基于位置的数据揭示极端天气对航空运输的影响及乘客延误

Chia-Wei Hsu、Chenyue Liu、Zhewei Liu*、Ali Mostafavi

Urban Resilience.AI Lab，Zachry土木与环境工程系，3136 TAMU，德克萨斯州学院站 *通讯作者

电子邮箱：lzwgre@gmail.com

摘要

极端天气对航空运输系统构成重大威胁，会导致航班改道和取消，并造成旅客出行延误。随着极端天气灾害日益频繁，了解航班中断及随后取消对旅客延误的影响程度至关重要。本研究通过调查基于隐私保护型基于位置的数据集所测得的旅客在机场的停留时间，重点量化近期极端天气事件（2022年埃利奥特冬季风暴）对美国航空运输系统的影响。本研究测算了极端天气事件期间机场的总停留时间及每位匿名用户的停留时间，并根据这些数值与上一年同期相比的变化计算其影响。结果显示，这场风暴导致旅客明显延误，表现为机场停留时间大幅增加。因子分析表明，客流较大且来自分散化航空公司的航班占比较高的机场，加剧了冬季风暴期间的旅客延误。机场的脆弱性主要源于风暴直接暴露，网络级联影响的作用则有限。本研究的发现为极端天气对航空运输的影响程度提供了新的见解，并在单个机场和国家层面进行了量化。这些结果可帮助机场所有者和运营商以及航空公司了解自身的脆弱程度，并为航空运输系统的天气相关风险评估提供有用信息。

1. 引言

冬季风暴、飓风和极端温度等极端事件日益频繁，扰乱航空运输系统的正常运行，导致出行延误，并给旅客、机场和航空公司职业人员带来后续经济成本（Doll、Klug 等，2014）。尽管人们日益认识到极端天气事件对航空运输的影响，但其对旅客出行延误的影响程度尚未得到充分理解和量化。据估计，由于极端天气事件发生的可能性和严重程度增加，其危害将进一步加剧（政府间气候变化专门委员会，2018），并对航空运输造成相应影响。因此，深入了解并量化极端天气事件对航空运输系统的影响至关重要，尤其应从旅客延误的角度加以考察。

既有研究已明确指出，影响机场基础设施和运营的主要气候事件包括海平面上升和城市洪涝、极端温度、强烈风暴以及强降水。（国际民用航空组织，2021年）。这些极端天气事件可能单独发生，也可能共同发生，并对机场系统的运行和安全产生复杂、相互交织且具有连锁效应的影响。例如，强烈风暴伴随的强风可能在起飞和着陆期间威胁航空器安全，在极端情况下还可能导致跑道关闭，从而造成严重的航班延误和取消。强烈风暴通常会在短时间内带来强降水，进而可能使机场排水系统超负荷运行（Voskaki、Budd 等，2023年）。2013年，伦敦盖特威克机场的一场严重冬季风暴叠加强降水，导致圣诞假期期间超过16,000名旅客遭遇延误和行程中断（Agency，2016年）。异常温度（极端热浪和寒潮）是气候变化给机场基础设施带来的另一项重大威胁。极高温和极低温都可能导致设备故障和运行不当。此外，极端温度还会影响跑道性能。极高温会使跑道过度软化，为航空器着陆形成不稳定的基础（De Vivo、Ellena 等，2021年）。例如，2018年7月，持续高温对德国汉诺威机场北跑道造成严重损坏，并导致数十个航班取消。极低温可能增加跑道的滑移性，削弱飞机的制动效能（Nuijten，2016年）。极端温度的另一项影响是飞机的最大起飞重量。由于湿度和温度波动导致空气密度变化，最大起飞重量会受到影响；这一因素对于海拔高度较高且跑道较短的机场尤其重要（Zhao，2020年）。

极端天气事件的频率和强度不断增加，这凸显了理解此类事件对航空运输系统的影响，以及随之而来的经济和社会后果的重要性。大多数现有研究（如 Chen 和 Wang，2019；Zhou 和 Chen，2020）主要通过分析航班取消和航班延误的程度，考察极端天气事件对航空运输系统的影响。此类航班延误通常被定义为计划航班出发/到达时间与实际航班出发/到达时间之间的差异（Borsky 和 Unterberger，2019）。然而，航班取消和航班延误并不能充分反映其对旅客出行延误的影响程度。基于位置的数据可以有效弥补这一局限。

基于位置的服务的兴起催生了基于精细化人类移动数据集的新型风险评估方法（Liu 等，2021年；Coleman 等，2022年；Zhang 和 Li，2022年）。此类数据集能够提供有关人口活动和流动的高时空分辨率洞见，可用于了解人们在灾害情景下如何移动、行动和应对（Wang 等，2020；Lee 等，2022年；Liu 等，2022年；Rajput 等，

2022年；Rajput 等，2022年）。通过评估人口活动和流动模式的变化，可以有效评估灾害引发的中断所造成的影响程度（Hsu 等，2022年；Lee 等，2022年；Rajput 和 Mostafavi，2022年；Wang 和 Taylor，2016年；Liu 等，2019年）。尽管基于位置的数据已被用于评估不同基础设施中的灾害引发的扰动（Lee 等，2022年），但此类高分辨率数据在考察航空运输系统对极端天气事件的脆弱性方面的应用仍相当有限。本研究弥补了这一空白，使用精细化的基于位置的数据，考察近期极端天气事件——2022年埃利奥特冬季风暴——对美国航空运输系统的影响，方法是量化并比较旅客延误（根据旅客在机场的停留时间推导得出）。

我们的数据集捕获了美国62座主要机场的41,344,261次匿名化出行记录，并记录了这些出行在稳态期（2021年12月21日至26日）和扰动期（2022年12月21日至26日）的停留时间。通过比较不同区域和时间段内乘客停留时间的变化，本研究旨在回答以下具体问题：（1）极端天气事件在多大程度上扰乱了航空运输系统，以及从乘客延误角度来看，受扰动最严重的是哪些机场；（2）机场在多大程度上受到直接灾害暴露的影响，又在多大程度上通过网络效应受到级联影响；（3）航空公司的运营模式（分散式与集中式）在多大程度上影响机场的脆弱性。图1展示了本研究的框架，包括所使用的数据、计算的指标以及为回答研究问题而开展的分析类型。有关数据集和方法的详细信息将在下一节中讨论。

