

卞双双,何宏让,安豪,等,2019.飞机积冰预报算法对比及其集成预报模型研究[J].气象,45(10):1352-1362. Bian S S, He H R, An H, et al, 2019. Comparative analysis of aircraft icing forecasting algorithms and research on ensemble prediction model [J]. Meteor Mon, 45(10):1352-1362(in Chinese).

## 飞机积冰预报算法对比及其集成预报模型研究\*

卞双双<sup>1,2,3</sup> 何宏让<sup>2</sup> 安豪<sup>3</sup> 潘晓滨<sup>2</sup> 张云<sup>2</sup>

1 山东省临沂市气象台,临沂 276000

2 国防科技大学气象海洋学院,南京 211101

3 北京应用气象研究所,北京 100029

**提 要:**以人工增雨作业获取的飞机积冰实例资料为基础,利用 WRF 模式对 51 次飞机积冰过程进行数值模拟,对比分析了常用七种积冰预报算法对积冰潜势区和强度的预报效果,进而采用评分权重集成法建立了飞机积冰强度集成预报模型,并检验了其预报效果。结果表明:(1)假霜点温度经验法对 2002 年 4 月 4 日积冰个例的预报效果与实况一致,而其他积冰算法预报效果均与实况相差较大;(2)对 51 次飞机积冰预报效果进行统计检验发现,假霜点温度经验法的预报效果最好,积冰强度预报准确率为 72.55%,其次是 RAOB 法,IC 指数法和 I 积冰指数法次之,改进的 IC 指数法预报准确率最差,只有 19.61%;(3)对比不同积冰算法建立的集成预报模型的预报效果发现,选用 IC 指数法、假霜点温度经验法、RAOB 法进行集成预报时,预报准确率最高,且漏报率、偏弱率及偏强率均能控制在 10%以内,比单一预报算法中的最高预报准确率提高了 8%,且漏报率降低了 4%,偏强率降低了 8%。

**关键词:**飞机积冰,数值模拟,积冰预报算法,评分权重法,集成预报模型

**中图分类号:** P456, P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.002

## Comparative Analysis of Aircraft Icing Forecasting Algorithms and Research on Ensemble Prediction Model

BIAN Shuangshuang<sup>1,2,3</sup> HE Hongrang<sup>2</sup> AN Hao<sup>3</sup> PAN Xiaobin<sup>2</sup> ZHANG Yun<sup>2</sup>

1 Linyi Meteorological Observatory of Shandong Province, Linyi 276000

2 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

3 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029

**Abstract:** Based on the aircraft icing data which were obtained from the artificial rainfall enhancement, this paper uses the Weather Research and Forecasting Model to simulate 51 aircraft icing processes, contrasts and analyses the prediction results of icing potential area and intensity forecasted by seven kinds of commonly-used icing forecasting algorithms, then utilizes the score weight integration method to establish the ensemble forecasting model of aircraft icing intensity, and tests its forecasting effect. The results show that (1) in forecasting an icing case that occurred in 4 April 2002, the forecasting effect of the false frost point temperature empirical method is consistent with the actual condition but there are great differences between the effect forecasted by the other icing algorithms and the observed condition. (2) After the statistical test for the 51 aircraft icing forecast effects, the prediction effect of the false frost point temperature empirical method is the best, whose accurate rate of icing intensity forecast is up to 72.55%, followed

\* 国家自然科学基金项目(41375106)资助

2018 年 6 月 6 日收稿; 2019 年 8 月 5 日收修定稿

第一作者:卞双双,主要从事数值模拟与数值预报、灾害天气监测研究. Email: bianss0130@163.com

通信作者:何宏让,主要从事数值模拟与数值预报研究. Email: hehongrang@aliyun.com

by the RAOB method, IC index method and I icing index method, but that of improved IC index method is the poorest, only 19.61%. (3) By comparing the forecasting effects of the ensemble forecasting models established by different icing algorithms, we find that when using IC index method, the false frost point temperature empirical method, and RAOB method to forecast, the forecast accuracy rate is the highest, which is 8% higher than the best forecast accuracy by a single forecasting algorithm and the false negative rate, weak rate and strong rate can all be controlled within 10%, and the false negative rate is reduced by 4%, the strong rate is reduced by 8%.

**Key words:** aircraft icing, numerical simulation, icing forecasting algorithms, score weighting method, ensemble prediction model

## 引 言

飞机在由过冷水滴组成的云中飞行时,其某些部位有时会出现由于水滴冻结、水汽凝华聚积而成的冰层,即飞机积冰。飞机积冰可能会改变机翼的表面形状乃至流体动力学性质(Sand et al, 1984; Cooper et al, 1984; Politovich, 1989),因而影响飞行,甚至造成飞行事故。随着航空事业的飞速发展,军民航运输量日益增加,另外,近几年我国还推进国产大飞机计划并开展自然积冰条件下试飞(袁敏等, 2017),飞机遭遇积冰的机会也逐渐增多。因此,有效识别易产生飞机积冰的区域,准确预报飞机积冰潜势区和积冰强度,是飞行安全气象保障的一项重要内容(刘开宇等, 2005)。

近年来,国内外已有不少学者对飞机积冰进行了研究。欧美等国的研究机构通过综合考虑与积冰相关物理量的动力预报和诊断计算,提出了多个预报飞机积冰的算法(Thompson et al, 1997),例如 NODDS 积冰指数(Carriere et al, 1997)、RAOB 积冰指数(Thompson et al, 1997)、I 积冰指数(Politovich and Sand, 1991)及 SCEM(VV)指数(Carriere et al, 1997)等。上述算法主要是基于飞机积冰产生的气象条件,将影响飞机积冰的气象要素进行组合,以此提出诊断飞机积冰的方法。随着数值模式准确性的提高,天气预报和气候预测等越来越依靠数值预报的结果(朱玉祥等, 2016),国内学者主要在国外积冰算法的基础上,结合数值模式来研究飞机积冰(李耀东等, 1997)。刘旭光(2001)、刘开宇等(2005)考虑了上升运动对液滴的影响,提出了新的积冰预报指数,通过数值预报产品验证表明:新指数能更准确地预报出飞机积冰的区域。迟竹萍(2007)利用数值模式输出的物理量场,分析了积冰

