

# 贵州区域飞机积冰时空特征及其气象条件分析

杨凤婷, 罗浩

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年4月5日; 录用日期: 2024年5月4日; 发布日期: 2024年5月11日

## 摘要

飞机积冰严重威胁着航空飞行安全。本文利用2007年~2023年贵阳机场话音方式航空器空中报告、ERA5再分析资料, 采用统计与诊断分析的方法, 探讨贵州区域飞机积冰的时空特征、强度特征及有利气象条件。结果表明: 贵州区域飞机积冰的发生次数逐年上升, 一年四季均有可能出现积冰, 其中, 冬季(1月)是飞机积冰的高发季(月)。积冰主要集中在3000 m~5000 m高度, 且多出现于贵州中北部和东北部地区。Ic积冰指数对积冰发生区域的估算与实况基本一致, 但对积冰强度的估算偏弱。5种可能引发飞机积冰的大气环流形势中, 静止锋型的飞机积冰出现次数最多。积冰发生时, 大气温度介于-20℃~4℃, 相对湿度介于75%~100%。

## 关键词

飞机积冰, 贵州, 时空特征, 强度, 气象条件

# Spatiotemporal Characteristics and Meteorological Conditions of Aircraft Ice Accumulation in Guizhou Region

Fengting Yang, Hao Luo

Guizhou Sub-Bureau of Southwest Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 5<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 4<sup>th</sup>, 2024; published: May 11<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Aircraft ice accumulation is a serious threat to aviation safety. By means of statistics and diagnostic analysis, the spatial and temporal characteristics, intensity characteristics and favorable meteorological conditions of aircraft ice accumulation in Guizhou region are discussed based on the

aerial report and ERA5 reanalysis data of Guiyang Airport from 2007 to 2023. The results show that the frequency of aircraft ice accumulation in Guizhou region is increasing year by year, and ice accumulation may occur all the year round, in which winter (January) is the highest season (month) of aircraft ice accumulation. Ice accumulation is mainly concentrated in the height of 3000 m~5000 m, and mostly occurs in the north-central and northeastern areas of Guizhou. The estimation of ice accumulation region by Ic index is basically consistent with the reality, but the estimation of ice accumulation intensity is weak. Among the 5 kinds of atmospheric circulation conditions that may cause aircraft ice accumulation, the stationary front type of aircraft ice accumulation occurs the most frequently. When ice accumulation occurs, the atmospheric temperature is between  $-20^{\circ}\text{C}$  and  $4^{\circ}\text{C}$ , and the relative humidity is between 75% and 100%.

## Keywords

Aircraft Ice Accumulation, Guizhou, Spatio-Temporal Characteristics, Intensity, Meteorological Conditions

Copyright © 2024 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

飞机积冰是指云层内或降水中的过冷水滴撞击机身时在飞机表面聚积冰层的现象,水汽在机身表面直接凝华也有可能形成积冰[1]。飞机积冰严重威胁着航空飞行安全,它会使飞机升力下降,阻力增大,减弱飞机性能,影响飞机稳定性,甚至会危害仪表系统的运行[2] [3]。随着我国航空业的快速发展和航班量的大幅增加,飞机积冰的研究和预报预警工作越来越得到重视。

王新炜等[4]对近 40 年中国飞机积冰的气候特征进行了研究,认为积冰主要发生在冬、春两季,其中贵州、湖南、四川等地属冬季积冰易发区。温度是影响积冰的最重要参数之一[5]。统计显示,飞机积冰一般发生在 $-20^{\circ}\text{C}$ ~ $0^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,尤其在 $-10^{\circ}\text{C}$ ~ $-2^{\circ}\text{C}$ 范围内遭遇次数最多[6] [7] [8]。王钦等[9]通过分析冬季四川盆地 7 次低空飞行飞机积冰的个例,发现出现中度积冰的温度范围在 $-4^{\circ}\text{C}$ ~ $-2^{\circ}\text{C}$ ,轻度积冰温度范围在 $-1^{\circ}\text{C}$ ~ $0^{\circ}\text{C}$ ,且相对湿度越大越有利于积冰的产生。有学者认为,飞机积冰一般分布在 400 hPa 以下,其中 700 hPa 层积冰分布最集中且具有代表性[10]。飞机积冰的形成与气象条件密不可分。万连成[11]通过计算 4 种积冰指数发现,影响我国冬季积冰潜势强弱的关键是“西高东低”的天气形势,此环流形势下冷平流较强,配合一定的温湿条件,使得冬季积冰中心显著。

