

王磊,李成才,赵增亮,等. 2014. 飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究. 气象,40(2):196-205.

# 飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究<sup>\*</sup>

王 磊<sup>1,2</sup> 李成才<sup>1</sup> 赵增亮<sup>2</sup> 姚志刚<sup>2</sup>

1 北京大学物理学院,北京 100871

2 北京应用气象研究所,北京 100029

**提 要:** 利用 7 个架次有积冰报告的飞机探测资料,对积冰云的微物理特征进行了分析,详细描述了云中相态组成、液水含量、中值体积直径和过冷大滴浓度特征。介绍了基于卫星、数值模式输出和地面观测资料的飞机积冰潜势监测技术,在与 20 个飞机探测积冰报告对比中,积冰监测可识别率为 90%,并应用飞机积冰潜势监测技术具体分析了 2010 年 10 月 26 日的积冰个例。最后介绍了基于积冰潜势监测技术的飞机积冰监测系统,该系统能够支持水平分辨率为 20 km、垂直分辨率为 25 hPa、时间分辨率为 1 h 的飞机积冰潜势产品的运算和显示,该系统可为实际业务提供参考。

**关键词:** 飞机积冰监测,飞机观测,云微物理特征,系统技术

**中图分类号:** P414 P426

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.007

## Microphysical Property Analysis and Detection of Air Icing Clouds

WANG Lei<sup>1,2</sup> LI Chengcai<sup>1</sup> ZHAO Zengliang<sup>2</sup> YAO Zhigang<sup>2</sup>

1 School of Physics Peking University, Beijing 100871

2 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029

**Abstract:** The cloud microphysical characteristics with aircraft icing during 7 flights are analyzed. The cloud phase, liquid water content, median volume diameter and the concentration of supercooled large droplets are described in detail. The aircraft icing potential monitoring technology which combines satellite, numerical model outputs and surface observations are introduced. In comparison with 20 icing reports during 2000—2010, it is found that it can detect 90% of icing correctly. The aircraft icing on 26 October 2010 is analyzed. Finally, the aircraft icing monitoring system based on aircraft icing potential detection technology is showed. The system determines the products of aircraft icing potential with horizontal resolution of 20 km, vertical resolution of 25 hPa, and temporal of 1 h. So, this system can be used in actual operations.

**Key words:** aircraft icing detection, aircraft observation, cloud microphysics, system technology

## 引 言

飞机积冰是最重要的危险天气之一。美国国家运输安全局研究认为飞机积冰每年都要引发数十起飞行事故,在 1982—2000 年间,共有 819 人死于与飞机积冰有关的事当中(Bellucci et al, 2007)。

即使对于经验丰富的飞行员,飞机积冰的影响也是致命的(Cole et al, 1991),在飞机积冰事故中有 67%发生在经验丰富的飞行机组,27%造成了飞机失事(Air Safety Foundation, 2002)。飞机积冰的准确识别可为航线规划提供重要参考信息。当遭遇积冰区时,飞机可有效水平绕开积冰区域或者垂直脱离积冰高度,飞机积冰的准确识别可避免飞机过

\* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05040000)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006047)、国家高技术研究发展计划(SQ2010AA1221583001)及国家自然科学基金项目(40775002,41075093 和 41175002)共同资助

2013 年 1 月 9 日收稿; 2013 年 9 月 10 日收修定稿

第一作者:王磊,研究方向为云物理和卫星遥感. Email: wang\_pku\_as@126.com

多的油料损耗、飞行路线的延长、不必要的飞机折旧损耗和机组人员精力损耗,有助于同一空域下多架次飞机的协调。

飞机探测是认识积冰区域云物理特征最有效的手段之一。美国联邦航空管理局利用飞机探测资料制定了适航标准第25部附录C(Federal Aviation Administration, 1999),该附录利用云中温度、平均有效直径和液水含量提供了飞机积冰环境的基本描述,其中平均有效直径可近似于中值体积直径。中值体积直径是指云滴尺度上液水含量分布的中值,该值经常用于描述飞机积冰环境(Coher et al, 2006)。美国粒子测量公司(Particle Measuring Systems Inc., PMS)生产的机载粒子测量设备能够自动完成对粒子的取样、测量和记录,可以对大范围云系进行连续观测,国际上在20世纪70年代后,已广泛使用PMS公司的光电探头进行云微物理参数探测(游来光,1987)。在1995—2000年,加拿大气象服务中心和美国航空航天局共进行了五次飞机积冰环境的飞机探测试验(Coher et al, 2001)。我国各省市的人工影响天气部门和气象科研机构自20世纪80年代初开始引进了PMS粒子测量系统,得到了广泛应用(郭学良,2010)。陈跃等(1989)对我国新疆地区1986年12月5日飞机探测资料的积冰云中含水量、滴谱和中值体积直径特征进行了分析。近年来,开展了一些与飞机积冰密切相关的混合相云的微物理结构分析研究(罗俊颀等,2012;辛乐等,2011;王维佳等,2011;孙鸿娉等,2011)。另外,机载积冰传感器可以直接探测飞机的积冰状态,其探测方式包括热学法、机械法、光学法和波导法(王起达等,2009)。

利用遥感资料和数值模式的积冰区域识别是积冰诊断的重要方面。卫星观测能够在较大范围内对积冰区域进行实时和连续的观测,可以用卫星多光谱数据识别云顶过冷水(Curry et al, 1992)。可以利用微波波段对云中液水含量进行反演为积冰诊断提供参考要素(Lee et al, 1994)。可综合多个卫星的可见光、红外、微波信息联合反演云中液水含量、云顶温度、云厚和云纹理特征识别积冰区域(Lawyer, 1995)。数值模式是飞机积冰区域预报的重要手段。可以建立基于温度和湿度阈值的数值模式积冰预报产品(Politovich et al, 1991)。还可结合垂直热力结构信息对积冰区进行预报识别(Thompson et al, 1997)。曹丽霞等(2004)分析了云微物理参数在积冰预报中的应用前景。李子良等(1996)开发了飞机积冰预报软件,利用判别方程进行积冰预

报。王洪芳等(2003)利用MM5中尺度数值模式和预报产品,建立了飞机积冰预报模型。近年来,开展了与飞机积冰相关的人工增雨潜力区域数值模拟研究(高茜等,2011;石爱丽等,2013)。

