

# 基于IC指数的中国飞机积冰时空变化特征及其与大气环流的关系

杜洋<sup>1,2\*</sup>, 张潮<sup>1#</sup>, 黎鑫<sup>1</sup>, 陈秀忠<sup>3</sup>, 王三庆<sup>4</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>中国人民解放军94582部队, 河南 信阳

<sup>3</sup>新疆军区气象室, 新疆 喀什

<sup>4</sup>中国人民解放军93762部队, 北京

收稿日期: 2023年4月19日; 录用日期: 2023年5月19日; 发布日期: 2023年5月26日

## 摘要

本文利用最新一代大气再分析资料(ERA5), 基于IC指数研究了我国东部飞机积冰时空变化特征, 并进一步通过合成分析解释了其与大气环流场的内在关系。结果表明: 冬季我国飞机积冰在700 hPa高度层比较显著, 空间分布呈现出较强的地域差异, 强度主要表现为轻度积冰, 中度以上积冰集中分布在川渝交界区域, 积冰日数最多的地方出现在长江流域。对逐月积冰概率进行EOF分解的结果表明, 第一模态以31°N为界呈南北偶极型分布, 呈现出准4年和准13年的年际及年代际变化。第二模态则反映了我国中东部积冰概率的一致偏小或偏大, 并且具有显著的3.5年和6年左右的年际变化特征。不同模态对应的大气环流形势存在明显差异。积冰概率呈南北偶极型时, 我国上空存在的气旋式或反气旋环流, 通过影响水汽输送过程影响南北两侧的水汽条件, 从而改变积冰概率。当积冰概率表现为一致变化型时, 我国东北以东和西北以西的上空存在相反的环流形势, 通过在它们之间的过渡区形成一致的偏南(或偏北)气流将暖湿(或干冷)空气输送入我国中部区域, 从而改变其积冰概率。

## 关键词

飞机积冰, IC指数, 大气环流

## Spatial and Temporal Variation Characteristics of Chinese Aircraft Icing Based on IC Index and Its Relationship with the Atmospheric Circulation

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 杜洋, 张潮, 黎鑫, 陈秀忠, 王三庆. 基于 IC 指数的中国飞机积冰时空变化特征及其与大气环流的关系[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(3): 502-513. DOI: 10.12677/ccr.2023.123052

Yang Du<sup>1,2\*</sup>, Chao Zhang<sup>1#</sup>, Xin Li<sup>1</sup>, Xiuzhong Chen<sup>3</sup>, Sanqing Wang<sup>4</sup>

<sup>1</sup>College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Unit 94582 of People's Liberation Army of China, Xinyang Henan

<sup>3</sup>The Southern Xinjiang Military Region, Kashi Xinjiang

<sup>4</sup>Unit 93762 of People's Liberation Army of China, Beijing

Received: Apr. 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 19<sup>th</sup>, 2023; published: May 26<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, the latest generation of atmospheric reanalysis data (ERA5) is used to study the temporal and spatial variation characteristics of aircraft icing in eastern China based on IC index, and its intrinsic relationship with the atmospheric circulation field is further explained through synthetic analysis. The results show that aircraft icing in China in winter is more significant at the altitude layer of 700 hPa, and the spatial distribution shows strong regional differences, the intensity is mainly manifested as mild ice accumulation, moderate aircraft icing is concentrated in the Sichuan-Chongqing junction area, and the place with the largest number of aircraft icing days appears in the Yangtze River Basin. The results of EOF decomposition of the monthly aircraft icing probability show that the first mode is distributed in a north-south dipole type bounded by 31°N, showing interannual and decadal changes in quasi-4 years and quasi-13 years. The second mode reflects the small or large consistency of ice accumulation probability in central and eastern China, and has significant interannual variation characteristics of about 3.5 years and 6 years. There are obvious differences in the atmospheric circulation situation corresponding to different modes. When the ice probability is a north-south dipole type, the cyclonic or anticyclonic circulation existing over China affects the water vapor conditions on the north and south sides by affecting the water vapor transport process, thereby changing the probability of ice accumulation. When the ice probability is manifested as a uniform variation, there is an opposite circulation situation in the sky east of northeast and west of northwest China, and warm and humid (or dry cold) air is transported into the central region of China by forming a consistent southerly (or northerly) air flow in the transition zone between them, thereby changing its ice accumulation probability.

## Keywords

Aircraft Icing, IC Index, Atmospheric Circulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

飞机积冰是指在飞机穿过云、雾、雨或雪的气层时，在飞机机身表面聚积冰层的现象[1]。积冰现象不仅仅发生在飞机机翼和尾翼，在发动机进气道、螺旋桨、雷达罩、挡风玻璃及温压传感器等部位也都可能发生，显著影响了飞机的操纵稳定性、气动性能及探测系统等，对飞机安全造成了严重威胁[2] [3] [4]。近年来我国的航空事业建设发展突飞猛进，航线、航班数量增多，飞行遭遇积冰的次数也越来越多，研究飞机积冰的形成原因和物理机制，准确预报飞机积冰，对保障飞行安全有着重要的意义，也是当前航空气象领域关注的重点和难点问题。

国内外对飞机积冰的种类、强度、形成机理已经有了较多的研究，也达成了一些共识[5]-[9]。对于飞机积冰的诊断和预报，国际民航组织推荐使用 IC 指数法，此外还有假霜点判别法、SCEM 积冰指数、SFIP 指数等方法。IC 指数法是综合大气温度和湿度条件进行诊断，物理意义明确，计算简便。此外，前人的研究也表明，IC 指数法在进行飞机积冰的诊断方面，具有较高的准确率[10] [11] [12]。因此本文主要采用 IC 指数法研究飞机积冰。

另外，以往的研究更多地关注飞机积冰个例，对于飞机积冰长期的气候演变特征研究较少，对飞机积冰长期变化的原因也缺乏深入认识。事实上，飞机积冰受水汽、温度等要素的显著影响，而我国区域水汽、温度变化与大气环流及海温异常有显著的关系[13] [14] [15]。本文基于 IC 指数，研究我国区域飞机积冰的时空分布及演变特征，探究飞机积冰与大气环流变化和海温异常的关系，以期进一步提高对飞机积冰的认识，提升飞机积冰预报准确率，从而进一步增强航空气象保障能力。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 数据

