

文章编号 1004-924X(2026)07-1068-19

近距光学检测在微藻密度测量中的研究进展

张乔杨¹, 陈海韵², 张珉杰², 章廓廓³, 胡章喜⁴, 李峰⁴, 肖华^{2,5*}

(1. 广东海洋大学 数学与计算机学院, 广东 湛江 524088;

2. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088;

3. 香港中文大学(深圳) 人工智能与机器人研究院, 广东 深圳 518172;

4. 广东海洋大学 水产学院, 广东 湛江 524088;

5. 新加坡科技研究局 材料研究与工程研究所, 新加坡 138634)

摘要: 基于近距光学检测的微藻密度间接测量方法因其非接触、非侵入且无需试剂添加等显著优势, 日益成为海洋微藻培养过程中密度监测的研究热点。本文系统综述了当前主流的微藻密度测量策略, 包括作为基准的人工计数法与干细胞重量(Dry Cell Weight, DCW)法, 以及属于间接光学测量手段的光学传感器法与图像分析法等; 围绕密度检测范围、检测精度、环境干扰与设备依赖性这四个维度, 探讨了各类方法的主要特点与适用条件。基于此, 构建覆盖典型海洋微藻种类、梯度细胞密度及多样化光照与成像条件的标准化测试平台, 建立多维、可量化、可复现的综合评价体系, 旨在为微藻生物过程监测系统的选型、算法优化及新型传感范式创新提供系统参考与技术路线指引。

关键词: 光学测量; 海洋微藻; 密度监测; 图像分析

中图分类号: O482.31 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263407.1068 **CSTR:** 32169.14.OPE.20263407.1068

Research progress in short-range optical detection for microalgal density measurement

ZHANG Qiaoyang¹, CHEN Haiyun², ZHANG Minjie², ZHANG Kuokuo³, HU Zhangxi⁴,
LI Feng⁴, XIAO Hua^{2,5*}

(1. School of Mathematics and Computer Science, Guangdong Ocean University,
Zhanjiang 524088, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University,
Zhanjiang 524088, China;

3. Institute of Artificial Intelligence and Robotics for Society (AIRS), The Chinese University of
Hong Kong, Shenzhen 518172, China;

4. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

5. Institute of Materials Research and Engineering (IMRE), Agency for Science, Technology and
Research (A*STAR), Singapore 138634, Singapore)

* Corresponding author, E-mail: oliviach@gdou.edu.cn

收稿日期: 2025-12-18; 修订日期: 2026-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62304054, No. 62204107); 深圳市低空经济项目经理人制专项资助项目(No. Z25306101)

Abstract: Indirect microalgae density measurement methods based on short-range optical detection have increasingly attracted attention in the monitoring of marine microalgae cultivation, owing to their advantages of non-contact, non-invasive operation and the absence of reagent requirements. This review systematically summarizes prevalent cell measurement strategies, encompassing benchmark methods (manual counting and dry cell weight, DCW) and indirect optical approaches (optical sensing and image analysis). The key characteristics and applicable conditions of each method are analyzed from four perspectives: detection range, accuracy, environmental interference, and equipment dependence. In light of existing limitations, the establishment of a standardized testing platform covering representative marine microalgae species, gradient cell densities, and diverse illumination and imaging conditions is proposed, together with a multidimensional, quantifiable, and reproducible evaluation framework. This work is expected to provide systematic references and technical guidance for the selection of microalgae bioprocess monitoring systems, algorithm optimization, and the development of novel sensing paradigms.

Key words: optical measurement; marine microalgae; density monitoring; image analysis

1 引言

微藻是一类体型微小、结构简单的光合自养生物,多为单细胞,少数为多细胞,广泛分布于海洋、淡水、土壤乃至极端环境中^[1]。微藻作为海洋和淡水生态系统的主要初级生产者,在生物燃料、营养补充和废水处理等方面展示出广泛的应用前景^[2]。其高附加值产物,如脂质、蛋白质、虾青素、不饱和脂肪酸等,广泛应用于食品、饲料、医药与化妆品行业,且具备碳中和潜力。测量微藻的密度/生物量对于生长监测、生产优化与生态模型参数化至关重要。密度是评估微藻生长阶段、收获时机及系统稳定性的核心指标,直接影响下游产物提取效率与碳汇估算精度^[3-5]。此外,在生物膜系统中,密度/生物量空间动态还关系到光穿透与传质限制。

微藻生物量的传统测量方法主要包括手动细胞计数、干重测定(Dry Cell Weight, DCW)和光密度(Optical Density, OD)测量。这些方法的特点是:手动计数繁琐、劳动密集、依赖操作者经验且易受主观偏见影响;DCW测定受制于所需藻液样本量较大、烘干时间长且具破坏性等因素,难以满足微量或实时监测需求^[6];OD测量在细胞形态和组成变化时会引入不确定性,且易受环境光干扰^[7]。流式细胞术等高级设备虽精确,但成本高昂,必须在实验室环境中操作^[8]。这些方法普遍难以用于实时、现场或高通量监测,且在精度和自动

化方面存在显著局限。

光学间接测量方法提供了一种非侵入、快速和易自动化的替代方案。基于RGB分析和灰度模型的数字图像处理技术以低成本实现细胞估计,仅需普通相机和图像分析软件。量子点LED(Quantum Dot Light-Emitting Diode, QD-LED)结合复合边缘检测技术(Optimized Composite Detecting Indicator, OCDI)在受控实验条件下可实现高精度的微藻密度反演,相关研究报道其预测性能在特定藻种与光照条件下,相对误差低于1%,表现出良好的抗光照扰动能力与方法灵敏度^[9]。2D荧光光谱结合偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, PLSR)能线监测多种生物参数,无需破坏性采样^[10]。该方法可有效克服环境光干扰,实现宽范围、误差小于10%的密度测量。上述方法支持高通量分析,易于与自动化系统集成,为大规模微藻培养提供了实时监测工具。

目前,微藻密度光学测量方法主要分为三类:光学传感器法、图像分析法以及特殊光学技术。其中,光学传感器法利用LED光源配合光电探测器,通过测量光衰减特性或光通信参数的变化来推算细胞密度。例如,基于QD-LED的可见光通信方法或基于QD-LED的光衰减传感方法已在典型密度区间内取得较高线性度^[11]。然而,常规商业LED往往缺乏光谱分布、照度稳定性及调制特性方面的校准,导致不同研究系统之间的光学输入条件差异显著,使测量结果的跨平

台对比性不足。图像分析法如 RGB 处理或 HSV 色彩空间分析,虽能实现非侵入测量,但其准确性受环境光、焦距和图像处理算法的显著影响,在未加控制的条件下,其对不同藻种及不同光生理状态缺乏普适性,难以建立跨藻种、跨环境的统一模型^[12]。特殊技术包括 LED 集成的光学传感—通信复合系统以及发光光谱传感等方法。相关研究中,这类系统在典型密度范围内可达到较高的预测精度,但缺乏与其他方法的系统性比较^[13]。这些方法普遍缺乏统一标准:首先,不同微藻种类的光学特性存在显著差异,而许多研究未充分考虑这些物种依赖性,使得模型在跨藻种或非标准培养条件下的适用性有限^[14];其次,研究多集中于狭窄密度范围,无法覆盖实际培养中的全谱密度变化^[15];最后,干扰因素(如光学路径

长度、接收角度、细胞形态变化)的影响未被标准化评估,例如最短 2 cm 光程才能确保足够信号接收,而 OD 测量在细胞形态变化时会产生不准确结果^[16]。此外,现有商用传感器的量程难以满足微藻培养对高密度监测的需求,某些水质监测设备(如 Aqua TROLL)仅能检测至约 1 mg/L,而典型微藻培养密度通常处于 25~1 000 mg/L 以上^[17]。由于缺乏基准测试协议、标准参考物质和跨平台验证数据,不同研究间的测量结果难以互比,阻碍了技术优化与工业应用推广。图 1 展示了不同场景下微藻密度检测方法的具体技术类型及核心特性,涵盖遥感监测、显微技术、成像分析等多维度检测手段,直观呈现各方法在高亮度、色彩可控性、快速响应及检测效率等关键性能指标。

