

孙晶,蔡森,王飞,等,2019. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象,45(10):1341-1351. Sun J, Cai M, Wang F, et al, 2019. A case study of aircraft icing conditions in Anqing Area[J]. Meteor Mon, 45(10):1341-1351(in Chinese).

安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析*

孙晶 蔡森 王飞 史月琴

中国气象科学研究院, 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

提 要: 利用卫星、雷达、探空、飞机等观测资料和 NCEP 再分析资料, 以及数值模拟结果, 对 2016 年 3 月 8—9 日我国安庆地区的云系特征和飞机积冰气象条件进行了分析, 并对比了几种积冰指数算法的计算结果。结果表明, 此次飞机积冰发生在寒潮天气背景下, 强冷空气造成锋面逆温。实测飞机积冰现象出现在对流降雨结束后的层积云层顶部, 积冰高度对应高空锋区逆温层底部, 云顶高度约为 3.4 km, 云顶温度为 -10°C , 无降水和雷达回波, 云中主要为过冷水, 丰沛时段飞机观测过冷水平均值为 $0.36\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 基本无冰相粒子。当云顶高度再度抬升, 冰相粒子增多时, 过冷水含量减少, 不利于积冰现象发生。多种积冰指数对比分析表明, CIP 初始积冰潜势算法较好体现了此次层积云飞机积冰特征。CPEFS 模式模拟出了与实测比较一致的云宏微观结构。

关键词: 飞机积冰, 过冷水, 寒潮, 积冰指数

中图分类号: P426, P416

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.001

A Case Study of Aircraft Icing Conditions in Anqing Area

SUN Jing CAI Miao WANG Fei SHI Yueqin

Weather Modification Centre of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Aircraft icing observation test was conducted in 8—9 March 2016 in Anqing Area of China. The icing conditions for the test are studied in this paper using observations of satellite, radar, soundings, aircraft, NCEP reanalysis data and simulations of the CPEFS model. The multi-scale structure about icing cloud is discussed and the results of several icing indexes are compared. The results show that large-scale weather system of the icing case was the cold wave on the surface. Strong cold air induced frontal temperature inversion. On the top of stratiform cloud after the convective rainfall, icing was detected by the aircraft. The height of the icing was under the layer of the front inversion. The cloud top height was about 3.4 km and the cloud top temperature was -10°C . There was no precipitation and radar reflectivity at this time. The cloud was composed of large number of supercooled water without ice particles. The average supercooled water during the icing time was $0.36\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. When the cloud top lifted again and ice particles increased to snow, the aircraft icing was not observed because of the poor supercooled water. The CIP initial icing potential results described this aircraft icing well. The cloud structure simulated by CPEFS model was basically consistent with observations.

Key words: aircraft icing, supercooled water, cold wave, icing index

* 国家重点研发计划(2018YFC1507901、2016YFA0601702)、中国气象科学研究院基本科研业务项目(2014R004)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY20120625)共同资助

2018年8月17日收稿; 2019年2月19日收修定稿

第一作者: 孙晶, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究. Email: sunjing@cma.gov.cn

引言

飞机积冰是指飞机机体因过冷水滴冻结或水汽凝华而聚积冰层的现象(王秀春等,2014)。飞机积冰通常发生在含有过冷水滴的云、雾、冻雨或湿雪中,多出现在突出部位。积冰影响飞机的稳定性和操纵性,并使导航仪表和无线电通信设备失灵,严重时甚至导致飞行事故。

飞机积冰涉及到多种飞行情况(张宇飞,2013),例如:高速飞机在低速的起飞、进近、着陆阶段,或航线穿越浓密云层或冻雨的环境中;一些低速飞机,如运输机、直升机等,发生积冰的可能性也很大;人工增雨作业由于需要选择过冷水丰沛的云层进行催化,飞机更易发生积冰;在飞机进行试飞试验时,要在积冰区域飞行,进行合格审定。为了飞行安全,增雨潜力区以及试飞地点的选择,对飞机积冰气象条件进行研究尤为重要。

飞机积冰的直接影响气象因子是指大气温度、云中过冷水含量、过冷水滴大小。最易发生积冰的温度范围是 $-10\sim-2^{\circ}\text{C}$,轻度积冰易出现在 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$,中度积冰易出现在 $-12\sim-2^{\circ}\text{C}$,强积冰易出现在 $-10\sim-8^{\circ}\text{C}$ (赵树海,1994)。云中过冷水含量越大,积冰强度也越大(王洪芳等,2003),云滴的大小影响积冰的类型和强度,但影响程度比含水量和温度小(庞朝云和张逸轩,2008)。大多数积冰发生在低云和中云中(袁敏等,2017)。有利积冰云层条件的产生离不开天气系统,李子良(1999)分析了广汉—贵阳和广汉—洛阳航线上几种有利于发生积冰的天气系统,指出在地面冷锋和空中槽线和切变线附近容易出现积冰。迟竹萍(2007)统计分析了山东春秋季节增雨作业天气系统,指出低压倒槽和南方气旋系统容易出现积冰。还有一些学者针对飞机积冰过程开展了天气和微物理分析(陈静和吕环宇,2006;刘开宇等,2008;刘烈霜等,2013;王黎俊等,2013;张利平等,2014),这些过程大多位于我国西北和西南地区,而对我国其他地区积冰天气分析较少。

2016年3月8—9日,中国气象局人工影响天气中心MA60飞机参加了多家单位联合在安徽省安庆市的飞机自然积冰探测试验,于9日上午和下午各执行了一个架次的试验飞行,并于上午成功探测到积冰现象。本文对这次安庆飞机积冰的气象条件和多尺度结构特征进行分析。

1 积冰探测介绍

此次积冰探测试验区位于安徽省安庆地区,试验飞机为中国气象局人工影响天气中心MA60飞机。2016年3月8日受空域限制未能试飞,9日进行了两个架次积冰探测,第一架次飞行时段为08:47—11:48,其中在09:10—09:32时出现了积冰现象,积冰厚度约为 $2\sim 4\text{ cm}$,积冰类型为毛冰,积冰高度约为 3000 m ,积冰温度约为 -5°C ;第二架次飞行时段为16:10—19:55,未出现明显积冰现象。

2 天气系统

受强冷空气影响,2016年3月7—10日,我国中东部大部地区先后出现 $4\sim 10^{\circ}\text{C}$ 降温,其中西北地区东部、江淮南部、江南大部、华南北部及贵州大部等地有 $14\sim 20^{\circ}\text{C}$ 降温,为一次寒潮天气过程(胡宁和孙军,2016)。发生此次寒潮过程的天气背景:亚洲中高纬为“两脊一槽”的形势,3月7日前乌拉尔山阻塞高压持续发展,贝加尔湖以东有冷涡存在;7日开始,冷涡后部冷空气不断从东路南下,9日乌拉尔山阻塞高压崩溃,蒙古国西部的横槽转竖,冷空气与较为活跃的高原槽相配合,造成我国中东部大范围雨雪天气。