本文主要采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的 ERA5 全球经纬度网格再分析资料[16]，包括温度、相对湿度和位势高度等，水平分辨率选用  $1^\circ \times 1^\circ$ ，分析时间范围为 1980 年至 2020 年。此外，本文还采用了美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)联合研制的全球大气再分析资料进行验证。研究季节选为冬季(12 月至次年 2 月；DJF)。

### 2.2. 方法

#### 2.2.1. IC 指数

研究表明，飞机在  $0^\circ\text{C} \sim -14^\circ\text{C}$  区间飞行遇有较大过冷水滴时最易积冰，强积冰区发生在  $-5^\circ\text{C} \sim -9^\circ\text{C}$  之间。IC 指数法就是根据容易积冰的温度、湿度范围进行建模计算[17] [18] [19]，其计算公式如下：

$$IC = (RH - 50) \times 2 \times \left( \frac{T \times (T + 14)}{-49} \right) \quad (1)$$

式中， $RH$  为相对湿度(%),  $T$  为温度( $^\circ\text{C}$ )。

利用 IC 指数判断积冰强度的依据如表 1 所示：

**Table 1.** IC Index and Ice Intensity Comparison Table

**表 1.** IC 指数与积冰强度对照表

IC 指数	$< 0$	$0 \leq IC < 50$	$50 \leq IC < 80$	$80 \leq IC$
积冰强度	无积冰	轻度积冰	中度积冰	强积冰

#### 2.2.2. 飞机积冰概率

本文定义的飞机积冰概率公式为：

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (2)$$

式中  $P(A)$  表示积冰发生的概率， $m$  为发生积冰的天数， $n$  为总天数。比如，某格点上 1 个月内(30 天)有 10 天 IC 指数大于 0，那么该格点当月飞机积冰概率为 1/3。由此可计算我国地区发生积冰的概率分布及时间变化特征。

### 3. 冬季我国飞机积冰的时空变化特征

图 1 为 1980~2020 年冬季纬向平均的 IC 指数(图 a)和积冰概率(图 b)分布图。可看出, IC 指数主要分布在 400 hPa 以下, 且随着纬度增高, 发生积冰的高度层变低。这主要是因为随着高度升高或纬度升高, 大气温度降低, 当温度低于 $-40^{\circ}\text{C}$ 时, 大气中过冷水滴含量显著减少, 从而飞机积冰减少。另外, IC 指数基本都在 50 以下, 表明都为轻度积冰, 这主要是多年平均的结果掩盖了中度以上积冰。从图 1(a)中还可以看出 IC 指数最大区域出现在  $28^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$  附近的 700 hPa 高度层。图 1(b)为我国冬季纬向平均积冰概率垂直分布图, 就冬季而言我国飞机积冰概率最大的位置都集中在 500 hPa 以下, 积冰概率最大可达 0.5 以上, 主要出现在  $28^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$  之间 700~600 hPa 高度层以及  $44^{\circ}\text{N}\sim 54^{\circ}\text{N}$  的 850 hPa 以下。与 IC 指数分布相似, 积冰概率的分布也呈现与积冰强度类似的形势, 即随着高度层降低和纬度增高, 积冰概率逐渐增大。综合纬向平均 IC 指数和积冰概率可知, 我国冬季积冰主要集中在 700 hPa 高度层附近, 另外, 由于我国航空活动在东部要更加频繁, 且西部地区受高原大地形影响较大, 因此, 在后续分析中主要针对东部 700 hPa 高度层进行分析。

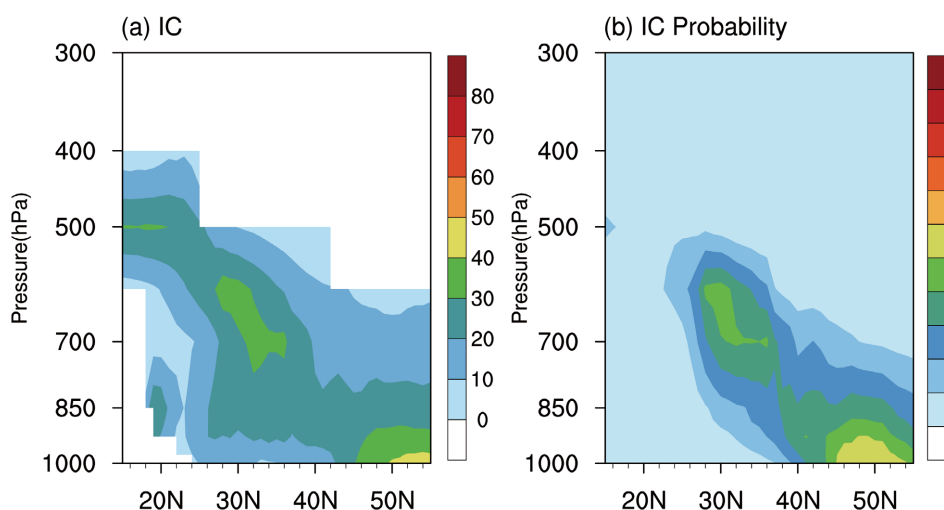
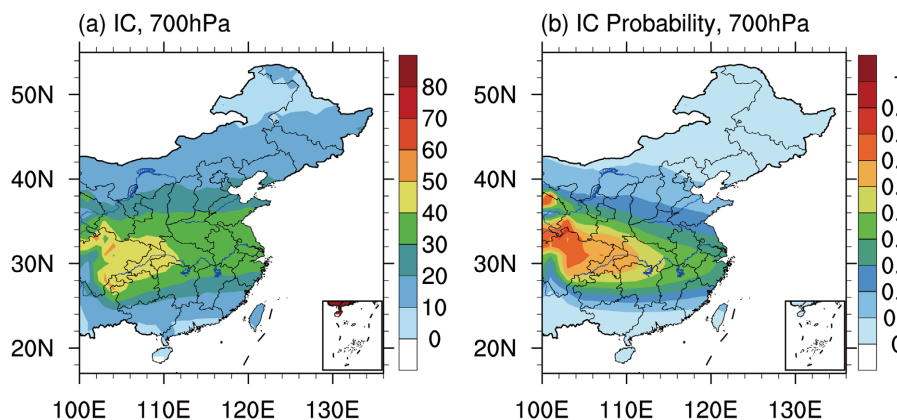