潜势区,通过与实况的对比分析发现模式的预报效果较好。王鹏云和阮征(2002)利用 MM5 湿物理显式方案模拟研究了冷锋前对流云团中的云物理过程,结果显示该模式可用于对飞机积冰的直接气象因子-云中过冷水的数值预报。刘凤林等(2011)利用物理量场模拟数据结合三种积冰算法(IC, RAP, RAOB)分别进行积冰的诊断预报试验,并对比积冰报告对三种诊断预报方法进行了准确率检验。这一系列的研究表明,利用数值预报产品可以实现对飞机积冰的客观定量预报(Anthes et al, 1987; 曹丽霞等, 2004)。

随着数值预报模式的改进及大气遥感探测技术等提高,飞机积冰的分析研究及预报也拥有了更多的途径(王新炜等, 2002)。当然,不可避免的是每种方法都存在着自身的优点和不足,这使得积冰预报还是不够准确,存在错报、漏报和空报现象。因此,综合考虑和权衡不同方法来研究飞机积冰,并提高积冰的预报效果显得尤为重要。目前,利用集成预报改进预报效果的研究已经成为气象工作者研究天气、气候的重要手段之一(李勇, 2016; 王佳等, 2017)。对于很难准确预报的一些天气过程和突发性天气,集成预报方法是一个强有力的工具(彭九慧等, 2008; 智协飞等, 2010; 董全等, 2016)。该方法广泛应用于降水、气温、热带气旋等的预报(魏凤英, 1999; 赵声蓉, 2006; 张涵斌等, 2015; Yamaguchi et al, 2009; Derome et al, 2001)。

然而,在国内外公开的文献中,利用集成预报法研究飞机积冰却涉及较少。为了找出预报效果较好的飞机积冰预报方法,本文将对甘肃省人工增雨作业时获取的 51 次飞机积冰实测报告所对应的天气过程进行数值模拟,利用各种积冰预报算法,分别诊断积冰潜势区和强度,并进行预报效果的对比分析及统计检验;在此基础上,建立飞机积冰强度集成预

报模型,并对模型的预报效果进行检验评估,为今后飞机积冰的精确预报提供技术支撑(卞双双等,2016)。

## 1 资料与方法

### 1.1 试验数据及模式方案

积冰实况来源于 1999—2005 年甘肃省人工影响天气试验中飞机发生积冰情况的 51 次积冰报告,积冰报告中包含了积冰发生的时间、位置、高度、强度以及飞行速度等信息,是研究飞机积冰和判据的重要资料。所谓飞机积冰强度,即单位时间内机体表面积聚冰层的厚度或者是飞机表面冰层积聚的速度(单位:  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ),这是目前研究飞机积冰所采用的较为普遍的飞机积冰强度定义。

采用 WRF 模式对飞机积冰发生时的天气过程进行数值模拟。初始场使用美国国家环境预测中心(NCEP)逐 6 h FNL 再分析资料,其水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ (郑焘等,2018;东高红等,2018)。模式的起报时间为积冰发生前的 12 h;模拟区域中心为  $37.5^\circ\text{N}$ 、 $100^\circ\text{E}$ ;模式采用二重双向嵌套网格模式,粗网格区域格点数为  $221 \times 184$ ,网格距为 30 km,

细网格区域格点数为  $265 \times 232$ ,网格距为 10 km。试验方案的基本参数见表 1 所示。

表 1 模式基本参数设置

参数	网格(D01)	网格(D02)
分辨率/km	30	10
格点数	$221 \times 184$	$265 \times 232$
地形分辨率/m	10	2
微物理过程方案	Kessler Scheme	
积云参数化方案	Betts-Miller-Janjic Scheme	
垂直分辨率	27 层	
长波辐射方案	RRTM Scheme	
短波辐射方案	Dudhia Scheme	
近地表层方案	Monin-Obukhov Scheme	
陆面过程方案	Noah Land Surface Model	
边界层方案	Yonsei University Scheme	
积分步长/s	180	

### 1.2 积冰预报算法

目前,国内外常用的积冰预报算法主要有以下七种:IC 指数法、假霜点温度经验法、改进的 IC 指数法、I 积冰指数法、RAOB 法、改进的-8D 法、SCEM(VV)法,这些算法的具体内容见表 2,RAOB 法具体判据见表 3。本文将对这七种算法的预报效果进行个例对比分析和统计检验。

表 2 积冰预报算法表

Table 2 Icing forecasting algorithms

积冰预报算法	计算公式	积冰有无及强度等级判定条件
IC 指数法 (赵树海,1994)	$IC = [(RH - 50) \times 2] \times [T \times (T + 14) / (-49)]$	当 $0\% \leq IC < 40\%$ 时,轻度积冰; 当 $40\% \leq IC < 70\%$ 时,中度积冰; 当 $IC \geq 70\%$ 时,严重积冰。
假霜点温度经验法 (Carriere et al.,1997)	$T_{fi} = -0.15 \left( \frac{V}{100} \right)^2 (T - T_d)$	当 $T_{fi} - T \leq -0.15 \left( \frac{V}{100} \right)^2$ 时,无积冰; 当 $T_{fi} - T > -0.15 \left( \frac{V}{100} \right)^2$ 时,有积冰; 当 $T_{fi} - T > 0$ 时,有中度以上积冰。
改进的 IC 指数法 (王新炜等,2002)	$II = [(RH - 50) \times 2] \times [T \times (T + 14) / (-49)] / 10$	在 $\omega \leq -0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 前提下, 当 $0 \leq II < 4$ 时,有轻度积冰; 当 $4 \leq II < 7$ 时,有中度积冰; 当 $II \geq 7$ 时,有严重积冰。
I 积冰指数法 (Politovich and Sand,1991)	$I = 5 + \ln LWC$	当 $I < 1$ 时,无积冰; 当 $1 \leq I < 3$ 时,轻度积冰; 当 $3 \leq I < 6$ 时,轻-中度积冰; 当 $6 \leq I < 8$ 时,中度积冰; 当 $I \geq 8$ 时,重度积冰。
RAOB 法 (Thompson et al.,1997)	无	具体判据见表 3

续表 2

积冰预报算法	计算公式	积冰有无及强度等级判定条件
改进的-8D 法 (赵树海,1994)	$IC_{5f} = -KD - T, D = T - T_d$ $K = 8e^{-\left(\frac{T}{D}\right)^{\frac{1}{2}}}$	当 $IC_{5f} > 0$ 时,有积冰。
SCEM(VV)法 (李子良和潘微多, 1996)	无	当云中满足 $-15^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$ , $RH > 80\%$ , $\omega \leq -0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 有积冰。

