

一次对流不稳定条件下飞机积冰的 天气动力诊断分析

陈 静 吕环宇

(北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871; 中国民航飞行学院洛阳分院气象台)

提 要: 通过对2006年2月16日洛阳至广汉航线严重积冰过程诊断分析得到: 青藏高原东部海拔3000~7500m之间强度较高的积冰生成与对流不稳定气象条件密切相关。 K 指数、上升速度和涡度平流等物理量可用于积冰的预报参考, 大的 K 指数和 K 指数增长区、上升气流较强区域、正涡度平流区域与较强积冰区域对应。

关键词: 飞机积冰 飞行高度层 0°C 等温线 对流不稳定

Dynamic Diagnosis on Aircraft Icing Under a Convective Instability Meteorological Condition

Chen Jing Lu Huanyu

(Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;
Luoyang Branch Meteorological Observatory of CAFUC)

Abstract: Diagnostic analysis on a server icing case occurring on the route from Luoyang to Guanghan on February 16, 2006 is conducted. It shows that the severe aircraft icing has close relations to the convective instability meteorological conditions between 3000 and 7000 high above the sea level in the east of the Tibetan Plateau. Such physical variables as K index, upward velocity vorticity advection, etc. can be used for the reference of icing forecast. Larger K index or its increasing areas, strong upward flow and advection regions of positive vorticity all correspond to the severe aircraft icing.

Key Words: aircraft icing flight level 0°C isotherm convective instability

引 言

飞机积冰是机身表面一些部位产生冰层聚积的现象。因其恶化飞机空气动力学性能、影响飞机安定性和操纵性，是一种航空危险天气^[1]。飞机积冰多发生于对流层内，尤其是 FL100-250（飞行高度 3000 ~ 7500m）的飞行器更易遭遇较强积冰，如飞行高度在 6000m 以下的运七、TB200 等飞机。其中洛阳至广汉的运七飞行穿越我国飞机积冰气候 I 区、II 区即最易发生积冰区和较易发生积冰区^[1]以及西南水汽通道，一旦温湿条件适宜，极易产生中度其以上强度积冰。积冰现象一年四季均可出现，以冬季最多，因飞行训练频繁，下垫面地形复杂，所以对于该航线 FL100-250 高度层的机型，做好积冰的分析和预报尤其重要。

目前飞机积冰分析预报的主要途径是通过经验预报或用有对云水显式预报能力的中尺度模式并结合天气形势，综合考虑其他因素进行。李子良^[2]等利用国内外预报飞机积冰的经验公式建立飞机积冰的判别方程，对飞机积冰进行分析预报；刘开宇^[3]等利用 WAFS 数值预报产品在国际民航组织向成员国推荐的积冰指数基础上重新构造积冰指数对飞机积冰进行分析研究；赵彩^[4]在分析积冰过程时探讨了云层热力特征和云层中、上部理查逊数的特征。通常在分析预报积冰时，多是考虑温度、相对湿度和云微物理参数等气象因子，但对与空气对流活动有关的云内动力学特征研究不多，尤其是冷季云中隐嵌的对流活动对积冰的影响。本文主要分析与严重积冰区对应的重要天气预告图、卫星云图上隐嵌对流云区、K 指数变化、垂直速度场和涡度平流场特征，研究云中存在的对流不稳定对积冰强度的影响。

