

微藻的絮凝过程和絮团特性

——以小球藻、谷皮菱形藻为例*

邓智瑞, 宫鹏杰

广东省水动力学应用研究重点实验室 / 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635

摘要: 为揭示不同体积分数(φ)条件下微藻的絮凝过程和絮团特性, 选取小球藻(*Chlorella* sp.)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)为代表性藻类, 开展环形水槽控制实验研究。实验结果表明, 小球藻的絮团粒径随着 φ (样品)的增加而增大, 从 φ (样品)=0.02%时约8 μm 增至 φ (样品)=0.08%时约22 μm 。相较之下, 菱形藻的絮团粒径在相同条件下呈现相反趋势, 从 φ (样品)=0.02%时约20 μm 降至 φ (样品)=0.08%时约13 μm 。小球藻的粒径分布随 φ (样品)增加而发生显著变化, 由分散颗粒逐渐聚合形成大颗粒絮团, 而菱形藻则没有明显的絮凝倾向。此外, 小球藻在 φ (样品)=0.06%时显示出快速的絮凝现象, 形成的絮团粒径是 φ (样品)低值时的2倍以上。研究发现微藻的形态对其絮凝行为有显著影响, 小球藻的球形结构比菱形藻的菱形结构更易于絮凝, 此外, 微藻的分泌物等特性也可能导致其絮凝效果差异。研究结果为理解微藻絮凝过程提供了重要参考, 并有助于研究水体中物质输运过程。

关键词: 微藻; 小球藻(*Chlorella* sp.); 菱形藻(*Nitzschia palea*); 絮凝; 粒度分布

中图分类号: Q945 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)05-0011-08

Microalgal flocculation processes and floc characteristics: Case studies with *Chlorella* sp. and *Nitzschia palea*

DENG Zhirui, GONG Pengjie

Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research / Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China

Abstract: This study aimed to elucidate the flocculation dynamics and floc characteristics of microalgae under varying volume fractions. Using *Chlorella* sp. and *Nitzschia palea* as model species, we conducted controlled experiments in an annular flume to systematically analyze the response of algal aggregation to hydrodynamic conditions. Experimental results demonstrated that the floc size of *Chlorella* sp. exhibited a concentration-dependent increase, expanding from approximately 8 μm at 0.02% to 22 μm at 0.08%. In contrast, *N. palea* displayed an inverse trend under identical conditions, with floc size decreasing from approximately 20 μm at 0.02% to 13 μm at 0.08%. Significant alterations in particle size distribution were observed in *Chlorella* sp., transitioning from dispersed particles to large aggregated flocs with increasing concentrations, while *N. palea* maintained limited flocculation propensity. Notably, *Chlorella* sp. exhibited rapid flocculation at 0.06%, forming flocs exceeding double the size observed at lower concentrations. The research findings indicate that the

* 收稿日期: 2024-09-04

录用日期: 2025-04-21

网络首发日期: 2025-06-17

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2023-06, 2024-06)

作者简介: 邓智瑞(1990年生), 男; 研究方向: 水力学及河流动力学; E-mail: dzhirui@foxmail.com

通信作者: 宫鹏杰(1984年生), 男; 研究方向: 水力学及河流动力学; E-mail: 271527349@qq.com

全文阅读



ZR20240271

morphology of microalgae has a significant influence on their flocculation behavior. The spherical structure of *Chlorella* sp. facilitates flocculation more readily than the rhomboid structure of *N. palea*, furthermore, characteristics such as algal secretions may also lead to variations in flocculation efficiency. These findings provide critical insights into microalgal flocculation mechanisms and offer valuable references for understanding material transport processes in aquatic systems.

Key words: microalgae; *Chlorella* sp.; *Nitzschia palea*; flocculation; particle size distribution

浮游植物是一个具有很强适应性的水生生物群落,广泛分布于河流、湖泊和海洋等水生环境中(Round, 1981)。水体中的微藻会由于颗粒碰撞、电荷相互作用以及胞外聚合物(EPS)的黏性等作用而产生絮凝现象(Walsby, 1968)。

针对于微藻絮凝过程的研究主要集中在微藻生产及藻华去除等方面,通过添加絮凝剂等方式促进微藻聚集沉降,进而便于过滤采集(Pugazhendhi et al., 2019; Singh et al., 2023)。在天然水体中,微藻可以产生EPS和其他分泌物而产生絮凝现象,同时能与泥沙、污染物等物质结合形成絮团(Deng et al., 2022; Ho et al., 2022),改变其沉降、输运过程。由微藻与其他物质组合成的絮团可以看成是一个具有自循环,且物理、化学和生物过程相互作用的微生态系统(Brinkmann et al., 2019; Droppo et al., 1997; Xia et al., 2024)。在水体发生藻华,或春季微藻大量繁殖的情况下,微藻分泌物浓度的提高会促进微藻与泥沙的絮凝过程(Droppo et al., 1992; Fettweis et al., 2015; Gratiot et al., 2004),从而常出现大絮团,此现象在河口、河流等水环境中均会发生(Fettweis et al., 2015; Guo et al., 2021; Ye et al., 2023)。大多数研究认为泥沙絮凝中的生物因素主要为有机物,但是最新研究表明,微藻自身也可以形成一定大小的絮团(Deng et al., 2023; Zhang et al., 2025),从而导致生物泥沙絮凝过程更为复杂。

