

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.06.013

## 雷暴天气下机场离场航班运行韧性评估模型

李克南<sup>1,2</sup>, 张晓夕<sup>1,2</sup>, 王兴隆<sup>1,2</sup>

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 民航飞联网重点实验室, 天津 300300)

**摘要:** 构建地空融合的机场雷暴影响强度量化评价方法, 研究雷暴影响下机场航班运行韧性的表征方法及演变特征, 可以为机场应对不同雷暴天气过程提供理论参考, 提高机场运行的安全和效率。首先, 本文提出一种结合地面雷暴强度(基于欧盟天气算法 ATMAP)和空中雷暴强度(基于对流天气空域阻塞概率模型)的雷暴影响强度指数, 其中 ATMAP 算法主要依赖 METAR 报文数据, 对流天气空域阻塞概率模型以气象雷达资料为基础; 其次, 以航班出发率作为关键指标, 建立适应雷暴特点的韧性评估模型; 最后使用层次聚类算法将雷暴天气进行分类, 解析不同类型雷暴的韧性演变特征。以 2018—2021 年间西安机场的雷暴天气过程为研究对象, 结果表明: 雷暴影响强度指数达到 0.09 时, 开始影响机场航班运行性能; 韧性评估模型能够准确反映机场韧性过程; 使用层次聚类法将雷暴天气过程分为了两类, 其非负综合韧性指标分别为 13.037 和 71.808; 机场在高强度、高波动和快增长的雷暴冲击下, 非负综合韧性指标越小。

**关键词:** 韧性评估模型; 雷暴影响强度指数; ATMAP 算法; 空域阻塞概率

中图分类号:U8;V355.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2025)06-1166-11

## A Resilience Assessment Model of Airport Departure Flight Operations Under Thunderstorm Conditions

LI Kenan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoxi<sup>1,2</sup>, WANG Xinglong<sup>1,2</sup>

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Key Laboratory of Internet of Aircraft, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Constructing a ground-air integrated quantitative evaluation method for airport thunderstorm impact intensity, and studying the characterization method and evolution characteristics of airport flight operation resilience under the influence of thunderstorms can provide theoretical references for airports to cope with different thunderstorm weather processes, and improve the safety and efficiency of airport operations. Firstly, a thunderstorm impact intensity index combining ground thunderstorm intensity (based on the EU weather algorithm ATMAP) and airborne thunderstorm intensity (based on the convective weather airspace obstruction probability model) is proposed, in which the ATMAP algorithm mainly relies on the METAR message data, and the convective weather airspace obstruction probability model is based on the meteorological radar data. Secondly, the flight departure rate is taken as a key metric to establish a resilience evaluation model that adapts to the characteristics of thunderstorms. Finally, the hierarchical clustering algorithm is used to categorize the thunderstorm weather and analyze the toughness evolution characteristics

**基金项目:** 国家自然基金重点项目(U2133207); 国家自然科学基金面上项目(62173332, 52272356); 天津多元基金(21JCYBJC0700); 中国民航大学研究生科研创新项目(2024YJSKC03004, 2024YJSKC03003)。

**收稿日期:** 2025-04-26; **修订日期:** 2025-09-01

**通信作者:** 王兴隆, 男, 教授, E-mail: xinglong1979@163.com。

**引用格式:** 李克南, 张晓夕, 王兴隆. 雷暴天气下机场离场航班运行韧性评估模型[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(6): 1166-1176. LI Kenan, ZHANG Xiaoxi, WANG Xinglong. A resilience assessment model of airport departure flight operations under thunderstorm conditions [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(6): 1166-1176.

of different types of thunderstorms. Taking the thunderstorm weather process of Xi'an airport during 2018—2021 as the research object, the results show that: When the thunderstorm impact intensity index reaches 0.09, it starts to affect the flight operation performance of the airport; the toughness assessment model can accurately reflect the toughness process of the airport; using the hierarchical clustering algorithm to categorize the thunderstorm weather process into two categories with non-negative general resilience index of 13.037 and 71.808, respectively; and under the impact of high-intensity, high-volatility, and fast-growing thunderstorms, airports with lower non-negative comprehensive resilience indices are more resilient.

**Key words:** resilience assessment model; thunderstorm impact intensity index; ATMAP algorithm; airspace obstruction probability

机场作为航空运输网络的枢纽,其运行的安全和效率日益受到重视。由2019—2023年民航行业发展统计公报可知,在导致航空公司航班不正常的原因中天气占比分别为46.49%、57.31%、59.56%、67.14%和60.42%<sup>[1]</sup>。其中雷暴天气因其伴生天气多、雷暴云团对空域运行影响大以及强度难以量化等特征,对机场航班运行造成了不容忽视的影响。雷暴天气不仅会导致航班延误、取消,甚至可能引发安全事故,给机场的运行带来极大的挑战<sup>[2]</sup>。机场运行对于不同雷暴过程的影响差别较大,因此,量化雷暴天气影响强度,研究雷暴天气过程对机场运行韧性的影响,成为当前航空业亟待解决的问题<sup>[3]</sup>。

为量化天气对空中交通的影响,学者们从航路、空域和机场等多角度出发,提出了各类天气强度评估方法。2001年Callaham等<sup>[4]</sup>提出了天气影响交通指数(Weather impacted traffic index, WITI),以量化航路天气对交通需求的影响程度。Lisa<sup>[5]</sup>在WITI模型中增加了相关变量,建立了WITI和延误的关系矩阵。Chatterji等<sup>[6]</sup>基于WITI提出了基于运输需求和恶劣天气延误的评估方法。在空域影响方面,Matthews等<sup>[7]</sup>通过量化天气影响区域来预测对流天气对空域运行性能的影响。Klein<sup>[8]</sup>将WITI与空域容量进行结合建立了扫描法模型以评估空域受天气影响强度。叶志坚等<sup>[9]</sup>为准确评估天气对空域的影响,建立了对流天气空域阻塞概率模型和航路交通阻塞指数模型,以减少管制员对天气影响的误判。在机场航班运行影响方面,王时敏<sup>[3]</sup>通过分析历史数据,用决策树模型和神经网络模型量化恶劣天气对航班延误的影响,总结恶劣天气条件下不同城市的航班延误规律。Mueller等<sup>[10]</sup>对飞机的到达和起飞延误特性进行了深入的统计分析,发现天气是导致航班延误的最主要因素。2011年欧盟为描述欧洲机场天气状况开发了ATMAP气象算法<sup>[11]</sup>。曾杨等<sup>[12]</sup>利用模糊C均值(Fuzzy clustering mean, FCM)聚类和ATMAP算法分析气象与策略特征对终端区运行的影响。