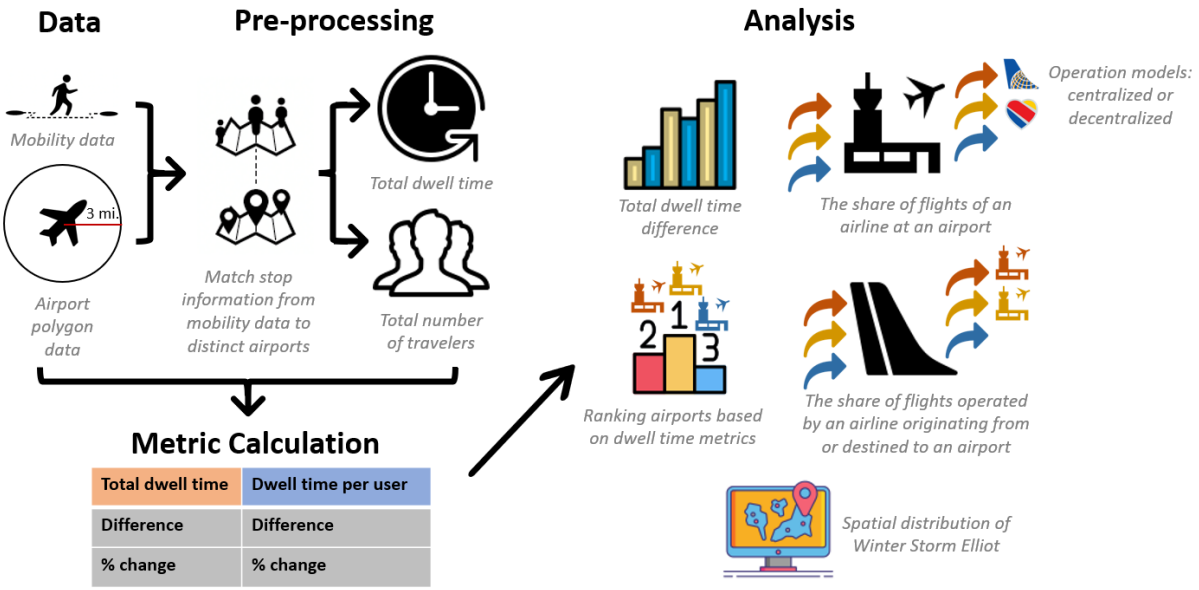


图1。研究框架概览：利用基于位置的数据和机场多边形数据估算乘客在机场的停留时间；随后，根据总停留时间和每位用户的停留时间的差异及百分比变化评估影响。根据总停留时间差异对脆弱机场进行排名。考察航空公司运营模式以及埃利奥特冬季风暴的直接暴露影响。

2. 研究背景

本研究收集了2022年埃利奥特冬季风暴的数据。这场极端冬季风暴发生于北美，2022年12月21日至26日期间带来了强风、

降雪和美国大部分地区的历史最低温度。由于极端天气，2022年12月22日至28日期间，美国有超过18,200架次航班被取消（2022年12月北美冬季风暴，2023），导致旅客严重出行延误，并严重扰乱了美国航空系统的运营。图2展示了美国国家气象局（NWS）提供的2022年12月22日埃利奥特冬季风暴对美国本土的影响。不同颜色表示不同类型的警报，并记录了受不同影响范围威胁的人口数量。

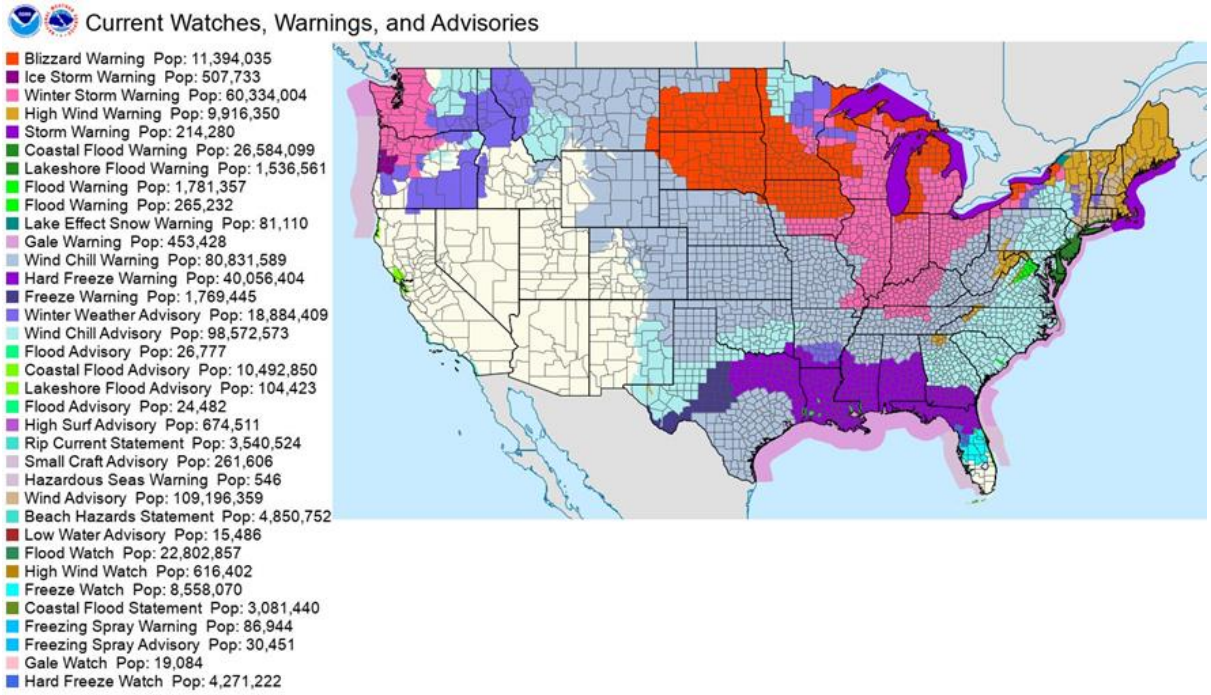


图2. 2022年12月22日埃利奥特冬季风暴对美国各地的影响。（来源：美国国家气象局）

3. 数据收集与处理

3.1. 机场信息

本研究关注位于美国地理边界内的机场。本研究使用的机场位置数据来自可公开访问的网站 ourairports.com。该数据库收录了美国各地 11,425 个机场的全面信息，并将机场分为多种类型，例如大型机场、中型机场、小型机场、直升机场、气球机场和水上飞机基地。本研究仅涵盖大型机场和中型机场，因此选取了 873 个机场进行进一步分析。对于每个机场，我们收集了机场名称和质心点数据，随后利用这些数据绘制多边形，覆盖每个机场周围三英里缓冲区，以确保最大程度的覆盖。

此外，我们还从交通运输统计局收集了与机场运营相关的其他数据，其中包括始发地和目的地机场识别号码（ID）数据。机场识别码是美国交通部（DOT）分配的独特数字代码，用于区分不同机场。

