

浮游藻类监测技术进展

周秋立¹, 邹本东^{1*}, 常 淼¹, 陈圆圆¹, 孙成华¹, 杜泽瑞¹, 吕学研²

¹北京市生态环境监测中心, 北京

²江苏省环境监测中心, 江苏 南京

收稿日期: 2025年3月16日; 录用日期: 2025年4月9日; 发布日期: 2025年4月18日

摘 要

浮游藻类对其所处的生活环境敏感, 是评价水体健康状况的重要指示生物。藻类水华监测预警是浮游藻类研究的重要方向之一。藻类水华形成过程中, 往往伴随着藻类群落结构的快速演替。快速的、合理的浮游藻类监测技术, 是支撑藻类水华监测预警的重要基础。本文在综合整理国内外藻类监测技术的基础上, 较为系统地梳理了当前浮游藻类监测技术现状, 分析了不同方法的工作原理和特点, 以期浮游藻类监测技术选择和发展提供指引。

关键词

浮游藻类, 富营养化, 分子生物学, 人工智能

Advances in Monitoring Techniques for Planktonic Algae

Qiuli Zhou¹, Bendong Zou^{1*}, Miao Chang¹, Yuanyuan Chen¹, Chenghua Sun¹, Zerui Du¹, Xueyan Lyu²

¹Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Centre, Beijing

²Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing Jiangsu

Received: Mar. 16th, 2025; accepted: Apr. 9th, 2025; published: Apr. 18th, 2025

Abstract

Planktonic algae is sensitive to its living environment and is an important indicator of water health. Algal bloom monitoring and early warning is one of the important directions of planktic algal research. The formation of algal blooms is often accompanied by rapid succession of algal community structure.

*通讯作者。

文章引用: 周秋立, 邹本东, 常淼, 陈圆圆, 孙成华, 杜泽瑞, 吕学研. 浮游藻类监测技术进展[J]. 水污染及处理, 2025, 13(2): 34-42. DOI: 10.12677/wpt.2025.132005

Rapid and reasonable algal monitoring technology is an important basis to support algal bloom monitoring and early warning. Based on the comprehensive review of algae monitoring technologies at home and abroad, this paper systematically reviews the current status of planktonic algae monitoring technologies, analyzes the working principles and characteristics of different methods, in order to provide guidance for the selection and development of planktonic algae monitoring technologies.

Keywords

Planktonic Algae, Eutrophication, Molecular Biology, Artificial Intelligence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

藻类是水域生态系统的重要初级生产者,广泛分布于海洋和淡水河湖中[1]-[4]。全世界已知藻类约有4万种,其中淡水藻类约2.5万种,约9000种淡水藻类在我国有记录[5]。藻类吸收二氧化碳和营养盐,通过光合作用合成有机物质并释放氧气,在维持生物圈物质和能量平衡中扮演着重要角色。浮游藻类,也称浮游植物,是指淡水或者海水中营浮游生活且缺乏一定运动能力的微小植物群体或部分原核生物[6],其个体微小,种类繁多,群落组成庞大且复杂,目前已知的浮游藻类约4000~5000种[7]。

随着经济社会的快速发展,氮、磷等营养盐被大量排入地表水中,导致水体富营养化[8]。浮游藻类过量增殖(也称藻类水华)是水体富营养化的重要外在表现形式之一。同时,有些浮游藻类还会产生藻毒素[9]-[11]、异味物质[12][13],直接威胁供水安全和人体健康,并对水生态环境造成影响[14][15]。

浮游藻类对其所处的生活环境敏感,能够对水体的营养状态变化迅速作出响应[16]-[18],是评价水体健康状况的重要指示生物[18]-[20],其种类组成和数量分布的生态学特征是水生态系统的重要研究内容[21]-[25]。鉴于藻类水华的危害性,藻类水华监测预警在浮游藻类研究中也占据着重要地位。藻类水华形成过程中,很多时候相关的水质理化指标并不发生明显变化,无法起到直观的预警作用,但是,其间往往伴随着藻类群落结构的快速演替。所以,快速的、合理的浮游藻类监测技术,是支撑藻类水华监测预警的重要基础。

本文在综合整理国内外藻类监测技术的基础上,较为系统地梳理了当前浮游藻类监测技术现状,分析了不同方法的工作原理和特点,以期对浮游藻类监测技术选择和发展提供指引。

2. 显微镜人工计数法

显微镜人工计数法,是基于藻类形态学特征对其进行分类鉴定并计数的方法。该方法是藻类鉴定和计数的传统方法,是浮游藻类监测的基础[26][27],适用于浓度低、种类多的样品[28]。根据样品前处理方式,可以分为自然沉降法、滤膜法和离心法。

