低空技术赋能水利现代化双轮驱动模式研究

姜谋余

（中国航空器拥有者及驾驶员协会无人机水利应用专业委员会，100028，北京）

摘　要：当前，我国水利现代化正处在夯基发力期，低空经济规模化也处于起步阶段。水利现代化亟须科技手段赋能，同时水利工程多位于偏远郊区、山区，空域条件良好、应用需求稳定，是落实国家低空经济发展战略、规模化拓展行业应用的首选领域和战略腹地。水利领域的低空应用目前多停留在设备采购与技术工具层面，存在顶层政策支撑不足、资金投入渠道单一、跨部门协同机制缺失等深层困境，导致水利难以从低空经济的应用场景方转变为战略引领方。借鉴新能源汽车产业的“示范－补贴－基建”政策演进逻辑，以及民航－农业领域的部际协同治理经验，通过模式迁移与场景适配，系统性构建水利低空应用的“政策牵引＋制度协同”双轮驱动模式。在某大型水库实践双轮驱动模式，通过应用示范工程、运营补贴、基建投资等政策牵引驱动轮，以及建立联合机制、申报“白名单”空域、应急绿色通道、标准联合制定等制度协同驱动轮，从顶层设计上为“有钱建设”和“顺畅运行”提供了保障。本模式可为实现水利现代化与低空经济体系完善提供可操作的方案。

关键词：低空经济；水利现代化；双轮驱动；产业政策迁移；部际协同治理

Research on dual-wheel driving model for empowering water conservancy modernization with low-altitude technology

JIANG Mouyu

(UAV Committee for Water Conservancy Applications, Aircraft Owners and Pilots Association of China, Beijing 100028, China)

Abstract: At present, China’s water conservancy modernization is in a critical period of foundation consolidation and accelerated development, while the large-scale development of the low-altitude economy is still in its initial stage. Water conservancy modernization urgently needs to be empowered by scientific and technological means. Water conservancy projects are mostly located in remote suburbs and mountainous areas, where airspace conditions are favorable, and application demands are stable. This makes them a preferred domain and strategic hinterland for implementing the national low-altitude economy development strategy and expanding industry applications at scale. Current low-altitude applications in the water conservancy sector mostly remain at the level of equipment procurement and technical tools. There are deep-rooted challenges, such as insufficient top-level policy support, single-channel funding sources, and a lack of cross-sector coordination mechanisms, which hinder the sector from transitioning from a mere application scenario provider to a strategic leader in the low-altitude economy. This paper, by drawing on the “demonstration, subsidy, and infrastructure” policy evolution logic of the new energy vehicle industry, as well as the inter-ministerial

收稿日期：2026-05-03

作者简介：姜谋余，主任，高级工程师，主要研究方向为水利无人机应用。E-mail：13801195332@139.com

collaborative governance experience from the civil aviation and agricultural sectors, systematically constructed a “policy guidance + institutional coordination” dual-wheel driving model for low-altitude applications in the water conservancy sector through model transfer and scenario adaptation. The mode has been practiced in a large reservoir. With policy guidance-driven wheels including application demonstration projects, operation subsidies, and infrastructure investment, as well as institutional coordination-driven wheels covering the establishment of joint mechanisms, application for white-list airspace, emergency green channels, and joint formulation of standards, it provided top-level design guarantee for sufficient construction funds and smooth operational execution. The proposed mode offers an operable scheme for the realization of water conservancy modernization and the improvement of the low-altitude economic system.

Keywords: low-altitude economy; water conservancy modernization; dual-wheel driving; industrial policy transfer; inter-ministerial collaborative governance

中图分类号：TV+V279　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1123(2026)09-0018-07

DOI：10.3969/j.issn.1000-1123.2026.09.003

一、“政策牵引+制度协同”双轮驱动模式的逻辑与内涵

1.时代背景与战略机遇

“十五五”时期是我国水利现代化与低空经济发展战略叠加的关键窗口期。水利行业高强度、持续性的投资为新技术应用提供了广阔市场需求，而低空经济的规模化发展亟须找到能够承载其技术验证、装备迭代和模式创新的核心场景。水利工程多位于偏远郊区、山区，空域条件良好、应用需求稳定且社会价值刚性突出，符合国家低空经济发展的优先路径。