基于多源数据的飞机积冰监测业务技术得到突破和应用。飞机积冰监测业务要求业务系统能够提供大尺度水平范围内三维空间上的实时积冰区域信息,对时间、空间分辨率有较高的要求。卫星资料可以提供比较准确的云顶信息,但无法提供可靠的云下信息。数值模式可以提供三维空间上的温湿等信息。地面观测资料可以提供较为准确的云底信息,但不能提供可靠的云底以上信息。于是综合多源数据各自的优势信息,建立精确的飞机积冰区域识别技术是飞机积冰监测业务技术的主要趋势。美国联邦航空管理局在2002年将基于CIP(Current Icing potential)技术(Bernstein et al, 2005)的飞机积冰监测系统正式投入使用,系统的主要任务是帮助空管人员制定飞行计划、更改飞行线路和选择飞行高度。CIP基于卫星资料、雷达资料、地面观测、闪电观测和飞行机组报告并结合数值模式输出,建立了在三维空间内每小时一次输出的飞机积冰潜势诊断算法。2006年12月美国联邦航空管理局对该系统进行了升级,新系统集成更多数值预报模式和更详细的观测资料,提高了定量诊断积冰的能力,并建立了先进的机载用户终端。

由于直接的飞机积冰探测资料获取比较困难,国内专门针对飞机积冰云微物理特征的观测研究较少。针对我们在外场飞行中遇到的飞机积冰实例,本文对7个架次飞机探测中积冰发生时的云微物理特征进行分析,给出了关于云相态、液水含量、中值体积直径和过冷大滴浓度等参数特征。目前,综合利用多种数据开展飞机积冰区域识别是当前的发展方向,本文参照CIP技术,建立了基于卫星、数值模式输出和地面观测资料的飞机积冰潜势监测算法,并利用飞机积冰报告实例对该算法进行了验证,文中最后介绍了基于该算法开发的可供业务参考的飞机积冰监测系统。

## 1 飞机积冰云环境微物理特征分析

### 1.1 所用数据

选取2005—2006年北京地区开展飞机探测时有飞机积冰记录的架次作为分析对象,提取积冰发生时的云微物理特征进行分析。这里一共选取了7

个飞行架次,提取其中的穿云时段,其中有积冰报告的穿云飞行时间为 3283 s。

由于飞行并非以获取飞机积冰区域为目的,并且当飞机积冰较强时,飞行员会采取措施脱离积冰区,故获取的飞机积冰探测数据不多,且不具有广泛的代表性,这里仅针对 7 个个例进行分析。

这里的飞机积冰记录是指在飞机探测过程中,当有积冰发生时,观测人员在飞机侧面的窗户通过观察机翼或者机身其他目标物,发现有积冰现象并进行记录。这种记录具有一定的个人主观性,当有这样的文字记录时,表明飞机在该时间段确实有积冰发生。

## 1.2 所用仪器

本文利用 PMS 公司的 FSSP-100 (Forward Scattering Spectral Probe) 和 OAP-2D-GA2 (The 2D-Grey optical array probe) 两个探头,对飞机积冰区域的云微物理特征进行分析。机上同时配备有测量温度、露点、高度、空速和 GPS 信息的相关仪器。所用飞机为夏延 III A。

FSSP-100 通过测量粒子通过激光束后的散射光强来测量云粒子。本文中 FSSP-100 的测量范围设置在  $2\sim 32\ \mu\text{m}$ ,共分 15 个粒子尺度档位。OAP-2D-GA2 的内部由 64 个光阵元件组成的光阵,每个光学元件的分辨率为  $30\ \mu\text{m}$ ,可以测量尺度为  $30\sim 1800\ \mu\text{m}$  的粒子图像。该探头属于灰度探头,可将粒子的档光程度分为四档,通过对不同档光程度的光学元件配以不同的颜色进行显示。

## 1.3 云相态

当云中存在过冷水时才有可能发生飞机积冰,过冷水存在于液水云和混合相云之中。这里利用云相组成系数  $\mu_3$  (Korolev et al, 2003) 对积冰时的云相组成进行分析(式 1)。

$$\mu_3 = \frac{\overline{\rho_{\text{ice}} N_{\text{ice}} D_{\text{ice}}^3}}{\overline{\rho_{\text{ice}} N_{\text{ice}} D_{\text{ice}}^3} + \overline{\rho_{\text{liq}} N_{\text{liq}} D_{\text{liq}}^3}} \approx \frac{\omega_{\text{ice}}}{\omega_{\text{ice}} + \omega_{\text{liq}}} \quad (1)$$

式中,  $N_{\text{liq}}$  和  $N_{\text{ice}}$  分别是液滴和冰晶粒子的数浓度;  $D_{\text{liq}}$  和  $D_{\text{ice}}$  分别是液滴和冰晶粒子直径,  $\rho_{\text{liq}}$  和  $\rho_{\text{ice}}$  分别为水和冰的密度。按照 Korolev 等(2003)给出的定义,当  $\mu_3 < 0.1$  时为液水云;当  $0.1 \leq \mu_3 \leq 0.9$  时为混合相云;当  $\mu_3 > 0.9$  时为冰晶云。

针对 2005—2006 年北京地区有飞机积冰记录的 7 个飞行架次,对其中穿云的 3283 s 数据逐个计

算  $\mu_3$ 。图 1 给出了  $\mu_3$  在  $-15^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$  范围内每  $5^\circ\text{C}$  一个间隔的频率分布情况。图中,  $-5^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$  和  $-10^\circ\text{C} < T < -5^\circ\text{C}$  这两个温度范围内的  $\mu_3$  分布情况相似,最大的出现频率分布在  $0.1 < \mu_3 < 0.2$ , 可达  $0.8\sim 0.9$ , 说明该温度范围内液水云出现频率较高,仅有  $10\%\sim 20\%$  的云为混合相云。当  $-15^\circ\text{C} < T < -10^\circ\text{C}$  时,  $0.1 < \mu_3 < 0.2$  的出现频率约为  $0.4$ , 说明该温度范围内混合相云的出现频率增大,高达  $50\%$ 。当  $\mu_3 > 0.9$  时,所有温度范围内的  $\mu_3$  出现频率较小,说明仅获取了很少冰云。

图 2 给出了  $-15^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$  温度范围内每隔  $5^\circ\text{C}$ , 液相和混合相云出现频率的分布情况。图中,液相云在  $-10^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$  温度范围内的出现频率  $> 80\%$ , 混合相云在  $-15^\circ\text{C} < T < -10^\circ\text{C}$  温度范围