Dong等<sup>[13]</sup>提出机器学习和ATMAP算法相结合的量化天气影响的新方法。

机场航班运行韧性是指机场系统在面对各种危险事件的扰动时,能够及时有效地预测、吸收和适应,并从中恢复其基本结构和功能的能力,包含了适应性、快速恢复性等多个维度。科学评估机场航班运行韧性的表征方法及演变特征,可以为机场应对不同雷暴天气过程提供理论参考,提升机场在雷暴天气的应对能力,从而提高机场运行的安全和效率。对于韧性研究,1973年加拿大生态学家Holling<sup>[14]</sup>首次提出了韧性的概念。Bruneau等<sup>[15]</sup>在此基础上提出了韧性损失(Resilience loss, RL)的概念,后被称为“韧性三角”。Nan等<sup>[16]</sup>提出一种定量评估系统韧性的方法,将遭受干扰后的系统韧性水平分为5个阶段,即初始稳定阶段、响应阶段、破坏阶段、恢复阶段和新的稳定阶段。Pamela<sup>[17]</sup>首次将韧性概念引用到交通领域,包含适应性、快速恢复性等方面,并提出具体的量化方法。Clark<sup>[18]</sup>对单个国家空域系统机场网络进行研究,定量评估鲁棒性和恢复策略,帮助系统更有效地应对扰动和灾害。王兴隆等<sup>[19]</sup>建立层次化的贝叶斯网络模型,量化空中交通运输系统韧性。Lordan等<sup>[20]</sup>通过构建模型,模拟对航空网络中基于不同标准选定的关键机场进行攻击的情况,以此来评估全球航空运输网络的鲁棒性。

为研究天气影响下的系统韧性,学者们建立了不同的韧性指标。戢晓峰等<sup>[21]</sup>从吸收能力、适应能力和恢复能力3个维度出发,用路段速度差、平均车速变化等指标评估暴雨下的高速公路韧性。黄莺等<sup>[22]</sup>在复杂网络理论和韧性城市理论基础上,将平均效率作为韧性指标研究城市地铁网络恢复策略。王金岩等<sup>[23]</sup>采用层次分析法,构建了一种基于韧性曲线的韧性评估指标,并从规划角度提出了韧性提升方法。黄信等<sup>[24]</sup>通过构建服务效率函数来量化暴雨下机场基础设施网络韧性。王兴隆等<sup>[25]</sup>通过延误时间、正常率等关键指标来评估系统在恶劣天气下的韧性变化,并提出恢复策略概

念及韧性恢复模型。

综上所述,天气对空中交通影响的研究成果较多,但普遍局限于单一维度,缺乏对空中与地面天气状况综合考量的视角,难以全面考量雷暴对机场终端区的影响。雷暴本身的非线性特性、气象要素之间的复杂性和雷暴灾害的差异性导致雷暴影响量化表示的难度大幅增加,雷暴在空中有一定的影响区,其雷暴主体范围严禁飞机进入,会影响飞机在空域中的运行;同时空中的雷电活动与地面强降水、雷暴大风等也具有相关性,且此类天气可距雷暴主体较远,如阵风锋可延伸至 20 km 以外,导致地面跑道侧风超标或低空风切变,影响航班起降,因此地空融合的雷暴量化方法可以更好的评估其对终端区航班运行的影响程度。韧性理论在民航领域也有一定的研究成果,但在恶劣天气对机场航班运行的影响方面,因雷暴天气具有特殊性,目前未进一步探讨不同强度的雷暴天气过程对航班运行的影响程度,也未考虑其与航班运行韧性之间的响应关系。本文提出地空结合的雷暴影响强度指数,并以雷暴天气下的航班运行韧性指标为依据进行聚类分析,建立了雷暴天气持续扰动下的韧性评估模型,从而揭示不同雷暴天气对机场航班运行韧性的影响。

## 1 雷暴影响强度指数

离场航班运行是从地面到空中的一次连续过程,机场场面雷暴天气指数采用 ATMAP 气象算法<sup>[26]</sup>,通过分析 METAR 报文,对地面雷暴天气强度进行评分,从而量化地面雷暴天气强度。空中雷

暴强度指数则运用特定方向对流天气空域阻塞概率模型,将终端区气象雷达数据作为资料,得出雷暴天气下交通流在各个方向被阻塞的概率,量化空中雷暴天气强度。最后,将地面雷暴强度与空中雷暴强度分别进行数据归一化处理和算数平均,将代表地面和空中两个维度的评估结果融合成一个综合性的雷暴影响强度指数。

### 1.1 ATMAP 算法

ATMAP 是对地面天气强度进行客观、综合衡量的一种算法。

(1) 选取雷暴发生过程中,机场的全部 METAR 报文每小时数据,通常包括风力信息、能见度、跑道视程、天气现象、云层以及温度/露点等。

(2) 提取出日期、机场代码、能见度云高、风速、降水、霜冻和危险天气信息,为后续的数据处理和计算做准备。

(3) 依据 ATMAP 算法对提取的关键信息进行解析,分别针对低云低能见度、风速、降水、冰冻和危险天气等 5 类气象要素的严重程度进行赋值。首先,利用严重程度代码将气象要素不同级别的影响程度进行分类,用于标识不同级别的气象条件。其次,由于严重程度代码无法描述气象现象的非线性变化,所以引入系数,对每类气象要素的严重程度进行评分,如图 1 所示<sup>[11]</sup>。最后汇总 5 类气象要素得分,得到该时刻天气分数,示例如表 1 所示。

$$\delta_t = V_t + W_t + P_t + F_t + D_t \quad (1)$$

式中:  $V_t$  为能见度系数,  $W_t$  为风速系数,  $P_t$  为降水系数,  $F_t$  为冰冻条件系数,  $D_t$  为危险天气系数,  $\delta_t$  为  $t$  时刻的 ATMAP 天气得分。

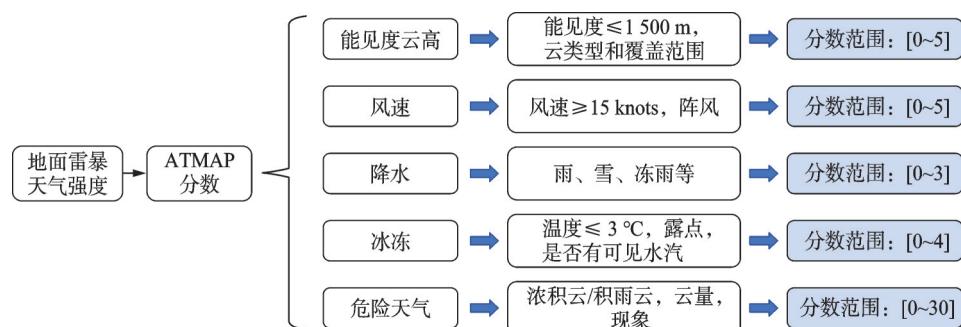


图 1 气象要素量化示意图<sup>[11]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of meteorological element quantification<sup>[11]</sup>

表 1 ATMAP 得分计算

Table 1 ATMAP score calculation

天气等级	能见度	风速	降水	冰冻条件	危险天气	总计
METAR 报文	METAR ZLXY 130900Z 35007G17MPS 280V050 9999 TS FEW033CB 34/09 Q0999 BECMG TL1000 NSW=					
字段	9999	35007G17MPS	TS	34/09	TS,FEW033CB	—
得分	0	1	0	0	24	25

