

复杂气象条件对中小机场管制指挥的影响分析

潘引愿

黔南荔波机场, 贵州 荔波

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年5月8日; 发布日期: 2025年5月16日

摘要

复杂气象条件, 如雷雨、颠簸、风切变、低云、低能见度等, 对中小机场的管制指挥工作带来诸多挑战。本文旨在分析常见的复杂气象条件对中小机场管制指挥的影响, 并提出相应的应对措施。通过对实际案例的探讨, 结合管制指挥的具体实践, 本文将为中小机场在复杂气象条件下的管制指挥提供有益的参考。

关键词

复杂气象条件, 中小机场, 管制指挥

Analysis of the Impact of Complex Meteorological Conditions on Air Traffic Control and Command at Small and Medium-Sized Airports

Yinyuan Pan

Qiannan Libo Airport, Libo Guizhou

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: May 8th, 2025; published: May 16th, 2025

Abstract

Complex weather conditions, such as thunderstorms, turbulence, wind shear, low clouds, and low visibility, pose numerous challenges to the air traffic control and command work at small and medium-sized airports. This paper aims to analyze the impact of common complex weather conditions on the air traffic control and command at small and medium-sized airports and propose corresponding countermeasures. Through the discussion of actual cases and in combination with the specific practice of air traffic control and command, this paper will provide useful references for the air

traffic control and command at small and medium-sized airports under complex weather conditions.

Keywords

Complex Meteorological Conditions, Small and Medium-Sized Airports, Air Traffic Control and Command

Copyright © 2025 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

中小机场作为区域航空运输网络的重要组成部分,其管制指挥工作直接关系到飞行安全和服务质量。然而,复杂气象条件的出现,如雷雨、风切变、低云、低能见度等,给中小机场的程序管制指挥带来了极大的挑战。本文将从多个方面分析这些复杂气象条件对中小机场程序管制指挥的影响,并探讨相应的应对策略。

2. 国内外文献综述

复杂天气条件,如大雾、霜冻、降雪、低能见度、强风等,会对飞行安全产生显著影响。Gultepe [1] 对天气对航空运行的影响进行了综述,指出能见度降低、降水、结冰等气象条件会增加飞行风险,影响飞机的起降和飞行过程。

复杂天气条件对空中交通管制员的指挥提出了更高要求。朱小伟和杨政[2]研究了复杂天气条件下的空中交通管制指挥方法,指出管制员在恶劣天气下,需要及时调整飞行计划,指挥飞机避让危险区域,同时协调机场各部门的运行保障工作。此外,气象信息的准确性和及时性对管制指挥至关重要,傅子涛 [3]提出了空管与气象信息一体化运行的研究分析,强调了气象信息与空中交通管制的深度融合,以提高管制决策的科学性和有效性。

国内空中交通管制部门在应对复杂天气条件方面采取了一系列措施。例如,昆明管制区对中小机场天气原因导致的航班返航备降架次进行了统计分析[4],通过数据挖掘和分析,找出天气对航班运行的影响规律,为管制指挥提供了科学依据。此外,新疆空管局空管中心终端管制中心塔台管制一、二室的秋冬换季工作[5],通过制定详细的换季计划、开展针对性培训、修订应急预案等措施,提高了复杂天气条件下的管制能力。

随着技术的发展,远程塔台和自动化系统在空中交通管制中的应用越来越广泛。Hernández-Romero 等[6]研究了将天气影响整合到远程和传统塔台的管制员排班中,指出通过合理安排管制员的工作时间和任务,可以提高复杂天气条件下的管制效率和安全性。ICAO 也鼓励各国积极探索新技术的应用,如气象雷达、卫星通信、自动化管制系统等,以提高空中交通管制的应对能力。