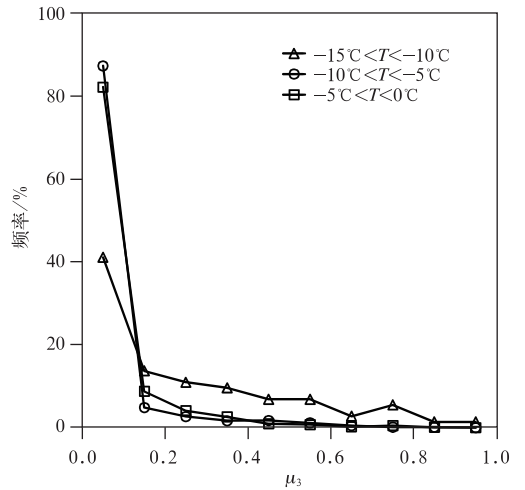


图 1 云相组成系数  $\mu_3$  的出现频率分布情况  
Fig. 1 Frequency of phase composition coefficient  $\mu_3$  for different temperature intervals

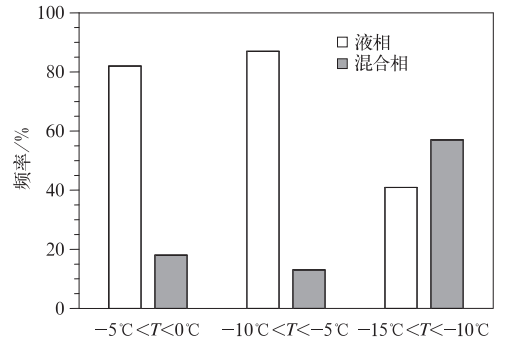


图 2 不同温度范围内液相和混合相云的出现频率分布  
Fig. 2 Frequency of liquids and mixed clouds for different temperature intervals

内出现频率增大到 50% 以上。

### 1.4 液水含量

云中过冷水含量是指示飞机积冰的重要参数之一。当过冷水含量越大时,积冰可能性越大。云中含水量计算公式:

$$W_{liq} = W_{liq\_FSSP} + W_{liq\_GA2} \quad (2)$$

式中,  $W_{liq\_FSSP}$  为 FSSP 探头计算的液水含量,  $W_{liq\_GA2}$  为 OAP-2D-GA2 探头计算的液水含量。

利用 FSSP 计算液水含量时,假设所有粒子为液态球状粒子,对所有尺度范围内的粒子积分得到最终含水量。利用 OAP-2D-GA2 计算液水含量时,首先要对获取粒子做形状分类,把粒子分为微小状、线状、聚合状、霰状、球状、六角形状、不规则状和枝状 8 种类型,分型方法使用 Holroyd(1987) 提出的方法。选取其中的微小状和球状粒子,假设其相态为液相,通过计算每个液相粒子的质量得到该探头的液水含量。

我们曾对 2005—2007 年共 27 个非降水混合相云的探测飞行架次进行了分析,并给出了非降水混合相云的云微物理特征分析结果。为了便于积冰云和一般混合相云之间进行比较,图 3 同时给出了积冰云和混合相云中液水含量 LWC(Liquid Water Content)平均值随温度的变化情况,从图中可以看出,在温度范围  $-15^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$  内,积冰云的液水含量平均值主要分布在  $0.04 \sim 0.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  之间,平均值峰值出现在  $-9^{\circ}\text{C} < T < -6^{\circ}\text{C}$  范围内,混合

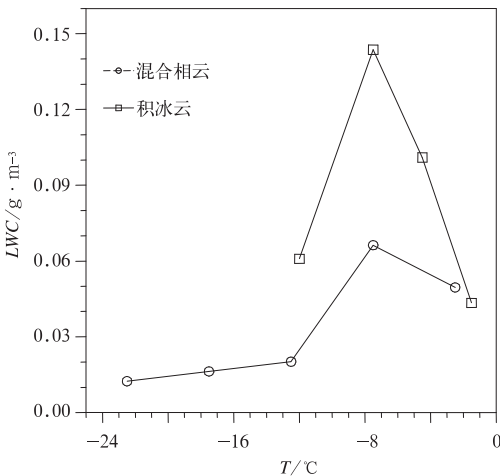


图 3 积冰云和混合相云的液水含量平均值随温度变化情况

Fig. 3 Dependence of mean liquid water content on temperature in icing clouds and mixed clouds

相云的液水含量主要分布在  $0.02 \sim 0.065 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  之间。在温度的各个区间,积冰云的液水含量均比混合相云要大。

### 1.5 中值体积直径

中值体积直径 MVD(Median Volume Diameter)经常用于描述积冰环境(Jeck, 1996; Ashenden et al, 1998)。这里中值体积直径计算所需的谱分布由 FSSP 的测量谱分布和 OAP-2D-GA2 的液滴谱分布组合而成,这里的 OAP-2D-GA2 的液滴谱已按照粒子分类的结果去除了冰晶粒子的影响。图 4 给出了每 1 s 的 MVD 在  $0 \sim 1000 \mu\text{m}$  范围内液水含量的分布情况。当 MVD 主要集中分布在  $8 \sim 20$  和  $50 \sim 500 \mu\text{m}$  范围内,当 MVD 较小时,液水含量主要分布在  $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以下,当 MVD 较大时,液水含量主要分布在  $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以下。

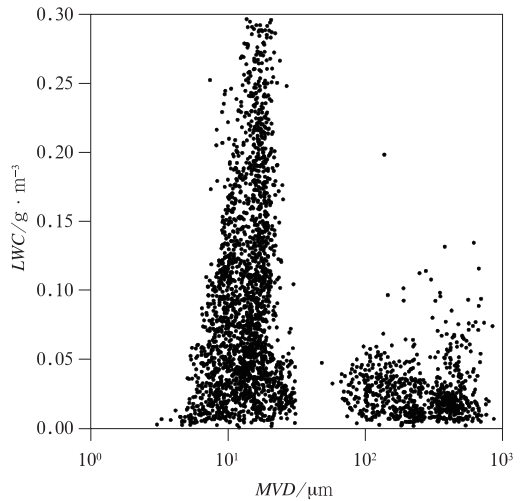


图 4 中值体积直径(0~1000 μm)与液水含量的分布情况

Fig. 4 MVD (0~1000 μm) vs LWC for 1 s data

### 1.6 过冷大滴浓度

过冷大滴浓度是描述飞机积冰的重要参数之一。按照 Ashenden 等(1998)的论述,定义过冷大滴为直径大于  $100 \mu\text{m}$  的液态云粒子,过冷大滴包括直径小于  $500 \mu\text{m}$  的冻滴(Supercooled drizzle drops)和直径大于  $500 \mu\text{m}$  的冻雨(Freezing rain)。这里利用 OAP-2D-GA2 识别的球状粒子进行统计。表 1 给出了过冷大滴浓度在  $-15^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$  范围内每  $5^{\circ}\text{C}$  一个间隔内的平均值、最小值和最大值,以

及 25%、50% 和 75% 的百分位数。过冷大滴浓度的平均值随着温度的降低呈减小的趋势,  $0^{\circ}\text{C} > T > -5^{\circ}\text{C}$  温度范围内的平均值为  $5.05 \text{ L}^{-1}$ 。