## 1.2 特定方向对流天气空域阻塞概率模型

将雷达气象回波图与终端区管制平面范围进行拟合分析,通过特定方向对流天气空域阻塞概率模型来准确评估空域受天气影响程度,从而量化空中雷暴天气强度。

### (1) 数据处理

以机场为几何中心,限制经纬度的范围。将机场雷达组合反射率因子逐10 min资料作为数据来源。反射率<18 dBZ为无阻塞区阈值,对应弱降水等非对流性天气,对航空器运行无显著影响,航空器可安全穿越;反射率=18 dBZ为概率性阻塞阈值,代表对流天气初始发展阶段,此阶段天气尚未成熟;反射率=41 dBZ完全阻塞阈值,代表成熟对流发展阶段,对航空器构成实质性威胁。因此,为简化雷达数据,对反射率进行阈值处理,反射率小于18 dBZ的值划分为0 dBZ;大于等于18 dBZ且小于41 dBZ的值划分为18 dBZ;大于等于41 dBZ的值划分为41 dBZ,从而得到过滤后的雷达回波图,红色虚线所示区域为终端区空域的平面范围,黑色虚线所示区域为扇区,红色点为航路点,如图2、3所示。

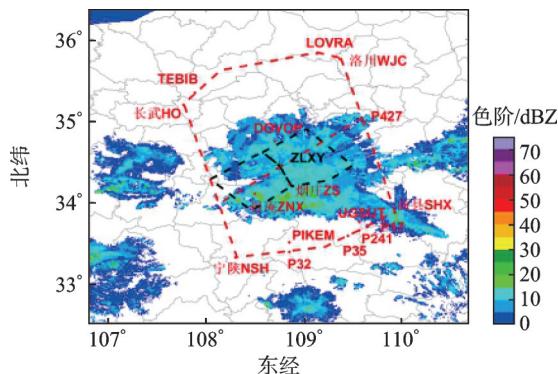


图2 雷达回波图

Fig.2 Radar echo map

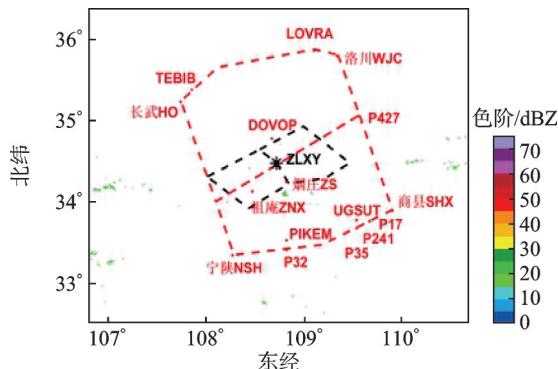


图3 过滤后的雷达回波图

Fig.3 Filtered radar echo map

### (2) 扫描基准线和扫描线

如图4所示,将机场的地理位置作为中心点,以磁北为基准,从0°开始,每隔15°做一条扫描线。虚线

所示区域为终端区空域的平面范围,扫描基准线共有12条(与反方向方位视为同一条基准线,例如0°和180°扫描线为同一条扫描基准线),如图4所示。

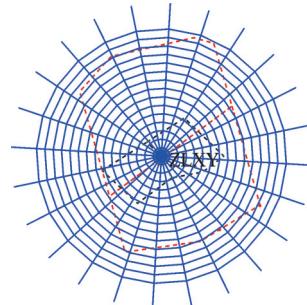


图4 扫描基准线示意图

Fig.4 Schematic diagram of the scanning reference line

### (3) 网格划分

在确定了扫描线和扫描基准线的基础上,进行网格化处理,以0.1°进行网格划分,1.5°可以完全覆盖整个终端区空域,因此共划分24×15个小网格,并将网格化的区域与过滤后的雷达气象回波图进行组合,从而对网格内的天气强度进行分析。

### (4) 空域阻塞概率

航空器在空域中是否受到天气影响而阻塞,取决于网格内天气强度最高的情况。扫描所有覆盖终端区空域的网格,分别扫描出反射率最高为18 dBZ或41 dBZ的网格数量,并以此评估空域阻塞概率。

若网格内天气强度最高值 $\lambda$ 小于临界值 $\xi_1$ 时,即 $\lambda < \xi_1$ ,空域阻塞概率 $\phi_i = 0$ ,航空器可以穿越;若 $\lambda$ 大于等于临界值 $\xi_1$ 且小于临界值 $\xi_2$ 时,即 $\xi_1 \leq \lambda < \xi_2$ , $\phi_i = 0.5$ ,航空器有50%的概率不可穿越;若 $\lambda$ 大于等于临界值 $\xi_2$ 时,即 $\lambda \geq \xi_2$ , $\phi_i = 1$ ,航空器不可穿越。 $\lambda$ 为网格内天气强度最高值, $\xi$ 为雷达反射率临界值,其中 $\xi_1$ 对应反射率18 dBZ, $\xi_2$ 对应反射率41 dBZ<sup>[9,27]</sup>。

表2 空域阻塞概率 $\phi_i$ 定义Table 2 Definition of airspace blockage probability  $\phi_i$ 

反射率/dBZ	阻塞概率 $\phi_i$	颜色(R, G, B)
( $-\infty$ , 18)	0.0	(255, 255, 255)
[18, 41]	0.5	(12, 255, 10)
[41, $+\infty$ ]	1.0	(250, 140, 0)

### (5) 空域阻塞概率计算

假设划定的空域范围有 $n$ 条有效扫描线,以 $m$ 单位长度进行网格划分,每个网格的空域阻塞概率为 $\phi_{ij}$ ,则终端区空域在 $t$ 时刻的阻塞概率 $\epsilon_t$ 为

$$\epsilon_t = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \phi_{ij} / (m \times n) \quad (2)$$

$\epsilon_t$ 的大小与所划设的网格大小有关, $\epsilon_t$ 值越大,则说明该时刻空域受天气影响程度越强。

### 1.3 雷暴影响强度指数

为了将得到的地面雷暴强度和空中雷暴强度数值缩放到同一区间,提升精度,采用式(3)最值归一化方法将数据映射到0~1之间。因 $x_{\max}$ 为数据样本中的最大值,若未来出现更极端的天气,即ATMAP得分或阻塞概率超出历史最大值时,归一化结果将暂时超过1,则触发预警并标记为“超限值”,并根据新数据更新归一化基准。构建的雷暴影响强度指数为经过归一化处理后的ATMAP得分和阻塞概率的平均值,如式(4)所示。

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

$$\omega_i = (\delta_i^{X_i} + \epsilon_i^{X_i})/2 \quad (4)$$

式中: $x_i$ 为要进行归一化的数据, $x_{\min}$ 为样本数据中的最小值, $x_{\max}$ 为样本数据中的最大值, $\delta_i^{X_i}$ 为 $t$ 时刻经过归一化处理后的ATMAP得分, $\epsilon_i^{X_i}$ 为 $t$ 时刻经过归一化处理后的阻塞概率, $\omega_i$ 为 $t$ 时刻的雷暴影响强度指数。

地空结合的雷暴强度指数通过综合地面与空中的数据来评估雷暴的强度,比单纯依赖机场天气分数或空中阻塞概率的方法更为全面和准确,也能更精确的评估雷暴影响下的机场航班运行韧性。