3.2. 停留时间估计

机场 d　停留时间是根据从 Spectu 获取的基于位置的数据估算的　　s

数据洁净室，这是一个位置智能平台，通过符合《通用数据保护条例》和《加州消费者隐私法》的框架，收集并处理已同意为研究目的分享其位置数据的用户的去标识化数据。借助高精度的GPS位置，Spectus计算设备的移动轨迹。单日内，平均每台设备可能获取100个数据点。每个记录的坐标均保存为经度和纬度的元组。值得注意的是，所有信息均已去标识化；也就是说，不会记录个人的任何个人信息。Spectus为每台设备分配了哈希加密ID，同时还采取了其他保护隐私的措施，例如将居住地位置模糊化至人口普查区级别，并删除来自敏感兴趣点的数据。在本研究中，我们使用了聚类停留数据，其中包含停留日期、时间、停留位置以及设备在该位置停留的时长（停留时间）等信息。我们将2022年12月21日至2022年12月26日收集的数据作为受影响期间，并将上一年的相同时间段作为基准时间段。通过将停留表与机场多边形相结合，我们确定了在稳态期（2021年12月）和扰动期（2022年12月）期间，每天在各机场停留的设备数量以及这些设备在各机场停留的总时长。

4. 方法论

我们使用总停留时间和每次使用停留时间作为评估冬季风暴对航空运输系统影响的主要指标。停留时间数据用于评估每个机场所受影响的程度，而航班数据则提供机场航线和航空运营商的信息。

首先，我们考察了埃利奥特冬季风暴从12月21日至2022年12月26日的总体影响。我们通过比较各机场总停留时间的差异和百分比变化与2021年同期的数据，量化风暴影响的程度。汇总总停留时间的计算方法是：先将机场每日的总停留时间相加，再将分析期内所有天数的数据进行汇总。其次，为了解哪些机场更容易受到冬季风暴影响，我们考察了各机场的停留时间。对于每个机场，我们计算了扰动期内每天的总停留时间和每位用户的停留时间，并将其与稳态期进行比较。随后，我们根据总停留时间最大值的增加幅度以及每位用户停留时间的变化对机场进行排名。

分析的第三步重点在于了解影响在多大程度上可归因于：（1）集中式或分散式航空公司运营模式；以及（2）直接灾害暴露与网络效应。我们利用稳态期的航班数据，获取每个机场不同航空公司的航班比例。我们计算了某航空公司在某机场的航班份额，以及某航空公司运营的、始发于某机场或以某机场为目的地的航班份额。某航空公司在某机场的航班份额，或某机场的航班构成，反映了机场整体运行表现可在多大程度上归因于航空公司的运营模式。某航空公司运营的、始发于某机场或以某机场为目的地的航班份额，则体现了该航空公司的运营方式，即其采用的是集中式还是分散式运营模式。集中式模式具有显著的枢纽，这意味着较大比例的航班始发于数量有限的机场或以这些机场为目的地。相比之下，分散式模式没有显著的枢纽，始发于不同机场或以不同机场为目的地的航班数量差异不大。为比较航班数量是否存在显著差异，我们计算了始发于不同机场或以不同机场为目的地的航班数量的标准差。如果标准差较大，则表明航班数量差异显著，说明采用的是集中式模式。另一方面，如果标准差较小，则表明差异较小

不同于航班数量，说明采用的是分散式模式。这一分析逻辑有助于区分两种航空公司运营模式。最后，我们根据每个机场停留时间和每位用户的停留时间变化的空间分布，考察这些影响是否与直接暴露于冬季风暴的区域在空间上重合。

5. 结果

5.1. 总体影响

首先，我们考察2022年12月21日至2022年12月26日期间冬季风暴的总体影响。图3展示了2021年和2022年同期的对比。2021年和2022年的累计总停留时间分别为61,585,574小时22分钟和73,556,239小时26分钟，在图3中分别以蓝色条形和橙色条形表示。由于冬季风暴，累计总停留时间增加了11,970,665小时4分钟。考虑到Spectus数据所覆盖的人口比例，以总停留时间增加量计，实际影响可能是这一数值的数倍。例如，假设Spectus数据覆盖总人口的15%至25%，机场停留时间的总增加量将在4,400万至7,400万小时之间。根据美国交通部的数据，航空个人出行的出行时间节省价值（VTTS）估计为每小时36.1美元（White，2016）。这场冬季风暴可能造成16亿至27亿美元的损失。

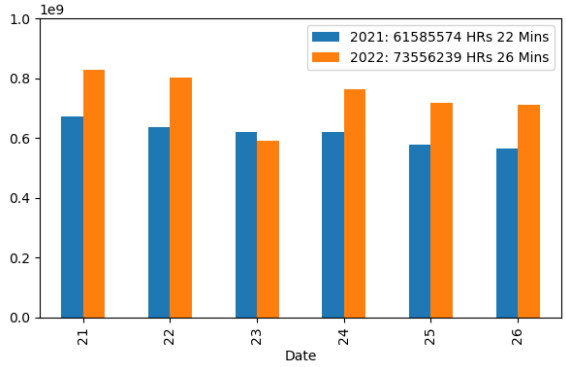


图3。2021年12月21日至12月26日期间，汇总总停留时间在2021年为61,585,574小时（蓝色），代表稳态期；在2022年为73,556,239小时（橙色），代表扰动时期。增加的11,970,665小时归因于冬季风暴。

5.2. 机场脆弱性

针对每个机场，计算了每日总停留时间和每位用户停留时间的差异及百分比变化。在图4中，正值柱表示总停留时间和每位用户停留时间增加，负值柱表示这些指标的数值下降。图4还展示了根据扰动期与稳态期之间总停留时间最大差异对机场进行的排名。该指标通过反映埃利奥特冬季风暴期间机场乘客总停留时间是否增加，体现机场的整体脆弱性。就总停留时间差异而言，受埃利奥特冬季风暴影响最大的机场为芝加哥中途国际机场、拉瓜迪亚机场、雷诺-太浩国际机场、哈里·里德国际机场和凤凰城天港机场。图5展示了根据扰动期与稳态期之间每位用户停留时间最大差异对机场进行的排名。

该指标反映因在机场额外停留时间而造成的乘客延误，体现埃利奥特冬季风暴期间乘客平均停留时间是否增加。就每位用户停留时间的差异而言，受埃利奥特冬季风暴影响最大的机场为布法罗尼亚加拉国际机场、波特兰国际机场、西雅图-塔科马国际机场、克利夫兰霍普金斯国际机场和米切尔将军国际机场。

