

上海一次大雾天气过程的航空运行情况评估

袁 娴¹, 胡伯彦², 吴福浪³

¹中国民用航空华东地区空中交通管理局气象服务部, 上海

²中国民用航空华东地区空中交通管理局气象中心, 上海

³中国民用航空宁波空中交通管理站气象台, 浙江 宁波

收稿日期: 2024年3月12日; 录用日期: 2025年8月29日; 发布日期: 2025年9月8日

摘要

本文利用气象资料(气象报文、预警等)、管制运行信息(MDRS实施情况、机场起降架次、控制限制发布情况等), 通过融合分析的方法, 对上海一次大雾天气过程的航空运行情况进行复盘评估, 旨在研究复杂天气导致大面积航班延误后提升运行效率的方法, 以提高空管运行、流量管理、飞行签派和气象服务等协同决策水平。

关键词

大雾, MDRS, 大面积航班延误, 预警, 运行

Assessment of Aviation Operations in a Foggy Weather Process in Shanghai

Xian Yuan¹, Boyan Hu², Fulang Wu³

¹Meteorological Service Department of East China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Shanghai

²Meteorological Center of East China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Shanghai

³Meteorological Observatory of Ningbo Air Traffic Management Station of CAAC, Ningbo Zhejiang

Received: Mar. 12th, 2024; accepted: Aug. 29th, 2025; published: Sep. 8th, 2025

Abstract

This paper uses meteorological data (meteorological messages, warnings, etc.), ATC operation information (MDRS implementation, airport movements, control restrictions, etc.). Through the method of fusion analysis, the aeronautical operation of a foggy weather process in Shanghai is reviewed in order to study the method of improving the operational efficiency after the massive flight delays

caused by complex weather, so as to improve the coordinated decision-making level of air traffic control, traffic management, flight dispatch and meteorological services.

Keywords

Fog, MDRS, Massive Flight Delays, Warning, Operation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航班正常工作关系广大旅客的切身利益, 国务院领导高度重视[1]。2017年, 全国民航共执行航班4039426班, 平均航班正常率为71.67%, 同比降低5.09个百分点。影响航空公司航班正常主要因素及所占不正常航班比例依次为: 天气原因占51.28%, 军事活动原因占27.73%, 航空公司原因占8.62%, 空管原因(含流量原因)占7.72% [2]。复杂天气作为影响航班运行的主要因素之一, 在航班量日趋增加和空域资源日趋饱和的条件下长时间影响主要机场、进出港口或主干航路, 往往会造成大面积航班延误。2014年起, 民航空管系统开始开展基于空中交通通行能力的大面积航班延误应急响应机制建设工作, 即MDRS (Massive Delay Response System) [3], 旨在提高大面积航班延误后的有序和高效运行。MDRS运行以后的效益评估以及技术层面的优化改进成了推进航班延误治理的关键点之一。与此同时, 随着华东地区协同决策(CDM)系统运行的日趋成熟, 流量管理对气象服务支持的需求也日益迫切[4]。

本文选取上海虹桥、浦东两机场2018年1月16日启动MDRS预警的一次大雾天气过程, 利用气象资料(气象报文、预警等)、管制运行信息(MDRS实施情况、机场起降架次、控制限制发布情况等), 通过融合分析的方法, 对此次天气过程下的航空运行情况进行复盘评估。

2. 天气及运行实况

如图1所示, 根据机场例行或特殊观测报告, 虹桥机场主导能见度在16日06:30~10:29(北京时, 下同)低于1000米, 出现大雾天气。所有跑道使用端RVR的最低值在07:30~10:29低于550米, 其中部分时段低于350米; 云高在04:00~11:29为60米, 其中09:00~10:29低于60米。虹桥塔台于06:21开始HUD运行准备, 07:51实施HUD运行, 10:53为止HUD运行结束。总体来看, 大雾天气对虹桥机场的直接影响(跑道使用端RVR低于550米或云高低于60米)时长为3h(07:30~10:29), 与HUD运行时段基本一致。大雾直接影响到虹桥早高峰运行。

如图2所示, 浦东机场主导能见度在16日05:05~09:59低于1000米, 出现大雾天气。所有跑道使用端RVR的最低值在06:30~06:59、07:19~08:29、09:00~09:29低于550米, 最低值400米, 云高在03:30~11:29为60米, 其中09:43~10:29低于60米。浦东塔台于04:03开始II类运行[5]准备, 04:32实施II类运行, 07:09为止II类运行结束; 09:09再次II类运行准备, 09:32实施II类运行, 11:18为止II类运行结束。总体来看, 大雾天气对浦东机场的直接影响(跑道使用端RVR低于550米或云高低于60米)同样接近3h(06:30~06:59, 07:19~08:29, 09:00~09:29, 09:43~10:29), 且大雾天气同样影响到浦东早高峰运行。16日00:00~09:00浦东机场还启动了MDRS黄色预警。

针对此次大雾, 区域预报室共发布重要天气快报4份(15日22:13、16日08:17、09:56、10:38)、虹桥气象台发布机场警报3份(16日06:01、09:25、10:41)、浦东气象台发布机场警报4份(16日04:19、08:29、

