



引文格式:张林意,孙华波,王纯,等.基于QAR飞行大数据的空中颠簸风险时空分布模式探索与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(3):482-490.DOI:10.13203/j.whugis20210616

Citation:ZHANG Linyi,SUN Huabo,WANG Chun,et al.Spatiotemporal Pattern of Air Turbulence Risks with QAR Flight Big Data[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(3):482-490.DOI:10.13203/j.whugis20210616

基于QAR飞行大数据的空中颠簸风险时空分布模式探索与分析

张林意¹ 孙华波² 王纯² 余长慧¹ 卢宾宾¹

¹ 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

² 中国民航科学技术研究院航空安全研究所,北京,100028

摘要:空中颠簸是民航飞行过程中的重大安全风险之一,其空间分布模式的探索与分析对有效规避颠簸区域、提升飞行安全水平有重要意义。利用中国民航行业快速存取记录器(quick access recorder, QAR)大数据提取了2017—2019年中国范围内发生的空中颠簸事件,通过核密度估计和时空可视化对其时空分布特征进行了初步的探索性分析,采用空间自相关分析、热点分析、地理加权主成分分析等时空统计分析技术从不同层次和视角对民航空中颠簸风险进行空间分布模式与规律探索。结果表明,中国民航飞机2017—2019年空中颠簸事件较多出现于西藏地区、中部地区和东南部地区,其中第一阶梯和第二阶梯地区空中颠簸事件发生密度明显高于第三阶梯,且多位于第一阶梯和第二阶梯分界线附近。空中颠簸程度具有较为显著的空间自相关性,表现为高-高值聚集特征。在精细尺度视角下,地理加权主成分分析结果表明,空中颠簸风险与相关属性参数间关系存在典型的空同异质性特征。该研究为切实提升民航行业风险管理与安全水平,从时空视角提供了理论算法与实践应用支撑。

关键词:民航安全;时空分布模式;空间自相关;地理加权主成分分析;空间异质性

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2022-03-20

DOI:10.13203/j.whugis20210616

文章编号:1671-8860(2024)03-0482-09

Spatiotemporal Pattern of Air Turbulence Risks with QAR Flight Big Data

ZHANG Linyi¹ SUN Huabo² WANG Chun² YU Changhui¹ LU Binbin¹

¹ School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Institute of Aviation Safety, China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, China

Abstract: Objectives: Air turbulence is one of the major safety risks during civil aviation flight. Explore the spatial distribution pattern of great significance for avoiding risky areas and enhancing flight safety. **Methods:** We use quick access recorder (QAR) big data of China's civil aviation industry from 2017 to 2019 to detect the nationwide air turbulence events, and conduct exploratory analysis in the spatiotemporal distributions and patterns via kernel density estimation and spatiotemporal visualization techniques. In addition, we use spatial statistical techniques, including spatial autocorrelation, hot spot analysis, and geographically weighted principal component analysis (GWPCA), to explore the spatial patterns of air turbulence events. **Results:** The results show that these events occur frequently in Tibet, central and southeastern regions of China. In particular, the event densities are highly correlated with local terrains, e.g. step I and step II regions, where the air turbulence events occur frequently. In the fine-grained scale, we adapt GWPCA to qualitatively analyze the spatial heterogeneities in the relationships between air turbulence and relative parameters. The surface elevation differences show significant impacts in the southeast coastal area, while the inertial vertical velocity tends to be the principle factor in Guangxi and Yunnan provinces. **Conclusions:** This study

基金项目:国家自然科学基金(U2033216,42071368);中央高校自主科研项目(2042022dx0001)。

第一作者:张林意,硕士,主要从事时空大数据统计分析方法研究。2015302590065@whu.edu.cn

通讯作者:卢宾宾,博士,副教授。binbinlu@whu.edu.cn

provides theoretical and practical supports in improving the risk management and safety insurance of the civil aviation industry.

Key words: civil aviation safety; spatiotemporal pattern; spatial autocorrelation; geographically weighted principal component analysis (GWPCA); spatial heterogeneity

空中颠簸指在飞行过程中飞机在空中气流或人为操作的影响下而出现机体上下、左右颠簸摇晃和抖动的现象。高强度的颠簸事件会严重影响民航服务质量,降低航空飞行经济效益,更有甚者会危及到飞机上旅客以及机组人员的人身安全。深入研究空中颠簸事件的风险特征、时空分布模式及其潜在影响因素,对颠簸风险预警、提升民航安全水平和改善飞行服务品质有重要意义。

目前,国内外学者对于空中颠簸的探索多集中于影响因素、诱发机制和预测预报等方面^[1]。在影响因素方面,利用数值仿真分析技术,探索飞机在大气湍流中发生颠簸的物理机制^[2],或基于空气动力学知识,分析空中颠簸与地面加热场、温度场、风场时空分布特征之间的关系^[3];在诱发机制方面,针对晴空湍流事例的数值模拟分析推测诱发飞机空中颠簸的原因,如重力波破碎^[4-5]、山地背风波^[6]、K-H 不稳定^[7-8]、副热带高空急流^[9]等;在颠簸预测预报方面,主要采用气象形式分析法和数值气象预报法,通过颠簸指数进行预测,以及在此基础上发展的集成预测算法^[10]。

