

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.01.008

利用偏振光散射技术的藻类絮凝过程监测

李嘉晋^{1,2}, 廖然^{1,3*}, 卓泽鹏^{1,4}, 余世骏^{1,2}, 马辉^{1,4*}

(1 清华大学深圳国际研究生院广东省偏振光学检测与成像工程技术研究中心, 广东 深圳 518055;

2 清华大学生物医学工程系, 北京 100084;

3 清华大学深圳国际研究生院海洋科学与技术学部, 广东 深圳 518055;

4 清华大学物理系, 北京 100084)

摘要: 在水体中添加适量絮凝剂和助凝剂将藻类絮凝沉降是藻华治理的常用方法。水体现场环境复杂, 影响絮凝效果因素较多, 能原位监测藻类絮凝过程有利于提高治理效果。以铜绿微囊藻为样本, 添加不同浓度的聚合氯化铝和高岭土形成絮凝体悬浮液, 并利用偏振光散射技术观察不同絮凝体悬浮液的偏振参数。研究结果表明, 偏振参数可表征随着絮凝剂和助凝剂用量变化而引起的不同絮凝过程, 显示偏振光散射技术描述藻类絮凝过程的潜力。该方法为藻类絮凝过程研究、藻华治理监测、污染水处理、药剂开发等提供了一种非接触、无标记、快速的原位监测手段。

关键词: 藻类; 絮凝; 偏振散射; 监测

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2020)01-0072-09

Monitoring of Algal Flocculation Using Polarized Light Scattering

LI Jiajin^{1,2}, LIAO Ran^{1,3*}, ZHUO Zepeng^{1,4}, YU Shijun^{1,2}, MA Hui^{1,4*}

(1 Guangdong Research Center of Polarization Imaging and Measurement Engineering Technology, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;

2 Department of Biomedical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3 Division of Ocean Science and Technology, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;

4 Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Adding proper amount of flocculants and coagulants into water can settle algal flocculation and remove algal bloom. Water body in scene is much complex and there are many factors affecting the flocculation effects. It is beneficial to improve the treatment effect to monitor the algae flocculation process *in situ*.

基金项目: Supported by National Key Project of Research and Development Program of China (国家重点研发专项, 2018YFC1406600), National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41527901, 61975088), Science and Technology Project of Shenzhen Grant (深圳市科创委学科布局项目, JCYJ20160818143050110)

作者简介: 李嘉晋 (1996 -), 广东广州人, 研究生, 主要从事悬浮颗粒偏振光散射方面的研究。

E-mail: lj18@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 廖然 (1981 -), 湖北荆州人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事水下悬浮颗粒物探测方面的研究。

E-mail: liao.ran@sz.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2019-10-14; **修改日期:** 2019-12-05

* **通信联系人.** E-mail: liao.ran@sz.tsinghua.edu.cn; mahui@tsinghua.edu.cn

Microcysts aeruginosa was used as a sample in this work to form flocculant suspension by adding different concentrations of polyaluminium chloride and kaolin, and then the polarization parameters of the different flocs suspension were measured by polarized light scattering technique. The results show that the polarization parameters can be used to characterize the flocculation processes affected by the dosage of flocculants and coagulants, which shows the potential of the proposed polarized light scattering technique to describe the algal flocculation process. It is indicated that the method provides an *in-situ* non-contact, unmarked and rapid monitoring tool for algal flocculation process research, algal blooms governance and monitoring, contaminated water treatment, pharmaceutical development, etc.

Key words: algae; flocculation; polarized light scattering; monitoring

1 引 言

藻华在世界各地的富营养化湖泊、河口、海洋频繁发生, 日益成为一个重要的环境问题, 对世界范围内的饮用水水质、渔业资源和旅游景观具有潜在威胁^[1-3]。有害藻类大量繁殖会产生恶臭气味, 同时会释放有毒物质, 对人体健康和水生生物构成危害^[4-5]。因此, 如何有效地去除过度繁殖的有害藻类, 已成为水环境保护中最重要的问题之一^[6-7]。

絮凝是目前藻华水处理的一种重要方法^[8], 主要通过向水中添加絮凝剂使小颗粒不稳定, 凝聚成较大的藻团颗粒, 然后通过固液分离去除过度繁殖的藻类^[9]。少量絮凝剂无法达到理想絮凝效果, 过量使用絮凝剂将会导致水体二次污染, 治理过程中会加入助凝剂进行强化絮凝^[10-11]。由于现场藻类浓度估测难度大和水体环境复杂, 导致絮凝剂和助凝剂用量难以控制、治理效果难以保证^[12], 所以原位监测絮凝剂和助凝剂投放后的藻类絮凝过程, 有利于控制药剂用量和实时监测藻华的治理效果。

