低空经济应用场景投入产出效率评价研究

郝力晓，陈豪齐

（中国民航大学经济与管理学院，天津 300300）

摘要：聚焦中国低空经济应用场景投入产出效率评价问题，在已有文献基础上，结合低空经济应用场景特征，构建低空经济应用场景投入产出效率评价指标体系，运用三阶段DEA-Malmquist指数模型，对中国省级2019—2023年低空经济应用场景投入产出效率进行评价分析。研究发现：中国低空经济应用场景投入产出效率呈逐年增长趋势，但区域分化显著；生产作业类场景规模效率最低，但技术进步显著，规模不足是核心瓶颈；公共服务类场景全要素生产率最高，但规模效率中等，技术转化能力突出；消费服务类场景呈现“高技术进步-低效率转化”悖论，需求端牵引不足制约产出转化。整体上，低空经济应用场景资源配置存在结构性失衡，重建设、轻运营的资源配置惯性制约了低空经济规模效率提升。

关键词：低空经济应用场景；三阶段DEA-Malmquist指数模型；投入产出效率评价

中图分类号：F203 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)05－0100－12

低空经济作为新质生产力的典型代表，已被纳入国家战略性新兴产业体系，成为驱动经济高质量发展的新引擎。低空经济应用场景作为产业链下游的价值实现终端，是技术成果向经济效益转化的最终环节，决定了产业投入能否形成实际生产力与市场竞争力。因此，科学评估不同应用场景的投入产出效率，不仅关乎资源配置的精准性，更能通过经济绩效反馈逆向拉动中上游技术创新与产业链协同，推动实现低空经济研发、制造与运营全生态的良性循环。

现有研究主要聚焦于低空经济的内涵界定[1-3]、发展逻辑[4-6]和政策法规[7-8]等宏观层面，对具体应用场景的关注相对较少。在有限的应用场景研究中，学者们主要探讨了3类问题：①产业融合模式，如“低空＋文旅”等新型业态培育[9]；②运营组织优化，包括无人机配送的空间模式[10]、空地协同机制研究[11]；③场景孵化的实现路径与对策分析[12]。然而，现有研究多局限于单一场景的个案分析，对不同类型场景的细化对比和系统性研究明显不足。并且，这些研究普遍缺乏对应用场景投入产出效率的系统考察，而投入产出效率问题恰恰是评估场景可行性、优化资源配置的基础和关键，直接关系到低空经济商业化落地的可持续性。

投入产出评价方法主要包括成本效益分析（cost-benefit analysis，CBA）、成本效果分析（cost-effectiveness analysis，CEA）、数据包络分析（data envelopment analysis，DEA）、随机前沿分析（stochastic frontier approach，SFA）及投入产出模型等。其中，CBA适用于公共项目的货币化评估，CEA常用于医疗或教育等单一效果领域，I-O模型则聚焦宏观经济关联分析。在效率评估方面，SFA虽具有良好统计性质，但需预设函数形式且对模型误设敏感；DEA因其适用性强、直观易懂的特性，被广泛应用于交通、能源和制造等领域[13-14]。然而，传统DEA模型难以控制环境因素与随机干扰，可能导致效率估计偏差。为突破此局限，三阶段DEA通过引入SFA回归分离环境噪声与随机误差[15]，提升了评估准确性；进一步结合Malmquist指数可动态分解效率变动，揭示了全要素生产率增长根源[16-17]。针对低空经济多投入多产出、结构复杂的特性，三阶段DEA-Malmquist模型的非参数特性规避了新兴业态生产函数不成熟的问题，无须价格信息可减少市场扭曲影响，并能兼容定性与定量指标。该模型融合环境调整与动态分析能力，既强化了横向比较的合理性，也增强了对效率演进机制的解释力。

收稿日期：2025-09-06

基金项目：国家社会科学基金后期资助项目(25FGLB057)

作者简介：郝力晓(1992—)，女，河北邢台人，博士，副教授，硕士研究生导师，研究方向为新兴产业及其经济社会影响；陈豪齐(2002—)，男，广东汕头人，研究方向为低空经济。

综上所述,已有文献提供了研究基础与方法。但目前关于低空经济应用场景投入产出效率评价问题尚处于起步阶段,尤其是低空经济细分场景比较研究更是鲜见。鉴于此,构建低空经济应用场景投入产出效率评价指标体系,采用三阶段 DEA-Malmquist 指数分析法测算应用场景投入产出效率,识别出低空经济应用场景运营效率短板,为优化财政补贴、基础设施及技术创新等资源配置提供实证支撑,加速低空经济从政策驱动向效率驱动转型。

1 研究方法与指标选取

1.1 三阶段 DEA 模型构建

在评价应用场景投入产出效率时,第 1 阶段的 DEA 分析使用投入导向的 DEA-BBC 模型[18]。以省份作为决策单元(decision making unit,DMU),对初始的低空经济应用场景投入产出效率进行分析。假设有 n 个 DMU,投入要素和产出要素分别为 x_{ij} 和 y_{rj},即

$$x_{ij}>0, y_{rj}>0, j=1,2,\cdots,n; i=1,2,\cdots,m; r=1,2,\cdots,s \tag{1}$$

式中:m 和 s 分别为单个 DMU 对应的投入变量、产出变量的个数。随后引入松弛变量 s^-、s^+ 和非阿基米德无穷小量 ε 进行对偶规划,得到:

$$\min\phi_0=\theta_0-\varepsilon\left(\sum_{i=1}^{m}s_i^-+\sum_{r=1}^{s}s_r^+\right) \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{j=1}^{n}\lambda_j x_{ij}+s_i^-=\theta_0 x_{i0}\\ \sum_{j=1}^{n}\lambda_i y_{rj}-s_r^+=y_{r0}\\ \sum_{j=1}^{n}\lambda_j=1\\ s_i^-, s_r^+, \lambda_j\geqslant 0, j=1,2,\cdots,n\end{cases} \tag{3}$$

式中:ϕ_0 为纯技术效率(pure technical efficiency,PTE),当 $\phi_0=\theta_0=1$,且 $s_i^-=0$,$^+s_r=0$ 时,DEA 有效,表示投入产出组合位于产业前沿;θ_0、s_i^- 和 s_r^+ 为最优解,若 $\phi_0=\theta_0=1$,且 $s_i^-=0$ 或 $s_r^+=0$ 时,则为弱 DEA 有效,说明需要减少投入 s_i^- 并保持产出不变,或投入不变而增加产出 s_r^+,若 $\phi_0<1$,表示 DEA 无效,即投入过多产出不足。通过该模型可以得到各个 DMU 的综合效率(technical efficiency,TE)、纯技术效率 PTE、规模效率(scale efficiency,SE)及松弛变量 S。其中,投入要素的松弛变量将作为第 2 阶段的因变量。

为了控制外部宏观环境对低空经济应用场景的影响,在第 2 阶段进行了 SFA 分析[16]。将宏观环境变量作为自变量,各项投入要素的松弛变量作为因变量,则第 i 个 DMU 的第 n 个投入要素松弛变量 S_{ni} 的 SFA 回归方程为

$$S_{ni}=f^n(z_i,\beta^n)+v_{ni}+u_{ni},\quad n=1,2,\cdots,N;\ i=1,2,\cdots,I \tag{4}$$