在空中颠簸事件时空分布特征的研究方面,部分学者针对中国局部地区的空中颠簸发生情况进行了分析^[11-16],但受限于相关数据获取的时间和空间覆盖范围,缺乏针对长时序、全国范围内空中颠簸事件时空分布特征进行系统、全面的研究。1998年,中国民用航空局要求在国内运营的所有运输类民航飞机安装快速存取记录器(quick access recorder, QAR)或等同设备^[17],详细记录飞机飞行过程中姿态、操作、状态等方面的指标,被广泛应用于飞行品质监控、飞行过程可视化仿真重现、机务维修、事故调查等方面^[18]。QAR飞行大数据也为系统地研究中国空中颠簸风险时空分布模式奠定了坚实的数据基础。本文利用2017—2019年中国民航行业所采集的QAR飞行大数据,全面提取了期间发生的空中颠簸事件,分别采用空间自相关分析、热点分析、地理加权主成分分析(geographically weighted principal component analysis, GWPCA)等时空统计技术,从不同层次和视角对其时空分布模式进行探索,为空中颠簸事件影响要素及其成因的深层

次分析与挖掘奠定了时空认知基础,同时为航路规划、航线签派等民航行业应用提供信息支撑。

1 研究数据

1.1 QAR 数据

本文使用数据为中国民航科学技术研究院民航飞行品质监控基站所采集的2017—2019年民航行业QAR飞行大数据。QAR原始数据按照1~8次/s的不同频率记录飞行过程参数信息。针对空中颠簸研究,本文从原始数据中筛选了相关的属性参数,如表1所示,其中 g 表示重力加速度。本文所采用的QAR数据覆盖了2017—2019年中国民航国内航班触发了空中颠簸阈值的所有航段,属性字段囊括了飞机飞行过程中的飞行时空信息、飞行速度、飞行姿态角、外部环境等数据。其中飞机攻角指的是机翼的前缘和后缘的连线相对于气流的角度;惯性垂直速度也叫瞬时下降率,对应飞机飞行高度改变的速率;左右推力指的是飞机机翼后左右两个发动机的推力大小。

1.2 数据预处理

由于不同型号飞机对应的QAR数据译码标准存在较大差别,导致QAR原始数据存在缺失、异构等问题,为了对QAR数据进行有效分析,本文对原始数据进行预处理流程如下:

1) 缺失值补全。对于QAR数据中的缺失项,分别采用邻近插补和数值插值对字符型和数值型变量进行补全。

2) 时间修正。原始QAR数据中时间为协调世界时间,将其修正为北京时间。

3) 异常值去除。采用统计方法检测原始QAR数据中异常值,并将异常值对应记录删除。

4) 巡航阶段数据提取。本文研究的空中颠簸事件均发生于巡航阶段,因此需要从全航段QAR数据专门提取巡航阶段数据。

空中颠簸强度一般使用垂直过载增量 Δn 表示,计算式为:

$$\Delta n = \frac{v_{\text{VRTG}} - g}{g} \quad (1)$$

式中, v_{VRTG} 是QAR数据中所记录的飞机垂直加速度,通常以重力加速度 g 的倍数表示。飞机垂

直加速度与重力加速度相差越大,则飞机颠簸强度越大。根据当前民航行业对颠簸风险的认定惯例,颠簸强度认定准则如表2所示。从式(1)中可知,空中颠簸事件强度的提取标准以重力加速度 g 为单位,当 $|\Delta n| > 0.2g$,则可提取对应QAR原始数据记录作为潜在的颠簸事件点。

表1 空中颠簸QAR数据属性列

Tab. 1 Attributes of Air Turbulence in QAR Data

字段名	字段含义	单位
VRTG	垂直加速度	g
RALT	无线电高度	英尺
PITCH	俯仰角	°
PITCH_RATE	俯仰率	°/s
IVV	惯性垂直速度	英尺/min
ROLL	滚转角	°
AOAL	左侧攻角	°
AOAR	右侧攻角	°
HEIGHT	飞行高度	英尺
MACH	马赫数	—
LATP	纬度	°
LONP	经度	°
WIN_SPD	风速	节
WIN_DIR	风向	°
LATG	横向加速度	g
LONG	纵向加速度	g
GW	毛重	磅
IAS	空速	m/s
TAT	空温	°C
N11	左推力	转/min
N12	右推力	转/min

表2 民航飞机空中颠簸强度等级划分表

Tab. 2 Air Turbulence Classification Criterion of Civil Aviation

颠簸强度	Δn 范围
无颠簸	$ \Delta n \leq 0.2g$
轻微颠簸	$0.2g < \Delta n \leq 0.5g$
中度颠簸	$0.5g < \Delta n \leq 0.8g$
剧烈颠簸	$ \Delta n > 0.8g$

通过对2017—2019年海量QAR数据进行预处理,按照表2所示划分标准最终从上百万个航班中提取了6 815个空中颠簸事件点。

1.3 实验方法与设计

在空中颠簸事件提取的基础上,首先利用时空可视化和核密度估计(kernel density estimation, KDE)技术对空中颠簸事件的时空分布进行初步探索,以观察空中颠簸事件发生期间以及不

同季度的密度分布规律;采用空间自相关分析和热点分析技术,以分析挖掘空中颠簸分布的聚集规律以及热点区域,为民航飞行过程中空中颠簸预警提供理论支持;此外,采用GWPCA技术,在考虑空间异质性的基础上进一步研究飞行过程中各参数空间分布模式^[19],从而探索各飞行参数与空中颠簸事件在精细尺度下的内部关联关系,以发现不同地理位置发生空中颠簸时的主要相关因素,为民航空中颠簸风险分析的精准建模奠定基础。本文所采用的具体实验方法如下:

