

面向低空经济的多维度风险量化评估模型

A Multi-Dimensional Quantitative Risk Assessment Model for the Low-Altitude Economy

陈 龙,沙默泉,姚树为,孙建龙(中国联通智能城市研究院,北京 100048)

Chen Long,Sha Moquan,Yao Shuwei,Sun Jianlong(China Unicom Smart City Research Institute,Beijing 100048,China)

摘 要:

随着低空经济的快速发展,低空飞行活动日益频繁,飞行环境的风险评估成为保障其安全高效的关键。构建了多维度风险量化模型,解决多维度风险要素复杂、动态性强且缺乏统一量化标准的问题。通过整合地面、空中及综合风险数据,设计科学的风险指标体系,提出动态权重分配策略与风险量化计算方法,构建“地面—空中—综合”三维评估框架。在某市的实证研究结果显示,该模型可精准识别高风险区域、动态响应环境变化,风险等级划分精度较高。

关键词:

低空经济;风险量化;三维评估模型;动态权重;多源数据融合

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.07.008

文章编号:1007-3043(2026)07-0044-06

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

With the rapid development of the low-altitude economy, risk assessment of its flight environment has become the key to ensuring safe and efficient development. It constructs a multi-dimensional risk quantification model to address the problems of complex, dynamic and lack of unified quantification standards of risk elements in the low-altitude flight environment. By integrating ground, air and comprehensive risk data, a scientific risk index system is designed, a dynamic weight allocation strategy and a risk quantification calculation method are proposed, and a three-dimensional “ground-air-comprehensive” assessment framework is constructed. In the empirical study of a City, the model can accurately identify high-risk areas, dynamically respond to environmental changes, and has high risk level classification accuracy.

Keywords:

Low-altitude economy; Risk quantification; Three-dimensional evaluation model; Dynamic weight; Multi-source data fusion

引用格式:陈龙,沙默泉,姚树为,等. 面向低空经济的多维度风险量化评估模型[J]. 邮电设计技术,2026(7):44-49.

1 概述

近年来,国家多次将低空经济写入政府工作报告,《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)》^[1]等政策文件明确提出拓展低空经济应用场景,将其列为战略性新兴产业。同时,无人机技术的进步为低空经济提供坚实支撑,应用场景从航拍测绘延伸

至物流配送、城市巡检、应急救援等领域,在偏远地区运输、基础设施监测、灾区搜救等场景中,低空经济展现出显著优势,彰显出其在未来经济增长中的重要作用。

当前低空飞行面临多重风险挑战:一是地面人员与设施暴露风险,高密度城市环境下无人机坠落后果严重;二是空中动态胁迫风险,包括气象突变、电磁干扰及航空器冲突;三是综合管控风险,涉及空域划设不合理及数据隐私泄露。既有研究往往受限于单一视角的静态评估框架,这种相对固化的管理模式难以

通讯作者:孙建龙,sunj180@chinaunicom.cn

收稿日期:2026-06-09

匹配低空环境瞬息万变的特性,致使航路规划缺乏针对性,存在安全隐患。中国民用航空局发布的《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》(CCAR-92部)^[2]及《国家空域基础分类方法》^[3]虽已制定基础规范,但构建科学有效的微观风险量化模型仍是低空经济安全发展的关键。

本文基于低空三维风险评估框架,构建多维度风险量化模型,整合空地各类风险要素,搭建指标体系并动态赋权,实现低空运行风险精准测算。从技术、安全、经济层面明晰研究价值,最后结合某市实证分析,验证模型的可行性与应用推广潜力。

2 现状研究

低空风险评估核心是通过“风险识别—风险分析—风险评价”的闭环,为飞行安全提供科学依据。风险识别聚焦地面与空中风险要素的提取分类,如人口密度、气象条件等;风险分析采用定量与定性结合的方法,刻画风险发生概率及影响;风险评价通过综合加权与等级划分,生成决策可用的量化结果,依赖精准数据与场景适配性。

