年 9 月至 2017 年 9 月南昌昌北机场四类雾发生期间逐小时风向和风速玫瑰图

(a) 雨雾, (b) 辐射雾, (c) 平流辐射雾, (d) 平流雾

Fig. 5 The hourly wind rose charts of four types of fogs at Nanchang Changbei Airport from September 2013 to September 2017

(a) rain fog, (b) radiation fog, (c) advection-radiation fog, (d) advection fog

速包括 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (8.5%) 和 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (6.5%), 统计发现, 有 8 次雨雾过程出现了地面强风 (风速 $> 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 均出现在冷锋临近冷空气扩散阶段。辐射雾 (图 5b) 的风向以北风和北东北风居多, 各占 15.0% 以上, 相应的风速以 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为主, $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 次之, 而当风向为西西北—北西北风时, 风速以 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为主。平流辐射雾 (图 5c) 以西西北风最多 (16.5%), 对应风速主要在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内, 其次是静风 (15.0%), 再次是南东南风 (10.0%), 对应风速多为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。详细分析发现, 4 次持续时间 $> 8 \text{ h}$ 的平流辐射雾过程中风向均有明显转变 (偏南风转偏北风或偏北风转偏南风, 转向后风速多为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 造成雾来回飘

移而长时间影响机场。平流雾 (图 5d) 以静风居多 (15.4%), 其次以西北风和北西北风为主 (各占 15.0%), 相应风速均在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内, 而在偏东北风 (风速为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和偏西南风 (风速 $< 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 上出现概率较均匀, 未出现偏东南风的情况。

3.2 温湿特征

全部雾气温 (图 6) 主要分布在 $6.5 \sim 17.4^\circ\text{C}$, 中位数为 12.1°C , 最高气温为 27.6°C , 最低气温为 -0.5°C , 平均气温为 12.3°C 。雨雾气温主要分布在 $11.6 \sim 17.5^\circ\text{C}$, 中位数为 14.9°C , 平均气温为 14.5°C ; 辐射雾气温主要在 $4.0 \sim 9.9^\circ\text{C}$, 中位数为 6.5°C , 平均气温为 7.2°C ; 平流辐射雾气温主要分

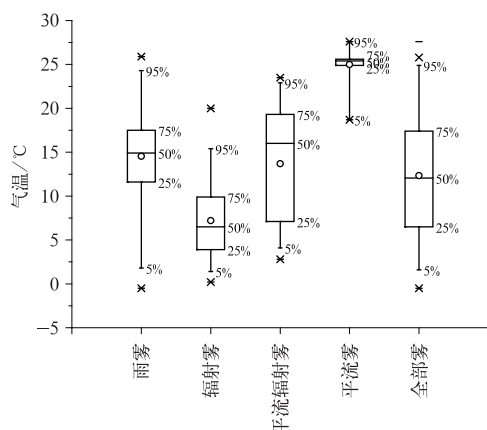


图 6 同图 4, 但为气温

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for temperature

布在 $7.1 \sim 19.3^{\circ}\text{C}$, 中位数为 16.0°C , 平均气温为 13.7°C ; 平流雾气温主要在 $24.9 \sim 25.6^{\circ}\text{C}$, 中位数为 25.4°C , 平均气温为 25.0°C 。

全部雾相对湿度(图略)主要分布在 $96\% \sim 100\%$, 四类雾相对湿度差异不大。辐射雾主要由辐射降温致使水汽趋于饱和所造成, 统计发现, 辐射雾发生前一日 22 时相对湿度全部达 80% 以上, 之后不断递增, 至少提前 2 h 达 90% 或以上, 多数(占比为 83.3%)提前 5 h 达 90% 或以上。平流辐射雾在生成前湿度较辐射雾要小(多为 $80\% \sim 85\%$), 但生成时相对湿度常突增至 90% 以上。

统计雾前期(3 d 内)降水情况发现, 大多数雾发生前期均有降水出现, 雨雾除了 5 次过程外前期均有降水(占比为 85.7%), 辐射雾占比为 83.3% , 平流辐射雾占比为 92.9% , 平流雾占比为 100% , 且基本雨停后不久即出现雾。大多数雨雾都在降水持续一段时间后出现, 整个过程以小雨或毛毛雨为主(占比为 77.1% , 雨量多在 1 mm 以内), 雨停、雨滴加大或风力加大后雾消散, 而突发性的强降水会立即引发雨雾, 雨势减弱后迅速消散。