式中:z_i 为 k 维宏观环境变量;β^n 为对应的宏观环境因素参数向量;$f^n(z_i,\beta^n)$ 为环境变量对投入要素松弛变量的影响;$f^n(z_i,\beta^n)=z_i\beta^n$,$v_{ni}$ 表示服从 $v_{ni}\sim N(0,\sigma_{vn}^2)$ 的随机误差项,u_{ni} 服从 $u_{ni}\sim N^+(\mu_u,\sigma_{un}^2)$ 正态分布,两者相互独立;$v_{ni}+u_{ni}$ 为复合误差项。当 $u_{ni}\geqslant 0$ 时,表示管理无效率。该阶段考虑到随机干扰因素的影响,需要将所有投入要素转换到同质环境,再测算出各 DMU 真实客观的效率值。利用 SFA 模型得到的回归结果对式(4)进行调整得到:

$$X_{ni}^*=X_{ni}+[\max(z_i\hat{\beta}^n)-z_i\hat{\beta}^n]+[\max(\hat{v}_{ni})-\hat{v}_{ni}],\ n=1,2,\cdots,N,\ i=1,2,\cdots,I \tag{5}$$

式中:X_{ni}^* 为原始投入值 X_{ni} 经调整后的目标投入值;$\hat{v}_{ni}$ 为第 i 个 DMU 在第 n 个投入要素对应的随机误差[3]。经过第 2 阶段 SFA 模型处理后,可以得到剔除环境影响后的低空经济应用场景生产投入数据,即调整后的目标投入值 X_{ni}^*。

第 3 阶段的 DEA 分析是用调整后的目标投入值 X_{ni}^* 替换掉原始投入值,重新代入 DEA-BBC 模型进行投入产出效率评价。该阶段所得结果,即为剔除了环境因素影响的客观参考数据。

1.2 三阶段 DEA-Malmquist 模型构建

尽管三阶段 DEA 模型能够剔除环境因素和随机误差,但由于其静态特性,无法反映技术进步或生产前沿面的移动情况。因此,引入 Malmquist 指数[19-20],借鉴 Fare 等[16]的研究,将该指数与三阶段 DEA 模型相结合,从动态视角对低空经济应用场景生产效率进行分析,以获取不同时间点生产效率的变化情况。

三阶段 DEA-Malmquist 模型是将三阶段 DEA 分析结果的最终投入产出数据代入到 Malmquist 指数模型:

$$M_{v,c}^{t,t+1}=\frac{D_v^{t+1}(x_i^{t+1},y_i^{t+1})}{D_v^t(x_i^t,y_i^t)}\times\left[\frac{D_v^t(x_i^t,y_i^t)}{D_c^t(x_i^t,y_i^t)}\Big/\frac{D_v^{t+1}(x_i^{t+1},y_i^{t+1})}{D_c^{t+1}(x_i^{t+1},y_i^{t+1})}\right]\times\left[\frac{D_c^t(x_i^t,y_i^t)}{D_c^{t+1}(x_i^t,y_i^t)}\cdot\frac{D_c^t(x_i^{t+1},y_i^{t+1})}{D_c^{t+1}(x_i^{t+1},y_i^{t+1})}\right] \tag{6}$$

式中：x_i^t和x_i^{t+1}分别为第i个 DMU 在时期t和时期$t+1$的投入向量；y_i^t和y_i^{t+1}分别为第i个 DMU 在时期t和时期$t+1$的产出向量；第 1 项表示动态规模下的纯技术效率变化；第 2 项表示动态规模效率变化；第 3 项则表示固定报酬下的技术变化率。

1.3　指标选取和数据来源

依据彭张林等[21]的综合评价理论，将低空经济投入产出效率解构为资源转化能力（投入维度）、经济与社会价值创造（产出维度）和环境适配性（环境维度）3 大核心维度。其中，投入维度遵循要素完备性原则[22]，覆盖基础设施、市场主体、人力资本、财政支持 4 类关键生产要素。产出维度采用多维价值导向，参照国际民航组织《通用航空活动分类标准》划分的生产作业类、公共服务类和消费服务类 3 类细分场景，既包含直接经济产出，又纳入生态服务价值和技术服务产出。依据库兹涅茨曲线假说，选取人均 GDP 作为环境变量，控制区域经济发展阶段对低空经济效率的非线性影响。具体指标见表 1。

研究数据来源于 2020—2024 年《中国统计年鉴》、2019—2023 年《通航生产情况汇总（经营性）》《民航行业发展统计公报》《通用航空发展专项资金预算方案》以及中国 AOPA 通用机场研究中心发布的《全国通用机场数据简报》。这些数据源为中国低空经济领域具有高度权威性和连续性的统计出版物，其数据收集、处理与发布遵循严格的规范，确保了指标数据的可靠性、准确性与一致性。

鉴于低空经济发展现阶段呈现出较强的区域性特征，相关统计数据的收集与发布也主要基于省级行政单元。因此，选取中国 31 个省份（因数据缺失，未包含港澳台地区）作为决策单元（DMU）的集合。该样本覆盖了中国低空经济发展的主体区域，集中了绝大部分低空运营活动、基础设施和市场参与者。其效率评估结果能够有效揭示中国低空经济应用场景的效率水平、省际差异格局及其关键影响因素，对理解全国低空经济整体运行效率具有充分的代表性和解释力。港澳台地区数据的缺失虽构成一定局限，但并不影响研究结论对于中国低空经济发展效率评价的充分性与合理性。

2　实证结果与分析

2.1　整体三阶段 DEA-Malmquist 模型分析

2.1.1　第 1 阶段 DEA 效率分析

根据三阶段 DEA-Malmquist 模型的分析流程，首先运行第 1 阶段传统 DEA 模型，采用投入导向、可变规模报酬的 BCC 模型。所有原始数据均已进行无量纲化标准化处理，以消除量纲影响并满足 DEA 模型要求。使用 DEAP 2.1 软件，将 2019—2023 年 31 个省份低空经济应用场景经标准化处理后的投入产出面板数据，按“产出在前，投入在后”的格式排列并导入程序计算。第 1 阶段 DEA 模型结果见表 2。综合技术效率为纯技术效率和规模效率的乘积；纯技术效率反映在规模报酬可变假设下，DMU 在最优生产规模前沿上的投影距离，衡量管理与技术效率；规模效率反映实际规模与最优生产规模的接近程度。

由表 2 可知，吉林、海南、安徽、江西、福建、新疆、四川、重庆 8 个省份处于规模收益递增的发展态势。其中，海南、江西、新疆、四川、重庆的各项效率数值分布较为均衡，而吉林、安徽的纯技术效率较为落后，福建的规模效率最低。河南、湖南、江苏、内蒙古、河北、陕西 6 地处于规模收益递减的发展态势，但效率值处于较高水准。剩余 17 个省份处于规模收益不变的情况，处于生产前沿面。根据第 1 阶段 DEA 分析结果初步判断，中国低空经济梯队分化显著。17 个前沿省份效率值达生产最优，安徽、福建等 8 个潜力省份存在技术或规模短板，江苏、河