Figure 1. Winter (DJF) 1980 to 2020 Zonal average ( $72^{\circ}\text{E}\sim 136^{\circ}\text{E}$ ) (a) IC Index and (b) Ice Probability  
图 1. 1980~2020 年冬季(DJF)纬向平均( $72^{\circ}\text{E}\sim 136^{\circ}\text{E}$ )的(a) IC 指数和(b)积冰概率

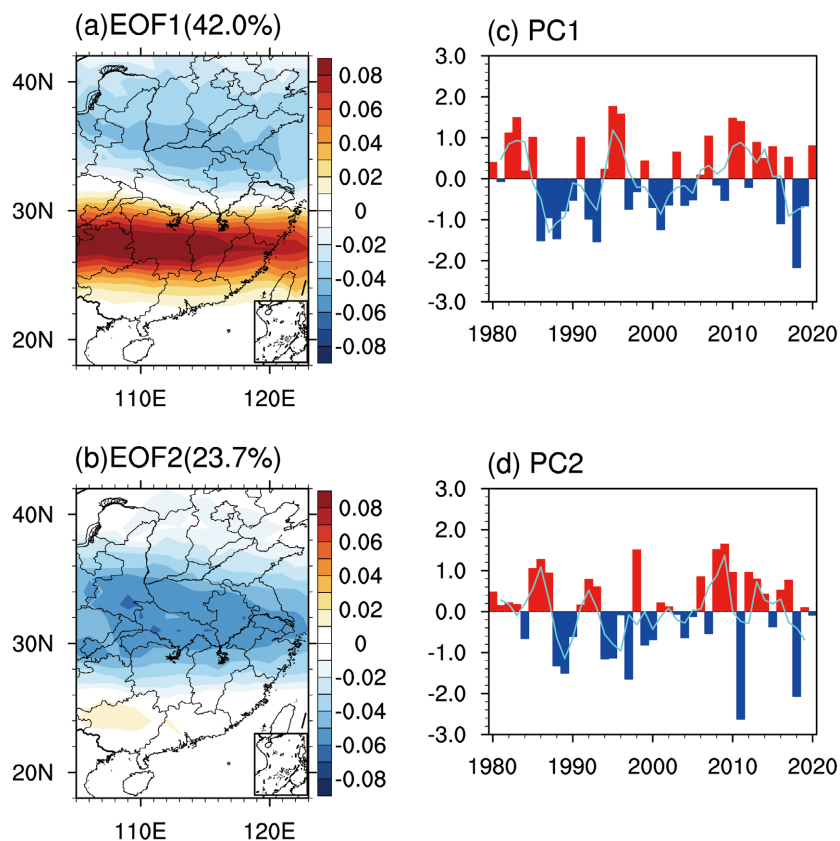
图 2 为 1980~2020 年冬季我国东部 700 hPa 多年平均的 IC 指数和积冰概率的空间分布图。可以看出, 冬季我国积冰主要集中在  $26^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$  之间的东西带状区域, 极大值出现在四川盆地, 在此区域内飞行易产生中度积冰(图 2(a))。积冰概率代表了研究区域发生飞机积冰日数占比, 与 IC 指数分布类似, 冬季我国 700 hPa 高度上积冰概率也呈现带状分布。在  $40^{\circ}\text{N}$  以北和  $25^{\circ}\text{N}$  以南我国区域, 积冰概率小于 0.1, 表示在此区域内积冰日数较少。在我国四川盆地、秦岭以及长江流域( $28^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$ )比较集中, 积冰概率普遍大于 40%。极大值出现在四川北部和重庆等地, 积冰概率超过 60%, 甚至到 70% 以上。飞机在此区域内飞行遭遇积冰的可能性较大, 需注意做好积冰预防和除冰措施。

为了进一步分析飞机积冰的时空演变特征, 利用 EOF 分析方法对我国东部区域( $104^{\circ}\text{E}\sim 124^{\circ}\text{E}$ 、 $19^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}$ ) 40 年冬季积冰概率进行分解。图 3(a)和图 3(c)分别是我国东部飞机积冰 EOF 分解的第一模态的空间分布和相应的时间系数序列。可以看到, 冬季我国东部飞机积冰概率的空间分布呈现南北偶极型分布, 其方差贡献率达到了 42.0%。从图 3(c)还可以明显看到我国东部冬季飞机积冰的时间系数呈现出 10 年左右的年代际变化特征, 即 1985~1993 年、1998~2005 年及 2016~2020 年, 时间系数为负, 1985 年



**Figure 2.** The average (a) IC index and (b) ice probability of 700 hPa for many years (1980~2020) in the central and eastern regions of China in winter

**图 2.** 冬季我国中东部地区 700 hPa 多年(1980~2020 年)平均的(a) IC 指数和(b)积冰概率



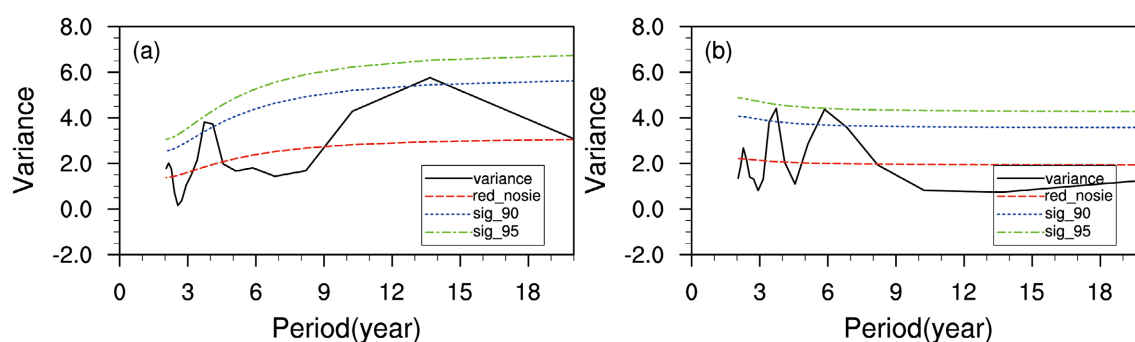
**Figure 3.** (a) The first mode of the ice probability of winter in the central and eastern regions of China and its (c) time coefficients; (b) and (d) are the same as (a) and (b), but are second modes (solid blue lines in (c) and (d) are multi-year moving averages)

