

无人机遥感技术在环境保护领域的应用研究

陈 建 刘 长

温州市生态环境局苍南分局 浙江 温州 325800

摘 要：本文系统梳理了无人机遥感技术的基本原理与系统组成，从大气环境监测、水环境监测、土壤环境监测、生态系统监测、污染源追踪与应急监测五个维度深入分析了该技术在环境保护领域的具体应用。研究表明，无人机遥感技术能够有效弥补传统环境监测手段在时空覆盖、数据精度和响应速度方面的不足，为环境管理提供了更加全面、及时、精准的数据支撑。当前该技术在传感器载荷、数据处理算法、飞行平台稳定性等方面仍面临诸多技术挑战，需要从硬件研发、算法优化、标准规范制定等层面协同推进。未来随着传感器微型化、人工智能算法集成、多机协同组网等技术的突破，无人机遥感在环境保护领域的应用将向智能化、自动化、网络化方向深入发展。

关键词：无人机遥感；环境保护；环境监测；高分辨率；实时监测

引言

环境保护离不开对生态状况的准确掌握。传统的地面站点监测和人工采样虽然精度较高，但点位有限、覆盖面小、时效性差。卫星遥感虽能扩大观测范围，却常受云层干扰、重访周期长和分辨率不足的限制，难以满足中小尺度区域的高频次、精细化监测需求。近年来，无人机技术快速发展，为环境监测提供了新工具。无人机可搭载各类传感器，在低空按预设航线自主飞行，获取高时空分辨率的环境信息，兼具灵活、快速、精细的特点，正好弥补传统手段的短板。从应用历程看，无人机遥感在环保领域大致走过了三个阶段：最初主要搭载可见光相机，用于目标识别；随后集成了多光谱、高光谱、热红外等专业传感器，参数维度显著扩展；当前则与实时传输、人工智能、北斗定位深度融合，初步形成天地一体的智能监测能力。本文在梳理无人机遥感技术体系的基础上，系统分析其在环保中的主要应用方向，探讨当前瓶颈，并对未来趋势进行展望。

1 无人机遥感技术概述

1.1 系统组成与工作原理

无人机遥感系统主要包含飞行平台、任务载荷和地面控制与数据传输三部分。飞行平台中，固定翼续航长、速度快，适合大范围巡查；多旋翼可垂直起降、空中悬停，操作简单，更适合定点精细监测；复合翼则兼顾两者优点，既能垂直起降又能长距离巡航。任务载荷是实现环境监测的关键。可见光相机可拍高分辨率影像，用来识别地物类型、植被覆盖等；多光谱和高光谱传感器通过分析反射光谱，反演水体叶绿素、植被生长状态甚至土壤性质；热红外成像仪能探测温度分布，常用于热污染和异常排放定位；气体检测传感器则可实时

测量二氧化硫、氮氧化物、臭氧和颗粒物浓度。地面控制系统负责规划飞行航线、设定航高和重叠率，并对飞行过程进行监控。采集到的环境数据可通过无线链路实时传回，也可先存在机载存储器中，待飞行结束后统一处理。

1.2 技术优势与局限性分析

无人机遥感有五个明显优势。一是响应快，几分钟就能起飞赶到现场，很适合突发污染事件的应急监测。二是时空分辨率高，飞行高度常在50到500米，影像分辨率可达厘米级，还能按需高频重复观测。三是适应性强，能进入人员难以到达的危险区域，比如陡坡、沼泽或核污染区，也保障了人员安全。四是综合成本较低，不需要专用机场和复杂保障，单次费用远低于有人机。五是灵活可控，用户可自主设计航线、随时调整，不像卫星那样受固定的过境时间和角度限制。不过，当前无人机遥感也存在一些不足^[1]。多数小型无人机载重有限，带不动高精度分析仪器，现场定量检测能力受限。续航时间较短，多旋翼通常只有20到40分钟，难以满足大范围或长时间连续监测。恶劣天气下飞行稳定性下降，雨雪、大风等会严重影响数据质量甚至无法作业。此外，海量高分辨率影像的拼接、分类和信息提取仍依赖较多人工操作，全自动化流程尚未完全成熟。

2 无人机遥感在环境监测中的具体应用

2.1 大气环境监测应用

无人机搭载气体传感器和颗粒物检测仪，可以同时垂直和水平方向开展立体监测。垂直探测方面，无人机能突破近地面边界层，获取从地面到几百米高度的污染物廓线。爬升和下降过程中，可连续记录二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、臭氧、PM2.5、PM10等浓度的