光学方法因为非接触、无损伤、高分辨优势被用于水质检测、藻类识别、环境监测等场合^[13-14]。光散射技术通过测量藻类颗粒的光散射强度、角度分布、偏振等特征被用于藻类的分类、计数等, 因其结构简单、对颗粒物敏感等特点广泛用于藻类的原位检测^[15-16]。

偏振是光的基本属性, 光的偏振态通常用斯托克斯矢量来描述, 如式(1)所示, 其中 I 表示光强; Q , U 和 V 都是偏振量; Q 表示光水平分量与竖直分量的强度差, U 表示光 45° 线分量与 -45° 线分量的强度差; V 表示光右旋分量与左旋分量的强度差。 Q, U, V 用光强 I 归一化后得到 q, u, v 如式(2)所示, 它们可以组合成不同的偏振量。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$q = Q/I, u = U/I, v = V/I. \quad (2)$$

偏振度 DOP 定义为如式(3)所示, 它是偏振光在总光强中所占的比例或光束偏振光部分的光强与总光强的比值, 能够表示偏振光散射后的退偏程度。偏振光被颗粒散射后 DOP 越小, 说明颗粒的散射光退偏程度大^[17]。

$$DOP = \sqrt{q^2 + u^2 + v^2}. \quad (3)$$

由于颗粒物的微观结构和光学属性影响散射光的偏振态, 散射光的偏振参数往往携带着丰富的样品微观结构信息^[18]。偏振光散射方法通过测量颗粒散射光的偏振态, 不仅能实现对颗粒的高通量原位探测,

还能获取比非偏振方法更丰富的颗粒信息^[19]。偏振光散射方法已经被用于研究生物组织的癌变、海洋微生物的识别与分类^[20-21]等。

文中提出了一种基于偏振光散射的表征水体藻类絮凝结构的高通量原位测量方法,研究了不同浓度的絮凝剂聚合氯化铝(PAC)和助凝剂高岭土(kaolin)对藻类絮凝结构的影响,定量分析絮凝效果。这项初步研究提供的实验结果表明,偏振参数可以表征藻类随着絮凝剂和助凝剂用量变化而引起的不同絮凝过程。该方法为藻类现场絮凝处理、污染水处理药剂的开发提供了原位监测方法。

2 实验装置和方法

2.1 实验装置

搭建了一套测量悬浮颗粒散射光偏振态的装置,它可以单个地测量水体中的悬浮颗粒,装置与文献[20]中提到的装置类似,其结构简图如图1所示,包括照明端、样品池和探测端三部分。在照明端,光源S为 $0.532\ \mu\text{m}$ 绿光激光器,功率为200 mW,出射光偏振态为竖直线偏振。偏振状态发生器(PSG)控制入射光的偏振态。光阑(DP)和透镜(L1)用于控制入射光的形状和焦点的大小。PSG由可旋转1/2波片(HW1)和可旋转1/4波片(QW1)组成。HW1用于将光源固有的垂直线偏振态转换为任意方向的线偏振态,通过QW1将线偏振态转换为所需的偏振态。

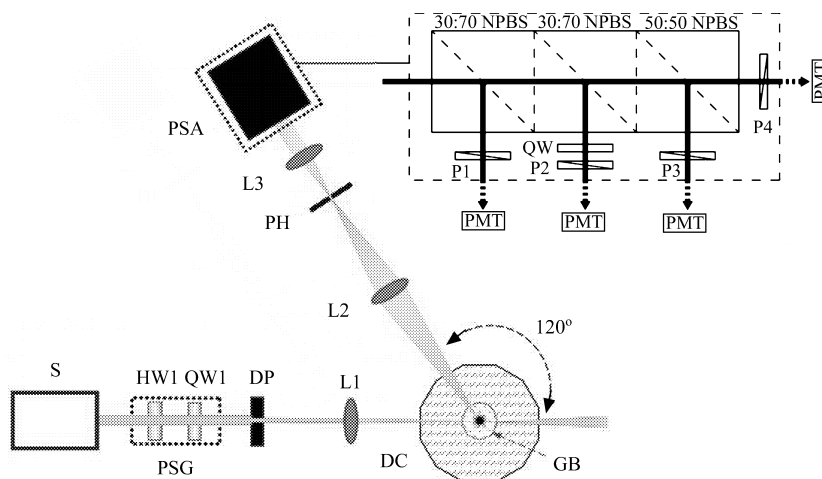


图1 实验装置示意图,右上虚线框内为偏振态分析仪(PSA,实心黑块部分)的详细设计图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup and the detailed design of the polarization state analyzer (PSA, shown as solid dark square) shown in upper right dashed square