表 1　指标选取与数据来源

指标类型	评价指标	数据选取	数据来源
投入指标	基础设施	通用机场数量	中国 AOPA 通用机场研究中心发布的全国通用机场数据简报
	市场主体	通航企业数量	2019—2023 年《民航行业发展统计公报》
	人力资本	培训小时数	2019—2023 年《通航生产情况汇总（经营性）》
	财政支持	通用航空发展专项资金预算	2019—2023 年《通用航空发展专项资金预算方案》
产出指标	直接经济产出	飞行小时数、载客量、低空航空器起落架次、载货重量、	2019—2023 年《通航生产情况汇总（经营性）》
	生态服务价值	护林面积、巡线距离	
	技术服务产出	测线距离、摄影面积	
环境因素	人均 GDP	人均 GDP	2020—2024 年中国统计年鉴

表 2　第 1 阶段 DEA 模型分析结果

省份	综合技术效率(crste)	纯技术效率(vrste)	规模效率(scale)	规模收益
吉林	0.636	0.733	0.868	递增
辽宁	1.000	1.000	1.000	不变
黑龙江	1.000	1.000	1.000	不变
广东	1.000	1.000	1.000	不变
广西	1.000	1.000	1.000	不变
河南	0.997	1.000	0.997	递减
海南	0.970	0.997	0.972	递增
湖北	1.000	1.000	1.000	不变
湖南	0.890	1.000	0.890	递减
上海	1.000	1.000	1.000	不变
安徽	0.511	0.590	0.866	递增
山东	1.000	1.000	1.000	不变
江苏	0.892	1.000	0.892	递减
江西	0.854	0.876	0.975	递增
浙江	1.000	1.000	1.000	不变
福建	0.009	1.000	0.009	递增
内蒙古	0.910	0.947	0.961	递减
北京	1.000	1.000	1.000	不变
天津	1.000	1.000	1.000	不变
山西	1.000	1.000	1.000	不变
河北	0.810	1.000	0.810	递减
新疆	0.916	0.934	0.980	递增
宁夏	1.000	1.000	1.000	不变
甘肃	1.000	1.000	1.000	不变
陕西	0.878	1.000	0.878	递减
青海	1.000	1.000	1.000	不变
云南	1.000	1.000	1.000	不变
四川	0.893	0.901	0.991	递增
西藏	1.000	1.000	1.000	不变
贵州	1.000	1.000	1.000	不变
重庆	0.885	0.886	0.999	递增
均值	0.905	0.963	0.938	—

表 3　第 1 阶段 Malmquist 指数结果

省份	技术效率指数	技术进步指数	纯技术效率指数	规模效率指数	全要素生产率指数
吉林	1.022	0.999	1.004	1.018	1.022
辽宁	1.000	1.149	1.000	1.000	1.149
黑龙江	1.000	0.677	1.000	1.000	0.677
广东	1.000	0.837	1.000	1.000	0.837
广西	1.000	1.036	1.000	1.000	1.036
河南	0.932	0.959	0.953	0.978	0.894
海南	1.008	1.306	1.001	1.007	1.316
湖北	1.000	0.805	1.000	1.000	0.805
湖南	0.860	1.054	0.997	0.862	0.907
上海	1.000	0.859	1.000	1.000	0.859
安徽	0.986	0.902	0.969	1.018	0.890
山东	1.000	0.991	1.000	1.000	0.991
江苏	1.007	0.880	1.000	1.007	0.887
江西	0.781	1.112	0.803	0.973	0.868
浙江	0.752	0.945	0.755	0.996	0.710
福建	2.573	0.556	1.000	2.573	1.431
内蒙古	1.002	0.922	1.013	0.988	0.924
北京	1.000	1.009	1.000	1.000	1.009
天津	1.000	4.745	1.000	1.000	4.745
山西	1.000	0.827	1.000	1.000	0.827
河北	0.911	1.032	0.947	0.963	0.940
新疆	0.993	0.995	0.989	1.004	0.988
宁夏	0.776	0.835	1.000	0.776	0.648
甘肃	0.993	0.664	1.000	0.993	0.659
陕西	1.033	1.147	1.000	1.033	1.185
青海	1.000	2.226	1.000	1.000	2.226
云南	0.915	0.577	0.920	0.995	0.528
四川	0.981	1.035	1.026	0.956	1.015
西藏	1.000	0.739	1.000	1.000	0.739
贵州	0.974	0.958	0.979	0.995	0.933
重庆	0.773	0.874	0.854	0.905	0.675
均值	0.984	0.981	0.972	1.012	0.965

南等 6 个高效益省份出现规模报酬递减。规模效率整体弱于纯技术效率,中西部潜力区需技术规模协同提升,而东部集聚区应转向集约化发展以化解过度投入风险。

从表 3 的 Malmquist 指数结果来看,中国低空经济发展呈现 3 个关键特征。①技术进步呈现两极分化,天津、青海等省(市)展现出突破性技术跃升,而黑龙江、云南等地则出现技术退步,这种分化导致全国技术进步指数均值低于基准水平,反映出行业整体创新动能不足。②规模效率与技术进步呈现替代效应。例如,福建规模效率指数通过超常规模扩张弥补了技术退步,而辽宁、陕西等技术领先省份则相对忽视规模优化,这种此消彼长的关系制约了全要素生产率的均衡提升。③DEA 静态效率与动态增长出现背离,广东、上海等 DEA 有效省份在动态分析中呈现技术衰退,而 DEA 低效的海南、陕西却实现生产率提升,这种矛盾现象可能预示静态效率评价掩盖了潜在增长危机。全国全要素生产率均值的负增长态势,与 DEA 模型显示的较高静态效率形成鲜明对比,说明当前低空经济发展存在效率幻觉,亟须建立动静结合的评价体系来识别真实发展质量。

结合第 1 阶段 DEA 静态效率与 Malmquist 动态指数分析,中国低空经济呈现静态高效但动态疲软的现象。DEA 结果显示 17 个省份已达生产前沿面,但 Malmquist 指数却揭示全国全要素生产率整体衰退,其中广东、上海等技术前沿省份出现显著技术退步,而 DEA 低效省份如福建却通过非常规规模扩张实现生产率跃升。这种静态效率与动态增长的结构性背离,反映出当前发展模式存在技术固化风险。DEA 有效的省份可能陷入效率陷阱而缺乏创新动力,而 DEA 低效省份的扩张可能透支

可持续发展能力。此外，DEA规模收益递增地区在动态分析中分化严重。吉林、海南保持良性增长，而安徽、江西则持续低迷，这说明DEA模型识别的潜力地区需要结合动态指标进行二次筛选，才能真正锁定有效投资方向。因此，进行第2阶段和第3阶段实证分析，以确保结果的可信程度。

