



贵州新气象科技有限责任公司

贵阳大数据交易所

天地际科技（北京）有限公司

释放气象数据 在低空经济领域的 产业价值



目录

前言	02
01 气象数据与低空经济的双向赋能	03
02 搭建面向低空经济的高质量气象数据集	08
03 建立服务于低空经济的可信气象数据空间	18
04 面向低空经济的气象数据产品和服务场景创新	26
05 面向低空经济的气象数据产品的资本化路径	30
结语	36
参考文献	37
联系我们	38
鸣谢	38

前言

在数字经济与绿色转型的双重驱动下,低空经济正成为全球新兴产业的重要增长极。当前,无人机与eVTOL技术逐步成熟,推动物流配送、城市空中交通等场景从概念验证迈向商业化落地;与此同时,各国政策框架加速完善,中国2024年也将发展低空经济明确写入《政府工作报告》。基础设施层面,5G专网、北斗增强系统等智能化改造构建了低空运行的“数字底座”,而航空制造、新能源、AI等产业的跨界融合,进一步催生了“硬件—服务—数据”一体化的生态体系。更值得注意的是,应用场景已突破传统农业植保、巡检等单一功能,向应急救援、医疗运输、文旅体验等多元化领域扩展,展现出万亿级市场潜力。

我们看到,低空经济的运营高度依赖于数据的精准赋能,同时又通过各类飞行活动持续生成海量数据,形成“数据驱动—数据反哺”的闭环生态。在这一过程中,气象数据扮演着至关重要的角色—它不仅是保障飞行安全的基础要素,更是提升运营效率、拓展应用场景的核心变量。中国气象局2024年12月也印发了《低空经济气象科技创新工作方案(2024-2030)》,提出要构建低空飞行“气象监测网”、低空经济“气象数字网”、低空“气象赋能网”,打造低空经济气象数字底座,赋能低空经济新质生产力高质量发展。

本期《气象数据价值白皮书》立足气象数据的战略价值,系统解构气象数据对低空经济的双向赋能机制:一方面,通过气象数据的深度挖掘与应用,为低空经济运营提供全天候、全空域的环境感知与决策支持;另一方面,基于低空运营产生的海量环境监测数据,反哺气象模型迭代升级,形成“感知—计算—应用”的增强闭环。

本期《气象数据价值白皮书》的研究进一步聚焦三大核心命题:首先,构建适配低空特性的高质量气象数据集,从数据代表性、准确性、颗粒度对称三大维度突破,并通过多源异构数据的融合治理实现价值跃迁;其次,构建跨机构、跨地域的可信数据空间,保障气象数据在跨主体场景下的顺畅流通和高效使用,破解“数据孤岛”对协同创新的制约;第三,构建气象与低空数据的价值转化双循环体系:在产业应用层面,着力推进气象与低空数据在交通、物流、旅游、能源、城市管理等重点领域的深度融合,构建可持续的商业化运营模式;在资本运作层面,基于产业场景创造的经济价值,构建多层次金融创新体系,打通数据要素向资本要素转化的市场化通道,实现产业与资本的协同发展。

这些探索不仅关乎技术可行性,更是对“数据要素×低空经济×气象服务”融合生态的前瞻性思考与实践,诚邀各界同仁共绘这一新兴领域的创新图景。

01

气象数据与低空经济的双向赋能

气象数据对于低空经济发展至关重要

低空经济的运行中面临着独特的挑战：低空大气环境的高度复杂性与剧烈变化性。强对流活动频发、能见度多变、微尺度天气过程（如风切变、湍流、结冰等）现象显著高于中空高空，这些气象要素直接构成了低空飞行器安全运行与高效运营的关键制约因素。因此，气象数据不再仅仅被视为辅助信息，而是保障低空经济安全、高效、规模化发展的核心基础设施和关键性生产要素。气象数据在低空经济发展中的核心重要性体现在：



气象数据对于低空经济发展至关重要

01 气象数据是飞行安全保障的基石

精准、实时、高分辨率的气象监测与预警数据是规避气象风险、保障人机安全的生命线。

02 气象数据驱动提升运营效率

精细化气象预报与实况数据是优化低空经济运营流程的核心驱动力。

03 气象数据是产业深度融合的催化剂

专业化、场景化的气象服务是释放低空经济在各垂直领域价值的关键。

04 气象数据是制度体系构建的核心锚点

制度保障、动态空域、智能调度三位一体协同，将促使气象数据作为“智慧引擎”，推动低空经济从规避风险向驾驭风险升级。

1. 气象数据是飞行安全保障的基石

风切变、湍流、结冰、低云、低能见度、雷暴等微尺度天气现象对飞行器稳定性和操控性构成直接威胁。精准、实时、高分辨率的气象监测与预警数据是规避气象风险、保障人机安全的生命线，也是保障大规模、常态化的低空飞行活动的首要前提。

2. 气象数据驱动提升运营效率

低空飞行活动（如物流运输、通勤摆渡、空中游览）对效率和成本高度敏感，易受不利天气影响而导致延误、绕航、能源效率下降。精细化气象预报与实况数据是优化低空经济运营流程的核心驱动力。它支撑动态航路规划以规避不利天气、缩短飞行距离；赋能起降时间窗口精准预测，最大化利用空域资源；指导飞行器（尤其是电动飞行器）的能源管理系统优化，提升续航能力与任务持久力。

3. 气象数据是产业深度融合的催化剂

不同低空应用场景（如物流、农业、应急、文旅）对气象条件有差异化的、精细化的要求，例如，保障医药冷链物流的温度与湿度精准控制、指导农业植保在最佳气象窗口施药、为空中应急救援提供实时气象保障、提升游客空中观光体验等。专业化、场景化的气象服务是释放低空经济在各垂直领域价值的关键，驱动价值链融合与创新业态涌现。

4. 气象数据是制度体系构建的核心锚点

低空经济的规模化发展需要通过顶层制度设计打通行政壁垒，实现军地民协同管理，而建立气象信息跨部门跨地域共享是建立协同管理体系的有效锚点。比如在空域管理层面，建立基于多部门数据的“气象适应性”动态分区体系，根据气象条件精细划分空域类型并设定开放规则，并结合数字化空域地图实时叠加风险信息来实现多部门的协同空域管理。

用于低空经济领域的核心气象数据

低空经济的规模化发展对气象数据的精细化、立体化提出了更高要求，而气象数据的深度应用也推动了低空经济场景的拓展与安全保障能力的提升。用于低空经济的核心气象数据通常包括：



1. 基础气象要素数据

包括气温、湿度、气压等基础参数，是飞行器性能计算与航线规划的基石。比如气温变化直接影响空气密度，进而影响飞行器升力；湿度一方面影响空气密度和能见度，同时高湿度也会导致飞行器电子设备腐蚀、短路、失效。气压与密度正相关，直接影响飞行器的动力需求和续航能力，同时局地气压突变引发阵风也会影响飞行稳定。

2. 风场数据

涵盖风速、风向、风切变及垂直风廓线信息，直接影响气动特性与稳定性、续航与能效、导航与定位精度等核心指标，是低空飞行安全的核心影响因素。比如某气象局通过深度学习解析风廓线雷达数据，构建垂直风切变气候规律模型，实现强对流天气分钟级预警。

3. 降水与能见度数据

降水强度、雾/霾导致的能见度变化直接影响目视导航与起降安全。比如通过机器学习将能见度实况产品分辨率提升，在重污染天气中显著提高监测精度，也可为物流无人机提供实时风险预警。

4. 特殊天气现象数据

雷暴、强对流、微下击暴流等极端天气是低空飞行的重大威胁。比如某气象局通过输入120米高度风场、云底高度等数据，即可利用AI模型生成气象风险等级报告，准确识别颠簸区域。

5. 垂直气象剖面数据

不同高度层的气象参数分布对多高度作业的飞行器至关重要，可精准刻画垂直风切变、湍流等风险区域。比如某气象局的低空三维风场快速更新算法，结合垂直遥感探空数据，就可为直升机、无人机动态选择最优飞行高度层提供支持。

6. 三维气象环境数据

包含云底高度、湍流强度、积冰风险等综合参数，是复杂气象条件下的决策核心，可通过整合多源数据评估通航目视飞行风险。比如某气象局主导的低空数字孪生模型，融合激光雷达、卫星遥感数据构建空域三维场景，就为低空物流、应急救援提供了立体化气象支撑。

低空经济的发展 对于气象数据的 补足与提升

低空经济的发展以场景化需求倒逼气象数据在观测能力、技术体系、服务维度等方面实现补足与升级，形成“需求牵引供给、应用反哺技术”的正向循环。这种补足与提升主要体现在五个方面：



1. 填补低空观测盲区，补足空间覆盖短板

传统气象观测侧重中高空（3公里以上）和大范围区域，3公里以下低空尤其是100米以下近地面层存在显著盲区，如城市微尺度风场、山区局地湍流等数据缺失。低空经济的核心活动推动观测网络向低空延伸：空间上，通过低空风廓线雷达、激光雷达及无人机搭载传感器，构建“固定+移动”观测网，填补10-3000米高度层数据空白；场景上，补充建筑物绕流强度、植被冠层湍流等微气象数据，解决传统观测对低空复杂环境覆盖不足的问题。

2. 推动数据维度升级，从静态基础向动态立体拓展

传统气象数据以定时定点基础要素为主，难以满足低空经济多样化场景需求。低空经济推动数据维度突破：从二维到三维，细化10-3000米垂直分层数据，支撑飞行器多高度层路径优化；从静态到动态，将数据更新频率从小时级缩短至10分钟级，部分核心空域实现分钟级刷新；从通用到专用，衍生出无人机电池舱冷凝风险指数等场景化数据，适配不同低空作业需求。