样品池由一个玻璃烧杯(GB)和一个十二边形玻璃容器(DC)组成。悬浮的絮凝体在玻璃烧杯中,用磁力搅拌器以每分钟200转(r/min)的速度搅拌。将玻璃烧杯置于盛满水的十二边形玻璃容器DC中央,在 120° 对应的平面收集散射光。GB和DC之间的水可以减小GB曲面产生的柱面透镜效应对照明光束的不良影响。

在检测端,散射光斑由透镜(L2)收集并聚焦于一个 $100\ \mu\text{m}$ 直径圆形针孔(PH)。仔细调整PH的空间位置,确保L2和PH定义的检测体积包含L1的焦点。光照明与探测光路的交点体积为散射体积。用透镜(L3)对通过PH的光进行准直,并用偏振状态分析仪(PSA)测量其偏振状态。

在PSA中,准直光束先由三个非偏振分光棱镜(NPBS)按一定比例分割成四份光,其中三份分别通过用 0° (P1)、 45° (P3)、 135° (P4)线偏振片组成三个线偏振检偏通道,第四份通过一个由 135° 快轴方向的1/4波片(QW)和一个 90° 线偏振片(P2)组成的左旋检偏通道,由此得到准直光束的四个偏振分量。

采用四个光电倍增管 (PMT, CH253, 日本 HAMAMATSU) 和多通道数据采集卡 (DAQ, FCFR-USB2066, 中国 FCCTEC 技术) 并行采集四个偏振分量的数据, 并记录在硬盘里以备分析。光电倍增管的输出辐射灵敏度为 4.3 V/nW 。实验中获取的颗粒信号为脉冲序列, 每个脉冲对应于一个颗粒。将脉冲的电压平均后获得平均电压, 利用输出辐射灵敏度可以转换得到颗粒散射光强 (单位为 nW)。为了计算方便, 将所有脉冲的散射光强都除以 $(1/4.3) \text{ nW}$, 即可得到归一化后的无量纲光强值 I_a 。

由于散射体积小于 $0.1 \mu\text{L}$, 当颗粒浓度小于 10^4 个 / mL 时, 可以获得单个颗粒的散射信号, 呈现出一个一个的脉冲, 每个脉冲对应一个水体里面的悬浮颗粒 [20]。

2.2 实验方法

选取铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 进行絮凝处理实验, 该藻常见于藻华且产生藻毒素。实验采用烧杯搅拌法 [22]: 用量筒量取 150 ml 铜绿微囊藻液并倒入烧杯中, 通过移液枪往烧杯投加不同浓度的絮凝剂聚合氯化铝或助凝剂高岭土; 启动搅拌器 (德国 color squid 磁力搅拌器) 先快速 (200 r/min) 混合 2 min , 再慢速 (50 r/min) 搅拌 10 min , 停止搅拌后静置 30 min 。取烧杯下层的稳定絮凝体置于实验装置的样品池玻璃烧杯 GB 中进行测试, 分析、对比不同浓度的絮凝剂和助凝剂所形成的絮凝体偏振光散射后的偏振参数。

3 结果分析

3.1 不同浓度的聚合氯化铝絮凝实验

测试不同浓度的 PAC 对铜绿微囊藻的絮凝效果, 分别投加 $0, 4, 40, 120, 400 \text{ mg/L}$ 的 PAC 进行实验。图 2 为随着 PAC 浓度的变化, 偏振度 DOP 和光强 I_a 的概率分布图, 利用各自最大值进行了归一化, 照明光为左旋偏振光。实验结果表明, 不同 PAC 用量所形成的絮凝体, 其偏振散射光的偏振度和光强都有明显的分布变化趋势。

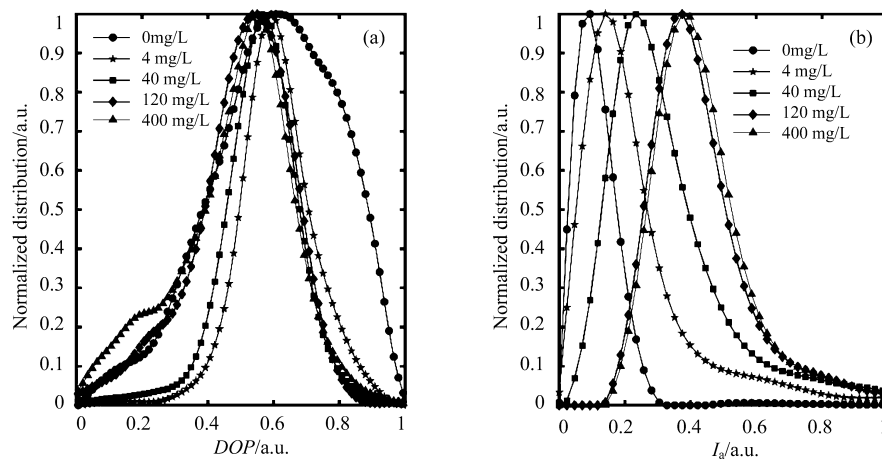


图 2 不同浓度 PAC 絮凝的 DOP 和 I_a 概率分布图。(a) DOP 概率分布图; (b) I_a 概率分布图

Fig.2 Probability distribution diagram of DOP and I_a of PAC flocculation at different concentrations.

