

贵州区域飞机空中积冰特征及指数适用性研究

李 云, 喻 晗, 陈义义

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年8月24日; 录用日期: 2026年9月17日; 发布日期: 2026年9月24日

摘 要

飞机空中积冰是威胁飞行安全的典型危险天气。在全球变暖背景下, 评估区域积冰风险的时空演变对航空安全保障至关重要。本文基于2018~2025年贵州区域的126份飞机空中积冰报告, 系统分析了积冰事件的月、日变化特征, 以及在不同季节下的强度、高度和空间分布规律。同时, 利用ERA5再分析资料, 对IC指数和加权平均SCIP指数在贵州复杂地形下的适用性进行了验证与对比。最后基于综合性能更佳的积冰指数对贵州区域积冰风险进行评估。结果表明: (1) 贵州区域飞机积冰事件主要发生在11月至次年3月, 7~13时及18~23时为出现高峰, 呈现出“中部密集、北部分散、西南空白”的空间格局特征, 高风险区集中于贵阳机场以北至东南的扇形区域上空3~5 km高度层。(2) 指数验证显示, 加权平均SCIP指数在AUC、TSS、F1分数及召回率等关键指标上均优于传统IC指数, 其最佳判别阈值为0.271。(3) 积冰风险“冬高夏低、夜高昼低”, 空间上黔东南为高风险区, 500 hPa层的积冰风险高于700 hPa层。本研究明确了贵州区域飞机空中积冰风险的历史时空特征, 并筛选出适用的诊断指数, 为后续的风险定量评估与预测研究奠定了基础。

关键词

飞机空中积冰, 时空特征, SCIP指数, 贵州区域

A Study on the Characteristics and Applicability of Airborne Icing Indices in Guizhou Province

Yun Li, Han Yu, Yiyi Chen

Guizhou Branch of Southwest Regional Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Guiyang Guizhou

Received: August 24, 2026; accepted: September 17, 2026; published: September 24, 2026

Abstract

Airborne icing is a typical hazardous weather phenomenon threatening flight safety. Under the background of global warming, assessing the spatiotemporal evolution of regional icing risk is crucial for aviation safety. This paper systematically analyzes the monthly and daily variation characteristics of icing events, as well as the intensity, altitude, and spatial distribution patterns under different seasons, based on 126 aircraft airborne icing reports from Guizhou Province between 2018 and 2025. Simultaneously, using ERA5 reanalysis data, the applicability of the IC index and the weighted average SCIP index under Guizhou's complex terrain was verified and compared. Finally, the icing risk in Guizhou Province was assessed based on the icing index with better comprehensive performance. The results showed that: (1) Aircraft icing events in Guizhou mainly occurred from November to March of the following year, with peak occurrences between 7:00~13:00 and 18:00~23:00, exhibiting a spatial pattern of "dense in the central region, scattered in the north, and blank in the southwest". The high-risk area was concentrated at an altitude of 3~5 km above a fan-shaped area north to southeast of Guiyang Airport. (2) Index verification showed that the weighted average SCIP index was superior to the traditional IC index in key indicators such as AUC, TSS, F1 score, and recall rate, with an optimal discrimination threshold of 0.271. (3) Icing risk was "high in winter and low in summer, high at night and low during the day". Spatially, northeastern Guizhou was a high-risk area, with the icing risk at the 500 hPa layer being higher than that at the 700 hPa layer. This study clarified the historical spatiotemporal characteristics of aircraft air icing risk in Guizhou and selected applicable diagnostic indices, laying the foundation for subsequent quantitative risk assessment and prediction research.

Keywords

Aircraft Air Icing, Spatiotemporal Characteristics, SCIP Index, Guizhou Province

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

航空器空中积冰指的是飞机在空中飞行时,冰、雪、霜冻结在飞机机体表面和操纵面表面的现象,产生原因主要是当飞机穿过冷却云层或雨区时,云中过冷却水滴或降雨中的过冷却雨滴接触到飞机机体后迅速冻结成冰,也可以由水汽直接在机体表面凝华而成[1]。空中积冰常发生在飞机表面的突出部位上,可以破坏飞机的空气动力性能,严重影响飞机的爬升和巡航能力,甚至造成机械损伤,从而导致飞行事故的发生[2]。飞机飞行手册(AFM)中规定,飞机起飞前必须除尽机身各部位的冰、雪、霜;未获得飞入已知积冰条件认证(FIKI)的机型严禁飞入已知积冰,误入必须立即脱离;飞机在雨中或降水区域中飞行时,必须激活机身/发动机除冰系统。在全球气候变暖背景下,大气热力与动力过程的变化,可能显著影响温度、湿度、液态水含量等积冰发生气象条件的时空分布,从而对既有的航空气象安全保障体系构成新的挑战[3]。

自2018年起,西太平洋副热带高压异常偏强,使得贵州区域高空冷暖气流长时间交汇,发生飞机积冰有利环流形势频发,关键飞行高度层的温湿条件持续处于积冰易发区间,叠加贵州东低西高地地形,航空器报告的积冰事件数量逐年增多[4]。目前,部分学者已对贵州区域个别积冰案例进行了分析[5]-[7],但尚缺乏对区域积冰风险系统性、量化的评估研究。本文对贵州地区飞机空中积冰风险的时空演变特征

