

西南地区严重飞机积冰环流分型研究

应雨辰¹, 蔺少龙^{2*}

¹民航西南空管局气象中心, 四川 成都

²民航西南空管局气象部, 四川 成都

收稿日期: 2026年2月15日; 录用日期: 2026年3月13日; 发布日期: 2026年3月23日

摘要

本文基于2015~2020年西南地区语音式航空器空中积冰报告资料和ERA5再分析资料, 按照较为严重飞机积冰报告为标准, 对造成严重飞机积冰的环流背景分为冷空气切变线/低涡型、冷空气型、切变线/低涡型和高空槽型共4个类型, 为西南地区飞机积冰预报业务及管制人员更有效地指挥飞机避开可能存在的积冰区提供便利。

关键词

飞机, 积冰, 环流分型, 西南地区

Research on Classification of Circulation Patterns for Severe Aircraft Icing in Southwest China

Yuchen Ying¹, Shaolong Lin^{2*}

¹Meteorological Center, Southwest Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Chengdu Sichuan

²Meteorological Division, Southwest Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Chengdu Sichuan

Received: February 15, 2026; accepted: March 13, 2026; published: March 23, 2026

Abstract

Based on voice-based aircraft icing reports and ERA5 reanalysis data in Southwest China from 2015 to 2020, this study classifies the circulation backgrounds associated with severe aircraft icing into four types: cold air shear line/low vortex type, cold air type, shear line/low vortex type, and upper-level

*通讯作者。

trough type. This classification aims to facilitate aircraft icing forecasting operations and assist air traffic controllers in more effectively guiding aircraft to avoid potential icing zones in Southwest China.

Keywords

Aircraft, Icing, Circulation Classification, Southwest China

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

飞机积冰是民航运行中会遭遇的影响飞行安全天气之一, 飞机积冰现象多出现在飞机的表面较为突出迎风位置, 如: 飞机的机翼、飞机引擎进气口、飞机尾翼、前风挡玻璃、空速管、信号天线等[1] [2]。积冰影响飞机的稳定性和操纵性, 并可能使导航仪器和无线电通讯设备故障, 严重时甚至导致飞行不安全事件或事故发生。根据美国国家运输安全委员会的调查统计, 仅在过去三十年间全美国由飞机积冰引起的飞行安全事故高达 803 次, 根据另外一项调查统计, 在 2003~2008 年期间, 共有 380 起飞机积冰的事故报告在全球各地发生[3]。相关研究表明积冰与地面气团性质、地面天气区、锋面、高空槽、低涡、降水类型、云的类型及其覆盖率以及雷暴等天气尺度系统影响相关[4]。在暖锋和锢囚锋的下部 1000~1500 米高度积冰的危险性最大, 而在冷锋云系中积冰区可伸展至很高的高度, 其积冰强度也随高度增大, 但其水平延展尺度小于暖锋, 所以飞机在穿越冷锋时发生积冰的时间较短[5]。相关研究表明当在地面观测到冻降水类型时, 其上方空域就会存在较大的过冷液滴[6]。雨滴一般比云滴大得多, 当飞机飞行在云中或云下时遭遇一些含有过冷水滴的降水如冻雨、冻毛毛雨和雨夹雪时会导致飞机飞快速产生积冰, 在该区域很短的飞行时间, 也能导致飞机表面产生较为严重的积冰, 危及飞行安全。目前已有的飞机积冰研究仅限于数个或单个积冰个例研究, 对于出现较为严重积冰报告时对于其主要环流背景分型研究较少, 本文通过对 656 个飞机积冰报告以当日出现三次中度及以上强度积冰报告为标准进行筛选, 共选取 25 个发生较为严重积冰报告天气个例, 对环流背景开展分型研究。

2. 资料与方法

2.1. 话音式航空器报告数据

本文所采用的数据为 2015 年 1 月~2020 年 12 月共 6 年的西南地区话音式航空器空中报告。航空器报告来源于机组人员以话音的通信方式向地面空中交通管制人员传递的飞机信息报告, 其内容包括具体报告的时间、飞机发生的天气现象及其强度、报告时的具体位置和高度、飞机具体型号、所属航空公司及其航班号等信息, 共有 656 个可用的飞机积冰报告。近年来, 随着我国航空运输业不断发展, 目前我国的大部分运营航空公司均采用 A330、A320、B737 和 B747 等服役时间较短且相关功能配套较为先进的飞机飞行, 这些新型飞机在全球各大航空公司广为应用, 久经验证, 其能够在飞行中遇到危险天气的抗干扰能力较强, 再结合管制部分的及时通报, 所收到的话音式飞机报告有较高的可靠性和较低的误报, 精准可靠的飞机报告资料为我们研究西南地区的飞机积冰现象提供了坚实的数据基础。

