

无人机高光谱成像技术在水体生态环境损害监测中的应用研究

薛方伟, 韩佩霖

(山东第一医科大学, 山东济南, 250000)

摘要

本研究主要分析无人机高光谱成像技术在水体生态环境损害监测领域的应用情况。通过阐释高光谱成像技术的原理, 结合无人机平台具有灵活性与高分辨率的优势, 本研究系统地分析了该技术在水体污染物浓度反演、富营养化监测、藻类水华识别等多个方面的应用, 包括技术实现路径与实际应用案例。研究结果表明, 无人机高光谱成像技术能够达成对水体生态环境损害的快速、精准监测, 进而为司法鉴定以及应急决策提供至关重要的数据支持。与此同时, 鉴于当前该技术在实际应用过程中存在的局限性, 研究人员提出了具有针对性的优化建议, 利于推动无人机高光谱成像技术在水体生态环境损害监测领域更广泛的应用。

Abstract

This study mainly analyzes the application of unmanned aerial vehicle (UAV) hyperspectral imaging technology in the field of water ecological environment damage monitoring. By explaining the principle of hyperspectral imaging technology and combining the advantages of flexibility and high resolution of the UAV platform, this study systematically analyzes the application of this technology in various aspects, such as the inversion of water pollutant concentration, eutrophication monitoring, and identification of algal blooms. It includes the technical implementation paths and practical application cases. The research results show that the UAV hyperspectral imaging technology can achieve rapid and accurate monitoring of water ecological environment damage, thus providing crucial data support for forensic identification and emergency decision-making. At the same time, considering the limitations of this technology in the actual application process, researchers have put forward targeted optimization suggestions, which are conducive to promoting the wider application of UAV hyperspectral imaging technology in the field of water ecological environment damage monitoring.

关键词

无人机；高光谱成像；水体生态环境损害；污染物监测；富营养化

Keywords

Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Hyperspectral Imaging; Water Ecological Environment Damage; Pollutant Monitoring; Eutrophication

一、引言

在全球范围内，水体生态环境损害已然成为一个极为重要且亟待解决的环境问题。随着工业化、城市化进程的不断加快，以及农业生产活动的日益频繁，大量的工业废水未经有效处理便直接排放，农业生产污染、生活污水肆意倾倒等现象屡见不鲜，这些行为对水体生态环境造成了严重的破坏，导致水体质量急剧恶化，生态系统功能持续衰退^[1]。水体生态环境的恶化会直接影响到人类的饮用水安全以及渔业资源可持续利用，也会对整个生态平衡造成深远的负面影响。

传统的水体环境监测手段，比如人工采样分析以及固定站点监测等，虽然在一定时期内为水体环境监测工作发挥了重要作用，但随着环境问题的日益复杂和严峻，其局限性也愈发凸显。人工采样分析通常需要耗费大量的人力、物力和时间，且空间覆盖范围极为有限，难以全面反映水体环境的整体状况；固定站点监测则只能获取特定地点的水质信息，对于水体环境的动态变化难以做到及时捕捉，在面对突发性污染事件时显得力不从心^[2]。

随着科学技术的飞速发展，遥感技术逐渐在环境监测领域崭露头角。其中，高光谱成像技术以其高光谱分辨率和精准的地物识别能力，展现出独特的优势^[3]。该技术能够准确获取地物在连续光谱波段的详细信息，为深入了解地物的物理和化学特性提供了便利。而无人机平台的引入，进一步弥补了卫星遥感在空间分辨率和灵活机动性方面的不足。无人机可以在低空飞行，贴近监测目标，实现对小范围水体，如河流、湖泊局部区域、小型水库等的精细化监测^[5]。二者的有机结合，为水体生态环境损害的精细化监测开辟了新的途径。

本研究紧紧围绕无人机高光谱成像技术在水体生态环境损害监测中的应用展开深入探讨，期望能够为该领域的技术创新与实践应用提供具有价值的参考依据，助力水体生态环境保护工作的有效开展。

二、无人机高光谱成像技术原理与优势

研究人员设计了表 1 所示的表格，以期更直观地介绍无人机高光谱成像技术的原理与优势。

表 1 无人机高光谱成像技术的原理与优势

Table 1 Principles and Advantages of Hyperspectral Imaging Technology of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