进行量化分析,为后续构建积冰风险定量评估模型、分析其未来演变趋势提供关键的方法学依据和数据基础。

2. 资料及方法

选取 2018~2025 年贵州区域与积冰有关的 126 份语音方式飞机空中报告作为“正样本”,分析飞机积冰事件的月、日变化特征以及发生高度、强度、位置的分布特征。为弥补航空器语音报告数据中缺乏明确“无积冰”报告的不足,采用随机抽样方法,从同期 ERA5 资料($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 逐 6 小时)中贵州区域($24^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$, $103^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$)随机选取了 200 个无积冰报告发生的时空点作为“负样本”,由此构建了总计 326 个样本的验证数据集。将每个航空器空中积冰报告匹配到最近网格点和最接近时次(时间偏差 ≤ 3 小时,空间距离偏差 $\leq 0.25^{\circ}$),提取对应位置的 IC 指数和加权平均 SCIP 指数值[8]。采用受试者工作特征曲线(ROC)、曲线下面积(AUC)、真实技巧统计(TSS)、召回率、精确率和 F1 分数等多项指标,综合评估两种指数对积冰事件的判别能力。通过 ROC 曲线确定最佳判别阈值,并进行了三次独立验证以保证结果的稳定性。最后利用验证后性能更优的指数对 ERA5 再分析资料进行计算,进一步揭示 2018~2025 年贵州区域积冰风险场的时空分布特征。

3. 贵州区域航空器空中积冰事件时空特征

3.1. 历史积冰事件月变化和日变化

由图 1 可知,2018~2025 年航空器空中积冰报告次数的月际分布差异显著,每年 11 月至次年 3 月是高发月份,共出现 108 次,占总数的 86%。其中 1 月出现 33 次之多,4~10 月积冰发生较少,6、7、9 月仅出现 1 次。从日变化来看,航空器空中积冰高发时段与区域航班流量高峰基本吻合,主要出现在 7~13 时和 18~23 时,各发生 58 次,合计占总数的 92%。在具体时次上,20 时积冰发生次数达到 16 次,08、09、10、21 以及 23 时也是相对高发时次,均 ≥ 10 次。

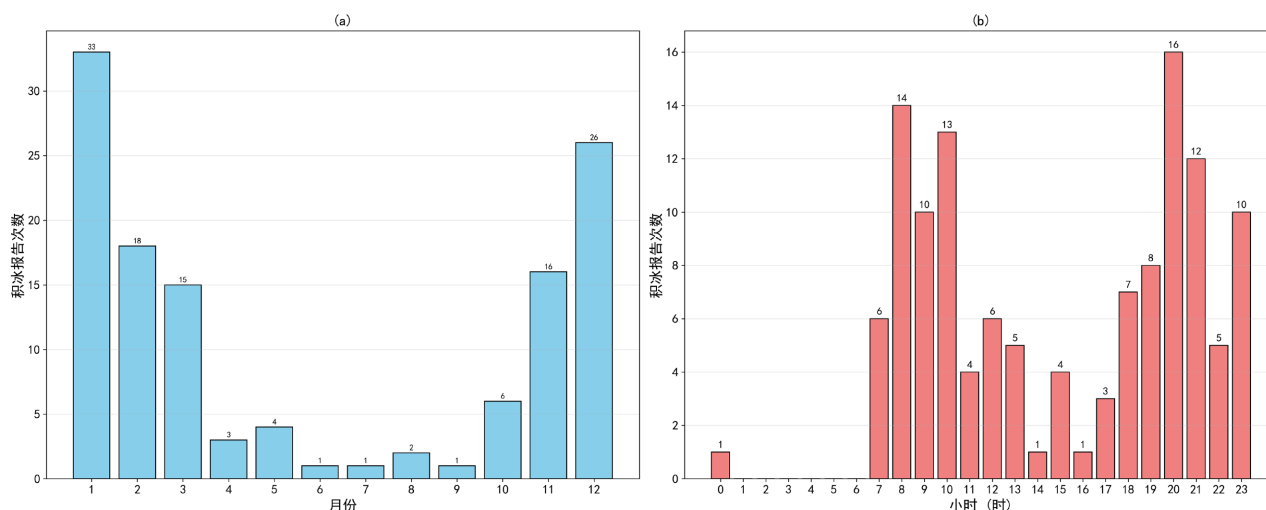


Figure 1. Monthly (a) and daily (b) variations in the number of aircraft air icing events in Guizhou Province from 2018 to 2025

图 1. 2018~2025 年贵州区域航空器空中积冰次数月变化(a)及日变化(b)