09:39、12:46)、空管中心气象席位滚动更新天气通报 10 次。此外还发布“引发大面积航班延误的重要天气发生概率”专项通报。

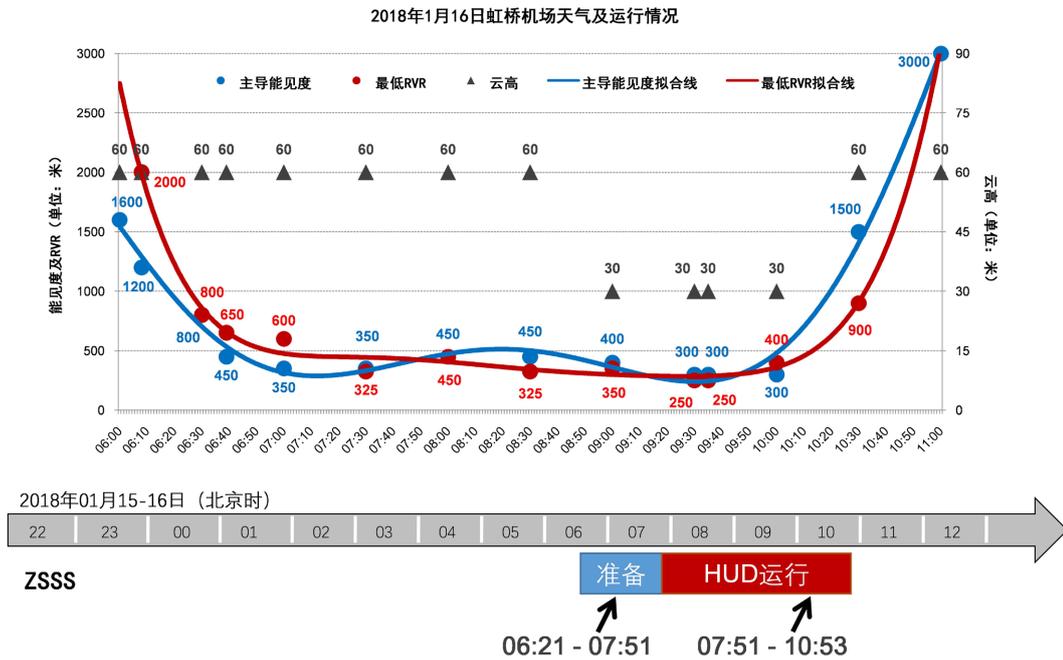


Figure 1. Weather and operation status of Hongqiao Airport on January 16, 2018

图 1. 2018 年 1 月 16 日虹桥机场天气及运行实况

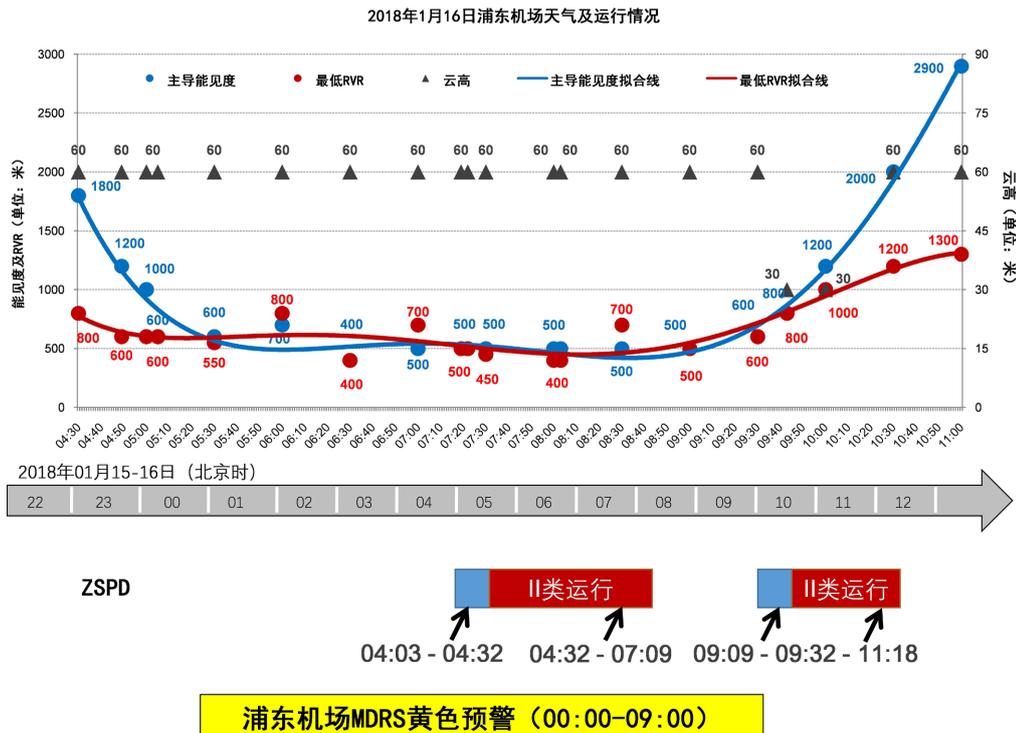


Figure 2. Weather and operation status of Pudong Airport on January 16, 2018

图 2. 2018 年 1 月 16 日浦东机场天气及运行实况

3. 天气形势分析

本次大雾主要由入海高压后部弱气压场配合浅层大湿区，在近地层辐合触发下形成。具体天气形势演变如下：

(1) 14~15日，控制华东地区的弱高压缓慢东移，云贵地区有低压倒槽发展，高空则处在由脊区到槽区的转变当中，低层西南风逐步加强使近地面湿度条件开始变好。15日凌晨虹桥、浦东两场还出现了部分雾或大雾天气，跑道使用端 RVR 最低到达 175 米。

