

周星旭,李昀英,张潮,2023. 飞机积冰预报方法及应用场景研究[J]. 气象,49(4):415-426. Zhou X X, Li Y Y, Zhang C, 2023. Study on the forecasting method and application scenario of aircraft icing[J]. Meteor Mon, 49(4):415-426(in Chinese).

飞机积冰预报方法及应用场景研究^{*}

周星旭 李昀英 张 潮

国防科技大学气象海洋学院,长沙 410073

提 要: 基于两种常用的飞机积冰诊断指数,利用 ERA5 再分析资料作为积冰发生的大气环境场,构建了飞机积冰诊断预报模型,对采集到的 25 个华东地区春季积冰个例进行了回算,并分别计算了我国不同纬度典型城市上空飞机积冰发生的时空分布特征,模拟了一次冷空气活动过程中浙江新昌上空积冰区域的时空分布,提出了飞机积冰预报方法的几种应用场景。结果表明:在选取的积冰个例中,积冰(IC)指数法诊断准确率为 80%,假霜点温度经验法诊断准确率为 92%;假霜点温度经验法考虑了飞机飞行速度与动力增温的影响,并且与冰水粒子浓度和中、低云的云量相关性更好,但在没有飞机真实空速情况下预测的积冰强度不够准确,400 hPa 以上高度空报较多;IC 指数法和假霜点温度经验法均能有效诊断出积冰易发生高度层和积冰高发时段,也可以有效预报某站点高空积冰强度分布情况,另外假霜点温度经验法可以反演发生积冰时的飞机临界飞行速度。

关键词: 飞机积冰, 积冰强度, 诊断预报方法, 应用场景

中图分类号: P426, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.030702

Study on the Forecasting Method and Application Scenario of Aircraft Icing

ZHOU Xingxu LI Yunying ZHANG Chao

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073

Abstract: In this paper, based on two commonly used aircraft icing diagnostic indices and ERA5 reanalysis data as the atmospheric environmental field for icing occurrence, an aircraft icing diagnosis and forecasting method is constructed and hindcast for 25 collected spring icing cases over Eastern China. The spatial and temporal distribution characteristics of aircraft icing occurrence over typical cities at different latitudes in China are calculated separately, and the spatial and temporal distribution of icing areas over Xinchang, Zhejiang Province during one cold air activity case is simulated. In addition, several application scenarios of aircraft icing forecasting methods are proposed. The results indicate that among the selected icing cases, the diagnosis accuracy of icing index (IC) method is 80%, while that of the false frost point temperature empirical (TF) method is 92%. The effects of aircraft flight speed and power warming are taken into account by TF method, which has better correlation with ice water particle concentration and cloud cover in medium and low clouds, but the predicted icing intensity is not accurate enough without the real flight speed of the aircraft, and there are more false forecasts of icing intensity above 400 hPa altitude. In general, both the IC and TF methods can effectively diagnose the icing-prone altitude layer and the icing-prone time, and can effectively forecast the distribution of high-altitude ice accumulation intensity at a certain station. In addition, the TF method can calculate the icing critical flight speed of the aircraft.

Key words: aircraft icing, icing intensity, diagnosis and prediction method, application scenario

^{*} 国家自然科学基金项目(42075077)、国家重点研发计划(2018YFC1507604)共同资助

2022 年 1 月 21 日收稿; 2023 年 3 月 17 日收修定稿

第一作者:周星旭,主要从事气象学研究. E-mail:zhouxingxu@nudt.edu.cn

通讯作者:李昀英,主要从事云动力学与云气候学研究. E-mail:ghlyy@mail.iap.ac.cn

引言

飞机积冰指的是飞机表面某些部位聚积冰层的现象,它往往是由云层内或降水中的过冷水滴撞击机身时结冰造成的,此外水汽在机身表面直接凝结也有可能形成积冰(王钦和吴俊杰,2018;孙晶和李想,2020)。近年来,我国航空业发展迅速,民用航空活动日益频繁,且随着军事飞行训练越来越贴近实战,飞行也越来越频繁,昼间跨区域飞行、夜间飞行、复杂气象条件飞行等已经成为常态,飞机遇到积冰的可能性大大增加,而华东地区空域繁忙,是飞机受积冰威胁最大的地区之一。积冰在飞机某些部位形成,影响飞机空气动力性能,升力减小,阻力增加,降低飞机的稳定性和可操作性,严重时还会造成重大事故(何新党等,2012)。因此,如何准确预报出飞机积冰是航空气象中亟需解决的技术难题之一。

关于积冰的预报,国内外已经有不少学者进行了研究。产生飞机积冰的气象条件,可以概括为以下三点:有足够的过冷水滴、环境温度和飞机表面温度低于 0°C (徐文霜,2020)。国内外的学者根据积冰的气象条件提出了不同的积冰预报方法,例如应用比较广泛的 IC 指数法(icing index method; Schultz and Politovich, 1992)、RAP 指数法(research applications program icing scheme; Thompson et al, 1997)、RAOB 方法(rawinsonde observation icing scheme by Air Force Global Weather Central; Zhang et al, 2016)、I 积冰指数法(I icing index method; 卞双双等, 2019)、假霜点温度经验法(Carrière et al, 1997),此外还有 Willam 算法(Smith et al, 2012)和改进的 IC 指数法(王新炜等, 2002)等基于统计结果改进的算法。近年来对上述飞机积冰算法有一些对比研究,刘凤林等(2011)统计验证了 RAP 指数法、IC 指数法、RAOB 方法等三种方法对积冰强度的诊断效果,结果表明 IC 指数法和 RAOB 方法两种算法效果较好。杨洁等(2020)利用 NCEP 再分析资料对江淮区域一次冷锋天气过程进行了云微物理过程分析,根据冷锋过程中的积冰报告,分别利用 IC 指数法和 Willam 算法进行积冰预报和诊断。不少学者基于新方法提出了新的积冰预报模型。赵阳等(2018)构建了基于云探测卫星 CloudSat 产品诊断飞机积冰潜势的模型,并在全球范围内对飞机积冰出现频率进行了统计分析。齐

晨等(2019)基于模糊逻辑隶属度函数,在考虑温度和相对湿度的基础上,补充垂直速度和云量作为判别因子定义了积冰指数,飞机积冰的预报准确率高于常用的 IC 指数法。王磊等(2014)建立了基于卫星资料、数值模式资料和地面观测资料的积冰潜势监测方法,通过与 20 个飞机探测积冰报告比较,发现积冰识别率为 90%,证明该方法具有一定实际应用价值。卞双双等(2019)根据飞机人工降雨作业获得的积冰实例数据,利用 WRF 区域模式对飞机积冰进行数值模拟,采用七种比较常见的积冰预报方法分别模拟积冰的发生,并建立了基于评分权重积分法的积冰强度综合预报模型,结果发现,IC 指数法、假霜点温度经验法和 RAOB 法用于综合预报时的预报准确率最高。

刘开宇等(2005)基于世界区域预报系统(World Area Forecast System; WAFS)对 2004 年一次积冰过程的环境特征变量进行了分析,用修正的积冰指数得到了较好的预报结果。曹丽霞等(2004)将模式模拟和卫星反演的微物理参数引入飞机积冰分析和预报,指出模式模拟有助于提高飞机积冰预报的准确性和合理性。孙晶等(2019)基于 NCEP 再分析资料 and 各类探测资料,利用数值模拟分析了飞机积冰的气象条件,成功得到了与实测比较一致的云微物理结构。杨超(2017)研究归纳了 NCEP、ERA、JRA 三种再分析资料的特性,对比了不同资料在积冰预报中的准确性,基于 ERA 资料的积冰预测准确率为 92%,积冰强度预测准确率为 60%,均优于 NCEP 和 JRA。这些研究表明,ERA 再分析资料在飞机积冰的预报中有较好的表现。

