

重庆区域飞机积冰特征分析及预报应用研究

海 滢

民航西南地区空中交通管理局重庆分局, 重庆

收稿日期: 2025年12月3日; 录用日期: 2026年1月2日; 发布日期: 2026年1月14日

摘 要

为提升重庆区域航空气象保障能力,降低积冰对飞行安全的影响,基于2021~2023年重庆江北机场航空器空中报告数据,系统分析了该区域飞机积冰的时间、高度及空间分布特征,并探讨了积冰预报方法在区域航空气象服务中的应用。结果表明:重庆区域3年共记录积冰69次,其中严重积冰34次、中度33次、轻度2次;积冰季节性特征显著,冬季占比66%,1~2月为高发期;高度集中在2~4 km (占比64.2%),且冬季高度最低、夏季最高;空间分布集中于本场(36%)、东1区(25%)和北1区(20%),北1区严重积冰占比达91%。基于IC指数法、VV积冰指数等构建的航空气象综合服务平台,实现了积冰预报的可视化与实时验证,为区域飞行安全提供了有效支撑。未来需结合航路流量信息进一步优化预报精度,提升预警精细化水平。

关键词

重庆区域, 飞机积冰, 特征分析, 积冰预报, 航空气象服务

Study on Characteristic Analysis and Forecast Application of Aircraft Icing in Chongqing Area

Ying Hai

Southwest China Air Traffic Management Bureau, Chongqing Sub-Bureau, Civil Aviation Administration of China, Chongqing

Received: December 3, 2025; accepted: January 2, 2026; published: January 14, 2026

Abstract

To improve the aviation meteorological support capability in the Chongqing area and reduce the impact of icing on flight safety, this study systematically analyzes the temporal, altitude, and spatial

distribution characteristics of aircraft icing in the area, and explores the application of icing forecast methods in regional aviation meteorological services, based on the aircraft in-flight report data from Chongqing Jiangbei Airport during 2021~2023. The results show that: A total of 69 icing events were recorded in the Chongqing area over 3 years, including 34 severe icing events, 33 moderate icing events, and 2 light icing events; the seasonal characteristics of icing were significant, with winter accounting for 66%, and January-February being the peak period; the altitude of icing was concentrated at 2~4 km (accounting for 64.2%), with the lowest altitude in winter and the highest in summer; the spatial distribution was concentrated in the airport itself (36%), East Area 1 (25%), and North Area 1 (20%), and severe icing in North Area 1 accounted for 91%. The comprehensive aviation meteorological service platform built based on the IC Index Method, VV Icing Index, and other methods has realized the visualization and real-time verification of icing forecasts, providing effective support for regional flight safety. In the future, it is necessary to further optimize the forecast accuracy by combining airway traffic information and improve the refined level of early warning.

Keywords

Chongqing Area, Aircraft Icing, Characteristic Analysis, Icing Forecast, Aviation Meteorological Service

Copyright © 2026 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

飞机积冰是航空气象领域典型的危险天气现象,指飞机机体在含过冷水滴的云、雾、冻雨或湿雪环境中,因过冷水滴冻结或水汽凝华形成冰层的过程[1]。其核心危害在于破坏飞机空气动力学特性,导致升力减小、阻力增加,进而影响飞行稳定性与操纵性,严重时可能造成导航通信设备失灵,引发飞行事故[2][3]。国内外航空史上,多起重大事故均与积冰直接相关,凸显了积冰防控对飞行安全的关键意义。

随着我国航空运输业的快速发展,民用航空活动日益频繁,跨区域飞行、夜间飞行及复杂气象条件飞行成为常态,飞机遭遇积冰的概率显著提升[4]。重庆作为我国西南地区重要航空枢纽,空域繁忙且地理气候条件特殊——区域内群山环绕、江河交汇,地形抬升作用显著,冬季冷空气与暖湿气流频繁交汇,形成了独特的积冰环境,使其成为我国飞机受积冰威胁最严重的区域之一[5]。此前研究表明,西南地区严重积冰占比显著高于其他区域,而重庆区域的积冰特征因地形与环流的耦合作用,与平原及其他山地地区存在明显差异[6]。因此,准确把握该区域积冰的时空、高度分布规律,优化针对性预报方法,对提升区域航空气象保障能力、降低积冰对飞行安全的影响具有重要现实意义。