(2) 15~16日，控制华东地区弱高压已基本进入东海(图 3(a)，蓝色实线)，上海处于高压后部弱气压场控制；高空为一致西南气流(图 3(b)~(d)，蓝色箭头)，华东中部进一步增湿。西南地区低压倒槽快速东移，15日夜间至 16日白天倒槽顶部划过上海(图 3(a)，红色实线)。正是因这一倒槽在 16日凌晨至白天移至上海地区，同时伴随了弱气压场、上海有弱降水、基础能见度不佳、高空有云层覆盖等诸多因素，导致大雾生成并持续至接近 16日中午。

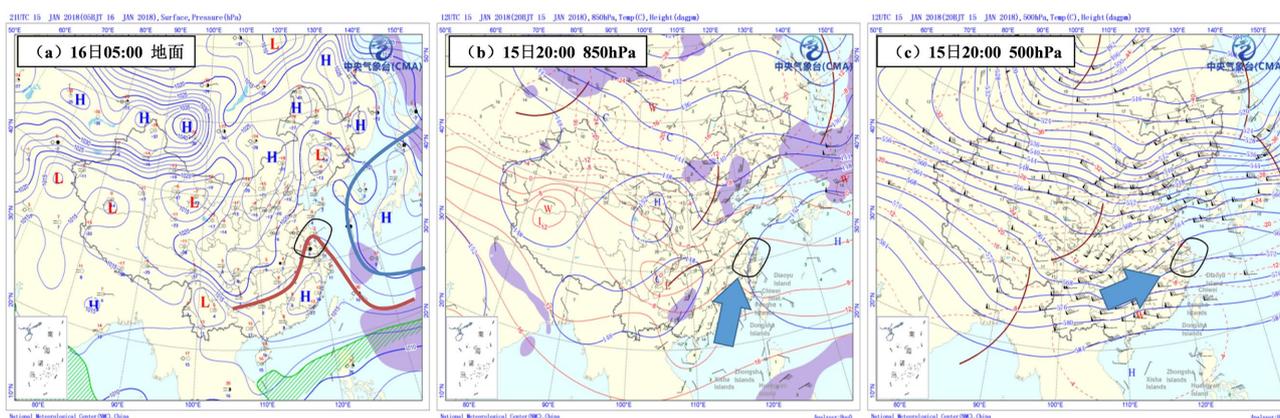


Figure 3. Current situation of ground and high altitude weather conditions

图 3. 地面及高空天气形势实况

(3) 此次大雾包含了多个子过程。大雾生成时为弱气压场、浅层湿度大、有辐合区，具备一定的辐射雾特征。而大雾消散阶段中高空非晴空，不满足典型辐射雾特征，同时在偏南风风向下出现大雾，也非典型上海地区平流雾，使得针对大雾消散的预报技术难度很大(辐射雾消散关注气温快速上升、平流雾消散关注风向风速变化) [6] [7]。而事实也证明，此次大雾在消散阶段出现了一定波动，相较传统的辐射雾其消散时间明显滞后。

4. 预报准确性评估

本节从形势预报和临近预报两方面评估气象部门预报准确性。

4.1. 形势预报

针对本次过程，气象中心从 15 日早间展开天气会商，空管中心气象席位于 10:20 首次给出提示性预警(图 4(a))：高度关注上海两场低云大雾天气。经进一步会商，15:42 在气象中心“引发大面积航班延误的重要天气发生概率”通报表中明确上海两场次日凌晨至白天出现大雾天气，发生概率 $\geq 70\%$ ，发生时段浦东 16 日 00:00~08:30、虹桥 16 日 03:00~08:30，其中 RVR 和云高预计低于 I 类运行标准。该结论也同时由空管中心气象席位进行更新。与实况对比，该份通报对大雾是否出现的预报准确，且在提前 12 h 情况下预报出 16 日仅上海两场大雾，其他主要机场不受影响，当日值班预报员所做工作应被肯定。针对