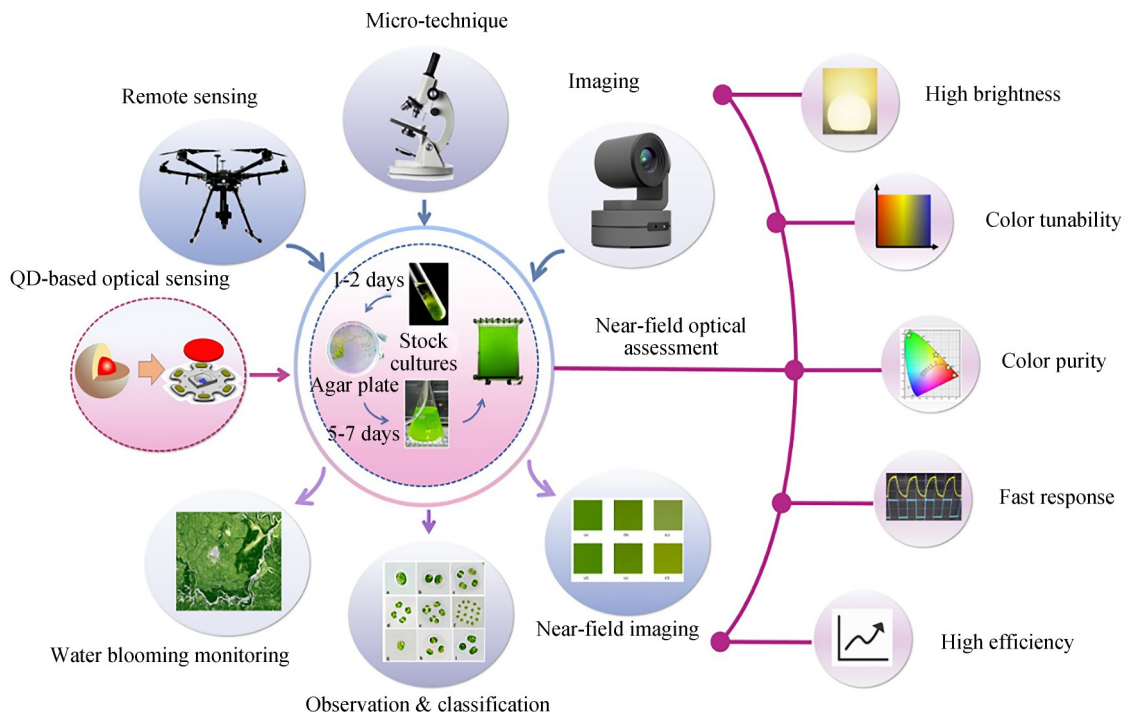


图 1 不同场景下微藻密度检测方法示意图^[16]

Fig. 1 Schematic diagram of microalgae density detection methods under different scenarios^[16]

综上所述,尽管基于光学手段的微藻密度测量方法已在实验室研究和工程应用中得到广泛探索,不同技术路径在检测精度、适用密度区间及抗干扰能力方面均表现出各自优势,但现有研究多侧重于单一方法或特定应用场景,缺乏在统一尺度与约束条件下的系统比较与综合评价,导

致不同研究结果之间的可比性与可复现性仍然有限。在此背景下,本文对现有光学微藻密度测量方法进行系统梳理与横向分析,尤其聚焦于近距离条件下的光学间接测量技术。本文中,近距光学检测是指光源、探测器或成像单元与微藻培养液之间的有效光学路径长度处于 0.01~1 m 内

的检测方式。该距离区间通常对应厘米至分米量级的光程,既能够保证足够的光信号强度与信噪比,又有利于系统的小型化与工程集成。基于上述界定,本文系统综述并比较了不同近距光学微藻密度测量方法在检测原理、适用密度区间、主要误差来源及工程实现约束等方面的差异,在此基础上总结并提出一套可执行评价建议,以期后续研究与技术规范的制定提供参考依据。

2 微藻密度测量方法分类

微藻密度的表征单位主要包括细胞浓度与生物量干重两类。其中,细胞浓度通常以 cells/

mL 或 cells/L 表示,用于反映单位体积内微藻细胞的数量分布;生物量干重一般以 mg/L 或 g/L 表示,用于表征单位体积培养体系中微藻有机物质的累积水平,在工程化培养与尺度放大研究中亦可等价地采用 g/m³作为体积生物量浓度单位。如图 2 所示,光学测量微藻密度作为非接触、实时原位的核心监测技术,基于测量原理与技术路径可划分为人工计数法、干重测量法、光学传感器法与图像分析法等主流类型,下文将围绕各类方法的核心原理、技术特征及适用场景展开详细阐述。其中,人工计数法与干重测量法作为光学的基准参考方法,常用于校准和验证各类光学间接测量技术的准确性。

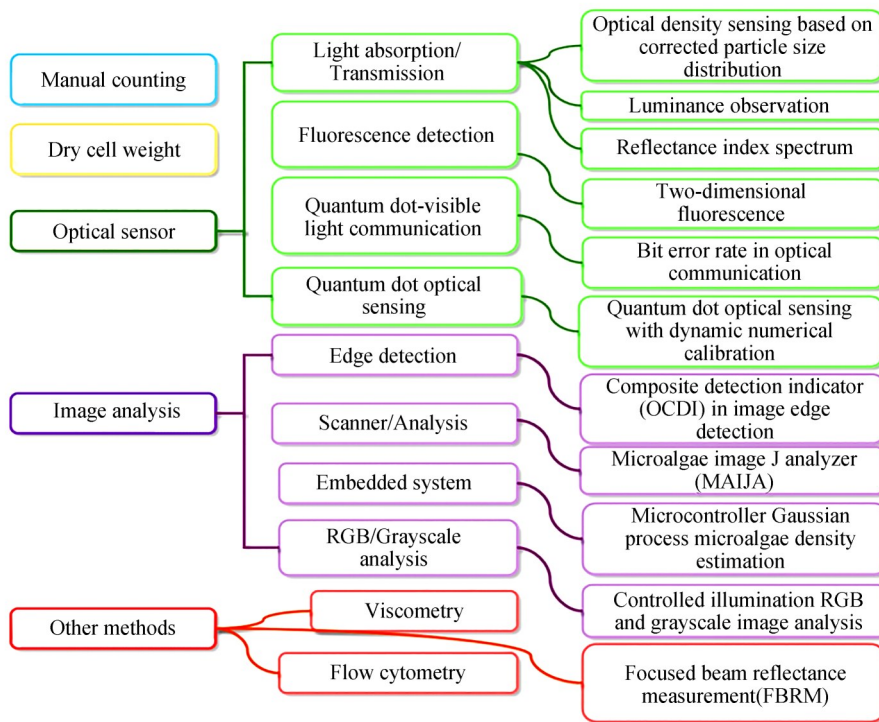


图 2 微藻生物量测量分类
Fig. 2 Classification of microalgae biomass measurement

2.1 人工计数法

人工计数法是通过显微镜结合血球计数板对微藻细胞进行直接观察与计数的传统方法,通常需配合碘液等染色剂以固定细胞形态并提升可视化效果。该方法被视作基准方法,用于验证其他光学或图像法的准确性^[18-19]。在实际操作中,当微藻样品浓度较高时,通常需进行适当稀

释,以避免细胞重叠对显微计数准确性的影响。随后取少量稀释后的样品注入血球计数板计数室,使其在毛细作用下均匀填充计数区域并形成厚度受控的液层。对于标准血球计数板,通常在中央大方格内选取若干小方格(如 80 个小格)进行细胞统计。依据计数板已知的几何结构参数,包括单个小格的面积及计数室的固定深度,可精

确定对应的观测体积。将所获得的细胞计数结果结合样品稀释倍数,并按照计数区域与总体积之间的比例关系进行换算,以推算出原始样品中单位体积内的细胞浓度^[20]。然而,其精度受多重因素制约:操作者经验与主观判断影响显著,尤其在细胞聚集、形态异常或密度过高/过低时易引入误差^[21];此外,稀释误差、取样代表性不足、计数重复性有限(通常重复3次计数)亦削弱结果可靠性^[22]。该法对设备要求不高(仅需光学显微镜与细胞计数板),但属离线破坏性检测,需频繁采样,易造成培养体系污染且无法实时监测^[23]。更深层问题包括劳动密集、通量低,难以适应大规模或自动化培养需求^[24],采用该方法仅得总细胞数,无法同步获取生理状态、色素含量或生物量干重等多维信息。因此,尽管该方法精度尚可作为参照标准,但其应用正被非接触、自动化替代方案逐步取代。

2.2 干细胞重量测量

DCW 是评估微藻生物量的基准方法,通过过滤、洗涤、干燥(通常 105 °C 下 24 h)后称重获得,因而具有较高的准确性与重现性,常用于校准各类光学间接测量技术^[25]。然而,该方法存在显著局限:过程冗长、操作繁琐,单次测量常需 24 小时以上,且需大量样品(通常数百毫升以上),不适用于小规模或高通量实验^[26];此外,频繁取样易引入污染风险,并破坏培养体系的连续性。设备方面,依赖精密天平(通常要求精度 ≤ 0.01 mg)、真空抽滤装置、烘箱或冷冻干燥设备及无菌操作环境,对实验室基础设施和人员技术要求较高。潜在问题还包括:干燥过程可能导致挥发性成分损失,影响结果准确性;细胞壁结构差异影响干燥效率与残余水分,需严格标准化操作;无法实现原位、实时监测,难以捕捉动态生长过程;高能耗与人工成本限制其在工业化在线监测中的应用^[27]。该方法的基本公式如下:

$$DCW = \frac{W_{\text{filter+cells}} - W_{\text{filter,dry}}}{V_{\text{sample}}}, \quad (1)$$

其中: $W_{\text{filter+cells}}$ 为过滤、洗涤、干燥后滤膜与细胞的总质量, $W_{\text{filter,dry}}$ 为同批次空白滤膜经相同干燥处理后的质量。