2.1. 自然沉降法

自然沉降法的作业原理是,在沉降装置中,失去活性的浮游藻类,在重力作用下,沉淀到沉降装置底部,通过回收沉积物并定容,用于最后的鉴定和计数。

《水质 浮游植物的测定 0.1 mL 计数框 - 显微镜计数法》(HJ1216-2021)即基于该工作原理制订[29]。该方法中,首先利用自然沉降原理浓缩样品并定容,然后在正置显微镜下利用0.1 mL计数框进行人工鉴定

计数, 计算单位体积样品中各种浮游藻类的个体或细胞数量。自然沉降法样品前处理耗时较长, 需要将样品置于浓缩装置中静置 48 h。同时, 在虹吸操作过程中, 容易造成一部分已沉降的浮游藻类再次悬浮被移出, 导致实验数据平行性较差[30][31]。较长的时耗, 制约了该方法在应急监测中的应用, 人工计数效率低、专业背景要求高进一步限制了该方法的实际应用[32]。董晓晨等[33]尝试将沉降时间缩短至 2 h, 并联合多参数水质分析仪来测定样品的浮游藻类总量。结果显示, 新方法(沉降 2 h)的计数结果能够达到传统方法(沉降 48 h)的 86.04%, 检测结果当天即可报出, 一定程度上可用于藻类水华预警和应急监测, 但是在更大范围的适用性还缺少进一步验证。

倒置显微镜计数法, 即 Utermöhl 计数法[34][35], 也是采用自然沉降原理。该方法中, 样品沉淀器由沉降柱和沉降板组成, 所需样品体积在 1~20 mL, 静置沉淀 24 h 以上或根据使用的沉降管高度选择静置时间, 确保浮游藻类细胞完全沉降, 然后采用倒置显微镜观察计数。因为对原水进行显微镜计数, 避免了浓缩过程中的物种损失, 准确度高、变异系数小, 能较为全面地反映样品中的浮游藻类物种分布。该方法所需样品体积小、操作简单易行, 较适合于藻类水华暴发期间等的临时性应急监测。为进一步拓展该方法的使用范围, Paxinos 等[36]把 Utermöhl 的静置沉降浓缩改为压滤浓缩, 将样品浓缩时间缩短至 2 小时左右, 且计数结果与传统的 Utermöhl 沉降浓缩结果具有很好的正相关性($R^2 = 0.98$)。相关研究[37][38]结果还显示, 采用 5 小时倒置显微镜自然沉降法来进行细胞计数, 能在缩短浮游藻类样品前处理时间的同时, 有效降低浮游藻类生物量损失。牛海玉等[39]比对发现, 正置显微镜自然沉降法所得的浮游藻类生物量和细胞密度要小于倒置显微镜法, 但两种方法得到的辛普森指数(Simpson Index)相近。

2.2. 滤膜法

滤膜法, 利用装有一定孔径滤膜的真空抽滤装置, 过滤一定体积含有浮游藻类的样品, 将浮游藻类截留在滤膜上, 然后在显微镜下对浮游藻类进行鉴定和计数。

《水质 浮游植物的测定滤膜 - 显微镜计数法》(HJ1215-2021)即基于该前处理方式制订[40]。该方法中, 首先利用混合纤维素酯膜(直径 25mm, 孔径 0.45~3 μm)抽滤富集样品中的浮游藻类, 然后将带有浮游藻类样本的滤膜经透明处理后在正置或倒置生物显微镜下镜检。该方法可对送达实验室或满足工作条件的移动工作仓的样品立即处理、鉴定, 适用于地表水浮游藻类的快速检测。杨亚莉等[41]在滤膜法的基础上, 用蒸馏水将滤膜上截留的浮游藻类冲洗定容, 对比分析滤膜法和自然沉降法的结果差异发现, 不同浓度梯度下, 滤膜法获得的浮游藻类密度更大。滤膜法的样本处理速率, 取决于过滤的体积以及样品中浮游藻类的细胞浓度和杂质的含量等[42]。由于在强光下会造成图像扭曲, 滤膜 - 显微镜计数法的缺点是细胞不能用明场照明, 很难识别不同门类的物种。

为了规避滤膜 - 显微镜计数法的缺点, 研究人员也在积极尝试不同处理方法的组合使用。超声振荡法, 是在滤膜法的基础上, 利用超声装置, 将滤膜上富集的浮游藻类洗脱, 定容后利用自然沉降法的镜检方式进行浮游藻类鉴定和计数。这一方法组合, 一方面能够快速完成浮游藻类样品的前处理操作, 另一方面避免了单纯滤膜法不能使用明场照明的缺点, 但是也存在过大的超声功率造成部分浮游藻类碎片化, 从而影响鉴定和计数结果的风险。然而, 选择合适的超声功率后, 可以有效避免超声清洗造成的细胞破裂问题, 且与传统方法相比, 具有取样量少、操作方便等优点[43]。在细胞处理方面, 在活细胞中, 中性红可将液泡染成红色, 当细胞死亡后, 中性红会充满整个细胞。利用这一特点, 马越等[44]在滤膜 - 显微镜计数法的基础上, 采用中性红固定藻类细胞 30 min, 实现了细胞的更好辨识, 有效避免了个体小且透明的浮游藻类的漏检问题。