然而,国内针对飞机积冰的研究主要集中于积冰预测算法,对算法的应用场景研究较少。本文针对 2013 年春季华东地区 25 个积冰个例,基于 ERA5 再分析资料利用 IC 指数法和假霜点温度经验法分别模拟积冰强度,进行统计检验,并给出可能的应用场景,分析华东地区 3 月积冰发生的时空分布,并反算积冰临界飞行速度,为预报飞机积冰提供依据。

1 资料和方法

1.1 积冰资料

飞机积冰资料来源于 2013 年华东地区的 25 个

飞机积冰报告,该资料包含了积冰报告的时间、高度、积冰强度以及飞机机型等信息。

采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的ERA5再分析资料进行模拟,资料的水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为1 h(每日24次),高度从1000 hPa到1 hPa共37层,在大气物理场变量中,主要采用了温度、相对湿度和云中液态水含量诊断积冰。

1.2 积冰诊断算法

目前,国内外有七种常用的积冰诊断算法,根据卞双双等(2019)对积冰诊断算法的研究,I指数法和RAOB法漏报率较高,而改进的-8D法和SCEM法只能简单判断积冰有无,不能得到积冰强

度和积冰潜势,因此本文主要选取IC指数法和假霜点温度经验法,并检验其预报效果。

(1) IC指数法

IC指数法是国际民航组织推荐的一种积冰指数诊断方法,根据飞机所处区域的温度和湿度条件确定是否有积冰。研究表明,飞机在环境温度 $-14 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 遭遇过冷水滴最容易积冰,最强的积冰发生在 $-9 \sim -5^{\circ}\text{C}$ (刘烈霜等,2013)。利用ERA5再分析资料中的温度和相对湿度,采用IC指数可以分析出积冰区域:

$$\text{IC} = [(\text{RH} - 50\%) \times 2] \times \left[T \times \frac{T + 14}{-49} \right] \quad (1)$$

式中:RH为相对湿度(单位:%),T为环境温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)。表1为积冰强度判据。

表1 IC指数法判据

Table 1 Criteria of icing index method (hereinafter referred to as IC method)				
IC指数/%	<0	$0 \leq \text{IC} < 50$	$50 \leq \text{IC} < 80$	$80 \leq \text{IC}$
积冰强度	无积冰	轻度积冰	中度积冰	强积冰

(2) 假霜点温度经验法

Carrière et al(1997)对霜点法进行修正给出了假霜点温度经验法,相较于霜点法通过判断云中水汽饱和程度来确定积冰,假霜点温度经验法综合考虑了飞机的动力增温以及飞行高度上的温度、湿度情况,更接近实际的积冰发生条件。

$$T_{\text{fi}} = -0.15 \times \left(\frac{V}{100} \right)^2 \times (T - T_{\text{d}}) \quad (2)$$

式中: T_{fi} 为假霜点温度,V为相对空气的飞行速度(以下简称空速,单位: $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),T为温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), T_{d} 为露点温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)。表2为积冰强度判据。

表2 假霜点温度经验法判据

Table 2 Criteria of false frost point temperature empirical method (hereinafter referred to as TF method)			
T_{fi} 指数	$T_{\text{fi}} - T \leq -0.15 \left(\frac{V}{100} \right)^2$	$T_{\text{fi}} - T > -0.15 \left(\frac{V}{100} \right)^2$	$T_{\text{fi}} - T > 0$
积冰强度	无积冰	有积冰	中度以上积冰

ERA5再分析资料未给出各层露点温度 T_{d} ,因此采用Magnus-Tetens模型(Tetens, 1930)根据温度和相对湿度计算各层露点温度近似值,并简化积冰判据:

$$T_{\text{Fi}} = T_{\text{fi}} - T + 0.15 \left(\frac{V}{100} \right)^2 \quad (3)$$

$T_{\text{Fi}} > 0$ 表示有积冰, $T_{\text{Fi}} \leq 0$ 表示无积冰,且 T_{Fi} 越大表示积冰强度越强。

2 积冰诊断算法检验

针对华东地区25个积冰报告个例,对IC指数

法和假霜点温度经验法进行检验。研究区域为($24^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$),高度选择ERA5资料提供的37层高度分层,输入数据为温度T(单位: $^{\circ}\text{C}$)、相对湿度RH和飞机空速V,输出为积冰强度。检验情况如表3。

值得注意的是个例中无飞机空速,模拟中采用假设空速,假设飞机为巡航状态,空速为四种机型飞机的巡航速度,A320、伊76、运8、B737分别为955、800、550、828 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

为了对积冰模型进行检验,将可能情况分为四种:诊断有积冰,观测有积冰,记为事件A;诊断无积冰,观测有积冰,记为事件B;诊断有积冰,观测无积

冰,记为事件 C;诊断无积冰,观测无积冰,记为事件 D。根据 Brown et al(1997),检验统计指标可以表述为:

$$\text{准确率} = (A + D)/(A + B + C + D)$$

$$\text{空报率} = C/(A + C)$$

$$\text{漏报率} = B/(B + D)$$

由表 3 可见,IC 指数法在 19 次有积冰情况中成功预测 14 次,漏报 5 次,在 6 次无积冰情况中成功预测 6 次,IC 指数法诊断预测准确率为 80%;假霜点温度经验法在 19 次有积冰情况中成功预测 19 次,无漏报,在 6 次无积冰情况中成功预测 4 次,空报 2 次,假霜点温度经验法诊断预测准确率为 92%,但积冰强度预测偏大。

5000 m 以下的 19 个个例中,IC 指数法成功预测 17 次(4 次积冰强度偏大),漏报 2 次,准确率为 89.5%,假霜点温度经验法成功预测 19 次(4 次积冰强度偏大);5000 m 以上的 6 个个例中,IC 指数法成功预测 3 次,漏报 3 次,预测准确率为 50%,假霜点温度经验法成功预测 4 次(2 次积冰强度偏大),空报 2 次,预测准确率为 66%。

在检验中,两种算法均能有效预测积冰发生,假霜点温度经验法准确率更高,但两种方法在中低空(5000 m 以下)和高空(5000 m 以上)预测准确率相差较大,中低空预测准确率远远高于高空预测准确率,假霜点温度经验法预测准确率高于 IC 指数法。IC 指数法容易造成漏报,假霜点温度经验法容易造成空报,下面引入积冰个例进行分析。

2013 年 2 月 8 日 09 时(世界时,下同),一架 B737 飞机在无锡上空遭遇积冰,分别在 3000 m、1500 m 发送飞行报告(表 3 中序号 7、8)。

分别利用两种方法分析上述 2 个个例,图 1、图 2 分别表示第 7、第 8 个积冰个例发生时所在高度上的积冰强度分布。第 7、第 8 个个例均发生在江苏地区,检验高度分别为 3000 m、1500 m,基本对应 700 hPa、850 hPa 气压高度。根据 ERA5 资料,江苏区域云中液态水含量大于 $0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,表明积冰区域存在液态水(图略)。模拟结果与飞机报告中江苏省中南部上空 3000 m 和 1500 m 发生飞机积冰的情况基本吻合。然而 IC 指数法计算得到的积冰范围偏小,诊断高空积冰能力偏弱,假霜点温度经验