微藻是水生生态系统中的初级生产者,对环境中的许多化学污染物质比鱼类更为敏感。国际经济合作与发展组织(OECD)已将小球藻、斜生栅藻列为标准毒性试验藻种之一,可作为水体沉积物重金属污染的指示物种(洪松, 2006)。菱形藻是一种分布广泛的硅藻,对重金属和杀虫剂等污染物具有耐受性(刘静, 2013; Kim Tiam et al., 2018)。

通过已有的相关研究可知,微藻絮凝的过程特性与其种类以及含量等密切相关。但是,由于絮凝过程十分微观且絮团容易破碎难以观测、天然水体中微藻种类多样、不同类型微藻对絮凝作用方式不同并且可能相互影响等问题,对微藻絮凝过程的研

究仍然较少。针对这些不足,拟选择小球藻、谷皮菱形藻为代表,通过室内控制实验研究,结合理论分析,探究微藻絮凝过程和絮团特性,以期完善和深化微藻絮凝基础理论,并为解决相关实际问题奠定基础。

1 方法

1.1 样品

实验藻种选择我国富营养化水体中常见的小球藻(*Chlorella* sp., 绿藻)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*, 底栖硅藻)为代表。小球藻样品初始密度 $\geq 5 \times 10^{10}$ cells/L;谷皮菱形藻样品初始质量浓度为 200 g/m^3 (干质量)。

1.2 环形水槽实验系统

实验平台为中山大学海洋工程学院实验室的环形水槽设备(图1),内置水循环系统、剪力环等机构,水槽设计满足相应的水流相似要求与率定验证,可以反映水流剪切变化。

整体实验装置分为上层旋转装置、中部环形水槽、底部支撑3部分,水槽外径3 m,水槽深0.5 m,水槽宽0.3 m,容积约为1 200 L。水槽内的实验装置采集仪器主要有:① 流速测量系统:水槽底部布置流速传感器,随水槽同步转动,传感器深度设置为与仪器平行,通过无线通信方式与控制主机进行数据交互;② LISST激光粒度仪:采用光学后向散射和声学后向散射成对技术,进行水体絮凝实时测量;③ YSI EXO多参数水质检测仪:采用新传感器技

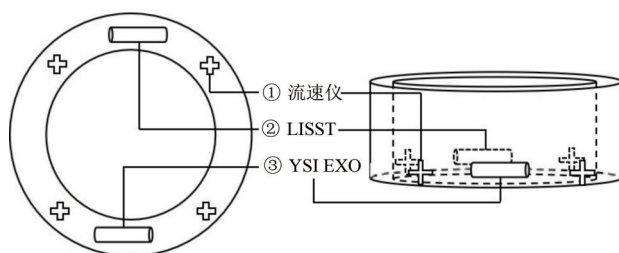


图1 环形实验平台模式图

Fig. 1 Schematic diagram of the annular experimental platform

术,可测量浊度、叶绿素等参数。

1.3 实验方案

每种微藻样品拟进行4组不同条件的实验,分别设置0.02%、0.04%、0.06%、0.08%的体积分数(φ)梯度(即每升水中分别含有0.2、0.4、0.6、0.8 mL的藻类样品),每组实验开展3次平行实验,实验结果取3次实验的平均值。实验时水体盐度设计为0,表征河流淡水环境;水体流速控制在0.1 m/s。

1.4 实验流程

根据实验设计,水槽水位设置为20 cm,水量约为500 L。根据预设流速0.1 m/s调整水槽转速。

实验开始时,首先将水槽装满清水,然后将紊动剪切率调节到实验设计的大小,之后加入计算好 φ 的微藻样品,并在该条件下维持10 min以使微藻絮凝达到平衡状态,观测絮凝过程及测量水质参数。然后再加入计算好 φ 的微藻样品并测量参数,测量至最后1组时,保持实验条件观测60 min。实验过程中,LISST、YSI仪器均保持观测频率为10 s记录1个数据。絮团相关参数通过LISST仪器配套软件计算获得。