2.2. 再分析资料

本文使用欧洲中期天气预报中心的 ECWMF-ERA5 再分析资料, 其时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为

0.25° × 0.25°, 垂直方向 37 层(1000 hPa~1 hPa), 数据格式为 netCDF (Netware Communication Data Format)。

3. 严重飞机积冰环流分型

3.1. 严重积冰报告环流背景统计

严重积冰对民航飞机飞行安全影响最大, 会严重降低飞机的稳定性和操作性。通过对 656 个飞机积冰报告以当日出现三次中度及以上强度积冰报告为标准进行筛选, 共选取 25 个发生较为严重积冰报告天气个例; 利用 ECWMF-ERA5 逐小时再分析资料, 将 25 个发生较为严重积冰报告天气个例进行环流背景诊断分型, 分为冷空气型、高空槽型、切变线/低涡型、冷空气切变线/低涡型(表 1)。

Table 1. Statistical classification of circulation backgrounds for severe icing reports in Southwest China (2015~2020)
表 1. 2015~2020 年西南地区严重积冰报告环流背景统计分型表

日期	严重积冰	中度到严重积冰	中度积冰	高度/米	环流背景
2017.12.07	3	1	1	2100~3900	冷空气型
2018.01.01	2	0	2	4800~7800	高空槽型
2018.01.03	2	0	1	2400~3300	冷空气型
2018.12.30	3	0	0	3000	切变线型
2019.01.01	4	0	0	2400~2700	冷空气型
2019.01.03	3	0	2	2700	低涡型
2019.01.09	6	0	0	1800~2700	低涡型
2019.01.10	2	0	2	3000	切变线型
2019.01.12	4	0	0	2100	冷空气切变线型
2019.01.14	5	0	0	3000	冷空气切变线型
2019.01.18	2	1	1	2400	冷空气切变线型
2019.01.20	2	1	0	2700	冷空气型
2019.02.17	3	2	3	2400	冷空气低涡型
2019.11.30	2	0	1	3600	冷空气切变线型
2019.12.24	2	2	2	2700	冷空气型
2020.01.09	3	0	0	2700	切变线型
2020.01.15	4	2	1	2700	切变线型
2020.01.17	1	1	1	2600	冷空气型
2020.01.18	4	1	5	2400	冷空气切变线型
2020.01.20	6	0	6	2700	切变线型
2020.01.23	3	0	8	3000	冷空气型
2020.01.26	1	1	2	3000	冷空气型
2020.01.27	3	0	1	2700	冷空气型
2020.11.22	3	0	3	4200	冷空气切变线
2020.11.27	1	1	2	3000	切变线型

3.2. 冷空气切变线/低涡型

西南地区 2015~2020 年间共有 7 次冷空气切变线/低涡型严重积冰个例, 均集中在冬季中的 11 月、1

月和 2 月, 报告高度在 2100 米至 4200 米之间, 主要分布于飞机在终端区飞行的起飞爬升和着陆进近阶段, 这一阶段飞机飞行安全受危险天气影响较大。综合来看这 7 次严重积冰过程均主要受低层 700 hPa 至 850 hPa 之间冷空气入侵同时配合切变线/辐合影响产生。

以 2020 年 1 月 18 日 13 时 35 分(北京时间, 下同, 图 1)的严重飞机积冰报告为例, 在 500 hPa 高空图上中高纬度地区呈两槽一脊形势, 东部地区有一槽位于我国华北至蒙古东部一带, 西北部浅槽位于西西伯利亚以南, 南支槽在青藏高原西南部逐渐发展, 整个西南地区受青藏高原东部偏西气流控制, 相对湿度偏低。