1) KDE技术^[20]。该技术是一种从数据样本本身出发研究空间要素分布特征的方法,用于计算要素在其一定领域范围内的密度,从而反映要素空间分布的疏密、聚集性特征,其函数 $f(x)$ 的一般表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{nb} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{b}\right) \quad (2)$$

式中, x 为目标变量; x_i 为样本值; n 为样本量; K 为值域为0~1的核函数; b 为核函数的带宽。

2) 空间自相关分析技术^[21-23]。该技术可用来反映空间要素属性值域空间分布模式,通常采用Moran's I 系数^[24]进行度量,计算式为:

$$I = \frac{N \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N w_{k,j} (x_k - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N w_{k,j} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中, I 表示Moran's I 系数; N 为研究区域中空间要素数量; x_k, x_j 分别为空间单元 k, j 对应的属性值; \bar{x} 为属性样本均值; $w_{k,j}$ 为空间单元 k, j 间对应的权重值。

3) 热点分析技术^[25-27]。该技术可用于识别具有统计显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类,使用 z 得分和 p 值来度量空间区域的高值或低值聚集性 Gi^* ,计算式为:

$$Gi^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{k,j} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{k,j}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{k,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{k,j}\right)^2}{n-1}}} \quad (4)$$

式中, S 为所有数据点的标准差。

4) GWPCA^[28]技术。该技术旨在局部尺度下分析多元空间变量数据,是主成分分析方法在局部尺度上的精细化拓展。假设 X 为 $n \times m$ 的观测数据矩阵,其中 n 为数据点个数, m 为属性维数。按照地理加权主成分分析的求解流程^[29],针对每

个解算位置点 (u_j, v_j) , 首先计算 X 所对应的地理加权协方差矩阵 $\Sigma(u_j, v_j)$:

$$\Sigma(u_j, v_j) = X^T W(u_j, v_j) X \quad (5)$$

式中, $W(u_j, v_j)$ 是 $n \times n$ 对角权重矩阵, 基于单调递减的核函数^[30]由解算点 j 与数据点距离计算得到。对地理加权协方差阵 $\Sigma(u_j, v_j)$ 进行正交分解, 可求取特征向量矩阵 $L(u_j, v_j)$, 计算式为:

$$L(u_j, v_j) V(u_j, v_j) L(u_j, v_j)^T = \Sigma(u_j, v_j) \quad (6)$$

式中, $V(u_j, v_j)$ 为特征值构成的对角矩阵。

将 $V(u_j, v_j)$ 中对角元素从大到小提取前 k 个为主成分, 以其对应特征向量为基向量, 将 m 维数据降为 k 维。根据计算结果选择主成分数为 k , 对数据解释程度达到 70%~90%, 本文依据结果选择 $k=5$ 。

2 时空分布特征探索

2.1 空中颠簸时空可视化

为了对空中颠簸事件的规律进行初步认识, 首先采用 KDE 方法对其空间分布进行初步探索。图 1 为 2017—2019 年所发生的颠簸事件空间密度分布结果。从图 1 中可以看出, 空中颠簸分布呈聚集特征, 主要聚集于中国西南地区、西藏地区以及中部平原和东部沿海的大部分地区。其中西藏地区和东部沿海地区是颠簸发生次数较多且强度较大的地区。由于西藏地区山区较多, 在飞行过程中容易遇到地形产生的上升或者下降的气流, 导致空中颠簸事件的频发。在东部沿海地区, 由于受到局部海陆环流的影响, 沿海地区气流稳定性较差, 容易形成净空风切变, 进而导致空中颠簸。

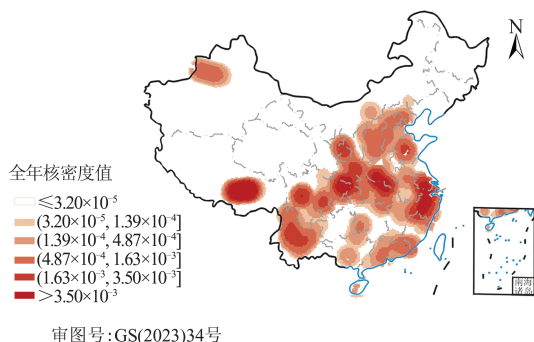


图 1 空中颠簸风险空间密度分布特征

Fig. 1 Spatial Density Distribution of Air Turbulence Risk

以季节为时间单元划分空中颠簸事件, 其中春季为 3 月 22 日至 6 月 21 日, 夏季为 6 月 22 日至 9 月 21 日, 秋季为 9 月 22 日至 12 月 21 日, 冬季为

12 月 22 日至次年 3 月 21 日。观察不同季节空中颠簸风险的空间分布之间的区别, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 冬季是一年当中空中颠簸事件发生次数最多的时段, 在空间上主要聚集在西藏高山地区、黄土高原地区、东部平原地区等; 春季空中颠簸事件也相对较多, 主要集中在东部沿海以及四川盆地等地区; 夏季和秋季颠簸事件发生频率较低。上述现象说明空中颠簸与对流层顶和平流层气流变化相关, 在北半球, 冬季会发生平流层爆发性增温, 尤其发生在 2 月, 增温会直接影响平流层大气环流的变化, 而且对对流层大气也有极大影响, 大气环流紊乱, 因而导致空中颠簸发生频次突然增多。黄仪方等^[16]依据四川航空公司提供的 2006 年部分机型 QAR 数据, 对高原航线空中颠簸出现频次与分布进行了分析, 发现高原机场颠簸多出现于 1 月—4 月, 侧面印证了上述结论的可靠性。

