

高密度旅游城市低空经济的场景选择与治理机制研究——以澳门特别行政区为例

林立国

(澳门科技大学 商学院, 中国 澳门, 999078)

摘 要: 澳门的常住人口、游客流量、机场净空、历史城区、口岸和琴澳跨境制度叠加, 使同一项飞行任务的公共价值与治理成本同时上升。本文以澳门为案例, 结合官方统计和民航监管资料, 采用场景—约束匹配的方法, 对应急医疗、台风灾后勘察、基础设施巡检、口岸应急支持、会展高价值小件等场景进行政策适配判断。分析结果表明, 澳门近期不宜从日常外卖、开放式低空观光或大规模商业飞行起步, 更适合先在固定节点和明确责任链条内开展小范围试点。文章提出平台统筹、风险分级、场地认证、异常停飞和琴澳制度沙盒等配套措施。

关键词: 低空经济; 澳门; 高密度旅游城市; 场景选择; 公共治理; 风险规制; 琴澳协同

Scenario Selection and Governance Mechanisms for the Low-Altitude Economy in High-Density Tourism Cities ——A Case Study of the Macao Special Administrative Region

Michael Liguó Lin

(School of Business, Macau University of Science and Technology, Macao, China, 999078)

Abstract: The combination of Macau's permanent resident population, tourist traffic, airport airspace, historic districts, border crossings, and the cross-border arrangements between Zhuhai and Macau means that the public value and governance costs of a single flight mission both increase simultaneously. Using Macao as a policy case, this paper combines official statistics, regulatory document analysis, and scenario-constraint matching to identify suitable entry points and governance priorities. The analysis suggests that Macao should not start with daily food delivery, open tourism flights, or large-scale commercial operations. Instead, emergency medical delivery, post-typhoon assessment, infrastructure inspection, checkpoint emergency support, and high-value MICE logistics should be considered first because their boundaries are clearer and their public value is more visible. This paper proposes a governance path of public-value prioritization, fixed-node pilots, platform-based coordination, risk-tiered regulation, and later

【作者简介】林立国(1983-), 男, 博士, 澳门科技大学 商学院, 工程师, 3220000140@student.must.edu.mo

cross-border experimentation.

Keywords: low-altitude economy; Macao; high-density tourism city; scenario selection; public governance; risk regulation; HengQin-Macao cooperation.

一、引言

当低空经济逐步进入城市政策议程后，其讨论往往先从设备、基础设施、航线和市场规模等方面展开。城市空中交通研究提醒我们，航空器并不能脱离地面节点、通信、能源、监管和公众接受度而独立运行（Cohen et al., 2021；Garrow et al., 2021）。2024 年《政府工作报告》将低空经济列为新兴的战略增长引擎之一，各地方政府纷纷开始布局低空物流、城市巡检、应急救援、文旅展示和电动垂直起降航空器（eVTOL）等应用领域，低空经济战略的发布为地方试点提供了政策窗口，也容易形成“先上项目、后补治理”的竞赛。然而澳门低空面对的却不是一般意义上的空域扩张和管理问题，而是怎么在有限空间内安排航空安全、旅游服务和公共秩序的先后次序。因此，本文研究从“是否能飞”转为“什么任务值得先飞、在什么边界内飞、谁对异常负责”。

澳门的特殊性很容易就可以从几组年度数据看出。2024 年末总人口为 688,300 人，全年入境旅客 34,928,650 人次；以本地统计口径看，游客活动的规模远大于常住人口（澳门特别行政区政府统计暨普查局，2025a，2025b）。游客规模约为常住人口的 50 倍，这些数据只能说明潜在的服务需求很大，却不能直接推导出飞行需求很大。而且游客流量具有节假日、周末、会展和口岸潮汐特征，需求高峰往往恰好与人群暴露、噪声投诉和空域协调压力重合。所以对澳门而言，需求统计首先要回答“谁在什么节点产生可计划的任务”，而不是仅仅把游客数换算成订单数。

在澳门低空活动还会受到多重制度边界的共同约束。澳门民航局公开的无人机要求和禁限飞说明涉及机场或起降地点周边、飞行路径、受保护建筑、历史城区以及临时限制区域（澳门特别行政区民航局，2026a，2026b）。总质量不超过 7 公斤与 7—25 公斤、超过 25 公斤的航空器，适用的登记、许可和保险要求并不相同；第三类无人机还涉及营运人许可、活动许可和最低 1,000 万澳门元第三者责任保险（Civil Aviation Authority of Macao, 2021）。因此，这意味着本文不能把大型货运无人机、eVTOL 和消费级无人机视为同一类政策对象，也不能把技术上能飞直接等同于已经具备在澳门运营资格。

现有澳门情境下的低空经济讨论也留下了一个管理学问题：项目为什么会被列入优先清单，往往没有被充分地解释。一些研究把技术性能和商业规模写得很细，却把法规、公众接受、个人

资料和文化遗产保护放到最后；一些方案列出了酒店、口岸、观光和外卖等丰富场景，却没有说明不同场景的风险边界；还有一些政策路线图重建设、轻顺序，但缺少“先做什么、暂缓什么、由谁承担验证成本”的说明。澳门的研究价值正是来自这些限制，而不是来自可以复制的一套通用方法。