700 hPa 与 850 hPa 均在西南地区东北方向有显著偏北气流引导冷空气南下影响西南地区东北部, 且在川渝地区相对湿度较大, 均在 90%以上, 在 700 hPa 上四川盆地至重庆区域北部地区有东北 - 西南向切变线, 积冰点位置受此切变线影响, 产生较为显著的垂直上升运动。此外地面冷空气主体已由四川东北部进入盆地内, 整个四川盆地内受冷性地面高压控制。

在这一类环流配置中, 高层 500 hPa 无显著影响天气系统, 而是由中低层环流占主导因素, 其较高的相对湿度, 同时 700 hPa 或 850 hPa 上的切变线配合冷空气入侵影响, 多产生层状云云系, 同时处在适宜的温度范围时, 云中就会存在大量过冷却液滴, 当飞机在云中飞行时极易产生积冰, 长时间飞行时甚至可能会出现对飞行影响较大的中度及以上程度积冰。

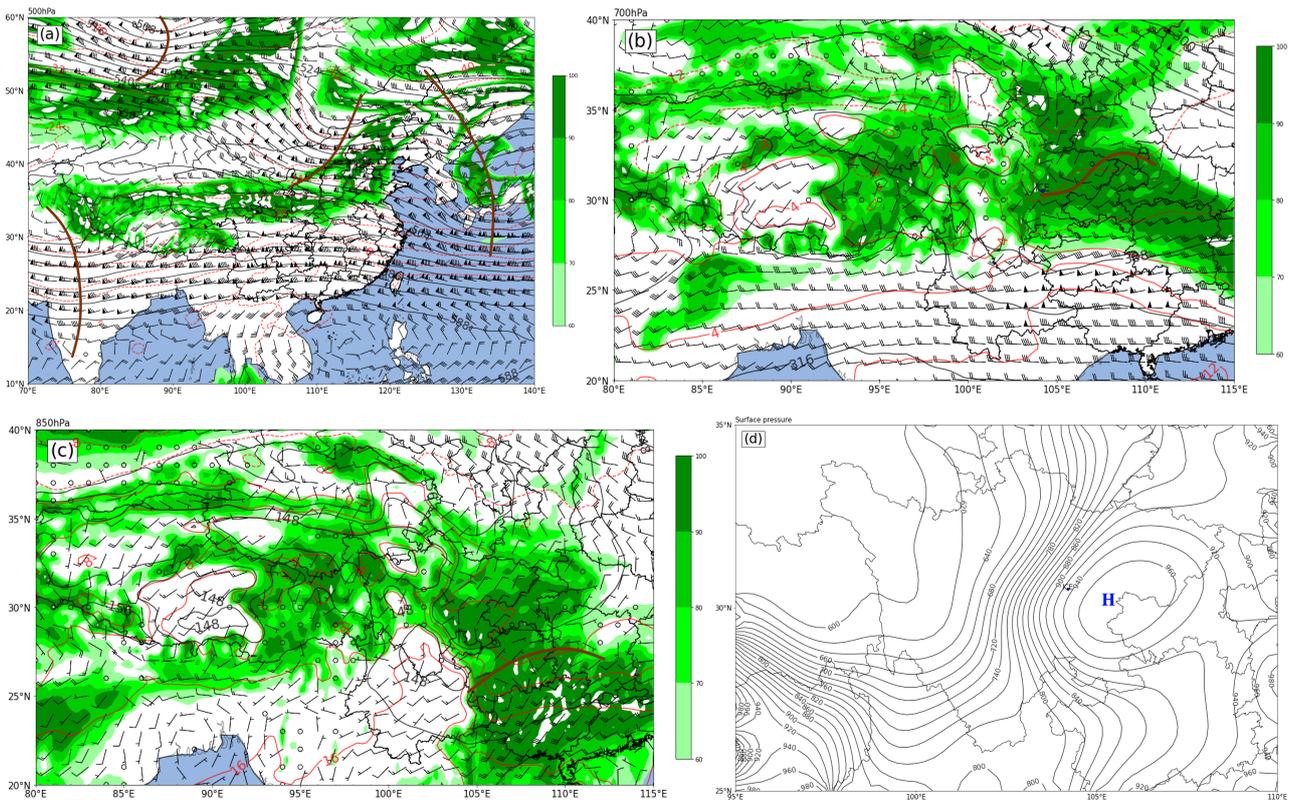


Figure 1. Circulation patterns at 500 hPa (a), 700 hPa (b), 850 hPa (c) and surface pressure field (d) at 13:00 on 18 January 2020 (The black solid lines, red dashed lines, green shadings, and wind barbs in panels (a), (b), and (c) represent geopotential height, temperature, relative humidity, and wind field, respectively; the black dots in panel (b) denote the locations of icing occurrences; the black solid lines in panel (d) indicate surface pressure)