2.3. 离心沉淀法

离心沉淀法, 利用浮游藻类细胞与水的重量差异, 在离心力作用下促使样品中的浮游藻类快速沉降

分离, 收集定容离心后的固体部分作为浮游藻类的待测样品。该方法能够实现样品的快速处理, 但是样品离心前的分批转移容易造成浮游藻类损失, 且不同藻类的重量差异会进一步影响沉淀效果, 造成浮游藻类再损失, 导致浮游藻类平行计数结果不稳定[45]。

2.4. 其他镜检方法

水体富营养化带来的藻类水华现象时有发生, 显微镜人工计数法虽然能够较为全面地反映浮游藻类的物种组成信息, 但无法满足浮游藻类快速检测需求, 且光学显微镜对粒径小于 20 μm 的浮游藻类分类鉴定较难[46]。此外, 当样品中杂质较多和(或)细胞破碎时, 均不能获得较为准确的鉴定结果。扫描电镜和透视电镜的出现克服了一些普通光学显微镜观察藻类时面临的肉眼不易区分识别的问题, 能更好地从表面细微形态和内部结构的精细特征上对藻种进行识别分类[47]。但在实际操作中, 仍存在分析速度慢、稳定性低、对操作者的经验要求高等问题。利用浮游藻类细胞组成、形态特征、遗传信息组成等差异以及人工智能(AI)新技术, 开发规范化、流程化、自动化的浮游藻类监测技术, 成为浮游藻类监测技术发展的增长点。

3. 仪器快速分析法

3.1. 基于色素组成的光学/化学分析法

叶绿素 a 是水体浮游藻类光合作用的重要载体, 其含量是反应浮游藻类生物量和初级生产力水平最直接有效的指标[48]。实验室叶绿素 a 浓度测定法操作复杂、耗时长, 而藻类荧光快速检测法在传统叶绿素 a 浓度测定的基础上, 通过分析浮游藻类所含的特定色素或色素组合可以快速识别和定量浮游藻类群落组成。

浮游藻类细胞不同的色素组成表现出不同特征的荧光光谱。荧光光谱法, 就是根据叶绿素/辅助色素的比率变化, 实现浮游藻类群落组成监测。直接荧光光谱法, 只需测定 1 个波长的荧光强度, 步骤简单, 耗时缩短, 在较低浓度区域及采样量不多或水体较混浊难以抽滤的情况下, 可测得较准确的叶绿素 a 含量, 一定程度上能够满足常规地表水叶绿素 a 的监测[49], 并且可以实现活体和原位连续测定。但是, 该方法无法获取藻类形态学信息, 不能区分到物种种类水平。三维荧光光谱法, 能够获得激发波长与发射波长或其他变量同时变化的荧光强度信息, 通过 1 次扫描, 便有可能获取监测体系中的全部组分, 提取的指纹信息更丰富, 更有利于区分目标物。张前前等[50], 提取活体浮游藻类三维荧光光谱特征, 建立藻类的特征谱库, 完成部分实验样本中硅藻和甲藻群落的分类识别。离散三维荧光光谱法, 能够进一步获取可以全面、准确表征不同门类藻类光谱特征的多个特征激发波长和发射波长, 实现了不同藻类离散三维荧光光谱的重构, 提高了浮游藻类的分类精度, 具有检测速度快、灵敏度高以及可在线原位测量等特点。袁静等[51]将基于离散三维荧光光谱法的水体藻类原位测量仪用于太湖水体叶绿素 a 浓度的测定及 5 个门类藻的分类, 发现精密性、准确率均优于基于普通荧光法生产的水体藻类原位测量仪。

高效液相色谱(HPLC)法具有自动化程度高、分离效果显著、能够定量和定性分析等特点, 在浮游藻类光合色素分析中也较为常用。HPLC 法能够精确测定叶绿素 a 和其他色素以及它们的衍生物含量, 并根据检测出的色素丰度推测各特异性色素所属类群的相对比例, 判断微型浮游藻类的存在[52] [53]。一方面, 原来因为样品过滤或预处理所造成的显微镜人工计数过程中浮游藻类种类缺失, 通过 HPLC 法的色谱峰也能清楚地辨别出来; 另一方面, 某些相似度极高, 但是光合色素等生物标志物上可能存在差异的浮游藻类, 通过 HPLC 法也可以实现有效鉴定。HPLC 法所需样品量少, 能够有效进行大量样品的定量和定性分析, 与荧光分析法相比, 具有快速、准确的特点[54], 但是所用仪器精密、价格昂贵、操作复杂, 且只能在门分类阶元上区分浮游藻类, 距离区分到种类的要求还较远。此外, 环境变化以及