Jeck(1996)给出了积冰环境下液水含量和过冷大滴的分布情况,认为当液滴直径大于  $100 \mu\text{m}$  时,

过冷大滴浓度的平均值为  $5.3 \text{ L}^{-1}$ ,其中 50%、75% 和 99% 的百分位数分别为 5.1、6.2 和  $40 \text{ L}^{-1}$ ,该结果与本文中  $0^{\circ}\text{C} > T > -5^{\circ}\text{C}$  范围的过冷大滴浓度结果相近。

表 1 过冷大滴浓度在温度区间上的统计情况

Table 1 The concentration of supercooled liquid droplets for different temperature intervals

温度	平均值/ $\text{L}^{-1}$	最小值/ $\text{L}^{-1}$	25%/ $\text{L}^{-1}$	50%/ $\text{L}^{-1}$	75%/ $\text{L}^{-1}$	最大值/ $\text{L}^{-1}$
$0^{\circ}\text{C} > T > -5^{\circ}\text{C}$	5.05	0.00	0.77	1.79	6.98	37.69
$-5^{\circ}\text{C} > T > -10^{\circ}\text{C}$	1.77	0.00	0.20	0.69	1.87	32.68
$-10^{\circ}\text{C} > T > -15^{\circ}\text{C}$	0.11	0.00	0.00	0.00	0.21	0.53

## 2 飞机积冰潜势监测技术

由于飞机积冰与云中温度、液水含量、过冷大滴尺度等参数之间存在着联系,使得利用云参数确定飞机积冰潜势成为可能。本文基于 Bernstein 等(2005)提出的云参数与飞机积冰潜势之间的关系,利用实时积冰潜势算法,建立飞机积冰潜势监测技术。这里所提出的监测技术需尽可能的满足业务中大区域范围内每 1 h 产品生成的需要,故主要基于卫星、数值模式输出和常规气象站地面观测资料。如能及时获取气象雷达、探空数据和民航飞机积冰报告时,对潜势算法的完善将会有极大的帮助。

图 5 给出了本文提出的飞机积冰潜势监测技术流程图。主要步骤如下:(1)相关数据集的收集和格点匹配,(2)利用多源数据确定出云的三维结构,(3)建立相关参数与积冰潜势的相关关系,(4)判断积冰的物理特征,(5)计算初始的积冰潜势,(6)计算最终积冰潜势。

### 2.1 所用数据

所用数据有静止卫星、数值模式输出和地面观测资料。

这里采用 MTSAT-1R 静止卫星资料。MTSAT-1R 是日本在 2005 年发射的静止气象卫星。利用卫星的可见光(VIS)  $0.55 \sim 0.80 \mu\text{m}$ 、红外 1(IR1)  $10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$ 、红外 2(IR2)  $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$  和红外 4(IR4)  $3.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$  通道数据。由于可见光和短波红外辐射场受太阳辐射的反射影响,所以静止卫星数据在白天、夜晚和晨暮三个时间段分别进行分析。

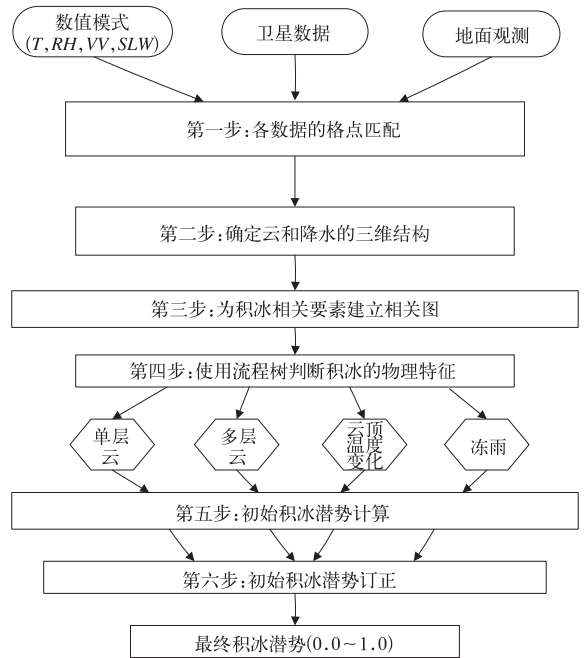


图 5 飞机积冰潜势监测技术流程图

Fig. 5 Flowchart of the icing potential detection

这里利用 WRF 中尺度数值模式的大气温度场、湿度场、垂直速度和云中液态水等信息。WRF 中设置两个网格,粗网格的水平分辨率为  $60 \text{ km}$ ,细网格的水平分辨率为  $20 \text{ km}$ 。垂直方向共设置 85 层,分辨率为  $25 \text{ hPa}$ 。模式中采用 Dudhia 短波辐射方案、RRTM 长波辐射方案、Noah 陆面模式,在细网格中不设置积云方案。由于数值模式中的边界层方案和微物理方案对云的模拟有较大的影响,根据 Otkin 等(2008) 试验结果,选取 MYJ 边界层方案和 SEIF 云微物理方案。

地面观测资料可以提供站点位置的云底信息和天气现象。这里主要使用地面观测资料提供的地面温度、湿度、云底高度和降水类型。



## 2.2 数据格点匹配

需要把卫星和地面观测数据匹配至数值模式的细网格上。WRF 的细网格水平分辨率为 20 km, 卫星数据的水平分辨率为 5 km, 这样卫星数据每 16 个格点将匹配一个 WRF 模式格点。由于地面观测数据分布不均匀, 所以这里假设离数值模式格点最近的地面观测数据最能够代表实际情况, 确定初始搜索格点附近 40 km 范围, 判断有无地面观测资料, 若没有则需搜索附近 125 km 范围。

## 2.3 确定云的三维结构

首先需要对每个格点进行云检测, 这里云检测使用 Lee 等(1997)和 Thompson 等(1997)提出的方法。对于白天和夜间, 由于积冰很少发生在破碎云中, 所以当格点中 16 个卫星像素有 40% 判断有云时可以确定该格点为有云。

云的三维结构通过格点内多像素卫星观测的最冷红外温度、模式预报的温度廓线判断。参照

Bernstein 等(2005) 给出的方法, 从上到下依次判断, 利用卫星观测判断高云层的云顶, 当模式的相对湿度低于 50% 并且至少有 75 hPa 厚度时, 判断为两个云层之间的干层, 当干层下相对湿度大于 70% 时, 判断为低云层。若格点有匹配的地面观测资料, 则利用地面观测资料来判断云底高度。若地面观测有降水发生, 还需考虑云底以下的积冰情况。