注:RH:相对湿度(单位:%),T:温度(单位:°C),T<sub>d</sub>:露点温度(单位:°C),V:飞行速度(单位:100 km·h<sup>-1</sup>),ω:垂直速度(单位:Pa·s<sup>-1</sup>),LWC:液态水含量(单位:g·kg<sup>-1</sup>)。Note: RH: relative humidity (unit: %), T: temperature (unit: °C), T<sub>d</sub>: dew point temperature (unit: °C), V: flight speed (unit: 100 km·h<sup>-1</sup>), ω: vertical velocity (unit: Pa·s<sup>-1</sup>), LWC: liquid water content (unit: g·kg<sup>-1</sup>)。

表 3 RAOB 法具体判据

Table 3 Criterion of the RAOB method

T/°C	-8 < T ≤ 0				-16 < T ≤ -8				-22 < T ≤ -16
T - T <sub>d</sub> /°C	≤ 1		1 < T - T <sub>d</sub> ≤ 3		≤ 1		1 < T - T <sub>d</sub> ≤ 3		≤ 4
温度梯度递减率 /°C·(1000 ft) <sup>-1</sup>	≤ 2	> 2	≤ 2	> 2	≤ 2	> 2	≤ 2	> 2	
积冰类型	轻度毛冰	中度明冰	微量毛冰	轻度明冰	中度毛冰	中度混合冰	轻度毛冰	轻度混合冰	轻度毛冰

注:1 ft=0.3048 m。  
Note: 1 ft=0.3048 m。

## 2 积冰预报算法对比分析

### 2.1 一次飞机积冰个例分析

为了比较不同积冰预报算法的预报效果,首先以 2002 年 4 月 4 日 09:50—10:56(北京时,下同)在甘肃东南部地区进行人工增雨作业时发生的弱-中度以上积冰为例,利用表 2 所示的七种积冰预报算法,对比分析其预报的飞机积冰潜势区和积冰强度。根据飞机积冰报告:飞机在 5 km 左右高度上以 420 km·h<sup>-1</sup>的速度飞行时,于白银、定西、天水三地上空发生了弱-中度以上积冰,积冰厚度达 2~6 cm。根据此次积冰发生的时间,结合 3 日 20 时的初始场资料,利用 WRF 模式模拟出 4 日 10 时的数据产品,对表 2 所示的七种积冰指数进行诊断分析。其结果如图 1 所示。

由图 1a 可以看出,IC 指数法诊断的中度积冰主要位于天水的东部,而白银、定西和天水周围 IC 指数值比较小,预报为轻度积冰,其模拟效果与飞机积冰的实况报告不相符。由图 1b 和 1f 可见,假霜点温度经验法和改进的-8D 法诊断的轻度积冰以上的区域范围较广,二者模拟的积冰区域分布比较相似,但是前者可以给预报出积冰的强度,而后者只预

报出了积冰的区域分布。同时,从图 1b 还可以看出,假霜点温度经验法模拟出了白银、定西、天水三地分别有中度以上积冰、轻度积冰、中度以上积冰,与三地的飞机观测报告基本吻合。由图 1c 可得出,改进的 IC 指数法模拟出的积冰区域与图 1a 相似,但该方法在 IC 指数法基础上又增加了水汽垂直速度  $\omega \leq -0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  的限制,因此该方法预报的三地均没有积冰。由图 1d 可见,I 积冰指数法预报白银有轻度积冰,而定西和天水均无积冰。而由图 1e 和 1g 可见,白银、定西和天水三地均不在积冰条件均满足的区域,说明 RAOB 法和 SCEM(VV)法均未模拟出积冰的存在。

综合上述分析,假霜点温度经验法和改进的-8D 法预报的积冰区域与实况较吻合,并且假霜点温度经验法不仅能预报出积冰的有无,还能预报出积冰的强度;而其他积冰指数的预报结果与实况相差均较大。因此,对于此次飞机积冰个例而言,假霜点温度经验法对积冰潜势区和强度的预报效果最优。

### 2.2 统计检验分析

由于一次积冰个例的分析结果不一定具有普适性,故考虑从所有飞机积冰实测报告(51 次)资料入手,采用 WRF 模式对 51 次飞机积冰过程进行数值模拟,在此基础上,利用假霜点温度经验法诊断飞机