2 实验与模型结果

2.1 絮团粒径、 φ (絮团)与叶绿素质量浓度变化

图2展示了不同 φ (样品)条件下小球藻和菱形藻的絮团粒径、 φ (絮团)和叶绿素质量浓度 $[\rho(\text{叶绿素})]$ 变化情况。小球藻的絮团粒径在 $\varphi(\text{样品})=0.02\%$ 时约为8 μm ,随着 $\varphi(\text{样品})$ 的增加,粒径呈现增大的趋势, $\varphi(\text{样品})=0.06\%$ 时粒径增加显著,从约8 μm 增大到约20 μm ,当 $\varphi(\text{样品})$ 增加到0.08%时粒径有所增大,但增大幅度不显著。菱形藻的絮团粒径表现出不同的趋势。 $\varphi(\text{样品})=0.02\%$ 时,其粒径大小约为20 μm ,而随着 $\varphi(\text{样品})$ 的增加,菱形藻没有出现粒径增大的趋势,而呈现出下降趋势, $\varphi(\text{样品})=0.08\%$ 时粒径约为13 μm ,整体变化幅度小于小球藻。从 $\rho(\text{叶绿素})$ 变化上看,小球藻 $\rho(\text{叶绿素})$ 与 $\varphi(\text{样品})$ 显著相关,每 $\varphi(\text{样品})=0.02\%$ 对应 $\rho(\text{叶绿素})$ 约0.5 $\mu\text{g/L}$,但菱形藻 $\rho(\text{叶绿素})$ 一直维持在低值0.05 $\mu\text{g/L}$ 左右。 $\varphi(\text{絮团})$ 的变化与絮团粒径的变化趋势相似,小球藻 $\varphi(\text{絮团})$ 有增大趋势,而菱形藻 $\varphi(\text{絮团})$ 变化较小,呈下降趋势。

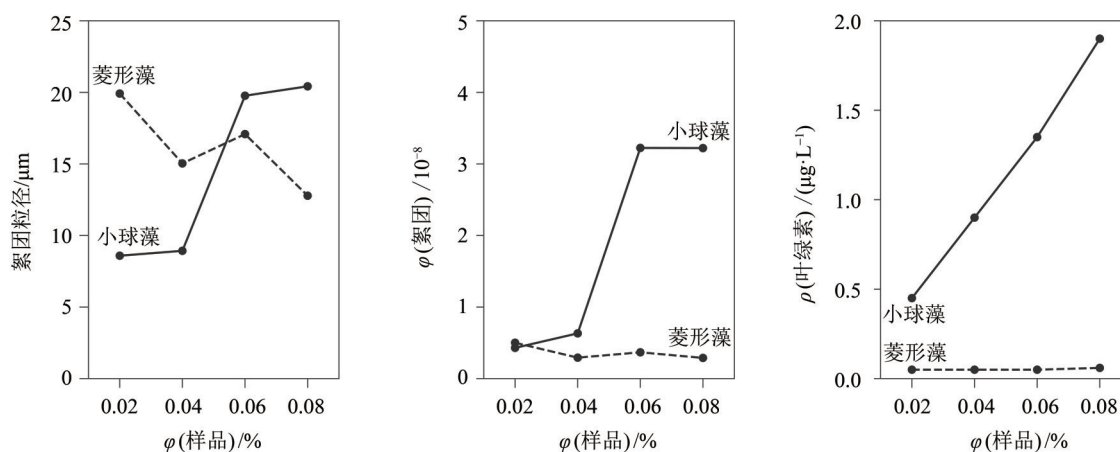


图2 不同 $\varphi(\text{样品})$ 条件下小球藻、菱形藻的絮团粒径、 $\varphi(\text{絮团})$ 、 $\rho(\text{叶绿素})$ 变化

Fig. 2 Variations in floc size, volume fraction and chlorophyll concentration of *Chlorella* sp. and *Nitzschia palea* under different volume fractions

2.2 絮团粒度曲线变化

图3展示了小球藻、菱形藻在不同 $\varphi(\text{样品})$ 条件下的粒度曲线变化。

在小球藻的粒径分布图中,不同 $\varphi(\text{样品})$ 条件下的粒径分布呈现出显著的多峰特征。在粒径为1~10 μm 范围内,所有 $\varphi(\text{样品})$ 条件下的分布均有显著峰值。其中, $\varphi(\text{样品})$ 为0.02%和0.04%时的最大峰值在9 μm 左右,较为接近,比例约为15%,而 $\varphi(\text{样品})$ 为0.06%和0.08%时的最大峰值

出现在40~50 μm 左右,分别占20%左右。在粒径为10~100 μm 范围内,各 $\varphi(\text{样品})$ 条件下的分布逐渐减少,但依然存在明显的峰值。

菱形藻的粒径分布同样表现出显著的多峰特征。其中 $\varphi(\text{样品})$ 为0.02%和0.04%时的菱形藻出现3峰态,峰值较为显著,分别约为20%和15%。 $\varphi(\text{样品})$ 为0.06%和0.08%时,菱形藻逐渐变为双峰态,在16 μm 左右比例可达40%。

总的来说,小球藻和菱形藻在不同 $\varphi(\text{样品})$ 条

件下的粒径分布均表现出显著变化。小球藻在低 φ (样品)时的粒径主要分布在 $10\ \mu\text{m}$ 以下,随着 φ (样品)增加,小球藻展现出由分散颗粒逐渐聚合形成大颗粒絮团的趋势,粒度主峰可达 $40\sim 50\ \mu\text{m}$ 左右。菱形藻的粒度曲线随 φ (样品)增加由3峰逐渐变为2峰,说明菱形藻在高 φ (样品)条件下没有明显的絮凝倾向。