现有积冰研究已形成多种诊断预报方法,如国际民航组织推荐的 IC 指数法、结合动力增温效应的假霜点温度经验法等[7],为积冰潜势判断提供了基础支撑。但针对重庆复杂地形下的积冰特征专项分析仍较为缺乏,现有预报方法在该区域的精细化应用效果有待验证。基于此,本文以 2021~2023 年重庆江北机场航空器空中报告数据为核心,该数据由飞行员实时上报,包含积冰发生的时间、高度、位置及强度等关键信息,真实性与时效性强。通过系统分析重庆区域积冰的时间、高度及空间分布特征,结合现有积冰预报技术探讨其在区域航空气象服务中的应用效果,旨在为重庆区域飞行安全提供科学的气象保障依据,填补区域专项研究空白。

2. 研究资料与方法

2.1. 数据来源

研究采用 2021~2023 年重庆江北机场航空器空中报告数据。该数据由飞行员通过语音向地面空中交通管制人员实时传递，包含飞机飞行参数、地理位置、遭遇的天气现象及强度等关键信息，当飞机遭遇积冰时会专项报告，数据真实性与时效性强，为积冰特征分析提供了可靠基础。

2.2. 研究方法

采用统计分析方法，对积冰的时间(月、日)、高度及空间分布特征进行量化分析，明确积冰高发时段、核心高度区间及重点影响区域。结合现有积冰预报指数与服务系统，探讨其在重庆区域的适用性与应用效果，为积冰预报优化提供方向。

3. 重庆区域飞机积冰特征分析

3.1. 时间分布特征

3.1.1. 季节与逐月分布

2021~2023 年重庆区域共记录积冰 69 次，其中轻度积冰 2 次、中度 33 次、严重 34 次，严重积冰占比达 49.3%。如图 1 所示，积冰季节性特征显著，冬季(12 月~次年 2 月)为高发期，占全年总次数的 66%；秋季(9~11 月)和春季(3~5 月)占比分别为 14%和 13%；夏季(6~8 月)最少，仅占 7%。

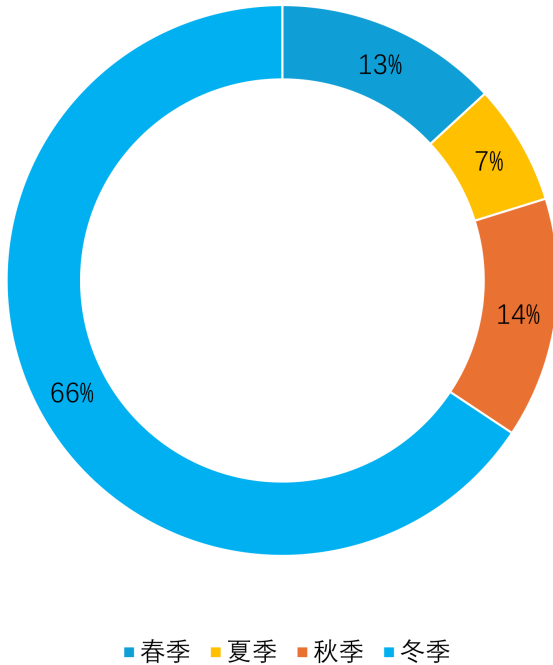


Figure 1. Seasonal distribution of icing
图 1. 积冰的季节分布

逐月分布上，如图 2 所示，除 4 月和 6 月无积冰报告外，其余月份均有积冰发生，峰值出现在 1 月和 2 月。夏季虽整体积冰频数偏少，但 2022 年 6 月出现 2 次积冰报告，推测为飞机穿越对流云高层过冷水与冰晶层所致[8]。