8—10日我国江南地区多短波槽活动。不同高度的天气系统配置显示,8日,安庆地区位于 500 hPa 槽前西南气流和上升运动区中(图1a), 700 hPa 有明显西南水汽输送(图1c), 850 hPa 位于暖切变线南侧西南气流中(图略),地面冷锋位于湖南—江西—浙江北部一线(图2a),安庆地区位于地面锋后;9日,安庆地区位于 500 hPa 位于偏西气流中(图1b),随着中低层冷空气南压, 700 hPa 西南水汽输送消失(图1d), 850 hPa 逐渐转为东北风(图略),地面冷锋继续南移至华南地区(图2b)。实况降水分布显示(图略),8日08时至9日08时,长江中下游地区出现雷电等对流性天气,降水量达到大到暴雨量级,安庆地区降雨量为 32 mm ;9日08时至10日08时,安庆地区转为雨夹雪天气,降水量为 7 mm 。

从沿安庆 117°E 经向剖面来分析此次过程天气系统的垂直结构(图3),8日08时,等相当位温线揭示地面锋线位于 29°N 附近,锋面向北伸展高空存

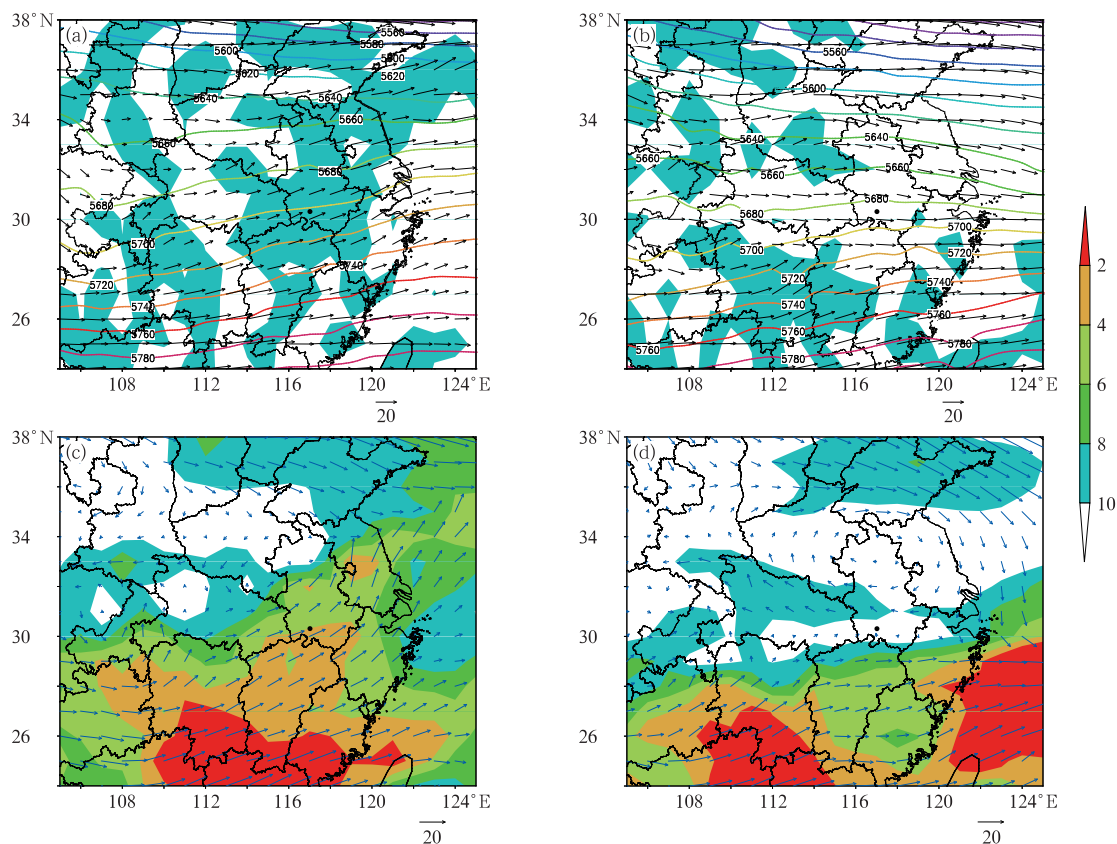


图 1 2016 年 3 月 8 日 08 时(a,c)和 9 日 08 时(b,d)NCEP 资料再分析场
(a,b)500 hPa 位势高度(等值线,单位:gpm)、上升运动区(阴影)、风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
(c,d)700 hPa 水汽通量(阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(黑点表示安庆)

Fig. 1 Geopotential height (contour, unit: gpm), updraft (shaded area) and wind (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 500 hPa (a, b), vapor flux (shaded area, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 700 hPa (c, d) of NCEP reanalysis data at (a, c) 08:00 BT 8 and (b, d) 08:00 BT 9 March 2016
(Black dot represents Anqing Station)

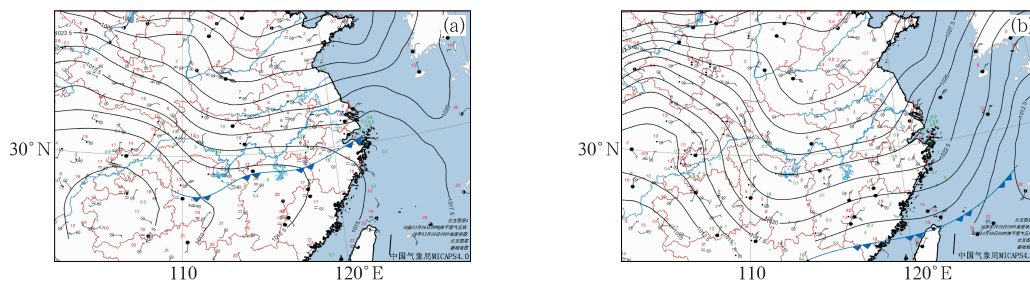


图 2 2016 年 3 月 8 日 08 时(a)和 9 日 08 时(b)地面天气图
Fig. 2 Surface synoptic map at 08:00 BT 8 (a) and 08:00 BT 9 (b) March 2016

在宽广的锋区,安庆位于地面冷锋后,其低层 800 hPa 以下为偏东风,有明显锋面逆温,整层相对湿度在 80% 以上;8 日 08—20 时是对流性降水阶段,8 日 20 时冷锋南压至 27°N 附近,安庆上空温度

明显下降,750 hPa 以下为偏东风和锋面逆温,整层相对湿度 95% 以上;8 日 20 时后,冷锋继续南移,中高层相对湿度减弱,9 日 08 时,安庆 700 hPa 以下为偏东风和相对湿度大值区,温度下降至 0°C 以下,