2.3 絮团组分变化

为进一步分析微藻絮凝过程中的组分变化,参考前人研究成果,将絮团粒径分布曲线(PSD)细分为4个类别(Lee et al., 2012)。分散颗粒(PP):粒径 $< 4\ \mu\text{m}$;微絮团(floculi):粒径 $4\sim 20\ \mu\text{m}$;小絮团(micro):粒径 $20\sim 200\ \mu\text{m}$;大絮团(macro):粒径 $> 200\ \mu\text{m}$ 。从图3的粒度曲线可以看到,小球藻和菱形藻絮凝过程均无法产生粒径 $> 200\ \mu\text{m}$ 的大絮团。

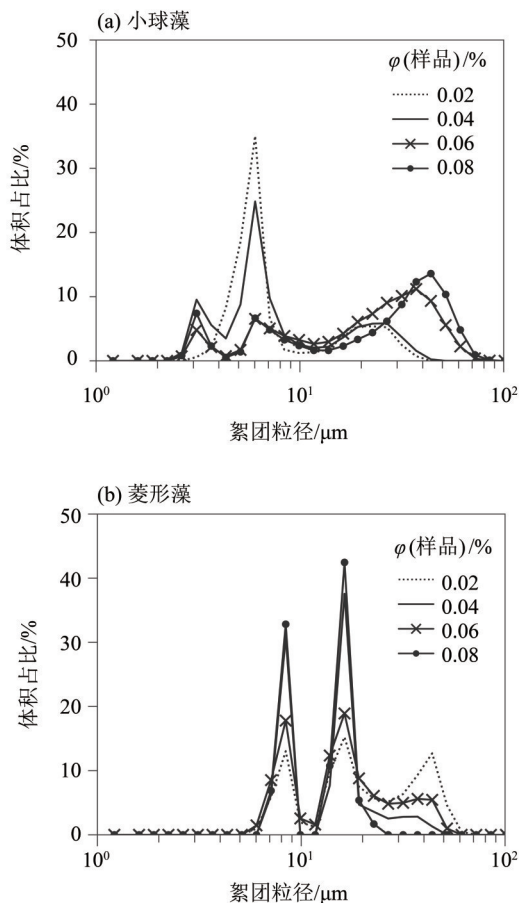


图3 不同 φ (样品)条件下小球藻、菱形藻的粒度分布
Fig. 3 Particle size distribution of *Chlorella* sp. and *Nitzschia palea* under different volume fractions

图4展示了小球藻、菱形藻在不同 φ (样品)下的组分占比变化。可以看出,小球藻分散颗粒随 φ (样品)变化不显著,在 φ (样品)= 0.02% 时比例最

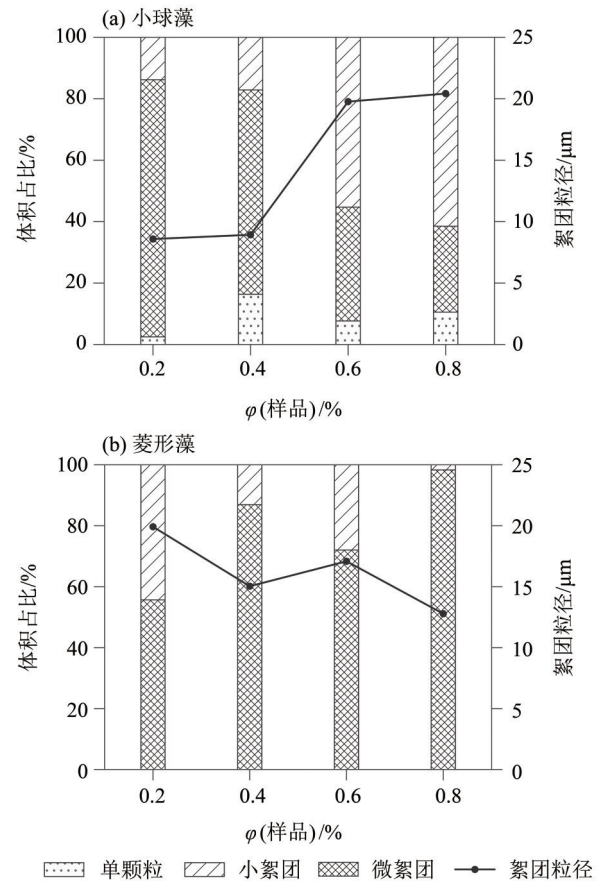


图4 不同 φ (样品)条件下小球藻、菱形藻的组分变化

Fig. 4 Compositional changes of *Chlorella* sp. and *Nitzschia palea* under different volume fractions

低,随着 φ (样品)增加,基本维持在 10% 左右。小球藻在低 φ (样品)(0.02%)时,微絮团的比例较高,约占 80% ,随着 φ (样品)的增加,微絮团的比例逐渐降低,至 φ (样品)= 0.08% 时降至约 30% 。同时,小絮团的比例则呈显著上升趋势,低 φ (样品)时约 10% , φ (样品)= 0.08% 达到最高,接近 60% 。小絮团的比例变化趋势与絮团粒径相似,说明小絮团组分的变化是影响小球藻絮团粒径的主要部分。