对比分析雾发生当日最低温度与前一日 14 时的露点温度时发现, 本文分析的 76 次雾过程中有 56 次过程雾当日最低温度均低于前一日 14 时的露点温度, 其中辐射雾为 21 次, 雨雾为 23 次, 平流辐射雾为 10 次, 平流雾为 2 次, 该指标对各类雾(特别是辐射雾)的预报有较好的指示意义。

3.3 空气质量特征

空气质量指数(AQI)反映了空气中污染物浓度状况, 田心如等(2014)指出, 污染物颗粒一方面可以

作为凝结核, 在具备雾形成的条件下有利于雾的形成, 同时使雾滴密度增大, 大雾增浓, 使雾的持续时间增长; 另一方面过多的污染物颗粒能降低地面辐射降温, 同时作为雾滴凝结核争食有限的水分, 使雾难以形成。实际上污染物对雾的影响机制十分复杂, 本文对其不做过多探讨, 仅期望在有限的数据中寻求到可能的预报指标。

根据昌北机场的观测预报经验, 当空气净化条件较好时($AQI < 50$), 即使后期天气形势和其他各气象要素变化等满足雾的形成条件, 出现雾的概率也很小, 而当南昌及周边地区污染浓度不断增大时, 则较容易出现雾。整体而言, 全部雾过程 AQI 主要分布在 $54 \sim 100$, 雨雾过程中 AQI 比其他三类雾要大, 主要在 $52 \sim 110$, 10 次过程达轻度以上污染, 1 次达重度污染(2015 年 1 月 26 日)。统计了 58 次雾过程前期 24 h 内 AQI 演变情况发现, 在 AQI 呈上升趋势的过程中雨雾比例为 $17/29$ (在未递增的 12 次雨雾中有 3 次过程主要是由短时强降水引发的雾, 9 次过程因污染颗粒在前期 24 h 内受到了明显的降水冲刷与沉降而导致 AQI 下降), 辐射雾比例为 $11/16$, 平流辐射雾比例为 $8/10$, 平流雾比例则为 $3/3$ 。因此在机场实际雾预报中有必要加入 AQI 的演变分析。

3.4 逆温结构特征

逆温对雾的形成具有非常重要的作用。分析南昌站逆温情况发现, 雨雾过程中出现逆温层的占比达 71.4% , 以单层逆温为主, 近地层逆温层底集中在 $1005 \sim 960\text{ hPa}$, 逆温差多在 $0 \sim 3^{\circ}\text{C}$; 辐射雾过程中出现逆温层的占比达 91.6% , 以多层逆温为主, 首层逆温层顶底集中在 $1020 \sim 1003\text{ hPa}$, 逆温差多在 $1 \sim 3^{\circ}\text{C}$; 平流辐射雾过程中出现逆温层的占比达 100% , 以多层逆温为主, 近地层逆温层底集中在 $1011 \sim 1004\text{ hPa}$, 逆温差在 $1 \sim 5^{\circ}\text{C}$; 平流雾过程中出现逆温层的占比达 66.7% , 均为单层逆温, 逆温层顶和层底高度分别为 969 hPa 和 905 hPa 。

研究发现, 雨雾维持时间与近地层逆温差呈显著负相关($R = -0.3$, 通过 0.10 的显著性水平检验), 即逆温差越大, 维持时间越短。而辐射雾持续时间和近地层逆温层底高、顶高均呈显著正相关(R 均为 0.33 , 通过 0.10 的显著性水平检验), 说明逆温层底高和顶高越高, 越不利于雾的消散。

4 各类雾的环流特征

4.1 地面环流形势

对四类雾的地面气压场合成图(图 7)进行分析,雨雾主要位于弱地面倒槽中(比例为 20/36, 图 7a),据统计有 17 次过程位于倒槽冷区一侧偏北气流中,另外值得注意的是,有 8 次雨雾过程为较强冷高压控制,虽风力较大(风速 $>4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),但此时南昌上空 925 hPa 及以上仍为暖湿平流控制,小雨滴在空中飞舞致使能见度保持低位。辐射雾主要位于弱高压中的均压场(图 7b),统计发现,除了 3 次弱高压后部和 2 次冷锋前部弱气压场外,均处于弱高压底部或弱高压脊中。平流辐射雾主要位于入海