类别	具体内容
技术原理	<p>1.光谱采集:无人机搭载的高光谱成像仪内置光谱仪与探测器,光谱仪通过棱镜、光栅或干涉仪等分光元件,将目标物体反射或发射的电磁辐射按波长分解为多个窄波段(波段宽度通常在几纳米),探测器同步记录每个波段的辐射强度,形成连续光谱数据。</p> <p>2.成像机制:通过推扫式或摆扫式等成像方式,逐行扫描目标区域,将光谱数据与空间位置信息结合,最终构成包含空间维(X、Y)和光谱维(λ)的三维数据立方体(数据格式如 ENVI 的 BSQ、BIL 等)。</p>
技术优势	<p>1.高光谱解析力:波段数可达数百个,能捕捉人眼及多光谱相机难以分辨的细微光谱差异,例如精准识别植被叶绿素含量变化、土壤重金属成分分布。</p> <p>2.快速响应能力:无人机起降便捷,可在灾害应急(如森林火灾、洪水)中数小时内完成数据采集,相较卫星(重访周期数天至数周)时效性显著提升。</p> <p>3.地形适应性:低空飞行特性使其可贴近目标作业,在峡谷、城市楼宇等复杂地形实现 0.1-1 米级高空间分辨率成像,弥补卫星遥感的分辨率局限。</p> <p>4.多维数据融合:结合无人机 LiDAR、RGB 相机等多源传感器,可同步获取地形高程、可见光影像与光谱数据,构建“图谱合一”的立体监测体系。</p> <p>5.低运营成本:单次飞行成本约数百至数千元,无需卫星数据购买费用,且设备维护简单,适合中小规模区域的高频次监测。</p> <p>6.智能分析潜力:基于高光谱数据可开发植被健康指数、水体富营养化指标等专用算法,结合 AI 模型实现作物病虫害预警、污染溯源等智能化应用。</p>

2.1 高光谱成像技术原理

高光谱成像技术作为一种先进的遥感技术,其核心原理是获取地物在连续光谱波段的反射、吸收和发射信息,进而构建出“图谱合一”的数据立方体。在自然界中,不同物质由于其自身的化学组成和物理结构存在差异,因而具有独特的光谱特征^[4]。这种光谱特征就如同物质的“指纹”一般,能够准确地反映物质的类别和特性。

在实际应用中,通过对光谱曲线的形状、峰值位置和吸收谷深度等特征进行细致分析,便可以实现对水体中多种物质的定性识别与定量反演。以叶绿素为例,叶绿素在红光波段(660 - 680nm)存在明显的吸收峰,而在近红外波段(700 - 750nm)则存在反射峰。利用这一光谱特性,研究人员可以借助相关的算法和模型,大致估算水体叶绿素浓度。由于叶绿素浓度与水体富营养化程度密切相关,因此通过对叶绿素浓度的大致估算,能够有效地判断水体的富营养化程度,为水体生态环境监测提供重要依据^[22]。

2.2 无人机平台的特性

无人机作为一种新型的监测平台,具有机动性高的特性,使其在水体生态环境监测中具有显著优势。无人机具备低空飞行的能力,能够在贴近水面的高度进行数据采集,避免了高空大气对光谱信号的干扰,从而获取更为准确的水体光谱信息^[5]。不仅如此,无人机还具有灵活起降的特点,无论是在地形复杂的山区,还是在交通不便的偏远地区,都能够迅速部署,实现对特定区域水体的快速监测。

与卫星遥感相比,无人机的高分辨率成像能力是其一大突出优势^[6]。卫星遥感虽然覆盖范围广,但空间分辨率相对较低,难以对小范围水体进行精细化监测。而无人机则可实现0.1 - 1米级的空间分辨率,能够清晰地分辨水体中的微小变化,如局部污染区域、藻类聚集斑块等^[7]。此外,无人机还可根据监测需求灵活调整飞行高度、速度和航线。在监测过程中,可以根据水体的不同区域、不同监测目的,获取多角度、多时段的影像数据,从而满足对水体生态环境动态监测的需求。

2.3 技术集成优势

将高光谱成像技术与无人机平台有机结合,形成了“空 - 地一体化”的监测体系,这一体系充分融合了两者的优势,展现出强大的监测能力^[31]。空中方面,高光谱成像技术能够提供丰富的光谱信息,准确识别水体中的各种物质及其含量;陆地方面,无人机平台的高机动性和高分辨率成像能力,使得监测工作能够更加灵活、精准地开展^[29]。

