

【航空管理与安全】

基于 FAHP-GIS 的物流无人机起降点 适宜性评价研究

江吕春, 柳 倩

(沈阳航空航天大学 民用航空学院, 辽宁 沈阳 110000)

摘 要:构建了一套通用的物流无人机起降点选址适宜性评价方法。基于多准则决策(MCDM)框架,构建涵盖空域安全、物流需求与效率等多维度的评价指标体系,运用模糊层次分析法(FAHP)确定指标权重,结合地理信息系统(GIS)空间分析方法对各指标进行分级赋分与栅格化处理,通过加权叠加分析整合所有指标,并引入约束掩膜处理“一票否决”因子,从而系统识别最优选址区域。以 H 市为案例的实证研究表明,起降点适宜性空间呈现“中心城区集聚、西南-东北轴向拓展”的分布特征,高度与极高度适宜区约占全市面积 5%,主要集中在中心城区的部分行政区域,并在外围若干县域呈散点分布。

关键词:物流无人机;起降点选址;适宜性评价;FAHP;GIS

中图分类号: V 351

文献标识码: A

DOI:10.13486/j.issn.2097-4973.2026.04.006

0 引言

低空物流作为低空经济的重要应用场景,具有极大的发展潜力。传统的地面配送模式满足不了日益增长的物流配送需求,无人机因其环保和快速的特性,其使用正逐渐成为解决末端物流配送“最后一公里”问题的有效方案^[1]。随着国内无人机物流的快速发展以及各地政府与企业联运试点的广泛开展,无人机起降点的科学、合理的布局正被提出了更高要求^[2]。

国内外对物流无人机起降点选址进行了许多研究,王雪佳提出三级起降机场设施选址布局及路径规划模型,采用双层遗传算法,上层选址模型主要考虑垂直起降机场的运作成本和仓储成本,下层路径模型考虑无人机固定投入成本、运营成本和飞行能耗成本^[3]。Dimas Numan Fadhil 提出一种结合供需标准和空间技术来确定无人机起降点的方法,综合加权线性组合、层次分析法和 GIS 分析法进行定位点的空间规划^[4]。Darshan 等考虑无人机能量消耗和射程限制,以需求覆盖最大化为目标,建立物流无人机设施点选址模型^[5]。在设施选址评价问题的研究中,集成模糊层次分析法与地理信息系统(FAHP-GIS)的空间决策方法具有独特优势。Buckley 提出的 FAHP 方法可用来处理决策中的模糊性与不确定性,借助 GIS 实现评价指标的空间化分析与可视化表达,该方法能够有效解决多准则、多约束的复杂空间决策问题^[6]。

收稿日期:2026-03-03

基金项目:辽宁省教育厅科研基金资助项目(JYT2020137);辽宁省推动低空经济创新发展研究(213124117)

第一作者简介:江吕春(2000—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事交通运输规划与管理研究。

E-mail:469523516@qq.com

通信作者简介:柳 倩(1984—),女,山西河曲人,讲师,博士,主要从事交通运输规划与管理研究。

E-mail:331658893@qq.com

与传统层次分析法(AHP)相比,FAHP 引入三角模糊数量化专家判断,允许以区间值代替绝对数值,更自然地容纳决策信息的不完备性,其模糊运算得到的权重结果更为稳健,对个别判断波动不敏感,决策可靠性更高。同时,选址问题涉及政策、社会接受度等定性因素,FAHP 能将这类模糊判断科学量化,并与地形、距离等定量指标纳入统一框架,实现定性与定量的统一。

目前,FAHP-GIS 方法已在各类设施选址中得到广泛应用。马一凡运用 FAHP-GIS 方法对内河水面垃圾上岸点选址决策进行了研究^[7]。Abdulkhalim 将 FAHP-GIS 方法应用于印度尼西亚井里汶县住宅与工业发展的土地适宜性分析^[8]。上述研究表明,FAHP-GIS 方法的适用性与可靠性已得到实践验证。

基于上述分析,本研究采用 FAHP 确定各评价指标的权重为后续 GIS 空间分析提供权重依据,构建了一套物流无人机起降点选址用地适宜性评价指标体系,从空域安全、运营效率、场地建设、环境相容性四个维度构建评价指标体系,综合运用 FAHP-GIS 方法,并以 H 市为例验证了该方法的有效性。