2.2 空中颠簸时态分布模式分析

本文分别以一年中的月份和一天内的小时为时间单元, 从时间维度对空中颠簸风险进行分析。图 3 展示了 2018 年航班数量与空中颠簸事件频次的时序分布情况。由图 3(a) 可以看出, 从月份维度分析, 空中颠簸发生高风险时间段多为冬春季, 而一年之内每月航班数量稳定, 进一步说明空中颠簸风险呈现季节性特征, 这也与前文分季节空中颠簸风险分析结果一致。由图 3(b) 可以看出, 从小时维度分析, 空中颠簸高风险时间段为中午以及下午前半段时间, 相比于每日航班数量分析, 每天白天时段航班数量基本稳定, 自 20 时之后开始减少, 说明午后时段空中颠簸发生相对频繁。此时段温度升高, 地面升温后产生上升气流, 导致空中颠簸的频次增多, 强度增大。

3 空间分布模式探索

3.1 全局空间自相关分析

为了探索中国民航空中颠簸风险的空间分布模式, 本文利用提取的空中颠簸数据点计算空中颠簸风险的全局 Moran's I 系数, 权重计算采用最近 8 邻域方法进行计算。其中全局 Moran's I 系数为 0.56, 说明中国民航空中颠簸风险分布存在显著的空间正相关关系, 即具有典型的高-高、低-低聚集特征。计算 z 值得分为 54.60, 进一步说明空中颠簸数据所呈现的高值聚集特征是统计显著的。

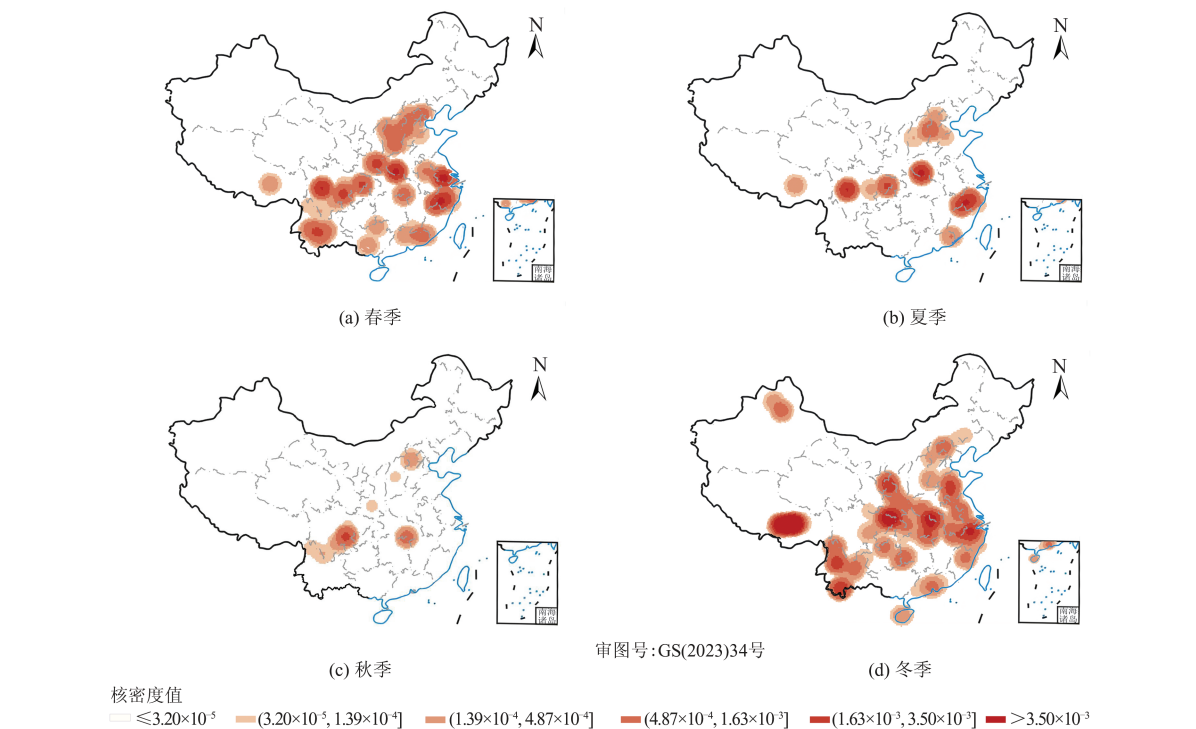


图 2 空中颠簸风险各季节的空间分布
Fig. 2 Spatial Distribution of Air Turbulence Risk in Each Season