该公式依据(GB 11901-89)标准,用于计算细胞干重^[28]。

2.3 光学传感器测量密度

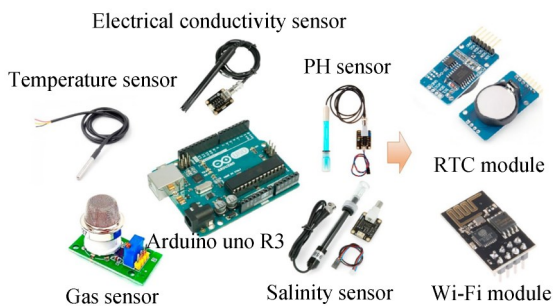
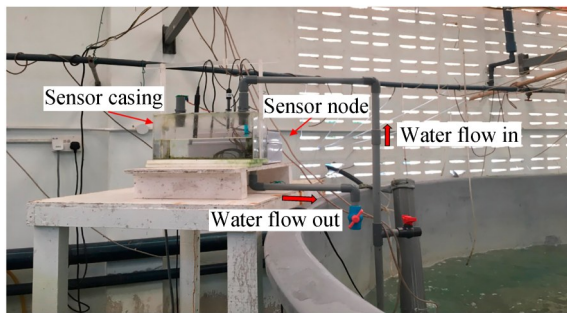
光学传感器法通过检测光与微藻细胞的相互作用(吸收、荧光、近场耦合、光斑增强或可见光通信)来间接估算生物量,可分为五种技术路径。其一为光吸收/透射法,通过测量特定波长(如 663 nm, 645 nm 或 750 nm 以减少色素干扰)下的光密度(Optical Density, OD)变化,间接推算叶绿素 a 含量或生物量密度^[29-31]。其二为荧光法,该方法利用叶绿素 a 等内源荧光物质在特定激发波长下的发射特性,结合二维荧光光谱(2D Excitation-Emission Matrix Fluorescence Spectroscopy, 2D-EEM)或多光谱荧光数据,通过多变量统计模型实现高精度参数反演^[32],该方法在受控条件下可显著提升对多参数(如生物量、生理状态)的同步估算能力。其三为近场光学耦合(倏逝波)法,利用光纤或光波导中倏逝场与周围介质的相互作用,实现高灵敏、无标记的在线检测。例如,塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)经 U 型弯曲或去包层处理后,其倏逝波对悬浮微藻引起的折射率或吸收变化敏感,可实时反映生物量动态^[33],此类传感器具有结构简单、成本低的优势,但易受温度漂移、材料老化及表面生物污损影响。其四为多光谱/光斑增强法,通过引入可调谐光源,构建多波段激发-检测体系,结合算法融合多通道响应,有效抑制背景干扰并提升对特定藻种的选择性,类似思路也应用于反射率光谱法,通过光谱仪获取反射信号反演生物密度。其五为可见光通信(Visible Light Communication, VLC)法,将微藻悬浮液视为光信道中的扰动介质,利用其对光信号传输质量的影响反演密度。例如,随着微藻浓度升高,信道误码率劣化,据此可建立误码率(Bit Error Rate, BER)与密度的映射关系。

在实际生产方面,通过构建基于低功耗传感器与简单线性回归校准的物联网水质监测系统,可实现对水产业养殖各个参数的高精度实时监测^[34]。图 3 展示了物联网水质监测系统实体装置,标注了传感器外壳、传感器节点、进出水口等核心组件,体现了低成本传感器与硬件

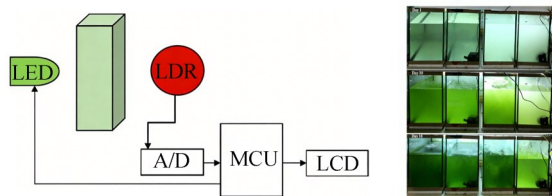
集成的现场安装架构。图 3(a)展示了该系统的核心硬件组件布局,包括 Arduino Uno R3 监测模块及与其连接的多种传感器、RTC 模块和 Wi-Fi 模块。基于光敏电阻与 LED 光源的简易光度计,可以通过建立校准方程实现对微藻细胞密度的快速、非破坏性测量,并验证其在微藻密度测量中与显微计数法具有良好的一致性。图 3(b)为系统原理框图和实验所用 *Dunaliella Salina* 样本的培养。该系统展示了 LED 光源、光敏电阻 (Light Dependent Resistor, LDR)、A/D 转换器、微控制单元 (Microcontroller Unit, MCU) 与液晶显示屏 (Liquid Crystal Display,

LCD) 的信号传输及硬件连接逻辑,体现其通过光信号检测实现微藻密度测量的工作流程。进一步可耦合可见光通信方法,通过误码率随微藻密度升高而劣化的规律反演密度^[35]。图 4(a)展示了基于可见光通信误码率的微藻密度测试系统实物装置,由任意波形发生器输出信号,经电源驱动 QD-LED 发射的光信号,光信号穿过可调平台上的微藻样品后,由带滤光片的 APD 探测器接收,最终通过宽带示波器采集信号,实现基于通信误码率的微藻密度检测。与之不同的是,图 4(b)采用了硬件集成方案:电源驱动发射端 LED 芯片发出光信号,经量子点薄膜、反射杯后穿过微藻样品,由接收端 Si PIN 光电探测器接收并通过源表采集光电流数据,结合旋转平台的角速度调节,实现光电流法的微藻密度测量。这些方法拥有非侵入性、实时在线监测、避免采样污染的优势,适用于封闭式光生物反应器的连续过程控制。

光学传感方案的局限性表现为:微藻个体差异(细胞大小、形态、色素组成)会同时影响散射、吸收与近场耦合特性,使得相同的光学读数在不同种或不同生理状态下对应不同的真实生物量,从而需要基于物种/状态的校准或多参量融合以提高泛化性^[36];高细胞浓度下光穿透深度下降,引发信号饱和与非线性响应,降低单一传感通道的线性区间^[37];不同物种光谱特征差异大,单一波长模型泛化能力弱^[38]。因此,该类方法的实际应用局限包括:环境因素(温度、光照强度)改变微藻生理状态,需频繁重新校准;培养基底色、容器材质(如玻璃/塑料折射率差异)、生物污损(biofouling)干扰信号稳定性^[39];复杂系统(如可见光通信系统)测量依赖光谱仪、任意波形发生器等复杂设备,成本高且需专业运维;倏逝波光纤传感虽然具有高灵敏度和较低的器件成本优势,但其响应也受温度、纤维材料老化和表面污染等因素影响。此外,部分模型易过拟合,泛化稳健性不足,对某些代谢物(如 β -胡萝卜素)的间接反演精度低;开放池培养中环境光干扰与样品不均质等因素进一步降低可靠性^[40]。尽管融合机器学习与多参数融合校准可提升适应性,当前多数技术仍局限于实验室或高附加值封闭系统,规模化应用尚待突破^[41-42]。这些方法可以用一个



(a) 基于低成本物联网的水质检测系统^[34]
(a) Low-cost IoT-based water quality detection system^[34]



(b) 基于光度计的微藻密度测量系统和 *Dunaliella Salina* 样本的培养^[35]
(b) Photometer-based microalgae density measurement system and cultivation of microalgae *Dunaliella Salina*^[35]

图 3 外壳式传感器辅助的物联网水质监控系统^[34]

Fig. 3 Shell-type sensor-assisted IoT water quality monitoring system^[34]

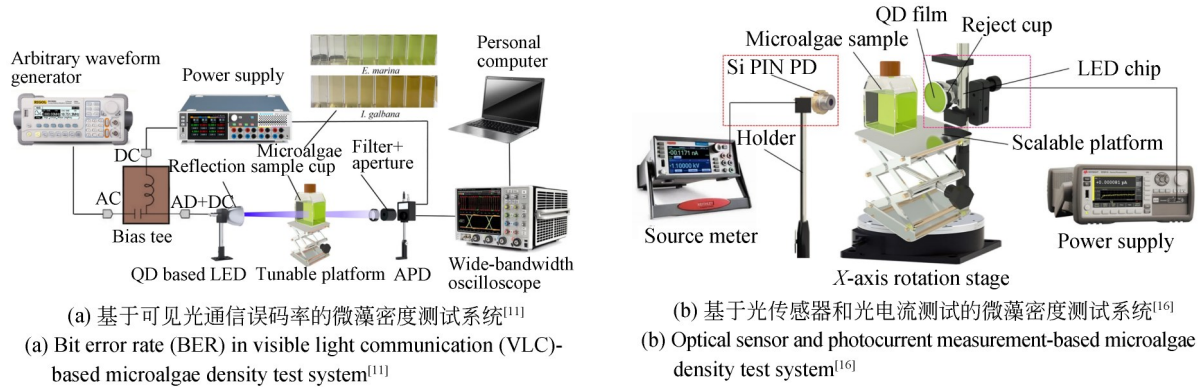


图 4 微藻密度测试系统

Fig. 4 Microalgae density testing systems

通用的公式表达:

$$D = f_{\theta}(S; P_{\text{env}}, P_{\text{bio}}), \quad (2)$$

其中: D 为待测生物量, S 为光传感信号, P_{env} 为环境协变量, P_{bio} 为生物先验知识, f_{θ} 为反演映射模

型, 用于将上述输入变量转化为微藻密度估计值。为比较不同光学检测方法在反演时所依赖的关键变量, 表 1 总结了代表性方法对 S, P_{env} 与 P_{bio} 的具体选取与实现方式。

表 1 不同光学检测方法用于微藻密度反演时所依赖的关键输入变量对比

Tab. 1 Comparison of key input variables required by different optical detection methods for microalgal density inversion