话音方式航空器空中报告是收集民用航空器在飞行中遇到积冰、颠簸、风切变等危险天气时的报告,是目前民用机场观测手段的重要补充[12]。本文收集、整理了贵阳龙洞堡机场近 17 年接收到的贵州区域话音方式航空器空中报告,总结、分析了贵州区域飞机积冰的时空分布特征、积冰强度特征、环流形势特征,以期为飞机积冰的预报和预警工作提供参考,为飞机积冰条件下的保障工作提供一定依据。

## 2. 资料及方法

本文选取 2007 年~2023 年贵阳机场收到的贵州区域范围内的话音方式航空器空中报告,筛选出有关飞机积冰的数据并剔除失效数据,整理后共得到 102 份飞机积冰报告,其中包括积冰发生的时间、方位、高度、积冰强度、机型等信息。以自然年为年划分标准,以 12 月~2 月为冬季、3 月~5 月为春季、6 月~8 月为夏季、9 月~11 月为秋季作为季节划分标准,统计逐年、季节、逐月、逐小时的飞机积冰次数,并统

计积冰强度、发生高度及积冰发生区域分布, 运用一元线性回归、三点滑动平均对 2007 年~2023 年贵州区域飞机积冰的时空特征展开分析与总结。文中时间均为北京时。

基于 ERA5  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  逐 6 小时再分析资料中的温度、相对湿度、位势高度、风场等数据, 分析出现飞机积冰时的大气温度和环流形势, 判断飞机积冰易发的气象条件, 并利用 ICAO 给出的积冰指数验证飞机积冰发生的区域分布和强度特征。

### 3. 飞机积冰统计特征

#### 3.1. 基于航空器空中报告的统计特征

通过对 2007 年~2023 年共 17 年贵州区域飞机积冰数据的整理, 选取积冰的年变化特征、季节变化特征、日变化特征、强度特征、高度特征、空间分布特征展开分析。

##### 3.1.1. 年变化特征

从接收到的航空器空中报告来看, 飞机积冰年发生次数总体呈现波动增长趋势(图 1), 其中 2021 年报告次数最多, 达 22 次; 其次为 2018 年, 为 20 次; 而 2007 年及 2013 年未接收到飞机积冰的报告。3 年滑动平均曲线显示, 积冰年发生次数在 2017 年以后激增。利用最小二乘法求得逐年飞机积冰次数的一元线性回归方程为  $y = 0.93x - 2.36$ , 相关系数  $|r| = 0.66$ , 且  $|r| > r_{0.01} = 0.515$ , 其相关性通过  $\alpha = 0.01$  的显著性水平检验, 表明飞机积冰发生次数逐年上升趋势显著。

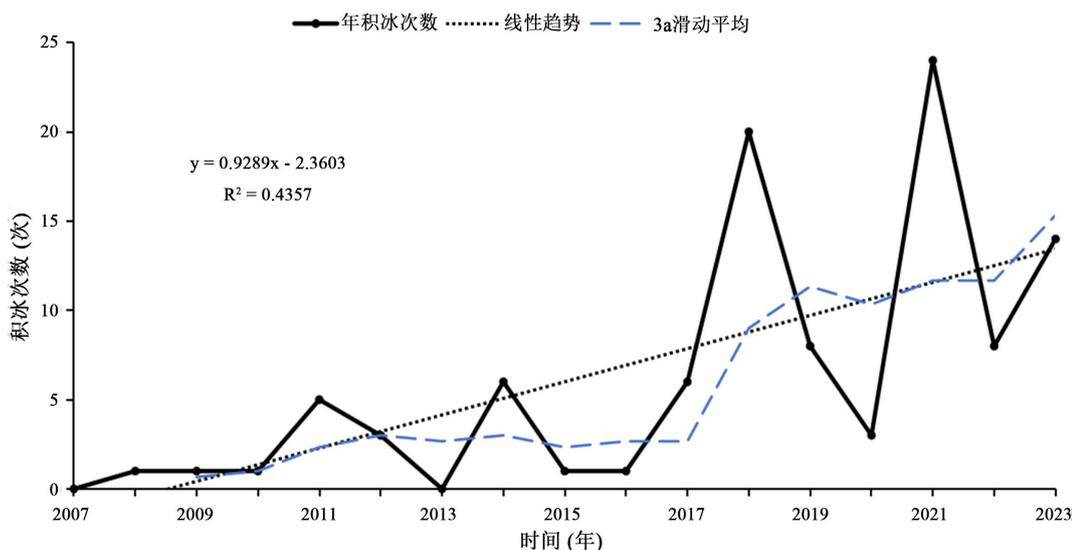


Figure 1. Annual changes in the number of aircraft ice accumulation in Guizhou from 2007 to 2023