大雾出现时段，则预报结论与实况相比具有偏差，其开始和结束时间均偏早。

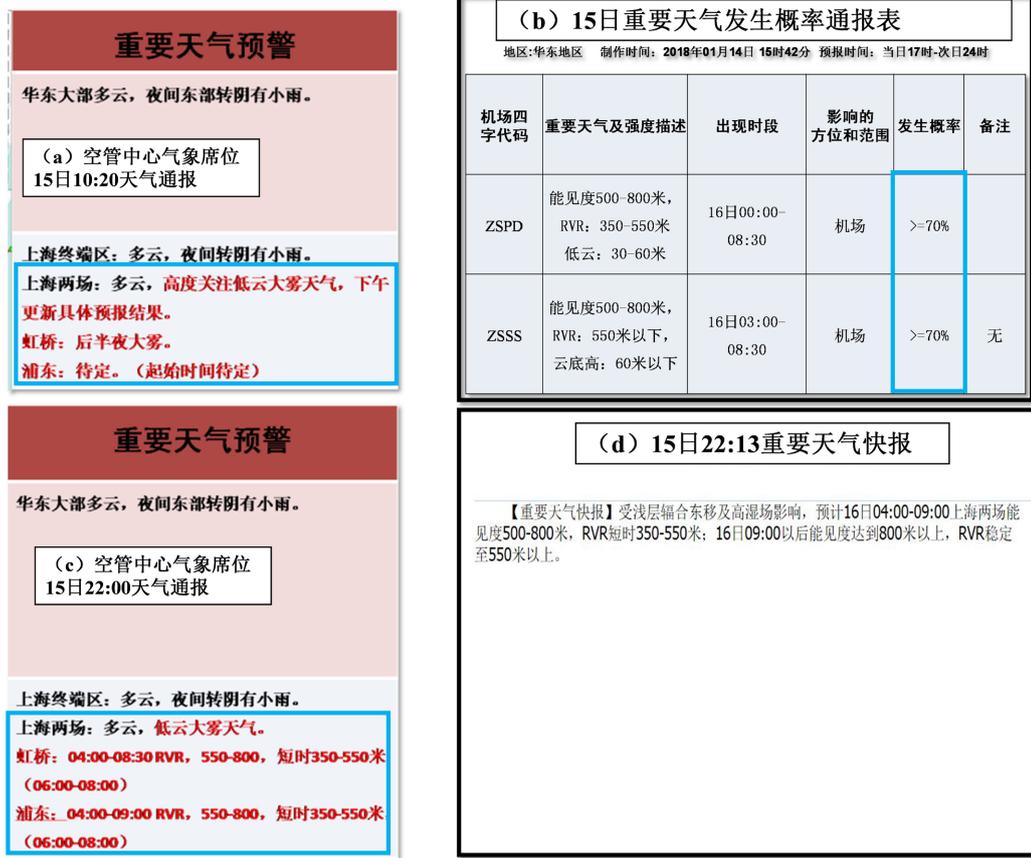


Figure 4. Meteorological center warning during situation forecast stage
图 4. 形势预报阶段气象中心预警

随着全球模式背景场数据及中国地区数值预报结果的更新，经再次会商确认，22:00 空管中心气象席位更新预警，22:13 气象中心对外发布首份重要天气快报，均预计上海两场受大雾影响时段为 16 日 04:00~09:00，修正后的结论大雾开始时间大幅接近实况(虹桥机场 06:00 云高降至 60 米、06:30 能见度降至 800 米；浦东机场 03:30 云高降至 60 米、05:05 能见度降至 600 米)；大雾结束时间预报仍有偏差(两场 10:30 能见度及云高转至标准以上，10:30~11:30 云高仍维持 60 米)。

必须要指出的是，受目前气象技术水平所限，要求预报员在提前量达 6 h 以上情况下对大雾起止时间作精确到小时或半小时量级、对 RVR 或云高作精确到 10 米间隔的预报是难度极大的。典型辐射雾或平流雾(平流低云)消散时间的预报主要参照临近阶段气象要素的显著变化，准确度较高的预报其提前量必然有所局限，同时预报准确性还与天气本身的预报难度有直接关系，这在以往复盘中心均有所论述。

4.2. 临近预报

按服务协议，虹桥、浦东两场需在危险天气临近时发布机场警报，并主要针对航空公司、塔台、驻场各运行单位等提供服务，因此机场警报发布属于临近预报阶段预报准确性评估范畴。

表 1 给出的是大雾开始时间评估，这里将机场主导能见度低于 800 米或云高低于 60 米作为大雾影响时段，其中“名义提前量”为大雾预计开始时间减警报发布时间，“预报误差”为大雾实际开始时间减预

计开始时间(正值表示与预报相比、实际出现偏晚, 负值表示与预报相比, 实际出现偏早)。根据名义提前量和预报误差, 可以计算得到“实际提前量”, 即当预报误差为正值时(包含 0 值), 实际提前量 = 名义提前量(实际出现偏晚对预报提前量无影响, 只影响预报质量); 当预报误差为负值时, 实际提前量 = 名义提前量 - 预报误差(实际出现偏早, 则预报提前量中应除去预报误差的部分)。对预报质量的评估参照“误差 - 提前量百分比”, 即预报误差/实际提前量 * 100%, 当数值小于 35%, 代表预报质量较好; 数值介于 35%~70%, 预报质量一般; 数值大于 70%, 预报质量较差。对于大雾结束时间的评估, 方法与之类似。

Table 1. Evaluation of airport warning effectiveness for the starting time of heavy fog at Hongqiao Airport and Pudong Airport
表 1. 虹桥机场和浦东机场针对大雾开始时间机场警报效果评估

发布单位	发布时间	预计开始时间	实际开始时间	名义提前量	预报误差	实际提前量	误差 - 提前量百分比
虹桥	06:01	06:30	06:39	29 min	+9 min	29 min	31.0%
浦东	04:19	05:00	05:05	41 min	+5 min	41 min	12.2%