(a) Probability distribution diagram of DOP ; (b) probability distribution diagram of I_a

观察图 2(a) 的 DOP 概率分布图可以发现, 当 PAC 为 0 mg/L 时, 主要是藻的贡献, 宽度比较大, 说明藻的形态比较丰富, 主峰右边还有一个次级峰。加入 PAC 以后, 分布宽度明显变小, 次级峰消失, 只有一个主峰。继续加入后, 分布宽度继续变小, 同时峰值向 DOP 小的方向移动。当 PAC 增加至 120 mg/L 时, 峰值最小, 而宽度开始增加, 并且在 $DOP=0.2$ 附近分布增强明显。当 PAC 大于 400 mg/L 时, 主峰位

置向 DOP 大的方向移动, 同时在 $DOP=0.2$ 附近出现次级峰。与之对应的图 2(b) 光强 I_a 分布图, PAC 从 0 增加到 120 mg/L, 主峰的位置向 I_a 变大的方向移动幅度显著, 同时分布范围变宽; 当 PAC 再增加至 400 mg/L 时, 主峰位置和宽度都变化不显著。

不同浓度 PAC 絮凝的 DOP 和 I_a 概率分布的均值和宽度变化如图 3 所示, 其中 0 mg/L 处用黑点表示, 即没有加入 PAC, 它是研究 PAC 浓度对絮凝影响的对照组。概率分布的半峰全宽 (Full-width half-maximum, FWHM) 常用于表征概率分布的宽度情况。为了便于比较, 文中利用相对 FWHM, 即实验组参数的概率分布的 FWHM 与对照组参数的概率分布的 FWHM 的比值, 来定量表征随着浓度变化 DOP 和 I_a 概率分布的集中程度相对变化情况。相对 FWHM 大于 1, 则表示实验组参数的概率分布的集中程度要小于对照组; 反之, 则表示实验组参数的概率分布的集中程度要大于对照组; 当对照组不变时, 相对 FWHM 越小, 实验组参数的概率分布的集中程度越大。

由图 3(a) 和图 3(c) 得出, DOP 均值随着加入 PAC 用量增加而单调递减, 而 DOP 概率分布的相对 FWHM 是先增大后减小; 由图 3(b) 和图 3(d) 得出, I_a 均值随着 PAC 用量增加单调上升至大浓度时有轻微下降, 而 I_a 概率分布的相对 FWHM 经历了先增大后减少再增大的过程。当 PAC 浓度增加到 120 mg/L 时, 再增加 PAC 的用量对絮凝效果的贡献放缓。相对而言, 加入 PAC 以后, DOP 概率分布的集中程度变大, 而 I_a 概率分布的集中程度变小, 即样品中颗粒的偏振特征更加集中, 而散射光强更加分散。

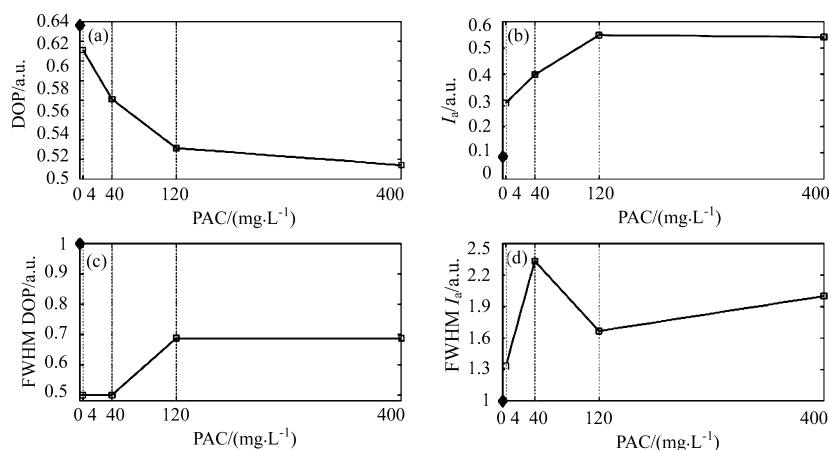


图 3 不同浓度 PAC 絮凝的 DOP 和 I_a 变化趋势。(a) DOP 均值; (b) I_a 均值; (c) DOP 概率分布图的半峰全宽; (d) I_a 概率分布图的半峰全宽