表 3 25 个积冰个例的检验结果

Table 3 Verification of 25 individual cases of ice accumulation

序号	时间/UTC (年.月.日,时刻)	机型	检验高度/m	飞机报告	IC 指数法	假霜点温度 经验法
1	2013.2.6,00:30	运 8	800	轻度积冰	中度积冰	轻度积冰
2	2013.2.6,01:30	B737	800	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
3	2013.2.7,00:00	B737	800	轻度积冰	强积冰	强积冰
4	2013.2.7,11:00	B737	800	轻度积冰	中度积冰	中度积冰
5	2013.2.8,02:00	B737	3000	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
6	2013.2.8,02:00	B737	5500	轻度积冰	无积冰	中度积冰
7	2013.2.8,09:00	B737	3000	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
8	2013.2.8,09:00	B737	1500	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
9	2013.2.8,09:00	B737	800	轻度积冰	中度积冰	中度积冰
10	2013.2.18,02:30	B737	7000	轻度积冰	无积冰	强积冰
11	2013.2.18,02:30	B737	9000	无积冰	无积冰	强积冰
12	2013.2.18,02:30	B737	3000	无积冰	无积冰	无积冰
13	2013.2.18,02:30	B737	1500	无积冰	无积冰	无积冰
14	2013.2.18,08:00	B737	1500	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
15	2013.2.18,08:00	B737	800	轻度积冰	无积冰	轻度积冰
16	2013.2.18,11:00	B737	1500	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
17	2013.2.18,11:00	B737	800	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
18	2013.2.19,03:00	B737	3000	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
19	2013.2.19,04:30	B737	5500	无积冰	无积冰	中积冰
20	2013.3.1,02:00	A320	5500	无积冰	无积冰	无积冰
21	2013.3.1,02:00	A320	3000	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
22	2013.3.1,02:00	A320	1500	轻度积冰	无积冰	轻度积冰
23	2013.3.20,12:00	伊 76	800	轻度积冰	轻度积冰	轻度积冰
24	2013.3.28,02:00	运 8	5500	轻度积冰	无积冰	轻度积冰
25	2013.3.28,02:00	运 8	3000	无积冰	无积冰	无积冰

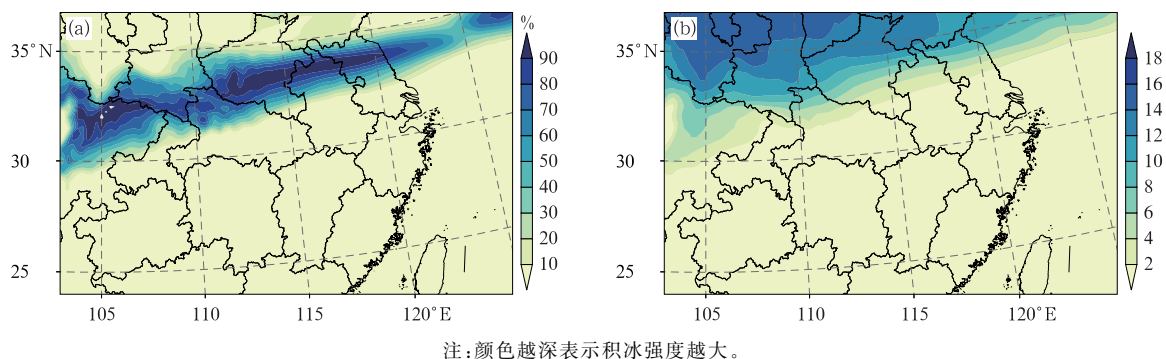


图1 (a)IC指数法和(b)假霜点温度经验法模拟的2013年2月8日09时700 hPa积冰强度分布

Fig. 1 Simulated distribution of ice accumulation intensity by (a) IC method and
(b) TF method at 700 hPa at 09 UTC 8 February 2013

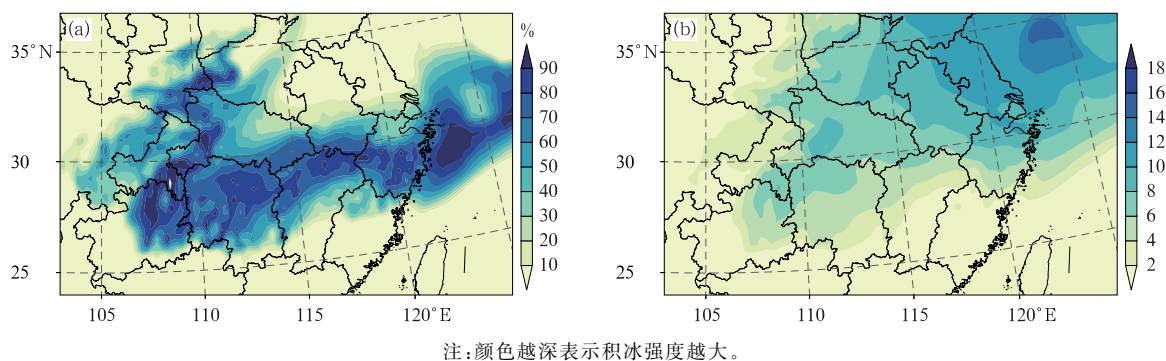


图2 (a)IC指数法和(b)假霜点温度经验法模拟的2013年2月8日09时850 hPa积冰强度分布

Fig. 2 Simulated distribution of ice accumulation intensity by (a) IC method and
(b) TF method at 850 hPa at 09 UTC 8 February 2013