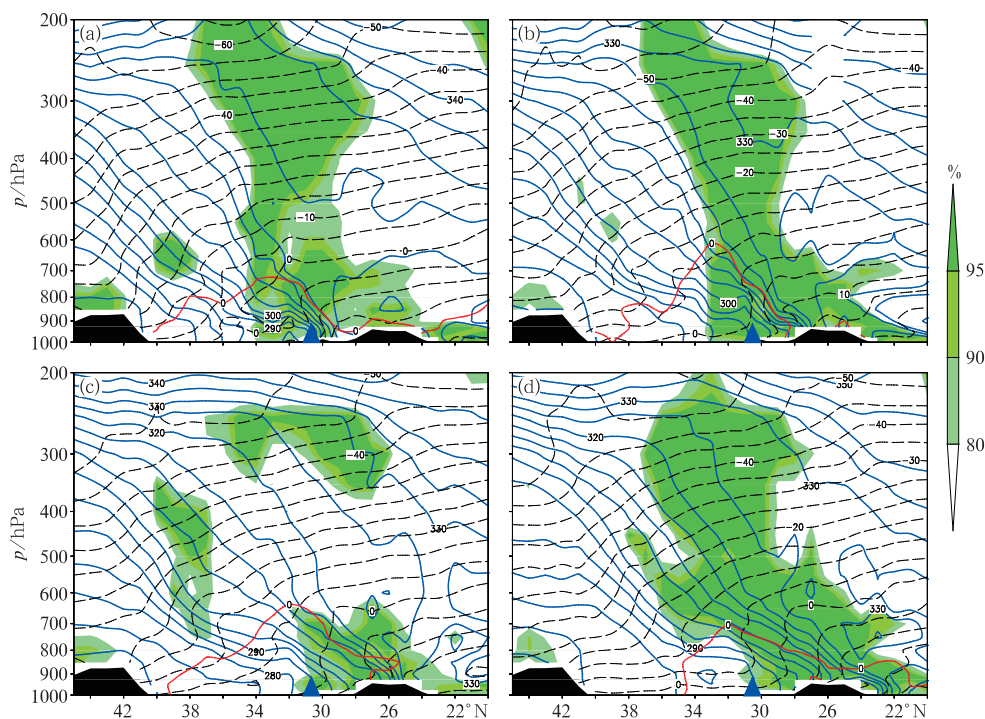


图3 2016年3月8日08时(a),20时(b),9日08时(c)和20时(d)

NCEP再分析资料沿117°E的经向垂直剖面

(长虚线:等温线,间隔5℃;细实线:等相当位温线,间隔5K;红色线:纬向风0风速线;
绿色阴影:相对湿度;黑色阴影:地形;三角:安庆)

Fig. 3 Cross-sections of NCEP data along 117°E at 08:00 BT 8 (a), 20:00 BT 8 (b),
08:00 BT 9 (c) and 20:00 BT 9 (d) March 2016

(long dashed line: isotherms with interval 5℃; thin solid line: equivalent temperature
line with interval 5 K; red line: zero zonal wind velocity; green shadow:
relative humidity; black shadow: terrain; triangle: Anqing)

地面无降水;9日08—20时,冷空气持续南压,中高层相对湿度逐渐加大,20时安庆700 hPa以下仍为偏东风,锋区高度抬高,整层相对湿度在95%以上,20时后出现雨夹雪天气。

3 云宏观结构

从天气系统分析可以看出这次过程受高空短波槽和地面冷锋影响,下面利用卫星反演产品、雷达回波、探空等资料分析在此天气条件下云系宏观结构和发展演变特征。

8日白天,在我国黄淮至长江中下游地区覆盖着大范围高空槽云系,云顶温度在-30℃以下,安庆地区位于高空槽云系南部,08—20时先后有两块TBB在-40℃左右的对流云团自西向东移过安庆(图4a),移速约为40~50 km·h⁻¹,对流云雷达回波最大在40 dBz以上(图5a),期间12—15时为强降

水间歇期;22时后对流云团东移,至9日09时安庆地区为比较均匀的层状云(图4b),云顶亮温>-20℃,基本无降水和雷达回波(图5b);9日09—14时(图4c),位于湖北地区的另一高空槽云系再次东移影响安庆地区,安庆云顶亮温逐渐下降至-40℃,但仍基本无降水和明显雷达回波(图5c);9日14—20时,安庆受高空槽云系影响,逐渐出现20~25 dBz的雷达回波(图5d),无明显降水,20时云顶亮温升高至-20℃以上(图4d)。

基于周毓荃和欧建军(2010)提出的探空云分析方法,利用8—9日安庆站6 h一次的加密探空,分析该地区的云垂直结构及演变特征(图6)。8日白天,安庆周边为单层云,云顶高度在6~7 km,0℃层高度约为3.5 km,低层由于冷空气影响,在1.5 km高度有明显逆温,这与图3a高空锋区位置相对应;8日20时云层发展深厚,云顶高度超过10 km,2 km以下为偏北风,3300 m以下高度出现3条0℃线,说

明云层自上而下具有冷—暖—冷—暖结构, 在 1.5 ~ 2 km 有明显逆温; 8 日夜间至 9 日凌晨为双层云

结构特征, 高层出现较厚干层, 随着低层偏东气流加厚, 0℃ 层高度降低并且低层冷区厚度增加, 逆温区

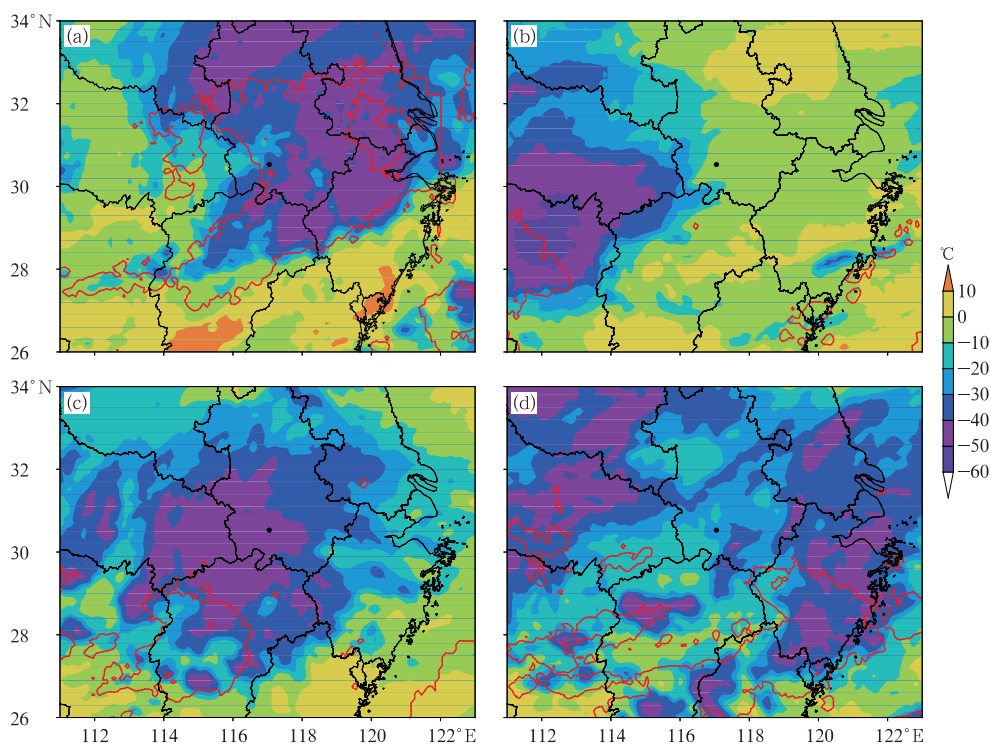


图 4 2016 年 3 月 8 日 20 时(a), 9 日 08 时(b), 14 时(c)和 20 时(d)卫星观测
云顶温度(阴影)和 1 h 降水(红色等值线; 1 mm)
(黑色圆点为安庆)

Fig. 4 Observations of cloud top temperature (shaded area) and
1 h rainfall (red contour; 1 mm) at 20:00 BT 8 (a), 08:00 BT 9 (b),
14:00 BT 9 (c), 20:00 BT 9 (d) March 2016
(Black dot represents Anqing)

