DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.02.003

全球农业低空作业空域治理与合规路径的比较研究

何勇[1, 2, 3, 4]，王月影[1, 2, 3]，何立文[1, 2, 3]，戴馥霜[1, 2, 3]，朱姜蓬[1, 2, 3*]

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院，浙江杭州，310058；2. 浙江省农业遥感与信息技术重点实验室，浙江杭州，310058；3. 农业农村部光谱检测重点实验室，浙江杭州，310058；4. 植被结构、功能与建造全国重点实验室，浙江杭州，310058)

摘要：低空经济发展正在重塑农用航空器的技术功能、组织形态与监管需求。以农业无人机为代表的农用航空器已由季节性植保装备演进为兼具生产作业、农情感知、灾害应急与社会化服务功能的低空生产单元。随着应用边界持续拓展，农业低空运行风险也由传统飞行安全问题扩展为飞行安全、作业质量、环境外部性与责任追溯相互耦合的综合治理问题。本文围绕“空域可用性—运行许可—可监管性—作业合规—执法追溯”构建比较分析框架，对中国、美国、欧盟及澳大利亚、新西兰等主要法域的农业低空治理制度进行系统梳理，并引入法规发布密度指标以及注册主体、注册无人机和操控员规模等公开数据，比较不同制度供给与规模化运行能力之间的关系。研究表明主要法域已形成强底座型、高效率授权型与风险评估服务型3类治理路径；面向农业场景的制度有效性，并不取决于单项规则数量，而取决于空域接入、数字识别、作业监管与证据留存能否形成可执行、可核验的工程化闭环；生产作业、遥感监测、应急保障与跨区社会化服务等常见应用的并行扩张，进一步强化了对差异化授权、载荷释放分级监管与跨区域协同监管的需求。基于此，提出面向任务分类、授权留痕耦合、载荷释放分级控制与农业化持续适航管理的工程化合规路径。研究结果可为我国农业低空经济治理体系完善及农业无人机规范化应用提供参考。

关键词：低空经济；农业无人机；空域管理；合规路径；数字化监管；农业低空治理制度

中图分类号：S25；S126　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-7217 (2026) 02-0021-16

何勇，王月影，何立文，戴馥霜，朱姜蓬. 全球农业低空作业空域治理与合规路径的比较研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2026，7(2)：21－36

He Yong, Wang Yueying, He Liwen, Dai Fushuang, Zhu Jiangpeng. Comparative research on airspace governance and compliance pathways for agricultural low-altitude operations across major jurisdictions [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(2): 21－36

0　引言

低空经济已成为推动农业装备智能化升级、生产性服务组织方式重构与农业新质生产力形成的重要力量[1-3]。随着飞行平台、导航控制、载荷系统与数字服务平台的协同发展，农业无人机的应用边界正由传统植保喷洒持续拓展至播撒施肥与播种、农情监测、遥感测绘、灾情评估、物资投送及跨区社会化服务等多类任务[4-8]。应用谱系的扩展表明，农业低空运行已不再是单一飞行问题，而是深度嵌入农业生产过程、资源配置过程与风险控制过程的复合系统。现有研究多聚焦于整机平台、作业参数优化、变量施用和作业效果评价等技术议题，而对低空经济背景下空域接入、运行许可、数字监管与作业合规之间耦合关系的系统讨论仍显不足。

与消费级航拍、巡检或一般测绘运行相比，农业低空作业同时具有贴地低空飞行、载荷释放、跨地块连续作业、季节性高频运行和跨区域调度等特征，其治理对象不仅涉及“飞行器是否安全运行”，还涉及“作业行为是否合规、作业结果是否可核验、责任链条是否可追溯”。尤其是喷洒、播撒等载荷释放类任务，直接关联药剂漂移、误喷漏喷、邻近敏感目标暴露及生态环境风险；而监测、应急与物流保障类任务则进一步提高了对空域接入效率、跨区域协同和任务响应时效的要求。因此，农业低空治理需要由传统以限高和禁限区管理为主的静态管制，转向覆盖空域接入、运行许可、作业质量约束、数据留痕与执法追溯的系统治理。

收稿日期：2026-03-20　　修回日期：2026-04-23

基金项目：国家自然科学基金资助项目(32572180)；山东省重点研发计划(2023CXGC010701)

第一作者：何勇，男，1963年生，浙江慈溪人，博士，教授；研究方向为智慧农业、农业航空。E-mail：yhe@zju.edu.cn

*通信作者：朱姜蓬，男，1994年生，浙江平阳人，博士，助理研究员；研究方向为农用无人机装备。E-mail：zhujianpn@zju.edu.cn

近年来,我国农业无人机制度进入系统性的完善阶段。在此背景下,农业低空作业治理的关键,已由规则条文的数量扩张转向制度链条的协同配置。基于此,本文围绕表1所示研究问题,构建“空域可用性—运行许可—可监管性—作业合规—执法追溯”的比较分析框架,并结合法规发布密度指标(regulatory release density,RRD)与注册/执照规模等量化证据,系统讨论不同法域农业低空治理路径的制度特征及其对我国的启示。

表1 农业低空作业治理研究的关键问题与分析方法

Table 1 Key research issues and analytical approaches for governance of agricultural low-altitude operations

研究问题	管理难点	分析方法	关键问题
农业低空作业与一般无人机应用的空域管理不同?	低空飞行、跨区调度,传统禁飞/限高难支撑规模化	任务与风险耦合分析	农业风险是“飞行+作业行为”耦合,不是单一飞行风险
主要法规在“授权效率”上采取了什么制度工具?	高频作业窗口短,审批慢导致灰色运行	LAANC/U-space/报备机制比较	平台化授权能显著降低管理成本
如何用量化数据支撑“政策密度—治理能力—规模化”的论证?	只讲法规不参考作业场景说服力不足	RRD指标+证照/注册规模数据	RRD-3上升与规模化治理能力增强相关

1 农业低空经济常见应用及其工程特征

农业低空经济并非农业无人机既有业务的简单叠加,而是以低空飞行平台为载体,将感知、作业、运输、调度与服务组织等要素重构为新型农业生产性服务体系。从任务属性和治理需求看,现阶段常见应用可概括为生产作业、信息感知与监测、应急保障与低空物流等类型,如图1所示[9]。不同应用在飞行高度、载荷属性、作业连续性、时效要求与责任边界等方面差异显著,是理解农业低空经济分层管理与制度适配的基础。



图1 农业低空经济典型应用场景

Figure 1 Typical application scenarios of low-altitude economy in agriculture

1.1 生产作业类应用

生产作业类应用是农业低空经济中最成熟、规模最大的一类,主要包括植保喷洒、喷粉、播撒施肥、播种、变量施药/施肥及定量投放等[3]。该类应用直接嵌入田间管理环节,具有贴地飞行、重复航线多、作业窗口集中和载荷释放连续等特征。其工程目标不仅在于完成飞行任务,更在于保证施用均匀性、边界控制精度和环境风险可控性。因此,这类任务通常需要同时满足飞行安全约束与作业质量约束,是农业低空治理中最典型的“飞行合规—作业合规”耦合场景。

1.2 信息感知与监测类应用

信息感知与监测类应用主要包括农情巡田、苗情与墒情监测、病虫害普查、多光谱/高光谱遥感、正射测图、三维重建及农田数字底图更新等[4,10-13]。该类应用以数据获取和状态识别为核心,通常不涉及载荷释放,但对航迹精度、时空分辨率、重复观测能力和数据质量一致性要求较高。在农业低空经济体系中,此类应用为精准管理、变量作业、灾害识别和经营决策提供基础数据支撑[5,14-15],其管理重点更多体现在空域接入效率、飞行边界控制、数据合规处理与平台互联互通等方面。

1.3 应急保障类应用

应急保障类应用主要包括农村灾情巡查与评估、突发灾害应急处置、抗旱防涝辅助巡查与急需物资投送等[16-18]。相较于常规生产作业,此类任务往往具有时间敏感性强、作业环境复杂、任务目标变化快等特点,部分场景还需在不利气象或临时管制条件下实施快速响应。因此,其制度需求不再局限于一般运行合规,而更强调应急授权机制、临时空域协调、任务优先级管理以及事后证据留存能力。

1.4 低空物流类应用

低空物流类应用是农业低空经济向规模化与网络化发展的重要形态,主要依托无人机系统开展农村复杂地形环境下的农资配送、农产品转运及跨区域物资调配等任务,贯穿产前、产中与产后多个环节,呈现出运行频次高、空间范围广及多主体参与等特征[19]。其典型模式包括基于订单的农资精准配送、面向产后环节的短途转运,以及灾害情境下的应急物资投送等。在工程实现层

面，该类应用依赖“飞行平台—任务调度系统—地面保障体系”的协同运行，其中多机协同调度与路径优化是提升运输效率的关键，起降节点布局及充换电设施构成基础支撑[20]。随着运行密度与跨区域流动性的提升，低空物流对空域管理与运行合规提出更高要求。