细胞生长周期不同阶段也会导致浮游藻类的光合色素含量发生一些变化,从而导致分类的结果受到影响[53] [55]。

3.2. 基于细胞形态特征的光学分析法

当激光照射过浮游藻类细胞时,会发生散射形成散射光。散射光与浮游藻类细胞的体积、形态、胞内物质组成及结构具有相关性,根据这些特征参数可以对细胞群体进行分选,区分真核微型浮游藻类、蓝藻等,实现对浮游藻类的分类。流式细胞法,即是基于这一原理所建立,是一种能对浮游藻类细胞进行快速鉴定、定量和分选的技术方法[56]。在该方法中,浮游藻类被分散为单细胞,并排列形成一束液流,通过激光束的照射。该方法对细胞体积较小(细胞<20 μm)的藻类效果较好,因为这些浮游藻类的细胞基本为球状,且易形成单细胞液流,检测过程稳定,便于进行定性及定量分析[57],很大程度上弥补了传统研究方法对微微型浮游藻类定性、定量检测的不足,可实现样品的大批量测定。但当浮游植物细胞的生理特征发生变化时,鉴定的准确率会下降[58],并且由于没有图像采集功能,对较大的颗粒和细胞体积较大的浮游藻类的直接识别还存在很大的困难[59],不太适用于组成复杂的浮游藻类样品检测[57]。此外,该方法所涉及的仪器精密、价格较高,不能直接用于现场测量,无法满足浮游藻类群落的快速在线监测需求。

流式细胞摄像系统(FlowCAM)的出现,不仅能够快速计数浮游藻类细胞,还能自动捕获生物体图像,提升浮游藻类分析速度的同时,还能自动识别到种类水平,在欧洲、美国等海洋生态系统研究及监测中得到了应用[60] [61],我国也有学者利用该方法系统检测海洋浮游藻类并建立了图谱库[62] [63]。在淡水方面, Park 等[64]将该系统方法用于河流中微囊藻群落细胞的计数,且认为效果很好。有研究表明, FlowCAM 适合于藻类密度较高水体、特别是有藻类水华发生水体的藻类鉴定和定量检测[65]。对藻类细胞低于 10 万个/mL 的样品可以直接测定进样,不仅节约时间,还避免样品保存过程中的损失,所检测出的浮游藻类细胞丰度整体要高于显微镜人工计数法。对粒径 20 μm 以上的小型浮游藻类可以鉴定到属水平,而对粒径在 20 μm 以下的微型浮游藻类只能提供较低分辨率的图像,分类鉴定效果较差[66]。

基于细胞形态特征的光学分析方法虽然经历了较长时间的发展,也分化出了流式细胞法和流式细胞摄像系统(FlowCAM)两种主要的发展方向,但是仍然未能彻底克服各自的缺点。表 1 对基于细胞形态特征的光学方法进行了对比汇总。

Table 1. Comparative summary of optical analysis based on morphological characteristics
表 1. 基于细胞形态特征的光学分析法对比汇总

方法	适用范围	缺点	制约因素
流式细胞法	该方法对细胞体积较小(细胞<20 μm)的藻类效果较好。	没有图像采集功能,对较大的颗粒和细胞体积较大的浮游藻类的直接识别还存在很大的困难,不太适用于组成复杂的浮游藻类样品检测。	仪器精密、价格较高,不能直接用于现场测量,无法满足浮游藻类群落的快速在线监测需求。
流式细胞摄像系统(FlowCAM)	适合于藻类密度较高水体、特别是有藻类水华发生水体的藻类鉴定和定量检测。	对粒径在 20 μm 以下的微型浮游藻类只能提供较低分辨率的图像,分类鉴定效果较差。	受图谱库制约较大。

4. 分子生物学鉴定法

分子生物学鉴定法,以 DNA/RNA 序列或蛋白质及氨基酸序列的特异性为研究载体,结合分子分类

标记方法,实现浮游藻类的识别和分类。它是目前除显微镜人工计数法外,为数不多的能在种分类阶元水平上对一些特定藻类进行种类鉴定的技术之一,为浮游藻类形态学鉴定提供了更加准确的基因层面的支持。多重分子检测,可同时分析多个有害藻种,其中,高通量测序更具方法优势,主要应用在环境类样品的鉴定和多样性分析。随着基因测序技术不断地发展与普及,大数据分析能力不断提高,基因组研究手段正越来越多地应用于形态学难以辨别的物种的鉴定[67]。高通量测序,具有能够检测数量较少、体积微小且不宜培养的生物体的能力[68],可以弥补显微镜人工计数法中难以判断的物种信息,从而提高了浮游藻类监测的综合能力。王靖淇等[69]、毕宏伟[70]等分别运用该技术开展了辽河以及东湖水域的藻类多样性分析和鉴定。该方法检测的藻类物种数,一般会多于显微镜人工计数法鉴定到的物种数。