基于此，本文围绕三个相互衔接的问题展开：澳门低空经济早期应选择哪些任务；任务选择要通过哪些法律、空间和公共安全门槛；政府应按什么顺序补齐治理能力短板。本文不提供未经专家判断和飞行试验支撑的精确排名，也不把公开统计推导成商业航线验证。文章采用约束优先的政策分析方法，把场景价值、运行边界和治理准备度放在同一个判断框架中。后文的政策建议也限定在澳门这一高密度旅游城市，不外推为所有城市的统一方案。本文的贡献主要体现在三个方面：一是将澳门低空经济从“技术能否飞”转向“城市是否适合让其持续飞”；二是提出适合高密度旅游城市的场景分层和治理机制；三是形成面向澳门的分阶段政策路线图，并明确其适用边界。

二、文献综述

（一）低空经济与城市空中交通：从航空器性能到城市系统治理

近五年的低空经济研究已经明显不仅限于“航空器能否飞行”的技术问题。Cohen 等（2021）从生态系统、市场潜力和运行挑战等方面讨论城市空中交通，Garrow 等（2021）进一步把航空运输与地面自动化交通、城市规划和社会影响放在同一比较框架中。Pons-Prats 等（2022）指出，城市空中交通的落地同时受到技术、基础设施、空域管理和社会接受度的影响；Wang 等（2023）的综述则强调，低空交通需要嵌入智能交通系统，而不是作为孤立的航空器应用。由此可见，低空经济的研究正在从单架飞行器转向“航空器—节点—空域—平台—城市治理”的组合系统。

（二）无人机物流与末端配送：效率模型不能替代场景选择

无人机末端物流研究主要沿两条路径展开：一类关注车辆，无人机协同、路径、时间窗、能耗和调度，另一类关注配送方式、消费者偏好和服务组织。Merkert 等（2022）基于离散选择实验发现，消费者对无人机配送的接受程度取决于速度、价格、安全和时间窗口，而不是单一的技术新颖性。国内研究近年开始把多中心配送、空地协同和客户类型纳入模型，任新惠、芮钰琪（2024）讨论了两级多中心物流无人机调度，崔林等（2024）将地理位置与能耗约束结合，傅惠等（2025）则从研究热点和应用模块对低空无人机物流进行系统梳理。这些成果提高了运营优化的精度，但大多以任务已经确定为前提，较少回答高密度城市应该先开放什么任务、暂缓什么任务的问题。

（三）城市治理、公众接受与研究缺口

治理研究提示，低空技术的可行性不仅取决于设备性能，也取决于城市在监管、数据、公共沟通和跨部门协调方面的准备度。Aoyama 和 Alvarez Leon（2021）把城市在自动化交通中的角色概括为监管者、协调者、数据催化者和促进者；Smith 等（2022）指出，公众对物流无人机的判断会随具体任务、隐私风险、安全边界和对技术的了解程度而变化。现有研究仍有三个不足：一是高密度旅游城市的游客潮汐、历史城区和口岸边界没有被充分纳入场景评价；二是技术优化与监管准入之间缺少一套判断语言；三是跨境低空服务常被写成航线问题，货物申报、查验、数据和事故责任的制度成本讨论不足。本文据此把澳门作为约束密集型案例，采用“公共价值—运行边界—治理准备度”的场景适配框架。相关研究脉络和本文切入点见表 1。

表 1 近五年低空经济与无人机物流研究的主题脉络及本文切入点

研究主题	代表性文献	已有研究侧重	本文的研究切入点
低空经济与城市空中交通	Cohen et al., 2021; Garrow et al., 2021; Pons-Prats et al., 2022; Wang et al., 2023	航空器、基础设施、空域融合、社会影响与需求分析	把高密度旅游城市的空间、游客流和治理约束纳入场景选择
无人机物流与末端配送	Merkert et al., 2022; 任新惠、芮钰琪, 2024; 崔林等, 2024; 傅惠等, 2025	成本、时间窗、能耗、路径和空地协同优化	在路径优化之前回答哪些任务值得进入低空试点
公众接受与社会风险	Smith et al., 2022; Merkert et al., 2022	隐私、安全、噪声、价格和具体使用情境对接受度的影响	将澳门人群密度、历史城区、口岸和数据保护作为场景边界
城市治理与新兴交通监管	Aoyama & Alvarez Leon, 2021; Wang et al., 2023	多层级治理、城市监管角色、数据基础设施和跨部门协同	形成平台、责任清单、风险分级和琴澳制度沙盒的治理组合

图 1 所示的分析流程具有两个特点：场景优先级不是由市场规模单独决定的，而是由任务必要性、运行边界和治理条件等共同决定；试点也不是一次性决策，任务完成记录、公众投诉和异常处置结果会反向修订场景清单。