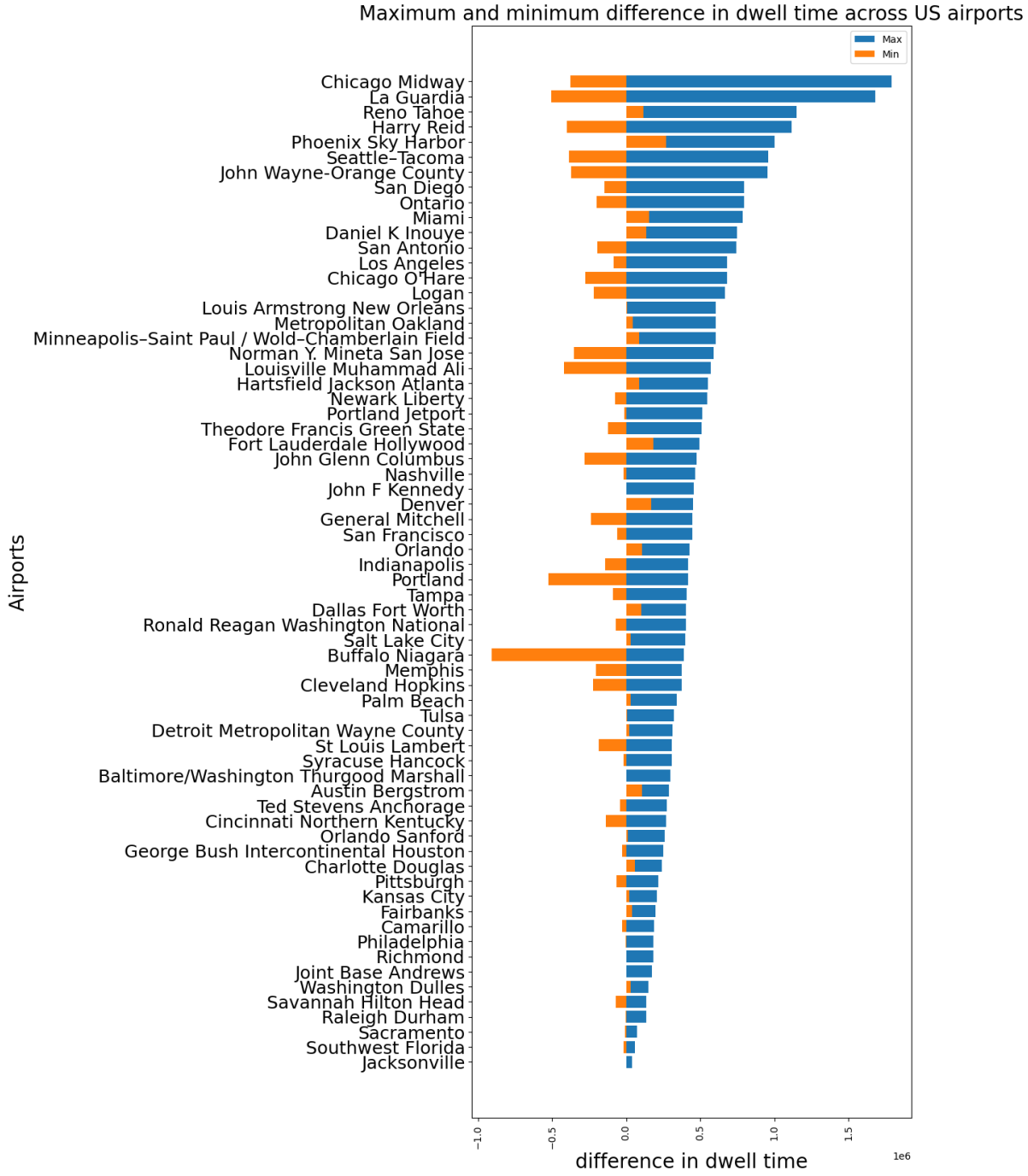


图4。根据扰动期与稳态期之间总停留时间的最大差异对机场进行排名。蓝色条形表示最大差异；橙色条形表示总停留时间的最小差异。排名越高，表明机场受冬季风暴的影响越大。

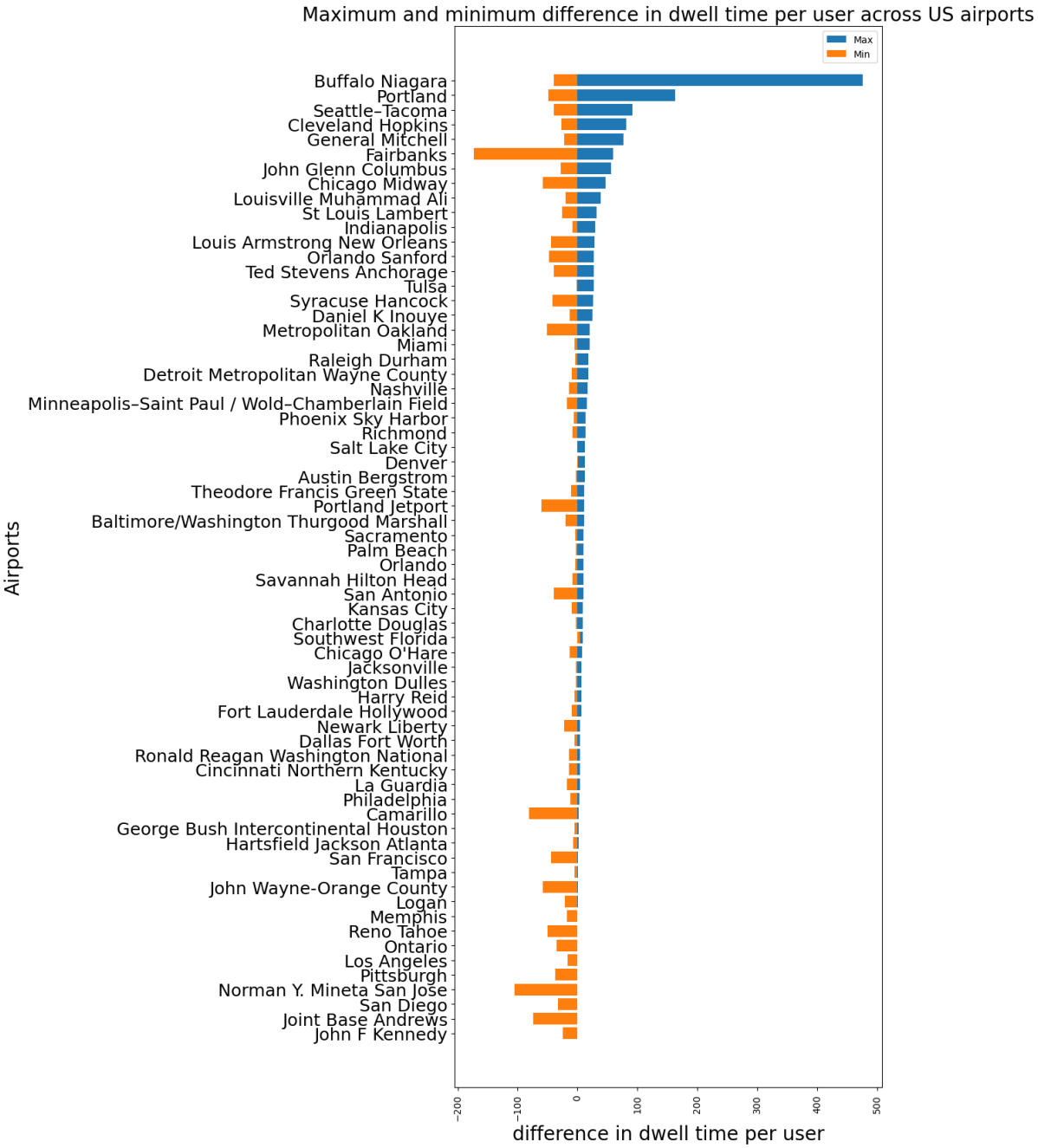


图 5. 根据扰动期与稳态期之间每位用户停留时间的最大差异对机场进行排名。蓝色条形表示最大差异；橙色条形表示总停留时间的最小差异。排名越高，表示机场受埃利奥特冬季风暴的影响越大。