法有一定预测能力,但计算的积冰强度略大,会产生空报。

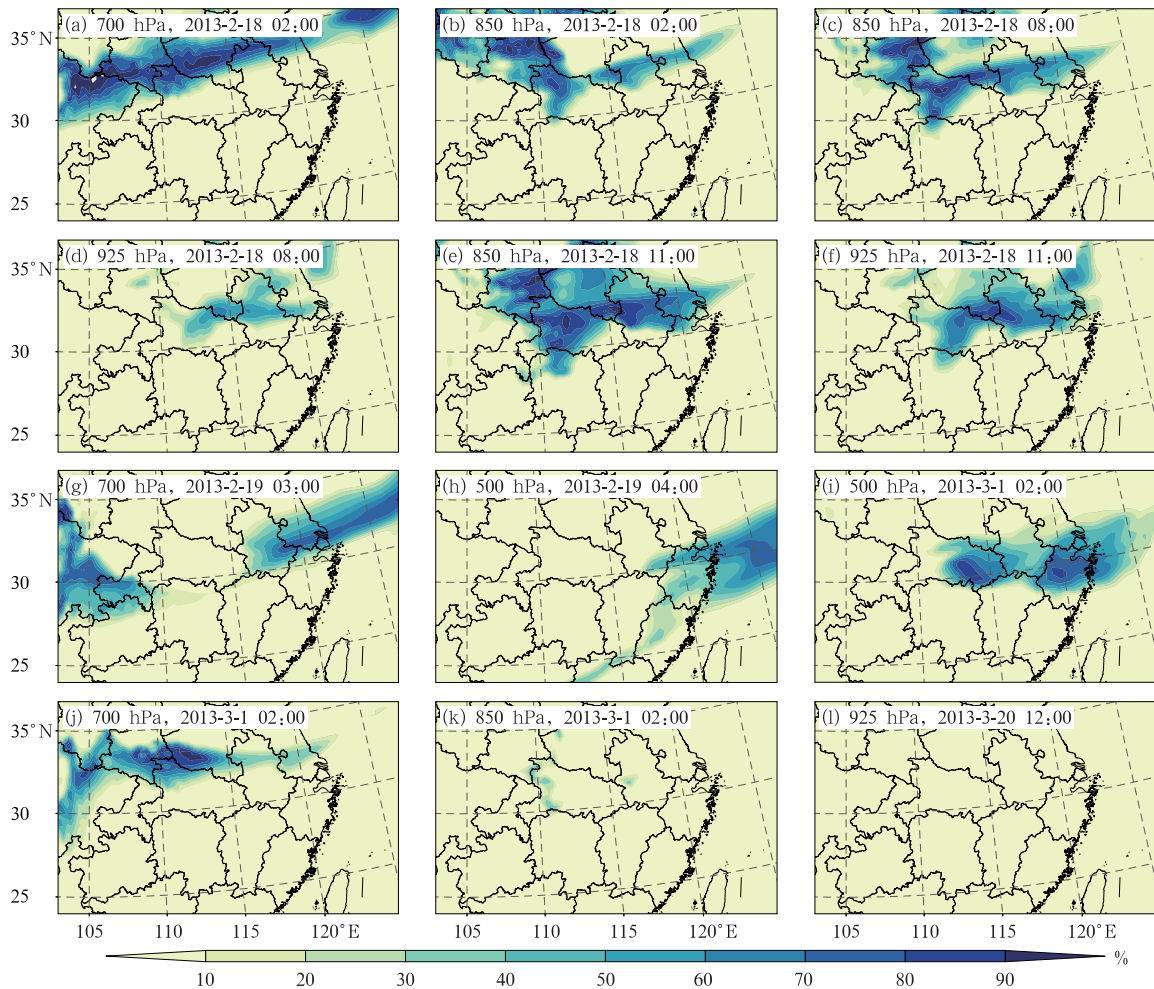
第12~第23个个例发生时所在各高度层积冰强度如图3、图4所示。结果显示,IC指数法预测易积冰高度层在700~500 hPa,且发生轻度以上积冰;而假霜点温度经验法则预测易积冰高度层为850~500 hPa,在500 hPa易发生强积冰,其覆盖范围更广,结果与飞行报告基本吻合。

综上所述,假霜点温度经验法考虑了飞机飞行速度与动力增温的影响,对春季华东地区有更高的积冰预测准确率,能有效预测出不同高度的积冰情况,漏报率明显小于IC指数法,但模拟中将飞机巡航速度设为空速,没有考虑风场的影响,可能与真实情况有所出入。IC指数法基于大气温度和相对湿度计算积冰潜势,结果实际上反映了该环境背景下积冰的可能性,并且在高空区域空报数少于假霜点

温度经验法,因此在风场条件和飞机空速不确定的情况下,IC指数法可能更为可靠,在实际应用中可以结合使用两种算法。

3 积冰个例分析

使用两种方法预测某站点空中积冰强度分布情况。2013年3月1—2日,浙江遭受入冬以来最大范围的寒潮,新昌等市达到强寒潮级别,日平均气温48小时降温幅度超过 9°C ,第20~第22个个例取自该寒潮过程,以2013年3月1日新昌为例,利用两种算法分析积冰发生气象条件,计算并绘制新昌2013年3月1日未来24小时内积冰发生高度情况(运8,空速: $550\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$),图5分别为两种方法预测结果。



注:图 3a~3l 依次为第 12~第 23 个积冰个例。

图 3 由 IC 指数法计算得到的华东地区积冰强度分布

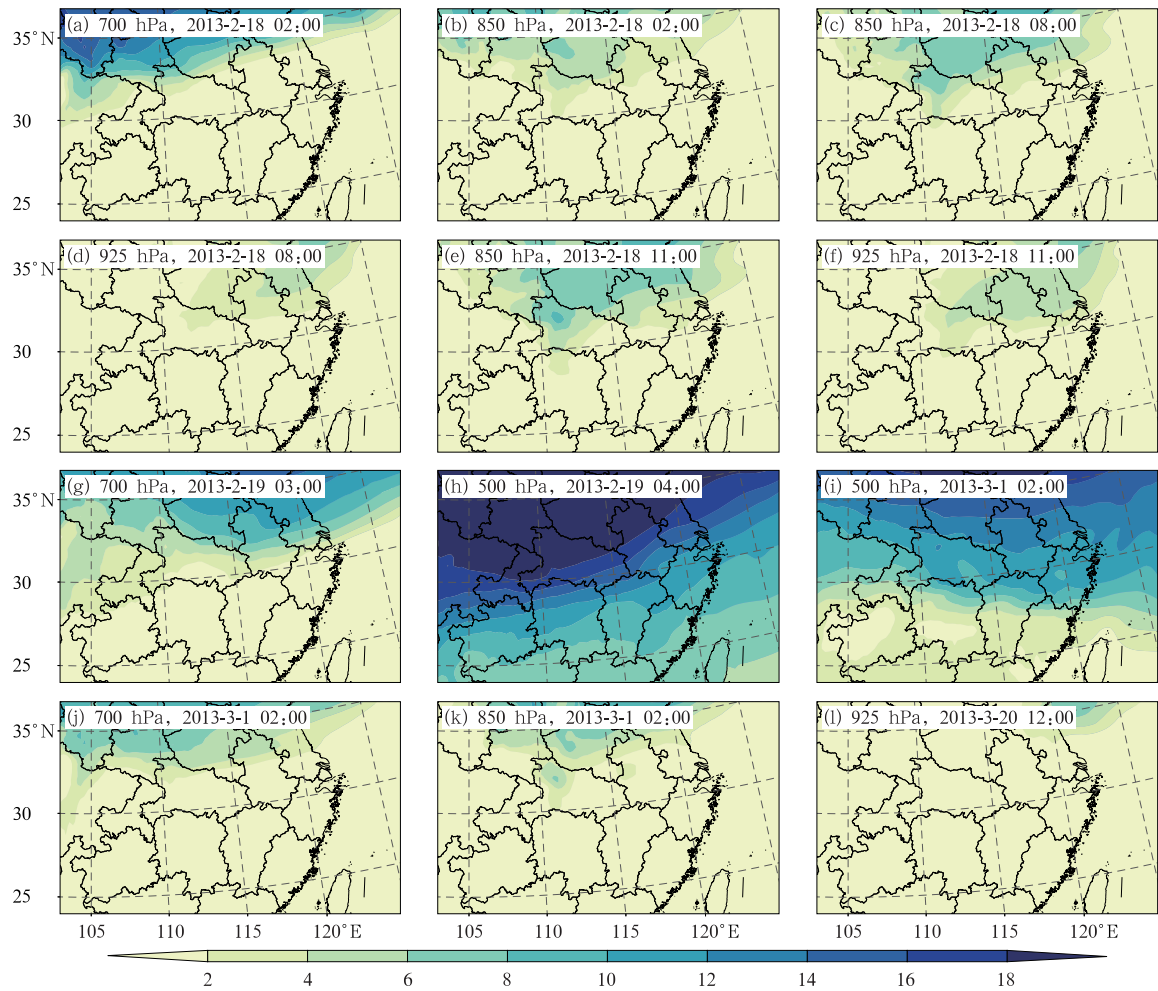
Fig. 3 Distribution of ice intensity over Eastern China calculated by IC method