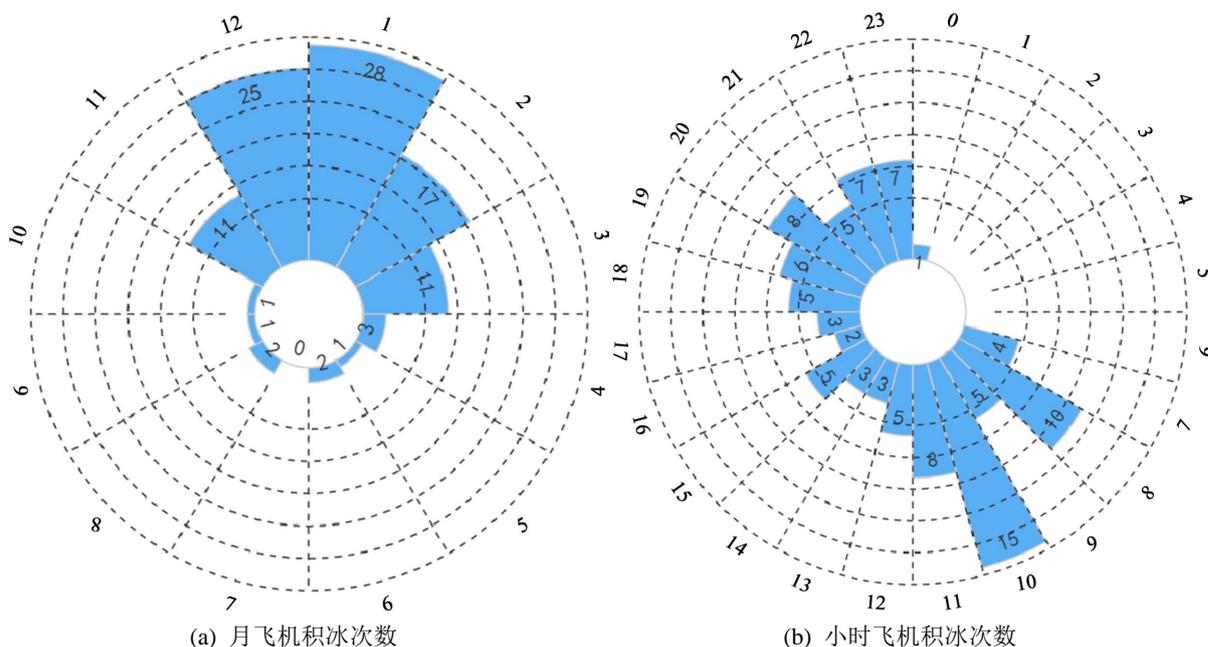
图 1. 2007 年~2023 年贵州区域飞机积冰次数逐年变化

##### 3.1.2. 月变化、日变化特征

贵州区域飞机积冰的发生呈现出明显的月变化和季节性。由图 2(a)可知, 除 7 月以外, 一年中的其它月份均有飞机积冰出现, 其中 11 月~12 月、1 月~3 月较其余月份的积冰次数明显偏多, 均在 10 次以上, 尤以 1 月发生积冰的次数最多, 达 28 次。对于季节而言, 一年四季航行中的飞机均有可能出现积冰, 其中冬季共发生积冰 70 次, 占总积冰次数的 68.6%; 其次为春季, 有 15 次, 占比 14.7%; 夏季最少, 仅有 4 次, 占比 3.9%。可见, 冬季(1 月)是贵州区域飞机积冰的高发季(月)。

图 2(b)为飞机积冰的小时分布, 发生时间较为分散。由于飞行时间等原因, 1 时~6 时无积冰报告,

不具有显著性, 暂不讨论。一日之中, 10 时为接收飞机积冰报告的高发时段, 共有 15 次, 占总积冰次数的 14.7%, 其次为 8 时, 有 10 次, 占比 9.8%, 16 时最少, 为 2 次, 占比 2.0%。因此, 10 时为贵州区域飞机积冰较为高发的时段。



**Figure 2.** Monthly and hourly variations of aircraft ice accumulation in Guizhou region from 2007 to 2023. (Figure (a) The outer circle figures represent the month, and the inner circle figures represent the number of aircraft ice accumulation in that month; In Figure (b) pie chart, the numbers in the outer circle represent the hour, and the numbers in the inner circle represent the number of aircraft ice accumulation in that hour)