高压后部弱气压场中(图 7c),除了 4 次过程为冷锋前部弱低压倒槽,其他均处于高压后部或弱高压脊中。平流雾主要出现在高压后部鞍型场中(图 7d)。

4.2 低层环流形势

对四类雾的低层形势场合成图(850 hPa 图略, 925 hPa 如图 8 所示)进行分析,南昌均处偏南气流中。雨雾出现时,在 850 hPa 和 925 hPa(图 8a)分别以西南风和东南风为主,风速在四类雾中最大,同时两层均有暖式切变线位于湘北—赣北—皖南一带,风向与等温线近乎垂直,暖湿平流十分明显,主要的降水区沿切变线分布,机场多处边缘弱降水中。辐射雾(图 8b)处于东西带状的弱高压脊中,赣北地区在 850 hPa 和 925 hPa 上均以偏东南风为主且与温度线平行,风速在四类雾中最小,无明显锋区和冷

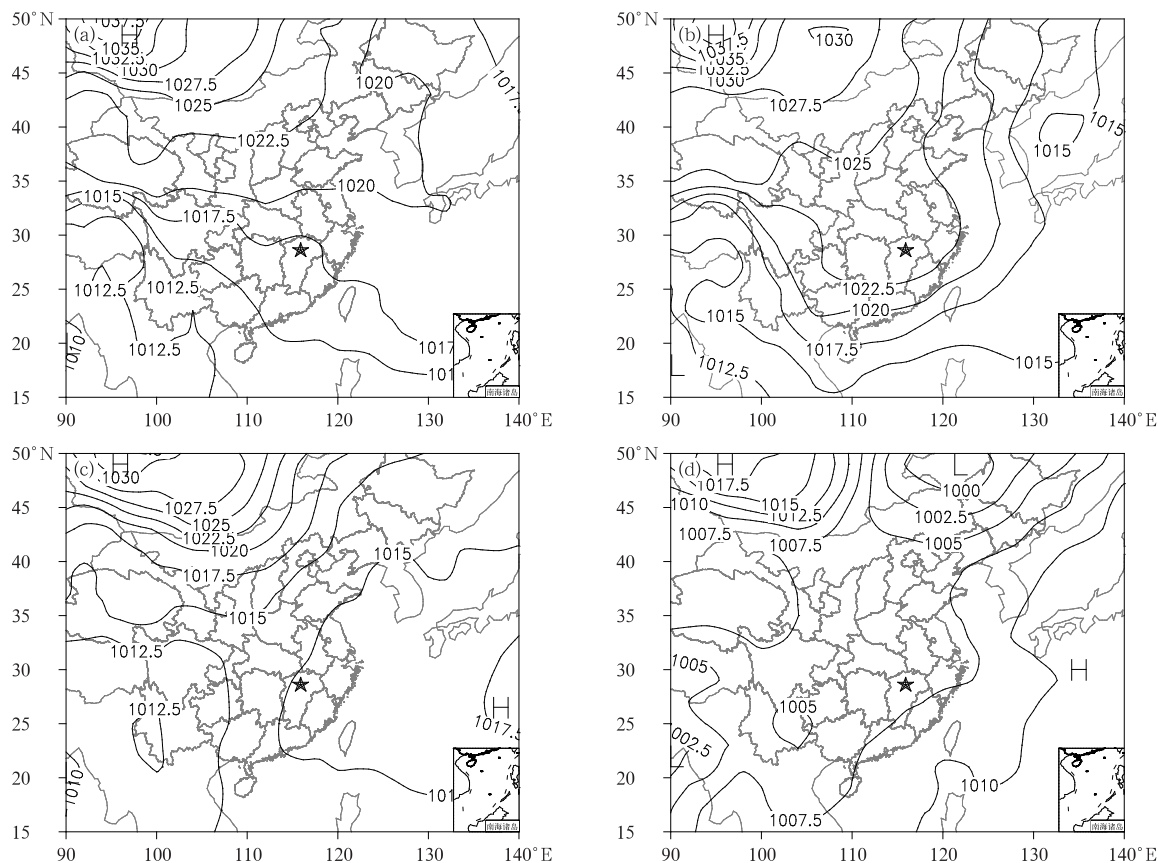


图 7 2013 年 9 月至 2017 年 9 月南昌昌北机场四类雾过程 08 时地面气压场(单位: hPa)