Method	S	P_{env}	P_{bio}	Ref.
QD-based visible light communication	Demodulated communication signal by oscilloscope	Ambient light, source bandwidth, data rate	Microalgal species (<i>E. marina</i> , <i>I. galbana</i>)	[13] [8]
QD optical sensing with dynamic numerical calibration	Electrical signal emitted by QD-LED	Reception angle, LED chip, driving voltage	Microalgal species (<i>E. marina</i> , <i>I. galbana</i>)	[14]
Particle size distribution correction with optical density	Transmitted or scattered light signals	Cell size, wavelength	N/A	[22]
Brightness assessment	Brightness image obtained by camera	Illumination uniformity, ambient light	Applicable DCW concentration range (0.03%~0.20%)	[23]
Reflectance index spectroscopy	Reflected spectrum obtained by spectrometer	Ambient light interference, pigment composition	Areal biomass density range (2.45~72.66 g/m ⁻²)	[27]
Two-dimensional fluorescence with partial least squares regression (2D-FLSR)	Fluorescence spectral data processed using GNU Octave	Inter-batch heterogeneity, fluorescence quenching, noise	N/A	[10]

2.4 图像测量密度

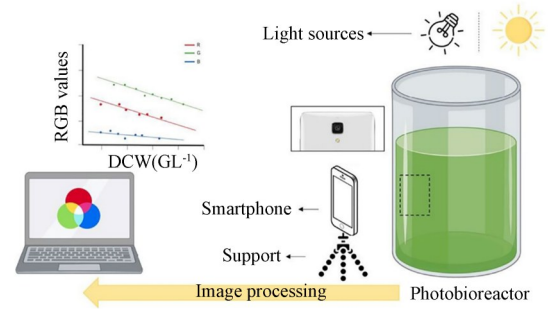
图像分析法用于微藻密度间接估算的核心原理是通过可见光成像设备(如智能手机、CCD/CMOS 相机、平板扫描仪或定制光学装

置)捕获微藻悬浮液图像,提取颜色特征(如 RGB 通道值、归一化色度 RGB、亮度 L)或纹理/边缘信息,并将这些影像特征与细胞数或干重(DCW)建立定量映射或回归模型。图 5(a)为

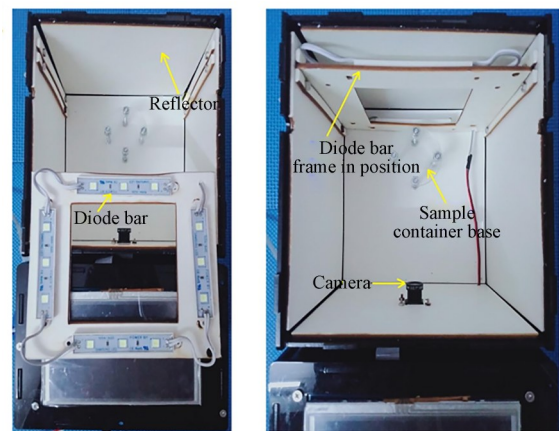
光生物反应器的微藻图像获取与分析系统示意图。固定于支架的智能手机从侧面拍摄反应器内微藻,经程序提取像素感兴趣区域的RGB值,关联微藻干重,同时标注了光源及数据处理终端。QD-LED具备高色纯度、窄发射谱线、可调谐波长及快速响应等优势,在需要精确光谱控制的生物光学检测中,可作为微藻光学检测等精密应用的定制化光源^[43-46],但需要结合热管理与封装策略以保障长期可靠性^[47]。

近年来,基于量子点材料的光致发光器件已能实现红、绿、蓝等多色可控光的发射,且具备器件集成与工程化应用条件^[48-50]。图5(b)为LED背光辅助的微藻图像拍摄系统暗箱内部结构,顶部安装有含LED芯片的条形灯(等距排列3个6500K色温白色二极管),内表面覆盖光滑纹理白色塑料泡沫材料以抑制光线反射折射。图5(c)为QD-LED背光辅助的微藻图像数据采集系统装置。该系统通过蓝色LED芯片与柔性量子点薄膜组合实现可更换光谱的背光照明。为提高信噪比并精确控制光学输入条件,典型系统常采用可调亮度LED面板、QD-LED背光或反射式暗箱等定制化光源方案^[52]。目前,QD-LED主要应用于可见光通信领域,但其具备高色纯度、窄发射谱线、可调谐波长及快速响应等优势,使其在需要精确光谱控制的生物光学检测中展现出潜力,未来有望作为微藻培养与非侵入式监测的定制化光源。图像处理流程常结合植被/色度指数(例如MAIJA插件所支持显示的指数)、色差模型或深度学习方法(如VGG, ResNet等卷积网络)来构建预测模型^[53-54]。该类方案普遍具备非侵入性、高效率、设备门槛低、易于现场部署等优势。例如,基于智能手机与简易LED光源的系统在 $3.2 \times 10^8 \sim 7.9 \times 10^9$ cells/L范围内可达 $>91\%$ 平均精度^[55],在理想光照与单一藻种条件下,RGB模型 R^2 能达到0.96的高度线性相关^[56]。

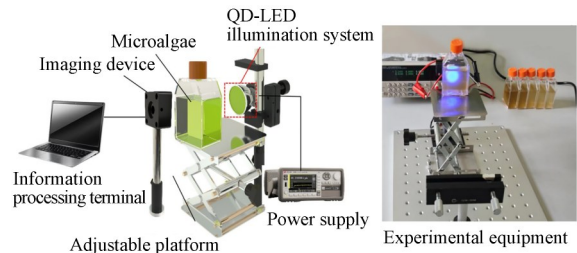
图6为QD-LED背光辅助的微藻密度计算与评估方法流程。以蓝色LED为激发源,经硒化镉量子点薄膜转换为四色光,作用于不同密度的微藻样本(*Nannochloropsis* sp.、*Chaetoceros* sp.),通过图像采集、预处理及OCDI综合检测指标(结合6种边缘检测算子)分析,经指数拟



(a) 光生物反应器的微藻图像获取与分析系统^[6]
(a) Microalgae image acquisition and analysis system for the photobioreactor^[6]



(b) LED背光辅助的微藻图像拍摄系统^[24]
(b) LED backlight-assisted microalgae image capture system^[24]



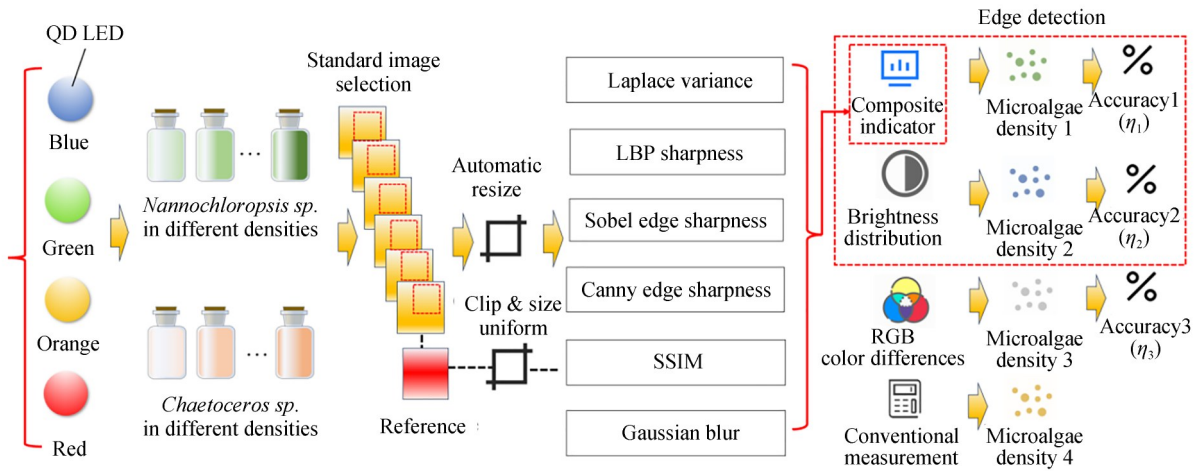
(c) 量子点LED背光辅助的微藻图像拍摄系统^[51]
(c) Quantum dot LED backlight-assisted microalgae image capture system^[51]

图5 微藻图像拍摄系统

Fig. 5 Microalgae image capture systems

合计算微藻密度并完成准确性评估,最终达成多色光辅助下的高精度微藻密度测量。

上述方法依赖实验条件与藻种特性,存在显著局限性:环境光干扰可能使得传统色差法稳定性下降;不同藻种(尤其色素组成差异大的种类)在颜色响应上差异明显,通常需对不同物种或生理状态进行单独标定或采用多模型策略^[57];生理状态变化(如胁迫诱导的色素降

图 6 量子点 LED 背光辅助的微藻密度计算与评估方法^[51]Fig. 6 Quantum dot LED backlight-assisted method for microalgae density calculation and evaluation^[51]

解或类胡萝卜素积累)可导致颜色偏移,严重削弱 RGB 模型泛化能力;浓度动态范围受限——低浓度($<0.03\%$ DCW)信噪比不足,高浓度则易引发图像饱和与通道失真;成像几何与介质影响显著,光程、容器材质(玻璃与塑料的折射/反射差异)、悬浮均匀性及成像角度稍有偏差,即可能导致模型失效,尤其在户外或工业规模反应器条件下,相关性常明显下降^[58];此外,多数系统依赖专用硬件(如量子点薄膜、

定制暗箱)且需定期校准传感器,而缺乏统一成像协议、基准测试集与跨平台验证框架进一步阻碍方法标准化与结果可比性。尽管在水环境监测与藻华预警中潜力巨大,其工程化应用仍需解决稳定性与普适性瓶颈。这些图像检测方法可以使用通用公式(2)表达。为比较不同图像检测方法在反演时所依赖的关键变量,表 2 总结了代表性方法对 S , P_{env} 与 P_{bio} 的具体选取与实现方式。

