

# 云微物理参数在飞机积冰分析和预报中的应用研究

曹丽霞<sup>1,2</sup> 纪飞<sup>2</sup> 刘健文<sup>2</sup> 白浩<sup>2</sup> 王新炜<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2. 空军航空气象研究所)

## 提 要

对飞机积冰预报的现状进行了分析,介绍了积冰预报中云微物理参数的应用概况,并就积冰预报中云微物理参数的应用前景进行了分析和讨论。将模式模拟和卫星反演的微物理参数引入飞机积冰分析和预报,将进一步提高飞机积冰预报的准确性和合理性。

**关键词:** 飞机积冰预报 云微物理参数 检验

## 引 言

飞机积冰作为一种航空危险天气,是指当飞机在含有过冷却水滴的云雨层中飞行,机体表面温度在摄氏零度以下时,机身表面一些部位产生冰层聚积的现象。它主要由飞机在云中或降水区中飞行时,过冷云滴或降水中的雨滴碰撞机身产生冻结而形成,也可由水汽直接在飞机外表面上凝华而形成。

飞机积冰将使飞机空气动力学性能恶化,表现为升力减小,阻力增大,增加飞行的油耗,妨碍静压系统仪表指示,严重影响飞机的安全性和操纵性。近年来随着航空技术的飞速发展,飞行速度和飞行高度明显提高,机身防冰、除冰设备日趋完善,飞机积冰的危害在一定程度上有所减少,但中高速飞机在起飞、着陆阶段以及在严重积冰天气区中飞行,同样可能发生积冰现象甚至导致飞行事故。因此,飞机积冰仍是影响飞行安全的较大隐患,飞机积冰预报目前是航空气象业务预报保障的主要内容之一。

### 1 飞机积冰的分析预报

传统的飞机积冰分析和预报多采用天气学方法,一般先根据飞行区域的天气形势及飞行高度的温湿条件定性判断是否有可能出现积冰,当天气形势和飞行高度层上的温湿

条件有利于积冰时,再选择其他一些方法或指标作进一步判断。将云微物理参数引入飞机积冰预报是近年来积冰预报研究一个新的发展方向。1992年美国国家大气科学中心提出了利用液态水含量、温度以及云滴的中位数体积直径等与积冰关系密切的云微物理参数来判识积冰强度的积冰严重性指数方法<sup>[1]</sup>,该方法在实际验证中取得了较好的结果。王洪芳等<sup>[2]</sup>分析了飞机积冰形成的物理过程和影响因子,从宏观和微观两个角度对传统的积冰预报指标和积冰严重性指数方法进行试验对比,建立了飞机积冰集成预报模型。李耀东等<sup>[3]</sup>采用暖云方案和积云参数化方案对与飞机积冰有关的云参数进行预报,得到了基于数值预报模式的一些积冰预报结果。多次外场试验数据也说明云微物理参数能代表云层的主要性质,通过对云微物理参数的研究可以对飞行潜在积冰区的云层环境有更好的了解。因此,将目前发展比较成熟的云微物理研究方法引入飞机积冰分析和预报方案中,是提高飞机积冰预报水平的一个有效途径。

### 2 云微物理参数的应用

飞机积冰预报,实际上是对在一定温度下云环境中云场分布和云的性质的一种预

测。云的微物理过程不仅包括尺度范围从  $10^{-2} \sim 10^5 \mu\text{m}$  各种微观粒子的变化,还涉及到云中宏观、微观过程相互作用对微物理过程的影响。大量外场试验和研究试验表明:飞机积冰主要受两个过程控制,一是过冷云滴碰撞机身产生;二是由于局地热量输送过程产生机身的冻结。在这两个过程中,云的环境温度、过冷水的含量和云滴浓度及大小是影响飞机积冰的主要因素。目前,可通过云模式模拟和卫星遥感推导所得到的液态水含量结合环境温度进行判断来得到对过冷水含量的预报信息。

## 2.1 云模式

云模式是研究云微物理过程的主要方法之一。云模式包括对流参数化云方案和显式云方案两种。其中,对流参数化方案以云微物理过程与大尺度环境之间的相互作用为主要研究对象,这里不做详细描述。显式方案以云物理过程作为主要研究对象,包括暖云模式和混合相云模式。暖云模式(或暖云方案)中只包含两个预报量云水  $Q_c$ 、雨水  $Q_r$ ,在温度高于  $0^\circ\text{C}$  时理解为云滴比质量和雨滴比质量,在温度低于  $0^\circ\text{C}$  时理解为冰晶和雪晶,没有  $0^\circ\text{C}$  下云水的存在,不适合进行过冷水的研究;混合相云模式(或混合相云方案)将水凝物分为云水、雨水、冰晶、雪、霰、雹等,细致地考虑了云中冰相过程,云中降水粒子的源汇,以及云中冰相水凝物的凝华、冻结和融化潜热等过程,对大气中的热力、动力反馈作用描述更加客观细致,预报结果中的云水和雨水中包含了有关过冷水的信息,可用于积冰分析和预报。