**图 3.** (a)我国中东部区域冬季积冰概率的第一模态及其(c)时间系数; (b)和(d)同(a)和(b), 但为第二模态((c)和(d)中蓝色实线是多年滑动平均)

以前、1994~1997 年及 2006~2016 年时间系数为正。这表明在 1985~1993 年、1998~2005 年及 2016~2020 年, 我国东部地区在 31°N 以北区域积冰概率增大、31°N 以南区域积冰概率减少; 而在 1985 年以前、1994~1997 年及 2006~2016 年, 情况相反。另外, 也注意到, 第一模态南北两个中心的强度存在明显的

不对称特征, 南侧中心强度更强, 这表明我国长江流域以南地区的飞机积冰概率变化要强于黄河流域, 这可能与南方冬季有较多的水汽有关。另外, 从图 4(a)所示的我国东部冬季飞机积冰概率时空变化第 1 主模态时间系数的功率谱分析可以看到, 它除了 13 年周期的年代际变化外, 还有一个 4 年左右的显著年际变化特征。

冬季我国飞机积冰概率第二模态的空间分布(图 3(b))表现为在其平均位置附近的一致变化型, 大值中心集中在  $29^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$  的湖北、安徽、河南南部和江苏南部等地区, 该模态的方差贡献率为 23.7%。第二模态的时间序列(图 3(d))在 1988~1990 年、1994~2005 年和 2016 年以后都表现为持续偏小的负异常, 在 1987 年以前、1991~1993 年、2006~2015 年表现为持续偏大的正异常, 结合第二模态的空间分布特征, 这表明我国中东部在 1988~1990 年、1994~2005 年和 2016 年以后飞机积冰概率持续增大, 在 1987 年以前、1991~1993 年、2006~2015 年表现为积冰概率减小。另外, 从第二模态时间系数的功率谱(图 4(b))可以看出, 该序列存在 3.5 年和 6 年左右的显著年际振荡周期。



**Figure 4.** (a) first modal time series and (b) second time series power spectrum of EOF decomposition of aircraft ice accumulation probability EOF in winter 1980~2020 (horizontal axis is period: year; The vertical axis is the variance; Solid black line: variance; Blue and green dashed lines: 0.9, 0.95 confidence lines; Red dashed line: red noise)

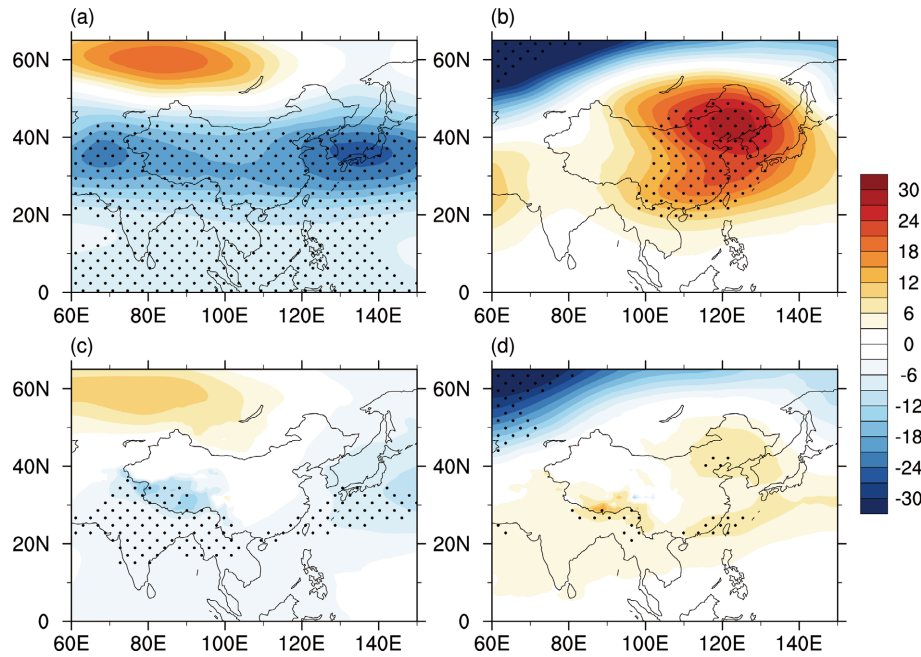
**图 4.** 1980~2020 年冬季飞机积冰概率 EOF 分解的(a)第一模态时间序列和(b)第二时间序列功率谱(横轴为周期: 年; 纵轴为方差; 黑实线: 方差; 蓝、绿色虚线: 0.9、0.95 置信度线; 红虚线: 红噪声)