2.产业政策理论与战略性新兴产业培育逻辑

产业政策理论以产业为分析单元，研究政府如何通过选择性干预与政策工具组合，引导产业结构优化、组织效率提升、技术创新与竞争力增强，以弥补市场失灵，实现经济赶超、结构升级与满足公共利益目标。研究表明，对正外部性显著、投资带动效应大和前期投入高的基础设施型产业，政府的前期引导至关重要。我国新能源汽车产业通过“十城千辆节能与新能源汽车示范推广应用工程”（以下简称“十城千辆工程”）打开发展局面，通过购置补贴与基础设施建设扩大规模，最终转向市场驱动的成功路径，验证了“政策驱动、市场培育”的有效性。水利低空应用同样具备正外部性与公共基础设施特征，其网络化建设投资大、回报周期长，必须依靠战略性政策干预，将其纳入国家及水利专项投资范畴，才能完成从技术试点到规模示范的定位跃升。

3.协同治理理论与跨领域监管融合机制

协同治理理论是指在多元主体（政府、企业、社会组织、公民、智库）平等协商基础上，通过正式化、共识导向、持续互动的机制，共享资源、共担责任、共同决策与执行，以实现公共利益最大化的治理模式。在我国社会治理实践中，强调跨部门的公共事务需通过权责重构、流程再造与标准互认来实现整体效能提升。中国民航局与农业农村部在农用无人机管理上成功构建了“场景定义、分类管理、联合监管”的范式，针对特定低风险作业场景豁免了部分许可，由无人机生产企业负责人员培训，大幅降低了制度性成本。这为破解水利低空应用面临的“审批难、监管难”问题提供了直接的理论参照与实践模板，证明通过部际协同实现差异化管理是可行且必要的。

4.双轮驱动模式的内涵与框架

为破解水利低空应用面临的瓶颈，本文提出“政策牵引+制度协同”双轮驱动模式（见图1）。政策牵引驱动轮的核心是借鉴新能源汽车等战略性新兴产业的发展经验，通过顶层规划、示范工程、财政补贴、基础设施投资等政策工具，系统性创造需求、培育市场、引导投资，实现从零散采购到系统性投入的转变。制度协同驱动轮的核心是参照中国民航局与农业农村部的部际协同治理实践，破解适航管理、监管权责、数据互通等制度性障碍，构建适配水利业务特点的监管体系，达到“能飞、好用、规模化”的目标。两轮相互支撑、动态耦合，共同构成水利低空应用可持续发展的核心动力系统。

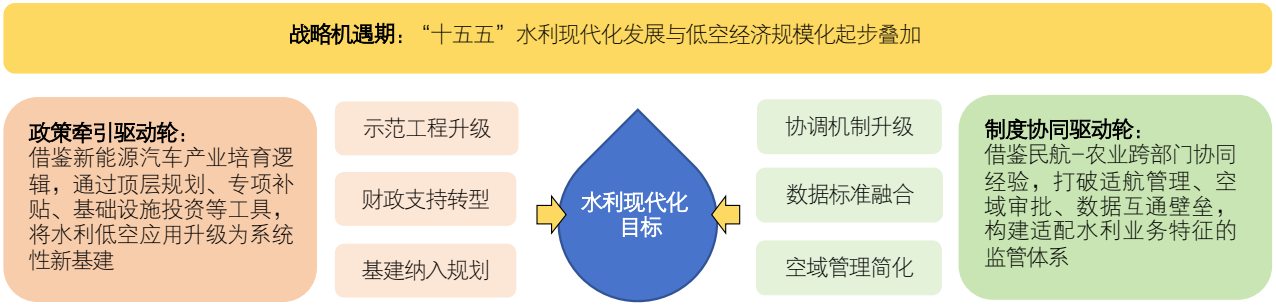

图1 低空技术赋能水利现代化双轮驱动模式示意

二、水利成为低空经济核心应用场景的合理性与紧迫性

1.水利应用场景与低空经济发展路径的三维契合性

水利行业在发展低空经济方面具有天然、多维的适配优势和契合性，主要体现在3个方面。

①空间条件高度适配。大多数水库、水电站等水利工程位于山区，人口密度低、空域敏感度低、净空条件好。这高度契合国家“先远郊、后城区”的低空开放路径，是推广阻力最小、安全冗余最高的天然试验场。