## 2.4 积冰潜势计算

飞机积冰潜势是指飞机积冰发生的潜在程度, 可以用来表示积冰可能出现的概率和强度。积冰潜势的计算是利用云中相关参数与积冰潜势之间的关系来完成的, 这种关系的建立是基于云物理规则、飞机积冰试验的经验参数和飞机报告分析得到的。图 6 给出了云中温度( $T$ )、云顶温度( $CTT$ )、相对湿度( $RH$ )、垂直速度( $VV$ )和过冷水含量( $SLW$ )与飞机积冰潜势相关关系图(Bernstein et al, 2005)。在具体计算时, 针对每个格点每个高度层获取图 6 中的 5 个参数, 然后把参数对应的相关关系指数代入到

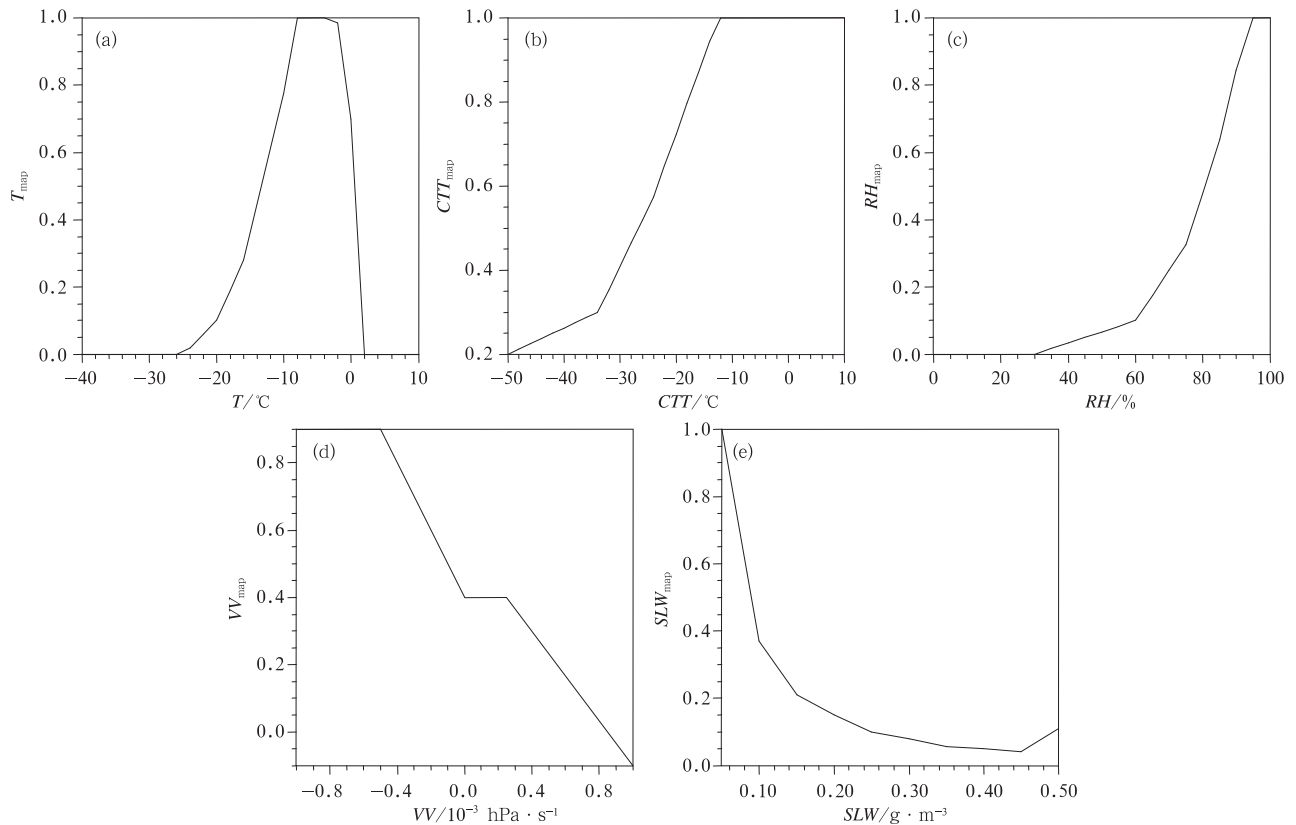


图 6 温度(a)、云顶温度(b)、相对湿度(c)、垂直速度(d)和过冷水含量(e)的相关关系图

Fig. 6 Correlation diagrams of temperature (a), cloud top temperature (b), relative humidity (c), vertical velocity (d) and super-cooled liquid water (e)

积冰潜势计算方程中,从而得到积冰潜势。

温度与积冰潜势的相关关系用来指示过冷水导致积冰的可能性。飞机观测和基本的物理观点认为过冷水通常存在于冰点以下,随着温度的变化过冷水存在的可能性逐渐减小。除了深层对流,在 $< -25^{\circ}\text{C}$ 时过冷水则很少出现。积冰主要发生在温度 $-15^{\circ}\text{C} \sim -3^{\circ}\text{C}$ 之间;云顶温度与积冰潜势的相关关系用来估计云中是否包含液态水。当云顶温度 $> -12^{\circ}\text{C}$ 时,这样的暖云主要由液态水组成,并且液态水随着云顶温度的下降而逐渐降低。根据单层云飞机积冰报告生成云顶温度的情况,结果表明积冰频率的峰值位于 $-12^{\circ}\text{C}$ 附近(Bernstein et al, 2005);相对湿度与积冰潜势的相关关系用来评估云顶和云底之间云存在的可能性。模式的相对湿度和积冰之间的关系在很大程度上依赖模式的精度。飞机积冰报告同模式相对湿度相匹配的结果表明积冰发生频率高时,其相对湿度也很高,约75%的飞机积冰报告发生在相对湿度 $> 70\%$ 的情况(Bernstein et al, 2005);垂直速度与积冰潜势的相关关系用来调整潜势的估计。当有云存在时,垂直向上速度能够促进液态水含量的产生,向下速度就意味着液态水的消失。模式预报中强上升运动与积冰具有很强的联系,同时与弱向上运动和向下运动关系不大。

初始积冰潜势计算方程(Bernstein et al, 2005)为

$$CIP_{ini} = T_{map} \times CTT_{map} \times RH_{map} \quad (3)$$

式中, $CIP_{ini}$ 为初始积冰潜势, $T_{map}$ 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。