表 2 不同图像检测方法用于微藻密度反演时所依赖的关键输入变量对比

Tab. 2 Comparison of key input variables required by different image-based detection methods for microalgal density inversion

Methods	S	P_{env}	P_{bio}
Optimized composite detecting indicator (OCDI) ^[51]	Results of image edge detection	Background luminance & color, inter-species variation, focus/centering deviation	Target microalgae (<i>Nannochloropsis</i> sp. <i>Chaetoceros</i> sp.)
Microalgae image analyzer (MAIJA) ^[29]	Digitized image (flatbed scanner + computer)	Sample homogeneity, vessel material, ambient light	N/A
Gaussian processing for density estimation ^[14,30]	Image data (OV5647 camera)	Non-uniform illumination, specular reflection/refraction from vessel	Microalgae concentration range
RGB & grayscale analysis under controlled illumination ^[6]	RGB and grayscale images (smartphone camera)	Unstable lighting, photobioreactor design & material, species-specific pigments	Specific pigment absorption characteristics

2.5 其他测量方法

除计数、干重及主流光学/图像方法外,部分研究也探索了基于粘度测定的微藻密度间接测量法。其原理为微藻悬液的动态黏度随细胞

浓度升高而线性增加,在恒温(如 $23\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$)下可建立高精度($R^2=0.9784$)校准模型用于浓度预测。该方法操作简便(约 17 min),非破坏性,但需手动取样,存在污染风险且仅适用于

低浓度(0.01%~0.20% DCW),高浓度易发生沉降干扰测量稳定性^[59]。基于 2D-EEM 与 PLSR 结合变量选择策略的机器学习方法实现了对微藻培养过程中细胞密度、叶绿素 b、类胡萝卜素等多参数的在线非侵入式监测,并构建了一套集成建模与稳健性分析的系统框架,如图 7 所示。该框架采用 LOBO 策略对多个培养批次进行独立测试,并通过迭代式数据划分与模型评估,从而提升多参数监测模型的可靠性。另有研究将流式细胞术用于脂质/生物量定量,依赖荧光染料(如 Nile Red)特异性结合

中性脂后检测荧光信号,虽具高通量检测与单细胞分辨能力,但该方法依赖前处理(染色、透化),设备成本高且受细胞壁通透性,染料结合效率与光漂白等因素影响,从而影响定量的一致性^[60]。此外,基于过程工程中常用的在线颗粒/颗粒形态监测技术,例如聚焦光束反射测量法通过分析背散射光信号统计微粒穿越事件以推算粒径分布与相对粒数,能实现在线监测并对絮凝/颗粒形成过程敏感,但其对小粒径($<0.2 \mu\text{m}$)或聚集体系的计数与尺寸估算存在局限,易导致计数偏差^[61]。

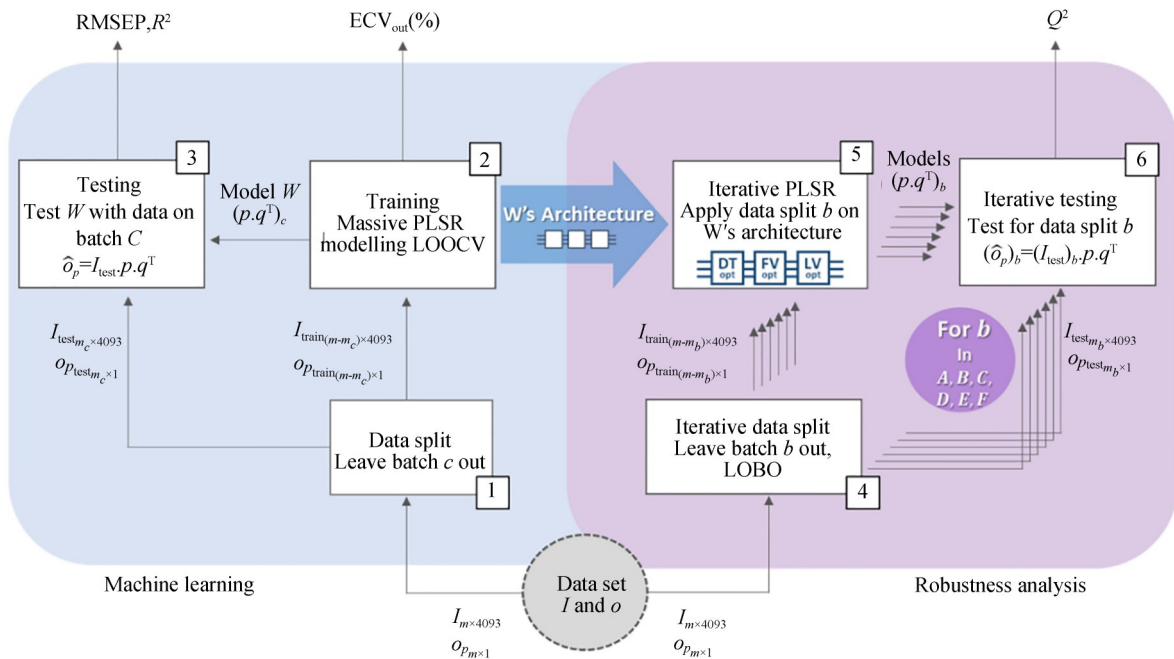


图 7 基于机器学习的微藻细胞数分析方法^[32]

Fig. 7 Machine learning-based analysis method for microalgae cell count^[32]

3 微藻密度检测准确率分析

当前光学检测技术在受控与标准化实验条件下的精确度表现卓越,但不同方案之间的差距依然巨大。其中,对单一藻种表现最为突出的是复合边缘检测指标图像边缘检测法,在标准细胞瓶中对 *Nannochloropsis* sp. 和 *Chaetoceros* sp. 的检测达到 $R^2 \geq 0.98$, 准确率高达 96.8%~99.0%。这一性能优势源于其独特的量子点光源与边缘识别算法协同工作,从而有效抑制背景

干扰并提升检测稳定性。光斑增强光学传感与动态数值校准方案也具有高灵敏度与良好的线性响应,在 $2.0 \times 10^8 \sim 9.6 \times 10^9$ cells/L 内实现 $R^2=0.982 \sim 0.999$ 的高线性度,但其性能呈较强的条件依赖性;而量子点的可见光通信(QD-VLC)系统则在 *E. marina* 和 *I. galbana* 两种藻类上能够维持相对稳定的性能表现,实现平均 97.0% 的密度检测准确率。因此表明,当测量系统在标准采样条件下针对特定藻种进行优化时,光学方法的准确率可与传统人工计数、细胞干重

法(被视为基准方法)相媲美,同时避免了前者的主观误差和低通量问题。为评估现有主流微藻密度光学检测方法在准确性、适用性、抗干扰能力及设备复杂度等方面的综合表现,表 3 汇总了

包括破坏性采样需求、设备配置、预处理流程、干扰类型容忍度、采样条件及最终检测精度(R^2 与准确率)在内的关键性能参数,供横向对比与方法选型参考。

表 3 微藻密度光学检测方法性能对比

Tab. 3 Performance comparison of optical detection methods for microalgal densit

Method	Type	De-structive	Equipment re-quired	Applicable range	Pretreat-ment	Major interferences	Sampling condition	Accuracy
RGB & Grayscale analysis under controlled illumination ^[6]	Image analysis	No	Smartphone camera, fixed mount, image processing software	N/A	N/A	Unstable lighting, photobio-reactor design & Material, pigments, chlorophyll change	Real-time	R/G chan-nels: $R^2=0.95\sim 0.97$; Gray-scale: $R^2=0.96\sim 0.97$
2D Fluorescence with VIP-PLSR ^[50]	Optical analysis & machine learning	No	2D fluorometer, data processing computer, GNU Octave	N/A	Direct sampling	Inter-batch heterogeneity, inner filter effect, fluorescence quenching, noise	Real-time	$R^2=0.93$
Optimized composite detecting indicator (OCDI) ^[51]	Image analysis	No	Uniform back-light, imaging device, image processing terminal	<i>Nannochloropsis</i> sp.: $3.15\times 10^8\sim 7.88\times 10^9$ cells/L <i>Chaetoceros</i> sp.: $3.12\times 10^8\sim 6.24\times 10^9$ cells/L	Sample placed in culture bottle	Background luminance & Color, micro-algae species, focus/centering deviation	Real-time	$R^2\geq 0.98$ accuracy= $96.8\%\sim 99.0\%$
QD-based visible light communication ^[13,8]	Optical Communication	No	QD-LED, arbitrary wave-form generator, filter & Aperture, mixed-signal oscilloscope	<i>E. marina</i> : 6.5×10^8 cells/L <i>I. galbana</i> : 5.8×10^9 cells/L	Sample placed in culture bottle	Ambient light, inter-species variation, LED bandwidth limitation, data rate selection	Real-time	$R^2\geq 0.95$ <i>E. marina</i> : accuracy= 97.0% <i>I. galbana</i> : accuracy= 97.0%

