

飞机积冰业务预报技术研究

王洪芳^{1,2} 刘健文² 纪飞² 董佩明²

(1 北京大学物理学院, 北京 100871)

(2 空军第七研究所, 北京 100085)

摘要 分析研究了飞机积冰的物理过程和影响因子, 试验对比积冰算法。采用 MM5 中尺度数值模式和预报产品, 建立了飞机积冰预报模型, 用历史飞机报告检验及业务运行验证, 预报效果较好。

关键词 飞机积冰 中尺度 数值模式 业务预报

引言

随着航空技术的发展, 飞机性能得到改善, 飞机速度大、升限高, 且配有防冰装置, 这些使飞机积冰的危害在一定程度上减小了。但现代中高速飞机在起飞、着陆阶段以及在严重积冰天气区飞行时, 同样可能发生积冰现象甚至导致飞行事故。尤其是低速飞机和直升机积冰的危险性更大。20 世纪 90 年代以来, 探测和预报飞机积冰的手段有了新的发展, 利用数值预报模式把基本物理量的动力预报与积冰的诊断计算结合起来, 先后提出了几种积冰算法^[1~7], 改善了飞机积冰的预报效果。1999 年 12 月至 2000 年 2 月, 由北美飞机积冰研究联盟签署的联合积冰研究一期计划在加拿大实施, 联合积冰研究二期计划也将于 2003 年 11 月着手进行, 综合利用卫星和地基遥感设备、飞机和数值预报模式来判识积冰区。本文通过分析研究飞机积冰的物理过程和影响因子, 试验对比积冰算法, 采用 MM5 中尺度数值模式, 建立了可供业务使用的飞机积冰预报系统, 经验证, 预报效果较好。

1 飞机积冰的类型及影响因素

飞机积冰是指机体表面某些部位聚集冰层的现象。由于液态水含量、水滴大小和云相等情况不同, 以及冻结过程中释放的潜热排走的快慢不同, 所成的冰层在结构、强度和外观上也各有不同。我国航

空气象界将飞机积冰划分为明冰、雾凇、毛冰和霜等四类, 其中明冰和毛冰对飞行的危害较大。

1.1 气象条件对飞机积冰的影响

(1) 温度是影响积冰的最重要参数之一

气象上常用环境温度。飞行员和飞机设计师使用总温(TAT), 它包含飞机速度效应。TAT 又称“驻点温度”, 等于环境温度加上由于气流阻滞和压缩而造成的动力增温。速度高时这种增温是显著的。在 926 公里(500 海里)/小时时驻点温度和环境温度之差高达 10℃。

相对小的环境温度与总温的变化, 能够引起相对较弱的毛冰条件向危险的混合冰条件转换。积冰严重程度对总温的非线性依赖关系与飞机速度作用相结合, 使得单独根据环境气温精确地识别中等以上积冰潜在区成为难点^[8]。

(2) 液态水含量(LWC)和水滴大小

云中过冷水含量越大, 积冰强度越严重。云中过冷水含量主要取决于气温。温度越低, 过冷水含量越小。

大水滴更易于被机体捕获。中位数体积直径(D_{Mv})和水滴大小分布的实际形状确定了飞机的有效冲并效率。以小水滴为主的云中, 高 LWC 只能产生微量或者忽略不计的积冰, 而主要由大水滴组成的云中, 相对低的 LWC 也可能形成中等以上的积冰。

(3) 云相态

对一特定云来说,积冰潜力直接与云中水凝物的相态相关。积冰通常产生于过冷水滴的冲击作用。干冰晶在冲击后一般不附着于飞机表面,如果部分冰晶融化变湿,或者由于除冰或穿越高液态水含量区而使飞机表面变湿,那么冲击冰晶将会粘附。