3.2. 历史积冰事件不同季节强度和高度分布特征

根据接收到的语音方式航空器空中报告,将飞机积冰强度划分为轻度、中度和严重 3 个等级,用以

说明积冰情况的严重性。图 2(a)为各强度积冰(除去 11 次未知强度)在不同高度上的分布图,可以发现,轻度、中度以及严重积冰分别出现 34、53 和 28 次。各个强度积冰事件的高发区均集中在 3~5 km 的高度,占比分别高达 76%、72%、71%; 5~7 km 高度上发生积冰的频次明显降低; 1~3 km 高度积冰罕见,特别当高度 < 2 km 时,仅 1 次轻度积冰发生;此外, 7 km 以上高度积冰报告最少,但强度均为严重。

从气象季节分布看,冬季是航空器空中积冰最频发的季节,共 77 次,占总数的 61%。其次为秋季和春季,分别出现 23 次和 22 次,夏季最少,仅 4 次。此外,从航空器空中积冰事件发生的高度来看,随高度增加积冰次数先增后减,表现出中层多,低、高层少的特征。春、秋季多分布在 3~7 km,在 4~5 km 达到峰值;冬季集中在 2~6 km,在 3~4 km 出现峰值;夏季积冰则散布在 4~8 km 高度。见图 2(b)。

图 2(c)反映了不同季节航空器空中积冰强度的分布,春季积冰均为中度及以下,以中度为主;夏季虽次数最少,但 4 次报告强度均在中度及以上,与夏季对流云强、含水量高、过冷却水滴大等因素有关;秋季以轻、中度为主,严重积冰少;冬季则是各强度积冰的多发季,且发生中度和严重积冰的概率显著高于其他季节。未知强度主要发生在春秋两季。

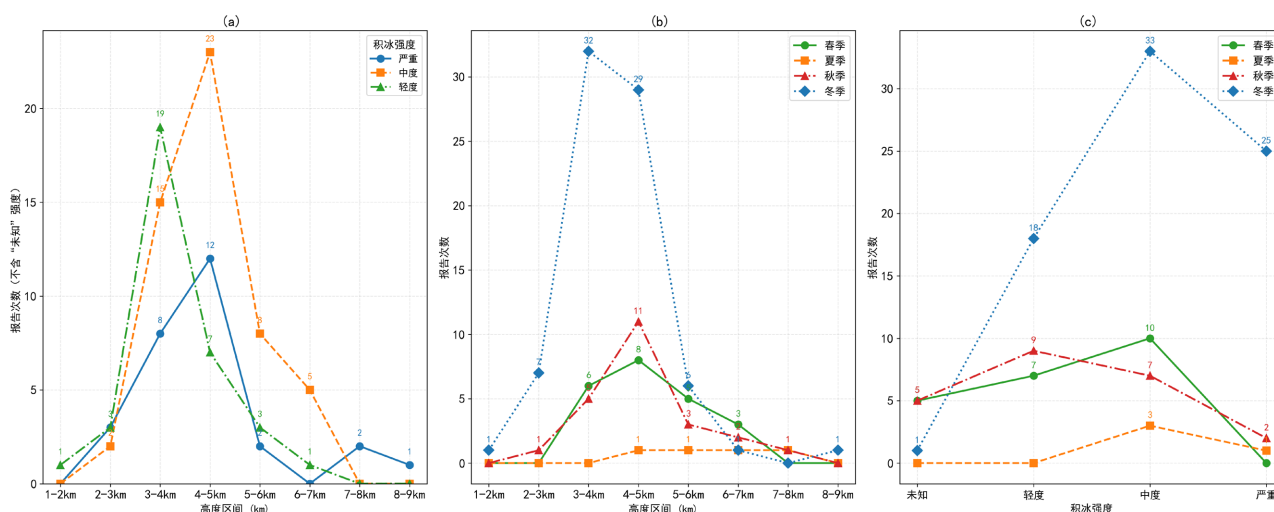


Figure 2. Aircraft air icing distribution in Guizhou Province from 2018 to 2025: (a) Intensity and altitude distribution; (b) Altitude distribution in different seasons; (c) Intensity distribution in different seasons

图 2. 2018~2025 年贵州区域航空器空中积冰: (a) 强度和高度分布; (b) 不同季节的高度分布; (c) 不同季节的强度分布

3.3. 历史积冰事件空间分布特征

图 3 展示了航空器空中积冰事件在三维空间和二维平面的分布。三维视角下(图 3(a)), 积冰在垂直方向上呈现明显的分层集中特征。以贵阳机场(后续图中均以“★”符号标注)为参考点, 其上空及进离场航路在 1.8~8.1 km 范围内存在不同等级的积冰点, 预示了贵阳机场终端区所面临的复杂积冰威胁。超过 85% 的积冰发生在 3~6 km 高度区间, 与云中过冷云滴活跃的高度区间相符。其中 3~5 km 高度是高发区, 且中度及以上积冰在此高度层内尤为突出。此外, 在贵阳机场东偏北方向 30~120 km 范围内, 存在一个从低空延伸至 5 km 的中度及以上强度的积冰密集区, 可能与该区域地形强迫抬升暖湿气流、形成持续过冷云带有关。值得注意的是, 在 7.8~8.1 km 的高空仍有少量严重积冰报告, 表明在特定天气系统下, 积冰风险可延伸至对流层中高层。从二维平面(图 3(b))分布可见, 航空器空中积冰整体上呈现出“中部密集、北部分散、西南空白”的格局。高发区集中于贵阳机场以北至东南半径约 120 km 的扇形范围内, 积冰点密集且强度以中度和严重为主; 毕节以东至遵义一带的黔北山区受大娄山脉地形影响, 积冰频率较高, 但积冰点较分散, 强度多为中度及以下; 沿积冰高发区外围至铜仁以及黔东南州方向的积冰点相对稀疏,