3. 创新观测技术手段，突破传统技术局限

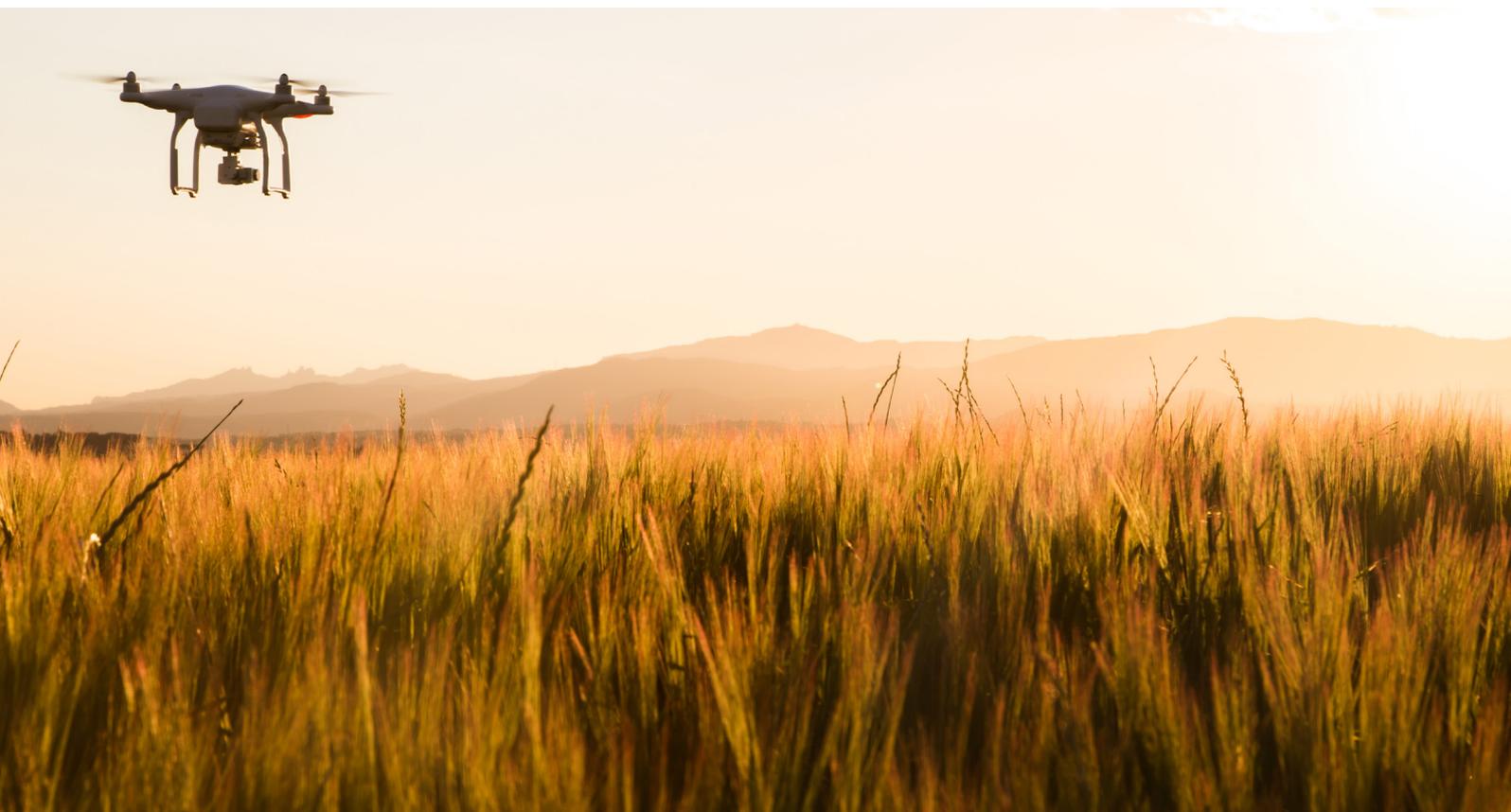
传统观测依赖固定站，移动性和时效性不足。低空经济推动技术升级：构建“固定+移动”观测网，结合低空风廓线雷达与无人机搭载传感器，实现动态监测；推动直升机、系留气球等改造为移动气象站，与地面设备形成立体观测；促进传感器微型化，适配飞行器载荷限制，同时保持测量精度，反哺传统观测设备轻量化升级。

4. 完善数据标准与服务体系，提升实用性与兼容性

传统标准难以适配低空经济多主体需求，推动标准与服务升级：制定专用标准，如《低空经济气象基础设施建设总体要求》明确数据精度与更新频率；建立跨领域交互机制，通过标准化API实现气象数据与空域、飞行器数据联动；形成分级服务体系，针对不同风险场景提供差异化服务，优化资源配置。

5. 强化数据融合与模型优化，提升预报精准度

低空经济产生的海量数据为气象模型提供训练样本，形成闭环优化：融合飞行器传感器、物联网等多源数据，提升微尺度预报精度；研发城市峡谷风场等场景化模型，适配复杂环境；推动模型快速循环更新，延长短时预报时效。



02

搭建面向低空经济的高质量气象数据集

高质量数据集的一般特征

高质量数据集是通过系统性筛选、清洗、标注、增强合成和质量评估形成的标准化数据产品，具有准确性、可验证性、多样性等特点。国家数据局将高质量数据集定位为“人工智能训练的‘原料’”，是推动“数据要素×”行动的核心资源。同时，国家数据局提出，强化标准引领，分通识、行业通识、行业专识三类建设高质量数据集。从基础质量属性、技术规范与安全性、场景适配与高级特性三个维度来看，高质量数据集通常具有如下特征：

基础质量属性	准确性	数据真实反映客观事实，无错误或误导性信息。例如，医疗数据集中的诊断编码需严格匹配临床术语标准，避免标签错误导致模型误判
	完整性	数据无缺失值或字段，覆盖所有必要维度。例如，骨肿瘤专病数据集需包含病理、基因组、随访等603个字段，确保全链条信息完整
	及时性	数据更新频率与时效性满足应用需求。金融风控数据集需实时整合交易记录，延迟数据可能导致模型失效
	一致性	数据格式、单位、编码统一。如工业传感器数据需统一时间戳和计量单位，避免多源数据冲突
技术规范与安全性	可验证性	数据来源、处理流程可追溯，支持第三方复现。元数据需包含采集设备、标注规范等信息
	安全性	符合隐私保护法规（如《数据安全法》），采用脱敏、加密技术。医疗数据集需隐藏患者身份证号等敏感信息
	有效性	数据符合业务逻辑与值域范围。例如，药品剂量数据需在合理药理范围内，异常值需标注原因
场景适配与高级特性	多样性	覆盖多场景、多类别数据分布。自动驾驶数据集需包含昼夜、雨雾等不同路况，避免模型过拟合单一环境
	无偏性	数据分布均衡，无历史或主观偏见。如人脸识别数据集需涵盖不同肤色、年龄群体，减少算法歧视风险
	相关性	数据特征与目标问题强相关。金融风险评估数据集需筛选与违约率显著相关的变量（如负债率、收入稳定性）
	即用性	经过清洗、标注、结构化处理，可直接输入模型。例如，ImageNet数据集提供标准化图像和标签，大幅降低预处理成本

面向低空经济的高质量气象数据集的特征

1. 数据代表性

气象数据的代表性遵循“以问题导向”和“以场景导向”的原则，数据需高度匹配任务需求和场景需求，要解决的问题不同或者面对的场景不同，需要配套的数据也不同。

从需要解决的问题来看，不同的任务（如飞行区域规划、飞行航线规划、飞行效率优化等）所需的气象数据各有侧重。飞行区域规划规划依赖长期气候统计数据（如10年期风场、雷暴频次），支撑空域资源分配；飞行航线规划需要实时动态数据（如秒级风场、短临预警），以实现路径动态规划；飞行运营效率提升聚焦超短期预报与参数耦合（如电池温度、逆风分量），以优化能源与调度策略。

低空飞行空域规划	低空飞行航线规划	低空飞行运营效率提升
10年尺度风场气候统计	秒级三维风场数据	逆风分量实时数据
垂直风切变气候特征	强对流短临预警产品	电池温度衰减模型
雷暴日数及强对流频次	能见度实况融合PM2.5	分钟级降水预报
低能见度发生概率	微下击暴流识别数据	光辐射强度预测
温度逆温层高度统计	云底高度垂直廓线	湿度 — 结露关联数据
云底高度分布模型	湍流耗散率实况	垂直能见度廓线
积冰指数气候特征	降水相态与强度	阵风突变预警
城市热岛强度空间分布	气压梯度力场数据	航线尺度逆温层数据
降水强度重现期数据	低空三维温度场	低空湍流动能预报
大气电场强度分布	通信衰减指数	高精度气压场数据

从面对的具体的场景来看，不同的场景（如城市峡谷、飞机起降、山地环境等）所需的气象数据也各有侧重。城市峡谷内建筑密集，热岛效应显著，需要重点关注建筑几何结构对微气候的扰动；飞机起降阶段对风场突变和能见度变化极为敏感，需要秒级实时数据支撑安全决策；山地环境导致局地环流显著，需要关注垂直气候分层和灾害性天气突变。

城市峡谷场景	飞行器起降场景	山地场景
三维风场湍流强度	微下击暴流识别	山谷风转换时序
建筑表面温度分布	跑道侧风分量	地形波湍流强度
天空可视因子 (SVF)	低空逆温层高度	局地降水增幅率
街道峡谷通风指数	云底高度与垂直能见度	垂直温度递减率
人为热排放强度	气压高度校准值	峡谷横切风风速
垂直风切变梯度	阵风前沿速度	雪线高度动态数据
局地降水再分配	跑道视程 (RVR)	岩石表面辐射温度
GNSS多径效应指数	地效区间风场	局地雾形成阈值
气溶胶垂直扩散率	积冰指数	闪电密度分布
城市冠层热储存量	湍流动能耗散率	冰川风垂直剖面

2. 数据准确性

气象数据的准确性是低空经济安全、高效运行的核心基石，缺乏精准数据，低空经济将面临不可控安全风险和运营成本激增。保证气象数据的准确性需从精密传感、科学布设、标准运维三个方面同步推进。

(1) 精密传感：硬件精度与场景适配

气象数据准确性的根基在于传感器性能的严格把控。核心参数需满足高精度要求：温度监测采用铂电阻（Pt100）传感器，误差 $\leq \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ （ 25°C ），响应时间 < 60 秒，避免数据滞后；风速监测在城市场景优选超声波传感器（精度 $\pm 0.1\text{m/s}$ ），消除机械式风杯的惯性误差，物流场景则需抗电磁干扰型号；降水计量选用称重式雨量计（误差 $\pm 1\%$ ），显著降低强降雨漏测风险。环境耐受性设计同样关键：高温地区采用硅压阻气压计（温漂 $\leq 0.1\text{hPa}/^{\circ}\text{C}$ ），沿海站点配备IP66防腐外壳。多源数据融合可进一步压缩误差，如广州平台通过激光雷达与超声波风速仪交叉验证，将风速误差降至 $\leq 0.5\text{m/s}$ 。