经过多年来许多学者的研究和完善,混合相云模式(或云方案)已取得了一些较为成熟的研究理论。胡志晋<sup>[4]</sup>提出一个比较完整的层状参数化微物理模式,推导了 18 种包括冰相过程在内的云微物理过程中水汽、云滴比水量和冰晶、雨滴、霰、雹的群体比水量和比浓度的转化率。J. Reisner<sup>[5]</sup>等设计了一个基于云显式物理方案和具有三种水汽现象选项的微物理方案,并在中尺度模式 MM5 中

调试,其预报结果与两次观测冬季风暴试验的实况相一致。Andre 等<sup>[6]</sup>由现行云微物理方案进行简化得到一个混合相态的云方案,其中考虑了整层水含量在低于冰点的温度下液态和固态的划分。刘公波<sup>[7]</sup>提出一个混合相层状云的云模式,包含了云滴、雨滴、冰晶、雪、霰的比质量和比浓度共 7 个预报量。胡志晋等<sup>[8]</sup>提出一个混合相云降水显式方案,预报云水(冷区为过冷水)和降水(冷区为冰雪,暖区为雨)2 个云物理量,考虑了 7 种云微物理过程。

另外,中尺度数值模式随着模式的水平分辨率提高也建立了相关的显式云物理过程,如 MM5、ARPS 和 RAMS 等中尺度模式都包含有详细云微物理过程的较复杂的混合相云方案<sup>[9]</sup>。以 MM5 为例,除简单的暖云方案不包括冰相过程外,总共有 6 种包含混合相的显式云物理方案,简单冰相方案、混合相方案及物理过程比较详尽的 Goddard、Reisner 霰方案都考虑了冰相过程(表 1)。

表 1 MM5 模式的显式微物理方案及预报量

模式中选项	显式云物理方案	云微物理参数预报量
3,4	Simple ice phase	$Q_c, Q_r, Q_i, (Q_i, Q_s)$
5	Mixed ice phase	$Q_c, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s$
6	Goddard	$Q_c, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g$
7	Reisner	$Q_c, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g, N_i$
8	Schultz	$Q_c, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g$

上述云模式(或云方案)都可以预报出云层中云水和雨水及云层的温度值,但模式结果本身不能对过冷水含量做出直观的预报,还要结合温度值对模式预报的云水量和降水量进行定性的划分或经验的推导<sup>[2]</sup>来得到过冷水的含量和范围。其中,特别强调的一点是,云模式(或云方案)中必须考虑冰相过程的存在。云模式的不断发展提供了微观角度上积冰分析预报的有效途径,通过模式之间及模式与实况之间合理的对比验证选择出效果好的积冰预报方法,在天气学积冰预报方法基础上建立包含云微物理参数的集成预报流程,将是未来飞机积冰业务预报的发展方向。

## 2.2 卫星遥感资料推导云参数

近年来,由卫星遥感资料进行云物理参数的研究已成为国际上热门的研究课题,而辐射传输模式的发展和不断完善为卫星资料推导云物理参数研究提供了有利条件。例如,LOWTRAN (Kneizys 1983) 和 MODTRAN (Berk 1983) 系列<sup>[10]</sup>是计算大气透过率及辐射的软件包,分别能以  $20\text{cm}^{-1}$  和  $2\text{cm}^{-1}$  的光谱分辨率计算大气透过率、大气背景辐射、单次散射的阳光和月光的辐射亮度、太阳直射辐照度。为了提高有云状态下辐射值的计算, P. Ricchiuzzi<sup>[11]</sup> 开发了 SBDART 辐射传输模式,计算了晴空和有云状况下地球大气和表面的平面平行大气辐射过程。模式中运用了离散坐标法的辐射传输软件包——DISORT,用标准矩阵解法直接由齐次微分方程组求特征值,使得计算效率大为提高。