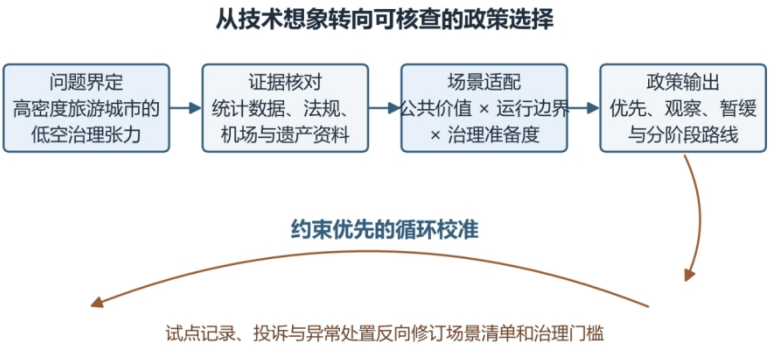


图 1 本文研究逻辑与场景适配流程

三、现状研究

（一）高游客密度带来的需求与风险叠加

澳门确实存在适合低空服务的任务场景。官方统计显示，2024 年入境旅客接近 3,493 万人次，旅客消费（不含博彩）约 753.6 亿澳门元；机场同期旅客量超过 764 万人次（澳门特别行政区政府统计暨普查局，2025b；澳门国际机场，2025）。这些数据更适合用来识别酒店、会展、口岸和旅游服务之间的连接场景，而不是用来证明可以立即开展普遍性配送。对高频但碎片化的订单，固定节点和人工交接可能比“直达收货人”更重要。

需求高峰与风险高峰在澳门往往同时出现。节假日、周末和大型活动会把客流压缩到少数商业、口岸和交通节点；在这类区域，航空器的运行风险不仅是坠落概率，还包括人群暴露、噪声、视觉干扰、物业协调和投诉处置。相同的货物，如果从低密度后勤区转运，主要就是考验效率；若在酒店群或历史城区上空运行，审批、保险、现场隔离和公众沟通都会改变成本结构。因此，应用场景评价需要把需求强度与风险暴露放在同一张表里。

（二）机场、世遗与关键设施构成空间约束

澳门国际机场 2024 年的货运量为 108,001 吨，飞机起降为 56,595 架次；机场同时承接约 5.9 万架次的航空器运行（澳门国际机场，2025）。这些数字说明澳门存在航空货运和机场运行基础，但无人货运机队尚不能使用现有航线。统计口径不同，DSEC 的“航空运输”与机场运营方的机场货运量并非同一指标，本文也会将其分别使用，并在推论中避免把两者相加。对低空经济而言，更重要的后续问题是：货物是否需要点到点飞行，还是在口岸和后勤区之间进行受控转运。

民航局公开资料显示，机场、起降地点、历史城区、受保护建筑和部分公共设施周边存在飞行限制或许可要求（澳门特别行政区民航局，2026b）。这些规定对场景设计有两个要求。其一，敏感空间原则上不能被当作普通航路使用，方案需要先进行空域和地面风险核查。其二，酒店、展馆和大型活动场地周边的运行条件会随活动安排变化，不能仅凭一张静态地图决定长期航线。即便是巡检或应急任务，也必须把临时授权、现场隔离和任务中止写进运行方案。

（三）低空规则与大型航空器的边界

现行民航规章是按照无人机的起飞总质量和运行活动对运营要求进行分类：不超过 250 克、超过 250 克但不超过 7 公斤、超过 7 公斤但不超过 25 公斤，以及超过 25 公斤的航空器，所涉登记、许可、营运和保险要求并不相同（澳门特别行政区民航局，2026a）。较高质量等级的航空器还会涉及机型、飞行计划、起降点、航线、操作员资格和保险等。由此，本文把大型无人货运机和消费级无人机分开讨论：前者的政策门槛不能被后者的低风险运行经验替代。

这一制度分层直接改变了低空应用场景的进入顺序。小型无人机可以先用于封闭空间内的验证，但固定翼无人货运机或 eVTOL 若涉及跨区、跨境或载荷运行，就需要把航空器类别、人员资质、起降场地、运行计划和责任保险同时纳入审核监管。澳门的场景选择也不能只比较航程、载荷和配送时效，还要看人群密度、敏感设施距离、航线可复核程度和跨部门协同成本。成熟的运营技术方案只有在这些条件均同时成立时才具有政策可行性。

（四）跨境制度边界并非单纯的航程问题

琴澳协同是澳门低空经济可能形成差异化价值的重要方向，但它首先将直面两地的制度衔接问题。医疗和生物医药样品、会展展品及高价值小件的跨境运输，涉及海关、边检、检疫、药械合规、数据跨境传输、责任追踪和事故处置。即使飞行器能够越过地理距离，货物也未必能够顺利越过制度边界。本文因此把跨境场景拆成货物类别、申报流程、接驳节点和异常责任四个问题，不用“跨境低空航线”这一概念掩盖实际的制度协调工作量。

基于上述判断，琴澳低空协同宜从固定节点、低频次和高价值货物开始，以制度沙盒验证申报、查验、数据留痕和异常处置，再根据海关、边检、检疫和民航部门的协同结果逐步扩大业务范围。跨境低空飞行不是把澳门现有业务简单延伸到横琴，也不是单纯的航线建设问题；它需要先证明一条可监管、可追踪、可暂停、可复盘的责任链能够顺利实施运行。