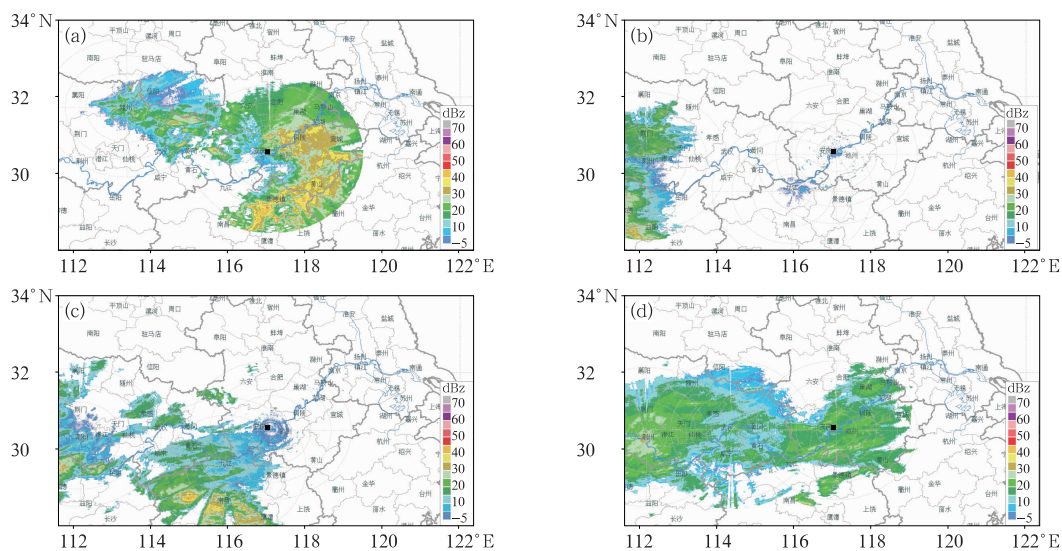


图 5 同图 4, 但为雷达观测组合反射率(阴影)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for observations of radar reflectivity (shaded)

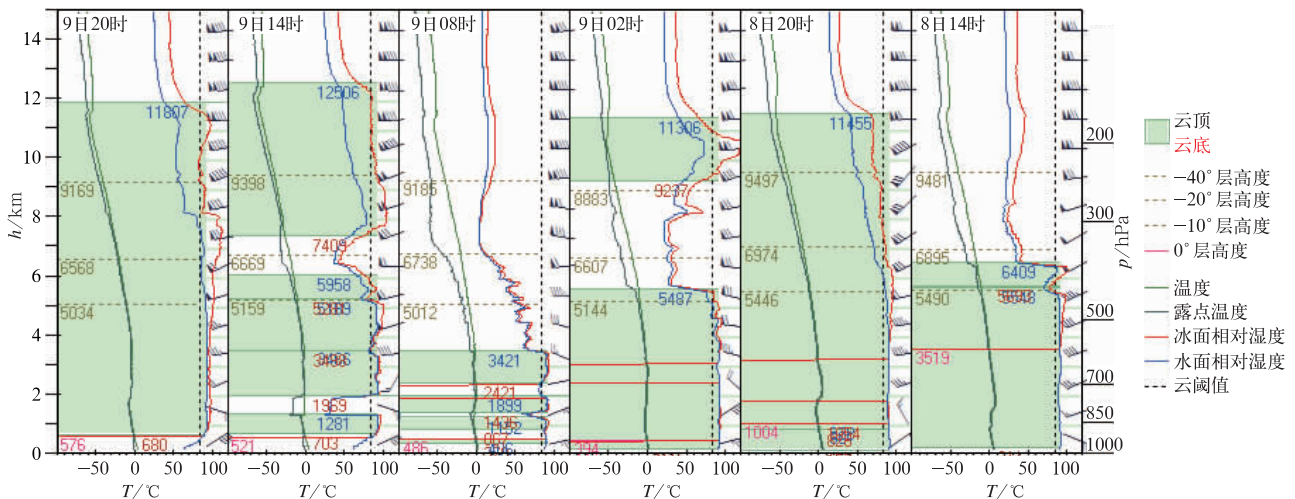


图 6 2016 年 3 月 8—9 日安庆站探空云分析产品时间演变

Fig. 6 Temporal evolution of cloud analysis products based on the radiosonde observation at Anqing Station from 8 to 9 March 2016

的厚度也增加;9 日 08 时,云顶高度降至最低约 3.4 km,云层中出现多处小的逆温,分别位于 3、2、1.3 km,湿度条件变弱且出现干的云夹层,基本为过冷云区;9 日白天,云顶高度逐渐抬高,中高层湿度再次加大,云层又发展深厚,0℃高度约 700 m,其上均为冷云。

4 云微观结构

中国气象局人工影响天气中心 MA60 飞机在 2016 年 3 月 9 日 08:47—11:48 和 16:10—19:55 于安徽省安庆地区进行了两个架次积冰探测,飞机搭载了热线含水量仪(LWC)、BCP(后向散射云滴探头,量程为 7~75 μm)、CIP(云粒子图像探头,量程为 25~1550 μm)、PIP(降水粒子图像探头,量程为 100~6200 μm)等云粒子探测设备。

图 7 为第一架次沿飞行轨迹的探测结果,在 09:20—10:00 及 10:40—11:00 有两个连续时段观测到过冷水,这两个时段均是飞机由 4000 m 盘旋下降至 3000 m(即云顶),在 3000 m 高度继续平飞观测到过冷水,过冷水量值的强弱有变化说明过冷水分布的不均匀性;在第一次下降后 09:28—09:35 时为过冷水含量最高时段,飞机在-5℃高度层平飞,BCP 探测结果表明,该时段内云区粒子直径普遍小于 30 μm,中值体积直径(MVD)平均为 21 μm,粒子浓度最高值为 58 个·cm⁻³,平均约 21.36 个·cm⁻³,热线含水量仪观测的过冷水含量峰值达

0.58 g·m⁻³,平均为 0.36 g·m⁻³,该时段内 CIP 图像上几乎看不到明显的大粒子(图略),也说明云区由小滴组成;登机人员记录第一次下降后 09:36 时即出现积冰,积冰温度约-5℃,积冰厚度约 2~4 cm。

图 8,图 9 分别为第二架次沿飞行轨迹的雷达回波垂直结构和云物理探测结果。飞行时段内,云系发展较为深厚,飞行区域内为均匀的层状云回波,雷达回波顶高普遍大于 6 km,最大可达 8 km,说明此时云中大的降水粒子发展旺盛。飞机在 3~4.2 km 不同高度上平飞,但 LWC 液水含量、BCP 和 CIP 的粒子数浓度结果均非常小,PIP 观测的云中大粒子含量较多;CIP 和 PIP 粒子二维图像多为大片的固态粒子(图略),说明云中以冰相粒子为主。登机人员记录在飞行高度目视有冰粒子击打机翼前缘,飞行中未出现明显积冰现象。

利用中国气象局人工影响天气中心云降水显式预报系统(CPEFS v1.0)对这次过程进行模拟,该系统是以 WRF 中尺度模式动力框架为基础耦合了中国气象科学研究院 CAMS 微物理方案(刘卫国等,2016)。模拟使用初始场为 6 h 一次 1°×1°的 NCEP 再分析格点资料,模式最高水平分辨率为 3 km。图 10a 为安庆南部(30.03°N、117.07°E)为中心周围 20 km 范围的云顶温度和 1 h 雨量的模拟与观测比较,图 10b 为相应范围的各水成物含水量垂直廓线模拟结果随时间变化。实况降水主要发生在 8 日白天至夜间,对流性降水为主;中雨(小时雨量