**图 2.** 2007 年~2023 年贵州区域飞机积冰次数逐月变化及逐小时变化。(图(a)饼状图外圈数字代表月份、内圈数字代表该月份飞机积冰发生次数; 图(b)饼状图外圈数字代表小时、内圈数字代表该小时飞机积冰发生次数)

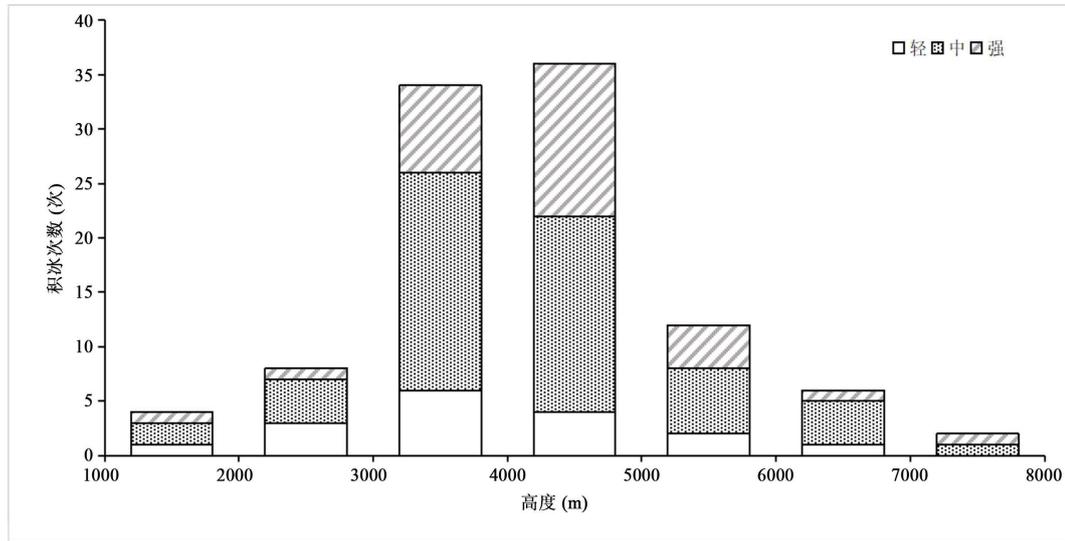
### 3.1.3. 强度、高度分布

统计航空器空中报告中对飞机积冰轻、中、强三个等级的记录, 在 102 次积冰报告中, 轻度积冰共出现 17 次, 中度积冰 55 次, 强积冰 30 次。可见贵州区域出现的大部分积冰为中度或强积冰, 这也与飞行员对中或强的积冰更为关注有关。

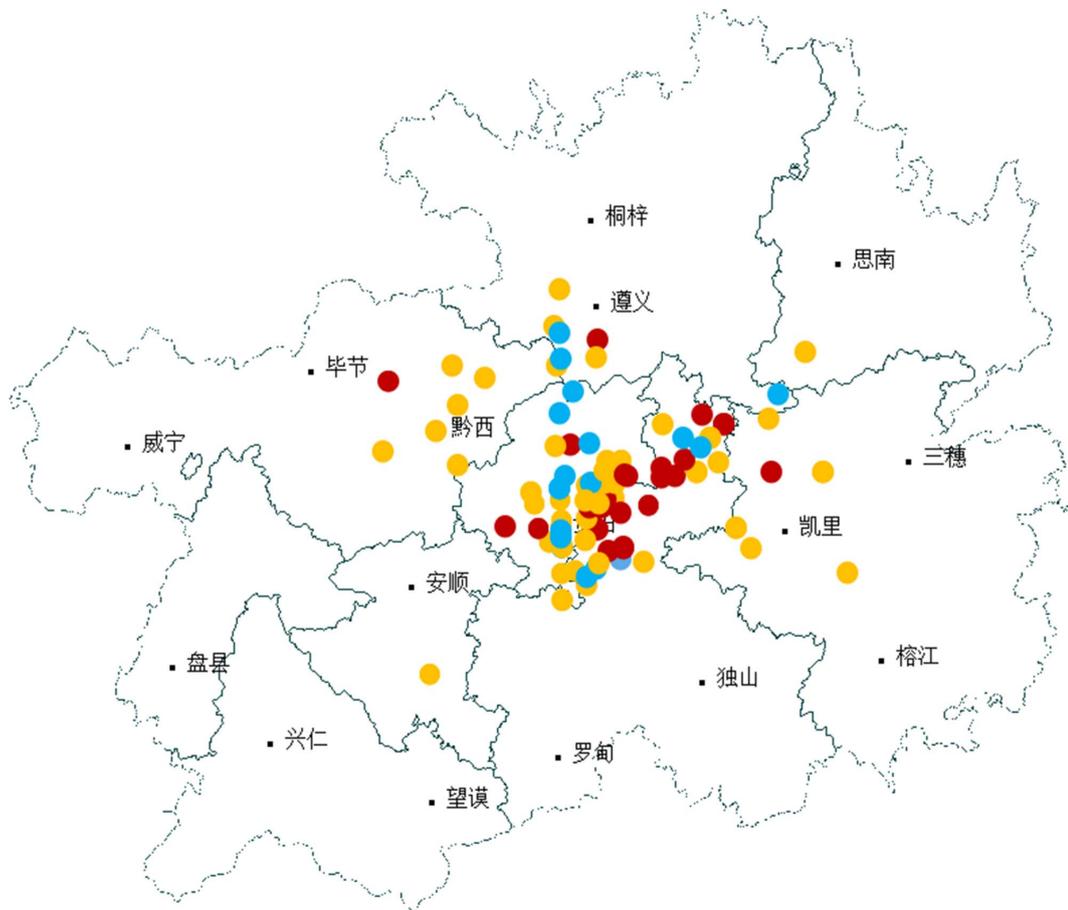
**图 3** 为各高度区间飞机积冰的发生情况。可见报告的积冰均发生在 8000 m 以下, 主要集中在 4000 m~5000 m 高度, 其次为 3000 m~4000 m 高度, 而 7000 m~8000 m 积冰次数最少。具体而言, 在 1000 m~7000 m 高度区间内飞机有可能出现轻、中、强等不同程度的积冰, 而 7000 m~8000 m 将出现中度及以上强度的积冰。轻度积冰、中度积冰在 3000 m~4000 m 高度发生次数最多, 强积冰在 4000 m~5000 m 发生次数最多。