总体而言，农业低空经济的常见应用已由单一植保作业扩展为覆盖生产、感知、应急和服务组织的复合体系。应用谱系的扩展意味着治理目标必须随之拓展：对生产作业类任务，应强化载荷释放过程控制与结果核验；对感知监测类任务，应重视空域接入效率与数据合规；对应急保障与跨区运营类任务，则需突出授权效率、跨区域协同与责任可追溯性。农业低空作业监管难点日益显现。

2　农业低空作业飞行任务合规化难点

农业低空作业并非单纯的飞行活动，而是由飞行过程与农业作业行为共同构成的复合型生产活动。飞行过程涉及空域接入、航线组织、失联处置与地面安全等通航安全问题；作业行为则涉及喷洒、播撒、定量投放等操作过程及其结果控制，进一步关联环境风险、农艺效果与责任认定。因此，农业低空治理除解决“飞行是否安全”外，还需解决“作业是否合规”“结果是否可核验”与“责任是否可追溯”等问题，目前典型的作业闭环框架如图 2 所示。

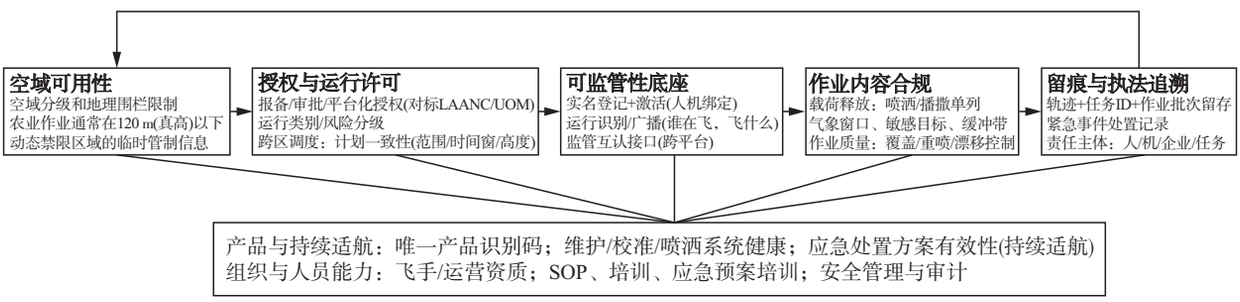


图 2　农业低空作业“空域可用性—运行许可—可监管性—作业合规—执法追溯”闭环框架

Figure 2　Closed-loop framework of agricultural low-altitude operations: airspace availability-operational authorization-regulatory observability - operational compliance-enforcement traceability

2.1　主要难点

农业低空作业面临的合规化难点主要体现在以下 3 个方面：

1）农业作业多为贴地低空、高频重复的运行方式，但仍可能触及机场净空、临时管制、禁限区及人口密集区边界等空域约束，导致“生产窗口短”与“审批/核验摩擦”并存；

2）载荷释放引入了漂移、误喷、残留与环境暴露等外部性风险，使得部分法域将喷洒/投放活动纳入更严格的运行类别或专项许可路径，形成“飞行合规≠作业合规”的制度落差；

3）农业社会化服务队伍跨县/跨市流动快、作业点分散，单靠现场管理难以覆盖全链条，必须依赖实名登记、运行识别与记录留存实现“事前核验—事中识别—事后追责”的可追溯闭环，否则容易出现监管不可见、责任难界定的问题。

2.2　风险分级与合规要点映射

为将“作业任务”转化为可执行、可检查的管理单元，按任务属性将农业低空作业进一步细分为信息采集、载荷释放、运输/保障与训练以及组织形态（群飞/跨区/应急）等类型，并从空域授权、可监管性底座、作业合规要求以及飞行与作业数据追溯四个维度构建风险等级与合规要点的对应关系。如表 2 所示，该映射旨在将不同任务的关键风险源与监管抓手对应起来，为后续法规发布密度量化、喷洒专项合规包设计以及跨区互认机制讨论提供统一的分析标准。

2.3　风险等级口径与“准入门槛”的政策关系

为保证跨场景比较的可操作性，采用四级风险分级口径：Ⅰ（低风险）：不涉及载荷释放，单机、短航时运行，远离敏感目标，作业组织相对简单；Ⅱ（中风险）：跨地块或长航时运行，包括转场飞行，或靠近受控空域与敏感区域，起降组织复杂度上升；Ⅲ（较高风险）：涉及载荷释放（喷洒或播撒）等外部性明显的作业场景，或夜间运行，靠近人群等风险情境；Ⅳ（高风险）：群飞协同、应急高时效任务、跨区规模化调度，或敏感区实施高风险药剂喷洒等高后果场景。

在此基础上进一步提出“建议准入门槛”概念，其目的并非以抽象的能力等级替代监管判断，而是将监管要求从“是否允许飞”具体化为可核验的人员岗位配置、主体制度文件、装备安全能力以及流程留痕与审计要求。通过强调“可检查、可证据化、可追溯”，该准入门槛为后续的喷洒专项合规包、跨区作业互认与应急绿色通道设计提供可操作的政策输入。

表 2 农业低空作业任务类型—风险分级—合规要点映射表

Table 2 Mapping of task types, risk levels, and compliance requirements in agricultural low-altitude operations

任务类型	典型场景	风险等级	主要风险源	空域/授权要点	监管要点	作业合规要点	数据留痕与追溯要点
信息采集类	农情巡田、病虫普查(不投放)	Ⅰ	越界、擦碰、失联	范围/高度边界清晰;敏感区邻近需报备/授权	登记激活、识别常开	边界控制、起降区安全隔离	轨迹、任务ID、异常事件
信息采集类	测绘/正射/三维建模	Ⅱ	长航时、跨地块、起降组织	跨区/受控空域需授权效率支撑	识别常开;资质核验	人群避让、起降布控	航线文件、起降点留存
运输/保障类	转场携带(不投放)	Ⅱ	载荷脱落、坠落后果升高	转场路线避敏感目标;必要时报备	识别常开;检查记录	载荷固定、防脱落	载荷清单、检查表
载荷释放类(喷洒)	常规植保喷雾	Ⅲ	漂移/误喷/环境暴露叠加飞行风险	缓冲区与禁喷区明确;敏感区更严格授权	登记激活、识别刚性化;资质分级	药剂合规、气象阈值、停喷策略、处方执行	批次、轨迹、药液流量
载荷释放类(播撒)	播种/追肥投放	Ⅲ	飞散、落点偏差、道路风险	禁投区明确;跨道路/水体加强管控	识别常开、任务ID绑定	流量/粒径、停投策略	批次、处方图、轨迹
载荷释放类(高风险药剂/敏感区)	水源地/居民区邻近喷洒	Ⅳ	高后果环境风险、公众暴露	授权更严格+更大缓冲带+公众告知	识别登记必须满足;高等级资质	药剂准入、双人核对、阈值更严、禁喷清单	核对记录、批号、告知与偏差
训练/试飞类	新机/新手试飞、标定	Ⅲ	失控概率高、飞行器不稳定	低风险空域/时间窗;必要时报备	识别常开、登记激活、试飞任务单	禁带药或最小风险;隔离布控	试飞日志、参数变更
群飞/编队协同	多机协同喷洒/播撒	Ⅳ	空中冲突、指挥链故障	分区分层/避碰策略;授权要求显著提高	每机识别登记、群控日志	指挥链职责、失联/迫降策略	群控日志、每机轨迹、时间线
跨区社会化服务	作业队跨县/跨市流动	Ⅳ	互认难、合规碎片化	计划一致性(范围/时间/高度)	登记识别作为跨区核验入口	SOP标准化、质量一致性	统一任务ID与日志格式
应急处置类	暴发病虫害紧急喷洒	Ⅳ	准备时间短、任务不可计划	应急绿色通道/预案式授权	识别登记必须满足、应急标识	公众告知、敏感边界更严	任务说明、轨迹、作业质量评估报告

3 主要国家低空运行法规与管理制度

为保证不同国家、地区法规的可比性,采用统一的分析框架对主要国家/地区的低空运行制度工具链进行对照分析。比较维度包括5个方面:①空域边界与运行限制;②授权或报备机制与运行效率;③运行识别与实名登记制度;④农业喷洒及其他载荷释放的监管路径;⑤数据追溯与执法接口。该框架强调低空治理的关键差异不仅体现在单一“限高数值”,而更多反映在授权机制的运行效率、可监管性底座的完备程度,以及是否针对载荷释放类作业场景设置独立的监管路径。

3.1 中国相关运行法规与管理制度

我国低空运行制度呈现“上位法规—运行规章—强制性技术标准”递进衔接的制度结构。国务院令第761号《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》[21]确立了分类管理与协同监管的基本原则,为无人机活动提供了统一的上位制度框架;CCAR-92《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》[22]进一步将运行活动纳入可执行的安全管理体系,明确了运行主体、运行条件与责任要求。在此基础上,GB 46750—2025(运行识别)[23]与GB 46761—2025(实名登记和激活)[24]以强制性国家标准形式,对运行识别、主体绑定和激活状态等关键要素做出统一规定,将“谁在飞、执行何种任务、是否具备识别能力以及是否可被追溯”等监管需求固化为标准化接口与测试方法,从而提升跨平台监管的一致性与工程落地性。总体而言,我国以空域分类为常态化农业低空作业提供制度入口,并以运行识别、实名登记与留痕追溯为核心构建了以民用无人驾驶航空器综合管理平台为代表的可监管性底座。与此同时,空域核验与授权报备机制正向平台化、数字化方向演进[25],但跨区域、跨部门数据接口与执法闭环的统一标准仍有待进一步明确。