1 研究方法

1.1 评价指标体系构建

物流无人机起降点的科学选址是一个受多维度因素共同制约的复杂空间决策问题。通过对现有研究的系统梳理,可将关键影响因素归纳为空域与飞行安全、物流需求与运营效率、场地建设适宜性、环境与社会相容性四大类别^[9]。

这些影响因素的性质存在显著差异:一部分因素(如空域限制、地形坡度)可直接定量表征,另一部分因素(如公众接受度、政策与规划符合度)则具有明显的定性特征,难以通过空间数据直接量化。对于后者,本研究通过相关间接指标进行表征,如用人口密度数据映射“社会环境影响度”,以间接反映公众对无人机运营噪声的接受程度,从而使定性因素得以纳入定量评价框架。

在此基础上,本研究通过以下流程系统筛选评价指标:(1)基于文献综述,从空域安全、运营效率、场地建设、环境相容性四个维度初步提取 20 余项潜在因素,形成基础指标池;(2)采用德尔菲专家咨询法,邀请来自低空物流领域的专家,对各指标从“重要性”和“数据可获取性”两个维度进行 5 级量表评分,经两轮咨询后保留得分均值均高于 4.0 的指标;(3)对筛选结果进行交叉验证,确保覆盖选址决策的关键维度,最终构建了包含 4 个一级指标和 11 个二级指标的评价指标体系,见图 1。

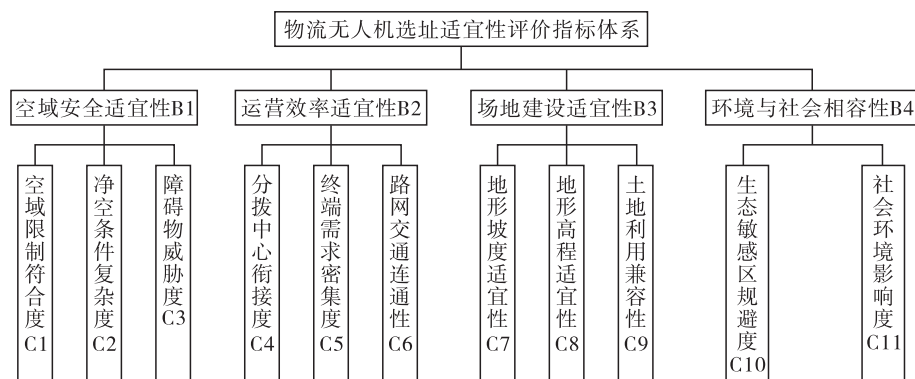


图 1 物流无人机起降点选址用地评价指标体系图

本研究构建的物流无人机选址适宜性评价体系包含 4 个一级指标和 11 个二级指标,各指标均通过可量化的空间分析方法实现评估。

空域安全适宜性:该指标评估起降点空域的合规性与物理环境安全性。空域限制符合度通过计算与机场净空区、军事管制区等敏感空域的欧氏距离进行量化;净空条件复杂度基于建筑轮廓数据采用核密度分析法评估起降端净空区的障碍物分布密度;障碍物威胁度则通过建筑高度数据识别潜在碰撞风险区域。

运营效率适宜性:该指标从经济性角度识别物流需求旺盛且集散效率高的区域。分拨中心衔接度通

过邻近度分析评估其区域物流枢纽的连接效率;终端需求密集度基于物流需求点核密度分析量化服务区市场潜力;路网交通连通性通过道路核密度分析评价地面接驳与货物疏散能力。

场地建设适宜性:该指标评估场址的自然地理与规划条件。地形坡度适宜性基于 DEM 进行坡度分析;地形高程适宜性通过高程分析确保海拔合理性;土地利用兼容性依据国土空间规划数据保障项目与土地政策的符合性。

环境与社会相容性:该指标关注项目的外部性影响。生态敏感区规避度通过选址点与自然保护区、生态保护红线的欧氏距离进行评估;社会环境影响度通过人口密度空间数据识别噪声敏感区域预判运营可能引发的社会接受度问题。