图 5a 表明,根据 IC 积冰指数的计算结果,04—23 时 900~850 hPa 有可能发生积冰,全天 650~500 hPa 高度有中度积冰。假霜点温度经验法的结果显示,03—07 时、14—21 时 900 hPa 高度有轻度积冰,700~450 hPa 有中度积冰,12—23 时 250 hPa 有轻至中度积冰(图 5b)。两种方法计算的积冰时空分布基本吻合,但 IC 指数法诊断 400 hPa 以上无积冰,而假霜点温度经验法得到的 900 hPa 积冰持续时间短于 IC 指数法。

04—23 时 1000~800 hPa 等温线明显对应了新昌市低层冷空气移动过程,与两种方法积冰预测时空范围吻合。基于袁敏等(2017)的研究,由于过冷水含量随温度降低而减少,绝大多数积冰发生在温度高于 -20°C 的环境中,过冷水含量高的情况下,极少数积冰发生在 -20°C 。图 5b 显示,假霜点温度

经验法预测在 12—23 时 250 hPa 有积冰发生,但该层温度远低于 -20°C ,不符合积冰发生规律。为验证假霜点温度经验法对高层大气的积冰诊断效果,对 2013 年 3 月 1 日新昌的大气物理环境进行分析(图 6,图 7)。

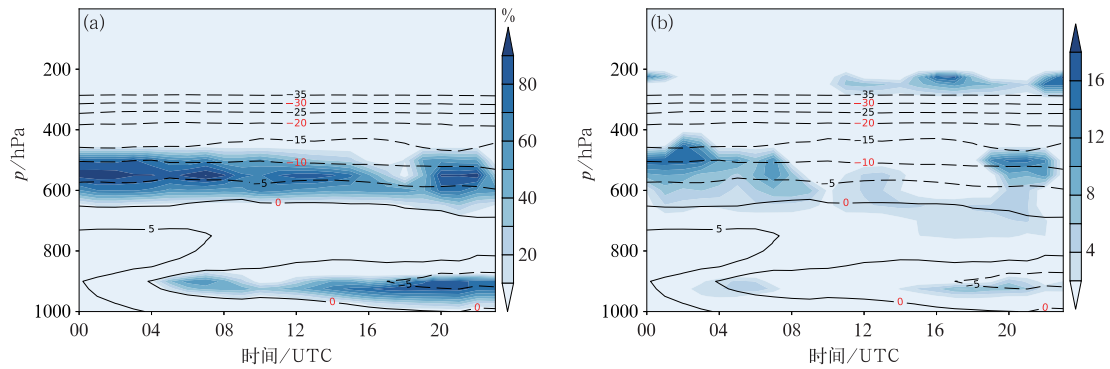
大气中低层云团以冰云为主(刘雪梅等,2016;刘旸等,2017),云团中的冰晶凝附增长可能导致飞机积冰。00—04 时、20—23 时 500 hPa 高度有较高浓度的冰水粒子,与两种方法诊断的 500 hPa 积冰主要时空分布吻合,满足产生中度积冰的环境条件(图 6)。700 hPa 以下主要为液态水,随着低层冷空气的移动和垂直气流的影响而逐渐消失,在 16—20 时部分转化为冰水粒子停留在 700 hPa,该区域与两种算法中底层积冰分布诊断吻合,进一步验证了两种算法对积冰具有较好的诊断效果。另外,低云



注:图 4a~4l 依次为第 12~第 23 个积冰个例。

图 4 由假霜点温度经验法计算得到的华东地区积冰强度分布

Fig. 4 Distribution of ice intensity over Eastern China calculated by TF method



注:填色:积冰指数;黑色等值线:温度,单位:℃。

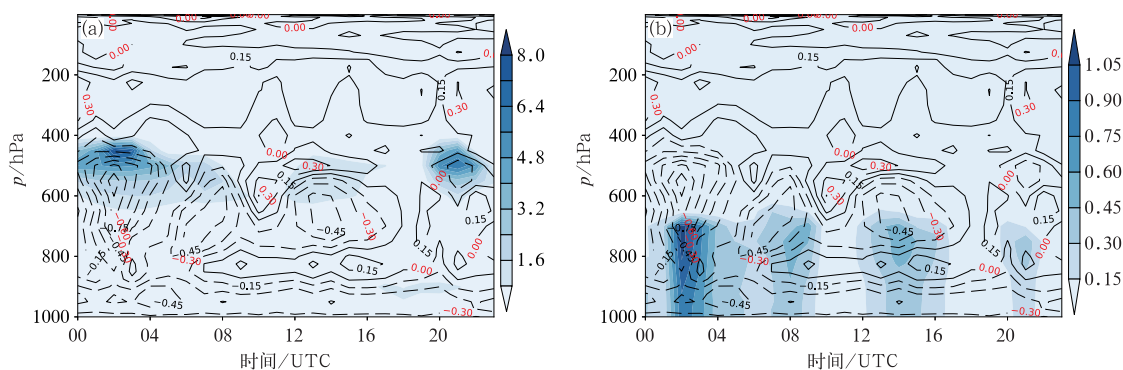
图 5 (a)IC 指数法,(b)假霜点温度经验法诊断的 2013 年 3 月 1 日新昌飞机积冰的时空分布

Fig. 5 Forecasted spatio-temporal distribution of aircraft ice accumulation by

(a) IC method and (b) TF method in Xinchang on 1 March 2013

量和总云水含量与假霜点温度经验法有较好的相关,而 IC 指数法与中低云量的变化相关不明显(图 7)。

图 6 显示 250 hPa 无冰水粒子,且该区域温度远小于 -20°C ,不满足积冰发生条件,而假霜点温度经验



注:黑色等值线为垂直速度,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 6 2013 年 3 月 1 日新昌(a)云冰水含量(填色,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$),
(b)云液态水含量(填色,单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的时空分布

Fig. 6 Spatio-temporal distribution of (a) cloud ice water content (shaded, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and
(b) cloud liquid water content (shaded, unit: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in Xinchang 1 March 2013

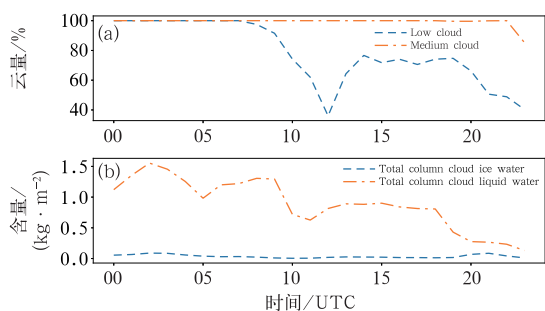


图 7 2013 年 3 月 1 日新昌(a)中低云量,
(b)总云冰(液体)水含量

Fig. 7 (a) Medium and low cloud cover and
(b) total cloud ice (liquid) water content in
Xinchang on 1 March 2013