2.1.2 第2阶段面板SFA回归分析

在第1阶段DEA中，除了投入产出效率数据，还可以获得各项投入数据的松弛变量。结合环境因素指标，利用Frontier4.1程序，进行第2阶段SFA回归分析。

低空经济应用场景投入产出效率与经济环境高度相关。因而，选取各地区的人均GDP作为环境因素。同时，结合第1阶段获取的投入松弛变量进行回归分析，结果见表4。

根据表4的SFA回归结果可以看出，环境变量对各项投入松弛变量的影响均达到1%显著水平，但影响方向存在差异。具体表现为人均GDP对通航企业数和通用机场数的松弛变量产生正向影响，而对培训飞行小时数和资金预算的松弛变量则呈现负向影响。技术无效率项占比γ值显示，通用机场数的管理无效率问题突出（γ=0.93），其次是通航企业数（γ=0.64）和资金预算（γ=0.59），培训飞行小时数的随机噪声影响相对较大。该结果验证了低空经济效率确实受到地区经济发展水平的影响，但不同投入要素对环境因素的响应机制存在明显差异，这为制定区域差异化政策提供了实证依据。

表4 第2阶段SFA回归分析结果

变量	通航企业数松弛变量	通用机场数松弛变量	培训飞行小时数松弛变量	资金预算松弛变量
人均GDP	3.74***	9.84***	−1 197.56***	6.90***
常数项	2.94	−2.05	13 318.38	1 081.16
σ^2	44.52	204.48	158 288 230.00	912 081.41
γ	0.64	0.93	0.45	0.59

注：*、**、***表示在10%、5%、1%水平下显著。

2.1.3 第3阶段DEA-Malmquist效率分析

根据第2阶段SFA回归分析结果调整原始投入项，将调整后的投入项与原始产出重新投入DEAP2.1程序中，再次进行DEA分析，并将结果与第1阶段分析结果对比，结果见表5和表6。

由表5可得，在剔除环境因素和统计噪声的影响后，各省份的效率值普遍出现明显下降。综合技术效率（crste）均值从第1阶段的0.905降至第3阶段的0.414，纯技术效率（vrste）均值从0.963微调至0.980，而规模效率（scale）均值则从0.938大幅下降至0.421。这一变化趋势表明，第1阶段DEA结果可能高估了实际管理效率，特别是规模效率被明显高估。此外，省份效率排名发生了显著变化。在第1阶段被视为有效的17个省（市）中，除黑龙江、广东、湖北、山东、北京、天津6个省（市）仍保持有效外，其余省份在第3阶段均转为无效状态。从表5还可以看出，规模报酬状态也发生了重要变化。在第1阶段处于规模报酬递减的河南、湖南、江苏、内蒙古、河北、陕西6个省份，在第3阶段全部转为规模报酬递增状态。与此同时，原先处于规模报酬不变的11个省份中，有9个转为规模报酬递增。这表明，在控制环境因素后，大多数省份的低空经济发展仍处于规模扩张的初级阶段，具有较大的发展潜力。

结合表6分析，在剔除环境因素和统计噪声的影响后，全要素生产率（tfpch）呈现显著改善。第3阶段tfpch均值从第1阶段的0.965提升至1.229，且技术进步（techch）和效率变化（effch）也实现增长。这表明第1阶段的效率评估可能低估了真实的技术进步和管理改善，在控制外部环境因素后，各省份的实际生产率增长潜力得到更准确反映。

从各省份表现来看，福建、青海、四川等省份在第3阶段呈现出全要素生产率增长，主要得益于显著的技术进步和效率提升。值得注意的是，第1阶段表现优异的天津在第3阶段大幅回落至0.865，说明其原先的高增长主要依赖有利的外部环境而非内生动力。此外，技术进步与效率改善的协同效应在第3阶段更为明显，如山东、广东等省份在技术进步带动下实现了更均衡的生产率增长。整体而言，第3阶段结果更准确地揭示了低空经济发展的质量改进，表明在控制环境差异后，行业整体呈现技术进步与效率提升并重的良性发展态势。

基于第2阶段SFA回归对原始投入数据的调整，第3阶段使用净化后的投入重新测算效率。通过量化松弛变量，揭示各地区资源错配的具体程度，为优化低空经济资源配置提供直接依据。表7显示，中国低空经济应用场景存在区域性与结构性冗余失衡。①资源错配呈现明显的“东重西轻”空间分布。江苏、河北等东部省份存在双重投入冗余，西部省份除内蒙古外普遍无显著冗余。这反映出

表 5　第 1 阶段与第 3 阶段 DEA 模型分析结果对比

省份	第 3 阶段				第 1 阶段			
	crste	vrste	scale	规模	crste	vrste	scale	规模
吉林	0.112	1	0.112	递增	0.636	0.733	0.868	递增
辽宁	0.289	0.946	0.306	递增	1	1	1	不变
黑龙江	1	1	1	不变	1	1	1	不变
广东	1	1	1	不变	1	1	1	不变
广西	0.354	0.996	0.355	递增	1	1	1	不变
河南	0.322	0.930	0.346	递增	0.997	1	0.997	递减
海南	0.169	0.992	0.171	递增	0.970	0.997	0.972	递增
湖北	1	1	1	不变	1	1	1	不变
湖南	0.159	0.931	0.171	递增	0.890	1	0.890	递减
上海	0.773	0.992	0.780	递增	1	1	1	不变
安徽	0.103	1	0.103	递增	0.511	0.590	0.866	递增
山东	1	1	1	不变	1	1	1	不变
江苏	0.429	0.943	0.454	递增	0.892	1	0.892	递减
江西	0.138	0.999	0.138	递增	0.854	0.876	0.975	递增
浙江	0.166	0.956	0.173	递增	1	1	1	不变
福建	0	1	0	递增	0.009	1	0.009	递增
内蒙古	0.286	0.972	0.295	递增	0.910	0.947	0.961	递减
北京	1	1	1	不变	1	1	1	不变
天津	1	1	1	不变	1	1	1	不变
山西	0.321	0.980	0.328	递增	1	1	1	不变
河北	0.479	0.932	0.514	递增	0.810	1	0.810	递减
新疆	0.750	1	0.750	递增	0.916	0.934	0.980	递增
宁夏	0.025	0.993	0.026	递增	1	1	1	不变
甘肃	0.222	0.982	0.226	递增	1	1	1	不变
陕西	0.561	0.937	0.599	递增	0.878	1	0.878	递减
青海	0.018	0.983	0.018	递增	1	1	1	不变
云南	0.244	0.962	0.253	递增	1	1	1	不变
四川	0.603	1	0.603	递增	0.893	0.901	0.991	递增
西藏	0.017	0.993	0.017	递增	1	1	1	不变
贵州	0.174	0.966	0.180	递增	1	1	1	不变
重庆	0.123	1	0.123	递增	0.885	0.886	0.999	递增
均值	0.414	0.980	0.421	—	0.905	0.963	0.938	—