四、分析框架与研究方法

（一）约束优先的场景适配框架

本文把场景适配理解为：一项低空任务在特定空间、运行条件和治理阶段下，能否同时满足公共价值、可控边界和治理准备度。法规不是项目排序完成后的附录，而是决定应用场景能否进入试点池的前置条件（Aoyama & Alvarez Leon, 2021；Wang et al., 2023）。因此，本文的“优先”只是表示更值得进入验证程序，不表示已经获得许可或具备商业化条件。

公共价值是第一道判断标准。医疗急救、灾害响应、基础设施维护、遗产保护和关键产业保障都可能具有较高公共价值，但公共价值只说明“为什么值得试”，不等于“可以立即飞”。评价时还要问：任务是否能够被明确委托，是否有可接受的服务对象，失败时由谁承担后果。

第二道判断是运行边界：起讫节点、时段、航线、载荷和地面交接能否事先确定，任务是否避开密集人群和敏感设施，是否具备人工观察、平台监管和中止任务的手段。边界越模糊，场景越不适合在早期作为常态化运营业务。

第三道判断是治理准备，包括许可、保险、操作员资质、航空器适航、数据保护、应急接管、事故报告和跨部门责任。准备不足时，即便需求强、商业价值高，也只能进入观察清单。这

个判断也意味着，澳门低空经济的早期政策应当把“暂缓”作为正常结果，而不是把所有场景都包装成可落地项目。

（二）研究资料与分析步骤

本文使用的证据主要来自四类公开材料：统计暨普查局的人口、旅游、GDP、会展和交通统计；民航局公开的无人机、禁限飞和航空监管资料；澳门国际机场、政府部门及文化遗产保护相关公开文件；以及跨境合作和公共治理文献。分析步骤是先确定场景任务，再核对其空间和法规边界，最后讨论公共价值与治理准备度。这样处理的好处是，应用场景不会因为商业想象力较强就自动获得优先级。

需要说明的是，本文没有把公共价值转化为一个看似精确的综合分数，也没有用问卷中位数替代运行试验。每个场景只回答几项可复核的问题：是否具有明确的公共任务；是否能够限定节点、时间、航线和载荷；是否满足许可、保险、人员、数据和异常处置要求；是否具备可留痕的验证路径。这样的判断适合形成政策清单，但不足以替代航空安全论证或商业财务测算。

（三）场景分类

结合澳门实际，本文设置了 11 类候选场景，分为公共应急与城市治理、文旅与会展服务、琴澳跨境协同、开放式商业配送四种类别，具体如表 2 所示。候选场景不是对未来项目的承诺，而是为了比较不同任务在澳门低空治理环境中的先后次序。

表 2 澳门低空经济候选场景及政策定位

类别	候选场景	政策定位
公共应急与治理	应急医疗物资、AED、血液样本配送	近期优先，封闭或固定节点试点
公共应急与治理	台风灾后积水、道路、建筑外立面勘察	近期优先，公共部门主导
公共应急与治理	桥梁、轻轨、岸线和市政设施巡检	近期优先，任务边界清晰
公共应急与治理	口岸应急与人流巡查	近期优先，需治安和民航协同
文化与城市治理	世遗保护性巡查、低频影像采集	条件试点，专项许可和隐私控制
文旅与会展	会展展品、文件和设备备件点对点配送	中期试点，固定节点和保险前置
文旅与会展	酒店群高价值小件配送	中期观察，避免穿越密集人群
文旅与会展	无人机灯光秀和大型活动展示	活动许可制，不能作为长期主线
琴澳协同	样品、药械和会展物料跨境运输	中期制度沙盒，跨部门审批
开放式商业	日常外卖和即时零售配送	早期后置，运行频次和人群风险高
开放式文旅	开放式低空观光、eVTOL 接驳	审慎后置，需专门适航和运营路径

五、澳门低空经济的优先场景与政策判断

（一）应急医疗：公共价值最高的入口场景

应急医疗物资（如 AED、血液和急救药品）适合作为澳门低空经济的早期验证场景，原因在于它必然具有最高收益，而是在于其任务目标相对明确、公共价值高并且容易解释，且可在封闭或半封闭空间内设计节点、载荷、签收、追踪和异常中止流程。节假日和大型活动期间，地面交通拥堵可能增加时间成本，但也会提高人群暴露和现场管控难度。试点应先在少量固定节点开展，并由医疗、民航、治安、消防和运营单位共同确认责任边界。

应急医疗不能简单理解为“医院之间的无人机快递”。血液、药品和医疗器械涉及温控、包装、交接、追踪和合规，运输任务又需要医院、卫生部门、民航、治安和运营方共同参与。首轮试点应设置标准化货箱、起飞前检查、异常返航、人工接管、交接记录和事故报告等环节，先证明流程可持续，再讨论扩大航线和频次。

