

解读“蓝眼泪”：生物学基础、赤潮形成与监测技术的综合探讨

石文杰^{1,2,3}, 林湘园², 康建华², 梁甲元⁴, 罗肇河^{2,3}

(1. 广西大学资源环境与材料学院 南宁 530004; 2. 自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005;
3. 中国海洋发展基金会海洋空间规划技术重点实验室 天津 300112; 4. 广西大学海洋学院 南宁 530004)

摘要: 夜光藻 (*Noctiluca scintillans*) 是一种在全球海洋广泛分布的甲藻, 同时也是造成许多海域暴发赤潮的主要物种。夜间大量夜光藻聚集于水面时会发出蓝色光芒, 因而俗称“蓝眼泪”; 部分海域已被开发为旅游观光项目。文章简要介绍了夜光藻的分类地位、系统发育关系、生活史及发光机理, 并探讨了其在全球的分布特点以及赤潮形成的主要驱动因素, 包括浮游植物生物量、温度、盐度、水动力条件、缺氧和光照等。此外, 还总结了当前针对夜光藻赤潮的监测方法, 如遥感技术和利用无人机影像结合深度学习的自动化识别技术。对夜光藻未来研究方向提出展望, 强调应从种群动力学、分子生物学和生态影响评估等多角度开展深入研究。文章为海洋生物学家、生态学家和环境管理者提供多维度的夜光藻研究进展, 为夜光藻赤潮的有效防控与海洋生态环境的科学管理提供科学依据和技术支撑。

关键词: 蓝眼泪; 夜光藻; 生活史; 环境驱动; 赤潮监测

中图分类号: X55; Q948.8 文献标志码: A 文章编号: 1005-9857 (2026) 01-0090-12

Deciphering “Blue Tears”: An Integrated Exploration of Biological Foundations, Red Tide Formation and Monitoring Techniques

SHI Wenjie^{1,2,3}, LIN Xiangyuan², KANG Jianhua², LIANG Jiayuan⁴, LUO Zhaohe^{2,3}

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China; 3. Key Laboratory of Marine Spatial Planning Technology, China Oceanic Development Foundation, Tianjin 300112, China; 4. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: *Noctiluca scintillans* is a dinoflagellate widely distributed in the global ocean and is also one of the major species responsible for red tides in many marine areas. When large numbers of *N. scintillans* aggregate on the sea surface at night, they emit a blue glow and are therefore commonly known as “Blue Tears”. In some coastal regions, this bioluminescence has become an attraction for tourism. This paper briefly introduces the taxonomic status, evolutionary relationships, life cycle, and bioluminescent mechanisms of *N. scintillans*. It further discusses its global

收稿日期: 2025-01-28; 修订日期: 2025-12-10

基金项目: 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费(海三科 2024018); 中国海洋发展基金会海洋空间规划技术重点实验室重点课题(ZK-HZ25005)

作者简介: 石文杰, 硕士研究生, 研究方向为海洋赤潮与富营养化生态学

通信作者: 罗肇河, 研究员, 博士, 研究方向为海洋赤潮与富营养化生态学、海洋微藻分类

distribution characteristics and the major driving factors of red tide formation, including phytoplankton biomass, temperature, salinity, hydrodynamics, hypoxia, and light availability. In addition, current monitoring methods for *N. scintillans* red tides are summarized, including remote sensing techniques and automated detection technologies based on unmanned aerial vehicle imagery combined with deep learning. Finally, the paper discusses future research directions, underscoring the importance of multifaceted investigations, encompassing population dynamics, molecular biology, and ecological impact assessments, to inform marine biologists, ecologists, and environmental managers. Such insights can offer scientific evidence and technical support for the effective prevention and mitigation of *N. scintillans* red tides as well as the scientific management of marine ecological environments.

Keywords: Blue tears, *Noctiluca scintillans*, Life cycle, Environmental drivers, Red tide monitoring

0 引言

夜光藻 (*Noctiluca scintillans*) 是一种广泛分布于全球海洋的单细胞甲藻, 在海洋生态系统中具有重要生态功能, 是许多海域赤潮事件的主要诱发物种^[1-2]。该物种在夜间大量聚集于海面并受扰动时, 可发出蓝色生物光芒, 被形象地称为“蓝眼泪”, 并在一些沿海地区被开发成为独特的自然景观, 吸引了广泛的关注与研究^[3-5]。然而, 夜光藻大量暴发不仅可能影响渔业资源与滨海旅游业, 还可能对沿岸生态平衡产生深远影响, 包括破坏海洋生物多样性、影响食物链和生态系统的能量流动等^[6-7]。因此, 深入研究夜光藻的生物学特性与生态功能, 解析其基础生物学、种群生态学及监测和预警方法, 对有效保护海洋环境和制定可持续管理策略具有重要意义。

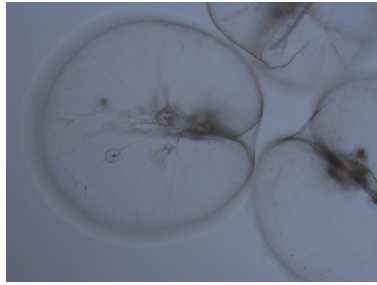
Harrison 等^[5]系统总结了红色夜光藻和绿色夜光藻的全球分布、生态位差异及环境适宜范围; Li 等^[3]在区域尺度上归纳了中国沿海及周边海域的赤潮暴发时空格局与主要环境驱动因素。此外, 近年研究在3个方面取得进展: 其一, 围绕其生活史策略(如有性、无性转换与混合营养过程), 开始量化这些过程在不同海区(含季风海域与上层低氧带背景)对种群扩张与赤潮暴发维持的作用; 其二, 气候变暖与海洋脱氧扩展对适生范围、季节节律与暴发强度的影响证据逐步累积; 其三, 高时空分辨率海色遥感, 搭载多光谱、高光谱传感器的无人机, 深度学习方法, 以及环境DNA(eDNA)、长读长宏条形码等技术, 显著提升了夜光藻识别与监测的精细化与实时化能力。基于这些进展, 本文将综合当前

学术界对夜光藻的研究成果, 围绕其分类学和进化地位、生活史、生物发光机理、全球分布特点, 以及夜光藻赤潮的形成机制、监测方法等方面展开论述, 旨在为相关防控措施和生态保护策略提供参考。