表 6　第 1 阶段与第 3 阶段 Malmquist 指数结果对比

省份	第 3 阶段					第 1 阶段				
	effch	techch	pech	sech	tfpch	effch	techch	pech	sech	tfpch
吉林	1.216	1.035	1	1.216	1.259	1.022	0.999	1.004	1.018	1.022
辽宁	0.934	1.080	0.981	0.952	1.008	1	1.149	1	1	1.149
黑龙江	1	0.837	1	1	0.837	1	0.677	1	1	0.677
广东	1	1.163	1	1	1.163	1	0.837	1	1	0.837
广西	1.141	1.032	1.001	1.140	1.178	1	1.036	1	1	1.036
河南	1.189	1.191	0.996	1.194	1.416	0.932	0.959	0.953	0.978	0.894
海南	1.559	1.124	1.002	1.556	1.753	1.008	1.306	1.001	1.007	1.316
湖北	1	1.012	1	1	1.012	1	0.805	1	1	0.805
湖南	1.083	1.052	0.982	1.104	1.140	0.860	1.054	0.997	0.862	0.907
上海	1.052	1.127	1.002	1.05	1.186	1	0.859	1	1	0.859
安徽	1.178	1.081	0.980	1.202	1.273	0.986	0.902	0.969	1.018	0.890
山东	1	2.087	1	1	2.087	1	0.991	1	1	0.991
江苏	1.189	0.843	1.009	1.178	1.002	1.007	0.880	1	1.007	0.887
江西	0.901	1.090	0.989	0.911	0.982	0.781	1.112	0.803	0.973	0.868
浙江	1.121	1.093	0.999	1.122	1.225	0.752	0.945	0.755	0.996	0.710
福建	5.323	1.082	1	5.323	5.759	2.573	0.556	1	2.573	1.431
内蒙古	1.055	1.013	1.007	1.048	1.069	1.002	0.922	1.013	0.988	0.924
北京	1	1.175	1	1	1.175	1	1.009	1	1	1.009

续表

省份	第3阶段					第1阶段				
	effch	techch	pech	sech	tfpch	effch	techch	pech	sech	tfpch
天津	0.829	1.044	1	0.829	0.865	1	4.745	1	1	4.745
山西	0.809	1.191	0.971	0.833	0.964	1	0.827	1	1	0.827
河北	0.981	1.063	0.94	1.043	1.043	0.911	1.032	0.947	0.963	0.940
新疆	1.075	1.192	1	1.075	1.281	0.993	0.995	0.989	1.004	0.988
宁夏	0.837	1.082	1.001	0.836	0.905	0.776	0.835	1	0.776	0.648
甘肃	0.951	1.074	1.005	0.946	1.020	0.993	0.664	1	0.993	0.659
陕西	1.155	0.930	1.016	1.137	1.074	1.033	1.147	1	1.033	1.185
青海	2.095	1.115	1.004	2.086	2.335	1	2.226	1	1	2.226
云南	0.864	1.146	0.986	0.876	0.99	0.915	0.577	0.92	0.995	0.528
四川	1.135	1.678	1	1.135	1.904	0.981	1.035	1.026	0.956	1.015
西藏	1.072	1.117	1.002	1.070	1.197	1	0.739	1	1	0.739
贵州	0.838	1.169	0.989	0.848	0.980	0.974	0.958	0.979	0.995	0.933
重庆	0.893	1.032	1	0.893	0.922	0.773	0.874	0.854	0.905	0.675
均值	1.107	1.111	0.995	1.112	1.229	0.984	0.981	0.972	1.012	0.965

表7　第3阶段投入指标冗余情况

省份	通航企业数量/家	通用机场数量/个	低空航空器培训飞行小时数	通用航空发展专项资金预算/万元
吉林	0	0.096	0	0
辽宁	2.373	2.564	0	0
黑龙江	0	0	0	0
广东	0	0	0	0
广西	0.056	0	0	1.528
河南	1.198	1.728	0	0
海南	0.737	0	0	0
湖北	0	0	0	0
湖南	1.826	2.334	0	0
上海	0.632	0	0	0
安徽	0	0	0	0
山东	0	0	0	0
江苏	4.603	4.691	0	0
江西	3.994	0	0	0
浙江	0	0	0	0
福建	0	0	0	0
内蒙古	2.536	0	0	0
北京	0	0	0	0
天津	0	0	0	0
山西	0.051	0	0	0
河北	8.267	8.782	0	0
新疆	0	0	0	0
宁夏	0	0	0	0
甘肃	0	0	0	0
陕西	1.271	2.582	0	0
青海	0	0	0	0
云南	0	0	0	0
四川	0	0	0	0
西藏	0	0	0	0
贵州	0	0	0	0
重庆	0	0	0	0

东部地区可能存在政策驱动下的过度投资，部分省份同时出现企业和机场的高冗余，表明其低空经济基础设施建设已明显超前于实际需求。②不同要素的错配程度存在显著差异。通用机场数量冗余最为普遍，涉及7个省份，部分省份的机场冗余与通航企业冗余并存，表明基础设施利用率不足；而培训飞行小时和资金预算在大多数省份无冗余，说明这两类投入的配置相对精准。广西出现唯一的资金预算冗余，可能反映其财政补贴政策与市场需求的错位。③资源配置效率与经济发展水平呈现非线性关系。上海、浙江等经济发达地区已实现零冗余，而同样位于东部地区的江苏、河北却存在冗余，这表明单纯的经济增长并不能自动优化资源配置。福建虽无冗余，但结合表5可知其因基础投入长期垫底，导致规模效率趋近于0，属于投入匮乏型而非配置优化型。这些发现为制定差异化调控政策提供了明确靶向，东部地区应重点压缩过剩产能，而中西部地区可适度增加优质资源投入，但需建立动态监测机制防范重复建设。

2.2　细化场景DEA分析

低空经济应用场景多，生产作业类、公共服务类、消费服务类等细分场景的投入偏好与效率可能存在差异。因此，进一步对细分场景进行投入产出效率分析，有助于精准定位冗余/匮乏资源的场景，为制定差异化政策提供靶点。

2.2.1　生产作业类应用场景

表8呈现了石油服务、航空护林、直升机机外载荷飞行、航空探矿、航空摄影、海洋监测、渔业飞行、空中巡查、电力作业、航空喷洒10类生产作业场景的DEA-Malmquist分析结果。

表8显示，黑龙江、广东、湖北、山东、北京、天津6个省份位于生产前沿面(crste=1)，与整体效率分析结论(表5)一致，验证了此类区域资源配置的持续性高效。非前沿面地区纯技术效率(vrste)均值

达0.98,接近技术有效,但规模效率(scale)均值仅0.344,表明规模不足是当前制约该场景生产效率的核心矛盾。这与表5揭示的硬件冗余与规模不足并存问题形成呼应。Malmquist指数中技术效率变化(effch)与规模效率变化(sech)均值分别为1.219和1.224,共同推动全要素生产率提升(tfpch=1.301),而纯技术效率变化(pech)均值0.996趋近于1。进一步证实了生产作业类场景的进步主要依赖规模扩张与技术应用,管理优化贡献有限,强化了表6中技术效率主导增长的结论。

此外,生产作业类场景的效率特征(规模效率均值0.344<0.5,前沿面区域一致性)与整体低空经济高度吻合,初步表明生产作业类场景是当前低空经济的核心构成场景。

2.2.2 公共服务类应用场景

表9呈现了直升机引航、航空医疗救护、城市消防、人工影响天气、科学实证、气象探测等公共服务类应用场景的DEA-Malmquist分析结果。

表9显示,仅广东、上海处于生产前沿面(crste=1),较生产作业类场景(6个前沿面)和整体效率分析大幅减少,表明公共服务场景的高效资源配置区域比较有限。非前沿面地区规模效率(scale)均值仅0.189,显著低于生产作业类场景(0.344)和整体水平(0.421),且28个地区呈现规模效益递增,说明公共服务场景存在规模约束。全要素生产率指数(tfpch)均值达1.479,远超生产作业类(1.301)和整体水平(1.229)。该增长主要由技术效率变化(effch=1.396)驱动,规模效率变化