### 3.1.4. 空间分布

将积冰发生的位置标注于图上, 可更为直观的描述贵州区域飞机积冰的空间分布特征。由**图 4**可明显看出, 积冰主要集中在贵州中北部和东北部区域, 南部报告积冰次数较少。飞机飞经贵州中北部、东北部时会出现不同强度的积冰, 而飞经贵州西北部、东部时主要出现中度及以上强度的积冰, 飞经南部时主要出现中度积冰。积冰呈现的空间特征与航线的密集度有较大关联, 与贵州西高东低的地势特征也有一定关系。



**Figure 3.** Intensity and height distribution of aircraft ice accumulation in Guizhou region from 2007 to 2023  
**图 3.** 2007 年~2023 年贵州区域飞机积冰强度及高度分布



**Figure 4.** Spatial distribution of aircraft ice accumulation in Guizhou region from 2007 to 2023. (Blue dots: light icing; Yellow dots: moderate ice accumulation; Red dots: strong ice accumulation)

**图 4.** 2007 年~2023 年贵州区域飞机积冰空间分布。(蓝色圆点: 轻度积冰; 黄色圆点: 中度积冰; 红色圆点: 强积冰)

### 3.2. 基于 Ic 积冰指数的统计特征

针对飞机积冰, 国际民航组织给出了一种参考指数, 也是目前比较常用的指数之一, 即 Ic 积冰指数。Ic 指数认为, 相对湿度 < 50% 时不存在积冰, 相对湿度 > 50% 则可能产生积冰, 温度在  $-14^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$  范围内飞机遇过冷水滴最易产生积冰:

$$Ic = [(RH - 50)][T(T + 14)/(-49)]$$

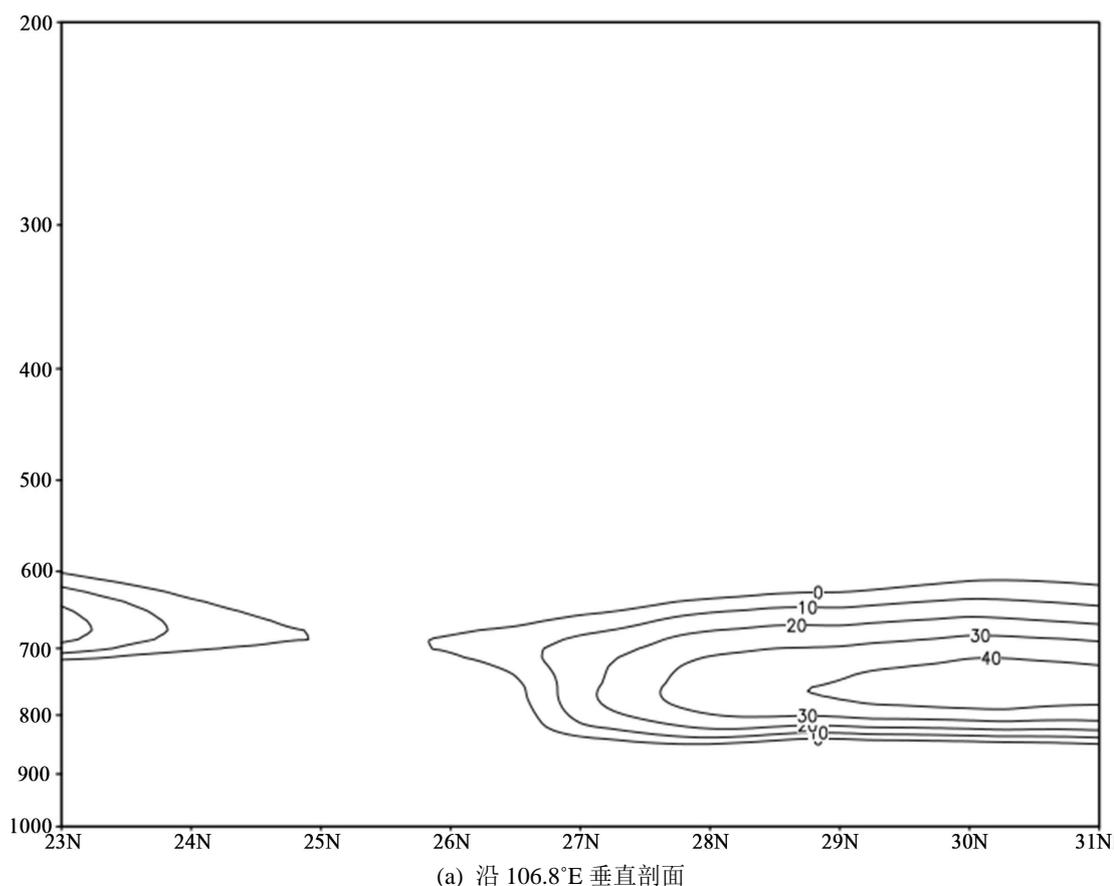
其中,  $RH$  为相对湿度(%),  $T$  为温度( $^{\circ}\text{C}$ )。Ic 指数对积冰强度的划分如表 1 所示:

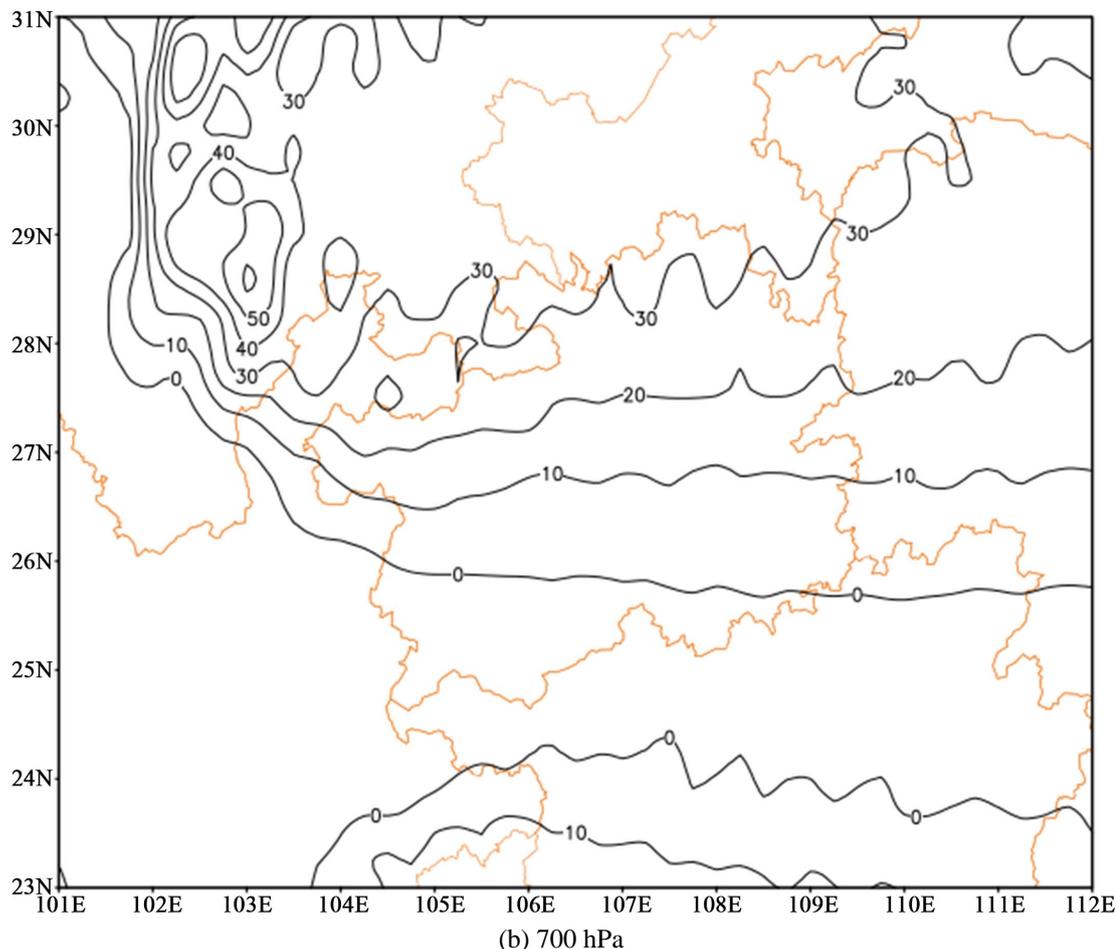
**Table 1.** Ic icing index

**表 1.** Ic 积冰指数

积冰强度	轻	中	强
Ic 积冰指数	$0 \leq Ic \leq 50$	$50 < Ic \leq 80$	$Ic > 80$

根据贵州区域飞机积冰出现的时间规律, 选择 2007 年~2023 年 1 月的再分析资料, 计算贵州区域的 Ic 指数, 分析飞机积冰的易发区, 如图 5 所示。沿机场所在位置  $106.8^{\circ}\text{E}$  做经向的垂直剖面可知(图 5(a)), 积冰主要集中在 850 hPa~600 hPa (约 1500 m~4000 m) 高度, 越向北积冰强度越强。在 700 hPa (约 3000 m) 高度上, 积冰主要发生在贵州中北部地区(图 5(b)), 且为轻度积冰。对比航空器空中报告的统计结果, Ic 积冰指数对积冰发生区域的估算与实况基本一致, 但对积冰强度的估算偏弱。





**Figure 5.** Spatial distribution of average Ic ice accumulation index from 2007 to January 2023

**图 5.** 2007 年~2023 年 1 月平均 Ic 积冰指数空间分布

## 4. 飞机积冰气象条件

### 4.1. 大气环流分型

分析贵州区域发生的 102 次飞机积冰时的天气形势和高低空关键天气系统, 将形成积冰的环流形势分为锋区型、槽前型、低涡型、静止锋型、西南倒槽型。

锋区型的飞机积冰主要发生在冷锋过境后, 此时中高层的西北到偏西气流提供冷空气, 低层多为东北气流或有切变线影响, 提供水汽和抬升运动条件, 配合地面冷锋, 使得云层深厚, 云中大量的过冷水滴, 有利于产生飞机积冰。