(a) 雨雾, (b) 辐射雾, (c) 平流辐射雾, (d) 平流雾

(★: 昌北机场位置)

Fig. 7 Synthetic analysis diagrams of surface pressure (unit: hPa) for the four types of fogs at Nanchang Changbei Airport at 08:00 BT from September 2013 to September 2017

(a) rain fog, (b) radiation fog, (c) advection-radiation fog, (d) advection fog

(★: the location of Changbei Airport)

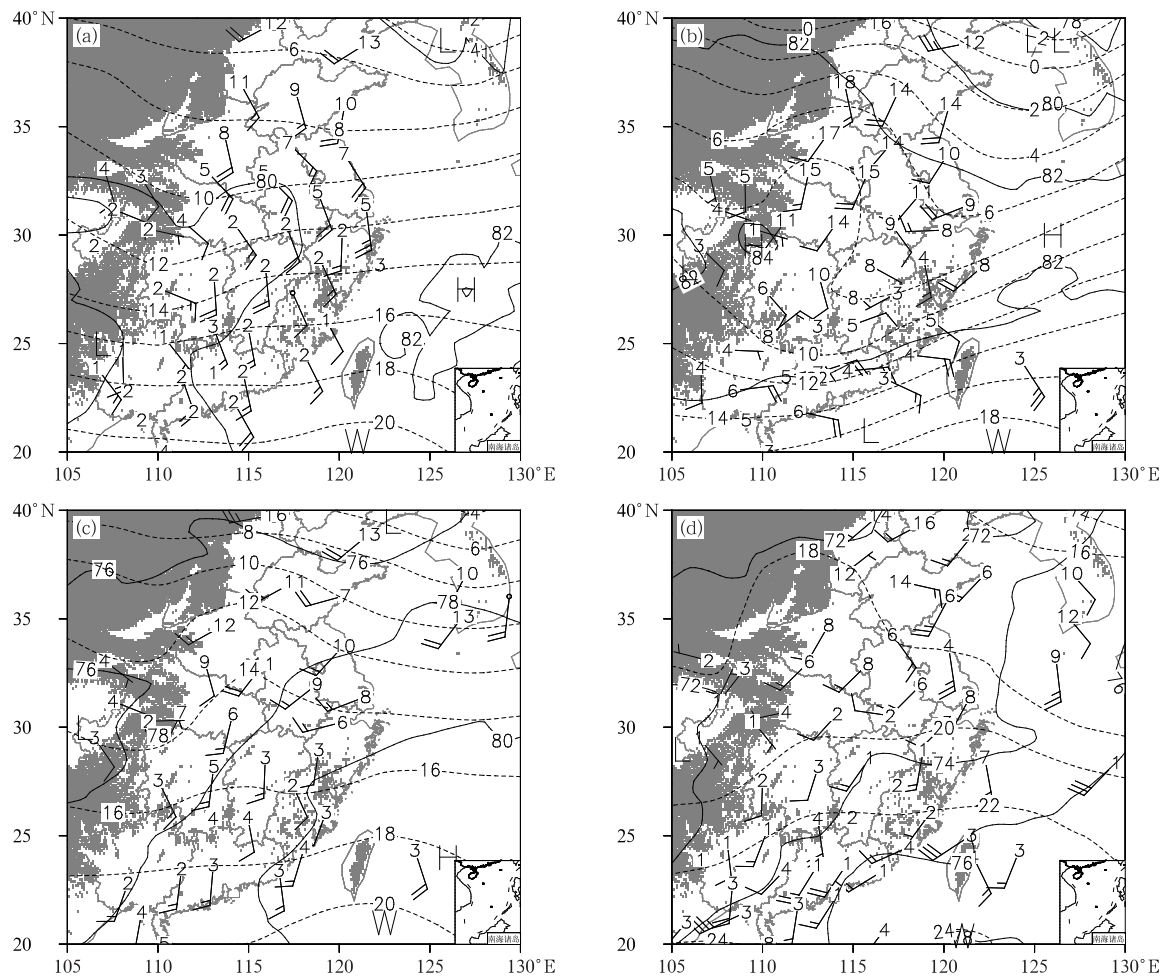


图 8 同图 7, 但为 925 hPa

(黑色实线: 位势高度, 单位: dagpm; 黑色虚线: 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 站点数值: 温度露点差, 单位: $^{\circ}\text{C}$;

风羽, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 阴影: 高度超 925 hPa 等压面区域)

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for 925 hPa

(Potential height is black solid line, unit: dagpm; temperature is black dotted line,

dew-point temperature deficit is number, unit: $^{\circ}\text{C}$; wind bar, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; area above 925 hPa is shaded)