且强度以中度和轻度为主；此外，由于贵州空域航线划设，航线较少的黔西南地区未见积冰报告。

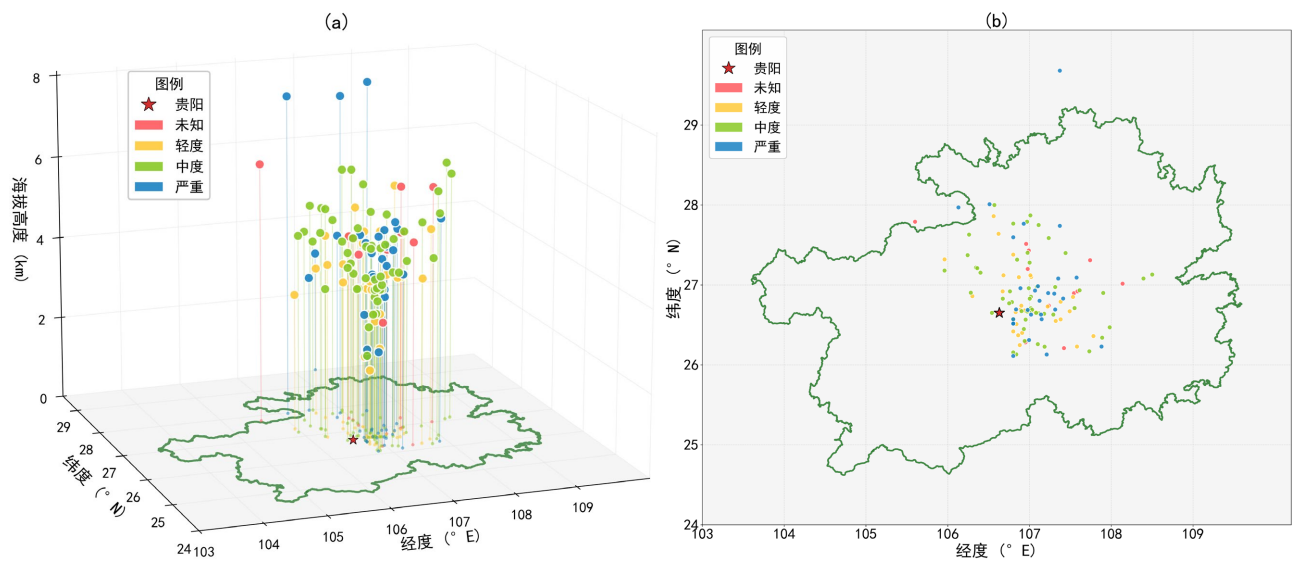


Figure 3. Spatial distribution of aircraft air icing accumulation in Guizhou Province, 2018~2024: (a) Three-dimensional spatial distribution map; (b) Two-dimensional planar distribution map
图 3. 2018~2024 年贵州区域航空器空中积冰空间分布：(a) 三维空间分布图；(b) 二维平面分布图

4. 积冰指数的筛选与验证

4.1. 积冰指数筛选

为评估积冰指数在贵州区域的适用性，本研究选取两种具有物理基础的积冰指数进行对比验证，一种是积冰指数(IC)，一种是加权平均 SCIP 指数。

IC 指数是一个综合温度、相对湿度因子的传统积冰指数，采用“温度 - 湿度阈值查表法”计算，等级划分见表 1。

Table 1. IC index classification table
表 1. IC 指数分级表

风险等级	相对湿度(RH)	温度(T_1)
无风险	无要求	$T_1 \geq 0$ 或 $T_1 < -20$
轻度风险	$RH < 80$	
中度风险	$80 \leq RH < 90$	$-20 \leq T_1 < 0$
重度风险	$RH \geq 90$	

加权平均 SCIP 指数，通过加权方式融合温度(T)、相对湿度和垂直速度(ω)三个关键气象因子，其计算公式为

$$SCIP = w_T * I_T + w_{RH} * I_{RH} + w_{\omega} * I_{\omega}$$
 (1)

其中， I_T 、 I_{RH} 、 I_{ω} 分别为归一化到[0, 1]的温度、相对湿度和垂直速度因子， w_T 、 w_{RH} 、 w_{ω} 为相应权重，经验分别设置为 0.4、0.4 和 0.2。温度因子在-20℃至 0℃区间内取高值，湿度因子在相对湿度超过 70%后线性增加，垂直速度因子在上升运动($\omega < 0$)时增强，阈值-0.3 Pa/s。