随着辐射传输模式的成熟,利用卫星资料推导云层中的液水含量和云滴大小也取得了一定的进展。罗云峰等人<sup>[12]</sup>利用 Eddington 近似及有云大气的微波辐射传输模式,对辐射亮温与云高及云中含水量的关系进行了计算。赵增亮<sup>[12]</sup>利用 NOAA-AVHRR 资料结合 SBDART 辐射传输模式较精确计算出云的光学厚度和云滴的有效粒径。

王新炜等<sup>[13]</sup>利用辐射传输模式结合 MODIS 卫星资料计算出过冷水含量及云滴中值直径,并引入严重积冰指数  $I_n$  方法<sup>[1]</sup>进行飞行积冰潜在区的识别。EOS/MODIS 卫星高分辨率资料的第 1 通道 ( $0.64\mu\text{m}$ ) 云的反射函数主要依赖于云的光学厚度,第 20 通道 ( $3.75\mu\text{m}$ ) 云的辐射值主要依赖于云滴的有效半径。引入 SBDART 辐射传输模式,分别用两个通道的资料来反演云的光学厚度和有效粒径;由 SBDART 模式直接得到云层平均消光系数并根据有效粒径计算出云层的液态水含量,从而确定云滴谱分布,得到对应谱形的中位数体积直径。根据液态水含量、温度以及云滴的中位数体积直径计算积冰严重性指数,实现了对飞机积冰区域的有效识别。图 1 是 SBDART 模式对 2002 年 11 月 22 日个例进行的计算结果,已得到了飞机报告的

验证。

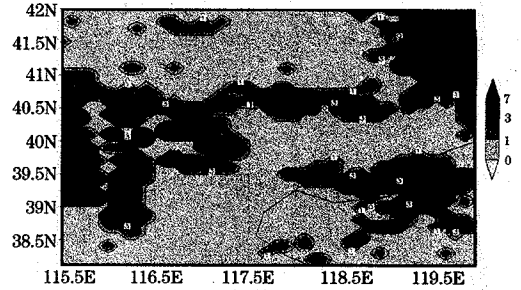


图 1 用 SBDART 辐射传输模式反演结果对飞机潜在积冰区的识别分布图(850hPa)

(晴空区:0,轻度积冰:1,中度积冰:3,严重积冰:7)

用卫星观测进行云层特性分析也是进行云微物理参数研究的一个新的途径。目前,对卫星云资料的分析正朝着客观合理的云图自动数字分析技术发展,并在云相态、云参数等云性质的反演上取得了初步成果。例如,在云参数反演方面,同步物理反演法 SPRM<sup>[14]</sup>和改进后的同步物理反演法 ISPRM<sup>[14]</sup>在同步反演云参数结果的应用试验中已得到较好的效果。云相态研究方面,已突破了传统意义上主观性较强的云图分类法,提出了根据云的光谱性质识别云相态的多光谱分类法——双光谱法<sup>[15]</sup>及较先进的多光谱法<sup>[16]</sup>和用可见光通道对云相态的分类<sup>[17]</sup>。

周著华等<sup>[17]</sup>利用多光谱法进行了 EOS/MODIS 遥感资料云相态分析的应用研究。使用 MODIS 通道 29、31、32 的亮温数据分别对云场进行相态分类,并将可见-近红外反射函数法与红外三光谱法进行直接比较,得出结合可见光技术和三光谱法的多光谱云相态分类方法。由 2002 年 5 月 4 日个例的云相态分析结果(图略)和 MM5 模式模拟的云冰参数结果比较<sup>[17]</sup>可看出:云相态反演结果反映存在云冰区;模式结果中四个层次上区域的左上角都存在一个云冰含量极大值区;较高层次(250hPa、200hPa)上,区域的右底部则有大片云冰含量极大值区。两种方法都能较好地体现几块大冰云区的整体分布,且结果较一致。

辐射传输模式和反演方法结合时空范围较广、分辨率较高的卫星资料进行云微物理

参数的推导,是云模式进行积冰分析和预报的有效补充。随着卫星资料的接收技术和反演方法的不断成熟完善,遥感资料的应用在飞机积冰分析和预报中也必将产生重要的作用。

### 3 总结与讨论

随着云物理学研究内容的不断丰富和深入,对与飞机积冰有关的云微物理参数也有了更详细具体的研究方法,这无疑给飞机积冰分析和预报提供了一个新的思路。在数值模式和遥感资料的反演逐渐成为飞机积冰分析和预报的主要方法的同时,模式性能的改进有赖于利用更为详细的外场观测事实所揭示出的物理机制的新认识。通过较为准确的外场观测资料对数值结果和推导结果的验证能充分地发现模式和推导方法中存在的问题,并加以改进,从而为预报工作提供更可靠的研究手段。