1.2 飞机参数对积冰的影响

飞行速度、飞机形状和类别等很多飞行参数都会对积冰过程产生影响。在其他条件相同的情况下,飞行速度的增加,一方面增加液态水的冲并效率,有利于积冰,另一方面产生动力增温,降低积冰可能性。飞机不同部位的积冰可以发生在气象条件完全不同的环境中。机体积冰一般发生在可见潮湿(云、降水等)环境中,而汽化器积冰或进气系统积冰常常发生在晴空甚至温度较高的大气环境中。

从积冰发生的条件和影响因素来看,预报和识别危害性积冰环境十分困难。积冰过程中很重要的许多参数(水滴大小、云相态等)预报人员不能直接获得,可以得到的参数(如温度、液态水含量等)与积冰严重程度非线性相关。另外不同飞机类型的多种敏感性意味着单一的积冰灾害分析会对一定飞机类型产生过高或过低的严重程度预报。

2 中尺度数值模式

研究中所采用的数值模式为 MMS 中尺度模式,水平网格 51×55 ,分辨率为 60km,垂直方向 23 层。所用资料为每日 08、20 时地面和高空常规气象报文。

针对积冰、云等航空气象要素的时空分布特点,加密了模式 850hPa 层以下低空的垂直分层(6 层),这对于飞机的起飞、着陆阶段及飞行高度低的中小型飞机来说,增加了预报的依据和可靠性,提高了云、积冰等重要航空气象要素的低空预报能力。

3 飞机积冰的预报算法

根据所收集的飞机积冰报告,分析研究了飞机积冰的大气环境条件的统计特征,设计了分别考虑云中液态水含量、大气温度、湿度、冷暖平流、垂直速度、大气稳定度、降水类型、云状等因素的多种积冰预报方法。通过试验对比,采用集成预报技术预报积冰。

3.1 积冰算法一

采用美国国家大气研究中心提出的积冰严重性指数的概念。考虑影响积冰的三个主要参数:大气环境温度、云中过冷水含量及云滴的中位数体积直径^[11]。将此三个量分为 5 至 6 档,构成一个数据矩阵。矩阵的每个元素指定为一个积冰严重性指数值 I ,它由 0 至 10 共 11 个数值表示。其严重性随数值的增大而增加。

(1) 液态水含量(单位: $g \cdot m^{-3}$)的计算

对于积状云,过冷水含量(L_C)用下式估计:

$$L_C = 0.95 \times P_h \times (Q_c - Q_h) / (2.87 \times T_h) \quad (1)$$

式(1)中 P_h 为飞行高度处的气压(单位:hPa); Q_c 为云底(或抬升凝结高度上)的饱和比湿(单位: $g \cdot kg^{-1}$); Q_h 为飞行高度处的饱和比湿(单位: $g \cdot kg^{-1}$); T_h 为飞行高度处的热力学温度(单位:K), t_h 为飞行高度处的摄氏温度(单位: $^{\circ}C$)。

对于层状云,过冷水含量(L_n)为:

$$L_n = 0.25 \times 10^4 f \times E(T_c - T_h) / (\overline{T} - 36)^2 \quad (2)$$

式中 f 为飞行高度处的大气相对湿度(%); $E = 6.11 \times 10^{7.5} \times t_h / (237.5 + t_h)$,单位:hPa; t_h 为飞行高度的温度,单位: $^{\circ}C$; T_c 为云底温度; $\overline{T} = (T_c + T_h) / 2$ 。表 1 是液态水含量(L)分级表。

(2) 云滴的中位数体积直径 D_{MV} 与云状有关,由表 2 3 确定:

表 1 液态水含量(L)分级表

	$L \leq 0.01$	$0.01 < L \leq 0.1$	$0.1 < L \leq 0.3$	$0.3 < L \leq 0.5$	$0.5 < L \leq 1.0$	$L > 1.0$
分级	L1	L2	L3	L4	L5	L6