图6展示了根据扰动期与稳态期之间总停留时间的最大百分比变化对机场进行的排名。该指标代表机场的整体脆弱性，反映了2022年埃利奥特冬季风暴期间其总停留时间是否相较于2021年有所增加。就总停留时间的百分比变化而言，丹佛国际机场、奥兰多国际机场、费尔班克斯国际机场、堪萨斯城国际机场和纳什维尔国际机场是受埃利奥特冬季风暴影响最大的机场。这些机场都是客流量较大的大型机场。图7展示了根据扰动期与稳态期之间每位用户停留时间的最大百分比变化对机场进行的排名。该指标代表

因在机场花费的相对额外时间而产生的旅客延误，反映其平均停留时间是否在埃利奥特冬季风暴期间增加。与每位用户停留时间差异的结果类似，就每位用户停留时间的百分比变化而言，布法罗尼亚加拉国际机场、波特兰国际机场、西雅图-塔科马国际机场、约翰·格伦国际机场和米切尔将军国际机场是受埃利奥特冬季风暴影响最大的机场。

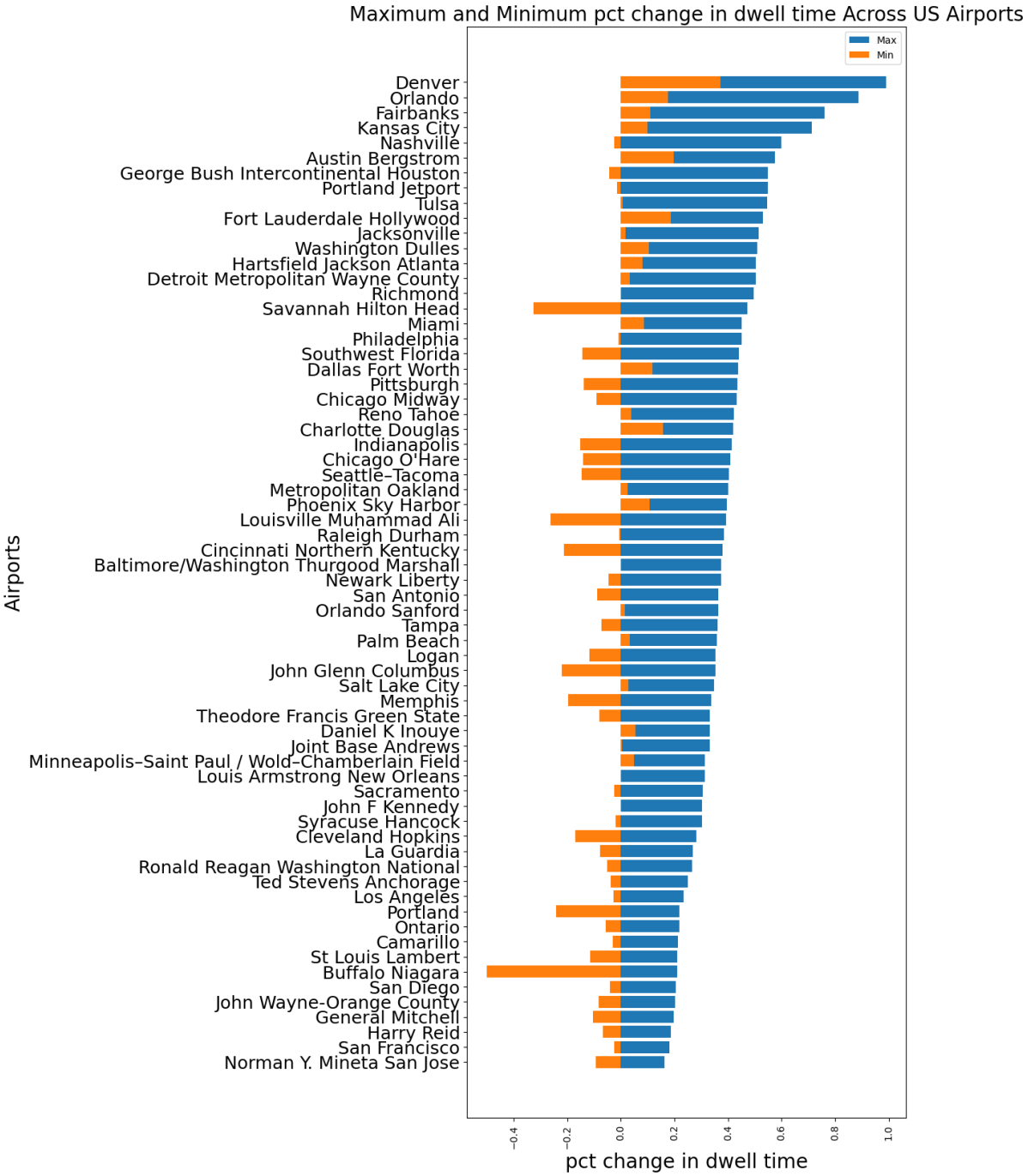


图6。根据扰动期与稳态期之间总停留时间的最大百分比变化对机场进行排名。蓝色条形表示最大百分比变化；橙色条形表示总停留时间的最小百分比变化。排名越高，表示机场受埃利奥特冬季风暴的影响越大。