当模式有垂直速度和过冷水结果时,利用这两个量来调整初始积冰潜势,生成最终积冰潜势(Bernstein et al, 2005)。其中当垂直速度结果为零或者上升速度时,最终积冰潜势计算方程为式(4),当垂直速度结果为下降速度时,最终积冰潜势计算方程为式(5)

$$CIP_{fin} = CIP_{ini} + (1 - CIP_{ini}) \times (0.6SLW_{map} + 0.4VV_{map}) \quad (4)$$

$$CIP_{fin} = CIP_{ini} + [(1 - CIP_{ini}) \times 0.6SLW_{map} + (CIP_{ini} \times 0.4VV_{map})] \quad (5)$$

式中, $CIP_{fin}$ 为最终积冰潜势, $SLW_{map}$ 为过冷水相关关系, $VV_{map}$ 为垂直速度相关关系。

## 2.5 实例分析

应用飞机积冰潜势监测技术,设置当飞机积冰

潜势 $> 0.6$ 为飞机积冰区域,对2000—2010年共20个飞机探测积冰个例进行了分析,以机上人员的飞机积冰报告为判别标准。其中在积冰监测对比中有18次监测到积冰区域,监测积冰可识别率为90%,可初步认为飞机积冰监测技术具备识别积冰区域的能力。在对8个无飞机积冰报告且有Sc、Ac云出现的飞机探测架次中,有2次计算得出飞机积冰结果,由于对飞机积冰空报率的试验架次较少,需在后续工作中进一步验证。本节就一个飞机积冰实例进行具体分析。

2010年10月26日11:18—12:50在四川广汉地区有一次飞机探测活动,根据机上飞行记录,11:33—11:55在4700 m高度发现有中度—重度的飞机积冰,GPS记录显示飞机在 $31.38^{\circ} \sim 31.76^{\circ}\text{N}$ 、 $104.5^{\circ} \sim 105.8^{\circ}\text{E}$ 范围内飞行,探测资料分析认为期间云中温度在 $-5^{\circ}\text{C}$ 附近,中值体积直径位于 $14 \sim 16 \mu\text{m}$ 之间,液水含量集中在 $0.15 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,云中连续飞行距离约为37 n mile(1 n mile = 1852 m)。图7给出了云中5 s平均的FSSP粒子浓度情况,主要分布在 $50 \sim 90 \text{ cm}^{-3}$ 之间,说明云中粒子的浓度较大。

把本次探测结果与适航标准第25部附录C进行了比较,由于无法有效获取17.4 n mile平均值,这里根据Jeck(2002)的定义,对云中LWC进行距离上的转换。图8给出了距离转换后 $0^{\circ}\text{C}$ 时最大连续积冰环境下,不同MVD大小的附录C(适航标准

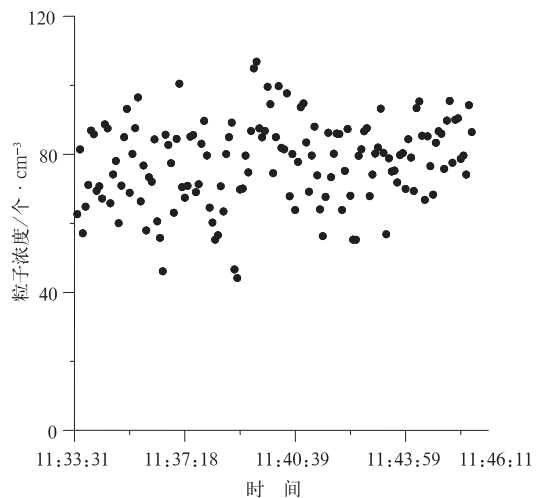


图7 2010年10月26日云中FSSP探头粒子浓度

Fig. 7 The concentration of FSSP on

26 October 2010

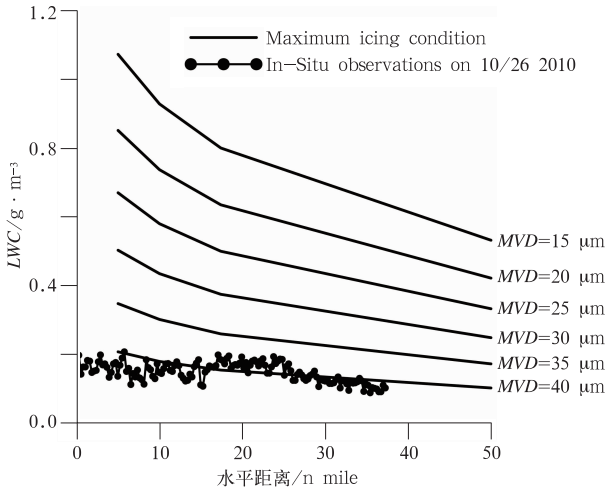


图 8 2010 年 10 月 26 日飞机探测结果与适航标准第 25 部附录 C 积冰转换曲线比较  
 Fig. 8 Comparison of data observed by aircraft on 26 October 2010 and continuous maximum icing conditions, Appendix C, FAR25

第 25 部)积冰曲线,其中  $MVD$  对应曲线表示在该  $MVD$  大小下最大积冰情况的液水含量值,当探测含水量位于该曲线上或者右上方时,表明此时的飞机积冰达到并满足附录 C 规定的最大积冰环境,否则就没有达到最大积冰环境。图 8 同时给出了本次飞机探测云中 5 s 平均  $LWC$  距离转换后的情况。图中可以看出,本次探测的  $LWC$  与  $MVD = 15 \mu\text{m}$  时最大积冰环境的  $LWC$  有较大差距,说明这时的飞机积冰尚未达到最大积冰环境。

利用飞机积冰潜势监测技术对 2010 年 10 月 26 日 12 时的四川地区进行积冰潜势计算,图 9 为当时 3900、4800、6000 和 6900 m 高度处的积冰潜势计算结果。从图中可以看出,在四川广汉地区附近,飞机积冰区域集中在 3900~6000 m 高度之间,部分区域积冰潜势较大,4800 m 高度飞机潜势结果与飞机在 4700 m 的积冰报告有较好对应。