监测要素	传感器类型	精度/误差	响应时间	典型适用场景
温度	铂电阻（Pt100）	$\leq \pm 0.2^{\circ}\text{C}$	< 60 秒	城市热岛、农业温室
风速	超声波传感器	$\pm 0.1\text{m/s}$	< 0.1 秒	城市峡谷、无人机起降区
降水	称重式雨量计	$\pm 1\%$	实时	暴雨监测、洪涝预警
湿度	电容式传感器	$\pm 3\%\text{RH}$	< 15 秒	高湿环境、森林防火

(2) 科学布设：位置优化与密度设计

传感器布设需规避环境干扰并匹配空间异质性：

位置避障：风速仪距建筑物 ≥ 3 倍高度（如30米高楼需90米间距），防止“风影效应”导致风速低估20%；温湿度传感器置于离地1.5米通风百叶箱（通风率 $\geq 80\%$ ），避免地面热辐射致温度误差 $> 1^{\circ}\text{C}$ ；PM2.5传感器远离道路 > 100 米，规避扬尘污染。

密度分级：城市峡谷按1站/1-2 km^2 网格布设，分3层（10m/50m/100m）监测建筑涡旋；平原农业区采用1站/10-15 km^2 密度，单层（2米高度）即可满足均质墒情监测。校准要求包括风向标北向误差 $\leq 3^{\circ}$ （北斗辅助）、雨量计倾斜度 $< 0.5^{\circ}$ 。

(3) 标准运维：全生命周期质控

数据准确性依赖计量检定、智能维护与应急响应的闭环管理：

计量检定：计量检定是指依据国家法定计量技术规范，利用高精度标准器具，对气象观测设备（传感器、仪器等）的性能和量值进行强制性检测与校准的过程。它是确保观测结果量值准确、可靠并具有法律效力的基础。依据《气象法》第十四条，气象观测设备必须依法进行年度强制检定，超出检定有效期的观测数据被视为无效。在精度层面，要求省级计量标准器与国家基准的误差必须控制在 ≤ 0.1 百帕（hPa）的高标准范围内；

智能维护：智能维护是指借助物联网、传感器网络和数据分析技术，对分散的气象观测设备进行远程实时监控、故障诊断和预测性维护，以最大限度减少设备性能衰减和数据漂移。比如某省级气象平台部署的物联网诊断系统，已成功将设备故障发现、定位和通知的延迟缩短至10分钟以内，显著提升了运维效率；

应急机制：应急响应机制是针对影响气象数据准确性的突发性设备故障或异常天气（如强降水、大风、冰冻）事件，预先制定的标准化快速处置流程，旨在以最快速度恢复数据的有效性和可靠性。比如流程规定如出现强降水事件，需要在降水结束后2小时内检查雨量计，排除堵塞物。对于重大设备故障，则启动分级响应预案，依据故障类型、范围和影响程度，配置相应资源和技术力量进行处置，确保关键观测数据的及时恢复和业务连续性，为系统提供制度保障。

3. 颗粒度对称

颗粒度对称的本质是需求与成本的动态平衡，需要依据决策类型、价值密度、风险系数等动态匹配数据精度，在实际操作中，需要从时间、空间、属性三个维度调控，避免“过粗失效”与“过细冗余”，且成本控制需贯穿技术闭环。



同时，不同的场景对于气象数据的颗粒度要求也不同，比如飞机的起降环节对数据的敏感度高，所以对数据颗粒度要求精细，而平稳飞行环节更关注较大尺度的天气系统，颗粒度可适当粗略。

飞行环节	气象风险等级	关键气象参数	时间颗粒度	空间颗粒度
起降阶段	超高敏感	跑道视程 (RVR)、飞切变、垂直能见度	秒级 (≤30秒)	≤100米网格
爬升/进近	高敏感	三维风场、大气湍流能谱、污染物扩散模型	分钟级 (≤5分钟)	≤100米+垂直分层50米
巡航阶段	中低敏感	温度梯度、气压场、航路积冰概率	10-30分钟	1-5公里网格

高质量的气象数据集的获取途径

高质量的气象数据集可通过三种方式获得，包括自建监测设备、共享气象观测数据、反演气象数据，三者从维度、精度、广度相互补充，并且兼顾了成本考量，保障了气象数据集的质量和可持续发展。



1. 自建监测设备

通过架设气象监测设备采集低空气象数据是获取高质量气象数据的核心手段，能有效保障数据采集和运维作业的质量和标准统一，但自建监测设备获取气象数据通常成本较高，适用于场站、重点飞行区域、其他流量较大的区域。根据设备部署的方式和技术原理，主要分为四类监测设备：

遥感监测设备（非接触式）

- **测风激光雷达 (LiDAR)**：通过激光束探测气溶胶粒子运动反演三维风场。
- **微波辐射计**：接收大气辐射信号反演温湿度垂直廓线。
- **声雷达 (SODAR)**：利用声波散射原理探测低空风场和湍流耗散率。
- **毫米波测云仪**：测量云底高度和云层厚度，精度达±10米。

无人机载监测设备（机动式）

- **多旋翼/固定翼无人机平台**：搭载温湿度、气压、超声风速仪等传感器，飞行高度50~2000米。
- **垂直起降无人机 (eVTOL)**：集成激光雷达、多光谱相机，实现“空天地”一体化监测。
- **系留无人机**：通过线缆供电，实现72小时连续悬停观测。

地面监测设备（固定式）

- **超声风速仪**：测量三维风速风向，精度±0.1m/s，时间分辨率0.1秒。
- **智能气象观测站**：集成温湿度、降水、能见度传感器，支持5G实时回传。
- **分布式光纤传感器**：布设于桥梁、铁塔等设施，监测温度、应变场变化。

新型传感器阵列（分布式）

- **MEMS微气象传感器网络**：低成本微型传感器群，覆盖城市楼宇、农田等区域。
- **机载气象载荷（飞行器反演）**：通过无人机飞行姿态数据反演实况风速。

2. 共享气象观测数据

由于自建监测设备的成本投入较高，因此对于一般飞行区域或者低流量飞行区域，通过共享方式获取气象观测数据通常是性价比更高的选择，共享的来源包括专业气象观测数据和社会气象数据。

专业气象观测数据的提供方包括国家级机构和国际机构（举例如下）。这些专业机构的数据优点在于质量有保障，缺点在于不同机构的数据标准可能不统一，气象要素可能不对称，而且除基础数据免费外，定制化数据需要付费购买。

国家级机构	中国气象局	通过中国气象数据网开放共享33类106种数据，涵盖地面观测、高空探测、雷达、卫星等数据。
	国家卫星气象中心	提供风云系列卫星（FY-2/3/4）的0-3级数据，覆盖全球大气、海洋、地表信息。
	国家气候中心	提供历史气候数据集、再分析产品（如CLDAS实时路面数据）。
国际机构	欧洲中尺度天气预报中心	提供高精度数值模式数据。
	美国NASA	开放全球气象卫星与再分析数据（如MODIS）

社会气象数据的主要提供方通常为商业气象服务商（举例如下）。从这些商业机构获取数据的优势在于数据的要素种类可能更多，颗粒度可能更细，但缺点在于数据质量不统一，传输稳定性难保障，跨行业数据传输可能存在阻碍，数据定价和交易模式复杂，同时还需要特别关注社会气象数据的合规和确权、数据安全、知识产权保护等问题。

中国公司A	中国公司B	中国公司C
<p>核心数据产品：</p> <ul style="list-style-type: none"> 分钟级降水预报：覆盖全国3000+城市，精度达500米网格 城市热力图：融合卫星遥感与地面观测，识别建筑热扰流区 行业气象指数：物流延误指数、农业病虫害气象风险指数等20+定制化指标 	<p>核心数据产品：</p> <ul style="list-style-type: none"> 国产化观测数据：自主研发北斗探空仪、天气雷达(S/C/X波段)，覆盖全国8万+地面站 风云卫星遥感产品：风云四号250米分辨率云图、地表温度反演数据 海洋气象漂流观测：实时海温、洋流数据填补远洋监测空白 	<p>核心数据产品：</p> <ul style="list-style-type: none"> 权威灾害预警：中央气象台独家授权的台风路径、暴雨红色预警数据 海洋气象导航：全球商船航线风浪预报(精度$0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$) 金融气象衍生品：气温期货指数、降雨量保险赔付模型
美国公司A		英国公司A
<p>核心数据产品：</p> <ul style="list-style-type: none"> 分钟级预报：未来120分钟逐分钟降水预报 健康气象指数：花粉浓度、紫外线致癌风险等级模型 商业影响分析：零售客流量—天气关联模型(精度商圈级) 		<p>核心数据产品：</p> <ul style="list-style-type: none"> 全球历史气候库：1940年至今40万+站点数据(温度/降水/气压) 空气质量网格图：PM2.5、SO₂等污染物1km×1km实时分布 光伏发电预测：短波辐射强度+云层光学厚度耦合模型



3. 反演气象数据

反演气象数据主要是解决在特定限制条件下，气象数据无法通过传统的观测手段直接有效获取的问题，比如存在空间覆盖盲区（地面观测站点在海洋、高原等区域稀疏，数据不连续）、垂直剖面探测不足（地面设备难以捕捉高空大气参数）、全天候监测能力缺失（由于云层干扰，传统光学遥感在多云时失效）、高精度动态监测需求（比如城市峡谷湍流、强对流突发难以捕捉）。

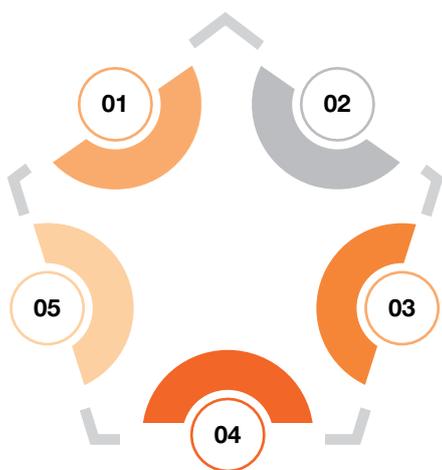
反演技术通过“推理”从已有观测数据中获取新知识，其核心在于利用人工智能、数据建模、数字孪生等工具，结合电磁波穿透特性和物理模型解算，推演出无法直接测量的参数。反演数据主要通过多平台协同与技术融合获取：**卫星平台**利用静止轨道卫星实现分钟级高频观测，反演云顶温度、降水与风场；极轨卫星提供全球覆盖的高分辨率温湿度及气溶胶数据；小卫星星座则通过掩星事件获取高精度温湿压垂直剖面。**空基平台**借助无线电掩星技术（如LEO卫星接收GPS信号偏折数据反演大气折射率），并结合无人机搭载的多波长激光雷达可实时追踪污染源扩散及气溶胶浓度。**地基平台**依托激光雷达系统（如米散射雷达、拉曼雷达）及多源协同网络（如GNSS水汽反演、微波辐射计与激光雷达联合观测）提升近地面参数精度。