国际学界在低空风险评估领域起步较早,研究范式主要遵循“从微观物理损伤到宏观空域容量”的演进路径,侧重于空中交通冲突的致灾机理及地面物理撞击后果的精确量化。首先,在空中冲突风险方面,欧美学者多基于概率碰撞模型(PCM)与蒙特卡洛模拟,深入探究无人机与有人机、无人机之间的动态避让逻辑。例如,文献[4]构建了基于地面人口密度分布的城市无人机运行风险图谱,通过高分辨率地理数据量化了坠机事故对地面人员的期望伤亡率(ECS),为城市低空空域的精细化划分提供了理论依据。其次,在物理损伤评估方面,研究重点已从简单的动能计算转向复杂的弹道分析与结构易损性建模。部分学者提出了基于弹道下降轨迹的动态风险评估方法,该方法结合无人机坠落姿态、电池爆炸概率及建筑物防护等级,实现了对地面设施损毁程度的多维度预测。然而,国外研究虽在物理模型构建上较为成熟,但多依赖于理想化的交通流假设,且针对复杂电磁环境及数据安全隐患等非物理维度的风险考量相对较少,难以直接适配中国高密度城市环境下的混合运行场景。

国内研究紧密跟随低空经济政策导向,呈现出“政策驱动型”特征,主要聚焦于特定场景下的单一维

度风险管控与静态指标体系构建。在地面风险防控领域,文献[5]率先针对无人机对地面人员的碰撞风险建立了数学模型,通过引入人口暴露度系数,量化了不同飞行高度下的地面安全风险等级,为禁飞区划设提供了数据支撑。在航路规划与应用层面,文献[6]以城市物流配送为切入点,构建了包含气象干扰、障碍物规避等多因子的航路风险评估模型,有效提升了物流无人机的运行效率。此外,部分学者开始尝试将层次分析法(AHP)与模糊综合评价法引入低空安全评估,初步形成了具有中国特色的评价指标体系。

在国内,尽管在特定场景下的单一维度风险管控方面已取得阶段性进展,但在理论架构的系统性与应用效能的实时性上仍存在显著局限。既有模型大多局限于地面暴露或空中胁迫的单一视角,缺乏对“地面—空中—综合”多维要素耦合机理的深入剖析,导致全域一体化风险画像构建存在盲区;同时,主流研究多依赖静态权重体系与离线历史数据,未能有效内嵌气象突变、临时空域管制等实时动态因子的响应机制,致使风险预警难以适配低空经济高动态、强时变的运行特征。此外,在追求评估精度的过程中,现有研究往往忽视了对飞行轨迹、用户位置等高敏数据的隐私防护,尽管文献[7]提出的基于差分隐私的轨迹发布技术为数据安全提供了理论可行路径,但学界当前尚未建立起隐私保护机制与风险量化模型的深度融合框架。针对上述维度割裂、动态响应缺失及数据安全缺位三大瓶颈,本研究进行了以下创新:一是构建“地面—空中—综合”三维评估框架,通过深度整合地面暴露、空中胁迫及综合管控多维指标,打破单一视角局限,实现对低空风险的全方位精准画像;二是设计基于实时数据流的动态权重分配机制,引入时间衰减因子与事件触发策略,动态调整指标权重以捕捉环境瞬时变化,显著提升模型的时效性与适应性。

3 低空风险量化模型构建

基于图1所示三维风险评估总体架构,构建多维度风险量化模型,整合地面、空中及综合风险要素,通过科学指标体系与动态权重分配,实现低空风险的精准量化^[8-10]。其意义体现在如下3个方面:在技术上,为低空航路网规划提供精准数据,优化航路设计;在安全上,动态响应环境变化,为无人机调度提供决策依据;在经济上,推动低空经济从“定性管控”向“定量治理”转型,为安全高效发展奠定基础。结合某市的