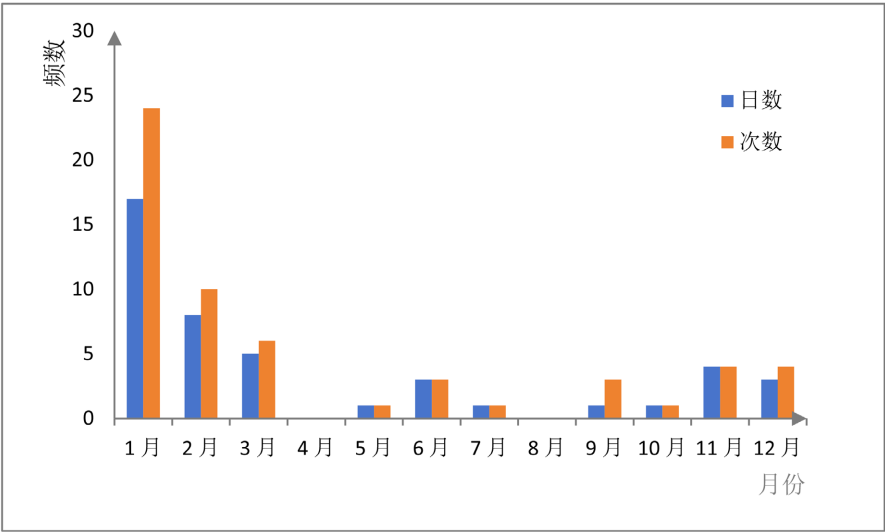


Figure 2. Monthly distribution of icing
图 2. 结冰的逐月分布

3.1.2. 日变化特征

结冰日变化如图 3 所示，呈现多峰值分布，7~8 时、11~12 时、16~17 时、22~23 时为高发时段。其中 11~12 时为最大峰值，共出现 7 次；7~8 时、16~17 时、22~23 时次之，均为 5~6 次；2~7 时未记录到结冰报告。结冰日变化特征与航班量分布密切相关，后半夜航班量少可能是该时段结冰报告缺失的重要原因[9]。

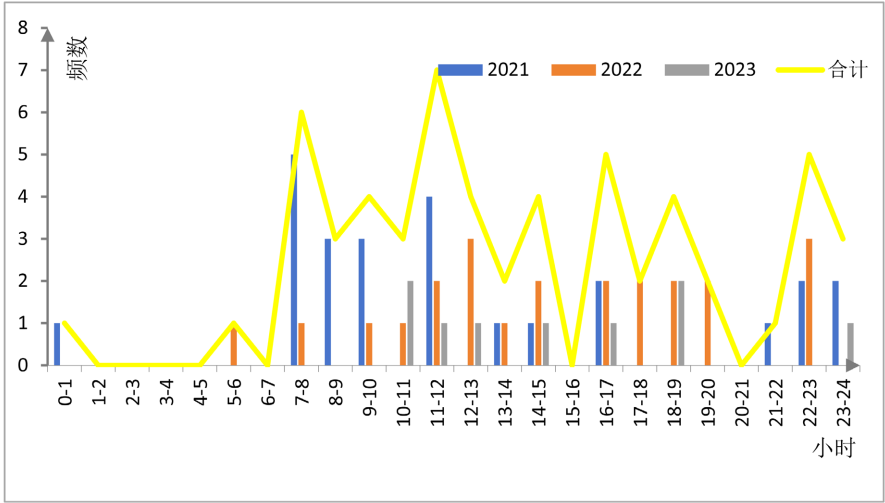


Figure 3. Hourly distribution of icing
图 3. 结冰的逐时分布

3.2. 高度分布特征

3.2.1. 高度集中区间

年结冰数据显示，结冰高度存在明显集中区间，如图 4 所示，2~4 km 为核心高度带，占总结冰次数的 64.2%。其中 3~4 km 结冰频数最高，共 22 次，占比 32.8%；2~3 km 次之，共 21 次，占比 30.4%；7~8