其中，**无人机**在反演气象数据中贡献尤为突出，一方面是可以利用无人机载传感器采集气象数据，例如，无人机升降过程中利用温湿度传感器采集不同高度的数据，生成大气温湿度垂直廓线，结合辐射传输方程可反演地表温度及边界层参数，精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；又如，无人机热像仪获取地表辐射亮度，通过同步大气廓线数据消除大气上行/下行辐射及透过率影响，并基于多光谱数据计算地表比辐射率，最终反演高分辨率地表温度；另一方面是利用飞行器状态反演运算气象条件数据，例如，通过无人机飞行姿态数据（云台俯仰角、镜头焦距）于绝对温度影响，通过三维点云重构算法生成城市建筑群的热力分布图；又如通过无人机姿态传感器（陀螺仪、加速度计）记录飞行器抖动数据，反演大气湍流，生成垂直风切预警指标。无人机反演数据的优点在于代表性强，对飞行辅助具有连续性参考，同时，其时间、空间颗粒度可能更细，对飞行区域、航线的观测有效性可能高于地面的观测和遥测设备。但值得注意的是，受限于小型飞行器制造标准相关标准缺乏，数据采集标准不一定统一，数据传输读取协议不一定通畅，所以数据可用性不一定稳定。

03

建立服务于低空经济的可信气象数据空间

以气象数据为基础，构建服务于低空经济的可信数据空间，要实现空间内数据“供得出、流得动、用得好、保安全”，需要从多个维度综合推进：



- 01 明确数据来源方和解决数据溯源及权属问题
- 02 多源、异构数据的标准化问题
- 03 动态数据与静态数据的处理方式差异问题
- 04 数据在使用和融合中的安全保障问题
- 05 可信数据空间内各参与主体的收益分配问题

明确数据来源方和解决数据溯源及权属问题

用于构建可信数据空间的气象数据，需满足高精度、分钟级更新的要求，具体分类及数据的来源可参考下图：

数据类别	具体数据项	主要来源方
三维气象要素	温度、比湿、相对湿度、风向风速 (垂直57层, 0-3km)	气象部门(国家气象信息中心)、气象卫星、天气雷达、地面气象站
灾害性天气监测	短时强降水、雷暴大风、强对流实况 (1km/10分钟分辨率)	气象雷达、风云气象卫星、地面监测站
低能见度监测	能见度实况(1km分辨率, 重污染天气优化)	激光雷达、微型气象站、机器学习融合数据
湍流与风切变	微下击暴流、涡旋、湍流强度、垂直风切变	风廓线雷达、多波段雷达融合系统
云与结冰条件	云底高度、云量、积冰概率	垂直遥感探空设备、三维云实况分析产品
局地微尺度气象	百米级三维风场、土壤湿度、城市热岛效应	高分卫星、城市下垫面传感器、物联网观测设备

同时，除了以上气象数据，要服务好不同的场景还需要将其他来源的数据进行融合开发，比如在物流运输场景，除了以上与气象相关的数据，通常还需要动态规划航线、起降点坐标数据、配送时效、包裹状态实时监控等，这些数据的来源方可能是物流企业、空管部门、GIS地理信息平台等；又如在农业植保场景，除了气象数据，通常还需要农田边界GIS数据、作物生长状态、病虫害分布、农药喷洒记录等数据，这些数据的主要来源方有农业部门、无人机植保企业、多光谱卫星等。

要让低空经济可信数据空间中数据持有各方放心将数据供得出，并且用得好，第一步就需要解决数据溯源和数据权属确认的问题，这是确保数据可信性、安全性、合规性的核心环节，同时也是按照“谁贡献、谁收益”原则进行收益分配的基础工作。

目前的技术方案是通过区块链技术的去中心化、不可篡改、可追溯的特性，为多源异构数据的全生命周期溯源提供技术底座。比如某物流无人机配送延迟，责任方不明，低空物流数据存在争议时，可通过区块链技术，调用物流订单，检索关联的链上数据指纹（航线规划、气象数据、空域状态），再通过智能合约日志定位关键节点，通过以上路径，即可生成不可篡改的溯源报告，明确责任主体。



多源、异构数据的标准化问题

不同来源、格式、结构的数据通常存在着差异，标准不统一将阻碍数据的融合和价值释放。多源、异构数据的缺乏标准化主要由技术层面因素、业务与组织管理因素、成本与资源控制因素造成。

从技术因素来说，首先是系统与工具存在差异，不同部门或业务单元独立引入的IT系统，采用差异化的数据库架构、数据格式等，导致数据无法直接互通；其次可能存在语义歧义与结构冲突，同一字段在不同系统中的命名规则、数据类型、或业务含义不一致，造成语义层难以对齐；此外，多模态数据存在复杂性，文本、图像、传感器时序数据等非结构化与结构化数据混合，缺乏统一处理框架，导致数据无法直接匹配。

从业务与组织管理因素来说，首先是存在需求差异，比如公司市场部关注用户行为数据，而财务部聚焦交易数据，业务目标分化导致数据采集标准碎片化；其次可能存在规划缺失，如企业初期未建立数据治理体系，后期数据量激增时面临高昂改造成本，被迫维持孤岛状态；此外，还可能存在团队协作壁垒，部分团队可能因“数据主权”意识拒绝标准化。

从成本与资源控制因素来说，首先是数据标准化成本高昂，数据清洗、格式转换、系统重构等需投入大量人力与资金，中小企业资源不足时往往搁置标准化；同时，也可能存在着技术人才缺口，精通数据建模、语义对齐的专业人才稀缺，难以支撑复杂的数据治理项目。

基于以上成因分析，解决多源异构数据的标准化问题，也应考虑从技术策略、治理体系、政策与生态协同三方面来着手，实现从异构到统一的转变，并且通过制度建设和生态协同来保障数据全生命周期管理，从而使可行数据空间内的多源异构数据达到标准化和易使用状态。

1

技术策略： 从异构到统一

- 统一数据标准与语义建模
- 中间件与集成平台应用
- 智能算法驱动融合
- 分布式架构升级
- 区块链增强可信度

2

治理体系： 制度保障数据生命周期

- 组织与流程再造
- 主数据管理:建立核心数据记录,同步至所有业务系统
- 元数据驱动自动化
- 质量与安全闭环

3

政策与 生态协同

- 国家/行业标准引领
- 开放数据生态
- 技术-政策沙盒试点:在可控环境测试跨境数据融合,平衡创新与合规。

动态数据与静态数据的处理方式差异问题

低空经济可信数据空间内的数据可大致区分为动态数据与静态数据，动态数据（如实时风场、温度、能见度等）与静态数据（如地形、建筑物外观、气候区划等）的特征不同，因此，对应的采集与传输、存储与计算架构、安全与隐私保护、应用与价值释放等均不同，这不仅是出于效率和效果的考虑，同时也是出于安全和成本的考虑。

1. 动态数据与静态数据的核心差异

维度	动态数据	静态数据
更新频率	秒级~分钟级 (如风切变预警与10分钟更新)	月/季度级 (如地形高程、历史气候区划)
数据量	高频产生 (单无人机每秒万条航迹点)	固定规模 (如地理信息底图)
时效性要求	毫秒级响应 (飞行路径实时避障)	低延迟容忍 (支持长期规划)
应用场景	实时空域调度、灾害预警 (如强对流规避)	航线规划、空域分层设计 (如禁飞区划定)

2. 可信数据空间内动态数据与静态数据的差异化处理策略

(1) 数据采集与传输

动态数据需通过边缘节点实时处理（如气象传感器秒级风场分析），并采用5G-A/卫星双通道传输保障低延迟通信（如飞行避障指令 $\leq 50\text{ms}$ ）；而静态数据则依赖集中化预加载（如地形库全量缓存至分布式存储）与季度级批量更新（仅增量同步地理变更数据），大幅降低传输频次。

(2) 存储与计算架构

动态数据需采用使用时序数据库存储实时气象流数据，结合相关处理引擎实时分析风场变化趋势，再配合内存计算优化；静态数据则基于空间数据库与文件系统，通过离线建模生成静态风险图谱（如历史气候区划预测航线颠簸概率）。

(3) 安全与隐私保护

动态数据需实施传输层动态加密+区块链存证（动态加密实时风场数据，关键轨迹上链存证），并采用差分隐私技术，在实时数据聚合时注入噪声，防止反推个体信息；静态数据则通过静态脱敏+权限分层后储存（如限制仅某部门可访问原始数据），再辅以数字水印追踪（嵌入隐形标识溯源泄露责任），建立分级防护体系。

(4) 应用与价值释放

动态数据通过API实时订阅机制开放流式接口（如供物流企业订阅实时风场数据，动态优化航线），或借助联邦学习跨域融合（如多区域气象局联合训练暴雨模型，本地数据不出域，仅共享梯度参数）；静态数据则集成空间分析引擎生成空域热力图（叠加地形/气候区划评估适飞性），或为保险行业提供气候风险定价模型（如基于历史数据的农业指数保险），释放规划与风控价值。

数据在使用和融合中的安全保障问题

为构建面向低空经济的可信气象数据空间，需系统性应对数据使用和融合中的安全风险，并结合技术、管理与合规、标准化与生态建设构建多层次防护体系，以“权限最小化、流转全留痕、风险可量化”为原则，通过技术硬防护和管理软约束在效率与安全中取得平衡，并实现数据空间内数据安全的持续迭代防护能力。

1. 数据使用和融合过程中核心的安全风险

01

数据泄露与未授权访问

- **敏感数据暴露**：气象数据、飞行轨迹、空域规划等融合后可能暴露国家敏感地理信息或军事设施位置。
- **权限滥用**：多源数据提供方权限分配不当，导致越权访问或内部人员窃取数据。



02

数据篡改与完整性破坏

- **恶意注入虚假数据**：攻击者伪造气象预警（如风切变、颠簸指数），误导航线规划引发事故。
- **传输过程劫持**：数据融合时通信链路被拦截，篡改实时风场数据导致无人机失控。

03

数据滥用与权属争议

- **超范围使用**：企业将气象数据违规用于未授权场景（如转售给第三方保险机构）。
- **融合数据确权难**：多源数据聚合后难以追溯原始提供方，引发收益分配纠纷。