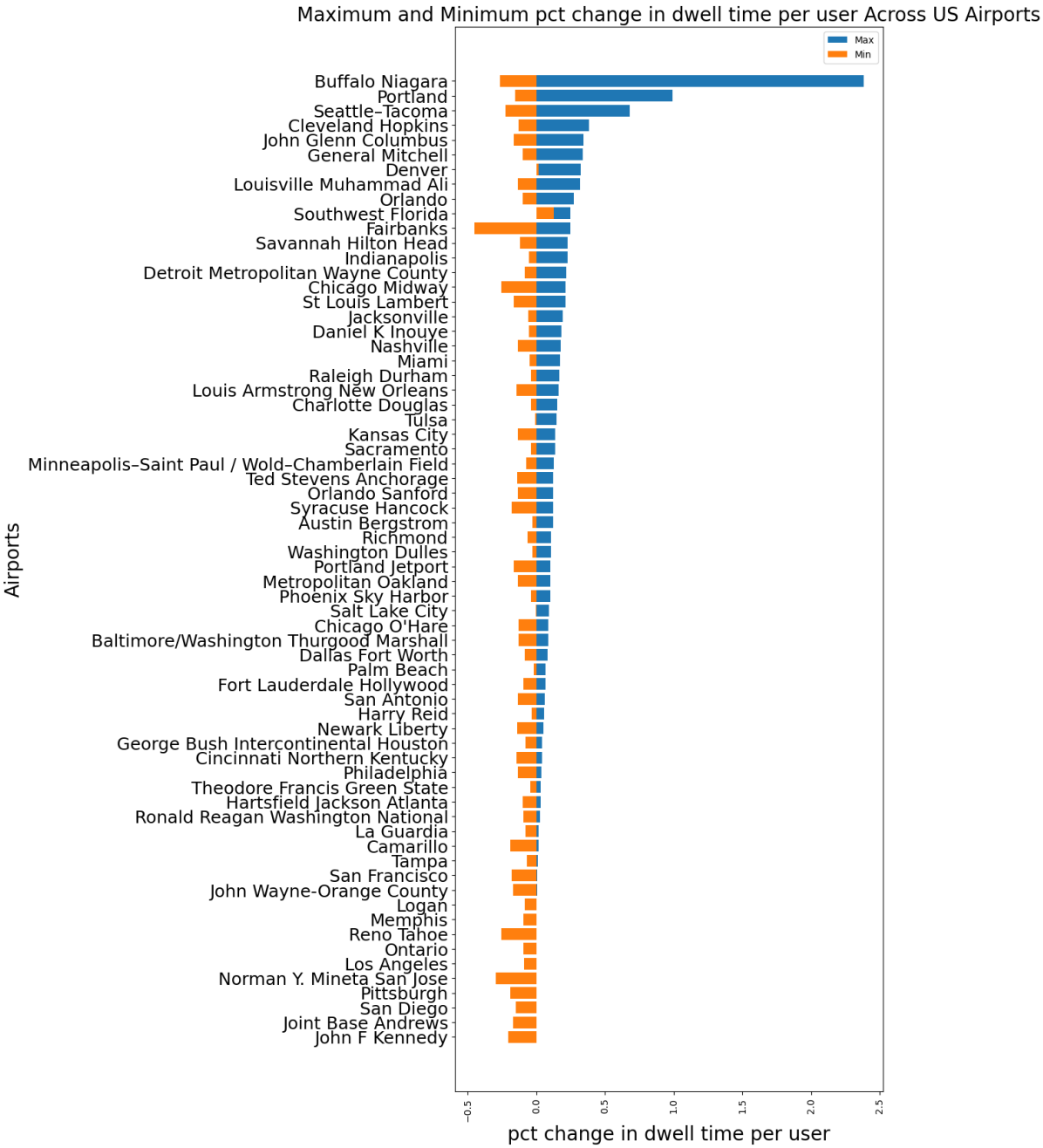
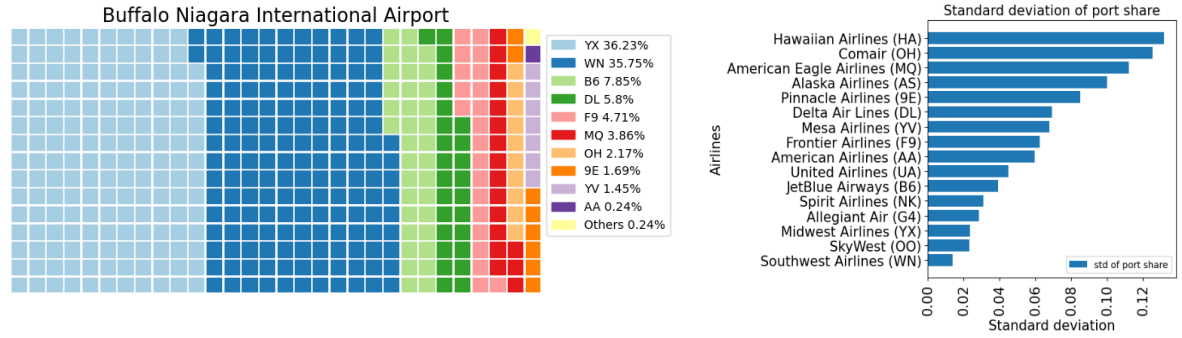


图7。根据每位用户在扰动期与稳态期之间停留时间的最大百分比变化对机场进行排名。蓝色条形表示最大百分比变化；橙色条形表示总停留时间的最小百分比变化。排名越高，表示机场受埃利奥特冬季风暴的影响越大。

根据上述结果，每位用户的停留时间可能是衡量事件影响时更具信息量的指标，因为与差异和百分比变化相关的结果相似。此外，值得注意的是，总停留时间指标的数值通常与这一时期用户数量的增幅成正比。因此，总停留时间指标可能反映这一时期客流的变化，而每位用户的停留时间指标则能更好地体现对个体乘客的直接影响。

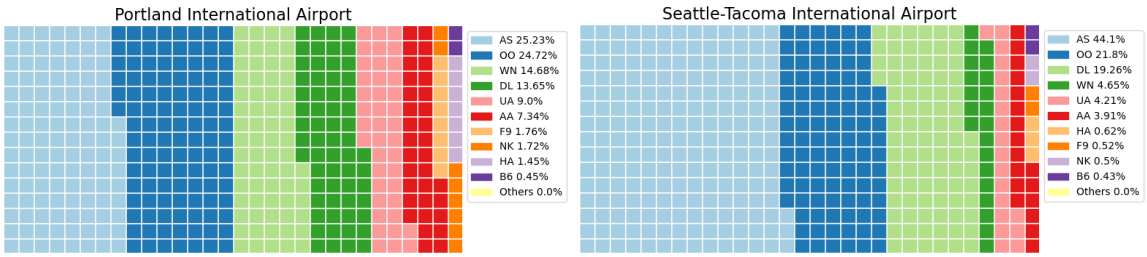
5.3. 影响与航空公司运营模式的关系

根据前述发现，接下来的分析将聚焦于每位用户停留时间指标的百分比变化。以每位用户停留时间变化排名最高的机场——布法罗尼亚加拉国际机场为例，图8(a)对该机场各航空公司的航班份额进行了细分。结果显示，中西部航空（36.2%）和西南航空（35.7%）的航班份额最高，合计达71.9%。图8(b)显示，这两家航空公司的航班份额标准差排名较低，这意味着它们的运营模式更加分散。图9所示的其他大多数每位用户停留时间变化排名靠前的机场也呈现出类似结果。例如，波特兰国际机场、西雅图-塔科马国际机场、克利夫兰霍普金斯国际机场和约翰·格伦哥伦布港国际机场的航班中，来自运营模式更加分散的航空公司的航班占比较高。因此，结果表明，冬季风暴造成的影响程度较大（依据每次使用停留时间的增幅）可归因于运营模式更加分散的航空公司。值得注意的是，西雅图-塔科马国际机场的排名也较高，但其航班份额分布与其他排名靠前的机场不同。该机场相当大比例的航班由阿拉斯加航空运营。由于阿拉斯加航空与阿拉斯加州的机场联系紧密，其运营模式较为集中。冬季风暴期间，航班可能没有太多其他机场可供备降，因此会导致不可避免的延误和取消。