#### 4. 冬季飞机积冰概率南北偶极型变化与大气环流的关系

飞机积冰的频率变化与大气的状态有密切联系, 为了进一步明确对大气环流要素场对中国东部飞机积冰概率的影响, 以不同模态的时间系数高低为依据进行合成分析。

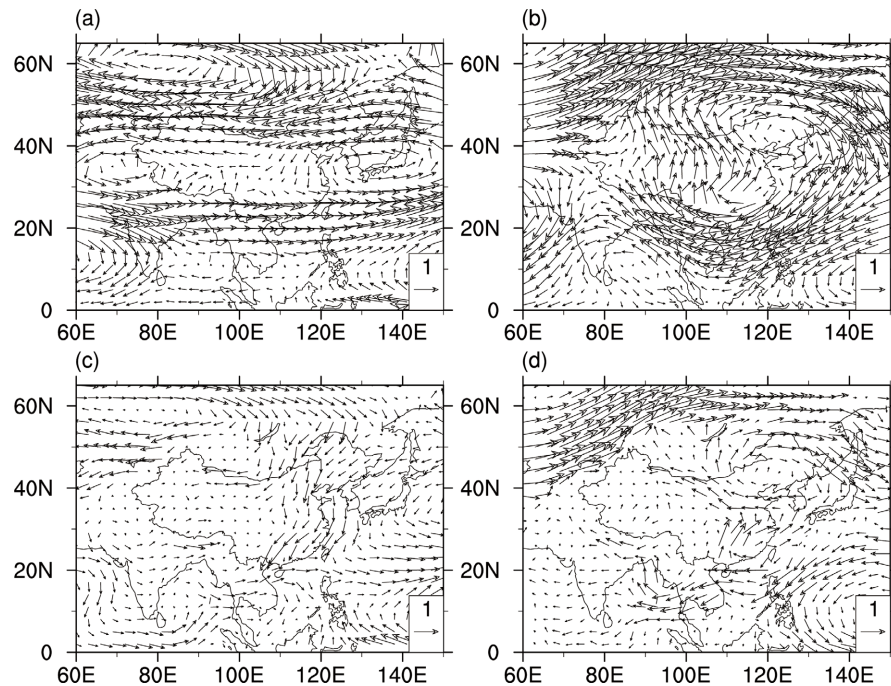
首先针对我国东部区域积冰概率第一模态的时间序列, 以 1 倍标准差为阈值筛选出高、低指数年典型年份, 分别有 9 年和 7 年。高指数年对应在我国飞机积冰概率南正北负的空间分布型, 表明南方地区积冰概率增大。图 5 为 500 hPa 和 85 hPa 位势高度场合成图。飞机积冰概率为南正北负型分布时, 500 hPa 在  $50^{\circ}\text{N}$  以北贝加尔湖以西区域有正的位势高度异常, 其中心位于  $(60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E})$  附近, 在  $50^{\circ}\text{N}$  以南的区域为负的位势高度异常, 负位势高度异常中心在  $(35^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\text{E})$  附近和  $(35^{\circ}\text{N}, 135^{\circ}\text{E})$  附近的日本岛南端, 且都通过了 95% 显著性检验(图 5(a))。在 850 hPa 上, 位势高度异常空间形态与 500 hPa 相似, 呈现出相当正压的结构, 但其异常强度较弱(图 5(c))。当飞机积冰概率为南负北正型分布时, 500 hPa 位势高度场上, 在贝加尔湖以南区域为正的位势高度异常, 异常中心位于  $(45^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{E})$  附近, 且都通过了 95% 显著性检验(图 5(b))。同样的, 在 850 hPa 上位势高度异常空间形态与 500 hPa 相似, 呈现出相当正压的结构, 但其异常强度较弱(图 5(d))。

图 6 给出了飞机积冰概率第一模态下的不同高度的风场分布。其风场分布与图 5 的位势高度场分布相对应。因此高指数年时, 在我国  $30^{\circ}\text{N}$  以北干冷空气通过偏北东气流将北部的干冷空气输送入我国北部



**Figure 5.** Potential height field synthesized by high and low index in the second mode of aircraft ice probability in winter in China in 1980~2020 (unit: dagpm). (a) is a 500 hPa potential height field synthesized in a high exponential year; (b) is a 500 hPa potential height field synthesized in a low exponential year; (c) and (d) are the same as (a) and (b), but are 850 hPa potential height fields

**图 5.** 1980~2020 年我国冬季飞机积冰概率第二模态下高低指数年合成的位势高度场(单位: dagpm)。(a)为高指数年合成的 500 hPa 位势高度场; (b)为低指数年合成的 500 hPa 位势高度场; (c)和(d)同(a)和(b), 但为 850 hPa 位势高度场

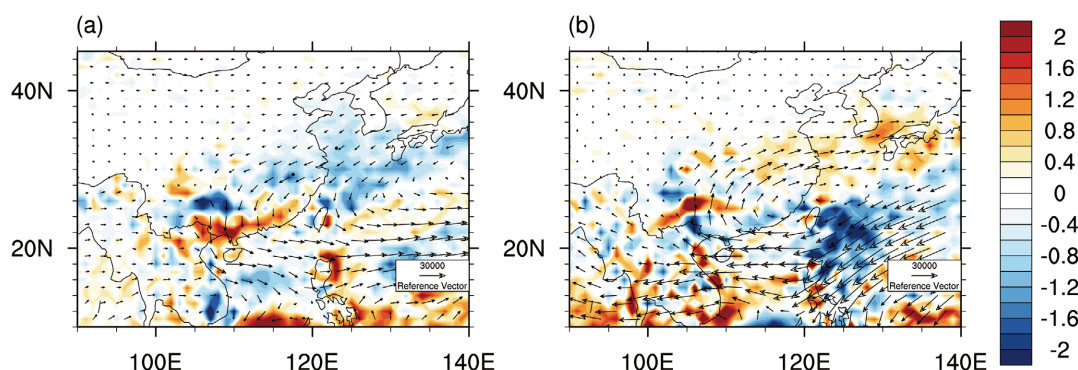


**Figure 6.** The 500 hPa and 850 hPa wind fields synthesized annually under the first mode of aircraft ice probability in winter in China in 1980~2020 (unit: m/s). (a) is 500 hPa wind farms with high index years; (b) is 500 hPa wind farm with low index year; (c) is 850 hPa wind farm with high index year; (d) is 850 hPa wind farm with low index year

**图 6.** 1980~2020 年我国冬季飞机积冰概率第一模态下高低指数年合成的 500 hPa、850 hPa 风场(单位: m/s)。(a)为高指数年 500 hPa 风场; (b)为低指数年 500 hPa 风场; (c)为高指数年 850 hPa 风场; (d)为低指数年 850 hPa 风场

区域,使得此区域的水汽减少,不利于积冰的产生;在我国 30°N 以南的区域,通过南西气流将海洋水汽输送到我国南部区域,使得水汽减少,有利于积冰的产生。在低指数年时,500 hPa 下我国处于整体的反气旋式环流中,与正的位势高度场对应,我国内陆整体处于偏南风场中;850 hPa 风场在我国西南、东南和东北地区有反气旋式环流,与此区域内的正位势高度场对应,我国东部主要以南西风为主,华北至东北有弱的东南气流产生。因此低指数年时,偏南气流将海上的水汽输送到我国北部区域,使得产生积冰的概率增大;北东气流将我国北部的干冷空气输送到我国南部区域,使得此区域的积冰概率降低。