06

数据一致性冲突

- **多源数据矛盾**：不同精度气象数据融合时（如卫星遥感 vs 地面雷达），矛盾数据导致模型误判。
- **时空校准失效**：动态数据（秒级风场）与静态数据（地形库）时间戳错位，引发航线规划冲突。

05

技术漏洞与攻击面扩大

- **跨系统漏洞利用**：气象数据平台与空管系统融合后，单一接口漏洞可被横向攻击（如SQL注入、DDoS）。
- **边缘节点入侵**：气象传感器、无人机端数据采集设备防护薄弱，成为黑客入口。

04

隐私侵犯与合规风险

- **个人身份关联**：飞行轨迹与气象数据融合后反推用户位置信息，违反《个人信息保护法》。
- **涉密数据误用**：低空测绘数据若包含机密级地理信息，可能触发《保守国家秘密法》违规。



2. 可信数据空间的安全保障体系

(1) 技术架构：

①**确保权限动态可控**：采用RBAC（基于角色的访问控制）与ABAC（基于属性的访问控制）融合模型，依据数据敏感度分级，实施最小化授权，关键操作时（如空域数据调用）需实时验证动态身份令牌；同时构建分时熔断机制——敏感数据融合任务限定时段执行，超时或异常访问行为自动切断权限并触发告警。

②**确保全过程可管**：基于区块链技术构建全链路可溯源的数据护照系统，完整记录每次数据访问的主体身份、操作目的及精确时间戳，实现从访问到销毁的全链路存证溯源；同步部署智能合约硬性规则约束机制（例如限定气象数据仅用于物流路径优化），对违规操作实时触发账户冻结。

③**确保数据空间本质可防**：静态数据和动态数据分别采用适用算法加密储存防攻击；同时基于隐私增强计算技术贯彻“数据可用不可见”原则——原始气象数据始终留在域内，仅通过安全通道实时交换加密梯度或中间计算结果，从根本上确保低空敏感数据在共享融合场景下的全生命周期防护。

④**技术支撑体系**：实施基于敏感等级的动态数据脱敏策略（如对军事坐标泛化处理）；构建国密SM4与国际AES并行的混合加密认证体系；部署融合TEE与联邦学习的隐私计算沙盒实现安全融合计算；并建立风险监测平台实时感知异常行为等，形成覆盖可信数据空间的安全防御闭环。

(2) 管理与合规机制

①**数据分类分级制度**：参照《数据安全法》确立分级标准，将气象数据明确划分为公开级（可自由流通，如基础温湿度、气压数据）、限制级（需授权使用，如高精度风场模型、航线数据）、涉密级（禁止出境，如军事敏感区气象测绘数据）。

②**跨主体协同治理**：订立责任共担协议（可信数据空间各参与方签订合作协议，明确泄露赔偿比例），同时使用第三方机构定期审查数据用途。

③**应急响应与溯源**：采用分钟级熔断技术，在发生数据泄露后自动隔离受损节点，阻断扩散路径；同时使用跨链溯源技术，追踪融合数据泄露源头。

(3) 标准化与生态建设

在标准化与生态建设层面，构建全域互认的气象数据身份证体系，实现跨域协同追溯；同时统一空域与气象数据编码格式（如规范经纬度时间戳）；最后对外推进跨域加密协议互认（如粤港澳与长三角协议互通），对内主导开源社区共建——联合各企业发布低空数据安全开源工具包，形成标准驱动、生态互促的治理闭环。

可信数据空间内各参与主体的收益分配问题

收益分配机制在数据要素市场中扮演着枢纽性角色，其合理性关乎激发多元主体供给数据的意愿，也能破解在数据采集、清洗、开发等全链条上成本回收的瓶颈，同时还能驱动创新和优化资源配置，因此，收益分配机制的设计对于数据供得出、流得动、用得好、保安全至关重要。

在构建服务于低空经济的可信数据空间过程中，数据的收益分配机制需兼顾公平性、效率性与可持续性，应从价值贡献维度、参与主体的属性维度、构建长期可持续生态的维度进行综合考量，确保各参与主体的合理收益。

价值贡献维度

- **数据生产投入**：覆盖气象数据采集设备（如雷达、传感器）部署、维护成本及数据清洗、标注等处理成本
- **加工增值程度**：评估数据产品化过程中的技术复杂度（如AI模型训练、三维风场反演算法开发）与应用场景价值（如物流航线优化、灾害预警）
- **生态协同效应**：衡量数据在跨主体流通中激发的衍生价值（如气象数据与空管系统融合提升低空通行效率）

主体属性维度

- **公共属性主体**（政府/气象部门）：作为原始数据持有方，需保障基础数据开放与安全，并通过授权运营获取公共收益
- **开发运营主体**（企业/科研机构）：承担数据加工与产品开发风险，按市场规则获取商业回报
- **终端使用主体**（低空企业/个人）：依据数据使用频次与效益（如无人机物流企业因气象预警降低事故率）支付合理费用

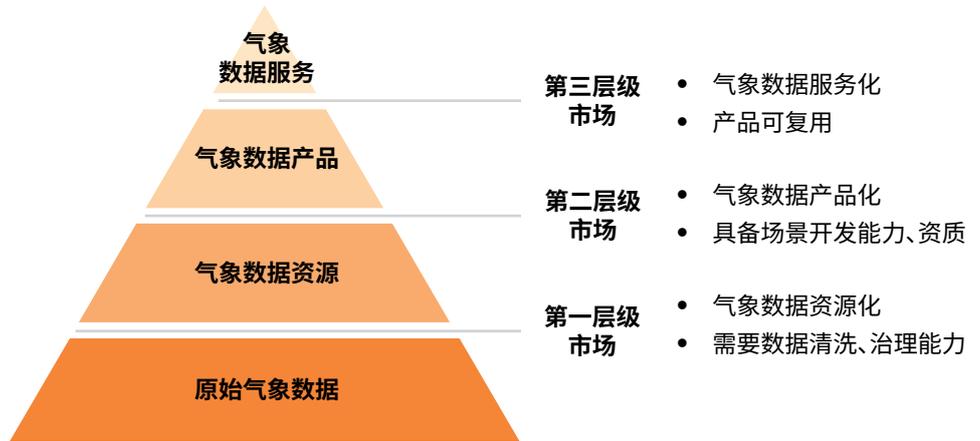
生态协同维度

- **短期激励**：通过即时分成刺激数据供给与技术创新
- **长期共生**：建立收益再投资机制，支持气象监测网络升级与标准迭代



我们在本系列第四本白皮书《探索气象数据收益分配新机制》中，也提出了气象数据生态链中的三级市场划分（第一层级市场为资源化市场，第二层级市场为产品化市场，第三层级市场为销售服务市场）以及相应的收益分配模式。资源化市场（一级）提供原始数据，主要是考虑成本投入和公共数据授权定价机制的要求，产品化市场（二级）通过加工数据形成不同场景下的数据产品，则不仅要考虑成本投入，还要根据市场接受度考虑利润水平；气象服务市场（三级）是数据产品完成开发后，如果高效、广泛触达需求方，通过对产品的复用和客户服务获得利润空间，这个市场有更多的参与方，如代理经销商，他们的存在对于繁荣数据市场有非常积极的作用，因此也要综合考虑他们的贡献及其对应的价值和报酬。

气象数据收益分配机制新探索



值得指出的是，收益分配机制的运行离不开对参与收益分配的数据资源、数据资产的估值定价，而数据估值定价一直是数据流通和交易的难点之一。在普华永道基于“势能模型”与贵阳数交所共同开发了全国首个数据产品价格计算器1.0版本后，双方在计算器2.0版本中聚焦于垂直场景优化，其中气象数据产品定价就是目前的重点领域，该升级版计算器将针对气象数据应用的各种商业模式，致力于对气象数据形成自动化，智能化的综合定价方式。

贵州某区域全要素数据建议定价示例

		数据覆盖的时间跨度						
人民币万元		...	1个月	1季度	1年	2年	5年	...
数据 采集 的 频 率	逐分钟	...	20	60	360	720	1800	...
	逐10分钟	...	15	45	180	360	900	...
	逐小时	...	12	36	144	288	720	...
	逐天	...	10	30	120	240	600	...
...	

通常，气象服务商会收到客户对特定区域、特定时间区间，特定数据频率的数据需求。2.0版本的定价工具，可实现输入以上需求要素后，自动输出建议定价金额，供气象服务商参考使用。

04

面向低空经济的气象数据产品和服务场景创新

在低空经济蓬勃发展的背景下，气象产品和服务创新需构建多维应用体系，其一，通过精准气象监测预警系统，为各类飞行器提供安全保障；其二，基于高精度气象预报数据，优化飞行路径规划，提高运营效率；其三，针对不同行业应用场景，开发专业化气象服务方案；其四，探索气象数据与金融服务的创新结合，为行业发展提供风险管理支持，推动“气象+金融”的跨界融合。这种全链条、场景化的服务创新，将有效释放低空经济的社会价值和商业潜力。

场景创新领域	创新方向	典型产品
保障飞行安全	1.精准规避高风险天气	<ul style="list-style-type: none"> • 三维低空风场实况分析产品 • 强对流短临预警网格产品 • 百米级能见度实况网格产品 • 微下击暴流识别算法产品
	2.强化低空监测预警能力	
	3.支撑智能决策与规划	
提升运营效率	1.路径动态优化	<ul style="list-style-type: none"> • 航线动态优化预报系统 • 逐分钟三维气象扫描产品 • 低空三维温度/湿度预报 • 风电场协同调度预报产品
	2.飞行窗口精准把控	
	3.空域资源高效利用	
赋能高气象敏感性行业	1.农业植保领域	<ul style="list-style-type: none"> • 物流结冰潜势分析产品 • 农业植保土壤墒情实况产品 • 低空文旅适飞指数产品 • 应急救援热力图产品
	2.电力巡检领域	
	3.应急救援领域	
激发金融创新	1.创新风险定价模型	<ul style="list-style-type: none"> • 温度指数衍生品 • 寒潮指数保险产品 • 低空物流天气期货 • 绿色信贷气候风险评估模型
	2.拓展金融衍生工具	
	3.赋能绿色投资	

保障飞行安全

气象数据与服务通过精密监测、智能预警、场景适配，成为低空飞行安全的核心防线，既规避及时气象风险，又支撑长期空域资源规划，为低空经济规模化发展奠定了安全基石。

1.精准规避高风险天气：通过高时空分辨率的三维实况网格产品（如百米级水平分辨率、50米垂直分辨率、分钟级更新），可实时监测风切变、低能见度、强对流等危险天气，帮助飞行器动态调整航线，显著降低事故风险；