法诊断该区域有轻度积冰,明显为空报,验证了模拟中假霜点温度经验法高空错报较多的结论。

在实际的积冰预报工作中,应当将两种方法诊断结果进行比对,结合使用,并利用数值预报产品提供的温度、湿度等相关物理量,代入诊断方程获取对积冰的预报结果。两种算法对中低层的积冰均有较好诊断效果,而假霜点温度经验法考虑了飞机的动力增温,且与低云量和冰水粒子浓度有更好的相关,但在 400 hPa 以上空报较多。实际应用中也应针对不同机型谨慎开展预报,例如:对于大型飞机或运输机,该类飞行器空速较慢,加速度小,加速增温效果较差,容易遭遇较强积冰,在进行积冰预报时需要更加谨慎,此时选择假霜点温度经验法预报较为合适,能够精准地预测积冰区域,虽然可能造成预测积冰强度偏大,但能有效保障大型飞机的飞行安全。对于歼击机或加速性能先进的飞机,该类飞行器空速

快,加速度大,如果在高空遭遇了飞机积冰,也可以通过加速使表面增温从而融化积冰,且该类飞机往往执行难度更大的训练任务或大型活动,需要忽略影响较小的轻度积冰,不宜出现过多空报,因此选择 IC 指数法预测较为合适,在保障安全的情况下在规定时间内完成任务。并且,积云和混合云中冰晶的淞附增长能力强,积冰潜势大,航空保障中需格外注意中低云的影响(朱士超和郭学良,2014;蔡兆鑫等,2019;刘香娥等,2020)。

4 积冰预报算法应用场景研究

对于飞机的季节分布差异而言,各个季节的积冰区分布差异比较显著,夏季积冰频率较低,冬春季频率较高(赵阳等,2018),且在春季,我国东部地区具有形成飞机积冰合适的温湿条件(王新炜等,2002)。因此,主要选取 3 月我国东部地区进行积冰预报算法应用场景的分析研究。

4.1 积冰易发生高度层分析

为了分析不同高度层上飞机积冰概率的分布情况,同时考虑不同纬度气候背景的差异,选取 2012—2021 年连续 10 年的逐小时再分析资料,分析 3 月的积冰潜势。用 IC 指数法和假霜点温度经验法分别计算了哈尔滨、北京、长沙、广州四个站各高度层积冰发生概率,其中,假霜点温度经验法中的空速取运 8 巡航速度(下同),其结果如图 8 所示。

图 8a 给出了 IC 指数法预报的哈尔滨、北京、长

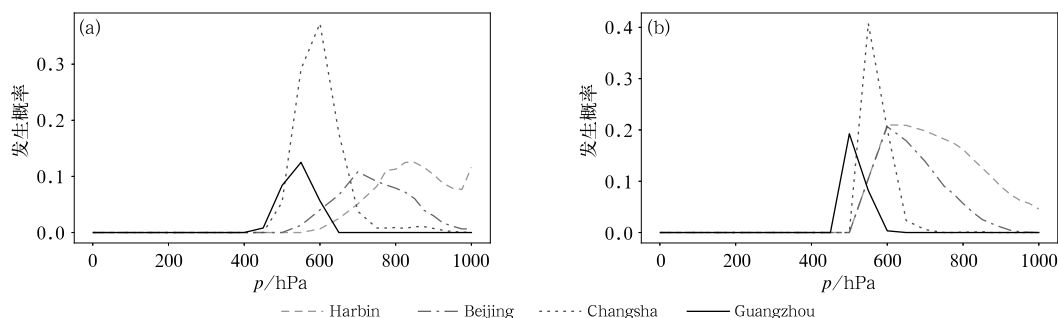


图8 (a)IC指数法,(b)假霜点温度经验法预报的2012—2021年哈尔滨、北京、长沙、广州各高度层3月的积冰发生概率

Fig. 8 Forecasted probability of ice accumulation in March at each altitude level at four stations from 2012 to 2021 by (a) IC method and (b) TF method

沙、广州飞机积冰发生的主要高度层,分别在1000~600、950~500、700~450、650~400 hPa,最容易发生积冰的高度层分别为800、700、600、550 hPa,积冰发生概率分别为0.13、0.11、0.37、0.13。根据假霜点温度经验法(图8b),2021年3月哈尔滨、北京、长沙、广州积冰发生主要高度层分别在1000~500、900~500、650~500、600~450 hPa,最容易发生积冰的高度层分别为600、600、550、500 hPa,最容易发生积冰高度层积冰发生概率分别为0.21、0.21、0.41、0.19。

两种方法预测的积冰发生概率不同,IC指数法预测得到的积冰发生概率略低于假霜点温度经验法,但两种方法对于3月哈尔滨、北京、长沙、广州易发生积冰高度层的分析结论基本相同。在3月的中国东部地区,纬度越高,积冰易发生的高度越低,四座城市中长沙该月积冰发生概率最高。造成上述结果的主要原因可能是过冷水含量随着温度降低而减少,大多数积冰发生在一20℃以上的温度环境中(袁敏等,2017),导致哈尔滨、北京积冰发生概率低,而3月孟加拉湾-中南半岛暖舌延伸至我国长江中下游西南部,我国低纬度地区湿度大,700~500 hPa高度空气温度低相对湿度大,易发生积冰,而广州位于25°N以南地区,即使冬季也为暖脊,空中温度高于0℃,不易发生积冰(王新炜等,2002)。

4.2 积冰易发生时段分析

通过两种方法计算得到积冰易发生高度层后,可以进一步分析在这些高度层上的积冰高发时间段,统计分析得到积冰易发生时段以及积冰发生概率。

取2012—2021年逐小时资料,用两种方法分别计算哈尔滨、北京、长沙、广州四个站在3月的积冰

最容易发生高度层逐小时积冰发生概率,图9分别为两种方法统计分析结果。

如图9所示,3月四座城市飞机积冰发生的时间不同,根据IC指数法,在最容易发生积冰的高度上,哈尔滨、北京、长沙、广州最容易发生积冰时间分别为07、05、00、23时,积冰概率分别为0.23、0.14、0.50、0.16。而由假霜点温度经验法得到的结果则表明,哈尔滨、北京、长沙、广州最容易发生积冰时间分别为01、01、19、00时,积冰概率分别为0.23、0.23、0.44、0.22。

两种方法预测的积冰发生概率不同,假霜点温度经验法预测得到的积冰发生概率大于IC指数法,两种方法对于2012—2021年四个区域在3月的积冰易发生时间的分析结论不同,主要因为IC指数法仅对大气物理场进行了积冰诊断,假霜点温度经验法考虑了动力增温效应,而模拟中空速为假设空速,与真实空速情况有所出入;不同区域的积冰发生时间明显不同,这可能与站点所处地理位置有一定关联,其原因需要更深入的研究。

4.3 计算积冰临界飞行速度

在飞机低速飞行过程中,飞行速度越大,积冰强度越强,而高速飞行时,由于动力增温而不容易发生积冰,当空速达到一定值后,便不发生积冰,该空速称为积冰临界飞行速度。可以采用假霜点温度经验法计算积冰临界飞行速度,设相对湿度RH分别为90%、80%、70%、60%,绘制其各温度下发生飞机积冰的临界飞行速度和积冰发生条件,图10中曲线为积冰临界飞行速度随温度的变化,灰色区域表示有积冰发生,白色区域表示无积冰发生。结果表明,在相对湿度一定的情况下,温度越低,积冰临界飞行速度越大;温度一定的情况下,相对湿度越大,