表 2 显示了根据 2018~2025 年贵州区域 ERA5 资料计算出的 IC 指数与加权平均 SCIP 指数对 326 个样本验证结果的对比(表中数值为三次独立验证结果的平均值 $\pm$ 标准差)。可以看出, 加权平均 SCIP 指数在多项综合性能指标如 AUC (0.718 vs 0.698)、TSS (0.351 vs 0.299)、F1 分数(0.634 vs 0.550)和准确率 (0.677 vs 0.673)上均优于 IC 指数, 表明其对贵州区域的航空器空中积冰识别能力更强。尤为关键的是, 加权平均 SCIP 指数召回率(0.783)显著高于 IC 指数(0.543), 这意味着它能识别出 78.3%的真实积冰事件, 漏报率大幅降低。尽管 SCIP 指数的精确率(0.534)略低于 IC 指数(0.623), 即虚警率有所升高, 但在航空安全“宁空勿漏”的原则下, 高召回率更具实际价值。SCIP 指数的最佳判别阈值为 0.271, 即当 SCIP 指数 ≥ 0.271 时, 判定存在积冰风险。

Table 2. Comparison of ice accumulation index verification results

表 2. 积冰指数验证结果对比

验证指标	IC 指数	加权平均 SCIP 指数	SCIP 指数优势
AUC	0.698 $\pm$ 0.020	0.718 $\pm$ 0.004	+0.020
最佳阈值	1.667 $\pm$ 0.577	0.271 $\pm$ 0.031	-
TSS	0.299 $\pm$ 0.016	0.351 $\pm$ 0.020	+0.052
召回率	0.543 $\pm$ 0.225	0.783 $\pm$ 0.064	+0.240
精确率	0.623 $\pm$ 0.087	0.534 $\pm$ 0.008	-0.089
F1 分数	0.550 $\pm$ 0.059	0.634 $\pm$ 0.017	+0.084
准确率	0.673 $\pm$ 0.040	0.677 $\pm$ 0.017	+0.004

图 4 的 ROC 曲线直观展示了 SCIP 指数的优势, 其曲线在大部分假正率区间位于 IC 指数之上, 说明在相同的虚警率容忍度下, SCIP 指数能获得更高的命中率。

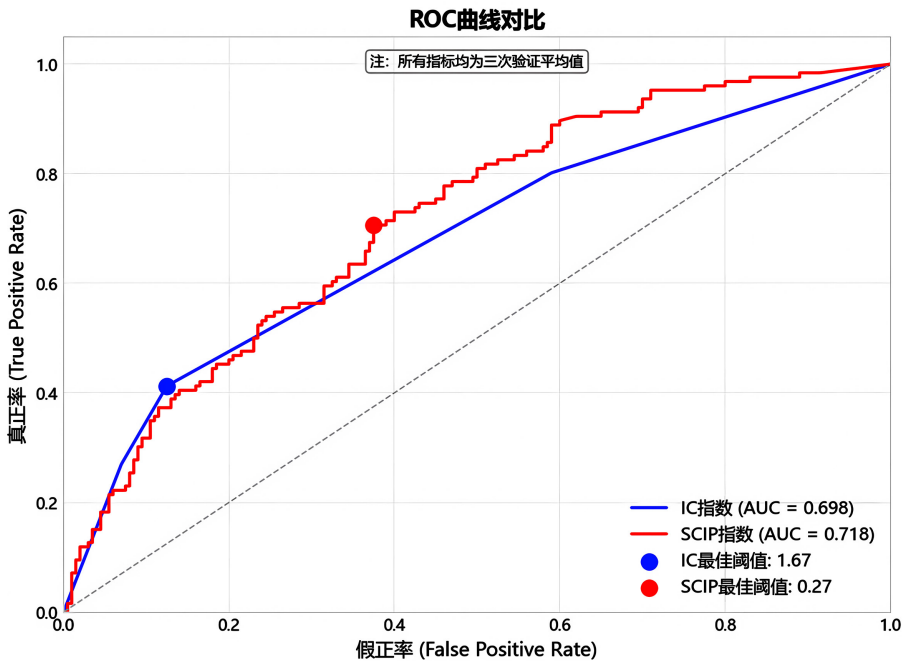


Figure 4. ROC curves of IC index and weighted average SCIP index for identifying icing events

图 4. IC 指数与加权平均 SCIP 指数判别积冰事件的 ROC 曲线

综上所述,加权平均形式的 SCIP 指数在综合性能上优于传统 IC 指数,其 78.3%的召回率能有效减少漏报风险,更适合贵州区域的航空器空中积冰风险评估。当 SCIP 指数 ≥ 0.271 时,可认为存在积冰风险。

4.2. 基于 SCIP 指数的历史积冰风险时空特征

基于 SCIP 指数(阈值 0.271)对贵州区域 2018~2025 年积冰风险进行分析,本节从时间变化、空间分布及垂直结构三个维度,系统揭示该区域该时段内积冰风险的时空演变规律。