2.强化低空监测预警能力：利用风廓线雷达、激光雷达等设备实时采集低空风场、湍流数据，结合AI模型（如颠簸指数、雷暴大风短临预警）实现强对流天气的分钟级预警，为起降和飞行过程提供即时避险支持；

3.支撑智能决策与规划：基于城市信息模型（CIM）和数字孪生技术构建低空气象服务平台，融合地理、建筑数据与气象实况，预演微尺度风场效应，优化航线设计并评估适飞条件，提升调度安全性与效率；

4.优化飞行器能耗管理：由于低空飞行器存在大量的电动设备，在不同气温、湿度、垂直水平风场下，低空飞行器的电池的电能输出和电能效率会有较大波动，因此，高分辨率准确的气象数据可以有效为飞行的能耗管理和辅助做出指导，保障高效用能和飞行安全。

提升运营效率

在低空经济领域，精细化气象服务已成为提升运营效率的关键支撑。通过高精度气象预报与智能调度系统的深度融合，运营商可以动态优化航线规划，有效减少天气因素导致的延误和空载；也可以精准把握飞行窗口，增强飞行作业的效果和稳定性；还可以统筹规划空域资源，提升空域使用效率。这种数据驱动运营模式，使气象数据成为提升效率、降低成本的核心生产要素。

1.路径动态优化：通过分钟级更新、百米级分辨率的三维实况网格（如风场、湍流数据），飞行器可实时规避逆风区、强对流等高风险区域。例如某无人机物流企业依托秒级风场数据动态调整航线，配送效率提升30%，能耗降低12%，同时通过强对流分钟级预警，备降率下降79%；

2.飞行窗口精准把控：基于气象风险指数（如颠簸指数、结冰概率），运营商可科学规划任务时段，例如某农业无人机企业通过实时接入微气象数据流，能动态调节飞行高度与速度，当系统检测到风速或颠簸指数超阈值时自动触发降速机制，在保证施药精度的同时将单日有效作业面积提升35%，农药利用率同步提高20%；

3.空域资源高效利用：基于数字孪生技术融合建筑群风廊、地形数据，预演微尺度风场效应，构建厘米级精度的城市三维数字底座，辅助空域规划，提升空域使用效率。如某城市基于气象数据等多源数据，构建智能中枢，实现空域资源高效分配与风险预测，该智能中枢使空域资源日利用率从35%提升至68%，飞行冲突预警响应时间缩短至毫秒级；

赋能高气象敏感性行业

在全球气候变化日益显著的背景下，气象服务正经历着从传统通用型预报向精细化场景解决方案的深刻变革，在对气象条件高度敏感的行业（如农业植保、电力巡检、应急救援等），通过建立“气象要素—行业参数—决策阈值”的智能关联模型，开发出具有高时空分辨率的定制化服务产品包。

1. 农业植保领域

气象数据赋能现代农业，能助力于**1) 科学化决策**（如某地基于风速、相对湿度、无降水概率的复合气象阈值，构建农药喷洒动态决策算法，将传统“经验判断”转化为可量化的数字操作模型，使施药窗口期预报准确率达90%）、**2) 作业效能倍增**（如某地通过无人机载气象传感终端实时监测低空微环境，在最优气象参数组合下，实现单位作业面积耗时减少35%，农药有效沉积率提升20%，农药漂移污染降低52%）、**3) 灾害防控前移**（如某地采用QX/T 665-2023标准开发的“气象—病害”耦合预警系统，通过积温、连阴雨等12项指标，提前72小时预测小麦赤霉病发生概率，准确率达87.3%）。

2. 电力巡检领域

通过气象数据赋能，电力巡检可实现从被动抢修到主动防御的转变，助力于**1) 风险预警前移**（如某电网通过平台融合卫星、雷达及历史故障数据，通过高精度气象模型与设备承灾阈值的智能关联，提前预判灾害风险，在寒潮期间提前拆除覆冰地线，使气象故障率降低10%，抢修用时缩短46%）、**2) 运维效率提升**（如某公司整合多套微气象站数据，结合三维气象场动态规划无人机航线与人力部署，单次任务隐患识别效率较人工提升300%，故障定位误差控制在500米内）、**3) 灾害防控闭环**（如某地使用灾害监测预警与应急指挥管理系统，实时定位故障区域，动态调配抢修资源，结合气象实况和电网数据生成抢修优先级电子地图，实现分钟级故障定位）。

3. 应急救援领域

气象数据赋能应急救援的核心作用在于**1) 提前预警风险**（如某市依托雷达实时监测，发现监测区域内2小时雨量达预警范围，立即发布暴雨红色预警并提前识别了山体滑坡风险，触发“叫应”机制直达基层责任人，为人员转移赢得黄金时间）、**2) 优化决策响应**（如某地通过“云盾”气象预警及交通部门信息，预判道路将发生严重积水，相关部门及时响应阻断通行，避免人员伤亡和财产损失）、**3) 精准调配资源**（如某地整合气象、水利、应急数据打造“数智驾驶舱”，基于气象实况与预报，动态规划物资投放、救援队伍部署及工程调度、协调救援力量预置低洼区域，最终实现“人员零伤亡、水库零垮坝”）。

4. 文化旅游领域

气象数据赋能文化旅游，有助于**1) 精准预判景观资源，激活消费新场景**：通过高时空分辨率监测和预测模型，精准推算云海、佛光、彩虹、金色傍晚等稀有气象景观的出现时段与位置，同时支撑游客搭乘直升机或eVTOL航空器实时观赏，形成优于地面无人机模拟的沉浸式体验、**2) 优化调控文旅运营**：如依托短临预报与风险预警能力，助力景区实时优化运营决策，如某地为某徒步路线安装智能雷电预警终端，当雷电逼近5公里范围时自动关闭索道并广播疏散指令、**3) 极限运动与赛事保障**：如针对跳伞、滑翔伞等高风险活动，利用加密气象站实时监测大风、强对流天气，当风速超过安全阈值时自动触发预警，确保赛事安全启停。

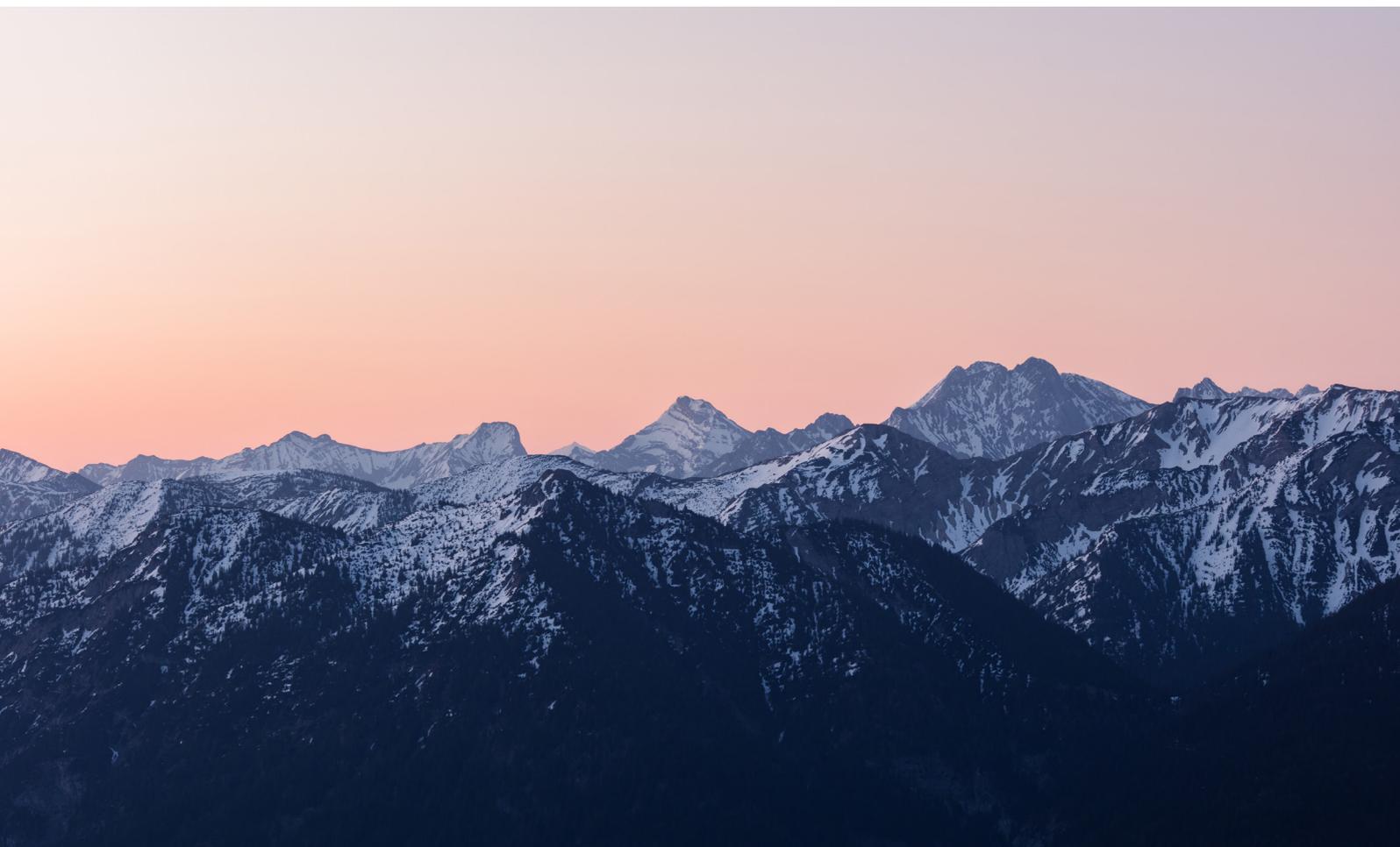
激发金融创新

气象数据通过量化风险、衍生工具、绿色金融三重路径，将低空经济的“天气不确定性”转化为“资本可配置要素”，既降低行业系统性风险，又吸引千亿级社会资本投入新基建，成为金融创新的核心驱动力。具体来说，金融机构通过融合高分辨率气象监测数据与动态建模，可构建区别于传统定价方式的动态风险评估体系；同时，气象数据与金融市场深度融合，可催生气温期货、天气期权等新型风险管理工具；此外，气象风险量化能力可引导资本投向气候适应性强的低空基础设施。