菱形藻絮凝过程同样无法产生大絮团,并且没有粒径 $< 4\ \mu\text{m}$ 的分散颗粒。菱形藻絮凝过程中的微絮团和小絮团比例呈现出相反的趋势,随着 φ (样品)增加,微絮团呈现出波动上升的趋势,体积占比从 60% 上升到 90% 左右,而小絮团呈现出波动下降的趋势。絮团粒径的变化与小絮团趋势相似。

总之,随着 φ (样品)的增加,小球藻的粒径分布发生显著变化,微絮团比例下降而小絮团比例增加,导致絮团粒径增加。而菱形藻随着 φ (样品)增加则出现微絮团增加,小絮团减少的趋势。

2.4 絮团粒径演化

为研究小球藻、菱形藻的絮凝过程,图5展示了实验过程中小球藻、菱形藻的粒径随时间的变化情况。

小球藻的粒径在初始阶段(0~10 min)保持在8 μm 左右,粒径大小分布有一定波动。在小球藻 φ (样品)增加到0.06%时,粒径在25~30 min期间经历了大幅波动,从9 μm 增大至25 μm ,表明在此时间段内,小球藻的粒径分布发生了显著变化。在30 min时小球藻 φ (样品)增加到0.08%,粒径出现先减小后增加的波动变化,最后趋于稳定,最终保持在20~35 μm 之间。菱形藻的粒径在初始阶段稍大,随后呈现出波动减小的趋势,粒径维持在10~15 μm 之间,波动幅度较小,显示出粒径分布的相对稳定性。

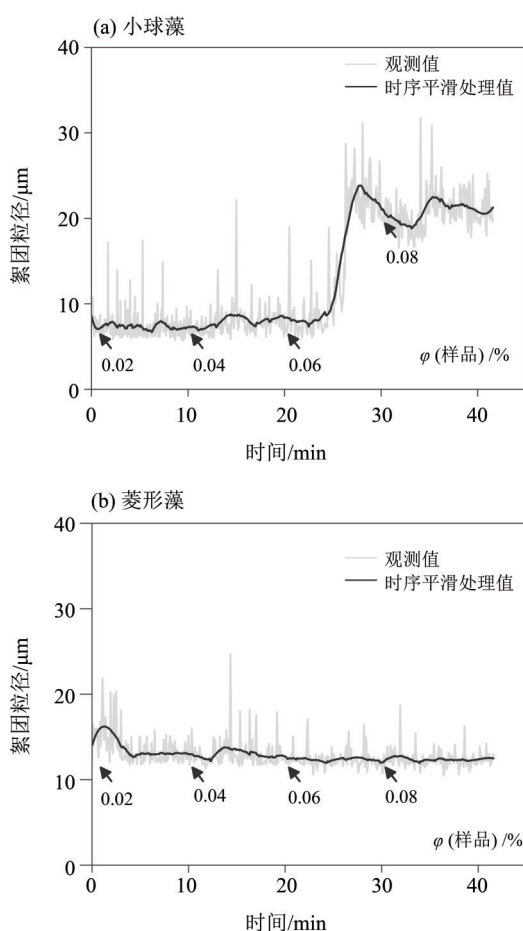


图5 小球藻、菱形藻絮团粒径随时间的变化
(每隔10 min添加微藻样品至预设浓度)

Fig. 5 Floc particle size variation of *Chlorella* sp. and *Nitzschia palea* over time with stepwise additions of microalgal samples to preset concentrations at 10-minute intervals

2.5 小球藻絮团增大过程

为进一步研究小球藻在 φ (样品)=0.06%时的絮团增大现象,针对25、26、27 min(对应图5中小球藻粒径增大阶段)选择相应的絮团粒度曲线显示如图6。

在25 min时,粒径分布曲线呈现出明显的3峰特征,主要集中在3、6和20 μm 处,显示出小球藻在该时间段内存在3个主要的粒径群体,其中6 μm 处的粒径组分占比较高,接近30%。而在26 min时,曲线的形状发生了显著变化,6 μm 的峰值明显降低至约10%,第3个峰值从20 μm 转移到30 μm ,3个峰占比接近,表示在该时间段内粒径分布的多样性增加。随着时间推移至27 min,粒径分布曲线的整体趋势再次发生变化,3、6 μm 处的峰值均有所降低,曲线变得相对平坦,而在50 μm 处出现了明显的主峰,峰值粒径体积占比约为10%。

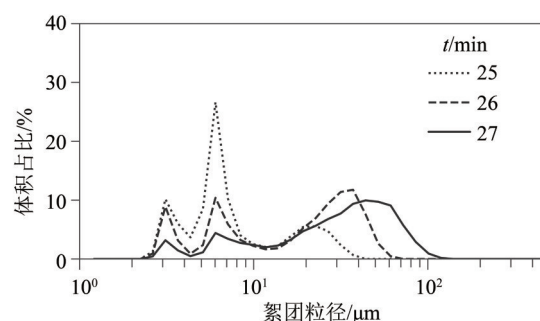


图6 小球藻在25、26、27 min之间的粒度曲线变化
Fig. 6 Curve variation of particle size distribution in *Chlorella* sp. between 25, 26, and 27 minutes