1.2 评价指标的计算与量化

物流无人机起降点用地适宜性评价体系中的 11 个评价指标需要用可以量化的数据指标来表现,表 1 给出各评价指标所对应的数据指标及得到数据指标的处理过程。

表 1 数据指标及其获取过程表

评价指标	数据指标栅格数据	数据处理过程
C1	距离禁飞缓冲区距离栅格	对禁飞中心点按禁飞半径生成禁飞缓冲区,通过求解各点到缓冲区的欧氏距离生成距离栅格
C2	建筑点核密度栅格	将建筑轮廓面要素转点,对建筑点做 5 km 范围的核密度分析
C3	建筑平均高度栅格	将建筑高度转为栅格,使用焦点统计工具计算平均高度
C4	物流分拨中心多环缓冲区栅格	对分拨中心做多环缓冲区分析
C5	物流需求点核密度栅格	对物流需求点做核密度分析
C6	道路核密度栅格	按道路类型分级赋值,按 1 km 搜索范围进行核密度分析
C7	坡度栅格	对 DEM 数据进行坡度分析
C8	高程栅格数据	对 DEM 数据进行剪裁融合
C9	用地类型栅格	对用地类型进行分类
C10	距离自然保护区距离栅格	对自然保护区做欧式距离分析
C11	人口密度栅格	对人口密度数据进行裁剪融合

对于距离型因子(如与禁飞区、自然保护区的距离)采用 GIS 欧氏距离工具计算得到连续距离栅格,并依据相关法规条例(如民航局规定、生态保护红线范围)设定距离阈值,采用距离衰减模型进行重分类赋分;对于密度型与强度型因子,采用核密度分析工具测算。主流物流无人机末端配送半径约 3~5 km,参考《低空物流无人机末端配送要求》(T/CAS 1090—2025)^[10],本研究将搜索半径设定为 5 km,以反映起降点的合理服务范围。计算结果采用自然断点法分为 5 级并赋分 1~9。对于地形因子(如坡度、高程),由 DEM 数据提取后,同样采用自然断点法进行分级赋分;对于特殊概念因子(如人口密度),基于“风险-需求”平衡理论,构建“倒 U 型”评价概念模型,并据此设定分级阈值进行赋分。

基于上述分级标准,对物流无人机起降场用地的适宜度进行 1~9 的赋值分级。定义物流无人机起降场用地适宜度为 $V \in \{1,3,5,7,9\}$,适宜性越好赋值越大。其中,1 级和 9 级分别为最不适宜和最适宜建立物流无人机起降场的区域,3 级属于不适宜建立物流无人机起降场区域,5 级属于较适宜建立物流无人机起降场的区域,7 级属于非常适合建立物流无人机起降场的区域^[11]。表 2 为物流无人机起降场用地适宜性等级评定表,表中分拨中心距离划分参考了《物流园区分类与规划基本要求》(GB/T 21334—2017)中关于物流节点辐射范围的相关建议。500 m 以内为步行接驳的理想范围,适用于无人机与地面配送的直接交接;500~1 500 m 为电动短途转运车的经济作业范围;1 500~3 000 m 为常规货车中转的典型接驳距

离;超过 3 000 m 则地面衔接效率显著下降。

表 2 物流无人机起降场用地适宜性等级评定表

适宜性分数	1	3	5	7	9
地形高度/m	<20 或 >200	150~200	100~150	50~100	20~50
地形坡度/(°)	>25	15~25	6~15	2~6	<2
与分拨中心距离/m	>5 000	3 000~5 000	1 500~3 000	500~1 500	0~500
用地类型	水体、湿地	森林	耕地	草地	人工改造用地
建筑点密度	534.73~946.93	349.06~534.73	193.09~349.06	59.41~193.09	0~59.41
建筑平均高度/m	41.25~75	28.03~41.25	19.59~28.03	11.71~19.59	0~11.71
与自然保护区距离/km	0	0~1	1~3	3~5	>5
人口密度	0~13 与 1 250~1 842	13~66 与 890~1 250	66~163 与 890~1 250	163~291 与 650~890	291~650
与禁飞区距离/km	0	0~3	3~6	6~10	>10
需求点核密度	0~0.215	0.215~0.742	0.742~1.759	1.759~3.225	3.225~4.985
道路核密度	0~0.655	0.655~1.918	1.918~3.603	3.603~5.802	5.802~11.933