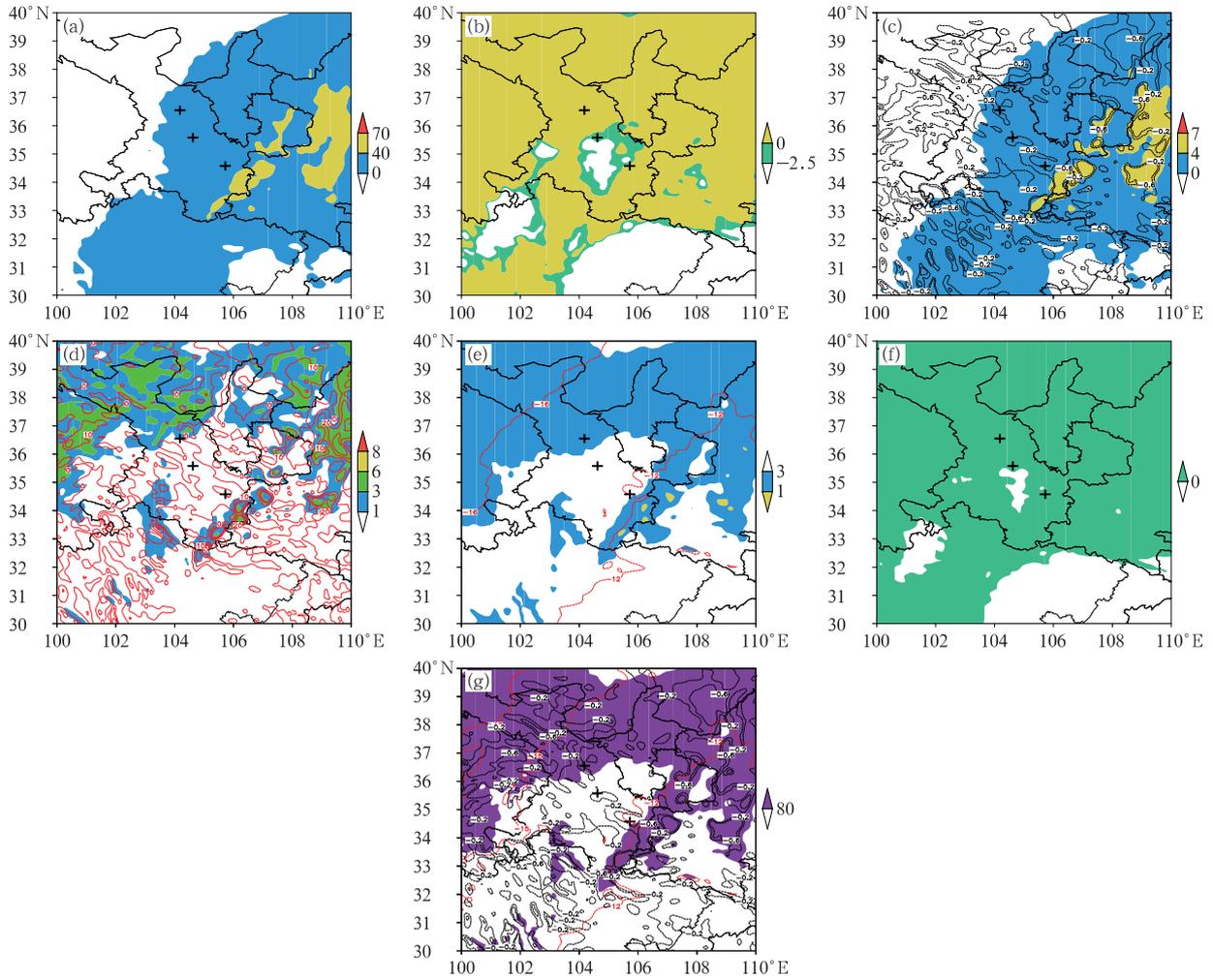


图 1 由模式输出结果计算得出的 2002 年 4 月 4 日 10 时 5 km 高度上的各积冰指数分布  
 (a)IC 指数法, (b)假霜点温度经验法, (c)改进的 IC 指数法, (d)I 积冰指数法,  
 (e)RAOB 法, (f)改进的-8D 法, (g)SCEM(VV)法  
 (阴影区:相对湿度,单位:%;实线:垂直速度,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ;细虚线:温度,  
 单位: $^{\circ}\text{C}$ ;三个“+”从上到下依次表示白银、定西和天水)

Fig. 1 Icing index distribution maps at 5 km height calculated based on the results  
 of model output at 10:00 BT 4 April 2002

(a) IC index, (b) false frost point temperature empirical method, (c) improved IC method,  
 (d) I icing index method, (e) RAOB method, (f) improved-8D method, (g) SCEM (VV) method  
 (shaded area; relative humidity, unit; %; solid lines; vertical velocity, unit;  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ ; thin dotted line; temperature,  
 unit;  $^{\circ}\text{C}$ ; three “+” symbols from top to bottom represent Baiyin, Dingxi and Tianshui, respectively)

积冰的潜势区和强度,并对预报结果进行统计分析。表 4 给出了该方法的预报结果及评定情况。

由表 4 可知,利用假霜点温度经验法预报飞机积冰强度时,预报结果准确 37 次,偏强 9 次,漏报 5 次。因此,该方法对积冰有无预报的准确率为 90.20%,漏报率为 9.80%;对积冰强度预报的准确率为 72.55%,预报偏强占 17.65%。

基于数值模拟资料,分别利用 IC 指数法、RAOB 法等其他六种积冰预报算法,对 51 次飞机积冰过程进行诊断预报和统计分析,见表 5。

由表 5 可以看出,在积冰有无预报方面,IC 指数法和假霜点温度经验法的预报准确率均达到 90%以上,且 IC 指数法的预报准确率超过了 98%;RAOB法和改进的-8D法也达到 85%以上;和 IC

表 4 假霜点温度经验法预报的飞机积冰强度及预报效果评定  
 Table 4 Aircraft icing intensity and forecasting effect assessment forecasted by the false frost point temperature empirical method