图 1. 2020 年 1 月 18 日 13 时 500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c) 环流形势及地面气压场 (d) (图 (a)、(b)、(c) 中黑色实线、红色虚线、绿色阴影、风向杆分别为位势高度、温度、相对湿度、风场, 图 (b) 中黑色点代表积冰发生位置, 图 (d) 中黑色实线为地面气压)

3.3. 冷空气型

2015~2020年间西南地区25例较为严重飞机积冰报告中,冷空气型共出现了9次,占到总严重积冰报告的36%,在西南地区出现冷空气型大气环流背景的严重积冰概率较大。以2017年12月7日19时13分发生的一次严重积冰报告为例,飞机在成都平原富家场附近上空2100~3900米的进近区域范围发生了一次严重程度积冰。图2为发生严重积冰期间大气环流形势,500 hPa上在我国新疆西北部和东北地区东部各有一冷性低涡,温度槽落后于高空槽,有显著冷平流南下影响西南地区东部。700 hPa和850 hPa西北地区东部至西南地区东部均受偏北气流控制,引导冷空气南下入侵四川盆地,与盆地内的暖湿气团交汇,产过冷却液滴。这一类环流形势与冷空气切变线/低涡型较为相似,但其产生云系和云中液滴的动力条件较弱,以冷暖气团交汇为主,无显著动力抬升系统。

此次严重积冰个例发生在3000米的高度,正处于700 hPa左右的层次,在700 hPa上 0°C 等温线已经压过川滇交界处,积冰报告点附近处于 -4°C 至 -8°C 之间,且积冰报告点的相对湿度在90%以上,较高的相对湿度配合适当的温度范围就会在云中出现大量过冷却水滴,从而导致严重飞机积冰的发生。