（二）台风灾后勘察与基础设施巡检：低人群暴露的公共服务场景

台风、暴雨、风暴潮和城市内涝发生后，受损道路、桥梁、排水设施和临时安置点需要快速获取影像和现场信息。无人机在这类任务中的公共价值较明显，但灾害性天气同时会降低能见度、改变风场、影响通信并增加坠落后果。因此，灾后勘察应预先规定气象阈值、备降点、通信冗余、地面警戒和停止运行条件，不能把“灾后需要快”理解为“任何天气都可飞”。

这类任务宜由政府部门或公共机构提出需求，并把飞行计划、数据权限、影像保存、公众告知和后续处置写入委托协议。台风前的设备和通信检查同样重要，台风期间原则上停止运行，灾后只有在气象和通信条件满足时才恢复。评价重点应放在信息是否及时、影像是否支持决策、异常是否可追溯，而不是单纯统计飞行架次。

（三）口岸应急与基础设施巡检：公共治理价值明确，但安全边界更严格

口岸巡查、拥堵识别、突发事件辅助处置和关键设施巡检具有明确的公共治理价值。由于口岸连接跨境交通、人员密集区和重要设施，运行方案必须同时考虑隐私、警务边界、数据访问和跨部门调度。无人机影像不应默认等同于人脸识别或持续监控；试点需要先定义采集范围、保存期限、授权人员、脱敏方式和投诉处理机制。

口岸应急支持适合采用专用设备、固定时段、限定高度、平台监管和可中止任务的组合。巡检与执法识别应当分开设计：前者关注设施状态和交通组织，后者涉及更高的数据与权力边界。对涉及个人或跨境活动的影像，应当按照最小必要原则处理，并在项目开始前完成数据保护影响

评估和责任确认。

（四）会展和酒店高价值小件：具有商业前景，但必须固定节点先行

澳门的会展业具有高价值、时点明确和节点相对集中的特点。展品、样品、证书和小型设备在短时间内进行点对点调度，理论上比开放式日常配送更容易限定任务范围。不过，会展中心和酒店群在活动期通常人流密集，且临时布展、道路管制和物业规则会改变地面条件。首轮应用应从楼宇内部或受控后勤区域的固定交接点开始。

会展和酒店高价值小件不宜一开始采用面向游客的开放式投递。更可行的流程是由后勤部门预约、人工核验货物、使用标准化货箱，在指定起降点完成交接；活动高峰时段则设置禁飞或降频规则。只有当货物追踪、保险、收货确认和投诉处置运行稳定，才有必要讨论跨楼宇、跨区域的扩展。

（五）琴澳跨境样品和药械：战略价值高，但应后置为制度沙盘

琴澳跨境低空应用具有制度和产业价值，但其复杂度也明显高于澳门本地固定节点任务。医疗、生物医药、会展展品和高价值货物都可能需要跨境运输，然而货物类别、申报主体、查验方式、药械合规、数据传输和事故责任并不相同。跨境场景的第一项成果应是形成一份可执行的制度清单，而不是先宣布航线开通。

因此，跨境低空应用可按递进方式验证：先选择时效要求明确、货物可标准化、责任主体清楚的文件或普通货物；再由海关、边检、检疫、民航和相关主管部门共同确认申报与异常处置流程；最后才考虑药械和更高时效货物。跨境任务的优先级取决于制度流程是否闭合，而不只取决于战略价值。

（六）日常外卖、开放式观光和灯光秀：不宜成为早期主线

日常外卖和开放式低空观光具有需求频率高、订单分散、地面接驳复杂和人群暴露高等特点。澳门空间紧凑，酒店、商业街、历史城区和口岸之间的航线很难长期保持清晰边界；eVTOL 载客还涉及更高的适航、起降场和乘员安全要求。小型无人机可以用于封闭场地的展示或培训，但不宜据此推导出面向全城的常态化业务。

这类场景并非永远不能发展，而是需要放在公共服务和固定节点试点之后。只有平台监管、动态禁限飞、保险、异常接管、公众沟通和投诉处理形成规范化成熟运作后，才有条件评估高频商业场景和载人观光。早期政策如果只追求飞行架次和展示效果，可能会把尚未解决的治理成本推迟到事故或争议发生之后。

图 2 用于表达本文的相对定位，不是对澳门各场景的实测评分。横轴表示治理准备度与运行

边界清晰度，纵轴表示公共价值与任务必要性，气泡大小用于提示风险暴露和制度复杂度。应急医疗、灾后勘察和基础设施巡检位于优先试点区；琴澳跨境场景公共价值较高，但因制度准备度不足进入沙盒；开放式观光和外卖则需先补足运行边界与公众接受证据。