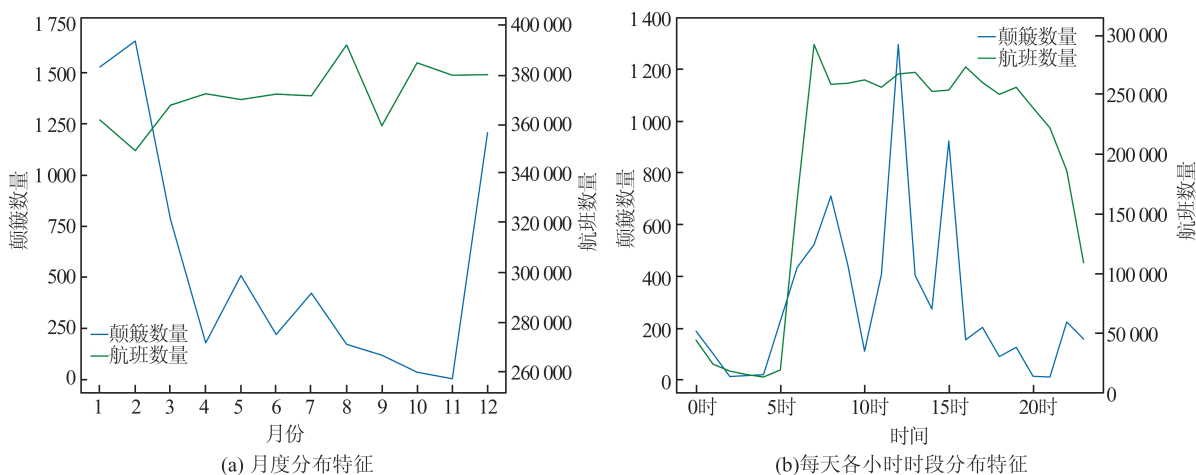


图 3 空中颠簸事件与航班数量时态分布特征
Fig. 3 Temporal Distribution of Air Turbulence Events and Number of Flight

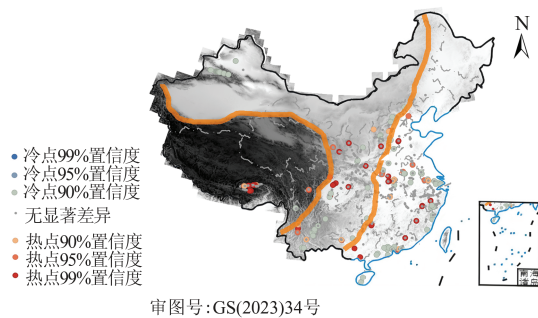
为了进一步探索空中颠簸风险的空间分布模式,本文采用热点分析技术,分析空中颠簸事件冷热点的空间分布模式,权重计算同样采用最邻近8邻域计算,结果如图4所示。空中颠簸风险热点区域主要集中在西藏地区、两广地区和黄土高原地区。中国地势地貌分布可分为三级阶梯,其中第一、二阶梯分界线为昆仑山-祁连山-横断山脉,从图4中可以看出,热点区域多位于山区地界和第一、二阶梯分界线附近。在阶梯分界线附近地形复杂,多为山区且高差较大,地面气流运动受到地形阻碍形成风切变造成动力乱流,进

而引起空中颠簸。长江中下游平原地区地势较为平坦,气流稳定,不易形成风切变,因此多为冷点区域。文献[11]指出空中颠簸多为急流颠簸,即山脉背风坡上升气流导致上升急流进而引起颠簸,因此空中颠簸多发于山区,这也解释了本文所发现的空中颠簸空间分布特征。

3.2 空中颠簸成因要素分析结果

为了对空中颠簸成因要素进行精细化分析,采用GWPCA技术对空中颠簸风险在不同空间位置进行潜在影响要素理解,从而探索分析空中颠簸主要诱因的空间分布模式。针对地理加权

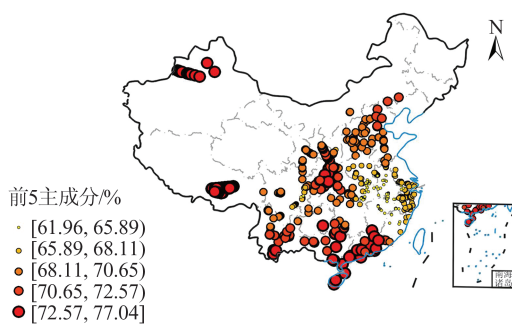
主成分分析结果,本文取各解算点前 5 地理加权主成分的累积解释度占比(cumulative percentage of total variation, CPTV),其空间分布如图 5 所示,散点的大小和颜色表示前 5 主成分对该区域数据的解释程度,散点越大或者颜色越深表示前 5 主成分解释度越大。从图 5 可以看出,在全国范围的不同区域内,前 5 主成分的 CPTV 在空间上存在明显差异。在南部沿海地区、新疆、西藏以及陕西等地区,前 5 主成分解释程度较高,说明上述地区的空中颠簸影响因子在局部范围内相对简单,通过变换前 5 主成分就能保留空中颠簸数据 72% 以上的变化,在该地区对空中颠簸风险的解释效果更优。在湖北、江西、安徽等地区,前 5 主成分的 CPTV 较低,表明在该地区空中颠簸影响因子在局部范围内相对复杂,前 5 主成分只能保留空中颠簸风险相关属性数据 65% 以下的变化。