国内外学者的研究表明,复杂气象条件对中小机场管制指挥的影响显著。但中小机场在复杂气象条件下的管制指挥仍处于“被动应对”阶段,缺乏系统性和前瞻性。随着技术的不断进步和国际合作的加强,复杂天气条件下的空中交通管制将朝着更加安全、高效、智能化的方向发展。各国应继续加强与 ICAO 的合作,遵循 ICAO 的规定,积极探索实践,同时结合本国实际情况,积极探索和创新应对复杂天气条件的方法和措施,为全球航空运输的安全和可持续发展做出贡献。

3. 复杂气象条件概述

复杂气象条件是指雷雨、结冰、颠簸、风切变、低云、低能见度等影响飞行安全的恶劣天气；其中雷雨、风切变、大风和低能见度，对塔台管制范围内运行的航空器构成极大威胁。雷雨天气中，航空器绕飞雷雨时根据航空器距离雷雨云的位置和距离可能会被电击、遭受雹击、穿云结冰、复飞、重着陆等风险；风切变则可能导致航空器升力下降、姿态不能保持、中止进近或者复飞、飞机大速度接地、飞机提前接地等不安全事件，危及飞行安全；低云和低能见度条件则可能会导致航空器机组不能建立目视参考复飞，中止进近，返航，备降，大面积地面延误。

4. 复杂气象条件对中小机场管制指挥的影响

4.1. 对管制员工作负荷的影响

首先复杂气象条件下管制员需要密切关注天气变化，及时获取气象信息，及时与气象部门沟通，了解天气趋势和可能的影响。在飞行过程中，管制员需要根据天气情况调整飞行路线、高度和速度，以确保航空器的安全。这些额外的任务和责任无疑增加了管制员的工作负荷。其次，复杂气象条件可能导致航班延误、取消或备降。在中小机场，由于航班量相对较少，一旦出现航班延误或取消，可能会对机场的运营造成较大影响。管制员需要处理大量的航班信息，与航空公司、旅客和相关部门进行沟通协调，以最大程度地减少航班延误和取消带来的不便。这些工作也会进一步增加管制员的工作负荷。此外，复杂气象条件还可能对管制员的心理健康产生影响。长时间面对高强度的工作压力和负荷，管制员可能会出现焦虑、疲劳等心理问题。这些问题不仅会影响管制员的工作效率和质量，还可能对航空安全构成潜在威胁。

4.2. 对飞行计划的影响

1) 航班延误与取消

复杂气象条件，如雷雨、大风、低云、低能见度等，经常会导致航班延误或取消。这是因为这些天气现象会危及飞行安全，使得飞机无法在规定的时间内起飞或降落。例如，雷暴区域可能存在强烈的颠簸、积冰和雷电等危险天气，飞机若进入这些区域可能会遭遇严重的飞行困难甚至事故。因此，为了确保安全，航空公司通常会选择延误或取消航班，等待天气好转后再进行飞行。

2) 飞行航路航线调整

在面对复杂气象条件时，飞行计划中的飞行航路航线可能需要调整。管制员会根据实时的天气情况和飞行安全标准，为飞机规划出一条避开危险天气的安全飞行路线。这可能需要飞机在空中进行额外的转弯、爬升或下降等操作，从而增加了飞行的复杂性和空中飞行时间。

3) 燃油消耗与成本增加

复杂气象条件还可能导致飞机在飞行过程中需要消耗更多的燃油。例如，当飞机需要在复杂气象条件下进行长时间的等待、盘旋或绕飞时，其发动机需要持续工作以维持飞机的飞行状态，从而导致燃油消耗量的增加。这不仅会增加航空公司的运营成本，还可能对航空器的续航能力产生影响。

4) 旅客行程受阻

复杂气象条件导致的航班延误或取消会直接影响旅客的行程安排。旅客可能需要花费更多的时间等待航班恢复，或者需要改变原计划中的交通方式、住宿等安排。这不仅会给旅客带来不便，还可能增加旅客的出行成本和时间成本。