序号	积冰时间/年-月-日	积冰地点	积冰实况	预报结果	评定
1	2000-6-6	武威、山丹、古浪	弱-中度积冰	弱-中度积冰	准确
2	2000-7-2	金昌、张掖、民乐	弱积冰	弱积冰	准确
3	2000-8-6	临夏、陇西、天水	弱-中度积冰	弱-中度积冰	准确
4	2000-8-6	会宁	弱积冰	无积冰	漏报
5	2000-7-7	武威、白银	弱积冰	弱积冰	准确
6	2000-9-28	武威、张掖、兰州	中度积冰	中度积冰	准确
7	2001-4-27	白银、兰州、临夏	中度积冰	中度积冰	准确
8	2001-5-26	成县、碧口	中度积冰	中度积冰	准确
9	2001-6-17	陇西、天水、定西	弱-强积冰	弱-中度积冰	准确
10	2002-4-4	天水、定西、白银	弱-中度积冰	中度积冰	准确
11	2002-4-28	定西、靖远、白银	中度积冰	中度积冰	准确
12	2002-4-28	环县、正宁	中度积冰	中度积冰	准确
13	2002-9-4	武威、金昌、张掖	中度积冰	弱-中度积冰	准确
14	2005-5-15	天水、静宁	中度积冰	中度积冰	准确
15	2000-9-25	庆阳、平凉	弱积冰	弱-中度积冰	偏强
16	2000-9-3	武威、临夏	弱积冰	弱积冰	准确
17	2000-9-4	秦安、平凉、环县	弱积冰	无积冰	漏报
18	2000-9-4	临夏、白银、定西	中度积冰	中度积冰	准确
19	2000-9-30	临夏、定西	弱积冰	弱积冰	准确
20	2000-9-24	天水、平凉、西峰	弱积冰	弱积冰	准确
21	2000-10-15	陇西、静宁、天水	弱积冰	弱积冰	准确
22	2001-3-21	天水	弱积冰	中度积冰	偏强
23	2001-4-22	临夏、兰州、榆中	中度积冰	弱-中度积冰	准确
24	2001-4-22	陇西	中度积冰	中度积冰	准确
25	2001-5-6	金昌、武威	弱积冰	弱积冰	准确
26	2001-5-23	兰州、白银、定西	弱-中度积冰	弱-中度积冰	准确
27	2001-5-23	定西、天水、平庆	弱积冰	弱积冰	准确
28	2001-5-28	碧口	弱积冰	中度积冰	偏强
29	2001-6-11	天水、平凉、庆阳	弱-中度积冰	弱-中度积冰	准确
30	2001-8-16	临夏、定西、天水	弱积冰	弱积冰	准确
31	2001-8-17	古浪、景泰、白银	弱-中度积冰	强-中度积冰	准确
32	2001-8-26	静宁	中度积冰	中度积冰	准确
33	2001-9-18	永昌、兰州、白银	弱-中度积冰	弱-中度积冰	准确
34	2001-10-12	永昌、兰州、景泰	弱积冰	弱积冰	准确
35	2001-10-13	张掖、兰州、景泰	弱-中度积冰	中度积冰	准确
36	2002-5-1	平凉	弱积冰	弱积冰	准确
37	2002-5-13	武威、景泰、白银	弱积冰	弱-中度积冰	偏强
38	2002-6-20	张掖、武威、景泰	弱积冰	弱-中度积冰	偏强
39	2002-8-11	临洮	弱积冰	无积冰	漏报
40	2002-9-19	定西、天水	中度积冰	弱-中度积冰	准确
41	2002-10-29	静宁、华亭、平凉	弱积冰	中度积冰	偏强
42	1999-9-13	定西	弱积冰	中度积冰	偏强
43	2000-5-7	兰州、景泰、定西	中度积冰	弱-中度积冰	准确
44	2000-5-8	定西、天水、平凉	弱-中度积冰	弱-中度积冰	准确
45	2000-5-25	张掖、民乐、山丹	中度积冰	中度积冰	准确
46	2001-3-15	静宁、平凉、庆阳	中度积冰	中度积冰	准确
47	2001-5-25	景泰	弱积冰	弱积冰	准确
48	2000-7-11	平凉、西峰	弱积冰	无积冰	漏报
49	2000-8-2	兰州、定西、天水	弱积冰	无积冰	漏报
50	2000-8-13	武威、临夏、定西	弱积冰	弱-中度积冰	偏强
51	2000-8-17	平凉、庆阳	弱积冰	弱-中度积冰	偏强

表 5 七种积冰算法预报积冰有无及积冰强度的统计检验结果(单位:%)  
Table 5 Statistical results of the presence or absence of ice and ice accretion forecasted by 7 kinds of icing forecasting algorithms (unit: %)

积冰算法	积冰有无预报		积冰强度预报			
	准确率	漏报率	准确率	漏报率	偏弱率	偏强率
IC 指数法	98.04	1.96	43.14	1.96	3.92	50.98
假霜点温度经验法	90.20	9.80	72.55	9.80	0	17.65
改进的 IC 指数法	35.28	64.71	19.61	64.71	1.96	13.73
I 积冰指数法	47.06	51.94	33.33	51.94	11.76	0
RAOB 法	86.27	13.73	64.71	13.73	21.57	0
改进的-8D 法	88.24	11.76	—	—	—	—
SCEM(VV)法	31.37	68.63	—	—	—	—

指数法、假霜点温度经验法的漏报率(均在 10% 以下)相比,RAOB 法和改进的-8D 法漏报率较高,均超过 10%;其余三种方法的预报准确率较小,低于 50%,同时漏报率较大,高于 50%。其中,改进的 IC 指数法和 SCEM(VV)法漏报率最高,由这两种预报算法的公式可知,两者都附加了一个垂直上升运动条件。由于模式的分辨率越来越精细,模式输出或诊断的物理量较敏感,因此在应用时可能会存在一定误差,这可能是造成两种预报算法漏报率较高的原因。综合以上分析,IC 指数法和假霜点温度经验法对积冰有无预报的效果较好。

在积冰强度预报方面,假霜点温度经验法对积冰强度预报准确率最高,达到 72.55%;其次是 RAOB 法,准确率为 64.71%;而 IC 指数法和 I 积冰指数法对积冰强度预报的准确率次之,分别为 43.14% 和 33.33%,改进的 IC 指数法预报准确率最小,为 19.61%。此外,IC 指数法预报的积冰强度偏弱率较高,RAOB 法和 I 积冰指数法预报的偏弱率较高。

由此可见,假霜点温度经验法对甘肃地区飞机积冰有无和强度预报的效果最优,可能是由于假霜点温度经验法除了考虑环境的温度、湿度等气象因素外,还考虑了飞机的空速。这也进一步说明飞机积冰强度除了与基本气象因素有关外,还与飞行速度等其他飞机飞行参数有重要的联系(王磊等,2014)。

### 3 飞机积冰强度集成预报模型研究

#### 3.1 模型建立

通过上述统计检验结果发现,假霜点温度经验法对飞机积冰有无和积冰强度预报的准确率较高,

但强度预报准确率也只达到 72.55%。为了进一步提高积冰预报的准确率,考虑采用集成预报的思想(黄威和牛若芸,2017)对各种积冰预报算法进行综合集成。集成预报的方法有很多,例如卡尔曼滤波法、优选概率权重训练集成法、评分权重集成法(尤凤春等,2002)和多元回归集成法等。由于评分权重集成法具有建立方程简单、关系式稳定、不受样本数量限制等优点,故在样本容量不够大,各预报方法准确率相差较大的情况下,采用该方法进行集成预报可稳定提高气象要素的预报质量(Багров,1983;施能,2002)。因此,本文将采用评分权重集成法进行研究,通过取优汰劣得出预报准确率更高的预报模型。

评分权重集成法的关键是确定集成预报模型的权重,本文将根据每种预报算法的预报准确率来确定。假设  $x_i (i=1,2,\dots,n)$  表示第  $i$  种飞机积冰预报算法的预报结果,  $p_i$  表示每种方法的预报准确率,则权重系数可表示为:

$$c_i = \frac{p_i}{\sum p_i} \quad (1)$$

集成预报模型为:

$$Y = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_n x_n \quad (2)$$

式中,  $Y$  表示飞机积冰强度,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  表示  $n$  种积冰预报算法的预报结果,  $c_i$  表示权重系数。