4.2.1. SCIP 指数时间变化特征

SCIP 指数在年际、季节、月际和日内尺度上均表现出规律性变化(图 5)。年际上(图 5(a)),700 hPa 和 500 hPa 层的区域平均 SCIP 指数在 2018~2025 年间均呈波动状态,无明显线性趋势,整体而言,500 hPa 层积冰风险年平均值显著高于 700 hPa 层,表明中高层大气更容易出现航空器空中积冰。季节上(图 5(b)),冬季风险最高,700 hPa 和 500 hPa 层 SCIP 指数平均值分别为 0.248 和 0.316;春季次之,但 500 hPa 层在春季出现峰值(0.362),明显高于其他季节;夏季风险最低,700 hPa 和 500 hPa 层平均值分别为 0.210 和 0.217;秋季风险开始回升,与实际积冰报告的季节分布一致。月变化上(图 5(c)),700 hPa 层最高风险出现在 10 月(SCIP = 0.257),最低风险出现在 8 月(SCIP = 0.186);500 hPa 层则在 4 月达到峰值(SCIP = 0.390),同样在 8 月降至谷值(SCIP = 0.192)。值得注意的是,500 hPa 层在冬春过渡季节(3~4 月)维持较高风险,可能与南支槽活动频繁导致水汽和上升运动增强有关。日变化上(图 5(d)),受辐射降温影响,SCIP 指数在北京时间 02 时左右达到一日中的最高值,700 hPa 和 500 hPa 层 SCIP 指数分别为 0.244 和 0.314;在北京时 14 时降至日最低值,分别为 0.211 和 0.286。这种日变化模式与夜间辐射降温导致的低层温度下降、相对湿度升高密切相关,表明后半夜至早晨是积冰高风险时段。