审图号:GS(2023)34号

图 4 空中颠簸事件热点分析

Fig. 4 Hot Spot Analysis of Air Turbulence Events



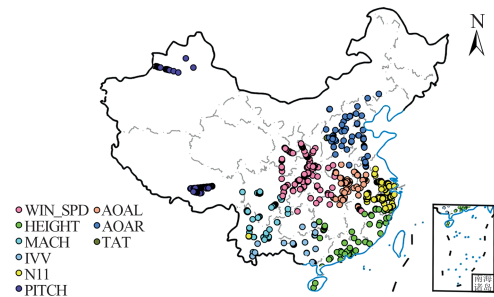
审图号:GS(2023)34号

图 5 前 5 主成分 CPTV 空间分布

Fig. 5 Spatial Distribution of CPTV of Top Five Principal Components

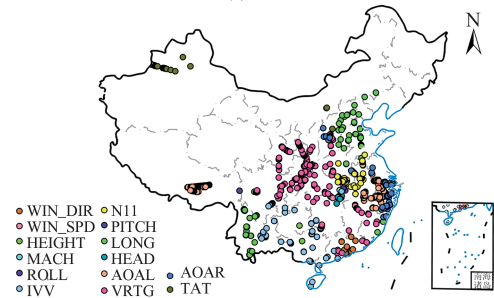
为了进一步研究空中颠簸的影响因子空间分布特征,在各局部区域内对第一主成分贡献即分量载荷前 3 位的飞行参数进行分析,结果如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,空中颠簸数据第一主成分贡献高的变量类型在空间不同区域上存

在明显差异,而且同一区域的变量类型相同。通过图 6 可以看出,贡献率第一的属性变量在全国范围内只有 9 种,而贡献率第二和第三的属性变量则有 14 种和 11 种,说明贡献率第一的属性变量较为集中。同时,VRTG 参数主要出现在贡献率第二的变量中,但没有出现在贡献率第一的相关变量中,且主要分布在陕西、重庆、四川、甘肃和江西福建等地区,说明在上述地区,空中颠簸数据中 VRTG 的变化程度要高于其他地区。



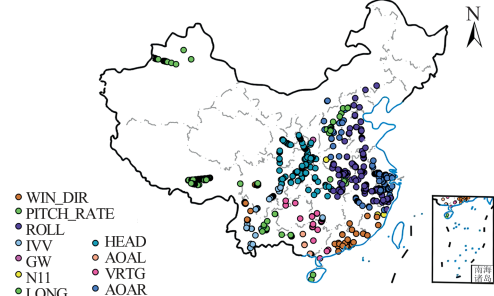
审图号:GS(2023)34号

(a) 第一飞行参数



审图号:GS(2023)34号

(b) 第二飞行参数



审图号:GS(2023)34号

(c) 第三飞行参数

图 6 第一主成分贡献前 3 位的飞行参数空间分布

Fig. 6 Spatial Distribution of Flight Parameters with Top 3 Loadings to the 1st Principal Component

从省级行政单元尺度来考虑,对地理加权第一主成分贡献最大飞行参数也存在较大差异。全国不同省份范围内贡献最大飞行参数的分布情况见表 3。从表 3 可以看出,在北京、天津、河北等地区,第一主成分贡献最大为右侧攻角,说明在华北平原地区颠簸与右侧攻角的相关性较大;在西藏、新疆地区,第一主成分为俯仰角,说明在

中国西部地区要注意俯仰角的控制,该参数与颠簸发生关系较大;在海南、广东、福建等东南沿海地区,第一主成分是地表高差,即飞行高度,在此地区受到海上气流的影响,导致飞行高度与颠簸息息相关;在广西、四川南部等地区,第一主成分为惯性垂直速度,在西南地区多为山区,在此地区气流紊乱,云层结构复杂,颠簸时常伴随着飞机的上升与下降,所以在此区域内空中颠簸风险与惯性垂直速度相关性较强。

表3 各省份地理加权第一主成分贡献最大飞行参数
Tab. 3 Flight Parameters with the Largest Loading to the 1st Principal Component of Geographically Weighted for Each Province

地区	贡献最大飞行参数
西藏、新疆	PITCH
北京、天津、河北、山东、山西	AOAR
陕西、重庆、甘肃、四川东北部、湖北	WIN_SPD
海南、广东、福建	HEIGHT
江苏、上海、安徽、浙江	N11
湖北、安徽、河南	AOAL
云南、四川	MACH
广西、四川南部、贵州	IVV

为了进一步体现地理空间要素对空中颠簸的影响,本文专门对纵向加速度、惯性垂直速度、地表高差和地表高程4个要素对空中颠簸风险数据的影响进行分析,结果如图7所示,其中4个方向的指针分别代表着4个要素;指针的长度代表着相应变量对第一主成分要素的载荷绝对值大小,指针越长,代表影响程度越大;指针的颜色代表载荷值的符号,蓝色的正值代表正向影响,红色的负值代表负向影响。从图7中可以看出,4个要素对于空中颠簸的影响多为正向关系,空中颠簸数据与4个要素之间的关系存在明显的空间异质性分布特征。在全国范围内,依据4个要素与空中颠簸之间的关系分为几大特征区域:在华北平原地区,4个要素对于空中颠簸的影响都较小,且均为正值,影响空中颠簸的参数是其他要素,在此地区气流稳定,空中颠簸主要与飞机实时飞行姿态相关;在西藏和新疆地区,地表高程对于空中颠簸的影响较小,而纵向加速度、惯性垂直速度和地表高差贡献率较大;地表高差对于空中颠簸的负向影响主要集中在华中平原地区;惯性垂直速度影响较大的地区为广西、云南,此地区地形以山地丘陵为主,且气候类型复杂,空中云层结构复杂,飞机飞行过程中发生颠簸时也经常