注: L 单位为 $g \cdot m^{-3}$

表 2 各类云状的中位数体积直径 D_{MV}

	St	Sc	Ns	As	Ac	Cu	Cb
$D_{\mu V}(\mu m)$	20	28	48	16	18	22	36

表 3 中位数体积直径 (D_{MV}) 分级表

	$D_{MV} \leq 1$	$1 < D_{MV} \leq 17$	$17 < D_{MV} \leq 28$	$28 < D_{MV} \leq 50$	$D_{MV} > 50$
分级	D1	D2	D3	D4	D5

注: D_{MV} 单位为 μm

(3) 环境温度(T)为实际观测值或模式预报值(下同),见表 4。

表 4 环境温度 ($T: ^\circ C$) 分级表

	$T > 0$	$-5 < T \leq 0$	$-10 < T \leq -5$	$-20 < T \leq -10$	$T \leq -20$
分级	T1	T2	T3	T4	T5

(4) 积冰严重性指数(I)矩阵

T1: $T > 0 ^\circ C$, 积冰严重性指数 $I = 0$;

T2: $-5 ^\circ C < T \leq 0 ^\circ C$						
指数	I	D1	D2	D3	D4	D5
L1	0	0	0	0	0	6
L2	0	1	2	3	3	7
L3	0	4	5	6	6	8
L4	0	5	7	7	7	9
L5	0	6	8	8	8	10
L6	0	8	9	9	9	10

T3: $-10 ^\circ C < T \leq -5 ^\circ C$						
指数	I	D1	D2	D3	D4	D5
L1	0	0	0	0	0	6
L2	0	1	2	3	3	7
L3	0	4	5	6	6	8
L4	0	5	6	7	7	9
L5	0	6	7	8	8	10
L6	0	8	8	9	9	10

T4: $-20 ^\circ C < T \leq -10 ^\circ C$						
指数	I	D1	D2	D3	D4	D5
L1	0	0	0	0	0	6
L2	0	1	2	3	3	7
L3	0	3	4	5	5	8
L4	0	4	5	6	6	9
L5	0	5	6	7	7	10
L6	0	7	8	8	8	10

T5: $T \leq -20 ^\circ C$						
指数	I	D1	D2	D3	D4	D5
L1	0	0	0	0	0	5
L2	0	1	2	3	3	6
L3	0	2	2	3	3	7
L4	0	3	3	4	4	8
L5	0	5	5	6	6	9
L6	0	7	7	7	7	10

3.2 积冰算法二

通过统计分析飞机积冰的大气环境条件发现, 温度(T)、温度露点差(Td)、温度平流、云、降水等要素对飞机积冰的影响十分重要, 据此试验设计积冰预报方案。

有无积冰判据:

当某一层满足 $-8 ^\circ C < t < 0 ^\circ C$ 且 $t - Td \leq 2.0 ^\circ C$ 时;

或 $-16 ^\circ C < t \leq -8 ^\circ C$ 且 $t - Td \leq 3.0 ^\circ C$ 时;

或 $-22 ^\circ C < t \leq -16 ^\circ C$ 且 $t - Td \leq 4.0 ^\circ C$ 时;

则此层有积冰。

积水强度判据见表 5。

表 5 积冰强度判据

		温度平流					
		冷			中性		
		强盛积云		积状云		层状云	
降水		有	无	有	无	有	无
积冰强度		严重	中度	中度	轻度	中度	轻度
							微量

3.3 积冰算法三

采用美国空军全球天气中心提出的积冰方案

(RAOB 积冰方案)^[6]。根据每个探空层上的温度 (T)、露点 (T_d) 及在本层与上层间计算的温度递减率,确定此层的积冰强度和积冰类型。积冰层的上下限根据积冰判据由温度、露点在高度上的插值得到。积冰层内最严重的积冰强度和类型被视为整层的强度和类型。

积冰强度划分为 8 个等级:0—无积冰,1—微量毛冰 (TRC-RIM),2—轻度混合冰 (LGT-MXD),3—轻度毛冰 (LGT-RIM),4—轻度明冰 (LGT-CLR),5—中度混合冰 (MDT-MXD),6—中度毛冰 (MDT-RIM),7—中度明冰 (MDT-CLR)