## 2 机场航班运行韧性评估模型

雷暴天气是一种强对流性天气,可能伴随降雨或闪电等极端现象,会直接影响飞行安全,导致航班延误或取消,这些天气条件通常不会瞬间消失,而是会持续一段时间,即使雷暴云团开始移动,其影响仍可能持续。雷暴过后,机场需要一段恢复时期来逐步恢复正常运行,处理积压航班,包括重新安排起飞顺序、调整航班计划等。因此,构建持续扰动状态下的韧性评估模型,可以使其更适应雷暴天气的韧性评估需求。

### 2.1 机场航班运行韧性评估框架

韧性是指一个系统及其组成部分能够及时有效地预测、吸收和适应危险事件的影响,并从中恢复其基本结构和功能的能力,包含了多个维度,具有鲁棒性(Robustness)、可恢复性(Recovery)、冗余性(Redundancy)、协调性(Reconcile)和快速性(Rapidity)5个特性。

雷暴天气过程是一个持续性的过程,机场航班运行系统一开始会受到发生在终端区的雷暴天气的间接影响,韧性水平波动一段时间后开始下降,接着会受到本场发生的雷暴天气的直接影响,雷暴停止后,对系统的影响消失,韧性水平逐渐恢复到初始状态。

如图5所示, $t_0 \sim t_1$ 时段为系统初始稳定阶段,

此时系统未受到外界干扰,系统韧性水平处于正常状态。 $t_1 \sim t_2$ 时段为响应阶段,代表着系统的抗干扰能力,体现系统的易感性,用响应时间(Response time, RST)来表示。 $t_1$ 时刻系统开始受到雷暴的持续性干扰,系统韧性处于波动状态, $t_2$ 时刻系统性能水平处于下降的临界状态。 $t_2 \sim t_3$ 时段为破坏阶段,此时系统因外界的干扰韧性水平开始下降,反映系统对干扰事件的吸收能力,用破坏时间(Destruction time, DST)来表示。 $P$ 代表系统韧性性能水平, $t_3$ 时刻下降到最低水平 $P_{\min}$ ,用鲁棒性(Robustness, R)来表示,即系统受外界干扰后不致崩溃,维持一定运行水平的能力。破坏速率(Destruction rate 1, Rate<sub>1</sub>)表示系统韧性下降的速度,反应系统性能损失的快慢程度。 $t_4$ 为本场雷暴结束时刻,航班运行性能在本场雷暴发生前已呈现下降趋势,且在 $t_4$ 时刻已经处于恢复阶段。雷暴 $t_3 \sim t_4$ 时段为恢复阶段,干扰对系统的影响消失后,韧性水平开始恢复,反映了系统调动资源以便快速恢复的能力,用恢复时间(Recovery time, RCT)来表示。恢复速率(Recovery rate 2, Rate<sub>2</sub>)为系统受破坏后恢复到正常运行水平的速度。 $t_4$ 之后的时段为新的稳定阶段,系统韧性维持在一个新的韧性水平,反映了受干扰后系统性能恢复的程度,用恢复能力(Recover ability, RA)来表示。韧性损失(Loss of performance, LOP)为干扰事件造成的系统韧性下降总量,可通过系统正常性能水平与系统在破坏阶段和恢复阶段的性能之差来计算。平均韧性损失(Time averaged performance loss, TA-PL)为单位时间的韧性下降总量,可以衡量在整个过程中干扰事件对系统韧性的影响程度。

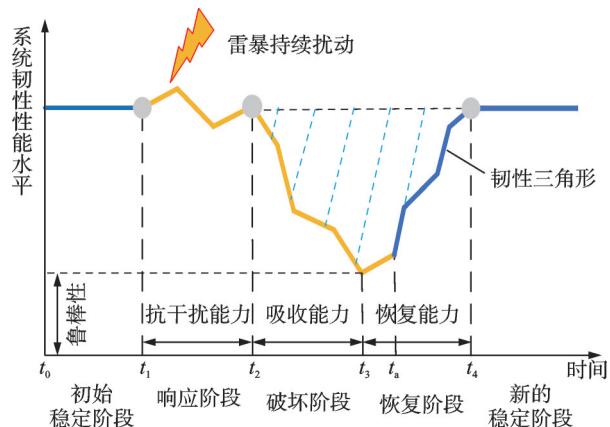


图5 雷暴持续扰动下的韧性指数模型

Fig.5 Resilience index model under persistent thunderstorm disturbances

非负综合韧性指标(Non-negative general resilience, NGR)是对系统韧性的整体评估,且避免了韧性指标为0的情况<sup>[2]</sup>。

$$\text{NGR} = f(R, \text{Rate}_1, \text{Rate}_2, \text{TAPL}, \text{RA}) = e^R \times \left( \frac{\text{Rate}_2}{\text{Rate}_1} \right) \times (\text{TAPL}^{-1}) \times \text{RA} \quad (5)$$

上述度量指标将韧性过程的5个阶段进行了定量评估,将纵坐标设置为选定的机场航班运行韧性指标,可以直接反应系统韧性随时间的变化。

## 2.2 机场航班运行韧性指标

有效地表征机场运行效率,选择合适的机场航班运行韧性指标是首要解决的问题。航班运行数据如正常率、准点率等是对机场系统内外多重因素的显性表现,反映了设备可靠性、人为决策等的综合影响,然而,正常率和准点率只描述当前时间段内的航班运行性能,并没有考虑到前序时间段延误航班对当前时间段影响。本文构建了出发率指标,考虑延误航班在当前时间段内起飞的情况。

(1) 航班离港正常率,即离港正常航班的航段班次与计划离港航班的航段班次之比,用百分比表示,该指标反映航班离港阶段的正常情况,其中离港正常航班为不晚于计划离港时间15 min的航班<sup>[28]</sup>,可描述为

$$D_{n, T_1, T_2} = \frac{N_{n, T_1, T_2}}{N_{p, T_1, T_2}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $D_{n, T_1, T_2}$ 表示 $[T_1, T_2]$ 时间段内航班的离港正常率, $N_{n, T_1, T_2}$ 为 $[T_1, T_2]$ 时间段内正常起飞的航班数量, $N_{p, T_1, T_2}$ 为 $[T_1, T_2]$ 时间段内计划起飞的航班数量。

(2) 航班离港准点率,即准点起飞的航段班次与计划航段班次的数量之比,即非延误航班的占比,用百分比表示。实际起飞时间晚于计划起飞时间30 min以内的航班均记为准点起飞,可描述为

$$D_{s, T_1, T_2} = \frac{N_{s, T_1, T_2}}{N_{p, T_1, T_2}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $D_{s, T_1, T_2}$ 表示 $[T_1, T_2]$ 时间段内离港航班的准点率, $N_{s, T_1, T_2}$ 为 $[T_1, T_2]$ 时间段内准点起飞的航班数量。

(3) 航班离港出发率在准点率的基础上,考虑到了之前的延误航班在此阶段的起飞情况,可描述为

$$D_{d, T_1, T_2} = \frac{N_{s, T_1, T_2} + N_{d, (T_1, T_2)}}{N_{p, T_1, T_2} + N_{d, (T_1, T_2)}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $D_{d, T_1, T_2}$ 表示 $[T_1, T_2]$ 时间段内离港航班的出发率, $N_{d, (T_1, T_2)}$ 为 $T_1$ 时刻之前延误,在 $[T_1, T_2]$ 时间段内起飞的航班数量。