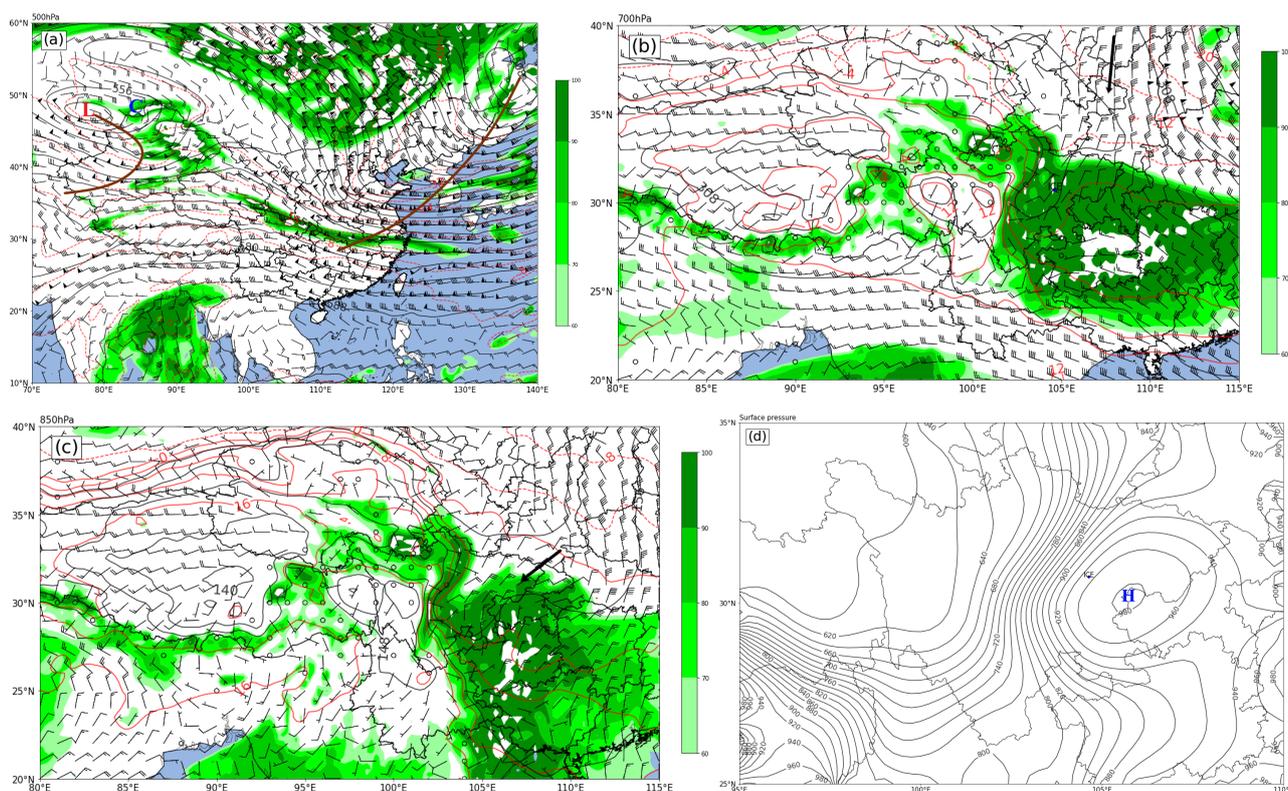


Figure 2. Circulation patterns at 500 hPa (a), 700 hPa (b), 850 hPa (c) and surface pressure field (d) at 19:00 on 7 December 2017 (The black lines with arrows indicate significant cold advection; other legends are the same as in Figure 1)

图 2. 2017 年 12 月 7 日 19 时 500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c) 环流形势及地面气压场 (d) (黑色带箭头线条为显著冷平流, 其余图例同图 1)

3.4. 切变线/低涡型

切变线/低涡型环流背景下的飞机积冰报告主要受出现在700 hPa或850 hPa上的西南地区东部的涡旋或切变影响为主。在25次较为严重的飞机积冰报告中出现频率较高,共出现了8次,分别在11月、12月各出现1次,在1月份出现了6次。

如图 3 所示, 以 2019 年 1 月 3 日 21 时 56 分的严重积冰报告为例, 在 500 hPa 上东北至华北地区受东北冷涡控制, 而西北地区北部有一弱脊, 在青藏高原的南部南支槽发展东移, 整个西南地区均受来自印度洋和南海的西南暖湿气流影响。700 hPa 上四川东北部至陕西南部地区和 850 hPa 川渝交接处均有一低涡, 此次严重积冰报告点的位置位于 700 hPa 辐合的西南部, 低空急流的左侧, 此时冷中心位置仍处在甘南地区。850 hPa 上积冰点位于辐合后部, 该点处于相对湿度较大的大值区域, 温度在 $-4^{\circ}\text{C}\sim-8^{\circ}\text{C}$ 之间, 有利于积冰的形成。积冰点在地面处于高压后部的均压场中。切变线/低涡型环流形势主要是高层 500 hPa 南支槽东移发展, 是一条暖湿气流输送带, 配合西南地区东部中低层的切变或辐合影响, 无显著冷平流影响, 尤其是在冬季, 容易在西南地区东部形成大片云系, 从而产生飞机积冰。