借助这一技术集成优势,在实际监测过程中,无人机可以实时获取水体表面的光谱信息,快速识别污染物的类型、确定其分布范围^[8]。这些数据能够为生态环境损害鉴定提供坚实的数据支撑,帮助鉴定人员准确判断水体污染的程度和范围。在面对突发性水污染事件时,无人机能够凭借其快速响应的特点,第一时间抵达现场,获取关键的影像数据,辅助相关部门进行应急决策,有效缩短应急响应时间,降低污染事件对水体生态环境造成的损害^[9]。

三、 无人机高光谱成像技术在水体生态环境损害监测中的应用

为了更直观的展示无人机高光谱成像技术在水体生态环境损害监测中各个方面的应用，研究人员将无人机高光谱成像技术在以下五个方面的应用制成了表 2 所示的表格，有助于更清晰地了解其作用。

表 2 无人机高光谱成像技术在水体生态环境损害监测中各个方面的应用

Table 2 Applications of Hyperspectral Imaging Technology of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in All Aspects of Monitoring the Damage to the Aquatic Ecological Environment

应用领域	无人机高光谱成像技术的作用
有机污染物监测	1.高光谱成像技术能够捕捉有机污染物独特的光谱特征，通过分析其吸收、反射光谱，识别不同种类的有机污染物，如石油烃、多环芳烃等。 2.以高空间分辨率获取污染区域影像,直观呈现有机污染物的空间分布范围和浓度梯度，为污染治理提供详细数据支持。 3.可定期开展监测，及时掌握有机污染物扩散、降解等动态变化过程，评估污染治理效果。
重金属污染监测	1.利用重金属在特定光谱波段的特征吸收峰，探测土壤、水体中重金属元素（如铅、镉、汞等）的存在。 2.建立光谱数据与重金属含量的定量关系模型，反演污染区域重金属含量，为土壤修复和污染评估提供依据。 3.快速覆盖大面积区域,高效筛查重金属污染疑似区域，为后续定点采样分析缩小范围，提高工作效率。
水体富营养化监测	1.通过高光谱数据反演水体中的叶绿素 a、总氮、总磷等富营养化关键指标浓度，评估水体富营养化程度。 2.识别藻类的光谱特征,判断藻类的种类和生物量，监测藻类的生长和聚集情况。 3.结合历史监测数据,分析水体富营养化发展趋势，为预防和治理提供决策支持。
藻类水华识别与预警	1.凭借高光谱的高分辨率光谱信息,在藻类水华发生初期，检测到水体中藻类的异常增殖和聚集。

	<div>2.实时获取藻类水华的范围、扩散方向和发展速度等信息，及时发布预警。</div> <div>3.结合环境数据（如气象、水文条件）和光谱数据，分析藻类水华形成的原因，为制定防控措施提供参考。</div>
生态环境损害司法鉴定	<div>1.获取客观、全面的污染区域高光谱影像数据，作为生态环境损害的直观证据。</div> <div>2.利用高光谱技术对污染类型、程度、范围进行精准量化分析，为生态环境损害程度评估提供科学依据。</div> <div>3.通过光谱特征分析，辅助判断污染物来源，为司法鉴定中的责任认定提供技术支持。</div>

3.1 水体污染物浓度反演

3.1.1 有机污染物监测

有机污染物是水体污染的关键因素，其中石油类、多环芳烃等有机污染物对水体生态环境危害极大。高光谱成像技术在有机污染物监测方面具有独特的优势，通过分析有机污染物的特征吸收波段，能够实现对其浓度的定量估算^[10]。例如，石油类物质在 2300 - 2500nm 波段具有明显的吸收特征，研究人员可以利用这一特性，结合光谱混合模型或机器学习算法，对石油类污染物的浓度进行精确计算^[11]。

在实际应用中，当发生石油泄漏事故时，利用搭载高光谱成像仪的无人机获取现场影像数据，通过线性光谱混合模型，可以准确反演石油覆盖面积和厚度。这一数据对于评估石油泄漏事故对水体生态环境造成的损害程度具有重要意义，能够为后续的损害赔偿、生态修复等工作提供关键依据^[13]。

3.1.2 重金属污染监测

重金属污染是水体污染中较为隐蔽且危害持久的一类问题，像镉、铅、汞等重金属，它们自身并无明显的光谱特征，难以直接通过光谱分析进行监测^[14]。有研究发现，重金属在水体中通常会与悬浮物、胶体等物质结合，形成特定的结合形态。高光谱成像技术可以通过分析这些结合形态的光谱特征，间接反演水体中重金属的污染程度。