表8 生产作业类应用场景DEA-Malmquist分析结果

区域	省份	DEA模型			M指数					规模
		crste	vrste	scale	effch	techch	pech	sech	tfpch	
东北	吉林	0.114	1	0.114	1.165	1.049	1	1.165	1.222	递增
	辽宁	0.349	0.948	0.369	1.002	1.063	0.987	1.015	1.065	递增
	黑龙江	1	1	1	1	0.818	1	1	0.818	不变
中南	广东	1	1	1	1	1.149	1	1	1.149	不变
	广西	0.077	0.979	0.079	0.722	1.025	1.005	0.718	0.740	递增
	河南	0.162	0.932	0.174	1.343	1.055	0.998	1.345	1.416	递增
	海南	0.047	0.984	0.047	0.982	1.062	1.004	0.978	1.043	递增
	湖北	1	1	1	1	0.912	1	1	0.912	不变
	湖南	0.079	0.931	0.085	1.007	1.104	0.982	1.026	1.111	递增
华东	上海	0.779	0.991	0.786	1.049	1.143	1.002	1.047	1.199	递增
	安徽	0.004	1	0.004	2.105	0.794	0.977	2.156	1.671	递增
	山东	1	1	1	1	2.166	1	1	2.166	不变
	江苏	0.218	0.938	0.233	1.382	0.809	1.007	1.373	1.119	递增
	江西	0.172	1	0.172	0.839	1.032	0.989	0.848	0.866	递增
	浙江	0.125	0.952	0.131	0.977	1.122	1	0.978	1.097	递增
	福建	0	1	0	16.464	1.081	1	16.464	17.797	递增
华北	内蒙古	0.575	0.994	0.578	0.830	1.052	1.001	0.829	0.873	递增
	北京	1	1	1	1	1.168	1	1	1.168	不变
	天津	1	1	1	0.888	1.035	1	0.888	0.919	不变
	山西	0.327	0.982	0.333	0.804	1.056	0.970	0.828	0.849	递增
	河北	0.149	0.933	0.160	0.890	1.090	0.941	0.947	0.970	递增
西北	新疆	0.562	1	0.562	0.943	1.094	1	0.943	1.032	递增
	宁夏	0.040	0.998	0.040	0.783	1.065	1	0.783	0.834	递增
	甘肃	0.014	0.977	0.014	1.437	0.964	1.006	1.429	1.386	递增
	陕西	0.126	0.933	0.135	1.680	0.706	1.018	1.651	1.186	递增
	青海	0.002	0.986	0.002	3.788	1.092	1.003	3.775	4.137	递增
西南	云南	0.269	0.966	0.279	0.861	1.165	0.986	0.873	1.003	递增
	四川	0.088	1	0.088	1.834	1.330	1	1.834	2.440	递增
	西藏	0	0.996	0	2.156	1.204	1.001	2.153	2.596	递增
	贵州	0.126	0.968	0.130	0.877	1.270	0.988	0.888	1.114	递增
	重庆	0.156	1	0.156	0.936	1.054	0.999	0.936	0.986	递增
均值		0.341	0.980	0.344	1.219	1.068	0.996	1.224	1.301	—

表 9　公共服务类应用场景 DEA-Malmquist 分析结果

区域	省份	crste	vrste	scale	effch	techch	pech	sech	tfpch	规模
东北	吉林	0.143	1	0.143	0.779	1.047	1	0.779	0.816	递增
	辽宁	0.005	0.928	0.005	0.087	0.929	0.985	0.089	0.081	递增
	黑龙江	0.293	0.945	0.310	0.954	1.051	1.014	0.941	1.003	递增
中南	广东	1	1	1	1	1.563	1	1	1.563	不变
	广西	0	0.977	0	0.901	1.108	1.006	0.895	0.998	递增
	河南	0.128	0.929	0.138	1.171	1.138	0.999	1.172	1.333	递增
	海南	0.117	0.983	0.119	0.946	1.047	1.004	0.942	0.991	递增
	湖北	0.120	0.928	0.129	1.114	1.106	0.964	1.155	1.232	递增
	湖南	0.045	0.929	0.048	0.702	1.143	0.981	0.715	0.802	递增
华东	上海	1	1	1	0.591	0.936	0.958	0.617	0.553	不变
	安徽	0	1	0	16.180	0.872	0.976	16.578	14.104	递增
	山东	0.024	0.927	0.026	1.856	1.197	1.019	1.822	2.222	递增
	江苏	0.333	0.940	0.354	0.730	1.068	0.972	0.750	0.779	递增
	江西	0	0.993	0	11.305	0.840	0.989	11.426	9.498	递增
	浙江	0.168	0.944	0.178	0.968	1.047	1.001	0.966	1.014	递增
	福建	0	1	0	0.899	1.088	1	0.899	0.978	递增
华北	内蒙古	0.222	0.963	0.230	0.981	1.049	1.009	0.972	1.029	递增
	北京	0.141	0.932	0.151	1.003	0.997	0.909	1.104	1	递增
	天津	0.080	0.952	0.084	0.857	1.090	0.995	0.861	0.934	递增
	山西	0.223	0.968	0.230	1.074	1.047	0.985	1.090	1.124	递增
	河北	0.189	0.929	0.204	0.943	1.061	0.942	1.001	1.001	递增
西北	新疆	0.234	1	0.234	1.055	1.046	1	1.055	1.103	递增
	宁夏	0	0.996	0	10.653	0.869	1	10.649	9.254	递增
	甘肃	0	0.977	0	13.826	1.098	1.006	13.745	15.176	递增
	陕西	0.415	0.930	0.446	1.040	1.047	0.986	1.055	1.089	递增
	青海	0.162	0.991	0.164	1.141	1.047	1.002	1.138	1.195	递增
西南	云南	0.152	0.956	0.159	0.997	1.153	0.985	1.012	1.150	递增
	四川	0.482	1	0.482	1.200	1.415	1	1.200	1.698	递增
	西藏	0.001	0.996	0.001	2.295	1.141	1.001	2.293	2.619	递增
	贵州	0	0.963	0	19.538	0.855	0.988	19.774	16.700	递增
	重庆	0.024	1	0.024	0.572	1.009	0.999	0.573	0.578	递增
均值		0.184	0.967	0.189	1.396	1.059	0.989	1.411	1.479	—

(sech＝1.411)贡献显著,而技术进步(techch＝1.059)与纯技术效率变化(pech＝0.989)作用有限,揭示公共服务效率提升依赖规模扩张与管理优化的双重机制。

2.2.3　消费服务类应用场景

表 10 呈现了航空短途运输、通用航空包机飞行、空中游览、跳伞飞行服务、个人娱乐飞行、空中拍照、空中广告、表演飞行、通用航空货运等消费服务类应用场景的 DEA-Malmquist 分析结果。