值得注意的是,当测量系统针对特定藻种进行专门优化并在标准采样/成像条件下操作时,某些光学方法的准确率可与传统人工计数或

DCW 等基准方法相媲美,且具备非侵入与实时在线的优势。例如,微藻粒径分布校正光密度法在离线采样条件下达到 $R^2>0.98$,但需进行样品

续表 3 微藻密度光学检测方法性能对比

Tab. 3 Performance comparison of optical detection methods for microalgal densit

Method	Type	De-structive	Equipment required	Applicable range	Pretreatment	Major interferences	Sampling condition	Accuracy
Microalgae image analyzer (MAIJA) ^[29]	Image analysis	No	Flatbed color scanner, computer, culture vessel	N/A	Immediate scanning after homogenization	Sample homogeneity, vessel material, ambient light	Real-time	$R^2=0.86\sim 0.99$
Brightness method ^[23]	Optical analysis	No	Dual-camera, LED, MATLAB-enabled computer	0.03%~0.20% DCW	Sample placed in a 500 mL flask	Illumination non-uniformity/reflection, low SNR at low concentrations, unstable blue channel, ambient light	Real-time	$R^2=0.8266$
Particle size distribution correction with optical density ^[22]	Optical analysis	No	Spectrophotometer, optical microscope, bioreactor	N/A	Sample dilution, homogenization, blank control	Cell size, measurement wavelength	Offline	$R^2>0.98$
QD optical sensing with dynamic numerical calibration ^[14]	Optical analysis	No	QD-LED, photodiode, source meter, microalgae container	$2.0\times 10^8\sim 9.6\times 10^9$ cells/L	Sample placed in culture bottle	Reception angle, LED chip, driving voltage, microalgal species, optical path	Real-time	<i>E. marina</i> : =87%~93% <i>I. galbana</i> : =90%~96%
Gaussian processing for density estimation ^[14,30]	Image analysis	No	Raspberry Pi 3 B+, OV5647 camera, white-lined dark box, white LED strips, peristaltic pump	$1.05\times 10^{10}\sim 4.23\times 10^{10}$ cells/L	Sample flowed through a transparent container	Non-uniform illumination, refraction from container, high contrast, uneven microalgae distribution	Real-time	Error=8.6% $\pm 1.8\%$ RMSE: $2.05\pm 0.29\times 10^6$ cells/mL
Reflectance index spectroscopy ^[27]	Optical analysis	No	Spectrometer, fiber optic probe, tungsten-halogen light	Areal biomass density: 2.45~72.66 g/m ⁻²	Sample placed on a cotton carrier	Ambient light, biofilm thickness, water content, pigment composition, biofilm structure	Real-time	$R^2=0.81\sim 0.97$

稀释与混匀等预处理^[62];MAIJA 扫描仪方案达 $R^2=0.86\sim 0.99$, 同样求样本高度均匀^[63]。但若条件偏离理想状态(例如样品为混合藻种、成像光照或几何未被良好控制、或存在容器/背景颜色变动),多数方法的准确率会显著下降,说明这些高精度成果的普适性与工程化可移植性仍需谨慎评估与额外验证。

4 讨论

4.1 测量方法对比

一个显著共性表明,环境光或背景光学/色彩干扰是限制近距光学检测方法测量精度的关键因素。其中,复合边缘检测指标法尽管通过光斑增强和图像边缘识别算法能在一定程度上抑制背景的干扰,但“背景光亮度,背景色彩”的影响仍然不可忽略;量子点通信系统易受环境光干扰;扫描仪(或类似图像系统)的方案对容器材质(如玻璃、塑料)与外部光照也非常敏感;RGB 图像分析则受光照条件不稳定和环境光影响制约。这些共性问题指向一个核心问题:现有高精度光学检测方法多依赖理想实验条件,其算法与传感系统在复杂自然光照场景(如开放池或户外养殖)下的稳定性仍缺乏充分验证。当从实验室移至户外,多数方法的相关系数会骤降,尤其在阴晴交替或昼夜变化条件下,单一传感模态(如仅靠边缘图像、单波长通信或固定色域模型)的稳定性和相关性常会显著下降。

鉴于单一技术路径的局限性,技术融合策略或将成为突破当前瓶颈的一条可行路径。通过二维荧光结合 PLSR 模型来监测生物过程,即使在培养基中施加基底限制时,也能够生成准确的干重、底物消耗和 pH 值,且其模型在未知培养条件下依然表现出较低的误差(平均相对 RMSE 为 6%)^[64]。相较于单一的检测方案,多参数协同的方案呈现显著的优势。利用 2D 荧光结合 PLSR 与变量重要性筛选策略,对单细胞藻类的细胞浓度、存活率进行联合预测,取得 R^2 高于 0.7 的预测性能^[65];而集成量子点 LED 与边缘检测的复合系统则通过硬件-算法协同优化实现了更广的适用范围和更高的准确率。这些突破表明,结合光谱特性与图像特征的互补信息,辅以针对环境适应性的动态校准机制,能够构建更具稳定性的

监测系统。

4.2 可执行的评价指标体系

为促进近距光学微藻密度测量方法在研究与工程应用中的可比性与规范化发展,本文在综合前述研究进展与计量学基本原则的基础上,总结并提出一套可执行的评价框架与关键评价维度建议。该评价框架包含以下方面:其一,线性动态范围,建议在 cells/L 或 g/L 单位下报告方法的有效检测区间,并明确对应回归模型性能指标(如 R^2 或 RMSE)的适用浓度上下限;其二,跨藻种泛化能力,建议在至少三种具有代表性的海洋微藻样本上验证模型性能,并报告平均预测误差及其标准差;其三,环境稳定性,建议在可控暗箱、室内散射光及户外自然光等不同光照条件下测试方法性能变化,量化环境扰动对模型精度的影响;其四,量值可溯源性,所有间接测量结果应以人工计数法或干重法(公式(1))作为参考基准,并明确校准样本数量与重复测量次数;其五,工程适用性,从设备成本、单次测量耗时、是否支持在线/原位监测以及操作复杂度等角度评估方法的工程可行性。

4.3 测试协议构建

为突破当前微藻密度近距光学检测在跨平台可比性、环境稳定性与工程适配性等方面的缺失,需要构建标准化的基准测试体系作为评价的核心,推进多模态的感知融合、动态校准机制与应用落地方案。首先,需构建一个标准化测试平台与配套的公共基准数据集,其应涵盖典型海洋微藻种类、梯度化的生物量范围($10^6\sim 10^{10}$ cells/L 或 0.03%~1.0% DCW)且包含多样化的标准光照场景:包括可控暗箱、自然光环境,以及不同材质容器与光程条件。在此基础上,应制定统一的性能评价协议,明确关键指标(如线性区间覆盖度、跨藻种泛化误差及环境光扰动容限)、规范采样与成像流程(光程固定、使用标准细胞瓶、规定光源色温与照度)以及提供物理参考标准(如已知浓度藻液或模拟散射微球)^[66]。该体系将为 RGB/HSV 色度分析、复合边缘检测指标、二维荧光光谱(2D-EEM)、光通信参数(BER/Q 因子)等各类方法提供一个公平的、可复现的横向验证基础,以破解当前方法众多、标准缺失、结果难比的困局。

4.4 系统集成与跨场景可比性

在此前提下,微藻密度测量技术的演进需要依托多模态融合感知架构,结合光谱、图像纹理与过程参数进行特征级或决策级融合,并引入变量重要性投影(VIP)、PLSR或轻量化深度学习模型(如MobileNet、知识蒸馏)提升对色素变异、细胞聚集与背景干扰的解耦能力^[67];同步嵌入在线动态自校准方法,通过微型光谱仪或参考光电通道实时监测光源衰减与探头污染,并基于检测结果采用高斯过程或在线迁移学习实现模型漂移补偿^[68]。面向应用层面,基于前述研究的综合分析,可进一步发展基于Raspberry Pi、智能手机等低成本硬件的模块化集成系统,并结合抗污损光学窗口与3D打印定制外壳,以提升近距光学检测系统在实际培养场景中的工程实用性与部署灵活性,并通过开源算法框架(如MAIJA插件、深度学习模型^[69])与跨平台校准迁移学习降低技术采纳门槛。确定标准先行、多维协同的方案才能实现将新技术从“实验室高精度”到“现场高可靠”的范式跃迁,为微藻生物制造、碳中和与生态监测提供坚实感知基础^[70]。

在技术层面,多模态信息融合与动态校准机制是提升系统稳定性的关键方向。通过集成光谱与图像数据,并结合在线自校验功能,可有效克服单一模态对环境扰动的敏感性。同时,系统设计需统筹考虑成本、可维护性及规模化实施的可行性,推动高性能检测方法从实验环境向实际养殖场景的可靠转化,最终通过建立通用的测试框架与标准化应用链路,将有力促进光学监测技术在微藻产业中的规范化推广与产业化部署。

综上所述,近距光学间接测量技术为实现微藻培养的在线监测与智能控制提供了可行路径,然而其从实验室迈向产业化应用仍面临关键挑战。当前基于光吸收、荧光或图像特征的方法虽在受控环境下表现良好,但其在实际复杂场景中

的泛化能力与长期稳定性仍受多种因素制约。未来研究应致力于构建标准化、系统化的技术评价体系,推动光学监测从方法创新向工程适用转变。重点发展方向包括:建立覆盖多藻种、宽密度范围的公共基准数据集,制定统一的光学参数描述与性能验证规范,并开发跨平台校准方法以增强结果的可比性与复现性。