本文所采用资料为气象台站日常业务中

所使用的 MICAPS 常规资料和民航 621 气象卫星传真广播系统下发的重要天气预告资料。

1 一次较强航线飞机积冰个例

2006 年 2 月 16 日 08 时 40 分（北京时，下同），洛阳运七机组执行洛阳—广汉—洛阳训练任务，当日四川境内多为降水，局地有降雪，广汉、成都为小雨。高空图 500hPa、700hPa 上西南部湿度较大，北京数据库提供的中层重要天气预告图 2 月 16 日全天川东地区有中度积冰。据机组反馈，当日洛阳—广汉飞行时，入川后局地有中度积冰，情况不严重。但在下午 13 时 40 分返回洛阳时，飞机起飞 20 分钟左右至 VENON 交接点（31°4.2'N、104°42.2'E）区域，高度 4800m，温度 -8℃，飞机出现中度积冰并很快出现严重积冰，积冰增强速度很快，厚度急剧加大，飞机动力特性严重受阻，机长当时给飞机加到全部动力，因严重积冰维持时间较短、除冰及时，才使飞机脱离严重积冰的危险状况，否则后果不堪设想。根据机长反映，这次积冰是其飞行多年来最严重的一次，积冰最大厚度约 30mm。

2 积冰过程成因分析

2.1 天气形势分析

2006 年 2 月 16 日 08 时高空图上，500hPa 欧亚大陆为一槽一脊，高原东部处于东亚大槽底部的槽前西南气流里；700hPa 在飞机飞越宁陕以后的航路上汉中、安康与达川、温江之间恰好是“人字形”切变线的东西向切变线区。航线上四川境内 500hPa、700hPa 平均温度分别为 -15℃、-7.5℃，温度露点差分别为 1.3℃、

0.9℃, 16 日 20 时 500hPa、700hPa 航线上四川境内温度露点差平均为 1.3℃和 0.7℃, 飞机穿越温度在-4℃至-10℃范围内出现积冰的概率最大, 如湿度条件适宜, 均可有中度以上的积冰^[5]。据机组反映, 当日强积冰生成时航线 4800m 高度温度为-8℃, 是最易生成强积冰的温度。20 时 700hPa “人

字形”切变线缓慢东移, 当日返回洛阳时四川境内航线位于切变线的最强辐合区, 地面天气报告和重要天气预告图都显示该区域出现了不同程度的对流不稳定天气。表 1 为沿航线积冰区各站 16 日 08 和 20 时的温度和温度露点差。

表 1 2006 年 2 月 16 日 08、20 时航线上 500hPa、700hPa 探空站温度 (T) 和温度露点差 ($T-T_d$) (单位: °C)

	08 时 500hPa		08 时 700hPa		20 时 500hPa		20 时 700hPa	
	T	$T-T_d$	T	$T-T_d$	T	$T-T_d$	T	$T-T_d$
汉中	-17	1.8	-12	2.0	-16	1.7	-14	1.7
安康	-19	1.5	-12	1.2	-18	1.3	-12	1.3
达川	-15	1.0	-6	0.5	-14	1.0	-9	0.0
温江	-15	1.6	-9	1.3	-15	1.1	-12	1.1

由表 1 可见对于 FL100-250 航线高度, 温度处于易于积冰范围, 温度露点差低, 水汽充足并存在大量的过冷却水滴, 尤其在汉中、安康以南, 温江、达川以北地区, 温度在-6~-12℃之间, 为中度或更强积冰生成最适宜的温湿条件。成都、广州和西安数

据中心发布的 14 时中层重要天气预告图上西南区域为中度积冰区, 积冰区面积大, 积冰高度层底高不明, 顶高从 4800~5700m 不等, 在北京数据库 14 时发布的重要天气预告图 (图 1) 上, 中度积冰高度层底高 3300m, 顶高 4800m。

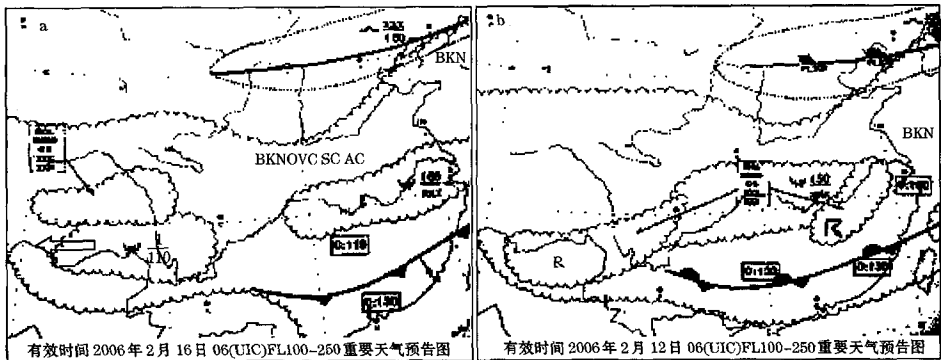


图 1 有效时间为 2006 年 2 月 16 日 14 时 (a)、20 时 (b) FL100-250 重要天气预告图
实心箭矢所指为隐嵌积雨云区, 空心箭矢所指为中度以上积冰区