将航班正常率、准点率和出发率进行对比,粉色区域为雷暴在本场发生到结束的时间段。由图6可以看出,在受到雷暴天气的扰动后,机场航班运行性能受到影响,正常率、准点率和出发率都在下降,正常率因只考虑正常离场的航班,略微下降后一直保持在较好的水平,即使空域内还有较强的雷暴活动,正常率也处于相对平稳的状态;准点

率则一直下降,从18:00开始在6个单位时间内保持为0;而出发率充分考虑了延误航班之后再次起飞的情况,在波动式下降到最低点后性能逐渐上升,因此使用构建的出发率指标作为韧性指标,可以更准确地衡量系统韧性。

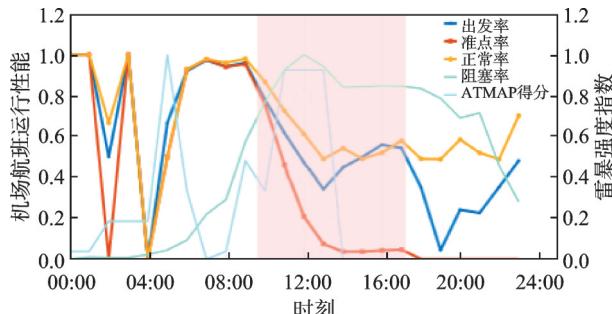


图6 正常率、准点率和出发率对比图

Fig.6 Comparison chart of normal operation rate, punctuality rate, and departure rate

## 2.3 机场航班运行性能基线

在现有的研究中,大多数学者假定系统的初始稳定阶段为理想天气状态,然而现实情况中,机场航班运行性能除了受天气影响外,还会受航空公司、空管和设备等因素影响,充分考虑航班运行系统受常态化因素影响的性能演变特征,能更准确反映出机场的性能损失。因此以正常天气下的离场航班出发率作为机场航班运行性能基线,方法如下:

(1) 数据筛选与分类。从METAR报文中筛选出包含CAVOK(Ceiling and visibility OKay)关键词的报文,按照周一到周日对筛选出的数据进行分类。

(2) 数据切割。按照1 h的间隔对每日的数据进行切割,得到每个小时内的航班出发率数据。

(3) 性能基线构建。计算每个小时内的平均出发率,以此作为该小时的性能基准,最终得到好天气下的机场航班运行性能基线。

## 2.4 机场雷暴影响持续时间阈值判定方法

为了科学、准确地评估机场航班运行性能受雷暴影响的程度,并确定一个明确的阈值来界定何时航班运行开始受到显著影响。首先将所有时刻的出发率和雷暴影响强度指数放入同一个数据池中,计算出雷暴影响强度指数所对应的平均出发率,然后将雷暴影响强度指数从大到小逐步删除,计算出每次删除后剩余池中所有出发率的平均值及其变化量。该变化量反映了删除某个雷暴影响强度指数后,航班出发率平均水平的变动程度。

出发率平均值变化量达到最大时的雷暴影响强度指数值,就是机场雷暴影响持续时间的阈值。它表示当雷暴影响强度达到或超过这个水平时,机场的航班运行性能将开始受到显著影响。

### 3 实例分析

#### 3.1 数据处理

把西安机场的离场航班运行资料作为主要数据来源,由于航班运行数据数量庞大且存在异常数据,首先要进行数据处理:

(1) 数据筛选。筛选出 25 天雷暴日和 60 天好天气的每小时计划航班架次、计划起飞架次、起飞延误架次、起飞取消架次、以及实际起飞架次等共 12 240 组相关数据。

(2) 数据清洗。对于 1 387 条缺失数据,采用插值法填补空缺;对于 334 条异常数据,采用插值法或者进行删除。

(3) 时序切分。为探究雷暴强度指数对航班运行韧性的影响,将原机场航班运行资料按照 1 h 的间隔进行切分统计,共 2 040 组。

#### 3.2 西安机场雷暴天气过程分析

通过分析 2018—2021 年西安机场 METAR 报文可知,西安机场本场共发生 25 次雷暴天气过程,多发于 5、6、7、8 四个月,时段大多发生在 17 点到 23 点之间,本场持续时间多为 3 h 内,雷暴强度较弱,仅在 2019 年 8 月 6 号发生 1 次强雷暴。对于雷暴伴随的天气现象,强降水现象共发生 1 次,中等强度降水现象共发生 6 次,弱强度降水现象共发生 14 次,无降水现象共发生 4 次,由雷暴引发的风速大于 10 m/s 的现象共发生 4 次,低能见度现象未发生。

#### 3.3 机场运行韧性过程分析

以 CAVOK 为关键词在 2018—2021 年西安机场 METAR 报文筛选出 60 天好天气,按照 1 h 的间隔进行切割,得到当前星期所对应的小时数据,以此计算出 1 天 0~23 h 内的平均出发率,最终得到了 7 条好天气下的机场航班运行性能基线。如图 7 所示。

分析 2018—2021 年西安机场在雷暴天气影响下的机场航班运行数据,确定航班运行性能开始受到雷暴影响的阈值。

由图 8 可知,随着雷暴影响强度指数的减小,对应的平均出发率在逐渐增大;删除雷暴影响强度

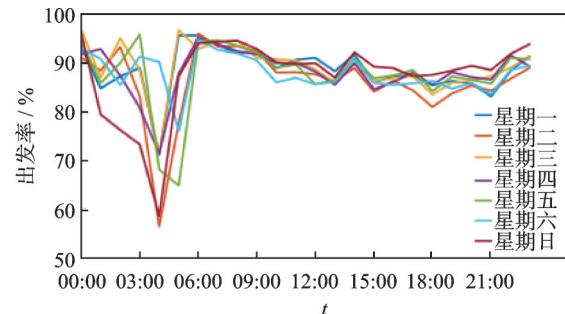


图 7 正常天气下的出发率

Fig.7 Departure rate under normal weather conditions

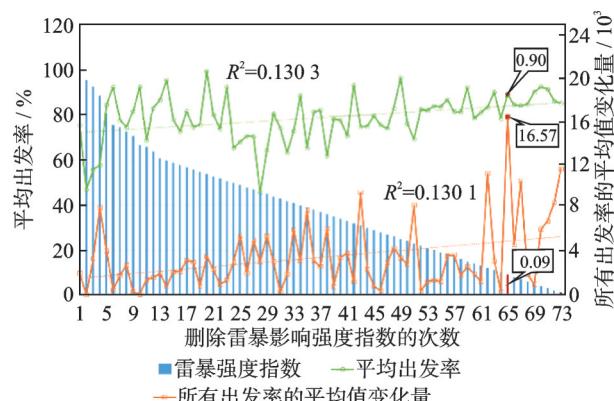


图 8 机场航班运行性能开始受影响的阈值

Fig.8 Threshold at which airport flight operations begin to be affected

指数较大的时刻,剩余池中所有出发率的平均值变化量也会增加,当雷暴影响强度指数为 0.09 时,变化量为最大值 16.57。因此,认定雷暴影响强度指数开始影响航班运行性能的阈值为 0.09。