1.创新风险定价模型：通过高精度气象数据（如分钟级风场、湍流指数）构建动态风险评估体系，推动保险产品从“固定保费”向实时浮动费率转型。如某地保险产品——“低空天气保”结合气象预警动态调整保费（风险高峰期费率上浮15%-30%，安全时段下调20%），并引入“防控服务包”主动阻断风险，试点企业事故率降低62%，形成“数据驱动风控——优化保费——降低损失”的闭环。

2.拓展金融衍生工具：气象数据与金融工程结合，衍生出参数化保险和天气指数期货等产品。如某地基于500米级快速更新预报系统开发气象指数衍生品，当特定区域阵风概率超70%时自动触发赔付，解决传统航空保险对低空场景“定价失效”问题；同时为投资者提供风险对冲工具，缓解资本对低空项目的估值折价。

3.赋能绿色投融资：精细化气象数据支撑气候适应型金融产品设计。如某金融机构将低空气象风险纳入ESG评估体系，为抗风等级 ≥ 7 级的eVTOL设备提供优惠绿色信贷，并通过气候债券募集资金建设低空监测网。



05

面向低空经济的气象数据产品的资本化路径

气象数据产品/服务的资本化路径选择由两大核心变量驱动，其一是气象数据服务的盈利模式及其对应的收入和现金流特征，其二是资本市场不同融资方式的具体要求和当下资本市场的偏好。值得注意的是，这两大变量并非孤立存在，而是相互影响、相互促进的，盈利模式的创新往往需要资本市场的支持，而资本市场的偏好又会引导盈利模式的演进方向，这种良性互动为气象数据服务的资本化路径提供了更多可能性。

面向低空经济的气象数据产品/服务的主要盈利模式

从目前的实践来看，为低空经济服务的气象产品主要有六种盈利模式：



依托固定期限收费机制，为核心运营场景提供持续性气象保障



针对高频次、碎片化需求场景，通过实际数据接口使用量实现精准收费



按客户业务增收比例进行分成，构建深度协同的资本纽带



针对客户特定需求使用气象数据定制化开发数据产品，以项目制实现交付，收取定制化开发服务费



通过订立授权协议向第三方有偿开放特定维度的精细化数据资产使用权，实现数据资产的战略性价值转化



将气象数据知识产权嵌入融资租赁交易结构，由融资租赁公司购入后回租给服务商使用

1. 周期性订阅

周期性订阅服务按照固定期限（如年、月等）收取服务费，为用户提供持续性气象服务，适合需长期保障的场景。比如低空飞行安全监测系统通过实时监测低空风切变、湍流、能见度数据，为eVTOL运营商提供动态预警推送，可按雷达覆盖半径收取年费；又如eVTOL专属气象保障套餐，基于温湿度适应性调控数据优化电池性能，按飞行器数量收取年费，实现全周期电池管理。

2. API调用计费

API调用计费模式针对高频次、碎片化需求场景，通过实际数据接口使用量实现精准收费。比如飞行轨迹气象回溯API，为保险公司提供历史飞行的精细化气象条件分析，成为保险定损的关键工具，可按照每次轨迹查询计费；又如低空能见度监测API，其融合卫星与地面观测数据，实时输出航线能见度指数，服务景区观光直升机运营商，按次及航线长度收取服务费。

3. 收益分成

收益分成模式指按客户业务实现的增收或降本的一定比例进行分成，从而与客户形成深度绑定和战略合作关系。比如气象服务商提供百米级风场、湍流预测数据，运营商基于数据动态调整航线，降低能耗并提升准点率，气象服务商就航线优化产生的经济利益按一定比例进行分成；又比如气象服务商向无人机植保队提供基于气象数据的优化施药方案，用于提升农户亩产收益，然后按照按农户增收比例获取分成。

4. 定制化开发

针对客户特定需求，使用气象数据定制化开发数据产品，以项目制实现交付，收取定制化开发服务费。比如，气象服务商为政府空域管理部门构建城市级低空数字孪生平台，集成湍流预警与灾害事件虚拟处置推演功能，按建模节点收取服务费；又比如为大型活动运营商搭建临时空域气象监控系统，通过实时风场追踪与禁飞区动态划设，保障活动和赛事顺利进行，按单次活动保障计费。

5. 高质量数据集授权

气象服务商构建高质量气象数据集，并将其授权给企业进行模型训练，并相应收取授权费。比如，气象服务商向AI企业授予历史飞行环境数据集（如十年期全球湍流数据库）的使用权，作为航空大模型训练的底层素材库，按模型训练量阶梯式收取授权费用；又比如地理信息公司将城市建筑三维动态数据集授权给金融机构，用于训练抵押物价值实时评测模型，并收取授权费。

6. 知识产权融资租赁

气象服务商将自主研发的气象算法模型、数据产品（如三维风场预测模块、湍流AI识别系统）的知识产权（IP）评估作价，由融资租赁公司购入后回租给服务商使用。服务商通过分期支付租金保留IP使用权，同时一次性获得IP变现资金，用于迭代研发或设备采购。

气象数据产品的 资本化路径选择

资本市场的融资模式大致可分为基于债权的融资、基于股权的融资、基于资产的融资、基于收入的融资等主要方向，低空经济气象服务商可根据自身的发展阶段、盈利模式、收入规模、现金流稳定性、及目前资本市场的要求和偏好，选择适合的资本化路径，以支持企业的发展和实现企业的价值。

基于债权的融资

- 银行贷款
- 发行债券



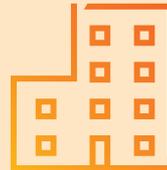
基于股权的融资

- 私募股权融资
- 上市融资



基于资产的融资

- ABS
- REITs
- RWA



基于收入的融资

- RBF



1. 基于债权的融资：

低空经济气象服务的债权融资，是指企业通过银行贷款（如政策性贷款、数据资产增信/质押贷款、绿色贷款等）和债券发行（如公司债、绿色债券）获得资金，用于气象监测设备采购、气象模型开发、气象数据平台建设和运营。这类融资核心依赖稳定现金流或抵押增信（如设备、数据资产），适用于气象基建类项目。如南京某低空气象数据服务企业以知识产权质押和未来数据收益权为增信，获得2000万元银行贷款，该贷款用于低空监测雷达网络建设，年化利率较市场低30%，显著降低企业融资成本，同时，企业凭借气象数据订阅服务（如无人机航线风场预警）的稳定订单实现还贷。又如天津农商行联合中国银行为某低空空域信息网系统项目提供9800万元融资支持，该项目聚焦低空空域信息网系统的开发与建设，深度融合气象数据的实时采集与分析功能，实现对空域动态、气象条件（如风速、能见度）的精准监测与调度，为无人机及低空飞行器提供关键航行保障，该贷款得益于政府贴息政策及银行低息定向额度支持，综合成本约为3.2%。

2. 基于股权的融资：

股权融资指企业通过出让部分股权引入战略投资人或财务投资人，获得企业发展所需的资金和资源，企业无需偿还本金和利息，而是与新股东共享企业盈利和增长。股权融资适用于高技术含量项目和新兴场景解决方案，在低空经济气象服务领域，典型的高技术含量项目包括三维AI低空气象预报系统（融合AI大模型与大涡模拟技术，实现百米级三维风场、湍流分钟级预报）、低空数字孪生空域管理平台（基于数字孪生技术构建城市级低空气象仿真系统，集成建筑群风场突变模拟、多源融合实况分析产品矩阵（利用机器学习融合卫星/雷达/地面站数据，生成1公里分辨率能见度、57层垂直风场实况产品）等，典型的新兴场景解决方案包括低空物流金融风险解决方案（融合气象数据和保险精算模型，开发天气触发式信贷产品）、低空碳汇监测与交易服务（通过eVTOL搭载传感器核证碳减排量，通过碳汇交易额分成和数据销售的方式获取收益）、低空文旅智慧气象平台（为旅游景区低空观光提供天气联动预测，提升游客体验，拉动文旅消费，获取门票收入分成）等。

股权融资针对不同阶段和成熟度的企业分为私募股权融资和上市融资，私募股权融资主要包括天使投资、VC投资、PE投资、并购等方式，如某气象科技企业，聚焦新能源虚拟电厂优化与数字农业风险管理，提供分钟级风场预报、航线风险低空航线风险评估等垂直场景服务，已完成D轮融资，估值超10亿元人民币；又如美国某气象服务商，为低空物流提供AI气象模型，动态优化无人机配送路径，被美国某大型科技公司以20亿美金收购。上市融资通常是企业发展到较为成熟的阶段登陆资本市场，如美国公司Tomorrow.io，上市估值12亿美元，募集资金2.3亿美元，该公司通过雷达卫星监测低空气象，为无人机运营商提供湍流预警SaaS平台；又如北京航天宏图，2019年科创板上市，IPO募集资金7.3亿元，当前市值53亿人民币，该公司基于卫星遥感数据为低空经济提供数字孪生空域管理平台。

3. 基于资产的融资：

基于资产的融资模式（如ABS、REITs、RWA）正在成为低空经济气象服务领域突破资金瓶颈的关键工具，通过将静态资产转化为动态资本，解决低空气象设施投资回收期长的融资难题。基于资产的融资核心需要关注资产合规性、现金流稳定性、风险对冲能力等问题，需要通过资产的选择、收益的测算、风险机制的设计来统筹安排。同时，不同类型的资产及其收益权适用的具体融资形式也不同：

ABS（资产支持证券）以可预测的稳定现金流（如气象数据订阅费、政府补贴收益权、设备租赁费等）为基础资产，通过结构化设计分散资产包风险，核心目的在于盘活存量资产，将已营运的资产或数据收益权变现，用于新技术研发或产业发展，如某城市将低空气象监测数据整合为资产包，并以未来数据服务收益（如向物流公司收取的API调用费）为基础发行ABS，募资2亿元，该笔资金专项用于全域低空气象传感网络升级。

REITs（不动产投资信托基金）适用于重资产基础设施（如气象雷达站、低空起降场、空域管理平台等），将不动产租金/使用费证券化，核心目的是吸引社会资本参与重资产建设，原始权益人实现轻资产运营，如深圳规划利用REITs融资建设1200个低空起降点及气象监测网，并考虑配套政府补贴机制等政府增信措施。