槽前型的飞机积冰主要发生南支槽前, 中高层西南气流输送水汽, 中低层为弱辐合或偏北冷气流影响, 冷暖平流的交汇, 有利于水汽抬升凝结, 产生飞机积冰。

低涡型的飞机积冰主要受到中低层的低涡移动影响, 而高层多有槽后冷平流加入, 在上冷下暖的不稳定层结和辐合的动力抬升作用下, 配合充足的水汽条件, 有利于飞机积冰的发生。

静止锋型的飞机积冰多发生在中低空, 此时大气中高层多为偏西气流, 而 700 hPa 则为强盛的西南暖湿急流控制, 850 hPa 为东北冷空气或切变线影响, 地面静止锋摆动, 此环流配置下, 大气中低层有逆温层形成, 飞机由冷层飞入暖层或由暖层飞入冷层, 水汽遇冷凝华易形成积冰。

西南倒槽型的飞机积冰多发生在 500 hPa 倒槽附近, 低层为偏南气流, 层结不稳定, 云顶可发展到较高高度, 飞机穿云将出现积冰。

统计发现(表 2), 对于贵州区域而言, 静止锋型积冰次数最多, 共计 41 次, 多发生在冬季, 且多为中度及以上强度的积冰; 西南倒槽型积冰次数最少, 仅有 3 次, 且发生在夏末初秋, 轻、中、强积冰各发生 1 次; 锋区型积冰共计 19 次, 槽前型积冰共计 23 次, 其积冰强度主要为中度; 低涡型积冰有 16 次, 多为中度及以上强度积冰。可见, 5 种可能引发飞机积冰的天气形势中, 在静止锋或南支槽的大气环流形势下, 飞机出现积冰的概率较大。

**Table 2.** The weather situation of icing

**表 2.** 产生积冰的天气形势

天气形势	锋区型	槽前型	低涡型	静止锋型	西南倒槽型
轻度积冰/次	6	3	2	5	1
中度积冰/次	9	15	7	23	1
强积冰/次	4	5	7	13	1
总计/次	19	23	16	41	3