1.3 评价指标权重计算

FAHP 是通过比较同层级因素的相对重要性,确定物流无人机起降点选址因素的权重。首先,构建包含各级评价指标的调查问卷;然后,邀请专家根据评分因素及选址目标对准则层及指标层的重要性进行评分;最后,将评分结果转化为模糊判断矩阵,进行模糊一致性检验,以确保判断结果的合理性与一致性,进而计算出各评价指标的权重。评分过程采用的是三角模糊数 (l, m, u) 表示两两比较的模糊偏好,其中: l 表示下限值, m 表示可能值, u 表示上限值^[12]。

本研究采用三角模糊数对语言变量进行量化。当两个指标同等重要时赋值为 $(1, 1, 3)$,稍微重要时赋值为 $(1, 3, 5)$,明显重要时赋值为 $(3, 5, 7)$,强烈重要时赋值为 $(5, 7, 9)$,极端重要时赋值为 $(7, 8, 9)$ 。对于相邻判断的过渡情形,采用中间值 $(x-1, x, x+1)$ 表示。各语言变量对应的含义:极端重要表示指标 i 比指标 j 绝对优先,强烈重要表示指标 i 明显重要于 j ,明显重要表示指标 i 较强重要于 j ,稍微重要表示指标 i 略重要于 j ,同等重要表示指标 i 与 j 同等重要。

1.3.1 构造模糊判断矩阵

确定判断对象,并针对每个上层要素,构建其下层要素的判断矩阵。该矩阵为 $n \times n$ 阶(n 为下层要素数量),矩阵元素表示第 i 个要素相对于第 j 个要素的重要性,采用三角模糊数 (l, m, u) 进行表征。矩阵满足互反性,即 (l, m, u) 的倒数为 $(1/u, 1/m, 1/l)$ 。对角线元素取值为 $(1, 1, 1)$,表示同一要素与自身相比同等重要。判断矩阵的具体形式如下所示:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \cdots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1, 1, 1) & \cdots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \cdots & (1, 1, 1) \end{bmatrix}。$$

1.3.2 检验模糊矩阵的一致性

对模糊判断矩阵进行一致性检验,以判断决策者的主观判断是否存在逻辑矛盾(如“A 比 B 重要,B 比 C 重要,却认为 C 比 A 重要”),只有通过检验的矩阵才能用于后续计算^[13]。将三角模糊矩阵按上限值 l 、中值 m 、下限值 u 拆分为三个正互反清晰矩阵 L, M, U ,分别计算三个边界矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$,进而计

算一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 。式中: n 为指标数量。 CI 用于衡量判断矩阵偏离一致性的程度, 其值越大表明一致性越差。

为消除矩阵阶数对一致性判断的影响, 引入平均随机一致性指标 RI , 计算一致性比率 $CR = CI / RI$ 。 RI 可通过查表获取, 其取值与矩阵阶数 n 相关。只有当 $CR_L < 0.1, CR_M < 0.1, CR_U < 0.1$ 同时成立时, 判断矩阵才通过一致性检验, 否则需修正判断矩阵, 即重新调整语言变量赋值。

1.3.3 模糊层次单排序

求解模糊判断矩阵的权重, 旨在将指标两两比较的模糊判断转化为各指标的综合模糊权重。常用方法包括模糊特征向量法、加权平均法和最小二乘法。本研究采用加权平均法的延伸形式——模糊几何平均法, 专门用于处理三角模糊数的权重计算^[14]。

以三角模糊矩阵 $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n} (\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}))$ 为例, 计算各指标的模糊综合值 $\tilde{S}_i$, 对每个指标 i 将其与其他所有指标的比较值相乘, 再开 n 次方:

$$\tilde{S}_i = (\prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij})^{1/n} = (\prod_{j=1}^n l_{ij}, \prod_{j=1}^n m_{ij}, \prod_{j=1}^n u_{ij})^{1/n}。$$

三角模糊数的乘法为 $(l_1, m_1, u_1) \times (l_2, m_2, u_2) = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2)$, 开方同理。

