

无人机遥感在监测蓝藻华中的应用研究

许靖舸 潘宇梁

昆明学院农学与生命科学学院, 云南 昆明 650214

大邱加图立大学, 韩国 庆尚北道 庆山 38430

摘要: 当全球气候变化和水质富营养化成为全球性的环境问题时, 蓝藻水华不仅破坏水生生态系统的平衡和影响水质的安全, 还对人类健康构成威胁。然而, 传统的蓝藻水华监测方法存在效率低、成本高、不灵活等局限性。无人机遥感技术作为一种新兴的监测手段, 以其灵活高效、高分辨率、实时性强等优势, 为蓝藻水华动态监测提供帮助。此研究综述了无人机遥感技术在蓝藻水华监测中的应用、方法、案例研究与展望, 旨在为蓝藻水华的有效监测与管理提供科学依据和技术支持。

关键词: 蓝藻水华; 无人机遥感; 遥感监测; 机器学习

引言

21 世纪以来, 由于全球经济的快速增长, 城市现代化进程日益加快, 水体富营养化进程也在逐渐加快^[1]。工业废水和人类生活污水带来的各种污染物大量流入湖泊、河流, 导致水体中氮磷等营养盐含量大幅度增加, 从而引起大量水体出现富营养化现象^[2]。水体富营养化会导致蓝藻过度繁殖形成蓝藻水华, 破坏了水域生态系统, 对人类生产生活和健康构成威胁, 已日益成为全世界范围内最主要的水污染问题^[3]。蓝藻水华中的部分藻类会释放藻毒素, 危害人类及动物健康^[4], 这些毒素还会酸化水体环境, 降低水体透明度和溶解氧含量, 导致水生生物因缺氧而死亡^[5], 不仅给水产养殖业造成巨大的经济损失, 还减少了水体中的生物多样性, 严重威胁湖泊和河流生态系统的健康^[6]。随着全球气候变化和人类活动的加剧, 蓝藻水华的发生频率和规模逐渐增加, 这对水资源管理和生态保护提出了更高要求。传统监测方法如现场采样、实验室分析等存在监测范围有限、时效性差等问题, 难以满足大范围、实时监测的需求。因此, 探索高效、准确的蓝藻

水华监测方法具有重要意义。

2 蓝藻水华的形成机制及监测需求

蓝藻水华的形成机制是其生物学特性与外部环境因子相互作用的结果。蓝藻是一种光合作用的原核微生物, 具有多种适应极端环境条件的生化特性。它们能够在高温、强光及低二氧化碳浓度等不利条件下生长繁殖, 这得益于其独特的二氧化碳浓缩机制 (CCM) 和固氮能力。此外, 蓝藻的气囊结构通过调节浮力实现垂直迁移, 占据表层光照资源, 抑制其他藻类生长。此外, 外部环境因素在蓝藻水华的形成过程中也起着至关重要的作用, 随着水体中营养盐 (如 N、P 等) 浓度的升高, 蓝藻等藻类能够大量繁殖。在适宜的温度和光照条件下, 蓝藻的密度会逐渐增加, 进而形成水华。除了营养盐、温度和光照等外部因素外, 水体的流动性、微量元素 (如铁、锌等) 的浓度以及气象条件 (如风速、降雨量等) 都会对蓝藻的生长和水华的形成产生影响。

蓝藻藻华的监测需求包括实时监测、预警预报、空间分布评估等方面。实时监测可以及时掌握有害藻华的发生和发展情况, 为应急响

应提供科学依据；预警预报可以提前发现有害藻华的潜在风险，为预防措施的制定提供依据；空间分布评估可以了解有害藻华的空间分布特征和变化趋势，为生态修复和资源管理提供决策支持。然而，蓝害藻华的监测面临诸多挑战，如监测范围大、时效性强、数据准确性高等要求，以及监测成本高、技术难度大等问题。因此，能否迅速且精确地监测藻华发生，理解其发生规律，并深入探究驱动藻华爆发的关键因素，对于制定有效的治理及预防措施而言，具备极为关键的科学理论意义与实际应用价值^[7]。

3 无人机遥感技术原理与特点

得益于其灵活性、高精度和实时性，无人机遥感技术在监测危险藻类方面具有显著的效益。该技术通过搭载高分辨率成像设备和多光谱传感装置，能够同步获取水域的空间分布特征与藻类色素光谱信息，为环境监测提供多维数据支持。其工作原理是通过无人机搭载遥感传感器，在预设的航线上进行低空飞行，对目标区域进行高分辨率影像采集^[8]。采集到的影像数据经过预处理、分类识别等步骤，即可实现对蓝藻水华的动态监测。