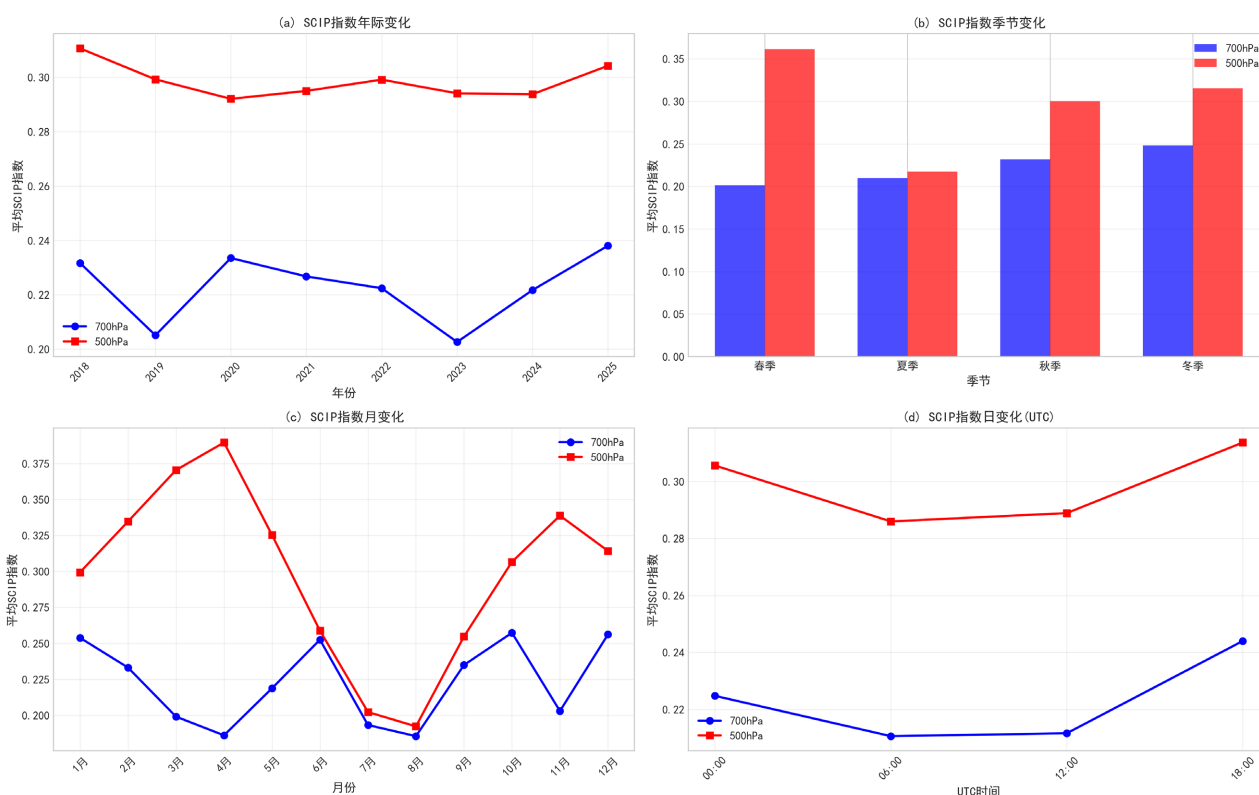


Figure 5. Time variation characteristics of the SCIP index
图 5. SCIP 指数的时间变化特征

4.2.2. SCIP 指数空间分布特征

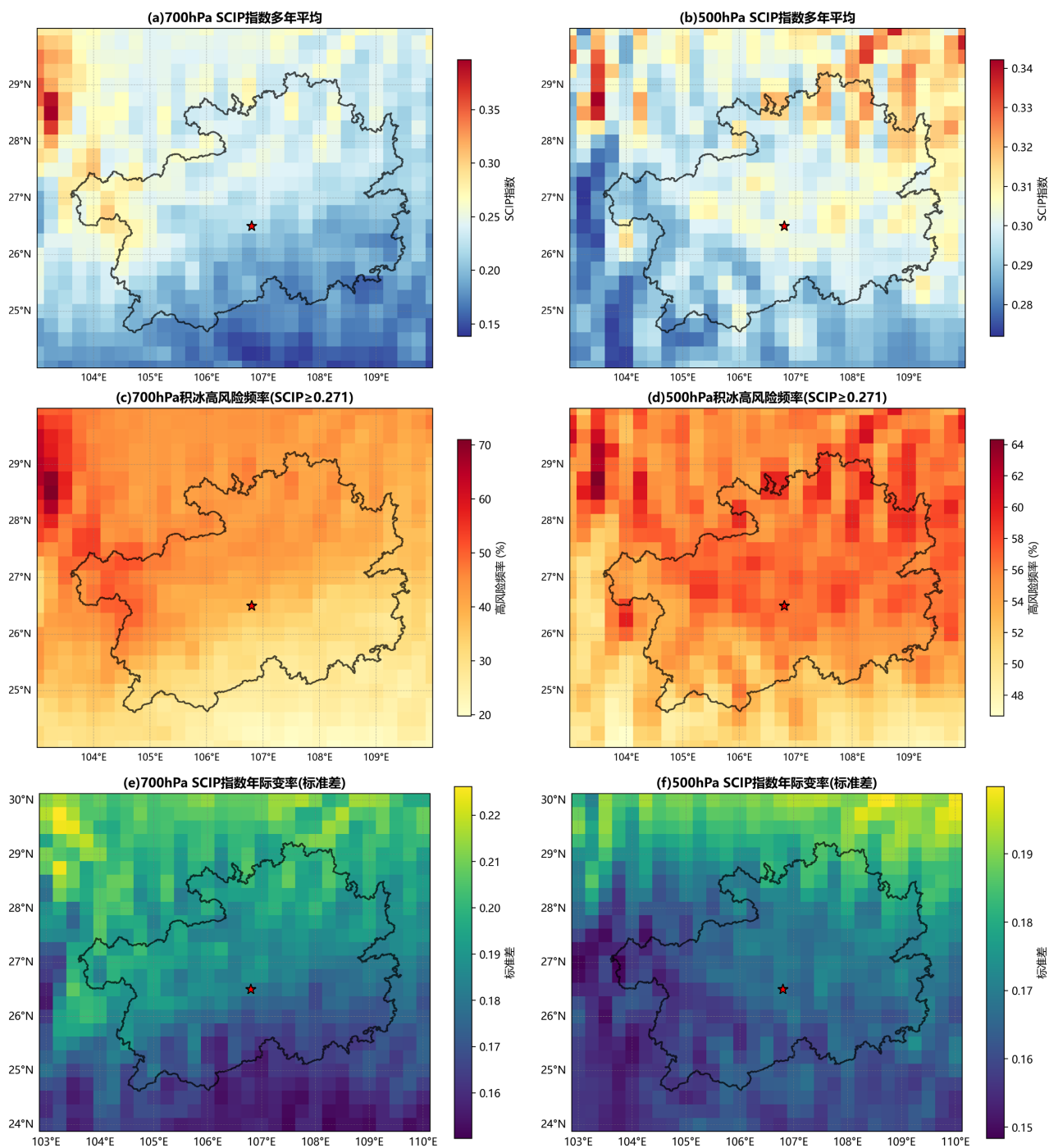


Figure 6. Space distribution characteristics of the SCIP index

图 6. SCIP 指数的空间分布特征

多年平均的 SCIP 指数空间分布呈现“北高南低”的格局(图 6(a)、图 6(b))。700 hPa 受地形影响大,西部部分地区已接近地表,抬升作用强烈,积冰风险较高;500 hPa 高风险区主要分布在贵州东北部的铜仁、遵义东部及黔东南州北部,平均 SCIP 指数较周边地区高 15%~30%。以 $SCIP \geq 0.271$ 为标准,700 hPa

和 500 hPa 层积冰高风险频率的平均值分别为 38.1%和 54.6%(图 6(c)、图 6(d)), 空间分布与平均场类似, 但在黔东北地区频率梯度更大, 局部高风险频率超过 40%(700 hPa)甚至 60%(500 hPa), 是航空器空中积冰风险的重点防控区域。SCIP 指数的年际变率(标准差)空间分布相对均匀(图 6(e)、图 6(f)), 700 hPa 层标准差在 0.16~0.22 之间, 500 hPa 层在 0.18~0.24 之间, 表明积冰风险的年际波动幅度不大, 各区域积冰风险的年际波动幅度相近, 较为稳定。