km 出现小峰值，共 8 次结冰报告。

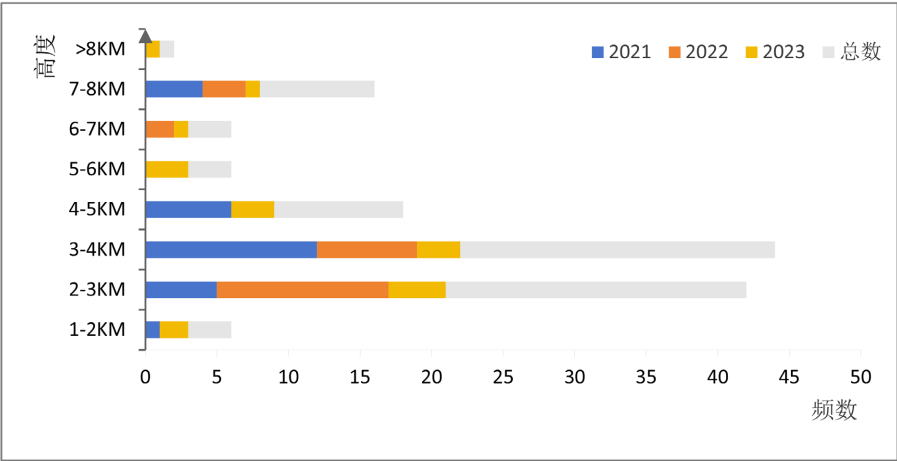


Figure 4. Vertical distribution of icing
图 4. 结冰的高度分布

3.2.2. 季节性高度变化

如图 5 所示，结冰平均高度呈现显著季节性变化。冬季结冰高度最低，1 月平均高度仅 2887 米，12 月~次年 2 月维持较低水平；随着季节转暖，结冰高度逐渐升高，7 月平均高度最高，达 7800 米(均出现在同一天)。这一特征与零度层高度变化及对流活动相关：冬季零度层高度降低，结冰多形成于较低空；夏季对流产生的强上升气流在高层形成过冷水或冰层，引发对流型结冰，高度显著升高[10]。

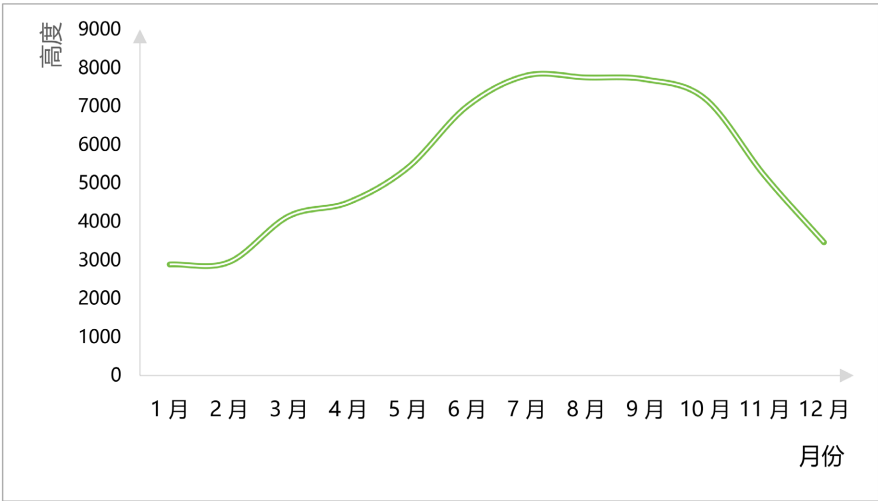


Figure 5. Monthly average vertical distribution of icing
图 5. 逐月平均的结冰高度分布

3.3. 空间分布特征

3.3.1. 终端区整体分布

重庆江北机场终端区按顺时针划分为 9 个子区域，如图 6 所示，结冰空间分布高度集中。本场结冰频数最高，占终端区总次数的 36%；东 1 区次之，占比 25%；北 1 区位列第三，占比 20%；三者合计占