②载荷类型高度契合。水利核心业务如工程巡检、应急物资投送等，均属于“载货”范畴，且对时效性、可达性要求高，符合低空经济“先载货、后载人”的渐进式发展次序，技术成熟度高，社会接受度和安全风险可控性强。

③社会价值刚性突出。水利事关防洪安全、供水安全、粮食安全和生态安全，是国民经济的基础支撑。应用低空技术提升防汛抢险速度、保障重大工程安全等，具有极强的公共属性与政策优先级，易获得国家层面的战略重视与资源倾斜。

2.水利引领低空经济发展的独特战略价值

水利不仅是低空技术的应用场景，更具备支撑和引领低空产业发展的战略功能。

①复杂环境技术试验场。水利低空作业环境涵盖高山峡谷、江河湖库，面临强风、高湿度、弱信号等挑战。在此开展的常态化飞行作业，能为未来城市发展低空经济积累宝贵的复杂环境适应性数据、运行经验和安全标准。

②专用装备产业链孵化器。水利作业对无人机的长航时、高防护、大载荷、强稳定性有特殊要求。一个稳定、庞大的水利市场需求，能够有效牵引和培育一批专注于工业级无人机、特种任务载荷、专用保障设施的“专精特新”企业，促进低空制造产业链的完善与升级。

③国际标准制定主动权抓手。通过未来5年我国大规模水利投资带动的规模化、规范化低空应用实践，可以率先形成水利低空应用的技术标准、作业规范和运行经验。这将使我国在国际低空经济细分领域标准制定中占据主动，提升国际话语权。

3.“十五五”关键窗口期的战略紧迫性

“十五五”时期是水利现代化夯基发力的关键期，也是低空经济从试点示范走向规模化应用的形成期。低空与智能化技术的融合，将极大强化水利对国民经济带动作用的有效发挥。

①防洪安全方面。无人机可在发生洪水灾害时提供应急监测支撑，进行全天候、高频次的堤防、大坝、库区险情巡查，结合人工智能（AI）识别算法，实现险情早发现、早预警，极大提升防洪决策的时效性与准确性，保护人民生命财产和工农业生产安全，减少洪灾经济损失。

②河湖安全监管方面。利用无人机搭载各类载荷可对河湖水域进行全覆盖、高频次的动态巡查。结合AI识别算法，实现对垃圾倾倒、污水直排等涉水违法违规行为的自动甄别与预警；同时可对河道行洪断面、水域岸线变化进行精准测量与动态监控，推动河湖管理向数字化、精细化、智能化转型。

③粮食安全方面。大中型灌区是承载我国粮食安全的重要载体。通过无人机搭载各类载荷，可实现大面积农田墒情、苗情精准监测，指导节水灌溉，提升水资源利用效率，并可通过无人机巡查等保障灌区生产安全，直接支撑国家粮食安全战略。

④供水发电安全方面。无人机可安全、高效地完成水库电站大坝、边坡、泄洪设施的隐患监测，替代传统人工巡检。结合AI识别算法，可实现工程安全状态

的实时感知与智能诊断，保障供水安全和清洁能源的稳定供应，降低运维成本。

因此，抓住“十五五”窗口期，系统性推进低空技术在水利领域的应用，不仅是水利现代化的内在需求，更是通过高价值场景牵引一个新兴产业发展、塑造国家未来竞争力的战略举措。