Fig.3 Trend of DOP and I_a of PAC flocculation at different concentrations. (a) Mean DOP ; (b) mean I_a ; (c) FWHM of the probability distribution diagram of DOP ; (d) FWHM of the probability distribution diagram of I_a

3.2 不同浓度的助凝剂强化絮凝实验

对不同浓度的高岭土下铜绿微囊藻的强化絮凝效果进行了测量。先向铜绿微囊藻悬浮液中分组分别投加 0、1、2、4、8、16、40 mg/L 高岭土, 快速搅拌 2 min 后全部加入 PAC, 控制在 4 mg/L。图 4 为随着高岭土浓度的变化, 絮凝体偏振散射光 DOP 和 I_a 的概率分布图, 利用各自最大值进行了归一化, 照明光为左旋偏振光。实验结果表明, 不同高岭土用量下所形成的絮凝体, 其偏振散射光的偏振度和光强同样具有明显的分布变化趋势。

由图 4(a) 得出, DOP 概率分布随着高岭土用量的增加不断往 DOP 减小的方向移动, 宽度变化相对不明显; 由图 4(b) 图得出, I_a 概率分布范围随着高岭土用量的增加总体呈现出变宽的趋势, 同时不断往 I_a 增大的方向移动。

不同浓度高岭土絮凝的 DOP 和 I_a 概率分布的均值和宽度变化如图 5 所示, 其中 0 mg/L 处用黑点

表示, 即只加了 PAC 而没有加高岭土, 它是研究高岭土浓度对絮凝影响的对照组。从图 5(a) 和 (c) 中可以看出, DOP 均值随着高岭土的浓度增加而单调递减, DOP 概率分布的相对 FWHM 出现了起伏波动; 由图 5(b) 和图 5(d) 得出, I_a 均值随着高岭土浓度增加总体呈现出上升趋势, 但在高岭土浓度较小时出现波折, I_a 概率分布的相对 FWHM 总体呈现出明显的上升趋势。

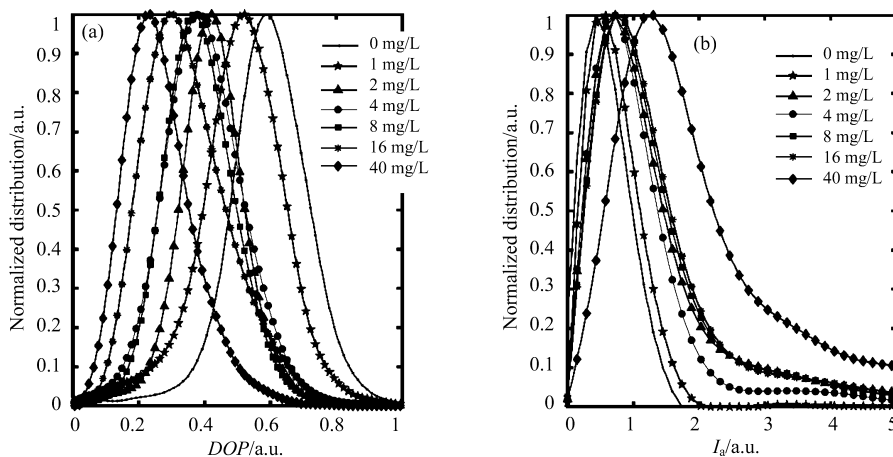


图 4 不同浓度高岭土絮凝的 DOP 和 I_a 概率分布图。(a) DOP 概率分布图; (b) I_a 概率分布图

Fig.4 Probability distribution diagram of DOP and I_a of kaolin flocculation at different concentrations.

(a) Probability distribution diagram of DOP ; (b) probability distribution diagram of I_a

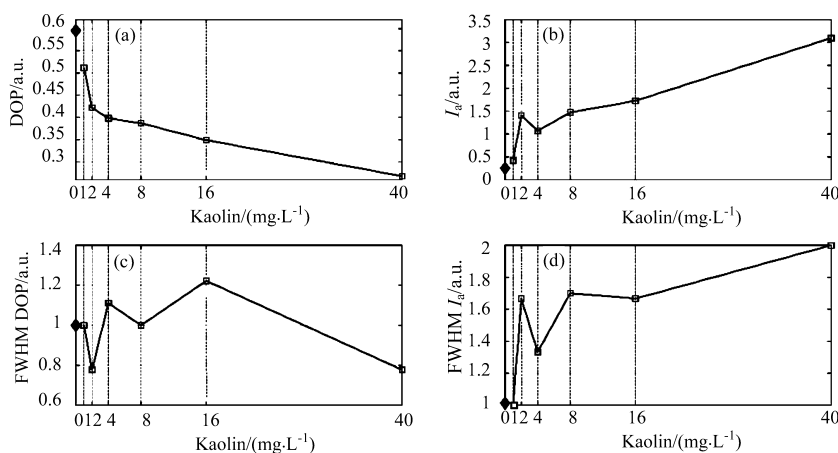


图 5 不同浓度高岭土絮凝的 DOP 和 I_a 变化趋势。(a) DOP 均值; (b) I_a 均值; (c) DOP 概率分布图的半峰全宽; (d) I_a 概率分布图的半峰全宽