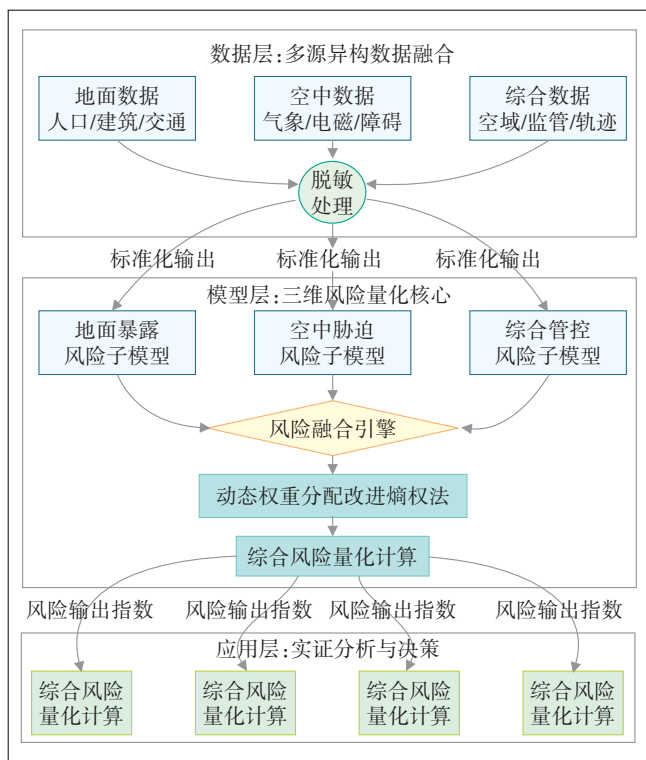


图1 面向低空经济的三维风险评估总体架构

实证分析,验证模型的有效性 & 推广价值。

3.1 数据来源与预处理

模型构建依赖多源异构数据(见表1),从而确保数据全面且有针对性。

表1 低空风险量化模型数据源及预处理明细

数据类型	具体数据内容	来源/设备	分辨率	时间区间
地面静态	地表覆盖、建筑白模	GF-7 卫星、IC-ESat-2	0.8 m/光子级	2022—2024
人口动态	活动密度	手机信令(智慧足迹)	基站级(~100 m)	2025-02-25—2025-03-01
气象环境	风温湿压、湍流	微气象站、国家站	定点/小时级	2025-02-25—2025-03-02
实装验证	轨迹、通信、定位	DJI M350、华为 Mate 30 Pro	秒级/厘米级	2025-02-26—2025-03-01

为保障数据质量,对原始数据进行时空对齐、异常值剔除、数据标准化等预处理操作,规避数据偏差对模型精度的影响,为后续指标设计与模型构建奠定基础。

首先,实施严格的时空基准统一。在空间上,利用七参数布尔莎模型将全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)原始观测值(WGS84)转换至CGCS2000高斯—克吕格投影坐标系,并以ICESat-2激光点云为绝对控制点,对GF-7生

成的数字表面模型(DSM)进行平差校正,消除系统高程误差。在时间上,建立ISO 8601标准时间轴,采用滑动窗口平均法将秒级遥测数据聚合至分钟级,同时利用三次样条插值将小时级气象背景场细化,实现多源数据在统一时空框架下的精确匹配与关联。

其次,执行多层级的数据清洗与质量控制。针对无人机轨迹数据,采用基于运动学约束的卡尔曼滤波算法,剔除速度超限(>120 km/h)的GNSS跳变点,并平滑悬停验证阶段的高频抖动,还原真实飞行状态。对于气象数据,依据物理极值原则剔除异常记录,并利用时空克里金插值修复短时缺测;针对人口信令数据,通过剔除夜间非居住区信号及驻留时长加权,修正人口密度分布以反映真实的日间活动特征。

然后,在此基础上进行特征提取与融合重构。利用深度学习语义分割网络提取1 m分辨率的地物矢量边界,结合校正后DSM构建城市三维白模;提出“背景场+实测残差”的降尺度融合方法,将中尺度气象预报与机载/地面实测数据结合,生成米级分辨率的三维微尺度风场与温度场,显著提升复杂地形下的风切变模拟精度。同时,基于反距离权重插值构建三维通信覆盖与定位可信度地图,量化空域信号盲区风险。