根据以上方法, 虹桥机场 06:01 发布第一份机场警报, 预计大雾 06:30 开始, 实际 06:39 开始, 警报名义提前量 29 min, 预报误差+9 min, 实际提前量 29 min; 浦东机场 04:19 发布第一份机场警报, 预计大雾 05:00 开始, 实际 05:05 开始, 警报名义提前量 41 min, 预报误差+5 min, 实际提前量 41 min (表 1)。针对大雾开始的临近预报, 机场警报质量较好(误差 - 提前量百分比均小于 35%)。

对于大雾结束时间(表 2), 虹桥机场 09:25 发布机场警报, 预计大雾 11:00 结束, 实际 10:30 结束, 警报名义提前量 95 min, 预报误差-30 min, 实际提前量 65 min; 浦东机场 08:29 发布机场警报, 预计大雾 09:30 结束, 实际 10:30 结束, 警报名义提前量 31 min, 预报误差 60 min, 实际提前量 31 min; 09:39 再次发布机场警报, 预计大雾 12:00 结束, 警报名义提前量 141 min, 预报误差-90 min, 实际提前量 51 min。两场针对大雾结束时间的预报效果不如大雾开始时间, 误差 - 提前量百分比明显增大, 特别是浦东机场预报结论较实况偏差相对明显。

Table 2. Evaluation of airport warning effectiveness for the end time of heavy fog at Hongqiao Airport and Pudong Airport
表 2. 虹桥机场和浦东机场针对大雾结束时间机场警报效果评估

发布单位	发布时间	预计开始时间	实际开始时间	名义提前量	预报误差	实际提前量	误差 - 提前量百分比
虹桥	09:25	11:00	10:30	95 min	-30 min	65 min	46.2%
浦东	08:29	09:30	10:30	31 min	+60 min	31 min	193.5%
	09:39	12:00		141 min	-90 min	51 min	176.5%

气象中心区域预报室和空管中心气象席位则整合两场预报结论, 并主要面向流量管理室、区管、进近等用户提供预警。相较机场警报, 区域室和气象席所提供预警需要具备更长时间提前量, 因此准确率方面必然受到影响。这里重点评估上述部门针对大雾结束时间预警效果。

如表 3, 空管中心气象席从 16 日 05:20 开始发布预警, 08:17 区域室发布重要天气快报, 均预报两场大雾于 09:00 结束。预报理由如下: 07:30~08:00 之间虹桥机场由西南偏南风(140~170 度)变为风向不定, 主导能见度由 350 米上升至 450 米, RVR18L 由最低 325 米上升至 800 米, 18R 为 450 米, 机场云高 60 米, 地面温度 12℃; 浦东机场由西南风(140~150 度)转为西南偏南风(170 度), 主导能见度 500 米, RVR35R 最低 550 米, 34L 由 450 米上升至 550 米, 35L 由 700 米上升至 800 米, 34R 最低 400 米, 机场云高 60 米, 地面温度 12℃。两场在上述时段出现了转风、能见度上升等有利变化, 符合大雾消散阶段气象要素

变化的部分特征, 据此气象中心维持两场大雾 09:00 结束的预报结论。然而不利条件也同时存在, 即地面气温上升不明显, 高空有云层覆盖, 风向上游雾区仍较为明显。

Table 3. Evaluation of the effectiveness of heavy fog end time warning for meteorological seats in regional forecast rooms and air traffic control centers

表 3. 区域预报室及空管中心气象席位大雾结束时间预警效果评估

发布单位	发布时间	预计结束时间	实际结束时间	名义提前量	预报误差	实际提前量	误差 - 提前量百分比	备注(预警机场)
气象席	05:20	09:00	10:30	220 min	+90 min	220 min	40.9%	浦东
	06:20			160 min	+90 min	160 min	56.3%	虹桥、浦东
区域室	08:17	09:00	10:30	43 min	+90 min	43 min	209.3%	虹桥、浦东
气象席	08:45	09:30	10:30	45 min	+60 min	45 min	133.3%	虹桥
气象席	09:20	11:00	10:30	100 min	-30 min	70 min	42.9%	虹桥、浦东
区域室	09:56	11:00	10:30	64 min	-30 min	34 min	88.2%	虹桥
		12:00	124 min	-90 min	34 min	264.7%	浦东	

至 08:30, 虹桥机场主导能见度 450 米, RVR18L 为 325 米、18R 为 400 米; 浦东机场主导能见度 500 米, RVR35R 为 800 米、34L 为 RVR700 米、35L 为 800 米、34R 为 700 米。浦东机场运行条件已明显好转, 虹桥机场转变不明显, 因此 08:45 气象席位将虹桥大雾结束时间调整至 09:30。

09:00 虹桥机场主导能见度下降至 400 米, RVR18L 为 375 米、18R 下降至 350 米; 浦东机场主导能见度 500 米, RVR35R 下降至 600 米、34L 下降至 600 米、35L 下降至 500 米、34R 为 750 米, 两场运行条件再次转差。考虑到此时仍有云层覆盖, 气温上升缓慢, 近地面辐合区实际移速较数值预报结果偏慢, 因此气象席位更新预警, 将两场大雾好转时间调整至 11:00。