表 6 给出 RAOB 积水方案。

表 6 RAOB 积冰方案

T - T _d = ddp	潮湿层温度/ °C								
	- 8 < t <= 0				- 16 < t <= - 8				- 22 < t <= - 16
	ddp ≤ 1		1 < ddp ≤ 3		ddp ≤ 1		1 < ddp ≤ 3		ddp ≤ 4
递减率	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	
	≤ 2	> 2	≤ 2	> 2	≤ 2	> 2	≤ 2	> 2	
积冰类型	LGT-RIM	MDT-CLR	TRC-RIM	LGT-CLR	MDT-RIM	MDT-MXD	LGT-RIM	LGT-MXD	LGT-RIM
	3	7	1	4	6	5	3	2	3

3.4 积冰算法四

Forbes 和 Thompson 定义了四种积冰类型 (RAP 积冰预报方案)^[2]:

层状、冻雨、不稳定、普通

层状(冻毛毛雨)积冰: $- 12\text{ °C} < t \leq 0\text{ °C}$ 且 $f \geq 85\%$,在较高层 $T < - 12\text{ °C}$ 且 $f < 85\%$

冻雨积冰: $t \leq 0\text{ °C}$ 且 $f \geq 80\%$,其上层 $T > 0\text{ °C}$, $f = 80\%$

不稳定条件积冰: $- 20\text{ °C} < t \leq 0\text{ °C}$ 且 $f \geq 56\%$,在较低的不稳定层 $f_{\max} \geq 65\%$

普通条件积冰: $- 16\text{ °C} < t \leq 0\text{ °C}$ 且 $f \geq 63\%$

图 1 给出 RAP 积水算法冻雨型积水示意图,图 2 给出 RAP 积水算法层状型积水示意图。

根据模式输出产品,计算温度和相对湿度的垂直廓线,并根据温度和相对湿度的阈值确定四种积冰类型:普通 1、不稳定 2、冻雨 3、层状(冻毛毛雨)4。

3.5 积冰的集成预报

集成预报中除了考虑上述四种主要积冰算法外,还包含下列三种积冰算法:美国国家航空天气中心用温度和相对湿度定义的高概率条件和低概率条件的积冰方案 (NAWAU 积冰预报方案),法国气象局根据温度、相对湿度、水汽混和比和垂直速度设计的积冰方案 (SKEW 算法),以及美国国家大气研究中心提出的利用地面观测的降水类型和云量,结合温度和相对湿度识别大过冷水滴 (SLD) 可能存在区域的积冰方案 (STOVEPIPE 飞机积冰算法)。采用综合多指标叠套技术来判识飞机积冰的落区,即当所采用的预报算法中大部分或部分主要算法在某一层某一区域内满足积冰判据时,则认为该层该区域有利于积冰的产生,预报有积冰。积冰的强度主要采用加权法综合确定,每种算法的权重根据其在那个例回报试算中的技巧得分能力给定。集成预报中把积冰强度等级分为 6 档,即无、轻度、轻-中度、中度、中-强以及严重积冰。同时,用数字 0、1、2、3、4、5 对应以上各级。制作预报图时用数值表示,以便作等值线分析或伪彩图显示。

4 积冰预报试验分析

研究期间共收集到 1990 ~ 2001 年的飞机积冰报告 37 例,用中尺度分析预报系统对这些个例逐一进行了 24h 模拟试验,并采用 7 种预报方法分别制作飞