5) 对飞行员的挑战

复杂气象条件对飞行员来说也是一项严峻的挑战。飞行机组需要在短时间内做出准确的判断和决策，

以应对突如其来的天气变化。这要求飞行员具备丰富的飞行经验和专业技能，以及良好的心理素质和应变能力。

4.3. 对管制指挥流程的影响

1) 调整飞行计划

复杂气象条件经常要求管制员对飞行计划进行紧急调整。例如，当航空器即将进入雷雨区域时，管制员需要迅速向军民航单位申请绕航，指挥航空器改变航向或高度，以避免危险天气。这些调整需要管制员具备丰富的经验和专业技能，以便在短时间内做出准确的决策。同时，调整飞行计划还需要与飞行员、航空公司和其他相关军民航单位进行紧密的沟通和协作，以确保飞行安全。

2) 加强监控与协调

在复杂气象条件下，管制员需要加强对航空器的监控和协调工作。通过 ADS-B 密切关注航空器的位置、速度和高度等信息，确保航空器在航路航线安全高度以上飞行。同时，管制员还需要与相关的区域管制室、进近管制室管制员、飞行员和相关军方管制单位进行紧密的沟通和协作，以便在紧急情况下能够迅速做出反应并采取相应的措施。

3) 影响空中交通流量

复杂气象条件还可能导致空中交通流量的减少。例如，当低能见度天气影响机场的能见度时，管制员可能需要限制航空器的起飞和降落数量，以确保飞行安全。这会导致空中交通流量的减少和航班的延误。为了缓解这种情况，管制员需要密切关注天气变化趋势，与相关部门进行沟通协调，以便在天气好转后尽快恢复正常的空中交通流量。

4) 对管制员心理素质的考验

复杂气象条件对管制员的心理素质也是一种考验。在面对突如其来的天气变化和紧急情况时，管制员需要保持冷静和镇定，以便做出准确的判断和决策。同时，管制员还需要具备良好的沟通能力和团队合作精神，以便与其他管制员、飞行员和相关军民航单位进行有效地沟通和协作。

4.4. 对飞行员和旅客的影响

复杂气象条件对飞行员和旅客的心理状态也会产生一定的影响。飞行员需要在恶劣天气条件下保持冷静和专注，以确保飞行安全；旅客则可能因航班延误或取消而产生焦虑情绪。这些都需要管制员在指挥过程中进行妥善处理和安抚，提供优质的管制服务。

5. 复杂气象条件下中小机场管制指挥效能的定量评估

5.1. 管制员工作负荷分析

5.1.1. 问卷调查设计与数据收集

为量化复杂气象条件下管制员的工作负荷，本研究对国内 6 个中小机场(日均起降架次 20~50)的管制员展开问卷调查。共发放问卷 120 份，回收有效问卷 98 份(有效率 81.7%)。问卷采用 NASA-TLX 量表(任务负荷指数)评估工作负荷，包含 6 个维度：心智需求(MD)、体力需求(PD)、时间压力(TP)、绩效表现(OP)、努力程度(EF)、挫折感(FR)。

5.1.2. 数据统计与分析

1) 工作负荷评分对比

不同气象条件下管制员的平均工作负荷评分(满分 100)如表 1 所示，进行可视化呈现，如图 1 所示。

Table 1. Average workload rating of air traffic controllers
表 1. 管制员平均工作负荷评分

气象条件	MD	PD	TP	OP	EF	FR
常规天气(N = 98)	52	48	55	60	58	40
低能见度(N = 98)	78	65	82	75	80	68
雷雨天气(N = 98)	85	72	88	80	86	75