值得注意的是在图 1 中 14 时成都以西有孤立的隐嵌 Cb 云区。20 时预告图上, 积冰区面积扩大, 成都至咸阳为中度积冰, 隐嵌 Cb 云区几乎覆盖了整个川陕航路。比较

前后两个时次积冰区域和隐嵌对流云区位置, 可以判断 14 时之后积冰区和对流云区从西南向东北、东移动并加强, 广汉至洛阳航线上川陕段处在中度积冰区和对流不稳定

区域。结合高空形势 VENON 区域正处于较强对流不稳定区。

2.2 云图特征分析

在温度低于 -15°C 时，镶嵌对流的强上升气流中会发生中度或严重积冰现象^[6]；在 0°C 至 -15°C 之间如果有隐嵌对流，积冰强度会更严重。Hauf, T. 等通过飞机上的积冰探测仪器探测发现，层状云里的隐嵌对流几乎所有阶段都有积冰、包括严重积冰生成^[7]。从 2 月 16 日 13—15 时 FY-2C 红外图像（图 2）看到，切变线云系自西南向东北方向移动加强，而且速度较快，13 时 VENON 上空云层稀疏，颜色灰暗，14 时云层变得浓密，其间一些云云状密实亮白为

对流性积状云块，说明该地区及附近有对流不稳定存在。这与 14 时重要天气预报图上的隐嵌积雨云区、垂直运动上升区（图 3）及地面图上测站的云状都是对应的。所以飞机应是穿越了对流上升气流和过冷却水滴密集区域，造成了中度及严重积冰。虽然当日云层很厚，因 VENON 区域处于有积状云的云系前缘，所以飞机向东北方向飞行很短时间就脱离了严重积冰区，这时如果返航将会进入更强的积冰区。从 15 时云图可看到云系加强北移明显，切变线以北的云层均匀，为中、高层层状云系，据机组反映该区域积冰强度弱也比较稳定。20 时重要天气预报图上（图 1）对流区扩大东移北伸，返回洛阳航线上广汉—咸阳为中度积冰区。

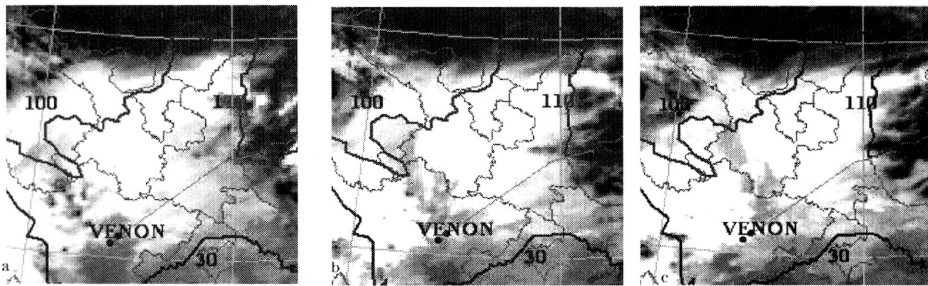


图 2 2006 年 2 月 16 日 13—15 时 FY-2C 红外图像
广汉： 30.58°N 、 104.17°E ，VENON： 31.01°N 、 104.7°E
a. 13 时；b. 14 时；c. 15 时

3 积冰过程的物理量分析

3.1 K 指数分析

K 指数是反映中、低层气层稳定程度和低层空气饱和程度的综合物理量，在预报对流天气时有很好的指示意义，由于积冰与温湿要素和对流活动关系密切，所以 K 指数分析可用于积冰预报。其定义为^[8]：