#### 3.2 模型参数计算及统计检验分析

对于飞机积冰强度集成预报模型的参数,即权重系数,可根据上述统计出的各积冰算法预报积冰强度的准确率(表 5),并结合式(1)得出权重系数,从而获得飞机积冰强度的集成预报模型。为了便于该模型预报效果的统计检验,需要将飞机积冰强度等级进行统一划分和量化,这里将其统一为 4 个等

级,即无积冰、弱积冰、中度积冰和强积冰,分别用 0、1、2、3 来表示,集成后的积冰强度值(Y):当  $0 \leq Y < 0.5$  时为无积冰,当  $0.5 \leq Y < 1.5$  时为弱积冰,当  $1.5 \leq Y < 2.5$  时为中度积冰,当  $Y \geq 2.5$  时为强积冰。

(1) 五种积冰算法的集成预报模型参数计算及预报效果统计检验

由于改进的-8D 法和 SCEM(VV)法只能预报积冰有无,不能预报积冰强度。因此,下面主要利用其他五种积冰预报算法的预报结果进行集成预报模型的参数计算。根据表 5 所给出的每种算法的准确率,利用式(1)可计算出每种方法的权重系数分别为 0.1849、0.3109、0.0840、0.2773 和 0.1429。因此,飞机积冰集成预报模型为:

$$Y = 0.1849x_1 + 0.3109x_2 + 0.840x_3 + 0.2773x_4 + 0.1429x_5 \quad (3)$$

为了验证该集成预报模型的预报效果,将五种积冰算法预报的积冰强度按照上述的强度等级进行量化,进而代入预报模型,分别对 51 次积冰个例的积冰强度进行预报,并统计其预报的准确率。表 6 给出了该模型对积冰强度预报效果的统计分析。可见,集成预报模型的积冰强度预报准确率为 72.55%,偏弱率为 17.65%。通过和表 5 结果对比发现,集成预报方程预报积冰强度的准确率和假霜

点温度经验法相同,且积冰强度预报的偏弱率较高。可见,该集成预报方程对积冰强度预报的准确率并没有提高,原因在于改进的 IC 指数法和 I 积冰指数法的漏报率太高(均达到 50%以上),从而降低了集成预报的效果。

(2) 四种积冰算法的集成模型参数计算及预报效果统计检验

由于利用五种积冰算法集成后积冰强度预报的准确率并没有提高,故剔除其中漏报率最大的改进的 IC 指数法(漏报率为 64.71%),将其余四种积冰算法进行集成分析,集成后得到的预报模型为:

$$Y = 0.2018x_1 + 0.3394x_2 + 0.3027x_3 + 0.1560x_4 \quad (4)$$

将四种积冰算法预报出的积冰强度进行量化,并代入该预报模型进行统计分析。表 7 给出了该模型对积冰强度预报效果的统计分析。可见,此时集成法对积冰强度预报的准确率为 74.51%,偏弱率为 15.69%。经对比发现,利用四种积冰算法集成后得到的预报模型对积冰强度预报的准确率有所提高,且偏弱率也有所降低,但仍然高于 10%,分析其原因可能是由于 I 积冰指数法对积冰强度预报的漏报率仍然较高,使其预报的部分个例的积冰强度与实况相比偏低。

表 6 五种积冰算法和集成预报模型的积冰强度预报结果统计(单位:%)

Table 6 Statistical results of ice accretion forecasted by 5 kinds of icing forecasting algorithms and integrated forecasting models (unit: %)

积冰算法	积冰有无预报		积冰强度预报			
	准确率	漏报率	准确率	漏报率	偏弱率	偏强率
IC 指数法	98.04	1.96	43.14	1.96	3.92	50.98
假霜点温度经验法	90.20	9.80	72.55	9.80	0.00	17.65
改进的 IC 指数法	35.28	64.71	19.61	64.71	1.96	13.73
I 积冰指数法	47.06	51.94	33.33	51.94	11.76	0
RAOB 法	86.27	13.73	64.71	13.73	21.57	0
集成法	90.20	9.80	72.55	9.80	17.65	0

表 7 四种积冰算法和集成预报模型的积冰强度预报结果统计(单位:%)

Table 7 Statistical results of ice accretion forecasted by 4 kinds of icing forecasting algorithms and integrated forecasting models (unit: %)

积冰算法	积冰有无预报		积冰强度预报			
	准确率	漏报率	准确率	漏报率	偏弱率	偏强率
IC 指数法	98.04	1.96	43.14	1.96	3.92	50.98
假霜点温度经验法	90.20	9.80	72.55	9.80	0	17.65
I 积冰指数法	47.06	51.94	33.33	51.94	11.76	0
RAOB 法	86.27	13.73	64.71	13.73	21.57	0
集成法	94.12	5.88	74.51	5.88	15.69	3.92

(3) 三种积冰算法的集成预报模型参数计算及预报效果统计检验

这里再将漏报率较高的 I 积冰指数法剔除, 将其余三种积冰算法进行集成分析, 则得到预报方程为:

$$Y = 0.2391x_1 + 0.4022x_2 + 0.3587x_3 \quad (5)$$

将三种积冰算法预报出的积冰强度等级量划后代入预报模型, 经统计得到集成法对积冰强度预报

的准确率为 80.39%(表 8)。通过比较发现, 其准确率有了明显的提高, 漏报率、偏弱率和偏强率分别为 5.88%、3.92%、9.80%, 均控制在 10% 以内; 此时的集成预报模型对积冰强度预报的准确率比三种算法中的最好结果改进了 8%, 漏报率降低了 4%, 偏弱率降低了 8%。这表明将 IC 指数法、假霜点温度经验法和 RAOB 法进行综合集成后所得的预报模型对积冰强度的预报效果有明显的提高。

表 8 三种积冰算法和集成预报模型的积冰强度预报结果统计(单位: %)

Table 8 Statistical results of ice accretion forecasted by 3 kinds of icing forecasting algorithms and integrated forecasting models (unit: %)

积冰算法	积冰有无预报		积冰强度预报			
	准确率	漏报率	准确率	漏报率	偏弱率	偏强率
IC 指数法	98.04	1.96	43.14	1.96	3.92	50.98
假霜点温度经验法	90.20	9.80	72.55	9.80	0	17.65
RAOB 法	86.27	13.73	64.71	13.73	21.57	0
集成法	94.12	5.88	80.39	5.88	3.92	9.80