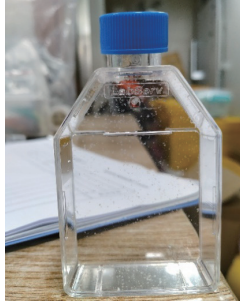
1 夜光藻的分类学和系统进化地位

夜光藻隶属于甲藻纲(Dinophyceae)、夜光藻目(Noctilucales)、夜光藻科(Noctilucaceae)、夜光藻属(*Noctiluca* Suriray), 是一种无甲壳、异养并能够生物发光的单细胞甲藻^[8]。根据是否内共生绿藻, 可将其分为红色夜光藻(red *N. scintillans*)和绿色夜光藻(green *N. scintillans*)。红色夜光藻没有光合色素体, 是典型的吞噬营养型甲藻, 能够摄食细菌、小型和微型浮游动植物、桡足类卵等^[4-5]。绿色夜光藻为混合营养型, 其细胞内共生的绿藻(*Pedinomonas noctilucae* Sweeney)可以提供部分光合产物, 作为吞噬营养的补充^[9]。截至目前, 我国沿海记录到的夜光藻全部为红色夜光藻, 未发现绿色夜光藻。

平常见到的夜光藻为囊泡状(图1), 是其二倍体的营养细胞; 营养细胞近圆球形, 游泳生活, 大小约为200~1000 μm, 肉眼可见; 细胞(膜)壁透明, 由两层胶状物质组成, 表面散布着众多微孔; 细胞内原生质淡红色, 细胞核为小球形, 被中央原生质包围, 不具光合色素体。夜光藻营养细胞的腹面中央有一个口腔, 上面着生1条长的触手, 触手基部有1条短小的鞭毛和齿状突^[10]。由于营养细胞不具有甲藻的典型特征(横沟、纵沟及甲藻核), 因此历史上夜光藻曾被误认为是一种水母。Haeckel^[11]首次报道了夜光藻的单倍体游动孢子, 观察到游动孢子有横沟和



(a) 夜光藻囊泡状的二倍体营养细胞



(b) 现场采集到的夜光藻水样

图1 夜光藻细胞形态与水样

Fig.1 Morphology of *Noctiluca scintillans* cells and field water sample

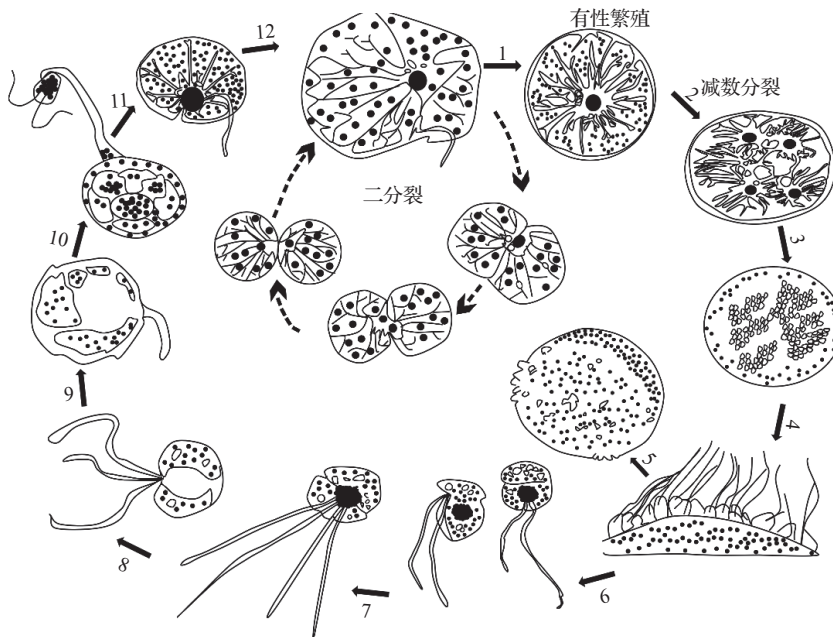
纵沟，细胞核呈半球形，位于游动孢子细胞的底部，猜测其可能是一种甲藻。随后，Kofoid^[12]详细地描述了夜光藻单倍体游动孢子形态，包括横沟、横沟鞭毛、纵沟和纵沟鞭毛，确认了其其为甲藻，并以夜光藻

为模式种正式建立了夜光藻目 (Noctilucales)。

基于核糖体大亚基 (LSU rRNA) 和小亚基 (SSU rRNA) 序列的系统发育分析表明，夜光藻在进化上属于较为古老的甲藻^[13-14]。此外，对其荧光素酶 (LCF)、微管蛋白 (tubulin)、热休克蛋白 90 (Hsp90) 等功能基因的进化分析也支持该结论^[15-16]。夜光藻配子形态简单，2 根鞭毛的分化程度也较其他甲藻更原始，因此综合形态学和分子系统学结果，夜光藻被视为甲藻系统发育中较早分化的类群^[10,17]。

2 夜光藻的生活史

夜光藻有无性繁殖和有性繁殖两种方式 (图 2)。其中，无性繁殖通过二倍体营养细胞的二分裂完成，可迅速扩大种群规模；而有性繁殖通过配子形成与融合实现基因重组，提升群体遗传多样性与环境适应力，并推动种群更新。在有性繁殖过程中，营养细胞的细胞核首先迁移至细胞一侧，并进行两次分裂形成 4 个细胞核；部分细胞质与细胞核结合在细胞表面形成原配子突起；随后，原配子突起继续分裂 6~8 次，形成 4 簇共 256~1 024 个原配子，并集中到母细胞表面的一侧，整个细胞变为半纺锤形，称为配子母细胞；配子长出 2 根鞭毛，成

图2 夜光藻的生活史 (仿 Fukuda 等^[17])Fig.2 Schematic life cycle of *Noctiluca scintillans* redrawn after Fukuda, et al.^[17]

注：虚线箭头为无性繁殖；实线箭头为有性繁殖。

熟后被释放到水体中, 称为游动孢子; 同时, 母细胞恢复球形, 然后消亡; 游动孢子两两融合, 形成具有4根鞭毛的合子; 合子丢失鞭毛, 并长出1根触手, 经过一系列变化后, 形成新的体积较小的营养细胞, 随后长大成为成熟的营养细胞^[17]。