09:30 浦东机场主导能见度上升, 但预计地面雾区抬升后低云仍维持(事实证明浦东机场 09:43~10:30 之间确实能见度转至 800~1200 米, 但云高仅 30 米), 因此区域室将浦东机场大雾(低云)结束时间调整至 12:00。

事后分析显示, 随着近地面辐合区完全东移出上海区域, 两场主导风向转为西南偏西(230~250 度)并稳定维持后, 大雾和低云才逐步好转。在这个过程中地面温度上升不明显(辐射雾消散经验不可用), 地面风向未完全转到西北或偏北方向(平流雾消散经验不可用), 因此如天气形势分析一节所述, 本次上海地区大雾即非典型辐射雾, 又非明显平流雾, 对运行关注的大雾消散时间预报技术难度较大。天气好转后, 区域预报室于 10:38 发布重要天气快报解除报, 虹桥机场于 10:41 发布机场警报解除报, 发布及时。浦东机场于 12:46 发布机场警报解除报, 发布滞后。

5. 机场运行情况

5.1. 虹桥机场

图 5 给出的是虹桥机场运行情况。由图 5(a)可见, 因大雾影响, 虹桥 16 日 06:00~13:59 之间航班实际起降架次少于计划架次, 平均每小时减少量达 12.6 架次。早间积压航班主要利用 14:00~19:59 逐步消化, 平均每小时较计划多起降 13.3 架次。从航班架次统计上来看表现为实际运行曲线峰值较计划曲线明显右移。在大雾时段中, 07:00 时次影响较小(不正常 3 架次), 与该时段能见度呈转好趋势有关; 09:00 时次则航班影响较大(不正常 21 架次), 这一时段虹桥机场雾最浓。此外还应注意, 天气好转后(11:00~12:59)航班影响同样较大(平均小时不正常 22 架次), 这主要由降落航班明显偏少引起(图 5(c))。

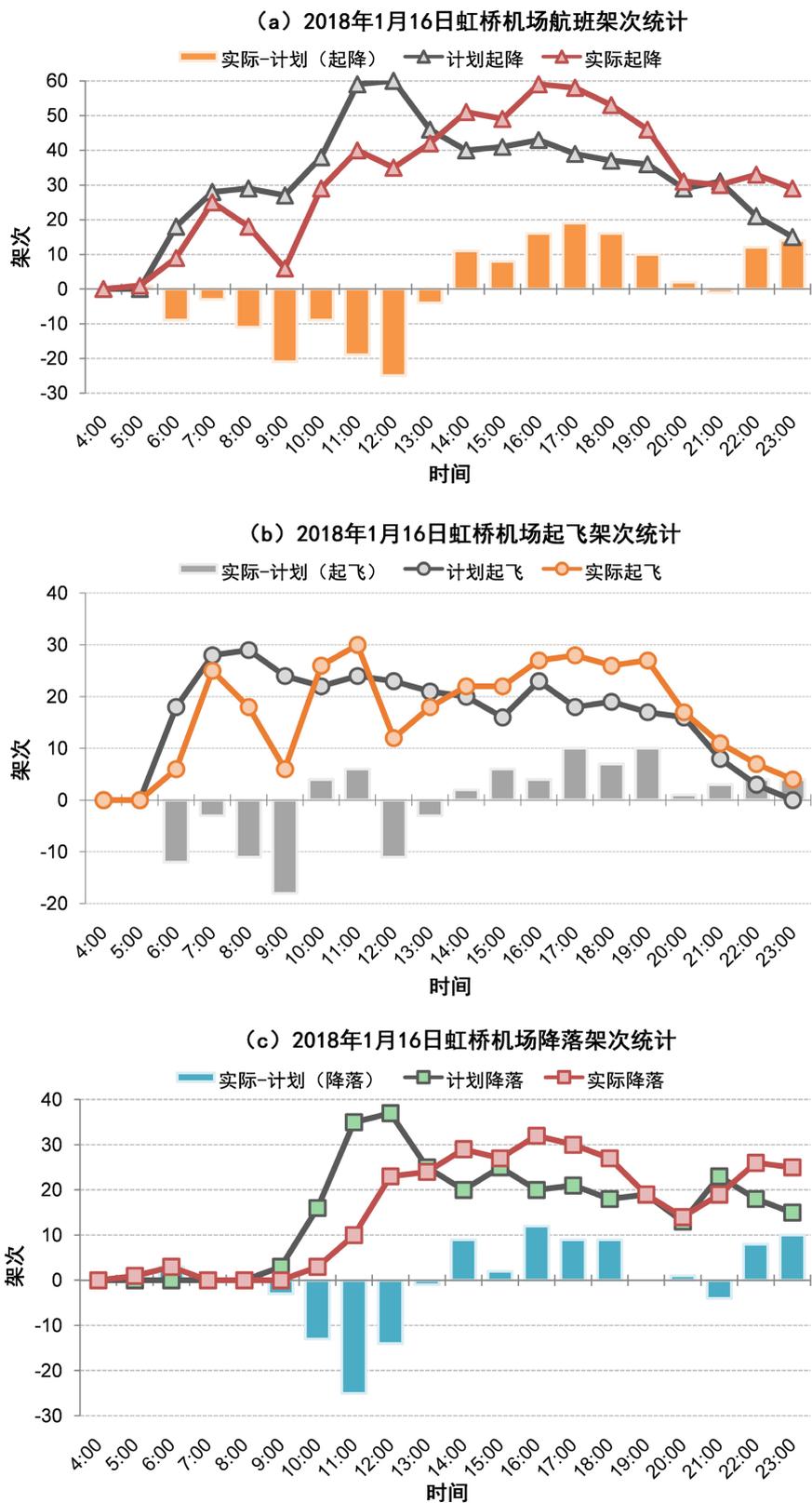


Figure 5. Operation of Hongqiao Airport on January 16th (green dashed box indicates heavy fog period)
 图 5. 1月16日虹桥机场运行情况(绿色虚线框为大雾时段)