为了进一步分析水汽的影响,图 7 给出了第一模态下整层水汽通量场的合成图。可以看出,在我国华南、华东偏南地区有正的整层水汽通量,表明在此区域内的整层水汽有所增加,有利于积冰的产生,积冰概率升高;在我国华中及其以北区域有弱的负整层水汽通量,表明此区域内整层的水汽含量有所流失,不利于产生积冰,积冰概率减小。而当飞机积冰概率为南负北正型分布时(低指数年),整层水汽通量分布情况相反,即在我国华南、华东偏南地区有负的整层水汽通量,不利于飞机积冰;在我国华中及其以北区域有弱的正整层水汽通量,积冰概率增大。



**Figure 7.** Composite distributions of vertically integrated water vapor flux anomaly (arrows; units:  $\text{gm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) from 1000 hPa to 300 hPa and its divergence (shaded; units:  $\text{gm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) in (a) high and (b) low index winters in China during 1980~2020

**图 7.** 1980~2020 年我国冬季飞机积冰概率第一模态下(a)高指数年与(b)低指数年的整层水汽通量(单位:  $\text{gm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )及水汽通量散度距平分布(阴影;单位:  $\text{gm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

综上所述表明,大气环流对冬季我国东部飞机积冰的南北偶极型变化模态的影响可以表述为,我国 30°N 以南区域存在气旋式环流,通过偏南气流将海上的水汽输送到我国华南区域,使得此区域整层水汽增加,有利于积冰产生,使得积冰概率增大;我国西北和东北区域有反气旋式环流生成,通过偏北气流将西伯利亚的干冷空气向我国东部区域的北部输送,使得此区域的水汽含量减少,不利于积冰产生,进而积冰概率减小。

## 5. 冬季飞机积冰概率一致变化型与大气环流的关系

针对我国东部冬季飞机积冰概率第二模态的时间系数序列,筛选高、低指数典型年份(分别为 5 年和 7 年),由图 3 积冰概率第二模态的时空分布特征可知,高指数年对应我国东部飞机积冰概率一致偏小,低指数年对应我国东部飞机积冰概率一致偏大。

图 8 为我国 40 年冬季飞机积冰概率第二模态下高低指数年合成的 500 hPa、85 hPa 位势高度场分布图。总体看来,位势高度距平形势场显著性差异集中在 850 hPa 和 500 hPa,且分布较为相似。不同指数年的合成的同一位势高度分布正好相反。高指数年即积冰概率偏小年合成的 500 hPa 位势高度(图 8(a))在我国东北地区及其北部区域出现负异常,即气旋式异常,气旋式异常中心在黑龙江以北鄂霍次克海以西区域,且通过了 95% 的显著性检验。在我国中部地区西侧、西南地区北部和西北地区一直向西北延伸存



在正异常，即反气旋式异常，反气旋式异常中心位于我国西藏地区，且通过了 95% 的显著性检验。正负异常之间有西北 - 东南走向的过渡区。而高指数年合成的 850 hPa 位势高度(图 8(c))分布与 500 hPa 相似，但其范围缩小和强度减弱，过渡区有所扩大。这种从低层到高层的位势高度场分布形势在过渡区西侧反气旋的西北气流和东侧气旋的西北气流加强了从我国以北的西伯利亚干冷空气进入我国内陆，使得我国内陆的水汽减弱，不利于积冰产生，积冰概率减小。

低指数年即积冰概率偏大年合成的 500 hPa 位势高度分布(图 8(b))与高指数年区域大致一致，但气旋式和反气旋式异常区相反，强度有所减弱，且低指数年 500 hPa 位势高度场分布其反气旋式异常区域南扩经鄂霍次克海到日本岛以南海域，气旋式异常区西缩到西北地区及其以西区域，在气旋和反气旋式异常区之间为过渡区，850 hPa 的位势高度场(图 8(d))分布与 500 hPa 相似，只在强度和范围上有所减小。气旋式和反气旋式异常区的东南气流在过渡区加强，将西太平洋上的水汽输送到我国内陆，使得我国内陆水汽增大，有利于积冰的形成。