在自然种群中, 红色夜光藻通过二分裂进行无性繁殖的比率远高于有性繁殖^[18-19]。青岛湾夜光藻的周年观测数据也显示, 二分裂个体数量与夜光藻总数的年际波动高度相关^[20]。尽管有性繁殖在数量上占比不高, 但是其在种群规模维持中扮演重要角色。研究发现, 配子与营养细胞接触后能够“重启”营养细胞的二分裂过程, 并促使其再度转变为配子母细胞^[21], 使夜光藻种群在一定环境条件下持续维持高密度。然而, 该过程的分子机制目前尚未见相关报道。现有证据主要来自早期形态观察与小尺度室内试验, 关于“有性—无性切换”发生的触发条件、在种群增长中的定量贡献及其与环境因子的耦合路径, 仍缺乏可靠的跨区域证据与统一框架。部分结论依赖于相关性而非因果检验, 且常未区分红色夜光藻和绿色夜光藻的生理差异, 导致相关推论的外推能力受限。这些问题值得在未来开展更深入的研究。

3 夜光藻的发光机理

夜光藻与其他发光甲藻相似, 其发光来源于细胞内的闪光体 (scintillons)。这些闪光体附着在液泡膜上, 内含荧光素、荧光素酶与荧光素结合蛋白, 共同构成了夜光藻发光的生物化学基础^[22]。外部物理扰动会透过细胞壁作用于液泡膜, 使膜电位发生变化并降低闪光体内的pH, 从而激活荧光素酶; 荧光素被氧化后释放波长约为474~476 nm的蓝光^[23-24]。研究表明, 夜光藻的荧光素酶基因在进化上展现出独特的保守性, 与其他光合自养型发光甲藻 [例如, 亚历山大藻 (*Alexandrium* spp.)、长刺角甲藻 (*Ceratocorys horrida*)、膝沟藻 (*Gonyaulax* spp.)、多边舌甲藻 (*Lingulodinium polyedrum*)、纺锤梨甲藻 (*Pyrocystis fusiformis*)、厚甲原多甲藻 (*Protoperdinium crassipes*) 及新月梨甲藻 (*Pyrocystis lunula*)] 相比, 其结构更接近甲藻的祖先基因。例如, 其荧光素酶基因在同一条多肽上同

时包含两个结构域, 而未经历复杂的基因分裂或重组, 这为理解甲藻发光机制的进化历程提供了重要线索^[16,25]。然而, 关于夜光藻这种“二域合一”的荧光素酶结构如何影响其在低pH条件下激活特性与发光动力学, 迄今仍缺乏将转录、蛋白质质量与细胞成像相结合的系统性证据。

甲藻的发光过程主要受物理扰动、营养和生理状况以及昼夜节律等多种因素调控^[22]。尽管甲藻发光需要消耗大量的能量, 但是研究发现其对发光的能量分配甚至优先于细胞的生长和繁殖^[26]。关于甲藻发光的生态学意义, 目前主要有“恐吓 (startle effect) 假说”和“报警 (burglar alarm) 假说”^[27]。“恐吓假说”认为, 甲藻的发光可以直接影响捕食者的摄食行为, 例如, 甲藻发光会让桡足类 (如 *Acartia hudsonica*) 游动速率显著加快, 可以理解为捕食者因受到甲藻发光的“恐吓”而产生应激性逃逸, 从而减少自身被捕食的机会。“报警假说”认为, 当甲藻遭遇浮游动物的捕食时, 它们通过发光来吸引其他更高营养级的捕食者, 从而降低自身被捕食的风险^[28]。进一步而言, 夜光藻在不同营养条件 (猎物充足或匮乏)、低氧与分层等情境下的能量分配与生长、抗捕食之间的权衡关系, 尚缺乏可量化、可比较的分析框架。该问题有待通过原位观测与中尺度实验进行系统检验与整合研究。

4 夜光藻的地理分布概况

夜光藻在温带、亚热带和热带沿岸水域广泛分布^[5,29]。但红色夜光藻和绿色夜光藻的分布范围存在差异: 绿色夜光藻分布相对局限, 主要分布在东南亚和阿拉伯海北部25~30℃水温的海域^[5]。每年1—3月在阿拉伯海都会形成大规模赤潮^[30]。相比之下, 红色夜光藻的分布范围更为广泛, 能在10~25℃的水域内具有较高的种群增长率。尤其在上升流及富营养化等高生产力海域密度较高, 如德国湾^[31]、日本濑户内海^[32]、土耳其马尔马拉海^[33]、印度西南海岸^[6,33-34]、阿拉伯海^[35]和我国沿海水域^[2,36]。

我国自1933年在浙江沿海首次记录夜光藻赤潮以来, 渤海、黄海、东海、台湾海峡以及南海近岸

均陆续有相关报道^[1]。统计显示,约86.8%的夜光藻赤潮集中于春季和夏季(4—6月),且多为短期、小范围赤潮^[3]。其中,渤海全域、长江口至台湾海峡西岸、珠江口邻近海域是夜光藻赤潮频发的热点区域;辽宁、山东、浙江是夜光藻赤潮暴发面积最大的3个省份,而河北、福建和广东是夜光藻赤潮事件记录最多的3个省份^[1,3,37]。受全球气候变暖和人类活动影响,夜光藻赤潮在我国的发生频率与覆盖面积仍呈上升趋势^[1,30,38]。最新的eDNA与单分子实时测序(Single Molecule Real-Time Sequencing, SMRT)长读长高通量测序结果显示,即便在非赤潮期,我国沿海各海域全年均可检出夜光藻序列,表明沿海一直存在夜光藻本地种群,可作为潜在的“种源库”,一旦环境条件适宜,便可迅速引发赤潮^[2]。

5 环境因子对夜光藻种群动态的调控

夜光藻赤潮作为一种复杂的海洋生态现象,其

形成机制涉及多种环境因素耦合的交互作用(图3)。根据《赤潮监测技术规程》(HY/T 069—2005),夜光藻赤潮基准浓度为0.3万~1.0万个细胞/升^[39],用于统一报告口径;但不同海域的生态背景、采样与计数以及分子检测等方法的差异,会使实际致灾阈值与该范围不完全一致。因而在判读时,应结合当地长期监测情况与历史案例,进行方法学换算或阈值校正。夜光藻赤潮的形成过程可以分为3个阶段^[40]:①适宜的水文和生物条件促进细胞丰度上升;②物理因素(降水、风等)引起表层海水辐聚,导致细胞局部集中;③营养细胞通过持续的二分裂快速增殖。现有研究表明,影响夜光藻赤潮形成的主要环境因素包括浮游植物生物量、温度、盐度、水文条件、溶解氧和光照等,但它们多为协变关系而非直接因果^[4,41-44]。当前,在全球气候变暖和富营养化背景下,升温和缺氧海域的扩大也为夜光藻赤潮的频发与扩张提供了有利条件^[7]。