(a) (b)

图 8。（a）某航空公司在布法罗尼亚加拉国际机场的航班份额；（b）根据航班份额标准差对航空公司进行排名；排名越高，表明其采用的运营模式越集中式。布法罗尼亚加拉国际机场的航班中，有很大比例（71.6%）由采用分散式模式的航空公司（Midwest、Southwest）运营。



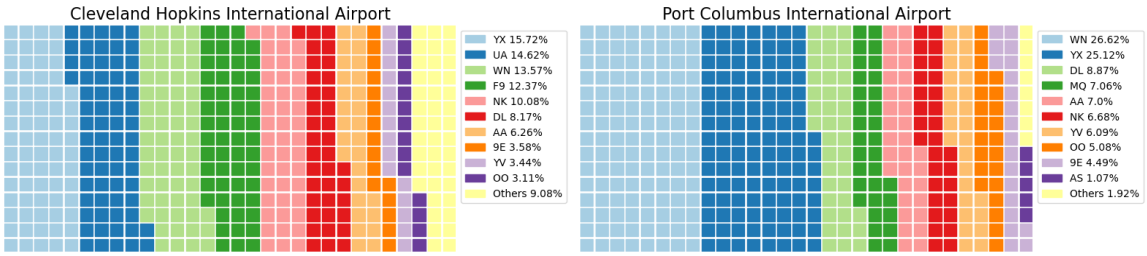
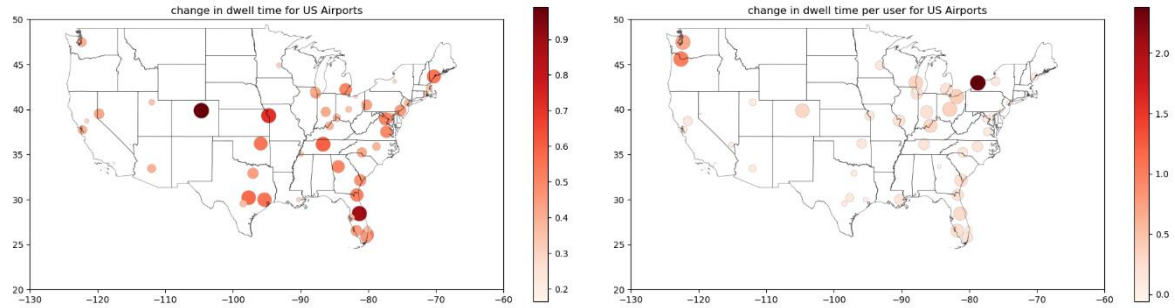


图9。航空公司在其他机场的航班份额对每位用户停留时间的百分比变化有很大影响。这些机场的大部分航班由采用分散式模式的航空公司运营，西雅图-塔科马国际机场除外。

5.4. 直接灾害暴露与网络效应所造成的影响

为了解影响在多大程度上可归因于直接灾害暴露或网络效应，我们评估了机场位置和航班数据。通过在图10(a)和图10(b)中以空间方式绘制这些影响，我们可以考察这些影响在多大程度上可归因于直接灾害暴露（即影响最大的机场是否位于美国国家气象局发布预警的区域）。我们可以观察到，位于五大湖地区和西北地区周边的机场处于NWS发布预警的区域，且总停留时间和每位用户停留时间的变化始终较大。其他机场的停留时间也出现了显著变化，这可能是由级联网络效应等间接影响或航线的策略性调整所致。



(a) (b)

图10。（a）总停留时间和（b）每位用户停留时间百分比变化的空间分布。较大且颜色较深的标记表示停留时间指标变化较大的机场。位于五大湖地区和西北地区的机场直接受到埃利奥特冬季风暴的影响。

6. 讨论与结论

近年来，极端天气事件变得更加频繁且强烈，对包括航空运输系统在内的交通运输系统造成了重大干扰。2022年12月袭击美国的埃利奥特冬季风暴就是此类事件的典型案例。本研究利用细粒度位置数据集，考察了埃利奥特冬季风暴对美国航空运输系统的影响，重点关注作为系统性能指标的乘客延误。

本研究提出了多项新颖贡献。首先，利用与机场停留时间变化相关的观测数据，研究结果从旅客延误的角度量化了冬季风暴对美国整个航空运输系统的总体影响。其次，研究对受埃利奥特冬季风暴影响最大的机场进行了排名，并揭示了这种关系

介于航空公司运营模式与机场对极端天气事件的脆弱性之间的关系。第三，利用基于位置的数据考察航空运输系统的脆弱性，展现了采用新兴数据集的潜力，有助于更好地理解航空运输系统面临极端天气灾害时的风险与脆弱性。最后，与大多数关注系统性能的研究（例如航班取消数量和每个航班的平均延误）不同，本研究以高分辨率评估了极端事件对旅客出行延误的影响。研究结果表明，埃利奥特冬季风暴对机场的乘客停留时间产生了显著影响，导致延误大幅增加。脆弱性较高的机场位于易受冬季风暴影响的地区，或客流量较高的地区。有趣的是，这些脆弱机场往往具有一个共同特征：其航班中有很大一部分由采用分散式运营模式的航空公司运营。结果表明，此类机场和航空公司对极端天气事件更加脆弱，并可能对航空系统的其余部分产生级联效应。

近年来，能源和交通运输等多个行业都日益呈现去中心化趋势。例如，通过分散式电网（又称微电网）提高能源安全的理念已受到广泛关注。电力电网的分散式架构可以在一定程度上增强其韧性，因为电力可以从未受影响的区域重新输送至发生停电的区域。同样，分散式航空公司运营也已成为提高运营灵活性、降低成本并改善客户体验的一种潜在方案。分散式航空公司运营能够促进竞争，减少对少数大型机场的依赖，从而为乘客提供更多样、更灵活的航班选择。然而，由于缺乏集中式管控来优化航班时刻表并协调运营，分散式航空公司运营也可能导致客流和飞机利用率低下。在正常条件或小规模扰动下，分散式航空公司运营可能更具韧性，因为一个机场的延误或取消不一定会影响整个网络。不过，在极端天气事件中，这种架构可能会加剧系统的脆弱性，因为一个机场的延误可能会蔓延 至其他机场，进而导致全系统扰动。