RWA（现实世界资产）融资模式利用区块链技术将实体资产或收益权转化为链上通证，核心目的在于拓展全球资本渠道。低空气象服务的三类资产可考虑采用RWA融资模式，包括气象数据资产（如分钟级风场模型、航线风险评估算法等）、收益权资产（如政府订单、API调用订阅费、保险分成合同等）、基础设施资产（如气象雷达站、低空监测设备等）。RWA是一种非常新型的融资模式，从目前资本市场的偏好来看，现金流稳定性、数据稀缺性、政策相关性是RWA资产选择的核心关注点，因此政府订单收益权、高频实时数据API调用费、碳积分核证数据是目前接受度比较高的资产类别。

4. 基于收入的融资 (RBF) :

对于处于初创期的气象服务企业，在缺乏稳定现金流的情况下，可考虑采用基于收入的融资 (RBF) 来获取企业发展所需的资金，并结合行业特性、收入来源结构及风险特征，构建分阶段、动态适配的RBF融资方案。比如，将气象服务企业的收入按照低、中、高风险进行分解，设计分层的RBF方案以降低融资风险，并增加融资吸引力。

	政府补贴订单层 (低风险)	企业API调用层 (中风险)	项目制服务层 (高风险)
融资标的	已签约但不一定到账的政府补贴 (如应急采购合同、低空经济试点补贴)	物流/无人机企业实时数据调用收入	定制化气象系统开发费 (如起降点数字孪生项目)
RBF结构	<ul style="list-style-type: none"> 按补贴到账金额一定比例分成, 设置倍数回报上限 触发条件: 补贴到账后次月启动还款 	<ul style="list-style-type: none"> 按调用收入一定比例动态分成 设置“双封顶”: 单月分成不超过总营收一定比例, 累计回报设置限额 	<ul style="list-style-type: none"> 按照首付款固定比例+尾款固定比例分成 引入“里程碑对赌”: 如项目延期超30天时分成比例减半

同时，在RBF融资方案设计时，还要考虑到气象服务的季节性波动特点，设置弹性条款，避免固定还款导致的现金流压力，如极端天气高发期启动“还款休眠期”，暂停分成1-2个月；又如从RBF融资池提取10%作为风险准备金，补贴因异常天气导致的收入下滑。

综上所述，低空气象服务的融资适配本质是风险与现金流的精准定价，债权看抵押、股权看壁垒、资产证券化看现金流、RBF看收入弹性，气象服务企业可在不同的发展阶段综合考虑最适配的融资方式，助力企业发展。

结语

低空经济的蓬勃发展，标志着数字经济与绿色转型深度融合的新纪元。气象数据作为连接物理空域与数字系统的战略纽带，已从传统的辅助角色跃升为在低空经济中保障安全、驱动效率、激发创新的核心生产要素。通过构建高质量气象数据集、可信气象数据空间、场景化气象服务创新、和气象产品金融创新，气象赋能实现了从单点突破到全链条协同的跨越：

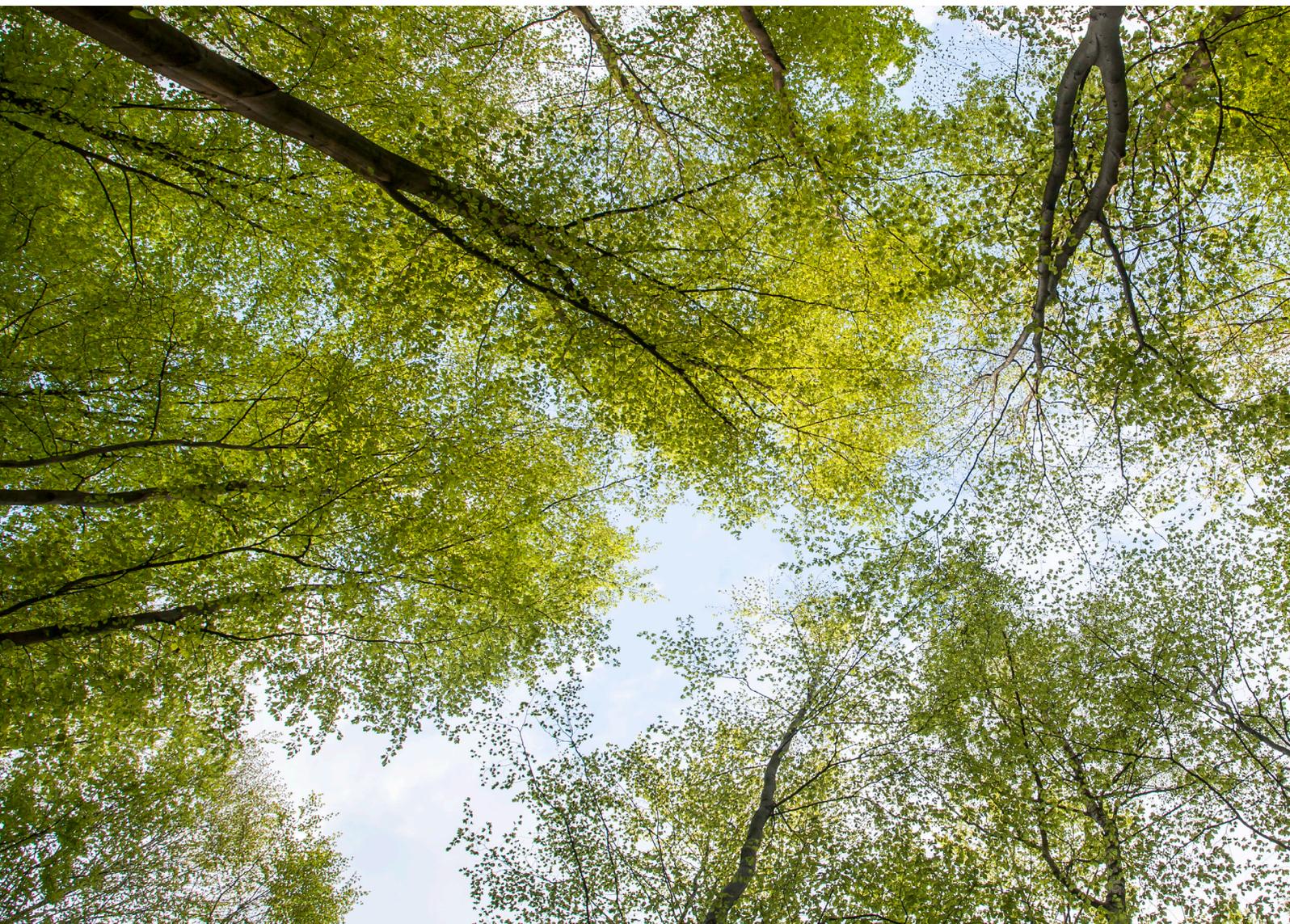
安全基石：分钟级三维风场预警、湍流识别技术为低空飞行构筑生命线；

效率引擎：动态路径优化与空域资源调度推动运营成本有效降低；

产业融合：农业植保、城市管理垂直领域依托气象数据实现智能化跃迁；

资本共振：天气衍生品、绿色债券等金融工具将气象风险转化为可配置资产。

未来，随着低空数字孪生、AI反演、区块链溯源等技术的深化应用，“气象×低空”的融合生态将进一步向实时化、智能化、资本化演进。政策与技术的双轮驱动下，气象数据不仅将重塑低空经济的价值链，更将为中国抢占全球低空产业制高点提供核心支撑。诚邀政产学研各界携手，共拓万亿级蓝海市场，绘制“空天一体”的创新图景。



参考文献

1. 《贵州省低空经济高质量发展三年行动方案（2025—2027年）》，贵州省人民政府办公厅，2025年
2. 《加快建设高质量数据集 推动人工智能赋能行业发展》，国家数据局，2025年
3. 《低空经济气象基础设施建设总体要求》，深圳气象创新研究院，2025年
4. 《人工智能气象应用服务办法》，中国气象局，2025年
5. 《2025低空经济城市发展全景研究报告》，中国信息协会，2025年
6. 《中国低空经济发展指数报告（2025）》，中国科学院，2025年
7. 《公共数据资源登记管理暂行办法》，国务院，国家数据局，2025年
8. 《公共数据资源授权运营实施规范（试行）》，国务院，国家数据局，2025年
9. 《关于建立公共数据资源授权运营价格形成机制的通知》，国务院、国家数据局，2024年
10. 《关于加快公共数据资源开发利用的意见》，国务院、国家数据局，2024年
11. 《低空经济气象科技创新工作方案（2024-2030年）》，中国气象局，2024年
12. 《可信数据空间发展行动计划（2024-2028年）》，国家数据局，2024年
13. 《关于加强金融气象协同联动服务经济社会高质量发展的指导意见》，中国气象局，2024年
14. 《气象高质量发展纲要（2022-2035年）》，国务院，2022年
15. 《“十四五”数字经济发展规划》，国务院，2021年
16. 《低空飞行服务保障体系建设总体方案》，中国民用航空局，2018年

联系我们

周伟然

普华永道全球科技、媒体及通讯行业主管合伙人
中国人工智能主管合伙人
电话：86 (755) 8261 8886
邮箱：wilson.wy.chow@cn.pwc.com

周星

普华永道中国公共事务主管合伙人
中国企业可持续发展主管合伙人
电话：86 (10) 6533 7986
邮箱：xing.zhou@cn.pwc.com

陈春

普华永道中国政府事务合伙人
中国交易咨询合伙人
贵阳主管合伙人
电话：86 (10) 6533 7627
邮箱：cindy.c.chen@cn.pwc.com

詹睿

普华永道中国并购交易服务合伙人
电话：86 (21) 2323 8261
邮箱：kate.zhan@cn.pwc.com

《释放气象数据在低空经济领域的产业价值》白皮书其他编写组成员**匡诚**

普华永道中国并购交易服务经理
电话：86 (21) 2323 3759
邮箱：vladimir.kuang@cn.pwc.com

赵灵航

普华永道中国贵阳办公室 助理兼顾问
电话：86 (851) 8861 2277
邮箱：lynn.lh.zhao@cn.pwc.com

鸣谢

本白皮书在撰写过程中得到以下机构和人员的大力支持，特此表示感谢。

贵州新气象科技有限责任公司

汤天然、徐高静、周天牧、袁晨、李从英、杨念华、丁立国、陈宇、陈清乐

贵阳大数据交易所¹

陈蔚、瞿吟洁、黄煜、刘君惠子、周艾琳、李霖泽

天地际科技（北京）有限公司

王一涵、唐宇、黄锐

1. 贵阳大数据交易所采用“一中心一公司”的体系架构，即，贵州省数据流通交易服务中心及贵阳大数据交易所有限责任公司。