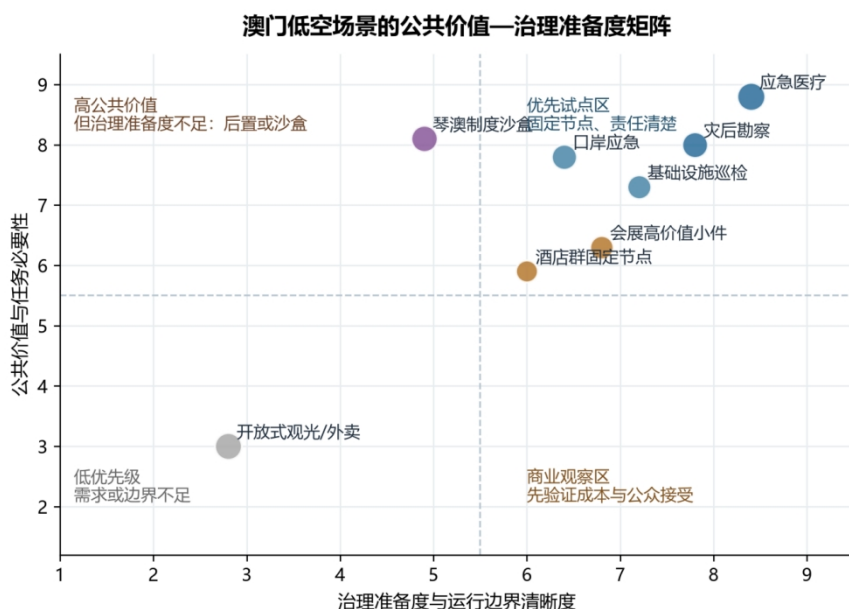


图2 澳门低空场景的公共价值—治理准备度矩阵

六、从“项目试点”到“治理能力”的机制设计

（一）建立跨部门低空治理协调机制

澳门低空经济不可能由一个部门或一家企业单独完成。民航部门需要明确运行和安全要求，治安、消防、医疗、交通、文化遗产、个人资料保护和城市管理部门分别掌握不同的风险信息，运营企业则承担设备、人员和任务执行责任。协同治理的关键不是把所有部门放进同一张组织架构图，而是预先写清谁批准、谁监管、谁接管、谁保存数据、谁处理事故（Aoyama & Alvarez Leon, 2021）。

平台化治理应减少重复提交和责任空当。运营方可以通过统一入口提交航空器资料、运营资质、飞行计划、航线图、载荷说明和保险证明；平台再按照场景、区域和风险等级分发给相关部门，并保留审批、变更、告警、停飞和事故处置记录。平台不是把行政判断自动化，而是让判断过程有据可查。

（二）建设“一平台、三清单、两闭环”

低空协同平台至少应记录任务申报、运行状态、禁限飞范围、气象和通信条件、异常告警、人工接管、事故报告和复盘结果。平台建设不应先追求复杂界面，而要先满足数据字段统一、责

任人明确、授权可追踪和紧急停飞有效四项要求。

治理清单应同时回答三类问题：哪些任务可在试点阶段开展，哪些任务需要专项许可，哪些任务暂缓；哪些空域、起降点、道路、口岸和设施属于敏感区域；每一次任务由谁申报、运营、监看、接管、处理数据和承担事故责任。清单只有与具体任务、具体节点和具体责任人绑定，才具有管理效力。

复盘机制是平台治理持续的关键。安全复盘关注气象、通信、航迹、载荷、异常和停飞原因；公共价值复盘关注任务是否真正改善响应时间、设施维护或服务可靠性；社会影响复盘则关注投诉、隐私、噪声和公众接受度。没有定期复盘和更新机制，试点很容易停留在一次性展示，无法形成可持续的制度学习。

（三）建立红黄绿分级，但不把它误写成官方禁飞地图

本文建议把风险分级与官方禁限飞、保护区、重点设施周边、人员密集区和跨境制度边界结合起来，形成可供审批和运行使用的分区图。原则上禁止或需专门授权的区域，不应因为项目价值高就被默认为可飞；适合试点的区域也要绑定固定线路、固定时段、载荷上限、保险和平台监管。地图只能提供空间底图，最终运行条件仍需以实时通知、批准文件和现场检查为准。

分区结果应服务于差异化管理，而不是制造一张静态的“可飞地图”。禁止区对应停止运行和专项审批，限制区对应人员培训、工程检查、现场警戒和实时监控，试点区则对应标准化运行和绩效记录。由于活动、施工、气象和临时管制会改变风险，平台需要保留分区更新和历史版本。

（四）把个人资料与文化遗产保护写入项目准入条件

低空巡查会涉及影像、定位和人员活动信息，项目申报时应先回答“能采集什么、谁能访问、保存多久、如何使用、能否跨境传输”等问题。对于口岸、酒店群和历史城区等敏感区域，应尽量采用低分辨率、局部采集、脱敏处理和最小权限访问；涉及跨境任务时，还应把个人资料保护、数据传输和责任追踪纳入同一份合规清单。

巡查任务还应区分安全巡查、运营管理和宣传展示。不同用途对应不同的必要性、保存期限和公众告知要求。涉及文化遗产的影像采集，应先核对保护范围、设备高度、拍摄角度、活动许可和成果归档规则；只有完成这些前置核查，影像成果才适合用于后续规划、维护或展示。