暖平流, 湿度较小(平均温露点差分别为 19°C 和 8°C)。平流辐射雾(图 8c)处于高压后部宽广偏南风中, 南昌在暖脊线上, 南昌站以及周边站湿度比辐射雾要大(平均温度露点差分别为 6°C 和 3°C)。有一定的暖湿平流, 详细分析发现, 有些雾以辐射为主, 有些以平流雾为主, 暖平流明显的雾逆温层结构明显, 逆温强度高达 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$, 一般较晚消散。平流雾在 850 hPa、925 hPa(图 8d)均为西南风, 平均风速为 $6\sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 苏皖一带有暖湿切变线存在, 该地区有大片雨区, 机场处于雨区南缘, 前期有少量降水, 当切变北抬、降水结束后雾即出现。

5 结 论

通过对昌北机场四类雾的分布特征以及对相应的气象要素和浅层环流形势场进行了统计和合成分析, 给出了昌北机场雾的分类特征和预报着眼点:

(1) 南昌昌北机场的雾主要出现在 11—5 月, 以雨雾居多, 其次是辐射雾, 再次是平流辐射雾, 平流雾最少。

(2) 昌北机场的雾开始时间大多发生在 04—10 时, 集中在 06—14 时消散, 而持续时间主要在 4 h 以

内。雾发生前 AQI 大都有上升趋势,多数为 54~100,雨雾时 AQI 最大,常有轻度到重度污染,因此预报雨雾时应着重分析 AQI 的变化。

(3)雨雾多发于秋、冬、春季的低空暖湿切变南侧较强偏南风 and 地面倒槽北侧偏北风中,常处于大片降水区南缘,多在连续小雨或毛毛雨后出现。生成前能见度长时间(≥ 5 h)维持低位(4 km 以下),生成后波动不大,能见度多为 600~800 m,主要影响飞机降落。

(4)辐射雾多发于深秋至次年初春的弱高压中,冷暖平流不明显,低层风力偏小($< 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),近地面多逆温层,且逆温层底越高雾持续时间越长。辐射雾常在雨后云层打开后的早间生成,日出后逐渐消散,早间最低气温一般低于前一日最低露点温度,同时生成前相对湿度递增,至少前 2 h 达 90% 以上,生成后能见度多在 200~600 m,影响飞机起降。

(5)平流辐射雾多发于早冬和春季的入海高压后部弱暖平流中,生消特征与辐射雾相似,出现前湿度突增,能见度多在 200~700 m,持续时间大于 8 h 的过程在四类雾中占比最大,对飞机起降影响较大。暖平流明显的雾一般较晚消散,特别是雾过程中地面风向出现逆转时,应考虑延后解除雾的警报。