(a) 2022年4月9日广东省阳江市海域夜光藻赤潮

(b) 2020年5月4日台湾海峡夜光藻赤潮

图3 中国沿海夜光藻赤潮

Fig.3 Coastal red tide of *Noctiluca scintillans* in China

5.1 浮游植物生物量的影响

红色夜光藻是典型的异养型生物,能够摄食多种浮游植物、小型浮游动物、鱼类和昆虫等的卵、真菌、细菌及有机碎屑等;绿色夜光藻是混合营养型浮游植物,其细胞内共生藻可提供部分有机物,作为吞噬营养的补充^[4,45]。多项现场观测显示,夜光藻丰度的峰值往往出现在浮游植物和叶绿素峰值之后,随着夜光藻密度上升,浮游植物数量开始下降,并最终导致夜光藻数量随之衰减^[46]。胶州湾区域逐月多学科综合调查结果表明,夜光藻丰度与中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)丰度间呈极

显著正相关关系,推测后者可能是夜光藻的主要食物来源^[47]。有研究发现,夜光藻的代谢产物可成为其他微藻的氮磷营养来源,并形成短暂的闭环式互利关系,从而持续促进夜光藻种群扩张^[48]。值得注意的是,夜光藻和浮游植物的“峰值先后”既可能源于资源脉冲触发的摄食响应,也可能是由水动力造成的同步聚集,或由夜光藻摄食引发的猎物衰减“自反馈”。若要将统计相关性转化为可验证的因果链,应在关键海域结合高频现场序列与围隔操控实验,辅以单细胞内含物DNA、稳定同位素追踪及水动力和状态空间(或结构方程)模型,定量

分解“摄食放大、物理聚集、损失”3个过程, 并估计阈值与区域差异。

5.2 温度的协变及潜在阈值

研究表明, 绿色夜光藻和红色夜光藻的适生温度存在差异。由于绿色夜光藻内共生体 (*P. noctilucae*) 在低于 25℃ 的条件下无法生长, 因此通常绿色夜光藻的分布北部边界位于吕宋海峡和越南海岸, 大致对应于 25℃ 的等温线^[49]。红色夜光藻的最佳生长温度为 16~24℃, 但即使海温低至 5℃, 其依然能够繁殖^[50]。实验室研究表明, 红色夜光藻在 16~24℃、盐度 18~26 的范围内增长最显著; 高温 (28℃) 会抑制其生长并导致种群消亡^[43]。另有研究借助浮游动物图像扫描分析 (ZooScan) 技术观察到, 温度和磷酸盐浓度是欧洲北海夜光藻种群的关键驱动因素, 水温升高有可能提升夜光藻赤潮发生的频率^[51]。综合历史记录与统计建模显示, 中国沿海夜光藻赤潮在海表温度 21.9~22.7℃ 时发生概率最高。近几十年, 随着海温持续上升, 中国沿海夜光藻赤潮高风险等温带整体北移并拉长了适生时窗 (更早出现、峰值期延长、结束推迟), 从而导致赤潮频率与持续时间的总体增加^[1-2]。

5.3 盐度的范围偏好与适应

夜光藻对盐度变化相对耐受, 属广盐种。野外观测显示, 其常见活动范围的盐度约为 10~37。在实验室培养条件下, 其在盐度 18~42 均可存活, 并在盐度 26 时种群增长率最高^[43]。然而, 不同地理株系的“最适盐度”存在显著差异^[31,52]。暴雨或河流淡水大量注入会迅速降低水体盐度, 从而抑制夜光藻种群数量^[53]。需要指出的是, 这些现象往往同时伴随营养盐输入、浊度升高与水体分层改变, 盐度效应常与其他环境因子高度协同变化, 因此难以将盐度变化单独视为主导因子。总体来看, 盐度对夜光藻赤潮的影响常通过多条途径间接实现: 一是渗透调节成本改变了个体的生理预算 (生长、摄食、发光能量分配); 二是淡水羽流重塑了微食物环与饵料组成, 从而影响夜光藻的摄食收益; 三是密度差异与分层强度改变了表层滞留与聚集的过程。因此, 盐度的影响在跨海域比较上常缺乏如水温等因子那样表现出的一致性规律^[44-54]。

5.4 水动力的聚集效应

水动力通过汇聚、保留与扰动三要素共同塑造夜光藻的局地浓度, 是赤潮形成的关键因素之一。风生流、潮汐残余流与环流边界可将夜光藻及其食物输送并汇聚至湾内或岸外涡旋、锋面与河口羽状体等拉格朗日收敛区。在水流流速缓慢与滞留时间较长的条件下, 种群更易维持并扩增^[55]。以大鹏湾为例, 风场驱动的输运与湾内弱交换促成夜光藻稳定聚集, 配合较长的水龄支持其持续繁殖^[36,56-57]。在平潭岛等海域, 弱循环与强分层常与夜光藻暴发同时出现, 风速减弱或风向改变时更易形成高密度区, 而过强风浪则使其迅速稀释与扩散, 呈现明显的阈值特征^[58]。在全球变暖背景下, 分层增强与混合减弱可能减少深层营养物质向真光层的输送, 使依赖摄食的夜光藻在低混合环境中获得相对优势, 从而延长赤潮暴发的持续时间^[59]。

5.5 低氧的共现证据与机制推断

在阿拉伯海, 冬季季风期间的绿色夜光藻暴发与上层水体低氧水上涌 [最小含氧带 (OMZ) 浅化] 长期呈显著共现关系^[30]。一种推测性的解释是绿色夜光藻的内共生体 (*P. noctilucae*) 在约 13 亿年前进化形成, 当时海洋氧气浓度远低于现代水平, 这暗示缺氧环境可能有利于绿色夜光藻生长^[60]。近年来, 韩国 Jangmok 湾的长期观测序列显示, 夜光藻暴发常伴随溶解氧下降和铵浓度升高, 这支持了“摄食—排放—再利用”的营养反馈机制可能在赤潮维持中发挥作用^[61]。同时, 赤潮暴发本身也可能加剧近岸缺氧并引发生态损害。例如, 在印度洋曼纳尔湾, 赤潮期间溶解氧质量浓度降至 2 mg/L 以下, 导致珊瑚大面积死亡^[62]。过去半个世纪, 热带海洋中层低氧区普遍扩张, 氧含量显著下降^[63-64]。地球系统模型一致预估, 在变暖与分层加剧, 以及人类活动加剧营养输入的共同作用下, 21 世纪全球海洋氧库存仍可能下降约 1%~7%^[65]。这将提高“低氧—分层—聚集—再循环”条件同现的概率, 为夜光藻在更广纬度和更长季节窗的暴发提供有利环境背景。