总之，本研究强调了提升航空运输系统应对极端天气事件韧性的必要性。研究结果表明，采用分散式运营模式的机场和航空公司更容易受到此类事件的影响，因此应制定减轻其影响的策略。一种可能的策略是提高系统的冗余性，使其能够更有效地吸收极端事件带来的影响。此外，政策制定者和利益相关者应考虑投资于基础设施和技术，以增强系统对这类事件的适应性和韧性。总体而言，本研究为极端天气事件对航空运输系统的影响提供了新的见解，并可为未来提升韧性的政策和策略提供参考。

数据可用性

所有数据均通过符合《加州消费者隐私法》和《通用数据保护条例》的框架收集，并用于研究目的。支持本研究结论的数据可从 Spectus 获取，但这些数据的可用性受到限制，因为本研究使用的数据均是在许可范围内获取的。可通过在 Spectus.ai 上提交请求来访问这些数据。本研究使用的其他数据均可公开获取。

参考文献

机构 y, E.（2016）。2013年至2014年冬季洪水的成本与影响，环境 t

布里斯托尔机构，英国。

Airport, H.（2011）。《气候变化适应报告》。来源：
h
t
t
p
s://
w
w
w.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company / heathrow-2-0-sustainability/futher- reading/Heathrow%20Airport%20CCAR% 202021%20FINAL.pdf。Board, T. R.（2012）。《机场气候适应与韧性：机场实践综述》，美国国家科学院。Borsky, S. 与 Unterberger, C.（2019）。《恶劣天气与航班延误：突发性和缓发性天气事件的影响》。《交通运输经济学》，18，10-26。交通运输统计局。https://www.bts.gov/Chen, Z. 与 Wang, Y.（2019）。《严重天气事件对高速铁路和航空延误的影响》。《交通研究D辑：交通与环境》，69，168-183。Coleman, N.、Gao, X.、DeLeon, J. 与 Mostafavi, A.（2022）。《人类活动与移动性数据揭示了新冠肺炎期间美国五个大都市城市社会脆弱群体在暴露风险降低指标方面的差异》。《科学报告》，12(1)，15814。De Vivo, C. 等（2021）。《地中海机场风险评估框架：聚焦极端温度、降水和海平面上升》。《自然灾害》：1-20。2022年12月北美冬季风暴。（2023年3月4日）。载于《维基百科》。https://en.
wikipedia.org/wiki/December_2022_North_American_winter_storm Doll, C. 等（2014）。《大数与小数：量化当前及40年后极端事件对交通运输成本的方案》。《自然灾害》，72：211-239。Haraguchi, M. 等（2022）。《用于城市韧性的人类移动性数据与分析：系统综述》。《环境与规划B辑：城市分析与城市科学》，49(5)：1507-1535。Hsu, C. W.、Ho, M. A. 与 Mostafavi, A.（2022）。《人类移动网络在宏观、子结构和微观尺度上呈现出不同的韧性特征》。《arXiv》预印本，arXiv:2207.10304。国际民用航空组织（2021）。《气候韧性机场》。来源：https://www.icao.int/environmental- protection/Documents/Climate% 20resilient%20airports.pdf。政府间气候变化专门委员会（2018）。《政府间气候变化专门委员会关于1.5摄氏度升温影响的特别报告。决策者摘要》。来源：https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/。Lee, C. C. 等（2022）。《将韧性纳入交通运输规划实践的量化措施：得克萨斯州案例研究》。《交通研究D辑：交通与环境》，113，103496。Lee, C. C.、Chou, C. 与 Mostafavi, A.（2022）。《利用基于位置的数据明确短期灾后恢复期间的疏散返家与居所转换稳定性》。《科学报告》，12(1)，15987。Lee, C. C.、Maron, M. 与 Mostafavi, A.（2022）。《社区尺度大数据揭示2021年得克萨斯州冬季风暴及其有序停电造成的差异性影响》。《人文

与社会科学传播》，9(1)，1-12。

Liu, Z., et al. (2022).《基于位置的社交网络数据与游客偏好对文化旅游景点进行分类：以香港中环为例》。Tourism Management 90: 104488. Liu, Z., et al. (2021).《利用带地理标签的社交媒体数据分析个人基准位置检测方法的性能与稳健性》。《国际地理信息科学杂志》35(3): 609-627. Liu, Z., et al. (2019).《通过多源志愿地理信息数据进行语义社区检测，推荐具有吸引力的主题区域》。《国际地理信息科学杂志》33(8): 1520-1544. Nuijten, A. D. (2016).《跑道温度预测：挪威奥斯陆机场案例研究》。《寒区科学与技术》125: 72-84. OurAirports 网站。https://ourairports.com/data/Rajput, A. A., & Mostafavi, A. (2022). 新冠肺炎疫情期间城市洪涝中的时序人类移动网络潜在子结构韧性机制。arXiv 预印本 arXiv:2203.16786. Rajput, A. A., Nayak, S., Dong, S., & Mostafavi, A. (2022). 城市洪涝期间受扰交通网络剖析。ArXiv. /abs/2210.00403 Rajput, A. A., Li, Q., Gao, X., & Mostafavi, A. (2022). 揭示新冠疫情暴发初期纽约市流动模式的关键特征。《建成环境前沿》, 7, 180. Spectus. https://spectus.ai/ Vogiatzis, K., et al. (2021).《气候变化适应研究作为确保机场可持续性的工具：雅典国际机场（AIA）案例》。《全面环境科学》754: 142153. Voskaki, A., et al. (2023).《气候灾害对机场系统的影响：影响与风险缓解趋势综述》。《交通评论》: 1-24. Wang, A., et al. (2020).《基于大数据的人类移动研究综述及其对智慧城市发展的启示》。ISPRS《国际地理信息》10(1): 13. Wang, Q. and J. E. Taylor (2016).《多种自然灾害影响下城市人类移动韧性的模式与局限》。《公共科学图书馆·综合》11(1): e0147299. White, V. (2016).《经济分析中出行时间估值的修订部门指南》。交通部长办公室，美国交通部

访问地址：transportation. gov/sites/dot. gov/files/docs/2016% 20Revised% 20Value% 20of% 20Travel% 20Time% 20Guidance. pdf。Zhang, X. 和 N. Li（2022年）。《刻画城市中的个体移动扰动，期间极端天气事件。”《国际灾害风险降低期刊》72：102849。Zhao, Y.（2020）。气候变化对飞机起飞性能的影响：

加拿大机场，麦吉尔大学（加拿大）。

Zhou, L.， & Chen, Z.（2020）。衡量机场应对严重天气事件的韧性表现。《交通研究D辑：交通与环境》，83，102362。