三、政策支撑不足与协同机制缺失困境

1.政策牵引驱动轮缺位，缺乏国家级系统性政策安排

当前，水利低空应用在政策层面面临需求不足、政策缺失的窘境。一是战略定位模糊，缺乏顶层规划。水利低空应用尚未被明确纳入国家低空经济发展的核心规划与重点投资序列，在“十五五”水利发展规划等顶层设计文件中也缺乏专项部署，导致其战略位势不高，资源整合困难。二是财政工具缺失，投入渠道单一。当前水利低空应用缺乏类似新能源汽车购置补贴、运营补贴的针对性财政政策工具，投入主要依靠零星的信息化及少部分水利工程配套的科研项目，资金规模小、连续性差，无法支撑流域级低空监测网络等新型基础设施的系统性建设。专项债、REITs等创新融资工具也难以适用。三是标准与采购引导不足，市场生态脆弱。尚未建立强制性的水利专用低空装备行业标准与安全作业规程。政府采购目录中也无相应品类，导致用户采购没有依据。此外，需求不多，规模化不够，市场主体研发投入动力不足，难以形成规模效应和良性产业生态。

2.制度协同驱动轮缺位，未形成民航-水利制度化协同体系

与民航-农业领域成熟的协同机制相比，水利低空应用面临显著的制度性壁垒，相关制度基本空白。一是适航管理缺乏场景适配。现行无人机适航审定标准主要针对消费级或通用工业级产品，未考虑水利作业面临的强风、高湿度、弱信号等极端环境。适用于农用无人机的豁免或简化审定条款，并未延伸至水利巡检、监测等类似低风险场景。二是空域使用程序复杂。水利作业空域未能像农用空域一样享受简化报备政策，每次飞行均需单独申请空域，流程复杂、耗时较长，严重制约了日常巡检效率，更无法满足防汛抢险等应急场景下随时飞、立即用的迫切需求。三是监管权责交叉与数据壁垒。水利部门负有工程安全监管责任，但无航空器管理权限；民航部门负责飞行安全监管，不熟悉水利业务逻辑。这种权责错位导致监管存在模糊地带。同时，飞行监控数据与水利业务数据分属不同系统，无法融合，制约了一体化智能调度能力的形成。

3.行业对水利低空应用的属性认知存在偏差

上述困境的深层根源在于，当前行业普遍将无人机等低空装备视为可采购的信息化工具或先进设备，而非国家新兴支柱产业基础设施。这种认知偏差导致了系统性缺陷。一是投资逻辑错位。投资集中于单机采购，忽视网络节点（起降场、能源站、通导监设施）和运维体系等配套建设。二是管理模式落后。当前沿用设备资产管理模式，而非网络化运营服务体系，导致设备利用率低、维护保养难。三是发展路径局限。当前主要聚焦解决单点问题，缺乏构建全域、全要素的低空感知网络发展路径。

四、双轮驱动的实施路径设计

1.新能源汽车产业三阶段政策演进规律

我国新能源汽车产业的成功实践是对产业政策理论的完美诠释，也为低空水利应用提供了清晰的政策驱动市场范式：初期示范引领，通过“十城千辆工程”等示范工程培育市场认知；中期政策扶持，通过购置补贴、税收优惠、充电网络建设等组合工具快速扩大规模；后期市场主导，通过“双积分”等市场化机制和基础设施建设，推动产业实现内生增长。其核心逻辑是政府通过精准政策干预，系统性降低用户成本、完善使用环境、引导技术迭代，最终完成从政策驱动到市场驱动的过渡。

2.产业政策工具的水利化重构

借鉴上述典型政策工具箱，结合水利特点进行场景化改造。

①培育示范工程。借鉴“十城千辆工程”模式培育“百河千库”低空应用示范工程。选取国家水网骨干工程、重要灌区、重点水库，开展规模化、体系化应用试点，验证技术模式，培育专业运营市场，形成可复制的标准规范。

②财政补贴转型。从面向消费者的购置补贴，转向针对水利工程管理单位、专业化运营服务商的采购补贴或运营补贴。可对符合水利专用标准（长航时、高抗风等）的装备给予定向激励，降低应用门槛。

③基础设施纳入国家投资范畴。参照新能源汽车充电网络建设思路，明确将水利低空起降场、能源补给网、通导监气（低空通信、导航、监视及气象技术）等，纳入水利新型基础设施规划，与水利工程同步设计、同