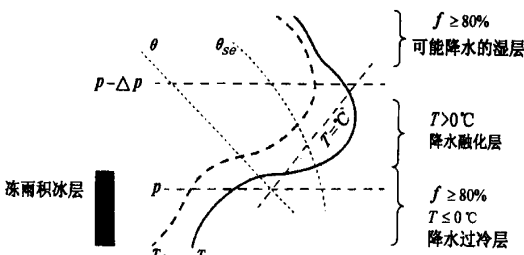


图1 RAP积水算法冻雨型积水示意图

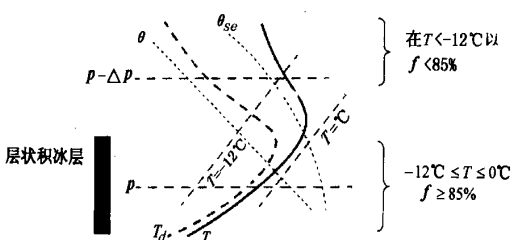


图2 RAP积水算法层状型积水示意图

机积冰的诊断、预报。以飞机报告作为判断预报结果是否正确的检验标准,对各预报方法的效果进行了分析和比较,提出了积冰综合预报方法。用 37 例飞机积冰报告作检验,有 30 次预报正确,有 7 次预报不正确,积冰预报准确率达 81.1%,预报效果较好。由此可见,基于中尺度数值预报模式和产品研究开发的综合积冰预报方法对飞机积冰有较强的预报能力。

以 2001 年 1 月 4 日为例。当日,某部在开封进行飞行训练。13 时 06 分、13 时 12 分先后有两架飞机在准备着陆阶段,下降高度至 400 m 处,因机翼、尾翼积冰,突然失速坠毁。

在 3 日 20 时 500hPa 图上,从山西南部至湖北西部有一小槽,开封处于偏西气流中。在 700hPa 图上,从河南西南部至湖北西北部有小高压,切变线位于南京、汉口、重庆一带,开封受西北西气流控制。

4 日 08 时,开封 500hPa 受西北西气流控制,中低层处于槽前,地面为冷高压控制。100km 以南有雨区。

12 时 30 分,飞机侦察天气:400 m 入云,1500 m 云上碧空。

图 3 图 4 分别为本系统制作的 1 月 4 日 08 时 950hPa 6 小时、12 小时飞机积冰综合预报图。图 5 为 1 月 4 日 08 时 850hPa 6 小时飞机积冰综合预报图。从图中可以看出,系统准确地预报出在近地面层较低高度上有轻—中度积冰区,位于开封、郑州、武汉一带,而 850 hPa 以上飞行空域内没有积冰。飞机较长时间在有利于积冰的云中飞行,造成了机翼、尾翼积冰。

图 6 图 7、图 8 分别为系统采用的单种方法诊断的 1 月 4 日 08 时 950hPa 6 小时飞机积冰预报图,其中,RAOB 积冰预报方案、NAWAU 积冰预报方案、RAP 积冰预报方案较好预报出了积冰区域和高度。