无人机能够用搭载高分辨率相机和多光谱传感器等设备进行数据采集，从而获取详细的空间信息和色素特征。无人机平台可以根据监测需求进行灵活部署，不受地形和交通限制，精确识别蓝藻水华的分布范围、密度和种类等信息。此外，无人机还可以进行实时监测和数据快速传输，为蓝藻水华的实时监测和预警提供有力支持^[9]。

4 无人机遥感在蓝藻水华监测中的应用方法

第一步进行影像获取与处理，根据监测区域的特点和监测需求，制定合理的航线规划，确保无人机能够全面覆盖目标区域。然后，通过无人机搭载遥感传感器进行低空飞行，采集

高分辨率影像数据。采集到的影像数据需要进行预处理，包括影像拼接、校正、增强等操作，以提高影像的质量和可读性。在收获影像后，进行蓝藻识别与提取，在预处理后的影像上，利用光谱特征分析、影像分类与识别算法等技术手段，对蓝藻进行识别与提取。常见的光谱特征包括红绿差值植被指数、藻蓝素（PC）与叶绿素 a 浓度比等。藻蓝素蓝藻的标志性色素，其吸收峰位于 620–630 nm（橙红光）和 650–660 nm（红光）区域。这一特征使其在光谱曲线上与绿藻等浮游植物形成显著差异，成为遥感识别蓝藻的关键指标。蓝藻叶绿素 a 在紫外-可见光波段具有典型吸收峰，主要集中在 436.0 nm（蓝光）和 664.5 nm（红光）附近。其中 664.5 nm 处的吸光度与叶绿素含量呈显著线性关系，常被用于定量反演蓝藻生物量。通过选择合适的算法和参数设置，可以实现对蓝藻水华的准确识别和量化分析。最后构建动态监测与预警系统，基于无人机遥感获取的蓝藻水华监测数据，构建实时监测数据处理与分析平台。通过数据分析与挖掘技术，建立蓝藻水华暴发预警模型与算法。当监测到蓝藻水华异常变化时，及时发布预警信息并启动应急响应机制。

5 无人机遥感在蓝藻水华监测中的应用实例

无人机作为新型飞行平台，是进行遥感监测的载体工具，由机载仪器和机载控制系统组成^[8]，用于监测信息的采集与传输，为了使监测数据更有准确性，根据现实需要，无人机可与多光谱、高光谱、LiDAR 和热红外传感器组合，实现多维数据采集。再搭配深度学习模型（如 YOLOv5、Mask R-CNN）提升数据处理效率与精度。

5.1 高精度多光谱成像与 RTK 定位技术结合监测蓝藻水华

目前，可在无人机系统内放置小型机载

GPS 板卡，采用基于载波相位差分技术（real-time kinematic, RTK）的无人机定位系统，该体系实时捕获 GPS 信号，并通过差分解算、内插处理等精确获取无人机拍摄照片的定位信息，最终确保图形的准确性。使用无人机搭载 RTK（实时动态差分定位）模块和多光谱相机，可实现厘米级定位精度与光谱数据的高效采集。高机动性的 RTK 无人机遥感技术能够快速高精度识别蓝藻并进行定位，其数据在能够进行精确小规模环境监测的区域使用起来更为便捷^[10]。研究发现，多光谱数据中的特定波段（如近红外和红光波段）对叶绿素 a 和藻蓝素浓度敏感，可通过归一化植被指数（NDVI）增强蓝藻的识别精度^[11]。该方法可在大面积水域中实现每日动态监测，与传统人工采样相比效率明显提升^[12]。

5.2 高光谱成像与水域蓝藻水华丰度风险评估

藻类丰度评基于高光谱成像技术，国内研究人员开发了经验模型，通过分析蓝藻藻蓝素（PC）与叶绿素 a（Chl-a）的浓度比，量化蓝藻的相对丰度^[13]。例如，国内学者利用无人机高光谱数据反演 PC:Chl-a 比值，发现当该比值超过 0.5 时，蓝藻水华风险显著增加。这一方法在长江中下游湖泊的试点应用中，成功预警了多次潜在水华事件，为管理部门提供了关键决策依据。爱尔兰研究团队则通过推扫式高光谱传感器，对潮间带褐藻（*Ascophyllum nodosum*）进行分类，分类准确率达 94.7%，展示了高光谱技术在藻类群落动态监测中的潜力^[14]。

5.3 激光雷达（LiDAR）与三维生物量估算

在加拿大沿海地区，无人机搭载测深 LiDAR 技术，通过多次回波穿透藻类冠层，获取浮游褐藻的高度和三维分布数据。结合卫星多光谱影像，研究人员构建了生物量估算模型，

发现 LiDAR 数据可精确计算藻类高度（误差 <10 cm），并反演单位面积生物量（ $R^2=0.85$ ）。该技术尤其适用于涨潮期传统监测手段难以覆盖的场景，为商业藻类资源管理提供了新方法^[15]。