步建设、同步运维。

④标准规范先行。加快制定水利专用无人机管理办法、技术标准、适航审定补充规定、安全作业规范等，设立产业准入门槛，引导行业有序竞争和技术升级。

3.基础设施模式迁移

水利低空基础设施建设目标是构建覆盖七大流域和重点工程的低空智能网联体系。其投资建设可纳入水利部“天空地水工”一体化监测感知系统建设，参照新能源汽车基建模式，采用“政府主导、市场参与”的多元投融资机制（如专项债等），实现“统一规划、统一标准、统一建设、专业运营”，真正体现其行业性、网络化基础设施属性。

4.民航－农业协同模式的经验借鉴

中国民航局与农业农村部通过联合发文等方式，对农用无人机在特定场景下的适航、经营许可、人员资质等实施了分类豁免和简化管理，并共建了培训考核体系。其精髓在于：基于风险评估，对低风险、大规模、固定区域的作业场景，采取与传统航空管理模式不同的、更高效灵活的监管方式，实现了“管得住”与“放得开”的平衡。这为民航－水利协同提供了直接范式。

5.民航－水利协同模式的升级设计

在农业模式基础上，针对水利的流域性、应急性、公益性进行升级。①协调机制升级。建立“水利部+中国民航局+中央空管委+应急管理部”常态化联合工作机制，重点强化防汛抢险等应急场景下空域优先保障、飞行绿色通道与协同指挥能力。②适航管理升级。推动设立“水利专用无人机”类别，由水利部门提出环境适应性、任务可靠性等专业要求，转化为适航审定补充规定。③飞行管理升级。推行“流域年度飞行白名单”制度，对规划内的日常巡检空域实行一次性报备。在重大水利工程周边划设常态化监视空域，应急状态下启动“先飞行、后报备”绿色通道。④数据与标准融合升级。推动水利无人机监测数据规范与民用无人驾驶航空器综合管理平台（UOM）对接，建设水利低空飞行服务平台，实现飞行计划、空域审批、动态监控、业务数据回传的一体化，达成“一飞多用、一数多享”。

6.场景化豁免与资质管理创新

明确在水利工程管理范围、河道、水库等划定区域内，用于日常巡检、监测的无人机，在满足安全监控要求后，豁免复杂的事前审批。人员培训考核可探索“设备厂商或专业机构培训发证、水利和民航部门联合监督”的模式，提升效率。

五、双轮驱动模式的实践探索

以某大型水库为例，围绕水库管理的大坝安全、水质安全、库区生产安全、供水发电安全的核心业务需求，具体阐述如何运用双轮驱动模式，系统性构建一个业务导向、平战结合的低空智能化运行体系。

1.系统组成与功能设计

体系总体采用“一平台统筹、四系统支撑”的架构，即一个低空智能网联管理服务平台（以下简称低空管服平台）作为大脑，指挥无人机、通信、监视、算法四大系统协同作业。

（1）低空管服平台分系统

作为体系的中枢神经，低空管服平台分系统负责全域资源的统一调度与智慧管理。核心功能包括：飞行任务的全流程组织与监控、空域计划的申报与协调、多源巡检数据的汇聚融合、基于AI的智能识别与分析、与水库等既有业务系统（如防汛调度、工程安全监测、水质管理平台）的深度协同与告警联动。

（2）无人机与载荷分系统

作为任务执行主体，无人机与载荷分系统构建起分层协同的无人机装备体系。包括：①垂直起降固定翼无人值守机库，用于库区大范围、长航时的日常普查；②多旋翼无人值守机库或自动机库，部署于大坝、取水口、排污口等重点目标附近，用于高频次、精细化详查；③单兵机动式无人机，用于应对突发任务的快速补充与灵活侦察。载荷配置包括可见光、红外、激光雷达、高光谱等，以适配不同业务场景。

（3）智能识别算法分系统

作为体系的“智慧大脑”，该系统可以提供自动化、智能化的数据分析能力。基于深度学习，实现对巡检视频和图像的实时分析，自动识别如水面漂浮物、非法船只、岸线塌陷、工程结构裂缝、水体颜色异常（水华）、非法捕捞和排污等多种目标与事件，极大提升问题发现效率。