把 2018—2021 年西安咸阳国际机场的 METAR 报文、气象雷达资料和离场航班运行资料作为主要数据来源,运用 ATMAP 算法和对流天气空域阻塞概率模型计算得到雷暴影响强度指数,并依据机场航班运行韧性评估模型计算出各阶段韧性指标。由表 3 可知,在雷暴天气的影响下,机场系统通过采取有效的措施且在雷暴消失后,大多恢复到了初始稳定阶段,即恢复能力 RA 值约等于 1。从整体情况来看,机场航班运行韧性损失指标与鲁棒性、非负综合韧性指标呈负相关,即韧性

表 3 雷暴天气下机场航班运行韧性度量指标

Table 3 Resilience metrics for airport flight operations during thunderstorm weather

时间	响应时间/h	破坏时间/h	鲁棒性	破坏速率/(%·h <sup>-1</sup> )	恢复时间/h	恢复速率/(%·h <sup>-1</sup> )	恢复能力	韧性损失	平均韧性损失	非负综合韧性指标
20180715	10	3	0.620	9.33	4	9.50	1.357	0.660	0.094	27.325
20190709	-1	4	0.590	7.80	7	5.90	1.323	1.535	0.140	12.890
20200531	6	3	0.400	17.00	2	30.00	1.176	0.690	0.138	22.435
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20210502	7	10	0.040	9.20	6	14.17	0.924	6.585	0.412	3.595

损失指标越大,鲁棒性和非负综合韧性指标越小。

计算雷暴天气下机场航班运行韧性度量指标、雷暴影响强度指数及日出发率的Pearson相关系数,并绘制相关系数热力图,数字越小代表其相关性越强,其中雷暴过程强度指标为雷暴影响强度指数在 $t_1 \sim t_4$ 时间段内的积分,日出发率为一天内每小时出发率的平均值。如图9所示,最大雷暴影响强度指数与韧性指标之间没有显著的相关性。雷

暴过程强度与韧性损失 LOP 在 5% 的显著性水平下显著( $r=0.494, p<0.05$ ),表明两者之间存在中度正相关关系,即随着雷暴过程强度的增加,韧性损失也倾向于增加。日出发率与多个韧性指标有显著的相关性,特别是与韧性损失( $r=-0.953, p<0.001$ )和平均性能损失( $r=-0.74, p<0.001$ )有非常显著的负相关性,表明日出发率越高,韧性损失和平均性能损失越大。

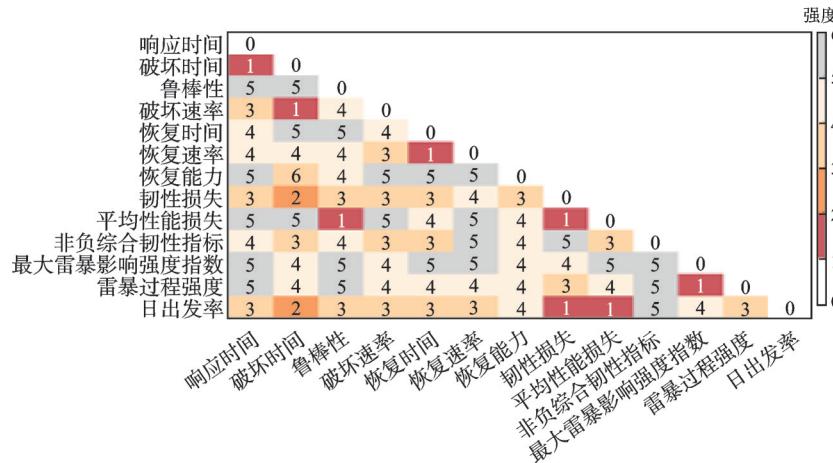


图9 相关系数热力图

Fig.9 Correlation coefficient heatmap

用逐步回归算法,设置参数为进入 0.05,删除 0.1,变量 Y 分别为响应时间  $y_1$ 、破坏时间  $y_2$ 、鲁棒性  $y_3$ 、破坏速率  $y_4$ 、恢复时间  $y_5$ 、恢复速率  $y_6$ 、恢复能力  $y_7$ 、韧性损失  $y_8$ 、平均性能损失  $y_9$  和非负综合

韧性指标  $y_{10}$ ,自变量 X 为阻塞率  $x_1$ 、天气分数  $x_2$ 、平均雷暴影响强度  $x_3$ 、最大雷暴影响强度  $x_4$ 、雷暴过程强度  $x_5$  和日出发率  $x_6$ ,逐步回归分析结果如表 4 所示。

表4 逐步回归分析模型

Table 4 Stepwise regression analysis model

变量 Y	逐步回归方程	$R^2$	调整 $R^2$	F 检验
响应时间	$y_1=442.65x_3+55.919x_6-47.206$	0.483	0.422	$F=7.927, p<0.001$
破坏时间	$y_2=-35.951x_6+35.657$	0.376	0.341	$F=10.828, p<0.001$
鲁棒性	$y_3=-10.723x_3+0.505$	0.231	0.188	$F=5.408, p<0.05$
破坏速率	$y_4=0.804x_6-0.495$	0.229	0.186	$F=5.347, p<0.05$
恢复时间	$y_5=-0.042x_2-23.191x_6+25.176$	0.399	0.328	$F=5.645, p<0.05$
恢复速率	模型无明显变量			
恢复能力	模型无明显变量			
韧性损失	$y_8=-18.123x_6+16.815$	0.908	0.903	$F=178.681, p<0.001$
平均性能损失	$y_9=-0.636x_6+0.694$	0.547	0.522	$F=21.744, p<0.001$
非负综合韧性指标	模型无明显变量			

通过逐步回归分析,评估了多个变量对不同韧性度量指标的影响,结果显示,韧性损失的模型具有最高的解释度,  $R^2$  值为 0.908, 调整后的  $R^2$  值为 0.903,  $F$  统计量为 178.681, 且  $p$  值小于 0.001, 这表明该模型在统计上非常显著。响应时间、破坏时间、恢复时间和平均性能损失的模型也表现出较好的拟合度, 分别有 48.3%、37.6%、39.9% 和 54.7% 的解释度, 且都具有统计显著性。鲁棒性和破坏速率的模型虽然解释度

相对较低, 分别为 23.1% 和 22.9%, 但它们仍然在统计上显著。恢复速率、恢复能力和非负综合韧性指标的模型在逐步回归过程中没有找到显著的预测变量, 意味着这些指标可能受到其他未在模型中考虑的因素影响, 需要进一步的研究来确定其影响因素。总体而言, 识别对因变量有着显著影响的预测变量, 为制定针对性的应对策略提供了量化依据, 有助于更好地应对雷暴天气对机场航班运行韧性的影响。

### 3.4 层次聚类分析

聚类是一种基于数据自身特征的无监督分类方法,它可以在不确定类别的情况下对数据进行分类,将相似性较高的数据分在同一类别下,常见的层次聚类连接方法有单链接法、全链接法、平均链接法和 Ward 链接法。单链接法以两类间最近样本点的距离作为类间距离,易形成链式聚类结构,导致类别划分松散;全链接法以两类间最远样本点的距离作为类间距离,易导致不稳定的聚类结果;平均链接法以两类间所有样本点距离的均值作为类间距离,在小样本数据中易受随机波动干扰。Ward 链接法是一种最小化类内方差的方法,更适合数据差异较小且需要类内紧密性的场景。