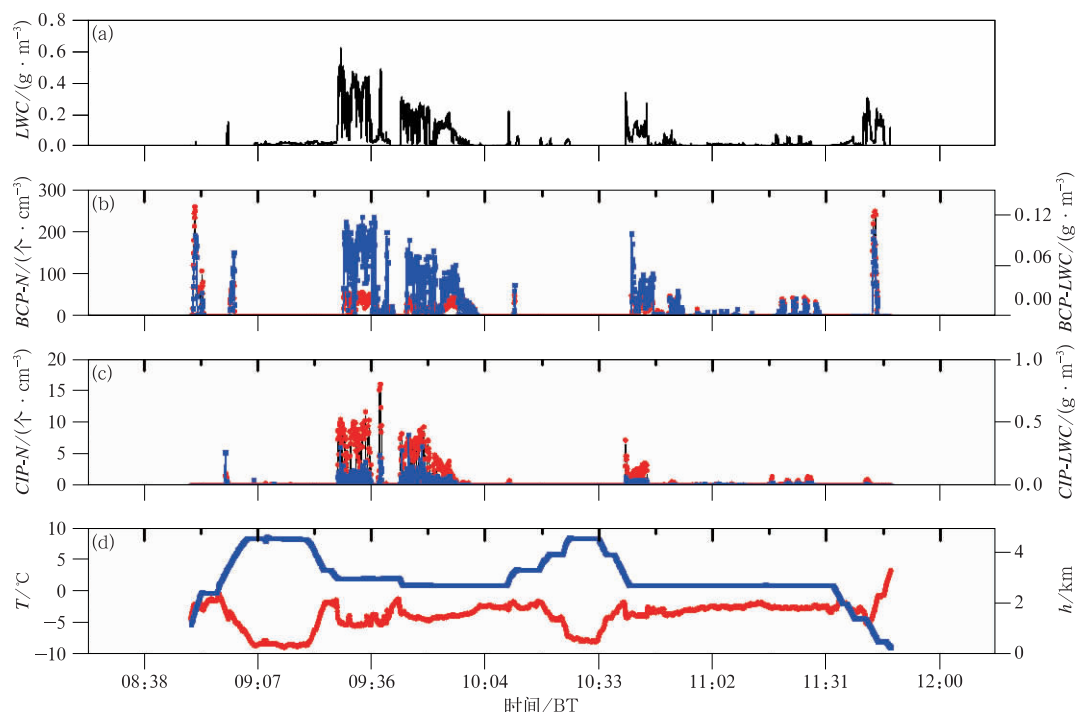


图 7 2016 年 3 月 9 日第一架次飞行时机载探测结果

(a) 热线含水量仪液态水含量(LWC), (b) BCP 粒子数浓度(BCP-N, 红线)和液态水含量(BCP-LWC, 蓝线), (c) CIP 粒子数浓度(CIP-N, 红线)和液态水含量(CIP-LWC, 蓝线), (d) 温度(红线)和高度(蓝线)

Fig. 7 Evolution of aircraft observations by the first flight on 9 March 2016

(a) hotwire LWC, (b) number concentration (BCP-N, red line) and LWC (BCP-LWC, blue line) of BCP, (c) number concentration (CIP-N, red line) and LWC (CIP-LWC, blue line) of CIP, (d) temperature (red line) and height (blue line)

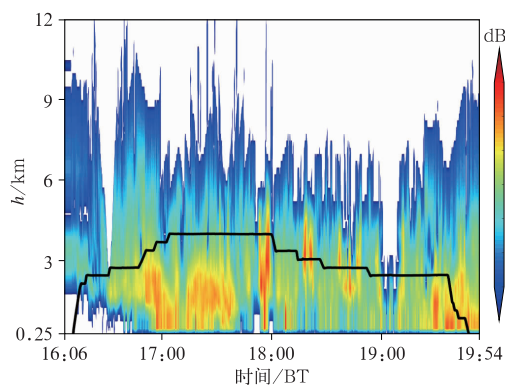


图 8 2016 年 3 月 9 日第二架次沿飞机轨迹的雷达回波垂直结构

Fig. 8 Evolution of vertical radar echo for the second flight on 9 March 2016

≥ 2.5 mm)时段为 8 日 08—11 和 18—19 时,对应云顶温度在 -30°C 以下;小雨(小时雨量 < 2.5 mm)时段为 8 日 12—17 和 20—21 时,对应云顶温度在 -30°C 以上;8 日夜间至 9 日白天,实况云顶温度逐

渐升高接近 0°C 又逐渐降低至 -40°C ,地面无降水。模拟结果显示,除前 6 h 为模式 spin-up 阶段模拟与实况有较大误差外,模拟的云顶温度和降水演变趋势与实况接近。模拟的云粒子分布表明,8 日白天至夜间云体结构为对流性冷暖混合云,有较大含量过冷云水和过冷雨水;9 日凌晨至上午为暖云滴和过冷云滴组成的层状云,没有冰相粒子,云顶高度在 700 hPa(约 3.2 km)以下,过冷水含量约为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;9 日下午,高层冰相粒子向下发展,虽然有过冷水,但含量少于 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;云粒子相态分布和演变的模拟结果与飞机两个架次观测结果也基本一致。