#### 4.2. 温、湿条件

飞机积冰的形成不仅与有利的环流形势有关, 还与飞行高度上的大气温度、湿度有关。基于再分析资料, 统计贵州区域 102 次飞机积冰出现时所处位置的温度、相对湿度数据发现(表 3), 轻度积冰发生时, 大气温度介于 $-9^{\circ}\text{C}$ ~ $4^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度介于 84%~100%, 平均温度约 $-3.5^{\circ}\text{C}$ , 平均相对湿度 92%; 中度积冰发生时的温、湿范围为 $-20^{\circ}\text{C}$ ~ $3^{\circ}\text{C}$ 和 75%~100%, 平均温度和相对湿度分别为 $-5.5^{\circ}\text{C}$ 、90%; 强积冰发生时的温、湿范围为 $-16^{\circ}\text{C}$ ~ $-1^{\circ}\text{C}$ 和 75%~100%, 平均温度和相对湿度分别为 $-7.6^{\circ}\text{C}$ 、87%。可见, 若要引发飞机积冰, 就需要大气的相对湿度高于 75%, 气温普遍需低于  $0^{\circ}\text{C}$ , 且温度越低, 积冰越强。

**Table 3.** Atmospheric temperature and relative humidity during ice accumulation by aircraft of different intensities

**表 3.** 同强度飞机积冰时的大气温度、相对湿度

积冰强度		轻	中	强
温度条件	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	$-9\sim 4$	$-20\sim 3$	$-16\sim -1$
	温度平均值/ $^{\circ}\text{C}$	$-3.5$	$-5.5$	$-7.6$
湿度条件	相对湿度范围/%	84~100	75~100	75~100
	相对湿度平均值/%	92	90	87

## 5. 结论

通过统计 2007 年~2023 年贵阳机场接收到的贵州区域范围内的话音方式航空器空中报告, 结合 ERA5 再分析资料, 对贵州区域飞机积冰的时空特征、强度特征, 以及有利于飞机积冰产生的气象条件展开分析。

1) 贵州区域飞机积冰的发生次数呈现显著的逐年上升趋势。一年四季飞机均有可能出现积冰; 除 7 月以外, 全年各月均有飞机积冰出现。其中, 冬季(1 月)是飞机积冰的高发季(月)。

2) 贵州区域飞机积冰多发生在 8000 m 以下, 主要集中在 3000 m~5000 m 高度。轻度积冰、中度积冰在 3000 m~4000 m 高度发生次数最多, 强积冰在 4000 m~5000 m 高度发生次数最多。

3) 贵州区域飞机积冰主要集中在贵州中北部和东北部, 其余地区虽出现次数偏少, 但多为中度及以上强度的积冰。

4) Ic 积冰指数对积冰发生区域的估算与实况基本一致, 但对积冰强度的估算偏弱。

5) 5 种可能引发飞机积冰的环流形势中, 静止锋型的飞机积冰出现次数最多, 西南倒槽型的飞机积冰出现次数最少。

6) 积冰发生时, 大气温度介于 $-20^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度介于 75%~100%。其中轻度积冰时大气平均温度和相对湿度分别为 $-3.5^{\circ}\text{C}$ 、92%; 中度积冰时大气平均温度和相对湿度分别为 $-5.5^{\circ}\text{C}$ 、90%; 强积冰时大气平均温度和相对湿度分别为 $-7.6^{\circ}\text{C}$ 、87%。

## 参考文献

- [1] 周星序, 李昀英, 张潮. 飞机积冰预报方法及应用场景研究[J]. 气象, 2023, 49(4): 415-426.
- [2] 张强, 曹义华, 潘星, 等. 积冰对飞机飞行性能的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(6): 654-657.
- [3] 于庆芳. Y12-II 型飞机结冰对其飞行特性影响的试飞研究[J]. 飞行力学, 1995, 13(2): 63-70.
- [4] 王新炜, 张军, 王胜国. 中国飞机积冰的气候特征[J]. 气象科技, 2002, 22(3): 343-350.
- [5] 王洪芳, 刘健文, 纪飞, 等. 飞机积冰业务预报技术研究[J]. 气象科技, 2003, 31(3): 140-146.
- [6] 袁敏, 段炼, 平凡, 等. 基于 CloudSat 识别飞机积冰环境中的过冷水滴[J]. 气象, 2017, 43(2): 206-212.
- [7] 王磊, 李成才, 赵增亮, 等. 飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J]. 气象, 2014, 40(2): 196-205.
- [8] 林丹. 利用 MODIS 卫星产品分析西南地区云水特征[J]. 气象科技, 2015, 43(1): 138-144.
- [9] 王钦, 吴俊杰. 四川盆地低空飞行飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象科技, 2018, 46(4): 799-808.
- [10] 杜洋, 张潮, 黎鑫, 等. 基于 IC 指数的中国飞机积冰时空变化特征及其与大气环流的关系[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(3): 502-513.
- [11] 万连成. 我国飞机积冰高发区的时空特征及其气象特征分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 中国民用航空飞行学院, 2002.
- [12] 赵晨阳, 李自鑫. 基于航空器空中报告的风切变事件统计分析[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(12): 1683-1691.