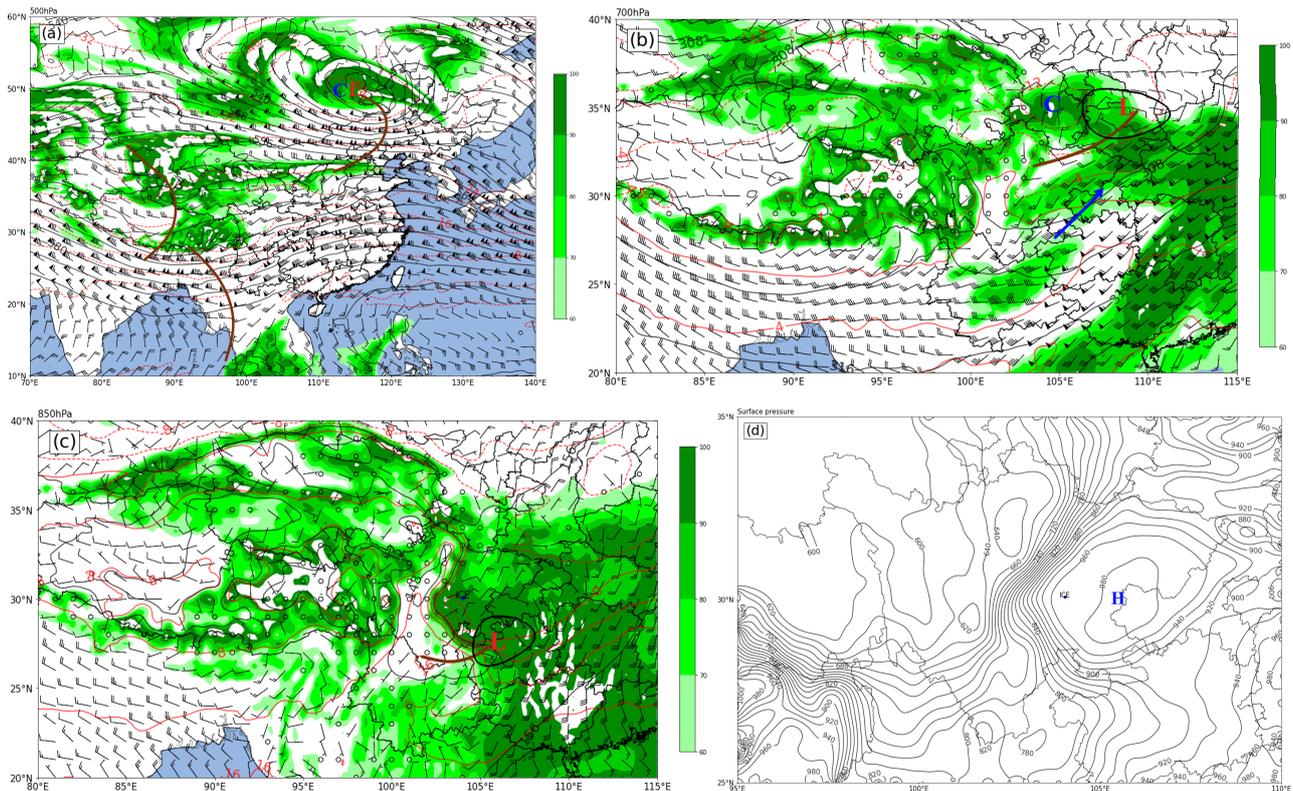


Figure 3. Circulation patterns at 500 hPa (a), 700 hPa (b), 850 hPa (c) and surface pressure field (d) at 21:00 on 3 January 2019 (The blue lines with arrows indicate the jet stream; other legends are the same as in Figure 1)

图 3. 2019 年 1 月 3 日 21 时 500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c) 环流形势及地面气压场 (d) (蓝色带箭头线条为急流, 其余图例同图 1)

3.5. 高空槽型

高空槽型在西南地区 25 个严重积冰报告个例中仅出现一次, 而在 2015~2020 年间 656 次飞机积冰报告中, 由于高空槽引起的积冰报告共有 81 次, 且积冰报告高度在 4000~4500 米及以上, 其中以轻到中等强度积冰报告为主, 虽然积冰强度不大, 但其发生此数占到总报告次数的 12.3%, 且高空槽型积冰报告中的 58 次发生在云南地区, 因此云南地区飞机积冰过程受高空槽型影响较大。以 2018 年 1 月 1 日 15 时 37 分发生的这次严重积冰报告为例, 机组报告高度为 4800 米, 位置在楚雄附近, 此次严重积冰报告环流形势如图 4 所示, 在 200 hPa 上高空槽前有一东北向的高空急流, 积冰点位于急流右侧。500 hPa 上南支槽发展深厚, 其槽前的西南急流输送印度洋的暖湿气流影响西南地区南部, 同时积冰报告点附近风速的辐合

促进垂直运动加强。低层 700 hPa 和 850 hPa 上均以偏南气流为主, 在云南东部至贵州区域有一西南低空急流, 积冰报告点在急流左侧。地面上处于云贵高原低压控制, 但气压梯度较大, 地面南风风速较大。

这一类严重积冰报告的环流形势主要受高低空急流耦合, 配合中低层暖湿平流造成位势不稳定层结从而产生降水云系, 云中含有大量液滴, 在 500 hPa 上积冰报告点附近, 处于温度 $-8^{\circ}\text{C}\sim-12^{\circ}\text{C}$ 等温线之间, 相对湿度大于 90%, 同时伴随风速辐合, 是 5000 米高度的云中充满过冷却液滴, 当飞机在云中穿梭或飞行时极易产生积冰。