3 讨论

3.1 微藻絮凝过程

在对小球藻和菱形藻絮凝过程的研究中,实验观察到小球藻的粒径在不同 φ (样品)条件下呈现出显著的变化趋势,而菱形藻的粒径变化相对较小且较为稳定。

小球藻和菱形藻在 φ (样品)增加时絮团粒径均出现了一定的波动现象,表明絮团一直发生破碎与重组,这与藻类颗粒碰撞频率有关(Deng et al., 2022)。在刚开始 φ (样品)增加时,絮团颗粒碰撞增加,使部分絮团发生破坏导致粒径变小;随着絮凝过程继续,小球藻颗粒相互聚合形成絮团;形成絮团后,絮团粒径增加,水体中部分大絮团发生沉降,从而导致絮团粒径减小。随着絮凝过程的进行,颗粒通过吸附架桥等作用重新聚集形成絮团,又会观测到絮团粒径增加。这种现象在河口地区也有发

现,表明藻类在特定环境下会形成大絮团并发生沉降(Deng et al., 2021)。从絮凝速度上看,微藻絮凝可在几分钟内完成,之后发生絮团沉降等现象而出现絮团粒径微弱减小趋势,这个现象在其他藻类絮凝实验中也会出现(Deng et al., 2023; Safar et al., 2023)。

小球藻在不同时间点的粒径分布变化反映了絮凝过程的动态性。在絮凝初期,小粒径的藻细胞通过碰撞和吸附形成较大的絮团,随后部分大絮团可能因水动力作用而发生破碎,导致粒径分布的多样性增加。随着时间的推移,絮凝过程逐渐稳定,形成了较大且稳定的絮团。相比之下,菱形藻的絮凝作用不明显,其粒径在实验过程中相对稳定。这可能与菱形藻细胞表面的电荷特性、分泌的胞外聚合物(EPS)的性质以及藻类自身的生物学特性有关(Cao et al., 2018)。EPS在藻类絮凝中起着关键作用,它可以通过改变藻类细胞表面的电荷分布和提供吸附位点来促进颗粒聚集。然而,菱形藻分泌的EPS形成的表面生物膜对絮凝的影响有限(Prochnow et al., 2001)。此外,菱形藻作为一种硅藻,其细胞壁主要由硅质构成,这种结构可能使其在絮凝过程中表现出较低的活性。因此,菱形藻在生长过程中可能形成较为稳定的单细胞或小群体,而不是易于絮凝的大群体(曹晶等, 2015)。

3.2 微藻絮凝机制

实验结果显示,小球藻的絮凝过程可能在 φ (样品)=0.06%左右时存在1个阈值,在低于这个阈值的 φ (样品)时,小球藻絮凝作用不明显,高于阈值的 φ (样品)时,会显著发生絮凝现象,且絮凝过程迅速,形成的絮团粒径是低于阈值的 φ (样品)的2倍以上。

微藻发生絮凝现象的原因可能涉及多种机制。首先,微藻细胞表面的电荷特性会产生引力,但此种机制形成的絮团十分脆弱;其次,微藻的分泌物会使藻类颗粒具有一定黏性而相互吸引;最后,藻类颗粒碰撞增加会促进颗粒进一步通过桥联等作用聚集形成更大的絮团(Deng et al., 2023; Zhang et al., 2025)。 φ (样品)低时藻类碰撞几率较低,且絮团较为脆弱,因此絮凝现象不显著。 φ (样品)高时,虽然在同样的水流剪切率下絮团也会产生破碎,但破碎的絮团很快就能重组,进而形成稳定的大絮团(Deng et al., 2022; Pugazhendhi et al., 2019)。

从絮团粒度分布的变化结果中可以证实小球藻的聚合过程(图6):小球藻在 φ (样品)=0.06%时,

随着絮凝过程进行,颗粒 $<10\ \mu\text{m}$ 的组分逐渐聚集形成大组分,导致了粒径分布的变化与微藻絮团的形成。

3.3 微藻种类的影响

研究表明,小球藻细胞一般呈球形,直径约为 $2\sim 10\ \mu\text{m}$ (Sadiq et al., 2011)。小球藻的形态可对应粒度曲线的多峰分布。小球藻在 $3, 6\ \mu\text{m}$ 的峰值代表小球藻的颗粒大小主要为 $3, 6\ \mu\text{m}$,而 $>15\ \mu\text{m}$ 的部分主要为小球藻颗粒的絮凝。小球藻的絮凝过程较为显著,这主要是颗粒碰撞、EPS连接等作用所造成。