通过以上对比分析表明: (1) 在各个积冰预报算法对积冰强度预报的准确率相差较大的情况下, 采用评分权重集成法在一定程度上可提高积冰强度预报的效果。(2) 积冰预报中漏报率较高的积冰算法会影响集成模型的预报效果, 不能有效提高积冰强度预报的准确率。因此, 选择积冰强度预报准确率较高、漏报率较低的积冰算法来实现综合集成模型的建立显得尤为重要。

## 4 结论与讨论

本文针对西北甘肃地区发生的 51 次积冰过程, 利用 WRF 模式输出的高时空分辨率资料, 对七种积冰预报算法的预报效果进行了对比分析及统计检验, 并建立了积冰强度的综合集成预报模型, 得到以下结论:

(1) 对 2002 年 4 月 4 日发生的弱-中度以上积冰个例预报效果的分析表明: IC 指数法、假霜点温度经验法和改进的-8D 法均能预报出积冰的产生, 但是 IC 指数法只预报出有轻度积冰, 改进的-8D 法只能预报积冰的有无, 不能预报积冰强度; 仅假霜点温度经验法所预报的积冰强度与实况完全一致。因此, 该个例分析结果初步说明假霜点温度经验法对积冰潜势区和强度的预报效果最优。

(2) 为进一步比较不同积冰算法的预报效果, 对 51 次飞机积冰个例的预报效果进行了统计检验,

结果表明: 在积冰有无预报方面, 假霜点温度经验法和 IC 指数法预报效果最好; 在积冰强度预报方面, 假霜点温度经验法预报准确率最高, 后面依次是 RAOB 法、IC 指数法、I 积冰指数法, 而改进的 IC 指数法预报准确率最低。因此, 统计分析结果进一步说明假霜点温度经验法对积冰潜势区及积冰强度的预报效果最优。

(3) 采用评分权重集成法建立了飞机积冰强度的综合集成预报模型, 系统分析和检验了不同组合积冰算法的预报效果, 得出了用于集成预报的较优积冰算法组合及其预报方程。结果发现: 选用 IC 指数法、假霜点温度经验法、RAOB 法进行集成时, 积冰强度预报的准确率最高, 达到 80.39%, 且漏报率、偏弱率及偏强率均能控制在 10% 以内。因此, 选择恰当的积冰算法的预报结果来建立集成预报模型, 有利于提高积冰强度的预报准确率。综合上述分析, 利用单一积冰算法进行积冰预报时, 应首先考虑预报效果最佳的假霜点温度经验法; 而要获得更高的积冰强度预报准确率, 应考虑选用较优组合 IC 指数法、假霜点温度经验法、RAOB 法集成所建立的集成预报模型来进行积冰预报。但是, 由于资料的限制, 本文所选的集成方案在积冰预报的准确率上并不一定是最优方案, 但在一定程度上提高了积冰强度预报的准确率。且本文在积冰有无及强度预报中着重对准确率、漏报率、偏弱率及偏强率进行研究, 而未涉及飞机积冰空报的检验, 下一步可考虑借