七、澳门低空经济的分阶段政策路线

（一）第一阶段：封闭试点与公共服务验证

第一阶段可安排为“封闭试点与公共服务验证”，建议周期约为 12 个月。任务范围限于应急医

疗、台风灾后勘察、基础设施巡检和口岸应急支持等能够明确委托人的场景；运行采用固定节点、固定航线、固定时段和低频次方式。阶段目标不是追求飞行架次，而是验证起降、通信、保险、货物交接、异常中止、事故报告和数据留痕是否能够持续运行。

阶段性评价至少应包括任务完成率、平均响应时间、异常中止率、通信失联率、事故和险情记录、数据合规通过率以及投诉处理时效。每个指标都应有数据来源、责任单位和复核周期，并据此决定下一阶段是扩大、维持还是暂停。

（二）第二阶段：固定节点的高价值商业服务

第二阶段可在公共服务流程稳定后，尝试连接会展中心、酒店群、医院和后勤节点之间的高价值小件运输。该阶段仍不宜开放为面向所有订单的全城配送，应采用预约制、标准化货箱、专用起降点、起飞前检查和平台全程留痕。会展活动或人群高度聚集时，运营方应执行降频、改线或暂停规则，不能把游客数量当作无限扩大飞行的依据。

第二阶段的评价重点是单位任务成本、人工交接时间、准点率、异常率、起降点周转能力和公众投诉率。只有当低空方案在时效、可靠性和可接受性上形成可重复记录，且没有明显增加治理负担，才有理由与地面运输方式进行进一步的成本效果比较。

（三）第三阶段：琴澳制度沙盒与有限开放

第三阶段才适合进入琴澳跨境制度沙盒。应先由相关部门制定货物分类、申报主体、数据边界、责任承担、异常处置和查验衔接的制度清单，再开展固定节点、低频次、可追踪的试运行。对于超过 25 公斤的航空器、eVTOL 和跨境载荷，应分别核对适航、营运、起降和保险要求，不能用小型无人机的经验替代。

第三阶段的判断标准不是“是否完成一次展示飞行”，而是是否形成稳定、可审计、可追责的跨境运行流程。只有当申报、查验、放行、交接、数据留痕和事故处置能够被复盘，才可以考虑扩大货物种类和服务频次。

三个阶段的具体政策任务如表 3 所示。

表 3 澳门低空经济分阶段政策任务

阶段	优先任务	治理重点	暂不建议
第一阶段	应急医疗、灾后勘察、基础设施巡检、口岸应急	许可、保险、固定节点、数据留痕、应急中止	全域商业配送、开放式观光
第二阶段	会展高价值小件、酒店群固定节点服务	起降点、标准货箱、预约制、公众沟通、成本评估	穿越密集人群的即时配送
第三阶段	琴澳样品、药械和会展物料制度沙盒	海关、边检、检疫、民航、数据和事故责任协同	未经专项授权的大型航空器和超视距常态化运营

图 3 把分阶段路线与可观察的复盘指标连接起来。阶段转换不以展示飞行完成为条件，而以任务完成率、异常中止率、数据合规、投诉处理和事故复盘等记录为依据。

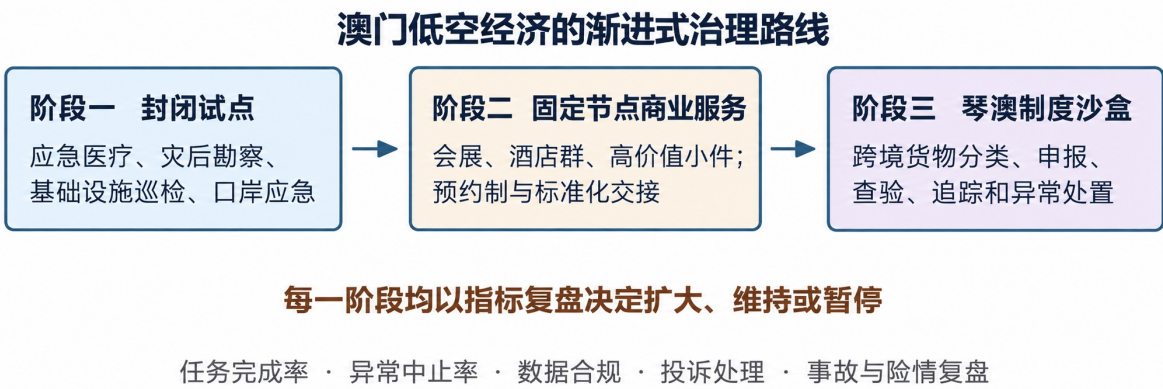


图 3 澳门低空经济的渐进式治理路线

八、讨论与结论

（一）管理学含义：低空经济首先是治理能力的生产

澳门低空经济的核心问题不是简单增加飞行器和航线，而是把航空安全、城市空间、公共服务和产业需求放在同一个治理安排中。固定节点、平台统筹、分级试点和跨境沙盒之所以适合澳门，是因为它们能把“谁可以飞、在哪里飞、承担什么责任、出现异常怎么办”转化为可审查的程序。

这一判断并不意味着澳门只能发展公共服务场景。它更像一条排序规则：在人群密度高、遗产保护强、空域边界复杂的城市，低空项目的早期优势应来自任务可控和责任清楚，而不是来自飞行规模。其他城市可以借鉴这一思路，但仍需根据人口密度、空域制度、机场布局和产业结构重新核对。