3.2 美国相关运行法规与管理制度

美国低空运行制度的突出特征在于对授权效率的

高度重视，以及对农业喷洒任务设置相对独立的监管路径。在空域接入方面，联邦航空局（federal aviation administration，FAA）通过 LAANC（low altitude authorization and notification capability）系统为无人机在受控空域（一般为 120 m 及以下）内提供近实时授权入口，并同步发布可飞空域信息和临时飞行限制等运行态势数据，从而形成以平台为核心的授权与态势感知机制[26-30]。常规商业运行以 14 CFR Part 107 为主线，明确界定小型无人机的运行边界，并通过豁免/授权机制承接超出常规条件的复杂运行情形。在可监管性底座方面，Remote ID（14 CFR Part 89）确立了远程识别要求[31]，将运行识别信息与注册/序列号相关联，以提升执法可见性与运行可追溯性[32-36]。针对农业喷洒及其他载荷释放活动，FAA 以 14 CFR Part 137 为核心框架，对“dispense/spray”等作业类型设置专门的许可与审查要求，从制度层面并行管理飞行合规与作业合规[37-38]。

3.3　欧盟相关运行法规与管理制度

欧盟低空运行监管体系以风险为核心逻辑，将无人机运行划分为 open、specific、certified 三类，并按风险等级施加差异化要求[39]。对农业作业场景而言，“载荷释放”通常伴随着更高的外部性风险与地面后果，在实践上更容易进入需要运行授权与风险评估的 specific 路径，并通过 SORA（specific operations risk assessment）等方法体系，对风险识别、缓解措施、验证与持续监督进行制度化约束[40]。在空域治理方面，欧盟以 U-space 法规框架（如 EU 2021/664 等）推动低空交通服务化运行：成员国可设定 U-space 空域，并要求在该空域内使用特定 U-space 服务，以支持高密度低空运行下的安全融合与容量管理[41]。从实施现状看，欧盟的“数据治理”更多体现为隐私与合规框架（如 GDPR）对数据处理行为的约束，其功能侧重于数据合规边界界定，而非直接构成执法接口。因此，在制度对照中，GDPR 更适宜归类为数据合规约束，而非运行执法工具。

3.4　澳大利亚与新西兰相关运行法规与管理制度

澳大利亚民航安全局（civil aviation safety authority，CASA）以可执行的通用运行规则为制度基础，通过执照（RePL）与运营资质（ReOC）管理商业运行主体，并结合行业风险画像与规模统计数据为监管规则的调整与完善提供依据[42]。对于超出常规条件的运行活动，通常需要进入更严格的许可/批准路径，从而形成“规则覆盖常态、证书化承接复杂”的治理模式[42-44]。新西兰则以 Part 101 作为常规规则框架，允许在满足规则条件下开展较为广泛商业活动；当运行条件超出 Part 101 限制时，进入 Part 102 认证路径，通过证书化方式承接更高复杂度运行需求。该模式在保持规则简洁性的同时，为复杂作业提供了制度化出口，有助于降低制度摩擦并提高合规可操作性[45-46]。

在上述分析框架下，表 3 对主要国家/地区在关键制度环节与实施路径进行结构化汇总，以呈现不同法域在空域接入、授权效率、可监管性底座及载荷释放治理等方面的制度组合特征。该对照并非意在穷尽各国具体规则细节，而在于揭示不同制度工具在“安全—效率—规模化运行”目标之间的配置取向，以及其中可能制约农业低空作业规模化推进的关键短板，从而为我国相关政策优化与落地机制设计提供参照。

3.5　典型农业作业场景的制度响应对比

为避免制度比较停留于通用法规层面的描述，并进一步揭示不同法域在农业低空高风险作业中的具体管理差异，本研究引入典型农业应用场景进行穿透式对比分析。具体而言，以距离居民区约 100 m 的果园区域使用最大起飞重量约 50 kg 的植保无人机开展夜间多机协同喷洒作业作为分析场景。该场景同时包含贴地低空飞行、载荷释放、夜间运行及多机协同等关键风险要素，对应表 2 所示的Ⅳ级风险情境，能够综合反映农业低空治理体系在复杂作业条件下的制度响应方式。

1）中国：以空域管控与作业规范协同约束为主。

在该场景下，运行主体需完成无人机实名登记与设备激活，并通过民用无人驾驶航空器综合管理平台进行作业报备或空域核验。对于居民区邻近作业，相关约束主要通过空域限制、地面安全距离及禁喷区划定等方式实现。在夜间运行及多机协同条件叠加时，部分地区会提高报备或审批要求，同时强化操控员资质与运行识别的合规性约束。针对多机协同作业，每架无人机需具备独立识别能力并保持识别信号的连续可用，群体运行通常通过作业组织规范与操作流程进行管理。在作业记录方面，群控过程及指挥链条的信息留存多依赖平台或企业侧实现，制度层面尚未形成统一的日志记录与审计规范。在载荷释放方面，监管重点主要体现在农药使用规范与作业操作规程层面。针对农业喷洒作业中普遍存在的药剂漂移风险，相关要求通常通过设定风速阈值、喷洒高度及禁喷区或缓冲带范围加以控制，以降低对周边居民区及生态环境的影响。同时，连续成片作业条件下对施药均匀性与作业稳定性的要求，主要依赖操作规范与经验约束实现。整体上，相关约束以规则条款与操作标准的组合实施为主，对复杂场景的风险控制表现为条件约束的叠加。

表3 主要国家/地区低空制度工具链对照

Table 3 Comparative overview of low-altitude regulatory toolchains across major countries/regions

国家/地区	低空主场景/高度边界	授权/报备机制	运行识别	登记/主体管理	农业喷洒审批	产品/适航与标准化	执法追溯接口
中国	以低空分类空域承载农业常态作业(如W类真高120 m以下等)	平台化报备/核验机制(中国民用无人驾驶航空器综合管理平台)	GB 46750—2025[23](强制)	GB 46761—2025[24](强制:实名登记与激活)	建议形成喷洒专项合规包(作业规范+台账+留痕)	产品唯一识别等生产侧合规+强标支撑互认	任务ID/轨迹/批次留存+跨平台互认
美国	一般120 m AGL为常用边界(规则+授权)	LAANC近实时授权+TFR动态信息	Part 89 Remote ID[31]	注册制度、远程驾驶员证照体系	Part137专门路径	以适航/合规评估与规则体系承接(按场景)	授权记录、Remote ID、运行豁免/审查材料形成追溯链
欧盟	风险分级(open/specific/certified)对应不同边界	specific类运行授权+(在U-space内)服务化空域要求	以法规要求与成员国实施为主	运营人注册(成员国实施)	多落入specific:授权+风险评估(如SORA)	2019/945产品合规框架+U-space服务规则	以授权文件、风险缓解与运行记录实现追溯;数据处理受GDPR等约束
英国	一般120 m AGL(规则承接并本土化)	CAA授权体系(特定运行/运营授权)	运行识别要求与欧盟承接	Flyer/Operator ID注册体系	载荷释放一般走更严格授权路径(视任务)	产品等级/合规标识要求(承接欧系并本土化)	授权文件+运行记录+合规审计形成追溯链
澳大利亚	常用120 m AGL(above ground level)边界	常规规则+超出即许可/批准(ReOC等)	视法规要求实施(以可监管性为目标)	RePL/ReOC体系+注册制度	视任务复杂度进入更严格审批	规则+MoS/指导材料支撑合规	运行记录、许可材料、行业风险画像数据支撑治理
新西兰	常用120 m(400 ft)AGL边界	Part 101一般规则;超出进入Part 102认证	以规则要求与认证材料落实可监管性	注册/认证与运营人管理(按规则)	复杂/高风险作业可纳入Part 102路径	规则+认证材料承接复杂运行	认证文件+运行记录+审计材料形成追溯链(AirShare等提供规则转译与行业协同入口)