5.6 光照驱动及生理响应

夜光藻具有复杂的光感受机制, 能够感知光的强度和方向, 并通过趋光性行为调整自身的运动方

向,以优化光合作用和生长条件^[66]。在光照充足时,夜光藻易于在表层聚集并形成赤潮。研究显示,无论摄取何种食物,绿色夜光藻的生长都必须依赖充足的光照^[67]。在最佳光照强度条件下,以多甲藻(*Peridinium foliaceum*)为食时,夜光藻的最大比生长率(μ)可达1.44/d,而在低光照强度条件下,比生长率仅为0.18/d,表明光照对夜光藻生长具有重要影响。光合电子传递率(ETR)和光照曲线也显示,在营养盐不受限时,摄食与否对内共生体的光合参数(ETR_max与 α)影响不显著,提示光合作用与摄食之间可能以代谢分工而非简单相加的方式协同作用^[67]。早期关于绿色夜光藻的光生理研究进一步表明,其光饱和曲线呈低饱和点、弱(或无)光抑制的特征,显示其在较宽的光强范围内具有高效的光能利用能力,有助于在浑浊近岸与表层强光环境中维持净光合^[68]。

6 夜光藻赤潮的监测

传统研究过程中,夜光藻赤潮监测以拖网/采水—显微计数、叶绿素荧光与温盐深仪(CTD)观测为主,并在《赤潮监测技术规程》(HY/T 069—2005)中实现监测口径与阈值的规范化,奠定了长时间序列与预警基线。2000年以来,海色遥感快速发展,中等到高分辨率卫星传感器[如中分辨率成像光谱仪(MODIS),地球同步轨道海洋水色成像仪(GOCI),国产海洋1号C/D卫星(HY-1C/D)等]利用红色夜光藻在红光与近红外增强反射的光学特征,实现了大范围、长时间序列的识别与追踪,揭示其季节性与年际变化规律。近年来,无人机影像与深度学习算法在米级尺度上实现了对近岸小尺度赤潮的自动提取,弥补了卫星空间分辨率与现场观测的不足。

6.1 遥感技术应用

遥感技术可以通过光学传感器获取赤潮发生区域的高分辨率影像,实现对赤潮的空间分布监测,追踪赤潮的动态变化^[69-71]。研究表明,夜光藻具有独特的吸收和散射特性(蓝色波段的吸收增强,红色和近红外波段的散射增强,导致富含红色夜光藻的水域的红色波段和近红外波段的反射率显著高于

周围水域)。因此,卫星图像可将红色夜光藻与其他藻类区分开来^[72-73]。Lin等^[74]通过分析2000—2017年的中等分辨率的卫星海洋颜色数据,绘制出4—8月我国东海的夜光藻赤潮分布图像,揭示了夜光藻赤潮在东海的分布呈现季节性和年际变化规律,并指出其有增加的趋势。王义衍等^[75]以2022年3月发生在广东省汕尾市红海湾的红色夜光藻赤潮为例,利用海洋一号C/D(HY-1C/D)卫星搭载的高空间分辨率、大幅宽和短重访周期的海岸带成像仪(Coastal Zone Imager, CZI),分析了红色夜光藻赤潮在红光和近红外波段的高反射特性和浑浊水体在绿光波段的高反射特性,构建了一套面向HY-1C/D的红色夜光藻赤潮探测、监测方法,进一步证实了高时空分辨率遥感产品在红色夜光藻赤潮监测中的可行性。

6.2 无人机影像与深度学习

无人机影像技术凭借其独特的视角、广泛的覆盖范围以及低廉的获取成本,在农业监测、城市规划、自然灾害评估等多个领域展现出广泛应用的潜力。而深度学习技术,作为一种基于人工神经网络的机器学习方法,通过构建多层神经网络模型,能够自动从海量数据中学习并提取特征,从而实现对目标的精准识别、分类和检测^[76]。利用前文提到的夜光藻独特的吸收和散射光特性,无人机搭载红光与近红外等关键波段的多光谱、高光谱传感器,可以在物种水平上识别夜光藻赤潮^[74]。近期有研究提出一套基于深度学习的无人机夜光藻赤潮提取方法:以无人机获取的高分辨率红绿蓝(RGB)视频为输入,在UNet++框架中采用卷积神经网络(VCG-16)作为骨干网络,并加入空间随机失活(dropout)以增强特征学习、降低过拟合;同时加载大规模图像数据集(ImageNet)预训练权重做迁移学习以加快收敛。实测结果显示,该模型无须人工设定阈值即可自动识别并分割夜光藻赤潮斑块,相比传统流程预处理更少、精度更高,适合大范围、近实时的海洋监测,展现出广泛的应用前景^[77]。

7 不足与展望

尽管已有研究对夜光藻的生态学特征和赤潮现

象进行了探索, 但仍存在诸多知识空白, 如其时空演变的复杂性、暴发驱动因素的不确定性、实地生态行为研究的缺乏等。为更全面地理解夜光藻的生态学特征, 预测其赤潮事件, 并采取有效措施减少其对海洋生态系统的负面影响, 未来的研究可着重关注以下几个方向。

(1) 种群动力学机制: 在重点海域开展高频长时间序列观测, 结合环境 DNA (eDNA) 与定量 PCR (qPCR) / 数字 PCR (Digital PCR) 对配子与营养细胞分型, 并配套流式、成像计数建立配子、营养细胞比例、分裂率以及赤潮前后阶段转换阈值与时间窗, 定量识别有性与无性繁殖切换在赤潮形成与消退中的作用, 服务于赤潮启动和消退的过程诊断与短临预警。

(2) 环境因子与种群动态调控: 开展拉格朗

日围隔与中尺度生态系统实验, 配合原位高频监测 (DO、 NH_4^+ 、叶绿素、浊度、分层强度、停留时间) 与摄食率估算 [如浮游动物图像扫描分析 (ZooScan)], 解析猎物密度及被捕食通量、铵释放与缺氧的时序一致性、表层辐聚强度与滞留时间等, 阐明营养反馈、水体分层与低氧等环境因子对种群动态的调控机制, 将统计相关性转化为可参数化的因果量, 为过程模型与管理阈值 (如 DO 与 NH_4^+ 阈值) 提供约束。