目前,分子生物学鉴定法,在藻类 DNA/RNA 提取、引物和数据库选择等方面存在一定挑战,较高的实验成本、复杂的操作过程使其在实际应用中受到限制。此外,它只能对目标藻类(即藻类 DNA 数据库中已经存在的藻类)进行有效检测,对非目标藻类无法有效进行测量和评估,从而造成非目标藻类群落生物信息缺失,进而无法对样品浮游藻类总体情况准确定量和分类。

5. 人工智能(AI)分析系统

浮游藻类的微观形态特征是传统监测技术方法的核心。随着人工智能(AI)技术的发展,使得浮游藻类智能化监测成为可能。基于自动图像识别技术的 AI 分析系统,是浮游藻类智能化监测的一个重要研究方向,其核心是系统的数据算法。深度学习是近几年兴起的大数据计算机算法,通过大量数据集的特征来实现对目标物的识别或预测。万永清等[71]基于深度学习框架对三种藻类进行特异性识别训练,识别率可以达到 100%,进一步支撑了该方法应用的可能性。项和雨等[72]基于太湖 11 个优势种属的 1036 张图像数据源,优化得到一种新的深度卷积神经网络算法,该算法对浮游藻类的识别准确率为 95.67%,推理速率为 41.5 帧/s。胡圣等[73]基于 3 万余张浮游藻类图片,采用深度学习技术对藻类智能监测系统进行训练,稳定后的算法可以检测 6 门 43 种属浮游藻类,平均检测时长低于 20 min,平均识别准确率为 87%,适宜检测密度范围为 $5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^7$ 个/L,样品可以完成自动进样、拍摄与图像识别和计数。Gong Xingrui *et al.* [74]介绍了一种高效自组织的藻类检测系统,可以完成样品快速扫描、信息数字化、物种鉴定、计数统计等多种功能,能够在 5 分钟内完成藻类玻片样本的扫描、拍照、检测分析和数据统计报表生成。

目前,具备自动进样、多景深拍摄、图像识别及数据分析的藻类 AI 分析系统已经在业务工作中逐步应用[18]。随着深度学习技术[75]、图像处理技术[76]等的迅速发展,势必大大提高浮游藻类监测的工作效率和数据分析的准确性,浮游藻类物种多样性、藻密度、生物量等的智能化识别和分析将迈入集规范化、流程化、自动化于一体的新时代。但是,与分子生物学鉴定法的局限相似,AI 分析系统也无法对未知藻种开展识别鉴定,其使用的范围和结果的准确性,需要更多的本地样品图谱库和实时更新的数据库支撑。

6. 总结与展望

浮游藻类是水生态系统重要的组成部分,对其所处的生活环境敏感,能够对水体的营养状态变化迅速作出响应,是评价水体健康状况的重要指示生物。传统的显微镜人工计数法以形态学特征为依据,可以完成浮游藻类定量检测及种属的分类鉴定,是实验室常用的经典方法,但是难以应对大批量连续样本的快速分析要求,并且结果受样品处理过程、鉴定人员的专业背景知识和经验影响较大。为有效防控藻类水华造成的危害,研发快速的、合理的浮游藻类监测技术非常重要。

仪器快速分析法可以实现浮游藻类样品快速定量分析,但在分类鉴定方面难以获得较为精确的结果。分子生物学鉴定法和 AI 分析系统,对数据的依赖程度较高,还需要结合传统显微镜人工镜检等方法,不

断扩充、完善物种基础信息数据库,才能获得较为满意、可用的结果。考虑到 AI 分析系统与传统显微镜人工计数法的结合较为紧密,可能成为浮游藻类监测技术最具发展潜力的新方向。随着浮游藻类图谱库不断扩充,数据库日趋完善,大数据模型不断更新, AI 分析系统图像识别准确率也将得到进一步提升。