2)美国:以通用运行规则与专项作业许可并行管理。

在美国,由于该场景中的植保无人机最大起飞重量约为50 kg,已超过14 CFR Part 107所适用的小型无人机重量边界,因此该类农业喷洒任务通常需在大型无人机运行豁免机制、通用运行规则与农业航空作业专项许可的叠加框架下实施:一方面,25 kg及以上无人机一般需依据49 U.S.C.§44807申请特殊授权或豁免[47],并按FAA规定纳入14 CFR Part 91及相关运行条件管理;另一方面,涉及化学品或农业产品喷洒、施放的作业行为还需依据14 CFR Part 137取得农业航空经营相关许可或认证。夜间运行、多机协同、邻近居民区运行以及可能靠近非参与人员的作业情形,通常不能仅依据Part 107的一般夜航条款处理,而应在§44807豁免、Part 137许可、空域授权及其附加运行条件中明确防撞照明、操控责任、机组配置、单人控制多机限制、作业边界、应急处置和记录留存等要求。在群飞或多机协同条件下,监管重点在于明确每架无人机的独立识别、操控责任、通信链路、失联处置和运行日志要求,并通过豁免条件、操作手册或批准文件对运行方式进行约束。针对农业喷洒作业,Part 137为载荷释放行为提供了专门制度路径,其监管重点不仅包括飞行安全,还包括施药行为、喷洒边界、人员隔离、环境暴露和漂移风险控制等作业合规问题。总体而言,美国对该类复杂农业低空作业并非简单适用Part 107常规小型无人机规则,而是通过§44807豁免、Part 91通用运行规则、Part 137农业航空作业许可及附加运行条件的组合,对大型植保无人机喷洒任务实施分层管理。

3)欧盟:以风险评估驱动的特定运行授权路径为核心。

在欧盟框架下,上述场景通常不属于open类别,而需纳入specific运行类别。在此路径下,运行主体需依据SORA方法开展特定运行风险评估,对地面风险、空域冲突风险及运行复杂度进行系统分析,并结合载荷释放带来的外部性提出缓解措施。在多机协同运行情境下,风险评估需进一步覆盖空中冲突缓解策略、通信可靠性及失联处置机制等内容。群体运行的安全间隔、协同控制方式及降级策略需在评估与审批过程中明确,并作为运行条件的一部分加以约束。运行过程中,群控日志与各单机轨迹记录需保持一致性,以支撑事后核验。在载荷释放相关风险方面,SORA评估需考虑喷洒作业对周边区域的潜在影响,包括药剂漂移范围及地

面暴露风险。针对居民区邻近喷洒及连续作业情境，评估过程中需通过扩大缓冲带、限制作业窗口或调整运行方式等措施降低环境与人员风险。在引入U-space服务的区域，还需接入相应的数字化运行支持系统。该路径将运行许可建立在风险评估与条件设定基础之上。

4　加权法规发布密度与注册规模增长

农业低空作业的规模化推进，不仅取决于制度供给是否形成可执行、可核验、可互认的工具链，也依赖于合规主体与可监管对象是否在实践层面出现可观的规模增长。因此，本研究从两个维度提供量化证据：①构建加权法规发布密度（weighted regulatory release density，RRD_W）[48-49]，用于量化主要法域近5年制度供给强度与工具化程度；②整理注册用户、注册无人机与有效/持证操控员等规模指标，用于验证“制度供给—合规进入—规模化运行”的逻辑体系。

4.1　RRD指标体系与统计口径

4.1.1　指标分层

RRD_W是借鉴监管密度与政策密度研究构建的指标，用于衡量特定时期内监管文件发布的加权频度；权重依据文件法律层级、约束力或内容重要性确定。为避免将不同法律层级和功能属性的文件简单等量计数而导致的解释偏差，按治理功能对法规发布密度（regulatory release density，RRD）进行分层划分，并在统计过程中保留层级信息。具体包括：①RRD-1（规则层）：涵盖核心法律、行政法规、部门规章、实施条例及运行安全规则等，主要回答“是否允许运行、运行边界如何界定以及监管主体是谁”等基础问题；②RRD-2（配套层）：包括咨询通告、实施指南、豁免政策、运行手册模板、审查要点文件以及授权平台能力的关键升级，其功能在于影响合规成本与制度执行效率；③RRD-3（底座层）：包括运行识别、实名登记与激活、数据接口与测试方法、产品一致性与标准化等，回答“运行主体是否可被识别、运行过程是否可留痕与可追溯”，是监管可见性与跨平台互认能力的基础。该指标主要基于通用无人机法规与制度文件构建，其结果更侧重反映整体制度供给结构，而对特定应用场景（如农业载荷释放）的针对性刻画存在一定局限。

4.1.2　加权规则与主题归类

考虑到不同类型制度文件对治理能力的边际贡献存在差异，本研究在分层统计基础上引入加权计数方法，构建加权法规发布密度指标（RRD_W），并选取2021—2025年作为统一统计窗口；相应的条目级统计清单、分层归类与权重赋值结果见表4。

表4　RRD统计清单（2021—2025）

Table 4　Summary of RRD statistics (2021—2025)

国家/地区	空域边界与限制清晰度	授权/报备效率与机制化	运行识别底座	登记/激活底座	载荷释放专项路径	留痕与执法可追溯	工具链综合分（18）	RRD_W	RRD_W关键计分条目
中国	3	2	3	3	2	2	15	9	2023《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》（2024-01-01生效，条例=3）；2024 CCAR－92（运行规则=2）；2025 GB 46750—2025运行识别（强标=2）；2025 GB 46761—2025实名登记与激活（强标=2）
美国	3	3	3	2	3	3	17	5	2021 Remote ID最终规则/Part 89（运行规则=2）；2021 “Operations Over People & Night”最终规则（运行规则=2）；2022 LAANC能力扩展（授权服务关键升级=1）
欧盟	3	2	2	2	2	2	13	4	2021 U-space法规框架 EU 2021/664（实施性法规=2）；2022 AMC/GM to 2021/664（指导材料=1）；2024 Easy Access Rules for U-space（规则整合/工具化发布=1）
英国	3	2	2	2	2	2	13	3	2025《Unmanned Aircraft (Amendment) Regulations 2025》（实施性法规/法令=2）；2025—2026 UAS class marking政策与实施安排（政策工具供给=1）[50]
澳大利亚	3	2	1	2	1	2	11	2	2023 Remote ID讨论稿/公开咨询（政策工具=1）；2024 CASA《RPAS & AAM Strategic Regulatory Roadmap》（路线图=1）
新西兰	3	2	1	1	2	2	11	2	2025更新Part 101/102并引入Part 107的规则包（运行规则/体系更新=2）

基于该清单汇总得到的年度分层结构在图3中作可视化展示。

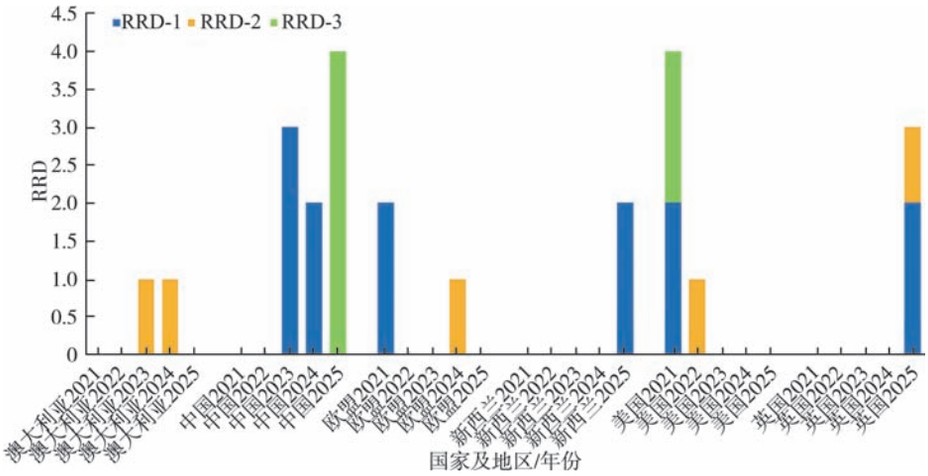


图3 主要国家/地区RRD年度堆叠图(RRD-1/2/3)

Figure 3 Annual stacked distribution of RRD categories (RRD-1/2/3) across major countries/regions

具体权重设置如下:

1)上位法、行政法规及条例:权重3;

2)部门规章、运行安全规则及实施性法规:权重2;

3)强制性国家标准或等效强约束技术要求:权重2;

4)指南性文件、整合版易用规则(easy access等)、咨询文件及授权平台关键里程碑事件:权重1。

在此基础上,所有统计条目进一步按主题归类并标注其与农业低空作业的相关程度(强/中/弱),主要主题包括空域与授权、运行许可与限制、识别与登记、适航与产品标准、载荷释放与喷洒监管,以及数据留痕与执法接口。在权重处理上,不同主题制度文件采用统一权重标准,以保证跨法域比较的一致性。该处理方式有助于在数量统计之外保留制度供给的功能结构信息,并为后续对不同法域制度供给结构差异的解释提供依据。以表4为基础,按法域与年份对制度条目分组,并依据条目的层级标签(RRD-1/2/3)与权重进行分层求和,得到各法域在每一年内规则层、配套层与技术底座层的加权发布密度。随后将三层结果进行堆叠并计算总量,据此形成"法域×年份"的分层汇总表,并进行可视化展示。

4.2 RRD的解释性结果

基于表4及图3所列统计结果,不同法域在制度供给结构上呈现出3类典型路径:

1)中国:规则层与底座层同步强化,制度供给向工程化收敛。近年来,我国在上位法规与运行规则(RRD-1)以及运行识别和实名登记等强制性技术标准(RRD-3)两条路径上同步推进,体现从规则管理走向系统治理/平台治理的趋势。通过行政法规与运行安全规则确立基本制度框架,再以强制性标准固化识别接口与测试方法,监管重点由"是否具备规则依据"逐步转向"是否具备可测试、可互认和可规模化实施的工程条件"。

2)美国:以授权效率与远程识别底座支撑高频商业运行。美国在受控空域接入方面,通过LAANC等平台化授权机制强化配套层工具(RRD-2),显著降低高频运行的合规摩擦;同时,通过Remote ID等要求夯实运行识别底座(RRD-3),增强执法可见性。整体制度结构体现为在既定规则边界内放开,以工具提升监管承载能力与运行容量。

3)欧盟:以风险分级与U-space服务化空域驱动容量治理。欧盟的制度供给更强调方法体系与服务体系的组合,即通过风险分级、风险评估与缓解框架配合U-space服务化空域运行,在高密度低空运行情境下实现容量与安全的并行治理。相较于以强制性标准密集发布为特征的路径,其优势更多体现在运行分类、风险缓解机制与服务接入的系统化设计。

需要进一步说明的是,RRD_W的提高主要反映制度供给强度与工具化程度的增强,其对农业场景治理能力的解释仍需结合高风险农业任务所依赖的具体制度条目加以理解。尤其对于载荷释放、敏感区作业、群飞协同以及跨区运行等任务而言,真正影响其规模化推进的,往往不是一般规则条文的简单增量,而是是否形成了能够支撑授权效率、运行识别、作业核验与证据留存的专门化制度安排。因而,RRD_W结果更适宜被理解为农业低空治理能力的制度供给侧表征,而非对农业治理绩效本身的直接量化。

4.3 规模化运行的量化比较

在制度供给结构持续完善的同时,合规主体与可监管对象规模的增长情况,为判断低空运行是否具备

规模化基础提供了重要的量化指标。鉴于不同法域在统计口径、指标定义与数据发布频率方面存在差异(如“注册用户/运营人”“注册无人机/机队估计”“持证操控员/Remote pilot”等概念并不完全等同),采取原始数据表结合口径说明的方式整理规模指标,并以趋势图与对照表形式呈现。为获得较强可比性的人员合规规模序列,本文选取中国、美国与澳大利亚3国公开的无人机操控员/远程驾驶员执照统计,绘制2021—2024年执照数量变化对比。

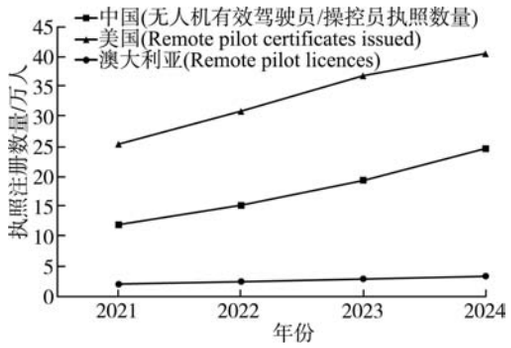


图 4　2021—2024 年部分主要国家/地区执照注册规模趋势

Figure 4　Line chart of licensing and registration scale trends in selected major countries/regions (2021—2024)

如图4所示,在具备连续年序列公开统计的样本中,持证操控员(或等效证照持有人)规模总体呈上升趋势,表明低空运行的合规参与主体正在扩张,为规模化运行提供了重要的量化指标。可将主要特征概括如下:

1)中国:注册用户、注册无人机与有效执照规模同步增长。依据《民航行业发展统计公报》口径,截至2024年底,注册用户与注册无人机均已达到百万量级,操控员执照及有效执照数量持续增加,并伴随无人机飞行小时数显著上升。该趋势反映农业及行业应用正由季节性、点状作业向常态化、高频运力转变,从而对监管体系提出由单一禁飞/限高约束向“识别登记底座—授权效率—留痕追溯”一体化能力配置的更高要求。

2)美国:Remote Pilot证照规模持续上升,运行识别与授权效率的重要性增强。FAA持续发布Remote Pilot证照数量及注册主体、机队规模等统计,用以刻画商业运行规模及其监管承载能力的扩张。随着持证操控员基数扩大,运行识别(Remote ID)与平台化授权(LAANC)在提升监管可见性、降低高频运行合规摩擦方面的边际作用更加突出。

3)欧盟/英国/澳大利亚:以运营主体注册与许可/证书规模作为补充参照。欧盟可采用“注册运营人规模”,英国可采用“Operator/Flyer ID活跃注册”,澳大利亚可采用RePL/ReOC及注册无人机等指标进行横向对照。上述指标与中国“注册用户—注册无人机—有效执照”的统计口径并不完全同构,但仍可用于刻画“合规进入规模”的变化,并通过口径标注明确可比性边界。

表 5　主要国家/地区执照和无人机注册规模数据表

Table 5　Licensing and UAV registration statistics across major countries/regions

国家/地区	年份/时间	指标对象	数量	增长信息	政策含义	参考文献
中国	截至2024年底	注册无人机	217.7万架(注册)	同比+98.5%	规模爆发要求“识别+登记+授权”数字化承载	[51]
中国	截至2024年底	无人机操控员执照	27.33万本(其中有效24.73万)	—	证照增长体现合规需求刚性化,对培训与监管提出要求	[51]
中国	截至2024年底	无人机运营合格证单位	19 979家	—	运营主体扩张推动监管从“单机合规”转向“系统合规”	[51]
美国	截至2024年12月	Remote Pilot证照	427 598(累计发放)	较2023年同期增加约59 000	证照规模支撑商业化扩张,但也放大监管可见性需求	[52]
欧盟	2025	注册无人机运营人	>200万(注册运营人)	—	区域性治理需要跨成员国互认与服务化空域支撑	[53]
英国	2024(ASR)	活跃注册Flyer+Operator	约72万活跃(同比+21.4%)	+21.4%	“活跃口径”更能反映治理承载与执行效果	[54]
澳大利亚	2024	RePL(远程驾驶员许可)	36 271(发放)	—	“许可+运营证书”体系支撑风险分层管理	[55]
澳大利亚	2024	ReOC(运营人证书)	2 802(持有)	—	运营主体许可是BVLOS/复杂农业任务的制度入口	[55]
澳大利亚	2024	注册无人机	29 876(注册)	—	注册规模与风险画像可用于评估监管强度匹配度	[55]

需要指出的是,由于各法域制度安排与数据发布体系差异,规模指标在概念上可区分为两类:一类为持证人员规模(如操控员/Remote Pilot证照),另一类为注册运营主体规模(如注册运营人、Operator/Flyer ID等)。二者反映的治理对象与责任载体并不完全一致。基于此,本文一方面在图4中优先呈现以证照为主、可获得连续序列的趋势对比;另一方面在表5中对各法域可获得的注册、许可与证照指标进行口径说明与补充对照,以提高跨区域比较的严谨性与可解释性。

5 合规数字底座

农业低空作业的规模化治理,关键不在于增加更多静态禁飞区或限高条款,而在于构建"可核验、可见、可追溯"的数字底座,使监管对象在高频、跨区、多机并行的运行环境下仍保持稳定的责任映射关系。本研究将数字底座的工程逻辑概括为:产品唯一标识(生产侧)→实名登记与激活(运营侧)→运行识别(空域侧可见)→运行与作业记录留存(执法侧可核验)。该逻辑所对应的数据对象与信息流向关系如图5所示。

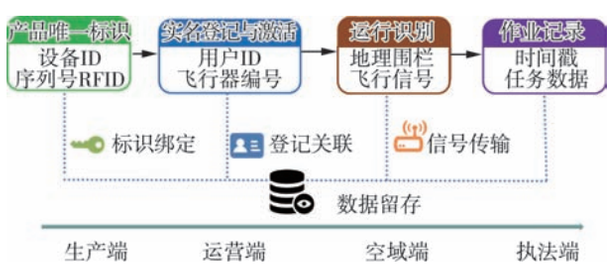


图5 农业低空作业数字底座的数据对象与信息流关系示意图

Figure 5 Schematic of data entities and information flows in the digital infrastructure for agricultural low-altitude operations

5.1 数字底座的模型

为实现跨平台互认与执法闭环,数字底座应优先统一"最小必要数据集"和稳定主键,从而支撑跨主体、跨区域的一致性核验。本研究采用"对象—主键—证据链"的表达方式,将监管相关对象定义为5类:

1)产品/设备对象:包含生产侧写入的唯一标识(如序列号/模块ID)、关键软硬件版本信息及合规声明,用于建立设备层面的唯一性与一致性基础;

2)主体对象:包含运营主体标识、责任人或操控员标识及其资质有效状态,用于明确运行责任归属;

3)任务对象:包含任务ID、作业类型(喷洒、播撒、测绘等)、地理范围(围栏或地块多边形)、时间窗以及处方图或航线文件摘要等,用于构建具体运行意图;

4)授权对象:包含授权ID及其对应的批准范围与条件集合(高度上限、范围边界、时间窗以及附加条件),用于界定运行合法性边界;