变化,画出精细的垂直剖面图。相比气象铁塔或探空气球,无人机布设更灵活,可重复性强。水平探测方面,无人机按网格或自适应航线飞行,得到目标区域的污染物平面分布图。结合风速、风向、温度、湿度等气象数据,还能分析污染物的输送路径和扩散趋势。在工业园区、交通干道、垃圾填埋场等区域,这种方法能有效找出污染热点和排放强度的差异,为污染源治理提供依据。与走航监测车相比,无人机不受地面道路限制,可以进入厂区内部或堆场上空等车辆难以到达的地方。此外,热红外成像仪在废气排放监测中也很有用。工业烟囱、火炬、无组织排放口等废气源温度较高,热红外图像能清晰显示排放口位置和烟羽扩散形态,辅助环境执法监管。

2.2 水环境监测应用

水中悬浮物、叶绿素、总磷等指标与水面反射的光谱存在关联。无人机搭载多光谱或高光谱传感器,在低空获取高分辨率光谱数据,再结合辐射传输或统计模型,就能反演出水质参数的空间分布。相比卫星,无人机飞行高度低,受大气干扰小,光谱信息质量更好,反演结果也更准。这项技术已在湖库富营养化监测、污染团追踪、赤潮和浒苔预警中落地应用。找排污口也是无人机的强项。工业或生活废水的温度通常与自然水体不同,尤其在冬夏两季。无人机热红外影像上出现的异常温度斑块,往往就是排污口位置,再配合高清可见光影像,就能判断排污类型、估算排水规模和扩散范围^[2]。相比人工沿河巡查,效率大幅提升。此外,无人机搭载水深探测激光雷达,可快速获取水下地形点云数据。传统船载声呐在浅水区、急流或水草密集处难以作业,而激光雷达能穿透一定深度的水体,适用于水库库容计算、河道冲淤监测和湿地水文分析。

2.3 土壤与土地环境监测应用

土壤重金属污染隐蔽性强,空间分布很不均匀。传统做法是网格布点、采样送检,费时费力。研究表明,重金属本身不直接显现在光谱上,但常与铁锰氧化物、有机质等有光谱特征的物质伴生,因此可通过高光谱影像间接推测。配合地面采样数据和机器学习,可以建立预测模型,画出污染分布图。目前这个方法还是半定量为主,但用于大范围筛查和风险区划定,已经比较实用。土壤有机质、酸碱度、含水量、盐分等属性,也能通过无人机搭载的多光谱或热红外传感器反演。在精准农业和土地整治中,这些图件被用来指导变量施肥、灌溉管理和盐碱地改良。土地利用和覆盖变化方面,无人机可见光影像分辨率可达厘米级,能清楚分辨非法占

地、违规建设、生态红线内的人类活动。对比不同时期的影像,可以追踪变化过程,为土地执法和生态监管提供依据。在矿山环境监测中,无人机还能评估损毁土地面积、排土场稳定性以及复垦后植被恢复情况。

2.4 生态系统监测应用

在植被监测上,无人机多光谱和可见光影像可提取植被覆盖度、叶面积指数、生物量等参数,借助归一化植被指数等指标评估植被健康。森林监测中,无人机可用于识别树种、测定郁闭度、定位枯死木、跟踪林隙变化。草原方面,则用于评估退化与沙化、估算牧草产量、调查鼠害虫害。湿地水文变化大、植被类型多,传统调查很难进入。无人机能飞越沼泽和浅滩,获取植被分布图、水文连通状况及水鸟栖息地信息。多期影像还能反映水位季节性变化、外来植物扩散和恢复工程效果。生物多样性监测传统上用样线和样方法,主观性强,对动物干扰大。无人机在动物调查中有优势,可统计麋鹿、野牦牛等大型野生动物的数量与分布,干扰小。对鸟类,可评估栖息地质量、监测繁殖种群和巢位。植被多样性方面,结合高光谱影像与机器学习,能识别植物群落类型与优势种,绘制大比例尺植被图。