菱形藻细胞一般呈菱形,宽 $(4.2\pm 0.8)\ \mu\text{m}$,长 $(15.7\pm 1.9)\ \mu\text{m}$ (Laviale et al., 2019),可以对应菱形藻在 $8, 15\ \mu\text{m}$ 左右的峰值,其中 $8\ \mu\text{m}$ 左右的峰值主要是菱形藻颗粒的非圆形形状影响仪器反演结果所导致(Deng, 2022)。菱形藻在 φ (样品)低时出现了 $>30\ \mu\text{m}$ 的第3峰,呈现与小球藻类似的3峰曲线,随着 φ (样品)增加,3峰曲线逐渐转化为2峰, $>30\ \mu\text{m}$ 的第3峰逐渐消失。结合图2的絮团粒径、 φ (絮团)和 ρ (叶绿素)情况分析,菱形藻属于底栖藻类,不具有浮游藻类随水流运输的特征(Wang et al., 2019),因此在水体可能存在 φ (样品)阈值,即在水体流速 $0.1\ \text{m/s}$ 的条件下,仅有部分颗粒能保持悬浮,此条件下菱形藻 φ (样品)的增加并不能增加水体中悬浮的菱形藻,因此相应的 ρ (叶绿素)和 φ (絮团)变化不显著。从组分变化和粒度曲线变化上看,菱形藻同样也具有一定的絮凝特征,即在 φ (样品)低时,菱形藻颗粒较为松散,在颗粒碰撞、EPS等作用下形成结构松散的大絮团。而随着菱形藻 φ (样品)增加,虽然颗粒碰撞、EPS浓度也在增加,但菱形藻由于生物活动产生了斥力,无法继续聚合,或者是自身EPS黏性不足,形成的小絮团抗剪能力不足而发生破碎,导致小絮团组分向微絮团组分转化,无法继续形成更大的絮团。类似现象在一些泥沙微藻絮凝研究中有提到,长条形的微藻会产生互斥作用而不是聚合成团(de Lucas Pardo et al., 2013)。

有研究发现,中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)可以絮凝形成 $70\ \mu\text{m}$ 左右的大絮团(Deng et al., 2023),但在本研究中,小球藻和菱形藻的絮凝作用较小,形成的絮团粒径在 $20\ \mu\text{m}$ 左右。这是由于中肋骨条藻的链状结构能使微藻相互缠绕聚合,利于形成大絮团(Deng et al., 2023),而小球藻、菱形藻由于其自身的圆形、菱形结构,无法相互缠绕,

絮凝方式主要为自身的颗粒碰撞和EPS黏结,因此形成的絮团较小,抗剪能力较低。

4 结 论

本研究探讨了小球藻和菱形藻在不同 φ (样品)条件下的絮凝行为和粒径变化。实验结果表明,小球藻的絮团粒径随 φ (样品)增加而增大,而菱形藻则表现出相反趋势。小球藻和菱形藻的粒径分布随 φ (样品)的增加而发生显著变化。小球藻在 φ (样品)低时主要分布在10 μm 以下,而 φ (样品)高时粒径分布主峰可达40~50 μm 。相比之下,菱形藻的粒度曲线随 φ (样品)增加由3峰逐渐变为2峰,显示出较小的絮凝倾向。在微藻絮凝过程中,小球藻的粒径在 φ (样品)=0.06%时表现出显著增大的趋势,展示了絮凝过程的动态变化。而菱形藻的粒径相对稳定,表明其絮凝作用不明显。同时,微藻絮团的特性也与微藻种类有关,小球藻和菱形藻的形态差异对其絮凝行为有显著影响,中肋骨条藻等链状微藻可

以相互缠绕聚合形成大絮团,而小球藻、菱形藻由于其自身的圆形、菱形结构,无法相互缠绕,絮凝方式主要为自身的EPS等分泌物的黏性作用。小球藻的球形结构使其在适宜的 φ (样品)条件下能够形成较大的絮团,而菱形藻则因其形态和分泌物特性限制,形成的絮团较小,絮凝作用不明显。

当微藻发生絮凝后,所形成的絮团粒径大于分散颗粒粒径,粒径变化会引起沉降速度变化,进而影响微藻在水体中的输运。小球藻能通过絮凝形成大絮团,其胞外聚合物等分泌物更容易吸附水体中的泥沙、污染物等悬浮物质而产生更复杂的絮凝过程。菱形藻虽然没有显著的絮凝现象,但其形态、分泌物等仍可能影响其他物质的絮凝。因此,不同种类微藻的絮凝过程势必会影响水体中其他物质的输运。微藻是影响生物泥沙絮凝过程的重要因素,在自然界中不同的水体有多种不同的微藻、泥沙,因此,对微藻絮凝、生物泥沙絮凝的研究仍需要开展更多的工作。

参考文献:

- 曹晶, 刘建辉, 储昭升, 等, 2015. 鄱阳湖水体颗粒物对3种典型藻类的生长及絮凝作用[J]. 环境科学学报, 35(5): 1318-1324.
- 洪松, 2006. 水体沉积物重金属质量基准研究[D]. 北京: 北京大学.
- 刘静, 2013. 东江流域底栖硅藻多样性及集合群落的研究[D]. 广州: 暨南大学.
- BRINKMANN B W, VONK J A, BEUSEKOM S A M, et al, 2019. Benthic hotspots in the pelagic zone: Light and phosphate availability alter aggregates of microalgae and suspended particles in a shallow turbid lake[J]. Limnol Oceanogr, 64(2): 585-596.
- CAO J, WANG P, CHU Z, et al, 2018. Effect of aquatic particles on the flocculation of *M. aeruginosa* and *Nitzschia*[J]. Environ Eng Sci, 35(10): 1109-1116.
- DE LUCAS PARDO M A, BAKKER M, VAN KESSEL T, et al, 2013. Erodibility of soft freshwater sediments in markermeer: The role of bioturbation by meiobenthic fauna[J]. Ocean Dyn, 63(9/10): 1137-1150.
- DENG Z, 2022. The role of algae in fine cohesive sediment flocculation[D]. Delft: Delft University of Technology.
- DENG Z, HE Q, CHASSAGNE C, et al, 2021. Seasonal variation of floc population influenced by the presence of algae in the Changjiang (Yangtze river) estuary[J]. Mar Geol, 440: 106600.
- DENG Z, HE Q, MANNING A J, et al, 2023. A laboratory study on the behavior of estuarine sediment flocculation as function of salinity, EPS and living algae[J]. Ma Geo, 459: 107029.
- DENG Z, HUANG D, HE Q, et al, 2022. Review of the action of organic matter on mineral sediment flocculation[J]. Front Earth Sci, 10: 965919.
- DROPPO I G, LEPPARD G G, FLANNIGAN D T, et al, 1997. The freshwater floc: A functional relationship of water and organic and inorganic floc constituents affecting suspended sediment properties[M]//EVANS R D, et al, eds. Interact Sediments Water. Dordrecht: Springer Netherlands: 43-53.
- DROPPO I G, ONGLEY E D, 1992. The state of suspended sediment in the freshwater fluvial environment: A method of analysis[J]. Water Res, 26(1): 65-72.
- FETTWEIS M, BAEYE M, 2015. Seasonal variation in concentration, size, and settling velocity of muddy marine flocs in the benthic boundary layer[J]. J Geophys Res Oceans, 120(8): 5648-5667.
- GRATIOT N, MANNING A J, 2004. An experimental investigation of floc characteristics in a diffusive turbulent flow[J]. J Coast Res(Special Issue No. 41): 105-113.
- GUO J, ZHENG Y, TENG J, et al, 2021. Characteristics of spatial distribution for microbial ecology inside and

- outside source water reservoir [J]. *J Clean Prod*, 311: 127697.
- HO Q N, FETTWEIS M, SPENCER K L, et al, 2022. Flocculation with heterogeneous composition in water environments: A review [J]. *Water Res*, 213: 118147.
- KIM TIAM S, LAVOIE I, DOOSE C, et al, 2018. Morphological, physiological and molecular responses of *Nitzschia palea* under cadmium stress [J]. *Ecotoxicology*, 27(6): 675–688.
- LAVIALE M, BEAUSSART A, ALLEN J, et al, 2019. Probing the Adhesion of the Common Freshwater Diatom *Nitzschia palea* at Nanoscale [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 11(51): 48574–48582.
- LEE B J, FETTWEIS M, TOORMAN E, et al, 2012. Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone: A multimodal psd of cohesive sediments [J]. *J Geophys Res Oceans*, 117(C3).
- PROCHNOW J V, SPORK V, JAHNKE J, et al, 2001. Using dissolved and particulate carbon for the prediction [J]. *Phys Chem Earth Part B Hydrol Oceans Atmosphere*, 26(1): 53–58.
- PUGAZHENDHI A, SHOBANA S, BAKONYI P, et al, 2019. A review on chemical mechanism of microalgae flocculation via polymers [J]. *Biotechnol Rep*, 21: e00302.
- ROUND F E, 1981. *The ecology of algae* [M]. Cambridge [Eng.]; New York: Cambridge University Press.
- SADIQ I M, DALAI S, CHANDRASEKARAN N, et al, 2011. Ecotoxicity study of titania (TiO₂) NPs on two microalgae species: *Scenedesmus* sp. and *Chlorella* sp. [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 74(5): 1180–1187.
- SAFAR Z, DENG Z, CHASSAGNE C, 2023. Applying a logistic growth equation to model flocculation of sediment in the presence of living and dead organic matter [J]. *Front Mar Sci*, 10: 1227849.
- SINGH H M, SHARMA M, TYAGI V V, et al, 2023. Potential of biogenic and non-biogenic waste materials as flocculant for algal biomass harvesting: Mechanism, parameters, challenges and future prospects [J]. *J Environ Manage*, 337: 117591.
- WALSBY A E, 1968. Mucilage secretion and the movements of blue-green algae [J]. *Protoplasma*, 65(1/2): 223–238.
- WANG J, LIU Q, ZHAO X, et al, 2019. Molecular biogeography of planktonic and benthic diatoms in the Yangtze River [J]. *Microbiome*, 7(1): 153.
- XIA J, HU H, GAO X, et al, 2024. Phytoplankton diversity, spatial patterns, and photosynthetic characteristics under environmental gradients and anthropogenic influence in the Pearl River Estuary [J]. *Biology*, 13(7): 550.
- YE L, PENALOZA-GIRALDO J A, MANNING A J, et al, 2023. Biophysical flocculation reduces variability of cohesive sediment settling velocity [J]. *Commun Earth Environ*, 4(1): 1–9.
- ZHANG Y, XU Y, ZHANG N, et al, 2025. Measured and predicted floc size of cohesive sediment in the presence of microalgae [J]. *Water Res*, 268: 122519.

(责任编辑 张 冰)