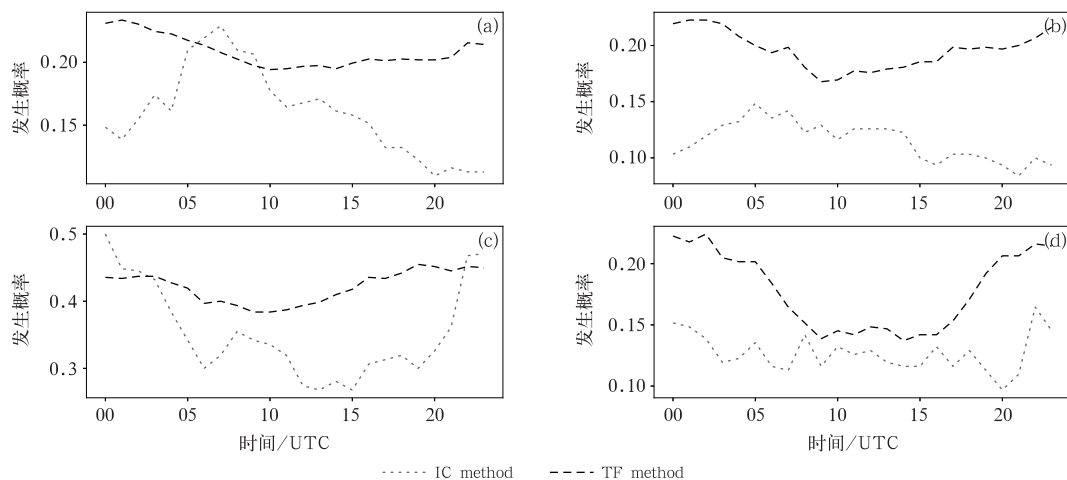
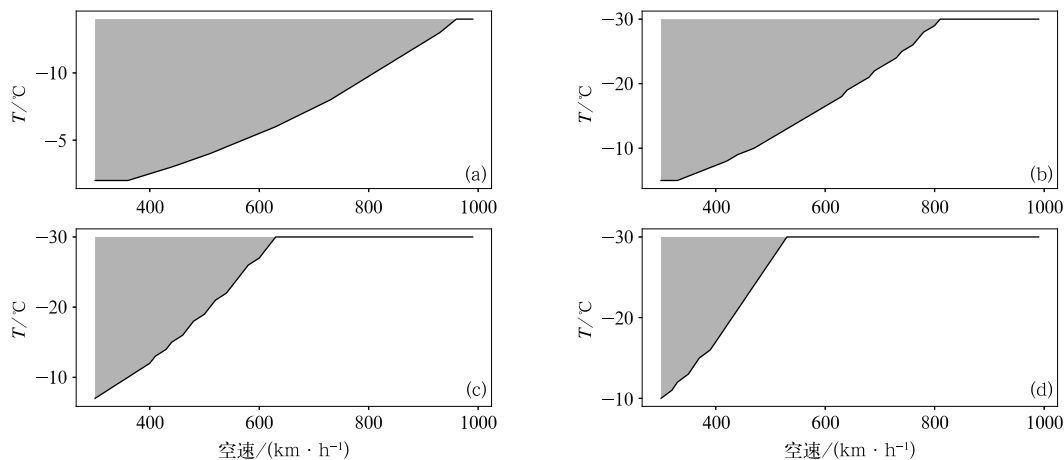


图 9 2012—2021 年(a)哈尔滨 800~750 hPa, (b)北京 750~700 hPa, (c)长沙 600~550 hPa, (d)广州 600~550 hPa 在 3 月的逐小时积冰发生概率
Fig. 9 Probability of hourly ice accumulation for (a) Harbin 800—750 hPa, (b) Beijing 750—700 hPa, (c) Changsha 600—550 hPa and (d) Guangzhou 600—550 hPa in March from 2012 to 2021



注:灰色区域表示有积冰发生,白色区域表示无积冰发生。

图 10 RH 分别为(a)90%, (b)80%, (c)70%和(d)60%条件下的积冰临界飞行速度
Fig. 10 Critical flight speed of ice accumulation under (a) RH=90%, (b) RH=80%, (c) RH=70% and (d) RH=60% conditions

积冰临界飞行速度越大。

5 结论与讨论

本文基于华东地区春季的 25 个飞机积冰个例,利用 ERA5 再分析资料的温度、湿度等大气物理量场,对 IC 指数法和假霜点温度经验法的积冰诊断效果进行了检验,重点关注现有积冰诊断预报模型的具体应用场景,积冰时空分布以及积冰临界飞行速

度等,得到如下结论,该结论主要适用于华东地区的春季。

(1)利用 25 个飞机报告的积冰个例,对 IC 指数法和假霜点温度法进行了检验,结果表明,IC 指数法诊断预测准确率为 80%,假霜点温度经验法诊断预测准确率为 92%,IC 指数法和假霜点温度经验法均能有效诊断飞机积冰区域,并较好地诊断出积冰强度情况。两种方法对于中空(5000 m 以下)积冰预测准确率较高,但对于高空(5000 m)以上积冰

预测准确率低。在积冰强度预测上,IC指数法结果偏小,计算得到积冰强度弱于观测强度,容易造成漏报,这主要与IC指数法计算方法有关,仅取决于大气温度和相对湿度。假霜点温度经验法预测准确率更高,与冰水粒子和低云云量相关性较好,但在高空容易造成空报,可能是由于计算时的空速并不是真实空速。

(2)在实际应用中,IC指数法和假霜点温度经验法均能有效分析积冰易发生高度层,两种方法也可以有效预测某站点高空积冰强度分布情况,但两种方法在积冰易发生时段的分析上差别较大,可能与假设空速条件有关。此外,假霜点温度经验法可以计算积冰的临界飞机速度,在相对湿度一定的情况下,温度越低,积冰临界飞行速度越大,而温度一定的情况下,相对湿度越大,积冰临界飞行速度越大。

由于飞机积冰报告有限,对积冰准确率的检验可能有一定影响,更多的积冰样本将有助于对比不同机型的积冰概率。另外,可以利用数值预报产品提供的大气温度、湿度等物理量,与积冰诊断算法结合来提供积冰强度预报,为航空活动提供更有针对性的气象预报保障产品(李佰平等,2018)。