2.5 污染源追踪与应急监测应用

发生危化品或油品泄漏、工业事故排放时,应急人员需要尽快摸清污染范围和扩散走向。无人机搭载可见光、热红外、气体传感器等设备,快速飞抵事故现场,拍下全景画面并回传实时视频,帮指挥人员看清现场情况。如果是有毒有害气体泄漏,挂载气体传感器的无人机可以描绘出污染羽流的分布与移动路径,据此划定安全区和疏散范围。遇到水体污染,无人机沿污染河段飞行,实时传回水面影像和光谱数据,追踪污染团的前锋位置和扩散速度^[3]。在查非法排污和固废倾倒时,无人机是一种隐蔽又高效的工具。执法人员从空中俯瞰,能发现夜间偷排、暗管偷排、露天焚烧、乱倒固废等行为,同时用机载定位模块记录准确坐标和高清影像,形成完整证据。这种“不上门”的执法方式减少了冲突,也提高了威慑力。矿山环境监管中,无人机可监测矿区废水排放、尾矿库渗漏、扬尘扩散等问题。通过对尾矿库坝体做三维建模和形变分析,判断坝体是否稳定、有无溃坝风险。一旦发生尾矿库泄漏,无人机还能快速评估泄漏量、波及范围和生态损失,为抢险和赔偿提供依据。

3 技术挑战与发展对策

3.1 传感器与载荷技术瓶颈

许多实验室级别的精密分析仪器重量动辄数千克甚至数十千克,远超小型无人机的承载能力。这使得现

场、实时、高精度的环境参数定量检测难以实现。多数监测任务只能采取“空中采样、地面分析”或“半定量反演”的模式,监测效率和数据质量受到制约。发展对策在于加快环境监测传感器的微纳化和集成化研究。微机电系统技术、芯片实验室技术、光学微腔传感技术等新兴方向为解决上述问题提供了可能路径。通过将传统大型仪器的功能集成到微型芯片上,有望在保持测量精度的同时将传感器重量降低至百克级别。同时,应针对典型环境监测场景,研发专用化的无人机载荷,避免运用传感器在灵敏度、选择性和环境适应性方面的不足。

3.2 数据处理与信息提取能力

无人机单次飞行即可获取数千张高分辨率影像,数据量庞大且格式多样。将原始影像转化为可用的环境信息产品,需要经过影像拼接、几何校正、辐射定标、大气校正、信息分类、参数反演等一系列处理步骤。当前的处理流程中自动化程度不足,许多环节仍需人工干预,处理周期长、主观性强。提高数据处理能力的关键在于引入人工智能算法^[4]。深度学习在影像目标检测、地物分类、变化检测等任务中已展现出超越传统方法的性能。通过训练针对环境监测场景的深度神经网络模型,可以实现污染源自动识别、地物类型智能分类、异常变化自动预警等功能。同时,需要开发云端协同的数据处理架构,在无人机端完成初步筛选和压缩,将高价值数据回传至地面或云端进行深度处理,形成高效的数据处理流水线。

3.3 标准规范体系建设

从飞行作业层面看,飞行高度、航速、重叠率、传感器参数设置等作业规程缺乏统一规定,不同单位、不同时间获取的数据可比性差。从数据产品层面看,环境参数的反演算法、数据格式、精度验证方法缺乏行业标准,数据产品的权威性和互认程度不高。推动标准规

范体系建设需要相关主管部门、行业协会、科研机构和企业协同努力。应优先制定无人机环境监测的术语定义、传感器性能要求、数据获取技术规程、数据质量评价方法等基础性标准。在条件成熟时,逐步建立覆盖主要环境监测参数的标准反演模型和参考数据集,规范行业应用行为,保障监测数据的科学性、可比性和法律效力。

4 结语

无人机遥感凭借灵活、高效、成本低等优势,已在大气、水、土壤、生态及应急监测等领域发挥重要作用,有效弥补了传统监测在时空覆盖和精细度上的短板。尽管目前仍面临传感器载荷、数据处理自动化及标准规范等方面的困难,但随着技术进步,这些问题正逐步改善。未来,传感器微型化将使无人机搭载更多高精度设备,提升现场定量检测能力;人工智能的引入可推动数据从人工判读转向智能识别,大幅提高效率;多机协同飞行则能实现大范围同步观测。可以预见,无人机遥感将与地面站点和卫星网络深度融合,构建天地一体化的立体监测体系,为美丽中国建设和生态环境治理提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]姚文琳.无人机遥感系统在环境保护中的应用[J].工程抗震与加固改造,2023,45(05):204.
- [2]司小会.无人机遥感技术在生态环境变化监测中的创新应用[C]//中国智慧工程研究会.2026工程技术与材料应用经验交流论文集.通辽市生态环境局开鲁县分局,2026:1009-1011.
- [3]曾媛.无人机遥感技术在生态环境监测中的应用研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(09):70-72.
- [4]周卓涵,范从勇,李静.基于无人机遥感技术的环境监测研究[J].黑龙江环境通报,2025,38(02):79-81.