5 结 论

近距光学间接测量技术凭借非接触、实时原位等突出优势,已成为海洋微藻密度监测的核心研究方向,为微藻培养智能化管控提供了关键技术支撑。当前主流方法(人工计数法、DCW法、光学传感器法、图像分析法等)在特定场景下表现出良好性能,但普遍面临普适性不足、缺乏统一基准测试体系与标准化评价指标、复杂环境中泛化能力及长期稳定性有限等问题。未来需以构建标准化测试平台、多维可量化评价体系,重点推进多模态信息融合、动态校准机制研发,建立多藻种宽密度范围的公共基准数据集,完善跨平台校准方法,同时兼顾技术的成本可控性与可维护性,推动该类技术从实验室方法创新向产业化实用化转变,实现微藻培养密度的规范化监测与智能管控,助力微藻产业高质量发展。

作者贡献声明:

张乔杨:论文构思与撰写,算法开发与程序编写;

陈海韵:论文构思与撰写,实验数据分析;

张珉杰:论文排版及数据整理分析;

章廓廓:实验平台搭建;

胡章喜:研究现状调研分析;

李峰:论文审核,实验材料获取;

肖华:论文指导与审核,项目执行。

参考文献:

- [1] CHU Y H, ZHANG C F, CHEN X, et al. Multi-stage defense response of microalgae exposed to pharmaceuticals in wastewater[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2023, 34(4): 107727.
- [2] SONG Y J, XIE L X, ZHANG X W, et al. En-

hancement of biomass, lipid accumulation, and carbon sequestration potential in microalgae via cultivation with Aggregation-Induced emission Light-Conversion films [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 483: 149148.

- [3] THIVIYANATHAN V A, KER P J, HOON TANG S G, et al. Microalgae biomass and biomol-

- ecule quantification: Optical techniques, challenges and prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 113926.
- [4] XU W Y, WANG Z F, LU B, *et al.* Effect of different microalgae-bacterium-fungus symbiont technologies on nutrient removal from aquaculture wastewater and biogas upgrading under a variety of mixed light wavelengths[J]. *Algal Research*, 2024, 79: 103486.
- [5] 陈明, 汪正坤, 辛鑫, 等. 基于高光谱的微藻生物膜生长特性研究[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10s): 39-45.
- CHEN M, WANG ZH K, XIN X, *et al.* Study on growth characteristics of microalgae biofilm based on hyperspectral imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10s): 39-45. (in Chinese)
- [6] SALGUEIRO J L, PÉREZ L, SANCHEZ Á, *et al.* Microalgal biomass quantification from the non-invasive technique of image processing through red-green-blue (RGB) analysis[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2022, 34(2): 871-881.
- [7] CHOE H W, KIM D, CHOI Y J, *et al.* Influence of microalgal cell division tendency on OD to DCW conversion factor and chlorophyll contents[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2025, 35: e2412049.
- [8] G R CS Z, TAMAMITSU M, BIANCO V, *et al.* A deep learning-enabled portable imaging flow cytometer for cost-effective, high-throughput, and label-free analysis of natural water samples [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 66.
- [9] KALNAITYTĖ-VENGELIENĖ A, MONTVYDIENĖ D, JANUŠKAITĖ E, *et al.* The effects of CdSe/ZnS quantum dots on autofluorescence properties and growth of algae *Desmodesmus communis*: dependence on cultivation medium[J]. *Environmental Science: Nano*, 2024, 11(4): 1701-1712.
- [10] GUARDA E C, GALINHA C F, DUQUE A F, *et al.* Non-invasive and real-time monitoring of polyhydroxyalkanoates production using two-dimensional fluorescence spectroscopy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122545.
- [11] XIAO H, LIU M X, KHAN K, *et al.* Quantum dot-based visible light communication system for microalgal density analysis [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2025, 37(17): 1001-1004.
- [12] WALTER A, SCHÖBEL H. Shed light on photosynthetic organisms: a physical perspective to correct light measurements [J]. *Photosynthesis Research*, 2023, 156(3): 325-336.
- [13] FREIRE M S, SILVA H J B, ALBUQUERQUE G M, *et al.* Advances on chalcogenide quantum dots-based sensors for environmental pollutants monitoring[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 931: 172848.
- [14] FEKETE G, SEBŐK A, KLÁTYIK S, *et al.* Comparative analysis of laboratory-based and spectroscopic methods used to estimate the algal density of *Chlorella vulgaris* [J]. *Microorganisms*, 2024, 12(6): 1050.
- [15] 何兆洋. 浮游植物智能检测与人工检测的对比分析[J]. *江淮水利科技*, 2025(5): 48-53.
- HE ZH Y. Comparative analysis of intelligent and manual detection of phytoplankton [J]. *Jianghuai Water Resources Science and Technology*, 2025(5): 48-53. (in Chinese)
- [16] XIAO H, LI F, JIANG Q N, *et al.* Microalgae density assessment using quantum dots-based optical sensing technique [J]. *Measurement*, 2025, 256: 118489.
- [17] NGUYEN D K, NGUYEN L, VIET LE D. A low-cost efficient system for monitoring microalgae density using Gaussian process[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 7504308.
- [18] GINCLEY B, KHAN F, HARTNETT E, *et al.* Introducing ARTiMiS: a low-cost flow imaging microscope for microalgal monitoring[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(30): 13540-13551.
- [19] XIAO H, WANG W S, ZHANG K K, *et al.* Microalgae density measurement using quantum-dot-integrated sensing and communication system [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 5506512.
- [20] American Society for Microbiology. *Manual of Microbiological Methods*[M]. New York: McGraw-Hill, 1957.
- [21] CHEN Y W, CHIANG P J. An automated approach for hemocytometer cell counting based on image-processing method [J]. *Measurement*, 2024, 234: 114894.
- [22] BORISOVA J, MORSHCHININ I V, NAZ-

- AROVA V I, *et al.* Low-cost microalgae cell concentration estimation in hydrochemistry applications using computer vision[J]. *Sensors*, 2025, 25(15): 4651.
- [23] ALIAS A B, MISHRA S, PENDHARKAR G, *et al.* Microfluidic microalgae system: a review [J]. *Molecules*, 2022, 27(6): 1910.
- [24] NGUYEN D K, NGUYEN H Q, DANG H T T, *et al.* A low-cost system for monitoring pH, dissolved oxygen and algal density in continuous culture of microalgae[J]. *HardwareX*, 2022, 12: e00353.
- [25] KARMAKAR D, TASNIM N, HASAN M R, *et al.* Kinetic study and modelling of drying of *Chlorella vulgaris* [J]. *Heliyon*, 2024, 10(19): e38441.
- [26] KRISHNAMOORTHY A, RODRIGUEZ C, DURRANT A. Sustainable approaches to microalgal pre-treatment techniques for biodiesel production: a review[J]. *Sustainability*, 2022, 14(16): 9953.
- [27] CALIJURI M L, SILVA T A, MAGALHÃES I B, *et al.* Bioproducts from microalgae biomass: Technology, sustainability, challenges and opportunities[J]. *Chemosphere*, 2022, 305: 135508.
- [28] 国家环境保护局. 水质悬浮物的测定重量法: GB 11901-1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. Water quality-Determination of suspended substance-Gravimetric method: GB 11901-1989[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990. (in Chinese)
- [29] 蒋璐璐, 魏莹, 赵艳茹, 等. 小球藻、球等鞭金藻和螺旋藻生物量高光谱成像的可视化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(3): 795-799.
- JIANG L L, WEI X, ZHAO Y R, *et al.* Study on the visualization of the biomass of *Chlorella sp.*, *isochrysis galbana*, and *spirulina sp.* based on hyperspectral imaging technique [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(3): 795-799. (in Chinese)
- [30] 沈萍萍, 王朝晖, 齐雨藻, 等. 光密度法测定微藻生物量[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2001, 22(3): 115-119.
- SHEN P P, WANG ZH H, QI Y Z, *et al.* An optical density method for determination of microalgal biomass[J]. *Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition)*, 2001, 22(3): 115-119. (in Chinese)
- [31] 徐敏, 殷高方, 赵南京, 等. 浮游植物明场与荧光双光路同步成像方法[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(12): 1725-1734.
- XU M, YIN G F, ZHAO N J, *et al.* Simultaneous bright field and fluorescence dual optical path imaging of phytoplankton[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(12): 1725-1734. (in Chinese)
- [32] BRANDÃO P R, SÁ M, GALINHA C F. Learning from fluorescence: a tool for online multiparameter monitoring of a microalgae culture [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2023, 179: 108452.
- [33] 刘洋, 钟年丙, 陈明, 等. 准确测量微藻生物量的塑料光纤倏逝波传感器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10z): 151-158.
- LIU Y, ZHONG N B, CHEN M, *et al.* Plastic optical fiber evanescent wave sensor for accurate measurement of microalgae biomass [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10z): 151-158. (in Chinese)
- [34] MOHD JAIS N A, ABDULLAH A F, MOHD KASSIM M S, *et al.* Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming[J]. *Heliyon*, 2024, 10(8): e29022.
- [35] WUNGMOOL P, RANGSI N, HORMWANTHA T, *et al.* Measurement of the cell density of microalgae by an optical method [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1298(1): 012005.
- [36] 王晓旭, 毛瑞鑫, 吴浩, 等. 螺旋藻光谱特性与生物量光密度检测方法的改进研究[J]. *农业技术与装备*, 2025(4): 3-7.
- WANG X X, MAO R X, WU H, *et al.* Research on the spectral characteristics and improvement of biomass optical density determination for *arthrospira platensis*[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2025(4): 3-7. (in Chinese)
- [37] ZHOU H Y, WANG J, ZHANG Z S, *et al.* High cell density culture of microalgae in horizontal thin-layer algal reactor: Modeling of light attenuation and cell growth kinetics[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 154175.
- [38] SARRAFZADEH M H, LA H J, LEE J Y, *et*