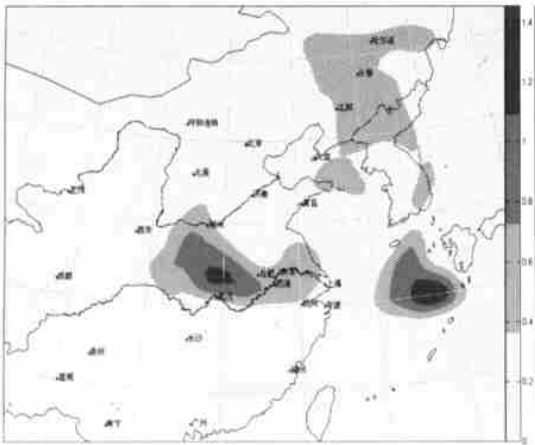


图 3 1 月 4 日 08 时 950hPa 飞机积冰 6 小时预报图

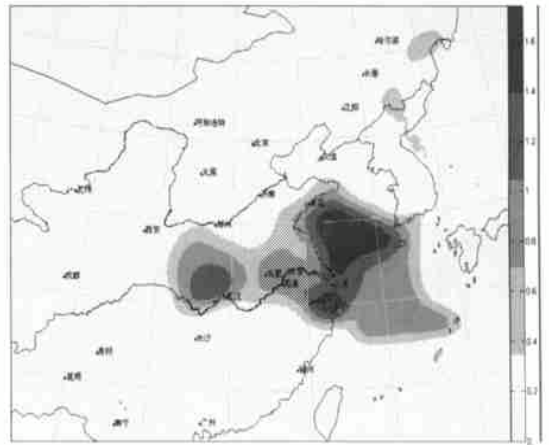


图 4 1 月 4 日 08 时 950hPa 飞机积冰 12 小时预报图

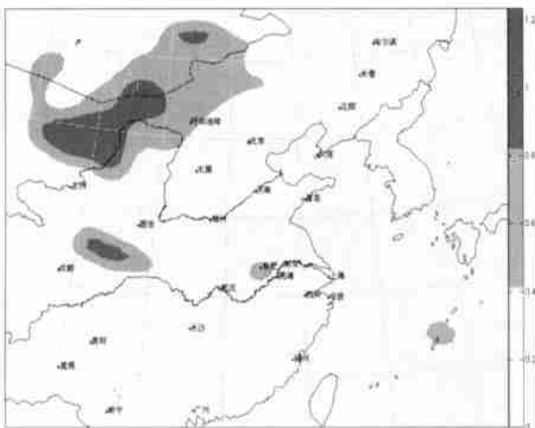


图 5 1 月 4 日 08 时 850hPa 飞机积冰 6 小时预报图

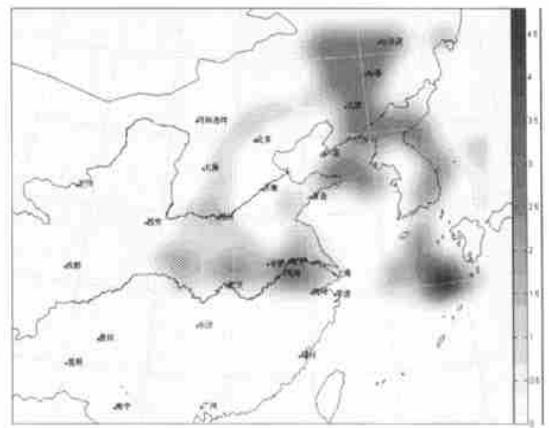


图 6 1 月 4 日 08 时 950hPa RAOB 方法飞机积冰 6 小时预报图

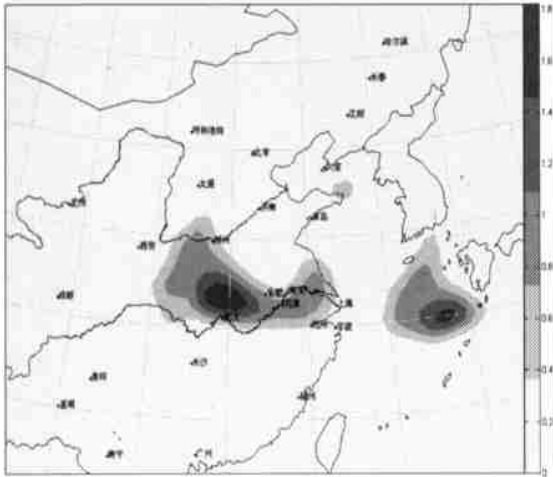


图7 1月4日08时950hPa NAWAU方法飞机积冰6小时预报图

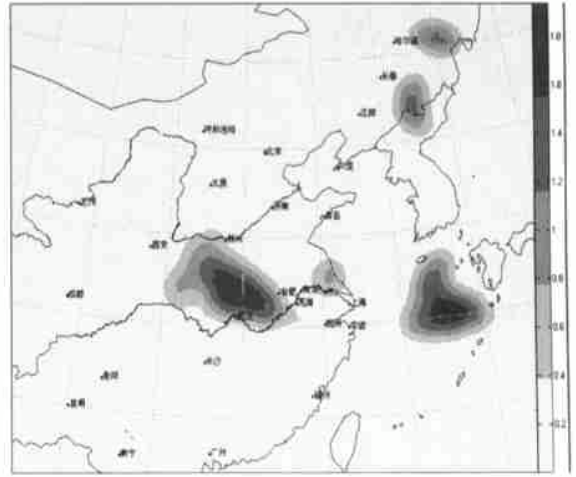


图8 1月4日08时950hPa RAP方法飞机积冰6小时预报图

5 讨论

(1) 本文采用 MM5 中尺度模式,根据云、积冰影响飞行活动的特点,提高中低层的垂直分辨率,将模式的中低层特别是 850hPa 以下的低层增加垂直分层(6 层)。提高了对小尺度现象的识别和预报能力,为积冰预报提供更细致的背景场。这样对于飞机的起飞、着陆阶段及飞行高度低的中小飞机来说,增加了预报的依据和可靠性。

(2) 对几种积冰算法进行了对比试验,结果表明,RAOB 积冰预报方案、NAWAU 积冰预报方案、RAP 积冰预报方案预报效果较好;而 STOVEPIPE 飞机积冰算法特别侧重于强度在中度以上的积冰,依赖于地面观测网的时空密度,预报时效短(12 小时以内);SKEW 算法预报严重积冰效果较好。

(3) 通过对比分析国内外已成熟的积冰预报方法发现,传统的统计预报方法没有生命力。在现有的观测探测系统下,要想进一步改进提高基于模式输出基本物理量场的积冰算法的预报准确率也是十分困难的。而研究合理的云微物理参数化方案、直接利用模式显式预报的云中液态水含量等与积冰关系密切的云参数来识别积冰潜在性的预报算法^[9],以及应用卫星遥感观测资料来判识飞机积冰区等方法^[10],具有较好的前景。

参考文献

- 1 Garriere J M, Alquier S, christine L B, et al. Statistical verification of forecast icing risk indices. *Meteorol. Appl.*, 1997, 4: 115 - 130
- 2 Schwartz B. The Quantitative use of PIREPs in developing aviation weather guidance products. *Wea. Forecasting*, 1996, 11: 372 - 384
- 3 Bruintjes B T and Thompson G. A case study of a moderate to severe icing event due to freezing drizzle during the wisp 1994 field program. 14th Conf. On WAF, 1994
- 4 Cober S G, George A I and Strapp J W. Aircraft Icing Measurements in East Coast Winter Storms. *J. Appli. Meteor.*, 1995, 34: 88 - 100