5 积冰气象条件

上文利用观测和模拟结果分析了此次寒潮过程的云宏、微观结构,根据云的演变特征可分为 3 个阶段,相关物理量对比可见表 1。8 日 08—21 时,为对

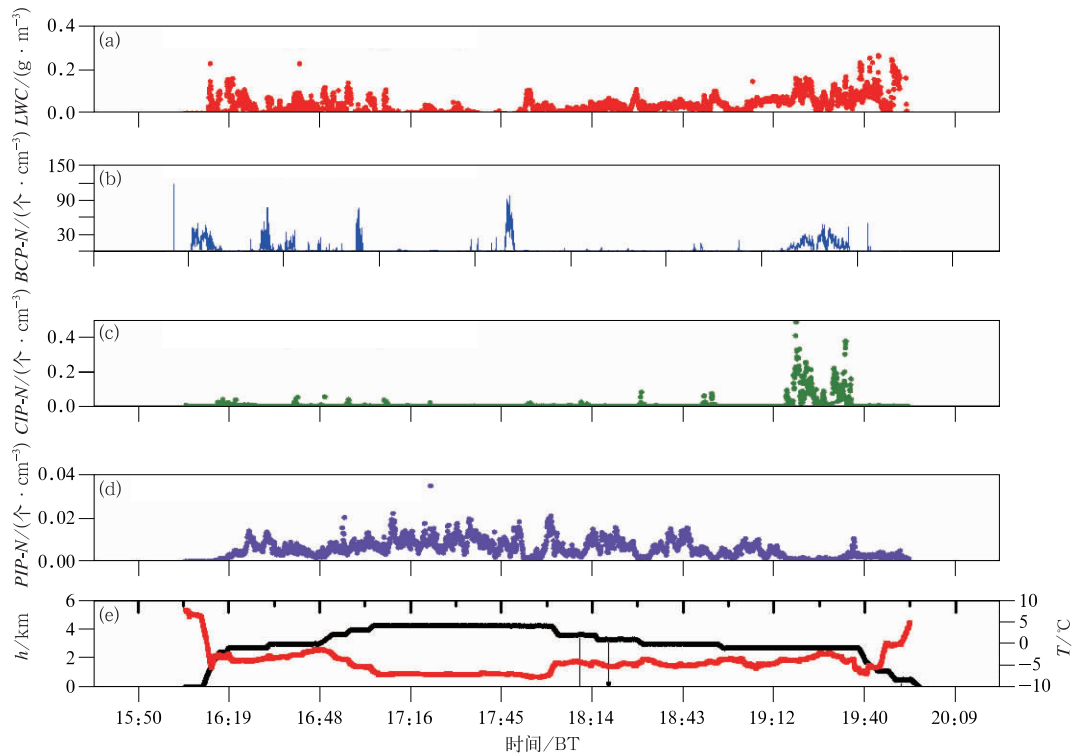


图 9 2016 年 3 月 9 日第二架次飞行时机载探测结果

(a) 热线含水量仪液态水含量(LWC), (b) BCP 云粒子数浓度, (c) CIP 云粒子数浓度, (d) PIP 降水粒子数浓度, (e) 温度(红线)和高度(黑线)

Fig. 9 Evolution of aircraft observations by the second flight on 9 March 2016

(a) hotwire LWC, (b) number concentration of BCP, (c) number concentration of CIP, (d) number concentration of PIP, (e) temperature (red line) and height (blue line)

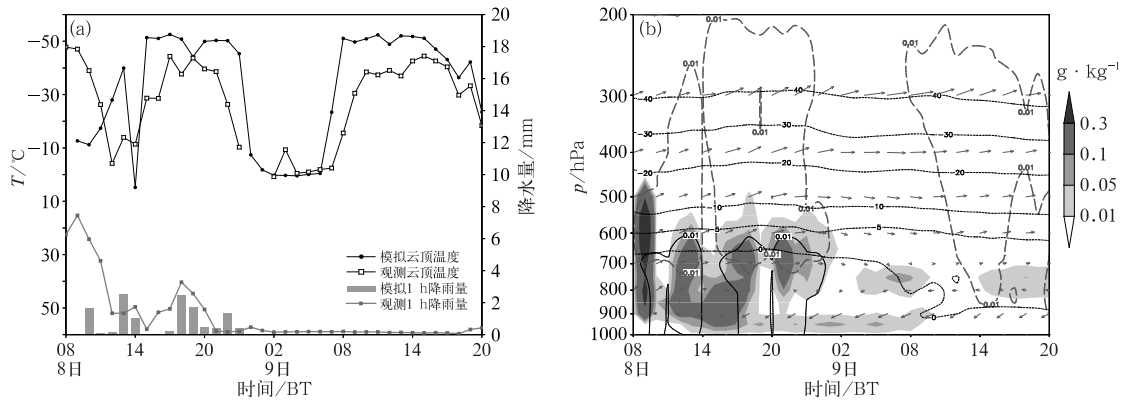


图 10 2016 年 3 月 8—9 日安庆南部 20 km 区域平均的物理量随时间变化

(a) 模拟和观测的云顶温度和 1 h 降水量, (b) 模拟的各水成物含量垂直分布(阴影: 云水; 长虚线: 冰相粒子; 实线: 雨水, 单位: mm; 短虚线: 温度, 单位: °C; 箭头: 水平风场)

Fig. 10 Evolutions of variables for the 20 km area averaged in the south of Anqing

(a) simulations and observations of cloud top temperature and 1 h rainfall, (b) vertical distributions of simulated hydrometeors (shaded: cloud water; long dashed line: ice phase particles; solid line: rain water, unit: mm; short dashed line: temperature, unit: °C; vector: horizontal wind)

流性降水阶段, 云顶温度低于 -30°C (图 4a), 云顶高度在 6~10 km (图 6), 对流性回波最大为 45 dBZ (图 5a), 模拟云中有大量过冷水 (图 10b), 最大为

$0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 具有一定积冰气象条件, 但因为出现闪电等对流天气不适宜飞机进行积冰探测飞行, 未取得飞机积冰资料来验证; 8 日 21 时至 9 日 10 时,

为对流性云系东移后转变为非降水的层积云阶段,云顶温度高于 -20°C (图 4b),云顶高度低至 3.4 km 并且有锋面逆温现象(图 6),无降水和雷达回波(图 5b),说明层积云中的液态水以小云滴为主,模拟有 $0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 过冷水,但无冰相粒子(图 10b),飞机在上午探测出现积冰,其中在 $09:28\text{--}09:35$ 热线含水量仪探测过冷水均值为 $0.36\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$;9日 $10\text{--}20$ 时,为高空槽层状云系再次发展阶段,云顶温度下降至 -40°C (图 4c),云顶高度升高大于 10 km (图 6),层状云回波最大为 25 dBz (图 5d),模拟云中高层冰相粒子再次发展(图 10b),过冷水含

量减少,飞机探测也出现大量冰相粒子,没有明显积冰现象。

从以上云层发展前后变化的对比表明,实测飞机积冰现象出现在对流降雨结束后的层积云层顶部,积冰高度对应高空锋区的逆温层底部,云顶高度约为 3.4 km ,云顶温度为 -10°C ,无降水和雷达回波,云中主要为过冷水,基本无冰相粒子;当云顶高度再度抬升,冰相粒子增多时,过冷水含量减少,不利于积冰现象发生。这些变化显示出,在云顶温度不过低、以过冷水滴为主、冰相过程尚未活跃的层积云中,存在着利于飞机积冰的条件。

表 1 2016 年 3 月 8—9 日安庆地区不同时段积冰气象条件
Table 1 Meteorological conditions of icing during 8—9 March 2016

时段	云性质	冰相	云顶温度 / $^{\circ}\text{C}$	云顶高度 / km	最大雷达回波 / dBz	热线含水量仪 探测过冷水	飞机探测积冰
8 日 08—21 时	对流	有	<-30	$6\sim 10$	45	——	——
8 日 21 时至 9 日 10 时	层积	无	>-20	$3\sim 5$	基本无回波	平均为 $0.36\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($09:28\text{--}09:35$)	有 ($08:47\text{--}11:48$)
9 日 10—20 时	层状	有	<-30	>10	25	$<0.01\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($17:40\text{--}17:50$)	无 ($16:10\text{--}19:55$)

积冰指数对积冰气象条件具有一定指示意义。目前,积冰指数大多利用大气温度、湿度等环境变量来计算。比较常用的是国际民航组织推荐的 IC 指数,计算公式为:

$$IC = [2(RH - 50)][T \frac{(T + 14)}{-49}]$$

式中, RH 为相对湿度(单位:%), T 为温度(单位: $^{\circ}\text{C}$),具体积冰强度判断为: $0\leq IC<50$,轻度积冰; $50\leq IC<80$,中度积冰; $80\leq IC$,重度积冰。刘开宇等(2005)在 IC 指数基础上重新构造了考虑上升运动的积冰指数 ICc,即先计算弱上升运动区($-2.0\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}\leq w<0.0\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)的区域,再计算民航组织推荐的 IC。美国近 20 年来发展了积冰潜势(CIP)算法(Bernstein et al,2005),该算法基于卫