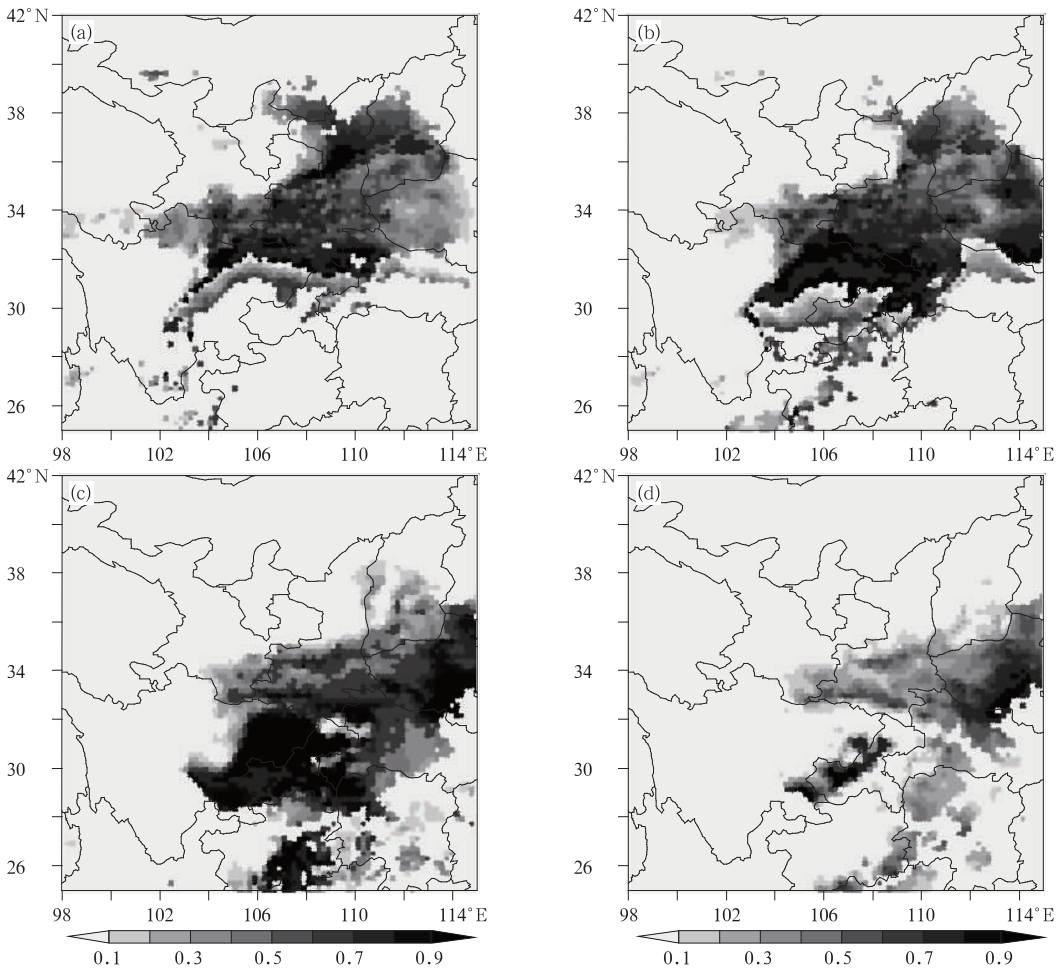


图 9 2010 年 10 月 26 日 12 时 3900 (a)、4800 (b)、6000 (c)和 6900 m (d)高度的飞机积冰潜势监测  
 The icing potential at 3900 m (a), 4800 m (b), 6000 m (c) and 6900 m (d) for 12:00 26 October 2010



### 3 飞机积冰潜势监测技术在业务保障中的应用

基于第 2 节提出的飞机积冰潜势监测技术,我们建立了可供业务运行参考的飞机积冰监测系统。系统利用数值模式业务自运行结果、静止卫星云分析结果和地面观测结果,生成实时飞机积冰潜势监测产品。该系统包含了数值模式自运行模块、静止卫星云分析模块、实时积冰潜势计算模块和积冰产品自显示和交互模块(图 10)。系统底层运行在 Linux 操作系统下进行,基于 FORTRAN 和 IDL 进行开发,利用 C-Shell 组织运行;系统的积冰产品结果交互式显示在 Windows 系统下运行。

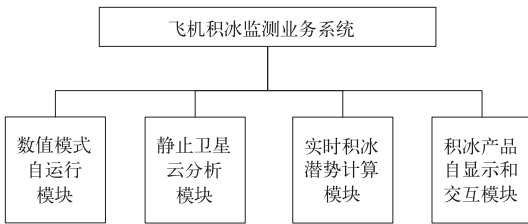


图 10 飞机积冰监测业务系统组成结构

Fig. 10 The structure of aircraft icing detection and forecast system

#### 3.1 数值模式自运行模块

数值模式自运行模块每天启动两次,模式的起报时间为 08 和 20 时,预报结果分别为 00 时至次日 12 时、12 时至次日 23:59:59 时每隔 1 h 的预报。预报结果为实时积冰潜势计算模块提供输入。数值模式初始场设置了 GFS 接口。

#### 3.2 静止卫星云分析模块

静止卫星云分析模块利用系统时间对接收到的卫星数据进行处理,进行云检测分析、相关光谱通道分。结果为实时积冰潜势计算模块提供输入。该模块根据系统时间和接收文件时间的自运行功能,每 1 h 启动一次。卫星资料设置了 FY-2E 接口和 MTSAT-1R 接口。

#### 3.3 实时积冰潜势计算模块

实时积冰潜势计算模块首先确定模块所需数据的准备情况,以数值模式自运行模块结果、静止卫星云分析模块结果和地面观测数据为输入,运行实时积冰潜势算法,给出潜势计算结果。根据系统时间

和数据准备情况,每 1 h 启动一次。

#### 3.4 积冰产品显示和交互分析模块

该模块用于实现用户界面的控制和系统各模块的调度与通信,与用户交互式发生互动,根据用户需求,合理调用不同子系统的适当功能模块,实现整个软件的有序、高效运行;用于实现对积冰监测数据、卫星数据、数值模式等数据按系统时间的自动访问;用于以可视化方式综合显示数据产品;用于实现各类产品的打印输出,生成符合标准格式的图像及图像产品。

该模块为用户提供了多类应用产品的显示。可定制和显示选择区域内 40 个高度层的积冰潜势分布;定制和显示选择单点的垂直积冰潜势分布;定制和显示选择两个和多个地理位置点之间的积冰潜势垂直剖面;显示当前天气形势图;显示区域内积冰的三维空间分布。图 11 为系统的显示界面示例,显示区给出了 2010 年 10 月 26 日 03 时中国境内 3900 m 高度的积冰潜势分布和北京至成都航线上的积冰剖面。

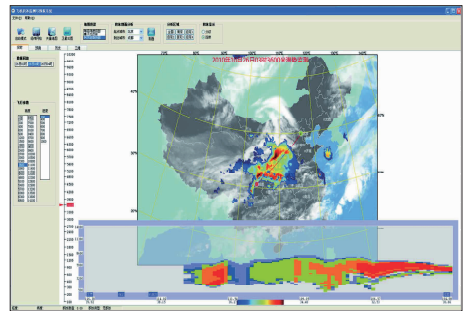


图 11 飞机积冰监测系统显示界面示例

Fig. 11 The example of display windows with aircraft icing detection and forecast system