5)证据对象:包含飞行轨迹、关键事件、作业启停信息、剂量或流量(释放类)记录、异常处置记录以及摘要校验信息等,用于支撑事后核验与举证。

在跨平台监管语境下,至少形成3类稳定主键:设备主键(UAS_ID/模块ID)、任务主键(Mission_ID)与授权主键(Auth_ID)。其中,设备主键用于回答"设备归属及是否具备识别能力";任务与授权主键用于回答"执行了何种任务以及是否处于授权边界内";证据对象用于回答"是否具备复盘与举证条件"。3类主键贯穿登记、授权、识别与留痕环节,是实现跨区互认与执法一致性的基础。

5.2 实名登记与激活

农业场景具有主体流动性强、作业点分散、季节性峰值明显等特征,仅依赖静态登记不足以支撑运行期的责任界定。因而,实名登记与激活可被视为一种"可运行状态管理",在工程上更接近状态机而非一次性备案。本研究将飞行器生命周期表述为:出厂写入唯一标识→完成实名登记→完成激活并绑定运营责任→进入可运行状态→异常或失效时暂停/注销。其中"激活"环节的意义在于:

1)通过建立设备、主体和资质之间的强映射关系,降低因借证、代管或更换外壳等导致的不可追责风险;

2)为运行识别提供可核验的上游来源,保证识别信息能够稳定映射到登记主体;

3)为跨平台互认提供一致的入口条件,避免出现因登记口径不同、互认成本高而导致的碎片化问题。

与表2所示的Ⅲ、Ⅳ级高风险场景相对应,激活机制至少应支持2类可核验约束:①一致性约束(如设备标识与识别模块标识的一致性、关键配置摘要的一致性);②有效性约束(如主体资质、操控员资质的有效状态,以及设备是否处于可运行状态)。当发生识别中断、越界、失联或事故等情形时,执法侧可将审计结果回写为"暂停、复核或重新激活"的触发条件,从而把事后追责与事前准入机制衔接起来。

5.3 运行识别

运行识别的核心功能在于提高运行期可见性,使监管侧在主体数量多、频次高的条件下,能够快速识别"谁在飞、在哪飞以及是否处于异常状态"。在农业作业场景中,运行识别的工程目标不应仅表述为"是否具备识别功能",而应进一步从可用性角度衡量其效能,至少包括以下3个维度:

1)连续性:识别广播中断率、最大中断时长以及任务期间的累计中断时长;

2)覆盖性:在典型作业半径或作业区域内的接收概率与有效覆盖比例;

3）完整性：识别轨迹与本地飞控轨迹之间的位置与时间对齐误差，以及是否存在跳点、伪点等异常。

对载荷释放类任务（表 2 中Ⅲ/Ⅳ级），运行识别还应与任务对象和证据链建立最小映射关系。识别广播本身不必承载完整作业数据，但至少应能够引用对应的任务 ID 或授权标识，以便执法侧在需要时按“任务—授权—证据”的链路调取并核验相关记录。

5.4　留痕与执法取证

农业低空作业的争议往往集中在载荷释放行为及其后果。即便飞行轨迹合规，仍可能发生漂移、误喷、越界喷洒或剂量偏差等问题。因此，留痕机制不应仅等同于飞行轨迹保存，而应扩展为覆盖“飞行—作业”全过程的一体化证据链。本研究将留痕分为 2 类：

1）通用留痕（适用于信息采集类与一般飞行任务）：包括飞行轨迹、起降点、关键事件（如失联、返航、告警）以及任务 ID；

2）作业留痕（适用于喷洒、播撒等载荷释放任务）：在通用留痕基础上，补充作业启停时间、流量或剂量记录、处方图或航线摘要引用、药剂批次索引（或等效台账索引），以及与漂移风险相关的环境阈值记录（如风速、风向等）。

为提高跨平台取证效率，证据链应满足可核验性要求，即能够围绕“任务 ID—授权 ID—日志摘要（hash/签名）”形成稳定检索入口，在抽检或纠纷处置过程中实现“先用摘要定位、再按需调取细节”的分层取证模式。该证据链结构与表 2 中跨区社会化服务、应急处置及敏感区喷洒等高风险场景的追溯需求一致，也为后续喷洒风险控制与持续适航指标讨论提供数据基础。

6　面向农业场景的工程化合规路径

在数字底座已具备“可登记、可识别、可留痕”的前提下，农业低空作业的规模化运行仍需解决 3 个紧密耦合的工程问题：①空域约束如何被任务规划以可计算的形式表达并在执行过程中持续校验；②载荷释放如何从依赖作业经验的操作过程转化为风险可控、质量可核验的技术过程；③在机队高频运行的条件下，系统可靠性如何通过持续适航指标进行量化表征并形成闭环维护机制。在任务风险分级与国际制度工具链对照的基础上，提出面向农业任务的“工程化合规路径”表述方式，即通过可复现的数据对象、约束校验机制与指标体系，将“允许运行”进一步细化为“可规模化、可核验的合规运行”。

6.1　空域—任务匹配

从工程角度看，农业任务规划可被抽象为一个约束满足问题：在给定作业地块范围、作业类型与时间窗的条件下，生成满足空域限制与运行安全约束的航线、参数配置与应急策略。与一般消费级航拍不同，农业作业场景普遍具有贴地飞行、地块边界不规则、起降点临时组织以及跨地块连续作业等特征，使得计划轨迹与实际执行之间的偏差风险，以及由此引发的越界与误入敏感区域风险更加突出。为降低上述风险，可在工程实现中将空域约束区分为 2 类：

1）硬约束：包括机场净空、禁限区、临时管制区以及人口密集区边界等，属于必须满足的约束条件；

2）软约束：包括气象窗口、通信覆盖条件、地形与障碍物风险以及作业组织条件等，可在一定范围内调整，但在超出阈值时需触发降级或中断策略。

对应到任务文件与校验流程，至少应包含 3 类静态一致性校验：①空间一致性校验，用于判断航线是否完全位于授权范围内，以及是否与禁喷区或缓冲区冲突；②时间一致性校验，用于判断任务计划与实际执行是否落在授权时间窗内；③垂直一致性校验，用于判断飞行高度是否满足限高要求与作业安全距离约束。上述校验结果可进一步转化为量化指标，如越界率、最大越界距离、时间窗违规时长及高度超限次数等，并写入任务对象或审计报告，为事后抽检与跨区互认提供依据。

6.2　授权与留痕的耦合

高频农业作业面临的现实约束在于生产窗口短且对审批摩擦高度敏感。国际实践中，LAANC 与 U-space 等机制体现了“平台化授权与态势信息服务相结合”的发展方向，但从工程实现角度看，其关键不在平台形式本身，而在于授权结果能否与任务文件、运行识别信息以及证据链形成稳定映射关系。为此，本研究提出一种可复现的“授权—任务—证据”三元结构，其基本构成包括：①授权输出：Auth_ID 及其对应的空间范围、时间窗、高度上限与附加条件）；②任务对象：Mission_ID 及其关联的航线摘要/处方图摘要、地理围栏与作业类型）；③证据对象：日志摘要（hash 或签名）及其对应的轨迹、事件与作业记录。

运行中由识别信息提供实时可见性，运行后由日志提供可复盘性，执法侧则以 Mission_ID 与 Auth_ID 作为检索入口进行核验。该结构的优势在于，即便不同地区采用的平台与实现路径并不完全一致，只要主键体系与最小字段集保持一致，即可显著降低跨区核验与抽检成本。

6.3　载荷释放

与信息采集类任务相比，载荷释放类任务的外部性风险更显著，且“飞行合规”与“作业合规”之间的差

异更容易引发纠纷。为将作业过程纳入可核验的技术闭环,将喷洒或播撒任务分解为风险要素识别、过程阈值控制、结果核验3个层次:

1)风险要素识别。喷洒风险不仅来源于飞行安全,还包括漂移、误喷、残留及由此引发的地面暴露后果。关键风险要素至少包括药剂风险等级、邻近敏感目标(居民区、水源地或养殖区等)、作业高度与航速、喷幅与雾滴特性(如可获取),以及风速、风向等气象条件。该要素集合与表2中Ⅲ级和Ⅳ级风险场景一致,可作为阈值设定与审计重点的输入。

2)过程阈值控制与异常处置。在工程实现层面,可通过引入阈值与联锁策略,将作业风险转译为可执行的控制动作。当风速/阵风、定位质量、离地高度或越界风险等指标触发阈值时,系统可执行自动停喷或停投、告警提示以及返航、悬停或爬升等降级策略,并将触发原因写入事件日志字段,形成可审计证据。

3)作业质量核验与实际施用图重建。为使合规判断从"是否作业"提升至"作业是否达标",在具备流量或启停记录条件下可重建实际施用图。具体做法是以处方图/航线分段为索引,将轨迹与流量或启停状态映射到地块网格,计算覆盖均匀性、漏喷或重喷率、边界过喷率及剂量偏差等指标。相关结果既可服务于质量评估与复喷决策,也能在纠纷处置中作为定量证据,提高作业合规性的可核验程度。