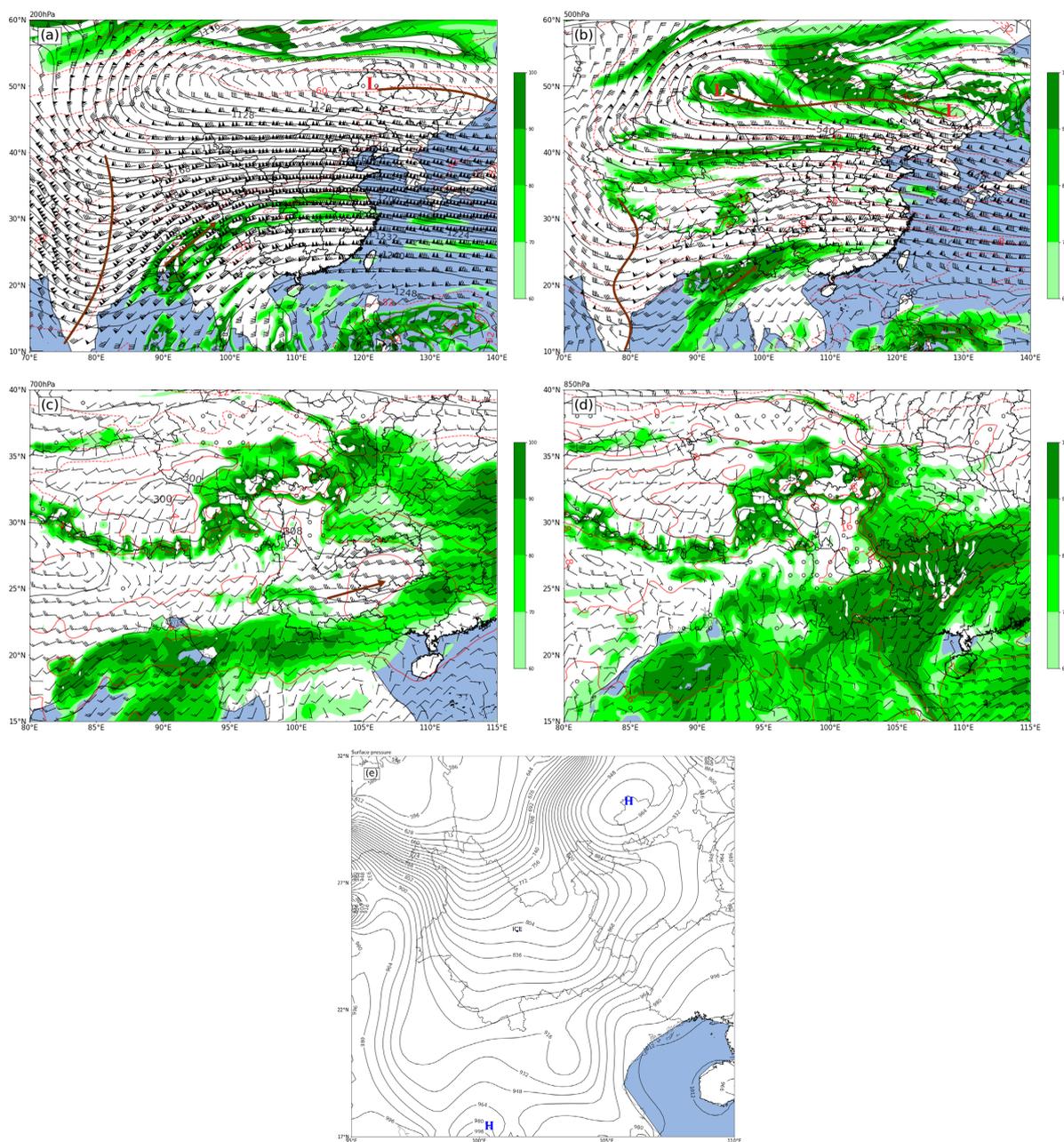


Figure 4. Circulation patterns at 200 hPa (a), 500 hPa (b), 700 hPa (c), 850 hPa (d) and surface pressure field (e) at 23:00 on 1 January 2018 (The brown lines with arrows indicate the jet stream; other legends are the same as in Figure 1)