5.4 多源数据融合与生态系统分析

在海水养殖区，无人机多光谱数据结合 NDVI 指数，可直观反映紫菜等藻类的生长状态。例如，NDVI 高值区（蓝色）对应藻类茂密区域，而低值区（黄色）则表明生长受胁迫。通过对比不同养殖网的光谱特征，研究人员可指导精细化养殖管理，提升产量^[16]。此外，无人机还可同步采集水体透明度、总磷、总氮等参数，结合气象数据构建多因子模型，预测水华爆发概率。

5.5 基于 Mask R-CNN 的渗漏区域检测

虽然主要针对堤防监测，但西北研究院的技术方案对蓝藻检测具有借鉴意义。研究团队利用无人机热红外图像构建数据集，结合 Mask R-CNN 模型实现渗漏区域的分割（精度 97.7%）。类似地，徐文欣等人在多光谱蓝藻检测中采用卷积神经网络（CNN），通过迁移学习优化模型，在巢湖数据集中实现了 89.6% 的检测准确率^[12]。此外，轻量化 YOLOv5 模型与边缘计算技术的结合，使无人机端实时处理成为可能，显著缩短了从数据采集到预警的时间。

结论

研究表明，无人机遥感技术以其灵活高效、高分辨率、实时性强等优势在蓝藻水华监测中展现出巨大潜力。通过合理的航线规划、影像预处理、蓝藻水华识别与提取以及动态监测与预警系统构建等步骤，可以实现对蓝藻水华的有效监测和预警。同时，无人机遥感技术还面临着诸多挑战和问题，需要进一步加强技术研发和政策支持以推动其在蓝藻水华监测中的广泛应用和发展。未来随着技术的不断进步和政策的逐步完善，无人机遥感技术将在蓝

藻水华监测中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 孙维民, 张志勇, 秦红杰, 等. 凤眼莲和双氧水协同抑藻及改善水质效果研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(11): 98-104.
- [2] Le, C., Zha Y., Li Y. Eutrophication of lake waters in China: cost, causes, and control Environmental Management. 2010, 45(4): 662-668.
- [3] Harke, M. J., Steffen, M. M., Gobler, C. J., Otten, T. G., Wilhelm, S. W., Wood, S. A., Paerl, H. W. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. Harmful Algae, 2016, 54, 4-20.
- [4] 谢平. 蓝藻水华及其次生危害 [J]. 水生态学杂志, 2015, 36 (04): 1-13.
- [5] Carmichael, W. W., 2012. Health effects of toxin-producing cyanobacteria: "The CyanoHABs". Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 7(5): 1393-1407.
- [6] 李媛, 张家卫, 魏杰. 我国蓝藻水华的发生机理、危害及防控利用研究进展. 微生物学杂志, 2015, 35 (04): 93-97.
- [7] 李一民, 谭振宇, 杨辰, 等. 基于多源卫星的滇池藻华提取机器学习算法研究[J]. 地球科学进展, 2022, 37(11): 1141-1156.
- [8] 闻亮, 李胜, 陈清, 等. 基于无人机遥感的水质监测信息集成与应用[J]. 江苏水利, 2020, (10): 35-40.
- [9] 李鑫. 基于无人机遥感数据的蓝藻识别应用研究[D]. 解放军信息工程大学, 2017.
- [10] 韩翠敏, 程花, 夏晴晴, 等. 无人机 RTK 技术在蓝藻水华监测中的应用[J]. 安徽农业科学, 2020, 48 (02): 225-227.
- [11] 王春林, 孙金彦, 钱海明. 低分辨率遥感影像在湖泊蓝藻监测中的应用[J]. 治淮, 2016(2): 24-25.
- [12] 徐文欣. 基于深度学习的多光谱河湖蓝藻水华检测方法研究[D]. 浙江大学, 2022.
- [13] Shi K, Zhang Y, Li Y, et al. Remote estimation of cyanobacteria-dominance in inland waters[J]. Water research, 2015, 68: 217-226.
- [14] Rossiter T, Furey T, McCarthy T, et al. UAV-mounted hyperspectral mapping of intertidal macroalgae[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 242-250.
- [15] Webster T, MacDonald C, McGuigan K, et al. Calculating macroalgal height and biomass using bathymetric LiDAR and a comparison with surface area derived from satellite data in Nova Scotia, Canada[J]. Botanica marina, 2020, 63(1): 43-59.
- [16] Che S, Du G, Wang N, et al. Biomass estimation of cultivated red algae *Pyropia* using unmanned aerial platform based multispectral imaging[J]. Plant Methods, 2021, 17: 1-10.

作者简介: 许靖舫, 昆明学院, 硕士研究生, 河南郑州, 资源利用与植物保护

潘宇梁, 大邱加图立大学, 硕士研究生, 山东日照, 医疗工程