基金项目

水利部重大科技项目(SKS-2022059)。

参考文献

- [1] 黎明民, 骆鑫, 付家想, 等. 基于浮游植物生物完整性的北部湾生态健康评价[J]. 中国环境监测, 2018, 6(34): 113-121.
- [2] 季相星, 姜毅, 王普力. 2015-2018 年海州湾及邻近海域浮游植物群落结构特征[J]. 环境监控与预警, 2021, 13(1): 47-51.
- [3] 李朝, 吴涛, 迟伟伟, 等. 徐州九里湖沉水植物对富营养化湖泊的生态改善作用[J]. 环境监控与预警, 2024, 16(1): 80-86.
- [4] 徐沙, 郭嘉伟, 胡恩, 等. 汉江上游平水期浮游植物群落特征及水质生物评价[J]. 水生态学杂志, 2024, 3(45): 148-155.
- [5] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 李洪武, 宋培学. 海洋浮游生物学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2012.
- [8] 黄文达, 饶伟民, 陈椽, 等. 夜郎湖水库富营养化特征及重金属风险污染评估[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S2): 144-149.
- [9] 宫于琛, 屈佩, 刘瑞娟, 等. 环境 CO₂ 浓度升高对海洋有毒微藻生长及产毒的影响研究进展[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(2): 141-145.
- [10] 金吉媛, 黄馨雯, 曹杰, 等. 铜绿微囊藻杀藻剂的现状综述: 性能及机理[J]. 工业水处理, 2024, 44(2): 11-16.
- [11] 李静, 晏萌, 沈金灿, 等. UPLC-MS/MS 测定海水、悬浮颗粒物及沉积物中 18 种藻毒素[J]. 分析测试学报, 2023, 42(2): 181-188.
- [12] 梁霄, 王许欣, 周楠, 等. 便携式固相微萃取-气质联用法结合离子隔离技术现场测定水中 4 种异味物质[J]. 环境监控与预警, 2024, 16(6): 46-51.
- [13] 费强, 刘伟, 尹乐, 等. 熊河水库浮游植物群落及产异味物质藻类季节变化特征[J/OL]. 水生态学杂志, 1-11. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202312310401>, 2025-03-26.
- [14] 陈晓国, 江天兵, 王思怡, 等. 城市景观水体藻源异味物质的时空分布、来源及其驱动因子——以武汉月湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(11): 2383-2392.
- [15] 赵勇, 王天艺, 李慷, 等. 土霉素对淡水鱼品质的影响及控制策略研究进展[J]. 水产学报, 2024, 48(7): 24-34.
- [16] To, S., Acevedo-Trejos, E., Smith, S.L., Chakraborty, S. and Merico, A. (2025) Ecological and Environmental Factors Influencing Exclusion Patterns of Phytoplankton Size Classes in Lake Systems. *Ecological Complexity*, **61**, Article ID: 101115. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2024.101115>
- [17] Wang, W., Huang, H., Zhao, K., Lv, J., Liu, X., Shi, Y., et al. (2024) Genome Size Affects Phytoplankton Response to Environmental Factors: A Preliminary Exploration in 26 Lakes in the Region East of the Hu Huanyong Line. *Water Biology and Security*. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100339>
- [18] 陶江, 邵旭东, 范帆, 等. 太湖生态涵养区浮游植物多样性[J]. 环境监控与预警, 2024, 16(5): 131-138, 156.
- [19] 刘晓维, 杨洋, 殷稼雯, 等. 高宝湖区 4 个湖泊浮游植物和底栖动物群落特征和生物评价[J]. 环境监控与预警, 2020, 12(6): 52-58.
- [20] 项文钰, 王新洲, 钱文杰, 等. 城市水体水生生物群落结构分析——以苏州工业园区为例[J]. 环境监控与预警, 2024, 16(5): 166-173.
- [21] Suikkanen, S., Laamanen, M. and Huttunen, M. (2007) Long-term Changes in Summer Phytoplankton Communities of the Open Northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **71**, 580-592. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.09.004>