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700}$$

其中： T_{850} 、 T_{d850} 分别为 850hPa 上的温度和露点温度， T_{500} 为 500hPa 上的温度， $(T - T_d)_{700}$ 为 700hPa 上的温度露点差。分析 2 月 16 日 08 时和 20 时洛阳—广汉航线附近的探空站 K 指数（表 2），08 时广汉西、西南区域（重庆、宜宾、温江）为高值区，与预告图上隐嵌积雨云区域吻合。比较 08 时和 20 时 K 指数高值区变化，达川一直为对流不稳定区域，早上 08 时的较强对流区减弱，重庆、宜宾、温江 K 指数减小，高值区自西向东移动，对流区也相应移动到广汉

东、东北区域, 汉中、鄂西 K 指数增大, 也与重要天气预告图上隐嵌积雨云区吻合。与 14 时云图和地面天气现象对应, 飞机下午返回时四川境内航线通过较高 K 指数区, 可见高 K 指数区或 K 指数增大区和积冰的生成和加强区域对应。

表 2 2006 年 2 月 16 日 00、12 (UTC) 洛阳—广汉航线沿线各站点 K 指数

	西安	汉中	安康	达川	温江	鄂西	重庆	宜宾
2月16日00(UTC)	6.0	-8.0	2.0	10.0	6.0	8.0	12.0	7.0
2月16日12(UTC)	0.0	3.0	2.0	10.0	3.0	10.0	8.0	4.0

3.2 垂直速度分析

上升气流区常与较强的对流相联系, 云

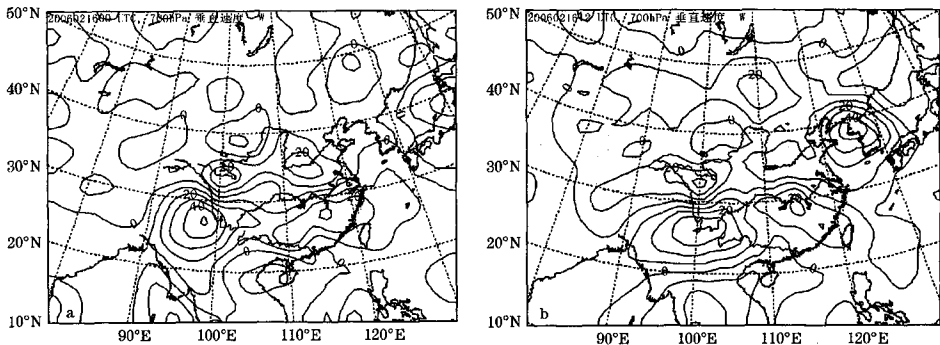


图 3 2006 年 2 月 16 日 08 时 (a)、20 时 (b) 700hPa 垂直速度场
广汉: 30.58°N, 104.17°E, VENON: 31.01°N, 104.7°E, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

3.3 涡度平流分析

在斜压扰动中, 涡度因子主要使低层系统发展, 高层系统移动。高层正的涡度平流使低层低压系统加强, 反之亦然。涡度平流随高度增加的地区, 上升运动加强, 涡度平流随高度减弱的地区, 有下沉运动。500hPa 正涡度平流区和涡度平流大于低层涡度平流区域温湿条件适宜是积冰易于生成并加强的区域。分析 2 月 16 日 08、20 时的 500hPa 涡度平流分布 (图 4), 广汉—洛阳

中含水量和过冷却水滴密度大, 飞机穿越时容易产生中度及其以上强度积冰, 而且常常是明冰^[5]。

通过计算分析 16 日 08 时和 20 时 700hPa 的垂直速度场 (图 3), 可以看到垂直速度的最大上升区域从广汉西、西南向东移动, VENON 区域位于最大上升速度中心的东北前沿, 该高度层上升速度最大值在 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 虽没有 14 时高空探空资料, 比较 08 和 20 时前后两个时次的垂直速度场变化及根据机组反馈信息, 在 16 日 11—15 时之间, 该次飞行返回航线西南段处于较强的上升气流区里, 湿度较大的上升气流区对应于中度及其以上强度的积冰区。