（4）低空监视分系统

作为安全管控的“天眼”，该系统构建了全域覆盖的低空态势感知网络。综合运用低空探测雷达、无线电侦测、光电跟踪等多种手段，实现对合作目标（本方无人机）与非合作目标（闯入无人机等）的全天候监视，为低空运行安全和重点区域防护提供保障。

（5）低空通信分系统

作为体系的“神经网络”，该系统构建了可靠的数

据传输链路。以4G和5G公网为主，在公网覆盖薄弱的库区、峡谷等关键节点，部署Mesh自组网或专用通信中继设备，形成“公专结合、弹性扩展”的通信网络，确保飞行控制指令与巡检数据（尤其是高清视频）的稳定、实时回传。

2.系统交互与协同关系

本体系以低空管服平台为唯一指挥调度核心，平台接收来自业务系统或自动计划生成的任务，一键式下达至无人机系统并调用通信和监视资源予以保障。无人机执行任务过程中，自动触发机载端轻量化智能识别算法进行分析，实时回传的数据经通信网络送达平台，识别结果连同原始数据一并存入数据中心，并根据规则向相关业务系统推送告警。监视系统则全程为空域内的飞行安全提供监控，发现异常立即告警。各分系统在平台的统一调度下，形成紧密协同、数据闭环的有机整体。

3.系统部署方案

①无人机部署。采用“固定值守+机动补充”模式。在库区管理中心、主要副坝、重要支流入口等处建设无人值守自动机库，部署垂直起降固定翼或多旋翼无人机，实现常态化自动作业。同时，为各管理处和巡检站配备单兵便携式无人机，用于快速响应和补充巡查。

②通信网络部署。全面评估库区现有公网覆盖情况，在管理站点、码头等已有良好信号的区域，直接利用公网；在巡查航线上的信号盲区或弱区，沿库岸或岛屿部署若干太阳能供电的通信中继站，构建冗余通信链路，确保全航线信号连续。

③监视网络部署。在水库大坝、取水口、核心保护区等敏感区域周边，部署低空探测雷达和光电跟踪设备，形成重点区域的无死角监视。在库区周界的制高点，部署无线电侦测设备，实现对全域低空目标的广域预警。

④平台与算法部署。低空管服平台与智能识别算法服务器集中部署于水库管理局本地数据中心，与现有的数字孪生、综合管控平台进行深度融合，实现数据共享与业务联动。

4.双轮驱动模式在案例中的应用

（1）政策牵引驱动轮的应用

①示范工程政策。将该水库低空智能化体系申报纳入国家或省级示范工程，争取国家专项资金、政策性贷款等支持。

②运营补贴政策。参照新能源汽车运营补贴，争取财政对水库低空巡查运营服务费的补贴，或对采购符合水利专用标准的工业级无人机给予购置补贴，降低建设单位的一次性投资压力。

③基建投资政策。将无人机自动机库、通信中继站、低空监视设备等，明确作为该水库除险加固或智慧化改造工程的配套新型基础设施，纳入项目总投资。

（2）制度协同驱动轮的应用

①联合机制建立。由水库所属流域管理机构牵头，与所在地民航监管局、空域管理部门建立常态化协同工作机制，为整个低空智能化体系正常运行提供制度保障。

②“白名单”空域获批。将该水库管理范围及周边必要空域划定为水利低空应用示范空域，向当地空域管理和民航部门申报纳入年度飞行计划白名单，日常巡检任务在报备后即可飞行，极大简化流程。

③应急绿色通道。制定联合应急预案，明确在防汛应急响应期间，启动“先飞后报”机制，确保无人机力量第一时间升空。

④标准联合制定。以本水库复杂环境（山区库区、大风、高湿度）下的运行数据为基础，水库管理局与民航部门、无人机厂商联合编制水库水利专用无人机运行安全规范等地方或行业标准。

通过政策和制度双轮驱动，本案例从顶层设计上解决了“有钱建设”（政策轮）和“顺畅运行”（协同轮）的保障问题，确保了该体系不仅能建成，更能用得好、可持续，真正发挥实效。