- [22] 沈爱春, 徐兆安, 吴东浩. 太湖夏季不同类型湖区浮游植物群落结构及环境解释[J]. 水生生态学杂志, 2012, 33(2): 43-47.
- [23] 申恒伦, 徐贺, 张鑫儒, 等. 泉水型城市湖泊浮游植物功能群特征及其生态健康评价——以济南大明湖为例[J]. 湖泊科学, 2024, 36(4): 1036-1046.
- [24] Sugianti, Y., Mujiyanto, Syam, A.R. and Nastiti, A.S. (2024) Phytoplankton Community Structure in Tunda Island Waters, Banten Indonesia as a Bioindicator to Measure Water Quality. *Marine Pollution Bulletin*, **209**, Article ID: 117147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117147>
- [25] Wang, Y., Niu, L., Li, Y., Zou, G., Wu, J. and Zheng, J. (2025) Using Modern Coexistence Theory to Understand the Distinct States of Phytoplankton Communities in a Subtropical Eutrophic River Network. *Water Research*, **274**, Article ID: 123062. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.123062>
- [26] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [27] 朱冰川, 张军毅, 魏轲, 等. 浮游植物半定量活检法在蓝藻预警中的应用[J]. 环境监控与预警, 2011, 3(6): 8-11.
- [28] 陈坤, 张前前, 史海燕, 等. 浮游植物计数方法比较研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(4): 383-385.
- [29] 云南省生态环境监测中心. HJ 1216-2021 水质浮游植物的测定 0.1mL 计数框-显微镜计数法[S]. 北京: 生态环境部, 2021.
- [30] Billington, N. (1991) A Comparison of Three Methods of Measuring Phytoplankton Biomass on a Daily and Seasonal Basis. *Hydrobiologia*, **226**, 1-15. <https://doi.org/10.1007/bf00007775>
- [31] 赵洋甬, 马静军, 肖国起. 微囊藻细胞计数法研究[J]. 福建分析测试, 2010, 19(3): 76-78.
- [32] 沈强, 向想民, 张礼嘉, 等. 藻类快速检测新技术在三峡水华监测中的应用[J]. 人民长江, 2015, 46(21): 13-17.
- [33] 董晓晨, 刘玉红, 邹一飞. 地表水中两种藻类应急检测方法[J]. 科技创新导报, 2010(29): 107-108.
- [34] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 一种海洋浮游植物定量研究分析方法-Utermöhl 方法的介绍及其改进[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(2): 105-112.
- [35] 贺小芮, 周俊杰. 倒置显微镜计数法检测浮游藻类[J]. 中国给水排水, 2004, 20(11): 98-100.
- [36] Paxinos, R. (2000) A Rapid Utermohl Method for Estimating Algal Numbers. *Journal of Plankton Research*, **22**, 2255-2262. <https://doi.org/10.1093/plankt/22.12.2255>
- [37] Bhaskar, P.V., Roy, R., Gauns, M., Shenoy, D.M., Rao, V.D. and Mochamadkar, S. (2011) Identification of Non-Indigenous Phytoplankton Species Dominated Bloom off Goa Using Inverted Microscopy and Pigment (HPLC) Analysis. *Journal of Earth System Science*, **120**, 1145-1154. <https://doi.org/10.1007/s12040-011-0132-z>
- [38] 张榆霞, 金玉, 施泽, 等. 富营养化水体藻类显微镜计数方法改进研究[J]. 福建分析测试, 2014, 23(1): 13-16.
- [39] 牛海玉, 肖利娟, 韩博平. 采用倒置显微镜法定量浮游植物的数据稳定性[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 141-148.
- [40] 浙江省生态环境监测中心. HJ 1215-2021 水质浮游植物的测定滤膜-显微镜计数法[S]. 北京: 生态环境部, 2021.
- [41] 李亚莉, 杨正健, 田盼, 等. 一种浮游植物快速浓缩及固定方法的可靠性分析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4300-4309.
- [42] Steinberg, M.K., First, M.R., Lemieux, E.J., Drake, L.A., Nelson, B.N., Kulis, D.M., *et al.* (2011) Comparison of Techniques Used to Count Single-Celled Viable Phytoplankton. *Journal of Applied Phycology*, **24**, 751-758. <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9694-z>
- [43] 王瓚, 乔俊莲, 王国强, 等. 浓缩过滤-超声振荡法检测水中藻类[J]. 中国给水排水, 2008, 24(14): 86-87
- [44] 马越, 陈琳, 黄宗耀. 基于中性红染色的原水藻类细胞快速检测方法[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 161-165.
- [45] 路晓峰, 林青, 韦雪柠, 等. 浮游植物样品的前处理优化及计数方法研究[J]. 聚焦水污染防治, 2018(9): 53-57.
- [46] 邓春梅, 姚鹏, 刘淑霞, 等. 海洋浮游藻色素分析和化学分类研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(4): 91-98.
- [47] 杨萍萍. 浮游植物显微镜计数方法适用范围探究[J]. 资源节约与环保, 2017(7): 101-102, 104.
- [48] 万修志. 提取测定淡水藻中叶绿素 a 的方法研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
- [49] 姜欣欣. 荧光光度法测定地表水叶绿素 a 的探讨[J]. 现代科学仪器, 2009(1): 79-80.
- [50] 张前前, 类淑河, 王修林, 等. 浮游植物活体三维荧光光谱分类判别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(10): 1227-1229.
- [51] 袁静, 戴源, 沈薇, 等. 基于离散三维活体荧光光谱法的湖泊水体叶绿素 a 浓度原位测量[J]. 湖泊科学, 2018, 30(3): 782-789.