最终,处理后的数据按L1(原始)、L2(基础)、L3(主题)三级架构存储,并通过OGC标准服务发布,直接支撑低空航路规划与风险实时计算。

3.2 风险指标体系设计

构建“地面—空中—综合”三维风险指标体系(见图2),涵盖地面暴露、空中胁迫两大单维度风险,通过加权融合形成综合风险指标,全面覆盖低空飞行全场景风险要素。

地面暴露风险用于量化低空飞行活动对地面人

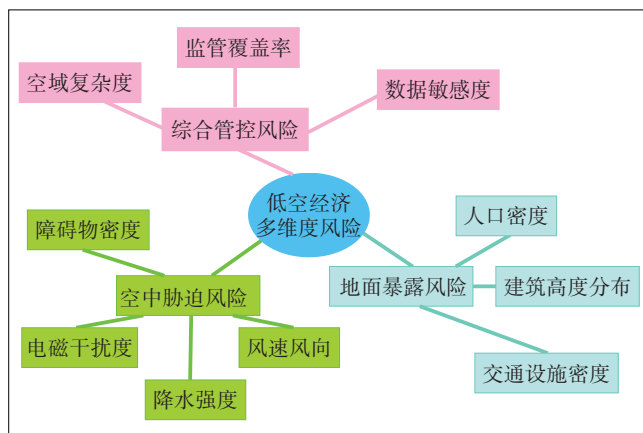


图2 多维度风险量化指标体系结构

员、建筑及交通基础设施的潜在威胁程度,核心评价指标包含人口密度、建筑高度分布与交通设施密度,具体量化逻辑如下:人口密度风险采用区域人口总数与区域面积的比值进行计算,采用文献[4]提出的公式: $R_{\text{pop}}=P/A$ (P 为区域人口总数, A 为区域面积),人口密度数值越高,表明低空飞行对地面人员的潜在威胁越大,风险等级越高;建筑高度分布风险采用加权评分法量化,结合区域内建筑高度的分位数分布特征赋值权重,建筑高度越高的区域,低空飞行的碰撞概率与事故后果严重性越高,对应的风险评分越高;对交通设施密度风险综合区域内交通设施的分布密度进行量化,交通设施密度越高,地面人员与车辆的流动频次越高,低空飞行活动对地面交通系统的干扰风险与潜在伤害风险越大。

空中胁迫风险聚焦于低空飞行过程中,各类空中环境因素对飞行安全的直接干扰与胁迫作用,核心评价指标包含障碍物密度、电磁干扰度、降水强度与风速风向,具体量化逻辑如下:障碍物密度风险通过统计单位空域内障碍物的数量与体积占比进行量化,障碍物密度越高,低空飞行器的飞行路径受限程度越大,碰撞风险越高;电磁干扰度风险基于区域内电磁辐射强度的实测数据进行标准化量化,电磁干扰度越高,对飞行器的通信链路、导航系统的干扰越强,易引发飞行控制失灵风险;气象胁迫风险涵盖降水强度与风速风向2个核心要素,采用加权求和法计算综合气象风险值:

$$R_{\text{met}} = \omega_1 \times I_{\text{rain}} + \omega_2 \times I_{\text{wind}} \quad (1)$$

其中, I_{rain} 为降水强度标准化值, I_{wind} 为风速风向影响系数, ω_1 、 ω_2 为权重系数。降水强度越大,风速风向越偏离飞行器安全运行阈值,标准化值越趋近于1,气象胁迫风险越高。

综合管控风险指标通过对地面暴露风险与空中胁迫风险进行加权融合得到,同时纳入空域复杂度、监管覆盖率与数据敏感度三大修正要素,实现对低空

经济运行风险的全方位综合评估,计算公式为:

$$R_{\text{com}} = \alpha \times R_{\text{ground}} + \beta \times R_{\text{air}} + \gamma \times R_{\text{corr}} \quad (2)$$

其中, R_{ground} 为地面暴露风险综合值, R_{air} 为空中胁迫风险综合值, R_{corr} 为修正项,综合量化空域复杂度、监管覆盖率与数据敏感度的协同影响, α 、 β 、 γ 为权重系数,且满足 $\alpha+\beta+\gamma=1$ 。权重系数采用熵权法与专家打分法相结合的方式确定:通过熵权法挖掘各指标的客观数据差异,赋予客观权重;结合低空交通管理、航空安全领域专家的经验判断,对权重进行修正,最终实现客观数据与领域知识的有机结合,保障综合风险评估结果的科学性与实用性。