比 81%，其余子区域占比不足 20%。东 4 区与西区 3 年未收到积冰报告，推测与区域温度差异、航路繁忙程度及飞行高度与积冰集中高度的匹配度相关[11]。

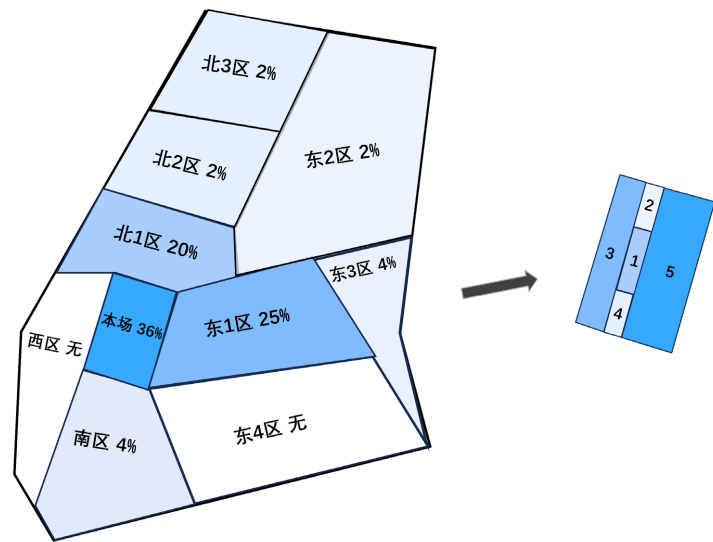


Figure 6. Spatial distribution of icing in the terminal area and the local airfield (Left: Terminal area; Right: Local airfield)

图 6. 积冰在终端区与本场的位置分布(左：终端区；右：本场)

3.3.2. 严重积冰区域分布

综合积冰频数与强度分析，北 1 区是重庆区域受积冰影响最严重的区域(图 7)。该区域不仅积冰发生频率高，严重积冰占比更达 91%；东 2 区和北 3 区积冰频数占比虽仅 2%，但严重积冰占比均为 100%，需重点关注；本场、东 3 区、南区严重积冰占比均为 50%，且本场与飞机起降直接相关，积冰影响更为突出。

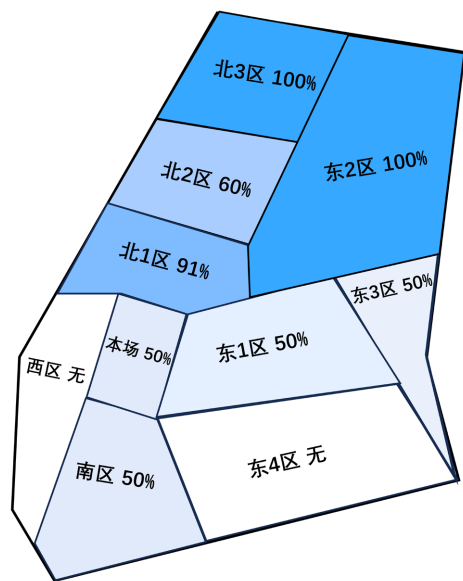


Figure 7. Proportion distribution of severe icing in the terminal area
图 7. 严重积冰在终端区的占比分布

4. 重庆区域积冰预报方法及应用

为满足重庆江北机场日益增长的航空气象服务需求,依托机场第四跑道建设空管工程,构建了航空气象综合服务平台,将积冰预报作为核心功能模块。平台采用翟菁等人优化的积冰预报算法,整合经典积冰指数与 VV 积冰指数,实现积冰潜势及强度的可视化预报[12]。经典的积冰指数 II (Icing Index):

$$II = 2(H - 50) [T(T + 14)/(-49)]/10$$

式中, H 为相对湿度(%), T 为温度(°C)。指数为正时存在潜在积冰区,接近 100 时积冰概率最高;温度超出 0°C~14°C 范围时,积冰增长率为 0。