航线四川境内为正涡度平流区, 08 时 VENON 区域涡度平流为 $5\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右, 最大值中心在广汉以西 32°N 、 100°E 附近 ($10\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), 20 时正涡度平流区面积明显扩大并且东移至 33°N 、 110°E 附近, 分析 700hPa 涡度平流分布 (图略), 航线上四川境内对应区域涡度平流值均比 500hPa 要小, 涡度平流随高度增大, 可见在返回航线上, 500hPa 以下天气系统强度和上升运动加强, 原本就比较适宜于积冰的温湿环境中过冷却水滴更多, 使积冰强度增大, 尤其是

气流上升区对应于 700hPa “人字形”切变 线的强辐合上升区。

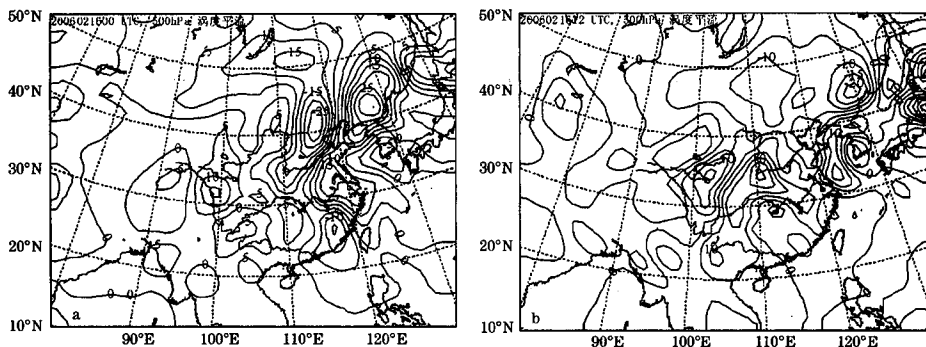


图 4 2006 年 2 月 16 日 08 时 (a)、20 时 (b) 500hPa 涡度平流场
广汉: 30.58°N, 104.17°E, VENON: 31.01°N, 104.7°E, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

4 小 结

(1) 对于 FL100-250 的飞行, 青藏高原东部、东北部航线温湿条件适宜时为中度及其以上强度积冰易发区, 起飞前应详细了解 500hPa、700hPa 的天气系统、温湿条件、航线云属和 0°C、-15°C 等温线位置和高度, 尽量避开积冰区。

(2) 对于 FL100-250 的飞行, 云中对流不稳定气象条件能够使积冰强度大大增强。航线上要注意隐嵌积雨云区和雷雨区, 尤其在冷季应引起特别重视。

(3) K 指数、上升速度和涡度平流等物理量可以用于积冰的预报参考, K 指数大值区和 K 指数增长区、上升气流较强区域、正涡度平流区域对应于较强积冰区域。

致谢: 本文得到北京大学物理学院大气科学系黄嘉佑教授的热心指导, 特此致谢!

参考文献

- [1] 章澄昌. 飞行气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 211-230.
- [2] 李子良, 潘微多. 飞机积冰预报应用软件 [J]. 气象, 1996, 22 (12): 17-19.
- [3] 刘开宇, 申红喜, 李秀莲, 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.
- [4] 赵彩. 贵州雨淞积冰过程的云层特征及环流背景 [J]. 气象, 1995, 21 (5): 48-52.
- [5] 黄仪方, 朱志愚. 航空气象 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002: 148-155.
- [6] 许健民, 方宗义, 许建平. 气象卫星 [M]. 北京: 气象出版社, 1994: 329-336.
- [7] Hauf, T., Schröder, F. Aircraft icing research flights in embedded convection [J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 2006, 91 (1-4): 247-265.
- [8] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1983: 296-315.