Fig.5 Trend of DOP and I_a of kaolin flocculation at different concentrations. (a) Mean DOP ; (b) mean I_a ; (c) FWHM of the probability distribution diagram of DOP ; (d) FWHM of the probability distribution diagram of I_a

随着助凝剂高岭土的加入, 会使得絮凝体偏振散射光的 DOP 减少而 I_a 增加; DOP 的单调性下降可以规避光强波折引入的不确定。利用这些特征, 可以区分出絮凝体中含有助凝剂高岭土, 以及它的相对浓度。利用这个特点, 可以设计出新的参数, 包括 DOP 和 I_a 的组合, 来表示不同的高岭土浓度对藻类絮凝效果的影响。2 mg/L 浓度高岭土就可以使得絮凝体产生比较明显的变化, DOP 均值相比于对照组 (即只加入 PAC 而未加入高岭土) 下降了 29.1%, I_a 均值上升了 5.6 倍。随后再增加高岭土用量, 变化则趋于平缓, 直至到加入 40 mg/L 的高岭土再次使得絮凝体的偏振散射光产生明显的变化, DOP 均值相对对照组下降了 54.9%, I_a 均值上升了 12.4 倍。

4 讨论

图 2~5 中, 发现絮凝体的偏振散射光的偏振度可以单调表征絮凝剂和助凝剂用量变化引起的絮凝变化; 光强对絮凝过程变化在某些时刻会出现不单调的情况, 并且分布集中程度变小。

实验过程中, 同时拍下了铜绿微囊藻絮凝处理前后的显微镜照片, 如图 6 所示。图 6(a) 显示的是铜绿微囊藻样品, 为对照组; 图 6(b) 和 (c) 分别是藻样品中只加了 PAC、加了 PAC 和高岭土以后的情况。从图中可以看出, 利用 PAC 絮凝处理后的铜绿微囊藻凝聚成团, 形成一个个复杂而松散的絮凝体, 图 6(e) 给出了一个絮凝体的放大图; 加入助凝剂高岭土强化絮凝以后, 高岭土会附着在絮凝体上, 如图 6(d) 给出的放大图, 在絮凝剂 PAC 架桥作用下形成高岭土颗粒 - 藻细胞相嵌型结构, 使得絮凝体结构更加复杂, 絮凝体更加稳定^[22-23]。

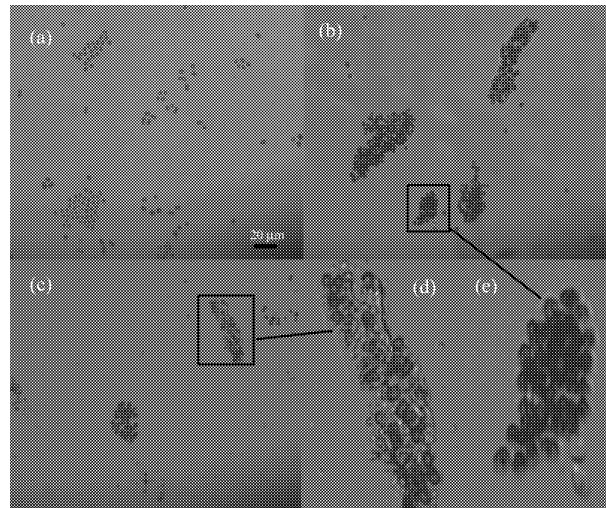


图 6 絮凝显微镜图。(a) 铜绿微囊藻; (b) 加入 PAC; (c) 加入 PAC 和高岭土; (d) 和 (e) 为图片局部扩大。标尺为 20 μm

Fig.6 Micrograph of the flocculation. (a) *Microcystis aeruginosa*; (b) flocculation after the addition of PAC; (c) flocculation after the addition of PAC and kaolin; black squares in (b) and (c) are magnified and shown as (d) and (e) respectively. Length of the bar is 20 μm