由于本文数据量较少,数据差异性不大,因此使用 Ward 链接法计算类与类的距离。由图 10 可知,使用 Ward 链接法对雷暴天气下的航班运行韧性指标进行层次聚类分析,对应的最佳平均轮廓系数为 0.898 6,雷暴天气过程最佳分为 2 类,此时“雷暴日”20200515、20210821、20200409、20200803、20210602、20210531、20210719、20210502、20180807、20190709、20210717、20180715、20200531、20190729、20180730、20180808 和 20180821 归为一类,为类别 1;“雷暴日”20190604 和 20210630 归为一类,为类别 2。

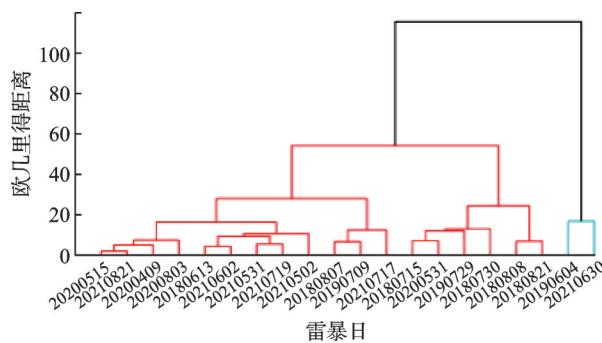


图 10 层次聚类树状图

Fig.10 Hierarchical clustering dendrogram

以正常天气下的机场航班运行性能为基线,描

绘出发率在雷暴天气下随时间的变化情况,3 条虚线分别代表航班运行性能开始下降时刻  $t_2$ ,性能最低时刻  $t_3$ ,恢复到稳定时刻  $t_4$ 。如图 11 所示,不同类别的雷暴天气过程对机场航班运行有着不同程度的影响,但整个雷暴过程持续时间远大于本场雷暴过程持续时间,且本场雷暴发生之前,机场航班运行性能已经呈现下降趋势。

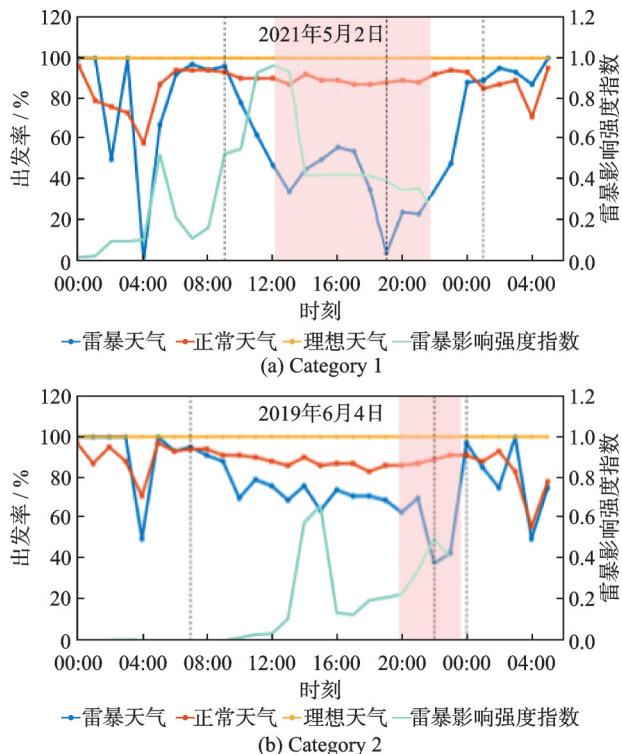


图 11 不同雷暴过程的韧性变化图

Fig.11 Resilience variations across different thunderstorm processes

类别 1 的平均雷暴过程强度为 4.511, 平均本场持续时间为 2.2 h, 类别 2 的平均雷暴过程强度为 3.887, 平均本场持续时间为 2.5 h。不同类别的航班运行韧性度量指标和雷暴特征指标的平均值如表 5 所示, 其中类别 1 的鲁棒性较小, 破坏速率快, 恢复速率慢, 韧性损失较大, 非负综合韧性指标为 13.037; 类别 2 的鲁棒性较大, 破坏速率慢, 恢复速率快, 韧性损失较小, 非负综合韧性指标为 71.808。

表 5 层次聚类后不同类别的度量指标平均值

Table 5 Average metric values for different categories after hierarchical clustering

类别	响应时间/h	破坏时间/h	鲁棒性	破坏速率/ ( $\% \cdot h^{-1}$ )	恢复时间/h	恢复速率/ ( $\% \cdot h^{-1}$ )	恢复能力	韧性损失	平均韧性损失	非负综合韧性指标	本场持续时间/h	雷暴过程强度
1	4.944	6.167	0.361	16.71	5	16.39	1.066	2.189	0.184	13.037	2.2	4.511
2	-1	10.5	0.46	4.40	2.5	22.42	1.284	1.96	0.14	71.808	2.5	3.887

通过深入分析不同类别的雷暴强度动态演化过程,类别 1 的平均雷暴强度大部分时间要比类别 2 的平均雷暴强度大;类别 1 的平均标准差为

0.194,类别 2 的平均标准差为 0.176,即类别 1 的雷暴强度在 24 h 内的波动更大,强度变化更剧烈;类别 1 和类别 2 的每小时平均上升速率为 0.09

和0.065,类别1相对于类别2其雷暴强度增长速度更快,整体增长趋势更强。类别1雷暴具有高强度、高波动和快速增强的特点,对机场造成了强烈冲击,对应着较差韧性表现;类别2雷暴则表现为弱强度、低波动和缓慢增强,为机场提供了宝贵的适应和调整时间,有着较好的韧性表现(图12)。

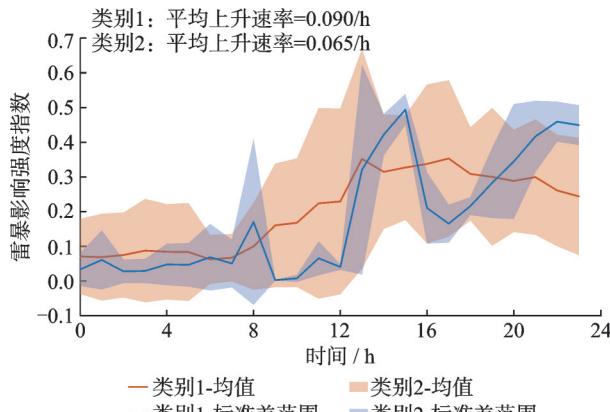


图12 不同类別雷暴强度演化过程对比图

Fig.12 Comparison of evolution processes for different categories of thunderstorm intensity

## 4 结 论

(1) 雷暴天气因具有突发性强、移动速度快和气象要素关系复杂等特性,导致雷暴天气影响程度难以量化。本文提出的基于ATMAP算法和对流天气空域阻塞概率模型的雷暴影响强度指数,充分考虑机场场面和地面受到的影响,提高了雷暴影响强度的量化评价的准确性和可靠性。