在实际研究中，利用高光谱数据结合偏最小二乘法（PLS）建立模型，是一种常用的重金属污染监测方法。该模型通过对大量高光谱数据和对应的重金属浓度数据进行分析 and 训练，能够建立起光谱特征与重金属浓度之间的定量关系，从而实现对水体中重金属离子浓度的有效预测。这种方法为水体重金属污染监测提供了一种准确、高效的技术手段。

3.2 水体富营养化监测

水体富营养化是水体生态环境损害的重要表现形式之一，其主要指标包括叶绿素 a、总氮、总磷浓度等。其中，叶绿素 a 作为水体富营养化的关键指示指标，与水体中藻类的生长密切相关。高光谱成像技术可以通过叶绿素 a 的光谱响应特征，结合经验算法或神经网络模型，实现对叶绿素 a 浓度的反演^[22]。

在众多算法中，基于归一化植被指数（NDVI）的改进算法，如 MCARI（Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index）、TCARI（Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index）等，具有重要的应用价值。这些算法通过对光谱数据的特定处理，能够有效消除水体背景干扰，提高叶绿素 a 浓度估算的精度。通过准确获取叶绿素 a 浓度，结合总氮、总磷等指标，能够全面评估水体的富营养化程度，为水体生态环境保护和治理提供科学依据^[22]。

3.3 藻类水华识别与预警

藻类爆发水华现象是水体生态环境恶化的一个重要标志，它会大量消耗水中的溶解氧，导致水生生物缺氧死亡，同时还会释放毒素，对水体生态系统和人类健康造成严重威胁。无人机高光谱成像技术在藻类水华识别与预警方面同样发挥着重要作用^[19]。

不同种类的藻类，如蓝藻、绿藻等，具有独特的光谱“红边”位置（700 - 750nm）和荧光峰（685nm）。利用这些光谱特征，无人机高光谱成像技术可以准确区分不同藻类的种类，并实时监测其时空分布情况^[23]。通过对时间序列数据的分析，结合藻类生长的环境因素，如水温、光照、营养盐浓度等，可以建立藻类生长模型，预测水华的发展趋势，提前发出预警信息，为相关部门采取防控措施争取宝贵时间。

3.4 生态环境损害司法鉴定应用

在生态环境损害司法鉴定中，准确、可靠的证据是裁决的关键。无人机高光谱成像数据作为一种新型的证据形式，具有重要的应用价值。通过对比污染前后的光谱影像，可以直观地观察到水体光谱特征的变化，从而量化损害的范围和程度。以无人机光谱数据作为证据对

生态环境损害进行司法鉴定，具有很强的说服力^{【15】}^{【16】}。

利用光谱解混技术，可以对水体中的混合光谱进行分解，追溯污染物的来源。当水体受到多种污染物混合污染时，光谱解混技术能够将不同污染物的光谱信号分离出来，从而确定每种污染物的贡献比例，进而追溯其可能的来源。结合地理信息系统（GIS）技术，将高光谱成像数据与地理空间信息相结合，可以生成详细的损害评估报告，为司法裁决提供科学、准确的依据^{【17】}。

四、 技术应用的局限性与挑战

4.1 数据处理复杂性

高光谱数据具有波段多、数据量大的特点，这给数据处理工作带来了巨大的挑战。在实际应用中，处理高光谱数据往往需要耗费大量的时间，对计算机硬件性能提出了很高的要求。不仅如此，光谱数据中不可避免地存在噪声干扰，以及大气校正误差等问题^{【18】}。这些因素会严重影响反演结果的准确性，导致监测数据出现偏差。

为了克服这些问题，研究人员需要不断优化数据处理算法，提高数据处理效率和精度。研究人员可以采用先进的降噪算法对光谱数据进行预处理，减少噪声对反演结果的影响；还可以通过改进大气校正模型，提高大气校正的准确性，从而获取更为真实可靠的水体光谱信息^{【24】}。

4.2 传感器性能限制

目前，无人机搭载的高光谱成像仪在性能方面还存在一些局限性。在这一局限中，光谱分辨率与空间分辨率难以兼顾是一个较为突出的问题^{【20】}^{【21】}。在实际监测中，为了获取更高的光谱分辨率，往往需要牺牲一定的空间分辨率，反之亦然。除此之外，高光谱成像仪的成像幅宽较小，这意味着在监测大面积水体时，需要进行多次飞行和数据拼接，增加了监测成本和时间。