6.4 农业化持续适航

在规模化运行条件下,系统可靠性构成另一项关键约束。农业作业具有季节峰值强、连续作业频繁等特征,载荷系统(如泵阀、喷头与管路)以及导航与控制系统(GNSS、飞控)长期处于高负载状态。因此,农业场景下的适航与持续适航不仅关乎"是否具备飞行能力",更关乎"是否能够长期稳定地按照质量指标运行"。本研究以失效模式为主线构建农业化持续适航指标体系,并将其与抽检以及运维机制联动,主要包括:

1)导航与控制类指标:定位有效性比例、航线横向偏差、越界事件频次、失联触发与返航成功率;

2)载荷系统类指标:流量稳定性、阀门响应时间、堵塞告警率、喷洒启停一致性;

3)识别与数据可信类指标:识别连续性、日志完整率、关键事件可复原率、摘要校验通过率。

在机队运维层面,可将飞行小时数或喷洒循环次数作为维护触发基准,对泵阀电流、压力波动与振动特征等健康指标进行趋势监测,实现预测性维护;并把运维结果写入设备对象的状态信息中,与激活、暂停机制衔接,形成"运行—监测—维护—再激活"的闭环管理流程。

7 结论与展望

在低空经济背景下,农业无人机正由以植保为主的季节性工具,逐步转变为支撑农业生产的常态化运力。这一转变使农业场景的风险结构由单一飞行风险扩展为"人—机—药—空域"高度耦合的综合风险体系:贴地低空、高频重复、跨区调度与载荷释放(喷洒或播撒)共同放大了空域边界擦碰、环境外部性暴露与责任界定的不确定性。基于此,本研究提出并采用"空域可用性—运行许可—可监管性—作业合规—执法追溯"的闭环分析框架,对主要国家和地区的低空治理制度工具链进行了结构化对照;进一步构建加权法规发布密度指标(RRD_W),将制度供给分解为规则层(RRD-1)、配套工具层(RRD-2)与数字底座层(RRD-3),并结合注册用户、注册无人机及操控员或证照规模等公开数据形成了评价体系。

综合比较显示,不同法域在"安全—效率—规模化"目标之间形成了3类具有代表性的治理组合:其一,强调登记、识别与标准接口的"强底座型"路径,通过统一身份与可见性底座提升可监管性与跨区互认效率;其二,强调近实时、平台化空域接入的"高效率授权型"路径,降低高频作业的合规摩擦并提升运行容量;其三,以风险分级与服务化空域为核心的"风险评估服务型"路径,通过方法体系与运行服务协同承接更复杂的低空运行需求。对农业作业而言,上述路径的共同指向并非简单地"放宽或收紧",而是将监管要求从静态规则转化为可执行、可验证、可审计的工程机制。

在工程实现层面,本研究进一步强调"数字底座—证据链—质量核验"在农业低空治理中的关键作用:以产品唯一标识、实名登记与激活、运行识别、任务与日志留存构成跨平台互操作主键和执法证据链,以实际施用图(as-applied map)重建将喷洒类任务从"飞行合规"推进到"作业合规与结果可核验",并以持续适航的农业化指标库覆盖高频作业环境下的关键失效模式与运维闭环。上述技术链路为制度供给向规模化运行能力转化提供了可复用的评价基线,也为后续实证研究提供了数据结构与方法框架。

未来研究可在以下3方面进一步深化:其一,完善加权法规发布密度指标(RRD_W)与规模化运行的因果识别与敏感性分析,区分规则发布强度与实际执行能力之间的滞后效应与结构差异;其二,围绕跨平台互认所需的最小字段集、主键体系与摘要取证机制开展标准化与可用性评测,形成可迁移的互操作指标体系;其三,在载荷释放任务中引入更精细的漂移风险建模

与在线阈值控制方法，并将作业质量核验与处方执行一致性评价系统化，推动农业低空从“可飞”走向“可规模化、可审计、可复盘”的高质量运行。总体而言，面向农业低空经济的治理体系建设应从“条款汇编式治理”升级为“底座可互认—授权可高效—作业可核验—证据可追溯”的系统化框架，以支撑农业无人机在复杂空域与复杂作业条件下的安全、合规与规模化发展。

参 考 文 献

[1] 兰玉彬，王朝锋，孙贺光，等．低空技术赋能智慧农业：技术体系，应用场景及挑战建议 [J]．智慧农业(中英文)，2025，7(6)：18－34.
Lan Yubin, Wang Chaofeng, Sun Heguang, et al. Low-altitude technology empowering smart agriculture: Technical system, application scenarios, and challenge recommendations [J]. Smart Agriculture, 2025, 7(6): 18－34.

[2] 何勇，王月影，何立文，等．低空经济政策和技术在农业农村的应用现状与前景 [J]．农业工程学报，2025，41(8)：1－16.
He Yong, Wang Yueying, He Liwen, et al. Current status and prospects of low-altitude economy policies and technologies inagriculture and rural areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(8): 1－16.

[3] 周志艳，明锐，臧禹，等．中国农业航空发展现状及对策建议 [J]．农业工程学报，2017，33(20)：1－13.
Zhou Zhiyan, Ming Rui, Zang Yu, et al. Development status and countermeasures of agricultural aviation in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 1－13.

[4] Saini P, Nagesh D S. A review of deep learning applications in weed detection: UAV and robotic approaches for precision agriculture [J]. European Journal of Agronomy, 2025, 168: 127652.

[5] Yadav P K, Thomasson J A, Hardin R, et al. Detecting volunteer cotton plants in a corn field with deep learning on UAV remote-sensing imagery [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107551.

[6] Gao C F, Ji X J, He Q, et al. Monitoring of wheat fusarium head blight on spectral and textural analysis of UAV multispectral imagery [J]. Agriculture, 2023, 13(2): 293.

[7] Gilliot J M, Hadjar D, Michelin J. Potential of ultra-high-resolution UAV images with centimeter GNSS positioning for plant scale crop monitoring [J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2391.

[8] Zhang Y L, Huang X R, Lan Y B, et al. Development and prospect of UAV-based aerial electrostatic spray technology in China [J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4071.

[9] 何勇，戴馥霜，朱姜蓬，等．农业低空经济应用场景及产业发展现状与趋势 [J]．智慧农业(中英文)，2025，7(6)：1－17.
He Yong, Dai Fushuang, Zhu Jiangpeng, et al. Current status and trends of application scenarios and industrial development in the agricultural low-altitude economy [J]. Smart Agriculture, 2025, 7(6): 1－17.

[10] Zhang S, Wang X R, Lin H, et al. A review of the application of UAV multispectral remote sensing technology in precision agriculture [J]. Smart Agricultural Technology, 2025: 101406.

[11] Xiao X W, Qu W H, Xia G S, et al. A novel real-time matching and pose reconstruction method for low-overlap agricultural UAV images with repetitive textures [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2025, 226: 54－75.

[12] Guo X H, Feng Q, Guo F X. CMTNet: a hybrid CNN-transformer network for UAV-based hyperspectral crop classification in precision agriculture [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 12383.

[13] Amarasingam N, Powell K, Sandino J, et al. Mapping of insect pest infestation for precision agriculture: A UAV-based multispectral imaging and deep learning techniques [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2025, 137: 104413.

[14] Zhang J, Zhang D F, Cai Z J, et al. Spectral technology and multispectral imaging for estimating the photosynthetic pigments and SPAD of the Chinese cabbage based on machine learning [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195: 106814.

[15] Yan G J, Li L Y, Coy A, et al. Improving the estimation of fractional vegetation cover from UAV RGB imagery by colour unmixing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 158: 23－34.

[16] Zhu Q L, Wang K, Liang D, et al. WLUSNet: A lightweight wheat lodging segmentation network based on UAV image [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110587.

[17] Vanexel K, Sherchan S, Liu S Y. Optimizing deep learning models for climate-related natural disaster detection from UAV images and remote sensing data [J]. Journal of Imaging, 2025, 11(2): 32.

[18] Karunanithy K, Velusamy B, Prasanth A. Remote assessments and aerial imaging using UAV for disaster management and precision agriculture with immediate response-A case study [J]. Drones for Transportation Logistics and Disaster Management, 2025: 371－398.

[19] Yao W X, Liu C L, Liu Y Z, et al. Unmanned aerial vehicle payload technology applications in agriculture and

other low-altitude scenarios: a review [J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1721484.

[20] Seo S, Lee K. Density-driven multidrone coordination for efficient farm coverage and management in smart agriculture [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2025.

[21] 中华人民共和国国务院,中华人民共和国中央军事委员会. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. [2026-02-15]. https://xzfg.moj.gov.cn/front/law/detail? LawID=1663.

[22] 中华人民共和国交通运输部. 民用无人驾驶航空器运行安全管理规则[EB/OL]. (2024-01-03)[2026-02-15]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/fgs/202401/t20240103_3980642.html.

[23] 中国民用航空局. 民用无人驾驶航空器系统运行识别规范: GB 46750—2025[S]. 中国标准出版社, 2025.