表 10 显示,消费服务类应用场景呈现显著的效率异质性。仅江苏、北京、甘肃处于生产前沿面(crste＝1),前沿面数量显著少于生产作业类。技术效率变化(effch＝0.941)、纯技术效率变化(pech＝0.986)与规模效率变化(sech＝0.954)均值均小于 1,系 3 类场景中唯一全项收缩,且全要素生产率(tfpch＝1.277)低于生产作业类(1.301)与公共服务类(1.479),证实存在系统性效率衰减。值得注意的是,技术进步率(techch＝1.358)为 3 类最高(超生产作业类 1.068 与公共服务类 1.059),但其与 tfpch 的相关系数仅 0.32,表明技术转化与资源配置的协同失灵。

造成这一现象的原因可能在于:一方面,空中游览等场景高度依赖市场需求,需求波动导致部分省份硬件资源闲置,呼应了表 7 中通航企业冗余 4.603 家;另一方面,纯技术效率停滞(vrste＝1)使其高 tfpch 不可持续,导致规模扩张无法弥补技术管理短板。因此,消费服务场景呈现“高技术进步-低效率转化”悖论,政策需通过需求侧刺激与硬件共享机制破解结构性错配。

2.3　区域整体及细分场景效率的对比分析

基于整体及 3 类细分场景的 DEA-Malmquist 分析,中国低空经济效率呈现显著的空间与结构分异。在生产作业类与整体场景中,黑龙江、广东、湖

表 10　消费服务类应用场景 DEA-Malmquist 分析结果

区域	省份	crste	vrste	scale	effch	techch	pech	sech	tfpch	规模
东北	吉林	0.022	1	0.022	0.692	1.254	1	0.692	0.868	递增
	辽宁	0.478	0.940	0.508	0.890	1.224	0.983	0.906	1.089	递增
	黑龙江	0.196	0.945	0.207	0.476	1.282	1.014	0.470	0.611	递增
中南	广东	0.626	0.964	0.649	0.941	1.276	0.966	0.973	1.201	递增
	广西	0.305	0.981	0.311	0.854	1.325	1.005	0.850	1.132	递增
	河南	0.386	0.943	0.410	0.687	1.396	0.991	0.693	0.959	递增
	海南	0.851	1	0.851	1.041	1.840	1	1.041	1.915	递增
	湖北	0.508	0.951	0.535	0.906	1.632	0.964	0.940	1.479	递增
	湖南	0.133	0.929	0.143	1.168	1.303	0.983	1.188	1.523	递增
华东	上海	0.300	0.934	0.322	0.804	1.231	0.973	0.826	0.989	递增
	安徽	0.270	1	0.270	0.899	1.475	0.974	0.922	1.326	递增
	山东	0.281	0.927	0.303	1.373	1.538	1.019	1.347	2.112	递增
	江苏	1	1	1	0.829	1.188	0.963	0.861	0.985	不变
	江西	0.116	0.996	0.117	0.947	1.235	0.989	0.958	1.170	递增
	浙江	0.436	0.957	0.456	0.643	1.399	0.998	0.644	0.899	递增
	福建	0	1	0	21.057	1.403	1	21.057	29.554	递增
华北	内蒙古	0.663	1	0.663	0.942	1.360	1	0.942	1.281	递增
	北京	1	1	1	0.836	1.180	0.904	0.925	0.986	不变
	天津	0.444	0.964	0.460	0.689	1.257	0.993	0.694	0.866	递增
	山西	0.017	0.968	0.018	1.753	1.285	0.969	1.809	2.253	递增
	河北	0.701	0.966	0.726	0.877	1.243	0.937	0.936	1.090	递增
西北	新疆	0.449	1	0.449	1.029	1.196	1	1.029	1.231	递增
	宁夏	0.047	0.996	0.047	0.780	1.514	1	0.779	1.180	递增
	甘肃	1	1	1	0.583	1.529	1	0.583	0.891	不变
	陕西	0.425	0.942	0.452	0.601	1.368	0.964	0.624	0.823	递增
	青海	0.080	0.986	0.081	0.642	1.346	1.003	0.639	0.863	递增
西南	云南	0.393	0.963	0.408	0.698	1.269	0.980	0.712	0.886	递增
	四川	0.499	1	0.499	1.190	1.736	1	1.190	2.065	递增
	西藏	0.040	0.996	0.040	1.017	1.311	1.001	1.016	1.333	递增
	贵州	0.269	0.963	0.279	0.839	1.285	0.988	0.849	1.078	递增
	重庆	0.300	1	0.300	0.747	1.474	0.999	0.748	1.102	递增
均值		0.395	0.975	0.404	0.941	1.358	0.986	0.954	1.277	—

北、山东、北京及天津共同构成前沿面,而公共服务类仅广东、上海入围,消费服务类则为江苏、北京、甘肃。按民航地区管理局划分统计,华北与中南各汇聚 5 个前沿面,华东占 4 个,东北占 2 个,西北占 1 个,西南地区前沿面缺失,高效区集聚于华北-中南轴带而西南形成效率洼地的空间格局。

在效率结构上,公共服务类全要素生产率最高(tfpch 均值 1.479),主要源于政策驱动的规模效率跃升(sech=1.411);生产作业类纯技术效率最优(vrste 均值 0.98)却受限于规模不足(scale 均值为 0.344);消费服务类虽规模效率领先(scale 均值为 0.404)但因技术转化失灵导致全要素生产率最低(tfpch=1.277)。

特别地,生产作业类场景的主导地位进一步由其与整体场景的前沿面完全重合、规模效率特征趋同验证。福建在 4 类分析中持续低迷,其症结在于基础投入系统性匮乏,通航企业数量、专项资金预算等关键指标不佳,导致规模效率趋近于 0,形成无冗余可优化的发展局面。

3　结论与建议

研究选取了作业量最多的 25 个低空经济应用场景作为研究对象,从投入产出效率角度进行评价分析。在已有研究基础上,构建了低空经济应用场景投入产出效率评价指标体系,采用三阶段 DEA-Malmquist 模型进行静动态结合的实证分析,探讨整体和不同类别应用场景的投入产出效率,得到以下结论。

(1)低空经济应用场景整体效率呈增长态势,但区域分化显著。剔除环境因素和随机误差干扰后,低空经济应用场景的综合技术效率均值为 0.414,规模效率均值为 0.421,纯技术效率接近前沿水平。全要素生产率指数均值为 1.229,表明效率整体呈增长趋势。然而,效率空间分布不均衡:黑龙江、广东、湖北、山东、北京、天津 6 省份持续处

于生产前沿，其技术进步贡献突出；福建因长期投入匮乏，规模效率趋近于0，综合效率持续垫底。此外，华北-中南地区集聚全国64.1%的前沿面，西南地区无前沿省份，呈现东强西弱的区域分布格局。

(2)低空经济应用场景不同类型效率分化明显，技术进步与规模约束并存。生产作业类规模效率最低，但技术进步显著，规模不足是核心瓶颈；公共服务类全要素生产率最高，但规模效率中等，技术转化能力突出；消费服务类呈现“高技术进步-低效率转化”悖论，规模效率虽高，但需求端牵引不足制约产出转化。