传感器的稳定性和续航能力也有待提高。在长时间的监测过程中，传感器可能会受到外界环境因素的影响，导致性能下降，影响监测数据的质量^{【25】}。而无人机的续航能力有限，限制了其长时间、大范围的监测应用，无法满足一些对监测时效性和连续性要求较高的场景。

4.3 环境因素影响

光照条件、云层覆盖、水体波动等环境因素对无人机高光谱成像技术的监测精度有着显著的影响。在强光照条件下，水面会发生反射，形成“耀斑”现象。这种“耀斑”会掩盖水体的真实光谱信息，导致监测数据出现误差，难以准确反映水体的实际情况^[26]。

云层覆盖会阻挡无人机获取水体光谱信息，使得监测工作无法正常进行。而水体波动则会导致光谱信号的不稳定，影响数据的准确性。为了减少环境因素的影响，研究人员需要在监测过程中选择合适的时间和天气条件，同时开发相应的算法对受环境因素影响的数据进行校正和补偿。

五、 优化建议与发展趋势

5.1 技术优化方向

针对当前无人机高光谱成像技术存在的问题，技术优化是关键。在数据处理方面，应积极开发高效的数据处理算法，如深度学习算法中的卷积神经网络（CNN）、Transformer 模型等^[26]。这些算法具有强大的特征提取和数据处理能力，能够实现光谱数据的快速降噪、特征提取与浓度反演，提高数据处理的效率和精度。

在传感器方面，需要改进传感器设计，提升光谱分辨率、空间分辨率和运行稳定性。通过研发新型的光学材料和改进传感器结构，可以解决光谱分辨率与空间分辨率难以兼顾的问题。开发探索多传感器（高光谱、热红外、LiDAR）集成技术，有利于将不同类型传感器的优势相结合，从而获取更全面的环境信息，为水体生态环境监测提供更丰富的数据支持。

5.2 应用拓展路径

为了充分发挥无人机高光谱成像技术的优势，需要拓展其应用路径。推动无人机高光谱成像技术与卫星遥感、地面传感器网络的协同应用，构建“高空 - 低空 - 地面”一体化监测体系。卫星遥感具有覆盖范围广的优势，能够获取宏观的水体环境信息；无人机高光谱成像可以在低空领域开展精密的监测；地面传感器网络则可以提供高精度的定点监测数据。三者协同工作，可以实现对水体生态环境的全方位、多层次监测^[30]。

值得一提的是，加强技术标准化建设也是至关重要的。制定统一的数据采集、处理和质量控制规范，能够确保不同地区、不同研究团队获取的数据具有可比性和可靠性，数据具有可比性将有利于对众多数据进行整体分析，可以以此得出一定的结论，便于规范统一标准，对司法鉴定具有很大的帮助。

5.3 未来发展趋势

随着人工智能、物联网技术的飞速发展，无人机高光谱成像技术将朝着智能化、自动化方向不断演进。在之后的发展中，有望开发出具备自主决策能力的无人机监测系统。该系统或可利用人工智能算法自动识别污染事件，根据预设的规则和模型进行预警，并启动相应的应急响应措施，实现监测、预警和应急响应的一体化^[27]。

结合区块链技术，能够确保监测数据的真实性和可追溯性。区块链技术具有去中心化、不可篡改等特性，可以为监测数据提供可靠的存储和管理方式，有效防止数据被篡改，提高数据的可信度，为水体生态环境损害监测和司法鉴定提供更坚实的数据保障。

六、 结论

无人机高光谱成像技术凭借其高光谱分辨率和灵活机动性，在水体生态环境损害监测领域展现出了显著的优势。通过对水体污染物浓度反演、富营养化监测、藻类水华识别与预警以及生态环境损害司法鉴定等方面的应用研究，可以看出该技术在实际工作中已经取得了一定的成果，为水体生态环境保护提供了有力的技术支持。

与此同时，我们也必须清醒地认识到，无人机高光谱成像技术在数据处理、传感器性能和环境适应性等方面仍然面临着诸多挑战。为了进一步提升该技术的实用性和可靠性，未来需要通过持续的技术创新，不断优化数据处理算法和传感器性能；加强多平台协同应用，构建更加完善的监测体系；推进技术标准化建设，规范数据采集和处理流程^[28]。如此，无人机高光谱成像技术才能在水体生态环境损害监测与司法鉴定领域发挥更大的作用，为保护水体生态环境、维护生态平衡做出更大的贡献。

参考文献

- 【1】 范旋, 王发, 连晋姣等. 东江湖上游浙水流域水质评价与污染源解析[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(3):400-412.
- 【2】 雷红平, 赵琳兴, 夏发长等. 黄河干流甘肃白银-宁夏沙坡头段水体污染现状评价及源解析[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(5):710-717.
- 【3】 黄清. 高盐水体环境监测技术的最新进展[J]. 大众标准化, 2025, (1):49-51.