## 4 结论和讨论

(1) 对北京地区 7 个飞机积冰个例的云中微物理特征进行了分析。在  $-10^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$  温度范围内液相云的出现频率可达 80%~90%,而  $-15^{\circ}\text{C} < T < -5^{\circ}\text{C}$  温度范围内有 40%~50% 的云为混合相云;液水含量平均值主要分布在  $0.04 \sim 0.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均值峰值出现在  $-9^{\circ}\text{C} < T < -6^{\circ}\text{C}$  范围内;当中值体积直径较小时,液水含量主要分布在  $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以下,当中值体积直径较大时,液水含量主要分布在  $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以下;过冷大滴浓度的平均值随着温度的降低呈减小的趋势,  $0^{\circ}\text{C} > T > -5^{\circ}\text{C}$  温度范围

内的平均值为  $5.05 \text{ L}^{-1}$ 。这些结论仅为针对个例的分析,不具有足够的代表性。

(2) 基于卫星资料、数值模式输出和地面观测资料,利用多个云参数与积冰潜势之间的相关关系,给出了飞机积冰潜势监测技术。在该技术中可利用多源数据中各个数据源的优势信息,得到相对准确的积冰诊断结果。通过与20个飞机探测积冰报告比较,积冰可识别率为90%,并对2010年10月26日在四川广汉地区一次飞机积冰进行了实例分析,认为该技术初步具备识别积冰区域的能力。

(3) 基于飞机积冰潜势监测技术,开发了可供业务运行参考的飞机积冰监测系统。该系统包含了数值模式自运行模块、静止卫星云分析模块、实时积冰潜势计算模块和积冰产品自显示和交互模块,实现了水平分辨率为20 km,垂直分辨率为25 hPa,时间分辨率为1 h的飞机积冰潜势产品的运算和显示,并为航空气象保障人员提供了较为友好的交互式显示平台,具备一定的实际应用能力。

## 参考文献

曹丽霞,纪飞,刘健文,等. 2004. 云微物理参数在飞机积冰分析和预报中的应用研究. *气象*, 30(6): 8-12.

陈跃,马培民,游来光. 1989. 飞机积冰环境下的液态水含量及滴谱个例分析. *气象*, 15(4): 24-28.

高茜,王广河,史月琴. 2011. 华北层状云系人工增雨两个例数值研究. *气象*, 37(10): 1241-1251.

郭学良. 2010. 大气物理与人工影响天气. 北京: 气象出版社, 526-527.

李子良,潘微多. 1996. 飞机积冰预报应用软件. *气象*, 22(12): 17-19.

罗俊颖,贺文彬,李金辉,等. 2012. 2003年春季陕西省层状云降水的雨滴谱特征. *气象*, 38(9): 1129-1134.

石爱丽,郑国光,孙晶,等. 2013. 河南省一次秋季层状云降水增雨潜力的观测和数值模拟分析. *气象*, 39(1): 67-73.

孙鸿娉,李培仁,闫世明,等. 2011. 华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究. *气象*, 37(10): 1252-1261.

王洪芳,刘建文,纪飞,董佩明. 2003. 飞机积冰业务预报技术研究. *气象科技*, 31(3): 140-146.

王起达,王同光. 2009. 机翼结冰探测技术进展. *航空制造技术*, 3: 62-64.

王维佳,刘建西,石立新,等. 2011. 四川盆地降水云系飞机云物理观测个例分析. *气象*, 37(11): 1389-1394.

辛乐,姚展予. 2011. 一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析. *气象*, 37(2): 194-202.

游来光. 1987. 我国云物理和人工影响天气研究工作新进展. *气象科技*, 21(1): 59-64.

Ashenden R, Marwitz J D. 1998. Characterizing the supercooled large droplet environment with corresponding turboprop aircraft response. *J Aircraft*, 35: 912-920.

Air Safety Foundation. 2002. Aircraft Icing. Safety Advisor,

Weather No. 1, Federal Aviation Administration.

Bellucci M, Vernillo P, Auletta A, et al. 2007. SONACA icing Test Campaign on a 2D model at CIRA IWT. SAE Technical Paper 2007-01-3335.

Bernstein B C, Frank McDonough, Marcia K, et al. 2005. Current icing potential: Algorithm description and comparison with aircraft observations. *J Appl Meteor*, 44: 969-986.

Cober S G, Isaac G A, Strapp J W. 2001. Characterizations of aircraft icing environments that include supercooled large drops. *J Appl Meteor*, 40: 1984-2002.

Cober S G, Isaac G A. 2006. Estimating maximum aircraft icing environments using a large data base of in-situ observations. AIAA 40th Aerospace Sci Meeting and Exhibit, Reno Nevada, AIAA 2006-0266.

Cole J, Sands W. 1991. Statistical study of aircraft icing accidents. Proc 29th Aerospace Sciences Meeting, AIAA 91-0558.

Curry J A, Liu G. 1992. Assessment of aircraft icing potential using satellite data. *J Appl Meteor*, 31: 605-621.

Federal Aviation Administration. 1999. U. S. Code of Federal Regulations Title 14 (Aeronautics and Space), Part 25 Appendix C. Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, U. S. Government Printing Office, Washington.

Holroyd E W. 1987. Some techniques and uses of 2D-C habit classification software for snow particles. *J Atmos Oceanic Technol*, 4: 498-511.

Jeck R K. 2002. Icing design envelopes converted to a distance-based format. Federal Aviation Administration, DOT/FAA/AR-00/30.

Jeck R K. 1996. Representative values of icing-related variables aloft in freezing rain and freezing drizzle. U. S. Department of Transportation Pep, DOT/FAA/AR-TN95/119: 44.

Korolev, Isaac G A, Cober S G, et al. 2003. Microphysical characterization of mixed phase clouds. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129: 39-65.

Lawyer D T. 1995. Exploratory study of an icing index derived from satellite remote sensing over land. Masters thesis, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Lee T F, Clark J R, Swadley S D. 1994. Potential applications of the SSM/I cloud liquid water parameter to the estimations of marine aircraft icing. *Wea Forecasting*, 9: 173-182.

Lee T F, Turk F J, Richardson K. 1997. Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9-mm data. *Wea Forecasting*, 12: 664-677.

Otkin J A, Thomas J G. 2008. Comparison of WRF Model-Simulated and MODIS-Derived Cloud Data. *Mon Wea Rev*, 136: 1957-1970.

Politovich M K, Olson R. 1991. An evaluation of aircraft icing forecasts for the continental United States. 4th Intl Conf Aviation Wea Sys, Pris Amer Meteor Soc. 234-238.

Thompson G, Bullock R, Lee T F. 1997. Using satellite data to reduce spatial extent of diagnosed icing. *Wea Forecasting*, 12: 185-190.