[24] 中国民用航空局. 民用无人驾驶航空器实名登记和激活要求: GB 46761—2025[S]. 中国标准出版社, 2025.

[25] 沈威力. 无人机飞行安全与管理[M]. 北京: 机械工业出版社,2024.

[26] Federal Aviation Administration. B4UFLY [EB/OL]. [2026-01-20]. https://www.faa.gov/uas/getting_started/b4ufly.

[27] Federal Aviation Administration. Temporary flight restrictions (TFRs) [EB/OL]. [2026-01-20]. https://www.faa.gov/uas/getting_started/temporary_flight_restrictions.

[28] Federal Aviation Administration. UAS facility maps [EB/OL]. [2026-01-22]. https://www.faa.gov/uas/commercial_operators/uas_facility_maps.

[29] Federal Aviation Administration. Part 107 airspace authorizations [EB/OL]. [2026-01-22]. https://www.faa.gov/uas/commercial_operators/part_107_airspace_authorizations.

[30] Federal Aviation Administration. UAS data exchange (LAANC) [EB/OL]. [2026-01-22]. https://www.faa.gov/uas/getting_started/laanc.

[31] Federal Aviation Administration. Remote identification of unmanned aircraft [EB/OL]. [2026-01-23]. https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-89.

[32] United States Government Publishing Office. Exception for limited recreational operations of unmanned aircraft [EB/OL]. [2026-01-24]. https://www.govinfo.gov/content/pkg/USCODE-2021-title49/pdf/USCODE-2021-title49-subtitleVII-partA-subpartiii-chap448-sec44809.pdf.

[33] Federal Aviation Administration. Flight restrictions in the proximity of certain areas designated by notice to airmen [EB/OL]. [2026-01-24]. https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-107/subpart-B/section-107.47.

[34] Federal Aviation Administration. Preflight familiarization, inspection, and actions for aircraft operation [EB/OL]. [2026-01-24]. https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-107/subpart-B/section-107.49.

[35] Federal Aviation Administration. Operating limitations for small unmanned aircraft [EB/OL]. [2026-01-25]. https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-107/subpart-B/section-107.51.

[36] Federal Aviation Administration. Operation in certain airspace [EB/OL]. [2026-01-23]. https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-107/subpart-B/section-107.41.

[37] Federal Aviation Administration. Processing of unmanned aircraft systems requests [EB/OL]. [2026-01-23]. https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/Order_JO_7200.23D_Processing_of_Unmanned_Aircraft_Systems_Requests_FINAL.pdf.

[38] Federal Aviation Administration. Agricultural aircraft operations [EB/OL]. [2026-01-24]. https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-G/part-137.

[39] Publications Office of the European Union. Commission implementing regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft [EB/OL]. [2026-01-20]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/? uri=CELEX:32019R0947.

[40] European Union Aviation Safety Agency. AMC & GM to regulation (EU) 2019/947-Issue 1, Amendment 3 [EB/OL]. [2026-01-20]. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/acceptable-means-of-compliance-and-guidance-material/amc-gm-regulation-eu-0.

[41] Publications Office of the European Union. Commission implementing regulation (EU) 2021/664 of 22 April 2021 on a regulatory framework for the U-space [EB/OL]. [2026-01-20]. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/664/oj/eng.

[42] Civil Aviation Safety Authority. Annual report 2024-25 [R]. Canberra, ACT, 2025.

[43] Civil Aviation Safety Authority. AC 101-01 v6.0: Remotely piloted aircraft systems-licensing and operations[EB/OL]. [2026-01-28]. https://www.casa.gov.au/remotely-piloted-aircraft-systems-licensing-and-operations.

[44] Civil Aviation Safety Authority. Review of aviation safety regulation of remotely piloted aircraft systems [R]. Canberra, ACT, 2018.

[45] Civil Aviation Authority of New Zealand. Civil aviation rules [EB/OL]. https://www.aviation.govt.nz/assets/rules/initial-issue/Rule-Part-101-Gyrogliders-and-Parasails-

Unmanned-Aircraft-Kites-and-Rockets-Operating-Rules.PDF.

[46] Civil Aviation Authority of New Zealand. AC102－1 Revision 1：Unmanned aircraft-operator certification [EB/OL]. [2026－01－23]. https://www.aviation.govt.nz/assets/rules/advisory-circulars/ac102-1.pdf.

[47] United States Government Publishing Office. Special authority for certain unmanned aircraft systems [EB/OL]. [2026－01－23]. https://www.govinfo.gov/link/uscode/49/44807.

[48] Citi M, Justesen M K. Measuring and explaining regulatory reform in the EU: A time-series analysis of eight sectors, 1984—2012 [J]. European Journal of Political Research, 2014, 53(4): 709－726.

[49] Hinterleitner M, Knill C, Steinebach Y. The growth of policies, rules, and regulations: A review of the literature and research agenda [J]. Regulation and Governance, 2024, 18(2): 637－654.

[50] UK Civil Aviation Authority. Proposed amendments to UK acceptable means of compliance and guidance material for UK regulation (EU) 2019/947 and UK regulation (EU) 2019/945 [EB/OL]. [2026－01－18]. https://www.caa.co.uk/publication/download/26032.

[51] 中国民用航空局. 2024年民航行业发展统计公报[R]. 北京：中国民用航空局, 2025.

[52] Federal Aviation Administration. FAA aerospace forecast fiscal years 2025—2045 [R]. Washington, DC: Federal Aviation Administration, 2025.

[53] European Union Aviation Safety Agency. Drone Economy Dashboard [EB/OL]. [2026－01－28]. https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/drone-operations-easa-member-states.

[54] UK Civil Aviation Authority. CAP3146: Annual safety review 2024 [R]. London: UK Civil Aviation Authority, 2025.

[55] Civil Aviation Safety Authority. Sector demographics and activity: remotely piloted aircraft systems [EB/OL]. [2026－02－03]. https://www.casa.gov.au/operations-safety-and-travel/safety-management-systems/sector-safety-risk-profiles/remotely-piloted-aircraft-systems-sector-safety-risk-profile/sector-demographics-and-activity-remotely-piloted-aircraft-systems.

Comparative research on airspace governance and compliance pathways for agricultural low-altitude operations across major jurisdictions

He Yong[1, 2, 3, 4], Wang Yueying[1, 2, 3], He Liwen[1, 2, 3], Dai Fushuang[1, 2, 3], Zhu Jiangpeng[1, 2, 3*]

(1. *College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*; 2. *Zhejiang Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing and Information Technology, Hangzhou* 310058, *China*; 3. *Key Laboratory of Spectroscopy Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou* 310058, *China*; 4. *State Key Laboratory of Vegetation Structure, Function and Construction (VegLab), Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract: The development of the low-altitude economy is reshaping the technological functions, organizational forms, and regulatory demands of agricultural aircraft. Represented by agricultural drones, such aircraft have evolved from seasonal plant protection equipment into low-altitude production units integrating field operations, crop and farmland sensing, disaster response, and socialized service provision. As application boundaries continue to expand, the risks associated with agricultural low-altitude operations have also shifted from conventional flight safety concerns to a more comprehensive governance problem in which flight safety, operational quality, environmental externalities, and liability traceability are mutually intertwined. Against this background, a comparative analytical framework was developed in this study centered on airspace accessibility, operational authorization, regulatory visibility, operational compliance, and enforcement traceability. And the governance regimes for agricultural low-altitude operations across major jurisdictions, including China, the United States, the European Union, Australia and New Zealand, were systematically reviewed. In addition, a regulatory release density

indicator was introduced, together with publicly available data on registered operators, registered unmanned aircraft, and remote pilots, to enable comparison of the relationships between diverse regulatory supply forms and large-scale operational capacity. The findings showed that major jurisdictions have developed three broad governance pathways: a strong-foundation model, a high-efficiency authorization model, and a risk-assessment-and-service model. In agricultural scenarios, institutional effectiveness depends not on the sheer number of individual rules, but on whether airspace access, digital identification, operational oversight, and evidentiary record retention can be integrated into an executable and verifiable engineering closed loop. Moreover, the concurrent expansion of common application scenarios, including production operations, remote sensing monitoring, emergency support, and cross regional socialized services, has further intensified the demand for differentiated authorization, tiered regulation of payload release, and cross regional collaborative oversight. On this basis, the study proposed an engineering-oriented compliance pathway centered on mission-based classification, the coupling of authorization and traceable records, tiered control of payload release, and agriculture-oriented continuing airworthiness management. The results may provide a useful reference for improving Chinese governance system of the agricultural low-altitude economy and for promoting the standardized application of agricultural drones.

Keywords: low-altitude economy; agricultural unmanned aerial vehicles; airspace management; compliance pathways; digital regulation; governance regime for agricultural low-altitude operations

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (32572180); Key R &D Program of Shandong Province, China(2023CXGC010701)

First Author: He Yong, E-mail: yhe@zju. edu. cn

* **Corresponding Author:** Zhu Jiangpeng, E-mail: zhujianpn@zju. edu. cn