3.3 动态权重分配机制

采用“基础权重计算—动态调整—权重归一化”3步流程,确保权重分配科学灵活,适配低空环境的动态变化(见图3)。

为消除人为赋权的主观干扰,首先引入熵权法确定基础权重。通过测度各指标数据的离散程度(信息熵)来反推其权重值。首先计算第*i*个指标的信息熵:

$$E_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^k p_{ij} \times \ln p_{ij} \quad (3)$$

其中, p_{ij} 为指标样本比重, m 为样本总数。

再计算差异性系数: $D_i=1-E_i$,最后得到权重: $w_i = D_i / \sum_{i=1}^n D_i$,信息熵越低权重越大。

在此基础上,结合实时数据与场景需求设计动态调整机制。当气象突变时自动上调气象风险权重,人口密集区可手动上调对应权重。系统根据预设阈值判断环境变化,触发权重调整流程,如风速超标时自动优化权重,提升模型灵活性与实时响应能力。

最后,对调整后的权重通过公式 $w_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i$ 进行归一化处理,确保权重之和为1,避免计算结果失真,可直接应用于综合风险计算。

3.4 风险量化计算流程

遵循“单维度风险计算—综合风险计算—风险可

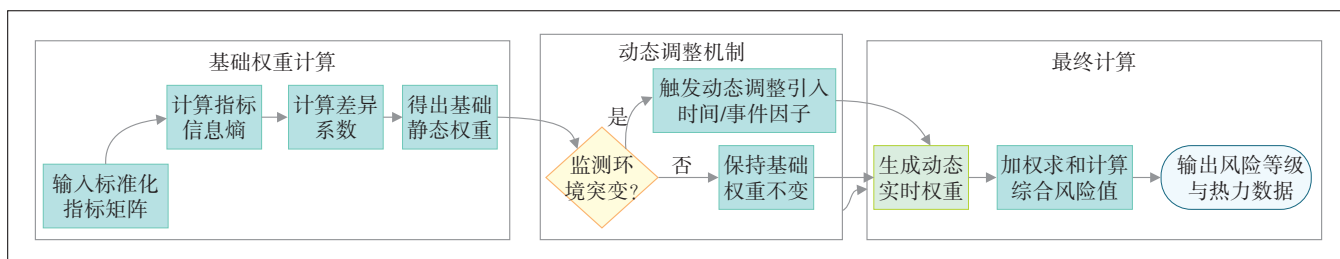


图3 基于改进熵权法的动态权重分配与风险量化计算流程

视觉”闭环流程,实现从指标量化到结果呈现的全链条规范操作。

地面与空中单维度风险均采用加权求和法:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{地面暴露风险: } R_{\text{ground}} = \sum_{i=1}^k w_i \times r_i \\ \text{空中胁迫风险: } R_{\text{air}} = \sum_{j=1}^l v_j \times s_j \end{array} \right. \quad (4)$$

其中, w 、 v 为权重, r 、 s 为指标标准化值, k 、 l 为指标总数。

参考行业通用标准并结合某市实测数据分布特征,将风险阈值划分为5个层级:极低风险—— $[0, 0.2]$ 、低风险—— $(0.2, 0.4]$ 、中等风险—— $(0.4, 0.6]$ 、高风险—— $(0.6, 0.8]$ 和极高风险—— $(0.8, 1.0]$ 。

综上,根据式(2)和式(4),采用动态归一化权重融合地面与空中风险得到综合风险,综合风险的等级划分与单维度一致,全面反映低空环境整体风险水平,为航路规划提供科学依据。

将研究区域划分为规则网格(如 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$),

通过双线性插值法计算单元风险值,采用颜色渐变表示风险等级(绿色至紫色风险递增),支持多层级缩放查看,直观呈现风险分布,为决策提供清晰支撑。

4 实证分析

4.1 实验区域选择

如图4所示,选取某市作为实证区域,其优势在于:该市地处华北平原与太行山脉过渡地带,兼具城区与山区地貌,可验证模型多场景适配性;产业基础完善,有低空航路网规划平台及丰富应用场景,数据充足;作为低空经济试点,政府配合度高,便于实地验证与数据获取,可有效评估模型适应性与泛化能力。现有研究如文献[11]以深圳为例开展了低空经济示范区运行风险评估实证研究,其方法论对本研究在某市的实证设计具有重要借鉴意义,特别是在网格化划分与数据融合方面。