计算各下层指标的模糊权重 $\tilde{w}_i$, 先求所有 $\tilde{S}_i$ 的总和 [三角模糊数的加法 $(l_1 + m_1 + u_1) + (l_2 + m_2 + u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2)$], 再计算模糊权重 $\tilde{w}_i = \tilde{S}_i \div \tilde{S}_{\text{总}} = (\frac{l_i}{u_{\text{总}}}, \frac{m_i}{m_{\text{总}}}, \frac{u_i}{l_{\text{总}}})$, 此时 $\tilde{w}_i = (l_i^w, m_i^w, u_i^w)$ 即为指标的三角模糊权重。

1.3.4 去模糊化

模糊权重是区间值, 需转化为单一数值 (清晰权重) 才能用于排序或计算^[15]。本文使用重心法, 取三角模糊数的“重心坐标”作为清晰值, 公式为 $w_i = \frac{l_i^w + m_i^w + u_i^w}{3}$ 。

1.4 GIS 加权叠加分析

本研究采用 GIS 加权叠加分析模型进行综合评判, 其基本公式为 $S = \sum (W_i \times R_i)$ ^[16]。式中: S 为综合适宜性得分, W_i 为第 i 个评价指标的权重, R_i 为该评价指标标准化后的评分。

常规加权叠加模型难以有效处理具有“一票否决”效力的刚性约束因子。此类因子一旦不满足, 无论其他条件如何, 该区域均应判定为不适宜。本研究中的禁飞区、永久基本农田、生态保护红线等均属此类。对此, 本研究引入约束掩膜法, 将法规性约束与一般评价因子分离, 先行排除明令禁止开发的区域。具体步骤如下: 首先生成约束掩膜, 将刚性约束因子二值化重分类, 禁止建设区赋 0, 可评估区赋 1, 通过栅格计算器进行逻辑“与”运算, 生成统一掩膜; 其次计算潜在适宜性, 对柔性评价指标进行加权叠加, 得到潜在适宜性表面; 最后输出最终结果, 将潜在适宜性表面与约束掩膜相乘, 禁止建设区得分归零, 允许建设区得分保留。

该方法解决了刚性约束因子在传统加权叠加模型中无法被有效排除的问题, 确保评价结果同时满足空域管制、土地保护与生态保护等法规政策要求。

2 案例区域概况与数据预处理

2.1 案例区域概况

H 市位于长江经济带沿线, 地处长三角与中西部地区衔接的重要节点位置, 在南北交流和东引西进中发挥着战略性物流枢纽作用。H 市所在地区是我国经济发展和消费最具活力的区域之一, 半径 500 km 范围覆盖 5 亿多人口, 以及全国 50% GDP 和 40% 消费市场^[17]。H 市经济产业基础较好, 物流市场规模不断扩大, 亟需科学规划物流基础设施, 来提升其物流运输能力。

2.2 数据来源与预处理

2.2.1 数据来源

本研究的数据均来自国家官方数据网站或相关权威数据机构,具体见表 3。

表 3 数据来源一览表

序号	评价指标	数据名称	数据来源
1	空域限制符合度	禁飞点中心坐标 POI 矢量数据	百度地图 API
2	净空条件复杂度	建筑房屋轮廓 AOI 矢量数据	OpenStreetMap 网站
3	障碍物威胁度	建筑房屋轮廓带高程 AOI 矢量数据	OpenStreetMap 网站
4	分拨中心衔接度	物流分拨中心坐标 POI 矢量数据	百度地图 API
5	终端需求密集度	物流需求点坐标 POI 矢量数据	百度地图 API
6	路网交通连通性	道路矢量数据	全国地理信息资源目录服务系统
7	地形坡度适宜性	地面高程栅格数据	地理空间数据云
8	地形高程适宜性	地面高程栅格数据	地理空间数据云
9	土地利用兼容性	土地利用栅格数据	全国地理信息资源目录服务系统
10	生态敏感区规避度	自然保护区 AOI 矢量数据	全国地理信息资源目录服务系统
11	社会环境影响度	人口密度栅格数据	WorldPop