4.2.3. SCIP 指数垂直分布特征

对比来看(图 7), 整体空间上呈现西部差异大、东部差异小的特征。其中 500 hPa 层的 SCIP 指数平均值、最大值和高风险频率均显著高于 700 hPa 层。平均而言, 500 hPa 层的积冰风险比 700 hPa 层高出约 36%; 最大值方面, 500 hPa 层(1.14)也略高于 700 hPa 层(1.07); 高风险频率方面, 500 hPa 层(54.6%)较 700 hPa 层(38.1%)高出 16.5 个百分点。垂直差异场(700 hPa 减 500 hPa)平均为-0.08, 这可能与贵州特殊的地理位置和天气系统有关: ① 500 hPa 层更频繁地受到南支槽、西南涡等中高层系统影响, 产生持续的大范围上升运动; ② 贵州高原海拔较高(平均 1100 米, 西部地区最高 2900 米), 700 hPa 层(约 3000 米)已接近部分山地高度, 而 500 hPa 层(约 5500 米)完全处于自由大气中, 受地形扰动较小, 系统性上升运动更明显, 天气系统信号更清晰; ③ 冬季中高层湿度条件可能优于预期, 为积冰生成提供了充足条件。

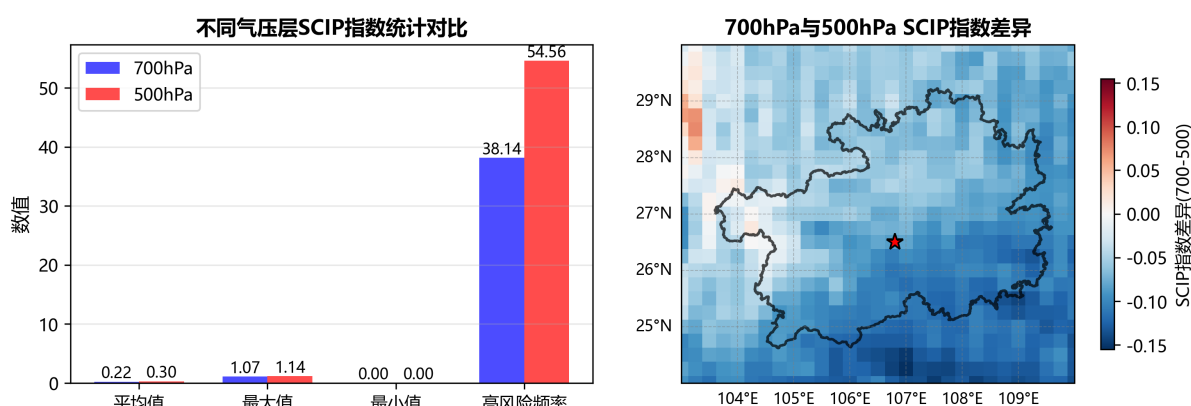


Figure 7. Vertical distribution characteristics of the SCIP index

图 7. SCIP 指数的垂直分布特征

5. 结论

本文基于历史话音方式航空器空中报告资料与再分析数据, 系统分析了贵州区域航空器空中积冰事件的时空特征, 同时对积冰诊断指数进行了本地化验证, 筛选出了适用的指数, 并明确了贵州区域积冰风险的历史气候特征。主要结论如下:

(1) 贵州区域航空器空中积冰事件主要发生在 11 月~次年 3 月, 在 07~13 时及 18~23 时出现日高峰。垂直方向集中于中低空, 3~5 km 为高风险层。水平空间呈现出“中部密集、北部分散、西南空白”的格局, 高发区位于贵阳机场以北至东南半径约 120 km 的扇形范围内, 积冰点密集且强度以中度和严重为主。

(2) 在贵州复杂地形条件下, 加权平均形式的 SCIP 指数在综合性能上优于传统 IC 指数, 其在保持可接受虚警率的同时, 召回率高达 78.3%, 能有效识别大部分积冰事件, 更适合该地区的积冰风险评估, 最佳判别阈值为 0.271。

(3) 基于 SCIP 指数的分析表明, 贵州区域积冰风险在时间上存在“冬高夏低、夜高昼低”的变化特

征, 水平空间上高风险区集中在地形迎风坡和黔东北部地区, 垂直方向上 500 hPa 层积冰风险普遍高于 700 hPa 层。此外, 在当前气候背景下, 贵州区域积冰风险未表现出显著的长期变化趋势。

基于以上发现, 建议在贵州区域航空器空中积冰预警中, 重点关注冬季和冬春过渡季节, 特别是夜间至早晨时段。加强对黔东北等高风险区域的监测和预警, 同时, 重视 500 hPa 等中高层气象条件分析, 将其纳入积冰预警的常规考虑因素。最后, 尽管趋势不显著, 仍需持续监测气候变化对积冰风险的潜在影响。

参考文献

- [1] 迟竹萍. 飞机空中积冰的气象条件分析及数值预报试验[J]. 气象科技, 2007, 35(5): 714-718.
- [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] 孟子靖. 气候变暖对中国区域飞机积冰的影响研究[D]. [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [4] 杨凤婷, 罗浩. 贵州区域飞机积冰时空特征及其气象条件分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(3): 488-496.
- [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] 刘开宇, 张云瑾, 龚娅. 一次飞机积冰气象条件的诊断分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2008, 30(S1): 330-332.
- [7] 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, 2025, 31(12): 23-27.
- [8] 刘风林, 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.