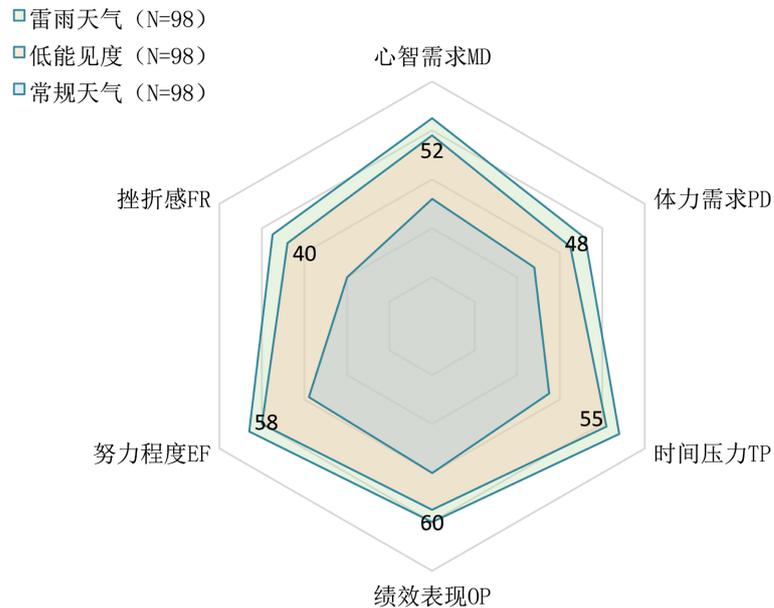


Figure 1. Multidimensional comparison chart of controller workload
图 1. 管制员工作负荷多维对比图

结果表明，雷雨天气下总分最高(81.0)，较常规天气提升 50.6%；时间压力(TP)和挫折感(FR)增幅最大(TP: +60%；FR: +87.5%)。

2) 关键影响因素分析

通过多元线性回归模型(公式 1)识别主要影响因素：

$$\text{总分} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \epsilon \tag{1}$$

其中：

X_1 ：气象条件等级(1~3 级，1 = 常规，3 = 雷雨)；

X_2 ：航班延误率(%)；

X_3 ：通信协调频次(次/小时)。

Table 2. Regression results

表 2. 回归结果

变量	系数(β)	标准误差	p 值
气象条件等级	12.3	1.8	<0.001
航班延误率	0.6	0.2	0.003
通信协调频次	1.1	0.4	0.012

表 2 结果表明, 气象条件等级对工作负荷影响最显著($\beta = 12.3, p < 0.001$); 航班延误率每增加 10%, 总分上升 6 分($p = 0.003$)。

5.2. 基于实际运营数据的航班延误分析

选取 2022~2023 年国内 3 个典型中小机场(日均起降 30~60 架次)的航班运行数据, 结合气象部门同期记录, 筛选出因复杂气象条件导致的延误事件, 统计不同气象条件的延误分布情况。

Table 3. Delay distribution under different meteorological conditions

表 3. 不同气象条件的延误分布

气象类型	平均延误时长(分钟)	延误率(%)	延误成本(万元/日)
常规天气	18.5	11.3	8.7
低能见度(RVR < 800 m)	47.2	34.6	28.9
雷暴伴风切变	68.9	42.1	45.6
强降水(>30 mm/h)	53.4	38.7	32.4

统计结果表明, 雷暴伴风切变天气的延误成本最高(45.6 万元/日), 是常规天气的 5.2 倍; 低能见度条件下, 每架次平均延误时长增加 155%。

基于表 3 中气象类型与延误成本数据(常规天气 8.7 万元、低能见度 28.9 万元、雷暴伴风切变 45.6 万元、强降水 32.4 万元), 进一步将总成本拆分为直接成本(燃油消耗、设备损耗、除冰作业等)与间接成本(旅客补偿、航空公司运营损失等)。