随着藻类絮凝体结构变大、变复杂, 照明偏振光被它们散射后偏振度就会越低, 而光强越高, 分布也越分散。从上述两个实验测试结果比较分析可以得出, 相对于只单纯加入絮凝剂 PAC 的情况, 加入高岭土以后, DOP 更小, I_a 更大。单纯加入絮凝剂 PAC 以后, 絮凝体结构较为松散且聚团偏小, 偏振光散射后的退偏度较小且光强较低。加入一定量的高岭土以后显著提高了絮凝结构的复杂性, 从而使得絮凝体结构更加稳定, 此时偏振光经过颗粒散射后退偏度较大且光强较高。在加入 PAC 后, 絮凝体的 DOP 分布比纯藻样品 (对照组) 更加集中, 而光强分布更加分散; 而高岭土的加入进一步促进了光强分布的分散。

如公式 (1)~(3) 所示, 测量得到斯托克斯向量, 可以进一步获取更多信息包括 DOP 和 I_a , 还有 q 、 u 、 v 组成的任意偏振量。如图 2~5 所示, 随着 PAC 或高岭土用量变化, 所形成的不同絮凝体的偏振散射光的偏振度 DOP 和光强 I_a 随之变化。如 3.2 节所述, 如果设计一个参数将两者结合起来, 能更好地区分加入不同浓度 PAC 或高岭土下藻细胞的絮凝状态。为此, 如图 7 所示, 将采集得到的脉冲点画在变换的偏振空间中, 能够利用偏振参数组合将不同浓度的絮凝剂和助凝剂形成的絮凝体区分。

图 7(a) 给出了不同条件下形成的絮凝体和 PAC、高岭土在两个由 q 、 u 、 v 组成的偏振量展开的二维空间的分布, 可以看出藻细胞、PAC、高岭土之间的区分度十分高, 不同条件下形成的絮凝体也有很好的区分度, 特别是加入高岭土后絮凝体区分效果十分明显。在高岭土到 40 mg/L 时, 絮凝体与高岭土重合的部分变多。图 7(b) 在 (a) 的基础上, 加入了光强 I_a 这个维度, 发现区分效果更好。在高岭土到 40 mg/L 时, 絮凝体与高岭土重合的部分也可以很好的区分开。这表明偏振量和光强的组合有助于提高区分度。但在某些浓度条件下, 样品之间的区分主要由偏振量来确定, 如图 2~5 中 DOP 变化的单调性。

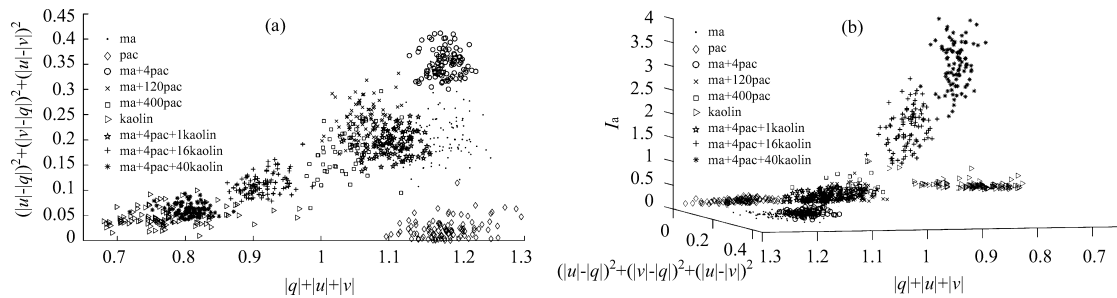


图 7 实验中逐个絮凝体颗粒测量的偏振量的空间分布图。(a) 偏振量的二维空间; (b) 偏振量和光强的三维空间

Fig.7 Spatial distribution of the measured polarization parameters of the flocculation.

(a) Two-dimensional space of polarization parameters; (b) three-dimensional space of polarization parameters and I_a

5 结 论

提出了一种原位监测藻类絮凝的方法。通过单个测量悬浮藻类絮凝体的偏振散射光的斯托克斯向量, 实现对不同状态藻类絮凝体的监测。定量实验研究发现, 絮凝剂、助凝剂的浓度会影响絮凝体的形成, 偏振参数可以定量地表征这种影响。同时结合显微镜观察了纯藻细胞和藻絮凝结构上的区别, 以及助凝剂对絮凝体结构的影响, 发现这些观察与偏振参数的变化一致。该方法有潜力发展成单个的、非接触、无标记的原位监测工具, 有助于在藻华治理、污水处理中控制絮凝剂和助凝剂的用量, 为水环境治理过程中快速检测以及判断和监测治理效果等方面提供新工具。

参考文献:

- [1] Zhang X J, Chen C, Ding J Q, et al. The 2007 water crisis in Wuxi, China: Analysis of the origin [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **182**(1-3): 130-135.
- [2] Umehara A, Tsutsumi H, Takahashi T. Blooming of *Microcystis aeruginosa* in the reservoir of the reclaimed land and discharge of microcystins to Isahaya Bay (Japan) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(8): 3257-3267.
- [3] Rastogi R P, Datta M, Aran I. Bloom dynamics of cyanobacteria and their toxins: environmental health impacts and mitigation strategies [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, **6**: 1254.
- [4] Chen J, Zhang H Q, Hu L B, et al. Microcystin-LR-induced phytotoxicity in rice crown root is associated with the cross-talk between auxin and nitric oxide [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(2):283-293.
- [5] Wang Y S, Tong Z H, Wang L F, et al. Effective flocculation of, *Microcystis aeruginosa*, with simultaneous nutrient precipitation from hydrolyzed human urine [J]. *Chemosphere*, 2018, **193**: 472-478.
- [6] Ma H, Cui F, Fan Z, et al. Efficient control of *Microcystis* blooms by promoting biological filter-feeding in raw water [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **47**: 71-75.

- [7] Campinas M, Rosa M J. *PAC/UF for Removing Cyanobacterial Cells and Toxins from Drinking Water* [M]. Expanding Issues in Desalination, 2011.
- [8] Nishi L, Vieira A M S, Vieira M F, *et al.* Hybrid process of coagulation/flocculation with *Moringa oleifera* followed by ultrafiltration to remove *Microcystis* sp. cells from water supply [J]. *Procedia Engineering*, 2012, **42**: 946-952.
- [9] Sun Y, Sun W, Shah K J, *et al.* Characterization and flocculation evaluation of a novel carboxylated chitosan modified flocculant by UV initiated polymerization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, **208**: 213-220.
- [10] Lu G, Song X, Yu Z, *et al.* Application of PAC-modified kaolin to mitigate *Prorocentrum donghaiense*: effects on cell removal and phosphorus cycling in a laboratory setting [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, **29**(2): 917-928.
- [11] Wu C D, Xu X J, Liang J L, *et al.* Enhanced coagulation for treating slightly polluted algae-containing surface water combining polyaluminum chloride (PAC) with diatomite [J]. *Desalination*, 2011, **279**(1-3): 140-145.
- [12] Yu Z M, Zou J Z, Ma C N, *et al.* Chemical method of red tide control [J]. *Ocean and Limnology*, 1993, **3**: 314-318(in Chinese).
俞志明, 邹景忠, 马锡年, 等. 治理赤潮的化学方法 [J]. *海洋与湖沼*, 1993, **3**: 314-318.
- [13] See J H, Campbella L, Richardson T L, *et al.* Combining new technologies for determination of phytoplankton community structure in the northern Gulf of Mexico [J]. *Journal of Phycology*, 2005, **41**: 305-310.
- [14] Millie D F, Schofield O M, Kirkpatrick C J. Detection of harmful algal blooms using photopigments and absorption signatures: A case study of the Florida red tide dinoflagellate, *Gyrodinium aureolum* [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(5): 1240-1251.
- [15] Dana D R, Maffione R A. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters [J]. *Applied Optics*, 2007, **36**(4): 6057-6067.
- [16] Karp-Boss L, Azevedo L, Boss E. LISST-100 measurements of phytoplankton size distribution: evaluation of the effects of cell shape [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2007, **5**(11): 396-406.
- [17] Sun P, Ma Y, Liu W, *et al.* Experimentally determined characteristics of the degree of polarization of backscattered light from polystyrene sphere suspensions [J]. *Journal of Optics*, 2013, **15**(5): 5708.
- [18] Liu T, Sun T, He H H, *et al.* Comparative study of the imaging contrasts of Mueller matrix derived parameters between transmission and backscattering polarimetry [J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, **9**(9), 4413-4428.
- [19] Mahler L, Tredicucci A, Beltram F, *et al.* High-power surface emission from terahertz distributed feedback lasers with a dual-slit unit cell [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(19): 191109.
- [20] Wang Y, Liao R, Dai J C, *et al.* Differentiation of suspended particles by polarized light scattering at 120 degrees [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(17): 22419-22431.
- [21] Chang J T, He H H, Wang Y, *et al.* Division of focal plane polarimeter-based 3×4 Mueller matrix microscope: a potential tool for quick diagnosis of human carcinoma tissues [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, **21**(5): 8-13.
- [22] Luo Y P, Shi Z, Wang S H, *et al.* Study on improving the effect of polyaluminum chloride on removing algae by using clay as coagulant aid [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, **23**(17):61-65(in Chinese).
罗岳平, 施周, 王仕汇, 等. 用粘土作助凝剂提高聚合氯化铝除藻效果的研究 [J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(17):61-65.
- [23] Wang D, Gregory J, Tang H. Mechanistic difference of coagulation of kaolin between PACl and cationic polyelectrolytes: a comparative study on zone 2 coagulation [J]. *Drying Technology*, 2008, **26**(8): 1060-1067.