(6)平流雾出现在暖湿平流明显的春、夏季,多生成于低空切变线以南地面鞍型场中,常在切变线北抬、雨停后出现,能见度多在 400~600 m,主要影响飞机降落。

参考文献

- 崔驰潇,包云轩,袁成松,等,2018. 不同边界层参数化方案对江苏地区一次平流雾过程的模拟影响[J]. 大气科学, 42(6): 1344-1362. Cui C X, Bao Y X, Yuan C S, et al, 2018. Influence of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of an advection fog process in Jiangsu[J]. Chin J Atmos Sci, 42(6): 1344-1362(in Chinese).
- 胡伯彦,陈志豪,冯雷,2017. 上海虹桥机场低能见度天气过程中的气象要素特征分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 28(2): 49-54. Hu B Y, Chen Z H, Feng L, 2017. The characteristics of meteorological elements in low visibility conditions at Shanghai Hongqiao Airport[J]. J Civ Aviat Flight Univ China, 28(2): 49-54(in Chinese).
- 黄玉仁,黄玉生,李子华,等,2000. 生态环境变化对雾的影响[J]. 气象科学, 20(2): 129-135. Huang Y R, Huang Y S, Li Z H, et al, 2000. The influence of ecoenvironmental variation on fog[J]. Sci Meteor Sin, 20(2): 129-135(in Chinese).
- 康志明,尤红,郭文华,等,2005. 2004 年冬季华北平原持续大雾天气的诊断分析[J]. 气象, 31(12): 51-56. Kang Z M, You H, Guo W H, et al, 2005. Diagnostic analysis of the long-drawn fog over Huabei Plain in 2004[J]. Meteor Mon, 31(12): 51-56(in Chinese).
- 李秀连,陈克军,王科,等,2008. 首都机场大雾的分类特征和统计分析[J]. 气象科技, 36(6): 717-723. Li X L, Chen K J, Wang K, et al, 2008. Statistic analysis and classification of fogs at Beijing Capital International Airport[J]. Meteor Sci Technol, 36(6): 717-723(in Chinese).
- 李玉芳,许彬,张安云,等,1999. 江西大雾的天气条件和形势特征分析[J]. 江西气象科技, 22(1): 9-10. Li Y F, Xu B, Zhang A Y, et al, 1999. Analysis of weather conditions and features about dense fog in Jiangxi Province[J]. Jiangxi Meteor Sci Technol, 22(1): 9-10(in Chinese).
- 鲁燕,肖天贵,唐钱奎,2016. 成都地区近 30 年大雾的气候特征分析[J]. 高原山地气象研究, 36(1): 68-74. Lu Y, Xiao T G, Tang Q K, 2016. Climatic characteristics of fog in Chengdu in recent 30 years[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 36(1): 68-74(in Chinese).
- 沈澄,姜有山,刘冬晴,2013. 南京秋季辐射雾与平流雾边界层气象要素特征比较[J]. 气象科技, 41(3): 552-557. Shen C, Jiang Y S, Liu D Q, 2013. Characteristic comparison of ABL meteorological elements in fall between radiation fog and advection fog in Nanjing[J]. Meteor Sci Technol, 41(3): 552-557(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).
- 田心如,白莉娜,唐红昇,等,2012. 江苏省大雾持续时间及相关要素的周末效应[J]. 环境科学与技术, 35(S2): 117-122. Tian X R, Bai L N, Tang H S, et al, 2012. Weekend effect of fog duration and other related elements in Jiangsu Province[J]. Environ Sci Technol, 35(S2): 117-122(in Chinese).
- 田心如,韩永翔,陈广昌,等,2014. 江苏省大雾的变化特征及气溶胶对其影响[J]. 中国环境科学, 34(10): 2485-2489. Tian X R, Han Y X, Chen G C, et al, 2014. Heavy fog's climate characteristics and possible effect of aerosol in Jiangsu Province[J]. China Environ Sci, 34(10): 2485-2489(in Chinese).
- 吴兑,李菲,邓雪娇,等,2008. 广州地区春季污染雾的化学特征分析[J]. 热带气象学报, 24(6): 569-575. Wu D, Li F, Deng X J, et al, 2008. Study on the chemical characteristics of polluting fog in Guangzhou Area in spring[J]. J Trop Meteor, 24(6): 569-575(in Chinese).
- 向波,刘德,廖代强,2003. 重庆雾的特点及其变化分析[J]. 气象, 29(2): 48-52. Xiang B, Liu D, Liao D Q, 2003. Analysis of characteristics of fog and its change in Chongqing[J]. Meteor Mon, 29(2): 48-52(in Chinese).
- 谢清霞,唐延婧,庞庆兵,等,2016. 贵州辐射雾的时空变化特征及其气象要素分析[J]. 气象与环境科学, 39(2): 119-125. Xie Q X, Tang Y J, Pang Q B, et al, 2016. Analysis of temporal and spatial variation and meteorological elements of Guizhou radiation