2.2.2 数据预处理

由于所获取的指标数据来源和类型各不相同,因此需对数据进行预处理,处理流程见图 2。

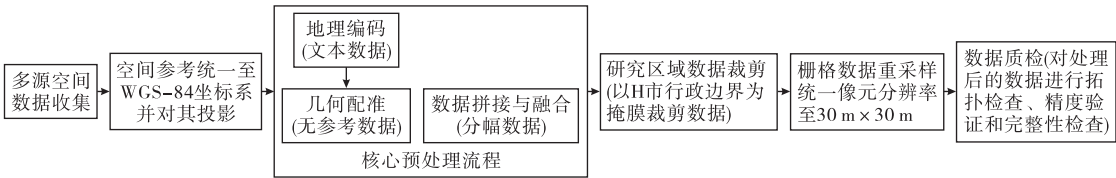


图 2 数据预处理流程图

3 分析与结果

3.1 选址分析

基于表 2 定义的适宜度分级,在 ArcGIS 10.8 中建立各评价指标的图层,利用系统工具箱中的多环缓冲分析、欧氏距离分析、核密度分析和重分类等工具,对上述 11 个评价指标进行相对应的分级得到各指标的重分类栅格。对各栅格进行分析汇总^[18],得到各指标等级的空间分布统计见表 4。

表 4 各评价指标等级的空间分布统计表

序号	评价指标	中心 片区	东北 片区	西北 片区	东南 片区	西南 片区	序号	评价指标	中心 片区	东北 片区	西北 片区	东南 片区	西南 片区
1	C1	优	良	优	中	优	7	C7	中	优	良	中	优
2	C2	差	中	中	优	良	8	C8	优	良	优	中	差
3	C3	差	良	良	优	中	9	C9	优	中	良	差	差
4	C4	优	良	中	差	良	10	C10	良	中	差	良	优
5	C5	优	良	中	差	中	11	C11	差	良	中	优	良
6	C6	优	优	良	中	良							

依据 1.3 的步骤得到物流无人机起降场选址用地适宜性各评价指标的权重如表 5 所示。根据 1.4 步

骤使用 GIS 对各评价指标加权叠加,得到 H 市物流无人机起降场建设综合适宜性分布见图 3。

表 5 H 市物流无人机起降场选址用地适宜性指标权重表

一级指标层	一级指标层权重	二级指标层	二级指标层权重	综合权重
B1	0.540	C1	0.614	0.332
		C2	0.241	0.130
		C3	0.145	0.078
B2	0.262	C4	0.442	0.116
		C5	0.437	0.114
		C6	0.121	0.032
B3	0.106	C7	0.617	0.065
		C8	0.218	0.023
		C9	0.165	0.017
B4	0.092	C10	0.742	0.068
		C11	0.258	0.025

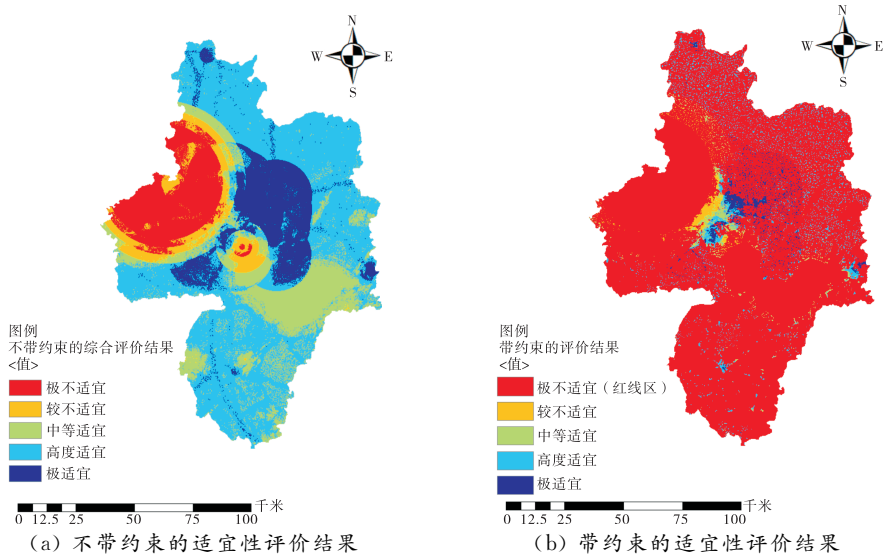


图 3 H 市物流无人机起降场选址用地适宜性综合评价结果

图 3 中的“约束”特指在选址中具有一票否决效力的刚性限制条件,主要包括法定禁飞区、永久基本农田、生态保护红线等法规禁止建设的区域。不带约束的综合评价结果仅通过加权叠加反映区位的理论适宜性;而带约束的评价则通过空间掩膜分析,在理论结果中直接排除上述受限区域,从而确保最终适宜性分布同时,满足地理条件最优与政策法规合规的双重要求,更具实际指导价值。