星、雷达、地面、闪电观测和飞行员报告并结合数值模式输出等数据,利用多个物理量的模糊逻辑相关关系而综合判断得到积冰潜势,这些相关关系(图 11)是根据云物理原理、美国飞机积冰试验经验和飞机报告分析得到;其稳定云层初始积冰潜势计算方法为:

$$CIP_{ini} = T_{map} \times CTT_{map} \times RH_{map}$$

式中, T_{map} 为温度相关关系, CTT_{map} 为云顶温度相关关系, RH_{map} 为相对湿度相关关系;当出现闪电时为深对流云, $CIP_{ini} = T_{map-convective}$ 。

本文参考 CIP 算法中的相关关系和初始积冰潜势计算方法,利用 NCEP 再分析资料对此次过程积冰指数进行计算。对于稳定云层: $CIP_{ini-s} = T_{map} \times CTT_{map} \times RH_{map} \times 100\%$;对于深对流云考虑与

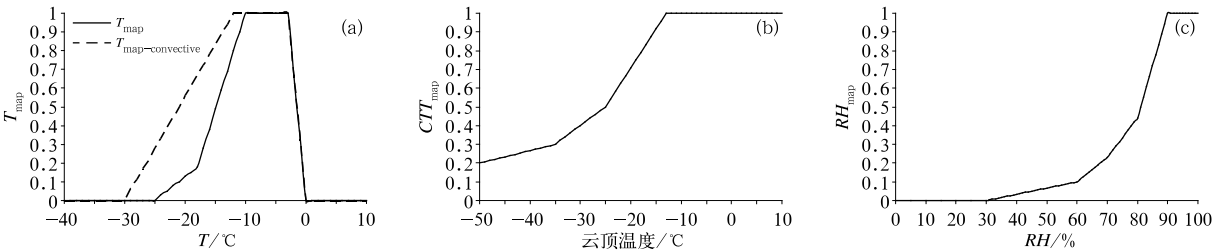


图 11 温度(a)、云顶温度(b)、相对湿度(c)的相关关系

Fig. 11 Correlation diagrams of temperature (a), cloud top temperature (b) and relative humidity (c)

CIP不同,本文考虑当上升运动 $\omega < -0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $CIP_{ini-c} = T_{\text{map-convective}} \times RH_{\text{map}} \times 100\%$;既考虑深对流情形也考虑稳定云层情形设为混合云层积冰指数(CIP_{ini-M})。同时也计算了上面提到的积冰指数IC和ICc。从2016年3月8日08时至9日20时安庆地区($30^\circ\text{N}, 117^\circ\text{E}$)的积冰指数随时间变化可以看出(图12),4种算法结果中积冰指数大于60的时段分别是: CIP_{ini-M} 主要在8日08—11时、8日17—22时、9日02—16时, CIP_{ini-s} 主要在9日02—16时;IC主要在8日08—23时、9日06—20时;ICc主要在8日08—16时、9日19—20时。ADTD闪电定位资料显示(图12a箭头), $30^\circ\text{N}, 117^\circ\text{E}$ 为中心100 km范围内的闪电主要出现在8日08时、11时、15—17时、20时,说明在8日白天出现了深对流,可能有过冷水会导致积冰,相比之下,对这一时段计算结果比较好的是 CIP_{ini-M} 和IC;飞机探测在9

日08:47—11:48出现积冰,下午16:10—19:55未出现积冰现象,探测时云层稳定,相比之下,对这两个时段计算结果比较好的是 CIP_{ini-M} 和 CIP_{ini-s} ,表现出了积冰气象条件在上午好而在下午逐渐转差的特征;IC在9日15—20时积冰指数偏高与实际探测结果不符,这是由于IC只考虑温度和相对湿度而没有考虑云顶温度对粒子相态的影响,可能不适用于云顶温度较低的层状云;ICc在9日上午积冰指数偏小而与实际积冰结果偏差较大,这是因为在此时段NCEP再分析资料的垂直运动为下沉气流(图12d)所致。通过比较, CIP_{ini-M} 积冰指数计算结果反映出了对流性和稳定性云层的积冰气象条件,并经验证与实测比较一致,该指数可用于飞机积冰气象条件预报; CIP_{ini-s} 可以比较好地反映稳定云层积冰气象条件,对于引导飞机进行积冰适航性验证和飞机人工增雨作业条件识别有一定指示意义。

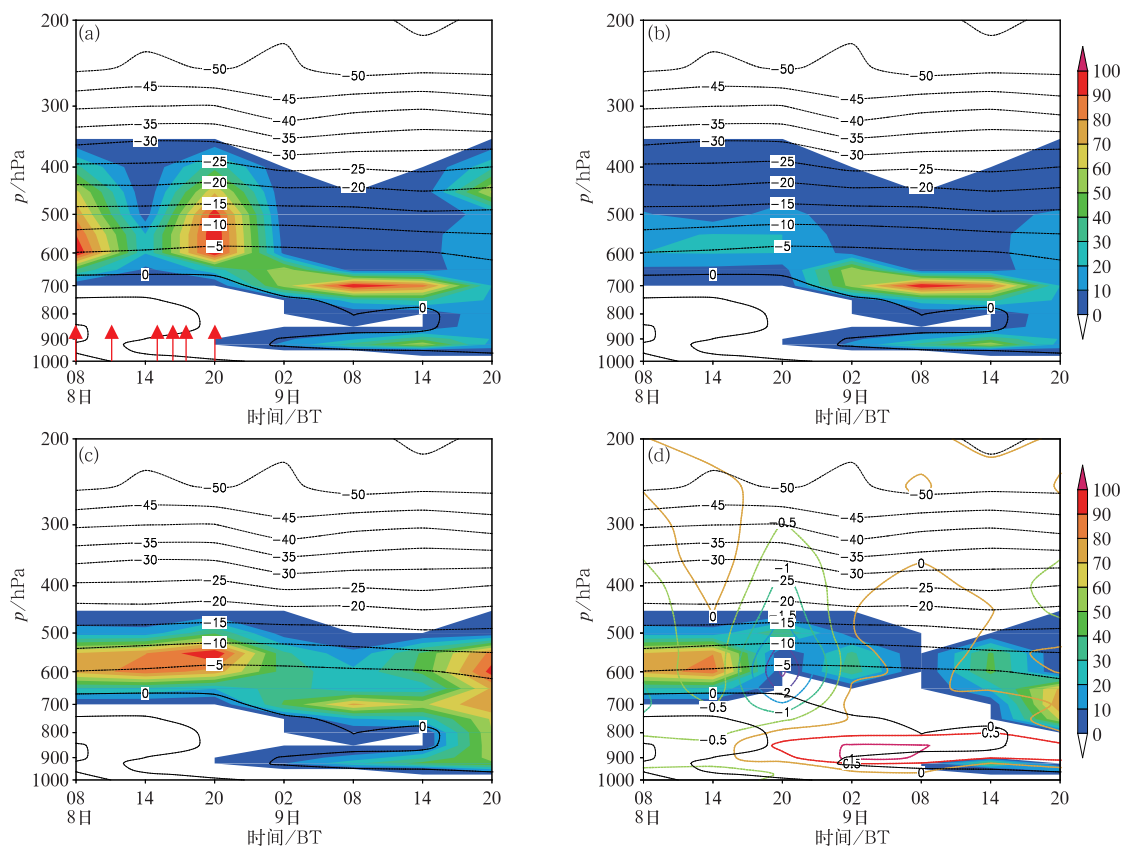


图12 2016年3月8—9日安庆地区($30^\circ\text{N}, 117^\circ\text{E}$)不同算法的积冰指数垂直分布随时间变化

(a) CIP_{ini-M} , (b) CIP_{ini-s} , (c)IC, (d)ICc

(阴影:积冰指数;黑色等值线:温度,单位:℃;红色箭头:该时刻出现闪电;彩色等值线:垂直速度,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 12 Evolution of vertical distributions of different icing indexes