伴随飞行高度变化,因此惯性垂直速度贡献率较大;在东南沿海地区,影响较大的参数为地表高差,飞机在飞行高度不足的情况下受到海风的影响容易发生颠簸,当飞机达到对流层顶高度时,受到海风的影响小,因此地表高差贡献率较大。

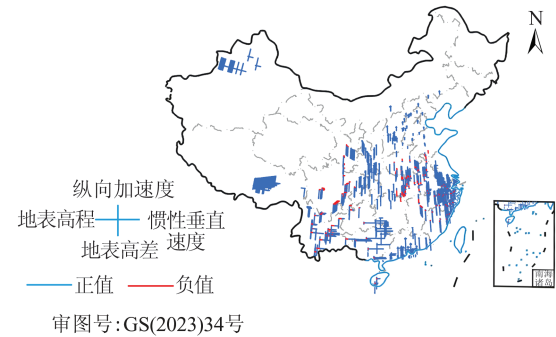


图7 空中颠簸风险地理加权主成分分析局部载荷分布
Fig. 7 Spatial Distribution of Local Loadings from the Geographically Weighted Principal Component Analysis

4 结 语

本文利用中国民航行业QAR大数据提取了2017—2019年全国范围内发生的空中颠簸事件,采用时空可视化,KDE对其时空分布特征进行了初步探索分析。此外,本文利用空间自相关分析、热点分析对空中颠簸风险的空间分布模式进行总结。本文研究空中颠簸数据各变量之间相关性,而主成分分析方法基于数据属性维度空间本身所呈现的相关性特征,不依靠过多先验知识,探索多元变量之间的内部关系特征。传统主成分分析是与地理空间位置无关的全局统计技术,而空中颠簸风险的发生与地理位置属性关系密切,变量间关系在全国范围内存在典型的空间异质性特征。因此本文利用GWPCA技术对空中颠簸风险的影响要素的空间异质性分布特征进行精细化研究。

通过本文研究总结出以下几点空中颠簸风险及其潜在影响要素的时空分布规律:

- 1)以季度为划分,空中颠簸多发于冬春两季,这主要是源于季节变化引起对流层和平流层气流变化。
- 2)以小时划分,空中颠簸多发于中午时段,这主要是不同时段的气温变化以及航班频次导致。
- 3)空中颠簸热点多位于第一阶梯和第二阶梯,以及阶梯分界线附近。在阶梯分界线附近山区较多,容易形成动力乱流,发生空中颠簸。

4)空中颠簸事件在空间上主要呈现正相关性,同时中国不同地区属性参数对于空中颠簸的关联影响程度也存在典型的空同异质性特征,相同地区飞行参数与空中颠簸内在联系有着相似的表现。

本文研究一方面为基于民航QAR大数据的飞行风险时空分布特征与规律提供了可行的时空统计分析框架参考;另一方面针对空中颠簸风险分布及其潜在影响要素从时空视角进行解读,为民航行业风险管理与决策应用提供了新的实践支撑。本文研究也为未来研究更加精细的颠簸风险要素关系建模奠定了必要的理论与实践基础,最终实现精准的民航空中颠簸预警,切实为提升民航行业风险管理与安全水平做出实质性贡献。此外,本文所研究的空中颠簸事件分布于特定的条带状航路,与此前GWPCA技术多应用于无空间约束的场景明显不同,但从分析结果来看仍体现了较为明显的空同异质性特征分布,一定程度上验证了该技术在特殊的空同对象分布场景下应用的有效性与适用性。

参 考 文 献

- [1] Gu Yunyan. Airplane Turbulence Distribution Analysis of Western Trunk Air Routes in China [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2009. (辜运燕. 我国西部干线飞机颠簸分布规律分析[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2009.)
- [2] Li Ziliang, Huang Yifang. Simulations of Aircraft Bump Caused by Topography[J]. *Meteorological*, 2006, 32(11): 32-35. (李子良, 黄仪方. 地形影响的飞机颠簸及其数值仿真实验[J]. 气象, 2006, 32(11): 32-35.)
- [3] Zou Bo. A Preliminary Dynamical Study on the Effects of Surface Heating on Air Turbulence[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, 27(4): 527-531. (邹波. 地面加热对飞机颠簸影响的动力学初步分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(4): 527-531.)
- [4] Clark T L, Hall W D, Kerr R M, et al. Origins of Aircraft-Damaging Clear-Air Turbulence During the 9 December 1992 Colorado Downslope Windstorm: Numerical Simulations and Comparison with Observations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(8): 1105-1131.
- [5] Koch S E, Jamison B D, Lu C G, et al. Turbulence and Gravity Waves Within an Upper-Level Front[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62(11): 3885-3908.
- [6] Sharman R D, Doyle J D, Shapiro M A. An Investigation of a Commercial Aircraft Encounter with Severe Clear-Air Turbulence over Western Greenland[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(1): 42-53.
- [7] Atlas D, Metcalf J I, Richter J H, et al. The Birth of "CAT" and Microscale Turbulence[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1970, 27(6): 903-913.
- [8] Ellrod G P, Knapp D I. An Objective Clear-Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and Operational Use[J]. *Weather and Forecasting*, 1992, 7(1): 150-165.
- [9] Zhou Lin, Huang Chaofan, Zhong Zhong, et al. Research on Formation Mechanism of a Clear-Air Turbulence Above South China Sea[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 32(4): 570-576. (周林, 黄超凡, 钟中, 等. 一次南海高空晴空颠簸事件的形成机制研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(4): 570-576.)
- [10] Sharman R, Tebaldi C, Wiener G, et al. An Integrated Approach to Mid- and Upper-Level Turbulence Forecasting[J]. *Weather and Forecasting*, 2006, 21(3): 268-287.
- [11] Shen Yanling, Wang Donghai, Gong Yuanfa. A Statistical Analysis of the Aircrafts Turbulence Properties in Winter over China[J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2017, 32(4): 426-432. (申燕玲, 王东海, 巩远发. 中国冬季飞机颠簸的统计分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2017, 32(4): 426-432.)
- [12] A Liman, Wang Jun, Feng Jinming, et al. Spatio-temporal Characteristics of High Altitude Turbulence over Eastern China and Their Relationship with the Equatorial Central and Eastern Pacific Sea Surface Temperature[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40(5): 1073-1088. (阿利曼, 王君, 冯锦明, 等. 中国东部高空颠簸时空分布特征及其与热带中东太平洋海温的关系[J]. 大气科学, 2016, 40(5): 1073-1088.)
- [13] Su Teng, Wang Yongzhong. A Research of Measures on Exploring the High-Incidence Areas of Turbulence Based on NCEP / NCAR Data[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2016, 38(4): 557-562. (苏腾, 王永忠. 利用NCEP/NCAR数据探寻高空颠簸高发区的方法研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 557-562.)
- [14] Wu Yancheng, Zhou Lin, Liu Kefeng, et al. AM-DAR Based Statistical Analysis on the Features of