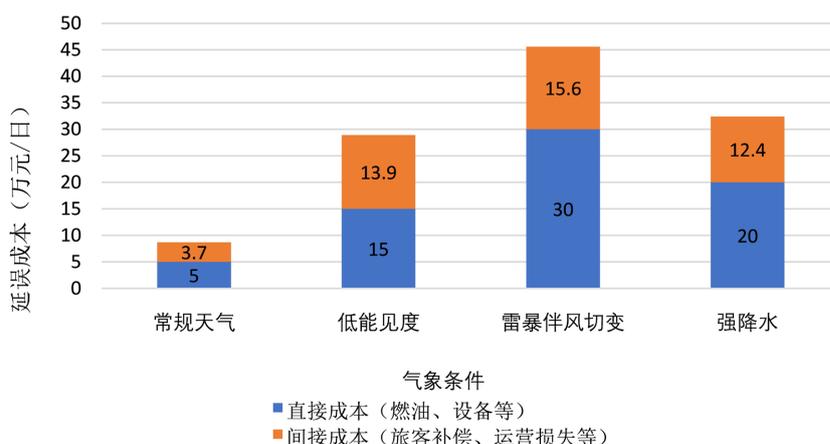


Figure 2. Distribution of flight delay costs under different meteorological conditions

图 2. 不同气象条件下的航班延误成本分布

进行可视化分析, 如图 2 雷暴伴风切变天气的延误总成本(45.6 万元/日)远超其他气象条件, 其中直接成本占比 65.8%, 主要源于燃油消耗与设备损耗。这一结果表明, 技术手段升级(如毫米波雷达部署)是降低雷暴天气经济损耗的关键。

6. 中小机场应对复杂气象条件的管制指挥策略

6.1. 加强气象监测与预警

1) 实时气象信息收集: 中小机场应配备先进的气象监测设备, 实时收集气象数据, 包括云高、能见

度、风向风速等关键气象信息。

2) 气象预警系统：建立与气象部门的信息共享机制，及时准确获取气象预警信息，并根据预警级别制定相应的应对措施。

6.2. 优化管制指挥流程

1) 飞行计划调整：根据气象条件，灵活调整飞行计划，包括起飞时间、航线、高度等，避免航空器进入危险天气区域。

2) 加强飞行监控：在复杂气象条件下，充分利用 ADS-B 加强对航空器的飞行轨迹监控，确保航空器在管制区域内安全高度以上飞行，及时发现并处理不正常情况。

3) 通信保障：在复杂气象条件下，通信导航部门要全力保障通信设备运行正常，确保管制员与飞行员之间的通信畅通，及时传达天气信息和管制指令。

6.3. 提升管制员应对能力

1) 培训与教育：定期对管制员进行复杂气象条件下的管制指挥培训，案例分析，观看警示教育片，提高管制员的专业技能和应对能力。

2) 模拟演练：组织模拟演练，模拟复杂气象条件下的管制指挥场景，若配备有管制模拟机的中小机场可以定期开展专项强化训练，检验管制员的应对能力和团队协作精神。

3) 心理辅导：为管制员提供心理辅导服务，帮助管制员缓解工作压力，保持良好的心理状态。

6.4. 加强与其他单位的协作

1) 与气象部门的协作：加强与气象部门的沟通和协作，共同制定应对复杂气象条件的策略和措施。

2) 与航空公司的协作：与航空公司保持密切联系，共同应对航班延误、取消等突发情况，确保旅客的行程安排得到妥善处理。

3) 与相关军民航管制单位的协作：与相关军民航管制单位建立信息共享机制，共同应对跨区域的复杂气象条件。

6.5. 完善应急预案

1) 制定应急预案：结合本机场管制空域运行环境，针对可能出现的复杂气象条件，制定详细的应急预案，包括应急指挥流程、应急处置措施等。

2) 定期演练：定期组织开展应急预案演练，检验预案的可行性和有效性，提高管制员的应急处突能力。

6.6. 引进先进技术和设备

中小机场应积极引进先进技术和设备，提高管制指挥的效率和准确性。例如，引进雷达监测系统，实时监测天气变化和飞机位置；引进气象预警系统，及时发布预警信息；引进自动化管制指挥系统，提高管制指挥的自动化水平。

7. 案例分析

案例一：微下击暴流条件下的风切变处置——以丽江三义机场为例

2023 年 7 月 15 日，云南丽江三义机场在航班进出港高峰时段突遇微下击暴流天气。当日 14:20 至 15:30，机场周边风速在 5 分钟内从 25 节骤降至 8 节，垂直风切变强度达 6 m/s，远超国际民航组织(ICAO)设定的 4 m/s 安全阈值。同时，短时强降水导致能见度骤降至 800 米以下，空域内 8 架进港航班(含 2 架