5.结论与建议

（1）主要结论

水利行业在空间、载荷、价值3个维度与低空经济发展路径深度契合，具备从规模化“应用方”升级为产业“引领方”的战略基础。当前发展滞后的核心症结在于系统性政策缺失与跨部门协同机制缺位，必须依靠政策牵引与制度协同双轮驱动予以破解。其根本出路在于推动水利低空应用从“工具化采购”向“规模化行业应用”、产业“引领方”进行升级转型。

（2）操作性政策建议

①争取顶层规划。主动谋划并将“百河千库”低空应用示范工程纳入国家低空经济重点工程及“十五五”水利相关规划，争取专项资金与政策支持。

②启动部际协同。建议水利部会同中国民航局，参照农用无人机管理经验，尽快启动联合研究，制定水利专用无人驾驶航空器运行安全管理规定。

③创新投融资模式。明确将低空感知网络及相关基础设施纳入水利新型基础设施范畴，探索专项债券、政策性金融工具等多种投融资模式。

④主导标准制定。以复杂环境适航、多来源数据融合标准为突破口，积极参与并主导相关国际标准制定，提升我国在低空水利应用领域的国际话语权。

参考文献：

[1] 沈清华，叶文芳，王进科，等.大型水利工程无人机智慧化监控及其成果应用[J].水利技术监督，2024(10):42-44.
[2] 李煜东.无人机LiDAR技术在水利崩岸应急测绘保障中的应用[J].水利技术监督，2022(5):49-52+118.
[3] 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.
[4] 交通运输部.民用无人驾驶航空器运行安全管理规则[A].2024.
[5] 沈映春.低空经济："飞"出新赛道[J].人民论坛，2024(8):74-79.
[6] 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.
[7] 黄丹.无人机机载雷达在广西古皂水库地形测绘中的应用[J].水利水电快报，2022，43(S2):18-22.
[8] 陈朝晖，荆长伟，凌在盈，等.大疆L1无人机激光雷达在数字高程模型制作中的应用研究[J].浙江水利科技，2023，51(2):102-106.
[9] 方卫华，杨浩东，谢双双，等.面向堤坝监测的无人机自动巡检系统设计[J].江苏水利，2024(2):1-4.
[10] 张明.基于无人机技术的下坂地水库智能巡检方案分析[J].水利技术监督，2024(6):250-253.
[11] 吴波涛，冯琦.无人机航测在大型水利工程中的应用[J].长江科学院院报，2017，34(3):148-150.
[12] 李星.基于无人机多源遥感的河道流量估算方法研究[D].兰州：兰州理工大学，2025.
[13] 付伟锋，盖侨侨.免像控无人机摄影测量技术在水利工程中的应用比较分析[J].广东水利水电，2026(2):122-127.
[14] 林志友，毛清华，田聪.无人机全自主巡检系统在水电站的应用探讨[J].人民黄河，2021，43(S1):194-195+197.
[15] 闫君晖，刘哲.无人机自动巡检系统在丹江口大坝巡检中的集成应用[J].水电与新能源，2025，39(10):102-105.
[16] 李芝贤，胡峻，韦秋莲，等."空-地"一体化智能巡检系统设计与研究[J].广西水利水电，2024(6):117-122.
[17] 杨阿龙，李铁男，王俊，等.无人机和卫星遥感技术在河湖监管中的应用[J].中国水利，2023(13):52-55.
[18] 黄育华，吴念辉，陈杰，等.基于无人机全景影像的河道岸线地物变化检测方法[J].人民长江，2025，56(3):230-236.
[19] 刘伟.无人机遥感影像在水利监测领域的运用[J].工程与建设，2023，37(1):68-70+121.
[20] 张晓兰，黄伟熔.低空经济发展的全球态势、我国现状及促进策略[J].经济纵横，2024(8):53-62.
[21] 孔玉霞，穆闯.基于无人机雷达技术的长江防洪应急应用技术研究[J].辽宁科技学院学报，2024，26(1):10-13.
[22] 何玉庆.低空经济拉动下的无人机技术与产业发展[J].中国工业和信息化，2024(10):36-39.
[23] 潘慧.广东人工智能院：发挥无人机技术优势 为低空经济产业发展贡献力量[J].广东科技，2024，33(3):23-26.

责任编辑 刘磊宁