- Cross-Ocean Airplane Turbulence over China's Surrounding Sea Areas[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, 34(1): 17-24. (吴炎成, 周林, 刘科峰, 等. 基于AMDAR资料应用于中国周边海域飞机颠簸的统计分析[J]. 气象科学, 2014, 34(1): 17-24.)
- [15] Huang Yifang, Liao Xiaochun, Gu Yunyan. Airplane Turbulence Distribution Analysis of Western Trunk Airlines in China[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2012, 32(2): 57-60. (黄仪方, 廖晓春, 辜运燕. 中国西部干线飞机颠簸分布规律分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(2): 57-60.)
- [16] Huang Yifang, Sun Zhibo, Xiao Huanquan. Analysis on the Rules of Distribution of Airplane Turbulence of Important Routes on Plateau of China[J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2011, 22(1): 5-9. (黄仪方, 孙智博, 肖焕权. 我国高原重要航线飞机颠簸分布规律分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(1): 5-9.)
- [17] Mao Quanxin. Thoughts on the Application of QAR Technology in China's Civil Aviation[J]. *China Civil Aviation*, 2010(12): 67-68. [17] (毛全新. 对我国民航QAR技术应用的思考[J]. 中国民用航空, 2010(12): 67-68.)
- [18] Wang Lei, Sun Ruishan, Wu Changxu, et al. A Flight QAR Data Based Model for Hard Landing Risk Quantitative Evaluation [J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(2): 88-92. (汪磊, 孙瑞山, 吴昌旭, 等. 基于飞行QAR数据的重着陆风险定量评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(2): 88-92.)
- [19] Xie Jiayi, Sun Huabo, Wang Chun, et al. Analysis of Influence Factors for Unstable Approach in Fine-Grained Scale[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(8): 1201-1208. (谢嘉仪, 孙华波, 王纯, 等. 精细尺度下的不稳定进近影响因素分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(8): 1201-1208.)
- [20] Li Cunhua, Sun Zhihui, Chen Geng, et al. Kernel Density Estimation and Its Application to Clustering Algorithm Construction [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2004, 41(10): 1712-1719. (李存华, 孙志挥, 陈耿, 等. 核密度估计及其在聚类算法构造中的应用[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(10): 1712-1719.)
- [21] Smouse P E, Peakall R. Spatial Autocorrelation Analysis of Individual Multiallele and Multilocus Genetic Structure[J]. *Heredity*, 1999, 82(5): 561-573.
- [22] Legendre P. Spatial Autocorrelation: Trouble or New Paradigm?[J]. *Ecology*, 1993, 74(6): 1659-1673.
- [23] Cliff O J. Spatial Autocorrelation [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1973, 14: 196.
- [24] Moran P A P. The Interpretation of Statistical Maps [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1948, 10(2): 243-251.
- [25] Ord J K, Getis A. Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(4): 286-306.
- [26] Getis A, Ord J K. Spatial Modelling of Disease Dispersion Using a Local Statistic: The Case of AIDS [M]//Econometric Advances in Spatial Modelling and Methodology. Boston: Springer, 1998: 143-158.
- [27] Getis A, Ord K. Local Spatial Statistics: An Overview [J]. *Spat Anal Model GIS Environ*, 1996, 374: 269-285.
- [28] Harris P, Brunsdon C, Charlton M. Geographically Weighted Principal Components Analysis [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(10): 1717-1736.
- [29] Lu B B, Harris P, Charlton M, et al. The GW-Model R Package: Further Topics for Exploring Spatial Heterogeneity Using Geographically Weighted Models[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2014, 17(2): 85-101.
- [30] Lu Binbin, Ge Yong, Qin Kun, et al. A Review on Geographically Weighted Regression[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1356-1366. (卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1356-1366.)