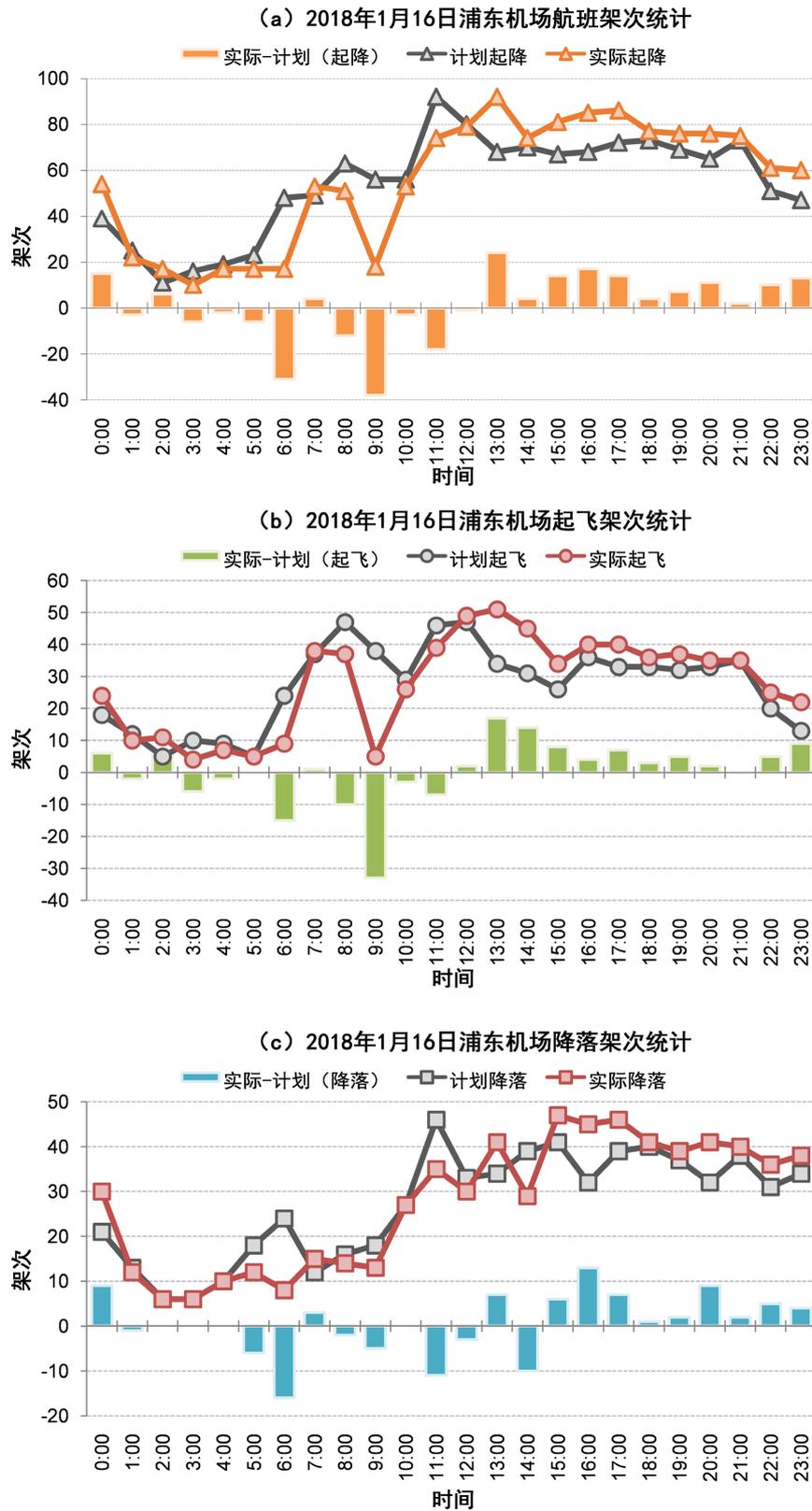


Figure 6. Operation of Pudong Airport on January 16th (green dashed box indicates heavy fog period)
图 6. 1月16日浦东机场运行情况(绿色虚线框为大雾时段)