(3) 多尺度融合监测与区域化预警: 构建卫星海色解析大尺度格局, 无人机刻画近岸细尺度斑块, 岸基、浮标提供长时间序列监测基线, 并嵌入 eDNA 生物分子快检一体化体系, 将物理场与生物信号同化为风险评分, 形成阈值化、区域化的预报产品。

参考文献 (References):

- [1] WANG Kang, LIN Hui, PENG Conghui, et al. Long-term changes in *Noctiluca scintillans* blooms along the Chinese coast from 1933 to 2020[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(17): 5099-5113.
- [2] LIN Xiangyuan, HU Wenjia, HII K S, et al. Climate change drives long-term spatiotemporal shifts in red *Noctiluca scintillans* blooms along China's coast[J]. *Molecular Ecology*, 2025, 34(7): e17709.
- [3] LI Xiaodong, LU Weijing, JIANG Fan, et al. The dinoflagellate *Noctiluca scintillans* in China: a review of its distribution and role in harmful algal blooms[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 194: 115415.
- [4] HUANG Changping, QI Yinghua. The abundance cycle and influence factors on red tide phenomena of *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in Dapeng Bay, the South China Sea[J]. *Journal of Plankton Research*, 1997(3): 303-318.
- [5] HARRISON P J, FURUYA K, GLIBERTT P M, et al. Geographical distribution of red and green *Noctiluca scintillans*[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(4): 807-831.
- [6] NAQVI S W A, GEORGE M D, NARVEKAR P V, et al. Severe fish mortality associated with 'red tide' observed in the sea off Cochin[J]. *Current Science*, 1998, 75: 6-25.
- [7] KORDUBEL K, BASCHEK B, HIERONYMI M, et al. Improving the sampling of red *Noctiluca scintillans* to understand its impact on coastal ecosystem dynamics[J]. *Journal of Plankton Research*, 2024, 46(3): 251-271.
- [8] 陆斗定, 张志道, 朱根海, 等. 浙江近海夜光藻的分布及其生态学特点[J]. *东海海洋*, 1994, 12(3): 62-69.
LU Douding, ZHANG Zhidao, ZHU Genhai, et al. Distributive pattern of *Noctiluca scintillans* in the Zhejiang coastal water area[J]. *Journal of Marine Sciences*, 1994, 12(3): 62-69.
- [9] WANG Lu, LIN Xin, GOES J I, et al. Phylogenetic analyses of three genes of *Pedinomonas noctilucae*, the green endosymbiont of the marine dinoflagellate *Noctiluca scintillans*, reveal its affiliation to the order Marsupiomonadales(Chlorophyta, Pedinophyceae) under the reinstated name *Protoeuglena noctilucae*[J]. *Protist*, 2016, 167(2): 205-216.
- [10] 钱树本, 刘东艳, 孙军. 海藻学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 712-800.
QIAN Shuben, LIU Dongyan, SUN Jun. *Marine phycology*[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005: 712-800
- [11] HAECKEL E. Natürliche Schöpfungsgeschichte: gemeinverständliche wissenschaftliche vorträge über die entwicklungslehre im Allgemeinen und diejenige von Darwin, Goethe und Lamarck und besonderen[M]. Berlin: Georg Reimer, 1923: 12-31.
- [12] KOFOID C A. New morphological interpretation of the structure of *Noctiluca* and its bearing on the status of the Cystoflagellata

- (Haeckel)[J]. University of California Publications in Zoology, 1920, 19: 317-34.
- [13] LENAERS G, SCHOLIN C, BHAUD Y, et al. A molecular phylogeny of dinoflagellate protists(Pyrrhophyta)inferred from the sequence of 24S rRNA divergent domains D1 and D8[J]. Journal of Molecular Evolution, 1991, 32: 53-63.
- [14] SAUNDERS G W, HILL D R A, SEXTON J P, et al. Small-subunit ribosomal RNA sequences from selected dinoflagellates: testing classical evolutionary hypotheses with molecular systematic methods[J]. Plant Systematics, 1997, 11: 237-259.
- [15] FUKUDA Y, ENDOH H. Phylogenetic analyses of the dinoflagellate *Noctiluca scintillans* based on beta-tubulin and Hsp90 genes[J]. Eur J Protistol, 2008, 44(1): 27-33.
- [16] LIU Liyun, HASTINGS J W. Two different domains of the luciferase gene in the heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans* occur as two separate genes in photosynthetic species[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104: 696-701.
- [17] FUKUDA Y, ENDOH H. New details from the complete life cycle of the red-tide dinoflagellate *Noctiluca scintillans* (Ehrenberg) McCartney[J]. European Journal of Protistology, 2006, 42(3): 209-219.
- [18] ZINGMARK R G. Sexual reproduction in the dinoflagellate *Noctiluca miliaris* suriray[J]. Journal of Phycology, 1970, 6(2): 122-126.
- [19] 陈汉辉, 纪桑. 夜光藻摄食和营养繁殖的昼夜节律[J]. 暨南大学学报 (自然科学与医学版), 1991, 12(3): 104-107.
CHEN Hanhui, QI Sang. The feeding and vegetative reproduction diurnal rhythms of *Noctiluca scintillans*[J]. Journal of Jinan University(Natural Science & Medicine Edition), 1991, 12(3): 104-107.
- [20] 周成旭, 吴玉霖. 夜光藻的繁殖[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(2): 162-164.
ZHOU Chengxu, WU Yulin. Reproduction In *Noctiluca Scintillans*(Macartney)[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(2): 162-164.
- [21] SATO M S, SUZUKI M, HAYASHI H. The density of a homogeneous population of cells controls resetting of the program for swarmer formation in the unicellular marine microorganism *Noctiluca scintillans*[J]. Experimental Cell Research, 1998, 245(2): 290-293.
- [22] 郭术津, 孙晓霞. 海洋发光甲藻研究进展[J]. 海洋科学, 2018, 42(7): 148-157.
GUO Shujin, SUN Xiaoxia. A review on bioluminescent dinoflagellates in the ocean[J]. Marine Sciences, 2018, 42(7): 148-157.
- [23] BAKER A, ROBBINS I, MOLINE M A, et al. Oligonucleotide primers for the detection of bioluminescent dinoflagellates reveal novel luciferase sequences and information on the molecular evolution of this gene[J]. Journal of Phycology, 2008, 44(2): 419-428.
- [24] WILSON T, HASTINGS J W. Bioluminescence[J]. Annual Review of Cell Developmental Biology, 1998, 14(1): 197-230.
- [25] VALIADI M, IGLESIAS-RODRIGUEZ D. Understanding bioluminescence in dinoflagellates: how far have we come?[J]. Microorganisms, 2013, 1(1): 3-25.
- [26] HADDOCK S H, MOLINE M A, CASE J F. Bioluminescence in the sea[J]. Ann Rev Mar, 2010, 2(1): 443-493.
- [27] ABRAHAMS M V, TOWNSEND L D. Bioluminescence in dinoflagellates: a test of the burgular alarm hypothesis[J]. Ecology, 1993, 74(1): 258-260.
- [28] BUSKEY E, MILLS L, SWIFT E. The effects of dinoflagellate bioluminescence on the swimming behavior of a marine copepod[J]. Limnology and Oceanography, 1983, 28(3): 575-579.
- [29] ELBRÄCHTER M, QI Y. Aspects of *Noctiluca* (Dino-phyceae) population dynamics[J]. Ecology of Harmful Algal Blooms, 1998: 315-335.
- [30] DO ROSÁRIO GOMES H, GOES J I, MATONDKAR S G P, et al. Massive outbreaks of *Noctiluca scintillans* blooms in the Arabian Sea due to spread of hypoxia[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 4862.
- [31] UHLIG G, SAHLING G. Long-term studies on *Noctiluca scintillans* in the German Bight population dynamics and red tide phenomena 1968-1988[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1990, 25(1): 101-112.
- [32] TADA K, PITHAKPOL S, MONTANI S. Seasonal variation in the abundance of *Noctiluca scintillans* in the Seto Inland Sea, Japan[J]. Plankton Biology and Ecology, 2004, 51(1): 7-14.
- [33] TURKOGLU M. Red tides of the dinoflagellate *Noctiluca scintillans* associated with eutrophication in the Sea of Marmara (the Dardanelles, Turkey)[J]. Oceanologia, 2013, 55(3): 709-732.
- [34] VENUGOPAL P, HARIDAS P, MADHUPRATAP M. Incidence of red water along South Kerala coast[J]. Indian Journal of Marine Sciences, 1979, 8: 94-97.