宽体客机 B787 和 A330)及 5 架离港航班的运行面临严重威胁。

丽江机场迅速启动低空风切变告警系统(LLWAS),对 0~500 米高度层的风速突变进行实时监测,并通过 ADS-B 数据链将实时告警信息推送至管制员终端。气象部门紧急介入,每 2 分钟更新一次终端区风场模型,精准预测微下击暴流的移动路径,为管制决策提供动态支持。针对 3 架已进入最后进近阶段(高度低于 1000 英尺)的航班,管制员果断下达复飞指令,要求其爬升至 3000 英尺以上等待。为确保宽体客机安全,管制员额外预留复飞余度,明确要求机组在决断高度前严格监控空速变化,避免因风切变导致升力骤减。对于离场航班,机场将 4 架次起飞计划推迟,离场间隔从 5 分钟延长至 10 分钟,并协调航空公司将 1 架原定 15:00 起飞的航班临时调整至大理机场备降,以规避起飞后可能遭遇的风切变风险。

此次事件中,所有航班均安全起降,未发生复飞后二次进近失败的情况。尽管平均延误时长为 42 分钟,仍低于区域平均值 58 分钟,延误成本约 23.5 万元。事后数据分析显示,风切变预警系统提前 90 秒触发告警,为管制员争取了关键的决策时间窗口。然而,系统对微尺度天气现象的识别存在平均 45 秒的延迟,暴露出技术短板。为此,丽江机场计划升级毫米波雷达以提升分辨率,并针对管制员开展复飞指令标准化培训,明确“立即复飞”与“建议复飞”的操作差异,避免机组因指令歧义引发误判。

案例二:持续性冻雨天气下的协同决策——以宜昌三峡机场为例

2024 年 1 月 8 日,湖北宜昌三峡机场遭遇罕见持续性冻雨天气,持续 18 小时的冻雨导致跑道结冰厚度达 3 毫米,跑道视程(RVR)降至 400 米,气温低至 -5°C 。当日计划执行的 12 架次航班涉及 3 家航空公司,其中包括 2 架无除冰设备的赛斯纳 208B 通航飞机。面对极端天气,机场迅速启动多部门协同响应机制,联合航空公司、地服公司实施三级除冰预案,每 30 分钟对跑道和滑行道进行一次尿素撒布与热力除冰作业。针对航空器,机场创新采用“两次除冰法”,即在航空器推出前完成机身预除冰,并在起飞前 5 分钟进行二次喷射,确保机身表面无冰层残留。

为保障运行安全,管制员将航班放行间隔从 15 分钟延长至 25 分钟,为除冰作业预留充足时间,同时对无法满足除冰条件的通航小飞机果断取消飞行计划。旅客服务方面,机场通过 APP 实时推送延误信息,并协调航空公司为滞留旅客提供餐食及住宿补偿,规定延误超过 4 小时即可获得每人 200 元的补偿。最终,当日实际执行航班 9 架次,取消 3 架次,平均延误时间 67 分钟,其中 58%的延误时长源于除冰作业。经济成本方面,除冰与旅客补偿支出共计 14.8 万元,航空公司因燃油浪费和机组超时产生的间接损失约 9.3 万元。尽管运行压力巨大,但未发生一起航空器滑行道偏离或轮胎打滑事件,安全记录得以保全。

此次事件暴露出资源与协议的双重短板:机场仅配备 1 台小型除冰车,单架次除冰耗时长达 25 分钟,严重拖累效率;通航公司因未在服务协议中明确除冰责任,导致补偿纠纷。后续改进中,宜昌机场计划增购多功能除冰设备,并将除冰条款纳入通航服务合同,明确各方责任。