外场观测是认识云物理过程的最重要的途径,其中机载资料作为直接入云获得的探测资料,能提供准确可靠的实况数据,并真实地反映云层的微物理特性。云模式模拟和卫星资料的反演和推导虽然可获得云的微物理参数,但这些结果能否直接用于积冰业务预报,还必须用外场实况观测来进行检验。目前,外场试验中普遍使用的PMS机载探测系统可进行云中不同直径(从 $0.15\sim 6400\mu\text{m}$ )粒子的观测,其观测结果包括云层中的粒子数浓度、云层液态水含量和粒子尺度大小及谱型分布,提供的粒子信息有云中粒子模式的区分、粒子谱的演变特点、含水量的空间分布、云中降水转化率分析等。利用机载观测资料提供的信息从多种角度验证卫星反演模拟结果、云微物理模式模拟结果,能发现模式中产生的误差及其产生原因,有利于模式的发展和完善。另外,在机载观测受诸多因素影响,获取资料有限的情况下,各种模式结果之间合理的对比可从补充验证的角度来分析各种方法的异同之处。

### 参考文献

- 1 Daniel Cornell, Christopher A. Donahue, Chan Keith. A Comparison of Aircraft Icing Forecast Models. Air Force Combat Climatology Center(AFCCC/SYT). Scott AFB, 1995, 12 IL 5125—5136.
- 2 王洪芳,刘健文,纪飞等.飞机积冰业务预报技术研究.气象科技,2003,31(3):140~145.
- 3 李耀东,金维明,王炳仁等.建立在数值预报系统上的航空气象要素预报试验.应用气象学报,1997,8(4):486~491.
- 4 胡志晋,严采繁.层状云微物理过程的数值模拟(一)—微物理模式.气象科学研究院院刊,1986,1(1):37~52.
- 5 Reisner, J. R. M. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. Quart. J. R. Met. Soc., 1998, 124(548): 1071—1107.
- 6 Andre Tremblay et. al. A mixed-phase cloud scheme based on a single prognostic equation. TELLUS, 1996, 48A: 482—500.
- 7 刘公波,胡志晋,游来光.混合相层状云系模式和中尺度低涡云系的实例模拟.气象学报,1994,52(1):77~88.
- 8 胡志晋,楼小凤,包绍武等.一个简化的混合相云降水显式方案.应用气象学报,1998,9(3):257~264.
- 9 楼小凤,胡志晋,王鹏云等.中尺度模式云降水物理方案介绍.应用气象学报,2003,14(3)增刊:49~59.
- 10 吴北婴.大气辐射传输实用算法.北京:气象出版社,1998:17~20.
- 11 Paul. Ricchiazzi, Shiren Yang, Catherine Gautier, and David Sowle. SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radioactive Transfer in the Earth's Atmosphere. Bulletin of The American Meteorological Society, 1998, 79(10):2101—2114.
- 12 赵增亮.用卫星资料反演云的光学厚度和有效粒径简介.大气环境研究,2001,(14):83~87.
- 13 王新炜,白洁,刘健文等.SBDART辐射传输模式在飞机潜在积冰区反演中的应用.气象科技,2003,31(3):152~155.
- 14 黎光清,张文建,董超华.同步物理反演方法改进试验.中国空间科学技术,1991(12),气象卫星遥感反演和应用论文集,北京:海洋出版社:104~109.
- 15 P. K. Rao等编,许健民等译,气象卫星—系统、资料及其在环境中的应用,北京:气象出版社:403~412.
- 16 周著华,白洁,刘健文.卫星云相态反演研究进展.卫星航空气象科技,空军第七研究所,2002,(6):38~42.
- 17 周著华.EOS/MODIS多光谱云相态识别技术应用研究,解放军理工大学气象学院硕士论文,2003:61~74.

# On Application of Cloud Microphysical Parameters to Aircraft Icing Forecasting

Cao Lixia<sup>1,2</sup> Ji Fei<sup>2</sup> Liu Jianwen<sup>2</sup> Bai Jie<sup>2</sup> Wang Xinwei<sup>2</sup>

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101;

2. Air Force Meteorological Institute)

## Abstract

The developments of aircraft icing forecasting and of research on cloud microphysics parameters is reviewed. The application of the cloud microphysical parameters to aircraft icing forecasting is analyzed and discussed. When model simulated and satellite retrieved cloud microphysical parameters are applied to aircraft icing forecasting, the accuracy and rationality would be improved.

**Key Words:** aircraft icing forecasting cloud microphysics parameter examination