- fog[J]. Meteor Environ Sci, 39(2):119-125(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).
- 许彬,王欢,李玉芳,等,2001.江西省雾日统计、地区分布及形成原因分析[J]. 江西气象科技, 24(3):18-20. Xu B, Wang H, Li Y F, et al, 2001. Fog days statistics and their regional distributions and cause analysis[J]. Jiangxi Meteor Sci Technol, 24(3):18-20 (in Chinese).
- 闫敬华,徐建平,2001.华南地区降水与雾的关系初探[J]. 广东气象, (2):19-21. Yan J H, Xu J P, 2001. A study on the relationship between fog and rainfall over South China[J]. Guangdong Meteor, (2):19-21(in Chinese).
- 严文莲,刘端阳,濮梅娟,等,2010.南京地区雨雾的形成及其结构特征[J]. 气象, 36(10):29-36. Yan W L, Liu D Y, Pu M J, et al, 2010. Formation and structure characteristics of precipitation fog in Nanjing[J]. Meteor Mon, 36(10):29-36(in Chinese).
- 严文莲,朱承瑛,朱毓颖,等,2018.江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J]. 气象, 44(7):892-901. Yan W L, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2018. Study on a wide range of explosive heavy fog in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 44(7):892-901(in Chinese).
- 杨华,柳艳香,章开美,2015.江西省雾日数的时空分布特征分析[J]. 气象与减灾研究, 38(1):66-72. Yang H, Liu Y X, Zhang K M, 2015. The temporal and spatial distribution of fog days in Jiangxi Province[J]. Meteor Dis Reduct Res, 38(1):66-72(in Chinese).
- 袁娴,陈志豪,2013.上海浦东机场平流雾的统计和监测分析[J]. 气象科学, 33(1):95-101. Yuan X, Chen Z H, 2013. Statistics and monitoring analysis of advection fog at Shanghai Pudong Airport [J]. J Meteor Sci, 33(1):95-101(in Chinese).
- 曾婷,李岩瑛,张强,等,2017.民勤干旱区冬季浓雾形成的边界层条件分析[J]. 气象, 43(8):936-942. Zeng T, Li Y Y, Zhang Q, et al, 2017. Analysis on boundary layer condition of winter heavy fog in Minqin arid area[J]. Meteor Mon, 43(8):936-942(in Chinese).
- 张涛,唐钱奎,李柏,等,2019.基于多种资料对成都辐射平流雾生消机理分析[J]. 气象科技, 47(1):70-78. Zhang T, Tang Q K, Li B, et al, 2019. Genesis and dissipation mechanisms of radiation-advection fogs in Chengdu based on multiple detection data[J]. Meteor Sci Technol, 47(1):70-78(in Chinese).
- 周述学,邓学良,王传辉,等,2020.华东 2018 年冬季一次典型雾霾过程的气象成因分析[J]. 高原气象, 39(5):1110-1121. Zhou S X, Deng X L, Wang C H, et al, 2020. Analysis of meteorological conditions for a typical fog and haze event over Eastern China in winter of 2018[J]. Plateau Meteor, 39(5):1110-1121(in Chinese).
- 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).
- 朱承瑛,朱毓颖,祖繁,等,2018.江苏省秋冬季强浓雾发展的一些特征[J]. 气象, 44(9):1208-1219. Zhu C Y, Zhu Y Y, Zu F, et al, 2018. Some characteristics of the development of heavy fog in autumn and winter in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 44(9):1208-1219(in Chinese).
- Middleton W E K, 1941. Visibility in Meteorology; the Theory and Practice of the Measurement of the Visual Range[M]. 2nd ed. Toronto: University of Toronto Press; 112-115.
- 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.
- Valdez J, 2000. National Weather Service; a high impact agency; we make a difference; reinvention goals for 2000 [R]. National Weather Service; Silver Spring.
- Willett H C, 1928. Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting[J]. Mon Wea Rev, 56(11):435-468.
- 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.