分别分析起飞(图 5(b))和降落(图 5(c))航班架次可见,大雾对虹桥出港早高峰(06:00~09:59)影响明显,06:00 时次和 08:00~09:59 未正常起飞航班数量较多。大雾消散阶段及以后,起飞航班则能够快速恢复(10:00~11:59)。但受到降落航班大量延误影响,12:00 时次实际起飞航班架次再次明显偏少。进港早高峰阶段(10:00~12:59)影响同样明显,除大雾期间(10:00 时次)降落架次偏少外,大雾结束后两小时(11:00~12:59)降落架次仍显著偏少,这与航班放行安排有关。理想状态为航班在大雾消散之前放行,抵达目的地机场时能见度恰好恢复至落地标准,航班顺利降落。然而如“预报准确性评估”一节所述,目前技术手段下针对大雾的预报不可能在提前量达 2 h 以上情况下精确到分钟或 10 分钟量级,因此大雾消散阶段的航班运行效能偏低是必然存在的情况。现阶段应关注的问题是如何将运行效能偏低的时间合理缩短,这就要求针对大雾消散的预报准确率能够提高,为此需从技术、人员、决策能力多方面进行改进。

5.2. 浦东机场

图 6 给出的是浦东机场运行情况。由图 6(a)可见,大雾对浦东航班影响主要集中在 06:00 时次和 09:00 时次(均启动 II 类),分别有 31 架次和 38 架次航班未能正常起降,其次则为 08:00 时次(不正常 12 架次)和大雾结束后的 11:00 时次(不正常 18 架次)影响较大。延误航班在 13:00~23:59 之间陆续执行,平均每小时较计划多起降 10.9 架次,使得浦东机场在 16 日后期一直维持满负荷运行。总体来看,大雾对浦东航班的影响具有波动性,07:00 时次和 08:00 时次机场处于 I 类运行状态,从起降架次上看受影响并不明显。

针对起飞航班架次(图 6(b)),09:00 时次影响最大,而实际上该时段能见度逐步上升(符合起飞标准),仅云高下降至 30 米,但由于此时区域内进港航班盘旋等待数量较多,已无空域或人力资源保障出港航班。在大雾结束后,起飞航班数量基本能够恢复至计划量,13:00 以后逐步开始消化未起飞积压航班。降落航班架次分析如图 6(c)所示,在浦东第一次实施 II 类运行的 05:00 时次和 06:00 时次,航班实际降落数量较计划数量明显偏少,小时最大减少量达 16 架次。第二次 II 类运行的 09:00 和 10:00 时次,航班实际降落数量已有一定改善。大雾天气结束后降落航班数量有一定恢复,但总体仍低于计划量,13:00 以后实际降落数量陆续高于计划量。

6. 小结和讨论

大雾天气的复杂性不仅体现在其生消突然,更体现在往往具有明显的波动性特征,因此无论是预报员的预测、服务,还是管制员对预报结论的理解,都有一定难度。总结来看,本次大雾天气过程的管制与气象融合分析具有如下特点:(1) 虹桥机场 16 日 06:30~10:29 出现大雾天气,跑道使用端 RVR 最低 250 米,云高最低 30 米,虹桥塔台实施 HUD 运行。浦东机场 16 日 05:05~10:29 出现大雾天气,跑道使用端 RVR 最低 400 米,云高最低 30 米,浦东塔台两次实施 II 类运行。(2) 本次大雾由入海高压后部弱气压场配合浅层大湿区,在近地层辐合触发下形成。预报员提前 12 h 预报出上海两场大雾,其他主要机场不受影响。针对雾生的预报质量较好,针对雾消的预报误差较大,效果不甚理想。(3) 16 日虹桥、浦东两场早高峰航班运行受到严重影响。大雾消散阶段及以后,起飞航班能够快速恢复,降落航班恢复具有一定滞后性。16 日后期两场维持满负荷运行。

但也需指出,尽管目前数值预报技术已大幅改进,针对大雾天气的预报经验有所积累,但由于数值预报本身时空分辨率和准确性有限、大雾天气类型复杂、发生背景多变、持续期间波动性强、消散阶段涉及多气象要素相互博弈、预报人员对复杂情况把握能力不强,因此针对大雾的航空气象要素(RVR、云高)精细化预报技术难度仍旧很大。此外,雾的发生时段不同,对运行造成的影响也不同,管理者在大雾天气下一方面不能期待航班运行仍接近理想状态,另一方面在敏感时间节点(雾生或雾消)应做出渐变或弹性式的运行策略设置。未来则需进一步提高气象技术水平和气象人员业务能力;关注重点转为气象与

运行结合的天气影响；进一步优化气象预警种类和内容，以支持实际运行决策。

参考文献

- [1] 民航局. 关于落实国务院民生领域督查工作部署全面开展航班正常督查工作的通知[Z]. 局发明电（2015）2710号.
- [2] 民航局. 关于2015年航班正常情况的通报[Z]. 局发明电（2016）265号.
- [3] 民航局空管局. 关于开展大面积航班延误应急响应机制建设工作的通知[Z]. 民航空发明电（2014）315号.
- [4] 民航局空管局. 民用航空空中交通流量管理运行指导材料[Z]. IB-TM-2014-002.
- [5] 民航局. 中国民用航空仪表着陆系统 II 类运行规定[Z]. CCAR-91FS-II.
- [6] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 448-449.
- [7] Koracin, D., Lewis, J., Thompson, W., Dorman, C. and Businger, J. (2001) Transition of Stratus into Fog along the California Coast: Observations and Modeling. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 1714-1731. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1714:TOSIFA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1714:TOSIFA>2.0.CO;2)