- [35] THANGARAJA M, AI-AISRY A, AI-KHARUSI L. Harmful algal blooms and their impacts in the middle and outer ROPME Sea Area[J]. *International Journal of Oceans and Oceanography*, 2007, 2(1): 85-98.
- [36] TSAI S F, WU Luying, CHOU Wenchen, et al. The dynamics of a dominant dinoflagellate, *Noctiluca scintillans*, in the subtropical coastal waters of the Matsu archipelago[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 127: 553-558.
- [37] WANG Weicheng, SUN Song, SUN Xiaoxia, et al. Seasonal phenology of the heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans* (Macartney) in Jiaozhou Bay and adjacent coastal Yellow Sea, China[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(4): 1280-1293.
- [38] AI-AZRI A, AI-HASHMI K, GOES J, et al. Seasonality of the bloom-forming heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans* in the Gulf of Oman in relation to environmental conditions[J]. *International Journal of Oceans and Oceanography*, 2007, 2(1): 51-60.
- [39] 国家海洋标准计量中心. 赤潮监测技术规程: HY/T 069—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
National Center Of Ocean Standards And Metrology. Technical specification for red tide monitoring: HY/T 069—2005[S]. Beijing: Standards Press Of China, 2005.
- [40] MIYAGUCHI H, FUJIKI T, KIKUCHI T, et al. Relationship between the bloom of *Noctiluca scintillans* and environmental factors in the coastal waters of Sagami Bay, Japan[J]. *Journal of Plankton Research*, 2006, 28(3): 313-324.
- [41] PIONTKOVSKI S A, SERIKOVA I M, EVSTIGNEEV V P, et al. Seasonal blooms of the dinoflagellate algae *Noctiluca scintillans*: regional and global scale aspects[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 44: 101771.
- [42] SINGH S P, SINGH P. Effect of temperature and light on the growth of algae species: a review[J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 431-444.
- [43] 曹新宇, 李远眉, 王伟, 等. 温度和盐度对夜光藻种群密度增长的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(1): 95-102.
CAO Xinyu, LI Yuanmei, WANG Wei, et al. Effects of temperature and salinity on increase in population density of alga *Noctiluca scintillans*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(1): 95-102.
- [44] 黎慧玲, 徐轶肖, 吴森, 等. 北部湾首次记录到的大规模夜光藻赤潮期间浮游植物与细菌群落分析[J]. *海洋学报*, 2023, 45(5): 39-52.
LI Huiling, XU Yixiao, WU Miao, et al. Analysis of phytoplankton and bacterial community during the first recorded massive *Noctiluca scintillans* bloom in the Beibu Gulf, China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(5): 39-52.
- [45] HARRISON P J, FURUYA K, GLIBERT P M, et al. Geographical distribution of red and green *Noctiluca scintillans*[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(4): 807-831.
- [46] 董婧, 王文波, 刘海映. 辽宁近海浮游植物与夜光藻赤潮的关系[J]. *水产科学*, 2000, 19(1): 17-20.
DONG Jing, WANG Wenbo, LIU Haiying. Relation between red tide caused by *Noctiluca scintillans* and phytoplankton at sea near Liaoning[J]. *Fisheries Science*, 2000, 19(1): 17-20.
- [47] 田达玮. 胶州湾夜光藻种群动态及其摄食特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2017.
TIAN Dawei. Population dynamic of *Noctiluca scintillans* and its grazing properties in Jiaozhou Bay[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [48] WANG Junyue, MAO Ning, XU Mingyang, et al. Interactions between *Noctiluca scintillans* and three co-occurring microalgae in response to varying nutrient levels[J]. *Diversity*, 2024, 16(4): 215.
- [49] FURUYA K, KOZONO K, YASUDA M, et al. Temperature as a factor controlling geographical distribution of green *Noctiluca scintillans* in Southeast Asia[J]. *Journal of Plankton Research*, 2023, 45(3): 478-484.
- [50] FUNG Y C, TROTT L B. The occurrence of a *Noctiluca scintillans* (Macartney) induced red tide in Hong Kong[J]. *Limnology and Oceanography*, 1973, 18(3): 472-476.
- [51] OLLEVIER A, MORTELMANS J, AUBERT A, et al. *Noctiluca scintillans*: dynamics, size measurements and relationships with small soft-bodied plankton in the Belgian part of the North Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 777999.
- [52] LEE J K, HIRAYAMA K. Effects of salinity, food level and temperature on the population growth on *Noctiluca scintillans* (Macarthy) [J]. *Bulletin of the Faculty of Fisheries, Nagasaki University*, 1992, 71: 163-168.
- [53] HUANG Changjiang, QI Yuzao, HUANG Yihua, et al. The population ecology and causative mechanisms of red tide of *Noctiluca Scintillans* in Dapeng Bay, The South China Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 1997, 28(3): 245-255.