案例三:强沙尘暴天气下的盲降系统失效处置——以敦煌莫高窟机场为例

2023 年 4 月 10 日,甘肃敦煌莫高窟机场遭遇强沙尘暴袭击,能见度骤降至 50 米,PM10 浓度超过 $2000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,导致仪表着陆系统(ILS)信号严重受干扰,盲降精度降至 CAT I 标准以下。当日 3 架 ARJ21 进港航班中,1 架因机组无法建立目视参考,最终备降至 180 公里外的嘉峪关机场。

面对导航系统失效,管制员立即指挥机组切换至全球导航卫星系统(GNSS)进近模式,并辅以人工语音引导,同时关闭受沙尘影响的 ILS 航向台,启用备用无方向信标(NDB)设备。为确保安全,管制员要求所有进港航班在最后进近阶段保持最低安全高度(MSA)以上飞行,直至目视参考建立。地面保障方面,机场紧急调度扫雪车改装为高压水雾除尘车,对跑道进行局部喷洒,将 PM10 浓度降至 $800\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,为航空器降落创造临界条件。

此次应急处置中, 2架次航班成功降落, GNSS进近轨迹偏差小于0.3海里, 符合所需导航性能-授权所需(RNP-AR 0.3)标准, 验证了非精密进近的可行性; 备降航班延误4小时25分钟, 燃油与除尘作业成本合计2万元。然而, 事件暴露 ILS 系统抗沙尘能力的不足, 以及操作手册中 GNSS 与 ILS 切换程序的缺失。后续改进中, 敦煌机场计划为 ILS 加装防风沙护罩及信号增强模块, 并修订手册, 明确联合进近程序的操作细则。

8. 结语

复杂气象条件对中小机场管制指挥的影响体现在工作负荷激增、航班延误成本攀升及安全风险加剧等多个层面。本文通过实证研究发现, 雷雨与低能见度天气是导致管制效能下降的主要因素, 其中管制员工作负荷的50.6%增幅与航班延误成本增长尤为突出。案例研究表明, 技术手段的升级(如丽江机场毫米波雷达部署)、流程优化(如宜昌机场“两次除冰法”)、协同机制完善(如敦煌机场四方应急联动)可显著提升应对能力。未来, 中小机场需从以下三方面突破: 其一, 加速智能化设备应用, 缩短气象预警响应时间; 其二, 细化应急预案与操作标准, 降低决策不确定性; 其三, 深化跨部门协作, 实现资源与信息的动态整合。通过系统性改进, 中小机场可有效控制复杂气象条件下的安全风险与经济损耗, 为区域航空网络的稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] Gultepe, I. (2023) A Review on Weather Impact on Aviation Operations: Visibility, Wind, Precipitation, Icing. *Journal of Airline Operations and Aviation Management*, 2, 1-44. <https://doi.org/10.56801/jaoam.v2i1.1>
- [2] 朱小伟, 杨政. 复杂天气条件下的空中交通管制指挥方法[J]. 科技资讯, 2018, 16(11): 96+98.
- [3] 傅子涛. 空管与气象信息一体化运行研究分析[C]//中国指挥与控制学会. 第一届空中交通管理系统技术学术年会论文集. 中国民用航空华北地区空中交通管理局, 2018: 48-55.
- [4] 江春明, 黄盛军, 刘星俞. 昆明管制区中小机场天气原因影响航班返航备降架次特征统计分析[J]. 民航学报, 2024, 8(4): 28-29+78.
- [5] 新华网. 新疆空管局空管中心终端管制中心塔台管制一、二室开展秋冬换季工作[EB/OL]. 2024-09-24. http://xj.news.cn/zt/2024-09/24/c_1130204631.htm, 2025-03-30.
- [6] Hernández-Romero, E., Josefsson, B., Lemetti, A., Polishchuk, T. and Schmidt, C. (2022) Integrating Weather Impact in Air Traffic Controller Shift Scheduling in Remote and Conventional Towers. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 11, Article ID: 100076. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2022.100076>