4.2 实验数据准备

实验数据对应模型所需多源数据,经预处理后用

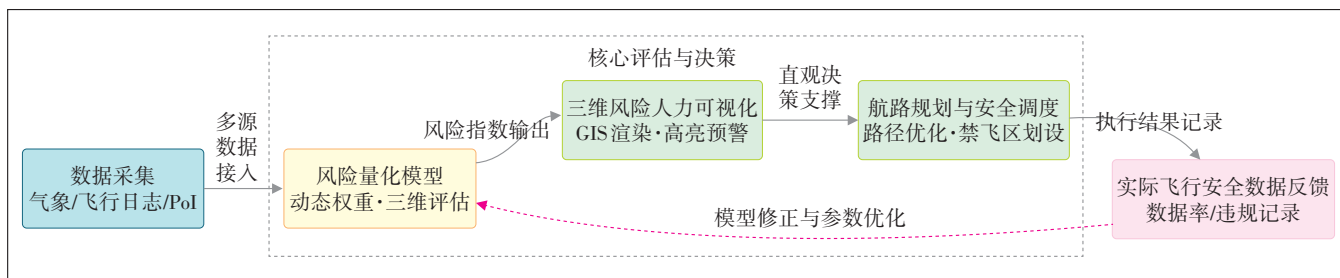


图4 某市低空经济风险量化评估实证应用闭环

于验证,具体如表2所示。

4.3 实验验证指标

设计4项验证指标,全面评估模型性能,具体如表3所示。

4.4 实验结果与分析

表2 低空风险量化模型数据源及预处理明细

数据类型	具体数据明细	数据来源	预处理操作
地面风险数据	2025年某市高精度人口密度数据、建筑三维点云数据、交通流量监测数据	某市统计局、城市数字化建模平台、交通管理部门	时空对齐、异常值剔除、Min-Max标准化
空中风险数据	实时风速、温度、湿度、电磁干扰强度、卫星定位信号质量	某市气象监测站、电磁环境监测网络、GNSS系统	实时清洗、时空配准、标准化处理
实装验证数据	无人机飞行轨迹、事故记录、高风险区域标注信息	某市低空航路网规划平台	轨迹对齐、标注校准,用于模型性能验证

表3 低空风险量化模型多维度验证指标体系

验证指标	指标定义	评估方法	评估标准
有效性	模型识别高风险区域与实际高风险区域的吻合程度	计算模型识别结果与实际验证标注区域的吻合度	吻合度 $\geq 85\%$,视为有效
动态性	模型对环境突变的权重调整响应速度	记录突发场景下的权重调整响应时间	响应时间 $\leq 1\,000 \text{ ms}$,满足实时性需求
精度	模型风险等级划分的准确程度	统计各风险等级划分准确率,与某数字航路网规划高风险占比对比	整体准确率 $\geq 85\%$,高风险识别准确率 $\geq 90\%$
适配性	模型在不同地形场景的适用程度	分别计算城区、山区场景下的有效性和精度	2类场景下指标均满足评估标准,适配性良好

从有效性、动态性、精度、适配性4个指标对模型进行验证,结果如下。

在有效性方面,模型在某市城区、山区高风险区

域的识别吻合度分别为95%、88%，均高于85%的标准要求，效果良好。城区高风险区域集中在人口密集区、高层建筑群，与事故多发区域一致；山区高风险区域分布在峡谷风切变地带、电磁信号遮挡区域，部分偏差源于山区数据采集不完整。

在动态性方面，模型在突发场景下响应时间均小于780 ms，满足实时性需求，具体如表4所示。

表4 环境突变场景下的模型动态响应机制验证

验证场景	环境突变条件	权重调整内容	响应时间/ms
突发强风场景	风速超过临界值(8 m/s)	上调气象风险指标权重	600
电磁干扰场景	电磁干扰强度超标(≥ 50 dB μ V/m)	上调电磁干扰风险指标权重	720

在精度方面，模型整体风险等级划分准确率为89%，高风险识别准确率为92%，中风险为87%，低风险为85%，均满足标准要求，与某市数字航路网规划高风险占比偏差仅3个百分点。山区精度(86%)略低于城区(92%)，主要因山区地形影响数据采样精度。