(3)低空经济应用场景资源配置存在结构性失衡，硬件冗余与软件投入短缺并存。河北、江苏、辽宁等10个省份存在通航企业或机场硬件冗余，合计冗余量为45.7单位；而软投入方面，全国仅广西出现培训时长轻微冗余，其余省份普遍面临培训与资金配套短缺，福建两项投入长期处于全国最低水平。SFA回归进一步揭示环境政策影响：人均GDP每提升1单位，通航企业数冗余增加3.74家，但培训需求冗余下降1 197.56 h，印证经济发达地区存在重基建轻人才倾向。这制约了规模效率提升，非前沿省份规模效率均值仅0.421，凸显结构性矛盾对产业发展的瓶颈效应。

根据研究结论，提出以下发展建议。

(1)破解消费服务类场景“高技术进步-低效率转化”悖论，需强化需求侧牵引与产业生态培育。实施场景化补贴改革，对消费服务类企业按技术进步指数与全要素生产率指数差值给予梯度奖励，并将补贴资金用于市场培育；设立低空技术研发实验室或平台，定向支持技术进步指数较高的省份研发低空技术。

(2)针对前沿面高度集聚华北-中南、西南缺失的空间失衡问题，构建跨区域效率补偿机制。在西南地区设立低空经济薄弱地区发展基金，联合四川前沿区共建滇黔桂“低空文旅走廊”；在华北-中南轴带建立技术扩散中心，从广东等前沿区每年输出低空经济人才至非前沿省份。增加区域协同试点，建立数据互通平台。

(3)针对硬件冗余与软件投入短缺并存的结构性矛盾，建立动态调整的要素配置机制。建议对规模效率较低的省份，实施基建补缺计划，通过专项债优先支持通航企业注册与培训基地建设；对冗余超均值较多的省份，推行设备共享平台，将闲置机场开放给周边规模效率递增区域使用，并给予共享时长税收抵扣。同时调整财政补贴导向，将专项资金预算中软投入占比提升，重点倾斜公共服务类场景。

参考文献

[1] 吕人力. 低空经济的背景、内涵与全球格局[J]. 人民论坛·学术前沿，2024(15)：45-56.

[2] 刘亚亚，杨德林，戴永. 低空经济的概念内涵、发展特征与推进策略[J]. 技术经济，2025，44(3)：29-37.

[3] 王树森，倪红福. 低空经济的概念辨析与经济含义[J]. 西安财经大学学报，2025，38(5)：42-53.

[4] 许冰，来逢波. 低空经济产业量质齐升：内涵解析、理论逻辑与靶向路径[J]. 东岳论丛，2025，46(7)：121-129.

[5] 张青兰，蒋永强. “产业-技术”协同式发展：低空经济高质量发展的新质生产力逻辑及其路径[J]. 当代经济研究，2025(5)：47-55.

[6] 王宝义，张萌萌. 我国低空经济发展的理论逻辑与实施要点[J]. 中国流通经济，2025，39(5)：59-72.

[7] 王庆. 低空经济发展：新兴安全风险与敏捷治理[J]. 科学学研究，2025，43(8)：1569-1578.

[8] 杜德林，谭文蔚，王姣娥，等. 中国低空经济政策演进及区域差异[J]. 资源科学，2025，47(8)：1651-1662.

[9] 沈映春. “低空＋文旅”打造文化消费新增长点[J]. 人民论坛，2025(9)：92-97.

[10] 韩留明，赵建吉，闫明涛，等. 中国无人机产业空间格局演化特征及影响因素[J]. 资源科学，2025，47(8)：1745-1757.

[11] 肖作鹏，张伟聪，李祎杨，等. 低空无人机配送的空地协同组织特征及挑战：以深圳市为例[J]. 资源科学，2025，47(8)：1663-1674.

[12] 钟成林，胡雪萍. 低空经济应用场景孵化：实现进路、瓶颈障碍与纾解对策[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版)，2025，46(4)：121-133.

[13] AGÜERO-TOBAR M A，GONZÁLEZ-ARAYA M C，GONZÁLEZ-RAMÍREZ R G. Assessment of maritime operations efficiency and its economic impact based on data envelopment analysis：a case study of Chilean ports[J]. Research in Transportation Business &amp；Management，2023，46：100821.

[14] 严修，鲁誉，谢谦，等. 基于Bootstrap-DEA-Gini模型的公交线路运行效率评价方法[J]. 交通信息与安全，2023，41(1)：161-168.

[15] 杨俊，陆宇嘉. 基于三阶段DEA的中国环境治理投入效率[J]. 系统工程学报，2012，27(5)：699-711.

[16] FARE R，GROSSKOPF S，NORRIS M，et al. Productivity growth，technical progress，and efficiency change in industrialized countries[J]. American Economic Review，1994，84：66-83.

[17] 刘玲洁，曾兵，温赛赛，等. 基于三阶段DEA-Malmquist指数的中国棉花全要素生产率测算[J/OL]. 中国农业资源与区划，1-12[2025-08-01]. https://link.cnki.net/

urlid/11.3513.S.20250328.1508.020.

[18] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078-1092.

[19] MALMQUIST S. Index numbers and indifference surfaces[J]. Trabajos de Estadistica, 1953, 4: 209-242.

[20] CAVES D W, CHRISTENSEN L R, DIEWERT W E. The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity[J]. Econometrica, 1982, 50: 1393-1414.

[21] 彭张林, 张强, 杨善林. 综合评价理论与方法研究综述[J]. 中国管理科学, 2015, 23(1): 245-256.

[22] 彭张林, 张爱萍, 王素凤, 等. 综合评价指标体系的设计原则与构建流程[J]. 科研管理, 2017, 38(1): 209-215.

Research on Evaluation of Input-output Efficiency in Low-altitude Economy Application Scenarios

HAO Lixiao, CHEN Haoqi

(College of Economics and Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Focusing on the evaluation of input-output efficiency in the application scenarios of low-altitude economy in China, based on the existing literature and combined with the characteristics of the application scenarios of low-altitude economy, an index system of input-output efficiency in the application scenarios of low-altitude economy is constructed, and the three-stage DEA-Malmquist index model is used Evaluate and analyze the input-output efficiency of low-altitude economic application scenarios at the provincial level in China from 2019 to 2023. The research findings show that the input-output efficiency of low-altitude economic application scenarios in China has been increasing year by year, but the regional differentiation is significant. Production operation scenarios have the lowest scale efficiency, but significant technological progress is made. Insufficient scale is the core bottleneck. The total factor productivity of public service scenarios is the highest, but the scale efficiency is moderate, and the technology transformation capacity is outstanding. The consumption service scenario presents a paradox of "high technological progress-low efficiency conversion". The insufficient demand-side traction restricts the output conversion. Overall, there is a structural imbalance in the resource allocation of low-altitude economic application scenarios. The inertia of resource allocation that emphasizes construction over operation has restricted the improvement of the scale and efficiency of the low-altitude economy.

Keywords: low-altitude economy application scenarios; three-stage DEA-Malmquist index model; input-output efficiency evaluation