参考文献

- 卞双双,何宏让,安豪,等,2019.飞机积冰预报算法对比及其集成预报模型研究[J].气象,45(10):1352-1362. Bian S S, He H R, An H, et al, 2019. Comparative analysis of aircraft icing forecasting algorithms and research on ensemble prediction model[J]. Meteor Mon, 45(10):1352-1362(in Chinese).
- 蔡兆鑫,蔡森,李培仁,等,2019.大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J].大气科学,43(6):1191-1203. Cai Z X, Cai M, Li P R, et al, 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6):1191-1203(in Chinese).
- 曹丽霞,纪飞,刘健文,等,2004.云微物理参数在飞机积冰分析和预报中的应用研究[J].气象,30(6):8-12. Cao L X, Ji F, Liu J W, et al, 2004. On application of cloud microphysical parameters to aircraft icing forecasting[J]. Meteor Mon, 30(6):8-12(in Chinese).
- 何新党,刘永寿,苟文选,等,2012.基于云微物理参数的飞机积冰多因子预测方法[J].航空计算技术,24(1):72-75,79. He X D, Liu Y S, Gou W X, et al, 2012. An aircraft icing forecasting method based on cloud microphysical parameters[J]. Aeronaut Comput Tech, 24(1):72-75,79(in Chinese).
- 李佰平,戴建华,孙敏,等,2018.一种改进的飞机自然结冰潜势算法研究[J].气象,44(11):1377-1390. Li B P, Dai J H, Sun M, et al, 2018. An improved aircraft natural icing potential algorithm[J]. Meteor Mon, 44(11):1377-1390(in Chinese).
- 刘凤林,孙立潭,李士君,2011.飞机积冰诊断预报方法研究[J].气象与环境科学,34(4):26-30. Liu F L, Sun L T, Li S J, 2011. Study on methods of aircraft icing diagnosis and forecast[J]. Meteor Environ Sci, 34(4):26-30(in Chinese).
- 刘开宇,申红喜,李秀连,等,2005.“04.12.21”飞机积冰天气过程数值特征分析[J].气象,31(12):23-27. Liu K Y, Shen H X, Li X L, et al, 2005. Analysis of an aircraft-icing event in Taiyuan Airport[J]. Meteor Mon, 31(12):23-27(in Chinese).
- 刘烈霜,金山,刘开宇,2013.用AMDAR资料分析两次强飞机积冰过程[J].气象科技,41(4):764-770. Liu L S, Jin S, Liu K Y, 2013. Diagnostic analysis of two severe aircraft icing events using AMDAR data[J]. Meteor Sci Technol, 41(4):764-770(in Chinese).
- 刘香娥,高茜,何晖,等,2020.一次积-层混合云系垂直结构和降水机制的飞机观测资料分析与数值模拟[J].气象学报,78(2):277-288. Liu X E, Gao Q, He H, et al, 2020. Analysis of aircraft observation data and numerical simulation of vertical structure and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convections[J]. Acta Meteor Sin, 78(2):277-288(in Chinese).
- 刘雪梅,张明军,王圣杰,等,2016.中国降水云云底高度的估算和分析[J].气象,42(9):1135-1145. Liu X M, Zhang M J, Wang S J, et al, 2016. Estimation and analysis of precipitation cloud base height in China[J]. Meteor Mon, 42(9):1135-1145(in Chinese).
- 刘旸,赵妹慧,蔡波,等,2017.基于CloudSat资料的东北地区降水云及非降水云垂直结构特征对比分析[J].气象,43(11):1374-1382. Liu Y, Zhao S H, Cai B, et al, 2017. Comparison of vertical structure between precipitation cloud and non-precipitation cloud based on CloudSat data over Northeast China[J]. Meteor Mon, 43(11):1374-1382(in Chinese).
- 齐晨,金晨曦,郭文利,等,2019.基于模糊逻辑的飞机积冰预测指数[J].应用气象学报,30(5):619-628. Qi C, Jin C X, Guo W L, et al, 2019. Icing potential index of aircraft icing based on fuzzy logic[J]. J Appl Meteor Sci, 30(5):619-628(in Chinese).
- 孙晶,蔡森,王飞,等,2019.安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J].气象,45(10):1341-1351. Sun J, Cai M, Wang F, et al, 2019. A case study of aircraft icing conditions in Anqing Area[J]. Meteor Mon, 45(10):1341-1351(in Chinese).
- 孙晶,李想,2020.飞机积冰气象条件研究进展[J].气象科技,48(4):561-569. Sun J, Li X, 2020. Advances in researches on meteorological conditions related to aircraft icing[J]. Meteor Sci Technol, 48(4):561-569(in Chinese).
- 王磊,李成才,赵增亮,等,2014.飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J].气象,40(2):196-205. Wang L, Li C C, Zhao Z L,

- et al, 2014. Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteor Mon, 40(2): 196-205 (in Chinese).
- 王钦, 吴俊杰, 2018. 四川盆地低空飞行飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象科技, 46(4): 799-808. Wang Q, Wu J J, 2018. Analysis of weather conditions for aircraft icing in low-level flight in Sichuan Basin[J]. Meteor Sci Technol, 46(4): 799-808 (in Chinese).
- 王新炜, 张军, 王胜国, 2002. 中国飞机积冰的气候特征[J]. 气象科学, 22(3): 343-350. Wang X W, Zhang J, Wang S G, 2002. Climatic features of aircraft icing of China[J]. Sci Meteor Sin, 22(3): 343-350 (in Chinese).
- 徐文霜, 2020. 乌鲁木齐地窝堡机场飞机积冰气象条件分析及其个例模拟[D]. 南京: 南京信息工程大学. Xu W S, 2020. Analysis of meteorological conditions of aircraft icing events at the Diwopu Airport in Urumqi and their case simulations[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 杨超, 2017. 基于再分析数据的飞机积冰预测研究[D]. 成都: 中国民用航空飞行学院. Yang C, 2017. The research on aircraft icing forecast based on reanalysis data[D]. Chengdu: Civil Aviation Flight University of China (in Chinese).
- 杨洁, 王兵, 刘峰, 2020. 一次冷锋过程的云微物理特征分析以及飞机积冰预报检验[J]. 气象科技, 48(1): 81-87, 96. Yang J, Wang B, Liu F, 2020. Cloud microphysical characteristic analysis of a cold front process and aircraft icing forecast[J]. Meteor Sci Technol, 48(1): 81-87, 96 (in Chinese).
- 袁敏, 段炼, 平凡, 等, 2017. 基于 CloudSat 识别飞机积冰环境中的过冷水滴[J]. 气象, 43(2): 206-212. Yuan M, Duan L, Ping F, et al, 2017. Identifying the supercooled liquid water in aircraft icing condition using CloudSat satellite data[J]. Meteor Mon, 43(2): 206-212 (in Chinese).
- 赵阳, 符养, 赵增亮, 等, 2018. 卫星资料统计全球飞机积冰潜势分布特征[J]. 热带气象学报, 34(1): 102-114. Zhao Y, Fu Y, Zhao Z L, et al, 2018. Satellite data based statistical study of the characteristics of potential distribution of global aircraft icing[J]. J Trop Meteor, 34(1): 102-114 (in Chinese).
- 朱士超, 郭学良, 2014. 华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究[J]. 气象学报, 72(2): 366-389. Zhu S C, Guo X L, 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: aircraft measurements[J]. Acta Meteor Sin, 72(2): 366-389 (in Chinese).
- Brown B G, Thompson G, Bruintjes R T, et al, 1997. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part II: statistical verification results[J]. Wea Forecasting, 12(4): 890-914.
- Carrière J M, Alquier S, Le Bot C, et al, 1997. Statistical verification of forecast icing risk indices[J]. Meteor Appl, 4(2): 115-130.
- Schultz P, Politovich M K, 1992. Toward the improvement of aircraft-icing forecasts for the Continental United States[J]. Wea Forecasting, 7(3): 491-500.
- Smith W L, Minnis P, Fleegeer C, et al, 2012. Determining the flight icing threat to aircraft with single-layer cloud parameters derived from operational satellite data[J]. J Appl Meteor Climatol, 51(10): 1794-1810.
- Tetens O, 1930. Über einige meteorologische Begriffe[J]. Zeitschrift für Geophysik, 6: 297-309.
- Thompson G, Bruintjes R T, Brown B G, et al, 1997. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part I: WISP94 real-time icing prediction and evaluation program[J]. Wea Forecasting, 12(4): 878-889.
- Zhang F, Huang Z, Yao H, et al, 2016. Icing severity forecast algorithm under both subjective and objective parameters uncertainties[J]. Atmos Envir, 128: 263-267.

(本文责编: 戴洋 王蕾)