- 5 Bernstein B C. A new technique for identifying locations where supercooled large droplets are likely to exist: the stovepipe algorithm. 15th Conf. On WAF, 1996
- 6 Thompson G, Bruintjes P T, Brown B G et al. Intercomparison of in-flight icing algorithms. *Wea. Forecasting*, 1997, 12: 878 - 889
- 7 Smith T L, Ramer J E and Benjamin S G. MAPS forecasts of aviation - impact variables. 6th Conf. On Aviation Weather Systems, 1995. 51 - 56
- 8 Lankford T T. Aircraft Icing: A Pilot's Guide, 1999. 1 - 218
- 9 Tremblay A. Explicit mesoscale forecasts of aircraft icing regions. 6th Conf. On Aviation Weather Systems, 1995. 237 - 242
- 10 Ellrod G P. Remote sensing of aircraft icing regions using goes multispectral imager data. 15th Conf. On WAF, 1996
- 11 Politovich M K, Sand W R. A proposed icing severity index based upon meteorology. 4th International Conference on Aviation Weather Systems, 1991. 24 - 27

OPERATIONAL FORECAST TECHNIQUE OF AIRCRAFT ICING

Wang Hongfang^{1,2} Liu Jianwen² Ji Fei² Dong Peiming²

(1 Physics School Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: An analysis and study of icing physics and conditions are made. Experiments and comparisons of different icing algorithms are performed. An operational icing potential forecasting technique is developed with MM5 numerical model. An objective verification is conducted by using observed pilot reports of icing and operational model output. The results show that the probability of detection is up to 81%.

Key word: aircraft icing, MM5, numerical model