图 4. 2018 年 1 月 1 日 23 时 200 hPa (a)、500 hPa (b)、700 hPa (c)、850 hPa (d) 环流形势及地面气压场 (e) (棕色带箭头线条为急流, 其余图例同图 1)

4. 结果与讨论

(1) 大多数严重积冰报告出现在 11 月至 2 月期间, 且严重积冰报告出现在 1 月的频次最高, 占到总严重积冰报告次数的 72%, 2 月最少, 仅出现一次, 占总严重积冰报告次数的 4%。

(2) 其中高空槽型发生次数最少, 仅出现一次, 冷空气型出现 9 次, 占到总严重飞机积冰个例的 36%, 切变线/低涡型共出现 8 次, 占到总严重飞机积冰个例的 32%, 冷空气切变线/低涡型出现 7 次, 占到总严重飞机积冰个例的 28%, 共占 90% 以上, 表明在西南地区出现冷空气型、切变线/低涡型和冷空气切变线/低涡型环流背景的严重积冰概率较大。

(3) 冷空气切变线/低涡型这类环流配置中, 中低层环流占主导因素, 700 hPa 或 850 hPa 切变线配合冷空气影响; 冷空气型环流形势与冷空气切变线/低涡型较为相似, 但其产生云系和云中液滴的动力条件较弱; 切变线/低涡型环流形势受西南地区东部中低层的切变或辐合影响, 无显著冷平流; 高空槽型受南支槽配合高低空急流耦合, 中低层暖湿平流造成位势不稳定层结。

5. 不足与展望

本文对我国西南地区严重飞机积冰的环流背景统计分型, 对西南地区航空气象人员开展积冰天气预报服务, 提供航班飞行时刻、航路航线规划参考, 助力航班运行安全与效率有助于识别易发生积冰的环流类型, 提高预报准确性等现实指示意义。但由于能力有限, 仍然存在部分问题没有得到解决, 具体如下:

(1) 飞机积冰报告位置信息是经过人工主观处理的, 其主观性太强, 虽然对于天气尺度系统影响不大, 但对于实际民航运行的 20 公里宽度的航路来说, 不足以满足实际运行需求;

(2) 本文所使用的 656 个飞机积冰空中报告是经过数据筛选处理后得到的, 原始话音式飞机空中积冰报告数据在传递过程中出现信息错、漏, 从而导致 2015~2020 年间个别数据无法使用, 以及我国西南地区午夜期间起降航班较少等原因, 飞机空中报告不能完全代表大气中的实际积冰情况, 可能导致部分严重积冰情况缺失从而导致环流分型不完善。因此在今后的研究工作中将不断累积不同地区更多年限的飞机积冰报告资料来加深研究;

(3) 本文仅使用 ERA5 再分析资料一种资料, 未选取其他资料进行对比分析环流背景, 因此后续研究将使用 NCEP、JRA55、ERA 等再分析资料进行对比分析。

参考文献

- [1] 丁玉江. 基于 NCEP/NCAR 资料的我国华东机场飞机积冰气候特征研究[D]: [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2014.
- [2] 蔺少龙, 邹永成, 应雨辰. 西南地区航空器积冰分布特征分析[J]. 科技与创新, 2022(6): 4.
- [3] 孟鹏程. 我国飞机积冰区云微物理特征分析研究[D]: [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2019.
- [4] Bernstein, B.C., Omeron, T.A., McDonough, F. and Politovich, M.K. (1997) The Relationship between Aircraft Icing and Synoptic-Scale Weather Conditions. *Weather and Forecasting*, **12**, 742-762. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0742:trbaia>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0742:trbaia>2.0.co;2)
- [5] 张燕光. 航空气象学[M]. 北京: 中国民航出版社, 2014.
- [6] Bernstein, B.C., Omeron, T.A., Politovich, M.K. and McDonough, F. (1998) Surface Weather Features Associated with Freezing Precipitation and Severe In-Flight Aircraft Icing. *Atmospheric Research*, **46**, 57-73. [https://doi.org/10.1016/s0169-8095\(97\)00051-3](https://doi.org/10.1016/s0169-8095(97)00051-3)