- [52] Lu, L., Jiang, T., Xu, Y., Zheng, Y., Chen, B., Cui, Z., *et al.* (2018) Succession of Phytoplankton Functional Groups from Spring to Early Summer in the Central Bohai Sea Using HPLC-CHEMTAX Approaches. *Journal of Oceanography*, **74**, 381-392. <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0469-x>
- [53] Wang, L., Ou, L., Huang, K., Chai, C., Wang, Z., Wang, X., *et al.* (2018) Determination of the Spatial and Temporal Variability of Phytoplankton Community Structure in Daya Bay via HPLC-CHEMTAX Pigment Analysis. *Journal of Oceanology and Limnology*, **36**, 750-760. <https://doi.org/10.1007/s00343-018-7103-z>
- [54] 戴荣继, 佟斌, 黄春, 等. HPLC 测定饮用水中藻类叶绿素含量[J]. 北京理工大学学报, 2009, 26(1): 87-89.
- [55] Hou, J., Huang, B., Cao, Z., Chen, J. and Hong, H. (2007) Effects of Nutrient Limitation on Pigments in *Thalassiosira weissflogii* and *Prorocentrum donghaiense*. *Journal of Integrative Plant Biology*, **49**, 686-697. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00449.x>
- [56] 张利华. 流式细胞术在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 东海海洋, 1998(1): 21-62.
- [57] Lomas, M.W., Bronk, D.A. and van den Engh, G. (2011) Use of Flow Cytometry to Measure Biogeochemical Rates and Processes in the Ocean. *Annual Review of Marine Science*, **3**, 537-566. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120709-142834>
- [58] 钱奎梅, 刘霞, 陈宇炜. 淡水浮游植物计数与定量方法[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 767-775.
- [59] 王玉, 李涛, 徐枫. 流式细胞仪藻类在线监测系统-架构与应用[J]. 水利信息化, 2018(5): 34-37.
- [60] Hrycik, A.R., Shambaugh, A. and Stockwell, J.D. (2019) Comparison of Flowcam and Microscope Biovolume Measurements for a Diverse Freshwater Phytoplankton Community. *Journal of Plankton Research*, **41**, 849-864. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbz056>
- [61] Detmer, T.M., Broadway, K.J., Potter, C.G., Collins, S.F., Parkos, J.J. and Wahl, D.H. (2019) Comparison of Microscopy to a Semi-Automated Method (Flowcam®) for Characterization of Individual-, Population-, and Community-Level Measurements of Zooplankton. *Hydrobiologia*, **838**, 99-110. <https://doi.org/10.1007/s10750-019-03980-w>
- [62] 余肖翰. 基于流式细胞摄像技术的福建南部海域赤潮藻类图谱数据库构建与分析[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [63] 任琳琳. 流式影像术在黄东海浮游植物群落结构研究中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [64] Park, J., Kim, Y., Kim, M. and Lee, W.H. (2018) A Novel Method for Cell Counting of *Microcystis* Colonies in Water Resources Using a Digital Imaging Flow Cytometer and Microscope. *Environmental Engineering Research*, **24**, 397-403. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.266>
- [65] 张俊芳. 流式细胞摄像系统应用于藻类检测的初步研究[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(2): 91-95.
- [66] 王珊珊, 万峻, 马丁, 等. 利用流式影像术(FlowCAM)分析淡水浮游藻类群落特征-以北京城区主要河流为例[J]. 中国环境监测, 2022, 38(1): 189-199.
- [67] 施军琼, 张明, 杨燕君, 等. 基于高通量测序探讨大宁河不同水华期真核浮游生物群落组成[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(2): 1-7.
- [68] 宋伦, 吴景, 李楠, 等. 基于高通量测序的真核微藻多样性质控分析[J]. 水产科学, 2019, 38(6): 804-812.
- [69] 王靖淇, 王书平, 张远, 等. 高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1403-1413.
- [70] 毕宏伟, 刘陈飞. 基于高通量测序的东湖蓝藻动态变化研究[J]. 人民长江, 2018, 49(19): 39-45.
- [71] 万永清, 张奇志. 深度学习在藻类分类识别中的应用[J]. 传感器世界, 2019, 25(1): 7-12.
- [72] 项和雨, 邹斌, 唐亮, 等. 基于残差注意力网络模型的浮游植物识别[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6883-6892.
- [73] 胡圣, 刘浩兵, 刘辉, 等. 基于深度学习技术的藻类智能检测系统开发[J]. 中国环境监测, 2022, 38(1): 200-210.
- [74] Gong, X., Ma, C., Sun, B. and Zhang, J. (2023) An Efficient Self-Organized Detection System for Algae. *Sensors*, **23**, Article 1609. <https://doi.org/10.3390/s23031609>
- [75] 胡越, 罗东阳, 花奎, 等. 关于深度学习的综述与讨论[J]. 智能系统学报, 2019, 14(1): 1-19.
- [76] 梁天泓, 殷高方, 邵新童, 等. 浮游植物类别不均图像分类方法对比研究[J/OL]. 生态学报, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.2031.Q.20250106.1723.001>, 2025-03-26.