3.2 选址结果

根据 1.4 按自然间断点法确定 H 市物流无人机起降点选址适宜性分级阈值划分,见表 6。

由图 3 可知,H 市物流无人机起降点适宜性空间分异显著,呈现出“中心集聚、外围疏散”的宏观格局。基于综合评价分值,可将研究区域划分为三类,各类区域的分布特征及其合理性分析如下。

高度适宜与极适宜区(适宜性评价值 ≥ 5.7 分)主要分布于中心城区的西南部及东北部部分区域,在外围若干县域呈散点状分布,总面积占比约 5%。这些区域在四个评价维度均表现出显著优势:从飞行安全性来看,成功避让了禁飞区限制,建筑密度与高度均在安全阈值内;从物流运营效率来看,产业园区密集、终端需求旺盛,且与分拨中心邻近度较高,路网密度优越;从场地建设条件来看,地形平坦(坡度 $< 5^\circ$),

土地利用兼容性良好;从环境与社会相容性来看,有效规避了生态保护红线,人口密度处于适宜区间。

表 6 H 市物流无人机起降点选址适宜性分级阈值表

分级	阈值划分	量化赋值	分级	阈值划分	量化赋值
极适宜区	6.3~9.0	9	不适宜区	0~4.9	3
高度适宜区	5.7~6.3	7	极不适宜区	0	1
中等适宜区	4.9~5.7	5			

中等适宜区(适宜性评价值 4.9~5.7 分)主要分布于城市边缘的工业乡镇及大型交通设施周边。这类区域表现出明显的优劣并存特征:从物流运营效率来看,虽具备一定的产业基础和交通便利性,但需求密度相对有限;从飞行安全性来看,可能存在轻度空域限制或中等障碍物密度;从场地建设条件来看,地形条件基本满足要求,但土地利用兼容性存在一定不确定性;从环境与社会相容性来看,生态约束较弱,但人口聚集度可能带来一定的运营风险。

不适宜与极不适宜区(适宜性评价值 ≤ 4.9 分)主要包括主城区核心地带、水域生态保护区及基本农田集中区。其不适宜性具有明确的刚性约束:从飞行安全性来看,主城区建筑密度极高,净空条件无法满足安全要求;从环境与社会相容性来看,生态保护区及水域涉及生态保护红线,属于法规明确禁止建设区域;从场地建设条件来看,基本农田集中区受土地用途管制严格限制。这些区域的识别充分体现了评价体系对政策红线和安全底线的严格遵守。

4 结论

本研究提出基于模糊层次分析法(FAHP)与地理信息系统(GIS)的空间决策方法,用于城市物流无人机起降点选址的用地适宜性评价,构建了包含空域安全、物流效率、建设条件、环境相容四个维度的评价指标体系,并引入“约束掩膜”处理禁飞区、生态红线等刚性约束,提高了评价的科学性和合规性。H 市案例表明,该方法能有效识别适宜性空间分布规律:高度适宜区集中在中心城区部分区域及外围若干县域,呈现“中心集聚、外围散点”的格局。空域管制与土地利用政策是选址的刚性门槛,物流需求与交通条件则是影响适宜性分异的主要因素。本研究在数据精度和动态评价方面仍有不足,后续可引入更精细的时空数据和运营成本、气象等因素,推动从点位评价向网络布局优化发展。

参考文献:

- [1] 刘桐桐. 面向城市物流配送的无人机航迹规划技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2025.
- [2] 沈舟,郑远,邹翔,等. 轻小型物流无人机起降场布局及起降策略设计[J]. 民航学报,2024,8(2):31-36.
- [3] 王佳雪. 基于双层规划的无人机城市配送选址-路径研究[D]. 天津:中国民航大学,2023.
- [4] Fadhil D N. A GIS-based analysis for selecting ground infrastructure locations for urban air mobility [D]. Munich:Environmental Engineering Technical University of Munich,2018.
- [5] Chauhan D,Unnikrishnan A,Figliozzi M. Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones[J]. Transportation Research,2019,99:1-18.
- [6] Buckley J J. Fuzzy hierarchical analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems,1985,17(3):233-247.
- [7] 马一凡. 基于 FAHP 和 GIS 的内河水面垃圾上岸站/点选址决策研究[D]. 武汉:华中科技大学,2023.
- [8] Abdulkhalim. 基于 GIS-FAHP 的印度尼西亚井里汶县住宅发展和工业发展土地适宜性分析[D]. 北京:北京交通大学,2024.
- [9] 广州空港经济区管理委员会. 广州市低空垂直起降设施场址选择及建设技术指引[R/OL]. (2025-04-01)[2026-02-18]. <http://kgw.gz.gov.cn/attachment/7/7792/7792477/10195110.pdf>.
- [10] 中国标准化协会. T/CAS 1090—2025 低空物流无人机末端配送要求[S]. 北京:中国标准出版社,

2025.

- [11] 周雨诗,张彦,王海金,等. 基于 ArcGIS 与多因子模型的风力发电场选址评估[J]. 太阳能学报, 2023,44(12):251-259.
- [12] 张丽华,邢鹏翔,王传捷,等. 基于改进的 FAHP-熵权法组合赋权与可拓云模型的新能源消纳预警评估方法[J]. 武汉大学学报(工学版),2024,57(10):1416-1423.
- [13] Alnsour M, Alnsour E. Application of structural equation modelling (SEM) and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) based approach toward a hybrid urban sustainability assessment system (USAS) of Jordan[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 130: 106590.
- [14] Lian Jiangong, Liang Dan. Construction of evaluation indicator system of festival tourism activity effect based on FAHP method[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2024, 9(1). DOI: 10.2478/AMNS-2024-1481.
- [15] Kedigui N J V. Research on cold chain logistics transport strategies for fresh agricultural products based on FAHP[J]. Open Journal of Business and Management, 2025, 13(4): 2377-2392.
- [16] 何尧,舒富民,郑皓文. 基于 GIS 多因素加权叠加的机场选址方法[J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(4): 42-47.
- [17] 合肥市人民政府办公室. 合肥市人民政府办公室关于印发合肥市“十四五”现代物流业发展规划的通知:合政办〔2022〕9 号[R/OL]. (2022-03-11)[2025-09-22]. <https://files.parkworld.net/files/8da/ef146603941/download>.
- [18] 闫俊霞,马兴雅,张建峰. 基于 GIS 的白石山景区生态敏感性评价[J]. 现代园艺, 2025, 48(11): 30-33.

Research on the suitability assessment of logistics UAV takeoff and landing sites based on FAHP-GIS

JIANG Lüchun, LIU Qian

(School of Civil Aviation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110000, China)

Abstract: This study aims to develop a general method for assessing the suitability of logistics UAV takeoff and landing site selection. Based on the multi-criteria decision-making (MCDM) framework, a comprehensive evaluation index system covering multiple dimensions such as airspace safety, logistics demand and efficiency is constructed. The fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) is used to determine indicator weights, and GIS spatial analysis methods are applied to grade and reclassify each indicator into standardized raster. Weighted overlay analysis is then used to integrate all indicators, and a constraint mask is introduced to handle “veto” factors, thereby systematically identifying optimal site locations. An empirical study conducted in H City shows that the spatial suitability of takeoff and landing sites exhibits a distribution pattern characterized by “clustering in the central urban area and axial expansion along the southwest-northeast direction.” The highly and extremely highly suitable areas account for about 5% of the city’s total area, mainly concentrated in some administrative districts of the central urban area, with scattered distribution in several peripheral counties.

Keywords: logistics UAV; takeoff and landing site selection; suitability assessment; FAHP; GIS

(责任编辑:唐立平)

引用格式 江吕春,柳倩. 基于 FAHP-GIS 的物流无人机起降点适宜性评价研究[J]. 山东航空学院学报, 2026, 43(4): 53-61.
Jiang Lüchun, Liu Qian. Research on the suitability assessment of logistics UAV takeoff and landing sites based on FAHP-GIS[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2026, 43(4): 53-61.