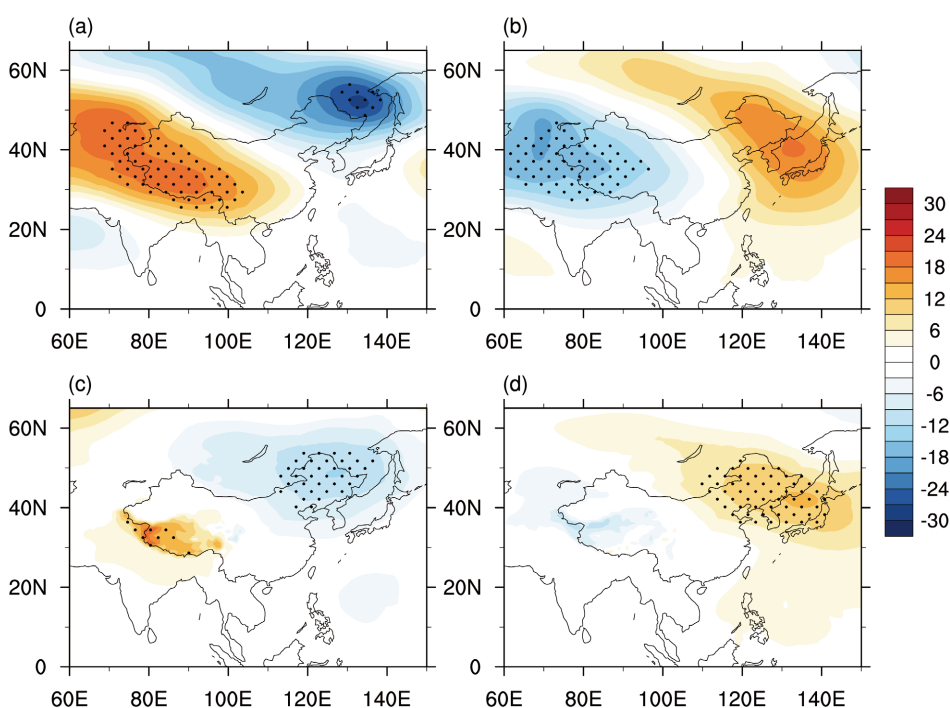
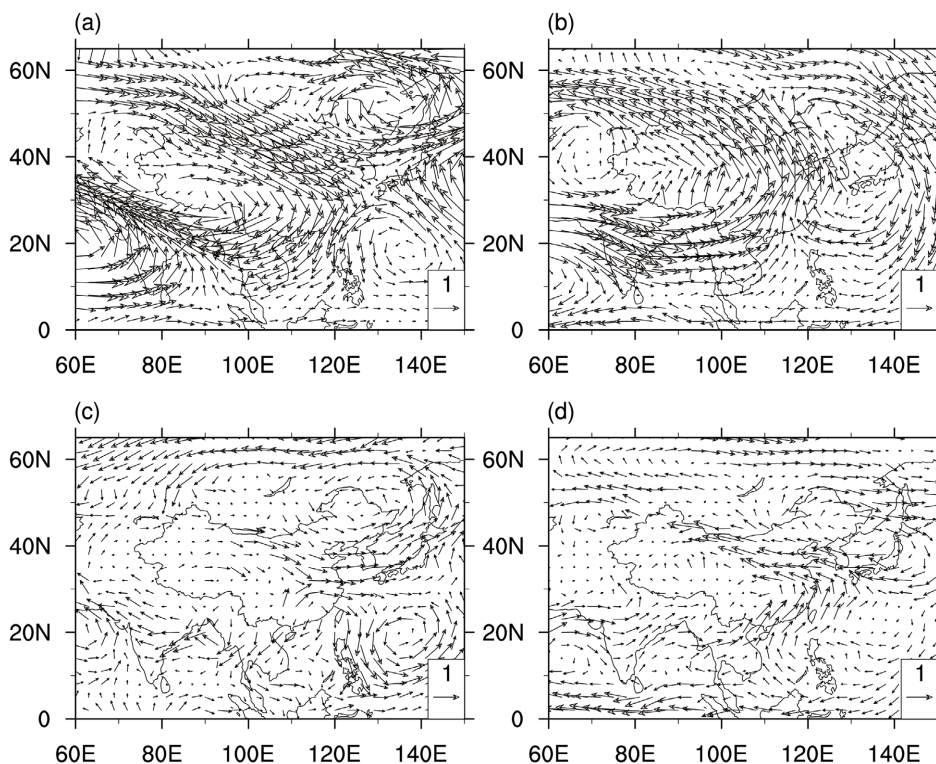


Figure 8. Same as Figure 5, but the result of the second modal synthesis

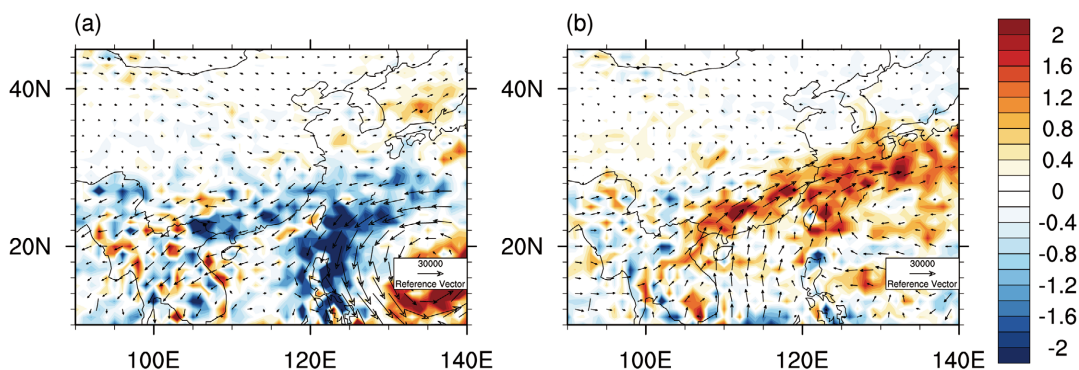
图 8. 同图 5，但为第二模态合成的结果

图 9 为我国 1980~2020 年冬季飞机积冰概率第二模态下高低指数年的 500 hPa、850 hPa 风距平场分布。对比分析，图 8 中高低指数年下 500 hPa、850 hPa 的位势高度场分布与图 9 中对应的 500 hPa、850 hPa 风场有很好的对应。在高指数年即积冰概率偏小年，500 hPa (850 hPa)位势高度场气旋(反气旋)式异常区与 500 hPa (850 hPa)风场的气旋(反气旋)式环流区对应，位势高度场中气旋、反气旋异常区间的过渡区与风场中的气旋、反气旋式环流区相对应，且它们的区域范围和位置吻合。由此可以得出，在积冰概率偏小年时，我国东北地区北部和西太平洋区域有气旋式环流产生，在我国西北西南以西区域有反气旋式环流产生，在两者之间即我国中华北向西北延伸到贝加尔湖以西地区为一致北西风的过渡区，将西伯利亚的干冷空气输送入我国中东部，使得此区域的水汽含量降低，也就不利于积冰的产生。在高指数年即积冰概率偏大年时，在我国东北北部区域向南延伸至日本岛南部有反气旋式环流产生，在我国中部、西

部一直延伸至哈萨克斯坦、阿富汗等中亚区域有气旋式环流产生，在这之间的我国中东部经华北区域延伸至蒙古国的偏南气流过渡区，将西太平洋丰富的水汽输送到过渡区内，使得水汽含量增加，容易产生积冰。



**Figure 9.** Same as **Figure 6**, but the result of the second modal synthesis  
**图 9.** 同**图 6**，但为第二模态合成的结果



**Figure 10.** Same as **Figure 7**, but the result of the second modal synthesis  
**图 10.** 同**图 7**，但为第二模态合成的结果

图 10 为我国 1980~2020 年冬季飞机积冰概率第二模态下高指数年(图 10(a))和低指数年(图 10(b))的整层水汽通量场分布。由图 10(a)高指数年的整层水汽通量场可以看出，在西太平洋伴随有热带气旋存在，气旋中心在 26°N、135°E 附近，且在气旋内侧有正的整层水汽通量，在气旋外侧的西部和北部一直延伸到我国华南和东部沿海区域，存在负的整层水汽通量，说明此区域内的空气中的水汽整体是减少的。在我国内陆的整层水汽通量变化较小。由图 10(b)低指数年的真更水汽通量场可以看出，其分布与高指数年