在适配性方面，风险热力图清晰呈现各等级风险分布：极高风险区(紫色)为城区核心区、山区强风峡谷等，禁止飞行；高风险区(红色)为城区人口密集区周边、山区风切变地带等，严格限飞；中等风险区(橙色)为城区边缘、山区缓坡等，谨慎飞行；低风险区(黄色)、极低风险区(绿色)为公园、远郊区等，可正常飞行，为决策提供直观支撑。

4.5 实验结论

本研究构建的多维度风险量化模型在某市的实证中，有效性、动态性、精度、适配性均满足实际需求，可有效识别高风险区域，动态响应环境变化，为低空航路网规划和无人机管控提供技术支撑。后续可优化山区数据采集方法，进一步提升模型在复杂地形下的评估能力，助力低空经济安全发展。

5 结束语

本研究针对当前低空风险评估中存在的维度割裂、动态响应滞后及数据安全缺位等关键瓶颈，构建了面向低空经济的“地面—空中—综合”三维风险量化模型，并以某市为实证对象进行了系统验证。

本研究虽在低空风险三维量化评估上取得阶段性进展，但面对低空经济快速发展带来的复杂挑战，模型在数据粒度、指标维度与泛化能力方面仍有提升空间。未来将进一步深化多源数据融合，引入高分辨

率遥感、激光雷达等数据构建数字底座，解析“人—机—环—管”耦合机理；拓展eVTOL等多类型航空器评估场景，在不同地貌区域开展跨区域验证，借助迁移学习形成通用评估框架；同时推进“评估—规划—调度—应急”闭环应用，研发与低空交通管理系统深度融合的平台，实现风险实时干预；并参与行业标准制定，开展高密度交通冲突预测研究，为构建安全高效的低空经济生态持续提供理论与技术支撑。

参考文献：

[1] 工业和信息化部,科学技术部,财政部,等.工业和信息化部 科学技术部 财政部 中国民用航空局关于印发《通用航空装备创新应用实施方案(2024-2030年)》的通知:工信部联重装[2024]52号[EB/OL]. [2026-03-06]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6942115.htm.

[2] 交通运输部.民用无人驾驶航空器运行安全管理规则[EB/OL]. [2026-03-06]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/fgs/202401/t20240103_3980642.html.

[3] 空管行业管理办公室.关于发布《国家空域基础分类方法》的通知[EB/OL]. [2026-03-06]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202312/t20231221_222397.html.

[4] Li D, Wang H. Risk assessment of UAV operations in urban environments based on ground population density[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 221: 108366.

[5] 王英训,范晓宣,魏志强.无人机对地面人员碰撞风险建模与评估[J].北京航空航天大学学报,2021,47(10):2089-2098.

[6] 陈兵,刘虎,魏志坚.城市低空无人机物流航路规划及风险评估[J].交通运输工程学报,2022,22(3):234-245.

[7] Liu Y, Zhang Q, Chen L. Privacy-preserving trajectory publishing for unmanned aerial vehicles based on differential privacy[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(12): 9876-9888.

[8] 杨伟,李想.复杂气象条件下无人机低空飞行风险分析[J].气象科技,2022,50(4):512-520.

[9] 张军,吕人力.低空空域运行风险动态评估方法研究[J].航空学报,2020,41(S1):723-735.

[10] 刘佳,赵阳,孙宏.基于改进熵权-TOPSIS法的低空飞行安全风险评估[J].安全与环境学报,2023,23(5):1560-1568.

[11] 王海,欧阳高翔.低空经济示范区运行风险评估实证研究--以深圳为例[J].地域研究与开发,2023,42(6):112-118.

作者简介：

陈龙,工程师,学士,主要研究方向为低空经济、智慧城市数字孪生,涉及前端、GIS、CIM、BIM、物联网等;沙默泉,高级工程师,硕士,主要研究方向为智慧城市、3S应用等方面及创新产品的研发;姚树为,工程师,硕士,主要研究方向为智慧城市领域相关技术创新与业务开发、网络与信息安全及数字化转型;孙建龙,工程师,硕士,主要研究方向为智慧城市数字孪生、数字航路网等。