- [54] TONG Yanbin, LEI Kun, WANG Li, et al. Spatial-temporal characteristics and the importance of environmental factors in relation to algal blooms in coastal seas[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 957: 177686.
- [55] DAI Shuangliang, ZHOU Yanyan, LI Na, et al. Why do red tides occur frequently in some oligotrophic waters? Analysis of red tide evolution history in Mirs Bay, China and its implications[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 844: 157112.
- [56] NAKAMURA Y. Biomass, feeding and production of *Noctiluca scintillans* in the Seto Inland Sea, Japan[J]. *Journal of Plankton Research*, 1998, 20(11): 2213-2222.
- [57] SUN Jingyun, YU Song, MA Zhiping, et al. Fungal community dynamics during a marine dinoflagellate (*Noctiluca scintillans*) bloom[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 131: 183-194.
- [58] ZAHIR M, BALAJI-PRASATH B, SU Yuping, et al. The dynamics of red *Noctiluca scintillans* in the coastal aquaculture areas of Southeast China[J]. *Environ Geochem Health*, 2023, 45: 4995-5012.
- [59] PRAKASH S, ROY R, LOTLIKER A. Revisiting the *Noctiluca scintillans* paradox in northern Arabian Sea[J]. *Current Science*, 2017, 113: 1429-1434.
- [60] RAVEN J A, GIORDANO M, BEARDALL J, et al. Algal evolution in relation to atmospheric CO₂: carboxylases, carbon-concentrating mechanisms and carbon oxidation cycles[J]. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 2012, 367(1588): 493-507.
- [61] CHOI S Y, JANG P G, CHA H G, et al. Dynamics of *Noctiluca scintillans* blooms: a 20-year study in Jangmok Bay, Korea[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 947: 174592.
- [62] RAJ K D, MATHEWS G, OBURA D O, et al. Low oxygen levels caused by *Noctiluca scintillans* bloom kills corals in Gulf of Mannar, India[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 22133.
- [63] STRAMMA L, JOHNSON G C, SPRINTALL J, et al. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans[J]. *Science*, 2008, 320(5876): 655-658.
- [64] DIAZ R J, ROSENBERG R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems[J]. *Science*, 2008, 321(5891): 926-929.
- [65] KEELING R F, KÖRTZINGER A, GRUBER N. Ocean deoxygenation in a warming world[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 2(1): 199-229.
- [66] TIMSIT Y, LESCOT M, VALIADI M, et al. Bioluminescence and photoreception in unicellular organisms: light-signalling in a bio-communication perspective[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(21): 11311.
- [67] GOMES H D R, MCKEE K, MILE A, et al. Influence of light availability and prey type on the growth and photo-physiological rates of the mixotroph *Noctiluca scintillans*[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 374.
- [68] SAITO H, FURUYA K, LIRDWITAYAPRASIT T. Photoautotrophic growth of *Noctiluca scintillans* with the endosymbiont *Pedinomonas noctilucae*[J]. *Plankton and Benthos Research*, 2006, 1(2): 97-101.
- [69] 李阳东, 李仁虎, 常亮. 基于 GOCI 数据的浙江沿海赤潮监测[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1617-1624.
LI Yangdong, LI Renhu, CHANG Liang. Red tide monitoring along the coast of Zhejiang Province based on GOCI data[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(8): 1617-1624.
- [70] 许源兴, 孙琰, 肖鹤, 等. 基于色相角算法的珠江口赤潮遥感识别[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2024, 63(1): 96-104.
XU Yuanxing, SUN Yan, XIAO He, et al. Remote sensing identification of red tide in Pearl River Estuary based on hue angle algorithm[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2024, 63(1): 96-104.
- [71] 张涛, 苏奋振, 杨晓梅, 等. MODIS 遥感数据提取赤潮信息方法与应用[J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(2): 244-249.
ZHANG Tao, SU Fenzhen, YANG Xiaomei, et al. A method for detecting red tide information from MODIS data and its application in Pearl River Estuary[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(2): 244-249.
- [72] MOL B V, RUDDICK K, ASTORECA R, et al. Optical detection of a *Noctiluca scintillans* bloom[J]. *EARSeL eProceedings*, 2007, 6(2): 130.
- [73] ASTORECA R, ROUSSEAU V, RUDDICK K, et al. Optical properties of algal blooms in an eutrophicated coastal area and its relevance to remote sensing[M]. In *Remote sensing of the coastal oceanic environment: SPIE*, 2005: 245-255.
- [74] LIN Qi, TSAI Shengfang, CHEN Yanlong, et al. In search of red *Noctiluca scintillans* blooms in the East China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*: 2019, 46(11): 5997-6004.

- [75] 王义衍, 刘荣杰, 刘建强, 等. 基于光谱特征的 HY-1C/D 卫星赤潮探测方法: 以红夜光藻为例[J]. 海洋学报, 2023, 45(12): 166-178.
WANG Yikan, LIU Rongjie, LIU Jianqiang, et al. Detection method of red tide based on the spectral features from HY-1C/D satellite: take red *Noctiluca scintillans* blooms as an example[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(12): 166-178.
- [76] 肖振久, 吴正伟, 张杰浩, 等. 自适应前景聚焦无人机航拍图像目标检测[J]. 光电工程, 2024, 51(9): 108-122.
XIAO Zhenjiu, WU Zhengwei, ZHANG Jiehao, et al. Adaptive foreground focusing for target detection in UAV aerial images[J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(9): 108-122.
- [77] 李敬虎, 邢前国, 郑向阳, 等. 基于深度学习的无人机影像夜光藻赤潮提取方法[J]. 计算机应用, 2022, 42(9): 2969-2974.
LI Jinghu, XING Qianguo, ZHENG Xiangyang, et al. *Noctiluca scintillans* red tide extraction method from UAV images based on deep learning[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(9): 2969-2974.