- al. Microalgae biomass quantification by digital image processing and RGB color analysis[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2015, 27(1): 205-209.
- [39] ZAIDI FAROUK M I H, JAMIL Z, ABDUL LATIP M F. Towards online surface water quality monitoring technology: a review[J]. *Environmental Research*, 2023, 238: 117147.
- [40] MORGADO D, FANESI A, MARTIN T, et al. Non-destructive monitoring of microalgae biofilms [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 398: 130520.
- [41] WAN MAHARI W A, WAN RAZALI W A, WAIHO K, et al. Light-emitting diodes (LEDs) for culturing microalgae and cyanobacteria [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149619.
- [42] APARICIO-RIZZO P, POBLETE-CABALLERO D, VERA-BASTIDAS C, et al. Phytoplankton detection study through hyperspectral signalling in the Patagonian fjords[J]. *Ocean Science*, 2025, 21(5): 2379-2395.
- [43] 肖华, 陈万里, 肖翔天, 等. 量子点LED用于可见光通信的调制带宽研究进展[J]. *发光学报*, 2022, 43(4): 598-607.
- XIAO H, CHEN W L, XIAO X T, et al. Progress on modulation bandwidth of quantum-dot LED in visible light communication [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(4): 598-607. (in Chinese)
- [44] 陈贇汉, 张雪, 周洁, 等. 红、绿 CdSe@ZnS 量子点配比对三波段标准白光 LED 器件的影响[J]. *发光学报*, 2014(8): 992-997.
- CHEN Y H, ZHANG X, ZHOU J, et al. Effect of red, green CdSe@ZnS quantum dots ratios on standard three-band white LED devices [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014(8): 992-997. (in Chinese)
- [45] 闫海珍, 程成, 张庆豪. 温度对 CdSe/ZnS 量子点吸收光谱和光致发光谱的影响[J]. *发光学报*, 2008, 29(1): 166-170.
- YAN H ZH, CHENG CH, ZHANG Q H. Effect of the temperature on absorption and photoluminescence spectra of CdSe/ZnS quantum dots[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, 29(1): 166-170. (in Chinese)
- [46] 余彬海, 卢汉光, 饶龙石, 等. 微通道反应器合成高质量的无机钙钛矿量子点及其 LED 应用[J]. *发光学报*, 2018, 39(4): 440-448.
- YU B H, LU H G, RAO L SH, et al. Synthesis of high quality inorganic perovskite quantum dots via microchannel reactor and their application in LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(4): 440-448. (in Chinese)
- [47] 胡炼, 吴惠楨. 基于量子点-CBP 混合层的量子点 LED 的制备[J]. *发光学报*, 2015, 36(10): 1106-1112.
- HU L, WU H ZH. Preparation of quantum dot light-emitting diodes based on the quantum dots-CBP hybrid [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(10): 1106-1112. (in Chinese)
- [48] 王志斌, 朱晓东, 贾浩然, 等. 蓝光钙钛矿发光二极管: 从材料制备到器件优化[J]. *发光学报*, 2020, 41(8): 879-898.
- WANG ZH B, ZHU X D, JIA H R, et al. Blue perovskite light-emitting diodes: from material preparation to device optimization [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(8): 879-898. (in Chinese)
- [49] 张文君, 翟保才, 许键. ZnO 作为电子传输层的绿光胶体 CdSe 量子点 LED (QD-LED) 的制备与表征[J]. *发光学报*, 2012, 33(11): 1171-1176.
- ZHANG W J, ZHAI B C, XU J. Fabrication and characterization of green CdSe quantum dot light emitting diodes with ZnO electron-transport layer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(11): 1171-1176. (in Chinese)
- [50] 卢子元, 庄永漳, 仇旭, 等. Micro-LED 全彩显示中量子点膜层制备及光转换效率优化[J]. *发光学报*, 2022, 43(3): 421-429.
- LU Z Y, ZHUANG Y ZH, ZHANG X, et al. Synthesis and conversion efficiency optimization of quantum dots layer for full-color micro-LED display [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(3): 421-429. (in Chinese)
- [51] XIAO H, CHEN H Y, ZHANG Q Y, et al. Microalgal density assessment based on quantum-dot light-emitting diodes and intelligent image edge detection [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 431: 132623.
- [52] 苏昂. 用于微藻现场检测的便携式显微系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- SU A. *Research on Portable Microscopic System for Field Detection of Microalgae* [D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese)
- [53] 王羽微, 程远, 毕海, 等. 基于深度学习 VGG 网

- 络模型的海洋单细胞藻类识别算法[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(2): 334-339.
- WANG Y ZH, CHENG Y, BI H, *et al.* Recognition algorithm of marine single-cell algae based on deep learning VGG network[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(2): 334-339. (in Chinese)
- [54] 吴志高, 陈明. 基于改进YOLO v7的微藻轻量级检测方法[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(1): 129-139.
- WU ZH G, CHEN M. Lightweight detection method for microalgae based on improved YOLO v7 [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2023, 38(1): 129-139. (in Chinese)
- [55] CHEN H Y, ZHANG Q Y, JIANG Q N, *et al.* Microalgae density measurement based on panel LED luminarie and color difference analysis [C]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Sensing, Measurement, Communication and Internet of Things Technologies*. Singapore: Springer, 2025: 325-333.
- [56] PÄÄKKÖNEN S, PÖLÖNEN I, RAITA-HAKOLA A M, *et al.* Non-invasive monitoring of microalgae cultivations using hyperspectral imager [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2024, 36(4): 1653-1665.
- [57] HAVLIK I, BEUTEL S, SCHEPER T, *et al.* On-line monitoring of biological parameters in microalgal bioprocesses using optical methods [J]. *Energies*, 2022, 15(3): 875.
- [58] SCHAGERL M, SIEDLER R, KONOPÁČOVÁ E, *et al.* Estimating biomass and vitality of microalgae for monitoring cultures: a roadmap for reliable measurements [J]. *Cells*, 2022, 11(15): 2455.
- [59] WINATA H N, NASUTION M A, AHAMED T, *et al.* Prediction of concentration for microalgae using image analysis [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(6): 8541-8561.
- [60] PARK J, YOON E Y, MOON S J, *et al.* Comparison of lipid content in nine dinoflagellate species using flow cytometry [J]. *Microorganisms*, 2024, 13(1): 44.
- [61] WHELAN J, MURPHY E, PEARSON A, *et al.* Use of focussed beam reflectance measurement (FBRM) for monitoring changes in biomass concentration [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2012, 35(6): 963-975.
- [62] PAHIJA E, HUI C W. A systematic study on the effects of dynamic environments on microalgae concentration [J]. *Algal Research*, 2019, 42: 101599.
- [63] SUNOJ S, HAMMED A, IGATHINATHANE C, *et al.* Identification, quantification, and growth profiling of eight different microalgae species using image analysis [J]. *Algal Research*, 2021, 60: 102487.
- [64] BERG C, HERBST L, GREMM L, *et al.* Assessing the capabilities of 2D fluorescence monitoring in microtiter plates with data-driven modeling for secondary substrate limitation experiments of *Hansenula polymorpha* [J]. *Journal of Biological Engineering*, 2023, 17(1): 12.
- [65] SÁ M, MONTE J, BRAZINHA C, *et al.* 2D Fluorescence spectroscopy for monitoring *Dunaliella Salina* concentration and integrity during membrane harvesting [J]. *Algal Research*, 2017, 24: 325-332.
- [66] PORRAS REYES L, HAVLIK I, BEUTEL S. Software sensors in the monitoring of microalgae cultivations [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2024, 23(1): 67-92.
- [67] DEBOWSKI M, KAZIMIEROWICZ J, ZIELIŃSKIM. Multi-sensing monitoring of the microalgae biomass cultivation systems for biofuels and added value products synthesis: challenges and opportunities [J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(13): 7324.
- [68] ZHANG Y L, XIANG S H, WANG Z H, *et al.* TDACNN: Target-domain-free domain adaptation convolutional neural network for drift compensation in gas sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 361: 131739.
- [69] 苏昂, 孙风云, 鲁子鹏, 等. 基于手机的便携式藻类显微与智能识别系统研究 [J]. 传感技术学报, 2022, 35(7): 897-901.
- SU A, SUN F Y, LU Z P, *et al.* Research on portable algae microscopic and intelligent recognition system based on mobile phone [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(7): 897-901. (in Chinese)

[70] SYED T, KRUIJATZ F, IHADJADENE Y, *et al.* A review on machine learning approaches for

microalgae cultivation systems [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2024, 172: 108248.

作者简介:



张乔杨(2003—),男,广东揭阳人,主要从事数据处理及图像处理领域的研究与应用。E-mail: qiaoyang@stu.gdou.edu.cn

通讯作者:



肖华(1989—),女,湖南邵阳人,副教授,2020年于香港城市大学获得博士学位,主要从事光学测量、水下可见光通信、纳米发光器件等方面的研究。E-mail: oliviahx@gdou.edu.cn