助其他实测资料进行研究。此外,本文仅限于西北甘肃地区的积冰过程的模拟和研究。因此,上述主要结论是否适用于其他地区有待进一步检验。

## 参考文献

- 卞双双,何宏让,张云,等,2016.飞机积冰形势场数值模拟试验的参数化方案效果评估[J].干旱气象,34(1):106-112. Bian S S, He H R, Zhang Y, et al, 2016. Effect evaluation of parameterization schemes in numerical simulation test about aircraft icing situation field[J]. J Arid Meteor, 34(1):106-112(in Chinese).
- 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[J].气象,30(6):8-12. Cao L X, Ji F, Liu J W, et al, 2004. On application of cloud microphysical parameters to aircraft icing forecasting[J]. Meteor Mon, 30(6):8-12(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).
- 东高红,李英华,刘一玮,等,2018.天津城市热岛效应对海风(锋)环流影响的数值模拟试验[J].气象,44(6):825-836. Dong G H, Li Y H, Liu Y W, et al, 2018. Numerical simulation test of Tianjin urban heat island effect on sea breeze (front) circulation[J]. Meteor Mon, 44(6):825-836(in Chinese).
- 董全,金荣花,代刊,等,2016. ECMWF 集合预报和确定性预报对淮河流域暴雨预报的对比分析[J].气象,42(9):1146-1153. Dong Q, Jin R H, Dai K, et al, 2016. Comparison between ECMWF ensemble and deterministic forecast for heavy rainfall in the Huaihe River Basin of China[J]. Meteor Mon, 42(9):1146-1153(in Chinese).
- 黄威,牛若芸,2017.基于集合预报和支持向量机的中期强降雨集成预报试验[J].气象,43(9):1110-1116. Huang W, Niu R Y, 2017. The medium-term multi-model integration forecast experimentation for heavy rain based on support vector machine[J]. Meteor Mon, 43(9):1110-1116(in Chinese).
- 李耀东,金维明,王炳仁,等,1997.建立在数值预报系统上的航空气象要素预报试验[J].应用气象学报,8(4):485-491. Li Y D, Jin W M, Wang B R, et al, 1997. Experiment on aviation meteorological factor forecasting based on a limited area model[J]. Quart J Appl Meteor, 8(4):485-491(in Chinese).
- 李勇,2016.2011年长江中下游梅雨期强降水延伸期集合预报性能初探[J].气象,42(9):1114-1123. Li Y, 2016. Performance analysis on extended-range ensemble prediction over middle and lower reaches of Yangtze River in Meiyu period of 2011[J]. Meteor Mon, 42(9):1114-1123(in Chinese).
- 李子良,潘微多,1996.飞机积冰预报应用软件[J].气象,22(12):17-19. Li Z L, Pan W D, 1996. Applied software on the forecasting aircraft icing[J]. Meteor Mon, 22(12):17-19(in Chinese).
- 刘凤林,孙立潭,李士君,2011.飞机积冰诊断预报方法研究[J].气象与环境科学,34(4):26-30. Liu F L, Sun L T, Li S J, 2011. Study on methods of aircraft icing diagnosis and forecast[J]. Meteor Environ Sci, 34(4):26-30(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).
- 刘旭光,2001.数值预报产品在航空气象预报中的应用[J].四川气象,21(4):18-22. Liu X G, 2001. Application of numerical products in aviation meteorological forecast[J]. J Sichuan Meteor, 21(4):18-22(in Chinese).
- 彭九慧,丁力,杨庆红,2008.几种降水集成预报方法的对比分析[J].气象科技,36(5):520-523. Peng J H, Ding L, Yang Q H, 2008. Comparative analysis of several consensus precipitation forecasting methods[J]. Meteor Sci Technol, 36(5):520-523(in Chinese).
- 施能,2002.气象科研与预报中的多元分析方法:第2版[M].北京:气象出版社:70-74. Shi N, 2002. Multivariate Analysis Method in Meteorological Research and Forecast[M], 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press:70-74(in Chinese).
- 王佳,梅钦,陈钰文,2017. WRF 模式不同微物理方案水凝物的预报能力检验与集成试验[J].气象,43(5):552-559. Wang J, Mei Q, Chen Y W, 2017. Performance verification and ensemble experiments of hydrometeors forecasting by different microphysical schemes in WRF model[J]. Meteor Mon, 43(5):552-559(in Chinese).
- 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[J].气象,40(2):196-205. Wang L, Li C C, Zhao Z L, et al, 2014. Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteor Mon, 40(2):196-205(in Chinese).
- 王鹏云,阮征,2002.对华南对流云中过冷云水-飞机积冰的直接气象因子的中尺度数值预报试验[J].热带气象学报,18(4):399-406. Wang P Y, Ruan Z, 2002. Mesoscale numerical forecast for supercooled cloud water in convective cloud of South China-the main meteorological factor responsible for aircraft icing[J]. J Trop Meteor, 18(4):399-406(in Chinese).
- 王新炜,张军,王胜国,2002.中国飞机积冰的气候特征[J].气象科学,22(3):343-350. Wang X W, Zhang J, Wang S G, 2002. Climatic features of aircraft icing of China[J]. Sci Meteor Sin, 22(3):343-350(in Chinese).
- 魏凤英,1999.全国夏季降水区域动态权重集成预报试验[J].应用气象学报,10(4):402-409. Wei F Y, 1999. Regional consensus forecast method with dynamic weighting for summer precipitation over China[J]. Quart J Appl Meteor, 10(4):402-409(in Chinese).
- 尤凤春,史印山,郝雪明,等,2002.气温集成预报方法的对比试验[J].河北气象,(3):1-3. You F C, Shi Y S, Hao X M, et al, 2002. Comparative experiments of integrated temperature prediction methods[J]. Hebei Meteor, (3):1-3(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).
- 张涵斌, 智协飞, 王亚男, 等, 2015. 基于 TIGGE 资料的西太平洋热带气旋多模式集成预报方法比较[J]. 气象, 41(9):1058-1067.
- Zhang H B, Zhi X F, Wang Y N, et al, 2015. Comparison of multimodel ensemble methods for Western Pacific tropical cyclone forecast based on TIGGE data[J]. Meteor Mon, 41(9):1058-1067(in Chinese).
- 赵声蓉, 2006. 多模式温度集成预报[J]. 应用气象学报, 17(1):52-58.
- Zhao S R, 2006. Multi-model consensus forecast for temperature[J]. J Appl Meteor Sci, 17(1):52-58(in Chinese).
- 赵树海, 1994. 航空气象学[M]. 北京: 气象出版社: 159-193.
- Zhao S H, 1994. Aeronautical Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press: 159-193(in Chinese).
- 郑焘, 李晴岚, 王兴宝, 等, 2018. 台风对深港局地风影响数值模拟及地形敏感性试验[J]. 气象, 44(3):361-371.
- Zheng T, Li Q L, Wang X B, et al, 2018. Numerical simulation of the local wind influence induced by tropical cyclones and topographic sensitivity tests in Shenzhen-Hong Kong Region[J]. Meteor Mon, 44(3):361-371(in Chinese).
- 智协飞, 伍清, 白永清, 等, 2010. 基于 IPCC-AR4 模式资料的地面气温超级集合预测[J]. 气象科学, 30(5):708-714.
- Zhi X F, Wu Q, Bai Y Q, et al, 2010. The multimodel superensemble prediction of the surface temperature using the IPCC AR4 scenario runs[J]. Sci Meteor Sin, 30(5):708-714(in Chinese).
- 朱玉祥, 黄嘉佑, 丁一汇, 2016. 统计方法在数值模式中应用的若干新进展[J]. 气象, 42(4):456-465.
- Zhu Y X, Huang J Y, Ding Y H, 2016. Some new advances in application of statistical methods to numerical models[J]. Meteor Mon, 42(4):456-465(in Chinese).
- Барров Н А, 1983. 几个预报的统一[J]. 施能, 译. 气象科技, (6):26-30.
- Барров Н А, 1983. Unification of several forecasts[J]. Shi N, trans. Meteor Sci Technol, (6):26-30(in Chinese).
- Anthes R A, Hsie E Y, Kuo Y H, 1987. Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model; Version 4 (MM4)[R]. Boulder: NCAR.
- Carriere J M, Alquier S, Le Bot C, et al, 1997. Statistical verification of forecast icing risk indices[J]. Meteor Appl, 4(2):115-130.
- Cooper W A, Sand W R, Politovich M K, et al, 1984. Effects of icing on performance of a research airplane[J]. J Aircraft, 21(9):708-715.
- Derome J, Brunet G, Plante A, et al, 2001. Seasonal predictions based on two dynamical models[J]. Atmos Ocean, 39(4):485-501.
- Politovich M K, 1989. Aircraft icing caused by large supercooled droplets[J]. J Appl Meteor, 28(9):856-868.
- Politovich M K, Sand W R, 1991. A proposal icing index based upon meteorology[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Aviation Weather System:24-27.
- Sand W R, Cooper W A, Politovich M K, et al, 1984. Icing conditions encountered by a research aircraft[J]. J Climate Appl Meteor, 23(10):1427-1440.
- Thompson G, Bruintjes R T, Brown B G, et al, 1997. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part I: WISP94 real-time icing prediction and evaluation program[J]. Wea Forecasting, 12(4):878-889.
- Yamaguchi M, Sakai R, Kyoda M, et al, 2009. Typhoon ensemble prediction system developed at the Japan Meteorological Agency[J]. Mon Wea Rev, 137(8):2592-2604.