（二）主要结论

第一，日常外卖、开放式低空观光和大规模展示活动不宜作为澳门的第一批常态化项目。它们并非没有市场价值，而是风险暴露高、频次高、空间边界复杂，容易在治理能力尚未成熟时放大投诉、隐私和安全问题。

第二，应急医疗、台风灾后勘察、基础设施巡检和口岸应急支持更适合先通过固定节点试点验证；会展高价值小件和酒店群服务可作为第二阶段的商业化方向，但前提是标准货箱、预约、专用起降点、保险和平台留痕能够运行。

第三，琴澳跨境低空的关键约束是制度协同而不是距离。医疗、生物医药、会展和高价值货物应从低频、可标准化、可追踪的任务开始，逐项验证海关、边检、检疫、民航、数据和事故责任边界。

第四，低空治理平台、部门责任清单、动态风险分区、数据和文化遗产保护要求，应作为基础设施的一部分同步建设。没有这些条件，增加飞行架次只能增加风险和协调成本，不能自动形成低空经济。

（三）研究局限

本文使用了官方统计、民航监管资料、机场公开资料、政策文件和治理研究，但没有开展实地飞行试验，也没有取得完整的企业成本、公众态度和运行事故样本。因此，本文提出的“优先试点”、“暂缓观察”和分阶段路线，属于基于公开证据的政策判断，不应被解释为许可结论或商业收益承诺。下一步需要由政府部门、运营企业和科研机构共同完成专家评审、受控飞行、公众沟通、数据保护影响评估和成本效果测算，并根据试点记录修订场景门槛。

【参考文献】

- [1] 崔林, 常迈, 周建山, 等. 面向低空快递配送的空地协同路径优化研究[J]. 无人系统技术, 2024, 7(3): 40-53. DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2024.03.26.
- [2] 任新惠, 芮钰琪. 基于配送服务模式及路径策略的物流无人机调度模型[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 98-111. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.20230083.
- [3] 傅惠, 崔煜, 赵佳虹, 等. 低空无人机物流配送研究与应用综述[J]. 工业工程, 2025, 28(1): 9-21. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7375.240388.
- [4] MERKERT R, BLIEMER M C J, FAYYAZ M. Consumer preferences for innovative and traditional last-mile parcel delivery[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2022, 52(3): 261-284. DOI: 10.1108/IJPDLM-01-2021-0013.
- [5] COHEN A P, SHAHEEN S A, FARRAR E M. Urban air mobility: History, ecosystem, market potential, and challenges[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 6074-6087. DOI: 10.1109/TITS.2021.3082767.
- [6] GARROW L A, GERMAN B J, LEONARD C E. Urban air mobility: A comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation for informing future research[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 103377. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103377.
- [7] AOYAMA Y, ALVAREZ LEON L F. Urban governance and autonomous vehicles[J]. Cities, 2021, 119: 103410. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103410.
- [8] SMITH A, DICKINSON J E, MARSDEN G, et al. Public acceptance of the use of drones for logistics: The state of play and moving towards more informed debate[J]. Technology in Society, 2022, 68: 101883. DOI: 10.1016/j.techsoc.2022.101883.

- [9] PONS-PRATS J, ŽIVOJINOVIĆ T, KULJANIN J. On the understanding of the current status of urban air mobility development and its future prospects: Commuting in a flying vehicle as a new paradigm[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 166: 102868. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102868.
- [10] WANG L, DENG X, GUI J, et al. A review of urban air mobility-enabled intelligent transportation systems: Mechanisms, applications and challenges[J]. Journal of Systems Architecture, 2023, 141: 102902. DOI: 10.1016/j.sysarc.2023.102902.
- [11] 澳门特别行政区政府统计暨普查局. 人口统计 2024[EB/OL]. (2025-03-10)[2026-08-18]. https://www.dsec.gov.mo/getAttachment/3827c09a-ab7b-4c40-8aa1-8fee04195f8e/C_DEM_PUB_2024_Y.aspx.
- [12] 澳门特别行政区民航局. 放飞无人机[EB/OL]. (2024-05-10)[2026-08-18]. <https://www.aacm.gov.mo/zh-hans/guide/DronesandOthers/Drones>.
- [13] 澳门特别行政区民航局. 无人机禁飞区及临时飞行限制[EB/OL]. (2024-05-10)[2026-08-18]. <https://www.aacm.gov.mo/zh-hans/guide/DronesandOthers/ProhibitedAreas>.
- [14] Civil Aviation Authority of Macao. Air Navigation Regulation of Macao[EB/OL]. (2021-11-20)[2026-08-18]. <https://www.aacm.gov.mo/static/2024/11/20/60b53ac1-180b-4aac-b649-c671a1d85a83.pdf>.
- [15] 澳门国际机场. 澳门国际机场 2024 年旅客量突破 764 万人次[EB/OL]. (2025-01-06)[2026-08-18]. <https://www.macao-airport.com/zh/media-centre/news/news-details/31892>.