(2) 雷暴从机场终端区开始出现起就已经对航班运行产生了影响,本场雷暴发生之前机场航班运行性能已呈现下降趋势,当本场雷暴发生时,航班运行性能大致处于最低点,并且雷暴的实际影响时间往往比本场雷暴的持续时间更长。因此提前采取措施应对雷暴天气,优化航班管理策略至关重要。

(3) 雷暴影响强度指数开始影响航班运行性能的阈值为0.09。使用层次聚类法对雷暴天气过程进行聚类可知,雷暴天气过程分为两类,平均雷暴过程强度分别为4.511和3.887,平均标准差分别为0.194和0.176,雷暴平均上升速率分别为0.09和0.065,非负综合韧性指标分别为13.037和71.808,即机场系统在高强度、高波动和快增长的雷暴冲击下,非负综合韧性指标越小。

本文只探讨了离场航班的运行韧性,未来的研究将拓展到进离场航班,研究雷暴天气下航班整体的运行韧性,并探索韧性提升与预测的新方法。

## 参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 2019年民航行业发展统计公报[EB/OL]. (2020-06-05). [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202006/t20200605\\_202977.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202006/t20200605_202977.html). Civil Aviation Administration of China. 2019 statistical bulletin on the development of the civil aviation industry [EB/OL]. (2020-06-05). [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202006/t20200605\\_202977.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202006/t20200605_202977.html).
- [2] 陈仔燕. 恶劣天气下机场航班运行韧性评估及预测[D]. 天津:中国民航大学, 2022. CHEN Ziyuan. Resilience assessment and prediction of airport flight operations under severe weather[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022.
- [3] 王时敏. 恶劣天气对航班延误影响的初步量化研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017. WANG Shimin. Research on the impact of severe weather on flight delay[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [4] CALLAHAM M B, DEARMON J S. Assessing NAS performance: Normalizing for the effects of weather[C]//Proceedings of the 4th Semantic Scholar. [S.I.]: Europe Air Traffic Management R&D Symposium, 2001: 3-7.
- [5] LISA G. Analyses of delay in an air traffic system with weather uncertainty[D]. Washington: University of Washington, 2002.
- [6] CHATTERJI G B, SRIDHAR B. National airspace system delay estimation using weather weighted traffic counts[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. San Francisco, California: AIAA, 2005: 6278.
- [7] MATTHEWS M, DELAURA R. Assessment and interpretation of en route weather avoidance fields from the convective weather avoidance model[C]//Proceedings of the 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Fort Worth, Texas: AIAA, 2010: 9160-9179.
- [8] KLEIN A, JEHLEN R, LIANG D. Weather index with queuing component for national airspace system performance assessment[C]//Proceedings of the 7th USA/Europe ATM R&D Seminar. Barcelona, Spain: Eurocontrol, 2007: 63-72.
- [9] 叶志坚,高伟,王莉莉,等.对流天气空域阻塞概率与阻塞指数模型[J].航空计算技术,2014,44(2):1-6,10. YE Zhijian, GAO Wei, WANG Lili, et al. Airspace blocking probability model and traffic obstruction index model under convective weather[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(2): 1-6, 10.
- [10] MUELLER E, CHATTERJI G B. Analysis of aircraft arrival and departure delay characteristics[C]//Pro-

- ceedings of 2002 Technical Forum of AIAA's Aircraft Technology, Integration, and Operations(ATIO). Los Angeles: AIAA, 2002: 1-8.
- [11] Urocontrol. Algorithm to describe weather conditions at European airports [R]. Technical Report, Performance Review Unit. Brussels: Eurocontrol, 2011.
- [12] 曾杨,袁立罡,陈海燕,等.基于多元特征的终端区运行场景分类分析方法[J].航空计算技术,2022,52(3): 33-37.
- ZENG Yang, YUAN Ligang, CHEN Haiyan, et al. Classification and analysis method of terminal area operation scenarios based on multivariate features[J]. Aeronautical Computing Technique, 2022, 52(3): 33-37.
- [13] DONG X, ZHU X, HU M, et al. A methodology for predicting ground delay program incidence through machine learning[J]. Sustainability, 2023, 15(8): 6883.
- [14] HOLLING S C. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [15] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [16] NAN C, SANSAVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35-53.
- [17] PAMELA M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]//Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2006: 1398-1405.
- [18] CLARK K L. Mitigating infrastructure risk: Reducing uncertainty in resilience modeling[D]. Boston: Massachusetts: Northeastern University, 2018.
- [19] 王兴隆,苗尚飞.空域扇区网络结构特性分析及韧性评估[J].北京航空航天大学学报,2021,47(5): 904-911.
- WANG Xinglong, MIAO Shangfei. Structural characteristics analysis and resilience assessment of airspace sector network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(5): 904-911.
- [20] LORDAN O, SALLAN J M. Robustness of the air transport network[J]. Transportation Research Part E, 2014, 68: 155-163.
- [21] 戴晓峰,谢军,伍景琼.考虑不同侵扰场景的高速公路韧性评估方法[J].中国安全生产科学技术,2019,15(1): 12-19.
- JI Xiaofeng, XIE Jun, WU Jingqiong. Assessment method of expressway resilience considering different intrusion scenes[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1): 12-19.
- [22] 黄莺,刘梦茹,魏晋果,等.基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J].灾害学,2021,36(1): 32-36.
- HUANG Ying, LIU Mengru, WEI Jingguo, et al. Research on urban metro network recovery strategy based on resilience curve[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 32-36.
- [23] 王金岩,丁坤,孙亚璐,等.强沙尘暴下新能源基地的韧性评估及其提升方法[J].电网技术,2025,49(1): 124-135.
- WANG Jinyan, DING Kun, SUN Yalu, et al. Research on resilience assessment and improvement methods of new energy bases under strong sand-storm[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 124-135.
- [24] 黄信,杨立志,张永康,等.暴雨灾害下机场基础设施网络韧性恢复策略研究[J/OL].北京航空航天大学学报:1-20[2024-07-03]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0396>.
- HUANG Xin, YANG Lizhi, ZHANG Yongkang, et al. Research on resilience recovery strategy of airport infrastructure network under rainstorm disaster[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 1-20[2024-07-03]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0396>.
- [25] 王兴隆,赵俊妮,王进.恶劣天气下机场离场航班运行韧性评估及恢复[J].北京航空航天大学学报,2024, 50(1): 110-121.
- WANG Xinglong, ZHAO Junni, WANG Jin. Resilience assessment and recovery of airport departure flights under severe weather[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 110-121.
- [26] SCHULTZ M, LORENZ S, SCHMITZ R, et al. Weather impact on airport performance[J]. Aerospace, 2018, 5(4): 109.
- [27] ROBINSON M, EVANS J, CROWE B. En route weather depiction benefits of the NEXRAD vertically integrated liquid water product utilized by the corridor integrated weather system[C]//Proceedings of the 10th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. [S. l.] : MIT Lincoln Laboratory, 2002: 120-123.
- [28] 中国民用航空局.2016年民航航班正常统计办法(征求意见稿)[EB/OL].(2016-06-02). [https://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content\\_5203621.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5203621.htm).