的分布正好相反,在西太平洋伴随有反气旋存在,其中心在 $26^{\circ}\text{N}$ 、 $130^{\circ}\text{E}$ 附近,从日本岛南侧经我国东海、华东东部至华南地区,有正的整层水汽通量,说明在此区域水汽含量是增大的,这种水汽条件有助于形成降水或积冰形成。在西南部分区域有负的整层水汽通量,其他内陆区域整层水汽通量变化较小。积冰概率第二模态时空综合分析,高(低)指数年即为积冰概率偏小(大)年。

综上,在积冰概率偏小(大)年时,我国内陆整层的水汽通量变化不大,但在西太平洋,从日本到南侧延伸到我国东海至华南区域有负(正)的整层水汽通量,表明此区域内水汽含量有所减少(增多),有利于水汽辐散(辐合)形成降水,积冰概率降低(增加)。

## 6. 结论与讨论

本文利用国际民航组织推荐的飞机积冰指数(IC 指数),分析了冬季我国飞机积冰的时空变化特征,研究飞机积冰概率与大气环流的关系,得出以下结论:

1) 我国冬季积冰分布有很强的差异性,积冰分布在 $400\text{ hPa}$ 以下,随着纬度增加,高度层降低,积冰指数呈增大趋势。 $700\text{ hPa}$ 层积冰分布最集中且具代表性,我国积冰主要集中在 $28^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 间即我国中部区域,且中部地区积冰日数多。在四川的北部和东部部分地区冬季 $60\%$ 以上的日数都有中度积冰。

2) 积冰概率 EOF 后的第一模态空间分布呈南北偶极的异常分布,其时间序列有 4 年的年际变化和 13 年的年代际变化周期,以 $31^{\circ}\text{N}$ 即我国的长江区域为界,存在南北波动的积冰概率偏大偏小年。

3) 积冰概率 EOF 分解后第二模态反映了积冰在我国中东部的一致偏少或偏多。这种一致变化有显著的 3.5a 和 6a 年际变化特征。

4) 对于冬季我国东部飞机积冰的南北偶极型变化模态而言,我国 $30^{\circ}\text{N}$ 以南区域存在气旋式环流,通过偏南气流将海上的水汽输送到我国华南区域,有利于积冰产生;我国西北和东北区域有反气旋式环流生成,通过偏北气流将西伯利亚的干冷空气向我国东部区域的北部输送,不利于积冰产生。

本文也进一步利用 NCEP 数据进行了验证,得到的结果与 ERA5 数据计算的一致。然而,本文讨论的 IC 指数只是表征了大气中有利于产生飞机积冰的条件,与实际飞机遭遇积冰不同,为了得到飞机积冰环境的变化特征,也没有结合具体飞机的机型和飞机的速度去研究。另外,在分析大气环流对飞机积冰的影响时,主要针对的是大气的水汽条件。在下一步工作中,我们会继续深入分析大气环流对飞机积冰的影响过程及机制,并利用飞机报告的积冰数据做检验。

## 致 谢

非常感谢刘宇迪老师对于飞机预报积冰公式及其适航性研究方面的悉心指导。感谢引文的各位作者,提供气象数据的单位。

## 参考文献

- [1] Frohboese, P. and Anders, A. (2007) Effects of Icing on Wind Turbine Fatigue Loads. *Journal of Physics: Conference Series*, **75**, Article ID: 012061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/75/1/012061>
- [2] 谢坤. 结冰翼型气动力特性数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [3] 胡义明. 积冰对飞机的危害及防除冰方法[J]. 科技风, 2021(5): 17-18.
- [4] 万连成. 我国飞机积冰高发区的时空特征及其气象特征分析[D]: [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- [5] Whalen, E.A., Broeren, A.P., Bragg, M.B., et al. (2005) Characteristics of Runback Ice Accretions on Airfoils and their Aerodynamic Effects. *Proceedings of 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, 10-13 January 2005, AIAA 2005-1065. <https://doi.org/10.2514/6.2005-1065>
- [6] Berthoumieu, P. (2012) Experimental Study of Supercooled Large Droplets Impact in an Icing Wind Tunnel. *Proceedings of 4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference*, New Orleans, 25-28 June 2012, AIAA 2012-3130.

<https://doi.org/10.2514/6.2012-3130>

- [7] 庞朝云, 张逸轩. 甘肃中部地区飞机积冰的气象条件分析[J]. 干旱气象, 2008, 26(3):53-56.
- [8] 肖光明, 杜雁霞, 李伟斌, 等. 过冷水滴凝固特性的计算与实验研究[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(10): 2196-2201.
- [9] 龙妍妍, 吴俊杰, 李飞, 等. 一次飞机积冰天气过程的成因研究[J]. 民航学报, 2018, 2(3): 41-44.
- [10] 刘凤林, 孙立潭, 李士君. 飞机积冰诊断预报方法研究[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(4): 26-30.
- [11] 卞双双, 何宏让, 安豪, 潘晓滨, 张云. 飞机积冰预报算法对比及其集成预报模型研究[J]. 气象, 2019, 45(10): 1352-1362.
- [12] 王禹润, 张军辉. 飞机积冰预报算法的研究与个例分析[J]. 气候变化研究快报, 2020, 9(5): 515-529.
- [13] 徐玮平, 张杰, 刘晨, 孟祥新. 20 世纪 90 年代以后华北初春低温增强和北大西洋海温关系[J]. 大气科学, 2020, 44(6): 1167-1187.
- [14] 邵宇行, 秦正坤, 李昕. 基于 EOF 的高时空分辨率自动站温度观测资料质量控制[J]. 大气科学学报, 2022, 45(4): 603-615.
- [15] 章大全, 袁媛, 韩荣青. 2022 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象, 2023, 49(1): 110-121.
- [16] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., *et al.* (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [17] 刘旭光. 数值预报产品在航空气象预报中的应用[J]. 四川气象, 2001, 21(4): 18-22.
- [18] 迟竹萍. 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, 2007, 35(5): 714-718, 766.
- [19] 黄仪方, 主编. 航空气象[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.