at Anqing ($30^\circ\text{N}, 117^\circ\text{E}$) during 8–9 March 2016

(a) CIP_{ini-M} , (b) CIP_{ini-s} , (c) IC, (d) ICc

(shaded: icing index; black line: temperature, unit: $^\circ\text{C}$; red vector: time for light;

color line: vertical velocity, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

6 结 论

利用卫星、雷达、探空、飞机等观测资料和NCEP再分析资料,以及云场数值模拟结果,对2016年3月8—9日我国安徽省安庆地区的云系特征和飞机积冰气象条件进行了分析,并对比了几种积冰指数算法的计算结果。主要得出如下结论:

(1) 此次飞机积冰发生在寒潮天气背景下,影响系统为地面冷锋和500 hPa短波槽。低层强冷空气造成锋面逆温,为积冰发生提供有利天气条件。

(2) 实测飞机积冰现象出现在对流降雨结束后的层积云层顶部,积冰高度对应高空锋区的逆温层底部,云顶高度约为3.4 km,云顶温度为 -10°C ,无降水和雷达回波,云中主要为过冷水,基本无冰相粒子。当云顶高度再度抬升,冰相粒子增多时,过冷水含量减少,不利于积冰现象发生。

(3) 多种积冰指数对比分析表明,CIP初始积冰潜势算法较好体现此次层积云飞机积冰特征,对于对流性和稳定性云层的积冰潜势具有指示意义;CPEFS模式模拟出了与实测比较一致的云宏观结构特征,云粒子相态分布和过冷水含量变化趋势与实测吻合。

参考文献

- 陈静,吕环宇,2006.一次对流不稳定条件下飞机积冰的天气动力诊断分析[J].气象,32(12):66-71. Chen J, Lü H Y, 2006. Dynamic diagnosis on aircraft icing under a convective instability meteorological condition[J]. Meteor Mon, 32(12):66-71(in Chinese).
- 迟竹萍,2007.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,35(5):714-718. Chi Z P, 2007. Statistical analysis and numerical prediction experiment of weather conditions for aircraft icing[J]. Meteor Sci Technol, 35(5):714-718(in Chinese).
- 胡宁,孙军,2016.2016年3月大气环流和天气分析[J].气象,42(6):770-776. Hu N, Sun J, 2016. Analysis of the March 2016 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 42(6):770-776(in Chinese).
- 李子良,1999.飞机积冰的气象条件分析[J].四川气象,19(3):56-57,55. Li Z L, 1999. Analysis on the meteorological conditions for icing on the plane[J]. J Sichuan Meteor, 19(3):56-57,55(in Chinese).
- 刘开宇,申红喜,李秀连,等,2005.“04.12.21”飞机积冰天气过程数值特征分析[J].气象,31(12):23-27. Liu K Y, Shen H X, Li X L, et al, 2005. Analysis of an aircraft-icing event in Taiyuan Airport[J]. Meteor Mon, 31(12):23-27(in Chinese).
- 刘开宇,张云瑾,龚娅,2008.一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),30(S1):330-332. Liu K Y, Zhang Y J, Gong Y, 2008. Diagnosis on meteorologic factor for a aircraft icing[J]. J Yunnan Univ (Nat Sci Ed), 30(S1):330-332(in Chinese).
- 刘烈霜,金山,刘开宇,2013.用AMDAR资料分析两次强飞机积冰过程[J].气象科技,41(4):764-770. Liu L S, Jin S, Liu K Y, 2013. Diagnostic analysis of two severe aircraft icing events using AMDAR data[J]. Meteor Sci Technol, 41(4):764-770(in Chinese).
- 刘卫国,陶珏,党娟,等,2016.2014年春季华北两次降水过程的人工增雨催化数值模拟研究[J].大气科学,40(4):669-688. Liu W G, Tao Y, Dang J, et al, 2016. Seeding modeling study of two precipitation processes over Northern China in the Spring of 2014[J]. Chin J Atmos Sci, 40(4):669-688(in Chinese).
- 庞朝云,张逸轩,2008.甘肃中部地区飞机积冰的气象条件分析[J].干旱气象,26(3):53-56. Pang C Y, Zhang Y X, 2008. Weather conditions of aircraft icing in the middle part of Gansu Province [J]. J Arid Meteor, 26(3):53-56(in Chinese).
- 王洪芳,刘健文,纪飞,等,2003.飞机积冰业务预报技术研究[J].气象科技,31(3):140-146. Wang H F, Liu J W, Ji F, et al, 2003. Operational forecast technique of aircraft icing[J]. Meteor Sci Technol, 31(3):140-146(in Chinese).
- 王黎俊,银燕,李仑格,等,2013.三江源地区秋季典型多层层状云系的飞机观测分析[J].大气科学,37(5):1038-1058. Wang L J, Yin Y, Li L G, et al, 2013. Analyses on typical autumn multi-layer stratiform clouds over the Sanjiangyuan National Nature Reserve with airborne observations[J]. Chin J Atmos Sci, 37(5):1038-1058(in Chinese).
- 王秀春,顾莹,李程,2014.航空气象[M].北京:清华大学出版社. Wang X C, Gu Y, Li C, 2014. Aviation Meteorology[M]. Beijing: Tsinghua University Press(in Chinese).
- 袁敏,段炼,平凡,等,2017.基于CloudSat识别飞机积冰环境中的过冷水滴[J].气象,43(2):206-212. Yuan M, Duan L, Ping F, et al, 2017. Identifying the supercooled liquid water in aircraft icing condition using CloudSat satellite data[J]. Meteor Mon, 43(2):206-212(in Chinese).
- 张利平,朱国栋,韩磊,2014.航空器遭遇严重积冰天气分析[J].中国民航飞行学院学报,25(6):57-61. Zhang L P, Zhu G D, Han L, 2014. Analysis of the weather condition for severe icing[J]. J Civil Aviation Flight Univ China, 25(6):57-61(in Chinese).
- 张宇飞,2013.浅析飞机积冰与航空安全[J].科技风,(14):194,197. Zhang Y F, 2013. Analysis of aircraft icing and aviation security [J]. Technol Wind, (14):194,197(in Chinese).
- 赵树海,1994.航空气象学[M].北京:气象出版社. Zhao S H, 1994. Aviation Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 周毓荃,欧建军,2010.利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J].气象,36(11):50-58. Zhou Y Q, Ou J J, 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. Meteor Mon, 36(11):50-58(in Chinese).
- Bernstein B C, McDonough F, Politovich M K, et al, 2005. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations[J]. J Appl Meteor, 44(7):969-986.