- 【4】 李云梅, 赵焕, 毕顺等. 基于水体光学分类的二类水体水环境参数遥感监测进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(1):19-31.
- 【5】 彭宇帆, 温华. 基于无线传感器网络技术的水体环境监测系统[J]. 物联网技术, 2017, 7(8):26-27, 30.
- 【6】 卞艳, 宫雨生, 马国鹏等. 基于无人机遥感影像的水体提取方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(4):764-774.
- 【7】 汪沛, 罗锡文, 周志艳等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18):1-12.
- 【8】 孙杰, 林宗坚, 崔红霞. 无人机低空遥感监测系统[J]. 遥感信息, 2003, (1):49-52.
- 【9】 范承啸, 韩俊, 熊志军等. 无人机遥感技术现状与应用[J]. 测绘科学, 2009, 34(5):214-215.
- 【10】 崔红霞, 林宗坚, 孙杰. 无人机遥感监测系统研究[J]. 测绘通报, 2005, (5):11-14.
- 【11】 晏磊, 吕书强, 赵红颖等. 无人机航空遥感系统关键技术研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(6):67-70.
- 【12】 张兵. 当代遥感科技发展的现状与未来展望[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(7):774-784.
- 【13】 胡健波, 张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展[J]. 生态学报, 2018, 38(1):20-30.
- 【14】 洪运富, 杨海军, 李营等. 水源地污染源无人机遥感监测[J]. 中国环境监测, 2015, (5):163-166.
- 【15】 赵俊喜. 无人机遥感监测在水土保持监测中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2018, (10):9-10.
- 【16】 孔龙, 冯登超. 基于低空无人机遥感技术的环境监测研究进展[J]. 电子测试, 2023, (6):62-66.
- 【17】 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.
- 【18】 王松吉, 宋君, 陈沭. 无人机低空遥感技术在水文监测中的应用[J]. 珠江水运, 2023, (17):84-86.
- 【19】 成鑫, 徐杰, 李云梅等. 城市黑臭河流污染源类型的无人机高光谱判别[J]. 遥感学报, 2024, 28(8):1914-1926.
- 【20】 邹宇博, 马振予, 焦庆斌等. 水体参数高光谱反演模型对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(3):949-954.
- 【21】 刘梅, 马启良, 原居林等. 基于无人机高光谱遥感技术对内陆养殖池塘水质监测的研究[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(1):195-205.
- 【22】 来莱, 张玉超, 景园媛等. 富营养化水体浮游植物遥感监测研究进展[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5):1299-1314.
- 【23】 宋嗣利. 高光谱遥感监测技术在治理黑臭水体中的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(11):90-91, 97.
- 【24】 周源. 基于低空遥感技术的河道水质监测方法[J]. 经纬天地, 2022, (2):23-25.
- 【25】 王长龙, 冀鲸宇, 赵月飞等. 无人机遥感图像目标检测技术研究综述[J]. 陆军工程大学学报, 2025, 4(1):35-46.
- 【26】 刘海华, 宋永琴. 超越与局限: 无人机新闻的发展和未来[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2021, (14):123-125.
- 【27】 张继贤, 刘飞, 王坚. 轻小型无人机测绘遥感系统研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(3):708-724.

- 【28】 廖小罕, 肖青, 张颢. 无人机遥感: 大众化与拓展应用发展趋势[J]. 遥感学报, 2019, 23(6):1046-1052.
- 【29】 张运林, 施坤, 张毅博等. 陆基(地基、岸基)水环境遥感的提出、实践和初步应用[J]. 遥感学报, 2021, 25(11):2163-2172.
- 【30】 段洪涛, 曹志刚, 沈明等. 湖泊遥感研究进展与展望[J]. 遥感学报, 2022, 26(1):3-18.
- 【31】 金和平, 罗惠恒, 杨磊等. 流域库坝安全“空-天-地-水”立体监测研究进展[J]. 水电与抽水蓄能, 2024, 10(5):1-9, 46.