VV 积冰指数:在经典积冰指数基础上增加垂直速度判据($\omega \leq -0.2$ hPa/s, p 坐标下)。分级标准为: $4 > II \geq 0$ 且 $\omega \leq -0.2$ hPa/s 时为轻度积冰(VV = 1), $7 > II \geq 4$ 且 $\omega \leq -0.2$ hPa/s 时为中度积冰(VV = 2), $II \geq 7$ 且 $\omega \leq -0.2$ hPa/s 时为严重积冰(VV = 3),其余情况为无积冰(VV = 0)。目前该积冰预报结果已实现在综合服务平台的可视化展示;同时实时读取航空器空中积冰报告,标注实时积冰位置与强度,既为预报员提供直观参考,也实现了预报结果的实时验证与优化。该平台已成为重庆区域积冰预警的重要支撑,有效提升了航空气象服务的精细化水平。

5. 结论与展望

5.1. 主要结论

(1) 重庆区域 2021~2023 年共记录积冰 69 次,以中度和严重积冰为主(占比 97.1%),冬季为高发期(66%),1~2 月频数最高,日变化峰值集中在 11~12 时、7~8 时等时段。

(2) 积冰高度集中于 2~4 km(占比 64.2%),呈现冬季低、夏季高的季节性变化特征,1 月平均高度最低(2887 米),7 月最高(7800 米)。

(3) 积冰空间分布集中,本场、东 1 区、北 1 区合计占比 81%,北 1 区严重积冰占比达 91%,是重点防控区域。

(4) 基于 IC 指数法、VV 积冰指数构建了机场综合服务平台的积冰预报产品,实现了积冰预报的可视化与实时验证,为区域飞行安全提供了有效保障。

5.2. 展望

未来需结合重庆区域积冰特征,进一步整合主要航路航线及流量信息,建立季节、时段与天气形势耦合的积冰预警模型;优化积冰诊断指数的区域适用性参数,提升不同高度、不同区域积冰预报的精细化程度;加强平台与管制部门、航司的信息联动,实现积冰预警信息的精准推送,为重庆区域航空安全运行提供更全面的气象保障。

参考文献

- [1] 赵树海. 航空气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 356.
- [2] 曹丽霞, 纪飞, 刘健文, 等. 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, 2004, 30(6): 8-12.
- [3] 李佰平, 戴建华, 孙敏, 等. 一种改进的飞机自然结冰潜势算法研究[J]. 气象, 2018, 44(11): 1377-1390.
- [4] 刘开宇, 申红喜, 李秀连, 等. “04. 12. 21”飞机积冰天气过程数值特征分析[J]. 气象, 2005, 31(12): 23-27.
- [5] 刘烈霜, 金山, 刘开宇. 用 AMDAR 资料分析两次强飞机积冰过程[J]. 气象科技, 2013, 41(4): 764-770.
- [6] 王新炜, 张军, 王胜国. 中国飞机积冰的气候特征[J]. 气象科学, 2002, 22(3): 343-350.
- [7] 刘凤林, 孙立潭, 李士君. 飞机积冰诊断预报方法研究[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(4): 26-30.
- [8] 刘香娥, 高茜, 何晖, 等. 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,

- 2020, 78(2): 277-288.
- [9] 刘雪梅, 张明军, 王圣杰, 等. 中国降水云云底高度的估算和分析[J]. 气象, 2016, 42(9): 1135-1145.
 - [10] 孙晶, 蔡淼, 王飞, 等. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象, 2019, 45(10): 1341-1351.
 - [11] Zhang, F., Huang, Z., Yao, H., Zhai, W. and Gao, T. (2016) Icing Severity Forecast Algorithm under Both Subjective and Objective Parameters Uncertainties. *Atmospheric Environment*, **128**, 263-267.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.066>
 - [12] 翟菁, 周后福, 申红喜, 等. 航空气象要素预报算法和个例研究[J]. 气象研究与应用, 2010, 31(1): 31-34+116-117.